



Title	葉群の分光反射と分光植生指数
Author(s)	中路, 達郎
Description	4章 分光測定 2. 分光測定法 g
Relation	光合成研究法. 北海道大学低温科学研究所, 日本光合成研究会共編
Citation	低温科学, 67, 497-506
Issue Date	2009-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/39184
Type	departmental bulletin paper
File Information	67-069.pdf



2. 分光測定法

g. 葉群の分光反射と分光植生指数

中路 達郎¹⁾

本節では、植物葉を対象とした分光特性研究の基礎的な知見と、野外における基本的な計測手法について解説し、葉内色素や光合成活性と関連した研究で用いられる評価指標（分光植生指標）について紹介する。

Foliar spectral reflectance and spectral vegetation index

Tatsuro Nakaji

This section explains the fundamental knowledge of the spectrum characteristic research for an ecophysiological study of plant leaf, and introduces the basic measurement technique in the field and general indices (spectral vegetation index) related to the foliar pigment and photosynthesis.

2.g.1 はじめに

すべての物質は、電磁波を反射、透過、吸収する性質を持ち、その性質は対象の物質に固有の波長特性を示すことから、分光特性と呼ばれる^{1,2)} (図1)。電磁波は波長の短いものから、 γ 線、X線、紫外線、可視光線、赤外線、電波と分類される。植物の分光計測研究では、おもに可視(400~700 nm)、近赤外(700~1100 nm)、短波長赤外(1100~2500 nm)の波長帯が扱われ¹⁾、原子レベルでみると、これらの波長帯における分光特性は、原子の外殻電子の励起や分子振動、格子振動などの内部状態を反映

している (図1)。

葉のスケールにまで拡大して、この分光特性を考えてみると、葉内にクロロフィルを多く含む緑葉で例えると理解しやすい。一般に緑葉では可視光のうち青(440 nm 周辺)や赤(680 nm 周辺)の波長はクロロフィルで吸収されて光化学系で励起エネルギーとして利用される。このため、太陽によって葉に照射される光のうち、これらの青と赤の波長の光はほとんど反射あるいは透過しない。その一方で、緑色の波長(550 nm 周辺)の光はほとんどクロロフィルに吸収されないため、この波長の光の大部分は反射や透過によって外部に出ていく。私たちが

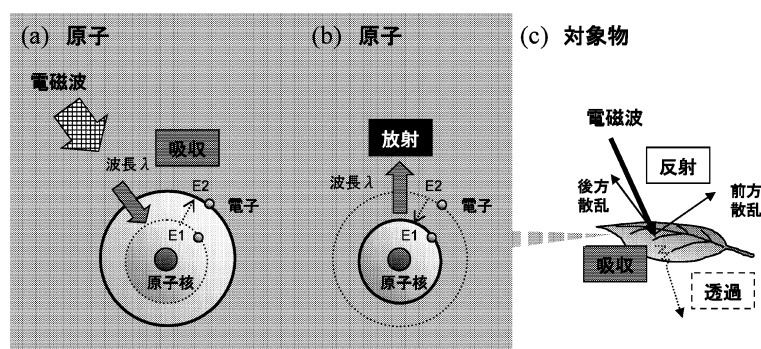


図1：分光特性の概念図。原子レベルでは、(a)電磁波が物質中の原子に当たると、一部の特定波長 λ の電磁波は吸収され内部状態の変化を起こす。他の波長の電磁波は作用せず、外部に出ていく。内部状態の変化は物質や波長に固有であり、可視～赤外波長帯では、励起や分子振動、格子振動などが起きる。励起の場合、 $E_2 - E_1 = hc/\lambda$ (h プランク定数、 c 光速)で決定されるエネルギーが吸収されて、外殻電子軌道があがる。(b)励起とは逆に電子軌道が下がる場合は電磁波が放射される。(c)観測対象(葉)の境界面でみた場合、吸収されない電磁波は外部に散乱する。表面で起きる反射のうち、電磁波の射出方向に散乱する成分を後方散乱(backward scattering)、入射光の進行方向に散乱するものを前方散乱(forward scattering)という。個葉の場合、葉内で吸収・散乱を繰り返してして裏側から抜けた電磁波が透過成分として観測される。

1) 独立行政法人国立環境研究所
(現職：国立大学法人北海道大学)

¹⁾ 波長の呼称は研究領域によっても若干異なることがある。分析化学の分野では、近赤外と短波長赤外の双方を含めて近赤外と呼ぶ場合もある。

葉の表面を眺めた時や森の樹冠を見上げた時にそれらを緑色と認識できるのは、緑色の波長が多くを占めている可視域の反射光・透過光を知覚しているためである。

植物の葉を対象とした場合、色素をはじめとする葉内物質の吸収による反射光や透過光の減衰過程は Lambert-Beer の法則に従っており、多くの事象は物理的に解釈することが可能である。例えば、私たちは“緑が濃い葉”=“クロロフィル濃度が濃い”と経験的に知っているが、その濃さの客観的な評価までは肉眼では行うことは不可能である。この点、分光特性、ここでももに扱う分光反射の計測では、葉における波長ごとの反射強度を正確な数値情報として取得し、波長ごとの強度や波長間のバランスを解析することで、色素をはじめとする葉の生理情報を非破壊かつ客観的に評価している。

このような非破壊計測の手法は、分析化学や植物生理学における比較的細かいスケールの対象から、航空機や人工衛星のセンサーを活用した地表面のリモートセンシングに至るまで、非常に多くの分野、さまざまな空間スケールで活用されている。本節では、植物の生理研究に関連した分光特性の研究事例を紹介し、次に、分光反射を中心に、地上における計測手法について概説する。そして最後に、分光反射情報をもとに算出される評価指標（分光植生指標）についていくつか実例を交えて紹介する。

2.g.2 葉の分光特性

図 2 a にポプラの緑葉（個葉）の可視～短波長赤外における分光特性を示す。波長ごとの反射や吸収、透過はそれぞれ分光反射率、分光吸収率および分光透過率と呼ばれるが、グラフに示したような波長に対する反射や吸収、透過の応答パターンは、それぞれ、反射スペクトル、吸収スペクトル、透過スペクトルとも呼ばれる。このようなスペクトルの計測や、それに対する植物種や環境要因の影響を調査した歴史は古く、玖村・石井³⁾は 1800 年代後半からの数多くの報告を取りまとめている³⁾。それらを参考に従来の報告を見渡すと、多くの緑葉では、図 2 a に示したようなスペクトルを示すことが知られている。すなわち、反射率を例にとると、可視域では 500 nm あたりまではカロテノイドやクロロフィルによる吸収のために 5 % 程度の低い反射率でほぼ安定し、550 nm 近辺を中心に 15 % 程度の反射のピークを示す（グリーンピークとも呼ばれる）。このピークは葉内色素の波長選択性に依存しているため、白斑を持つ植物やアルビノ種の葉、紅葉が進んだ葉では観察されない^{3,4,5)}。反射率は、その後、670

