

## 公開シンポジウム

# 世界における土壌荒廃の現況と修復への課題

- 新しい技術の創造を目指して -

## 講演資料

日時：1995年11月20日(月)10：30～17：00

場所：日本学術会議・講堂(千代田線・乃木坂駅下車)

共催：日本学術会議：土壌肥料・植物栄養学研究連絡委員会  
農業土木学研究連絡委員会  
環境工学研究連絡委員会

後援：(社)日本土壌肥料学会  
(社)農業土木学会

肥沃で、健全な土壌は高い生物生産を産み出す場であるばかりでなく、整然とした物質循環が行使されるため、低いエネルギーの投与で安定な生物生産が行なえる場でもある。人類がたかだか 30cm にも満たない耕土を繰り返し使用することによって、生命と文明を育てこられたのはこのような低いエネルギーの投与で高い生物生産性を維持できる優良な農地が存在したことにほかならない。

しかし、生命と文明の育成は一方では、人口を増大させ、農業以外のさまざまな産業を出現させた結果、優良農地の転換を余儀なくさせられ、生物生産の比重が次第に問題の多い土壌へと移らざるを得なくなっている。加えて、地球規模の気候変動は問題の多い土壌地帯での生物生産を一層困難な状況に追い込んでおり、たとえば、1960 年代後半に起こったアフリカ・サヘル地域の干魘は、多数の人と家畜を犠牲にただけではなく、その後広範囲に砂漠化をもたらし、一時は砂漠化の面積は毎年 500 万ヘクタール(四国と九州をあわせた面積に相当する)ずつ拡大されていると報告されたことは記憶に新しいところである。さらに最近では、1992 年、ワシントンにある世界資源研究所は「世界の全植生領域 114 億ヘクタールの約 11%にあたる 12 億ヘクタール(インドと中国をあわせた面積に相当する)の面積におよぶ貴重な土壌の表層土が、1945 年～1990 年間の 45 年間に侵食によって、失われており、今後もこの流出は拡大され、21 世紀の半ばごろまでには表層土の流出面積は倍増するであろう」と予想している。土壌の表層土はそれが上記のような優れた機能を有するようになるのは、土壌の母材から発して長大な時間をかけて生成されることを思えば、土壌の表層土を侵食により失うことは、生物生産性が簡単にはもとの状態に戻らないことは容易に想像されるところである。

このような土壌侵食に代表される土壌荒廃の問題が世界の至るところで近年とくに深刻に起こりつつあるのは、まさに生物生産の場をより問題の多い土壌へと移さざるを得なくなった上述の事実を反映するものと考えられる。しかし、われわれはもとの状況に回帰することはできないのも事実であり、反省こそすれ、このままの状態を放置するわけにはいかないことは言うまでもないことである。

21世紀を間近に控えた今日、どのようにしてこの難局を乗り越え、新しい世紀を創造していくのか、それは今、われわれに緊急に問われているきわめて大きな課題である。この問題の解決を目指すには、単に土壌科学だけではなく、広く農学各分野のほか、環境工学やシステム工学の研究手法も取り入れた総合的な修復手法の開発が必要と考え、今回のシンポジウムを企画した。

本シンポジウム開催に当たって、話題提供を行なっていただく講演者の方々をはじめ、御協力を賜った関係機関に深甚なる謝意を表すものである。

# 気候システムからみた土壌劣化の現況と課題

東京都立大学・理学部・地理 篠田雅人

## 1. 乾燥地域における土地荒廃

砂漠である極乾燥地域を除いた乾燥地域(図 1)のうち、約 20%が土壌荒廃、約 50%が土壌荒廃の伴わない植生荒廃にさらされている。これらを合計すると、約 70%、約 36 億ヘクタールがなんらかの土地荒廃を被っている(Dregne *et al.*,1991)。砂漠化とは、不適切な人間活動に起因する、乾燥・半乾燥・乾性半湿潤地域における土地の荒廃現象である。ここで、荒廃とは、風・水による土壌侵食・堆積、自然植生の長期的な減少または収穫高の減少、土壌の塩性化・アルカリ化をさす。また、人間活動とは過放牧、過耕作、樹木の過剰伐採、火入れ、不適切なかんがいなどをさす。

乾燥地域における土壌荒廃の分布図によると(図 2)、世界の土壌荒廃のうち約 90%が軽度・中程度であるが、アフリカにおいては他の大陸と比べて、強度・極強度の割合が高い。特に、サハラ砂漠から中近東の砂漠周辺域での土壌荒廃が著しい。

## 2. 半乾燥地域の環境特性

砂漠化は人間活動が主要因となって生じるものであるが、降水量の経年変動が大きいという不安定な半乾燥地域の気候下で生じる干ばつ・洪水がひきがねとなっている。雨季は数カ月の短期に集中し、強い雨が草本主体の薄い植被に覆われた土壌を侵食する。長い乾季には、一年生の草本が枯れ植被がなくなった地表面で、風による土壌侵食が起きる。このように、降水がほどよくあり(年間数百ミリ程度)植被が少ない半乾燥地域では、短い雨季と長い乾季にそれぞれ雨と風による土壌侵食が効率的に働くため、世界の気候帯のなかでも侵食量が極大となる。水循環という視点から、半乾燥地域の雨となる水蒸気は、ほとんどが地表面からの蒸発散によって供給され、この蒸発散に地表面状態が重要な役割を果たしている。

### 3. 気候システムと砂漠化

気候とは大気の長期的な平均状態である。大気の状態(気候)は、水圏・地圏・生物圏という地球表層を構成する他の部分系から影響を受けている。乾燥地域における砂漠化という生物圏・地圏の人為的変化は大気圏に影響を及ぼしていると同時に、地球規模の大気圏の変化(たとえば、地球温暖化・オゾン層破壊)も生物圏・地圏に影響を及ぼしている。このように、大気状態はそれ以外の部分系からの影響を受けているので、これらを統合して「気候システム」と呼ぶ。気候システムの各部分系は、エネルギー・物質をやりとりしながら、相互作用を及ぼし、全体として変化している。

干ばつと砂漠化のうちどちらが原因で結果かは、気候システムの問題である。ここでは、砂漠化、すなわち人為的な地表面状態の改変が干ばつを引き起こしているのか、あるいは、人為的要因と干ばつを含む自然的要因によって砂漠化がもたらされるのか、という問題について、考察する。

### 4. 大気大循環モデルによる数値実験

近年、砂漠化で犠目を浴びたのは、サハラ砂漠南縁地帯のサヘル地域である。ここでは、1950年代から1980年代中ごろまで、降水が一方向的に減少し続けている(図3)。サヘルにおいて、砂漠化によるアルベド(日射の反射率)の増加が降水量の減少をもたらし、その結果ますます砂漠化と干ばつが加速されてゆくという正のフィードバック機構が働いている可能性を、Charney(1975)が初めて示唆した(図4)。

中・上流域がサヘルを流れるニジェール川では降水の約96%が、地表面からの蒸発散によってまかなわれている。もし砂漠化して流出が多くなると、地表面からの蒸発散が減少し、降水が減少するものと推察される。最近の大気大循環モデルによる研究によると、砂漠化によるアルベドの増加、土壌水分・蒸発散量の減少、地表面粗度の減少という変化が、降水を減少させる効果を持つことが定性的にわかってきた。

しかしながら、大気大循環モデルの空間分解能が現実的な砂漠化地域を表現するのに粗すぎることで、そこで仮想した砂漠化による地表面状態の変化が非現実的であるため、定量的な議論には至っていない。

### 5. 地表面状態の衛星観測

サヘルにおける広域的な地表面状態の観測は、衛星データが利用可能になった1970

年前後に始まった。このような解析によると(Norton et al., 1979; Courel et al., 1984; Dregne and Tucker, 1988)、アルベド・植生指標(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)は降水量と同調して経年変動しているが、降水量の多寡で地表面状態が決まっているように見える。この結果だけからすると、上で述べたような「砂漠化 干ばつ」という機構が働いていることには疑問がもたれる。

NDVIと降水量の季節変化を並べてみると(図5, 実線)、雨季におけるNDVIの極大は降水量のそれにおよそ0-1カ月遅れる。このような雨とNDVIの季節変化のずれは、雨が降り、土壤水分が満たされ、それが植物の成長のために使われるまでの時間であると考えられる(Shinoda, 1994b)。平均的な季節変化(破線)からの偏差(点線)をみると、雨季におけるNDVIの偏差は、降水量のそれに0-1カ月に遅れているように見える。このように、季節・経年変化とも「雨 植生」という因果関係が成り立っているようである。

一方、「88年雨季の雨の正偏差 引き続く乾季のNDVI正偏差-89年雨季の雨の正偏差」という現象(図5)は、季節を越えて持続する大気と地表面の相互作用(図6)の可能性を示すものであり、このような事例の詳細な解析が今後望まれる。

衛星観測以前の期間については、Gornitz(1985)が西アフリカにおける人為的な植生変化を文献資料から復元し、ここ100年間のアルベドの増加が最小0.4%(17.4-17.8%)、最大4%であると推定したが、この長期的変化は近年の干ばつ時の変化(Norton et al., 1979; Courel et al., 1984)に比べて小さい。また、サヘル地帯よりもその南に位置する湿潤地域でアルベドの増加が大きいとしている。すなわち、Charney(1975)が数値実験で仮定したようなアルベドの大きな変化はサヘルで実際には起きていないのである。

## 6. 全球規模の気候変動

粒界の半乾燥地域のなかで、アフリカ南部のカラハリ、インド北西部、オーストラリア、南米のノルデステは、数年の周期をもつエルニーニョ/南方振動(ENSO)現象の影響を受けている(Ropelewski and Halpert, 1987)。

一方、サヘルではENSOの影響は比較的小さく、むしろ、先に述べたような長期的な変化が卓越している(図3)。このような現象は、他の熱帯半乾燥地域ではみられない。最近、この降水の減少傾向の原因として、Charney(1975)の提案したような地表面状態の変化よりも、全球規模の海水面温度・大気大循環の変動を重視する研究が増えてきている(Folland et al., 1986; Shinoda, 1995a など)。全球海水面温度の上位3主成分

モードで、サヘル降水量変動の約 55% を説明できる(篠田, 1995c)。

## 7. まとめ

サハラ砂漠南縁の半乾燥地域、サヘルでは近年砂漠化が著しく、長期的な干ばつが発生した。サヘルにおける降水量変動の分散の約 55% は、全球規模の海水面温度によって説明され、地域的な地表面状態は二次的な要因である。このような視点からすると、「砂漠化 干ばつ」ではなく、干ばつが砂漠化の自然的要因のひとつになっている可能性が高い。サヘル以外の熱帯半乾燥地域では、近年、顕著な降水の減少傾向はみられず、数年周期をもつ ENSO 現象がその降水量変動を支配しているように見える。しかしながら、サヘルにおける雨と植生指標の季節・経年変化をみると、「砂漠化 干ばつ」というプロセスが否定されたわけではなく、干ばつを引き起こす各要因の貢献度を、サヘル以外の半乾燥地域でも明らかにしてゆく必要がある。

