

# 沙漠研究

JOURNAL OF ARID LAND STUDIES

---

## 目 次

---

**口 絵**

長島秀樹・岡田菊夫・竹見哲也：中国内陸部のダストストーム

**特集：アジア内陸起源の風送ダスト**

長島秀樹・岡田昭彦・矢吹貞代・三上正男：「特集：アジア内陸起源の風送ダスト」編集にあたって ..... 85-86

**原著論文**

- 竹見哲也：1993年5月5日の中国北西部に発生したダストストームとその発生  
環境 ..... 87-96
- 三上正男：タクラマカン砂漠南縁で発生したダストストーム ..... 97-106
- 甲斐憲次・高杉年且・中村 一：タ克拉マカン沙漠を起源とする黄砂の長距離  
輸送について ..... 107-117
- 大日方 裕・柳澤文孝・小谷 韶・上田 晃：山形県鶴岡市と山形市の乾性降  
下物に含まれている非海塩性硫酸イオンのイオウ同位体比 ..... 119-126
- 矢吹貞代・岡田昭彦・上田 晃・常 青・樊 自立：中国、新疆ウイグル自治  
区の砂漠域における塩類化土地および塩鉱中の塩類のイオウ同位体比  
に関する研究—アジア内陸起源の風送塵の起源との関わり—（英文） ..... 127-138
- 本多将俊・清水 洋：粒度組成及び主成分組成に基づくタ克拉マカン砂漠の風  
成堆積物の移動機構に関する検討（英文） ..... 139-146
- 權 成顔・岩坂泰信・松永捷司・柴田 隆：黄砂エアロゾルの長距離輸送—  
1994年春期のライダー観測を中心に— ..... 147-155
- 岩坂泰信・林 政彦・森 育子・權 成顔・松永捷司・石 廣玉・周 軍・  
柴田 隆・西川雅高・奥原靖彦・原 圭一郎・長谷正博・渡辺征春・  
金 潤信・糸知 本：アジア大陸大気中のエアロゾル粒子—気球、航  
空機およびライダーによる日本および中国における観測—（英文） ..... 157-167
- 短 報**
- 安井元昭・水谷耕平・板部敏和・高部政雄・周 紀侠・凌 裕泉・劉 立超：  
中国蘭州における対流圈エアロゾルのライダー観測 ..... 169-173
- 展望論文**
- 井伊博行・平田健正：黄土高原の土壤浸食とダスト中の窒素化合物について ..... 175-180
- 資 料**
- 矢吹貞代・岡田昭彦：中国、新疆ウイグル自治区の地名表記 ..... 181-184

**原 著 論 文**

- 莫 文紅・名取俊樹・姜 恕・西村 格・大政謙次：一年生沙漠植物  
*Agriophyllum squarrosum* 及び *Bassia dasypylla* の水ストレスに対する  
光合成と水利用の反応（英文） ..... 185-195
- 鷹木恵子：チュニジアのナツメヤシ民族文化—ジェリード地方のオアシスの事例— ..... 197-214

中国内陸部のダストストーム  
Dust Storm in the Inland Area of China



写真1. 1993年5月5日午後、中国北西部甘肅省で発生したダストストーム。  
ガストフロント（突風前線）が砂を巻き上げながら進行している。

Photo 1. A violent dust storm occurred in Gansu province, northwestern China, in the afternoon of May 5, 1993.  
The gust front ran lifting many sand particles.



写真2. 1993年5月5日のダストストームによる蘭州の農業被害。農地や農業用水路は、膨大な量の砂塵に埋め尽くされ、大きな被害を受けた。

Photo 2. The dust storm in Photo 1 inflicted serious damage on the crops in Lanzhou, where farmlands and irrigation channels were buried under a huge amount of sand.



写真3. 1988年5月27日、タクラマカン沙漠南辺のオアシスを襲ったダストストーム。(皮山にて、矢吹英雄氏撮影)

Photo 3. A dust storm on May 27, 1988 caused damage to oases along the southwestern edge of the Taklimakan Desert. (At Pishan. Photo by Hideo YABUKI)



写真4. 1991年5月11日甘粛省張掖 ( $39^{\circ} 52' N$ ,  $100^{\circ} 23' E$ ) で採取された大気浮遊ダストの電子顕微鏡写真。

Photo 4. An electron micrograph of atmospheric dust particles collected at Zhangye ( $39^{\circ} 52' N$ ,  $100^{\circ} 23' E$ ), Gansu, on May 11, 1991. (Photo by Kikuo OKADA)

ダストストームは、強風にともない砂塵が巻き上がる現象で、中国では、内陸部の乾燥地で、春にしばしば発生する。強風が家屋を破壊し、降下した砂が農地を埋めるなど、周辺に甚大な被害を与える。さらに、上空高く舞い上がったダストは、偏西風によって運ばれ、東アジアから太平洋圏の大気環境に影響を与える。写真1、2は1993年5月に甘粛省で発生したダストストームで、49人の死者を出した。(詳細は本号の「1993年5月5日の中国北西部に発生したダストストームとその発生環境：竹見哲也」を参照)。写真3は、1988年5月27日タクラマカン沙漠南縁で発生した黒風暴で、西域南道西部のオアシスを次々と襲い、各地に甚大な被害を与えた。また、写真4は大気浮遊ダストの電子顕微鏡写真で、ミクロン～サブミクロンの微粒子が数多くみられる。このような微粒子が舞い上がり、上層の風によって長距離輸送される。

(長島秀樹・岡田菊夫・竹見哲也)

## 「特集：アジア内陸起源の風送ダスト」編集にあたって

長島秀樹\*・岡田昭彦\*\*・矢吹貞代\*\*・三上正男\*\*\*

ダストストームは乾燥地や半乾燥地でしばしば発生する現象で、これによつて沙漠域から運ばれるダストは年に1~2億トンにおよぶと見積もられてゐる（IPCC Report 1995）。巻き上げられた粒子のうち、5~50ミクロンのサイズのものは、数キロから100km程度運ばれ沈降し、レスとして地表面を覆う。また、より細かいミクロン・サブミクロンの粒子は浮遊したまま大気中に残り、雨とともに降下する。このような風送ダストは土壤の形成、作物への影響のみならず、海や大気、気候変化にも大きな影響があると考えられる。またそれだけでなく、風送ダストは人間・家畜・植物に有害な物質も運ぶとされており、その振る舞いや地球環境への影響を正しく評価することが重要である。

ダストストーム研究会（代表：吉野正敏愛知大学教授）は、1997年6月27日、理化学研究所において、「アジア

内陸起源の風送ダストに関するシンポジウム」を開催した。ダストストーム発生域の環境、ダストの舞上がりから長距離輸送の力学、浮遊ダストの大気環境への影響など、ダストに関するさまざまな観点からの研究発表と活発な討論が行われた。本特集は、その際の研究発表をまとめたものである。本特集を編集するにあたり、日本沙漠学会編集委員会（委員長：門村浩立正大学教授）の下に、「ダスト特集編集小委員会」を設置した。委員には長島秀樹（主査：東京水産大学）、岡田昭彦（理化学研究所）、矢吹貞代（理化学研究所）、三上正男（気象研究所）の4名が選出され、編集を行つた。ここに掲載された10編の論文はいずれも通常の投稿論文と同じ編集手続きを経て掲載されている。多忙の中、丁寧な査読をしていただいた会員、非会員の諸氏に紙面にて厚く御礼を申し上げる次第である。

\*東京水産大学海洋環境学科。〒108-8477 港区港南4-5-7。

\*\*理化学研究所表面解析室。〒351-0198 和光市広沢2-1。

\*\*\*気象研究所環境・応用気象研究部。〒305-0052 つくば市長峰1-1。

## Introduction

Hideki NAGASHIMA\*, Akihiko OKADA\*\*, Sadayo YABUKI\*\* and Masao MIKAMI\*\*\*

The dust storm is a common phenomenon that occurs frequently in arid and semi-arid lands. It is estimated that wind-blown dust carried from deserts amounts to  $1.2 \times 10^9$  tons annually (IPCC Report 1995). Particles of between  $5\mu\text{m}$  and  $50\mu\text{m}$  are carried a few kilometers to nearly 100km and cover land surfaces throughout the world and form loess deposits. Fine particles of micron or sub-micron in size remain suspended in the air until brought down by rainfall. Such wind-blown particles probably have strong effects not only on formation of soil and crop growth but also on ocean sedimentation, air pollution and climate change. Moreover, wind-blown dust also spreads pathogens that are harmful to man, animals and plants. Thus, it is very important and urgent to investigate the behavior and environmental consequence of aeolian dust.

The Dust Storm Research Group (Chairman: Prof. Masatoshi YOSHINO, Aichi Univ.) had a symposium entitled [Aeolian dust originated from inland Asia] at RIKEN on June 26, 1997. Researchers of various scientific fields concerned with aeolian dust participated in the discussion. There were 16 presentations in total at the symposium. Ten of them are included in this volume. The sub-committee responsible for the publication of this special issue was organized under the editorial committee (Chief Editor: Prof. Hiroshi KADOMURA, Rissho Univ.) of the Japanese Association for Arid Land Studies (JAALS). The articles included in this volume were reviewed according to usual process of JAALS. We, the members of this sub committee, Drs. Hideki NAGASHIMA (Tokyo Univ. Fisheries), Akihiko OKADA (RIKEN), Sadayo YABUKI (RIKEN) and Masao MIKAMI (Meteorological Research Institute) would like to express our sincere thanks to the reviewers for their courteous review.

---

\*Tokyo University of Fisheries. Kohnan 4-5-7, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan.

\*\*RIKEN. Hirosawa 2-1, Wako 351-0198, Japan.

\*\*\*Meteorological Research Institute. Nagamine 1-1, Tsukuba 305-0052, Japan.

# 1993年5月5日の中国北西部に発生したダストストームと その発生環境

竹見 哲也\*

## 1. 序論

砂漠地域では、しばしば砂塵を伴った強風（ダストストーム）が発生することがある。この現象は人的災害を及ぼすだけでなく、農作物にも大きな被害をもたらす。さらに、砂塵が空中に巻き上げられて大気中で長距離輸送されると、地域スケールの気候にも影響を及ぼす。したがって、ダストストームの成因を調べることは気象学的に興味あるだけでなく、その地域の気象・気候への影響を評価するためにも必要なことである。本論文では、中国で発生した大規模なダストストームの事例について、その発生メカニズムと発生環境について論じる。

ダストストームは、これまで世界の各地で報告してきた（SUTTON, 1925; MATTICE, 1935; FARQUHARSON, 1937; LAWSON, 1971; IDSO *et al.*, 1972; MORALES, 1981; 大野, 1994）。特に北アフリカ・スーダンで発生するものは「ハブーブ」と呼ばれている。中国北西部の砂漠地域においても、数年に一度という頻度で激しい砂嵐が発生することがある。これらのシビアなダストストームは、図1に示されるようなガストフロント（突風前線）状の形状で発生するのか特徴的で、このフロントの通過に伴い、気温の急降下や相対湿度の上昇という気象変化がしばしば報告さ



図1. 1993年5月5日中国北西部の乾燥地域で発生したダストストーム。中国のニュース番組より切り出したもの。

れている。

中国において砂嵐は、ダストストーム（視程1km以下）とブラックストーム（視程50m以下・風速 $25\text{ms}^{-1}$ 以上）に分類されている。ゴビ砂漠ではダストストームは4月をピークとして春に発生頻度が高い（光田, 1988; PARUNGO *et al.*, 1994）。また、ブラックストームと定義される激しい砂嵐も春に発生している（MITSUTA *et al.*, 1995）。YANG *et al.* (1991) や SHENG *et al.* (1994) により解析されたダストストームの事例も春（4月）に発生したもので、彼らはその発生原因として極前線上に発達した低気圧の活動によるものと述べている。地表面気圧を統計的に解析した CHEN *et al.* (1991) によれば、モンゴル平原では4月～5月、8月～9月に低気圧活動のピークがあることが示されている。これらの研究から、低気圧活動と春に頻度が高いダストストームにはなんらかの相関があると考えられる。すなわち、この季節は大気が乾燥している上に、強い日射によって地面温度が50-60°Cまで大きく上昇するため（加藤ほか, 1992）、砂が大変乾燥し飛散しやすい状態にあり、強風が砂嵐になりやすいといえる。

1993年5月5日に中国北西部乾燥地で発生したダストストームは、数年に一度程度しか起こらないような大規模なもので、ブラックストームと呼ばれるものであった（図1）。49人の死者を出したのを始め、農作物などの経済的な損失も多大であった。このダストストームは、スコールラインというメソ（中間規模）対流系の発達に伴って発生したものである（MITSUTA *et al.*, 1995; TAKEMI, 1998）。一般に、雲システムの発達には水蒸気が必要不可欠であるが、乾燥地という水蒸気量の少ない環境でも、シビアなスコールラインが発達するというのは大変興味深い。

中国北西部の乾燥地における水蒸気量の分布を左右する水蒸気輸送については、砂漠における降水を考えための要素として、夏季を中心に解析された例が多い（鬼頭ほか, 1993; YATAGAI and YASUNARI, 1993）。鬼頭ほか（1993）はアメリカ気象局の客観解析データを用いて、

\*京都大学防災研究所

(受付：1997年11月12日、受理：1997年12月10日)

中国北西部の水蒸気フラックスを調べた。彼らの解析によれば、6~8月の平均場において、ゴビ砂漠での水蒸気フラックスは南北成分よりも東向きフラックスが卓越していることがわかる。彼らは、中国北西部への水蒸気はヨーロッパから來るもののが重要であると指摘している。一方、YATAGAI and YASUNARI (1993) は、ゴビ砂漠における夏季の降水イベントとその地域への水蒸気輸送との関連を調べ、季節内の変動として、ゴビ砂漠への水蒸気フラックスには南東風によるものもあることを示した。しかし、以上の解析は平均化した流れのパターンに注目しており、個々の対流活動の事例と関連した解析は行われていない。

本研究では1993年5月5日のダストストームの事例を対象にする。まず、本事例に関する著者らの今までの解析を概観しながら、特にダストストームの発生という観点からその発生メカニズムについて述べ、次に、その際に発達したメソ対流系を取り巻く背景場における水蒸気の移動形態について考察する。解析にあたり、HEIFEプロジェクト(1989年~1993年: 光田, 1988)による自動気象観測によるデータに加えて、中国のルーチン観測

によるデータ、および人工衛星による雲画像データを用いた。

## 2. 1993年5月5日のダストストームの発生メカニズム

図2は本研究で対象とする砂嵐が発生した地域を示す。嵐は線状に延び、東南東に進むフロント(図中の点線)をなしている。この地域はゴビ砂漠の南部に位置し、南には西北西から東南東に連なるQilian山脈が存在する。この山脈は5,000m級の山がそびえる高い山地であり、チベット高原の北東端に位置する。一方、乾燥した平原は海拔1,000mから1,500m程度である。砂嵐の被害を受けた地域は、北西から南東方向に500km以上も広がっていた。

また、このダストストームにより巻き上げられた砂塵の空中濃度は、 $1,016 \text{ mg m}^{-3}$ に達していたと報告されている(MITSUTA *et al.*, 1995)。

図3に、Minqinにおける自動気象観測による物理量の時間変化を示す。ガストフロントが通過した16:50BST

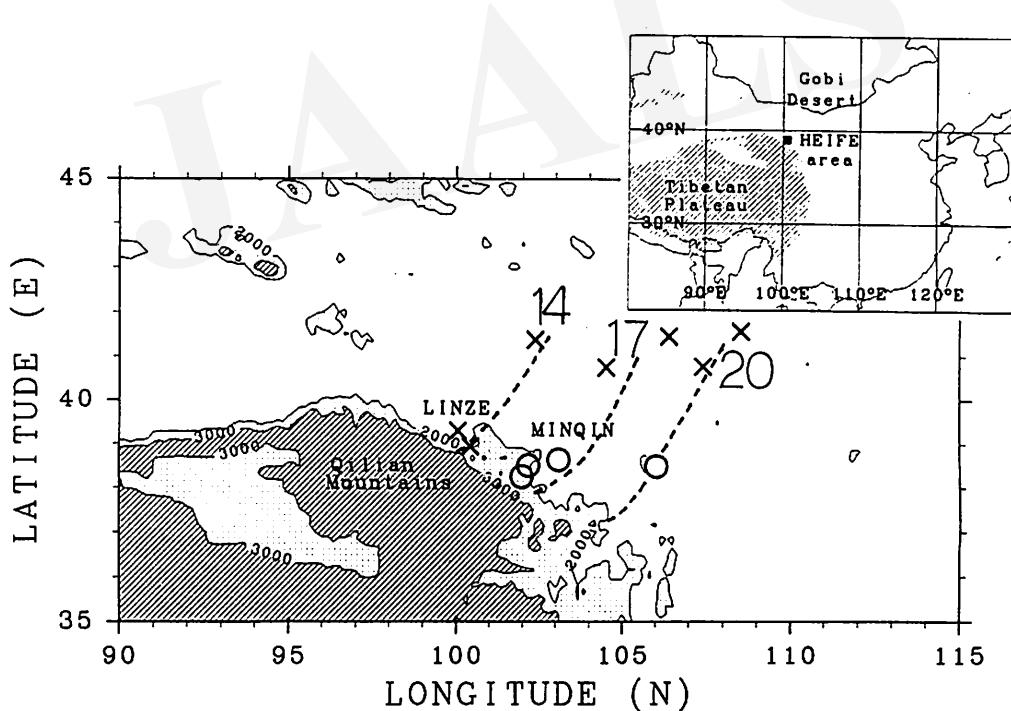


図2. 中国の概略地図(右上)および中国北西部乾燥地とその周辺の地形。

海拔高度2,000 m以上、3,000 m以上をそれぞれ点彩、斜線で表示する。LinzeとMinqinに自動気象観測器(AWS)がある。点線は3時間毎のガストフロントの位置を示し、数字は北京時間(BST)を表す。×印はダストストーム、○印はブラックストームが観測された地点。

(北京時間)に強風が吹き始め、気温が下降し、気圧、相対湿度が増加している。突風速としては、Zhangyeにおいて観測された $37.9 \text{ m s}^{-1}$ が最も強いものであった。ダストストームが激しかつた1993年5月5日17:30BSTにおける人工衛星による雲画像を図4に示す。この地域には積乱雲が線状に組織化されたメソ対流システム、すなわちスコールラインが発達していた。このスコールラインは、寒冷前線に伴う幅の広いバンド上の雲システムの前面に発生・発達したもので、 $19 \text{ m s}^{-1}$ という高速で東南東へ移動していた。

このダストストーム発生以前の大気状態は条件付不安定な成層をしており、日中には強い日射により地面が加熱されて、地面温度は最大 $51^\circ\text{C}$ まで達していた(図6)。気温と地表面温度の差が大きくなるために顯熱フラックスは大きく、非常に深い対流混合層が発達していたと考えられる。その最大の高さは、地上から約4,400 mと見積もられる(TAKEMI, 1998)。一方、乾燥地であるために、地上空気塊を断熱的に持ち上げてその気塊の浮力が正に

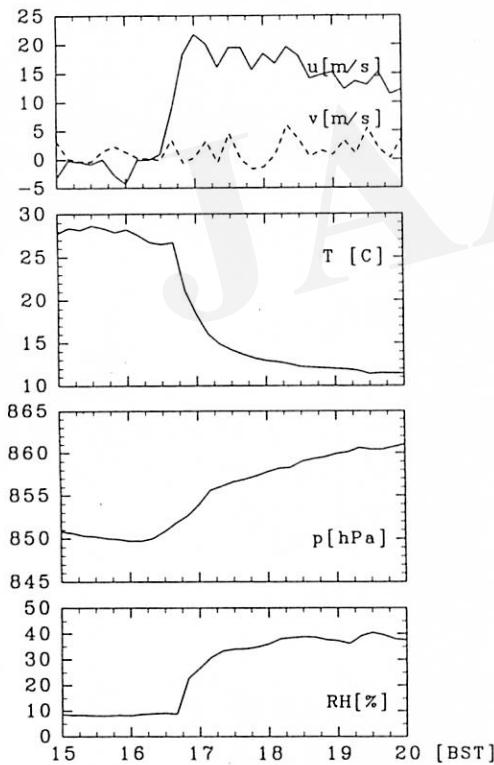


図3. 1993年5月5日のMinqin AWSにおける地上の風速、温位、気圧、相対湿度の時系列。

$u$ および $v$ は、ガストフロントの進行方向にそれぞれ平行、垂直な方向の風速成分を示す。

なる高度(自由対流高度)は非常に高い。そのため、積乱雲を発達させるような深い対流が発生するには、非常に高い自由対流高度まで気塊を持ち上げるような強制力が必要である。今の場合には、対流混合層が深いということによって、気塊は自由対流高度まで持ち上げられやすい状況にあつたといえる。図4に示したスコールラインが発達したのは、今述べたような深い対流雲が、極前線の前面での上昇気流のために線状に組織化したことによるものである。

スコールラインがMinqinを通過した時刻の後の5日20:00BSTにおける高層観測データより、ラインの進行方向に平行で鉛直な断面図を作ると(図5)、ラインの後面の地上には、相当温位にして $-15\text{K}$ 程度暖気側より冷たい冷気塊が発達しているのがわかる(竹見ほか,

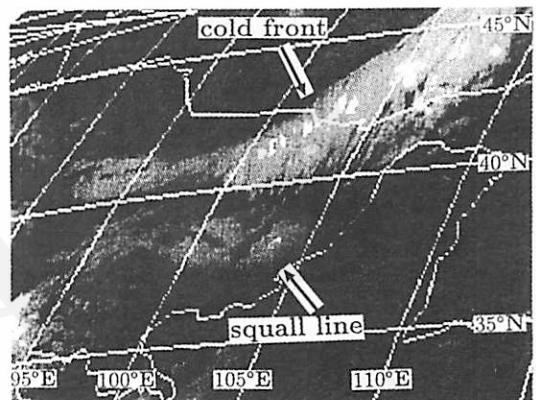


図4. 17:30 BSTにおけるGMS-4によるスコールラインの赤外画像。

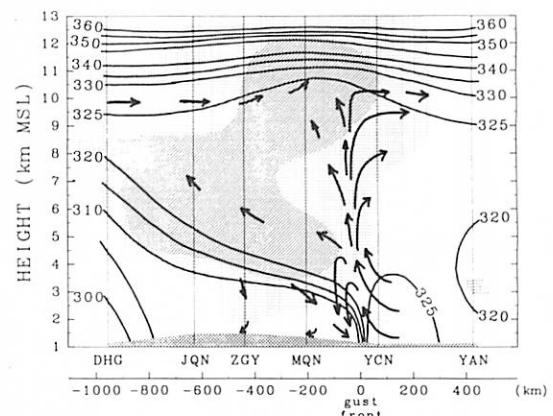


図5. 20:00 BSTにおけるスコールラインの鉛直断面図。

TAKEMI (1998) より改作して引用。

実線のセンターは相当温位を示す。点彩部および斜線部は、それぞれ相対湿度が50%-60%, 60%以上の領域を示す。矢印はスコールラインの移動速度に相対的な流れを概念

1997; TAKEMI, 1998). この冷気塊の厚さは約1.5kmと見積もられる。また、LinzeとMinqinの2点のAWSの時系列データより、この冷気塊は $19\text{ m s}^{-1}$ の速度で移動していたと見積もられる。この冷気塊は、ガストフロントを形成した強い下降流により生じたものである。この冷気塊により、地上気圧は静水圧的に上昇する。図7は17:00BSTにおける地上気圧の変化量と地上風の分布を示す。 $101^\circ\text{E}$ ,  $40^\circ\text{N}$ 付近を中心に強い高圧部が存在し、強い発散風が吹いているのがわかる。

ストームが発達したこの日の日中には、空気は相対湿度10%以下にまで乾燥し、地表面温度が $50^\circ\text{C}$ 以上にまで上昇していたために(図3、図6)、地面の砂は飛散しやすい状態にあつたといえる。この砂が $25\text{ m s}^{-1}$ 以上の強風によって巻き上げられたのである。今回のスコールラインのケースでは、図3にも明らかなように風速の準周期的な変動が見られるため、複数の下降流が存在していたと推論される(TAKEMI, 1998)。そのため、地上では2時間以上も強風が持続し、準周期的なガストの通過とともに地面の砂が巻き上げられ、ダストストームの持続時間も長時間となつたといえる。

ここで、このストームに伴つたダストの飛散量は次のように見積もることができる。まず、下降冷気塊中のダストの濃度は、先に示した砂塵の濃度 $1,016\text{ mg m}^{-3}$ で一様だと仮定する。また、下降冷気塊の全体積は、スコールラインの幅200km、長さは強風の持続時間2時間×移動速度 $19\text{ m s}^{-1}$ で $140\text{ km}$ 、高さ1.5kmとすれば、 $4.2 \times 10^{11}\text{ m}^3$ となる。したがつて、下降冷気塊中のダストの総

量は約 $4 \times 10^7\text{ トン}$ 程度と推算される。

図8に、砂漠域の2ヶ所の観測点(LinzeとMinqin)における各放射量の時系列を示す。それぞれの観測点において、ダストストームが激しかった時間には一時的に下向き長波放射が大きくなっている(Linzeでは14:00BST, Minqinでは17:30BST)。これは、空中に舞い上がつた砂塵からの赤外放射と考えられる。日射量については、Minqinでは16:00BSTを過ぎると急激に減少し始め、この急変はガストフロントの到着よりも約30分先行している。一方、Minqinの約260km北西に位置するLinzeでは、日射量の急下降(14:00BST)はガストの通過(13:40BST)より若干遅れている。この事実により、Linzeではガスト通過時にはまだ上空にダストが舞い上がりつていなかつた、ということが示唆される。この時の

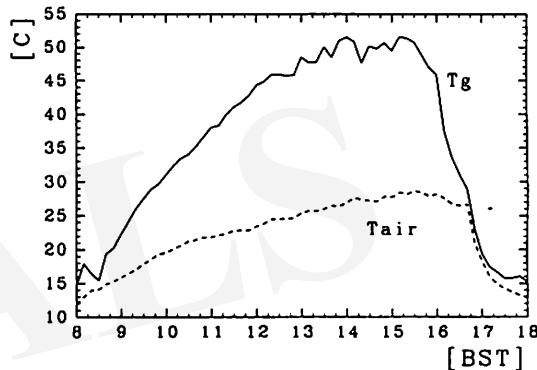


図6. 1993年5月5日のMinqin AWSにおける地表面温度Tg(実線)および地上1.5mでの気温Tair(点線)の時系列。

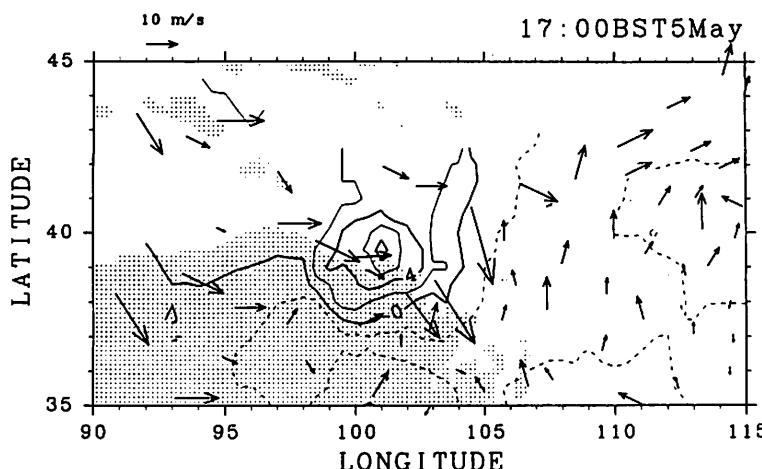


図7. 17:00 BSTにおける気圧変化量(hPa)と地上風速ベクトル。気圧変化量は、3時間前との偏差を現地気圧で規格化し、さらに1,000倍して示してある。コンター間隔は2であり、実線が正、破線が負である。ベクトルのスケールは図の左上に示す。点彩部は海拔高度が2,000 m以上の領域を示す。

対流圏上層（高度10km程度）の風は西北西、 $30\text{--}40\text{m s}^{-1}$ であった。この風速はガストフロントの移動速度よりも速い。以上のことから、Minqinで観測された日射の急減の理由は次のように考えられる。Minqinより西の地域（Linze付近）で発生したストームによって、砂塵が地面から大気上層まで対流活動に伴って鉛直上方に輸送される。大気上層に達した砂塵は上層の強風によって移流される。上層風は下層のガストフロントより速いため、上層風に流される砂塵は先にMinqinに達して日射を遮るのである。

### 3. スコールラインの背景場の水蒸気輸送

スコールラインのような激しい対流が発生するためには、熱源となるべき水蒸気が必要である。乾燥地である

この地域には、どのようにして対流活動に必要な水蒸気が集まつてくるのかが問題となる。事実、この時の状況を数値シミュレーションにより再現してみると、高さ4kmの境界層内の水蒸気が少ないと対流は発達せず、 $8\text{g kg}^{-1}$ 弱にしてはじめて対流が持続することがわかる（竹見・里村、1997）。もし、ある程度以上対流が発達すれば、対流圏上部に存在する西から移流してきた水蒸気だけでも、対流雲は維持される可能性はある。したがつて、実際にはこのシミュレーションで必要であった水蒸気量よりやや少ない量でも、スコールラインは発達できると考えられる。

図9に5月2日～6日までのMinqinにおける地上の水蒸気混合比の時系列を示す。4日の正午までは、2日の午前中を除けば、 $2\text{g kg}^{-1}$ 以下で推移していた。その後徐々に増加していき、5日の午前には $5.5\text{g kg}^{-1}$ にまで達

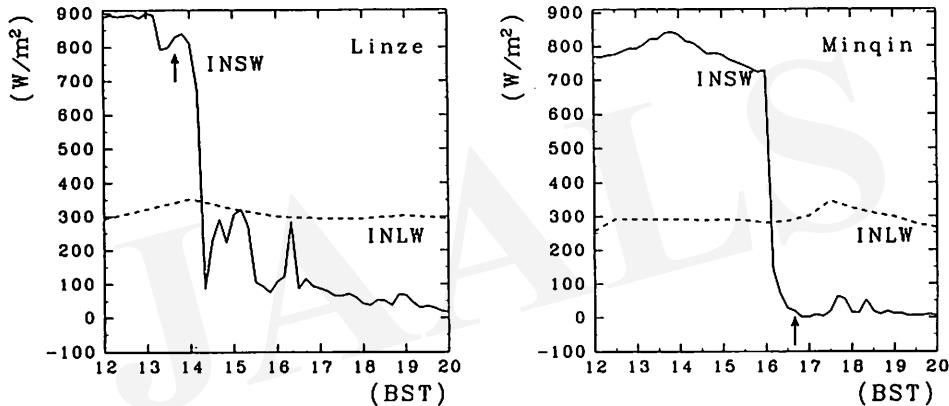


図8. 1993年5月5日のLinzeおよびMinqinにおける日射量 (INSW) および下向き長波放射量 (INLW)。  
矢印はガストフロントの通過時刻を示す。

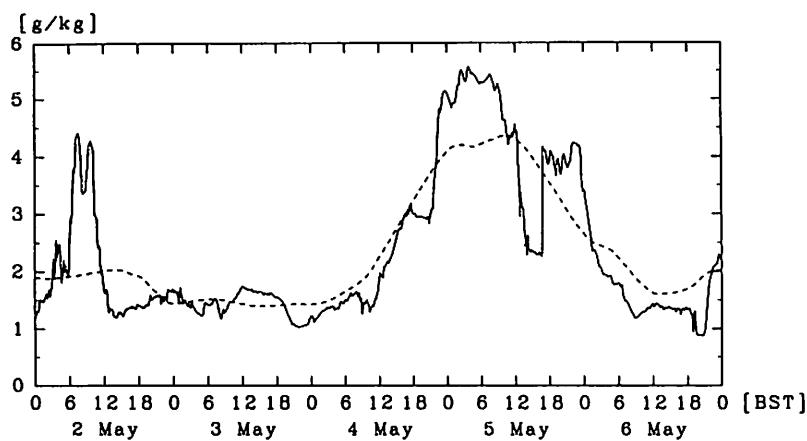


図9. 5月2日～6日までのMinqin AWSにおける地上の水蒸気混合比の変化。  
破線は1日の移動平均を取ったものである。

していた。Linzeの観測点においても、同様の水蒸気量の増加が見られた。この水蒸気の増加が対流活動につながっていたと考えられる。そこで、このような水蒸気量の増加はどのような原因で生じたのかを以下に考察する。

図10は4日11:00および5日02:00BSTの地表での水蒸気フラックスと混合比を示す。11:00BSTのゴビ砂漠南部では混合比は $2 \text{ g kg}^{-1}$ 前後で少ないが、チベット高原東部では $5 \text{ g kg}^{-1}$ 以上になり、南部ほど量が多い。この高湿部は、中国中・南部の東側に広がっているものである。5日02:00BSTになると、チベット高原上にある $5 \text{ g kg}^{-1}$ 以上の比較的高い混合比の領域が、ゴビ砂漠南部まで達しているように見える。しかし、ゴビ砂漠南部へ

流入する水蒸気フラックスは、いずれの時間にも顕著なものは認められない。

対流圏下層の水蒸気フラックスを、4日20:00BSTおよび5日08:00BSTについて地上から700hPaまで積分したフラックスとして図11に示す。4日20:00には、チベット高原の東側に南東風成分のフラックスが認められる。しかし、このフラックスは $35^{\circ}\text{N}$ 以南で顕著であるが、ゴビ砂漠南部までは到達していない。5日08:00になると、チベット高原東側には東風成分が卓越しているもののゴビ砂漠南部にまでは影響を及ぼしてはいない。また、500hPa以上では水蒸気フラックスは西風成分が卓越していた。

チベット高原東側領域で見られる大気下層における北

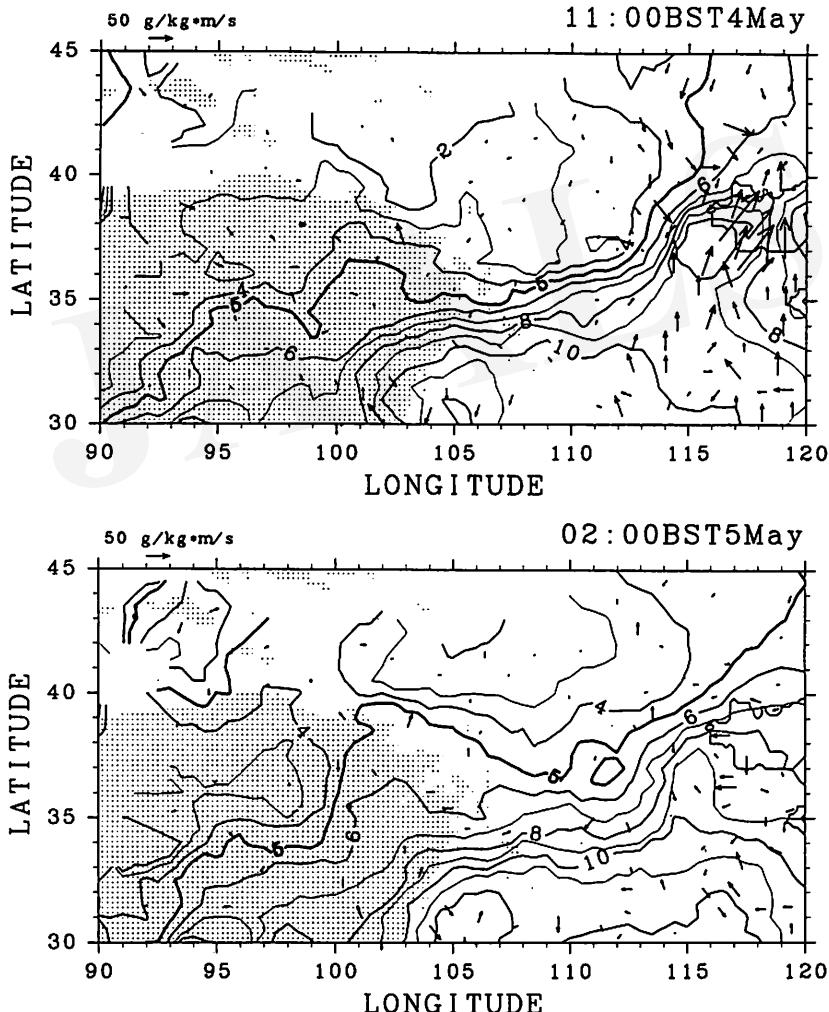


図10. 4日11:00および5日02:00BSTの地上の水蒸気フラックス（スケールは左上のベクトル）および水蒸気混合比のコンター（ $1 \text{ g kg}^{-1}$ 間隔）。

点彩は、海拔高度2,000 m以上の山岳地を示す。

西向きの水蒸気輸送は、35°N以南に限られていた。したがって、ゴビ砂漠南部への水蒸気の供給源は、総観規模の流れの場によるとは考えにくい。それならば、図9に見られるような5日午前の水蒸気量の増加は、何によるものと考えればよいのであろうか。図10で指摘したように、チベット高原上の高い混合比の領域はゴビ砂漠南部へ侵入しているようにみえる。図には示さないが、4日夜間のLinzeおよびMinqinの風向は南～南西であった。仮に、水蒸気量の増加が山岳地と砂漠地域との間の局地的な循環に伴うものであると考えてみると、この風向は南にある山岳地からの方向と一致する。ただ、今回のケースの気温のデータからは、冷気流といった山岳地からの循環を示唆するような変化は認められなかつた。

そのため、現在のデータからは局地循環の存在を積極的に示すことは困難である。しかし、総観規模の流れの場がこの地域の下層大気に水蒸気を運んでいるとはいえない以上、砂漠において水蒸気の増加をもたらしたのは局地的な循環が関与している、という可能性は否定できないと考えられる。

HEIFE領域の局地循環を解析したWANG *et al.* (1995)は、総観規模擾乱の影響が弱いときには、Qilian山脈からゴビ砂漠に向かつて吹く夜間下降流（南西風）がしばしば発生することを示した。CHEN (1995)はHEIFE観測領域の地上風の解析および数値モデルを用いて、総観規模の擾乱のない晴天日には、山岳地と砂漠地域との間で日変化する局地循環があることを示した。彼はWANG

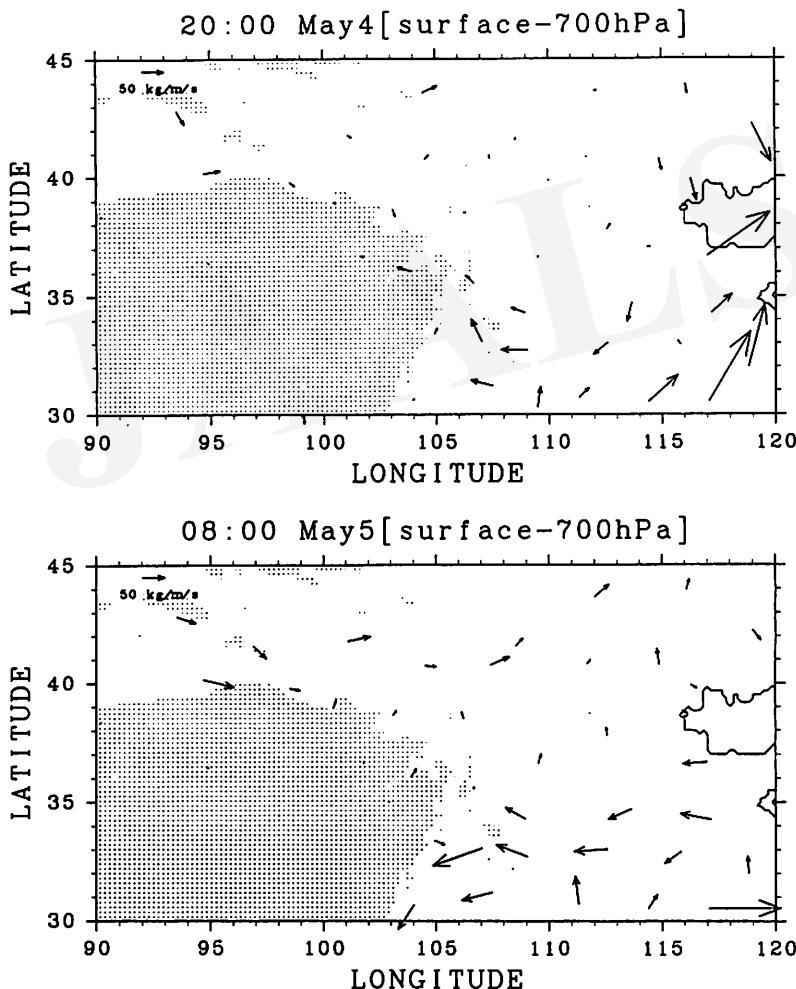


図11. 4日20:00 BSTおよび5日08:00 BSTにおける、地上から700hPaまで積分した水蒸気フラックス（スケールは左上のベクトル）。  
点彩は、海拔高度2,000 m以上の山岳地を示す。

*et al.*と同様に、HEIFE観測領域では夜間には山岳地から砂漠へと向かう南西風が卓越していることを示している。以上の解析結果からも、今回のストームが発生する前の5月4日～5日夜間の気象状況が晴天であったことを考慮すれば、同様の山岳地から砂漠地域へ吹く局地循環の可能性が示唆される。

#### 4. 結論

1993年5月5日に中国の砂漠域で発生した大規模なダストストームの発生メカニズムについて、スコールラインの対流活動という観点から解析を行った。このダストストームは、地上の風速が $25\text{ m s}^{-1}$ を超える強風が吹いたために起こつたものである。この強風は、スコールラインの強い下降流が地上で発散することで生じたものである。Linzeの放射データより、ダストストームはLinze付近で発生したと推定され、人工衛星の画像からもこのLinzeはスコールラインが発達し始めた地域にあることがわかる。地上での発散風により砂漠の砂が上空に巻き上げられ、大気上層まで鉛直輸送された。上層風はスコールラインの移動速度よりも速いため、上層に達した砂塵はガストフロントの通過よりも先行してMinqinに到達した。これによって、Minqinではガストよりも先に日射量が減少したと考えられる。

また、スコールラインを取り巻く背景場の水蒸気輸送について考察を行つた結果、地上における水蒸気は5月4日～5日にかけて増加しており、急激に積雲対流が発達する環境は整つていたといえる。大気下層の水蒸気輸送を調べてみると、総観規模の流れによる南東風成分は $35^\circ\text{N}$ 以南で顕著であるが、ゴビ砂漠南部までは到達していない。したがつて、水蒸気は総観規模の流れによつて移流されてきたとは考えられない。むしろ、山岳地と砂漠地域との間の局地的な循環が水蒸気量の増加に寄与しているという可能性が指摘された。

#### 謝辞

光田 勝京都大学名誉教授には、本論文に関する研究・原稿に対して多大なる助言・コメントをいただきました。ここに深い感謝の意を表します。本研究で用いたデータは、中国・蘭州高原大気物理研究所よりいただきました。あわせて感謝いたします。本研究を進めるにあたり、日本学術振興会特別研究员制度による科学研究費特別研究员奨励費の補助を受けました。

#### 引用文献

- 加藤内蔵進・岩崎博之・松本 淳(1992): 東アジア乾燥地域周辺の水循環。「天気」39: 408-413。
- 鬼頭昭雄・山崎孝治・時岡達志(1993): 客観解析データによる夏季の中国北西部の水蒸気フラックス。「沙漠研究」3: 9-17。
- 光田 勝(1988): 大気-地表面相互作用に関する日中共同研究(HEIFE)。「天気」35: 501-505。
- 大野久雄(1994): ニジェールのガストフロント。「天気」41-7: カラーページ。
- 竹見哲也・里村雄彦(1997): 乾燥地におけるスコールラインの数値実験。「日本気象学会1997年秋季大会講演予稿集」72: A 209。
- 竹見哲也・板野稔久・光田 勝(1997): 対流システムにおける雨滴の蒸発冷却の効果について。「京都大学防災研究所年報」40B-1: 189-196。
- CHEN, J.Y. (1995): Atmospheric boundary layer wind field in the HEIFE area. *J. Meteor. Soc. Japan*, 73: 1245-1261.
- CHEN, S.J., KUO, Y.H., ZHANG, P.Z. and BAI, Q.F. (1991): Synoptic climatology of cyclogenesis over East Asia, 1958-1987. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 1407-1418.
- FARQUHARSON, J.S. (1937): Haboobs and instability in Sudan. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 63: 393-414.
- IDS0, S.B., INGRAM, R.S. and PRITCHARD, J.M. (1972): An American haboob. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 53: 930-935.
- LAWSON, T.J. (1971): Haboob structure at Khartoum. *Weather*, 26: 105-112.
- MATTICE, W.A. (1935): Dust storms, November 1933 to May 1934. *Mon. Wea. Rev.*, 63: 53-55.
- MITSUTA, Y., HAYASHI, T., TAKEMI, T., HU, Y., WANG, J. and CHEN, M. (1995): Two severe local storms as observed in the arid area of northwest China. *J. Meteor. Soc. Japan*, 73: 1269-1284.
- MORALES, H.C. (1981): A case study of a dust storm weather situation in the Sudan in April 1973. *PAGEOPH*, 119: 658-676.
- PARUNGO, F., LI, Z., LI, X., YANG, D. and HARRIS, J. (1994): Gobi dust storms and The Great Green Wall. *Geophys. Res. Lett.*, 21: 999-1002.
- SHENG, P., MENG, G., DOU, W. and QIN, Y. (1994): Trajectory analyses of the duststorm over east asia. *Acta Meteor. Sin.*, 8: 238-246.
- SUTTON, L.J. (1925): Haboobs. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 51: 25-30.
- TAKEMI, T. (1998): Structure and evolution of a severe squall line over the arid region in the northwestern China. *Mon. Wea. Rev.*, submitted.
- WANG, Q., ZHU, P., WANG, B. and JIANG, R. (1995): Analysis of nighttime drainage wind in the HEIFE region. *J. Meteor. Soc. Japan*, 73: 1285-1291.
- YANG, D., XU, X. and WEN, Y. (1991): A case study on sandstorm.

*Acta Meteor. Sin.*, 5: 150-159.

YATAGAI, A. and YASUNARI, T. (1993): The precipitation and water vapor transport over and around the arid and semi-arid regions of China. MITSUTA, Y. ed., *Proc. Int'l. Symp. on HEIFE*, Disaster

Prevention Research Institute, Kyoto University and Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, 316-321.

JAALS

## The 5 May 1993 Dust Storm over the Northwestern China and the Environmental Condition of Its Development

Tetsuya TAKEMI\*

The severe dust storm that occurred in the desert of the northwestern China on 5 May 1993 was investigated from the standpoint of the convective activity of the long-lived squall line. The dust storm was resulted from the strongly diverging surface winds greater than  $25\text{m s}^{-1}$ . The total amount of the dust blown up in the cold-air pool was estimated to be  $4 \times 10^7$  tons. Some of the dust were raised up to the upper troposphere and might be transported as far as Japan by the strong westerlies.

The amount of the water vapor at the surface increased during the nighttime from 4 to 5 May before the dust storm broke out, which was one of the indispensable conditions for the development of mesoscale convective system. The water vapor transport surrounding the desert showed no synoptic-scale flow into the region, thus the water vapor was not advected by the synoptic-scale winds. It was proposed that the increase of the water vapor in the desert region was attributed to the local circulation between the mountainous area and the desert.

**Key Words:** Black storm, Squall line, Moisture flux, Gobi Desert

---

\*Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan.

(Received, November 12, 1997; Accepted, December 10, 1997)

## タクラマカン砂漠南縁で発生したダストストーム

三上 正男\*

### 1. はじめに

ダストストームは、強風に伴い地表面の砂が大量に大気中に巻き上げられる現象で、世界の乾燥・半乾燥地域の農業・交通・通信・運輸等の各分野に多大な損害を与えており、とりわけアフリカの乾燥地帯のダストストームはハブーブ (Haboob) という名で知られ、その実態や構造について報告がなされている (LAUSON, 1971; 大野, 1994)。また北アメリカの乾燥地帯でも同様の現象がしばしば発生している (Idso *et al.*, 1972)。これらのダストストームに共通する特徴として、対流性の降水系に伴う強い下降流によって大気下層に密度流（重力流）が生じ地上付近でダストストームが発生していることと、ダストストーム先端のガストフロント通過時に強風・温位の急降下・気圧と水蒸気量の増大が見られる点等が指摘されている。

中国乾燥域・半乾燥域で発生するダストストームについては、中国国内の研究所や気象台により統計的に調べられており、内陸部の新疆ウイグル自治区から内蒙古自治区にかけての広い範囲で発生することが知られている (王, 1990; 戴, 1990; 新疆地理学会, 1993; 吉野正敏, 1997)。このうち中国黄土高原のダストストームについては、PAURUNGO *et al.* (1994) が4~5月に発生頻度が高くなることなどを大規模な風沙対策の概要と共に紹介している。また、中国西北部乾燥域のダストストームについても MISUTA *et al.* (1995), 竹見・光田 (1997) らは、それ

らが強い対流性の雲域からの下降流で特徴づけられることを事例解析によって明らかにした。

一方、中国最大の砂漠であるタ克拉マカン砂漠の南縁地域は、年平均風沙日数が民車で35.4日、和田で32.9日、策勒で25.2日とダストストームの発生率が極めて高いことが知られている (表1)。しかし、同地区のダストストームの実態とメカニズムについては観測データが充分でないこともあり、詳しいことはわかつていない。ダストストームは局地性の強い現象であり、発生域の地形や気象条件によりその成因や構造も異なると考えられる。本研究では、ルーチン気象観測データと筆者らが取得した自動気象観測装置による気象データを基に、タ克拉マカン砂漠南縁地域におけるダストストームの特徴について解析を行い成因について考察を行った。

### 2. 対象地域と同地域の地上気象特性

今回の解析対象とした和田地区はタリム盆地の南端に位置している (北緯37度、東経80度付近)。タリム盆地の北部には天山山脈・南部には崑崙山脈・西部にはパミール高原があり、東部を除き三方を高い山に囲まれた地形を成している (図1)。タリム盆地はまたユーラシア大陸の中央に位置しており、降水が極度に少ないため砂漠 (タ克拉マカン砂漠) を形成している。和田地区は南部の崑崙山脈から北部のタリム盆地中央に連なる穏やかな斜面上 (傾斜約1/100) に位置していて、標高は約1,400mである。和田地区的地表面状態は平坦な砾砂漠

表1. 和田地区各地点における月別平均風沙発生回数。

(「新疆短期天気予報指導手帳」(1986) より作成)

観測所名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年
皮山	0.2	0.6	3.4	4.9	6.6	7.5	3.3	1.8	1.1	0.5	0.4	0.1	30.4
和田	0.3	0.6	3.4	6.1	6.8	6.0	3.9	3.2	1.5	0.5	0.3	0.1	32.9
策勒	0.6	0.9	2.7	4.2	5.7	4.5	3.1	1.9	1.0	0.2	0.3	0.1	25.2
于田	0.1	0.4	2.0	3.1	5.1	3.9	2.0	0.8	0.3	0.0	0.1	0.1	17.8
民車	0.6	0.8	4.4	5.7	6.6	5.5	5.3	4.0	1.3	0.5	0.3	0.4	35.4
安迪尔河	0.1	1.0	3.0	4.3	4.7	4.6	4.0	2.4	0.9	0.0	0.2	0.1	25.1

\*気象研究所

(受付: 1997年11月4日, 受理: 1997年12月10日)

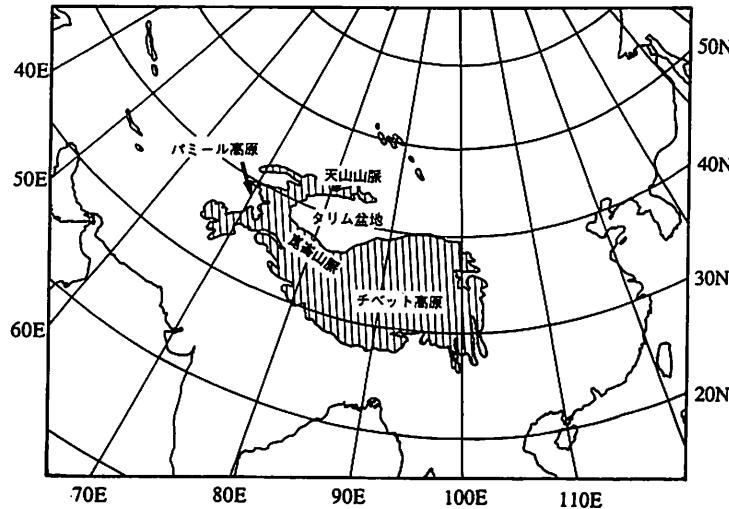


図1. タリム盆地周辺地形図。  
斜線部は標高3,000m以上の領域を示す。

(ゴビ)が大部分を占め、残りは砂漠とオアシスである。同地区的平均年降水量は中国の統計資料によれば約30mmで極めて乾燥している。

同地区においては、1991年11月9日より著者らによって自動気象ステーションによる長期観測が行われている(三上ほか, 1995)。観測地点は和田市の110km東方にあるオアシス都市策勒郊外の砾砂漠(ゴビ)上である。測定項目は地上10mの風向・風速・気温・湿度・日射量・放射量ならびに地表面温度で、それぞれ30分毎にサンプリングされたデータは装置内の記憶装置に収録される仕組みになっている。さらに集中観測時には土壤水分量やアルベドの測定などもあわせて実施している。ここで得られたデータによれば、ゴビ上のアルベドは0.3程度と大きな値を示すものの、土壤水分量は0.1%程度(含水比)と極めて少なく、地表面温度の日変化は非常に大きく、太陽からの有効放射量の大部分が顯熱と地中熱によってバランスしていることが特徴的である(三上ほか, 1995)。このため崑崙山脈とタリム盆地中央部との間で熱的に強制された局地循環が生じ、顕著な地上風系の日変化が見出されている(長島ほか, 1991; MIKAMI *et al.*, 1995)。

さらに同地点では春から夏にかけて西から北西の強風がしばしば発生することが、地上風速データの解析結果から明らかにされている。タクラマカン砂漠における気象要素と砂面変動の観測結果によれば、同地点では地上10mの風速が $7\text{ms}^{-1}$ を超えると砂粒子の移動が著しくなることが知られている(長島ほか, 1991)。図2は、ゴビ

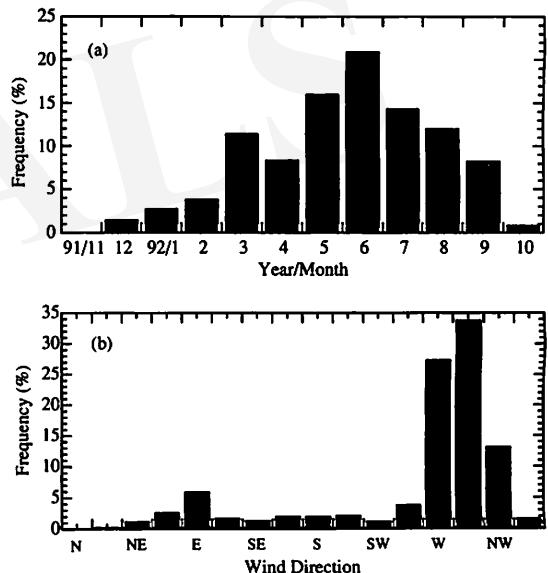


図2. ゴビ上の強風( $7\text{ms}^{-1}$ 以上)時の(a)月別頻度分布と(b)風向別頻度分布。(三上ほか, 1995より)

上の地上風速 $7\text{ms}^{-1}$ 以上の強風発生数の月別頻度分布と風向別頻度分布であるが、図から明らかのように強風の大部分は5月から7月の時期に集中しており、また強風時の風向は東向きの風がその大部分を占めている。同様の結果は、吉野(1992)による新疆の砂漠地区の風に関する気候学的解析でも示されており、それによれば4~6月にかけてタリム盆地南部のうち和田地区以西的最大

風速の風向は崑崙山脈に沿った東向きの風となつてゐる。一方、和田地区以東の若羌では西向きの成分となつてゐる。

和田地区で見られる春から初夏にかけての東向きの強風が同地区的風沙の発生と関連があるか否かについて中國の統計資料を調べてみると、確かにここ和田地区周辺では4月から7月にかけての時期に風沙の発生が集中している（表1）。これらの事実から春から初夏にかけて集中して発生する和田地区的ダストストームは、同時に発生する西よりの強風と関連が深いことが示唆される。そこで、この西風がどの様にして形成されるのか、またダストストームの成因とどの様な関係があるのかについて調べるため、長期観測データとルーチン気象データ

タを用いて事例解析を行うことにした。

### 3. データと解析事例

解析に用いた資料は、気象庁のソートファイルドキュメント (SDデータ) に含まれる地上気象観測データ・高層気象観測データと、和田の東100kmのゴビ上で得られた自動気象ステーションデータならびに気象庁印刷天気図である。気象庁のSDデータから対象域の和田地区を中心とする東経75~90度、北緯35~45度の領域内の全データを切り出して解析を行った(図3)。地上気象観測点は領域内に24カ所あり、そこで得られた3時間毎のルーチン気象データを解析に用いた。また同領域に

表2. 現在天気 (WW = 09, 30~35) の基準一覧表.

現在天気 (WW)	通報基準
09	観測時に視界内に砂じんあらし (duststorm or sandstorm) あり、又は観測事前1時間内に観測所に砂じんあらしあり
30	砂じんあらし (duststorm or sandstrom) (視程500m以上) 観測事前1時間内にうすくなった
31	砂じんあらし (duststorm or sandstrom) (視程500m以上) 観測事前1時間内変化無し
32	砂じんあらし (duststorm or sandstrom) (視程500m以上) 観測事前1時間内に始った
33	砂じんあらし (duststorm or sandstrom) (視程500m未満) 観測事前1時間内にうすくなった
34	砂じんあらし (duststorm or sandstrom) (視程500m未満) 観測事前1時間内変化無し
35	砂じんあらし (duststorm or sandstrom) (視程500m未満) 観測事前1時間内に始った

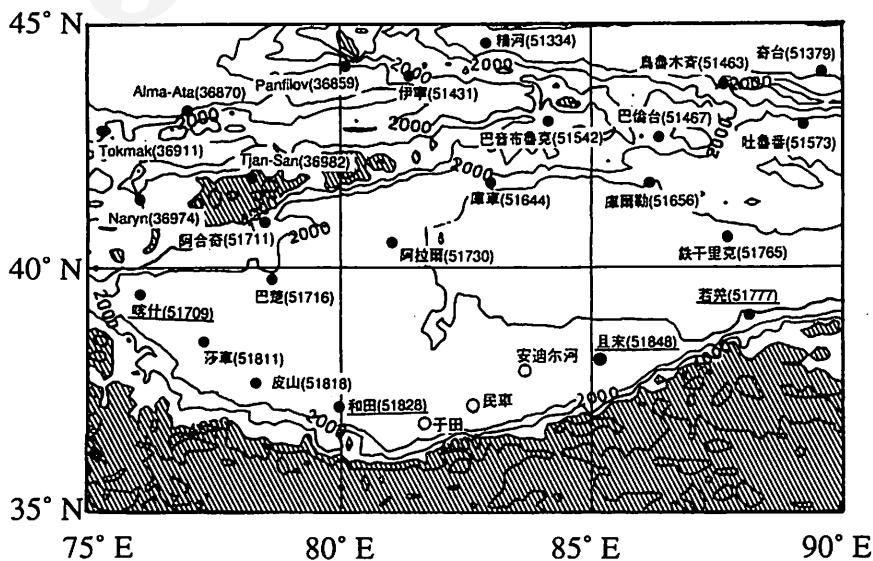


図3. 解析領域図.  
斜線部は標高4,000m以上の領域を示す.

