

リモートセンシングによる流域の土壌及び植生情報の 収集に関する基礎的研究

Basic Studies on the Extraction of Soil and Vegetation Informations
of a Basin Using Remote sensing

瀬口昌洋*・渡辺 潔**・林 稔人***

By Masahiro SEGUCHI, Kiyoshi WATANABE and Toshihito HAYASHI

This paper discusses the characteristics of soil reflectance under many different soil moisture ratios and vegetation cover rates, and the influence of vegetation vitality on its reflectance. A very close correlation between soil reflectance at a wavelength of 650nm and that at a wavelength of 800nm is revealed. The vegetation cover rate is formulated in terms of soil and vegetation reflectance at wavelengths of 650nm and 800 nm. The vegetation reflectance is strongly influenced by its vitality, which is related to the moisture content and chlorophyll-a concentration in the vegetation.

Keywords : remote sensing, soil reflectance, soil moisture ratio, vegetation cover rate, vegetation vitality

1. はじめに

流域の表層土壌特性や土壌水分量、さらにはその地表面を被覆する植生の種類や分布状況などは、流域内の土壌水分移動や蒸発散、さらにはここでの流出現象に非常に大きな影響を及ぼしている。したがって、これらに関するデータを収集することは、流出現象を明らかにしたり、また流出予測を行ううえで不可欠なものといえる。しかし、これらに関する定量的データを現地調査などによって収集することは、非常に労力と時間を費やす。

この研究は、広域的調査において大きな威力を発揮するリモートセンシングを活用し、流域における土壌や植生に関する情報を収集するためのアルゴリズムの確立を目指すものである。このような観点から、特に今回は土壌特性、土壌水分量及び土壌面の植生被覆率などの土壌反射率への影響、さらには植生の活性とその反射特性との関係などについて、実験的に検討、考察したものである。

2. 実験の概要

2.1 反射率の測定方法

地球観測衛星などのように高い高度を飛行するプラットフォームに搭載されたセンサーによって感知され

* 正会員 農博 佐賀大学助教授 農学部浅海干潟総合実験施設
(〒840 佐賀市本庄町1番地)

** 農博 佐賀大学教授 農学部生物生産学科

*** 佐賀大学大学院 農学研究科

る地表面からの電磁波エネルギーは、一般に(1)式によって表される。

$$I_s(\lambda) = \tau(\lambda)R(\lambda)I_o(\lambda) + P(\lambda) \quad (1)$$

ここに、 $I_s(\lambda)$: センサー入射電磁波エ

エネルギー、 λ :波長、 $\tau(\lambda)$:大気透過率、 $R(\lambda)$:地表面の反射率、 $I_0(\lambda)$:地表面入射電磁波エネルギー、 $P(\lambda)$:パリアジアンズである。(1)式から明かなように、センサーによって感知される電磁波エネルギーは、地表面上の物体の種類と状態によって左右される反射率に大きく依存している。したがって、このような画像データから土壌情報を正しく抽出するためには、まず種々の条件下での土壌の反射特性を把握することが重要となる。ここでは、図-1に示される波長別光エネルギー分析装置を用いて、土壌などの反射率を測定した。図示されるように反射率は、波長別光エネルギー分析装置と光ファイバーケーブルで接続されたテレスコープの直下60cmの位置に試料あるいは標準白色板をセットし、それらの反射電磁波エネルギーを測定して(2)式から求められた。

