

樹葉の季節的分光特性変化と
その応用に関する研究

1995

吉村晴佳

樹葉の季節的分光特性変化と
その応用に関する研究

1 9 9 5

吉村晴佳

目 次

第 1 章 緒論	1
第 2 章 単葉の可視域分光特性	6
2. 1 はじめに	6
2. 2 材料および測定方法	7
2. 2. 1 材料	7
2. 2. 2 樹葉の分光スペクトルの測定方法	7
2. 3 結果および考察	10
2. 3. 1 緑葉の分光スペクトル特性	10
2. 3. 2 落葉広葉樹の秋季の可視域分光特性変化	12
2. 4 まとめ	16
第 3 章 単葉の近赤外域分光特性	17
3. 1 はじめに	17
3. 2 材料および測定方法	19
3. 3 結果および考察	19
3. 3. 1 樹木の活性度と単葉の近赤外域反射	19
3. 3. 2 単葉の近赤外域反射におよぼす含水率の影響	21
3. 3. 3 単葉の近赤外域分光特性の季節変化	22
3. 4 まとめ	24
第 4 章 重なり合った樹葉の反射特性の季節的变化	27
4. 1 はじめに	27
4. 2 重なり合った 2 枚の樹葉の光学モデル	28
4. 3 重なり合った 2 枚の樹葉の光学モデルの検証および考察	
－樹葉の重なりによる近赤外域反射の季節変化の場合－	32
4. 4 まとめ	44
第 5 章 樹葉の季節的可視域分光特性変化におよぼす植物色素の影響	47
5. 1 はじめに	47

5. 2	樹葉の経時的可視域分光反射スペクトル変化	47
5. 2. 1	材料および測定方法	47
5. 2. 2	秋期の樹葉の経時的な可視域分光反射特性変化	48
5. 3	植物色素量の経時的変化	49
5. 3. 1	材料および方法	49
5. 3. 1. 1	材料	51
5. 3. 1. 2	色素の抽出方法	51
5. 3. 1. 3	色素の定量方法	51
5. 3. 2	植物色素抽出・定量の結果および考察	53
5. 3. 2. 1	抽出色素スペクトル	53
5. 3. 2. 2	緑葉のクロロフィル・カロチノイド比	54
5. 3. 2. 3	植物色素量の秋期の経時的変化	57
5. 4	季節的樹葉反射特性変化におよぼす植物色素の影響	61
5. 5	まとめ	65
第6章	樹葉の可視域分光特性におよぼすカロチノイド類の影響	67
6. 1	はじめに	67
6. 2	材料および方法	70
6. 3	結果および考察	71
6. 3. 1	緑葉のカロチノイド種類	71
6. 3. 2	秋季の黄葉・紅葉時のカロチノイド種類	73
6. 3. 3	樹葉の可視域分光スペクトルにおよぼす カロチノイドの影響	74
6. 4	まとめ	77
第7章	樹葉の季節的分光スペクトル特性変化の応用に関する研究	
	—樹葉分光反射スペクトルの物理測色法による色彩解析への応用例—	78
7. 1	はじめに	78
7. 2	材料および方法	79
7. 2. 1	材料および分光反射スペクトル測定方法	79

7. 2. 2	色彩計算の方法	79
7. 3	解析結果および考察	86
7. 3. 1	秋季の樹葉の分光反射特性変化に伴う三刺激値の変化	86
7. 3. 2	夏から秋にかけての三刺激値の経時的変化	87
7. 3. 3	樹葉の重なり合いの効果による三刺激値の変化	89
7. 4	まとめ	96
第8章	まとめと展望	98
8. 1	まとめ	98
8. 2	今後の展望	102
謝辞		108
参考および引用文献		109

第1章 緒論

地球環境問題が国際的に問題視されている。このような環境問題のなかでも、陸域の植生に関する問題、とりわけ、熱帯雨林の減少をはじめとする森林の荒廃、酸性雨による影響、砂漠化の進展などに関して、現状把握、現象解明、影響評価などに広範な研究が必要となってきた^{5)・6)・8)}。衛星データを用いたリモートセンシング技術による観測は、広域性、反復性、データ処理の容易性などのすぐれた特性を持っており、今後その特性を生かして、陸域の植生の解析に関しても大きな役割を果たすものと期待されている。

砂防的観点から陸域の植生について考えてみると、古代から現代に至るまで、世界のいたる地域で、森林の被覆を失うことにより、土壌侵食、河川の土砂の堆積とそれによって引き起こされる洪水、土石流など、森林の変化と関連した問題が深刻化することを体験してきている。

たとえば、古代文明の発祥の地であるメソポタミアが滅びてしまった要因として、森林の乱伐とそれにより引き起こされた洪水が挙げられているのは有名な話である。また、先史時代には深い森林に覆われていた欧州の中部・南部地方も、中世から近世にかけての農地の開発と産業の発達を支えるエネルギー資源の収奪により著しく森林が荒廃し、それによる生態学的手痛い“しっぺ返し”を受けた。アルプス山脈とピレネー山脈の乱伐は、夏期の河川の渇水、また、ひとたび雨が降れば、河川の氾濫や地すべり、鉄砲水を引き起こし、オーストリア、ドイツ、イタリア、スペインの諸国に脅威を与えた。我国においても、明治の急激な近代化と第二次世界大戦中の森林資源の収奪による森林の荒廃が、戦後の河川の洪水を引き起こした大きな要因であった。

今日では、このような森林の消失とそれにより引き起こされる災害および生態系の破壊の問題は開発途上国といわれる地域でとりわけ深刻である。近年、バングラデッシュ・エチオピア・インド・パキスタン・サハラ周辺国などにおいて、洪水や干ばつによって農業が打撃を受けているが、これらの災害と上流域で森林がなぎ倒されていることとは無関係ではないと指摘されている⁴⁾。

このような森林の荒廃の程度が災害や農業におよぼす影響については定量的

に評価することが困難な点も、治山・治水・環境問題解決への障害のひとつとなっている。今後、このような問題を科学的に解決していくためには、現状把握・計画・評価のいずれの場面においても、砂防的観点から広範囲にわたる地域の植生被覆状況の全体像の把握が必要となるであろう。対象地域の面積が小さいときには現地調査や空中写真などで十分に対応できるが、広領域になればなるほど、現状把握に要する時間、経費ともに増大してくる。この問題を軽減し、実効ある方策として、全地球にわたって定期的な観測を現在行なっている衛星データを利用することは、リアルタイムでのモニタリングも可能であり、今後有力な方法となり得る。

近年、我国の砂防においては、流域管理の重要性が指摘されている。すなわち、流域管理に必要な水や土砂の流域からの流出を予測し、砂防計画を立案していくうえにおいて、崩壊地の分布、土地の詳細な植生被覆状況など、流域の全体像を把握することはきわめて重要である。このようなデータの収集に際して衛星データを利用することは、広領域を捉え、その変化をリアルタイムで把握できる点からも非常に有効な技術となり得る。

また、緑化の目的で導入された植物や酸性雨などの環境の影響を受けた植物の状態を監視する植生モニタリングや活性度を診断する必要性も高まってきており、さまざまな手法の開発が試みられている。その活性度診断技術の方法の一つとして、リモートセンシング技術が応用され、成果をおさめている^{47, 48)}。

このような植生域あるいは植物を対象としたリモートセンシングの研究では、植物葉の分光反射が、赤領域で低く、近赤外域で高いという特性を利用した近赤外写真^{7, 50)}、バイバンド比^{22, 44, 58, 62, 65, 93)}、正規化植生指数^{35, 59, 66)}が用いられている。一例として、Fig. 1.1に、植物葉と花崗岩の可視域から近赤外域の分光反射スペクトルを示す。一般に花崗岩のような無機物では可視域から近赤外域の分光反射スペクトルは比較的単調に推移している。一方、植物葉は可視域での吸収が高いため反射は非常に低く、それとは対照的に近赤外域では高い反射を示している^{72, 73)}。バイバンド比 (IR/R) は、植物葉の可視域赤領域の反射 (R) が低く、近赤外域の反射 (IR) が高いという特性に

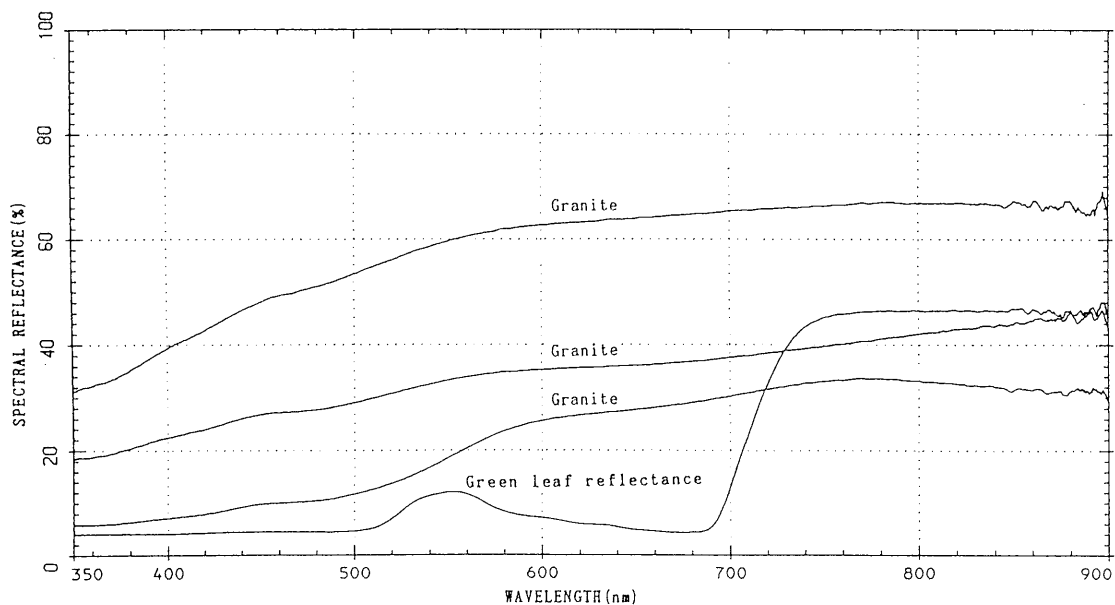


Fig. 1.1 Spectral reflectance curves from a green leaf and three granite samples.

基づいた植生指数である。また、今日もっともよく使われている植生指数である正規化植生指数NDVI (normalized differential vegetation index) は、次式によって表される。

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (1-1)$$

ここで、NIRは近赤外域のバンド値（たとえば、AVHRRバンド2、MSSバンド7、TMバンド4など）であり、VISは可視域のバンド値（たとえば、AVHRRバンド1、MSSバンド5、TMバンド3）である。

このようリモートセンシングによる植物域の解析研究の基礎となったのは、主にこれまでの野外での地表物質分光反射の直接計測による研究によってである。植物を対象とする分光反射特性の研究についても、これまでは主に野外測定でなされてきている^{3, 73, 88}。

しかしながら、植物を対象とした野外測定では、他の対象物にはない困難な問題点がある。まず、樹木をはじめ植生については、一般的にかなり共通した

パターンを持つことが知られており、このことは、植物と他の対象物を区別する場合には大変効果的であるが、植生そのものをさらに詳細に解析する場合には、かなり共通したパターンのなかでの微細な変化のあることが問題となる。植物を対象とした分光反射特性の野外測定では、対象物以外からの直接反射光などのノイズの影響が一様ではなく、また、厳密には測定時間内のエネルギーが一定ではないなどの問題があり、これらのことが微細な変化の解析を困難にしている。とりわけ、森林域を対象とする場合には、樹冠を直接測定することは物理的にかなり困難であるとともに、コストや気象の影響といった点からも有効なデータが得にくい。

さらに、リモートセンシング技術によって植生を解析する場合の大きな問題として、植物の分光反射特性は、他の対象物とは異なり、同じ植物であっても季節的に変化すること、また環境条件の影響を受けて生理生態的に多様に変化することなどが挙げられる。しかし、この問題は、分光特性変化を明確に捉え、さらに樹種群特性や生理生態的知識と関連づけることができれば、植生域の解析の非常に有効な手段となり得る。

本研究は、樹葉の電磁波特性に関する基礎的な知見を得るとともに、リモートセンシング技術による植生域に関する解析法をさらに発展させ、現在行なわれている活性度診断技術の手法のうちでも植物葉の電磁波特性を利用したより正確で精度の高い解析に資することを目的として行なった。それゆえ、植物の基本的な分光スペクトル変化を正確に把握するために、植物葉のような拡散反射物体の反射率を現在最も正確に計測できる機器である積分球付分光光度計を用いて、再現性の高い分光スペクトルを実験室内で測定した。測定波長域は、可視波長域および近赤外域を中心とし、植物の特性である季節変化を明らかにするため、経時的に分光スペクトルの測定を行なった。測定対象は、植生域のうちでも森林域を対象としたリモートセンシング技術あるいは樹木の活性度診断技術の基礎となる分光特性の知識を得るために、主に樹葉とした。米国においても、リモートセンシングの研究が1970年代および1980年代の初めには、農業生産物収穫高の推測を中心にして行なわれていたという状況もあって⁴³⁾、こ

のような実験室においての樹葉の季節的分光特性変化についての報告は極めて少ない^{3,4)}。

本研究の第2章では、単葉について、緑葉の可視域における特性と顕著な可視域分光特性変化である落葉広葉樹の秋季の紅葉現象の分光特性について述べる。第3章では、単葉の近赤外域における反射量に影響をおよぼす要因について考察を加え、近赤外域分光特性の季節変化について述べる。また、植物葉では、実験室内での分光反射スペクトルの測定から、植物葉が重なり合うことによって、近赤外域で反射が増加することが知られている^{1,14,34)}。第4章では、樹葉が重なり合った場合の反射量増加の効果についての光学モデルを提案し、重なり合いの季節変化について考察を加えた。

第5章では、樹葉の可視域分光特性におよぼすクロロフィルおよびカロチノイド等の植物色素の影響について、樹葉分光反射スペクトルとこれらの植物色素の経時的定量を対応させ、樹葉の可視域の反射におけるこれらの色素の影響について考察を加えた。また、第6章では、樹葉のカロチノイド類について薄層クロマトグラフィによる定性的な解析を行ない、可視域分光スペクトル特性におよぼす影響について確認した。第7章では、樹葉分光反射特性の応用に関する研究の一例として、分光光度計で測定した可視域分光反射スペクトルを用い計算によって求める物理測色法による色彩解析について述べる。色彩解析は国際照明委員会 (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE) が等色実験結果に基づき定義しているXYZ表色系を採用し、計算は分光測色法にしたがった。分光測色法では、CIEによって分光エネルギー分布および等色関数が規定されており、分光反射スペクトルを用い測色計算を行なうことにより三刺激値X, Y, Zを求めた。なお、CIE・XYZ表色系の三刺激値X, Y, Zは、変換式により、CIE・RGB表色系に変換が可能である。この応用研究は、景観評価の基礎研究として、また、モニタージュ画像の作成手法の色彩に関する技術に大いに役立つと考えている。第8章で、本論文の総まとめを行ない、今後の展望について述べる。

第2章 単葉の可視域分光特性

2.1 はじめに

緑の植生の光に対する反射特性は、波長に対して特有な変化を示す特徴を有することが知られている^{11, 37, 98)}。

実験室における植物葉の分光スペクトル測定については、GATES *et al.*¹¹⁾ (1965), GAUSMAN¹³⁾ (1974), GAUSMAN *et al.*^{12, 14)} (1970, 1976), KNIPLING³⁷⁾ (1970), WOLLEY⁹⁸⁾ (1971), 妹尾⁷³⁾ (1977), 石山ら³⁴⁾ (1984) による報告があるが、落葉広葉樹の秋季の紅葉現象についてはこれまでなされていない。

Fig. 2.1に緑色単葉の典型的な分光反射スペクトルを示した。波長400nmから700nmの可視域においては、植物葉の分光特性に対しては植物色素の影響が最も強いといわれている^{11, 37, 98)}。落葉広葉樹の秋季の紅葉現象は、顕著な可視域の分光特性変化であると考えられ、衛星データを用いてこの変化を解析するこ

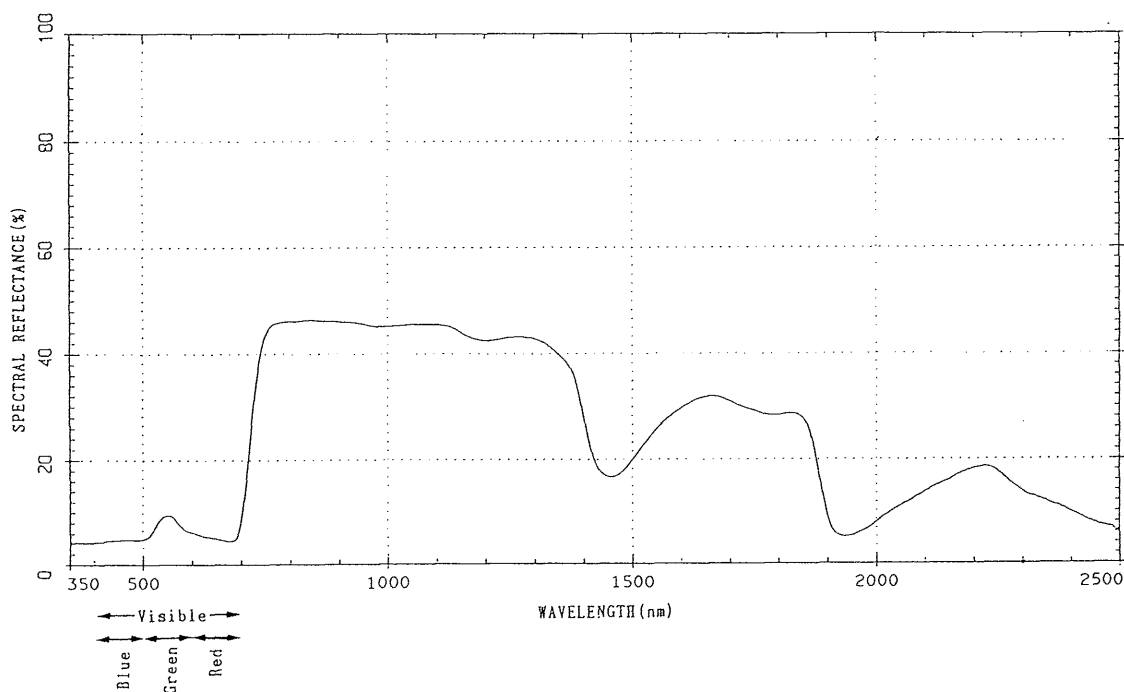


Fig. 2.1 Spectral reflectance of a green leaf. (*Cinnamomum camphora*)

とにより、樹葉の生理生態的特性に基づいた樹種群判別も可能になると考えられる。このような理由により、落葉広葉樹の秋季の分光特性変化を明確に捉えるため、実験室で積分球付分光光度計による樹葉の可視域の分光反射スペクトルおよび分光透過スペクトルの測定を経時的に行なった。

2. 2 材料および測定方法

2. 2. 1 材料

樹葉の分光スペクトルの測定に用いる試料として、京都府立大学および京都府立植物園に生育している樹木より、暖温帯林の構成樹種木であるTable 2.1に示した9科15種の落葉広葉樹、常緑広葉樹、常緑針葉樹を選定した。試料採取は、1990年7月から1990年11月にかけて行なった。試料木は、いずれも林分構成個体の樹高3m以上の南向きのものを選定し、採取は、午前中に同一個体の陽葉の部分を高枝切りで枝ごと行なった。また、常緑の樹種については、当年葉を採取した。採取した枝は、アイスボックスに入れて研究室に持ち帰り、分光スペクトル測定用に樹葉をとり、直ちに測定を行なった。

2. 2. 2 樹葉の分光スペクトルの測定方法

試料の分光スペクトルの測定は、積分球付分光光度計（島津製作所製、UV-2100）を用いて、350～800nmの波長域について0.2nm間隔で行なった。

積分球付分光光度計の光学系統図をFig. 2.2に示す。積分球付分光光度計（島津製作所製、UV-2100）は、光源のハロゲンランプW Iから出た光を、回折格子Gにより分光し、Fig. 2.2のA側と白板である硫酸バリウム（BaSO₄）側を交互に照射するダブル・ビーム方式であり、光源の変動等による誤差を補正している。積分球の内面は、測定波長域内で高い反射率をもつ硫酸バリウムで塗装されており、反射測定の際の拡散反射および、透過測定の際の散乱透過光を効率的に捕捉する。反射または透過光の検出には、積分球の下部に設けてある光電子増倍管（photo-multiplier）が用いられる。試料面に照射されている光束の面積は、3×5.5mmである。光の試料面に入射する角度は8度で、拡散反射と鏡面反射を含む全ての反射を測定した。

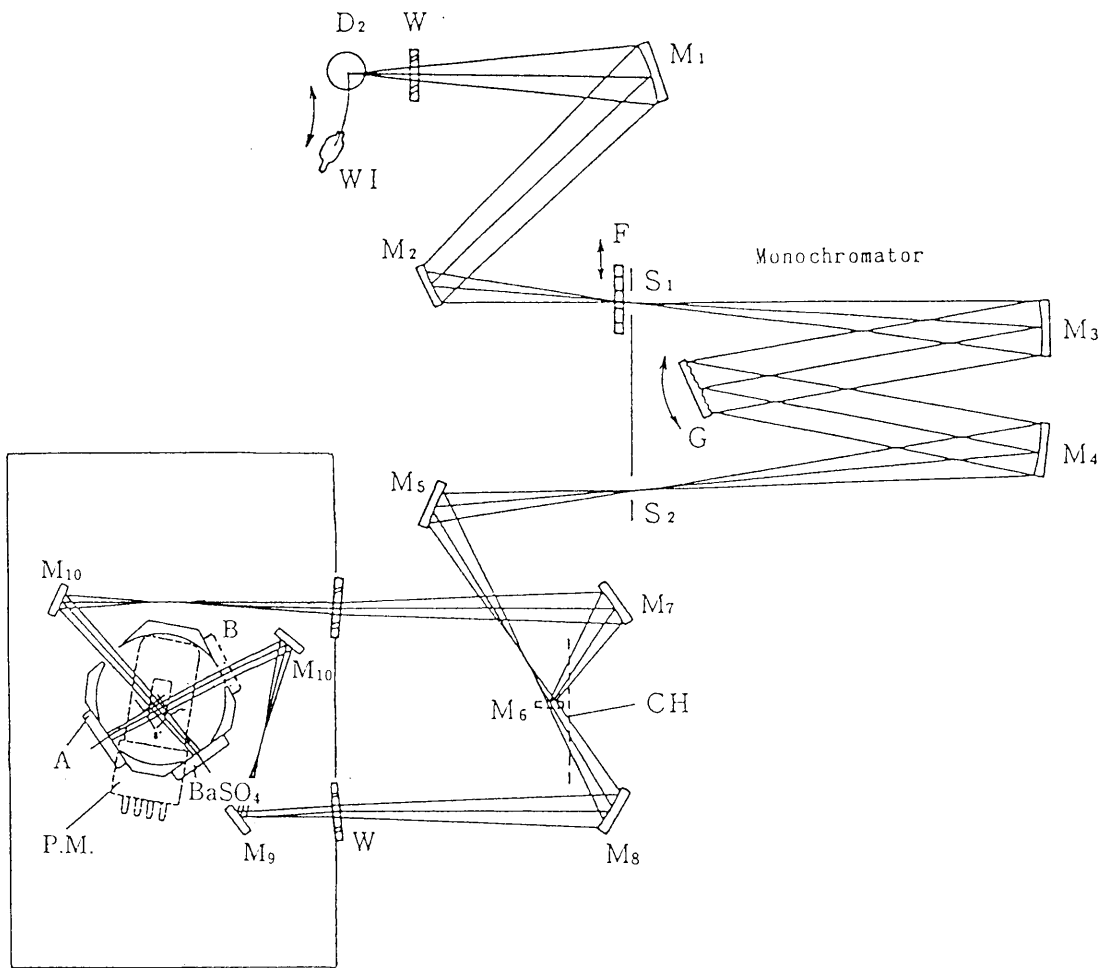
Table 2.1 Tree species for measurements^{36, 70)}

スギ科	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i> (L.f.) D. Don
ヒノキ科	ヒノキ	<i>Chamaecyparis obtusa</i> (Sieb. et Zucc.) Endlicher
ブナ科	クヌギ	<i>Quercus acutissima</i> Carruthers
	コナラ	<i>Quercus serrata</i> Murray
	アラカシ	<i>Quercus glauca</i> Thunberg
	コジイ	<i>Castanopsis cuspidata</i> (Thunberg) Schottky
ニレ科	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i> (Thunb.) Makino
	エノキ	<i>Celtis sinensis</i> Persoon
カツラ科	カツラ	<i>Cercidiphyllum japonicum</i> Sieb. et Zucc.
クスノキ科	クスノキ	<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Presl
	タブノキ	<i>Persea Thunbergii</i> (Sieb. et Zucc.) Kostermans
	ダンコウバイ	<i>Lindera obtusiloba</i> Blume
バラ科	ヤマザクラ	<i>Prunus jamasakura</i> Sieb. ex Koidzumi
カエデ科	イロハモミジ	<i>Acer palmatum</i> Thunb.
イネ科	モウソウチク	<i>Phyllostachys heterocycla</i> (Carr.) Mitf.

樹葉の分光反射スペクトルの測定では、Fig. 2.2のAの位置に硫酸バリウムの白板を置き、光度計とオンラインで接続されているコンピュータの処理によって白板の反射率を100%に補正を行ない、その後、試料の樹葉をおいて測定した。なお、反射測定の場合の直進光はトラップされるので測定されない。

透過スペクトルを測定する場合にはFig. 2.2のAの位置に白板を取り付け、コンピュータ処理によって100%に補正を行ない、破線で表示した位置Bに透過測定用の試料樹葉をおいて測定した。

反射スペクトルの測定は、完全拡散面に近似した硫酸バリウム白板の分光反



D₂:Douterium lamp, WI:Halogen lamp, F:Filter, G:Diffraction Grating
S:Slit, W:Window plate, CH:Chopper, P.M.:Photomultiplier, M:Mirror

Fig. 2.2 Optical schematics of spectrophotometer with
integrating sphere.

射強度に対する試料面からの反射強度の比を分光反射率として測定した。なお、硫酸バリウム白板の分光反射率は、電圧の変化などによる光源の変動に対しても常に100%としてコンピュータ処理により補正されている。透過測定についても同様である。

試料葉は、標準的なものを選定し、主脈をさけて、1樹種3試料の測定を行なった。測定データは、3.5インチフロッピイディスクに格納した。反射率 $\rho(\lambda)$ は、波長 λ 、強度 $\Phi_i(\lambda)$ の光が試料面に入射し、試料面より反射された光の強度を $\Phi_r(\lambda)$ とすると、次の(1)式で表される。

$$\rho(\lambda) = \frac{\Phi_r(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \times 100 \quad (2-1)$$

透過率 $\tau(\lambda)$ は、ある物質に強度 $\Phi_i(\lambda)$ の光が試料面に入射し、試料面より透過された光の強度が $\Phi_t(\lambda)$ とすると、

$$\tau(\lambda) = \frac{\Phi_t(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \times 100 \quad (2-2)$$

と表せる。

また、一般的に、反射率 ρ 、透過率 τ 、吸収率 α には、次のような関係が成立している。

$$\rho + \tau + \alpha = 100(\%) \quad (2-3)$$

したがって、樹葉の吸収率は、100%から反射率と透過率を差し引いたものである。

2. 3 結果および考察

2. 3. 1 緑葉の分光スペクトル特性

15種の樹葉の分光反射スペクトル測定の結果、可視域における緑葉の分光反射と波長の関係については、樹種による差は認められず、基本的に共通の特性を示していた。Fig. 2.3に6種の緑葉の分光反射スペクトルを示したが、全ての樹種について、可視域の分光反射スペクトルのパターンは一致していた。

Fig. 2.4に、エノキを例にとって緑葉の反射および透過の分光スペクトルを示した。樹葉の反射スペクトル・透過スペクトルは、吸収特性を反映している。すなわち、反射スペクトル・透過スペクトルは、吸収の要因の存在する部分では共に低く、吸収の要因の弱い部分では共に高くなっている。斜線の部分が緑葉の吸収となる。緑葉では、紫外域から可視域が高い吸収域となっている。

可視域の吸収については、400~500nmの青領域と600~700nmの赤領域で高く、

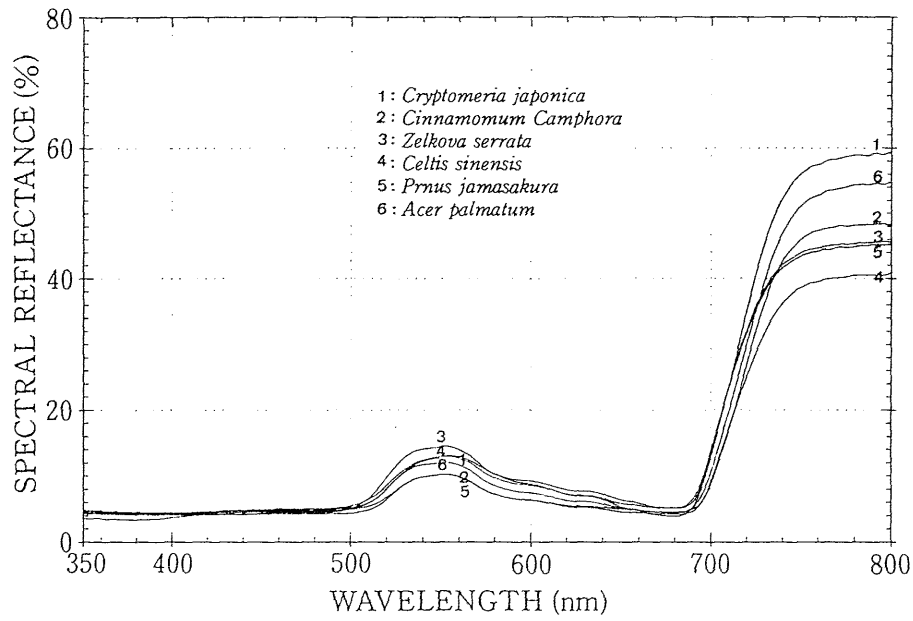


Fig. 2.3 Spectral reflectance curves in the visible region for representative six species.

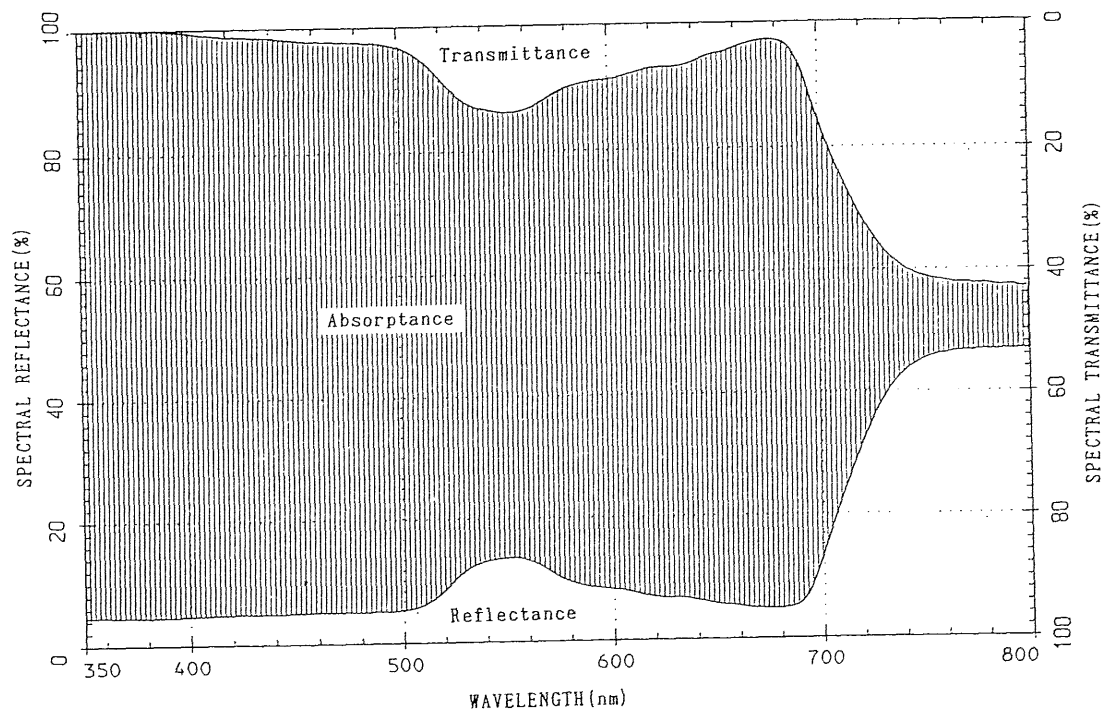


Fig. 2.4 Optical property of a green leaf in the visible region.
 (*Celtis sinensis*)

500～600nmの緑領域でやや低かった。緑領域における最小吸収ピークは555nm付近であった。

また、緑葉の吸収は、可視域の680nm付近から急激に低下し、近赤外域の750nm付近からは平坦で低い吸収を示している。分光反射スペクトルと分光透過スペクトルは、極めて類似しているが、分光透過スペクトルのカーブの方がよりシャープなピークを示している。これは、反射光の方が透過光より、樹葉中の物質による光の吸収の影響が少ないためであると考えられている^{9,8)}。一方、分光吸収スペクトルは、分光反射および透過スペクトルとは全く対照的である。

緑葉の分光吸収スペクトルをFig. 2.5に、また参考として光合成に有効な波長領域をFig. 2.6に示した。緑葉の可視域分光吸収スペクトルと光合成の作用スペクトルはほとんど一致している。緑葉の可視域分光特性は、光合成に有効な波長域の光を吸収し、それ以外の波長域の光を反射および透過しているという植物の生理に基づいた極めて特徴のある共通の特性を示していた。

2. 3. 2 落葉広葉樹の秋季の可視域分光特性変化

一般に緑色の樹葉が季節によってさまざまな色に変化する現象は、熱帯から温帯さらに寒帯に至るまで、地球上の広い地域にわたる森林域で見られる。とりわけ、落葉広葉樹葉が秋季の生理変化にともなって色彩変化する現象は、その色彩が“燃えるように”鮮明で強い印象を残すため、他の季節の樹葉の色彩変化については語られる機会が少ない。広葉樹では、落葉、常緑を問わず、新葉期の幼葉に新鮮な赤色が現れる樹種群がある。常緑の竹類では、晩春から初夏にかけて一斉に黄変化するため、この季節には竹類が周囲が新緑のなか、ひととき目立つ。また、常緑針葉樹のスギ・ヒノキなどでは、葉色の変化が2月に最も著しいが、12月から3月の冬季にかけて紅化し、この季節には遠くからでも他の常緑樹種群との区別が容易である。

落葉広葉樹葉の秋季の色彩変化についても、イロハモミジに代表される紅葉からダンコウバイなどの黄色に変化する黄葉、また、クヌギ、コナラのように離層が発達しないものでは樹冠で黄色あるいは赤色から褐色に変化するなど、多様性に富んでいる。

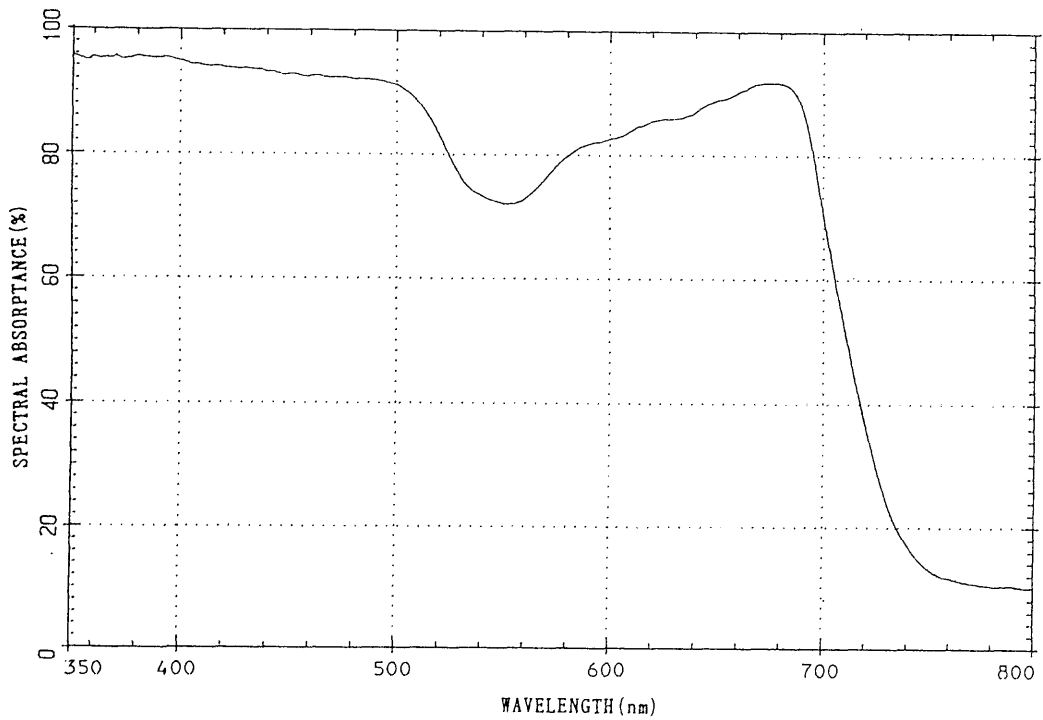


Fig. 2.5 Spectral absorptance of a green leaf in the visible region.
(*Celtis sinensis*)

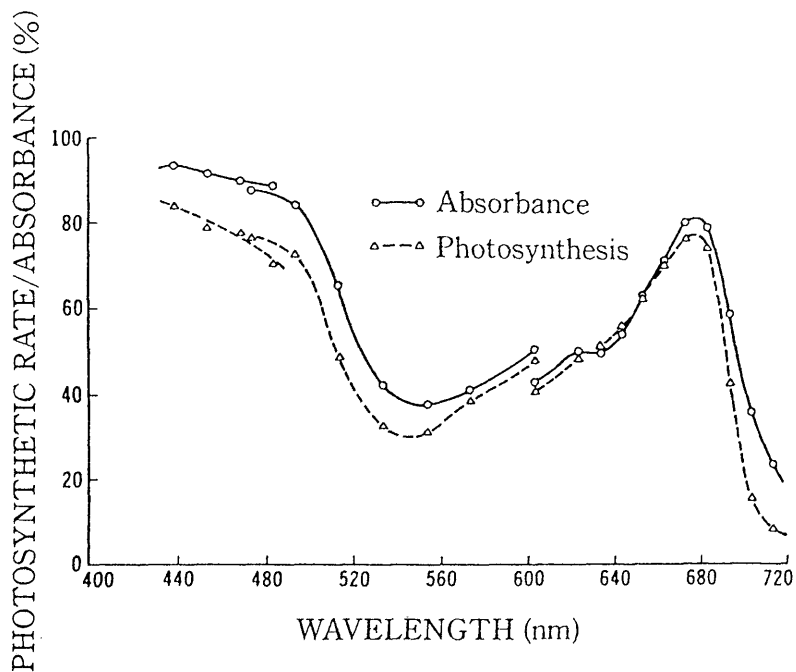


Fig. 2.6 Action spectrum of photosynthesis. (*Chlorella pyrenoidosa*)
(EMERSON & LEWIS, 1943)^{4 5)}

