

リモートセンシングによる 植生衰退状況のモニタリング

清水 庸 Yo Shimizu

東京大学 大学院農学生命科学研究科
生物・環境工学専攻 助教

石村 彰太 Akihiro Ishimura

東京大学 大学院農学生命科学研究科
生物・環境工学専攻 修士課程4年

大政 謙次 Kenji Omura

東京大学 大学院農学生命科学研究科
生物環境情報工学研究室 教授

可視域から近赤外域の波長における分光反射の情報を利用して作成される植生や水に関する指標、そして地表面温度の情報を利用した植物のストレスの程度を示す指標など、リモートセンシングによる植生の衰退状況のモニタリング時に利用される指標を説明するとともに、iTVDI画像による丹沢山地の植生のモニタリングの例について紹介した。

1 リモートセンシングによる 植生のモニタリング

植物や植生*を衰退させることになるストレスの原因は、水分や日射の過不足、高温・低温、病害虫、大気汚染など、さまざまである。リモートセンシングによる植物や植生のストレス検知とは、植物の生育にとって適さない環境条件に対する「植物の応答」もしくは「その累積によって引き起こされた結果」をモニタリングすることである。たとえば、病害虫に起因する「葉の成長不良」および「葉の量の減少や植物体の枯死」を対象とする場合、リモートセンシングデータから植物葉の量を示す植生指数の画像を作成し、対象地域の中でその数値を比較することによって、地域内での相対的なダメージの程度を知ることができる。

農地や山岳地など広い地域を対象と

して、植物や植生のモニタリングを行う場合、分光放射計によって取得された分光情報や赤外温度計によって取得された温度情報がよく使用される。それは、可視域から近赤外域の波長*における分光反射の情報が光合成に関わる植物内の色素や地表面(植物や土壌)の水分の情報を表すためであり、また温度の情報は地表面の蒸発散の情報と関わるためである。

2 植生や水の指標

表に、代表的な植生指数を示す。これらの指標は、単位面積当たりの植物葉の量や植物葉の被覆が占める比率と相関関係をもつ指標であり、植物葉の分光反射特性を利用して作成されている¹⁾。光の波長ごとの反射率を「分光反射率」と呼ぶが、植物の場合、その

分光反射特性は、① 可視域での分光反射率が低く、② 近赤外域で分光反射率が高い、ことである(図1)。植物は光合成を行い、光の物理エネルギーを有機物の化学エネルギーに変換する。その際、すべての波長の光を使用するわけではなく、光合成に有効である400～700 nmの波長の光を吸収し使用する。特に、主要な植物色素であるクロロ

【植生】

ある対象とする地域に生育している植物体の総称。

【波長】

電磁波の波動で、波の山から次の山までの水平距離を示す。物体はその物体の温度が絶対零度でないかぎり電磁波を放射しており、単位波長当たりの放射強度が最大となる波長は、物体の温度が高くなるにつれて短くなる。たとえば、太陽の場合(約5,780 K)、放射強度が最大となる波長は約500 nmである。

フィルの吸収帯である青色光450 nmと赤色光680 nm付近の波長の光を吸収するため、2つの波長に挟まれる緑色光550 nm付近で反射率が少しだけ高くなる。一方、近赤外域の800~1,100 nm付近の光は葉内ではほとんど吸収されないため、反射率は高く、それよりも波長が長い場合は、後述のとおり、水の吸収によって部分的に反射率が低くなる。植生指数は、近赤外域と可視域における分光反射率の差を利用して、表に示す3種類の植生指数は計算式の分子にその項が含まれている。

したがって、単位面積当たり(1ピクセル(pixel)*当たり)で植物葉が多く存在するとき、値は大きくなる。正規化植生指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)は、計算式が単純で理解しやすいこともあり、植生のモニタリングによく利用されている。

また、植物・土壌の水分の情報を示す指標も多く研究されている。近赤外域には複数の水の吸収帯があり、たとえば1,450 nmと1,950 nmの付近に、そして1,200 nmあたりにも存在する(図1)。植生や土壌における水分量に