は高層気象観測所が8カ所あり、そのうち崑崙山脈北麓沿いに位置する4カ所（喀什・和田・且末・若羌）で得られた高層気象観測値を主に調べた。自動気象ステーションデータは1991年11月より得られているが、今回の解析事例はその中から観測値の誤差補正処理等が終了した1991年11月から1992年10月の期間中から選ぶことにした。

中国では砂の浮遊により視程が1km以下になった場合を風沙と呼び、そのうち特に視程50m以下で風速が $25\text{ms}^{-1}$ 以上の風沙を黒風暴（Blackstorm, カラブラン）と呼んで区別している。しかし今回は現地の視程観測データが得られないため、SDデータの地上気象観測の現在天気（WW）が09ないし30～35を記録した場合をダストストームと判断することにした（表2）。上記の判定基準に基づき今回の解析期間中に和田地区内でダストストームが記録された事例を調べると、4月に3例、5月に2例、6月に1例の計6例が見出された。いずれの事例もダストストームの発生はタリム盆地の南部・崑崙山脈の北斜面に限られているのが特徴的である。本報告では、このうち現象が顕著で資料も揃っている4月18日の事例について解析を行った結果を紹介する。

#### 4. 1992年4月18日のダストストームの特徴

##### 1) 総観場の特徴

500hPaの印刷天気図によれば、4月15日12Z（Z：グリニッジ標準時）にアラル海の東にあつたトラフ（気圧の谷）は17日の12Zにはパミール高原から北西に延びる

位置に達し、タリム盆地を東進した後、19日12Zにはチベット高原東端の東経100°まで移動している（図4）。後で見るように、ダストストームが報告されたのは17日の21Z以降である。

ダストストーム発生前の17日12Zの500hPaの印刷天気図によれば、トラフの西側の寒気は南に大きく張り出しておらず、その結果パミール高原からタリム盆地にかけて温度場と高度場の東西傾度が強まっている（図5）。これは、トラフの東側のパミール高原によって大気中～下層で寒気の東への流出がブロックされ、その結果トラフの西側の寒気が南下するためであると考えられる。700hPaでも500hPaと同様、パミール高原で温度場の東西傾度は前日までと比べて強くなり、タリム盆地南縁の

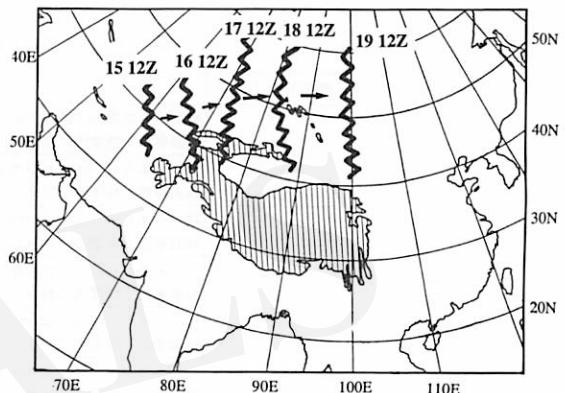


図4. 500hPaにおけるトラフ（波線）位置の時間変化。

数字は日時（グリニッジ標準時）を示す。斜線部は標高3,000m以上の領域を示す（以下同じ）。

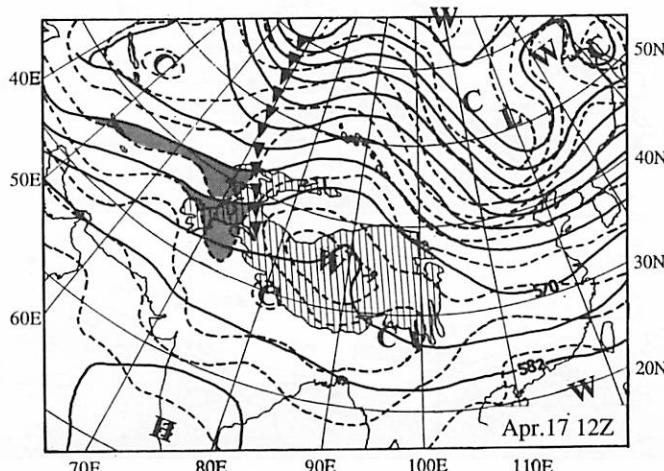


図5 500hPa高層天気図（1992年4月17日12Z）。  
実線は高度場、波線は温度場、▼鎖線はトラフの位置、陰影部は寒気の流入を示す。

観測点では強い東風となつてゐる。

18日になると、トラフはパミール高原からタリム盆地に東進するため、パミール高原東斜面からタリム盆地への寒気の流入が始まる(図5)。喀什(76°E)から若羌(88°E)にかけての風の鉛直プロファイル東西断面を見ると、17日12Zには700hPa以下の全層で西向きの風が吹いてゐるのに対し、トラフがパミール高原からタリム盆地に東進した18日00Zには喀什から和田間の西部は東風となつていて、和田と且末間が収束域になつてゐることがわかる(図6)。しかし18日12Zの700hPa天気図を見ると、この収束域は崑崙山脈北麓のタリム盆地の南部に限られている(図7)。この18日の寒気の流入に伴い700hPaではタリム盆地上的暖域が消滅し、チベット高原の暖域も変形を受け、高原上に生じた熱的低気圧のパターンも変化している。700hPaの湿数(気温-露点温度)はタリム盆地周辺では非常に大きな値を示してゐて、トラフの通過にも関わらず降水を発生させる大規模な雲域の存在はなかつたと考えられる。

同様の特徴は、地表面に近い850hPa天気図でも見出された(図8)。トラフの通過に伴う寒気流入が見られた18日にはタリム盆地上的暖域は縮小し、タリム盆地南縁の喀什で北よりの風、東部の且末以東では東よりの

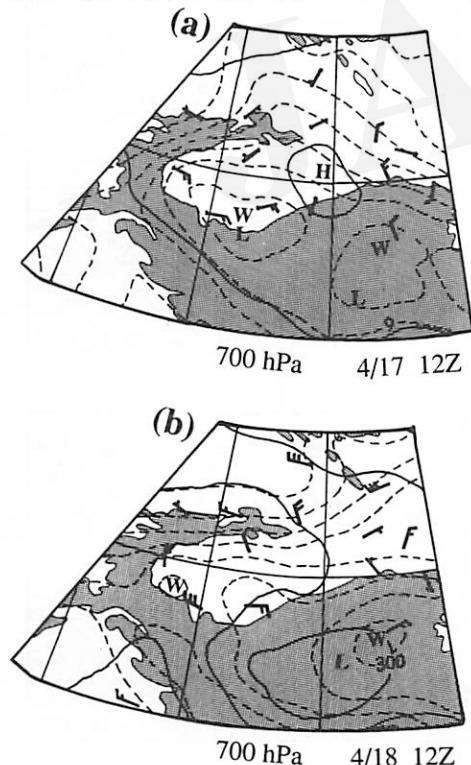


図7 700hPa高層天気図(a: 17日12Z, b: 18日00Z)。

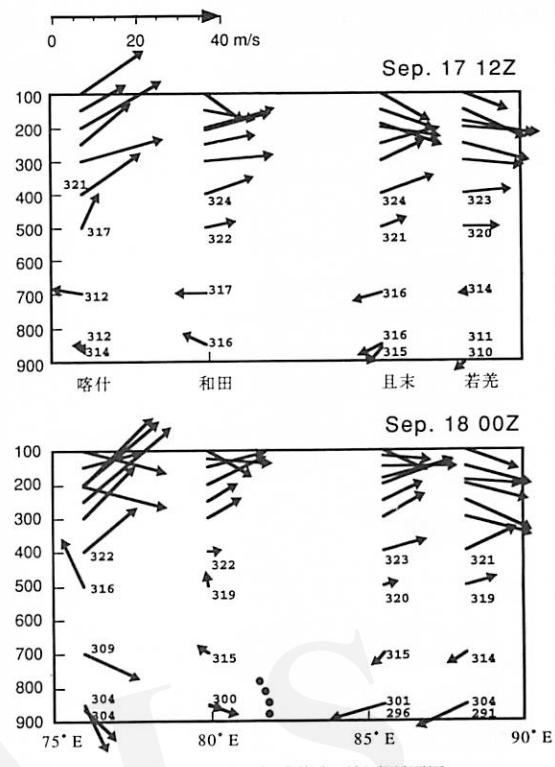


図6 風向風速・仮温位東西鉛直断面図  
a: 17日12Z, b: 18日00Z. 点線部は風の収束域を示す。

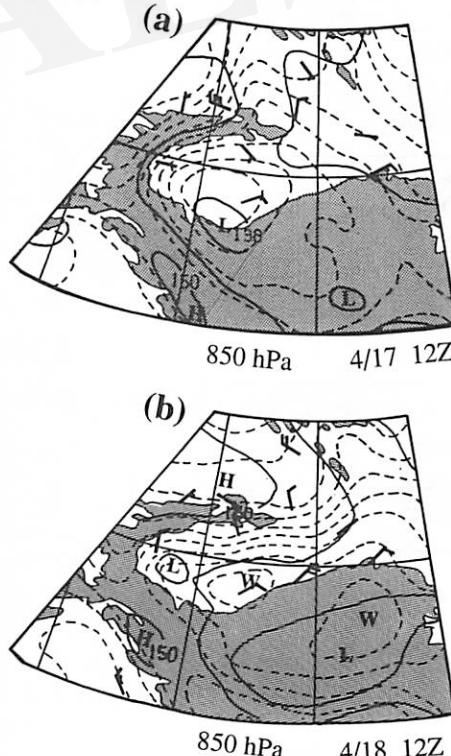


図8 850hPa高層天気図(a: 17日12Z, b: 18日00Z)。

風が見られ、収束域の和田は微風になっている。また700hPaと同様に、850hPaにおいても湿度は大きく、空気は非常に乾いていることがわかる。

## 2) タリム盆地南縁の地上気象要素

タリム盆地周辺の地上風とダストストームの発生場所を図10に示す。タリム盆地西端の喀什では、トラフの通過に伴ってパミール高原を越えてきた寒気の侵入によると思われる西よりの風が17日15Z前後から顕著になった。西風の領域は次第に東に広がり、18日00Zには和田

以西は全て強い西風となっている。

ダストストーム（現在天気 = 09, 30~35）は17日21Zに莎車で初めて観測され、18日00Zには皮山、03Zには和田で観測されている。莎車・皮山・和田間はそれぞれ110~120kmの距離があるので、今回のダストストームの移動速度はおよそ  $40\text{ km h}^{-1}$  前後であったと考えられる。同地域におけるダストストームの記録は06Zまでで09Z以降の報告はなく、09Zまでには消滅していたと考えられる。したがって、今回のダストストームの発生から消滅までの持続時間はおよそ10時間程度である

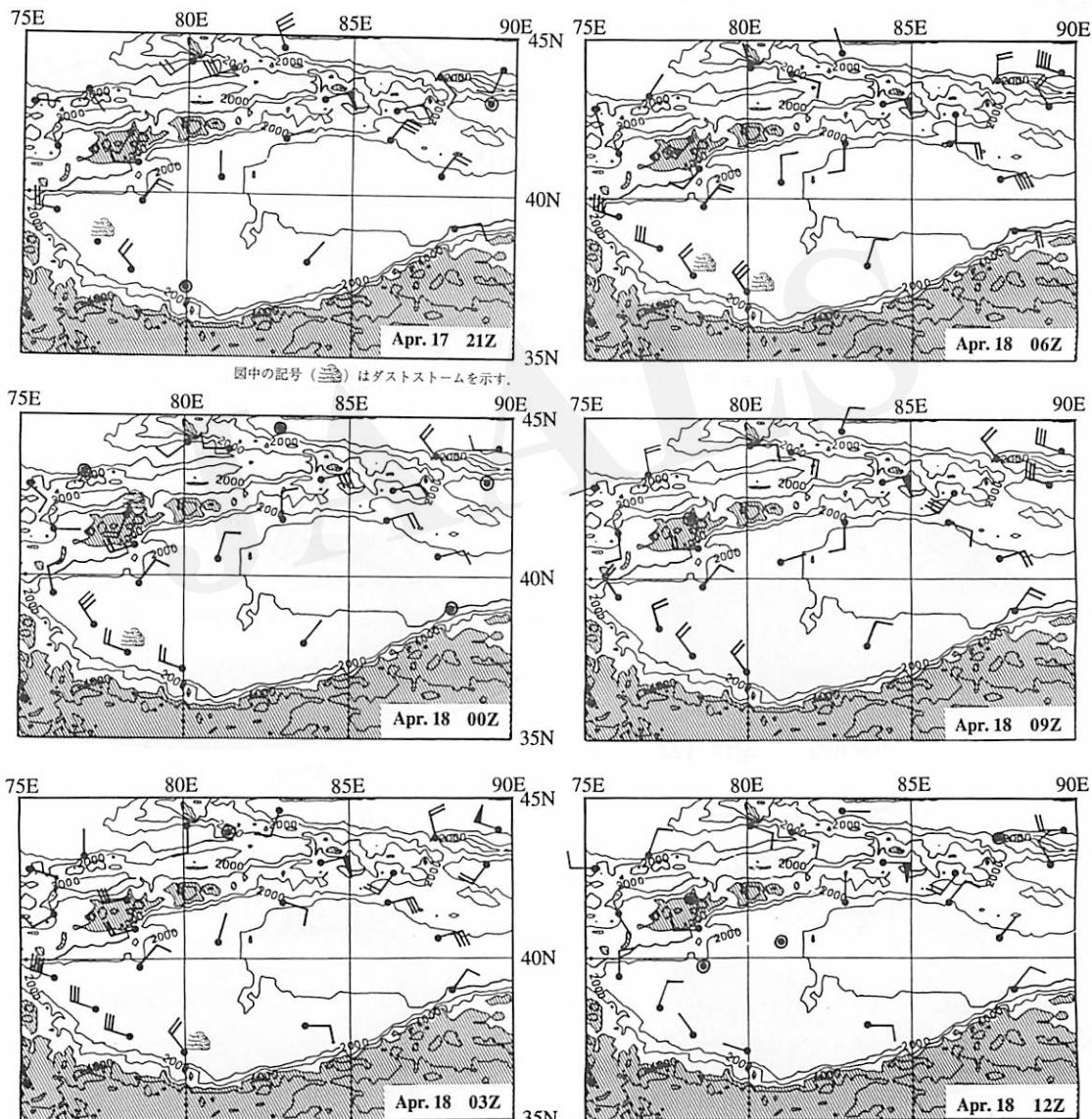


図9 地上風向風速とダストストームの位置。  
風速の矢羽の単位はノット。

と考えられる。また、和田地区東方の且末や若羌ではダストストームの報告はなされておらず、ダストストームの発生域が和田付近の風の収束域より西側の領域に限定されていたことがわかる。

また、他の地域のダストストームの一般的特徴と異なる点として、この期間中いざれの地点でも降水は記録されておらず、今回のダストストームは降水を伴わないドライな現象であった。

### 3) ダストストーム通過時の地上気象要素の特徴

策勒郊外のゴビ上での自動気象ステーションの時系列データによれば、地上風速は北京時間で18日の7時（17日23Z）から急に大きくなり、風向も東南東から西に急

変している（図10）。これは、2章で述べた風系の日変化とは明らかに異なつておらず、トラフの通過に伴う現象と考えられる。和田を北京時間で11時（3Z）頃通過したダストストームが $40\text{ km h}^{-1}$ で移動したと仮定すると、策勒には13時前後に到達すると考えられる。策勒郊外の自動気象ステーションの風速も12時30分に極大を示しており、この頃ダストストームのフロントが通過したと思われる。ダストストーム通過時の最大風速は $13.8\text{ ms}^{-1}$ で、瞬間最大風速は $20.3\text{ ms}^{-1}$ であった。トラフの通過に伴つて地上風速が西に急変してから、ガストフロントの通過まで数時間のタイムラグがある。ダストストームの前線面の通過と共に風速は次第に弱まり、およそ12時間後には平常時の風速に戻った。

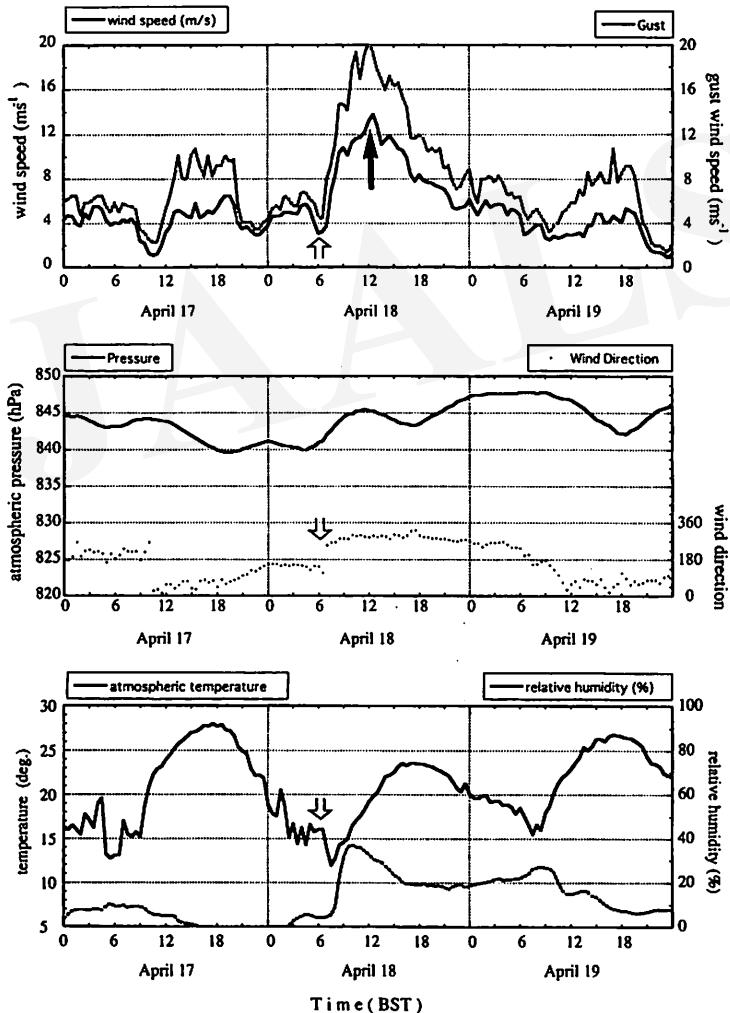


図10 策勒周辺ゴビ上における (a) 地上風速と最大風速および (b) 気圧・風向、(c) 気温・相対湿度の時間変化。  
黒矢印はガストフロントの通過と思われる時刻、白矢印は風速・風向の急変時を示す。

自動気象ステーションの時系列データによれば、18日の7時には地上風速の増大と共に相対湿度が上昇している（図10）。地上気温については日変化の振幅が大きいためはつきりしたことはわからない。また、ダストストームの通過を示唆する下向き長波放射の増大・日射量の低下等の現象も見出される。一般にダストストームの通過時、とりわけ前面のガストフロント通過時には、風速の急激な増大と共に気温の急低下と湿度の急上昇ならびに気圧の一時的な急上昇などが観測されている。こうしたガストフロント通過に伴う気象要素の変化は、いずれも上空の降水系からの降雨の蒸発によって生じた冷気の下降流に伴うコールドプールの形成と、地上付近での密度流の発生によるものと考えられている。今回の事例では、こうした変化傾向の顕著な不連続は少なくとも最大風速発生時には見出せない。今回の事例解析では目視による地上気象観測や視程に関する情報がなく、同地点での風速・気温・湿度の鉛直プロファイル情報もないことで、ダストストーム通過時のダスト濃度やダストストーム前線面のガストフロントの構造を明らかにすることはできなかつた。

## 5. ダストストームの成因に関する考察

今回解析を行ったダストストームは偏西風波動に伴う気圧の谷がパミール高原からタリム盆地を通過することにより生じ、その発生にはタリム盆地の三次元的な地形が関係している可能性が高い。これまで見てきた解析結果から今回のダストストームは以下の過程によって発生したと考えられる。

4月下旬以降の融雪に伴い、チベット高原は大気に対する熱源として働く。その結果、プレモンスーンからモンスーン期にかけてチベット高原では大気中・下層に熱的低気圧が生じる。チベット高原北部のタリム盆地南東部では、この熱的低気圧に向かう大気下層の流れは崑崙山脈の地形効果によって南向きから山麓斜面に平行な西向きの流れに変化する。偏西風波動に伴うトラフ（気圧の谷）がパミール高原まで東進すると、トラフの西側の寒気は平均3,000m以上の標高を持つパミール高原によりブロックされてパミール高原の西側に滞留し一部は南下するが、パミール高原を越えてタリム盆地には流入してこない。寒気がブロックされるためパミール高原からタリム盆地にかけて東西方向の温度傾度と気圧傾度は強まり、その結果タリム盆地南部の崑崙山麓沿いの東風は強化される。トラフがさらに東進しタリム盆地を通過するに伴い、トラフの西側の寒気はパミール高原の東側斜

面を下つてタリム盆地に流入する。しかし、この南向き成分を持った寒気は崑崙山脈の地形（壁）効果によってタリム盆地南部では強制的に西風へと変形する。

このパミール高原東斜面を下る寒気は重くて冷たいため大気下層に密度流として流れ込み、さらに崑崙山脈の壁効果によりその風系は収束効果を伴うため、タリム盆地南西部の喀什から和田にかけての地上付近では強い西風となる。この東向きの風は風速が非常に強いため、地表付近でダストストームを発生させる。この点で、このダストストームをもたらした東向きの強風は、パミール高原の東斜面から崑崙山脈の北斜面を下る大規模な斜面滑降風の性質を持っていると考えられる。通常の斜面風が斜面上と同じ高度の空気と斜面直上の空気との温位差による熱的に励起された局地循環であるのとは異なり、この斜面滑降風はシノプティックな擾乱の通過に伴つて生じた斜面を下る風である点が特徴的である。

トラフがタリム盆地内の西に位置している間はタリム盆地南縁東部では東風になっているため、中央部の和田地区周辺は西部の西風と東部の東風の間で収束域が形成される。パミール高原からタリム盆地中央部へのトラフの東進に伴いダストストームは東進するが、この収束域より東ではダストストームは観測されていない。その後トラフがタリム盆地から東へ移動するに伴い、パミール高原東斜面の強い寒気の流入は収まりダストストームは消滅する。このメカニズムによれば和田地区でダストストームを発生させる強風は西風成分となり、ゴビ上で長期観測の結果や吉野（1992）が解析した大風の風向分布とも良く一致する。

トラフのタリム盆地の通過により生じるパミール高原東斜面から崑崙山脈北斜面を下る寒気は、断熱膨張による昇温効果のために乾燥した気塊を形成し、他方トラフ東側の暖気側はチベット高原によって南方からの水蒸気の移流が妨げられる。したがって、タリム盆地内ではトラフの通過に伴う降水性の擾乱は発生しにくいと考えられる。すでに見てきたように、砂漠乾燥域のダストストームは対流性の降水系に伴つて発生するのが一般的であるが、和田地区で発生するダストストームはそのメカニズムが一般に考えられるものとはかなり異なつていると考えられ、極めて興味深い。

さて、和田地区のダストストームの発生件数の大部分は5月を中心とする短い期間に集中している。この特徴に関しては今回の事例解析ではその原因について明らかにすることはできないが、高藪（1997）は東進成分の波数3.2～6.4日の擾乱のパワースペクトルの緯度分布の時系列を客観解析データを用いて解析し、擾乱のパワーの

ピークが5月に最も南下しタリム盆地付近にまで達していることを示している。偏西風波動に伴う擾乱が5月前後にチベット高原北部を通過する事実は、和田地区のダストストームの成因に関する上の作業仮説とも良く整合する。

## 6. まとめ

1992年4月18日にタクラマカン砂漠南縁和田地区で発生したダストストームは以下の特徴を持つていた。

- (1) 移動速度はおよそ  $40 \text{ km s}^{-1}$  程度で、持続時間はおよそ10時間程度であった。
- (2) 降水を伴わないドライな現象であった。
- (3) ダストストーム通過前後の地上気象要素は風向急変時には一般的なダストストームに見られるような顕著な気象要素の変化は見出しつく、最大風速発生時刻は風向急変時から数時間のタイムラグがあった。

このダストストームは、偏西風波動に伴うトラフ（気圧の谷）がパミール高原を東進しタリム盆地を通過する時に発生した。パミール高原東斜面を下ってタリム盆地南部に流入した寒気は、崑崙山脈による地形効果のためタリム盆地南西部で東向きの強い斜面滑降風となつた。ダストストームはこの斜面滑降風が吹いたタリム盆地南部・崑崙山麓の西側で発生している。トラフの通過に伴う寒気の流入が大規模な斜面滑降風の性質を持って、地形による収束効果によりその強さを増しつつ地上でダストストームを発生させたという点で、今回のダストストームは他の地域でこれまで報告されているものとその成因・構造が大きく異なると考えられる。

今回対象とした和田地区のダストストームの詳しい構造については、今回のデータだけでは不明の点も多い。また和田地区においても降水を伴ったダストストームと思われる事例も知られており（東京水産大長島秀樹博士の私信による）、これらについてもその実態と発生メカニズムの相違について調査・解析を進める必要があろう。さらにダストストームの前面のガストフロントはスケールが小さい局所的な現象なので、既存のルーチン気象データを利用した解析だけでは現象の理解が困難であると思われる。今後現地での観測も含めた研究手法を模索する必要がある。

## 謝 辞

気象研究所物理気象研究部青木耕夫氏は著者と共にタクラマカン砂漠の現地調査を行った。彼の尽力なしには長期観測は困難であつたろうと思われる。またタリム盆地周辺の風系についても議論・助言をしていただいた。東京水産大長島秀樹博士には本論文を取りまとめるにあたり貴重な助言を戴いた。ここで両氏に深く感謝の意を表したい。またSDデータの編集に関しては気象研究所環境・応用気象研究部佐々木秀考氏に協力していただきました。

## 引用文献

- 大野久雄 (1994): ニジェールのガストフロント. 「天気」 41-7: カラーページ.
- 気象庁編 (1990): 「国際気象通報式第8版」 気象庁.
- 高森 出 (1997): ユーラシア大陸中央部の低気圧活動について. 日本国象学会1997年度春季大会講演予稿集, 199.
- 竹見哲也・光田 寧 (1997): 1993年5月5日の中国乾燥地におけるダストストームの発生メカニズム. 理化学研究所シンポジウム「アジア内陸起源の風送ダスト」 講演要旨集, 58.
- 長島秀樹・趙 墓峰・岡崎守良・李 崇舜・夏 訓誠 (1991): タクラマカン砂漠における気象要素と砂面移動の自動観測. 「沙漠研究」 1: 61-66.
- 三上正男・藤谷徳之助・張 希明 (1995): 中国タ克拉マカン砂漠における気象要素の長期観測. 「沙漠研究」 4: 103-117.
- 吉野正敏 (1992): 新疆の沙漠地域の風と雨. 「沙漠研究」 1: 1-15.
- 吉野正敏 (1997): 「中国の沙漠化」 愛知大学文学会叢書 I, 大明堂.
- 王 文輝編 (1990): 「内蒙古气候」 气象出版社, 北京.
- 戴 加洗編 (1990): 「青藏高原气候」 气象出版社, 北京.
- 「新疆短期天気予報指導手册」 編集組 (1986): 「新疆短期天気予報指導手册」 新疆人民出版社, 乌鲁木齐.
- 新疆地理学会 (1993): 「新疆地理手册」 新疆人民出版社, 乌鲁木齐.
- MIKAMI, M., FUJITANI, T. and ZHANG, X. (1995): Basic characteristics of meteorological elements and observed local wind circulation in Taklimakan Desert, China. *J. Met. Soc. Japan*, 73: 899-908.
- MITSUTA, Y., HAYASHI, T., TAKEMI, T., HU, Y., JIEMIN, W. and CHEN, M. (1995): Two severe local storms as observed in the arid area of northwest China. *J. Met. Soc. Japan*, 73: 1269-1284.
- IDSO, S.B., INGRAM, R.S. and PRITCHARD, J.M. (1972): An American haboob. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 53: 930-935.
- LAWSON, T.J. (1971): Haboob structure at Khartoum. *Weather*, 26: 105-112.
- PARUNGO, F., LI, Z., LI, X., YANG, D. and HARRIS, J. (1994): Gobi dust storm over east asia. *Acta Meteor. Sin.*, 8: 238-246.

## Dust Storm Observed in the Southern Edge of Taklimakan Desert

Masao MIKAMI\*

Basic characteristics of the dust storm event in the southern edge of Taklimakan Desert on April 18 in 1992 were analyzed based on the routine meteorological data and AWS (Automated Weather Station) data. Mechanism of this dust storm event was also discussed.

The velocity of the gust front of the dust storm was considered to be roughly  $40 \text{ km s}^{-1}$  and the duration time of the event was approximately 10 hours. No precipitation was found during this event, in contrast to ordinary dust storm reported in the literature. The passage of the gust front was found to be several hours later from the time of the abrupt change of the surface wind direction from east-southeast to west.

It is seen that strong downslope winds occurred with the passage of the trough from Pamir plateau into Tarim basin. This is caused by the inflow of the cold air mass via Pamir plateau. The region of this downslope wind was found to be distributed from west to meddle of the south part of Tarim basin and the dust storm was observed within this region. The topographical effects of the Tarim basin and the surrounding high mountains are essentially important for the occurrence of this dust storm event.

**Key Words:** Dust storm, Taklimakan Desert, Tarim Basin, Topographical effect, Downslope wind

---

\*Meteorological Research Institute, Nagamine 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan.

(Received, November 4, 1997; Accepted, December 10, 1997)

# タクラマカン沙漠を起源とする黄砂の長距離輸送について

甲斐憲次\*・高杉年且\*\*・中村一\*\*\*

## 1. はじめに

黄砂は春の風物詩である。春先、中国大陸の沙漠地域では、しばしば砂塵嵐が発生する。舞い上げられた砂塵は上空の偏西風に乗って日本に飛来する。黄砂は大陸に近い西日本ほど多く観測されるが、東日本でも弱い黄砂はしばしば観測される。

黄砂は、古くて、新しい研究テーマと言える。晚冬から春にかけて、黄砂現象に伴うエアロゾルが大気中の雲物理・光学・放射の諸過程に影響を及ぼすことは、以前から知られていた (ISONO *et al.*, 1959; ARAO and ISHIZAKA, 1986)。

最近では、気象衛星・ライダー等のリモートセンシングによる黄砂の観測も試みられている。黄砂はまた、対流圏の物質循環を調べるためのトレーサーとしても重要

である (村山, 1980; IWASAKA *et al.*, 1983; KAI *et al.*, 1988)。IWASAKA *et al.* (1983) は、名古屋市上空で観測された2層の黄砂層について等温位面解析を行い、それぞれは別々の発生源からもたらされたものであることを示した。一つの発生源はタ克拉マカン沙漠で、他の一つは黄河流域であると推定した。KAI *et al.* (1988) の数値シミュレーションによると、つくば市上空4kmと2kmで観測された2層の黄砂層は、発生源が同一であるが、途中の輸送経路の違いによって生じたものであることが判明した。日本上空を通過した黄砂がハワイやアラスカでも観測されている (RAHN *et al.*, 1977; DUCE *et al.*, 1980; SHAW, 1980)。

他方、中国のタ克拉マカン沙漠やゴビ沙漠の周辺地域では、気候変動、砂丘の移動、降塵、人間活動による沙漠化の進行が深刻な環境問題になりつつある (吉野, 1997)。このような問題を解決するためには、沙漠から

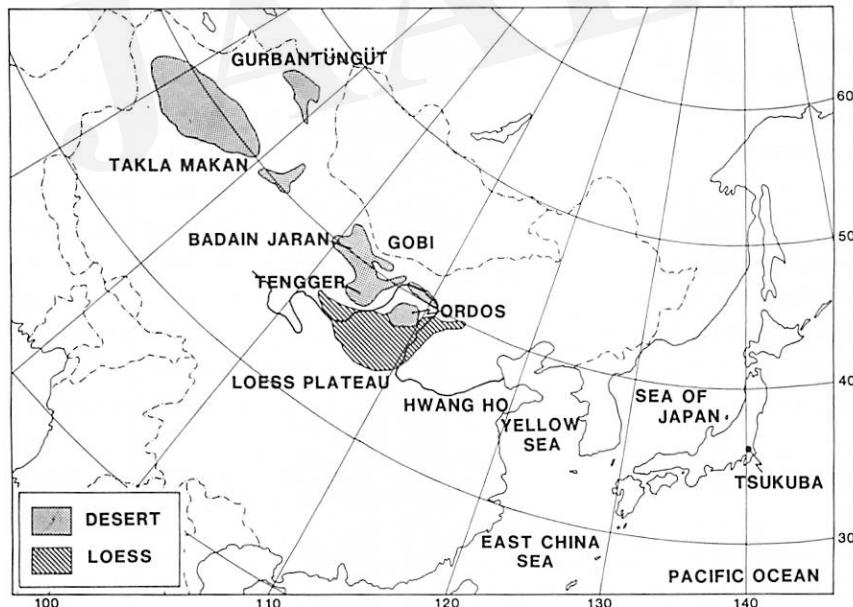


図1. アジア大陸における沙漠と黄土の地理的分布 (KAI *et al.*, 1988).

\* 筑波大学地球科学系

(受付: 1997年11月26日、受理: 1997年12月10日)

\*\* 気象庁予報部

\*\*\* 気象庁気象研究所

の砂塵の舞い上がり、そして輸送経路を定量的に予測することが重要である。

黄砂現象は、空間スケール数千km、時間スケール数日から1週間に及ぶ物質の長距離輸送現象である。黄砂粒子をトレーサーとして扱えば、黄砂現象は大規模な輸送拡散実験とみなすことができる。我々はすでに黄土高原・ゴビ沙漠周辺をソースと仮定した黄砂の数値シミュレーションを行った (Kai *et al.*, 1988)。本研究では、もう一つの有力なソースと考えられるタクラマカン沙漠に黄砂の発生源を置き、移流拡散モデルにより黄砂の輸送経路を調べた。

本稿では、1986年3月に発生した黄砂現象を事例として、数値シミュレーションで再現した黄砂の輸送過程を述べる。また、タ克拉マカン沙漠の現地調査を1991年2・3月に行ったので、その結果も報告する (甲斐, 1995)。

## 2. 黄砂の発生地と現地調査

### 1) 黄砂の発生地

図1は、アジア大陸における沙漠と黄土の地理的分布と、つくば市の位置を示す。黄砂の発生地は $33\text{ - }47^\circ\text{N}$ ,  $75\text{ - }115^\circ\text{E}$ に広がる広大な乾燥地帯で、西域にはタ克拉マカン沙漠、黄河流域には黄土高原、ゴビ沙漠等がある。この乾燥地帯の特徴は、晚冬から春にかけて大量の砂塵が大気中に浮遊することである。砂塵嵐は、主としてこの時期、頻繁に発生している。寒冷前線通過に伴う強風がその発生に寄与している。ときどき砂塵は上空高く舞い上がり、強い偏西風によって日本に輸送され、黄砂となる。

### 2) 現地調査

タ克拉マカン沙漠の現地調査は、平成2-6年度科学技術庁・科学技術振興調整費「砂漠化機構の解明に関する国際共同研究」の一環として行われた。調査日程は1991年2月17日-3月3日の2週間である。寒波の通過した2月19日、ジェット機で北京からウルムチ空港に到着した。最低気温は $-27^\circ\text{C}$ を記録した。ウルムチでプロペラ機に乗り換え、天山山脈を越えてタ克拉マカン沙漠南縁のホータンに向かった (甲斐, 1995)。黄砂の発生と長距離輸送という観点から、現地調査の成果を報告する。

図2に東アジアの鳥瞰図と現地調査写真を示す。図2(c)に示すように、タ克拉マカン沙漠はユーラシア大陸のほぼ中央に位置し、三方を4,000-5,000m級の山脈に囲まれているという地理的特徴を持っている。北を天山山

脈、南を崑崙山脈に囲まれたタリム盆地の中に、広大なタ克拉マカン沙漠がある。

天山山脈の写真を図2(a)に示す。プロペラ機で飛行高度が低く、天山山脈が間近に見えた。山肌は陥しく、雪が多かつた。

天山山脈を過ぎると、雪が急に少なくなる。この山脈の南側では、地肌があらわれはじめめる。天山南路上空を西にアクス ( $40^\circ 56' \text{N}, 78^\circ 26' \text{E}$ ) に向かう。右手には天山山脈が壁のように走り、左手には薄茶色の雲に覆われたタ克拉マカン沙漠がある (図2(b))。この雲の下に、厚さ1-2kmのダスト層がある。このダスト層の中に機体が入ると、下界がまったく見えなくなる。

ホータンを基点に現地調査を行った。図2(d)は、ホータンの東約100kmに位置するシーラの大砂丘である。砂塵が漂い、視程が悪い。この砂丘列はタ克拉マカン沙漠の中でもっとも規模が大きく、砂丘の比高は約30mである。

この地域の気象業務の中心であるホータン気象台を訪問した (図2(e))。ホータン気象台は $37^\circ 08' \text{N}, 79^\circ 56' \text{E}$ に位置し、標高は1,374mである。地上気象、農業気象、ラジオゾンデ観測、日射観測などを1日8回行い、最高・最低気温、強風などの予報を行っている。観測項目は地温 (5, 10, 15, 20, 40, 80, 160, 320cm), 風、気温、湿度、降水量、蒸発散、凍土 (0-1m, 冬の間だけ), 日射量である。気象測器は、旧ソ連製のものが使用されている。

年間の降水量は過去最小で3.4mm/年、最大で110mm/年、平均で33.2mm/年である。風に関しては4・5月が強く、8月が弱い。砂塵は、通常、地面から高度1kmまで漂う。最大、標高3kmまで舞い上がることがある。もつとも強い砂塵嵐、すなわち黒風 (カラブラン) は数年に1回発生する。このとき、湿度がほぼゼロ、日射量もほぼゼロになる。視程は全般に悪く、年間に15回崑崙山脈が見えるという。

次に、黄砂の発生機構に重要な役割を果たすダスト層の様子を述べる。1991年2月20日、天山南路のアスクからタ克拉マカン沙漠を横断して、沙漠南縁のホータンに向かつた。フィールドノートには、次のような記述があった。

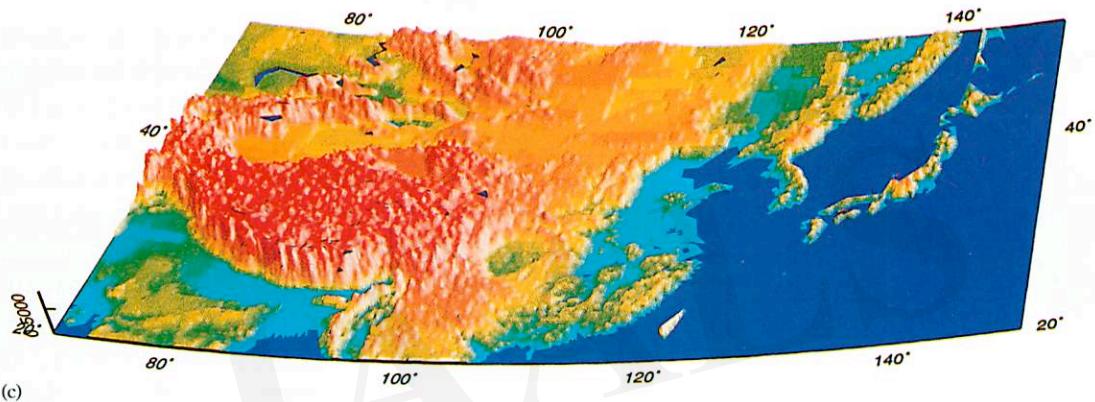
「タ克拉マカン沙漠上空に入ったようだ。下界がまったく見えなくなった。遙かかなたに天山山脈が白い雲海の上に見える。雪に覆われた天山山脈と青い空のコントラストが美しい。ホータンに近づき、飛行高度を下げはじめると、機体が大きく揺れた。これはダスト層上端付近のエントレインメントゾーンにあたるのでないだろ



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

図2. タクラマカン沙漠をとりまく自然環境。

- (a) 階しい天山山脈, (b) タ克拉マカン沙漠(左)と天山山脈(右), (c) 東アジアの島瞰図, (d) シーラの大砂丘,  
(e) ホータン地区気象台の露場一百葉箱

うか、そして、ダスト層の中に入ると、周囲の風景は見えなくなる。」

飛行機から観察したダスト層の様子を図3にまとめた。地上から高度1-2kmまでがダスト層で、砂塵が深い、視程が極めて悪い。ダスト層の上端部がエントレインメントゾーンで、大気境界層と自由大気の物質・エネルギー交換が行われている。このゾーンを通過する際、機体が激しく揺れた。エントレインメントゾーンの上に薄茶色の雲の層がある。この時期、ダスト層の上の雲が雲海となって、タクラマカン沙漠のほぼ全域を覆っていた。この上の自由対流圏は視程が極めてよく、アスク付近では天山山脈が、ホータン付近では崑崙山脈がよく見え

た。

冬季、タリム盆地全体は高気圧性の循環系が発達している（吉野、1997, p.28）。タクラマカン沙漠を覆うこの雲の層は、沈降性逆転による高温層の上面とも考えられる。この2月の観察結果は冬の典型的な場合で、三方を山脈で囲まれたタクラマカン沙漠では、砂塵は高度1-2kmの強い逆転層であるダスト層に滞留し、その上の自由対流圏には舞い上がりついていないように見えた。この逆転層が春先になって破壊されたときダストストームとなって、黄砂の原因となるであろう。

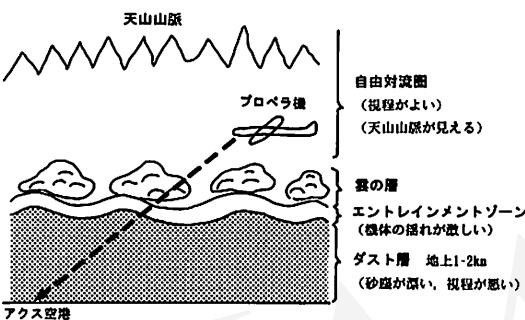


図3. タ克拉マカン沙漠上空を覆うダスト層のスケッチ  
(1991年2月20日)。

### 3. 気象条件とライダー観測

#### 1) 気象条件

1986年3月13日、日本の各地の気象台で黄砂現象が観測された。黄砂現象の発生した期間の気象条件を明らかにするために、地上天気図（いずれも00 UTC）および地上実況気象通報（SYNOP）を調べた。図4に3月8日から13日の地上天気図を示す。8日、中国平原北部に低気圧があり、一方、日本は高気圧の圏内にあつた。9日、低気圧は黄海に移動した。10-11日、寒冷前線を伴う低気圧が東進し、日本を通過した。この前線の後を高気圧が進み、華中に達した。中国東北区には別の低気圧があつた。12日、移動性高気圧は黄海を越えて東進し、九州に達した。翌13日、移動性高気圧は西日本から東日

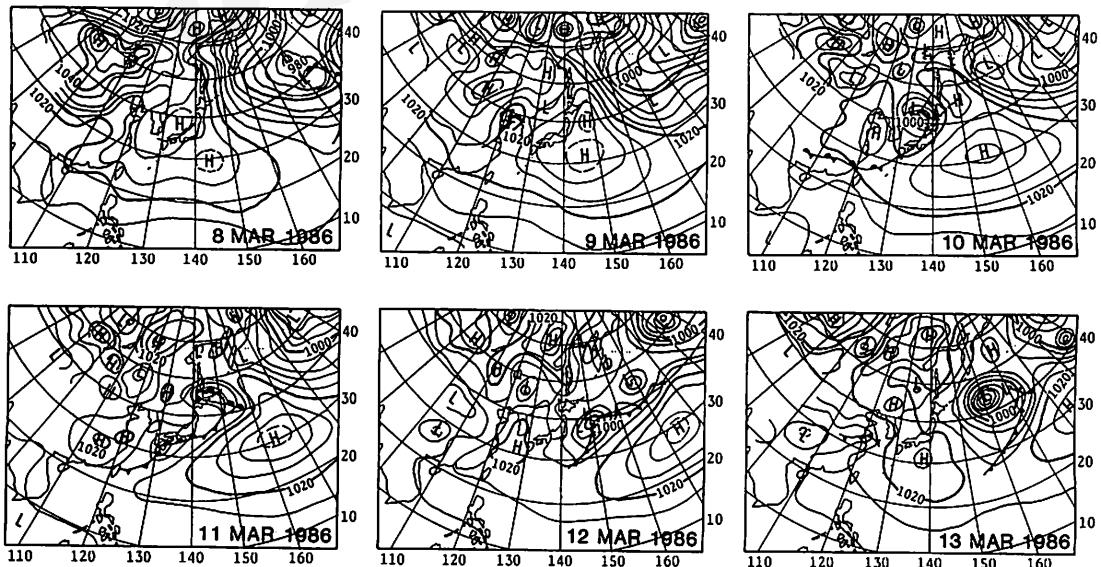


図4. 地上天気図 (KAI et al., 1988).  
1986年3月8日-13日、いずれも00 UTC.

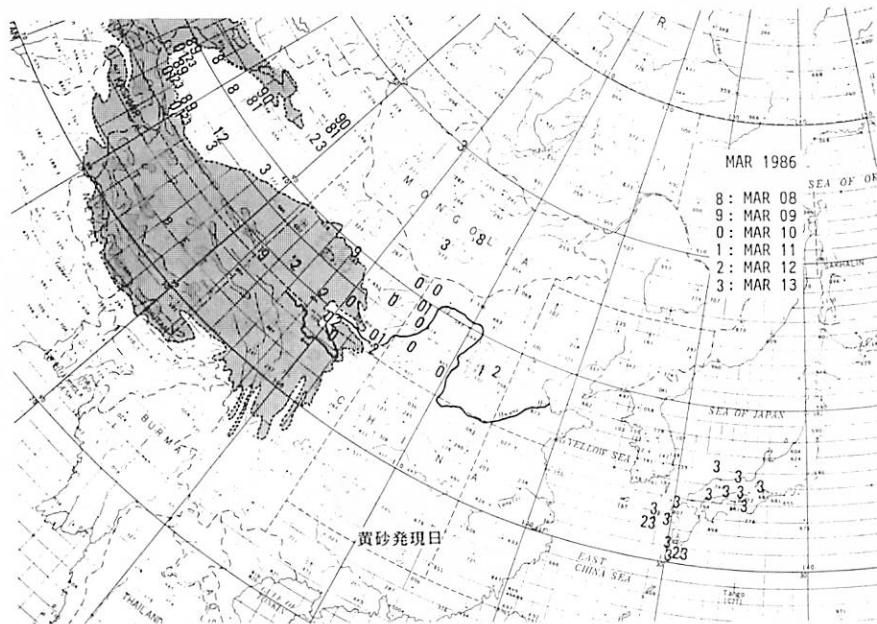


図5. 砂塵嵐、黄砂等の発現日の地理的分布 (KAI et al., 1988).  
図中の数字は発現日の日付を示す。

本に達した。この高気圧は日本に黄砂をもたらし、12・13日の両日、日本の各地で黄砂が観測された。

図5は砂塵嵐、黄砂等の発現日の地理的分布を示す。用いた資料は、気象庁で収集した地上実況気象通報(SYNOP)である。図中の数字は発現日の日付を示す。ハッチをかけた領域は、標高3,000m以上の場所である。対象期間中、タクラマカン沙漠では連日、砂塵嵐が発生した。10-12日、黄土高原とその周辺の沙漠では砂塵嵐がまとまって発生した。

## 2) ライダー観測

黄砂のライダー観測は、1986年3月13日06 UTC(日本時間15時)より12UTCまで気象研究所(つくば市、 $36^{\circ}04'N$ ,  $140^{\circ}07'E$ , 海抜24.7m)で行われた。その観測から得られた散乱比の高度-時間断面を図6に示す。ここで散乱比とは、エアロゾル濃度を光学的に表すパラメーターで、ライダーで観測された実際の大気からの散乱をレーリー散乱で正規化したものである。散乱比は、完全にクリーンな大気では1、混濁大気では1以上の値をとる。

06:04 UTC (15:04 JST)、高度4kmと2km付近に2つの散乱層が観測された。上層は厚さ1km、散乱比は3.2であった。地上の目視観測によると上空に雲はなかつた。通常、晴天時には高度4km付近にこのような顕著な散

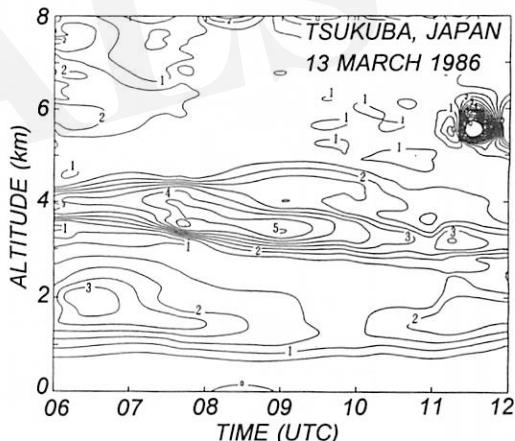


図6. つくば市上空における散乱比の高度-時間断面  
(1986年3月13日)。

乱層は認められないので、この散乱層は黄砂によるものと考えられる。下層は散乱比2.6で、バックグラウンドエアロゾルと混じり合っていたかも知れない。続いて上層の黄砂層は発達し、厚さは1.5km、散乱比は5.7に増加した。

09:03 UTC (18:03 JST)、上層の黄砂層は高度4.5kmと3.5kmを中心とする2つのサブ層に分かれ、それぞれ散乱比は2.9, 5.1であった。上下のサブ層を含む厚さは、2.2kmであった。09 UTC (18 JST) から11 UTC (20 JST)

にかけて、上層の黄砂層の高度は約0.5km低下した。この間、高度2kmにある下層の黄砂層は弱くなり、散乱比は2.0以下になった。なお、11:37 UTC (20:37 JST) のプロファイルをみると高度5.5kmに鋭いピークがみられるが、これは上空を雲が通過したものである。

1986年の黄砂現象の特徴は、筑波の上空4kmと2kmに2つの黄砂層が観測されたことである。次に、なぜ黄砂層が2層構造になったのか、そして輸送経路はどうな

つっていたかを数値シミュレーションにより考察する。

#### 4. 数値シミュレーション

黄砂粒子の長距離輸送を調べるために、TAKASUGI and NAKAMURA (1988) の開発した粒子移流拡散モデルを用いて、数値シミュレーションを行った。黄砂の発生地の候補として、タクラマカン沙漠 ( $40^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E}$ ) を選ん

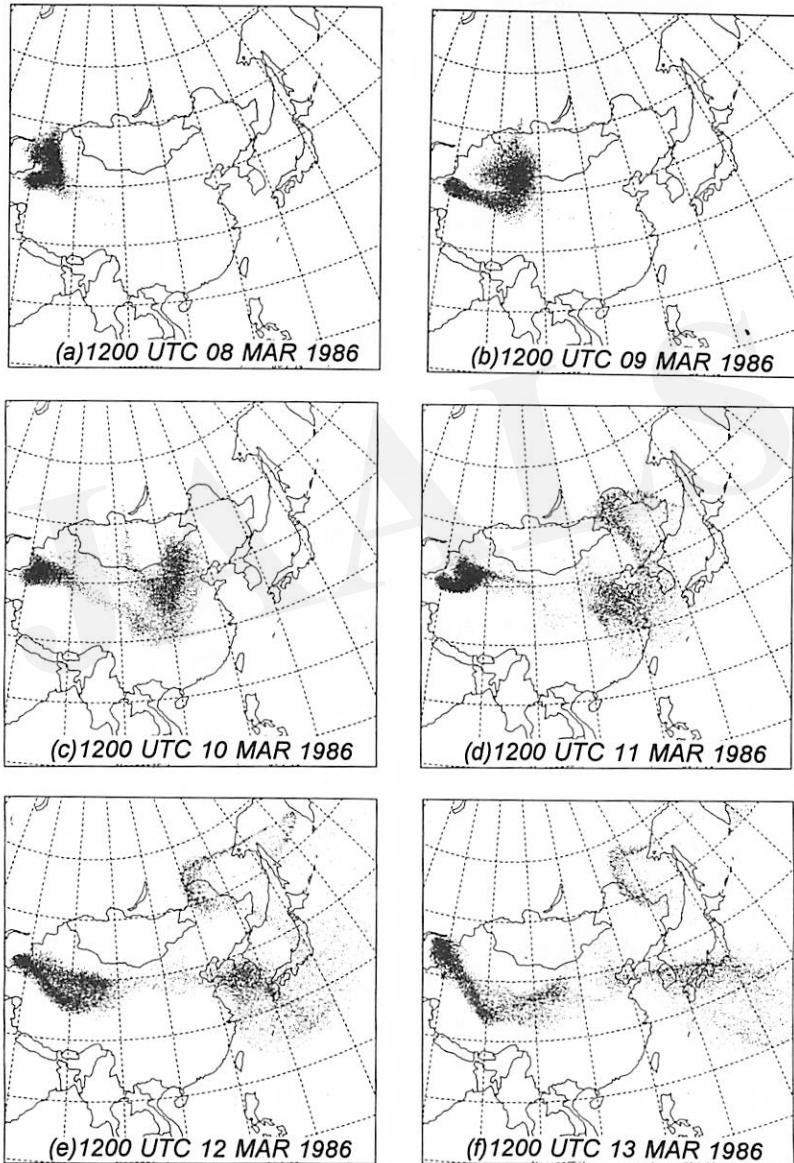


図7. 数値シミュレーションにおけるトレーサーの水平分布。

- (a) 1986年3月8日12 UTC, (b) 1986年3月9日12 UTC, (c) 1986年3月10日12 UTC,  
 (d) 1986年3月11日12 UTC, (e) 1986年3月12日12 UTC, (f) 1986年3月13日12 UTC

だ。ここにトレーサーの発生源を置き、大量のトレーサーを連続的に放出し、その輸送経路を追跡した。

### 1) 粒子移流拡散モデルの概要

粒子移流拡散モデルは、気象庁の数値予報モデルから供給される3次元の風の場と拡散係数を使用する。数値予報モデルは、鉛直12層、波数42の全球スペクトルモデルである。全球スペクトルモデルに取り入れられている物理過程は、積雲対流、境界層、放射過程、雲量、陸面温度、山岳等であり、KANAMITSU *et al.* (1983) に詳しい説明がある。

粒子移流拡散モデルは、発生源から放出されたトレーサーの3次元のラグランジ的運動と鉛直拡散を計算する。鉛直拡散は、鉛直拡散係数で定義されている。トレーサーの重力落下および降水による除去過程は考慮されていない。

予報精度の低下を防ぐため、全球スペクトルモデルと粒子移流拡散モデルを結合したプログラムの「サイクル・ラン」を行った。すなわち、全球スペクトルモデルの初期値を12時間毎に観測値で更新しながら、モデルを走らせた。従つて、粒子移流拡散モデルで使用される風の場は、現実大気に近いものになっている。

### 2) 数値シミュレーションの結果

モデルでは、高さ4km、半径200kmの円柱型の発生源をタクラマカン沙漠に置いた。この発生源より、3月6日00 UTC - 11日23 UTCの期間、毎時125個のトレーサーを放出した。トレーサーの全放出数は、18,000個であった。

図7 (a)-(f) は1986年3月6日から13日の期間におけるトレーサーの水平分布を示す。6-7日、放出直後、トレーサーは弱い東風により一旦タ克拉マカン沙漠の西側

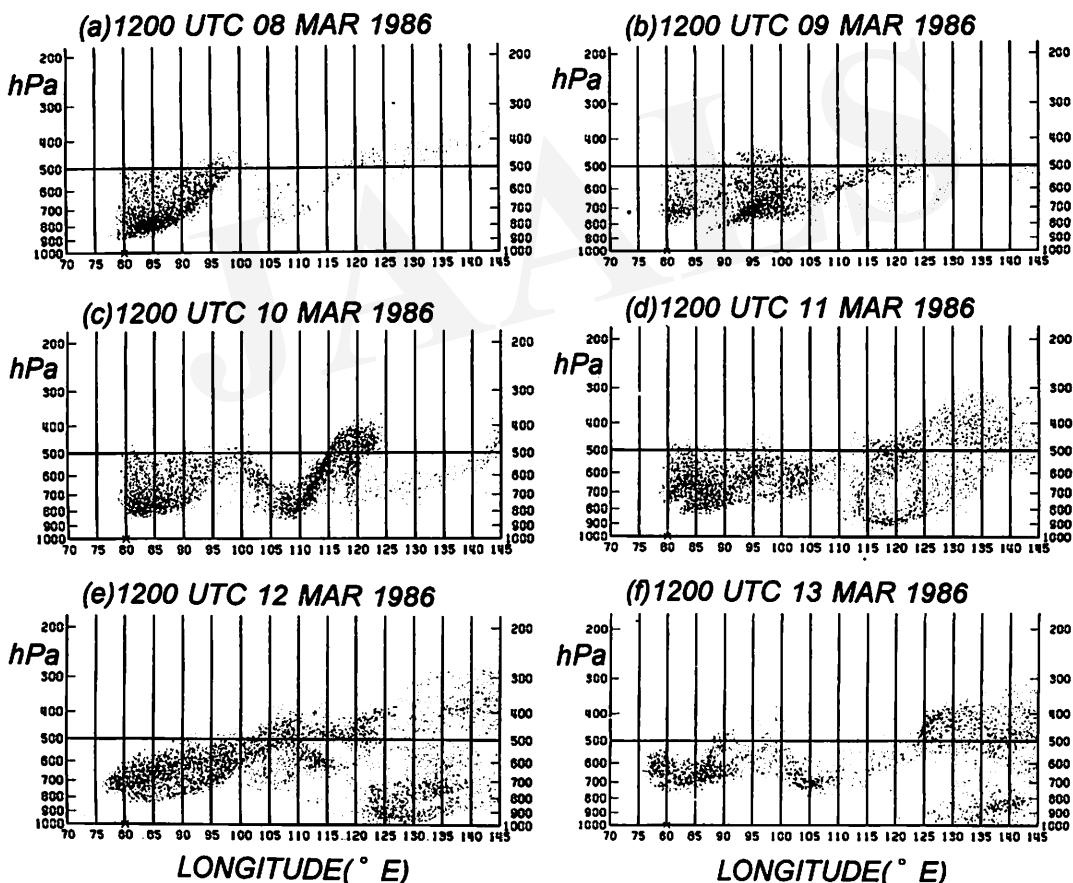


図8. 数値シミュレーションにおけるトレーサーの鉛直分布。

(a) 1986年3月8日 12 UTC, (b) 1986年3月9日 12 UTC,

(c) 1986年3月10日 12 UTC, (d) 1986年3月11日 12 UTC,

(e) 1986年3月12日 12 UTC, (f) 1986年3月13日 12 UTC

に流されるが、その後は西風に押し戻される。8-10日、西風により東進し、11日にはトレーサーの先端は中国平原 ( $30\text{-}40^\circ\text{N}$ ,  $110\text{-}120^\circ\text{E}$ ) に達する。

10-11日、寒冷前線上に分布する先端のトレーサーは日本を通過する。残りの大半のトレーサーは2つのグループに分かれる。 $40^\circ\text{N}$ 以北のトレーサーの大部分は中国東北部の低気圧に取り込まれて滞留し、日本に到達するトレーサーはほんのわずかであった。一方、 $40^\circ\text{N}$ 以南のトレーサーは移動性高気圧と共に黄海に移動する。

12日、移動性高気圧によって輸送されたトレーサーは西日本に達し、13日には東日本にも広がった。明瞭なトレーサーの高密度域が、黄河流域から日本に広がっている。日本の気象台で黄砂現象が報告されたのは12-13の両日であった。トレーサーの水平分布は、中国および日本の気象台における地上観測の結果(図5)とよく一致した。

日本上空におけるトレーサーの履歴を調べると、タクラマカン沙漠から日本にトレーサーが輸送される時間は5-6日である。

次に、図8にトレーサーの鉛直分布を示した。この図では、日本付近のパターンを見やすくするために、 $30\text{-}40^\circ\text{N}$ の緯度帯に含まれるトレーサーのみをプロットした。

先に、水平分布の説明で述べたように、10-11日、移動性高気圧に取り込まれたトレーサーは上層から900-850hPa(高度1-1.5km)の下層に下降した。この下降運動は、図8(d)の $120\text{-}125^\circ\text{E}$ の領域における鉛直分布に明瞭に示されている。下層のトレーサーは、ゆっくりと東進した。

12日、上層(数km)で放出されたトレーサーは、上空の強い偏西風に乗って東進し、先に放出された下層起源のトレーサーに日本上空で追いついた。このとき、図8(e)の $120\text{-}125^\circ\text{E}$ の領域の鉛直分布に2層構造がみられる。この状況は、図7(e)と(f)に明瞭に示されている。トレーサーの履歴を調べると、700-500hPa(3-5.5km)付近の上層のトレーサーは発生地において11日に放出されたものである。一方、900-850hPa(1-2km)付近の下層のトレーサーは10日に放出されたものである。上下両層のトレーサーの放出時期には、約1日のラグがある。

13日、2層構造は、より明瞭になった。図8(f)の $125\text{-}145^\circ\text{E}$ では、上層は600hPa(4km)付近にあり、下層は850hPa(1.5km)付近にある。13日12 UTC(21JST)の $140^\circ\text{E}$ 付近の鉛直分布は、図6のライダープロファイルとよく一致する。

鉛直分布をみると2層構造になっているが、上層は高度600-400hPa(4-7km)に広がり、下層は高度850hPa(1.5km)に中心がある。鉛直分布にいくつかの相異点がみられる。すなわち、数値シミュレーションの上層の高度(4-7km)は、ライダー観測と比較すると約2km高く、またちらばりが大きい。

## 5. 考 察

### 1) 観測と数値シミュレーションの比較

数値シミュレーションにおけるトレーサーの水平分布は、中国および日本の気象台における地上観測の結果とよく一致した。鉛直分布は2層構造が再現されたが、上層の高度はライダー観測と比較すると約2km高かった。トレーサーが日本に到達するのに要する時間は、タクラマカン沙漠からは5, 6日であった。次に数値シミュレーションと観測の相異点を考察してみよう。

先にも述べたように、粒子移流拡散モデルではトレーサーの重力落下による終末速度は考慮されていない。KASTEN(1968)によると、終末速度は粒子の半径に大きく依存し、半径 $1\mu\text{m}$ の粒子で約 $0.01\text{cm/s}$ 、半径 $10\mu\text{m}$ の粒子では約 $1\text{cm/s}$ となる。たとえば、半径 $1\mu\text{m}$ の粒子は1日で約 $10\text{m}$ 、半径 $10\mu\text{m}$ の粒子は1日で約 $1\text{km}$ 落下し、そして半径 $10\mu\text{m}$ 以上の粒子は数日で地上に落下する。従って、重力による粒子の除去作用は $5\mu\text{m}$ 以下の粒子に対しては無視できるが、粒子の半径がこれ以上増加すると飛躍的に増大する。

シミュレートされた上層の黄砂層は、ライダー観測と比較すると高度が高く、また拡散している。もし重力落下の効果が粒子移流拡散モデルに組み込まれていたら、数値シミュレーションで再現された上層の高度(4-7km)は、より低くなり、ライダー観測と一致したかも知れない。

### 2) 発生地での黄砂の舞い上がりについて

黄砂の発生機構について、現地調査の結果をまじえて考察したい。

まず、数値シミュレーションに使用した移流拡散モデルでは、高さ4km、半径200kmの円柱状の発生源をタ克拉マカン沙漠に置いた。この仮定は、タ克拉マカン沙漠において砂塵嵐が半径200km四方で発生し、この砂塵は高度4kmまで舞い上がるこことを意味する。

さて、現地調査の結果はどうであったろうか。第2章の図3で説明したように、1991年2月下旬の状態では、砂塵の漂うダスト層は地上から高度1-2kmに形成され、

この中では視程が極めて悪かつた。このことは地上実況気象通報 (SYNOP) からも確認される。この時期、タクラマカン沙漠南縁の気象台では連日、煙霧 (haze) が報告されている。高度4kmの自由対流圏では砂塵は少なく、視程は極めてよかつた。このように、黄砂の発生に関わるダスト層は高度1-2kmで、自由対流圏に達していない。

鳥瞰図からも明らかかなように、三方を山脈で囲まれたタ克拉マカン沙漠では、砂塵が何らかの原因、たとえば低気圧あるいは熱対流の上昇気流によって舞い上げられて自由対流圏に達したとき、長距離輸送される可能性があると言える。この点については、将来、高層気象観測が実施されれば明らかになるであろう。

## 6. まとめ

我々は1986年3月の黄砂現象を対象として、黄砂の鉛直構造をライダーで観測し、その輸送過程を数値シミュレーションで調べた。また、黄砂の主要な発生源の一つであるタ克拉マカン沙漠で現地調査を行った。

主な結果は、次の通りである。

(1) ライダー観測によると、3月13日06 UTC (15 JST), つくば市上空の高度4kmと2kmに2つの黄砂層が観測された。

(2) タ克拉マカン沙漠起源の黄砂粒子は、タリム盆地を越えると、上空の西風により東に輸送され、5-6日で日本に達する。

(3) 数値シミュレーションで再現されたトレーサーの水平分布は、日本および中国の地上気象観測とほぼ一致した。

(4) 数値シミュレーションでは、観測された黄砂の2層構造をよく再現した。しかしながら、上空の黄砂層の高度は、ライダー観測より約2km高かつた。

(5) 三方を山脈で囲まれたタ克拉マカン沙漠では、砂塵が何らかの原因、たとえば低気圧あるいは熱対流の上昇気流によって舞い上げられて自由対流圏に達したとき、長距離輸送される可能性がある。

本研究で用いた移流拡散モデルでは、黄砂粒子の重力落下を考慮していない。将来、黄砂の粒径情報と重力落下の効果を取り入れれば、数値シミュレーションとライダー観測が一致する可能性がある。

最後に、数値シミュレーションとライダー観測を比較した結果、我々の使用した粒子移流拡散モデルは黄砂の輸送機構を解明する上で有効であると結論付けられる。特に、従来の研究手法ではとらえられなかつた、黄砂の

3次元的な輸送過程が明らかにされたことは、意義が大きいと思われる。黄砂の発生地であるタ克拉マカン沙漠での現地観測が必要なことは言うまでもない。

## 謝 辞

本研究で使用したライダー観測および数値シミュレーションの結果は、著者が気象庁気象研究所在職中に行ったものである。タ克拉マカン沙漠の現地調査は、平成2-6年度科学技術振興調整費「沙漠化機構の解明に関する国際共同研究」(分担課題代表: 吉野正敏、甲斐憲次)の一環として行った。

本研究をまとめるにあたって、多くの方々の協力を得た。気象資料の収集にあたっては、気象庁観測部統計室の小柴 厚氏、黄砂現象については気象衛星センターの村山信彦氏(故人)、元木敏博氏、沙漠・黄土の地理的分布については愛知大学の吉野正敏氏から有益な助言を得た。東アジアの鳥瞰図は、ハワイ大学图形処理システムGMT (WESSEL, P. and W. SMITH, 1995) で作図した。作図にあたっては、筑波大学地球科学系の鈴木力英氏のお世話になった。ここに記して感謝の意を表す。

## 引用文献

- 甲斐憲次編 (1995): 「「既観測・蓄積データの収集・解析」報告書」平成6年度科学技術振興調整費「沙漠化機構の解明に関する国際共同研究」, 55pp.
- 村山信彦 (1980): 気象衛星から見た洋上の風塵。「海と空」55: 149-168.
- 吉野正敏 (1997): 「中国の沙漠化」大明堂, 301pp.
- ARAO, K. and ISHIZAKA, Y. (1986): Volume and mass of yellow sand dust in the air over Japan as estimated from atmospheric turbidity. *J. Meteor. Soc. Japan*, 64: 79-94.
- DUCE, R.A., UNNI, C.K., RAY, B.J., PROSPERO, J.M. and MERRILL, J.T. (1980): Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: Temporal variability. *Science*, 209: 1522-1524.
- ISONO, K., KOMABAYASHI, K. and ONO, A. (1959): The nature and origin of ice nuclei in the atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 37: 211-233.
- IWASAKA, Y., MINOURA, H. and NAGAYA, K. (1983): The transport and spatial scales of Asian dust-storm clouds: A case study of the dust-storm event of April 1979. *Tellus*, 35B: 189-196.
- KAI, K., OKADA, Y., UCHINO, O., TABATA, I., NAKAMURA, H., TAKASUGI, T. and NIKAIIDOU, Y. (1988): Lidar observation and numerical simulation of a Kosa (Asian Dust) over Tsukuba, Japan during the spring of 1986. *J. Meteor. Soc. Japan*, 66: 457-472.
- GANAMITSU, M., TADA, K., KUDO, T., SATO, N. and ISA, N. (1983): Description of the JMA operational spectral model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 61: 812-828.
- KASTEN, F. (1968): Falling speed of aerosol particles. *J. Appl.*

- Meteor.*, 7: 944-947.
- RAUN, K.A., BORYS, R.D. and SHAW, G.E. (1977): The Asian source of Arctic haze bands. *Nature*, 268: 713-715.
- SHAW, G.E. (1980): Transport of Asian desert aerosol to the Hawaiian Islands. *J. Appl. Meteor.*, 19: 1254-1259.
- TAKASUGI, T. and NAKAMURA, H. (1988): A tracer diffusion model coupled with the JMA global spectral model. *JMA/NWPD Technical Report*, No.24: in press.

