

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：13801

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2019

課題番号：16KK0170

研究課題名（和文）ハイパースペクトルによるキャノピー機能評価（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Canopy functional assessment based on hyperspectral reflectance (Fostering Joint International Research)

研究代表者

王 権 (Wang, Quan)

静岡大学・農学部・教授

研究者番号：50402235

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 6,600,000円

渡航期間： 8ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究の基課題では、キャノピーレベル分光反射特性の複雑性起因となる生理・生化学・構造的要因を特定することについて挑戦した。ガス交換モデルと輻射伝達モデルの更なる融合は分光反射から生理特性を評価する上での鍵である。そのため、本研究では、融合について十分なノウハウがあるカナダ・トロント大学とアルバート大学チームとの共同研究により、ガス交換モデルと輻射伝達モデルの新たな発展を目指した。本研究により、ガス交換モデルBEPS及び輻射伝達モデル5-scaleとLAI推定プログラムを、基課題に応用して、ハイパースペクトルによるキャノピー機能評価をより一層発展させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、リモートセンシングデータとガス交換モデルの融合に取り組み、異なるスケールや複雑地形での生態系シミュレーションに適用した。その成果は、近年注目される定量リモートセンシングの発展に貢献する。本研究は、Functional Biogeographyの発展にも貢献する。

研究成果の概要（英文）：The base project of this international cooperation project is on revealing the complex joint effects from within canopy variations of structural, biochemical, and physiological properties on reflectance. This project has set eyes on the coupling of both gas exchange and radiative transfer models, which is the key to the base project. The collaborators of the University of Toronto and the University of Alberta in Canada are both world wide famous researchers with extensive experiences on both gas exchange models and radiative transfer models as well as Lidar data processing and field monitoring using wireless network. By closely cooperating with them, I have learned BEPS, 5-Scale, and LAI processing from fisheye images and Lidar data, which have been applied in situ. Through the cooperation, know-how on applying hyperspectral information on assessing canopy functions has been accumulated.

研究分野：森林科学

キーワード：林学 分光特性 キャノピスケール 機能評価 RTM

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 1. 研究開始当初の背景

リモートセンシングは、時間的動態を含めた地球上の生態系を俯瞰することが可能な唯一の方法であり (Cohen and Goward, 2004)、広域を対象とした生態系機能評価での需要が高まっている。HyspIRI のようなプロジェクトが NASA の 2013~2016 年の中期的観測の柱となるなど、高分解能データがリモートセンシングの最近の主流である。Functional Biogeography は異なるスケールにおける機能の多様性に関する新たな学問である (PNAS, 2015)。生態系の環境応答の理解及び予測の理論的なベースラインとなり、広い分野での適用が呼びかけられている。

リモートセンシングによる生態生理学的パラメータの推定を目的とした研究では、分光反射特性が活用されており、生理特性の迅速な評価及び早期におけるストレス検知を可能にしている。さらに、全球規模での気候変動の影響を理解する上でリモートセンシングデータとガス交換モデル融合など新たなアプローチを開発する研究が定量リモートセンシングのトレンドとなっている。基課題はまさに本トレンドに沿ったものとなっている。

基課題の成功には、ガス交換モデルと輻射伝達モデルの融合を欠くことはできない。しかし、既存の研究ではこれらの相互作用に全く関心が向けられてこなかった。結果として、分光反射特性に影響する生理メカニズムを明らかにするには至っておらず、分光反射特性に基づくキャノピースケールでの機能評価への発展を妨げてきた。

本研究の中心であるガス交換モデルと輻射伝達モデルの融合が、分光反射特性から生理的に評価する最も効果的な手段である。本研究は、Functional Biogeography に関して、日本が国際的な遅れをとらないためにも非常に重要である。

## 2. 研究の目的

カナダ・トロント大学の Chen Jing Ming 教授は、分光反射特性を用いた植物の生理機能評価を含め、リモートセンシングに関する幅広い見識を有し、当該分野のトップジャーナルである Remote Sensing of Environment のチーフエディタを務めているなど国際的な知名度も高い。Chen 教授のチームはガス交換モデル BEPS 及び輻射伝達モデル 5-scale のほか多くの実績があり、ガス交換モデルと輻射伝達モデルの融合に十分なノウハウがある。