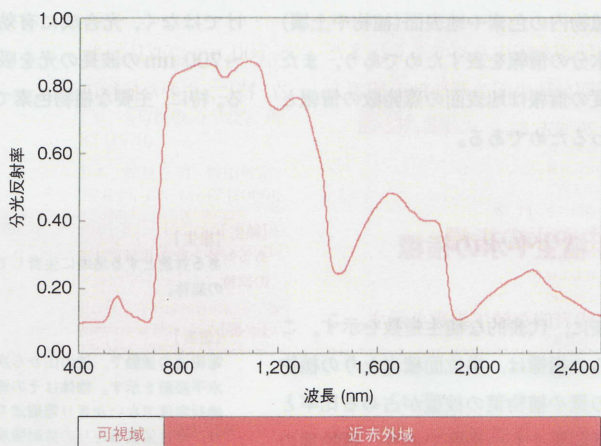
応じて、これらの波長における反射率は変化(乾燥すると反射率は上昇)するため、水の指標に利用されている。式の形はNDVIと同じであり、NDVIにおける可視域の反射率の代わりに、NDII(Normalized Difference Infrared Index, 正規化赤外線指数)は1,550~1,750 nmの反射率を使用し⁵⁾、NDWI(Normalized Difference Water Index, 正規化水指数)では1,240 nm付近の反射率を使用している⁶⁾。

植生や水に関する指標は、光合成に関わる葉内の色素量の変化、葉そのものの減少、葉の萎れや植物体の枯死など、主に可視障害(目で見てわかる障害)が対象となる。したがって、植物や植生がストレスを受けた場合、ある程度の時間を経た後に生ずる現象を対象としている。

表 植生指数の例

植生指数	計算式
正規化植生指数 ²⁾ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}$
土壌調整植生指数 ³⁾ Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$SAVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red} + L} \times (1 + L)$ L = 0~1.0
植生強調指数 ⁴⁾ Enhanced Vegetation Index (EVI, SARV2)	$EVI = \frac{2.5(R_{NIR} - R_{Red})}{1 + R_{NIR} + 6R_{Red} - 7.5R_{Blue}}$

*：表中の R_{Red} と R_{Blue} はそれぞれ可視域の赤色光と青色光における分光反射率であり、 R_{NIR} は近赤外域(たとえば850 nm付近)における分光反射率を示している



(USGS Digital Spectral Library splib06aデータを編集)

図1 波長400~2,500 nmにおけるナラの葉の分光反射率の変化

3 温度情報を使った指標

可視障害が見つかる前に、早期に植物のストレスをみつけることはできないであろうか？ 植物の短期的な応答を検知するために、温度の情報が利用されている。植物は光合成を行うとき、気孔を開孔して二酸化炭素を吸収するが、同時に水分を空气中に放出する。この現象を「蒸散」というが、植物はストレス時に気孔を閉じてしまうため、植物から大気への蒸散速度が低下(潜

【ピクセル(pixel)】

画像データを構成する最小単位であり、「画素」ともいう。ピクセルの大きさは、リモートセンシングのセンサやデータの種類によって異なり、たとえばMODIS(後出)データの場合、250 m四方、500 m四方、1,000 m四方の3種類がある。

熱フラックス密度が低下)し、植物(キャノピー・葉)の温度が上昇するからである⁷⁾⁸⁾。Omasa *et al.*の研究⁹⁾¹⁰⁾では、植物の葉面における熱収支式を解いて、葉温分布から気孔抵抗、蒸散速度、そして汚染ガスの吸収量などの葉面分布を定量的に求めている。それらの応用例として、地上やヘリコプターから取得した温度の画像情報を使って、街路樹や都市近郊の森林を対象とした植物のストレス診断を行っている¹¹⁾¹²⁾。

圃場における農作物の水ストレス診断のため提案されたCWSI(Crop Water Stress Index, 作物の水ストレス指標)¹³⁾も、温度の情報を使用した指標である。CWSIの導出において中心となる考え方は、式1に示すとおり、可能(最大の)蒸発散速度 E_{rp} に対する実際の蒸発散速度 E_r の比である。

$$\begin{aligned} \text{CWSI} &= 1 - \frac{\lambda E_r}{\lambda E_{rp}} \\ &= \frac{(T_s - T_a) - (T_s - T_a)_{\min}}{(T_s - T_a)_{\max} - (T_s - T_a)_{\min}} \end{aligned} \quad (\text{式1})$$