$$R(\lambda) = I_a(\lambda)/I_r(\lambda) \quad (2)$$

ここに、 $I_a(\lambda)$ 、 $I_r(\lambda)$:それぞれ試料及び標準白色板の反射電磁波エネルギーである。

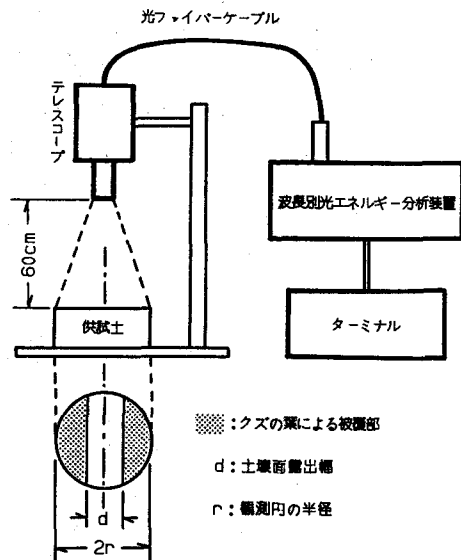


図-1 測定装置の概念

表-1 供試土の特性

土の種類	シルト	粘土	砂	比重	灼熱減量比	土壌図での名称
砂	1.26	1.05	97.69	2.573	1.8 %	褐色低地土壌
マサ土	3.97	8.70	87.33	2.506	1.6 %	黄色土壌
圃場土	19.18	42.45	38.37	2.663	10.2 %	灰色低地土壌
赤色土	24.09	71.07	4.84	2.808	10.0 %	暗赤色土壌
有明粘土	45.56	51.20	3.24	2.536	9.4 %	グライ土壌
クロボク土	2.48	82.26	15.26	2.461	29.9 %	黒ボク土壌

表-2 供試土の露出幅と被覆率

露出幅 d(cm)	被覆率 (%)
1.0	85.88
2.0	71.94
3.0	58.36
4.0	45.33
5.0	33.09
6.0	21.91

2) 供試土と測定条件

今回の実験で使用された土壌は、佐賀県内の5カ所と熊本県内の1カ所で採取されたものである。これらの土壌の特性を一覧すると、表-1となる。この実験では、まず土壌水分量と土壌反射特性との関係を明らかにするために各土壌に対して含水比を5~9段階にわたって変化させ、その反射率を測定した。さらに土壌の植生被覆率と土壌反射特性との関係についても明らかにするために、図-1のように供試土をクズの葉で被覆し、各土壌に対してその反射率を測定した。なお、供試土の露出幅と植生被覆率との関係は、表-2のようになる。最後に、植生の活性とその反射特性との関係を把握するために、採取直後のクズの緑葉と採取して1~2時間経過し、シオレた緑葉、さらには黄葉と枯葉の反射率を測定した。なお、これらの土壌反射率の測定時における地表での太陽入射エネルギー分布曲線は、図

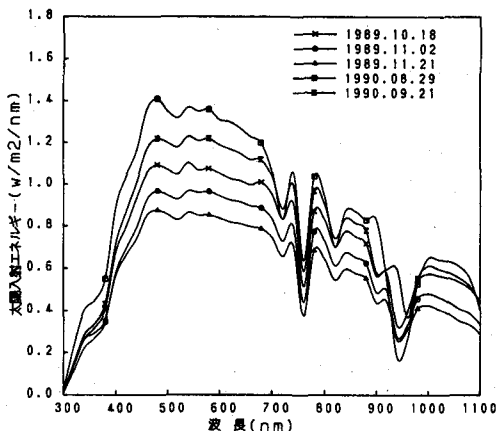


図-2 測定時における太陽入射エネルギー分布曲線

-2に示される。

3. 実験結果及び検討、考察

3.1 土壌含水比と反射率との関係

図-3～6は、表-1に示された土壌のうちの一部について土壌含水比とその反射率曲線との関係を図示したものである。図示されるように、これらの土壌の反射率は、土壌含水比の増加に伴って全波長域（可視波長域から近赤外波長域）にわたり低下している。しかし、これらの反射率曲線は、含水比が変化しても各土壌ごとに固有の形状を保持している。例えば、圃場土においては、全波長域にわたって直線的に増加、分布している。また、赤色土では、波長720nm付近で反射率が最大となり、凸状の分布となっている。さらに有明粘土については、波長域300nm～700nmの範囲では、波長の増加に伴って反射率も比較的大きな割合で増大している。しかし、波長が700nm以上では、その増加の割合は低減している。一方、クロボク土については、波長域300～700nmの範囲では、反射率は比較的低く増加しているが、700nm付近からその増加の割合は大きくなり、凹状の分布となっている。このように各土壌の反射率曲線は、それぞれの土壌固有の形状を成しており、各土壌の物理、化学的組成を総合的に反映したものと考えられる。また、波長700nm付近を境に、すなわち可視波長域と近赤外波長域とでは、圃場土を除いた各土壌の反射特性がかなり大きく変化する傾向が伺われる。