カナダ・アルバータ大学の Arturo Sanchez-Azofeifa 教授らのチームは特に近接リモートセンシングに要する機器・処理システムの充実度はカナダ国内においてトップレベルである。特にフィールドでの自動観測無線ネットワークや地上と UAV ベース Lidar データの解釈等々幅広いノウハウを持っている。

これらを学び、ガス交換モデルと輻射伝達モデルの新たな発展を目指す。

## 3. 研究の方法

温帯落葉広葉樹特にブナ林を対象として、個葉からキャノピースケールにおける分光特性と生理応答の関係を明らかにする。キャノピー内の高さ、方位を考慮した様々な環境勾配に沿って異なるレベルで分光特性と生理応答を同時に測定する。個葉で得られた情報をキャノピースケールにアップスケーリングするため、レーザースキャナによる詳細な 3 次元キャノピー構造情報を得る。フィールドで得られた情報に基づく、ガス交換モデルと輻射伝達モデルの融合を試みる。

### (1) 渡航先外国機関名

2018 年 9 月から 2019 年 2 月までの間に、トロント大学 (University of Toronto, <https://www.utoronto.ca/>) において本研究を実施した。この大学はカナダ及び世界でのトップ大学の一つあり (カナダでのランクは 1 位)、滞在した地理及び計画学科 (Department of Geography & Planning) は 1935 年に成立され、北アメリカに置いて最も古くかつ大きい地理学科の一つである (<https://geography.utoronto.ca/department/>)。この学科では、一連の学部及び大学院で都市及び日常生活の研究に関するプログラムが提供されている：気候過程及び炭素循環モデル；地表過程及び水文；自然、社会及び環境変化；古気候及び生物地理；政治生態；政治空間；及び交通学。海外共同研究者の Jingming Chen 教授はリモートセンシング、GIS、生物地球化学循環モデル、および微気象学及び水文学等々分野の専門家であり、彼は世界でも有名なカナダロイヤル科学院フェローのほか、カナダの上級リサーチチェアである (<https://geography.utoronto.ca/profiles/jing-ming-chen/>)。彼は主にリモートセンシング及び多数の空間データセットを用いて空間上の詳細な炭素及び水循環モデルを研究し、一連の輻射転送及び気体交換モデルを発展させた。例えば：5-Scale, BEPS 等々、多くの研究者に利用されている。滞在期間中は、特にこの二つのモデル及び魚眼画像を LAI, CI パラメータに処理することに集中して、研究を行った。

2019 年 7 月から 2019 年 11 月の期間は (うち 9-10 月は静岡大学で)、アルバータ大学 (University of Alberta, <https://www.ualberta.ca/index.html>) において本研究を実施した。この大学はカナダのトップ 5 で、世界のトップ 100 大学の一つである。海外共同研究者は地球

及び大気科学学科 (Department of Earth and Atmospheric Sciences) の Arturo Sanchez - Azofeifa 教授である。この学科は1912年に成立され、カナダでの最大、最高学科の一つで、幅広い研究テーマと教育プログラムを提供しており、主には大気科学、環境地球科学、地理学、Paleontology, 及び計画などを含む (<https://www.ualberta.ca/earth-sciences/about-the-department/index.html>)。海外共同研究者の Arturo Sanchez - Azofeifa 教授は Alberta 大学 地球観測科学センター (CEOS) (<https://apps.ualberta.ca/directory/person/gasanche#overview>) のディレクターであり、彼の研究重点は熱帯乾燥森林環境のリモートセンシングで、特に環境変化及び熱帯乾燥森林生産力間の関連性、生物気候学、炭素及び水フラックス等について研究している。LiDAR 及びハイパースペクトルリモートセンシングについて関心があり、LiDAR データのプロセッシングについていくつかのモデルを開発した。フィールド研究におけるワイヤレスセンサーネットワークも発展させ、熱帯乾燥森林における LUCC の影響から生物多様性の損失及び生息地分断化等の研究で利用されている。この LiDAR プロセッシングプログラムは本研究でも使用しており、フィールドでのデータ獲得便利なワイヤレスセンサーネットワーク方法についても検討した。

(2) モデルと技術

5-Scale

これは幾何学—光学輻射転送モデルであり、異なるスケールにより森林キャノピスケールの結構組成を特に重要視している。植物キャノピの構成スケールについては以下の通りである ([http://faculty.geog.utoronto.ca/Chen/Chen%27s%20homepage/res\\_5scale.htm](http://faculty.geog.utoronto.ca/Chen/Chen%27s%20homepage/res_5scale.htm)) :

