

国際農林水産業研究センター 研究会報告集

No.2

- 農業限界地における環境資源利用技術の開発と今後の研究推進
- 国際熱帯林研究をめぐる諸問題

平成6年3月

農林水産省
国際農林水産業研究センター

国際農林水産業研究センター

研究会報告集 No. 2

目 次

・農業限界地における環境資源利用技術の開発と今後の研究推進

平成4年度 熱帯農業試験研究推進会議「環境資源」部会

1. 農業限界地における環境資源利用技術

環境資源利用部長 蘭 道 生 …… 1

2. 荒廃林地の回復とアグロフォレストリー ―林内光環境の解析―

森林総合研究所生態遺伝研究室長 中 島 清 …… 4

コメンテータ 森林総合研究所群落生態研究室長 斎 藤 昌 宏 …… 17

3. 熱帯乾燥地域における岩石の風化機構

環境資源利用部 八 田 珠 郎 …… 19

コメンテータ 筑波大学助教授 松 倉 公 憲 …… 31

4. 乾燥地における農業気象改良

環境資源利用部 真 木 太 一 …… 33

コメンテータ お茶の水女子大学教授 内 嶋 善兵衛 …… 44

5. リモートセンシングを利用した乾燥地の草地保全計画

環境資源利用部 高 畑 滋 …… 46

コメンテータ 筑波大学教授 林 一 六 …… 54

・国際熱帯林研究をめぐる諸問題

(平成4年1月18日開催)「熱研セミナー」報告

1. 国際熱帯林研究の最近の動向

東京大学農学部教授 佐々木 恵 彦 …… 55

2. 熱帯林再生の生態学的試み

横浜国立大学環境科学研究センター教授 宮 脇 昭 …… 62

3. 熱帯多雨林の種の多様性と動態 ―西スマトラの事例から―

鹿児島大学理学部教授 堀 田 満 …… 64

JIRCAS Workshop Papers

No. 2 (March 1994)

Contents

• Development of Techniques for the Utilization of Environmental Resources and Perspective of Promotion of Research in the Marginal Land Area

1. Technology for the Utilization of Environmental Resources in Marginal Land Area

Michio ARARAGI 1

2. Degraded Forest Land in the Tropics and Agroforestry

—Analysis of light conditions under a canopy of fast-growing trees—

Kiyoshi NAKASHIMA 4

Masahiro SAITO 17

3. Mechanism of Rock-Weathering in Tropical Dry Areas

Tamao HATTA 19

Yukinori MATSUKURA 31

4. Agro-meteorological Improvement in Arid Lands

Taichi MAKI 33

Zenbe UCHISHIMA 44

5. Planning for Rangeland Conservation in the Dry Areas using Remote Sensing

Shigeru TAKAHATA 46

Ichiroku HAYASHI 54

• Recent More on International Tropical Forest Research

1. International Tropical Forest Research Cooperation

—Japan pledges financial and technical Contribution—

Satohiko SASAKI 55

2. Ecological Trials for Regeneration of Tropical Forests

Yokohama National University Akira MIYAWAKI 62

3. Species Richness and Dynamics of the Tropical Rain Forest, an Example of West Sumatra.

Mitsuru HOTTA 64

農業限界地における環境資源利用技術の開発と今後の研究推進

1. 農業限界地における環境資源利用技術

蘭 道 生
熱帯農業研究センター
環境資源利用部

Development of Techniques for the Utilization of Environmental Resources and Perspective of Promotion of Research in the Marginal Land Area

1. Technology for the utilization of environmental resources in marginal land area

Michio ARARAGI

Marginal Land Research Division, Tropical Agriculture Research Center
Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

The increase of the population is particularly evident in the tropics and subtropics, and it is anticipated that many people will be confronted with food shortage and the deterioration of the environment, including the disappearance of tropical forests and desertification. Expansion of land area for cultivation is needed, but the land area suitable for cultivation is decreasing because of desertification, soil degradation, etc. Therefore, the development of marginal land areas for agriculture in harmony with the regional eco-environments is necessary. The Marginal Land Research Division has carried out fundamental research to enable the exploitation for agriculture of the marginal lands of the tropics and subtropics and to promote sustainable agricultural production. The soil and water resources and climatic analysis of the marginal lands were evaluated as agricultural resources in order to promote the development of techniques for the utilization of such lands for agriculture.

Key words: marginal land, desertification, sustainable agriculture

キーワード: 農業限界地, 砂漠化, 持続的農業

農業限界地は英語では Marginal Land, または Rangeland といい, その地域で農業生産をすることが経済的に採算のあうぎりぎりの限界地をさす。

このような地域は農業をやっていく自然資源および人的資源がきわめて厳しい条件にありそのため農業生

産が著しく困難なものとなっている。このような地域は, いまある技術の応用もしくは, 組立では農業が成り立たず, このような地域に適合した新しい技術の開発が必要となる。そこで, これらの新しい技術開発のための基盤的研究を実施している。

このような地域を開発する背景としては世界的な人口増加それに対応して、将来にそなへて食糧生産のための土地の確保がある。世界の人口は今世紀始め 16 億人であったものが世紀なかばには 25 億人となり、それから約 35 年経った 1985 年には 48 億人とほぼ 2 倍となり、今後もこの勢いで増加すると 2000 年までには 90 億人程度にまでなることが推測されている。しかし人口の抑圧作用もあることから、2000 年には 61 億人程度の人口になることが一般的な予測である。

特に開発途上国では中国等の一部を除き人口増加の割合が高い値で推移していくものと見られている。なかでも東および南アジアの人口は全世界の 6 割弱を占めており、この地域での人口増加が著しい。以上のことから、世界の人口は将来とも増加していくこと、さらに熱帯・亜熱帯の開発途上国ではこの傾向が強いことから、将来食糧事情の逼迫が予想される。食糧不足の対応策としては単位面積当たりの収量をあげていくことが一つの方策ではあるが、肥料、農薬、農業資材の投与および品種、栽培法、規模の拡大等の改善による単位面積当たりの収量増には限界があり、またコストの上から言っても大きな制約がある。

そこで現在農地として利用できないような土地を利用可能な農地にして利用していく方策も進めていく必要がある。この場合、注意をしなければならない事は、森林を伐採して農地にすることはさけなければならない。あくまで利用されていない農林荒廃地等を対象とする。

全世界の土地面積は 132.5 億 ha、このうち耕作可能な面積は 40 億 ha あり、その他は砂漠、寒冷地、傾斜地等となっている。この 40 億 ha のうち半分は耕地化されているが、残りは森林や草地等で、開発可能地は砂漠、湿地の周辺や農林荒廃地、高冷地、傾斜地等となっている。

開発可能地は砂漠、湿地の周辺や農林荒廃地、高冷地、塩類土壌等であり、現在農林業が行われている地域との境界領域となる。またこれらの地帯は地球規模の環境問題の面からも注目されているところである。

1. 乾燥地における研究活動

乾燥地は世界の陸地の 1/3 を占める程広大な面積が分布している。これらの地域に住む人達は早魃、砂漠の拡大に悩まされている。熱帯農業研究センターは中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所と中国で、また国

際乾燥地農業研究センター (International Center for Agricultural Research in the Dry Area, 略称 ICARDA) とシリアでそれぞれ共同研究を開始した。

新疆生物土壤沙漠研究所との共同研究相手国である中国の 30% は乾燥地であり、大きくは砂漠化、また早魃、土壌の塩アルカリ化、風砂等の災害も多く、農業を著しく困難にしている。中国政府は中国科学院を中心として開発を進めようとしている。新疆地区は平均年降雨量は 145 mm で、山間部を除く大部分が乾燥地である。その中にあって、トルファン盆地は面積約 7 万 km² で特に降雨も少なく、極端な砂漠となっている。盆地の大部分が海拔 200 m 以下であり、最深部は艾丁湖 (湖面が -155 m) で閉鎖性の盆地である。

研究内容は「乾燥地域の極端な条件下における環境資源の研究」(トルファン盆地で実施)

- a) 土壌の分布及び土壌特性
- b) 気候特性、水、熱、光、風などの資源の利用の有効性および災害性要素の予防と対策の研究である。

現在、長期派遣研究者として 1 名、その他にまた短期派遣を送っている。

いづれも「乾燥地における土壌特性・水特性」という熱帯農業研究センターのプロジェクト研究として実施した。農業限界地における将来の技術開発のための基礎的研究として位置づけている。ICARDA はシリアのアレッポに位置し、周囲は広々とした圃場が広がり、その中央の小高い丘の上に ICARDA の立派な建物がある。アレッポは 100 万都市で古都であるが、ここから ICARDA までは車で約 20 分であり研究環境は良いようにみうけられた。

研究内容は、まず砂漠化の進行が心配されるシリア砂漠周辺地域において、リモートセンシングデータと地上調査により、植生の経年的・季節的な年次変化を明らかにし放牧密度と植生変化の関係を調べつつある。近々、この周辺で観測気球を飛ばして研究を進めた。

2. 低湿地における研究活動

乾燥地と対照的に低湿地も農業の限界地となっている。最近では地球規模レベルの環境問題の悪化の視点から重要性が認識されている。熱帯・亜熱帯にはマングローブ林の下部に分布する酸性硫酸塩土壌、また内部の湿地林に泥炭土壌というそれぞれ特色ある土壌が分

布している。これらの土壌は東南アジアに広く分布しており、マレー半島には81万haの泥炭と35万haの酸性硫酸塩土壌が分布している。サラワク州には166万haの泥炭と20万haの酸性硫酸塩土壌がある。

マレー半島の泥炭地帯にジャランクブン試験場があり、背後に低湿地林が広がっている。ここで平成2年7月から共同研究を開始した。「熱帯低湿地の植生と土壌特性の解明」のプロジェクト研究のなかで、熱帯条件下で多腐植質土壌として特異的に存在する泥炭土壌の生化学的分解特性に焦点をあわせて研究を開始した。熱帯泥炭土壌は、マングローブ林下の酸性硫酸塩土壌と隣接しており、これらの土壌が海の方へ広がるにつれて内部の方では数々の湿地植生の変動があり、湿地樹木が主として堆積し木質泥炭が形成されている。すでに国内において、北海道および熱帯の泥炭を比較研究し興味ある結果を得ている。両泥炭の化学的組成、特に有機成分の組成は明確に相違している。

この研究では広域水管理、土壌微生物の解析、またこれら土壌に対する植物の耐性等について研究を進めた。

3. 熱帯林関連の研究活動

伐採、焼畑、農地への転用等により熱帯林が急速に減少し、以前60億haあった森林は1954年頃までに約40億haという減りようで、約30%の減となった。その後も減少し続けており、今や地球規模の環境問題を引き起こす1つの要因までに考えられるようになった。

こういった背景のなかでアグロフォレストリーと地球環境の変化に係わる熱帯林の生態機能の研究を行った。

林間に作物を植え森林の環境保全機能を生かしながら作物からの収入増、また林業をも併立的に行うアグロフォレストリーの研究をフィリピン大学およびカセサート大学林学部で実施した。

森林の近くに住む人達は樹を切ってその利益を得たり、また焼畑を行って生活の糧を得ているが、新しいアグロフォレストリーの永続性のあるシステムが構築できれば森林を荒さずに生活の糧を得ることができる。

このシステムは林間に作物を植えることによる樹木への影響、樹木の乾燥耐性特性、作物に対する光の影響、土壌攪拌による土壌侵食等について研究を進めており主要成果として取り上げられた。アグロフォレストリーは大昔はこの形態の農業があったのであろうが、大規模化、機械化の困難性等からこの形態は見捨てられてきた。人口増加により森林が減少し同時に食糧の確保が逼迫してくるところのアグロフォレストリーが見なおされてきたわけである。アフリカ等、多くの国で様々な形態のアグロフォレストリーがあり間口が広くて研究の深化が難しいが、最近はさらにタイのカセサート大学林学部に拠点を設けて研究を拡大した。いずれにしても森林減少をくいとめる対策技術の1つと言える。国内でも基礎的な研究を実施することになっており、現在、筑波での研究も始めている。

「熱帯乾燥地域における風化作用と土壌特性の解明」では、熱帯乾燥条件下での風化過程を研究しており、物理的、化学的、鉱物学的、力学的性質の変化機構に挑戦している。

また乾燥地では水の表面蒸散が大きい。これらの乾燥地での測定手法が確立されていなかったが、大洗海岸をモデルにして砂漠に適した蒸散測定法を考案した。

農業限界地における環境資源利用技術の開発と今後の研究推進

2. 荒廃林地の回復とアグロフォレストリー

—林内光環境の解析—

中 島 清

森林総合研究所生物機能開発部生態遺伝研究室長

Development of Techniques for the Utilization of Environmental Resources and Perspective of Promotion of Research in the Marginal Land Area

2. Degraded forest lands in the tropics and agroforestry

—Analysis of light conditions under a canopy of fast-growing trees—

Kiyoshi NAKASHIMA

Forestry and Forest Products Research Institute

Matsunosato, Kukizaki, Inashiki-gun, Ibaraki 305, Japan

The quality and quantity of light energy were analyzed in order to study its effect on the production of agricultural crops in agroforestry systems. Transmittance of leaves was measured in about 50 species and the spectrum of transmitted light of a leaf was very different from that of solar radiation. The absorbance of a leaf was very high for blue, green and red light, ranging from 400 to 700 nm wavelength (PAR), but it was low for the far-red light in the range from 700 to 1100 nm. Transmittance varied with the leaf age and it was higher in a young leaf than in a mature or an old one for green and red light in the range from 500 to 700 nm but it was lower in an old leaf than in a young or a mature one for far-red light in the range from 700 to 1100 nm. Reflectance of light energy on a leaf surface was high for far-red light but it was very low in the range of PAR. However, transmittance was very low in the range of PAR and high for far-red light.

Under the closed canopy of fast-growing trees, most of the natural radiation (direct solar radiation and sky radiation) was reflected and absorbed by the leaves of a canopy. The diffused light under the canopy was very different from that of natural radiation and the spectrum exhibited a low and approximately constant energy at all wavelengths. Light conditions under a canopy also varied with the tree age and with the spacing of tree stands. In *Acacia auriculiformis* and *A. mangium* stands at 2 x 2 m and 2 x 4 m spacings, the relative light intensity (RLI) decreased rapidly to less than 20 % three or four years after the trees were planted and the decrease of RLI

continued gradually with tree growth subsequently. In the *A. leptocarpa* stands planted at 2 x 2 m, 2 x 4 m and 2 x 6 m spacings, a large amount of energy of diffused light was observed at all wavelengths in the stands with a wider spacing. Relative light intensity under the canopy was closely related to the area of an opening in the canopy but not with the reflectance or transmittance in a leaf. This fact suggests that the light conditions under a canopy depend on the structure of the stand.

はじめに

熱帯地域では、商業的木材生産のための過剰な森林伐採、人口増加による食料生産の場としての耕地の拡大、燃料材生産やローテーションを無視した焼き畑移動耕作等により、森林が急速に消滅しつつある。森林面積の減少により、そこに生育する豊富で貴重な動植物遺伝資源の消失、地域生態系の破壊及びそれに伴う様々な自然災害の多発を招いている。

熱帯の森林地帯では、伝統的な焼き畑移動耕作が山岳民族等により行われてきた。しかし近年、人口増加とともに、焼き畑以外に生産手段を持たない土地無し農民が作物栽培を目的として森林を伐採するケースが増加している。こうした耕作のための伐採の外、木材生産を目的とした不法伐採や商業的大規模伐採が現在もなお続けられている。

熱帯の森林生態系では落葉落枝等は急速に分解され、生態系を構成する主要な元素は地上部現存量として蓄えられている。そのため伐採や火入れが繰り返されると、生態系外に流出する量が増えて土地生産力が急速に低下する。熱帯地域には、現在、火入れや木材生産等により荒廃して放置された痩悪地が拡大しつつある。

これら熱帯地域の国々では、森林生態系の保全及び回復、森林遺伝資源の保全等を図りつつ、同時に急増する人口圧にも対処するための農業生産の拡大が強く求められており、限られた土地の有効利用を図るため、林木と作物を混植するアグロフォレストリーに大きな期待が寄せられている。

アグロフォレストリーの歴史は比較的長く、様々な地域に応用されてきた。そのため多くの形態があり、それぞれの地域に適応したシステムが発達している。しかし、アグロフォレストリーに関する植物生態、生理、栽培学的なアプローチは乏しく、これまで経験的技術を拠り所として実施されてきたものが多い。造林

地の拡大にともない、アグロフォレストリーの対象となる生産力の高い土地が不足し、生産力の低い痩悪地への拡大による生産量の低下や林-作物混植による競争等の問題が指摘されている。

林木と作物を混植するアグロフォレストリーでは、樹種と作物種の組み合わせの問題とともに、林-作物混植による光エネルギーの利用、水、養分の吸収等の競争の問題が特に重要である。アグロフォレストリーにおける光エネルギーの利用についてはすでにいくつかの報告¹⁾¹⁰⁾¹³⁾があるが、光の波長組成に関してはほとんどふれられていない。アグロフォレストリーでは光の量と質が農作物の収量に大きく影響する¹³⁾ことから、林内光環境を把握しておく必要がある。そこで様々な樹種について、葉を透過した光の質と樹冠層を透過した林内散乱光の質と量について解析を行った。

1 全天日射の波長別エネルギー組成

太陽からの放射エネルギーは 100 ~ 3,000 nm の範囲の電磁波であり、地球大気中の空気分子、水蒸気、塵埃等の分子で吸収、散乱されながら、その一部が地表に到達する。地表で得られる日射エネルギー量は太陽高度、大気汚濁度、天気条件等により大きく異なる。ここでは日射エネルギーの日変化、年変動及び雲による吸収・散乱の影響を調べた。

材料と方法

波長別日射エネルギーは波長別光エネルギー分析装置（ライカ社製 LI-1800）を用いて行った。計測波長域は 300 ~ 1,100 nm とし、2 nm 間隔で波長別エネルギーを求めた。計測はバンコク市内にあるタイ農業局の芝生地で行い、午前 8:30 ~ 16:30 まで、30 ~ 60 分間隔で測定した。また、年変動は 1990 年 10 月から 1991 年 9 月まで、合計 6 回行った。さらに雲に遮蔽されたときの散乱日射の波長別エネルギーを計測した。

結果と考察

1) 波長別日射エネルギーの日変化・年変動

地上で計測した波長別日射エネルギーの一日の変化を図-1に示す。日射エネルギーは日の出とともに上昇し、正午に最大値を示した後、日没まで漸次減少していく。太陽の上昇とともに、全波長域で日射量が増加する。特に400～700 nmの可視光域での上昇が著しい。また、500～600 nmの波長域に最大値が認められる。正午の波長別日射エネルギーに対する相対値でみると、13時を除き、330～700 nmの波長域ではほぼ一定値を示すが、日の出、日没間近の時間帯では、遠赤色光域の相対値が高い。また、760と940 nm付近に相対値が著しく低い部分があり、この部分は午前中には顕著に現れるが、午後には日没に近い時間帯までほとんど認められない。このように一日のうちでも、時間帯により波長別日射エネルギーの組成が異なる。

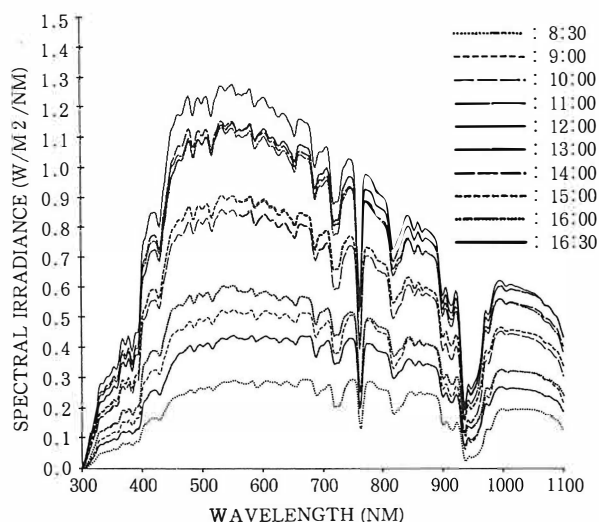


図-1 バンコク市内における全天日射の日変化

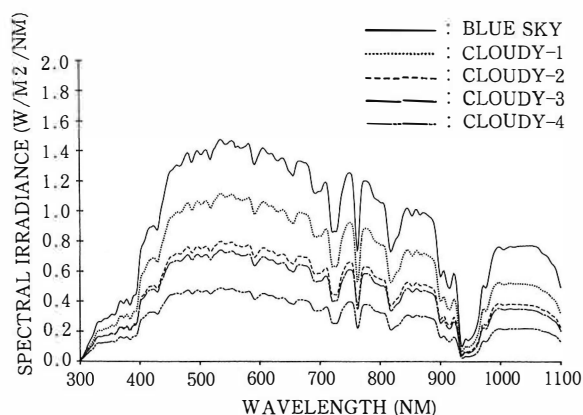


図-3 散乱日射の波長別エネルギー

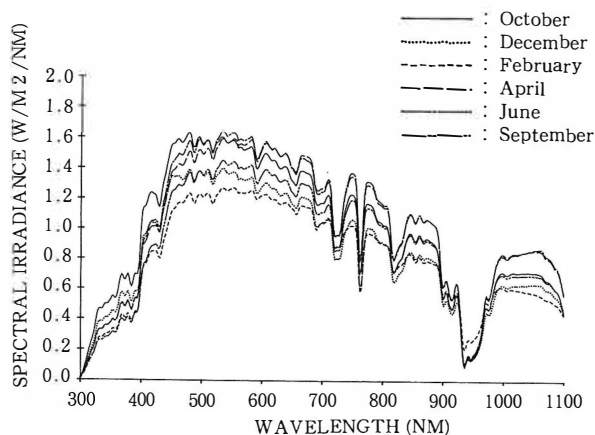
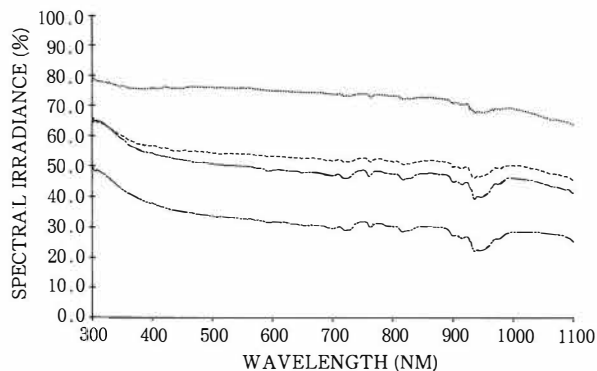


図-2 バンコク市内における全天日射エネルギーの年変動

表-1 直達日射エネルギーの年変化

	PPFD $\mu\text{mol/s/m}^2$	IL lx	IT w
December 12	.1721 E 04	.9668 E 05	.6858 E 03
February 14	.1581 E 04	.8960 E 05	.6463 E 03
April 12	.1971 E 04	.1119 E 06	.8069 E 03
June 20	.2004 E 04	.1144 E 06	.8172 E 03
September 2	.1762 E 04	.1009 E 06	.7082 E 03

波長別日射エネルギーの年変動を図-2と表-1に示す。一年のうち、4～6月の夏期～雨期にかけて日射量が最大となり、乾期の12～2月に最低となる。わが国の全天日射の月総量も、多くの場合、5月に最大、12月に最小となる。波長別組成割合にも明瞭な季節変化があるといわれている。また、全天日射量に対する波長別日射エネルギーの相対値は波長帯により異なり、且つ季節変化が認められ、特に明瞭な季節変化は395～475 nmの波長域にあり、夏期に大きく、冬季に小さい。光合成有効波長域(395～715 nm)の相対値の年変化も夏期に大きく、冬季に小さいといわれて



いる¹⁴⁾。熱帯モンスーン地帯のタイでも明瞭な乾期と雨期の季節変化があり、同様の変化が認められる。

2) 雲による波長別日射エネルギーの散乱, 吸収

太陽からの日射エネルギーは地表に達するまでに、様々な分子により散乱, 吸収される。特に雲や大気中の混濁物による影響は大きく、その組成を著しく変える。雲の状態をその厚さで4段階に区分し、それぞれの状態の雲で遮蔽された時の散乱日射の波長別エネルギー組成を求めたのが図-3である。また、全天日射に対する散乱日射の波長別相対値も同様に示した。雲の状態による散乱, 吸収の影響は明かで、その組成は全天日射のそれとは著しく異なる。相対値でみると、ほぼ全波長域でエネルギー量の均等な減衰がみられるが、長波長域にかけて緩やかな減少、つまりより多くのエネルギーが吸収, 散乱されている。また、各波長毎のエネルギーレベルの差が少なくなり、全波長域で平均化される傾向が伺われる。

2 日射エネルギーの樹木の葉による吸収, 反射

林内や林床の散乱光エネルギーは、林冠の隙間から到達する直達光と、葉を透過したり枝葉や幹の表面で反射して到達する光からなり、その波長別エネルギー組成は樹冠を構成する樹種毎の葉の構造、葉群構成、季節や太陽高度、天候条件などによっても異なる⁵⁾。そのため、林内の光エネルギーの波長組成は林外での直達日射のそれとは一般に著しく異なる。光エネルギーの波長組成は植物の発芽、発芽後の形態形成に影響を与えることが明らかにされており²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁷⁾⁸⁾、混植を行うアグロフォレストリーでは、個々の樹木の葉を透過した、あるいは反射した光の質的な変化を把握しておくことは重要である。ここでは早生樹の葉を透過した光と表面で反射した光について、その波長組成の特性を明らかにした。

材料と方法

葉を透過した光及び葉の表面で反射した光の波長別エネルギーの特性は波長別光エネルギー分析装置 (LI-1800) 本体及びリモートコサインレセプター (LI-1800-11) を用いて行った。光源として、葉の透過光エネルギーの計測には自然光および人工光 (陽光ランプ D-400 及び DR-400 小糸工業コイトロン KG-206 HL-P) を、反射光については人工光のみを用いた。材料の樹葉は、タイ王室林野局ラチャブリ試

験地に植栽されている早生樹種の中から、透過光には52樹種を、反射光については47樹種を選定し、それぞれ測定に供した。測定波長域はLI-1800本体で直接測定する場合には300～1,100 nmの範囲で、リモートコサインレセプターを用いる場合には330～1,100 nmの範囲で、それぞれ2 nm間隔で行った。また、日射が雲に遮蔽された状態での葉の透過光の特性と影響を調べるため、チーク (*Tectona grandis*) の葉で、さらに透過する葉の枚数による日射エネルギー減衰の効果を調べるため、数樹種の葉を用いた測定も同様に行った。

結果と考察

1) 透過光の波長別エネルギーの特性

図-4に熱帯地域の再造林樹種として広い地域で、且つ最も多く植林されている早生樹種の一つである *Eucalyptus camaldulensis* の葉を透過した光及び全天日射の波長別エネルギー組成を示した。一般に光が葉を透過するとき、その一部は葉の表面で反射され、さらに残りの大部分が葉の葉肉組織で吸収されるため、透過光の波長別エネルギー組成は全天日射のそれとは著しく異なる。特に青色光域 (400～500 nm) と赤色光域 (600～700 nm) は光合成活動に最も効率よく利用されることから、その大部分は葉肉組織で吸収されるが、緑色光域 (500～600 nm) と遠赤色光域 (700 nm 以上) の光は透過する。測定した早生樹種の葉でも、従来報告されている結果⁵⁾¹⁴⁾とほぼ同様の結果が得られた。特に赤色光域の吸収が著しいが、青～緑色光域ではかなりの量が透過する。また、遠赤色光域では大部分がそのまま透過している。

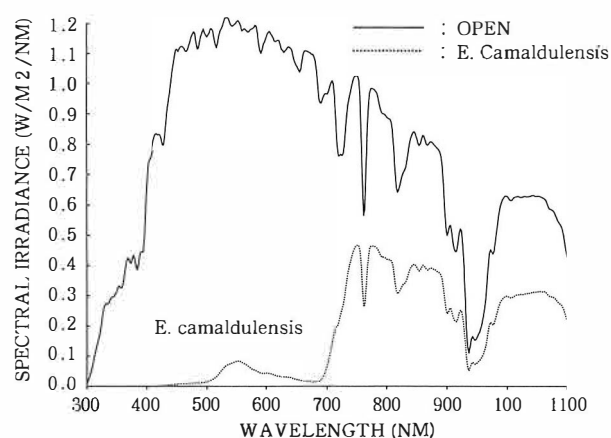


図-4 散乱日射と葉を透過した光の波長別エネルギー

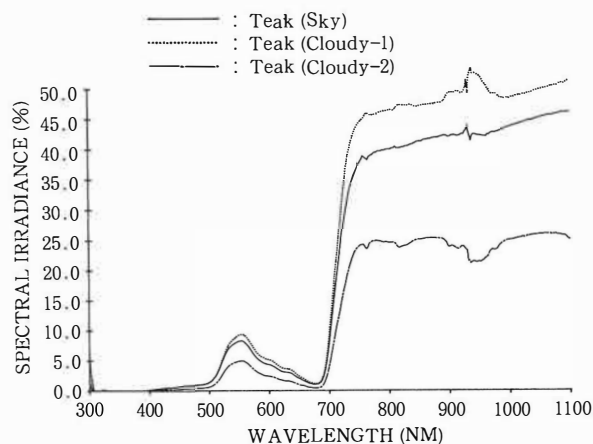
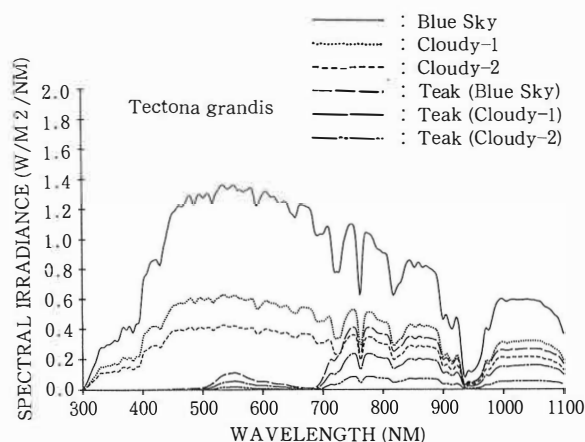


図-5 全天日射と葉透過光の波長別エネルギー

2) 雲による日射の遮蔽が葉の透過光に及ぼす影響

日射が雲に遮蔽された状態、つまり散乱光のみからなる日射のもとで、葉を透過した光の波長別エネルギーを測定した結果を図-5に示した。雲の状態により、地表に届く波長別日射エネルギーの組成が大きく変化することはすでに見たとおりである。日射エネルギーの変化に対応して、葉を透過した光のエネルギー組成も変化する。また、それぞれの波長別エネルギーの値をその時の散乱日射に対する相対値で示すと、全天日射で得られた透過光の相対値よりも高い値となることがある。これは比較的薄い状態の雲により日射が遮られた状態の時に測定したもので、厚い雲に覆われた状態で測定した場合には、全天日射の値に比べて相当小さな値となった。このように日射を遮蔽する雲の状態により、透過光のエネルギー組成は著しく変化する。

3) 葉齢と透過光の波長別エネルギー特性

葉の形態、機能には新しく展開した幼葉から成熟葉、落葉間近の老葉まで、様々な段階がある。幼、成、老葉について、それぞれの葉を透過した光の波長別エネルギーを測定してみると、明かな相違が認められる。図-6は *E. camaldulensis* と *Depterocarpus alatus* の葉について求めた結果を示す。一般に、成葉に比べて幼葉では緑～赤色光 (500～700 nm) 領域の透過率が高い。*E. camaldulensis* では幼葉では 500～700 nm の透過光の割合が高いが、成葉と老葉の間では 400～700 nm の波長域ではほとんど差がない。一方、700 nm 以上の遠赤色光域では、老葉は成葉に比べて透過率が低い。ところが *D. alatus* では、遠赤色光域では成葉と老葉との間に明瞭な差は認められないが、500～700 nm での透過率は老葉で低い。このように葉齢

に伴う波長別エネルギーの透過率にも樹種の特徴が認められる。

4) 透過する葉の数と透過光の波長別エネルギー特性

全天日射エネルギーのうち、光合成有効放射と呼ばれる波長域のエネルギーは葉で効率的に吸収、利用されている。しかし、この波長域でも 10% 前後の光が透過しており、さらに遠赤色光域では 50% もの光が透過している。一方、林内の散光を調べてみると、単一葉を透過した光の波長別エネルギー組成とはかなり異

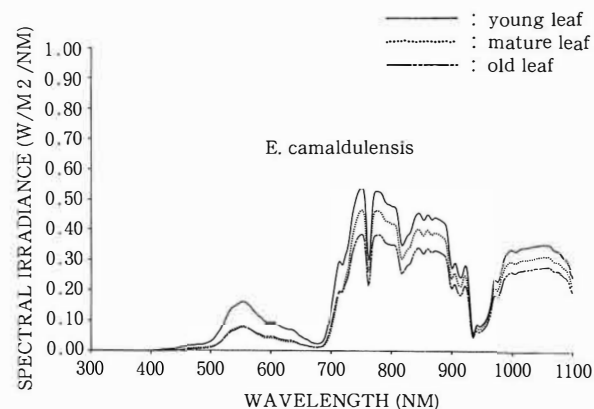
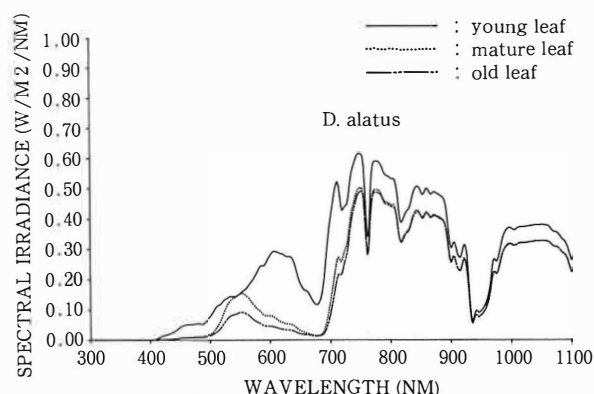


図-6 葉齢の異なる葉を透過した光の波長別エネルギー

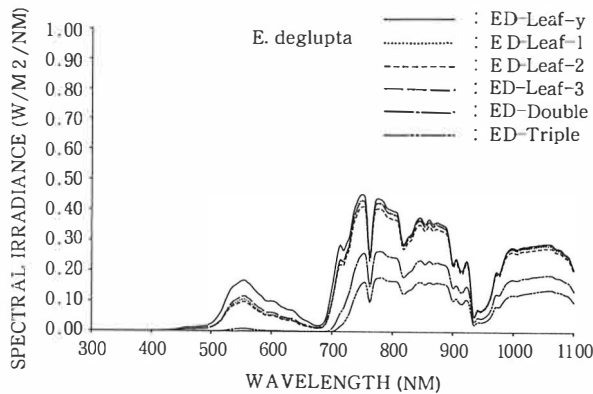


図-7 複数の葉を透過した光の波長別エネルギー

なっている。林内の散光は複数の葉を透過した光や反射した光から構成されているため、直達日射や単一葉を透過した光とはかなり異なる組成を呈するものと推測される。そこで複数の葉を透過することにより、波長別エネルギー組成がどのように変化するかをいくつかの樹種について測定し、その結果を図-7、表-2に示した。図-7は *E. deglupta* の葉で測定したものである。単一葉では700 nm以下の波長域の吸収が顕著であるが、まだ500～700 nmにかけて光合成有効放射領域で3～4％程度の透過光が認められる。しかし2枚の葉を透過した光では0.2％程度となり、3枚ではさらに0.03％程度にまで減少する。これ以外の樹種でもほぼ同様に、2枚の葉を透過した光は1枚の葉を透過した光の約1/10、3枚の葉ではさらに1/100程度にまで減少する(表-2)。しかし、図-7からわかるように、遠赤色光域での減少率は光合成有効放射領域ほど顕著ではない。

5) 葉透過光の波長別エネルギーと樹種による差異

葉を透過した光の波長別エネルギー組成には顕著な特徴が認められる。特に光合成有効放射領域での吸収が著しく、一方、遠赤色光域での吸収はそれほど顕著ではない。植物の生育にとって重要な光合成有効放射領域に限ってみても、樹種により吸収率に相当な違いが認められることから(図-8、表-3)、それぞれの樹種の光特性を示すものと考えられる。早生樹種50数種について、自然光、人工光をそれぞれ光源として測定した光合成有効放射束密度(PPFD)には、樹種により明らかに違いのあることがわかった(1％水準で有意)。これは葉の透過光の光合成有効放射束密度がそれぞれの樹種の葉の光特性を示す重要な要因になり得ること示唆している。

