

6種の落葉広葉樹模型林内の光質環境と形成過程

荒木 眞之

Spectroscopic light environment in model stands of six deciduous broad-leaved trees,
and their course of formation

Masayuki ARAKI

目 次

I. はじめに	25
1. 背景	25
2. 目的	25
II. 材料と方法	25
1. 測定林分と調査区	25
1) 測定林分	25
2) 調査区選定	26
2. 相対分光放射量率	26
1) 相対分光放射量率と測機	26
2) 相対分光放射量率の測定	27
3) データの集成と解析波長	27
3. 各層の相対光強度	27
4. 林分サンプリング	27
5. 基礎計算	28
1) 相対生長式	28
2) 各器官の垂直配分率	28
3) 葉の比面積の光強度反応	28
III. 結果	28
1. カツラ林分	29
1) 調査時期99/9の林分	29
2) 他のカツラ林分	30
2. シラカンバ林分	31
1) 林分概況と現存量	31

2) 波長別吸光係数	31
3. コナラ林分	32
1) 林分概況	32
2) 相対生長式と現存量	32
3) 葉の比面積の光強度反応	32
4) 波長別吸光係数	32
4. ヤマザクラ林分	32
1) 林分概況	32
2) 相対生長式と現存量	32
3) 葉の比面積の光強度反応	33
4) 波長別吸光係数	33
5. ケヤキ林分	33
1) 相対生長式と現存量	33
2) 葉の比面積の光強度反応	33
3) 波長別吸光係数	33
6. アキニレ林分	33
IV. 考察	34
1. 吸光係数スペクトルの樹種間差	34
2. 吸光係数の林分間差	34
1) 特定波長	34
2) 吸光係数の変異範囲	34
3) 吸光係数と林分葉量の関係	35
4) まとめ	35
3. 分光強度比	36
1) 680nm 光と800nm 光	36
2) (680/800)分光強度比と(680/910)分光強度比の関係	37
3) 林内各層の積算葉面積指数と680/800nm 分光強度比の関係	37
4) まとめ	38
V. まとめ	38
謝辞	39
文献	39
Summary	40

I. はじめに

1. 背景

林床の散光の光合成有効波長域における波長別エネルギー分布には、林外と異なり560nmに極大値・680nmに極小値が出現する。光合成有効波長域より長波長側の近赤外光域では急にエネルギーが増加する(森川ら, 1983)。同様の調査は各種の温帯林(Coombe, 1957; Federer & Tanner, 1966; Jordan, 1969; Atzet & Warning, 1970)で行われており、閉鎖林の林床ではほとんど同じ傾向を示す。このような、葉層透過光の波長別エネルギー分布が林外光のエネルギー分布と異なること(光質変化)の発生原因は、主に葉による赤色光の吸収と緑色光の透過、及び特に近赤外光の透過が大きいことによる(Moss & Loomis, 1952; 森川ら, 1983)。光合成有効波長域の、特に450~570nm域の光(青色から緑色)は広葉樹の葉によって透過されやすい(荒木・斎藤, 1981: 1982)。しかし、各波長域の分光強度とも小異はあるものの、葉量の増加に伴って減衰する(荒木, 1986b: 1989)ので、葉量が多い林における林床の波長別エネルギー分布(光質特性)は針葉樹林(荒木, 1986b)・広葉樹林(森川ら, 1983)・熱帯林(佐々木ら, 1981)を問わず類似した傾向となる(荒木, 1989)。

一方、群落内の光質環境把握に関して、上記のような連続スペクトルでなく、赤色光域と近赤外光域の2波長の光を測定した例もある。前述のように、赤色光は林床への透過性が低く、逆に近赤外光は高いため、両者の比(R/FR)が林分葉量の指標(Jordan, 1969)となるからである。特に、幼齢ヒノキ林ではR/FR比と林分の葉面積指数とが乱れの少ない直線関係を示す(荒木, 1986a: 1989)。

2. 目的

上記の諸研究は林床のみにおける波長別エネルギー分布の測定から行なわれたが、葉層内の各高さにおける波長別エネルギー分布の連続的変化を測定把握した例は未だ殆ど無い(荒木, 1986a: 1989)。そこで、光質環境の形成過程を明らかにするため、落葉広葉樹模型林内において波長別吸収係数を求め、その一般的性質を調べることを目的とした。

II. 材料と方法

1. 測定林分と調査区

1) 測定林分

(1) 農林技術センター内模型林分

本学の農林技術センター(以下、農技セン)は、つくば市内(36°06'49"N・140°05'45"E・標高27m)に位置し、年平均気温13.7°C・年降水量1,299mmの気候条件下にある。1996年に、農技セン内の畑地に下記5樹種の高密度模型林分(250,000本/ha)を造成した。各樹種の2~3年生苗木を、各々6×7mの区画内に20cm間隔で正方形植栽したものである。樹種は、シラカンバ(*Betula platyphylla* Sukatchev var. *japonica* (Miq.))・カツラ(*Cercidiphyllum japonicum* Sieb. et Zucc.)・コナラ

(*Quercus serrata* Thunb.)・ヤマザクラ(*Prunus Sargentii* Rehd. subsp. *Jamasakura* (Sieb.) Ohwi)・ケヤキ(*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino)である。但し、コナラ林のみは植栽間隔25cm・密度160,000(本/ha)である。日常的な除草と数回の害虫駆除を行った。これらの林分の調査時における林齢は2年生・3年生であった。

(2) ハヶ岳演習林内模型林分

本学のハヶ岳演習林(以下、八演)5林班は、ハヶ岳東山麓(35°57'N・138°28'E)・標高1,350mに位置し、年平均気温8.2°C・年降水量1,200mmの気候条件下にある。5林班内の模型林は、1985年及び1991年に共に2年生シラカンバ苗を各々1.6×8.0m及び1.6×5.0mの区画に共に20cm間隔で正方形植栽をして造成したものであり、調査時には各々12年生・6年生であった。

(3) 民間苗畑の林分

樹種事例を増やすため、緑化樹生産業者(以下、兵頭緑販)の苗畑で養成中のケヤキとアキニレ(*Ulmus parvifolia* Jacq.)の林分を部分的に買い取り、調査した。この苗畑は、千代田村(36°09'50"N・140°13'55"E・標高29m)に位置し、年平均気温13.8°C・年降水量1,393mmの気候条件下にある。ケヤキとアキニレ林共に、約40×40mの区画に1.54mの間隔で正方形植栽されており、植栽密度は4,200(本/ha)で林齢は8年であった。

2) 調査区選定

(1) 農技センの林分

農技センの林分では、同一林分から林分の破壊を招く調査(林分サンプリング)を繰り返すため、あらかじめ林床に縦横1m間隔でビニール紐を張り格子群を作った。そして、調査区に対する周辺効果及び既サンプリング区のエッジの影響を無くすため、東西方向及び南北方向に一つ置き市の松模様状に配列した格子を分光放射量測定と林分サンプリングを行う格子(調査区)とした。1区には25本の苗が植栽されたが、調査時の個体数は自己間引きにより減少していた。調査区の面積は原則的に1m²であるが、個体数の減少が著しい区は面積を拡大し、減少が少ない区は面積を縮小した例もある。

(2) 八演の林分

八演の林分においては、植栽年が異なる2林分とも林分の長さ方向(東西方向)に均一性が高い部分を選び、かつ幅1.6mに植栽したので南側2列・北側1列を除いて調査区を選定した。

(3) 兵藤緑販の林分

ケヤキ・アキニレ林とも、林分の全域から縦3本横6本の合計18個体からなる集団が最も斉一な個所を調査区に選定した。

2. 相対分光放射量率

1) 相対分光放射量率と測機

分光放射量は、単位面積・波長域当り放射強度であり、一般の光強度測定と同様に太陽高度・天候・林冠の影響により著しく変動するため、絶対値測定の有用性は低い。そこで、林内と林外で同じ波長の分光放射量を同時に測定し、林内外2つの測定値の比(相対分光放射量率(%)):(林

内値/林外値)×100)を用いることにより、森林の影響を分離して解析する必要がある(荒木, 1986b: 1989)。

用いた分光放射計(分光計器 KK 製)は、受光器・ファイバースコープ・分光器・1024個の受光素子群・制御器などを、林内用・林外用の2組(林内器・林外器と略)備え、2組を1台のCPUが同時に駆動させる測機である。本測機は、測定波長域が280～1,100nmと広く、波長0.825nm 間隔毎の同時測定(10ns)が可能である。ファイバースコープは地上に置いた分光器に測定位置の光を伝達するものである。また、林内器と林外器の器差は概ね無視出来る。なお、ファイバースコープを取り付けた状態では校正を行えないため、本測機で測定した相対値は正しいものの、絶対値は正確とは云えない。

2) 相対分光放射量率の測定

まず、相対分光放射量率の繰り返し測定を行うため、各調査区内に光斑光照射が少ない3～5の測定地点を設置した。次に、各測定地点において群落の最高層位から最低層位まで、層毎に測定点を設けた。なお、層深度を20cmとしたため、最高層位は例えば区内個体の最大樹高が190cmの区であれば層位180～200cmとなる。最低層位は、例えば区内最下部の生葉の地上高が30cmであれば層位20～40cmとなる。以下これらを下面の地上高を用いて180・20cm層と称する。各測定点において林内器の受光器を水平に支持しつつ林内の分光放射量を測定し、同時に林外の一定位置に設置した林外器で林外分光放射量を測定した。

3) データの集成と解析波長

林分内外で同時に波長0.825nm 間隔で測定された各1,024個のデータから10nm おきのデータを抜き出すこと、10nm ごとに相対分光放射量率を計算すること、その5測定地点間の平均値を求めることは、別途作成したプログラムによった。

測器で測定可能な波長は280～1,100nm であるが、両端付近の波長域及びエネルギー強度が極めて低くなる波長940～990nm 域では測定値に安定性が欠ける場合が見られた。そこで、解析波長を380～930nm とした。さらに、光合成有効波長域として400～700nm 光域、及び近赤外光として710～930nm 光域に分けて述べた場合もある。

3. 各層の相対光強度

葉の比面積の光強度反応(後述)を定式化(荒木, 1972a・1973a)するため、各林分・各層位で相対光強度の測定を行った。デジタル照度計(ミノルタ T 1 型)或は群落相対照度計(三紳工業 NS-II 型)で相対照度を求めた場合と、2種の光量子センサー(LICOR-Quantum と Line quantum)と2センサーの同時測定を行うデジタル電圧計により相対光量子密度を求めた場合がある。両例を同列に表現するため、相対光強度と称する。

4. 林分サンプリング

選定された調査区において、分光放射量および相対光強度の測定を行った後、各器官の現存量と垂直配分率を求めるための林分サンプリングを行った。まず、調査区内の全個体について根元

