

# 沙 漠 研 究

JOURNAL OF ARID LAND STUDIES

---

## 目 次

---

**口 絵**

谷山一郎：中国内モンゴル自治区奈曼旗の土地荒廃

**原 著 論 文**

- 真木太一・杜 明遠・潘 伯榮・鮫島良次：中国新疆トルファンの沙漠  
とオアシスにおける気候特性 ..... 1-14
- 金 鳳鶴・西崎 泰・尹 懐寧・白 鴻祥・鄭 応順・山口達明：  
砂質土壤におけるピートの施用が土壤の理化学性および植物の生長  
に及ぼす効果—ハクサイのポット栽培実験の統計的解析— ..... 15-23
- 篠田 裕・西崎 泰・野頼成嘉・山口達明・王 周琼・蒋 進・  
馬 劍：中国新疆における草炭を用いる沙漠緑化の基礎的実験  
—草炭の保水効果とチンゲンサイのポット栽培試験— ..... 25-33
- 石山 隆・中島康裕・梶原康司：乾燥地の植生モニタリングに適した植生  
指数アルゴリズム（英文） ..... 35-47
- 青木輝夫・青木忠生・深堀正志・廣田道夫・張 希明：中国タクラマ  
カン沙漠における大気中の水蒸気及びメタンの遠隔測定 ..... 49-58

**小特集：第6回沙漠工学講演会講演要旨集**

- 概 要 ..... 59-60
- 榎 啓二・山田興一：乾燥地における生物的CO<sub>2</sub>固定法の位置づけ ..... 61-64
- 尾崎益雄：乾燥地における排水処理と処理水再利用 ..... 65-68
- 清水 浩：砂漠の交通機関としての電気自動車の可能性 ..... 69-73

**資 料**

- 山川修治：気候変化影響研究部会研究会における沙漠・砂漠化関連  
事柄について ..... 75-78
- 谷山一郎：第9回国際土壤保全会議に出席して ..... 79-83
- 書 評 ..... 85-86

中国内蒙古自治区奈曼旗の土地荒廃  
Land Degradation in Naiman Province of Inner-Mongolia

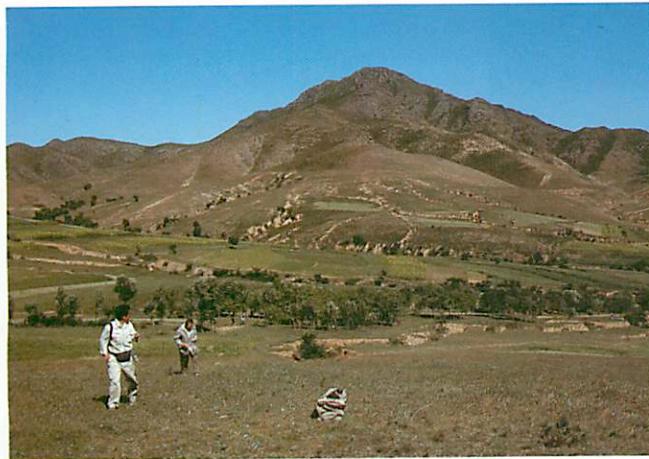


写真1. 奈曼旗南部丘陵地のガリー侵食。  
(1995年9月11日)

Photo 1. Gully erosion in hilly land of the south Naiman province. (Sep. 11, 1995)



写真2. 奈曼旗中央部を南から北に向かって  
流れる教来河。(1995年9月3日)

Photo 2. Jiaolai river which runs from south to north through Naiman Province. (Sep. 3, 1995)



写真3. 奈曼旗中部の砂丘地。  
(1995年8月30日)

Photo 3. Sand dune in the central Naiman province. (Aug. 30, 1995)

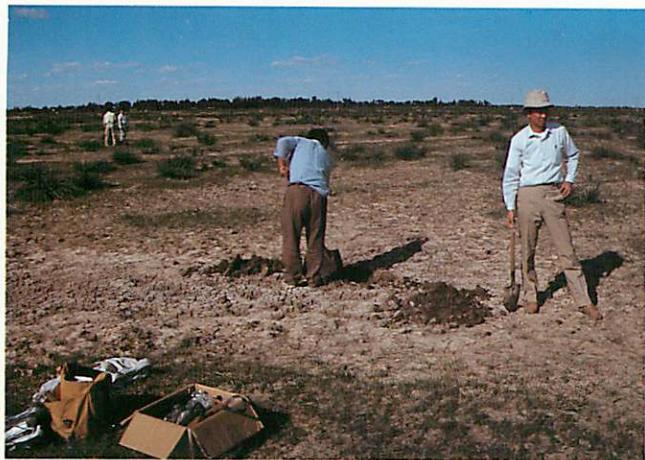


写真4. 奈曼旗北部の塩類集積土. (1995年9月7日)

Photo 4. Saline soil in the north Naiman province. (Sep. 7, 1995)



写真5. 写真3と同地点における土壤断面.  
有機物層の累積が認められる.  
(1995年8月30日)

Photo 5. Soil profile at the same site of Photo 3.  
Accumulated organic layers are observed.  
(Aug. 30, 1995)



写真6. 写真4と同地点の土壤断面. (1995年9月7日)  
Photo 6. Soil profile at the same site of Photo 4.  
(Sep. 7, 1995)

(谷山一郎, Ichiro TANIYAMA)

# 中国新疆トルファンの沙漠とオアシスにおける気候特性

真木太一\*・杜 明遠\*\*・潘 伯榮\*\*\*・鯨島良次\*\*\*\*

## 1. はしがき

地球上の全陸地の1/3は乾燥・半乾燥地であり、そのなかで、主として人口増加に伴う過開発、過放牧、過伐採に起因して、地球規模で沙漠化が進行している。現在、世界の人口は57億人であるが、中国の人口は1995年2月に12億人を突破し、世界の人口の21%を占めている反面、耕地面積は7%で、耕地面積当たりでは世界平均のちょうど3倍の人口を抱えていることになる。中国では沙漠面積は全国土の13.6%（夏、1988）を占めており、開発・開墾による緑化（オアシス化）が進む一方、沙漠化も進行し、差引きでは沙漠化の進行速度が速い状態（朱・劉、1981; WANG, 1994）である。このため、沙漠化防止は極めて重要な問題である。

中国北西部の新疆は内陸部に位置し、沙漠が多く、乾燥した地域で、土地は広大であるが、オアシス・農地面積は少ない。新疆の吐魯番（トルファン）は中国国内はもちろん、世界でも地形・気候的に極めて特異である。その気候の厳しいトルファンにおいて、まず気象状況を把握し、それを解析することとした。

ところで、トルファン市内のオアシスには吐魯番気象站（台）があり、長年月、貴重なデータを収録している。そこで、より気候的に厳しい沙漠を代表する気象データを収録するため、1990年6月より新疆生物土壤沙漠研究所吐魯番沙漠研究站（所）付近で気象観測を開始し、年間を通してデータ収録を行なった。

ここでは、沙漠の気象特性を把握するとともに、沙漠内にある吐魯番沙漠研究站（オアシスの境界付近）とオアシス内にある吐魯番気象站、すなわち乾燥地トルファンの沙漠とオアシスの気象特性を比較検討した。

なお、最近のトルファンの気象データの一部については、「農業気象」（真木ほか、1994）、「沙漠研究」（真木ほか、1995）、などで報告しているが、気象・気候データについての主要部分は内部資料（熱帶農業研究センター、1993; 真木ほか、1993; DU and MAKI, 1993a, b）であり、一般には公表されていないので、ここに発表するこ

とした。

なお、最近の新疆の沙漠気象データとして、地理的に大きく異なるタクラマカン沙漠南部の策勒（チーラ）での報告（長島ほか、1991; 三上ほか、1995）があるが、それらの特徴とも比較・検討を行なった。

## 2. 気象観測と解析方法

### 1) 吐魯番沙漠研究站の気象観測データ

#### (1) 気象観測時期・地点とデータ解析

トルファン地域は盆地地形を形成し、盆地内にあるアイディン湖の最低点は海拔-155mである。その盆地の海拔-76~-95mにある中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所吐魯番沙漠研究站・植物園(42°51'N, 89°11'E)の25m×16mの露場（海拔-80m）に、気象観測装置を図1に示すように設定して気象観測を1990年6月29日から開始し、現在も観測を継続している。なお、地表面は凝固した白褐色の壤土・粘土質土壤である。

気象データ解析には1990年7月~1995年8月のうち、主として1991年7月~1992年7月の気象データを用いた。ただし、1991年8月18日6時~21日10時および21日15時~24時の3日間余りは欠測となった。

#### (2) 気象観測項目と観測方法

風向、風速、日照時間、日射量、アルベド、純放射量、

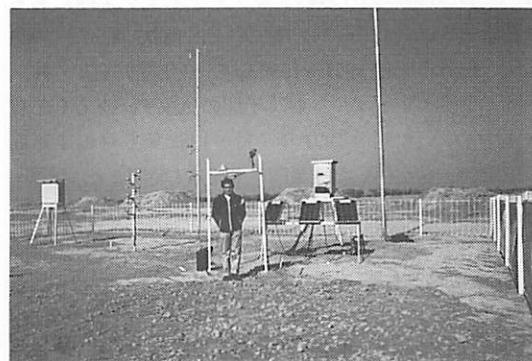


図1. トルファン沙漠研究站付近に設定した定点気象観測装置。

(受付: 1995年10月4日, 受理: 1996年10月14日)

\* 農林水産省農業環境技術研究所環境資源部気象管理科

\*\* 農林水産省国際農林水産業研究センター環境資源部

\*\*\* 中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所

\*\*\*\* 農林水産省東北農業試験場地域基盤研究部

気温、湿度、地温、地中熱流量、雨量を自動連続観測し、データはフロッピーに移して解析した。なお、パン蒸発量、土壤水分量は手動で計測した。

気象観測センサーのうちの風向計は610cm、風速計は600、300、220、160、100cm、気温・湿度の乾湿球温度計は160、100cm、日射計・日照計は200cm、放射収支計は150cm、雨量計は100cm、パン蒸発計は50cmの高さに設置し、地温計は1、5cmの深さ、熱流板は1、5、10cmの深さに設置した。

### (3) 気象観測計器と性能

気象観測用の蒸発散测定装置は牧野応用測器研究所社製であり、主に次の測定機器で構成されている。

風向計(VF016)は16方位(始動風速0.2m/s)、風速計(AF750)は光電式三杯式微風速計(始動風速0.2m/s)である。

日照計(H-061)の出力は、しきい値20mV/0.21kWm<sup>-2</sup>のパルス積算方式である。また日射計(MS-42)の感度は7mV/kWm<sup>-2</sup>、および熱流計(CN-81)の感度は0.05mV/kcal·m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>である。なお、アルベドを測定するための下向きの日射計は必要に応じて放射収支計と交換可能である。

通風乾湿球温度計(TR-203)・温度差計(TRD-02)・地温計(TRD-20)の精度は0.1°Cである。

雨量計(MR-100)は0.5mm転倒升型であり、小型パン蒸発計(NO-41)は直径20cm、土壤水分計(磁気カップ式マノメーター)はテンシオメーターである。

## 2) 吐魯番気象站の気象解析データ

沙漠研究站での気象観測データと比較するために、中国の代表36地点のうちのトルファンオアシス内にある吐魯番気象站(42°56'N, 89°12'E、海拔34.5m)の気候値(統計年間は1951~1980年の30年間)(張・林、1985)を表1に示す。なお、年間の気象データとしてはトルファン気象站の1991年7月~1992年6月の1年間の気象データを用いた。風向・風速は1時間ごと、気温・相対湿度は3時間ごと、地温は6時間ごとの値である。

## 3. 観測結果と考察

### 1) トルファンの沙漠における風速の経時変化、風速の垂直分布、突風率の特徴

#### (1) 日平均風速の年変化

1991年7月1日~1992年6月30日の日平均風速と日最大瞬間風速、およびそれらの5日間移動平均風速の変化を図2に示す。ただし、1年間の変化状況を見るためには、強風期で分断するとわかりにくくなるので、1992

表1. 乾燥地のトルファン気象站の気候特性。

気象要素	数値
月平均最高気温	39.9°C(7月)
月平均最低気温	-14.5°C(1月)
最高月平均気温	32.7°C(7月)
最低月平均気温	-9.5°C(1月)
年平均気温	13.9°C
年平均地温	17.2°C
最高気温の極値	47.6°C
最低気温の極値	-28.0°C
最高地温の極値	76.6°C
最低地温の極値	-31.6°C
年平均相対湿度	41%
最低相対湿度	0.5%以下
年降水量(平均)	16.4mm
パン蒸発量	2,837.8mm
日照時間	3,049.5h
平均風速	1.7m/s
卓越風向	東
最大風速	25.0m/s
強風時の卓越風向	西北西~北西
風力8级以上日数	年間26日
強風期	4~6月

年1月1日~6月30日の後方に1991年7月1日~12月31日のデータを結合させて解析を行なった。

図をみると5月に最大風速が記録され、続いて11月、4月にピークが認められる。季節変化を見ると4~8月が強風期であり、また9~11月にも時々強風が吹くが、概して弱風である。特に、12月~2月の冬季は非常に弱風である。またその他の年でもほぼ同様の傾向であった。

風速は大きく変化するが、風は早朝から午前中に弱く、午後から夜半に強くなる日々の周期的変動(後述の図4)、およびピークの周波数解析(図2)から、7~8日、12~15日、40~45日程度の周期的変動が認められた。これらは高・低気圧の移動周期に現われる7~8日間周期の2倍の期間や、大陸・海洋性高気圧の強弱による季節変化の半分の期間と関連があると考えられ、シノプティックスケールの天気図、高層気象図などによる解析は興味深いことではあるが、これらのデータを用いた詳しい解析は、ここでは割愛して別の機会に譲りたいと思う。

#### (2) 月平均風速の年変化

1991年7月~1992年6月の日平均風速・日最大10分間平均風速(日最大風速)・日最大瞬間風速の月平均風速から求めた年変化を図3に示す。

月平均風速・日最大風速・日最大瞬間風速とともに7月が最強、1月が最弱であった。前述と同様に4~8月が強風期間であり、月平均風速では1月が最小の1.3m/s、7月が最大の3.5m/s、年平均風速では2.2m/sであり、

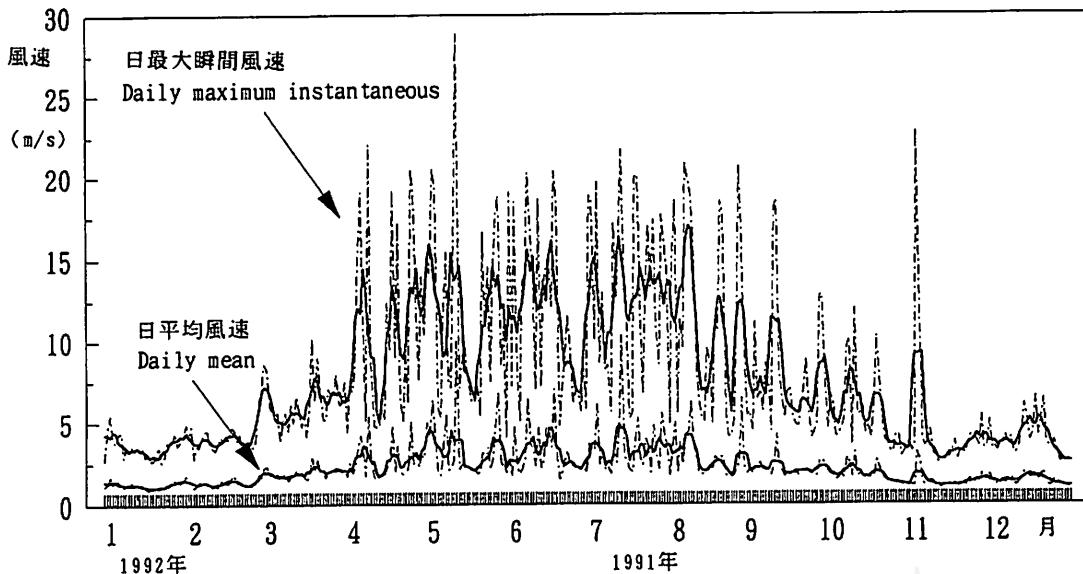


図2. トルファンにおける日平均風速と日最大瞬間風速（一点鎖線）および、それぞれの5日間移動平均風速（実線）の変化。

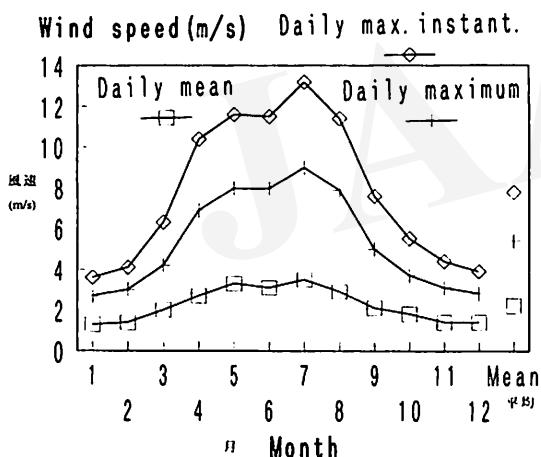


図3. トルファンにおける日平均(□)・日最大(+)・日最大瞬間(◇)風速の月平均値の変化。

また日最大風速の年平均では 5.4m/s であった。特に、日最大瞬間風速の月平均では 4～8 月で 10m/s を超え、7 月では 13.2m/s に達しており、年平均では 7.8m/s であった。

### (3) 風速の日変化

風速の日変化をみると、図4に示すように、1月、9月の風速変化幅は小さいが、6月は大きい日変化が認められる。風速は6～10時に小さく、17～21時に大きい。その日変化は Du and MAKI (1993a) に示すとおり、近似的にサインまたはコサイン曲線で表現できる。

$U_t \geq U_{\min}$  の場合は、

$$U_t = U_{\min} + \frac{1}{2}(U_{\max} - U_{\min}) \sin\left(\frac{1}{12}t - \frac{1}{12}t_{\min} + \frac{3}{2}\pi\right)$$

$U_t < U_{\min}$  の場合は、

$$U_t = U_{\min}, \text{ただし, } t=0, 1, 2, \dots \text{である。}$$

ここに、 $U_{\text{mean}}$ ,  $U_{\text{max}}$ ,  $U_{\min}$  は日平均・日最大・日最小風速である。なお、最小風速は通常 8 時頃に発生する。

このようなサイン曲線で表現できる日変化は暖候期または主に強風期の 4～8 月に顕著に出現する。これは日射による地表面の昇温に起因する対流に関連して風速が増大するが、これには発生時刻の遅れがあり、夕方～夜半のうちの 20 時頃に最大となり、逆に夜明け～早朝のうちの 8 時頃に最小となる特徴が明らかになった。ただし、9 月～3 月では日射の昇温による対流が小さいために、風速の変動幅は小さく、サイン曲線ではうまく表現できない。なお、17～18 時には風向変化のため、風の発生が多く、弱風となっている。

一方、強風期以外では、早朝（春・秋季 7～8 時、冬季 9～10 時）と夕方（春・秋季 18 時、冬季 16～18 時）に弱風となっている。冬季の弱風期には冷気流、または山谷風のような風が吹くことが多いが、これは天山山脈と盆地の位置関係に起因する局地気象特性である。

### (4) 沙漠の突風率

沙漠における日最大瞬間風速  $U_{mi}$  と日最大風速  $U_{mm}$  には、

$$U_{mi} = 1.41U_{mm}, r = 0.980$$

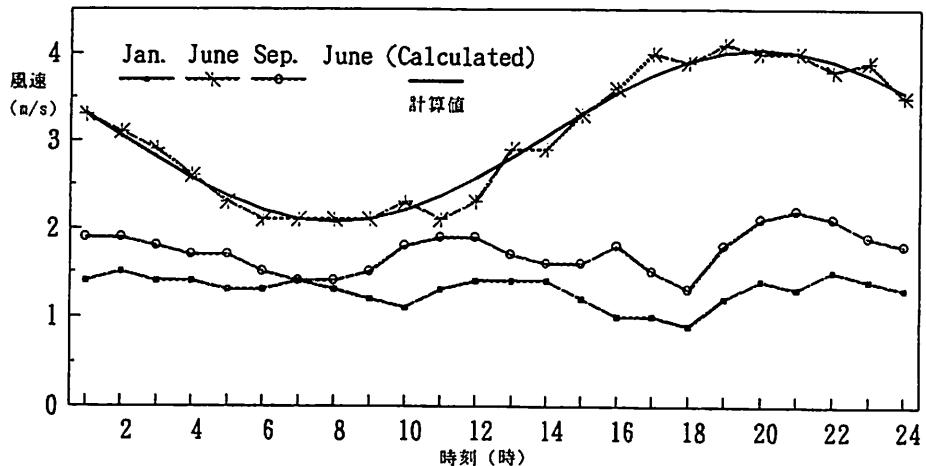


図4. トルファンにおける1月, 6月, 9月の平均風速の日変化およびサイン・コサイン曲線によって平滑化された6月の推定風速(滑らかな曲線)。

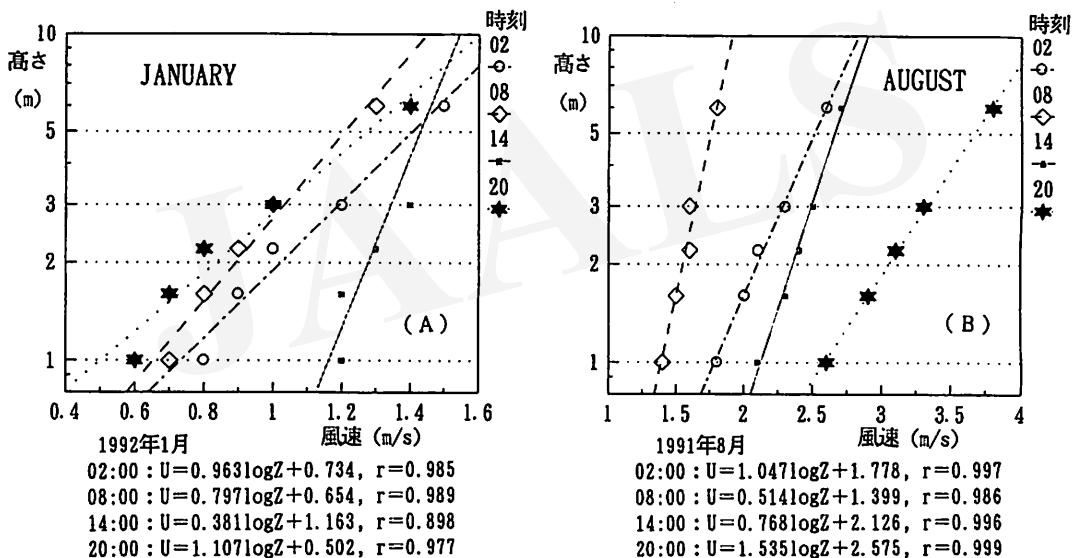


図5. トルファンにおける冬季1月と夏季8月の風速の垂直分布。

の比例関係が認められ、相関係数( $r$ )は非常に高い。また、1990年7月～1992年12月の26回に及ぶ20m/s以上の日最大瞬間風速と日最大風速との関係も全く一致している。この比例係数の1.41が突風率またはガストファクターと呼ばれ、日本国内では平均的には1.6～1.8(朝倉ほか, 1995)であるが、比較的滑らかな沙漠地形上を吹く風の影響で、トルファンの沙漠の突風率はかなり小さくなっている。

##### (5) 風速の対数分布と地表面の粗度

1991年8月と1992年1月の月平均風速の垂直分布を

図5に示す。また、図中の2, 8, 14, 20時における時間別の対数分布の関係式と相関係数を図の下側に示した。夏季8月は強風期であり、冬季1月の風速よりも全時間とも大きい。トルファンにおける3時間ごとの風速分布を見ると、夏季の20時には最強であるが、冬季では最弱である。また冬季の14時は最強であり、冬季では2番目の強さであるとか、夏季の8時には最弱であり、冬季では2番目に弱いなどの特徴がある。

風速分布をみると、夏季よりも冬季の夜間に傾斜が緩く、冬季よりも夏季の昼間に傾斜がきつくなる傾向は、

次のとおりである。すなわち夜間の安定状態では下層空気の密度が高く、重くて動きにくくなり、相対的に下層の風速が弱くなるのに対して、昼間の不安定状態では下層の空気が対流で動きやすくなり、相対的に強くなることを意味している。

夏季8月では不安定条件が多いわりに対数分布が成立しているが、冬季1月では対数分布から少しずれる傾向がある。このことは次の理由による。夏季（8月）と冬季（1月）の高さ1～6mの気温傾度が同じと仮定すると、8月では強風のため対数法則が比較的成立しやすいが、なかでも不安定状態では沙漠（土漠の裸地）で障害物の少ないトルファンの地形を考えると、地表面の粗度による摩擦に起因する風速の減少程度は小さく、相対的に下層部の風速が大きくなり、対数分布により一層近似する。

それに対して、安定状態では下層部の風速が相対的に大きくなるため、安定状態の方が不安定状態よりも相対的に対数法則が成り立ち難くなると考えられる。以上のこととはトルファンの風速分布の特徴と考えられる。

なお、地表面の粗さを示す粗度長（ $Z_0$ ）は図5の1991年8月の14時では0.16cm、1992年1月の14時では0.09cmであった。また、中立に近い時間帯の平均値は1991年7～8月で0.1cm、1992年4～5月で0.5cmであった。これは、1992年には露場付近の地表面の一部をブルドーザーでかき乱し、凹凸が大きくなっていたためである。

## 2) トルファンの沙漠における最多風向と風向の経時変化の特徴

### (1) 年間の時間別の最多風向

年間の1時間ごとの全風向（欠測4日間）について求めた風配図を図6(A)に示す。図のとおり、最多（卓越）風向はNEが16%であり、NNE、Nがそれに次ぎ、それぞれ13%、12%であるが、最少風向のSSEでも2%であり、平均的に分布する特徴がある。また、日最大風向の年最多風向の風配図（真木ほか、1995）ではNEが42.4%であり、続いてNNEが18.3%、Nが16.9%で、3風向で78%を占めている。一方、日別の最多風向の年最多風向ではN～NEの3風向が25%で1/3以下になり、かなり分散している。

### (2) 年間の強風時の最多風向

日最大風速時の風向についての年間風配図では、最多風向はWで11%であるが、WNWでも11%、E、NE、NNEでもそれぞれ10%であり、5風向ともほとんど差がない状態である。

一方、日最大瞬間風速17.2m/s以上の時の風向につ

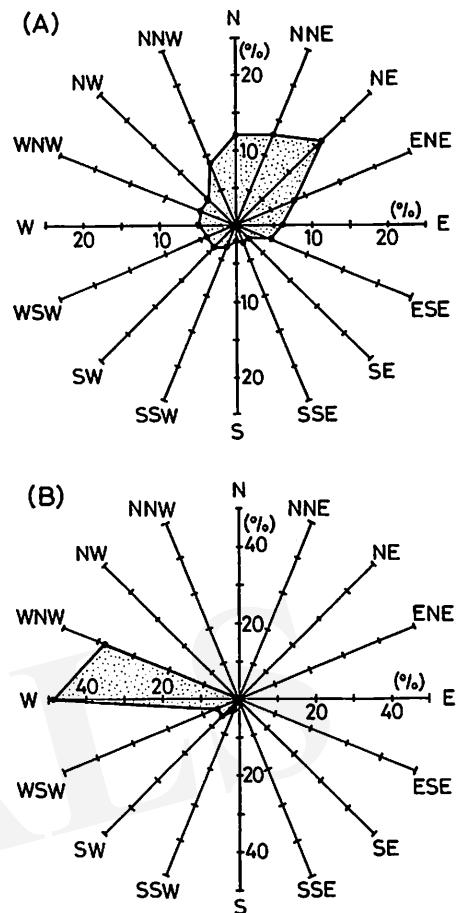


図6. (A) 毎時間平均の風配図。  
(B) 日最大瞬間風速17.2m/s以上の風速時の風配図。

いての年間風配図を図6(B)に示す。図のように、日最大瞬間風速17.2m/s以上の日数は37日間あるが、その風速時の風向による最多風向はWが48.6%、次にWNWが37.8%であり、2方向でほとんどの86%を占めている。その他はWSW～SSWがわずかにある程度で、図6(A)の時間別の主風向であるNE～Nは全くなく、極めて対照的な分布である。また後述するように、瞬間風速20m/s以上になると最多風向はWNWとなる。

### (3) 風向の季節変化

月別最多風向は10月～2月はNNE、3～10月はNEである。また5～8月にはWNWとWがやや多いが、これらは強風時の風向に相当する。この風向は天山山脈の北側のウルムチとその南東～東南東方向のトルファンを結ぶ天山山脈の切れ目からの吹き抜け風（局地風）に相当する。

月別日最大風速の最多風向では強風に影響されて、

表2. トルファンにおける時間別の風向の出現頻度。

(A) 1992年1月

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	26	29	29	26	23	23	10	19	6	0	0	0	6	0	3	0	0	0	16	26	32	32	26	29
NNE	48	19	29	29	19	32	29	45	35	13	6	3	0	3	10	0	10	6	6	10	13	23	35	42
NE	13	19	13	10	10	13	29	10	13	13	3	6	10	10	3	23	13	6	3	0	13	16	19	6
ENE	0	6	3	10	3	0	0	0	0	3	6	10	3	6	0	10	6	10	0	3	3	0	3	0
E	0	0	3	3	0	3	0	3	3	6	13	13	10	16	16	19	10	10	0	3	0	0	0	0
ESE	0	3	3	0	0	0	3	3	0	6	16	29	23	23	10	19	6	10	0	0	0	0	0	13
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	3	6	6	0	10	0	0	0	3	0	0	0
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	3	3	0	3	0	3	0	3
S	3	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	10	3	0	3	13	0	6	13	6	0	3	0	0
SSW	3	0	3	0	6	6	0	0	10	10	6	6	10	16	0	13	3	10	0	0	0	0	0	3
SW	0	3	0	6	3	3	0	3	0	6	3	16	13	13	19	0	6	10	3	3	0	0	0	0
WSW	0	0	0	0	3	3	3	0	3	10	16	6	6	6	3	10	6	10	3	0	0	0	0	3
W	3	0	0	3	3	3	3	3	0	3	3	0	6	0	0	0	3	3	0	0	6	0	0	3
WNW	3	6	3	0	3	3	6	6	6	10	3	0	3	0	3	0	3	10	13	16	6	3	3	0
NW	0	3	0	10	13	3	3	3	6	3	6	6	0	0	0	3	10	10	23	10	3	0	0	0
NNW	0	10	13	3	10	3	13	6	6	10	0	3	0	3	0	0	0	0	16	29	23	16	6	0

(B) 1992年5月

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	16	16	16	29	19	10	26	13	13	3	3	13	3	6	13	13	6	6	6	10	19	19	16	26
NNE	10	16	23	23	19	23	13	6	6	3	6	10	10	3	16	3	0	0	6	6	13	13	19	6
NE	16	29	19	23	26	6	32	42	29	32	39	26	29	16	16	16	19	13	3	3	3	6	3	10
ENE	6	3	10	0	6	0	6	16	13	6	10	10	13	3	0	3	3	0	3	6	0	0	0	6
E	3	0	0	0	0	3	0	6	19	19	10	6	6	10	6	3	3	10	3	0	0	3	0	10
ESE	0	0	3	3	0	0	0	0	3	10	19	6	13	3	13	0	10	6	3	6	3	0	0	0
SE	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	3	3	0	3	3	0	0	0	0	0
SSE	0	6	0	0	0	3	0	0	0	3	0	3	0	0	3	3	0	3	3	0	0	0	0	6
S	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	3	3	6	0	3	0	0	0	3
SSW	0	0	0	0	0	6	0	3	3	3	6	0	3	6	6	3	0	6	0	0	0	0	6	6
SW	0	3	0	0	0	0	0	0	3	3	3	6	6	3	0	0	6	10	0	6	10	3	3	6
WSW	3	3	10	3	6	0	3	0	0	0	0	3	13	3	10	0	13	13	10	13	10	6	13	3
W	3	6	13	3	0	0	0	0	0	3	3	3	10	13	16	23	23	16	19	26	16	16	6	16
WNW	6	6	0	0	6	6	0	0	3	3	3	0	6	10	0	6	3	23	26	10	16	13	3	0
NW	6	3	0	10	3	23	6	0	0	0	3	0	0	0	3	6	3	3	0	0	3	3	6	3
NNW	29	3	6	3	13	19	10	3	0	0	0	3	0	10	0	0	0	0	0	3	13	13	16	3

5～8月はW, WNWが1, 2位で多く、4月はWNWが多かった。9月～3月は月によりばらついているが、強風が少ないためにNNE～Eが多かった。ただし、12月ではSSWが1位、NNEが2位であった。これは1991～92年の特徴と考えられる。

#### (4) 風向の時間変化

時間別、風向別の分布割合を1992年1月と5月について求めると表2のとおりである。弱風期の1月には、特に夜間にはN～NEが多く、昼間はESE, EおよびS寄りの風向が多い。これらをみると、真木ほか(1995)で述べたように、時間による風向の回転である日変化が認められる。すなわち、21時～6時のN, NNEから7～10時でNNE, NEに移り、11時からE, ESEとなり、16時まで続く。17時には皿のため明確ではないが、18時のSから19～20時のNW, NNWを通って21時以

降のN～NEの風向へと時計回りに変化する。

5月では夜間から早朝(21時～7時)にはNNW～NEが多く、午前中から午後(8～15時)にはNE～Eに変わり、夕方(15～21時)にはW～WNWの風向へと、ある程度時計回りに変化する。ただし、夕方から夜間には強風の吹く場合が多いことが関与して、風向は時計回りを示さず、不連続的にEからWへと、反時計回りに180°変化するという特徴を示す。

これら時計回りの回転特性は長島ほか(1991), 三上ほか(1995)にも認められる。ただし、崑崙(クンルン, コンロン)山脈の北部のタクラマカン沙漠の南部にある策勒(チーラ)と天山山脈の南部のトルファンとでは、ちょうどタ克拉マカン沙漠の対極に当たるため、昼夜の風向は逆向きである。

### 3) トルファンの沙漠における降水量と蒸発量の経時変化の特徴

1991年7月1日～1992年6月30日の1年間の降水日数は6日間、降水量は16.0mmであった。1990年7月～1992年12月の2年間半の降水量は1990年（9月欠測）は7月11日2.5mm、7月19日1.5mmであり、7月19～20日には天山山脈での強雨のため、沙漠で珍しく洪水となった。また、1991年は8月2日と9月13日に2.0mm、8月9日と9月6日に0.5mmで、8～9月に計5.0mmであり、1992年は3月19日と6月10日に5.5mm、7月23日に0.5mm、10月31日に1.0mmで計12.5mmであった。なお、1991～1992年の2年間平均では8.8mmで、少なかった。

降雨日の天候の変化形態は図7の1991年8月1～3日、9月12～14日および1992年6月18～20日の例についても、ほぼ同様に半日～1日間にわたって強風が吹くとともに曇天が続き、その風が必ずといってよいほど弱まった後に、数時間、降雨となるパターンが多い。

降雨は8月2日8時に2.0mmで、9月13日には6時に1.5mm、7時に0.5mmの計2.0mmであり、同時に気温も急激に低下している。その気温は図にも示したとおり、翌日、晴天になんでも前日の気温レベルには回復しない状態である。回復には後述のように数日かかることが多い。

夏季6～8月には、直径20cmの小型蒸発計蒸発量が20mm/日を超える日がほとんどであり、非常に多量である。1990年7月1～18日の蒸発量（図8）は、降雨日の11日（0.5mm）とその翌日（10.5mm）を除いた平均で22.6mm、全期間の平均でも20.7mmであった。この期間の最高は26.3mmであり、夏季の晴天日には25mm程度でほぼ一定している。

### 4) 夏季6～8月におけるトルファンの沙漠気象の特性

夏季、6～8月の沙漠気象の特徴を明らかにするために、代表的な気象特性を示す1990年8月1～5日（図9）と1992年6月28日～7月2日（図10）の気象を事例として示す。

#### (1) 1990年8月1～5日の気象の特徴

図9に8月1～5日の気象変化を示すように、この期間は気温が高く、特に8月3日14:00には47.9℃の最高気温を記録した。吐魯番気象站（オアシス内）の従来の最高気温は47.6℃だったので、従来の観測所での記録を上回る新記録となり、その後も数回超えている。

これは沙漠とオアシスの気候の違いで、沙漠の気候が厳しいことを意味している。なお、8月2日16:30には46.9℃、その前後の8月1日と4日にそれぞれ44.0℃を

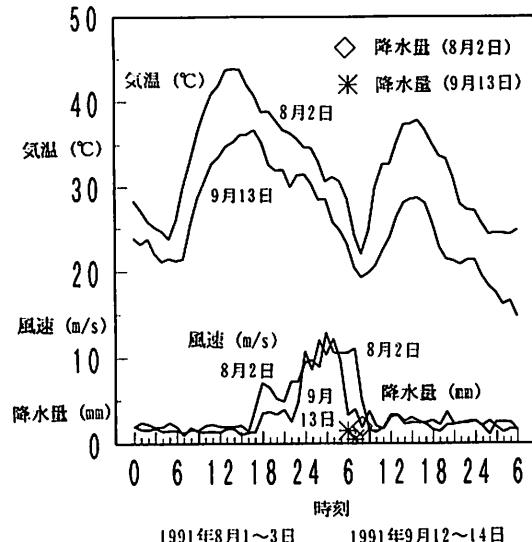


図7. トルファンの降雨特性とその降雨前後における典型的な風速と気温の変化形態。

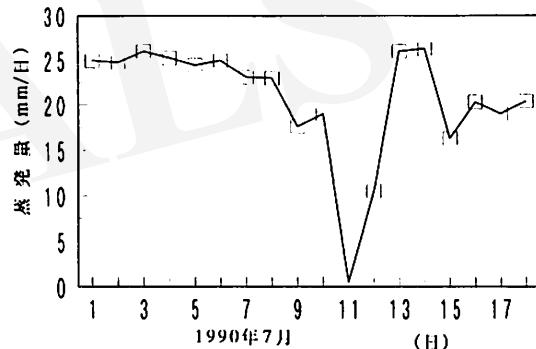


図8. トルファンにおける小型パン蒸発計による日蒸発量の経日変化。

記録した。一方、最低気温は8月1日に23.7℃、次に2日の26.4℃であり、気温日較差は20℃を超えていた。また、最高地温は8月2日に73.0℃、次に1日の71.5℃であり、最低地温は8月1日に24.2℃、次に3日の27.5℃であった。

この期間でも気温と湿度の変化は乾燥地の晴天日にはほとんど逆相関の状態である。最低相対湿度は8月3日に3.8%，次いで2日の4.9%であり、非常に乾燥している。

8月2日の風速は高さ1m、6mとも1～3m/sの弱風であったが、8月3日12時頃より強風となり、23時頃まで続いている。高さ6mの1時間平均風速は16.0m/s（発生時刻19:40）、10分間平均風速は16.6m/s、

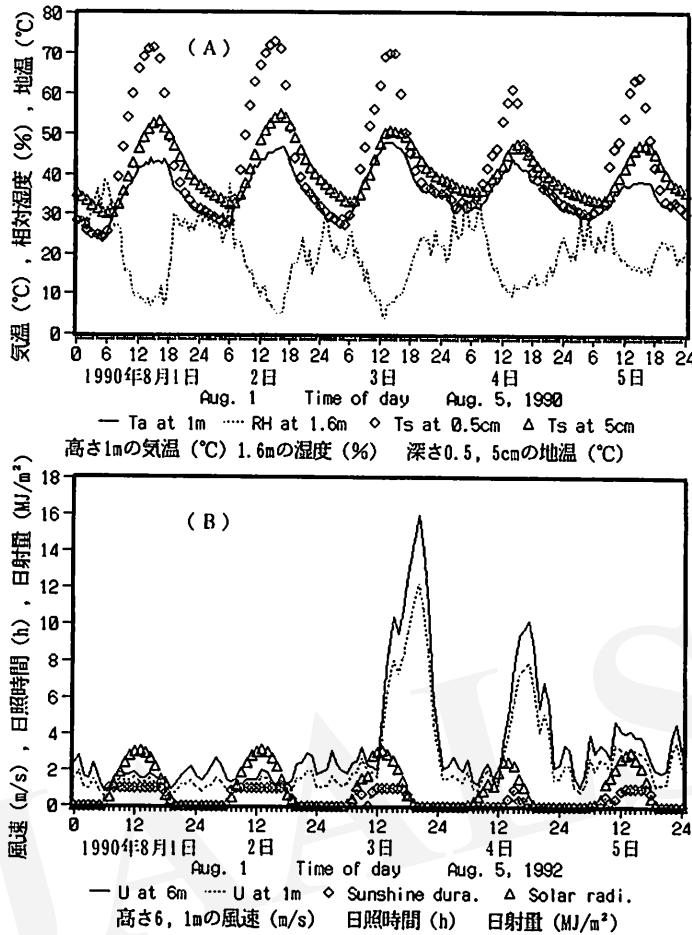


図9. 夏季, 高温日(1990年8月1日~5日)の(A)気温, 湿度, 地温, (B)風速, 日照時間, 日射量の時間変化。

最大瞬間風速は 22.1m/s で、10m/s 以上は 18~21 時に及んだ。この強風時の主(最多)風向は W, 気温は 36~42°C, 相対湿度は 18~27% であった。また、8月4日にはそれぞれ 10.2m/s (14:50), 11.4, 16.0m/s で、最多風向は WNW であった。なお、この風は後述するようにフェーン風である。

## (2) 1992年6月28日~7月2日の気象の特徴

図10に気象変化を示すように、最高気温は6月29日15:00に47.9°C, 30日15:30に47.8°C, 7月1日14:30に47.7°Cで非常に高温であり、しかも5日間の平均最高気温は47.0°Cであった。この期間の高温はフェーン風とは関係の薄い弱風状態での昇温である。最低気温は6月28日に24.9°C、次に29日の26.7°Cで、気温較差は20°C以上であった。最高地温では7月1日に70.3°C、最低地温は23.7°Cであった。最低相対湿度は6月30日に10.6%, 5日間の範囲は10~13%程度で、平均では12.0%

であった。

風速は6月28日~7月1日では弱風であるが、7月2日12時以降にやや強風(風向W~S)となり、特に23~24時には高さ6mで10分間平均風速が10m/sを超えており、W風向の強風(23:20に最大瞬間風速16.2m/s, 10分間平均風速12.5m/s)となった。この風は後述の条件のとおりフェーン風ではあるが、夜半からの強風であり、気温は低く30°C近くに低下し、多湿となっている。なお、トルファンでは一般に昼間の南寄り(南西)の風は北寄り(北西)の風より低温になることが多い。この期間は高温(6月29日)についての事例を示したもので、7月2日のフェーン風は典型的なものではない。例えば1990年7月1~2日や8月2~3日(真木ほか, 1993)によると、典型例ではさらに高温(吹き始めは気温43~47°C), 乾燥(吹き始めは相対湿度5~10%), 強風(平均風速10~15m/s)で、長い継続時間

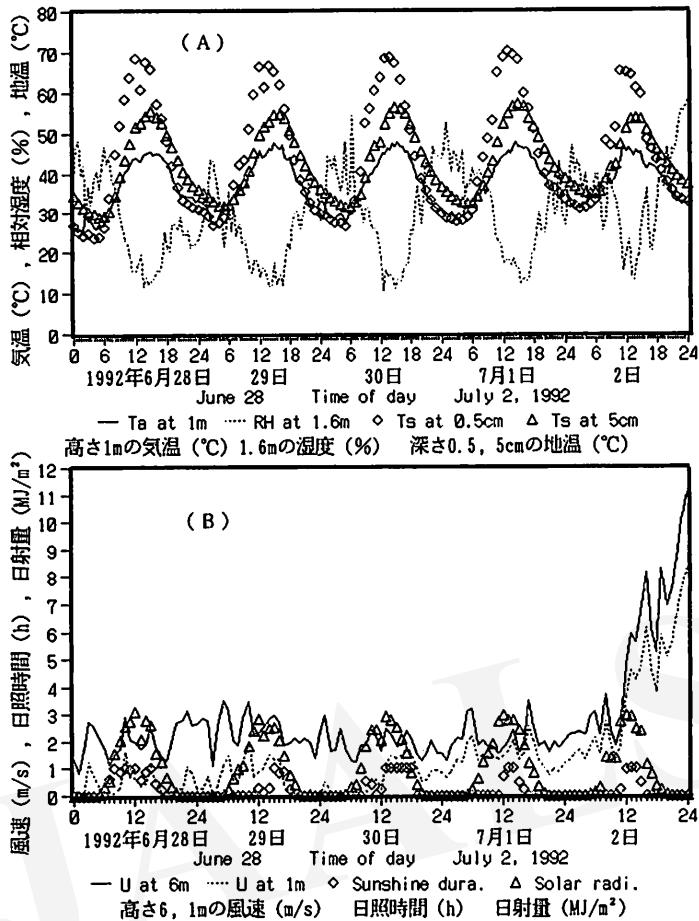


図 10. 夏季, 高温日 (1992年6月28日～7月2日) の (A) 気温, 湿度, 地温, (B) 風速, 日照時間, 日射量の時間変化.