樹葉の色彩変化は、樹葉中の植物色素を中心とする可視域吸収物質の生成、分解により、樹葉の可視域吸収特性が変化する結果、分光反射特性も変化するためであり、この分光反射変化を人間は視覚によって色彩変化として認識している。

本章では、落葉広葉樹の黄葉・紅葉の紅葉現象について、その特性変化を明らかにするために分光スペクトルを測定した。秋季の落葉広葉樹の黄葉・紅葉の分光スペクトルは、可視域において、それぞれ特徴のある特性変化を示した。

Fig. 2.7に、秋季の黄葉の反射および透過の分光スペクトルを示した。黄葉の分光特性は、680nm付近の吸収が著しく低下し、高い吸収は可視域の500nm以下の青領域のみとなっていたが、この領域の吸収も緑葉の場合より低下した。秋季に黄葉となる落葉広葉樹の樹種群には、このような分光特性変化が共通に見られた。

イロハモミジをはじめとする紅葉の分光スペクトルでは、黄葉と同様に光合成機能領域である680nm付近の吸収の低下と同時に、新たに生成された赤色色素アントシアニンによるものと考えられる500nmから580nm付近にかけての吸収を生じた。その結果、Fig. 2.8に示すように、400~500nmの青領域・500~580nm付近の緑領域に連続した吸収を示す分光スペクトルに変化した。このような可視域の分光特性変化は、落葉広葉樹の秋季に紅葉する樹種群に共通の変化であった。

赤領域680nm付近の吸収は、光合成色素・クロロフィルの吸収ピークであり、光合成の機能と深く関わっている領域であることが知られている^{10, 45, 68})。Fig. 2.7の黄葉についても、Fig. 2.8に示した紅葉でも、共通の変化として赤領域680nm付近の吸収が失われていた。したがって、この領域の吸収を失っていることは、光合成という植物の生理活性を失っているものと考えられた。樹木の活性度を樹木個体の物質生産に関連した生理活性状態の尺度とすると、この領域で吸収を失っている状態は、当然のことながら、活性度をも失っていることになる。

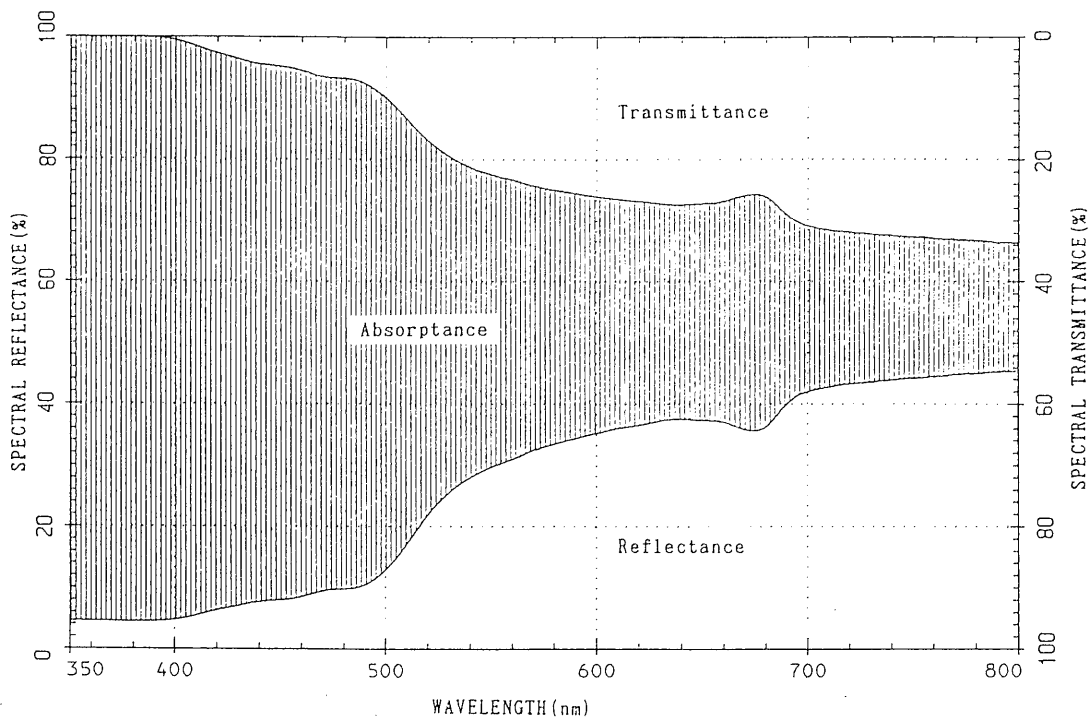


Fig. 2.7 Optical property of a yellow leaf. (*Celtis sinensis*)

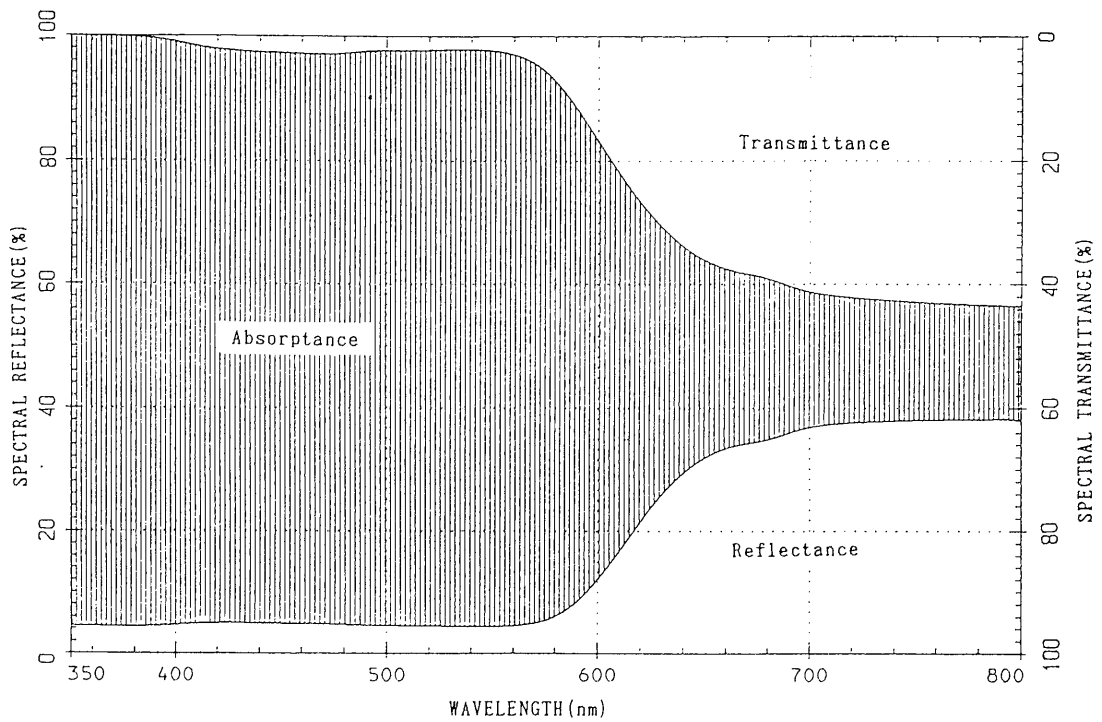


Fig. 2.8 Optical property of a red leaf. (*Acer palmatum*)

2. 4 まとめ

樹葉の積分球付分光光度計による分光スペクトル測定の結果、緑葉では、可視域の分光特性と波長の関係については、樹種による差は認められず、基本的に同じであり、全ての樹種について、可視域の分光反射、透過および吸収スペクトルのパターンは一致していた。

緑葉では、紫外域から可視域が高い吸収域となっており、その吸収は、可視域の680nm付近から急激に低下し、近赤外域の750nm付近からは平坦で低い吸収を示している。可視域の吸収については、400~500nmの青領域と600~700nmの赤領域で高く、500~600nmの緑領域でやや低くなっている。緑領域における最小吸収ピークは555nm付近であった。

緑葉の可視域分光吸収スペクトルと光合成の作用スペクトルはほとんど一致しており、緑葉の可視域分光特性は、光合成に有効な波長域の光を吸収し、それ以外の波長域の光を反射および透過しているという植物の生理に基づいた極めて特徴のある共通の特性を示していた。

秋季の落葉広葉樹の黄葉・紅葉の分光スペクトルは、可視域においてそれぞれ特徴のある著しい特性変化を示した。黄葉の分光スペクトルは、680nm付近の著しい吸収が低下し、高い吸収は可視域の500nm以下の青領域のみとなっていたが、この領域の吸収も緑葉の場合より低下した。イロハモミジをはじめとする紅葉の分光スペクトルでは、黄葉と同様の光合成機能領域である680nm付近の吸収の低下と同時に、新たに生成された赤色色素アントシアニンによるものと考えられる500nmから580nm付近にかけての吸収を生じた。その結果、400~500nmの青領域・500~580nm付近の緑領域に連続した吸収域を示す分光スペクトルに変化した。

黄葉・紅葉の分光スペクトルでは、共通して赤領域680nm付近の吸収が失われていた。680nm付近の吸収は光合成の機能と深く関わっている領域であることが知られているが、この領域の吸収を失っていることは、光合成という植物の生理活性を失っているものと考えられた。このような可視域の分光特性変化は、落葉広葉樹の秋季に黄葉・紅葉する樹種群にそれぞれ共通の変化であった。

第3章 単葉の近赤外域分光特性

3.1 はじめに

ランドサットTMデータのチャンネル4,3,2を三原色RGBに割り当てるフォルスカラー画像では、植生は赤く表現される。これは、植物が、チャンネル4(776~905nm)に相当する近赤外領域で高い反射特性を示すからである。

近赤外画像は、植物の近赤外域での高い反射特性を利用して、植物の活性度の判別や農作物の収穫予測に用いられ、また、林業における樹種の判別にも有効であると期待されている^{7, 13, 19}。

可視赤領域と近赤外域の比、いわゆるバイバンド比を用いて、虫害状況や活性度の評価に利用しようとする研究も数多く報告されている^{2, 3, 9, 47, 58, 76, 77, 93}。これは、一般に植物の量および活性が大きいほど赤色光を良く吸収し、かつ近赤外光を強く反射するとされているからである。

葉面積指数LAI(Leaf area index)は、農業生産物収穫高や生態学における一次生産と相関が高いとして、植物の生産性あるいは光合成量を示す重要な指標とされているが、バイバンド比や正規化植生指数は、LAIの推定のためにも有効であることが報告されている^{5, 6, 2, 63, 85}。

植物葉の近赤外域の分光特性については、水分量、樹葉内部の構造等のさまざまな要因が影響をおよぼしていることが報告されている^{11, 13, 37}。

“近赤外域”といわれる波長範囲については、リモートセンシングの分野では、750~1350nmの範囲を指し、1350~2500nmの範囲は中赤外域といわれている。Fig. 3.1に緑葉の350~2500nmの波長域の分光吸収スペクトルと水の吸収スペクトルを対比させたものを示した。樹葉の分光吸収スペクトルは、950~2500nmの近赤外域の長波長寄りの部分と中赤外域では、水の吸収スペクトルと非常に良く対応しており、樹葉中の水分の影響を大きく受けていることが示されている^{11, 23, 37, 92, 94}。水の吸収域としては、強い吸収が1950nm付近と、1450nm付近にある。さらに、弱い吸収が974nm, 1164nm, 1674nm付近に認められる。ところが、Fig. 3.1に示されたように、樹葉の分光スペクトルにおいてランドサットTMのおよそバンド4に相当する760~900nmの領域は、水の吸収による影響は

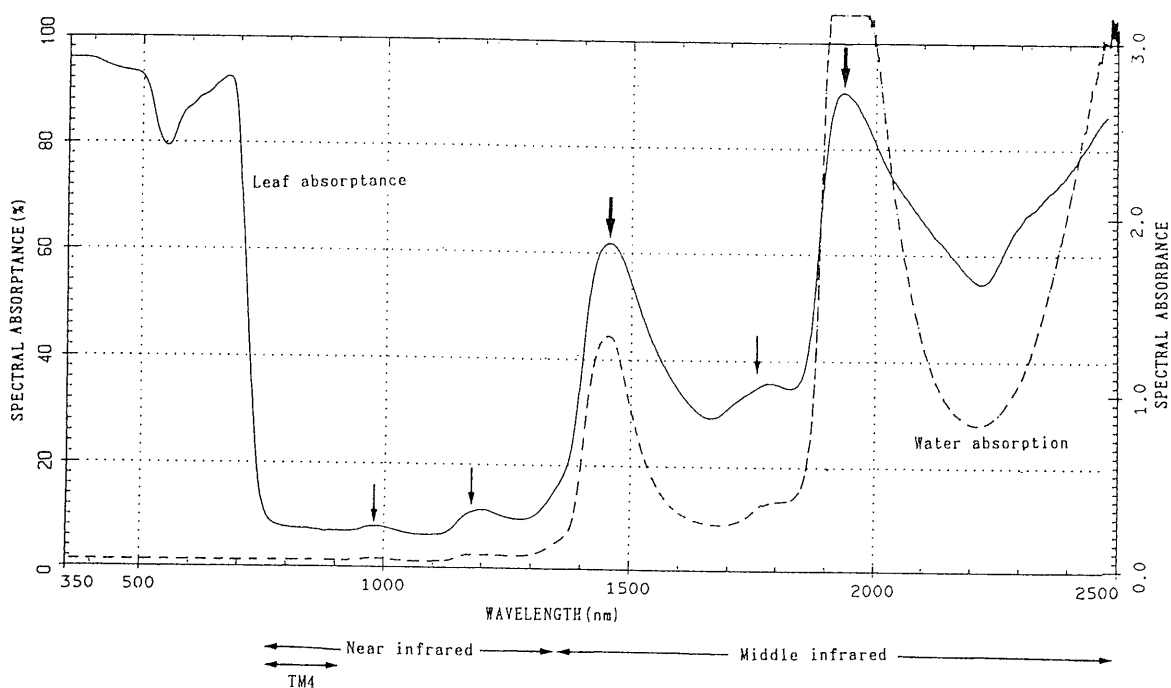


Fig. 3.1 The relationship between leaf absorptance and water absorption.

認められない。また、この領域については、植物葉色素であるクロロフィルおよびカロチノイドの影響もない¹⁰⁾。

760～900nmの近赤外域では、樹葉は、プラトー（plateau）とよばれている高く平坦な反射特性を示している。760～900nmの近赤外域においては、植物葉色素であるクロロフィルおよびカロチノイドによる吸収も水による吸収もない領域であり、吸収の要因が無いために、植物葉の分光スペクトルは高い反射および透過特性を示すのではないかと考えられている²³⁾。

この章では、ランドサットTMのバンド4（776～905nm）に相当し⁹⁵⁾、また、赤外写真の感光波長領域（およそ750～900nm）¹³⁾であり、植物葉色素や水による吸収の影響を受けない760～900nmの近赤外域における樹葉の単葉の分光スペクトル特性とその季節的変化について述べる。

3. 2 材料および測定方法

この章では、第2章で測定に用いた樹種のうち、次の4科6種の樹種を試料として取り上げた。

ブナ科	クヌギ	<i>Quercus acutissima</i> Carruthers
	コナラ	<i>Quercus serrata</i> Murray
	コジイ	<i>Castanopsis cuspidata</i> (Thunberg) Schottky
ニレ科	エノキ	<i>Celtis sinensis</i> Persoon
クスノキ科	クスノキ	<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Presl
カエデ科	イロハモミジ	<i>Acer palmatum</i> Thunb.

測定方法についても第2章と同じである。なお、800nmより長波長の赤外域を含む範囲についての測定が必要な場合には、積分球付分光光度計（島津製作所製、UV-2100）の測定波長範囲が240～800nmであるため、同系機種（島津製作所製、UV-3100）を用いた。積分球付分光光度計・UV-3100の光学系の基本原理は第2章のUV-2100と同じであるが、780nmより長い波長領域の検出には硫化鉛（PbS）が用いられている。

3. 3 結果および考察

3. 3. 1. 樹木の活性度と単葉の近赤外域反射

植物葉の近赤外域の反射は、一般に植物の活性度との関わりが深い。すなわち、植物の生理機能が低下するにつれて葉の近赤外域反射は低下し、健全な状態ほど近赤外域の反射は高いといわれている^{7,2)}。

ここでは、単葉の近赤外域における反射と樹木の活性度の関係について検討を加えた。Fig. 3.2に完全に黄葉した樹葉と緑葉の分光反射スペクトルを対比させた。また、Fig. 3.3では、完全に紅葉した樹葉と緑葉の分光反射スペクトルを対比して示した。第2章で述べたように、黄葉・紅葉は共に可視域赤領域の680nm付近のクロロフィルの吸収ピークであり光合成に関わっている領域の吸収を失った状態である。樹木の活性度を樹木個体の物質生産に関連した生理活性状態を表す尺度と考えると、黄葉あるいは紅葉というのは、光合成という植

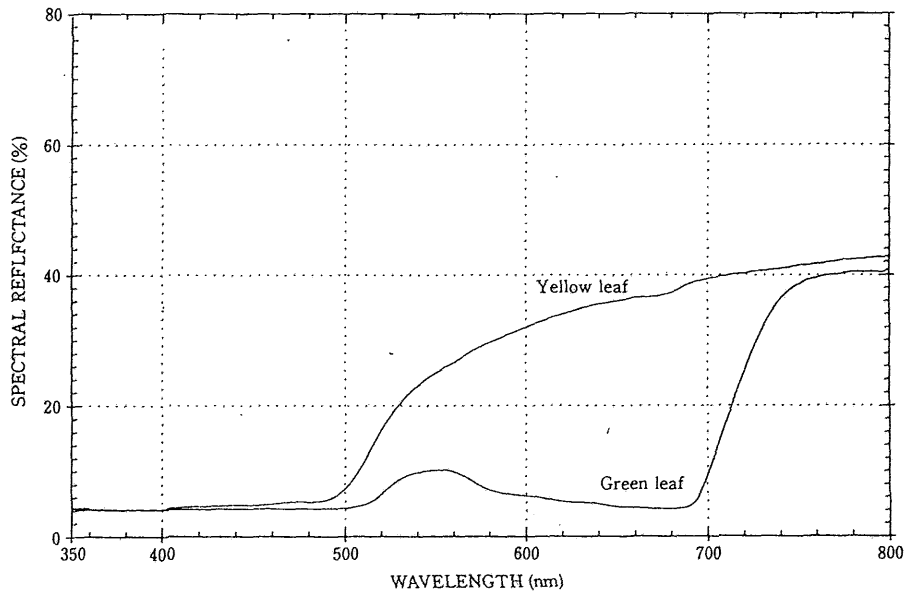


Fig. 3.2 Spectral reflectance of a single green leaf and a single yellow leaf. (*Celtis sinensis*)

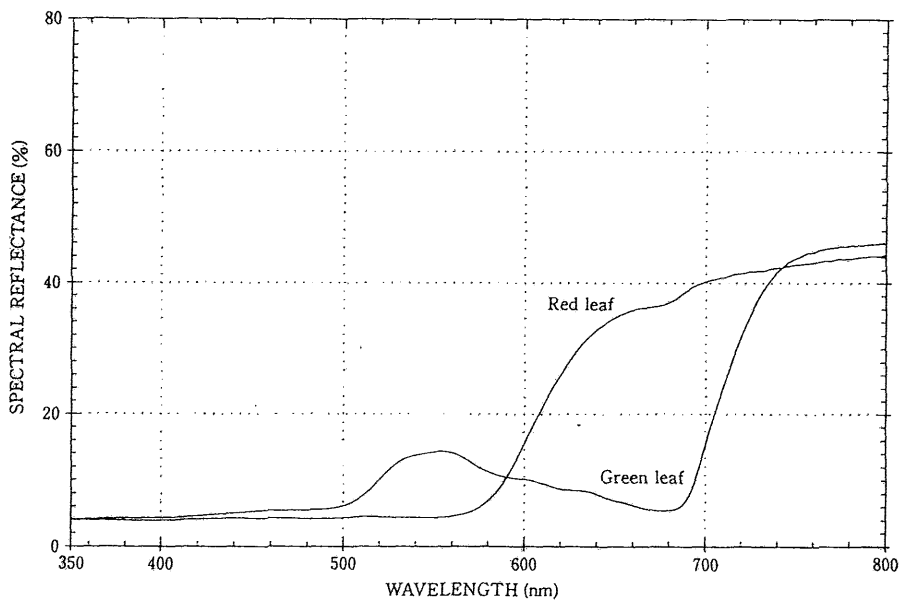


Fig. 3.3 Spectral reflectance of a single green leaf and a single red leaf. (*Acer palmatum*)

物の生理活性をほぼ完全に失っている状態であり、樹木は活性度を失っていることになる。ところが、秋季に物質生産に関連した生理機能が消失した状態である黄葉あるいは紅葉について、緑葉との対比で示したように、近赤外域での反射の低下は認められなかった。したがって、少なくとも単葉については、近赤外域の760~900nmの反射は、植物の生理機能あるいは健全度・活性度との関わりはないものと考えられた。

3. 3. 2 単葉の近赤外域反射におよぼす含水率の影響

葉中の含水率と近赤外域の反射については、葉中の含水率の低下にともなって、近赤外域の反射が低下するとの報告があり、水分量が高く活性度が高いほど、近赤外域の反射は高いといわれている^{7,2)}。

ここでは、単葉における乾燥による近赤外域反射量への影響を確かめた。

Fig. 3.4 には、葉を枝から切り取った直後に測定を行なった分光反射スペクトルと、同じ樹葉を半日間室内で放置し乾燥させた後、および同じ樹葉についてシリカゲルを入れたデシケータ中で1週間乾燥した後の分光反射スペクトルを示した。定性的な試みであるが、乾燥、すなわち葉中の水分が失われることによって、中赤外域の1930nm, 1450nmに見られる水の吸収のピークが上昇すると同時に、水の吸収の影響を受けない760~900nmの近赤外域の反射も増加していることが示された。

このように、単葉中の水分の低下すなわち乾燥によって近赤外域の反射が上昇するという報告は、GAUSMAN^{1,2, 13)} (1970,1974), WOOLLEY^{9,8)} (1971), HUNT^{2,8)} (1989), BOWMAN⁴⁾ (1989) 等によって多くなされている。

GAUSMAN^{1,3)} (1974) は、植物葉の、水の吸収の影響を受けない760~900nmの近赤外域の反射は樹葉の構造によるものであるとして以下のように説明している。すなわち、760~900nmの近赤外域の電磁波は、植物葉中での吸収が低いいため、葉細胞の細胞壁と樹葉内の空隙との不連続面で散乱ならびに反射する。したがって、乾燥などにより樹葉内構造にこのような空隙が多くなり、不連続面が増加するほど、反射が高くなるとしている。

以上のことから、単葉の近赤外域反射は、葉中の含水率の低下すなわち乾燥

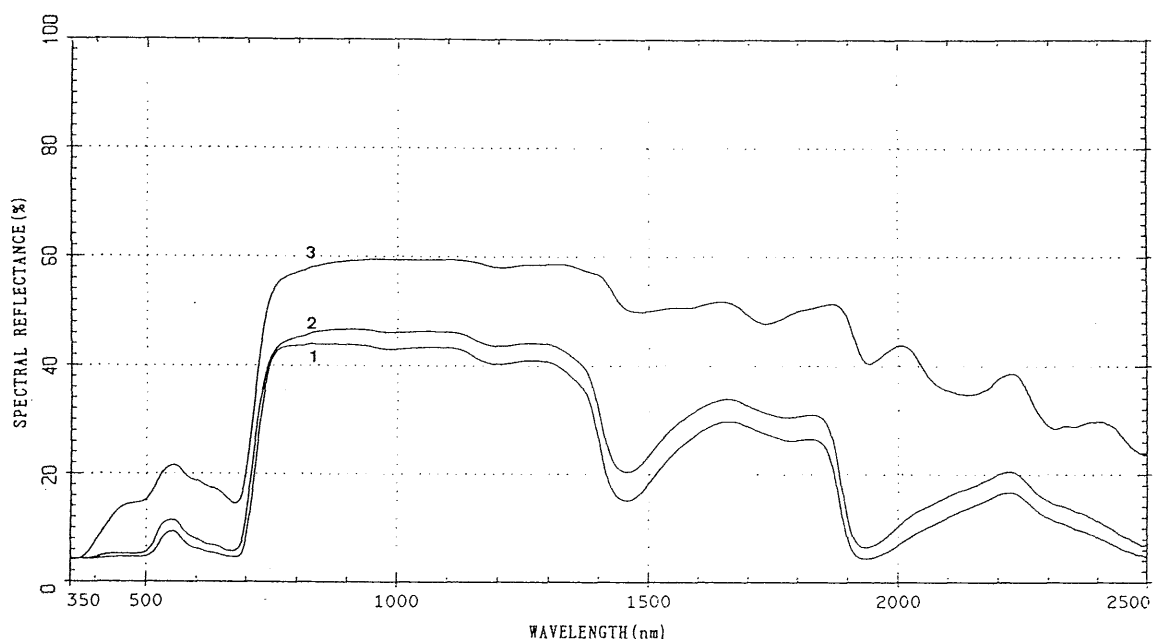


Fig. 3.4 Effects of dryness on spectral curves of *Cinnamomum camphora*. Spectra 1 and 2 represent the measured results after the drying time of zero and eight hour, respectively. Spectrum 3 represents the result of sample dried in desiccator over silicagel for one week.

によって、高くなることが明らかとなった。

3. 3. 3 単葉の近赤外域分光特性の季節変化

植物色素のクロロフィルおよびカロチノイドの吸収域でもなく、また、水の吸収の影響も受けない近赤外の760~900nmの領域における樹葉の分光特性は、樹葉の成熟によって変化が見られた。Fig. 3.5 に、クヌギ、コナラ、コジイの春の新葉および夏の成熟葉の分光反射スペクトルを対比させて示した。単葉の近赤外域反射は、ほとんどの樹種について、成熟葉が新葉より高い傾向を示した。

この現象について、GAUSMAN¹³⁾ (1974) は、近赤外域の電磁波は、葉中での吸収が低く、葉細胞の細胞壁と樹葉内の空隙との不連続面で散乱・反射するた

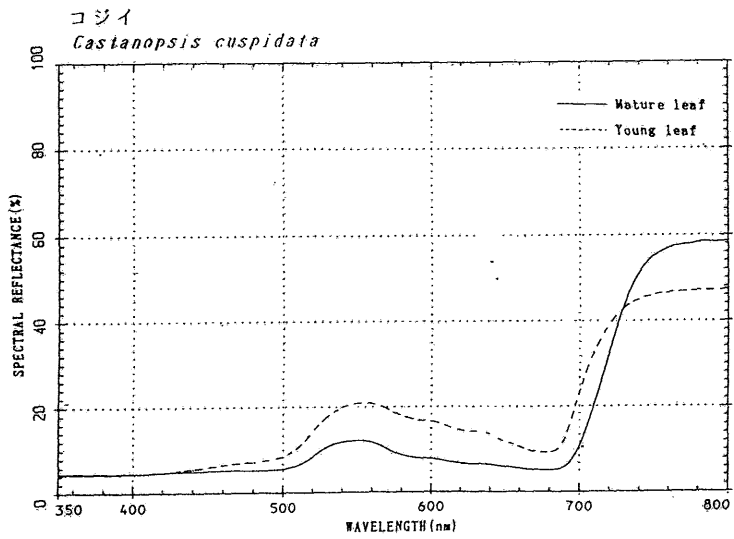
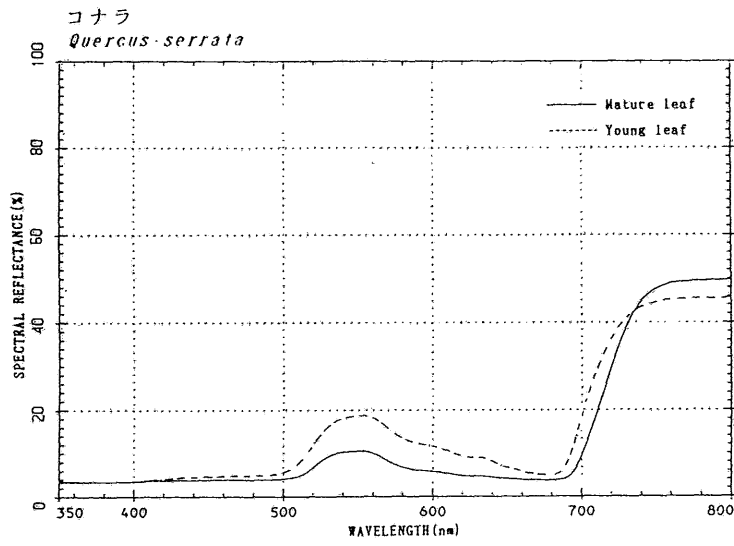
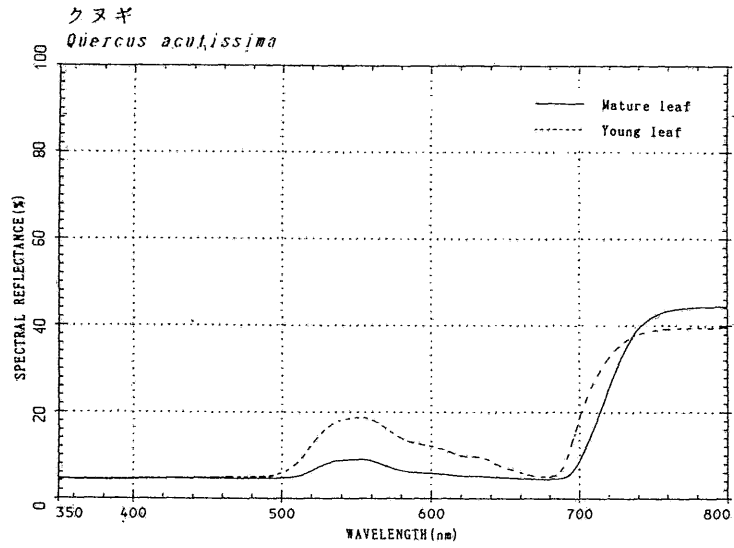


Fig. 3.5 Spectral reflectance of young and mature leaves.

め、樹葉内構造にこのような空隙が多いほど反射が高くなるが、成熟によっても葉内構造に空隙が増えることによると説明している。

さらに、樹葉の近赤外域の分光特性の季節的变化としては、この領域における吸収の変化も明らかに認められた。Fig. 3.6に、コナラの単葉の春の新葉、夏の成熟葉、秋の褐葉の場合についての分光反射スペクトルおよび分光透過スペクトルを示した。斜線の部分が分光吸収スペクトルである。

単葉の季節による吸収の変化を、Fig. 3.6のコナラを例にとり、近赤外域800nmについて検討してみた。新葉の吸収率は非常に低く7.8%である。成熟葉の吸収率は新葉より増加し20.4%を示し、褐葉ではさらに高く34.6%であった。同一樹種の樹葉であっても、成熟・老化にしたがって、近赤外域の吸収は増加した。

単葉における近赤外域反射には、葉内構造、単葉の吸収特性の変化、あるいは葉厚といったさまざまな要因が関与しているものと考えられるが、以上に示したように、同じ樹種であっても、単葉の近赤外域における吸収は成長にしたがって増加する傾向が認められた。植物葉の細胞壁は、成長するにつれて、セルロースを主成分とする厚い層の形成されることが知られている⁶⁸⁾。したがって、この領域の吸収の増加はセルロースを主体とした細胞壁の形成による可能性があるが、この点については今後の検討が必要である。

3. 4 まとめ

この章では、ランドサットTMのバンド4(776~905nm)に相当し、植物葉色素や水による影響を受けない760~900nmの近赤外域における単葉の分光スペクトル特性とその季節的变化について述べた。

植物葉の近赤外域における反射については、活性度との関わりが深く、生理機能の低下にともない低下するといわれてきていた。そこで、生理機能を失っている黄葉・紅葉について近赤外域における反射を確認した。ところが、光合成という生理活性をほぼ完全に失っている黄葉・紅葉の単葉での近赤外域における反射の低下は認められなかった。このことから、少なくとも単葉について

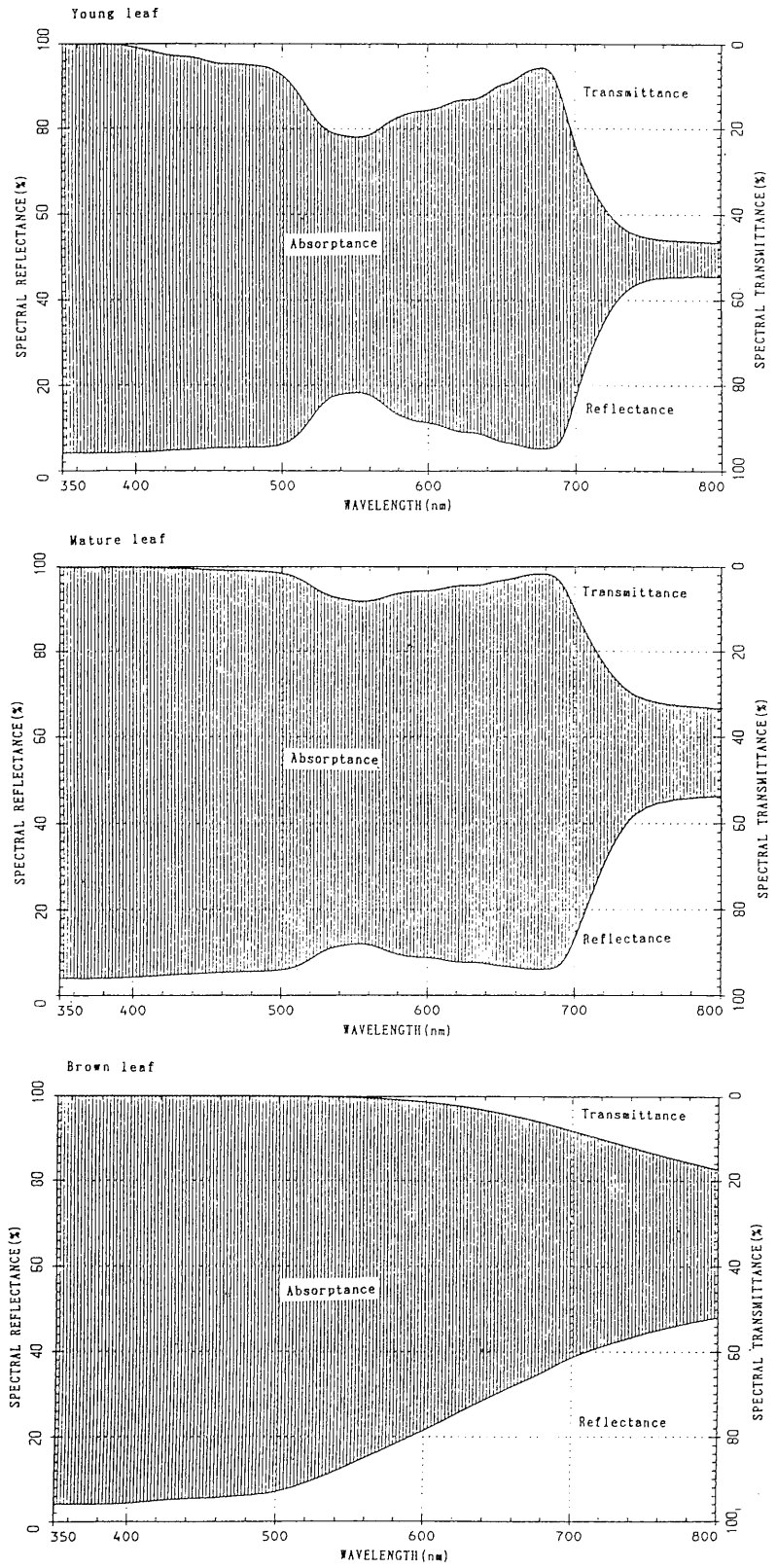


Fig. 3.6 Optical properties of young, mature and brown leaves.
(*Quercus serrata*)

は、760～900nmの近赤外域の反射と植物の生理機能あるいは健全度・活性度との直接的な関わりはないものと推察した。

葉中の含水率が近赤外域の反射におよぼす影響については、葉中の含水率の低下にともなって近赤外域の反射も低下するといわれてきた。そこで、単葉の近赤外域反射量への含水率の影響を確かめた。その結果、葉中の水分が失われることによって、中赤外域の1930nm、1450nmに見られる水の吸収ピークが上昇すると同時に、水の影響を受けない760～900nmの近赤外域の反射も増加していることがわかった。したがって、単葉中の含水率の低下すなわち乾燥によって、これまでいわれてきた760～900nmの近赤外域における反射の低下は認められず、上昇することが明らかとなった。

また、同じ樹種の樹葉でも、近赤外域の分光特性は、樹葉の成熟度によって変化することが認められた。単葉での近赤外域反射は新葉より成熟葉の方が高かった。

乾燥あるいは成熟による単葉の近赤外域における反射の上昇については、次のように説明できた。すなわち、近赤外域の電磁波は植物葉中での吸収が低いため、葉細胞の細胞壁と樹葉内の空隙との不連続面で散乱・反射するが、樹葉内構造にこのような空隙が多くなるほど反射が高くなる。単葉の近赤外域における反射の上昇は、乾燥あるいは成熟により葉内構造の空隙が増加したことによる。

単葉の近赤外域における吸収については、樹葉の成熟と老化が進むにしたがって、高くなる傾向が認められた。この領域における吸収の増加はセルロースを主体とした細胞壁の形成による可能性がある。

以上に示したように、同一樹木の樹葉であっても、単葉の760～950nmの近赤外域における反射・透過・吸収の特性は季節により変化した。また、この変化の傾向は樹種によらず植物葉の成熟・老化にともなって共通であった。

第4章 重なり合った樹葉の反射特性の季節的变化

4.1 はじめに

第2章では、単葉の可視域分光特性の季節的变化について、また、第3章では、単葉の近赤外域分光特性の季節的变化について検討した。その結果、単葉の分光特性は、可視域および近赤外域のいずれにおいても季節によってかなり大きく変化することが明らかとなった。

十分にうっ閉した森林域を対象にした衛星データは、葉が重なり合った状態での森林群落の分光反射特性を捉えている。したがって、衛星によって得られたデータを用いて森林植生を解析する場合に、実験室で得られた単葉のデータだけでは不十分であり、樹葉が重なり合った状態での分光反射特性に関する知見を得ておくことが必要である。

これまでの実験室における植物葉の分光スペクトル測定では、Fig. 4.1に示すように、植物葉を重ねることによって近赤外域の反射が高くなることが知られている^{1, 14, 23, 34, 42)}。このように樹葉が重なることによる分光スペクトル

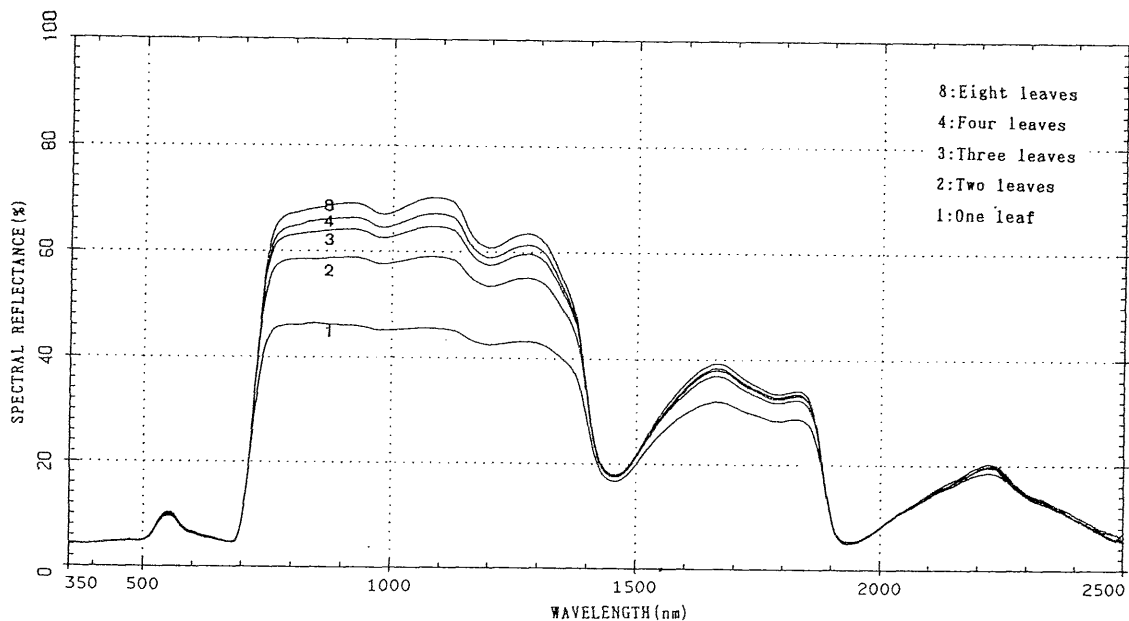


Fig. 4.1 Spectral reflectance of multiple green leaf layers.

