

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H02245

研究課題名(和文)炭素循環モデルによるヒノキ林生産力の地理的ダイナミクスの予測

研究課題名(英文)Geographical dynamics of stand productivity of Japanese cypress predicted by a carbon cycle model

研究代表者

鳥山 淳平(Toriyama, Jumpei)

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：00582743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、気候変動に伴うヒノキ林の生産力の地理的分布の変化を全国1kmスケールで予測するため、新たな炭素循環モデルを開発した。モデルのパラメタリゼーションのため、ヒノキ林のフラックス長期観測データの精緻化を行うとともに、異なる観測手法のクロスバリデーションによる、ヒノキ林の二酸化炭素吸収量の長期トレンドを明らかにした。さらに、炭素循環モデルの気候に対する生理応答の裏付けのため、既往研究の年輪コア試料とあわせて、ヒノキの年輪クロノロジーを全国19サイトにおいて構築するとともに、年輪クロノロジーに影響の強い気候因子を特定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒノキに特化した全国スケールの炭素循環モデルを新たに開発した研究成果は、伐採が進む一方で再造林に課題を抱える国内の人工林に対し、次世代にヒノキを植えるべきか、科学的な判断材料を提供する点で社会的意義をもつ。また、スギとヒノキの生理特性の違いを炭素循環モデルのパラメタリゼーションとして表現した成果は、両者を含むヒノキ科の樹種の、過去の地理的変遷を理解するための新たな視点をもたらす。加えて、幅広い気候レンジを含む全国のヒノキの年輪クロノロジーのデータセットは、我が国の人工林の気候応答を解明するための重要な成果である。

研究成果の概要(英文)：We developed a carbon cycle model to estimate the change in geographic distribution of Japanese cypress stand productivity at a national scale with a resolution of 1 km under a changing climate. We refined long-term flux monitoring data to parameterize the carbon cycle model, and clarified a long-term trend of carbon removal in a Japanese cypress stand by cross-validation using different types of monitoring methods. In addition, we developed the Japanese cypress tree-ring chronology data set over 19 sites in Japan, including some sites established in previous research projects, and specified the climatic factors affecting the tree-ring chronologies.

研究分野：森林科学

キーワード：ヒノキ 炭素循環モデル フラックス観測 年輪クロノロジー

様式 C-19、F-19-1 (共通) :

1. 研究開始当初の背景

ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) はスギ (*Cryptomeria japonica*) と並び、我が国を代表する造林樹種である。戦後の造林地の拡大に伴い、ヒノキは関東から九州地方まで広く植栽されるようになった。しかしながら、気候変動の進行に伴い、今後ヒノキの植栽適地はシフトする可能性がある。先行研究ではスギに関して、気温上昇と夏季の乾燥化のシナリオにより、西日本の一部の地域で純一次生産量 (Net Primary Production, NPP) の低下が示唆されている (Toriyama *et al.* 2021, 図 1)。一般にヒノキはスギより乾燥した環境を好むと考えられているため、スギの生産力低下予測地域において、ヒノキの生産力は維持されるか？さらには言えば、ヒノキはスギの代替樹種となりえるか？という問いが生じる。しかしながら、これまでヒノキ林の生産力に対する気候変動の地理的な影響は検討されていない。

上記の問いに答えるためには、ヒノキ林の生産力のモデル化が有効である。とりわけ総一次生産量 (Gross Primary Production, GPP), NPP の推定を行う炭素循環モデルは有力なアプローチであり、その根幹とは気象に対する樹木の生理応答 (以下、生理応答) である。近年は、炭素循環モデルのパラメータをヒノキ林分に最適化するための計算技術が発達するとともに、ヒノキ形質データベースや国家森林インベントリ等の関連データが充実してきた。加えて、急速に発達する樹木年輪年代学的手法にもとづく統計的アプローチは、長期的な気候変動に対するヒノキの生理応答に関する科学的根拠を提供する。このように、全国スケールのヒノキ林の炭素循環モデルを構築し、多角的に検証するための環境が整いつつある。

