

気候変動が 人工林に及ぼす影響を 予測する



国立研究開発法人 森林研究・整備機構

森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute

はじめに

我が国は国土の3分の2にあたる2500万ヘクタールを森林が占めており、このうちの1000万ヘクタールが人工林です。日本が気候変動枠組条約事務局に提出している温室効果ガスインベントリ報告書によると、2018年度における森林の二酸化炭素純吸収量は5,809万二酸化炭素トンです。2003年以降、人工林の成熟が進むとともに森林における純吸収量は継続的に減少しているものの、我が国の2050年に向けた目標である温室効果ガスの排出を実質ゼロにするカーボンニュートラルに向けて、人工林は非常に重要な温室効果ガスの吸収源となります。一方で、「気候危機」という言葉が使われるほど気候変動の影響は顕在化してきており、吸収源としての人工林への影響も懸念されるところです。

我が国では、気候変動により台風の巨大化や短時間強雨の頻度の増加などが起こる一方で、気温上昇と降水パターンの変化によって乾燥化が進み、吸収源として重要な役割を果たす人工林の成長にも影響を与えることが予測されています。しかし、気候変動が具体的に人工林にどのような影響を与えるのか、科学的知見とデータをもとに解明されていませんでした。そこで、国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所は、信州大学、岐阜大学と共同でコンソーシアムを組み、農林水産省技術会議からの委託プロジェクトとして気候変動が人工林に及ぼす影響の解明に取り組み、その成果をここに取りまとめました。本成果が我が国における気候変動下での森林管理に貢献することを期待しています。

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所
研究ディレクター 平田 泰雅

目次

プロジェクト概要 (齊藤 哲)	01
第1章 (橋本 昌司)	
将来のスギ林の生産力を予測する	04
トピック1 将来気候の不確実性 ―未来は私たちの今にかかっています	07
第2章 (荒木 眞岳)	
土壌の乾燥に対するスギ成木の反応	08
トピック2 水節約型と消費型 ―スギは自身の蒸散で土壌を乾燥させる	11
第3章 (安江 恒・斎藤 琢)	
スギの肥大成長と炭素収支の関係性	12
トピック3 休眠期の気温が肥大成長に影響する仕組み	15
まとめ (齊藤 哲)	16
用語説明	18

プロジェクト概要

(国研) 森林研究・整備機構 森林総合研究所 関西支所 齊藤 哲

研究の必要性

^{*1}気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が平成15年に出した第5次評価報告書では、気候変動が確実に進行していることが明記されています。日本政府は平成30年に「^{*2}気候変動適応法」を公布し、気候変動が人の生活に及ぼす影響への対策にのりだしています。農林水産業に目を向けてみると、気候変動による環境の変化が生産現場へ影響を及ぼすことも懸念されています。そこで農林水産省では、当面10年程度に必要な取組を中心に分野・品目ごとの計画として「^{*3}農林水産省気候変動適応計画」を策定しました。本計画では業種ごとに気候変動の影響の現状と将来予測が示され、今後の取り組み（計画）がまとめられています。そのなかで気候変動の人工林への影響に関する記述をみると、大気の乾燥化による水ストレスの増大でスギ林が衰退しているという現状が報告されています（松本ら1992）。将来予測に関しては、降水量の少ない地域でスギの生育不適地が増加する可能性を示しています。その基となっている研究では、スギ林から^{*4}蒸散される年間の水分量と年降水量の割合から、スギ林に適する水分条件をもつ森林面積が減少する可能性を報告しています（Shigenaga, et al.2006）。これは水分条件だけから予測された結果です。スギの成長は、光合成によりどれだけ有機物を樹体内に取り込めたか、つまり光合成量から呼吸量を差し引いた量（^{*5}純一次生産量、NPP）に大きく依存しています。水分条件は純一次生産量を決める重要な要因のひとつですが、光合成を行うにはほかの条件も大きく影響しています。しかし、気候変動が人工林に及ぼす影響については、水分条件以外も組み込んだ評価ができていないため、十分な情報が得られているとはいえないのが現状です。農林水産省気候変動適応計画では、正確な予測のためには今後更に研究を進めていく必要がある点も指摘しており、造林樹種が受ける影響を評価する、より高度な技術の開発が求められています。

そこで、農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究：農林水産分野における気候変動対応のための研究開発のひとつとして、平成28年度～令和2年度までの5年間、「人工林に係る気候変動の影響評価」を実施しました。

参考文献

松本陽介ほか（1992）森林立地 34(1): 2-13.

Shigenaga, H. et al. (2005) Journal of Agricultural Meteorology 60: 451-456.

プロジェクト課題構成

プロジェクトは、気候変動が人工林に及ぼす影響を高精度、高解像度で予測する技術の開発を目的とし、次ページの「研究課題の全体計画」に示すように、以下の3つの小課題で構成されています。

小課題1：林分の成長に影響する環境要因の抽出及びマッピング

小課題2：環境条件に対する樹木の生理的応答及び林分成長特性の解明

小課題3：樹木の肥大成長と⁶フラックス観測データとの比較解析

小課題1では、光合成のメカニズムを組み込んだ⁷炭素循環モデル（Biome-BGC）を日本のスギ林に適合するように改良し、将来のスギ林の生産力（純一次生産量）を全国スケールで予測するモデルを開発しました（第1章）。小課題2では、実際のスギ林で⁸林内雨を遮断する実験を行い、土壌が乾燥した際のスギ成木の生理特性と成長の反応を調べました（第2章）。また、長期モニタリングによるスギ林の成長データも整理しました。小課題3では、国内12地点のスギ林について、年輪解析から肥大成長への⁹気象要素の影響を調べるとともに、小課題1とは別の¹⁰生態系モデル（NCAR/LSM）を用いてスギ林の生産力を推定しました（第3章）。

小課題1で行った将来のスギ林の生産力の予測結果を、土壌の乾燥に対する実際のスギの生理特性の反応や別の方法による生産力の推定値と相互比較しながらモデルを改良し、気候変動がスギ人工林の生産力に及ぼす影響（純一次生産量の変化）を全国スケールの地図で評価しました（第1章）。