## Long Range Transport of the Asian Duststorm (Kosa) Particles Originated from the Takla Makan Desert

Kenji KAI\*, Toshikatsu TAKASUGI\*\* and Hajime NAKAMURA\*\*\*

A number of duststorms occurred in the deserts and loess lands of the Asian Continent in early March of 1986. After a few days, the dust laden air was transported over the Yellow Sea to Japan by westerly winds. On 12-13 March, Japanese meteorological observatories reported a "Kosa (Asian dust)" phenomenon. The lidar observation of the Kosa was made at Tsukuba, Japan from 06 UTC to 12 UTC on 13 March 1986. The lidar observation showed that two Kosa layers existed at the altitudes of 4km and 2km, respectively over Tsukuba.

A numerical simulation using the JMA pollutant tracer model was carried out to investigate the long range transport of the Kosa particles originated from the Takla Makan Desert. Generally speaking, simulated horizontal and vertical distributions of the tracers were in good agreement with the lidar observation at Tsukuba and the routine meteorological observations in Japan and China. The observed structure of the two Kosa layers was simulated in the model. But, the simulated upper Kosa layer was higher and more dispersed when compared with the lidar observation. Taking account for the gravitational sedimentation of the tracers, this difference between the simulation and the lidar observation can be explained. Travel time of the Kosa particles to reach Japan was five to six days from the Takla Makan Desert.

A field survey of the environment around the Takla Makan Desert was carried out from February to March 1991. The results of this survey are also presented in the paper.

**Key Words:** Asian duststorm (Kosa), Takla Makan Desert, Lidar, Long range transport

\*Institute of Geoscience, University of Tsukuba. 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan.

\*\*Japan Meteorological Agency. 1-3-4 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0004, Japan.

\*\*\*Meteorological Research Institute/JMA. 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan.

(Received, November 26, 1997; Accepted, December 10, 1997)

# 山形県鶴岡市と山形市の乾性降下物に含まれている 非海塩性硫酸イオンのイオウ同位体比

大日方 裕\*・柳澤文孝\*・小谷 卓\*\*・上田 晃\*\*\*

## 1. はじめに

石炭・石油などの化石燃料の燃焼の際に、不純物として含まれているイオウ分からイオウ酸化物が生じる。イオウ酸化物は窒素酸化物と比較して大気中での滞留時間が長く放出源から遠く離れた地域にまで影響を及ぼすため、大気汚染物質の長距離輸送として国際的な問題となつていて、日本における大気中の二酸化イオウガス濃度は年々減少しているのに対し、世界的にはイオウ酸化物の排出量は増加している。これは、日本ではイオウ分の少ない燃料が使用されるとともに排煙脱硫装置が普及した結果と考えられる。しかし、イオウは人間活動によつて放出されるだけでなく自然界からも放出され、さまざまな化学的、生物的、物理的过程を通じて循環している。大気降下物には現地から放出されたものと他の地域から飛来したもののが混在しており、化学種や濃度変化から起源を推定することは困難である。

イオウは供給源によって特有のイオウ同位体比を有していることから、イオウの動態を解明するにはイオウ同位体比を測定することが有効な手段となる。NAKAI and JENSEN (1967) は湿性降下物に含まれている硫酸イオンのイオウ同位体比について、東京などの工業地帯に存在する大都市と鳥取などの非工業地帯にある地方都市とを比較して、大都市の方がイオウ同位体比が低いことを示した。この現象について彼らは石油などの人為的汚染物質の影響であるとした。また、測定を継続するにつれて地方都市のイオウ同位体比が大都市の値に近づいていく傾向が認められたことから、地方都市においても人為的な汚染物質の影響が増大していることを示した。北村ほか (1993) は、金沢において湿性降下物中の硫酸イオンのイオウ同位体比の季節変動を測定し、冬季に重くなり夏季に低くなる季節変動があることを示した。また、この原因を冬季に大陸からの季節風により人為起源の酸性

物質が飛来しているためと推定した。大泉ほか (1991, 1994), OHIZUMI *et al.* (1997a, b) は新潟・長岡・六日町で、佐竹ほか (1992) は富山で、高ほか (1994, 1996) は府中・八王子・志賀で、関ほか (1994) は松江で、岡田ほか (1997) は茎崎と吉峰で観測を行つており、北村ほか (1993) と同様の結果を得ている。

一方、柳澤ほか (1993, 1994, 1997a, b), 川田ほか (1995), 柳澤・上田 (1996, 1998), YANAGISAWA *et al.* (1996, 1997a), YANAGISAWA and UEDA (1997) は、東北地方の日本海に面した酒田・奥尻島・利尻島、内陸の山形・新庄・米沢、太平洋に面した大船渡・多賀城・太田で湿性降下物を採取して硫酸イオンのイオウ同位体比を測定し、非海塩性硫酸イオンの起源について検討した。この結果、以下の諸点が明らかとなつた。

(1) 硫酸イオンのイオウ同位体比は、どの観測点でも夏低く冬高い季節変動を示す。非海塩性硫酸イオンのイオウ同位体比は、硫酸イオンの値と比較して常に低い値である。このことは、どの地点でも海塩粒子の影響があることを示している。

(2) 酒田・奥尻島・利尻島では、非海塩性硫酸イオンのイオウ同位体比に夏低く冬高い季節変動が見られる。大船渡・多賀城・太田でも同様の季節変動を見ることができる。大陸からの大気汚染物質は日本海側で湿性降下物に取り込まれて降下するが、北西の季節風によつて太平洋側にまで運搬されていることを示すと考えられる。

(3) 山形・新庄・米沢では季節変動が見られるものの変動幅は小さい。これは、山形・新庄・米沢は周囲を山地に囲まれておらず、外部からの大気汚染物質の流入は少ないと考えられることから、現地性の硫酸イオンが卓越しているためと推定される。

(4) 冬季に観測される非海塩性硫酸イオンのイオウ同位体比は、日本列島の北に行くほど高くなっている。冬季には北西の季節風が卓越し、大陸起源の大気汚染物

\* 山形大学理学部地球環境学科

\*\* 鶴岡工業高等専門学校

\*\*\* 三菱マテリアル総合研究所

(受付: 1997年11月9日, 受理: 1997年12月10日)

質が日本に飛来していると考えられている。アジア大陸の湿性降下物に含まれる硫酸イオンのイオウ同位体比はアジア南部で低く北部で高くなつており、日本列島の北側ほど大陸の北側の汚染物質の影響を受けていると推定される。

このように、日本におけるこれまでの研究対象は湿性降下物中心であった。乾性降下物については西川ほか(1988)、上田・坂本(1989)の報告しかなく、また、観測期間も黄砂期に限られていた。広範囲に観測点をもうけ、湿性・乾性の両降下物を同時に採取して比較検討することはアジア大陸からの物質移動を考える上で大変有用である。山形の湿性・乾性降下物に含まれている非海塩性硫酸イオンのイオウ同位体比の季節変化について、大日方・柳澤(1996)およびYANAGISAWA *et al.*(1997b)で報告した。その結果、山形の乾性降下物に含まれている非海塩性硫酸イオンのイオウ同位体比は年間を通じてほとんど変化しないことから、現地性のイオウ分の影響が卓越していることが明らかとなつた。

本研究では日本海に面した鶴岡と内陸の山形で乾性降下物を採取してイオウ同位体比を測定し、両地域でイオウ同位体比の挙動に差異があることが明らかになつた。また、イオウ同位体比の季節変動の特徴から乾性降下物の挙動について考察したので報告する。

## 2. 分析法

### 1) 試料採取

#### (1) 乾性降下物

山形県の鶴岡市にある鶴岡高専と山形市にある山形大学理学部の屋上で採取した(図1)。乾性降下物はSHIBATA社製ハイボリュームエアサンプラーHVC-1000型を用い、1分間700リッターの流量で大気を吸引した。試料採取は240時間の休止期間をはさみ96時間運転する方法で行った。採取期間は1993年10月から1995年7月までである。なお、鶴岡では1993年12月24日から1994年3月2日までエアサンプラー故障のため試料採取ができなかつた。フィルターには東洋滤紙社製QR100石英繊維フィルター(203mm×253mm)を使用し、4分の1(102mm×127mm)を分析に用いた。フィルターをハサミで細断してガラスピーカーに入れ蒸留水20mlを加え、5分間超音波洗浄器にかけ可溶性成分を抽出した。この操作を5回繰り返し、各浸出液を合わせてから0.45μmのMillipore社製メンブランフィルターで濾過し以下の分析に供した。

#### (2) 湿性降下物

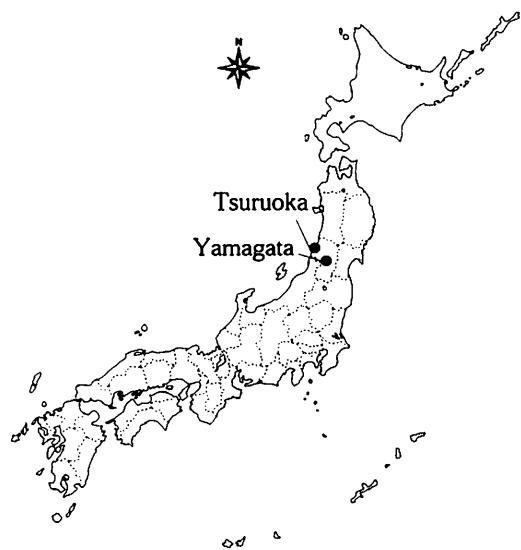


Fig. 1. Location of aerosol sampling stations.

山形県の酒田市にある酒田商業高校と山形市にある山形大学理学部の屋上に、直径21cmのロートをつけた容量10リッターのポリプロピレン製タンクを設置して採取した。試料は1カ月ごとに回収し雨量を測定したのち、直ちに濾過を行い以下の分析に供した。

### 2) 溶存成分の分析

pHはHORIBA社製のB-111型pHメーターを、電気伝導度(EC)はHORIBA社製のC-173型電気伝導度計を用いて測定した。

陰イオン(硫酸イオン・硝酸イオン・塩化物イオン)はDIONEX社製2020i型イオンクロマトグラフィーによって、陽イオン(ナトリウムイオン・カリウムイオン・マグネシウムイオン・カルシウムイオン)はセイコー電子工業株式会社製SPS7000A型発光分光分析装置を用いて定量した。

アンモニアイオンはインドフェノール青法によって発色させ日立社製の101型分光光度計によって定量した。なお、主要・微量元素の挙動については別途報告する予定である。

### 3) イオウ同位体比の分析

試料溶液に1:1HClを加えて酸性とし、水浴上で沸騰寸前まで加熱しながら10%塩化バリウム溶液を加えて硫酸バリウムを沈殿させた。沈殿物は0.45μmのMillipore社製メンブランフィルターで濾別し乾燥させたあと、フィルターごと陶器製るつぼに入れて800℃の電

熱炉で10分間燃焼させ有機物除去した。回収した硫酸バリウムはYANAGISAWA and SAKAI (1983) の方法に従って10倍量の二酸化ケイ素と五酸化バナジウムを加えて混合し、三菱マテリアル総合研究所にある真空ラインで加熱分解して二酸化イオウガスを発生させた。イオウ同位体比は同研究所にあるFinnigan Mat社製のDelta-E型質量分析計によって測定した。なお、再現性は±0.2%である。

イオウには32, 33, 34, 36の4つの安定同位体が存在する。おのおのの存在比率は95.02%, 0.75%, 4.21%, 0.02%である。イオウ同位体比は、最も存在比率の高い同位体である<sup>34</sup>Sに対する2番目に存在比率の高い同位体である<sup>33</sup>Sの存在比率の比 ((<sup>34</sup>S/<sup>32</sup>S) sample) の、標準物質の存在比率の比 ((<sup>34</sup>S/<sup>32</sup>S) std) に対する千分偏差(パーミル‰)で示すのが一般的である。これをδ値と呼んでいる。イオウの同位体比 (δ<sup>34</sup>S) は下式のように国際標準物質であるCanyon Diablo鉄隕石中のtroilite (CDT) に対する千分偏差の形で表示することになる。

$$\delta^{34}\text{S} = ((^{34}\text{S}/^{32}\text{S}) \text{ sample} / (^{34}\text{S}/^{32}\text{S}) \text{ std} - 1) \times 1000 \quad (1)$$

ここで、(<sup>34</sup>S/<sup>32</sup>S) sampleは試料中のイオウ同位体比、(<sup>34</sup>S/<sup>32</sup>S) stdは標準物質のイオウ同位体比である。

日本は四方を海に囲まれており、日本全土に降下する海塩粒子の量は年間150万トンにものぼる(角井・乗木, 1983)。硫酸イオンは海水の主成分の一つであるので海塩粒子の影響を無視するわけにはいかない。非海塩性硫酸イオン ((SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) nss) の濃度はナトリウムイオンが全て海塩粒子起源であると仮定して下式によって求め

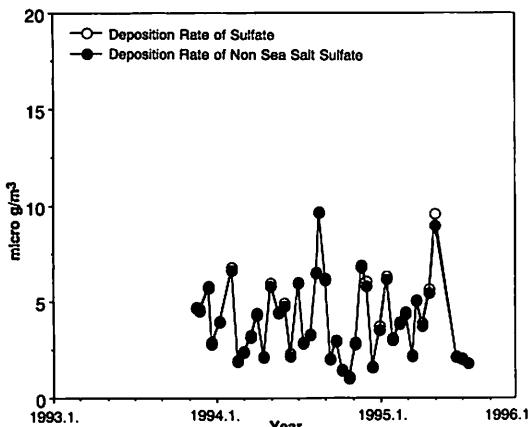


Fig. 2. Seasonal variation of deposition rate of sulfate (○) and non-sea-salt sulfate (●) in aerosol at Yamagata.

た。

$$(\text{SO}_4^{2-})_{\text{nss}} = (\text{SO}_4^{2-})_{\text{mes}} - (\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+)_{\text{sea}} \times (\text{Na}^+)_{\text{mes}} \quad (2)$$

ここで、(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) mesは硫酸イオン濃度、(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Na<sup>+</sup>) seaは海水中の硫酸イオンとナトリウムイオンの濃度比で、角井(1985)を元に算出すると0.252である。

イオウ同位体比についても海塩粒子の影響を除去しなくてはならない。海水中の硫酸イオンのイオウ同位体比については数多くの測定結果が報告されており、世界中のどの地点においても+20.3パーミルの一定の値を取ることが明らかとなっている(中井, 1984)。そこで、非海塩性硫酸イオンのイオウ同位体比 ((δ<sup>34</sup>S) nss) は下式によって算出した。

$$\delta^{34}\text{Snss} = (\delta^{34}\text{Smes} \times \text{SO}_4^{2-} \text{ mes} - 20.3 \times (\text{SO}_4^{2-} \text{ mes} - \text{SO}_4^{2-} \text{ nss}) / \text{SO}_4^{2-} \text{ nss}) \quad (3)$$

ここで、δ<sup>34</sup>Smesは硫酸イオンのイオウ同位体比である。

### 3. 結果と考察

#### 1) 硫酸イオンと非海塩性硫酸イオンの降下量

図2と図3に、山形、鶴岡における乾性降下物中の硫酸イオン (○) と非海塩性硫酸イオン (●) の降下量の季節変化を示した。

鶴岡の硫酸イオンと非海塩性硫酸イオンの降下量は、山形のおよそ2倍である。

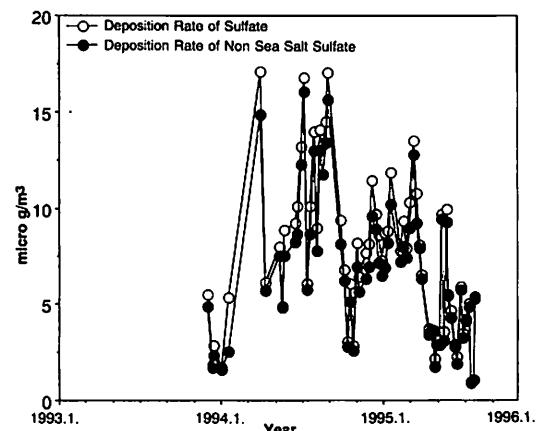


Fig. 3. Seasonal variation of deposition rate of sulfate (○) and non-sea-salt sulfate (●) in aerosol at Tsuruoka.

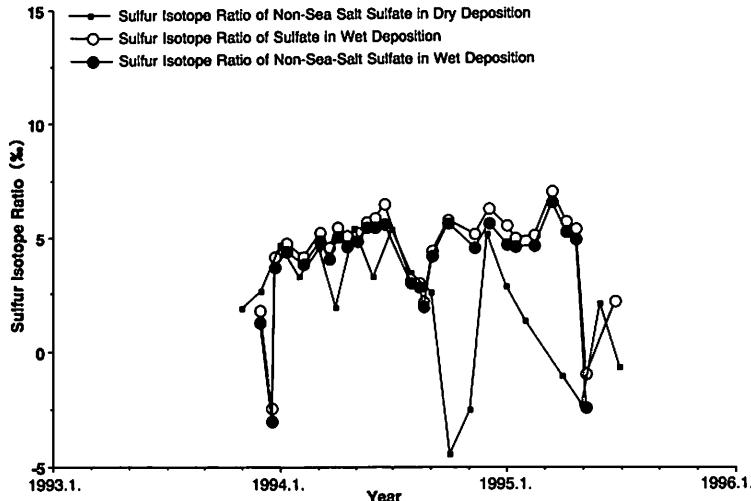


Fig. 4. Seasonal variation of sulfur isotope ratios (permil) of sulfate (○) and non-sea-salt sulfate (●) in aerosol at Yamagata.

山形において、硫酸イオンと非海塞性硫酸イオンの降下量には明確な季節変化は見られなかった。

鶴岡で観測した硫酸イオンおよび非海塞性硫酸イオンの降下量は大きく変動している。また、1993年12月24日から1994年3月2日までハイボリュームエアサンプラーの故障のため試料採取ができなかつた。1994年冬季～春季と1995年夏季を比較すると、1994年冬季～春季の方が降下量が多くなっている。一方、1994年4月の降下量は1994年夏季と同程度であった。従つて、1994年冬季～春季も1994年夏季と同程度あるいは冬季～春季の方が降下量が多かつた可能性は高いと考えられる。日本海側に面した地域では、冬季になると湿性降下物に含まれている硫酸イオンの降下量が増加することが観測されており、冬季に卓越する北西季節風により大陸からイオウ化合物が供給されていると考えられてきた (SATAKE and YAMANE, 1992)。乾性降下物についても同様と考えられる。一方、春季は黄砂の影響が考えられる。なお、夏季の硫酸イオンおよび非海塞性硫酸イオンは生物活動に伴うイオウ化合物を起源とする可能性も考えられる。今後さらに検討を進めたい。

## 2) イオウ同位体比の季節変化

図4と図5に、山形と鶴岡における乾性降下物に含まれている非海塞性硫酸イオン (●) と硫酸イオン (○) のイオウ同位体比の季節変動を示した。なお、比較のため、山形では山形の、鶴岡では酒田で同時に採取した湿性降下物に含まれている非海塞性硫酸イオンのイオウ同位体比 (YANAGISAWA and UEDA, 1997) も合わせて図示し

た。

### (1) 山形

山形では硫酸イオンと非海塞性硫酸イオンの同位体比はほぼ同じであり、年間を通じて海塩粒子の影響が小さいことを示している。また、非海塞性硫酸イオンのイオウ同位体比は1年を通じて $+4\sim+5$ パーミルで推移しており季節変化は見られなかつた。前項で述べたように非海塞性硫酸イオンの降下量の季節変動も小さい。これらのこととは、海塩粒子を含めて外部からのイオウ化合物の流入が小さいと言うことを意味している。

湿性降下物に含まれている非海塞性硫酸イオンのイオウ同位体比は乾性降下物の同位体比とほぼ同じである。以上のことから、山形では大気中に浮遊している乾性降下物の非海塞性硫酸イオンと湿性降下物に取り込まれて地上に落下してくる非海塞性硫酸イオンの起源が同一か、あるいは、ある特定の供給源から供給されていることを示すものである。従つて、 $+4\sim+5$ パーミルという値は山形の現地性のイオウ同位体比と考えてよいであろう。

### (2) 鶴岡

鶴岡では季節に関係なく海塩補正によって同位体比が2程度低下することから、常に海塩粒子の影響が認められる。非海塞性硫酸イオンのイオウ同位体比は、夏季～秋季は $+2\sim3$ パーミル、冬季～春季は $+5\sim+8$ パーミルで推移しており、季節変動が認められる。

非海塞性硫酸イオンの起源を特定するには、人間活動によるイオウ酸化物、海岸の潮間帯から放出される生物起源の硫化水素、陸上の生物活動による硫化水素、海表

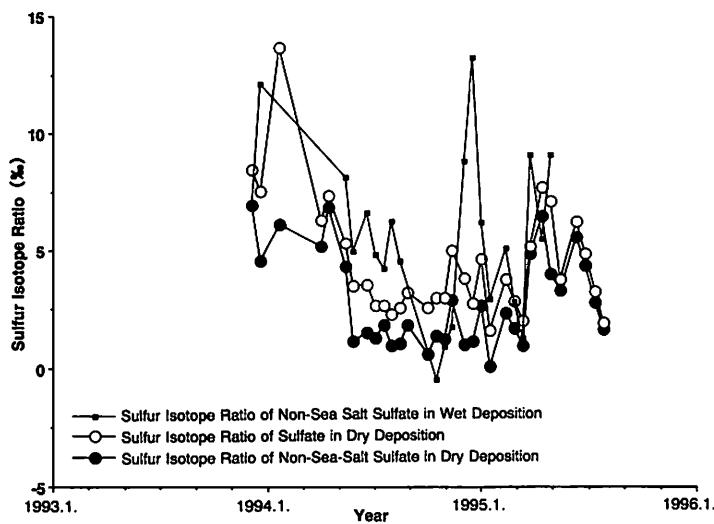


Fig. 5. Seasonal variation of sulfur isotope ratios (permil) of sulfate (○) and non-sea-salt sulfate (●) in aerosol at Tsuruoka.

面域から放出される生物活動起源のイオウ化合物、火山活動による硫化水素やイオウ酸化物、大陸からの黄砂に含まれる硫酸塩、肥料に含まれる硫酸塩等を考慮しなくてはならない。しかし、生物起源のイオウ化合物の影響は大きなものではないと考えられる。また、火山活動に由来するイオウ化合物のイオウ同位体比は、0パーミルを中心として非常に広範囲に分布するとされている。しかし、本研究の観測地点周辺には活動的な火山は存在しないことから考察からは除外していいであろう。

鶴岡では夏季～秋季に弱い東風がふくことが多い。また、鶴岡は日本海に面しており東側に月山等の2,000m級の朝日連峰が控えていることから、夏季～秋季の+2～3パーミルは現地性の非海塞性硫酸イオンの同位体比、すなわちバックグラウンド値と考えてよいであろう。

鶴岡では冬季になると北西方向からの風が卓越することから、現地性のイオウ酸化物起源とは考えにくい。海岸に面していることから、潮間帯から放出される生物活動起源の硫化水素や海表面域から放出される生物活動起源のイオウ化合物も考えられるが、ともに夏季に活発化するものであり冬季に影響があるとは考えにくい。また、冬季は黄砂の影響も小さいであろう。従って、冬季に考えられるのは人間活動によるイオウ化合物である。人間活動によって放出されるイオウ化合物は主に石油・石炭などの化石燃料の燃焼によって生成される。日本で多く用いられる中東産の石油に含まれるイオウ分のイオウ同位体比は-4～-5パーミルと考えられている(THODE and REES, 1970)。この値は鶴岡のバックグラウンド値よ

りも低く、仮に含まれていたとしても同位体比を高くする要因とはなり得ない。一方、大泉ほか(1991)は国内産と中国産の石炭の燃焼実験を行い、生成したイオウ酸化物ガスのイオウ同位体比を測定している。それによると、前者の値は+0.2～+3.0パーミル、後者は+6.4～+22.8パーミルであった。また、大泉ほか(1991)は中国北部産の石炭の燃焼実験を行い、イオウ同位体比の平均を+6.9パーミルと算出した。一方、HONG *et al.*(1992)は中国各地より産する石炭のイオウ同位体比を測定し、長江を境に北部の石炭は高い同位体比を示すことを明らかにしている。また、彼らは中国の湿性降下物中の硫酸イオンのイオウ同位体比を測定し北部で+5.3～+8.0パーミルの値を取ることを示した。

以上の報告から、冬季に鶴岡に降下する非海塞性硫酸イオンは大陸北部で産した石炭起源のイオウ酸化物が北西季節風に乗って運ばれてきた可能性が考えられる。なお、1994年の冬季は+5～+8パーミルの値を示したのに対し、1995年の冬季は0～+3パーミルと夏季～秋季における値と同程度であった。図4と図5を比較すると、1994年冬季の湿性降下物の非海塞性硫酸イオンのイオウ同位体比は乾性降下物の非海塞性硫酸イオンとほぼ一緒である。一方、1995年冬季の湿性降下物の非海塞性硫酸イオンには+10パーミルを超える値が観測されている。従って、1995年の冬季も大陸より人為起源のイオウ酸化物が日本に飛来していたと考えられる。これらのことは、大陸からもたらされたイオウ酸化物も湿性降下物に含まれるものと大気中に浮遊しているものでは運搬過程が異なることが推測される。運搬過程については

今後さらに検討する必要がある。

1994年の春季と1995年の春季はともに+6～+8パーセントの値を示した。上田・坂本(1989)は黄砂時に乾性降下物を採取してイオウ同位体比を測定して+4.1～+7.6パーセントの、西川ほか(1988?)は+2.8～+5.4パーセントの結果を得ており、この値を黄砂のイオウ同位体組成としている。春季は大陸からのジェット気流が日本上空を通過する時期にある。本研究の値は彼らの測定値の範囲内であり、本研究の試料採取期間にも黄砂現象が観測されていることから、黄砂によって日本に運搬されたイオウ化合物の影響を考えることができる。ただし、砂漠の砂に含まれる硫酸塩のイオウ同位体比は、場所によって異なるが一般的には本測定値より高い(伊藤ほか, 1995)。このことは、日本に運搬される過程で大陸において発生した大気汚染物質を取り込むことで、同位体比が変化している(低下している)可能性も考えられる。今後さらに検討が必要である。

#### 4. 結 論

(1) 鶴岡の硫酸イオンと非海塞性硫酸イオンの降下量は山形のおよそ2倍である。また、山形において硫酸イオンと非海塞性硫酸イオンの降下量には明確な季節変化は見られなかつたが、鶴岡では冬季と春季に降下量が増加した。

(2) 山形の乾性降下物に含まれている非海塞性硫酸イオンのイオウ同位体比は年間を通じて+4～+5パーセントで推移していることから、現地性のイオウ化合物が卓越していると考えられる。

(3) 鶴岡の非海塞性硫酸イオンのイオウ同位体比は、夏季～秋季は+2～+3パーセント、冬季～春季は+5～+8パーセントで推移しており、季節変動が認められる。

(4) 鶴岡では夏季～秋季に弱い東風がふくことが多いことから、夏季～秋季の値は現地性の非海塞性硫酸イオンの同位体比と考えられる。

(5) 冬季に鶴岡に降下する非海塞性硫酸イオンは、大陸北部で産した石炭起源のイオウ酸化物が北西季節風に乗って運ばれてきた可能性が考えられる。

(6) 鶴岡の春季のイオウ同位体比は黄砂の影響と考えられる。

#### 引 用 文 献

- 伊藤 博・柳澤文孝・金井 豊・鈴木利孝・伊五沢 敏・上田 晃(1995): 中国の砂漠砂・レスに含まれる硫酸塩の硫黄同位体比、「1995年日本地球化学会年会」11P34.
- 川田 聰・柳澤文孝・大日方 裕・志田惇一・上田 晃(1995): 降雪に含まれる硫酸イオンのイオウ同位体比。日本雪水学会東北支部報「東北の雪と生活」10: 68-69.
- 北村守次・杉山 実・大橋哲二・中井信之(1993): イオウ安定同位体比から見た石川県の降水中の硫酸イオンの起源の推定。「地球化学」27: 109-118.
- 高 春心・上田真吾・小倉紀雄(1994): 多摩小流域における大気降下物中の硫酸の安定同位体組成。「日本地球化学会講演要旨集」12B16.
- 高 春心・上田真吾・小倉紀雄(1996): 硫黄同位体比とフッ素/非海塞性硫酸比から見た大気降下物中の硫酸の起源。「日本地球化学会講演要旨集」P03.
- 中井信之(1984): イオウの循環と人間生活。「現代化学」165: 39-44.
- 西川雅高・金森 恒・中井信之・溝口次夫(1988): 微量元素、無機イオン、イオウ同位体比の分析結果。「昭和62年度環境庁委託業務報告書「エアロゾル中の炭素成分等の分析に関する調査」」
- 大日方 裕・柳澤文孝(1996): 濡性・乾性降下物に含まれる硫酸イオンのイオウ同位体比。新しい海洋化学の構築。酒井均教授退官記念号「月刊地球」号外, 16: 182-186.
- 大泉 肇・福崎紀夫・森山 登・塗山佳雄・日下部 実(1991): イオウ同位体比からみた大気降下物イオウの供給源—新潟県の場合。「日本化学会誌」5: 675-681.
- 大泉 肇・福崎紀夫・日下部 実(1994): イオウ同位体比を利用した大気降下物中の硫黄の供給源寄与率の推定。「日本化学会誌」9: 822-827.
- 岡田直紀・佐々木 昭・安田 洋(1997): 国内の樹皮と降水の硫黄同位体組成。「環境科学会講演要旨集」60.
- 佐竹 洋・山根隆幸・市川哲也(1992): 富山における大気降下物中のイオウ・酸素同位体比。「日本地球化学会要旨集」48-49.
- 関 圭司・前田憲一郎・永峰康一郎・池辺幸正・日下部 実・吉岡勝廣(1994): 硫黄同位体とラドン娘核種を用いた酸性雨原因物質の発生源評価。「日本地球化学会講演要旨集」12B15.
- 角皆静男(1985): 「化学が解く海の謎」共立化学ブックス70, 共立出版.
- 角皆静男・乗木新一郎(1983): 「海洋化学」産業図書.
- 上田 晃・坂本和彦(1989) 同位体分析一主としてイオウ同位体一。「昭和63年度環境庁委託業務報告書「黄砂エアロゾルに関する調査研究」」
- 柳澤文孝・上田 晃(1996): 濡性降下物に含まれる硫酸イオンのイオウ同位体比。「寒地技術論文集」12-1: 42-49.
- 柳澤文孝・上田 晃(1998): 濡性降下物に含まれている非海塞性

- 硫酸イオンのイオウ同位体比. 雪水学会東北支部報「東北の雪と生活」12: 印刷中.
- 柳澤文孝・大日方 裕・上田 覧・伊藤 博・松浦隆一・持木一夫・羽柴 恵・志田惇一 (1993): 山形県米沢市の湿性降下物に含まれる硫酸イオンのイオウ同位体比. 「山形大学紀要(自然科学編)」13-3: 239-250.
- 柳澤文孝・上田 覧・志田惇一 (1994): 山形県米沢市の湿性降下物に含まれる硫酸イオンの起源. 「分析化学」43-11: 101-106.
- 柳澤文孝・佐々木みどり・上田 覧 (1997a): 湿性降下物に含まれる非海塞性硫酸イオン (2): イオウ同位体比の季節変動 (日本海沿岸地域). 「寒地技術論文集」13-1: 275-282.
- 柳澤文孝・上田 覧・志田惇一 (1997b): 湿性降下物に含まれる非海塞性硫酸イオン (3): イオウ同位体比の季節変動 (内陸地域). 「寒地技術論文集」13-1: 283-290.
- HONG, Y., ZHU, Y., ZHANG, H., PIAO, H., JIANG, H., ZENG, Y. and LIU, G. (1992): Compositional Characteristics of Coal in China and Fractionation of Sulfur Isotopes during Coal-burning Process. *Geochemistry Chinese Academy of Science*, 241-250.
- NAKAI, N. and JENSEN, M.L. (1967): Sources of atmospheric sulfur compounds. *Geochem. J.*, 1: 199-210.
- OHIRIZUMI, T., FUKUZAKI, N. and KUSAKABE, M. (1997a): Sulfur isotopic view on the sources of sulfur in atmospheric fallout along the coast of the Sea of Japan. *Atmos. Environ.*, 31-9: 1339-1349.
- OHIRIZUMI, T., FUKUZAKI, N. and KUSAKABE, M. (1997b): Contribution of various sulfur sources to atmospheric sulfur deposition in Niigata Prefecture, Japan. *Proc. Int. Cong. Acid Snow and Rain, Niigata*, 582-587.
- THOBE, V. and REES, E. (1970): Sulfur isotope geochemistry and Middle East oil studies. *Endeavour*, 29: 24-28.
- SATAKE, H. and YAMANE, T. (1992): Deposition of non-sea salt Sulfate observed at Toyama facing the Sea of Japan for the period of 1981-1991. *Geochem. J.*, 26: 299-305.
- YANAGISAWA, F. and SAKAI, H. (1983): Thermal decomposition of barium sulfate-vanadium pentoxide-silica glass mixture for preparation of sulfur dioxide in sulfur isotope ratio measurement. *Anal. Chem.*, 55: 985-987.
- YANAGISAWA, F. and UEDA, A. (1997): Sulfur isotope ratios of sulfate in wet deposits in Japan. *Proc. 3rd International Conference on Snow Engineering*, 151-154.
- YANAGISAWA, F., UEDA, A. and SHIDA, J. (1996): Seasonal variation of sulfur isotope ratios of non-sea salt sulfate in wet deposits in northern part of Japan. *Bull. Yamagata Univ. (Engineering)*, 24-2: 115-121.
- YANAGISAWA, F., OBINATA, Y., UEDA, A. and SHIDA, J. (1997a): Sulfate ion in atmospheric deposition in Japan. (1) Sulfur isotope ratios of sulfate in wet deposition in Japan. *Proc. Int. Cong. Acid Snow and Rain, Niigata*, 143-148.
- YANAGISAWA, F., OBINATA, Y., ITO, H., UEDA, A. and YABUKI, S. (1997b): Sulfate ion in atmospheric deposition in Japan. (2) Seasonal variation of sulfur isotope ratios of aerosol in Yamagata, Japan. *Proc. Int. Cong. Acid Snow and Rain, Niigata*, 149-154.

## Sulfur Isotope Ratio of Non-sea-salt Sulfate in Dry Deposition in Tsuruoka and Yamagata, Yamagata Prefecture, Japan

Yutaka OBINATA\*, Fumitaka YANAGISAWA\*\*, Takashi KOTANI\*\* and Akira UEDA\*\*\*

In order to investigate the origin of the atmospheric particulate matter in the dry deposition in northern part of Japan, aerosol samples were collected, using high volume air sampler, at two localities in Yamagata Prefecture, Japan, from 1993 till 1995, *i.e.*, Tsuruoka City locating at the Japan Sea coastal area and Yamagata City locating in the basin, 80km far from the coast of the Japan Sea. The water-soluble chemical components and sulfur isotope ratio ( $\delta^{34}\text{S}$ ) of the aerosols were studied. The samples of Tsuruoka show a clear evidence that the  $\delta^{34}\text{S}$  values of non-sea-salt sulfate in higher in winter and spring, *i.e.*, +5 to +8 permil, and is lower in summer and autumn, *i.e.*, +2 to +3 permil. On the other hand, it is almost constant through the year in Yamagata City's samples, *i.e.*, +4 to +5 permil. The seasonal variation of  $\delta^{34}\text{S}$  value of non-sea-salt sulfate found in Tsuruoka's samples could be reasonably interpreted as follows, considering the seasonal wind trajectories in the eastern part of Asia. The higher trend of  $\delta^{34}\text{S}$  values appeared in winter season indicates that the anthropogenic SOx emitted by the coal combustion in the northern part of Asian continent is transported over the Japan Sea coastal area by the seasonal northwest wind, and that in spring season could be attributed to the long-range transportation of sulfate-bearing dust particles of desert origin in the Asian inland. At Tsuruoka facing the Japan Sea, the atmospheric component in the dry deposition in winter and spring is distinctly influenced by the atmospheric particulate matter transported from Asian continent, while the influence is negligibly small at Yamagata City which is located in the inland basin.

**Key Words:** Aerosol, Sulfur Isotope, Dry Deposition, Kosa, Non-sea-salt sulfate

\*Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Yamagata University. 1-4-12, Kojirakawa, Yamagata 990-0021, Japan.

\*\*Tsuruoka National College of Technology. 104, Sawada, Ioka, Tsuruoka 997-0842, Japan.

\*\*\*Mitsubishi Materials Corporation, Central Research Institute. 1-297, Kitabukuro, Omiya, Saitama 330-0835, Japan.

(Received, November 8, 1997; Accepted, December 10, 1997)

# Sulfur Isotope Study of Salt Materials in Saline Lands and Salt Deposits around the Desert Areas in Xinjiang, China —Implications to the Study of the Source of the Aeolian Dust of Inland Asia—

Sadayo YABUKI<sup>1)</sup>, Akihiko OKADA<sup>1)</sup>, Akira UEDA<sup>2)</sup>, Qing CHANG<sup>3)</sup> and Zi-Li FAN<sup>4)</sup>

In saline lands around the desert areas in Xinjiang, China, saline soils contain significant amount of sulfate salt minerals. We investigated the sulfur isotope ratios of the salt materials to study the salt accumulation in the environment. In Xinjiang, sulfate salts have accumulated on the ground surface owing to the very arid condition, and thus a large amount of sulfur-bearing aeolian dust are transferred from the ground into the atmosphere due to the frequent dust storm events. The sulfur isotope ratios of the air-borne dust particles could be a significant indicator to trace the origin of aeolian dust of inland Asia.

**Key Words:** Sulfur isotope ratio, Evaporite, Desert, Aeolian dust, Xinjiang

## 1. Introduction

In arid and semiarid zones, salt accumulation in the soil brings about a land degradation problem in the area where the local ground water level is shallow. Progressive salinization is one of the most serious causes of desertification of lands because of the prevention of vegetation growth. In saline lands around the desert areas in Xinjiang, China, saline soils contain significant amount of sulfate salt minerals such as thenardite, gypsum, bloedite and so on (OKADA *et al.*, 1997). We investigated the sulfur isotope ratios of salt materials in saline lands of Xinjiang to study the salt accumulation in the environment. In Xinjiang, China, sulfate salts have accumulated on the ground surface owing to the extreme arid climatical condition, and thus a large amount of sulfur-bearing aeolian dust are transferred from the ground to the upper atmosphere due to the frequent dust storm events. The sulfur isotope

ratios of the air-borne dust particles over Japan is expected to be a useful indicator to investigate the source of aeolian dust of inland Asia origin.

## 2. Sampling Sites

Salt material, soil, river water and ground water samples were collected in and around the saline lands distributing at the margins of the desert areas in Xinjiang, China (Fig. 1) during 1987-1994. Sampling sites (YABUKI *et al.*, 1996) are (1) northern part of Tarim Basin (Kuerle, Luntai, Kuche, Akesu), (2) western and southwestern parts of Tarim Basin (Kashi, Shache, Yecheng, and saline lands along the Kashi, Tizinap and Yerqiang Rivers), (3) southern part of Tarim Basin (Moyu, Hetian, Luopu, Cele, Yutian), (4) eastern and southeastern parts of Tarim Basin (Yuli, Tieganlike, Ruoqiang, Qiemo, Minfeng), (5) Turpan Basin, (6) southern part of Zhungar Basin (Fukang, Mosuowan, Jinghe, Yining) and Pamir (Tashikuergan). Tarim Basin is an arid, closed

<sup>1)</sup> Institute of Physical and Chemical Research. Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan.

<sup>2)</sup> Life and Environment Technology Research Laboratory, Central Research Institute, Mitsubishi Materials Corp. Kitabukuro-cho, Ohmiya, Saitama 330-0835, Japan.

<sup>3)</sup> Department of Environmental Science, Kumamoto University. Kurokami, Kumamoto 860-0862, Japan. On leave from Xinjiang Institute of Biology, Pedology and Desert Research, Chinese Academy of Sciences.

<sup>4)</sup> Xinjiang Institute of Biology, Pedology and Desert Research, Chinese Academy of Sciences. Beijing South Road, Urumqi, Xinjiang, People's Republic of China.

(Received, November 16, 1997; Accepted, December 10, 1997)

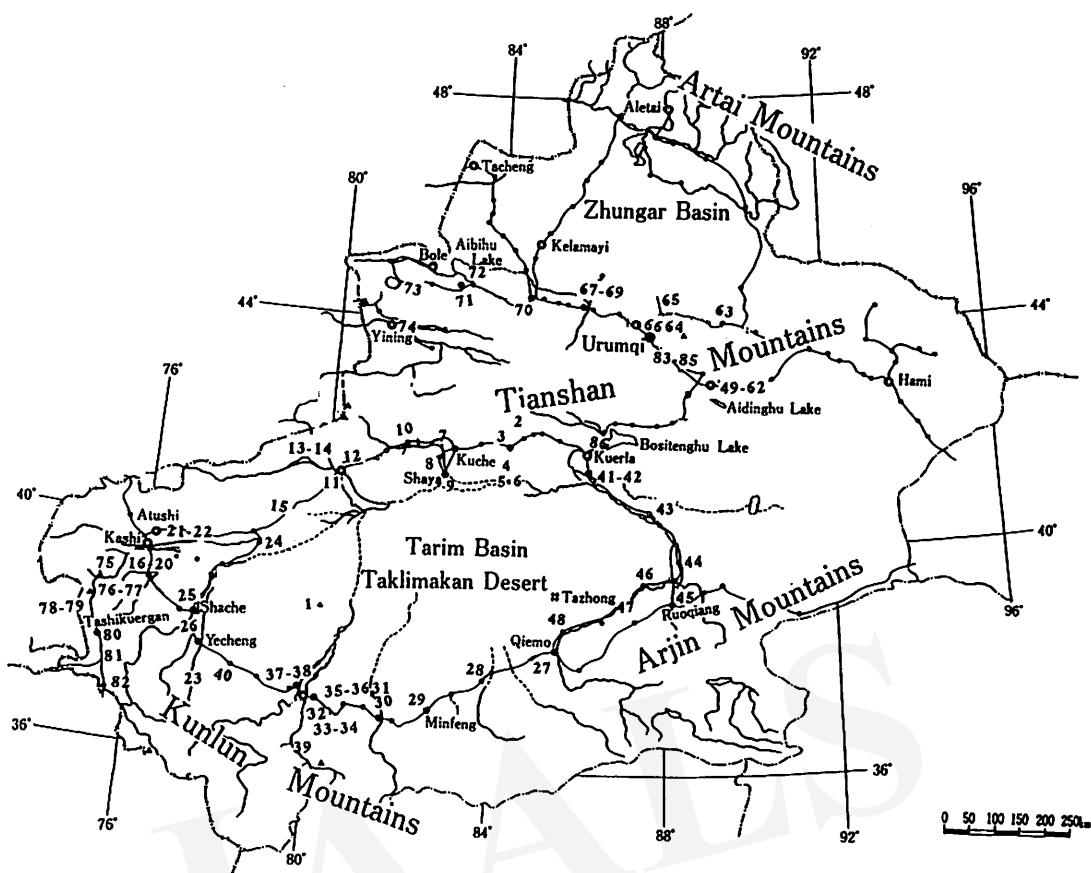


Fig. 1. A geographic map of Xinjiang area including sampling sites.

basin occupied mostly by the sandy Taklimakan Desert. The annual precipitation and evaporation are < 50mm and 2,000-3,000mm, respectively, in the western and south-western periphery of the Taklimakan Desert in the Tarim Basin, and < 20mm and 3,000mm, respectively, in Turpan area (ZHU *et al.*, 1986). A salt lake called Aidinghu is located at the deepest part, 154m below sea level. Zhungar Basin has a mild climate compared with Turpan and Tarim Basins. The annual precipitation is about 200mm in the southern part and 100 mm at the central part of the desert in the basin (ZHU *et al.*, 1986).

### 3. Experimental Method

Measurement of sulfur isotope ratio ( $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ ) of sulfate materials is based on the mass spectrometric analysis of  $\text{SO}_2$  which was produced by transforming sulfate-group into  $\text{SO}_2$  gas. The

chemical method for the transformation of sulfate into  $\text{SO}_2$  gas is basically the same as that developed by YANAGISAWA and SAKAI (1983) and UEDA and KROUSE (1986). An outline of the method is briefly described as follows. The sulfate salt sample containing about 20 micrograms of S was mixed with 50mg of  $\text{SiO}_2$  and 50mg of  $\text{V}_2\text{O}_5$ , and was finely pulverized. The mixture was put in a quartz tube, and was covered with quartz glass wool. After connecting the quartz tube to a vacuum line,  $\text{SO}_2$  gas emitted by heating up to 950°C was collected in a cold trap cooled down to liquid nitrogen temperature. The  $\text{SO}_2$  gas purified by vacuum-distillation using a cold agent of n-pentan-alcohol mixture was introduced into the gas inlet of the mass spectrometer, and then the isotope ratio of  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  was measured. The analytical machine used in this work is a Finnigan Mat Instruments Inc. made Delta-E mass spectrometer. The analytical error is  $\pm 0.2$  permil.

Sulfur isotope ratio is expressed as  $\delta^{34}\text{S}$  value calculated by the following equation.

$$\delta^{34}\text{S} = \frac{[(^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{sample}} - (^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{standard}}]}{(^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{standard}}} \times 1000 \text{ (in permil)}$$

The standard value of  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  is obtained from troilite (FeS) of Canyon Diablo iron meteorite.

#### 4. Result and Discussion

##### (1) Regional characteristics of sulfur isotope ratios of salt samples in Xinjiang

Table 1 shows the result of sulfur isotope ratios ( $\delta^{34}\text{S}$ ) of salt samples collected in Xinjiang. In this Table, both Yima in Tarim Basin and Taoergou in Turpan Basin show extraordinary high positive and negative  $\delta^{34}\text{S}$  values, i.e., +26.1 and  $-26.9 \sim -30.3$ , respectively. The sampling site at Yima used to be a farm land, but is now left to be a waste, marsh land, because of salt accumulation. In the organic-rich soils in the permanently wet land, such as salt marsh, sulfur species in the soil are inclined to increase  $^{34}\text{S}$  content due to inactive microbial sulfide-oxidation reaction (CHUKHROV *et al.*, 1978). The sulfur isotope data strongly suggests that the environmental condition at Yima is close to that of the salt marsh. On the other hand, both magnesium sulfate hydrate minerals ( $\text{MgSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) and gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) from Taoergou, Turpan Basin, are characteristic of highly negative  $\delta^{34}\text{S}$  values,  $-26.9$  and  $-30.3$ , respectively. In this sampling site, the sulfate species of both gypsum and magnesium sulfate hydrate minerals might have been supplied from the same  $^{34}\text{S}$ -depleted sulfur source. According to KROUSE (1988), in the case of extremely  $^{34}\text{S}$ -depleted soil ( $\delta^{34}\text{S} : -30$ ) in Alberta, Canada, its origin was attributed to have formed by the weathering of shale that contained  $^{34}\text{S}$ -depleted sulfide mineral and organic sulfur compound. In the outcrop at Taoergou, Turpan Basin, an organic-rich, thick soil layer, dark brown to blackish in color is distributed under the yellowish to reddish brown soil layer which contains a crystalline magnesium and calcium sulfate hydrate mineral layer, about 10cm thick. Such local pedological circumstances at Taoergou is possibly related to the occurrence of highly  $^{34}\text{S}$ -depleted sulfate sulfur.

$\delta^{34}\text{S}$  values of salt samples from southern areas of Zhungar Basin, +1.6 to +4.9, are inclined to be lower compared with the  $\delta^{34}\text{S}$  data from Tarim Basin and Turpan Basin. This is probably due to the fact that the salt precipitates in this areas are strongly influenced by the hydrological and geological conditions of the northern part of the Tianshan Mountains. Within the Tarim Basin, the  $\delta^{34}\text{S}$  values of sulfate salt materials occurring in the subsurface zone of the fan sediment which extends from Kekeya-Pishan-Hetian-Cele to Yutian-Qiemo-Ruoqiang in the northern foot of the Kunlun Mountains is distributed within a relatively narrow range from +8.4 to +10.1. Geological history of Xinjiang area indicate that the west part of the Tarim Basin experienced a marine transgression in the Cretaceous to early Tertiary (TANG *et al.*, 1989). Both the salt deposit ( $\delta^{34}\text{S} : +10.7 \sim +17.8$ ) at Akesu located at the northern margin of Taklimakan desert and the gypsum-anhydrite deposit ( $\delta^{34}\text{S} : +12.0 \sim +17.1$ ) at Mazatage Mountains at the central part of the Tarim Basin were formed due to the transgression during that period. Both salt deposits are distributed in early Tertiary strata, and the  $\delta^{34}\text{S}$  values of salt samples almost agree with the sulfur isotope curve of marine evaporites at the same geological period (CLAYPOOL *et al.*, 1980).