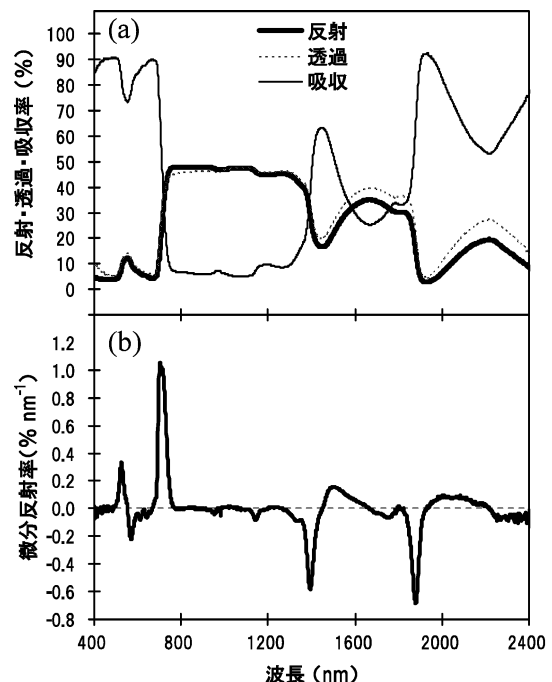


図 2：(a) 緑葉の反射・透過・吸収のスペクトルと (b) 微分分光反射率。ポプラの個葉の表側に人工光（ハロゲン光）を照射し、センサーを近接させて分光特性を計測した。

nm 近辺を境に 780 nm 近辺まで急勾配で増大し、その後 1100 nm あたりまでおよそ 50 % で安定する（図 2 a）。短波長赤外においても反射率は比較的高い値を維持するが、水の吸収によって 1450 nm, 1940 nm 近辺で反射率は大きく低下する。なお、図 2 a ではあまり顕著ではないが、970 nm 近辺にも水の吸収帯が存在する。リモートセンシングの分野では、これらの吸収帯近辺の反射率を用いて地表面や植生の水分量の評価手法が提案されている^{6,7)}。一方、1600～2300 nm の波長帯には、セルロースやリグニンなどの構造的炭水化物やデンプンや糖、タンパク質といった同化産物・生体物質の吸収帯も存在している。食品や土壌などを扱った分析化学分野では、対象物の短波長赤外の反射スペクトルを極めて詳細な波長分解能（ $<10^{-1}$ nm）で計測し、微分処理や多変量解析手法を活用することで、動植物の組織や土壌などに含まれる炭素や窒素化合物などの化学成分の推定を行っている^{8,9,10)}。野外において植物の計測に利用される短波長赤外の分光反射計測機材の多くは、室内分析で利用されるフーリエ変換赤外分光光度計などよりもその分解能は格段に粗い。しかし、航空機搭載のマルチバンドセンサー（波長分解能～数十 nm）を使ったりリモートセンシングにおいても、2000～2200 nm における反射率のひずみの程度から地表面の植物残さに関連したセルロース量の分布を推定する手法が提案されている¹¹⁾。現在も分光観測装

置の波長分解能が進歩し続けていることもあり、今後、野外の植物葉の観測研究においても、葉内成分の定量などに短波長赤外の反射情報が注目される日が来るかもしれない。

ここで、波長に対する分光反射率の変動を解析する際の一技法である微分処理についても少し触れておく。図2bに、ポプラ緑葉の一次微分反射スペクトルを示す。これは、波長方向に連続して計測された分光反射率をもとに、ある中心波長の前後の波長の反射率の値を用いてその増減を算出したものである。このような微分スペクトルは可視～近赤外を中心に研究されており、反射率の変動が明確な色素吸収帯を中心にした報告は非常に多い。可視～近赤外に着目すると、グリーンピークと赤色～近赤外にかけたクロロフィル吸収帯に比較的大きなピークを得ることができる。特に710 nm 近辺のピークはレッドエッジと呼ばれ、そのピーク高さはクロロフィル濃度と高い相関にあり、ピーク波長は色素のフェノロジーと関連して変動することも知られている^{5,12,13}。気温などの環境要因を変化させながら、人工光チャンバー内でカエデの葉群の分光反射計測を行った Zalco-Tejada et al.¹⁴ は、レッドエッジ周辺 690–710 nm の間にクロロフィル蛍光に関連する2つの微分ピークが検出されることに着目し、二つのピークの明瞭さが定常状態のクロロフィル蛍光特性の温度ストレス応答と関連があることを報告している。また、野外でも、航空機搭載型の分光画像情報から得られる微分反射スペクトルをもとにした指標でクロロフィル蛍光の強度 (Ft) や蛍光ベースの量子収率 ($\Delta F/Fm'$) の評価が行われており¹⁵、個体スケールから群落スケールにおいても、微分反射スペクトル情報の解析が光合成研究にとって有効な情報となりつつある。

次に、葉のタイプや季節ごとの分光特性の応答についても簡単に紹介する。約80種類の植物で可視～近赤外の植物の分光反射、吸収、透過といった分光特性を調査した例では、植物種間の差は約10%程度と報告されている^{3,16}。他方、熱帯の25種¹⁷、温帯26種¹⁸の植物の葉について陽葉と陰葉の分光特性を比較した研究では、植物種による多少の相違は認められるものの、陰葉と陽葉では明瞭な特性の違いが認められないことが報告されている。Knapp & Carter¹⁸ は、考察の中で、この一因として、葉の成長パターン、形態や寿命などの違いが複雑に分光特性に影響し、明確な傾向を示さなかった可能性がある」と述べている。

葉齢や葉色、葉組織の発達、毛茸やワックスの有無、水分状態、葉の表裏など、非常に多くの生物的要因が可視～近赤外の反射スペクトルに影響することはよく知

られている^{3,5,19,20,21,22}。たとえば、葉の老化に伴うクロロフィルの分解はグリーンピークの右側の反射率を増大させ、カロテノイドの分解は左側の反射率を増大させる^{3,5,22} (図3)。また、老化によって組織が崩壊すると、表面の粗度や内部組織の空隙率、水分の状態が大きく変わり、近赤外における反射・散乱も強く影響を受ける。また、毛茸やワックスは葉の表面の反射率を全体的に高めることは古くから知られており、表面を実験的に洗浄したり毛を刺ると反射率は低下する^{3,20,21}。多くの観測研究では葉の処理を行うわけにはいけないので、色素評価のための指標の開発研究では、このような表面反射の影響を軽減するために青(445 nm)や赤の波長帯の反射率を基準にした反射率の補正を行っている⁵。また、多くの広葉では、表側と裏側で柵状組織や海面状組織の配置が異なるため、光の内部散乱過程が異なり、一般に裏面の反射率のほうが表側よりも高いことも良く知られており^{3,19}、群落内部における光の吸収、散乱を解釈する上でも貴重な知見を与えている。