このパンフレットは、そのプロジェクトの成果を紹介したものです。

以下、小課題1から順に第1章、第2章、第3章でその成果を紹介します。

コンソーシアム

代表機関：

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所

参画研究機関：

国立大学法人 信州大学 山岳科学研究拠点

国立大学法人 東海国立大学機構 岐阜大学 流域圏科学研究センター

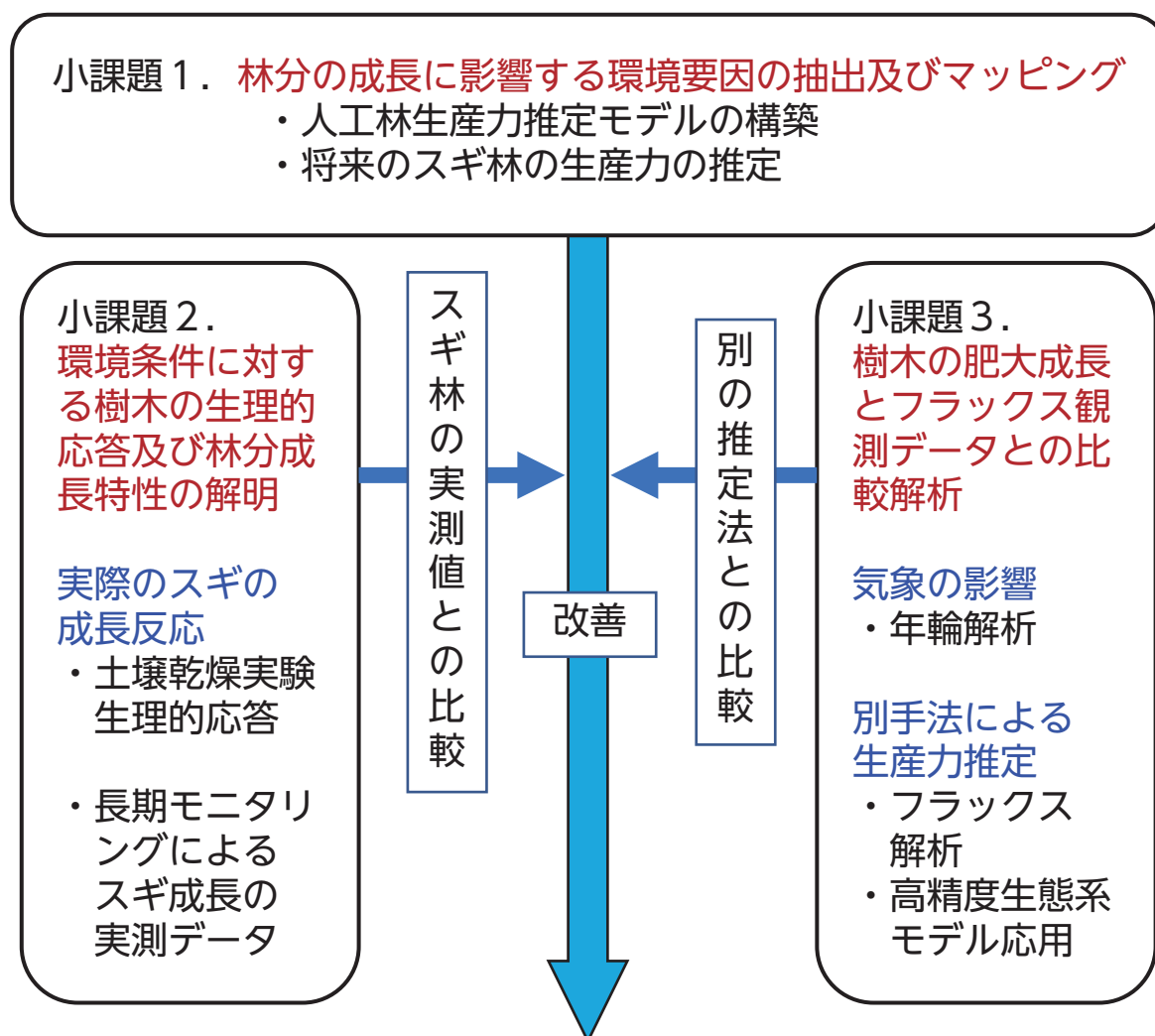
研究資金

農林水産技術会議 農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究

農林水産分野における気候変動対応のための研究開発

研究課題名：人工林に係る気候変動の影響評価（個別課題番号：16808214）

研究課題の全体計画



気候変動が人工林へ及ぼす影響評価の全国マッピング

第1章 将来のスギ林の生産力を予測する

(国研) 森林研究・整備機構 森林総合研究所 立地環境研究領域 橋本 昌司

要点

- 気候変動のスギ人工林への影響を評価するため、炭素循環モデルを改良し、全国1 kmの解像度でスギ林の生産力（⁵純一次生産量）の将来予測を初めて行いました
- 将来、スギ林の生産力が増加する地域と低下する地域の両方が出現する可能性があり、特に西日本で低下する懸念があることがわかりました
- 将来の生産力は将来の気候予測により異なり、低下幅は小さい可能性がある一方で、激しく温暖化が進んだ場合、生産力が低下する地域が広がると予測されました

研究の重要性

気候変動により、森林生態系は大きな影響を受けることが予想されており、世界中でその影響予測の研究が行われています。特に、気候変動により森林の生産力がどのように変化するかは、人工林の管理や林業の将来を考える上で重要なポイントです。樹木の光合成は大気環境に加え、生育地の土壌環境、それぞれの樹種に特有の生理特性にも影響を受けるためプロセスは複雑で、生産力予測のためには炭素循環モデルを用いた評価が必要です。しかしこれまで、スギ人工林を対象とした気候変動影響予測はほとんど研究がありません。

目的

森林の生産力を予測できる炭素循環モデルを日本のスギ林用に調整し、気候変動下でのスギ林の生産力を評価することを目的としました。

方法

国内外の研究事例を調べ、広く世界で利用されている⁷Biome-BGCというモデルを改良して、スギ林の将来の生産力を予測する炭素循環モデルを構築しました。過去に国内で行われたスギに関わる研究データを学術雑誌などから集約し、新たなデータベースを構築しました（Osone et al. 2020）。また、国内のスギ林の⁶フラックス観測タワーサイトのデータも取り寄せました。これらのデータを活用してモデル内の変数を調整し、スギ林の炭素循環を適切に表現できるようにしました。そのモデルに、現在の気候と将来の気候予測（¹¹気候シナリオ）をそれぞれ入力し、スギの生産力（純一次生産量、NPP）の変化を調べました（Toriyama et al. 2021）。将来の気候の予測は、今後の温室効果ガスの排出量の予測やそれに基づいて気候を予測するモデルにより、たくさんのシナリオが示されています（トピック1 参照）。本研究では、世界で広く採用される5つの¹²気候モデルの結果のうち、二酸化炭素濃度の上昇が小さいシナリオ（¹¹RCP2.6）と大きいシナリオ（¹¹RCP8.5）を用いました。

成果

モデル調整のために構築したデータベースは、ヒノキのデータも含め22,000のデータを収録することができました。そのデータベースなどを活用しモデルを調整した結果、日本のスギ林に適したモデルを構築することができました。そのモデルを用いて、全国の森林域のスギ林の生産力（⁵純一次生産量）を1kmの解像度で推定できるシステムを構築しました。そのシステムに現在の気候と将来の気候を入力してスギ林の生産力を評価し、その差を見ることによって将来どの地域において生産力が増えるか、減るかを評価しました。複数の¹²気候モデルの結果を平均して評価しました。

まず、スギ林の純一次生産量の変化量を全国の平均で見ると（図1-1）、¹¹RCP2.6でもRCP8.5でも生産力は増加しました。しかし、RCP2.6では生産力が低下する地域も多く見られました。RCP8.5では高二酸化炭素濃度の影響によりスギの光合成が促進され、全国的に生産力が現在よりも増加する可能性が明らかになりました。

次に、生産力の変化量の地域分布を見ると（図1-2）、東日本よりも西日本でスギ林の生産力が低下する可能性が明らかになりました。また、冬と夏の季節別に見ると、冬では全国的に生産力が増加する傾向にありましたが、夏では特に西日本で生産力が低下することがわかりました。したがって、西日本の生産力低下には夏の影響が大きいと考えられました。しかし、生産力が低下する地域であってもその低下幅は小さく、気候変動の影響はそれほど大きくない可能性もあります。

ただし、今回の予測結果には注意が必要です。特に気温上昇が大きい気候モデルでは、東日本も含むほぼ全域でスギ林の生産力が低下し、低下度合いも大きいことがわかります（図1-1、1-3）。つまり、今回の試算は温暖化の進行具合に強く依存します。また、一部の研究で示唆されているように、将来の高二酸化炭素濃度下でスギの光合成能力がモデルでの想定通りに高まらない場合は、スギ林の純一次生産量の予測値は下方修正される可能性があります。

このように、気候変動によって、日本の人工林は成長が良くなる可能性もありますが、成長が大きく低下する可能性もあることがわかりました。今後は、今回評価の対象にしなかった生理的なメカニズムや極端現象の影響を炭素循環モデルに組み込むなどさらなる研究を進めるとともに、今後の気候変動の進行を慎重に見極めていく必要があります。

参考文献

Osone, Y. et al. (2020) Ecological Research 35: 274–275.

