

令和 6 年 9 月 16 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03764

研究課題名（和文）樹木集団の空間不均一性を簡約化した森林生態系の環境応答モデル

研究課題名（英文）Modeling forest ecosystem responses to environmental change implementing spatial heterogeneity of trees

研究代表者

横沢 正幸（Yokozawa, Masayuki）

早稲田大学・人間科学学術院・教授

研究者番号：80354124

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、気候変動に対応した植生分布予測精度の向上を目指し、植物個体の空間配置構造を陽に考慮せずに、位置モーメントを用いてギャップダイナミクスを精度良く記述するサイズ構造モデルを開発した。このモデルは、植物個体間の競争や森林の更新・遷移過程を考慮し、広域スケールでの植生分布の変化を高精度に予測可能とするものである。また、長期にわたる毎木センサスデータを用いてモデルの妥当性を検証し、空間明示型個体ベースモデルと比較して精度の高いシミュレーション結果を提供することが確認された。しかし、数値計算上のアルゴリズムやクロージャ問題など、解決すべき課題も残されている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、植物個体の空間配置構造を陽に考慮せずに、個体配置が重要なギャップダイナミクスを精度良く記述するモデルスキームの開発を目指した。このモデルスキームは、個体の空間配置情報を位置モーメントで表現し、個体サイズごとの消長環境を定式化することにより、空間不均一性を簡約的に取り込むものである。また、このモデルを地球システムモデルの動的植生サブモデルに導入することにより、森林生態系の広域スケールでの環境応答の理解および予測精度の向上に資する。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to improve the accuracy of vegetation distribution predictions in response to climate change by developing a size-structured model that accurately describes gap dynamics without explicitly considering the spatial arrangement of individual plants. Using position moments, the model accounts for competition between plants and the processes of forest regeneration and succession. It enables high-precision predictions of changes in vegetation distribution on a large scale. The model's validity was verified using long-term tree census data, showing that it provides more accurate simulation results compared to spatially explicit individual-based models. However, challenges such as numerical calculation algorithms and closure problems remain to be addressed.

研究分野：生態系モデリング

キーワード：サイズ構造 位置モーメント 空間不均一性

1. 研究開始当初の背景

地球環境は、気圏・水圏・地圏・生物圏の4つのサブシステム間の相互作用により維持され、自らの影響や外力を受けて絶えず変化している。現在、人間活動に起因すると考えられる様々な自然環境の変化や近い将来起こる可能性のある地球規模の気候変化が懸念され、そのような変化を広域的かつ長期的に評価・予測するために、サブシステム間の相互作用を記述する地球システムモデルが作成・利用されている。とりわけ今後起こりうる気候変化は、かなり急速であるとの認識が広まるにつれ、気候変化と植生分布変化との動的相互作用を記述するサブモデル（動的全球植生モデル:DGVM）が地球システムモデルに組み込まれている。

このように、ギャップダイナミクスを扱うモデルは、樹木個体の空間配置に応じた水平方向における光環境の不均一性を扱う。本来ギャップの下はとても明るい森林は速やかに再生されるが、これを森林全体の平均的な光環境で扱った場合、森林の再生が大幅に遅れるためである。DGVMに、このようなギャップダイナミクスを取り入れるために、さまざまな工夫がなされている。各樹木個体の空間配置と樹冠の幾何学形状を考慮して、光の空間分布を3次的に計算し、生長、枯死、定着などのプロセスを記述する個体ベースの動的植生モデルも提案・利用されている。

一方、地球システムモデルには、陸域生態プロセスだけでなく、海洋と海水の物理、エアロゾル、海洋炭素循環、大気化学など対流圏内の様々な物理化学過程がサブモデルとして結合され、より包括的なモデルへ発展している。しかし、計算環境が格段に向上した現代においても、個体ベースのDGVMを組み込んだ地球システムモデルは、扱いにくいのが現状である。加えて、そもそもモデルは多かれ少なかれ、複雑な自然システムを高度に抽象化するものである。説明したい現象における最も本質的な部分からシンプルにモデルを構築し、その挙動の見通しを良くしておくことが、現象解明ならびに予測にモデルを利用する際には重要である。

2. 研究の目的

気候環境の変化に対応した植生分布の変化を長期かつ広域で予測するモデルには、植物個体間の競争、ギャップダイナミクスによる森林の更新や遷移過程を考慮する必要がある。植物個体のサイズと空間配置情報をモデルに取り込む必要がある。しかし、個体ごとのそのような情報を取り込んだモデルは計算負荷が大きく、広域・全球を対象とした場合、出力値の不確実性も大きく計算効率性が低いのが現状である。本研究では、植物個体の空間配置構造を陽に考慮せずに、個体配置が重要な役割を演ずるギャップダイナミクスを精度良く記述するモデルの開発を目的とする。具体的には、個体の空間配置情報を位置モーメントによって表現し、個体サイズごとの消長環境を定式化することにより空間不均一性を簡約的に取り込んだサイズ構造モデルを開発する。このモデルスキームを、地球システムモデルなどにおける動的植生サブモデルに導入することにより、森林生態系の広域スケールでの環境応答の理解ならびに予測精度の向上が期待される。

