

気候変動適応のための森林バイオマスと 天然更新後の樹種構成変化のシミュレーション —石川県でのケーススタディ—

芳賀 智宏¹・堀尾 亮太²・松井 孝典³・町村 尚⁴

¹非会員 大阪大学大学院生 大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

E-mail :chihiro.haga@ge.see.eng.osaka-u.ac.jp

²非会員 大阪大学大学院生 大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

³正会員 大阪大学助教 大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

⁴非会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

地域スケールで気候変動の適応策を検討するためには、個々の運営主体の活動を表現できる詳細スケールで空間明示的に影響を評価することが重要であり、高解像度な将来予測技術の開発が必要である。そこで本研究では、気候変動が森林バイオマスと天然更新後の樹種構成に与える影響を高解像度でシミュレーションするための技術開発を試みた。石川県を対象に、Forest Landscape ModelのLANDIS-IIを応用してRCP8.5シナリオでの植生遷移をシミュレーションした。時間分解能は1年、空間分解能は100m、計算期間は2005年から2055年とし、バイオマスの変化と樹種構成の推移をシミュレーションし、かつ評価するプロセスを実装した。石川県全域の平均バイオマスは初年度の24.7 kg m⁻²から、50年後には (Base, GFDL, CSIRO, MRI, MIROC) = (42.0, 51.3, 49.8, 47.4, 49.2) に増加した。全ての将来ケースでEcoregion 2 (平野部) とEcoregion 4 (山岳部) で増加が顕著であった。特に増加量が大きかったGFDLケースの天然更新後の種構成の推移をBaseケースと比較すると、樹種構成の変化にEcoregion別の特徴がみられた。加えて、日本国内で高解像度将来気候データとForest Landscape Modelを用いて適応策を検討するにあたっての課題を議論した。

Key Words : CMIP5, RCP8.5, climate change adaptation, forest succession, LANDIS-II

1. 研究の背景と目的

(1) 背景

現在、気候変動により社会・自然生態系が受ける影響を分析するため、RCP シナリオに基づく影響評価と適応策の検討のための技術開発プロジェクト (Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology, SI-CAT) が進められている¹⁾。気候変動の具体的な適応策を検討するためには、地域スケールで個々の運営主体の活動を表現可能な空間解像度で、空間明示的に影響を評価することが重要である。

現在北米を中心に、植物の成長や競争、攪乱をプロセスレベルで記述できる LANDIS-II²⁾をはじめとする Forest Landscape Model が開発され、近年では気候変動の影響評価にも応用されている。Duveneck et al. (2016)³⁾では、アメリカのニューイングランドを対象に、解像度 12 km の気候データを用いて森林の回復動態の予測を行った。アジア地域では、Dai et al. (2016)⁴⁾が中国で 1 度グリッドの将来気候データを用いて植生の変化の予測を行った。

一方日本国内では、20 km 解像度の将来気候データを利用して、日本全国を対象に種分布予測モデル (Species Distribution Model, SDM) によって RCP シナリオ別の潜在生息域の変化の予測が行われた⁵⁾。今後は地域スケール評価を実施すること¹⁾や、移動や生育、競合種との種間関係を考慮することが課題として挙げられている⁶⁾。

(2) 本研究の目的

このように、国内でも気候変動に伴う森林生態系への影響評価が進んでいるが、自治体別に実行可能な適応策を設計し、その効果を定量的に評価するためには、日本国内でもプロセスベースの高解像度な将来予測技術の開発が必要である。そこで本研究では、SI-CAT¹⁾が作成を進める CMIP5 の全球気候モデルをもとにした高解像度気候データと Forest Landscape Model の LANDIS-II を組み合わせることで、森林バイオマスと天然更新後の樹種構成に与える影響を空間明示的にシミュレーションするプロセスを開発した。加えて、気候変動適応策をシミュレーションし、社会実装に向けた支援情報を提供するための技術開発課題を議論した。

