



Title	Evaluation of variations in gross primary production over terrestrial ecosystem using remote sensing technique [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	孫, 仲益
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第13585号
Issue Date	2019-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74013
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Sun_Zhongyi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称： 博 士（農学）

氏名：孫 仲益

学 位 論 文 題 名

Evaluation of variations in gross primary production over terrestrial ecosystem using remote sensing technique

（リモートセンシング技術を用いた陸域生態系における GPP 変化の評価に関する研究）

陸域生態系総一次生産量（GPP）は、グローバルな炭素収支バランスと生態系プロセスにおいて重要な役割を果たしている。GPP の時間的推移と空間分布パターンは、植物の生物学的特性と外部環境要因（CO₂濃度の上昇、土地被覆の変化（LCC）、気候変動など）との相互作用により、大きな変動性が報告されている。したがって、グローバルな気候変動によって引起こされた潜在的な GPP の変化を定量的に評価するためには、生物圏・大気間の炭素フラックス及び GPP のダイナミックな変化を正確に推定することが重要である。しかし、現在、異なる生態系や広範囲の環境条件下で GPP を推定するのに適したモデルは少ない。先行研究によると、様々なモデルシミュレーションによって得られた GPP は、環境要因に対する影響を示す空間的分布に著しい差異が生じている。過去の気候変動、LCC 及び大気 CO₂ 濃度の上昇に対する GPP の反応を解明できれば、将来の CO₂ 及び気候条件における炭素循環の変化状態を推定することに寄与できる。

本論文では、リモートセンシング技術を用いて、GPP の変動と分布の時・空間的なパターンを導出し、グローバルな GPP へ影響する環境要因を解明し、リモートセンシングベースの GPP 算定アルゴリズムの相違点について検討した。この目標を達成するために、(1) 複数のモデルを用いたグローバルな GPP の推定とその特性の検討、(2) グローバルな GPP の長期的変動傾向と原因の特定、(3) GPP への CO₂ 施肥効果影響の検証、(4) 外部環境要因の変化によるリモートセンシングベースの GPP モデルの感度評価を行なった。

1. GPP の推定に関する適切なモデルを選択するため、機械学習、植生指数（VI）、光利用効率（LUE）及びプロセスベースの 4 種類のアルゴリズムに属する、計 12 のリモートセンシングベースのモデルにより GPP を計算し、その結果の比較・評価を行った。更に、12 年以上の観測値があるフラックスタワーサイトから得られた GPP 及び全球植生動態モデル（DGVM）によって算定された GPP を基準として個々のモデル出力を評価した。12 のモデルによって推定された GPP の空間的・季節的及び経年的な変化は整合性が示され、特別に優れたモデルを選ぶことはできなかった。4 種類のアルゴリズム中、VI と LUE は一般的に構造が簡単かつパラメータが少ないモデルであるが、複雑なプロセスベースのモデルと同等な GPP の推定精度を持っていることが判明した。これらのモデルは概して同じ空間的分布を示しており、異なる気候帯の中では熱帯地域が最も大きな年間 GPP を示し、湿潤・乾燥の季節変化に対する GPP の変動は小さい特徴があった。一方、月間 GPP の最大値について、北半球では温帯森林は熱帯森林より大きかった。CO₂ 濃度データが含まれているリモートセンシングモデルによると、年間 GPP トレンドの増加傾向が顕著であった。

2. GPP トレンドの空間的なパターンとその駆動要素は、グローバルな GPP 変化の研究において注目されている。ここでは、1982 年～2015 年の GPP トレンドに対する環境要因の実質的な効果を評価するため、CFix（炭素固定）モデルを使用し、陸域生態系における類似な振