本論で述べたような大気-陸面相互作用の研究を進めるためには、今後、衛星観測を利用した広域的な地表面状態(植生・土壌水分・積雪など)を継続的・長期的にモニターしてゆく必要がある。また、温暖化ガスの増加がどのように大気大循環を変化させ、乾燥地域の土壌・植生・気候に影響を及ぼすかという問題も重要な研究テーマである。

## 文 献

- Chamey, J. G. (1975): Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101, 193-202
- Courel, M. F., R. S. Kandel, and S. I. Rasool(1984): Surface albedo and the Sahel drought, *Nature*, 307, 528-531
- Dregne, H. E. and C. J. Tucker(1988): Green biomass and rainfall semi-arid sub-Saharan Africa. *J. Arid Environments*, 15, 245-252.
- Dregne, H., M. Kassas, and B. Rosanov(1991): A new assessment of the world status of desertification. *Desertification Control Bull.*, No.20, 6-18
- Gomitz, V(1985): A survey of anthropogenic vegetation changes in West Africa during the last century- climatic implications. *Climatic Change*, 7, 285-325.
- Norton, C.C, F.R. Mosher, and B. Hinton(1979): An investigation of surface albedo variations during the recent Sahel drought. *J. Appl. Meth.*, 18, 1252-1262.
- UNEP(1992): *World atlas of desertification*. Edward Arnold, London 69p.
- Folland, C.K., T.N. Palmer, and D.E. Parker(1986): Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, 1901-85. *Nature*, 320, 602-607.
- Ropelewski, C.f. and M.S. Halpert(1987): global and regional scale precipitation patterns associated with the El Nino/Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1606-1626.
- 篠田雅人(1994): サヘル干ばつは終息したか. *地理*, 39, 66-80.
- Shinoda, M.(1995a): West African rain belt variation. : An update to 1990. *J. Meteor. Soc., Japan*, 73, 259-366.
- Shinoda, M.(1995b): Seasonal phase lag between rainfall and vegetation activity in tropical Africa as revealed by NOAA satellite data. *Int., J. Climatol.*, 15, 639-656.
- 篠田雅人(1995c): サヘル干ばつにおける海水面温度と地表面被覆の影響. *地学雑誌*, 104, 592-59R.

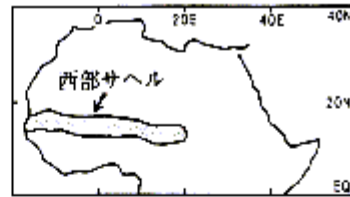
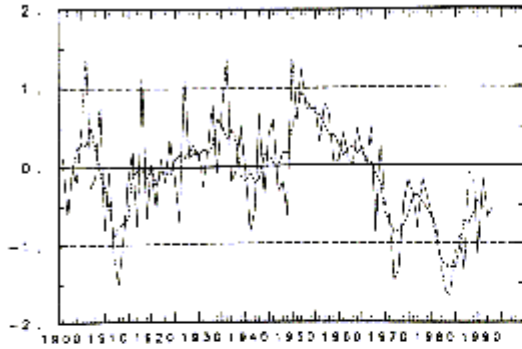


図3 西部サヘルの5-10月(雨季)の降水量変動(篠田,1995c) 破線は5年移動平均。

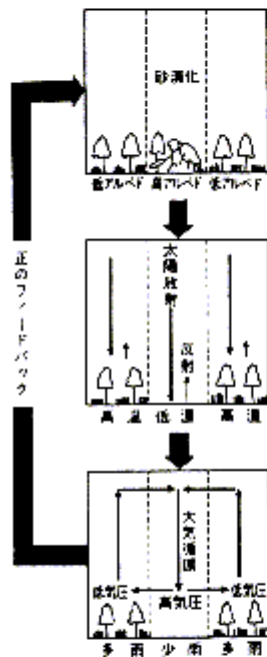


図4 砂漠化が干ばつをひき起こす機構(篠田,1994)

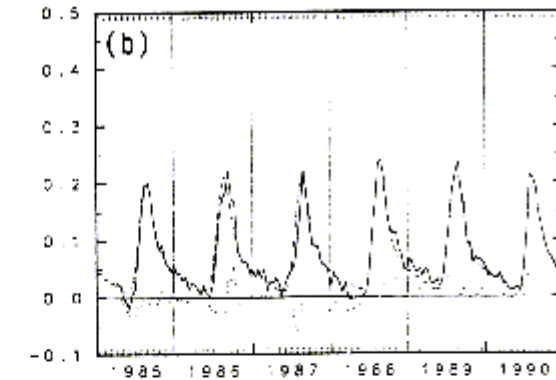
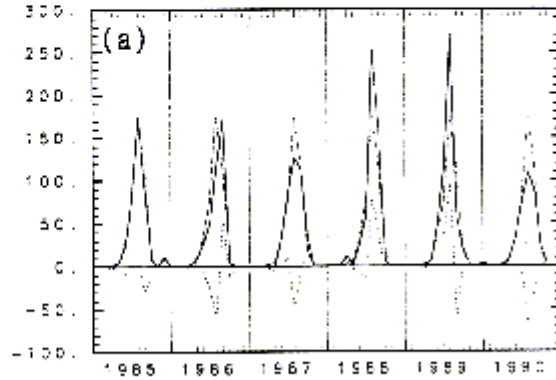


図5 西部サヘルにおける雨(a)と植生指標(b)の変動(実線)(篠田,1995c) 破線と点線は平均的な季節変化とそれからの偏差。

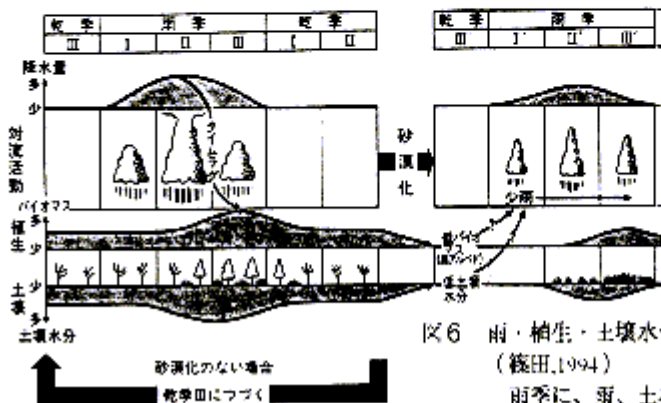


図6 雨・植生・土壌水分の季節変化と砂漠化の影響(篠田,1994)

雨季に、雨、土壌水分、植生の順に季節変化する。砂漠化は植生・土壌を通して大気に影響する。



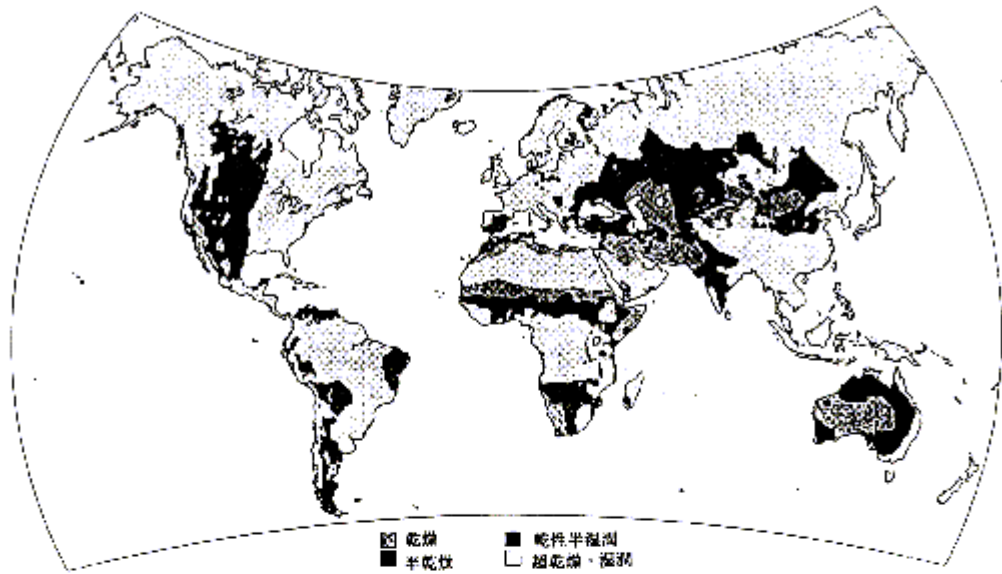


図1 世界の乾燥地域の分布 (UNEP,1992)

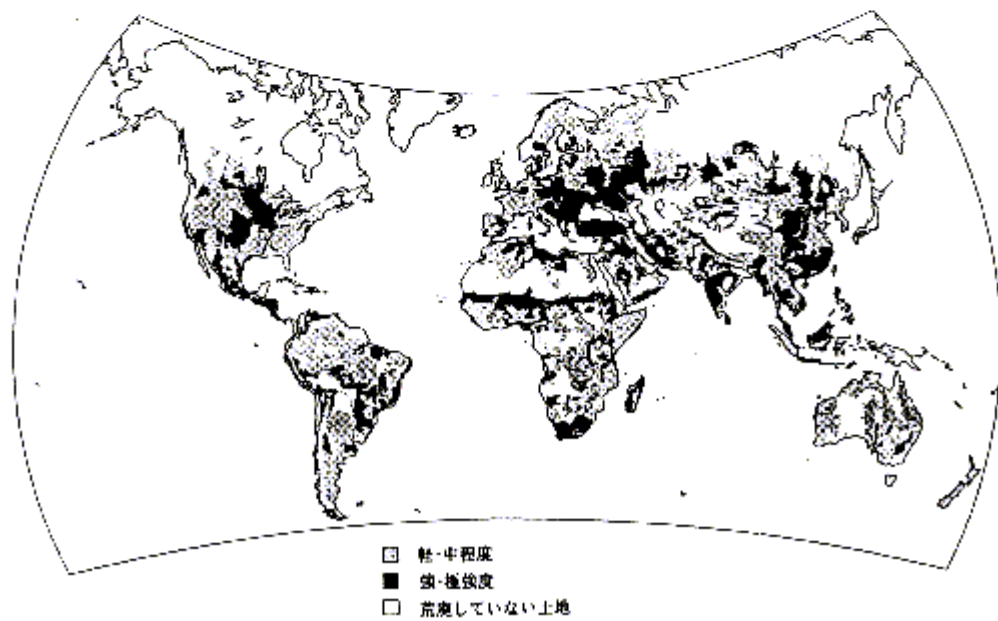


図2 世界の土壌荒廃の分布 (UNEP,1992)

