

## ブナ個葉の含水率と反射スペクトルの関係—人工乾燥と自然状態の比較—

粟屋善雄 (森林総研)・丸山温 (森林総研北海道)

要旨: ブナの葉をサンプリングして水分指標 (EWT, 重量含水率, 相対含水率) と短波放射域(400~2500nm)の分光反射率の関係について検証した。人工乾燥した葉と自然状態に近い葉 (自然状態) について両者の関係を比較したところ, 各水分指標について人工乾燥では全波長で負の相関が, 自然状態では約 800nm 以上の波長で負の相関が認められた。緑(555nm), 近赤外(860nm), 短波長赤外(1640nm)について EWT および重量含水率と反射率の散布図を描くと, 人工乾燥サンプルと自然状態サンプルが異なる傾向を描いて分布した。しかしながら 1640nm の EWT の場合は人工乾燥と自然状態のサンプルを 1本の直線で近似できたことから, 反射率を用いて水分量を評価する場合にこの波長帯で EWT を推定することが適切と考えられた。

キーワード: 反射率, 重量含水率, 相対含水率, EWT, 個葉

## I はじめに

1972年にランドサット1号が打ち上げられてから35年が経つが, 植生の反射スペクトルの特徴についての理解は必ずしも十分ではない。葉の水分量と短波長赤外(1600nm付近)の反射率の相関が高く, 水分量(例えば重量含水率)が少ないほど反射率が大きくなることが分光計測により知られており, その特徴を報告した研究は1960年代半ばから実施されているが(2,3,4,6,7,8,9,11,15), 近年のリモートセンシングのテキストに取り上げられている例は少ない。葉の含水率に関わるリモートセンシングの研究は, スペクトルから水ストレスを判定するものと(4,5,8,9,12), 樹冠水分量を推定して(14)火災危険度判定(10)などに応用するものに大別されるが, 季節が移り変わっていく中で, 樹木の葉の含水率と反射係数がどのように変化するかを指摘した論文は見あたらない。

植物生理学的には含水率よりも水ポテンシャルが重要な指標であるが, 測定にはプレッシャーチャンバーを必要とし, 手軽には測定できない。他方, 含水率には重量含水率(WC)(6)や相対含水率(RWC)(8)などがあり, 水分量を表す指標としては他に EWT(Equivalent Water Thickness)(9)がある。水ストレスの観点からは RWC を用い, 樹冠水分量の観点からは EWT を用いた研究が多いようである。Maki ら(10)はこれらの含水率と NDWI(Normalized Difference Water Index)との関係を論じているが, 反射率との関係はほとんど触れていない。

ところで, ランドサット衛星セマティックマップ

(TM) データを用いて落葉広葉樹林の反射係数を推定すると, 葉の水分量が多い新緑期(苦小牧5月末)のほうが水分量が少ない盛夏(8月)や紅葉期(10月中旬)よりも短波長赤外での反射係数が高く, 分光計測で得られている知見と矛盾する(1)。短波長赤外域での個葉の反射には含水率以外に細胞構造の違いなどが影響し(15), 林分レベルでは葉量や太陽高度も影響すると指摘されている(4)。このため, 群落レベルでの反射の季節変化の要因を明らかにするには, まず季節を変えて個葉の反射スペクトルと含水率の関係を検証しておくことが必要である。

このような背景から, 本報告では樹冠レベルでの水分量評価に結びつけることを念頭に, 人工乾燥と自然状態で測定された個葉の反射スペクトルと水分指標(WC, RWC, EWT)の関係を解析して, 各指標の特徴を検討した結果を報告する。

## II サンプルと計測方法

森林総合研究所本所(茨城県つくば市)に植栽されている樹高約7mのブナを対象とし, 異なる3本の個体の長枝から陽葉をサンプリングした。

温暖湿潤な環境にある日本では, 樹木は夜間に水分を十分補給し, 明け方気孔が開く前の蒸散はゼロである。蒸散がゼロの時の葉の水ポテンシャルは通常-0.5MPa以上でほぼ飽水状態にある(13)。そこで, 2007年7月24日の日の出時に葉をサンプリングし, 実験室に持ち帰って重量(搬入時重量)と計測時の時間を記録した。サン

