

原著論文

Water deficit index (WDI) を用いた丹沢山地における ブナ群落の衰退状況の評価

Estimation of Beech Forest Decline in Tanzawa Mountains using Water Deficit Index (WDI)

石村彰大、清水 庸、Parinaz Rahimzadeh Bajgiran、大政謙次*
Akihiro Ishimura, Yo Shimizu, Parinaz Rahimzadeh Bajgiran and Kenji Omasa*

東京大学 大学院農学生命科学研究科 〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1
Department of Biological and Environmental Engineering, Graduate School of Agricultural and Life Sciences,
The University of Tokyo
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8657, Japan

(2010年6月11日受付、2010年8月23日受理)

ABSTRACT

We have estimated natural beech forest decline at Tanzawa mountains spreading over Kanagawa, Yamanashi and Shizuoka prefectures, in which the decline has become a serious problem since 1980s, using multi-temporal 8day-composite data obtained from MODIS aboard the Terra satellite, AMeDAS data in 2007 and GDEM (Global Digital Elevation Model) obtained from ASTER aboard Terra. The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and WDI (Water Deficit Index) maps, which indicate vegetation density and the difference of transpiration rates between similar vegetation density areas, were derived from these data and compared with an existing mortality-map of beech forests at the study area in order to verify their accuracy. To produce WDI-map, we calculated maps of air temperature using AMeDAS data and GDEM. The interpolation method using the environmental lapse rate calibrated air temperature maps with the good accuracy of RMSE = 0.49K. The WDI-map could detect the mortality more accurately than NDVI-map in summer although both maps were effective in spring. Considering the characteristic of WDI, the index detects forest decline inducing the reduction of transpiration rates caused by air pollution and water deficit. Therefore WDI could be expected as an index for monitoring vegetation decline.

Key words : Beech decline, MODIS, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Tanzawa mountains, Water Deficit Index (WDI)

1. 緒 言

丹沢山地は神奈川県北西部に位置し、山梨・静岡両県にまたがる山地である。ブナやモミの原生林など豊かな自然が残っており、国定公園にも指定されている。しかし、1980年代よりブナやモミの立ち枯れが深刻化しており、森林の衰退は現在も進行中である。衰退要因として、オゾンに代表される光化学オキシダントによる大気汚染や水分ストレス、病虫害などが挙げられるが、衰退要因の絞り込みや衰退機構の解明には至っていないのが現状である(丸田・臼井、1997a; 丸田・臼井、1997b; 山根ら、2007a)。

丹沢山地のような山岳地において、広域を対象に定期的かつ高頻度に現地調査を行うことは困難であり、効果的な植生モニタリング手法の確立が必要とされる。広域を対象としたモニタリング手法には、航空機や衛星に搭載されたセンサにより取得されるリモートセンシングデータの利用が有用である。例えば、丹沢山地を対象として、衛星データを用いてモニタリングを行った研究として、2時期のLANDSATデータを使用して、土地被覆分類を行い、変化域を抽出することで裸地や崩壊地の検出を行った例がある(鎌形・原、2007)。また、他の地域を対象に航空機や衛星を用いて植生のモニタリングを

*Corresponding author : Phone: +81-3-5841-5340, Fax: +81-3-5841-8175, E-mail: aomasa@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

行った例として、都市近郊の大気汚染地域を対象とし、森林温度の違いから気孔や蒸散速度への影響を調査した例 (Omasa et al., 1993, 2002) や半乾燥地域の干ばつ調査 (Rahimzadeh et al., 2009) などの例がある。このうち Rahimzadeh et al. (2009) では衛星データとして MODIS データを使用している。MODIS データは、空間分解能は中程度 (250 m、500 m、1000 m) だが、日単位の高頻度観測が可能であり、広域を対象として時系列変化を解析する場合に有効である。また、植生の生理生態的な情報である植生密度を評価する NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) や蒸発散速度を評価する WDI (Water Deficit Index, Moran et al., 1994) の算出が可能である。