直径(D)と樹高(H)を測定した。次に、調査区内で D^2H の最大値・最小値を示す個体および最大最小値間を対数的等間隔に等分する大きさの D^2H を示す数個体、計5～6個体をサンプリングした。各試料個体を根元から切り取り、層毎に幹・枝・葉に分け熱風乾燥(80°C)させ、1mg単位で乾重を求めた。

なお葉は、各層の葉面積を求める資料とするため、乾燥前に0.01cm²単位で面積を測定した。

5. 基礎計算

1) 相対生長式

各林分とも試料個体の測定値から、個体の D^2H を独立変量とし各器官の個体当り乾重を従属変量とする3器官(幹・枝・葉)の相対生長式を求めた。相対生長式の式型は、使用した林分はどれも斉一な人工林でかつ幼齢のため D^2H に対する個体重の頭打ち現象が全く認められなかったため、下の(1)式とした。

$$\log W = b \log D^2H + \log a \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

(D^2H =個体サイズ指標値(cm³), W =個体の各器官の乾重(g))

得られた相対生長式に調査区内の全個体の D^2H を代入し、個体・器官毎の乾重を推定した。この推定値の個体間合計値を、調査区面積で除して器官ごとの現存量を求めた。

2) 各器官の垂直配分率

各層における器官毎の乾重の試料個体間合計値を求め、それを全層の合計値で除することにより、器官毎の垂直配分率を求めた。この値に当該器官の現存量を乗じて各層の器官毎の現存量を求めた。

3) 葉の比面積の光強度反応

林分の吸光係数算出には、各層の積算葉面積指数(指数は密度とも云われるが本研究では指数が適当)が必要である。そのため、各層の葉の現存量(乾重)に試料個体から得た葉の比面積(葉面積/葉乾重)を乗じて、各層内の全葉面積合計値を求めなければならない。葉の比面積は、相対光強度の影響を極めて強く受ける(荒木, 1972a: 1972b)ので、層位によって異なった値を示すが、不規則変動などを除去するため相対光強度との回帰関係を求めた。用いた回帰式型は式(2)の通りである。

$$\text{葉の比面積}(\text{cm}^2/\text{g}) = b \cdot \log \text{相対光強度}(\%) + a \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

III. 結果

樹種と季節が異なる多数の林分について調査を繰り返したが、調査及び解析手法は全て同じであるため、最初に示すカツラ林の場合に限って吸光係数を求める過程に沿って詳細な説明を行った。

1. カツラ林分

カツラ林における調査は、全て農技センの林分で行なわれ1998年5月（以下98/5と略）から99/9まで6回の調査繰り返しがある。

1) 調査時期99/9の林分

(1) 林分概況・現存量・生産構造

面積 1.100m^2 の調査区内の残存個体数は25本で、自己間引きは未だ発生していなかった。平均樹高は203cmで平均根元直径は1.73cmであった。林分から5個体をサンプリングして求めた D^2H と各器官の乾重間の相対生長式は表-1の通りで、全器官で有意($P<0.001$)であった。この式に調査区内の全個体の D^2H を代入して求めた器官毎の現存量を表-1に併記した。サンプル個体から求めた器官毎の垂直配分率は表-2の通りであった。そして、表-1の現存量に表-2の垂直配分率を乗じて各層に配当される器官重を求めて生産構造図(図-1)を描いた。

(2) 葉の比面積と各層の葉面積指数

各層の葉の比面積を、各個体の葉面積合計値と葉重合計値から求めた。そして、各層の比面積と相対光強度の対数値との間の関係(葉の比面積の光強度反応)を見た。強度反応は、一部に直線から離れた谷が生じているが(図-2)、有意な片対数直線式($F=38.2742$, $N=9$, $r=-0.9194$, $P<0.001$)が得られた。そこで、その式を用いて各層の平滑化された比面積を推定し、それを葉の現存量に乘じ、面積換算を行ない各層の葉面積密度を求めた。

次に、各層の葉面積指数を上層から積算して表-3に示す積算葉面積指数(ΣLAI)を得た。0cm層には葉がないため値は20cm層と同じとなる。

(3) 相対分光放射量率

相対分光放射量率の測定結果の一部を図-3に示す。各層の折れ線は、区内の5地点で測定した5組の林内外分光放射量測定値から5個の相対分光放射量率を求め、その平均値の波長方向の変化(スペクトル)を示している。近赤外光域において180cm層と160cm層の値が逆転しているが、測定時の光斑光の影響或いは林内分光器の受光面の水平度が充分では無かったことの影響と考えられた。

光合成有効波長域と近赤外光域を比較すると、最上層では光合成有効波長域の放射量率と近赤外光域のそれはほぼ同じ程度の値を示す。しかし、中～下層では光合成有効波長域の放射量率の方が近赤外光域のそれより低くなっており、下層ほど連続的に差が増加している。これらのことはヒノキ林の例(荒木, 1986a)と全く同様である。

参考のため、各層位における林内の分光放射量スペクトルの絶対値を図-4に示す。100cm層と80cm層の値がほぼ完全に重なっているものの、どの波長でも上層から下層に至る放射量の減衰が生じていることが明瞭である。前述の通り、本機では縦軸の単位を正確には示せないが、概ね $1/7000$ を乗ずることにより kW/m^2 単位に換算できると考えられる。両図を比較して判る通り、相対分光放射量率に拠らなければ葉層の入射光に対する影響を直接的に解析出来ない。

(4) 波長別吸光係数

この林分では最上層の200cm 層における相対分光放射量率の測定値を欠いているが、吸光係数を求める際に殆ど問題にならない。なお、他の林分の中間層で、林内分光器受光面の水平度の狂い或はノイズの混入によると考えられたが、100以下であるべき相対分光放射量率が100を超えた場合があった(その場合は、その層を除外して吸光係数を求めた)。相対分光放射量率の最上層における欠測、或は途中層における欠測が問題にならない理由は以下の通りである。吸光係数は、各層の葉面積指数を上層から順に積算した数列と、上層から順に並べた相対分光放射量率の数列を(4)式の Beer-Lambert 式に代入して求めるからである。すなわち、放射量率値が欠けている層は飛ばして2つの数値列を作れば良いからである。但し、最小二乗法により(3)式の係数を求める式が別にある。

$$\log (I/I_0) = -KF \dots\dots\dots(3)$$

(I/I_0 = ある層の相対分光放射量率(%), F = 林冠表面からその層までの積算葉面積指数(m^2/m^2), K = 吸光係数(-))

各層位の積算葉面積指数(表-3)と相対分光放射量率(図-3)を用い、波長10nm 毎に計算した吸光係数値の一部を表-4に示す。吸光係数を表す直線をデータ群に当てはめた時の適合度は、吸光係数の式では分散比(F 値)の計算が困難のため、積算葉面積指数と相対分光放射量率間の相関係数で代用した。この林分では、表-4に掲げた波長を含む380~930nm 間の10nm おきの合計56波長(以下、56波長と略)において有意($P < 0.001$)な吸光係数が得られた。

このようにして求めた吸光係数スペクトルを図-5に示す。吸光係数は負の符号を持つから、図の上方の値ほど透過光量が多いことを意味する。光合成有効波長域では細かい凹凸はあるものの波長約560nm にピークを持つ山型傾向を示す。そして、680nm 域で極小値を示した後、近赤外光域に向けて急増し、近赤外光域では比較的近似した値を示す。

2) 他のカツラ林分

ここでは、他の5つの調査時期(98/5・98/7・99/5・99/7・99/8)の結果と、比較のため前述の調査時期99/9の結果を併せて述べる。

(1) 林分概況

各調査時期における林分概況は表-5の通りであり、調査時期99/9の区は樹体サイズがやや小さいものの、時期毎に別の区を調査していることから、この林分の生育経過は概ね順調であったと言える。

(2) 相対生長式と現存量

器官毎の D^2H と乾重間の相対生長式は、全ての調査時期・器官とも有意($P < 0.001$)であった。また、各器官の式とも時期間差(林分間差)は認められなかった(共分散分析)。しかし、相対生長式においては係数の僅かな差も乾重推定値にかなりの影響を与える(荒木, 2000)ため、現存量推定には個々の林分で得られた式を用いた。このようにして推定された各器官の現存量は、表-6に示す通り調査時期の進行により明らかに増加している。

(3) 葉の比面積の光強度反応

葉の比面積には、孤立木の南側樹冠の表面に位置する完全無被陰の葉においても季節の進行、すなわち葉の日齢の増加による季節変化がある（荒木，1971）。このため、各時期のカツラ林における比面積の光強度反応の式には、シラカンバ林（荒木，1973a）の場合と同様に季節変化が認められ（表-7），また全ての時期で有意（ $P < 0.001$ ）であった。そこで、各時期とも対応する式から葉の比面積の平滑化値を求め、各層の葉の現存量に乗じて層毎の葉面積示数を算出した。但し、調査時期98/7と99/7は式の係数がほぼ同じため、両期に99/7の係数を適用した。また、調査時期98/5には相対光強度の測定を行なわなかったため調査時期99/5の式を代用した。

4) 波長別吸光係数

各調査時期とも波長毎の吸光係数は有意であったが、念のため各林分の56波長における有意水準の構成割合を表-8に示す。本研究では $P < 0.050$ を有意とする限界水準としているため、カツラ林では全体の93%の吸光係数が有意で、74%が $P < 0.001$ と極めて高い水準で有意であったと云える。

図-6を見ると、99年の4例は調査時期毎に吸光係数スペクトルがきれいに平行移動しており、差は僅かであるものの時期が遅いほど係数が小さいことが明瞭である。一方、98年の2例における光合成有効波長域の係数スペクトルは両調査時期の例とも値が小さい。なお、時期98/5の近赤外光域の値が特に小さい理由は、近赤外光域では吸光係数の有意性が0.050に達しなかった波長が集中している（表-8）ことから、この林分は未だ葉量が少ない（表-6）ため光斑光の不規則射入が多かったためと考えられた。

この樹種の吸光係数スペクトルは、6林分の全組合せにおける2林分間の相関係数が有意（ $P < 0.001$ ）であったので、林分相互間で非常に良く近似していると云える。

2. シラカンバ林分

1) 林分概況と現存量

表-9に示す通り、八演の12年生林分は樹体が大きいが特徴である。 D^2H と各器官重間の相対生長式は各林分・器官の式とも有意（ $P < 0.05 \sim 0.001$ ）であった。3年生と6年生の林分は、葉量が2 ton/ha弱と少なく葉層深が1.8~1.4mであったので、葉重分布密度（荒木，2000）は99~138 (g/m³)となる。一方、12年生林分は葉層深が2.6mと深かったが、葉量が10ton/ha以上と通常のシラカンバ林（荒木，1972a：1973a）の3倍も多いため葉重分布密度は574 (g/m³)と高かった。