(*Cinnamomum camphora*)

の変化は、単葉の分光特性変化に依存することが予測される。

ここでは、単葉が重なり合った最も単純な樹冠光学モデルを仮定して、その重なり合った樹葉の総反射量を算出する新しい方法を提唱した。さらに、同一樹種の樹葉を重ねた場合の分光スペクトルを積分球付分光光度計を用いて経時的に測定した結果、近赤外域（760～910nm）の反射量が季節によって大きく変化することを認めた。この近赤外域における反射量の季節的変化を、重なり合った樹葉の光学モデルにしたがった計算式で検証した。その結果、樹葉を重ねた場合の近赤外域反射量の季節的変化は、単葉の反射・透過・吸収特性の変化によって説明できることが明らかとなった。

さらに、このような単葉の重なりによる反射量の増加は、黄葉・紅葉のように可視域の分光特性が大きく変化した場合には、近赤外域のみならず可視域についても同様に反射量が増加することを積分球付分光光度計を用いた測定により示した。可視域における黄葉・紅葉の重なりによる反射量の増加は、単葉の可視域での反射・透過の割合が高くなった場合に、近赤外域と同様な反射量の増加が起こるためであることが、このモデルにより説明できた。

また、このモデルを用いることによって、衛星データにおける森林植生域の近赤外域バンド値の季節的変化や正規化植生指数NDVIの季節的変化、あるいは針葉樹林域と広葉樹林域について、近赤外域バンド値が針葉樹林域のほうが広葉樹林域でのそれより低いことについても、説明しうることを明らかにした。

4. 2 重なり合った2枚の樹葉の光学モデル

樹葉を重ねた場合の総反射量を求めるために、2枚の樹葉を重ねた場合の総反射量を求める光学的モデルを考えた。

類似の研究としては、LILLESAETERが1982年に発表したものがある⁴²⁾。しかし、そこでのモデルは透過率を考慮した葉の反射特性について言及しているものの、葉の裏面からの2次反射の影響を無視しているため不完全である。

2枚重ねた葉に光が入射するとき、入射した光の動きは、Fig. 4.2のような模

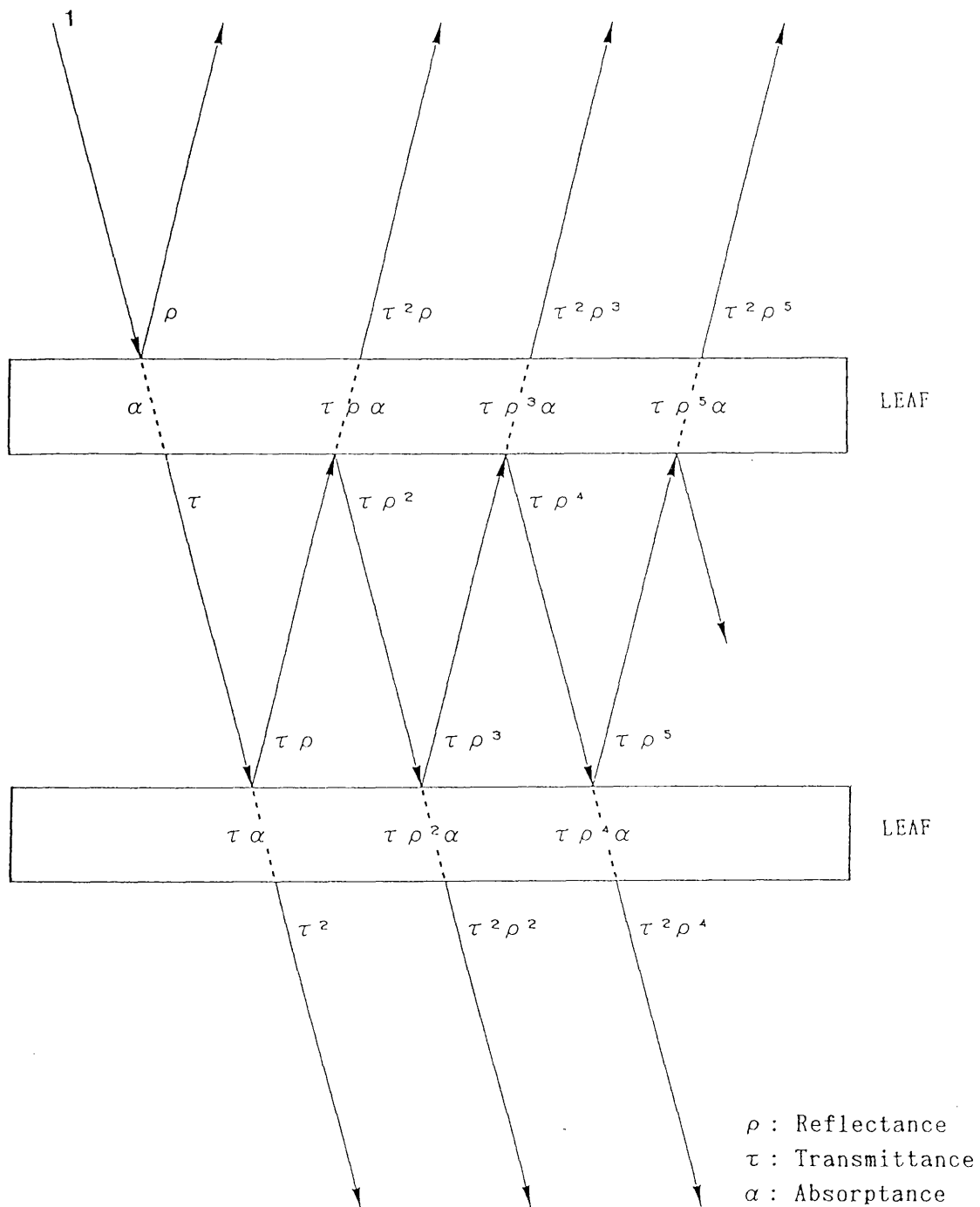


Fig. 4.2 Schematic diagram of a model for calculating total reflectance value in a layer of two leaves.

式図で表せる。

ここで、樹葉に光が表から入射しても裏から入射しても、樹葉は同じ反射率 ρ 、透過率 τ 、吸収率 α を持つとすれば、2枚重ねの葉に単位量 1 だけの光が入射した場合、最終的に反射してくる光の量 P は、

$$\begin{aligned}
 P &= \rho + \tau^2 \rho + \tau^2 \rho^3 + \tau^2 \rho^5 + \dots + \tau^2 \rho^{2n-1} + \dots \\
 &= \rho + \tau^2 \sum_{n=1}^{\infty} \rho^{2n-1} \quad (4-1)
 \end{aligned}$$

となる。

$0 \leq \rho < 1$ なので、この無限等比級数は収束する。

よって、 P は次の式で与えられる。

$$P = \rho + \frac{\rho \tau^2}{1 - \rho^2} \quad (4-2)$$

また、樹葉に光が裏から入射した場合と表から入射した場合では、反射率と透過率は異なっているとして、表裏による反射率 ρ 、透過率 τ を考慮した式を求めた。

樹葉に光が表から入射した場合に、反射率 ρ 、透過率 τ 、吸収率 α を持ち、裏から光が入射した場合には、反射率 ρ' 、透過率 τ' 、吸収率 α' を持つとすると、Fig. 4.3 のような模式図で表される。すなわち、2枚重ねの葉に単位量 1 だけの光が入射したとき、最終的に反射してくる光の量は、(4-2) 式と同様に

$$\begin{aligned}
 P &= \rho + \tau \tau' \rho + \tau \tau' \rho^2 \rho' + \tau \tau' \rho^3 \rho'^2 \\
 &\quad + \tau \tau' \rho^4 \rho'^3 + \dots + \tau \tau' \rho^n \rho'^{n-1} + \dots \\
 &= \rho + \tau \tau' \sum_{n=1}^{\infty} \rho^n \rho'^{n-1} \quad (4-3)
 \end{aligned}$$

となる。

$0 \leq \rho \rho' < 1$ なので、この無限等比級数は収束する。

よって、 P は次の式で与えられる。

$$P = \rho + \frac{\rho \tau \tau'}{1 - \rho \rho'} \quad (4-4)$$

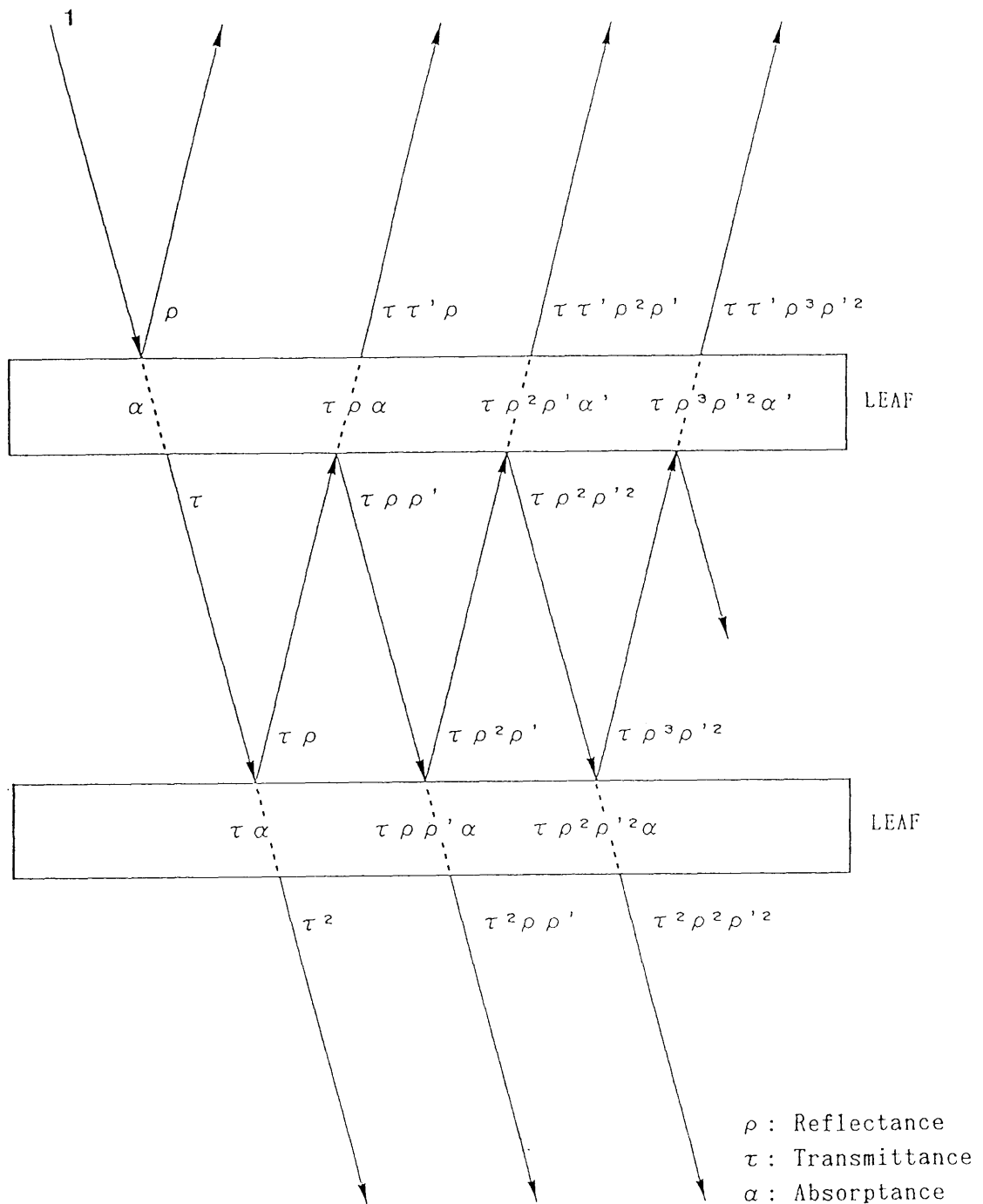


Fig. 4.3 Schematic diagram of a model for calculating total reflectance value in a layer of two leaves, considering the difference of reflectance from the top and bottom of leaf.

4. 3 重なり合った2枚の樹葉の光学モデルの検証および考察

－樹葉の重なりによる近赤外域反射の季節的变化－

重なり合った2枚の樹葉の光学モデルの検証の材料として、暖温帯林の広い領域を占める落葉広葉樹二次林のコナラを用い、その近赤外域における反射量の季節的变化について検討した。

コナラの春の新葉、夏の成熟葉、秋の褐葉の場合についてそれぞれ1～8枚の樹葉を重ねたときの可視域から近赤外域までの分光反射スペクトルをFig. 4.4に示した。単葉での近赤外域における反射は、新葉より成熟葉のほうがやや高いにもかかわらず、樹葉を重ねた場合には反対に新葉の場合の反射の方が非常に高くなる。

この現象は、新葉の近赤外域における透過性が成熟葉より高いため1枚目の葉を透過する光も多く、また、2枚目の葉により反射され、再び1枚目の葉を透過して反射光になる光も多くなるためと考えた。

同様にして、コナラの春の新葉、夏の成熟葉、秋の褐葉の場合についてそれぞれ1～8枚の樹葉を重ねた場合の可視域から近赤外域までの分光透過スペクトルをFig. 4.5に示した。実際に新葉の近赤外域における透過率は成熟葉のそれより10%以上高かった。

得られたコナラの可視域の680nmおよび近赤外域の800nmにおける反射率 ρ 、透過率 τ 、吸収率 α の季節的变化をTable 4.1に示した。可視域680nmでは、新葉、成熟葉共に90%程の高い吸収率を示しているが、褐葉では吸収が低下していた。また、近赤外域800nmでは、樹葉の吸収率は非常に低く、新葉では10%未満である。成熟葉では、800nmの吸収率は、新葉より増加し、褐葉ではさらに高くなった。第3章でも示したように、同じ樹種であっても、樹葉の反射・透過・吸収の特性は季節により変化した。

樹葉を重ねた場合の反射量の季節的变化を、2枚重ねた場合について前記計算法を用いて検証した。

光が単葉の表から入射した場合と裏から入射した場合の反射率および透過率を、同一の樹葉を用いて測定した例をFig. 4.6に示す。コナラの緑葉の例では、

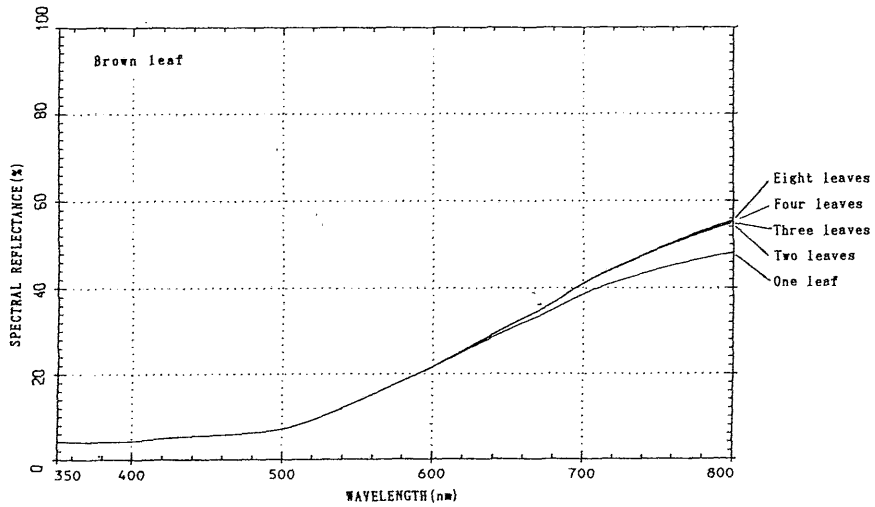
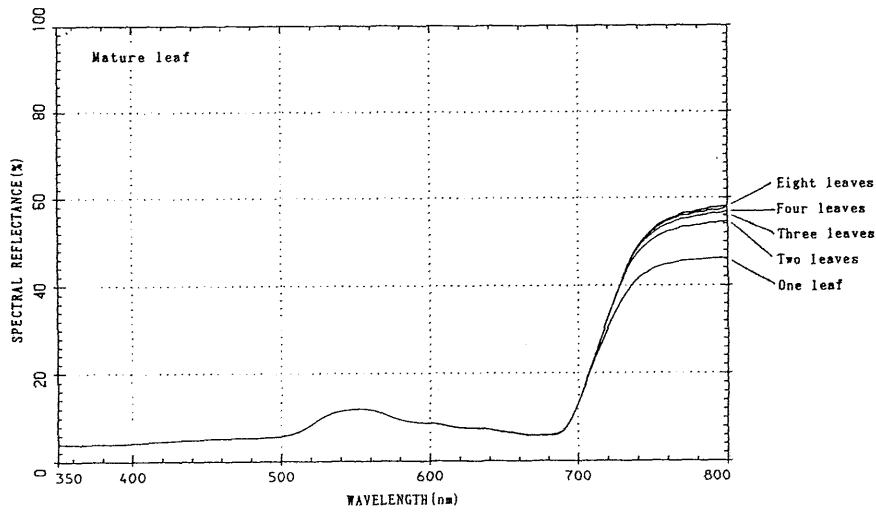
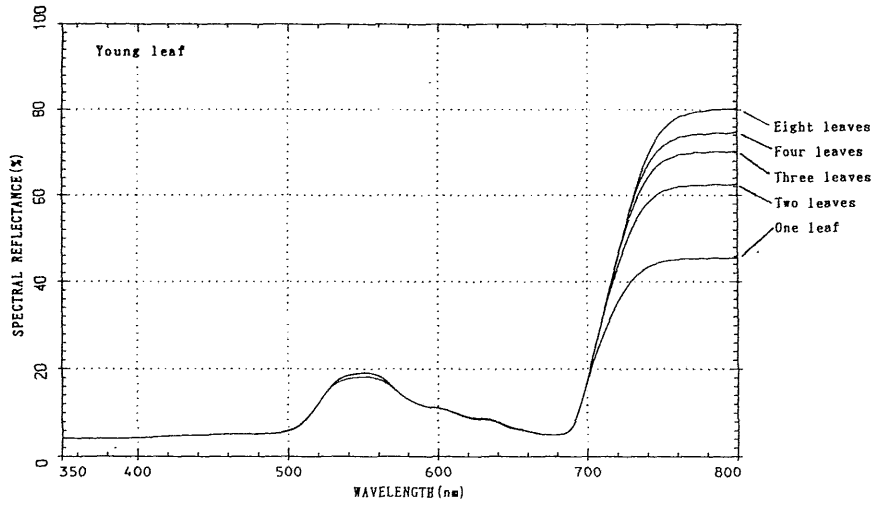


Fig. 4.4 Spectral reflectance of multiple leaf layers of (*Quercus serrata*).

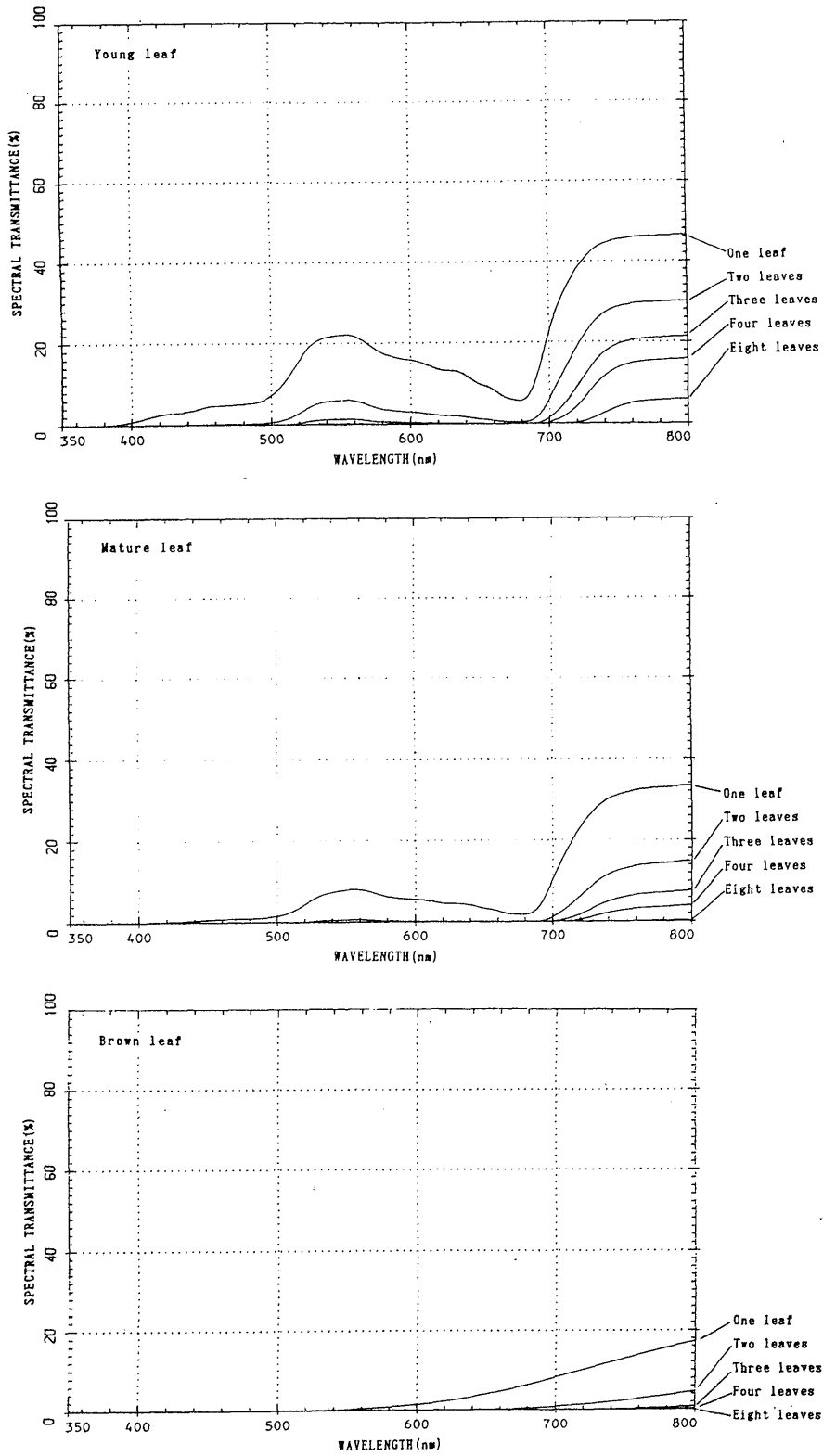


Fig. 4.5 Spectral transmittance of multiple leaf layers of (*Quercus serrata*).

Table 4.1 Reflectance, transmittance, and absorptance values of a single leaf at 680nm and at 800nm (*Quercus serrata*).

Sample	ρ	τ	α	ρ	τ	α
	(at 680nm)			(at 800nm)		
Young leaf	0.051	0.058	0.891	0.458	0.464	0.078
Mature leaf	0.060	0.017	0.923	0.464	0.333	0.204
Brown leaf	0.359	0.063	0.578	0.481	0.173	0.346

See also Fig. 4.4 and Fig. 4.5.

Fig. 4.6.1と4.6.2に示すように、近赤外域においては、裏からの反射率が表からのそれより5%低く、透過率が2%高くなっていた。また、コナラの褐葉の例では、Fig. 4.6.3と4.6.4に示すように、近赤外域800nmにおいては、裏からの反射率が6%低く、透過率は3.8%高くなっていた。

Fig. 4.4と4.5のコナラの800nmにおける実測値 ρ, τ を用いて、2枚を重ねた場合の反射光を(4-2)式により求めた計算値 P_c と実測値 P_m をTable 4.2に示した。また、同表中に800nmにおける実測値 ρ, τ に、樹葉に光が裏から入射した場合と表から入射した場合の差を考慮した値を ρ', τ' と仮定して、(4-4)式にしたがって求めた計算値 P_c および実測値 P_m を示した。

また、Table 4.3には、同様の方法により求めたコナラの680nmにおける P_c と P_m を示した。

(4-2)と(4-4)式による検討の結果より、近赤外域800nmにおいて、単葉では反射率が新葉より成熟葉のほうがやや高いにもかかわらず、2枚を重ねた場合に最終的に反射してくる光の量は、新葉の場合の反射率の方が非常に高くなることを説明することができた。すなわち、新葉の透過性が成熟葉より高いため1枚目の葉を透過する光が多く、また、2枚目の葉により反射され再び1枚

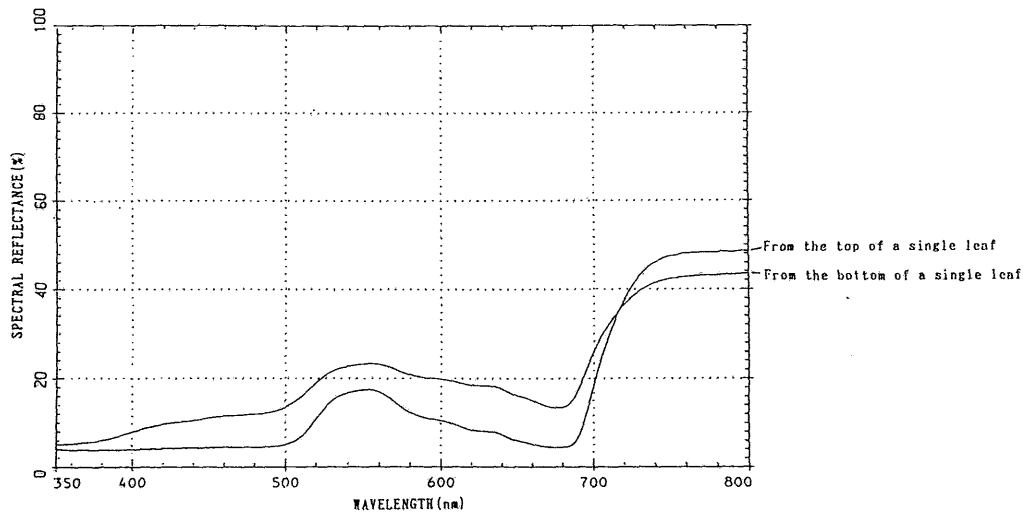


Fig. 4.6.1 Spectral reflectance from the top and bottom of a single green leaf (*Quercus serrata*).

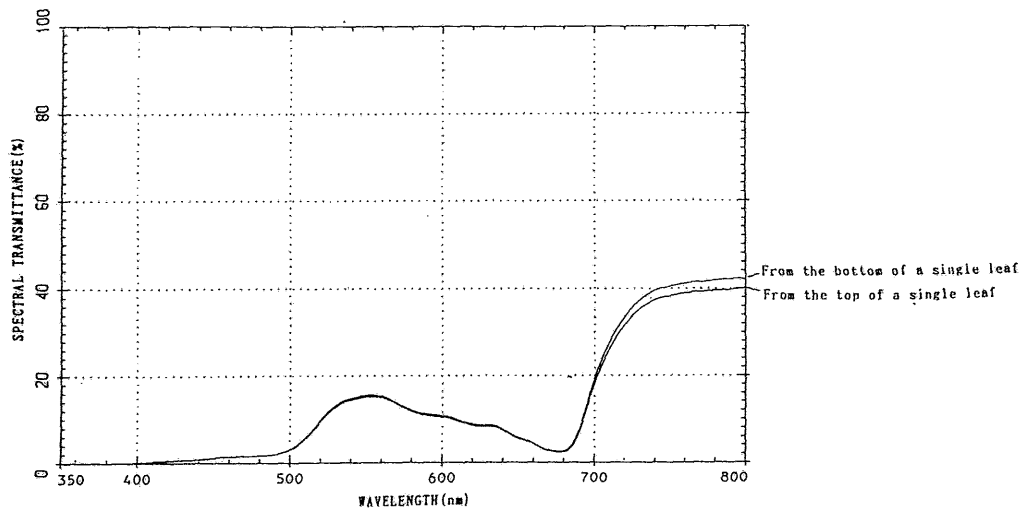


Fig. 4.6.2 Spectral transmittance from the top and bottom of a single green leaf (*Quercus serrata*).

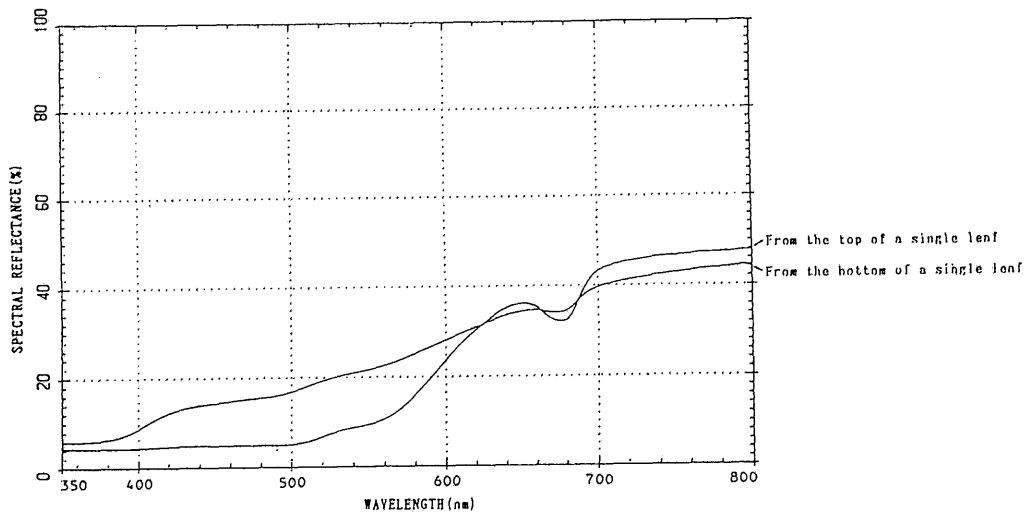


Fig. 4.6.3 Spectral reflectance from the top and bottom of a single brown leaf (*Quercus serrata*).

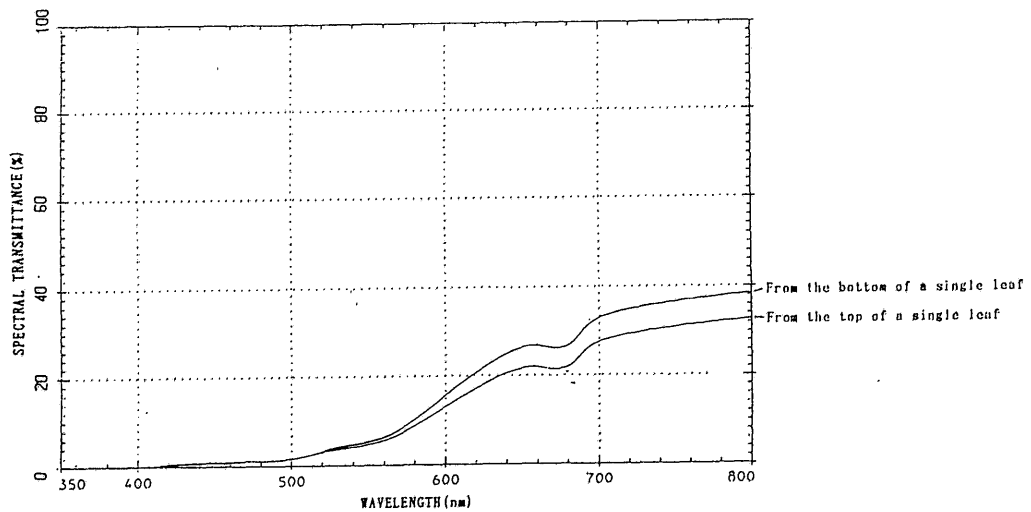


Fig. 4.6.2 Spectral transmittance from the top and bottom of a single brown leaf (*Quercus serrata*).

Table 4.2 Total reflectance value of *Quercus serrata* at 800nm in a layer of two leaves.

Sample	ρ	τ	ρ'	τ'	$P_C(1)$	$P_C(2)$	R_M	$R_M - P_C$
Young leaf	0.458	0.464	—	—	0.583	—	0.626	0.043
	0.458	0.464	0.407	0.486	—	0.585	0.626	0.041
Mature leaf	0.464	0.333	—	—	0.529	—	0.547	0.018
	0.464	0.333	0.413	0.354	—	0.582	0.547	-0.035
Brown leaf	0.481	0.173	—	—	0.500	—	0.547	0.047
	0.481	0.173	0.423	0.211	—	0.497	0.547	0.050

ρ : Reflectance value at 800nm from the top of a single leaf

τ : Transmittance value at 800nm from the top of a single leaf

ρ' : Reflectance value at 800nm from the bottom of a single leaf

τ' : Transmittance value at 800nm from the bottom of a single leaf

$P_C(1)$: Total reflectance value calculated according to formula(4-2) at 800nm in a layer of two leaves

$P_C(2)$: Total reflectance value calculated according to formula(4-4) at 800nm in a layer of two leaves

R_M : Total reflectance value measured

目の葉を透過して反射光になる光も多くなり、最終的に2枚を重ねた場合の反射が高くなる。

褐葉の場合、単葉の近赤外域800nmにおける反射率は、緑葉より高い場合もあるが、透過性が低いため重なった状態では、反射量は低くなる。

いま、同じ反射率 ρ で、異なる透過率 τ_1, τ_2 ($\tau_1 > \tau_2$)を持つ2種類の葉があり、両者の葉を2枚重ねた総反射率を P_1, P_2 とすれば、その差は、

$$P_1 - P_2 = \rho (\tau_1 - \tau_2) / (1 - \rho^2) > 0 \quad (4-5)$$

となり、透過率の高い葉のほうが重なりあった状態では反射率が高くなる。透過率と吸収率と反射率とは、互いに補数の関係にあるから、この式は吸収率の低い葉のほうが、重なり合った状態では、反射率が高くなると言ってもよい。

また、単葉の裏と表から入射した場合の反射率および透過率の差を考慮した場合には、裏と表からの差を考慮した(4-4)式による計算値がやや実測値に近くなったものの、いずれの場合にも、計算値と実測値は一致していない。これ

Table 4.3 Total reflectance value of *Quercus serrata* at 680nm in a layer of two leaves.

