

## 森林の光合成能力と光合成量のリモートセンシングによる推定

## 学位論文内容の要旨

森林は主要な温室効果ガスである二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の吸収源と考えられており、地球規模の気候変動に関連して森林による炭素収量を高精度で推定することが世界的な課題となっている。植物の光合成による $\text{CO}_2$ 吸収量 (GPP) は様々な環境要因によって規定され、そのひとつに植生の季節変化 (フェノロジー) が挙げられる。フェノロジーは気候変動の影響評価の観点からも重要な指標であるが、従来のGPPの推定モデルでは、光利用効率に関するパラメータに季節性が考慮されていないことが推定誤差の一因となっている。そこで、本研究は広域における森林のGPPの時空間分布を高精度で推定するため、フラックス観測とリモートセンシングの統合により植生の季節性を組み込んだGPPの推定方法を開発することを目的とした。そのための推定モデルとして、光-光合成関数とそのパラメータ (光飽和時の群落最大光合成速度  $P_{\max}$  と初期勾配  $\phi$ ) の変動に着目した。光合成能力を表すこれらのパラメータはクロロフィル量に関連して季節変動を示すことから、リモートセンシングによる植生指標を活用してフェノロジーを把握し、光合成能力の季節性を評価できると考えた。そこで多様な植生において、フラックス観測から得られる  $P_{\max}$ ,  $\phi$  と植生指標の季節性との関係について、分光放射計、デジタルカメラおよび人工衛星 (MODIS) のデータを利用して調べた。様々な植生指標が提案されている中で、一般に利用されている可視域と近赤外域の波長を使ったNDVI (Normalized difference vegetation index) とEVI (Enhanced vegetation index) に加え、葉の色に関連する可視域の波長のみを使ったGRVI (Green red vegetation index) とGR (Green ratio) の4種類の指標について有効性を比較検討した。その結果導出された  $P_{\max}$ ,  $\phi$  と植生指標との関係性を用いて北海道全域のGPPの推定を行った。

1) 落葉針葉樹林において分光放射計から得られた植生指標は、いずれの指標もフェノロジーに対応して変動し、 $P_{\max}$ ,  $\phi$  との間に高い相関が認められた。しかし常緑針葉樹林においては、NDVIとEVIには変動が見られず  $P_{\max}$ ,  $\phi$  の季節変動に対応しなかった。一方、GRVIとGRは  $P_{\max}$ ,  $\phi$  と同様の変動を示し有意な相関が認められた。このことから、可視-近赤外域の植生指標が主に葉の量の変化に反応するのに対し、可視域の植生指標は葉の色に反応し、落葉樹林のみならず常緑樹林においても光合成能力のフェノロジーを反映することが示唆された。このような季節変動のほか、 $P_{\max}$  は大気飽差、 $\phi$  は日射率 (理論的な日最大日射量に対する観測値の割合) に関連した短期的な変動が認められた。その原因は乾燥による気孔コンダクタンスの低下あるいは散乱光による群落光合成能力の上昇、強光阻害による光合成能力の低下と考えられ、GPP推定モデルのパラメータに、気象条件による短期変動を組み込む必要性が示された。

2) GRVIとGRはデジタルカメラの画像解析からも算出でき、分光放射計から得られた指標と同様の季節変動を示した。全国の国立公園に設置されたライブカメラネットワークの画像を利用して、9種類の植生について最大8年間のGRの変動から植生ごとのフェノロジーが把握できた。フェノロジーは地域間、年次間変動が大きく、春の展葉開始時期は温度依存性を示した。デジタルカメラの画像から得られる植生指標によって多様な植生のフェノロジーを数値化し、多地点かつ長期のフェノロジーを客観的に比較する方法を確立した。

3) 国内の森林6サイトと水田1サイトにおいて、MODISによる植生指標と $P_{max}$ ,  $\phi$ との関係を調べた結果、いずれのサイトにおいてもEVI、GRVI、GRは直線的な高い相関を示したが、NDVIは夏に飽和するため指数関数的な関係を示した。植生指標に対する $P_{max}$ の関係（回帰直線の傾きと切片）は植生タイプに依存し、その傾きは水田>落葉針葉樹林>混交林>常緑針葉樹>落葉広葉樹の順に大きかった。GRVIとGRはNDVIやEVIに比べて、台風の風倒被害による植生の攪乱に対して高い感度を示し、大気の影響による変動も小さかった。さらに、GRは冬季の地表面の状態に影響されず、植物の生育期間と非生育期間を明確に判別できることから、光合成能力の評価に有効であると判断できた。