2) 波長別吸光係数

各林分で求めた葉の比面積の強度反応式（表-10）は八演1林分を除き有意であった。八演1林分の反応式の係数は他のシラカンバ林における係数と近似していた。したがって、各林分の式と葉の層別現存量から、各林分・層位における積算葉面積指数を求めた。

シラカンバ4林分における波長別吸光係数は全て有意（ $P < 0.001 \sim 0.050$ ）であった。この林分のスペクトル（図-7）において特異的なことは、波長約380~440nm域における傾向が林分八演2のみ他の林分と異なっていること、および林分八演3の値が非常に小さいことである。

このような差はあるものの各林分の吸光係数スペクトルは、林分間の相関係数が全ての組合せ

において有意($P < 0.001$)であったので、相互に良く近似していると云えよう。

3. コナラ林分

1) 林分概況

コナラ林でも、農技センに所在する同じ林分において表-11の通り、6時期に調査を繰り返した。この林分は、表のように平均値を見る限り概ね順調な生長経過を辿ったと云えるが、個体の大小差が激しい区が多かったことが特徴である。また、調査時期99/9には調査区を小個体が集中した格子に取らざるを得なかった。なお、林齢はカツラと同様2年と3年である。

2) 相対生長式と現存量

時期毎に求めた相対生長式は、概ね有意であったが有意性が低い時期があった。また、小個体が多かった99/9を除いた各時期の式には有意差(共分散分析)が認められなかった。そこで、98/7～99/8の各時期のデータを一括して表-12に示す有意な($P < 0.001$)相対生長式を求め、該当時期の現存量推定に用いた。調査時期99/9の式も各器官とも有意($P < 0.001$)であった。このようにして求めた各時期の現存量は表-13の通りで、時期99/9は概ね各器官とも現存量が少なかった。

3) 葉の比面積の光強度反応

この林分では、相対光強度を測定した時期が少なく、また前述の個体差のため有意な比面積の光強度反応の式が少ない。そこで、相対光強度と葉の比面積の測定試料がある全時期を一括して、葉の比面積の光強度反応式(傾き $= -61.2992 \cdot$ 切片 $= 222.4007 \cdot$ 分散比 $= 122.1988 \cdot N = 33 \cdot P < 0.001$)を求めた。全期間とも、この式によって葉の層別現存量を葉面積に換算した。

4) 波長別吸光係数

吸光係数は、336例中の調査時期99/8の散出する7波長を除き有意($P < 0.001 \sim 0.050$)であった。スペクトル(図-8)は、調査時期98/7の結果が過大・99/9が過小であることを除くと、カツラ林の場合と同様に98年より99年の係数が大きく、また遅い季節の係数値が大きい傾向があった。

但し、原因は不明であったが、99/8の結果は光合成有効波長域の係数が近赤外光域のそれより大きいという一般例と逆の傾向を示した。このため、林分間の吸光係数スペクトルの相関係数は、99/8がかかわった組合せの全てが有意でなく、他の全ての組合せで有意($P < 0.001$)であった。

4. ヤマザクラ林分

1) 林分概況

ヤマザクラ林の資料も、農技センの同じ2年生・3年生林分からの調査繰り返しであり、調査時期は表-14に示す5回である。この林分は接木苗の植栽により造成した。そのため、接ぎ穂のほぼ下端の直径を根元径としたが、接合部の隆起の関係で根元径には個体差が多かった。

2) 相対生長式と現存量

時期毎の相対生長式は概ね有意であったが、有意でない時期があり、また時期間で係数の不規則変化が見られた。その発生原因は根元径の変動と考えられた。そこで、全期間のサンプル個体を一括して表-15に示す有意な($P < 0.001$)相対生長式を求め、全期間に適用した。しかし、現存量

は表-16のように時期間で不規則な変化を示した。

3) 葉の比面積の光強度反応

一方、葉の比面積の照度反応式は全期間で有意($P < 0.001$)であったが、両年ともほぼ同様の季節の進行に伴う係数の変化が認められた(表-17)。しかし、シラカンバ林(荒木, 1973a)・前述のカツラ林とは異なり、葉の日齢が進んだ遅い季節の方が傾きが大きくなっている。この原因は、樹種特性とも考えられるが、データの限りでは不明であった。いずれにせよ、各時期の反応式を用いて葉の現存量を面積に換算した。

4) 波長別吸光係数

吸光係数は、280例中の調査時期98/5に散出する7波長を除き有意($P < 0.001 \sim 0.050$)であった。吸光係数スペクトル(図-9)には、調査時期98/7の結果が過大であること、時期99/7と99/8間に程度は僅かな逆転があるものの、大局的には99年の方が且つ時期が遅い方が係数値が小さいと云う前述の傾向が現れている。5林分の吸光係数スペクトルの2林分間相関係数は全組合せにおいて有意($P < 0.001$)であった。

5. ケヤキ林分

1) 相対生長式と現存量

農技センの林分と兵藤緑販の林分の概況は表-18の通りである。農技センの林分では、林齢が1年と極めて若いと思われるが D^2H と枝間の相対生長式が有意でなかった(表-19)。しかし、この林分も葉の現存量が只木ら(1976)の基本葉量に達しており、佐藤ら(1959)の壮齢林の例と同等であるので、調査・解析には差し支えないと考えられた。

2) 葉の比面積の光強度反応

葉の比面積の光強度反応は表-20の通りである。調査時期は両林分とも秋(9月と10月)であるにも拘わらず、係数に差がある原因は両林分間の樹体サイズと本数密度の差(表-18)と考えられた。

3) 波長別吸光係数

吸光係数は、両林分・全波長とも有意($P < 0.001 \sim 0.050$)であったが、特に兵頭緑販林分の56波長は有意性が高かった($P < 0.001$)。吸光係数スペクトルは図-10の通りで、2林分間の相関係数は有意($P < 0.001$)であった。

6. アキニレ林分

この林分も兵頭緑販のもので、1997年10月に一部を譲り受けて調査した。面積 42.716m^2 の調査区内の18個体から推定した林分概況は、林齢8年・平均根元直径 10.1cm ・平均樹高 4.81m であった。この林分から、都合により、4個体のみをサンプリングし相対生長式と現存量を求めた(表-21)。葉の比面積の光強度反応式は、傾き $-107.4720 \cdot \text{切片} 256.8836 \cdot \text{分散比} 59.07$ であり、有意($P < 0.001$)であった。これらのデータと層別相対分光放射量率から波長別吸光係数求めた結果、全56波長で有意($P < 0.001$)であり、図-11に示す吸光係数スペクトルが得られた。

IV. 考察

1. 吸光係数スペクトルの樹種間差

各樹種の代表林分を選定し、吸光係数スペクトルの樹種間差を見た。代表林分は、コナラ・カツラ・ヤマザクラでは調査時期99/7の林分、シラカンバは八演1の林分、ケヤキ・アキニレは兵藤緑販の林分とした。ケヤキ・アキニレ林は共に平均根元径8.5~10.1cmと他樹種の1.4~2.1cmの4倍以上太い。このように樹体サイズが大きい反面、他樹種の林分より本数密度が低い。それにも拘らずスペクトルの傾向は相互に良く近似しており(図-12)、6林分の全組合せにおいてスペクトルの2林分間の相関係数は有意($P < 0.001$)であった。すなわち、スペクトルの傾向は相互に極めて良く近似していると云える。全24林分を通覧しても明らかな近似性が確認できた。

光合成有効波長域における吸光係数スペクトルは、波長560nmに極大値を、波長680nmに極小値を持つ緩い山形傾向を示す。近赤外光域では、波長約780nmに向かって急増し、その後は910nmまで緩やかに増加する。近赤外光域においても、24林分の吸光係数スペクトルは相互に良く近似している。なお、波長560nmの極大値は最小のヤマザクラにおいて-0.136であり、最大のシラカンバにおいて-0.312であるが、この差の出現原因については後述する。

吸光係数が560nmで極大値を示し680nmで極小値を示す原因は、単葉の光の反射率と透過率が555nmで極大値・675nmで極小値を示す(荒木・斎藤, 1981)ためである。但し、ここで示した波長に5nmのずれがある原因は吸光係数を10nm毎に求めたからである。

なお、全24林分中で極小値が波長680nm以外に現われた例は2例で、700nmと730nmに現われた。一方、極大値が560nm以外に現れた例は9林分あったが、それら極大値の出現波長は550(2)・570(5)・580(1)・590(1)・波長(例数)であったから、測定は概ね良好に行われたと云える。

2. 吸光係数の林分間差

1) 特定波長

吸光係数の計算は波長380~930nmまで10nm毎に行ったが、データが膨大なため以下の5つの特定波長によって、林分間差の発生原因の解析を行った。波長選択の理由は以下の通りである。450nmは青色光の代表波長として、560nmは緑色光の代表波長であると同時に光合成有効波長域における吸光係数の極大値を示す波長のため選定した。なお、この波長は前述のような、また逆に単葉の光吸収率の最低値を示す(荒木・斎藤, 1981:1982; 斎藤, 1983)などの特徴がある。また、680nmは光合成有効波長域における吸光係数の極大値出現後の極小値(光合成有効波長域の極小値ではない)を示す波長である。730nmは、光合成有効波長域から近赤外光域に向かう急激な上昇を示す波長域のほぼ中央の波長として選定した。820nmは、近赤外光域における吸光係数の極大値を示す波長(図-5~9参照)として選択した。但し、820nmにおいて極大値を示すことには、24林分中でケヤキ2林分・アキニレ林分・カツラ林分(98/5)の4例の例外があった。

2) 吸光係数の変異範囲

例えば、カツラ林分では6調査時期の資料があるが、波長450nmの吸光係数の最大値は時期99/

9の-0.154であり、最小値は時期98/5の-0.278であるので、-0.154～-0.278を変異範囲とした。図-13に波長・樹種ごとの吸光係数の変異範囲を、作図の都合により吸光係数に-1.0を乗じて示した。図から、各波長とも吸光係数の最大値は最小値より樹種差が少ないこと、吸光係数の変異範囲は各樹種とも波長680・450nmで大きく730・820nmで小さいことが判る。

調査時期の幅が5～8月・5～9月と比較的広いカツラ・コナラ・ヤマザクラの3樹種の林分を比較すると、コナラ・ヤマザクラの変異範囲は概ね同程度であるが、カツラのそれの2倍以上広い。この3樹種における吸光係数の最大値は、コナラでは全5波長とも時期99/8に、カツラでは3波長で時期99/9に、ヤマザクラでは4波長で時期98/7に出現した。一方、最小値はコナラでは3波長で時期99/9に、カツラでは3波長で時期98/5に、ヤマザクラでは4波長で時期98/5に出現した。したがって、係数は概ね春に大きく秋に小さいようであるが、例外も多い。