Sample	ρ	τ	ρ'	τ'	$P_C(1)$	$P_C(2)$	R_M	$R_M - P_C$
Young leaf	0.051	0.058	—	—	0.051	—	0.049	-0.002
	0.051	0.058	0.142	0.061	—	0.051	0.049	-0.002
Mature leaf	0.060	0.017	—	—	0.060	—	0.061	0.001
	0.060	0.017	0.151	0.020	—	0.060	0.061	0.001
Brown leaf	0.359	0.063	—	—	0.361	—	0.365	0.004
	0.359	0.063	0.404	0.055	—	0.360	0.365	0.005

ρ : Reflectance value at 680nm from the top of a single leaf

τ : Transmittance value at 680nm from the top of a single leaf

ρ' : Reflectance value at 680nm from the bottom of a single leaf

τ' : Transmittance value at 680nm from the bottom of a single leaf

$P_C(1)$: Total reflectance value calculated according to formula(4-2) at 680nm in a layer of two leaves

$P_C(2)$: Total reflectance value calculated according to formula(4-4) at 680nm in a layer of two leaves

R_M : Total reflectance value measured

は、樹葉が均質でないための測定誤差であると考えられた。

さらに、(4-2)と(4-4)式により求めた結果から、緑葉の可視域680nmのように吸収率が高い場合には、2枚を重ねた場合にも最終的に反射してくる光の量はほとんど増加しないことがわかった。

このように、樹葉が重なり合った場合の近赤外域における反射量増加の季節的变化を新しく導入した重なり合った2枚の樹葉の光学モデルを用いることによって明解に説明することができた。

この(4-2)と(4-4)式は、樹葉を重ねた場合の総反射量が単葉の反射・透過・吸収特性に依存していることを示している。すなわち、これまでは近赤外域のみの特性と考えられてきた樹葉を重ねた場合の反射量の増加は、吸収が低下した場合には可視域についても起こる。

したがって、第2章で示した秋季に可視域における吸収が低下した落葉広葉樹の黄葉・紅葉の場合には、重なり合うことにより近赤外域のみならず可視域

についても反射量が増加することが予測された。測定の結果、この予測にしたがったFig. 4.7とFig. 4.8の分光反射スペクトルを得た。Fig. 4.7に黄葉の、また、Fig. 4.8に完全に紅葉した場合の樹葉が重なり合うことによる可視域の反射量の増加のスペクトルを示した。黄葉・紅葉の場合には、それぞれ可視域での波長に対する反射・透過・吸収特性が異なるために、反射量増加のスペクトルのパターンについても違いがみられた。

黄葉・紅葉いずれの場合も、また、近赤外域と可視域の両域において、樹葉が重なり合うことによって反射量が増加することは、(4-2)と(4-4)式を導いた考え方によって十分に説明できる。このことから、可視域・近赤外域を問わず、樹葉が重なり合った場合の総反射量は、単葉の季節的変化による反射・透過・吸収特性に依存したものであり、樹葉の透過特性が総反射量に大きく影響を与えることが明らかとなった。

以上の結果の応用として、単葉が重なり合っているという最も単純な樹冠の光学モデルに、衛星データの植生域のレベルをあてはめた場合について検討を試みた。すなわち、樹冠を単葉の重なりと考えた場合、可視域および近赤外域の反射は単葉の樹種あるいは季節的変化による反射・透過・吸収特性を反映したものであり、森林域における衛星データの可視域・近赤外域の反射特性について、以下のように、ある程度説明することができた。

たとえば、TMランドサットデータの暖温帯の落葉広葉樹林域での近赤外域4バンド(776~905nm)のレベルについては、この章で述べた実験室の測定で得られた重なり合うことによる近赤外域の反射の季節的変化と同様のバンド値変化が明らかに認められた。すなわち、同一の広葉樹林域における近赤外域4バンドのレベルは、新葉期から展開期に高く、夏から秋に向かうにしたがって低下した⁴⁰⁾。

また、衛星データによると、植生域については、落葉広葉樹林域に限らず、新葉期から展開期と考えられる時期に近赤外域のレベルが最も高くなっていることが認められた⁴⁰⁾。この現象は、一般的に植物葉の近赤外域における透過が、本章で述べたように、新葉では高く成熟するにしたがって低下するという生理

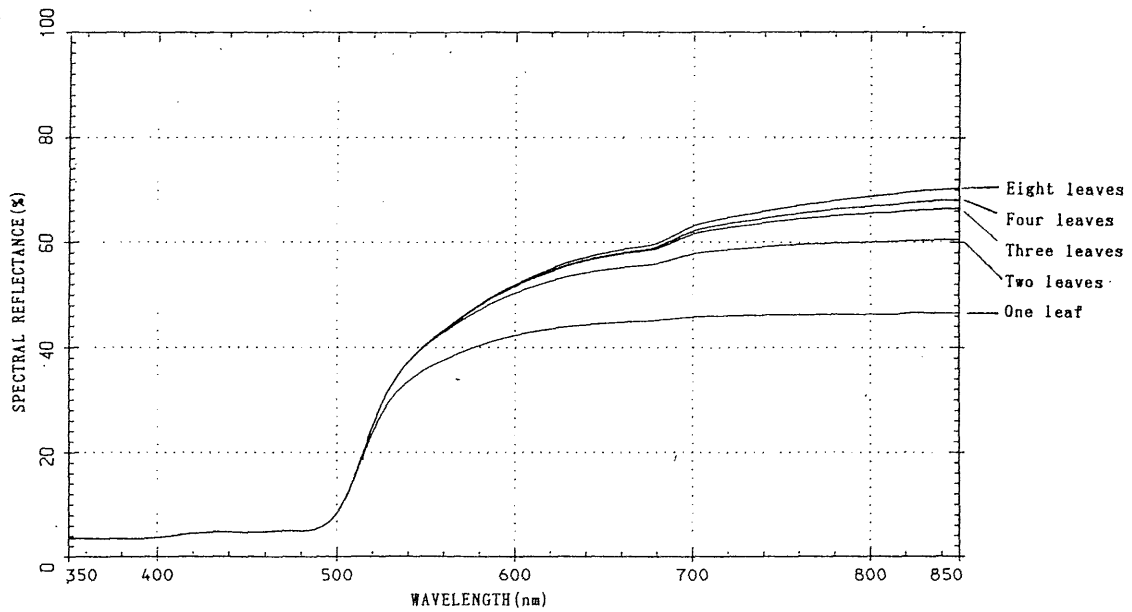


Fig. 4.7 Spectral reflectance of multiple yellow leaf layers.
(Lindera obtusiloba)

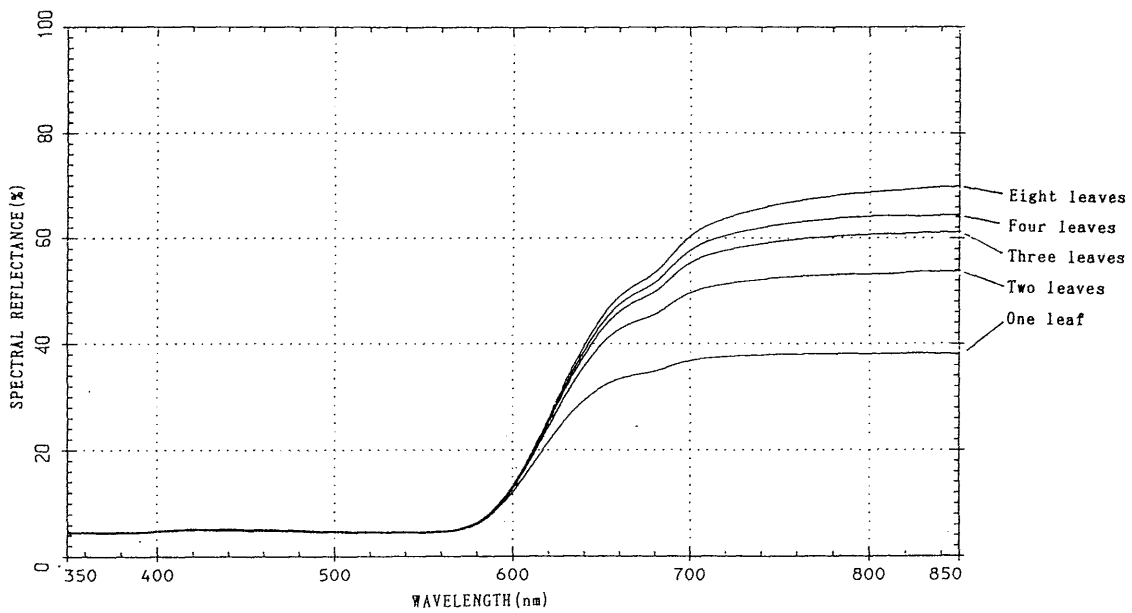


Fig. 4.8 Spectral reflectance of multiple red leaf layers.
(Acer palmatum)

生態的分光特性を有していることに基づいていると考えられた。すなわち、近赤外域における単葉の透過が高い新葉期には葉量そのものは低い、重なり合うことにより反射量が大きく増加する。展開期には、単葉の成熟にしたがって単葉の透過は低くなるために重なりによる反射量の増加は低減するが、葉量は増加する。そのため、単葉の透過が高くかつ葉量が増加した展開期のある時点で、近赤外域4バンドの輝度値が最大となると考えられた。

最近の1990年代より、NDVIの季節的変化についての報告が多くなされてきている^(40, 84)。NDVIの季節的変化の要因としては、太陽高度・季節による影の影響の違いなどが考えられるが、本章で述べた植物葉の近赤外域反射における生理生態的季節変化も大きく関わっているものと考えられる。

また、針葉樹林と落葉広葉樹の近赤外域の反射についてみると、野外測定データおよび衛星データのいずれにおいても、針葉樹林の近赤外域の反射量が広葉樹林より低い^(49, 60)。そこで、この針葉樹と広葉樹の近赤外域における反射量の違いについて、単葉の分光特性から樹冠の近赤外域の反射について考えてみた。そのために針葉樹葉の大きさが積分球付分光光度計の試料面に照射されている光束の大きさ(幅3mm, 高さ5.5mm)を超え、単葉の反射・透過が計測可能な数種(ナギ, コウヨウザン, ラカンマキ)について測定を行なった。その結果、供試したいずれの針葉樹についてもFig. 4.9のナギ(*Podocarpus Nagi*)の例のように、対比で破線によって示した広葉樹のコナラ(*Quercus serrata*)に較べ、反射は高いが、透過が非常に低い値を示した。この針葉樹の単葉の反射・透過・吸収特性からモデルを用いて重なり合った場合の近赤外域の反射量を推定し、衛星データでの針葉樹林の樹冠の近赤外域の反射について考えると、広葉樹林の樹冠の反射より低いことが当然予想された。したがって、単葉の反射・透過・吸収特性より、森林域の樹冠の反射についてをある程度予想できるのではないかと考えた。しかし、針葉樹と広葉樹では着葉の傾斜角度が大きく異なっており、このような単葉の反射・透過・吸収特性以外の要因も反射量の違いと関連していると考えられるが、この点については今後の検討課題としたい。

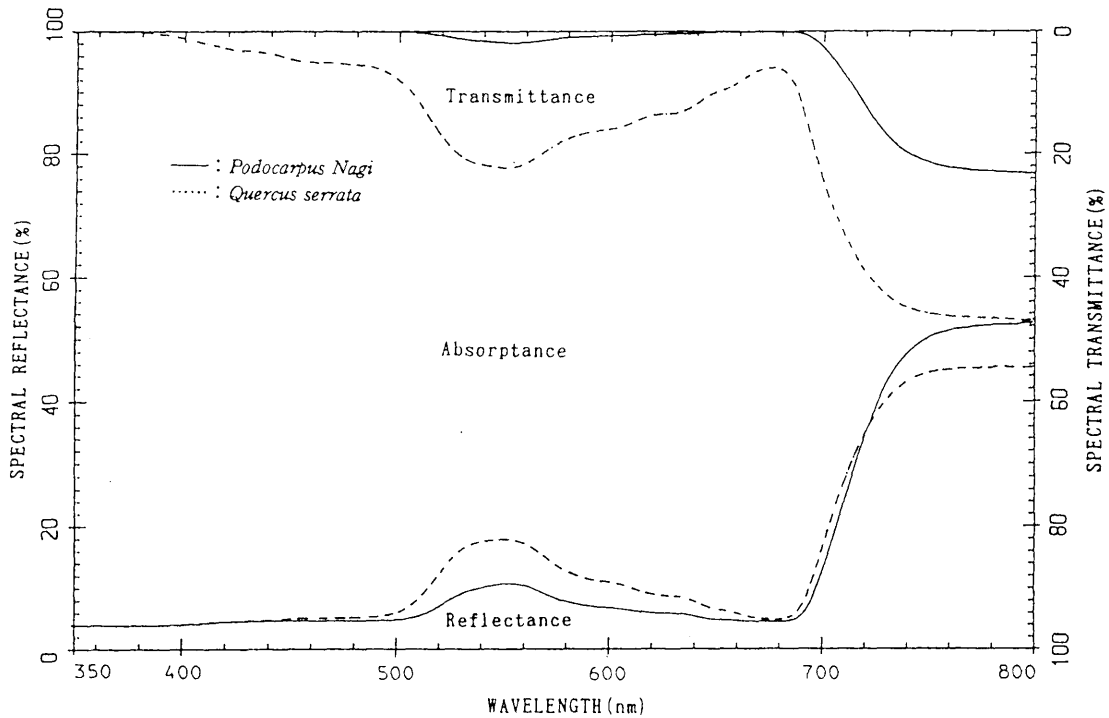


Fig. 4.9 Spectral reflectance and transmittance curves of a single green leaf from a coniferous tree species (*Podocarpus Nagi*) and a deciduous tree species (*Quercus serrata*).

また、活性度の指標としての近赤外域反射をこれまでの結果から推察すると、樹葉がなんらかの要因により生理的变化を引き起こし、褐葉に近い状態に変化した場合には、樹冠での近赤外域の反射量が低下し、同時に680nmの反射量は上昇するものと考えられる。同様に、大気中の粉塵等が葉面に付着すると、樹葉の近赤外域における透過が低下し、その結果、樹冠の近赤外域における反射は低下するが、可視域680nmの吸収域には顕著な変化は認められないであろう。

いずれにせよ、活性度の指標として近赤外域の反射を利用する場合には、樹種や季節、樹葉の表面状態などの要因により近赤外域における分光特性は変化するということが十分に認識し、近赤外域反射と同時に可視域における変化を考慮に入れなければならないことがわかった。

4. 4 まとめ

樹葉が重なり合った場合の総反射量の機構は、本論文で提案した以下に示す2枚の葉を重ねた場合の計算式を用いることによって十分に説明することができた。

$$P = \rho + \frac{\rho \tau^2}{1 - \rho^2}$$

P : 2枚を重ねた場合の総反射量

ρ : 単葉の反射率

τ : 単葉の透過率

すなわち、いま、同じ反射率 ρ で、異なる透過率 τ_1, τ_2 ($\tau_1 > \tau_2$) を持つ2種類の葉があり、両者の葉を2枚重ねた場合の総反射率を P_1, P_2 とすれば、その差は、

$$P_1 - P_2 = \rho (\tau_1 - \tau_2) / (1 - \rho^2) > 0$$

となり、透過率の高い葉のほうが重なりあった状態では反射率が高くなる。透過率と吸収率と反射率とは、互いに補数の関係にあるから、この式によると吸収率の低い葉のほうが、重なり合った状態では、反射率が高くなることになる。

この式は、樹葉を重ねた場合の総反射量は、単葉の反射・透過・吸収特性に依存することを示している。したがって、この式を用いることによって樹葉が重なり合った場合に近赤外域反射量が季節的に変動する現象を、単葉の季節的分光特性変化によるものであると明確に説明できた。同様に、単葉・可視域の分光特性が大きく変化した黄葉・紅葉の樹葉が重なり合った場合の可視域における総反射量の増加についても説明することができた。

さらに、樹冠を単葉が重なったものと仮定した樹冠光学モデルを、衛星データの植生域に適用することによって近赤外域における輝度値の季節的变化を説明することができた。すなわち、落葉広葉樹域における近赤外域の新葉期の高い反射、また、夏に向かうにしたがって近赤外域の反射が低下し、褐変化した場合にはさらに低下する現象を実験室で得られたコナラ樹葉の重なり合いの結果より説明できた。

また、1990年代になってから、衛星データを利用した時系列な植生指数およびNDVIの季節的変化による植生域特性の解析の報告が多くなされているが、実験室で得られた樹葉の近赤外域の反射量の季節的変化は、これらの報告の理論的根拠を与えるものである。すなわち、NDVIの季節的変化についても、単葉の生理生態による反射・透過・吸収の季節的分光特性変化に依存した近赤外域反射量の変化によるものとして説明することができるものと考えた。

さらに、針葉樹と広葉樹の近赤外域反射の違いについても、単葉の反射・透過・吸収特性の相違からある程度解明できた。

衛星データは、葉が重なり合った状態での植物群落の分光反射特性を捉えているので、衛星データを用いて森林植生を検討する場合には、単葉の分光特性ではなく、樹葉が重なり合った状態での分光反射特性を推定することが肝要である。

今回実験室で得られた結果の応用として、今後は、さらに植生群・樹種群の近赤外域反射の季節的変化の特性、同じ季節での近赤外域反射特性の植生群・樹種群による違いを基にして、リモートセンシングデータを用いた植生域についてのさらに詳細な解析、森林域については、樹種判別や林分構造の探査が可能になるのではないかと期待している。リモートセンシングデータを用いた植生域の解析には、それと対応した植物葉の分光特性の知識と、その基礎となっている生理生態的知識が必要である。

また、近赤外域の反射量を活性度の指標として野外に応用する場合には、バイバンド比あるいはNDVIのみでなく、近赤外域における反射特性の変化と可視域・赤領域の変化の両方を解析することにより樹葉の生理状態を推測し、さらには生理変化を引き起こした原因まで特定できる可能性がある。しかしながら、実用的には、植生の葉の重なりが不十分な場合には、背景である土壌の分光特性が考慮されなければならないであろう。あるいは、葉の重なりが十分な場合であっても、樹冠がなす陰などの反射量におよぼす影響が考えられる。また、バイバンド比あるいはNDVIにも、第3章で述べた単葉の近赤外域分光特性、第4章で述べた樹葉が重なり合うことによる反射量増加の効果から、

可視域の反射量増加も大きく影響することが考えられる。いずれにしても、実験室での植物の分光特性に関する研究とその応用が、つねにフィード・バックされることが重要である。また、その場合の実験室での分光特性の測定に関しては、積分球付分光光度計の測定によるような再現性の高いものによるべきである。

第5章 樹葉の季節的可視域分光特性変化におよぼす植物色素の影響

5.1 はじめに

これまでの植物の分光反射特性を利用した活性度診断技術や植生域解析のためのリモートセンシング技術の研究では、植物葉分光反射特性の赤領域の反射が低く、近赤外域での反射が高いという特徴が利用され、近赤外写真、バイバンド比、NDVIが実用的に用いられ、多くの報告がなされてきている^{35, 44, 50, 93)}。

ところで、バイバンド比やNDVIの値については、第3章で述べた単葉の近赤外域分光特性および第4章で述べた樹葉が重なり合うことによる反射量増加の効果から、近赤外域での分光特性と同時に可視域での反射量増加もかなり大きく影響をおよぼす要因になっていることが示唆された。また、最近の樹葉分光スペクトルの研究によっても、樹木の障害は、赤外域より可視域で明瞭に現れることが多く報告されている^{27, 96)}。また、落葉広葉樹の秋季の紅葉現象は、第2章および第4章で述べたように、顕著な可視域の分光特性変化で捉えられることから、衛星リモートセンシングデータを用いて、この変化を抽出することにより広域の樹種群判別が可能であると考えられる¹⁰⁰⁾。したがって、今後、植物の分光特性を利用した活性度診断やリモートセンシング技術を用いた植生域解析のためには、可視域についてさらに詳細な植物葉分光特性の知見を得ておく必要がある。

可視域の植物葉分光特性については、植物色素であるクロロフィル・カロチノイドおよびアントシアニン量が主として影響をおよぼしていると考えられている^{2, 91, 98)}。そこで、本研究では、最も顕著な樹葉の可視域分光スペクトル変化である秋季の落葉広葉樹の黄葉・紅葉現象について、樹葉分光スペクトルと植物色素量を対応させ、樹葉の反射におけるこれらの色素の影響に考察を加えた。

5.2 樹葉の経時的可視域分光反射スペクトル変化

5.2.1 材料および方法

樹葉の分光スペクトルの測定に用いる試料として、落葉広葉樹の秋季に黄葉する樹種群よりエノキ (*Celtis sinensis* Persoon), 紅葉する樹種群よりイロハモミジ (*Acer palmatum* Thunb.), また、常緑のものとしてコジイ (*Castanopsis cuspidata* (Thunberg) Schottky) ・タブノキ (*Persea Thunbergii* (Sieb. et Zucc.) Kosterm.) ・スギ (*Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don) の5種を選定した。

試料採取は京都府立大学及び京都府立植物園において、1990年7月から1990年11月にかけて行なった。試料木は、いずれも林分構成個体の樹高3m以上の南向きのものを選定し、採取は、午前中に同一個体の陽葉の部分を高枝切りで枝ごと行なった。また、常緑の樹種については、当年葉を採取した。採取した枝は、アイスボックスに入れて研究室に持ち帰り、分光スペクトル測定用に樹葉を取り、直ちに測定を行なった。樹葉の分光反射スペクトルの測定方法は、第2章、第3章と同じである。

5. 2. 2 秋季の樹葉の経時的な可視域分光反射特性変化

第2章で示したように、樹葉の分光反射スペクトルは、樹葉の吸収特性を反映している。すなわち、吸収の要因の存在する場合には、反射率は低く、吸収が弱い部分では、反射率は高くなっている。

常緑樹葉の例として、Fig. 5.1に常緑樹であるコジイの9月,10月, 11月の3時期の分光反射スペクトルを示したが、夏から秋にかけて可視域分光反射スペクトルに変化は認められなかった。

一方、落葉広葉樹の樹葉では、夏から秋にかけての老化に伴い、経時的に可視域の分光反射スペクトルに変化が認められた。Fig. 5.2は、エノキの緑葉から黄葉するまでの9月, 10月, 11月の3時期の分光反射スペクトルの変移を示したものである。黄葉する樹種の葉の分光反射スペクトルの変移は、緑葉から黄葉へ進むにつれ、緑領域と赤領域の反射率が急激に上昇した。樹葉が緑葉から黄葉に変移する場合の分光反射スペクトルの変化は、近赤外域やクロロフィルの吸収のピークである680nm付近ではなく、540nm付近から660nm付近の上昇として認められた。これは、HOUQUE *et al.*²⁷⁾ (1988), WESTMAN *et al.*⁹⁶⁾ (1988)

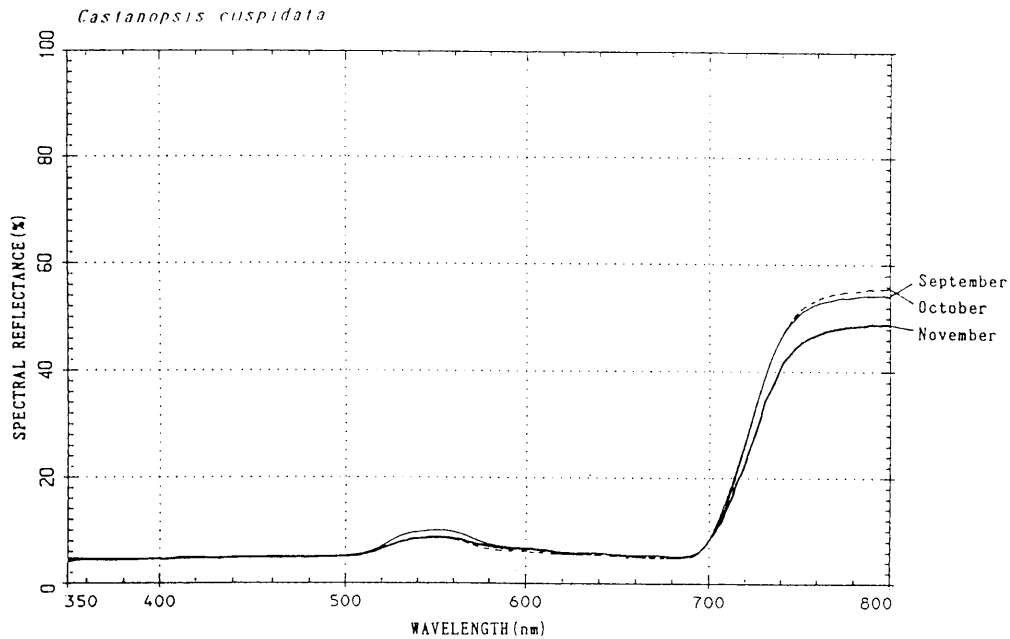


Fig. 5.1 Leaf reflectance curves from evergreen tree species
in September, October and November. (*Castanopsis cuspidata*)

の森林衰退による樹葉の退色による反射スペクトル変化で指摘されている結果と同様であった。

Fig. 5.3にイロハモミジの緑葉から紅葉するまでの分光反射スペクトルの変移を示した。緑葉から紅葉への分光反射スペクトルの変移は、黄葉の場合と次の2点で異なっていた。赤領域が急激に上昇する点は黄葉と同様であったが、紅葉の場合、緑領域の反射は、黄葉の場合とは異なり、しだいに低下した。また、紅葉の青領域の反射については、いったんやや高くなった後再び低下した。緑領域の反射が減少するのは、この領域が新たに形成されたアントシアニンによる吸収領域にあたるためと推測された。また、青領域の反射が、いったん高くなった後、再び低くなることについても、アントシアニンの吸収域が500nm以下にもあるためと考えた。

5. 3 植物色素量の経時的变化

5. 3. 1 材料および方法

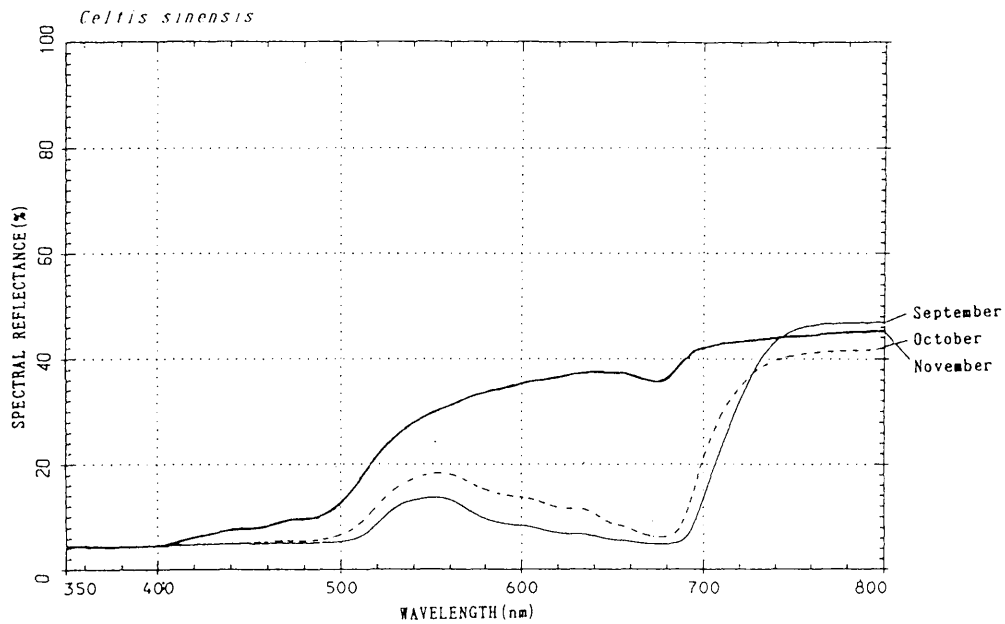


Fig. 5.2 Leaf reflectance curves from deciduous tree species turn yellow during the autumn coloration period in different months.

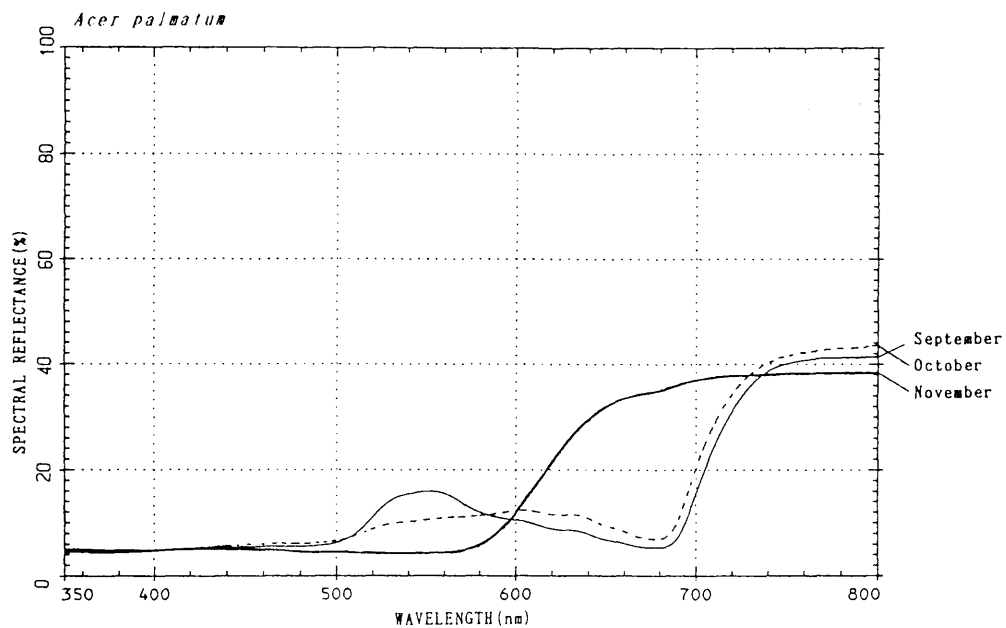


Fig. 5.3 Leaf reflectance curves from deciduous tree species turn red during the autumn coloration period in different months.

5. 3. 1. 1 材料

5. 2の樹葉の分光スペクトル測定試料と同樹種・同一個体について同条件で同時に採取を行ない、採取した枝より色素抽出・定量用の樹葉をとり、直ちに色素の抽出を行なった。

5. 3. 1. 2 色素の抽出方法

クロロフィルおよびカロチノイドの抽出は、次のような方法にしたがって行なった。採取した樹葉はそれぞれ正確に5gを計量し、細断した。細断した樹葉は、少量(25ml)の-15°Cに保った90%冷アセトンとともに、1gのMgCO₃を加え、ワーリングブレンダーで粉碎し、ガラスフィルターを用いて減圧吸引濾過した。冷アセトン(-15°C)を用いるのは、クロロフィラーゼの働きを抑えるためであり、MgCO₃を加えるのは、フェオフィチンを形成させないためである^{1)・2)}。残渣は、アセトンで再抽出し、同様の手順を3回繰り返す、最終体積を200mlにした。

得られたアセトン抽出液には、クロロフィルのほかにカロチノイドも含まれており、カロチノイドだけを抽出するために、抽出液中のクロロフィルをケン化し、それを取り除く方法をとった。樹葉中の総カロチノイド量については、GOODWIN¹⁾(1958)およびSANGER²⁾(1971)の報告がある。予備実験により同一アセトン抽出液よりそれぞれの方法によりケン化を行ない総カロチノイド量を測定したところ、非常に大きな収量の開きがあった。したがって、カロチノイドの抽出については、高い収量の得られたSANGER²⁾の方法によった。アセトン抽出液のうち25mlに同量の20%メタノール性KOHを加えラップで覆い、暗室下室温で2時間ケン化を行なった。その後、カロチノイドを分液ロートを用いて、石油エーテル(沸点30°~60°)に転溶させ抽出し、この石油エーテル溶液を蒸留水で洗浄し、無水Na₂SO₄で乾燥させた後、最終体積を計量した。

アントシアニンは、生葉試料1gを1%塩酸を用いて、抽出濾過し、最終体積を50mlとした²⁾。

5. 3. 1. 3 色素の定量方法

クロロフィルの定量は、25mlのアセトン抽出液をとり、それを5倍に希釈し

光路長1cmの石英セルに入れ、自記分光光度計（島津製作所製、UV-2100）で吸光度を測定した。その結果から、次の(5-1)式で表されるArnonの式にしたがって単位生葉量（g）当たりの全クロロフィル量を算出した^{21, 24}）。

$$\text{全クロロフィル (mg/ℓ)} = 20.2 D_{645} + 8.02 D_{663} \quad (5-1)$$

D_{645} : 645nmにおける吸光度

D_{663} : 663nmにおける吸光度

カロチノイドの定量は、試料を透過した光 I_t と、対照溶液を透過した光 I_0 との比から求める比色分析法によった。濃度 c で光路長 $ℓ$ のある液体に強度 I_0 の光が入射し、強度 I_t の光が透過した場合、(5-2)式に示すようなLambert-Beerの法則が成り立っている。

$$I_t = I_0 \cdot 10^{-\epsilon c \ell} \quad (5-2)$$

ϵ : 吸光係数

c : 試料濃度

$ℓ$: セルの光路長

透過度 T は(5-3)式で表され、

$$T = \frac{I_t}{I_0} \quad (5-3)$$

吸光度 E は(5-4)式で表される。

$$\begin{aligned} E &= \log_{10} \frac{1}{T} = \log_{10} \frac{1}{\frac{I_t}{I_0}} = \log_{10} 10^{\epsilon c \ell} \\ &= \epsilon c \ell \end{aligned} \quad (5-4)$$

(5-4)式の試料濃度を w/v [%] , セルの光路長の単位を cm とおいた場合、濃度1% , セル光路長1cmの ϵ を比吸光係数といい、(5-5)式で表す。

$$E_{1\%}^{1\text{cm}} = \frac{E}{c [\%] \times \ell} \quad (5-5)$$

色素量は、試料を光路長1cmのセルに入れ分光光度計で吸収極大における吸光度を求め、これと比吸光係数 $E_{1\%}^{1\text{cm}}$ と試験液量から計算して求めた。たとえば、 x [g] のカロチノイドが y [mℓ] の溶液に溶けている場合の吸収極大における吸光度が E であるとする、色素含量は次の(5-6)式により求められる^{6, 41)}。

$$x = \frac{E y}{E_{1\%}^{1\text{cm}} \times 100} \quad (5-6)$$

上記の方法により抽出した石油エーテル溶液には、 β -カロチンの他にルテインなどのキサントフィル類を含んでいるため純粋の比吸光係数は得られない。したがって、本実験での比吸光係数は β -カロチン(石油エーテル溶液)の比吸光係数(2500)と仮定して求める方法にしたがい単位生葉量(g)当たりの総カロチノイド量を算出した^{15, 41)}。

アントシアニン量は、樹葉の単位生重量(1g)について同体積のアントシアニン1%塩酸抽出液とし、520nmにおける吸収ピークの吸光度を用いて相対変化を示した。

5. 3. 2 植物色素抽出・定量の結果および考察

5. 3. 2. 1 抽出色素スペクトル

緑葉のアセトン抽出液の吸収スペクトルをFig. 5.4に示した。アセトン抽出液には、クロロフィルの他にカロチノイド、フラボノイドが含まれている。アセトン抽出液の可視域における吸収スペクトルは、663nmをピークとする赤領域と400nmから500nmの青領域に二つの大きな吸収域が存在する。アセトン抽出液の663nmをピークとする吸収はクロロフィルのみによるものであり、400nmから500nmの青領域の吸収はクロロフィルとカロチノイドの吸収スペクトルが重なっている。

Fig. 5.5に緑葉のカロチノイド石油エーテル抽出液の吸収スペクトルを示した。石油エーテル溶液の吸収スペクトルは、450nm付近に主要な吸収ピークがあり、その両側に2つの吸収ピークを持つというカロチノイドに典型的な吸収ス

ベクトルを示していた¹⁸⁾。 Fig. 5.6に希塩酸による紅葉のアントシアニン抽出液の吸収スペクトルを示した。吸収のピークは、メタノール性塩酸によるものと同様で520nmであった⁶⁹⁾。

5. 3. 2. 2 緑葉のクロロフィル・カロチノイド比

植物葉の紫外域・可視域における吸収スペクトルは、植物色素の吸収スペクトルの重なり合ったものであり、植物色素の組成・濃度・分布により決定されているといわれている^{2, 91, 98)}。この考えにしたがうと、樹葉の可視域の分光スペクトル特性については、クロロフィルとカロチノイド比が重要となる。

わが国では、一般に植物の成葉でのクロロフィルとカロチノイド比については、ほぼ8:1であると記載されている²¹⁾。

ところが、樹葉については、GOODWIN¹⁵⁾により、落葉広葉樹のカエデの類 (*Acer pseudoplatanus*), オーク (*Quercus rober*), プラム (*Prunus nigra*), などについて、夏季にそれぞれほぼ22:1, 65:1, 70:1の値が報告されている。同様に、

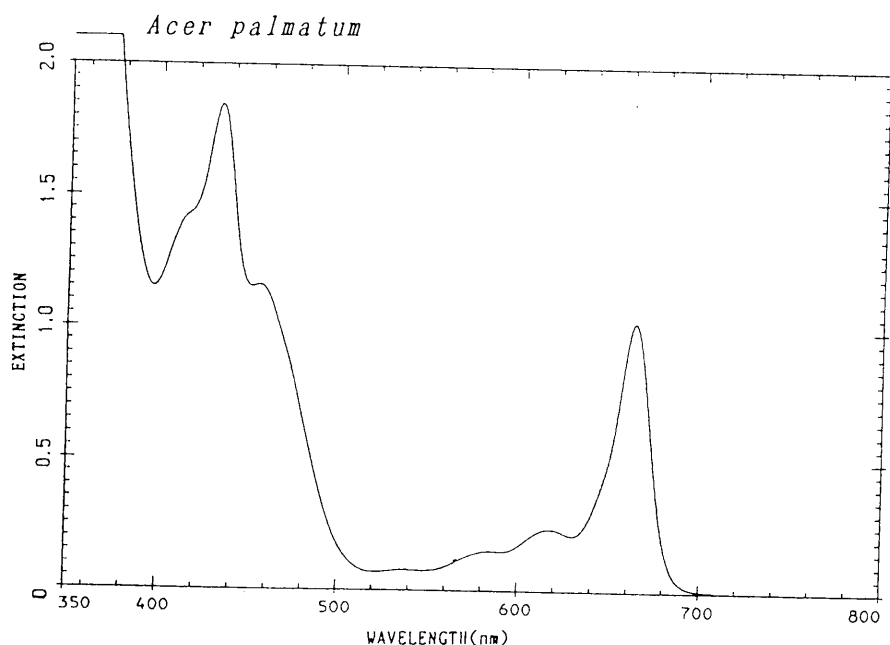


Fig.5.4 Absorption spectrum of leaf pigments in the original acetone extract. (Reference:90%acetone, Pathlength:10mm)

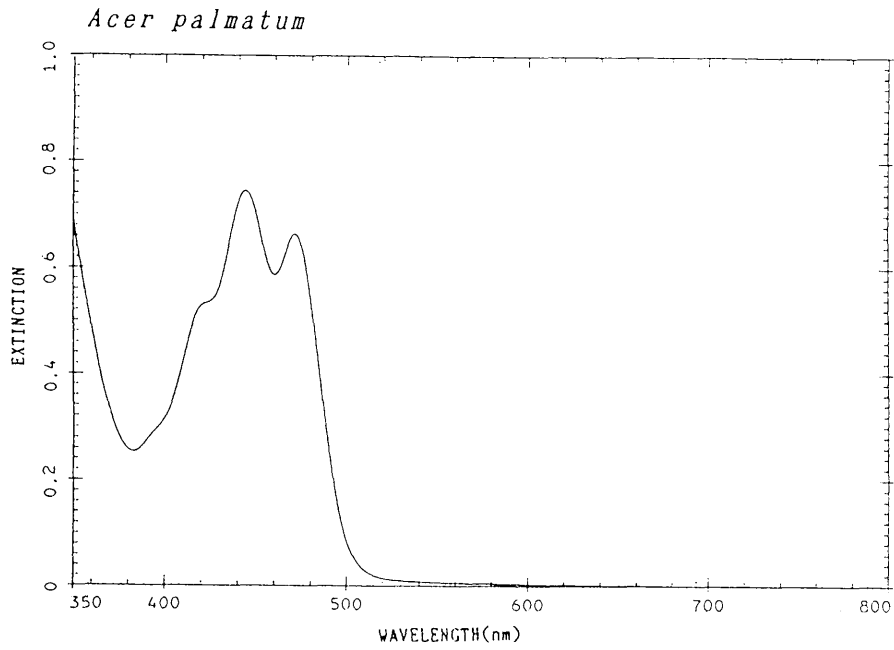


Fig. 5.5 Absorption spectrum of carotenoids.
 (Reference:petroleum ether, Pathlength:10mm)

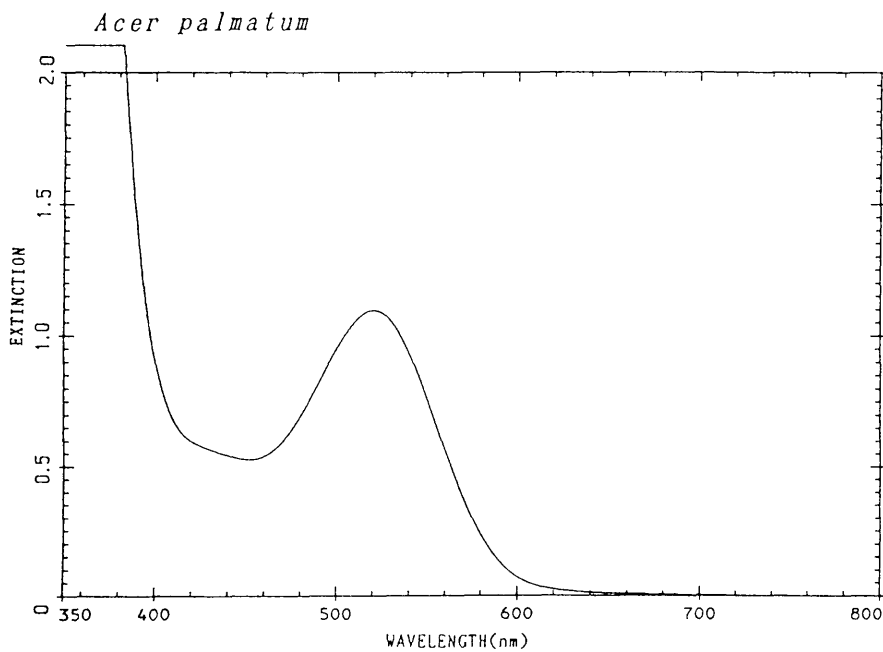


Fig. 5.6 Absorption spectrum of anthocyanin.
 (Reference:1%hydrochloric acid, Pathlength:10mm)

SANGER⁸⁾⁹⁾によると、落葉広葉樹のオークの一種(*Quercus ellipsoidalis*), ヘーゼル(*Corylus americana*), ポプラ(*Populus tremuloides*)について45:1, 44:1, 35:1である。

わが国では、井田²⁹⁾³⁰⁾(1981)により、裸子植物のスギ(*Cryptomeria japonica*), ヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)などの9科に属する32種4変種についてクロロフィル・カロチノイドの同時定量がなされている。その比は、4.45:1より14:1であり、また、黄色カロチノイド含量とクロロフィル含量との間には正の相関があり、36樹種についての両色素間の関係はかなり変動はあるもののほぼ直線関係で近似することができると報告されている。

また、THOMAS&GAUSMAN⁸⁾⁹⁾(1977)は、トウモロコシ(*Zea mays*)など8種の作物について植物色素と可視域反射の関係について述べているが、クロロフィル・カロチノイド比については、8.1:1より12.0:1の値であり、やはり相関の高い直線関係の得られることを報告している。

本研究では、9月の値で14.3:1(エノキ), 13.9:1(イロハモミジ), 12.5:1(コジイ), 9.9:1(タブノキ), 13.7:1(スギ)であった。

Fig. 5.7に、本研究の5樹種の9月におけるアセトン抽出液の吸収スペクトルを示したが、スペクトル青領域の400nmから500nmにおける吸収スペクトルの波形が非常に似かよっていた。青領域の400nmから500nmの吸収はクロロフィルとカロチノイドの吸収スペクトルの重なり合ったものであるが、この部分についても樹種による差がなく、このことはクロロフィル・カロチノイド比に樹種による大きく差異のないことを示している。

かねてより、光合成に関与する色素類については、生体内でタンパク質分子等と結合しているため、色素そのものだけで測定された吸収スペクトルと、生体内で測定されたそれとは必ずしも同一ではないことが指摘されている¹⁶⁾。近年、光合成の基本単位である系I・系IIの構造と機能に関する研究が飛躍的に進んできている⁸⁾¹⁷⁾。それらの知見によると、光合成の基本単位および光合成反応は、植物に共通であるとされており、したがって、高等植物のクロロフィル・カロチノイド比については、基本的に種に関係なく一定か一定に近い値を

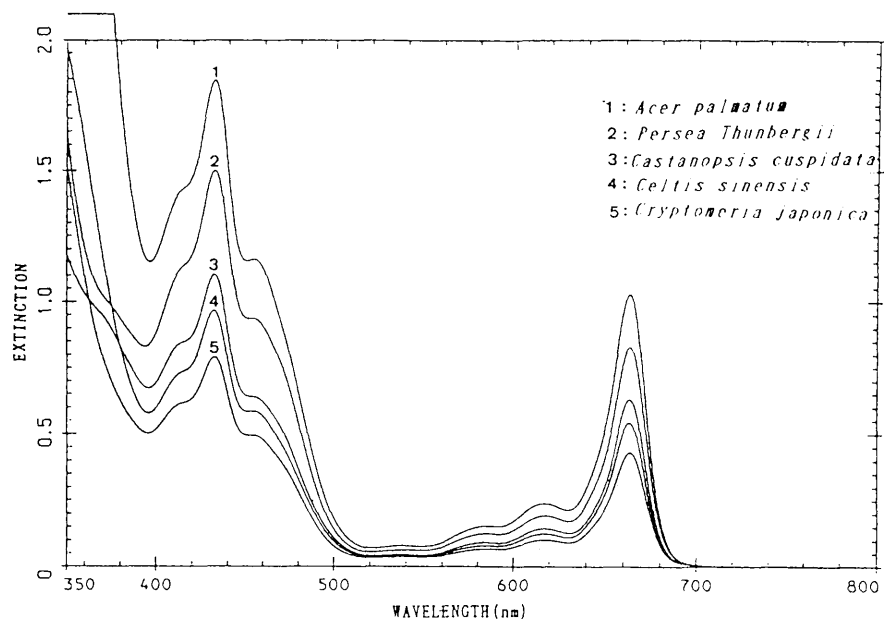


Fig. 5.7 Absorption spectra of leaf pigments in the original acetone extract from five different tree species.