そこで、各土壌について可視波長650nmの反射率 R_{650} を横軸に、また近赤外波長800nmの反射率 I_{R800} を縦軸にプロットすると、図-7となる。図示されるように、土壌特性の差異や含水比の大小に係わらず、両者の間には非常に高い相関性（相関係数 $r=0.99$ ）が認められる。そして、これらの間には(3)式の関係が成り立つ。

$$I_{R800} = 1.15R_{650} + 2.12 \quad (3)$$

(3)式は一般にソイルラインと呼ばれ、この直線上での位置は、土壌の組成や含水量と密接な関係にあるといわれている¹⁾。したがって、表-1に示された各土壌の灼熱減量比 L_s 及びソイルラインと縦軸との交点から風乾状態の各土壌に対するソイルライン上での位置までの長さ $D_s (= \sqrt{R_{650}^2 + (I_{R800} - 2.12)^2})$ とを図示すると、図-8となる。図示されるように、両者の関係は片対数紙上においてはほぼ直線となり、(4)式で表される

$$D_s = 55.95 \exp(-0.0595L_s) \quad (4)$$

このことから明かなように、土壌の灼熱減量比、すなわち

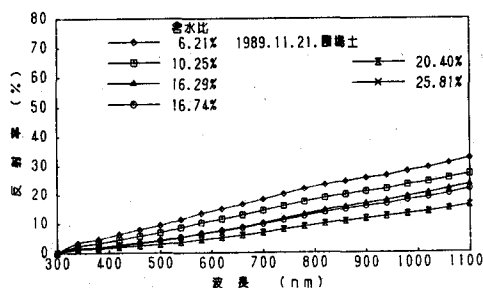


図-3 土壌（圃場土）の含水比と反射率曲線との関係

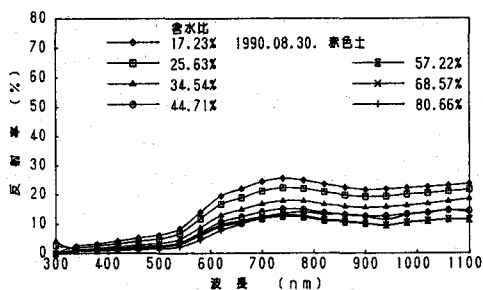


図-4 土壌（赤色土）の含水比と反射率曲線との関係

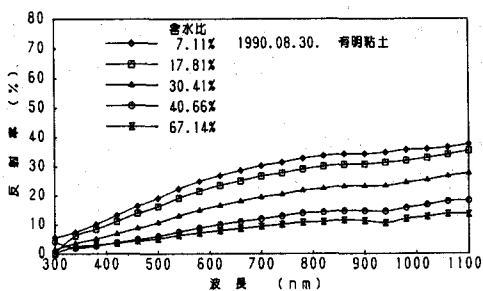


図-5 土壌（有明粘土）の含水比と反射率曲線との関係

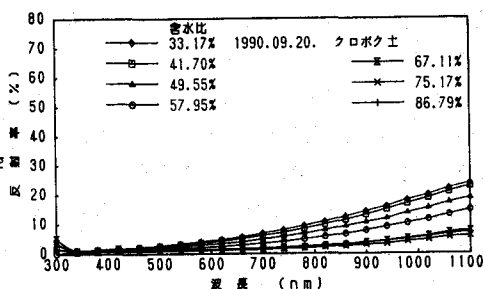


図-6 土壌（クロボク土）の含水比と反射率曲線との関係

有機物含有量はソイルライン上での位置を大きく左右しているといえる。また、同一土壌について見た場合、土壌含水比が大きくなるほどソイルライン上での位置は下方に移動している。

3.2 土壌の植生被覆率と反射率との関係

図-9~12は、各土壌の風乾状態で植生被覆率を表-2のように変化させて測定した土壌反射率曲線の一部を示したものである。図示されるように、植生被覆率が0%から100%へと増加するに伴い、その反射率曲線は風乾土壌の反射率曲線から緑葉のそれへと漸変している。特に植生被覆率の変化に伴い、土壌反射率曲線は風乾土壌の反射率曲線と緑葉のそれとの交点をヒンジとして変化している。しかし、その変化の仕方は、両者の反射率曲線の相対的位置関係によって大きく異なっている。例えば、圃場土のように風乾土壌の反射率曲線が全般的に高い場合には、被覆土壌の反射率曲線は可視波長域で低下し、逆に近赤外波長域で増加している。また、クロボク土のように風乾土壌の反射率曲線が緑葉のそれより全般的に低い場合には、反射率曲線は全波長域で増加している。しかし、近赤外波長域での変化は、可視域波長域でのそれに比べて非常に大きい。