このとき、 λ は水の蒸発潜熱、 E_{rp} は可能蒸発散速度、 E_r は実際の蒸発散速度、 T_s は地表面の温度(このとき、特に植物の温度)、 T_a は気温であり、下添え字のmaxとminはそれぞれ $T_s - T_a$ の最大値と最小値を示す。水ストレスを受けた植物は蒸散速度が低下するため、CWSIの値は1に近づくことになる。この指標は可能蒸発散速度と比較することによってストレスの程度を相対値として表現している。また、蒸発散速度の比は地表面のエネルギー収支式から、「植物の温度」と「大気温度」の差($T_s - T_a$)を変数とした式に置き換えることができる(式1)。なお、詳しい説明については、Jackson *et al.* (1981)¹³⁾とIdso *et al.* (1981)¹⁴⁾を参

照してほしい。CWSIの導出では、植物が観測対象地域の地面を覆っており、植物の下や植物と植物の間の土壌は見えないことを前提条件としている。WDI (Water Deficit Index, 水分欠損指標)¹⁵⁾は、植生指標(表1のSAVI)を利用して、土壌が見える状態において取得された地表面温度でも植物のストレスの状態をモニタリングできるように、CWSIの考え方を応用したものである。図2に、横軸を植生被覆率(植生の被覆が占める比率)、縦軸を地表面温度から気温を差し引いた値($T_s - T_a$)と設定した場合に描かれる台形状の形(PQWV)を示す。台形の各頂点P, Q, V, Wはそれぞれ「十分に灌水された植物」、「水ストレスのかかった植物」、「十分に灌水された土壌」、そして「乾燥した土壌」を示している。CWSIは、地表面温度の測定時に土壌が見えていないとき、すなわち横軸の植生被覆率が1.0のときのみを対象と

している。P点における $T_s - T_a$ の値は可能蒸発散速度を示すときの値であるため $T_s - T_a$ の最小値を示し、反対にQ点では $T_s - T_a$ の最大値を示す。 $T_s - T_a$ の観測値がR点のとき、R点のCWSIは次のように示すことができる。

$$\text{CWSI} = 1 - \frac{RQ}{PQ} = \frac{PR}{PQ} \quad (\text{式2})$$

このとき、RQ, PQ, PRは各線分の長さを示す。WDIは、ある植物の量のもとで可能蒸発散速度に対する実際の蒸発散速度を比較することから、植生被覆率が1.0未満でも適用可能である。図2のC点は植生被覆率が0.4のときを例として示し、C点におけるWDIは次のように示すことができる。