(Reference: 90% acetone, Pathlength: 10mm)

とるものと考えられた。

これまでの報告によりクロロフィル・カロチノイド比に差異があるのは、カロチノイド抽出方法の違いによる収量の差が大きな要因ではないかと推測した。

今後、植物色素間の比を求める研究については、可能なかぎり原液 (crude) の状態から求める方がより正確であろう。クロロフィル・カロチノイド比については、現在の測定機器ではデータがディスクに格納でき、各種演算も容易にできるようになってきているので、原液のアセトン抽出液についてスペクトル演算などにより求める方法の開発が期待され、それによって本研究分野の飛躍も可能となる。

5. 3. 2. 3 植物色素量の秋季の経時的変化

アセトン抽出液よりARNONの式により求めたクロロフィル量、石油エーテル抽出液の445nmの吸収ピークの吸光度から求めたカロチノイド量より、樹葉の単位生葉量(g)あたりのクロロフィル量(mg)およびカロチノイド量(μ g)を求め、各

樹種ごとの経時的变化を、Fig. 5.8～Fig. 5.10に示した。なお、Fig. 5.9に示したイロハモミジのアントシアニン量の変化は、樹葉の単位生重量について同体積のアントシアニン1%塩酸抽出液とし、520nmにおける吸収ピークの吸光度の相対的变化で示した。

常緑の樹種では、Fig. 5.9に示したように、秋季に色素量の変化はなかった。

一方、落葉広葉樹種では、経時的に大きく変化を示した。Fig. 5.8に示した秋季に黄葉するエノキでは、黄葉が始まる10月下旬より、クロロフィルおよびカロチノイド量が急激に減少した。クロロフィル量は、11月下旬には0.038mg/gとゼロに近づいた。また、カロチノイド量もクロロフィル量の低下と同時に急激に低下した。従来、わが国の樹葉の黄葉に対する認識は、秋季におこる葉緑体の解体にともなってクロロフィルが分解し、残ったカロチノイドのために黄色が発現するというものであったが、この結果からは、クロロフィルの分解にともない、カロチノイドも急速に分解減少しており、残されたカロチノイドで、黄色が発現しているものと推測できた。

また、Fig. 5.9に示した秋に紅葉するイロハモミジのクロロフィル・カロチノイド量の経時的变化も、紅葉時に両色素量が急激に減少するという、黄葉と同様の結果を示した。クロロフィル量は、10月上旬以降より急激に減少し、11月下旬には0.058 μ g/gとゼロに近づいた。カロチノイド量も10月上旬以降減少し、11月下旬には89.76 μ g/gまで低下した。紅葉の場合には、その変化に加えて急激にアントシアニンが形成された。アントシアニン量は、クロロフィル・カロチノイド量の低下と相反して紅葉の始まった10月下旬から11月下旬にかけて急激に増加した³³⁾。

ここに示した広葉樹の黄葉・紅葉に伴う色素量の変化は、基本的にGOODWIN¹⁵⁾およびSANGER⁶⁹⁾の結果と同じであった。したがって、黄葉する樹種群では、クロロフィルはほぼ完全に分解され、それに合わせてカロチノイド量も急激に減少する。しかしカロチノイドの一部は残存し、それによって黄色が発現する。また、紅葉する樹種群では、黄葉と同様のクロロフィルのほぼ完全な分解・カロチノイド量の減少に加えて、赤色色素のアントシアニンが新たに生成された

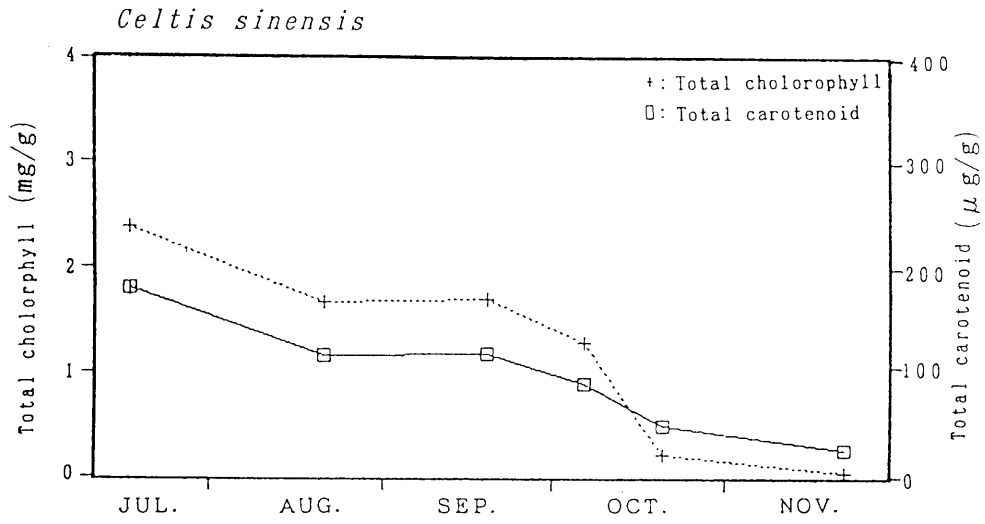


Fig. 5.8 Variations of total chlorophyll and carotenoid values of deciduous tree leaves turn yellow during autumn. (per unit raw weight)

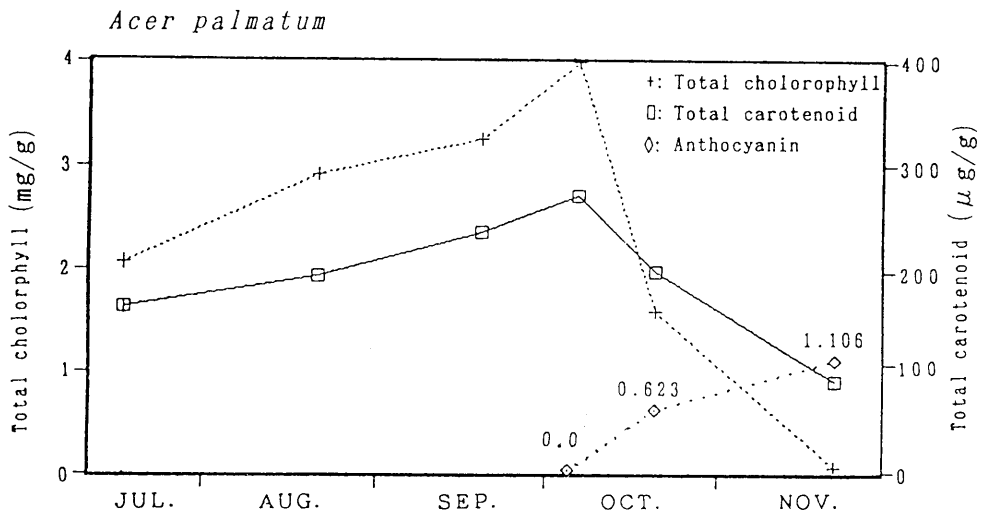


Fig. 5.9 Variations of total chlorophyll, carotenoid and anthocyanin values of deciduous tree leaves turn red during autumn. (per unit raw weight)

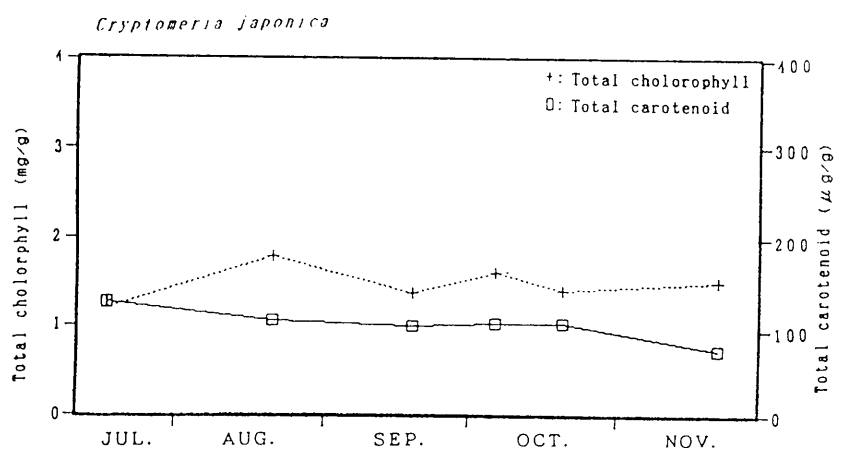
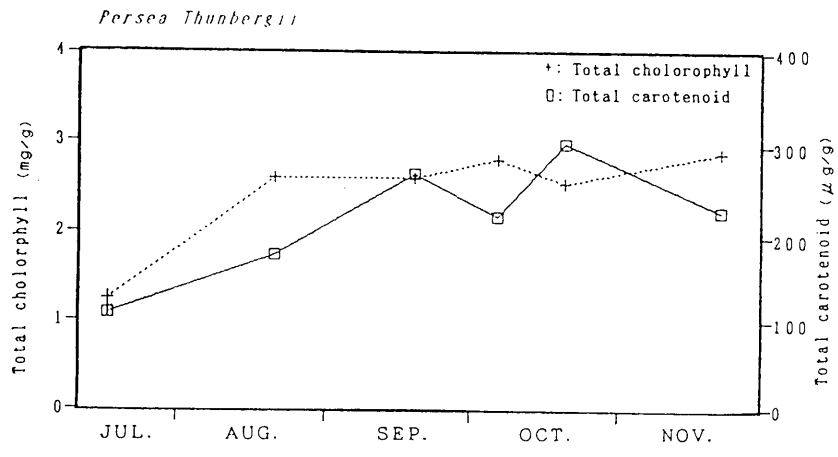
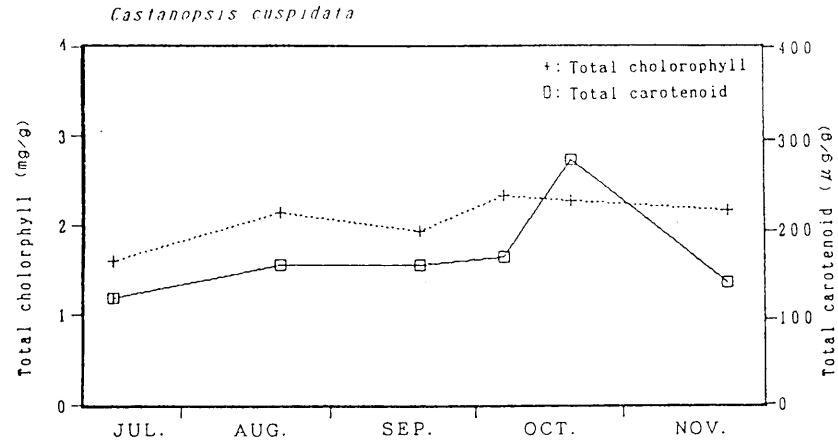


Fig. 5.10 Variations of total chlorophyll and carotenoid values of evergreen tree leaves. (per unit raw weight)

ことによる可視域分光特性変化であると結論づけることができた。

5. 4 季節的樹葉反射特性変化におよぼす植物色素の影響

Fig. 5.11およびFig. 5.12に黄葉・紅葉について秋季の樹葉反射特性変化と色素量変化を対応させた。Fig. 5.11にエノキの緑葉から黄葉するまでの9月、10月、11月の3時期の分光反射スペクトルの変移と色素量の変化を色素抽出液の吸収スペクトルの相対的变化で表したものを対比して示した。植物葉のアセトン抽出液吸収スペクトルの赤領域における吸収はクロロフィルのみであり、この部分の吸光度 E は色素濃度と比例関係にある。したがって、赤領域の吸光度 E はクロロフィル濃度を示すことになる。また、石油エーテル溶液はアセトン抽出液よりケン化・転溶によりカロチノイドのみを抽出したものであり、その吸収スペクトルの青領域における吸光度 E はカロチノイド濃度と比例関係にある。

緑葉について、赤領域の680nm付近で反射が低いのはクロロフィルの吸収によるものであり、青領域はクロロフィルとカロチノイドの両色素の吸収によるものである。

秋季に黄葉するエノキの分光反射スペクトルについてみると、緑葉から黄葉へ変移するにつれて緑領域と赤領域の反射率は急激に上昇した。これは、クロロフィル量の減少に伴い、同色素の赤領域の吸収が減少していくのに対応していた。また、青領域の反射についても、緑葉の場合よりわずかではあるが上昇していた。これは、カロチノイド量とクロロフィル量の減少にともなう青領域の吸収の減少に対応していた。完全な黄葉の状態でも、残存するカロチノイドの影響により400~500nmの青領域の反射は高くならなかった。樹葉の反射スペクトルは、緑葉から黄葉に変移する場合に、クロロフィルの吸収のピークではない540nmから660nmのスペクトルが上昇していたが、色素量の変化のみではこのスペクトル変移を説明できなかった。

Fig. 5.12に秋季に紅葉するイロハモミジの緑葉から紅葉するまでの、分光反射スペクトルの変移と色素量の変化を色素抽出液の吸収スペクトルで表したも

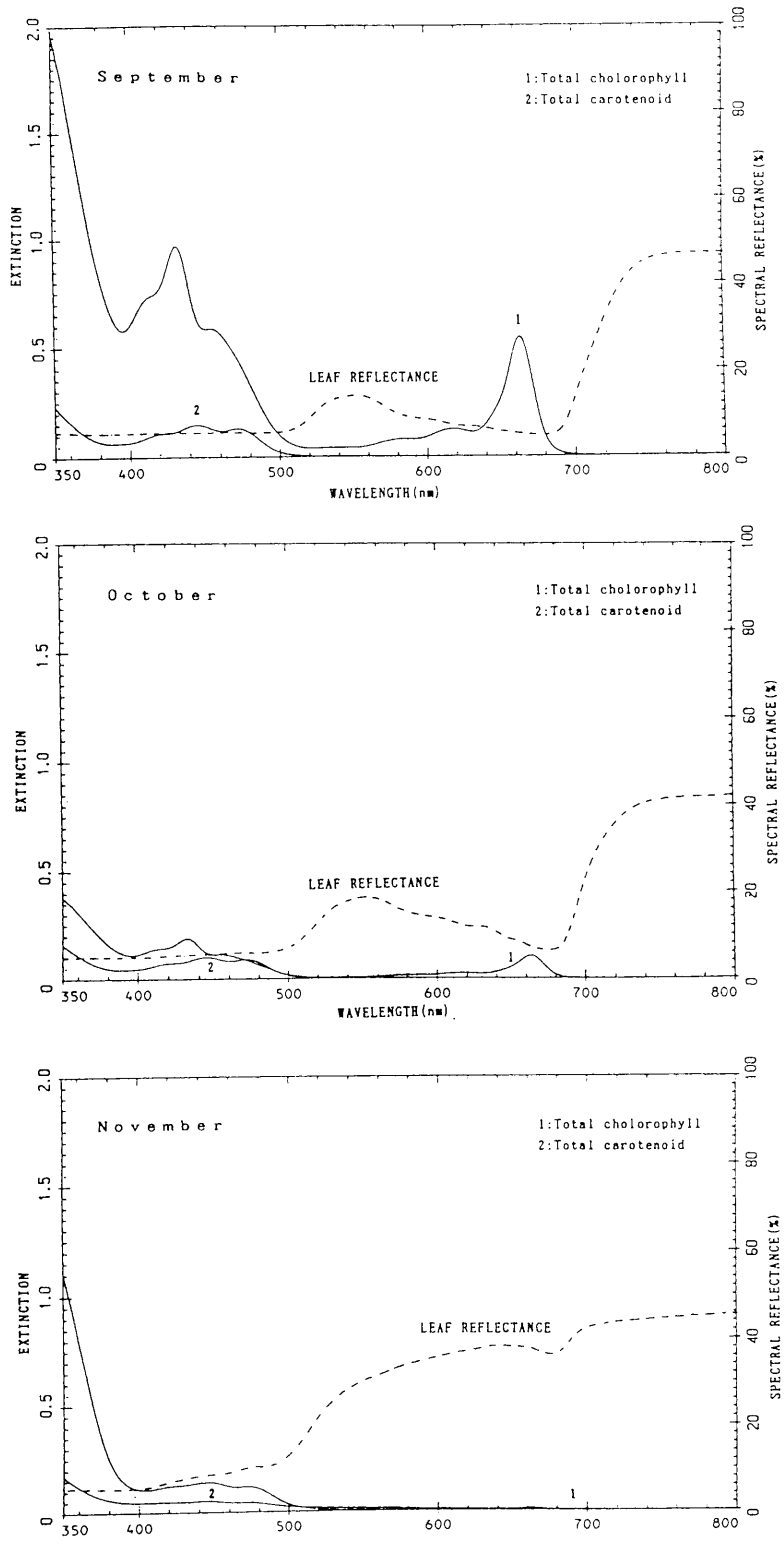


Fig. 5.11 Variations of leaf reflectance and pigment values expressed by absorption spectra from deciduous tree species turn yellow during the autumn coloration period. (*Celtis sinensis*)

のを対比させた。紅葉の分光反射スペクトル変移は、赤領域については黄葉と同様に上昇した。しかし、黄葉の場合とは次の点で異なった。黄葉の場合には、緑領域の反射は、黄葉にともない上昇したのに対して、紅葉では、緑領域の反射は急激に低下した。第2は青領域の反射が、いったん高くなった後再び低下した。

紅葉の500~580nmの緑領域における反射が減少したのは、この領域に吸収特性をもつ赤色色素であるアントシアニンが新たに生成されたことによることがFig. 5.12により示された。また、400~500nmの青領域では、クロロフィルのほぼ完全な消失・カロチノイドの減少により吸収が減少するものの、その後のアントシアニンの増加にともない、吸収量が増加し、反射量が減少したと説明できた。

以上のことより、樹葉の分光反射スペクトル変化と色素量吸収スペクトルの経時的変化の対応により、樹葉の秋季の分光特性変化は、色素の分解と生成による樹種群に共通な生理的变化であることが明らかとなった。

したがって、衛星データ等を利用するリモートセンシング技術において、落葉広葉樹の秋季の可視域反射スペクトルの顕著な変化を抽出することにより、森林域の樹種群判別に利用できるであろう。実際のリモートセンシングデータを用いての応用研究は今後の課題である。

樹葉の可視域分光特性解析に関しての問題点としては、植物色素は、生体内でのスペクトルと抽出で得られる分光スペクトルが同じではないこと、さらには抽出収量の問題などがあり、樹葉の分光特性変化を抽出色素量のみで論じることには限界があると考えられる。

今後の活性度診断に利用できるような樹葉の分光特性研究の方向としては、特性変化がどのようになぜ引き起こされるかをさらに詳細に検討する必要がある。樹葉の分光スペクトル測定に用いた積分球付分光光度計（島津製作所製、UV-2100）のような機種では、スペクトルデータをディスクに格納でき、さらにコンピュータ使用により装置関数と入力記号のたたみこみ計算処理により微分スペクトルを得ることができる。たとえば、植物葉の分光スペクトルでは、こ

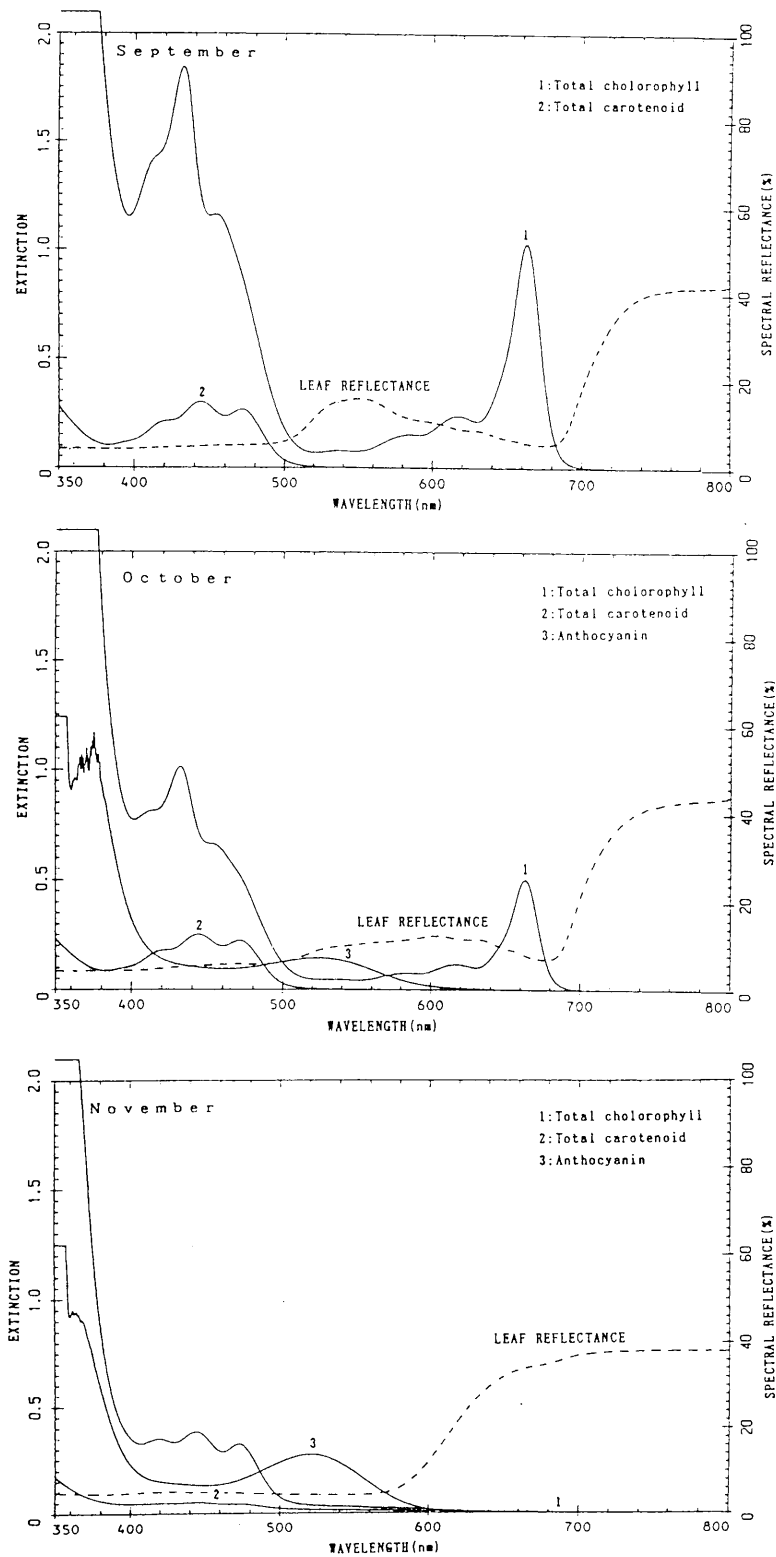


Fig.5.12 Variations of leaf reflectance and pigment values expressed by absorption spectra from deciduous tree species turn red during the autumn coloration period. (*Acer palmatum*)

の微分法によりレッド・エッジ (red edge) とよばれる680nm付近の吸収のピークを正確に求めることができる。このレッド・エッジは単位面積あたりのクロロフィル量と高い相関があり、早期のストレスの検出などにも応用が期待されるという報告もある²⁶⁾。今後の研究は、このような微分法などによる樹葉の非破壊解析の方向が検討されるべきであろう。

5. 5 まとめ

樹葉の可視域分光特性変化は、葉中の植物色素の組成・濃度・分布により決定されているといわれている。本章では、黄葉および紅葉する落葉広葉樹と常緑樹について、樹葉の季節的な分光反射スペクトルの経時変化と、抽出して得た葉色素量の変化とを対応させて検討した。その結果、以下のような知見を得た。

緑葉中の光合成色素であるクロロフィル・カロチノイドの比については、供試した5樹種のアセトン抽出液の吸収スペクトルが非常に似ていることから、樹種に関係なく一定かそれに近い値をとるものと考えられた。

また、緑葉の680nm付近をピークとする吸収はクロロフィルのみによるものであり、400~500nmの青領域は、クロロフィル・カロチノイドの両方の色素の影響であることが明らかとなった。

常緑樹では、秋季の色素量変化はなかった。落葉広葉樹の秋季の黄葉現象では、クロロフィルはほぼ完全に分解され、それと同時にカロチノイド量も急激に減少した。樹葉の黄色の発現は残存したカロチノイド色素によるものであり、黄葉の吸収はカロチノイドによる400~500nmの青領域のみとなった。紅葉は、黄葉と同様にクロロフィルのほぼ完全な分解とそれに合わせてカロチノイド量の急激な減少という変化に加えて、赤色色素のアントシアニンが新たに生成されたことによるものであった。紅葉の吸収域は、カロチノイドによる400~500nmの青領域に、アントシアニンによる500~580nm付近の緑領域が加わった。

落葉広葉樹葉の秋季の分光特性変化は、色素の分解と生成という樹種群に共通な生理的变化によるものである。したがって、衛星データ等を利用するリモ

ートセンシング技術において、落葉広葉樹の秋季の可視域反射特性変化を抽出することにより、森林域の樹種群判別に利用できるものと考えた。

第6章 樹葉の可視域分光特性におよぼすカロチノイド類の影響

6.1 はじめに

植物葉の可視域分光特性は、植物色素により決定されているといわれているが、第5章では、緑葉および秋季の黄葉・紅葉について、植物色素を抽出して分光スペクトルとの関係に考察を加えた。その結果、緑葉の可視域680nm付近の赤領域の吸収はクロロフィルによるものであり、400~500nmの青領域の吸収はクロロフィルとカロチノイドの両色素によるものであることを明らかにした。また、落葉広葉樹の黄葉・紅葉では、クロロフィルのほぼ完全な消失と同時にカロチノイドも急激に減少している。したがって、秋季に完全に黄葉あるいは紅葉した樹葉の400~500nmの吸収は、紅葉についてはアントシアニンによる影響も考えられるが、主にカロチノイドによるものである。第5章で得られた樹葉の可視域分光反射特性におよぼす植物色素の影響を、Fig. 6.1に示した¹⁰³⁾。なお、SANGER⁹⁹⁾(1971)は、樹葉の老化にしたがって、クロロフィルが急速に分解すること、カロチノイドの分解はクロロフィルの分解と同時に始まるがより緩慢であること、枯葉についても春までカロチノイドのうちルテインと β -カロチンが残存していること、を報告している。

これまで、リモートセンシングの分野では、植物葉の可視域400~500nmの分光特性については関心が持たれていないが、TUCKER⁹⁰⁾(1977)は、草地において野外放射計を用いて緑葉と褐葉の反射波長域とバイオマスとの回帰分析を行ない、350nm~440nmの波長域とバイオマスの相関が高いことを報告している。生きた植生被覆のみならず、枯死植物の存在、落葉層の存在など植物性の被覆が、表土の風や水による侵食防止に有効であることは広く知られており、したがって、今後高まるであろう生態的基盤である表土の保全を監視する場合には、枯死など様々な状態の分光特性に関する知見が必要である。

植物葉の可視域400~500nmの分光特性には、カロチノイドが影響をおよぼしていると考えられるが、これまで、植物葉の分光スペクトルとカロチノイドとの関係に関する報告は極めて少ない^{11, 99)}。第5章においては、可視域・青領域の400~500nmの吸収におけるカロチノイドの影響を抽出色素によって明確に

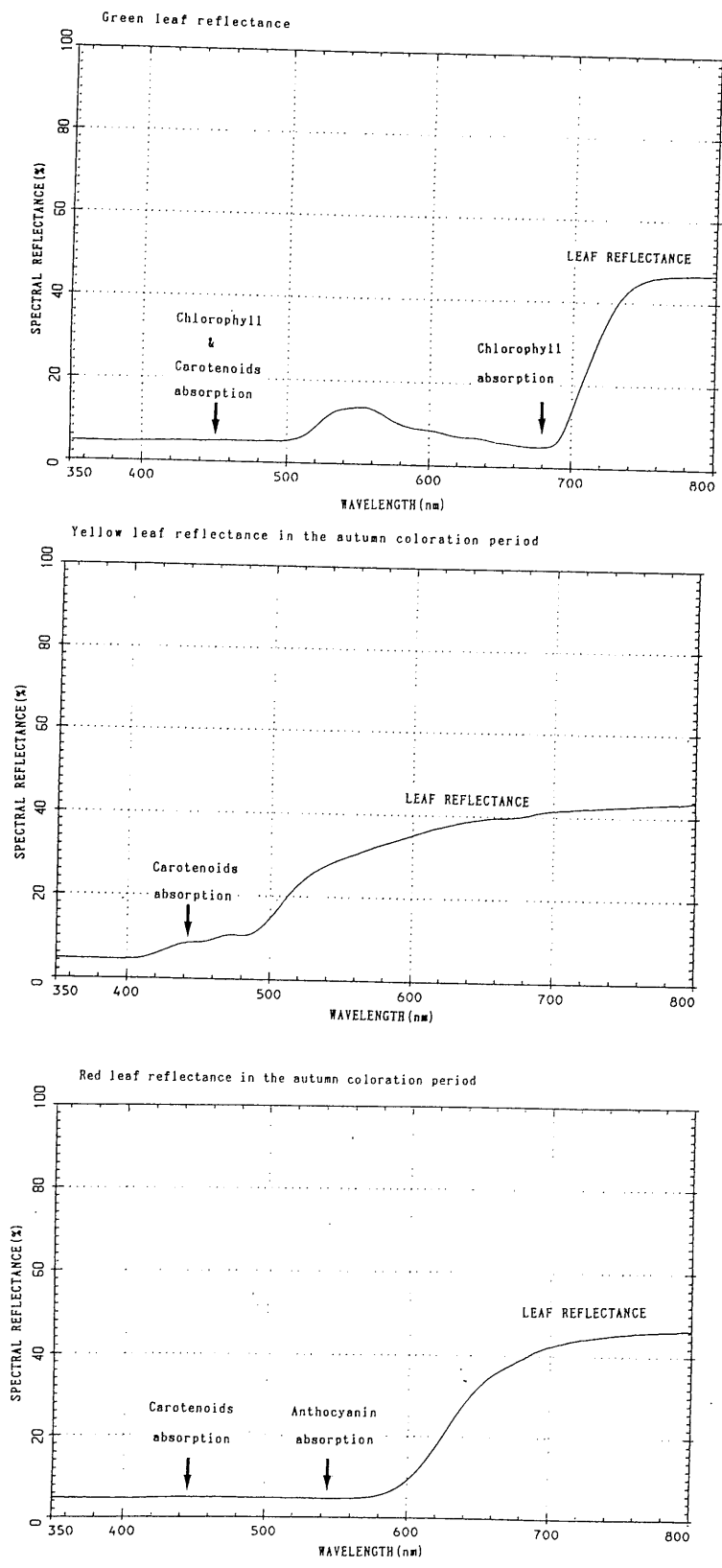


Fig. 6.1 Effects of plant pigments concerning spectral response characteristics of tree leaves in the visible region.

したが、この章では、緑葉のカロチノイド類が樹種により差異があるのかどうか、また、秋季の黄葉・紅葉時の主体となるカロチノイドの種類を定性分離して確認し、分光特性へおよぼす影響を明らかにすることを目的として実験を行った。

カロチノイド類の定性分析の方法としては、ペーパークロマトグラフィ、薄層クロマトグラフィ、カラムクロマトグラフィ、高速液体クロマトグラフィなどの方法がある。これらのうち、薄層クロマトグラフィ（TLC）による方法は、信頼性があり、比較的安価で、簡便、迅速かつ安定的な結果が得られるとして植物葉の色素分離に一般的に用いられ、報告も多い^{3, 10, 16, 18, 20}。

植物葉のカロチノイドは、光合成の補助色素としての機能が知られているが、Fig. 6.2に示したように、酸素を含まない炭化水素である β -カロチンと酸素を含むキサントフィル類がある^{10, 16, 18}。高等植物の緑色植物の葉に含まれるカロチノイドについては、全ての高等植物葉は、同じ主要なカロチノイドを含んでいると記されている。すなわち、 β -カロチン、ルテイン、ヴィオラキサントリン、およびネオキサントリンであり、 β -カロチンは α -カロチンを伴うことがあ

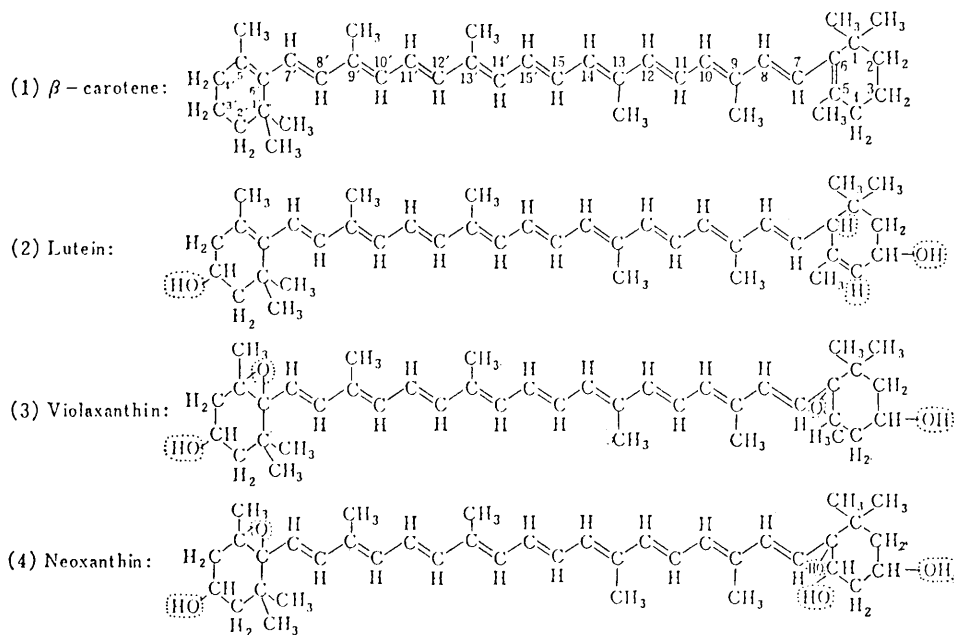


Fig. 6.2 Carotenoids in the leaves of higher plants.¹⁰⁾
(Dotted lines show oxygenated substituents.)