(10時間程度) を示す。

また, この期間では日照時間が短く, 曜天が多かった。日射量については, 直達光は薄雲に遮られるため少なくなるが, 散乱光の割合が増加すると考えられるため減少程度はそれほど大きくなかった。

### (3) 夏季6～8月の気象の特徴としてのフェーン風

夏季6～8月の強風の発生割合は, 表3に示すとおりである。乾燥・高温の強風(乾熱風)は, いわゆるフェーンである。その発生頻度の多い年は1991年で, 6～8月に38%であり, 每正時の日最大瞬間風速20m/s以上の強風は8%観測された。一方, 少ない年は1994年6～8月に, それぞれ32%, 2%であった。また, 平均では1990～1992年6～8月には, それぞれ33.0%, 8.1%であり, 全体の1990～1994年平均ではフェーン風の発生率は33.4%であり, 20m/s以上の強風は6.2%であった。

ここでのフェーン風の条件は, 日最大風速が7m/s(突風率をかけた風速としての日最大瞬間風速10m/sに相当)以上, 高さ1.6mの気温が30°C以上の高温, 高さ1.6mの相対湿度が35%以下の乾燥, および風向がWSW～N(真木ほか, 1995の図1参照)である。気温は多くは35°Cであるが, 後述の1992年7月2日の例のように夜半から吹き始めたり, 曜天から小雨が降るような場合には35°C以下になる場合があるため, 30°C以上とした。また, 高さ1.6mの湿度が不良の場合には1.0mの湿度より推定した。

トルファンでの強風は, 発生時刻としては夕方から夜半, または早朝までの夜間に吹く特徴があり, 夜明け頃から正午頃の時間帯は弱風が多い。これは前述したとおり, 日射による昇温に起因して強まる風と夜間の降温に起因して弱まる風との関連が深く, 発生時刻の遅れが顕著に認められる。

表3. トルファンにおける1990~1994年の夏季6~8月の強風とフェーン風の発生率(%)。

期 間	毎正時の10分間平均風速			毎正時の最大瞬間風速			フェーン風・
	7m/s≤	10m/s≤	15m/s≤	10m/s≤	15m/s≤	20m/s≤	
1990年7~8月	37.3%	16.9	6.8	57.6%	23.7	10.2	27.1%
1991年6~8月	48.3	23.6	3.4	59.6	31.5	7.9	38.2
1992年6~8月	46.6	23.3	6.8	57.5	30.1	6.8	31.5
1993年6~8月	55.7	29.5	2.3	58.0	27.3	5.7	36.4
1994年6~8月	60.9	39.1	2.2	66.3	37.0	2.2	31.5
平均	50.9	27.4	4.0	60.1	30.4	6.2	33.4

・ここでフェーン風とは、風向(WSW~N)、強風(毎正時の10分間平均風速7m/s以上)、高温(30°C以上)、乾燥(相対湿度35%以下)の風を指す。

1990年8月3日、4日(図9(B))、1992年7月2日(図10(B))などの高温の乾燥した強風は、天山山脈を越えて吹くフェーン風(真木ほか、1994、1995)である。この風は、単に高山を越えることによる断熱昇温だけではなく、天山山脈を越えるときに北西~南東に切れた谷間で收れん・発散するため、山越え気流効果と谷間での收れん効果が相互に影響し合い、一段と乾燥した強風になると考えられる。

このようなフェーン風の吹く気象現象は、前述のとおり夏季6~8月には各月10日程度、すなわち1/3を占めている。また、春季4~5月の強風期にも多く発生し、気温が30°Cを超えない場合もあるが、ほぼ同様の現象であった。したがって、トルファンの春・夏季の気候特性は高温・乾燥の強風(フェーン風)に強く支配されている。

### 5) 1990~1992年におけるトルファンの極値と最頻値

最高気温は1990年8月3日および1992年6月29日に47.9°Cであった。ただし、1990年6月22日に48°Cを超えていたと推測された(真木ほか、1994)。また、地表温度は1992年7月16日14:00に防風林内の堆砂面上で地表温84.7°Cを記録した。一方、最低気温は1991年12月28~31日に-21~-22°Cであった。

最低相対湿度は1990年8月3日に3.8%であった。

1990年7~12月(9月欠測)には最大瞬間風速20m/s以上は7日間以上、1991年には10日間、1992年には9日間あった。最大瞬間風速20m/s以上の出現時刻は日中頃から夜半に多く、早朝には認められなかった。また、この観測期間では28.9m/sが最大値であった。

1991年7月~1992年6月の最大瞬間風速17.2m/s以上の最多風向はWであり、また、1991年5月~1992年8月の10分間平均風速14.0m/s(最大瞬間風速18.6m/s)以上の28回の強風のうち、Wが18回、WNWが13回で、最多風向はWであった。1990~1992年の20m/s以上の強風時の風向はWNWが14回、Wが10

回、SWが2回であり、最多風向はWNWであった。このように20m/s以上ではWNWが多くなる。いずれにしても強風時の主風向はWNW~Wであった。

### 6) トルファンの沙漠の気象特性とオアシスの気候緩和

Du and MAKI(1993b)から、トルファンの沙漠とオアシスの1991年7月1日~12月31日の気象データを示し、その気象特性の差異を考察する。

#### (1) 風速

沙漠に対するオアシスの風速比は日平均風速と日最大風速に対して、それぞれ0.41と0.54であり、オアシスでは沙漠の約半分の風速になっている。沙漠に対するオアシスの風速比は、防風林が茂った夏季の強風期には一層小さい値を示し、大きい減風率(防風林による減少風速の基準風速に対する割合)を示す。

#### (2) 風向

夏季7月の日最大風速時の最多風向は、沙漠とオアシスとも同じWNWである。一方、冬季12月のそれは沙漠ではSSW、オアシスではSWで、少しずれている。また日最大風速時の風向はオアシスではSSEがかなり多いが、沙漠では非常に少ない。沙漠とオアシスの風向差は夏季の強風期には小さいが、冬季の弱風期には大きい。それは盆地内の山地から低平地に変化する局地的な地形差およびオアシス内での凹凸のある微地形や防風林などの影響が関与するためと考えられる。

#### (3) 気温

オアシスと比較して、沙漠(オアシスとの境界地域の沙漠内)では夏季の最高気温は高く、また10月まではやや高いが、11月以降の冬季間はほとんど同じであった。最低気温は7月はわずかに高く、8~9月ではほとんど同じか、やや低目であり、10月、特に11月以降の冬季間は低かった。平均気温は7~8月では高いが、9~10月はほとんど同じで、11~12月の冬季間は低かった。

次に事例として、1991年8月23~29日の沙漠(沙漠

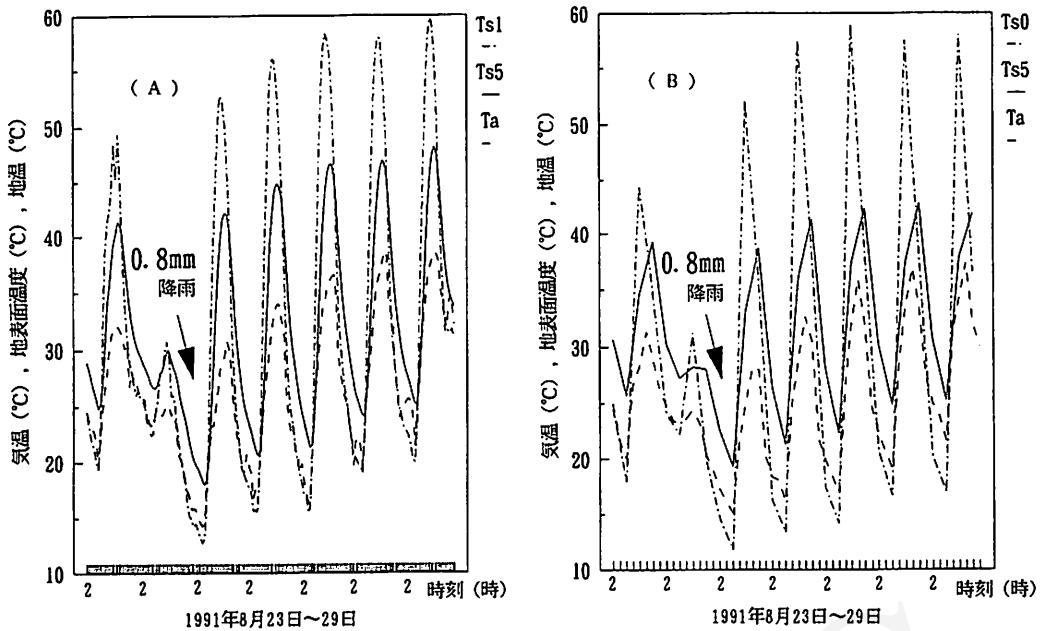


図11. トルファンの(A) 沙漠と(B) オアシスにおける降雨後の気温、地表面温度、地温の時系列変化。  
Ta : 気温, Ts0 : 地表面温度, Ts1 : 深さ 0.5cm の地温, Ts5 : 深さ 5 cm の地温 (°C)

研究站)とオアシス(気象站)の気温(Ta)と地表面と深さ 0.5cm, 5 cm の地温(Ts0, Ts1, Ts5)の変化を図11に示す。

最高気温は沙漠で高く、オアシスでは低く、最低気温は沙漠では低く、オアシスでは高い。したがって気温の日較差は沙漠で大きかった。最高・最低気温は、ともに深さ 5 cm の地温(Ts5)よりも低い方にずれている。

1991年7~12月の沙漠とオアシスの平均気温の日変化を図12(A)に示す。図に示す気温の日変化をみると、沙漠の夏季7月の気温は昼間ではオアシスよりも高い。オアシスでは最高気温は低く、早朝の最低気温はごくわずかに高く、したがって日較差は小さい。また7~20時では沙漠の方が高かった。逆に、冬季12月の沙漠における最高気温はオアシスとほぼ同じであり、最低気温は低かった。沙漠では日中(10~15時)は少し高く、したがって日較差は大きかった。沙漠では7月は昼間の高温の時間が長く、12月は夜間の低温の時間が長い。

最高気温の発生時間は夏季7月の沙漠では16時頃、オアシスでは17時頃であり、冬季の1月では14~15時、オアシスでは16~17時であり、沙漠では発生時刻が早く、オアシスでは時刻の大きな遅れが認められる。

#### (4) 地温

図11に示すように、気温と同様に沙漠では深さ 5cm の最高地温は顕著に高く、最低地温は低かった。なお、地表面温度(地表温)については、オアシスでは地表面

の 0 cm の地表温(Ts0)と沙漠の深さ 0.5cm の地温(ここでは地表温とする。図では簡略化のため、Ts1では、四捨五入して深さ 1 cm の意味の 1 の数字を付してある)の深さの違いのために、地表面付近の地温の比較は難しいが、最高地温ではほぼ同じであり、その分、沙漠の方が地温の上昇がオアシスより大きいことになる。一方、最低地温では沙漠の方が深いため低下は小さくなっているが、同じ深さの場合では沙漠の方が低くなると考えられる。また、0.8mm の降雨後に、沙漠では最高気温が 5 日間にわたって毎日、加算的に上昇しているが、オアシスでは 3 日目にはほぼ最高に達して一定状態になっている。地温 Ts5 は気温 Ta より時間の遅れが大きい。

1991年7月~12月の沙漠とオアシスの平均地温の日変化を図12(B)に示す。7月の両地点間の地温差は気温より大きいが、ほぼ同様の変化傾向を示している。また12月にも同様の変化傾向がある。深さ 5cm の地温(Ts5)では沙漠の最高地温はオアシスより7月に 6.8°C、12月に 4.3°C 高かった。一方、最低地温では沙漠の方が7月には約 1°C、12月には約 3°C 低かった。したがって日較差が大きかった。7月には日中の時間が12月よりも長いために、地温の高い時間は12月より長く、また日較差も大きい。

最高地温の発生時刻は、夏季7月の沙漠では16時頃、冬季12月では15時頃である。一方、オアシスでは夏・冬季ともに16~20時頃(14, 20時のデータのため間隔

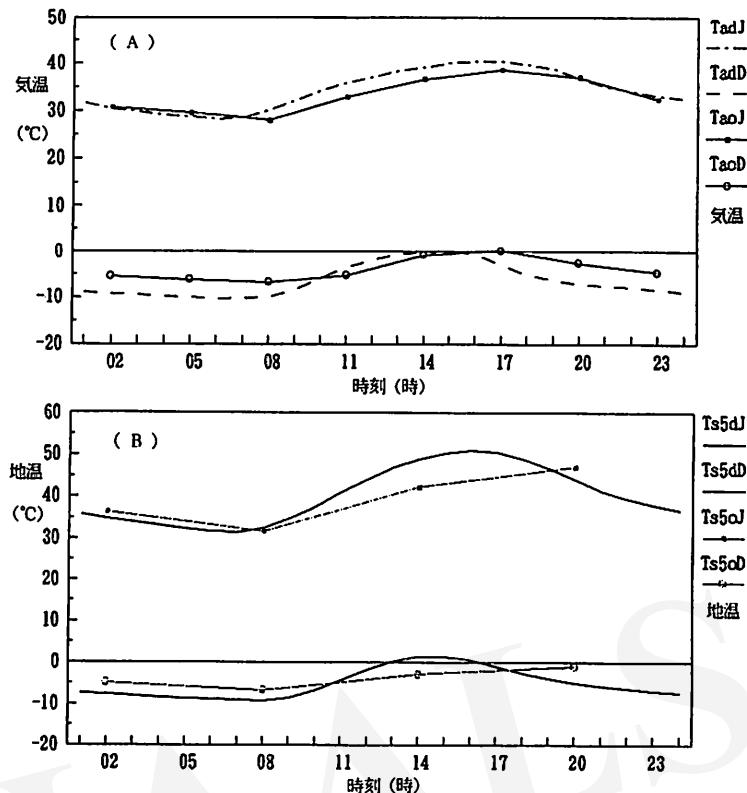


図12. 沙漠とオアシスの1991年7、12月の平均(A)気温、(B)地温の日変化。

TadJ : 7月・沙漠1991年・気温, TaoJ : 7月・オアシス・気温

TadD : 12月・沙漠・気温, TaoD : 12月・オアシス・気温

Ts5dJ : 7月・沙漠・5 cm 地温, Ts5oJ : 7月・オアシス・5 cm 地温

Ts5dD : 12月・沙漠・5 cm 地温, Ts5oD : 12月・オアシス・5 cm 地温

が広い)であり、沙漠より遅い。最高地温の発生時刻は最高気温のそれより遅い。

##### (5) 相対湿度

移動観測用のデジタル温湿度計の測定によると、沙漠ではオアシスより明らかに相対湿度が低かった。

定常気象観測露場(沙漠)とオアシスの相対湿度の変化傾向は類似している。観測露場がオアシス内の群落の西方にあるため、特に夜間～早朝に北東寄りの風向が多いことが影響してか、沙漠(沙漠研究站)とオアシス(気象站)の値がほとんど差がなく、むしろ沙漠の方の値が低い場合よりも高い場合が多くなっている。

この相対湿度に限っては、精度上で若干問題がある。自動観測装置では、乾湿球温度計感部に砂ぼこりが付着すると、水の浸潤が悪くなり、蒸発潜熱が十分使われないため、湿球温度が高くなる傾向があり、湿球感部のガーゼの汚れによって、また非常に乾燥した条件では露場の相対湿度が十分追従できなくなる可能性がある。したがつ

て、ガーゼを交換した直後はよいが、日数の経過、特に砂嵐があるとその直後から湿度が見かけ上、急激かつ相対的に高くなる傾向があった。ただし、各短期間のデータについては、デジタル温湿度計(チノー、HN-K)の値と比較することで、補正して使用した。なお、11～2月には湿球が結氷するため、観測は中止している。

##### (6) オアシスの気候緩和

沙漠とオアシスの気候を比較考察すると、オアシスでは防風林の影響によって沙漠より土壤水分と湿度が高いため、気温・地温は夏季の昼間に低く、冬季の夜間に高く、日較差・年較差がともに小さい、すなわち気候緩和効果が顕著である。オアシスの気温・地温の降雨後の回復速度(図11で降雨後に最高・最低気温が安定化する速さ)、および最高気温・地温の発生時刻は、オアシスでは日陰の割合が高いため蒸発散量が多く、土壤水分と湿度が高いことに起因して沙漠よりも遅い。

結論的にはオアシスでは風速の減少、気温・地温較差

の減少、蒸発散量の増加、相対（絶対）湿度の増加、昼間の気・地温低下が起こり、気候緩和が顕著である。

#### 4. ま と め

中国新疆のトルファン沙漠研究站で1990年7月から気象観測を実施し、現在も継続中である。乾燥地の気候特性および沙漠とオアシスの気候的差異を明らかにした。

(1) 月平均風速・日最大風速・日最大瞬間風速ともに7月が最も大きく、1月が最も小さい。季節的には春・夏季の4~8月が強風期であり、冬季12月~2月は弱風期である。

(2) 春・夏季の強風期の風速は早朝に最小、夕方~夜半に最大となり、日変化にはサインまたはコサイン曲線に近似して表示できる。風速には天候の特性によって1日、7~8日、12~15日、40~45日の周期的変動が認められる。

(3) 日最大瞬間風速と日最大10分間平均風速には強風時、長期間平均いずれにおいても高い相関関係があり、その比例係数1.41は突風率を表わし、風の息が地形的に小さくなることに起因して、日本国内の複雑地形の場合よりかなり小さくなっている。

(4) 強風期の夏季8月の風速分布には対数法則が認められる。また冬季にも若干認められるが、特に1月の夜間は強い安定成層状態となるため、対数分布からずれる傾向があった。なお、トルファンの沙漠の粗度長は0.1~0.2cmであった。

(5) 年間の卓越（最多）風向はNE（2位： NNE）であるが、日最大風速、および日最大瞬間風速17.2m/s以上の強風時の最多風向はW（WNW）であり、さらに強風の20m/s以上の風速ではWNW（W）である。

(6) 風は時間の経過につれて、昼間は東寄りから南寄りの風向、そして北西寄りの風向を経て、夜間には北~北東寄りの風向へと時計回りの変化特性がある。その傾向は夏季より冬季に顕著である。

(7) 年降水量は1991年7月1日~1992年6月30日に16.0mm、1991年1月~1992年12月の2年間平均で8.8mmであった。乾燥地トルファンの地表面からの蒸発量は非常に少ないが、夏季、晴天日の小型パン蒸発量は平均約25mmであり、非常に多い。

(8) 夏季6~8月に長期間続く非常な高温・乾燥状態は、高温・乾燥・強風のフェーン風に大きく支配されている。このフェーン風の5年間平均の発生日数頻度は33.4%であり、なかでも20m/sの強風は6.2%であった。

(9) 最高気温は1990年8月3日と1992年6月29日に47.9°C、地表面温度の最高値は1992年7月16日に

84.7°Cであり、最低相対湿度は1990年8月3日の3.8%であった。最大瞬間風速は1992年5月26日に28.9m/sであり、年平均風速は2.2m/sであった。

(10) オアシスでは気候緩和効果が大きく、気温・地温は沙漠よりも夏季に低く、冬季に高く、日中に低く、夜間に高い。また年較差・日較差は小さい。沙漠では降雨後の気温・地温の上昇は急激であるが、オアシスでは日陰が多く、土壤水分・蒸発散量・湿度の増加のため気温・地温の上昇は緩やかであり、風速は半減する。

#### 引 用 文 献

- 朝倉 正・関口理郎・新田 尚（1995）：『気象ハンドブック』朝倉書店：773p.
- 張 家誠・林 之光（1985）：『中国気候』上海科学技術出版社：603p.
- 真木太一・大場和彦・潘 伯榮・中井 信・朱 衛東・上村賢治（1993）：中国北西部の乾燥地トルファンにおける気候・蒸発散特性、「日中共同研究成果発表報告会論文集」：118-127.
- 真木太一・杜 明遠・潘 伯榮・上村賢治（1994）：中国北西部の乾燥地トルファンにおける砂漠・オアシス気候と蒸発散特性、「農業気象」50：185-195.
- 真木太一・潘 伯榮・杜 明遠・鮫島良次（1995）：中国北西部の新疆および特にトルファンにおける沙漠気候と砂丘移動。「沙漠研究」4：91-101.
- 三上正男・藤谷徳之助・張 希明（1995）：中国タクラマカン沙漠における気象要素の長期観測。「沙漠研究」4：103-117.
- 長島秀樹・趙 塔峰・岡崎守良・季 崇舜・夏 訓誠（1991）：タクラマカン沙漠における気象要素と砂面変動の自動観測。「沙漠研究」1：61-66.
- 熱帶農業研究センター（1993）：『日中共同研究成果発表報告会論文集』：164p.
- 夏 訓誠（1988）：沙漠と人間. *Shimizu Bull.* 57 : 2-3.
- 朱 肇遠・劉 惠（1981）：『中国北方地区的沙漠化過程及其治理区划』林業出版社：83p.
- Du, M. and MAKI, T. (1993a) : Wind and sand transport in Turpan, Xinjiang, China. *Proc. Japan-China Joint Res. Conf. on Environ. Resources* : 42-50.
- Du, M. and MAKI, T. (1993b) : Climatic differences between an oasis and its marginal area in Turpan, Xinjiang, China. *Proc. Japan-China Joint Res. Conf. on Environ. Resources* : 110-117.
- WANG, T. (1994) : Preliminary assessment on development of desertification in North China. *Proc. Japan-China Inter. Symp. on the Study of the Mechanism of Desertification, STA* : 364-371.

## Climatic Characteristics at a Desert and an Oasis in Turpan of Xinjiang, China

Taichi MAKI\*, Mingyuan DU\*\*, Borong PAN\*\*\* and Ryoji SAMESHIMA\*\*\*\*

Meteorological observations have been carried out at Turpan Desert Research Station in Xinjiang, China, since June 1990. Climatic characteristics in the arid land and climatic differences between the desert and the oasis are as follows:

(1) Monthly mean wind speeds, and mean daily maximum and daily maximum instantaneous wind speeds were highest in July and lowest in January, respectively. The strong wind season was in spring and summer, i.e., from April to August, while the weak wind season was in winter, i.e., from December to February.

(2) Wind speeds in spring and summer are generally strong. The minimum was observed in the early morning and the maximum was noticed from late afternoon to midnight. The diurnal variation can be approximately expressed by a sine or cosine trigonometric function. Cyclic wind variations of a single day, 7 to 8 days, 12 to 15 days and 40 to 45 days were recognized in relation to weather patterns.

(3) The relation between daily maximum instantaneous wind speed and daily maximum 10-min-mean wind speed had a high correlation both for the strong windy periods and for the long-term periods, and its proportional coefficient was 1.41 as a gust factor which is based on gustiness related to topography. The coefficient in the desert was smaller than that at a complex terrain.

(4) The logarithmic law on wind speed profile was recognized for a strong wind period in summer or August and was slightly recognized for a weak wind period in winter, but the log-law was not adapted for a stable stratification particularly in January. Roughness length was 0.1 to 0.2 cm on the desert at Turpan.

(5) The annual most prevailing wind direction for 10-min-mean wind speed was NE (the second most frequent: NNE), however, the annual most prevailing wind directions for strong wind period in the daily maximum 10-min-mean wind speed and daily maximum instantaneous wind speed over 17.2m/s were W(WNW), and stronger wind period over 20 m/s was WNW(W).

(6) The wind direction changed gradually from E to S during the daytime and veered from N to NE during the nighttime in clockwise circulation by passing through NW. This inclination was more significant in winter than in summer.

(7) Annual amount of precipitation from July 1, 1991 to June 30, 1992 was 16.0 mm and 2-year mean precipitation from January, 1991 to December, 1992 was 8.8 mm. The amount of evaporation from the extremely dry ground surface in arid land of Turpan was significantly small. The amount of evaporation measured by a small pan type evaporimeter with 20 cm diameter was very large amount of 25 mm on a fine day in summer.

(8) The climatic situation of very high temperature and low humidity for a long-term period of June to August was recognized as a result of Foehn wind with a hot, dry and strong wind condition. The percentage of appearance days of Foehn wind for 5-year average was 33.4 %, and in particular that of strong wind over 20m/s was 6.2 %.

(9) As for extremes, maximum air temperature was 47.9 °C on August 3, 1990 and June 29, 1992, and maximum soil surface temperature was 84.7 °C on July 16, 1992. Maximum relative humidity was 3.8 % on August 3, 1990. Maximum instantaneous wind speed was 28.9 m/s on May 26, 1992 and annual mean wind speed was 2.2m/s from July 1991 to June 1992.

(10) The effect of climatic alleviation in an oasis was significant. Air and soil temperatures were lower in summer but higher in winter, and lower in a daytime but higher in a nighttime. The annual and diurnal range of temperatures in the oasis was smaller than that in the desert. The increasing rate of air and soil temperatures after a rain was faster in the desert, on the contrary in the oasis offered much shade, it was slower by reason of an increase in soil moisture, evapotranspiration and humidity. The wind speed values in the oasis was half compared with the values in the desert.

**Key Words:** Arid land, Climatic characteristic, Desert, Oasis, Wind

\*Division of Agrometeorology, Department of Natural Resources, National Institute of Agro-Environmental Sciences.  
3-1-1, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

\*\*Environmental Resources Division, Japan International Research Center for Agricultural Sciences.  
1-2, Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

\*\*\*Xinjiang Institute of Biology, Pedology and Desert Research, Chinese Academy of Sciences.  
40, Beijing South Road, Urumqi, China.

\*\*\*\*Department of Yamase-Area Agro-Environment, Tohoku National Agricultural Experiment Station. 4, Akahira, Shimo kuriyagawa, Morioka, Iwate 020-01, Japan.

(Received October 4, 1995; Accepted October 14, 1996)

# 砂質土壤におけるピートの施用が土壤の理化学性 および植物の生長に及ぼす効果

## —ハクサイのポット栽培実験の統計的解析—

金 凰鶴<sup>\*</sup>・西崎 泰<sup>\*\*</sup>・尹 懷寧<sup>\*\*\*</sup>・白 鴻祥<sup>\*\*\*</sup>・鄭 応順<sup>\*\*\*</sup>・山口達明<sup>\*</sup>

### 1. はじめに

腐植酸を大量に含んだ天然有機資源の一種であるピート (Peat, 草炭あるいは泥炭) の利用に関する研究は世界的に広範囲の目的で行なわれている。これまでの研究でピート個々の特性に関しては次第に明らかにされ、その利用法に関する研究も進んでいる。

ピートを資源として利用する歴史は古く、主な利用分野は農業、園芸およびエネルギー産業であり、その他は、わずかに環境、建築、医薬などで利用されているにすぎない。農業、あるいは園芸用ピートは有機肥料、土壤改良材、飼料および植物生育促進剤などとして多く利用されている (日本機械工業連合会, 1983; 尹, 1991)。

筆者らはピートの個々の特性を解明する中で、その吸水・保水性、保肥・肥効性に優れていることから、ピートを天然土壤改良材として活用し、沙漠緑化、あるいは沙漠化防止に用いるための関連研究を行なうこととした。

沙漠におけるピートを用いた栽培実験は、沙漠緑化のための基礎研究の一環として行なわれたもので、1994年にはピートの混入量の変化による植物の生長効果の検討を目的として、中国クルパンチングト沙漠南辺の阜康におけるチンゲンサイのポット栽培実験 (篠田ほか, 1996) および中国内モンゴルのカルチン沙漠におけるハクサイのポット栽培実験を行ない、ピートが植物の生長に有効に働く成果を得た (金ほか, 1995a, b; 西崎ほか, 1995)。

本報は、1995年カルチン沙漠で行なったハクサイのポット栽培継続実験の結果である。1994年のピート最適混入量の検討結果に基づいて、ピートと土壤改良材として用いた風化炭との比較検討を行なうとともに、これらを混入した場合の水分条件および砂の粒径が砂質土壤の理化学性および植物の生長にどのような影響を与えるかについて検討した。そして、栽培後の土壤の理化学性についての分析とともに、ハクサイの生長に与える効果

について実験計画法による統計的解析を行なった。

### 2. 実験条件および栽培方法

#### 1) 実験場の自然条件

実験場は中国カルチン沙漠の南東辺に位置する内モンゴル通遼市ガンチカ (Ganqika) にある (Fig. 1 参照)。地理的位置は、E 121° 30' ~ E 123° 43', N 42° 45' 20" ~ N 43° 41' 30" である。気候は中温帯大陸性半湿润気候区に属する。年平均気温は 5.8°C、最低気温は 1 月の -15.1 °C で、最高気温は 7 月の 23.9°C である。年平均降水量は 452mm で、主に 6 月 ~ 8 月に集中している。年平均蒸発量は 2,200mm である。平均相対湿度は各季節によって異なるが、春季 (4 月) は 45~50%、夏季 (7 月) は 75%、秋季 (10 月) は 60~65%、冬季 (1 月) は 55~60% である。春季の乾燥が気候的な特徴である。地形的には平坦で、砂丘の間に湖沼が分布している。塩類集積土壤が広く分布しているが、主にソーダアルカリ土壤である。地下水位は高く、平均深さは 50~250cm である (金・山口, 1995)。

#### 2) 実験材料と供試体

土壤改良材は、実験場の近くに産出するピートおよび風化炭を用いた。ピートは遼寧省撫順市新賓県北四平産を、風化炭は内モンゴル霍林河炭鉱産を使用した。Table 1 に実験で用いたピートと風化炭の主な特性を示す。pH はピートの方が風化炭より低い値を示した。有機質含有量はピートの方が風化炭よりやや低いが、全窒素・フミン酸含有量はいずれもピートの方が高い値を示した。

改良対象土壤としては沙漠現地の砂を用いた。その栽培前の砂の有機質含有量は 0.19%、全窒素含有量は 0.02% であった。pH は 8.04 で、弱アルカリ性を示した。これをふるいで粗砂 (>0.25mm) と細砂 (≤0.25mm、シルト約 1~2%、粘土約 2~3% 含有) の 2 種類に分

\* 千葉工業大学工業化学科

\*\* 千葉工業大学工業経営学科

\*\*\* 遼寧師範大学地理系

(受付: 1995 年 12 月 7 日、受理: 1996 年 9 月 10 日)

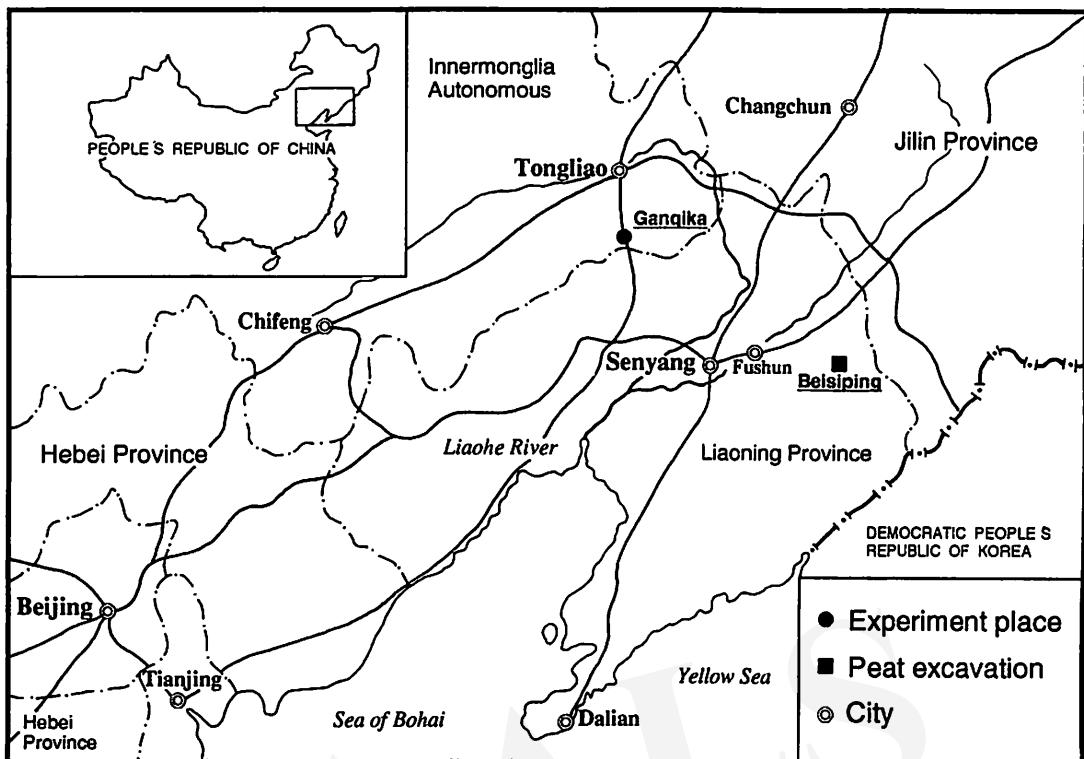


Fig. 1. The location of experiment place and peat excavation.

Table 1. Main characteristics of improving materials.

Material	pH (H <sub>2</sub> O)	Contents: dry base %		
		organic substance	total nitrogen	humic acid
peat	5.50	79.36	2.24	45.78
weathered coal	6.04	83.65	0.67	30.13

Table 2. Factorial, level and orthogonal array.

factorial	level 0		level 1	
	A : particle size of sand	fine sand (≤0.25mm)	coarse sand (>0.25mm)	B : exp. I : peat
B : exp. II : weathered coal	exp. II : weathered coal	none	8wt%	exp. II : weathered coal
C : water supply	C : water supply	pF1.8	pF2.4	pF1.8
B <sub>0</sub>		B <sub>1</sub>		
C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	
A <sub>0</sub>	X <sub>000</sub>	X <sub>001</sub>	X <sub>010</sub>	X <sub>011</sub>
A <sub>1</sub>	X <sub>100</sub>	X <sub>101</sub>	X <sub>110</sub>	X <sub>111</sub>

けて実験に用いた。ポットはφ275×240mmのプラスチック製を用いた。供試栽培植物は現地産ハクサイ（晋3号）を用いた。

### 3) 栽培法およびデータの採取

各条件毎に3つのポットを用意し、分級した砂に各々8wt%（重量パーセント、以下同）のピートおよび風化炭をできるだけ均一に混合してポットに入れて実験に供した。各ポットに入れた砂と改良材の重量は合計13kgとした。対照として砂のみを同じ重量ポットに入れた。各ポットは播種前に飽和状態になるまで給水を行なった。給水条件は、pF1.8（水分充分）とpF2.4（pF1.8に比べ約30%不足）の2つを設定した。

各ポットに10粒のハクサイの種を播種した。発芽後間引いて各ポットに3本残した。収穫までにハクサイの生長状況について定期的に観察・測定し、水分設定条件に従って給水を行なった。収穫後、ハクサイの乾物重、土壤理化性などについて以下の項目を測定した。

栽培期間は1995年8月2日種蒔き同年9月21日までの50日間である。

a. ハクサイの生長状況：草高、葉面の幅、乾物重（地上部および地下部）。

Table 3. Observed data of the experiment.

No.	Notation	Plant height (cm)		Width of leaf (cm)		Dry matter weight (leaf and stalk)(g/plant)		Dry matter weight (root) (g/plant)	
		exp. I	exp. II	exp. I	exp. II	exp. I	exp. II	exp. I	exp. II
1	X <sub>000</sub>	9.5	9.5	4.3	4.3	0.86	0.86	0.11	0.11
2	X <sub>001</sub>	12.3	12.3	5.6	5.6	1.31	1.31	0.22	0.22
3	X <sub>010</sub>	13.1	9.7	6.3	4.6	3.30	1.00	0.43	0.12
4	X <sub>011</sub>	14.0	10.4	6.6	5.2	3.17	0.82	0.39	0.13
5	X <sub>100</sub>	9.9	9.9	4.7	4.7	0.62	0.62	0.11	0.11
6	X <sub>101</sub>	10.2	10.2	4.9	4.9	0.73	0.73	0.15	0.15
7	X <sub>110</sub>	14.1	10.0	6.8	4.9	4.62	0.61	0.62	0.08
8	X <sub>111</sub>	11.7	9.5	7.1	4.6	2.44	0.56	0.45	0.04

exp. I : peat, exp. II : weathered coal.

- b. 土壌の物理性: 三相分布, 総孔隙率, 容積重, 最大容水量(重量).
- c. 土壌の化学性: pH (H<sub>2</sub>O), 電気伝導度 (EC), 有機質, 全窒素, 有効態窒素・リン・カリ.

### 3. ハクサイの生長に対する統計的解析

#### 1) 特性値の選定および定義

測定項目の中で、ハクサイの生長効果を評価する特性値として草高, 葉面の幅および乾物重(地上部および地下部)を選定した。各特性値を次のように定義する。

- a) 草高: 収穫直前, 一本のハクサイで地上部の一番長い部分.
- b) 葉面の幅: 収穫直前, 一本のハクサイで一番広い葉面の幅.
- c) 地上部乾物重: 収穫後, 一本のハクサイの地上部(茎と葉)の乾燥重量.
- d) 地下部乾物重: 収穫後, 一本のハクサイの地下部(根)の乾燥重量(乾燥前に水洗).

#### 2) 因子の割りつけ

栽培実験は実験Ⅰと実験Ⅱに分けた。実験Ⅰはピートの混入実験、実験Ⅱは風化炭の混入実験である(以下同)。実験Ⅰと実験Ⅱのいずれも3因子2水準の実験を設定した。実験Ⅰにおいて、因子Aは砂の粒径で、水準0は細砂、水準1は粗砂を示す。因子Bはピートの混入量で、水準0は混入量0 wt%, 水準1は混入量8 wt%を、因子Cは給水条件で、水準0はpF1.8, 水準1はpF2.4を示す。実験Ⅱでは、因子Bは風化炭の混入量で、水準0は混入量0 wt%, 水準1は混入量8 wt%を示し、その他の因子と水準は実験Ⅰと同じ内容を示す。

因子の割りつけ法および各水準による特性値のデータをTable 2, 3に示す。

#### 3) 解析方法

Table 3のデータを用いて、分散分析法の手順(鷲尾, 1991; 村井ほか, 1993)に準じて統計的解析を行なった。まず、平方和、自由度、平均平方を算出し、つぎに、有意差の検定を行なった。因子あるいは因子間の平均平方と誤差平均平方との比(分散比F0)を算出し、分母2あるいは3、分子1の自由度を持つF分布値と比較して、5%の有意差(信頼度95%, “で記する。以下同)と1%の有意差(信頼度99%, “で記する。以下同)での有意差の検定を行なった。

最後に、母平均の推定を行なった。

### 4. 結果および考察

#### 1) 土壌の理化学性の改良効果

##### (a) 土壌の物理性

栽培後の土壌の物理性をTable 4に示す。土壌三相分布・孔隙率・最大容水量および容積重は、土壌の保水性・通気性を示し、土壌の物理性の良さを評価する重要な因子である。土壌の三相は互いに関与し合っているが、一般的に作物の生育に適する比率は、固相45~50%, 液相および気相20~30%といわれる(藤原ほか, 1996)。今回の実験においては、液相率からみると、ピートを混入した土壌(以下ピートの方と省略する)は12~23%, 風化炭を混入した土壌(以下風化炭の方と省略する)は6~18%と最適値より低い値を示したが、両者は対照の5~10%より高い値を示した。固相率からみると、ピートの方は44~47%で非常に理想的な結果を示した。風化炭の方は56~61%で、対照の59~67%と同様高い値を示した。すなわち、ピートの方は砂質土壌のやわらかさが高められたことがわかる。これは、ピートの密度が風化炭より低いことと、三相分布の条件が良かったため、土壌微生物による団粒構造の形成が促進されたためであ

Table 4. Physical properties of sandy soil after the cultivation.

Sample	Three phase(%)						Void (%)		Unit weight (kgm <sup>-3</sup> )		Max. water holding capacity (g kg <sup>-1</sup> )	
	pF1.8			pF2.4			pF1.8	pF2.4	pF1.8	pF2.4		
	solid	liquid	gas	solid	liquid	gas						
fine sand	none	67	7	32	59	5	36	38.8	40.9	1.56	1.56	227.7
	peat	46	12	42	45	13	42	54.1	55.5	1.18	1.14	345.9
	weathered coal	56	17	27	56	18	26	44.3	44.3	1.41	1.42	245.8
coarse sand	none	63	10	27	61	5	34	37.4	39.2	1.60	1.66	223.5
	peat	44	23	33	47	18	35	56.2	53.1	1.13	1.21	314.1
	weathered coal	61	11	28	58	6	36	39.5	41.9	1.53	1.47	223.3

Table 5. Chemical properties of sandy soil after the cultivation.

