

植物群落およびその構成要素の太陽光に対する 分光指向反射特性計測に関する研究

Field Study on Spectral and Directional Reflection Characteristics
of Plant Canopy and Its Constituents for Solar Irradiation

吉田篤正^{*}
Atsumasa YOSHIDA

明石徳之^{*}
Tokuyuki AKASHI

牧野俊郎^{*3}
Toshiro MAKINO

Abstract

Field measurements in the wavelength ranges around 550 nm and 800 nm were carried out on the directional reflection characteristics of plant canopies and the constituent elements for solar irradiation. The strong directivity of reflection was made clear for the green leaves and the natural lawn as plant canopy in the wavelength range around 550 nm. The directional reflection characteristics of plant canopy depended on not only the optical properties of leaves but also the three-dimensional structure. A ratio of directional reflection indices in two wave length ranges was proposed to estimate the chlorophyll content of plant.

キーワード；植物群落、葉、太陽光入射、指向反射、分光測定、野外計測、葉緑素含有量

Key words:Plant canopy, Leaf, Solar irradiation, Directional reflection, Spectral measurement, Field measurement, Chlorophyll content

1. 緒言

植物群落は太陽光を受け取り、光合成によって生育に必要な物質を作り出す。したがって植物群落の生育活動と太陽光の受け取りには深い関係があり、群落の立体構造やその構成要素の光学的性質が反映される。植物群落の太陽光入射に対する反射特性は、リモートセンシングのデータによってその生育状況を把握したり、植物群落に覆われている環境表面における熱輸送を評価する場合には重要である。

これまで、環境表面の熱収支の評価につながる半球反射率スペクトルの現地計測⁽¹⁾、人工衛星、航空機を利用して、数波長帯域の垂直方向の反射測定による植生を含めた土地利用状況の調査⁽²⁾、などが行われてきた。垂直方向以外の指向反射特性にも環境表面に関する有益な情報は含まれてい

ると考えられるが、積極的な利用はこれからの課題である。環境表面の中で植物群落については、数値計算による群落内外の指向反射特性に関する研究がいくつか報告されている^{(3), (4)}。植物群落あるいはその構成要素である葉の指向反射特性についての測定も行われてきた^{(5), (6)}。しかし、植物群落の指向反射特性について、その要素である葉の光学特性が大きく異なる波長帯域に注目して、植物群落のもつ立体構造も含めて議論をし、新しい計測方法の開発に結びつけた研究は報告されていない。

本研究では、多角的な情報が得られる屋外計測法の開発を目指して、環境表面の太陽光入射に対する分光指向反射特性に注目する。環境表面として植物群落を取り上げ、その指向反射の角度分布の基本的な特性を調べることにする。ここでは基礎的な資料を得ることを目的としているため、背

*1 岡山大学工学部(〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

*2 京都大学工学部(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

*3 京都大学大学院工学研究科

(原稿受付 平成10年12月19日)

Dept. Mech. Eng., Okayama Univ.

Dept. Eng. Sci., Kyoto Univ.

Dept. Eng. Phys. & Mech., Kyoto Univ.

の高い森林、広い面積の草原などを取り上げることは必ずしも必要ではない。相当本数の植物集合体を植物群落と考えて、その高さ、立体構造などを考慮して、傾斜している葉を多く含む天然芝を主な試料として測定を行う。また、植物群落の構成要素である葉と土壤についても別途測定を行う。対象とする波長帯域には多くのものが挙げられるが、葉の光学特性が大きく異なると考えられ、葉緑素含有量の推定⁽¹⁾の可能性も探るため、550nm、800nmの2つの波長帯域に限定し、その測定結果を比較、検討する。