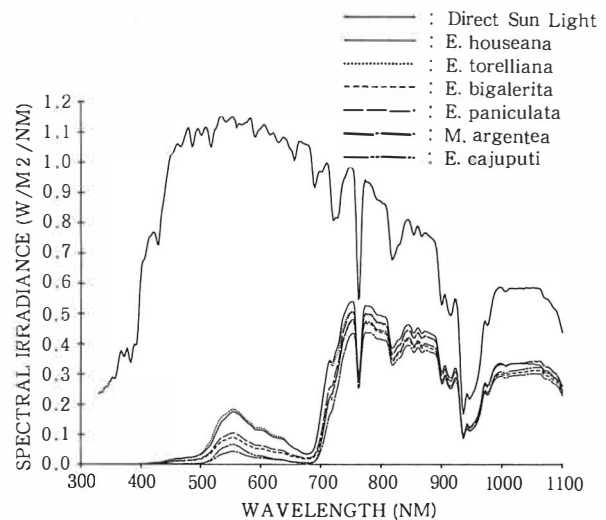


図-8 早生樹種の葉を透過した光の波長別エネルギー

表-2 複数の葉を透過した光のエネルギーの減衰

Species	PPFD (μ mol/s/m ²)		IL (L)		IT (W)	
		(%)		(%)		(%)
<i>T. grandis</i> (Mature)	.5363 E 02	3.71	.5083 E 04	6.21	.1164 E 03	19.29
<i>T. grandis</i> (Double)	.4876 E 01	0.34	.5400 E 03	0.66	.6813 E 02	11.29
<i>T. grandis</i> (Triple)	.4573 E 00	0.03	.5070 E 02	0.06	.3683 E 02	6.10
<i>E. deglupta</i> (Mature)	.4803 E 02	3.32	.4425 E 04	5.40	.1166 E 03	19.33
<i>E. deglupta</i> (Double)	.3132 E 01	0.22	.3325 E 03	0.41	.6928 E 02	11.48
<i>E. deglupta</i> (Triple)	.4206 E 00	0.03	.3920 E 02	0.05	.4730 E 02	7.84
<i>A. auriculiformis</i> (Mature)	.3576 E 02	2.47	.2931 E 04	3.58	.1111 E 03	18.42
<i>A. auriculiformis</i> (Double)	.1936 E 01	0.13	.1809 E 03	0.22	.6063 E 02	10.05
<i>A. mangium</i> (Mature)	.2092 E 02	1.45	.2161 E 04	2.64	.1299 E 03	21.53
<i>A. mangium</i> (Double)	.2263 E 01	0.16	.1798 E 03	0.22	.7316 E 02	12.13
<i>A. mangium</i> (Triple)	.1312 E 00	0.01	.1139 E 02	0.01	.5443 E 02	9.02
Control	.1447 E 04	100.00	.8191 E 05	100.00	.6033 E 03	100.00

PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density (400–700 nm)

IL : Illuminance (370–790 nm)

IT : Integrated Light Energy (300–1,100 nm)

表-3 早生樹の葉を透過した光の合成有効放射束密度 (PPFD) と照度 (IL)

Species	PPPD		IL		IT	
	($\mu\text{mol/s/m}^2$)	(%)	(L)	(%)	(W)	(%)
<i>Eucalyptus torelliana</i>	.1097 E 03	7.61	.9336 E 04	11.46	.1624 E 03	2104
<i>Eucalyptus houseana</i>	.1035 E 03	7.18	.8704 E 04	10.68	.1651 E 03	27.48
<i>Eucalyptus brassiana</i>	.9497 E 02	6.58	.8945 E 04	10.98	.1712 E 03	28.50
<i>Eucalyptus citriodora</i>	.8132 E 02	5.64	.7128 E 04	8.75	.1604 E 03	26.70
<i>Melaleuca symphyocarpa</i>	.7296 E 02	5.06	.6632 E 04	8.14	.1493 E 03	24.85
<i>Melaleuca leucadendra</i>	.7286 E 02	5.05	.7070 E 04	8.68	.1704 E 03	28.36
<i>Eucalyptus raveretiana</i>	.6787 E 02	4.71	.6058 E 04	7.43	.1545 E 03	25.72
<i>Melaleuca leucadendra</i>	.6542 E 02	4.54	.6438 E 04	7.90	.1561 E 03	25.98
<i>Eucalyptus paniculata</i>	.5918 E 02	4.10	.5052 E 04	6.20	.1495 E 03	24.88
<i>Melaleuca dealbata</i>	.5419 E 02	3.76	.4280 E 04	5.25	.1316 E 03	21.74
<i>Eucalyptus bigalerita</i>	.5069 E 02	3.51	.4384 E 04	5.38	.1394 E 03	23.20
<i>Eucalyptus bigalerita</i>	.4972 E 02	3.45	.4269 E 04	5.24	.1365 E 03	22.72
<i>Melaleuca saligna</i>	.4573 E 02	3.17	.4296 E 04	5.27	.1263 E 03	21.02
<i>Melia azedarach</i>	.4375 E 02	3.03	.4598 E 04	5.64	.1426 E 03	23.74
<i>Eucalyptus punctata</i>	.3035 E 02	2.10	.2619 E 04	3.21	.1089 E 03	18.13
<i>Azadirachta indica</i>	.2803 E 02	1.94	.2959 E 04	3.63	.1339 E 03	22.29
<i>Eucalyptus exserta</i>	.2761 E 02	1.91	.2364 E 04	2.90	.1309 E 03	21.79
<i>Melaleuca cajuputi</i>	.2636 E 02	1.83	.2648 E 04	3.25	.1334 E 03	22.20
<i>Melaleuca argentea</i>	.1948 E 02	1.35	.1806 E 04	2.22	.1236 E 03	20.57
Control	.1442 E 04	100.00	.8149 E 05	100.00	.6008 E 03	100.00

6) 葉表面で反射された光の波長別エネルギー特性

人工光源を用いて測定した葉表面からの反射光の波長別エネルギー組成を図-9に、それぞれの波長における反射率を図-10に示した。人工光源はグロースキャビネット内に備え付けられたもので、植物の生育に最適な条件となるように、光合成有効放射領域のエネルギーを高く設計してある。図-10から、反射率は、470 nm以下の短波長域では激しく変動する部分があるが、470～700 nmの範囲では比較的安定していて、0.8～12%の範囲にある。一方、700 nm付近では急激な上昇が見られ、しかも長波長域ほど高くなっている。

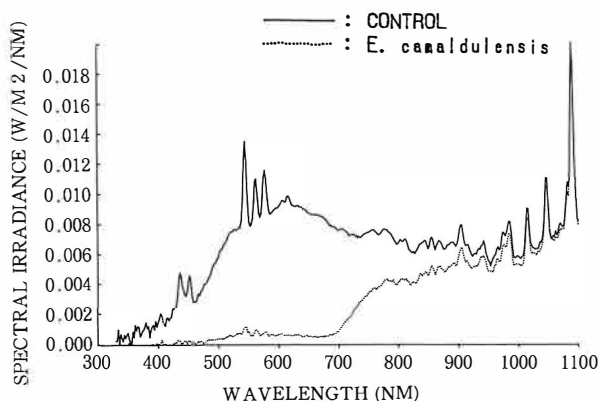


図-9 葉表面で反射された光の波長別エネルギー

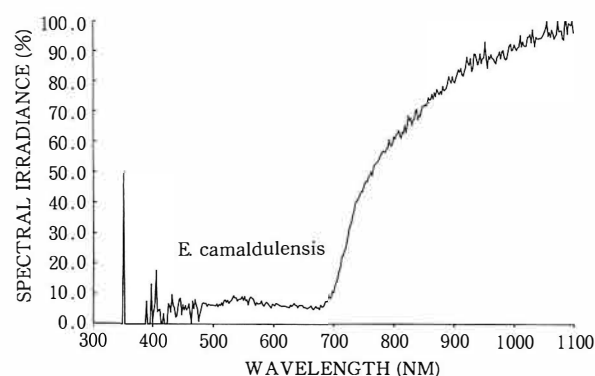


図-10 葉表面における波長別反射率

る。さらに樹種による差異も700 nm以下の領域に比べ、700 nm以上の領域ではより顕著である。葉の表面では光合成に重要な働きを持つ光合成有効放射領域のエネルギーをできるだけ反射しないで葉肉組織内に取り込み、光合成にはほとんど利用されない遠赤色光領域のエネルギーを反射している。

3 林内光環境の解析

林内の光環境は樹冠構造、樹冠を構成する樹種、樹冠の閉鎖の度合い等により異なり、また季節によっても変動する。林内の光は直達光と散光からなり、散光

は葉の透過光と枝葉や樹幹等で反射した光からなる⁵⁾。そのため、林内光の波長別エネルギー組成は直達光や葉の透過光、反射光とも異なった組成を示す。

林木と作物を混植するアグロフォレストリーでは、林木の生長により、作物の生育環境は影響を受ける¹¹⁾¹²⁾。特に林冠の閉鎖による林内光環境への影響は著しく¹⁾、光量のみならず光質の変化も重要である²⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。ここでは林内の光の質の特性とともに照度で表す光の量について、林冠を構成する樹種、樹冠構造、植栽間隔による差異、林齢に伴う変化、季節変動等について解析を行った。

材料と方法

林内散光の波長別エネルギーは LI-1800 を用いて、300～1,100 nm の波長域で、それぞれ 2 nm の間隔で計測した。林内相対照度は照度計（ミノルタ T-1）を用い、林内と林外で同時測定を行い、それぞれの相対値で示した。LI-1800 による林内散光の測定は、タイ王室林野局ファイタ試験地内の *D. alatus*（5年生）、*E. camaldulensis*（12年生）、*A. aliculiformis*（12年生）の林分で、また植栽間隔を異にする林分内の散光については、同試験地の *E. camaldulensis*、*E. degru-pta*、*A. leptocarpa* の 4 年生林分で行った。林内相対照度の測定は、同ラチャブリ試験地内の早生樹 42 樹種 43 林分で、林齢及び植栽間隔と相対照度との関係については、同サケラート試験地内の *A. aliculiformis*、*A. mangium*（3～7年生）林分について行った。季節変動は LI-1800 により、チェンマイ県ドイ・アンカンにあるキングスプロジェクト内に植栽されている *Paulownia taiwaniana*、*A. confusa*、*Liquidamber formosana*、*Cinnamomum camphora*、*Fraxinus griffithii* の 9 年生林分において、1990 年 8 月、12 月、1991 年 3 月、8 月の計 4 回行った。

結果と考察

1) 林内散光の波長別エネルギー特性

林内散光は、透過光、反射光等から構成されるものの、直達光及び透過光、反射光とは異なった波長組成を持つ。単一葉を透過した光の波長別組成では 500～700 nm 域にエネルギー分布が認められるものの、700 nm 以下の領域では透過光の割合はごく僅かである。一方、林内の散光成分の波長別組成では、図-11 に示すように、300～700 nm の全域にわたって平均化された波長別エネルギー組成を示す。700 nm 以上の遠

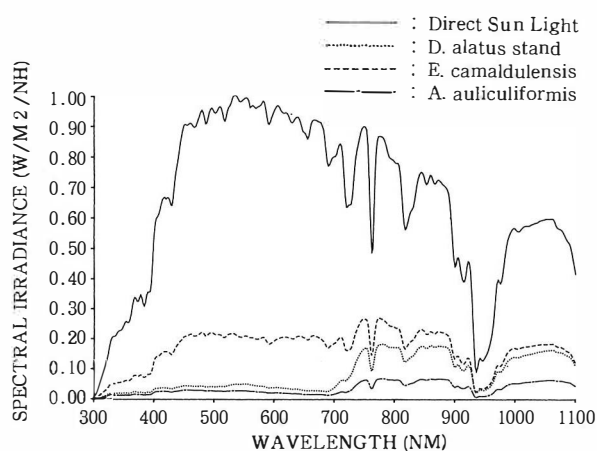


図-11 林内散光の波長別エネルギー

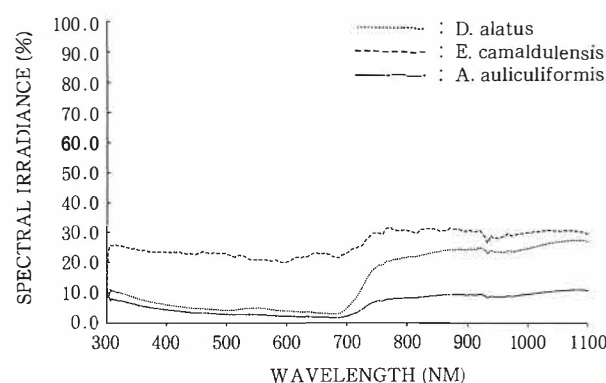


図-12 林内散光の全天日射に対する相対値

赤色光域においては、葉透過光に比べ透過率が相対的に低く、この領域でも平均化されている。林内散光は透過光、反射光などにより構成されているため⁵⁾⁶⁾と考えられる。図-11 から明らかなように、林冠が閉鎖した林分内の散光エネルギーはきわめて低く、しかも林冠を構成する樹種に依存する。

全天日射に対する相対値で表すと、林内散光の波長別組成、透過率などをよく知ることができる。図-12 に示すように、林分一樹種により明かな違いが認められ、全波長域で透過率が一定な林分、700 nm 付近を境に遠赤色光域で透過率が上昇し 780 nm 以降一定値を示すもの、全波長域で高く、安定した透過率を示すものなどがある。林内散光では遠赤色光の成分割合が増すと言われるが⁵⁾⁶⁾、全天日射に対する相対値でみる限り、遠赤色光の割合は林冠を構成する樹種に依存しているといえる。

2) 植栽間隔と林内散光の波長別エネルギー組成

図-13 は 4 種類の植栽間隔（2×2、2×4、2×6 m）で植栽した *A. leptocarpa* の 4 年生林分で林内散

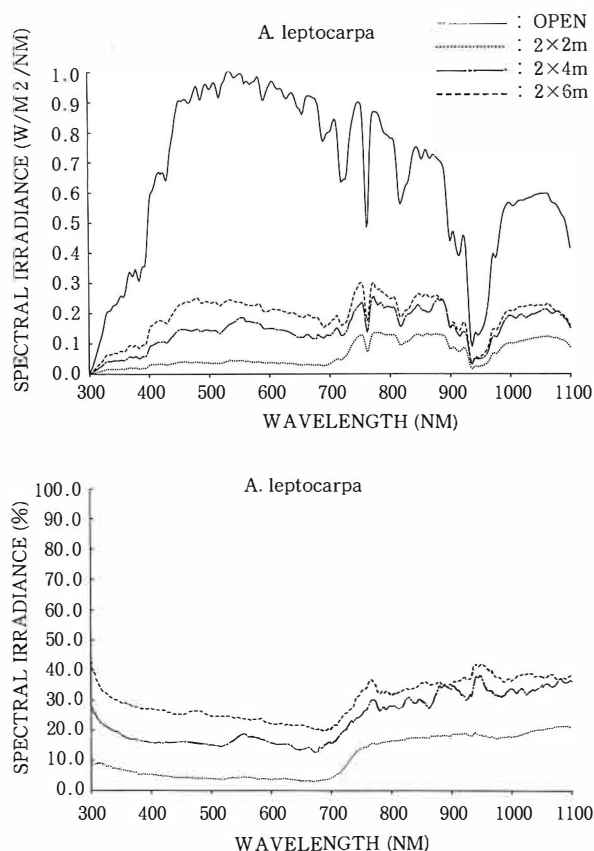


図-13 植栽間隔を異にする林分での林内散光の波長別エネルギー

光を測定した結果を、波長別エネルギー組成と全天日射に対する透過率で示したものである。植栽間隔が広がるにつれ、全波長域で散光成分の増加が認められる。特に 400 ~ 700 nm 域での増加が著しく、植栽間隔を広く採ることにより、林内散光の安定した確保が図られている。

3) 林内相対照度の解析

(1) 樹種と林内相対照度、樹冠構造の関係

表-4 は 4 ~ 6 年生の早生樹 43 林分 (2 x 2 m 植栽, 10 x 10 m/ブロック) で測定した林内相対照度の一部を示す。相対照度は、*Melaleuca agentia* の 83.2% から *A. stennohylla* の 3.12% まで、広い範囲にわたり、林分間で統計的に有意な差 (1% 水準) が認められる。表-4 には葉の透過光と反射光の光合成有効放射束密度および樹冠の開空率も示してある。林内相対照度と透過光、反射光との間にはいずれも有意な相関は認められないことから、林冠層を透過した林内散光の波長別エネルギー (光合成有効放射束密度) は、個々の葉の透過光、反射光の波長別エネルギーから直接推定することはできない。一方、林冠の開空率で表す樹冠構造と光合成有効放射束密度との間には高い相

表-4 林内相対照度、葉の透過光及び反射光の光合成有効放射束密度 (PPFD)、林冠開空率

Species	林内の 相対照度 %	透過光* 有効放射 %	反射光** 有効放射 %	林冠の 開空率 %
<i>Melaleuca argentea</i>	83.28	2.32	1.71	73.8
<i>Eucalyptus exserta</i>	76.44	3.41	4.01	36.5
<i>Melaleuca symphyocarpa</i>	75.34	3.54	6.54	63.0
<i>Eucalyptus brassiana</i>	71.07	6.30	2.03	52.5
<i>Acacia leptocarpa</i>	63.66	2.48	6.50	64.7
<i>Eucalyptus bigalerita</i>	57.07	4.73	2.18	50.2
<i>Acacia auliculiformis</i>	56.67	2.53	5.88	49.5
<i>Acacia julifera</i>	53.26	2.68	1.66	64.1
<i>Acacia torulosa</i>	52.56	2.30	2.01	54.6
<i>Grevillea parallela</i>	49.85	2.32	2.22	46.9
<i>Acacia aulacocarpa</i>	48.89	3.46	6.62	35.0
<i>Grevillea pinnatifida</i>	41.27	2.91	4.07	28.3
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	39.00	8.48	2.06	27.4
<i>Eucalyptus torelliana</i>	33.20	6.44	1.56	28.7
<i>Acacia polystachya</i>	27.52	3.02	6.73	37.7
<i>Petalostigma pubescens</i>	25.79	3.01	1.92	29.4
<i>Melia azedarach</i>	21.06	4.12	6.46	25.4
<i>Azadirachta indicca</i>	15.84	2.75	2.42	20.2
<i>Peltophorum dasyrachis</i>	8.00	1.89	0.85	15.2

*: 太陽直達光に対する相対値, 3 回繰り返し平均値

** : 直達光 (人工光) に対する相対値, 繰り返し無し

関があり (0.1% 水準で有意), 林内の光環境は開空率等で表される樹冠構造, つまり枝葉の空間的配置や枝葉量等, 形態的な樹種特性に大きく依存していることがわかる。金沢¹⁾は枝下高の違いにより, また樹冠下の水平的な位置の違いによっても林床の明るさは異なることから, 林床の光環境に大きく影響する要因に樹冠の大きさ, 配列, 高さを挙げている。このように樹冠構造は樹種の選定その他, 植栽間隔や林齢に伴う林冠の開鎖等とともに, 林内光環境の人為的調節に結びつく重要な要因といえる。

(2) 植栽間隔と林内相対照度

植栽間隔が異なると, 林冠の開鎖するまでの期間が異なり, それが林内光環境に作用する。表-5 に 4 種類の間隔 (4 x 8, 2 x 8, 4 x 4, 2 x 4 m) で植栽した *E. camaldlensis* の 4 年生林分で測定した林内相対照度の結果を示す。相対照度の平均値は 2 x 8 m 植栽区

表-5 植栽間隔と林内相対照度 (*A. auliculiformis*)

	4 x 8 m	2 x 8 m	4 x 4 m	2 x 4 m
相対照度	53.71	60.78	39.83	25.76
標準偏差	16.5533	11.564	11.4617	4.80317
変異係数	0.30818	0.19026	0.28779	0.18647

表-6 植栽間隔と胸高直径、樹高の平均値、標準偏差、変異係数

	4×8		2×8		4×4		2×4	
	DBH(cm)	H(cm)	DBH(cm)	H(cm)	DBH(cm)	H(cm)	DBH(cm)	H(cm)
平均値	10.86	793.70	8.45	742.50	9.93	731.04	8.57	754.56
標準偏差	2.7737	113.86	2.8726	146.77	12.043	130.69	2.4459	121.495
変異係数	0.2553	0.1435	0.3399	0.1977	1.2132	0.1788	0.2853	0.1610

が60.8%と最も高く、次いで4×8m区の53.7%, 4×4m区の39.8%, 2×4m区が最低で25.8%であった。4×8m区と2×8m区で平均値が逆転していることを除けば、ほぼ植栽密度に反比例して相対照度は低くなっている。2×8m区が4×8m区よりも平均相対照度が高い理由として、次のことが考えられる。すなわち4×8m区では1本当たりの占有面積が4×8m区に比べて広く、それだけ個々の植栽木は樹冠を広く展開できる。相対照度の変異係数は4×8m区が2×8m区よりも大きな値を示しており、場所による測定値の大きなバラツキが伺われる。さらに表-6に示すように、この林分では胸高直径(DBH)が2×8m区のそれよりも大きく、より広く樹冠を展開していること、そのため樹冠下部では著しく光量不足になっていることが推察される。一方、4×4m区及び2×4m区ではすでに樹冠が閉鎖していて、植栽密度のより高い林分で光量不足が進んでいる。

(3) 林齢に伴う林内相対照度の推移

林内光環境は、樹木の生長につれて林冠の閉鎖が起こり、林内に届く光の量も質も著しく変化する。図-14は *A. auliculiformis* と *A. mangium* の2×2m植

栽の林分で調べた林齢に伴う林内相対照度の推移を示したものである。*A. auliculiformis* の林分では、3年生時までは林冠がほとんど閉鎖しないため、林内の光環境は概ね良好で、3年生時でも50%近い光量が得られている。また、測定地点による変動も大きい。しかし、4年生時以降では林冠の閉鎖が始まり、相対照度は急速に低下し、20%を下回るようになる。また林内の場所による変動も減少する。その後、再び相対照度、変異係数ともに上昇がみられ、6年生時には20%まで回復するが、7年生時には再び減少に転ずる。これは林冠の閉鎖による個体間競争の始まりと、競争の激化にともなう枯損、林冠閉鎖の崩壊が繰り返されるためであろう。相対照度と変異係数は連動して変化しており、このことを如実に裏付けている。

A. mangium の林分でも同様の傾向が認められる。しかし、ここでは3年生時にすでに相対照度が20%を割り、4年生時では15%まで落ち込んでいる。5年生時のデータは得られなかったが、6年生時には再び4年生時のレベルまで回復している。*A. mangium* の林分でも相対照度と変異係数は連動して変化している。

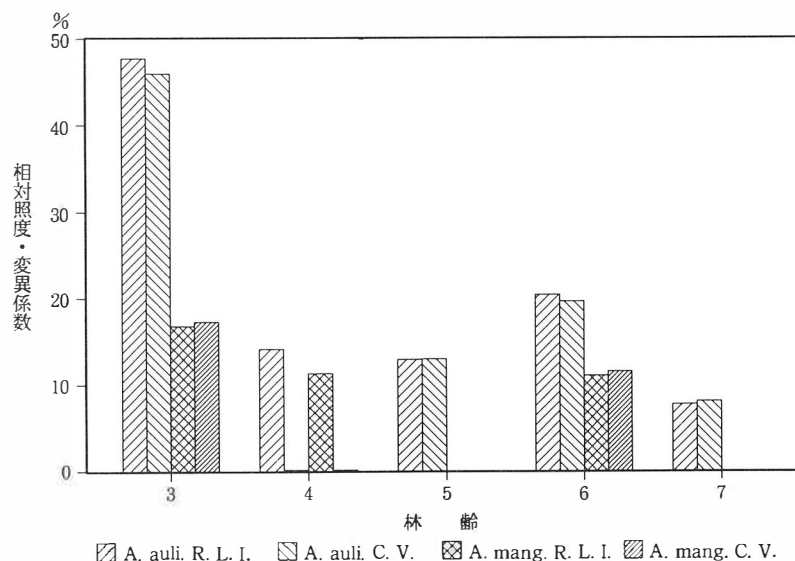


図-14 林齢に伴う林内相対照度の推移

A. auliculiformis に比べ、*A. mangium* の林分では相対照度は早くから低下していて、林冠の閉鎖がより早く始まっていることが推測される。これはそれぞれの樹種特性によるものであろう。

2x2mの他、2x4mで植栽された林分についても測定を行った。2x4mの林分では2x2mの林分に比べ、林冠の閉鎖とそれに伴う相対照度の低下がやや遅れるものの、2x2m植栽林分と同様の傾向を示した。

このように、林内光環境は林木の生長とともに著しく変化するが¹²⁾、植栽間隔にも大きく依存し、同時に林冠を構成する樹種にも依存していることがわかる。

(4) 林内光環境の年変化

表-7はドイ・アンカンに植栽されている9年生の林分で測定した光合成有効放射束密度 (PPFD) と相対照度 (IL) を示したものである。*Paulownia* の林分では、5～11月の雨期には葉を展開し、11～4月の乾期には落葉する。そのため林内は雨期の間は光量不足となり、乾期には十分な光量が得られる。一方、*Acacia* や *Liquidamber*, *Cinammomum*, *Fraxinus* の林分では、年変動は認められるものの、*Paulownia* ほど明瞭ではない。*Liquidamber* は当地では一斉に落葉しないため、年間を通して林内光環境、特に光合成有効放射領域は光量不足の状態にある。この他、常緑性である他の樹種では旧葉が新葉に交代する12月から

3月にかけて光量不足がやや回復する。

斉藤⁹⁾はスギ林で林内光エネルギーの年変動を測定している。その結果、林内光エネルギーの相対値は夏に大きく、冬に小さい傾向を見いだしている。これは日射量に季節変化があることの外に、林内における日射量の減衰が季節によって異なるため、また林外日射の質的变化に起因すると推定している。全天日射の波長組成には明瞭な季節変化が認められ、特に明瞭な季節変化は395～475 nmの波長帯にみられ、夏期に大きく、冬季に小さい。このため、光合成有効放射領域の相対値は冬季に小さく、夏期に大きい¹⁴⁾とされる。このように林内の光環境は全天日射の季節変化の外に、林冠を構成する樹種のフェノロジーとも密接な関係にあり、熱帯モンスーン地帯のような乾期と雨期が明瞭な地域では、乾期の終わりに落葉する樹種が多く、この時期に林内の光量は多くなる。しかし日射量が最も多く、植物が生長するのに最も適した雨期は、林木にとっても生長期であり、樹冠上の葉を最も多く展開しているため、林内には僅かな光しか届かない。

結 論

アグロフォレストリーで、林木と作物を混植する際に問題となる光環境について、波長別光エネルギーと相対照度を用いて、林木、作物の生育環境の解析を試みた。乾期、雨期が明瞭なタイでは、全天日射エネルギーは4月から6月にかけて最高となり、乾期の12月から2月にかけての時期に最低となる。林内光環境も季節により変動し、落葉性樹種からなる林分では、落葉期の12月から3月にかけて林内光エネルギー量は最も高くなるが、新葉の展開にともない、その後再び減少する。熱帯モンスーン地域では、雨期に栽培する作物が多い。しかしこの季節は林木にとっても生育時期に当たり、林内の光環境は作物にとって必ずしも適してはいない。特に初期生長の早い早生樹種を用いたアグロフォレストリーでは、植栽間隔を十分に広く採らないと早くから林冠が閉鎖して、林床は光量不足となり、作物の生長は著しく阻害される¹²⁾¹³⁾。林内光環境は林冠を構成する葉の光特性、特に葉量、樹冠構造、植栽間隔及び林冠閉鎖の程度等と密接な関係にある¹²⁾。林内の光環境は林分により異なり、樹種、植栽間隔、林齢等により変動することから、栽培目的に合わせた保育形式と、下層に栽培する作物種を考慮する必要がある。

表-7 林内光環境の年変動 (ドイ・アンカン)

Species	August	December	March	August*
[PPFD]				
<i>Paulownia</i>	18.1 (1.9)	303.1 (20.0)	839.9 (61.7)	83.0 (5.9)
<i>Acacia</i>	6.6 (0.7)	5.7 (0.4)	18.3 (1.4)	25.9 (5.3)
<i>Liquidamber</i>	6.9 (0.7)	10.8 (0.7)	26.4 (2.0)	10.3 (2.1)
<i>Cinammomum</i>	— (—)	12.3 (8.2)	74.0 (5.5)	64.3 (2.8)
<i>Fraxinus</i>	— (—)	71.7 (7.2)	265.9 (19.6)	— (—)
[RLI] **				
<i>Paulownia</i>	1.9	35.0	61.9	6.0
<i>Acacia</i>	0.7	4.0	1.5	5.4
<i>Liquidamber</i>	0.8	8.5	2.0	2.2
<i>Cinammomum</i>	—	8.4	5.7	3.0
<i>Fraxinus</i>	—	7.4	22.3	—

PPFD: $\mu \text{ mol/s/m}^2$

RLI : lux

* : in 1991

** & () : %

要 旨

- 1) アグロフォレストリーにおける林木-作物混植による光エネルギーの効率的利用法を検討するため、造林樹種の葉の光特性と林内光環境の解析を試みた。
- 2) 樹木の葉を透過した光の波長別エネルギー組成は、全天日射のそれとは著しく異なり、400～700 nmの光合成有効放射領域でのエネルギー吸収が顕著であるが、700 nm以上の遠赤色光域での吸収は少ない。
- 3) 葉透過光の光合成有効放射束密度 (FFPD) は、全天日射に対する相対値でみると、1.2～12.5%の範囲にあり、樹種により異なることがわかった。
- 4) 葉の透過光の波長別エネルギー組成は、その時の日射の影響を受け、雲に遮蔽された散乱光の条件下では、その時の雲の状態に大きく影響される。
- 5) 透過光のエネルギー組成は、透過する葉の量によっても異なる。透過葉数が増えるに伴い透過率は著しく低下し、特に光合成有効放射領域での減衰が顕著である。
- 6) 葉の加齢に伴い、透過率も変化する。一般に、幼葉では光合成有効放射領域の透過率が成葉に比べて高く、老葉では逆に低くなる。しかし、これは樹種により異なり、種の特性と考えられる。
- 7) 葉の表面で反射した光の波長別エネルギー組成も全天日射とは大いに異なる。400 nm以下、及び700 nm以上の波長域での反射率が著しく、400～700 nmの波長域での反射率は0.8～12%の範囲で比較的安定している。反射率についても樹種による違いが認められる。
- 8) 林内光環境を解析するため、林内散光の波長別エネルギー組成を測定した。その結果、散光のエネルギー組成は全天日射、葉の透過・反射光のそれとは著しく異なり、700 nm以下の波長域の透過率は低く、且つほぼ一定で安定している。一方、700 nm以上の波長域では透過率が高い。林内散光についても、林冠を構成する樹種による違いが認められた。
- 9) 林内の光環境は樹種、植栽間隔等により異なり、また林齢、季節等によっても変動する。樹種、植栽間隔、林齢と林内光環境とは密接な関係にあり、植栽密度が高いほど林内の散光量の低下が早くから起こり、林齢が進につれて一層光量不足が加速される。光量低下の程度と速度は林分を構成する樹種に

よっても異なる。林内の光環境は単一葉の光特性の他に、特に林冠構造が重要で、林内相対照度と林冠の開空率との間には密接な関係が認められる

- 10) 林内光環境の季節変動は、林冠を構成する樹種のフェノロジーに依存し、雨期と乾期の明瞭な熱帯モンスーン地域では、林木と作物の生長期が一致するため、作物栽培期には林内光環境は作物の生育には必ずしも適した状態とはいえない。
- 11) 林内光環境は林冠を構成する葉の光特性、特に葉量、樹冠構造、植栽間隔及び林冠閉鎖の程度等と密接な関係にある。林内の光環境は林分により異なり、樹種、植栽間隔、林齢等により変動することから、栽培目的に合わせた保育形式と、下層に栽培する作物種を考慮する必要がある。

引 用 文 献

- 1) 金沢洋一 (1988). 熱帯地方の数種樹冠下の光環境. 99 回日林論: 415-416.
- 2) 森 徳典 (1982). フタバガキ樹種の生態と生理
3) いろいろな被陰下でのフタバガキ苗木の生長. 熱研集報. 43: 91-98.
- 3) MORIKAWA Y., S. ASAKAWA & S. SASAKI (1976) Growth of pine and birch seedlings under light with different spectral compositions and intensities. J. Jap. For. Sci. 58: 174-178.
- 4) 森川 靖・井上敏雄・佐々木恵彦 (1980). いろいろな光強度で生育した *Shorea talura* 苗木の光-光合成曲線. 林試研報 309: 109-115.
- 5) 森川 靖・佐々木恵彦・浅川澄彦 (1983). 林床の光の性質と稚樹の生長. 森林立地 25(1): 1-7.
- 6) 佐々木恵彦 (1982). 熱帯降雨林における林内の光環境. 熱研集報 43: 78-85.
- 7) 佐々木恵彦 (1982). フタバガキ樹種の生態と生理
2) 光条件の違う林内での苗木の生長. 熱研集報 43: 87-91.
- 8) 佐々木恵彦 (1982). フタバガキ樹種の生態と生理
4) 光質と苗木の生長. 熱研集報 43: 98-101.
- 9) 斉藤昌宏 (1987). スギ人工林の林内日射量に冠する研究. (1) 林内日射量とその季節変動. 新大演報 20: 1-50
- 10) 佐藤 明・R. D. ビライ・R. V. ダルマシオ (1988). フィリピンにおけるアグロフォレストリーに関する研究(I) 林床上における受光量について. 99

- 回日林論：417-418
- 11) 佐藤 明・R. D. ビライ・R. V. ダルマシオ (1988). フィリピンにおけるアグロフォレストリーに関する研究(Ⅲ)ヤマネ (*Gmelina arborea*) の樹冠構造の変化. 100 回日林論：479-480
- 12) SATO A. and R. V. DALMACIO (1991). Maize production under an Intercropping system with Fast-Growing Tree Species: A Case in the Philippines. JARQ 24: 319-326
- 13) 佐藤 明 (1992). アグロフォレストリーによる熱帯林の再生. 森林科学 6: 27-33.
- 14) 柴田和雄・内嶋善兵衛 (1987). 太陽エネルギーの分布と測定. 学会出版センター p. 191

コメント

荒廃林地の回復とアグロフォレストリー
—林内光環境の解析—

森林総合研究所森林環境部群落生態研究室長 斉藤 昌宏

現在、熱帯林の消失が問題になっていますが、これは地球規模の問題として二酸化炭素の増大、すなわち、①地球規模の気候変動、②遺伝資源および種多様性の保全に係る問題であり、必ず、熱帯地域の荒廃地の増大、土壌劣化、侵食、水資源の破壊を伴うことにより、それらの地域の生活環境の破壊につながって行きます。

これらの問題に対し、Agro-forestry がどこまで有効か？の議論はさておき、荒廃地の増大に対する歯止めとして、さらに荒廃地の回復を行うに有効な手段（方策、政策）の一つとして Agro-forestry が位置づけられています。

Agro-forestry に様々な方式、あるいは各種の作物と樹木の組合せがあることはご存じの通りです。これは実施する地域の置かれている立地条件（自然的にも、社会的にも）が多様であるため、当然と言えば当然のことですが、問題は樹木と作物という2つの相反する、毛色の違う、より具体的に言えば、大きさと成長期間の異なる植物を同一の場所に生育させなければならないことが技術的に問題となるわけです。

一方、樹木でも作物でも植物である以上、成長するためには光と水と養分が必要です。このうち、水と養分はそれぞれ灌漑あるいは施肥によって補ってやることはできます。また、この辺は林業関係の研究者より農業関係の研究者の方が当然詳しいわけです。光については少し事情が異なります。農業でも林業でも、基本的には太陽の光以上のものを追加することはコストパフォーマンスとして引き合わないわけです。

それゆえ、林地での光のコントロールとしては、植栽密度と枝打ち、間伐が必要になり、例えば智頭林業で行っているように、林内でのオウレン栽培などでこれらの技術を用いた林内光条件のコントロールを昔からやっていました。近年では、複層林などの施業においてもこれらの技術が重要視されています。林業研究者からみた場合、Agro-forestry に対する技術的な問題はほぼ同様で、基本的に灌漑や施肥の考え方が有りませんから、上にある樹木と下に生育させる作物との間で太陽光を如何に配分するかという技術的な問題に

帰着します。言い換えれば、手間・暇・金のかかる灌漑や施肥はなるべく控えて、無料の太陽光を最大限利用して、一つの土地に適当な密度で樹木を生育させながら、しかも、間作する作物で飯を食うだけの収入を上げることが求められるわけです。

Agro-forestry に対して、少し厳しすぎる見方かもしれませんが、歴代の森林総合研究所から出た担当者（佐藤、金沢、田中）も林内の光環境をいろいろな角度から研究してきています。これらの人々の報告および論文のすべてがそうではありませんが、林内の光に関するものの割合が多いのも事実です。林内における光条件の研究は、門司-佐伯の研究に始まり、M. C. Anderson, Hutchison & Void など、1950 年代から様々な研究者が手掛けており、今でも未解決の問題が多々あります。中でも林内における光の質（言い換えれば、波長の組成）については特に研究が遅れていました。一つは総量が把握されていないのにそこまで踏み込むかという研究上の問題と、もう一つはスペクトルアナライザーが非常に高価であるということも確かなわけです。

長くなりましたが、以上述べたことは、今回中島さんがタイで行われた研究に対する、私なりの位置づけということになります。

次に研究の内容についてのコメントをさせていただきます。林内の光を波長別に測るとしたならば、私が必要だと思う測定項目はすべて網羅して研究されています。ただ、この研究で得られた知見が、温帯林で断片的に得られていた林内の波長組成の研究結果から予想されることとそれほど違っていない、また、最終的な Agro-forestry に対する技術的な提言も、これまで光を量として研究してきた研究者（例えば、佐藤、金沢）の結論とほぼ同じであることはやや寂しいような、ほっとするような印象を持ちます。じつは、これまでの Agro-forestry の研究でこれ以上進まない共通した問題があります。結局、林業研究者が Agro-forestry を扱う場合、どうしても上にある樹木を中心に研究を行いますから、これが限界になってしまいます。

Agro-forestry の研究を行う以上、間作する作物の挙動を研究することが必要であることは、頭の中では理解しているのですが、具体的に何を用いて、どんな項目を測定するか、それをどう樹木の配置と結び付けるかということになると技術、経験、思考法がありませんから、後込みせざるを得ない。あるいは、勇敢にチャレンジしても農業分野の研究者からみると疎漏な結果しか出せないことになってしまいます。

林業研究者からのアプローチで当面できることはほとんどやってしまった。というのが、中島さんの今回の報告を聞いての感想です。ただ、Agro-forestry の研究は全て終わったというわけではありません。現状は農業研究者からのアプローチを待っている段階だと思います。両者をつきあわせることで更に研究が発展する余地はまだあります。たとえば、樹木が配置さ

れた状態で少ない光であっても、十分に生育する作物はないか、今回の中島さんの研究ではっきりしたように樹種によって林冠で反射吸収される波長が異なるのであれば、*E. camaldulensis* の下に栽培するにはどんな作物が有利であるのか、林内の光の量・質に季節変化があるのであれば、作物育成期間をどう季節的に配分するのかなど、樹木と作物の組合せ、季節配分、あるいは樹木帯と作物などの位置および面積配分といったいろいろな課題が出てきます。

Agro-forestry の課題は今年で終了と言うことですが、熱帯農業研究センターも国際農林水産業開発研究センターとして拡充されることですし、農と林の横断的な研究として Agro-forestry に関する研究を今後進めて頂きたいと希望します。

農業限界地における環境資源利用技術の開発と今後の研究推進

3. 熱帯乾燥地域における岩石の風化機構

八 田 珠 郎

熱帯農業研究センター環境資源利用部

Development of Techniques for the Utilization of Environmental Resources and Perspective of Promotion of Research in the Marginal Land Area

3. Mechanism of rock-weathering in tropical dry areas

Tamao HATTA

Marginal Land Research Division, Tropical Agriculture Research Center
Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

The mechanism of rock-weathering in tropical dry areas is important in studies on desertification. The present studies dealt with the changes in the chemical and physical properties of standard rocks during experimental weathering. The formation of secondary minerals and the behavior of chemical species in aqueous solution were studied by geochemical simulation which is an analytical method of rock decomposition. The physical weatherability of rocks as a cause of rock disintegration can be determined by the relation between the TMA (Thermo-Mechanical Analysis) α -values and pore ratio.