Toriyama, J. et al. (2021) PLOS ONE <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247165>

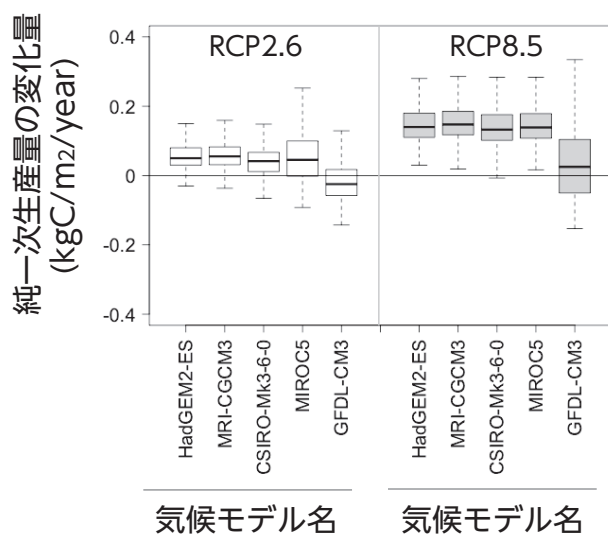


図1-1. 2つの¹¹気候シナリオ (RCP2.6とRCP8.5) における5つの¹²気候モデルごとの生産力の変化量。2000年頃からみた2100年頃の変化量。特に気温上昇が大きい気候モデル (GFDL-CM3) では、生産力の低下度合いが大きい。

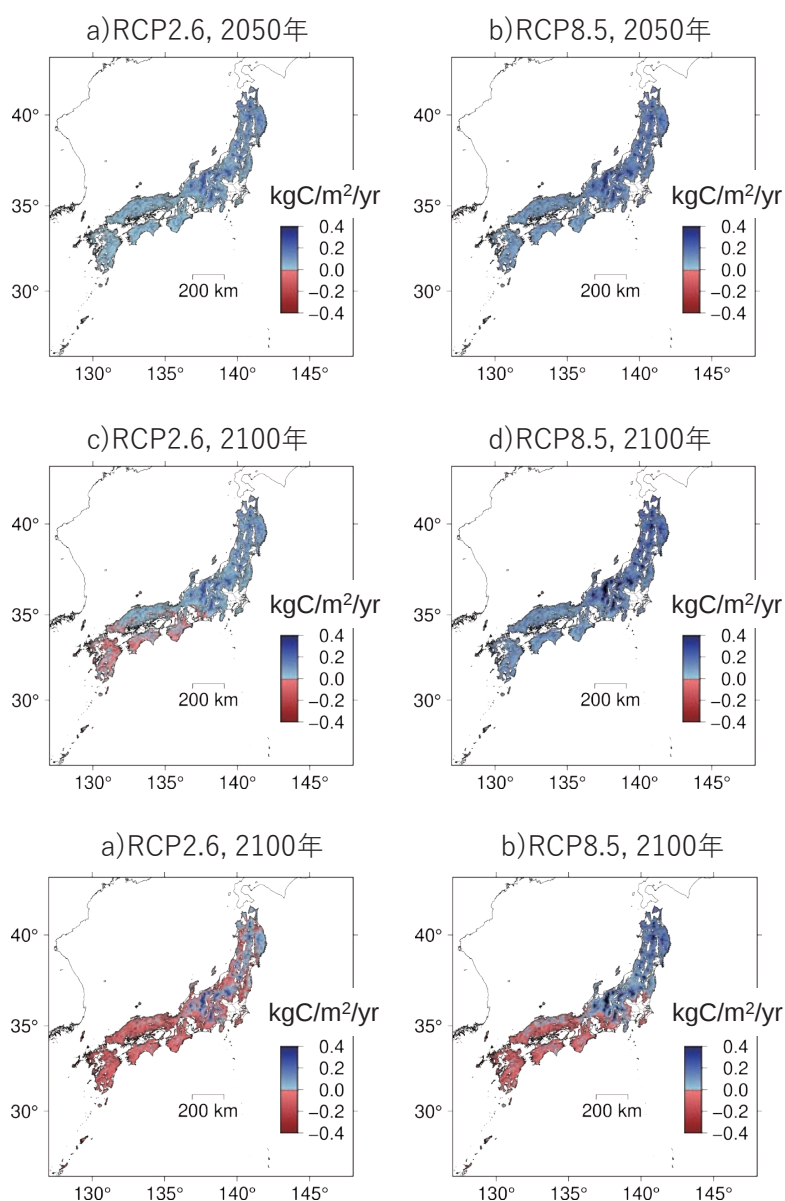


図1-2. 生産力の変化量の地域分布。5つの気候モデルの結果の平均を示す (左上 a : RCP2.6, 2050年、右上 b : RCP8.5, 2050年、左下 c : RCP2.6, 2100年、右下 d : RCP8.5, 2100年)。青色は生産力が増大、赤色は生産力が低下している。RCP2.6の2100年に赤い地域が広がっている。

図1-3. 特に気温上昇が大きい気候モデル (GFDL-CM3) を用いた場合の生産力の変化量。特にRCP2.6では東日本を含め広い範囲で低下が見られる。RCP8.5でも関東と中部以西で低下が見られる。

トピック1

将来気候の不確実性 ― 未来は私たちの今にかかっています

今回の研究で使用した将来の気候予測（^{*1}気候シナリオ）にたくさん種類があるように、今後の気候変動には大きな不確実性（予測幅）があります。その理由は、今後の人類の温室効果ガスの排出量にいろいろな予測があるためです。私たちが今後大きく排出量を抑制し現状を維持するというものから、この勢いで排出量が増え続けるというものまであります。また、それに基づいて将来の気候を予測するモデルによって、どこでどのように気候が変化するかという予測が異なっています。将来の気候を予測するモデルは、気候モデルとか地球システムモデル(Earth System Model: ESM)と呼ばれ、地球上のエネルギー、水、炭素などの循環をシミュレートして将来の気候を予測します。

おおまかに見れば、温室効果ガスの排出量を減らせば将来の気温上昇は小さく、排出量がこのまま増え続ければ将来の気温の上昇は大きくなります。同じ排出量予測でもモデルによって温度上昇の予測は幅があります。今後、日本の人工林が気候変動によってどのように変化するかという予測も、この不確実性に大きく影響を受けます。

