

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：若手研究 (A)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18688007
 研究課題名 (和文) 山岳地向けリモートセンシングの新展開：生理情報の導入とフラックスモデルへの応用
 研究課題名 (英文) New phase of remote sensing in Mountainous area: derivation of physiological information and coupling with gas flux models
 研究代表者
 王 権 (WANG QUAN)
 静岡大学・農学部・准教授
 研究者番号：50402235

研究成果の概要：

本研究の目的は、リモートセンシングデータから山岳生態系のプロセスを解明するため、生物物理学的、生理学的パラメータを推定し、それらのパラメータを利用して長期的なモニタリングの手法を確立することである。具体的には、(1) リモートセンシングデータによる炭素と水分動態を予測するために欠かせない、葉の生理学的なパラメーター (V_{cmax} など) とその季節変化を予測する、(2) 分光計を利用して個葉および樹冠スケールで分光反射特性を測定し、生物学的なパラメータのアップスケーリングを円滑にする、(3) 複雑な地形の山岳地帯でもリモートセンシングデータによる生理学的なパラメータの推定が高い精度を確保する手法を開発する、などが挙げられる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2007年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2008年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野：森林生態、生態モデル、応用リモートセンシング、地理情報システム

科研費の分科・細目：(分科) 林学 (細目) 森林工学

キーワード：森林生態、リモートセンシング、山岳地

1. 研究開始当初の背景

山岳生態系は大きな標高差に伴う環境変異の著しい場所にあり、地球環境変動の影響を強く受けやすい空間である。従って、山岳地帯は地球環境変動が生態系に与える影響のプロセスや実態を解析する絶好の場所といえる。しかしながら、山岳生態系の炭素と水分動態に関する研究は、起伏の激しい場

所でデータを得ることの難しさから、平野部の研究に比べて、著しく遅れている。

これまで、リモートセンシングによる分光反射特性データは分光指数との経験的な関係に基づいて生物物理学的パラメータを推定することに利用されるに留まっており、分光反射特性から V_{cmax} 、 J_{max} 、 g_s など生態系の炭素と水分動態にかかわっての生理的パラ

メータを推定することは非常に少なかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、リモートセンシングデータから山岳生態系のプロセスを解明するため、生物物理学的、生理学的パラメータを推定し、それらのパラメータを利用して長期的なモニタリングの手法を確立することである。

このプロジェクトは、これまでリモートセンシングの適用が困難であるとされてきた山岳生態系を対象として、その生物物理学的、生理学的なパラメータを予測することに焦点をあてて、リモートセンシング情報を地球環境変動のインパクトの評価に応用しようとするものである。

3. 研究の方法

(1) 研究サイト

新潟県南部苗場山のブナ天然林において、標高 550m、900m 北東斜面(X1)、900m 南西斜面(X5)、1500m の 4 試験地に生育するブナ成木を研究対象とした。

(2) 実地観測

①日変化 (インタクト手法)

観測用鉄塔において、葉の分光反射率と光合成・蒸散速度、気孔コンダクタンスの日変化を測定した。測定は、日の出から日没まで 1 時間おきと同じ葉について行った。蒸散速度等の測定には Li-6400F(LI-COR Inc., USA)を用い、チャンバー内環境(光量子束密度、温度、湿度、CO₂濃度)は各種センサーを用いて外部環境と同調させた。サンプルは各日 4~5 枚である。標高 900m の 2 試験地では 6 月、8 月、10 月にそれぞれ 1 日ずつ、550m と 1500m では 8 月のみ 2 日ずつ測定を行った(2007)。

②季節変化 (デタッチ手法)

生育期間(5 月上旬~11 月上旬、1500m は 5 月下旬~10 月下旬、2006-2008)を通して、葉の分光反射率と最大光合成・蒸散速度、気孔コンダクタンス、含水率の季節変化を測定した。樹冠最上部の枝を採取して持ち帰り、実験室内で測定を行った。サンプルは 3~5 枚である。測定は 1 ヶ月おきに行い、変化の大きい生育初期と落葉期は 1 週間おきに行った。樹冠の反射率測定についても同じペースで行っている。