The process of chemical weathering can be simulated as a reaction occurring between rock-forming minerals and aqueous solution. The changes in the amount (grams) of chemical species/1000g of solution (M) and the degree of saturation of secondary minerals, shown in Fig. 3, were calculated as increments of the reaction progress (ξ) in the hydrolysis of standard granite as an example. The changes in the values of the chemical parameters were complex. The formation of saturated mineral zoning by weathering is represented by the reaction area (10 cm^2) in the profile (Fig. 4). Satisfactory results were obtained in the alteration to laterite.

Physical weathering takes place when rocks on the earth surface are broken into fragments or grains. Weathering by thermal expansion only occurs under very hot and very dry climatic conditions. The behavior of thermal expansion and shrinkage of 14 standard rocks in the temperature ranges of 0 to +100°C and -125 to +550°C was examined by TMA. The rocks characterized by a large thermal expansion contain a large amount of quartz. The samples of granite were fractured during the

experiment (Fig. 8). A new stability series of physical rock-weathering can be determined based on the thermal expansion-shrinkage coefficient and the pore ratio in each rock type (Fig. 11). This order reflects the geomorphological characteristics in a desert area.

Although there is no natural water at present, many hydrous minerals (e.g. goethite, gibbsite, kaolinite etc.) occur on the earth surface in a desert area. The formation of these secondary minerals can be explained by geochemical simulation that describes the water-rock interaction. As natural water is essentially involved in soil genesis, it is considered that the secondary minerals forming soils in a tropical dry area have not been formed under the present climatic conditions. The rock stability series in physical weathering indicates that the rocks characterized by a large thermal expansion are not prone to weathering, because the pores in rocks play an important role in the alleviation of various environmental stresses. The importance of the thermal expansion coefficient of rocks on the earth surface in tropical dry areas has been well documented. The physical weatherability of rocks can be studied by the determination of thermal coefficients and the physical properties of each rock type.

key words: weathering, dry area, geochemical simulation, TMA (Thermo-Mechanical Analysis)

キーワード: 風化, 乾燥地域, 地球化学的シミュレーション, 熱機械的分析

1. はじめに

地球表層条件においては, 風化→侵食→運搬→堆積→続成の各作用が存在する。地表に存在する岩体・岩石は, これらの作用により礫, 砂, シルト, 粘土およびこれらの混合物よりなる物質に変化する(図1)。ま

た従来より, 熱帯乾燥地域においては, とくに風化作用が卓越するとされている。本研究においては, 風化作用からみた熱帯乾燥地域における地表構成物質の生成機構を考察する。

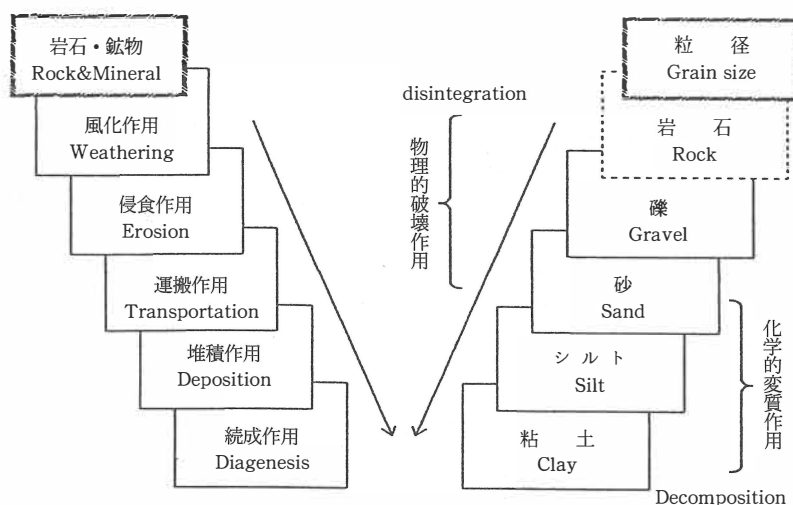


図1 一般の地球表層条件における諸作用と細粒化による変化。ただし, 氷河地域におけるような物理的破壊作用(磨耗による粘土化も存在する)

2. 風化と風化系列

近年、風化の定義は次第に変わりつつある。風化は「地表もしくは地表近くで、そこに優勢な条件に対する一つの応答としての物質の変質である。それは通常少しも平衡とはなっていない岩石圏、気圏、水圏、および生物圏間の相互作用の複合的セットの結果生ずる。そのプロセスは、地球表面から下は続成帯まで広がる地帯において起こる。変化が漸移的であるため、二地帯間の境界は任意であろう」^{24)・26)}とされる。この定義によれば、従来、数多くみられた地球表層環境における「平衡化」、「安定化」、「粘土化」へのプロセス等の概念を一部では包含し、一部では否定していることになるため、より厳密である。確かに従来の研究結果、とくに化学平衡に関しては曖昧な点が多い^{3)・9)・11)}。しかし、実際の調査、分析、実験等においては、平衡の仮定、粘土化等に関する条件を用いざるをえない場合も存在する。

風化作用に関する研究は、図2のように区分可能である。従来の研究の多くは、主として「化学的風化」作用による「鉱物」の変質に対し、「化学および鉱物学的性質」を分析することにより行われてきた。「岩石」を対象とした例はきわめて少ない。しかし変質あるいは破壊は、「鉱物」を含む「岩石」に対して行われる。とくに熱帯乾燥地域での岩石から土壌への変化過程においては、「物理的風化」作用の影響が著しいといわれ、その効果も考慮せねばならない。

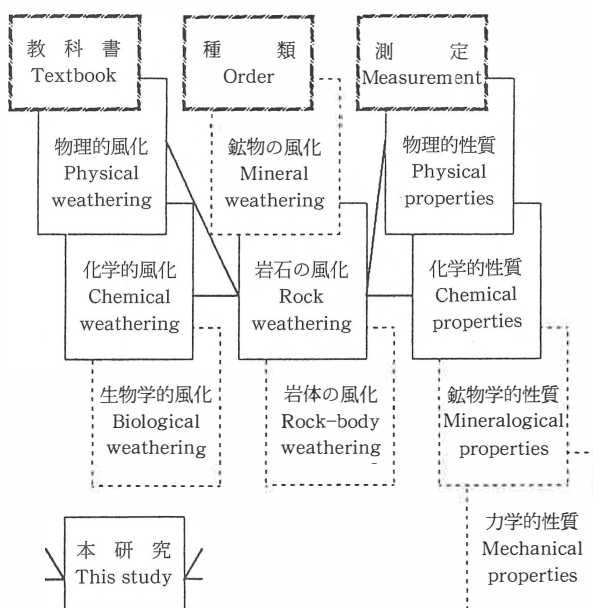


図2 風化に関する研究の分類。

多くの岩型および鉱物種には、それぞれに多様な風化特性が認められる。これをまとめたものが「風化系列」である。ただし「風化系列」は、①風化による鉱物種の変化経路を求めるときに用いる場合と、②weatherability（風化されやすさ）の比較を行うときに用いる場合との、二通りの意味をもつ⁷⁾。①は、しばしば「風化変質系列」とも呼ばれ、例として、長石→カオリナイト→ギブサイトがあげられる。②は、「風化安定系列」とも呼ばれている。この概念は、Bowenの反応原理¹⁴⁾をもとに Goldich¹⁷⁾により初めて導入された。その後、いくつかの系列が提案された（例えば、Jackson and Sherman²²⁾、Lasaga²³⁾など）。しかし、それらの安定系列は全て「鉱物」の「化学的風化」に対して求められたものであり、「岩石」の「物理的風化」に関する系列は構築されていない。本研究においては、「風化系列」を考慮し、熱帯乾燥地域における「岩石の風化」に対し、「化学的」および「物理的」の両側面より、それぞれ異なる実験方法を用いて検討した結果を報告する。

3. 化学的風化作用に関する実験

熱帯乾燥地域のみならず、現在の地表付近を広く覆う岩石（・鉱物）の風化生成物に関する、過去の履歴の把握および将来の変化予測は、困難な場合が多い。種々の変質鉱物の生成機構を求めるためには、溶解実験が理想的である⁸⁾が、常温常圧条件下で、目的の結晶（二次鉱物）を容易に得ることはできない。しかし、反応の初期条件を設定し、熱力学（化学平衡論）を基礎とするシミュレーションによる実験を行えば、ある程度の推定は可能となる¹⁾。そこで風化作用を岩石—水溶液系における相互反応とし、風化条件における計算により、水溶液中の種々の化学種の変化を求めることを試みた。

【出発物質】

シミュレーション（地球化学的シミュレーション）は固相—液相における不可逆反応とする⁴⁾。反応モデルの原理は、反応進行度（あるいは反応強度） ξ を用い以下のように表される²⁰⁾。

$$n_s = \frac{dm_s}{d\xi} = \frac{1}{\gamma_s} \frac{da_s}{d\xi} \quad (1)$$

ここで n_s は s 化学種のモル数、 m_s は水溶液相における s 化学種の重量モル濃度、 a_s と γ_s はそれぞれ s 化学

種の活量と活量係数である。反応がわずかに進行したとき、

$$m_s(\xi + d\xi) = m_s(\xi) + n_s \cdot d\xi, \quad (2)$$

となる。こうして実験開始前に初期条件として与える造岩鉱物種から溶液中に種々の化学種が放出される。したがって反応実験開始後、しばらくは反応系の固相が液相と接し、congruent 溶解（生成系に固相を生成しない溶解）を行うことになる。 ξ の変化にともない、溶液は生成系に与えられた固相（二次鉱物）の組成（計算上は平衡定数の値）に近づく。水溶液が生成系における固相の組成に到達し、全固相成分に飽和したとき反応が終了する。なお計算に必要な値は、固相および液相の化学組成、反応系および生成系の固相の成分、 CO_2 、 O_2 等の各フュガシティー、各化学種の与えられた温度、圧力における平衡定数、pH、Eh、 a_w （水の活量）などである。ここでは、例として、かこう岩（quartz: 53.75%, microcline: 12.75%, low albite: 10.00%, anorthite: 17.50%, annite: 3.75%, および tremolite: 2.50%）の 1000 g の水溶液（Al: $0.2698 \text{ E} - 08 \text{ g/kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$, K: $0.3910 \text{ E} - 08 \text{ g/kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$, Na: $0.4008 \text{ E} - 08 \text{ g/kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$, Mg: $0.2431 \text{ E} - 08 \text{ g/kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$, Fe: $0.585 \text{ E} - 08 \text{ g/kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$, Si: $0.9612 \text{ E} - 08 \text{ g/kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$, C: $0.6660 \text{ E} - 02 \text{ g/kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$, および Cl:

$0.1185 \text{ E} - 02 \text{ g/kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$)⁵⁾ 中での加水分解による変質鉱物（goethite, gibbsite, kaolinite, および montmorillonite）への反応をとりあげた。

【実験および結果】

計算の結果より、反応の進行にともなう溶液組成（溶存成分 37 種の $\text{g/kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）変化および各鉱物の生成、消失状況が得られた（図 3 および表 1）。まず、かこう岩を構成する各種鉱物が congruent 溶解を行う。この場合、ある $\log \xi$ まで反応が進行すると、溶液は goethite $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ 成分に対して過飽和となり、goethite が沈澱する。すなわち Fe 成分は、結晶（goethite）に分配され、同時に溶液側の Fe 成分量が減少する。次に、gibbsite $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ が過飽和となる環境がつけられる。gibbsite の生成にともない、溶液中の Al 成分の変化が起こる。さらに、kaolinite $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ の生成中に gibbsite が溶解、消失するため、Al 成分の変化は複雑となる。このとき goethite の生成は、継続して行われている。反応系の出発物質成分に飽和し、溶液が生成された二次鉱物を溶解する能力を失った段階で反応は終了する。なお反応の過程において、溶液中の H^+ 成分量は次第に減少する。これは各二次鉱物種の生成に H^+ が消費されるためである。

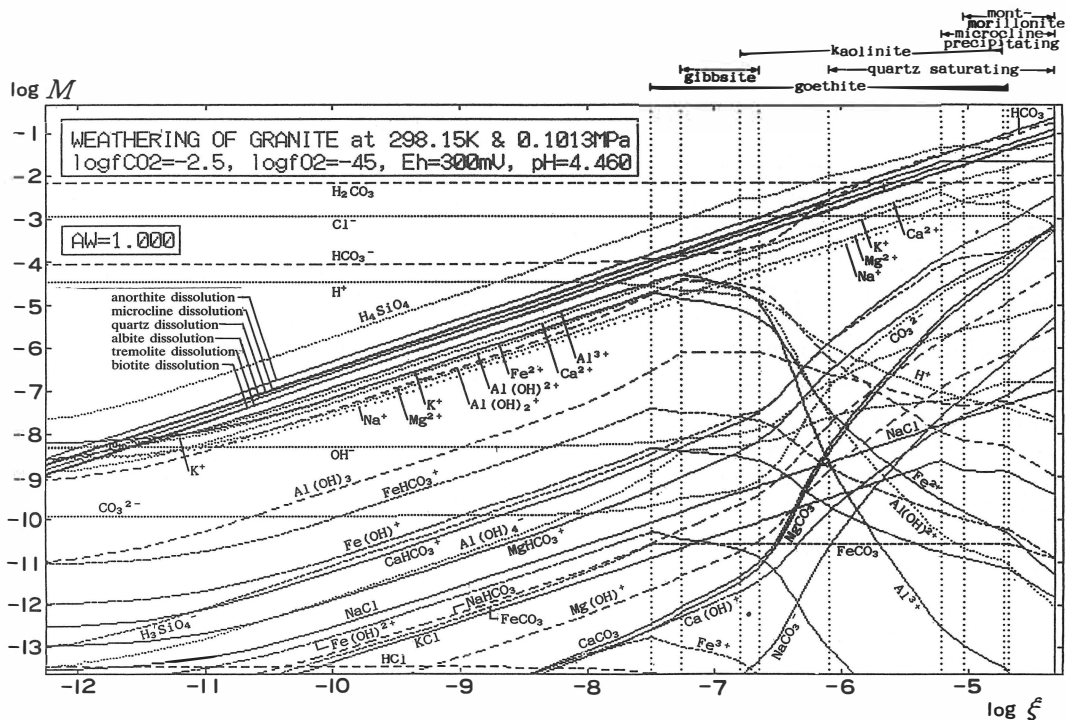


図3 地球化学的シミュレーションによる、かこう岩の加水分解における化学種(Mg)/溶液 1000 g の変化、および反応進行度 (ξ) の関数としての二次鉱物の飽和。なお溶液は $\log \xi = -4.348$ から方解石に対して過飽和となる。

表 1 a. 反応における鉱物の溶解量 (g).

(a-1)	log ξ	Quartz	Microcline	Low albite	Anorthite	Annite
(1) Goethite sat.	- 7.497	0.1029 E- 03	0.1109 E- 03	0.8358 E- 04	0.1552 E- 03	0.6118 E- 04
(2) Gibbsite sat.	- 7.259	0.1778 E- 03	0.1915 E- 03	0.1444 E- 03	0.2683 E- 03	0.1057 E- 03
(3) Kaolinite sat.	- 6.798	0.5142 E- 03	0.5540 E- 03	0.4175 E- 03	0.7752 E- 03	0.3056 E- 03
(4) Gibbsite disap.	- 6.647	0.7359 E- 03	0.7928 E- 03	0.5975 E- 03	0.1109 E- 02	0.4374 E- 03
(5) Quartz sat.	- 6.102	0.2563 E- 02	0.2762 E- 02	0.2081 E- 02	0.3865 E- 02	0.1524 E- 02
(6) Microcline sat.	- 5.218	—	0.2107 E- 01	0.1588 E- 01	0.2948 E- 01	0.1162 E- 01
(7) Montmorillonite sat.	- 5.305	—	—	0.2421 E- 01	0.4495 E- 01	0.1772 E- 01
(8) Kaolinite disap.	- 4.728	—	—	0.4972 E- 01	0.9232 E- 01	0.3640 E- 01
(9) Goethite disap.	- 4.691	—	—	0.5451 E- 01	0.1012 E+ 00	0.3990 E- 01

(a-2)	log ξ	Tremolite	Gibbsite	Goethite	Kaolinite
(1) Goethite sat.	- 7.497	0.6474 E- 04	—	—	—
(2) Gibbsite sat.	- 7.259	0.1118 E- 03	—	—	—
(3) Kaolinite sat.	- 6.798	0.3234 E- 03	—	—	—
(4) Gibbsite disap.	- 6.647	0.4628 E- 03	0.6174 E- 03	—	—
(5) Quartz Sat.	- 6.102	0.1612 E- 02	0.6174 E- 03	—	—
(6) Microcline sat.	- 5.218	0.1230 E- 01	0.6174 E- 03	—	—
(7) Montmorillonite sat.	- 5.305	0.1875 E- 01	0.6174 E- 03	—	—
(8) Kaolinite disap.	- 4.728	0.3851 E- 01	0.6174 E- 03	0.7248 E- 02	0.6126 E- 01
(9) Goethite disap.	- 4.691	0.4222 E- 01	0.6174 E- 03	0.9228 E- 02	0.6126 E- 01

表 1 b. 反応における鉱物の生成量 P (g).

(b)	log ξ	Goethite	Gibbsite	Kaolinite
(1) Goethite sat.	- 7.497	—	—	—
(2) Gibbsite sat.	- 7.259	0.3344 E- 04	—	—
(3) Kaolinite sat.	- 6.798	0.1465 E- 03	0.6174 E- 03	—
(4) Gibbsite disap.	- 6.647	0.2202 E- 03	0.6174 E- 03	0.1661 E- 02
(5) Quartz Sat.	- 6.102	0.7934 E- 03	0.6174 E- 03	0.6272 E- 02
(6) Microcline sat.	- 5.218	0.6053 E- 02	0.6174 E- 03	0.4787 E- 01
(7) Montmorillonite sat.	- 5.305	0.9228 E- 02	0.6174 E- 03	0.6126 E- 01
(8) Kaolinite disap.	- 4.728	0.9228 E- 02	0.6174 E- 03	0.6126 E- 01
(9) Goethite disap.	- 4.691	0.9228 E- 02	0.6174 E- 03	0.6126 E- 01

鉱物の溶解・生成が行われたときの、任意の ξ における溶解量を M (g), 反応面積 (底面積) を a (cm^2), 反応系の固相の密度を ρ_r ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), 生成系の固相の密度を ρ_p ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) とすれば, そのときの表面からの長さ (深さ) l (cm) は,

$$l = M \cdot a^{-1} \cdot \rho_r^{-1}, \quad (3)$$

となり, 反応表面 (例えば, 地表, 粒子表面など) からの変質分帯が得られる。式(3)において $a = 10 \text{ cm}^2$ と仮定したときの変質断面 (鉱物分帯) を図 4 に示す。

各分帯における生成固相の層厚 l_s (cm) は,

$$l_s = \Sigma [P \cdot a^{-1} \cdot \rho_p^{-1}], \quad (4)$$

と表せる。ここで P (g) は鉱物の生成量である。した

がって式(4)より, 反応表面からのいくつかの物理的性質の変化を算出することが可能となる¹⁰⁾。各分帯, 任意の ξ , あるいは任意の区間 $\Delta\xi$ 層における間隙率 n (%) および間隙比 e (ここでは%) は, それぞれ,

$$n = 100(l \cdot a - l_s \cdot a)(l \cdot a)^{-1}, \quad (5)$$

および

$$e = 100(l \cdot a - l_s \cdot a)(l_s \cdot a)^{-1}, \quad (6)$$

となる。また湿潤密度 ρ_w ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) および乾燥密度 ρ_d ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) は, それぞれ,

$$\rho_w = P \cdot l^{-1} \cdot a^{-2}, \quad (7)$$

および

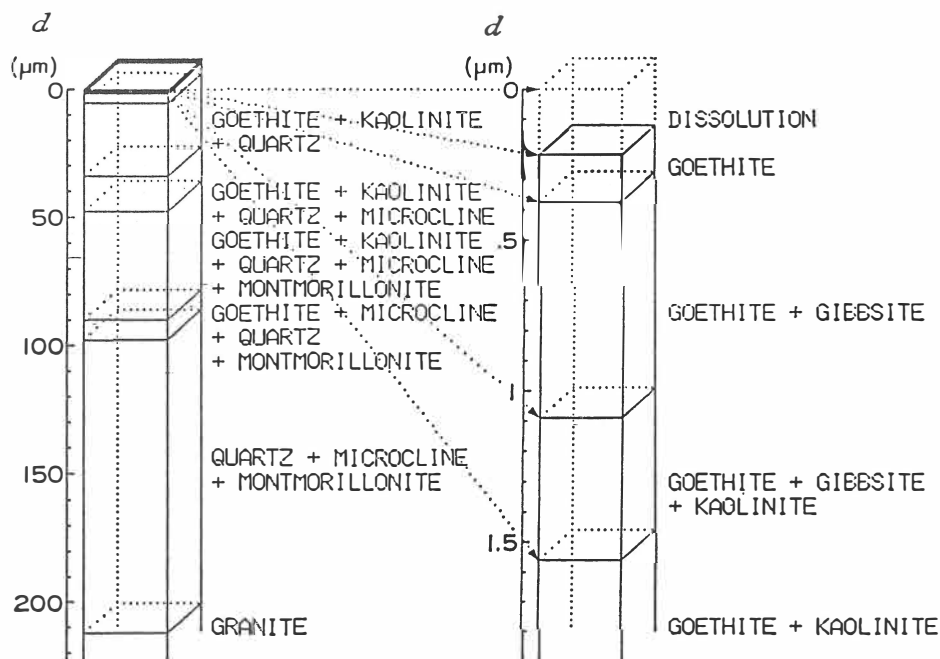


図4 シミュレーションの結果得られた風化断面（底面積 10 cm^2 のときの microprofile）における鉱物分帯。

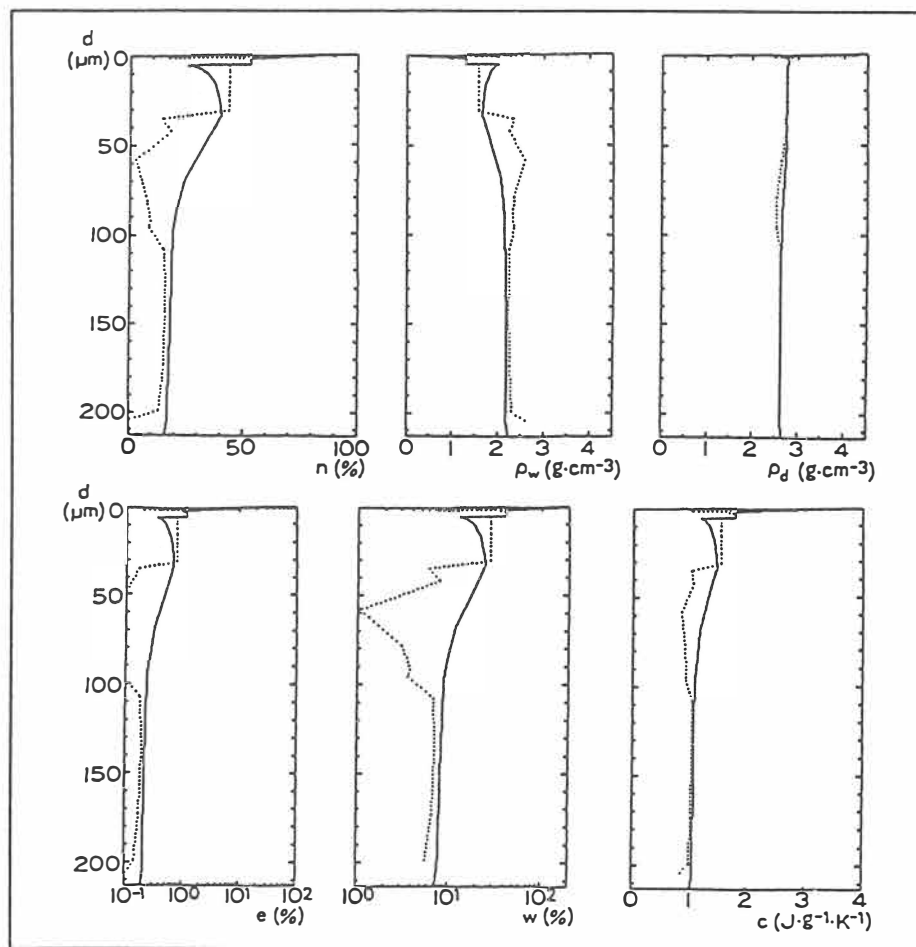


図5 シミュレーションによる風化断面における物性変化。n: 間隙率, ρ_w : 湿潤密度, ρ_d : 乾燥密度, e: 間隙比, w: 含水率, および c: 比熱容量。（実線: 鉱物分帯ごとに基づく値, 点線: プログラム上の STEP 値に基づく値。）

$$\rho_d = P \cdot l_s^{-1} \cdot a^{-2}, \quad (8)$$

として求められる。したがって含水率 w (%) は,

$$w = 100(\rho_w - \rho_d)\rho_d^{-1}, \quad (9)$$

となる。風化による変質の進行にともなう比熱容量 c ($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$) の算出は,

$$c = (w \cdot c_1 + 100c_s)(w + 100)^{-1}, \quad (10)$$

により得られる¹⁹⁾。ここで c_1 および c_s は、それぞれ水および反応開始前の岩石（あるいは鉱物）の比熱容量である。かこう岩変質の例における物理的性質の算出結果を図5に示す。

4. 物理的風化作用に関する実験

一般に、物理的風化作用は、①溶液からの結晶成長、②熱膨張作用、③水和作用に分けられる¹⁶⁾。多くの地球科学および土壌学の教科書には、熱帯乾燥地域における地表構成物質の生成に関し、熱膨張作用の重要性が指摘されている。しかし従来より物質科学の分野で、数岩型の膨張特性を求めた例はある^{18)・25)}ものの、乾燥地域の生成機構あるいは膨張特性の系列化を念頭に置き、研究が行われた例はない⁶⁾。本研究においては、熱分析により、いくつかの岩石の熱膨張—熱収縮特性を得た後、物理的風化系列を求め、教科書等にみられる前述の通説の検証を行った。

【出発物質】

熱膨張—熱収縮に関する諸因子の値を求めるためには、TMA (Thermo-mechanical Analysis: 熱機械的分析) が有効である。TMA は、温度変化に対する物質の変形を、非振動的な荷重を加えて、温度の関数として測定する技法である。本実験においては、一般に地表に広く分布する岩型を用いた。岩石から $3.54 \text{ mm} \times 3.54 \text{ mm} \times 20.00 \text{ mm}$ の直方体（底面の対角線長さが 5 mm ）を切り出し、各面を #1000 研磨剤により平滑化したものを出発物質とした^{12)・21)}。

【実験および結果】

14 岩型（表2）に対し、実験における温度条件を、① $\pm 0 \rightarrow +100 \rightarrow \pm 0^\circ\text{C}$ および② $-125 \rightarrow +550 \rightarrow -125^\circ\text{C}$ とし、この条件を1試料につき5回繰り返した。出発物質を TMA 試料室にセットし、液体窒素により

表2. TMA 実験に用いた岩石試料と造岩鉱物。

岩 型		造 岩 鉱 物
Rock type		Rock-forming minerals
1. Basalt	(玄武岩)	Pl, Px, Ol
2. Anaesite	(安山岩)	Pl, Qtz, Px
3. Rhyolite	(流紋岩)	Qtz, Kfs, Pl, Bt
4. Tuff	(凝灰岩)	Kfs, Pl, Qtz, Zeo, Gl
5. Dunite	(ダナイト)	Ol, Pl
6. Gabbro	(はんれい岩)	Pl, Hb, Px
7. Diorite	(閃緑岩)	Pl, Qtz, Hb, Kfs
8. Qtz-diorite	(石英閃緑岩)	Qtz, Pl, Hb, Kfs
9. Granite 1	(かこう岩1)	Qtz, Kfs, Pl, Bt
10. Granite 2	(かこう岩2)	Qtz, Kfs, Pl, Bt
11. Hornfels	(ホルンフェルス)	Qtz, Bt, Kfs, Pl
12. Sandstone	(砂岩)	Qtz, Pl, Kfs
13. Limestone	(石灰岩)	Cal
14. Chert	(チャート)	Qtz

Ol : olivines, Px : pyroxenes, Hb : hornblende, Bt : biotite, Pl : plagioclases, Kfs : alkali-feldspar, Qtz : quartz, Zeo : zeolites, Gl : glass, and Cal : calcite.

試料温度が、それぞれ 0°C および -125°C に到達した時点から測定を開始した。また昇降温速度を $5^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 、荷重を 0.1 g 、最高・最低温度におけるホルド時間を① 10 分および② 20 分とし、線膨張係数などを求めた。実験には、セイコー電子工業(株)製 TMA 120 C を用いた。さらに熱膨張—熱収縮における岩石の空隙および鉱物学的特性の影響を考慮し、試料の間隙比測定（真空吸引法）、SEM (Scanning Electron Microscopy: 走査型電子顕微鏡) による観察、XRD (X-ray Diffraction Analysis: X 線回折分析) および偏光顕微鏡による鉱物の同定も併せて行った。なお熱膨張係数を熱膨張率と呼ぶこともあるが、本研究では前者に統一した。

両実験条件ともにほとんどの岩型において、昇温にともなう膨張、および降温にともなう収縮が認められる（図6a）。また温度条件①の1回目の膨張時における、各岩型の熱膨張特性を図7に示す。凝灰岩を除き、単調な増加傾向が認められる。凝灰岩の膨張における特殊性は、沸石もしくはガラスの存在に起因すると考えられる。温度条件②のかこう岩では、顕著な破壊が観察された（図8）。温度条件②の石灰岩に関して、特異な熱膨張—熱収縮特性が得られた（図6b）。また、別途行った全く異なる産出地点（2試料）の石灰岩の実験においても、同様な傾向が認められた。TG (Thermogravimetry: 熱重量測定)—DTA (Differential Thermal Analysis: 示差熱分析) により、この特異性を検討したが、現段階で原因は不明である。

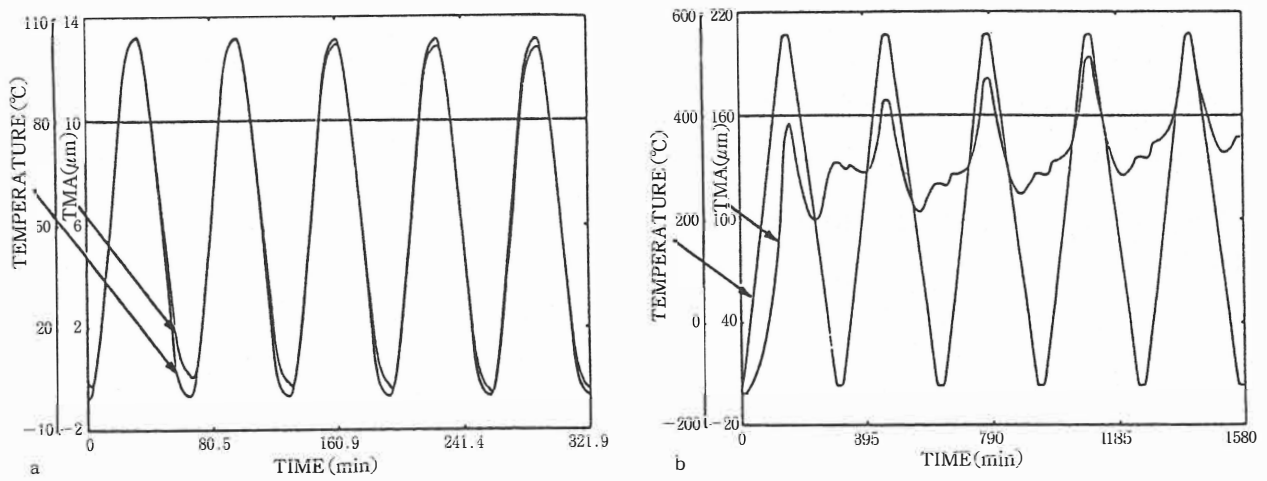


図6 TMA による繰り返し熱膨張-熱収縮実験結果の例
(a: はんれい岩, b: 石灰岩).

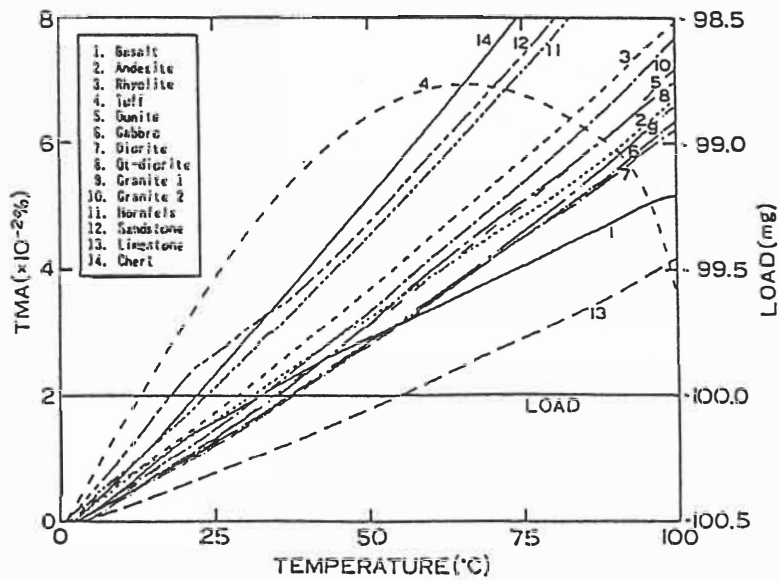


図7 条件①の膨張1回目における14岩型の熱膨張係数の変化.