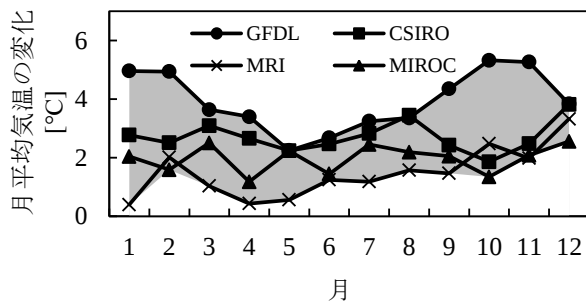


図-1 (a) 2005 年比の 2055 年の月平均気温の変化

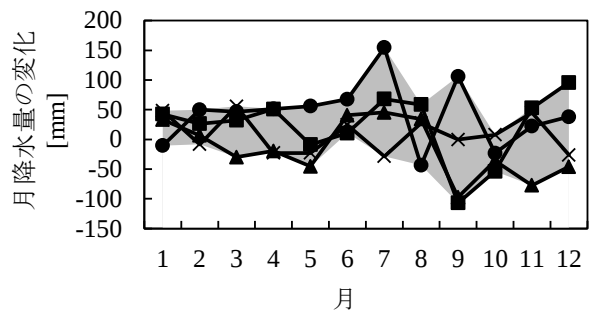


図-1 (b) 2005 年比の 2055 年の月降水量の変化

2. 研究方法

本研究では、1 km 解像度に統計的ダウンスケーリングが施された4つのGCMの出力を、代表的なForest Landscape Modelの一つであるLANDIS-IIモデルに入力し、天然更新後の植生回復をシミュレーションすることで、その結果を評価する一連のプロセスを開発した。すでに本モデルを適用した実績のある石川県を対象に、ケーススタディを行った。以下に手法の詳細なプロセスを記す。

(1) 高解像度気候データの説明

気候データには、SI-CAT プロジェクトの技術開発機関が 4 つの全球気候モデル (GFDL-CM3, CSIRO-Mk3-6-0, MRI-CGCM3, MIROC5) を 1 km 解像度に統計的ダウンスケーリングを施したデータを用いた⁹⁾。図-1 に示した各気候モデルの月平均気温と月降水量の 2005 年と 2055 年の差分から、モデル間のばらつきが大きいことが分かる。これらの 4 つに加えて、比較のために 2005 年の気象条件が 50 年間継続する Base ケースを設定し、5 つのシナリオ (GFDL, CSIRO, MRI, MIROC, Base) を設定した。

(2) Forest Landscape Model : LANDIS-II の説明

気候変動下の植生遷移のシミュレーションには、LANDIS-II PnET succession⁷⁾を応用した。LANDIS-II モデルは、コホートレベルでの植生の成長、種内・種間競争、種子の拡散や攪乱を、任意の大きさの対象領域・空間解像度で計算できる。図-2 に PnET succession の概念図を示す。特に PnET succession は、月別の温度や大気中の二酸化炭素濃度の変化による成長量の増減や、水と光をめぐる資源競争を計算できるため、気候変動の影響を評価する目的に適している。

モデルの入力データやパラメータは芳賀ら (2016)⁸⁾と同様に準備した。ただし、本研究では気候変動の影響を分析することが目的であるため、特に気温への適性を反映した植生分類に変更し、適切なパラメータを設定した。まず、自然環境保全基礎調査の 5 万分の 1 植生図⁹⁾の群落名から、天然林と人工林、針葉樹と広葉樹、落葉樹と

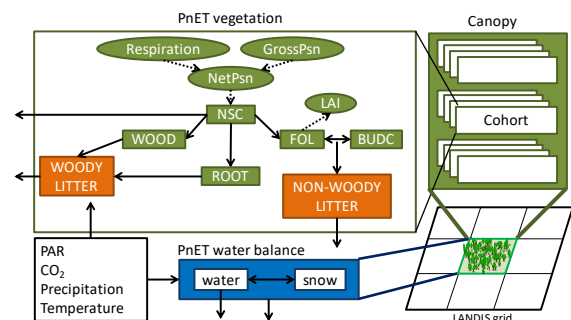


図-2 PnET succession extension の概念図

(Arjan de Bruijn et al.⁷⁾を参考に作成)