Sample	EC (dS m <sup>-1</sup> )		pH (H <sub>2</sub> O)	Organic substance (%)	Total-N (%)	Quick-N (mg kg <sup>-1</sup> )	Quick-P (mg kg <sup>-1</sup> )	Quick-K (mg kg <sup>-1</sup> )	
	pF1.8	pF2.4							
fine sand	none	0.51	1.86	7.94	0.397	0.024	25.3	1.4	41.0
	peat	2.54	2.81	6.04	3.177	0.103	100.3	3.0	49.0
	weathered coal	1.95	3.03	6.86	5.019	0.055	30.7	0.4	33.0
coarse sand	none	0.88	1.18	8.04	0.217	0.016	15.7	0.4	35.0
	peat	2.63	3.31	6.06	2.965	0.096	77.1	3.6	28.0
	weathered coal	1.53	2.74	6.86	5.526	0.059	20.5	0.0	25.0

ると思われる。気相率は全体的にピートの方が高かった。そのため、ピートの方が孔隙率も最大容水量も一番高い値を示し、容積重は一番低い値を示した。

砂の粒径による土壤の物理性改良効果からみると、砂のみの場合は、細砂の方が粗砂より最大容水量・気相率および間隙率は高く、容積重は低い。ピートを混入した場合は最大容水量は細砂の方が高く、その効果は砂のみの場合より著しかった。これはピートの高い吸水性によるものである。他の物理性は水分条件によって異なる。すなわち、水分が充分(pF1.8)の場合は粗砂の方が三相分布が植物の生長に適しており、間隙率・最大容水量は高く、容積重は低い値を示した。上記の結果から、砂の粒径による土壤の物理性改良効果は異なるが、砂のみと改良材混入のいずれも、細砂の方が粗砂より改良効果が優れていることがわかった。これは、細砂に含まれているシルトおよび粘土によるものであると思われる。

#### (b) 土壌の化学性

栽培後の土壤の化学特性値を Table 5 に示す。有機質含有量は風化炭の方がピートのより高いが、全窒素お

よび速効態窒素・リン・カリの含有量はピートの方が風化炭より高い値を示した。すなわち、ピートの方が風化炭より有機質の分解性が大きく、土壤の微生物の生育に寄与すると思われる。

pH は植物の生長に与える影響が大きい。ピートと風化炭を土壤改良材として用いるのは、Table 1 に示したように、いずれも酸性を示すため塩類集積土壤（とくにアルカリ土壤）の改良効果が著しいと期待されるからである。測定結果からみると、pH のより低いピートの方が風化炭より pH の調節効果が高いことがわかった。

EC 値は、土壤の肥料などの塩分基の含有量と相関性があり、とくに硝酸態窒素含有量とは相関性が高い（藤原ほか、1996）。ピートの方が EC 値が高くなることは、土壤中に窒素分が多く、硝酸化が進んでいるからであると推定される。

砂の粒径による土壤化学性の改良効果からみると、ピート・風化炭のいずれも細砂の方が効果が良かった。これは、細砂に含まれているシルト、粘土による土壤の团粒構造の形成および保水・保肥性によるものと思われる。対照と比べると、風化炭の方は対照より有機質、全窒素、有効態窒素の含有量が高いが、とくに粗砂は速効態リン・カリの含有量はより低い値を示した。これは、前に述べたように土壤の微生物による分解能力が低いからと思われる。

Table 6. Analysis data of variance.

## (1) Plant height and width of leaf

Factor	Plant height: exp. I (with peat)				Plant height: exp. II (with weathered coal)				Width of leaf: exp. I (with peat)				Width of leaf: exp. II (with weathered coal)			
	s.s.	d.f.	m.s.	F <sub>o</sub>	s.s.	d.f.	m.s.	F <sub>o</sub>	s.s.	d.f.	m.s.	F <sub>o</sub>	s.s.	d.f.	m.s.	F <sub>o</sub>
A	1.12	1	1.12	22.40*	0.66	1	0.66	3.71	0.06	1	0.06	0.48	0.045	1	0.045	18.00
B	15.12	1	15.12	302.40**	0.66	1	0.66	3.71	6.66	1	6.66	53.28*	0.005	1	0.005	2.00
C	0.32	1	0.32	6.40	1.36	1	1.36	7.65	0.55	1	0.55	4.40	0.405	1	0.405	162.00**
A×B	0.02	(1)	—	—	0.15	(1)	—	—	0.15	1	0.15	1.20	0.000	(1)	—	—
A×C	4.20	1	4.20	84.00*	1.71	1	1.71	9.61	0.15	1	0.15	1.20	0.500	1	0.500	200.00**
B×C	2.64	1	2.64	52.90*	1.05	1	1.05	5.90	0.10	(1)	—	—	0.180	1	0.180	72.00*
E	0.08	(1)2	0.05	—	0.21	(1)2	0.18	—	0.15	(1)2	0.125	—	0.005	(1)2	0.0025	—
T	23.52	7	—	—	5.80	7	—	—	7.28	7	—	—	1.140	7	—	—

## (2) Dry matter weight (leaf and stalk) and dry matter weight (root)

Factor	Dry matter weight (leaf and stalk): exp. I (with peat)				Dry matter weight (leaf and stalk): exp. II (with weathered coal)				Dry matter weight (root): exp. I (with peat)				Dry matter weight (root): exp. II (with weathered coal)			
	s.s.	d.f.	m.s.	F <sub>o</sub>	s.s.	d.f.	m.s.	F <sub>o</sub>	s.s.	d.f.	m.s.	F <sub>o</sub>	s.s.	d.f.	m.s.	F <sub>o</sub>
A	0.007	1	0.007	0.16	0.270	1	0.270	22.50*	0.0040	1	0.0040	1.60	0.0050	1	0.0050	1.14
B	12.525	1	12.525	28.36*	0.035	1	0.035	2.92	0.2110	1	0.2110	84.40*	0.0060	1	0.0060	1.36
C	0.383	1	0.383	0.86	0.014	1	0.014	1.17	0.0004	1	0.0004	0.16	0.0018	1	0.0018	0.41
A×B	0.248	(1)	—	—	0.004	(1)	—	—	0.0128	1	0.0128	5.12	0.0084	1	0.0084	1.91
A×C	0.714	(1)	—	—	0.006	(1)	—	—	0.0050	(1)	—	—	0.0018	(1)	—	—
B×C	1.030	1	1.030	2.33	0.078	1	0.078	6.50	0.0162	1	0.0062	6.48	0.0040	1	0.0040	0.91
E	0.363	(1)3	0.442	—	0.026	(1)3	0.012	—	0.0008	(1)2	0.0025	—	0.0070	(1)2	0.0044	—
T	15.270	7	—	—	0.433	7	—	—	0.2502	7	—	—	0.0192	7	—	—

s.s.: sum of squares, d.f.: degrees of freedom, m.s.: mean squares, F<sub>o</sub>: variane comparison, E: error sum of squares, T: total sum of squares,

\*: significant difference of 5%, \*\*: significant difference of 1%

$$\text{exp. I : peat, exp. II : weathered coal, F-distribution deviation : } F_2^1(0.05) = \frac{18.5}{98.5} = 0.185, F_3^1(0.05) = \frac{10.0}{34.1} = 0.294$$

## 2) ハクサイの生長効果についての統計的解析

有意差の検定結果を Table 6 に、母平均推定結果を Fig. 2 に示す。各特性値に対する効果を因子単独水準効果（以下主効果と略称する）および交互作用効果（以下交互効果と略称する）にわけて、有意差のある効果のみを解析した。

## (a) 草高に与える影響

まず、草高に与える各主効果の影響について考察する。砂の粒径は細砂、給水条件は pF2.4、改良材の混入によって促進効果がみられた。改良材はピートの方が風化炭よりも優れ、風化炭は対照よりやや劣る傾向がみられた。

主効果の中で、ピートの混入効果および砂の粒径に有意差が認められ、前者は 99% の信頼度、後者は 95% の信頼度を示した。解析の結果、ピートの混入と細砂の方が草高の増長に大きな影響を与えることがわかった。これは、ピートの混入によって、土壤中の窒素（とくに速効態窒素）および速効態リン・カリの含有量が大幅に増

え、ハクサイの葉・茎の生長を盛んにする有効性栄養分を与えたからであると思われる。また、ピートの混入砂は土壤の三相分布が植物の生長に適し、保水性、通水・通気性がよいため、ハクサイの草高に大きな促進効果を与えたと思われる。

上記の栄養分の含有量は、細砂の方が粗砂より高い。これは細砂の方が粗砂よりシルト・粘土成分が富み、保肥性が高く、三相分布および最大容水量はピートの混入の有無にかかわらず細砂の方が粗砂よりハクサイの生長に適しているからである。

つぎに、草高に与える各交互効果の影響について考察する。草高に与える効果は A×C・B×C 交互効果にあるが、A×C 交互効果は、細砂の場合の pF2.4、粗砂の場合の pF1.8 で促進効果がみられた。B×C 交互効果は、ピートを混入した場合の pF1.8、風化炭を混入した場合の pF2.4 で促進効果がみられた。

交互効果の中で、ピート混入実験の A×C、B×C 交

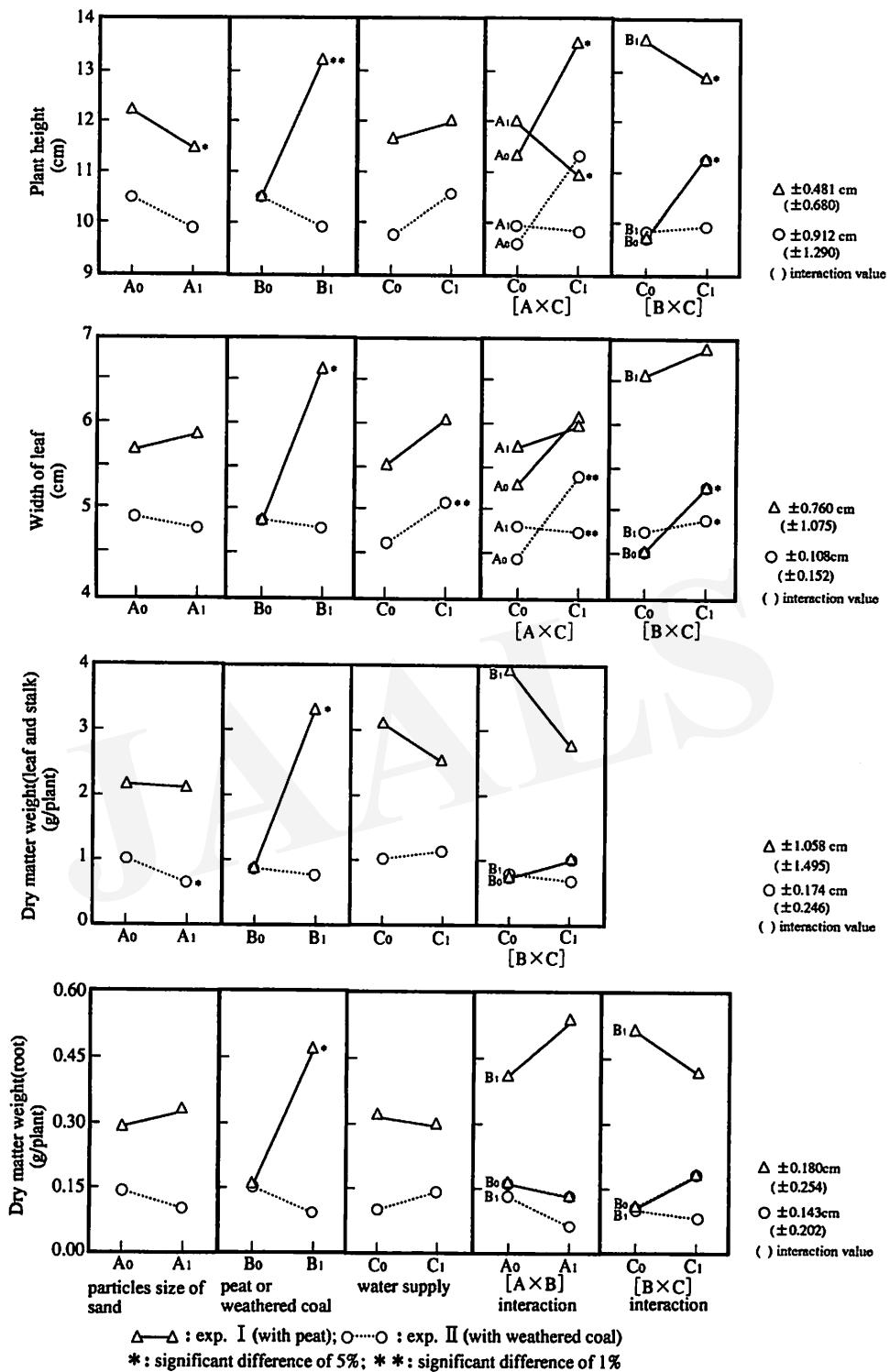


Fig. 2. Expectation of population means.

互効果に有意差が認められたが、両者は95%の信頼度を示した。A×C交互効果があることは、砂の粒径と水分量との相関性が高いことを意味する。解析の結果、粗砂の場合、pF1.8の方が草高の増長に与える促進効果が著しく、細砂の場合、pF2.4の方が促進効果が大きいことを示した。B×C交互効果があることは、ピートの混入量と水分量との相関性が高いことを示す。解析の結果、pF1.8およびpF2.4のいずれもピートの混入によって草高の増長に大きな影響を与えたが、pF1.8の方がpF2.4より効果が大きいことがわかった。これは、ピートの高い保水性によるものであるが、水分が充分の場合でも、土壤の通気性にはあまり影響を与えられなかったからであると思われる。

#### (b) 葉面の幅に与える影響

まず、葉面の幅に与える各主効果の影響について考察する。砂の粒径はピートを混入した場合の粗砂、風化炭を混入した場合の細砂、給水条件はpF2.4、そして改良材の混入によって促進効果がみられた。改良材の混入効果はピートの方が風化炭より優れ、風化炭は対照よりやや劣る傾向がみられた。

主効果の中でピートの混入効果および風化炭の混入実験の水分効果に有意差が認められたが、前者は95%の信頼度、後者は99%の信頼度を示した。解析の結果、ピートの混入によって葉面の幅の増長に大きな促進効果があることがわかった。その原因については、草高に与える効果を評価する時に分析した場合と同様、ピートの混入によって、植物生長に有効性栄養分を与え、土壤の三相分布および通気・通水性を改善したからであると思われる。風化炭の混入によってpF2.4の水分条件の方が葉面の幅の増長に大きな促進効果があることがわかった。これは、水分量を減らすことによって土壤の通気性が改善され、有効性栄養分の分解効果が良くなつたからであると思われる。

つぎに、葉面の幅に与える各交互効果の影響について考察する。葉面の幅に与える効果は、A×C・B×C交互効果にあるが、A×C交互効果は、細砂の場合のpF2.4、粗砂の場合のピートの混入実験のpF2.4、風化炭の混入実験のpF1.8で促進効果がみられた。B×C交互効果は、ピート・風化炭ともpF2.4で促進効果がみられた。

風化炭の混入実験において、A×C、B×C交互効果に有意差が認められたが、前者は99%の信頼度、後者は95%の信頼度を示した。A×C交互効果があることは、粒径と水分量との相関性が高いことを意味する。解析の結果、pF2.4の方がpF1.8より葉面の幅の増長効果が著しいが、細砂の方が粗砂より增加率が高いことがわかった。これは、細砂の方が粗砂より保水性が高いので、

少ない水分量の方が通気性がよいことを示す。B×C交互効果があることは、風化炭の混入量と水分量との相関性が高いことを意味する。解析の結果、風化炭を混入した場合、pF2.4の方が効果が著しいが、風化炭の混入は対照より増加率が低かった。この原因については、風化炭の混入によって土壤の理化学性が低下する傾向が見られたことによるものと思われる。

#### (c) 地上部乾物重に与える影響

まず、地上部乾物重に与える各主効果の影響について考察する。砂の粒径は細砂、給水条件はピートを混入した場合のpF1.8、風化炭を混入した場合のpF2.4、そして改良材の混入によって促進効果がみられた。改良材の混入効果はピートの方が風化炭より優れ、風化炭は対照よりやや劣る傾向がみられた。

主効果の中で風化炭の混入実験の砂の粒径効果およびピートの混入実験のピートの混入効果に有意差が認められたが、両者は95%の信頼度を示した。解析の結果、風化炭の場合、細砂とピートの混入は地上部乾物重の増加効果が高かった。これは、草高と葉面の幅に与える効果と同じであった。風化炭を混入する場合、細砂の方が通気性がよくなつたことからも説明できる。

つぎに、地上部乾物重に与える各交互効果の影響について考察する。B×C交互効果のみ地上部乾物重に与える効果があるが、ピート・風化炭ともpF1.8で促進効果がみられた。しかし、交互効果には有意差が認められなかった。

#### (d) 地下部乾物重に与える影響

まず、地下部乾物重に与える各主効果の影響について考察する。砂の粒径はピートを混入した場合の粗砂、風化炭を混入した場合の細砂、給水条件はピートを混入した場合のpF1.8、風化炭を混入した場合のpF2.4、そして改良材の混入によって促進効果がみられた。改良材はピートの方が風化炭より優れ、風化炭は対照よりやや劣る傾向がみられた。

主効果の中でピートの混入効果のみ95%の信頼度で有意差が認められた。これは、ピートの混入はハクサイの根の増長に与える促進効果が著しいことを示した。ピートの混入は根の生長に必要な速効態窒素・リン・カリを与え、土壤の物理性を改善したからである。

つぎに、地下部乾物重に与える各交互効果の影響について考察する。地下部乾物重に与える効果は、A×B・B×C交互効果にあるが、A×B交互効果は、ピートを混入した場合の粗砂、風化炭を混入した場合の細砂で促進効果がみられた。B×C交互効果は、ピート・風化炭ともpF1.8で促進効果がみられた。しかし、交互効果には有意差が認められなかった。

## 5. ま と め

1) ピートを混入させることによって、砂質土壌の三相分布を植物の生長に適するように改良し、通気・通水性および保水性を高め、アルカリ性を低下し、植物の生長に不可欠な栄養分、とくに速効態窒素・リン・カリを与え、土壌の理化学性の著しい改良効果が認められた。またピートの混入とハクサイの葉・茎・根の生長との間に有意差があることが高い信頼度で認められた。これより、ピートの土壤改良効果および植物の生長に与える促進効果が著しいことが明らかとなった。

2) 風化炭の混入によって、砂質土壌の三相分布が改善され通気・通水性および保水性が向上、またアルカリ性の改善、植物の生長に不可欠な栄養分を与えること、土壌の理化学性の著しい改良効果が認められ、ハクサイの生長に有意差があることが高い信頼度で認められた。しかし、風化炭による土壌の理化学性の改良効果はピートに及ばなかった。また、風化炭の混入とハクサイの葉・茎の生長との間には有意差があったが、根の生長との間には有意差が認められず、ハクサイの生長は対照よりも劣る傾向がみられた。これより、ピート・風化炭のいずれも、砂質土壌の理化学性の改良効果およびハクサイの生長に与える促進効果はあるが、ピートの方が優れていることが明らかとなった。

3) 砂の粒径の砂質土壌の理化学性の改良効果は、細砂の方が粗砂より土壌の保水性が高く、有効性栄養分（とくに窒素・カリ）の供給量が大きかった。そのため、植物の生長に与える効果も細砂の方が粗砂より良かった。細砂の方が粗砂より葉・茎の生長に与える促進効果が高いことも高い信頼度で有意差が認められた。また、砂の粒径と水分条件との交互効果に有意差があることも高い信頼度で認められたが、その効果は改良材および特性値

によって異なる。ピートを混入する場合、細砂と pF2.4の方が草高の生長に与える促進効果が著しく、風化炭を混入する場合、細砂と pF1.8の方が葉面の幅に与える促進効果が著しかった。

## 謝 辞

本研究にあたり、実験計画の作成および実験データの解析について詳細に検討なされ、適切な助言をお与え下さった早稲田大学理工学研究所の森本源蔵先生ならびに、実験場を提供し、実験にご協力いただきました中国科学院瀋陽応用生態研究所ガソチカ実験場の張春興・王桂榮両氏および関連の方々に心より感謝の意を表します。

## 引 用 文 献

- 藤原俊六郎・安西徹郎・加藤哲郎（1996）：『土壤診断の方法と活用』農文協。
- 尹 善春（1991）：『中国の泥炭資源および開発利用』地質出版社。
- 金 凤鶴・山口達明（1995）：中国カルチン沙漠における塩漬積土壌改良技術の現状。「沙漠研究」5:1-6。
- 金 凤鶴・尹 懿寧・西崎 泰・白 鴻祥・鄭 応順・山口達明（1995a）：草炭を利用して土壌を改良する可能性研究。「遼寧師範大学学報（自然版）」1:66-70。
- 金 凤鶴・西崎 泰・山口達明・尹 懿寧・白 鴻祥・鄭 応順（1995b）：半乾燥地に対する草炭の土壌改良効果。「日本沙漠学会講演要旨集」第6集:19-20。
- 日本機械工業会（1983）：『環境保全、資源有効利用システム技術開発等事業一泥炭の有効利用システムの調査研究報告書一』（社団法人）日本機械工業会。
- 西崎 泰・山口達明・金 凤鶴・王 周琼・馬 劍（1995）：草炭を利用した沙漠緑化の基礎研究。「日本沙漠学会講演要旨集」第6集:17-18。
- 村井賛長・高宮信夫・遠山征雄・森本源蔵（1993）：ピートを利用した乾燥地緑化の基礎研究（I）—メロン栽培実験の統計的解析—。「早稲田大学理工学研究所報告」140:41-51。
- 篠田 裕・西崎 泰・野賴成嘉・山口達明・王 周琼・蒋 進・馬 劍（1996）：中國新疆における草炭を用いる沙漠緑化の基礎的実験—草炭の保水効果とチングエンサイのポット栽培試験—。「沙漠研究」6:25-33。
- 鷲尾泰俊（1991）：『実験計画法入門』日本規格協会。

**Effects of the Peat Application on the Physical and Chemical Properties of  
Soil and Growth of Plants in Sandy Soil  
—Statistical Analysis for Pot Cultivations of Chinese Cabbage—**

Fenghe JIN\*, Yasushi NISHIZAKI\*\*, Huaining YIN\*\*\*, Hongxiang BAI\*\*\*,  
Yingshun ZHENG\*\*\* and Tatsuaki YAMAGUCHI\*

Peat is generally utilized for the horticultural purpose. However, its application as ameliorant for sandy soil in the arid land have been scarcely investigated. During 1994-1995, we have carried out a series of experiments about the effect of peat application on the pot cultivations using the sandy soil in China.

This paper summarizes the results of the experiment on Chinese cabbage cultivations at Keerqin sandy desert of Inner Mongolia, China. The domestic peat sample was excavated from Beisiping of Liaoning Province, China. For comparative analysis the local weathered coal was adopted as another improving material. We have conducted the experiment according to the designed plan and performed on statistical analysis. Factors of model were designed so as to include particles size, water supply and improving materials to find how the factors and their interaction affect on the plant growing and the sandy soil improvement.

The main results are summarized as follows:

- (1) Particles size of sand, water supply and improving materials were influential to the growth of Chinese cabbage and the improvement of physical and chemical properties of soil.
- (2) The fine sand was affected by the soil improving effect of peat more greatly than the coarse sand.
- (3) The improving effects of the peat were larger than the weathered coal.

**Key Words :** Sandy soil, Peat, Physical and chemical properties, Weathered coal, Pot cultivation, Chinese cabbage, Statistical analysis

---

\*Department of Industrial Chemistry, Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma Narashino-shi Chiba 275, Japan.

\*\*Department of Industrial Management, Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma Narashino-shi Chiba 275, Japan.

\*\*\*Department of Geography, Liaoning Normal University, 850, Huanghe Road, Dalian, 116022 China.

(Received December 7, 1995; Accepted September 10, 1996)

# 中国新疆における草炭を用いる沙漠緑化の基礎的実験

## —草炭の保水効果とチングエンサイのポット栽培試験—

篠田 裕<sup>\*</sup>・西崎 泰<sup>\*\*</sup>・野頬成嘉<sup>\*\*\*</sup>・山口達明<sup>§</sup>・  
王 周琼<sup>†</sup>・蔣 進<sup>†</sup>・馬 劍<sup>†</sup>

### 1. はじめに

本研究は、地球上に推定で5,000億トンも存在する草炭を利用して、沙漠を緑化することを目的としている。

本報では、中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所との共同研究として、中華人民共和国新疆ウイグル（維吾爾）自治区のグルバントンコト（古尔班通古特）沙漠において1993年と1994年の夏季に実施した、1) 砂土壌に混入した草炭の保水材としての効果、2) 草炭混入によるアルカリ性砂の中和効果、3) 特に水分要求量の高いチングエンサイを用いて、給水制限下でポット栽培試験を行ない、草炭混入による砂質土壌の改良材としての効果、に関する基礎的実験の結果を報告する。

### 2. 草炭利用の意義

草炭とは、泥炭の中でも特に草木の繊維質遺体が多いもので、主に北緯40~60度近辺の寒冷地帯で、禾本科植物・灌木・水苔類が、水中で枯死堆積したものである。

草炭を沙漠緑化への利用を試みた理由と、期待される効果は、以下の通りである。

- ①吸水力・保水力があるため、沙漠の土壌に混入することによって、沙漠の砂・土に保水力を与え、保水材としての効果が期待できる。
- ②フミン酸等を多く含んだ弱酸性の物質であるため、弱アルカリ性である沙漠の土壌に混入することで、中和材としての効果が期待できる。
- ③世界各地に大量に賦存する天然資源であり、工業製品である他の保水材に比べて比較的安価である。
- ④沙漠の土壌の中に放置しても、本質的に無害である。

### 3. 沙漠における現地実験

#### 1) 実験場の状況

現地実験の拠点は、中華人民共和国新疆ウイグル自治区の首都ウルムチ（烏魯木齊）から、北東へおよそ80kmのフーカン（阜康）に近いフーベイ（阜北）に所在する阜康荒漠生態系統観測試験所（阜康試験所）で、グルバントンコト沙漠の南縁から10kmほど南に位置する。新疆ウイグル自治区における沙漠の分布を図1に示し、試験所と現地実験場の位置および周辺の地勢を図2に示す。ボゴダ（博格達）峰を主峰とする天山山脈から流れ出たいく筋かの河川は、低山丘陵帯を流下し、一部は冲積平原で貯留されて灌溉に利用されるものの、そのほとんどが地中へ浸透するか蒸発する。したがって、沙漠の地下には豊富な水脈があり、ポンプによって汲み上げることができる。しかし、その水は表1に示すような水質で、過剰な灌溉によって土壌がすぐ塩類集積化する原因となるような成分を含むので、耕作地の延命を図るために、少ない量の水を有效地に利用する植物栽培法が求められている。

現地実験場は図3に示すように、沙漠と半固定砂丘が交差した場所で、200mほど離れた唐朝路の南側では、灌溉水路によってスイカやハミウリが栽培されている畑が広がっている。

実験は、砂丘上の平坦な場所を選定して行なった。沙漠の砂の粒度分布は、10%粒径が0.095mm、最大粒径が0.425mmの細砂分から構成され、「粒度分布が悪い」ことがわかる。20%粒径が0.1mm前後であることから、Creagerの方法による透水係数の推定値は、 $1.7 \times 10^{-3}$  (cm/s) となる。

\* 千葉工業大学土木工学科

\*\* 千葉工業大学工業経営学科

\*\*\* (株)建設企画コンサルタント

§ 千葉工業大学工業化学科

† 中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所

(受付：1995年12月14日、受理：1996年10月14日)

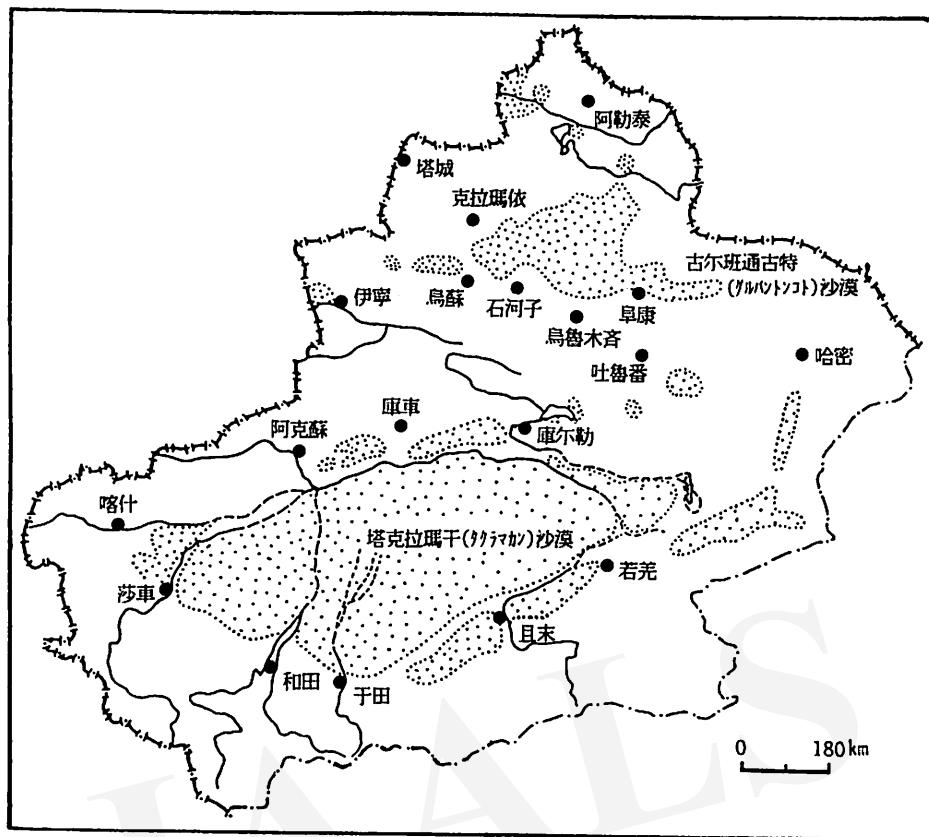


図1. 中国新疆の沙漠分布図. (夏, 1991, p.2 より)

表1. 水質分析結果（阜康試験所使用水）。

pH	易溶性塩分 $\left[ \frac{\text{mg当量数}/100\text{g}}{\text{g}/\ell} \right]$							
	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	
8.4	—	2.360	0.374	1.284	0.915	1.477	1.590	
	—	0.144	0.013	0.060	0.018	0.018	0.037	

(中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所からの資料による)

表2. 产地別草炭および沙漠砂の特性。

試料名	含水率 (%)	吸収倍率 (g/g)	灰分 (%)	フミン酸含有率 (%)	pH	電気伝導度 (mS/cm)	金属イオン (mg/100g)			
							Ca	Mg	K	Na
カナダ産草炭(無処理)	43.9	1.35	6.4	18.3	3.4	0.27	24.0	13.4	7.09	4.59
" (処理)	—	—	—	—	—	0.26	36.0	16.5	10.4	3.62
中国石河子産草炭(生)	68.9	2.21	71.6	19.2	4.5	2.47	1,130	159	15.3	136
" (天日乾燥)	20.4	1.10	66.5	17.0	4.2	—	—	—	—	—
中国烏魯木齊産風化炭	9.8	—	6.5	56.2	5.6	0.17	0.0	0.0	1.67	51.6
沙 漠 砂					9.1	0.06	16.4	12.8	18.9	3.72

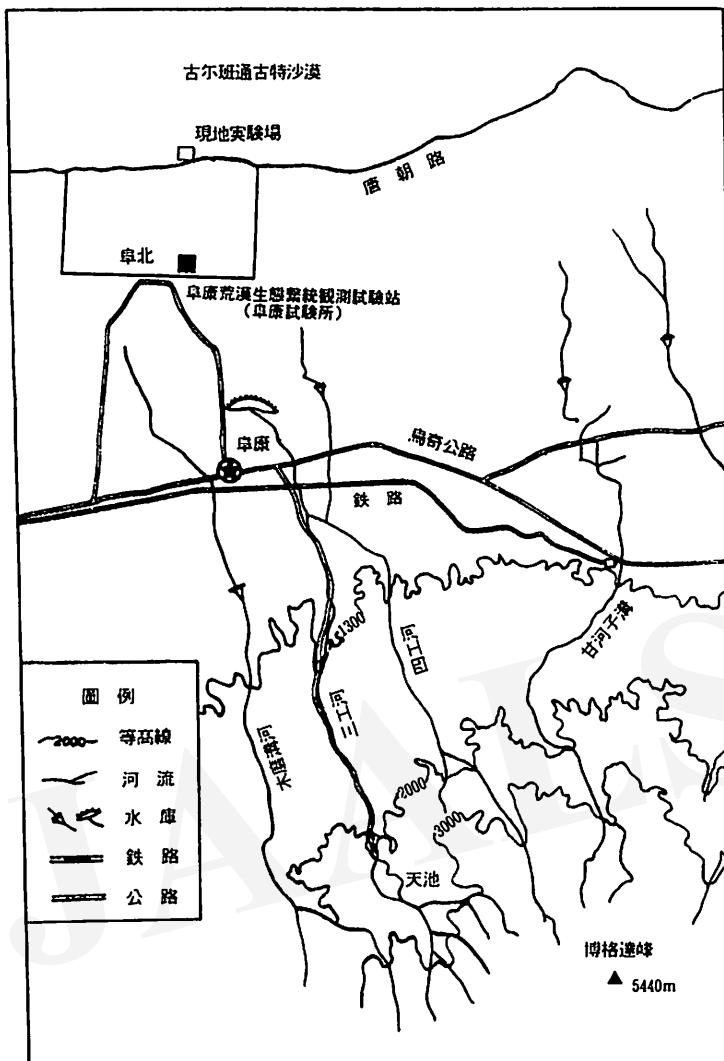


図 2. 阜康試験所・現場実験場位置図。(中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所, 1990, p.2 より)

## 2) 使用草炭

本実験で使用した草炭は、日本国内でも広く流通するコストの安いカナダ産草炭と、中国現地の石河子産草炭である。カナダ産草炭は LAMEQUE 社製の市販品を、石河子産草炭は実験場の近くの石河子市郊外で採掘したものを天日乾燥後、フリイにかけて夾雑物を取り除いたものを使用した。さらに、中国現地等で従来土壤改良材として使用されている風化炭（ウルムチ近郊産）を、比較のため使用した。表 2 に、これらの草炭の特性を示す。

## 4. 1m×1m区画の保水性試験

現場に1m×1mの試験区画を9面設けた（図4）。対

照区画と草炭を表層から深さ15cmまで混入した区画に、1区画当たり10lの水を5分間で散水し、24, 48, 72時間経過した時に、表層から5cmごとに深さ35cmまで7層にわたって、100mlの試料円筒サンプラーで各3個のサンプルを採取し、体積含水率を求めた。

草炭の混入率は、予備実験で、カナダ草炭・石河子草炭それについて、本実験と同一の給水量を与えて、2wt%と5wt%の体積含水率の比較を行なって定めた。すなわち、深さ15cmまでの各層の体積含水率の平均値が、給水後72時間のカナダ草炭2wt%が2.75%, 5wt%が4.23%となり、観測2日目に降雨のあった石河子草炭では、給水後24時間の値を比較すると2wt%が2.30%, 5wt%が6.12%となったので、保水力に顕著な差が表われ

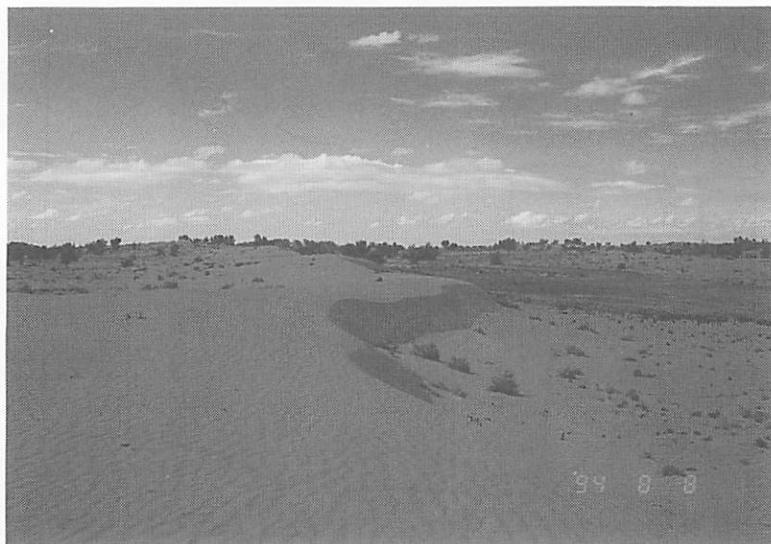


図 3. グルバントンコト沙漠南縁の現地実験場付近の様子。

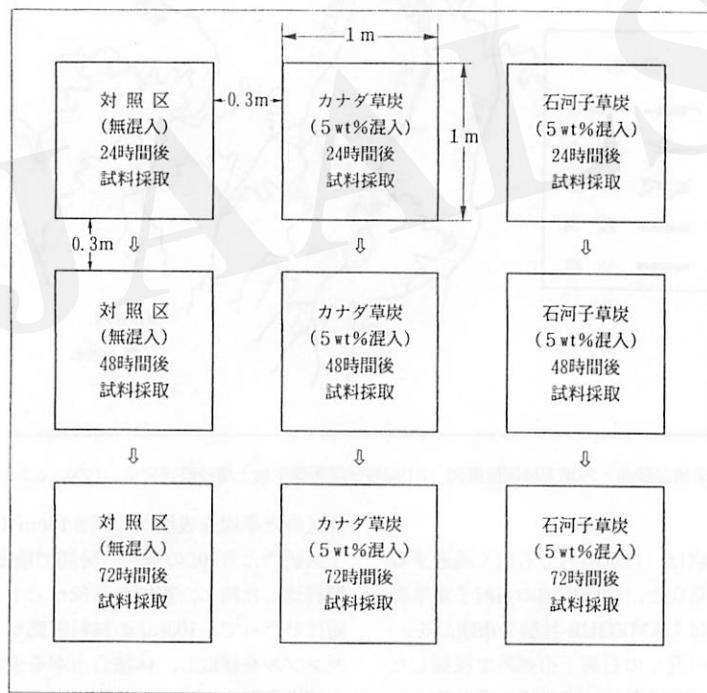


図 4. 1m×1m試験区画平面図。

た5wt%とした。草炭を混入しない区画（対照区）、カナダ草炭（無処理）5wt%混入区と石河子草炭5wt%混入区の保水力の比較を行なった。

その結果を図5に示す。カナダ草炭を混入した深さ15cmまでの含水率は、石河子草炭・対照区（無混入）に比べて勝っていた。また、草炭を混入していない15cm

以下の部分の含水率に着目すると、カナダ草炭混入区が、他の区よりも小さい傾向を示している。これは、草炭混入層で水分がほぼ保持され、その層から下への水の浸透量が少なかったことが原因と考えられる。

図6は、試料採取時に行なった地中温度測定の結果である。深さ15cmより深い部分については、ほとんど差

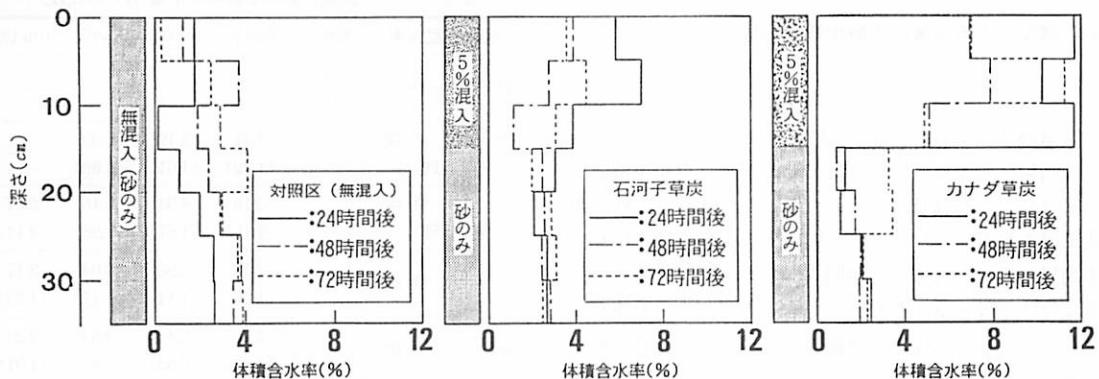


図 5. 1m×1m区画試験の結果(1) 体積含水率の時間変化.

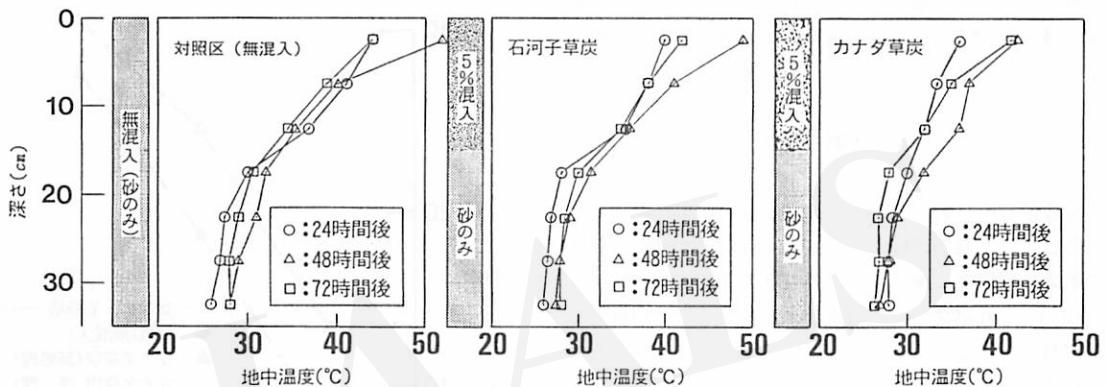


図 6. 1m×1m区画試験の結果(2) 地中温度の時間変化.

表 3. 草炭混入深(15cm)までの水分量(l).

表 4. pH の測定結果.