As seen in Table 1, a few salt lakes are present in Xinjiang. In Aiding-hu salt lake in Turpan Basin, located at the lowest altitude in China, the Na-, Cl- and  $\text{SO}_4^2-$ -concentrated lake water is currently depositing halite ( $\text{NaCl}$ ) and thenardite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) -mirabilite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) crystals. In Turpan Basin, large amounts of lucastrine evaporitic deposits consisting mainly of halite ( $\text{NaCl}$ ) -gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) are present in the Lower Cretaceous to the Upper Tertiary formations in the Huoyanshan Mountains area (ref. *Geological Map of Turpan Basin*, 1978).  $\delta^{34}\text{S}$  values of salt samples from Huoyanshan Mountains range from 8.2 to 20.6 (samples from Shenquan, Tieshan-Gongzhu Dong, Baizikelike Buddhist Cavern and Yemushi in Table 1). The salt materials in Turpan Basin finally flow into Aiding-hu salt lake which is located at the lowest site in the Basin.  $\delta^{34}\text{S}$  value of the currently precipitating sodium sulfate crystals at the northern shore of the Aiding-hu lake water is 6.0 (Table 1). This fact indicates that the sulfate

Table 1 Sulfur isotope ratios ( $\delta^{34}\text{S}$ , permil) of the salt evaporites in saline lands and salt deposits of Xinjiang, China

## 1. Tarim Basin

Sampling Site	Occurrence of Salt Minerals	$\delta^{34}\text{S}$
<i>Central area of Tarim Basin</i>		
1. Mazatage(38°58'N, 80°50'E)	Layered outcrop of gypsum in the sedimentary rocks. Halite and anhydrite also coexist.	+12.0 (gypsum) +17.1 (anhydrite)
<i>Nothern districts</i>		
2. Cedaya(41°58'N, 84°49'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite and eugsterite.	+9.6
3. Luntai(41°48'N, 84°18'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite and eugsterite.	+11.7
4. Luntai(41°14'N, 84°13'E) (38km SSW of Luntai)	Fine-grained efflorescent materials of halite and eugsterite.	+5.6
5. Luntai(41°10'N, 84°14'E) (60km S of Luntai, Point1,Tarim River side)	Fine-grained efflorescent materials of halite and eugsterite.	+7.4
6. Luntai(41°14'N, 84°13'E) (60km S of Luntai, Point2,Tarim River side)	Fine-grained efflorescent materials of halite and eugsterite.	+14.8
7. Yanshui-gou(41°52'N, 82°48'E)	Salt efflorescents consisting mainly of halite.	+10.8
8. Xinhe(41°33'N, 82°47'E) (20km N of Xinhe, Muzati River side)	Fine-grained saline efflorescent materials.	+10.2
9. Shaya(40°58'N, 82°54'E) (30km SSE of Shaya,Tarim River side)	Fine-grained efflorescent materials of halite, eugsterite and humberstonite.	+5.9 ~ +7.7
10. Yangdouma(41°38'N, 81°28'E) (Muzati River side)	Fine-grained efflorescent materials of halite, thenardite and bloedite.	+6.0
<i>Akesu River area</i>		
11. Akesu(40°43'N, 80°38'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite and thenardite.	+7.8
12. Akesu Salt Mine (40°43'N, 80°38'E)	Layered salt deposits consisting mainly of halite and accessory gypsum.	+10.7 ~ +17.8 (av. 13.0) (gypsum)
13. Aheya(40°13'N, 79°42'E) (Tuoshigan River side)	Fine-grained saline efflorescent materials.	+7.9
14. Tuman(41°120'N, 80°35'E) (Tuoshigan River side)	Fine-grained efflorescent materials of halite, thenardite and bloedite.	+8.9
15. Yiqiansfang(41°10'N, 80°20'E) (15km NE of Yiqiansfang)	Fine-grained efflorescent materials of halite and thenardite.	+8.1
<i>Western districts</i>		
<i>Kashi River areas</i>		
16. Tazihong(39°27'N, 76°10'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite, thenardite, bloedite konyaite and eugsterite. Large thenardite crystals are locally found.	+8.3 (thenardite)
17. Yapanquan(39°12'N, 76°10'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite and bloedite.	+6.2
18. Yingjisha(38°45'N, 76°10'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite, thenardite and vanthoffsite.	+7.6
19. Meiqitiji(39°17'N, 76°55'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite, thenardite and bloedite.	+6.0
20. Yangdaman(39°24'N, 76°14'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite, thenardite and bloedite.	+8.8
21. Gedaliang(39°46'N, 76°40'E)	Fine-grained efflorescent materials of thenardite, hexahydrite and eugsterite	+5.4
22. Youkuer-kebaqiang (39°47'N, 76°25'E)	Fine-grained efflorescent materials of thenardite.	+7.0
<i>Yerqiang River and Tizinap River areas</i>		
23. Kekeya(37°23'N, 77°11'E)	Gypsum crust at the subsurface of the desert fan sediment.	+9.5-9.7
24. Wuke(38°55'N, 77°44'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite, hexahydrite and starkeyite.	+9.3
25. Bage-awate(38°25'N, 77°25'E)	Fine-grained efflorescent materials of thenardite.	+9.4
26. Yima(38°30'N, 77°20'E)	Fine-grained efflorescent materials of thenardite and eugsterite at wet, saline land.	+26.1
<i>Southern districts</i>		
27. Qiemo(38°08'N, 85°15'E)	Crustic salt efflorescent materials consisting of halite, gypsum, thenardite and eugsterite on the surface of the desert fan sediment.	+10.6

28. Andier(37°35'N, 83°48'E)	Crustic salt efflorescent materials of halite, thenardite, hexahydrite and konyaite in the terrace sediment.	+4.1
29. Minfeng(37°04'N, 82°20'E)	Fine-grained efflorescent material composed of bloedite.	+19.2
30. Yuitan(36°50'N, 81°40'E)	Salt efflorescent materials of halite, thenardite, starkeyite and celestite on the surface of the terrace sediment.	+9.4
31. Yaogantuokekake (37°12'N, 81°33'E)	Salt precipitates consisting of fine-grained halite, thenardite, hexahydrite and starkeyite on the soil surface along the Keriya River	+16.0
32. Aqikeshan(36°50'N, 80°10'E)	Crustic salt efflorescent materials of halite, bassanite, glauberite and celestite at the subsurface of the desert fan sediment.	+10.1
33. Hetian-Cele(36°50'N, 80°30'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite, bloedite and eugsterite at the lower terrace sediment.	+9.7
34. Hetian-Cele(37°00'N, 80°20'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite and gypsum in the dried river.	+8.8
35. Cele(37°00'N, 80°47'E)	Gypsum crust on the surface of the terrace sediment.	+10.1
36. Cele(37°00'N, 80°45'E)	Salt pan of gypsum at the inter-dune sediment at west Cele.	+9.2
37. Heitian(37°07'N, 79°55'E) (Kekakeshi River side)	Fine-grained efflorescent materials at the lower terrace sediment.	+10.1
38. Heitian(37°07'N, 79°55'E) (Kekakeshi River side)	Fine-grained efflorescent materials at the middle terrace sediment.	+9.0
39. Buya(36°23'N, 80°00'E)	Salt efflorescent materials of halite, thenardite, gypsum, konyaite and hexahydrite on the surface of the terrace sediment.	+9.5
40. Pishan(37°37'N, 78°16'E)	Salt crust of gypsum at the subsurface of the desert fan sediment.	+8.4
<i>Eastern districts</i>		
41. Yuli(41°22'N, 86°16'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite and eugsterite.	+10.0
42. Yuli(41°22'N, 86°15'E) (Tarim River side, 30km SE of Yuli)	Fine-grained efflorescent materials of halite and eugsterite.	+13.5
43. Tieganlike(40°38'N, 87°42'E)	Fine-grained salt precipitates of gypsum and eugsterite on the soil surface.	+9.2
44. Luobuzhung(39°30'N, 88°07'E)	Salt crust consisting of halite and eugsterite at the surface sandy	+10.2
45. Ruoqiang(39°00'N, 88°05'E)	Salt crust consisting of halite and kieserite on the surface of the gravel sediment.	+9.3
46. Washixia(38°41'N, 87°22'E)	Crustic salt materials consisting of gypsum, bassanite and dolomite of the terrace sediment.	+10.4
47. Jianggeshayi(38°09'N, 85°28'E)	Salt crust consisting of thenardite on the surface of the terrace sediment.	+10.7
48. Hedileke (38°36'N, 86°57'E)	Gypsiferous salt crust on the surface of the gravel sediment.	+10.6

## 2. Turpan Basin

Sampling Site	Occurrence of Salt Minerals	$\delta^{34}\text{S}$
<b>Huoyanshan Mountains Area (East)</b>		
49. Lianmuqin(42°49'N, 89°52'E)	Fine-grained saline efflorescent materials.	+8.6
50. Baizikelike Buddhist Cavern (42°57'N, 89°34'E)	Sedimentary salt deposits consisting mainly of gypsum occurring in Huoyanshan Mts.	+8.2
51. Aketamu(42°59'N, 89°35'E)	Fine-grained saline efflorescent materials.	+9.6
52. Shengjin-gou(42°56'N, 89°34'E)	Fine-grained saline efflorescent materials.	+9.2 ~ +11.7
53. Shenquan(42°56'N, 89°29'E)	Fine-grained salt efflorescent materials consisting mainly of halite from the saline ground water of the Huoyanshan Mountains.	+20.6
54. Tieshan-Gonzu Dong (42°56'N, 89°15'E)	Water-extracted salt materials from the sediments of Huoyanshan Mountains.	+17.7
<b>Huoyanshan Mountains Area (West)</b>		
55. Yemushi (42°50'N, 89°05'E)	Sedimentary halite and gypsum outcrop of the west part of Huoyanshan Mountains.	+10.6
56. Xiaocao-gou(43°10'N, 88°32'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite, thenardite, gypsum and eugsterite.	+10.4
57. Huoyanshan Qianshadi (42°50'N, 89°25'E)	Fine-grained efflorescent materials of thenardite, glauberite, gypsum and bassanite of the sand dune sediment, about 5 km south from Huoyanshan Mountains.	+5.9 ~ +7.3 (av. 6.6)

### 3. Zhumgar Basin, Southern Areas

Sampling Site	Occurrence of Salt Minerals	Sampling Area
61. Aidiling-hu Salt Lake (42°39'N, 89.25'E)	Halite, thenardite and gypsum crystals deposited from the brine at the north shore.	+6.0
62. Aidiling-hu North (42°42'N, 89.26'E)	Gypsum crystals ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) growing over the saline ground water table.	+10.6
60. Taoergou (43°01'N, 89.11'E)	Salts deposits of magnesium sulfate hydrate minerals (epsomite, -26.9 (hexahydrite), heptahydrite, pentahydrite, sajikayhydrite and kieserite) and gypsum.	-30.3 (gypsum)

### 3. Zhumgar Basin, Southern Areas

Sampling Site	Occurrence of Salt Minerals	Sampling Area
63. Qiazi (44°01'N, 89.35'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite and thenardite.	+4.9
64. Tiaochi (43°33'N, 88.08'E)	Fine-grained efflorescent materials of gypsum.	+4.5
65. Fukang (44°09'N, 87.59'E)	Fine-grained efflorescent materials of thenardite and gypsum.	+3.7
66. Shibadaoliang (44°10'N, 87.50'E)	Salt crust of gypsum on the desert sediment.	+3.6
67. Luhudu (44°30'N, 86.30'E)	Fine-grained efflorescent materials in sandy soil.	+1.6 ~ +2.1 (a.19)
68. Moosowan (44°56'N, 86.12'E)	Fine-grained efflorescent materials in sandy soil.	+4.5
69. Moosowan (44°56'N, 86.12'E)	Fine-grained efflorescent materials on the inter-dune sediment of Gurbantonggut Desert.	+2.2
70. Gaoduan (44°22'N, 84.14'E)	Salt precipitate composed of thenardite on the surface of the saline land.	+6.6
71. Jimuhe (44°36'N, 82.52'E)	Fine-grained eugsterite on the soil surface.	+0.6
72. Aidi-hu Lake (44°45'N, 83.01'E)	Salt precipitates of halite, thenardite and eugsterite in the lake water.	+11.6
73. Sallimu-hu Lake (44°45'N, 83.20'E)	Salt precipitates of halite on the surface of the soil along the lake.	+7.3
74. Yimeng (43°55'N, 81.09'E)	Precipitate of thenardite on the surface of the soil along the Yili River.	+0.2

### 4. Pamir

Sampling Site	Occurrence of Salt Minerals	Sampling Area
75. Gazi (38°26'N, 75.19'E)	Fine-grained saline deposits consisting of pentahydrite and starkeyite.	+5.5
76. Lianggtai (38°44'N, 75.01'E)	Fine-grained efflorescent materials of pentahydrite.	+4.3
77. Kalakuli-hu Lake (38°40'N, 74.57'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite, thenardite, bleddite and konyaitie.	+7.2
78. Bulunkoule (38°26'N, 75.03'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite and thenardite.	+6.1
79. Kalaasu (38°12'N, 74.55'E)	Fine-grained efflorescent materials of halite and thenardite.	+7.5
80. Taslikuregan (37°55'N, 75.11'E)	Fine-grained precipitate of mirabilite from hot spring water.	+12.2
81. Dabuda (37°20'N, 75.24'E)	Fine-grained precipitate of mirabilite from the brine.	+7.5
82. Hongqilapu (36°50'N, 75.25'E)	Water-extracted saline material from the sediment.	+19.4
83. Chawopu-hu Lake (43°35'N, 87.56'E)	Fine-grained efflorescent materials of thenardite at the shore.	+7.1
84. Daabanchein-g East Salt Lake (43°23'N, 88.08'E)	Salt crystals of halite and thenardite deposited from the brine.	+7.4
85. Daabanchein-g West Salt Lake (43°25'N, 88.04'E)	Salt crystals of halite and thenardite deposited from the brine.	+6.8
86. Bosten-ge-hu Lake (41°49'N, 86.46'E)	Fine-grained efflorescent materials of thenardite at the shore.	+10.2

Sampling Site	Occurrence of Salt Minerals	Sampling Area
87. Caiyopu Basin (43°35'N, 87.56'E)	Fine-grained efflorescent materials of thenardite at the shore.	+7.1
88. Daibanchein-g East Salt Lake (43°23'N, 88.08'E)	Salt crystals of halite and thenardite deposited from the brine.	+7.4
89. Daibanchein-g West Salt Lake (43°25'N, 88.04'E)	Salt crystals of halite and thenardite deposited from the brine.	+6.8
90. Taoergou (43°01'N, 89.11'E)	Salt deposits of magnesium sulfate hydrate minerals (epsomite, -26.9 (hexahydrite).	-14.2
91. Keeneger (42°58'N, 88.56'E)	Fine-grained saline efflorescent materials.	+6.2

**Saline mineral species and their composition in Table 1.**

anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), bassanite ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ), bloedite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), celestite ( $\text{SrSO}_4$ ), epsomite ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), eugsterite ( $2\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), glauberite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$ ), gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), halite ( $\text{NaCl}$ ), hexahydrite ( $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), kieserite ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), mirabilite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), pentahydrite ( $\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), starkeyite ( $\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), thenardite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), vanthoffite ( $3\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4$ )

species with isotope ratio of about 6.0 or so are predominant in the Turpan Basin.

Dabancheng salt lakes-east and the -west, are placed together with Chaiwopu-hu Lake in the Chaiwopu fault depression basin in the Tianshan Mountains. The east one is located at  $88^\circ 03'53''$ - $12'15''\text{E}$ ,  $43^\circ 25'00''$ - $25'25''\text{N}$ . The lake water enriched in Na, Cl and  $\text{SO}_4$  precipitates halite ( $\text{NaCl}$ ) and thenardite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )-mirabilite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ). As seen in Table 1, the  $\delta^{34}\text{S}$  values of thenardite from Dabancheng salt lakes are close to that from Chaiwopu-hu Lake, where the lake water is not yet salt-enriched. This fact

indicates that the sulfur species of these three lakes could be supplied from the same sources and the same hydrological systems. In Table 1, the sulfur isotope ratios ( $\delta^{34}\text{S}$ ) of the salt species are summarized as follows, i.e., +5.4 to +17.8 in Tarim Basin (except Yima), +5.4 to +20.6 in Turpan Basin (except Taoergou and Wudaolin), +1.6 to +4.9 in the southern Zhungar Basin, and +4.3 to +19.4 in Pamir. In the present-day most salt-concentrating sites, Aiding-hu salt lake and Dabancheng salt lakes,  $\delta^{34}\text{S}$  is +6.0 and +6.8~+7.4, respectively. The regional characteristics of the sulfur isotope data of salt materials is

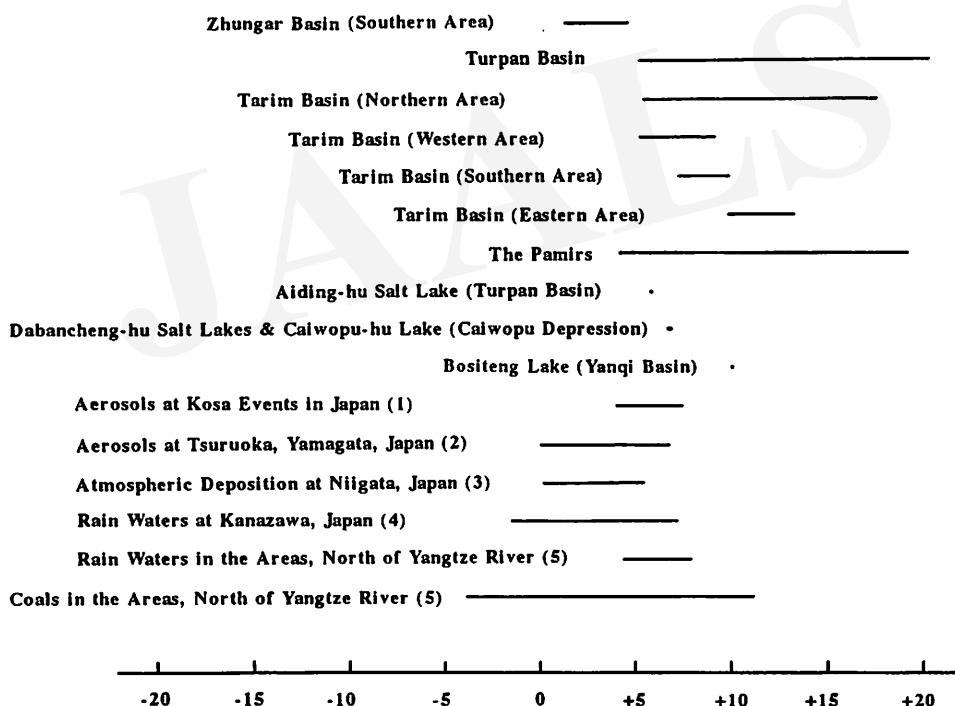
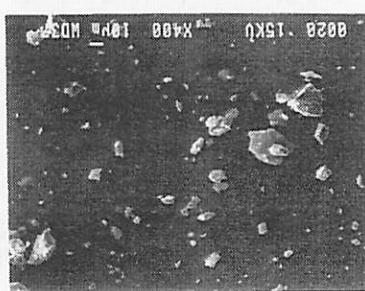
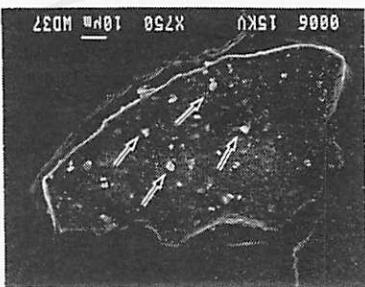


Fig. 2. Sulfur isotope data ( $\delta^{34}\text{S}$  permil) of saline evaporites in Xinjiang, aerosols, atmospheric deposition and rain waters in Japan, and rain waters and coals in the areas, north of Yantze River, China.

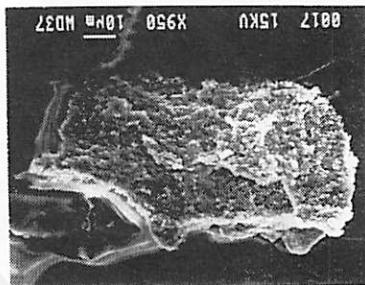
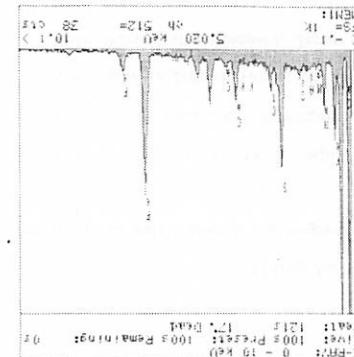
- (1) non-sea-salt  $\delta^{34}\text{S}$  by UEDA and SAKAMOTO (1989).
- (2) non-sea-salt  $\delta^{34}\text{S}$  by YANAGISAWA and OBINATA (1997).
- (3) non-sea-salt  $\delta^{34}\text{S}$  by OHIZUMI *et al.* (1991).
- (4) non-sea-salt  $\delta^{34}\text{S}$  by KITAMURA *et al.* (1993).
- (5) HONG *et al.* (1992).



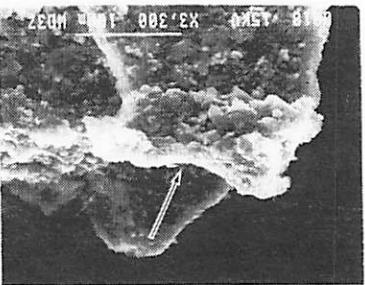
8



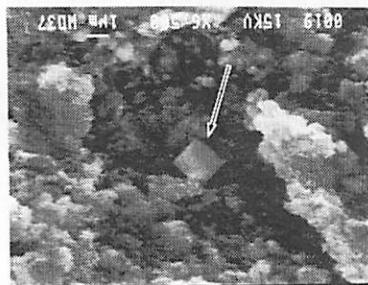
1



E



H



10

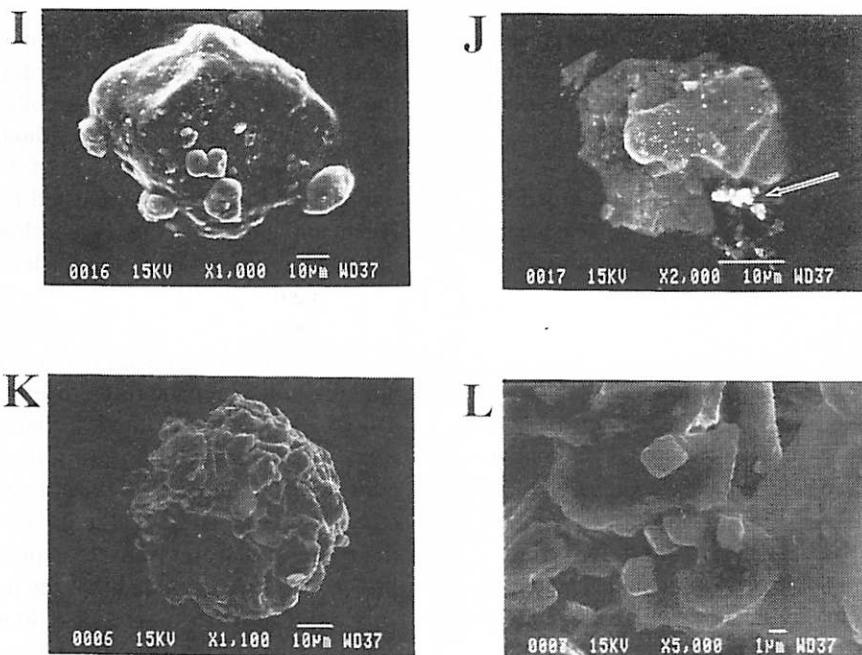


Fig. 3. SEM (scanning electron microscope) images of air-borne dust particles trapped on the adhesive tapes on the slide glass.

Samples were collected at the marginal areas around Taklimakan Desert in Tarim Basin, Xinjiang, China, in October, 1994.

A: Dust particles collected at Hetian.

B: A magnified view indicates the presence of minute single grains of salt, euhedral in shape. Collected at Hetian.

C: A quartz grain bearing sub-micron calcium sulfate particles on the surface (arrows). Collected at Yaogantuokelake.

D: The EDX analysis indicates the particles in Photo C are composed of Ca and S.

E: Ilmenite dust particle covered partially by saline materials composed of  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  and  $\text{NaCl}$ . Collected at Ruoqiang.

F: The bulk EDX analysis shows the presence of Na, Ca, S and Cl in addition to Fe and Ti of the main mass of ilmenite.

G: A magnified view of  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  aggregate (arrow) in Photo E.

H: Occurrence of micron-sized  $\text{NaCl}$  crystal (arrow) in the hollow in the  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  aggregate. A magnified view of Photo E.

I: Fine grains of  $\text{NaCl}$  on the surface of the feldspar grain. Collected at Buya.

J: A micaceous grain comprising minute  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  grains (arrow). Collected at Buya.

K: A spherical dust particle composed of a complex aggregate of  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaSO}_4$  and  $\text{CaCO}_3$ . Collected at Buya.

L: A magnified view of the dust particle of Photo K. Micro-particles of  $\text{NaCl}$ , cubic in form, are present surrounded by larger grains composed of calcium sulfate.

summarized as follows (Fig. 2). (1) In southern Zhungar Basin area, the  $\delta^{34}\text{S}$  values, mostly ranging from +1.6 to +4.9, are inclined to be less than those from Tarim Basin and Turpan Basin. (2) In the diluvial-alluvial fan sediment in the southern part of Tarim Basin which extends from the northern foot of the Kunlun Mountains, the

$\delta^{34}\text{S}$  values are relatively constant, ranging from +8.4 to +10.1. (3) In the eastern part of Tarim Basin,  $\delta^{34}\text{S}$  values range from +9.2 to +13.5. (4) In Turpan Basin, the  $\delta^{34}\text{S}$  values vary more or less from site to site in the basin, but finally approach +6.0 at Aiding-hu salt lake, into which the brines in the basin flow.

Through these sulfur isotope studies, it is suggested that the aerosols of Asian continental origin transported to Japan are influenced by the mixing of sulfur species emitted by the activities in Japan. In these aerosol sampling investigations in Japan,  $\delta^{34}\text{S}$  values of the non-sea-salt sulfate aerosols in the ground near the Xijiang area (Table 1 and Fig. 2). This could be because aeolian dust aerosols including "Kosa" sampled near the surface of salt samples from Xijiang area (Fig. 2). The recent remote sensing observations of the Asian dusts using lidar and satellite observations have revealed that the dust particles of the ground. The recent remote sensing onto the ground. The recent remote sensing of the atmospheric deposition materials during the investigation of atmospheric anthropogenic pollution by the contamination of the ground near the Xijiang area (Table 1) and Fig. 2).

found in the  $\delta^{34}\text{S}$  distribution of salt samples from Xijiang. Several sulfur isotopic studies of the aerosols in the precipitates collected in Japan have been carried out to date. Although the origin of the non-sea-salt sulfate of the aerosols in the atmosphere has not yet been made clear, the detailed source and transportation route have been clarified from the wind projectiles in the East Asian Zone, Asian continent from the meteorological analyses of the wind fields.

Ueda and Sakamoto (1989) measured sulfur isotope ratio of the "Kosra" aerosol sampled at Yakushima Isl., Fukuejima Isl., Nagasaki, Kanazawa and Wajima in Japan at the time of "Kosra" phenomena, and obtained  $\delta^{34}\text{S}$  values of +4.1 to +7.6. As seen in Fig. 2, it is interesting that these values partly overlap with the range of the non-sea-salt sulfate components ranging from +4.1 to +7.6.

(2) Sulfur isotope data of the desert salts in Xinjiang, and implications to the study of the sources of atmospheric dust aerosols of inland Asia

particles blown up high in the troposphere, 2,000-8,000m above sea level, from desert areas extending from Xinjiang, Gansu to Inner Mongolia and the Loess Plateau ranging from Gansu, Ningxia to Shanxi in northwestern and northern part of China at dust storm events are directly transported from the sources across Japan toward the Pacific area by strong west winds (ARAO and ISHIZAKA, 1986; IWASAKA *et al.*, 1983; KAI *et al.*, 1988; MURAYAMA, 1988; TANAKA *et al.*, 1989).

KWON *et al.* (1996) found that several aerosol layers were present over Japan at the high altitude of 4,000-9,000m from sea level by using lidar observation. In a typical dust storm event, dust is raised up to a height of several thousand meters, e.g., 4,000m high in Oklahoma, U.S.A., in February, 1977 (KESSLER *et al.*, 1978), 8,000-9,000m high in Ashkhabad, Turkmenistan, in January, 1968 (PETROV, 1968). This fact suggests that mineral dust particles might directly reach the upper troposphere at dust storm events, and that the sulfate materials accumulated on the ground surface under arid environment might be directly transported to high altitudes within the atmosphere to form sulfate dust aerosols. In the case of Saharan dust, 0.1-1 mm-sized dust particles are transported in the troposphere at an altitude of 2,000-6,000m to the Atlantic Ocean, 5,000km away from the source area (SCHUTZ *et al.*, 1981). These facts indicate that the aeolian dust particles in the upper troposphere are little influenced by the anthropogenic sulfate emitted from the earth surface during long-range transportation. Therefore it is promising to trace the dust-supplying sources by sulfur isotope studies of atmospheric dust particles collected at high altitude.

### Reference

- ANDREAE, M.O. (1990): Ocean-atmosphere interaction in the global biogeochemical sulfur cycle. *Mar. Chem.*, **30**: 1-29.
- ARAO, K. and ISHIZAKA, Y. (1986): Volume and mass of yellow sand dust in the air over Japan as estimated from atmospheric turbidity. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**: 79-93.
- CHUKHROV, F.V., YERMILOVA, L.P., CHURIKOV, V.S. and NOSIK, L.P. (1978): Sulfur-isotope phytoge geochemistry. *Geochem. Intern.*, **1978**: 25-40.
- CLAYPOOL, G.E., HOLSER, W.T., KAPLAN, I.R., SAKAI, H. and ZAK, I. (1980): The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. *Chem. Geol.*, **28**: 199-260.
- DUCE, R.A. (1995): Sources, distributions, and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate. In CHARLSON, R.J. and HEINTZENBERG, J. eds., *Aerosol Forcing of Climate*, John Wiley & Sons, 43-72.
- HONG, Y., ZHU, Y., ZHANG, H., PIAO, H., JIANG, H., ZENG, Y. and LIU, G. (1992): Compositional characteristics of coal in China and fractionation of sulfur isotopes during coal-burning process. In Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, *Development in Geochemistry*, Seismological Press, 241-250.
- IWASAKA, Y., MINOURA, H. and NAGAYA, K. (1983): The transport and spacial scale of Asian dust-storm clouds: A case study of the dust-storm event of April 1979. *Tellus*, **35B**: 189-196.
- JACKSON, L.L. and GOUGH, L.P. (1988): The use of stable sulfur isotope ratios in air pollution studies: An ecosystem approach in south Florida. In RUNDEL, P.W., EHLLERINGER, J.R. and NAGY, K. eds., *A. Stable Isotopes in Ecological Studies, Ecological Studies*, **68**, Springer-Verlag, 471-490.
- KAI, K., OKADA, Y., UCHINO, O., TABATA, I., NAKAMURA, H., TAKASUGI, T. and NIKAIDOU, Y. (1988): Lidar observation and numerical simulation of a Kosa (Asian Dust) over Tsukuba, Japan during the spring of 1986. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **66**: 457-472.
- KESSLER, E., ALEXANDER, D. and RARICK, J. (1978): Dust storms from the US High Plains in late winter 1977—Search for cause and implications. *Oklahoma Acad. Sci.*, **58**: 116-128.
- KITAMURA, M., SUGIYAMA, M., OHASHI, T. and NAKAI, N. (1993): An estimation of the origin of sulfate ion in rain-water in view of sulfur isotopic variations. *Chikyu Kagaku (Geochemistry)*, **27**: 109-118.
- KROUSE, H.R. (1980): Sulphur isotopes in our environment. In FRITZ, P. and FONTES, J.C. eds., *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Elsevier, 433-471.
- KROUSE, H.R. (1988): Sulfur isotope studies of the pedosphere and biosphere. In RUNDEL, P.W., EHLLERINGER, J.R. and NAGY, K.A. eds., *Ecological Studies 68, Stable Isotopes in Ecological Studies*, Springer-Verlag, 424-444.
- KWON, S.A., IWASAKA, Y. and SHIBATA, T. (1996): Depolarization ratio of air molecules in the free tro-



The Taklimakan Desert in the Tarim Basin, China, is the largest sand desert in northwestern China and is surrounded by the Tianshan, Kunlun and Altun mountains (Fig. 1). Sediments in the Taklimakan Desert are mainly supplied from baselement rocks in the surrounding mountains. Aeolian sediments used in this study were collected from dune surfaces at different elevations southwest Taklimakan Desert (Fig. 1) and Pishan, Qira, Mazartag and Yaqgantugelake in Pishan, Qira, Mazartag and Yaqgantugelake in Table 1). Pishan and Qira are located at the

## 2. Samples and Analytical Methods

FRANK and KOCUREK, 1996). Compared with those appraoches, the use of geochemical data and grain-size distribution data of the aeolian sediments is assumed to give information on transportation processes with longer intervals in space and time. Thus far, there have been few studies applying such approaches to the aeolian mechanism of aeolian sediments.

We have studied the major-element composition, mineral distribution for Quaternary aeolian sediments from the Taklimakan Desert (Honda and Shimizu, 1998), and presented the chemical features of the Taklimakan desert (Nagashima *et al.*, 1992), we will study the transportation processes of aeolian sediments from the Desert. After the pioneering work by Bagnold (1941), transportation processes have been studied mainly through physical approaches using wind tunnel experiments (e.g., Iversen and White, 1982; Williams *et al.*, 1990, 1994; Iversen and Rasmussen, 1994; Rice *et al.*, 1995) or field investigation using sand traps and anemometers (e.g., Sweet and Kocurek, 1990; McDonald and Anderson, 1995; and traps and anemometers (e.g., Sweet and Kocurek, 1990; McDonald and Anderson, 1995; and

## 1. Introduction

### composition, transport mechanism

**Key Words:** Taklimakan Desert, Aeolian sediment, Grain size distribution, Major element

The transport mechanism of aeolian sediments from the Taklimakan Desert is studied on the basis of wind low-frequency data in the Taklimakan Desert and is verified by examining the size distribution of the sediments and the variation of major-element compositions with different grain-size fractions. The Taklimakan Desert sediments are characterized by extremely small amounts of grain-size fractions finer than  $45\mu m$  and smaller deviations from the chemical composition for the  $45-75\mu m$  fractions than for other grain-size fractions. These results and the observed wind low-frequency data in the Taklimakan Desert consistently suggest the following transport modes for grains with different sizes in the Taklimakan Desert: saltation for grains finer than  $45\mu m$ , mainly suspension with secondary saltation for  $45-75\mu m$  grains, mainly saltation with secondary suspension for  $75-150\mu m$  grains, and bed load (saltation and traction) for grains coarser than  $150\mu m$ .

Masatoshi HONDA\* and Hiroshi SHIMIZU\*\*

## Study of Transport Mechanism of Aeolian Sediments from Taklimakan Desert: Implication of Grain-Size Distribution and Major-Element Composition

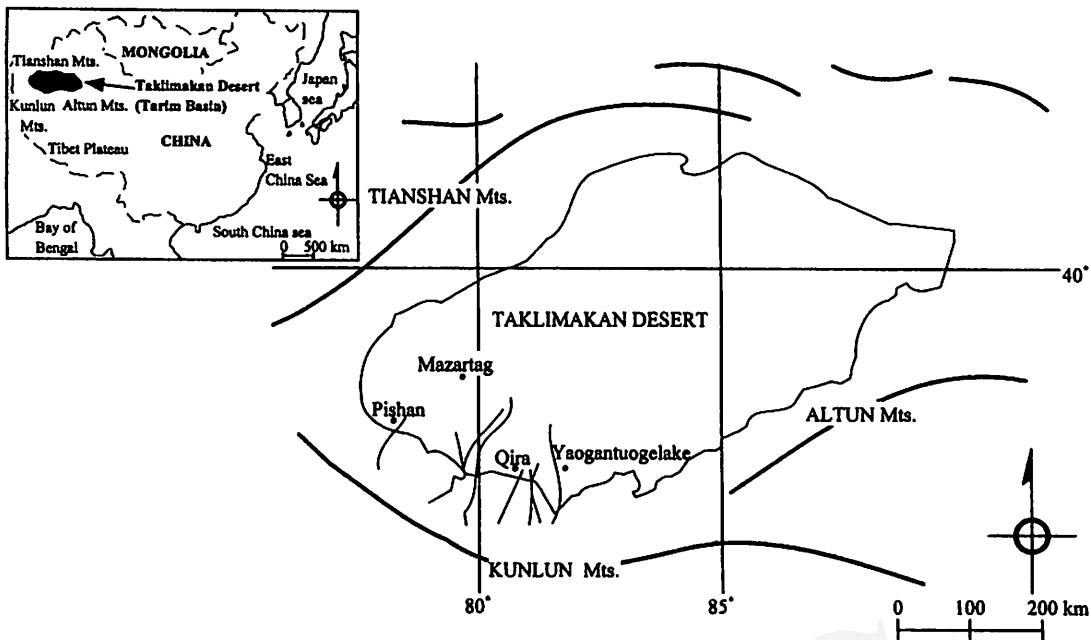


Fig. 1. Location of the Taklimakan Desert and sampling sites.

southern margins of the Taklimakan Desert. Yaogantuogelake is about 30km inside the southern margin, while Mazartag is in the middle of the western part of the Desert.

For grain-size analysis, a sample of 100 g was sieved, using the Ro-Tap shaking machine, for two hours, with the following mesh sieves: 14 (1,180 $\mu\text{m}$  opening), 26 (600 $\mu\text{m}$ ), 50 (300 $\mu\text{m}$ ), 100 (150 $\mu\text{m}$ ), 200 (75 $\mu\text{m}$ ) and 330 (45 $\mu\text{m}$ ).

Major-element compositions were determined for each grain-size fraction using an X-ray fluorescence spectrometer (Philips PW1404). Fusion glasses made from the mixture of sample and flux ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) in the proportion of 1:10 were used for the measurement. Calibration was carried out using the standard rocks prepared by the Geological Survey of Japan. Repeated analysis shows precision better than 5% for  $\text{P}_2\text{O}_5$  and better than 3% for the other major elements.

### 3. Size Distribution and Chemical Composition of Each Grain-size Fraction

Mineralogical and chemical compositions and grain-size distribution of the aeolian sediments of the Taklimakan Desert were given in our other paper (HONDA and SHIMIZU, 1998). Some grain-size

Table 1. Sample list.

Locality	Sample No.
Pishan	2811, 931017.3-b
Qira	3001, 3003, 3004, 931014.1-b, 931014.2
Mazartag	931023.5-b, 931023.6-b
Yaogantuogelake	901018

distributions and chemical compositions are given in Table 2 and Figs. 2 and 3, respectively.

Table 2 and Fig. 2 give the grain-size distribution of aeolian sediments in the Taklimakan Desert. Regardless of locality, the amount of the grain-size fraction finer than 45 $\mu\text{m}$  is very small, less than about 10% in all samples (Table 2 and Fig. 2). The mean size is 2.4-4.0  $\phi$  (189-63mm), except for the Qira 3.004 sample which shows bimodal grain-size distribution. Sorting, skewness and kurtosis are 0.42-0.99, 0.02-0.35 and 0.65-1.06, respectively. These parameters are close to those reported by QIHUI (1993) and ISHII *et al.* (1995); QIHUI (1993) reported 3.0-3.2  $\phi$  (126-108 $\mu\text{m}$ ) for mean size, 0.43-0.67 for sorting, 0.08-0.28 for skewness and 0.94-1.55 for kurtosis, and ISHII *et al.* (1995) reported 2-3  $\phi$  (250-125 $\mu\text{m}$ ) for mean size and 0.4-1.0 for sorting. Mean sizes of Pishan samples (3.9-4.0  $\phi$ ; 67-63 $\mu\text{m}$ ) and

Yaogantuogelake sample ( $3.8 \phi$ ;  $72 \mu\text{m}$ ) are smaller than those of Qira samples ( $2.6\text{-}2.9 \phi$ ;  $165\text{-}134 \mu\text{m}$ ) and Mazartag samples ( $2.4\text{-}2.7 \phi$ ;  $189\text{-}154 \mu\text{m}$ ) and those studied by QIHUI (1993) and ISHII *et al.* (1995). QIHUI (1993) also noted that grain-size distribution in the eastern part of the Taklimakan Desert is finer and better sorted than that in the western part. Although the grain-size

distribution of the Taklimakan Desert sands is more homogeneous than those of other sediments around the Desert (HONDA and SHIMIZU, 1998), minor differences in grain-size distribution are observed among desert sands from different sample localities, as discussed above. The observed difference might be due to differences in the source material and transport process of

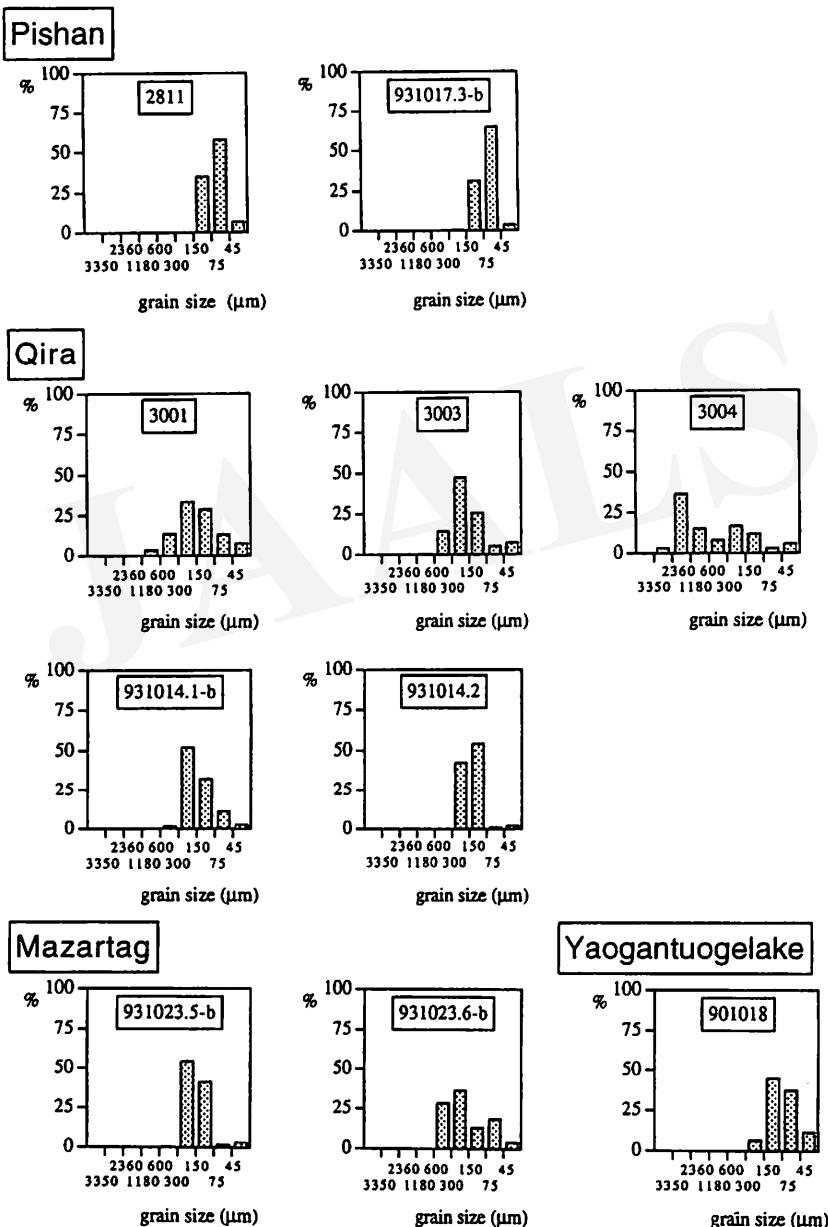


Fig. 2. Grain-size distribution of the Taklimakan Desert sediments.

the desert sediments.

In Fig. 3, major-element compositions of each grain-size fraction are compared with the average for Qira samples in each fraction because Qira is located closest to the junction of prevailing winds (INSTITUTE OF DESERT, LANZHOU, 1971). It should be noted that major-element compositions for the 45–75 $\mu\text{m}$  grain-size fraction show smaller variations and less deviation from the average composition for Qira, compared with those for other grain-size fractions. These results for major-element compositions reflect the difference in aeolian transport modes among grains of each grain-size fraction, because chemical weathering, which is another possible factor that affects the chemical compositions, is negligible in a dry environment such as a desert.

#### 4. Aeolian Transport Modes

Three principal modes of aeolian transport are proposed (*e.g.*, GREELEY and IVERSEN, 1985); sus-

pension, saltation and traction. Suspension is the floating movement of grains in the air; a suspended grain can travel several kilometers or more from takeoff to landing. Saltation is the bouncing movement of grains; a saltated grain can travel several tens of centimeters from takeoff to landing. Traction is sliding or rolling movement of grains along the surface. Saltation and traction are generally called bed load.

VISHER (1969) proposed an approach for distinguishing the transport mode from the cumulative grain-size distribution curve on log-normal probability diagram, assuming that grain-size of natural sediments is log-normally distributed. However, it has been suggested that the grain-size distributions of sediments conform not to the normal probability function, but to a hyperbolic probability (*e.g.*, BANGOLD and BARNDORFF-NIELSEN, 1980; BARNDORFF-NIELSEN *et al.*, 1982). Furthermore, a sediment in the single transport mode shows a multi-segmented cumulative curve on a log-normal probability

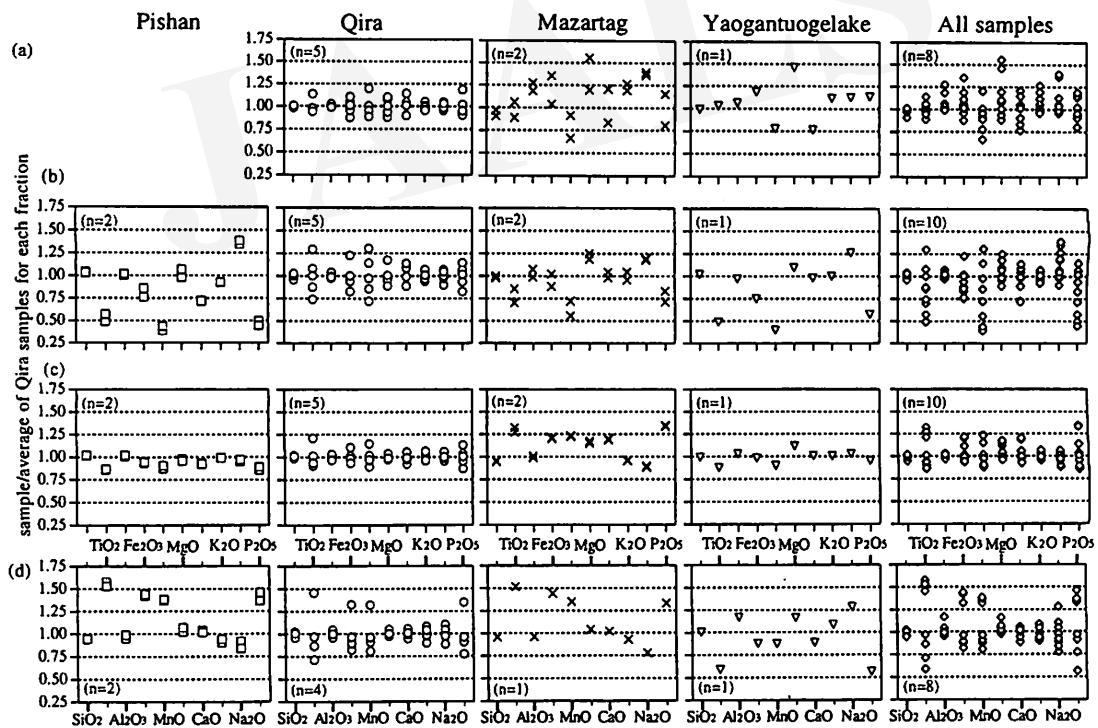


Fig. 3. Major-element composition in each grain-size fraction of the Taklimakan Desert sediments, normalized by average composition of Qira samples for each fraction.

(a) 300–150 $\mu\text{m}$ , (b) 150–75 $\mu\text{m}$ , (c) 75–45 $\mu\text{m}$ , (d) finer than 45 $\mu\text{m}$ . Numerical number (n) shows the number of samples.

diagram (e.g., CHRISTIANSEN and DALSGAARD, 1984; FLENLEY *et al.*, 1987).

In this study, the wind velocity boundary for a particular-size grain between suspension and bed load is estimated from the ratio of the friction velocity of wind to the settling velocity of the grain in the air.

The settling velocity,  $U_f$  (cm/sec), of quartz spheres in the size range 1-50  $\mu\text{m}$  can be calculated approximately, according to Stokes's Law, (PYE, 1987)

$U_f = KD^2$ ,  
where  $D$  (cm) is the grain diameter and  $K$  is given by

$$K = \frac{\rho_p g}{18\mu}, \quad (2)$$

where  $\rho_p$  is the grain density,  $g$  (cm/sec<sup>2</sup>) is the acceleration due to gravity and  $\mu$  (cm<sup>2</sup>/sec) is the dynamic viscosity of air,  $K$  is given as  $8.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}\text{sec}^{-1}$  for air of 15°C at sea level (PYE, 1987). The settling velocity for coarser grains can be

Table 2(a). Grain-size distributions (wt%) of the Taklimakan Desert aeolian sediments.

Locality	Sample No.	grain size ( $\mu\text{m}$ )								
		> 3350	3350-2360	2360-1180	1180-600	600-300	300-150	150-75	75-45	< 45
Pishan	2811	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02	0.14	0.16	34.88	58.11	6.69
	931017.3-b	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.07	0.26	31.15	64.84	3.67
Qira	3001	< 0.01	< 0.01	0.01	3.55	13.63	33.32	28.62	13.22	7.66
	3003	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.37	14.36	47.15	25.43	5.27	7.41
	3004	< 0.01	2.89	36.25	15.02	8.06	16.83	11.88	3.10	5.97
	931014.1-b	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02	1.76	51.86	32.47	11.22	2.68
Mazartag	931014.2	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.01	42.36	54.13	1.26	2.24
	931023.5-b	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.29	54.20	40.97	1.68	2.86
	931023.6-b	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.07	28.18	36.24	13.10	18.31	4.09
Yaogantuogelake	901018	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02	6.57	44.63	37.12	11.66

Table 2(b). Grain-size distribution parameters of the Taklimakan Desert aeolian sediments.

Locality	Sample No.	mean( $\mu\text{m}$ )	mean( $\phi$ )	median( $\phi$ )	sorting( $\phi$ )	skewness( $\phi$ )	kurtosis( $\phi$ )
Pishan	2811	67	3.9	3.9			
	931017.3-b	63	4.0	4.0	0.44	0.02	0.99
Qira	3001	144	2.8	2.8			
	3003	165	2.6	2.7			
	3004	707	0.5	0.8			
	931014.1-b	154	2.7	2.9	0.70	0.35	0.99
Mazartag	931014.2	134	2.9	2.9	0.42	0.18	0.92
	931023.5-b	154	2.7	2.8	0.47	0.28	1.06
	931023.6-b	189	2.4	2.6	0.99	0.32	0.65
Yaogantuogelake	901018	72	3.8	3.7			

$$\phi = -3.3219 \log d \quad (d: \text{diameter of grain size in mm})$$

Table 3. Settling velocity of quartz grains in air and wind velocity (at 10m height) required to suspend the grains.

grain diameter ( $\mu\text{m}$ )	settling velocity (cm/sec)	wind velocity required to suspend (m/sec)
1,180	413	117
600	270	76
300	160	45
150	81	23
75	33	9.3
45	16	4.6

calculated by

$$U_f = \frac{-3\mu + \sqrt{9\mu^2 + gr^2\rho(\rho_p - \rho)(0.0088 + 1.041r)}}{(0.0066 + 0.781r)} \quad (3)$$

where  $r=D/2$  is the grains radius (Cui *et al.*, 1983). Friction velocity ( $u^*$ ) is given by the square root of the ratio of shear stress to fluid density and can be regarded as the wind velocity just above the ground surface. The value of the vertical component of wind velocity near the ground surface is thought to be approximately equal to the friction velocity (PYE, 1987). Therefore, when the settling velocity is less than the friction velocity, the grain moves in the suspension mode. On the other hand, when the settling velocity is larger than the friction velocity, the grain moves in the saltation mode. If the grain is too large or heavy to be lifted from the ground surface by the wind, it moves in the traction mode. In short, the boundary state between suspension and saltation transport modes can be given by setting  $U_f/u^*=1$  (PYE, 1987).

Settling velocities of quartz sphere grains whose diameters are 1,180, 600, 300, 150, 75 and 45 $\mu\text{m}$  are calculated using equations (1) and (3), and are shown in Table 3; these diameters correspond to the mesh openings of sieves used in this study. These settling velocities are equal to the friction velocities required to suspend these

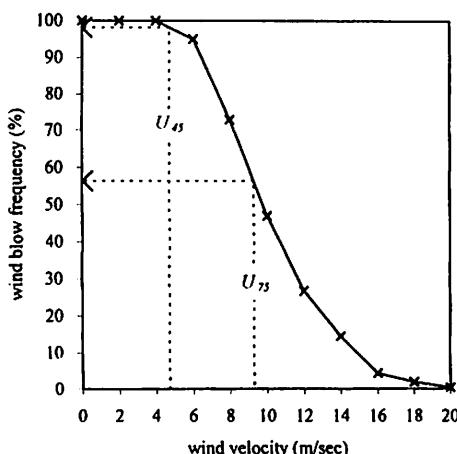


Fig. 4. Wind blow frequency at Qira modified from NAGASHIMA *et al.* (1992).

$U_{45}$  and  $U_{75}$  are the wind velocities required to suspend quartz grains with 45 and 75 $\mu\text{m}$  diameters.

grains. The friction velocity and the wind velocity measured at an arbitrary height,  $z$ , is given as (e.g., PYE, 1987; GREELEY and IVERSEN, 1985)

$$\frac{U}{u_*} = \left( \frac{1}{k} \right) \ln \left( \frac{z}{z_0} \right), \quad (4)$$

where  $U$  is the wind velocity measured at height  $z$ ,  $u^*$  is the friction velocity of the wind,  $k$  is the von Kármán constant which varies with the temperature gradient but is usually taken to be 0.4, and  $z_0$  is the aerodynamic roughness height at which the wind velocity is zero and is about 1/30 of the sediment grain diameter for closely packed grains (GREELEY and IVERSEN, 1985). In this study,  $z_0$  is set to be 120/30 $\mu\text{m}$  because the average mean size of the Taklimakan Desert aeolian sediment samples is about 120 $\mu\text{m}$ , except for Qira 3004 which shows bimodal grain-size distribution (Table 2). Generally,  $z$  is set to be 10m (e.g., *Iwanami Physical and Chemical Dictionary*: KUBO *et al.*, 1987). Thus, the wind velocities, at a height of 10m, required to suspend quartz sphere grains are calculated for grain-size diameters of 1,180, 600, 300, 150, 75 and 45 $\mu\text{m}$ , using equations (1), (3) and (4) (Table 3).

The frequency distribution of wind velocity at Qira in the southwestern Taklimakan Desert was reported by NAGASHIMA *et al.* (1992). The wind velocities required to suspend quartz grains with 45 and 75 $\mu\text{m}$  diameter are calculated using equations (1), (3) and (4) and are shown in Fig. 4, where the wind blow-frequency is plotted with the corresponding wind velocity. Fig. 4 indicates the following transport modes for grains with different diameters in the Taklimakan Desert sands: suspension for grains finer than 45 $\mu\text{m}$ , mainly suspension with secondary saltation for

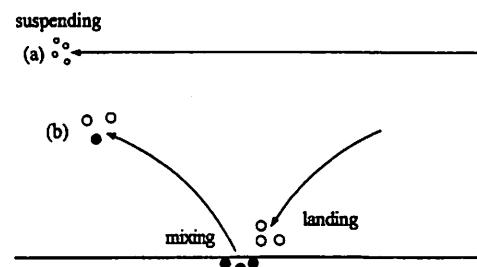


Fig. 5. Schematic diagrams of aeolian transport modes. Suspended grains (a) have smaller chance of mixing than landing grains (b).

grains with  $45\text{-}75\mu\text{m}$  diameter, mainly saltation with secondary suspension for  $75\text{-}150\mu\text{m}$  grains, and bed load (saltation and traction) for grains coarser than  $150\mu\text{m}$ .

## 5. Interpretation of Grain-Size Distribution and Major-Element Features Based on Transport Mode

Figure 4 indicates that grains finer than  $45\mu\text{m}$  are always suspended in the air of the Taklimakan Desert. This suggestion is consistent with the observed grain-size distribution, *i.e.*, the small amount of the finer-than- $45\mu\text{m}$  fraction in the Taklimakan samples. The discussion further suggests that wind velocity distributions at Pishan, Mazartag and Yaogantuogelake are not so different from that at Qira. Our discussion on the transportation mode is based on the wind velocity distribution at Qira reported by NAGASHIMA *et al.* (1992).

Figure. 4 and Table 3 also show that grains of  $45\text{-}150\mu\text{m}$  diameter are transported by suspension and bed load; mainly by suspension for finer  $45\text{-}75\mu\text{m}$  grains, and mainly as bed load for coarser  $75\text{-}150\mu\text{m}$  grains. In Fig. 3, it is shown that the major-element composition variation for the Taklimakan Desert sands is the smallest for the  $45\text{-}75\mu\text{m}$  grain-size fraction, not the grain-size fraction finer than  $45\mu\text{m}$ . This result suggests that landing of traveling aeolian sediments provides a good chance of mixing with other aeolian sediments at the ground surface, and that grains that are always suspended have less chance of mixing (Fig. 5). The  $45\text{-}75\mu\text{m}$  grains are considered to have more chance of mixing at the ground surface than grains finer than  $45\mu\text{m}$ .

It is considered that traveling aeolian sediments in a desert have two modes of the chance of mixing with other aeolian sediments in the Desert. One is mixing upon landing, in which traveling aeolian sediments mix with other aeolian sediments at the ground surface. The other is mixing at wind junctions, at which traveling aeolian sediments mix with other traveling aeolian sediments. It is also considered that bed-loaded grains have less chance of mixing with other grains because they cannot travel long distances. Suspended grains can travel long distances but have the less chance of mixing

because they do not often land. Intermediately transported grains can travel a longer extent than bed-loaded grains and land more frequently than suspended grains, so they should have the highest chance of mixing.

Between the two grain-size fractions of  $45\text{-}75\mu\text{m}$  and  $75\text{-}150\mu\text{m}$ , chemical variations among samples are smaller for the  $45\text{-}75\mu\text{m}$  fraction. It is suggested that  $45\text{-}75\mu\text{m}$  grains travel for longer distances than  $75\text{-}150\mu\text{m}$  grains and that the  $45\text{-}75\mu\text{m}$  fraction becomes more homogeneous than the  $75\text{-}150\mu\text{m}$  fraction.

In summary, the transport mode of aeolian sediment under the wind blow-frequency observed for the Taklimakan Desert can consistently explain the following observed features of grain-size distribution and major-element compositions of different grain-size fractions for aeolian sediments in the Taklimakan Desert: a very small amount of the grain-size fraction finer than  $45\mu\text{m}$  and smaller deviation of the major-element composition for the  $45\text{-}75\mu\text{m}$  grain-size fraction than that for fractions with grain-size finer than  $45\mu\text{m}$ .

### Acknowledgements

We thank Drs. Kazuya TAKAHASHI, Sadayo YABUKI and Hideo YABUKI (Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN) and Dr. Hideki NAGASHIMA (Tokyo University of Fisheries) for offering samples and helpful information on them. Our thanks are extended to Dr. Akihiko OKADA (Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN), Dr. Mamoru ADACHI (Nagoya University), Dr. Masaaki OBATA (Kyoto University) and Mr. Qing CHANG (Kumamoto University) for helpful discussion. This research is supported by a grant-in-aid for scientific research from the Ministry of Education, Science, Sports and Culture of Japan.

### References

- BAGNOLD, R.A. (1941): *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, London, 241pp.
- BAGNOLD, R.A. and BARNDORFF-NIELSEN, O. (1980): The pattern of natural size distributions. *Sedimentology*, 27: 199-207.
- BARNDORFF-NIELSEN, O., DALSGAARD, K., CHALGREEN, C., KUHLMAN, H., MØLLER, J.T. and SCHOU, G. (1982): Variation in particle size distribution over a small dune. *Sedimentology*, 29: 53-65.

- CHRISTIANSEN, P.B. and DALSGAARD, K. (1984): Re-interpreting 'segmented' grain size curves. *Geological Magazine*, **121**: 47-51.
- CUI, B., KOMAR, P.D. and BABA, J. (1983): Settling velocities of natural sand grains in air. *J. Sedimentary Petrology*, **53**: 1205-1211.
- FLENLEY, E.C., FIELLER, N.R.J. and GILBERTSON, D.D. (1987): The statistical analysis of 'mixed' grain size distributions from aeolian sands in the Libyan Pre-Desert using log skew Laplace models. In FROSTIC, L. and REID, I. eds., *Desert Sediments: Ancient and Modern*. Geological Society Special Publication, No. 35, 271-280.
- FRANK, A. and KOCUREK, G. (1996): Toward a model for airflow on the lee side of aeolian dunes. *Sedimentology*, **43**: 451-458.
- GRELLEY, R. and IVERSEN, J.D. (1985): *Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan*. Cambridge University Press, Cambridge, 333pp.
- HONDA, M. and SHIMIZU, H. (1998): Geochemical, mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan Desert sands. *Sedimentology*, in press.
- INSTITUTE OF DESERT, LANZHOU (1971): *Desert Map of China*.
- ISHII, T., ISOBE, I., MIZUTA, K., KANAI, Y., MATSUHISA, Y., MIZOTA, C., QIAN, Y., TERESHIMA, S. and OKUMURA, K. (1995): Study of the formation processes and sedimentary environment of surface geological features in desertic areas of China, with special reference to the characteristics and origin of eolian sediments. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **45**: 651-685.
- IVERSEN, J.D. and RASMUSSEN, K.R. (1994): The effect of surface slope on saltation threshold. *Sedimentology*, **41**: 721-728.
- IVERSEN, J.D. and WHITE, B.R. (1982): Saltation threshold on Earth, Mars and Venus. *Sedimentology*, **29**: 111-119.
- KUBO, R., NAGAKURA, S., IGUCHI, H. and EZAWA, H. eds. (1987): *Iwanami Physical and Chemical Dictionary*. Iwanami Press, Tokyo, 1629pp.
- MCDONALD, R.R. and ANDERSON, R.S. (1995): Experimental verification of aeolian saltation and lee side deposition models. *Sedimentology*, **42**: 39-56.
- NAGASHIMA, H., OKAZAKI, M. and YAMADA, Y. (1992): Studies on transportation of sand particles and accumulation in the desert area: Investigation of sand-dune shifting by wind. *Annual Report of Japan-China Joint Study on Desertification, Research and Development Bureau, Science and Technology Agency of Japan*, 199-217.
- PYE, K. (1987): *Aeolian Dust and Dust Deposits*. Academic Press, London, 334pp.
- QIHUI, J. (1993): The characteristics of sand grain size in Taklimakan Desert. *Proceedings of the Japan-China International Symposium on March 2-4, Tsukuba*, 270-279.
- RICE, M.A., WILLETT, B.B. and McEWAN, I.K. (1995): An experimental study of multiple grain-size ejecta produced by collisions of saltating grains with a flat bed. *Sedimentology*, **42**: 695-706.
- SWEET, M.L. and KOCUREK, G. (1990): An empirical model of aeolian dune lee-face airflow. *Sedimentology*, **37**: 1023-1038.
- VISHER, G.S. (1969): Grain size distributions and depositional processes. *J. Sedimentary Petrology*, **39**: 1074-1106.
- WILLIAMS, J.J., BUTTERFIELD, G.R. and CLARD, D.G. (1990): Rates of aerodynamic entrainment in a developing boundary layer. *Sedimentology*, **37**: 1039-1048.
- WILLIAMS, J.J., BUTTERFIELD, G.R. and CLARK, D.G. (1994): Aerodynamic entrainment threshold: Effects of boundary layer flow conditions. *Sedimentology*, **41**: 309-328.

## 黄砂エアロゾルの長距離輸送 —1994年春期のライダー観測を中心に—

権 成顔\*・岩坂泰信\*・松永捷司\*・柴田 隆\*

### 1. はじめに

日本を含む東アジア地域は偏西風の影響が強く、特に春期の自由対流圏エアロゾルの中には、アジア大陸からもたらされたと考えられるものがしばしば観測される (IWASAKA *et al.*, 1983, 1988; KWON *et al.*, 1997)。アジア大陸起源のエアロゾル粒子の長距離輸送あるいは輸送中の変質は、エアロゾルの放射効果や、粒子が関与する大気化学反応を通して、アジア・太平洋地域の気候や環境に大きな影響を与えていていると考えられる。この地域でのグローバルな物質循環が大きな関心事になっているのは、このような背景があるからである。アジア大陸の13.6%を占める砂漠地域から起源した土壤粒子等が偏西風により太平洋まで拡散し (SHAW, 1980; BRAATEN and CAHILL, 1986; PARUNGO *et al.*, 1994)，金属をはじめ種々の化学成分のグローバルな物質収支、特に大気圏から海洋への物質の移動に大きな寄与をしていると考えられる (DUCE *et al.*, 1980; UEMATSU *et al.*, 1983)。

IWASAKA *et al.* (1988), OKADA *et al.* (1987)，あるいはNISHIKAWA *et al.* (1991) は、黄砂粒子の化学的変質が、輸送中に生じていたことを示した。これらの研究で、自由対流圏で水溶性物質によって表面がおおわれたと推定される土壤粒子が見出されたことは粒子の変質を考える上で興味深い。なぜなら、水蒸気の土壤粒子表面への凝縮は、黄砂とそれを取り巻いているガス状物質との間で進行する反応の場をつくる重要な前駆プロセスと考えられるからである。黄砂粒子の長距離輸送やその途中での化学的な変質等を理解する上で、自由対流圏での観測がきわめて重要であるが、技術的な制約が多く観測手段は限られている。しばしば用いられてきたのは、ライダー等のリモートセンサーであり、その他の手法（例えば直接採取した粒子を分析する等）の多くは、地上大気中の観測で使われることが多い。

大気中の粒子の形状は、粒子の物性、エアロゾルの放射効果、粒子表面のいろいろな反応 (heterogeneous

reactions) を考える上で重要な要素の一つである。最近のライダー観測では、粒子濃度の観測に加えて、エアロゾルの偏光消度から大気エアロゾルの形状に関する情報を得ることも試みられるようになっている。また、ラマン散乱を利用したライダーによって自由対流圏のエアロゾルと水蒸気の同時観測も行われるようになっている (MELFI *et al.*, 1989; WHITEMAN *et al.*, 1992; SHIBATA *et al.*, 1996)。自由大気中のエアロゾル層は、発生源の違いや輸送中に生じる変質等を反映して、高度方向に粒子の濃度、粒子の形状等を含めて光学的特性が異なっていると考えられる。従って、このような同時観測から輸送中の変質メカニズムや経路特性等が予測できるだろう。

本研究では、ラマンライダーによって観測された春期対流圏エアロゾルの光学的特徴およびその気塊の輸送経路を検討した後、黄砂エアロゾルの発生源と輸送中の変質可能性について考察した。

### 2. ライダーによる大気中のエアロゾル粒子と水蒸気の観測

本研究で使用されたライダーシステムは、Nd:YAGレーザ発振器、直徑1mの受信用望遠鏡 (Cassegrain), multichannel photon-counter 等によって構成されている。Table 1はライダーの主要諸元である。本ライダーによってエアロゾルの散乱比、偏光消度および相対湿度を名古屋大学東山キャンパス (35° N, 137° E) で1994年4月10日から30日まで観測した。散乱比R (Z) は、次の様に定義される (RUSSELL *et al.*, 1976)。

$$R(Z) = \frac{\beta_{\text{Mie}}(Z) + \beta_{\text{Rayleigh}}(Z)}{\beta_{\text{Rayleigh}}(Z)} \quad (1)$$

それ故、 $R(Z) - 1$  は光の散乱から見た大気エアロゾル粒子の混合比に対応するものと見なすことができる。

$$R(Z) - 1 = \frac{\beta_{\text{Mie}}(Z)}{\beta_{\text{Rayleigh}}(Z)} \quad (2)$$

ここで  $\beta_{\text{Mie}}(Z)$  と  $\beta_{\text{Rayleigh}}(Z)$  は、それぞれ高度  $Z$  でのエアロゾル粒子と空気分子の後方散乱係数である。

偏光消度 ( $\sigma$ ) は直線偏光しているレーザ光がエアロゾルによって散乱された後、どの程度偏光状態が変化したかを示すパラメータである。受光した光の偏光面が、射出したレーザ光の偏光面に対して垂直な成分と平行な成分を用い、ここでは以下の様に定義した。

$$\sigma = \frac{\beta_{\perp}}{\beta_{\perp} + \beta_{\parallel}} \quad (3)$$

Fig. 1 は 1994 年 4 月の散乱比と偏光消度の高度-時間

断面である。縦軸および横軸はそれぞれ高度と観測日を示している。この図を見ると、4 月にはエアロゾル量の多い領域が高度 2~8km の広い範囲に多く存在し、そのエアロゾル粒子が非球形であることがわかる。

ラマン散乱を応用したライダーでは、大気中の水蒸気濃度の高度分布を計測することができる (SHIBATA *et al.*, 1996)。その結果によると、4 月の対流圏での相対湿度の高度分布は 30 パーセント以上の層も所々に見えるが、全般的には湿度が低く、春期の乾燥した大気状態で占められている (権ほか, 1997)。

Table 1. Main characteristics of Roman lidar system.