り、まれにクリプトキサンチン、ゼアキサンチンが微量に認められることがあるとされている^{16, 18, 21)}。

広葉樹の葉中カロチノイド組成については、GOODWIN¹⁵⁾(1958)のペーパークロマトグラフィによる報告があるが、クロロフィルaとヴィオラキサンチンの分離が不十分で緑葉のカロチノイドの種類が明瞭には示されていない。SANGER⁶⁹⁾は、ペーパークロマトグラフィの二次展開によって、落葉広葉樹のカロチノイドが β -カロチン、ルテイン、ヴィオラキサンチン、およびネオキサンチンであることを示し、さらにそれぞれのカロチノイドの経時的な定量を行なっている。

カロチノイドについては種類により、有機溶液中で吸収極大値がかなり異なり¹⁶⁾、これは色調の違いとして認識されている。樹種間で、カロチノイドの組成の違いが大きいとすれば、可視域400~500nmの分光特性に影響をおよぼすであろうし、とりわけ秋季の黄葉・紅葉の現れた樹葉については影響が大きいと考えられる。この章では、薄層クロマトグラフィによる緑葉期における樹種間のカロチノイド類および秋季に完全に黄葉・紅葉した樹葉のカロチノイド類について定性分離を行ない、樹葉の可視域分光スペクトルにおよぼす影響について考察を加えた。

6. 2 材料および方法

第5章で用いた落葉広葉樹で秋季に黄葉するエノキ (*Celtis sinensis* Persoon), 紅葉する樹種のイロハモミジ (*Acer palmatum* Thunb.), 常緑広葉樹のコジイ (*Castanopsis cuspidata* (Thunberg) Schottky) およびタブノキ (*Persea Thunbergii* (Sieb. et Zucc) Kostermans), 常緑針葉樹のスギ (*Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don) の5種を試料とした。

第5章のSANGER⁶⁹⁾の方法にしたがって樹葉の色素抽出により得られたアセトン抽出溶液、およびアセトン抽出溶液に含まれているクロロフィルをケン化処理・転溶によって取り除いたカロチノイド石油エーテル溶液を点着試料とした。カロチノイド石油エーテル溶液については、必要に応じてエバポレータで濃縮

した。

市販のシリカTLCプレート (Whatman PLK5F) に点着試料をスポットし、点着スポットをドライヤーで完全に乾燥させて、展開槽に入れた。なお、Whatman PLK5F (20cm×20cm) の下部には、3.5×20.0cmの前吸着・点着領域 (pre-adsorbent spotting area) が予め設定されており、スタートが一致し、試料は水平に分離する。

展開溶媒の選択にあたっては、FRANCIS *et al.*⁹⁾ (1988) の方法にしたがい、似かよった置換をしているカロチノイドを識別するための分離力の優れた展開溶媒を採用し、石油エーテル：tert-ブタノール = 80:20 (V/V percent) を用いた。展開に際しては、展開槽が溶媒気体で満たされるように注意し、室温、暗条件で行なった。以上のような手順で、緑葉時の5樹種の試料と、秋季にそれぞれ完全に黄化したエノキ、紅化したイロハモミジについて色素の同定を試みた。色素の種類は薄層クロマトグラム上の *R_f* 値 (展開物質の移動距離 / 溶媒の始点から先端までの移動距離 × 100) , および色調から同定した¹⁸⁾。

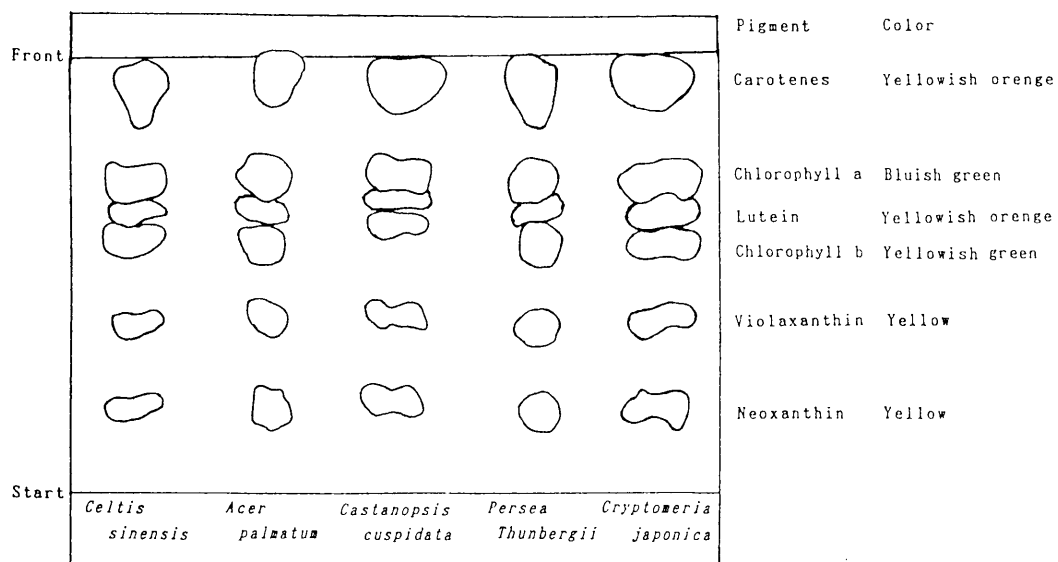
6. 3 結果および考察

6. 3. 1 緑葉のカロチノイド種類

緑葉に含まれるカロチノイド類について、エノキ、イロハモミジ、コジイ、タブノキ、スギの5樹種の緑葉期の薄層クロマトグラフィーの結果をFig. 6.3に示した。樹種によるカロチノイドの種類の違いはなく、5種の全ての緑葉時の樹葉でカロチン類、およびキサントフィルのルテイン、ヴィオラキササンチン、およびネオキササンチンが確認された。カロチン類とルテインは橙黄色、ヴィオラキササンチンとネオキササンチンは淡黄色を示していた。

植物葉のTLCに関しては、SHIRAKI^{8,2)} (1978)らにより、ハウレンソウでカロチノイドは、カロチン類、ルテイン、ヴィオラキササンチン、ネオキササンチンが確認されている。また、朴^{8,1)} (1981)らは、水稻の3品種 (japonica型：ササニシキ, indica型：IR24, japonica×indica：Milyang No.23) について葉色素を分離し、カロチノイド類については、品種による差は無く、カロチン類、ルテ

The original acetone extract



The solution of carotenoids in petroleum ether

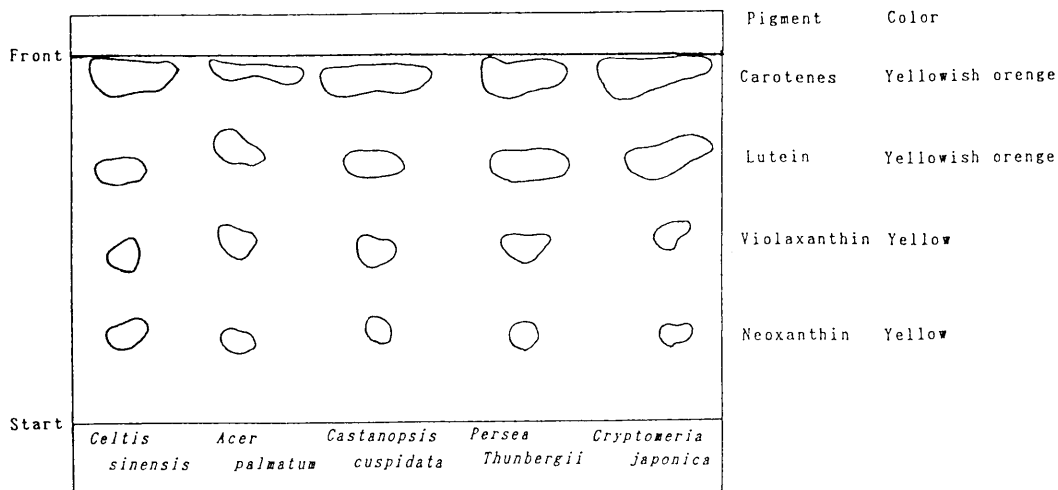


Fig. 6.3 Thin-layer chromatogram of green leaves from different five tree species.

イン， ヴィオラキサンチン， およびネオキサンチンであったと報告している。また， 裸子植物の樹葉では， 井田らにより， 緑葉時において樹種によらずカロチノイドは α -カロチンと β -カロチン， ルテイン， ヴィオラキサンチン， およびネオキサンチンの存在が確認されている³²⁾。また， 常緑・落葉を問わず裸子植物の晩秋から冬にかけて紅褐色化するもの全てが， 赤色カロチノイドのロドキサンチンの出現によることが報告されている^{29, 31)}。

広葉樹の葉中カロチノイドについての報告は，GOODWIN¹⁵⁾のペーパークロマトグラフィーによるものがあるが， クロロフィルaとヴィオラキサンチンの分離が不十分で緑葉のカロチノイドの種類が明瞭には示されていない。SANGER⁶⁹⁾は， ペーパークロマトグラフィーの二次展開によって， 落葉広葉樹のカロチノイドが β -カロチン， ルテイン， ヴィオラキサンチン， およびネオキサンチンであることを示し， 秋季の経時変化をも示している。

今回の緑葉の結果は， 定性分析の方法は異なるが， SANGER⁶⁹⁾による結果と同じであった。また， 溶媒は異なるもののTLCによるSHIRAKI⁸²⁾らによるハウレンソウ， 朴⁸¹⁾らによる水稻の3品種とも存在するカロチノイドの種類は同じであることから， 高等植物の緑葉中のカロチノイド類は共通である可能性が高いといえる。

6. 3. 2 秋季の黄葉・紅葉時のカロチノイド類

落葉広葉樹の秋季の黄葉・紅葉は， クロロフィルの分解と同時にカロチノイド量も減少することは， GOODWIN¹⁵⁾によって示され， SANGER⁶⁹⁾によっても支持されている。また， 筆者らの結果も同様であったことを既に報告している¹⁰³⁾。

すなわち， 黄葉あるいは紅葉する落葉広葉樹においては， 秋季にクロロフィルはほとんど完全に分解する。同時にカロチノイドについても， クロロフィルの分解にともなって急激に減少するものの， わずかの量のカロチノイドは残存する。落葉広葉樹の紅葉現象はこの残存するカロチノイドによるものである。

クロロフィルの分解された紅葉時に残存するカロチノイドの種類について， 黄葉時のエノキ， 紅葉時のイロハモミジのそれぞれの薄層クロマトグラフィーの結果をFig. 6.4に示した。いずれも， 橙黄色のカロチン類， ルテインが明瞭

に確認され、淡黄色のヴィオラキサンチン、およびネオキサンチンがわずかに認められた。

秋季の紅葉現象の主体となるカロチノイドについて、GOODWIN¹⁵⁾は、ペーパークロマトグラフィを用い、共通の変化として β -カロチンとネオキサンチンがまず分解し、紅葉時の主体となる秋のキサントフィル (autumn xanthophyll) であるエポキシ化したルテイン “lutein-5:6-epoxide” が出現するとしている。

その報告に対して、SANGER⁹⁾はペーパークロマトグラフィの二次展開を用いて、ピオラキサンチンとネオキサンチンが秋季に分解されやすく、 β -カロチンとルテインが安定で残存し、また、GOODWIN¹⁵⁾が主張するエポキシ化したルテイン “lutein-5:6-epoxide” は見られなかったと報告している。

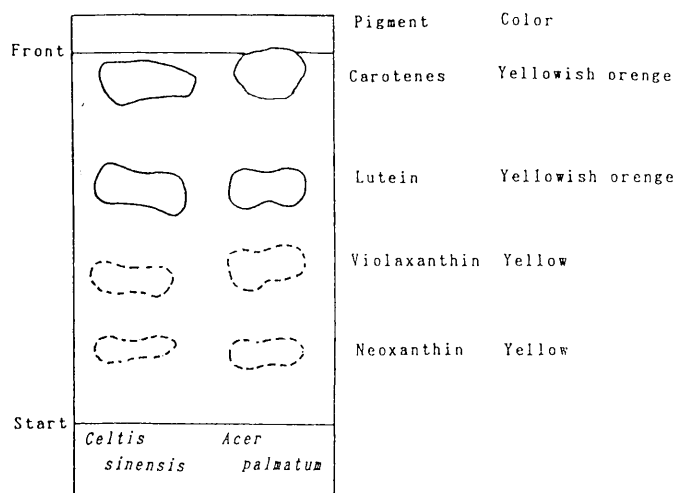
本研究の秋季の紅葉時のカロチノイド類については、SANGER⁹⁾のペーパークロマトグラフィによる結果と同じで、カロチン類とルテインが安定で残存する一方、ピオラキサンチンとネオキサンチンが分解されやすいことを示していた。したがって、紅葉時のカロチノイドは、橙黄色を示すカロチン類、ルテインが主体であると考えた。

6. 3. 3 樹葉の可視域分光スペクトルにおよぼすカロチノイドの影響

薄層クロマトグラフィによるカロチノイドの定性分離の結果より、樹葉の分光スペクトルにおよぼす影響について考察する。薄層クロマトグラフィの定性分離により、高等植物の緑葉のカロチノイド類が共通である可能性が高いという結果が得られた。また、第5章では、緑葉のクロロフィル・カロチノイド比に樹種による差異がほとんど無いと考えられた。したがって、緑葉の可視域・400~500nmにおける分光スペクトルについては、樹種による違いは認められないであろう。実際、第2章で示されているように、緑葉の分光スペクトルにおいて、この領域は、樹種によらず高い吸収を示しており、樹種による違いは認められなかった。

Fig. 6.5に、緑の生葉、秋季の黄葉と紅葉、および枯葉の可視域における分光反射スペクトルを示した。黄葉の可視域400~500nmにおける分光スペクトルについては、黄葉時のカロチノイドが、橙黄色を示す β -カロチン、ルテインが

The original acetone extract



The solution of carotenoids in petroleum ether

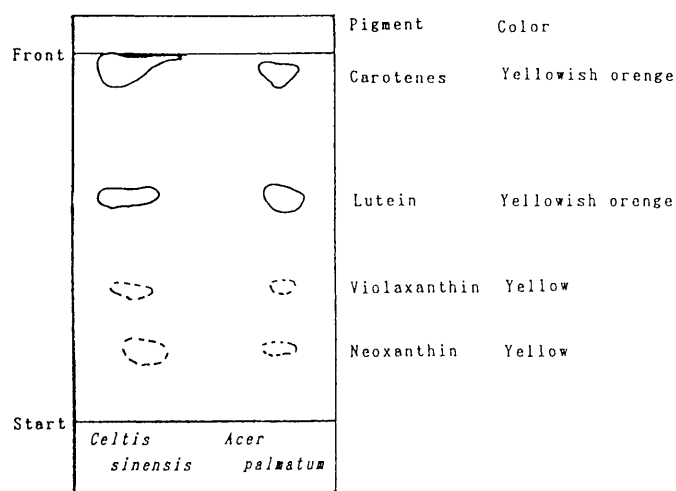


Fig. 6.4 Thin-layer chromatogram of autumn coloring leaves from different tree species.

主体であるとの結果は，吸収域が400～500nmにわたっていることと矛盾していない。紅葉の可視域400～500nmにおける分光スペクトルで黄葉の場合よりさらに吸収が高いのは，カロチノイドのみならず新たに生成されたアントシアニンによる吸収の影響が加わっているためと考えられた。

さらに，枯葉の分光反射スペクトルでもFig. 6.5に示されるように，可視域400～500nmの領域が吸収域となっていた。このことは，枯葉についても春までカロチノイドのうちルテインと β -カロチンが残存しているというSANGER⁶⁹⁾の報告を裏付けるものであると考えられた。

植物葉の可視域400～500nmにおける分光特性としては，緑の生葉，紅葉時，さらには枯葉のいずれの状態の場合についても，この領域がカロチノイドが関与する吸収域であることである。したがって，今後，この特性を利用したリモートセンシング技術による植生域に関する解析において，裸地と植生域の区別，すなわち，生きた植生被覆のみならず，枯死植物の存在，落葉層の存在など植

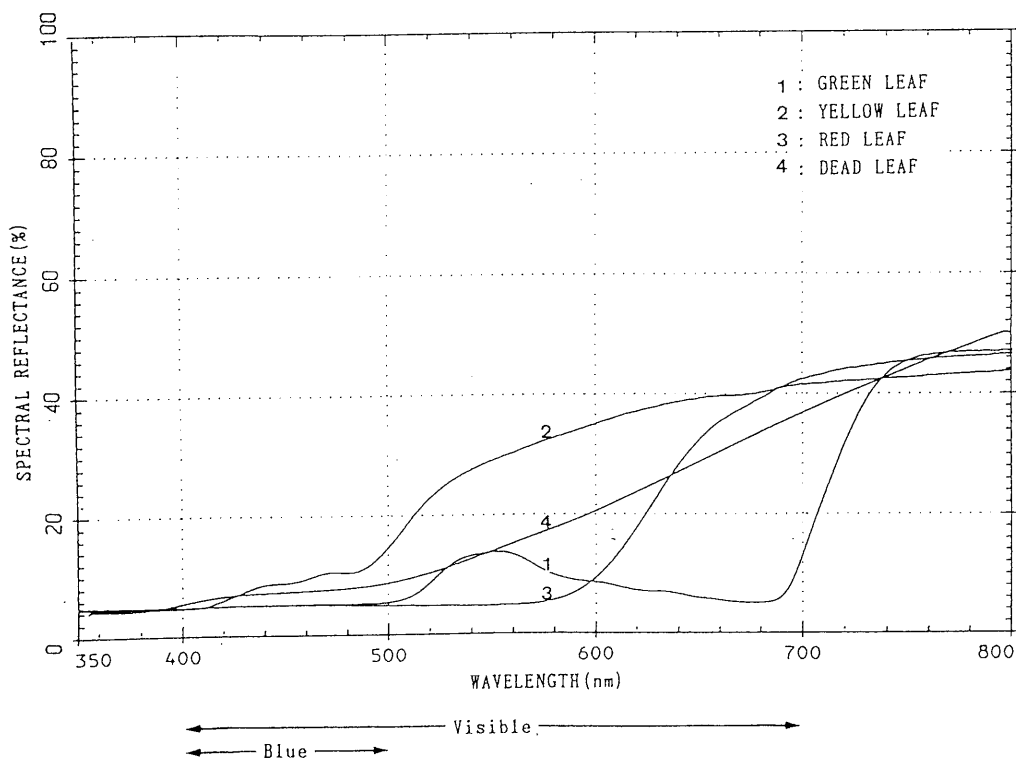


Fig. 6.5 The effect of pigmentation on leaf reflectance.

物性被覆の識別に応用できる可能性がある。

6. 4 まとめ

可視域400～500nmにおける樹葉の分光スペクトル特性に影響をおよぼしていると考えられるカロチノイドに関して、次の2点を明らかにするために薄層クロマトグラフィ（TLC）による定性分離を行なった。第一は、緑葉のカロチノイドの種類が樹種により差異があるのかどうかであり、第二は、秋季の黄葉・紅葉時の主体となるカロチノイドの種類を明らかにすることである。その結果、次のような結論を得た。

5樹種の緑葉のTLCの結果では、カロチノイドの種類に樹種による差はなく、橙黄色のカロチン類、ルテイン、淡黄色のヴィオラキサンチン、ネオキササンチンが分離され、高等植物の緑葉のカロチノイド組成は共通である可能性が高いことを確認した。

また、落葉広葉樹の秋季の黄葉・紅葉のTLCクロマトグラムでは、カロチノイドは、橙黄色のカロチン類とルテインが明瞭に確認され、淡黄色のピオラキサンチンとネオキササンチンがわずかに認められた。したがって、黄葉・紅葉時のカロチノイドは、橙黄色のカロチン類、ルテインが主体であることがわかった。

樹葉の可視域400～500nmにおける分光特性としては、生きている緑葉、紅葉時、さらには枯葉の状態の場合についても、この領域がカロチノイドが関与する吸収域であることであり、今後、この特性を利用して、リモートセンシング技術による植生域に関する解析において、裸地と、生きた植生被覆のみならず、枯死植物の存在、落葉層の存在などの植物性の被覆とを区別できる可能性がある。

第7章 樹葉の季節的分光スペクトル特性変化の応用に関する研究

－樹葉分光反射スペクトルの物理測色法による色彩解析への応用例－

7.1 はじめに

本研究の2章では、単葉の可視域分光特性の季節変化である落葉広葉樹の黄葉・紅葉の特性について明らかにし、また、第4章では、可視域の吸収が低下した黄葉・紅葉においては、重なり合うことにより、近赤外域のみならず可視域でも反射量が増加することを示した。

第7章では、樹葉の季節的分光スペクトル特性変化の応用に関する研究として、樹葉の可視域分光反射スペクトルの物理測色法による色彩解析への応用を試みた。樹葉の可視域分光特性変化について、得られた分光反射スペクトルと光源の分光エネルギー分布という物理量より計算を行なって求める物理測色法によって色彩解析を行なった。色彩を数量化するにあたっては、国際照明委員会 (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE)・XYZ表色系の三刺激値により示した。これにより樹種群による樹葉の秋季の季節的色彩変化の傾向を示すことを試みた。

CIEのXYZ表色系は、CIE・RGB表色系より式の変換により求められたものであり、逆に、XYZ表色系より変換式にしたがった計算によってRGB表色系へ変換することも可能である。したがって、今後の可能性として、樹木を扱うコンピュータ・グラフィックスによる景観評価やモンタージュ画像の作成の場合の色彩に関して、樹葉レベルでの再現性の高いスペクトル測定に基づいた色彩データが参考となる場合もあると考えた。また、この分光反射スペクトルより計算によって求める分光測色法は、たとえば、光源の状態が変化した場合でも、光源の分光分布の計算条件を変えることにより色彩変化を計算によって求めることができる利点がある。これにより、たとえば、光源の分光分布が昼光の状態とは異なっている“夕陽に照らされているイチヨウ並木”といった色彩表現を、樹葉反射スペクトルと光源の分光分布からの計算によって、色彩の数値的データとしてコンピュータ・グラフィックスに与えることも理論的には可能になる。

7. 2 材料および方法

7. 2. 1 材料および分光反射スペクトル測定方法

試料は、京都府立大学および京都府立植物園から、暖温帯の構成樹種より落葉広葉樹の秋季に黄葉する樹种群よりエノキ (*Celtis sinensis* Persoon), ケヤキ (*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino), 紅葉するヤマザクラ (*Prunus jamasakura* Sieb. ex Koidzumi), イロハモミジ (*Acer palmatum* Thunb.), 常緑広葉樹のクスノキ (*Cinnamomum camphora* (L.) Presl), 常緑針葉樹のスギ (*Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don) の6種を選定し、分光反射スペクトル測定を行なった。試料採取は、1989年の7月から12月にかけて行ない、採取した試料はアイスボックスに入れて研究室に持ち帰り直ちに測定を行なった。

樹葉の分光反射スペクトル測定方法は、第2章、第3章、第4章と同じであり、積分球付分光光度計(島津製作所製, UV-2100)を用いて350~800nmの波長域について0.2nm間隔で行なった。

7. 2. 2 色彩計算の方法

樹葉の可視域における分光反射スペクトルを用いて色彩解析するにあたっては、物理測色法によるCIE・XYZ表色系を採用した。物理測色法は、積分球付分光光度計による測定によって得られた分光反射スペクトルおよび光源の分光分布の値から計算により三刺激値 X_{10} , Y_{10} , Z_{10} を求める分光測色方法であり、 X_{10} , Y_{10} , Z_{10} 表色系の三刺激値で表示する方法を採った。

従来、色の表示方法としては、国際照明委員会(CIE)が1931年に推奨した2度視野(観測者が50cmの位置で直径1.7cmの試料を観察し、色を判定)の等色実験結果に基づくXYZ系が工業規格として制定されていた。1964年、国際照明委員会は10度視野(観測者が50cmの位置で直径8.8cmの試料を観察し、色を判定)の等色実験に基づく表色系を補助表色系として採用し、併用するようになったことから、新たに日本工業規格として1971年10度視野による表示方法である X_{10} , Y_{10} , Z_{10} 表色系が制定された。

XYZ表色系および X_{10} , Y_{10} , Z_{10} 表色系は、観測者の目に対して張る角が、それぞれ1~4度の視野および4度を越える視野における視感等色に対して良い相

関を得ようとするときに適応する。

従来、各種色彩評価は、視感的な判定方法が行なわれていたが、近年の分光測色方法等の発展および精度の向上に伴い、分光反射率、光源の分光分布の測定値といった物理量のみから計算される物理測色に切り替えられており、今後は、物理的判定が主流になると考えられている。その際には、物理的な測定値が、視感的な判断とよく対応することが必要条件となるが、2度視野より10度視野の方が、物理的測色値と視感測定値が良好に対応し、観測精度が高い点で優れている。したがって、将来的に、10度視野に基づくスペクトル三刺激値がかなり重要視されることは疑いのないところといわれている^{5.5)}。また、樹葉の場合、目視の状態は、視角4度以上の場合が多い。以上の理由により、CIE・ X_{10}, Y_{10}, Z_{10} 表色系を採用し、三刺激値で表示する方法を採った。

人がものを見て色を感じる色感覚は、ヤング・ヘルツホルムの3色説によれば、視細胞の赤(R)、緑(G)、青(B)の刺激量の組合せによるといわれている^{5.2, 5.3, 5.4)}。

この官能量としての色は、Fig. 7.1に示したように物理量として計測できる光源の各波長における光の強さ(分光エネルギー分布)、色物体の反射率、およびCIEが規定したスペクトル三刺激値(等色関数) $\bar{x}_{10}, \bar{y}_{10}, \bar{z}_{10}$ により物理感覚量として算出することができる。

スペクトル三刺激値 $\bar{x}_{10}, \bar{y}_{10}, \bar{z}_{10}$ は、ヒトが色を知覚する視覚系が、視角4°以上である場合に各波長の光を原刺激としてどのように感じるかを間接的に表現していると考えられている量であり、Fig. 7.2に示したように規定されている。これは、人間の網膜上に分布する視細胞の特性を直接表したものではないが、密接に関係していると考えられている。

いま、ある波長 λ における照明光源の光のエネルギーを $S(\lambda)$ 、色物体の反射率を $R(\lambda)$ 、波長 λ の関数として表したスペクトル三刺激値(等色関数)を $\bar{x}_{10}(\lambda), \bar{y}_{10}(\lambda), \bar{z}_{10}(\lambda)$ とすれば、ヒトの目に入射する波長 λ における刺激値は、 $S(\lambda)\bar{x}_{10}(\lambda)R(\lambda), S(\lambda)\bar{y}_{10}(\lambda)R(\lambda), S(\lambda)\bar{z}_{10}(\lambda)R(\lambda)$ となる。ここで、物体の色刺激の性質を表す色刺激値を X_{10}, Y_{10}, Z_{10} とする

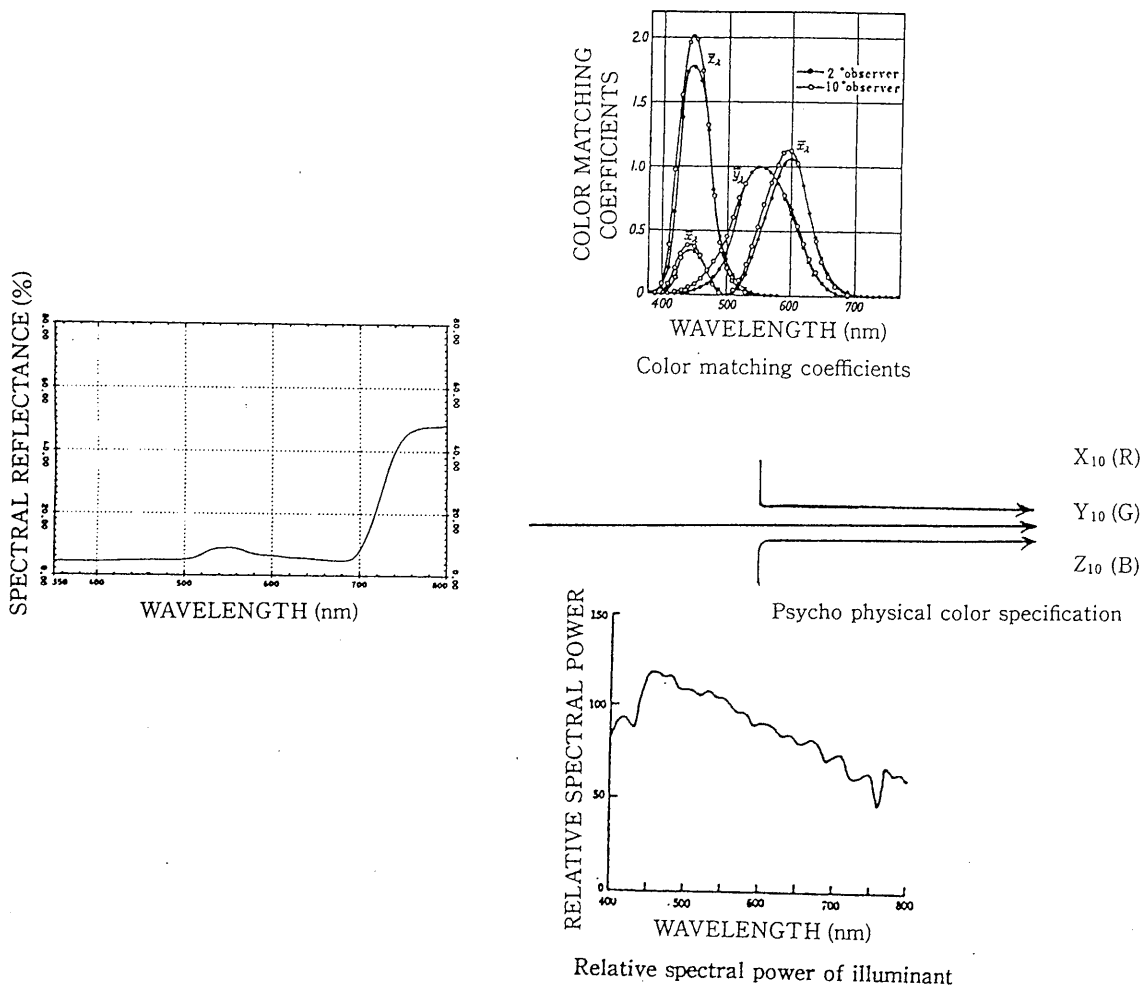


Fig 7.1 Schematic diagram of spectrophotometric colorimetry.

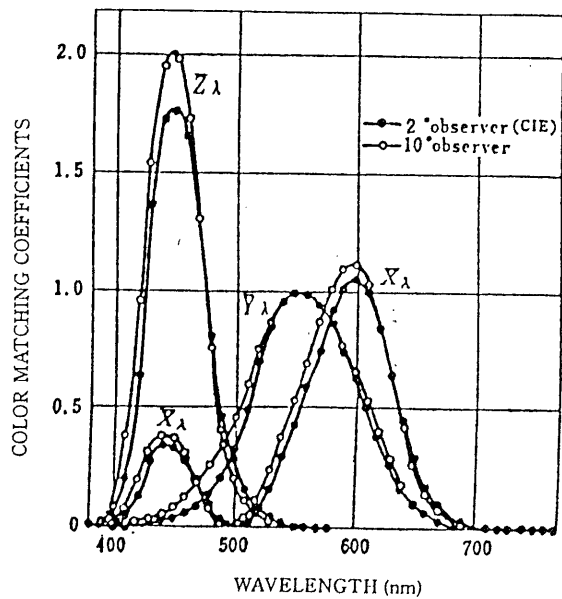


Fig 7.2 Color matching coefficients.

と,

$$X_{10} = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \overline{x}_{10}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

$$Y_{10} = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \overline{y}_{10}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (7-1)$$

$$Z_{10} = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \overline{z}_{10}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \overline{y}_{10}(\lambda) d\lambda}$$

と表せる。

Y_{10} は、明度を表す。

分光光度計を用いて測定した分光反射スペクトル測定値より、 $X_{10} Y_{10} Z_{10}$ 表色系における三刺激値 X_{10}, Y_{10}, Z_{10} を実際に求めるには、波長間隔を、等しく5nmごとに分割して近似計算をするJISの方式にしたがった^{56, 57)}。その計算式は、次のようになる。

$$X_{10} = K \sum_{380}^{780} S(\lambda) \overline{x}_{10}(\lambda) R(\lambda)$$

$$Y_{10} = K \sum_{380}^{780} S(\lambda) \overline{y}_{10}(\lambda) R(\lambda) \quad (7-2)$$

$$Z_{10} = K \sum_{380}^{780} S(\lambda) \overline{z}_{10}(\lambda) R(\lambda)$$

$$K = \frac{100}{\sum_{380}^{780} S(\lambda) \overline{y}_{10}(\lambda)}$$

$S(\lambda)$: 標準の光D₆₅の分光分布の波長 λ における値

$\overline{x}_{10}(\lambda), \overline{y}_{10}(\lambda), \overline{z}_{10}(\lambda)$: $X_{10} Y_{10} Z_{10}$ 表色系における等色関数の値

$R(\lambda)$: 試料の波長 λ における分光反射率

計算にあたっての光源は、自然昼光に相当する標準の光 D₆₅ を用いた。実際の計算には、重係数 $S(\lambda)\bar{x}(\lambda)$, $S(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $S(\lambda)\bar{z}(\lambda)$ の値が 5nm の波長間隔毎に計算された表が重係数として用意されているので⁵⁾、それを用いて行なった。10度視野、標準の光 D₆₅ を用いた場合の重係数を Table 7.1 に示した。

Table 7.1 Weight coefficient.

[WEIGHT COEFFICIENT]
ILLUMINANT : D65 VIEW ANGLE : 10°

λ (nm)	S \bar{x}	S \bar{y}	S \bar{z}	λ (nm)	S \bar{x}	S \bar{y}	S \bar{z}
380	0.01	0.00	0.04	575	91.37	87.91	0.00
385	0.03	0.00	0.15	580	97.15	83.24	0.00
390	0.13	0.01	0.57	585	99.09	76.16	0.00
395	0.50	0.05	2.22	590	99.20	68.95	0.00
				595	101.35	64.36	0.00
400	1.58	0.17	7.12	600	101.17	59.26	0.00
405	3.78	0.39	17.17	605	97.80	53.33	0.00
410	7.75	0.80	35.62	610	92.33	47.31	0.00
415	13.00	1.34	60.72	615	84.28	40.94	0.00
420	19.11	2.00	90.86	620	75.10	34.91	0.00
				625	64.54	29.03	0.00
425	23.84	2.66	115.50	630	53.93	23.61	0.00
430	27.28	3.35	134.66	635	44.68	19.06	0.00
435	34.26	4.75	172.24	640	36.12	15.05	0.00
440	40.24	6.51	206.29	645	28.13	11.48	0.00
445	42.90	8.29	224.91				
				650	21.47	8.61	0.00
450	43.38	10.47	233.41	655	16.37	6.50	0.00
455	40.27	12.48	223.16	660	12.24	4.84	0.00
460	35.61	15.10	205.62	665	9.12	3.58	0.00
465	29.56	17.77	180.90	670	6.69	2.62	0.00
470	22.47	21.27	151.33				
				675	4.65	1.81	0.00
475	15.27	25.38	118.87	680	3.20	1.25	0.00
480	9.33	29.40	89.50	685	2.12	0.82	0.00
485	4.62	33.45	64.06	690	1.39	0.54	0.00
490	1.76	36.90	45.18	695	0.98	0.38	0.00
495	0.56	43.13	32.98				
				700	0.69	0.27	0.00
500	0.42	50.39	23.89	705	0.48	0.19	0.00
505	1.68	57.70	17.29	710	0.34	0.13	0.00
510	4.04	65.41	12.08	715	0.21	0.08	0.00
515	7.59	72.89	8.74	720	0.13	0.05	0.00
520	12.34	79.82	6.36				
				725	0.10	0.04	0.00
525	18.37	87.47	4.57	730	0.07	0.03	0.00
530	25.47	94.25	3.28	735	0.05	0.02	0.00
535	32.26	97.97	2.18	740	0.04	0.01	0.00
540	39.34	100.44	1.43	745	0.02	0.01	0.00
545	47.07	102.37	0.83				
				750	0.02	0.01	0.00
550	55.13	103.19	0.41	755	0.01	0.00	0.00
555	62.85	101.93	0.11	760	0.01	0.00	0.00
560	70.52	99.73	0.00	765	0.01	0.00	0.00
565	77.93	96.44	0.00	770	0.00	0.00	0.00
570	84.64	92.05	0.00				
				775	0.00	0.00	0.00
				780	0.00	0.00	0.00
				X, Y, Z	2203.54	2324.11	2494.25
				x, y, z	0.3138	0.3310	0.3552

試料葉は、標準的なものを選び、1樹種につき3試料として分光反射スペクトルを0.2nm間隔で測定した。それぞれについて(7-2)式にしたがって三刺激値を計算し、それらの平均値をその樹種の三刺激値として採用した。Fig. 7.3にクスノキの3試料についての分光反射スペクトル例、Fig. 7.4に、Fig. 7.3のクスノキの3試料のうちの1試料の分光反射スペクトルの例を、また、Table 7.2にFig. 7.4の5nm間隔の測定値を示した。10月の測定からは、以上に述べた色彩計算を自動で行なう、島津UV-2100用カラー測定ソフトパッケージを用いた。

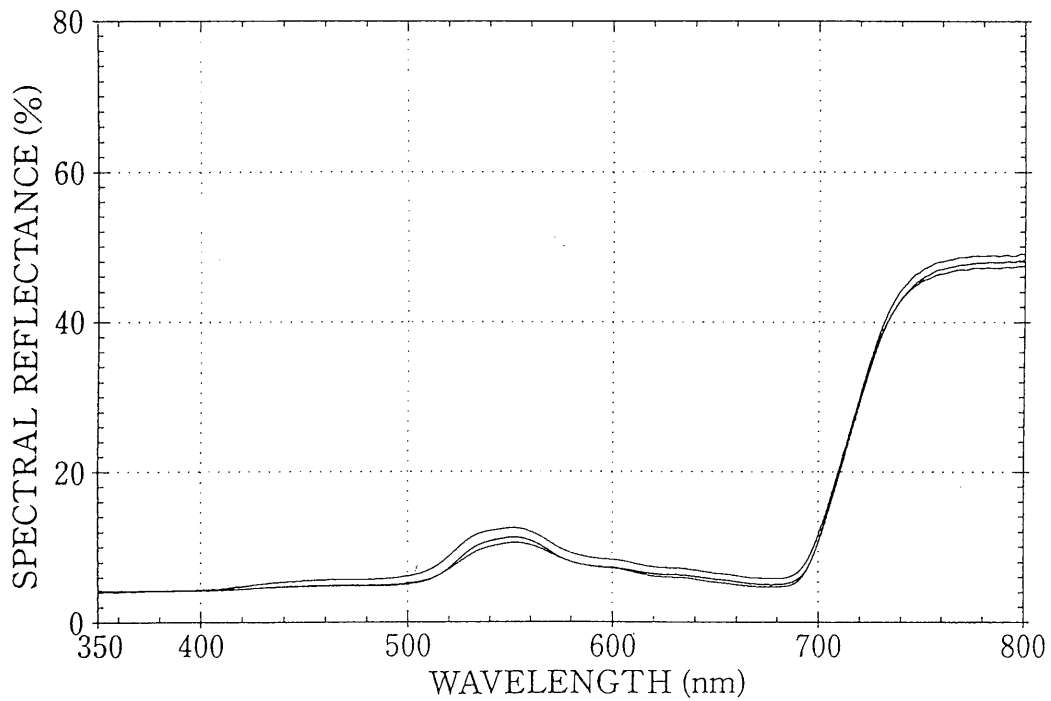


Fig. 7.3 Spectral reflectance of three samples of green leaves.
(*Cinnamomum camphora*)

Table 7.2 An example of Photometric data of spectral reflectance of a *Cinnamomum camphora* green leaf.

λ (nm)	DATA(%)	λ (nm)	DATA(%)	λ (nm)	DATA(%)	λ (nm)	DATA(%)
		450	4.77	575	8.60	700	10.90
		455	4.79	580	8.04	705	15.39
		460	4.80	585	7.67	710	20.25
		465	4.83	590	7.41	715	25.22
		470	4.83	595	7.27	720	30.05
		475	4.84	600	7.16	725	34.44
		480	4.81	605	6.96	730	38.23
360	4.24	485	4.83	610	6.66	735	41.05
365	4.22	490	4.85	615	6.38	740	43.09
370	4.21	495	4.93	620	6.14	745	44.52
		500	5.06	625	6.04	750	45.48
375	4.22	505	5.30	630	5.99	755	46.06
380	4.21	510	5.67	635	5.93	760	46.48
385	4.21	515	6.32	640	5.74	765	46.84
390	4.21	520	7.27	645	5.53	770	47.00
395	4.23						
		525	8.45	650	5.36	775	47.21
400	4.24	530	9.54	655	5.22	780	47.22
405	4.24	535	10.32	660	5.03	785	47.21
410	4.29	540	10.77	665	4.88	790	47.32
415	4.35	545	11.05	670	4.78	795	47.36
420	4.42						
		550	11.27	675	4.73	800	47.48
425	4.51	555	11.23	680	4.75		
430	4.59	560	10.85	685	4.88		
435	4.65	565	10.24	690	5.50		
440	4.71	570	9.40	695	7.36		
445	4.72						

See Fig. 7.4.