採取	土壤深さ(cm)	対照区 (無混入)	石河子草炭 (5wt%)	カナダ草炭 (5wt%)
24時間	0~5	1.45	4.10	6.85
	5~10	1.50	3.00	6.35
	10~15	0.10	1.50	7.35
48時間	0~5	1.05	2.90	4.35
	5~10	3.10	2.15	4.45
	10~15	1.60	1.00	3.45
72時間	0~5	0.25	2.65	4.05
	5~10	2.15	3.35	6.65
	10~15	2.45	2.35	3.40

(l : 1m×1m×0.05m=0.05m<sup>3</sup>当たり)

がみられないが、地表面近くでは、カナダ草炭混入区が低温である傾向が認められた。これは、保水量の差によると考えられる。

表3は、試料の体積含水率から、試験区画中の保水量を算定した結果を示したものである。区画に散水する前に、カナダ草炭が7.6l、石河子草炭が3.4lの水分を含んでいたこと、時間経過によるサンプリングの区画が同一

試 料	状 態	pH
グルバントンコト沙漠砂	乾燥	9.1
カナダ草炭	乾燥	3.8
カナダ草炭	潤湿	4.6
石河子草炭	乾燥	5.4
沙漠砂 + カナダ草炭(5wt%)	潤湿	5.9
沙漠砂 + 石河子草炭(5wt%)	乾燥	6.9

(ここで用いた砂は、1993年の実験場のものである)

場所ではなく、試料そのものの含水率にばらつきがあること、土壤中の側方への水分移動に差異があることを考慮しても、保水量のおおよその傾向がうかがえる。

以上の現地実験の結果から、沙漠の砂土壤に草炭を混入することによって、沙漠の乾燥した真夏日においても、給水後72時間以上経過しても水分を保持していることが認められ、沙漠緑化用の保水材としての可能性が確認できた。また、草炭の種類によって、その吸水能力に差異があることを明らかにした。

## 5. 草炭による沙漠砂の酸度矯正試験

沙漠の砂にカナダ草炭・石河子草炭を5wt%混入して、土質試験法に準じた方法で実験室内でpHを測定した。この結果、表4に示すように、沙漠の砂に草炭を混入することによってpHが低下した。このことから、砂に草炭を混入することによって、弱アルカリ性の砂を中和する効果が期待されることが明らかとなった。実際には、乾燥状態の砂と草炭を混合しても、そこに十分な水分が介在しないと中和作用が発揮されないことも懸念されるので、実証段階でのチェックが必要である。これは、本実験でのpH測定法が、蒸留水を十分に加えた懸濁試料溶液の水素イオン濃度を測定したのに対し、実際の沙漠での極めて少ない土中水の水素イオン濃度を正確に測定することができなかつたことからの懸念である。

## 6. チンゲンサイのポット栽培試験

阜康試験所において、水分保持試験の結果を検証するためにポット栽培試験を行なった。栽培植物は、耐旱性で耐暑、耐病性に優れ、水分要求度の高いチンゲンサイを用いた。栽培期間は1994年8月8日から9月10日までの34日間、土壤の砂は、水分保持試験を行なった沙漠から採取した砂を天日乾燥させ、3mmフルイでふるい分けたものを使用した。

土壤改良材（保水材）は、カナダ産草炭、中国石河子草炭および中国の農民が普段利用している風化炭を用いた。カナダ草炭は、そのまま利用するものと、保水性をより増加させるため界面活性剤で処理したものと用いた（以後界面活性剤で処理したカナダ草炭を、カナダ処理草炭と記す）。それらを砂に対して各々2wt%，5wt%，8wt%，10wt%混入し、対照（無混入）と比較した。給水条件は各ポットを最初に飽和状態にした後、

- ①pF1.9の状態に保持する
- ②pF2.4の状態に保持する
- ③水を供給しない

の3条件を設定した。

なお、pFの測定はミズハカール（大起理化工業製）を用いて測定した。ポットは、サイズが直径300mm深さ200mmの白色プラスチック製輪鉢を使用した。このポットに砂と土壤改良材をできるだけ均一に混ぜた物をまず6kg入れ、その表面上に肥料（N~5g, P~5g, K~5g）を15g置き、さらにポット内の全重量が12kgになるように均一に混ぜた砂と土壤改良材を加えた。肥料を全体に混ぜなかったのは、土壤改良材の効果を見るた

表5. ポット試験における飽和吸水量( $I_s$ )の比較。

保水材混入率	無混入	2wt%	5wt%	8wt%	10wt%
対照(砂のみ)	2.60 (1.00)	—	—	—	—
カナダ草炭 (無処理)	—	3.11 (1.20)	4.19 (1.61)	4.39 (1.69)	—
カナダ草炭 (処理)	—	3.10 (1.19)	4.34 (1.67)	5.16 (1.98)	5.57 (2.14)
石河子草炭	—	2.75 (1.06)	2.96 (1.14)	3.04 (1.17)	3.17 (1.22)
風化炭	—	2.30 (0.89)	2.42 (0.93)	2.53 (0.97)	2.26 (1.01)

処理：界面活性剤処理、( )内は、 $I_s$ を1.0としたときの値。

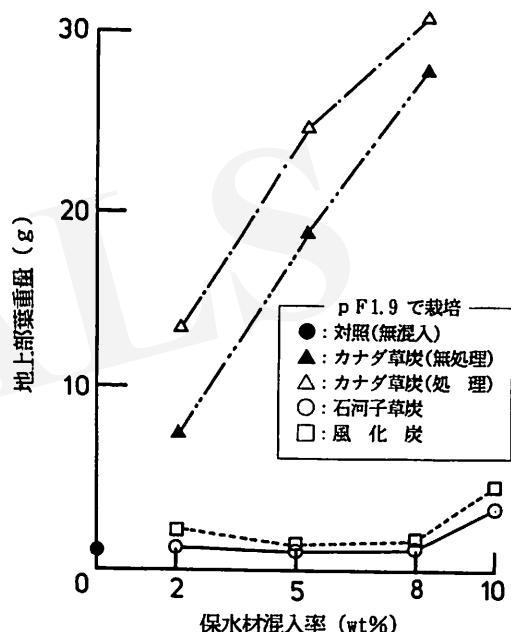


図7. 保水材の混入率とチンゲンサイ地上部葉重量の関係。  
pF1.9で制限給水した場合。

めで、土壤改良材そのものの効果で植物がある程度生長しないと肥料効果が受けられないように配慮した。ポットの土壤表面から5mmの深さに、9粒のチンゲンサイの種をまき、発芽後間引いて各ポット3株とし、1条件3ポット、計9株の生長度合で比較判定を行なった。

表5は保水材の違いによる飽和吸水量を比較したものである。この表からも、カナダ草炭は、極めて吸水性の良いことがわかる。特に界面活性剤で処理したものは、混入量が増加するほど、より顕著に表われた。それに対して、石河子草炭は混入量の増加とともに吸水量は若干増加するが、風化炭は混入量が増加しても変わらず、かえって対照よりも劣るものが認められた。

表6. ポット栽培によるチンゲンサイの栄養分含有量と吸収量。

	栄養分含有量(%)						吸収量(%)					
	全N		全P		全K		N		P		K	
	地上部	根 部	地上部	根 部	地上部	根 部	地上部	根 部	地上部	根 部	地上部	根 部
対 照	0.76	1.13	0.73	0.16	2.4	2.06	0.55	0.45	0.53	0.45	1.75	1.50
2wt%	0.77	1.10	0.37	0.41	2.4	2.5	1.39	1.35	0.67	0.58	4.32	4.50
5wt%	1.03	1.33	0.36	0.39	2.5	2.6	2.61	2.70	0.91	0.99	6.33	6.58
8wt%	1.39	1.34	0.36	0.36	2.9	2.4	3.75	4.11	0.97	0.97	7.83	6.48

(カナダ無処理草炭、単位は対乾物重当たり)

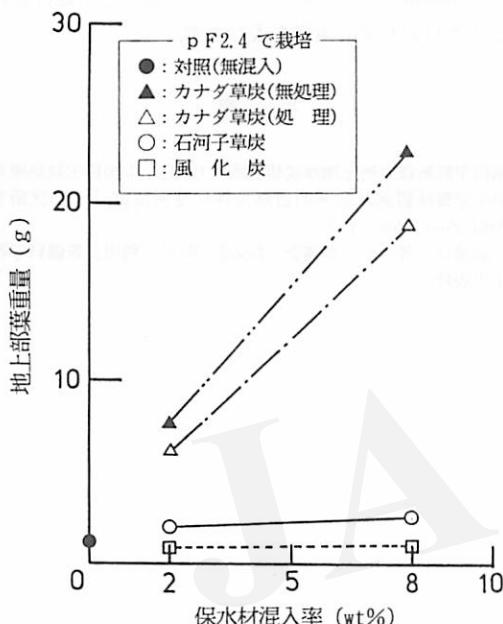


図8. 保水材の混入率とチンゲンサイ地上部葉重量の関係。pF2.4で制限給水した場合。

保水材の植物に対する寄与効果を調べるために、チングセンサイの成育を地上部分の葉の乾物重で比較したもののが図7・図8である。

図7は、チングセンサイの最適水分条件であるpF1.9で栽培した場合である。この条件下で、表5の吸水量の結果と同様、カナダ草炭は石河子草炭や風化炭に比べて際だって良い結果を示した。特に処理草炭において顕著で、保水材の混入割合が増加するほど、生長量は向上した。

これはカナダ草炭が保水性・保肥性を有するため生長が早く、根の生育によって肥料域に達し肥料効果が得られたこと、および生長に伴って葉からの蒸発散量も多くなり、pF低下にともなう水分補給量の増加等によって、差が表われたものと考える。

これに対して、石河子草炭および風化炭は、保水性や



図9. カナダ処理草炭10wt%混入ポット飽和給水後35日間無給水の状態。

保肥性に乏しいため生長が遅く、栽培期間中に根が肥料まで達せず、生長量が劣ったものと考えられる。また、石河子草炭は、表2からもわかるように、電気伝導度が高いことも影響していると考えられる。

図8は、最適水分条件より30%水を制限したpF2.4の状態で栽培した場合であるが、生データの絶対値はpF1.9の最適栽培試験値より劣るもの、図7の場合と同様な傾向を示している。しかし、カナダ草炭の場合、吸水量の大きい処理草炭の方が、吸水量の小さい無処理草炭よりも生育が悪いという、図7とは逆の結果となった。

これは、処理草炭が界面活性剤の入った液に1時間浸漬して処理するため、草炭に含まれる微量有効元素や、フミン酸の可溶性養分が溶け出したことも原因の一因と考えられる。

表6は、草炭混入量のチングセンサイに対するN・P・K吸収量の影響をみるため、チングセンサイの地上部と根部のN・P・Kを分析したものである。栄養分含有量は土壤中に含まれる全栄養分であり、吸収量はチングセンサイが吸収した栄養分(可給能)で、草炭を混入した方が対照よりN・P・Kの吸収量が高く、草炭混入量の増加によって大きくなる傾向がみられた。

図9は、カナダ処理草炭を10wt%混入後飽和状態まで給水、8月8日に種をまいた後、給水を絶って放置した9月13日の状態である。この写真からもわかるように、界面活性剤で処理した10wt%草炭混入条件では、8月の盛夏期間中無給水でも、約1カ月間は生育可能で、植物の生長度合は、pF2.4で栽培したカナダ処理草炭の2wt%混入した条件のものに匹敵した。

## 7. まとめ

- (1) 現地実験の結果から、沙漠の砂土壤に草炭を混入することによって、沙漠の乾燥した真夏日においても、給水後72時間以上経過しても水分を保持していることが認められ、沙漠緑化用の保水材としての可能性が確認された。
- (2) 草炭の種類によって、その吸水能力に差異が認められた。
- (3) 草炭の弱酸性の性質から、適切な混入・給水方法により、アルカリ性の沙漠砂の酸度矯正効果が期待される。そのメカニズムについては、今後の課題である。

(4) 草炭が植物に与える影響をみるため、チンゲンサイのポット栽培により確認した。その結果カナダ草炭が、その保水性により、給水量の低減化に寄与できる見通しがついた。

(5) 今後、ポット栽培の実績を基に、実際に植物を沙漠に直植えするといった、実証的な栽培試験が必要である。幸い、中国科学院の手によって、栽培試験が継続して実施されているので、いずれ解決されるものと期待される。

おわりに、本研究は千葉大学付属研究所研究助成金によって草炭研究会のプロジェクトの一部として遂行されたことを付記して、謝意を表します。

## 文 献

- 中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所（1990）：中国科学院阜康荒漠生態系統観測試験所の自然条件和建所依据。「干旱区研究 Arid Zone Res.」7: 2.  
夏 創誠ほか著、邸 华盛訳：『沙漠の開発と利用』新疆科学衛生出版社。

## A Fundamental Experimentation of Desert Fertilization Using Peat in Xinjiang China —Water Retentivity of Peat and Pot Cultivation of Pak-choi—

Yutaka SHINODA\*, Yasushi NISHIZAKI\*\*, Shigeyoshi NOYORI\*\*\*, Tatsuaki YAMAGUCHI<sup>§</sup>,  
Zhouqiong WANG<sup>†</sup>, Jin JLANG<sup>†</sup>, and Jian MA<sup>†</sup>

The peat is most useful water retention agent among natural resources.

The objectives of the present experimental investigation are to afford the fundamental data as to its practical use in arid zone.

In the summer season of 1993 and 1994, we had performed a few tests in Gurbantunggut Desert of Xinjiang China. The field tests are conducted as follows:

- (1) Direct measurement of water retention in the desert sand mixed with peat.
- (2) Continuous observation of soil moisture and temperature by a simple practical system.
- (3) The effect of peat addition to desert sand on the pot cultivation of pak-choi.

Results are summarized as follows:

- (1) By the 1m × 1m area test, Canadian peats showed the most best water retentivity. The optimum ratio was 5 percents in weight.
- (2) Peat could neutralize the alkaline desert sands.
- (3) Canadian peat was very useful for growing of pak-choi in the pot cultivation with controlled water by pF meter.

**Key Words:** Peat, Gurbantunggut desert, Desert reclamation, Sandy soil moisture measurement, Pot cultivation

---

\* Department of Civil Engineering, Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba 275, Japan.  
 \*\* Department of Industrial Management, Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba 275, Japan.  
 \*\*\* Construction Project Consultants, 2-1-9, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169, Japan.  
<sup>†</sup> Department of Industrial Chemistry, Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba 275, Japan.  
<sup>§</sup> Xinjiang Institute of Biology, Pedology and Desert Research, Chinese Academy of Sciences, No. 40 South of Beijing Road Urumqi, Xinjiang 830011 P. R. China.

# Vegetation Index Algorithm for Vegetation Monitoring in Arid and Semi Arid Land

Takashi ISHIYAMA\*, Yasuhiro NAKAJIMA\*\* and Koji KAJIWARA\*

## Abstract

In estimating the vegetation coverage from NDVI (Normalized Vegetation Index: ROUSE *et al.*, 1974) or SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index: HUETE, 1988) which is calculated from the satellite data, the vegetation density within a pixel affects the results. To eliminate this undesirable effect, an optimum vegetation index (OPVI) is presented in this paper. In this method, the vegetation coverage within each pixel is calculated from the reflectance ratio of radiance in TM 5 band to that in TM 7 band. Then, if the reflectance ratio is larger or smaller than a critical value, we select either NDVI or SAVI for calculating the vegetation index in each pixel. In this case, the critical value must be set in advance. For determining the critical value, the relationship between vegetation coverage and the reflectance ratio is studied. The spectral reflectance is estimated in the laboratory experiment as a function of the ratio of coverage area of plants to that of soils. As a result, the critical value is determined by comparing the results obtained by NDVI and SAVI.

Comparison of results obtained by OPVI method with those by both NDVI and SAVI is made by using the satellite data collected in and around oases in Taklimakan Desert in China where the vegetation is expected to vary over the wide range. The results show that OPVI is a better indicator of actual vegetation coverage in an arid area than single NDVI or SAVI alone.

**Key Words:** Remote Sensing, Vegetation Index, NDVI, Vegetation Cover, Satellite Data

## 1. Introduction

Many researchers have presented methods for evaluating the vegetation biomass since the initial stage of remote sensing technology. From remote sensing data, however, the quantitative and efficient evaluation is not easy since interactions between vegetation and electromagnetic waves are complex. Plants strongly absorb the blue and red in the visible light through chlorophyll while exhibiting a high reflectance in the near infrared part out of the red edge (HORLER *et al.*, 1983). These spectral reflectance characteristics are in contrast to that of soil, which shows gentle characteristics within the same spectral ranges.

Some vegetation indices utilizing these reflectance of plants have been presented up to

now. Among them, NDVI is a representative index and many researchers have prepared regional or global vegetation maps using this method. However, one of the problems in NDVI is an increase of errors in arid lands where vegetation is sparse because of strong influences of the reflectance from the background soil. To overcome such defects of NDVI, HUETE (1988) proposed SAVI, which is described later in details. In addition to NDVI, PVI (Perpendicular Vegetation Index: RICHARDSON and WIEGEND, 1977) and TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index: BARET and MAJOR, 1989) have been proposed by other researchers. These indices, however, have the difficulties in practical use since reflectance from soil must be known. The above mentioned all vegetation indices use the radiance in the red band and near infrared band. The selection of the same

\* Center for Environmental Remote Sensing (CEReS), Chiba University. 1-33, Yayoicho, Inageku, Chiba-shi 263, Japan.

\*\* Remote Sensing Technology Center of Japan. 1-9-9, Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106, Japan.

(Received, June 25, 1996; Accepted, November 20, 1996)

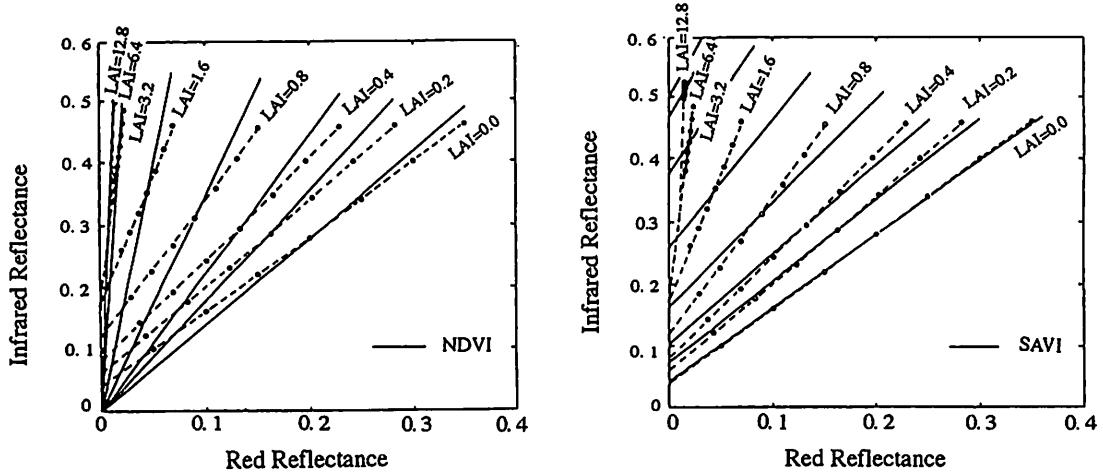


Fig. 1. Vegetation isolines plotted in NIR-red wavelength as a parameter of LAI and vegetation indices.

The dashed lines correspond to canopies with different soil backgrounds for the same LAI. The line, for which LAI=0, is the soil line. The open circles correspond to the canopy reflectance simulated by SAIL model. The thin lines are the lines along which the different vegetation indices are constant. These indices are determined for each LAI and for the median value of soil reflectance (0.20 in red reflectance). (after BARET and GUYOT, 1989)

bands is also found in other indices reported, and few algorithms use other bands for evaluation of the vegetation. One exception is found in an index proposed by PICKUP *et al.* (1993); they obtained the vegetation coverage based on the MSS (Multi Spectral Scanner) bands 4 and 5 to extract the vegetation index on the red soil. Although this was practically a modified PVI, they reported that better results were obtained than that calculated from MSS bands 5 and 7 in the case of the red soil background. The present studies will examine several vegetation indices proposed up to now, and develop and discuss an algorithm to overcome the defects of such vegetation indices.

## 2. Evaluation of Biomass Using a Vegetation Index

### 1) Vegetation indices (NDVI, SAVI)

This section briefly describes the several algorithms proposed in the past for the evaluation of the biomass of vegetation. In earlier studies, the ratio between the red band radiance ( $R$ ) and near infrared band radiance ( $NIR$ ), *i.e.* RVI (Ratio Vegetation Index: PEARSON and MILLER, 1972), was proposed for

evaluating vegetation after removing the influence of the reflection from soil. Since this method showed a very large error, NDVI, which uses the ratio between the difference and sum of radiance at two bands, was proposed. This method uses radiance at the red band in the visible part and near infrared band, *e.g.* MSS bands 5 and 7, TM (Thematic Mapper) bands 3 and 4, or NOAA/AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) bands 1 and 2.

NDVI is defined by,

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}}. \quad (1)$$

The accuracy of NDVI was estimated by the BARET and GUYOT (1991), and their results are shown in Fig. 1. In the figure, the variation of isolines for NDVI and LAI (Leaf area index is defined as the cumulative one-sided leaf area per unit ground area measured from the canopy top to a plane a given distance above the ground. The total LAI is the value determined at the plane of the soil, ALLEN *et al.*, 1970) are plotted on R-NIR coordinate as a parameter of LAI and the reflectance of background soil. The reflectance used here was calculated by the SAIL model (VERHOEF, 1984), which is a

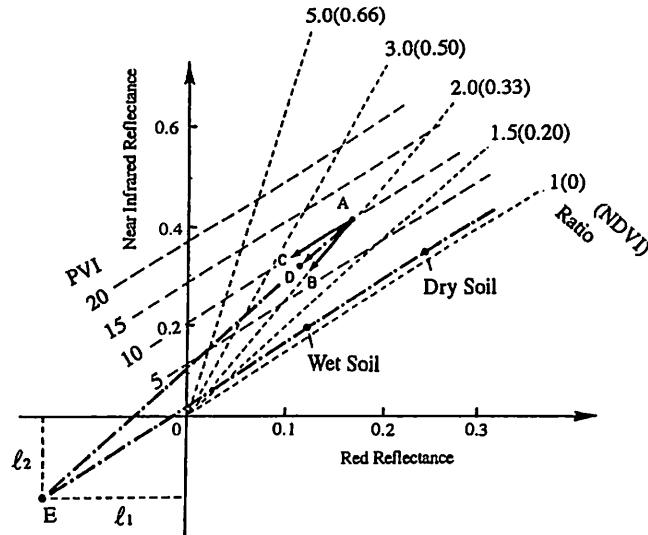
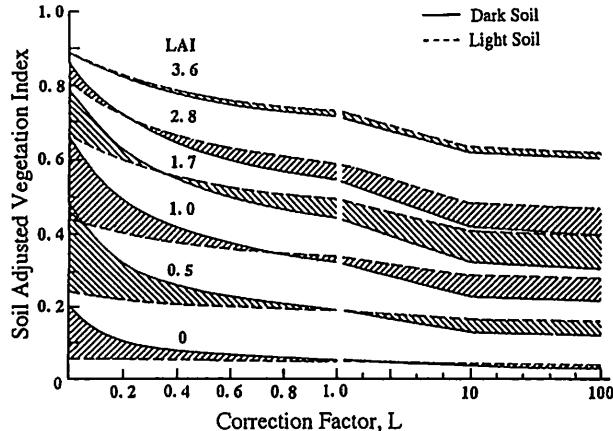


Fig. 2. Vegetation isolines in NIR-red coordinate as predicted by the ratio-, normalized difference-, and perpendicular-vegetation indices.

The lines of constant vegetation amounts (isolines) as predicted by the ratio and orthogonal indices. The ratio indices are represented by vegetation isolines of increasing slopes diverging out from the origin while orthogonal index isolines remain parallel to the soil line. (after HUETE, 1988).

reflection simulation models for plant leaves. When LAI is large, NDVI is an effective index for evaluating vegetation since the isolines of NDVI and LAI almost overlap each other as seen in Fig. 1. When LAI is small, however, error increase. This deviation is ascribed to the increase of the reflection from background soil when vegetation is sparse, particularly when soil is dark. In this case, the apparent vegetation index becomes large since the reflectance in the red band is low. In order to improve this situation, PVI was proposed by RICHARDSON and WIEGAND (1977) as an index for evaluating sparse vegetation. The reflectance of soil varies with the water content, etc. In the visible and near-infrared region of spectrum, however, the plot of reflectance in the near-infrared against that in visible light falls on near the line of direct proportion. The line is called the soil line (corresponding the line in case of LAI=0.0 in Fig. 1), and PVI is defined by the Euclidean distance from the soil line. In this case, it is necessary to know the soil line in advance to use this vegetation index.

On the other hand, HUETE (1988) proposed SAVI which is applicable for sparse vegetation and practically modified NDVI; the origin of the visible and near infrared coordinate for NDVI is moved. Let's assume that the data in the case of sparse vegetation is located at point A on the visible and near infrared coordinate in Fig. 2. With decreasing reflectance of soil, the data moves to point D. On the other hand, the index itself does not change because the vegetation is unchanged. It should be noted that the isoline of NDVI is extended toward point B, and the isoline of PVI also toward point C. Accordingly, the index at point D differs from that at point A. If the original point is moved to point E ( $-l_1, -l_2$ ), the point A is shifted to point D on the isoline of NDVI. This results in correct evaluation of vegetation index. To simplify the calculations here, it is assumed that,  $l_1$  and  $l_2$ , are equal each other ( $=L/2$ ). Further, the index is multiplied by  $(1+L)$  so that it is 1 when  $R=0$  and  $NIR=1$ , and  $-1$  when  $R=1$  and  $NIR=0$ . Thus, SAVI can be expressed as,



**Fig. 3.** Soil adjusted vegetation index in case of cotton is plotted against the shifted origin correction factor showing influence of light and dark soil on the SAVI.

Shaded area indicates vegetation index variations from a constant amount of vegetation over the two soil backgrounds. (after HUETE, 1988)

$$\text{SAVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{L} + \text{R}} (1 + \text{L}).$$

$$\text{when } \text{L} = l_1 + l_2 \quad (2)$$

The constant L (Soil adjusted factor) is introduced in order to minimize soil radiance influences and to produce vegetation isolines more independent of the soil background (Fig.1). It can vary from zero to infinity with the canopy density. If L=0, SAVI is equivalent to NDVI. For vegetation with intermediate density the best adjustment is obtained for L=0.5. Fig. 3 shows that the light, and dark soils and various LAI influences on the variation of SAVI with L. As far as L is located near the point where the characteristic soil curves for a low and high reflectances intersect each other, it is clear from the figure that the index calculated is not affected by the reflectance of soil.

However, the optimum value of L becomes smaller as LAI increases. This indicates that the influence of soil decreases as the vegetation coverage increases. Further, when L=0.5, the isoline of SAVI comes nearer to the isoline of LAI on the visible near infrared coordinate than that of NDVI. On the basis of these results, HUETE (1988) suggested the validity of SAVI. When the value of L is 0.5, it is clear from Fig. 1 (SAVI) that the isolines are apart from each other more than in the case of NDVI in the area

where LAI is high but the isolines come closer to each other when LAI is small. From the above results, it is concluded that NDVI and SAVI ( $\text{L}=0.5$ ) are appropriate vegetation indices when vegetation index is high and low, respectively.

## 2) A semi-empirical model of vegetation index and LAI

The relationships between VI and LAI obtained from the reflectance in the red band and near infrared band, were studied by many researchers in the past, and they showed that vegetation index is gradually saturated as LAI increases. In order to relate the vegetation index to LAI, VERHOEF (1984) presented a semi-empirical model.

$$\text{VI} = \text{VI}_{\infty} + (\text{VI}_{\text{lg}} - \text{VI}_{\infty}) \cdot \exp(-K_{\text{VI}} \cdot \text{LAI}). \quad (3)$$

where,  $\text{VI}_{\text{lg}}$  is the value of VI for bare soil ( $\text{LAI}=1$ ),  $\text{VI}_{\infty}$ , the saturated value for VI (practically reaches this limit always for LAI greater than 8.0), and  $K_{\text{VI}}$ , the coefficient which determine the slope of the relationship (equivalent to an extinction coefficient). These constants vary with the solar irradiance and the distribution of leaves. The coverage values of  $\text{VI}_{\text{lg}}$  and VI given by BARET and GUYOT (1991), are  $\text{VI}_{\text{lg}}=0.19$  and  $\text{VI} = 0.93$  for NDVI and are

$V_{IG}=0.12$  and  $VI=0.77$  for SAVI.  $K_{VI}$  largely depends on the slope of leaves from the zenith and ranges between 0.7 and 1.4 for NDVI and 0.5 and 1.0 for SAVI. It was shown that the  $K_{VI}$  for NDVI is always approximately 1.4 times larger than the  $K_{VI}$  in SAVI. They evaluated LAI on each index through the simulation using the SAIL model. When  $LAI>3$ , their results show that dispersion becomes large in any index because of the saturated vegetation index. When  $LAI<3$ , however, they concluded that SAVI is suitable index for the evaluation of vegetation coverage.

### 3. Experiments

#### 1) Spectral reflectance characteristics of vegetation in relation to vegetation coverage

For deriving vegetation indices such as NDVI and SAVI from satellite data, the radiance ratio of the red band and near infrared band is used in general. For the Landsat TM, for example, radiance at TM 3 band (630 to 690 nm) and TM 4 band (750 to 900 nm) are used. However, it is known that reflectance varies with vegetation not only in TM 3 and TM 4 bands but in TM 5 (1,550 to 1,750 nm) and TM 7 bands (2,080 to 2,350 nm) (ISHIYAMA *et al.*, 1984). The reflectance of vegetation decreases as the wavelength increases in the order of TM 4, TM 5, and TM 7 bands. On the other hand, the reflectance of dry soil gradually increases as the wavelength increases. The correlations between the vegetation coverage and reflectance in the red band and near infrared band are examined in this study. As described in the previous section, the error of vegetation index depends on the vegetation coverage. In this study, the vegetation index is represented by NDVI or SAVI; either NDVI or SAVI is selected by using the critical value of vegetation coverage which is described below.

As the first step for determining the critical value, the variation of spectral reflectance with vegetation coverage was investigated. The variation of spectral reflectance vs vegetation coverage was studied in the following manner. The vegetation coverage is defined as the ratio of the area of vegetation projected on the sight of the spectral radiometer to total area of sight.

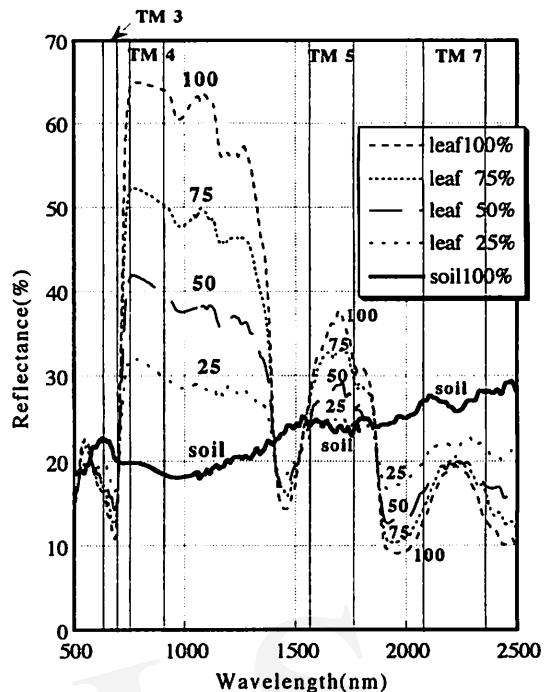


Fig. 4. Observed spectral reflectance characteristics of various vegetation coverages with dry soil.

The leaves of Canna (*Canna indica* var. *orientalis* Hook fil.) was used for the experiment. The leaves of this plant are so large and flat that even a single leaf can fully cover the sight of the spectral radiometer and can eliminate effects of the diffusion due to the roughness of leaf surfaces and the shade produced by the leaf itself. Although the reflectance from leaves is slightly larger and smaller in the red and near-infrared bands, respectively, than that from an actual canopy of grass and trees, it is the most suitable index for investigating the influence of vegetation coverage on the reflection spectrum of vegetation at a high accuracy. On the other hand, the soil collected in the southern part of the Taklimakan Desert, which was selected as the experimental site of the present study, was used for this experiment. Spectral reflectance was measured with the IRIS spectral radiometer (GER Inc., USA) which measures the reflectance in the spectral range of 400 to 2,500 nm; the spectral reflectance is measured 2 nm in the visible part and near infrared part and 4 nm in the middle infrared part. As the light source a tungsten lamp was

used.

The measurement of spectral reflectance as a function of vegetation coverage was performed in the following manner. First, for the calibration of vegetation coverage, the various gray levels were prepared by varying areal ratio of area of carbon powder board to that of standard white board. The reflectance of carbon powder is expected to be similar to that of blackbody. The reflectance at each gray level was measured in the wavelength range of 450 to 2,500 nm. The results show the proportional relation between the reflectance and gray level. Next, the spectral reflectance at several ratios in area between vegetation and soil was measured. The spectral reflectances averaged over three successive measurements are shown in Fig. 4. The reflectance increases in TM 4 and TM 5 bands as the vegetation coverage increases. Particularly, the increase in reflectance in TM 4 band is remarkable. On the other hand, the reflectance in TM 7 band decreases as the vegetation coverage increases up to 50 %. For the vegetation coverage larger than 50 %, the reflectance is kept constant with increasing vegetation coverage. It should be noted here that the low reflectance around 1,450 nm and 1,950 nm is ascribed to the light absorption by the water content present in the leaf.

The relation between the spectral reflectance and vegetation coverage over a wide and continuous range from the visible part to middle infrared part has been reported by a few researchers. RIKIMARU *et al.* (1988) measured the variation of the spectral reflectance in the visible band and near infrared band with various coverage ratios among grass, bare soil, and concrete, and discussed their spectral characteristics. ELVIDGE and CHEN (1995) measured spectral reflectance of the various coverage of the vegetation planted on an experimental plate in the spectral range of 400 nm to 1,000 nm. From the experimental results, they evaluated the vegetation index and vegetation coverage and discussed the correlations among them. Further, DYMOND *et al.* (1992) compared the quadrat vegetation coverage observed in situ with the vegetation index obtained from SPOT (System Probatoire d'Observation de la Terra) data, and evaluated the accuracy of the

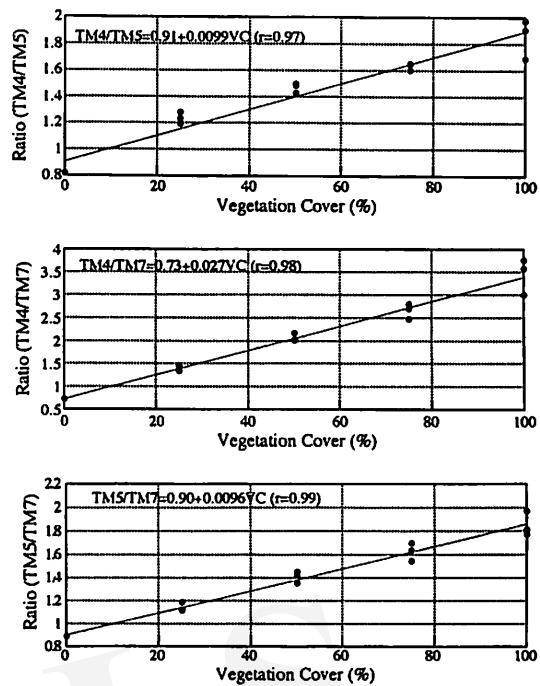


Fig. 5. Correlation between vegetation coverage and ratio of reflectance at TM band 4 to that at TM band 5.

vegetation index in order to obtain vegetation coverage from vegetation index. The results obtained by the authors cited above, are based on the spectral reflectance at several discrete bands or in the limited spectral range. The present studies which is based on the accurate laboratory measurements in the wide and continuous spectral range are valuable for obtaining the detailed relations of the spectral reflectance to the vegetation coverage.

#### 4. OPVI and Its Critical Value

##### 1) Relationship between the coverage and the radiance ratio in the middle infrared band

Based on the relationship between the vegetation coverage and spectral reflectance obtained in the laboratory, an algorithm to estimate vegetation coverage from the Landsat TM data will be introduced below. First, the radiance in TM 4, TM 5, and TM 7 bands are calculated from the measured spectral reflectance and then the correlations between those radiance ratios and vegetation coverage are

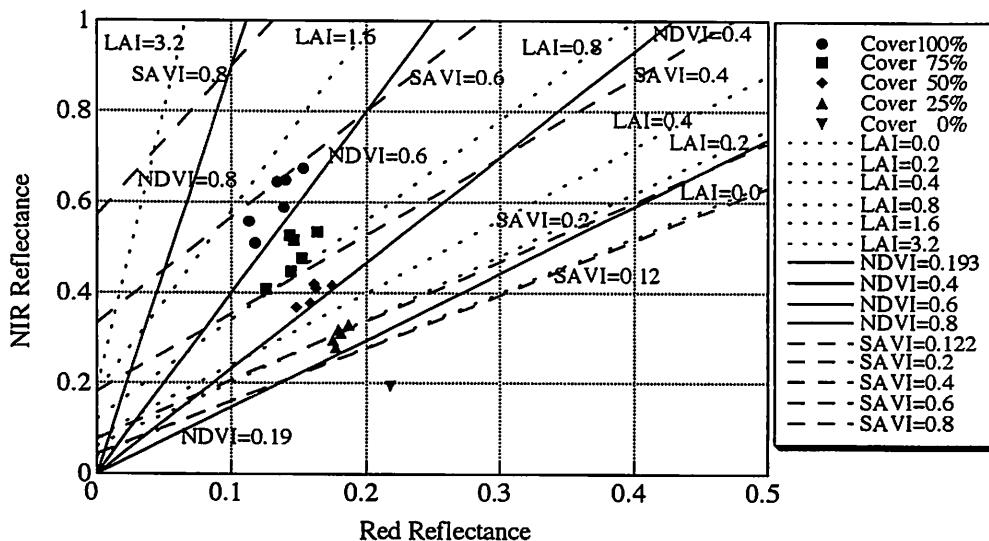


Fig. 6. Vegetation isolines plotted in NIR-red wavelength as a parameter of LAI, vegetation indices and various vegetation cover are shown in Fig. 4.

The dashed lines correspond to canopies with different soil backgrounds the same LAI. The line, for which LAI=0, is the soil line. The thick and broken lines correspond to the different NDVI and SAVI.

calculated. The results are shown in Fig. 5. The vegetation coverage and reflectance show a high correlation in any spectral band, particularly the radiance ratio of TM 5 and TM 7 bands show the higher correlation with vegetation coverage. The relationship between the ratio of radiance of bands 5 and 7 (TM 5/TM 7) and the vegetation coverage ( $x$ : %) can be expressed as follows:

$$\frac{\text{TM5}}{\text{TM7}} = 0.9 + 0.01x \quad (4)$$

As described above, OPVI (Optimum Vegetation Index) proposed in this paper calculates the vegetation index using either NDVI or SAVI depending on whether TM 5/TM 7 in each pixel is above or below the critical value. From the ratio of radiance of TM 5 and TM 7 of satellite data, vegetation coverage is estimated by equation (4). A critical value is estimated from the coverage which is estimated from the radiance ratio between TM 5 and TM 7 bands in each pixel of Landsat data.

## 2) Algorithm of the OPVI

Fig. 6 shows the vegetation indices of NDVI and SAVI and the reflectance of vegetation as a parameter of LAI and vegetation coverage on the red band and near infrared band

coordinate. Red and NIR reflectance as a function of each vegetation coverages which obtained in Fig. 5 are also plotted in the figure. The isolines of SAVI (0.4) and LAI (0.8) cross each other around 75 % of vegetation coverage. On the other hand, the isolines of NDVI (0.6) and LAI (1.6) are parallel each other around 100 % of vegetation coverage. The results suggest that the critical value for selecting either NDVI or SAVI lies around 87.5 % which is an intermediate point between 100 % and 75 % of vegetation coverage. From Fig. 5, 1.75 in terms of the radiance ratio of TM 5/TM 7 at 87.5% of vegetation coverage, is determined as the critical value for OPVI.

Vegetation index of OPVI is calculated as follows. First, the ratio in radiance between TM 5 and TM 7 is substituted in equation (4) to obtain vegetation coverage. When the ratio (TM 5/TM 7) of satellite data is larger than 1.75, NDVI (equation 1) is adopted as the index. On the other hand, the ratio is smaller than 1.75, SAVI (equation 2) is adopted. Constants for NDVI and SAVI in equation 3 which is used for evaluating for LAI are different. Substituting the constants in equation (3), NDVI and SAVI are expressed as follows:

$$\text{NDVI} = 0.93 - 0.74 \exp(-1.4k_{\text{SAVI}} \cdot \text{LAI}), \quad (5)$$

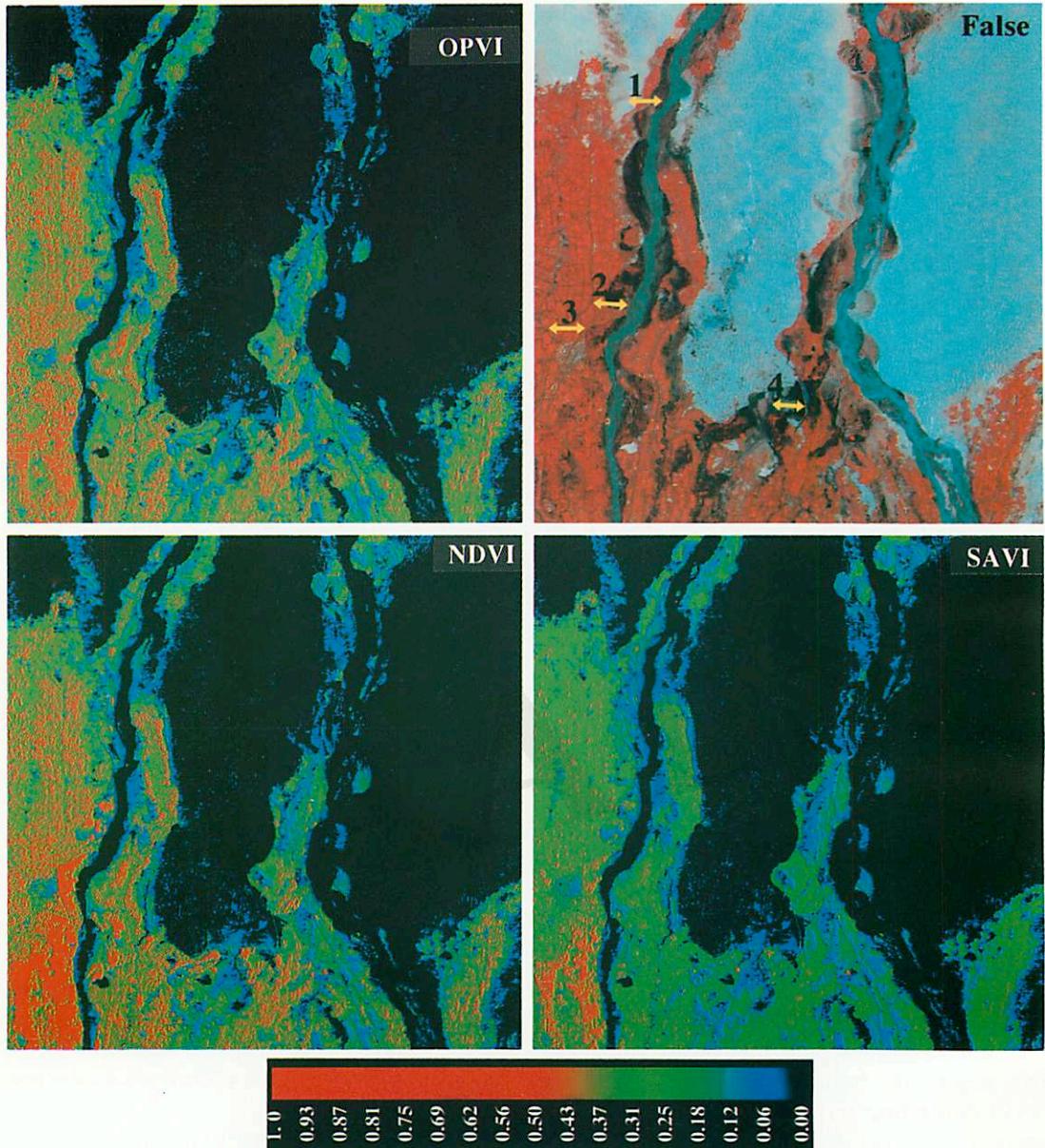


Fig. 7. False color image and normalized difference-, soil adjusted-, and optimum-vegetation indices around Hotan oasis in southern periphery of Taklimakan Desert.

$$\text{SAVI} = 0.77 - 0.65 \exp(-k_{\text{SAVI}} \cdot \text{LAI}). \quad (6)$$

From equations 5 and 6, we obtain a following equation valid for both OPVI and SAVI:

$$\text{OPVI} = 0.93 - 0.74 \left( \frac{0.77 - \text{SAVI}}{0.65} \right)^{1.4}. \quad (7)$$

Accordingly, LAI is obtained as,

$$\text{LAI} = \frac{1}{1.4k_{\text{SAVI}}} \ln \left( \frac{0.74}{0.93 - \text{OPVI}} \right). \quad (8)$$

## 5. Vegetation Index Maps Based on Satellite Data

### 1) Analysis of satellite image in arid and semi arid land

To examine the validity of OPVI proposed in this study, the vegetation is evaluated from the satellite data collected over the arid area around the Hotan oasis in the southern part of

the Taklimakan desert in China. This area contains the oasis with a relatively high vegetation density, semi desert with a low vegetation density, and desert with almost in the absence of vegetation. Although the in situ survey was not performed on the same days as overpass for the Landsat, it was repeated five times during the period of the end of summer to autumn in every year from 1991 to 1995. The TM data of Landsat 5 (path: 146, row: 34) observed on July 27, 1988 was used for analysis. Before calculating the vegetation index from satellite data, the digital count of TM is converted into radiance. The absolute radiance at the satellite ( $L$  in  $\text{Wm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ) is calculated from the CCT (Computer Compatible Tape) count by means of,

$$L = \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{255} \right) \text{CCT} + R_{\min}. \quad (9)$$

where,  $R_{\min}$  and  $R_{\max}$  ( $\text{mWcm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ) are the upper and lower limit of radiance, respectively, for the TM sensor. The reflectances are calculated from the radiance obtained from equation (9) and is related by,

$$\rho = \frac{\pi L}{E_0 \cos \theta}. \quad (10)$$

where  $E_0$  is mean solar exoatmospheric irradiance at the top of the atmosphere ( $\text{W} \mu^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ), and  $\cos \theta$  is cosine of the solar zenith angle ( $\theta_0$ ).