- 1—スケール: 混濁媒質 (turbid media) ;
- 2—スケール: ランダムに分布している不連続の個体 (randomly distributed discrete objects) ;
- 3—スケール: 非ランダムに分布している不連続の個体 (non-random discrete objects) ;
- 4—スケール: 内部構造を持つ非ランダムに分布している不連続の個体 (non-random discrete objects with internal structures) ;
- 5—スケール: 4—スケール及び葉内部の輻射転送。

本研究で使用した 5-Scale は、元の C バージョンから Matlab バージョン に転換されている。

BEPS

The Boreal Ecosystems Productivity Simulator (BEPS) は代表的なガス交換モデルであり、衛星データを利用して、様々な炭素シンクとソースを評価できる (Chen et al., Ecological Modelling, 124:99-119, 1999)。現在、更に一連のモデルを新たに発展させ、例えば BEPS-Hourly, TerrainLab, BEPS - EASS, BEPS - Isotope および BEPS - GEM などを含み、幅広いエコシステムに応用されている。これはデイリースケールでのモデルである (Fig. 1)。もっと少ない衛星データにより、詳細な空間上の土地被覆及び LAI が提供されることが可能である。

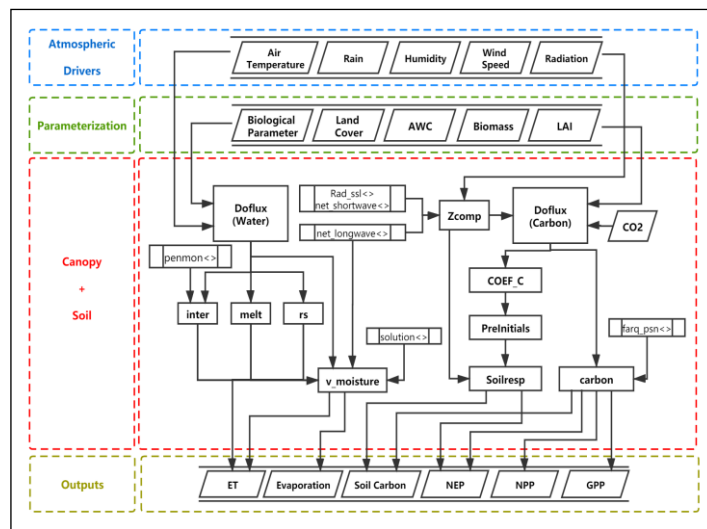


Fig. 1 Flowchart of BEPS

魚眼画像からの LAI の推定

DHP は Chen 教授グループによって発展されたプログラムで、魚眼画像の処理により LAI を推定する。CIMES (<http://jmnw.free.fr/>) は Chen 教授グループの A. Gonsamo 博士 (McMaster 大学) によって発展された同じくプログラムである (<https://remotesensing-mcmaster.org/>)。CIMES は本研究の中に利用され、LAI 及び CI パラメーターを推定する。

Lidar 3-D ポイントクラウドからキャノピ構造の推定

Sanchez-Azofeifa 教授研究グループの JA Guzman-Quesada は Lidar 3-D データを処理する R プログラム rTLS を開発した。このプログラムと元々開発されていたプログラムを使用し、キャノピスケール構造と LAI などのパラメータを推定した。

#### 4. 研究成果

##### 5-Scale に基づくキャノピスケール反射特性のシミュレーション

Fig.2 に示されるように、研究サイト中川根森林プロットにおける樹木の空間分布は PIG

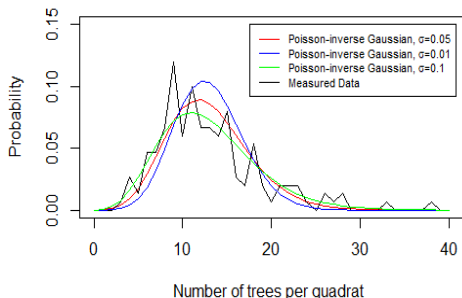


Fig.2 Fitted PIG for Nakagawane forest

(Poisson-inverse Gaussian) モデル ( $\sigma = 0.05, 0.01, 0.1$ ) によってシミュレーションした。PIG 分布は Sichel 分布の特別のケースで、Sichel 分布中の shape parameter は  $-0.5$  に設定される。従って、PIG 分布は二つのパラメータ ( $\mu$  と  $\sigma$ ) だけで決定され、モデル決定係数 ( $R^2$ ) を基準とした場合、 $\sigma=0.1$  が測定されたデータに最適であった。