Transmitter			
Laser	Nd:YAG		
Wavelengths (nm)	1,064	532	355
Energy/Pulse (mJ)	300	150	150
Pulse Repetition Rate		10Hz	
Laser Beam Divergence	0.2 mrad (after collimation)		
Receiver			
Diameter & Optics	Cassegrain Telescope with Diameter of 1m		
Field of View	0.2 - 5.0 mrad		
Detection System			
PMT-1 (407.4 nm)	Raman shift line H <sub>2</sub> O of Nd: YAG THG		
PMT-2 (375.4 nm)	Raman shift line O <sub>2</sub> of Nd: YAG THG		
PMT-3 (532 nm)	P-component of Nd: YAG SHG		
PMT-4 (532 nm)	S-component of Nd: YAG SHG		
PMT-5 (1,064 nm)	Backscatter of Nd: YAG Fund		
Constituents measured here			
H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> (Raman Scattering)			
Aerosol and Air Molecules (Mie & Rayleigh Scattering)			
Height Resolution	50 & 100m		

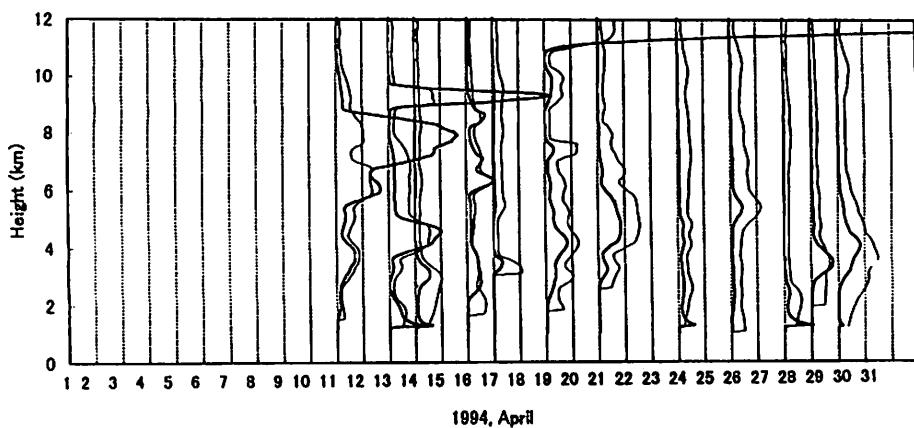


Fig. 1. Vertical profile of scattering ratio (1,064 nm: thick line) and depolarization ratio ( $\lambda = 532$  nm: thin line) in April, 1994, in Nagoya, Japan.

### 3. 結果および考察

アジア大陸から輸送される黄砂エアロゾルの影響を見積るために、飛来する黄砂の水平や高度スケールが重要なファクターである。ライダーで観測された1994年4月の黄砂エアロゾルの分布を見ると、境界層だけではなく下部、上部対流圏全体に分布している(Fig. 1)。このように、分布特徴は黄砂現象が東アジアで見られる局地的現象でなくグローバルな物質循環に関わる大きな現象であることがわかる。また、樺ほか(1997)は、春期の対流圏のライダー観測で得られたデータから判別解析法を応用して、対流圏の粒子状物質のタイプ分類を試みた。その結果によれば、この時期の対流圏の粒子状物質には6つの異なるタイプのものが認められ、それらのうちの2つは黄砂に分類されている。黄砂と分類判定されたもののうち一つは「弱い黄砂」と呼ぶ。これはIWASAKA *et al.* (1988)による呼称に従い、定常的に自由対流圏で観測されているものの、気象官署から「黄砂」の報告がないものに由来する。

黄砂粒子の表面での水溶液の膜形成は、今日大きな関心を呼んでおり、黄砂粒子へ大気中のNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、あるいはオゾンなどが吸収される過程は、この膜形成がこれらの初期過程としてきわめて重要であろうと示唆されてきた(IWASAKA *et al.*, 1988; DENTERNER *et al.*, 1996)。これらの過程を総称して粒子の変質と呼んでいる。この観測で興味が持たれるのは、水蒸気濃度が比較的高い領域で存在していた黄砂粒子である。水溶液の膜形成がどの程度の相対湿度から始まるのかについて、直接的な観測や

実験は以下の例を除いて見当たらない。坂本・川中(1996)は相対湿度が20%程度から急速にSO<sub>2</sub>ガスの黄砂粒子への吸着が始まることを指摘している。また、HANEL (1976)はサハラ砂漠の砂について相対湿度50%以上になると砂が活発に水分子を吸収(uptake)し始めることを報告している。これらのことから、相対湿度が50%程度の大気中に存在している黄砂粒子は、周辺大気中のいろいろな化学物質を取り込んでいる(変質を起こしている)可能性が高いと想像し得る。

その結果によると、名古屋の4月の対流圏において、黄砂エアロゾルと判定されるものが全体の40%近くを占めていた。ライダーによって対流圏全体で観測される黄砂エアロゾルの発生源は、アジア大陸の砂漠地域であるタクラマカン砂漠、ゴビ砂漠、黄土高原が体表的地域と言われている。しかし、対流圏で長距離輸送されている黄砂エアロゾルについて、輸送経路と発生源および発生条件との関係などについて言及したものはきわめて少ない。Fig. 2はアジア地域の気象点で観測された1994年4月のダスト発生分布を示しているもので、黄砂発生の代表的地域であるタクラマカン砂漠、ゴビ砂漠、黄土高原地域の他にチベット付近および北京、吉林省付近でもダスト発生が認められる(CHUN, 1996)。

Fig. 3には、同期間である4月のライダーで観測された黄砂エアロゾル層に対して等温位面流跡線解析を行った結果を示す。流跡線解析は気象庁全球客観解析データ(水平格子間隔1.875° × 1.875°、鉛直15層、12時間間隔)を利用し、ライダー観測点を始点として対流圏下部と上部に分けて(ここでは、後述するように黄砂粒子の分布状態が高度6km付近を境に違いが見られたことから、

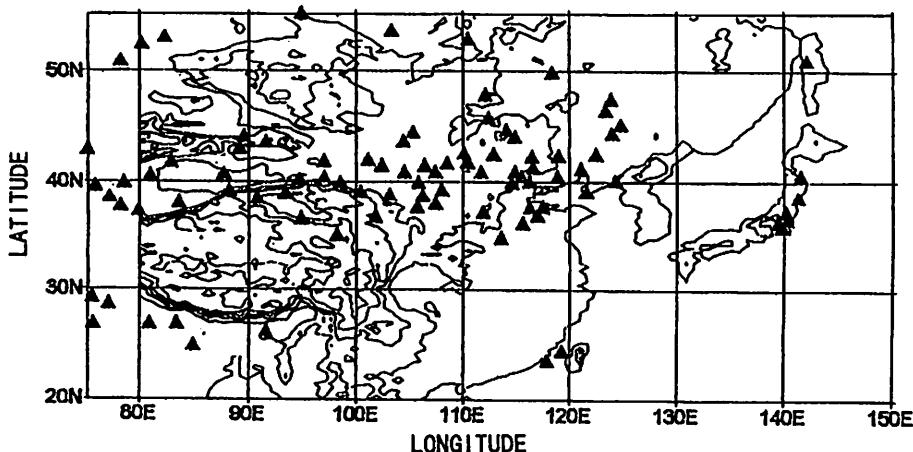


Fig. 2. The synoptic stations where the dust rise has been reported at least once in April in 1994.

6kmを基準とした、もちろん一般的な上部対流圏と下部対流圏の分類ではない) 5日間の計算を行った。その結果、下部対流圏で見られた黄砂エアロゾルはゴビ砂漠および黄土高原、北京、吉林省付近で発生したもののが輸送されてきたことがわかる。上部対流圏で見られた黄砂エアロゾルはタクラマカン砂漠とチベット付近で発生したものが多く、一部はゴビ砂漠と吉林省付近で発生したものが輸送されてきたことがわかる。

エアロゾル粒子濃度や粒子の非球形性の鉛直分布が連続的に観測できるライダーは、自由対流圏の黄砂の観測等には大変有効な装置である。日本では多くのライダー観測研究が行われて、黄砂エアロゾルの空間やその時間変化の解明、輸送過程の解明等に大きな成果を挙げてきた (IWASAKA *et al.*, 1983, 1988)。Fig. 4は、権ほか (1997) がライダー観測から分類した対流圏エアロゾルの光学的性質を利用して、1994年4月16日のライダーで観測され

た散乱比と偏光解消度の鉛直プロファイルとそれぞれのエアロゾルの特徴を示す。この日は高度3.5kmと6.2km、6.7km、8.5kmで黄砂エアロゾル層が見られ、特に高度6km付近の黄砂エアロゾルは弱い黄砂 (タイプ2) と強い黄砂エアロゾル層 (タイプ1) がサンドイッチ構造を持ち、4km以下では弱い黄砂エアロゾル層と変質可能性がある黄砂エアロゾル (タイプ4) が存在していた。

この結果から黄砂エアロゾルの変質過程を吟味するために、変質可能性黄砂エアロゾルと弱い黄砂エアロゾルが観測された高度2kmと3kmに対して、日本中部地域の南北を対応する名古屋と金沢を始点として多点の等温位面流跡線解析を行った (Fig. 5)。Fig. 5のAは流跡線の高度分布、Bは流跡線の緯度と経度分布を示すもので、流跡線で示しているシンボルは6時間間隔のエアロゾルの位置を示す。この結果を見ると4月16日午後9時頃に中部地域を通過した気塊は同じ経路を持ち、ゴビ砂漠で

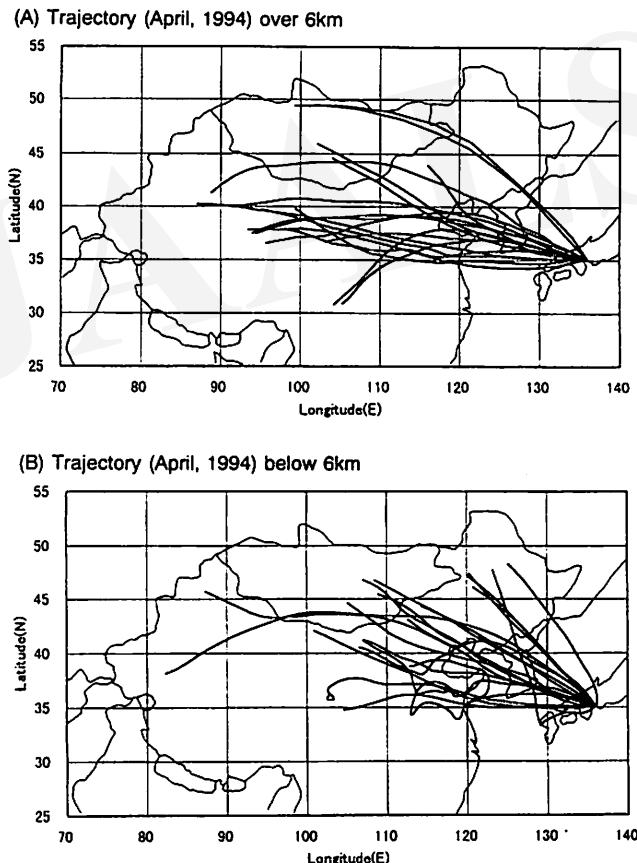


Fig. 3. Isentropic trajectories of air mass of altitude of Kosa aerosol layers in April 1994.  
Figure A and B are related to trajectories below 6km and over 6km, respectively.

発生したものが偏西風によって長距離輸送されたと予測される。しかし、主な輸送経路中で名古屋のライダーで観測された2km付近の変質可能性があるエアロゾル層の場合だけが東シナ海で発生した後、ゴビ砂漠から来る

気塊と混合されたことがわかる。

4月16日の天気図を見るとサハリン付近では低気圧が位置し、中国中部と南部にかけて高気圧が東シナ海に向かって東進している模様で、その気圧の谷に従つてアジ

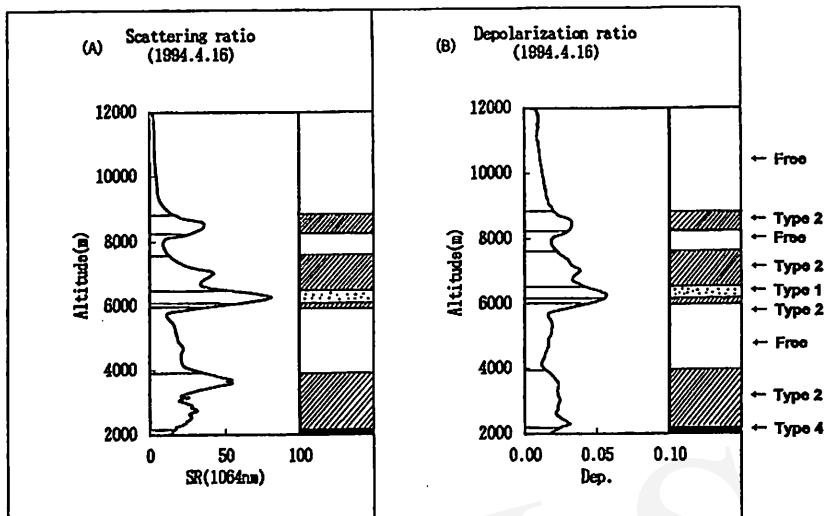


Fig. 4. The profile of scattering ratio (A) and depolarization ratio (B) measured at Nagoya, April 16, 1994.

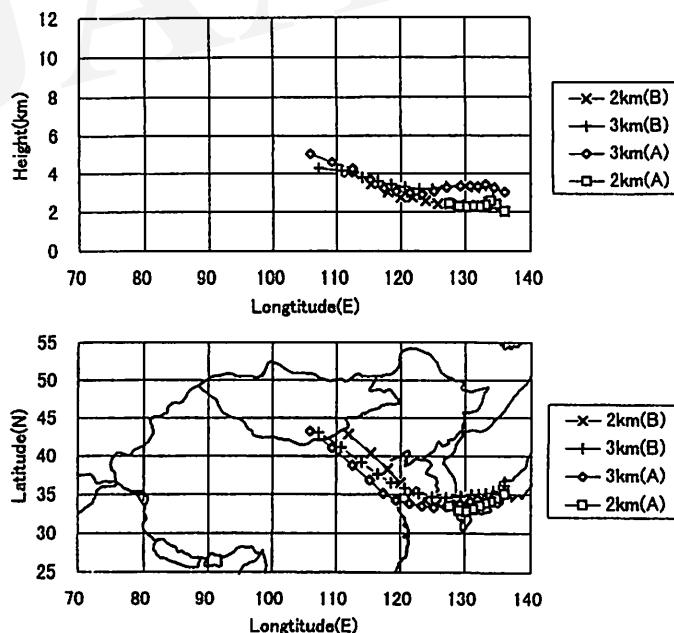


Fig. 5. Isentropic trajectories of air mass of altitude about 2 and 3 km at Nagoya (A) and Kanazawa (B) in April 16, 1994.

ア大陸からの気塊が日本に向かっている (Fig. 6). また, 700hPa (約3km) 以上の天気図では偏西風が強く、地上付近の天気図では東シナ海に高気圧が接近すると周辺の風向が変わることがわかる。

#### 4. まとめ

春期の日本上空に見られる黄砂現象は、アジア地域だけでなくグローバルな大気圏内の物質循環のひとつと見なすことができる。1994年4月のライダーによって観測された対流圏内の黄砂エアロゾル層に対して流跡線解析を行った結果、すべてがアジア大陸から起源するもので

あることがわかる。また発生源としては、下部対流圏の場合はゴビ砂漠と黄土高原、吉林省付近が主な地域であり、上部対流圏の場合はタクラマカン砂漠とチベット付近が主な地域であることがわかる。このように日本上空で観測される黄砂エアロゾルは発生源の違いと異なる輸送経路を経験するので、予想以上に物理的・化学的に異なる性質を持つていることが考えられる。ここで4月16日の観測例を用いて黄砂エアロゾルの変質可能性について検討した結果、4月12日にゴビ砂漠で発生した黄砂エアロゾルは16日に日本の中部地域を通過したことがわかる (Fig. 7)。この黄砂エアロゾルの一部 (16日の名古屋でライダーによって観測された高度2km付近のもの)

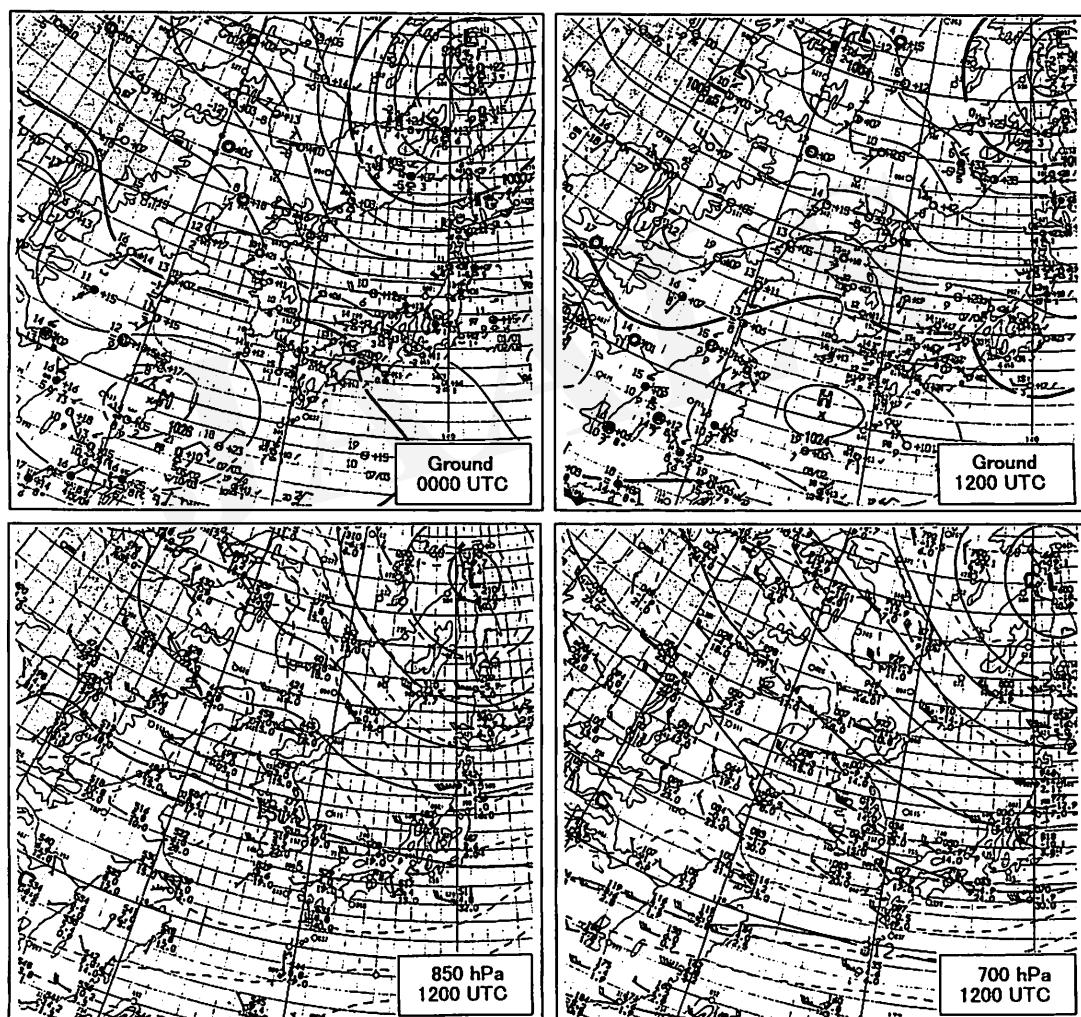


Fig. 6. Weather map at ground (A) in 0:00 GMT and (B), (C), (D) are ground, 850hPa, 700hPa in 12:00 GMT, April 14.

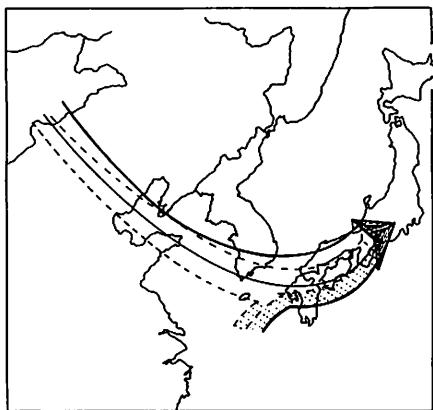


Fig. 7. Dynamic conversion scheme of long range transport of Kosa aerosol particles.

は他の黄砂エアロゾル層とは違う変質可能性があるものと考えられる。この黄砂エアロゾルは、15日東シナ海上で発生した高湿度のエアロゾルが高度2~4kmの大陸起源の黄砂エアロゾル層に流入し、輸送中に異なる性質を持つ黄砂エアロゾルに変質したものであると考えられる。このような現象は黄砂エアロゾルが長距離輸送中に起きる変質メカニズムの一つとして、あるいは大気圈中にガス状物質として存在したものがエアロゾル物質となって黄砂エアロゾルに取り込まれ長距離輸送されるメカニズムとして環境科学的に見るときわめて興味深いものである。

#### 謝 辞

本研究は、文部省科学研究費補助金による国際学術研究（代表者：岩坂泰信、課題番号06041049）の一部として行われた。

#### 引 用 文 献

- 樋 成顕・岩坂泰信・柴田 隆・中根英昭 (1997): ライダー観測にもとづく春の大気エアロゾルの特性に関する研究: エアロゾルの類別のための統計的解析法の応用. 「エアロゾル研究」 12: 209-219.
- 坂本和彦・川中洋平 (1996): 黄砂上への大気汚染物質の沈着(黄砂上におけるSO<sub>2</sub>の酸化反応). 大気エアロゾルのモニタリングに関するシンポジウム講演要集, 112-116.
- BRAATEN, D.A. and CAHILL, T.A. (1986): Size and composition of Asia dust transported to Hawaii. *J. Atmos. Environ.*, 20: 1105-1109.
- CHUN, Y.S. (1996): *Long Range Transport of Yellow Sand with Special Emphasis on the Dust Rise Conditions in the Source Regions* (in Korean). Doctoral dissertation, Seoul University.

23pp.

- DENTENER, F.J., CARMICHAEL, G.R., ZHANG, Y., LEIEVELD, J. and CRUTZEN, P.J. (1996): Role of mineral aerosol as a reactive surface in the global troposphere. *J. Geophys. Res.*, 101: 22869-22889.
- DUCE, R.A., UNNI, C.K., RAY, B.J., PROSPERO, J.M. and MERRILL, J.T. (1980): Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: Temporal variability. *Science*, 209: 1522-1524.
- HANEL, G. (1976): The properties of atmospheric aerosol particles as functions of relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air. *Adv. Geophys.*, 19: 73-125.
- IWASAKA, Y., MINOURA, H. and NAGAYA, K. (1983): The transport and special scale of Asian dust-storm clouds: A case study of the dust-storm event of April 1979. *Tellus*, 35B: 189-196.
- IWASAKA, Y., YAMATO, M., IMASU, R. and ONO, A. (1988): Transport of Asian dust (KOSA) particles: Importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles. *Tellus*, 40B: 494-503.
- KWON, S.A., IWASAKA, Y., SHIBATA, T. and SAKAI, T. (1997): Vertical distribution of atmospheric particles and water vapor densities in the free troposphere: Lidar measurement in spring and summer in Nagoya, Japan. *Atmos. Environ.*, 31: 1459-1465.
- MELFI, S.H., WHITEMAN, D. and FERRARE, R. (1989): Observation of atmospheric fronts using Raman lidar moisture measurements. *J. Applied Meteor.*, 28: 789-806.
- NISHIKAWA, M., KANAMORI, S. and MIZOGUCHI, T. (1991): Environment significance of Kosa aerosol collected in Japan. *Proceedings of 2nd IUPPA Regional Conference on Air Pollution, Seoul, Korea*, 35-41.
- OKADA, K., KOBAYASHI, A., IWASAKA, Y., NARUSE, H., TANAKA, T. and NEMOTO, O. (1987): Features of individual Asian Dust-storm particles collected at Nagoya, Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65: 515-521.
- PARUNGO, F., LI, Z., LI, X., YANG, D. and HARRIS, J. (1994): Gobi dust storms and the great green wall. *Geophys. Res. Lett.*, 21: 999-1002.
- RUSSELL, P.B., VIEZEE, W., HAKE Jr., R.D. and COLLIS, R.T.H. (1976): Lidar observations of the Stratospheric aerosol, California, October 1972 to March 1974. *Quat. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102: 675-695.
- SHAW, G.E. (1980): Transport of Asian desert aerosol to the Hawaiian Islands. *J. Applied Meteor.*, 19: 1254-1259.
- SHIBATA, T., SAKAI, T., HAYASHI, M., OJIO, T., KWON, S.A. and IWASAKA, Y. (1996): Raman lidar observations: Simultaneous measurements of water vapor, temperature and aerosol vertical profiles, Part II. *J. Geomag. Geoelectr.*, 48: 1127-1135.
- UEMATSU, M., DUCE, R.A., PROSPERO, J.M., CHEN, L., MERRILL, J.T. and McDONALD, R.L. (1983): Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, 88: 5343-5352.

WHITEMAN, D.N., MELFI, S.H. and FERRARE, R.A. (1992): Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the earth's atmosphere. *Applied Optics*, 31: 3068-3082.

JAALS

## Long Range Transport of Kosa Aerosol Particles: Measured by a Lidar in Spring 1994

Soung-An KWON\*, Yasunobu IWASAKA\*, Katsuji MATSUNAGA\* and Takashi SHIBATA\*

In order to know Asian dust particle distribution in the free troposphere, lidar measurements on scattering ratio (atmospheric aerosol density), depolarization ratio (nonsphericity of aerosol particles), and relative humidity were made in spring of 1994 at Nagoya using the Raman scattering effects. Discriminant analysis of the lidar returns suggested that dust particles were frequently transported from the Asian continent to Japan in spring. Chemical transfer of dust particles was suggested on the basis of the discriminant analysis and backward trajectory analysis of the air-mass containing dust particles.

**Key Words:** Kosa aerosol particle, Lidar measurement, Free troposphere, Long range transport, Discriminant analysis, Chemical transfer

---

\*Solar Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan.

(Received, October 23, 1997; Accepted, December 10, 1997)

# Aerosol Particles in the Asian Continental Atmosphere: Balloon-borne, Aircraft-borne, and Lidar Measurements in Japan and China

Yasunobu IWASAKA<sup>1)</sup>, Masaharu HAYASHI<sup>1)</sup>, Ikuko MORI<sup>1)</sup>, Sun Aun KWON<sup>1)</sup>,  
Katsuji MATSUNAGA<sup>1)</sup>, Guang Yu SHI<sup>2)</sup>, Jun ZHOU<sup>3)</sup>, Takashi SHIBATA<sup>1)</sup>,  
Masataka NISHIKAWA<sup>4)</sup>, Yasuhiko OKUHARA<sup>1)</sup>, Keiichiro HARA<sup>1)</sup>,  
Masahiro NAGATANI<sup>1)</sup>, Masaharu WATANABE<sup>1)</sup>, Yoon Sin KIM<sup>5)</sup> and Zhi Ben GONG<sup>3)</sup>

Atmospheric aerosol measurements (particle size, number concentration, and morphological features) made in China and Japan showed that the Asian continental atmosphere contained lots of soil particles. Balloon-borne measurements made over Beijing in China suggested that soil particles diffused over the boundary atmosphere (the free troposphere). Aircraft-borne measurements made over Nagoya in Japan suggested that those particles were frequently transported to Japan during the time when westerly wind dominated over east Asia and the west Pacific region.

From lidar measurements made in Nagoya, particulate matter was frequently transported in the atmosphere with height range of about 2-6km in spring season.

**Key Words:** Aerosol particle, Asian continental atmosphere, Balloon-borne measurement

## 1. Introduction

Asian continent has been recognized as one of important source areas of atmospheric soil particles which are globally diffused over east Asia and the western Pacific region by westerly wind. The particles give a large influence on environment and climate in this region through scattering solar radiation and terrestrial radiation, long-range transport of particulate matter on geochemical cycle of various metals and other constituents, and contribution of particles as nuclei of cloud condensation.

Recent estimations showed that noticeable radiative forcing of atmospheric aerosols possibly occurred over east Asia and the western Pacific ocean region (KIEHL and BRIEGLEB, 1993; KIEHL and ROHDE, 1995). Many investigations suggested that soil particles and other atmospheric constituents

were frequently transported from the Asian continent to Japan, Alaska, and the north western Pacific Ocean in the free troposphere by westerly wind (DUCE *et al.*, 1980; UEMATSU *et al.*, 1983; BRAATEN and CAHILL, 1986; IWASAKA *et al.*, 1988; IKEGAMI *et al.*, 1993; NIIMURA *et al.*, 1994). Electron microscopic examinations of the particles collected in the free troposphere over Japan suggested the possibility that surface of soil particles acted as a chemical reaction site for absorbing atmospheric sulfate and nitrate (IWASAKA *et al.*, 1988), and the soil particles containing sulfuric acid solution was detected over the western Pacific Ocean (particle was collected at 4.5km altitude) (IKEGAMI *et al.*, 1993).

Additionally, there is a great concern that anthropogenic perturbations of atmospheric particles due to the increase in sulfur loading with expanding industrial activities and soil particle loading with desertification in the east Asian

<sup>1)</sup> Solar Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan.

<sup>2)</sup> National Climate Research Center, China Meteorology Administration, Beijing 100871, China.

<sup>3)</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China.

<sup>4)</sup> National Institute of Environment Studies, Tsukuba 305-0053, Japan.

<sup>5)</sup> Graduate School of Environmental Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea.

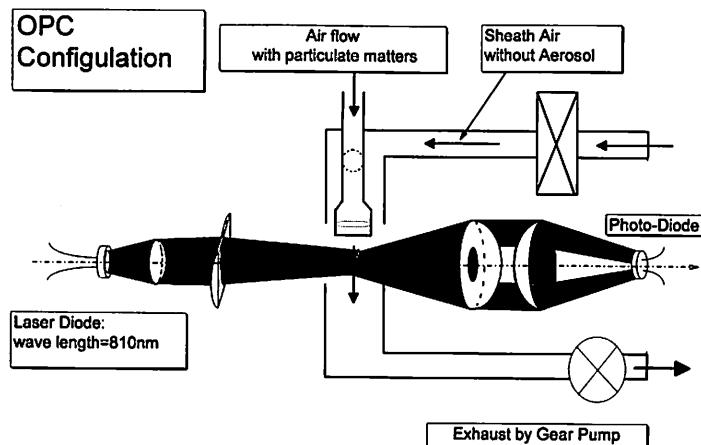


Fig. 1. Schematic diagram of a balloon-borne particle counter used for the measurements of atmospheric aerosol concentrations in the Asian continental atmosphere (IWASAKA *et al.*, 1997).

regions (e.g., HOUGHTON, 1996).

Although the effect of atmospheric particles on radiation, clouds, precipitation, and overall climate in east Asia and the western Pacific region has been recognized, acquired knowledge pertaining to causes and effects so far is inadequate. The information has been based mostly on measurements made in the surface atmosphere but few measurements in the free atmosphere where long-range transport of atmospheric constituents is expected to be active.

The purpose of this paper is to show atmospheric particles in the free troposphere over east Asia on the basis of aircraft-borne, balloon-borne, and lidar measurements made in China and Japan.

## 2. Size and Number Concentration of Free Tropospheric Particles –Measured over Beijing in China and Nagoya in Japan–

A balloon-borne optical particle counter has been developed to measure particle size and number concentration in the free troposphere and the stratosphere by atmospheric research group of Solar Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University and engineering group of SIGMATEC Co. Ltd. The detailed description about the particle counter used here was already given in other paper (TSUCHIYA *et al.*, 1996), and

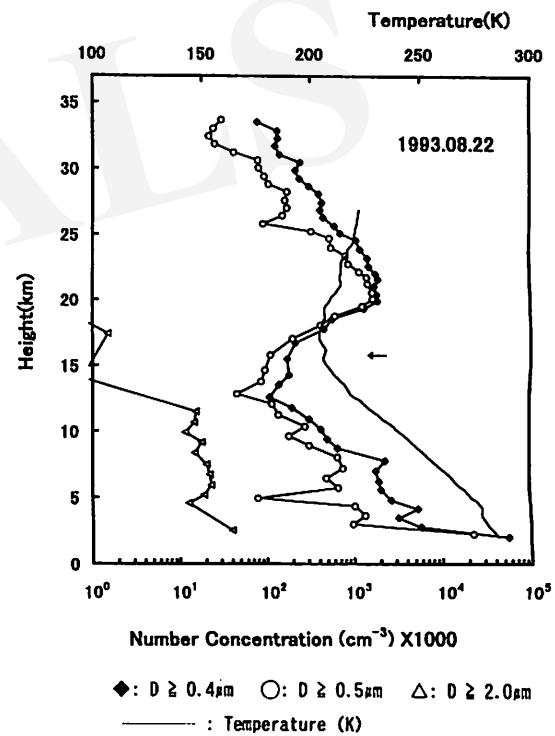


Fig. 2. Number concentrations of particles with diameters ( $D$ ) larger than 0.4, 0.5, and  $2.0 \mu\text{m}$  measured with balloon-borne particle counter at Xianghe, Beijing ( $40^\circ \text{N}, 116^\circ \text{E}$ ) on August 22, 1993 (IWASAKA *et al.*, 1997).

the outline of the counter is described here. The counter contains a halogen lamp or semiconductor laser as light source, light scattering chamber, photodiode as detector of the scattering light by the particles, an air pump used to introduce aerosols, electronics, and battery used for electric power source (Fig. 1).

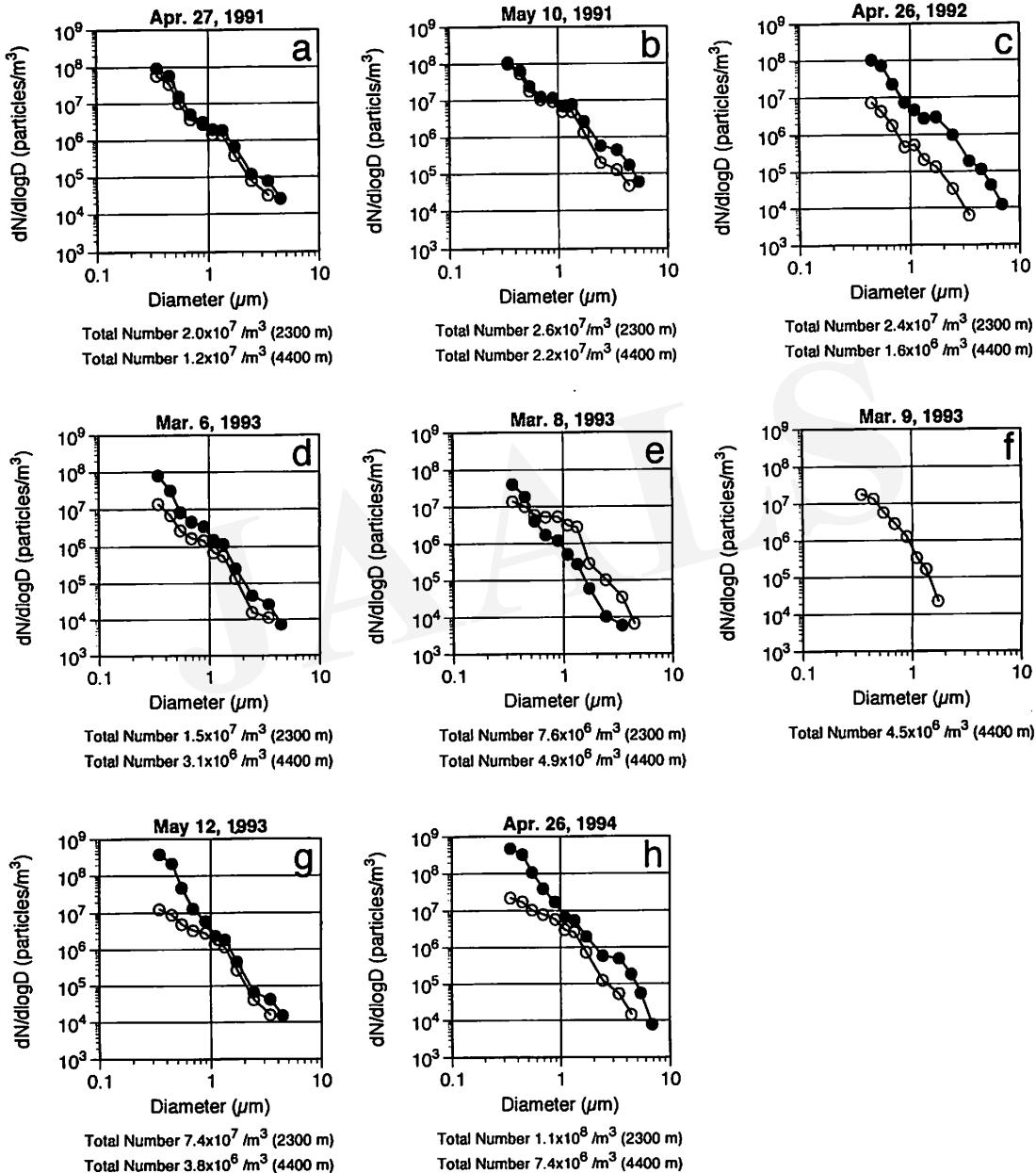


Fig. 3. Number-size distribution of atmospheric particles obtained from the aircraft measurements made over Nagoya ( $35.5^\circ \text{ N}$ ,  $136.5^\circ \text{ E}$ ) area in the springs of 1991, 1992, 1993, and 1994.

● and ○ correspond to the measurements at 2.2km and 4.4km altitudes, respectively.

Figure 2 shows some examples of balloon-borne measurements of aerosol concentration density made with the optical particle counter at Xianghe, Beijing ( $40^\circ \text{ N}$ ,  $116^\circ \text{ E}$ ) on August 22, 1993 and September 15, 1994. According to the temperature distribution measured, tropopause height was 15km and small temperature inversion

was observed near 13km. Noticeable concentration peak of the particles with diameters ( $D \geq 0.4$  and  $\geq 0.5\mu\text{m}$ ) is found at 22km and minimum of concentration at 13km in the measurements of 1993. The particles with  $D \geq 2.0\mu\text{m}$  decreased above about 12km.

A large difference in aerosol size distribution is expected between the region above and below about 13km, suggesting that stratospheric aerosols contained only few supermicron particles.

The peak concentration of particles with  $D \geq 0.4\mu\text{m}$  in the stratosphere (3 particles/cm<sup>3</sup> at 22km) was apparently larger than the values observed during the quiet stratospheric period without volcanic disturbance (e.g., HOFMANN *et al.*, 1975; HOFMANN and ROSEN, 1982; JAGER and HOFMANN, 1991; DESHELER *et al.*, 1992). According to those previous measurements, the number density of the particles with  $D \geq 0.3\mu\text{m}$  was in the range of 0.5-1.5 particles/cm<sup>3</sup> during the calm stratospheric period.

Below the tropopause number concentration of atmospheric particles showed large irregular variations. The concentration peak of aerosols with  $D \geq 0.4\mu\text{m}$  is found at heights of 8km and 5km, and others seems to well correlate to the peak of particles with  $D \geq 0.5\mu\text{m}$ . However, features in the profile of concentration of particles with  $D \geq 2.0\mu\text{m}$  is apparently different from those profiles. The concentration profiles of particles with  $D \geq 2.0\mu\text{m}$  seems to be more uniform than those of particles with  $D \geq 0.4$  and  $0.5\mu\text{m}$ . In the previous measurements made over the north American area (HOFMANN and ROSEN, 1982; ROSEN *et al.*, 1988), concentration of particles with  $D \geq 1.9\mu\text{m}$  appeared to be less uniform and increased from about 10-5 to 10-1 particles/cm<sup>3</sup> as the height decreased having large variations in the middle and lower troposphere.

Every spring, Asian dust particles are frequently transported to Japan by westerly prevailing winds. The haze produced by the dust-storm particles in Japan is called 'Kosa' in Japanese which literally means 'yellow sand'. The number-size distributions of aerosols measured with an aircraft-borne particle counter in the springs of 1991, 1992, 1993, and 1994 over Nagoya (35.5° N, 136.5° E) in Japan are shown (Figs. 3a-h). Most of the distributions in the

figures show small peaks in the range of coarse particle size (mostly 0.89, 1.0, or  $1.3\mu\text{m}$  diameter) at the altitudes of both 2.3 ( $\pm 0.3$ ) and 4.4 ( $\pm 0.3$ ) km, possibly due to soil and/or sea salt particles which are directly injected into the atmosphere from the local ground sources. In addition to those, soil particles transported from the Asian continent is, as described below, possible source of those coarse particles.

IWASAKA *et al.* (1988) suggested that weak KOSA events were frequently identified in the free troposphere, typically in the range of 2km to 6km, over Japan in spring from lidar measurement, even when KOSA events were not reported by the meteorological observatory.

KRISTAMENT *et al.* (1993) and LECHNER *et al.* (1989) observed the number-size distribution patterns of free tropospheric aerosols around New Zealand and over the southwestern Pacific. A comparison of the present results with their results shows the number concentrations in dN/dlogD (D=diameter) in the diameter range of 0.7-2.0μm over Japan in spring are 10-100 times higher than those of the marine atmospheric particles. Microscopic measurements of particles collected at 4.4km altitude, as described below, frequently showed existence of irregular shape particles, possibly soil particles, with a diameter  $\geq 10\mu\text{m}$ . Active transportation of soil particles from the Asian continent to Japan by westerly winds seems to clearly explain the discrepancy between the results here and those obtained in the marine atmosphere over the southwestern Pacific ocean.

Backward trajectory analysis of air masses, even though not shown here, indicates that most of the air mass came from the Asian continent to Japan within a few days in winter and spring (e.g., IWASAKA *et al.*, 1996).

### 3. Electron Microscopic Examinations of Individual Atmospheric Particles

Figure 4 shows the transmission electron microscope (TEM) imagery of a particle collected on thin calcium film in the flight at 4,350 m altitude on April 23, 1987 over Nagoya, Japan (IWASAKA *et al.*, 1988). It is worth noting that the TEM imagery showed a trace indicating the existence of water surrounding the electron-

dense particle (possibly one of soil particles transported from the Asian continent). A calcium thin film is very sensitive to water, and therefore the trace of water easily forms on calcium thin film surface. According to the lidar measurements on April 23, 1987 the aerosol layer, which was suggested to be Kosa particle layer on the basis of depolarization ratio measurements (description of depolarization ratio is given later), was found in the height of 3.0-4.5km over Nagoya. Therefore, the particle shown in Fig. 4 was suggested to be collected in the Kosa particle layer found in the lidar measurements. Measurements of meteorological sondes at Hamamastu Meteorological Observatory (about 60km southeast of Nagoya) showed that the relative humidity was about 75% in the vicinity of peak of the aerosol layer detected by a lidar on April 23, 1987.

This TEM imagery is very suggestive of the role of Kosa particles as chemical reaction sites of atmospheric gases. When Kosa particle coated by water travels in the atmosphere, various atmospheric gases, e.g., SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub>, may be absorbed and complex heterogeneous reactions can follow during the transport. If so, Kosa particles seem to play an important role as chemical reaction sites in the atmosphere and to act as carrier of the products by these chemical

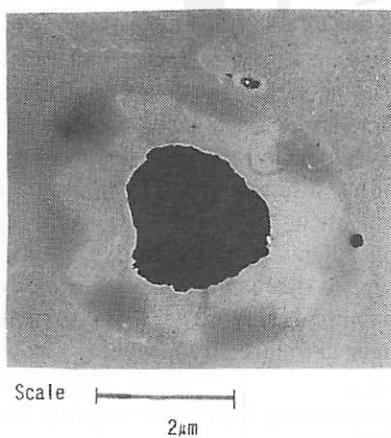


Fig. 4. Electron micrograph (Transmission electron microscopic imagery) of particles collected on calcium thin film. Particle collection was made on April 23, 1979 at a height of 4,350 m (over Nagoya (35.5° N, 135.5° E)). The trace of solution is observed around the electron dense particle (Kosa particle).

reactions (OKADA *et al.*, 1990).

From our recent balloon-borne measurements made at Xianghe (40° N, 114° E), Beijing, China in 1993 and 1994, soil particles with the sizes of supermicron were frequently identified in the continental free troposphere by electron microscopy. Some examples of the measurements with a scanning electron microscope (SEM) are

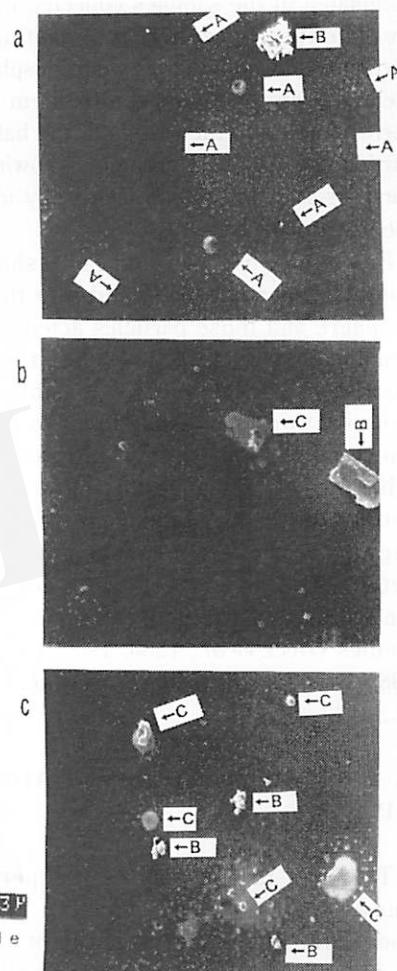


Fig. 5. Electron micrograph (Scanning electron microscopic imagery) of particles collected in the Asian continental atmosphere at Xianghe, Beijing (40° N, 116° E) on August 22, 1993 (IWASAKA *et al.*, 1997).

Upper panel (a): particles collected in 19.4-20.6km altitudes (the lower stratosphere).

Middle Panel (b): particles collected in 12.1-13.9km altitudes (the upper troposphere).

Lower panel (c): particles collected in 4.2-5.7km altitudes (the middle troposphere).

Raman-scattering lidar more recently becomes available for measurements of atmospheric aerosols and water vapor (Kwon *et al.*, 1997). The lidar data in Figs. 6a-d show a large difference in free tropospheric aerosol and water vapor (Kwon *et al.*, 1997). The lidar data in Figs. 6a-d show a large difference in free tropospheric aerosol and water vapor (Kwon *et al.*, 1997). The concentrations in April and August of 1994 (Kwon *et al.*, 1997). Concentration of free tropospheric aerosol was apparently higher in April (spring) than in August (summer), and vice versa, water vapor concentration in April and August of 1994 (Kwon *et al.*, 1997). Concentration of free tropospheric aerosol was apparently higher in April (spring) than in August (summer), and vice versa, water vapor

Condensation of atmospheric water vapor on soil particles, as described before, seems to be an important process controlling chemical reactions on the particle surface, since water condensed on the particle surface can easily activate reactions between Kosa materials and constituents in the surrounding atmosphere. Thus, simultaneous measurements of Kosa particles and atmospheric water vapor densities in the free troposphere are interesting to discuss the processes. However, simultaneous measurements of soil particles and atmospheric water vapor in the free troposphere is only few

The depolarized component in backscattering light from Rayleigh scattering of atmospheric molecules is extremely low (only 0.02–0.04) (e.g., Iwasaka, 1986). However, the depolarized component of backscattering light from nonspherical particles is noticeably high, and therefore it is easily to detect nonspherical particles from polarization ratio. According to field studies of Asian dust storm (Iwasaka *et al.*, 1986) and volcanic ash dust storm (Hayashida *et al.*, 1984), the backscatter particles in the disturbed stratosphere by an eruption (Hayashida *et al.*, 1984), the backscatter particles showed large depolarization ratios (0.05 and more) than those by those nonspherical particles (0.02–0.04).

The value of  $[R - I] = \rho_2 / \rho_1$  can be recognized as mixing ratio of particular matter measured by chemical tracer technique.

where  $f_1$  and  $f_2$  are backscatter coefficients of atmospheric molecules and aerosol particles, respectively; and total backscattering coefficient of molecular aerosols both contains both components of molecules and aerosols, surface of parallel and perpendicular plane of backscatter light to the optical axis.

$$\delta = \text{Depolarization Ratio} = \beta_1 / [\beta_1 + \beta_2] \quad (2)$$

The lidar measurements was performed to know temporal and spatial changes in concentration and nonsphericity of atmospheric particles at Nagoya from scattering ratio (defined by eq. (1)) and depolarization ratio (defined by eq. (2)). From lidar measurements it is possible to know free tropospheric particle concentration and nonsphericity with high vertical resolution (typically order of meter) at high repetition rate (typically ~ 10 minutes to obtain a vertical profile). The scattering ratio and depolarization ratio are defined by following relations:

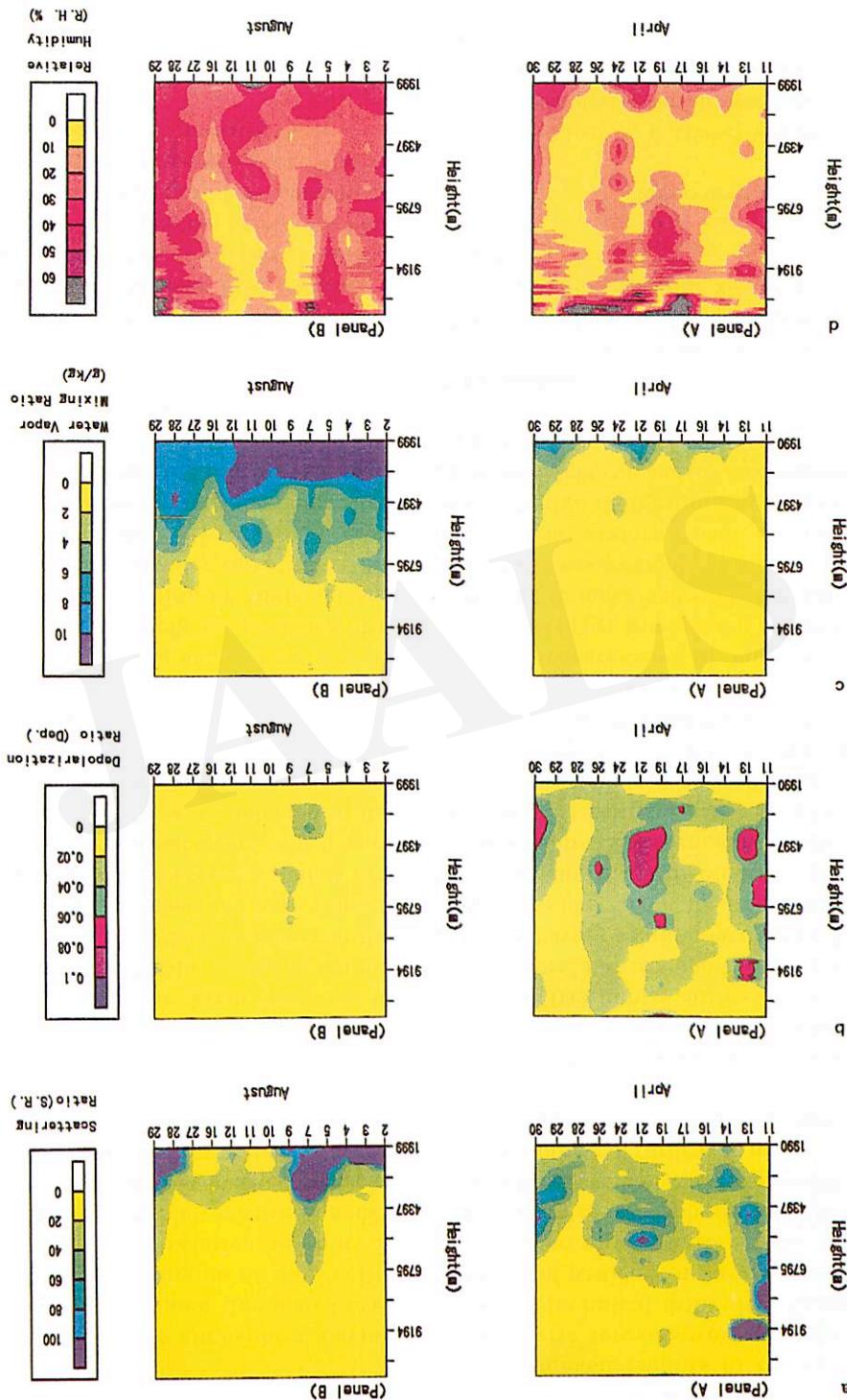
4. Lidar Measurements of Atmospheric Particles

From the troposphere, many soil particles diffused into the free troposphere and those particles acted as chemical reagent sites in the atmosphere, it is suggested that those particles make possible important chemical cycle of sulfate, nitrate, metals and others and to radiative forcing of atmospheric aerosols in east Asia and the western Pacific region. However, measurements were not sufficient to understand those aerosol effects since the measurements described only case studies (Duce *et al.*, 1980, 1983; Uematsu *et al.*, 1983; Betzer *et al.*, 1988; Okada *et al.*, 1990; Gao *et al.*, 1992).

shown in Fig. 5. The typical shape of sulfuric acid droplets which exhibit satellite droplet structure on carbon film are frequently found in the samples of stratospheric aerosol particles (see particles (A) in Fig. 5a). Irregular shaped particles (B), possibly soil particles and fuzzy particles (see particles (C), sometimes they have small dots around the central material and middle troposphere, suggesting that soil particles diffused into the free troposphere. Those particles correspond to the results of the balloon-borne electron microscopic results seem to be well correlated counter measurements showing that the particle count D =  $2.0 \mu\text{m}$  frequency identified in particles with  $D = 2.0 \mu\text{m}$  frequency that the

Scattering ratio and depolarization ratio are approximately correspondingly to mass mixing ratio and relative humidity measured in April and August of 1994 at Nagoya, Japan.  
 and relative humidity measured in April and August of 1994 at Nagoya, Japan.  
 of atmospheric particles, respectively (Kwon *et al.*, 1997).

Fig. 6. Time-height cross section of scattering ratios (a), depolarization ratio (b), water vapor mixing ratio (g/kg) (c),



vapor concentration in August, higher than in April.

In summer, the marine atmosphere having large amounts of water vapor dominates over Japan according to expansion of the Pacific anticyclone, and higher relative humidity is frequently observed. The high relative humidity in summer, shown in Fig. 6, seems to correspond well to such general trend in activities of the Pacific anticyclone. As suggested by many investigators (e.g., DUCE *et al.*, 1980; IWASAKA *et al.*, 1983; UEMATSU *et al.*, 1983; ARAO and ISHIZAKA, 1986; LEINEN *et al.*, 1994), westerly wind transported lots of dust particles from the Asian continent to Korea, Japan, and the Pacific Ocean in spring. High concentrations of particulate matter in the spring free troposphere observed here showed good agreement with those previous studies, and fine structures in the aerosol layers, which were not measured previously, were detected in the present lidar measurements.

Comparing the water vapor content in April and August, the relative humidity in April was apparently lower than the values in August. Only from the present lidar measurements, it is impossible to conduct directly the possibility that dust particles have solution on their surface through condensation of water vapor under the high relative humidity. However, recent laboratory experiments (private communication of SAKAMOTO, 1996) suggested that surface reaction of Kosa particles became rapidly active according to increase in relative humidity, and the particles actively absorbed SO<sub>x</sub> under the condition of relative humidity  $\geq 30\%$ .

It is important to discuss the history of relative humidity of air mass containing Kosa particles. If the air mass containing lots of soil particles meets high relative-humidity condition before reaching the lidar site, those particle can have solution on their surface and keep it even after relative humidity of the air-mass becomes low.

## 5. Conclusions

Aerosol particle size, concentration and features have been intensively investigated in east Asia and the western Pacific region in previous researches. Most of those measurements were carried out on the basis of collection of

atmospheric aerosols in the boundary atmosphere and the measurements of behavior of free tropospheric aerosols were extremely limited owing to technical difficulty. Knowledge on behavior of particles in the free troposphere is essential to obtain better understanding of contribution of atmospheric particles to global geochemical cycle of chemical constituents and radiative forcing of particulate matter.

The measurements of free tropospheric aerosol particles made in Japan (aircraft-borne and ground-based lidar measurements) and in China (balloon-borne measurements) showed that soil particles frequently diffused into the free troposphere and transported over Japan. Soil particles having solution layer over the particle surface was observed in the free troposphere over Japan on the basis of electron microscopic examinations. Existence of such particles suggests that particles can have active reaction site on their surface and affect geochemical budget of atmospheric constituents such as SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in east Asia and the western Pacific area through the surface reactions.

Since measurements of dust particles in the middle and upper troposphere are very limited, it is desired to make balloon-borne, aircraft-borne and lidar measurements at many points in east Asia and the western Pacific region in order to obtain better understanding of effect of soil particles on climate and/or environment in these regions.

## Acknowledgment

This research was financially supported by Japan Ministry of Education, Science, Sports and Culture (Grant-in-Aid for Scientific Research 07554078 and 09558067).