このように、葉の分光特性には葉の生理生態的な特徴が反映するため、逆に、分光情報を用いることで、植物の状態を非破壊かつ迅速に計測、評価することが期待されている。個葉だけでなく、葉群(群落表面)においても葉自体がもつ反射や吸収の特徴は大きく変わらないので、観測手法は応用が可能と思われる。ただし、野外の群落表面の分光情報を扱うときには、植物側の生物要因だけでなく、周囲の光条件や枝や幹、土壌からの反射と

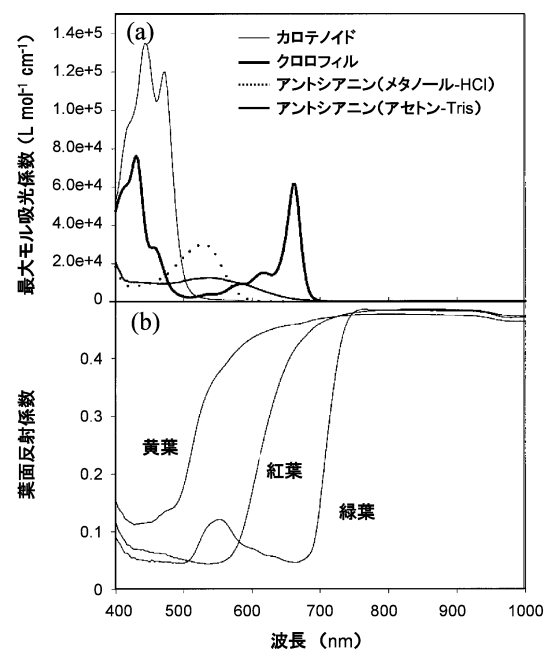


図3：(a) 葉内色素の吸光特性と、(b) 季節の異なるモミジバフウの個葉の反射スペクトル⁵。

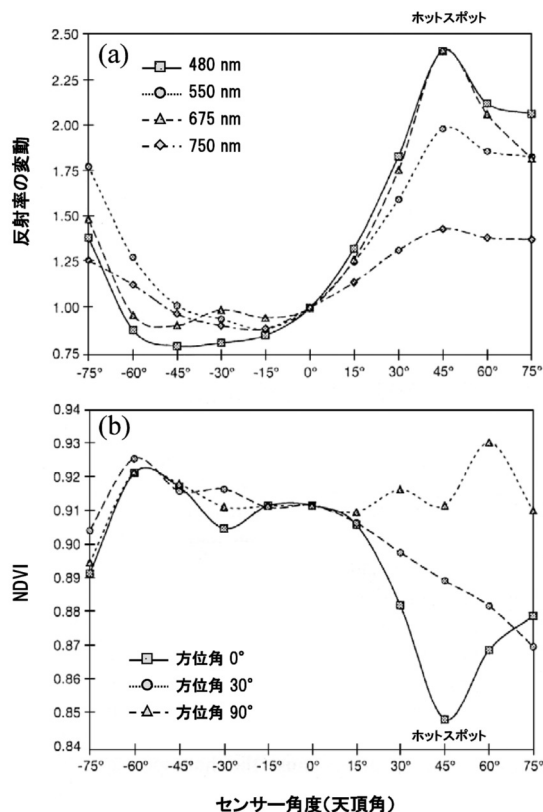


図4：イネ科草本群落の(a)波長ごとの分光反射率および(b)NDVIに対するセンサー角度(天頂角)の影響²³⁾。地上2mの位置から計測したデータを示している。上の図は、太陽天頂角が35°のときにセンサーの俯角を変えながら分光反射率を計測し、天頂から垂直に群落を観測したときの値を1とした相対値を波長ごとに示している。下の図では、センサーの天頂角を変動させた際のNDVIの変化をセンサーの方位角ごとに示している。上の図において横軸(センサー角度)が35°のとき、下の図において横軸が35°、方位角が0°のときは太陽を背に計測している状況になる。ホットスポットとは、太陽を背にした際にできる自身の影の周囲部分で反射率が高い。

いった物理的要因も影響することを念頭に置く必要もある。例えば、植物群落に分光放射計などを一方向から向けて反射を計測する際、センサーの角度や日射の角度が変化すると反射率も変動し、また、その変動パターンも波長によって異なることが知られている(図4)。これは、光の入射角度や観測位置によって検出する反射成分(後方散乱, 前方散乱)が異なること、波長ごとの光学厚さが波長によって異なることなどによる。この詳細な原理や対策については観測視野内の構成物の割合や、群落内の光の散乱・吸収プロセスを紐解く必要があり、今回は触れないが、少なくとも、野外の葉群や植物群落における分光反射を扱う際は、植物の生理生態条件を考慮するだけでなく、例えば観測角度や太陽角度を一定にするなど、非生物的要因の影響がなるべく小さくなるように観測条件にも考慮する必要がある。

2.8.3 分光反射の計測

分光反射率は入射光の放射に対する対象物からの反射の比として算出される(図5)。このうち、入射光の計測に関しては、直接太陽光やランプなどの光源を見て計測する手法と、拡散板を使用して一度反射させた入射光の輝度を計測する場合の2種類がある。センサーの受光部に透過拡散板を装着している全天分光放射計などでは前者の手法で計測し、受光部に透過拡散板を用いない分光放射計や、分光輝度を画像で記録する分光カメラでは、拡散板を使用する後者の手法で計測する。

(a) 分光放射計

最近の分光放射計の多くは分光系に回折格子を用いており、数nmの高い波長分解能で数十～数百バンドの連続した波長の情報(ハイパースペクトル)を計測できる。受光部の仕様によって、全方位型のものと測定視野が狭いファイバー型に大別される(図6)。いずれも、内部で平行光にした導入光を回折格子に照射し、分光された光を内部のセンサーで検出し放射量として計算し出力する。分光放射計は視野角内の反射情報を平均化して計測する点が後述の分光カメラと大きく異なる点である。全方位型のは、受光部に装着した透過拡散板を通した光を計測するため、視野角はほぼ180度であり、太陽位置による角度効果も補正されている。風雨に耐えられる機構のものが多く、野外の植物群落上の分光放射収支の長期計測に適している。市販品では、英光精機製MSシリーズやPREDE社の分光アルベドメーターなどがある。一方、受光部に光ファイバーを使った分光放射計(ASD社 FieldSpec, スペクトラコープ社 Handy-Lambda2など)は、視野角は狭いが、逆に、ある一定の対象範囲を特定して計測することができる。また、ファイバースコープを使った分光放射計では、波長分解能や価格帯などの選択の幅が広く、積分球やリーフクリップなどのアクセサリ類も充実しているため、分光反射率だけでなく、葉の分光透過や分光吸収も計測できる利点がある。