ケヤキは2林分とも秋(9・10月)に測定されたが、吸光係数の差はカツラより多い。シラカンバは、いずれも秋(8・9月)の測定であるが、1林分の吸光係数が他の3林分の約3倍大きい程の林分間差があった。

3) 吸光係数と林分葉量の関係

ヒノキ林では、550nm光の吸光係数が林分の葉面積指数と明確な対応関係を示す(荒木, 1986b: 1989)ことが知られている。本研究の場合も、カツラ林の吸光係数(図-6)は調査時期が遅いほど値が小さい、かつ時期が遅いほど葉の現存量が増加している(表-6)と前述した。また、このことはヤマザクラの5林分でもほぼ同様で、コナラ6林分でもほぼ同様であろうと前述した。

そこで、各特定波長の光に対する吸光係数と林分葉面積指数(林分最下層の積算葉面積指数)の関係を解析した。まず、樹種と期間を一括した全24林分における吸光係数と林分葉面積指数の関係を波長毎に図化した。そのうち最も対応関係が明瞭な波長680nmの例を図-14に示すが、両者の間には一定の関係が期待できると考えられた。

次に、樹種ごとの対応程度を把握するため、葉面積指数-吸光係数間の関係把握に好適な回帰式型を探した。その結果、(4)式に示す両対数軸上の1次式の適合性(F値)が最も高いことが判った。但し、吸光係数の絶対値の対数値を用いた。

$$\log(\text{吸光係数} \times -1.0) = b \times \log(\text{林分葉面積指数}) + \log a \quad \dots\dots\dots(4)$$

この式型は、データ数が少なかったヒノキ林の例と異なる。ちなみに、図-14の例を両対数変換すると図-15の通りの関係となる。

次に、樹種毎に吸光係数と葉面積指数間の関係に両対数軸上の1次直線式を当てはめた結果を表-22に示す。但し、測定繰返しが無いアキニレは省いた。また、測定繰返しが2のケヤキは適合性の検定が出来ない。

残りの4樹種中で有意な式が得られた樹種は2つである。一方、全樹種を一括した24林分に対して表-23の通り6波長全てに有意な($P < 0.001$, 820nmのみ $P < 0.005$)回帰式が成立した。したがって、吸光係数は葉面積指数に強く影響されるといって良い。

4) まとめ

以上のことから、各樹種・波長において吸光係数は林分葉面積指数の増加に伴い増加すると云って差し支えない(図-16参照)。このことは、葉量が多い林分の方が少ない林分より葉層の光透過性が良いことを意味する。

しかしながら、吸光係数は林冠表面から下層に向かう際の葉量(積算葉面積指数)の増加に対する光強度の減衰の関係から求める概念である。換言すれば、式中で葉量は既に消去済みである。すなわち、吸光係数が林分の葉面積指数に影響されることは、既に指摘した(荒木, 1986b; 1989)通り奇異なことに思える。

しかし、吸光係数は均質体内における透入光の減衰過程を表す Beer-Lambert 式を植物群落に応用したものである(Monsi und Saeki, 1953)。そして、葉層内で起こる葉群の光強度に対応した諸変化(荒木, 1972b; Araki, 1985; 荒木, 1986c)に関し、この式では葉の比面積しか考慮していない。これらのことを考えると、吸光係数が林分の葉面積指数に影響されることは当然のことと云える。葉層中で、個々の葉の諸形質はそれぞれ葉が受ける光強度に対応した連続的变化を示しており、そのような葉の集合体(葉層)が下層の葉層の光強度を規定しているからである。約言すれば、葉層は水のような均質体ではないからである。

3. 分光強度比

葉層最下部における分光強度比、すなわち波長800nm 光の強度を分母とし675nm 光強度を分子とした比も吸光係数と同様に林分葉量に対応した変化を示すことが知られている(Jordan, 1969; 荒木, 1986a; 1989)。そこで、落葉広葉樹林の場合における関係を調べた。但し、本研究ではデータ処理の関係上675nm 光の代わりに680nm 光を用いた。

葉層を通過した680nm 光の強度は光合成有効波長域における極小値を示し、800nm 光は葉層を良く透過する近赤外光域の光である。したがって、葉層の影響を受けにくい赤外光に対する葉層の影響を最も受け易い赤色光の強度の比は葉量、詳しくはクロロフィル A (Jordan, 1969)の量に対応した変化を示すことになる。

1) 680nm 光と800nm 光

各樹種の代表林分(図-12と同様)における、最下層の相対分光放射量率スペクトルを図-16に示す。図の通り、各樹種の相対分光放射量率スペクトルは相互に良く近似しており、特にカツラ・コナラ・ヤマザクラ・シラカンバ林分間およびケヤキ・アキアキニレ林分間では近似性が高い。

そして、各樹種とも光合成有効波長域における相対分光放射量率スペクトルの極小値が680nm に出現する。このことは、全24林分とも全く同じで例外は皆無であった。

一方、近赤外光域における林分最下層の相対分光放射量率スペクトルは、図-16のように波長700nm から770nm に向けて急増し、それ以降は脈動的増減を示しつつ910nm まで漸増している。データの範囲では、近赤外光域における最大相対分光放射量率、すなわち葉層透過光の最大値を与える波長は910nm である。

なお、脈動的増減の極大値と極小値を示す各波長には、コナラとシラカンバの一部を除き、樹種差が認められない。葉の光学的性質を近赤外光域まで拡大して測定した例が無いので詳細は不

明であるが、光合成波長域における極大・極小の出現と同様、葉の光学的性質に対応した現象と考えられる。

一方、近赤外光域における代表波長として800nmが使用されて来た。しかし、上記のように800nm光はこの波長域における極大値・極小値(特異点と総称する)の何れでもない。葉層を透過した光の分光放射量(絶対値)の強度スペクトル(図-17)も、近赤外光域において極大値と極小値が交互に出現し脈動的増減を示す。特異点を示す波長と、その各波長において極大値・極小値のいずれが出現するかを、表-24にまとめた(図では絶対値スペクトルと示す)。なお、表には相対分光放射量率スペクトル(図では相対値スペクトル)における特異点と極大値・極小値を併記した。また、肩とは極大値から極小値への移行部分であること、及びその逆を示す。

絶対値・相対値スペクトル共に特異点である波長は、770・830・860nmであるが、800nmは極大値でも極小値でもない。すなわち、従来800nm光を代表波長に選定して来た根拠が理解出来ない。

2) (680/800) 分光強度比と(680/910) 分光強度比の関係

近赤外光域の代表波長を800nmとすることは将来見なおす必要があるかも知れない。ここで、各林内における680nm光・従来通りの800nm光・吸光係数の最大値を示す910nm光の各強度を用いて、680/800分光強度比と680/910分光強度比とを求め比較した。カツラの全6林分の合計40層における680/800強度比と680/910強度比の関係を図-18に示す通り、両強度比間には極めて厳格な直線関係が見られた。念のため、各樹種における両分光強度比間の関係を確かめた。すなわち、樹種毎に調査時期を一括したプールデータに直線式を適合させた結果、全樹種の関係とも有意($P < 0.001$)であった(表-25)。そして、どの樹種も切片が概ね無視出来るので、単純に800nm光の強度は910nm光のその約1.03~1.16倍であると云えよう。結果的には、分光強度比を求める際の代表波長としては800nm光を用いて差し支えないことが判った。

3) 林内各層の積算葉面積指数と680/800nm 分光強度比の関係

680/800nm 分光強度比は、林床でこの2波長の葉層透過光強度を測定し、林分葉量を推定するものである(Jordan, 1969)。しかし、同一林内の各層位で測定した分光強度比は、葉量の葉層表面から下方に向かう漸増に伴う連続的変化を示す筈である。そして、同一林分からデータを得るため、林分間で得た関係より密接な関係が期待できる。しかし、これに関する報文は現在のところヒノキ林(荒木, 1989)の例のみである。そこで、落葉広葉樹林の場合を調べた。

分光放射量測定値に乱れがある3林分を除いた21林分について、林内各層位における分光放射量測定値から各層位の680/800nm 分光強度比を求め、各層位の積算葉面積指数に対比した。そのうち、カツラ5林分における両者の対応関係を図-19に例示する。この関係は、葉層表面で約1.2であった分光強度比が積算葉面積指数の増加に伴って低下すること、換言すれば葉層内を降下するにつれ、葉層表面では800nm光より強度が高い680nm光が激しく減衰するのに対して、800nm光は比較的減衰が少ないため、比が小さくなる過程を表している。

両者間の関係を把握する回帰式の型式は、林分(98/7)はヒノキ林の場合と同様に一次直線式が適していたが、他の調査時期及び他の樹種はほぼ全て下式(5)の適合性が際だって高かった。

$$y = be^{ax} \dots\dots\dots(5)$$

(y =分光強度比(-), x =積算葉面積指数($m^2/m^2/0.2m$), a =冪係数, b =係数, e =自然対数の底)

ちなみに、カツラ(99/9)林分の式は $y = 1.6227e^{-0.2786x}$ となり有意($P < 0.001$)であった。全21林分における積算葉面積指数と分光強度比間の関係に上式を当てはめた結果、コナラ(99/9)の1林分を除き $P < 0.05$ の水準で有意であり、 $P < 0.01$ の水準で18林分が有意であったから、両者間の関係は明確なものと云える。

4) まとめ

分光強度比と葉量の関係における樹種差をみるため、樹種毎に各調査時期の各層の積算葉面積指数と各層の分光強度比データをプールして(5)式を求めた。その結果、各樹種の式及び全樹種の式とも全て有意($P < 0.001$)であった(表-26)。一部の樹種で比較的大きな係数が与えられているが、他は概ね値が近似している。したがって、大局的には樹種により係数に大差は無いと考えられる。また、用いた模型林はいずれも林齢は若い葉量がほぼ満度にあるため、他の林分にも適用可能と考えられる。