③垂直プロファイル

各試験地測定対象木の上層部および下層部の位置はそれぞれ樹冠最上部、最下部

で、中層部は、地上からの高さではなく、葉の外観や光の当たり具合などの違いから中間的なものと思われる位置を主観的に選定した。測定はサンプル採取後 4 日以内で行われ、生育期間中、月に一度行われた(2007)。2008 の 6~10 月は 900m X5 サイトの層を 5 層に分けて測定した。

④主な樹種

対象植物として、試験地でよく見られる以下 17 種の植物を選んだ。

(*Fraxinus lanuginosa*, *Acer japonicum*, *Magnolia obovata*, *Acanthopanax sciadophylloides*, *Lindera umbellata*, *Hamamelis japonica*, *Acer tschonoskii*, *Quercus crispula*, *Viburnum furcatum*, *Acer shirasawanum* Koidz, *Clethra alnifolia*, *Prunus grayana* Maxim, *Sasa magnolia salicifolia*, *Acer rufinerve*, *Fagus crenata*, *Betula ermanii*)

切り枝方法により用意した葉をそれぞれ 3 枚ずつ用いた(2008)。

⑤樹液流観測

グラニエモデルの樹液流測定センサーを 900m の X1、X5 サイトに設置し、蒸散量を 30 分間隔で測定した(2007)。

⑥樹冠レベルでのブロードバンド指標

ブロードバンド NDVI は上向き、下向きの光量子束密度と放射量から Wang et al. (2004) の方法で計算した。光量子束密度と放射量は 5 月から 11 月まで 30 分間隔で測定した(2006-2008)。

⑦渦相関システム

900m の X5 サイトに設置し、CO₂ と水のフラックスをスタンドレベルで計測した(2008)。

⑧LAI の測定

直接的手法(リタートラップ)と間接的手法(Fish-eye, SUNSCAN, LI-2000)を用いて、すべてのサイトにおいて LAI の季節変化を観測した(2006-2008)。

(3) リモートセンシングデータ

異なる空間精度(250m, 500m, 1000m)における MODIS、NDVI、EVI プロダクトを収集した。さらに、ALOS、ASTER、TM などの他のリモートセンシングデータも同様に収集した(2006-2008)。

(4) 実験室内での測定

切り枝方法で採取したサンプルを以下の測定(Full Package)を行った：

① 生理学的パラメータ

携帯型光合成測定装置 LI-6400 (LI-COR)を用いて、光子束密度は 1000 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)とし、 CO_2 濃度を 350・300・200・100・50・350・1200・1500・1800・2000 (ppm)の順で変化させ葉内二酸化炭素濃度-光合成曲線 (A-Ci 曲線)を作成した。最大光合成・蒸散速度、気孔コンダクタンスの測定、よって V_{cmax} と J_{max} を推定した。また Mini-PAM を用いて、蛍光反応を観測した。

②分光反射率の測定

採取した個葉の分光反射率 (波長 350~2500nm) を Field Spec3 (ASD, USA) の leaf clip を用いて測定した。測定は各樹種 3 枚の葉を対象とし 1 枚につき 3 点行い、その平均値を測定値とした。

③生化学的パラメータ

光・光合成測定に使用された葉から 5~7 枚のリーフディスクを抜き取り、液体窒素中 (-80°C) に保存したうえで、後日リーフディスクからクロロフィルを抽出し、分光光度計 (Ultrospec 3300 pro) を用いてクロロフィル含有量を測定した。ポリフェノール含有量は Dualex 3.3 (FORCE-A, PARIS, FRANCE) を用いて測定された。測定は各樹冠層の個葉 10 枚を対象とし、個葉 1 枚につき 3 点行い、その平均値を測定値とした。

④生物物理学的パラメータ

サンプルの生重量 (FW: Fresh Weight) を電子天秤 (精度 0.001 g) で、葉厚 (LT: Leaf Thickness) をマイクロメータでそれぞれ測定した。葉面積 (LA: Leaf Area) は、スキャナーで画像を取得後、ピクセル数から算出した。乾燥重量 (DW: Dry weight) は、80°C のオーブンで十分乾燥させた後、電子天秤で測定した。また以上の測定結果から、比葉面積 (LMA: Leaf Mass per Area)、SLA (Specific Leaf Area) と EWT を算出した。最後に、Sumigraph (NC-95、住化分析センター) を使って乾式燃焼法で窒素と炭素含有量を分析した。