Removal of path radiance which acts as noise in analyzing the satellite data is desirable. The upward radiant energy from below the water surface becomes very small in the near infrared part (above 700 nm). Therefore, the minimum value of radiance in the near infrared part from the water area is almost equal to the path radiance (GRIGGS, 1975; NAGARAJA *et al.*; 1989; HILL and STURM, 1991). In this study, the path radiance is estimated from the near infrared (TM 4) radiance from the water area (reservoir) found in the image of the object area. After removal of path radiance, NDVI and SAVI are calculated by equations (1) and (2), respectively. In this case, the reflectance in TM 3 and TM 4 are substituted to Red and NIR, respectively. SAVI is normalized by equation (8) to compare it with NDVI. The vegetation indices should take a positive value here because the reflectance of vegetation is higher in the

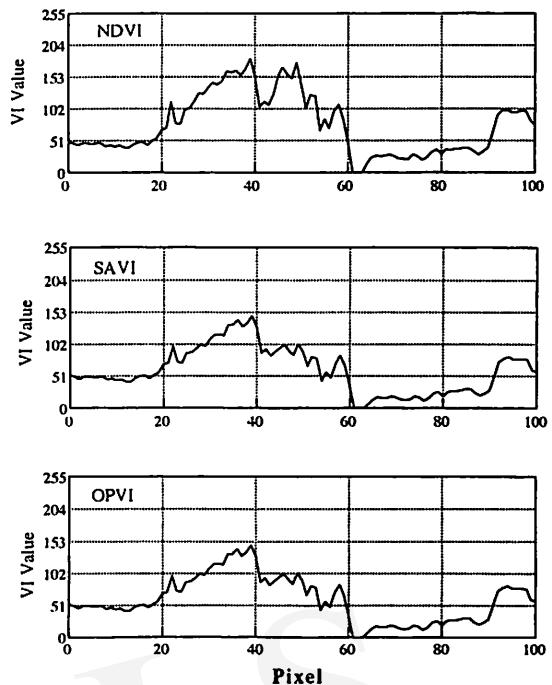


Fig. 8. Horizontal distribution of vegetation indices along the line 1 shown in false color image in Fig. 7.

near infrared band than that in the red band. Therefore, if there is the pixel which takes negative index, is regarded as a water area. In addition, in calculating the ratio of reflectance of TM 5 and TM 7, the ratio becomes too large if the radiance in TM 7 is extremely low as happened in a water area. Therefore, pixel of which radiance in TM 7 is smaller than 5 % is also regarded as a water area.

Fig. 7 shows the false color image and the NDVI, SAVI, and OPVI maps of the object area for this study. Most of the area inside the oasis in the NDVI map shows higher vegetation index than in OPVI. Further, a high vegetation index in the NDVI is shown outside the oasis which has a lower vegetation density. On the other hand, the vegetation index in the SAVI, as a whole, is evaluated to be a low even inside the oasis. Particularly, even in a high vegetation density such as fruit gardens and cotton fields as confirmed by in situ survey, the vegetation obtain from the SAVI is too low. To compare the results from NDVI, SAVI and OPVI, several areas having characteristic coverage of

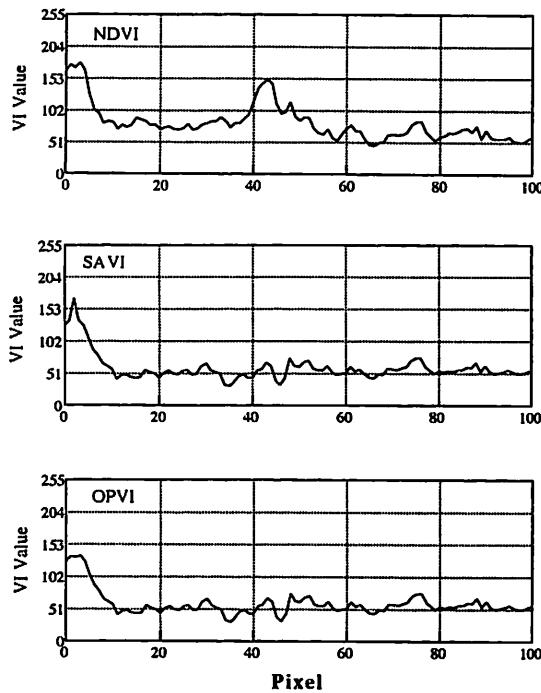


Fig. 9. Horizontal distribution of vegetation indices along the line 4 shown in false color image in Fig. 7.

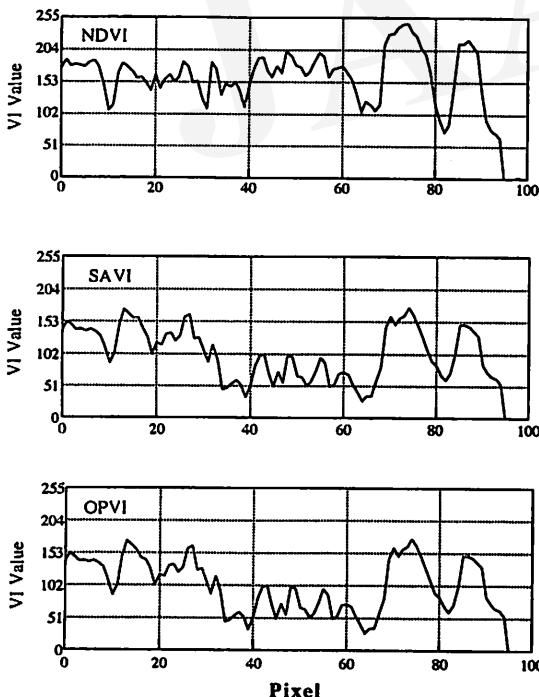


Fig. 10. Horizontal distribution of vegetation indices along the line 2 shown in false color image in Fig. 7.

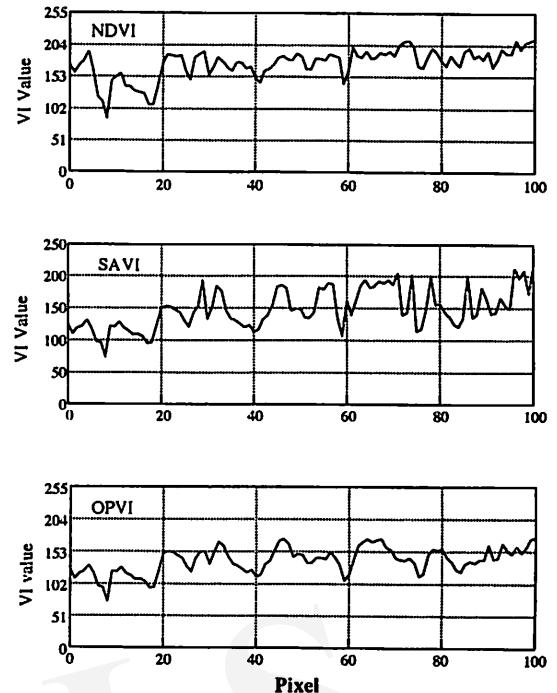


Fig. 11. Horizontal distribution of vegetation indices along the line 3 shown in false color image in Fig. 7.

soil were selected and the horizontal distribution of the vegetation index was obtained. The results corresponding to the line Nos. in Fig. 7 (False color imagery) are shown in Figs. 8, 9, 10, and 11. The abscissa and ordinate in the figure stand the relative pixel number and vegetation index, respectively. In the pixel located in the range of 45 to 53 in Figs. 8, in the range of 40 to 47 in Fig. 9, and in the vicinity of 70 in Fig. 10, NDVI shows an extremely high as compared with SAVI. In this area, irrigation reservoirs, rivers (lines 1 and 4) and paddy fields along with swamps and pastures that extend over around them (line 2) judging from the in situ survey. Therefore, it is natural to suppose that wet soil leads to a low reflectance and the vegetation index becomes large. In this area, the vegetation index was derived from SAVI, and the results show that the vegetation index estimated from NDVI becomes larger if the reflectance from the background is low. On the other hand, the vegetation index in relatively rich vegetation (lines 2, 3) is calculated from NDVI. On the whole, most of the area is occupied by

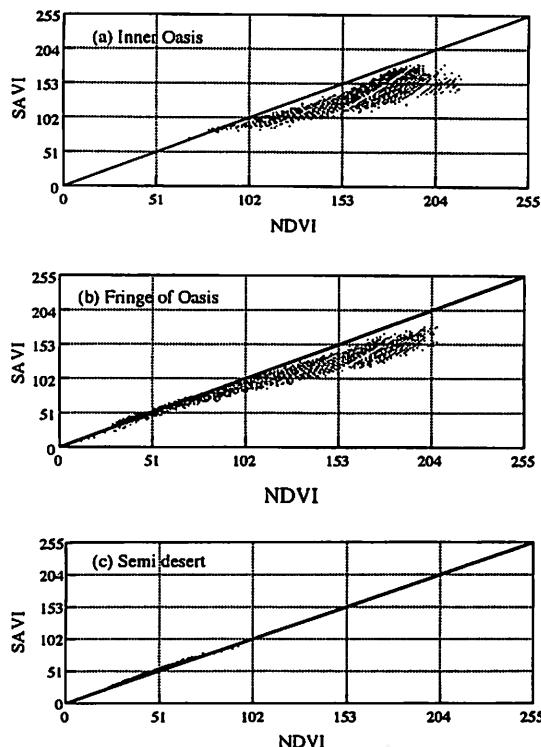


Fig. 12. Scatter diagrams of NDVI vs SAVI in the inner oasis, fringe of oasis and semi-desert area.

desert with low vegetation. In fact, the number of the pixels where the vegetation index were derived from NDVI attains to nearly about 10 % of total pixels in this area.

## 6. Conclusion

In this study, the vegetation coverage is estimated from the ratio of radiance in TM 5 to that in TM 7 through the vegetation index algorithm selecting either NDVI or SAVI. Judging from the resultant vegetation index map as shown in Fig. 12 (a, b, c), NDVI is selected for most of the pixels inside the oasis indicating a high vegetation density. A few pixels for which SAVI is selected correspond to the bare soil inside the oasis and small scale of desertified areas. These results are confirmed by the in situ survey. Thus, we concluded the conventional evaluation from NDVI alone may cause errors in a mixture of farmland and bare soil, and OPVI proposed in this study is effective for more accurate evaluation of vegetation index.

As shown in Fig. 12 (b), the vegetation index of nearly 90 % pixels is evaluated from NDVI in the high vegetation density areas due to irrigated farmland in spite of the location of boundary between the oasis and desert (fringe). On the other hand, the vegetation index in most pixels in the semi desert area are evaluated by SAVI as shown in Fig. 12 (c), indicating a low vegetation index. Thus, since wide range of vegetation density is found, an evaluated vegetation index results in lower accuracy if NDVI alone is used in the oases and their peripheral area. Accordingly, OPVI is effective indicator for monitoring the vegetation in a mixture of a high and low vegetation coverages.

Because the purpose of this study was to evaluate the vegetation density in semi arid areas, dry soil was used in laboratory measurements as the background of vegetation. For further studies, however, it is necessary to examine the changes in reflectance in those cases where the background is wet soil showing a low reflectance and typical soils in various parts of the world, e.g. laterite, which is a popular soil in the tropical region. Further, effects of natural canopy upon the vegetation index to be evaluated must be studied experimentally in comparison with the results for a single leaf which was used in this study for obtaining the spectral reflectance of vegetation. It is also necessary to perform experiments about actual canopy. In addition, to estimate the accuracy of the analysis results from the satellite data, it is necessary to compare OPVI results from the satellite data quantitatively with in situ concurrent surveys of the biomass such as LAI and coverage of the vegetation. Recently, large-size deforestation is becoming at issue in tropical forest in South America and South East Asia. These area may be a mixture of a high vegetation density and bare soil resulted from deforestation. If NDVI alone is applied to estimating the vegetation index in those areas, we could not obtain the results. Further, OPVI becomes effective to investigate the desertification, which is becoming at issue in many arid and semi-arid areas in the world.

## Acknowledgements

The authors are indebted to Prof. S. Sugihara, National University of Fisheries for his valuable suggestions and kind encouragement.

## References

- ALLEN, W. A., GAYLE, T. V. and RICHARDSON, A. J. (1970): Plant-canopy irradiance specified by the Duntley Equations. *J. Optical Soc. America*, **60**: 372–376.
- BARET, F., GUYOT, G. and MAJOR, D. J. (1989): TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In *12th Canadian Symp. on Remote Sensing and IGARSS '90, Vancouver, Canada, 10–14 July 1989*: 4pp.
- BARET, F. and GUYOT, G. (1991): Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, **35**: 161–173.
- DYMOND, J. R., STEPHENS, P. R., NEWSOME, P. F. and WILDE, R. H. (1992): Percentage vegetation cover of a degrading rangeland from SPOT. *Int. J. Remote Sensing*, **13**: 1999–2007.
- ELVIDGE, C. D. and CHEN, Z. (1995): Comparison of broad-band and narrow-band red and near infrared vegetation indices. *Remote sensing of Environment*, **54**: 38–48.
- GRIGGS, M. (1975): Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS-1 data. *J. Air Pollution Control Association*, **25**: 622–626.
- HILL, J. and STURM, B. (1991): Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. *Int. J. Remote Sensing*, **12**: 1471–1491.
- HORLER, D. N. H., DOCKRAY, M. and Barber, J. (1983): The red edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sensing*, **4**: 273–288.
- HUETE, A. R. (1988): A Soil-Adjusted Vegetation Index(SAVI). *Remote Sensing of Environment*, **25**: 295–309.
- ISHIYAMA, T., TSUCHIYA, K. and OKAYAMA, H. (1984): Spectral reflectance and polarization characteristics of leaves. *J. Remote Sensing Society of Japan*, **4**: 225–231.(in Japanese)
- NAGARAJA Rao, C. R., STONWE L. L. and McCLEAIN E. P. (1989): Remote sensing of aerosols over the oceans using AVHRR data theory, practice and applications. *Int. J. Remote Sensing*, **10**: 743–749.
- PERSON, R. L. and MILLER, L. D. (1972): Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass Prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado, In *Proc. 8 the Int. Symp. on Remote Sens. of Environ.*, ERIM, Ann Arbor, MI: 1357–1381.
- PICKUP, G., CHEWINGS, V. H. and NELSON, D. J. (1993): Estimating changes in vegetation cover over time in arid rangelands using Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment*, **43**: 243–263.
- RICHARDSON, A. J. and WIEGAND, C. L. (1977): Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, **43**: 1541–1552.
- RIKIMARU, A., KAMIJO, N. and OSHIMA, T. (1988): Development of simple method for extract pixel inside spectral information. *Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, **27**: 23–34. (in Japanese)
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., DEERING, D. W. and HARLAN, J. C. (1974): *Monitoring the vernal advancement of retrogradiation of natural vegetation*. N ASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, 371.
- VERHOEF, W. (1984): Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL Model. *Remote Sensing of Environment*, **16**: 125–141.

## (Appendix 1)

### 1. Formulation 2

SAVI can be obtained by shifting the point which has a position of R and NIR on a two-dimensional space, so that the isoline of NDVI becomes near to the isoline of LAI. The procedure is formulated below. If the position of the vegetation point (V: this corresponds to A in Fig. 2) are (R, NIR), NDVI is expressed by,

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}}. \quad (\text{A1})$$

While NDVI isolines coverage to the origin, the LAI isoline of V does not pass through the origin. Therefore, the origin is shifted to the point where the LAI isoline and the soil line intersect each other (Fig. 2). If the coordinates of this intersection point are  $(-l_1, -l_2)$ , equation (1) is express by,

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} + l_2) - (\text{R} + l_1)}{(\text{NIR} + l_2) + (\text{R} + l_1)} = \frac{\text{NIR} - \text{R} + (l_2 - l_1)}{\text{NIR} + \text{R} + (l_2 + l_1)}. \quad (\text{A2})$$

Because the slope of the soil line is approx. 1, we may assume that  $l_1$  is equal to  $l_2$ , putting  $L/2$  where  $l_1 + l_2 = L$ . Then equation (A2) is reduced to,

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R} + L}. \quad (\text{A3})$$

Let's consider to match the boundary condition to that of NDVI. Since  $\text{NDVI} = -1$  when  $\text{NIR} = 0$  and

$R=1$ , their values are substituted into equation (A3), and we obtain,

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR}-R}{\text{NIR}+R+L} = \frac{0-1}{0+1+L} = -\frac{1}{1+L}. \quad (\text{A4})$$

Because  $\text{NDVI}=1$  when  $\text{NIR}=1$  and  $R=0$ , substitution of the values in equation (A3) gives,

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR}-R}{\text{NIR}+R+L} = \frac{1-0}{1+0+L} = \frac{1}{1+L} \quad (\text{A5})$$

Therefore, equal boundary conditions can be obtained if  $(1+L)$  is multiplied in equation (A3).

This leads to SAVI expressed by,

$$\text{SAVI} = \frac{\text{NIR}-R}{\text{NIR}+R+L} (1+L) \quad (\text{A6})$$

## 2. Formulation of equation (A8)

From equation (6), the following equation is obtained.

$$\exp[-k_{\text{SAVI}} \cdot LAI] = \frac{0.77-\text{SAVI}}{0.65},$$

$$\text{and } LAI = -\frac{1}{K_{\text{SAVI}}} \ln \left[ \frac{0.77-\text{SAVI}}{0.65} \right]. \quad (\text{A7})$$

By substituting (A7) into equation (5), equation (A8) can be obtained as follows,

$$\begin{aligned} VI &= 0.93 - 0.74 \exp \left\{ 1.4 \ln \left( \frac{0.77-\text{SAVI}}{0.65} \right) \right\} \\ &= 0.93 - 0.74 \exp \left\{ \ln \left( \frac{0.77-\text{SAVI}}{0.65} \right)^{1.4} \right\} \\ &= 0.93 - 0.74 \left( \frac{0.77-\text{SAVI}}{0.65} \right)^{1.4}. \end{aligned} \quad (\text{A8})$$

## 乾燥地の植生モニタリングに適した植生指数アルゴリズム

石山 隆・中島康裕・梶原康司・

衛星データから計算された植生指標の NDVI (Normalized Vegetation Index) や SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) によって植生被覆を評価する場合、ピクセル内に占める植生の密度によってその指標値に誤差が生じる。本論文ではそれらの誤差を除去するための最適植生指標 (Optimum Vegetation Index, OPVI) を提案する。OPVI は始めに Landsat-TM データの赤外バンドの反射率比(TM 5/TM 7)から各ピクセルの植生の被覆率を求める。求めた反射率比から、あらかじめ設定した閾値より大きな値は NDVI で、より小さな値は SAVI により衛星データの各ピクセルの植生指標を計算する。

閾値を導出するための基礎研究として、室内実験において分光放射計により土壤に対する植物の被覆率と赤外バンドの反射率比との関係を求め、指標を選択するための閾値を決定する。

本論文で提案された OPVI と NDVI, SAVI を検証するために、オアシスを含むタクラマカン沙漠周辺の植生被覆のレンジの広い地域の衛星データを解析した。その結果、NDVI または SAVI の単独の植生指標による解析より、OPVI が植生被覆の評価に有効であることが確認された。

・ 千葉大学環境リモートセンシング研究センター

\*\* 倫理リモートセンシング技術センター

(受付: 1996年6月25日, 受理: 1996年11月20日)

# 中国タクラマカン沙漠における大気中の水蒸気及びメタンの遠隔測定

青木輝夫<sup>\*</sup>・青木忠生<sup>\*</sup>・深堀正志<sup>\*</sup>・廣田道夫<sup>\*</sup>・張 希明<sup>\*\*</sup>

## 1. はじめに

中国タ克拉マカン沙漠はユーラシア大陸のほぼ中心に位置し、西側を除く三方を4,000~5,000m級の山脈に囲まれるという地理的特徴を持っている。一方、大気中の水蒸気は一般に大気の下層にその大半が存在し、発生源は海洋であるため、タ克拉マカン沙漠は大気中の水蒸気が供給されにくい地形と言える。沙漠の特徴は降水量が少ないとあるが、降水は大気中の水蒸気が凝結した結果起こるため、沙漠の気候を考える場合、大気中の水蒸気分布やその輸送過程を明らかにすることが必要である。

タ克拉マカン沙漠の気候について、吉野(1991a, b)は中國国内で観測された地上気象観測データを用い、天山山脈の東を迂回してタリム盆地へ流れ込む北東の気流が存在することを指摘した。また、鬼頭ほか(1993)は全球客観解析データを用いて夏季の水蒸気フラックスを調べ、吉野(1991a, b)が指摘した風系によって下層の水蒸気が輸送されていることと、上層では逆に発散傾向の西風フラックスがあることを示した。さらにYATAGAI and YASUNARI(1995)は夏季降水母の経年変動を解析し、タ克拉マカン沙漠の降水量は西側の大西洋~ユーラシア大陸の偏西風循環及びチベット高気圧の強弱と関係していることを見出した。これらのことからタ克拉マカン沙漠における大気中の水蒸気は、少なくとも夏季に関しては大きなスケールでの大気の流れと関係しながら沙漠の東側下層より供給されていることが確からしい。

一方、タ克拉マカン沙漠付近では地上気象観測データの蓄積が1950年代よりあり、気温、降水、風を解析した解説書やデータ集(例えば、国家気象局北京気象中心気候資料室, 1986; 張・邓, 1987; 新疆地理学会, 1993)が発表されている。しかし、それらは連続観測データではなく、特に夜間のデータが不十分である。最近、長島ほか(1991)は砂面変動の解明を目的に、タ克拉マカン沙漠南西部の策勒(Qira)において、1990年10月から1991年3月にかけて自動気象観測装置による観測を行なった。その結果、夜から午前中には山岳域から沙漠域に向かう風、午後は沙漠から山岳域に向かう風が

存在することや、限られた風向(西北西)の強風(7m/s以上)によって砂面が変動していることなどを明らかにした。三上ほか(1995)及びMIKAMI *et al.*(1995)は長島ほか(1991)の観測地点付近の2地点でさらに詳しく観測し、長島ほか(1991)の指摘した風系の日変化は1年を通じて起こっていることを見出した。そして、この風系の日変化が起る理由として、崑崙山脈と沙漠地帯の間に局地循環が存在する可能性を指摘した。

以上のことから、タ克拉マカン沙漠周辺における水蒸気の振舞いは、天山山脈の東を迂回してタリム盆地へ流れ込み、その後、沙漠と山岳域の局地循環によって分配または別の場所に輸送されている様子が考えられる。一方、タ克拉マカン沙漠の北に広がるシベリアの湿地帯はメタンの発生源として最近注目されている(MATTHEWS and FUNG, 1987; ASELMANN and CRUTZEN, 1989)。このため水蒸気と同時にメタンを測定することにより、水蒸気輸送過程を明らかにするためのトレーサーとして利用することが期待される。そこで我々は地上から大気中の水蒸気等の大気微量成分を遠隔測定する装置TERSE(Tunable Etalon Remote Sounder for the Environment)を用い、タ克拉マカン沙漠内での水蒸気とメタンの変動を観測した。また、三上ほか(1995)が指摘した沙漠域と山岳域の局地循環を捉えるため、沙漠域と山岳域の植生の差から濃度差の予想されるメタンのエアサンプリングを行ない、TERSEによる測定結果と比較した。

さらに、沙漠のような厳しい条件で、精密な光学機器であるTERSEがどれくらい有効であるかを調べることも本研究のもう一つの目的である。

## 2. 観測の概要

### 1) 観測方法

TERSEは太陽直達光を観測し大気中の水蒸気とメタンの吸収線を高分解分光測定する放射計である。太陽直達光は図1で示したように、屋外の太陽追尾装置(HS)によりTERSEの本体へと導かれる。TERSEの制御はパソコン(PC)からコントローラ(CTL), ランプジェネレータ(RAMP)を介して行なわれる。TERSEへ導

\* 気象研究所

\*\* 中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所

かれた太陽直達光は、図2で示した様にエタロン（E）、ロングパスフィルター（LPF）、ブロッキングフィルター（BF）によって波長選択され、目的とする気体の吸収線が選び出される。その吸収線はチューナブルエタロン（TE）によって高分解で走査され、検知器へと導かれる。図3は水蒸気の吸収線と各フィルターの透過特性の関係を示したものである。測定する波長は大気による散乱の影響の少ない  $1.5\text{ }\mu\text{m}$  付近の近赤外域である。水蒸気の吸収線は図3の “H<sub>2</sub>O” のパネルで示した様に何本もの吸収線が並んでいる。気体の吸収の性質から1本の吸収線の中心部には大気上部の気体の濃度情報が多く含まれ、反対に吸収線の裾野の部分には大気下部の気体の濃度情報が多く含まれている。従って、気体の鉛直分布の違い

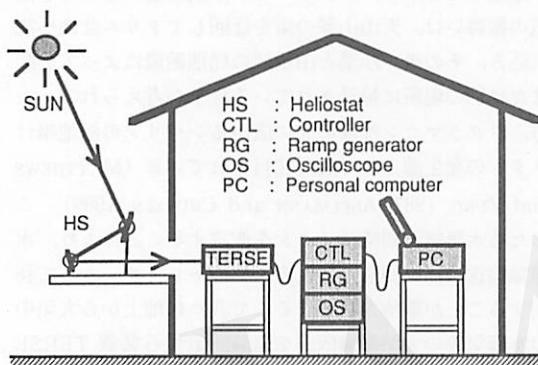


図1. TERSEによる太陽直達光を用いた大気中の水蒸気及びメタンの測定システム。

により吸収線の形が変化する。このことを利用し、目的とする1本の吸収線を高分解分光することにより、大気中の気体の鉛直分布を抽出することができる。ただし、吸収線は1本1本強度が違うので、観測場所の水蒸気量の変化に対して最も変化（情報量）の大きい吸収線をあらかじめ選んでおく。これが目的の吸収線で、この観測では  $6,589.3\text{ cm}^{-1}$  のものを使った。次に、その吸収線を選ぶ方法について述べる。TERSEでは図2に示したエタロンとブロッキングフィルターによって図3の“1”的パネルで示したバンドパス透過関数が得られる。波長に対するこの透過関数の位置は、エタロンの傾きを変えることにより波長方向に移動させることができる。透過関数の位置は、目的とする吸収線がこの透過関数の中心になるよう調整される。これにより目的とする水蒸気の吸収線が選ばれ、エタロンとブロッキングフィルターを通過した光の透過率は“ALL”的パネルで示した形となる。一方、チューナブルエタロンによって作られる透過関数は、気体の吸収線よりもさらに狭いバンドパスフィルターで、実際には櫛型をした複数の透過関数が得られる。それを波長方向に動かすことによって、目的とする水蒸気の吸収線が走査される。チューナブルエタロンによる波長走査は電気的に行なわれる。パネル“2”～“5”はチューナブルエタロンの走査によって得られる透過関数の時間変化で、数秒でパネル“2”からパネル“5”まで動かすことができる。このチューナブルエタロンにより“ALL”的パネルで示した目的の吸収線が走査される。

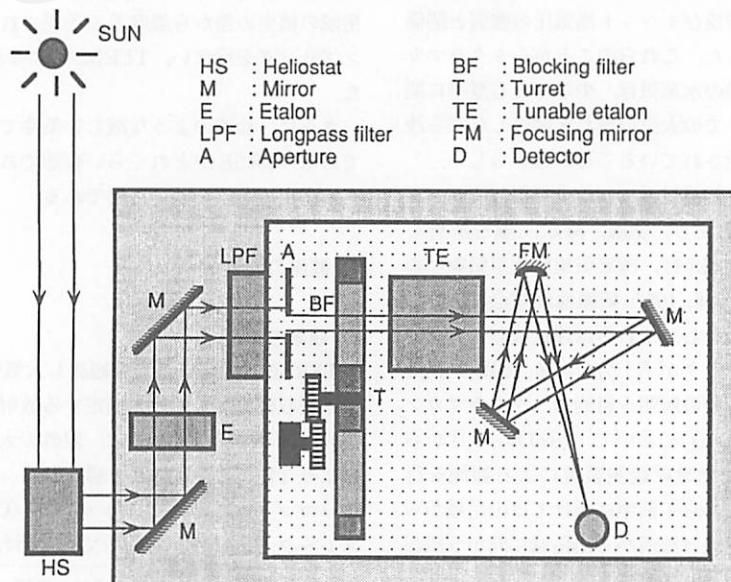


図2. TERSE光学系内部の各光学コンポーネントの配置。

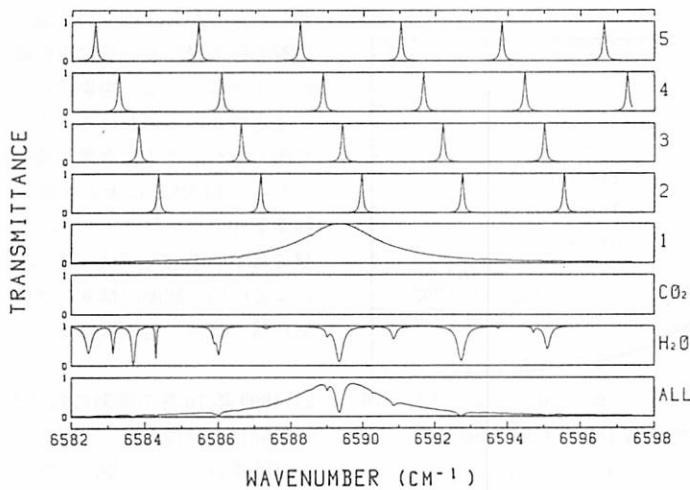


図3. TERSEによって測定を行なう水蒸気吸収線付近のスペクトル。

“1”のパネルはエタロン及びブロッキングフィルターによって作られた透過関数，“CO<sub>2</sub>”及び“H<sub>2</sub>O”的パネルはそれぞれ大気中の二酸化炭素及び水蒸気の透過率，“ALL”的パネルは“1”，“CO<sub>2</sub>”及び“H<sub>2</sub>O”的透過率の積，“2”～“5”的パネルはチューナブルエタロンの走査で得られる透過関数の時間変化を表わす。

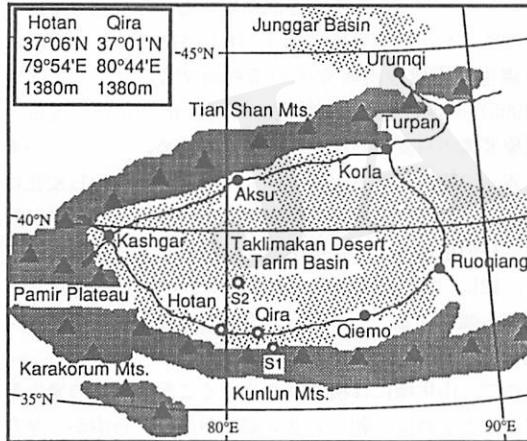


図4. タクラマカン沙漠周辺の地図。

TERSEによる観測は和田(Hotan)及び策勒(Qira)で行なった。エアサンプリングは崑崙山脈の北側斜面(S1), タ克拉マカン沙漠内部の麻扎塔格(S2)及び策勒の3地点において行なった。高度は海拔。

観測データは最尤法により、ある初期値から繰り返し法によって気体の鉛直分布が求められる。TERSEによる水蒸気の情報抽出アルゴリズムは青木ほか(1990)に、また国内におけるTERSEの観測結果と精度については青木ほか(1992)にそれぞれ述べられている。さらに、TERSEは将来衛星に搭載する事も計画されており、その際の光学系の設計と抽出アルゴリズムはAOKI *et al.* (1993)に述べられている。

## 2) 観測場所

TERSEによる観測は1992年10月に和田(Hotan)で水蒸気について、1993年10月に策勒(Qira)で水蒸気とメタンについて行なった(図4)。1994年9月にはメタン濃度の検証のため図4に示す崑崙山脈の北側斜面(S1), タ克拉マカン沙漠内部の麻扎塔格(S2)及び策勒の3地点においてエアサンプリングを行なった。和田の観測点はオアシスの中で、同じオアシス内に和田気象台があり、地上気象及び高層気象観測が行なわれている。策勒の観測点は三上ほか(1995)のオアシス気象ステーションの近くで、策勒のオアシスの外れにある。中国では全国で北京時間が用いられているため、現地時間(LT)として北京時間を用いるが、観測地点と北京の南中時刻の差は約2.5時間である。

## 3. 観測結果

### 1) 1992年10月の和田における水蒸気の観測

タ克拉マカン沙漠におけるTERSEの初めての観測は1992年10月15日～22日の期間、和田市内のホテルの窓に太陽追尾装置を設置して行なった。オアシスとはいえ沙漠域での観測は極端な乾燥や大気中の砂、電圧の低下や停電といった電源事情の悪さなど光学観測にとって不利な条件が多い。その上、この年は曇りの日が多く、観測にとって条件の良い日は少なかった。このため、この年の観測はTERSEが沙漠域でどの程度役に立つか、精度はどの位かといった予備観測的要素を持ったものと

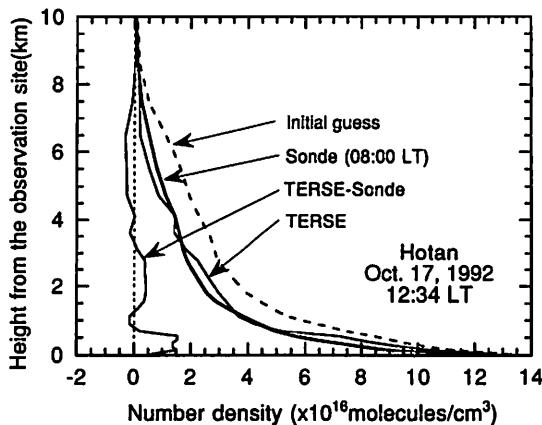


図5. TERSEによる大気中水蒸気の鉛直分布測定例。

細実線はTERSEによる結果、太実線は和田気象台におけるラジオゾンデによる結果、破線はTERSEによる水蒸気鉛直分布計算時の初期値、左側の細実線はTERSEとゾンデ観測の差。単位は分子の数密度、高度は観測地点(1,380m)からの高さ。

なった。

TERSEによる観測精度の検証は、前章で述べた和田気象台のゾンデによる高層気象観測データを用いて行なった。ゾンデによる相対湿度の精度はWMOの勧告では $\pm 5\%$ であるが、検定の基準となる方法がないため(気象庁, 1995)、正確な見積りは難しい。村山(1983)によると、日本で使用されているカーボン湿度計による相対湿度の精度は、5km以下では $\pm 5\%$ 、5~15kmでは $\pm 10\%$ である。中国国内で使用されているゾンデの湿度計の精度は不明であるが、ある程度WMOの勧告に従っていると考え、ゾンデを基準にTERSEの精度を議論することにする。

図5はTERSEによる水蒸気鉛直分布の観測例で、和田気象台におけるゾンデ観測値も同時に示している。単位は数密度(単位容積当たりの分子の個数)である。観測当日の天気は晴れ、TERSE観測時の気温は16°Cであった。ゾンデの観測はTERSEより約4.5時間前に行なわれている。単純に両者を比較すると、TERSEの観測値はゾンデのそれと比べ地表付近で+12%、2kmで+25%、6kmで-30%の差となっている。しかし、破線で示した初期値に比べTERSEの観測値はゾンデのそれに近く、観測がある程度信頼できるものと考えられる。ただし、TERSEによる鉛直分布はゾンデのそれよりも細かな構造を持っているが、これはTERSEの鉛直分解能から考えて、その様な細かな構造までは信頼できない。一方、水蒸気の鉛直分布を気柱量になおした場合の可降水量の値は、TERSEが $0.60\text{g}/\text{cm}^2$ 、ゾンデの08LTの観測が $0.54\text{g}/\text{cm}^2$ 、20LTが $0.63\text{g}/\text{cm}^2$ と10%以内で一

致した。しかし、朝夕の太陽高度の低い時間帯や大気中に舞う砂の量が多い日に吸収線が浅くなる(水蒸気が見かけ上少なくなる)現象が見られた。この原因の一つとして光学系内部における迷光が考えられ、次の年に対策を施したが、さらに今後の検討が必要である。以上のことから、TERSEによる水蒸気の大まかな測定精度は、観測条件の良い状態で、鉛直分布では10~30%、気柱量では10%程度と考えられる。これは青木ほか(1992)による国内の観測の精度に比較して鉛直分布で同程度、気柱量ではやや劣る程度である。

## 2) 1993年10月の策勒における水蒸気とメタンの観測

長島ほか(1991)、三上ほか(1995)の観測から、日中は沙漠方向からの風、夜間は崑崙山脈から吹き下ろす風の存在がわかっていたので、沙漠域と山岳域で植生の違いから濃度差のありそうなメタンを水蒸気と同時にトレーサーとして測定し、日変化あるいはそれよりスケールの大きな場の変化に対して、これらの気体がどのように変化するかという点に着目して観測を行なった。前年度のTERSEの問題点に対処するため、絞りを小さくし、ブロッキングフィルターを高精度のものと交換して迷光を押さえた。観測実施日は10月13日~21日、場所は新疆生物土壤沙漠研究所の策勒研究站で、三上ほか(1995)の自動気象観測装置から数百mの位置にある。気象要素の日変化の様子を把握するため、三上(一部未公表)の観測による記録を図6に示す。気温の日変化は大きく、最低気温3°C、最高気温18°Cであった。06LTから日の出過ぎまで崑崙山脈から冷たい南風が吹き下ろし、12LT頃、風は北東~東の沙漠からの風に変化し、風速も強くなる。その後、日没頃から夜半まで東風が持続している。

さて、山岳域には植生があり、そこがメタンの発生源であるとすれば、朝にメタン濃度が高く、日中から夕方にかけて減少することが期待される。一方、水蒸気は大きなスケールの輸送に伴い、東系の風により日中の方が増加しそうであるが、沙漠域で日中下向きの水蒸気輸送が観測された例(WANG and MITSUDA, 1990)もあり、そう単純ではなさそうである。また、大きなスケールの気塊の輸送に伴い、シベリアの湿地帯を発生源とするメタンの流入が起これば、水蒸気場の変動と共に数日以上の観測により2つの気体の変動が捉えられる可能性がある。

TERSEによる水蒸気とメタンの気柱量の日変化の観測例を図7に示す。水蒸気は可降水量、メタンは単位底面積の気柱に含まれる分子の数で示している。水蒸気は時間により大きく変化しており、後述する様に測定日