4) 各植生タイプの $P_{max}$ ,  $\phi$ とGRとの関係式、MODISで得られるGRの時系列データおよび対象地域の植生分類と気象条件のグリッドデータを組み合わせることにより、 $P_{max}$ ,  $\phi$ の時空間分布が得られた。この $P_{max}$ ,  $\phi$ と光合成有効放射量を光-光合成関数モデルに適用することによって、北海道全域の森林のGPPを500mグリッドで1日ごとに推定した。GPPの推定値は観測値の季節変動と日々変動をよく再現し、植生タイプごとに典型的な季節変化パターンを示した。GPPの推定精度は植生分類に大きな影響を受け、高精度の植生分類図の必要性が明らかになった。従来の推定モデルでは風倒被害によるGPPの低下を表現できなかったが、本研究のモデルでは局地的なGPPの低下を明示できた。植生変化に感度の高いGRを活用して光合成能力を評価することによって、季節変動のみならず攪乱によるGPPの変動も高精度で推定することが可能になった。

5) MODISとデジタルカメラを比較すると、視野範囲や解像度、センサーの波長特性などの差異があるにも関わらず、均質な植生においては、両者の同時観測から得られたGRやGRVIがほぼ同様の季節変動、年々変動を示した。したがって、デジタルカメラを多点に配置することによって、衛星観測の時空間解像度の限界や被雲などによるデータ取得上の問題に対して補間的な利用が可能である。一方、衛星の1ピクセル中に複数の土地利用や植生が混在するミクセルに対して、デジタルカメラの画像解析を利用することにより植生や樹種など任意の要素を抽出し、各要素のフェノロジーを高精度で把握できる。このように衛星観測とデジタルカメラネットワークを組み合わせることによって、高時間・空間分解能で種スケールから広域までのフェノロジーの把握とGPPの推定を可能にする、新しいマルチスケール・リモートセンシングを提案した。

本研究では、光合成能力の季節変動の評価に対する可視植生指標GRの有効性を示唆し、多様な植生タイプにおけるGRと光合成能力との関係性を初めて明らかにした。植生変化に感度の高いGRから評価したパラメータに基づく光-光合成関数モデルは、従来のモデルでは把握できなかった攪乱影響も含めた高精度のGPPの推定を可能にした。今後、GPPの推定精度の向上には、植生分類図の高精度化、常緑広葉樹や草地などの代表的な植生タイプにおける $P_{max}$ ,  $\phi$ と植生指標との関係性や気象要因による短期的な応答の解明、および衛星観測の大気補正の改善や高分解能化などが求められる。本研究で提案した衛星とカメラによるマルチスケール・リモートセンシングはフェノロジー観測とGPP推定の精度向上に貢献するものと期待できる。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 平野 高司

副査 教授 浦野 慎一

副査 准教授 高木 健太郎(北方生物圏フィールド科学センター)

## 学位論文題名

### 森林の光合成能力と光合成量のリモートセンシングによる推定

本論文は、図80、表19を含む104頁の和文論文であり、参考文献6編が添えられている。

森林は主要な温室効果ガスである二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の吸収源であり、地球温暖化に関連して炭素吸収量を高精度で推定することが重要な課題となっている。光合成による $\text{CO}_2$ 吸収量(GPP)は植生の季節変化(フェノロジー)の影響を受けるが、従来のモデルでは光利用効率にフェノロジーが考慮されることがなかった。本論文では、広域の森林GPPを高精度で推定することを目的に、フラックス観測とリモートセンシングを統合してGPPを推定する方法を開発した。光-光合成関数のパラメータ(光飽和時の最大光合成速度 $P_{\max}$ と初期勾配 $\phi$ )はクロロフィル量に関連して季節変動するため、リモートセンシングによる植生指標からフェノロジーを把握し、光合成能力の季節性を評価できると考え、フラックス観測から得られる $P_{\max}$ 、 $\phi$ と植生指標の季節性との関係を、分光放射計、デジタルカメラ(デジカメ)および人工衛星(MODIS)のデータを利用して解析した。一般的な可視域と近赤外域を使ったNDVIとEVIに加え、葉色に関連する可視域のみを使ったGRVIとGRの4種類の指標について有効性を比較検討するとともに、 $P_{\max}$ 、 $\phi$ と植生指標との関係を用いて北海道全域のGPPを推定した。