(b) 分光カメラ

分光カメラには、任意の数波長の分光反射を計測するマルチバンドカメラと、多波長の反射画像を撮影できるハイパースペクトルカメラがある(図7)。カメラによる分光反射観測では画像の中の任意の地点の解析をすることができるため、近接撮影による個葉の解析や、群落内の個体ごとの評価、土壌など構成物ごとの評価が可能に

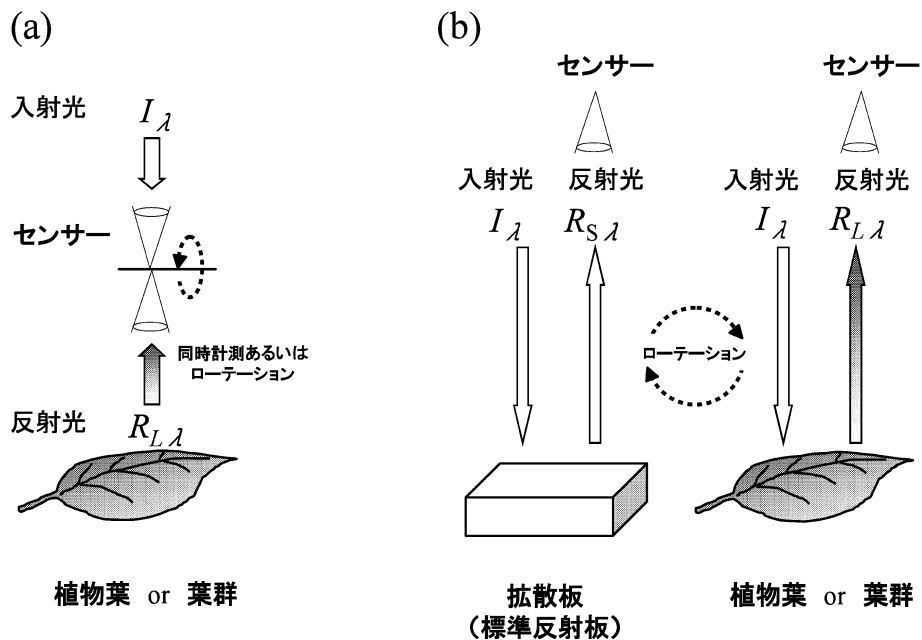


図5：分光反射の計測手法。(a) 対象の直上の入射と対象の反射の両成分を直接計測して両者の比率 ($R_{L\lambda}/I_\lambda$) を求める手法と、(b) 既知の反射率を持つ拡散板をリファレンスにして入射光の強度を計測し、対象の反射輝度との比から反射係数 ($R_{L\lambda}/R_{S\lambda}$) を計算して後で反射率に変換する手法がある。

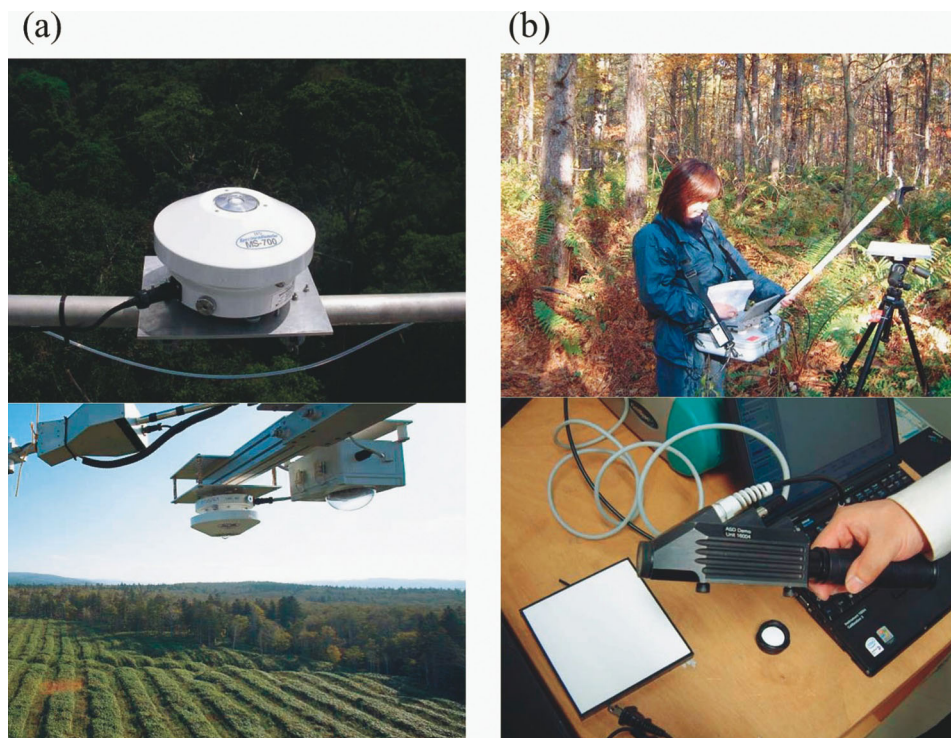


図6：分光放射計を使った観測風景。(a) 全天放射計では上向きと下向きの同時計測によってその日射と反射の比率を計算する。(b) ファイバタイプのものであれば、任意の場所で計測したり、人工光源を内蔵したリーフクリップを使用した個葉の観測が可能である。