気候が大きく変化すると、それだけ私たちの生活も大きな影響を受けることが予測されています。気候の変化をできるだけ最小限に抑えるために、私たちは温室効果ガスの排出量を減らし、森林などの炭素吸収源を大切にしていける必要があります。

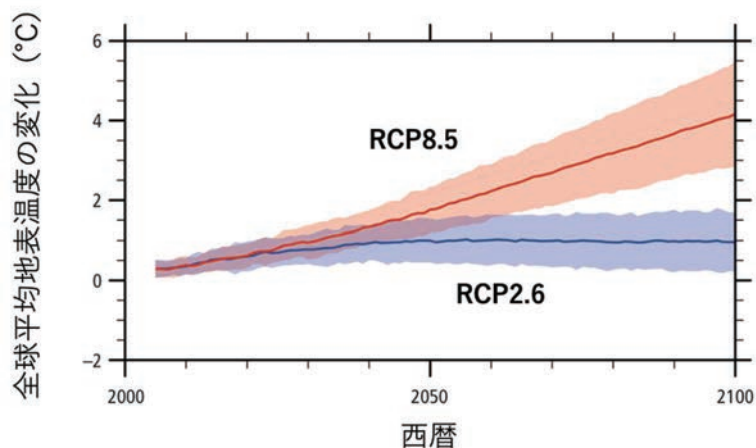


図1-4. RCP2.6とRCP8.5のふたつのシナリオの地表温度変化
^{*1}IPCC第5次報告書より引用（1986-2005の平均からの変化量）。

第2章 土壌の乾燥に対するスギ成木の反応

(国研) 森林研究・整備機構 森林総合研究所 植物生態研究領域 荒木 眞岳

要点

- 気候変動による乾燥がスギ人工林に及ぼす影響を評価するため、実際のスギ林で土壌を乾燥させる実験を行い、スギ成木の水利用の仕方と成長を調べました
- スギは葉がしおれるぎりぎりまで光合成を行う水消費型の種であり、その水利用の仕方は土壌が乾燥しても変わりませんでした
- 土壌が強く乾燥すると、特に夏において、日中の葉への水の供給が不足するため、*¹³気孔が閉じて光合成速度が低下することがわかりました
- 土壌の乾燥が長期間続くと、スギの成長が低下する可能性が示されました

研究の重要性

将来の気候変動によって無降雨期間の増加が予測されており、乾燥によって樹木が衰退したり枯死したりすることが世界的に懸念されています (Allen et al. 2010)。スギは日本における重要な造林樹種ですが、これまで西日本を中心にスギ林の乾燥害が観察されており、少雨が主な原因だとする報告もあります (讃井 1998)。将来にわたり安定的に木材生産を続けていくためには、ある程度成長したスギに対する乾燥の影響を調べる必要があります。しかし、野外に生育しているスギ成木を対象に、実際に土壌を乾燥させてスギの水利用の仕方や成長を調べた実験はありません。

目的

土壌が乾燥した際に、スギ成木の水利用に関する生理特性がどのように変化するのか、また、成長が低下するのかどうかを明らかにすることを目的としました。

方法

茨城県かすみがうら市にある約40年生のスギ林 (平均胸高直径21cm、樹高約20m) 内に、*⁸林内雨を遮断するための約10m四方の屋根を設置して (図2-1)、土壌の乾燥処理を約3年間行いました (乾燥区)。その隣に雨を遮断しない対照区を設定しました。環境条件とスギ成木の生理特性および成長を定期的に測定し、乾燥区と対照区の結果を比較することで乾燥の影響を評価しました。環境条件として、気温と相対湿度、および土壌の水分条件 (*¹⁴水ポテンシャル) を観測しました。水利用に関する生理特性として、*¹⁵樹液流速、夜明け前と日中の*¹⁶シュートの水ポテンシャル、および*¹⁷膨圧損失時の水ポテンシャルを調べました。また、針葉の最大光合成速度と*¹⁸気孔コンダクタンス、潜在的な*¹⁹光合成能力を測定しました。成長特性として、*²⁰一次枝先端のシュート伸長量、*²¹胸高直径成長量、および樹高成長量を調べました。

成果

林内雨の遮断を2018年5月末に開始し、2020年の12月まで継続しました。10cm深さの土壌の¹⁴水ポテンシャルは、対照区では全期間を通じて -0.2MPa を下回ることはありませんでした。一方乾燥区では、特に遮断2年目と3年目において、10cm深さの土壌の水ポテンシャルはスギの成長期間を通じて $-0.6 \sim -0.8\text{MPa}$ 程度であり、強い土壌の乾燥が観察されました。

林内雨遮断2年目と3年目において、夜明け前のシュートの水ポテンシャルは対照区よりも乾燥区で低かったことから、土壌の乾燥によってスギ成木に水ストレスがかかっていることがわかりました。しかし、日中の水ポテンシャルの値は、対照区でも乾燥区でも¹⁷膨圧損失時の値とほぼ同等まで低下していました。このことから、スギ成木は葉がしおれるぎりぎりまで光合成を継続する水消費型の種であり（トピック2参照）、そのような水利用の仕方は土壌が乾燥しても変わらないことが明らかとなりました。一方、針葉の¹⁸気孔コンダクタンスと光合成速度は対照区よりも乾燥区で低い傾向にあり、特に8月にその差が大きくなりました（図2-2）。個体の蒸散速度を示す樹液流速も同様の傾向でした。これらの結果は、強い土壌の乾燥によって水を吸い上げづらくなり、日中の葉への水の供給が不足するため、気孔が閉鎖して光合成速度が低下することを示しています。このような土壌の乾燥がスギの光合成速度に及ぼす影響は、特に夏に大きいことがわかりました。

長期間にわたる土壌の乾燥に対応して、スギの生理的な能力が向上（順化）するかどうかを調べました。その結果、葉の潜在的な¹⁹光合成能力（ V_{cmax} 、 J_{max} ）や耐乾性を示す膨圧損失時の水ポテンシャルに乾燥区と対照区の間で差は認められませんでした。したがって、今回の結果からは、土壌の乾燥に対して光合成能力の向上や耐乾性の向上などの順化は起きていないと考えられました。林内雨遮断前後5年間のスギ成木の年間の胸高直径成長量と樹高成長量、および遮断後3年間のシュート伸長量を見ると（図2-3）、遮断前の成長量に乾燥区と対照区の間には差は認められませんが、遮断後はいずれの成長量においても乾燥区の方がやや小さい傾向にありました。このことから、長期間の土壌の乾燥によって、スギ成木の成長が若干低下したことがわかりました。

土壌の乾燥がスギの光合成に及ぼす影響は、夏に大きいことがわかりました。一方で、スギは水消費型の種であり、その水利用の仕方は土壌が乾燥して水ストレスを受けても変わりませんでした。そのため、スギは土壌の乾燥があるしきい値をこえると急激に吸水できなくなって衰退や枯死にいたると予想されます。本実験における土壌の乾燥程度は非常に強いものでしたが、スギは枯死しませんでした。このことは、スギが乾燥に強いことを示しているのではなく、乾燥処理が完全ではなくスギがどこからか吸水できたと考えるのが妥当です。また、本実験では大気乾燥の影響は評価できていないことに注意が必要です。

参考文献

- Allen, C.D. et al.(2010) Forest Ecology and Management 259: 660-684.
讃井孝義 (1998) 樹木医学研究 2: 65-78.