主な記号

E_i : 入射太陽光に対する検知器の出力

E_r : 反射太陽光に対する検知器の出力

m : 雲量

R : 式(1)、(2)で定義される太陽光入射－指向反射指数

R_h : 半球反射率

θ : 反射天頂角

θ_s : 入射天頂角

ϕ : 反射方位角

添字

(550) : 波長550nm帯域

(800) : 波長800nm帯域

2. 計測装置と測定方法

環境表面の太陽光反射の計測は、対象とする表面のある現場において、その状態を変えることなく、実時間、非接触測定を可能とするものが望ましい。非均質表面の場合にはその表面の平均的性質を示すものでなければならない。また、連続測定あるいは任意の時刻に測定を任意の場所で行うためには指向反射の測定である必要がある。さらに、入射太陽光と環境表面からの反射太陽光の波長特性は、一般に異なっているので、分光測定は重要である。

図1にこれらの要件を考慮した計測装置の概要を示す。直達、散乱成分からなる天空から水平面への入射太陽光は拡散板①を通して、また、対象とする表面系から測定角方向への反射太陽光はレンズ⑥を通して計測装置本体内部(図1の破線で囲まれた部分)に取り込まれ、波長550nm、800nm帯域のバンドパスフィルター②⑧(中心波長550nm、半値幅55nm)③⑨(中心波長780nm、半値幅47nm)を

通して4つのシリコンフォトセル検知器④⑤⑩⑪で検知される。それぞれの出力値を $E_i(550)$ 、 $E_i(800)$ 、 $E_r(550)$ 、 $E_r(800)$ とする。これらの値はADコンバータで変換されディスプレイに表示される。反射光測定部の視野角は3°で、測定距離1.5mの場合には測定対象は直径約7cmの円内である。

波長550nm、800nm帯域の指向反射率に相当する太陽光入射－指向反射指数 $R(550)$ 、 $R(800)$ を、それぞれ次式で定義する。

$$R(550) = E_r(550)/E_i(550) \quad \dots (1)$$

$$R(800) = E_r(800)/E_i(800) \quad \dots (2)$$

本計測装置は入射光と反射光に対して異なった光学系を持つため、 $R(550)$ 、 $R(800)$ は後述のように1を越え、各試料のそれぞれの値だけでは物理的意味を持たない。しかし、2つの波長帯域における指向反射特性について議論すること、各試料間で相対比較をすることは可能である。

測定は周囲が開けた場所で行った。測定距離は1.5mとした。測定角は、図1に示すように方位角 ϕ については太陽を背にする方向を0°として、10°、45°、90°、135°、180°、天頂角 θ については鉛直方向を0°として、0°、30°、60°、75°とした。本計測装置では入射および反射太陽光の同時測定が可能であるが、天空からの太陽光入射は水平面に対して測定する必要があるため、反射太陽光のそれぞれの測定角における測定と入射太陽光の測定を交互に行った。一連の測定時間は約20分であり、その間の天候が安定していたデ

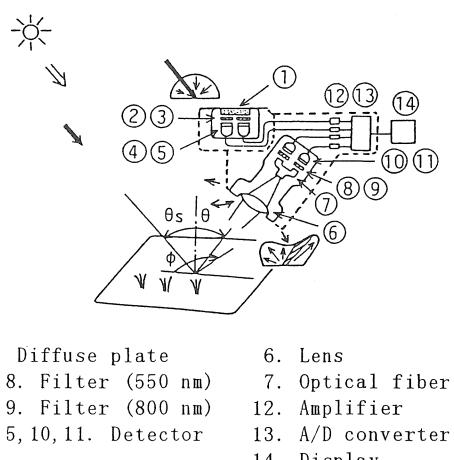


図1 屋外環境表面の太陽光入射－指向反射特性計測装置の概要

ータのみを採用した。角度に関しては測定開始時刻の太陽の入射角度を基準とした。

3. 測定結果と考察

3.1 植物群落およびその構成要素の太陽光入射－指向反射特性

(a) 緑葉

試料はダンボール紙の上に模造紙を貼り、その上に両面テープで楠あるいは月桂樹の葉を隙間のないように直径約30cmの円内に貼り付けたものである。これらの葉を透過して模造紙で反射する太陽光が測定値に与える影響は無視できる。1枚の葉の長さは5~10cmである。葉の表面のみに光沢を持つ。