3. 研究の方法

本研究では、植物個体の空間配置構造を陽に考慮せずに、個体配置が重要なギャップダイナミクスを精度良く記述するモデルスキームの開発を目的として、個体の空間配置情報を後述する位置モーメントによって記述し、個体間競合過程を考慮した個体サイズごとの消長環境（群集内の光環境と光合成速度）を推定するサブモデルを作成する。そのサブモデルをサイズ構造モデルに組み込みことで、従来の平均場近似モデルの精度向上を図る。さらに、気候帯の異なる樹木群集動態に関する長期にわたる毎木センサデータを利用して、モデルの検証と改良を行う。

4. 研究成果

(1) 位置モーメントによる平均場モデルの改良

これまでに研究協力者らが測定してきた林木データの整理を行い、過去のアメダスデータおよび気象官署の観測データを利用して、統計的空間内層法を用いて林木データがとられた地点における過去の気象データを整備した。また、樹木個体の位置モーメントによるサイズ構造モデルの改良として、個体間競争を表現するスキームを再検討し改良した。とりわけ後者については、研究代表者らはこれまで開発・改良してきた空間情報を明示した植物個体ベースモデルを援用して、多数の個体の相互作用の重ね合わせによって創発する諸現象のメカニズムを解明してきたが、それらを適切に再現する補正スキーム(位置モーメント)を空間情報を捨象したサイズ構造モデルに導入することを目的とした。それにより、人間活動由来の気候変動が陸域生態系へ及ぼす影響を評価・予測するために、環境変動に対する植生分布の応答を植物個体間および環境との相互作用の素過程から記述しシミュレートするモデルの高度化を目指した。位置モーメント近似を数値的に計算する場合、格子状に対象エリアを分割することで、2次モーメントの時間発展を計算する。このとき、一定条件下でサイズクラスごとの個体密度が過大評価になる。このため位置モーメント・モデルでは空間明示型個体ベースモデルのサイズ分布をよく再現できないことがある。先行研究である Adams *et al.*(2013) らの研究結果でもこの問題が見受けられる。この問題を解決するため、それぞれの条件における2次モーメントでのサイズクラスの個体が受ける競争強度の改良を行なった。従来の位置モーメントモデルは空間明示型個体ベースモデルのサイズ分布に比べ、なだらかな分布になっており再現できていなかった。しかし競争強度推計の改良の結果、今回提案した空間モーメントを取り込んだ平均場サイズ構造モデルでは空間明示型個体ベースモデルのサイズ分布の挙動をほぼ再現できるようになった。

(2) モデルの検証に用いた毎木データの整備

4つのサイトで測定された毎木センサスデータに基づいて林木動態を解析した。優先樹種は暖温帯常緑広葉樹林、冷温帯落葉広葉樹林、亜高山帯常緑針葉樹林、亜寒帯常緑針葉樹林である。これをグリッドデータとして整備し、林木動態を格子モデルを用いてシミュレートした。気象環境データは気象庁の高層グリッド気象データ(GPV)データを境界条件として、局地気象モデル(SCALE)を駆動して、毎木データが測定された期間の気象環境の推定を試みた。局地気象モデルのパラメータ決定と推定結果の妥当性判定は近隣のアメダス観測値などの気象観測データによって行った。再現した気象要素は日射量、気温、降水量、湿度、地温、土壌水分である。各サイトにおける林木集団動態の格子モデルシミュレーションは、群集サイズ構造の平均、CV、および歪度の時間変化をよく再現した。この結果を空間情報を最大限利用した動態推定の結果として担保して、空間情報を捨象したサイズ構造モデルの推定結果と比較することにした。格子モデルによるシミュレーションとその動態解析によって、個体サイズと空間配置との関係を詳細に分析でき、空間情報を捨象したサイズ構造モデルが追従できないアスペクトについて、その因果関係を解析することに利用できる。再解析による気象環境については、局地気象モデルのキャリブレーションを行った結果、気温、地温については良好に近隣アメダスの時系列を再現することができたが、日射量、降水量および湿度は推定精度が悪かった。理由は、このような環境要素は空間不均一性が高いことが主要因であるが、局地気象モデルの空間解像度の問題、アメダスデータの誤差の問題などが挙げられた。

(3) 毎木データによる検証

これまでに作成した空間モーメント近似を取り込んだサイズ構造モデルの妥当性を調べるために、既存の毎木調査データと4つのサイトで測定された毎木センサスデータに基づいて林木動態を解析した。