ここで、参考のため Jordan(1969)の方法に従った680/800nm 分光強度比と林分葉量との対比、すなわち林床における分光強度比値を林分葉面積指数(=最下層の積算葉面積指数)に対比させた図-20を示す。Jordan は、林床の強度比測定値を図-20の関係に代入することから容易に林分葉量が推定できると述べた。しかし、図-20の式は $y = 0.4219e^{-0.1032x}$ となるのに対し全林分・全層のデータから求めた式は $y = 1.1067e^{-0.2399x}$ (表-26)となり、2つの係数には大差がある。差の発生原因は、2以下の林分面積指数値を欠いているからである。言い換えれば、分光強度比の特性、すなわち強度比は林分最上層で1.0以上(680nm 光強度 > 800nm 光強度)となり、層位を下るに伴う葉量増加により漸減すること、特に林分葉面積指数が小さい範囲で激減することを無視しているからである。また、Jordan の報文では両者間の回帰式を一次直線式としたことも、分光強度比が激減する範囲の林分葉面積指数値を欠いたままで求式したことによる。以上のことから、Jordan の式を一般式とするには無理があり、本報の式が正しいと云える。

V. まとめ

未だ測定例が極めて少ない林内光質について、落葉広葉樹模型林6樹種・24林分において、著者以外の報告例が無い林内各層の分光放射量測定を、林外の分光放射量測定と同時にしない、森林の影響を分離・独立させて把握した。層位を下るに伴う相対分光放射量率の低下を、層位を下るに伴う積算葉面積指数の増加に対比させて、著者以外の報告例を見ない波長別吸光係数を求めた。そして、吸光係数スペクトルの極大値・極小値等を示す波長には樹種差が無く、単葉の光反射率・透過率・吸収率等において極大値・極小値を示す波長と一致することを明らかにした。但し、吸光係数の極大値・極小値自体は、樹種・測定時期等による変動があるが、変動原因は樹種・

時期差に伴う林分葉量の差であることが判った。

林内光質が林外のそれと異なる程度を指標する概念に、葉層による吸収が激しい波長680nmの光強度と吸収が少ない波長800nmの光強度の比(680/800nm 分光強度比)が知られている。これについて検討し、原報告者の式は正しくないことを指摘し、より正しい式を提案した。

本研究は、苗木を高密度植栽して造成した模型林によったため、結果の応用性に限度がある可能性はあるものの、樹種特性を明らかにするには最も良い方法であると考ええる。

謝辞

本報告は、飯尾佳代氏が筑波大学農学研究科1999年度修士論文に用いたデータ及び修士論文に使用しなかったほぼ同量のデータを集成したものである。データ採取に3年間尽力された飯尾氏ならびに模型林分の造成に苗畑を貸与された筑波大学農林技術センターに厚く御礼申し上げる。

文献

- 荒木眞之（1971）林木のSLAに関する研究Ⅰ．カラマツ葉のSLAと照度・季節・密度・施肥の関係．日林誌53：359-367
- 荒木眞之（1972a）林木のSLAに関する研究Ⅱ．—シラカンバ模型林における葉の比面積と季節・庇陰の関係．日林誌54：184-191
- 荒木眞之（1972b）シラカンバ模型林における葉群の諸変化(予報)．日林誌54：192-198
- 荒木眞之（1973a）林木のSLAに関する研究Ⅲ．—シラカンバ模型林における葉の比面積と季節・庇陰の関係(承前)．日林誌55：227-233
- 荒木眞之・斎藤武史（1981）2, 3の落葉広葉樹葉の分光特性．92回日林論：233-234
- 荒木眞之・斎藤武史（1982）ハンノキ葉出葉後の分光特性の経時変化．93回日林論：227-228
- Araki M. (1985) The vertical profile of light intensity in a forest stand (I). Light-transmission coefficient of partial foliage and its estimation. J. Jpn. For. Soc. 67: 1-10
- 荒木眞之（1986a）分光強度比と葉面積指数の関係．97回日林論：197-198
- 荒木眞之（1986b）ヒノキ林における光質問題と間伐の関係．37回日林関東支論：77-78
- 荒木眞之（1986c）落葉広葉樹林内の光強度推定に関する研究．林試研報339：37-115
- 荒木眞之（1989）間伐前後における林内光質の変化と予測手法．(好適生産環境の作出-林地生産環境)．農林水産技術会議成果シリーズ GEP III-5：3-28
- 荒木眞之（2000）アカマツ高密度模型林における枝剪除処理が現存量・生産量・林内光環境に与える影響．筑大演報16：9-34
- Atzet, T. and Warning, R. H. (1970) Selective filtering of light by coniferous forest and minimum light energy requirements for regeneration. Can. J. Bot. 48: 2163-2167
- Coombe, D. E. (1957) The spectral composition of shade light in wood-lands. J. Ecol. 45: 843

- Federer, C. A. and Tanner, C. B. (1966) Spectral distribution of light in the forest. *Ecology* 47 : 555-560
- Jordan C. F. (1969) Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50 ; 663-666
- Monsi M., und Saeki T. (1953) Über die Lichtfaktor in den Pflanzen-gesellschaften und seine Bedeutung für die Stoff-production. *Jap. J. Bot.* 14 : 22-52
- 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 : 1-7
- Moss, R. A. and Loomis, W. E. (1952) Absorption spectra of leaves (1). The visible spectrum. *Plant Physiol.* 21 : 370-391
- 斎藤武史 (1983) 針葉の分光特性測定法の一試案及びモミ針葉の分光特性. *森林立地*25 : 33-37
- 佐々木恵彦・森 徳典・Francis S. P. Ng. (1981) *IUFRO 論*17 : 876-883
- 佐藤大七郎・根岸賢一郎・扇田正三 (1959) 林分生長論資料V—上層間伐をおこなったケヤキ人工林における葉の量と生長量— . *東演報*55 : 101-123
- 只木良也 (1976) 森林の現存量—とくのが国の森林の葉量について—. *日林誌*58 : 416-423

Summary

This study presents some facts on spectroscopic light environment in 24 young congested stands of 6 deciduous broad-leaved trees, *Betula platyphylla*, *Cercidiphyllum japonicum*, *Quercus serrata*, *Prunus Sargentii*, *Zelkova serrata* and *Ulmus parvifolia*. Spectral energy distribution (SED) between 380nm to 930nm wave length of light on every stratum in each stand and control light (out of stand) were synchronously measured with spectro-radiometer.

SED of light at the highest stratum in the stands shows a peak at 550nm, same to that of control light. But the intensity of photosynthetically active radiation (PAR) rapidly decreases with decrease of stratum height. Therefore, intensity of PAR becomes weak than that of near infrared rays at lower strata in the stand (Fig. 4).

In the Fig. 4, effect of leaf layer to SED is not shown directly. Therefore, relative radiation intensity of light (RRI), being intensity ratio among light of inside and outside of stand at same wave length, was used. Fig. 3 was re-drawn with the RRI and data for the Fig. 4. It is clear that values of RRI are 80~100(%) in the highest stratum, decreasing rate with decrease of stratum height is larger in PAR than in near infrared range. From these, it is suggested that light-extinction-coefficient (LEC) has spectral change even in stand of deciduous-broad trees. Differences of LECs between species and seasons were analyzed, because this fact has not been reported yet. Calculation of allometry, estimation of biomass and generalizing the specific-leaf-area for each 24 stand was conducted, and cumulative-leaf-area-index (CLAI)

of each strata of every stand was calculated. From CLAI and RRI of each stratum, 55 LECs in 10nm interval were estimated for each 24 stand (Fig. 6-11). As the results, they were clarified that spectrum of LEC in range of PAR show hill-shape tendencies with maximum at 560nm and minimum at 680nm, spectrum of LEC in the near infrared range show rapid increase to 780nm and gradual increase to 930nm.

Spectrum of LEC is nearly equal to each other among 6 species (Fig. 12), and among seasons (Fig. 6-9). However, the LEC becomes larger (light transmissibility of leaf layer becomes high) in the later season of *Cercidiphyllum japonicum* stand (Fig. 6). Stand with much biomass of leaves show large LEC, because progress of season is equal to growth of stand. This fact is confirmed by many wave length of light with high significance ($P=0.001$) in the all species.

Another method to clarify a quality change of SED by the stands had reported. This is an intensity ratio of two lights measured at stand floor, the numerator is intensity of 680nm light being well absorbed by leaf layer, and denominator is intensity of 800nm light being less absorbed. As a matter of course, it was clarified that the ratio decreases with increase of LAI of stand, even in deciduous broad leaved tree stands (Fig. 19).

表-1. カツラ林(99/9)の相対生長式と現存量

器官	傾き	切片	現存量 (ton/ha)
幹	0.8950	-0.6372	19.027
枝	1.0287	-1.7474	3.612
葉	0.7933	-0.8541	5.860

表-2. カツラ林(99/9)の垂直配分率

層位	幹	枝	葉	層位	幹	枝	葉
000-020	0.2534	0.0112	0.0000	100-120	0.0738	0.1711	0.2109
020-040	0.1874	0.0759	0.0008	120-140	0.0608	0.1567	0.1719
040-060	0.1352	0.1157	0.0083	140-160	0.0442	0.0999	0.1555
060-080	0.1070	0.0921	0.0233	160-180	0.0281	0.0792	0.2006
080-100	0.0926	0.1295	0.0498	180-200	0.0174	0.687	0.1789

表-3. カツラ林(99/9)の積算葉面積指数

層位(cm)	180	160	140	120	100	80	60	40	20	0
$\Sigma LAI(m^2/m^2)$	0.682	2.017	4.303	6.070	7.824	8.407	8.695	8.804	8.815	8.815

表-4. カツラ林(99/9)の波長別吸光係数(一部)

波長(nm)	吸光係数	波長(nm)	吸光係数
400	-0.186	600	-0.131
440	-0.151	640	-0.145
480	-0.158	680	-0.160
520	-0.145	720	-0.085
560	-0.123	760	-0.058

6種の落葉広葉樹模型林内の光質環境と形成過程（荒木）

表-5. カツラ林の林分概況

	98/5	98/7	99/5	99/7	99/8	99/9
調査区面積(m ²)	1.563	1.563	1.563	1.563	1.563	1.100
平均樹高(cm)	151	144	197	213	226	203
平均根元径(cm)	1.21	1.24	1.62	1.87	1.97	1.73
残存個体数(本)	24	25	25	25	23	25

表-6. カツラ林の現存量の推移

	98/5	98/7	99/5	99/7	99/8	99/9	
幹	4.606	4.822	10.399	14.170	15.797	19.027	(ton/ha)
枝	0.750	0.783	1.899	2.705	3.141	3.612	
葉	1.595	1.671	3.299	4.343	4.706	5.860	

表-7. カツラ葉の比面積の光強度反応

	99/5	99/7	99/8	99/9
傾き	-300.6544	-122.4821	-95.2472	-95.2369
切片	730.9602	339.2002	266.9173	266.9060

表-8. カツラ林の波長別吸光係数の P 値(有意水準)構成

時期	0.001	0.005	0.010	0.025	0.050	N
99/9	56	0	0	0	0	0
99/8	39	16	1	0	0	0
99/7	40	1	0	10	5	0
99/5	56	0	0	0	0	0
98/7	38	1	5	9	1	2
98/5	21	12	0	0	1	22