図2、3に楠の緑葉の表面の太陽光入射－指向反射指数R(550)、R(800)の測定値をそれぞれの測定角において半径方向の大きさとして示す。図中

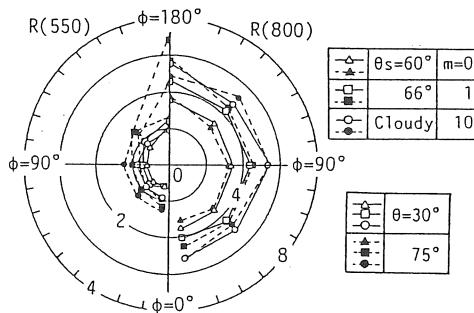
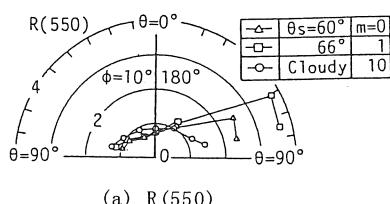


図2 楠の緑葉表面の指向反射指数の反射方位角方向の分布



(a) R(550)

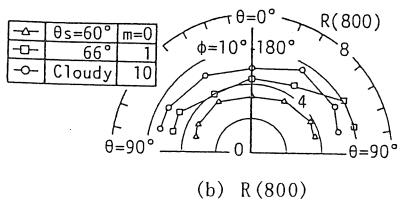
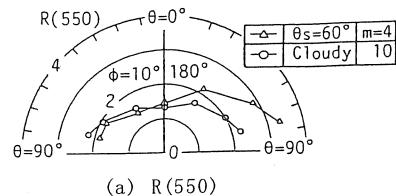


図3 楠の緑葉表面の指向反射指数の反射天頂角方向の分布

の θ_s は、図1に示すように、太陽光の直達成分の入射角であり、Cloudyは太陽光の直達成分がない状態を表す。 m は雲量を表し、全天が雲で覆われた状態は雲量10である。図2の左半分はR(550)、右半分はR(800)の方位角分布を天頂角 $\theta = 30^\circ, 75^\circ$ の場合について示す。図3(a)、(b)はそれぞれR(550)、R(800)の天頂角分布を、方位角 $\phi = 10^\circ$ （図の左半分）、 180° （図の右半分）の場合について示す。図4、5はそれぞれ楠の緑葉の裏面、1週間自然乾燥した後の楠の葉のR(550)、R(800)の天頂角分布を示す。

緑葉に関しては、晴天の場合の波長550nm帯域では、太陽光の入射角の鏡面方向に近い $\phi = 180^\circ$ 、 $\theta = 60^\circ, 75^\circ$ に強い反射が測定された。その程度は表面の方が裏面より、また、太陽光の入射が水平に近い方が強い。曇天の場合は反射の強い指向性は認められない。緑葉の波長800nm帯域では太陽光の入射条件によらず、反射の指向性は認められない。枯葉では波長550nm帯域においても反射が拡散的である。以上の結果は、緑葉の表面下に多く分布する葉緑体による波長550nm帯域の太陽光の吸収のため表面反射が支配的であり、その影



(a) R(550)