常緑樹、種子散布の様式別に分類し、さらに温度適正の情報を加えるためにクラス域に基づいて分類し、最終的に 22 種に分類した。それぞれのクラス域に属する植物の成長の最適温度は、各クラス域の石川県内の最暖月平均気温の平均を設定した。

LANDIS-II モデルでは、計算負荷を軽減するために類似した気象・土壌条件のセル群を一つの Ecoregion と定義し、Ecoregion 内では気象・土壌状態が均一であると仮定して計算を行う。そのため、上記の 1 km 解像度の気候データから、2005 年と 2055 年の月平均気温 °C、月平均日最高・最低気温 °C、月降水量 mm を標準化したのちに k-means 法で 5 つの気象クラスタに分類した。また、土壌は FAO の土壌図¹⁰⁾より 2 つに分類され、気象クラスタと合わせて合計 6 つの Ecoregion に分割された。

(3) シミュレーション条件

計算期間は 2005 年から 2055 年までの 50 年、空間分解能は 50 m として石川県の植生遷移をシミュレーションした。森林管理の対象樹種と主伐・間伐面積は、平成 26 年度の能登・加賀の地域森林計画書¹¹⁾¹²⁾から設定した。

(4) 分析手法

気候変動により天然林施業後の植生の変化がどのように影響を受けるかを評価するため、2006 年から 2010 年の間に天然林施業を行ったセルで、樹種別のバイオマスの割合の変化を算出した。

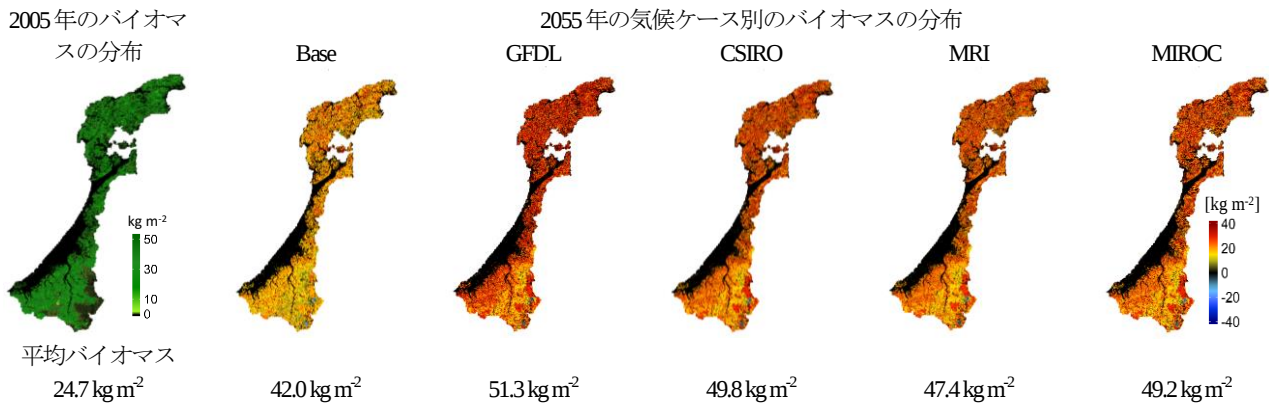
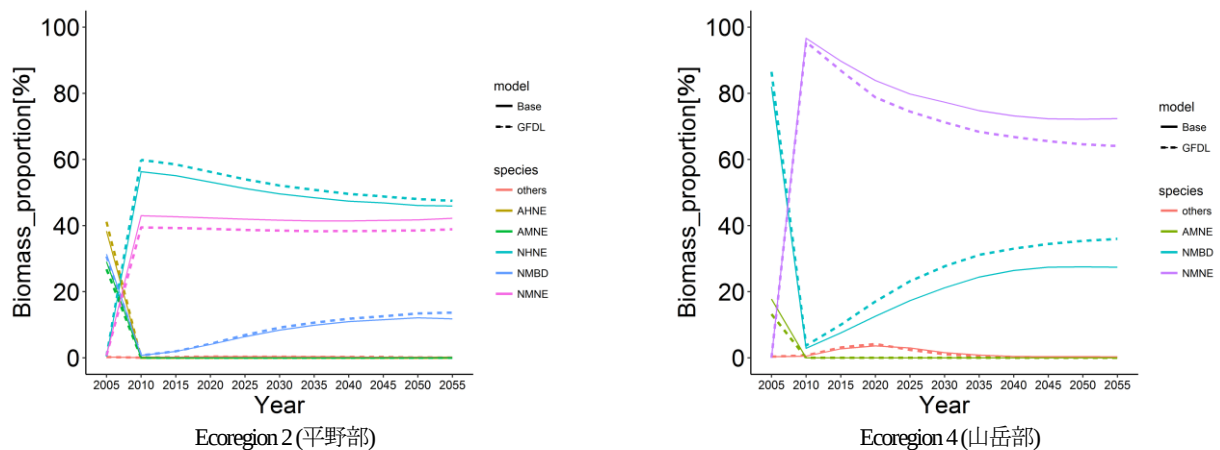


