

論文

NDVI 計測に特化したカメラによる樹木単葉の風乾過程での水分状態と NDVI の関係^{*1}渡邊涼介^{*2}・作田耕太郎^{*3}・舟戸陽介^{*2}

渡邊涼介・作田耕太郎・舟戸陽介：NDVI 計測に特化したカメラによる樹木単葉の風乾過程での水分状態と NDVI の関係 九州森林研究 75：75－78，2022 NDVI（正規化植生指標）は植物の葉群が反射する光のうち、赤色光と近赤色光を捉えることで得られる指標であり、植物群落の分布や作物栽培における養分状態の把握などへ応用されている。本研究では、樹木個体の適切な管理の上で重要となる樹冠の水分状態の非破壊的な把握に資するための基礎的資料とすることを目的として、飽水から風乾過程での樹木単葉の NDVI 値について NDVI 画像の撮影に特化したカメラ（NDVI カメラ）を使用して計測を行った。材料として常緑の針葉樹と広葉樹および落葉広葉樹の計 6 樹種を選定し、それぞれについて 1 生育期間での単葉の相対含水率と NDVI との関係性を得た。風乾によって、飽水時から徐々に低下した相対含水率に対して、単葉の NDVI の値は一定、もしくは徐々に低下するという変動を示した。しかし、ある特定の相対含水率以降は急激に NDVI 値が低下するという関係性があった。飽水時の NDVI 値や、NDVI 値の急激な低下が発生するときの相対含水率は樹種や季節ごとに異なっていた。

キーワード：NDVI、非破壊測定、水分状態、画像解析、樹木葉

I. はじめに

樹木にとって水は土壌から葉へ養分を運ぶ際の溶媒であり、樹木中での生化学反応に使われるなど非常に重要な物質である (1)。植物体中の水分量は含水量あるいは相対含水量として表されることが多い (7)。これらの指標は、対象となる器官や部位などの乾燥重量を計測する必要があり、その際に植物体は破壊されることになる。継続的に植物体の健全度等をモニターする上では、可能な限り植物体が破壊されないことが望ましい。非破壊的に植物体の水分状態を推定する方法として、地球観測衛星の画像データの NDVI (Normalized Difference Vegetation Index: 正規化植生指数) から含水率を推定する方法や (2)、この技術をハイパースペクトルカメラと UAV を組み合わせることで、農業作物の栽培管理への応用も試みられている (3,5)。しかし、衛星画像の利用では樹木 1 個体を対象とすることは困難であり、山林など広範囲の地域が対象として限定される。また UAV に搭載可能で軽量なマルチスペクトルセンサは、高価で画像データの取得費用も比較的大きい (10)。樹木 1 個体の樹冠を対象とするような、比較的狭い範囲での非破壊的な水分状態の推定を試みた研究例は見あたらない。また、樹木単葉の水分状態と NDVI 値の年間を通じた関係性を明らかにすることは、NDVI 値から樹冠の水分状態を評価する上で重要と考えられるものの不明な点が多い。

本研究では、市販のコンパクトデジタルカメラを改良した、比較的安価に入手可能な NDVI カメラによって、樹木単葉の飽水から風乾過程での NDVI 値を一定間隔で取得し、そのときの単葉の相対含水率との関係性を明らかにした。また、常緑針葉樹、常緑広葉樹および落葉広葉樹を対象として生育期間を通じて撮影

を行うことで、NDVI 値と相対含水率との関係性の季節変化および樹種間差についても検討することから、幅広い樹種に対する NDVI カメラでの健全度診断の可能性について検討を行った。