1) 分光放射計による植生指標は、落葉針葉樹林ではフェノロジーに対応して変動し、 $P_{\max}$ 、 $\phi$ との間に高い相関を示したが、常緑針葉樹林ではNDVIとEVIに季節変動がみられなかった。一方、GRVIとGRは $P_{\max}$ 、 $\phi$ と同様に変動し、有意な相関を示した。可視-近赤外域の植生指標は主に葉量を表すが、可視域の植生指標は葉色に反応するため、GRVIとGRが常緑樹林においても光合成能力のフェノロジーを反映すると思われる。また、 $P_{\max}$ は大気飽差、 $\phi$ は散乱日射に関連して変動し、GPP推定モデルに気象条件を組み込む必要性が示された。

2) デジカメ画像から算出されたGRVIとGRは、分光放射計から得られたものと同様の季節変動を示した。国立公園のデジカメネットワークの画像を利用し、9種類の植生についてGRの季節変動から植生ごとのフェノロジーが把握できた。フェノロジーは地域間や年次間で変動が大きく、春の展葉開始時期に温度依存性がみられた。

3) 森林と水田でMODISによる植生指標と $P_{max}$ ,  $\phi$ との関係を調べた結果、いずれのサイトでもEVI, GRVI, GRは強い直線性を示したが、NDVIは指数関数的であった。植生指標と $P_{max}$ の関係は植生タイプに依存し、その傾きは水田>落葉針葉樹林>混交林>常緑針葉樹>落葉広葉樹であった。GRVIとGRはNDVIやEVIに比べて、台風による風倒被害に対して高い感度を示し、大気の影響による変動も小さかった。さらに、GRは冬季の地表面の状態に影響されず、植物の生育期間と非生育期間を明確に判別できることから、光合成能力の評価に有効であると判断できた。

4) 各植生タイプの $P_{max}$ ,  $\phi$ とGRとの関係式、MODISによるGRの時系列データおよび対象地域の植生分類と気象を用いて、 $P_{max}$ ,  $\phi$ の時空間分布を得た。この $P_{max}$ ,  $\phi$ と光合成有効放射量を光-光合成モデルに代入し、北海道全域の森林GPPを500 mグリッドで1日ごとに推定したところ、季節変動と日々変動を再現できた。従来のモデルでは風倒被害によるGPPの低下を表現できなかったが、本研究のモデルでは局地的なGPPの低下を明示できた。植生変化に感度の高いGRを活用することで、季節変動のみならず攪乱によるGPPの変動も高精度で推定することが可能になった。

5) MODISとデジカメを比較すると、均質な植生では両者のGRやGRVIの季節変動、年々変動が良く一致した。デジカメの多点配置により、衛星観測の時空間解像度の限界や被雲などによる問題を解決できることがわかった。このように衛星観測とデジカメネットワークを組み合わせることで、高時間・空間分解能で種スケールから広域までのフェノロジーの把握とGPPの推定を可能にする、新しいマルチスケール・リモートセンシングを提案した。

本論文は、光合成能力の季節変動の評価に対する可視植生指標GRの有効性を示し、多様な植生タイプにおけるGRと光合成能力との関係性を初めて明らかにした。植生変化に感度の高いGRから評価したパラメータに基づく光-光合成モデルは、従来のモデルでは把握できなかった攪乱影響も含めた高精度のGPPの推定を可能にした。本論文で提案された衛星とデジカメによるマルチスケール・リモートセンシングは、フェノロジー観測とGPP推定の精度向上に大きく貢献すると思われる。よって、審査員一同は井出玲子が博士(農学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。