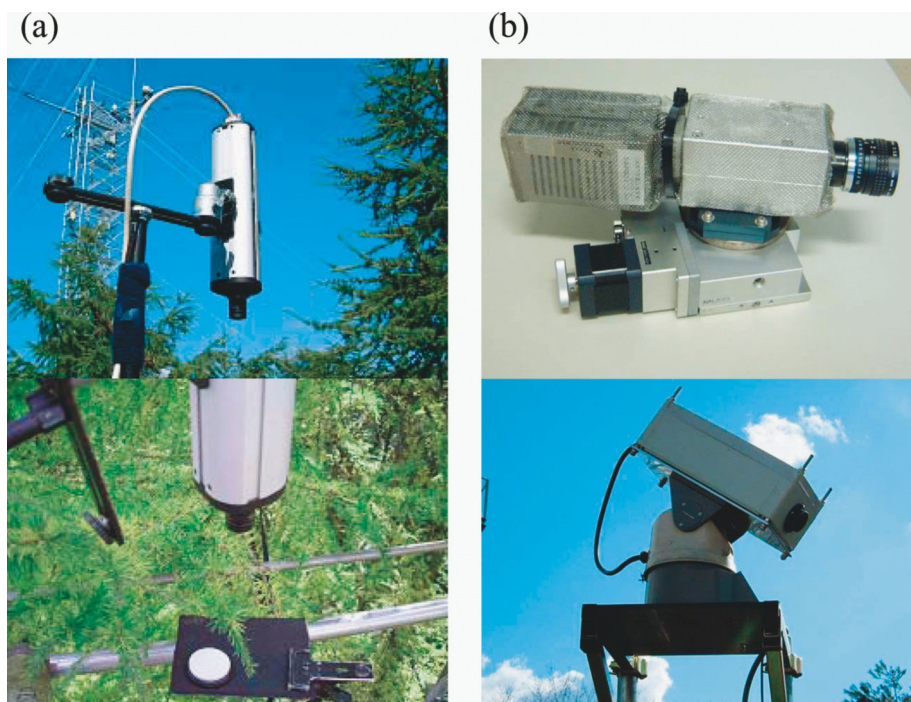


図7：分光カメラを使った観測風景。(a)マルチバンドカメラによる個葉の分光撮影実験。拡散板と対象の葉をひとつの画面に映しこみ、両者のピクセル比から反射率を計算する。後ろの黒い板には、低反射率の布が貼ってあり、対象の背面からの反射の影響を軽減している。(b)ハイパースペクトルカメラシステムの一例。カメラ本体に電動の回転ステージや雲台を装着してスキャンを行う。

なる。

マルチバンドカメラの分光方式は、任意の波長を透過するバンドパスフィルターを装着して透過した分光画像を撮影するものが主流であり、4バンドの市販分光カメラでは Photron 社 MSI-4、Optical Insights 社 Agro-Imager などがこれにあたる。また、私たちが通常使っているカラーデジタルカメラも青、緑、赤の3色の画像を撮影しており、ある意味では3バンドの分光カメラとも言える。カラーデジタルカメラ内部の CCD や CMOS は可視～近赤外において広く感度を持つが、素子表面に近赤外をカットするフィルターを貼り付けることで可視の3色の画像を撮影している。このため、近年では、その近赤外カットフィルターの代わりに青色波長のカットフィルターを装着することで緑、赤、近赤外域に感度を持たせた3バンドのマルチスペクトルカメラを作り研究する例もあり、Tetracam 社の ADC3 のような製品も市販されている。ハイパースペクトルカメラでは、分光方式に回折格子、液晶チューナブルフィルター、音響チューナブルフィルターなどが用いられているが、回折格子を用いるものが多い (Specim 社 ImSpector シリーズ、Headwall Photonics 社 Hyperspec シリーズなど)。回折格子を用いたカメラでは、レンズと分光系の間には幅が数～数十ミクロンのスリットが入っており、スリット

を通して入射した線上の画像を分光して撮影する。このため、コピー機のラインスキャンのように、センサー部位を動かしながら高速で連続スキャンし、後でそれらの画像を結合させることで二次元情報として分光画像を解析する。

ファイバースコープを使った分光放射計や分光カメラによる観測では、反射標準となる拡散板を用いる。拡散板には、一般に BaSO_4 を圧縮して固めたものや、テフロン樹脂製のプレート (Labsphere 社 Spectralon や SphereOptics 社 Zenith など) が利用される。EVA (エチレンビニルアセテート) 樹脂や発泡スチロールの板などの安価な素材を二次標準として使用することも可能だが、表面が鏡面になっていたり、粗すぎたりすると反射率に方向性が強く出たりしてしまうので、あらかじめ分光反射値の検証が必要である。

2.g.4 分光植生指標

前述のように、分光反射率や微分反射率は、特定の波長領域に葉の光合成機能に関する色素や水分、構造などの生理生態情報を反映している。そのため、これらを活用した多くの指標、いわゆる分光植生指標 (Spectral

表 1：植生群落や個葉において利用される分光植生指標。R, D はそれぞれ分光反射率, 一次微分反射率を示し, その後ろの英字および数値は使用される波長帯, 波長を示す(NIR: 任意の近赤外波長, VIS: 任意の可視波長, RED: 680 nm 近辺の赤色波長帯)。波長は使用するセンサーの性能や対象植物などで変わる場合もある。