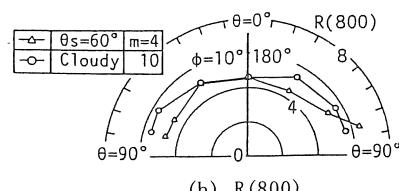


図4 楠の緑葉裏面の指向反射指数の反射天頂角方向の分布

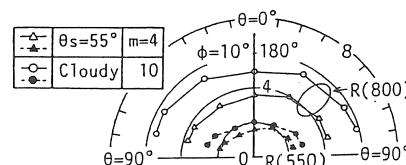


図5 乾燥した葉の指向反射指数の反射天頂角方向の分布

響を受けない波長800nm帯域および枯葉では葉内部での散乱が測定値に効果を及ぼすためと考えられる。

(b) 土壤

試料は直径約30cmの円内に土を1cm程度の厚さに盛ったものである。図6、7にそれぞれ湿潤状態(含水率15%)の粘質土壤のR(550)、R(800)の方位角分布、天頂角分布を示す。図8に十分に乾燥した粘質土壤のR(550)、R(800)の天頂角分布を示す。

2つの波長帯域の結果の図が相似形であり、波長域による指向反射特性の違いはない。乾燥状態では表面の凹凸の影響を強く受け、太陽光の入射方向に反射の指向性が測定された。湿潤状態では乾燥状態に比べてR(550)、R(800)の値はともに小さく、反射の指向性もやや弱いが、入射方向と鏡

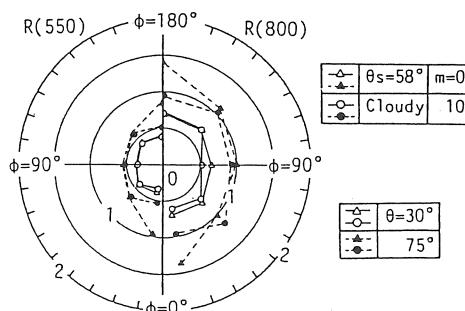


図6 湿った粘質土壤の指向反射指数の反射方位角方向の分布

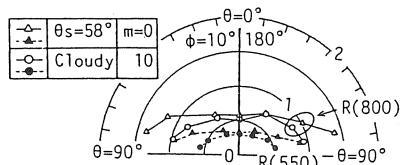


図7 湿った粘質土壤の指向反射指数の反射天頂角方向の分布

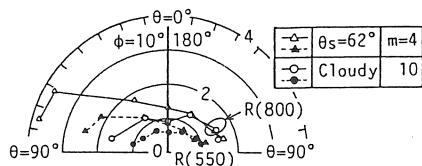


図8 乾いた粘質土壤の指向反射指数の反射天頂角方向の分布

面方向に反射が認められる。土壤と緑葉の指向反射特性は大きく異なっていることがわかる。

(c) 芝生

植物群落の試料として、約60x60cmの箱庭に植えた天然芝(日本芝)を取り上げる。対象とした芝生の葉の長さの分布、水平面から測った葉の角度の分布を図9に示す。葉の角度は葉クリノメータ法^(*)により1枚ずつ測定した。分度器の中心を軸として自由に回転できるように先端に小さな平板のある柄を取り付け、平板を葉面に密着させる。地面に対して鉛直方向と柄のなす角度を分度器で求める。なお、葉面積指數(単位面積当たりの葉の総面積の割合)は2.12であった。

図10、11はそれぞれ芝生のR(550)、R(800)の方位角分布、天頂角分布を示す。測定の天頂角θが大きくなるほどR(550)の値は大きい。これは芝生が持つ立体構造のため、芝生内部での多重反射の影響を受けにくく、測定の視野に反射率の低い土の部分が含まれる割合が小さくなるためである。R(800)はR(550)に比べると、測定の天頂角に対する依存性は小さい。方位角方向への依存性は全般に小さい。R(550)、R(800)の値は緑葉と比較して、反射率が低く多重反射の影響を受けやすいR(550)は芝生の方が小さいが、R(800)は両者ほぼ同じ値を示す。芝生と構成要素の葉の反射の指向性を比較してみると、葉の反射の指向性が強い波長550nm帯域に芝生の立体構造の影響が強く現れ、芝生からの反射は鏡面反射方向だけでなく、入射方向にも強い指向性を示していることがわかる。葉に拡散反射性の傾向が強い波長800nm帯域では芝生の立体構造の影響は小さく、芝生は多く