る舞いを示す地域を教師なし分類法でグループに分け、気候及び環境要因の変化への GPP の反応を解析した。その結果、考慮された 5 つの外部環境要因 (LCC, CO₂, 温度, 日射及び水条件) の変動は、GPP トレンドに全て正の影響を示したが、空間パターン・スケール及びメカニズムが異なった。地球上の 75% 以上の地域で GPP が増加傾向であり、グローバルな GPP 増加に最も寄与している要因は大気中 CO₂ 濃度の上昇であると推定された。一方、地域的な観点から見ると、GPP の変化には LCC と気候要因の影響が強い。GPP の増加は、低緯度地域では GPP の年サイクルが大きく、主に水条件によって支配されると考えられた。中緯度地域には、温度と日射の影響を受けて生育期の早期化が現われた。高緯度地域でも温度と日射の影響を受け、生育期が前後とも延長された。また、空間的・季節的・グローバルな GPP の変化傾向が明らかになり、CO₂, LCC と気候要因の役割も解明された。

3. 従来、リモートセンシング手法を用いるグローバルな GPP の推定に大気 CO₂ 濃度の時・空間的なパターンの影響を考慮しない条件で行った研究が多かった。ここでは、プロセスベースの BEPS (北方生態系生産率シミュレータ) を使用して推定された GPP と、CO₂ モジュールを含まないモデルの出力を比較した。その結果、CO₂ 施肥効果を考慮していないモデルは GPP を過小評価することが判明した。更に、温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT) から得られた CO₂ 濃度データと植物機能タイプのデカップリング係数を合わせ、キャノピーの CO₂ 濃度を推定し、独自のモデルを開発した。このモデル精度検証のため FluxNet2015 データセットの GPP 値と比較し、一致する傾向が確認された。一方、CO₂ 濃度の時・空間的な分布を考慮しない場合は、地球全体で年間 GPP が過大評価された。その様子は場所及び時期によって異なり、特に低緯度地域で中緯度及び高緯度より過大評価が明白であった。中高緯度における GPP の過大評価は、北半球では夏季に大きく、南半球では各季節に均一に現われた。このように、リモートセンシング手法を用いて GPP を推定する時、CO₂ 濃度の時・空間的な変化を考慮する必要性が示された。

4. 本研究で使用した複数のモデルの感度を評価するため、フラックスタワーで測定された気候因子及び開放系大気 CO₂ 増加実験 (FACE) サイトで測定された CO₂ 濃度データから計算された感度を基準として GPP の反応を評価した。その結果、CO₂ に関する各モデルの感度解析を通して、Greenness 指数に対する CO₂ 施肥効果を無視し、光合成に及ぼす CO₂ 濃度変化の影響のみ考慮すると、感度が過小評価され、逆の場合も同様の傾向であることが判明した。また、FACE の結果と比較すると、CO₂ 飽和現象や水分などの環境制限が考慮されていない場合、モデルは CO₂ 施肥効果を過大評価しがちであった。モデル間で水効果の表現が異なるにもかかわらず、水分条件の変動に対する応答は比較的一貫していた。グローバルなスケールでは、温度と日射が各モデルに及ぼす影響が異なった。熱帯地域では、モデルの違いによる GPP の空間的な差異がよく現れており、また不確実性も高かった。高緯度地域では、すべてのモデルが温度と日射に対する反応がほぼ一致し、中緯度地域では降水量が有意な正の相関を示した。これらのモデルの感度は、フラックスサイトのデータから算出された気候要因の感度の信頼区間に位置するが、どの地域にも普遍的に適用できるモデルは存在しなかった。

本論文は、グローバルな GPP 評価に関する研究であり、リモートセンシングベースのモデルを利用することに焦点を当て、GPP の空間的な分布・時間的な変化・季節的な特徴、それらが生じる原因特定及び CO₂ 施肥効果などの解析に挑戦した。リモートセンシングモデルによる GPP の推定値を地球規模で比較・検証・評価し、加えて、生理学的・生物化学的な過程の議論から、グローバルな GPP への気候変動の影響と CO₂ 施肥効果のメカニズムを検討し、GPP の変化特徴ゾーンマップを作成した。更に、GPP の推定に GOSAT から得られた CO₂ 濃度データを導入したモデルを開発した。本論文の結果は、リモートセンシングベースの GPP 推定モデルの発展に貢献でき、特に陸域生態系の炭素循環・地球規模の気候変動など、複数の分野において理論上及び実際の応用に重要な情報が提供できると期待される。