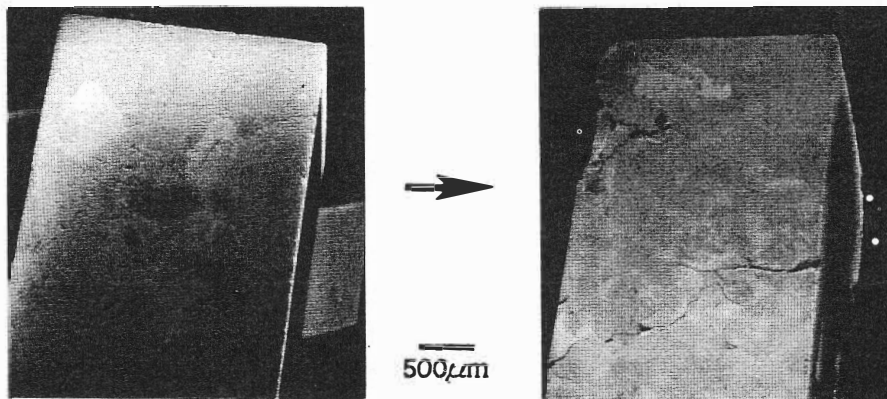


図8 名件②における実験で破壊した、かこう岩の SEM 写真 (左: 実験開始前, 右: 実験終了後).

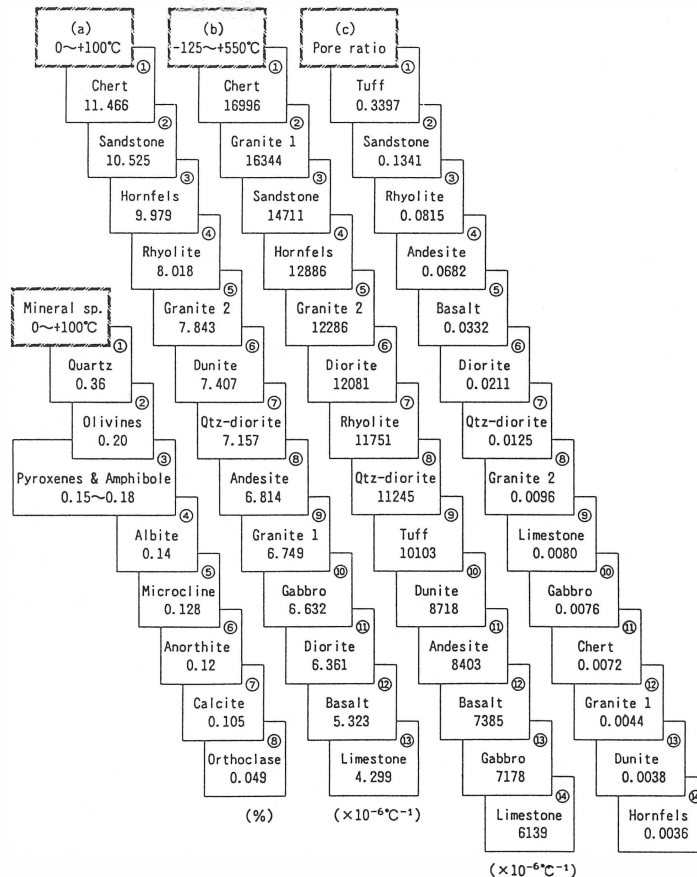


図9 熱膨張-熱収縮実験により得られた、14岩型の(a)0→100℃における平均線膨張係数、(b)125→550℃における平均線膨張係数、(c)間隙比、および関連する鉱物の20→100℃における体膨張%¹⁵⁾。なお(a)の条件における凝灰岩は、64℃付近において膨張係数の極大値をもつため、系列から除外した。64℃のときの膨張係数を計算すれば、10.702となり、100℃まででは3.566となる。なお体膨張は、小さい試料を膨張量既知の粉末の入ったセルに包埋し、セルの膨張量を線膨張測定方法を用いて求められる。本研究では、岩石組織の影響を考慮し、試料サイズをわずかでも大きくするとともに、機器機能を最大限に活かすため、線膨張測定を行った。

各岩型の平均線膨張係数 α を用い、温度条件①および②における熱膨張—熱収縮系列を求めた。 t_1 ℃から t_2 ℃までの α は、

$$\alpha = l_0(l_2 - l_1)(t_2 - t_1)^{-1}, \quad (11)$$

として表される。ここで l_0 は試料長さ、 l_1 は t_1 ℃における試料長さ、および l_2 は t_2 ℃における試料長さである。系列を各岩型の間隙比の測定値とともに図9に示す。一般の造岩鉱物では、石英の膨張%が最も高い。したがって岩石を対象とした本実験においても、石英を多く含む岩型の熱膨張—熱収縮係数の値は大きく、マフィック岩・石灰岩の熱膨張—熱収縮係数の値は小さい傾向が認められた。

5. 議 論

熱帯乾燥地域の地表構成物質は、まず物理的および化学的風化作用により生成される。次に、もしくはほぼ同時に風化生成物は侵食作用を受けると考えられている。湿润地域においては、最初に化学的溶脱が行われ、鉱物の物理的性質の変化と鉱物の変質がもたらされる。また物理的性質の変化は化学的溶脱作用を促進させる、という過程が一般的である。熱帯乾燥地域においては、物理的破壊作用の効果が増大するといわれる。しかし現段階で、化学的変質作用との関係を単純に求めることが困難である。そのため、ここでは乾燥地域における化学的風化作用および物理的風化作用のそれぞれに対し議論を行う。

化学的風化作用による岩石から風化生成物への変化を求めた地球化学的シミュレーションの結果におい

て、諸物性の変化傾向は、単調増加もしくは単調減少とはならない。砂漠の表面もしくは地下浅所に存在する硬盤、空隙および密度の変化、一次鉱物から二次鉱物への変質過程などは、天然に認められるラテライト断面の一般的岩相をよく再現している。したがって、現在の熱帯乾燥地域に存在する岩石の風化断面形成には、多量の天然水の関与が必要である。岩石と中～長期間に一度の降雨、地下水、極少量の土壤水等との反応による部分平衡下における溶解によってのみ、厚い風化層あるいは風化殻が形成されたと考えることは不可能である。

地球化学的シミュレーションには、以下の仮定あるいは問題点も存在する²⁾。(1)物理的性質変化の評価、とくに空隙径およびその形態に関する反応条件の変化、(2)化学的性質変化の評価、とくに岩石・風化生成物の化学組成、土壤中の f_{CO_2} 条件、および congruent 溶解の仮定、(3)力学的性質変化の評価、とくに溶解(溶食あるいは化学的侵食)以外の侵食の評価、(4)岩石学的性質変化の評価、岩石中の結晶粒界を考慮できず、岩石を単純な鉱物集合体とする仮定、(5)鉱物学的性質変化の評価、とくに熱力学特性関数値のばらつき、およびへき開・エッチピットの存在による、変質に対する結晶物性の不均質性。しかし本シミュレーションは、種々の因子において、多くの範囲を初期条件として設定可能なため、熱帯乾燥地域の形成機構解明および今後の予測に対して、きわめて強力な手段である。

一般に熱帯乾燥地域の地表において、図9の系列の上位にある岩型は抵抗性を有する。さらに石英は、乾燥地域の地表に多く残存する⁵⁾。したがって岩型ごとの熱膨張係数による比較系列は、単に熱に対する変化

量の大小を示しているにすぎない。本来、熱膨張—熱収縮による岩石の抵抗性の大小は、疲労程度に依存すると考えられる。本実験では、凝灰岩を除けば、各岩型ごとの1回目と5回目の膨張—収縮量の絶対値に、顕著な差は認められなかった。しかし、かこう岩における例(図10)のように、膨張—収縮量のヒステリシス・ループが描かれ、終了時の値に関し、岩型ごとの相違がみられた。その特性は、2形式(膨張—収縮の繰返しにより、I. TMA 値が回復性を示す岩型、およびII. TMA 値が非回復性を示す岩型)に大別される。さらにIIは、①実験開始から終了に至るまで徐々に膨張量(0あるいは -125°C) >0 となる岩型、および②実験開始から終了に至るまで徐々に膨張量(0あるいは -125°C) <0 となる岩型、に分けられる。

一般に、 $t^{\circ}\text{C}$ における線膨張係数 α_t は、

$$\alpha_t = \alpha_0^{-1} \left(\frac{dl}{dt} \right), \quad (12)$$

で表される。微小温度変化 dt に対する、試料の微小膨張が dl であり、 α_t は α の $(t_2 - t_1)$ を無限に小さくした場合に相当する。実験終了時の膨張係数が、0とはならないことから、式(12)が適用可能となる。また岩石中の空隙は、とくに膨張時において歪を解消する役割を果たすと考えられる¹³⁾。そこで、空隙状態に関する値も考慮し、各岩型の物理的風化指標 E_p を算出した。

$$E_p = \alpha_f (1 + e)^{-1}, \quad (e \geq 0) \quad (13)$$

ここで、 α_f は実験終了時の最低温度における熱膨張係数(表3)、 e は空隙比である。式(13)の空隙に関する項は、次の性質をもつ。

$$\lim_{e \rightarrow 0} (1 + e)^{-1} = 1, \quad (14)$$

および

$$\lim_{e \rightarrow \infty} (1 + e)^{-1} = 0. \quad (15)$$

岩型ごとの相違の大きい $-125 \sim +550^{\circ}\text{C}$ における実験データを用い、式(13)により各形式における安定性を求めた結果を、図11に示す。

この結果は、従来より定性的に述べられていた、①岩石の抵抗性を基礎とする地表の起伏状態の序列、および②野外観察結果と概ね合致している。従来より物理的風化作用は、その評価が困難である、と考えられていたきらいがある。物理的風化系列の構築は、熱帯乾燥地域のみならず、地表構成物質一般における今後

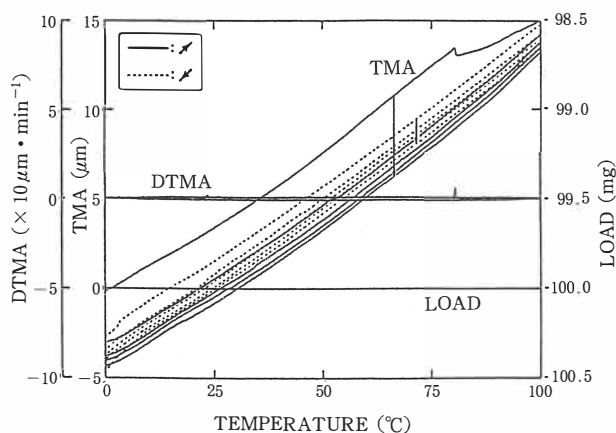


図10 熱膨張—熱収縮にともなうヒステリシス・ループ (かこう岩の例)

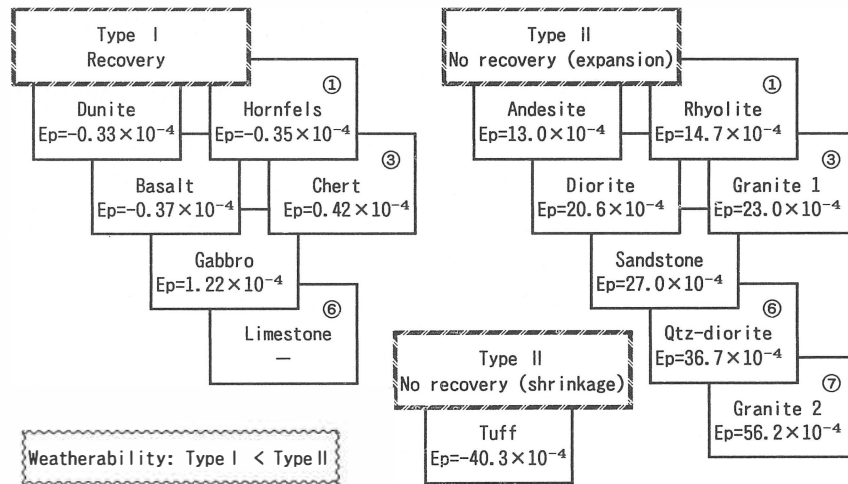


図 11 繰り返し熱膨張—熱収縮実験により得られた「岩石の物理的風化系列」。
石灰岩の E_p が記載されていない理由は、すでに図 6 b に示した通り、特異な
膨張—収縮結果が得られたため。

表 3. 各岩型の実験終了時、最低温度における熱膨張係数, α_f .

岩 型 Rock type	α_f
1. Basalt	-0.370
2. Andesite	1.385
3. Rhyolite	1.595
4. Tuff	5.400
5. Dunite	-0.335
6. Gabbro	0.123
7. Diorite	2.101
8. Qtz-diorite	3.719
9. Granite1	2.315
10. Granite2	5.670
11. Hornfels	-0.035
12. Sandstone	3.065
13. Limestone	—
14. Chert	0.415

($\times 10^{-3}$)

の変化を予測するうえで、重要となるものと考えられる。

以上より、熱帯乾燥地域における地表構成物質の生成について、多くの地球科学、土壌学の教科書に述べられている「熱膨張係数の大きい岩石は風化されやすい（破壊されやすい）」なる記述は誤りであることが指摘される。このことは、鉱物に対しても同様である。なぜなら熱膨張係数の大きい石英は、熱帯乾燥地域の地表に残存しているからである。なお物理的風化系列を、より確固たるものにするためには、①多量の試料を用いる実験、②力学的強度測定、および③間隙状態の精密測定などが不可欠である。

6. 結 論

本研究においては、以下を結論とする。

- (1) 熱帯乾燥地域に存在する風化物の生成機構を、岩石—水相互化学反応とし、化学平衡論を基礎とする地球化学的シミュレーションを行った。かこう岩→ラテライトを例とした結果、①二次鉱物の生成過程、②水質変化過程、③風化断面の鉱物分帯および物性変化、が求められた。
- (2) 熱帯乾燥地域の生成に最も重要な作用の一つである、岩石の物理的風化（熱膨張—熱収縮）による変化に関し、TMA を用い実験した。その結果、①岩石の熱膨張—熱収縮系列、②岩型の熱膨張—熱収縮特性における 2 様式の存在、③岩石の物理的風化系列、④石灰岩および凝灰岩における特異な熱膨張—熱収縮特性、⑤石英を多く含む岩型の熱膨張—熱収縮係数は大きいこと、が得られた。
- (3) ①熱帯乾燥地域の地表を構成する二次鉱物は、過去における多量もしくは長期間にわたる天然水の供給がなければ、形成されない。したがって現在の熱帯乾燥地域に存在する各種二次鉱物は、現在の気候条件下で形成されたとはいえない。②熱帯乾燥地域における地表構成物質の生成について、多くの地球科学・土壌学の教科書に述べられている「熱膨張係数の大きい（熱膨張率の高い）岩石は風化されやすい（破壊されやすい）」なる記述は誤りである。

謝 辞

本研究を推進するにあたり、各種実験・分析の補助を行うとともに貴重な示唆等を与えられた、熱帯農業研究センター（現在、国際農林水産業研究センター）、根本清子、高嶋浩子の両氏に対し、記して深謝の意を表する。

引用文献

- 1) 八田珠郎 (1990). 化学と工業 43: 247.
- 2) 八田珠郎 (1990). 三鉱 (日本鉱物学会・日本岩石鉱物鉱床学会・日本鉱山地質学会連合) 学会講要. H-2: 79.
- 3) 八田珠郎 (1990). 文部省総研 A, 熱水変質作用と粘土鉱物の生成. 資料: 1.
- 4) 八田珠郎 (1991). 日本化学会誌 1991, 5: 509.
- 5) 八田珠郎 (1991). 科技厅総研, 砂漠化機構の解明に関する国際共同研究. 平成2年度成果報告書: 225.
- 6) 八田珠郎 (1992). 科技厅総研, 砂漠化機構の解明に関する国際共同研究. 平成3年度成果報告書: 350.
- 7) 八田珠郎 (1993). 土壌の事典 (土壌の事典編集委員会 編), 朝倉書店, 印刷中.
- 8) 八田珠郎・廣瀬孝・松倉公憲 (1989). 日本地理学会講要 36: 350.
- 9) 八田珠郎・野呂春文・中井信・篠原也寸志 (1990). 鉱物学雑誌 19: 121.
- 10) 八田珠郎・坂本満・篠原也寸志 (1990). 日本化学会講要 60: 684.
- 11) 八田珠郎・野呂春文・草場敬・齋藤貴之・廣瀬孝 (1991). 地球惑星科学関連学会合同大会, 地球化学講要: 28.
- 12) 八田珠郎・野呂春文・篠原也寸志 (1991). 粘土科学討論会講要 35: 22.
- 13) 八田珠郎・草場敬・齋藤貴之・野呂春文・篠原也寸志・河野元治・藤本光一郎・廣瀬孝 (1992). 日本土壤肥料学会講要 38: 146.
- 14) Bowen, N. L. (1992). *Jour. Geol.*, 30: 177.
- 15) Clark, S. P. Jr. (ed.) (1966). *Handbook of Physical Constants, Revised ed.*, NY: 587.
- 16) Cooke, R. U. and Smalley, I. J. (1968). *Nature*, 220: 1226.
- 17) Goldich, S. S. (1938). *Jour. Geol.*, 46: 17.
- 18) Rechter, D. and Simmons, G.: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.*, 11: 403 (1974).
- 19) Hatta, T. (1987). *Chem Geol.*, 60: 131.
- 20) Hatta, T. and Hatta, C. (1990). *Trans. 14th Inter. Cong. Soil Sci.*, 2: 379.
- 21) Hatta, T., Shinohara, Y., Noro, H., Fujimoto, H., Kusaba, T., Saito, T., and Hirose, T. (1992). *Abst., 29th Inter. Geol. Cong.*, 3: 712.
- 22) Jackson, M. L. and Sherman, G. D. (1953). *Advan. Agron.*, 5: 219.
- 23) Lasaga, A. C. (1984). *Jour. Geophys. Res.*, 89, B6: 4009.
- 24) Martini, I. P. (ed.) (1992). *Weathering, Soils & Paleo-soils*, Elsevier, Amsterdam: 618.
- 25) Thirumalai, K. and Demou, S. G. (1970). *J. Appl. Phys.*, 41: 5147.
- 26) Yatsu, E. (1988). *The Nature of Weathering*, Sozosha, Tokyo: 624.

コメント

砂漠における岩石の風化

Rock Weathering in Desert Areas

筑波大学地球科学系 松 倉 公 憲

Institut of Geoscience, University of Tsukuba

Yukinori MATSUKURA

ただいま紹介いただきました松倉です。

例えば、日本のような湿潤地域では、風化といいますと一般的には「化学的風化」といいますか、岩石と水との反応を考えなければなりません。しかし「熱帯乾燥地域では水が少ないということで、化学的風化の影響は小さいだろう」と言われています。

それで、八田さんとは多少異なるかもしれませんが、一応最初に三つのことを考えればいいたろうということで、砂漠での岩石の風化機構を次のようにまとめてみました。

1. 日射による風化
2. 水分の役割
3. 塩類風化

1 は、八田さんのいう「熱による風化」と同じことです。砂漠の地表面は昼間熱せられますので、非常に熱くなります。70℃ 以上になるという報告もあります。そのため熱による風化があるだろう、といわれているわけです。実際に、砂漠では岩石の割れる音が聞こえとか、砂漠でなくても日本でも、例えば山火事があれば、そのときに岩石が割れるんだ、という話もあります。そういうことを根拠にして熱風化があるんだろうという話になっているわけです。ところが実験をやってみますと、岩石に熱を加えてそれを冷却するというをやっても、なかなか岩石は破壊しないことが多いんです。というか、ほとんどの実験例では、破壊しないんです。そういう実験をやる人に言わせると「熱風化というのが果してあるのか?」という疑問も一方では提示されてはいるんです。そういう観点から言いますと、今日の八田さんの話で、かこう岩が実験で壊れたということを聞きましたので、大変興味深く伺いました。彼の実験は、-125℃ から+550℃ までということで、非常に温度範囲が広いものですから、いわゆる砂漠の条件と多少温度レンジが違うということもありますので、そんへんはちょっと考えなくてはならないかもしれません。しかし一つの実験としては、非常に面白いものであると考えます。

それと彼の話では、熱膨張と冷却による収縮とがヒステリシスで、要するに歪が解消しない岩石があるということです。その「歪が解消されない岩石が多分風化が速い」というのが彼の主張なんですが、今までそういう主張がなかったということで、一つの研究の進展だろうと思います。ただ強いていいますと、さらに研究を進めるとすれば、歪の解消しない岩石が実験のサイクルを繰り返すと同時に物性もどんどんいろいろと変化するつまり強度的に弱くなるとかですね、もう少し詰めていけば、熱風化のメカニズムという問題に多分立ち入ることができるだろう、というふうに考えております。ということで、一つ彼に注文したいと思います。

それから2番目の問題ですが、砂漠には実際に水はあまりないわけですが、いや、ないというより少ないわけですが、それでもたまに雨は降りますし、霧は発生するし、露、この露が重要だと私は思っているんですが、そういう水が関与することによって、当然化学的風化も起こる。彼の話は、この化学的風化の話で、岩石と水との反応のシミュレーションを行ったわけです。非常におもしろいシミュレーションですが、彼の使った pH の値は、4.460 で非常に低い値を使ってシミュレーションされていますけれども、おそらく砂漠では、pH はアルカリの方にいっている例が多いわけです。そういう状態では当然シリカが出ます。そういうシミュレーションを、是非これからプラスしてほしいというふうに考えます。

それから彼の話にはなかったんですが、おそらく熱帯乾燥地で重要な風化の一つとして塩類風化というのがあるといわれています(3)。この塩類風化のメカニズムは、一つは、塩類の結晶成長という、つまり岩石中に取り込まれた水が乾燥によって蒸発し、中の塩が結晶化し、それが岩石を壊すんだという話ですね。それから結晶になる前に水が取り込まれたときに、もうすでに水和でももちろん膨張しますが、それからできた結晶がさらに熱によって岩石を壊すというような

メカニズムがいわれているんです。具体的に砂漠で塩類風化がどんなふうに行っているかという一つの例です(OHP)。これは砂漠に岩石を、砂岩ですが、6年間放置した結果、最後にはシルトになってしまったという実験例があります。これは野外での実験例です。こういうふうに塩類風化では、いわゆるシルトの生産というのが非常に大事だ、というか「塩類風化によるシルトの生産というのがある」ということがきわめて

重要であると思っています。これはアメリカのデス・バレーの例です。デス・バレーの扇状地の礫が塩類風化で徐々に細粒化して行って結局最後はシルトになるという報告例もありますので、わざわざここに書きましたが、塩類風化によるシルトの生産ということが、砂漠の風化を考える上でかなり重要なことであると思っています。

簡単ですけども。

農業限界地における環境資源利用技術の開発と今後の研究推進

4. 乾燥地における農業気象改良

真 木 太 一*

熱帯農業研究センター 環境資源利用部

Development of Techniques for the Utilization of Environmental Resources and Perspective of Promotion of Research in the Marginal Land Area

4. Agro-meteorological improvement in arid lands

Taichi MAKI

Marginal Land Research Division, Tropical Agriculture Research Center
Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

Arid and semi-arid lands account for one third of all the lands on earth. Desertification is now prevailing and is occasionally linked to the decrease of rainfall due to climatic change. However, it is mainly linked to adverse human activities, i. e., excessive cultivation, over-grazing, deforestation and excessive consumption of water resources.

Wind erosion and agro-meteorological disasters are apt to occur frequently in the marginal agricultural regions of arid lands. There are various prevention methods against desertification. A practical prevention technique is introduced as a case study of environmental control or meteorological improvement Turpan (China).

Meteorological observations related to the improvement of climatic conditions in arid lands were carried out at the Turpan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Biology, Pedology and Desert Research located in the northwestern of post China from 1990 to 1992.

Key words: arid land, windbreaks, meteorological improvement, desert, wind erosion
キーワード: 乾燥地, 防風林, 気象改良, 風食, 砂漠

1. はじめに

地球規模の環境問題では現在も砂漠化の問題が大き

く取り上げられている。昨年 1992 年 6 月にはブラジルで「環境と開発に関する国連会議 (地球サミット)」が開催され、砂漠化の問題も論議された。そしてアジェンダ 21 に取りあげられて対策がとられつつあるが、まだ不十分である。

*現在: 農業研究センター耕地利用部

地球上の乾燥地は全陸地の1/3を占めている。この乾燥地では、人口増加に伴う過開墾、過放牧、過伐採などによって砂漠化の危険性が高い。特に中国では、緑化の進む一方では砂漠化が進行している。乾燥地の農業限界地域では常に砂漠化の危険性があり、この砂漠化の脅威によって農業の持続が不安定な状態にある。従って、気象災害防止と気象改良は不可欠であり、特に節水が必要である。乾燥地では水資源に限りがあり、極めて貴重な資源であるが、日本的なイメージとしての‘湯水のごとく消費する’程ではないにしても、中国北西部の乾燥地域でさえ、かなり浪費している傾向が見られる。

ここでは砂漠化、植生破壊に関連深い問題を取りあげ、防風施設とその他の対策技術について中国北西部の新疆における事例を中心に記述する。

2. 中国の砂漠と砂漠化の現状

中国における砂漠化は、図1に示すように、1970年末までに相当広範囲に及んでいる。もちろん砂漠化であるから、例えば中国のタリム盆地のタクラマカン大砂漠の内部のように、昔から砂漠である地域は除き、近年砂漠化した地域のみを示してある。その面積は17万km²に達する。また砂漠化進行速度は1500km²/年であり、今後砂漠化の可能性のある地域は16万km²に及ぶと言われており、緊急を要する課題である。

砂漠化の原因には自然的要因（気候変化による降水

減少）と人為的要因がある（図2、朱・劉, 1981; 河野, 1986; 著者改稿）。中国の乾燥地では、人為的要因による砂漠化は主として過放牧、過開墾、過伐採、過消費によるが、この砂漠化の過程は流れ図に示したとおりである。

3. 砂漠のオアシスとトルファンの気候

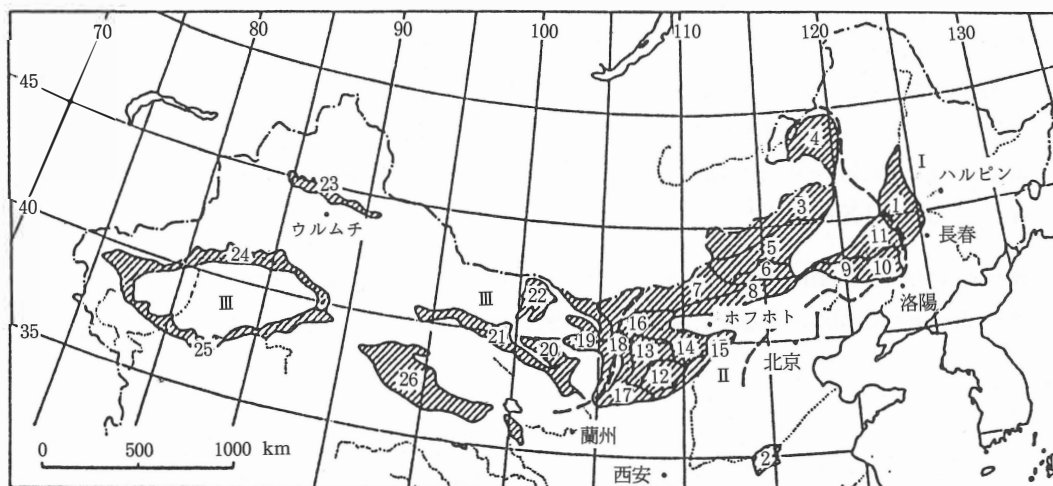
1) 砂漠のオアシス

大陸では春・秋はないとも言われる程であり、冬から夏、夏から冬へと一足飛びに気候が変わる。砂漠のオアシス（緑州）とは非常に好適な精神的にやすらぎを与える桃源郷のイメージがあるが、たとえ広いオアシスといえども、周辺の乾燥地、すなわち砂漠の影響を受ける。その乾燥地域では強風が風食を起こし、上空に砂塵を巻き上げ、太陽を見えなくすることが多いが、その時にはオアシス内でも砂塵は降り、高温時には高温、低温時には低温となる。ただ、それらの程度が小さいということと風食の発生が少ないことである。

オアシスの典型は林に囲まれた土地である。乾燥地域のオアシスは防風林、防砂林がないものはないと言っても過言ではない。

2) トルファンの気候

トルファン気象站(42°56'N, 89°12'E, 海拔34.5m)における月平均気温は7月に32.7℃, 1月に-9.5℃, 年平均気温は13.9℃, 最高・最低気温の極値は47.6℃, -28.0℃である。年降水量16.4mm, 年蒸発



中国北方地区における砂漠化地域の地域区分図
 I. 半湿润地带砂漠化土地零細分布区 II. 半乾燥草原地带および砂漠草原地带砂漠化進展区
 III. 乾燥砂漠地带流砂侵入および固定・半固定砂丘活性化区

図1 中国北方地域の砂漠化の地域区分 (朱・劉, 1981; 河野, 1988; Maki, 1992)

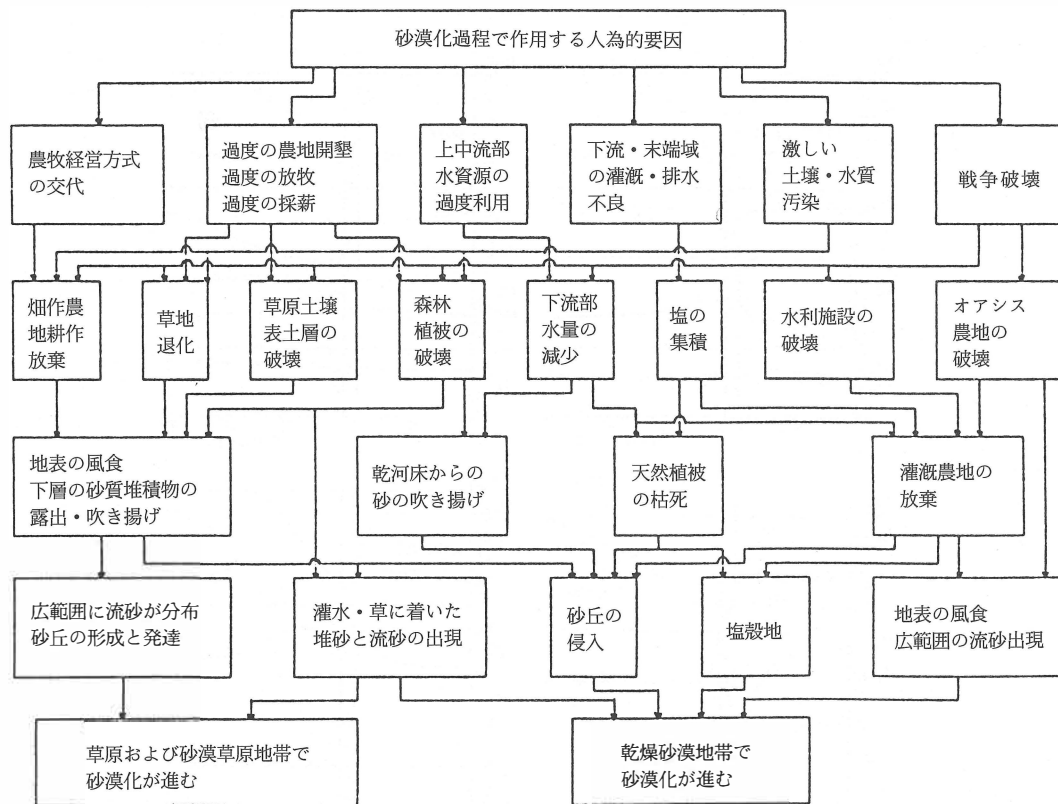


図2 砂漠化過程で作用する人為的要因の流れ図(朱・劉, 1981; 河野, 1988; 真木, 1992)

量 2837.8 mm, 年最小湿度 0 %, 年平均風速 1.7 m/s, 最多風向 E, 強風時の風向 NW と WNW, 8 級 (平均風速 17.2 m/s) 以上の日数は年間 26 日, 強風期は 4 ~ 6 月である。

なお, 砂漠研究 station の気象観測地点 (海拔 - 80 m) では 1990 年に 47.9℃, 1991 年に 47.0℃, 1992 年 6 月に 3 日連続で 47.9, 47.8, 47.7℃ の最高気温, および 1992 年 7 月に地表温 84.7℃ を記録した。

次に, 防風林と防風ネットによる気象改良効果について, 著者が 1990 年 3, 6 ~ 7, 10 ~ 11 月, 1991 年 4 ~ 5, 8 ~ 9, 11 ~ 12 月, 1992 年 4 ~ 5, 7 ~ 8 月に 9 回, 307 日間にわたって中国の乾燥地で実施した代表的な観測結果を報告する。

4. 砂漠化防止のための防風施設による気象改良

1) タマリスク防風林による気象改良効果

(1) 1 列の場合: 中国北西部のトルファンで実施中の防風施設による気象改良効果および広域の気象改良の事例を示す。夏季 (1990 年 7 月 1 ~ 2 日), タマリスク防風林 (高さ 4.6 m, 密閉度 85%) による減風・気象改良効果を図 3 (真木, 1991; 真木ら, 1992) に示す。

最低相対風速は基準風速の 10% 程度になり, 減風範囲は風上 - 10 H ~ 風下 30 H (高倍距離, 防風施設の高さで表した距離, - は風上側, + は風下側), 主として - 5 ~ 20 H である。夜間 0 時には風下側では減風による放射冷却で砂質の地表温は低温である。6 時には防風林の風上直前は日陰のため低温であるが, 風下直後は日射によって高温である。12 時には防風林前後, 特に風下側で 80℃ になり, 防風林内では日陰のため 28℃ も降温させる効果がある。

相対湿度は 18, 0 時に林葉からの蒸散による加湿作用のため風下側で少し高く, 6 時には風速が弱く加湿効果が顕著である。12 時には防風林内から風下直後で湿度が高い。気温は地表温の変化より小さい。また 18, 0 時の変化形態は比較的良好に類似している。6 時には防風林の直前・直後の日当たり・日陰部の変化のみである。12 時には防風林による昇温が顕著に認められる。乾燥地ではこの効果が有効である。

乾燥地の夏季の防風林の効果には, 防風林付近での減風, 蒸散作用による加湿, 夜間の降温があるが, 昼間の昇温は不利である。

(2) 2 列の場合: 夏季・極高温・乾燥期 (1992 年 7 月 14 ~ 16 日) の 2 列のタマリスク防風林による気象改

U: 風速, U_r : 相対風速, T_s : 地表温, RH: 相対湿度, T_a : 気温

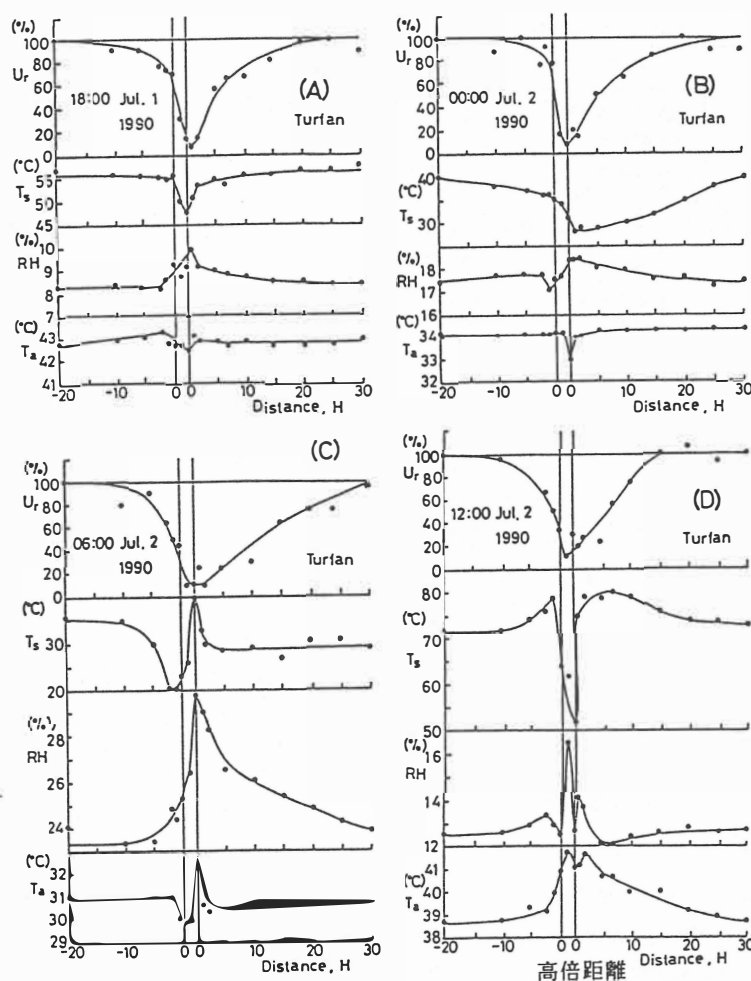


図3 1列のタマリスク防風林による気象変化

良について報告する。

風上側(第2防風林, 2列目)の防風林の密閉度は上層部は50%, 中・下層部は100%, 樹帯の平均の高さは4.0 m, 風下側(第1防風林, 1列目)の密閉度は同じであり, 平均の高さは2.5 mである。防風林内には砂の堆積があり, 風上側は1.5 m, 風下側は7.5 mである。従って, 防風林帯の高さは風上側は5.5 m, 風下側は10.0 mである。2列の防風林を用いて行われた結果, 夏季, 極高温・乾燥期の気象改良の特徴, 特に加湿効果が明らかになった。