(5) データ解析

①分光反射指標の探索

本研究では、2 種類の波長域を使用する、Simple Ratio と Normalized difference spectral Index の 2 種の分光反射指標を使用した。分光反射指標に使用する波長域と分光反射率のタイプであるが、これらは対象となる樹種や、葉齢、測定機種などの依存する可能性がある。このため、従来使用されてきた波長域を使用するのではなく、すべての可能性を考慮し、測定した分光反射データからすべての波長の組み合わせについて分光指標値を計算し、各因子

と比較した。

②INVERSION モデル

PROSPECT モデル (ver. 3.01) は、総クロロフィル量 [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$]、EWT [cm] (= 含水率 [g/cm^2])、単位面積あたりの乾燥重量 (= LMA) [g/cm^2] と N [無単位] (葉構造パラメータ) の 4 つの入力値から分光反射透過率 (400-2500nm, 5nm Step) を求めるモデルである。本研究では、PROSPECT モデルの分光反射率 (透過率は含まない) から、3 因子を推定する Inversion モデル (400-2500nm, 1nm Step) を構築した。eFAST を用いて、PROSPECT モデルに対して感度分析を行った。

4. 研究成果

(1) 冷温帯生態系における優勢種の分光反射特性のデータライブラリ、およびそれと同時期の生物物理学的、生化学的、生理学的なパラメータが、日本における典型的な山岳地帯である苗場山で 2006 年から 2008 年の成長期に複数回収集されていて、それを基にして分光反射特性と生態系機能が同調した状態で内包される、包括的で他に類を見ないデータベースが現在構築されている。その主な項目は、個葉レベルにおける LMA/SLA、葉厚、葉断面図などの生物物理学的要素、クロロフィル a、クロロフィル b、カロチノイド、ルビスコ、炭素や窒素の含有量、EWT などの生化学的要素、 V_{cmax} 、 J_{max} 、 g_s 、蒸散量、水ポテンシャルなどの生理学的要素と分光反射特性、樹冠レベルにおける LAI、樹冠投影などの構造的要素、蒸散量、分光反射特性、スタンドスケールにおける CO_2 と H_2O のフラックス、ランドスケープスケールにおける衛星画像などである。このデータベースは将来的に、リモートセンシングデータに含まれる生理的メカニズムを解明する上で非常に重要な役割を果たすことが期待されている。

(2) ブナ (*Fagus crenata*) 個葉の生物物理学的、生化学的、生理学的な複数のパラメータに対して、季節変化を示しうる新しい指標をそれぞれに発見した。

総当たり法で分光指標を計算し、開葉期から落葉期までのさまざまな状態の葉の生理特性 (V_{cmax} 、 J_{max} 、 P_{max} 、Quantum Yield, Tr)、生物化学含有物質量 (Chl, N, C/N, EWT) 及び生物物理パラメータ (LMA, LT) と比較した。これより、様々のパラメータに対し特定の分光指標を確定できた。一例として、クロロフィル含有量は 400-520 & 580-650, 700-750 & 700-750nm と強い相関があることが認められた。ま

た、EWT の相関波長域は 1000-1300 & 1300-1400, 1400-1600 & 1500-1800nm であり、LMA については、2200-2300 & 2200-2300, 1400-1600 & 2000-2400nm であることも解った。この結果をうけ、新たな分光指標として、総クロロフィル含有量をしめす $SR_{450,600}$ (R_{450}/R_{600} , $R^2=0.85$), を提案した。また、EWT については $SR_{1335,1220}$ (R_{1335}/R_{1220}) ($R^2=0.88$) を、LMA については、 $NDSI_{2265,1490}$ ($R^2=0.86$) と $NDSI_{2250,2230}$ ($R^2=0.87$) をそれぞれ提案した。

- (3) ブナ (*Fagus crenata*) 個葉の生理学的な複数個のパラメータ (P_{max} , g_s , Tr) に対して、日変化を示しうる新しい指標をそれぞれに発見した。 P_{max} の日変化を示す新たな分光指標として、 $SR_{680,520}$ (R_{680}/R_{520} , $R^2=0.41$, $P<0.001$), を提案した。また、 g_s については $SR_{685,535}$ (R_{685}/R_{535} , $R^2=0.35$, $P<0.001$) を、 Tr については、 $SR_{2020,1880}$ (R_{2020}/R_{1880} , $R^2=0.71$, $P<0.001$) を同様に提案した。

