

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早く、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一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、林一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。

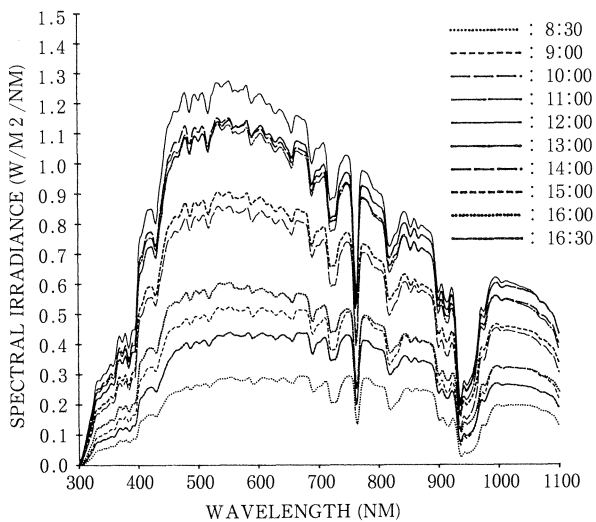


図-1 バンコク市内における全天日射の日変化

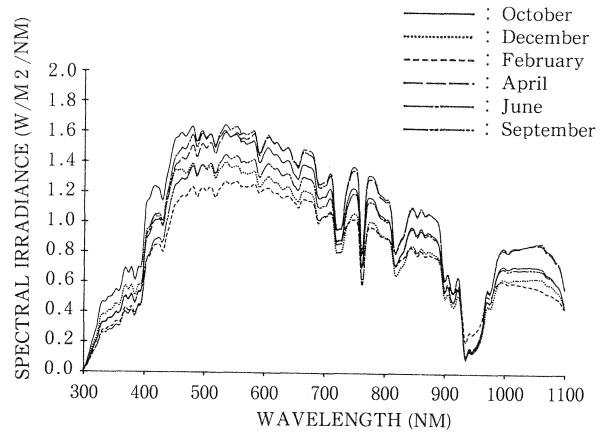


図-2 バンコク市内における全天日射エネルギーの年変動

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

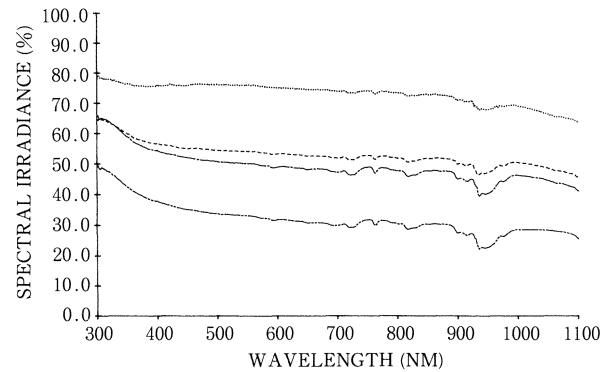
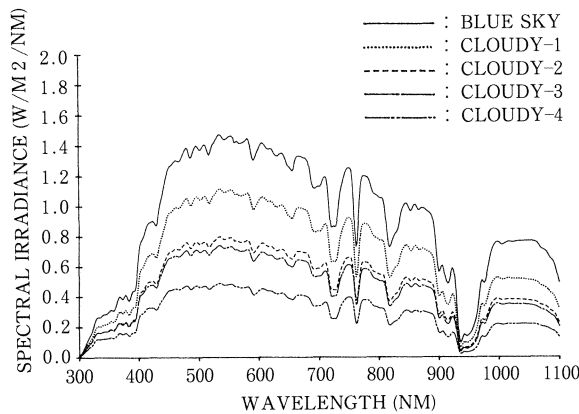


図-3 散乱日射の波長別エネルギー

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300~1,100nm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330~1,100nmの範囲で、それぞれ2nm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 (400~500nm) と赤色光域 (600~700nm) 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 (500~600nm) と遠赤色光域 (700nm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。