図3 2005年と2055年のバイオマスの比較



※凡例の略語は1文字目のAが人工林、Nが天然林、2文字目は、植生の気候帯を表し、Aは高山帯、Sはコケモトウヒクラス域、Mはブナクラス域、Hはヤブツバキクラス域、3文字目以降は、NEが常緑針葉樹、BDは落葉広葉樹、othersはその他の樹種を表す。

図4 バイオマスの割合から見た Ecoregion 別の天然林施業後の植生回復

3. 結果

(1) シナリオ別のバイオマス量の増加

図-3 に各将来ケースの石川県全域の平均バイオマスの変化を示す。平均バイオマスは、初年度の 24.7 kg m^{-2} から、(Base, GFDL, CSIRO, MRI, MIROC) = (42.0, 51.3, 49.8, 47.4, 49.2) に増加した。すべての将来ケースで、Ecoregion 2 (平野部) と Ecoregion 4 (山岳部) で増加が顕著であった。バイオマス量の増加に関して、4つの気候変動ケースで共通して Ecoregion 4 が他の Ecoregion よりも増加の傾向が顕著であった。また、気候モデル別では、GFDL ケースでのバイオマスの増加量が最も大きく、特に Ecoregion 1 および 2 で顕著であった。CSIRO シナリオ、MRI シナリオ、MIROC シナリオの増加量は類似していた。

今回のシミュレーションでは、各将来ケースごとに気温と降水量が異なる。RCP 8.5 シナリオでは、50年間で気温が平均して約 3°C 上昇し、図-1(a) から特に GFDL ケースで上昇が大きかった。この気温の上昇により植物の成長の最適気温に近づき、純一次生産にかかる成長制

限が弱まり、純一次生産およびバイオマス量が増加したと考えられる。

(2) 樹種構成の変化

図-4 に、特にバイオマスの増加量が大きかった GFDL ケースと Base ケースの天然更新後の種構成の推移を示す。GFDL ケースを Base ケースと比較すると、温暖で多雨な Ecoregion 2 で、GFDL ケースでヤブツバキクラス域の常緑針葉樹 (NHNE) のバイオマスの割合が大きくなった。一方で、寒冷で降水量が少ない Ecoregion 4 では、GFDL ケースでブナクラス域の常緑針葉樹 (NMNE) のバイオマスの割合が減少した。また Ecoregion 4 では、GFDL ケースのブナクラス域の落葉広葉樹 (NMBD) のバイオマス量の割合が増加した。また、Others で示した他の樹种群は 2020 年をピークに減少した。