(4) PROSPECT 感度分析結果

葉の構造を表わすと言われる N は、全波長を通して大きな割合を示している。図 1 に示すとおり、N の波長ごとの感度特性は、葉の分光反射率の特性と似ていることがわかる。また、クロロフィルは、可視域のみに感度を持っており、クロロフィルが可視域に大きな役割を果たしていることを示す。水は 1300nm 以降の SWIR の付近で感度を持っているが、この感度分析の結果からは、900-970nm 付近の水の感度は現れていない。Dry Matter は N と同様、全波長を通して感度もっているが、可視域の範囲で、クロロフィルの吸光係数が高い部分では、感度を持たない。また、水、クロロフィルに比べ、吸光係数との相関が低い。特に 1400nm、1900nm における感度は、水の感度の影響を大きくうけている。また、複数の因子がの相互作用を示す Interaction は、N の感度が比較的小さくなる波長域で、大きくなる傾向があった。クロロフィル、LMA、EWT の実測値と反転モデルによる推定値の比較図 (図 2) を示す。物質含有量の推定は、RMSE は $Ch1=6.5 [\mu g/cm^2]$ 、 $EWT=0.00076 [g/cm^2]$ 、 $LMA=0.00063 [g/cm^2]$ と、開葉期から落葉期を通して相関が高く、精度良く物質含有量の推定ができた。クロロフィルでは、分光指標と遜色ない結果となり、LMA は分光指標とくらべ多少精度が低い結果となった。しかし、EWT の推定においては、葉の成熟具合に影響をうける結果となり、

分光指標と同等の性能を示すことができなかった。

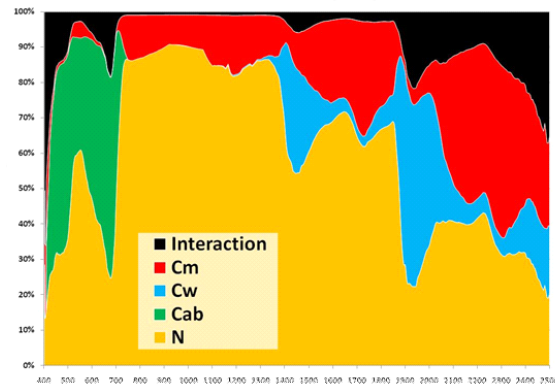
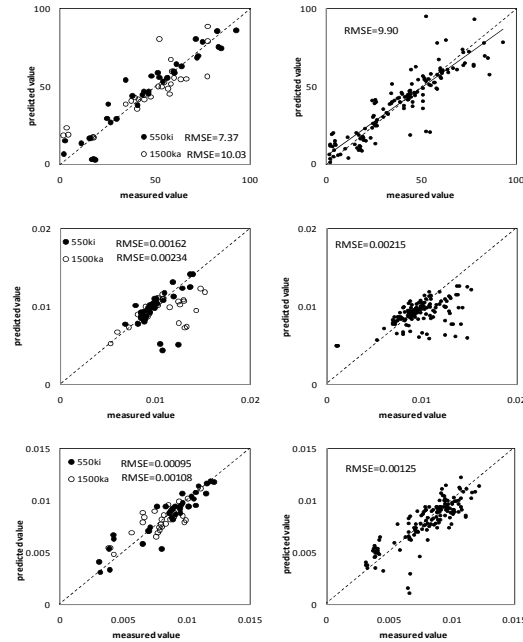


図 1 PROSPECT 感度分析結果

N : 葉構造パラメータ、Cab クロロフィル量、Cw : EWT, Cm : LMA, Interaction : 相互作用

図 2 : INVERSION モデルによる精度評価



- (5) 異なる 17 種に対して同様に適応できる共通の指標を発見した。例として、 V_{cmax} に関しては $SR(1640,1740)$ ($R^2=0.51$, $P<0.001$) が一番高い相関を示し、次いで EWT に対しては $SR_{1730,1520}$ (R_{1730}/R_{1520}) ($R^2=0.77$) を、LMA については $SR_{2180,1850}$ (R_{2180}/R_{1850}) ($R^2=0.92$) をそれぞれ提案した。

- (6) ブロードバンド SR 指標は樹冠における V_{cmax} の季節変化にトレースできることが解った。図 3 の示すように、ブロードバンド SR 指標と V_{cmax} は非常に高い相関関係にある