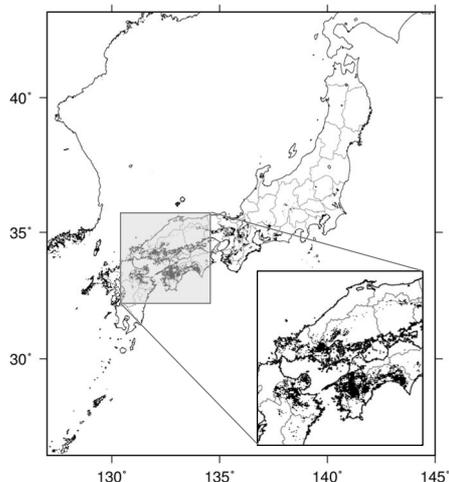


図 1: 炭素循環モデルを用いたスギ林の生産力低下地域の予測例。黒色が 2100 年の低下予測地域。MIROC5-RCP2.6 温暖化シナリオによる。(Toriyama *et al.* 2021)

2. 研究の目的

本研究は、全国規模のヒノキ林の炭素循環モデルを新たに開発し、それにより気候変動進行下において時々刻々と変化するヒノキ林生産力の地理的分布、すなわちヒノキ林生産力の地理的ダイナミクスを予測を行うことを目的とする。炭素循環モデルの根幹となる、気象に対するヒノキの生理応答を適切に表現するため、ヒノキ形質データベース、ヒノキ林のフラックス観測データ、および年輪クロノロジーデータによるモデルのパラメータの最適化と生理学的根拠の裏付けを行う。

3. 研究の方法

(1) ヒノキ林の炭素循環モデルの開発と検証

スギ林の先行研究を参考に、全国スケールで 1km 解像度の炭素循環を推定するモデルを開発する。研究計画の前半でベースとなるモデルを選定したのち、ヒノキ林に最適化した生理パラメータを選定する。生理パラメータ選定の際は、ヒノキの形質に関するデータペーパーと、下記(2)のフラックス長期観測データを参照する。研究計画の後半ではモデルの検証を行う。その際、下記(3)の年輪クロノロジーデータを利用する。加えて、高時間分解能の炭素循環モデル NCAR/LSM モデルとの相互比較を行う。NCAR/LSM は緻密な構造をもつ一方で計算量の要求が高いため、全国スケールの運用ではなく、本研究の基幹となる炭素循環モデルの挙動を確認するために利用する。

(2) ヒノキ林のフラックス長期観測データの精緻化

ヒノキ林のフラックス観測サイトである桐生水文試験地は滋賀県大津市に位置する。同試験地は 1959 年に植栽された無間伐のヒノキ人工林であり、2001 年より渦相関法による CO₂ 交換量の測定と、測定地周辺での毎木調査を行っている。本研究では同試験地の 20 年にわたる観測データから、生理パラメータの較正に適切な (台風攪乱等による林分構造の変化がない、等) 期間の GPP および蒸散量データを選定し、方法(1)のモデル作業班に受け渡す。加えて、さらなるモデル改良のための検討材料として、ヒノキ林の二酸化炭素吸収量について詳細な検討を行う。具体的には、毎木調査の結果を用いて過去 20 年間の森林動態の変化を分析するとともに、積み上げ法によって算定された純生態系生産量 (NEP) と、渦相関法により算定した年間の純生態系炭素交換量 (NEE) の変動を比較する。

(3) ヒノキ林の年輪クロノロジーの構築

研究分担者の先行課題で収集したコア試料と合わせ、幅広い環境傾度を含む全国 (目標: 15 サイト) のヒノキ林の年輪クロノロジーを構築するため、新たに、桐生水文試験地を含む国内 3 サ