このような植生被覆率の変化に伴う土壌反射率曲線の性状を考慮し、図-7 の場合と同様に植生で被覆された各土壌に対して反射率 R_{650} を横軸に、また反射率 IR_{800} を縦軸にプロットすると、図-13 となる。なお、この図には、図-7 の結果も併せて示されている。図示されるように、風乾土壌の植生被覆率を0%から100%へと増大するに伴い、土壌反射率はソイルラインから次第に離れて一点Pに集中する傾向が見られる。このような結果は、すでに福原らの研究においも明らかにされている¹⁾。さらに、これらの土壌のうち、特に有明粘土について、3種類の含水比のもとで植生被覆率を変え、反射率 R_{650} と IR_{800} との関係をプロットすると、図-14となる。図示されるように、含水比を変えた場合についても図-13と同様な傾向が見られる。そこで、赤色土、有明粘土及びクロボク土について、ソイルラインから一点Pまでの長さ l とソイルラインから各植生被覆率に対応する座標点までの長さ l' との比 l'/l を求め、それと植生被覆率との関係を図示すると、図-15となる。図示されるように、両者の間にはほぼ比例関係が認められる。したがって、この関連性と(3)式を用いて植生被覆率 V_x を定式化すると、(5)式となる。

$$V_x = \frac{(IR_x - 1.15R_x) - 2.12}{(IR_p - 1.15R_p) - 2.12} \quad (5)$$

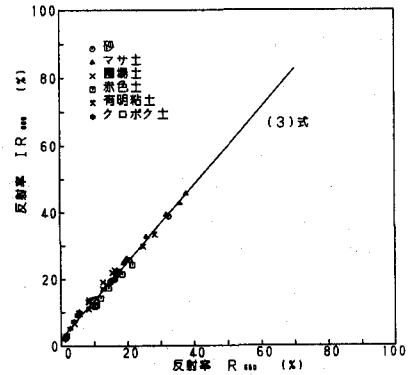


図-7 土壌反射率 R_{650} と IR_{800} との関係

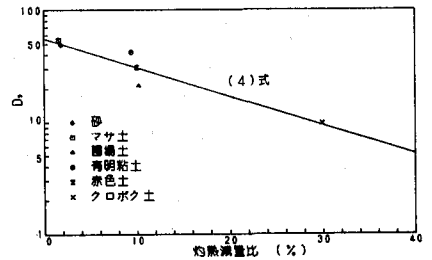


図-8 風乾状態の各土壌に対するソイルラインの長さ D_s と灼熱減量比との関係

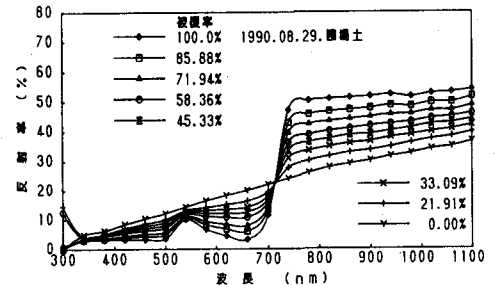


図-9 土壌の植生被覆率と反射率曲線との関係

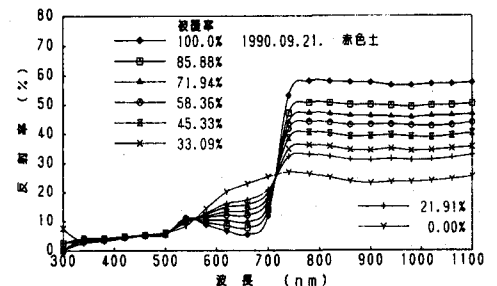


図-10 土壌の植生被覆率と反射率曲線との関係

ここに、 R_x, IR_x : 植生被覆率 V_x のもとでの土壌反射率 R_{650} と IR_{800} 、 R_p, IR_p : 一点P(植生)の反射率 R_{650} と IR_{800} である。したがって、(5)式を用いて、逆に $R_{650}-IR_{800}$ 座標での座標点(R_x, IR_x)に対応する植生被覆率 V_x の推定が可能となる。