①7月14日13時(図4A): 風上側の強い風は防風林内に入ると急減して, 通過後は少し回復するが, 風下側の防風林によって再び減少する。風向は主風向に対して逆である。地表温は防風林内では日陰のために20℃以上低い。防風林内の堆砂の頂上では70℃を越えている。気温は林内で少し低く, 湿度は高い。ただし, 湿度については蒸発気流の風下への流れのため,

やや風下側に移動している。

②7月14日17時(図4B): 風速は風上側では2 m/s前後であるが, 防風林内から風下側では非常に弱くなり, 風下防風林内の直前にはわずかに強いが, 防風林を通過するまでは弱い。地表温は林内で低く, 風下防風林の頂上では高温である。気温は地表温と類似した変化を示す。湿度は風下防風林とその風下側で少し高く, また風下防風林では10%も高く, 蒸散による加湿効果がよく出ている。夏季, 日中の気温の過剰昇温を緩和している。

③7月15日5時(図4C): 風上防風林内で無風状態となり, 2列の防風林帯間でやや強い風が吹いている。地表温は風上防風林内で保温されているため高く, 林間では23℃と低い。また風下防風林内でも25~26℃であり, その風下で再び低下している。気温は逆に風上防風林内で1℃低く, また風下防風林内では2℃も低い。湿度は風上防風林で5%程度, 風下

U: 風速, U_r : 相対風速, T_s : 地表温, RH: 相対湿度, T_a : 気温

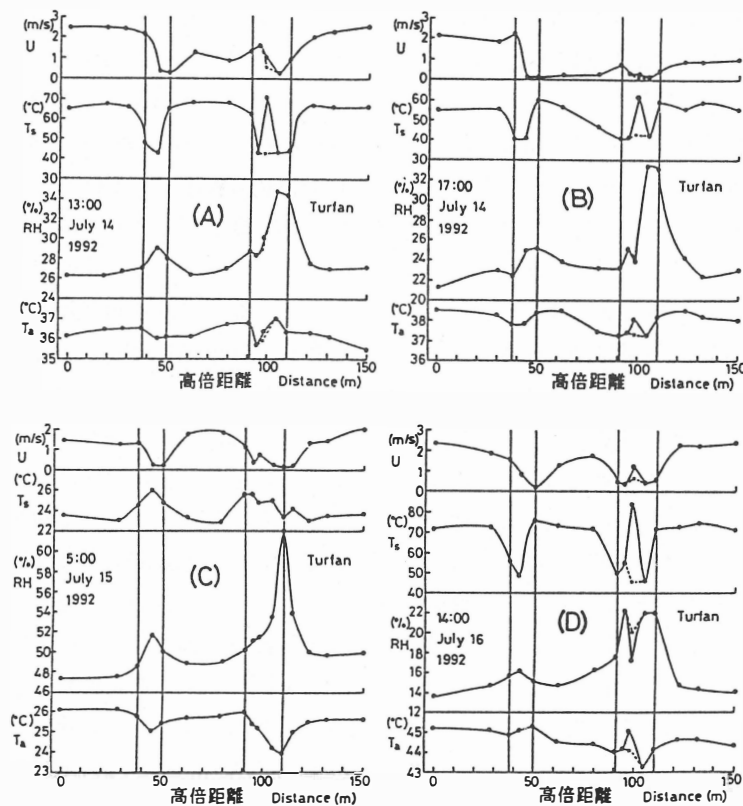


図4 2列のタマリスク防風林による気象変化

防風林では13%も加湿されて62%の値を示している。その前後の値は53~54%を示す。その防風林の風下側(林外)の値は、風によって高湿空気が風下へ流されたものである。特に、朝夕の加湿の効果は大きい。

④7月16日14時(図4D): 2.4 m/sの風速から林内では無風状態となり、林間では70%に回復して、再び風下防風林内で減風して比較的急速に回復している。地表温は2列の防風林内では30℃も低温であるが、風下防風林の頂上では84.7℃になっており、その直後の林内では45.1℃で、40℃の温度差を示す。気温は風上防風林内で少し低下するが、通過後は日射のために少し高い。林間で少し低く、林内ではさらに低い。林内の堆砂の頂上部では少し高い。湿度は風上防風林内で少し、また風下防風林内では7~8%も加湿しており、高温、乾燥時にもかかわらず湿度が上昇している。

2) 防風ネットによる気象改良効果

(1)1列の場合: 2種の防風ネットによる気象改良効果について報告する。1991年8月24日の防風ネット(高さ1.85 m, 密閉度A: 50%, B: 45%)による効果

例を図5(真木, 1991)に示す。

①8月24日6時: 気温は0~5H付近まで0.5~1℃昇温している。湿度は気温の変化に対称に0.2~0.5%低下しており、Aネットの方が変化が大きい。風速は弱く、1.2 m/s程度であり、相対風速は-5~15Hで減少しており、最低風速はAネットで40%, Bネットで25%程度となっている。地表温はネット付近でわずかに昇温しているが、風下側のAネットでは2~15Hで1~1.5℃低く、Bネットでは2~5Hで1℃程度低下している。

②8月24日9時(図5A): 風下側の0~10Hでは日射によってAネット0.5℃、Bネットで1℃程度高い。湿度はネット付近で乾燥化している。風速は弱く、1.8 m/sであり、相対風速は-5Hより減少しはじめ、10Hまでは半減域であり、Aネットでは7Hで30%, Bネットでは2Hで20%である。

③8月24日12時: 気温は風上側と風下側の±2H~1H付近でAネット1℃、Bネットで0.5℃程度高いがネット付近では逆に低温化している。ネット付近の±1Hで気温が低いために、湿度が1%程度高くなっている。風速は5 m/sとかなり強い。ネット

に対して斜風であるため効果範囲は狭く、 $-2 \sim 5$ H である。相対風速は A ネットの 2 H で 50%, B ネットの $0 \sim 2$ H で 50% 程度あり、5 H では 90% 程度まで回復し、10 H ではどちらも原風にもどっており、効果範囲は狭い。地表温は風上側 -2 H では 3°C 程度、風下側 2 H で 5°C 程度昇温しており、B ネットは風下側 2 H で 3°C 程度昇温している。また、ネット付近では A ネットで 4°C 、B ネットで 7°C 低温化している。ただし効果範囲は 5 H 程度であり狭い。

④ 8 月 24 日 15 時 (図 5 B): 気温は A, B ネット共に $-5 \sim 5$ H で昇温しており、 $-2 \sim 2$ H で $0.5 \sim 1^\circ\text{C}$ 昇温している。湿度はネット付近のみで $1 \sim 2\%$ 乾燥している。風速は 2 m/s であり、相対風速は $-5 \sim 10$ H で減少している。ネット付近で最小値を取り A ネットで 25%, B ネットで 45% 程度となっている。地表温は A ネットで風上側で 5°C 、風下側で 9°C 、B ネットでそれぞれ 4°C 、 3°C 昇温している

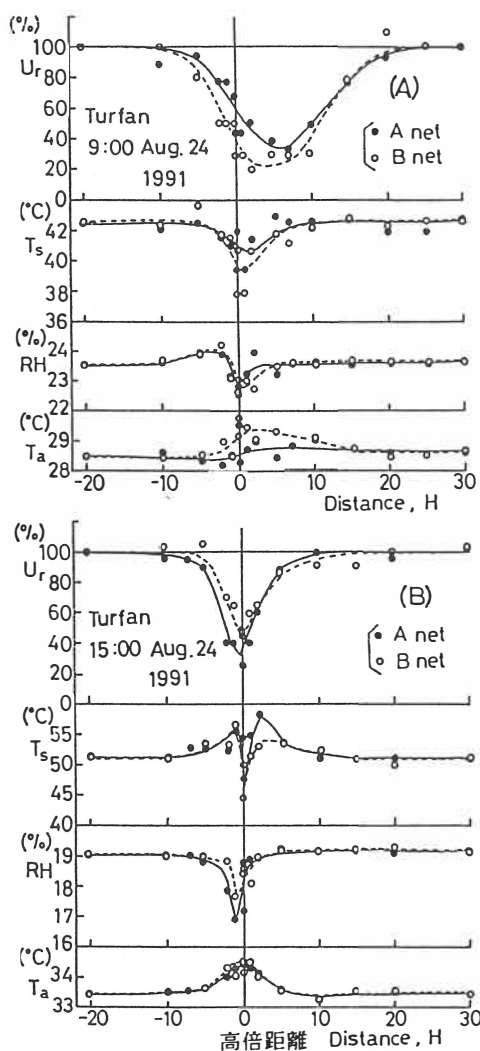


図5 1列のラッセル防風ネットによる気象変化

が、他と同様 $-2 \sim 5$ H 付近の変化が主体である。またネット直下では日陰のために A ネットで 4°C 、B ネットで 7°C 低下している。

B ネットは A ネットより減風効果大きい。密閉度はそれぞれ 40%, 30% である。なお、ネットにはほこりや植物の種子などが付着しているために、A ネットで 45%, B ネットで 50% で 5% 程度の差があると推定される。そのため、風速差への影響が出ている。なお、この期間には風向が防風ネットに直角でない場合が多く、効果範囲は狭くなっている。

(2) 2 列の場合: トルファンにおいて 2 列の防風ネットによる気象改良効果を調査した。秋季・低温・乾燥期 (1992 年 10 月 30 日 7 時, 12 時) の 2 列の防風ネットによる気象改良について報告する。防風ネットの高さは 1.9 m 、長さ 30 m 、2 列の間隔 50 m である。なお、ネットの下方 $5 \sim 10\text{ cm}$ は開けてあり、1 列目の風上は砂質土壌、1 列目の風下 5 H (高倍距離) 以降は堅い凝固した粘土質土壌である。その結果、2 列のポリエチレン・ラッセル防風ネットを用いて観測された結果、秋季・弱風・低温・乾燥期の気象改良の変化量が明らかになった。

① 10 月 30 日 7 時 (早朝) (図 6 A): 全般的に気象の変化は小さい。気温の変化は防風ネットの風上 -5 H から風下 15 H まで放射冷却によって低くなっているが、防風ネット直前では風速の回復とも関連して少し高い。湿度は気温とはおおむね逆の変化を示している。地表温が防風ネットの直前で少し高いのは日射の影響と考えられる。また 1 列の通過直前での低温化は減風による放射冷却であると考えられる。風速は防風ネット付近では $10 \sim 20\%$ の値を示すが、1 列目では回復は早い。

② 10 月 30 日 12 時 (日中) (図 6 B): 気温は防風ネット直前で 2°C 昇温し、防風ネット直前・直後でやや低温化した後、再び昇温している。防風ネット間では低温化し、また 2 列目のネットでもほぼ同様の变化形態を示している。一方、湿度は気温とは大体逆の変化傾向を示している。地表温は防風ネット直前で少し昇温し、ネット直下で少し降温する。ネット通過後は約 5°C の昇温が認められる。2 列目のネット付近で低温化するの地面が白色の粘土質土壌で凝固していることによる熱伝導と日射の反射が大きいためと考えられる。ネット通過後は防風ネットによる昇温作用によってかなり昇温している。風速は小さいが、変化傾向は防風ネット通過後 20% 程度の値をとり、防風

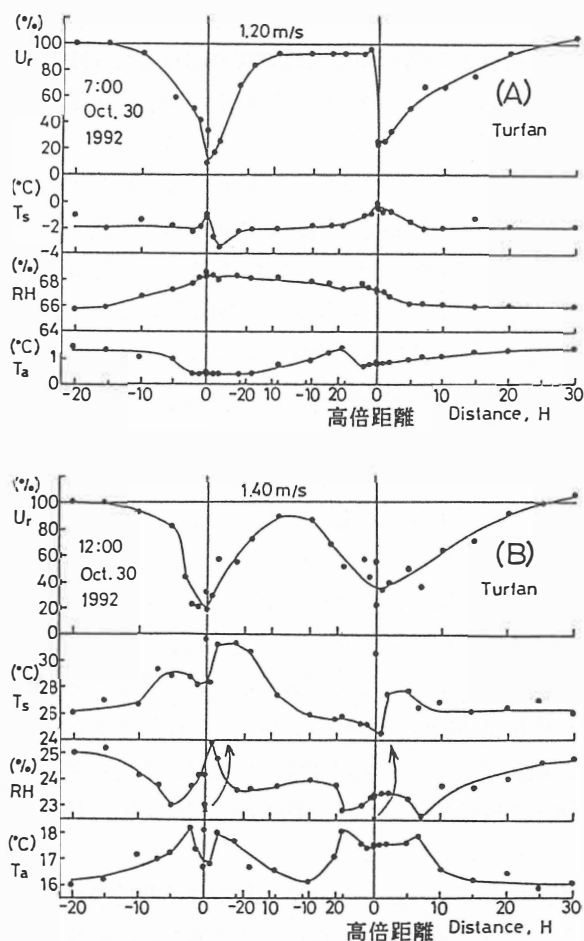


図6 2列のラッセル防風ネットによる気象変化

ネット間では90%まで回復するが、再び20~30%まで減風して、次第に25Hまでに回復している。

要約：日陰による昇温抑制が小さいため夏季、昼間は過昇温となる。防風林のような加湿効果は小さいが、減風に伴う風食防止、飛砂防止効果が期待できる。防風ネットによる減風、春・秋季の昇温や夏季、夜間の降温の各効果は好適である。また防風林の生育は長年月かかるが、防風ネットは短期間に効果を発揮でき、防風林自体の育成保護用に利用できる。

3) 防風施設による飛砂防止効果

タマリスク防風林による堆砂状況を図7Aに示す。堆砂は防風林内の高い所で2.5m、平均的な所で1.5m、低い所でも0.5mある。堆砂は防風林の前後-6~6Hであり、それ以上防風林から離れると風食・堆砂の混合域に変わるが、それは主風向、逆風向時の風食による。

防風ネットによる堆砂状況について報告する。防風ネット（密閉度45%）による堆砂は図7Bのとおりである。Bネットではネットに堆砂する場合、高い所で

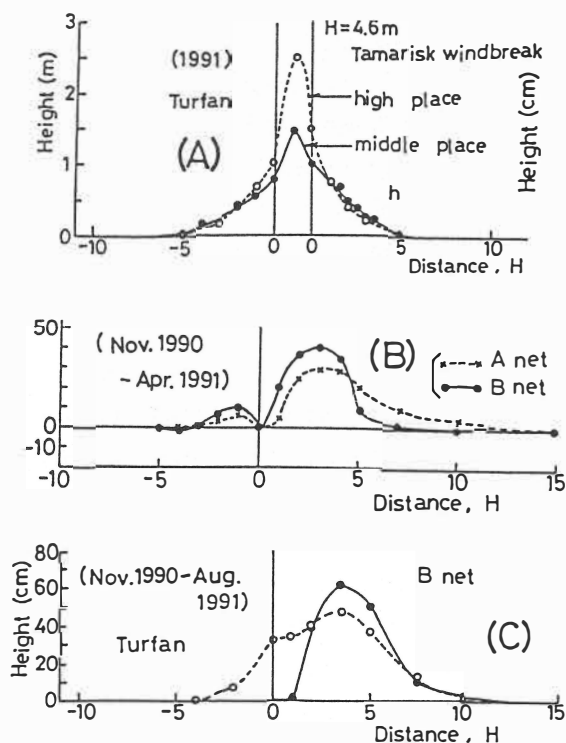


図7 (A) タマリスク防風林による堆砂状況
(B) 防風ネットによる堆砂状況
(堆砂期間短い)
(C) 防風ネットによる堆砂状況
(堆砂期間長い)

は3Hで45cmであり、ネットの風上、風下側に砂が着いている。またネットの下方を砂が通過する場合には1H付近から砂が着き3~4Hで最高であり、高い所で60cmである。

図7Cに示すとおり、防風ネットの下方に砂が着く場合と着かない場合で少し異なるが、50~60cmの堆砂が認められる。ただし、これらの防風ネットは減風が主目的であり、堆砂は副次的な現象である。

4) 防風林による作物への効果と種類

乾燥地において数種の防風林による作物の草丈への影響を調査した。乾燥地のトルファンで、オアシスを作る種々の防風林による作物への効果を明らかにするために、秋季に作物の生長が止まった最高の草丈を防風林からの距離の変化を測定することによって防風林の効果を評価する。作物にはワタ、コウリヤン、トウモロコシを、防風林にはスナナツメ、コヨウ、ポプラを用いた。沙枣、榆、タマリスク、ポプラ防風林によるワタ、コウリヤン、トウモロコシの生育状況を示す。

①ワタ(図8A): スナナツメ(砂棗)防風林(高さ

6 m, 幅 11.5 m, 密閉度 70%, 防風林間 100 m) による作物の生育状況を草丈を指標に調査した結果, 図のように 1 列目の防風林によって, 風下 4 ~ 6 H (高倍距離) で高く, 9 ~ 13 H では低い。また 15 ~ 16 H, すなわち 2 列目の防風林の風上 - 1 ~ - 2 H で高い。この傾向は昨年の場合と類似している。

②ワタ: 別の場所でのスナナツメ防風林 (高さ 5 m, 幅 5 m, 密閉度 70%) によるワタへの影響を調査した。その効果についても同様 2 H 付近で高くなっている。

防風林がなければワタの草丈は 50 ~ 80 cm である。乾燥条件下での作物栽培は環境が厳しいため効果範囲は狭くなる。防風林によるワタ収量への影響程度は草丈の場合より顕著である。

③コウリャン (図 8 B): タマリスク防風林 (高さ 4 m, 幅 1 m, 密閉度 50%) では風下 6 ~ 8 H で高い。この例では防風林から 4 H までは裸地となっているため, 4 ~ 6 H では草丈が低い。また風下 10 ~ 15 H ではほぼ同じ値を示している。

④トウモロコシ (図 9 A): トルファンではトウモロコシが春播の場合は夏季の極端な高温 (45°C 以上) によって受精できないため, 夏~秋季の栽培が行われて

いる。スナナツメ・タマリスク防風林 (高さ 6 m, 幅 4 m, 密閉度 70%) の効果は防風林の風化 1.5 H 付近で非常に高く, その後 220 cm から減少して 6.5 H で 170 cm に低下している。

⑤トウモロコシ (図 9 B): 低いポプラ防風林 (高さ 4 m, 幅 1 m, 密閉度 50%) では 2 H 付近で高く, 6 H 付近まで減少するが, その後 10 H まではほぼ一定である。トウモロコシの草丈は 2 H 以降については上述の例とほぼ同様の变化を示す。これはトウモロコシ自体が防風および気象改良の役割を果たし, 乾燥地における群落としての効果を与えているためである。

乾燥地のトルファンにおいて, 数種の防風林による作物への効果が顕著であること, およびその範囲を定量的に明らかにした。

5) 防風林の種類とオアシス化

タマリスクは耐風, 耐干, 耐熱, 耐寒, 耐塩性が大きく, 乾燥農業限界地域に適する。砂に埋まると植物体が伸長する特性があり, トルファン砂漠研究 station 付近には植林当初からの樹高が 10 m に近いものもある。防風・防砂林にはポプラ (数種), 沙枣, 胡楊, 柳, 榆が多く利用されている。

中国の東北, 華北, 西北の三北では三北防護林事業として南北 400 ~ 1700 km, 東西 7000 km に及ぶ緑の長城 (万里長城 6700 km にちなんだ名称) として農地, 道路, 水路の保護林を造成しつつある。東北部では成長が早く, 材木として利用できるポプラを主に植林しているが, 新疆では環境が厳しいために上述の数樹種を植林している。乾燥農業限界地域では防風林は不可欠である。オアシス (緑州) 化は防風林の造成が初めて可能となる。

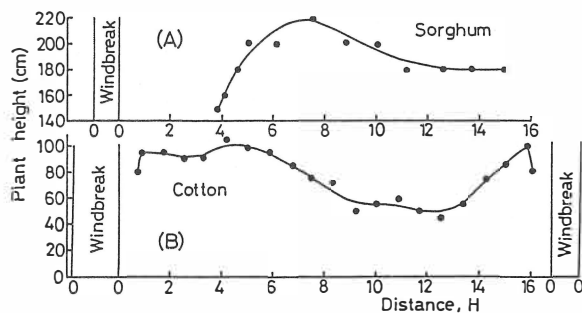


図 8 防風林によるワタ, コウリャンの草丈の変化

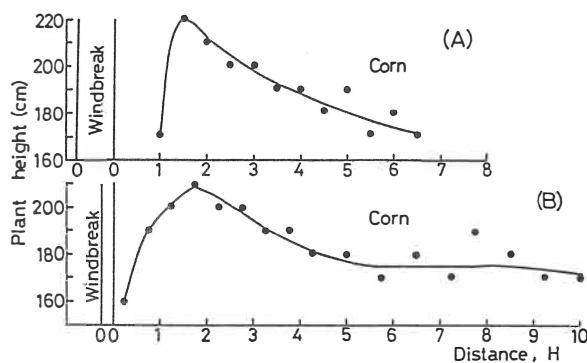


図 9 防風林によるトウモロコシの草丈の変化

5. 防風施設以外の気象改良技術と砂漠化防止

1) 灌漑法による気象改良

乾燥地の天水依存型の作物栽培 (ドライファーマーミング) では一般的に年降水量が 800 mm 以下, または栽培期間の降水量が 500 mm 以下の地域では干害発生の危険性が高く, 何らかの灌漑を行う必要がある。農地内では地表面が湿ることによって蒸発散量が増加し, 湿度が上昇し, 高温の場合には気温, 地温は低下する。乾燥地で灌漑を行うこと, それ自体, 気象改良となる。

新疆のトルファンでは天山山脈からの融雪水をカレーズ (カンジン, カナート, フォガラ, ファラージ)

と呼ばれる地下導水路，または明渠で引いて来て作物に灌漑したり，生活用水に利用している。水を有効利用するにはスプリンクラー，ドリップ（点滴）灌漑が好適であるが，施設費や技術の問題でほとんど導入されていない。

2) 被覆法などによる気象改良

地表面を被覆する方法に草生法がある。この植生によって気象改良を行い，厳しい気象環境を緩和することができる。草生法には地上での播種や航空機播種があり，移植する場合には灌木や高木性の樹木の移植が多い。また雨の比較的多い地域では播種法が有効であるが，乾燥の激しい地域では灌漑による移植法が多い。

植生回復としては防風と植物保護になる草方格が効果的である。草方格はムギワラの中央部を砂中に押し込んで 1×1 m の碁盤の目状に作る防風・防砂施設である。代表的な設置場所は巴丹吉林砂漠の東端の包頭—蘭州鉄道沿にあり，幅 1 km の飛砂・砂丘防止帯で鉄道・道路を保護し，成功している。

ジュンガル盆地の石油と同様に，最近タリム盆地で石油が発見された。ただ，そこはタクラマカン砂漠の中央部であるため，砂漠横断道路を作り，道路を保護する必要がある。砂丘による道路の埋没防止技術開発を行うため，現在 2 km の試験道路を輪台（庫車—庫爾勒間）のタリム川南方に造り，防風林，防風ネット（著者のネット），防風垣，前述の草方格，アスファルト，塩散布，植生区などによる保護実験をしている。実用に際しては，いくつかの手法を組み合わせることが望ましく，今後の実用化を期待したい。

6. 農業気象改良としての水食・風食防止

1) 水食防止

乾燥地では平均的に雨が少ないが，一たび降ればかなりの量になる。例えばトルファンの年降水量は 16.4 mm であるが，1 日に 36.0 mm も降ったこともあり，一方，年間で 2.9 mm の場合もある。このように砂漠では年変化，場所による変化が大きい。乾燥地では植生がほとんどないため 1 日に数 mm も降れば砂漠で洪水ということになり，土漠，砂（砂丘）砂漠，ゴビ（礫）砂漠を蛇行しながら流れ，植物が定着しないことになる。

水食を防止するには山地に植生を回復させることである。従って，天山山脈の 1500 ～ 2500 m にある森林の伐採は控える必要がある。また，土漠や砂・礫砂漠では川，水路を土木的に整備して，決まった場所を水が流れるようにするとともに，防風林や土砂かん止林を造成する必要がある。

圃場では地表面の被覆率を高め，密植，牧草導入，混作，冬春季の裸地化防止，マルチ（ワラ，フィルム）を行い，等高線栽培を実施する。また，堆肥の施用，塩集積地では石こうなどの施用や客土などの土壌改良を行う。

地表面の固定としてアスファルト乳剤，ラテックス乳剤で被覆する。さらに水路では素掘りでなく，草生，敷石，コンクリート，管（土・コンクリート・鉄管）などで整備する。

2) 風食防止

風食防止は上述の素移植防止とほぼ同じ方法で対応

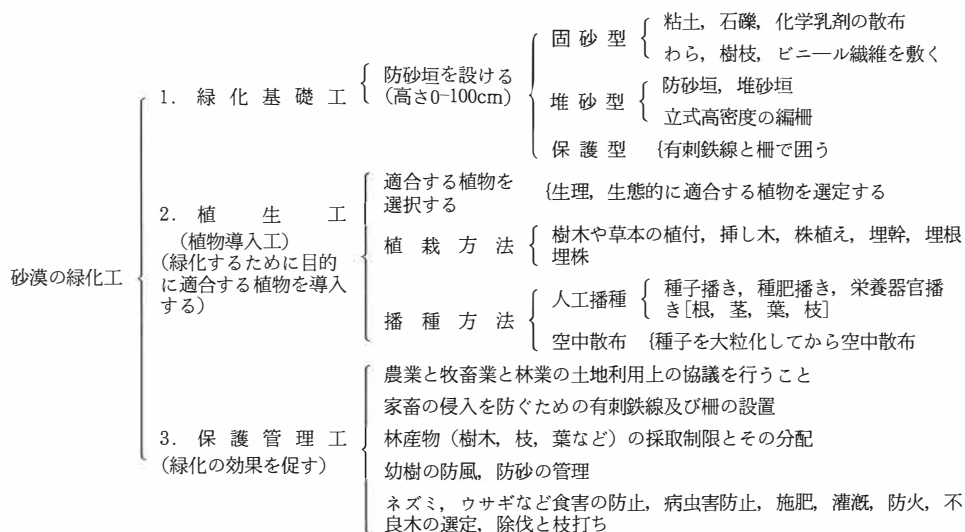


図10 砂漠の緑化法の流れ図（姚，1986；Maki，1992）

できるが、その他に、風食防止には防風林、防風ネットや井げた状のわら立て（草方格）、粘土格、スプリンクラー、溝、うね間灌漑などを行うとよい。

砂漠（砂丘）の緑化（固定化）には風の力を弱めるか、砂丘表面を保護するかである。従って飛砂を防止し、砂丘の緑化工を行う必要がある。これは緑化工法の流れ図（図 10）（姚，1986；Maki，1992）にまとめられている。砂漠化の対策技術と緑化技術および具体的作業の状況がよく示されている。

7. おわりに

乾燥地の作物は厳しい環境下にあり、耐干、耐風、耐熱、耐寒、耐塩性を持つ必要がある。このような農業限界地で農業を行うには、防風林帯、防風垣帯、草生帯（図 11，新疆生土研，1978；Maki，1992）などが必要であり、組織的な環境改善を行うことが望ましい。

一方、水関係ではダムによる過剰取水の制限とともに農業や生活レベルでは砂地への表面灌漑の効率化、導水路中の周辺への漏水、地中への浸透の減少、水路での蒸発の減少、塩水化防止また水道パイプのパッキングなどの改善によって節水に務め、水資源を有効利用する必要がある。

防風林を造成しないと作物栽培は難しい。しかし、過剰に開発したのでは「沙進人退」になりかねない。人口増加の条件下でも「人進沙退」であって欲しいと思う。これには利用可能水量の評価と使用水量および利用可能（開発）土地の評価を行う必要がある。すなわち環境アセスメントである。

これらについては、次年度より始まる日中共同研究で経済的效果も含めて具体的事例・成果が出ることを期待する。

引用文献

- 1) 環境庁水質保全局 (1990). 砂漠化の現状と対策 P. 132.
- 2) 河野通博 (1988). 中国における砂漠化とその防止についての覚書. 地理学評論 61 (2): 186 ~ 197.
- 3) 真木太一 (1991). 中国乾燥地域の気象・蒸発散特性の解明と防風施設による風食防止. 国際農林業協会情報 14 (3): 31 ~ 40.
- 4) 真木太一 (1992). 中国北西部の乾燥農業地域の気象改良事例. 日本農業気象学会耕地気象改善研究会講論集 5: 13 ~ 25.
- 5) 真木太一・潘 伯榮・黄 丕振・閻 国榮 (1992). 中国トルファン乾燥地におけるタマリス

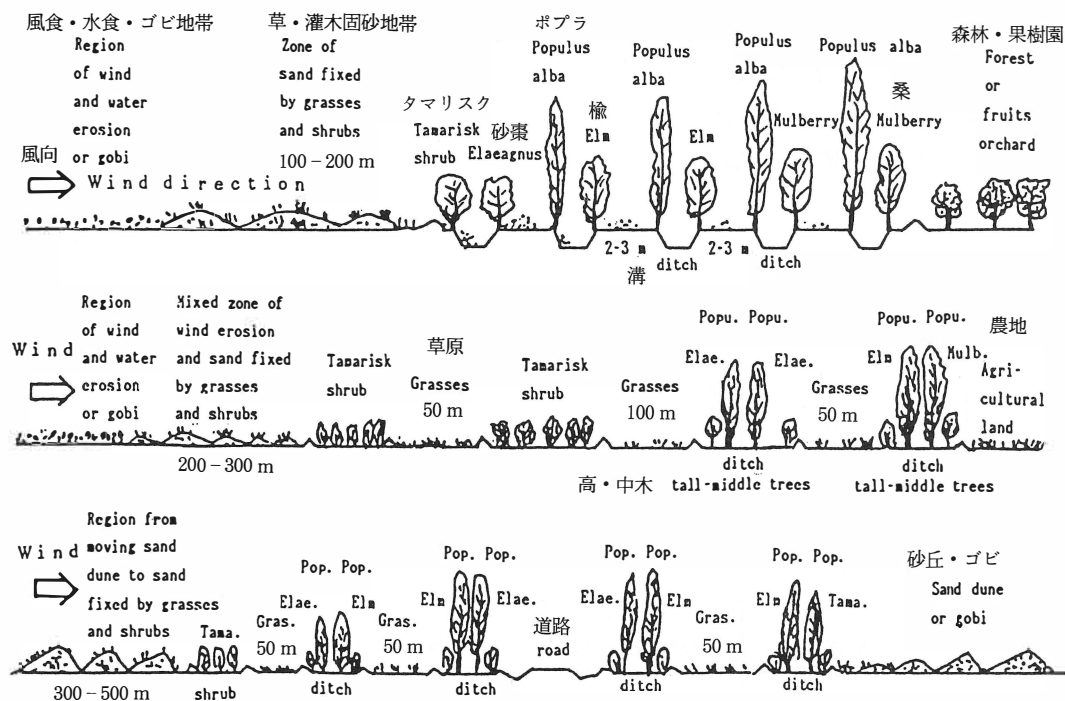


図 11 砂丘地からオアシスまでの防風林帯、防風垣帯、草生帯などの配置状況
(新疆生土研, 1978; Maki, 1992)

- ク防風林による微気象改良. 農業気象 48(2): 157 ~ 164.
- 6) Maki, T. (1993). Present research status on methods to prevent desertification. Agric. Met. 48(5): 523 ~ 530.
- 7) 中井 信 (1991). 中国の砂漠問題—タクラマカン砂漠—地球環境と農林業. 養賢堂 P. 171 ~ 192.
- 8) 熱帯農研 (1988). 乾燥地 特集号, 熱帯農研集報: 85.
- 9) 西村 格 (1986). 内蒙古草原の砂漠について. 農林業協会専門家通信 7(2): 1 ~ 15.
- 10) 新疆生土研 (1978). 新疆沙漠和改造利用. 新疆人民出版社 P. 104.
- 11) 姚 洪林 (1986). 砂漠の緑化技術について. 緑化工技術 12(1): 29 ~ 43.
- 12) 朱 震達・劉 恕 (1981). 中国北方地区的沙漠化過程及其治理区劃. 林業出版社 P. 83.