(550m サイトにおいて $R^2=0.59$ 、1500m サイトにおいて $R^2=0.91$)。すべてのサイトのデータにおいては $R^2=0.3$ と低い値をとるが、統計的な有意性は保たれている ($P<0.000$)。

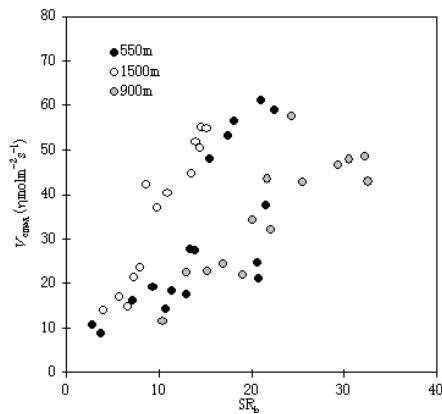


図3：ブロードバンドSR指標と V_{cmax} の関係

(7) 樹冠スケールの蒸散量、およびコンダクタンス（樹液流測定データによる）の季節変化を表すことのできる指標を発見した。図4に示す通り、蒸散量においてはSR(1810, 800)が最も相関が高く（比例関係、 $R^2=0.80$, $P<0.0001$ ）、コンダクタンスにおいてはSR(670, 740)が最も相関が高くなった（指数関係、 $R^2=0.72$, $P<0.0001$ ）。

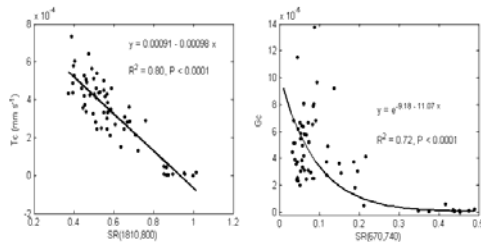
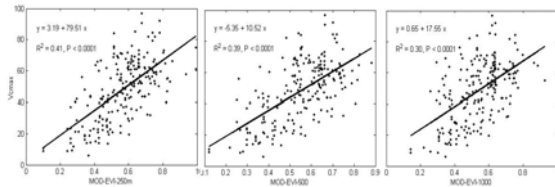


図4：樹冠スケールの蒸散量及びコンダクタンスと分光指標の関係

(8) MODIS の異なる空間精度の EVI 指標は、



山岳地においても V_{cmax} との季節変化をとることができる。図に示すように、3種の EVI 指標 (250m, 500m, 1000m) のいずれにおいても有意性の高い相関を示したが、空間精度が荒くなるほど R^2 値は低くなった。

図5：MODIS による EVI 指標と V_{cmax} の関係

(9) これまでの研究では、個葉レベルでの反射モデルには生理的なパラメータが含まれておらず、樹冠レベルでの反転モデル

も構築されていない。将来的には、この貴重なデータベースに基づいてそれらを実現すべきであると考え、さらに、リモートセンシングデータとガスフラックスモデルのリンクについても重点を置くべきだと考える次第である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. Wang, Q., Tenhunen, J., Vesala, T. 2009. Gross primary production simulation in a coniferous forest using a daily gas exchange model with seasonal change of leaf physiological parameters derived from remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, in press. 査読有。
2. Wang, Q., Tenhunen, J., Vesala, T. 2009. Correlated change in normalized difference vegetation index and the seasonal trajectory of photosynthetic capacity in a conifer stand. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 983-1001. 査読有。
3. Wang, Q., Iio, A., Kakubari, Y. 2008. Broadband simple ratio closely traced seasonal trajectory of canopy photosynthetic capacity. *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2008GL033619, 35: L07401. 査読有。
4. Wang, Q., Iio, A., Tenhunen, J., Kakubari, Y. 2008. Annual and seasonal variations in photosynthetic capacity of *Fagus crenata* along elevation gradient in the Naeba Mountains, Japan. *Tree Physiology*, 28: 277-285. 査読有。

[学会発表] (計 16 件)

1. Kojima, K., Makita, M., Godo, T., Wang, Q. 2009. 全天空写真を用いた LAI 推定精度の検証。第 120 回日本森林学会大会, 京都, 2009 年 3 月 28 日。
2. Godo, T., Kojima, K., Makita, M., Wang, Q. 2009. 苗場山主要植物の光合成能力を表す分光反射指数の探索。