$$\text{WDI} = 1 - \frac{CB}{AB} = \frac{AC}{AB} \quad (\text{式3})$$

このとき、CB, AB, ACは各線分の長さを示す。なお、図中の各頂点P, Q, V, Wの4点は、純放射量や水蒸気輸送に関する空気力学的抵抗、風速など、

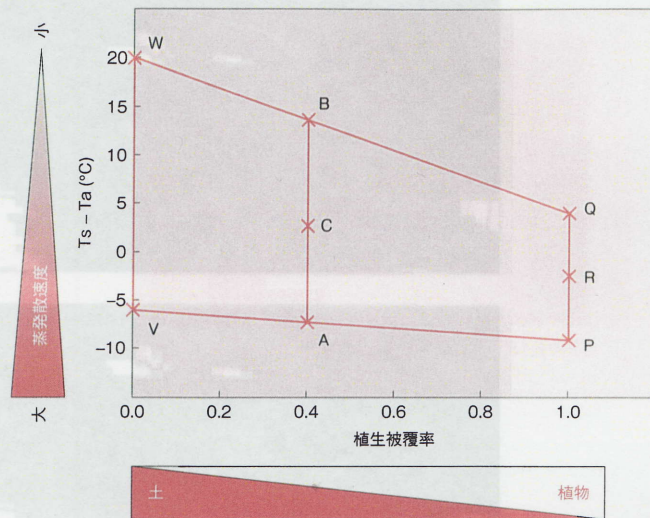
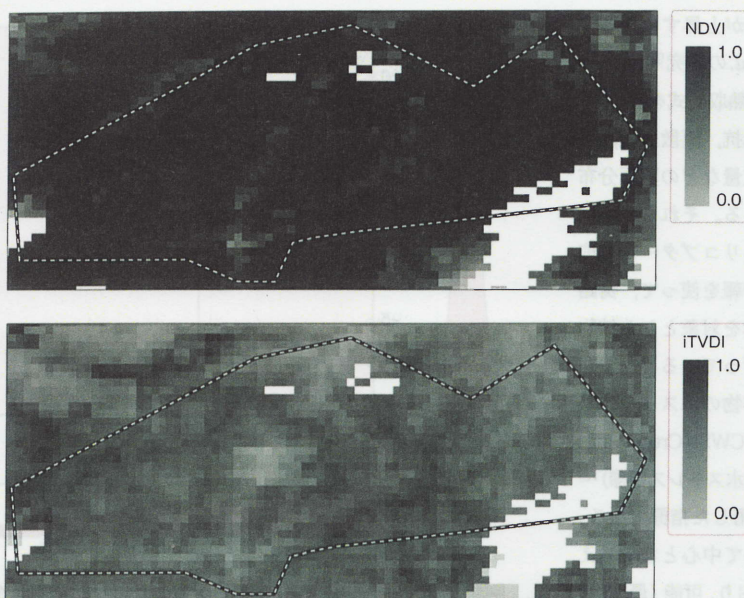


図2 温度情報 ($T_s - T_a$) と植生被覆率の関連性



図中の点線にて囲まれる範囲が対象地域である。白いピクセルは雲の影響などのデータ欠損を示す

図3 夏季におけるNDVI画像とiTVDI画像(石村ら(2010)¹⁹⁾の図を一部修正)

圃場における多くの観測データを使用して算出することになる。また、線分VPと線分WQは、植生被覆率を変数とする一次式によってそれぞれ算出可能であるため、C点におけるWDI算出に必要な点Aと点Bはそれらの一次式から求めることができる。

衛星リモートセンシングデータを利用し、山岳地など広域における植生や土壌の水分状態のモニタリングを行う場合、図2の4つの頂点を求めるために必要となる多くの観測データを正確に求めることは難しい。Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI)¹⁶⁾やimproved Temperature-Vegetation Dryness Index (iTVDI)¹⁷⁾は、WDIの考え方を利用した指標である。iTVDIの場合、具体的には、

(1) 対象地域でリモートセンシングに

より取得された地表面温度(Ts)と植生指数(NDVI)の2つの画像データ

(2) 対象地域内の気象観測所において記録された気温データを空間補間・標高補正することによって作成した気温(Ta)の画像データ

を使い、図2のように、Ts-Taを縦軸に、植生被覆率(NDVI)を横軸に設定し、画像データの各ピクセルをサンプルとして散布図を描く。そして、図2における4つの頂点P、Q、V、Wを、多くの観測データを使って算出する代わりに、散布図の外縁部の点群から線分VPと線分WQの代理となる2つの直線を推定することによって、各植生被覆率のもとでのiTVDIを算出している。なお、TVDIの場合¹⁶⁾、気温(Ta)の画像データを使用しておらず、温度

の情報は地表面温度(Ts)のみである。したがって、標高差の大きい地域など、対象地域内に気温の差がある場合には正しい推定はできず、適用可能な対象地域の範囲は限定される。