そこで、本研究では高頻度にデータ取得が可能な MODIS データ、ASTER より取得した標高データ、アメダス観測点のデータを使用して、植生密度と相関のある NDVI と蒸発散速度を評価する WDI について空間分布図を作成し、現地調査により得られたブナ林の枯死状況図 (山根ら, 2007b) と比較する。そして MODIS データにより丹沢山地におけるブナ群落の枯死状況や、さらに、気孔閉鎖に関する蒸散速度などの生理生態的变化を検出できる可能性について検討することを目的とする。

2. 研究対象域

対象域は丹沢山地を含む約 6300 km² (東経 138.62~139.40 度、北緯 35.33~36.00 度) の領域である。本研究の対象域を Fig. 1 に示す。Fig. 1 下図の点線で囲まれた領域は丹沢大山国定公園と県立丹沢大山自然公園を合わせた領域で、ブナ林の衰退はこの領域内にて報告されており、特に衰退の深刻化している区域は国定公園特別保護区域内にある。

3. 解析手法

3.1. 使用データ

衛星 Terra に搭載されたセンサ、MODIS より取得されたデータを用いた。MODIS は波長 0.40~14.4 μm の範囲に 36 バンドの観測波長帯を有し、利用目的に応じた様々なデータプロダクトを提供している。本研究では、各ピクセルに分光反射率の情報を持つ MOD09A1 データ (空間分解能 500 m) と、地表面温度の情報をもつ MOD11A2 データ (空間分解能 1000 m) の 2 種類の規格のデータを利用した。いずれのデータも観測は日単位で行われるが、雲やノイズの影響を除去するため 8 日間のコンポジット処理が施されている。2007 年の 46 シーン

のデータを使用した。研究対象域におけるピクセル数は、空間分解能 500 m で 24820 ピクセルである。データにはあらかじめ地上基準点による幾何補正が施されており、ピクセルの位置情報について深刻なずれはないとする。

対象域の気温分布図を作成するため、対象域に分布する 10 点のアメダス観測点 (神流、秩父、鳩山、所沢、小河内、八王子、野辺山、勝浦、大月、山中) における日単位気温データと各観測点の高度情報を取得した。また、気温の標高補正を行うため Terra に搭載されたセンサ、ASTER より取得した対象域の Global Digital Elevation Model (GDEM) データ (空間分解能 30m) を使用した。

森林の枯死状況の現地調査データとして、ブナ林の衰退実態調査 (山根ら, 2007b) における、ブナ林の枯死状況調査図を利用した。手法として、1977 年と 2004 年の空中写真 (分解能 25 cm) を利用したテクスチャ解析により、2 時期の樹冠粗密度の変動を計算することで枯死木の検出を行っている。枯死状況はそれぞれ、1 km²