表-9. シラカンバ4林分の概要

林分所在	林齢 (年)	区面積 (m ²)	個体数 (本)	樹高 (cm)	根元径 (cm)	現存量(ton/ha)		
						幹	枝	葉
農技セン	3	1.025	23	155	1.17	6.708	1.461	1.778
八演1	6	0.896	16	173	1.39	7.300	1.642	1.932
八演2	6	0.779	16	174	1.24	6.930	1.483	1.837
八演3	12	0.859	11	326	2.87	39.760	16.189	10.324

表-10. シラカンバ葉の比面積の光強度反応

林分	傾き	切片	P 値
3年生(農技セン)	-87.3284	288.1938	0.005
6年生(八演1)	-57.3855	266.6552	0.200
6年生(八演2)	-109.8198	387.6914	0.005
12年生(八演3)	-62.8418	280.7327	0.010

表-11. コナラ林の林分概況

	98/7	98/9	99/5	99/7	99/8	99/9
調査区面積(m ²)	1.700	1.690	1.563	1.563	1.563	1.360
平均樹高(cm)	157	160	176	169	188	171
平均根元径(cm)	1.50	1.70	1.58	1.78	2.14	0.79
残存個体数(本)	23	23	22	22	21	20

表-12. コナラ林の相対成長式

器官	傾き	切片
幹	0.8830	-0.5378
枝	0.6021	-0.7061
葉	0.7413	-0.7236

6種の落葉広葉樹模型林内の光質環境と形成過程（荒木）

表-13. コナラ林の現存量の推移

	98/7	98/9	99/5	99/7	99/8	99/9
幹	12.847	9.347	9.294	11.809	15.985	10.921
枝	1.631	1.091	1.098	1.303	1.566	1.620
葉	3.589	2.502	2.502	3.070	3.915	2.261

(単位：ton/ha)

表-14. ヤマザクラ林の林分概況

	98/5	98/7	99/5	99/7	99/8
調査区面積(m ²)	1.690	0.920	1.100	1.100	1.100
平均樹高 (cm)	163	216	241	247	248
平均根元径(cm)	1.38	1.86	1.62	1.84	1.97
残存個体数(本)	25	24	23	23	25

表-15. ヤマザクラ林の相対生長式

器官	傾き	切片
幹	1.0546	-1.0984
枝	0.9677	-1.8741
葉	1.0975	-1.5926

表-16. ヤマザクラ林の現存量の推移

	98/5	98/7	99/5	99/7	99/8
幹	5.449	29.915	16.615	23.533	27.458
枝	0.544	2.603	1.560	2.137	2.495
葉	2.257	5.281	2.854	4.087	4.767

(単位：ton/ha)

表-17. ヤマザクラ葉の比面積の光強度反応

	98/5	98/7	99/5	99/7	99/8
傾き	-122.4629	-158.5701	-160.4852	-171.2954	-191.1985
切片	301.2992	482.6264	486.2877	428.4861	441.2003

表-18. ケヤキ林の林分概況

所在	調査	林齢 (年)	本数密度 (千本/ha)	区面積 (m ²)	個体数 (本)	樹高 (cm)	根元径 (cm)
農技セン	97/9	1	250	0.917	24	185	1.65
兵頭緑販	97/10	8	42	42.716	18	547	8.50

表-19. ケヤキ林の相対生長式と現存量

器官	林分	傾き	切片	P 値	現存量
幹	農技セン	0.8779	-0.6057	0.001	16.186
	兵頭緑販	1.0435	-1.1872	0.001	19.440
枝	農技セン	0.7992	-1.0673	0.200	3.383
	兵頭緑販	1.0325	-1.2829	0.005	13.840
葉	農技セン	1.6131	-3.3042	0.005	3.742
	兵頭緑販	1.1594	-2.4433	0.005	3.827

(現存量の単位は ton/ha)

表-20. ケヤキ葉の比面積の光強度反応

林分	傾き	切片	P 値
農技セン	-200.7518	448.7410	0.005
兵頭緑販	-143.7447	334.3598	0.001

表-21. アキニレ林の相対生長式と現存量

器官	傾き	切片	P 値	現存量 (ton/ha)
幹	0.7008	0.4230	0.010	21.664
枝	0.8340	-0.4876	0.050	11.464
葉	0.7183	-0.4194	0.025	3.774

表-22. 680nm 吸光係数と林分葉面積指数の関係

樹種	傾き	切片	層数	P 値	樹種	傾き	切片	層数	P 値
カツラ	-0.3834	-0.4194	6	0.100	シラカンバ	-0.8176	-0.0099	4	0.010
コナラ	-1.4767	0.3259	6	0.100	ケヤキ	-1.1963	0.3477	2	—
ヤマザクラ	-1.3100	0.4018	5	0.050	一括	-0.7548	-0.0847	24	0.001

表-23. 各波長の吸光係数-林分葉面積指数間回帰式

波長 (nm)	傾き	切片	波長 (nm)	傾き	切片
450	-0.7469	-0.1021	680	-0.7548	-0.0847
550	-0.7299	-0.1806	730	-0.6795	-0.3752
560	-0.7245	-0.1936	820	-0.6677	-0.6694

表-24. 近赤外域における光強度特異点波長

波長 (nm)	760	770	780	790	800	820	830	860
絶対値スペクトル	大	小	肩	大	肩	肩	小	大
相対値スペクトル	肩	大	小	肩	肩	大	小	大

(大＝極大値, 小＝極小値, 肩＝移行値)

表-25. 各樹種林分における 2 種の分光強度比間の関係

	コナラ	ケヤキ	カツラ	シラカンバ	アキニレ	ヤマザクラ
勾配	1.0337	1.1566	1.1576	1.1080	1.0961	1.1475
切片	0.0408	-0.0275	-0.0068	-0.0053	-0.0110	-0.0036
層数	34	24	54	33	12	57

表-26. 各樹種の林分葉面積指数と680/800nm 分光強度比間の回帰式

樹種	係数 b	冪係数 a
カツラ	1.3689	-0.2667
シラカンバ	1.2506	-0.4648
アキニレ	1.4476	-0.2733
ヤマザクラ	1.2320	-0.2336
ケヤキ	1.1049	-0.2359
コナラ	1.2321	-0.3481
全林分	1.1065	-0.2399