指標 ^a	計算式	評価対象 ^b	特徴	文献
SR	$R_{\text{NIR}}/R_{\text{VIS}}, R_{\text{RED}}/R_{\text{BLUE}}$ など	群落の greenness, 色素など	2 波長の反射率の比率を計算したもので, 組み合わせは非常に多い。800 nm と 680 nm を組み合わせた SR_{680} や 750 nm と 705 nm を使った SR_{705} はクロロフィル濃度の評価にも利用されている。計算式の特長から, 高輝度の情報や陰影の強い場合などに値の振れ幅が大きくなる特徴をもつ。	25 ほか
NDVI	$(R_{\text{NIR}} - R_{\text{RED}})/(R_{\text{NIR}} + R_{\text{RED}})$	群落の greenness, FAPAR	最も古くから利用される。2 波長の反射率の差を正規化した指標の総称で PRI や CI などともこの類に入るが, NDVI と呼ばれる指標の多くは, 赤色域と近赤外を利用している。緑色域を使った Green NDVI などもある。一般にこの NDVI は, LAI が 2 を超えると飽和し, LAI との関係が非線形になる。	26, 27 ほか
GEMI	$\eta(1 - 0.25 \times \eta) - (R_{\text{VIS}} - 0.125)/(1 - R_{\text{VIS}}),$ $\eta = (2 \times (R_{\text{NIR}}^2 - R_{\text{VIS}}^2) - 1.5 \times R_{\text{NIR}} + 0.5 \times R_{\text{VIS}})/(R_{\text{NIR}} + R_{\text{VIS}} + 0.5)$	群落の greenness	NDVI に対する土壌表面の高輝度反射の影響を抑え, 大気成分の影響を軽減させるために開発された指標。	28
SAVI	$((R_{\text{NIR}} - R_{\text{RED}})/(R_{\text{NIR}} + R_{\text{RED}} + L)) \times (1 + L)$	群落の greenness, FAPAR	土壌表面の高輝度反射の影響を補正した指標。係数 L は 0 ~ 1 の値をとり, 0.5 で利用される。土壌や植生タイプが異なる時の安定性に課題がある。他にも MSAVI2, TSAVI, OPVI など多くの補正指標がある。	29, 30
EVI	$((R_{\text{NIR}} - R_{\text{RED}})/(R_{\text{NIR}} + C_1 \times R_{\text{RED}} - C_2 \times R_{\text{BLUE}} + L)) \times G$	群落の greenness, FAPAR, 光合成量	青の反射情報に加えてエアロゾルによる影響を軽減し, 非線形補正係数 (L) も加えることで植生情報に対して飽和しにくい利点を持つ。C ₁ , C ₂ はエアロゾル抵抗係数, G は出力係数。一般に L=1, C ₁ =6, C ₂ =7.5, G=2.5 で計算される。最近では, NDVI に代わって光合成ポテンシャルの評価に使われるようになった。	31, 32
PVI	$(R_{\text{NIR}} - aR_{\text{VIS}} + b)/(a_2 + 1)_{0.5}$	群落の greenness	可視と近赤外を 2 軸に取った散布図における土壌反射率の分布を直線で定義し, 解析対象の分光情報がその直線からどれだけ離れているかユークリッド距離を算出, 指標化したもの。衛星などの画像解析でよく利用される。a, b は土壌の基準線を定義する変数。	33
PRI	$(R_{531} - R_{570})/(R_{531} + R_{570})$	葉内キサントフィルサイクル, 光化学系 II 活性, 光利用効率, カロテノイド/クロロフィル比	光強度に応じたキサントフィルサイクルの色素組成を検出する指標。光化学系 II の励起状態や, 光合成速度における光利用効率 (単位光あたりの CO ₂ 固定効率) の日内変化を間接的に評価する。また, グリーンピークのスロープの反射率を使うためカロテノイド, クロロフィルのバランスも反映する。	34
SIPI	$(R_{800} - R_{445})/(R_{800} + R_{680})$	カロテノイド/クロロフィル比	カロテノイドとクロロフィルの吸収波長の違いを考慮して半経験的に開発された指標。葉表面組織や葉肉細胞の影響が軽減されている。	35
PSRI	$(R_{680} - R_{500})/R_{750}$	カロテノイド/クロロフィル比	カロテノイドとクロロフィルの吸収波長の違いを考慮して半経験的に開発された指標。両色素の比率が葉の老化や果実の熟成に関連することからこの指標名になっている。	22
CI	$(R_{750} - R_{705})/(R_{750} + R_{705})$	クロロフィル濃度	750 nm と 705 nm を使った NDVI。	36
mSR ₇₀₅	$(R_{750} - R_{445})/(R_{705} - R_{445})$	クロロフィル濃度	750 nm と 705 nm を使った SR に, 445 nm をベースにした補正を施した指標。	5
mND ₇₀₅	$(R_{750} - R_{705})/(R_{750} + R_{705} - 2 \times R_{445})$	クロロフィル濃度	750 nm と 705 nm を使った CI に, 445 nm をベースにした補正を施した指標。Datt (1999) は 680 nm を補正に使ったが, Sims & Gamon ₄) によって改良された。	5
CCI	D_{720}/D_{700}	クロロフィル濃度	クロロフィル濃度と関連が強いレッドエッジ周辺の 720 nm と 700 nm の微分反射率の傾きを指標化したもの。微分を扱うため, 高い SN, 波長分解能が要求される。	37
WI	R_{970}/R_{900}	水分	近赤外における水の吸収帯の深さを指標化したもの。ある程度の乾燥ストレスがかかった植物葉において効果が認められる。	6
NDWI	$(R_{\text{NIR}} - R_{\text{SWIR}})/(R_{\text{NIR}} + R_{\text{SWIR}})$	水分	短波長赤外における水吸収帯の深さを近赤外のプラトー領域で評価した指標 ⁷⁾ 。SPOT-VGT を使った例では, 植生の春先のフェノロジーの評価に有効であると報告されている ³⁸⁾ 。また, この指標と NDVI を 2 軸にして広域の地点の散布図を作成し, 対象とする地点と同じ NDVI で取りえる最小 NDWI と対象地点の NDWI のユークリッド距離を乾燥の指標 (VDI: Vegetation Dryness Index) と定義して森林火災ポテンシャルを評価した研究もある ³⁹⁾ 。	7, 38, 39
CAI	$0.5 \times (R_{2000} + R_{2200}) - R_{2100}$	セルロース	セルロースの吸収帯 (2100 nm 近辺) における反射率のひずみを両側の反射率を基準に指標化したもの。植物残さの検出などで有効性が示されている。	11

a 略称 SR: Simple Ratio, NDVI: Normalized Difference Vegetation Index, GEMI: Global Environment Monitoring Index, SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index, EVI: Enhanced Vegetation Index, PVI: Perpendicular Vegetation Index, PRI: Photochemical Reflectance Index, SIPI: Structure Insensitive Pigment Index, PSRI: Plant Senescing Reflectance Index, CI: Chlorophyll Index, mSR: Modified Simple Ratio, mND: Modified Normalized Difference, CCI: Canopy Chlorophyll Index, WI: Water Index, NDWI: Normalized Difference Water Index, CAI: Cellulose Absorption Index.

b FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) は光合成有効放射量が群落内で吸収される比率を示す。Greenness の示すものとしては, 土地被服分類を行う際の緑被率や, 緑葉の葉面積指数 (LAI, Leaf Area Index) などが指標をもとに評価される。

Vegetation Index)が開発されている。表1に代表的な分光植生指標を示す。反射率の値をそのまま用いるケースや、反射と透過の比率を利用する例などもあるが、ここで紹介した指標の多くは、植物の情報に感度を持つ波長の分光反射率の変動を対象波長と基準波長の正規化差分や比率から検出している。

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)²⁶⁾は、最も古くから利用されてきた指標であり、クロロフィルの反射領域と構造に関連した近赤外の反射率の正規化差分として算出される。人工衛星による広い分光幅の反射データから計算できることもあり、広域の群落スケールにおける光合成有効放射 (FAPAR, Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) や葉面積指数 (LAI, Leaf Area Index) の推定に広く利用されてきたが、LAIがおおよそ2を超えると飽和するなどの欠点もあるため、最近ではEVI (Enhanced Vegetation Index)^{31,32)}のほうが良く利用される。EVIは群落における日積算のGPP (総一次生産) の間に正の関係を示すため、衛星データを用いた全球の炭素吸収量マッピングなどに広く利用されており、地域ごとの安定性の検証や気象条件が変動したときの対応などが今後の課題となっている。