# タイ東北部塩類土壌の成因とその修復

名古屋大学農学部 木村真人

## 1.はじめに

タイ国東北部に分布する塩類土壌の面積は東北部の総面積の 17%にも相当する。その成因は、第三紀に形成されたマハサラカム層中の塩類を含む頁岩や砂岩から、その風化に伴って地下水中に溶け出した塩類が地下水と共に下方へと運ばれ、地下水面の浅いところで乾期の蒸発散に伴い地表面に運ばれ集積したものである。そのためこれら塩類土壌は Natraqualfs や Halaquepts に属し、地下水面の浅い場所に通常分布している。塩類土壌は Mun 河や Chi 河の沖積地帯と、undulating 地帯に広く分布する。また、近年の塩類土壌の拡大は、森林伐採、製塩、ダム・道路・水源の建設のためと言われている。

ところで、本地域はサバンナ気候(ケッペンの"Aw")に属し、乾期と雨期が明瞭である。例えば、コンケン県における過去 30 年間の平均降雨量は 1,190mm であり、その 85%が 5 月から 10 月の雨期に集中している。塩類集積に伴う各種の問題は乾期中に現れる。この乾期の蒸発散に伴う地下水の毛管上昇に加え、近年高濃度の塩類を含む灌漑水の利用が新たな耕地土壌の塩類化を引き起こしている。

## 2. コンケン地域に分布する塩類土壌

### 1) 塩類土壌の特徴

当地域の塩類土壌は一般に風化の進んだ砂質(SL-LS)土壌で、CEC をはじめ N、P、K、各種微量元素に乏しく有機物含量もきわめて低い。また主要粘土鉱物はカオリンである。このように砂質で CEC、有機物含量が低く、Na、Cl が主要な塩類であることから本土壌はきわめて緩衝能が弱く、透水にともない容易に pH が上昇し、透水液中には多量の粘土が分散する。

当地域の塩類土壌に広く生育する野生植物としては *Fimbristylis dichotoma*, *F.miliacea*, *Friocaulon sp.*, *Cyperus rotendus*, *Cynodon dactylon*, *Panicum repens*, *Maytemus mekongensis* などのイネ科植物やスゲ類が主体をなし、タマリンなど木本性を除き草本性の豆科植物は見あたらない。また当地域の野生植物は耐塩性と耐湿性を兼ね備えた多年生植物と乾期のあいだ種子状態で過ごす 1 年生植物に大別される。過酷な乾期に加え、土壌

の肥沃性が低くまた塩類濃度も高いため当地域は植物にとって生育限界地域であり、植物群落は脆弱で容易に致命的な打撃を受ける。塩類集積の結果放棄された農地が水牛や家畜の放牧地にしばしば利用されているが、このような場合過放牧は脆弱な植物群落を容易に破壊し塩類の噴き出した真っ白な裸地を拡大する。

## 2) 塩類土壌の理化学性の季節変動

土壌中の水分、塩含量は大きな季節変動を示す。1983年にKK-3地点で測定した地下水水位は雨期の終わり65cm、乾期の終わりには、195cmであった。

下図に同地点の乾期と雨期の土壌表層部における水分と塩類の収支を示す。この年の乾期の雨量は僅かに24mmであり、他方蒸発散能(PET)は375mmと計算された。ところで表層140cm中の水分量はこの間288mmから192mmへと96mmも減少し、そのうちの58mmは地下水の低下によるもの、残り38mmが蒸発散によるものであった。従って、乾期中の土壌表面からの蒸発散量の合計はPETの約1/6に相当する62(24+38)mmと見積られた。このように僅かの水分しか実際には蒸発しなかった原因は塩類土壌の表面が塩の集積した皮殻で覆われ、さらにその直下にはスポンジ状の構造が発達し水分の蒸発を抑制していたためと推察された。

塩類の洗脱は僅かの降雨で容易に進行し、雨期開始1月以内の110mmの降雨により表層60cm中の塩類の約70%が洗い流されていた。これに対し土壌中の水分含量の上昇にはさらに長い時間が必要で同期間の水分増加は僅かに5mmで、雨期開始後2-3カ月目ようやく水分含量の顕著な増加が記録された。

pHの季節変動も大きく雨期には9以上に、他方乾期には4以下に低下する。これは雨期に降雨がNa型粘土(または有機物)と反応し(Na-粘土 + H<sub>2</sub>O → H-粘土 + NaOH)、生成したNaOHによりpHを上昇させるためであり、他方乾期には逆にH型粘土と地下水中のNaClが反応し(H-粘土 + NaCl = Na-粘土 + HCl)、生成したHClによりpHを低下させるためである。本土壌はCECが低く、有機物含量も低いことからこのような機構によるpHの変動幅を著しく大きなものとしていた。

## 3) 塩類土壌の改良試験

当地域塩類土壌の特徴を念頭に、塩類濃度の減少、粘土の分散抑制、土壌肥沃性の増進を目的とした各種の土壌改良処理を施し、それにともなう土壌の理化学性の変化を調査した。

土壌への添加資材として、硫酸カルシウム、炭酸カルシウム、転炉スラグ、堆肥を、また乾期における塩類を含んだ地下水の毛管上昇抑制を目的として作土直下に岩石、

粗朶、竹、籾殻、廃油を埋設した。また激しい降雨による団粒破壊の軽減と、水分維持を目的として稲藁マルチの効果も検討した。

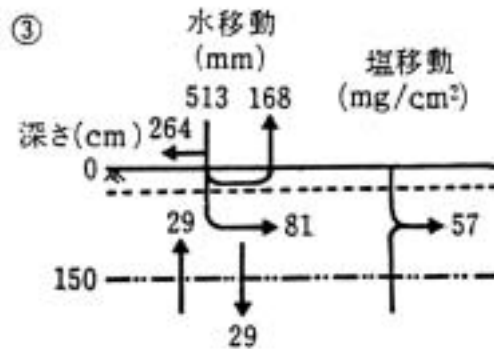
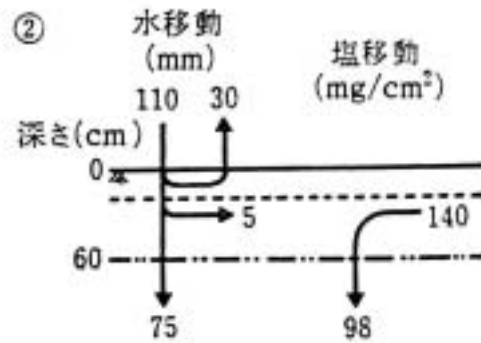
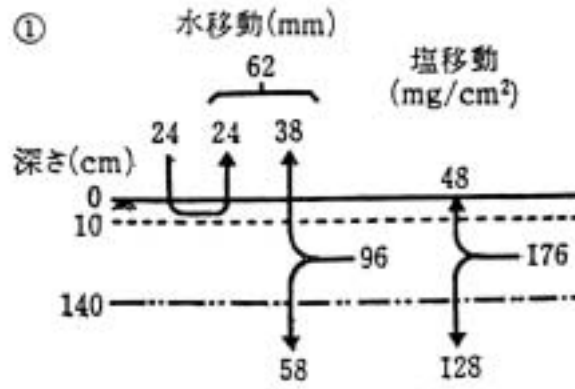
これら処理が土壌の pH におよぼす影響を比較すると、堆肥施用区、硫酸カルシウム添加区、稲藁マルチ区では pH が中性に維持されていたのに対し、転炉スラグ添加区、炭酸カルシウム添加区では pH が著しく上昇した。廃油や籾殻を埋設した区では pH の季節変動が無処理区同様激しかった。

降雨の浸透にともなう粘土分散に対するこれら資材の抑制効果を比較すると、硫酸カルシウム、炭酸カルシウム、転炉スラグ施用区が最も優れ、堆肥施用区でも粘土の分散抑制効果が認められた。他方、塩分を含む地下水の毛管上昇抑制を目的とした各種資材埋設区では無添加区同様多量の粘土分散が観察された。興味あることは、稲藁マルチ区においても粘土の分散が抑制されていたことであり、これはマルチ処理により降雨から団粒構造が保護されたことに加え、稲藁から浸出した物質が団粒構造の安定に寄与したためと推察した。検討した各種資材のうち、地下水の毛管上昇抑制には籾殻が最も優れ、岩石、粗朶がそれに次いで優れていた。

以上の結果より、堆肥施用と稲藁マルチの併用が最も有効な改良方法であり、さらにカルシウム資材の添加(過剰施用に気を付けなければならないが)は土壌の緩衝力増進に役立つものと結論された。

#### 参考文献：

- 木村眞人・高井康雄 1990：日土肥誌、61，538-544
- Kohyama, K. and T.subhasaram 1993：ADRC，Khon Kaen, Thailand. Technical Paper No.12.  
pp. 55
- Mitsuchi, M, P. Wichaidit and S.Jeungnijirund 1986：ADRC，Khon Kaen, Thailand  
Technical paper No.1, 24-35
- Murase,J., B.Topark-Ngarm, T.Adachi, M.Losirikul and M.Kimura 1990: Soil Sci. Plant  
Nutr., 40, , 173-177
- Patcharapreecha, P., B. Topark-Ngarm,, I. Goto and M. Kimura 1990:Soil Sci. Plant Nutr., 36.  
363-374
- Topark-Ngarm, B., P.Patcharapreecha, I. Goto and M. Kimura 1990:Soil Sci. Plant Nutr., 36.  
289-298
- Wada H., P. Wichaidit and P.Pramojanee 1994: ADRC, Khon Kaen Thailand Technical  
Paper No.15.pp67



土壤中での水分および塩の移動 (コンケン、KK-3 地点)

①乾期、②雨期開始後1ヶ月、③雨期開始後2～3ヶ月

# ニジェールにおける砂漠化防止実証試験の実際

農用地整備公団 東北支社 深井善雄

## 1.はじめに

農用地整備公団では砂漠化防止の主たる技術課題は「農地の生産力の安定及び持続する方法の確立」にあるとの考え方に基づいて、1990年より6カ年の予定で砂漠化防止対策実証調査を西アフリカニジェール国のトロディ地域において実施してきている。