コメント

砂漠化防止の農業気象的方法について

お茶の水女子大学 内 嶋 善兵衛

1. はしがき

人口爆発は、乾燥気候のため自然的な生物扶養能力の低い地域で、砂漠化を促進している。砂漠化により地域の植物生産力はさらに低下し、これは土地の劣化（砂漠化）に正のフィードバックとして作用している。近い将来、砂漠化はさらに大きな自然的そして社会的な問題として人類の前にたたかざるものと思われる。

それゆえ、砂漠化防止または砂漠の緑化に関するプロジェクトが種々な分野でとりあげられ、研究が進められている。しかし、方法論的にみて十分検討されていない点が多く、十分な成果をあげていないように見受けられる。そこで、ここでは、砂漠化防止法について農業気象的な立場から簡単に考察する。

2. 砂漠化のメカニズム

Hare (1983) は「気候の変動・変化による少雨・干ばつと人間活動によるインパクトが合わさって、乾燥・半乾燥地帯や半湿潤地帯で植生が貧困化する現象」と定義している。これから分かるように、気候変動・変化もさることながら、人間活動（森林伐採、過剰の耕作・放牧など）のインパクトをかなり重要視している。この定義をモデル的に表わすと図1のようになる。

図から分かるように、増大する人口を扶養するため、1) 耕地拡大・利用強化・管理失敗；2) 放牧家畜数の増加；3) 燃料材の採取が強く行われてるため、地表を守っている植生の貧困化が急進する。これらと気候変化による少雨・干ばつが重なると、一気に砂漠化が起き始め、放置すると砂漠化の前兆から砂漠化へと進み、地域の生物扶養能力の極度の低下、そして地域社会の崩壊と放置へと発展していくことになる。

これから、砂漠化防止の基本は、自然的な生物扶養能力内に人口を規制し、その能力内で生きることであることが分かる。古い時代には、それが地域社会内のルールとして守られてきたことは文化人類学の教えるとおりである。しかし、外部世界との交流によって、このルールを守ることは非常に困難になってきている。それゆえ、砂漠化防止は次善の策—砂漠化前兆を防止し、地域の生物扶養能力の維持・向上を図ることに力が注がれている。すなわち、風蝕・水蝕による表土の飛散・流亡の防止を通して、貧弱化する植生の回復を図ることに注目が集まっている。

3. 防風林（ネット）の農業気象的效果

防風林（ネット）は耕地環境の改良と作物保護のための有力な技術である。古くから、防風林（ネット）は、乾燥気候からオアシス内の耕地環境を守るため、また強風地帯で作物や果樹を守るために育成・利用さ

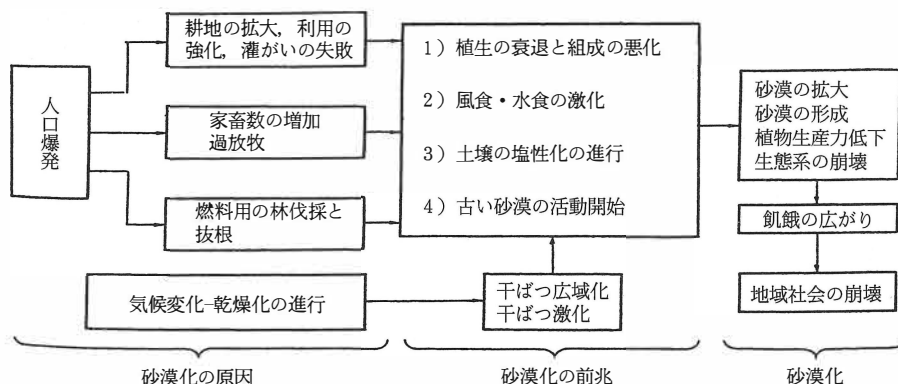


図1 砂漠化進行のメカニズム (内嶋, 1991)

れてきた。そして、それぞれかなりの効果をあげてきた。また、より優れた防風林（ネット）の構造や設置法を明らかにするため、そして作物生産への効果や経済的利益を評価するために、多くの研究が行われている。

最近、砂漠化防止の観点からも防風林（ネット）に関する研究が進められており、砂漠化での減風効果や防砂効果についても新しい知見が得られている。しかし、砂漠化防止というスケールの大きい場所での研究には、小さいスケールでの研究と違った研究対応が必要のように思われる。とくに、現在砂漠化現象は砂漠をとりまくサバンナ・ステップ気候域で地球的規模で生じていることを考えると、広い乾燥地域の生物扶養能力、すなわち植生生産力を維持・向上させるかという方法の確立を目的に研究を展開しなければならない。

このためには、耕地や荒地の表土の風蝕・水蝕を防止する防風林（ネット）に関する研究は、現象・メカニズムの解明だけを主とする理学的色彩の強いものから、環境改良を通して生産力増強をはかるより工学的な色彩の強い環境生産工学の確立を目指すことが必要である。その第一歩は、耕地・半砂漠地上の微気象場（風速、乱流拡散係数、蒸発散、熱収支）を支配する物理的法則に基づいて、不良環境下で植生の回復・維持を可能にする気象場の改良方法の確立。次に、種々な気象改良を施した条件下での植生の成長・乾物生産を

評価する生産生態学的方法の確立。第三番目に、中規模スケールの区域への、これらの方法の適用の可能性の探究とその改良。最後に、地域の生物扶養能力の維持・向上のための環境生産工学的な方策の経済効果の評価法の確立が必要である。

園芸施設を用いての生物生産（野菜・花など）については、かなり環境生産工学的な研究が展開されているが、広い耕地で営まれる土地利用型農業、とくにいま問題にして砂漠化防止や砂漠緑化に関する環境生産工学的な研究はまったくなされていない。

砂漠化防止の農業気象的研究は、土地利用型農業での環境生産工学的方法の確立を目指して推進することが重要である。

参 考 文 献

- 内嶋善兵衛監訳（1991）．熱帯を知る／21世紀の地球環境．280頁，丸善出版．
- 内嶋善兵衛（1984）．ソ連における耕地保護林の研究．日本農業気象学会農業気象災害研究部会「風害および防風施設」，36－46．
- Konstantinov, A. R. and Struzer, L. R. (1974)．森林帯と作物収量．213頁，水文気象出版局（ロシア語）．
- Barfield, B. J. and Gerber, J. F. (1979)．Modification of the aerial environment of crops. 538頁，ASAE．

農業限界地における環境資源利用技術の開発と今後の研究推進

5. リモートセンシングを利用した乾燥地の草地保全計画

高 畑 滋

熱帯農業研究センター環境資源利用部

(現在 東北農業試験場 草地部)

Development of Techniques for the Utilization of Environmental Resources and Perspective of Promotion of Research in the Marginal Land Area

5. Planning for rangeland conservation in the dry areas using remote sensing

Shigeru TAKAHATA

Department of Grasslands, Tohoku National Agricultural Experiment Station

4, Akahira, Shimo-Kuriyagawa, Morioka, Iwate 020-01, Japan

It is estimated that there are about 20 million km² of dry rangelands, where land deterioration tends to increase. Rangeland conservation should be based on information about natural and socio-economic conditions obtained by remote sensing. The current study which aimed at developing a proper grazing system for sustainable use of rangelands, was conducted in the northern steppe of Syria as a cooperative research project between ICARDA and TARC from 1990.

The framework of the grazing system is shown in Fig. 10.

Remote sensing is useful to observe the wide rangelands and to acquire information for land use analysis.

Key words: rangeland, remote sensing, grazing, conservation, Syria

キーワード: 牧野, リモートセンシング, 放牧, 保全, シリア

1. はじめに

世界の牧野地帯は全陸地面積の 1/4, 4,000 万 km² におよぶといわれる程広大な面積を占める。気象的にも、地形・土壌からも農業限界地であるところが牧野になっている。このような地域で持続的牧畜利用計画を考えることは地球規模の環境問題にも通じる大きな課題である。「牧野の過放牧による砂漠化」は社会

的な注目を浴びていることであるが、広大な牧野地帯のどの場所でどんな現象が起きているかと言う現象論の段階でも実態ははっきりつかまれている。ニュース報道などで植生のない所で家畜が餓死していく様子などが示される。それはもはやその地域では放牧ができないことを明確にあらわしているが、生態学的な現象把握としては不十分である。その土地の気象や土壌はどういうものであったのか、最近変化しているの

か、植物の生育条件としての水・養分・温度の関係はどうか、薪採取や家畜放牧の程度はどのようなものであったのか、などが調べられてはじめて過放牧と砂漠化との関係が明らかになる。

この報告では西アジアシリア北部の牧野を試験地として、ランドサットデータ及び大縮尺空中写真によって植生の季節変化及び年次変化を解析し牧養力推定の基礎とした調査を報告する。

2. 牧畜地帯の成立条件

世界的にみた牧畜ゾーンは図1に示すとおりであるが、南北アメリカ、オーストラリア、ニュージーランドなどは19世紀以降の入植者によって牧畜が持ち込まれたものである。歴史的にみて牧畜が盛んであった所は、森林と草地の境界付近であった。そういう所には群居性草食獣が住んでいて、農耕民とは異なる発展をした牧畜民によって狩猟から遊牧へと展開していった。ユーラシア大陸では紀元前7000年頃より牧畜・農耕が始まったといわれる。牧畜地帯はサヘル、スーダンの牛飼育、北アフリカ、西アジアの羊・山羊飼育、ユーラシアの羊・山羊・馬・ラクダ飼育などに大別される¹⁾。

エネルギーサイクルの面からみると二次生産者である動物は、一次生産者の植物に支配され、草食獣は草

類の生育に支配される。草類は基本的には太陽（光・温度）と水に支配されるが、同じ植物でも森林植生が成立する場所では競合に負けて草原は成立しない。森林植生ができるのには Martonne の乾燥指数 $= p / (T + 10)$ (p : 年降水量 mm T : 年平均気温 $^{\circ}\text{C}$) が 40 以上といわれ、日本は全国土が森林地域に含まれる。乾燥指数が 5 ~ 10 をステップ地域、10 ~ 20 は乾燥耕作地域、20 ~ 30 は灌漑農業地域といわれるが、実際には植物の生育期間をあらわす月平均気温 5°C 以上を合計した温量指数もあわせて植生帯がわかれる。温量指数 15 以下はツンドラ地帯であるが、ここでもトナカイ遊牧民による牧畜が行われている。モンゴル高原では馬・羊・山羊・牛による牧畜が盛んであるが、温量指数 30 ~ 65, 乾燥指数 8 ~ 32 付近である。西アジアは羊・山羊・ラクダの牧畜で温量指数 90 ~ 200, 乾燥指数 5 ~ 35 の範囲である。アフリカの牧畜地帯は牛を飼い温量指数 140 ~ 250, 乾燥指数 5 ~ 30 くらいである。

3. シリアの自然環境

シリアの西には地中海があって湿った空気をもたらす。しかし海岸沿いにそびえる 3000 m 級のレバノン山脈、アンチレバノン山脈の二つの高い山脈に遮られて内陸は乾燥する。数百 km で年降水量が 1500 mm から 50 mm まで減少する。衛星画像 1 シーンの中で



図1 世界の牧野地帯の分布

森林地帯から砂漠まで観察できる。

シリア北部アレppoは年降水量 332 mm (14 年平均値) であるが、ここを中心に国際乾燥地農業研究センター (ICARDA) の気象観測ネットがある。これを使って降水量の季節変化、年次変化、地域差などを知ることができる。

図 2 は最近 8 年間の月別降水量 (9 月更新) である。'87~'88 年は約 500 mm の多雨年であったが翌年からの 2 年間はその半分以下の 230 mm 台の寡雨年であった。乾燥地での降雨の特徴は季節的にも年次的にも変動が大きいことであって、'88~'89, '89~'90 年の寡雨年は秋には平年に近い降雨があったが春には少ない降り方であった。ムギ類の収量には秋の発芽と初期生育時の降雨が有効であるといわれ、'85~'86 年は寡雨年でしかも秋の降雨量が少なかったので不作年であった。牧草のように栄養生長が収量となるものではある程度大きくなって光合成が盛んな春の時期の降雨が収量に影響する。

乾燥地では年間降水量の多少だけではなくて植物の生育にとって有効な時期に降らなければ豊作とはならない。放牧地の草量に見合った放牧強度を保つことが、草地の保全にとって一番重要なことで、降水の時期と量とから牧養力を推定するモデルでその地域の草地管理をする必要がある。実際には降水と草の生産量との関係を示すデータの蓄積はないので、豊作年と不作年程度の分け方しかできない。また、放牧のコントロールもフェンスのない遊牧条件下では、ヘクタールあたり何頭という決め方はできない。季節ごとの営地の数と範囲を制限する方法しかない。

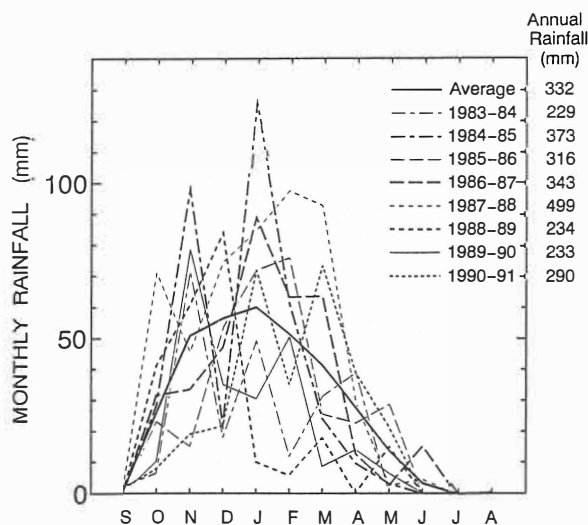


図 2 降水量の年別、月別変化 (シリア・アレppo)
乾燥地域での降水量は変動が大きい。

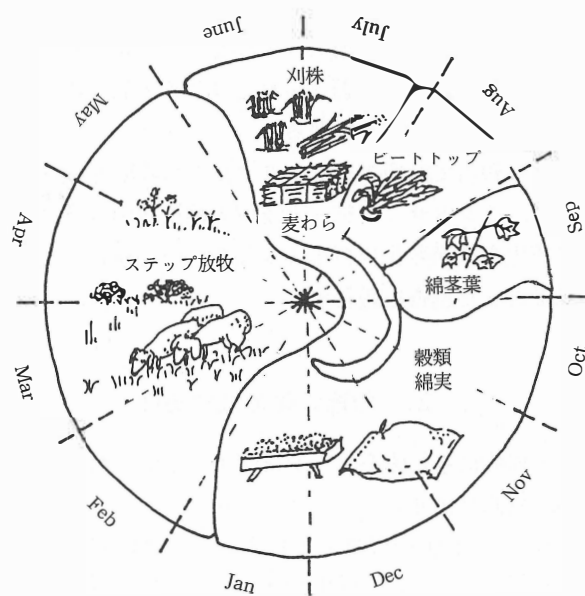


図 3 シリア北部の羊飼料供給構造モデル

4. シリアでの遊牧計画

羊の原産地はユーフラテス川、チグリス川の上流のアナトリア山地からイラン北部にかけてといわれる。この付近で羊の家畜化も始まったものと思われ、現在でも、東はモンゴルから西はモロッコに至る広大な羊・山羊牧畜地帯の中心的位置にある。

近年シリアでは羊飼育頭数が増加している。北シリアでの飼料供給構造モデルを図化したものが図 3 である。飼育基盤のうち牧野放牧に依存する割合は高くないが、ほとんどの季節で飼料の基礎になっている。牧野植生が貧弱であると穀実や麦稈に頼る率が高くなるので、農牧混合地帯では農作物残渣などの飼料化対策技術が必要である。牧野の植生を調査し適正な放牧圧に抑えることが、持続的な牧畜にとって必要なことである。

5. リモートセンシングによる植生推移 モニタリング

広大な地域の植生動態を観察するには衛星データの利用が効果的である。地表面からの反射のうち植生を強調するために TM4 バンド (近赤外領域) と TM3 バンド (赤領域) を使って植生指数 (VI) を次式で計算した。

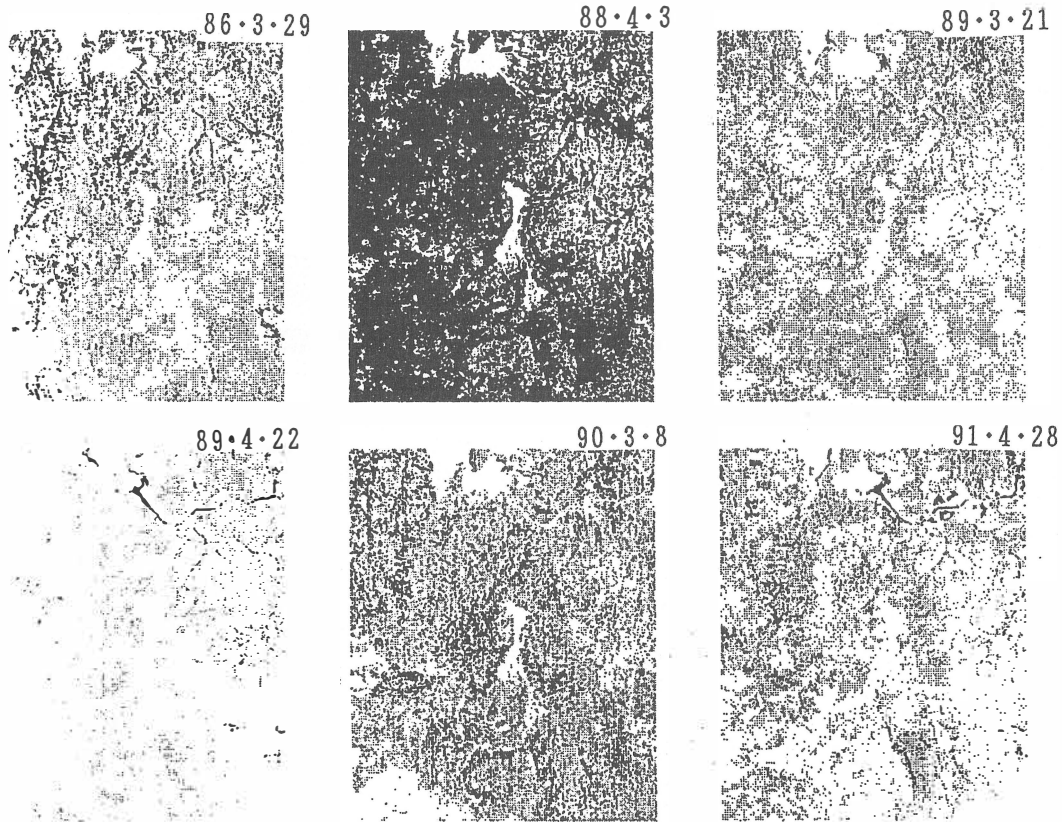


図4 春の植生指数はその年の降水状況によって変化する
1986-1991年, マガラ北部

$$(TM4 - TM3) / (TM4 + TM3) * 200 + 128$$

この値の128以下を白く出し、VI値の高い部分を黒く出力したのが図4である。中央北部と中心部に塩湖があり、季節的に干上がる場所はあるが全体に無植生である。北側塩湖より東側に川があり、湖の川沿いに植生指数の高いところが分布する。これより北側に耕地が多い。3～4月はムギ類の伸長期であり、最も植生指数の高くなる時期である。

春の植生指数の年次変化をみると、'88年>'90年>'86年>'91年>'89年の順で高かった。調査地から約80 km 西方での降水量と比較すると、'88年は例年の150%という多雨年であり特に1～3月に十分な降水があった。'89、'90年は例年の70%、88年の47%の降水量しかない寡雨年であった。'91年はやや寡雨年で例年の87%であった。月別の降水量をみると'89年は1月以降ほとんど雨が降らなかった年であり、最も干ばつがひどかった。'90年は2月に平年並みの降水があったため'89年よりも高い植生指数が得られた。しかし、畑地の大麦の植生指数は低かった。植生によって有効な降水パターンが違うものと思われる。

麦類、草本群落、灌木優占地など主要な植生ごとに植生指数地とバイオマスとの関係を明らかにすること、季節的降雨パターンと各植生の生育との関係を明らかにすることが今後の課題である。

6. 気球空中写真による植生判読

図5に示すような装置によって地上約200 mの高さからカラー写真とビデオを撮影し、植物群落密度と冠部被度とを測定した。図6は *Atriplex halimus* の冠部被度20.4%、図7は *Salsola vermiculata* の冠部被度4.9%である。

微地形と植生との関係を知るため凹地を中心に90 mのラインコドラートを取り草種、出現頻度、草高、被度を測定した。(図8, Table 1～3)

凹地の低い所に *Carex*, *Plantago*, *Peganum* が多く、周辺の高い所に *Hordeum* が多かった。微地形によって変わる土壌水分を利用した棲みわけと判読された。空中写真から植生分布の状況がよく判読された。(図9)

7. ま と め

ランドサットデータ及び大縮尺空中写真で乾燥地での草原植生の動態を知ることができた。まだ牧養力を

推定するところまでいっていないが、図 10 のように気象データとリモートセンシング、地理情報との関係を明らかにすることによって放牧で利用できる草量を推定することができよう。

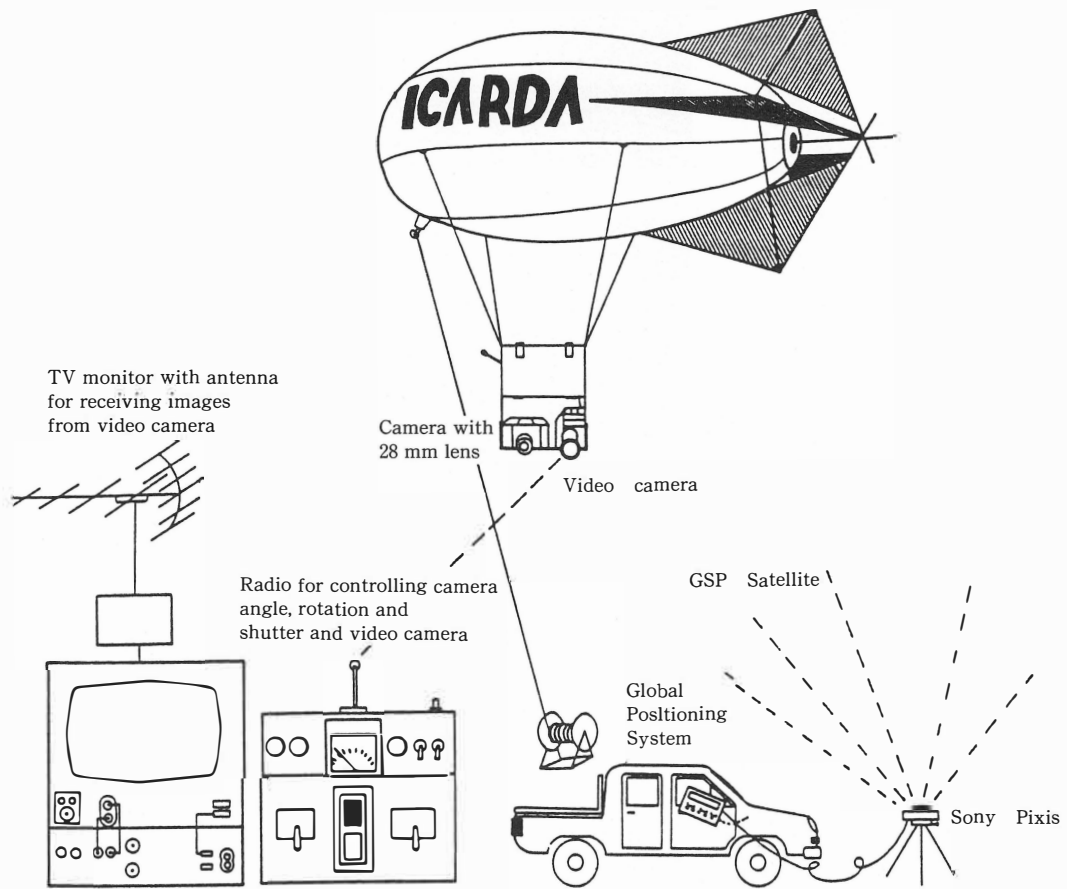


図5 気球式空中写真撮影装置



図6 *Atriplex halimus* 樹冠投影図 マラガ灌木植栽区 Plot 10

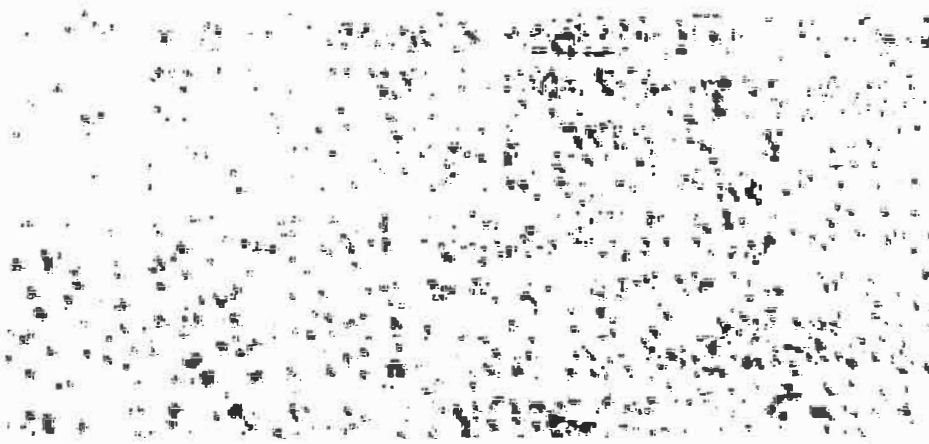
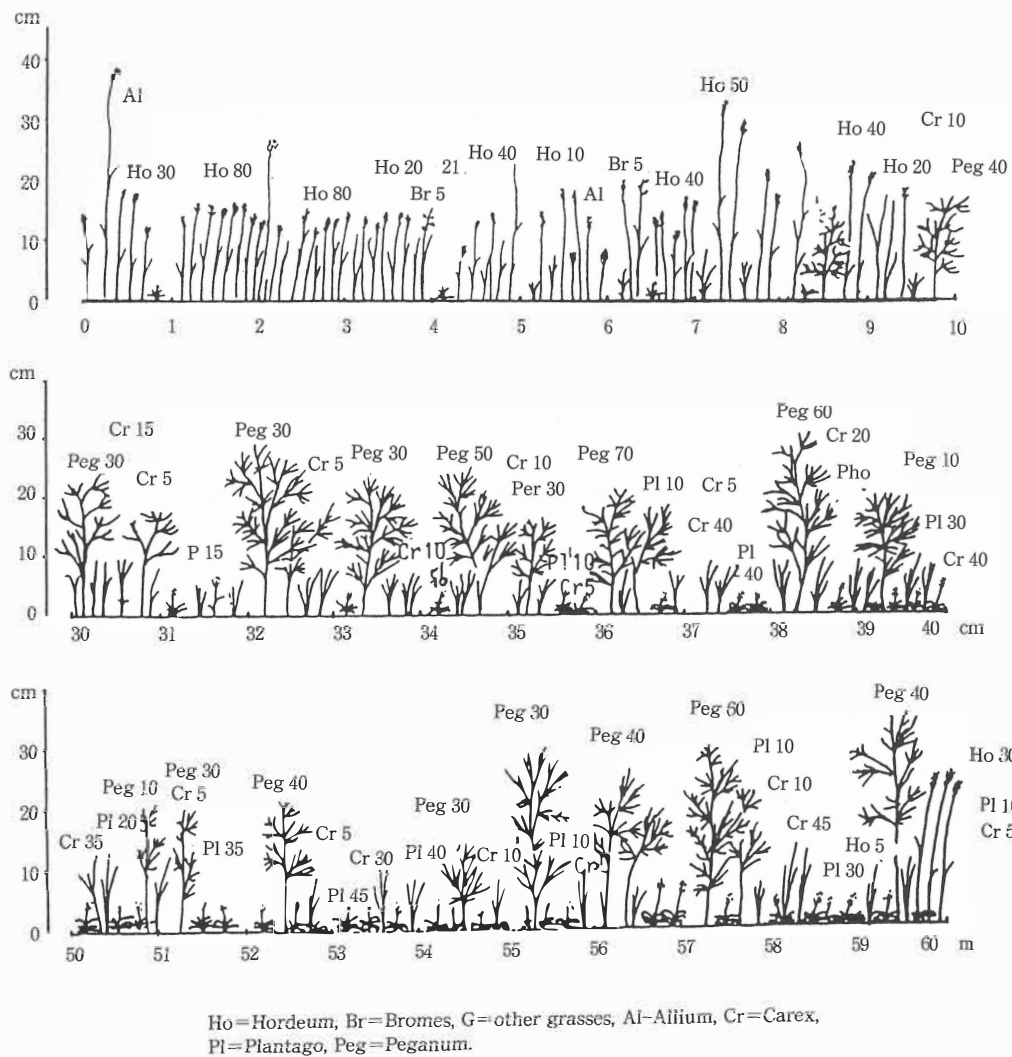
図7 *Salsola vermiculata* 樹冠投影図 マラガ灌木植栽区 Plot 10

図8 草高と冠部被度模式図
 草種名の後の数字は10メートルライン間の被度%
 縦軸は草高 cm, 横軸は調査ライン m

Table 1 Frequency % Maragha Natural Plot 3 1991 / 5 / 5

	0 - 10 m	10 - 20 m	20 - 30 m	30 - 40 m	40 - 50 m	50 - 60 m	60 - 70 m	70 - 80 m	80 - 90 m
Hordium	100	70	10			20	90	100	100
Bromus	20							10	40
other Gramineae		30	20	10	20				10
Plantago	30	80	30	80	100	90	70	20	40
Carex	60	100	100	100	100	100	80		
Compositae		20	20	20	10	10	10		40
Umbelliferae									
Allium						10		10	
Peganum	20	90	100	80	60	80	90	50	40
Brassicaceae					10			20	40
others	30			10	10	10	10		50

Table 2 Plant Height cm Maragha Natural Plot 3 1991 / 5 / 5

	0 - 10 m	10 - 20 m	20 - 30 m	30 - 40 m	40 - 50 m	50 - 60 m	60 - 70 m	70 - 80 m	80 - 90 m
Hordium	44.5	22.9	30.0			26.5	34.2	32.4	23.3
Bromus	30.0							15.0	11.5
other Gramineae		5.0	6.0	8.0	9.0				9.0
Plantago	4.7	4.6	4.7	5.8	5.5	6.7	8.1	30.5	2.5
Carex	13.8	10.8	9.7	10.8	9.6	11.7	11.8		
Compositae		4.0	3.0	4.0	4.0	5.0	6.0		12.3
Umbelliferae									
Allium						8.0		22.0	
Peganum	33.5	30.5	27.0	26.8	21.8	22.0	27.2	26.8	29.8
Brassicaceae					10.0			28.0	26.8
others	34.7			4.0	1.0	6.0	7.0		9.4

Table 3 Coverage % Maragha Natural Plot 3 1991 / 5 / 5

	0 - 10 m	10 - 20 m	20 - 30 m	30 - 40 m	40 - 50 m	50 - 60 m	60 - 70 m	70 - 80 m	80 - 90 m
Hordium	41.0	9.0	1.0			3.5	26.5	78.0	47.0
Bromus	0.3							0.3	2.0
other Gramineae		2.7	2.0	1.5	1.5				0.2
Plantago	0.7	4.8	1.3	12.0	19.0	20.5	4.5	2.0	2.5
Carex	4.7	7.6	12.5	14.5	10.8	17.0	22.0		
Compositae		0.5	0.1	0.5	1.6	0.5	0.1		2.5
Umbelliferae									
Allium						0.2		0.5	
Peganum	7.0	20.5	26.0	32.0	19.0	34.0	27.5	10.5	11.0
Brassicaceae					0.5			0.6	5.5
others	0.7			0.3	0.1	0.1	0.5		0.7



Fig. 9. 気球写真で撮影したマラガ自然区 Plot 1

引用文献

- 1) 福井勝義・谷泰編集 (1987). 牧畜の原像・生態社会歴史. NHK.
- 2) Noor Mohammed (1989). Range management

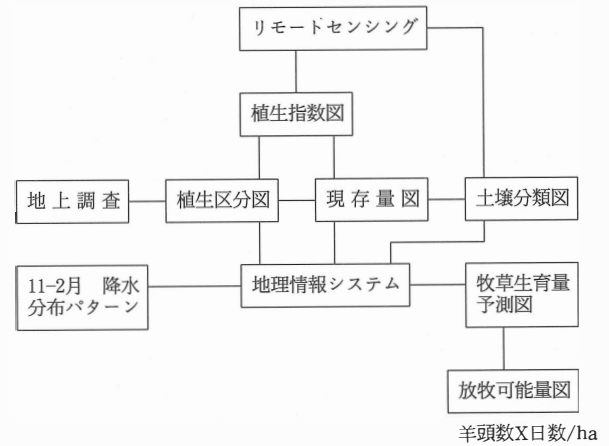


図10 リモートセンシングと地理情報システムを使った牧野の牧養力推定流れ図

in Pakistan, ICIMOD (Kathmandu).

- 3) G. Pickup and V. H. Chewings (1988). Forecasting patterns of soil erosion in arid lands from Landsat MSS data, Int. J. Remote Sensing 9 (1).
- 4) ICARDA. Annual Report 1984 ~ 1992.

コメント

リモートセンシングを利用した乾燥地の草地保全計画
についてのコメント

筑波大学教授 林 一 六

植生生理学の立場からこの発表についてコメントをする。

草地保全の問題を乾燥地域の広域植生分布を調査し、環境要因との関係を調べることから始めようという構想は植生地理学の役割を正しくとらえている点で評価できる。これにより草地の状態診断を行い、牧養力を判断して保全的、放牧計画につなげようということだと思うが、発表を聞いている限りでは、その前段の地域植生調査法の導入の段階で終わっているのが残念である。広域の植生調査をする場合にリモートセンシングが有効であることは知られているが、あくまでも地上での植物社会学的な調査の裏付けのある植生地を面的に拡げる手法だということに徹しなければならぬ。その点この調査では地上でのデータが不足である。乾燥地植生の調査例が少ないだけに惜しまれる。海外での植生調査にはアウフナーメ（植物社会学的調

査に必要な全植物のリストアップ）ができる現地研究者との共同作業が必要であろう。

発表では *Atriplex* や *Salsola* などの灌木類が生えているところがランドサットデータからよくわかるということであったが、牧野地帯の植生遷移では普通は家畜の放牧が進んだところにこれら灌木類が残るとみられている。放牧地での植生遷移も、家畜の種類や放牧強度、土壌や気象などの環境因子によって優占してくるものが異なると思われるので、よく観察してほしい。

放牧強度を調べるのはむずかしいとのことであったが、大事なことなので地域の生棲頭数だけでも調べられないだろうか。

年降水量が 200 mm に満たない乾燥地でも世界的にみるといろいろな植生がみられる。このような調査研究がもっと発展するように期待する。

国際熱帯林研究をめぐる諸問題

1. 国際熱帯林研究の最近の動向

佐々木 恵 彦

東京大学農学部

Recent Move on International Tropical Forest Research

1. International Tropical Forest Research Cooperation

—Japan pledges financial and technical contribution—

Satohiko SASAKI

Professor, Faculty of Agriculture, Tokyo University

Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

The recent move of International Organizations on Tropical Forest Research cooperation stems from the serious concerns on global environmental issues caused by large-scale energy consumption and on deterioration of land resources due to the population expansion pressing the land use development for agriculture and industries. The awareness on Sustainable Development forced the reexamination of development investment in the past. The World Bank Project Review in 1988: "Renewable Resources Management in Development—Lessons from World Bank Experiences in Agriculture and Forestry" pin-pointed the failure of agricultural investment and the lack of sufficient development efforts in forestry sector. The deterioration of tropical forest urged World Bank, FAO and WRI to form and establish TFAP (Tropical Forestry Action Plan) in 1986. TFAP is expected to formulate country and regional action plans in the tropical developing countries, which may require the fund of 1 billion US\$ annum and technical project support from more advanced nations. Japan presently offers US\$ 390 000 to TFAP programs, and sent forestry experts to 7 TFAP country missions.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) working on global warming issues formed by WMO (World Meteorological Organization) confirmed the importance of forest conservation, particularly of tropical rainforest as a part of the measures to be taken against global warming. The tropical rainforest absorbs carbon dioxide, while its poor management due to agricultural development and shifting cultivation by burning may become a significant source of CO₂ in the global atmosphere. The 1980 Survey of tropical forest by FAO/UNEP provides the basal data on this problem and pointed out that unsustainable commercial logging also

poses a great problem. For example, Brazil, Indonesia, Colombia, Cote d' Ivoire, Thailand and Laos share more than half (1.2 billion tons) of the total evolution of CO₂ in the global atmosphere due to tropical deforestation (1.66 billion tons).

FAO started in 1990 the second global survey on tropical forest, by means of satellites and database analyses, which will be completed in 1992. The Interim Report published in 1991 admitted the underestimation of 1980 Survey on the degree of deforestation in 62 countries. It estimated that 16 785 200 ha of forest was lost in 1990. The annual rate of forest loss is 1.2%. Also, large tropical forest areas have become fragmented into smaller pieces of forest to accelerate the present rate of deforestation.

As the measures to control CO₂ evolution, the introduction of agroforestry to replace shifting cultivation, improved forest management and logging practices and reforestation are being reviewed. The reforestation program is being proposed in the tropics under the assumption of available land area for reforestation of totally 621 million ha.

Based on the Tropical Timber Trade Agreement adopted in 1983, ITTO (Tropical Timber Trade Organization) has been established in Yokohama, Japan, and been greatly contributing not only to international tropical timber trade issues but also to tropical forest conservation, sustainable development and reforestation. Japan assumes the major donor to the ITTO since its establishment.

While the strengthening TFAP, the support to ITTO programs, both multilateral and bilateral aid programs and the exploitation of Debt for conservation exchanges is emphasized, the CGIAR (Consultative Group on International Agricultural Research), which is basically international donors' association supporting 13 international centers of agricultural research (IARCs), proposed the integration of forest and forestry research within its activities, under such recognition that the impacts of agricultural development to forest conservation is great in tropical developing countries, that deforestation is being caused by agricultural practices including shifting cultivation, and that forest is essential for agriculture. CGIAR proposed first the integration of ICRAF as the Center for agroforestry research and second the establishment of a new International Institute for Tropical Rainforest Research possibly in Southeast Asia, which has not been existing by now, although each country of the Region has its own national research center of forestry.

The Australian group was assigned the task of studies on implementing this proposal and the new research center will be visualized in one of the Southeast Asian countries not too distant in future. Japan is requested to assume a major donor, and Ministry of Foreign Affairs has decided contributing significant resources to the new center. The key function of this new 'International Tropical Forest Research Center' is primarily conducting the basic studies on biology, Physiology, ecology of tropical forest, and the sustainable management of tropical forest. It should not compete with national forest research institutions of the Region, but rather should well coordinate by transferring the results of basic research at international level to the technical applications in the institutions at national level. Amongst a range of research areas, the studies of land use and zoning problems will be of utmost

importance.

Since its inauguration, two NGOs of the USA have played an important role in CGIAR System, The Rockefeller and Ford Foundation. This encourages the potential Japanese foundations and NGOs that may also join and support this new international forestry research. The responsibility of Japan is increasingly high in international cooperation in forestry research.