図2-1. 林内雨を遮断するためスギ林内に設置した10m四方の屋根と林冠にアクセスするための足場

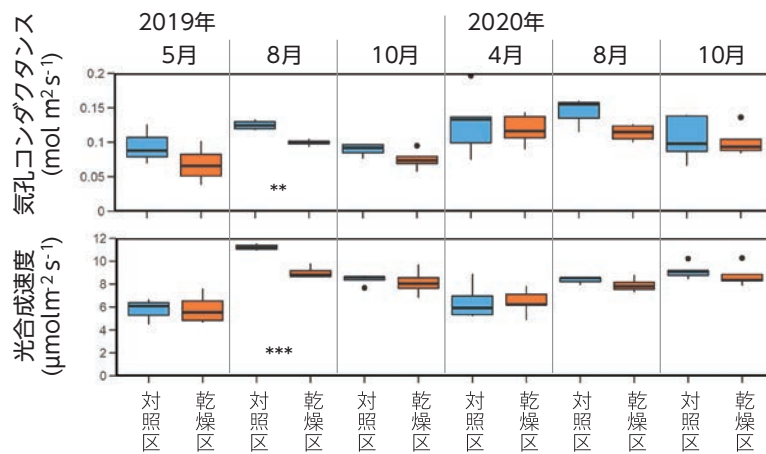


図2-2. 林内雨遮断 2 年目と 3 年目におけるスギ針葉の¹⁸気孔コンダクタンスと光合成速度。全体的に対照区よりも乾燥区で低い傾向にあり、8月に差が大きいことから、夏に土壌乾燥の影響が大きいことがわかる。

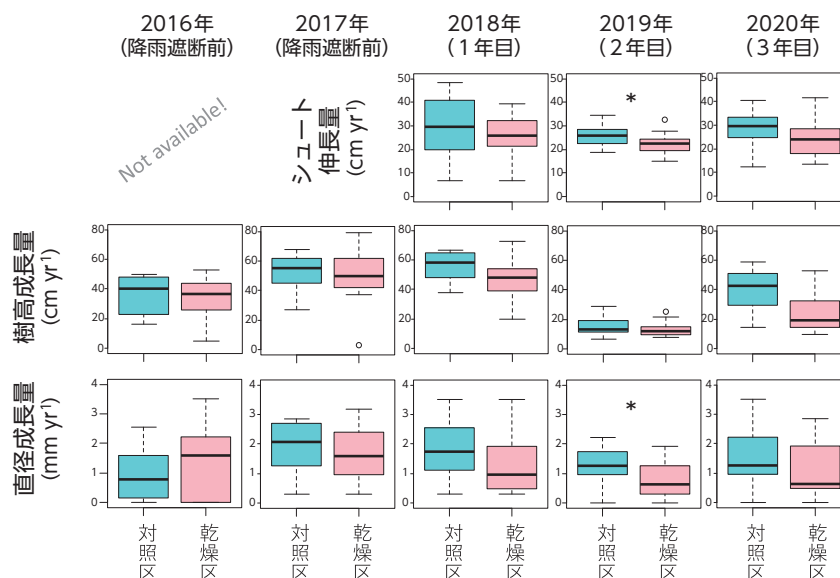


図2-3. 林内雨遮断前後のスギ成木の年間成長量。遮断後は対照区よりも乾燥区で年間成長量が小さい傾向が認められ、長期間の土壌乾燥によってスギの成長が低下したことがわかる。

トピック2

水節約型と消費型 ―スギは自身の蒸散で土壌を乾燥させる

一般に、樹木は土壌中の水を根から吸い上げ、水は幹と枝の中を流れて葉に運ばれ、葉の水ポテンシャルは夜明け前に最大となります。夜明けとともに葉が光合成を始めると、二酸化炭素を葉に取り込むために気孔が開きますが、同時に蒸散によって葉の水が失われていきます。ある程度まで日中の水ポテンシャルが低下すると、気孔が閉じて光合成速度は低下します。土壌が強く乾燥して水を吸い上げられなくなり、葉の水ポテンシャルが低下して限界に達すると（膨圧損失時の水ポテンシャル）、細胞の膨圧が失われて葉がしおれます。

水節約型といわれる樹種では、日中の水ポテンシャルが葉のしおれる限界に達する前に気孔を閉じ、安全マージンを残すとされています。一方、スギ成木では、日中の水ポテンシャルの値は膨圧損失時の値とほぼ同程度まで低下しており、4～8月は安全マージンがほとんどありませんでした（図2-4）。つまり、スギは葉がしおれるぎりぎりまで光合成を行う、水消費型の種であるといえます。また、水節約型の種では、土壌が乾燥して土壌中の水分が少なくなると、その乾燥程度に応じて気孔の開閉を調節することで、蒸散による土壌水分の消費を抑える場合があります。気孔を閉じた分、光合成量が減って成長が低下する可能性があります。一方で、水消費型であるスギは、土壌が乾燥しても葉のしおれるぎりぎりまで蒸散を続けていました。そこで、無降雨期間中の土壌水分の減少量とスギの蒸散量との関係を調べたところ、強い正の相関が見られました。つまり、無降雨期間中の土壌の乾燥は、主にスギ自身の蒸散によって引き起こされているといえます。例えるなら、収入（雨）がなくなって貯金（土壌水分）が少なくなっても、スギは日々の生活を変えずに支出（蒸散）を続け、突然破産（枯死）するようなタイプといえそうです。

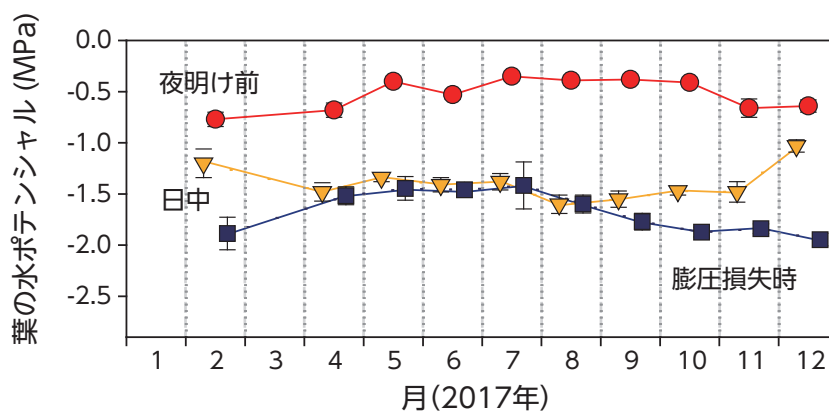


図2-4. 自然条件下におけるスギ成木のシュートの水ポテンシャルの季節変化

第3章 スギの肥大成長と炭素収支の関係性

信州大学 山岳科学研究領域 安江 恒
岐阜大学 流域圏科学研究センター 斎藤 琢

要 点

- スギの肥大成長への気候変動の影響を評価するため、^{*22}大きな環境傾度を有する国内の12地点において^{*23}年輪構造クロノロジーを構築し、気候応答解析を行いました
- ^{*6}フラックス観測データを利用して^{*10}生態系モデル（NCAR/LSM）を調整し、上記の12地点について炭素収支計算を行いました
- 冷涼な地域の肥大成長および林分炭素収支の変動には冬から春先にかけての気温が重要な役割を果たすことが明らかになり、肥大成長の変動と生態系モデルによって予測される^{*24}総一次生産量の変動はよく合っていました
- 生態系モデル（NCAR/LSM）を用いて気候変動にともなう炭素収支変化の将来予測を行ったところ、第1章（^{*7}Biom-BGC）による予測結果と概ね一致しました