II. 材料と方法

1. 供試材料

材料として、九州大学伊都キャンパス（福岡市西区）内に生育するスギ (*Cryptomeria japonica*)、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*)、タブノキ (*Machilus thunbergii*)、アラカシ (*Quercus glauca*)、エノキ (*Celtis sinensis*) およびヤマザクラ (*Cerasus jamasakura*) の単葉を用いた。いずれの樹種についても 1 個体を対象とし、対象個体の胸高直径はそれぞれ、42.6 cm, 31.9 cm, 13.7 cm, 11.3 cm, 26.7 cm, 9.3 cm であった。常緑樹 4 種は 2020 年 3 月から 12 月にかけて、落葉樹の 2 種は同年 5 月から 9 月にかけて、毎月 20 日頃の夕方に対象個体から長さ 25 cm 程度の枝を 1 本ずつ採取した。その際、地表から 2 m から 4 m 程度の高さの範囲で、光が比較的よくあたっている樹冠から枝を採取した。採取した枝は水切りしたのち、切り口を水中につけた状態とし、枝と水を入れた容器を黒色のビニール袋で覆い 24 時間以上放置して葉を飽水させた。

2. 相対含水率の測定

各枝の先端付近に着生するもっとも若い葉を各樹種 3 枚ずつ切り離し、風乾させながらそれぞれ 1 時間ごとに計 20 時間程度、生重量の計測を行った。計測終了後、人工乾燥器によって葉を 70℃で 72 時間以上乾燥させ、絶乾重量を計測した。また、得ら

^{*1} Watanabe, R., Sakuta, K. and Funato, Y.: Relationships between NDVI and Hydraulic Status of Single Tree Leaves through Air Drying Process with Using The NDVI Camera.

^{*2} 九州大学大学院生物資源環境科学府 Grad. Sch. Biores. & Bioenv. Sci., Kyushu Univ. Fukuoka 819-0395, Japan

^{*3} 九州大学大学院農学研究院 Fac Agric., Kyushu Univ., Fukuoka 819-0395, Japan

れた生重量と絶乾重量をもとに各計測時での相対含水率を算出した。なお、相対含水率は以下の式(1)で計算した。

$$(\text{相対含水率}) = 100 \times \frac{(\text{各時間の生重量}) - (\text{絶乾重量})}{(\text{飽水時の生重量}) - (\text{絶乾重量})} \quad (1)$$

各樹種3枚の葉の各計測時の相対含水率より平均値を算出した。

3. NDVI 値の推定

NDVIは、植物の葉に含まれるクロロフィルが可視光域の赤色域の波長帯を強く吸収し、葉の細胞構造が近赤外域の波長帯を強く反射する特性を利用し、この2つの波長帯の反射率を用いて算出される指標である(6)。一般的に、対象範囲の植物の量や活性度が大きいほど値は大きくなる。なお、NDVIは以下の式(2)で表される。

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (2)$$

ここで、 ρ_{NIR} は近赤外域の表面反射率を、 ρ_{RED} は可視赤色域の表面反射率をそれぞれ表す(2)。

本研究においては、生重量の計測直後に葉を実験台上に置き、人工太陽照明(XC-100E, セリック株式会社)によって光を単葉の真上から当てた状態で、三脚を用いて撮影角度を固定したNDVIカメラ(Yubaflex, BIZWORK社)でNDVI画像を撮影した。光とカメラのなす角度は30度、カメラと単葉がなす角度は60度とした。この状態で、葉にあたる人工太陽照明による光子束密度は約 $270 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、夏場の快晴日の早朝や夕方あるいは曇天日の光強度に近かった。撮影終了後、得られた画像をカメラに付随する解析ソフト(Yubaflex)によって、NDVI値を測定した。NDVI値の測定にあたっては、図-1に示すように1枚の単葉につき10か所のNDVIを計測した。樹種ごとに単葉3枚ずつを供したことから、計30か所の計測値の平均を求め、代表値とした。