6種の落葉広葉樹模型林内の光質環境と形成過程（荒木）

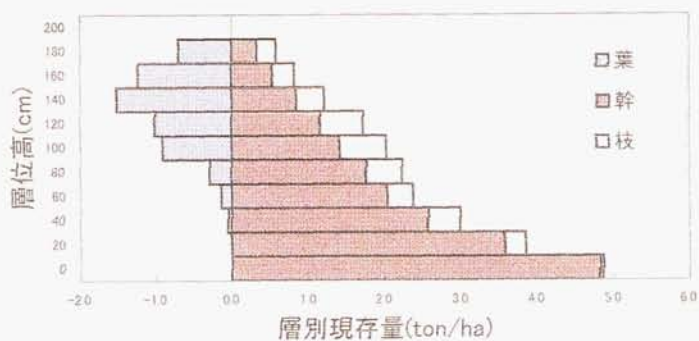


図-1. カツラ林(99/9)の生産構造

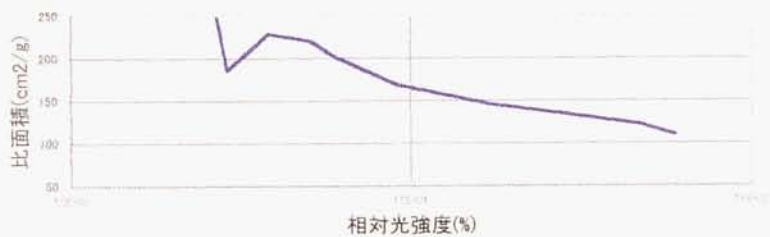


図-2. カツラ林(99/9), 葉の比面積の光強度反応

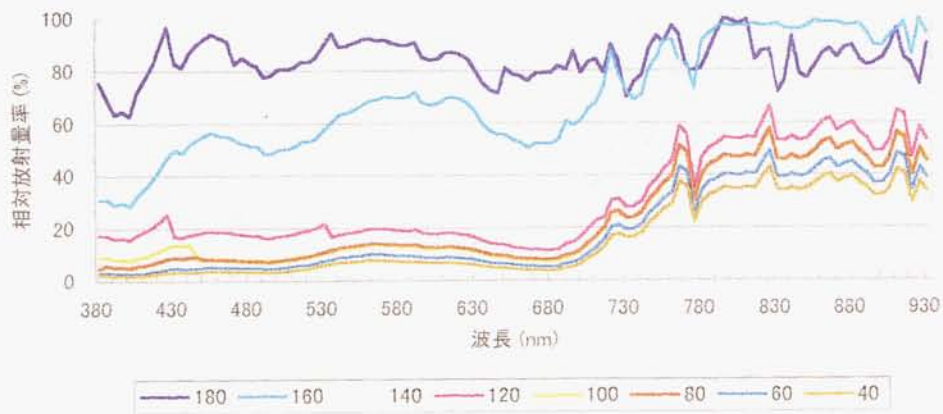


図-3. カツラ林(99/9)各層の相対分光放射量率スペクトル

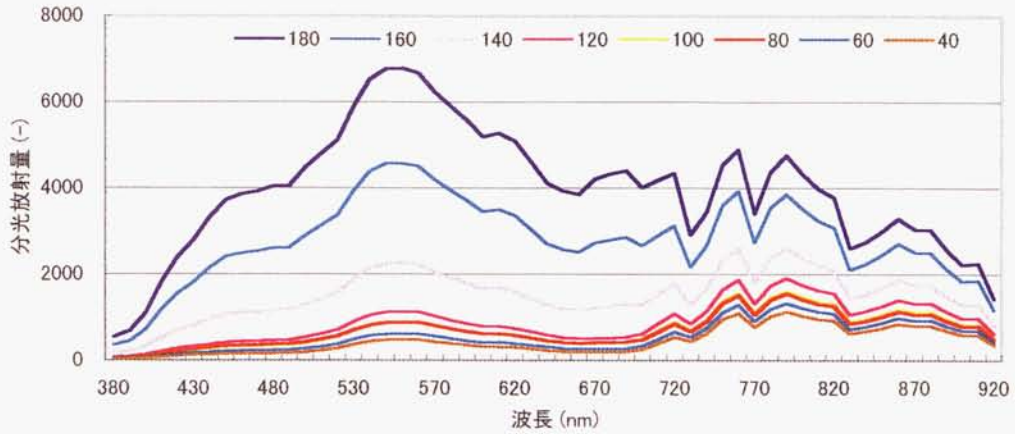


図-4 . カツラ林(99/9)各層の分光放射量スペクトル

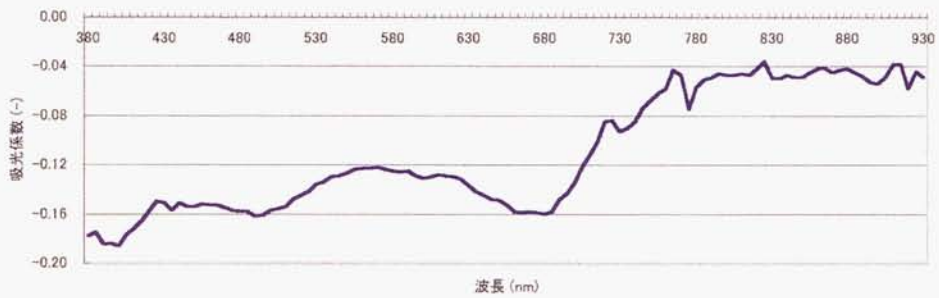


図-5 . カツラ林(99/9)における波長別吸収係数

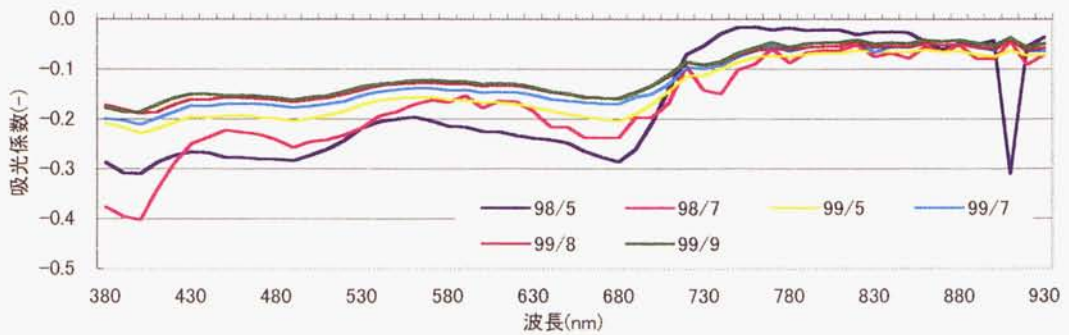


図-6 . カツラ林の吸収係数スペクトル

6種の落葉広葉樹模型林内の光質環境と形成過程（荒木）

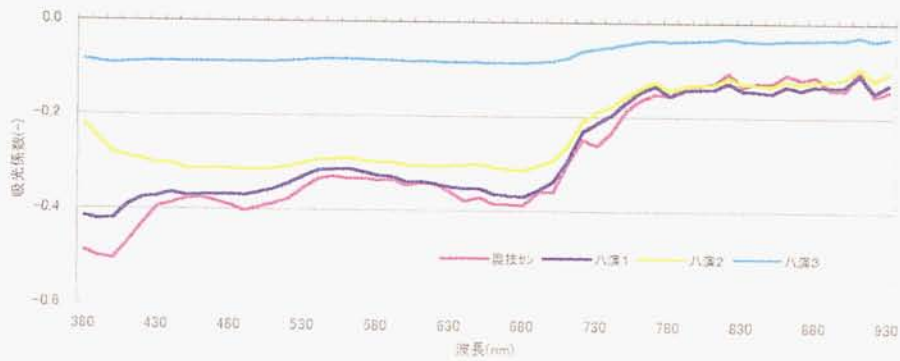


図-7. シラカンバ林の吸光係数スペクトル

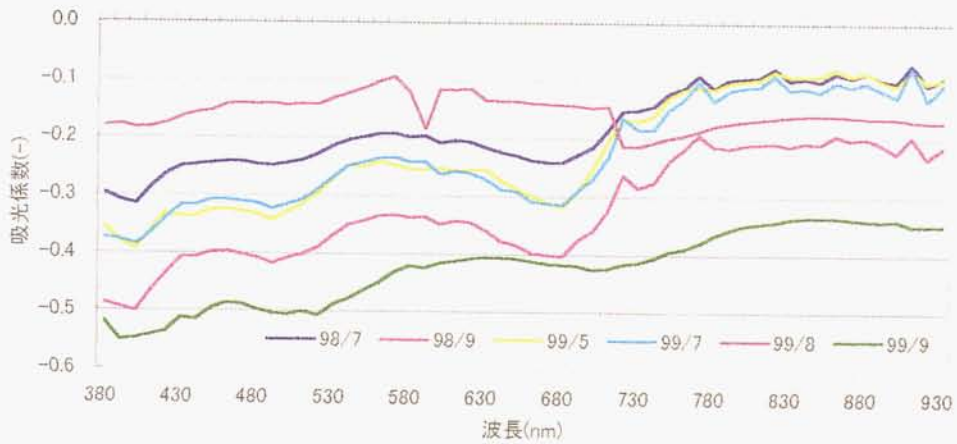


図-8. コナラ林の吸光係数スペクトル

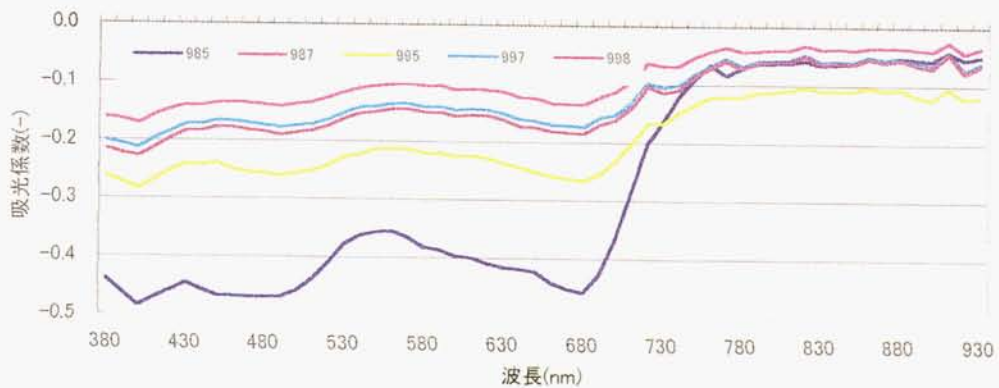


図-9. ヤマザクラ林の吸光係数スペクトル

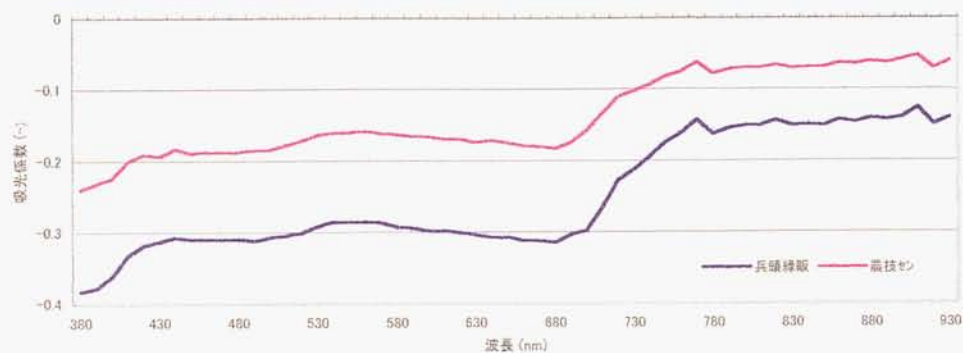


図-10. ケヤキ林の吸光係数スペクトル

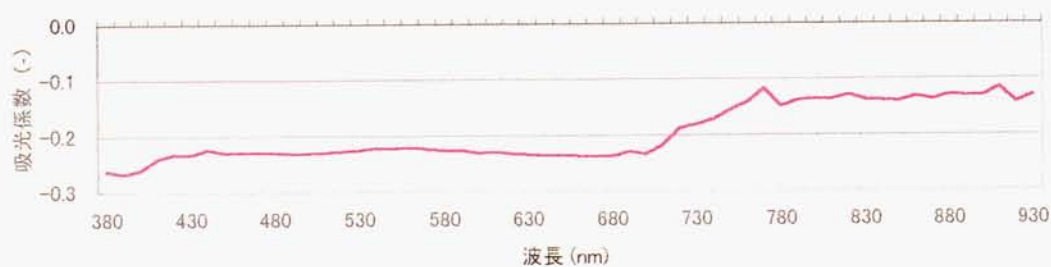


図-11. アキニレ林の吸光係数スペクトル

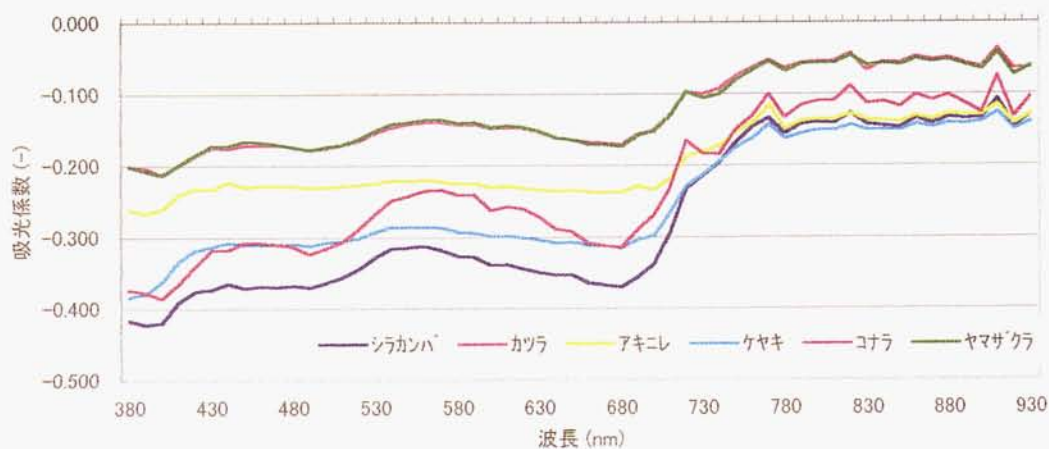
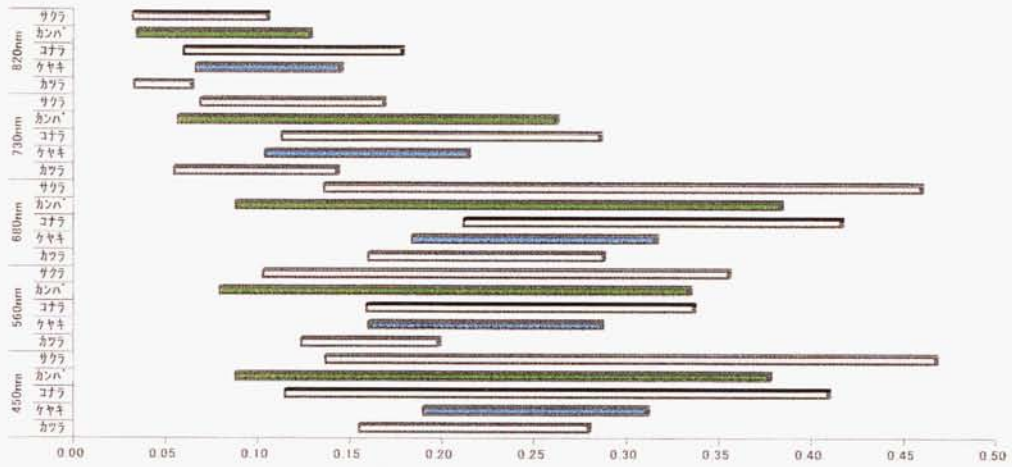