一方、生理情報との関連があり、個葉においても研究利用が期待される指標としては、クロロフィル濃度を可視-近赤外の反射率から推定するmND₇₀₅ (Modified Normalized Difference)⁵⁾や微分スペクトルを利用したCCI (Canopy Chlorophyll Index)³⁶⁾といった色素系の指標、キサントフィルサイクルの光応答を反映し光化学系IIの活性とも関連のあるPRI (Photochemical Reflectance Index)³⁴⁾などであろう。PRIは、グリーンピークの両側の反射率の正規化差分を使っているため、長期的な変動にはクロロフィルとカロテノイドの比率が影響するが^{5,40)}、キサントフィルサイクルの色素であるピオラキサンチンが強光時にアンテラキサンチンやゼアキサンチンに移行する際に生じる531 nm近辺の反射率低下も検出するため、キサントフィルサイクルのエポキシ化や、間接的な光化学系IIの指標として提案されている^{34,40,41)}。また、光合成において単位光あたりの炭素固定効率 (LUE, Light Use Efficiency, 光—光合成曲線の初期勾配 ϕ とは異なる) とPRIの間の正の相関関係も個葉から群落まで報告されている^{42,43,44)}。日本のカラマツの針葉における観測研究でも、光化学系II活性やエポキシ化率、LUEの日変動や^{39,45)}、群落スケールのLUEの季節変動⁴⁶⁾とPRIの間には正の相関が得られている (図8)。群落においては、衛星データを用いたLUEの推定研

究も進んでおり⁴⁷⁾、PRIも広域の植生観測の観測指標としての実用化が検討されている。しかし、これまでの個葉や群落スケールでの観測研究では、植生タイプごとの感度の違い^{43,46)}や土壌の影響による感度低下³⁶⁾も指摘されており、そのメカニズムの解明とそれに即した実用化に研究の余地が残っている。これまでの指標の多くがそうであるように、PRIもCO₂の吸収などの光合成機能を直接計測しているものではなく、光学的に検出可能な光合成関連物質 (色素など) の組成の変化から光合成機能を間接的に評価している。このため、今後は、光合成の各種モデルにおけるパラメータの外挿として利用や、植物のストレス応答やフェノロジーの検出といった定性的な観点からの利用性を探るのも、分光観測の活用手法として重要になると思われる。

引用文献

- 1) 日本リモートセンシング研究会編,「図解リモートセンシング」, 社団法人 日本測量協会, 1992, P.308.
- 2) G. Asrar, Theory and Applications of Optical Remote Sens., Toronto, John Wiley & Sons, 1989, P.734.
- 3) 玖村敦彦, 石井龍一, 葉における光の反射・吸収・透過, 「作物の光合成と物質生産」, 戸荻義次監修, 養賢堂, 1971, P.29.
- 4) E. Baldini, O. Facini, F. Nerozzi, F. Rossi & A. Rotondi, Trees, **12** (1997) P.73.
- 5) D. A. Sims & J. A. Gamon, Remote Sens. Environ., **81** (2002) P.337.
- 6) J. Peñuelas, J. Pinol, R. Ogaya & I. Filella, Int. J. Remote Sens. **18** (1997) P.2869.
- 7) B.-C. Gao, Remote Sens. Environ. **58** (1996) P.257.
- 8) D. Gillon, C. Houssard & R. Joffre, Oecologia, **118** (1999) P.173.
- 9) H. W. Siesler, Y. Ozaki, S. Kawata & H. M. Heise, Near-infrared spectroscopy, principles, instruments, applications, Weinheim, Wiley, 2002, P.269.
- 10) A. Stevens, B. Van Wesemael, G. Vandenschrick, S. Toure & B. Tychon, Soil Sci. Soc. Am. J. **70** (2006) P.844.
- 11) P. L. Nagler, Y. Inoue, E. P. Glenn, A. L. Russ, & C. S. T. Daughtry, Remote Sens. Environ. **87** (2003) p.310.
- 12) J. R. Miller, J. Wu, M. G. Boyer, M. Belanger & E. W. Hare, Int. J. Remote. Sens. **12** (1991) P.1509.
- 13) A. A. Gitelson, M. N. Merzlyak & H. K. Lichtenthaler, J. Plant Physiol. **148** (1996) P.501.
- 14) P. J. Zarco-Tejada, J. C. Pushnik, S. Dobrowski & S. L. Ustin, Remote Sens. Environ. **84** (2003) P.283.
- 15) P. J. Zarco-Tejada, J. R. Miller, G. H. Mohammed, T. L. Noland & P. H. Sampson, Remote Sens. Environ. **74** (2000) P.596.