4 丹沢山地における植生衰退状況のモニタリング

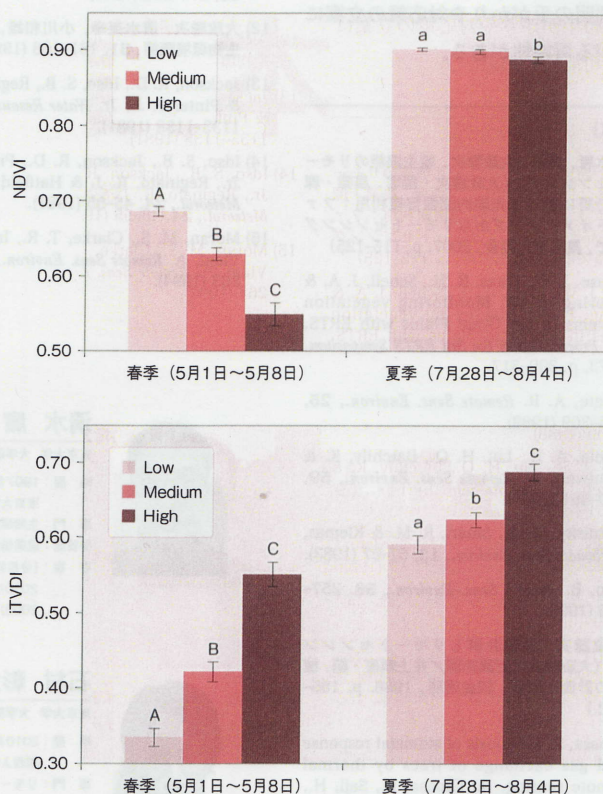
神奈川県北西部に位置し、山梨・静岡両県にまたがる丹沢山地は、ブナやモミの原生林が残り、国定公園にも指定されている。しかし、1980年代より、ブナやモミの立ち枯れが深刻化していることが報告されている¹⁸⁾。そこで、衛星リモートセンシングデータのMODIS*データ(可視～近赤外域の反射率データと地表面温度データ)を使

用してiTVDI画像を作成し、丹沢山地における植生の衰退状況のモニタリングを行った¹⁹⁾。対象とした時期は2007年の春季と夏季の2時期である。同時期における気温の画像データは対象地域内10地点のAMeDASの日単位平均気温データを空間的に補間し、同時にDigital Elevation Modelデータ(標高の画像データ)を利用して、標高補正を行うことで作成した。

図3に、夏季におけるNDVI画像とiTVDI画像を示す。NDVIは全体的に0.8以上の高い値を示し、空間的に値の違いはほとんど見られない。一方、iTVDIは値の違いが見られ、NDVIが一樣に高い値をとることから、植物葉の量は同程度であるが、蒸発散速度に違いが見られることがわかる。図4に、現地調査データ²⁰⁾において枯死状況が“Low”, “Medium”, “High”に分類されたピクセルにおけるNDVIとiTVDIの平均値を示す。春季と夏季のどちらのデータにおいても、iTVDIの方がNDVIと比較して枯死状況をよく捉えており、春季のiTVDIの値は夏季と比較して、枯死状況と強い対応関係をもっていることが示された。iTVDIはその特性上、枯死木を直接的に検出しているわけではなく、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。

[MODIS]

“Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer”の略。日本語では「中分解能撮像分光放射計」と訳される。NASAの衛星TerraとAquaに搭載されている光学センサの名前で、このセンサによって取得・算出された分光反射率や地表面温度などのデータはNASAのWEBサイトから取得できる。



図中のアルファベットが異なる場合は、平均値に統計的な差 ($p < 0.05$) があることを示す

図4 現地調査の枯死状況図をもとにしたNDVIとiTVDIの平均値の比較(石村ら(2010)¹⁹⁾の図を一部修正)

5 まとめ

植生や水に関する指標、そして地表面温度の情報を利用した植物のストレスの程度を示す指標など、植生のモニタリング時に利用可能な指標を説明するとともに、丹沢山地における植生の衰退状況モニタリングの例について紹介した。

丹沢山地の植生衰退について、その原因として、水分ストレス、オゾンなどの大気汚染の影響、病虫害などがあげられている。しかし、原因の特定化

や衰退のメカニズムの解明には至っていない²⁰⁾。植生の衰退など、生態系に深刻なダメージが生じる場合、それらは復元可能であるとはかぎらない。したがって、植生の状況についてモニタリングを継続しつつ、早期の対応策が必要とされる。そのためには、長期間において反復的に、そして広域を対象として情報の取得が可能となる衛星リモートセンシングデータの利用は適している。そして、モニタリングの結果を空間情報データベースとして蓄積し、時系列の変化動向に関する情報を

整備していくことは、衰退に関する原因の解明の手がかりや対応策の立案につながる可能性がある。

[文 献]