図-12. 吸光係数の樹種間比較

6種の落葉広葉樹模型林内の光質環境と形成過程（荒木）



(横軸は吸光係数 $\times -1.0$)

図-13. 吸光係数の樹種・波長毎の時期間変化範囲

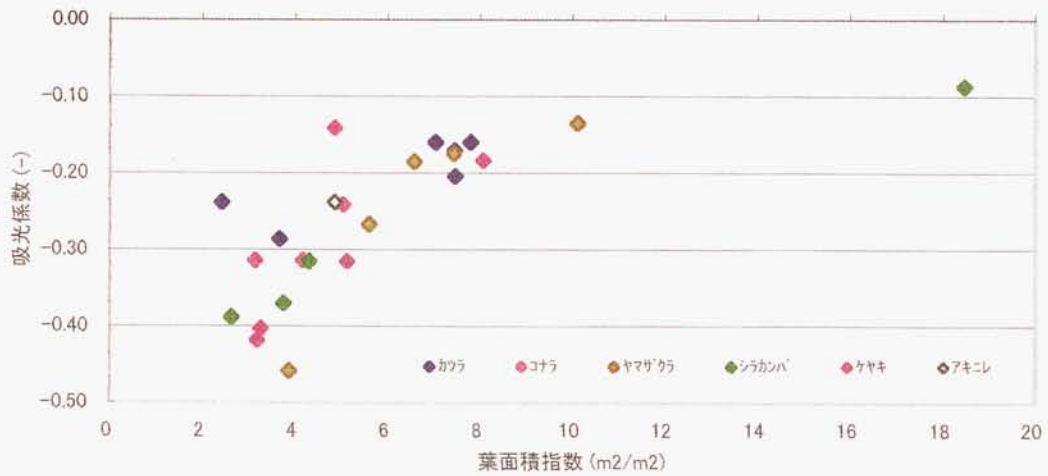


図-14. 680nm 光における林分の吸光係数と葉面積指数の関係

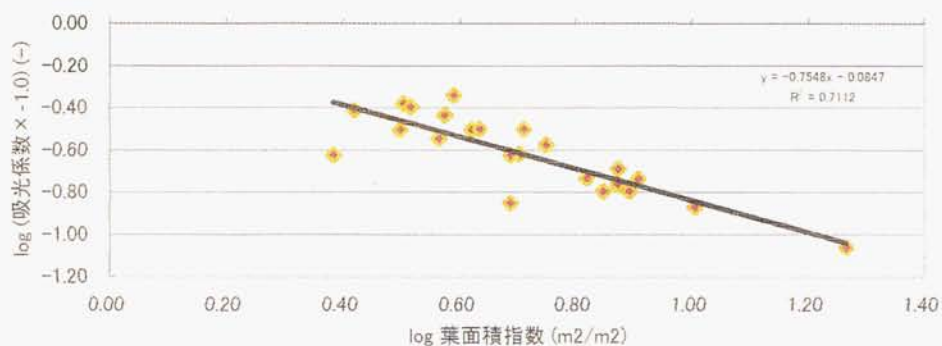


図-15. 680nm 光の吸収係数と葉面積指数の関係

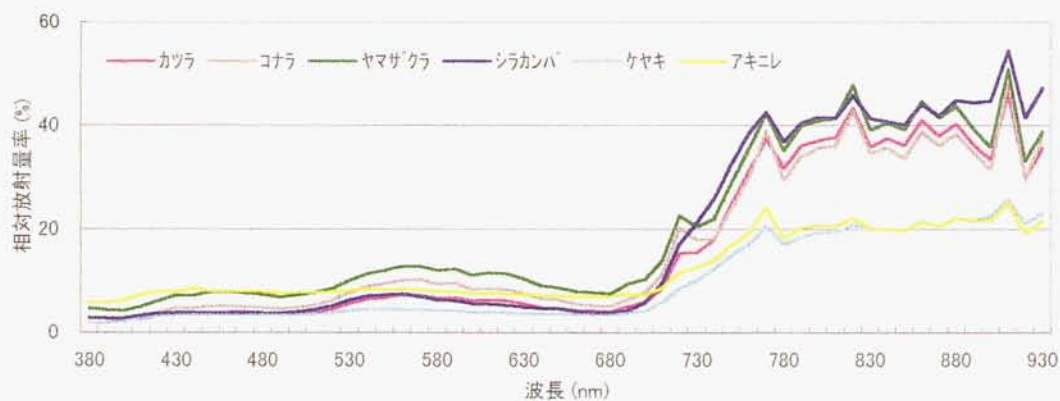


図-16. 林分最下層の相対分光放射量率スペクトル

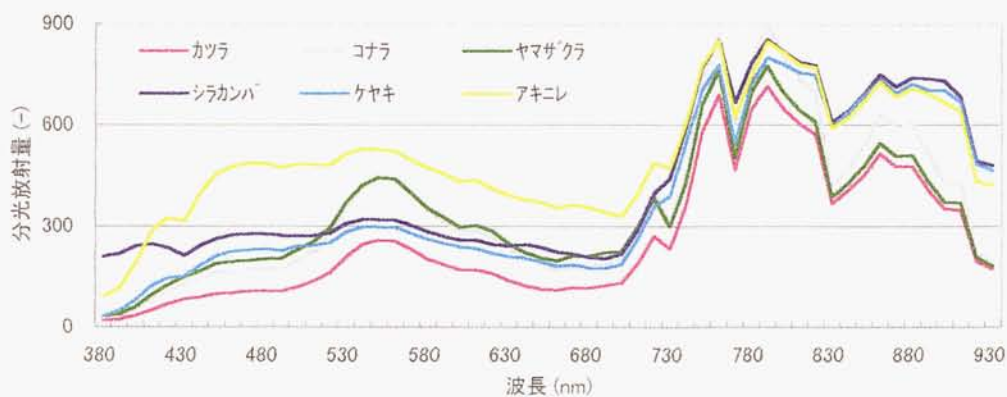


図-17. 林分最下層の分光放射量スペクトル

6種の落葉広葉樹模型林内の光質環境と形成過程（荒木）

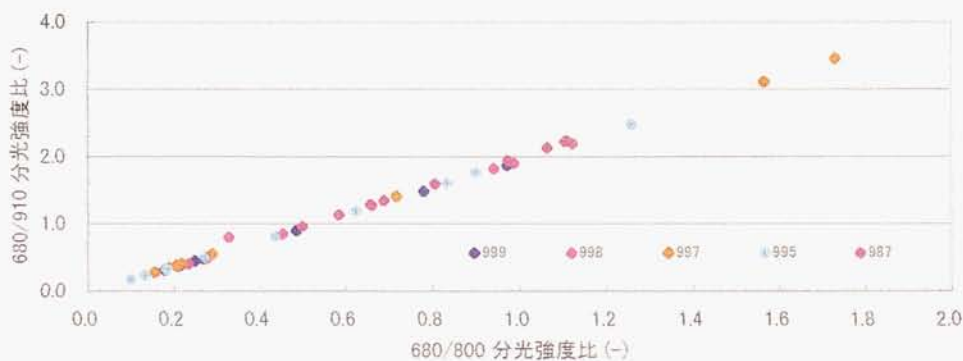


図-18. カツラ林における2種の分光強度比間の関係

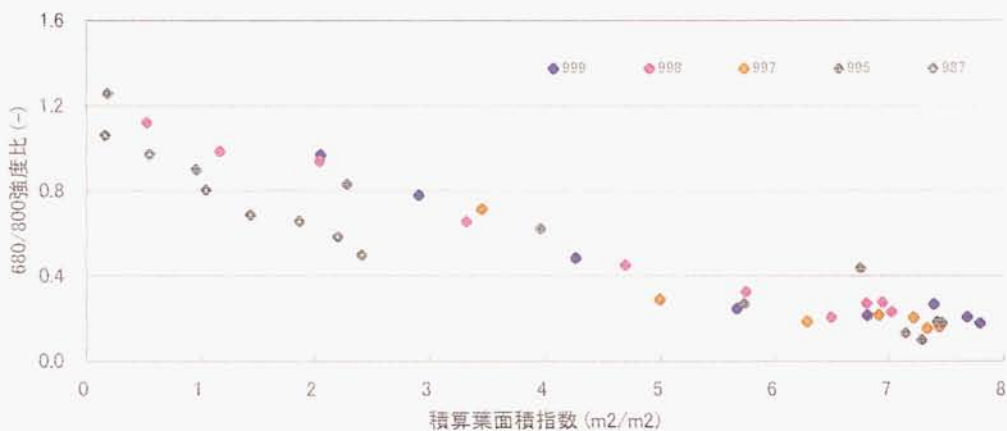


図-19. カツラ林における680/800nm 分光強度比の層位間変化

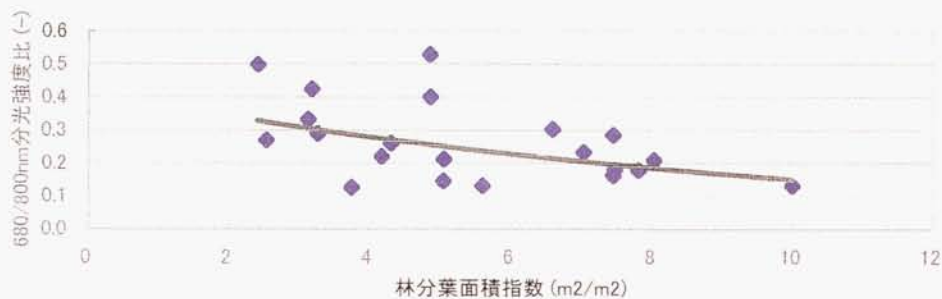


図-20. 全林分最下層の680/800分光強度比と林分葉面積指数