国際機関が森林に対して協力しはじめた大きな要因はエネルギー大量消費による環境問題の深刻化と人口増加による土地開発の拡大と開発地の悪化である。このため Sustainable Development が重要視され、過去の開発投資に対する反省がおこった。1988 年の世銀の農業および林業プロジェクトレビュー: Renewable Resource Management in Development ……Lessons from World Bank Experience in Agriculture and Forestry. の中で、農業投資の失敗と林業に対する開発投資の少ないことを指摘している。こうした Sustainability の問題は熱帯林の減少と結び付き、FAO, UNEP などを中心になって、熱帯林行動計画 (Tropical Forestry Action Plan) が作られた。この指針によって、熱帯各国および地域の行動計画が策定されることになっている。このためには、年間 10 億ドルの資金と先進国によるプロジェクト支援が必要である。日本は TFAP のために、毎年 39 万ドルを提供している。また、国別計画策定のために、カメルーン、ペルー、ホンジュラス、パナマ、タンザニア、アルゼンチン、コスタリカに調査員またはラウンドテーブル会議 III に参加している。これまで、24 カ国で国別計画の策定を終了し、41 カ国で、策定を行っている。これから計画を策定する希望を持っている国が 14 カ国ある。合計 79 カ国が森林行動計画を策定する予定である。

更に、地球温暖化を問題にする世界気象機関 (WMO) が中心となって、IPCC が結成され、その答

申として、地球温暖化に対する対策として、森林の重要性和保全が確認された。特に、熱帯林に関する関心が示され、二酸化炭素の吸収源として、逆に、管理が悪く、焼き畑などで森林が劣化する場合には、発生源にもなりうるということが指摘されている。これらの分析の基礎データは FAO/UNEP の 1980 年調査 (1982 年の報告書) を基にしている。農業開発、焼畑が二酸化炭素の排出源となっているが、管理の悪い天然林商業伐採も問題であると指摘している。ブラジル、インドネシア、コロンビア、アイボリーコースト、タイ、ラオスの 6 カ国で、1980 年の森林破壊による炭素放出の半分以上 (熱帯林の破壊による炭素放出量 1.66 billion ton の内 1.2 billion ton) を占めている。

こうした地球規模の森林調査は公式にはここ十年ほど行われていなかった。しかし、種々の情報から判断して、森林破壊がさらに加速していることが懸念されている。FAO は 1990 年の森林状況を報告するために、1989 年 3 月に (1) 各国の国内地区別または部局別のデータをもとに、森林、人口密度、社会経済状況の統計の解析、(2) 植生、生態分布、国境および国内境界、(3) 人工衛星データの荒い解像力による全地球照査、高解像データによるサンプル地の経時的照査を始めた。この調査は 1992 年の中頃完了する。この調査の中間発表として、1980 年の FAO/UNEP の熱帯林資源評価に含まれた 76 カ国の内、62 カ国の調査結果を公表した (表-1)。これによると、1980 年の FAO/UNEP

表-1. 熱帯林の減少に関する FAO 中間報告—1990 年

Continent	Countries Studied (No.)	Total Land Area	Forest Area 1980 (1,000 ha)	Forest Area 1990	Annual Deforest 1981 – 1990	Rate of Chages 1981 – 1990 (%)
Africa	15	609,784.2	289,699.0	241,815.3	4,788.4	– 1.7
Latin America	32	1,263,637.2	825,865.4	752,967.7	7,289.8	– 0.9
Asia	15	891,109.2	334,529.9	287,459.8	4,707.0	– 1.2
Total	62	2,764,530.6	1,450,094.3	1,282,242.8	16,785.2	– 1.2

(Interim report on forest resources assessment 1990 project secretariat note 1990.)

た。1990年には年間16,785,200 haの熱帯林が減少していると推定している。年減少率は1.2%となっている。さらに、残された森林が断片的になっていることがわかり、更に森林が加速度的に減少する可能性が高い。

炭素放出をコントロールする方策として、アグロフォーレストリーなどによって焼畑を減少させること、森林の管理強化、伐採の改善等の他、植林によって、二酸化炭素を吸収することが考慮されている。

積極策として、熱帯植林が提案されているが、熱帯における植林可能な土地について、二つの説がある。

その一つは、植林可能な土地が621 million haあり、そのうち、418 million haが乾燥山岳地帯に、203 million haが湿潤地帯にある。

もう一つの推定は、植林に適する土地865 million haの内、ラテンアメリカに100 million ha、アジアに100 million ha、アフリカに300 million ha、合計500 million haの森林跡地で放置された土地がある。残りの365 million haは農業生産が向上し農地から除外される場合のみ、植林が可能になる。

最近、TFAPの実施状況について、Reviewが行われ、TFAPを積極的に押し進めることが重要であると言う提言がなされた。また、IPCCの地球温暖化対策においても、TFAPの支援、ITTOの役割の強化、国際協力機関、二国間協力機関の支援強化、Debt for conservation exchangesの活用などが指摘されている。

したがって、今後、TFAPの組織化とIPCCの圧力によって、熱帯林にたいする資金援助が増大する可能性がある。

一方、国際熱帯木材協定(ITTA)が1983年11月に採択された。この協定の目的は:

- ①生産国と消費国との協力枠組み
- ②貿易の持続可能な拡大と多様化
- ③森林経営と木材利用の研究開発の促進と支援
- ④市場情報
- ⑤生産国における加工度の向上
- ⑥産業用材の造林と森林管理の支援
- ⑦熱帯木材の流通・販売の改善
- ⑧熱帯林の持続的利用と保全、遺伝子資源の確保のための政策の向上

この協定のもとに、国際熱帯木材機関(ITTO)が設立され、横浜に本部を設置した。これまでの各国の拠

表-2. ITTOに対する各国の拠出金

	(単位: 万ドル)	計
1887 日本 200, スイス 100, オランダ 60,		360
1988 日本 220, スイス 30, オランダ 44, スウェーデン 15,		309
1989 日本 2,213, フランス 200, フィンランド 200, イタリア 100, スイス 100, オランダ 15, スウェーデン 89, NGO 2		2,869

出金の状況は表-2の通りである。わが国に存在する国際機関として、最近、その存在が注目されるようになっており、わが国の外務省、農林水産省、林野庁が力を入れていることが拠出金を見ても明かである。

各国の拠出金ばかりでなく、NGOもITTOに注目し、資金を支出していることが重要な点である。

最近、NGOの間で、Debt for conservation exchangeとかDebt-for-natureswapと言われる資金調達法が注目されている。累積債務によって不良債券化した開発途上国の債券をNGOの組織が債券流通市場で割引で購入する。債券を売った銀行は不良債券を処分する。NGOは購入した債券を開発途上国の中央銀行で現地通貨に替え、その資金で現地の環境保護活動を行うものである。このような方法によって、累積債務の軽減と環境保全を同時に行うことができる。WWFとかCI(Conservation International)などがこの方法を利用している。

二国間経済協力

国際機関のほか、先進国は各国とも独自の組織を中心に熱帯林に対する経済・技術支援を行っている。

表-3. 先進国の経済・技術支援機関

英 国	外務省	海外開発庁 (ODA)
フ ラ ン ス	海外協力省	経済協力中央金庫
	外務省	援助協力基金 (FAC), 熱帯林業研究センター
ド イ ツ	経済大蔵省	海外科学技術研究所(ORSTOM)
	経済協力省	技術協力公社 (GTZ), 復興金融公庫 (KfW), 国際開発基金 (DEE)
スウェーデン	外務省	国際開発庁 (SIDA)
オランダ	外務省	開発途上国投資銀行 (NIO)
米 国	国務省	米国国際開発庁 (USAID)
カナダ	外務省	カナダ国際開発庁 (CIDA)
日 本	外務省	国際協力事業団 (JICA)

表-4. 林業分野の協力（1988）

(単位：百万ドル)				
区分	二国間協力	開発銀行	国連機関	計
技術協力	393.0	19.1	43.7	455.9
資金協力	238.7	193.4	144.3	576.4
計	631.7	212.6	188.0	1,032.3
アフリカ	327.9	18.5	102.8	449.2
アジア太平洋	169.3	137.1	47.8	354.2
ラテンアメリカ	105.1	43.5	10.8	159.4
中東・その他	29.4	13.5	26.6	69.5

表-5. 林業分野における先進国の二国間協力

(単位：百万ドル)	
カナダ	75.1
フランス	42.9
ドイツ	147.3
日本	86.4
オランダ	32.1
スウェーデン	57.9
英国	23.1
米国	82.7

表-6 熱帯林問題の動き

1980 「西暦 2000 年の地球」発刊	
1981 FAO/UNEP 熱帯林資源評価調査 (1130 万 ha/年の減少)	
1983 FAO Committee on Forest Development in the Tropics. Action Plan の要請	国連熱帯木材会議 国際熱帯木材協定採択 (ITTA)
1985 FAO: Tropical Forestry Action Plan Draft. FAO 会議および世界林業会議 TFAP の承認, FAO が調整	ITTO 第一回理事会
1986 WRI, WB, UNDP-Tropical Forest 熱帯 53 カ国 80 億ドル/5 年間	ITTO 横浜に事務局
1987 WB, UNDP, WRI, FAO による TFAP の集約 ベラジオ会議 TFAP 支援: 年間 10 億ドル必要	
1988	IPCC
1989 FAO 森林資源調査開始	アルシュサミット ノールトヴェイク
1990	IPCC Response
1992 「地球サミット」で熱帯林の保全を討議	

国際林業研究所の設立の必要性を強調した文書

1) 第2回熱帯林に関するベラジオ会議

FAO, World Bank などが呼びかけで開催された。この会議において、国際林業研究強化が提言され、CGIAR が活動範囲の拡大を検討し始めた。

2) World Bank

(1) 1988 年の世銀の農業及び林業プロジェクトレビュー: Renewable resource management in development-Lessons from World Bank experience in agriculture and forestry. このレポートの中で、世銀は過去において、農業開発にのみ力を入れていたことを反省し、環境問題を含め、林業に投資をするべきだとしている。

(2) Forest Policy Paper: その後、世銀の Agricultural and rural development, Policy, Research

and External Affairs では新しい Forest Policy Paper を 1991 年 7 月に発表した。その総括においても、TFAP の再構築と、持続可能な林業を押し進めるため CGIAR の再編が必要と述べている。さらに、本文においては、熱帯林の問題にたいする国際社会の役割として、その重要な部門が三つあり、技術援助・研究・組織制度作り; 資金援助; 国際通商改革であるが、研究については: 林業, アグロフォレストリー, そのほか関連する環境問題を CGIAR のシステムに組み込むことである。世銀の役割として、CGIAR のなかに林業および関連分野の研究拡大を助成していく。

3) OED

世銀のこうした政策は OED のレポート: Forestry Development: A Review of Bank Experience のなかでも述べられている。一般論では、研究の必要性、土

地利用区分の問題を取り上げている。さらに、個別のプロジェクトとして、植林、苗畑、ソーシャルフォレストリー、天然林管理、流域保全・修復などについて、研究に関する問題が指摘されている。

4) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

IPCC Working Group III (Response Strategies) Subgroup on Agriculture, Forestry, and Other Human Activities: このレポートの熱帯林に関する項目のなかに、Policy Options があるが、その中で、森林・林業と気候変動に関する研究を CGIAR の組織に加えること、この組織を中心にして世界的な森林と気候の研究を行うよう提言している。IPCC の提言はノールトヴェイク宣言、ヒューストン・サミット宣言のなかで重要視されている。

5) 「地球環境保全に関する東京会議」議長報告 (1989 年 9 月)

熱帯林とその将来に関するコメントのなかで、CGIAR の組織にできる林業研究部門には国際社会が積極的に支援するべきであると提言している。

6) 熱帯林問題に関する懇談会 (座長: 大来佐武郎) (林野庁)

「熱帯林問題に関する懇談会」中間報告一録の地球経営の実現に向けて一平成 2 年 5 月 30 日 このなかで、国際森林総合研究所の設立を提言している。

7) 経済協力評価調査報告書 (世界経営協議会, 平成 2 年 3 月)

外務省が委託し、独立の調査機関によっておこなわれる経済協力評価調査において、「熱帯林の保全」関連の経済協力プロジェクトの評価が行われたが、その総括の項目に、熱帯林に関する基礎研究の必要性和国際研究所の設置が提言されている。

CGIAR (Consultative Group on International Agricultural Research)

CGIAR は先進国各国、世銀、アジ銀、FAO、UNDP、フォード財団、ロックフェラー財団などが連合したドナーグループであり、開発途上国の農林漁業の研究を推進するために活動している。現在、全世界に 13 の国際研究所を経営し、研究所の建設費・運営費を支出している。フィリピンにある国際稲研究所 (IRRI) もこのグループの研究所である。日本では外務省の経済協力局、国際機構課がこのグループの一員であり、年 2 回の会合に出席し、予算を計上し、種々

の事務を担当している。この活動に農林水産省、林野庁などが支援し、技術支援委員会のメンバーに 2 人の専門家を推薦している。近年、日本の貢献が目され、資金面での日本の存在は極めて大きなものになっている。

開発途上国、ことに熱帯諸国における農業開発が森林に与える影響が大きいこと、焼畑耕作による森林破壊、さらに、農業にとって森林が重要であるという認識が広まったことなどから、CGIAR に林業関連の国際研究所を作るべきであるという意見が強くなった。これまで、CGIAR ばかりでなく、森林・林業に関する国際研究所は存在していない。

CGIAR の技術支援委員会 (TAC: Technical Advisory Committee) は、アグロフォレストリーの研究所が熱帯林と林業の研究を行うべきであるという案を提案していた。そのため、アフリカにあるアグロフォレストリーの振興機関として、先進諸国が設立した ICRAF (International Council for Research on Agroforestry) を CGIAR の組織として参加させ、その内容を充実させ、基礎的研究を導入するように勧告した。しかし、ICRAF の理事会は CGIAR の勧誘を断わり、独自の活動路線を採ることを決定した。

CGIAR は新たに森林・林業に関するワーキンググループを作り、森林に関する研究所をどうすべきかを検討した。ワーキンググループは、まず、第一素案としてアグロフォレストリーを中心とした農業色の強い案を提示して、ドナー会議にのぞんだ。しかし、欧州におけるドナー会議 (ブリュッセル) では、森林・林業を中心にした研究所の設立すべきと言う意見が大半をしめ、第二次素案が作られ、これが現在の基本となっている。

予算に関する説明: 初年度に 50 万ドル、3 から 4 年後には 750 万ドルの予算となる。そのうち、300 万ドルは委託研究やネットワーク研究として、調整者 (研究者) に委ねる。6 年後には 2000 万ドルの予算となる。大規模な研究所を作る事に対する警戒が述べられた。予算規模の拡大、人員のスカウトによる中央化、各国の研究発展の障害となることなどを避けることが重要。

林業に関する国際協力機関名

1) Multilateral Organization

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)

UNDP (United Nations Development Programme)

UNEP (United Nations Environment Programme)

UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)

UN ESCAP (United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific)

IBRD (World Bank/International Bank for Reconstruction and Development)

ADB (Asian Development Bank)

ITTO (International Tropical Timber Organization)

IEA (International Energy Agency)

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate

Change)

WMO (World Meteorological Organization)

2) Research Organizations

IUFRO (International Union of Forestry Research Organizations)

CGIAR (Consultative Group on International Agricultural Research)

(FAO)

(IBRD)

(ADB)

3) NGO (Non-government organizations)

WWF (World Wildlife Fund)

PECC (Pacific Economic Cooperation Conference)

国際熱帯林研究をめぐる諸問題

2. 熱帯林再生の生態学的試み

宮 脇 昭

横浜国立大学環境科学研究センター教授

Recent Move on International Tropical Forest Research

2. Ecological trials for regeneration of tropical forests

Akira MIYAWAKI

Professor, Research Center for Environmental Science,
Yokohama National University
Tokiwadai 156, Hodogaya-ku, Yokohama 240, Japan

Regeneration of forests, particularly that for conservation of environment or national lands, must be undertaken by the ecological recipe based on the potential vegetation in individual regions. In the tropical forests such as dipterocarp forests in the South-east Asia, a large number ($68 - 320 / \text{m}^2$) of juvenile seedlings are found on the forest floors for a certain short period under the dense canopy. These seedlings mostly die due to the lack of enough light but could be utilized as regeneration sources in other areas. As it is very difficult to collect seeds at the right time and to preserve them for a long period, utilization of seedlings in the forest is worth to consider.

Planting seeds in a high density ($300 - 3000 / \text{m}^2$) guarantees formation of climax or its approximate forests in a shorter period than on-going, natural regeneration.

日本の国土の90数%はかつて森林で覆われていた。たとえば、関東地方では海拔700 m以下は照葉樹林、1,500 mまではブナ林で構成されていたが、様々な開発により本来の植生を保持している地域は1%以下になっている。

森林の再生は、特に環境保全、国土保全を目的とする場合は、できるだけ潜在自然植生を基礎にした生態学的処方箋を用いる必要がある。それには十分な科学的現地調査に基づいて、地球的規模で決められた植物群落の現存および潜在植生図を作成し、それを基礎にして植栽樹種の選択、表土の復元を行う必要がある。

そして、3年経てば、“管理しないことが最良の管理”ということで放置し、自然の回復力に信頼をおく方法が良い。その土地のポテンシャルな潜在自然植生を基礎にして、初めて農業生産も、林業生産も、あるいは緑の環境づくりも可能になる。

関東地方では、森林は薪炭林として利用され、この何百年もの間15-25年毎に伐採が繰り返されてきたが、クヌギ、コナラ、エゴノキの落葉広葉樹の他にこの土地本来の深根性、直根性の台風にも地震にも強い、また常緑のため防火機能も果たすシダ、カシ、アラカシ、アオキ、ヤツデといった自然植生があった。

現在の緑が失われた地域での森林再生手法としては、これら様々な樹種のポット苗を2-3本/m²、ときには9本/m²で密植し、植栽時から森林環境を形成させる手法をとる必要がある。これまで多くの地域でこのような試みをし、成功してきたので、このノウハウを熱帯林の再生に適用できると考え、実証研究を行ってきた。

熱帯林の再生は非常に難しい。花が咲かない、実がならない。実っても虫に食われて拾えない。拾ってきても芽が出ない。芽が出ても大きくなならない。様々な階段で生育の阻害要因がある。しかし、熱帯林、たとえば東南アジアのフタバガキ科を高木・優先種とする森林では、高木種の下に68-320本/m²の幼苗が生育しており、それらは上木が枯れて光が届くようにならないと死ね運命にあるが、一時期は多数が生存している。したがって、これらの幼苗を利用しない手はな

く、幼苗および落下種子を利用した植栽・施業法の開発を日本で行ってきたのと同様の考え方で試みている。

マレーシアでは一年少々の間に30種、30万本のフタバガキ科を中心にしたポット苗の育苗に成功し、また小さな双葉から五つ葉までの幼苗を植栽すれば、より高い活着率が得られることも解った。マニュアルとしては、まず林地からなるべく多くの種の種子を拾い、ポット内で300-3000種子/m²の高密度で発芽させ、現地に密植するということになる。従来の手法では極相林になるまで300年以上かかるといわれてきたが、この手法によれば、50年ほどで比較的近似の植生を持った森林にする事が可能になるかもしれない。こうした短期間でもとあった天然林になるべく近い森林形態に戻し、地球規模での緑の環境回復に役立てたいと考える。

国際熱帯林研究をめぐる諸問題

3. 熱帯多雨林の種の多様性と動態—西スマトラの事例から—

堀 田 満

鹿児島大学理学部教授

Recent Move on International Tropical Forest Research

3. Species richness and dynamics of the tropical rain forest, an example of West Sumatra

Mitsuru HOTTA

Professor, Department of Biology, Faculty of Science, Kagoshima University

Kourimoto 1-21-35, Kagoshima 890, Japan

In Mt, Gadut area of Padang, Sumatra Nature Study Project established 6 permanent plots for study of tropical rain forest structure and its dynamics, such as the foot hill plots (Gajabuih, Pinang Pinang, Pinang Pinang Bawah, Pinang Pinang Atas), the hill plot (Airsirah), and the mountain plot (G. Gadut). This region characterized by heavy rainfall, annual precipitation reached 6000 – 8000 mm.

Number of tree species of these plots given the richest flora in tropical region; over 300 species in 1 ha Pinang Pinang plot (DBH > 8 cm), and 276 species in narrow 0.33 ha of Pinang Pinang Atas transect (DBH > 5 cm).

This richness caused by:

- (1) Multistratum construction of the foot hill forest resulted vertical complexity of the tree species.
- (2) Species distributions depend by topographical gradients and mosaic environmental factors resulted horizontal complexity of forest structure.
- (3) Gap regeneration process of the forest resulted to complexity mosaic distribution pattern of tree species.

These things will contribute to the richness of species number of the foot hill plots.

These plots have special tree genera. The genus *Eugenia* (Myrtaceae) and *Diospyros* (Ebenaceae) have many species in a narrow area of the plots. Species of these genera closely related and occupied same habitat (under the canopy tree layer). Twenty-five genera belonging to the family Sapotaceae, Fagaceae, Burseraceae, and others characterized by this strange speciation group that represented more than 40% of tree species of the plots.

The tree species that only one tree appears in plots are much too. In Pinang Pinang Atas transect, for example, 112 species, ca. 2 / 5 of 276 species, found only one tree in

the plot.

Studies about speciation of the various tree groups are necessary for understanding of richness in the tropical rain forest.

1. はじめに

湿潤な熱帯地域に成立する熱帯多雨林は、構造の複雑さと種の多様性で特徴づけられている。多くの場合、胸高直径 10 cm 以上の木本植物だけを取り上げてもヘクタールあたり 100–200 種にのぼる樹木が生活している。それより小さな木本植物や、林床の草本植物、樹幹や林冠に生活する着生の植物までも含めるとその種数は膨大なものにのぼるだろうが、その全貌はまだはっきりしていない。種類数の豊富な熱帯多雨林の数ヘクタールの地域内には、多分温帯地域ではもっとも植物相が豊富な地域とされている日本列島の 1 つの府県に分布するほどの植物が生育しているだろう。そのような種数の豊富さに引き換えて、東南アジア熱帯の植物の分類学的な研究は、記載的な段階さえまだ未完成である。なんとか信頼に足る地方植物誌がまとめられているのはマレー半島とジャバぐらいで、他の地域では 100 年ほど前に出された地域植物誌があるか、簡単なチェックリストやあるいはうまく行けば特定の群のモノグラフが出されているだけである。相手の種類が多くて、それを調べる手掛かりになる文献がないものだから、東南アジアの森林調査のときにであう植物の種の同定はなかなか進まない。また東南アジア地域では現地に根を下ろした植物分類学の研究者も絶対的に足りない。日本でも植物分類学自体が絶滅するのではないかと危惧されている学問分野になってしまっているから、温帯圏からやってきた研究者の問題とする植物を都合よく同定できる現地研究者がいないことを嘆くわけにはいかない。

さらに熱帯での森林調査で樹木の同定を困難にしているのは、生態調査で採集される植物標本の大部分が同定や分類のための資料標本としては不完全な標本であることである。日本の生物学の教育では、野外調査では基本的な調査技術である標本の作り方はほとんど教えられないことがない。標本が生殖器官を付けた完全標本であれば、時間はかかるが研究を進めれば確実にどの植物群に所属するものであるかは分かるし、未記載のものであれば新属なり新種として記載報告できる。しかし苦労して採集された標本であっても不完全

標本であれば、それを分類学的な研究の対象として取り上げるほど分類研究者は暇ではないし、そのような資料を完全に保管できるほどの人手も標本室の空間もない。また不完全な標本を基礎にしてでは研究の進みようがないのである。

そういうわけで熱帯地域での森林調査を、正確に種の同定にもとづいて進めるのには大変な時間と努力を必要とするし、ちょっとした短期間の現地調査で何らかの結果を出そうとするならば、種の同定という馬鹿なことをしてはいけないことは「賢い研究者」は良く知っている。

この報告はスマトラでの約 10 年間の継続調査の結果にもとづいて、熱帯の多様性のきわめて高い森林の実体と分類群を基本にした動態について概括してみたい。私は分類、それもサトイモ科やバショウ科などの草本性の植物群を研究材料としてきたから、スマトラの熱帯林で木本植物の分類的な問題と取り組むのはいささかお門違いではあるのだが、他に研究者がいなかったばかりに森林調査の一部を受け持つはめになった。難しい同定業も少しはやったおかげで、10 年かかってやっと何種類ぐらいの樹木があるかがいえるようになってきた。その結果をもとにして森林の動態について触れてみたい。この調査は川村俊蔵博士（現京都大学名誉教授）を日本側の、Amsir Bakar 博士（アングラス大学理学部）をインドネシア側のチームリーダーとして組織されたスマトラ自然研究計画の中の植物・森林班（私と現愛媛大学教授荻野和彦博士が代表）が 1980 年から 89 年にかけて行なったものである。

2. 調査地域の地理的特徴と設定された調査区

スマトラ島はその西側を南から北までバリサン山脈が走っている。その赤道直下の南緯 2 度、バリサン山脈の西側の狭い海岸平野に西スマトラ州の州都パダン市がある。このパダン市の東部、バリサン山脈から張り出した山塊の一つがガド山 G. Gadut 1860 m で、そこに深くえぐれこんだ谷がウルガドの谷である。この谷はインド洋側に大きく口を開き、谷の奥は 1000 m

表1 設定されたプロットと樹木種数

Plot	面積(ha)	標高(m)	設定	種数(8cm以上)	種数(5cm以上)
PIN (Pinang ²)	1.0041	490–520	Aug. 1981	304	–
PBA (Pinang ² Bawah)	0.0880	470	Sept. 1984	39	61
PAT (Pinang ² Atas)	0.338	460–550	Aug. 1984	173	274
GAJ (Gajabuih)	0.9054	500–595	Dec. 1980	248	–
AIR (Airsirah)	0.0961	1130	Sept. 1980	69	92
GAD (G. Gadut)	0.1	1550	Jan. 1983	60	78

近くのきり立った崖になっている。そのためかインド洋からの湿った風をまともに受けとめて雨が非常に多い場所になる。海岸に位置するパダン市でも年間降水量は4800 mm 近いのであるが、ウルガドの谷の入口近くのバリサン山脈の山麓に位置するインダルン Indarung では約 6000 mm に達している。我々がプロットを設定した場所の雨量は、観測値はないが、パダンとインダルンの降水量からすると 7000–8000 mm に達していると推定される。しかもこの地域は赤道直下に位置するため年に2回の乾・雨季が繰り返され、パダンの乾季の月平均降水量は、驚くべきことに同じ熱帯圏のジャカルタやメダンの雨季の月平均降水量に匹敵するか、あるいはそれよりも多い。この雨量からは、この地域では地形的に乾燥するような場所を除いては植物の生長に対する水分ストレスは、ほとんどないと考えられる。わずかの期間のデータしかないが、設定されたプロットで測定された土壌水分含有率はほとんど飽和状態で、数箇月で水分測定のために設定された機器が崩壊し、測定不能になってしまった。このような多雨地帯、地球上では年雨量ではもっと多い場所はあるが、年間を通じてずっと湿潤な地帯は他にはないであろう。

この多雨地域に、私達は結局6つの森林調査のプロットを設定した(表1)。それぞれのプロットの基本データは表に示されているが、特徴を簡単に述べると：

Pinang Pinang (PIN) と Gajabuih (GAJ) プロットはどちらも約1ヘクタールの面積があり、我々の調査の基本プロットで、山麓フタバガキ混交林と呼びたいものであるが、後でも述べるようにフタバガキ科の樹木はそれほど多くなく、ブナ科の樹木が優占する奇妙な林で、巨大高木にはウルシ科の *Swintonia schwenkii* が多い。また PIN プロットの近くには1979–80年に伐採され、その後は火入れされずに放置された所に成立した二次林にがあり、そこに設定され

た Pinang Pinang Bawah (PBW) プロットと谷から尾根そして反対側の谷までの巾10 m、長さ370 m の Pinang Pinang Atas Transect (PAT) が設定されている。このトランセクトプロットは、地形に対応した森林構成樹種や森林構造、あるいは生長の違いを調査するために設定された。さらにこれら低山地のプロットのほかに、Airsirah 峠の近くの標高1100 m 地点に Airsirah プロット (AIR) が、またガド山の標高1650 m の地点には G. Gadot プロット (GAD) が高地プロットとして設定された(図1)。これら高地プロットは標高の違いによる森林構成樹種の違いや森林動態の違いを解析・比較するために設けられたものである。

それぞれのプロットは異なった時期に設定されたが、設定以後綿密な樹木標本の採集と胸高直径の測定が繰り返されてきた。しかし測定は日本の国内的な事情、特に研究費の関係から、一定の期間ごとには実施することができなかった。それでも長いものではほぼ10年の長さにわたる胸高直径の測定データを得ることができた。調査期間中に開花したり結実した樹木はそれほど多くはない。そのためこれら森林を構成する樹種の同定は難渋した。標本はボゴール標本館の所蔵標本と比較検討されたが、分類学的な検討を進めるためには標本館の標本そのものの分類・整理から始めなければならなかったものも多かった。

G. GADUT AREA

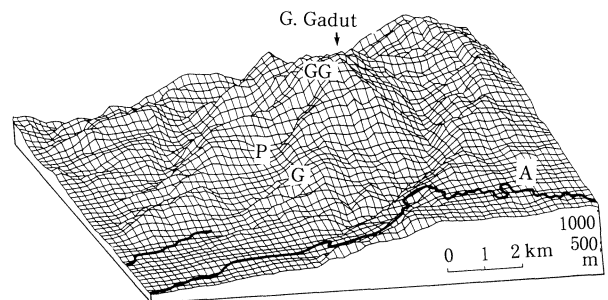


図1 ガド山域 岡田博士の原図(1984)による。
各プロットの位置: A, Airsirah; G, Gajabuih;
P, Pinang Pinang; GG, G. Gadut

3. 記録された種類

10年間の調査で、各プロットを構成している樹種数がほぼ判明した。まだ所属の科さえはっきりしない未同定のものが約10%あるが、それでも種類数がどれほどかはほぼ明らかになってきた。それぞれのプロットごとの木本植物の種類数を表2に示しておく。面積1ヘクタールのPINプロットでは胸高直径8cm以上の木本植物が300種を越え、GAJプロットではやや少ないといっても248種が記録された。またPATでは、面積は0.37ヘクタールに過ぎないのに胸高直径5cm以上では274種、8cm以上をとってみても173種にのぼる。これら3プロットの約10×10mのサブプロットを単位として種類面積曲線をグラフにしてみると(図2)、我々が設定したプロット面積のサイズでは種類の増加はまだとまらないように見える。またこの曲線の途中で数サブプロットの区間では種類の増加が見られない部分が出現する。それはこれほどの広がりでは種類組成で均質な森林が存在していることの反映とも受け取れる。

それにしてもPATでの増加のカーブの立ち上がり方は著しい。これは胸高直径5cm以上のものを拾ったために加入した種類数が多くなったことと、谷から

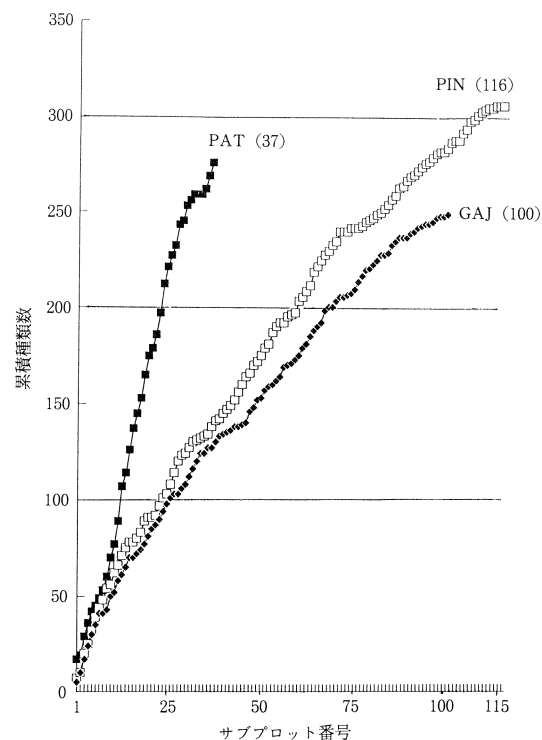


図2 ガド山域の3プロットの各サブプロットを単位とした種類面積曲線

PATは胸高直径5cm以上。PINとGAJは胸高直径8cm以上の種数。サブプロットは約10×10mである。()内はサブプロット数。

表2 ガド山域のプロット内に5種以上の種が記録された属

	種数	PBA	PIN	PAT	GAJ	AIR	GAD
<i>Eugenia</i> (MYRT)	22(2)	0	15	9	11	3	3
<i>Ficus</i> (MORA)	18	7	9	8	6	1	1
<i>Litsea</i> (LAUR)	16(2)	1	7	6	11	3	4
<i>Lithocarpus</i> (FAGA)	12(2)	2	11	3	6	2	2
<i>Elaeocarpus</i> (ELAE)	12(3)	1	0	8	1	1	6
<i>Palagium</i> (SAPO)	11(1)	4	6	4	5	2	0
<i>Aglaia</i> (MELI)	11(1)	0	6	6	4	2	0
<i>Mallotus</i> (EUPH)	10	2	3	5	5	1	0
<i>Diospyros</i> (EBEN)	9	1	4	6	4	0	0
<i>Canarium</i> (BRUS)	9	0	5	5	6	2	1
<i>Aporosa</i> (EUPH)	8(1)	0	8	2	3	1	0
<i>Sterculia</i> (STER)	8	1	8	4	4	0	0
<i>Dysoxylum</i> (MELA)	7(1)	2	4	6	3	0	0
<i>Xanthophyllum</i> (POLY)	7	0	4	5	1	1	1
<i>Shorea</i> (DIPT)	7	0	3	4	4	0	0
<i>Memecylon</i> (MELA)	7	0	4	3	3	0	2
<i>Macaranga</i> (EUPH)	7	5	4	5	5	1	1
<i>Quercus</i> (FAGA)	6	0	5	4	4	1	0
<i>Cryptocarya</i> (LAUR)	6	0	3	1	3	1	0
<i>Phoebe</i> (LAUR)	5(1)	0	2	5	1	1	0
<i>Castanopsis</i> (FAGA)	5(1)	0	3	1	4	1	0
<i>Knema</i> (MYRI)	5(2)	0	4	4	3	2	0
<i>Nephelium</i> (SAPI)	5	3	5	4	3	0	0
<i>Ilex</i> (AQUI)	5	1	1	0	1	1	2
<i>Cinnamomum</i> (LAUR)	5	0	2	4	2	2	1
合計	223	30	126	112	103	29	24

()内の数字は同定が不確実な種数。

尾根までの異なった地形環境や一部に二次林を含むためにそのような林に出現する種類が加わったことが原因になっているだろう。ウルガドの森林の木本植物のこの高い多様性は約1ヘクタールの広さに日本列島全域に分布する高木性の樹木の種類と同じほどの種類が詰まっていることを示している数値である。また、熱帯域の森林で記録される種類数としても、多分特別に豊富な種類数であろう。

AIR と GAD の2つの高地の森林は、どちらも0.1ヘクタールの小さなプロットであるが、前者では92種(5cm以上)が、またGADでは78種(5cm以上)が出現している。二次林をとってみても0.1ヘクタールのPBAプロットでは5cm以上が61種、8cm以上に限っても39種が記録された。比較的単純な樹種構成を有しているとされる高地や二次林の林さえも、ガド山域ではこのような高い種数を維持しているのである。

このような多数にのぼる樹木はどの分類群に属しているのだろうか。第2表にはガド山域の6つのプロット全体から、記録された種数が5種以上ある属をまとめてある。特に多くの種を産しているのはフトモモ属 *Eugenia* で20種をこえる。この属はPINプロットからは15種も記録されたが、高地プロットにも出現している。クワ科のイヌビワ類 *Ficus* は18種、クスノキ科のハマビワ属 *Litsea* は16種、他に10種をこえるものにマテバシイ属 *Lithocarpus*、ホルトノキ属 *Elaeocarpus*、オオバアカテツ属 *Palaquium*、モラン属 *Aglaia*、それにアカメガシワ属 *Mallotus* の諸属がある。これら5種以上出現する属の総種数は223種になり、標高500mから600mに設定された低地プロットでは、それぞれのプロットに分布する種数の40%以上を占める。すなわち熱帯低地域で非常に種分化をした少数の植物群が、その地域に分布する樹木種数の約半分を代表していることがわかる。高地ではこの率は30%前後になるが、それは低地には分布しない樹種群(たとえばクルミ科、マンサク科等)が出現すること、また熱帯低地で分化している植物群の多くは標高1000m以上には、特別な代表者しか生育していないことによる。

また、科レベルでまとめてみると、バンレイシ科(30種)、トウダイグサ科(54種)、ブナ科(28種)、クスノキ科(71種)、センダン科(31種)、フトモモ科(26種)、アカテツ科(23種)などが多くの種が分布しているものである。これらの多くは熱帯域を分布中心

とするものであるが、温帯系の植物群とされるブナ科が低地のPINプロットでは19種、GAJプロットで14種、PATトランセクトにも8種が記録された。面積が異なるため単純には比較できないAIRやGADの高地プロットの種数をはるかに上まわっていることが注目される。