## References

- ARAO, K. and ISHIZAKA, Y. (1986): Volume and mass of yellow sand dust in the air over Japan as estimated from atmospheric turbidity. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 64: 79-94.
- BETZER, P.R., CARDER, K.L., COSTELLO, D.K., YOUNG, R.W., DUCE, R.A., MERRILL, J.T., TINDALE, N.W., UEMATSU, M. and FELY, R.A. (1988): Long range transport of giant mineral aerosol particles. *Nature*, 336: 568-571.
- BRAATEN, D.C. and CAHILL, T.A. (1986): Size and com-

- position of Asian dust transported to Hawaii. *Atmos. Environ.*, **20**: 1105-1109.
- DESHLER, T.D., HOFMANN, J., JOHNSON, B.J. and ROZIER, W.R. (1992): Balloonborne measurements of Pinatubo aerosol size distribution and volatility at Laramie, Wyoming during the summer of 1992. *Geophys. Res. Lett.*, **19**: 199-202.
- DUCE, R.A., UNNI, C.K., RAY, B.J., PROSPERO, J.M. and MERRILL, J.T. (1980): Long-range transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: temporal variability. *Science*, **209**: 1522-1524.
- DUCE, R.A., ARIMOTO, R., RAY, B.J., UNNI, C.K. and HARDER, P.J. (1983): Atmospheric trace elements at Enewetak atoll: 1, concentrations, sources, and temporal variability. *J. Geophys. Res.*, **88**: 5321-5342.
- GAO, Y., ARIMOTO, R., ZHOU, M.Y., MERRILL, J.T. and DUCE, R.A. (1992): Relationships between the dust concentrations over eastern Asia and the remote North Pacific. *J. Geophys. Res.*, **97**: 9867-9872.
- HAYASHIDA, S., KOBAYASHI, A. and IWASAKA, Y. (1984): Lidar measurements of stratospheric aerosol content and depolarization ratio after the eruption of volcano El Chichon: Measurements at Nagoya, Japan. *Geof. Int.*, **23**: 277-288.
- HOFMANN, D.J. and ROSEN, J.M. (1982): Balloon-borne observations of stratospheric aerosols and condensation nuclei during the year following the Mt. St. Helens eruption. *J. Geophys. Res.*, **67**: 11039-11061.
- HOFMANN, D.J., ROSEN, J.M., PEPIN, T.J. and PINNICK, R.G. (1975): Stratospheric aerosol measurements I: Time variations at northern midlatitudes. *J. Atmos. Sci.*, **32**: 1446-1456.
- HOUGHTON, J.T., MEIRA FILHO, L.G., CALLANDER, B.A., HARRIS, N., KATTENBERG, A. and MASKELL, K. eds. (1996): *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. IPCC, Cambridge University Press.
- IKEGAMI, M., OKADA, K., ZAIZEN, Y. and MAKINO, Y. (1993): Aerosol particles in the middle troposphere over the northwestern Pacific. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **71**: 517-527.
- IWASAKA, Y. (1986): Measurements of depolarization of stratospheric particles by lidar - A case study on disturbed stratospheric aerosol layer by the volcanic eruption of Mt. El Chichon. *J. Geomag. Geoelectr.*, **38**: 729-740.
- IWASAKA, Y., MINOURA, H. and NAGAYA, K. (1983): The transport and spacial scale of Asian dust-storm clouds: A case study of the dust-storm event of April 1979. *Tellus*, **35B**: 189-196.
- IWASAKA, Y., YAMATO, Y., IMASU, R. and ONO, A. (1988): Transport of Asian dust (KOSA) particles; importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles. *Tellus*, **40B**: 494-503.
- IWASAKA, Y., MORI, I., NAGATANI, M., NAKADA, H., MATSUMAGA, K. and NAKANE, H. (1996): Size distribution of aerosol particles in the free troposphere: Aircraft measurements in the spring of 1991-1994 over Japan. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, **7**: 43-60.
- IWASAKA, Y., OKUHARA, Y., WATANABE, M., HAYASHI, M., SHI, G., GONG, Z. and ZHOU, Z. (1997): Balloon-borne measurements of atmospheric particles at Beijing, China in summer of 1993: Morphology, size and concentration. *J. Aerosol Res. Japan*, **12**: 320-326.
- JAGER, H. and HOFMANN, D. (1991): Midlatitude lidar backscatter to mass, area, and extinction conversion model based on in situ aerosol measurements from 1980 to 1987. *Appl. Optics*, **30**: 127-138.
- KIEHL, J.T. and BRIEGLEB, B.P. (1993): The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases. *Science*, **260**: 311-314.
- KIEHL, J.T. and RODHE, H. (1995): Modeling geographical and seasonal forcing due to aerosols. In CHARLSON, R.J. and HEINTZENBERG, J. eds., *Aerosol Forcing of Climate*, John Wiley Chichester, 281-296.
- KRISTAMENT, I.S., LILEY, J.B. and HARVEY, M.J. (1993): Aerosol variability in the vertical in the southwest Pacific. *J. Geophys. Res.*, **98**: 7129-7139.
- KWON, S.-A., IWASAKA, Y., SHIBATA, T. and SAKAI, T. (1997): Vertical distribution of atmospheric particles and water vapor densities in the free troposphere: Lidar measurement in spring and summer in Nagoya, Japan. *Atmos. Environ.*, **31**: 1459-1465.
- LECHNER, I.S., FISHER, G.W., LARSEN, G.W., HARVEY, M.J. and KNOBBEN, R.A. (1989): Aerosol size distributions in the Southwest Pacific. *J. Geophys. Res.*, **94**: 14893-14903.
- LEINEN, M., PROSPERO, J.M., ARNOLD, E. and BLANK, M. (1994): Minerology of aeolian dust reaching the North Pacific Ocean 1. Sampling and analysis. *J. Geophys. Res.*, **99**: 21017-21023.
- NIIMURA, N., OKADA, K., FAN, X.-B., KAI, K., ARAO, K. and SHI, G.-Y. (1994): A method for the identification of Asian-dust storm particles mixed internally with sea salt. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **72**: 777-784.
- OKADA, K., NARUSE, H., TANAKA, T., NEMOTO, O., IWASAKA, Y., WU, P.-M., ONO, A., DUCE, R.A., UEMATSU, M. and MERRILL, J.T. (1990): X-ray spectrometry of individual asian dust-storm particles over the Japanese islands and the north Pacific Ocean. *Atmos. Environ.*, **24A**: 1369-1378.
- ROSEN, J.M., HOFMANN, J.D. and HARDER, J.W. (1988):

- Aerosol measurements in the winter/spring antarctic stratosphere 2. Impact on polar stratospheric cloud theories. *J. Geophys. Res.*, **93**: 671-686.
- TSUCHIYA, M., KASAI, T., HAYASHI, M., IWASAKA, Y. and TAKAMI, K. (1996): Development of aerosol sonde for observation balloon. *Trans. SICE*, **33**: 290-296. (in Japanese with English abstract)
- UEMATSU, M., DUCE, R.A., MERILL, J.M. and McDONALD, R.L. (1983): Transport of mineral aerosol over the north Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, **88**: 5342-5352.

## アジア大陸大気中のエアロゾル粒子

—気球、航空機およびライダーによる日本および中国における観測—

岩坂泰信<sup>1)</sup>・林 政彦<sup>1)</sup>・森 育子<sup>4)</sup>・権 成顔<sup>1)</sup>・松永捷司<sup>1)</sup>・石 廣玉<sup>2)</sup>・  
周 軍<sup>3)</sup>・柴田 隆<sup>1)</sup>・西川雅高<sup>4)</sup>・奥原靖彦<sup>1)</sup>・原 圭一郎<sup>1)</sup>・長谷正博<sup>1)</sup>・  
渡辺征春<sup>1)</sup>・金 潤信<sup>5)</sup>・龜 知本<sup>3)</sup>

中国および日本で行なわれた大気エアロゾルの観測（粒子サイズ、粒子の数密度、あるいは粒子形状）では、大陸大気中にしばしば土壤粒子が存在していることがわかつた。中国で実施された大気球観測では、土壤粒子が境界層大気の高度をこえて自由対流圏へ拡散していることが示されているし、日本で行なわれた航空機観測では西風が卓越する時期にはしばしばそれらの粒子が日本へ運ばれていることがわかつている。

<sup>1)</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所

(受付：1997年11月7日、受理：1997年12月10日)

<sup>2)</sup> 中国気象局国家気候センター

<sup>3)</sup> 中国科学院安徽光学精密機械研究所

<sup>4)</sup> 環境庁環境研究所

<sup>5)</sup> 漢陽大学大学院環境科学研究科

# 中国蘭州における対流圏エアロゾルのライダー観測

安井元昭\*・水谷耕平\*・板部敏和\*・高部政雄\*・周 紀俠\*\*・  
凌 裕泉\*\*・劉 立超\*\*

## 1. はじめに

黄砂として知られている中国砂漠地域を起源とする砂塵粒子は、それ自身による光学的、環境的な影響だけでなく、水晶核として働くことによる降水機構への効果等も指摘されている(田中, 1987)。これらの砂塵粒子は長距離輸送され、ハワイ上空でもその存在が確認されている(PARRINGTON, et al., 1983)。このような砂塵粒子の気象、気候への影響を調べるために、その源である砂漠で上空へ輸送される砂塵の量を観測することも重要である。通信総合研究所と蘭州沙漠研究所は、中国蘭州の沙波頭(37° 27' N, 104° 57' E)(図1)にエアロゾルライダーを設置し、1994年4月から継続して観測を行っている。ここでは、1996年の4月から11月の期間に観測された結果を紹介する。

## 2. 観測と解析

沙波頭に設置したライダーの概要を表1に示す。送信波としてNd: YAGレーザーの第二高調波(波長532nm)を用い、望遠鏡で受信された後方散乱光を平行偏光成分

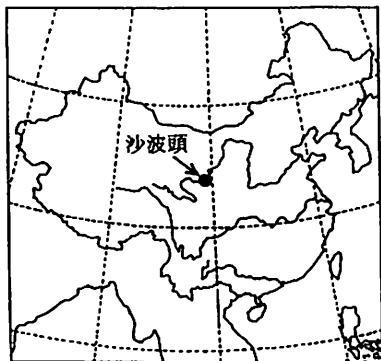


図1. 観測地、沙波頭の位置。

(P成分)、垂直偏光成分(S成分)にわけてフォトマルで検出する構造になっている。

ここで、ライダー観測データの解析でよく用いられる量について簡単に説明しておく。ライダーによる観測データの解析では通常、散乱体の光学的な量を示す物理量として後方散乱係数( $\beta_a(z)$ )を求め、それによって量的な議論を行う。この後方散乱係数と受信シグナル( $P(z)$ )とは次のライダーフォン程式で関係付けられる。

$$P(z) = ECz^{-3} [\beta_a(z) + \beta_m(z)] T_a^2(z) T_m^2(z) \quad (1)$$

$$T_a(z) = \exp \left[ - \int_0^z \sigma_a(z) dz \right] \quad (2)$$

$$T_m(z) = \exp \left[ - \int_0^z \sigma_m(z) dz \right] \quad (3)$$

ただし、

$z$ : 高度

$P(z)$ : 高度 $z$ からの受信信号

$E$ : 送信レーザーパルスの出力に関する定数

$C$ : 受信光学系に関する定数

$\beta_a(z)$ : エアロゾルの後方散乱係数

$\beta_m(z)$ : 大気分子の後方散乱係数

$T_a(z)$ : エアロゾルの透過率

$T_m(z)$ : 大気分子の透過率

$\sigma_a(z)$ : エアロゾルの消散係数

$\sigma_m(z)$ : 大気分子の消散係数

また、エアロゾルの大気に対する光学的な混合比を示す量として、次式で定義される散乱比( $R(z)$ )という量もよく用いられる。

$$R(z) = \frac{\beta_a(z) + \beta_m(z)}{\beta_m(z)} \quad (4)$$

さらに、エアロゾルが球形であるか、非球形であるかを判別するための指標として、次式で定義される偏光解消度( $\delta(z)$ )を用いる。偏光解消度が大きいほど非球

\*郵政省通信総合研究所

\*\*中国科学院蘭州沙漠研究所

表1. 沙波頭に設置したライダーの概要.

## 通信系

Laser	Nd: YAG Laser
Wavelength	532nm (SHG)
Output	150mJ / pulse
Repetition rate	10Hz
Beam divergence	0.1 mrad
Coolant	Laser head :water Power supply :air

## 受信系

Telescope	28cm (Diameter) Schmidt Cassegrain
Detector	Photomultiplier Hamamatsu H957-08 (April 1994 - September 1996) Hamamatsu R3234 (September 1996 - )

形粒子の存在の効果が大きい。

$$\delta(z) = \frac{I_s(z)}{I_p(z)} \quad (5)$$

$I_s(z)$ ,  $I_p(z)$  はそれぞれ、受信された垂直 (S) 偏光成分の強度、平行 (P) 偏光成分の強度である。

観測は4月から11月までの8か月間行い、各月に約1週間の期間を設定して観測を行った。各観測期間中の晴天時には昼夜を問わずに連続観測を行い、今回の解析では午前6時から午後6時までを昼間、午後6時から午前6時までを夜間として分けて解析した。

## 3. 解析結果

1996年4月、7月、9月、11月に観測された散乱比の鉛直分布を図2 (a) ~ (d) に示す。図に見られるように、どの場合にも最下層にエアロゾル濃度の濃い層が存在していた。さらに各プロファイルを比較してみると、春から夏の時期と秋から冬にかけての時期とでは、その特徴が大きく異なることがわかる。即ち、図 (a) (4月) と図 (b) (7月) の時期のエアロゾルは地表から5, 6kmの高度にわたるかなり厚い層を形成していたのに対し、図 (c) (9月)、図 (d) (11月) の時期のエアロゾル粒子層の厚さは薄く、その主要部分は地表から高度2, 3km付近までの間に分布していた。これらの特徴をさらにはつきりと確認するために1.5km~6kmの間に存在するエアロゾルによる後方散乱係数 ( $\beta_a(z)$ ) の積算値 (IBC : Integrated Backscattering Coefficient) を計算し、季節による変動を調べた。後方散乱係数の積算値の変化の形は気柱内のエアロゾル粒子の質量の積算値の変化の形とほぼ相似な特徴を示すので、ここで見積もったIBC

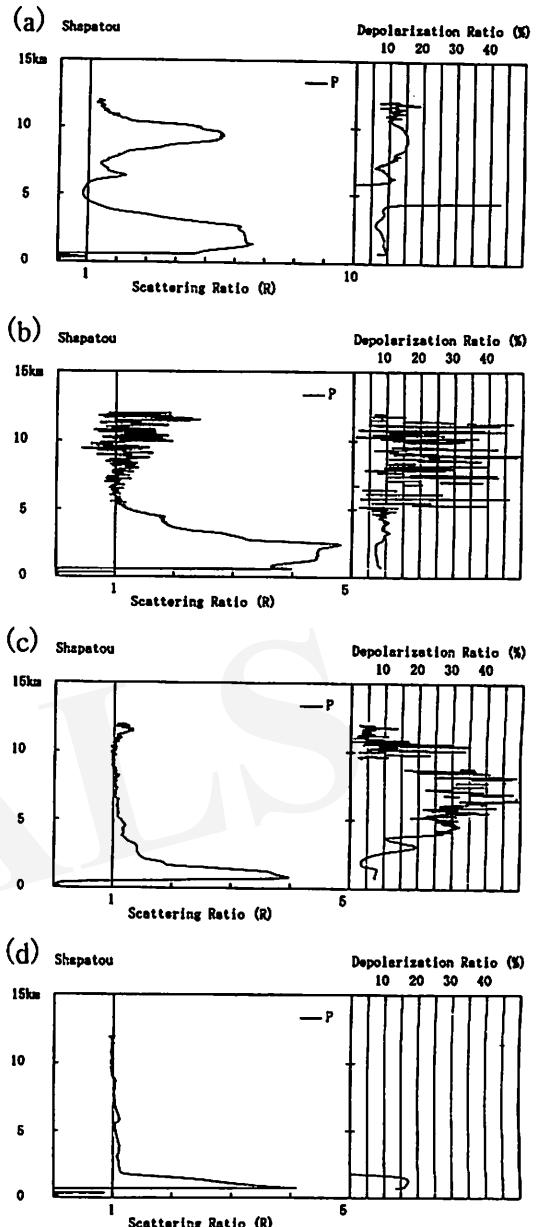


図2. 1996年に観測された散乱比 (R), 偏光解消度の例。

(a) 4月7日, (b) 7月17日, (c) 9月26日, (d) 11月21日

の季節的な特徴は、1.5kmから6kmの間に含まれるエアロゾルの全質量の季節変化の特徴を近似的にあらわしているものと考えることができる。積算の下限を1.5kmとしたことには、ライダーによる観測方法の性質に起因する理由がある。ライダーでは送信レーザービームと受信望遠鏡の視野が完全にオーバーラップする範囲の観測を行うことができるのであるが、観測に用いたライダーに

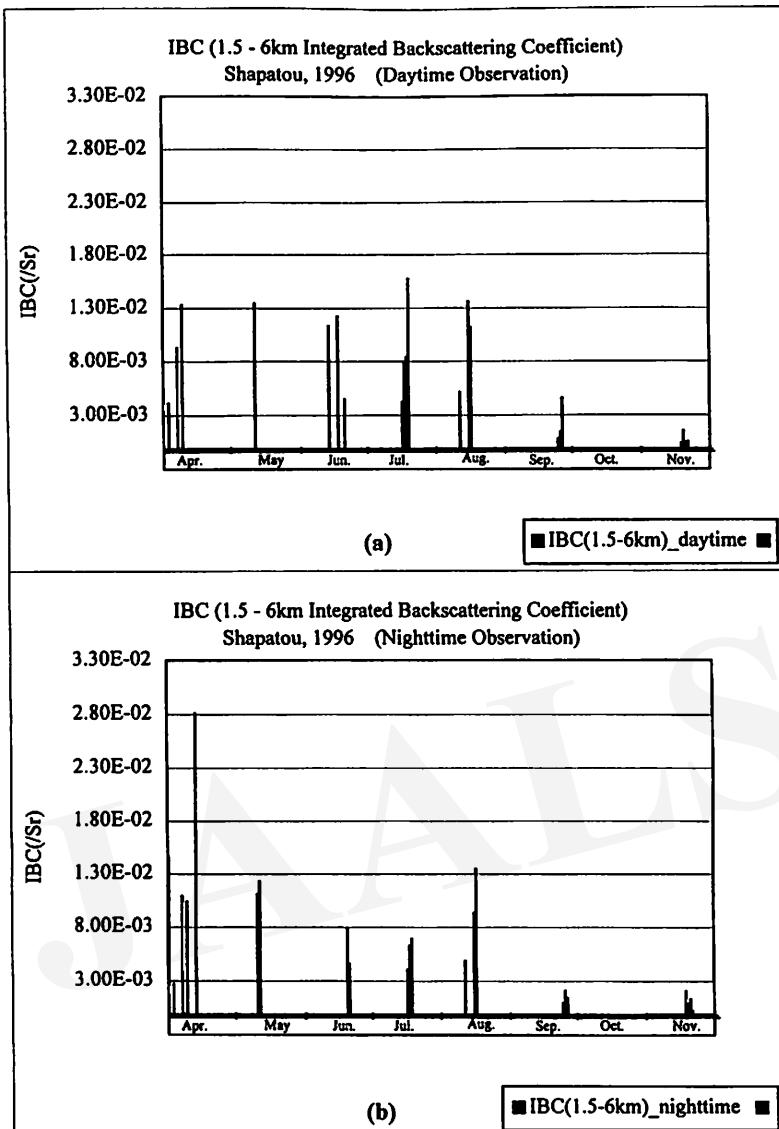


図3. 高度1.5kmから6kmの間のエアロゾルの後方散乱係数( $\beta_a$ )の積算値。

(a) 昼間(午前6時から午後6時), (b) 夜間(午後6時から午前6時)

おけるオーバーラップ高度は約1.5km以上で、それよりも下層のエアロゾルによる散乱光は完全には受信されない。このため、1.5km以下のエアロゾル層に関する正確な情報は得られない。それよりも上層のデータに関する議論のみが可能である。図3(a)は昼間の観測結果、(b)は夜間の観測結果についてのIBCを観測日毎に表示したものである。4月の昼間のエアロゾルが夜に比べてやや多いことを除けば、昼、夜の特徴に大きな違いは無く、どちらにおいても春から夏にかけてエアロゾル

量の多い時期が続き、秋から冬にかけてエアロゾル量の少ない時期が続く傾向が認められた。

#### 4. 結論

ここで示した観測結果はライダーのみによる観測結果なので、データは晴天時のものに限られ、雲や非常に大きな擾乱に伴う極めて光学的厚さの大きな層が存在する時のデータは含まれていない。また、地表から1.5km付

近までの観測データも無い。従つて、この結果が中国砂漠域の大気中砂塵粒子の量に関する特徴の全てを示しているわけではない。しかしながら、今回の結果は非常に興味深い示唆を含んでいる。1.5kmから6kmの間の層内で春季に多量のエアロゾルの存在が認められたが、夏期にかなり多くの量のエアロゾルが存在することも確認された。つまり、春から夏にかけてエアロゾルの多い時期が続き、秋から冬にかけてエアロゾルの少ない時期が続く傾向が今回の解析結果の特徴である。これまでの多くの研究者たちによる報告のほとんどは、エアロゾル濃度が春に極大になり、夏に極小になるというものであった(MERRILL *et al.*, 1989; 田中, 1987)。また、ZAIZEN *et al.* (1995) はオプティカルパーティクルカウンターを用いて中国の地表でのエアロゾル濃度の季節変化を観測し、半径1.5ミクロン以上の大粒子に関しては春に大きな極大、夏に大きな極小があり、また半径が1.5ミクロンよりも小さい粒子は冬に最大濃度になっていたことを報告した。彼らの地表付近のエアロゾル濃度に関する観測結果と、我々のライダーによる高度1.5km以上のエアロゾル濃度の観測結果の違いは、1.5kmよりも下層にある境界層内のエアロゾルの振る舞いと、それよりも上層の領域でのエアロゾルの振る舞いの違いを示しているものとも考えられる。

擾乱が起きる頻度が最も高いといわれている春期でも晴天時のエアロゾル量は夏季のものと極端には違わないことから、春期にライダー観測ができないほどの大きな擾乱による多量の砂塵粒子巻き上げが起きたとしても、巻き上げられた砂塵粒子がその場所の上空に留まる時間スケールは短く、ライダー観測が行えるような穏やかな状態に落ち着いた時には1.5kmより上層の大気中の砂塵粒子量は夏季の平均的な量程度に収まっていたということも考えられる。また、逆に、夏季の砂塵粒子の層が春のものに匹敵するほど厚いことから、夏季にも効果的な

砂塵巻き上げのイベントが起きていた可能性も考えられる。実際、夏季の砂塵巻き上げの可能性については、PARUNGO *et al.* (1994) の解析結果の中にも認められる。彼らはゴビ砂漠地域におけるダストストームの月ごとの頻度を解析し、4月、5月に極大(月に5回程度)、9月から1月の時期に極小(月に1回程度)となる傾向があることを示し、夏季にも月に2~3回の頻度でダストストームが起きていたことを示した。

我々の観測の場合、境界層内のエアロゾルに関する情報が無く、大きな擾乱時の観測結果も無いので、これらの部分に関しては推測の域を出ない。ライダー以外の観測手段も加えることで観測の幅を広げることが必要である。現時点ではデータ量が十分ではなく、統計的に深い議論を行うことは難しいので、本文では可能性を示唆するだけにとどめておきたい。現地での観測は現在も続いている、データが蓄積されつつあるので、統計的なデータとしても信頼性の高いものになっていくものと期待している。

#### 引用文献

- 田中豊顕 (1987): 氷晶核としての黄砂. 「天気」 34: 189-194.  
 MERRILL, J.T., UEMATSU, M. and BLECK, R. (1989): Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific. *J. Geophys. Res.*, 94: 8584-8598.  
 PARRINGTON, J.R., ZOLLER, W.H. and ARAS, N.K. (1983): Asian dust: Seasonal transport to the Hawaiian Islands. *Science*, 220: 195-197.  
 PARUNGO, F., LI, Z., LI, X., YANG, D. and HARRIS, J. (1994): Gobi dust storms and The Great Green Wall. *Geophys. Res. Lett.*, 21: 999-1002.  
 ZAIZEN, Y., IKEGAMI, M., OKADA, K. and MAKINO, Y. (1995): Aerosol concentration observed at Zhangye in China. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 73: 891-897.

## Lidar Observation of Tropospheric Aerosols at Lanzhou in China

Motoaki YASUI\*, Kohei MIZUTANI\*, Toshikazu ITABE\*, Jixia ZHOU\*\*, Yuquan LING\*\* and Lichou LIU\*\*

Dust particles originated from desert areas in the Chinese Continent affect the climate and the weather in the Asian and the Pacific regions. To investigate transport mechanisms of the dust particles, it is important to measure quantities of the dusts blown into the atmosphere in the desert areas. Communications Research Laboratory and Institute of Desert Research constructed an aerosol lidar at Shapatou ( $37^{\circ} 27' N$ ,  $104^{\circ} 57' E$ ) in China. Measurements of the atmospheric aerosols have been performed every year since 1994. In the present paper, the results which were obtained in 1996 are shown. Column density of the aerosol particles was large in the spring and the summer, and was small in the autumn and the winter. The results suggest that some effective sweeping mechanisms of the dust particles into the atmosphere occurred in the summer as well as in the spring.

**Key Words:** Lidar, Aerosol, China, Dust, Observation

---

\*Communications Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications. 4-2-1, Nukui-kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan.

\*\*Institute of Desert Research, Chinese Academy of Science. Lanzhou 730000, People's Republic of China.

(Received, November 17, 1997; Accepted, December 10, 1997)

## 黄土高原の土壤浸食とダスト中の窒素化合物について

井伊博行\*・平田健正\*

### 1. はじめに

中国におけるダストストームのダストの供給地は、タクラマン砂漠、ゴビ砂漠などの砂漠地域や黄土高原が挙げられる。黄土はその西にある砂漠地帯から風で運ばれた風送起源の堆積物である。黄土地帯では、耕作、放牧、乾燥化などにより表面の植被が破壊され、雨水による土壤浸食が起こり、下流域で土石流や洪水が発生しやすくなっている。また、植被が破壊された黄土高原では風による浸食も起こり、ダストの供給源にもなっている。

近年、酸性雨による被害が世界各国で発生している。その原因物質は、硫黄化合物や窒素化合物である。硫黄化合物や窒素化合物による土壤水や地下水の酸化化の一部は、肥料によってもたらされており、ダスト中に風

食によって運ばれた耕作土壤が含まれていれば、降水の酸化化や風食による窒素化合物の物質移動が考えられる。ここでは、この黄土高原の風による土壤浸食とダストについて、窒素循環の観点から考察する。

### 2. 黄土高原の土壤浸食

黄土高原の黄土は、100万年から数万年前に堆積した固結度の低いシルト分を主体とする砂漠起源の風成堆積物で、水や風による浸食を受けやすい。また、黄土は蘭州から西安の東方まで黄河の南側を中心に広い範囲に分布し、その厚さは100m以上にも達する。そのため、冬季の強い季節風によって黄土は容易に浸食され、まきあげられた黄土は、ダストの重要な供給源になっているものと考えられる。

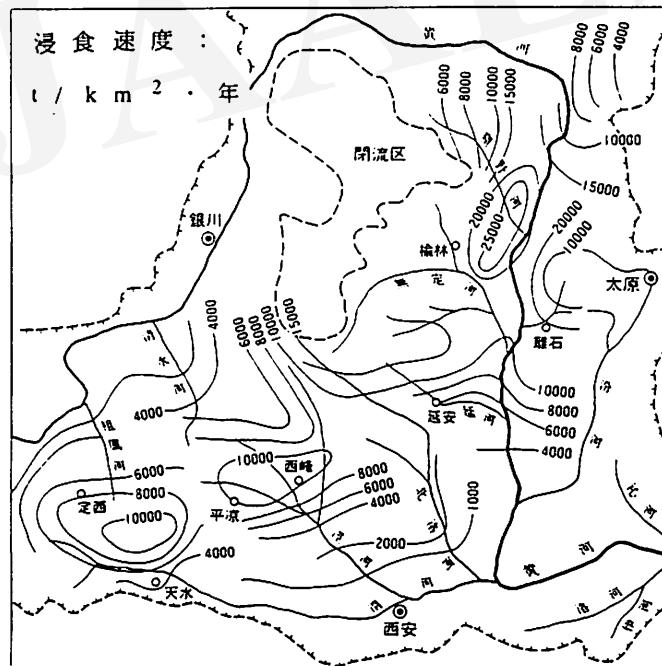


図1. 黄河中流域の土壤浸食速度 (芦田, 1989).

図1に黄河中流域の土壤浸食速度（芦田, 1989）を示す。また、1994年に黄土高原を調査した時に写した土壤浸食の状況を図2に示す。図1の黄河南側に分布する土壤浸食量の多い場所は、黄土地帯である。写真を撮影した場所は、榆林北東の土壤浸食量が $20,000\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{年}$ に達する神木付近で、山の頂上付近は平坦な地形で、耕作地として利用されている。しかしながら、図に示すように近年、ガリの発達と共に土壤浸食が進み、農耕地が減少している。これらの土壤浸食によって、黄河上・中流地区において1年間に流出した窒素・リン・カリ肥料はあわせて3,000万tに達する。大部分の耕地は水・土、肥料とともに流出した土地になってしまい、そのため山腹耕地の農作物生産高は平年300～380kg/haしかない。特に土壤浸食速度が大きい神木地域では、年降水量が400mm程度で、冬から春は主に風によって、夏から秋は雨によって土壤浸食が起こっている。風による土壤の浸食量は年平均深さ2cmで、全体では $30,000\text{t}/\text{km}^2$ に達する。年平均風速は $2.5 \sim 2.7\text{m/sec}$ で、最大風速は月平均で10から15m/secである（WANG *et al.*, 1993）。

近年加速している土壤浸食の原因是、自然要因だけではない。燃料確保のための自然林の伐採や自然林から農耕地への開墾によって、土壤が浸食されやすくなっている。自然林は、植物体によって土壤を常に保護しているが、農耕地では休耕期間に植物の被覆が失われ、土壤が直接露出する。特に、冬は裸地なった耕作地から風によって土壤が失われる。また、この地域では図3に示すように炭田開発が行われていることも、土壤浸食を加速させている。露天掘り跡や廃石置き場などが植林されずに放置されると、土壤浸食が起こる。降水量が少なく元々植生の乏しいところでは、自然林が一度破壊され、そこから土壤が流出すると植物がなかなか生えず、そこから広い範囲に浸食が拡がっていく。

神木地域の土壤の化学組成は、表層から深さ2mまで



図2. 黄土高原の土壤浸食。

の範囲では全窒素量が0.01から0.06%含まれており、多くは、0.01から0.03%である（Jia *et al.*, 1993）。このように、黄土高原では窒素を含む土壤が多量に風食によって失われている。これらの土壤と共に窒素も日本に運ばれているものと考えられる。

### 3. 酸性雨

1960年代から酸性雨による被害が北欧諸国から始まり、最近、その被害がアジア諸国にも拡がっている。酸性雨による被害は、水棲動物の死滅、森林の衰退や目や皮膚の痛みなどである（日本化学会, 1990）。日本においても、中国での鉱工業活動と雨水の硫酸イオン濃度やその硫黄同位体比との関連研究がなされ、日本各地の硫酸イオンの起源が推察されている（柳沢ほか, 1994）。硝酸も酸性雨の原因物質の1つであり、工場や自動車などの燃焼過程で空気中の窒素が酸化されることで窒素酸化物が大気中に放出され、雲や霧の中で硝酸に変わり、降雨と共に地表に達する。そのため、日本に降下するダストや酸性雨に含まれる窒素には、日本や中国の鉱工業活動によるものや黄土高原の土壤の風食によるものが考えられる。

中国と日本において採取した黄砂粒子に硝酸イオンが含まれていることが、Wu and OKADA (1994) によって明らかになった。しかしながら、窒素の起源や大気中の窒素の動態については、まだわかっていない。そこで、地下水や表流水に関して著者らが研究した窒素の同位体比を用いた実例を紹介し、ダストの研究に適用できるかどうかを次に検討する。

### 4. 窒素の同位体比による窒素の起源の推定

日本の耕地では、過剰の施肥によって河川、池などの



図3. 黄土高原の炭田開発。

地表水や地下水の酸性化や硝酸イオン濃度の増加が問題となっている。著者らは、地表水や地下水に含まれる硝酸性窒素の起源の推定や窒素の動きを推定するのに、窒素の安定同位体を用いた研究を行った。窒素には、重さの異なる<sup>15</sup>Nと<sup>14</sup>Nが存在する。<sup>15</sup>Nと<sup>14</sup>Nの比は一般に次のように定義される。

$$\delta^{15}\text{N} = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{air}}) - 1] \times 1000 \quad (1)$$

ここで、Rは窒素を構成する<sup>15</sup>Nと<sup>14</sup>Nの比である。

$$R = {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N} \quad (2)$$

$R_{\text{sample}}$ は対象試水、 $R_{\text{air}}$ は空気中の窒素成分の比である。 $\delta^{15}\text{N}$ は、降水や化学肥料に含まれる窒素では0%以下と小さく、有機肥料や生活排水に含まれる窒素で10%以上と高くなる傾向がある。そのため、土地利用の違いによって地下水中の硝酸イオン濃度や窒素の同位体比が変化する。

単位面積あたりの窒素肥料の使用量は茶畠で非常に多

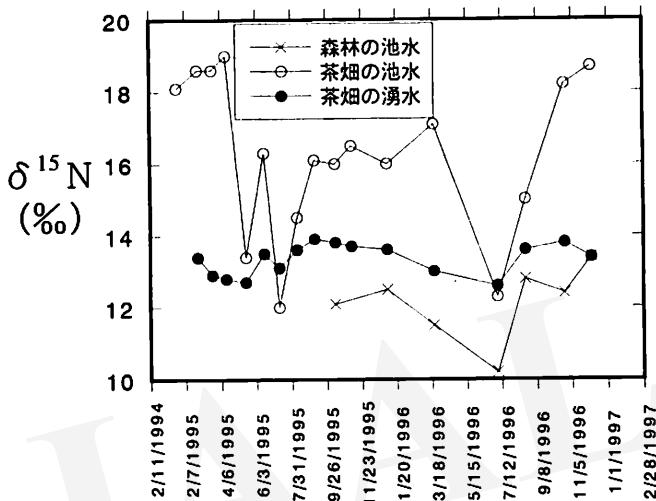


図4. 表流水の窒素同位体比の経時変化.

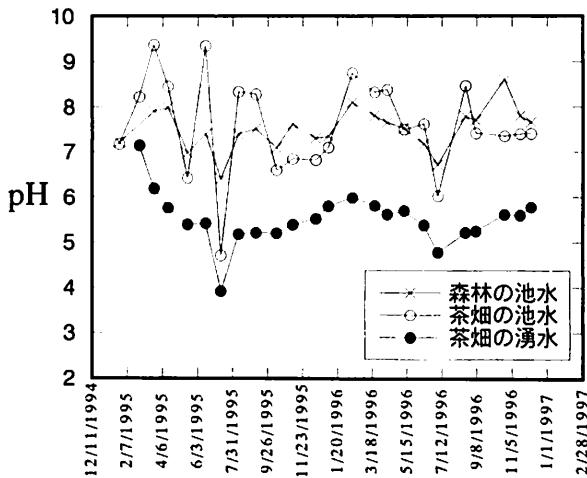


図5. 表流水のpHの経時変化.

く、 $1t/ha$ を超えることも珍しくない。そのため、肥料による酸性化や硝酸イオンによる地下水汚染が茶畠で特に著しい。図4に九州の茶畠地域の窒素同位体比を示す。茶畠からの湧水、茶畠の湧水が唯一の水源である池水、茶畠に隣接する森林の池水を比較すると、森林の池水の同位体比は12%と常に他の水よりも小さく、茶畠からの湧水は13%とほぼ一定である。森林の池水も茶畠の湧水も有機肥料の影響で窒素の同位体比は高く、茶畠の池水の方がより有機肥料の影響を受けていることがわかる。また、茶畠からの湧水が唯一の水源である茶畠の池水の同位体比は12から19%と変動が大きい。これは、池水内でのプランクトンによる光合成や池の底のような還元環境での脱窒菌による脱窒により、硝酸イオンの一

部が吸収や分解されて、軽い $^{14}N$ が選択的に失われたために起きた現象であると考えられる (Ii et al., 1997)。光合成や脱窒によって湧水から池に流れた水のpHは大きくなり、硝酸イオン濃度は小さくなつた。図5、6にpHと硝酸イオン濃度の変化を示す。茶畠の湧水のpHは、最低で4にまで下がることがわかる。しかしながら、酸性の水が唯一の水源である池水では、肥料の影響が小さい森林の池水に比べてアルカリ性になることがある。特にpHが9以上の強アルカリ性にもなる。これは、以下の式に示される光合成や脱窒の過程で硝酸イオンが吸収・分解されると、酸が消費されることが原因である (Ii et al., 1997)。

池水内のプランクトンによる光合成では、炭酸ガスと

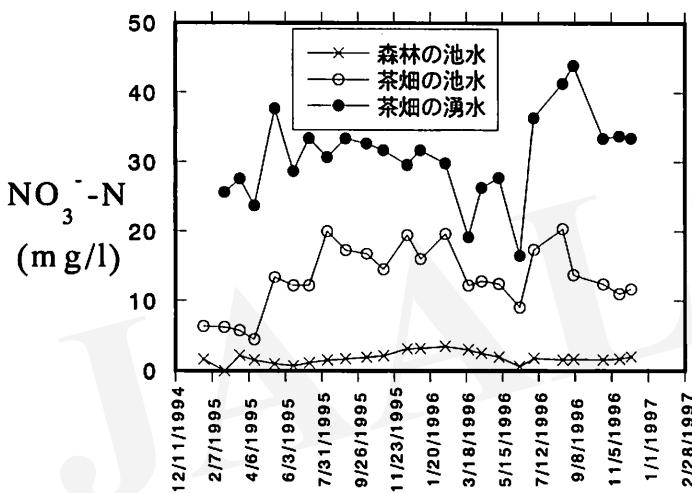


図6. 表流水の硝酸イオン濃度の経時変化。

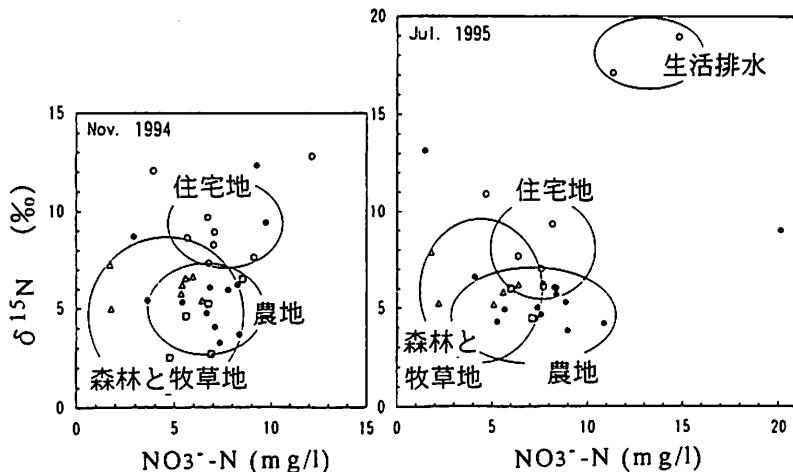
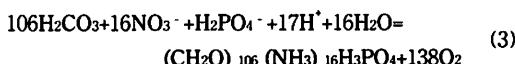


図7. 宮古島の地下水の窒素同位体比・硝酸イオン濃度と土地利用との関係 (HIRATA et al., 1997)。

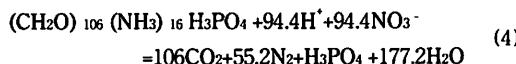
○：住宅地、●：農地、△：森林、□：牧草地

硝酸イオンから有機物が合成される（松尾, 1989）；



ここで、 $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}\text{H}_3\text{PO}_4$  は光合成によって合成されたプランクトン内の有機物である。この反応は、本来、酸素に富む海洋表層の生物活動に基づいて提案された反応であるが、緑色植物一般の反応であるので、陸上の湖沼、池にも同様に適用できる。

池の底のような還元環境では、脱窒菌によって脱窒反応が起こる（半谷, 1988）；



このように、光合成や脱窒反応によって表流水のpH、硝酸イオン濃度、窒素同位体比の差や変化を説明することができる。

宮古島での土地利用の違いによる、地下水や地表水の窒素の同位体比や硝酸イオン濃度への影響を図7に示す（HIRATA et al., 1997）。この図で生活排水の影響のある地域は、硝酸イオン濃度、窒素の同位体比が高く、容易に他の土地利用区分の水と区別することができる。住宅地、農業地域、森林からの地下水や地表水でも硝酸イオン濃度や同位体比が土地利用に応じて変化していることがわかる。

このように、窒素同位体比は窒素の起源やその後の化学反応を推定するのに有効である。一方、ダスト中には硝酸などの窒素化合物が含まれている。これらの窒素化合物は酸性雨の原因にもなっている。また、黄土高原の土壤が風食によってダストとして大気中に供給され、それと共に窒素も移動している可能性がある。そこで、窒素の供給源や大気中の化学反応を調べるために、窒素同位体比によるダストに含まれる窒素化合物の研究は重要である。特に、ダスト中の窒素の挙動を調べることは、黄土高原の土壤浸食が日本に運ばれるダストへの程度影響を与えていたかを推定するのに有効であると考えられる。

## 5. まとめ

黄土高原では、開発活動が拍車をかけて土壤の浸食が進んでいる。土壤浸食の一部は風食であり、土壤に含まれている窒素は、土壤と共に日本にも運ばれているものと考えられる。一方、日本や中国の工業活動によって、硫黄化合物と共に窒素化合物も大気に放出されている。これらの窒素化合物もダストや酸性雨として供給されているものと考えられる。窒素の同位体を用いた研究は、地下水や地流水などでは、起源を推定したり化学変化が起きたことを推定するのに有効であった。そこで、ダストに含まれる窒素化合物の起源を推定するのに窒素同位体を用いた研究は有効であると考えられる。

## 引用文献

- 芦田和男 (1989): 「黄河の治水と開発」 古今書院。
- 日本化学会編 (1990): 「大気の化学」 季刊化学総説10巻、学会出版センター。
- 半谷高久編著 (1988): 「地球化学入門」 丸善。
- 松尾慎士監修 (1989): 「地球化学」 講談社。
- 柳沢文孝・上田 見・志田惇一 (1994): 山形県米沢市の湿性降下物に含まれる硫酸イオンの起源、「分析化学」 43: 947-952。
- HIRATA, T., LI, H., TASE, N. and NISHIKAWA, M. (1997): Nitrogen isotopes in groundwater as indicator of land use. 27th IAHR Congress, US, California. Proceedings of Theme C, 271-276.
- LI, H., HIRATA, T., MATSUO, H., NISHIKAWA, M. and TASE, N. (1997): Surface water chemistry, particularly concentrations of  $\text{NO}_3^-$  and DO and  $\delta^{15}\text{N}$  values, near a tea plantation in Kyushu, Japan. *J. Hydrology*, 202: 341-352.
- JIA, H., YONG, S. and WANG, F. (1993): The soil resource in the Shenmu experimental area. *Academic Shinica and Ministry of Water Resources*, 18: 36-46.
- WANG, B., TANG, K., ZHANG, K. and ZHANG, P. (1993): Types and intensity of soil erosion and its temporal and spatial distribution in Liudaogou watershed Shenmu county. *Academic Shinica and Ministry of Water Resources*, 18: 57-66.
- WU, P.M. and OKADA, K. (1994): Nature of coarse nitrate particles in the atmosphere - A single particle approach. *Atmos. Environ.*, 28: 2053-2060.

## Soil Erosion in the Loess Plateau and Nitrogen Compounds in Dust

Hiroyuki Ii\* and Tatemasa HIRATA\*

Soil erosion in the Loess Plateau was caused by wind and rain water. Some of the soil particles containing nitrogen compounds in the Loess Plateau were transported to Japan by wind. In China, nitrogen compounds accompanied with sulfur compounds were released into the air by automobile production and other industrial activities using combustion. Some of the nitrogen compounds were thought to cause acid rain in Japan. Japanese automobile and industrial activities also released nitrogen compounds into the air. Nitrogen isotopic analysis was effective for groundwater and surface water monitoring. Therefore, nitrogen isotopic analysis could be of considerable help in dust study such as estimating of nitrogen sources.

**Key Words:** Loess, Nitrogen isotope, Dust, Soil erosion

---

\*Faculty of Systems Engineering, Wakayama University. Sakaedani 930, Wakayama city, Wakayama 640-8510, Japan.

(Received, November 17, 1997; Accepted, December 10, 1997)

# 中国、新疆ウイグル自治区の地名表記

矢吹貞代\*・岡田昭彦\*

Chinese, Japanese and English Notations of Local Sites in Xinjiang, China

Sadayo YABUKI\* and Akihiko OKADA\*

論文を書くにあたって、中国の地名をいかに表記するか、難しい問題である。現地調査の際には、人民解放軍作成の5万分の1の地形図を使用するが、これには、ローカルな地点まですべての地名が中国語で記されている。一方、通常の英語表記のアトラス (*The Times Atlas of the World*, 1985; *Britanica Atlas*, 1991) などには、ローカルな地点までは、地名が記されていない。従つて、全ての地名のアルファベット表記を統一したものにするためには、中国語ピン音で表記するのが一番良いように思われるが、主要な地名に関しては、慣例として使われている英語表記を用いた方がわかりやすい。そのようなわけで、地名のアルファベット表記はしばしば混乱したものになる。

ここに新疆ウイグル自治区の主な地名を中国語ピン

音、英語表記、中国語、日本語表記の一覧表をしめす。本表は矢吹ほか (1997: 本特集) の試料採取地点および、新疆ウイグル自治区の主要な地名を表したもので、全ての地名が網羅されているわけではないが、参考資料として活用していただければ幸いである。

なお、英語表記は、アメリカ政府機関 Defence Mapping Agency 発行の100万分の1 (O.N.C.) 地図、および50万分の1 (T.P.C.) 地図の表記を用いた。

日本語表記については、「平凡社世界大百科事典」 (*Heibonsha's World Encyclopedia*, 1991) から引用したが、通称または別名に関しては、かつて内に示した。また、平凡社世界大百科事典に記載のないものについては、中国語ピン音をカタカナ表記した。

資料 中国、新疆ウイグル自治区の地名一覧

Chinese pinyin	English	Chinese	Japanese	Latitude (N)	Longitude (E)
Urumqi Wulumuqi	Urumqi	乌鲁木齐	ウルムチ	43° 50'	87° 37'
Tarim Basin					
Talimu Pendi	Tarim Basin	塔里木盆地	タリム盆地		
Takelamagan Shamo	Taklimakan Desert	塔克拉瑪干沙漠	タクラマカン砂漠		
Central Region					
Mazatage	Mazartag	麻扎塔格	マザールタグ	38° 30'	80° 50'
Tazhong		塔中	ターチョン	38° 56'	83° 45'
Northern Region					
Aheya		阿合牙	アヘヤ	41° 13'	79° 42'
Akesu	Aksu	阿克苏	アクス	41° 10'	80° 20'
Baicheng	Baicheng	拜城	バイチョン	41° 48'	81° 52'
Baishitukeman		拜什吐格曼	バイシトケマン	41° 00'	80° 20'
Cedaya	Qedir	策大雅	チダヤ	41° 58'	84° 49'
Kuche	Kuqa	库车	クチャ	41° 43'	83° 00'

\*理化学研究所、表面解析室

\*The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN). 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198 Japan.

Chinese pinyin	English	Chinese	Japanese	Latitude (N)	Longitude (E)
Kuerle	Kurla	库尔勒	クルル (コルラ)	41° 15'	86° 09'
Luntai	Luntai	轮台	ルンタイ	41° 48'	84° 18'
Shaya	Xayar	沙雅	シャヤル	40° 58'	82° 54'
Talimu He	Tarim River	塔里木河	タリム河		
Tianshan Shanmai	Tianshan Mts.	天山山脉	ティエンシャン山脉		
Tuman	Tuman	吐曼	トマン	41° 20'	80° 35'
Wensu	Wensu	温宿	ウェンスー	41° 10'	80° 14'
Wushi	Wushi	乌什	ウーシー	41° 13'	79° 15'
Xinhe	Xinhe	新和	シンホー	41° 33'	82° 47'
Yangdouma	Yangdouma	央都马	ヤンドーマ	41° 38'	81° 28'
Yangxia		阳霞	ヤンシャー	41° 57'	84° 36'
Yansuigou		盐水沟	ヤンシュイコウ	41° 52'	84° 13'
Yijianfang		一间房	イーチエンファン	41° 10'	80° 20'
<b>Western Region</b>					
Atushi	Atushi	阿图什	アルトウシ (アトウシ)	39° 43'	76° 10'
Bageawate	Bageawate	巴格阿瓦提	バグアワチ	38° 25'	77° 25'
Baqiang Qiao	Baqiang Bridge	巴羌桥	バーチャン橋	39° 47'	76° 25'
Gedaliang		格大良	グーダーリン	39° 46'	76° 40'
Jiangeluosi		江格络斯	ジャングルス	38° 03'	77° 30'
Jiashi	Jiashi	伽师	ジャーシー	39° 30'	76° 45'
Kashi	Kaxgar	喀什	カシュガル	39° 28'	76° 00'
Kashigar He	Kaxgar River	喀什噶尔河	カシュガル河		
Kekeya		柯克亚	ククヤ	37° 23'	77° 11'
Maigaiti	Markit	麦盖提	メルケト	38° 55'	77° 40'
Meiqitiji		美其提激	マイチティジ	39° 17'	76° 55'
Shache	Shache	莎车	シャーチョー (ヤルカンド)	38° 30'	77° 32'
Shule		疏勒	シュール	39° 25'	76° 03'
Tazihong		塔孜洪	タツホン	39° 27'	76° 10'
Wuke		乌柯	ウク	38° 55'	77° 44'
Yafuquan		牙甫泉	ヤフチュアン	39° 12'	76° 10'
Yangdaman		羊大曼	ヤンダーマン	39° 24'	76° 14'
Yecheng	Yecheng	叶城	イエチョン	37° 53'	77° 26'
Yerqiang He	Yarkant River	叶尔羌河	ヤルカンド河		
Yima		依马	イマ	38° 30'	77° 20'
Yinjisha	Yangisar	英吉沙	ヤンギサル	38° 45'	76° 10'
Yuepuhu	Yuepuhu	岳普湖	ユブフ	39° 25'	76° 03'
Zepu	Zepu	泽普	ツエブ	38° 12'	77° 16'
<b>Southern Region</b>					
Andier	Andir	安迪尔	アンディル	37° 35'	83° 48'
Aqike Shan		阿其克山	アチクシャン	36° 50'	80° 10'
Arjin Shanmai	Altun Mts.	阿尔金山脉	アルテイン (アルトゥン) 山脈		
Baheqi		巴合奇	バヘチ	37° 03'	81° 39'
Buya		布雅 (昆仑山地)	ブヤ	36° 23'	80° 00'
Cele	Qira	策勒	チラー	37° 00'	80° 47'
Hadelike	Hedilik	哈的里克	ヘディリク	37° 41'	85° 57'
Hetian	Hotan	和田	ホータン	37° 07'	79° 55'
Hetian He	Hotan River	和田河	ホータン河		
Kalakashi He	Karakax River	喀拉喀什河	カラカシ河		
Keriya He	Keriya River	克里雅河	ケリヤ河		
Kunlun Shanmai	Kunlun Mts.	昆仑山脉	クンルン (コンロン) 山脈		

Chinese pinyin	English	Chinese	Japanese	Latitude (N)	Longitude (E)
Luopu	Lop	洛浦	ロプ	37° 07'	80° 05'
Minfeng	Minfeng	民丰	ミンファン (ニヤ)	37° 04'	82° 20'
Moyu	Moyu	墨玉	モーユー	37° 17'	79° 42'
Pishan	Pishan	皮山	ピーサン	37° 37'	78° 16'
Qiemo	Qiemo	且末	チエモー (チエルチエン)	38° 08'	85° 15'
Cherchen He	Qurqan River	车尔臣河	チャルチヤン (チエルチエン) 河		
Sutangdaoban		苏塘道班	スータンダオバン	37° 56'	84° 22'
Yaogantuokelake		尧干托格腊克	ヤオガントグラク	37° 12'	81° 33'
Yingbage		英巴格	インバグ	36° 54'	81° 34'
Yulongkeshi He	Yurungkax River	玉龙喀什河	ユーロンカシ河		
Yutian	Yutian	于田	ユーテイエン (ケリヤ)	36° 50'	81° 40'
<b>Eastern Region</b>					
Alagan	Argan	阿拉干	アラガン	40° 08'	88° 21'
Jiangeshayi		江格沙依	ジャングサイ	38° 09'	85° 28'
Luobu Po	Lop Nur	罗布泊	ロブノール		
Luobuzhuang		罗布庄	ロブチュアン	39° 30'	88° 07'
Ruoqiang	Ruoqiang	若羌	ルオチヤン	39° 00'	88° 05'
Tashishayi		塔什沙依	タシサイ	38° 32'	86° 59'
Tieganlike	Tikanlik	铁干里克	ティーカンリク	40° 38'	87° 42'
Washixia	Waxxar	瓦石峡	ワシシャー	38° 41'	87° 22'
Yuli	Yuli	尉犁	イリ	41° 22'	86° 15'
<b>Yanqi Basin</b>					
Yanqi Pendi	Yanqi Basin	焉耆盆地	イエンチー盆地		
Bositeng Hu	Bosten Lake	博斯腾湖	ボステン湖		
Kaidou He	Kaidu River	开都河	カイドウ河		
Kongque He	Konqi River	孔雀河	コンチエ河		
Kumishi	Kumux	库米什	クミシ	42° 15'	88° 08'
Yanqi	Yanqi	焉耆	イエンチー	42° 04'	86° 55'
<b>Pamir</b>					
Pamir	Pamir	帕米尔	パミール高原		
Bulunkuole		布伦阔勒	ブルンコラ	38° 40'	74° 57'
Dabudar		达布达尔	ダブダー	37° 20'	75° 24'
Gaizi		盖孜	ゲイツ	38° 26'	75° 19'
Hongqilafu Daban	Khunjerab Pass	红其拉甫大坂	クンジェラブ峠	36° 50'	75° 25'
Kalakuli Hu	Kalakuli Lake	喀拉库里湖	カラクリ湖	38° 26'	75° 03'
Kalaqigu		卡拉奇古	カラチグ	37° 13'	75° 23'
Kalasu		卡拉苏	カラス	38° 12'	74° 55'
Liangtaiadaoban		凉台道班	リアンタイダオバン	38° 44'	75° 01'
Maza		麻扎	マザー	37° 10'	75° 26'
Tashikuergan	Tashkurgan	塔什库尔干	タシュクルガン	37° 55'	75° 11'
<b>Junggar Basin</b>					
Zhungar Pendi	Junggar Basin	准噶尔盆地	ジュンガル盆地		
<b>Southern Region</b>					
Aibi Hu	Aipi Lake	艾比湖	エビ・ノール	44° 45'	83° 01'
Changji	Changji	昌吉	チャンギ	44° 01'	87° 18'
Daquangou		大泉沟	ダーチュアンコウ	44° 30'	86° 30'

Chinese pinyin	English	Chinese	Japanese	Latitude (N)	Longitude (E)
Fukang	Fukang	阜康	フーカン	44° 09'	87° 59'
Ganhezi	Ganhezi	甘河子	ガンフーズ	44° 06'	88° 20'
Gaoquan	Gaoquan	高泉	ガオチュアン	44° 22'	84° 14'
Jinghe		精河	チンホー	44° 36'	82° 52'
Kuitun	Kuytun	奎屯	クイトウン	44° 25'	84° 54'
Liuhudi		六户地	リウヘージ	44° 30'	86° 30'
Manasi	Manasu	玛纳斯	マナス	44° 18'	86° 13'
Mosuowan		莫索湾	モスオワン	44° 56'	86° 12'
Miquan	Miquan	米泉	ミーチュアン	43° 57'	87° 39'
Qitai	Qitai	奇台	チータイ	44° 01'	89° 35'
Sailimu Hu	Sailimu Lake	赛里木湖	サイラム・ノール	43° 33'	81° 20'
Shibadaoliang		十八道架	シーバーダオリアン	44° 10'	87° 50'
Shihezi	Shihezi	石河子	シーホーツ	44° 18'	86° 02'
Sikeshu		四棵树	スークーチュ	44° 22'	84° 14'
Tianchi	Tianchi	天池	ティエンチ	43° 54'	88° 08'
Wusu	Wusu	乌苏	ウースー	44° 20'	84° 34'
Yamatu Daqiao		雅玛图大桥	ヤマト大橋	43° 37'	81° 47'
Yining	Ining	伊宁	イーニンク	43° 55'	81° 09'
<b>Turpan Basin</b>					
Tulufan Pendi	Turpan Basin	吐鲁番盆地	トルファン盆地		
Aiding Hu	Aiding Lake	艾丁湖	アイディン湖	42° 39'	89° 24'
Aketamu		阿克塔木	アクタム	42° 59'	89° 35'
Baizikelike		柏孜克里克	バイツクリク(ベゼクリク)	42° 57'	89° 34'
Bogeda Shan	Mt. Bogda	博格达山	ボグダ山		
Daheyuan	Daheyuan	大河沿	ダーフーヤン		
Hami	Hami	哈密	ハミ	42° 50'	93° 30'
Honqixiang		红旗乡	ホンチーシヤン	42° 55'	89° 10'
Huoyan Shan	Huoyenshan	火焰山	ホーイエンシャン(カエン山)		
Huoyan Shan Qianshadi		火焰山前沙地	ホーイエンシャンチエンシャティ	42° 50'	89° 25'
Kenger		肯格尔	ケングルー	42° 58'	88° 56'
Lianmuqin	Lamjin	连木沁	ラムチン	42° 49'	89° 52'
Saierkepu		塞尔克普	セルクプ	42° 48'	89° 52'
Shenjingou	Shenjinkou	胜金沟	シェンジンコウ	42° 56'	89° 34'
Shenquan		神泉	シェンチュアン	42° 56'	89° 29'
Shanshan	Shanshan	鄯善	シャンシャン		
Taoergou		桃儿沟	トーアルコウ	43° 01'	89° 11'
Tieshangonzhu Dong		铁扇公主洞	ティーシャンゴンチュードン	42° 56'	89° 15'
Tulufan	Turpan	吐鲁番	トルファン	42° 57'	89° 09'
Tuokesun	Taksun	托克孙	タクスン	42° 48'	88° 39'
Wudaolin		五道林	ウーダオリン	42° 59'	89° 04'
Xiaocaogou		小草沟	シャオツアオコウ	43° 10'	88° 32'
Yemushi		也木什	イエムシ	42° 50'	89° 05'
<b>Chaiwopu Basin</b>					
Chaiwopu Pendi	Chaiwopu Basin	柴窝堡盆地	チャイウープー盆地		
Chaiwopu Hu	Chaiwopu Lake	柴窝堡湖	チャイウープー湖	43° 35'	87° 56'
Dabanchengyan Hu	Dabancheng Salt Lake	达坂城盐湖	ダーバンチョン塩湖	43° 25'	88° 06'

# Responses of Photosynthesis and Water Use to Drought in Two Desert Annuals, *Agriophyllum squarrosum* and *Bassia dasypylla*

Wenhong MO\*, Toshiki NATORI\*\*, Shu JIANG\*\*\*, Noboru NISHIMURA\*  
and Kenji OMASA\*\*

*Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq. is the most common pioneer plant of shifting sand dunes in northern China. As shifting sand dunes are largely fixed by vegetation, this species is found to be excluded from sand dunes which have already become semi-fixed. The purpose of this study was to compare the responses of photosynthesis and water use to drought in *A. squarrosum* and another desert annual, *Bassia dasypylla* Kuntze, which frequently occurs in semi-fixed sand dunes, and to examine whether soil water availability is responsible for the exclusion of *A. squarrosum* from semi-fixed sand dunes. Seeds of both species were collected from the Shapotou desert area of northern China in September 1990, and grown in a greenhouse. Rates of photosynthesis and transpiration under different leaf water potentials were then measured in controlled environmental conditions. A field survey was conducted at the seed collection sites in August 1992, to measure soil moisture in shifting and semi-fixed sand dunes. Under the given conditions, increases in water stress led to a decline of net photosynthesis in both species. A marked decline in net photosynthesis occurred in *A. squarrosum* as the leaf water potential fell to less than -0.6 MPa, whereas the photosynthetic rate of *B. dasypylla* decreased gradually as the leaf water potential decreased from -1.2 to -4.8 MPa. In other words, *A. squarrosum* appeared to be more sensitive to drought than *B. dasypylla*. In addition, a higher water use efficiency in *B. dasypylla* during moderate water deficiency showed that this species was able to use water more economically than *A. squarrosum* under water stress. These findings, and the evidence that water availability in semi-fixed sand dunes is much lower than in shifting sand dunes, suggest that soil water availability may be the key factor determining the exclusion of *A. squarrosum* from semi-fixed sand dunes in the Shapotou area.

**Key Words:** *Agriophyllum squarrosum*, *Bassia dasypylla*, Leaf water potential, Photosynthesis, Soil moisture

## 1. Introduction

*Agriophyllum squarrosum* (Chenopodiaceae) is a pioneer species in shifting sand dunes of northern China (LU *et al.*, 1985). Shifting sand dunes represent an unique habitat where an extremely unstable surface and drought conditions prevail (ZHU *et al.*, 1988). The subsequent phases of succession do not progress under these conditions, although *A. squarrosum*,

an annual herb, can grow at some sites which are relatively stable in shifting sand dunes, and will become the core of ecological succession if these conditions are relieved (NEMOTO and LU, 1992). However, when shifting sand dunes become largely fixed by plants, and reach a semi-fixed situation, *A. squarrosum* should be excluded (SHEN, 1986). Numerous studies have demonstrated that soil water availability becomes increasingly limited as shifting sand dunes are fixed progressively by vegetation, particularly

\* Institute for Basin Ecosystem Studies, Gifu University, Yanagido 1-1, Gifu 501-1112, Japan.

\*\* National Institute for Environmental Studies, Onogawa 16-2, Tsukuba, Ibaraki 305-0053, Japan.