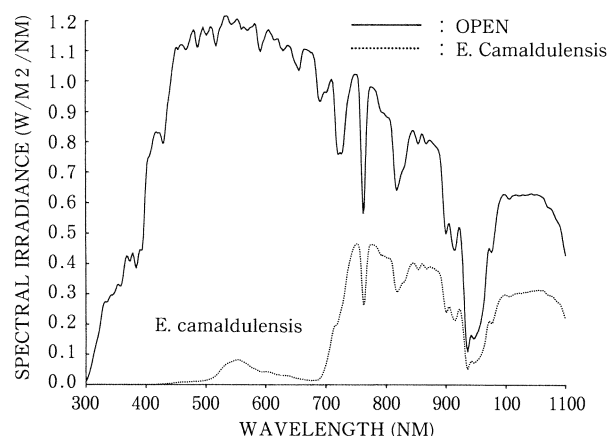


図-4 散乱日射と葉を透過した光の波長別エネルギー

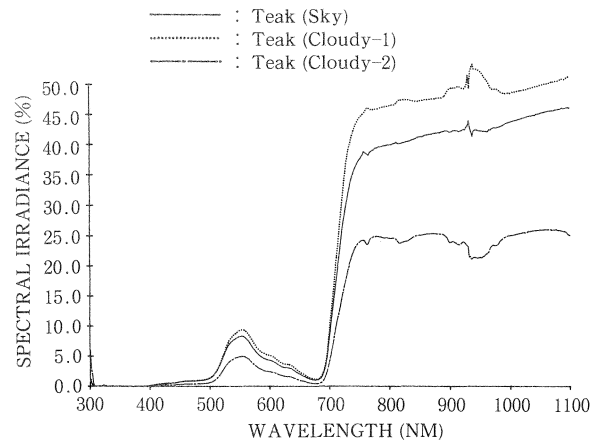
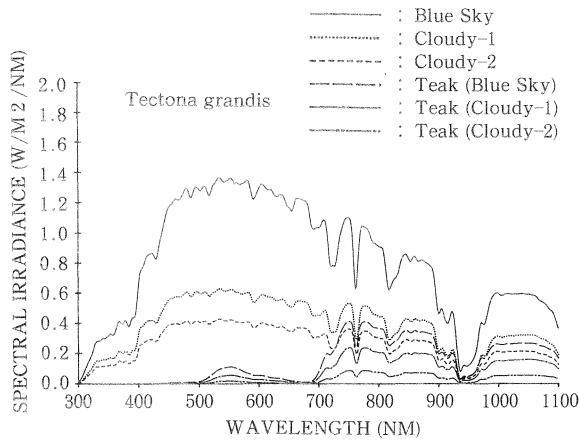


図-5 全天日射と葉透過光の波長別エネルギー

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

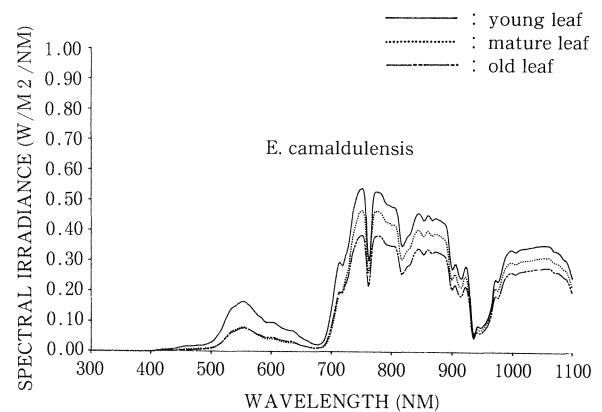
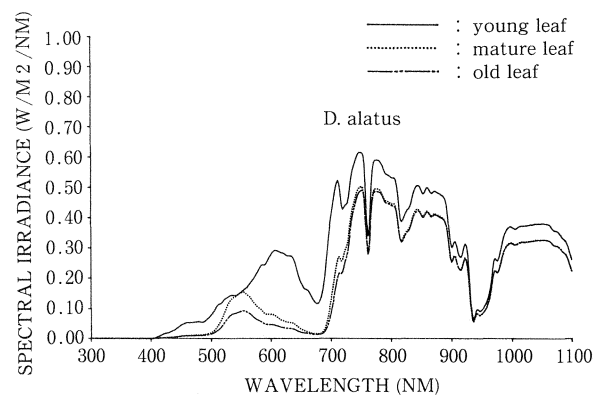