逆に西マレーシア熱帯多雨林を代表する樹木群であるフタバガキ科は、17種が記録されたが、それは西マレーシア地域の樹種が豊富な熱帯の混交林としては異常ともいえる少ない種数である。またフタバガキ科樹木はガド山域では種数が少ないだけでなく、単位面積あたりの胸高断面積で比較しても、各プロットともブナ科よりも小さい値をとる。

このように、我々がプロットを設定したガド山域の低地の森林は、西マレーシア熱帯の現在までの報告された森林とは、構成樹種相が異なりブナ科が多く、フタバガキ科が少なく、トウダイグサ科やクスノキ科、それにバンレイシ科などの種類数の多い特異な林であることがはっきりした。

そして、これほど多数の樹木種が、森林の中でどのような構造を作っているのかがまず問題になる。

4. 樹種群と森林の構造

ガド山域の多数にのぼる木本植物が、森林のどの階層を占めて生活しているかについては、甲山(京大、生態研)と鈴木(鹿大、教養)の両博士によってPINプロットの胸高直径を測定してきた全ての樹木の樹高が測定されたことで、状況が明らかになってきた。ある分類群に所属する樹木の樹高は、その地域に生育する背の低い幼木から相対的に高い成木までのすべてを含むから、低いものから高いものまでの連続的な値をとる。そのため、すべての樹種をこみにして、樹高—直径の散布図を描くと、測定された値はある巾をもった線上に集中し、直径と樹高の関係は一定の数式であらわすことができる。ところが、分類群(科なり属、場合によっては種)ごとに、樹高を総覧してみると(図3)、それぞれの分類群ごとに最高樹高とでもいえるものが存在する。ウルシ科の *Swintonia schwenkii* の開花結実する成熟木は樹高50~60mに達するが、ブナ科のマテバシイ属 *Lithocarpus*、アカガシ類 *Quercus*、クリガシ属 *Castanopsis* はいずれも成熟木は30mを越えることが多いが、40m以上のものは少数であるし、45m以上のものはなかった。ランブータ

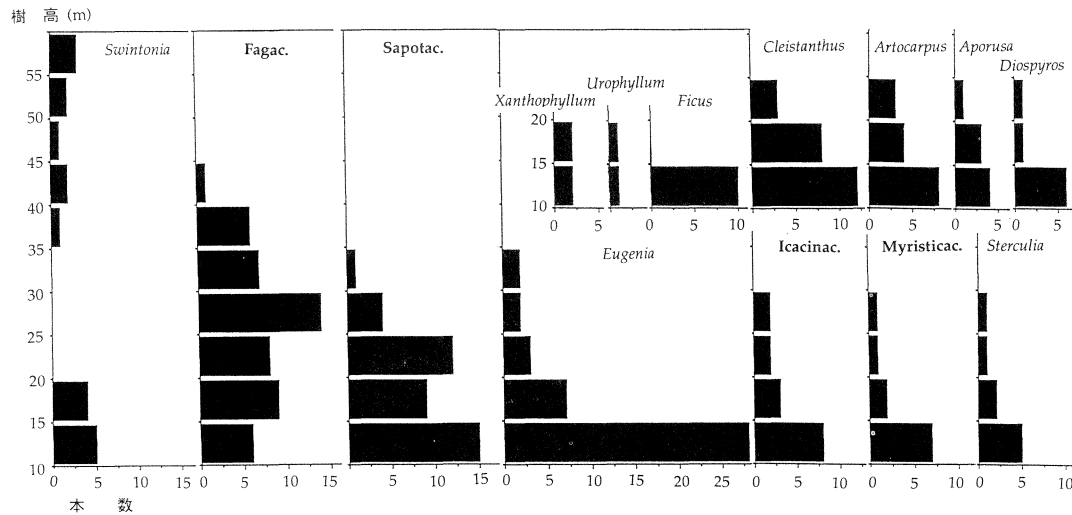


図3 各樹木群の樹高の分布のヒストグラム 甲山・鈴木(1989年調査)の未発表データにより堀田作図。

ンの仲間 *Nephelium* や多くの種が記録されたセンダン科 Meliaceae も、このブナ科の樹木と同様に、40 m クラスにまでにはなり、林冠の第一層をつくるが、それを突き抜けて超出木になることのないものである。

ガド山域で、1つの属としてはもっとも多くの種が記録されたフトモモ属 *Eugenia* は、ほとんどの種が20 m どりまりで、ごく少数の種のみが30 m に達するが、40 m に達し、林冠の第一層を形成する種はなかった。アカテツ科 Sapotaceae も多くの属と種が記録されたものであるが、その樹高分布はフトモモ属とほぼ同じである。

その次に樹高25 m から30 m クラスのクロタキカズラ科 Icacinaceae、ニクズク科 Myristicaceae、などが位置するが、これらは樹高30 m 以上になることはない。

さらに、その下層に位置し、樹高20 m クラスで成熟する樹木群にカキノキ属 *Diospyros*、「沈香」の仲間(ジンチョウゲ科)の *Gonystylus forbesii*、それにトウダイグサ科の *Cleistanthus* spp.がある。これらは樹高20 m 以上に達するが、林冠木にはならないものである。この群にはキワタ科のドリアン属 *Durio*、クワ科のパンノキ属 *Artocarpus* (河岸林には樹高45 m 以上にまでなる種がある)、トウダイグサ科の *Aporosa*、アカメガシワ属 *Mallotus*、サガリバナ科のサガリバナ属 *Barringtonia* などがあげられよう。

また、樹高が20 m に達しない小高木群もある。アカネ科の *Urophyllum*、ヒメハギ科の *Xanthophyllum*、クワ科のイヌビワ類 *Ficus* (着生—しめ殺し型の種は除く)、ノボタン科の *Pternandra* や *Memecylon*

などである。

これらはいずれも胸高直径10 cm 以上になる木本性のものであるが、その他に直径10 cm にまで至らず、樹高もせいぜい3~10 m にしかならないアカネ科のルリミノキ *Lasianthus* やボチョウジ属 *Psychotria* などの木本植物も林床には多い。

超出木や林冠の第1層に優占する樹木群(*Swintonia schwenkii*, *Lithocarpus* spp., *Quercus* spp., *Castanopsis* spp., *Barringtonia* spp., *Nephelium* spp., *Calophyllum soulattri*, フタバガキ科, カンラン科など)の散布体はいずれも比較的大型で重い果実で、そのほとんどは1個の種子を入れている。そしてこの果実はフタバガキ科や *Swintonia schwenkii* のように散布(ソフトランディング?)のための翼が発達している場合もあるが、それでも遠距離の散布はしていないことがはっきりしている。ランブータン *Nephelium* やテリハボク類のように果肉が動物の餌となり散布されるものでは、散布距離は少し大きくなるようである。ドングリ(ブナ科)やサガリバナ類の大きくて重い果実は、見ているかぎり親木のそばにしか落ちていない。これらの林冠木や超出木になる樹木では樹高のサイズクラスの分布を見ると、かならずしも小さなものが多くて、大きなものが少ないという一般的な(正常な)分布にはなっていないことが多い(図3参照)。*Swintonia schwenkii* では樹高20 m 以下の幼木かそれとも30 m 以上の亜成木や成木しか見られなかった。逆にブナ科では亜成木の25-30 m クラスの樹高の木がもっとも多くてそれよりも大きいものも小さいものも個体数が少なくなっていた。テリハボク属

の *Calophyllum soulattri* も成木と直径 8 cm 以下の幼木のみから集団が構成されていた。また幼木の個体数が相対的に多い野生ランブータンやカンラン科でも幼木の数は必ずしも多くはない。超出木や林冠木の樹高の分布に見られるこのような片寄りは種子（果実）散布とその後の定着、林冠木あるいは超出木への生長過程における、これら樹木群の特異性の反映と考えられるが、その実体についてはよくは分らない。

非常に多数の種からなるガド山域の森林は、それを構成している樹種の繁殖に達した樹高に注目すると、森林のそれぞれの階層を占める樹種群が存在しているといえそうである。このことは、それぞれの階層における光条件の違いに、それぞれの階層を構成している樹種群が何らかの生理的・形態的な適応をしていることによるものであろうし、それはまた樹木種や樹木系統群の特性として解析されるべきものであろう。熱帯の樹高が高く林冠が凸凹した構造の森林は、林冠から林内、林床にいたる空間に多様な光環境を産み出し、それらの光環境に適応した多様な樹木群を産み出してきたのであろう。

さらに、林冠木や超出木の枯死、風倒によって形成されるギャップは森林の光環境を突然に変化させる。オオバギ類 *Macaranga* spp. , アカメガシワ類 *Malotus* spp. , イヌビワ類 *Ficus* spp. の種など、ギャップに特徴的に出現する樹木種や野生バナナに代表されるギャップに出現する草本植物は多く知られているが、そのことがまた森林の複雑な樹種構成をもたらしている。面白いことに典型的なギャップ種とされるオオバギ類はガド山域ではギャップではない、成熟した自然林にも多少とも見られる。それらの約 65% は樹高 20 m 以下の未成木であるが、ギャップ形成まで待機しているように見受けられる。しかし、日本南部にまで分布するオオバギ *M. tanalius* は自然林内には見られず、またそのようなところに形成されたギャップにも出現しないが、大規模な人為的破壊が起こると侵入してくる。同じような現象はショウジョウハグマ属の木本になる種 *Vernonia arborea* でも認められる。この種は森林が人為的に破壊された後には広く出現するが、自然林内に形成されたギャップには稀にしか見られない。

5. 地形と種の分布

階層的な森林構造の形成は、光環境に対する様々な

適応形態を産み出し、そのことによって多様な種を森林の構成体として維持してきたように見えるが、もう一つの熱帯多雨林の多様性の維持システムとして、地形や土壌条件、特に水分条件が複雑な生育環境を作りだしていることを見逃すわけには行かない。

PAT トランセクトは全長 370 m、巾が 10 m の尾根から両側に谷底までのプロットであるが、ここで各種の植物の分布が地形とどのように関連しているかを調査した。草本植物では、サトイモ科の *Schismatoglottis* 属の 4 種の分布が代表的であるが、きれいな地形と対応した分布が認められた。この場合、山腹上部から尾根には *S. lancifolia* が、中部から谷までは *S. batoensis* と *S. rupestris* が住み分け的に分布し、*S. calyptrata* は川近くにだけ出現した。また 10 × 10 m のサブプロットを単位にして分布を見ると *S. batoensis* と *S. rupestris* は同じサブプロットに出現するが、細かく分布を調査すると群落としては混生することがなかった。また、例外的に尾根に 1 箇所だけ *S. batoensis* が分布しているが、これはよく調べてみると、この標高は丁度しよっちゅう雲がかかる高さで、尾根に 1 本ある *Aglaia* sp. の大木に雲粒がキャッチされ樹幹流となって流れ落ち、その近くだけは他は乾いていても湿潤な状態になっている場所であった。

サトイモ科植物だけではなく、イラクサ科のウワバミソウの仲間やイワタバコ科の多くの林床性草本植物も山腹中部から谷にかけての適湿な場所に分布していたが、ヤクシマラン属の *Apostasia nuda* の分布は山腹上部から尾根にかけてであった。これらの草本性の植物はいずれも林床性で、林床の光条件にはそれほどの違いはないから、その住み分け的な分布の原因は地形に対応した土壌水分量とその変動のパターンが原因しているように見えた。

林床性の草本植物では地形に対応した分布が多く種の明らかに認められたが、木本性の植物ではどうだろうか。トウダイグサ科の *Cleistanthus sumatranus* は川岸林に生活する種であるが *C. glandulosus* は明らかに山腹中部以上を分布域としている。両種とも二次林性の種ではない。またイヌビワ類には数種が記録されたが、そのうち *Ficus fistulosa* と *Ficus* sp. (*F. geocarpa* 群の種) は中腹から尾根に分布するが、これらは二次林性のギャップ種であるようだ。カキノキ属 *Diospyros*, マテバシイ属やアカガシ類、それにフタバガキ科の種は山腹中部以上に分布がほぼ限られるが、これは伐採の影響であろう。面白いことにしばしば代

表的な二次林の種とされるオオバギ属 *Macaranga* は、5種記録されたが、その分布は必ずしも二次林に分布が限られているとはいえない。すでに触れたことであるが、オオバギ属の多くの種は自然林のなかの小規模なギャップをさまよう樹種ではないかと、このデータからは推定せざるを得ない。

PAT トランセクトでは二次林と成熟した自然林の分布が、また山腹下部から谷と山腹上部から尾根という地形的な違いと対応していたために、木本性の種では地形のみによる分布の違いを抽出することができなかった。それは高木性の樹木では幼木から成木にいたる過程での生存を決めるもっとも重要な要因が光条件であることによるのかも知れない。それとともにまた、ここにはあげなかったが谷近くの湿潤な場所に特徴的に見いだされる樹種もいくつかある。それらは近

縁種が谷と尾根に住み分けるのではなく、もっぱら谷近くの湿潤な場所に出現する種である。

高度がほとんど同じで、尾根に設定されたという地形的にも似ている PIN と GAJ の2つのプロットは種類数の多少はあるが、樹木相もよく似ている。しかし、よく調べてみると興味ある違いを見いだすることができる。例えば GAJ には普通に見られたニレ科の *Gironiera subaequalis* や *Piper aduncum* は、PIN プロットには見られない。そしてこれらの樹種は、GAJ ではつき上がってくる小さな谷の、プロットのなかではもっとも湿潤である場所に多く分布している。このような地形環境は PIN には見られない。ミズキ科の *Mastixia trichotoma* は逆に PIN に多く見られるが、その分布はこのプロットの1/3ほどに分布する石灰岩起源の土壌の地域を中心に行っているようである。

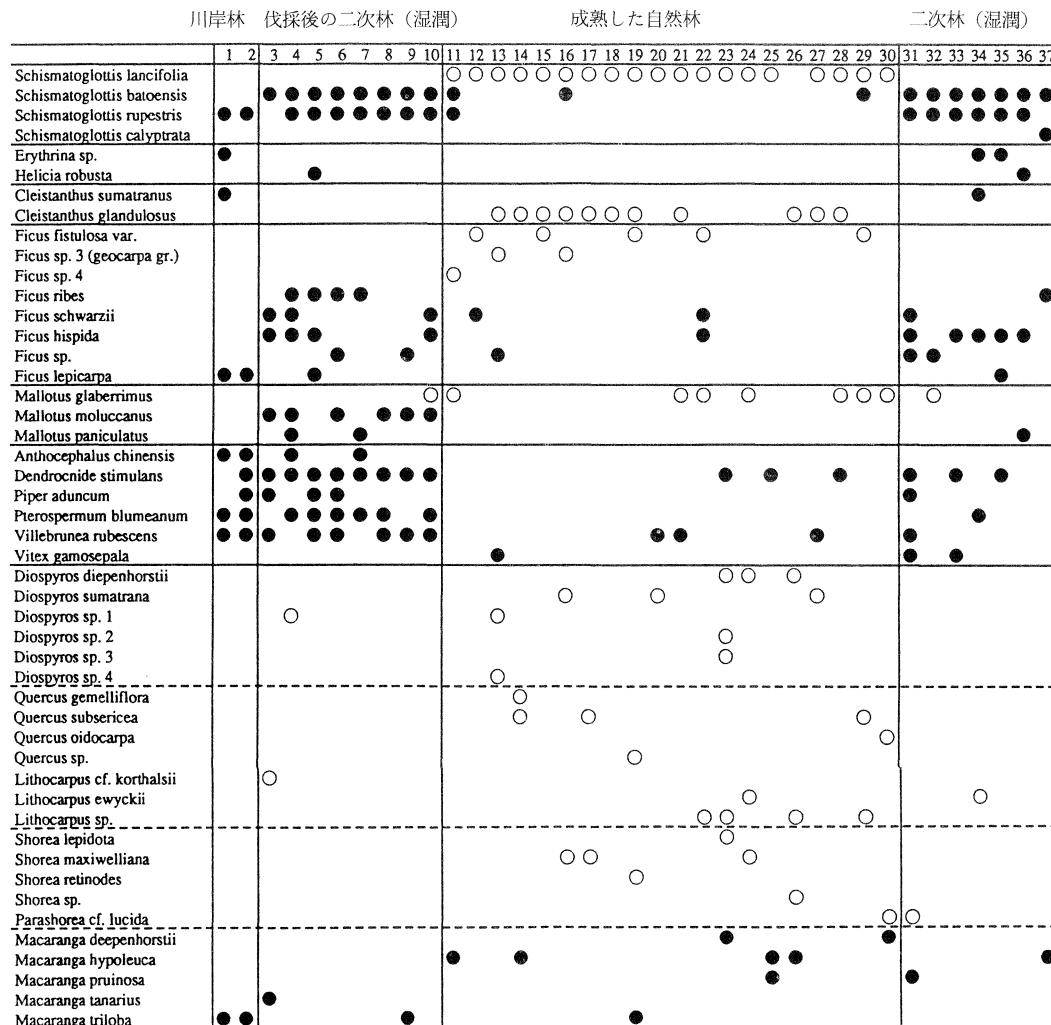


図4 Pinang Pinang Atas Transect での林床植物及び各樹種のサブプロット単位の分布
 草本(*Schismatoglottis*属)では白丸は山腹から尾根に、黒丸はより湿潤な山腹下部から谷に出現する種。
 木本では白丸は自然林あるいはやや乾燥した場所に、黒丸はより二次林や湿潤な場所に出現する種。
 尾根はサブプロット16の所にある。伐採後の二次林の地域は1970年代の後半にほぼ完全に伐採された。

熱帯での植物の分布と土壌や土壌含水量の関係については、ケランガス林や泥炭湿地林といった特殊な場合については、ある程度のデータが集積されているが、ごく普通の森林のなかでの微妙な違いについてはまだ不明な点が多い。モザイク状のそれら環境の違いが、熱帯多雨林の樹木種の多様性に寄与しているだろうことは推定できるが、さらに新しいデータが必要である。

6. 新規加入と死亡

— 分類群の特徴はあるのか

ヘクタールあたり 300 種を越えるほどの種の多様性に満ちたガド山域の森林の中で、それぞれの樹木はどのような動きをしているのだろうか。熱帯の湿潤地域にある森は、空間的な立体構造（階層構造）とモザイ

ク的な環境構造という二重の多様性をもっているから、そこに多数の種が詰まることが出きるのではないかと考えてはいるのであるが、それではどのようにしてそれぞれの種は個体群を維持しているのか、いいかえれば生長と死亡はどうなっているのかについて最後に少し論議を試みてみよう。

表 3 に、PIN, PAT, それに GAJ の 3 プロットにおけるプロット設定時の分類群別の本数（種や属が単位）と、調査期間中の加入（胸高直径 8 cm に達した本数）と死亡の本数、加入率、死亡率、それに加入から死亡本数を減じた増加した本数、増加率をまとめてみた。これはそれぞれの分類群で調査本数が 20 本以上の群だけであり、実際は 20 本以下の分類群のほうが多いのであるが、そのようなものでは偶然的な変動が大きくなる。

この表からは、分類群ごとの加入率や死亡率は大き

表 3 調査期間中の分類群ごとの新規加入、死亡および増加（本数）
PIN, PAT, GAJ の 3 プロット；調査本数 20 本以上の種または属のみ。

属/種	科	本数	加入数	加入率	死亡数	死亡率	増加数	増加率
<i>Castanopsis</i> spp.	FAGA	21	5	23.8	0	0	5	23.8
<i>Durio</i> spp.	BOMB	24	2	8.3	3	12.5	-1	-4.2
<i>Knema</i> spp.	MIRI	25	3	12.0	3	12.0	0	0.0
<i>Hopea</i> spp.	DIPT	25	2	8.0	2	8.0	0	0.0
<i>Quercus</i> spp.	FAGA	26	6	23.1	3	11.5	3	11.5
<i>Urophyllum macrophyllum</i>	RUBI	26	4	15.4	7	26.9	-3	-11.5
<i>Gonystylus</i> spp.	THYM	28	2	7.1	1	3.6	1	3.6
<i>Aporosa</i> spp.	EUPH	29	15	51.7	0	0	15	51.7
<i>Mastixia trichotoma</i>	CORN	29	3	10.3	1	3.4	2	6.9
<i>Pithecellobium</i> spp.	LEGU	29	6	20.7	10	34.5	-4	-13.8
<i>Aglaia</i> spp.	MELI	32	6	18.8	2	6.3	4	12.5
<i>Canarium</i> spp.	BURS	34	4	11.8	2	5.9	2	5.9
<i>Grewia florida</i>	TILL	36	10	27.8	2	5.6	8	22.2
<i>Dysoxylum</i> spp.	MELI	37	3	8.1	3	8.1	0	0.0
<i>Diospyros</i> spp.	EBEN	38	9	23.7	1	2.6	8	21.1
<i>Sterculia</i> spp.	STEDR	38	9	23.7	2	5.3	7	18.4
<i>Swintonia schwenkii</i>	ANAC	43	12	27.9	3	7.0	9	20.9
<i>Styrax</i> spp.	STYR	45	12	26.7	6	13.3	6	13.3
<i>Dendrocnide stimulans</i>	URTI	50	10	20.0	11	22.0	-1	-2.0
<i>Shorea</i> spp.	DIPT	56	20	35.7	2	3.6	18	32.1
<i>Palaquium cf. hexandrum</i>	SAPO	58	8	13.8	4	6.9	4	6.9
<i>Lithocarpus</i> spp.	FAGA	58	7	12.1	15	25.9	-8	-13.8
<i>Nephelium</i> spp.	SAPI	60	13	21.7	1	1.7	12	20.0
<i>Litsea</i> spp.	LAUR	64	20	31.3	5	7.8	15	23.4
<i>Cleistanthus</i> spp.	EUPH	69	12	17.4	2	2.9	10	14.5
<i>Mallotus</i> spp.	EUPH	69	12	17.4	13	18.8	-1	-1.4
<i>Villebrunea rubescens</i>	URTI	75	18	24.0	8	10.7	10	13.3
<i>Macaranga</i> spp.	EUPH	84	21	25.0	13	15.5	8	9.5
<i>Ficus</i> spp.	MORA	112	27	24.1	24	21.4	3	2.7
<i>Eugenia</i> spp.	MYRT	129	19	14.7	14	10.9	5	3.9

く異なっていることが読み取れる。トウダイグサ科の *Aporusa* 属は新規加入率は 50% を越え、調査期間中には 1 本の枯死木もなかったもので、加入＝増加になっている。この属は林床の小高木層を形成する、耐陰性の強い種からなる。また 30% 以上の加入率を示したフトバガキ科の *Shorea* 属とクスノキ科のハマビワ属 *Litsea* は、どちらも成木になっても林冠木に達しない樹種が大部分を占める。耐陰性の強い群であった。

他方死亡も大きなばらつきがあり、マメ科の *Pithecellobium* 属（大部分は *P. microcarpa*）のように 35% 近いものから、前述の *Aporusa* 属やブナ科のクリガシ属のように調査期間中には死亡が起こらなかったものまである。

加入本数から死亡本数を差し引いた増加本数は、プロットが比較的よい林分を選んで設定されているためか、多くのものではプラスの数値になっている。なかには *Pithecellobium* 属のように加入率も平均よりも高いが、死亡率も高く、結局は本数では減少しているものがある。このような加入率も高いが死亡率も高いものにはアカネ科の *Urophyllum macrophyllum*, エゴノキ科のエゴノキ属 *Styrax* spp., イラクサ科のナンヨウイラノキ属の *Dendrocnide stimulans* や *Villebrunea rubescens*, トウダイグサ科のアカメガシワ属 *Mallotus* やオオバギ属 *Macaranga*, それにイヌビワ類 *Ficus* spp. があげられる。これらはいずれも林冠木にまでは樹高がならない、二次林性の樹種か、湿潤な場所を好み生長が速い樹種である。例外はマテバシイ属とアカガシ類で加入率は前者は 12% で死亡率が約 26% に、また後者は加入が 23%, 死亡が 11.5% に達している。これは GAJ プロットで林冠崩壊的な死亡が起こり、その中心がマテバシイ属とアカガシ類であったためで、いつもはこのような高い死亡率を示しているとは考えられない。またこの GAJ プロットでの広いギャップの形成は、そのきっかけがプロット下部の谷にあった 1 本の最大樹高をはこったウルシ科の *Swintonia schwenkii* の枯死によって、林内に風が吹き込むようになったことが原因になっていると推定される。

ブナ科に見られるような例外的な事例を除くと、多く新規加入をしているが死亡もまた多い型の変動を示すものは生長が早い二次林性の樹種によって代表され、逆に低い加入率や死亡率は森林の下層部分を構成する樹木群によって代表されるらしい。

図 5 は調査本数と増加率の関係を散布図にしたもの

であるが、一見して高い死亡率や高い加入率とよんでいたものが、増加率にまとめてみると、調査本数が多くなると加入と死亡が釣り合っている状態に収斂していく様子がよく分かる。この図には調査本数 5 本以上の分類群が示されているが、調査本数が 20 本以下になると増加率のばらつきは急に大きくなることが明らかである。このことは、ある期間だけに限定された地域空間での加入や死亡の動態調査の結果は、それぞれの分類群のサイズによってその変動が強く影響され、短い期間や小さいサイズであれば、群ごとに異なった値を取り、加入や死亡が分類群の特徴のように見えることがあることを示している。しかし多分、広い地域と長い期間をかけた十分なサイズの集団を調査対象にするならば、加入と死亡は釣り合った状態になるだろうことを示唆するものである。

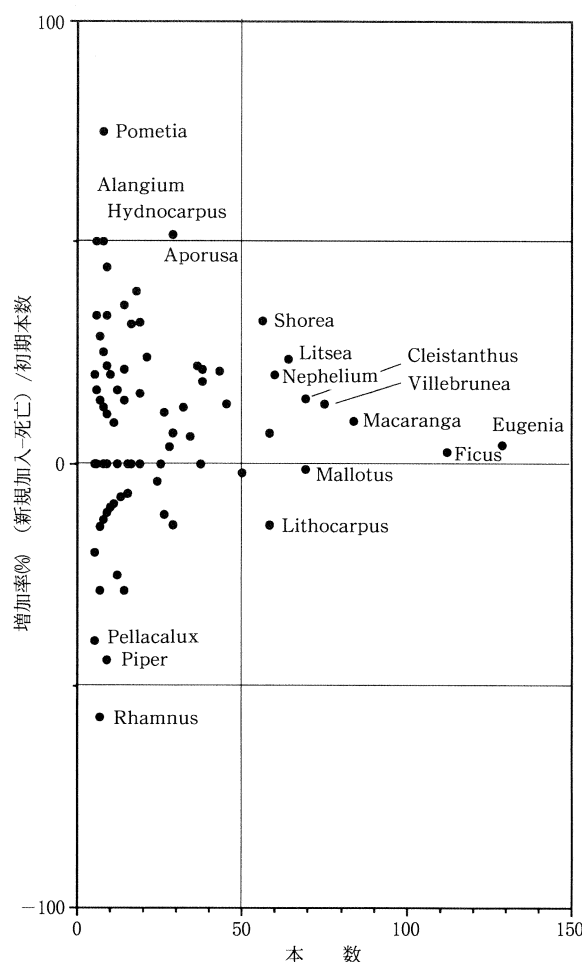


図 5 樹種群ごとの増加率と調査個体数との相関
縦軸は新規加入本数から死亡本数を差し引き、それと初期本数との割合を%にしたもの、横軸は調査本数。

7. まとめ

ガド山域の森林は、どの標高のプロットをとっても全胸高断面積の15–20%をブナ科樹木が占める、西マレーシア地域（スマトラ・ボルネオ）の熱帯多雨林としては特異な樹木構成をした林になっていた。通常は標高1000 m以上の地域に見られる山地カシ林になると西マレーシアではブナ科が優占する林に移行するが、ガド山域ではこの山地カシ林的な樹木相が、標高500–600 mの所まで降りている。それはまたこの高度までシキミ属の1種 *Illicium* sp. やハウチャクソウ属 *Disporum* sp. が生育している分布現象としても見られる。それとともに、ガド山域の低標高のプロットにはバンレイシ科、クスノキ科、ニクズク科、アカテツ科、フトモモ科などに代表される、熱帯低地で多くの種を分化させた樹木群が多数の種を分布させている。この原因は、雨量が多いため、植物の生活において水ストレスがないだけでなく、降雨による冷却効果、雲のための日照の不足など気温低下の効果がはたらき分布の降下現象をもたらしているのであろう。その結果として低地熱帯系の植物群と山地カシ林系（暖温帯的）の植物群が混在する、地球上の熱帯地域ではもっとも種数の多い森林がこの地域で成立してきたのであろう。

ガド山域の森林の特徴としてもう一つあげるとすれば、それはフタバガキ科樹木が、種類数でも個体数でも、また胸高断面積を比較しても、けっして優占的な樹木群ではないことである。西マレーシアの熱帯林は、一般にフタバガキ熱帯多雨林とかフタバガキ混交林とよばれるように、フタバガキ科の樹種がもっとも優占し、超出木から林冠層の相当部分を占拠する。ガド山域ではこの超出木はウルシ科の *Swintonia schwenkii* で代表され、フタバガキ科樹木の超出木はプロット内にはPATに *Shorea* 属が1本存在しただけである。これは人為的な伐採の影響も考えられるが、幼木の種類構成を見てもガド山域ではフタバガキ科樹木相が貧弱である。

ボルネオでフタバガキ科樹木が優占する森林は、ガド山域よりも降水量が小さく、土壌も貧栄養な場所である。西マレーシアのフタバガキ熱帯多雨林はもっとも湿潤な地域に成立する熱帯林と考えられているが、どうも西マレーシア地域でも極端に湿潤な地域になるとフタバガキ科樹木はガド山域のように樹種も個体数も減少するのかもしれない。

ガド山域ではブナ科樹木が森林の優占樹種になるにしても、それは限定されたもので、超出木にはなることがない。いつも林冠層を占めてはいるが、40 m前後が最大樹高で、それ以上の高さにはならない。それは系統進化的に形成されたブナ科という系統群がもっている可能な樹高の最大限が、約40 mであるように見えるような現象である。超出木の *Swintonia schwenkii* にしても、ブナ科の樹木達にしてもガド山域の湿潤な条件で可能なかぎり背を伸ばしたのが我々が調査した森林であるように思える。

植物種の地形環境に対応した分布は林床草本や林床性の低木では比較的明確に出てくるが、高木、特に林冠層を作る樹種ではギャップかギャップでないか、二次林か自然林かといった要因が種の分布位置を決めているようにもみえる。この問題の解明についてはさらに広い、種々の環境条件をふくんだプロットでの調査解析が必要である。

森林の動態に関連して、分類群ごとの生長—新規加入—死亡について調べた結果は、二次林・ギャップ種で相対生長速度が大きい樹種では加入も死亡も大きくて速く回転しているが、一般に相対生長速度の小さい森林の基底部分を作っている樹木群では加入も死亡も少なかった。いい換えれば高い死亡率を示す分類群は二次林やギャップに分布するパイオニア種やそのような種を含む属である場合が多いのである。

この小論では触れなかったが、相対生長速度の分布は、各樹木群によって特徴的であった。二次林性の樹種群では、プロット総体の平均相対生長値よりも大きい相対生長速度を示す個体が、小さいものよりも多く、逆に成木の樹高が30 m以下のクラスで林内型の生活をしている樹種群では相対生長値は小さい個体が多い。相対生長量は同じ分類群に所属している個体の間でも、その個体が立地している環境によって大きく違うものであるが、それでも長期間にわたって多くの個体の生長を測定し続けると、分類群の特徴を垣間見ることができる。

森林の動態に関係する個々の樹木の生長と死亡は、その樹木の位置している環境条件に左右されるとともに、その個体が所属している分類群に特有のパラメータも有しているに違いない。後者についての解析は問題が複雑すぎると、エレガントな結果をもたらさないものだから、多くの場合無視されるか、軽視され続けてきた。しかし熱帯多雨林の実態を、熱帯多雨林の多様な樹種構成と複雑な構造を基礎にして理解しよう

とするならば、種や種群の問題を横においては進めないだろう。たしかに、なにをしているのか知れないが、とんでもない種数が同所的に生活しているフトモモ属 *Eugenia* の種をはっきりさせて調査・解析を進めているのは、間違いじみてはいるし、フトモモ属に見られるような種分化パターンを有する植物は熱帯に多いから、種を正面に据えて仕事をすれば、すぐにはエレガントな結果は得ることができないことも確実である。しかし、「木を見ずしても森が語れる」のであれば問題はないのだが、「木を見ることができなくて」語る「森について物語」はどこに行き着くものになるのだろうか。

参 考 文 献

- この発表は調査報告のような内容であったので特に引用文献をあげることはしないが、スマトラ自然研究(植物班)の印刷公表した報告や論文の中で重要なものをあげておく。これらのうち1, 2, 3は、科学研究費海外学術調査の調査報告書であり、多くの予備的な報告論文と基本的なデータとが掲載されている(必要な方は私に申し出てください)。シンポジウムで配付した資料の多くは未発表データで、紙数の関係からここに再録することが出来なかった。近い将来に印刷公表する予定である。
- 1) HOTTA, M. (ed.) (1984). Forest ecology and flora of G. Gadut, West Sumatra, 1-220, with 9 separate maps. Sumatra Nature Study (Botany), Kyoto.
 - 2) — (ed.) (1986). Diversity and dynamics of plant life in Sumatra, i-xii, 1-128. Sumatra Nature Study (Botany), Kyoto University.
 - 3) — (ed.) (1989). Diversity and plant-animal interaction in equatorial rain forest, i-xvi, 1-201, with 2 separate maps. Sumatra Nature Study (Botany), (Kagoshima University Research Center for the South Pacific, Occasional Papers no. 16).
 - 4) — (1981). A new genus of the family Araceae from West Sumatra. Acta Phytotax. Geobot. 32: 142-146.
 - 5) — (1985). New species of the genus *Homalomena* (Araceae) from Sumatra with a short note on the genus *Furtadoa*. Gard. Bull. 38 (1): 43-54.
 - 6) — (1987). A new rheophytic aroid, *Schismatoglottis okadae* from West Sumatra. Contr. Biol. Lab., Kyoto Univ. 27: 151-152.
 - 7) —, OKADA, H. & ITO, M. (1985). Species diversity at wet tropical environment I. Polymorphic variation and population structure of *Schismatoglottis lancifolia* (Araceae) in West Sumatra. Contr. Biol. Lab. Kyoto Univ. 27 (1): 9-71.
 - 8) ICHINO, T., KATO, M. & HOTTA, M. (1991). Pollination ecology of the two wild bananas, *Musa acuminata* subsp. *halabanensis* and *M. salaccensis*: chiropterophily and ornithophily. Biotropica 23 (2): 151-158.
 - 9) ITO, M. & HOTTA, M. (1986). *Carallia eugenioides* (Rhizophoraceae) and its new variety from Sumatra. Acta Phytotax. Geobot. 37: 144-148.
 - 10) KATO, M., ICHINO, T., HOTTA, M. & Inoue T. (1991). : Pollination of four Sumatran *Impatiens* species by hawkmoths and bees. Tropics 1: 59-73.
 - 11) 甲山隆司 (1992). 動いているスマトラの森. 堀田・井上・小山編: 赤道直下, 森と火山の島・スマトラの自然と人々, 38-52. 八坂書房, 東京.
 - 12) KOHYAMA, T. & HOTTA, M. (1986). Growth analysis of Sumatran *Monophyllaea*, possessing only one leaf throughout perennial life. Pl. Sp. Biol. 1: 117-125.
 - 13) KOHYAMA, T. & HOTTA, M. (1990). Significance of allometry in tropical sapling. Funct. Ecol. 4: 515-521.
 - 14) OKADA, H. & HOTTA, M. (1987). Species diversity at wet tropical environments II. Speciation of *Schismatoglottis okadae* (Araceae), an adaptation to the rheophytic habitat of mountain stream in Sumatra. Contr. Biol. Lab., Kyoto Univ. 27: 153-170.
 - 15) SUZUKI, E. & KOHYAMA, T. (1991). Spatial distribution of wind-despersed fruits and trees of *Swintonia schwenkii* (Anacardiaceae) in a tropical forest of west Sumatra. Tropics 1: 131-142.

国際農林水産業研究センター研究会報告集
No. 2

平成 6 年 3 月

●編集・発行●

農林水産省・国際農林水産業研究センター

〒305 茨城県つくば市大わし1-2

事務局：企画調整部情報資料課 ☎0298-38-6340

●印刷●

筑波印刷情報サービスセンター協同組合

〒305 茨城県つくば市吾妻3-10-1 (松見ビル3F)

TEL 0298-51-4111代 FAX 0298-52-3756