- 第 120 回日本森林学会大会, 京都, 2009 年 3 月 28 日.
3. Wang, Q., Matsumura, M., Godo, T., Kojima, K., Kakubari, Y. 2008. Vegetation indices from various sources remained correlating with canopy photosynthetic capacity in beech forests. Proceedings of the 2nd International Symposium of 21st Century COE Program "Satellite Ecology", Gifu University, Gifu, Japan, July 30 - August 1st, 86.
 4. Irie, C., Iio, A., Wang, Q., Mizunaka, H., Kakubari, Y. 2008. ブナの水分生理特性を表現し得る分光反射指数の探索. 第 119 回日本森林学会大会, 東京, 2008 年 3 月 27 日.
 5. Matsumura, Y., Wang, Q., Kakubari, Y. 2008. ブナ個葉の分光反射率を用いた光合成能力推定方の提案. 第 119 回日本森林学会大会, 東京, 2008 年 3 月 27 日.
 6. Fukazawa, R., Wang, Q., Kakubari, Y. 2008. 複雑な山岳地における MODIS LAI の検証. 第 119 回日本森林学会大会, 東京, 2008 年 3 月 28 日.
 7. Wang, Q., Matsumura, M., Kato, T., Zhao, X., Kakubari, Y. 2007. Forest carbon stocks along elevation gradients in the Naeba Mountains. In: Quantifying and predicting terrestrial carbon sinks in East Asia: toward a network of climate change research. First joint seminar for the joint research in East Asia: sharing knowledge for ecosystem carbon cycling studies. Takayama, Japan, November 19-22, 2007. Page 15.
 8. Kakubari, Y., Takano, M., Fujimoto, S., Wang, Q., Mukai, J., Sanchez-Azofeifa, A. 2007. 分光反射特性を利用した流域レベルへのアップスケーリング. 第 118 回日本森林学会大会, 博多, 2007 年 4 月 3 日.
 9. Wang, Q., Irie, C., Nakamura, T., Kakubari, Y. Identification of Best Reflectance Indices with Close Relationship to Canopy Scale Water Status. 第 118 回日本森林学会大会, 博多, 2007 年 4 月 3 日.
 10. Iio, A., Irie, C., Kakubari, Y., Wang, Q. 異なる標高に生育するブナ樹冠の最大カルボキレーション反応速度と分光反射特性の季節変化. 第 118 回日本森林学会大会, 博多, 2007 年 4 月 3 日.
 11. Kurata, M., Fukazawa, R., Sanchez-Azofeifa, A., Wang, Q., Kakubari, Y. 2007. 苗場山における林分レベルから流域レベルへの LAI 情報のスケールアップ. 第 118 回日本森林学会大会, 博多, 2007 年 4 月 3 日.
 12. Irie, C., Nakamura, T., Takano, M., Wang, Q., Kakubari, Y. 2007. ブナ個葉の水分生理特性を表現し得る光反射指数の探索. 第 118 回日本森林学会大会, 博多, 2007 年 4 月 3 日.
 13. Matsumura, Y., Fukazawa, R., Wang, Q., Kakubari, Y. 2007. 苗場山成長固定試験地における生理生態情報データベースの構築. 第 118 回日本森林学会大会, 博多, 2007 年 4 月 3 日.
 14. Wang, Q., Irie, C., Iio, A., Nakamura, T., Kakubari, Y. 2006. Identification of best spectral indices to remotely trace the diurnal course of leaf stomatal conductance. International Workshop on Water Cycle and Sustainable Use of Water Resources, Shijiazhuang, China, October, 16-17.
 15. Wang, Q., Kurata, M., Endo, T., Zhao, X., Kakubari, Y. 2006. Carbon Stocks in beech forest ecosystems along the altitudinal gradient in Naeba Mountain. 第 117 回日本森林学会大会, 東京, 2006 年 4 月 2-3 日.
 16. Kurata, M., Takano, M., Sanchez-Azofeifa, A., Wang, Q., Kakubari, Y. 2006. 苗場山ブナ林分における葉面積指数の季節変化と年変動について第 117 回日本森林学会大会, 東京, 2006 年 4 月 2-3 日.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
王 権 (WANG QUAN)
静岡大学・農学部・准教授
研究者番号: 50402235
 - (2) 研究分担者
 - (3) 連携研究者