図-6 葉齢の異なる葉を透過した光の波長別エネルギー

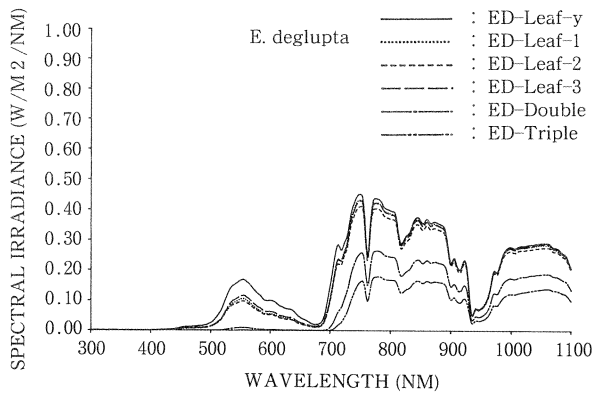


図-7 複数の葉を透過した光の波長別エネルギー

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。

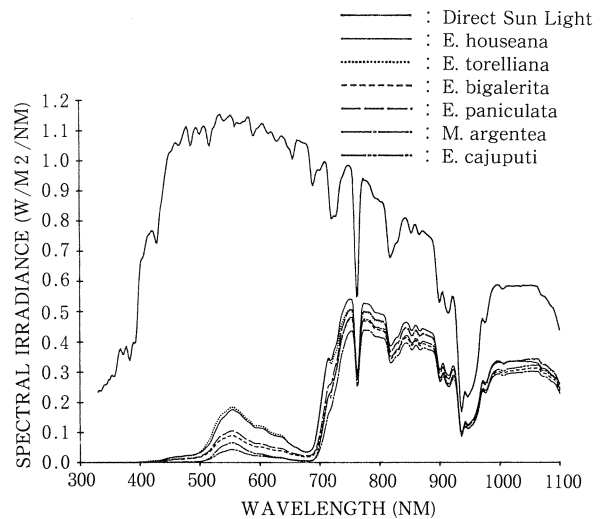


図-8 早生樹種の葉を透過した光の波長別エネルギー

表-2 複数の葉を透過した光のエネルギーの減衰

Species	PPFD		IL		IT	
	(μ mol/s/m ²)	(%)	(L)	(%)	(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	
	(μ mol/s/m ²)	(%)	(L)	(%)	(W)	(%)
<i>Eucalyptus torelliana</i>	.1097 E 03	7.61	.9336 E 04	11.46	.1624 E 03	21.04
<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。人工光源はグローブ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

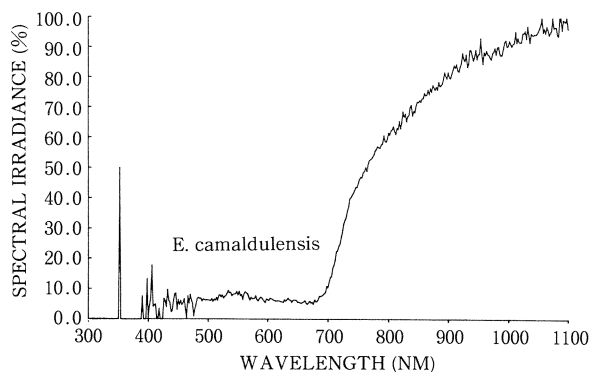


図-10 葉表面における波長別反射率

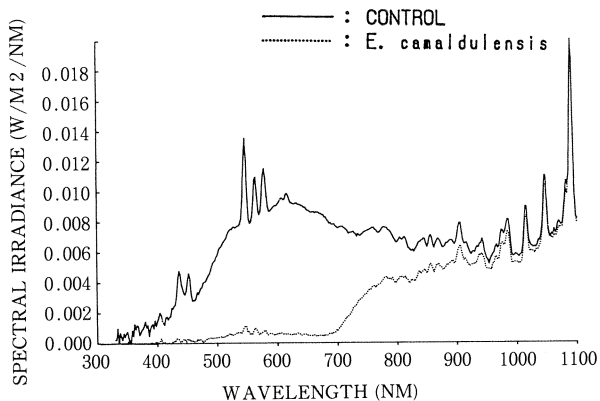


図-9 葉表面で反射された光の波長別エネルギー

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ト試験地内の *D. alatus*（5年生）、*E. camaldulensis*（12年生）、*A. auliculiformis*（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. degrupta*、*A. leptocarpha* 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. auliculiformis*、*A. mangium*（3～7年生）林分で行った。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

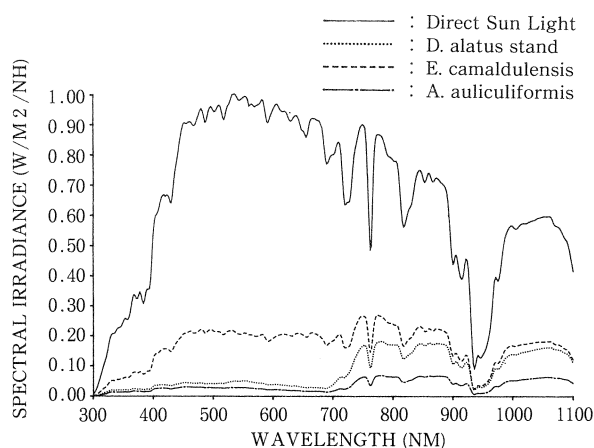


図-11 林内散光の波長別エネルギー

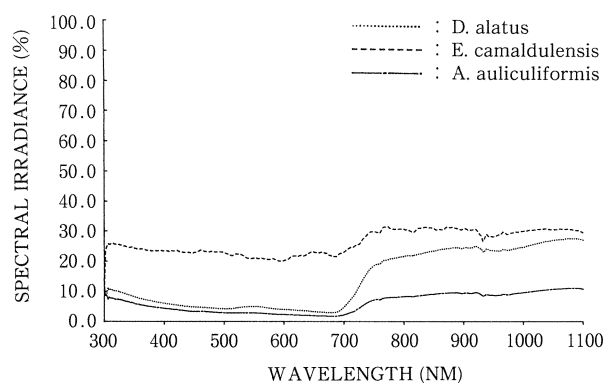


図-12 林内散光の全天日射に対する相対値

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-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 x 2、2 x 4、2 x 6 m）で植栽した *A. leptocarpha* の 4 年生林分で林内散