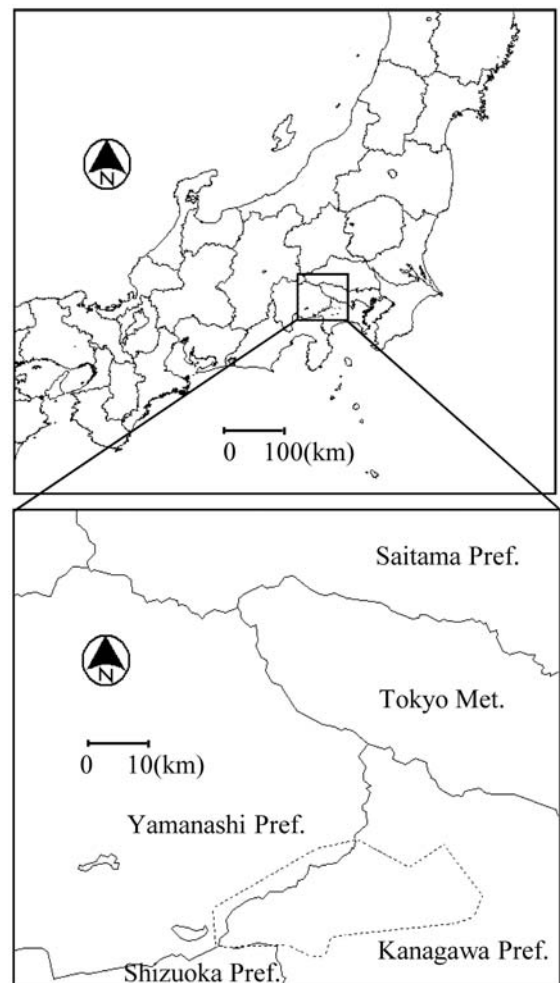


Fig. 1 Location of the study area. The dotted line in the lower figure indicates Tanzawa-Oyama Quasi-National Park where serious beech forests decline is reported.

のグリッド内に存在する枯死木の本数に応じて Low, Mid., High の3段階に分けられており、Low は 1 km² あたり 200 本以下、Mid. は 201 本から 400 本、High は 401 本以上である。

3.2. 解析手法

Fig. 2 に解析の手順を示す。図中の平行四辺形は使用データを、長方形は処理を示す。Ts は地表面温度、Ta は気温を示す。本研究では NDVI と WDI についてそれぞれ空間分布図を作成し、現地調査データ（山根ら、2007b）との比較を行い、各指標値と枯死状況との対応関係を検証した。データは全て緯度・経度の情報を持つ画像データとして処理を行う。MODIS データの前処理として MOD09A1, MOD11A2 の各データについて、投影変換を行い、雲やノイズの影響を除くためにマスク処理を行った。

3.2.1. NDVI

NDVI は赤色波長帯をよく吸収し、近赤外波長帯をよく反射するという植生の分光反射特性を利用した植生指標であり、近赤外波長帯の反射率と赤色波長帯の反射率の差分を正規化することで計算される。MODIS の観測波長帯では赤色波長帯として Band1 (620~670nm)、近赤外波長帯として Band2 (841~876nm) の分光反射率を取得できる。MODIS の観測波長帯を利用した NDVI

の計算式は以下の通りであり、これより各ピクセルに NDVI の値をもたせた。NDVI は -1 から +1 の値をとり、植生密度が高いと赤色波長帯 (Band1) の反射率が低下するため、1 に近い値をとる。

$$NDVI = \frac{Band2 - Band1}{Band2 + Band1} \quad (1)$$

3.2.2. Ts-Ta

WDI の値を計算するためには各ピクセルにおける NDVI と Ts-Ta の値が必要である。そのため Ts-Ta の空間分布図を作成する。まず Ta の空間分布図の作成方法を示す。対象域における 10 点のアメダス観測点より各観測点における日単位気温データを取得し、10 点のうち各ピクセルと最も近い 4 点の観測点における気温について距離の重み付けを行い、各ピクセルの距離の重み付き平均気温を計算した。その後、平均気温について標高データを用いて高度補正を行った。気温減率は国際標準大気で定義された 6.49 (K/1000 m) を使用した。Ts の値は MODIS データより取得されるが、本研究で用いた MOD11A2 データは日単位で取得されたデータに対して 8 日間のうち信頼性の高い (雲やエアロゾル、センサのノイズの影響の少ない) 値の平均値を各ピクセルにもたせるといったコンポジット処理が施されており、Ta の値もこれと同期させるため 8 日間の平均気温に計算した値を各ピクセルにもたせ、2007 年の 46 シーンの Ta 分布図を作成した。Ts の分布図は MOD11A2 データより取得可能であり、Ta の分布図と差分値を計算し、Ts-Ta の分布図を作成した。

Ts-Ta の値は一般に蒸発散速度に対応する値として用いられる。蒸発散速度が大きいと Ts は潜熱の影響により、低い値となり Ts-Ta は小さくなる。逆に蒸発散速度が小さいと Ts-Ta は大きくなる。日射や気流が一定という条件下において、Ts-Ta は蒸発散速度の程度を示す指標として比較できる。