一方、1994年6月砂漠化防止条約政府間交渉会議で採択された「深刻な干ばつ又は砂漠化に直面している国(特にアフリカの国)における砂漠化防止のための国際連合条約」では「砂漠化」とは「乾燥、半乾燥及び乾燥半湿潤地域における種々の要素に起因する土壌の劣化」と定義づけている。すなわち、砂漠化防止に取り組むことはそのまま土壌劣化防止に取り組むことを意味するのである。

そこで今回は「世界における土壌荒廃の現況と修復への課題」というテーマではあるが、砂漠化防止という観点からその中でも代表的な植林活動を通して新しい技術の創造の提案を試みる。

## 2. 現地のプロジェクト事情

植林プロジェクトは砂漠化が深刻な地域において防風、防砂効果から現地においてしばしば実施されている。しかし、それらの活動資金は援助に頼っているのが実情で、資金援助終了と同時に活動も実質的に停止してしまうのが常である。

## 3. なぜ植林活動は持続しないのか

先に述べたように現地政府は残念ながら植林活動に支出するだけの財政的余裕はない。したがって、援助によって活動するための基礎を築いた後、プロジェクトは完了し、その後は現地に住む人々(政府も含めて)の自助努力に期待すると結んでいるが、それらのほとんどが立ち消えになってしまっている。そこで「引き継がれていない原因は…」と関係者に問うと「それは地元の自助努力の欠如によるため…」などと答えが返る。

しかし、資金がないということはその活動に参加すること自体がボランティア活動の一種となる。生活に余裕のない今の彼らに無償奉仕を期待するのは無理がある。他方、現地を観察するに限り、彼らが決して怠けものの集団とは思えない。あの酷暑の中で家族の糧を得るため、彼らは誰の指示を受けているわけでもなく農耕に従事する。それは彼らが耕作する事が必要性だと感じているからである。

#### 4. 彼らは植林の必要性を認識していないのか

その辺りの意識を確認するため地元住民にアンケートを実施し、その主な回答内容をまとめると以下のとおりである。

- ・周囲の木々が減少していることは感じているものの、まずは食べる事事が最優先と考える
- ・植林により利益を得るまでには時間を要するので関心が薄い
- ・防風、防砂を目的とする場合、その利益は視覚的に認めにくく、プロジェクトが何をしようとしているのか理解できない
- ・通常、プロジェクトが植林した樹木は自由に利用できないため、彼らにとっては何の利用価値もなく、かえって貴重な耕作地を奪われて困る
- ・欲しい木はある

#### 5. 彼らが必要と感じる植林(=木)とは

現地に限らず、日本でも樹木は生活のあらゆる場面で登場する。燃料はもちろん、食用、飼料用、薬用、建材などその用途が多岐に渡る。ただ日本と現地で異なる点はそれらの代替品の有無にある。

彼らの生活において木はまだまだ不可欠な要素なのである。ところが、プロジェクトの目的が防風、防砂としていれば、生育が早く、耐乾、耐塩性に優れるなどの特性ばかりに目が奪われる(多くは彼らの全く知らない外来種)。しかし、逆にその目的が住民生活に寄与する植林とすれば、その植栽樹種構成は全く異質のものとなるはずである。そして、まさに彼らが望む植林とは生活に密着し、自由に活用できる木々なのである。

## 6. なぜ、そのような植林プロジェクトが存在しなかったのか

このような地域の実情を政府の植林局の役人の中でも認識している人もいる。それでもそのようなプロジェクトが蘇生しなかった理由を彼らへのアンケート調査によれば次のようにまとめられる。

- ・ 内容の策定段階で現地意見が取り入れられない場合が多い
- ・ 計画を策定する側に在来種の重要性を認識している人が少ない
- ・ 計画の目的そのものに地元住民の生繕に配慮したものがない
- ・ 在来種は相対的に生育は遅く、早急な成果を期待するなら不利である
- ・ 在来種を植林するための情報、実績がまだまだ少ないため、実績のある外来種を採用している

## 7. 今必要とされる情報とは

本実証調査の植林分野では以上のような実情をふまえ、まずは住民が必要とする樹木(主に在来種)に関する情報(援助する側への情報)及びそれらを植林する場合に必要な技術情報(援助側、輾援助側双方へ向けての情報)を提供すべく実証調査、試験を行った。その調査結果の一部のみを参考までに紹介するが、スペースの都合上その方法等具体的な内容については省略する。

### 1) 圃場周辺に現存する樹種を確認する

まずはどのような樹木が存在するかを確認する。

地元には樹木のその効能について詳しい人物が1村に2、3人はいる。彼らから基本的な情報を得てから作業に入るほうがよい。参考までに実証圃周辺の自生する樹木の一部を紹介する。

樹木名一覧表

表-1

樹種番号	樹種名(ZARMA) トロディ地域の呼び名	学名	属名
1	GAO	Acacia albida	MIMOSACEAE
2	RUBU-KOWARE	Acacia ataxacantha	MIMOSACEAE
3	GUMBI	Acacia erythrocalyx	MIMOSACEAE
...	...	...	...
78	MORAYE	Ximenia americana	OLACACEAE
79	DARE	Ziziphus mauritania	RHAMNACEAE
80	KORO-DAREY	Ziziphus mucronata	RHAMNACEAE



## 2)それらの用途及び住民の評価

在来種の活用方法及び住民の希望を確認する。これは村人達に集まってもらい質問形式で行うほうが時間的には省力化できる。また、男性と女性では全くことなる見方をしているケースも多く見られた。人選はバランスよく選抜することをお勧めする。なお、調査結果の一部は下表のとおりである。

樹種別評価表

表-2

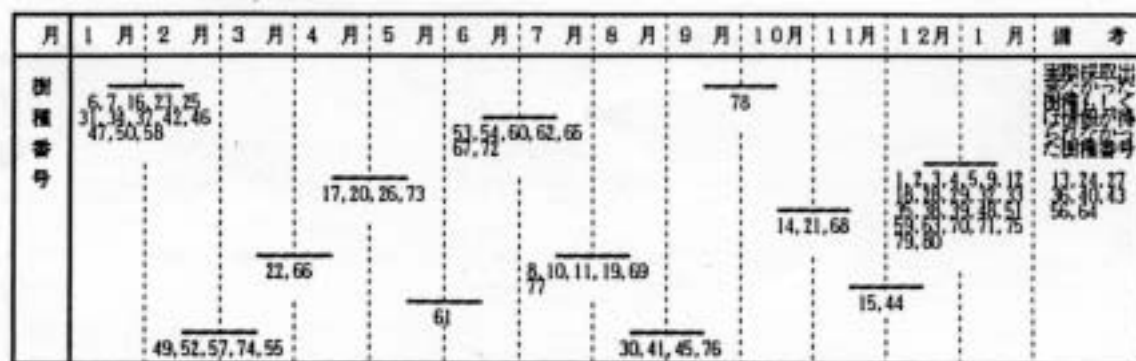
樹木番号	燃料木	食用	飼料木	薬品	用材	A	B	C	評価
1	B	C	A*	B	B	2	3	1	12
2	B	C	B	C	C	0	2	3	4
3	B	C	B	C	C	0	2	3	4
..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
78	B	A*	B	B*	B	1	4	1	11
79	B*	A*	B	A	B	2	4	0	14
80	B	B	B	B	B	0	6	0	12

## 3)種子を確保する

在来種を育苗する場合、種子を購入できる樹種は限られているため採取からスタートする。まず種子を採取できる時期を確認するとともに採取したらそれらの重量を計測しておき、種子の出来不出来(成熟度)の比較検討材料にする。参考までに実証圃周辺の種子採取時期をカレンダーとして作成したので紹介する。なお、表中の番号は調査で設定した樹種番号である。

在来樹木の種子採取カレンダー

表-3



#### 4)水節約(育苗期間短縮)のための発芽試験

現地で育苗に使える水は限りがある。そこで少しでもかん水量を節約し、より多くの苗木を生産するために、育苗期間の短縮を図るべく種子に数通りの処理を施して、発芽までの日数を比較検討した。その結果、処理を施すことにより大幅に日数を短縮できる種がいくつも確認された。処理方法は「傷つける」、「一晩水に浸す」、「煮沸する(3分程度)」、「未処理」の4通りとした。

#### 5)苗を育てる

在来種を中心に実際に播種、育苗して、種毎の育苗日数、成功率、用水量を調査した。育苗日数及び1本/日あたり必要な用水量から求めた総必要用水量と井戸のキャパシティを比較し、生産可能本数を求めることもできる。ちなみに調査では100本・日当たり1.8Lとなった。

樹種別育苗日一覧表

表-4

樹種番号	平均樹高までの育苗日数	平均樹高(cm)	育苗成功率(%)	樹種番号	平均樹高までの育苗日数	平均樹高(cm)	育苗成功率(%)	樹種番号	平均樹高までの育苗日数	平均樹高(cm)	育苗成功率(%)
1	80	25	100	21	65	25	100	58	70	25	50
2	80	11	60	26	65	25	100	60	50	25	70
3	70	25	60	29	75	25	100	63	80	14	30
11	80	4	10	50	80	12	30	79	80	20	50
14	80	21	100	52	80	17	30				

#### 6)苗木を植える

育苗出来た種を実際に定植し、活着率、成長速度等を調査する。植栽位置は同種が現存する周囲の環境(土壌、水条件、地形、降雨量等)より判断して決定する。一方、果樹などの換金価値が高い種は、管理(家畜からの害も比較的容易に防げる)が容易で、生活污水等をかん水としても利用できる居住区周辺に植林す事をお勧めする。また、周囲の社会状況より判断して植栽樹種を決定するのも有効である。例えば、家畜の多い地域では飼料木を増やしたり、人口増加の激しい地域ではエネルギーの確保を目的として生育の早い外来種を植林するなどその地区の実情にそくした植え方することが望ましい。

## 7)成長及びそれらの需給バランスを予測する

将来期待できる材積を予測することはより具体的な計画を立案する貴重なデータとなると同時に住民へ植林の意義を説明する上で説得力あるデータとなる。詳細については省略するが、調査ではまず樹木毎の成長として代表的な種毎の「樹径と年輪」、「樹径と樹高」、「樹径と材積」、「年輪と材積」それぞれの関係式を求め、現場で樹径を計るだけでその年数、材積等を把握できるようにした。それら数式を用いて、一定区域内にある樹木の樹径を計測し、総材積を求めた。

他方、需要としては最も消費目的として大きな薪としての消費に注目し、一人・日当たりの薪消費量(0.65kg)から国全体の消費量を計算するとともに人口増加率などから数年先の消費量を予測した。これら双方の結果を比較検討し、その地区における薪としての消費を恒久的に賄うための必要植林本数、面積を提案した。