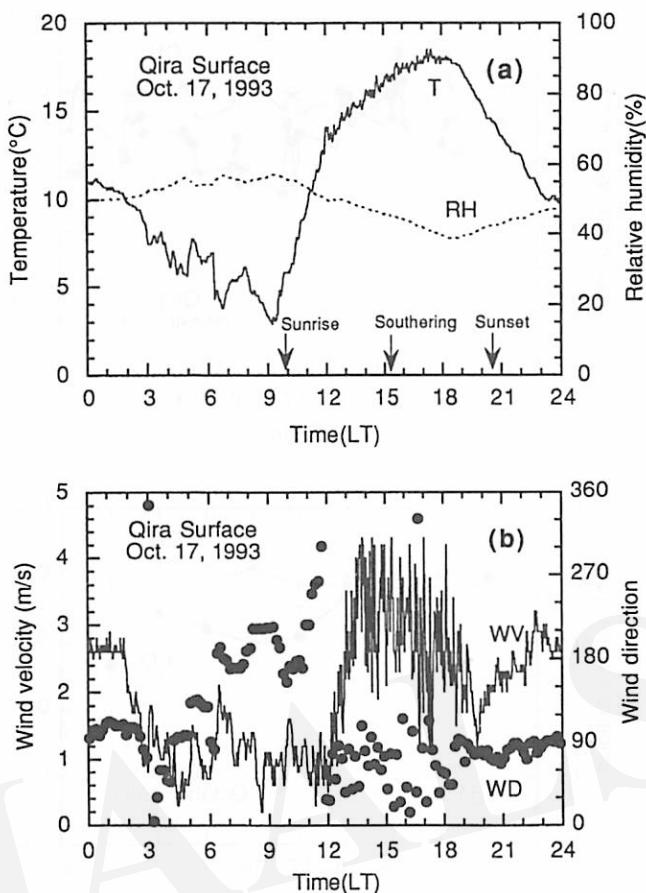


図6. 策勒における自動気象観測装置による(a) 気温(実線)と相対湿度(点線),(b) 風向(ドット)と風速(実線)の日変化の例。

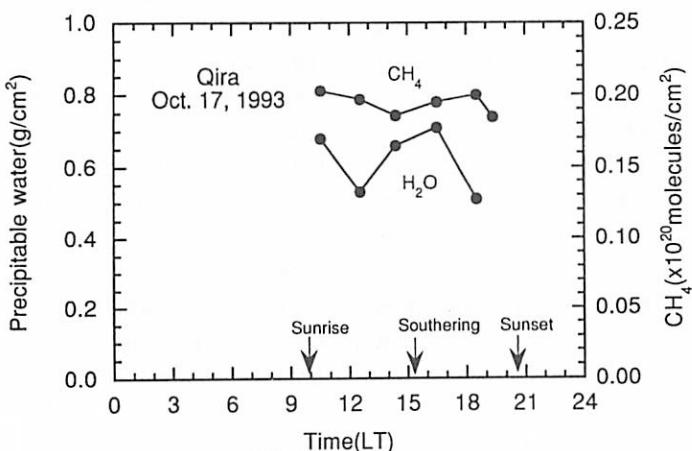


図7. 策勒におけるTERSEによる大気中の水蒸気及びメタン気柱量の日変化観測結果。水蒸気は可降水量、メタンは分子の数密度で示す。

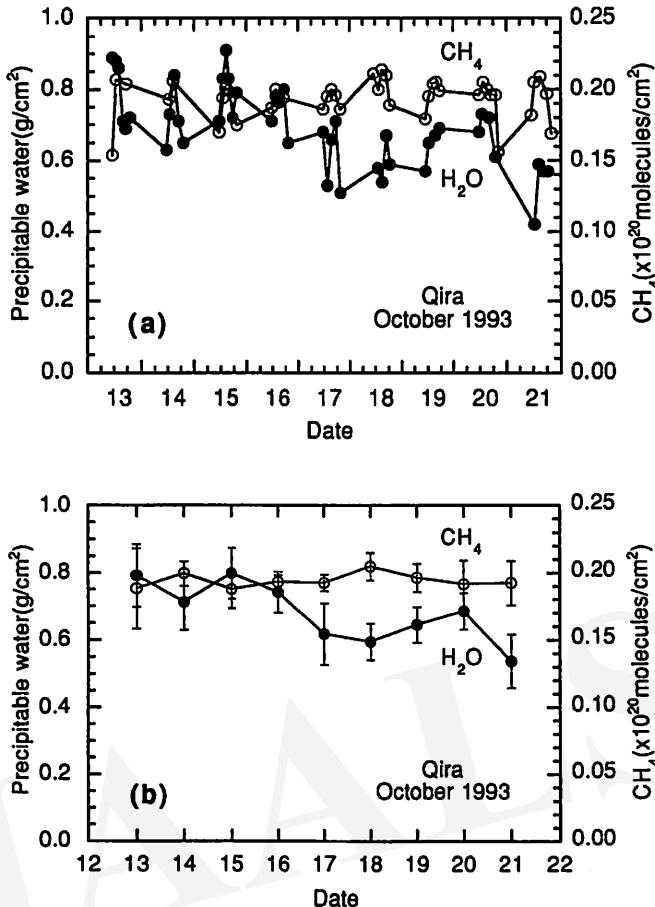


図8. 策勅における TERSE による大気中の水蒸気及びメタン気柱量の 9 日間の変化。  
単位は図7に同じ。 (a) は個々の観測結果、(b) は日平均値及び標準偏差をエラーバーで示したもの。

よってその傾向が異なる。従って、これだけのデータからその特徴を述べるのは難しい。一方、メタンの気柱量に対する TERSE の精度は、我々が使用したメタンの吸収線が水蒸気のそれよりも弱いことから、水蒸気の気柱量に対する精度よりも悪い (10%以下) と考えられる。TERSE によるメタンの観測値は朝、最も高い値を示しているが、1日の変動幅は約 10% であるため、この変動は意味のあるものとは言い難い。これらのことより水蒸気、メタンともに日変化の顕著な傾向を TERSE の観測から見出すことはできなかった。ただし、より精度が悪いと考えられるメタンの観測値の日変化の変動幅が水蒸気よりも小さいことから、この結果はメタンの方が水蒸気よりも実際に変動していない可能性を示唆するものである。

次に観測期間中の 2 つの気体の気柱量の変化を図8(a)-(b)に示す。図8(a)は個々の観測結果、図8(b)は日平均値及び標準偏差をエラーバーで示したものである。

この年は天気が良く、ほぼ毎日終日観測ができた。各気体について 1 日の観測値の変動に注目してみると、図8(a)の個々のデータや図8(b)のエラーバーが示す様に、日変化は水蒸気の方がメタンより大きい。しかし、前述した日変化同様、毎日の各気体の変動に毎日決まった傾向は見えず (図8(a))、2 つの気体の実際の日変化を TERSE の誤差が捉えにくくしているものと考えられる。このことは逆に TERSE の誤差は時間や日によって変化するすることを示唆している。国内の実験からはその様な経験がなかったことから、大気中の砂や気温の大きな日変化など、沙漠域特有の現象が原因であった可能性もある。一方、観測期間中の 2 つの気体の変化傾向は水蒸気が前半の  $0.8 \text{ g/cm}^2$  前後から後半の  $0.6 \text{ g/cm}^2$  前後へと減少しているのに対し、メタンは全期間  $0.2 \times 10^{20}$  個/ $\text{cm}^2$  前後で一定である。この結果は、沙漠よりも大きなスケールの場の変化により、大気中の水蒸気量は減少したが、メタンは変化しなかったことを示唆している。

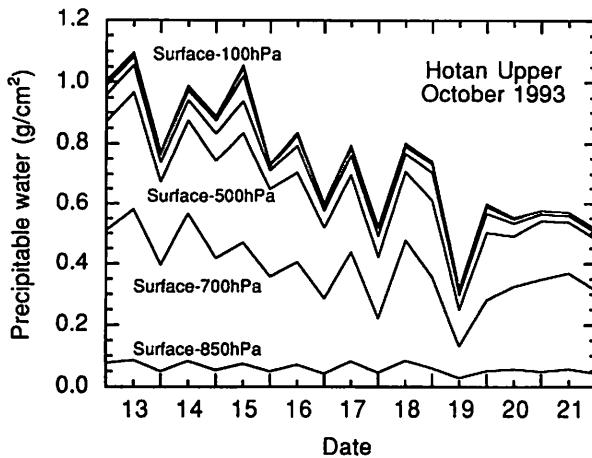


図9. 和田気象台における高層気象観測データから求めた9日間の可降水量の変化。  
それぞれの曲線は地表から各層までの積算値で、500hPaと100hPaの間には400, 300, 250, 200, 150hPaの層までの値が示されているが、一部は重なっている。

表1. エアサンプリングによるメタン濃度（乾燥空気中の体積混合比）の測定結果。  
サンプリング地点は、崑崙山脈斜面（S1）、麻扎塔格（S2）及び策勒の3地点  
(図4参照)。高度は海拔。

Site	Date	Time	Height	Position	CH <sub>4</sub> concentration
S1	Sep. 24, 1994	14:20	3,130m	36°12' N, 81°09' E	1.84 ppmv
S2	Sep. 26, 1994	13:00	1,180m	38°32' N, 80°42' E	1.80 ppmv
Qira	Sep. 25, 1994	15:00	1,380m	37°01' N, 80°44' E	1.80 ppmv

そこで和田気象台の高層観測データから見積もった可降水量の変化を図9に示す。策勒と和田は約80km離れているが、大きなスケールの変動に関しては十分比較ができる距離である。和田における地表から100hPaまでの可降水量の変化は、策勒におけるTERSEによる観測結果とよく一致している。また、図8(b)で示すように観測期間9日間における水蒸気の日平均値のトレンドがエラーバー以上に変化している。つまりTERSEの観測値は個々のデータはある程度誤差を含んでいるものの、いくつかのデータを平均することにより信頼できるものになると考えられる。これはTERSEによる観測及び測定データの解析が、まだ完全に最適化（観測の自動化や客観解析化）されていないためと考えられる。一方、メタンの濃度についての検証は次章で述べる。

2つの気体の鉛直分布を観測期間の前半、中間、後半の代表的な3日間について示したのが図10(a)(b)である。単位は数密度（単位容積当たりの分子の個数）である。水蒸気が前半から後半にかけて減少している様子がよくわかる。特に、10月14日から10月21日にかけて水蒸気密度が50%以下に減少した層は、1.5km(710 hPa)以下の対流圏下層であった。また、和田気象台の

高層観測による可降水量の変化（図9）でも700hPaより下層での減少が大きい。同じく和田気象台の高層風の観測によると、この間の850~700hPaは東系の風が卓越し、500hPaは西系の風が卓越していた。これは鬼頭ほか(1993)の解析による水蒸気フラックスの輸送パターンと一致している。以上のことより、この間の水蒸気変化は主に長距離輸送してきた水蒸気の変動によるものと思われる。一方、メタンについてはほとんど鉛直分布が変化していない。このことは偶然メタン濃度の異なる気塊が流入してこなかったためか、あるいはその変動量がTERSEの精度以下だったための2つの理由が考えられる。この点に関しては次章で検証する。

### 3) 1994年9月のメタンのエアサンプリング

1993年の策勒におけるTERSEによるメタン濃度測定値の検証とタクラマカン沙漠付近の場所による濃度差を調べるために、メタンのエアサンプリングを行なった。サンプリングを行なった場所は、図4に示す様に山岳域の地点として崑崙山脈北斜面の標高3,130m地点(S1)、沙漠内部の地点として麻扎塔格(S2)、その中間として策勒の3地点である。分析方法については廣田ほか

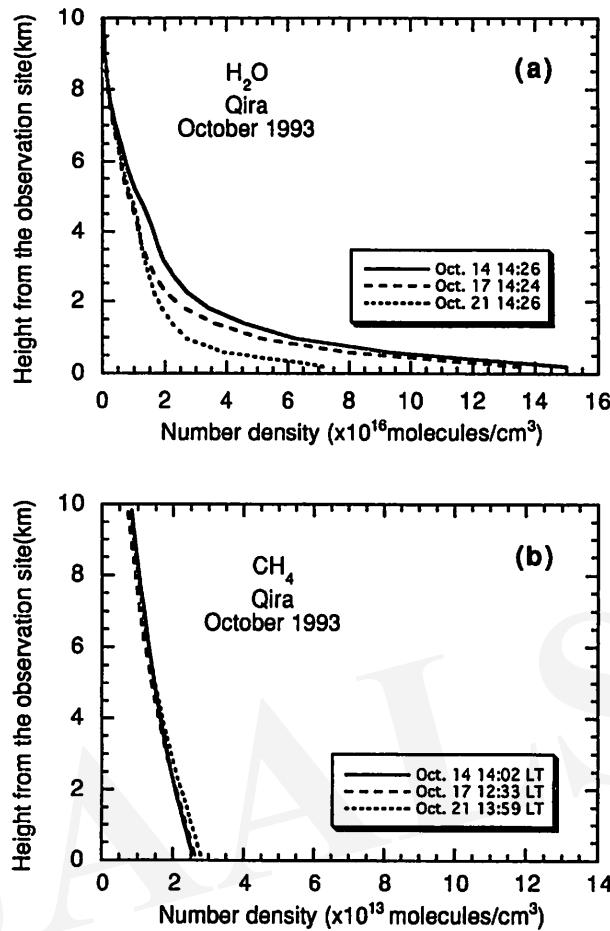


図10. 策勒における観測期間中の代表的3日間のTERSEによる大気中の(a)水蒸気及び(b)メタンの鉛直分布。単位は分子の数密度、高度は観測地点(1,380m)からの高さ。

(1991)と同じ装置を用いた。測定結果は表1に示すように山岳域のS1で1.84ppmv、沙漠域のS2と策勒で共に1.80ppmvとなった。やはり山岳域の植生がメタンの発生源になっていた可能性が高い。TERSEによるメタンの観測とは約1年の差があるが、メタンが鉛直方向によく混合された気体であること、山岳域を含むこの地域全体のメタン発生源としての植生は弱いものであること、サンプリングによるメタン濃度の場所による差が0.04ppmv(2%)であることなどを考慮すると、前述したTERSEのメタンの気柱量に対する測定精度(10%以下)から見て、TERSEによって日変化が検知できなくても不思議なことではない。また、シベリアの湿地帯からメタンが輸送されて、その濃度が変動する可能性についても、その変動があったとしても結果から見てTERSEの測定精度以下であったと解釈できる。特に、気柱量にして見た場合、この地域におけるメタン濃度の変動量は

TERSEの精度に比べ十分に小さいと思われる。このことから図8(a)に示したメタン気柱量の短時間での変動、例えば10月13日の最初のデータや10月20日の最後のデータなどは明らかにおかしい。さらに、TERSEによるメタンの鉛直分布から読みとった地上の測定値、 $2.7 \times 10^{13} \text{ 個}/\text{cm}^3$ (図10(b))は混合比になおすと1.22ppmvである。これは策勒におけるエアサンプリングによる実測値1.80ppmvに比べると32%も少ない。TERSEとサンプリングの測定年の違い、季節の違いを考えてもこの差は大きすぎる。このことからTERSEによるメタン測定には、何か系統的な誤差が含まれていると言わざるを得ない。その原因として考えられるのは、メタンを選択するためのブロッキングフィルターが完全ではないため、不必要的波長域における光の漏れが存在することである。このような場合、ブロッキングフィルターにおける光の漏れは迷光と同じ働きをし、メタンの吸収線は相対的に

浅くなる。このため、メタン濃度は過小評価される。迷光の効果を取り入れたシミュレーションによると、15%の迷光があったとき、メタン濃度は約30%過小評価されることがわかった。後に実験室でブロッキングフィルターを測定した結果、不完全な透過特性を持っていることが確認された。ただし、このようなフィルターは取り付ける角度や位置、エタロンなど他のフィルターとの関係によって特性が変化するため、TERSEシステムとしての迷光の効果が15%だったかどうかという点については、さらに検討をする。

このようにメタンの絶対値に関しては過小評価という問題が残った。また、沙漠域におけるメタンの変動は、局地的な循環及びスケールの大きな変動に対しても共に小さい可能性があり、TERSEの測定値が相対値として信頼できたとしても、検知できない大きさであったと考えられる。

#### 4.まとめ

中国タクラマカン沙漠において、1992年10月に水蒸気の遠隔測定、1993年10月に水蒸気とメタンの遠隔測定、1994年9月にメタンのエアサンプリングを行なった。遠隔測定に用いた測器は、太陽直達光の近赤外域における気体による吸収線を高分解分光測定する放射計TERSEである。1992年10月の和田におけるTERSEによる水蒸気の観測結果を和田気象台の高層気象観測データと比較した結果、TERSEによる水蒸気の観測はゾンデに対して条件のよいときでは、鉛直分布で10~30%、可降水量では10%の差で求まることがわかった。1993年10月の策勒におけるTERSEによる水蒸気とメタンの観測では、日変化についてはその特徴を見出すには至らなかったものの、9日間の観測期間中の水蒸気の減少を捉えることができた。特に、その減少は2km以下の対流圈下層で起こっており、過去の全球観察解析データを用いた研究結果と一致するものであった。また、この減少は吉野(1991a, b)や鬼頭ほか(1993)が指摘している大きなスケールでの水蒸気輸送の変動に伴うものであると考えられる。

一方、TERSEによるメタンの観測では、観測期間中の変化傾向は認められなかった。TERSEによるメタン濃度を検証するため、1994年9月にタ克拉マカン沙漠付近の山岳域、策勒、沙漠内部の3地点においてメタンのエアサンプリングを行った。その結果、3地点のメタン濃度は1.80~1.84ppmvで、山岳域が他の2地点よりわずかに高い値を示した。この濃度差はTERSEの精度から考えて検知できない大きさであると考えられる。また、TERSEによるメタン濃度の絶対値はエアサンプリ

ングによる値よりも30%以上過小評価されていた。その原因としてTERSEに用いたメタンを選択するためのブロッキングフィルターが不完全であったため、不必要的波長域における光の漏れが存在した可能性が大きい。この点に関してはさらに検討する必要がある。最終的には気柱量で気塊の入れ替わりによるメタン変動が検知できる精度(数%)を目標にTERSEの改良を計るべきである。

以上よりTERSEによるタ克拉マカン沙漠での水蒸気及びメタンの遠隔測定は、精度に関してはまだ問題が残るもの、大きなスケールの気体の変動を把握する上では有効な測器と考えられる。特に、鉛直分布が精度よく求めれば、より細かな大気の構造を明らかにできると考えられる。沙漠での光学観測は極端な乾燥、大気中の砂、電源事情の悪さなど不利な条件が多いが、反対に晴天率が高いという有利な要素もある。TERSEは水蒸気やメタンだけでなく、炭酸ガスやHDOなどの測定も可能なため、将来衛星に搭載された場合には大変期待できる測器である。今後、発生源の異なる複数の気体を測定することにより、沙漠域の大気の流れが明らかになると期待される。

#### 謝 辞

本研究は平成1年~6年度の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」の一環として行なったものであり、本研究の主任研究者であった福岡管区気象台、藤谷徳之助博士に深くお礼申し上げます。また、現地調査に同行していただいた気象研究所の三上正男博士、東京水産大学の長島秀樹博士、理化学研究所の橋内徳司氏、山田 豊氏、米田 児氏、並びに現地観測に協力していただいた中国科学院、新疆生物土壤沙漠研究所及び同研究所、策勒研究站の所員各位に深く感謝致します。

#### 引 用 文 献

- 青木忠生・深堀正志・青木輝夫(1990)：水蒸気鉛直分布遠隔測定装置の開発、「リモートセンシング学会講演論文集」10: 37-40.
- 青木忠生・深堀正志・青木輝夫(1992)：大気分光観測による対流圈気体分布の算出、「第3回大気化学シンポジウム講演集」: 126-129.
- 張家宝・邓子風(1987)：『新疆降水概論』気象出版社.
- 廣田道夫・青木輝夫・牧野行雄・村山昌平(1991)：東京-昭和基地間ににおける大気中メタン濃度、「日本化学会誌」5: 358-360.
- 気象庁(1995)：『高層気象観測指針』気象庁.
- 鬼頭昭雄・山崎孝治・時岡達志(1993)：観測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.
- 国家気象局北京気象中心気候資料室編(1986)：『中国気温降水変率図集』気象出版社.
- 三上正男・藤谷徳之助・張希明(1995)：中国タ克拉マカン沙漠における気象要素の長期変動、「沙漠研究」4: 103-117.

- 村山信彦 (1983) : 「これから気象観測」 気象学のプロムナード 12, 東京堂出版。
- 長島秀樹・趙景峰・岡崎守良・李崇舜・夏訓誠 (1991) : タクラマカン沙漠における気象要素と砂面変動の自動観測—チーラでの1990年10月～1991年3月の観測から—。「沙漠研究」 1: 61-66.
- 新疆地理学会編 (1993) : 「新疆地理手帳」 新疆人民出版社。
- 吉野正敏 (1991a) : 新疆の沙漠地域の風と雨。 「沙漠研究」 1: 1-15.
- 吉野正敏 (1991b) : 「中国の乾燥地域と半乾燥地域の気候—特に沙漠化機構に関連した既存資料の調査(1)」 77p.
- AOKI, T., FUKABORI, M. and AOKI, T. (1993) : Trace gas remote sounding from near IR sun glint observation with tunable etalons. In CHEDIN, A., CHAINE, M.T. and SCOTT, N.A. eds., *High Spectral Resolution Infrared Remote Sensing for Earth's Weather and Climate Studies*, Springer-Verlag, 309-322.
- ASELMANN, I. and CRUTZEN, P.J. (1989) : Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions. *J. Atmos. Chem.*, 8: 307-358.
- MATTHEWS, E. and FUNG, I. (1987) : Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochem. Cycles*, 1: 61-86.
- MIKAMI, M., FUJITANI, T. and ZHANG, X. (1995) : Basic characteristics of meteorological elements and observed local wind circulation in Taklimakan Desert, China. *J. Meteor. Soc. Japan*, 73: 899-908.
- YATAGAI, A. and YASUNARI, T. (1995) : Interannual variations of summer precipitation in the arid / semi-arid regions in China and Mongolia: Their regionality and relation to the Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 73: 909-923.
- WANG, J. and MITSUDA, Y. (1990) : Peculiar downward water vapor flux over Gobi Desert in the daytime. *J. Meteor. Soc. Japan*, 68: 399-402.

## Remote Soundings of the Atmospheric Water Vapor and Methane in Taklimakan Desert, China

Teruo AOKI\*, Tadao AOKI\*, Masashi FUKABORI\*, Michio HIROTA\* and Ximing ZHANG\*\*

Remote soundings of the atmospheric water vapor and methane from the ground have been made with the use of TERSE (Tunable Etalon Remote Sounder for the Environment) in Hotan and Qira, Taklimakan desert of China in Octobers, 1992 and 1993. TERSE is a kind of spectrometer which scans the absorption lines of water vapor and methane in the direct solar radiation with a tunable etalon and gives the spectral information. These spectral informations are, in turn, converted to the vertical profiles of water vapor and methane by the maximum likelihood retrieval. The vertical profile of water vapor and the precipitable water observed by TERSE in Hotan in October, 1992 are compared with the data of radio sonde observed by Hotan observatory. The accuracy of TERSE was 10-30% for vertical profile and 10% for precipitable water. Although the characteristics of diurnal variations of water vapor and methane observed by TERSE in Qira in October, 1993 could not be found, the reduction of water vapor in a 9-day observation period was observed. Its reduction was mainly made in the lower troposphere below 1.5 km. It is consistent with the past research result of the global objective analysis data. This reduction of water vapor is considered to be the result of a variation of large-scale water vapor transportation. On the other hand, the column amount of methane observed by TERSE did not vary in a 9-day observation period. In order to verify the concentration of methane observed by TERSE, air samplings for methane have been made at three sites in the Kunlun mountain area, inner desert area and Qira. The result was 1.84 ppmv for the site in the Kunlun mountain area and 1.80 ppmv both for the other two sites. These differences of methane concentrations in three sites cannot be detected by TERSE from the viewpoint of accuracy of TERSE. Furthermore, the absolute amounts of methane observed by TERSE were underestimated over 30% from those by air samplings. There is a possibility that this is due to the use of incomplete blocking filter for methane in TERSE.

**Key Words:** Taklimakan Desert, Water vapor, Methane, Remote sounding, TERSE

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

\*\* Xinjiang Institute of Biology, Pedology and Desert Research, 40 South Beijing Road, Urumqi, Xinjiang 830011, China.

(Received July 16, 1996; Accepted October 14, 1996)

## 特集 第6回沙漠工学講演会講演要旨集

日本沙漠学会沙漠工学分科会\*

### 概要

本稿は、日本沙漠学会沙漠工学分科会主催で行われた第6回講演会の講演内容をプログラムとともにまとめて示したものである。また、昨年度、日本沙漠学会主催で富士本栖湖ホテルにて開催された国際会議“Desert Technology III”（10月15日～20日）のプレ会議のイベントとして開催された第5回講演会の内容についても述べる。

第5回講演会は、1995年7月20日、理化学研究所鈴木梅太郎記念ホールにて開催された。演者と演題は、吉川友章氏（気象庁気象研究所）「黄砂と日本海側山岳地帯の降雪」、安部征雄氏（筑波大学農林工学系）「内陸オーストラリアの土地利用の現状と問題点」、森正次氏（日商岩井物資紙パルプ部）「植林と地域特性について」であった。吉川氏は前回第4回講演会の講演予定者であったが、都合で講演できなかったものを、この第5回講演会で行った。講演内容は沙漠研究 Vol. 4, No. 2 の第4回沙漠工学講演会講演要旨集に掲載されている。安部、森両氏の講演については本誌編集の都合上、要旨を掲載できなかった。機会をみて論文などの形で公表願えればと期待したい。

第6回講演会は、1996年10月17日理化学研究所大河内記念ホールにおいて開催された。講演プログラムは以下に示すとおり近未来の乾燥地域の役割や状況に関する極めて興味深い内容であった。しかし、たまたま当日、農用地整備公団の砂漠化防止シンポジウムの開催と重複してしまい、日程の調整ができなかったため、当講演会への参加者が極めて少なかった。万全の準備で臨んでいたいたい講演者の先生方には拍子抜けの気分を味わわせてしまい、会の持ち方に慎重を期すこと、イベントに関する情報の交換を密にすることなどの必要性を痛感することとなった。

本分科会の現在の主な活動としては、1997年9月オーストラリアのカルガリーで開催される“Desert Technology IV”への参加準備と乾燥地に関する教科書を目指した『沙漠工学』（森北出版）の刊行がある。これらに関する情報は「沙漠研究」や「おあしす」誌上で逐一報告する予定であるので、興味のある方は注目していただきたい。

（文責：安部征雄）

### プログラム

- 14:00-14:10 開会挨拶：沙漠工学分科会長 遠藤 炎  
(理化学研究所)
- 14:10-15:10 講演I：乾燥地における生物的CO<sub>2</sub>固定法の位置づけ：榎 啓二・  
山田興一（東京大学工学部）
- 15:30-16:50 講演II：乾燥地における排水処理と処理水再利用：尾崎益雄（前橋市立工業短期大学建設工学科）
- 16:50-17:50 講演III：砂漠の交通機関としての電気自動車の可能性：清水 浩  
(国立環境研究所地球環境研究グループ)
- 17:50-18:00 閉会挨拶：沙漠工学分科会副会長 小島紀徳（成蹊大学工学部）

**Special Report**  
**Proceedings of Sixth Symposium on Arid Land Technology**

The Japanese Research Group for Arid Land Technology.\*

This special report is the proceedings of the sixth symposium of The Japanese Research Group for Arid Land Technology held at Riken, Wako, Saitama, on October 17, 1996.

The first lecture was a general topic given by Professors Keiji SAKAKI and Koichi YAMADA, the University of Tokyo, on "Position of Biological CO<sub>2</sub> Fixation in Arid Land".

The second lecture was a sample of case study given by Professor Masuo OZAKI, Maebashi City College of Technology, on "Waste Water Treatment and Recycling Use in Arid Land".

The last lecture was given by Dr. Hiroshi SHIMIZU, National Institute for Environmental Research, on "The Possibility of Electric Vehicles as Transport Facilities in Desert".

JAALS

---

\* c/o The Japanese Association for Arid Land Studies. The Institute of Physical and Chemical Research, 2-28-8 Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan.

# I. 乾燥地における生物的 CO<sub>2</sub> 固定法の位置づけ

榎 啓二・山田興一・

## I. Position of Biological CO<sub>2</sub> Fixation in Arid Land

Keiji SAKAKI\* and Koichi YAMADA\*

### 1. はじめに

現在、化石燃料の使用による CO<sub>2</sub> 放出は炭素換算で年間約 60 億トンに達し、地球温暖化の最大要因となっている。地球温暖化は地球規模の気候変動や海面上昇を引き起こし、もし何らかの対策を施さなければ、近い将来に人類の生産活動ひいてはその存続に大打撃を及ぼしえることが予測されている。そのため、CO<sub>2</sub> 固定法の研究が精力的に行なわれるようになり、今までに、地中や海洋への物理的貯留、生態系を利用した固定法等の基礎的・応用的研究開発が進められてきた。

陸地の 1/3 を占めさらに拡大を続けている乾燥地を炭素固定の場として利用できるならば、それは人類にとって最良のプロジェクトになろう。実際に沙漠の緑化を目的として、バイオ技術、土壤改良技術、造水技術等の開発が進められ、エネルギー、コストを考えないならば、沙漠緑化は既に実現可能な技術レベルに達している。現在の工学的な課題は、投入エネルギー、コストの削減と大規模化であり、いわゆる持続可能な植林、緑化の実現である。

平成 7 年度に化学工学会では十数人からなる委員会を発足し、NEDO の委託調査「生物的 CO<sub>2</sub> 固定に関する調査」を行なった。調査目的は、生物的 CO<sub>2</sub> 固定のための様々な対策法を調査し、その可能性を固定機構、規模、環境影響などの面から総合的に検討し、定量的な評価を行なおうとするものである。今回の報告では、その調査で得られた結果を紹介するが、主に生物的 CO<sub>2</sub> 固定法の特徴、植林技術、バイオマスエネルギー変換技術、乾燥地の植林のための要素技術について説明する。

### 2. 生物的 CO<sub>2</sub> 固定法

#### 1) 特 徴

生物的 CO<sub>2</sub> 固定法は、植物の持つ光合成機能を利用して、大気中の CO<sub>2</sub> を有機物に変換するもので、太陽エネルギーの固定とも言える。エネルギーの変換効率は太陽電池の 15% と比べると小さく、成熟した森林では 1% 程度と言われている。作られた有機物の 3/4 は呼吸に利用されるため正味の生産は 1/4 になり、その結果 CO<sub>2</sub> 固定のためには膨大な面積が必要になる。しかし植林が自立し得る場所ならば、設備コストは少なくなり、投入エネルギーも植林、肥料、伐採、運搬に要するくらいとなる。生産された有機物の用途は食糧、材木など植物種によって様々であるが、実質的な CO<sub>2</sub> 固定となるためには、そのまま長期的に保持されるか化石燃料代替エネルギーとして利用される必要があり、食糧として利用され短期間で CO<sub>2</sub> に戻る場合は、眞の意味の固定とはならない。また、植生は地域の土壤、気候に依存しており、適した栽培種は限られてくる。

以上に述べた特徴は、陸上生態系利用の CO<sub>2</sub> 固定についてのものであり、海洋生態系利用の固定法は異なる固定機構と特徴を持っている。以下、陸上生態系と海洋生態系に分け、それらの定量的な評価の結果を紹介する。

#### 2) 陸上生態系利用の CO<sub>2</sub> 固定

表 1 に陸上生態系の炭素現存量、純生産速度を示す。森林の純生産速度自体は、大気中に放出されている CO<sub>2</sub> 量を吸収するだけの能力を持っている。しかし、成熟した森林では生産された有機物のほとんどが分解されてしまうため、CO<sub>2</sub> の吸収源としては大きくなない。また、農地は食糧生産の場であり、CO<sub>2</sub> の固定場所としての利用は難しい。沙漠や半乾燥地での植林は水の供給がネックとなり、地下水脈が近くにあるような地域でない限り、持続可能な植林は現時点では困難である。従って植林可能な土地は、従来森林であって、現在裸地や灌木帯となっている場所が適当と考えられ、世界で 16-17 億 ha あると見積もられている。自立の可能性、現地の技術レベル、

\* 東京大学工学部、〒113 東京都文京区本郷 7-3-1 Tel. 03-3812-2111 (7751)

\* Faculty of Engineering, the University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan.

表1. 陸上生態系の面積、炭素現存量、純生産速度。

	面 積 (億 ha)	現 存 量 (億 ton-C)	純生産速度 (億 ton-C/y)
熱帯林	18	2,200-2,500	97-146
温帯林	12	800-1,400	38-77
針葉樹林	11-13	900-1,500	32-45
熱帯草原	13	19.5	
温帯草原	9	22.5	
低木林	8	24	
砂漠+半乾燥地	45		
農地	14	(2-55ton/ha)	42

表2. 海洋生態系の炭素現存量、純生産速度。

	面 積 (億 ha)	現 存 量 (億 ton-C)	純生産速度 (億 ton-C/y)
外洋域	332	4.5	430+280
大陸棚	27	1.2	
河口	1.4	6.3	(マイナス)
藻原サンゴ礁	2.0	5.4	~61
湧昇域	0.4	0.04	

土地制度等を考慮すると、面積はもっと限られ、2億ha以下と推定されている(SUGIYAMA *et al.*, 1995)。

植林技術としては、ブラジル等で行なわれているユーカリ植林が進んでおり、商業的に採算の採れるレベルに達している。ユーカリの森林の純生産速度は、樹種にも依るが約10ton-C/ha y程度である。従って、可能面積全てに植林した場合、定常的に20億ton-C/y程度が固定されることになる。ただし、FAOの調査によると、可能な植林速度は1,000万ha/yであり、2億haの植林には最低でも20年かかることになる。

陸上生態系の場合、一番の問題点は土地の確保であると思われる。地球人口の増大を考えると、食糧生産の場としての土地の利用が優先されるであろう。土地の確保という観点では、乾燥地の利用は大きな魅力と可能性を持っている。

### 3) 海洋生態系利用のCO<sub>2</sub>固定

表2に海洋生態系の炭素現存量と生産速度を示す。海洋生態系は面積が広い割に現存量が少なく、陸上植物の1%にも満たない。ただし、純生産速度が大きいため、大気中に放出されているCO<sub>2</sub>量を吸収するだけの能力を持っている。その固定機構を図1に示すが、光合成プランクトンによって生産された有機物は食物連鎖に入り、一部は再びCO<sub>2</sub>として大気中に戻るが、一部は粒子となり中深層中に沈降する。そこで大部分が分解され無機炭酸となるが、深層水は表面に出てくるまで100年以上かかるので、長期的な炭素固定と言える。ただし、海洋

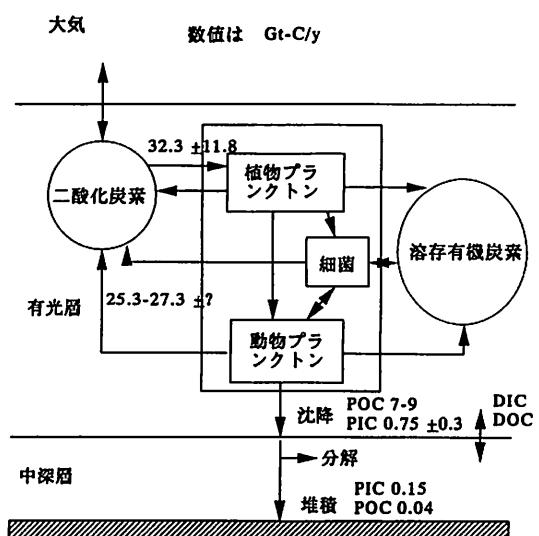


図1. 海洋生態系の炭素循環。

生物の純生産速度については研究者によってバラツキが大きく、図に示した循環炭素量も定量的には意見が一致していないのが現状である。

海洋生態系を利用したCO<sub>2</sub>固定法の概念は次の通りである。外洋の表面領域は栄養塩状態にあるため、窒素、リンの施肥によって光合成を活性化し、結果として中深層に沈降する有機物粒子を増大しようとするものである。また、微量栄養素として鉄が重要であるとの報告がMARTINによって行なわれ、実際に鉄の散布の影響が実地調査された。プランクトンの増殖は確認されたものの、生態系が乱されるため、結果としてCO<sub>2</sub>の固定となるかどうかについては不明確である。委員が試算した結果を示すと、栄養塩の豊富な南極海湧昇域に日本から輸送した塩化鉄を散布した場合、鉄が12~77万ton/yで0.12~0.85億ton-C/yの固定となる。コストは、100~2,000円/ton-Cで、これは火力発電所から放出されるCO<sub>2</sub>を分離して海洋投棄する場合のコストよりも1~2桁小さい。また、窒素、リンを海洋施肥する場合も、肥料製造エネルギーはCO<sub>2</sub>放出に対して1割程度のエネルギーに収まることから、炭素の実質固定になることが分かる。しかし、海洋生態系については不明な点が多く、計算通りCO<sub>2</sub>固定が促進されるのか、生態系への悪影響はないのか、等の解明が今後の課題である。

### 3. バイオマスエネルギー

発展途上国では、バイオマスは暖房用、調理用の有力なエネルギー源になっている。林産資源、農産廃棄物、

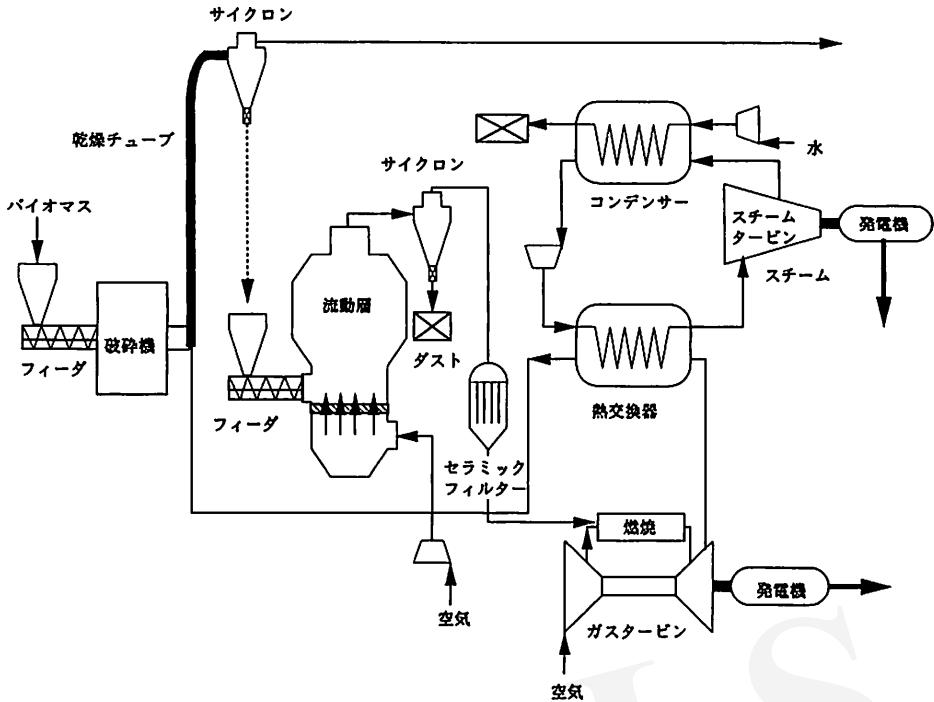


図 2. GCC プロセスフロー図.

表 3. バイオマス発電、太陽光発電の比較.

	バイオマス GCC	太陽光発電	
		屋根置き型	蓄電池型
面積当たり発電量 (GWh/km <sup>2</sup> y)	1.3	147	128
EPT (d)	32	179	402
CO <sub>2</sub> 放出 (g-C/kWh)	2	5	15
発電コスト (¥/kWh)	3-7	18	32

エネルギー作物などが挙げられるが、直接燃焼するか、メタン醸酵やエタノール醸酵によって使いやすい形に変換して用いる。ここでは、電力への変換技術の一例を紹介する。近年、バイオマスのガス化と複合サイクル発電を組み合わせた発電方式（GCC: gasification-combined cycle）が注目されているが、そのフロー図を図2に示す。チップにしたバイオマスは排ガスによって乾燥され、さらに流動層中で空気によってガス化される。燃焼ガスはガスタービンに導入され、排出ガスの熱はさらにスチームタービンによって回収される。

タイにユーカリをプランテーションし GCC 発電を行なった場合の計算例を以下に示す (YAMADA, 1996)。ユーカリの燃焼熱は 16.7 MJ/kg、成長速度は 12.5 dry-ton /ha y とし、10 年サイクルで収穫するものとする。発電規模 100MW、発電効率 30.5%、土地の使用料 ¥24,000

/ha y、賃金 ¥1,500/d man、年間経費を投資額の 12%、運転のエネルギーを 210GJ/d として、エネルギー・ペイ・バックタイム (EPT)、コスト、CO<sub>2</sub> 放出量を計算した。その結果を表3に示す。また、参考のため、太陽電池での計算結果も合わせて示した。バイオマス発電は、太陽エネルギーの変換効率が太陽電池よりも小さいため、同じ電力を得るために 100 倍の面積が必要になる。しかし、EPT、コスト、CO<sub>2</sub> 放出量の点では、太陽電池よりも優れている。また石炭火力発電の CO<sub>2</sub> 放出量は 250g-C/kWh であり、バイオマス発電ではその 1/100 に削減できる。

#### 4. 乾燥地における CO<sub>2</sub> 固定

乾燥地域の緑化技術は、ある程度まで確立していると言える。実際に、サウジアラビア等の中東諸国では、大規模な沙漠緑化プロジェクトが進められている。しかし CO<sub>2</sub> 固定の観点では、乾燥地における大規模で持続可能な植林、緑化には解決すべき点が多い。一番の問題は水の供給であるが、灌漑によって水を供給するのは現実的ではなく、樹木の長期的生育に利用できるような地下水脈が必要である。さらに、土壤の改善、塩類の除去、耐乾、耐塞性の植物の開発が望まれる。本章では、乾燥地での持続可能な CO<sub>2</sub> 固定を可能にする要素技術について

て説明する。

#### 1) 塩類化の防止技術と除塩技術

塩類集積は蒸発に伴う土壤溶液の上昇移動によって生じるが、その予防には、地下排水システムを用いて土壤溶液を排水し地下水位上昇を防ぐ方法、土壤表面をマルチングして蒸発を抑える方法がある。ただし排水施設の費用やマルチングの規模の面で問題がある。集積した塩類の除去には、灌水によって下層へ移動させるリーチング法がある。しかし、乾燥地では用水の確保が難しく、また塩類の再集積が生じやすい。そこで考えられているのは、塩類を捕集するシートを土壤表面に敷設して上昇してくる塩類を除去しようとするものである。

#### 2) 土壤管理

乾燥地では、土壤水分をいかに土中に取り入れ保持するかが、最も重要な問題である。高分子ポリマーのような保水剤の利用も考えられているが、乾燥地は降雨の絶対量が少なく集中的に降る場合が多いことから、水を貯留し保持する方法の開発が重要である。灌溉における水の利用率の向上も必要である。河川水や貯留水が圃場まで到達して利用されるのは40%弱と言われており、蒸発や水路からの浸出を防ぐための地下灌水方式などのシステム改良が考えられている。

#### 3) 造水技術

海水や塩分の高い地下水の淡水化法として幾つかのプロセスが開発されているが、中東沿岸諸国で稼働しているものの97%は多段フラッシュ蒸留法である。これは、多段フラッシュ蒸留が大規模プラントに適しているためと思われるが、膜を用いる逆浸透法の方が消費エネルギーは小さくなる。淡水1トン当たりの消費エネルギーは、多段フラッシュ蒸留が51kWh要するのに対し、逆浸透法では8.8kWhと一桁小さくなる。最近、凍結淡水化法が研究されているが、この方法では淡水1トン当たり19kWh要する。エネルギー的には逆浸透法より劣るが、このシステムは冰蓄熱装置でもあり、空調のエネルギーまで加味した場合メリットが出てくる。

#### 4) 耐乾、耐塩性のバイオテクノロジー

耐乾、耐塩性植物の創出には多段階のアプローチが必要である。まず、遺伝子レベルでの耐乾、耐塩性機構の

解明、さらに遺伝子のクローニングと対象植物への導入、大量培養後の順化と栽培である。耐乾、耐塩性の機構については、多くの知見が集積されるようになっているが、実用化に向けての研究には、まだ見るべき成果が得られていない。しかしながら、乾燥、塩類集積に悩む諸国では、日本や他の先進諸国のハイテクバイオ技術に期待する所は大きい。

#### 5) 水循環の制御

ここでの水循環とは、局所気候レベルの規模のことであり、人工的に雨を降らすことが可能かどうかというものである。降雨のためには、水分の蒸発、上昇気流、凝結核の存在が最低限必要であるが、さらに地表面の湿潤度、光線の反射能、地形などの条件が関係する。気象モデルによるシミュレーションを行ない、どの地域でいかなる処置を施せば、降雨量が増大するかを見積もる。森林自体も周囲の気温や湿度に影響を及ぼすことが知られており、例えば人工の浅瀬を海岸に構築して蒸発皿を増やし、森林と雲の間での水循環を補うことができれば、森林が自立し得る可能性がある。現状のシミュレーションは境界条件も単純化されたもので、小さなメッシュでの議論は難しく定量的な評価は出来ていないが、実現したならば大規模で持続可能な植林のための強力な武器となり得る。

#### 5. おわりに

現在の技術では、乾燥地を持続可能で大規模な生物的CO<sub>2</sub>固定の場と変えることは難しい。しかし、将来の人口増加を考えると、自立的に植物が生育し得るような土地は食糧生産の場に利用されるであろうから、近い将来、乾燥地利用法の研究開発が必要とされるのは間違いない。長期的な観点で地球温暖化を捉えるとともに、生物的および物理的CO<sub>2</sub>固定法の位置づけが必要であろう。

#### 参考文献

- SUGIYAMA, H., SAIKI, H., WATANABE, Y., NAKASONO, S. and FUJINO, J. (1995): プランテーションによるバイオマスエネルギーの生産に関する調査. 「電力中央研究所報告」Y95005.
- YAMADA, K. (1996): Importance of renewable energy. *Proceedings of International Symposium on Global Environment, Univ. of Tokyo*: 8-22.