3.2.3. WDI

WDI は NDVI と Ts-Ta の値から計算される、葉量に応じた蒸発散速度の違いを評価できる指標である。ある葉量の条件下において潜在的に可能な最大の蒸発散速度を LE_p 、実際の蒸発散速度を LE とすると WDI は Eq.(2) より計算される。蒸発散速度が相対的に小さいと WDI は 1 に近い値をとることになる。

$$WDI = 1 - \frac{LE}{LE_p} \quad (2)$$

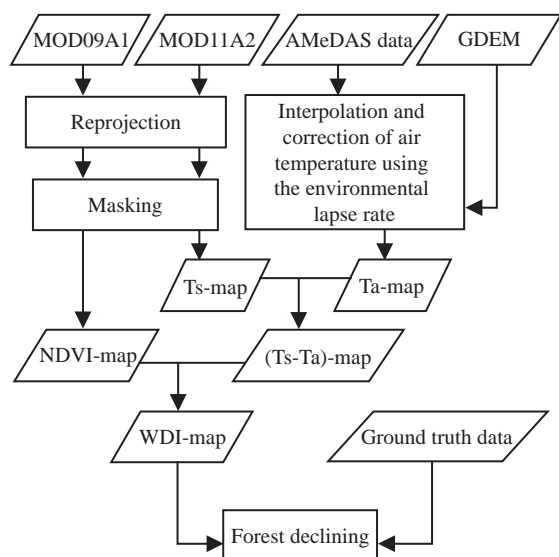


Fig. 2 Flow chart of the image processing. MOD09A1 and MOD11A2 are MODIS data. AMeDAS data have daily temperature values and their altitudes. GDEM is Global Digital Elevation Model obtained by ASTER. Ts is surface (soil and canopy) temperature, Ta is air temperature. Ground truth data is GIS-data of beech forest's mortality in Tanzawa mountains (Yamane et al., 2007b).

実際に衛星データと気象データを用いて WDI を計算する方法を説明する。縦軸 NDVI、横軸 Ts-Ta の特徴空間上に対象域のピクセルのもつ値をプロットしていき、プロットを含むように台形を設定する (Fig. 3)。台形の各頂点は特徴的な環境条件にあることを示し、1) 湿潤で植生密度が高い、2) 乾燥しており植生密度が高い、3) 湿潤な裸地、4) 乾燥した裸地となる。WDI は NDVI 一定の直線上の各ピクセルについて、Ts-Ta の相対的な位置を示す指標である。Fig. 3 において点 C にプロットされたピクセルについて WDI の値は線分 BC, AB の長さを用いて Eq.(3) より計算される。

$$WDI = 1 - \frac{LE}{LE_p} = 1 - \frac{(Ts-Ta) - (Ts-Ta)_{dry}}{(Ts-Ta)_{wet} - (Ts-Ta)_{dry}} = 1 - \frac{BC}{AB} \quad (3)$$

Moran et al. (1994) において台形の 4 頂点はそれぞれ実測値に基づいて決められている。本研究においては、NDVI と Ts-Ta の実測値は取得出来ないため、森林や裸地、畑地など多くの環境条件を含むように対象域を設定し (Fig. 1 下図全域)、NDVI の 0.1 刻みのプロットにおける 95% 信頼区間に相当する、平均値 ± 2 標準偏差の点を線形回帰することで線分 1)-3), 2)-4) を設定した (Fig. 3)。

WDI の値は 0 から +1 の値をとり、1 に近いほど相対的に蒸発散速度が低下していることを示す。WDI は NDVI 一定、すなわち植生密度が同じピクセル間での蒸発散速度の違いを評価しており、葉がついていながら