研究の重要性

気候変動にともなう森林の生産力の予測で、その妥当性を確認するためには異なる方法を用いた相互比較による検証が必要になります。本章では、1) ^{*23}年輪構造クロノロジーの構築、2) ^{*10}生態系モデル（NCAR/LSM）による予測を独自に行い、第1章の結果と比較します。年輪は数十年にわたる気候変動の影響を記録しており、多様な気象条件の中で成長量への影響が大きい^{*9}気象要素を抽出することが可能です。加えて、森林の主生産物である木材の成長量を直接的に表す指標でもあります。生態系モデル（NCAR/LSM）は長期にわたる^{*6}フラックス観測に基づいて調整することで、精密な炭素収支変動を提供することが可能となります。

目 的

年輪構造の変動と生態系モデルを利用した炭素収支推定値との関係を定量的に表すとともに、生態系モデルにより将来の炭素収支を予測することを目的としました。

方 法

幅広い環境条件を含むように全国12地点を選択し、年輪構造クロノロジーを作成しました。年輪幅、^{*25}早材幅、^{*26}晩材幅クロノロジーと、気温、降水量、日照時間などの気象要素との相関分析を行い、それぞれの変動に影響する気象要素を明らかにしました。

また、岐阜大学流域圏研究センター高山試験地において、気象およびフラックス観測を継続し、生態系モデル（NCAR/LSM）をスギ林用に合うように改善しました。年輪採取地に該当する全国12地点を対象に、当該モデルを用いて現在と将来の炭素収支を予測しました。

成果

スギの年輪幅の変動と^{*25}早材幅の変動は全ての地点において高い正の相関を示し ($r = 0.94 \sim 0.99$)、材積成長量の主要な指標となる年輪幅は早材幅に規定されていることが明らかになりました (平野ら 2020)。最寄りの気象観測点の^{*9}気象要素との単相関解析を行ったところ、早材幅について、冷涼な生育地では冬～春先の月平均気温および月最高気温との正の相関が認められました (図3-1)。一方で、温暖な生育地においては有意な相関は認められませんでした。以上の結果より、冷涼な地域のスギの肥大成長は冬～春先の気温に主に制限されており、その制限要因がなくなる温暖地との間にしきい値が存在することがわかりました (図3-2)。一方、亜熱帯 (奄美、沖縄) では、1月の気温が負の寄与を示すことが明らかになりました (図3-1)。

^{*23}年輪構造クロノロジーを作成した12地点のうち亜熱帯を除く10地点について、27年分 (1990 - 2016年) の^{*10}生態系モデルの推定値と気象要素の相関分析を実施しました。特に、早材幅に最も影響を及ぼす当年春の生産量に着目すると、冷涼な地域においては、この時期の生産量は主に気温によって制御されていることが明らかとなりました (図3-3、栃木、香川、愛媛、岐阜、福島)。一方、温暖な地域 (宮崎、長崎、静岡、福岡、茨城) においては、春の生産量と気温との関係性が低い傾向でした。この結果は、早材幅クロノロジーと気象要素との相関解析の結果と整合性がとれていました。

第1章のモデルシミュレーションとの相互比較を実施するために、5つの^{*12}気候モデル (HadGEM2-ES、MRI-CGCM3、CSIRO-Mk3-6-0、MIROC5、GFDL-CM3) の将来の気候変動予測値 (2096-2100年、PCP2.6の気候シナリオ) および現在の気象条件 (1996-2000) を利用し、全国12地点の将来気候における生態系モデルを用いた^{*5}純一次生産量を予測しました。いずれの気候モデルでも、寒冷な地域ほど、純一次生産量が増加する傾向にあり、温暖な地域では、純一次生産量が減少する可能性も見いだされました。特に気温上昇の大きい気候モデルGFDL-CM3では、多くの地点で純一次生産量が減少する結果となりました。それらの傾向は第1章の結果と概ね一致していました (図3-4)。

参考文献

平野・斎藤・安江ら (2020) 木材学会誌 66: 117-127.

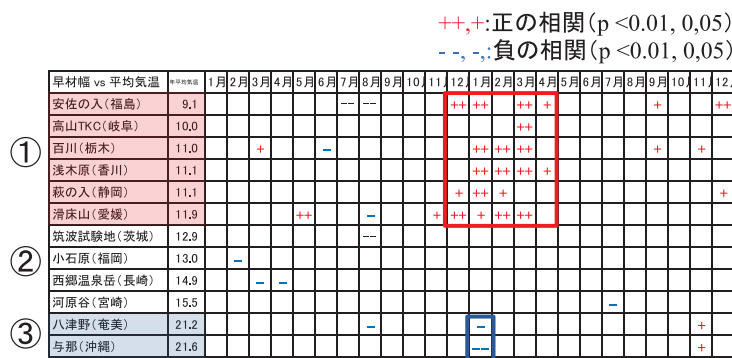


図3-1. 気候帯が異なる各地域における²⁵早材幅と月平均気温との相関。①冬期の気温上昇により肥大成長量が増える地域、②冬期の気温上昇と肥大成長量の関係がない地域、③最寒月の気温上昇により肥大成長量が減る地域。