## 8. 新しい想像による新しい技術の創造

今回実施した調査については現地政府の技術者も地元住民は高い関心を示した。また、植林後の利用方法を住民に一切任せるという条件であれば、住民にとっても今までの植林プロジェクトより活動内容はわかり易く、利益も伴うため興味を持つはずである。まず魅力ある計画が提案できて、はじめて住民の参加を期待できるのである。

そのように考えてくると今後はハード面もさることながら、同時にソフト面も充実した、バランスの取れた援助形態が期待されると考えられる。一方、砂漠化に取り組む場合には非常に長い期間を要するため地元住民による持続的な協力なくして根本的な対策とは言えない。ただ、住民自ら管理運営できる活動であれば、おのずと限界があり、目に見える成果がすぐに得られるとも限らない。

それに加えて、彼らが受け止められる技術レベル、社会レベルは先進国からすれば物たりなさを感じる内容となる場合も考えられる。しかし援助側が納得するようなレベルまで彼らが到達するのを待つほどの時間的余裕はなく、逆に援助側がレベルダウンする方が現実的な解決策ではないだろうか。

現地の生活が安定し、余裕が生まれるまでは経緯、形、手法にこだわらず、相手の立場になって物事を想像し、当事者が受け入れことのできるような「新しいと考える技術を創造する」ことこそが砂漠化防止 = 土壌修復への第一歩である。

# 砂漠緑化とエネルギー問題

成蹊大学・工学部・小島紀徳

## 1.はじめに

砂漠化をはじめとする地球環境問題は、他の地球環境問題やエネルギー問題とは切っても切れない関係にある。環境問題に対する対策を考えると、そこには必ずといってエネルギーが関与する。これらの環境問題は人的な関与が引き起こしたものだと言ってよく、その意味でエネルギーを含め、人的活動を含めて考える必要がある。砂漠化も同様である。自然の範囲内での気候変動、あるいは異常気象によるものは、むしろ自然災害であり、環境問題ではない。また、超異常気象が有るとするならこれも人為的と考えるべきだろう。

砂漠化の原因としては、種々の人為的影響が考えられるがその一つに薪などのエネルギー採取の問題が上げられる。これは原因としてのエネルギーとの関わりである。全地球規模の環境問題として二酸化炭素問題が上げられる。これはほとんどエネルギー問題と同意と考えてよいが、その対策技術のひとつとして砂漠の緑化による炭素固定が上げられる。一方で、砂漠は日本などの高緯度、多雨地域と比べて太陽の恵みが多く、太陽光直接発電、太陽熱利用、温度差、風力をはじめ様々な自然エネルギー生産の場として考えることが将来必要となろう。そしてさらにこれらのエネルギーを環境改変に適用することこそ、砂漠工学のひとつの役割と考えられる。地球環境の問題は、「何が地球に優しいか？」すら明確になってはいないといって良いだろう。砂漠化防止のために、二酸化炭素を放出しながら貴重な化石エネルギーを大量に使用するなら、そのこと自身は砂漠には優しくとも、地球には決して優しくはない。本講演では、何が地球に優しいかを、様々な視点、特にエネルギーを関連させながら、著者の見解を述べる。

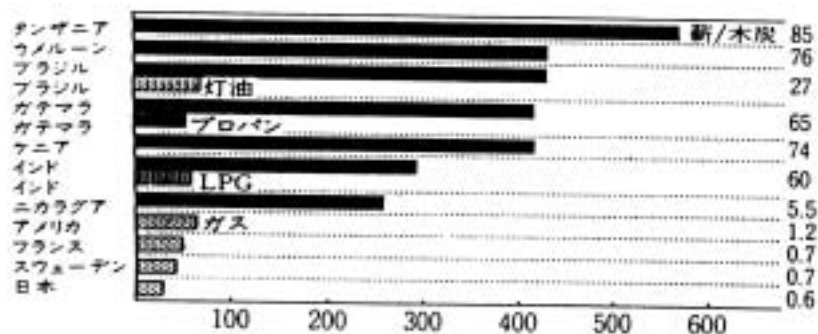
## 2. 砂漠化と薪の利用

森林破壊あるいは砂漠化の一因である薪の利用について議論しよう。サヘル地域等での砂漠化の原因として若木等を薪として利用することが上げられる。もちろんその背景には人口増加と自然の気候変動があるが、人類の過剰な利用が砂漠

化を促進していることは間違いが無い。まず第一の視点は、このエネルギーが何に使われるかである。途上国ではもちろん全使用エネルギー量は先進国に比べ小さい上に、図1に示すようにその大部分が調理用エネルギーに用いられる。(注：薪年間1トンを570ワットと計算しているが、これは薪の発熱量を数千kcal/kとし、その熱を夜昼かまわずずっと使っているとして平均した値。電気ストーブをずっとつけっぱなしにしたと思えばよい。)そして一人当たりの調理用エネルギー使用量は先進国に比べ非常に大きい。すなわちその利用効率は著しく低く、非効率的であるといわざるを得ない。緑のサヘル等でもその活動の一環としてかまどの熱効率改善に取り組んでいるようである。

それでは薪を石炭などの化石燃料におきかえることはどうだろう。経済的な問題はあがるが、出来ないことはないだろう。その薪の採取が、もしそのまま育成するならば樹木となるであろう若木からなされているならば、石炭に変えることでも砂漠化は防げる。しかし、それは、もし熱効率の改善がなされないままで売らなければ、後述の二酸化炭素の排出増につながるであろうし、また硫黄酸化物などの問題も生じるかも知れず、望ましいとは思えない。

薪を使った場合、エネルギーの利用効率が低い一番の理由は、固体の非効率的燃焼にあるのだろう。固体の場合、燃えはじめるまでに時間がかかり、調理が終わってもすぐに火は消えない。一方、灯油にしるガスにしる止めればコックを



1人あたりの調理用エネルギー消費量 (W)  
注：年間1tの薪を燃焼したときのエネルギーは平均570W

図1 発展途上国における一人当たりのエネルギーの消費量。右の数字は調理用エネルギーの比率、% (カーメン、1993；小島、1994)

ひねるだけである。小さな炉でもよいからガス化炉があり、ガスを貯めるタンクがあれば便利になり、エネルギー効率も大幅に改善されるのではないかと期待される。仮に薪を使うにしてもガス化すればその使用量は大幅に削減出来る。

砂漠で得られるもうひとつのエネルギー源は太陽エネルギーである。太陽熱による熱湯供給あるいは凸レンズ、凹面鏡集光による炊事用熱源の供給等の簡易的なエネルギー供給手段が考えられる。アルミ箔を箱に貼り、太陽光を反射により集めるだけの物でも、2リットルのお湯が50分で沸くという[カーメン、1993]、目的に応じたエネルギー利用が大事だろう。

### 3. 砂漠での自然エネルギーによる発電とその輸送

上述のように砂漠は雨もほとんど降らず、雲も少なく、いつでも太陽が降り注いでいる。そのうえ、日本より緯度が低い地域では、その力も強い。同じ太陽電池でも、あるいは太陽熱利用でも日本の数倍近い働きが期待できる。

風も強い。牛山[1993]によれば、夜には風も強く、太陽の補完的役割も期待できるという。もちろん調理用の他、造水、揚水、送水に用いることが出来る。直接太陽熱によりポンプ駆動に利用する、ソーラーポンプシステム[日本太陽エネルギー学会、1985]、風力ポンプ[牛山、1993]なども、砂漠での利用が期待される。

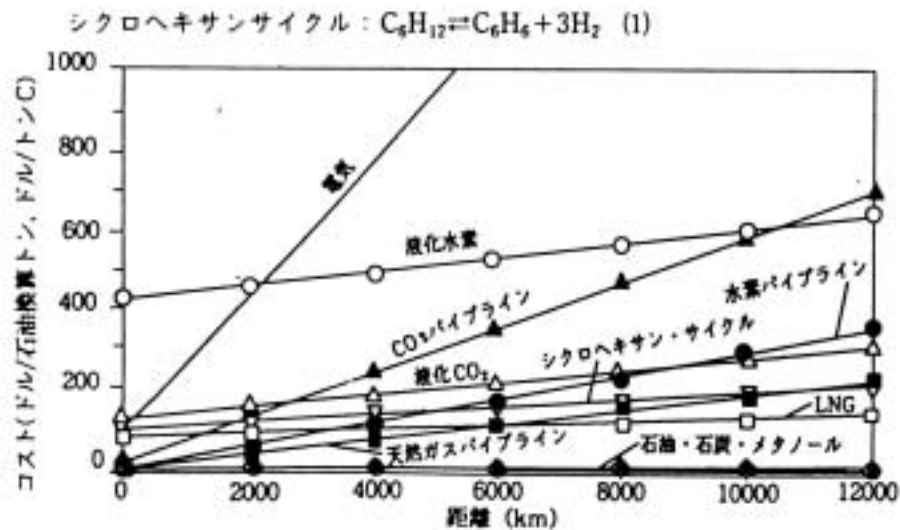


図2 各種エネルギーの長距離輸送コスト。(藤井、1993; 小島、1994)

しかし、これからの世界のエネルギー供給を考えると、このような自然エネルギーを利用しない手はない。海洋エネルギーもあるが、それよりも陸上というだけで実現には近いような気がする。まずは発電だろう。風力については、日本は小規模なものがあるだけだが、カリフォルニアの砂漠の丘陵地では、風車がずらりと並んだ光景がみられるという。太陽電池については、軍用化にはまだまだ問題もあるが、効率は年々増大しつつあり、価格も下がりつつある [ 稲葉ら, 1993 ]

しかし、最も大きな問題はエネルギー輸送の問題である。エネルギーの輸送コストを図 2 [ 藤井、1993、小島、1994 ] に示す。これから、石炭、石油といった化石燃料が実は非常に運びやすいことに気がつく。しかし、電気を直接輸送するとすれば、これは膨大なコストとなる。電気分解により水素を造り、パイプラインで運ぶとしても日本は非常に遠い。エネルギー多消費型産業、例えば鉄、アルミ産業を砂漠に置き、これを運ぶとすれば、エネルギーを運んだことになる。砂漠に産油国があるとするなら、重質油の軽質化、脱硫のための水素をまずは太陽電池で作ってみたい。重質な油を輸入する代わりに軽質化した油を輸入すれば、その一部が太陽エネルギーの缶詰となる。もう少し大規模にやるのなら、石炭を砂漠に運び、それを電気分解で作った水素で液化することも出来るだろう。中国には石炭も砂漠もある。液化をするには最適な場所である。ただ問題は液化残渣がでること。そのためには液化の効率を上げるという技術開発が必要である。