Yoshio AWAYA (Forestry and Forest Products Research Institute, Matsunosato 1, Tsukuba, Ibaraki 305-8687) and Yutaka MARUYAMA (Hokkaido Research Center, For. and For. Prod. Res. Inst., 1, Hitsujigaoka, Sapporo 062-8516) Relationship between water content and reflectance spectra of beech leaves - A comparison of artificial desiccation and natural condition -

プリングから重量測定までに要した時間は約6分だった。

分光放射計 (FieldSpec FR, ADS USA) と簡易積分球 (ISP-REF, Ocean USA) を利用して葉のスペクトルを測定した。FieldSpec の観測波長域は 380~2500nm で、波長分解能は 1050nm までが約 3nm, それ以上では約 10nm で、計測結果は自動的に 1nm 間隔に内挿される。葉は光の一部を透過するためスペクトル計測では背景の物体の色の影響を受ける。そこで、個葉を 400~2500nm までの反射率が約 2% の反射板 (Spectralon SRS02, Labsphere USA) の上に載せて、背景の影響を最小限におさえて計測した。1枚の葉について 10箇所輝度 ( $S_r$ ) を計測し、反射率が 100% の標準白色板 (Spectralon SRS99, Labsphere) の計測値 ( $W_r$ ) との比をとって個葉の反射率 ( $R_s$ ) を算出した (1式)。

$$R_s = S_r / W_r \quad (1)$$

FieldSpec FR は暗電流を除去した計測値を記録するので、暗電流の補正は行わなかった。また、Terra 衛星 MODIS の観測波長帯について反射率の平均値を算出した。分光計測の直前と直後に電子天秤 (BL220-H, 島津) により葉の重量を測定して平均値を葉の重量とした。

スペクトル計測後に葉を定温乾燥器 (DX30, ヤマト科学) に入れて、温度 40°C で約 10 分間乾燥した後にサンプルを取り出して、分光計測と重量測定を繰り返し、葉の重量変化がほぼ終了するまで計測を続けた。計測終了後、温度 80°C で約 24 時間乾燥させてから絶乾重量を計測した。その後、スキャナを用いて葉面積を計測した。

WC, RWC, EWT はそれぞれ以下の式で計算した。

$$WC = (F_w - D_w) / D_w \quad (2)$$

$$RWC = (F_w - D_w) / (S_w - D_w) \quad (3)$$

$$EWT = (F_w - D_w) / L_a \quad (4)$$

ここで、 $F_w$ : サンプルの重量(g),  $D_w$ : サンプルの絶乾重量(g),  $S_w$ : 飽水時のサンプル重量(g),  $L_a$ : 葉面積( $\text{cm}^2$ ) である。なお、搬入時重量と初回のスペクトル計測前重量とに基づいて、時間間隔に比例配分させてサンプリング時の葉重量を算出して  $S_w$  とした。

この測定データに加えて 2006 年 5 月 2 日, 5 月 8 日, 9 月 15 日にサンプリング直後の自然に近い状態 (以下、自然状態と呼ぶ) で、2007 年 5 月 17 日に人工乾燥下の状態で計測した反射スペクトルと WC, EWT を利用した。

### III 解析方法

最初に WC を変えた場合の反射スペクトルの変化を、人工乾燥と自然状態の場合について比較した。

次いで、7 月 24 日のサンプルについて波長別の各水分指標 (WC, RWC, EWT) と反射率との相関係数を算出して

特徴を検証した。さらに自然状態で計測した全てのサンプルを用いて、WC, EWT と反射率の相関係数を算出して、人工乾燥と自然状態のケースを比較しながら水分指標と相関が高い波長を検証した。