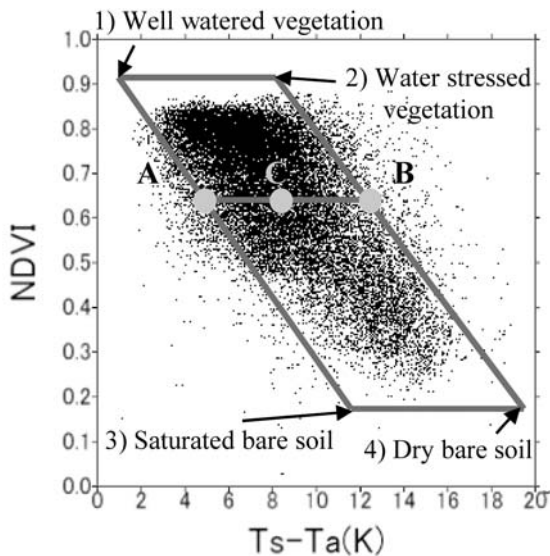


Fig. 3 Definition of WDI. The plots are calculated from the data of May 1 to 9 in 2007. This trapezoidal shape shows the difference in potential evapotranspiration under each vegetation density. The WDI at point C is given by $1-BC/AB$, as shown in Eq.(3).

も、相対的に蒸発散速度の低下している状況を検出することが可能と考えられる。なお、十分に植生で被覆され、また、葉表面が濡れていない場合には、WDI は気孔を介した蒸散速度の指標とみなせる。

4. 結果および考察

作成した 46 の気温分布図のうち 2007 年 7 月 28 日から 8 月 4 日までの 8 日間の平均気温の分布図を Fig. 4 に示す。精度を検証するため、解析に使用した 10 ヶ所のアメダス観測点のうち大月における気温データを除いて同様の手法により気温分布図を作成し、推定時に外した大月における実測値と推定値を比較した。その結果 RMSE = 0.49K と高い精度で推定できた。

落葉樹が葉をつけ始める春季 (2007/05/01~2007/05/08) と植生密度が最大化し、健全な植生と被害を受けている植生間の葉量および蒸発散速度の差が最大となると考えられる夏季 (2007/07/28~2007/08/04) のデータについて解析を行った。

夏季の NDVI 空間分布図、WDI 空間分布図を Fig. 5 に示す。白いピクセルはマスク処理により除去されたピクセルである。NDVI の値は全体的に 0.8 以上という高い値をとっており、空間的な値の差もほとんどみられない。これは全体的に植生密度が高く、枯死木の存在を検出できていないといえる。一方、WDI は空間的に値の差が見られ、値の高い領域と低い領域がまとまっている。NDVI が一様に高い値をとり、植生で十分被覆されていたことより、葉量は同程度だが蒸発散速度に差のある領域がまとまって存在しているといえる。

春季と夏季のデータについて、山根ら (2007b) の現地調査データにおいて枯死状況が Low, Mid., High に分

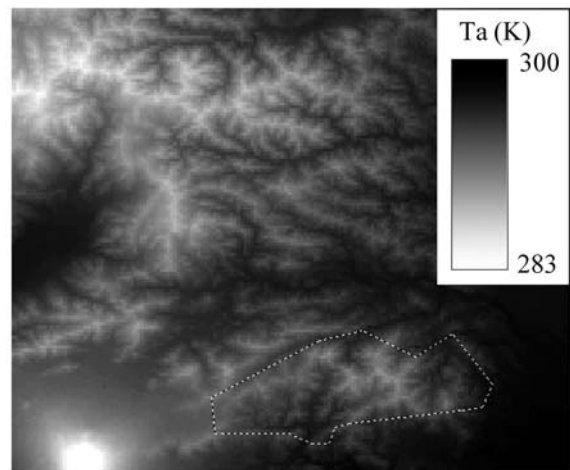


Fig. 4 Ta-map (the average of July 28 to August 4 in 2007) calculated by AMEDAS data and GDEM data.