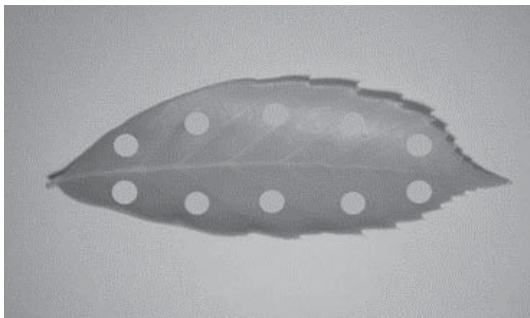


図-1. 撮影されたNDVI画像とNDVI値の計測箇所の例

Ⅲ. 結果と考察

1. 時間経過に伴うNDVI値と葉重の変化

季節や樹種を問わず、生重量は風乾の時間経過に伴って徐々に減少していく傾向にあった。また、NDVI値はある特定の時間が経過するまでは一定の値を保つ、もしくは徐々に低下し、その後急激に低下する傾向を示した。図-2にはNDVI値と葉重の変化が分かりやすいアラカシの7月測定結果を示した。

NDVI値の急激な低下が生じた原因の一つとして、葉中の水分

の減少によって細胞の膨圧が失われ、健全な生理活動が維持できなくなったことがあげられる。ヒノキにおいては、圧ポテンシャルが0になる際の相対含水率は60%から75%程度と報告されており(8)、この数値は本研究で確認された、ヒノキにおける急激なNDVI値の低下が生じた際の相対含水率とおおむね一致していた(図-3)。すなわち、風乾過程でのNDVI値の急激な低下は葉の膨圧が失われたことで細胞の健全な生理活動が維持できず、クロロフィルの濃度や活性、また葉の構造の急激な変化などが生じたためと考えられた。このことより、急激なNDVI値の低下が生じるときまでが、葉の健全な生理活動が行われる水分状態と予測される。

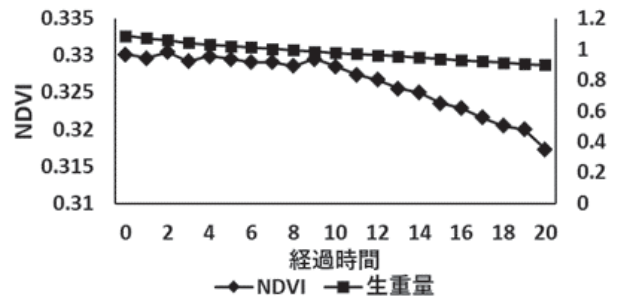


図-2. 時間経過に伴う生重量とNDVI値の変化(アラカシ7月)

2. NDVI値と相対含水率の関係

葉の相対含水率の低下にともなって、NDVI値は樹種や季節を問わずにほとんどの場合で図-3に示すように、ある特定の値に到達するまでは一定の値を保つ、もしくは徐々に低下するという変化を示した。その後、さらに相対含水率が下がり、ある特定の値に達するとNDVI値は急激に低下していった。なお、相対含水率100%のとき(飽水時)のNDVI値や、NDVI値の急激な低下が始まる際の相対含水率は樹種や季節ごとに異なった。

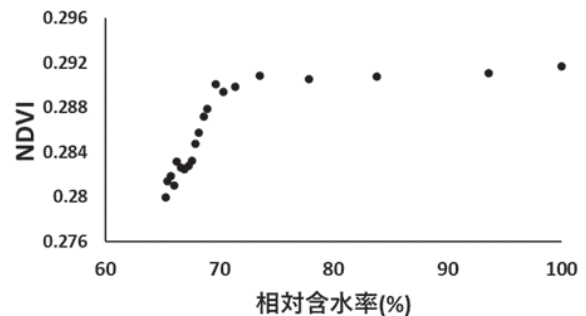


図-3. 相対含水率に対するNDVI値の関係(ヒノキ7月)

本研究で得られた上記の関係性を、地球観測衛星Landsat-5/TMによって撮影されたNDVI画像を解析して得られたNDVI値とスダジイの葉の葉内含水率の関係(2)と比較した(図-4, 5)。図-5の含水率は葉の生重量に対する水分量である。本研究で得られた単葉の相対含水率に対するNDVI値の関係性(図-4)は、衛星画像によって得られた結果(図-5)と同様の関係性だった。すなわち、葉のNDVI値はある特定の水分量(含水率や相対含水率)に到達するまでは一定の値を保つ、もしくは徐々に低下し、その後急激に低下していくという挙動を示すとい