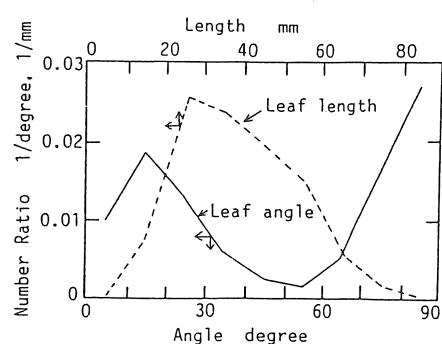


図9 天然芝の葉の長さと角度の分布

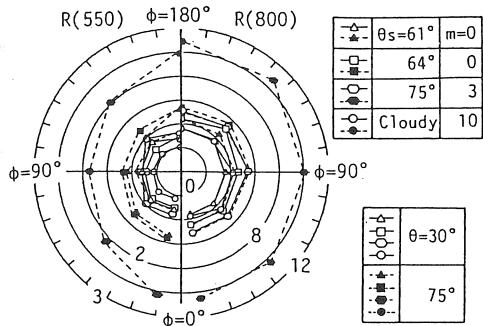
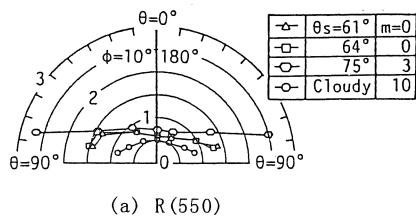
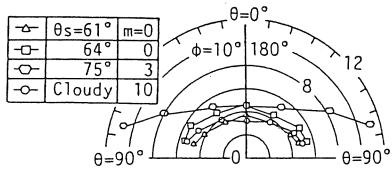


図10 天然芝の指向反射指数の
反射方位角方向の分布



(a) R(550)



(b) R(800)

図11 天然芝の指向反射指数の
反射天頂角方向の分布

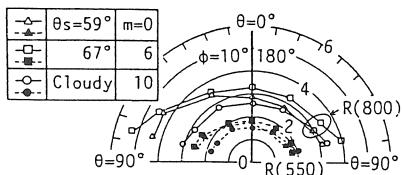


図12 枯芝の指向反射指数の
反射天頂角方向の分布

の場合、拡散的な反射を示す。

図12は枯れた芝生のR(550)、R(800)の天頂角分布を示す。枯れた芝生の葉はほぼ水平である。R(800)は太陽光の入射方向への反射がやや強いが、全体的には反射は拡散的であると言える。

3・2 2波長帯域の太陽光入射ー指向反射指数の比と太陽光の入射条件の関係

稲田らはイネ科作物の葉の半球反射率スペクトル R_h を測定し、 $R_h(800)/R_h(550)$ の単位面積あたりの葉緑素含有量に対する相関が強いことを示した⁽⁷⁾。ここでは、前述の結果より反射の指向性が弱い $\phi=90^\circ$ 、 $\theta=30^\circ$ の場合の $R(800)/R(550)$ と太陽光の直達成分の入射角 θ_s の関係を調べ、 $R(800)/R(550)$ が葉緑素含有量を推定する指標となるかどうかを検討する。その結果を図13に示す。図中には曇りの状態の結果も併せて示す。図中の記号■は、3・1(c)の試料の芝生を主に立っている葉を約半分刈り取った場合の結果である。また、記号◇は市販のかいわれ大根を数パックを隙間なく並べた試料の結果であり、記号◆はそれを1/3程度間引いた場合の結果である。立体構造を持たない試料を4つのグループ（①葉表 ②葉裏 ③乾燥した葉 ④乾燥した土、湿った土、枯れた芝）に分けて、曇天日、晴天日の測定結果をそれぞれを曲線で囲んで表示する。