この結果に基づいて、相関が高い緑 (MODIS 555nm チャンネル相当), 近赤外 (MODIS 860nm チャンネル相当) および短波長赤外 (MODIS 1640nm チャンネル相当) で、全てのサンプルを用いて WC および EWT と反射率の散布図を描いて、人工乾燥と自然状態のサンプルの分布状況を検証した。

### IV 結果と考察

ブナの場合、WC は開葉後に 400% を越えたものが、葉の成熟に伴って初夏には 100% 程度に、黄葉期には 70% 程度に減少した。EWT も WC と同様に季節変化が大きいが、RWC は葉が保持できる水分量に対する比率であるので、100% を超えることはない。7 月 24 日の 1 時点の計測結果に限れば、3つの指標の相関はほぼ 1 で各指標は比例し、それぞれが葉の水分量に対して同じように変化していることを示していた。

図-1 は葉を人工乾燥させた場合の WC 別の反射スペクトルである。全ての波長で WC が低いほど反射率が高くなっているが、変化量が大きいのは 1500~2200nm 付近の短波長赤外域である。一方、自然状態の場合の反射スペクトルと WC の関係 (図-2) は人工乾燥した場合ほど明確ではない。

人工乾燥の場合、可視から短波長赤外までの反射率と各指標との間には高い負の相関があるが、とくに 1400~1900nm 付近で高く、全波長域を通じて 3つの水分指標でほとんど差がなかった (図-3)。一方、自然状態で計測した場合は、WC と EWT のパターンに差が生じ、可視域では正、他の波長域では負の相関が得られた (図-4)。これは可視域ではクロロフィル濃度の変化によって葉の色が変わったためと考えられた。他の研究の場合、WC では多くの波長で正の相関を示す場合 (7)、EWT では本研究と同様に可視と他の波長で傾向が異なる場合 (7) や、1400nm 付近までは正で長い波長では負の相関を示す例が報告されている (6)。本研究を含めてこれらに共通するのは EWT の場合、1500~1600nm 付近で相関係数が高いことである。本事例は単一樹種でサンプル数が少ないため、相関係数が極めて高い。普遍的な結果を得るためには樹種と季節を変えてサンプル数を増やす必要がある。

波長別の散布図では 5 月 17 日, 7 月 24 日と 2006 年のサンプルが分離して分布している例が多かった。とくに

555nm の人工乾燥サンプルは反射率と水分指標の関係が非線形になっていた (図未掲載)。相関が高い 1640nm チャンネルについて反射率と WC の関係を検討すると、人工乾燥した場合と自然状態の場合とで分布の傾向が異なることが分かる (図-5)。人工乾燥と自然状態の各々については相関が認められるが ( $P < 0.01$ ), 両者を込みにすると直線では近似しがたく、対数関数で近似できた。反射率と EWT の場合は (図-6), 両者を一本の直線で回帰することができた ( $P < 0.01$ ) ことから、反射率に基づいて水分条件を評価する場合、この組み合わせが有効と思われる。図-6 は、異なるメカニズムで葉の水分量に変化しても、EWT を介して反射率から水分量を推定できる可能性を示唆している。サンプル数が少ないため断言できないが、分光反射率と植物体の水分量を論じる場合、水分指標としては EWT が扱いやすいと推察された。EWT と葉面積指数の積をとると群落の水分量を得ることができるので、短波長赤外のデータは群落レベルの水分量の推定に向いていると言えよう。

## V おわりに

個葉から群落へとスケールアップを目指すには反射スペクトルは有効な情報と考えられている。しかしながら、個葉レベルの成果を群落レベルに拡張する場合に、様々な要因を考慮する必要があることが、この研究からも実感された。今後、群落レベルでの解析に本研究の知見を生かしたい。

## 引用文献

- (1) 粟屋善雄・田中伸彦 (1999) 冷温帯森林の反射スペクトルの季節変化の特徴：ランドサット TM データを利用した解析。写真測量とリモートセンシング 38(4):35-46.
- (2) CECCATO, P., FLASSE, S., JACQUEMOUD, S. and GRÉGORIE, J. (2001) Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sens. Environ.* 77:22-33.
- (3) CIBULA, W.G., ZETKA, E.F. and RICKMAN, D.L. (1992) Response of Thematic Mapper bands to plant water stress. *Int. J. Remote Sensing* 13:1869-1880.
- (4) COHEN, W.B. (1991) Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water stress conditions.