しかし、拙著 [ 安部ほか、1994 ] にも書いたように、最もエネルギーを消費し、そしてエネルギーをかけずに運べる「人間」をエネルギーの豊富な砂漠に運ぶ。それが「砂漠に人が住む日」であり、そのための工学として砂漠工学がある。と最近思い始めている。あまりに SF 的すぎるだろうか。

#### 4. 地球温暖化問題、二酸化炭素問題、そして砂漠緑化

地球温暖化問題において二酸化炭素の寄与は最も大きいといわれている。しかし、二酸化炭素はエネルギーを生産したから生じたガスであり、残念ながらこれを工学的に“固定する”ことは原理的に不可能である。そのほかの対策、すなわち二酸化炭素を回収し、これを海洋や地中に隔離することも、できればやりたくない。なぜならそのためにまた余計なエネルギーを大量に使わざるを得ないからである。

さて、地球規模の炭素循環は、図3 [小島、1994] に示すように化石燃料の使用に伴い炭素換算で約55億トン(1979~88平均)が放出され、そして大気にはこのうちの65%弱の二酸化炭素(炭素換算で年間35億トン程度、1979~88平均)が蓄積される。

一方で、一般的には熱帯林破壊、砂漠化により二酸化炭素は15~20億トン-C程度放出されていると考えられている。この数字の信頼性は乏しいものの、実は非常に大きい意味を秘めている。すなわち、前述の大気中への残留二酸化炭素量、35億トン程度の半分にもなっているのである。熱帯林破壊、砂漠化さえ防止すれば、大気への残留が半分となり、さらには従来の熱帯林破壊とほぼ同一速度で逆に植林を進めるとすれば、二酸化炭素問題は解決し得るともみなし得るのである。

最近こそ化石燃料の寄与は大きいですが、歴史的にみればむしろ森林の破壊により放出された二酸化炭素の方が蓄積量としてはずっと多い。そしてその用途は、農牧畜あるいは鉄、煉瓦生産等のエネルギー多消費プロセスに用いられたとされている。砂漠を緑化することは、環境被填では決してない。砂漠は砂漠であるべきとの議論は、少なくとも人為的に出来た砂漠には当てはまらない。元の森林に戻すべきだ。

それでは問題は何か。もちろん水である。淡水製造は非常にエネルギーを要する。塩水、海水が手に入ったとしてもである。一所懸命エネルギーをかけて水をつくり、その水で森林をつくり、その森林から得られる生産物を燃やしても、か

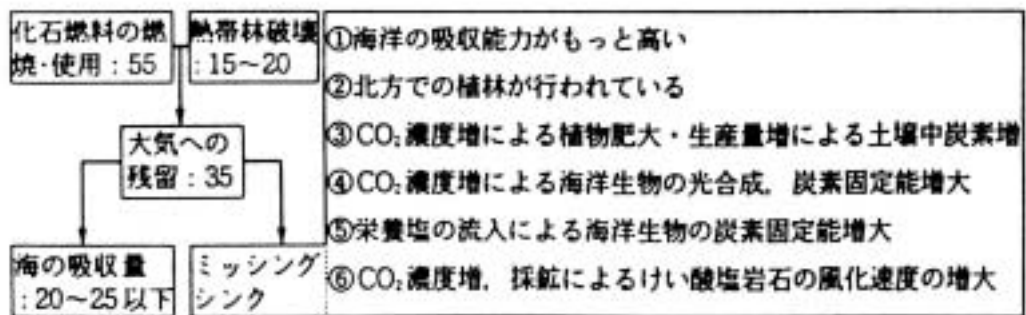


図3 人類が関与したことによる非定常炭素移動(億トン/年)、1978年~1988年平均。(小島、1994)



けたエネルギーは回収できない。多重効用缶を使っても、省エネルギープロセスである膜を使ってもである [松村、小島 1991]

結局のところ現状ではこれらの効率を上げる工夫とともに、むしろ節水などにより水の有効利用を図り、必要水量を減らすことに重点を置くことになる [小島, 1991]。水の用途と、必要な水質との関係を明らかにすることが必要である。日本ガス協会 [1994] では、砂漠地に大規模に雨を降らせることまで考えている。夢のような話であるが、近い未来に最も現実味のある技術なのかも知れない。

## 引用文献

安部征雄・小島紀徳・遠山粧雄編(1994)：『沙漠物語』、森北出版：p. 135 .

稲葉敦・島谷哲・田畑総一・河村真一・渋谷尚・岩瀬嘉男・角本輝充・

小島紀徳・山田興一・小宮山宏(1993)：

太陽光発電システムのエネルギー評価。「化学工学論文集」19：809-817 .

牛山泉(1993)：沙漠の風力エネルギーと風車。「沙漠研究」3：177-181.

カーメン、D. (1993)：21世紀地球賞。「日経サイエンス」5月号特別付録 .

小島紀徳(1991)：沙漠工学を考える・沙漠にもっと水を「沙漠研究」3：73-76

小島紀徳(1994)：『二酸化炭素問題ウソとホント』アグネ承風社

日本ガス協会(1994)：『CO2 対策としての砂漠緑化技術調査研究会最終報告書』

日本太陽エネルギー学会編(1985)：

『太陽エネルギー利用ハンドブック』pp. 554-557

藤井康正(1993)：東京大学博士論文

松村一夫・小島紀徳(1991)：

沙漠緑化による炭素固定のエネルギー収支「沙漠研究」1：17-26

# 地球温暖化防止、緑化促進のためのシステム工学

東京大学 小宮山宏

## 大規模緑化の意義

21世紀を間近にひかえ、有限の地球と拡大する人類活動の相克が生じる問題が顕在化している。地球温暖化は、そうした中でも最も本質的な問題である。その進行の定量的予測や影響の評価に関して不確実性があり、今後の科学的知見の蓄積が重要であることも事実である。しかし、惑星の表面温度が、太陽放射、反射率、温室効果で支配されていることは確実であり、温暖化ガスであるCO<sub>2</sub>の蓄積が平均気温の上昇をもたらすことも疑いない。地球のバランスは意外に微妙であるらしく、その影響を軽視する根拠はない。

もし、大気中CO<sub>2</sub>濃度の上昇を抑制するという立場に立つとすれば、対応は限られる。炭素の発生をもたらす化石資源の使用を削減するか、固定かである。固定の定義を明確にする必要があるだろう。固定の目的は大気中CO<sub>2</sub>を削減することである。我々は、大気と陸と海しかもっていない。したがって、CO<sub>2</sub>問題における固定とは、何かを行った最後の結果として「陸か海の炭素量が増えること」である。

その他、固定法の意義をランクづける基準として、炭素収支、規模、期間、コストなどが挙げられる。詳細を議論しないが、こう考えてくれば、CO<sub>2</sub>問題の対策の中で「緑化」が占める位置は明らかであろう。

## 湾岸の植林

アマゾン地球の肺ではない。全体収支として、成熟林はCO<sub>2</sub>を固定もしないし、O<sub>2</sub>を放出もしない。CO<sub>2</sub>問題における緑化は、草原が森林になること、疎林が密林になること、そして、砂漠が森になることである。砂漠の植林は水を供給すれば容易である。しかし、海水淡水化により造水しその水で木を育てると、造水に使ったエネルギーから発生するCO<sub>2</sub>をその水で成長する木は固定できない。つまり、「湾岸の植林」はCO<sub>2</sub>発生型の植林である。

## 何が必要か

砂漠を緑化するために、必要な要素は数多いであろう。樹種、土壌、砂止め等々。われわれは、キーのひとつとして、水の循環を考えている。造水でエネルギー収支がとれないなら、太陽エネルギーを利用した造水を考えることが必要であろう。最も大規模な太陽熱造水は、言うまでもなく降雨である。降雨量増大は可能なのであろうか。砂漠化が、木の蒸散作用を失わせ、気象に影響し、砂漠化を促進するといった説もある。それは違うという説もある。明らかなことは、調査した限り論理的結論は得られていないということである。それで、大規模植林が降雨量増大をもたらすかどうかをキーのひとつとして、大規模植林の可能性を体系的に探索する研究を進めているところである。次頁以下は、RITEの調査グループの報告書の一部である。

最後に、地球温暖化問題の問題の枠組みを明確化し、対応を具体例をもって体系的に示した拙著「地球温暖化問題に答える」(東京大学出版会、TEL:03-3812-2111(7967))をお読み下さい。

## はじめに

地球温暖化対策の一環として緑化を考える場合、大気中のCO<sub>2</sub>を陸地に正味で正の値となるよう固定し、大気中CO<sub>2</sub>量を削減する、または少なくとも濃度増加をくい止めるのに有効な規模を設計基礎としなければならない。現在、地球全体で大気への炭素放出量が年間70~80億トン、このうち化石燃料に由来する炭素は約60億トンと見積もられている。従ってCO<sub>2</sub>対策として多少とも有効な固定であるためには、1億トン以上の規模が求められる。温帯林並みの植林密度で緑化がなされたとして、年間1億トンの炭素固定に必要な面積は70~100万ha、すなわち約100km四方と算出される。このような規模での植林技術は現存しない。この面積は、従来型技術の延長で考えると途方もなく巨大であり、この巨大さ自体が考慮すべき因子の数を飛躍的に増大させ、問題の性質を複雑化させている。新たな要素技術、システム化技術の研究開発が必要な理由は、ここにある。

上に述べた規模の植林を実施する対象として当面考えられる地域の多くは、乾燥した未利用地帯であろう。従ってこのような大規模緑化においては、水資源の確保が基本条件であり、しかもCO<sub>2</sub>対策であるからには、できる限り自然エネルギーだけを利用して、超省エネルギー的に実行しなければならない。

そこで、本調査研究では、自然エネルギー利用による水資源確保技術の実効性について研究するとともに、その水資源を有効に活用するための技術の調査を行った。さらに水資源の確保を含めた大規模緑化をCO<sub>2</sub>対策として位置づける上での、評価手法の策定に着手した。大規模緑化のための研究開発課題が水資源問題だけでないことは言うまでもないが、本年度は最も基本となる水資源の確保と利用に限定して調査研究を進めた。

研究の遂行に当たり、基本方針を以下のように定めた。すなわち、水資源の確保または利用に関する課題について、Science上の知見を明らかにし、それをモデル化してSimulationを行い、その結果に基づき、要素となるTechnologyを具体化する。これを図示すると図1のようになる。これを研究の内容から整理すると、次の3分野に大別できる。これらについて、以下簡単に説明する。

### (1)水資源の確保-降雨量増加の可能性の研究

砂漠等の乾燥地域における水資源確保の基本は、その地域の水資源に影響する全地域において降雨量を増加させることである。降雨量を増大させるには、次の3条件を整えることが必要である。