イト以上で現地調査を行う。

1 サイトにつき 40 個体程度、また 1 個体につき 2 方向のコア試料を採取する。コア試料に対し熱水およびトルエン・エタノール混合液で抽出作業を行い、溝のある台木に固定して 1.6mm の厚さに切り出す。X 線写真を撮影し、軟 X 線デンシトリー法で年輪幅、早材幅、晩材幅、年輪内平均密度を計測する。クロスデイティングを行った後、計測した実測値の時系列変動に成長傾向曲線を当てはめ、スプライン関数のフィルター長を 32 年として標準化を行う。その後、自己回帰分析を行い、残差クロノロジーを作成する。上記により得られたヒノキ林の年輪クロノロジーを方法(1)のモデル作業班に受け渡す。加えて、ヒノキの生理応答を探索するための統計解析を行う。具体的には、月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温、月降水量、月日照時間等の気象値を算出し、それらの気象値と年輪幅のクロノロジーとの単相関分析を行う。

4. 研究成果

(1) ヒノキ林の炭素循環モデルの開発と検証

研究期間の前半において、炭素循環モデルを全国 1km で展開するための手法開発を進めることができた。ベースとなるモデルの候補として、Biome-BGC とその後継である Biome-BGCMuSo を選定した。さらに詳細な検討を続けた結果、Biome-BGCMuSo には細やかな森林管理の履歴や、土壌の多層構造を表現できる強みがある一方で、複雑なモデル構造に起因する出力の不安定さが確認された。このため本研究課題では限られた研究期間を勘案し、Biome-BGCMuSo の最新の研究成果をフォローしつつ、実績の高い Biome-BGC をベースに課題を組み立てる方針を決定した。

続いて 2020 年に出版されたヒノキ形質に関するデータペーパー(Osone *et al.* 2020) を精査した結果、ヒノキの主要な生理特性について、観測値の蓄積に裏付けされた代表値を特定した。この知見をもとに Biome-BGC のいくつかの生理パラメータの値を絞り込み、暫定のパラメータセットを構築した。さらに、Biome-BGC の出力とヒノキ林のフラックス長期観測データとの比較を行い、別の生理パラメータの値を調整した。この過程において、林分枯死率を高めに設定することで、ヒノキ林のフラックス観測データを良好に再現できることを明らかにした。その一方で、全国スケールに展開するモデルの林分枯死率としては適切でないレンジとも考えられた。このため、林分構造の変化の影響が比較的小さい期間のフラックスの再現を重視する方針に切り替えた。また、当初の計画にはなかったが、炭素循環モデルの出力を、ヒノキ林の長期観測サイトである浅木原収穫試験地(香川県)の材積データで検証するとともに、近隣のスギの収穫試験地の材積データと比較した。その結果、本研究の炭素循環モデルが、比較的乾燥した気候条件における長期的なヒノキ林のバイオマスの蓄積過程と、同気候条件でより成長が遅いスギ林との違いを再現できることを確認した。

研究期間の後半では、年輪クロノロジーデータと、Biome-BGC および高時間分解能モデル NCAR/LSM モデルとの相互比較を行った。その結果、Biome-BGC の出力の不確実性が高い環境条件を明らかにした。具体的には、ヒノキ年輪クロノロジーサイトから、上記の浅木原、桐生、高山・清見(岐阜県)、奄美(鹿児島県)を対象に、ヒノキ林とスギ林のモデル出力を比較した(図 2)。このとき年輪クロノロジー、および Biome-BGC と NCAR/LSM のモデルの傾向は必ずしも一致しておらず、特に亜熱帯地域(奄美)で Biome-BGC の高い不確実性が示された。以上の成果は、予測の不確実性を含めたヒノキ林生産力の将来予測の提示に貢献すると考えられた。しかしながら、研究期間内にすべての年輪クロノロジーサイトの結果に裏付けられた生理パラメータの確定には至らなかった。そのため現在も、生理パラメータの調整を継続している。

その他の成果として、近年は都道府県スケールにおいても、森林の炭素吸収量の現状把握と、気候変動下における将来予測が重要視されてきた。そのため、当初の計画にはなかったが、日本の岐阜県を対象として、本研究で扱った炭素循環モデルを応用し、気候変動が森林炭素吸収量に及ぼす影響を評価した。その結果、岐阜県のように環境傾度が卓越した地域では、気候変動が森林炭素吸収に及ぼす影響とそのメカニズムが、気候帯と植生タイプによって大きく異なる可能性が示された。