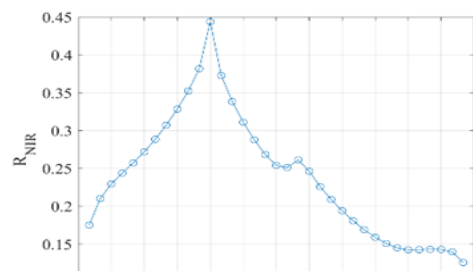
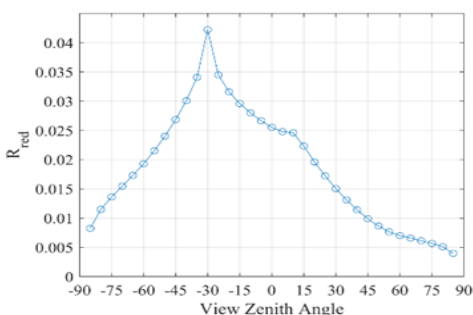
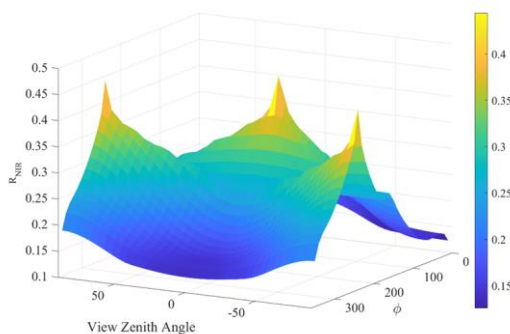


Fig.3 Changes of reflectance values in Nakagawane forest with view zenith angles when the solar zenith angle set to  $30^\circ$  : (a)  $R_{red}$  ; (b)  $R_{NIR}$

5-Scale を用いて、中川根森林の両方向性の反射特性 (Bidirectional reflectance) をシミュレーションした。明らかに、異なる入射-観測幾何学条件によって、反射値はかなり変化した。Red 及び NIR 二つの波長バンドを例として、Fig.3 により太陽入射角  $30^\circ$  の時に異なる観測角度による反射特性の変化を示した。両方ともにホットスポットがはっきり表示されている。

さらに、キャノピスケールでの両方向性の反射特性は太陽入射と観測方向の間の位相差にも影響され、Fig.4 のように示された。観測角度が大きくなると方向間の位相差の効果はもっと大きくなった。これらの成果は将来衛星リモートセンシングの分野への応用が期待できる。

Fig. 4 Change of the Reflectance in the near infra-red band ( $R_{NIR}$ ) with the view zenith angle and the relative azimuth angle between the sun and the viewer ( $\Phi$ )



##### BEPS に基づくキャノピスケールガス交換特性のシミュレーション

BEPS を用いて、中川根森林において 2018 年のガス交換特性 (GPP/Transpiration) をシミュレーションした。シミュレーションの結果によると、4 月から 9 月までの期間で GPP は  $947\text{gC}/\text{m}^2$ 、蒸散は  $301.2\text{mm}$  に達し、活発にガス交換をしていることがわかった。同期の樹液流観測データを用いて水フラックスの動態を検証した結果、Hourly ベースの決定係数は  $0.34$ 、Daily ベースの決定係数は  $0.20$  となり、更なる精度向上を必要とする。

BEPS は、これまで比較的平坦な生態系を対象に利用されており、本研究のように複雑な地形を有する生態系に適用した例はまだ少ない。種々の生態系のガス交換特性を理解する上で、本研究の試みは重要な意義を持ち、将来の精度向上に貢献できる。

### LAI の比較：魚眼画像から vs. Lidar 3-D ポイントクラウドから

中川根演習林の 150m x 90m プロットの中に、15m x 15m の 60 個の sub-plots を設け、半球写真は定期的に魚眼レンズを持つ Nikon D5100 デジタルカメラ (Sigma`s 4.5mm F2.8EX) を使用して撮影した。全ての写真は CIMES を利用して処理を行った。地面 TLS (FARO LS130X, United States) も使用され、プロットの中に 15m x 15m の 34 ケ所の sub-plots について、キャノピスケール構造をスキャンした。水平方向及び垂直方向の回転角度はそれぞれに