\*\*\* Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Nanxincun No. 20, Xianshan, Beijing 100093, P. R. China.

when the sand dunes are independent of ground water (ZHANG and XU, 1985; ZHU *et al.*, 1988; CHEN, W., 1991; CHEN, H., 1992; QIU *et al.*, 1995). This suggests that the exclusion of *A. squarrosum* from semi-fixed sand dunes might be due to the low soil water availability in the dunes (ZHAO, 1991). Only limited information supporting this suggestion is available in relation to the growth of *A. squarrosum* in shifting sand dunes of Inner Mongolia (KOBASHI *et al.*, 1988; NEMOTO and LU, 1992), e.g. NEMOTO and LU (1992) have reported that the plant size of *A. squarrosum* is smaller at sites with a lower water content. However, there is still a lack of data on photosynthetic traits to clarify whether this species is drought-sensitive. Indeed, there are some contradictory findings with regard to the characteristics of *A. squarrosum*: it has been reported to be a xerophyte because of its xerothermic structure (LIU, 1982), but also a mesophyte according to its plant water relations (ZHAO and HUANG, 1981; LIU *et al.*, 1987), and has even been regarded as a desert ephemeral (LU, 1980).

LARCHER (1995) has pointed out that the responses of plant species to water deficiency are largely reflected in their features, and that mesophytes and xerophytes can be distinguished precisely according to their photosynthetic response patterns to drought. It has been demonstrated that economical water use by reduction of water loss may postpone the dehydration of plants that are suffering from water deficiency, thus helping to maintain photosynthetic activity during moderate water stress (SCHULZE, 1986). In this study, therefore, we investigated the photosynthesis and water use of *A. squarrosum* in response to drought in controlled environmental conditions, and compared the results with the performance of another annual herb, *Bassia dasypylla*. This species is suitable for comparison because it usually occurs in semi-fixed sand dunes and belongs to the same family as *A. squarrosum* (LIU *et al.*, 1985). The soil moisture of shifting and semi-fixed sand dunes was also measured at the seed collection sites of the two species. The purpose of this study was to compare the responses of photosynthesis and water use to drought in these two desert annuals, and to clarify their photosynthetic traits and examine whether

soil water availability is responsible for the exclusion of *A. squarrosum* from semi-fixed sand dunes.

## 2. Materials and Methods

### 1) General description of seed collection sites

The seed collection sites were situated in the Shapotou desert area (1,250–1,500 m a.s.l.) in the extreme southeastern part of the Tengger Desert in northern China (Fig. 1). This area has a typical arid continental temperate climate with a mean annual air temperature of 9.7°C and an annual mean precipitation of 186 mm, 80% of the precipitation falling between May and September (LIU *et al.*, 1987). Most of the area is covered by huge shifting sand dunes, 5–20 m high, and the ground water level is extremely deep (more than 80 m). The dominant wind direction in the area is northwest, and the shifting sand dunes move slowly southeast at a rate of 0.5–2.0 m a year (ZHAO, 1991). Shifting sand dunes with sparse vegetation are the natural landscape in this area (Fig. 2; QIU *et al.*, 1995). Only a few species appear on the shifting dunes at some sites with a total coverage of 1–2%. These include *A. squarrosum* (herb), *Corispermum mongolicum* Iljin (herb), *Artemisia*

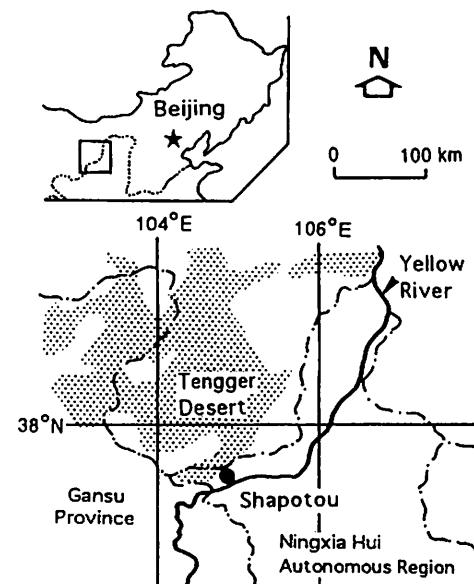


Fig. 1. Location of Shapotou, the seed collection site, with an inset map showing its situation in northern China.

*sphaerocephala* Krasch. (semi-shrub) and *Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey. (shrub) etc.

In order to protect railways in this area from the drifting sand, an artificial vegetation system, with and without irrigation, has been established along the right-of-way since 1956 (Fig. 3). As a result, the landscape has changed from shifting sand dunes to semi-fixed and fixed sand dunes in a 500-m-wide non-irrigated artificial vegetation

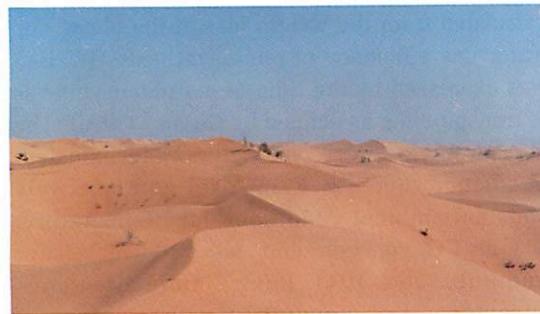


Fig. 2. The natural landscape of shifting sand dunes in the Shapotou area (outside the non-irrigated artificial vegetation belt).

The plants growing at the bottom of sand dunes are *Agriophyllum squarrosum*.

belt (Fig. 3, Fig. 4; QIU *et al.*, 1995). The present vegetation of the semi-fixed sand dunes is dominated by the planted semi-shrub *Artemisia ordosica* Kraschen., and the planted shrubs *Caragana korshinskii* Kom. and *Hedysarum scoparium*, with naturally established annual herbs such as *Bassia dasypylla*, *Corispermum* spp. and *Salsola ruthenica* Iljin, the total coverage reaching 30% or so (SHEN, 1986; QIU *et al.*, 1995).



Fig. 4. The landscape of semi-fixed sand dunes in the non-irrigated artificial vegetation belt in the Shapotou area.

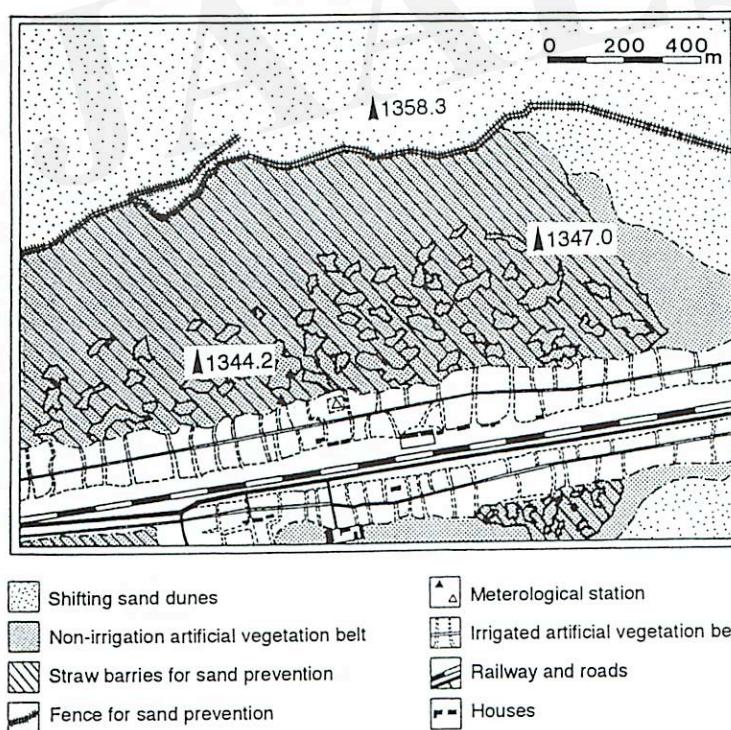


Fig. 3. A sketch map of the artificial vegetation system for prevention railways from drifting sand in the Shapotou area (following LIU *et al.*, 1984)

As one of the native species growing on the shifting sand dunes, *A. squarrosum* was selected for sand fixation when the artificial vegetation system was first instituted in the Shapotou area (ZHAO, 1991). However, *A. squarrosum* was found to be unable to grow well and produce seeds by itself when the sand dunes were largely fixed in the non-irrigated artificial vegetation belt (SHEN, 1986). In contrast, *B. dasypylla*, which became naturally established in the non-irrigated artificial vegetation belt, is becoming increasingly important to the present vegetation of semi-fixed dunes (ZHAO, 1991; QIU *et al.*, 1995).

*A. squarrosum* seeds were collected from sites at the bottom of shifting dunes outside the non-irrigated artificial vegetation belt in September 1990. *B. dasypylla* seeds were gathered at the same time from semi-fixed sand dunes in the non-irrigated artificial vegetation belt (Fig. 3). It should be pointed out that the terms "shifting sand dunes" and "semi-fixed sand dunes" in this paper refer in particular to the areas in which seeds were collected.

## 2) Plant material and gas exchange analysis

After legal formalities, *A. squarrosum* and *B. dasypylla* seeds were transported from China to Japan, sown in the bats filled with river sand, and then maintained in a greenhouse (30/20°C day/night air temperature, 60% relative humidity, 16-hour supplemental photoperiod). Each 60-day-old plant was transplanted into a plastic pot (15-cm diameter and 25cm deep) filled with river sand, and grown in the same greenhouse. The plants were watered daily, and nutrient solution (Hyponex 1000-fold diluted) was applied once a week (according to the method of NATORI *et al.*, 1992). When the plants were between eight to ten weeks old, and had finished their initial growth (NATORI *et al.*, 1994), they were submitted to photosynthetic measurements in February 1992. Before the measurements, the plants were well watered, or exposed to drought by withholding water from the soil for 2 to 6 days, in order to induce different leaf water potentials.

For measurement, each plant was set in an open gas exchange system which was enclosed in a 4.0m<sup>2</sup> phytotron chamber, and normal air was passed through the assimilation chamber (49 × 49 × 95cm<sup>3</sup>) at a constant flow rate (38 l/min).

The photosynthetic rate was calculated from the change in CO<sub>2</sub> concentration measured with an infrared gas analyzer (ZALDE 152-1, Fuji Electric Co. Ltd., Japan). The plant was placed on an electric balance which was enclosed in the assimilation chamber, and the pot was sealed by two plastic bags to prevent release of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O from the soil surface. An NEC computer was used to record readings of the balance at one-minute intervals, and the transpiration rate was calculated from the weight loss of the plant. The water use efficiency of photosynthesis (WUE<sub>ph</sub>) was expressed by the ratio of net photosynthesis to transpiration, as defined by LARCHER (1995). The measurements were conducted under constant irradiance (368.5  $\mu$  E/m<sup>2</sup>/sec) and relatively constant ambient conditions (air temperature: 30°C air CO<sub>2</sub> concentration: 340 ± 10ppm; relative humidity: 50 ± 10%). Immediately after measurement of photosynthesis, the leaf water potential of the plant was measured with a Dew Point Microvoltmeter (HR-22T, WESCOR, USA). The leaves of the plant were then cut, dried at 80°C for 48hrs, and weighed. Because the leaves of *B. dasypylla* are succulent and needle-shaped, rates of photosynthesis and transpiration are expressed per leaf dry matter unit in this paper.

## 3) *In situ* soil moisture of shifting and semi-fixed sand dunes

Soil samples were collected from shifting and semi-fixed sand dunes at the seed collection sites of *A. squarrosum* and *B. dasypylla* on Aug. 4, 1992. Because the root system of both species is distributed mainly at a depth of 0-50cm (Liu *et al.*, 1991), the soil was sampled every 5 or 10cm from the ground surface to 60cm deep at each site using soil core samplers (100cc). The wet weight of the samples was measured immediately, and the samples were then dried at 104°C for 12hrs and weighed. Soil moisture was calculated by the formula: relative moisture (%)=(W-D)/D × 100%, where W is the wet weight and D is the dry weight of the soil sample.

## 3. Results

### 1) Responses of photosynthesis and water use to drought

In well-watered plants, the leaf water potential

was  $-0.57 \pm 0.03$  MPa in *A. squarrosum* and  $-1.68 \pm 0.06$  MPa in *B. dasypylla* (Fig. 5). Rates of photosynthesis in both species maximized in these well-watered plants, which was  $29.78 \pm 0.37$  mgCO<sub>2</sub>/gDM/hr for *A. squarrosum* and  $30.44 \pm 0.74$  mgCO<sub>2</sub>/gDM/hr for *B. dasypylla*. Fig. 5 shows that increases in water stress led to a decline in rates of photosynthesis and transpiration in both species, although the sensitivity of their photosynthetic capacity to water stress differed. A marked decline in net photosynthesis occurred in *A. squarrosum* as the leaf water potential fell to below  $-0.6$  MPa, while in *B. dasypylla* the photosynthetic rate gradually decreased as the leaf water potential declined

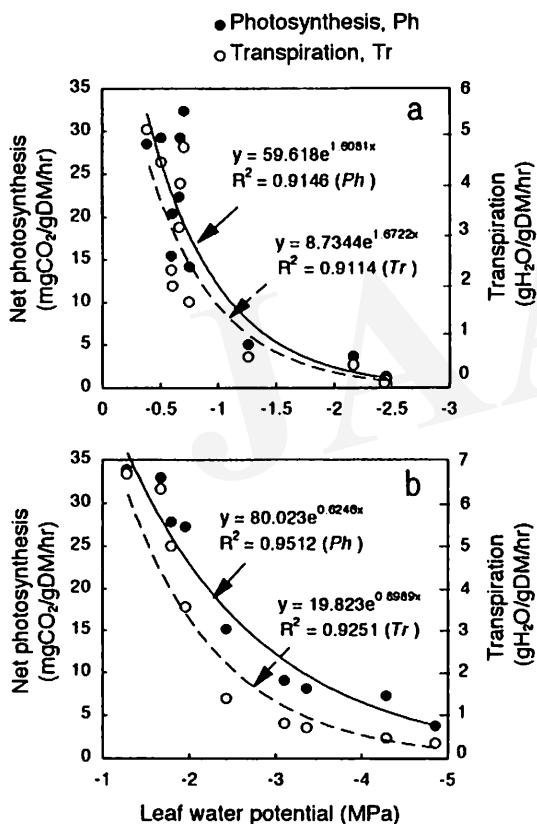


Fig. 5. Rates of photosynthesis and transpiration in *Agriophyllum squarrosum* (a) and *Bassia dasypylla* (b) with decreasing leaf water potential under controlled environmental conditions (irradiance:  $368.5 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ ; air temperature:  $30^\circ\text{C}$ ; air CO<sub>2</sub> concentration:  $340 \pm 10\text{ppm}$ ; relative humidity:  $50 \pm 10\%$ ). All equations are highly significant ( $P < 0.001$ ).

from  $-1.2$  to  $-4.8$  MPa. When the leaf water potential decreased to  $-2.0$  MPa, the photosynthetic rate of *A. squarrosum* was only 10% of maximum, whereas that of *B. dasypylla* was still 80% of maximum.

The relationships of photosynthesis, transpiration and leaf water potential in the two species are re-illustrated in Fig. 6, which shows the values in Fig. 5 as percentages (see Discussion for the threshold and null point of photosynthetic capacity). Fig. 6 shows more clearly that the range of leaf water potential between 100% and near 0% of photosynthetic capacity differed in these two species, which was much wider in *B. dasypylla* ( $-1.3$  to  $-4.9$  MPa) than in *A. squarrosum* ( $-0.5$  to  $-2.4$  MPa). It also indicated that a greater reduction of water loss in *B. dasypylla* than in *A. squarrosum* during moderate water stress, e.g. when the photosynthesis of both species decreased to 44% of maximal, the transpiration of *B. dasypylla* decreased to 21% of its maximum, whereas that of *A. squarrosum* was still 33% of its maximum.

WUE<sub>Ph</sub> of well-watered plants of the two species was  $6.0\text{mgCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$  or so, and both species showed a similar pattern of WUE<sub>Ph</sub> response to water stress, i.e. an increase in WUE<sub>Ph</sub> at the

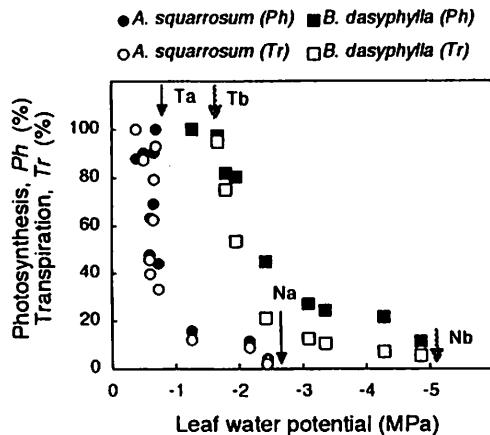


Fig. 6. Relationships of photosynthesis (%), transpiration (%) and leaf water potential in *Agriophyllum squarrosum* and *Bassia dasypylla*. Arrows show the threshold (Ta, Tb) and the null point (Na, Nb) of photosynthetic capacity in *A. squarrosum* and *B. dasypylla* respectively.

Arrows show the threshold (Ta, Tb) and the null point (Na, Nb) of photosynthetic capacity in *A. squarrosum* and *B. dasypylla* respectively.

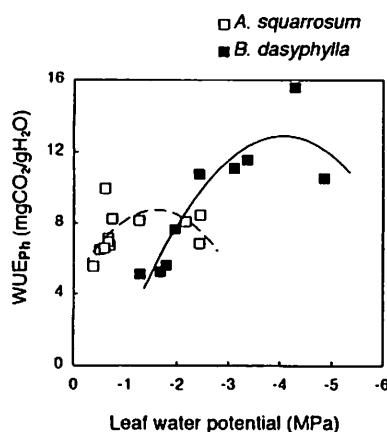


Fig. 7. Relationship between WUE<sub>Ph</sub> (water use efficiency of photosynthesis) and leaf water potential in *Agriophyllum squarrosum* and *Bassia dasypylla*.

beginning of water deficit, and then a sharp decline when severe water stress occurred (Fig. 7). During moderate water deficiency, *A. squarrosum* showed a lower WUE<sub>Ph</sub>, ranging between 6.7 and 9.9 mgCO<sub>2</sub>/gH<sub>2</sub>O, whereas *B. dasypylla* exhibited a higher WUE<sub>Ph</sub> which ranged between 7.6 and 15.6 mgCO<sub>2</sub>/gH<sub>2</sub>O.

## 2) Soil moisture of shifting and semi-fixed sand dunes *in situ*

Figure 8 shows the soil moisture of shifting and semi-fixed sand dunes at the seed collection sites. Because of a 10-mm rainfall on the two days before sampling, the soil moisture of the shifting sand dune was relatively high, reaching 6% in the layer 10-20cm deep. The water content of the semi-fixed dune was much lower than that of the shifting one in almost all layers, especially at 40-60cm depth.

## 4. Discussion

### 1) Responses of photosynthesis and water use to drought in the two desert annuals

When grown under favorable conditions and well watered, *A. squarrosum* and *B. dasypylla* exhibited similar maximum photosynthetic rates (Fig. 5). A decline in net photosynthesis occurred in both species when they were subjected to

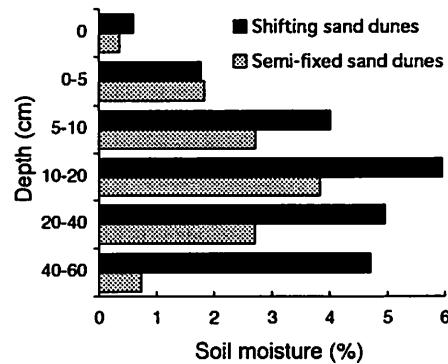


Fig. 8. Soil moisture (%) of shifting and semi-fixed sand dunes in the Shapotou area.

Aug. 4, 1992; there was a 10-mm of rainfall on the two days before sampling.

water stress, however, *A. squarrosum*, the most common pioneer plant of shifting sand dunes, appeared to be more sensitive to water stress than *B. dasypylla*, which occurs frequently on semi-fixed sand dunes (Figs. 5, 6). LARCHER (1995) demonstrated that the curve of net photosynthesis vs. leaf water potential shows two critical points, one being the threshold between full photosynthetic capacity (100% of maximal) and reduced capacity (<100% of maximal), the other the null point for gas exchange (near 0% of maximal), and inferred that the sensitivity of photosynthetic capacity to drought is reflected by the position of the threshold and the null point. That is, the more sensitive a species is to drought, the earlier the null point is reached, e.g. the leaf water potential between the two critical points ranges between -0.5 and -2.5 MPa in mesophytes, and between -1.6 and -7.0 MPa or so in xerophytes (LARCHER, 1995). In this study, the leaf water potential between the two points ranged from -0.73 to -2.4 MPa in *A. squarrosum*, and from -1.3 to -4.9 MPa in *B. dasypylla* (Fig. 6). Accordingly, *B. dasypylla* exhibited the features of xerophytes, whereas *A. squarrosum* behaved like a mesophyte. These results on the features of *A. squarrosum* agree with the findings of LIU *et al.* (1987) and ZHAO and HUANG (1981), and show clearly that *A. squarrosum* is a mesophyte rather

than a xerophyte, according to its photosynthetic response to drought under our experimental conditions (Figs. 5, 6).

The two species exhibited similar values of  $\text{WUE}_{\text{Ph}}$  when well watered, and both showed an increase in  $\text{WUE}_{\text{Ph}}$  at the beginning of water deficit, followed by a sharp decline when the water stress became severe (Fig. 7). However, *B. dasypylla* exhibited a higher  $\text{WUE}_{\text{Ph}}$  during moderate water deficiency, i.e. it was able to use water more economically than *A. squarrosum* under water stress (Fig. 7). LARCHER (1995) pointed out that this increase of  $\text{WUE}_{\text{Ph}}$  at the beginning of water deficit occurs when the stomata are partially open and when the exchange processes of both  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  are already slightly limited. The higher  $\text{WUE}_{\text{Ph}}$  in *B. dasypylla* than in *A. squarrosum* during moderate water stress, may be explained in part by a greater reduction of water loss in the former than in the latter (Fig. 6). A preliminary study on the diurnal course of transpiration in both species has also shown that *B. dasypylla* tends to reduce transpiration to a great extent when under drought stress (MO *et al.*, 1994). For xerophytes like *B. dasypylla*, a greater  $\text{WUE}_{\text{Ph}}$  during water deficiency may contribute to its survival in drought habitats (this will be discussed later). Nevertheless, the above results show clearly that *A. squarrosum* is not drought-resistant and behaves like a mesophyte, requiring sufficient water for its growth, whereas *B. dasypylla* tends to tolerate more severe water deficiency like a xerophyte, either through the sensitivity of its photosynthesis to drought, or through its water use efficiency during drought stress (Figs. 6, 7).

## 2) Soil water availability at the growing sites of the two desert annuals

The drought-sensitive *A. squarrosum* usually occurs as a pioneer species on shifting sand dunes, and is excluded from dunes which have become semi-fixed, whereas the drought-resistant species *B. dasypylla* is frequent on semi-fixed sand dunes. The results of our field survey indicated that the soil water content is much lower in semi-fixed than in shifting sand dunes at the seed collection sites of the two species (Fig. 8). This suggests that soil water availability may be the key factor responsible for the absence of *A.*

*squarrosum* on semi-fixed sand dunes.

To show more clearly that the water status of semi-fixed sand dunes is poorer than that of shifting dunes, we summarize the soil moisture data from the Shapotou Desert Research Station (SDRS) in Fig. 9 (samples taken every 10cm from the ground surface to 60cm deep at 15-day intervals). Rainfall is the only source of water supply for plant growth in the Shapotou desert area because of the extremely deep ground water level (QIU *et al.*, 1995). The soil moisture depends on the frequency and intensity of rainfall in this area. However, even in this very dry year of 1991 there was a relatively stable water content of 2-3% in shifting sand dunes, whereas the soil moisture

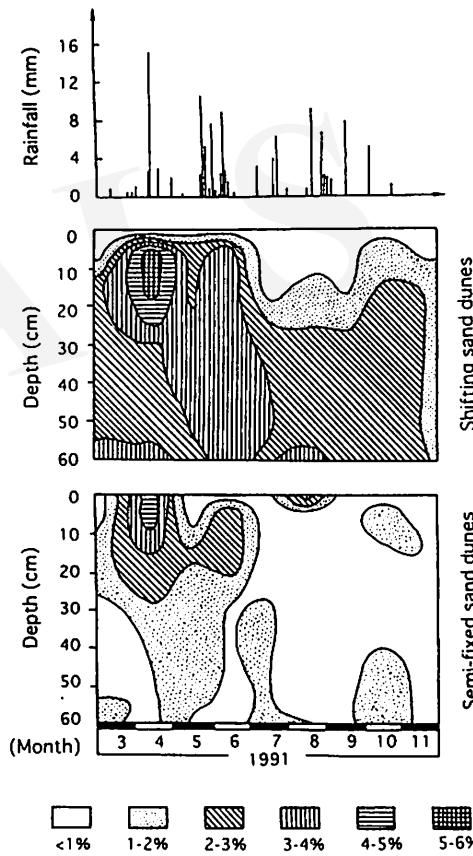


Fig. 9. Soil moisture (%) of shifting and semi-fixed sand dunes in the Shapotou area and its relation to daily rainfall.

1991 was an extremely arid year with annual rainfall of only 125mm; data from the Shapotou Desert Research Station, Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences.

Plants differ in the ways in which they survive drought (Turner, 1986) and desert plants vary widely in their capacity to maintain photosynthesis under water stress (EHLERINGER, 1994). There are species which can escape to occur in the brief period when sufficient water is available, LARCHER (1995) has referred to such plants as "drought-escaping xerophytes". A desert is like *A. squarrosum* is drought-sensitive

In conclusion, *A. squarrosum* is the most common pioneer plant of shifting sand dunes in northern China. However, when the shifting sand becomes excluded by vegetation, this species dunes are largely fixed by vegetation, this species becomes excluded. In this study, the clear finding that *A. squarrosum* is more sensitive to drought than *B. dasyphylla*, which frequently occurs on semi-fixed sand dunes (Figs. 5, 6), and the evidence that the soil water content is much lower in semi-fixed than in shifting dunes (Figs. 8, 9), strongly suggest that the exclusion of *A. squarrosum* from the low water availability area is mainly due to the low water availability there. The survival of *B. dasyphylla* on semi-fixed sand dunes is mainly due to its photosynthetic capacity and use maintenance its photosynthetic capacity and use mesophytic (Figs. 5, 6) and as a result, it can grow from semi-fixed sand dunes. However, it can grow on shifting dunes where the soil water content is at least 2-3%) throughout the growing seasons.

### 5. Conclusion

droUGHT-sensitivity as a mesophyte rather than a xerophytic, based on its photosynthetic response to droUGHT under our experimental conditions (Figs. 5, 6). On the other hand, the water availability of shifting sand dunes, the growing habitat of *A. squarrosum*, is found to be relatively higher than that of semi-fixed sand dunes where vegetation cover is greater (Figs. 8, 9). These findings suggest that to clarify the characteristics of a species, must consider carefully both plant itself (including morphological features and physiologicaL responses) and the habitat conditions.

(Figs. 5, 6), but it can escape drought by selecting its growth sites, and can survive in desert regions. On the other hand, *A. squarrosum* is able to germinate between spring and summer whenever the conditions are suitable, and then grows rapidly after germination, almost all stands producing seeds (SHI, 1991; NEMOTO and LU, 1992; OHKURO *et al.*, 1994). Overall, shifting sand dunes still represent an unique habitat where the extremely unstable surface is a common stress for plants growing on them (NEMOTO and LU, 1992). NATORI *et al.* (1994) inferred that the growth of *A. squarrosum* on shifting sand dunes, may be mainly determined by other factors such as unstable surface rather than water availability of sand dunes. Clearly, further studies are needed for fully understanding the survival strategies of *A. squarrosum* on shifting sand dunes, especially seed production and dispersal, seed storage during dry seasons, seed longevity, germination and initial growth on the unstable surface.

#### Acknowledgements

This work was supported by a grant from the Japan Science and Technology Agency, and was conducted as part of the Japan-China Joint Study on Desertification (JC-JOSDES). We are grateful to the staff of the Shapotou Desert Research Station, Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences, for their help in many ways.

#### References

- CHEN, H. (1992): The characteristics of biological crust and its environmental significance in Shapotou region. *Chinese Arid Zone Res.*, 9-1: 31-38. (in Chinese with English summary)
- CHEN, W. (1991): Water balance in the revegetated area along the railway in Shapotou area. In SDRS eds., *Studies on Drifting Sand Control in the Shapotou Area of Tengger Desert (II)*, Ningxia People Press, Yinchuan, China, 66-75. (in Chinese with English summary)
- EHLINGER, J.R. (1994): Variation in gas exchange characteristics among desert plants. In SCHULZE, E.-D. and CALDWELL, M.M. eds., *Ecophysiology of Photosynthesis*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 361-392.
- LARCHER, W. (1995): *Physiological Plant Ecology* (3rd ed.). Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, 388pp.
- LIU, J. (1982): The xeromorphic structure of different typical plants in deserts of China. *Acta Phytocological et Geobotanica Sinica*, 6-4: 314-319. (in Chinese)
- LIU, J. *et al.* (1984): *Map of the Shapotou Artificial Vegetation System for Prevention Railways from Drifting Sand*. Ningxia Press. (in Chinese)
- LIU, J., PU, J. and LIU, X. (1987): Comparative studies on water relations and xeromorphic structure of some plant species in the middle part of the desert zone in China. *Acta Botanica Sinica*, 29-6: 314-319. (in Chinese)
- LIU, Y., YANG, X., TAO, Y. and ZHANG, G. (1985): *Flora in Deserti Reipublicae Populorum Sinarum*, Vol. 1. Academy Press, Beijing, China. (in Chinese)
- LIU, Y., LI, Y. and YANG, H. (1991): Root systems of psammophytes. In SDRS (Shapotou Desert Research Station, Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences) eds., *Studies on Drifting Sand Control in the Shapotou Area of Tengger Desert (II)*, Ningxia People Press, Yinchuan, China, 185-209. (in Chinese with English summary)
- LU, Z. (1980): Studies on water status in the green organs of xerophytes. *Chinese Bull. Plant Physiol.*, 4: 23-27. (in Chinese)
- KOBASHI, S., YOSHIKAWA, K. and MASUDA, T. (1988): Growth of Shami (*Agriophyllum squarrosum*) on sand dune at the Mu Us desert in Inner Mongolia. *Bull. Revegetation Res.*, 10: 167-199. (in Japanese with English summary)
- MO, W., NATORI, T., OMASA, K. and JIANG, S. (1994): Comparative studies on drought resistance of *Agriophyllum squarrosum* and *Bassia dasypylla* in controlled environment. In ICHIKUNI, M. ed. *Proceedings of the Japan-China International Symposium on the Study of the Mechanism of Desertification*, Toyo Publishing & Printing Co., Ltd., Tokyo, 493-499.
- NATORI, T., MO, W., LI, X., OMASA, K. and JIANG, S. (1992): The culture of Chinese desert plants in a greenhouse. *Acta Horticulturae*, 319: 453-458.
- NATORI, T., TOBE, K., MO, W., LI, X., JIANG, X. and OMASA, K. (1994): Growth of several desert plants under favorably controlled conditions. In ICHIKUNI, M. ed. *Proceedings of the Japan-China International Symposium on the Study of the Mechanism of Desertification*, Toyo Publishing & Printing Co., Ltd., Tokyo, 451-454.
- NEMOTO, M. and LU, X. (1992): Ecological characteristics of *Agriophyllum squarrosum*, a pioneer annual on sand dunes in eastern Inner Mongolia, China. *Ecol. Res.*, 7:

- 183-186.
- OHKURO, T., NEMOTO, M., LU, X., XU, B. and LU, X. (1994): Ecological characteristics of three native species, grown in semi-arid grassland in eastern Inner Mongolia, China. In ICHIKUNI, M. ed., *Proceedings of the Japan-China International Symposium on the Study of the Mechanism of Desertification*, Toyo Publishing & Printing Co., Ltd., Tokyo, 440-445.
- QIU, G.Y., YANO, T., MOMI, K. and SHI, Q.H. (1995): The succession of planted communities in Tengger Desert in relation to root distribution and soil water status. *J. Arid Land Studies*, 4: 81-89.
- SCHULZE, E.-D. (1986): Carbon dioxide and water vapor exchange in response to drought in atmosphere and in the soil. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 37: 247-274.
- SHEN, W. (1986): The status of *Artemisia ordosica* in vegetation succession at Shapotou area. *Chinese J. Desert Res.*, 6-4: 13-22. (in Chinese)
- SHI, Q. (1991): The plant phenophase in Shapotou area. In SDRS (Shapotou Desert Research Station, Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences) ed., *Studies on Drifting Sand Control in the Shapotou Area of Tengger Desert (II)*, Ningxia People Press, Yinchuan, China, 425-435. (in Chinese with English summary)
- TURNER, N.C. (1986): Adaptation to water deficits: a changing perspective. *Aust. J. Plant Physiol.*, 13: 175-190.
- ZHANG, J. and Xu, B. (1985): Moisture condition in different dunes in southern Horqin steppe. *Chinese J. Desert Res.*, 5-3: 33-39. (in Chinese)
- ZHAO, C. and HUANG, Z. (1981): A preliminary study of xeromorphism of some important xerophytes growing in Tengger Desert. *Acta Botanica Sinica*, 23-4: 278-283. (in Chinese)
- ZHAO, X. (1991): Problems of revegetation on sand dunes in Shapotou area. In SDRS (Shapotou Desert Research Station, Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences) ed., *Studies on Drifting Sand Control in the Shapotou Area of Tengger Desert (II)*, Ningxia People Press, Yinchuan, China, 27-57. (in Chinese with English summary)
- ZHU, Z., ZOU, B., DI, X., WANG, K., ZHANG, J., CHEN, G., WEN, Z., SHAO, L. and XU, B. (1988): *Desertification and Rehabilitation: Case Study in Horqin Sandy Land*. Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, China, 2-16, 60-63.

## 一年生沙漠植物 *Agriophyllum squarrosum* 及び *Bassia dasypylla* の 水ストレスに対する光合成と水利用の反応

莫 文紅\*・名取俊樹\*\*・姜 恕\*\*\*・西村 格\*・大政謙次\*\*

この研究は、中国北部乾燥地域の流动砂丘において最も一般的な先駆植物として分布する *Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq. が、植生の被覆の増加によって流动砂丘が固定されていく過程で消滅する原因を明らかにすることを目的として実施した。そのため、異なる水ストレス条件下で *Agriophyllum squarrosum* と半固定砂丘に良く見られる *Bassia dasypylla* Kuntze を、光合成と水利用に対する反応から比較し、さらに現地における砂丘土壌の含水率の分布状況を比較し考察した。

実験に用いた2種植物の種子は、中国トンゴリ沙漠の東南部にあるシャボトウ地区から採取し、温室内のポットに播種育成した植物体を材料に用いた。光合成速度、水ポテンシャル及び蒸散速度変化の測定は、ポットの灌水を停止した後、経時的にファイトロン内で同化箱法を用いて測定した。また、採種地における流动砂丘及び半固定砂丘の土壌含水率についての現地調査も併せて実施した。

これらの実験及び調査の結果、流动砂丘に分布する *A. squarrosum* は、LARCHER (1995) による区分では中生植物に区分され、*B. dasypylla* は乾生植物に区分される。*A. squarrosum* は *B. dasypylla* に比較して水ストレスに対して光合成量の低下が著しく、*B. dasypylla* は強い水ストレスに対して、高い水利用効率を示した。また、砂丘土壌の含水率は半固定砂丘では下部において、流动砂丘よりも低いことが明らかにされた。これらが総合された結果として、流动砂丘の先駆植物である *A. squarrosum* は半固定砂丘になると生存できなくなるものと推定された。

\* 岐阜大学流域環境研究センター

\*\* 国立環境研究所

\*\*\* 中国科学院植物研究所

(受付：1997年9月12日、受理1997年11月27日)

## チュニジアのナツメヤシ民俗文化 —ジェリード地方のオアシスの事例—

鷹木 恵子\*

### 1. はじめに

ナツメヤシは、中東・北アフリカの熱帯・亜熱帯乾燥地帯を代表する植物であり、その環境に生きる人々の生活文化と深い結びつきを行している。ナツメヤシは、ペルシャ湾沿岸地域が原産とされ、その果実は既に6,000年もの昔から食用として知られていたとされている（佐竹, 1972: 636-637）。この木はまた果実ばかりでなく、株全体が、幹や枝葉を始め樹液、樹芯、繊維、刺、果実の房、種子に至るまでが、それぞれ多様な利用価値をもち、

乾燥地帯の物質文化の重要な部分を構成してきた。象徴的にも、ナツメヤシの木は、アラビア半島で誕生したイスラームとも少なからぬ関わりをもつている。

ナツメヤシの文化は、しかしながら実際には、そのオアシスの景観だけを取り上げてみても、水の問題や灌漑様式、労働力の投入量などにより、地域によつても異なるものがみられ、またナツメヤシには学術的には数百に及ぶ品種があるともされ、さらにこの木の利用法・加工法、この木にまつわる民俗伝統や象徴性ともなると、当然ながら地方色やその多様性を抜きに論じることは不可能である。加えて、今日、ナツメヤシから作られる物質文化は近代的な商品文化とも競合し、大きな変容を余儀なくされてきている。

本小論では、チュニジア南部のナツメヤシ・オアシス地帯、ジェリード地方での調査に基づき、ナツメヤシの民俗文化、特にナツメヤシの利用法とこの木のもつ象徴性について、今日の変容の在り方も含めて報告することにする<sup>1)</sup>。なお、筆者はナツメヤシ・オアシスの生活誌に関する小論（鷹木, 1994）を既に刊行しているため、ナツメヤシ農業の詳細やオアシス管理に関する社会組織については重複を避け、また部分的に内容がその論文と重複する箇所ではより詳しい追加資料を提示するかたちで述べることとした。

### 2. ジェリード地方のナツメヤシ・オアシスと農作業の概要

#### 1) ジェリード地方の地理と地名

ジェリード地方は、チュニジア南部、首都のチュニスからこの地方の主要都市のトゥズルまでは約475キロ、北アフリカ最大の鹹湖ジェリード湖の北側に位置している（図1, 2）。ジェリード地方のオアシス地帯は、この鹹湖とその南面一帯を接するかたちで東西に広がつており、鹹湖を挟み、その対岸にあるネフザーワ地方のオアシスと共に、チュニジアを代表する二大ナツメヤシ・オアシス地帯として知られている。今日、この二大オアシ

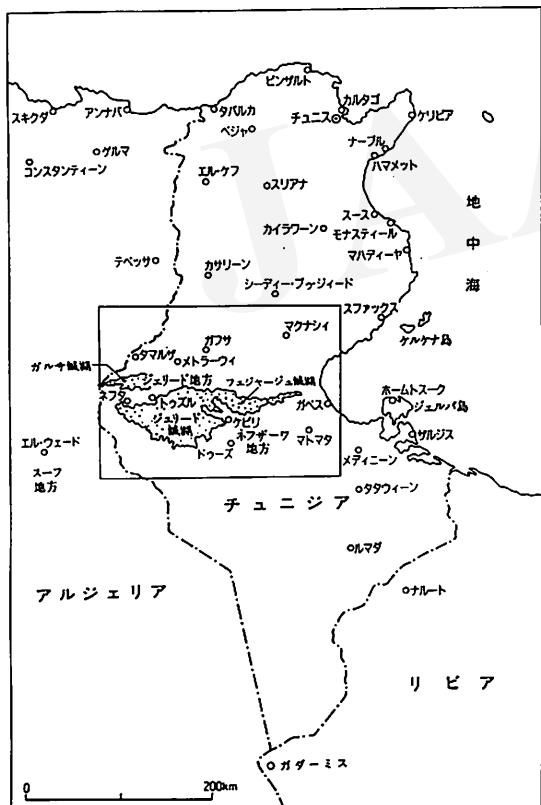


図1. チュニジア共和国（枠内：図2）。



図2. チュニジア南部ジェリード地方とネフザーワ地方

スが有するナツメヤシの株の本数は、チュニジア全体のほぼ75%<sup>2)</sup>、ナツメヤシの実の生産量では全国総生産量の約85%を占めている<sup>3)</sup>。

ジェリード地方は、気候的には1983~1994年間の統計では、年最高気温が39.1~46.6°C、また年最低気温は-1.4~5.8°C、年平均気温は21.3~24.2°C、そして年降水量は、48~300ミリという半砂漠性気候の一帯である<sup>4)</sup>。この地方は、乏しい降水量の一方で、自然の湧水源 (râ's al- 'ain) に恵まれていたことから、歴史的には既に2,000年もの昔からオアシスが存在していたとされている (TONNEAU, 1993: 7)。ネフザーワ地方のオアシスも起源は古いか、近年の遊牧民の定住化とともに、急速に開発され発展してきたオアシスであるとすれば、ジェリード地方のオアシスは、それとは対照的に古来の定住耕民のオアシス地帯である<sup>5)</sup>。

10世紀にジェリード地方を訪れたイブン・ハウカルは、そのオアシスの豊かさを印象的に記しており (IBN HAWQAL, 1964, tome I: 92, 94)、ほぼ同様の記録は11世紀半ばのエル・ベクリの地理書 (EL-BEKRI, 1965: 48, 102-103) や12世紀半ばのイドリーシーの著書 (EDRISI, 1969: 121-123) のなかにも見出すことができる。この地方は、当時はまだ「カステイリーヤ Qastiliya/Bilad al-Qastiliya」という地名<sup>6)</sup>で呼ばれていた。「ジェリード Bilâd al-Jarid/le Djérid」という地名<sup>7)</sup>は、「ナツメヤシの枝葉 al-jarid」を意味する語に由来するが、この地名は14世紀始めのティッジャーニーの旅行記 (AL-TUJJANI, 1980: 157-164) のなかに、既に今日と同様の地方を示す地名として出てきている。ただし14世紀半ばのイブン・ハルドゥーンの著書 (IBN KHALDOUN, 1969, Tome IV: 497, 519) や16世紀前半のレオ・アフリカヌスの著書『アフリカ誌』 (L'AFRICAIN, 1980: 4-5, 7-8) のなかでは、現在のジェ

リード地方よりもさらに広い、北アフリカ一般のナツメヤシ・オアシス地帯、すなわちモロッコからトリポリタニアあるいはエジプトに至るナツメヤシ・オアシス群を指す地名として使われていた<sup>8)</sup>。そして今日では、ジェリード地方とは、チュニジア南部のオアシス地帯、ほぼトゥズル県に相当する地方を指して使われている<sup>9)</sup>。

## 2) ナツメヤシ・オアシスの形態と農事暦

ジェリード地方のナツメヤシ・オアシスは、豊富な水量や定住農耕民による年間通じた農作業によって、ナツメヤシの木々の他にもさまざまな果樹や野菜が植えられた三層の形態を成している。すなわち、ナツメヤシの木々を最高層とし、その下の中間層には果樹類の層があり、地面付近には野菜類が植えられている。この点では、同じくチュニジア南部のナツメヤシ・オアシス地帯でも、ネフザーワ地方の場合は、従来ナツメヤシを主とする一層形態のオアシスであったのとは異なっている (図3, 4)。ネフザーワ地方では、水源が小さな湧水源のみで、また従来住民の半数近くが遊牧民であったため農業への労働投入量が少なかつたことから、ナツメヤシ以外

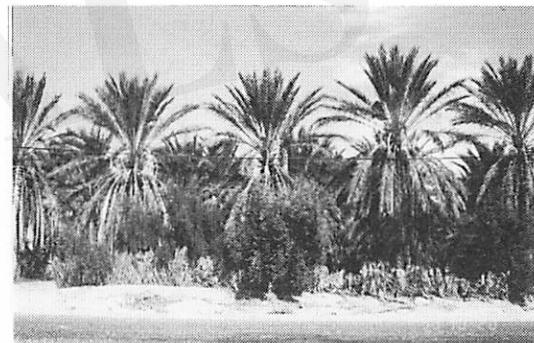


図3. 三層形態のオアシス (ナツメヤシの下にオリーブの木が生えている)。



図4. ナツメヤシを中心とした一層形態のオアシス (近代的オアシス)。

の果樹・野菜の栽培はごく限られたものであつた。

ジェリード地方のオアシスでは、上層のナツメヤシの木々に続き、中間層には果樹類として、オリーブ (*zaitün*)、アンズ (*mashmâsh*)、イチジク (*karmûs/tîn*)、モモ (*khûkh*)、ナシ (*anzâs*)、ザクロ (*rummân*)、レモン (*qâris*)、カリン (*sfranjil/safarjal*)、リンゴ (*tuffâh*)などが植えられている。そして下層の地面付近には、まず夏向け野菜・果物 (*khudra şâifiya, ghalla şâifiya*)として、青菜類の西洋パセリ (*ma 'dnûs*) やクラーフィズ (*klâfîz*)、シルク (*silk*)、サラダ菜 (*khass*)、トマト (*tmâtum*)、甘ピーマン (*filfil halû*)、辛ピーマン (*filfil hâr*)、ジャガイモ (*baṭâta*)、ナス (*bidanjân*)、タマネギ (*başal*)、キュウリ (*faqqûs*)、カボチャ (*gara 'ahmar*)、オクラ (*gnawîya*)、トウガラシ (*filfil*

*ahmar/filfil bar 'abid*)、スイカ (*dillâ '*)、メロン (*battîkh*)が、そして冬向け野菜 (*khudra shitawiya*)としては、ニンジン (*sfînâriya*)、ジャガイモ (*baṭâta*)、ナガネギ (*başal*)、シロカブ (*lift*)、ソラマメ (*fûl*)、ヒヨコマメ (*hummuş*)、モロコシ (*dura '*)、またその他にモロヘイヤ (*mulukhiya*) やヘンナ (*henna*)、バラ (*ward*)、ヒマワリ ('*abid al-shams*)などの低木類、家畜の餌となるウマゴヤシ (*fâşşa*)などが植えられている（表1）。

農事暦も、したがつて表2のように、ナツメヤシの農耕サイクルと果樹・野菜類のそれとに大別し得る。前者は受粉作業の行われる3月に始まり、収穫期の終わるほど1月に閉じる。後者は播種や苗の植え付けが夏冬の野菜・果物ごとに異なり<sup>10)</sup>、また収穫の時期もさまざまである。

表1. ジェリード地方の三層構造のオアシス形態と農作物。

上層	ナツメヤシのさまざまな品種の株
中層	オリーブ、アンズ、イチジク、モモ、ナシ、ザクロ、レモン、カリン、リンゴなどの果樹類
下層	青菜類（西洋パセリ、クラーフィズ、シルク、サラダ菜）、トマト、甘ピーマン、辛ピーマン、ジャガイモ、ナス、タマネギ、キュウリ、カボチャ、オクラ、トウガラシ、スイカ、メロン、ニンジン、ナガネギ、シロカブ、ソラマメ、ヒヨコマメ、モロコシ、モロヘイヤ、ヘンナ、バラ、ヒマワリ、ウマゴヤシなどの野菜・果物類

表2. ジェリード地方のオアシスの農事暦。

ナツメヤシの農作業	
1月	ヌティーミーの収穫期 結婚祝い 収穫期の後のオアシスの掃除
2月	農園：オアシスの土地の整備 耕耘、肥料（堆肥・化学肥料）を施す 道路や耕地の作り替え ナツメヤシの花が咲き始める
3月	レーベミーの収穫期 苗（ガルス）の植付け 受粉作業（タスキール）
4月	シーシュ（受粉作業無しに成了った実）の採り入れ
5月	果樹植え（ファラオの祭り）（5月中旬）
6月	苗（ガルス）の二度目の植付け ナツメヤシの実の房を枝に糸で束ねて束ねる作業（イフライーズ） バラ水の採り入れ
7月	枝葉（ジェリード）払い → 日用品・工芸品の材料になる ビスルの採り入れ
8月	ヌマル・アブヤドの収穫期 草熟の実の採り入れ（タンギーヤ） その後に房ごとの採り入れ 灌漑装置を行う
9月	エグロの収穫期
10月	市場への出荷 デグラト・ヌールの収穫期
11月	ヌティーミー（アリーヴ）の収穫期
12月	ヌマル・マハシー作り ヌマル・マジューン作り 観音堂参詣祭（ジヤーラ）開催（12月下旬）

野菜・果物の農作業	
1月	ヌオリーブの収穫期
2月	土地を開拓する。肥料（堆肥・化学肥料）を撒く 道路・耕地の区画を作り替える
3月	夏・夏向け野菜・果物の播種と苗の植え付け（サラダ菜、マドヌース、シルク、クラーフィズ、トマト、ピーマン、ジャガイモ、ナス、タマネギ、キュウリ、赤カブ、カボチャ、オクラ、スイカ、メロン等）
4月	オレンジの花を摘集 → オレンジ水作り クワの実の採り入れ ソラマメの採り入れ
5月	バラの花を摘集 バラ水作り イチジクの若い実 アブリコットの採り入れ
6月	夏野菜の収穫期
7月	ヌモ・イチジクの収穫期 スイカ・メロンの収穫期
8月	
9月	ヌオリーブの収穫期 → オリーブの漬物作り ザクロの採り入れ
10月	主・夏向け野菜・果物の播種と苗の植え付け（ジャガイモ、ニンジン、長ネギ、白カブ、ナス、ピーマン、エンドウ豆、ヒヨコ豆、ソラ豆、コムギ、オオムギ等） トウガラシの採り入れ → ハリサ作り
11月	ヌオリーブの収穫期 → オリーブ油作り+オリーブの漬物作り
12月	レモン・オレンジの採り入れ

表3. アジャミー暦の語彙と西暦での対応月日。

アジャミー暦（自然暦）	西暦での対応月日（1994年）
新年 (râs al-sana al- 'ajamiya)	1月15日
黒い夜 (al-liyâli al-sûd)	1月15日（20日間続く）
イザーラ (al- 'izâra)	2月 3日
山羊の寒さ (qurrat al- 'anz)	2月14日
風の温み (jumrat al-hawâ'î)	2月20日
水の温み (jumrat al-mâ'î)	2月27日
春 (al-rabi' ')	2月28日
土の温み (jumrat al-turâbo)	3月 6日
ハスーム (al-hasûm)	3月10日
春分 (a ' tdâl al-rabi' ')	3月19日
夏 (al-şifî)	5月29日
アウッスー (awussû)	7月25日（40日間続く）
秋 (al-kharîf)	8月23日
秋分 (a ' tdâl al-kharîf)	9月12日
桂夜等分の日 (istiwâ' al-lail wa al-nahâr)	9月27日
冬 (al-shitâ')	11月29日
白い夜 (al-liyâli al-bid)	12月25日（20日間続く）

年間を通じた農作業サイクルとなっている。農事暦は、今日では太陽暦の西暦に基づいている。しかし西暦がフランス植民地時代以降、次第に普及するまでは、ほぼ8世紀以降この地方がイスラーム化し、太陰暦のヒジュラ暦が用いられるようになってからも、古代ローマ時代の暦を継承したアジャミー暦 (al-yawmiya al- 'ajamiya) と呼ばれる太陽暦が併用されていた（表3）。「アジャミー」とは、「非アラブのnon-arabic」という意味で、この暦はもともとはエリウス暦に由来するとされ、グレゴレオ暦より半月遅れた西暦の1月15日を新年としている。表3のように、それは一日一日を精確に定めた暦ではなく、季節ごとの特徴を表わす語彙によって大まかに時節を表した暦で、現在でもこれは地方的年中行事などとの関わりで使用されている（鷹木, 1992）。ジェリード地方のナツメヤシ農耕との関わりでは、アジャミー暦での5月1日には、受粉後、ナツメヤシの実が大きく成長することを願う「ファラオの祭」と呼ばれる豊饒儀礼が行われる（Payre, 1942; 鷹木, 1984）。この儀礼は土着的信仰や習俗を今に留めた、また地中海世界に広くみられる「五月の祭」とも共通する内容をもつものである（フレーザー, 1992: 258-285）。

オアシスの存在やその景観とも関わる水源に関しては、一般的に考えられる自然の湧水 ('ayn), 河川 (nahr), 井戸 (bi'r), 天水 (maṭar/naw') などのうち、ジェリード地方の場合は、古くから主に湧水に依存してきた。トウズルやネフタは、そうした大湧水源を基に発達してきた町であり、その水が河川のように都市の中へ

と流れ込み、それを利用しました人工的に統制分水して、古くからその回りには広い耕地が開けていた。その他の古来のオアシス集落では、農耕地が小湧水源を中心に地形の起伏をそのまま反映するかたちでより不規則的に広がることが多かった。しかし、1960年代以降、灌溉方法にモーターポンプが導入されてからは、既存の湧水源が次々と枯渇した一方、人工的に一定量の水の安定供給が可能となり、耕地がより規則的に幾何学状に広がるようにと景観自体も変化してきている。

また従来のオアシス農地では、1ヘクタール当たり、300本以上のナツメヤシの株が植えられた高密度の農地が多かつたのに対し、近代的な開発オアシスでは、農業技術者の助言もあり、ナツメヤシの株が10メートルの等間隔で整然と植えられているという対照性を成している（CONFORTI et al., 1994: 17-19）。

こうしたより計画的で規則的な農地の広がり方は、モーター導入以降の近代的オアシスばかりでなく、例えばカナートやカハン、フォガラと呼ばれる地下水路を発達させてきたイランやパキスタン、アルジェリアなどの一部の地域でも、水の安定供給と関わり、古くからみられていたものであった（岡崎, 1988; 松井, 1991a, b; 小堀, 1997）。

また水の供給が困難な地域では、例えばアルジェリア・スーフ地方などでは、ナツメヤシの株を低地の、しかもすり鉢状に深い穴を掘った部分の底に植え、それによつてナツメヤシの根自体が直接地下の帶水層から水分を得るかたちで生育し、ナツメヤシの群を成すという例もみられた（CAUVET, 1914）。その場合は、ナツメヤシの株が半分砂に埋もれているように見え、オアシスの景観も、当然ながら全く異なるものであった。そのようなオアシスは、チュニジアでも南東部、サハラ砂漠により近接した地域などにみられる。

ジェリード地方のナツメヤシの品種については、学術的分類では100種程度とされるが（KRAENEY, 1910; RHOUMA, 1994），一般の人々のあいだでも20種程度の品種が見分けられている。そしてこれらのナツメヤシの品種もまた、オアシスの新旧やその大まかな年代、変容など関わり合っている。すなわち、最も古い自然発生的なオアシスでは野生の品種シッカーン (shikkân) が主であり、また19世紀頃までに開発されたオアシス農地ではアリグ ('alig) とフティーミー (futîmî) の品種が中心を占めていた。そして、チュニジア独立（1956年）以降、オアシスの開発が進むに従い、より近代的オアシスでは、商品価値の高いデグラ (deglat) の品種がより大きな割合を占めるようにと変容してきている。



図5. 手作業での受粉作業.



図6. オアシスでの手作業での灌漑.

(Rouissi, 1973).

### 3) ナツメヤシ農業で使用する農具と計量単位

ジェリード地方のオアシスでは、農地にはナツメヤシの木々が林立しているため、穀物地帯とは異なり、農作業に家畜を使用するということはない。近年に開発されたナツメヤシ・オアシスは、耕地が広く、また木々の間には充分な間隔がとられていることから、トラクターの使用も若干みられる。しかしそれ以外では、現在でも、耕耘、耕地整備、播種、苗の植え付け、受粉作業、灌溉、作物の手入れ、収穫、枝払いなどの農作業が、全て基本的には手作業で進められている（図5、6）。こうした農作業に、現在ジェリード地方で使用されている農具には、図7のようなものがあり、それぞれ、以下のように使い分けられている。

#### (1) ミンジル (minjil)

鋸刃付きの鎌の一種。柄と刃の角度が約120度に曲がっている。これは、ナツメヤシの実の収穫時の房の刈り取りや若い株（ghars）の切り取り、枝払いなどに使用。最も使用頻度の高い農具のひとつ。

#### (2) マハッシャ (mahashsha)

鋸刃付きの丸刃の鎌。ミンジルより小さく、牧草刈りや野菜類の手入れなどに使用。

#### (3) ハジャミーヤ (hajamîya)

鋸刃無しの鎌。ミンジルに形は類似し、鋸刃のないもの。ナツメヤシの樹液採取の折に、株の樹芯部を削り取るためなどに使用。

#### (4) ティスター (tîstara) またはミンシャール (minshâr)

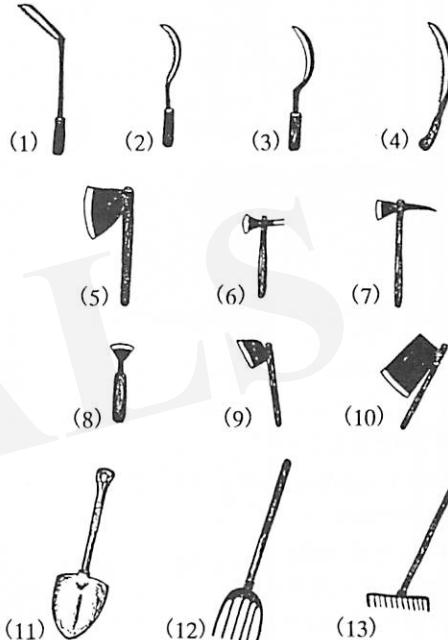
小鋸。木や株の伐採に使用。

#### (5) シャグール (shagûr)

斧。木や株の伐採や幹を割るために使用。

#### (6) フアース・サギール (fâ's şaghîr)

小斧。薪を割つたり、枝を払うのに使用。



- (1) ミンジル (minjil) , (2) マハッシャ (mahashsha) ,
- (3) ハジャミーヤ (hajamîya) , (4) ティスター (tîstara) ,
- (5) シャグール (shagûr) , (6) フアース・サギール (fâ's şaghîr) , (7) シャウカ (shawka) , (8) マルシャム (marsham) , (9) マスハ・ガフシー (mashâ gafsi) ,
- (10) マスハ (mashâ) (11) バーラ (bâla) (12) フルカ (furka)
- (13) ラートウ (râtû)

図7. ジェリード地方のオアシスで使用されている主な農具.

#### (7) シャウカ (shawka)

つるはし。穴を掘る時などに使用。

#### (8) マルシャム (marsham)

のみ型の農具。背丈の短い草、根の張った植物などの刈り取りに使用。

#### (9) マスハ・ガフシー (mashâ gafsi)

小丸鍬. 耕耘や播種, 苗の植え付けの時に使用.

(10) マスハ (masha)

平鍬. 耕耘や畦道の整備などに使用. 灌溉時に盛土をしたり, 塙を崩すなどのために使用.

(11) バーラ (bâla)

スコップ. 土を運んだり, 肥料を撒くためなどに使用.

(12) フルカ (furka)

フォーク. 牧草を積み上げる時に使用.

(13) ラートウ (râtû)

熊手. 土を均したり, 砂利除け, 刈り取り後の雑草集めなどに使用.

またナツメヤシの実は, 現在ではグラム・キログラムの重量の単位で計量されているが, 少し以前までは容量で計り売買されていた. その単位としてはジェリード地方では, 次のようなものが知られている. これらの容量単位は, 現在でも穀物類の売買では, グラムの重量単位とともに併用されている.

(1) カール (s.kâr, pl.kirân)

1カール = 1/4 リットル.

(2) ルーハ (s.lûha, pl.alwâh)

1ルーハ = 4 リットル. 1ルーハ = 16 カール.

ルーハは, チュニジアでも地域により, ルブゥーイー (rubû 'î), トゥニシー (tûnisi), サーア (sâ ' ) という語彙で呼ばれることがある.

(3) ガルバ (s.galba, pl.galbât)

1ガルバ = 16 リットル. 1ガルバ = 4 ルーハ.

(4) ギフィーズ (gifîz)

1ギフィーズ = 32 リットル

1ギフィーズ = 8 ルーハ = 2 ガルバターン.

以上のように, ジェリード地方のナツメヤシ農業では, 灌溉の動力や植え付けの品種, 植え付け方, その規模, 果実の計量単位, またここでは扱わなかつたが販売ルー



図8. さまざまなナツメヤシの実の種類.

トや商品化の規模などの点では, 貨幣経済の浸透や近年の交通手段の発達などに伴い, 大きな変化がみられてきている. しかしその一方, 最も基本的な農作業の技法に関しては, 現在でも専ら従来通りの手作業であり, その点ではほとんど変化がみられていないことになる.

### 3. ナツメヤシの利用法

ナツメヤシの木の利用法には, かなり広い地域に共通してみられるものと, またアラブ圏内でも地域的多様性のみられるものもある. またほぼ同様のものが方言により異なる語彙で知られていることが多い. 続いてはジェリード地方のナツメヤシの利用法について, その用途ごとに今日の変容も含めて述べてみたい.

#### 1) 食する (ya'kul)

(1) ナツメヤシの種類と収穫期

ナツメヤシの実タムル (tamr) は, ジェリード地方でも従来は, 食生活の重要な部分を占めていた. 実の消費の仕方は, 品種, 品質, 成長段階などによっても異なり, 完熟した実ばかりではなく, 各成長段階での実や自然落とした実なども消費する.