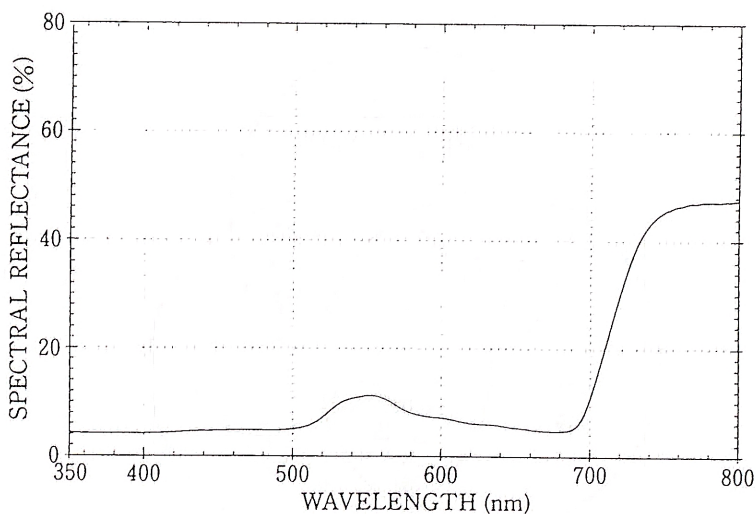


Fig. 7.4 An example of spectral reflectance of a green leaf (*Cinnamomum camphora*). See Table 7.2.

7. 3 解析結果および考察

7. 3. 1 秋季の樹葉の可視域分光反射特性変化に伴う三刺激値の変化

第2章で述べてきた落葉広葉樹の秋季の紅葉現象である分光反射スペクトル変化を視覚での色彩変化としての認識を数量的に捉える試みを行なった。

色覚は、目の網膜に存在する色を感じる3種類の受容器（錐体）の興奮の割合の相対値によって決まるといわれている^{52, 53, 54)}。物理測色法による三刺激値 X_{10} , Y_{10} , Z_{10} は、色の3原色、赤、緑、青と対応しているものではないが、 X_{10} , Y_{10} , Z_{10} をそれぞれ赤、緑、青と対応づけることにより、樹葉の色彩特性を説明することができた。

一般に、加法混色については、Fig. 7.5に示したような概念が知られている。

緑葉の分光反射スペクトルより物理測色法によって求めた三刺激値は、Fig. 7.6に示したように $[Z_{10}]$ (青)の値が低く、 $[Y_{10}]$ (緑)の値が高く、 $[X_{10}]$ (赤)の値が低いために緑色として認識されていることが説明できた。

常緑樹種では、夏から秋にかけての分光反射スペクトルに変化は認められなかったことを第5章で述べているが、Fig. 7.6のコジイの例で示したように、三刺激値についても夏と秋の変化はみられなかった。

エノキなどの秋季の黄葉では、分光反射スペクトルが変化することを第2章

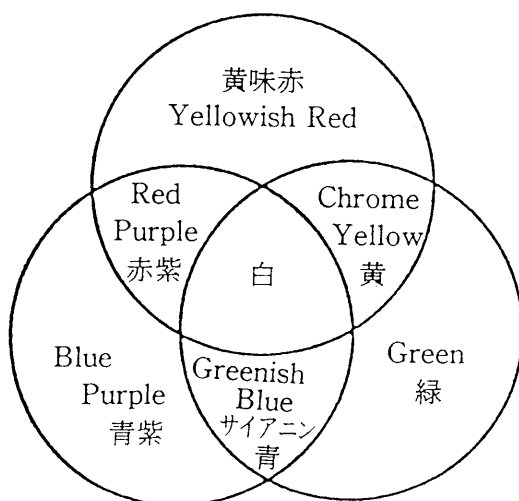


Fig. 7.5 Schematic diagram of additive mixture of color stimuli.

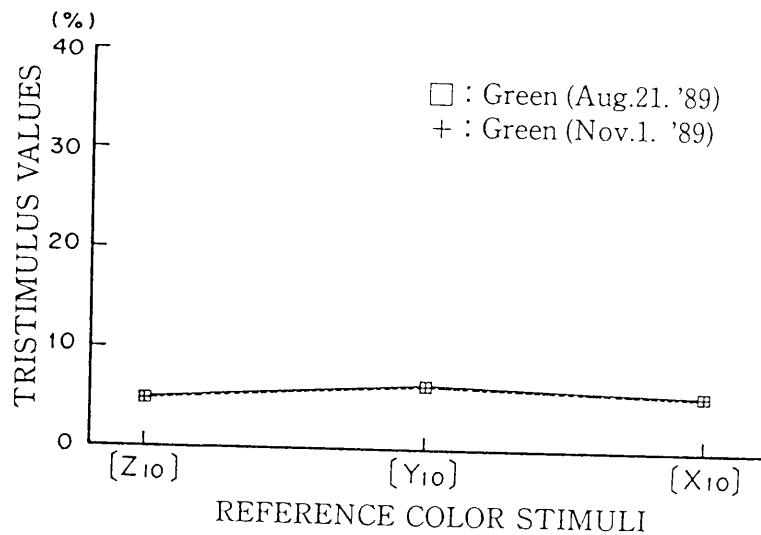


Fig. 7.6 Tristimulus values of a single evergreen tree species leaf in summer and autumn. (*Persea Thunbergii*)

で示しているが、黄葉の分光反射スペクトルより求めた三刺激値は、Fig. 7.7のような変化を示した。すなわち、緑葉の場合と比較して、[Z₁₀](青)の値が低いことは変わらないが、[Y₁₀](緑)の値と[X₁₀](赤)の値がともにほぼ同じレベルで高くなり、その結果[Y₁₀](緑)と[X₁₀](赤)の二者の混色である黄色として認識されることがわかった。

紅葉の例では、イロハモミジの秋の分光反射スペクトルから求めた三刺激値は、Fig. 7.8のような変化を示した。紅葉の場合でも、[Z₁₀](青)の値が低いことは変わらない。そして、[Y₁₀](緑)の値と[X₁₀](赤)の値のレベルがともに高くなるが、[X₁₀](赤)の値のレベルが[Y₁₀](緑)の値のレベルより高くなるので、その結果、赤として認識されることが示された。

7. 3. 2 夏から秋にかけての三刺激値の経時的変化

Fig. 7.9~Fig. 7.11に、供試樹種6種について7月から12月の測定期間内の三刺激値 X₁₀, Y₁₀, Z₁₀の経時的な変化をグラフで示した。

コジイ、クスノキ、スギ、のような常緑の樹種では、夏から秋にかけて可視

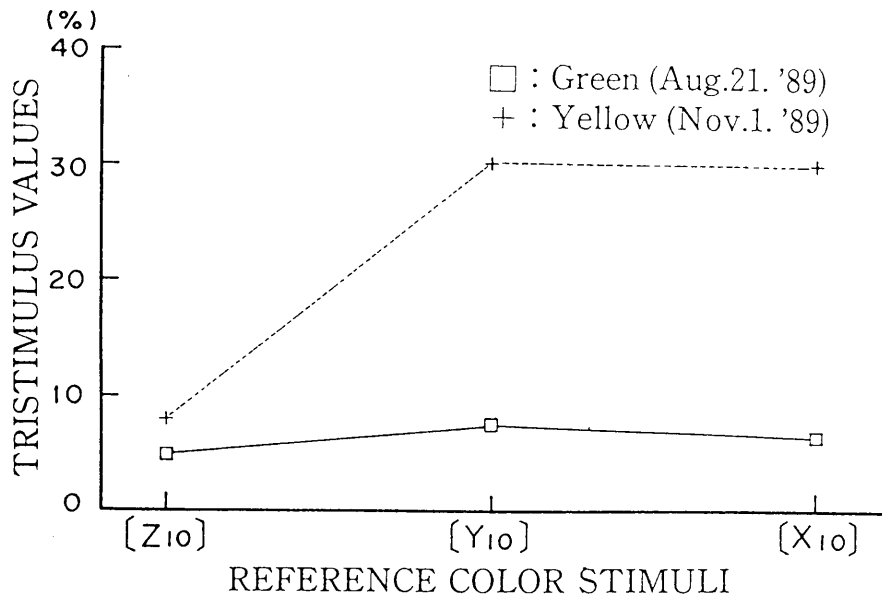


Fig. 7.7 Tristimulus values of a single deciduous tree species leaf in summer and autumn turning yellow during autumn. (*Celtis sinensis*)

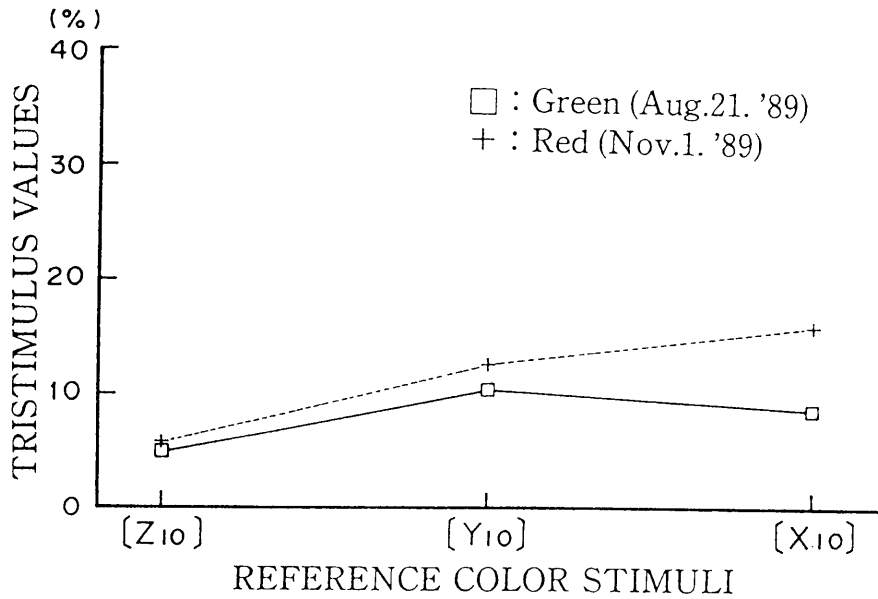


Fig. 7.8 Tristimulus values of a single deciduous tree species leaf in summer and autumn turning red during autumn. (*Acer palmatum*)

域分光反射特性の変化は、ほとんど認められなかった。したがって、Fig. 7.9にスギ・クスノキの例で示したが、三刺激値についても、夏から秋にかけての変化は、ほとんど認められなかった。

Fig. 7.10にエノキ、ケヤキの秋季に黄葉現象の現れる樹葉種群についての夏から秋にかけての三刺激値の経時変化を示した。エノキ等の秋季に黄葉する樹種群では、秋季に $[Y_{10}]$ (緑)の値と $[X_{10}]$ (赤)の値がともにほぼ同じレベルで高くなる経時変化が示された。

また、Fig. 7.11に秋季に紅葉するイロハモミジ、ヤマザクラの樹葉について夏から秋にかけての三刺激値について経時的な変化を示した。イロハモミジ、ヤマザクラといった秋季に紅葉する樹種では、秋季の分光反射スペクトル変化に伴い物理測色法により求めた三刺激値についても、 $[X_{10}]$ (赤)の値のレベルが $[Y_{10}]$ (緑)の値のレベルより高くなる経時変化をしていることが認められた。したがって、樹葉の可視域分光反射スペクトル変化については、物理測色法による色彩解析によって、色の変化を経時的に示すことができることが明確になった。

7. 3. 3 樹葉の重なり合いの効果による三刺激値の変化

第4章では、樹葉が重なり合うことによって、単葉の反射・透過・吸収特性により、可視域についても反射量が増加する場合があることを示した。夏から秋についての緑葉の場合には、Fig. 7.12に示すように、可視域での吸収がきわめて高いために、樹葉の重なりによる可視域の分光反射量の増加は無かった。したがって、物理測色法による三刺激値についても変化は示さなかった。

一方、黄葉の場合には、第4章で述べたように、可視域の植物色素による吸収が失われ、その結果、樹葉が重なり合うことによって可視域の分光反射量がFig. 7.13のように増加した。Fig. 7.14に単葉の場合と8枚が重なり合った場合の分光反射スペクトルから物理測色法により求めた三刺激値を示した。その結果、単葉の場合と8枚が重なり合った場合の三刺激値については、 $[Z_{10}]$ (青)の値が低く、 $[Y_{10}]$ (緑)の値と $[X_{10}]$ (赤)の値がともにほぼ同じレベルで高いというパターンには変化がないものの、重なり合った場合のほうが、明度 Y_{10} が

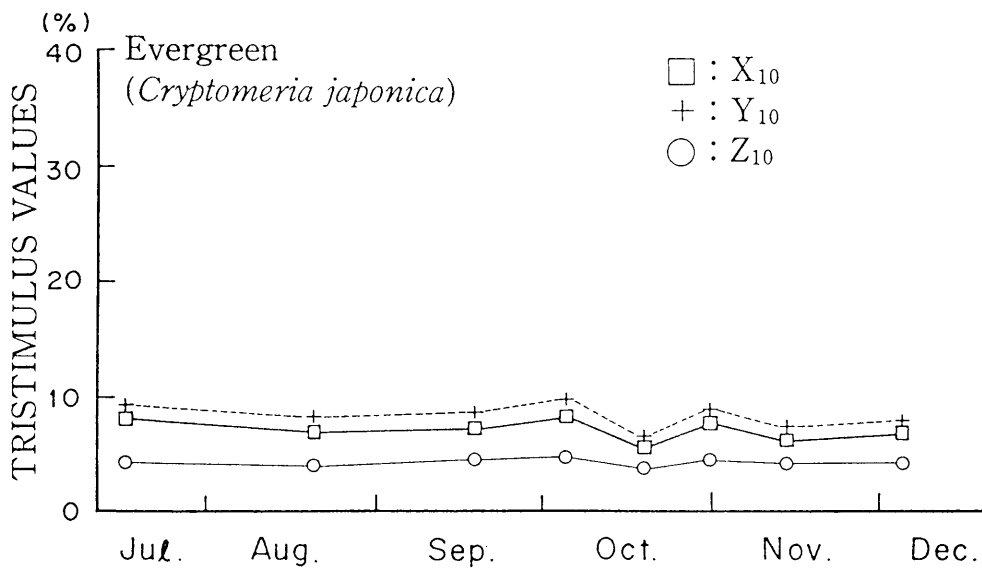
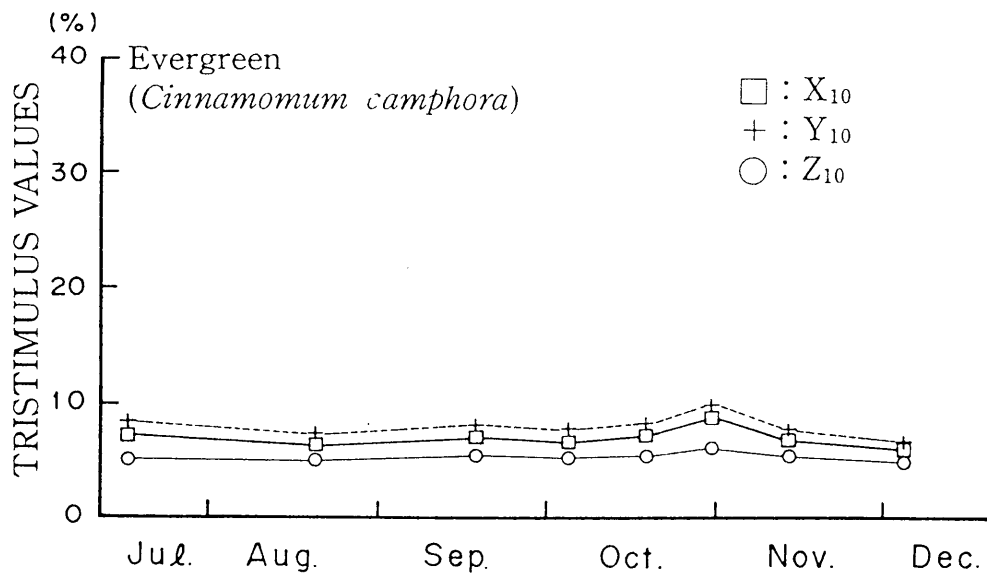


Fig. 7.9 Seasonal variations of tristimulus values from evergreen tree species leaves.

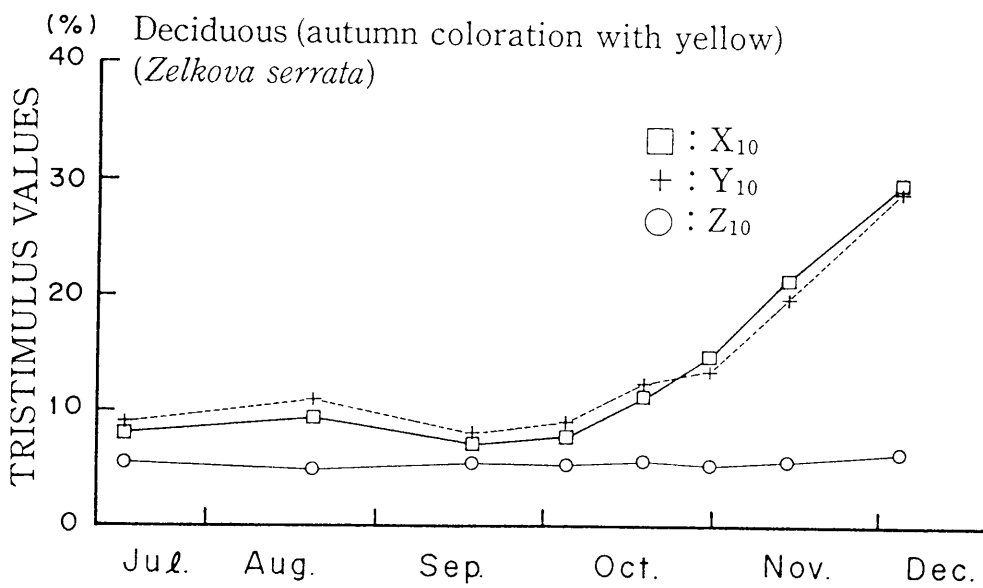
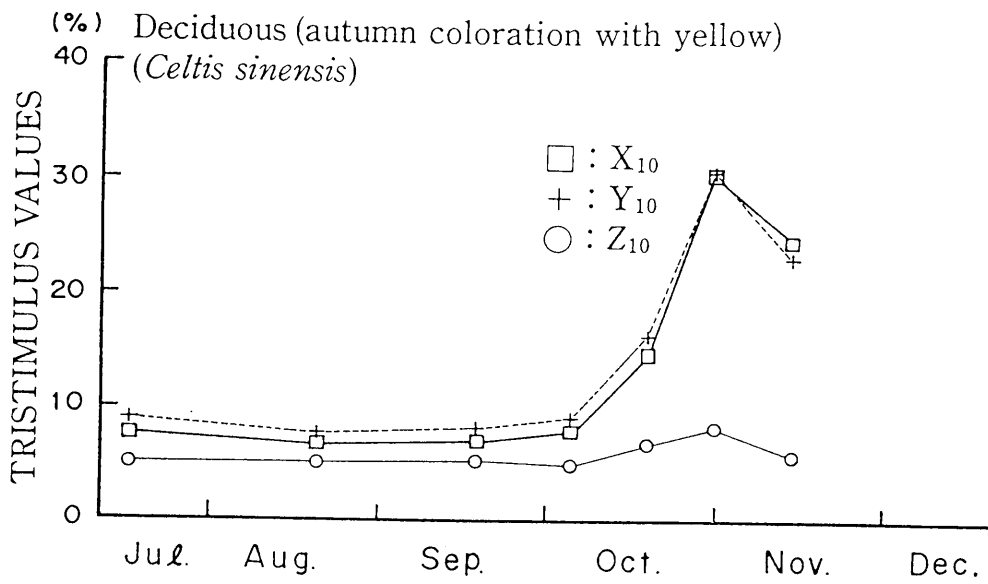


Fig. 7.10 Seasonal variations of tristimulus values from leaves of deciduous tree species turn yellow during autumn.

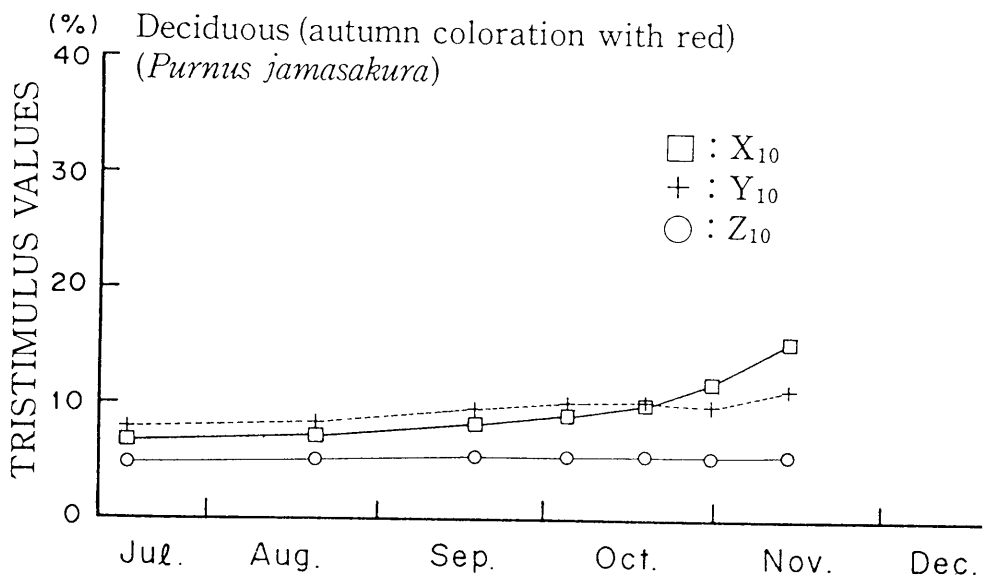
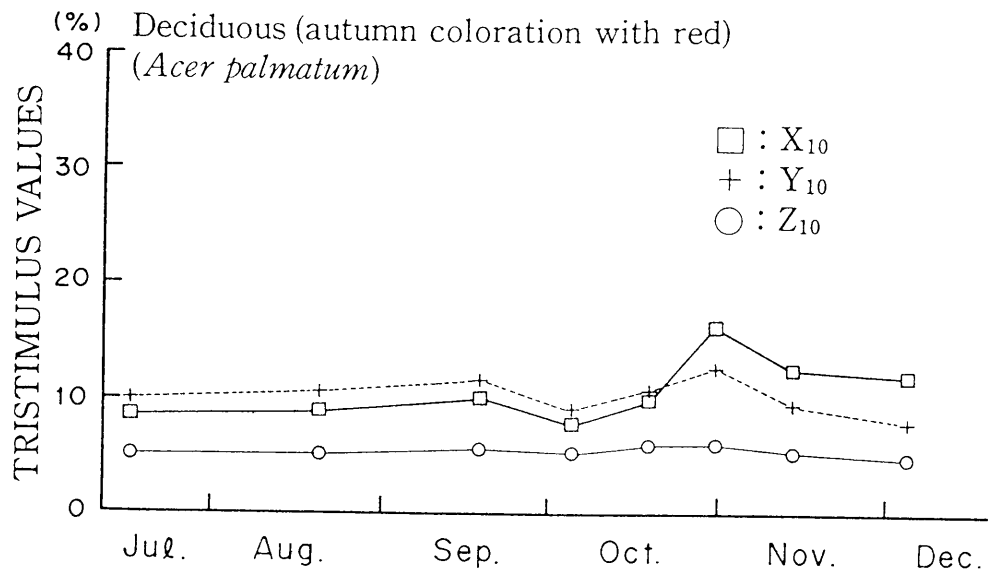


Fig. 7.11 Seasonal variations of tristimulus values from leaves of deciduous tree species turn red during autumn.

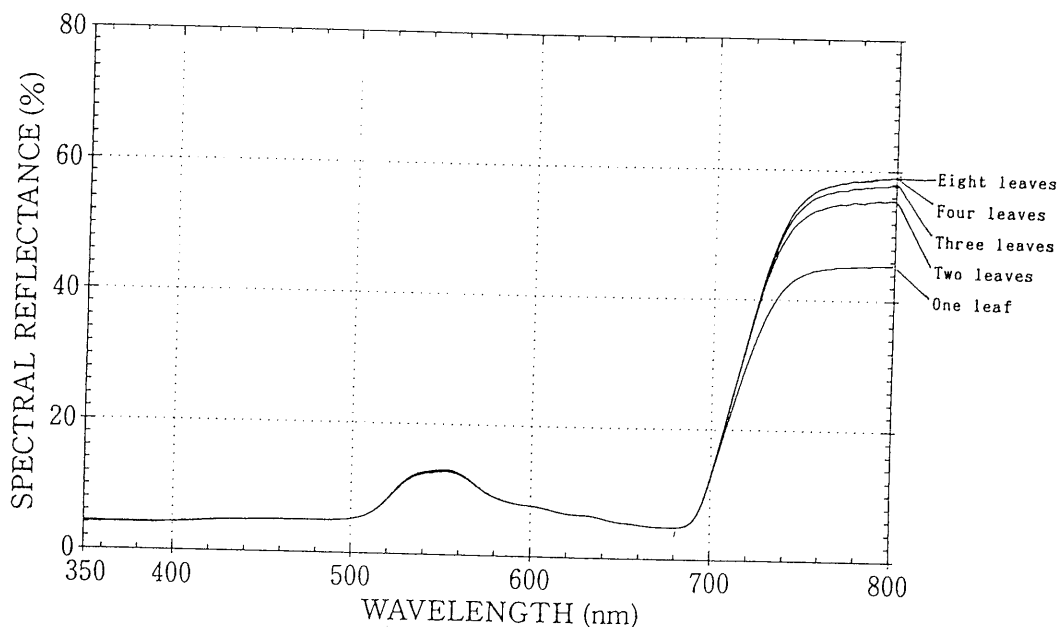


Fig. 7.12 Spectral reflectance of multiple green leaf layers.
(*Celtis sinensis*)

上昇した。

紅葉の場合にも、樹葉が重なり合うことによって、可視域の分光反射量が増加した。紅葉の重なり合った場合の可視域の分光反射スペクトルをFig. 7.15に、また、単葉および8枚が重なり合った場合の分光反射スペクトルより求めた三刺激値をFig. 7.16に示した。紅葉の樹葉が重なり合うことによる可視域分光反射量の増加の効果によって、Fig. 7.16に示したように、黄葉と同様に $[X_{10}]$ (赤)の値とともに明度 Y_{10} が上昇した。

落葉広葉樹の黄葉・紅葉の樹葉が重なり合った場合には、いずれの場合にも可視域の分光反射スペクトル変化を増幅するように可視域分光反射量が増加した。したがって、このような可視域の分光反射量増加は色彩の明度の上昇をもたらすことが、完全に黄葉・紅葉した樹葉の重なり合った場合の分光反射スペクトルの物理測色法による解析から明らかとなった。樹葉の季節的な色彩変化のなかでも、とりわけ落葉広葉樹の秋季の黄葉・紅葉が強い印象をうけるのは、このような樹葉の重なり合いの効果による可視域分光反射量の増加が影響して

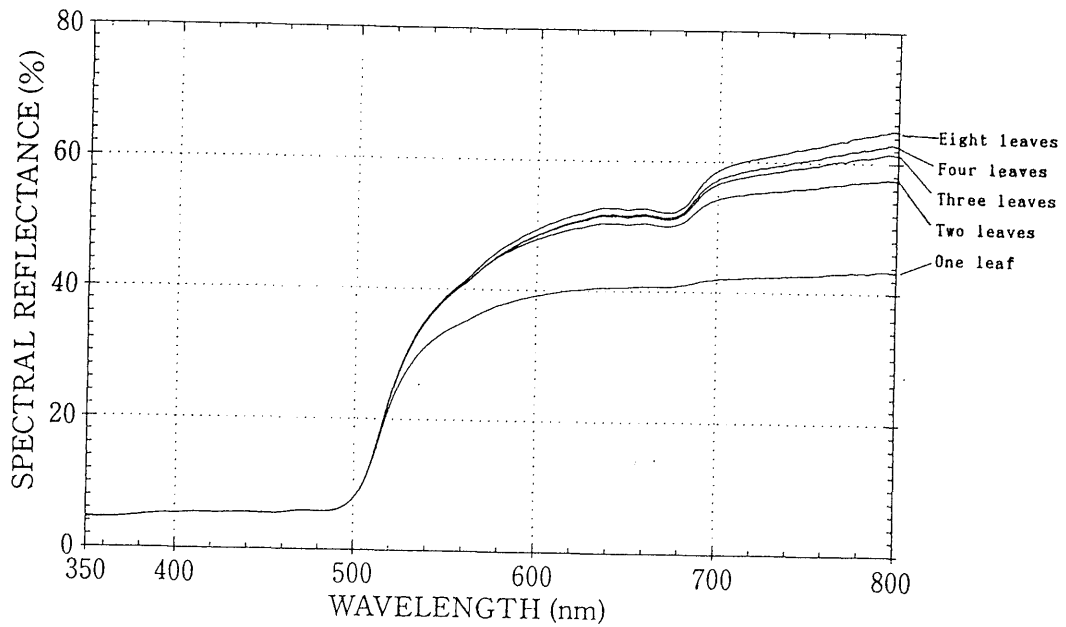


Fig. 7.13 Spectral reflectance of multiple yellow leaf layers.
(*Zelkova serrata*)

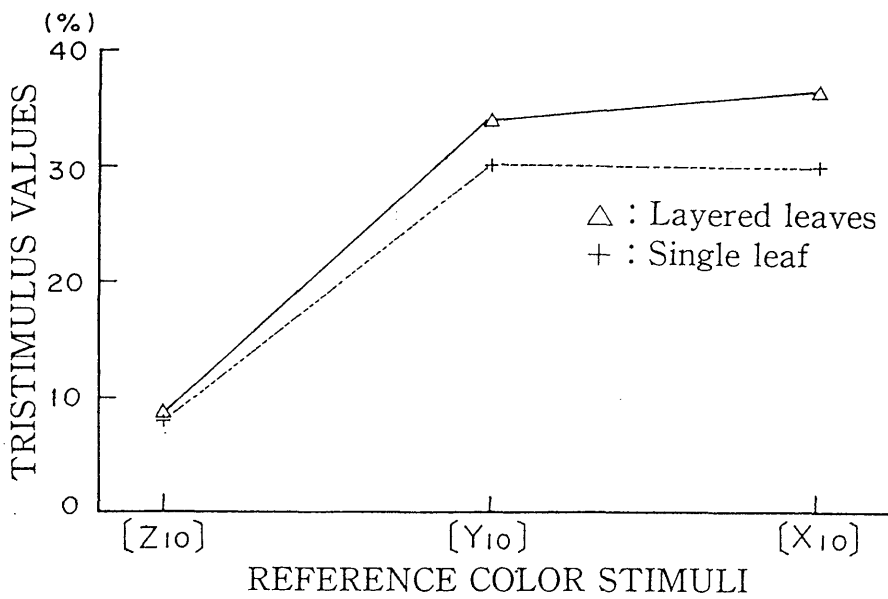


Fig. 7.14 Tristimulus values of a single yellow leaf and multiple yellow leaf layers. (*Zelkova serrata*)

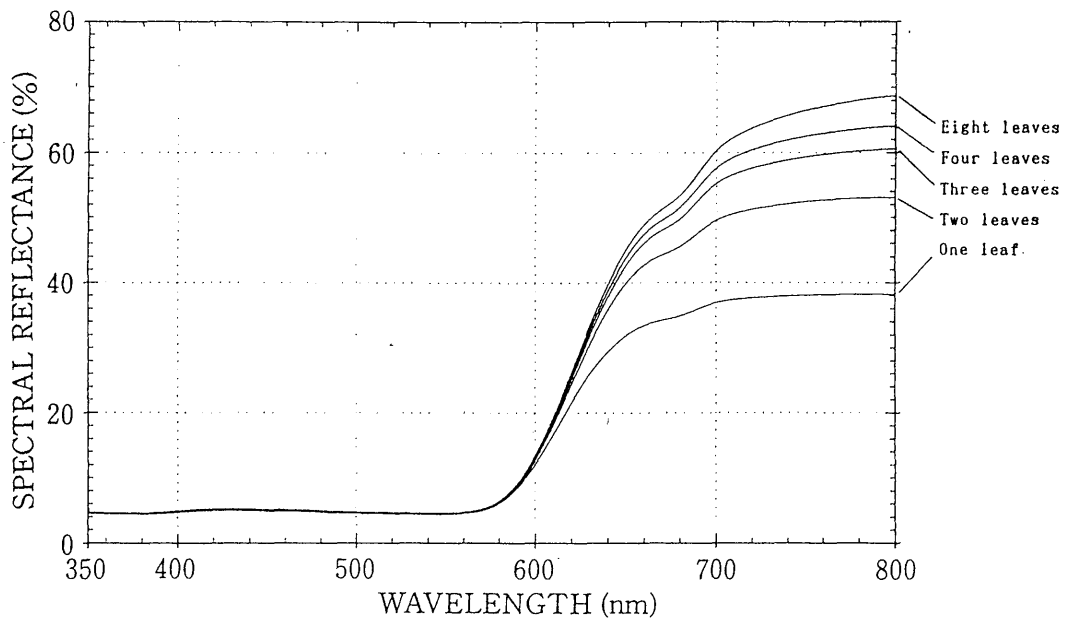


Fig. 7.15 Spectral reflectance of multiple red leaf layers.
(*Acer palmatum*)

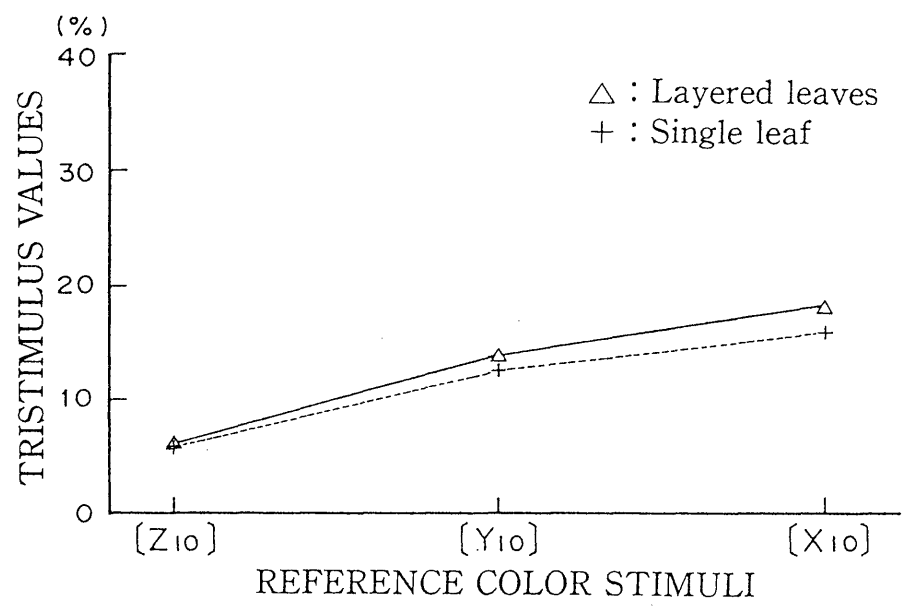


Fig. 7.16 Tristimulus values of a single red leaf and multiple red leaf layers. (*Acer palmatum*)

いるのであろう。

単葉および重なり合った場合の分光反射スペクトルの物理測色法による三刺激値により、秋季の紅葉や黄葉の“燃えるような”色彩の鮮やかさの現象は、樹葉が重なり合うことによる可視域の分光反射量増加によってもたらされるものであることを物理測色法による色彩解析によって数値的に明らかにできた。

7. 4 まとめ

樹葉の季節的分光スペクトル特性変化の応用に関する研究として、樹葉の可視域分光反射スペクトルの物理測色法による色彩解析への応用例について述べた。樹葉の可視域分光反射特性について、変化を数量的に表現するために、得られた分光反射スペクトルより、光源の分光エネルギー分布という物理量のみより計算を行って求める物理測色法によって色彩解析を行なった。色彩変化を定量的に示す方法として、CIE・ X_{10} ・ Y_{10} ・ Z_{10} 表色系における三刺激値によって表す方法を採用した。

この方法による色彩の数値的解析で、常緑の樹種では、夏から秋にかけての分光反射スペクトルにほとんど変化がないために、物理測色法によって求められた三刺激値についてもほとんど変化は示さなかった。一方、秋季に黄葉する樹種群では、夏から秋にかけてこの樹種群に共通の分光反射スペクトル特性変化に伴い、物理測色法により求められた三刺激値についても、 $[Y_{10}]$ （緑）の値と $[X_{10}]$ （赤）の値がともにほぼ同じレベルで高くなるという変化を共通に示した。秋季に紅葉する樹種群では、共通して三刺激値の $[X_{10}]$ （赤）の値が $[Y_{10}]$ （緑）の値より高くなることが示された。 X_{10} ・ Y_{10} ・ Z_{10} 表色系の三刺激値を用いることによって、樹葉の季節による色彩変化を分光反射スペクトルよりの物理測色法による色彩計算により数量化して表現することが可能であった。

落葉広葉樹の紅葉現象の黄葉・紅葉の分光反射スペクトルでは、樹葉が重なり合うことの効果によって、可視域の反射量がそれぞれの分光反射スペクトル変化を増幅するように増加することを第4章に示した。その結果、これらの樹葉が重なり合った場合の分光反射スペクトルよりの物理測色法による色彩計算

では、黄葉・紅葉が重なり合った場合には、単葉の場合より明度 Y_{10} が上昇し、色彩がより明るくより鮮やかに認識されることが示された。すなわち、秋季の紅葉や黄葉の“燃えるような”色彩の鮮やかさは、樹葉の重なり合いの効果による可視域の分光反射量の増加によってもたらされるものであることが、物理測色法によって数値的に明らかとなった。

このような分光反射スペクトル測定に基づいた経時的な色彩データは、今後、リモートセンシングデータの可視バンドを利用して樹種群判別を行おうとする場合において、目的とする樹種群の判別に最適な時期を知ることの指標となりうるものである。

また、今後、樹木を扱うコンピュータ・グラフィックスによる景観評価やモニター画面の作成の場合の色彩に関する再現についてよき参考となるであろう。

第 8 章 まとめと展望

8. 1 まとめ

地球環境問題が人類共通の課題として国際的に重要視されている。とりわけ、陸域の植生が関与する諸問題について広範な研究が求められており、リモートセンシング技術による観測が大きな役割を果たすものと期待されている。

本研究は、基礎的な樹葉の電磁波特性に関する知識を得るとともに、リモートセンシング技術による植生域に関する解析法を現在以上に高度に進め、また、活性度診断技術の手法のうちでも植物葉の電磁波特性を利用した解析に資することを目的として行なった。植生域のうちでも、とりわけ森林域解析の基礎的データをを得ることを目的とした。そのために、植物葉のような拡散反射体の反射率を現在最も正確に計測できる機器である積分球付分光光度計を用いて、樹葉の分光特性について可視波長域および近赤外波長域を中心として、とりわけ樹葉の特質である季節変化をはじめとする生理生態的変化特性を明らかにするために経時的な測定を行なった。本論文は、以下の 8 章より構成されている。

第 1 章では、広領域の土地利用や植生状況把握の重要性とリモートセンシング技術による植生解析の現状について述べるとともに、その際の基礎的データとなる植物の反射電磁波特性解析の問題点を明らかにし、樹葉の分光スペクトル測定に積分球付分光光度計を用いる利点について述べた。