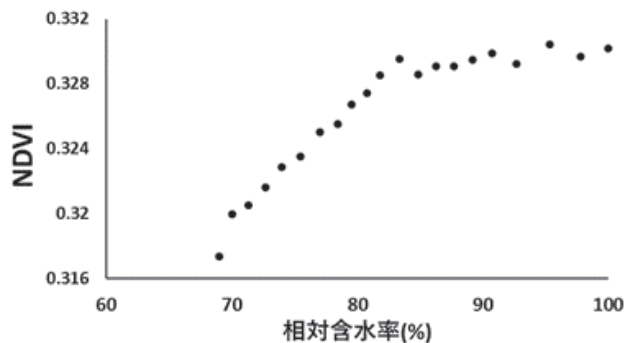


図-4. 相対含水率に対する NDVI 値の関係 (アラカシ7月)

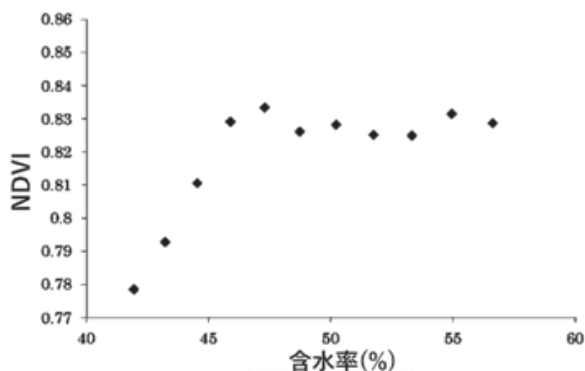


図-5. Landsat-5/TM によるスタジイの葉の NDVI 値と葉内含水率の関係 ((2) より一部改変)

える。

図-4と5における NDVI 値に比較的大きな差があった理由の一つとして、NDVI 画像の撮影環境の違いが考えられる。本研究では屋内において人工太陽照明を用い、入射光および単葉とカメラの角度を固定した状態で撮影を行ったのに対して、図-5では昼間の屋外に対象林分から葉を採取し、そのときの含水率と鉛直方向からの衛星による画像が使用されている(2)。そのため、光強度や入射光の角度、および撮影対象とカメラの撮影角などは異なる。これらの相異によって全体的に NDVI 値が異なっていた(急激な低下が生じる直前の NDVI 値で約0.5の差)と考えられた。

よって、樹種や個体あるいは生育状態や時期など撮影条件による固有の NDVI 値を事前に確定させておくことが出来れば、NDVI カメラを用いた葉の水分状態の推定は可能であると考えられる。

3. 樹種間の NDVI の違い

飽水時の NDVI 値の樹種間差の例として、9月の飽水時における各樹種の NDVI 値を図-6に示した。以下、図-6~8の異なるアルファベットは、互いに有意な差が認められたことを示している (statcel 3, Scheffe's F test, $p < 0.05$)。飽水時の葉の NDVI 値には樹種間差が認められ、落葉広葉樹は常緑樹に比べて飽水時の NDVI 値が高い傾向を示した。樹種間で飽水時の葉の NDVI 値に差が認められた理由としては、常緑樹と落葉樹の葉における細胞構造や葉の厚さに差があることがあげられる。