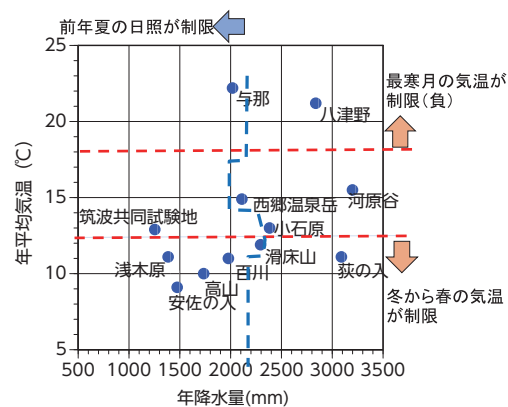


図3-2. 気候帯が異なる各地域における早材幅を制限する気象要素

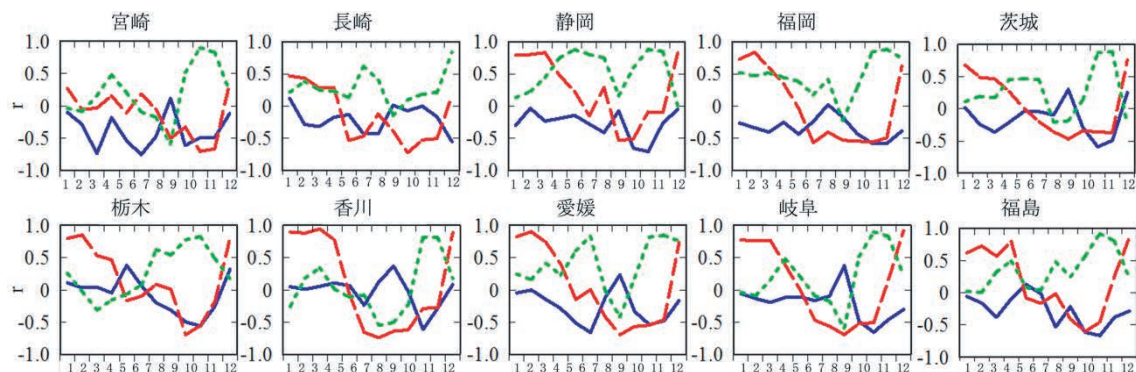


図3-3. 気候帯が異なる各地域における純一次生産量のモデル推定値と気象要素(降水量(青線)、気温(赤線)、日射量(緑線))との相関係数の季節変化

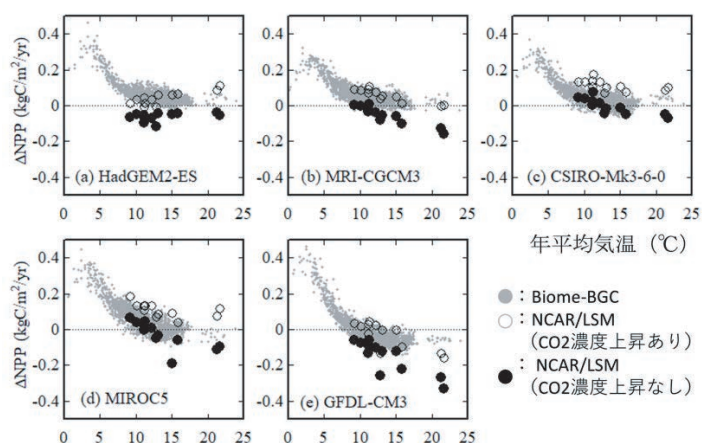


図3-4. 5つの気候モデルを利用して推定された年積算純一次生産量(NPP: kgC/m²/year)の気候変動応答と年平均気温の関係。ΔNPPは、将来気候(2096-2100年)と現在気候(1996-2000)の差分。

トピック3

休眠期の気温が肥大成長に影響する仕組み

高山試験地で、^{*25}早材幅と30日間の^{*24}総一次生産量（GPP）との相関を一日ずつずらしながら算出したところ、両者に有意な正の相関がみられる季節のあることがわかりました（図3-5）。また、本章で示した、冷涼な6地点で冬の気温が高い日数と早材幅の間でも高い相関がみられた結果も含めて考えると、スギにおいては当年の成長期前の気温が光合成に影響を与え貯蔵光合成産物が増加することにより、早材幅が増加することが示唆されました（図3-6）。これは、モデル計算における春季のGPPの変動からも支持されます。世界各地での常緑針葉樹の^{*27}年輪年代学的な研究において、冬季の気温と年輪幅との有意な相関が報告されていましたが、そのメカニズムは不明なままでした。本研究により、常緑針葉樹の肥大成長には^{*28}休眠期の気温が重要であることが明らかになってきました。

一方で、肥大成長への夏以降の気象要素やGPP、呼吸量（RE）の顕著な寄与は認められず、夏以降の季節の気象要素が直径成長に及ぼす影響は相対的に小さいことがわかりました。夏季の気温上昇や降水変化にともなう純一次生産量の低下は、幹直径成長以外の炭素収支に負うところが大きいのかかもしれません。モデルの計算結果をより正しく理解するためには、光合成によって取り込まれた炭素の樹体内への配分（葉、幹、根）の季節変化に関する情報が必要と考えられ、今後の観測が求められます。



図3-5. 早材幅と積算GPPの相関。前年4-7月当年4-5月のGPPが大きいと早材幅が広い。

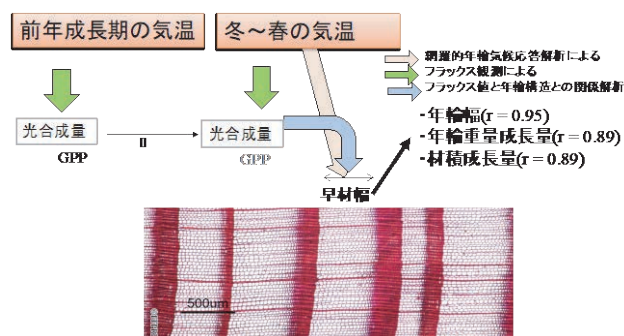


図3-6. 気候要素が年輪幅や年輪重量成長量に影響を及ぼす過程の模式図

まとめ

森林総合研究所 齊藤 哲

プロジェクトでは、気候変動が人工林に及ぼす影響を予測するため、光合成の仕組みを組み込んだスギ林の純一次生産量を推定するモデルを構築しました。気候シナリオも含め様々な環境条件を整理し、そのモデルを使って将来（2100年）のスギ林の生産力を予測しました。その結果、これまでの水収支だけからの評価ではわからなかったことがみえてきました。

まず、気候変動の影響の不確実性です。気候変動がどのように進行するかという予測はそれ自体不確実性を含んでおり、いくつもの気候モデルや気候シナリオが用意されています。そこで、10通りの気候モデルと気候シナリオの組合せで予測した結果、気候変動の進行の仕方次第で影響の出方は大きく異なることがわかりました。特に、最も気温上昇が大きい気候モデル（GFDL-CM3）のように気候変動が進行した場合、全国的に多くの地域でスギ林の生産力が低下することが危惧されました（第1章）。

次に、気候変動がスギ林の生産力に及ぼす影響は、地域によっても出方が異なるということがわかりました。気候モデルや気候シナリオによっては生産力が低下する可能性がある地域を、全国的な地図で示しました。将来のスギ林の生産力が低下しない地域もみられましたが、生産力が低下する可能性がある地域を1 kmメッシュの細かさで抽出できたことはプロジェクトの大きな成果といえます（第1章）。同時に、将来における潜在的な生産力も推定しました。平均気温の高い西日本では、生産力の低下する地域が多い傾向がみられる反面、潜在的な生産力は東日本に比べ高いという傾向が2100年でも維持されている結果でした。将来の人工林管理を考える上で、潜在的な生産力の大きさと、気候変動による変化の大きさの両方をみて施策計画を立てることが重要です。

プロジェクトでは、実際の土壌が乾燥したときのスギ成木の生理的応答も大規模な野外実験によって明らかにしました（第2章）。林冠の葉の水分状態から判断して、スギは葉がしおれる限界近くまで気孔を開いて光合成を続ける水消費型であることがわかりました。第2章で土壌乾燥による影響（光合成速度の低下）は夏に顕著であったという結果は、第1章のシミュレーションによる推定でもみられました。さらに、第3章で示したように、第1章とは異なる手法でも純生産量の推定結果に同様の傾向がみられたことも合わせて考えると、このプロジェクトの結果は妥当な結果であったと考えられます。