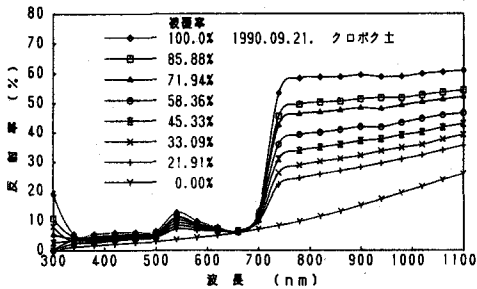


図-12 土壌の植生被覆率と反射率曲線との関係

3.3 植生の活性とその反射率との関係

図-16は、採取直後のクズの緑葉と採取後1~2時間経過してシオレた緑葉の反射率曲線を示したものである。また、図-17は、クズの緑葉、黄葉及び枯葉の反射率曲線を比較したものである。さらに、表-3は、図-16に示した3状態の緑葉の含水比とクロロフィル-aの含有量を、また表-4は、図-17に示した3種類の葉のクロロフィル-a濃度を一覧したものである。これらの結果によって示されるように、葉の水分量が減少し、そのシオレが増大するにつれて緑葉の近赤外波長域での反射率曲線の勾配は、次第に大きくなっている。しかし、可視波長域では、反射率の変化はほとんど見られない。これは、表-3に示されるように含水比の大きな変化にも係わらず可視波長域に大きな吸収帯を有するクロロフィル-a濃度が、3状態の緑葉においてほとんど変化していないことによるものと考えられる。一方、緑葉、黄葉及び枯葉の反射率曲線においては、かなり大きな差異が見られる。すなわち、緑葉から黄葉に変化した場合、近赤外波長域ではほぼ一樣な反射率の低下が見られる。しかし、500nm~600nmの波長域では、逆に反射率が増加している。これは、表-4からも明らかなように緑葉から黄葉へと変化するにつれてクロロフィル類が分解、消滅し、それとは異なった吸収スペクトルを持つ黄色カロチノイドなどが顕在化してくるためによるものと考えられる²⁾。さらに、枯葉の場合には、可視波長域から近赤外波長域に進むにつれて反射率は次第に増加し、先に示した土壌のそれに類似している。これらのことから明らかなように、植生の反射率はその活性によって大きく左右される。しかし、そ

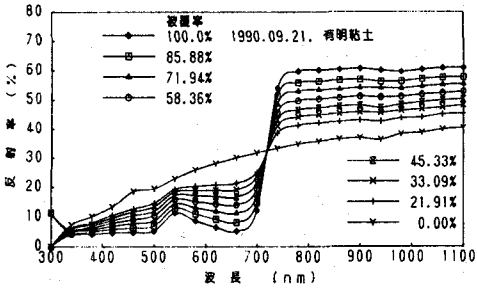


図-11 土壌の植生被覆率と反射率曲線との関係

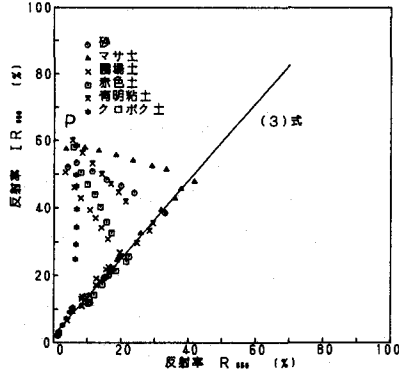


図-13 植生被覆率と土壌反射率 R_{650} 及び IR_{800} との関係

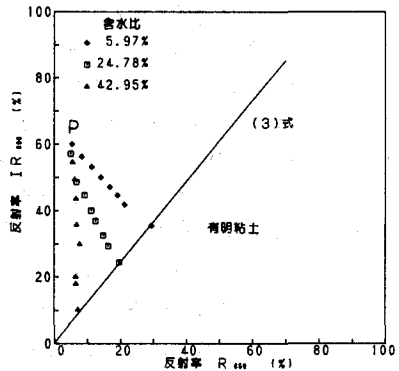


図-14 土壌の含水比及び植生被覆率と土壌反射率 R_{650} 及び IR_{800} との関係

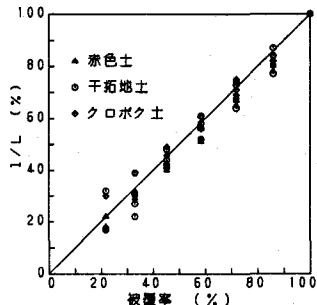


図-15 土壌の植生被覆率と1/Lとの関係

の反射率への影響の仕方は、植生の活性状態、すなわち水分の減少に伴い、シオレで活性を失った場合と季節の推移に伴い緑葉、黄葉さらには枯葉へと変化しながら活性を失っていく場合とでは大きく異なっている。したがって、現在、衛星リモートセンシングにおいて植生の活性状態などを示す指標として広く活用されている正規化植生指標³⁾は、すべての活性状態を示す指標として必ずしも妥当なものとはいえない。そこで、正規化植生指標に対応する(6)式の指標 VI_1 とシオレによる活性の変化をよりの確に示すと考えられる(7)式の指標 VI_2 との比較を示すと、表-3となる。