NDVI は、前述したように、クロロフィルと葉の細胞構造の影

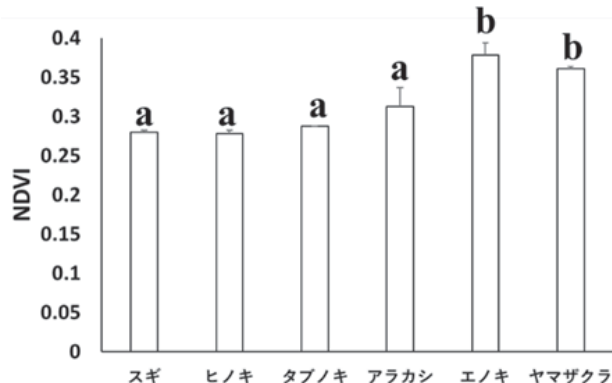


図-6. 9月における飽水時の NDVI 値

響をうける(6)。NDVI は葉の表面での光の反射率を利用しているが、表面反射率を把握する上では、葉への入射光のうち反射、吸収そして透過する光の割合が葉によって異なることが想定され、葉の細胞構造や厚さによってこれらの成分割合は決定されると考えられる。一般的に、常緑樹は落葉樹に比べて単位面積当たりの葉の乾燥重量 (LMA: Leaf Mass Area) が大きい、つまり葉が厚いことが知られている。このことは、本研究でも確認することができた(図-7)。常緑樹は、葉が相対的に厚いことから近赤外領域の吸収割合が高く、近赤外領域の反射割合が低かったことにより、落葉樹よりも低い NDVI 値を示した可能性がある。また、葉が厚い樹種は光合成タンパクの割合が低いことも報告されており(12)、葉の厚い常緑樹では光合成タンパクの一つであるクロロフィルが相対的に少ないことが、より低い NDVI 値に反映した可能性もある。今後このようなことを明らかにするためには、NDVI のように葉の表面での反射率を利用する指標に加えて、葉での透過や吸収などについても観測を行う必要がある。

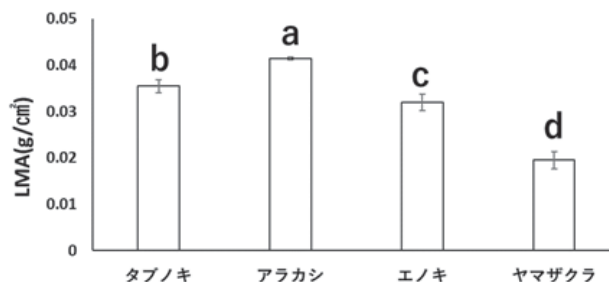


図-7. 9月における各樹種の LMA

4. NDVI の季節変化

樹種ごとの飽水時の葉の NDVI 値の季節変化について図-8に示す。スギは3月の NDVI 値が最も高く、12月に最も低い値を示した。ヒノキはスギと同様の变化傾向にあったが、季節変化はスギより小さかった。タブノキには年間を通しての NDVI 値の変化に一定の傾向を見いだせず、アラカシと落葉広葉樹は春先に NDVI 値が低くその後高くなる傾向にあり、特にエノキでは顕著だった。なお、6月のタブノキと7月のヤマザクラでは、どちらのケースでも測定中に黄色や茶褐色への葉の変色が比較的早期に生じていた。

NDVI は葉内のクロロフィルの影響を受けており、落葉広葉樹においては秋季の紅葉などによってクロロフィルの濃度が低下す

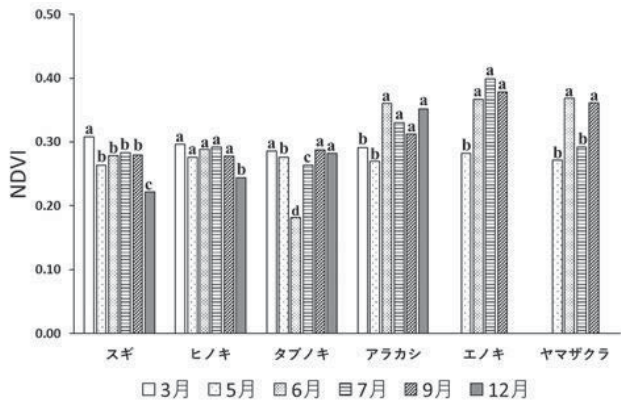


図-8. 樹種ごとの飽水時のNDVI値の季節変化

ることが報告されている(10)。また、NDVIとクロロフィルの量および濃度は正の相関を持つことも報告されている(9)。すなわち、6月のタブノキと7月のヤマザクラにおいては実験開始時の飽水が何らかの理由によって不十分であったために、葉内の含水率と生理機能が早期に低下し、クロロフィルの変成や減少(葉の変色)の発生によって、可視赤色域の反射率が増大したことで飽水時のNDVI値が低かった可能性があった。