これらの変化から、50年間という短い期間であっても、天然林施業後は気候変動に伴って新しい環境に適応した植生に変化することが示された。

4. まとめと今後の課題

(1) まとめ

本研究では、日本国内で地域スケールでの気候変動適応策検討を支援する技術開発のため、1 km 解像度の将来気候データと代表的な Forest Landscape Model の LANDIS-II を応用して、気候変動下での天然林施業後の樹種構成変化をシミュレーションし評価する一連のプロセスを開発した。ケーススタディとして石川県に適用したところ、気候モデル間のばらつきは見られたものの、全域の平均バイオマスは増加傾向にあった。1 km という高解像度の気候データを用いたことで、地域内の気象条件の特徴をより詳細にとらえ、樹木構成への影響が地域別に異なることを示すことができた。気候変動で環境ストレスが変化することによる植生への影響を、定量的かつ空間明示的にシミュレーションできる点が本手法の特徴である。

(2) 適応策検討に向けた今後の課題

今回は気候変動により森林のバイオマス量が増加し、天然更新後の種構成が変化するという結果が得られた。森林にかかわる気候変動の影響には、環境ストレスの変化による植生の分布域や樹種構成、物質収支への影響が大きく、このような林業の施業を空間明示的に表現できる LANDIS-II は適応策の検討に有用であるといえる。

a) モデルの表現力の向上

その他の気候変動の影響には、強風や台風の増加による風倒や短期間の強雨や大雨による土砂災害の多発など、森林景観を大きく変える気象現象が指摘されており、これらも林業施策上重要である。一方で、本モデルの樹木の成長は月別、攪乱は年別に計算されるため、日別や時間別に発生する短期間強雨や大雨の影響を十分に再現することができない。これらの気象現象は土砂災害や水害の影響評価に重要であるため、今後の開発課題としては、より詳細な土壌水文モデルで計算したのちに土地被覆の変化を LANDIS-II に入力するなど、災害の影響評価も可能なシミュレーションプロセスに改良する必要がある。

B) 適応策の実装と評価方法の確立

適応策としては、気候変動に対してのレジリエンスの高い森林の形成のための保安林や保護林、緑の回廊の設定のほか、気候変動に適応した品種開発などが挙げられる¹³⁾。地域に適した適応策検討には、それらをモデルの入力データとして実装し、適切に評価する必要がある。本シミュレーションプロセスで用いた LANDIS-II モデルは、森林管理の対象樹種と対象地域を年別に設定することが可能なため、保護林などを設定した場合の森林の構造や景観の変遷をシミュレーションできる。また

LANDIS-II を用いてバイオマスの変動から森林のレジリエンスを定量的に評価¹⁴⁾する事例もあり、それらを参考にしつつ、意思決定者の興味と適合した指標で評価を行う必要がある。

謝辞：本研究は、文部科学省気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT) の技術開発機関ならびに、環境省平成 28 年度戦略的研究開発領域課題 (S-15) 「社会・生態システムの統合化による自然資本・生態系サービスの予測評価」の支援を受けた。