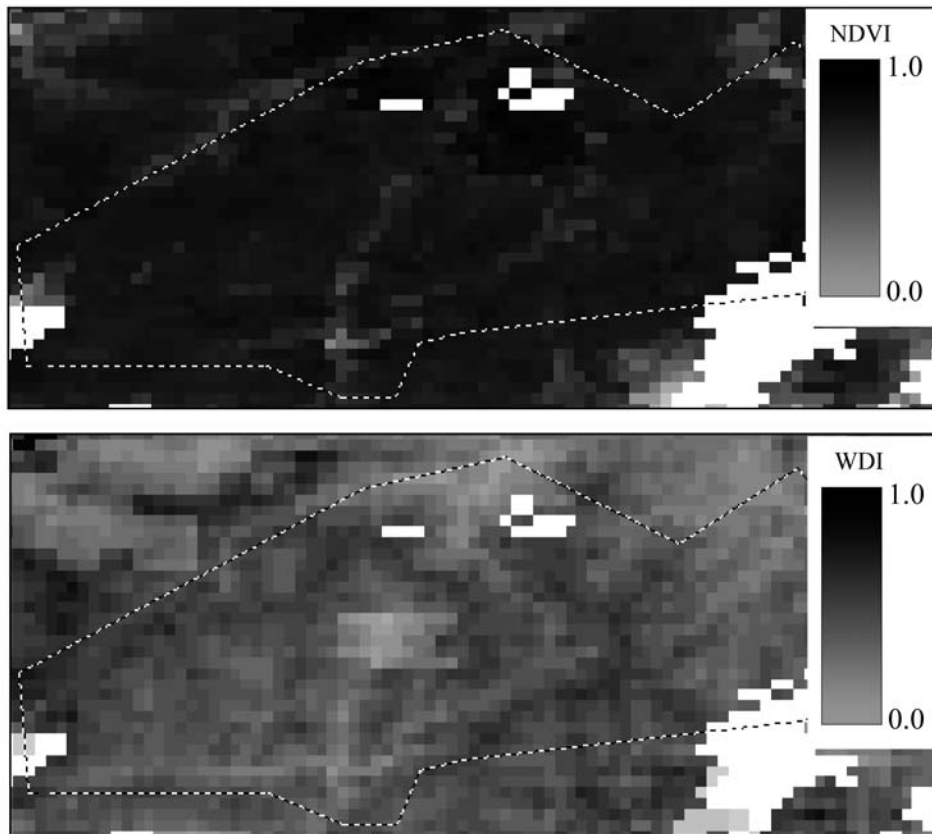


Fig. 5 NDVI and WDI-map calculated from MODIS composite data obtained from July 28 to August 4, 2007. White pixels are no data area deleted by the cloud masking.

類されたピクセルにおける NDVI と WDI の値について対応関係を示したものを Fig. 6 に示す。有意差の検定には分散分析の後、LSD 法（最小有意差検定）を使用した。春季、夏季のどちらのデータにおいても WDI の方が NDVI に比べて枯死状況を反映している。特に夏季の NDVI の値は 0.9 に近い高い値をとっており、枯死状況を反映しているとはいえない。また、春季と夏季で WDI の値を比較すると春季の WDI の方が夏季のものと比較して、枯死状況と強い対応関係をもっていることがわかる。

MODIS データより計算された 2 つの指標について、NDVI は春季においては枯死状況を反映していたものの夏季は枯死状況を反映しておらず、一方、WDI は春季・夏季ともに枯死状況をよく反映していた。

植生密度が等しいピクセル間での蒸発散速度の差を評価する WDI の導出過程の性質上、夏季の結果は、葉のついていない枯死木というよりは、葉がついていながらも通常より蒸発散速度の低下している状態にある植生を検出しているといえる。WDI は蒸発散速度が低下している領域を検出することで、枯死状況の検出に繋がったといえる。蒸発散速度を低下させる要因としては大気汚染や水分ストレスによる気孔閉鎖が考えられる。