第 2 章では、積分球付分光光度計により、単葉の可視域における季節的分光特性変化を経時的に測定した。その結果、緑葉の分光特性では、樹種による差は認められず、基本的に同じであった。緑葉では、紫外域から可視域が高い吸収域となっており、その吸収は、可視域赤領域の 680nm 付近から急激に低下し、近赤外域の 750nm 付近からは、平坦で低い吸収を示した。可視域の吸収は、400～500nm の青領域と 600～700nm の赤領域で高く、555nm 付近をピークとする緑領域でやや低くなっていた。緑葉の可視域分光特性は、光合成に有効な波長域の光を吸収するという植物の生理に基づいた共通の特性を示し、それ以外の波長域の光を反射および透過していると考えられた。

秋季の落葉広葉樹では、黄葉に変化する樹種群、紅葉に変化する樹葉群にそ

れぞれ共通の可視域分光特性変化を示した。黄葉の分光特性については、光合成の機能領域である680nm付近の著しい吸収が低下し、可視域の500nm以下の青領域のみが高い吸収域となった。紅葉では、黄葉と同様に光合成の機能領域である680nm付近の著しい吸収の低下と同時に新たに生成された赤色色素アントシアニンによると考えられた500～580nm付近にかけての吸収を生じた。その結果、紅葉の分光スペクトルでは、400～500nmの青領域・500～580nm付近の緑領域に連続した吸収を示した。

第3章では、植物葉色素や水による吸収の影響を受けない760～900nm付近の単葉の近赤外域における分光特性について、次のような知見が得られた。単葉の近赤外域における反射量と植物の生理機能あるいは健全度・活性度との直接的な関わりはなかった。また、葉中の含水率の低下すなわち乾燥によってこれまでいわれてきた近赤外域における反射の低下は認められず、上昇することが明らかとなった。同じ樹種の同一樹木の樹葉でも、単葉の近赤外域における反射・透過・吸収特性は季節的に変化した。また、その変化は植物葉の成熟・老化にともなって共通であった。

十分にうっ閉した森林域の衛星データは、樹葉が重なり合った状態での森林群落の分光反射特性を捉えている。したがって、実験室で得られたデータを利用し、衛星データを用いた森林植生域解析の場合には、単葉のデータでは不十分であり、樹葉が重なり合った状態での分光反射特性に関する知識を得ておく必要がある。第4章では、樹冠光学モデルとして、単葉が重なり合ったものと仮定し、重なり合った2枚の樹葉の総反射量を算出する新しい方法を提唱した。測定により、同一樹種の樹葉を重ねた場合の近赤外域(760～900nm)の総反射量が季節に大きく変化した結果を得たが、これを次式で明確に説明できた。すなわち、樹葉に光が表から入射しても裏から入射しても、同じ反射率 ρ 、透過率 τ であるとすれば、2枚を重ねた場合の総反射量 P は次式で表される。

$$P = \rho + \frac{\rho \tau^2}{1 - \rho^2}$$

P : 2枚を重ねた場合の総反射量, ρ : 単葉の反射率, τ : 単葉の透過率

この式は、樹葉を重ねた場合の総反射量は、単葉の反射・透過・吸収に依存することを示しており、単葉・可視域の分光特性が大きく変化した黄葉・紅葉の樹葉が重なり合った場合の可視域における総反射量増加の説明にも適用することができた。

また、この実験室での結果より、衛星データの同一植生域における近赤外域輝度値の季節的变化、すなわち、新葉期に高く、夏に低下し、秋季にさらに低下する現象を説明することができた。1990年代より、衛星データを利用した時系列な植生指数・NDVIの季節変化による植生特性の解析の報告が多くなされているが、この結果は、これらの報告の基礎的な理論根拠になりうるものであると考えられる。

第5章では、可視域の植物葉分光特性に影響をおよぼすと考えられる植物色素について、抽出により落葉広葉樹の秋季の経時的な紅葉現象を定量的に解析し、考察を加えた。

緑葉中のクロロフィル・カロチノイド比については、供試した5樹種のアセトン抽出液吸収スペクトルの可視域における波形が非常に似ていることから樹種に関係なく一定かそれに近い値をとるものと考えられた。また、緑葉の680nm付近をピークとする吸収はクロロフィルのみによるものであり、400~500nmの青領域の吸収はクロロフィル・カロチノイド両方の色素の影響であることが明らかとなった。

常緑樹では、秋季の色素量変化はほとんどなかった。落葉広葉樹の秋季の黄葉では、クロロフィルはほぼ完全に分解されたが、のみならずカロチノイド量も急激に減少した。樹葉の黄色の発現は、残存したカロチノイド色素によるものであり、黄葉の吸収はカロチノイドによる400~500nmの青領域のみとなった。紅葉は、黄葉と同様なほぼ完全なクロロフィルの分解と同時にカロチノイドの減少という変化に加えて、赤色色素のアントシアニンが新たに生成したことによるものであった。紅葉の吸収域は、カロチノイドによる400~500nmの青領域に、アントシアニンによる500~580nm付近の緑領域の吸収が加わったスペクトルとなった。落葉広葉樹葉の秋季の分光特性変化は、色素の分解と生成という

樹種群に共通な生態生理的变化によるものであった。したがって、今後、衛星データ等を利用するリモートセンシング技術において、落葉広葉樹群の秋季の可視域反射特性変化を抽出することにより、森林域の樹種群判別に利用できるものとする。

第6章では、可視域400~500nmの青領域における樹葉分光特性に影響しているカロチノイドに関して、次の2点を明らかにするために薄層クロマトグラフィ(TLC)による定性分離を行なった。第一は、緑葉のカロチノイドの種類が、樹種により差異があるのかどうかであり、第二は、秋季の黄葉・紅葉時の主体となるカロチノイドの種類を明らかにすることである。

緑葉のTLCの結果より、カロチノイドの種類に樹種による差はなく、橙黄色のカロチン類・ルテイン、および淡黄色のヴィオラキサンチン・ネオキササンチンが認められ、高等植物の緑葉のカロチノイド類は共通である可能性が高いことを確認した。

また、秋季の落葉広葉樹の黄葉・紅葉のTLCクロマトグラムでは、カロチノイドは、橙黄色のカロチン類とルテインが明瞭に確認され、淡黄色のヴィオラキサンチンとネオキササンチンがわずかに認められた。したがって、黄葉・紅葉期のカロチノイドは、橙黄色のカロチン類とルテインが主体であることがわかった。

樹葉の可視域400~500nmにおける分光特性としては、生きている緑葉のみならず、紅葉時、枯葉の状態の場合についても、この領域がカロチノイドが関与する吸収域であることが明らかとなった。今後、この特性を利用して、リモートセンシング技術による植生域に関する解析において、裸地と、生きた植生被覆だけでなく、枯死植物の存在、落葉層の存在などの植物性の被覆とを区別できる可能性がある。

第7章では、樹葉の季節的分光スペクトル特性変化の応用に関する研究として、樹葉の可視域分光反射スペクトルの物理測色法による色彩解析への応用例について述べた。樹葉の分光反射スペクトルについて、光源の分光エネルギー分布という物理量から計算によりCIE・ $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系における三刺激

値を求めた。

この方法による色彩解析では、常緑樹種については夏から秋にかけての分光反射スペクトルにほとんど変化がないために、物理測色法により求められた三刺激値についても変化が示されなかった。一方、秋季に紅葉現象をおこす落葉広葉樹では、樹種群に共通の分光反射スペクトル特性変化に伴い、物理測色法により求められた三刺激値についても、黄葉樹種群・紅葉樹種群のそれぞれに共通の変化を示した。

また、落葉広葉樹の紅葉現象の黄葉・紅葉の分光反射スペクトルでは、樹葉が重なり合うことにより、可視域において、それぞれの分光反射スペクトル変化を増幅するように、反射量が増加する。その結果、黄葉・紅葉の樹葉が重なり合った場合には、単葉の場合より明度が上がり、色彩はより明るくより鮮やかに認識されることが示された。すなわち、秋季の黄葉や紅葉の“燃えるような”色彩の鮮やかさは、樹葉の重なり合いの効果による可視域の分光反射量の増加によってもたらされるものであることが、物理測色法によって数値的に示された。

この分光反射スペクトル測定に基づいた経時的な色彩データは、今後、樹木を扱うコンピュータ・グラフィクスによる景観評価や、モンタージュ画像の作成の場合の、色彩に関する再現に関して大いに参考となるであろう。

8. 2 今後の展望

今後の研究の流れとしては、2つの方向性が考えられる。まず、第1は活性度診断の一手法として、積分球付分光光度計で得られる再現性の高い分光スペクトルそのものを解析し、樹葉を非破壊的に分析・診断する方向である。第2は、積分球付分光光度計を用いて実験室で得られた樹葉の反射スペクトル変化を利用して、リモートセンシング技術によって植生域についての生理生態的特性に基づいた情報を得る応用研究の方向である。

第1の再現性の高い分光スペクトルそのものを解析し、樹葉を非破壊的に、分析・診断する方向についての、活性度診断に利用できる樹葉の解析法の一

例としては、レッド・エッジ (red edge) とよばれている680nmから700nm付近の鋭い吸収のピークの解析が考えられる。可視・赤領域の吸収がクロロフィルによっていることは、第5章に示したが、このレッド・エッジとよばれている680nmから700nm付近の吸収は、クロロフィルによる低い赤領域の反射と、第3章で述べた植物葉の内部構造による高い拡散反射がもたらす高い近赤外域反射という植物葉に特有な2つの特性の結果として生じている。したがって、レッド・エッジは、緑の植物に特有の特性であるといえる。分光光度計(島津製作所製, UV-2100)のような機種では、スペクトルデータをディスクに格納でき、さらにオンラインで接続されたコンピュータ使用により装置関数と入力記号のたたみこみ計算処理により微分スペクトルを得ることができる。このスペクトルの微分法により、鋭い吸収であるレッド・エッジの吸収のピークを正確に求めることができる。このレッド・エッジは葉単位面積あたりのクロロフィル量と高い相関があり、早期のストレスの検出等にも応用が期待されるという報告もある²⁶⁾。樹葉の分光スペクトルを利用した活性度診断に関しては、今後、スペクトルデータの微分スペクトルを得るという微分法などによる樹葉の非破壊解析の方向が考えられる。

このような樹葉の非破壊解析・診断では、湿式化学分析のように大量の溶媒や化学薬品を必要としないため、分析コストが安く、かつ、化学薬品による実験室環境汚染の恐れが少ない。さらに、分析に際し特別に熟練した技術が必要とせず、また、試料の前処理を必要としないため、迅速な解析が可能であるといった利点がある。世界的にも、酸性雨や大気汚染の影響を受けた植物の状態を的確に診断する植物のモニタリング・活性度診断の必要性が高まっており、樹葉を光学的に非破壊解析・診断する技術は、極めて有望な方法であると確信する。

このような樹葉の光学的非破壊解析・診断技術の砂防への利用の展望に関して述べてみる。近年、砂防工事に関しても、環境に配慮した建設工事が求められる時代となってきたおり、ダムや堤防といった砂防計画施設についても、有機的な連携の下に十分機能するよう求められてきている。さらに、社会的に快

適性（アメニティー）に対する要望が拡大した現在、これからの砂防工事の方向として、従来の治山砂防上の意味のほか、自然景観の維持向上や生態系の復活を目的として考慮することが求められてきている。このような要請に基づいて、様々な砂防工事についても、樹木が導入される機会が増加してきている。とりわけ、大規模崩壊地に対する斜面緑化などの砂防工事では、生態系の復活を目的とした森林空間の復元も考えるべき方向となっていており、木本類や郷土植物の導入が積極的に計られるようになってきている。

また、世界的にみても、現在、中国内陸部における半乾燥地帯をはじめとして、世界各地で砂漠化が進行しつつあるといわれており、流動砂地の固定と飛砂防止のための緑化および造林技術の確立が急がれている。また、水土流出が問題となっている中国黄土高原や、山麓の森林伐採が下流域の国々の洪水を引き起こしているヒマラヤ山岳地のような地域の侵食防止対策にあたっては、森林などの植生の回復によって裸地斜面や急峻斜面を被覆防護することが、最も適切な方法と考えられている。

このような砂防緑化工事において、樹木が導入される場合には、裸地あるいは裸地に近い状態に導入されることになり、導入された樹木の生育評価・活性度診断が必要となることが当然予想される。今後、樹葉の光学的非破壊解析・診断の技術を、実用的な樹木の活性度診断技術として、完成度の高いものにまで発展させることができれば、砂防工事において導入された樹木の生育評価・活性度診断に利用でき、適切な管理技術の確立に資するものと考えられる。

また、第2の、実験室で得られた樹葉の反射スペクトルを利用して、リモートセンシング技術によって観測植生域についての情報を得る応用研究の方向について述べてみる。衛星あるいは航空機で観測されるリモートセンシングデータは、輝度値であるために、実験室で測定される反射率と直接比較することはできない。しかし、地質の分野では、HOOK and RAST²⁵⁾(1990)により、輝度値を反射率に変換する簡便法が提案され、岩石のスペクトル特性を基礎として未知の地質の判別に良好な結果が得られている。また、WHITE⁹⁷⁾(1993)は、実験室で計測した地表物質の分光反射スペクトル曲線を計算処理し、TMバンドの応

答をシミュレートし、地表の地質分類地図を作成している。

植物葉に関しても、実験室で得られた季節的反射率スペクトルを輝度値に変換する計算は可能である。すなわち、実験室で得られた分光スペクトル曲線を計算処理し、たとえばランドサットTMバンドにおける応答のシミュレートを行なう。具体的には、樹種群による季節的分光反射特性の大きな変化領域が、既に示しているようにTM可視バンドのうち2バンドと3バンドにあるので、反射スペクトル曲線と、TMセンサー応答カーブより計算したフィルター特性を用いて近似積分計算を行なう。結果の積分計算は、完全反射体の積分値の割合として表すことで反射に変換する。実際のデータと対応させる場合には、光源である太陽光の季節的な相対スペクトル変化などの問題点も考えられるが、それらを含めて実際の衛星データとの対応については、今後の課題である。

現在の時点では、これまで実験室で得られている樹葉の季節変化のデータの検討より、樹種群の季節的可視域分光反射特性変化の違いで、落葉広葉樹と常緑樹の判別、さらに落葉広葉樹の樹種群の判別が樹葉の生理生態的特性という理論的根拠に基づいて可能であると考えられる。

また、衛星データで、森林域における近赤外域(750~910nm)のレベルが、新葉期から展開期にかけて高く、夏から秋に向かうにしたがっての低下については、第4章で述べた樹葉の季節的分光特性も大きな要因であると考えられるが、樹種群による新葉展開時期の違いがあることから、近赤外域反射の季節変化から常緑広葉樹群と常緑針葉樹群の判別が可能と考えられる。

森林資源については、これまでは、林業的視点から木材資源としての経済的生産価値に主眼をおいて論じられてきた。しかし、20世紀末の今日、森林の急速な消失は、森林資源という意味についての社会的な価値観をも劇的に転換させてきている。すなわち、木材の経済的生産という視点だけでなく、森林資源が存在することからもたらされるそのほかの利益、たとえば、森林が存在することによる景観等の環境的価値、水源かん養機能、漁業に及ぼす影響、森林に生育する動植物の保全など、また、今後の人類の生存に関わる遺伝子資源としてなどを統合的に考えようとする動きなど、多様な資源価値で論じられるよ

うになってきている。

また、近年の急激な森林資源の消滅は、世界的な気候にも大きな影響をもたらすのではないかと考えられるまでに至っており、地球環境問題としての地球温暖化の原因であるCO₂増加の大きな要因であるとされている。

今後、地球の森林消失の回避と森林面積の拡張により、気候安定化をめざすためには、その基礎として、森林状況に関する現在より数段すぐれたデータが必要となる。たとえば、化石燃料に由来する炭素排出量の世界的な数値は、毎年信頼度の高いものが得られるが、森林破壊による排出量は入手不能である。熱帯林の伐採のペース、伐採地の再生状況、森林地域に存在するバイオマス（炭素量）などについても、不確定部分がきわめて大きい。こうした部分の解明が、今後の課題となることが予想されるが、このような森林アセスメントに人工衛星によるリモートセンシング技術が期待されるであろう。

実験室で得られた樹葉の分光スペクトル特性の知識より、生理生態的知見に基づく森林域解析が可能となれば、以上に述べてきた目的での広領域にわたる森林アセスメントに有効となるであろうと考えられる。

さらに、今後、将来的に、航空機あるいは衛星のリモートセンシングのセンサについても、“Hyperspectrometry”といわれる超多バンド数の超高スペクトル分解能の光学センサが一般的になれば、森林生態系をはじめとする植生域についての利用技術の基礎として、このセンサの対象波長域である太陽エネルギーの反射光を利用する400～2350nmの範囲についての植物葉の分光スペクトル特性に関する基礎的知識は不可欠なものとなるであろう。

また、このようなりモートセンシングでの生理生態的知見に基づく森林域解析技術の砂防分野における応用の展望について述べてみる。森林の荒廃については、砂防の観点からも、過去の歴史において、一つの地域に発達した文明が数世紀もつづく、燃料や用材の採取によって森林がしだいに収奪され、周辺の森林は荒廃するという経過を繰り返していることが知られている。現在、世界中の発展途上国においても、急激な人口の増加にともなって、ほとんど例外なく森林の荒廃と土砂流出が深刻な問題になっている。我国では、農業生産力

の増加した16世紀頃より人口が増加し、はげ山からの土砂流出の問題が顕在化した。とりわけ、古くから文化の開けた畿内の山地では、それ以前の数百年間におよぶ用材・燃材の収奪により荒廃は著しかった。琵琶湖の南に位置する田上山は、淀川水系の水上輸送の便が良いことから、かつて藤原京造営のためのヒノキ材が伐り出されたことが、万葉集にも詠まれているが、明治の初期には全山はげ山の状態となっていた。明治以降は、国の直轄砂防事業として、山腹工事が行なわれ、その結果成立したクロマツ、アカマツ、ヒメヤシャブシ等により植被率は、かなり回復してきている。このような広域にわたる植生被覆の回復状況のモニタリングに衛星データを用いるリモートセンシング技術は大変有効である^{74, 99)}。

森林が水循環に及ぼす影響には、さまざまな論議があるものの、水循環を調節しながら、かつ表面侵食を防ぐ機能はこれに代わるものは考えられない。今後、森林の荒廃とそれにともなう土砂流出が問題となっている地域での生態的安定の回復をめざすには、森林などの植生の回復によって裸地斜面や急峻斜面を被覆防護することが計られなければならないであろう。また、近年、流域管理の重要性が指摘されているが、流域からの水や土砂の流出を予測し、流域計画を立案していくうえで、崩壊地の分布、土地の詳細な植生被覆状況など、流域全体を把握することが必要である。砂防計画を立案するうえでは、現状把握・計画・評価のいずれにおいても広範囲にわたる地域の植生被覆状況の全体像の把握が必要となる。広域にわたって定期的な観測を行なっている衛星データを利用することは今後有力な方法となる得るものと考えられるが、植物は生理生態的特性を持っていることが特質であり、その特性に基づいたリモートセンシング技術によるさらに正確で高精度の植生域解析は非常に応用性と発展性の高いものである。そのために本論文が役立つなら望外の喜びである。

謝辞

本研究を進めていく過程で、多くの方々からご指導とご教示を賜りました。京都府立大学農学部大手桂二教授には、終始暖かいご指導と励ましをいただき、研究環境にもたえずご配慮をいただきました。京都大学農学部小橋澄治教授には、実際的な研究の進め方について常に適切なご指導とご教示を賜りました。

京都府立大学農学部の各先生方には、学科・講座をこえてご指導とご援助を賜りました。植物色素の実験を行なうにあたっては、石田雅士教授より実験や手法についてのご指導をいただきました。附属演習林の妹尾俊夫助教授にはリモートセンシングの理論と解析についてご教示いただき、本城尚正助教授には激励とご援助をいただきました。砂防工学研究室の水原邦夫助教授、日浦啓全博士（現 高知大学農学部助教授）、三好岩生先生には機会あるごとに適切なご教示を賜りました。

さらに、（財）リモートセンシング技術センターの田中總太郎博士には、リモートセンシング工学についての懇切なご指導とご協力を賜りました。森本幸裕博士（現 大阪府立大学農学部教授）には、植物の分光特性と画像解析についてご教示いただきました。大阪女子大学助教授井田和子博士には、植物色素の抽出方法および定量法について、また、島津製作所の谷本恭章氏、山本孝一氏には光学理論、比色分析法の実際についてのご指導とご助言をいただきました。心より厚くお礼申し上げます。

参考および引用文献

- 1) ALLEN, W.A., and RICHARDSON, A.J.: Interaction of Light with a Plant Canopy, J. Opt. Soc. Am., 58(8), p.1023-1028, 1968.
- 2) ALLEN, W.A., GAUSMAN, H.W., RICHARDSON, A.J. and THOMAS, J.R.: Interaction of Isotropic Light With a Compact Plate Leaf, J. Opt. Soc. Am., 59(10), p.1376-1379, 1969.
- 3) 粟屋善雄・大貫仁人・露木 聰：植物反射電磁波特性の解析（II），98回日林論， p.137-138， 1987.
- 4) BOWMAN, W.D.: The Relationship between Leaf Water Status, Gas Exchange, and Spectral Reflectance in Cotton Leaves, Remote Sens. Environ., 30, p.249-255, 1989.
- 5) CURRAN, W.A., and MILTON, E.J.: The Relationships between the Chlorophyll Concentration, LAI and Reflectance of a Simple Vegetation Canopy, Int. J. Remote Sens., 4(2), p.247-255, 1983.
- 6) DAVIES, B.H.: Analysis of Carotenoid. in "Chemistry and Biochemistry of Plant Pigments" ed. by Goodwin, T.W., Academic Press, p.489-532, 1965.
- 7) 江森康文・安田喜純・宮沢 寛：赤外カラーフィルムの表示色による樹種および活力度の判別，写真測量， 12， 1973.
- 8) FORD, B.: Giant Revelations to Come, Nature, 337(6207), p.510-511, 1989.
- 9) FRANCIS, G.W. and ISAKSEN, M.: Thin-Layer Chromatography of Carotenoids with Tertiary Alcohol-Petroleum Ether Solutions as Developing Solvents, J. Food Sci., 53(3), p.979-980, 1988.
- 10) 藤茂 宏：光合成，裳華房， pp.322， 1973.
- 11) GATES, D.M., KEEGAN, H.J., SCHLETER, J.C. and WEIDNER, V.R.: Spectral Properties of Plants, Appl. Opt., 4, p.11-20, 1965.
- 12) GAUSMAN, H.W., ALLEN, W.A., CARDENAS, R. and RICHARDSON, A.J.: Re-

- lation of Light Reflectance to Histological and Physical Evaluations of Cotton Leaf Maturity, *Appl. Opt.*, 9(3), p.545-552, 1970.
- 13) GAUSMAN, H.W.: Leaf Reflectance of Near-infrared, *Photogramm. Eng.*, 40, p.183-191, 1974.
 - 14) GAUSMAN, H.W., RODRIGUEZ, R.R. and RICHARDSON, A.J.: Infinite Reflectance of Dead Compared with Live Vegetation, *Agron. J.*, 68, p.295-296, 1976.
 - 15) GOODWIN, T.W. : Studies in Carotenogenesis. The Changes in Carotenoid and Chlorophyll Pigments in the Leaves of Deciduous Trees during Autumn Necrosis, *Biochem. J.*, 68, p.503-511, 1958.
 - 16) GOODWIN, T.W.: "Chemistry and Biochemistry of Plant Pigments," Academic Press, London, New York, pp.583, 1964.
 - 17) GOVINDJEE and COLMAN, W.J. : How Plants Make Oxygen, *Scientific American*, p.42-51, February, 1990.
 - 18) HARBORNE, J.B.: "Phytochemical Methods, Sec. ed.," Chapman and Hall, London, New York, pp.288, 1988.
 - 19) 服部 静夫・林孝三 : 二三ノかえて類ノ色素ニ就イテ. *The Botanical Magazine*, 605, p.366-372, 1937.
 - 20) 林孝三・阿部幸頼 : Papier-chromatographische Übersicht der Anthocyane im Pflanzenreich(II) Farbstoff des Roten Herbstlaubes, *植物学雑誌*, 68, p.299-307, 1955.
 - 21) 林孝三 : 植物色素, 養賢堂, pp.647, 1988.
 - 22) 東 敏生: 二時期のランドサット T M データを用いた松枯れ被害拡大地域の抽出, *日本リモートセンシング学会誌*, 10(3), p.77-83, 1990.
 - 23) HOFFER, R.M.: Biological and Physical Considerations in Applying Computer-Aided Analysis Techniques to Sensor Data, in "Remote Sensing -The Quantitative Approach-", ed. SWAIN, P.H. and DAVIS, S.M. McGRAW HILL Book Company, p.227-265, 1978.

- 24) HOLDEN, M.: Chlorophylls. in "Chemistry and Biochemistry of Plant Pigments," ed. by Goodwin, T.W., Academic Press, p.461-488, 1965.
- 25) HOOK, S.J. and RAST, M.: Mineralogic Mapping Using Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer(AVIRIS) Shortwave Infrared(SWIR) Data Acquired over Cuprite, Nevada, Proceeding of the Second Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer(AVIRIS) Workshop, p. 199-207, JPL Publication 90-54, 1990.
- 26) HORLER, D.N.H., DOCKRAY, M. and BARBER, J. : The Red Edge of Plant Leaf Reflectance, *Int. J. Remote Sens.*, 4(2), p.273-288, 1983.
- 27) HOUQUE, E., HUTZLER, P.J.S. and SEIDLITZ, H.K. : Relationship between Discoloration and Histological Changes in Leaves of Trees Affected by Forest Decline, *Remote Sens. Environ.*, 26, p.171-184, 1988.
- 28) HUNT, E.R.Jr. and ROCK, B.N.: Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- and Middle-Infrared Reflectance, *Remote Sens. Environ.*, 30, p.43-54, 1989.
- 29) IDA, K.: Eco-Physiological Studies on the Response of Taxodiaceous Conifers to Shading, with Special Reference to the Behavior of Leaf Pigments, *The Botanical Magazine Tokyo*, 94, p.41-54, 1981.
- 30) 井田和子 : 遮光に対するスギ科針葉樹の反応の生態生理学的研究 - 特に葉の色素の消長について -, 大阪市立大学博士論文, pp.97, 1981.
- 31) IDA, K., SAITO, F. and TAKEDA, S.: Isomers of Rhodoxanthin in Reddish Brown Leaves of Gymnosperms and Effect of Daylight Intensity on the Contents of Pigments during Autumnal Coloration, *Bot. Mag. Tokyo*, 104, p.157-169, 1991.
- 32) 井田和子他 : *Journal of Plant Research* 投稿中
- 33) ISHIKURA, N. : The Changes in Anthocyanin and Chlorophyll Content during the Autumnal Reddening of Leaves, *Kumamoto J. Sci. Biol.*,

- 11(2), p.43-50, 1973.
- 34) 石山隆・土屋清・岡山浩：葉の分光反射および偏光特性，日本リモートセンシング学会誌，4(3)，p.15-21，1984.
- 35) JUSTICE, C.O., TOWNSHED, J.R.G., HOLBEN, B.N. and TUCKER, C.J.: Analysis of the Phenology of Global Vegetation Using Meteorological Satellite Data, *Int. J. Remote Sens.*, 6(8), p.1271-1318, 1985.
- 36) 北村四郎・村田源：原色日本植物図鑑木本編（I・II），保育社，1971・1979.
- 37) KNIPLING, E.B.: Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation, *Remote Sens. Environ.*, 1, p.155-159, 1970.
- 38) 小橋澄治・村井宏・亀井章：環境緑化学，朝倉書店，pp.188，1992.
- 39) LECKIE, D.G., and OSTAFF, D.P.: Classification of Airborne Multi-Spectral Scanner Data for Current Defoliation Caused by the Spruce Budworm, *For. Sci.*, 34, p.259-275, 1988.
- 40) 李雲慶・大沼一彦・安田喜純：時系列な植生指数による中国の植生特性の解析，写真測量とリモートセンシング，29，1，p.4-12，1990.
- 41) LIAAN-JENSEN, S. and JENSEN, A.: Quantitative Determination of Carotenoids in Photosynthetic Tissues, in "Methods in Enzymology," ed. by PIETRO, A.S., Academic Press, London, New York, 23, p.587-602, 1971.
- 42) LILLESAETER, O.: Spectral Reflectance of Partly Transmitting Leaves: Laboratory Measurements and Mathematical Modeling, *Remote Sens. Environ.*, 12, p.247-254, 1982.
- 43) MacDONALD, R.B. and HALL, F.G.: Global Crop Forecasting, *Science*, 208, p.670-679, 1980.
- 44) MARKHAM, B.L., KIMES, D.S. and TUCKER, C.J.: Temporal Spectral Response of a Corn Canopy, *Photogrammetric Engineering and Remote*

- Sensing, 48(11), p.1599-1605, 1981.
- 45) 増田芳雄 : 植物生理学, 培風館, pp.396, 1988.
- 46) MATHER, A.S.: "Global Forest Resources," Timber Press, Inc., pp.341, 1990.
- 47) 森本幸裕・小橋澄治 : 赤外線テレビカメラとパソコンを利用したリモートセンシングシステム, 緑化研究, 9, p.20-31, 1987.
- 48) 森本幸裕・武居二郎・小南裕志・花山秀文・三輪賢志 : 街路樹ケヤキの活性度診断. 日本緑化工学会誌, 17(1), p.9-15, 1991.
- 49) 内藤健司・青木均 : 森林植性のランドサットTMデータ反射分光特性の季節変化, 日本リモートセンシング学会誌, 10(3), p.47-51, 1990.
- 50) 中島巖 : 赤外カラー写真による環境と樹木活力の診断. 農業および園芸, 48(1), p.195-200, 1973.
- 51) 中山裕則・田中總太郎 : 衛星データに見るチャド湖の水域および植物域の変化, 日本リモートセンシング学会誌, 10(1), p.37-49, 1990.
- 52) NATHANS, J., THOMAS, D. and HOGNESS, D.S.: Molecular Genetics of Human Color Vision: The Genes Encoding Blue, Green, and Red Pigments., Science, 232(4747), p.193-202, 1986.
- 53) NATHANS, J., SHOWS, T.B. and HOGNESS, D.S.: Molecular Genetics of Inherited Variation in Human Color Vision, Science, 232(4747), p.203-210, 1986.
- 54) NATHANS, J.: The Genes for color Vision, Scientific American, February, p.42-49, 1989.
- 55) 日本規格協会 : J I S 色に関する用語 J I S Z 8 1 0 5 -1982.
- 56) 日本規格協会 : J I S 物体色の測定方法 J I S Z 8 7 2 2 -1982.
- 57) 日本規格協会 : J I S X Y Z表色系及び X_{10} , Y_{10} , Z_{10} 表色系による色の表示方法 J I S Z 8 7 0 1 -1982.
- 58) 西川肇・藤井寿生・工藤勝輝・岩下圭之・安藤正信 : 大気汚染が樹木の分光反射特性に及ぼす影響, 日本リモートセンシング学会誌, 10(3), p.5-

- 12, 1990.
- 59) NORWINE, J. and GREGOR, D.H.: Vegetation Classification Based on Advanced Very High Resolution Radiometer(AVHRR) Satellite Imagery, Remote Sens. Environ., 13, p.69-87, 1983.
- 60) 大林成行・江野沢誠・小島尚人：分光反射率データを用いた対象物有効波長帯の選定，日本リモートセンシング学会第9回学術講演会論文集，p.165-166, December, 1989.
- 61) 朴慶培・佐藤庚：水稻幼植物の葉身の色素分離法について，日作紀，50(2), p.239-240, 1981.
- 62) PETERSON, D.L., SPANNER, M.A., RUNNING, S.W. and TEUBER, K.B.: Relationship of Thematic Mapper Simulator Data to Leaf Area Index of Temperate Coniferous Forests, Remote Sens. Environ., 22, p.323-341, 1987.
- 63) POLLICK, R.B., and KANEMASU, E.T.: Estimating Leaf-area Index of Wheat with LANDSAT Data, Remote Sens. Environ., 15, p.307-312, 1979.
- 64) RICHARDS, J.F. and TUCKER, R.P.: "World Deforestation in the Twentieth Century," Duke University Press, pp.321, 1988.
- 65) RUNNING, S.W., PETERSON, D.L., SPANNER, M.A. and TEUBER, K.B.: Remote Sensing of Coniferous Forest Leaf Area, Ecology, 67(1), p.273-276, February, 1986.
- 66) SADER, S.A., WAIDE, W.T.L. and JOYCE, A.T.: Tropical Forest Biomass and Successional Age Class Relationships to a Vegetation Index Derived from Landsat TM Data, Remote Sens. Environ., 28, p.143-156, 1989.
- 67) SAGAN, C., TOON, O.B. and POLLACK, J.B.: Anthropogenic Albedo Change and the Earth's Climate, Science, 206(4425), p.1363-1368, 1979.

- 68) 桜井英博・柴岡弘郎・清水 碩：植物生理学入門，培風館，pp.293，1989.
- 69) SANGER, J.E.: Quantitative Investigations of Leaf Pigments from their Inception in Buds through Autumn Coloration to Decomposition in Falling Leaves, *Ecology*, 50(6), p.1075-1089, 1971.
- 70) 佐竹義輔・原 寛・亙理俊次・富成忠夫：日本の野生植物 木本 I，平凡社，1989.
- 71) 佐藤一紘：リモートセンシングのモンクローブ林への沖縄での適用，日本リモートセンシング学会誌，10(3)，p.55-61，1990.
- 72) 妹尾俊夫：リモートセンシングによる樹木の活力評価のための基礎的研究 (I)，京都府立大学演習林報告，21，p.1-13，1977.
- 73) 妹尾俊夫：リモートセンシングによる樹木の活力評価のための基礎的研究 (II) - 分光放射測定による活力判読と野外測定への適用について -，京都府立大学演習林報告，22，p.25-35，1978.
- 74) 妹尾俊夫・岩浪英二・大手桂二・小橋澄治：ランドサット M S S データによる山腹植栽工林地の植生回復診断，京都府立大学学術報告・農学，35，p.110-123，1983.
- 75) 妹尾俊夫・岩浪英二・田中總太郎・杉村俊郎：比演算を施した 2 季節のランドサット M S S データによる広域山地の林相区分，日本リモートセンシング学会誌，5(3)，p.55-65，1984.
- 76) SENOO, T. and HONJYO, T.: Assessment of Tree Stress by Airborne Multi-Spectral Scanning Data, *Jpn. For. Soc.*, 70(2), p.45-56, 1988.
- 77) 妹尾俊夫：森林植生のモニタリングによる環境評価，日本リモートセンシング学会誌，10(3)，p.119-129，1990.
- 78) SENOO, T., KOBAYASHI, F., TANAKA, S. and SUGIMURA, T.: Improvement of Forest Type Classification by SPOT HRV with 20m Mesh DTM, *Int. J. Remote Sens.*, 11(6), p.1011-1022, 1990.
- 79) 資源観測解析センター：宇宙からの地球観測システム，pp.329，1990.

- 80) 資源観測解析センター：画像データの処理と解析（1），pp.169，1990.
- 81) 資源観測解析センター：画像データの処理と解析（2），pp.294，1990.
- 82) SHIRAKI, M., YOSHIMURA, M. and IRIYAMA, K.: Rapid and Easy Separation of Chlorophylls, Their Derivatives, and Plant Yellow Pigments by Thin-Layer Chromatography, Chemistry Letters, 73, p.103-104, 1978.
- 83) SHUKLA, J. and MINTZ, Y.: Influence of Land-Surface Evapotranspiration on the Earth's Climate, Science, 215, p.1498-1501, 1982.
- 84) SPANNER, M.A., PIECCE, L.L., RUNNING, S.W. and PETERSON, D.L.: The Seasonality of AVHRR Data of Temperate Coniferous Forests, Relationship with Leaf Area Index, Remote Sens. Environ., 33, p.97-112, 1990.
- 85) STEVEN, M.D., BISCOE, P.V., and JAGGARD, K.W.: Estimating Sugar Beet Productivity from Reflection in the Red and Infrared Spectral Bands, Int. J. Remote Sensing, 4(2), p.325-342, 1983.
- 86) 武居 有恒：砂防学，山海堂，pp.243，1990.
- 87) 武居 有恒編：砂防工学，文永堂出版，pp.306，1993.
- 88) TANAKA, S., KIMURA, M. and SUGA, Y.: Preparation of a 1:25000 Landsat Map for Assessment of Burnt Area on Etajima Island, Int. J. Remote Sens., 4(1), p.17-31, 1983.
- 89) THOMAS, J.R. and GAUSMAN, H.W.: Leaf Reflectance vs. Leaf Chlorophyll and Carotenoid Concentrations for Eight Crops, Agron. J., 69, p.799-802, 1977.
- 90) TUCKER, C.J.: Spectral Estimation of Grass Canopy Variables, Remote Sens. Environ. 6, p.11-26, 1977.
- 91) TUCKER, C.J., and GARRATT, M.W.: Leaf Optical System Modeled as a Stochastic Process, Appl.Opt., 16(3) p.635-642, March, 1977.
- 92) TUCKER, C.J.: A Comparison of Satellite Sensor Bands For Vegeta-

- tion Monitoring, Photogram. Engr. Remote Sens., 44, p.1369-1380, 1978.
- 93) TUCKER, C.J.: Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, Remote Sens. Environ., 8, p.127-150, 1979.
- 94) TUCKER, C.J.: Remote Sensing of Leaf Water Contents in the Near Infrared, Remote Sens. Environ., 10, p.23-32, 1980.
- 95) 宇宙開発事業団 地球観測センター：地球観測データ利用ハンドブック ランドサット編・改訂版，（財）リモートセンシング技術センター，1986.
- 96) WESTMAN, W.E. and PRICE, C.V.: Spectral Changes in Conifers Subjected to Air Pollution and Water Stress: Experimental Studies, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 26, p.11-21, 1988.
- 97) WHITE, K.: Image Processing of Thematic Mapper Data for Discriminating Piedmont Surficial Materials in the Tunisian Southern Atlas, Int. J. Remote Sens., 14(5), p.961-977, 1993.
- 98) WOLLEY, J.T. : Reflectance and Transmittance of Light by Leaves, Plant Physiol., 47, p.656-662, 1971.
- 99) 吉村晴佳・大手桂二・妹尾俊夫・寺岡猛・久保健：衛星データによる植生情報の砂防計画への適用について，平成2年度砂防学会研究発表会概要集，p.78-81，1990.
- 100) 吉村晴佳・小橋澄治・大手桂二・妹尾俊夫：樹葉の分光反射特性変化およびその色彩の数値的解析についての研究，日本リモートセンシング学会誌，11(2)，5-17，1991.
- 101) 吉村晴佳・田中總太郎・小橋澄治・大手桂二・妹尾俊夫・国友 優：単葉および重なり合った葉の近赤外域反射の季節的变化，日本リモートセンシング学会誌，11(4)，p.5-19，1991.
- 102) 吉村晴佳：カナダの森林と日本，岡山女子短期大学紀要，16，p.109-117，1993.

103)吉村晴佳・石田雅士・小橋澄治・大手桂二：樹葉の季節的可視域分光特性変化におよぼす植物色素の影響,日本緑化工学会誌, 20(2), p.99-110, 1994.