(2) ヒノキ林のフラックス長期観測データの精緻化

桐生水文試験地の 2001 年以降のフラックスデータを精緻化するとともに、同サイトの 1903 年以降の長期気象データを復元できた。長期気象データは、過去のヒノキ林生産力の再現、およびヒノキ林の肥大成長の生理応答の解析に利用された。

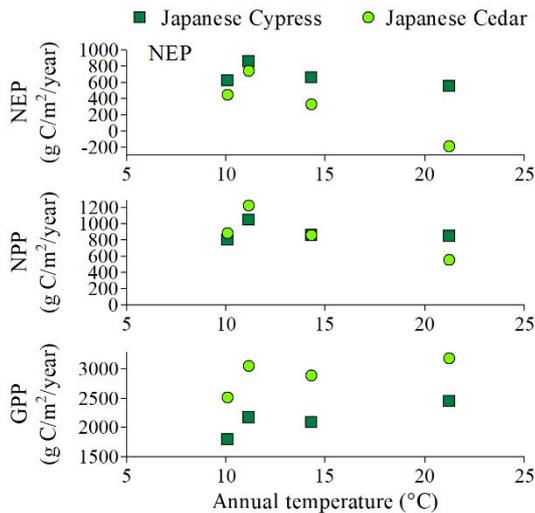


図 2: 炭素循環モデル NCAR/LSM を用いたヒノキ林とスギ林の解析例。年間炭素フラックスの気温依存性を示す。Biome-BGC の結果は検討中のためここに示していない。

桐生水文試験地の毎木調査では、調査開始から 2015 年にかけて胸高直径が 15 cm 以下である比較的小さなヒノキが多く枯死する一方で、生存したヒノキの成長が 2014 年以降に特に旺盛になり、自己間引きが確認された。体サイズの比較的大きなヒノキの継続した成長により現存量は一貫して増加し続けたが、毎木調査により算定した年間の炭素固定量は 2008 ~ 2015 年は低く推移した。渦相関法により測定された二酸化炭素吸収量は 2007 年の $728 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ をピークに 2008 年以降は減少を続け、2011 ~ 2013 年は $78 \sim 99 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ まで低下したが、その後は増加に転じて 2016 年は $285 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ まで回復し、毎木調査から推定された NEP と同様の変動が確認された。このように、積み上げ法によって算定された純生態系生産量 NEP の挙動と渦相関法により算定した年間の純生態系炭素交換量 NEE の変動は整合しており、ヒノキ林の二酸化炭素吸収量は林分構造の変化に応じて大きく変動しながら林齢 60 年を超えても維持され続けていることが明らかとなった。

(3) ヒノキ林の年輪クロノロジーの構築

初年度に、当初の計画を上回るペースで 3 サイト（桐生、浅木原、奥足川（高知県））のヒノキ林のコア試料を取得できた。これにより、既往研究で取得したコア試料とあわせ、ヒノキ年輪クロノロジーのサイト数の目標値（全国 15 サイト）を達成した。さらに次年度以降により冷涼または温暖な 4 サイト、すなわち御明神（盛岡県）、筑波（茨城県）、田野（宮崎県）、奄美を追加し、最終的に全国 19 サイトのヒノキ林年輪クロノロジーを構築できた。

上記のうち 16 サイトを対象に、年輪幅のクロノロジーと月ごとの気象値との相関係数を算出した結果、年平均気温が 12.4 以下の全てのサイト（9 地点）において 12 月 ~ 4 月のいずれかの月の月平均最高気温との間に有意な正の相関が認められた。このことから、比較的気温の低い生育地においては冬季 ~ 春季の気温が光合成量に影響し、結果的に肥大成長の制限要因となっていることと、その温度にはしきい値が存在することが示唆された。また、年平均気温が高く年降水量が少ない地点では前年の 7 ~ 8 月の月平均最高気温との間に負の相関が認められた。このことは、乾燥しやすいサイトにおいては前年夏期における水ストレスが制限要因となっていることを示唆する。特定の温度域以下の地点において冬季から春季の気温が制限要因となっていることは、炭素循環モデルにおける GPP の気温に対する依存性が低温域においてのみ明瞭であること（図 2）と整合性があると考えられた。