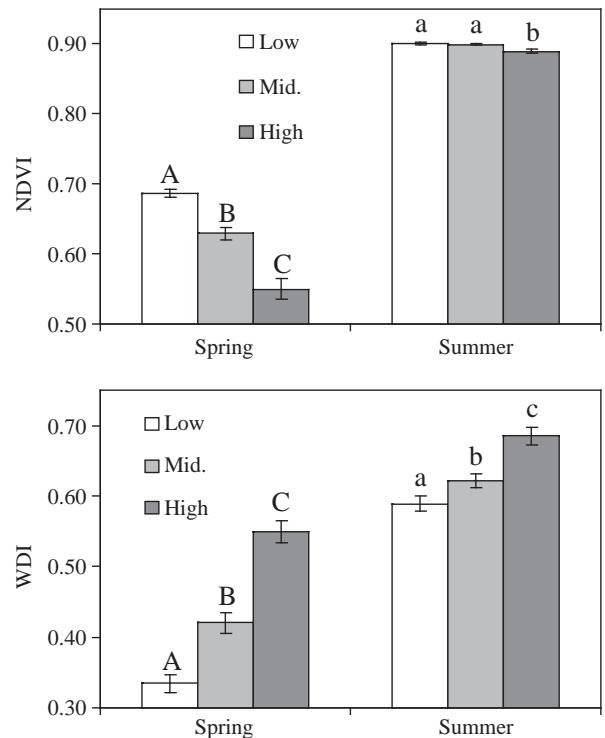


Fig. 6 Values of NDVI and WDI in areas classified as low, mid. and high by the ground truth data in spring and summer. Columns marked by different letters are significantly different at $p < 0.05$ according to LSD, one-way ANOVA. Error bars show the standard error of the mean (SEM).

一方、春季においては、葉の展開との関係で、植生密度（葉量）の指標である NDVI にも影響が見られた。丹沢山地においては局所的に高濃度のオゾンが分布していることが報告されており（河野ら、2007）、春季の NDVI の違いは、枯死状況の直接的な検出に加えて、オゾンによる葉の展開への影響の可能性を示唆している。また、WDI により、オゾンによる気孔閉鎖を蒸発散速度低下として検出している可能性も考えられる。

以上より、MODIS データより算出された指標、特に WDI を用いて、春季、夏季にかかわらず丹沢山地のブナ林の枯死状況を評価できることが分かった。しかしながら、WDI はその特性上、直接枯死木を検出しているわけではなく、大気汚染や水ストレスなどの衰退要因が深刻化し、蒸散速度の低下や枯死に至る可能性の高い地域を検出しているといえる。WDI は植生の衰退進行度の評価に有用であると期待される。