ナツメヤシの多種に及ぶ品種は, ジェリード地方では, 収穫期と商品的価値とから, 次の三つに大別されている. まず, 商品価値が最も高い品種として, ①デグラまたはデグラトルヌール (deglat al-nûr) があり<sup>11)</sup>, 次に価値があるとされるのが②アリーグ (alîq) あるいはフティーミー (futîmî) と呼ばれる品種で, 最後に一株当たりの収穫量が少なく, また商品価値も低い多種の品種が総称で3.タムル・アブヤド (tamr abyad) と呼ばれているものである<sup>12)</sup>. これら三分類されるナツメヤシの実は, 収穫期も少しずつ異なり, 最初に収穫されるのが③タムル・アブヤドで, 8月の初旬には収穫期を迎える. 次に

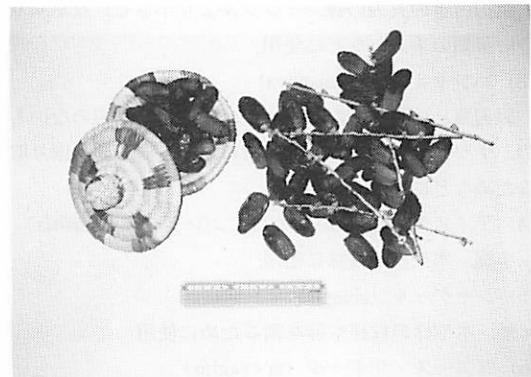


図9. 最も高価な品種デグラの実とヤシの葉で作ったタバッケ.

9月下旬頃から、デグラの収穫期が始まり、12月頃まで続く。そして最後に10月末から1月頃までが、アリーグの品種の収穫期となる。

ナツメヤシの実には、成長段階ごとの名称もあり<sup>131</sup>、この地方では、3月初旬頃の芽が出たばかりの花は①ターラア (*tála 'a*)、4月頃の少し膨らみ始める受粉期前の花は②ビリール (*birırı*)、受粉後のそれは③ビージィル (*bizırı*)、少し青みがかり大きくなつた6~7月頃の実は④バラホ (*balahı*)、完熟前のやや茶色味かがつてきた実は⑤ビスル (*bisırı*)、そして完熟した実が⑥タマル (*tamrı*) とされている。

そして特にデグラの品種については、バラホやビスルの段階で、房 ('arjún) から一部自然落下した実も、5~8月にかけては量は多くはないが採り入れをし、食用とする<sup>132</sup>。バラホは黄色い実で、またビスルは茶色の水分の少ない乾いた実で、それぞれに異なる味わいがある。またこれらの自然落下した実は、完熟した実とは異なり、長期保存は不可能で、収穫後数日のうちに消費される。

8月始めには、早成種のタムル・アブヤドが収穫期を迎える。その採り入れ作業は、まずタンギーヤ (*tangiya*) という作業から始められる。これは、実の房全体が完熟する前に、房のなかでも先に熟した実だけを一粒一粒選んで摘み取る作業のこと、真夏の猛暑のなか、樹上で1~2時間にもわたる作業であるため、ナツメヤシ農作業のなかで最もきつい仕事とされている。これはタムル・アブヤドの種についてのみ行われ、その後房全体が熟す8月半ば頃には房ごとの採り入れがなされる。

ジェリード地方でタムル・アブヤドの総称で呼ばれるナツメヤシには、多種の品種が含まれており、それらには、グンディ (*gundi*)、ラーグー (*lágú*)、アンマリーー ('ammârî), ガスビー (*gaşbî*)、ハルト (*khaltı*)、アハワート・アルフティーミー (*akhwât al-futîmî*)、シュカーン (*shukân*)、ハルト・ブウ・シューシュ (*khalṭ bû shûsh*)、ガルス・ムティーギー (*gars muṭîğî*)、マナーハル (*manâkhar*)、ハムラーイー (*hamrâyî*)、キンティシー (*kintîshî*)、ハルト・アラー・ミスキーン (*khalṭ 'alâ miskîn*)、ブウ・ファクース (*bû faqûs*)、ビーダ・ハマーム (*bîda hammâm*)、ハルワーヤ (*halwâya*)、キンター (*kintâ*)、ターザルザイト (*tâzarzâyt*)、アトランジー (*atranjî*)、ティキル・ミスト (*tikil mistî*)、シッダーハ (*shiddâkh*) などがある。これらの実は、品種ごとに色も、黄や茶、焦げ茶・黒・藍色・赤などさまざまで、形も細長いもの、丸いもの、やや太めのものもあり、また硬さや甘み・水分などにより味わいも微妙に異なる。



図10. ナツメヤシの実をヤギの皮袋に入れる保存食作りの作業。

ている（図8、9）。タマル・アブヤドはこうした多種の品種を含むが、これら一株当たりの収穫量は少なく、今日では商品価値の高い品種の株に植え替えられ、その総数自体が減少してきている。ただし、多様な品種を含むタムル・アブヤドを栽培することは、天候不順などで一部の品種に被害が出た場合でも、他の品種は収穫可能であるなど、災害に対する保障の意味をも有していた（HAMZAOUI, 1979）。またこれらの品種は、商品価値は高くはないが、灌漑用水がやや不足気味でも成長し、また収穫後はほとんどそのまま長期保存が可能で、それらの点では最も手のかからない品種とされている。

9月末頃からはデグラの、そして10月末頃からはアリーグの品種が、それぞれ収穫期を迎える。デグラの収穫は、その他の品種の収穫時には房を樹上から単に地上へと切り落とすのに対し、この品種については商品価値ができるだけ損なわないよう、今日でも、数人の者たちが株の幹によじ登り、切り取った房を地上まで丁寧に手渡して降ろすという方法で収穫をする。デグラの実は商品価値が高く、海外への輸出品目もあるが、その一方、多くの灌漑用水を必要とし、収穫後には乾燥作業が要されるなど、商品化するまでに最も多くの人手の掛かる品種とされる。デグラの実は、房ごと壁に吊して干したり、充分な乾燥が必要な場合は実を房からほぐし、中庭などの日当たりに広げて干す。乾燥の期間は10日間から2週間ほどで、毎日日干しを繰り返し、害虫などを取り除いてから、保存する。

## (2) 食し方と保存の仕方

収穫された実のうち最も上質のものは、そのまま生食される。かつては上質の実は男性用の食べ物とされ、また客への接待や祝宴などに供されていた。これらの実は、また二つに裂いて種を除いた後、中にバターやピスタチオのペーストを詰めて、一種の高級菓子に加工して食することも、特に都会などではよくみられる。

デグラやアリーグの実の保存法は、より上質の実はヤギの皮袋シャクワ (shakwa) に入れて保存し、それもかつては男性の食べ物とされていた（図10）。またより質の劣る実はサッバーラ (sabbâla) またはハービヤ (khâbiya) と呼ばれる大瓶に、また最近ではビニール袋や牛乳パックの箱なども再利用し、それらに詰めて翌年の収穫期までの保存食とする。これらは一種の真空保存で、真空の固まりの状態で保存されたこれらのナツメヤシの実は、タムル・マハシー (tamr mahshi) と呼ばれる。ヤギ袋や瓶にナツメヤシの実を詰める際には、空気を入れないようにするそれなりのコツがあり、直径1メートルほどもある大瓶に詰める際にはその瓶の中に人が入り、足で実を踏み固めながら作業をしていたという。またヤギ袋に詰められた実を食する際には、皮を切り裂いて中身を取り出す。

ナツメヤシの実の保存用の大瓶には、通常その下部に穴が空いており、そこからナツメヤシの蜜が採取される。この蜜は、砂糖が流通する以前は専ら甘味料として利用され、また喉の痛みなどを和らげる薬としても珍重されている。

ナツメヤシの実のなかでも、水分を多く含んだ品質の劣るものは、種を取り除き練りもの状のマアジューン (ma 'jûn) にする。それはそのまま食される他、ちょうど餡のように、菓子の中身に使われたり、煮出してその甘露を料理に使うこともある。

ジェリード地方では、さらにこの練りものを使って、この地方独特のアブード ('abûd) と呼ばれる食べ物にもする。アブードとは、このナツメヤシの実の練りものにパン粉やコロハの種 (helba) の粉末<sup>15)</sup>、葉草などを加え、オリーブオイル少量とよく混せて手で何度も練り合わせてなめらかにし、その後さらにそれを親指くらいの太さに丸め、そのまま噛み碎かずに水または牛乳などとともに飲み込むという、やや風変わりな食の習慣である。アブードの材料には、採り立ての実ではなく、必ず一年越しの昨年収穫した実を使う。採り立ての実でアブードを作ると喉越しが悪く、時に喉を痛めることもあるとされる。丸めたアブードを何度も口に運ぶ合間には、オリーブや乾燥小魚などを食する。

アブードの食の習慣は、女性だけにみられるもので、また女性たちは男性の前では決してこれを食べることはなく、それは恥すべき行為、タブーともされている<sup>16)</sup>。アブードを常食とする女性は、今日では年輩の女性が中心となり、若い女性たちはほとんど食さない。しかしアブードを常食とする女性たちによれば、アブードを食べると空腹感を感じず、肉食と同様の活力が出るという。



図11. ナツメヤシの木の樹液レグミーの採取。

アブードの習慣は、食生活が現在ほど豊かではなかった時代、質の劣る実をも充分食料として活用し、かつこうしたナツメヤシの固まりをそのまま飲み込むことで消化に時間をかけ、腹持ちを良くするひとつの工夫であったと考えられる。

ナツメヤシの実の収穫の折には、食用に適さない質の悪い実や虫のついた不良果実なども全て集められる。また収穫期をかなり過ぎてから実ったシーシュという実は、人工受粉無しに自然に成った実のこと<sup>17)</sup>、これも商品価値はないが、放置しておくと、株の健康を害し、翌年は実を結ばなくなる恐れもあるため、必ずその採り入れも行う。

これらの実はその後、乾燥作業などを経て食用可能な実とそれ以外のものとに選別され、後者のものはハシャフ (ḥashaf) と呼ばれ、家畜の飼料に回される。ナツメヤシの実はその食べた後の種も、ラクダやヤギ・ヒツジなどの餌とされるが、いずれも栄養価の高い良質の飼料とされている。さらにナツメヤシの新芽も、家畜の餌とされることがある。

### (3) 樹液の利用

ナツメヤシから採れる食用のものには、実の他に樹液のレグミー (légmi) がある。これは樹冠部を切り取り、ジュンマール (jummâr) という樹心の白い部分に管を差し込んで集められる乳白色の液体で、年中採取可能なものである。しかし、受粉作業の行われる春3～4

月頃が旬で最も味も良く、また量的にも多く採取される(図11)。春には採取を開始した最初の7~10日間ほどは、毎日4~5リットルの樹液が得られる。その後は次第に減り、3週間ほどで尽きる。冬期にはそれが1日1リットル程に減少する。レーグミーは、果汁のように甘くさわやかな味の飲料で、整腸作用があり、皮膚病や麻疹の治療薬としての薬効も知られている。樹脳のジュンマールも、果肉のように甘く柔らかいもので、この部分をそのまま食することもあり、フランス料理では高級食材として珍重されているという。

レーグミーは、さらにこれを発酵させ、東方のアラブ地域ではアラック('araq)、この地方ではキーシム(qisim)と呼ぶアルコール飲料にして消費されることもある。キーシムは、早朝採取したレーグミーに、粗挽き小麦粉(simid)と酵母菌(hamila)また塩と砂糖をそれぞれ少量ずつ加え、日当たりの良い場所に置き発酵させてできる醸造酒で、同日の夕方頃には既に飲み頃のアルコール飲料となる。キーシムは、自家製あるいはそれを作っている人から個人的に購入するのが一般的で、市販はされていない。チュニジアはイスラームを国教とする国家であるが、ラマダーン月中と金曜日以外には、アルコールの販売が許可されており、それら市販のアルコール類と比べると、キーシムの価格は1リットル約600ミリーム(約60円、因みにレグミーは約40~50円)で、普通のワイン1本4~5ディナール(約400~500円)という価格よりも、はるかに安価である。そのため、ジェリード地方ではキーシムの方を嗜む男性が少なくない。

樹液採取のためには、毎日樹心のジュンマールの表面を少しづつ削り取る必要がある。このジュンマールの部分は、ナツメヤシの心臓部とも言われ、これを傷つけるとナツメヤシの株は枯死し、再生不可能となる<sup>10)</sup>。したがって、レーグミー採取の対象となる株には、老木や雄の株やまた商品価値のない品種の株などが選ばれる。

#### (4) ナツメヤシの実の食文化の変容

ナツメヤシの実は、従来は栄養価の高いバランス食品として、この地方の食生活でも重要な部分を占めていた。しかし商品作物化が進むなか、現在ではその1キロ当たりの価格は、末端価格で約2ディナール(約200円)、参考までに述べるならば、小麦1キロ約600ミリーム(約60円)の3倍以上の価格に相当する。しかも小麦の場合は、これをクスクスなどに料理すると、水分を含み1キロの小麦が2.5キロほどの量にも増え、経済面からも商品化したナツメヤシの実は、土地の人々の食卓にはますます上がりにくくなっている。さらに交通機関の発

達と商品の流通により、主食としてはクスクスやパン以外に、スパゲティやマカロニなど小麦の加工食品も簡単に入手できるようになり、地元の人々の食生活におけるナツメヤシの実の消費量は一層減少傾向にある。しかし、安価なキーシムなどは、ナツメヤシの実の消費の減少とは対照的に、嗜好品として相変わらず愛飲されている。

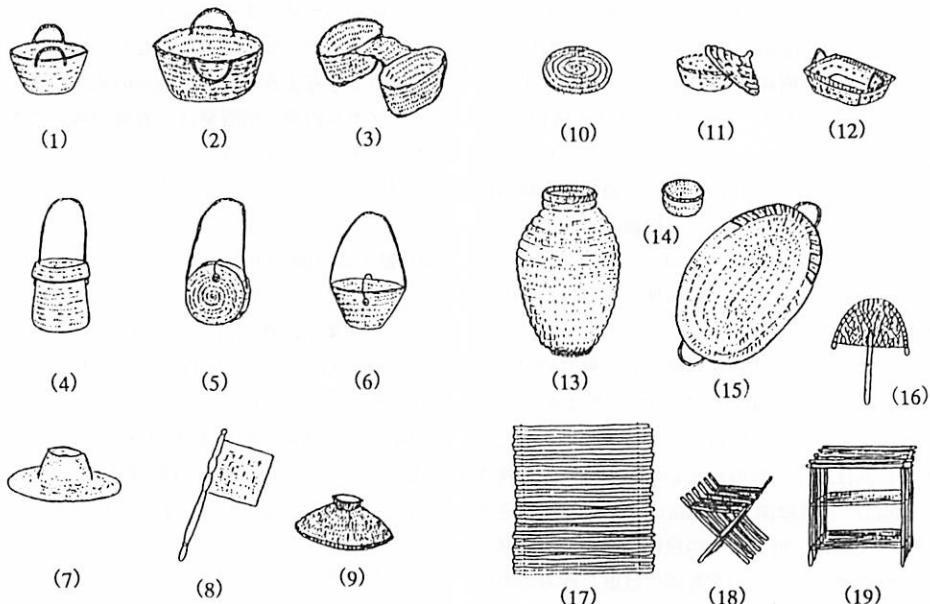
#### 2) 建てる(yabunî)

ナツメヤシは、住生活の面でも、さまざまに活用されてきた。まず、株の幹ジズウ(jidh')は、材木ハシャブ(khashab)として、特に建材に利用されてきた。幹は、樹冠部を切り取り、樹液レーグミーを採取し切った段階で、しばらくそのまま放置し、その後に伐採する。伐採後も日向に放置し充分乾燥させてから使用するが、特にジェリード地方ではこれらの幹をジェリード鹹湖湖畔に半年近くも放置してから使用する。そうすると、太陽熱と鹹湖の塩分とて、これらの幹は鉄のように丈夫な建材になるとされている。幹は、従来は家屋の骨組みや柱、天井部分を葺くために欠かせない建材とされていた。しかし最近では建材に鉄筋やコンクリートが使用されるようになり、従来のようにナツメヤシの木と石または日干しレンガや泥で住宅が建てられることはほとんどなくなっている。しかし特に天井部分については、ナツメヤシの幹と葉柄部分(a.j.sig/a.f.sig)で葺くと、夏は涼しく冬は暖かいという効果があるため、これらを建材に用いることが多い。特に玄関から中庭へと繋がる長い廊下部分サギーフア(sagifa)は、風通しが良く、夏には涼をとる空間や接客の場ともなることが多いため、その部分の天井には現在でもナツメヤシの幹や枝で葺かれること(tasqif)が少なくない。

幹は、テントを張る際の支柱や梁としても使用されていた。また今日でもオアシス農地に点在する農作業の休息所ギリーシャ(girisha)は、専らナツメヤシの幹と枝葉(jerid)から作られる小屋のことで、家畜小屋なども同様に現在でもナツメヤシを建材に用いて作られることが多い。さらに葉柄部分だけを用いて、避暑用の家屋が建てられることもある。

幹の部分は、その他、橋や道路整備のための建材として、また井戸の支柱や機織り機の骨組み、オリーブ・オイル製造圧縮機などの機械の材料としても利用されている。

ナツメヤシの枝葉の部分からは、ザルブ(zarb)というオアシス農地を取り囲む柵も作られる。葉柄の部分を大地に深く差し込み、羽状の葉が上下に交互にならうように重ねて並べ、それらをナツメヤシの纖維で作られた網



(1) グッファ (aj.guffa) , (2) シャバーリーヤ (shabâriya) , (3) ジインビール (zinbil) , (4) ~ (6) サック (sâk) ,  
 (7) ミザッラ (mizalla) , (8) ミルワハ (mirwâha) , (9) ギターウ (gitâ!) , (10) ジイルティーラ (zirtila) ,  
 (11) (12) タバック (tabaq) , (13) サッバーラ (sabbala) , (14) ギニーナ (ginina) , (15) サッジャーダ (sajjâda) ,

図13. ナツメヤシの枝葉から作られるさまざまな日用品.

で結わえていき辦にする。ザルブは、防砂のために砂地に建てられることも多い。

### 3) 篠を作る (yaşna ' ) ・縄をなう (yaftal) ・ゴザを編む (yansij)

ナツメヤシの枝葉ジェリード (jerid) は、図12のように、長さ3~4メートルほどの長さがある。このナツメヤシの葉は、細長い葉サアフ (sa 'f) の部分と葉柄のシーグ (sig/siq) の部分とから成るが、特に枯れ葉の葉の部分からは、図13のようなさまざまな籠類や日用品が作られる。

材料には充分乾燥した葉を用い、買い物用の最も一般的な籠のグッファ (a.j.guffa/a.f.quffa) や、それより大きい農作業用の土砂や肥料を運ぶのに使う籠シャバーリーヤ (shabâriya)、またロバやラクダの背中に乗せる振り分け籠ジインビール (zinbil) なども作られる。最近では、観光客向けに肩から下げるさまざまな形をしたハンドバッグ風の籠も創られ、名称もフランス語の語彙同様サック (sâk) と呼ばれ、出回るようになっている(図14)。これらのうち(4)の形のものは、チュニジア沿岸部では從来、漁獵の際の魚入れや魚の餌入れとして



図12. ナツメヤシの枝葉ジェリード.

使用されていた。

同様にナツメヤシの葉からは、帽子ミザッラ (mizalla) も作られる。もともとはこうした帽子は、男性たちが農作業用に使用していたもので、ジェリード地方では女性が帽子を被る習慣はない。今日みられる大小さまざまな形や飾りのある帽子などは、やはり観光産業と関わりのなかで創り出されるようになったものである。その他、団扇ミルワハ (mirwaha) や、台所用品としては、パンなどに被せる蓋ギターウ (gitā') や鍋敷きのジルティーラ (zirtila)、ナツメヤシの実など乾物を入れるさまざまな形の容器タバック (ṭabaq)，同じく小麦などの乾物保存用の瓶サッバラ (sabbāla)，さらにアスファルトを上に施して水を飲む容器として使うギニーナ (ginīna)，礼拝用の敷物サッジャーダ (sajjāda) なども、全てこの葉を編むことで作り出されている。

籠やマット作りは一般的に男性の仕事であるが、タバックは女性の内職で作られていることが多い。タバックは、ナツメヤシの実の房の芯の部分を利用し、それをほぐしてまず細い竹針のようにし、それを芯にして、その回りに葉をきつく巻き付け、編み込むかたちで作っていく。ヤシの枯れ葉の自然な薄茶色とまたそれに赤や緑、青などの染色を施したものとを共に編み込み、さまざまな柄や紋様を付けたより民芸品としても価値のあるものが創り出されるようになってきている。直径ほぼ25センチ程の中位のタバックを完成させるのに、手慣れた人でも普通半日は要する。

ナツメヤシの枝の生え際の部分には、またリーフ (lif) と呼ばれる茶色い纖維状のものがみられる。これは解した後、クッションの中身として用いられたり、またこの纖維を綯うことで紐や綱が作られる。ナイロン製の紐や綱が今日普及するようになっているが、従来は、専らこのリーフからのものが紐や縄として使われていた。特にこの紐や綱は遊牧民たちに重宝がられ、ラクダの装備や馬具、荷造りに用いられていたという (Du PATY DE CLAM, 1893: 290)、またこの綱は耐水性があるため、井戸水の汲み上げの際にもヤギの革袋ダルー (dalū) に結びつけて使われていた。さらに紐としては、実の房 (ganṭ) の芯の根元に近い部分を細く解し、その纖維をそのまま利用することもある。

#### 4) 家具・道具を作る (yaṣna 'ar)

ナツメヤシの葉の葉柄部分シーグ (sig) は、最も一般的には棒として多様な用途に、身近な例では老人用のステッキなどにも使われる。この棒からは、またそれらを幾つも繋げて簾状にしたものシッダ (sidda) が作ら



図14. ヤシの葉からのカゴやバッグを観光客向けに売る店。

れる。これを作るには、一旦シーグを水に浸けて柔らかくし、それから針金を通して繋いでいく。シッダは、それを土台となるものの上に敷くと、ベッドのようにもなる。シーグの長さ3~4メートルの横幅をもつベッドに、小さな兄弟姉妹たち数人がみな一緒に寝るという光景も、この辺りでは一般的によくみられることである。シッダは、商店の戸口などに垂らし、ブラインドのように日除けにも用いられる。

葉柄の部分からは、さらに家具類、すなわち図13のような椅子や机、棚などが作られる。ジェリード地方の子供たちは、また葉柄と葉を利用して、図13の(16)にあるような罠ファハ (fakh) も作る。そしてそれを農地などに仕掛け、野鳥などをよく生け捕りにする。

ヤシの木の葉柄部分はまた、チュニジア沿岸部ガベス地方では、魚の追い込み漁の柵作りにも使用しているという (Du PATY DE CLAM, 1893: 291)。

実がほぐされた後の房の芯の部分はガント (ganṭ) と呼ばれ、この先の部分はちょうど帯のようにもなっていることから、実際に庭帯のように使用されている。

これらの家具や道具類は、しかしながら今日ではますます近代的な物質に代替されるようになってきている。

#### 5) 燃やす (yash 'ar)

ヤシの枯れ枝は、また重要な燃料でもある。ヤシの葉が一本あれば、それでひとつの料理を完成させることもできる。葉先の部分でまず火を起し、少しずつ枝の細い部分からより太い部分を薪としてくべていき、火力を強めていく。燃料としては、枝の他に、幹の表面にみられる枝葉が落ちたあとに残るカルナーフ (karnāf) という硬質の木片部分も、火力を強めるのに効果があるとされる。ナツメヤシを材料として作られているものの多くは、今日ではより近代的な物資や西欧風の商品に取って替わられつつあるが、ナツメヤシの枝葉の燃料としての価値

は、他の例えは石油などの燃料が有料であるのに対し、農地所有者であれば農地から得られる無料の燃料でもあり、今日でも重宝がられている。ジェリード地方の伝統的建築様式に使用する日干しレンガを作る工房やまた一部の公衆浴場などでは、現在でもナツメヤシの枝葉が燃料として使われている。

#### 6) 縫う (yukhayyit)・留める (yushidd)

ナツメヤシの葉のより幹に近い部分には、鋭く長い刺シューケ (shūk) がみられるが、これは調理や機織り作業に用いられる。遊牧民のあいだでは、テントの布の側面を留めるのにもこの棘が用いられていた。さらに葬儀に際しては、遺体を包んだ白布を縫合する際には、普通の縫い針ではなく、使い捨てのできる針として、今日でもナツメヤシの刺が用いられている。地方によつては、さらにこの刺を集めて、羊毛を梳く道具、ガルダーシュ (gardāsh) 代わりに用いるところもあるという。

#### 7) 遊ぶ (yal 'ab)

葉柄のシーグの部分は、またそれを短く細く切つたものが、ジェリード地方では、日本の「たけとり」にも似た遊びに用いられている。細く切つたシーグを数本落とし、その裏表の出方をみて、コマを進めるという遊びである。またナツメヤシの実の種も、幕並べに似たこの地方で最もポピュラーな遊びであるハルバガ (kharbaga) という遊戯では、小石に対するコマとして用いられている。

#### 8) 飾る (yuzayyin)

ナツメヤシの木は、常緑樹であることから、その枝葉の緑色は乾燥した砂漠地帯では特に豊饒や生命の象徴として捉えられている。そのため、それらの枝葉は結婚式の新郎新婦の玉座の背景を飾つたり、また新年にはこの地方の多くの商店では、ちょうど日本の松飾りのように入り口をヤシの枝葉で飾るという習慣がある。

ナツメヤシの木の象徴性に関しては、さらに次の章でより詳しく述べることにする。

### 4. ナツメヤシの象徴性

#### 1) イスラームの聖典・ハディースの中のナツメヤシ

ナツメヤシの木は、アラビア半島で興つた宗教イスラームの聖典「クルアーン」の中においても、その自然環境との関わりもあり、90個所余りに及んで出てきている。その中では、ナツメヤシの木は神の恩寵やその比類

なき力を象徴するもののように語られている<sup>19)</sup>。また預言者ムハンマドの言行録、ブハーリー編の「ハディース」では、ナツメヤシの木は「ムスリムのような木」<sup>20)</sup>、あるいは「信心深い人間のような木」であるとも述べられており、細かい伝承や繰り返しまで含めると、この木にまつわる伝承は200個所近くに及んでいる。それらは、預言者ムハンマドが生きていた時代に、どのようにナツメヤシが使われ、また預言者自身の生活とも関わっていたかを具体的に示しており、実に興味深いものがある。そしてそれらには、現代のジェリード地方の民俗文化とも部分的に共通しているものがある。

その幾つかの例として、関わりのある部分のみを抜粋してみるならば、次のようなものが挙げられる<sup>21)</sup>。まず食用との関わりでは、

- ・アーサイシャによると、ムハンマドの家族が一日二度の食事をする場合、その一度はなつめやしだけであったという。(人生における恵み 一七 (四))
- ・神の使徒は、断食明けの祭りの日、なつめやしを食べてから出かけた。(二大祭の書四 (一))
- ・彼女 (サフィーヤ) の前の夫と死別後、結婚を控えるべき期間が過ぎたので、彼女と正式に結婚し、なつめやしの実の入つたハイスクミーとい食べ物を作らせ「お前の身近の人たちを喚びなさい」とわたしに言った。(聖戦 七四 (一))
- ・神の使徒は「毎朝、アジュワ (メディナで採れる最高のなつめやし) を七つ食べる者は、毒の害も魔法の害も受けない」と言った。(食べ物 四三 (一))

などの伝承がある。

住まうこととの関連では、

- ・そのとき彼 (預言者) はなつめやしの葉で編んだマットに何も敷かずに座り、毛皮のクッションに寄りかかっていた。(五分の一の規定 一 (三))
- ・アーサイシャによると、神の使徒のベッドは動物の皮になつめやしの筋を詰めたものであつたという。(人生における恵み 一七 (五))
- ・わたし (イブン・マスウード) が預言者と共にメディナの畑に居たときのこと、彼 (預言者) はなつめやしの枝の杖をついていた…。(慈悲深く慈愛あまねき神の御名において神の書および預言者の慣行を拠り所とすること三 (九))

ナツメヤシの木の薬効も知られていたようで、例えば

- ・預言者が脳天を打たれて額は血まみれ、前歯も折れたとき、アリーが盾のくぼみに入れて何度も運んだ水でファーティマは傷口を洗つた。しかし血はますます流れ出たので、彼女がなつめやしの筵を取つて焼き、そ

れを傷口に当てるとき、ようやく血は止まった。（聖戦八〇（二））

さらにこの木のもつ宗教性や超自然的な力に関連しては、

- ・預言者は「夢でわたしは自分がメッカからなつめやしの生えている土地へ移るのをみ、それはアル・ヤマーマカハジルだと思ったが、本当はヤスリブの町であった」と言った。（援助者達の功績 四五（一））

- ・我々が預言者の傍らに座っていたとき、なつめやしの體がもたらされ、彼は「木々の中には丁度ムスリムのように祝福されたものがある」と言った。わたしはそれがなつめやしを指しているのではないかと思い、神の使徒よ、それはなつめやしです、と言おうとしたが、見渡すと、そこにはわたしを含めて十人が居り、わたしは最年少だったので黙っていた。すると預言者は「それはなつめやしだ」と言った。（食べ物 四二（一））

- ・預言者は「木々の中にはムスリムのようなものがあり、それはなつめやしである」と言った。（食べ物 四六（一））

- ・わたしに男の子が生まれたとき、預言者のもとに連れて行くと、かれはそれにイブラヒームという名をつけ、なつめやしを噛み碎いて喉に塗り、祝福してからわたしに返した。（アキーカ 一（一））

- ・神の使徒は「汝ら、なつめやしの実の半分でも施すことによって地獄の火から身を護れ」と言った。（喜捨の書 一〇（三））

- ・預言者がなつめやしの上一或いは、真中一に座り、「債権者のためになつめやしの実を計つてやれ」と命じた。そこでわたしは、彼らのために量目をたっぷり計つてやったが、不思議なことになつめやしは全く減らず、もとのままであった。（売買の書 五一（二））

以上のナツメヤシの宗教的呪術的な象徴性の他に、さらに「ハディース」のなかには、ナツメヤシを擬人化して捉えている部分も見受けられる。

- ・預言者は一本のなつめやしの幹によりかかって説教を行っていたが、説教台を作らせ、それを使うようになった時、なつめやしの幹が呻いたので、彼はそれを撫でた（傑出した者たち 二五（一三））

以上のように「ハディース」からは、ナツメヤシが預言者ムハンマド自身の生活とも少なからぬ関わりを有していたことや、またそれが聖木に近い象徴性を与えられていたこと、ナツメヤシの擬人的表現のあつたことなどを理解し得る。そしてそれらは、既述のジェリード地方のナツメヤシの利用法や、また次に述べるようなジェリ

ード地方におけるこの木の民俗的な象徴性とも部分的には重なり合うものもある。

## 2) ジェリード地方におけるナツメヤシの民俗的象徴性

ジェリード地方の民俗文化においても、「ハディース」にみられたようなナツメヤシを擬人化して語るということが、知られている。

例えば、人間には男女の性別があるが、同様にナツメヤシの木にも雌雄の株があり、しかも双方の容姿は、ナツメヤシの株においても雄株の方は幹が太く棘も鋭いのに対し、雌の株は幹がより細く、棘も少ないと語られている。また女性が年齢が高くなるに連れて子供を産まなくなるのと同様に、ナツメヤシの木も樹齢を増すと実を結ばなくなるとされている。さらに、人間が斬首によつて命を落とすと同様に、ナツメヤシの木も、オアシスの他の果樹などとは異なり、樹冠部を切り落とされると枯死し再生せず、やはり人間と共に通していると語られている。またナツメヤシには人間と同様に感情があり、時には人間同様、気が狂うこともあるという。そしてそうした木は曲がって生えるともいう。こうしたナツメヤシと人間との類似性は、ジェリード地方では、さらにナツメヤシを意味するナハラ（nakhlā）というアラビア語の語彙と同語根の「篩にかける」という意味の語彙（nakhalā）との関わりから説明されている。すなわち、イスラームでは人間は土から創造されたとされるが、この地方の人々によれば、同じ土でも人間は篩にかけられたきれいな土から創られ、一方ナツメヤシはその「篩に残つたもの」の方から作られたのだという。したがつて、もともとは同じ土から作られたため、この両者は当然ながら相互に似ているのだと語られている（ROUSSI, 1973: 91）。

ナツメヤシの木の宗教的な象徴性についても、例えばジェリード地方出身の社会学者M. ルイシーは、ジェリード地方では、ナツメヤシは「宗教的な木」とまでは言えなくとも、少なくとも「高貴な木」「寛大な木」と捉えられてきたと述べている（ROUSSI, 1973: 91）。ジェリード地方におけるナツメヤシの木のもつ宗教・呪術的な象徴性は、より具体的な形としては、例えばこの地方の女性たちの顔や手足、胸元などに施こされている入れ墨（washm）のモチーフにみることができる。図15～18は、こうしたジェリード地方の女性たちの身体に施されている入れ墨のうち、特にナツメヤシを表わしたモチーフを写し取つたものである。図15は、特に額や頬などによくみられるナツメヤシのモチーフのバリエーションである。図16は、胸部に施された入れ墨の図柄で、やはり

その中にもナツメヤシのモチーフをみることができる。図17は、特に腕に施された入れ墨のモチーフで、さらに図18は、足の脇ら脛の入れ墨の図柄を写し取ったものである。これらの入れ墨にみられるナツメヤシのモチーフは、さまざまにデフォルメされながらも、鳥や動物や人間、月や星などのモチーフと共に美しい文様となり、女性の身体を美化し、また豊饒や多産などの象徴性を女性に付与するものであることを示している。すなわち、ジェリード地方におけるナツメヤシの木の民俗的な象徴性としては、ナツメヤシが女性の美化や魅力また女性の守護に繋がる形象でもあつたことを物語っている。

しかし今日では、入れ墨の習慣自体、イスラームの教義に反する慣習ともみなされるようになり<sup>29</sup>、さらに近代的な化粧品も出回るなか、すっかり衰退してきている。現在では入れ墨のある女性は高齢者のみとなり、若い世代の女性にはこうした習慣は既にみられなくなっている。

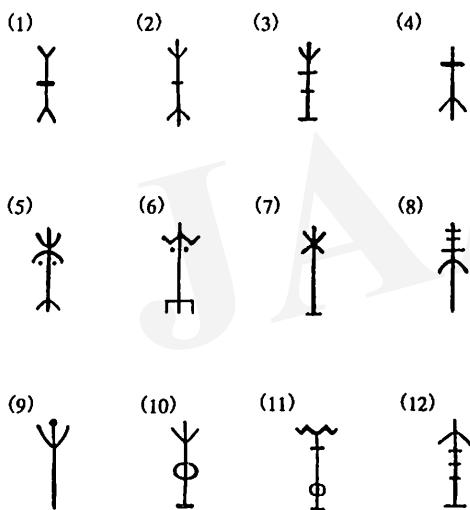


図15. 入れ墨にみるナツメヤシのさまざまなモチーフ。

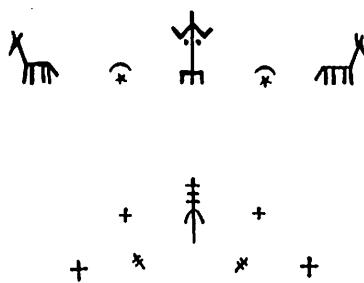


図16. 胸元の入れ墨のナツメヤシのモチーフ。

## 5. 結 語

ナツメヤシは、以上でみてきたように実質的な用途の多様性や、またそれのもつ象徴的意味合いからも、ジェリード地方の民俗文化の重要要素であることが窺えよう。しかし今日、こうしたナツメヤシにまつわる民俗文化は、まず食生活や住生活面でそれが占める比重が、果実の商品化や貨幣経済の浸透、また近代的物資の流通が盛んになるなかで、著しく減少してきている。また女性の入れ墨の習慣などについてもほぼ消滅しつつあるというのが現状である。しかしその一方、ナツメヤシの手作業での農業技法や、燃料としての価値、樹液からのアルコール飲料の消費などは、以前とほとんど変わらず、その技術や知識が継承されてきている。さらに単に継承されるのみならず、ヤシの葉を利用した籠類や容器類などは、観光産業の影響下で単なる日用品から新たにより洗練さ

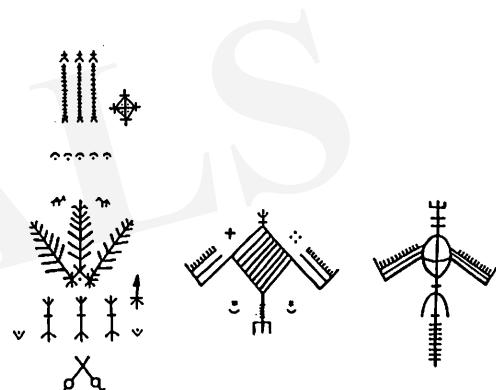


図17. 腕の入れ墨にみるナツメヤシのモチーフ。

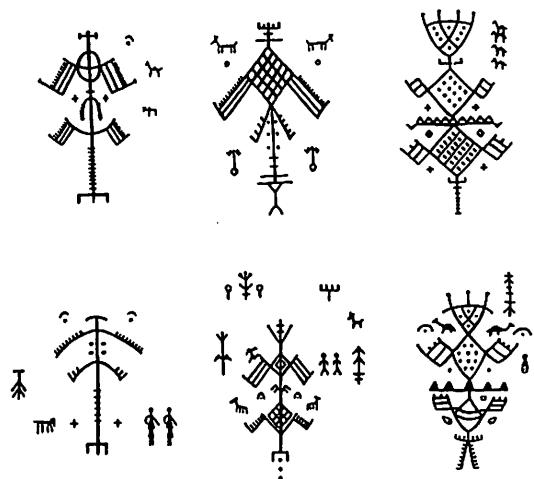


図18. 足の脇ら脛の入れ墨にみるナツメヤシのモチーフ。

れたものへと民俗工芸品化する傾向もみられる。そしてそれらの工芸品作りは、外に出て働くことのないこの地方の女性にとっては絨毯織りに次ぐ、重要な内職の仕事ともなってきてている。

この小論ではジェリード地方のナツメヤシの民俗文化に焦点を当て考察してきたが、それは一部ではあるかイスラームの預言者の時代のそれとも共通するものがあり、また今日においてはより広い外の世界の動向との関わりのなかで、衰退や新たな発展を含みつつ変容していることが窺えるのである。

### 注

- 1) この調査は、平成9年度文部省科学研究費補助金（国際学術研究）「ムスリム社会における民俗知識の継承とその変容—北アフリカの民族誌的研究」（研究代表者：大塚和夫）のプロジェクトの一環として行った現地調査の成果の一部に基づくものである。
- 2) Centre de Recherches Phéniciennes de Degache で入手した *Zirā'a nakhil al-tamr bil-jumhuriya al-tunisiya*. に基づく。
- 3) *Annuaire Statistique de la Tunisie, Année 1994, 1995*: 121.
- 4) *Annuaire Statistique de la Tunisie, Année 1989, 1990*: 9-11.
- 5) 19世紀半ばのジェリード地方とネフザーワ地方のナツメヤシの木の概数は、VALLENSI (1977) によれば、それぞれ約770,000本と約140,000本とされ、ジェリード地方の方がネフザーワ地方の約5.5倍のナツメヤシを行っていたことが知られている。しかし、近年の1994年の統計では、ナツメヤシの実の年間の生産量ではケビリ県（ネフザーワ地方）が47,250トンで、トウズル県（ジェリード地方）のそれは29,500トンとされ、前者が後者の約1.5倍となり、ネフザーワ地方のオアシスの開発の急速な発展ぶりを示している (VALLENSI, 1977: 170; *Annuaire Statistique de la Tunisie, Année 1994, 1995*: 121).
- 6) 「カステイリーヤ Qastīliya」という地名は、古代ローマ帝国の一王女名に由来するともされ (Dakhlia, 1990: 45)、トウズルの旧名またはトウズルを中心とする地方を指して使われていた。
- 7) この地方の地名の発音は、現地では「ジェリード」と発音されていることから、本論文でも「ジェリード地方」と記述する。なお、本文中のアラビア語は、引用以外は特に断わらない限りこの地方の方言で記すこととし、アラビア語のローマ字転記は「イスラム事典」(平凡社) のそれに習うこととする。ただし、この地方で濁音となるカーフの音qについては、gと表示し、ガインghと区別することとする。
- 8) イブン・ハルドゥーンの著書では、「モロッコ・スース地方からトリポリ辺りまでのナツメヤシ・オアシス地帯」とされ (IBN KHALDOUN, 1969, Tome IV: 497, 519)、レオ・アフリカヌスの著書では、アフリカは4つの部分「バルバリア」「スミディア」「リビア」「黒人の地」から成るとされ、そのうちの「スミディア」つまり「東はエジプトのナイル川東部のナツメヤシ・オアシスから西は大西洋に面したナン (Nun) まで、北はアトラスと南はリビアの砂漠地帯まで」が、アラブ人が「ビラード・ルジャリード」と呼ぶ地域としている。アフリカヌスは、同書の他所ではまたその地域にある町として、トウズル (Teozar)、ガフサ (Capheza)、ネフザーワ (Nefzeoa)、エルハーンマ (El Chama)、ガベス (Chalbiz) を挙げている。それらは全て今日のチュニジア南部のオアシスにある町名で、この頃から次第にジェリード地方が今日の一帯を指すようになつていったことが疑われている (L'AFRICAN, 1980: 4-5, 78)。「アルジャリード」の語源については、その他土地の不毛さや荒涼たる風景と関連があるとし、「ナツメヤシ」ではなく、「乾燥した枯れ枝」や「いなご」 (jarād) と関連があるとする説もある。ただしアラブ人のなかでそうした指摘を肯定する者はなく、不毛などに結びつけるのは西欧的偏見ともいえる。
- 9) E.I. (New Edition) の Bilād al-Djārid の項目をおいても、トウズル、ネフタ、アル・ワディヤーン、アル・ハーンマのオアシス地帯とされており、ほぼこの用法に相当する定義がなされている (Yver, M. 1983: 717-718).
- 10) ジェリード地方の土地は塩分を含むなど地味が必ずしも肥沃ではないことから、野菜の多くは播種 (zar') ではなく、苗 (shatra) を植付ける方法を探っている。
- 11) デグラという名称は、この地方の伝承では、この品種がイラクのチグリス川付近原産のため、チグリス川のアラビア語名「デジュラ」に因み命名されたとされる。ただしエジプト経由で伝えられ、その時にエジプト風に訛り「デグラ」となったとされている。
- 12) 「タムル・アブヤド」とは、「白いナツメヤシの実」という意味である。ただし、実自体が白い訳ではない。
- 13) 例えば、パキスタンのバルチスタンの例を認知人類学の立場から報告した業績としては、(松井, 1991a, b) がみられる。ジェリード地方では、ナツメヤシの株の各成長段階ごとの名称も知られており、まず芽が出てから約5年目くらいまでの株はガルサ (gharsa)、約5~10年目までの株はフィシリ (fiṣil)、約10~20年目までの株はジャッバーラ (jabbāra) またはルブイーヤ (reb 'iya) と呼ばれ、この時期から納税対象となり始め、そして20年目以上の株が一般的にナツメヤシとして知られている語彙ナハル (nakhal) の語で呼ばれている (Rouissi, 1973: 100-101)。
- 14) バラホやビスルの実は落下した実のみを収穫し、同じ成長段階であっても房に残っている実は味が渋く食用には適さないことから、収穫しない。ナツメヤシの成長段階ごとのこうした果実の自然落下現象は、実の房が重くなり過ぎ、房ごと完熟前に落下しないよう、ナツメヤシの株自体が自然淘汰をしている現象とする説が有力とされる。これは、デゲッシュのCentre de Recherches Phéniciennesの副センター長のハイブ・ブウ・アビーデー氏のご教示に基づく。
- 15) 英語名はfenugreek seed、植物学名は *Trigonella foenum-graecum*.

- 16) チュニジア東部のケルケナ島でも、干しブドウを用いたこれと似た食の習慣がある。アブードの食習慣と性別との関わりを論じたものには (FERCHIOU, 1968) がある。
- 17) シーシュには、人工授粉が全くなされなかつた場合のものと、受粉作業後、発芽したため、それがなされなかつたものとがある。
- 18) ただし、レーグミー採取のために樹冠部を一端切った株でも、樹幹ジュンマールの部分を完全に切り取らず、またその上に砂をかけておくと、そこから新芽が生え株を再生させることも可能である。衰弱した株を再生させるために、故意にこうした措置を取ることもある。
- 19) 例えば「蜜蜂」の章：メッカ啓示全128節の67 (65), 69 (67) 「コーラン」(中) (井筒訳1978 (1958) : 82], 「マルヤム」の章：メッカ啓示全98節の23～26) (井筒訳1978 (1958) : 129). また東方のイスラーム美術におけるナツメヤシ装飾に関しては、ゴルパンの論文がある (GOLVIN, 1961). またイスラーム以前にも、既に古代ギリシアやフェニキア人のあいだにおいても、ナツメヤシの木は「典雅さ」や「完璧さ」を象徴するものであったともされている (MOREAU, 1947: 125). ナツメヤシの象徴性については、さらにアト・ド・フリース『イメージ・シンボル事典』(アト・ド・フリース, 1984: 451-452) を参照。
- 20) 「木々の中にはムスリムのような木があり、それはなつめやしである」という伝承は、「ハディース」の「知識の書」「光賀の書」「食物」などに繰り返し出てきている。「ハディース」(上巻) (牧野, 1993: 40, 45, 63, 527). 「ハディース」(中巻) (牧野, 1993: 815).
- 21) 「ハディース」の訳は、牧野信也訳 (1993～1994) に基づく。なお、本文中では、ナツメヤシと片仮名表記しているが、引用部分に関しては牧野信也訳の通り、「なつめやし」の平仮名表記とする。
- 22) ジエリード地方では、例えば入れ墨のある女性が亡くなつた場合には、遺体をそのまま包まず、遺体の入れ墨の個所には全てヘンナを塗り、それが見えないようにしてから白布に包み、埋葬する。イスラームの教義上、タブー(ハラーム)とされていることを残したまま、死者を埋葬すると、死者が天国に行けないと考えられていることによる。

#### 参考文献

- フレーザー, J.G. 著、永橋卓介訳(1992):「金枝篇(一)」岩波書店.  
 FRAZER, J.G. (1925), *The Golden Bough. A Study in Magic and Religion*. Abridged Edition, Macmillan.
- 原 隆一 (1997):「イランの水と社会」古今書院。  
 井筒俊彦訳 (1978):「コーラン (中)」岩波文庫。
- 小島麗逸・大岩川 嫌編 (1986):「「はかり」と「くらし」—第三世界の度量衡—」アジア経済研究所。
- 小堀 巍 (1997):「乾燥地域の水利体系—カナートの形成と展開」大明堂。

- 牧野信也訳 (1993-1994):「ハディース—イスラーム伝承集成一」全3巻. 中央公論社。
- 松井 健 (1991a): バルーチュ族のヤシ文化. 田中二郎・掛谷 誠編著「ヒトの自然誌」平凡社, 193-212.
- 松井 健 (1991b): バルチスタン・マクラン地方の農業と社会. 版本寧男編著「インド亜大陸の雑穀農牧文化」学会出版センター, 279-343.
- 岡崎正孝 (1988):「カナート・イランの地下水路」論争社。
- 佐竹利彦 (1972): ヤシ類. 「万有百科事典(植物)十九」小学館, 636-637.
- 鷹木恵子 (1984): 春の農耕儀礼—ファラオの祭り. 「マグレブ」24: 15-26; 25: 23-27.
- 鷹木恵子 (1992): チュニジア・アラビア語方言での暦の表現. 「チュニジア通信」No. 6: 1-2.
- 鷹木恵子 (1994): なつめやしオアシスの村の生活誌. 板垣雄三監修, 片倉もとこ編「調査イスラーム世界1 イスラーム教徒の社会と生活」栄光教育文化研究所, 295-343.
- L'AFRICAIN, Jean-Léon (1980): *Description de L'Afrique*. Tome I, II (traduite par EPAULARD, A.). Maisonneuve, Paris.
- ALTORKI, Soraya and COLE, Donald P. (1989): *Arabian Oasis City; Transformation of Un Unayzab*. University of Texas Press, Austin.
- ATIA, Habib (1965): Modernisation agricole et structures sociales; Exemple des oasis du Djérid. *Revue Tunisienne des Sciences Sociales*, No. 2: 59-93.
- BECHRAOUI, Abid (1980): *La vie rurale dans les oasis de Gabes*. Publication de Université de Tunis, Tunis.
- BÉDOUCHA, Geneviève (1987): *L'Eau, l'amie du puissant: Une communauté oasisienne du Sud-tunisien*. Edition des Archives Contemporaines, Paris.
- CAUVET, S. (1914): La couture du palmier au Souf. *Revue Africaine*, Tome 58: 27-87.
- CASTANY, Gilbert et DOMERGUE, Charles (1951): Les ressources hydrauliques du sud tunisien; Djerid et Nefzaoua. *Bulletin Economique et Social de la Tunisie*, No. 56, Sept.: 30-49.
- CONFORTI, J., BEN MAHAMOUD, O. et TONNEAU, J.P. (1994): *Zonage des oasis du Jéríd (Séminaire "Agriculture oasisenne")*. INRAT et GRIDAO, Déghache.
- COMBES, G. (1928): *Tozeur et Le Djerid*. Tunis.
- DAKHILJA, J. (1990): *L'oubli de la cité*. Editions la Découverte, Paris.
- DESPOIS, J. et RAYNAL, R. (1975[1967]): *Géographie de l'Afrique de nord-ouest*. Payot, Paris.
- DU PATY DE CLAM, A. (le Comte) (1893): Études sur le Djerid. *Bulletin de géographie, historique et descriptive*: 283-338.
- EDRISI, Abou Abdallah Mohammad (1969): *Description de l'Afrique et de l'Espagne*, traduite par Dozy, P.A. et DE GOEJE, M.J., Oriental Press, Amsterdam.
- EL-BEKRI, Abou-Obeid (1965): *Description de l'Afrique septentrionale*, traduite par MAC GUCKIN de Slane. Adrien-Maisonneuve, Paris.

- FERCHIOU, Sophie (1968): Differenciation sexuelle de l'alimentation au Djérid. *L'Homme*: 64-86.
- GOLVIN, L. (1961): Le Palmerie dans le décor musulman d'Occident. *Hespéris-Tamuda*, II: 145-160.
- HAMZAoui, Salah (1979): Non capitalist relations of production in capitalist society: The khammessat in southern Tunisia. *J. Peasant Studies*, 26: 444-470.
- IBN HAWQAL (1964): *Configuration de la terre (Kitâb Surat al-Ard)*. (Introduction et traduction avec index par KRAMERS, J.H. et WIET, G.) Maisonneuve et Larouse, Paris.
- IBN KHALDOUN (1968-1969): *Histoire des Berbères et des dynasties musulmâmes de l'Afrique septentrionale*. (traduite par le Baron de Slane ), Tome I-IV, Paul Geuthner, Paris.
- KASSAB, Ahamad (1980): *Etudes rurales en Tunisie*. Publications de l'Université de Tunis, Tunis.
- KRAENEY, T.H. (1910): *Le dattier en Tunisie; culture et variétés. (Date Varieties and Date Culture in Tunis)*, traduit et remanié par SIMONT, J.), Imprimerie Centrale, Tunis.
- LETHIELLEUX, J. (1948): *Le Fezzan; ses jardans, ses palmiers*. Imprimerie Bascone et Muscat, Tunis.
- LOUIS, André (1968): Aux Nefzaoua; le palmier et les hommes. *IBLA*: 315-346.
- LOUIS, André (1979): *Nomades d'hier et d'aujourd'hui dans le sud tunisien*. Edisud, Aix-en-Provence .
- MARCY, G. (1930): Origine et signification des tatouages de tribus berbères. *Revue d'Histoire des Religions*: 13-66.
- MASSELOT, F. (1901): *Les dattiers des oasis du Djérid*. Imprimerie Rapide, Tunis.
- MENOUILARD, H. (1910): L'Année agricole chez les indigènes de l'extrême-Sud Tunisien. *La Revue Tunisienne*, 17: 1-6.
- MOREAU, Pierre (1947): *Des lacs de sel aux Chaos de sable; le pays des nefzaouas*. Imprimerie Bascone et Muscat, Tunis.
- PAYRE, Gabriel (1912): Une fête du printemps au Jerid. *La Revue Tunisienne*, 171-175.
- REBOUR, M.H. (1933): Le Dattier en Tunisie. *Bulletin de la Direction Générale de l'Agriculture, du Commerce et de la Colonisation*, 37: 363-409.
- RHOUMA, Abdelmajid (1994): *Le Palmier dattier en Tunisie*. INRAT, Déghache.
- ROUSSI, Moncer (1973): *Une Oasis de Sud Tunisien: le Jarid (Essai d'Histoire Sociale)*. Thèse de Doctrat de 3e cycle, Université de Paris, École Pratique des Hautes Études Vle Section.
- SECRETARIAT d'ÉTAT à l'AGRICULTURE (1957): *Région 11 Djérid Nefzaoua*. Étude de plan de Développement Agriculture de la Tunisie, République Tunisienne Tunis.
- AL-SHABBI, 'Ammâr (1979): *Wâhâd al-Jarid wa hayât sukkânhâ*. Bruxelles.
- STEMBERG-SAREL, Benno (1961): Les Oasis de Djérid. *Cahiers Internationaux de Sociologie*. Vol. XXX: 131-145.
- Al-TUJJÂNI, Abû Muhammâd Abdallah bin Muhammâd bin Ahîmad (1980): *Rihla al-Tujjâni; Tûnis-Trâblas (H.706-708)*. al-Dâr al-'arabiya al-kitâb, Tûnis.
- TISSOT, C. (1879): Notices sur le Chott El Djérid. *Bulletin de la société de géographie*. Juillet: 5-25.\*
- TONNEAU, Jean Philippe (1993): *Zonage des oasis du Djérid: Typologie des productions de ivetta*. Gridao et Inrat, Centre de Recherches Phœnicicoles, Déghache.
- VALLENSI, Lucette (1977): *Fellahs tunisiens; l'économie rural et la vie des campagnes aux 18e et 19e siècles*. Mouton, Paris .
- YVER, M. (1983): *Djarid. The Encyclopaedia of Islam (New Edition)*. E.J. Brill, Leiden, Vol. II, 717-718.
- ZGHAL, A. (1965): Modernisation de l'agriculture et population semi-nomade. *Revue Tunisienne des Sciences Sociales*. No.2: 31-49.

## Folk Culture of the Date Palm Tree in Tunisia: A Case Study of Djerid Oasis

Keiko TAKAKI\*

The date palm (*Phoenix dactylifera*) is one of the representative plants of the tropical and sub-tropical arid zones in the Middle East and North Africa. It has great importance in the material as well as symbolic culture of the residents of these areas. This article, which is based on field research in Djerid Oasis, focuses on the changing folk culture of the date palm in Tunisia, especially with regard to folk knowledge, techniques of its utilization, and symbolism.

The region of Djerid is located in the south of Tunisia, and its oasis is well-known as one of the two largest date palm-oases in the country. This oasis has a history of about 2000 years, but the folk culture of the date palm tree has changed rapidly since Tunisian independence in 1956, as a result of the exploitation of new oases, the use of motorized-pumps in irrigation, and the commercialization of date farming.

In Djerid, the date palm traditionally supplied not only food but also materials for various other objects. This article describes the techniques by which the date palm is cultivated and its wide range practical uses: food stuff, construction, the making of mats and baskets, the making of tools and furniture, fuel, sewing, play, and decoration. In the discussion, special reference is made to date palm-related vocabulary items in the Arabic dialects of Tunisia.

In addition to its practical uses, the date palm tree also had nearly the same religious symbolic meanings in Djerid as we find in the Islamic Holy Books, the *Quran* and *Hadith*. The motifs found in tattoos on women's bodies also portray palm trees in many forms, symbolizing the beauty and the fertility of women.

Today, the influx of modern goods and the commercialization of date farming have caused many changes. People eat fewer dates as part of their daily diet, and the leaf stalks and trunks of date palms are used less commonly as materials for tools and construction. The tradition of body tattoos has now almost disappeared, remaining only among the senior women. But on the other hand, the fabrication of baskets and small commodities using palm leaves is increasing under the influence of the tourism industry.

**Key Words:** Date palm, Folk culture, Utilization of palm tree, Symbolism, Changes

---

\*Faculty of International Studies, Obirin University. 3758 Tokiwa-cyo, Machida, Tokyo 194-0294, Japan.

(Received, October 18, 1997; Accepted, November 27, 1997)

特集：「アジア内陸起源の風送ダスト」編集委員会  
長島秀樹（主査）、岡田昭彦、矢吹貞代、三上正男

Editorial Board of Special Articles on  
“Aeolian Dust Originated from Inland Asia”  
Hideki NAGASHIMA (Chief), Akihiko OKADA, Sadayo YABUKI and Masao MIKAMI

編集委員 門村 浩（委員長：立正大学） 安部征雄（筑波大学） 小島紀徳（成蹊大学） 斎藤享治（埼玉大学）  
嶋田義仁（静岡大学） 谷山一郎（農業環境技術研究所） 長島秀樹（東京水産大学）  
山川修治（農業環境技術研究所） 書記：黒瀬匡子  
日本沙漠学会編集委員会/〒113 文京区本駒込2-28-8 理化学研究所駒込分所内  
TEL 03 (3947) 7708/FAX 03 (3947) 8389

Editorial Board Hiroshi KADOMURA (Chief Editor), Yukuo ABE, Toshinori KOJIMA, Kyoji SAITO,  
Yoshihito SHIMADA, Ichiro TANIYAMA, Hideki NAGASHIMA, Shuji YAMAKAWA

Editorial Secretary : Kyoko KUROSE

Editorial Office of The Japanese Association for Arid Land Studies

c/o The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)  
2-28-8 Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan.

TEL: 03-3947-7708/FAX: 03-3947-8389

本誌の刊行にあたっては文部省科学研究費補助金（研究成果公開促進費）の援助をうけた。

編集発行：日本沙漠学会/〒113 東京都文京区本駒込2-28-8 理化学研究所駒込分所内

© The Japanese Association for Arid Land Studies

TEL 03-3947-7708/FAX 03-3947-8389

定価 1,500円（本体1,492円）

発行日 1997年12月25日

印刷：佐藤印刷（株）

# JOURNAL OF ARID LAND STUDIES

## CONTENTS

### Frontispiece

Hideki NAGASHIMA, Kikuo OKADA and Tetsuya TAKEMI: Dust Storm in the Inland Area of China

### Special Articles

"Aeolian Dust Originated from Inland Asia"

Hideki NAGASHIMA, Akihiko OKADA, Sadayo YABUKI and Masao MIKAMI: Introduction ..... 85 - 86

### Original Articles

- Tetsuya TAKEMI: The 5 May 1993 Dust Storm over the Northwestern China and the Environmental Condition of Its Development ..... 87 - 96
- Masao MIKAMI: Dust Storm Observed in the Southern Edge of Taklimakan Desert ..... 97 - 106
- Kenji KAI, Toshikatsu TAKASUGI and Hajime NAKAMURA: Long Range Transport of the Asian Duststorm (Kosa) Particles Originated from the Takla Makan Desert ..... 107 - 117
- Yutaka OBINATA, Fumitaka YANAGISAWA, Takashi KOTANI and Akira UEDA: Sulfur Isotope Ratio of Non-sea-salt Sulfate in Dry Deposition in Tsuruoka and Yamagata, Yamagata Prefecture, Japan ..... 119 - 126
- Sadayo YABUKI, Akihiko OKADA, Akira UEDA, Qing CHANG and Zi-Li FAN: Sulfur Isotope Study of Salt Materials in Saline Lands and Salt Deposits around the Desert Areas in Xinjiang, China — Implications to the Study of the Source of the Aeolian Dust of Inland Asia — ..... 127 - 138
- Masatoshi HONDA and Hiroshi SHIMIZU: Study of Transport Mechanism of Aeolian Sediments from the Taklimakan Desert: Implication of Grain-Size Distribution and Major-Element Composition ..... 139 - 146
- Soung-An KWON, Yasunobu IWASAKA, Katsuji MATSUNAGA and Takashi SHIBATA: Long Range Transport of Kosa Aerosol Particles: Measured by a Lidar in Spring 1994 ..... 147 - 155
- Yasunobu IWASAKA, Masaharu HAYASHI, Ikuko MORI, Sun An KWON, Katsuji MATSUNAGA, Guang Yu SHI, Jun ZHOU, Takashi SHIBATA, Masataka NISHIKAWA, Yasuhiko OKUHARA, Keiichiro HARA, Masahiro NAGATANI, Masaharu WATANABE, Yoon Sin KIM and Zhi Ben GONG: Aerosol Particles in the Asian Continental Atmosphere: Balloon-borne, Aircraft-borne, and Lidar Measurements in Japan and China ..... 157 - 167

### Research Note

- Motoaki YASUI, Kohei MIZUTANI, Toshikazu ITABE, Jixia ZHOU, Yuquan, LING and Lichou LIU: Lidar Observation of Tropospheric Aerosols at Lanzhou in China ..... 169 - 173

### Note

- Hiroyuki II and Tatemasu HIRATA: Soil Erosion in the Loess Plateau and Nitrogen Compounds in Dust ..... 175 - 180

### Data

- Sadayo YABUKI and Akihiko OKADA: Chinese, Japanese and English Notations of Local Sites in Xinjiang, China ..... 181 - 184

### Original Articles

- Wenhong MO, Toshiki NATORI, Shu JIANG, Noboru NISHIMURA and Kenji OMASA: Responses of Photosynthesis and Water Use to Drought in Two Desert Annuals, *Agriophyllum squarrosum* and *Bassia dasyphylla* ..... 185 - 195
- Keiko TAKAKI: Folk Culture of the Date Palm Tree in Tunisia: A Case Study of Djerd Oasis ..... 197 - 214