(4) 得られた成果の位置づけと今後の展望

本研究では従来にない、ヒノキに特化したプロセススペースの炭素循環モデルを構築した。その成果は、伐採が進む一方で再造林に課題を抱える国内の人工林に対し、次世代にヒノキを植えるべきか、科学的な判断材料を提供する社会的意義をもつ。スギとヒノキの生理特性の違いをフラックス観測データから読み解き、炭素循環モデルのパラメタリゼーションとして表現した成果は、スギ、ヒノキを含むヒノキ科の樹種が、過去の気候変動を経てどのように拡大、縮小してきたか理解するための、新たな視点をもたらすものである。さらに、桐生水文試験地のヒノキ林の二酸化炭素吸収量に関する緻密な解析は学術的にも高く評価され、日本森林学会においてポスター賞を授与された。

本研究課題では新型コロナウイルスの感染拡大により、研究期間の大半で野外調査が制限された。にもかかわらず、幅広い気候レンジをカバーする全国のヒノキの年輪クロノロジーのデータセットを構築できたことは、我が国の人工林の気候応答を解明するための重要な成果である。今後はすべての年輪クロノロジーサイトの結果をふまえ、ヒノキ炭素循環モデルの生理パラメータを確定するとともに、成果普及のため、スギ林の既往研究と同様に、モデルの出力結果（ヒノキ林生産力の予測結果）を国、自治体の関係者が利用しやすい形（空間データ等）に加工し、公表するための作業を進める。なお、ヒノキのコア試料の採取に際し、各地の国有林と民有林を含む、多くの試験地の協力を得た。ここに深謝する。

引用文献: Toriyama *et al.* (2021) PLOS ONE 16(2) e0247165; Osone *et al.* (2020) Eco Res 35(1) 274-275

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Saitoh T.M., Shin N., Toriyama J., Murayama S., Yasue K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Chapter3: Forest carbon sequestration in mountainous region in Japan under ongoing climate change: implication for future research	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 River basin environment: evaluation, management and conservation, Springer Singapore, Li F. Awaya Y., Kageyama K., Wei Y. (eds.)	6. 最初と最後の頁 55-80
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-981-19-4070-5_3	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 傳田羽都音、鳥山淳平、荒木眞岳、高木正博、安江恒
2. 発表標題 茨城と宮崎に生育するヒノキの年輪要素の気候応答
3. 学会等名 日本木材学会大会研究発表要旨集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 斎藤琢、永井信、鳥山淳平、村山昌平、安江恒
2. 発表標題 気候変動が岐阜県の森林炭素吸収量に及ぼす影響
3. 学会等名 第69回日本生態学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神取美奈、小杉緑子、鳥山淳平、安江恒
2. 発表標題 滋賀、高知に生育するヒノキの肥大成長の気候応答
3. 学会等名 日本木材学会大会研究発表要旨集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤薫、小杉緑子、坂部綾香、陳思羽、神谷有咲
2. 発表標題 桐生水文試験地ヒノキ林における森林動態およびNEEの長期変動
3. 学会等名 第135回日本森林学会大会
4. 発表年 2024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
研究分担者	安江 恒 (Yasue Koh) (00324236)	信州大学・学術研究院農学系・准教授 (13601)	
研究分担者	斎藤 琢 (Saitoh M. Taku) (50420352)	岐阜大学・環境社会共生体研究センター・准教授 (13701)	
研究分担者	小杉 緑子 (Kosugi Yoshiko) (90293919)	京都大学・農学研究科・教授 (14301)	

	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
研究協力者	高木 正博 (Takagi Masahiro) (70315357)	宮崎大学・農学部・教授 (17601)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	荒木 眞岳 (Araki G. Masatake) (80353564)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・チーム長 (82105)	
研究協力者	橋本 昌司 (Hashimoto Shoji) (90414490)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 (82105)	
研究協力者	福本 桂子 (Fukumoto Keiko) (30822712)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・研究員 (82105)	

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