参考文献

- Kamakata, N. and Hara, K., 2007: Development the monitoring technique using Satellite remote sensing data. *In Reports of scientific investigation on Tanzawa-Oyama* (ed. by Institution of scientific investigation on Tanzawa-Oyama). The Hiraoka Envir. Sci. Lab., Kanagawa, pp. 679-681. (鎌形・原, 2007: 衛星リモートセンシングデータを用いたモニタリング手法開発. 丹沢大山総合調査学術報告書 (丹沢大山総合調査団 編). (財)平岡環境科学研究所, 神奈川, pp.679-681.)
- Kohno Y., Suto H., Ishii T., Aihara K. and Uchiyama Y., 2007: Concentration and AOT40 of ozone in Tanzawa mountains and its potential effect on Japanese beech forests. *In Reports of scientific investigation on Tanzawa-Oyama* (ed. by Institution of scientific investigation on Tanzawa-Oyama). The Hiraoka Envir. Sci. Lab., Kanagawa, 383-395. (河野吉久・須藤 仁・石井 孝・相原敬次・内山佳美, 2007: 丹沢山地周辺のオゾン濃度の実態とブナに対する影響. 丹沢大山総合調査学術報告書 (丹沢大山総合調査団 編). (財)平岡環境科学研究所, 神奈川, 383-395.)
- Maruta, E. and Usui, N., 1997a: The circumstance of the forest damage at Hinokiboramaru. *In Reports of investigation on Tanzawa-Oyama* (ed. by The society for parks of Kanagawa pref. and Institution of investigation on Tanzawa-Oyama). Department for Envir. of Kanagawa pref., Kanagawa, 78-80. (丸田恵美子・白井直美, 1997a: 檜洞丸における森林被害の状況. 丹沢大山自然環境総合調査報告書 (神奈川県公園協会・丹沢大山自然環境総合調査団企画委員会 編). 神奈川県環境部, 神奈川県, 78-80.)
- Maruta, E. and Usui, N., 1997b: Acid rain and fog. (ed. by The society for parks of Kanagawa pref. and Institution of investigation on Tanzawa-Oyama). Department for Envir. of Kanagawa pref., Kanagawa, 81-88. (丸田恵美子・白井直美, 1997a: 酸性雨・霧. 丹沢大山自然環境総合調査報告書 (神奈川県公園協会・丹沢大山自然環境総合調査団企画委員会 編). 神奈川県環境部, 神奈川県, 81-88.)
- Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y. and Vidal, A., 1994: Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.*, **49**, 246-263.
- Omasa, K., 2002: Diagnosis of stomatal response and gas exchange of trees by thermal remote sensing. *In Air Pollution and Plant Biotechnology* (ed. by Omasa, K., Saji, H., Youssefian, S. and Kondo, N.). Springer. pp. 343-359.
- Omasa, K., Shimizu, H., Ogawa, K. and Masuki, A., 1993: Diagnosis of trees from helicopter by thermographic system. *Environ. Control. Biol.*, **31**, 161-168. (大政謙次・清水英幸・小川和雄・増喜彰久, 1993: サーモグラフィ装置によるヘリコプターからの樹木の診断. 生物環境調節. **31**: 161-168)
- Rahimzadeh, R. B., Shimizu, Y., Hosoi, F. and Omasa, K., 2009: MODIS vegetation and water indices for drought assessment in semi-arid ecosystem of Iran. *J. Agric. Meteorol.*, **65**, 349-355.
- Yamane, M., Aihara, K., Suzuki, T., Sasakawa, H., Hara, K., Katsuyama, T., Kohno, Y. and Yamagami, A., 2007a: Integrated analysis for beech (*Fagus crenata*) forests restoration in the Tanzawa Mountains. *In Reports of scientific investigation on Tanzawa-Oyama* (ed. by Institution of scientific investigation on Tanzawa-Oyama). The Hiraoka Envir. Sci. Lab., Kanagawa, 703-710. (山根正伸・相原敬次・鈴木 透・笹川裕史・原慶太郎・勝山輝男・河野吉久・山上 明, 2007a: ブナ林の再生に向けた総合解析 丹沢大山総合調査学術報告書 (丹沢大山総合調査団 編). (財)平岡環境科学研究所, 神奈川, 703-710.)
- Yamane, M., Fujisawa, T., Tamura, A., Uchiyama, Y., Sasakawa, H., Koshiji, M. and Saito, H., 2007b: Current status of forest structure and decline of Japanese beech (*Fagus crenate*) forests in the Tanzawa Mountains. *In Reports of scientific investigation on Tanzawa-Oyama* (ed. by Institution of scientific investigation on Tanzawa-Oyama). The Hiraoka Envir. Sci. Lab., Kanagawa, 479-484. (山根正伸・藤沢示弘・田村 淳・内山佳美・笹川裕史・越池 正・斉藤央嗣, 2007b: 丹沢山地のブナ林の現況 - 林分構造と衰退状況 -. 丹沢大山総合調査学術報告書 (丹沢大山総合調査団 編). (財)平岡環境科学研究所, 神奈川, 479-484.)