毎木データに加えてデータが測定された期間の気象環境データも用意した。局地気象モデルを気象庁GPV データと近隣のアメダス観測値などの気象観測データに基づいて駆動して、過去の気象環境を再現した。再現した気象要素は日射量、気温、降水量、湿度、地温、土壌水分である。検証に利用したサイズ構造モデルは、Watanabe *et al.* (2003) で作成した樹木群集の群落構造・微気象相互作用モデル (MINoSGI) のサイズ構造動態のサブモデルに空間モーメント近似を導入したものである。各サイトにおける樹木集団のサイズ分布の時間変化をシミュレートしたところ、サイズ分布の平均、CV、および歪度などの統計量の時間変化をよく再現した。さらに、この空間モーメントを導入したモデルと空間情報を捨象したサイズ構造モデルの推定結果と比較した。その結果、モデルの時間発展にしたがって実測されたサイズ分布から乖離するが、空間モーメント近似を導入したモデルは従来モデルに比べて比較的長い時間にわたって良い近似解を提示すること傾向が見られた。しかし、これは対象林分や気象環境などの境界条件にも依存することが示唆された。すなわち、環境や樹木個体の配置状況などによっては空間モーメント近似が適切に作用しないことが推定された。

(4) モデルの拡張の検討

これまでのモデルの独立変数は樹高のみであり、樹高から幹の直径に依存したキャノピーのプロファイルやアロメトリーによる樹高-個体重間の関係式を仮定してモデルを構成している。しかしながら実際の林木動態では樹高と直径（一般に胸高直径として測定される）との関係は時間的に固定された関係ではなく一般に個体間競争や環境変化とともに動態に応じて変化する。これまでの同種のモデルでもそのような樹高と直径とのダイナミックな関係は仮定されていない。そこで Yokozawa & Hara (1995) で提案した樹高と直径の2つを独立変数としたサイズ構造モデルをベースとして、本研究で導入した空間モーメントに基づいて個体の空間配位情報を取り込む手法を適用することについて検討を行った。この場合、モデルはサイズ変数2次元と時間変数1次元の偏微分方程式によって記述され、空間モーメントもサイズ変数2次元の関数となる。理論的にはこれまでの1次元の空間モーメント関数の拡張として定式化でき、樹高と直径変数の多項式で表現される交互作用を記述する項が含まれた複雑な表式が得られた。その結果、樹高-直径関係を時間的に固定した場合に比べて非常に広い個体群のサイズ動態を表現できることが示され今後の発展が期待された。一方で数値計算上のアルゴリズムならびに空間モーメント関数の間の関係（クロージャー問題）について多くの課題が明らかとなった。

演習林観測サイトにおける毎木データを利用して、各個体の動態を集団的に解析してこれまで提案してきたサイズ構造モデルなどの記述の妥当性および改良方向について検討した。まず毎木の樹高と胸高直径をサイズとしてそれらの時間変化をデータベースから取り出し、これまで試行した関数データ解析の手法により毎木データの観測期間ごととサイズごとの平均成長速度ならびに成長速度の2次元モーメントを関数として表現した。関数化の際の基底関数はB-スプライン関数を使用した。関数データの解析には毎木データをそのまま利用するのではなく、まず個体ごとのサイズの時間変化の様相を樹高と胸高直径を変数とする2次元平面上でプロットした。すなわち各個体のサイズの時間変化は平面上のプロットの動きとして捉えられる。そして各個体のサイズの時間変化を各サイズ変数（樹高と胸高直径）を離散化して個体数が保存するように離散化レンジに分配した。すなわちサイズの時間変化は連続的であるため、その連続値に近い離散値に距離の重みで分配した。その離散値に変換したデータを利用して関数化し、2次元のサイズ構造モデルを作成した。同時に位置モーメントを考慮した1次元のサイズ構造モデルも作成した。今回の手法が既存の手法と異なる点は、既存の手法ではデータから求めた各期間における同一サイズ個体群の成長速度とその分散値をそのまま回帰式で表現したのに対して、今回の手法では各個体の成長分を離散化し、その後に関数化する点が異なる。これにより個体数の保存が保証されることになる。作成した両サイズ構造モデルの現象再現性を解析したところ、両モデルとも概ね現実の動態

を再現することが分かった。この結果より、個体のサイズ動態を個体数が保存するように適切に扱ってモデル化することが重要であることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakagawa Yoshiaki, Yokozawa Masayuki	4. 巻 18
2. 論文標題 A social system to disperse the irrigation start date based on the spatial public goods game	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PLOS ONE	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） 10.1371/journal.pone.0286127	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6件（うち招待講演 2件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡田将誌、永山聡一朗、横沢正幸
2. 発表標題 関数回帰に基づく生活用水の気象環境応答分析
3. 学会等名 2023年日本地理学会春季学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 横沢正幸、 ロッシュフェリックス拓磨
2. 発表標題 水資源最適配分問題に対する量子アニーリングの適用可能性
3. 学会等名 日本農業気象学会2020年全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 ロッシュフェリックス拓磨、横沢正幸、戸田求
2. 発表標題 パーティクルフィルタを利用した森林生態系の環境応答の解析
3. 学会等名 日本農業気象学会2020年全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横沢正幸
2. 発表標題 群落光合成モデルを導入したサイズ構造モデル
3. 学会等名 第67回日本生態学会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 ロッシュフェリックス拓磨、横沢正幸
2. 発表標題 攪乱の時空間ダイナミクスの格子モデル解析
3. 学会等名 日本農業気象学会2019年全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ロッシュフェリックス拓磨、横沢正幸
2. 発表標題 攪乱の時空間ダイナミクスの格子モデル解析
3. 学会等名 第66回日本生態学会大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------