また、アラカシ、エノキ、ヤマザクラなどで示されたNDVI値が春先に低く、その後高くなる傾向についてもクロロフィル量、および濃度の高低が影響したものと考えられた。落葉広葉樹のNDVIは春先に低く、夏にかけて高まった後に落葉に向けて低くなっていく傾向があり、針葉樹については夏季には落葉樹より低く、冬季には広葉樹より高くなるものの年間の挙動では同様の傾向を示し(9)、葉内クロロフィルの季節変化もNDVI値と同様の季節変化とされている(10)。このようなクロロフィル濃度とNDVIとの正の相関によって、本研究でのNDVI値の季節変化が認められたと考えられた。

以上のように、NDVIカメラによる葉の水分状態の推定を行う際にはNDVIの季節変化についても配慮する必要があると言える。

IV. まとめ

本研究より、常緑樹4種と落葉広葉樹2種の葉の水分状態(相対含水率)とNDVI値の関係性は、衛星画像を用いた既報(2)と同様の関係性であり、比較的安価なNDVIカメラによる樹冠の水分状態判定の可能性を見いだすことができた。ただし、単葉

レベルでのNDVI値の種間差や季節変化は比較的顕著であり、このようなことについては十分に考慮する必要があると考えられた。今後の展望として、NDVIカメラを用いた樹体の水分状態推定の実用化に向けては、樹種間差の要因、NDVI値の急激な下降が生じる際の相対含水率などについて検討していく必要がある。また、屋外での使用に向けては、光や角度などの撮影条件の違いがNDVI値に与える影響などの関係性や樹冠内での測定部位による差異などについて明らかにしていくことで、樹木1個体を対象とした含水率推定へと発展させることができると考えられる。

本研究の一部はJSPS科研費JP18H04152の助成を受けた。

引用文献

- (1) 福島和彦, 船田 良, 杉山淳司, 高部圭司, 梅澤俊明, 山本浩之(2011)木質の形成2版 p.473 海青社 滋賀
 - (2) 福田真也(2016)リモートセンシングによる斜面の土壌水分域の抽出に関する基礎的研究 長崎総科大大学院 学位論文
 - (3) 濱侃, 早崎有香, 望月 篤, 鶴岡康夫, 田中 圭, 近藤昭彦(2016)水文・水資源学会誌29(1)44-54
 - (4) 石田圭佑, 桑田賢太郎, 玉井修二(2016)農業農村工学会誌84(9)769-772
 - (5) 片桐哲也, 安藤和登, 松本由美, 森 静香, 藤井弘志(2016)計測と制御55(9)806-809
 - (6) 加藤正人(2010)森林リモートセンシング第3版-基礎から応用まで- p.172-176 森林林業調査会 東京
 - (7) 丸山 温(1996)森林科学17 p.63
 - (8) 水永博己(1985)日林誌68(11)454-461
 - (9) T. Tada, S. Kazama, M. Sawamoto(1994)J. Japan Soc. Hydrol. and Water Resour. 7(2) 114-119
 - (10) Y. Tadaki, M. Kinoshita(1988)J. Jpn. For. Soc. 70(11) 488-490
 - (11) 玉城 聡, 花岡 創, 福田陽子(2020)北方森林研究68 43-46
 - (12) Y. Onoda, I. J. Wright, J. R. Evans, K. Hikosaka, K. Kitajima, Ü. Niinemets, H. Poorter, T. Tosens and M. Westoby(2017)New Phytologist. 214(4) 1447-1463
 - (13) H. Poorter, Ü. Niinemets, L. Poorter, I. J. Wright, R. Villar(2009)New Phytologist 182(3) 565-588
- (2021年11月15日受付;2021年12月17日受理)