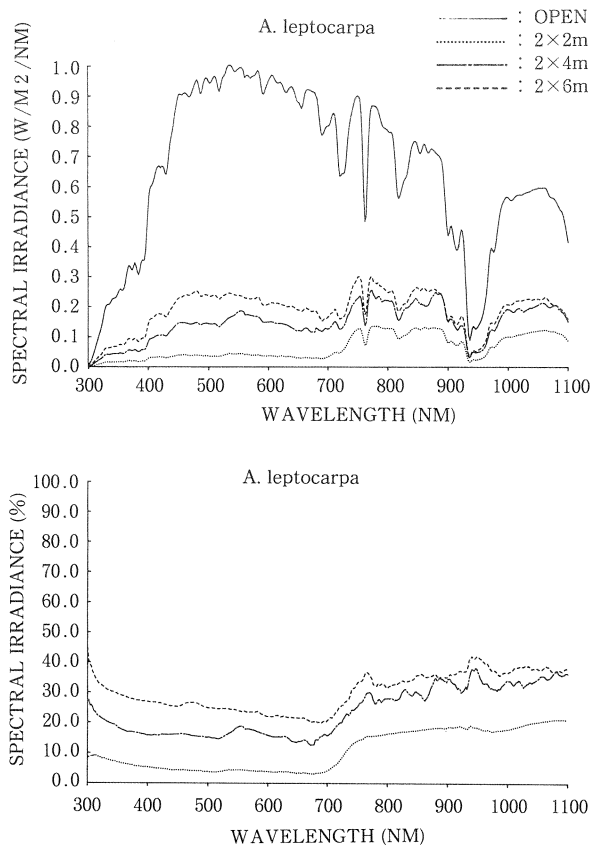


図-13 植栽間隔を異にする林分での林内散光の波長別エネルギー

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(2x2m植栽, 10x10m/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. stennophylla*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回繰り返しの平均値

** : 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の他、植栽間隔や林齢に伴う林冠の閉鎖等とともに、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、林冠の閉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(4x8, 2x8, 4x4, 2x4m)で植栽した*E. camaldensis*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2x8m植栽区

表-5 植栽間隔と林内相対照度(*A. auliculiformis*)

	4x8m	2x8m	4x4m	2x4m
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4x8m区の53.7%、4x4m区の39.8%、2x4m区が最低で25.8%であった。4x8m区と2x8m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。2x8m区が4x8m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4x8m区では1本当たりの占有面積が4x8m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4x8m区が2x8m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2x8m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、4x4m区及び2x4m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2x2m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年生時では再び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。

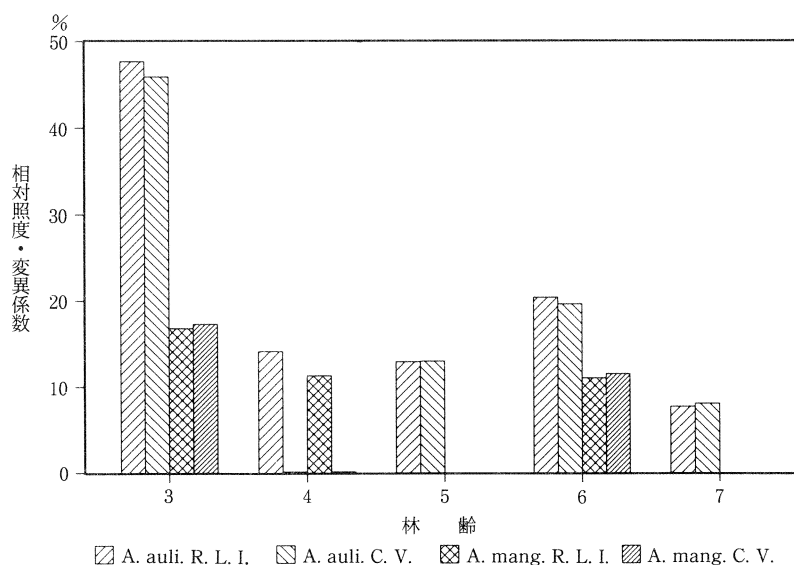


図-14 林齢に伴う林内相対照度の推移

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の林分と比べ、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*, *Cinnamomum*, *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。

齊藤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、新葉の展開にとまない、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>Cinnamomum</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>Cinnamomum</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) 齊藤昌宏 (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(II)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