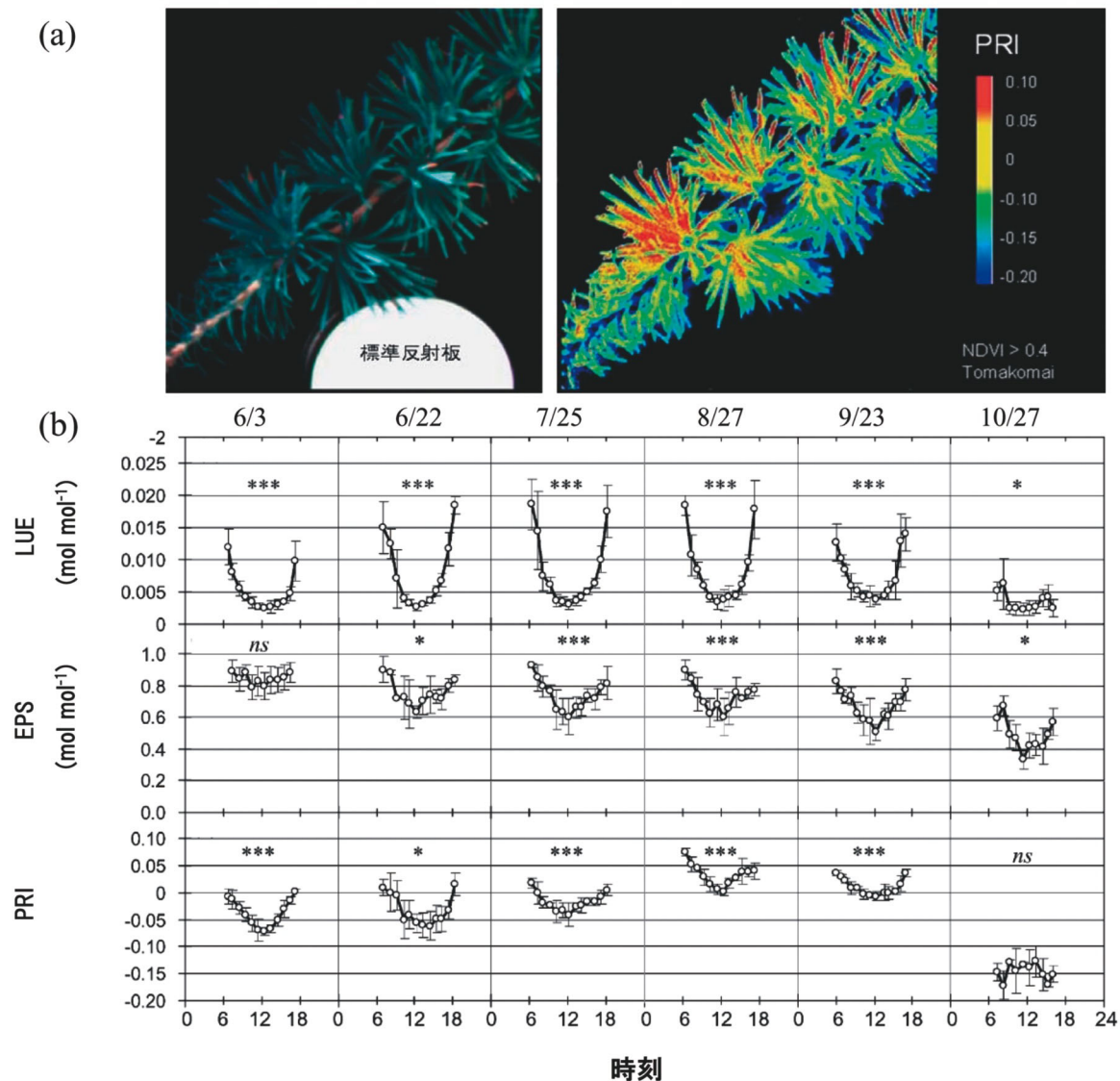


図8：分光カメラを使ったPRIの観測結果。(a) マルチバンドカメラによるカラマツ針葉の撮影画像。便宜的にNDVIを閾値にしてバックグラウンドのデータを削除して表示させてある。(b) 画像を撮影した針葉における純光合成速度の光利用効率(LUE＝純光合成速度/PAR)、エポキシ化率(EPS=($V+0.5A$)/($V+A+Z$), V : ビオラキサンチン濃度, A : アンテラキサンチン濃度, Z : ゼアキサンチン濃度)およびPRIの季節ごとの経時変化。快晴日におけるデータを示してある。LUEやEPSは日中に低下し、PRIは緑葉時期(6/3～9/23)は日中に同様に低下する。緑葉時期は、PRIは他のパラメータと正の相関を示すが、10月の黄葉では正の相関を示さなかった(Nakaji *et al.*³⁹⁾の一部を抜粋)。

- 16) A. F. Kleschnin & J. A. Shul'gin, Dokl. Acad. Sci. USSR. **125**, (1959) P.108.
- 17) D. W. Lee & R. Graham, Am. J. Bot. **73** (1986) P.1100.
- 18) A. K. Knapp & G. A. Carter, Am. J. Bot. **85** (1998) P. 940.
- 19) G. I. Pearman, Aust. J. Biol. Sci., **19** (1966) P.97.
- 20) R. J. Cameron, Aust. J. Bot. **88** (1970) P.275.
- 21) J. T. Woolley, Plant Physiol., **47** (1971) P.656.
- 22) M. N. Merzlyak, A. A. Gitelson, O. B. Chivkunova & V. Y. Rakitin, Physiol. Plant. **106** (1999) P.135.
- 23) S. R. Sandmeier & K. I. Itten, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. **37** (1999) P.978.
- 24) C. F. Jordan, Ecology **50** (1969) P.663.
- 25) C. J. Tucker, Remote Sens. Environ. **8** (1979) P.127.
- 26) J. A. Gamon, C. B. Field, M. L. Goulden, K. L. Griffin, A. E. Hartley, G. Joel, J. Peñuelas & R. Valentini, Ecol. Appl. **5** (1995) P.28.
- 27) M. M. Verstraete & B. Pinty, IEEE Trans. Geo. Remote Sens. **34** (1996) P.1254.
- 28) A. R. Huete, Remote Sens. Environ. **25** (1988) P.295.
- 29) X. Gao, A. R. Huete, W. Ni, T. Miura, Remote Sens. Environ. **74** (2000) P.609-620.
- 30) H. Q. Liu & A. R. Huete, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. **33** (1995) P.457.

- 31) A. R. Huete, K. Didan, T. Miura, E. P. Rodriguez, X. Gao & L. G. Ferreira, *Remote Sens. Environ.* **83**, (2002) P. 195.
- 32) A. J. Richardson & C. L. Wiegand, *Photogram. Eng. Remote Sens.* **43** (1977) P.1541.
- 33) J. A. Gamon, L. Serrano & J. S. Surfus, *Oecologia* **112** (1997) P.492.
- 34) J. Peñuelas, F. Baret & I. Filella *Photosynthetica* **31** (1995) P.221.
- 35) A. A. Gitelson & M. N. Merzlyak, *J. Plant Physiol.* **143** (1994) P.286.
- 36) D. A. Sims, H. Luo, S. Hastings, W. C. Oechel, A. F. Rahman & J. A. Gamon, *Remote Sens. Environ.* **103** (2006) P.289.
- 37) N. Delbart, L. Kergoat, T. L. Toan, J. Lhermitte & G. Picard, *Remote Sens. Environ.* **97** (2005) P.26.
- 38) M. Maki, M. Ishihara & M. Tamura, *Remote Sens. Environ.* **90** (2004) P.441.
- 39) T. Nakaji, H. Oguma & Y. Fujinuma, *Int. J. Remote Sens.* **27** (2006) P.493.
- 40) J. Peñuelas, F. Baret & I. Filella, *Photosynthetica* **31** (1995) P.221.
- 41) J. Peñuelas, J. Llusa, J. Pinol & I. Filella, *Int. J. Remote Sens.* **18** (1997) P.2863.
- 42) I. Filella, T. Amaro, J. L. Araus & J. Penuelas, *Physiol. Plant.* **96** (1996) P.211.
- 43) J. C. Nichol, J. Lloyd, O. Shibistova, A. Arneth, C. Roser, A. Knohl, S. Matsubara & J. Grace, *Tellus* **54** (2002) P.677.
- 44) I. B. Strachan, E. Pattey, J. B. Boisvert, *Remote Sens. Environ.* **80** (2002) P.213.
- 45) 中路達郎, 武田知己, 向井讓, 小池孝良, 小熊宏之, 藤沼康実, *日林誌* **85** (2003) P.205.
- 46) T. Nakaji, R. Ide, K. Takagi, Y. Kosugi, S. Ohkubo, K. Nishida, N. Saigusa & H. Oguma, *Agr. For. Meteorol.* **148** (2008) P.776.
- 47) G. Drolet, K. F. Huemmrich, F. G. Hall, E. M. Middleton, T. A. Black, A. G. Barr, H. A. Margolis, *Remote Sens. Environ.* **98** (2005) P.212.