- 1) 清水庸, 盧珊, 大政謙次. 植生機能のリモートセンシング. (大政謙次・編著. 農業・環境分野における先端の画像情報利用: ファイティメーキングからリモートセンシングまで, 農業電化協会, 2007, p. 115-125)
- 2) Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. & Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Proceedings of the 3rd ERTS Symposium*, 1973, p. 309-317.
- 3) Huete, A. R. *Remote Sens. Environ.*, **25**, 295-309 (1988).
- 4) Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K. & Leeuwen, W. *Remote Sens. Environ.*, **59**, 440-451 (1997).
- 5) Hardisky, M. A., Smart, R. M. & Klemas, V. *Remote Sens. Environ.*, **13**, 57-67 (1983).
- 6) Gao, B. *Remote Sens. Environ.*, **58**, 257-266 (1996).
- 7) 大政謙次. 画像計測とリモートセンシング. (大政謙次/近藤矩朗/井上頼直・編. 植物の計測と診断, 朝倉書店, 1988, p. 155-192.)
- 8) Omasa, K. Diagnosis of stomatal response and gas exchange of trees by thermal remote sensing. In: Omasa, K., Saji, H., Youssefian, S. & Kondo, N., editors: *Air pollution and plant biotechnology: Prospects for phytomonitoring and phytoremediation*, Springer-Verlag, Tokyo, 2002, p. 343-359.
- 9) Omasa, K., Hashimoto, Y. & Aiga, I. *Environ. Control Biol.*, **19**, 59-67 (1981).
- 10) Omasa, K., Abo, F., Aiga, I. & Hashimoto, Y. *J. Soc. Instrum. Control Eng.*, **17**, 657-663 (1981).
- 11) 大政謙次, 田島彰, 宮坂佳代子. 農業気象, **45**, 271-275 (1990).
- 12) 大政謙次, 清水英幸, 小川和雄, 増喜彰久. 生物環境調節, **31**, 161-168 (1993).
- 13) Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J. & Pinter P. J., Jr. *Water Resour. Res.*, **17**, 1133-1138 (1981).
- 14) Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Jr., Reginato, R. J. & Hatfield, J. L. *Agr. Meteorol.*, **24**, 45-55 (1981).
- 15) Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y. & Vidal, A. *Remote Sens. Environ.*, **49**, 246-263 (1994).
- 16) Sandholt, I., Rasmussen, K. & Andersen, J. *Remote Sens. Environ.*, **79**, 213-224 (2002).
- 17) Rahimzadeh-Bajgiran, P., Omasa, K. & Shimizu, Y. [Submitted.]
- 18) 丸田恵美子, 臼井直美. 丹沢大山自然環境総合調査報告書, 神奈川県, 1997, p.78-80.
- 19) 石村彰大, 清水庸, Rahimzadeh-Bajgiran, P., 大政謙次. *Eco-Engineering*, **22**, 141-146 (2010).
- 20) 山根正伸, 藤沢示弘, 田村淳, 内山佳美, 笹川裕史, 他. 丹沢大山総合調査学術報告書, 神奈川県, 2007, p. 479-484.

清水 庸 Yo Shimizu

東京大学 大学院農学生命科学研究科 生物・環境工学専攻 助教

略 歴: 1997年, 筑波大学大学院社会工学研究科博士前期(修士)課程修了。1999年, 東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程中退後, 同年より現職。

専 門: 生物環境情報工学

受賞歴: 農業情報学会学術奨励賞(2003年)

著 書: [分担執筆]「保全生態学の技法: 調査・研究・実践マニュアル」(東京大学出版会, 2010), [分担執筆]「地球温暖化: 世界の動向から対策技術まで」(裳華房, 2003) など

石村 彰大 Akihiro Ishimura

東京大学 大学院農学生命科学研究科 生物・環境工学専攻 修士課程1年

略 歴: 2010年, 東京大学農学部卒業。同年, 東京大学大学院農学生命科学研究科修士課程入学。現在に至る。

専 門: リモートセンシング

大政 謙次 Kenji Omasa

東京大学 大学院農学生命科学研究科 生物環境情報工学研究室 教授

[著者紹介はp. 64をご覧ください(編集部)]