試料が立体構造を持たない場合、葉緑素の含有量に対応して緑葉の表面、裏面、乾燥した葉、枯れた芝生、土の順に $R(800)/R(550)$ の値が小さくなってしまっており、太陽光の入射角によらずほぼ一定の値である。また、これらの値は曇りの状態での値

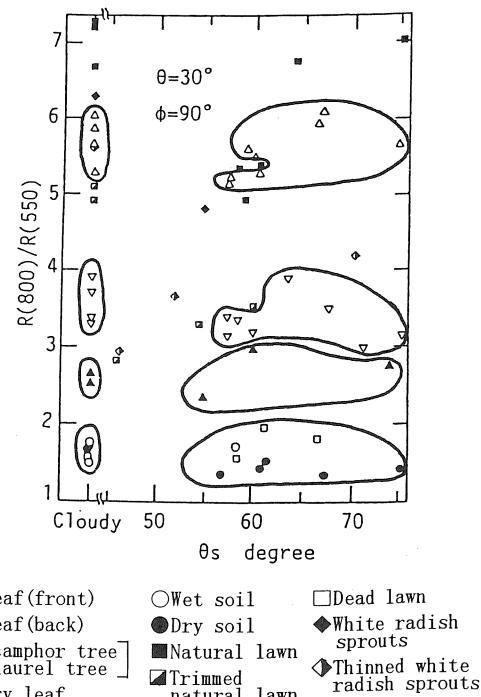


図13 自然環境表面に対する2波長帯域の指向反射指数の比と太陽光の入射条件の関係

とほぼ一致する。しかし、立体構造を持つ天然芝、かいわれ大根のそれぞれのR(800)/R(550)の値は、太陽光の入射角が大きくなるとともに大きくなつておき、これらの値は葉緑素含有量を推定する指標としては不適当である。しかし、曇りの場合には葉緑素含有量に対応した順序になっていると考えられ、葉緑素含有量を推定する指標となる可能性が示唆される。

4. 結言

環境表面として植物群落およびその構成要素を取り上げ、波長550nm、800nm帯域で太陽光入射ー指向反射特性の屋外計測を行った。その結果、次のことが明らかになった。

(1) 植物群落の波長550nm帯域の指向反射特性は、構成要素である緑葉の光学的性質のみならず、植物群落の立体構造にも強く依存する。植物群落の波長800nm帯域の指向反射の角度特性は、波長550nm帯域のそれよりも拡散的であり、構成要素である緑葉の指向反射特性に近い。

(2) 曇天日の波長550nm、800nm帯域の指向反射率の比は葉緑素含有量を推定する指標となる可能性がある。

なお、本研究で用いた器材に関してミノルタカメラ株の御協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 吉田篤正 他, "太陽光に対する屋外環境表面の分光反射特性に関する研究", 日本機械学会論文集B, 54-497 (1988), 172-177.
- (2) たとえば、平川秀樹、高木直樹, "マルチテンポラル人工衛星データによる土地利用の分類精度に関する研究", 日本建築学会計画系論文報告集, 480 (1996), 61-68.
- (3) Shultz, J.K. and Myneni, R.B., "Radiative transfer in vegetation canopies with anisotropic scattering", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 39-2 (1988), 115-129.
- (4) Verhoef, W., "Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling", *Remote Sens. Environ.*, 16 (1984), 125-141.
- (5) Kimes, D.S., "Dynamic of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies", *Appl. Opt.*, 22-9 (1983), 1364-1372.
- (6) Breece, H. and Holmes, R., "Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybean and corn leaves in vivo", *Appl. Opt.*, 10-1 (1971), 119-127.
- (7) Inada, K., "Spectral ratio of reflectance for estimating chlorophyll content of leaf", *Jpn. J. Crop Sci.*, 54-3 (1985), 261-265.
- (8) 大政健次 他, "植物の計測と診断", 朝倉書店, (1988), 140-141.