参考文献

- 1) 文部科学省：気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT), <<https://si-cat.jp/>> (2017.8.14閲覧).
- 2) Robert M. Scheller, James B. Domingo, Brian R. Sturtevant, Jeremy S. Williams, Arnold Rudy, Eric J. Gustafson, David J. Mladenoff: Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution, *Ecological Modelling*, Vol.201, pp.409–419, 2007.
- 3) Matthew J. Duveneck, Jonathan R. Thompson, Eric J. Gustafson, Yu Liang, Arjan M. G. de Bruijn: Recovery dynamics and climate change effects to future New England forests, *Landscape Ecology*, pp.1-13, 2016.
- 4) Erfu Dai, Zhuo Wu, Quansheng Ge, Weimin Xi, Xiaofan Wang: Predicting the responses of forest distribution and aboveground biomass to climate change under RCP scenarios in southern China: *Global Change Biology*, Vol.22, pp.3642–3661, 2016.
- 5) 環境省：温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究環境省：気候予測計算結果をもとにした影響評価の結果について, <<https://www.env.go.jp/council/06earth/y0616-08/ref02.pdf>> (2017.1.20参照).
- 6) SI-CAT 技術開発機関：課題2ダウンスケーリング <<https://si-cat.jp/staticpages/index.php/gijutsu-2>> (2017.8.17参照).
- 7) Arjan de Bruijn, Eric J. Gustafson, Brian R. Sturtevant, Jane R. Foster, Brian R. Miranda, Nathanael I. Lichti and Douglass F. Jacobs: Toward more robust projections of forest landscape dynamics under novel environmental conditions: Embedding PnET within LANDIS-II, *Ecological Modelling*, Vol. 287, No. 10, pp. 44–57, 2014.
- 8) 芳賀智宏, 松井孝典, 町村尚：将来シナリオ分析のための里山の景観の多様性のシミュレーションプロセスの開発—LANDIS-II と改良さとやま指数を用いて—, 土木学会論文集G (環境), Vol.72, No.6, 2016.

- 9) 環境省自然環境保全基礎調査：植生調査情報提供ホームページ, <gis.biodic.go.jp> (2017.1.30参照).
- 10) FAO: Guidelines for soil descriptions Fourth edition, pp.27, 2006.
- 11) 石川県：地域森林計画書 能登森林計画区, pp.56,<http://www.pref.ishikawa.lg.jp/shinrin/kikaku/tiikisinrinkaikaku/documents/noto_h26.pdf> (2017.1.30参照).
- 12) 石川県：地域森林計画書 加賀森林計画区, pp.46,<http://www.pref.ishikawa.lg.jp/shinrin/kikaku/tiikisinrinkaikaku/documents/kaga_h26.pdf> (2017.1.30参照).
- 13) 気候変動適応情報プラットフォーム：分野別影響&適応, <<http://www.adaptation-platform.nies.go.jp/impact/index.html>> (2017.8.14閲覧).
- 14) Melissa S. Lucash, Robert M. Scheller, Eric J. Gustafson, and Brian R. Sturtevant: Spatial resilience of forested landscapes under climate change and management, *Landscape Ecology*, 32, pp.953–969, 2017.

(2017. 8. 25 受付)

SIMULATION OF CHANGES IN FOREST BIOMASS AND TREE SPECIES COMPOSITION AFTER NATURAL REGENERATION FOR ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE —CASE STUDY IN ISHIKAWA PREFECTURE—

Chihiro HAGA, Ryota HORIO, Takanori MATSUI, Takashi MACHIMURA

In order to examine climate change adaptation option on the regional scale, it is important to explicitly evaluate the impacts on a detailed scale that can express individual activities of management entities, and we need to develop a high-resolution future projection technology. In this study, we tried to develop a simulation process which simulates the effect of climate change on forest biomass and species composition after natural regeneration at high spatial resolution. We selected Ishikawa prefecture as case study area, and we applied LANDIS-II model (a Forest Landscape Model) in order to simulate vegetation succession from 2005 to 2055 under RCP8.5 scenario. We set temporal resolution as 1 year and spatial resolution as 100 m. We implemented a process which simulates and evaluates changes in biomass and species composition. The results showed that the averaged biomass was increased from 24.7 kg m⁻² in 2005 to (Base, GFDL, CSIRO, MRI, MIROC) = (42.0, 51.3, 49.8, 47.4, 49.2) in 2055. In all future cases, biomass was remarkably increased in Ecoregion 2 (plain region) and 4 (mountainous area) compared with other Ecoregions. We compared species composition shift under Base and GFDL case which showed the largest increase in biomass. The results showed regional characteristics by Ecoregions. In addition, we discussed challenges to examine adaptation option using high resolution future climate data and Forest Landscape Model in Japan.