## II. 乾燥地における排水処理と処理水再利用

尾崎 益雄\*

### II. Waste Water Treatment and Recycling Use in Arid Land

Masuo OZAKI\*

#### 1. はじめに

「沙漠でボートあそびをしよう!」「ボートの上から淡水魚を釣ろう!」「沙漠でとれたての野菜を食べよう!」。私の研究室に卒業研究のために配属になった学生に、最初に言う言葉である。その時の学生の反応は、「何を言い出だしたのか?」「この先生、だいじょうぶだろうか?」「排水処理や水環境の勉強をしにきたのに、沙漠だってなんなんだ?」。都市生活排水の処理をテーマとしてきた私が、かつて「沙漠」と聞いて「東京沙漠」ならばわかるけれども、「どうも関連性がないな」と感じたのと同じように、学生も水環境と沙漠は無縁だと思っている。いわんや排水処理なんて、と最近まで私も思っていた。本日このような機会を作っていただき、下水処理屋が話をさせていただけるなどということは、2~3年前には考えてもみなかったことである。

昨年開催された International Conference of Desert Technology IIIにおいて、沙漠工学分科会水グループの一員として、沙漠開発の可能性に関する研究 (OZAKI et al., 1995) について発表した。そのなかで、沙漠開発を考えるときに沙漠の真ん中に新たな都市を形成することも良いが、既に乾燥地域に点在する都市周辺部の沙漠化防止とその都市を沙漠開発のための拠点化することを、優先することを提案した。下水処理屋としては、生活排水が出てこないと立場がないので、本日もこの提案に拘って話を進めさせていただく。しかし、沙漠の真ん中に新都市を建設する場合においても、そこからは生活排水が排出することになるので、その場合にも対応可能と考える。

オーストラリアの西オーストラリア州東部に位置するカルグーリ市は、私の立場からみて排水処理と再利用を検討するに最も適した都市と言える。したがって、この都市を例に取り沙漠工学における排水処理と再利用の問

題を検討していく。

#### 2. 乾燥地の都市の水問題

乾燥地・沙漠の水問題の第1番に挙げるのは、降水量の不足による水資源問題である。給水量の増加が得られれば、沙漠化防止や沙漠開発の大きな進展が見られ、生産性を増すことができる地域が多い。地下水源の開発や、湿润地帯や水源となるオアシスからのパイプラインや地下水管による淡水輸送等の技術が用いられ、給水量の確保が行なわれている。また、海水の淡水化や塩分濃度の高い地下水の除塩による用水取得も行なわれている。さらには、大気中の水分固定まで試みられている。排水再利用技術も水源確保と供給量の増加のために、乾燥地や沙漠だけでなく今まで十分な水源があるとされている地域でも、必要とされ実施されている技術である。

2番目に挙げるのは、乾燥地・沙漠には河川がないことである。当然のことではあるが、水処理の立場からみると、海という地球上の最大浄化槽に放流する手段がないことになり、問題は大きい。塩類濃度の高い地下水を持つ地域では、水資源が得られても排水の最終処理工事が成立しなければ、塩類集積を生じて農業生産性等を上げることができない。したがって、どのような水循環を作成するかが問題となる。

3番目には水面蒸発量が大きいことが挙げられる。排水処理と処理水再利用の面からは、これは利点と不利点を合わせ持っている。制御の仕方に問題が多い。

4番目として、地球環境における都市排水の問題がある。私たちは現在地球規模の問題として沙漠を考えている。その時に、沙漠・乾燥地の問題だけに限定して都市の水問題を考えることはできない。「後始末」を考慮することが重要になる。

\* 前橋市立工業短期大学建設工学科。〒371 前橋市上佐鳥町460 Tel. 0272-65-0111

\* Maebashi City College of Technology, 460 Kamisadori, Maebashi, Gunma 371, Japan.

### 3. カルグーリの現状

1997年にDesert Technology IVが開催されるカルグーリは、図1に示すように、オーストラリアの乾燥地の東端に位置する。金とニッケルを産出し、それと郊外での羊の放牧が経済を支えている。人口は30,000人であるが、金とニッケルの埋蔵量は無限ではなく、羊の放牧可能地は徐々に都市部から離れ、畜産後継者の不足が心配されている。

年間平均降水量は250mmで、年間平均水面蒸発量は3,000mmである。降雨は集中的に降り、数回の降雨で年間平均降水量に達する。地下水は塩分濃度が高く、そのままでは利用できない。したがって、水資源には極めて乏しい。

現在、都市用水の供給は、600km離れたバース近郊の貯水池を水源としたパイプライン輸送に頼っている。現状以上のパイプラインシステムによる淡水供給は、バース近郊の降水量、貯水池の容量、パイプライン改修又は新設コストの問題等多数の制限があり困難になっている。図2には、この都市の用排水の流れと簡単な収支を示す。パイプラインによる1日当たりの供給水量には、夏季で45,000kL、冬季には8,000kLと大きな違いがある。しかし、下水排水の処理量は1日当たり6,300kLとほぼ一定である。処理水の再利用率は17%で、運動施設の芝の管理や道路の緑化に使われている。

下水排水の処理方式は酸化池方式が採用されている。この方式は処理時間が長いので、大きな処理のための池が必要である。処理時間を40日間と見積もっても、水深を1.2mとして210,000m<sup>2</sup>程の水面積が必要となる。1日当たりの下水排水流入によるこの池の水位上昇は30mmとなるが、年間平均水面蒸発量から1日当たり

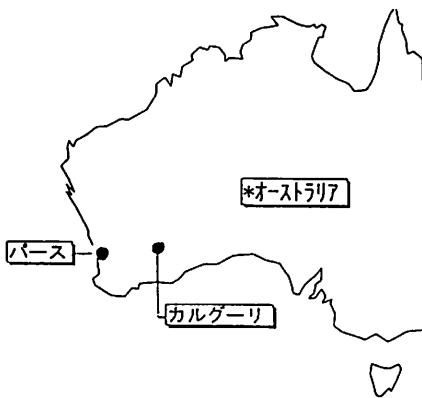


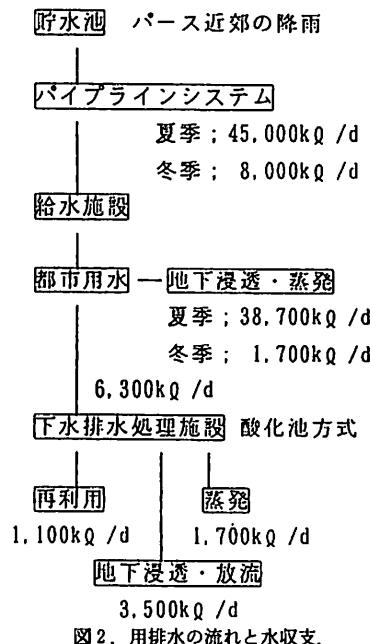
図1. カルグーリの位置。

の蒸発による水面低下量を試算すれば8.2mmとなり、流入下水排水量の27%が蒸発処理されることになる。これは、8,000人を超える人口の下水排出量に相当する。

図3は、西オーストラリア州の平均的な家庭の年間を平均した水使用状況を示すもの(PYLE, 1995)である。1日当たりの水使用水量は890Lであるが、屋外の使用量が42%と大きい。トイレの使用水量と灌漑用水量を合わせると57%となるが、これらは飲料水に相当する水質を持つ淡水を使用する必要のないものである。したがって、再利用水の需要は十分に見込まれる。

### 4. 再利用を目的としたカルグーリにおける排水処理の条件

パイプライン輸送に頼るカルグーリの水資源は、それによる大きな発展性が望めない。地中海性気候のバース近郊の降水量がこの都市の水資源量を左右する。自給自足が可能となれば問題は解決するが、そのためには地下水利用を考えなければならない。沙漠の真ん中にある観光地エーズロックリゾートでは、膜処理を主体とした地下水の除塩による淡水化を行ない、必要水量を確保している。さらに、下水排水の再利用も行なわれていて、リゾート内の中水道システムが稼動している。技術的には十分可能である。しかし、カルグーリの地下水は比較的浅いところにあるものの季節変動が大きく、その塩分濃度は7,000~120,000mg/Lに達する。膜処理が可能と



しても濃縮塩類の処理をどうするのか問題が残る。自給自足とはいかないが、再利用を促進することによって前述の乾燥地の都市の水問題第1番をクリヤーすることにする。したがって、再利用可能な水質まで排水処理を行なうことになるが、現状では淡水供給をパイプラインシステムに頼ることには変わりない。

パイプラインシステムによって淡水が供給されるならば、どのようにしてカルグーリから排水するかが次の問題となる。前述の水問題第2番を検討しなければならない。河川がないので海に向けての放流は出来ない。地下浸透か蒸発散がその手段となる。土壤の塩類集積を生じる地下浸透は極力避けなければならない。したがって、蒸発散システムをどう構築するか検討を要する。これは前述の水問題第3番を検討することにもなるが、再利用を十分に行ない、その上で蒸発散による最終処理が行なえることが望ましい。現在の処理プロセスである酸化池方式は前述のように、27%の蒸発処理を行なっているので有効であるといえる。しかし蒸発処理の限界を示していることになり、植物による蒸発散を有効に使うことを検討しなければならない。

蒸発散処理を有効に行なうためには、灌漑用水に適した水質に排水処理する必要がある。また、蒸発処理にも期待しなければならないが、その時現在のような酸化池ではなく灌漑用水貯水池としての役割も合わせ持つ蒸発池であって欲しい。そこにボートを浮かべて釣りをして…、

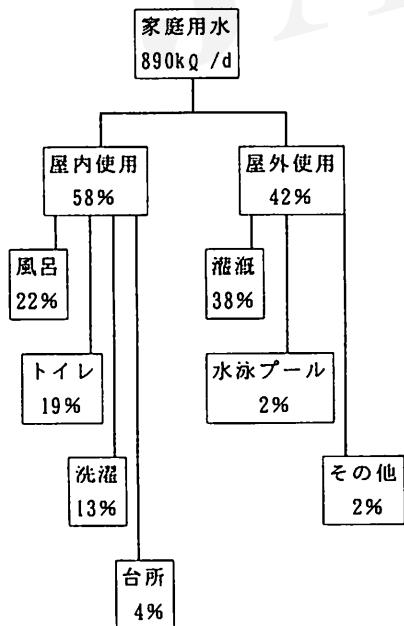


図3. 西オーストラリア州の水使用。  
(PYLE, Fig. 5より)

余剰水で野菜の水耕栽培はどうだろうか。当初に述べた学生への提言につながるものである。

前述の乾燥地の都市の水問題第4番目については、具体的な対策を考慮しているわけではない。乾燥地の条件を工学という立場で変化させるならば、その影響を考えておこうと思うものである。

## 5. カルグーリの下水排水処理と再利用計画

以上の観点から、カルグーリの下水処理プロセスを検討する。下水道の整備はなされているので、排水処理施設と再利用及び最終処理についてまとめたい。

ここで新たに提案する用排水の流れを、図4に示す。下水処理プロセスは多数提案されているが、処理量と安定性を考慮して二次処理として生物処理を選択し、それに高次処理を付加して処理プロセスを構築する。

導入可能な生物処理方式を検討するに当たって、現在オーストラリア国内で用いられている処理プロセスを参

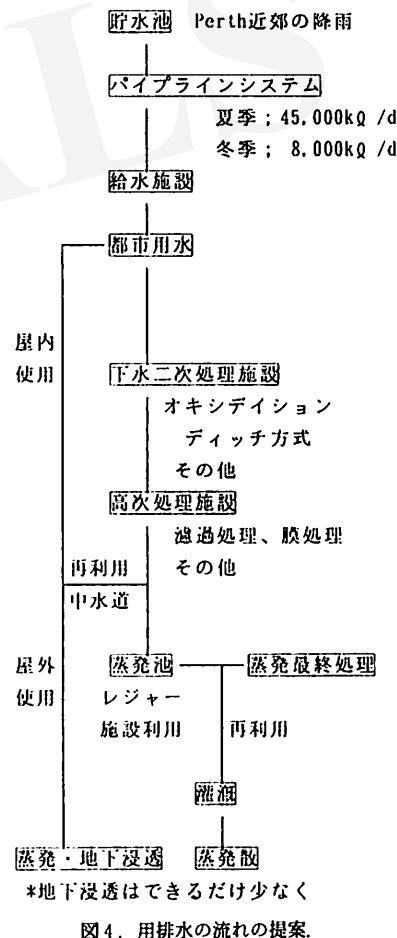


図4. 用排水の流れの提案。

照しよう。そこでは酸化池方式が主流を占めていて、アデレードやバースでは散水濾床方式が併用されている。これらは、実施に際して広い敷地が必要とされるが構造が簡単で管理も容易であることから、オーストラリアには適した処理方式といえる。しかし、乾燥地に適しているかどうか疑問である。前述のエアーズロックリゾートでは、酸化池方式と活性汚泥法を併用して再利用効率を上げている。このことは、カルグーリーでも活性汚泥法が利用できることを示している。

活性汚泥法は酸化池方式に比べてはるかに小さな装置で処理が可能となり、光合成作用が必要ないので地下埋設型や覆蓋設置による蒸発抑制型の装置を作ることができる。ただし、管理は多少複雑になり、運転経費も高くなる。しかし安定した処理を行なうには適した方法である。カルグーリーに適した二次処理プロセスを検討中であるが現在のところ結論はまだ見えず、活性汚泥法の中で最も有効なプロセスを選択するならばオキシディションディッヂ方式になろう。余剰汚泥が発生するが、処理水と共に農地還元による利用が可能となろう。

高次処理方法も多数あるが、エネルギー問題が解決できれば膜処理は有効である。現状では、砂濾過方式を最初に取り上げたい。

再利用システムはトイレおよび屋外使用用の中水道として設置する。中水道の配管は、下水道を使って行なうことも可能である。また、地形の高低差がないので中水道の配水も容易である。さらに、余剰高次処理水は蒸発池に貯水し、農業用灌溉用水として使用すると共に、蒸発池はレジャー施設として使用する。

## 6. おわりに

今年も東京は水不足を心配した。東京都の水は、200km 弱離れた群馬県山間部から利根川を使って輸送してくれる。関東地方の平野部に多量の雨が降っても、群

馬県山間部に降水がなければ、東京都の水資源が不安定になることは度々経験している。地下水の汲み上げはままならない。海水の淡水化を検討しなければならなくなるだろうか。程度の差はあるが、カルグーリーと東京都の水資源に関する状況は本質的には変わらない。それならば、下水処理屋が沙漠工学に首を突っ込む余地は十分にある。キーワードは処理水再利用である。私の住む前橋市を始めとして群馬県の大部分の都市の下水処理水は利根川に放流されており、東京都の皆さんはそれを再利用している。東京都の全ての上水水源が下水処理水ではないが、バース近郊からパイプラインによって淡水が送られてくるカルグーリーの方が、水資源には恵まれているのかもしれない。

水を使うことは水に負荷を加えることである。除荷することによりもとの水がまた使えるようになる。下水処理は、再利用目的にあった水質の処理水を生産することになり、後始末屋だけではなくなってきている。それでは、乾燥地・沙漠に適した下水処理システムとはなんだろうか。さらには中国の乾燥地・沙漠のような低温を考慮しなくてはならない所に適した処理プロセスはなんだろうか。厳しい水環境の中での水処理問題はまだまだ課題が多い。

最後に、このような講演を行なう機会を与えて下さった日本沙漠学会沙漠工学分科会の皆様に、心より感謝申し上げる。

## 引用文献

- OZAKI, M., SATAKE, K., KOKUBU, H., ABE, Y. and OHTSUKA, Y. (1995): Feasibility study and technological requirements for development of arid and semi-arid land in Australia. *J. Arid Land Studies*, 5s: 291-294.  
 PYLE, A.J.P. (1995): Human water use in arid and semi arid environments. *A discussion on domestic water in Western Australia*, Kalgoorlie College.

### III. 砂漠の交通機関としての電気自動車の可能性

清水 浩\*

### III. The Possibility of Electric Vehicles as Transport Facilities in Desert

Hiroshi SHIMIZU\*

#### 1. まえがき

交通に関する環境問題の抜本的な対策の1つとして電気自動車の研究が行なわれてきたが、現実にはその性能の低さや価格の高さということが大きな問題とされ、普及は遅々として進んでいない。このような現状に対して、筆者らはその設計に新しい概念を導入すれば通常思われている以上に高い性能の電気自動車を作ることができるとの観点から研究を進めてきた。

さらに、電気自動車はこれまでの車にない種々の特徴を有しており、それを有効に活用することにより、これまでの車では実現不可能であった特徴や機能を利用者にもたらしてくれる可能性がある。

本文では新しい概念に基づく電気自動車の開発の経緯について紹介するとともに、これらの開発の延長線上として、とくに砂漠でこれを利用する場合にもたらし得る幾つかの可能性について述べることを目的とする。

#### 2. 新しい電気自動車技術の概念の基本的考え方

今、電気自動車と聞くと、ほとんどの人々の認識は次のとおりである。すなわち、確かに音はせずクリーンな車だが、性能がとてもエンジン車に及ばない。しかも価格もとても高くない。さらに地球環境問題と関連して、この車は走行中に排ガスは全く出さないが、替わりに発電所で大量の排出があるから、地球全体でみれば環境やエネルギー問題にとってむしろマイナスかも知れない、ということである。

このような常識に対して、まず電気自動車は意外に効率が高いことがある。図1は通常の電気自動車とエンジン自動車が走行する場合の原油を一次エネルギーとするときのエネルギー効率の比較をしたものである。電気自動車では発電、送電、充電を経てモーターを回転

させるため、エネルギー変換に長いプロセスを経由する。従って、一見効率が低そうであるが、それぞれでの効率が高いため総合効率が比較的高い。しかし、エンジン自動車ではエンジン自体の効率が高くなないので結果的に電気自動車の効率が高い。この事実は電気自動車が将来的にみて環境やエネルギー問題の解決に役立つ可能性があることを示唆している。

次に、電気自動車の作り方として2つある。1つは現行のエンジン車を改造して作る車で、コンバート車と呼ばれている。もう1つはゼロから電気自動車として作る方法で、グランドアップ車と呼ばれている。これまで世界中で作られた電気自動車のほとんどはコンバート車であったが、このような車では電気自動車の持ち得る特性を必ずしも有効に引き出すことができないため、性能も低いものにならざるを得なかった。

一方、グランドアップ車を前提として、ここに(1)電気自動車の性能向上に役立つ技術を集め、(2)電気自動車だから使える技術を採用し、さらに(3)電気自動車の特徴を生かした設計を施すという3つの配慮することにより、電気自動車は通常考えられている以上に高い性能を出すことができる。

このような考えをもとに筆者らは何台かの車を手がけて来たが、本文執筆中にはほぼ完成し、これが印刷になる頃には基本的な特性が得られることが予定されているエコピーカーと名付けた車がある。ここではこの車の概要を紹介することにより、電気自動車の可能性をご理解いただけたら幸いだ。

#### 3. エコピーカーの概要

エコピーカーでは前章で述べた基本的考え方をでき得る限り盛り込み、太陽電池による充電で走行エネルギーを一部まかない、車体を小型化することによって、環境問題、エネルギー問題、資源問題のそれぞれに可能な限

\* 国立環境研究所地球環境研究グループ 〒305 滋賀県つくば市小野川16-2 Tel. 0298-50-2453

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

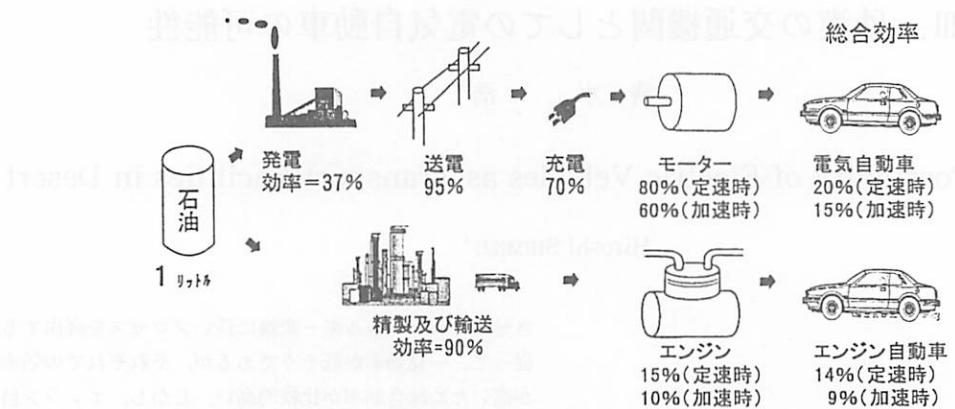


図1. 原油を一次エネルギーとする場合のコンバート電気自動車とガソリン自動車のエネルギー効率.

り貢献することを目的としている。しかも、従来の車であれば小型化すれば性能が低くなり、安全性にも問題が出、乗り心地等の快適性も低下せざるを得ないという問題があったが、電気自動車の特徴を生かしてこれらの問題点を最小に抑えることを目標としている。

ここで取り入れた性能向上に役立つ技術としては高効率なブラシレスDCモーターの採用、インバーターを低損耗化するための省エネルギー型スイッチング素子であるIGBTの利用、低転がり摩擦タイヤの新規開発等である。これらの技術は最近開発された車ではごく一般的に使われ始めているが、この車でももちろん最高レベルのものを採用した。

電気自動車だから使える技術としては新しい型式のインホイルモーターシステムがある。エンジン自動車ではドライブシステムとしてエンジンと車輪の間にトランスミッションと差動装置が挿入されることが必須であるが、電気自動車用のモーターはエンジンと特性が大いに異なるために幾つかの方式の利用ができる。その中で、駆動輪のそれぞれにモーターを組み込むインホイル方式は究極のドライブシステムになり得ると考えている。このインホイル方式をより重量当たりの出力を上げ、かつ低速においても高速でも高い効率を得るために新しい方式を開発した。このシステムでは高速回転が可能なブラシレスモーターの出力を遊星歯車で減速し、車輪に伝えるものとしているが、駆動系全体を軽量化するためにこれらにさらにペアリングとドラムブレーキを組み込んである。図2、3にそれぞれこのシステムの模式図と外観写真を示してある。このシステムでは最大出力が36kWのモーターを5分の1のギア比で減速しており、システム全体の重量は25kgである。

電気自動車の特徴を生かした設計としてはバッテリー

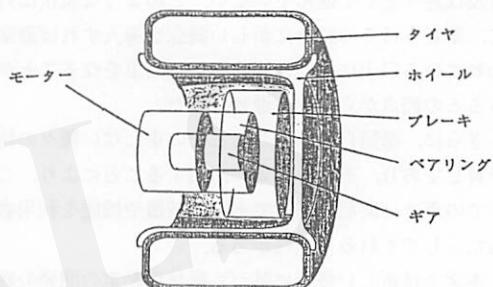


図2. ドライブシステムの模式図.

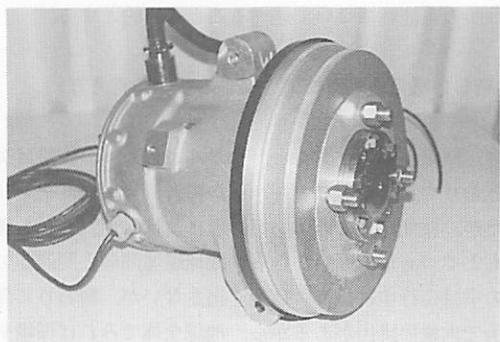


図3. ドライブシステムの外観写真.

ビルトイン式フレーム（以下BBFと略）と名付けるところの新しいフレーム構造である。

電気自動車の最大の問題点は電池の単位重量当たりの容量とされているが、車の設計上はその容積も問題である。これまでの電気自動車では電池をボンネット内やトランクルーム、あるいは車室を狭めて位置することが多かった。また、床下の中央部に設置するものも最近は増えている。これらの方針ではいずれも利用者が有効に使

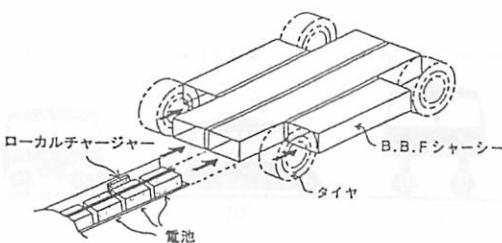


図4. バッテリービルトイン式フレームの模式図。

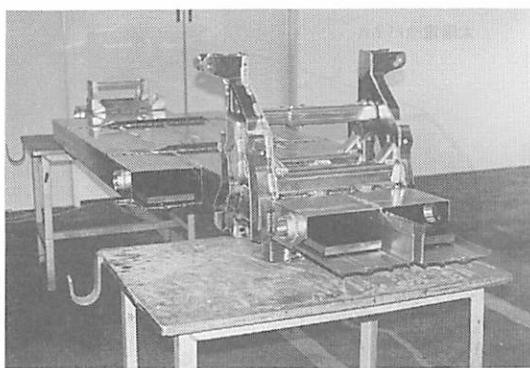


図5. バッテリービルトイン式フレームの実物写真。

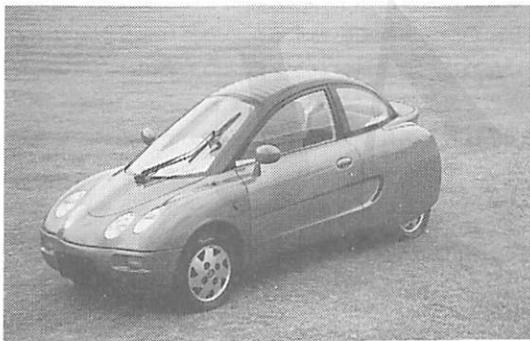


図6. エコバイクルの外観写真。

用できる空間が減ったり、床の高さが高くなったりするという問題があった。これらの問題を解決するためBBFではアルミの押し出し成形材を組み合わせて高さ約10cmの中空状の床のフレーム構造を作り、この中空状の空間の断面形状とほぼ等しい断面を持つ電池をここに挿入するという方法である。これまでのエンジン自動車では床下にマフラー、ときにはプロペラシャフトが設置されるため、8～10cmの空間が設けてあるが、BBFではこの空間を有效地に使うことが可能である。その結果、電池収納の空間の問題が解決されるのみならず、最も重い電池が床下に置かれるため、重心が極めて低くなることや、衝突の際に電池が人間に危害を与える危険性が少なくなるなどの利点が生まれる。

表1. エコバイクル基本車輌の主な仕様。

・主要寸法、重量	
全 長	3.30m
全 幅	1.20m
全 高	1.34m
乗 車 定 員	2名、又は大人1名+子供2名
車 輛 重 量	910kg (電池重量 269kg)
・性 能	
一充電走行距離	140km (80km/h 定速走行) 130km (10・15 モード)
燃 費	50km/リットル(10・15 モード、原油換算)
最 高 速 度	130km/h
加 速 性 能	17.9秒 (0～400m) 3.9秒 (0～40km/h)

図4にBBFの模式図を示す。ここでは電池は小型のものを多数用意し、これをトレーの上に置き、トレーごと車の前部から収納する構造としてある。また、図5はBBFの実物の写真である。この図ではBBFに前後輪のサスペンションをとりつけるためのサスペンションメンバーが設置されている。

エコバイクルは以上の技術を使った2人乗りの乗用車であるが、座席は前後に配置したいわゆるタンデム型となっている。タンデム型とすることの利点は車の全幅が狭くできるということであり、この車では現行の軽自動車より20cm狭い。これまでの大型トラックやバスは2.5mの幅があり、かつ駐車スペースは2.5mから3mの幅のところが多いことからこれらの幅の半分以下の車では駐車場の確保が容易であり、時には車線幅を有効に使うことも可能になる。さらなる利点は1.2m幅のところに座席が1つだけ設置されるということはドアの厚さを非常に厚くすることが可能で、横からの衝突に対する強度が増すことである。また、車幅が狭く、運転席が中央に来るため、運転が極めて容易になる。

一方、欠点としては車幅が狭くなったことにより走行中の安定性が低下することが挙げられるが、BBFの採用により重心が低下したことに基づき、この問題が自と解決できている。

この車の外形写真を図6に示す。この図より明らかのように、空気抵抗を小さくするために、可能な限り流線型とし、かつ後部にスポイラーを取り付けてある。また、太陽電池は屋根の上とスポイラーの部分の約0.6m<sup>2</sup>の面積に貼り付けた。

表1にこの車の仕様を示す。

全長はこれまでの軽自動車の規格である3.3mにとどまる。定員は大人2名または大人1名、子供2名である。重量は910kgである。電池は密閉式鉛で、1個当たり4V、40Ahで、これを56個直列につないでおり、

その重量は 280kg である。

性能は、一充電走行距離は時速 80km で 130km, 10・15 モードで 120km である。最高速度は 130km/h, 0・400m 加速時間は 17.9 秒である。これらのうち、最高速度と加速性能はこれまでのこのサイズのガソリン車と比べても格段に高い。また、一充電走行距離は街の中での利用であれば十分に実用的なレベルである。

また、近年鉛電池に替わる電池としてリチウムイオン電池やニッケル-水素電池の実用化に向けた開発が進められているが、これらが用いられるようになれば一充電走行距離の問題は解決できる。

#### 4. 電気自動車の砂漠での利用についての可能性

エコピークルは一般市街地での利用を想定して開発された。また、その高速性能も追求した。のために空気抵抗はできるだけ小さくすることを念頭におき、かつデザイン的にもスポーティーなイメージを重視した。但し、その利用法を考えるとき、このような形状のみが合理的とは言えず、目的に従った設計があり得る。とくにエコピークルではインホイルモーターと BBF という 2 つの技術を特徴としているが、これらの技術で基本となるシャシーを構成すれば床上の構造体については比較的容易に形状変更を行なうことができる。この利点を生かしてここで砂漠における応用を考えたい。

砂漠における応用を考えるとき、これまでの車が苦手としてきたことは砂の抵抗が大きく、時には砂に車輪をとられて前に進めなくなることである。第 2 に岩肌の露出しているような悪路面のところではマフラーなど床下の突起物が地面に接触し、走行不可能になることがあげられる。さらに、砂漠地帯は人家から離れたところが多く燃料の供給が難しいという本質的問題がある。

このような難しさに対して電気自動車であれば解答を用意することができる。

第 1 の砂に足をとられる問題については、インホイル式モーターを採用した電気自動車ではモーターを各車輪に挿入することができるため、完全な四輪駆動とすることが可能であることによって解決できる。エンジン自動車では四輪駆動車といえども各輪に均等に駆動力を持たせることは不可能で、車輪のうちの幾つかが砂に足を取られてしまえば走行不能となる。しかし、四輪にそれぞれインホイルモーターを組み込むことにより、すべての車輪が最大トルクの駆動力を發揮することができる。

エコピークルにおいては登坂力は 30% であった。もし、同じ重さの車で四輪駆動とすればこれが 60% にまでなる。これだけの登坂力があればかなり急な砂丘をも

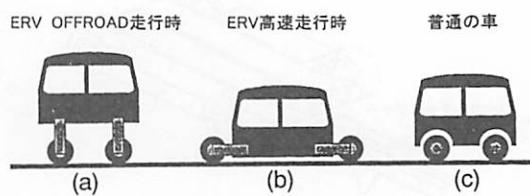


図 7. 最低地上高の高い車の実現法。

太陽電池パネル

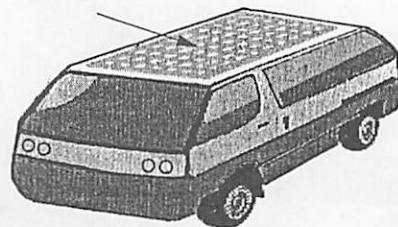


図 8. 砂漠用電気自動車の概念図。

無理なく登ることができる。

第 2 の悪路面については床構造を BBF として平らにすることにより、床下への突起物をなくすことが可能であり、かつ、車輪を駆動するためのプロペラシャフトもないために、サスペンション構造の工夫の仕方によっては極めて最低地上高の高い車にすることができる。例えば図 7 は我々の仲間の考案によるものであるが、サスペンションをリーディング・トレーリングアーム方式にし、かつそのアームの長さを長くすることによりその長さに相当する最低地上高の車を実現することができる。これによって、これまで思いもよらなかった悪路の走行も可能となる。

第 3 の燃料補給に関しては砂漠ではふんだんにある太陽エネルギーの利用によって通常走行分をまかなうことが可能である。エコピークルは 2 人乗りの車としたが、軽自動車サイズの 4 人乗りの車を仮定し、その長さは 3.4m、幅は 1.45m としよう。そして、車体形状は図 8 に示すように屋根の平らなバン型を作るものとする。これによって、乗用のみならず貨物も運べる車とすることができるが、さらに屋根面積を広くとることもできる。この屋根に太陽電池を貼るものとしよう。この大きさの車であれば屋根全体を利用することにより、 $4 \text{ m}^2$  の太陽電池を貼ることができる。この電池の効率を 10%，電池への充電効率を 80%，年間日照時間を 3,600 時間とし、時間と季節により太陽光高度が変わることを考慮に入れると、年間 820kWh の充電ができる。この車の高さを 1.4m、空気抵抗係数を 0.6、重さを 900kg とする。

また、路面の良くないところでの転がり摩擦係数を 0.02、モーターの平均効率を 80% としよう。また、砂漠地帯では信号等はほとんどなく平均時速 40km で走行が可能とする。すると、この車が走行中に消費する電力は 3.7kW であり、太陽電池で充電できる電力で年間に走行可能な距離は 8,900km となる。現在、国内での乗用車の年間の走行距離は平均約 7,000km となっており、もし、砂漠地帯でも同等の走行距離となるものと仮定すれば屋根に貼った太陽電池のみで年間の走行用電力をまかなうことができる。

また、これ以上の走行距離を必要とする場合には据置型の太陽電池に一旦充電したものから再充電してまかぬ方法や、太陽電池を折り畳み式としておき、駐車中にはこれを開いて面積を広げて充電可能電力を増やす方法も考えられる。いずれにしても、太陽電池の力のみで走行可能な車を実現することは十分に可能である。

以上述べた砂漠用の電気自動車は言わば個人利用のもので、これまでの砂漠での交通手段でたとえれば馬のようなものである。これに対して、大量の荷物を隊商として長い距離を運ぶためのラクダに相当する手段も要求される。

このような目的の電気自動車として、ここでは次のようなものを想定する。

(1) 1 台の車両は重量が 1 トンでこれに 1 トンの荷物を積めるものとする。

(2) この車両にはそれぞれ駆動用のインホイルモーターと、BBF に収納される電池が載せられるものとする。

(3) 各車両は電車のようにそれぞれが接続されて走行が可能であるものとする。

(4) 運転は先頭の車両に付けられた運転台に乗員が乗って行なわれる。

(5) 先頭車両に約 10 車両の被牽引車両が接続されたものを 1 ユニットとする。

(6) 充電は主に太陽電池で行なわれる。

ここではこのような交通機関を電動ラクダ（ラク電）と呼ぶことにしよう。

ラク電の走行は主に夜行なわれ、電池が切れるところ

まで走行し、日中は太陽電池パネルで充電を行なうものとする。

もし、平均の時速を 40km とすると、電力消費量は 1 車両当たり約 5.4kW であり、もし、450kg のリチウム電池を積むものとすると時間にして 8 時間、距離では 320km 走行することができる。450kg のリチウム電池の容量は 45kWh で、効率 10% の太陽電池で 12 時間かけて充電を行なうものとすると 66m<sup>2</sup> の太陽電池を必要とする。320km 以内にオアシスがあり、そこに固定式の太陽電池が置かれていれば、このような運用法で問題がない。

この距離以内に中継地がない場合には、先頭車にエンジン発電機を搭載し、補助的に電力を供給しながら走行する方法や、電力が切れた地点に車両を停車させ、1 日かけてできるだけ多くの充電を行ない、夜間に再び走行する方法が考えられる。この場合、1 車両当たり 66m<sup>2</sup> の太陽電池パネルを広げるのは現実的でないため、1 日で充電できる量は制限される。

このため、現実的な方法としては小型のエンジン発電機と太陽電池パネルの双方からのエネルギー供給によって走行距離を伸ばすことになる。

## 5. まとめ

本文では電気自動車の可能性を筆者らが現在開発中の車を中心述べてきた。また、このような電気自動車を砂漠地帯で応用することの可能性についても検討した。その結果、このような電気自動車は性能面でみても、新しい機能を持ち得るという点でみても将来の車として十分に実用性があると考えている。今後は、このような車をいかにして普及させるかということが重要な問題になる。

## 参考文献

- 清水 浩 (1996) : 近未来交通プラン。三一書房。  
清水 浩 (1996) : 電気自動車のすべて。日刊工業新聞社。

資料

## 気候変化影響研究部会研究会における 沙漠・砂漠化関連事柄について

山川 修治\*

Topics Concerning Deserts and desertification in the Meetings  
of the Research Group on Influences of Climatic Change

Shuji YAMAKAWA\*

日本農業気象学会では気候変化影響研究部会を1994年に設立し、年2回の研究会を中心とした活動を進めている。これまでに5回の研究会を開催したので、その演題をまとめて列挙するとともに、沙漠・砂漠化・乾湿特性に関する発表を中心として紹介したい。関連研究の発展のための一助になれば幸いである。

### 1. 第1回研究会

テーマ：《地球温暖化の農業生産および植生に与える影響》 開催日：1994年10月3日／会場：気象庁／共催：気候影響・利用研究会

①吉野正敏（愛知大学）：「農業への地球温暖化の影響—2, 3の気候変動の事例から」

「地球温暖化と農業」に関するこれまでの認識、気候要素と農作物への温暖化の影響、インドネシアの気候・稻作・人口の関係、歴史時代の気候変化と農業について、具体的な内外の研究成果を用いて解説された。温暖な期間についての気圧配置の特徴から、高気圧に覆われる頻度の増大（春～秋、特に春）、梅雨の中休みの明瞭化などが認められる。ENSO（El Niño+Southern Oscillation）と東南アジアや南西諸島では、El Niño年に干ばつになりやすい。また、台風の出現頻度との関係については、La Niña年の8月に南西諸島から西日本に北上する台風が多いのに対し、ENSO年には9～10月に日本付近およびその東方海上を北東進する頻度が高く、農業水資源として重要な問題である。温暖化に対応するクロップカレンダーの変化、気候条件と人間活動との相互関係についても言及された。

②内嶋善兵衛（当時：お茶の水女子大学、現：宮崎公

立大学）：「気候変化と植生」

地球上での植物の役割、植生の分布、植生と気候、乾物生産力、植生への気候変化の影響について解説された。最終氷期から現在に至る植生の変遷、特に、縄文時代には日本本土の90%以上が森林に覆われていたが、その後減少の一途を辿ったことが示された。予測される気候帶の移動速度は花粉分析から得られた樹木の移動速度に比べてはるかに高速であるため、より一層の研究の必要性がある。炭素に関しては化石燃料の利用による放出量、熱帯林による固定量、森林破壊による損失量についての議論があった。また、数十年スケールの気候変動の原因についての質問に対し、1960～1970年代の低温期に核実験の影響があったことが示唆された。

③堀江 武（京都大学・農学部）：「水稻生産に及ぼす高温・高CO<sub>2</sub>濃度環境の影響予測モデル」

温度・CO<sub>2</sub>濃度処理のための実験施設、水稻の生育・生産過程に及ぼす高温・高CO<sub>2</sub>濃度の影響、高温・高CO<sub>2</sub>濃度環境の水稻収量への影響予測モデル、CO<sub>2</sub>濃度倍増気候が日本の水稻収量に及ぼす影響予測（高温障害も含む）について、モデル開発を中心に論述された。水利用効率については、CO<sub>2</sub>倍増下で蒸散量が若干減少し乾物生産が増加する結果、通常大気より35%高まることが指摘された。

④時岡達志（気象庁）【講演】鬼頭昭雄（気象研究所）：「気候温暖化予測に関する話題」

気象研究所における地球温暖化予測実験、GFDLにおける最近の気候変化に関する数値実験、放射強度に関するIPCC（気候変化に関する政府間パネル）第2次報告書での話題、さらに、El Niñoの周期性などについて報告された。最近100年間の気温上昇トレンド（0.5°C

\* 農業環境技術研究所、気候変化影響研究部会幹事。

\*\* Global Agro-Environment Research Team. National Institute of Agro-Environmental Sciences (NIAES). Tsukuba 305, Japan.