- Int. J. Remote Sensing* 12:1865-1876.
- (5) COHEN, W. (1991) Response of vegetation indices to changes in three measures of leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57: 195-202.
- (6) DANSON, F.M. and STEVEN, M.D. (1992) High-spectral resolution data for determining leaf water content. *Int. J. Remote Sensing* 13:461-470.
- (7) DATT, B. (1999) Remote sensing of water content in Eucalyptus leaves. *Australian Journal of Botany*, 47:909-923.
- (8) HUNT, E.R. Jr., ROCK, B.N. and NOBEL, P.S. (1987) Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sens. Environ.* 22:429-435.
- (9) HUNT, E.R. Jr. and ROCK, B.R. (1989) Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. *Remote Sens. Environ.* 30:43-54
- (10) MAKI, M., ISHIAHRA, M. and TAMURA, M. (2004) Estimation of leaf water status to monitor the risk of forest fires by using remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.* 90:441-450.
- (11) PU, R., GE, S., KELLY, N.M. and GONG, P. (2003) Spectral absorption features as indicators of water status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves. *Int. J. Remote Sensing* 24:1799-1810.
- (12) RIGGIS, G.A. and RUNNING, S.W. (1991) Detection of canopy water stress in conifers using the Airborne Imaging Spectrometer. *Remote Sens. Environ.* 35:51-68.
- (13) SCHULZE, E.-D. (1991) Water and nutrient interactions with plant water stress. *In* Response of plants to multiple stresses. Mooney, H.A. *et al.* (eds.), Academic Press, London, 89-101.
- (14) SERRANO, L., USTIN, S.L., ROBERTS, D.A., GAMON, J.A. and PEÑUELAS, J. (2000) Deriving water content of chaparral vegetation from AVIRIS data. *Remote Sens. Environ.* 74:570-581.
- (15) WOOLLEY, J.T. (1971) Reflectance and transmittance of light by leaves. *Plant Physiol.* 47:656-662.