0-360 度及び 0-90 度にセットした。スキャンする過程において、葉と枝の静止状態を保つために、全てのスキャンは無風あるいは微風の時にいった。スキャンされた画像を前処理するために、Faro 会社のソフトウェア Scene 5.3 を利用し、半球写真に転換した。サブプロット (No. 24) において、2019 年 8 月の魚眼と Lidar 両方から得られた半球画像を Fig. 5 に示す。

魚眼画像により生成される LAI と Lidar データにより推定される LAI の高い相関性が得られた (Fig. 6)。よって、慎重に校正された後の魚眼データも信頼できる LAI 評価が可能であることが示唆される。

### 今後の展望

将来にわたって、カナダの海外共同研究者たちとは緊密な連絡を維持する。トロント大学の Chen のグループとは、ガス交換特性と分光反射特性の関連性を明らかにするために、輻射伝達過程をガス交換モデルに融合する研究を継続する。一方、Sanchez - Azofeifa のグループとは、温帯及び熱帯生態系における無線観測ネットワークを構築し、さらに UAV Lidar とハイパースペクトルリモートセンシングに関連する合同フィールドワークを行う予定である。今現在共同で合作するプロポーザルの準備を進めている。将来、密接な交流をより一層を発展させていきたい。

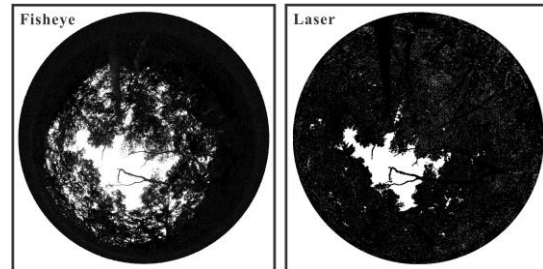


Fig. 5 Fisheye data and Laser data taken in August 2019 (subplot No. 24)

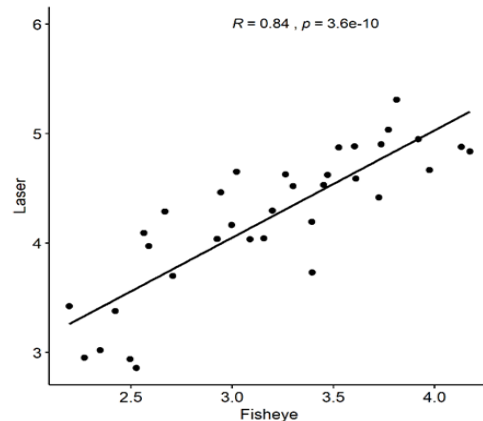


Fig. 6 Relationship between LAIs estimated from Fisheye images and Lidar data

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Jia Jin, Quan Wang	4. 巻 11
2. 論文標題 Evaluation of Informative Bands Used in Different PLS Regressions for Estimating Leaf Biochemical Contents from Hyperspectral Reflectance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 197 ~ 197
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/rs11020197	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Jia Jin, Quan Wang	4. 巻 73
2. 論文標題 Informative bands used by efficient hyperspectral indices to predict leaf biochemical contents are determined by their relative absorptions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation	6. 最初と最後の頁 616 ~ 626
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.08.002">https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.08.002</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Guangman Song, Quan Wang, Jia Jin	4. 巻 11
2. 論文標題 Leaf photosynthetic capacity of sunlit and shaded mature leaves in a deciduous forest	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Forests	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/f11030318	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Niken Andika Putri, Quan Wang
2. 発表標題 Comparison of parametric and non-parametric methods for LAI estimation using Sentinel-2 imagery
3. 学会等名 The 6th International Symposium toward the Future of Advanced Researches in Shizuoka University (ISFAR-SU2020)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Quan Wang, Jia Jin, Rei Sonobe, Jingming Chen	4. 発行年 2018年
2. 出版社 CRC Press- Taylor and Francis group	5. 総ページ数 27-63
3. 書名 Chapter 2 (of Volume II of Four-Volume Book): Derivative hyperspectral vegetation indices in characterizing forest biophysical and biochemical quantities. Volume II Title: Hyperspectral Indices and Image Classifications for Agriculture and Vegetation.	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	陳 鏡明  (Chen Jingming)	トロント大学・Geography & Planning・Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	サンチェズアゾフェファ アルトゥ ロ  (Sanchez-Azofeifa Arturo)	アルバータ大学・Earth & Atmospheric Sciences・Professor	