$$VI_1 = \frac{IR_{p800} - R_{p650}}{IR_{p800} + R_{p650}} \quad (6)$$

$$VI_2 = \frac{IR_{p1100} - IR_{p800}}{IR_{p1100}} \quad (7)$$

ここに、 R_{p650} :可視波長650nmでの植生の反射率、 IR_{p800} 、 IR_{p1100} :近赤外波長800nm、1100nmでの植生の反射率である。表-3に示されるように、シオレによる植生の活性変化を評価する際には、 VI_1 よりもその変化をよりの確に表していると考えられる VI_2 の方が妥当な指標といえる。

4. まとめ

ここで得られた主な知見を要約すると、次のようになる。

- 1) 土壌の種類やその含水比の大小により、土壌の反射率曲線は大きく変化する。しかし、可視波長650nmの反射率 R_{650} と近赤外波長800nmの反射率 IR_{800} とは、 $R_{650}-IR_{800}$ 座標においてソイルラインと呼ばれる一本の直線を形成し、(3)式で表される。そして、この直線は、土壌特性や水分量に左右されない一定のもと考えられる。
- 2) ソイルライン上での位置は、土壌の組成と含水比に大きく依存している。特に風乾状態の各土壌に対するソイルラインの長さは、灼熱減量比と密接な関係にあり、この関係は(4)式で表される。
- 3) 土壌の植生被覆率は、その反射率曲線に大きな影響を及ぼす。特に植生被覆率が0%から100%へと増加するに伴い、可視波長域及び近赤外波長域の反射率は一点をヒンジとして、それぞれ緑葉のそれらに漸近する。また、 $R_{650}-IR_{800}$ 座標における土壌の反射率の座標点は、植生被覆率の増加に伴ってソイルラインから離れ、一点に集中する傾向が見られる。さらに、この関係より、土壌の植生被覆率は(5)式で表される。
- 4) 植生の活性は、その反射特性に大きな影響を与える。しかし、その影響は植生の活性状態の差異、すなわち植物中の水分状態による活性の変化と季節の推移によるその変化とでは大きく異なる。

参考文献

1) 福原道一・斉藤元也: リモートセンシング技術応用-土壌調査-, 農業土木学会誌, 54, 59-64(1986)
 2) 増田芳雄: 植物生理学, オーム社, 東京, p. 52-56(1988)
 3) 李 慶雲: 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, 4-12(1990)

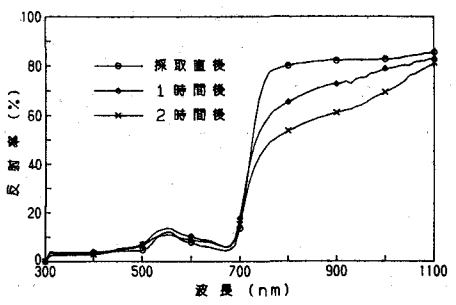


図-16 緑葉採取後の経過時間と反射率曲線

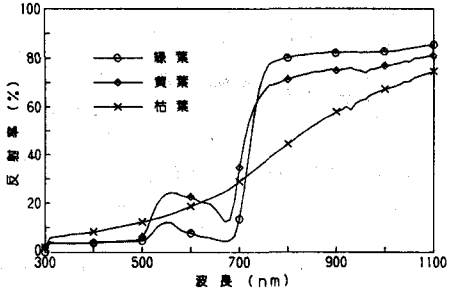


図-17 緑葉、黄葉、枯葉の反射率曲線

表-3 緑葉採取後のクロロフィル-a濃度、含水比及び VI_1 、 VI_2 の変化

緑葉採取後の経過時間	クロロフィル-a濃度 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	含水比 (%)	VI_1	VI_2
0 時間	25.27	38.2	0.87	0.06
1 時間	22.74	4.2	0.79	0.21
2 時間	23.40	2.7	0.76	0.34

表-4 緑葉、黄葉及び枯葉のクロロフィル-a濃度と VI_1

葉の状態	クロロフィル-a濃度 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	VI_1
緑葉	25.27	0.87
黄葉	5.81	0.60
枯葉	2.00	0.32