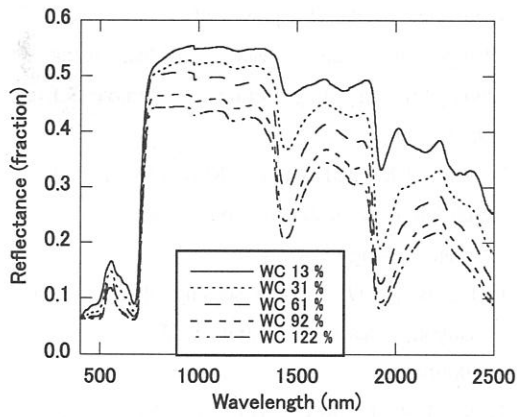


図-1. 重量含水率とスペクトルの関係 (人工乾燥)  
WCが小さくなると、全ての波長で反射率が上昇した。

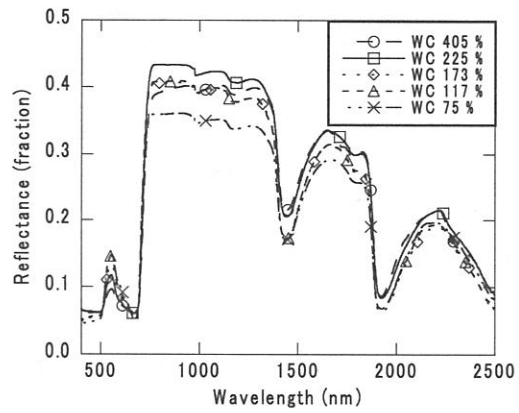


図-2. 重量含水率とスペクトルの関係 (自然状態)  
季節別のサンプルの WC と反射スペクトルの関係はあまり明確ではない。

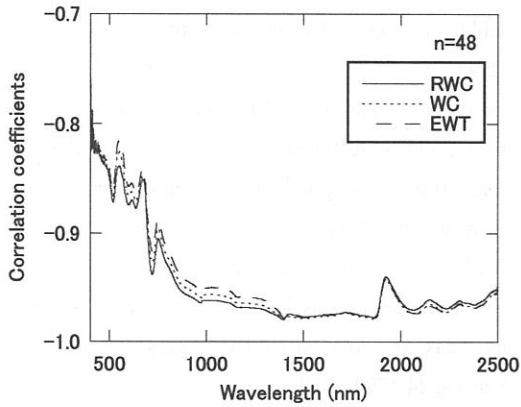


図-3. 各水分指標と反射率の相関 (人工乾燥)  
人工乾燥の場合、全波長で高い相関が見られた。全ての波長で1%の危険率で有意。

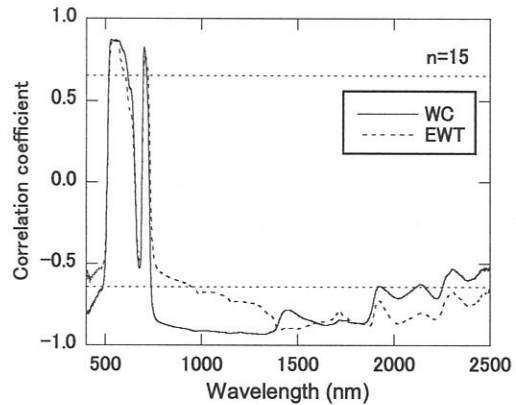


図-4. 重量含水率・EWTと反射率の相関 (自然状態)  
緑 (550nm) 付近で正、760nm よりも長い波長で負の相関が認められた。図中点線の外側は1%の危険率で有意。

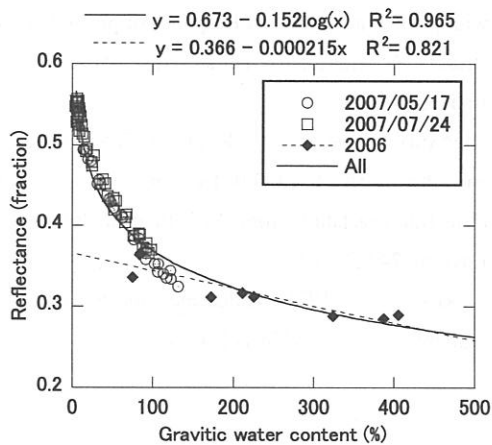


図-5. 重量含水率と反射率の関係

2006年に観測したサンプルは人工乾燥したサンプルと違う傾向を示した。(MODIS, 1640nm相当)

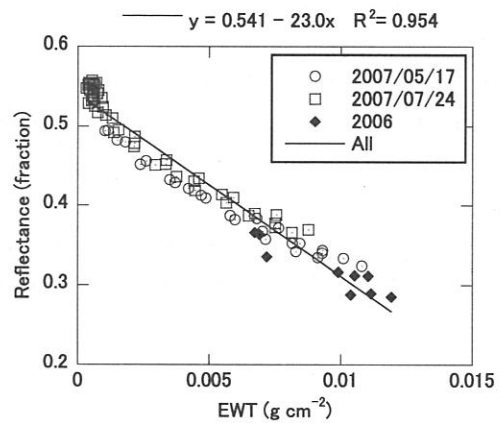


図-6. EWTと反射率の関係

2006年と人工乾燥したサンプルがほぼ同じ傾向を示し、一本の直線で回帰できた。(MODIS, 1640nm相当)