湿潤空気の供給 ---地表からの蒸発促進

湿潤空気の過冷却---上昇気流作り

氷晶核の形成 ---誘雨核の存在

この3条件を整備するために、次の3方向からのアプローチが考えられる。

地表には人為的な変更を加えず、自然条件の中で降雨促進条件を探す。

人工構造物の構築等により地表状況に変更を加え、積極的に降雨増大の条件を作る。

対象地域の一部を緑化することにより、それを引き金として緑化による微気候の改善が進み、

以後緑化が自立的に進行できるようにする。

これらのアプローチに必要と考えられる技術の有効性を確認し、その上でその有効性を定量的に評価することが本調査研究の主たる目的である。これらの研究体系を描いたのが図2である。これらのうち、本年度は気象モデルによるシミュレーションを中心に、降雨増加の可能性の検討と降雨増大の技術的手段の評価研究を進めた。

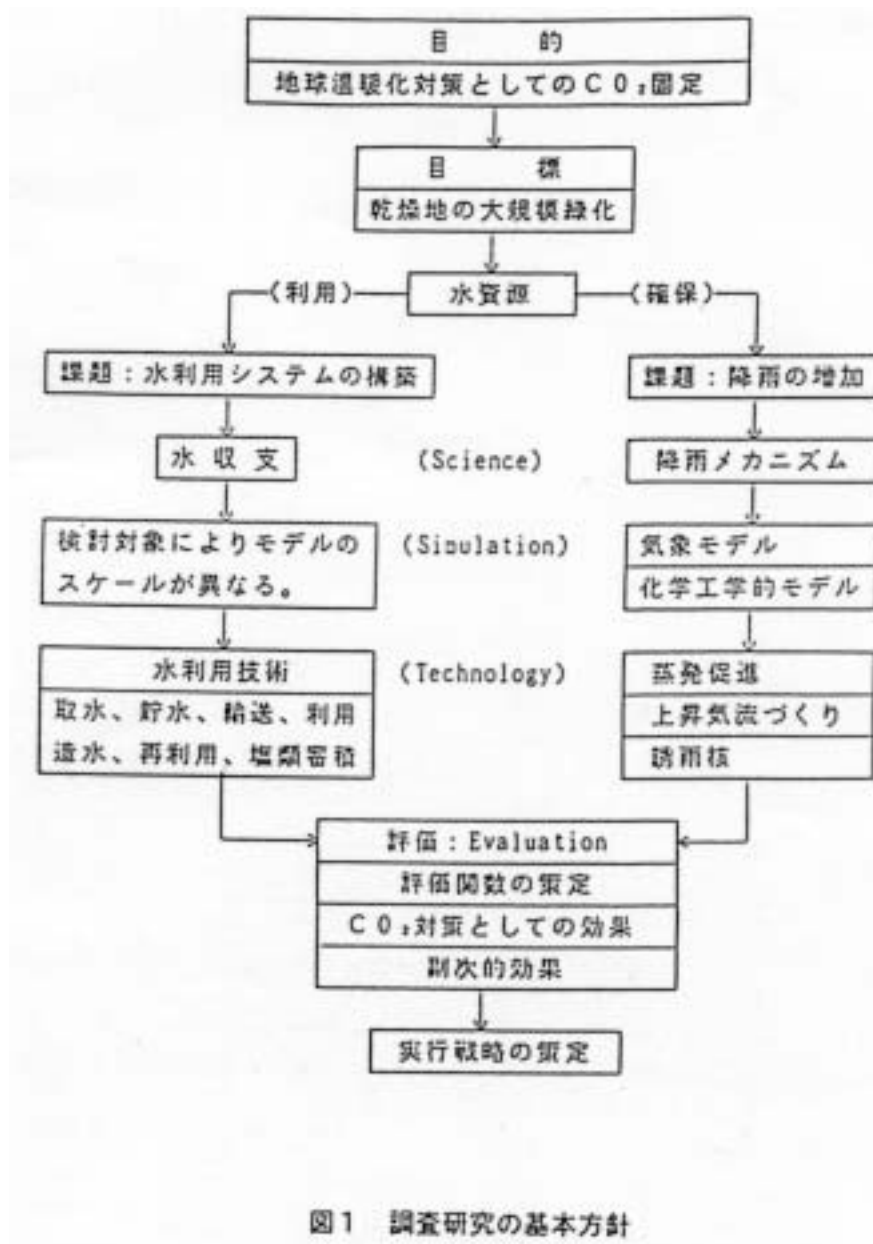


図1 調査研究の基本方針

図2 降雨量増加の可能性の研究

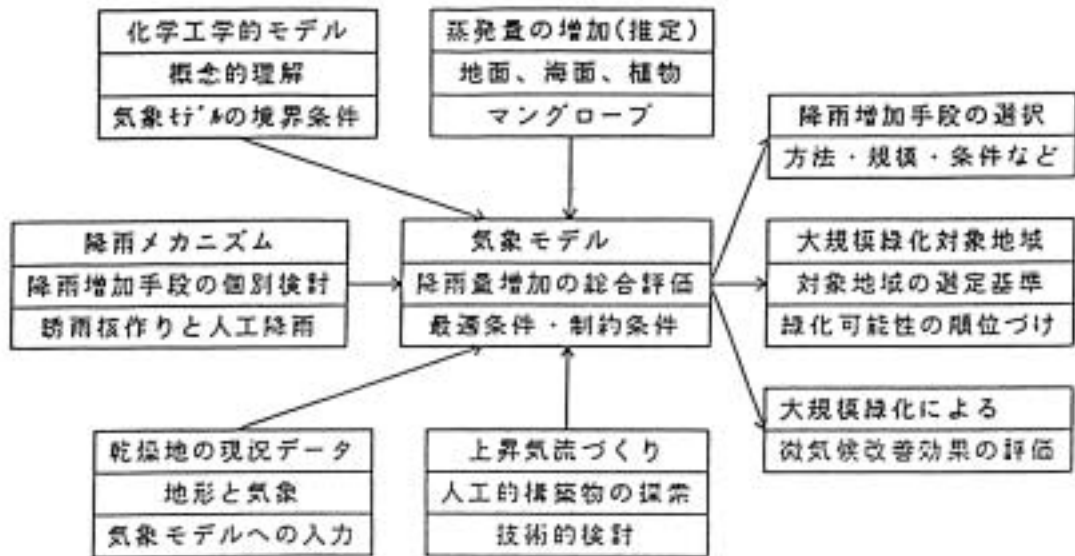


図2 降雨量増加の可能性の研究

### (2)大規模緑化の評価手法の策定の研究

大規模緑化の目的が地球温暖化対策の一環としてのCO<sub>2</sub>固定にあるので、緑化の効果を評価する際、エネルギー効率で比較したのでは意味をなさない。単位投入エネルギー量当たりの実質CO<sub>2</sub>固定量が、最も基本となる評価指標である。これを緑化の規模(面積)、CO<sub>2</sub>対策としての有効年数、人的資源の投入量、コスト係数などをパラメータとして関数化する必要がある。本年度は、評価関数の基本構造の構築を目的とし、大規模緑化の戦略シナリオの具体性を高めるための評価手法および一次的評価の具体例を挙げた。

### (3)要素技術としての水利用技術の研究

要素技術に関する研究として、本年度は、水の利用技術の調査・体系化を目指した。まず第一に、水利用を検討する上での基礎になる水収支の科学を整理した。

一口に水収支といっても、大気循環に伴うマクロな水収支から、樹木1本に関わるミクロな水収支まで、種々のスケールで問題が存在する。そのいずれもが乾燥地での大規模緑化を考える上での基本的重要問題と言える。特に、必要水量を見積もるために、植物からの蒸発量や土壤中での水分移動のような、ミクロな水収支に関連する現象について、その本質を理解し、水収支に対する影響を定量的に把握することが不可欠である。これを実験室レベルの基礎研究から始め、実際の乾燥地に近い環境でのフィールド試験を経て、モデル地域での実証研究に進むという段階を踏むことになる。水収支と同時に物質収支、エネルギー収支についても同様に扱う必要があることは言うまでもない。

次いで、水源、取水、貯水、水供給(輸送)、利用および再利用の各段階に分けて必要な水利用技術を抽出し、乾燥地の緑化技術としての評価を試みた。乾燥地にも種々のタイプがあり、環境条件、水資源条件は千差万別である。従って各技術の画一的評価は不可能であるが、本年度は最も基本的な視点として、降った雨をどう有効利用できるかに注目した。

実際の大規模緑化の実行計画を策定する際には、対象地域を具体化し、そこでの実際の条件の下で水利用システムを計画・設計し、個々の要素技術の評価を詳細に行うことになる。なお、本調査研究では、緑化対象地域の選定基準についても、可能性ランキングに必要なデータ等を整理した。

本年度は研究の端緒に就いたに過ぎないが、いくつかの事項については有用な知見が得られている。以下、報告書の章立てに従って主な内容の概略を紹介する。

## 1.水資源確保の基礎データの調査収集

### 1.1 局所気候の調査

乾燥地域に局所的に湿った灌水区を設けることは、移流熱の作用による局地的なオアシス効果(蒸発散量の増加)のため、広い耕地の蒸発散量よりも大きくなることが知られている。しかし、実際に緑化等が局所気候に影響を及ぼした状況を定量的に詳述したデータ、文献はほとんど見当たらない。実際に緑化が進行すれば、緑化地域内と影響域外の連続的なデータを時系列的に比較・検討できるようになるが、事前のプロジェクト評価では、もっぱら既存の気象データを基にしたコンピュータシミュレーションによって影響を予測するケースが多い。そのために必要なデータとしては、地形、地上での温湿度、風向風速の他、大気の安定度を示す上空の鉛直気温分布特性が重要である。高度が上がるほど

温位(Potential Temperature)が高けれ

ば、すなわち鉛直温位分布が右上がりの曲線になれば、大気は安定であり、逆に低くなれば(=曲線が右下がりになれば)不安定である。地形は当然、降雨量に大きな影響を及ぼす。

微気候への影響要因として、森林自体の効果も見逃せない。森林の内部は林外と比べて気温の日較差が小さくなることや、森林が大きくなるとその周囲の風や湿度、気温に影響を及ぼすことが知られている。一例として、ヒノキ林の内外で観測された気温の日変化を図3に示す。林内気温は林外より日中に低く夜間高くなるため、林内の日較差は林外より小さい。