/100yrs) は自然変動としては起こり得ないものであり、2000年以降は極域の昇温が加速するとの予測が示された。CO<sub>2</sub>のほか、エアロゾル量の変動、オゾン層破壊の影響をどう評価するかという質問がだされた。NCARにおいては既に試みられているとのことである。

[筆者注]：その後、IPCC (1996) で対流圏の硫酸系エアロゾルによる北半球中緯度の温暖化軽減が指摘された。

## 2. 第2回研究会

テーマ：《アジアにおける乾湿特性の変動》 開催日：1995年7月26日/会場：名城大学農学部

①上口弘晃（気象庁）：「日本における近年の大雨と干ばつ」

はじめに、小雨・長雨を中心とした降水量変動について、長期にわたる特徴と近年の特徴が示された。特に、暖候期についてみると、1993年の冷夏・長雨、1994年の高温・少雨は記録的であった。1970～1980年代は北・東日本を中心 に異常少雨の出現頻度が増加し、長期的にみても全国15地点の年平均降水量は-5.7%/100年(危険率5%で有意)を検出した。グローバル(地上)においては、北半球および全球で有意な減少傾向、南半球では変動が大きいという特徴が現われた。気候系と降水量変動の関係について解析された。El Niño年(約11回)における日本の地域別降水量は、とりわけ冬季・夏季に特徴的で、12月の西日本太平洋側、7月の東日本日本海側において多い。El Niño年8月の降水には、明瞭な傾向は認められない(参考資料:『熱帯の海面水温と日本の天候』気象庁長期予報課)。1993年冷夏・長雨、1994年高温・少雨を統計的に評価した。再現期間(岩井法)によると、1993年の場合、降水1mm以上の継続日数は50年に1度が近畿、30年に1度が瀬戸内・北陸周辺に点在した。1994年の場合、5mm以下の無降水継続日数は50年あるいは30年に1度が西日本・北陸を中心分布した。メッシュ気候値とソーンスウェート法による不足水分の年間総量は、1993年は沖縄と北海道のごく一部で不足を示すのみであったが、1994年には西日本の太平洋岸を除く広域、北陸、関東の南東部をはじめ、東北・北海道にも散在した。なお、農業水利の予測、水収支の推定など水資源の管理データについては、民間の支援センターなどを通して利用できる。

②谷田貝亞紀代・安成哲三(筑波大学・地球科学系)：「中国とモンゴルの乾燥半乾燥地域における夏季降水量の経年変動」

中国北部・北西部からモンゴルにかけて広く分布する

乾燥・半乾燥地域において、夏季降水量の経年変動が解析された。地域性を調べるために回転主成分分析を夏季(6～8月)の降水量時系列(1951～1990年)に適用し、対象地域を5地域、I：タクラマカン砂漠、II：レス高原(黄河中流域)、III：中国華北～モンゴル中・南東部、IV：天山山脈の北側、V：モンゴル北部、に区分した。

対象地域の降水量の経年変動とアジアモンスーン活動との関連を調べるために、インド総降水量資料(IMR)と対象地域の降水量変動との関係を調べた。また、各地域の変動に伴う大気循環場の変動について、100hPa、500hPa等圧面高度と地上気圧場の偏差を用い検討した。その結果、各地域の夏季降水量の経年変動(1951～1990)の特徴は次の通りである。i) タ克拉マカン砂漠：長期変動がみられ、最近15年ほどは変動の振幅が大きい。多雨年には、中央アジアにリッジ、90°E付近にトラフがくるなど、対象地域および、風上側の偏西風波動と関係している。また、多雨年(少雨年)にはチベット高気圧が東偏(西偏)している。IMRと負相関がみられるが、インドモンスーン変動そのものではなく、それに伴う局地的な中央アジア周辺の気圧場に関連する。ii) 黄土高原：顕著な2～3年周期変動を示し、太平洋高気圧の位置に対しては独立で、インドモンスーン変動に伴う局地的な中央アジア周辺の気圧場に関連する。iii) モンゴル～中国北部：1955年以降夏季降水量が顕著に減少した。iv) 天山山脈の北側：decadal-scaleの変動が卓越。v) モンゴル北部：かなりランダムに変動している。

この成果報告に対し、偏東風ジェットが乾湿分布に及ぼす影響について検討する必要性が指摘された。また、華北では小麦が干ばつの被害を受けているので、夏だけではなく冬についても検討してほしいという要望もあった。

③田淵 洋(法政大学・経済学部)：「インドネシア、ジャワ西部における最近の降水量変動の稻作への影響」

インドネシアにおけるEl Niño現象に伴う異常気象について述べられた。1971～1979年の年平均降水量に比べて、各年の年降水量が120%以上の場合を異常多雨年(W)、80%以下の場合を異常少雨年(D)とし、それらの出現状況を示した。1972～1973年のEl Niñoに伴い赤道直下の東カリマンタンで異常少雨が確認された。ジャカルタの日降水量データから、0.1mm以下の無降水日が4日以上連続した場合の状況が図示された(dry spellダイヤグラム: NIEUWOLT, 1977)。雨季には年による著しい差はみられないが、乾季には異常少雨の1972, 1976, 1977年に無降水日の出現頻度が高く、無降水日が長く継続した。また、雨季入りの状況は年々大きく変動している。西部ジャワにおける1968～1992年の農作物(主要7

作物)の作柄指数とその変動係数を調べてみると、年々収量が最も変動するのは大豆であった。一方、キャッサバは最も変動の少ない安定した作物である。水稻・陸稻の収量変動は中間的だが、陸稻の方が安定している。El Niño異常少雨年(1973年など)には、水稻・陸稻の作柄指数は東タクラマカンで著しく低下するのに対して、西部ジャワでは収穫面積に著しい減少が認められる(収穫面積は年々変動を繰り返しつつ増加傾向)が、収量に大きな低下がなかったのは、異常少雨年の陸稻が好条件耕地のみに限定され、栽培放棄、作目転換の傾向が現われるためである。また、少雨年に平年作を上回ることもあるが、それは日射量の多いことが効いているとみられる。なお、灌溉についての詳しいデータはないが、西部ジャワでは灌溉施設は完備されている。

④小元敬男:「水資源の観点からみたアジア地域の気候変化」

温室効果気体の増加で予想される気温の上昇は、森林帯がついていけないほど速いともいえるが、農業は気候変化への対応が比較的容易であり、また、同レベルの高温や乾燥度であっても、短期間の異常気象による場合と気候ベースがその値に達した場合とでは様々な点で違うとの認識が示された。半乾燥地域など広大な地域で、農作物(穀物)の収量が気温より降水量の変動に強く影響される。しかし、各GCMについてみると降水量の予測の相違は著しく、特に地域スケールでは正反対の予測結果さえある。湿润気候の日本でも、1994年のような干ばつ発生が懸念され、温暖化による耕地の蒸発散量の増加、乾燥度の増大が問題となる。それと関連して、CO<sub>2</sub>増加による作物の水利用効率の向上の量的評価が重要である。

気温の上昇は地表付近で最大で、上層ほど小さく、成層圏では逆に降温する。これは大気成層の大規模な不安定化、熱帯低気圧の巨大化、降雹頻度の増加、ひいては農業に悪影響を及ぼすだろう。地球温暖化に絡む降水特性の問題としては、大規模風系変化による降水量の変化、大気安定度の変化、昇温による雪から雨への変化が挙げられる。特に降雪か否かは、中央アジアなど融雪水への依存度が強い地域での水利用計画に重大な影響を及ぼしかねない。気候変化の水資源に及ぼす影響予測は人類の食料確保の観点から重要で、気象学的な研究のほか、農業気象学にかかる水資源からの研究が大切である。

### 3. 第3回研究会

テーマ:《近年における冬季の気候特性と作物生産》

開催日:1995年11月28日/場所:埼玉県園芸試験場

会場/共催:日本農業気象学会関東支部会(合同シンポジウム)

①高野清治(気象庁):「近年における日本の暖冬」

1980年代の終わりから1993/94年まで日本は暖冬傾向が続いた。これに伴い日本海側の降雪量も減少傾向が続いた。それに対し、北海道での降雪量は減少しなかった。この理由は、もともと十分に低温なため暖冬でも雪でなく雨になることは滅多にないこと、気温が上昇すると大気の可降水量が増えることなどが考えられる。

②杉浦俊彦(果樹試験場):「果樹生育に及ぼす暖冬の影響」

暖冬はほど凍害を受けやすい。冬季における樹体の重要な変化である耐凍性と休眠の進行・解除に対する暖冬の影響について、ニホンナシを中心論述した。

③寺添 齊(電力中央研・生物部):「気候に影響されない農業—野菜工場の最近の事例」

野菜工場とは、施設園芸に空調装置や人工照明などの技術を取り入れ、野菜を効率的に計画栽培する施設である。作業の機械化・自動化により環境改善や省力化が可能になる。野菜工場は光源の種類によって、人工光型(完全制御型)、太陽光型、両者併用型に分けられる。太陽光型では栽培作物は葉菜類から果菜類まで可能だが、地域・季節・天候の影響を受け、安定生産が困難な面もあるが、沙漠などでの実用化が期待される。

④稻山光男(埼玉県園芸試験場):「埼玉県における園芸の現状について」

1993年夏は低温寡照で生理障害が、1994・1995年夏は異常高温で干ばつや病害虫などの被害が発生し、直接間に気象の影響を強く受けている。いずれにせよ、早期に気候を把握できれば被害を軽減できた。

### 4. 第4回研究会

テーマ:《植物生長からみた気候・環境変動》 開催日:1996年7月31日/会場:宇都全日空ホテル

①中川博規(京都大学・農学部):「高CO<sub>2</sub>・高温環境に対する水稻の生育・収量反応」

高CO<sub>2</sub>条件下での群落における総蒸散量はわずかな減少に留まる。気孔のガス拡散抵抗が大幅に減少するが、その一方で葉面積拡大および葉面飽差の増加が蒸散を促進する効果が現われるためである。

②清田 信(大阪府立大学・農学部):「CO<sub>2</sub>濃度の上昇と樹木のガス交換」

一般に、CO<sub>2</sub>濃度の上昇に伴い蒸散速度は減少するが、その割合は植物の種類により異なる。CO<sub>2</sub>濃度の倍増条件下で、気孔抵抗の増加しにくいヒノキなどは蒸散

速度がほとんど低下しないのに対し、気孔抵抗の増加しやすいユーカリなどでは蒸散速度低下は40%に達するなど、樹種による大きな違いが示された。

③福岡義隆（広島大学・総合科学部）：「樹木年輪による気候環境復元に関する諸問題」

年輪は、気候の寒暖や乾湿の歴史を辿れるほか、気候災害を探る手がかりともなるなど、環境の総合的な記録計として役立つ。年輪サンプリングの方法とその解析法、およびそれらの問題点が指摘された。高緯度の場合とは異なり、日本では降水量が最も決定的な気候要素である。岡山県津山市の年輪分析に基づく、1797～1979年の干ばつ・大雨などの古気候復元例が示された。ただし、冷夏年にも年輪生長が鈍るため、その識別が問題点である。

年輪に関する国際シンポジウムについての紹介もあった。

④岡本和人（東洋学園大学）：「温室効果と成層圈オゾン破壊の農業生産に及ぼす相乗的影響」

対流圏で増加しつつあるメタンが成層圏に拡散するはどうなるか？メタンは酸化して水蒸気量が増加し硫酸エアロゾルへの吸着が進むとともに、水蒸気の分圧を増大し結氷点を上げるために、極成層雲（PSC）の生成率が高まる。また、対流圏での温暖化による水蒸気量の増加が成層圏（寒冷化中）に及ぶと、PSCの増加に寄与するとみられる。これら相乗的作用によってオゾン破壊が進行することについて警鐘された。

## 5. 第5回研究会

テーマ：《温暖化と東北の農業》 開催日：1996年10月7日/会場：郡山会館/共催：日本農業気象学会東北支部会・関東支部会（合同シンポジウム）

①鳥谷 均・清野 豊・林 陽生（農業環境技術研究所）：「温暖化による東北地方の農業への影響」

IPCC（1996）の内容の紹介があり、熱帯・亜熱帯地域、乾燥・半乾燥地域の一部では、飢餓のリスクが高まることが示された。また、各種GCMによる来世紀半ばの気候変化予測が示され、気温以上に降水量についてはモデルによって増減まちまちで、地域性を論ずるには問題が大きい。乾燥地域の蒸発散の算出方法に関して留意すべき点について質疑が交わされた。

②金 漢龍（東北農業試験場）：「水稻の生育・収量に及ぼすCO<sub>2</sub>濃度と気温の複合的影響」

作物の固体群をできるだけ自然に近い条件下で実験し、

品種ごとにCO<sub>2</sub>濃度と気温の変化に応じた生理的な影響がまとめられた。高CO<sub>2</sub>は稻の生長を助長する（倍増時に乾物生産は24%増）。

③小林和彦（農業環境技術研究所）：「Rice FACE project」

1996～2000年に実施されるプロジェクトで、CO<sub>2</sub>濃度上昇によって陸上生態系に生じる変化を、実験とモデリングによって解明することを目的とする。日本での実験圃場は岩手県零石に設定される予定。自然の水田内におけるCO<sub>2</sub>の施肥効果などが、総合的に究明される見込み。気温上昇による蒸発散量の推移にも研究が及ぶ。

④荒川市郎（福島県庁農林水産部）：「現場における気候変化対策技術」

福島県内の気温分布の特性がメッシュ図（カラー）に基づいて解説され、特に近年の異常気象時について状況が例示された。温暖化時の農業に有利な県中北部の丘陵地においては干ばつの恐れがあり、既にその兆候が現われているとの指摘もあった。

## 6. 論文集について

本研究会の講演内容は論文集の形式で印刷され、下記の通り、第Ⅰ号（第1回）、第Ⅱ号（第2/3回）、第Ⅲ号（第4/5回）の3部が既刊となっています。販売価格はいずれも1冊1,000円（郵送料込み）です。ご希望の方は、FAX（0298-38-8279）にてご注文ください。

## 参考文献

- 日本農業気象学会気候変化影響研究部会（1994）：『地球温暖化の農業生産および植生に与える影響』第1回研究会講演論文集、I : 54p.
- 日本農業気象学会気候変化影響研究部会（1995）：『アジアにおける乾湿特性の変動』『近年における冬季の気候特性と作物生産』第2/3回研究会講演論文集、II : 54p.
- 日本農業気象学会気候変化影響研究部会（1996）：『植物生長からみた気候・環境変動』『温暖化と東北の農業』第4/5回研究会講演論文集、III : 58p.
- HOUGHTON, J.T., FILHO, L.G.M., CALLANDER, B.A., HARRIS, N., KATTENBERG, A. and MASKELL, K. ed. (1996): *Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the IPCC*. Cambridge Univ. Press: 572p.
- NIEUWOLT, S. (1977): *Tropical Climatology*. John Wiley & Sons: 207p.

## 資料

# 第9回国際土壤保全会議に出席して

谷山一郎\*

### 1. はじめに

1996年8月26日から31日まで、ドイツ共和国ボンの国際会議場で第9回国際土壤保全会議(9th Conference of the International Soil Conservation Organization)が「持続的土地利用に向けて一人間と制度との協力の促進」というモットーを掲げて開催された(図1)。この会議は約2年毎に開催され、第5回のタイ以後、エチオピア、オーストラリア、インドでおこなわれている。今回は、国際土壤保全機構(International Soil Conservation Organization: ISCO)が主催し、ドイツ土壤科学会、ドイツ連邦環境省、経済援助・開発省などが事務局を担当した。この会議では、土壤侵食、土壤圧密、砂漠化、酸性雨の影響や土壤化学汚染など環境問題全般の技術的問題だけでなく、それらの社会・経済的評価および普及・教育などについても取り扱われている(表1)。全体で約800名の研究者、行政担当者および非政府組織(NGO)メンバーが出席し、講演発表は約100題、ポスター発表は約180題を数えた。

日程は以下のようなものであった。

8月26日に開会式および「持続的土地利用に向けて」と題したパネルディスカッションが、国連開発計画、世界銀行、世界野生動物基金などの担当者によっておこなわれた。8月27日は基調報告として、「地球的気候変動が土壤に及ぼす影響」「土地荒廃の評価手法」「都市化による土地荒廃」といった3題の講演があり、その後16の分科会に分かれて講演発表がおこなわれ、午後はいくつかの分科会がまとまって討論会があった。28日はボン近郊で現地検討会がおこなわれた。29日は27日とまったく同じスケジュールが組まれ、「土壤保全と持続的土地利用」「持続的土地利用に及ぼす民主化、社会・経済および文化の影響」「人間と制度の協力」と題する基調報告のうち、14の分科会に分かれた。30日は午前中にポスター発表と「アジェンダ21採択後の持続的土地利用のための政策と方法」と題するパネルディスカッションが国連環境計画、国連食糧農業機構、ヨーロッパ共同体の担当者に

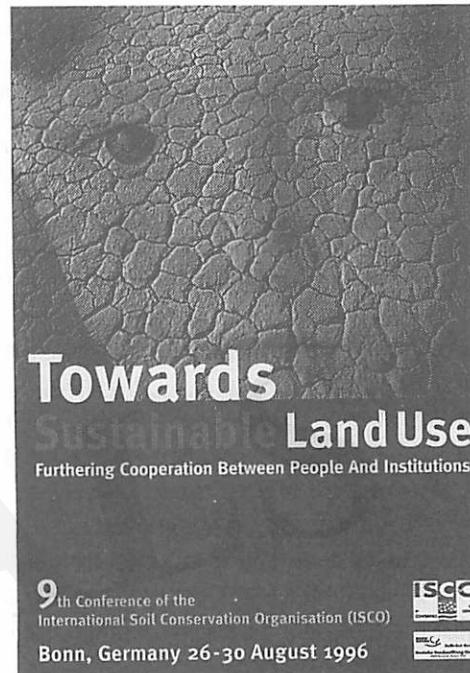


図1 第9回国際土壤保全会議のポスター。

よっておこなわれ、午後からの取りまとめの総合討論の後、散会した。31日からはヨーロッパ各国を巡るいくつかの調査旅行が催された。また、会議開催中会議に並行して、ポスター発表会場の美術館において土壤保全、砂漠化防止および持続的農業などに関する国際機関、政府機関や非政府組織など、59カ国の177組織の活動を会議参加者や一般市民に紹介するパネルやビデオ展示会「Dare-to-Share Fair」が開催された。

これまでの会議に比べると、土壤侵食や圧密などに関する基礎研究および防止技術の開発に関する研究発表の相対的な数が減り、統合分科会17課題のうちそれらに関するものが2課題しかなかった(表1)。これに対し、その他の砂漠化、酸性雨の影響や都市化といった土地荒廃に関する課題における現状報告、モニタリング手法、土地資源の情報化や評価手法などの発表の比率が増加する

\* 農業環境技術研究所。

表1 統合分科会の課題名。

1. Assessment, prevention and rehabilitation of soil degradation caused by improper handing of agrochemicals, manure, composted municipal wastes and sewage sludge
2. Assessment, prevention and rehabilitation of soil degradation caused by acidification and polluted air water
3. Assessment, prevention and rehabilitation of soil degradation caused by compaction and surface sealing
4. Water and wind erosion-causes, impacts and reversing measures
5. Concepts and indicators for sustainable land use
6. Soil properties and climate change
7. Issues and measures in land use planning-evaluation of practical experiences
8. Land tenure and land management
9. Demographic and cultural factors influencing land use systems
10. Economic and political conditions and strategies for the promotion of sustainable land management
11. Importance of cultural patterns, social rules and indigenous knowledge in designing appropriate soil conservation technologies
12. Handling relevant information to promote sustainable land use systems
13. Promising soil and water conservation approaches and technologies
14. Strategies for cooperation and dialogue
15. Organizational and human resource development
16. Implications for the design of research approaches
17. Physical and social monitoring of sustainable land use development

傾向にあり、分科会課題、発表数および出席者にもその傾向が顕著に表わされていた。特に、土地資源評価や土地荒廃評価については、世界レベルからヨーロッパやサヘル地域といった数カ国レベル、国レベル、国内の地域から流域レベルまでのさまざまなスケールにおける、手法としてGISを駆使した多くの発表がおこなわれた。

また、Dare-to-Share Fairにおいて各機関の研究成果をインターネットのホームページ上で公開していることを紹介しており、パソコンを利用した情報の公開・利用についても進歩がみられた。

## 2. 主な砂漠化に関する発表

300近い発表課題の中で、湿润熱帯を対象とした課題が全体の約50%と圧倒的に多く、次いで乾燥地・半乾燥地を対象としたものが30%程度を占め、温・寒帯が20%であった。半乾燥地・乾燥地を対象とした研究・事例発表の内容は、砂漠化の実態の把握、その要因の解析、研究手法、砂漠化防止の個別技術、砂漠化防止プロジェクトの推進手法などであり、それらが多く分科会に発表された。そのうち主なものを紹介する。もちろん、非乾燥地における研究手法や技術のうち乾燥地に適応できる成果も散見されたが、ここでは乾燥地を研究対象にしたものに限定した。

ISRIC (International Soil Reference and Information Center) が作成した GLASOD (Global Assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation) のデータによると乾燥地では過去50年間に10億ha以上、すなわち乾燥地土壤の20%が人間活動によ

り荒廃化し、そのうち60%は風食が原因であった。しかし、風食についての報告は少なく、それは定量化が水食に比べ困難であることと、人口が少ないところで起こるために情報が少ないためである。乾燥地の降雨は時間的、空間的変動が大きく、このことが土地利用計画策定を困難にしている。強力な政策と財政の支援が息の長い土地保全・回復プログラムに必要である。

モロッコの Telata 流域 (1.8万ha) における30年間の植生変化を航空写真と SPOT のデータから解析し、密林、疎林、草原が、耕地化や過放牧によりそれぞれ、65%, 95%, 68% 減少した。それにともない、流域から流出する土砂は、予測式から1993年では 32t/ha・yr と見積もられ、32% 増加した。この値は Telata 観水池の土砂堆積速度 39t/ha・yr とよく一致していた。

ウズベキスタンでは風食が土壤劣化の主な原因であり、侵食防止プログラムにより、防風林やオアシス内外の砂丘地固定のための植林、かんがい設備の整備、草地の開発や輪作などをおこない、今まで対象地域の30%まですんでいる。

エチオピアではかつて国土の35%を占めていた森林が、薪炭材の採取や農地開発などで現在では3%にすぎない。砂漠化地域は国土の73%にも達し、常に干ばつの危険にさらされている。このため、1994年から砂漠化防止の国家プロジェクトを開始したが、国際機関の助言と財政援助を必要としている。

トルコでは国土の79%が中～強度の風食・水食を受け、年間5億tの表土が失われてる。特に国土の26%, 2千万haを占める森林の60%の管理状態が不良で、早急な植林が必要である。現在までに森林省による砂漠化防止ア



写真 1. Dare-to-Share Fair の会場。

プロジェクトが28万haで実施されている。

ニジェールでは、ドイツの援助で、250の村を対象とした持続的資源と土地利用のプログラムを実施し、地域の実情に応じた異なる技術・手法を適用している。例えば、「tassa」と呼ばれる栽植用の穴、畑境界の石垣、堆肥用の穴、アグロフォレストリー用の技術などである。これらの普及には、教訓的な話を盛り込んだパンフレット、ポスターや漫画などを活用している。また、婦人教育に力を入れ、燃料節減型調理ストーブ、健康や衛生知識、収穫物の処理・利用などについて女性向けの文書を作成して普及をはかっている。

### 3. Dare-to-Share Fair について

Dare-to-Share Fairは「分配する勇気」展とでも訳せるであろうか。ドイツ技術協力公社（Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit: GTZ）の主催でドイツ連邦美術館において8月26日から31日まで開催された（写真1）。土曜日を除いて連日夜8時まで公開され、会議出席者や一般市民のために便宜を図っていた。特に、8月28日は、学生、団体のための公開日、31日の土曜日は一般公開日となった。開会日にマスコミ取材があり、新聞やテレビ・ラジオでも報道されたためか、多くの学生・市民が訪れ、熱心にパネルやビデオ・スライドに見入り、担当者の説明に耳を傾け、質問していた。

会場内では各団体ごとに、パネルと机が準備されたブースが確保されていた。各ブースでは、パネルに活動の紹介文や写真、啓蒙ポスターなどを貼り、机にパンフレットを置いたり、実物の農具や日用品または地域のジオラマを展示するものもあった。中にはブース内に現地の民家を再現して、いろいろや食卓が置かれ、ワラの壁まで編

んだものまであった。また、会場内の数カ所に、モニターを中心としているが15脚ほど準備された、小討論、ビデオやスライドショウのためのスペースがあり、ビデオによる活動紹介の後で質疑応答がおこなわれたり、民族舞踊や音楽などの実演もおこなわれた。

59カ国177団体の出展のうち、国別ではドイツが最も多く27団体、次いでインドが8、コロンビアが7、オランダ、パラグアイがそれに続いている。隣国のイタリアは2団体、フランスとイギリスは1団体のみ、オーストリアはゼロであった。地域別ではアフリカが47、ヨーロッパが43、アジアが24などとなっている。出展組織の活動内容についてのキーワードでもっとも多いのは Land Use Planning の 55、次いで、Agroforestry の 22、Desertification の 21、Gender Issues、Watershed Management などが続いている。Indigenous Knowledge、Land Tenure、Empowerment といったものもある。

Dare-to-Share Fair用のカタログが発行され、これには組織名、国、住所、電話・FAX番号、e-mail アドレス、コンタクトパーソン、組織の紹介、活動開始年、活動対象地域、活動内容（方法、手段、協力組織、対象集団など）、成功・改善の要因および問題点などが記載されている。そのうち乾燥地域で活動している組織の概略について表2に示した。

カタログの入手などの問い合わせについての連絡先は以下のとおりである。

Mr. Christoph Berg : ISCO-Cordinator  
c/o GTZ, GmbH,  
P.O.Box 5180, D-65726 Eschborn, Germany  
TEL: +49-6196-79-1153  
FAX: +49-6196-79-7153  
e-mail: christoph@berggtz.de

### 4. おわりに

この会議がヨーロッパで開催された上、研究の細分化が進み、多くの類似の学会があちらこちらで開かれているといえ、全体で800名の出席に対し、日本からの参加者は5名、発表者が1名、Dare-to-Share Fairの出展はゼロというのは少し寂しい。今後の関係諸氏の積極的な参加を希望する。また、砂漠化防止に関する活動の内容を納税者である一般市民や学生に積極的に伝えようとする努力は見習わなくてはならないと思う。

表 2 Dare-to-Share Fair に出演した乾燥地域を対象とした組織。

組織名	国	FAX/e-mail番号	コンタクトパーソン	活動内容
Agence Nationale des Ressources Hydrauliques	アルジェリア／ドイツ	+49-721-921-9453022	Mohammed Ouaar	アルジェリア山地での技術協力プロジェクトを推進
Agricultural Research Corporation	スーダン	+249-11-774591	Mekki Omer	西スーダンでの持続的農業生産のための研究と普及・教育
Center for Development and Environment	スイス	+41-31-6318544 hurni@giub.unibe.ch	Hans Hurni	世界の自然資源管理と持続的地域開発の研究、教育・訓練
CILSS	ブルキナファソ	+226-317473	Werner Petruelli	サヘル地域の砂漠化防止委員会
Department of Soil Science, Institut National de Formation Supérieure en Agronomie	アルジェリア	+213-6214743	Lakhdar Kouri	バイロット地区での土壤保全の研究活動
International Environment and Development Research Institute	イギリス	+44-171-388-2826 iiedagru@gn.apc.org	Fiona Hinchcliffe	世界の環境・開発に関する研究機関
Farming System Program, Institut d'Economie Rural Bamako; Royal Tropical Institute	マリ	+223-620349	Salif Kanté	農業研究所の土壤生产力管理のためのプロジェクトの推進
Haut Commissariat au Développement de la Steppe	アルジェリア	+213-2-597875	Mustapha Benchaoui	ステップの持続的経済開発プロジェクトの立案と実行
Hessische Landesanstalt für Forsteinrichtung, Waldforschung und Waldökologie	ドイツ	+49-5541-700479	Horst Weisgerber	中国北部の植林プロジェクトの推進
Implementation and Management of Water Protection Areas	モロッコ	+212-7-759109	D. Kissi	飲料水資源管理プロジェクトの推進
Indo-German Watershed Development Program	インド／ドイツ	+49-69-7431-2944	Jens Clausen	インドの半乾燥地での流域レベルの土地回復プロジェクトの実行
National Network of Farmer-Researchers/ENDA GRAF SAHEL	セネガル	+221-273215 graf@endadak.gn.apc.org	Tine Alphonse Sambe	村落単位の植林、小ダム建設などのプロジェクトの推進
Natural Resource Management Project	スーダン	+249-11-451041 100611.360@compuservy.com	Abdul Majeed	Wadi Kutum 地区における自然資源管理プロジェクトの推進
Observatoire du Sahara et du Sahel	フランス	+331-42733827 trux@app-paris.no.org	Anneke Trux	サヘル地域のセミナーの開催や出版物の印刷などの情報交換
Office de Développement Sylvo-Pastoral du Nord Ouest	チュニジア	+216-8-454718	Abdemajid Jemai	チュニジア北西部の資源保全と生活改良プロジェクトを推進
Programme Sahel Burkinafabe	ブルキナファソ	+226-660297	Matthias Banzhaf	村落単位での土地利用計画と資源管理の自助プログラムの推進
Project GE. O. R. E.	チュニジア	+49-216-1-792659	M. El Hédi Louati	水資源管理プロジェクトの推進
Projet Agro-Sylvo-Pastorale de Tillabéri, Projet de Développement Rural de Tahoua	ニジェール	+227-735029	Ibrahim Coulibally	ドイツの援助を受けた地域開発プロジェクト
Projet d'Aménagement des Terroirs et Conservation des Ressources dans le Plateau Central	ブルキナファソ	+226-301394	Karl P. Kirsch-Jung	ドイツの援助を受けた土壤保全やアグロフォレストリーのプロジェクト
Projet Pourghère, T. B. W. GmbH/GTZ	マリ／ドイツ	+49-69-440049 cbw@pop-frankfurt.com	Jürgen Gliese	燃料用作物生産による砂漠化防止プロジェクト
Resources Management Information System (REMIS)/GTZ	ドイツ	+49-6196-797153 christoph@berg.gtz.de	Christoph Berg	ドイツの援助を受けた29のプロジェクト地区の情報
RIOD-INTERNATIONAL NGO NETWORK	マリ	+223-22-23-59 enegy@endadak.gn.apc.org	Sina Maiga	砂漠化防止のための NGO の情報交換を推進
RIOD	パキスタン	+92-21-4964001	Arif Tanveer	アジア地域の砂漠化防止に関する NGO 会議の開催、RIODの構成団体
Sierra Leone Adult Education Association	シエラレオネ	+232-22-241620	Judith Conteh	女性のための砂漠化防止の教育を推進する NGO, RIOD の構成団体
Solidarité Canada Sahel	カナダ	+1-514-522-2370 scsmte@web.apc.org	Friederike Knabe	マリ、ニジェール、ブルキナファソで砂漠化問題の普及教育活動を推進。RIOD
The Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands	シリヤ	+963-11-5323063	Gilani Abdelgawad	アラブ地域における乾燥地の農業開発に関する研究

## Report on 9th Conference of the International Soil Conservation Organization

Ichiro TANIYAMA\*

The 9th Conference of the International Soil Conservation Organization was held in Bonn, Germany from 26 to 31 August, 1996. The theme of the conference was "Towards Sustainable Land Use-Furthering Cooperation Between People And Institutions". Almost 800 specialists from 80 countries took part in the conference. The conference was continued by 17 joint sessions about soil erosion, desertification and sustainable land use etc. with 100 oral communications and 180 poster presentations.

The exhibition, "Dare-to-Share Fair" was also held during the conference and opened to the public. The objects of this fair were information exchange, the transfer of innovations and informal technical discussions with booths, video and/or slide shows, and discussion meetings. At the fair 177 governmental and non-governmental groups from 60 countries showed the "state of the art" in the area of sustainable land use and resource management.

---

\* National Institute of Agro-Environmental Sciences, 3-1-1 Kannondai, Tsukuba, 305 Japan.

## 書評

真木太一：『中国の沙漠化・緑化と食料危機』信山社、1996年5月、A5版、205p.、2,700円。

1996年11月15日、中国の李鵬首相は世界食料サミットで、「1995年の生産量は4億8,000万トンに達し、開放政策で農業投資、農村の改革を推進し食糧自給に成功した。今後の国内の食糧消費の伸びを年率1%と想定、その需要を充足させることは完全に可能である」と言い切った。しかし飢餓や食糧不足問題を抱える途上国にとっては依然深刻な状況であり、とりわけ12億人を抱え全世界の1/5を占める中国の食料需給をどうするかが大きな問題である。

評者も1995年暮れに発行された『だれが中国を養うのか？一迫りくる食糧危機の時代』（レスター・ブラウン著）に衝撃を受けている。真木氏は以前からこの問題を取り組み、本書では詳細な調査結果を基に冷静かつ公平に分析し、予測モデルを考案して今後を展望している。「中国は現在、計画経済から市場経済へと移行しつつあり、ある程度の社会経済的混乱は避けられない。かなりの食糧輸入国にはなるが、世界を震撼させるような大量輸入国にはならない」というのが真木氏の予測である。中国に対する誠実な思い入れが感じられる。

この5～6年で12回、合計1年間に匹敵する現地調査と、砂漠化防止の基礎研究の成果に基づき、7章の構成からなっている。「中国の農林牧畜業の背景」「中国の農林牧畜業の特徴」「中国の沙漠とオアシス」「中国の沙漠化」「緑化と環境改良」「中国の沙漠化防止と緑化」「最近の中国と今後の展望」である。各章の内容はそれぞれ独立しているので、どの章から読み始めて良い。第5章「緑化と環境改良」は、真木氏の専門の農業気象分野である。防風林や防風ネットが気象改良・緩和効果があり、緑化と環境改良に役立つことを紹介している。従来、感覚的に推定していたことを、実際に現地で実証試験を数年間の苦労を重ねて得た膨大な観測データで証明していることは歴史的な功績である。この試験期間中に、猛烈な砂塵の中で危険な気象観測を続けたこと、夏季の気温40℃、地表面温80℃以上の砂丘調査後、道を間違え水が無くなり疲労困憊したことなどの体験を述べている。第11次南極地域観測隊越冬隊員も経験しているからこそ得られた貴重な沙漠での気象観測データであり、真木氏の真骨頂を示している部分もある。これらのデータと、現在中国全土に進められている緑化計画の実践と独自の考察が、第6章「中国の沙漠化防止と緑化」へつながり、第1章から5章までの内容を各地の実情に合わせて

説明されており一貫性がある。さらに防風林の種類と緑化草種として多目的用、緑化・木材用、乾燥地緑化用の高木・中木・低木・草種に分けて数多く列挙されていること、防風・防砂法での生物・生態的方法、物理的方法、化学的方法その他に整理・分類されていることなど、総合的に理解しやすい。中国の沙漠化防止について今までの研究成果にオリジナルな考えを追加し、具体的な事例も付加してまとめられているので、今後の事業計画にも最適な参考資料となるであろう。本書における図40枚と表12枚は、身体をかけて収集したデータを駆使し、見やすくするための工夫がなされている。また、随所に掲載されている論文、報告書、新聞情報などは驚くほどの最新データであり、出版直前ギリギリまで心血を注いで新しい情報を収集した努力と誠意には敬意を表するものである。さらに写真の腕前も相当なもので、本学会が募集した写真展で優秀賞を受賞、「おあしす」の表紙を飾ったこともある。本書の中にも47枚の写真がふんだんに掲載されており、その写真を通して真木氏の沙漠に対する深い愛着に触れることができる。

評者自身は、今年度から中国内蒙ゴホルチン沙漠で砂漠化防治及び自然生態系復元のためのモデル事業を日本沙漠学会会員を中心に進めているが、真木氏が推奨している様な地域の総合開発を目指しており、大いに参考にしたい。本書は中国における砂漠化防止、緑化に関する者にとってバイブル的存在であり、研究者、教育者、行政官等には必読本である。これから中国や沙漠について学ぼうとする学生諸君にとって、自然に学術的な内容を理解してしまう本である。

「日本の沙漠研究の水準を高め、その成果を全世界の沙漠に住む人々に還元できるようにしたい」という当学会の願望から考え、本書を基点に全地球的な問題として、世界各地の沙漠化地域について『○○国の沙漠化・緑化と食料危機』シリーズが、学会の事業として継続できたら素晴らしいことである。これが日本沙漠学会に託された役割ではないかと思う。

(長濱 直)

篠田雅人：『神々の大地 アフリカ』古今書院、1996年、古今書院、220p., 2,678円。

壮大なゴンドワナ大陸からアフリカ大陸への変遷には数億年の歴史がある。その壮大なロマンに夢馳せること——本書はそれを可能にしてくれる。タッシリナジールの壁画には「緑のサハラ」が描かれている。長い気候変動の歴史の中で、サハラが緑で覆われていた湿润な時代が何度か繰り返し訪れた。そのような自然環境の変遷や砂漠化のメカニズムを探る研究を筆者は手がけてきた。読者も緑のサハラを夢み、湿润化再来の可能性へ想像を膨らませながら、アフリカの広大な大地をタイムトラベルすることができる。

不思議な自然現象の世界が展開する。アフリカといえばサハラ砂漠を連想するが、キリマンジャロの標高4,000～5,000mに山岳砂漠がある。貿易風逆転のため大気が安定し、雨はその下の2,000～3,000mにだけ降る。

赤道直下とはいえ、キリマンジャロにも山岳氷河がある。そのダイヤモンド氷河から伸びる1,400mの氷柱は、唯一世界的な登山家メスナーによってアイスクライミングされた。ところが、あるべきはずの氷柱の一部がいつの間にか消え、単なる岩場と化した。気候変動のなせるわざとしても、登頂をめざす登山家にとっては、大きなショックであっただろう。

リフトバレーの西斜面を降りるとお茶の産地ケリチョがある。年降水量は1,837mm（ケニア最高）に達し、世界一電の多いところでもある。高原を熱する熱帯の日射が斜面を滑昇する強い気流を生じるが、もう一方の条件である上空の寒気はどうして流入していくのだろうか？ケニアの雨季（3～5月、10～11月）には、局地豪雨が降る。ケニアでは偏東風擾乱がなぜかはっきりと観測されないという。高原が熱源となって波動を誘発しそうに思えるが…。

1日の天気変化にも顕著な地域性がみられる。リフトバレー（大地溝帯）を挟み、東にインド洋、西にビクトリア湖が位置している。昼は東寄りの一般風がリフトバレーの西側まで入り込み、そこでビクトリア湖の湖風と収束して、雲が発生し、降雨をもたらす。夜にはリフトバレーの東斜面を山風が吹き降り、東寄りの一般風との間で収束、雲を生じ、雨が降る。そして、インド洋からもビクトリア湖からも水蒸気の届かないリフトバレー内は非常に乾燥している。しかしこの谷間にも湖が存在する。映画にもでてくるフラミングの湖である。

アフリカは熱帯・亜熱帯にまたがる広大な大地がゆえに、降雨の不安定性が大きな問題となっている。例えば、1910年代にはカメルーン北部を大干ばつが襲い、牧畜民

ボボロ族は放牧地を失い、南に移動した。1968～73年の干ばつ時には冷涼なカメルーン西部高地に北方からの移民が入り、周辺地域の森林破壊が進行した。

サヘルの降水は7～9月にまとまって降る。この季節に数百ミリの降雨があり、かろうじて天水農業が行える限界地域に当たっている。ミレットは年降水量300mm、ソルガムは500mmが耕作限界だが、その限界値をわずかに下回るだけで、干ばつになってしまう。

アルジェリア気象局長は「イナゴはメッカよりいでて、アラビア半島、…、サハラと回教国を旅する」という。1980年代前半の大干ばつの後、1987～88年に降雨があり、イナゴが大発生し、モロッコとアルジェリア北部の農作物に大被害がでた。

半乾燥の厳しい自然条件のなかでも、限られた草木が生育している。ところが、都市化による裸地は街を取り囲むように同心円状に拡大しつつある。これこそ人為的な砂漠化である。

「サヘルの干ばつは終息したか」では、1950年代から1980年代前半（1984年を中心とする今世紀最悪の干ばつ期）にかけて、顕著な降水量の減少トレンドとともに、地域的な降水量分布の関連が指摘される。つまり、南北半球の乾燥地、サヘルとカラハリには長期的な降水量変動に正の相関が認められ、また、両地域と東アフリカには負の相関があるという。これはグローバルな上昇・下降気流の場が効いていると解釈される。「熱帯アフリカにおける気候・植生・土壤の緯度変化」は大気循環と植生帶との関係をわかりやすく表示した模式図で、理解を助けてくれる。そして著者は、ENSO（エルニーニョ関係）サイクルとは異なる10年スケール変動の観点から、海洋の役割が大きいと考えた。特にインド洋の海面水温に着目し、その昇温が熱帯アフリカの降水量減少に影響すると推論している。

アフリカといえば、過酷な自然条件下で民族紛争の種が尽きない。現に「1980年代前半には、干ばつ、飢え、疫病、内戦と、この世のありとあらゆる災禍が巻き起こっていた」し、「大軍の後には必ず凶作あらん」とは悲しい現実を端的に示すものである。しかし、本書のそこから、人間味あふれる民族性が浮き彫りにされる。ポレポレ（スワヒリ語でゆっくりゆっくりの意）、悠久の時を刻むアフリカには、現代社会が忘れてきた大自然と心の豊かさが満ちている。

「砂漠の写真を眺めていると懐かしい」という著者の弾むような滑らかな語り口が、遠き大地への空想の世界を無限大に広げてくれる。

（山川修治）

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 03-3262-1401

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 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 1,457 円)

発行日 1996年10月25日

印刷:(有)英和出版印刷社

# JOURNAL OF ARID LAND STUDIES

---

## CONTENTS

---

### Frontispiece

Ichiro TANIYAMA: Land Degradation in Naiman Province of Inner-Mongolia

### Original Articles

- Taichi MAKI, Mingyuan DU, Borong PAN and Ryoji SAMESHIMA: Climatic Characteristics at a Desert and an Oasis in Turpan of Xinjiang, China ..... 1-14
- Fenghe JIN, Yasushi NISHIZAKI, Huaining YIN, Hongxiang BAI, Yingshun ZHENG and Tatsuaki YAMAGUCHI: Effects of the Peat Application on the Physical and Chemical Properties of Soil and Growth of Plants in Sandy Soil—Statistical Analysis for Pot Cultivation of Chinese Cabbage— ..... 15-23
- Yutaka SHINODA, Yasushi NISHIZAKI, Shigeyoshi NOYORI, Tatsuaki YAMAGUCHI, Zhouqiong WANG, Jin JIANG and Jian MA: A Fundamental Experimentation of Desert Fertilization Using Peat in Xinjiang China—Water Retentivity of Peat and Pot Cultivation of Pak-choi— ..... 25-33
- Takashi ISHIYAMA, Yasuhiro NAKAJIMA and Koji KAJIWARA: Vegetation Index Algorithm for Vegetation Monitoring in Arid and Semi-Arid Land ..... 35-47
- Teruo AOKI, Tadao AOKI, Masashi HUKABORI, Michio HIROTA and Ximing ZHANG: Remote Soundings of the Atmospheric Water Vapor and Methane in Taklimakan Desert, China ..... 49-58

### Special Reports

“Proceedings of Sixth Symposium on Arid Land Technology”

- Summary ..... 59-60
- Keiji SASAKI and Koichi YAMADA: Position of Biological CO<sub>2</sub> Fixation in Arid Land ..... 61-64
- Masuo OZAKI: Waste Water Treatment and Recycling Use in Arid Land ..... 65-68
- Hiroshi SHIMIZU: The Possibility of Electric Vehicles as Transport Facilities in Desert ..... 69-73

### Material

- Syuji YAMAKAWA: Topics Concerning Deserts and Desertification in the Meetings of the Research Group on Influences of Climatic Change ..... 75-78
- Ichiro TANIYAMA: Report on 9th Conference of the International Soil Conservation Organization ..... 79-83

### Book Review

..... 85-86