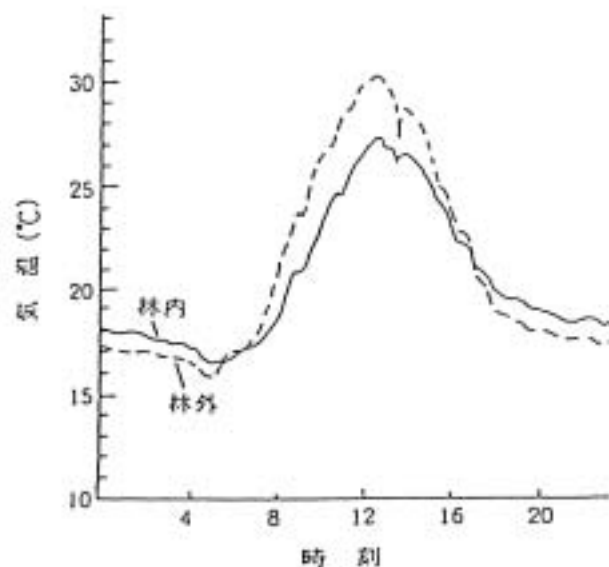


図3 ヒノキ林内外の気温差

また平均気温も、程度はわずかであるが、林内の方が低

い。湿度も、樹木の蒸散作用のため外部より平均して3~10%程度高くなるとされている。森林の規模や密度、地形との相乗作用については重要な検討課題であるが、乾燥地域を対象とした測定例は見当たらない。

## 1.2 蒸発量の推定

地表面から大気への水蒸気の輸送過程は、一般に蒸発散(Evapotranspiration)と呼ばれる。この中には、自由水面からの蒸発(Evaporation)、土壌表面からの蒸発、植物による蒸散(Transpiration)、および植物の葉や枝などによって遮断された降水の蒸発の4過程が含まれる。この蒸発散には水、エネルギー、大気、土壌植物などの因子が複雑に関係し、上の4過程でも影響度はそれぞれ異なる。なお植被におけるエネルギー収支を図4に示す。

蒸発散の測定法には流域水収支法、渦相関法、熱収支法、空気力学法などがある。流域水収支法以外は、いずれも測定地点での値しか得ることができない一方、流域水収支法は短期間の測定には適さないなど、測定法ごとに一長一短である。

蒸発散の推定法には、蒸発計の蒸発量に経験的な定数を乗じる方法と、気候資料に基づき可能蒸発量を求め、それから実蒸発散量を計算する方法がある。なお可能蒸発量とは、水不足が起きないよう十分に給水した状態で、丈の低い植生およびその他表面から失われる蒸発散量を言う。砂漠乾燥地域では自然植生が皆無に近いので、植生の種類や面積、分布等が明確でないと可能蒸発量は厳密に定義できない。地表面蒸発、蒸散、および土壌水分の挙動と外的な気象要因の関係を明らかにするには、まだ未解明な項目が多い。

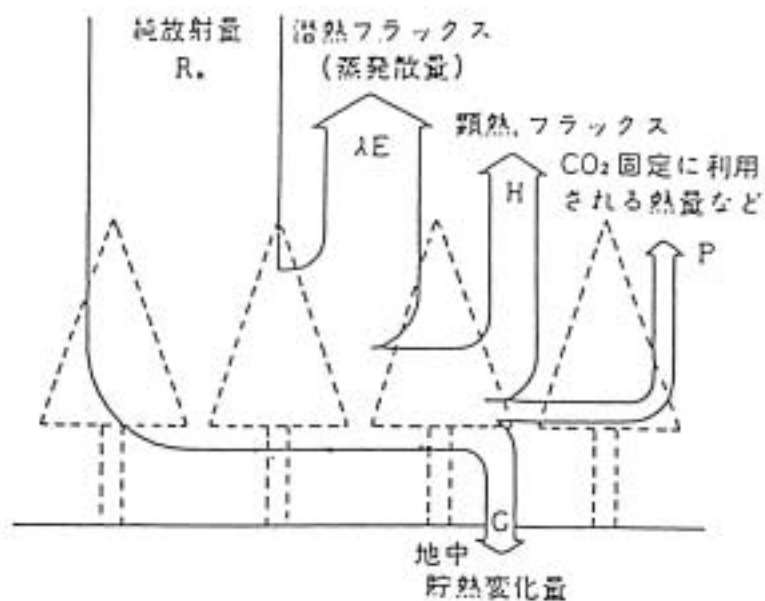


図4 植被におけるエネルギー収支

### 1.3 マングローブによる蒸発促進

熱帯や亜熱帯の沿岸域あるいは河口域の海水の影響下にある潮間帯(汽水域)に分布する樹木群を総称してマングローブと呼ぶ。マングローブ植物は、耐塩性あるいは好塩性植物の遺伝子資源としても注目されている。海に近い地域の大規模緑化においては、沿岸域におけるマングローブ植林が種々の好ましい効果を与えると期待できる。水利用技術の観点からは、蒸発促進効果が重要である。マングローブは、通常の植物に比較して高い耐塩性を持つことに特徴があるが、それだけでなく、気孔開度が高く葉面からの活発な水分の蒸散作用によっても特徴づけられる。従って、ある程度の広がりを持ったマングローブ林の存在は、長期的には群落周辺の気象環境の改善と安定化に寄与できるだけでなく、塩分を含む灌漑水しか得られないような乾燥・半乾燥地での持続的(Sustainable)な緑化に対して、重要な手段の一つを提供すると考えられる。マングローブは、全般的に陸上の非マングローブ植物より蒸散量の多いことが報告されているが、特に満潮時等、海水の影響を強く受ける場合に蒸散量が増大する特徴があり、水を節約しながら生育する耐乾性植物とは対照的な、塩分を含む水を大量に吸収して生育する水浪費型の植物である。

この他にもマングローブ林には、熱帯・亜熱帯の自然生態系の維持に大きな役割を果たすことが知られており、海の砂漠化を解消し、地域住民の直接的利用資源(用材、薬物、魚介類等)を増加させる経済効果も大きく、様々な面で緑化実施上の利益が大きいと期待できる。

### 1.4 降雨のメカニズム

雨が降るためには、まず雲ができ、それが雨滴にまで成長しなければならない。雲は、大気中の水蒸気が浮遊するダストを中心に凝結して、無数の水滴となって浮いているものである(同じものが地上にあれば霧になる)。この雲粒が浮かんで「水雲」になる。水雲の中で雲粒が成長し、あるいは雲粒同士が合体して雨滴に成長し、地上に落下する。これが「暖かい雨」の生成である。一方、雲頂の温度が0より低いと、水雲を作っていた雲粒の中に、凍結して「氷晶」に変わるものがある。この雲は雲粒と氷晶が混在した「混合雲」であり、この雲から落下する雨は「冷たい雨」と呼ばれる。このように、降雨にも種類があり、その前提として雲核の生成が欠かせない。これに大気中のエアロゾルが大きな役割を果たしている。エアロゾルとしては、海塩粒子、工場や自動車の排ガス、土壌から放出される各種酸化物、硫酸アンモニウム等がある。これらの核形成物質には、水の凍結を早めるだけの「凝結核」と、水蒸気から直接氷晶のできるのを助ける昇華核としての役割も果たす「氷晶核」があり、物質ごとに性質が決まっている。

これまでの観測結果によると、凝結核の数から推定される雲粒の数と雲底近くで実際に測定される雲粒数は大体一致するのに対し、大気中の氷晶核数と実際の氷晶数には明らかな比例関係が見られない(核の数よりも結晶数はるかに多い)。この問題に関しては現在まで確実な説明がなされておらず、氷晶核として他に有効な物質の存在を見過ごしている可能性が示唆されているのみである。降水機構の解明は、未だ完全ではない。



## 2. モデル地域でのシミュレーション

### 2.1 気象モデルによるシミュレーション

本節で述べるシミュレーションは、荒れ地を森や浅瀬、黒い土壌等に変えるなどの手段によって、地表の湿潤性・粗度・光線に対する反射能を変化させた際に、それに伴って起こる局地的な気象の変化を再現することに主な目標を置いている。用いたプログラムは、気象庁が開発したスペクトルモデルをベースに、オーストラリア南西部を対象として地形等の境界条件を与えた。

20～2000km 四方程度の、中規模な領域での現象である局地的な気象のシミュレーションを行うには、次の諸条件を満たす適切な数値モデルが必要である。すなわち、水平、垂直双方に高い分解能を有すること、特に、対流と地表境界層でのプロセスを記述するための適切な数値化の仕組みを持つこと、中規模な領域にわたる初期フィールドが与えられること、の3点である。本研究で用いたモデルは、フーリエ変換を基底関数に用いて、従属変数を波数空間に変換するスペクトル法を採用してこれらの条件を満たしている。このモデルは、運動量、質量、湿度、仮想温度の水平移動に関する基礎方程式からなり、座標を用いている。計算プログラムは11のデータからなり、うち2つは96のフォートランで書かれたソースプログラムと、13のコントロールプログラムであり、残り9つが陸地と海洋の分布、地表の粗度や湿潤状態、輻射や境界条件など、計算に必要な諸データを入力するためのものである。これを用いて、オーストラリア南西部における、与えられた大気の初期条件及び境界条件の下に、様々な地表条件についての気象変化のシミュレーション、並びに結果の比較を行った。

シミュレーションは2段階で行った。最初は広範囲にわたる領域で、単純化された測定値または計算上の適当な値を初期条件・境界条件に与えた。比較のため、現実の表面状態と改質を施した表面状態の2ケースを取り上げた。このときの予報領域および初期条件のメッシュサイズはそれぞれ45km、境界領域でのそれは50kmである。次の段階では、広領域での計算結果を初期・境界条件として、より限定された狭い領域でのシミュレーションを行った。このときのメッシュサイズは、予報領域15km、初期条件と境界条件領域がそれぞれ45kmである。

第一段階のシミュレーション結果の一例を図5に示す。地表の湿潤性を高めることにより、地表温度が低下するとともに、地域によっては10倍を越える降水量が観察されるなど、十分効果的な降水量の増大が期待できるという結果が得られた。(図5 a. b)

第二段階では、第一段階での結果を用いて、オーストラリア西部のパーズ近郊を対象に、より限定された地域でのシミュレーションを試みた。結果の例を図6に示す。この例でも、地表面の改質を行うと、上昇気流の発生、降水量の増大、降水領域の広域化などの現象が現れるという結果が得られた。現状のシミュレーションは初期条件・境界条件などが極めて単純化されたものであり、地表改質が気象に与える効果の粗い見積もりに過ぎないが、スペクトル法によるこの種の予測が成果あるものになることを示唆するものである。(図6)



(オリジナルケース) (変化させたケース)

図5 a) 18時間後の気温分布