一方で、結果をみる上でいくつか注意すべき点があります。1つめは、気候変動により強い台風や病虫獣害が増加すると予測している研究結果もみられますが、今回の予測には台風の被害や病虫獣害などで樹木が一斉に枯死または衰弱してしまうような不可逆的な現象の影響は含まれていないという点です。今回は将来の生産力のポテンシャルとして純一次生産量を予測しましたが、人工林経営を考える上では台風などの気象害や生物被害の影響も考慮する必要があります。2つめは、長期的な気候変動により、スギの光合成をする能力も変わってくる可能性もあるという点です。今回の結果では、土壌の乾燥にともなう光合成能力の向上（順化）は認められませんが

したが（第2章）、より長期間乾燥が続いた場合は順化が起こる可能性もあります。また、光合成速度は二酸化炭素濃度が増加すると一時的に大きくなるものの、しばらくすると以前と同程度に戻るという現象（光合成のダウンレギュレーション）が、いくつかの樹種で報告されています。しかし、そのメカニズムは未解明の要素が多く、スギについてはよくわかりません。そのため、今回のモデルではこのプロセスを適用していません。今後、このプロセスがスギ林のモデルに適用されるようになると、今回の予測結果が変わる可能性があることに注意する必要があります。3つめは、第2章で行った3年間の土壌乾燥実験の結果は、大気乾燥を評価できていないことと、スギ成木を対象としたものであるという点です。植栽されて間もないスギの幼樹は、根張りが小さいため、乾燥に対する耐性は低いと予想されます。スギの幼樹に対する乾燥の影響も、確認していく必要があるでしょう。

今後は、上述の不可逆的な被害の影響を組み込んだ総合的な人工林管理への影響を明らかにしていくことが重要です。また、学術的にも、長期間の気候変動に対する光合成能力の順化の確認や、二酸化炭素濃度の増加にともなう光合成のダウンレギュレーションの定量化も重要な課題です。さらに、こうしたモデルにより影響を評価すると同時に、しっかりとしたモニタリング体制を整備していくことが重要です。

用語説明

- *1 **気候変動に関する政府間パネル (IPCC)**：気候変動に関する科学的な知見や予測に関する専門家で構成された国際的な政府間機構。数年おきに報告書が作成され、第5次報告書は2014年に完成した。IPCCはIntergovernmental Panel on Climate Changeの略。
- *2 **気候変動適応法**：政府が定めた将来の気候変動に対する適応策に関する法律。2018年に閣議決定。
- *3 **農林水産省気候変動適応計画**：農林水産業の発展等のため、農林水産省が策定した気候変動に対する適応策を講じるための計画。2015年決定、2018年改定。
- *4 **蒸散**：水が水蒸気として植物体内から大気へ拡散する現象。主に葉の気孔を通して行われる。
- *5 **純一次生産量 (NPP)**：光合成によって植物体に取り込まれた炭素の総量から植物の呼吸によって放出された炭素量を引いたもの。植物の成長に使われ植物体内に炭素として蓄積される。
- *6 **フラックス観測**：森林と大気間の二酸化炭素・水の交換量（フラックス）や気象状況を、観測用タワーを用いて林冠上部で行う測定。
- *7 **炭素循環モデル (Biome-BGC)**：本研究では陸域の光合成・呼吸・分解等の炭素循環プロセスを数式により記述したモデル（陸域炭素循環モデル）を利用している。これまで世界中で多くの炭素循環モデルが開発されているが、Biome-BGCは米国で開発された炭素循環モデルのひとつ。地球規模の純一次生産量の推定にも応用されている。
- *8 **林内雨**：森林に降る雨（林外雨）は、葉に触れずに直接地面まで落ちる「直達雨」と、葉に付着する雨に分かれ、葉に付着した雨は、地面へと滴り落ちる「滴下雨」と木の幹を流れ下る「樹幹流」、大気へと蒸発する「遮断蒸発」に分かれる。このうち、直達雨と滴下雨をあわせたものを林内雨とよぶ。本研究では、林内雨を遮断するため屋根を林内に設置したが、樹幹流もなるべく遮断するようにした。
- *9 **気象要素**：気温、降水量、日射量など気象に関連する要素。
- *10 **生態系モデル(NCAR/LSM)**：陸域生態系の炭素・水・熱循環を1時間分解能で再現可能なモデル。
- *11 **気候シナリオ、RCP2.6, RCP8.5**：将来的な温室効果ガスの排出量の違いを反映した、複数の温暖化予測シナリオが存在する。本研究では低排出シナリオ（RCP2.6）と高排出シナリオ（RCP8.5）の2つを利用している。トピック1参照。
- *12 **気候モデル**：大気・海洋・陸域等における気象現象を、物理法則により記述したモデル。地球規模の気候モデルはGCM（Global Climate Model）と呼ばれ、気候変動の予測に用いられる。
- *13 **気孔**：主に葉の裏に存在する小さな孔を気孔とよぶ。気孔は開閉することにより植物体と大気間のガス（水蒸気・酸素・二酸化炭素）交換の調節を行う。

- *14 **水ポテンシャル**：水の標準状態に対する単位体積あたりのポテンシャルエネルギーであり、水が移動するための駆動力を示す。水ポテンシャルが高い方から低い方へ水が移動する。
- *15 **樹液流速**：土壌から葉へ水が吸い上げられる際、幹の木部を移動する水のことを樹液流（蒸散流）といい、その移動速度を樹液流速という。
- *16 **シュート**：1本の茎（樹木の場合は枝）とそれにつくすべての葉をまとめてシュートとよぶ。スギの場合、若いシュートでは木部の周囲に針葉が着生するため、枝と葉の区別が難しい。
- *17 **膨圧損失時の水ポテンシャル**：葉の細胞の膨圧が失われる時（原形質が分離する時）の水ポテンシャルで、葉がしおれる限界の値を示す。
- *18 **気孔コンダクタンス**：気孔の開閉により調節される植物体と大気間のガスの通りやすさの指標。
- *19 **光合成能力（ V_{cmax} 、 J_{max} ）**：本研究では、光合成速度（A）と葉内二酸化炭素濃度（Ci）との関係を示した曲線（A-Ci曲線）を作成し、そこから得られる最大カルボキシレーション速度（ V_{cmax} ）と電子伝達速度（ J_{max} ）を潜在的な光合成能力の指標とした。
- *20 **一次枝**：本研究では、幹から直接分岐する枝を一次枝と定義した。なお、ここで一次枝先端のシュート伸長量とは、1年間で一次枝が伸びた長さを意味する。
- *21 **胸高直径**：胸の高さ（本研究では地上から1.3m）で測定した幹の直径を示す。
- *22 **大きな環境傾度**：環境要素の値の範囲が広い、例えば、気温の高いところから低い所まで幅広い、という意味。
- *23 **年輪構造クロノロジー**：多数の個体の測定値を元に算出される、生育地を代表する年輪幅などの時系列。本報告で対象とした年輪構造は、年輪幅、早材幅、晩材幅。
- *24 **総一次生産量**：光合成によって植物体に取り込まれた炭素の総量
- *25 **早材**：針葉樹材において放射径が大きく細胞壁の薄い仮道管により構成される年輪前半部。密度が低く白色を呈している。
- *26 **晩材**：早材に引き続いて形成される放射径が小さく細胞壁の厚い仮道管により構成される年輪後半部。密度が高く暗褐色を呈している。
- *27 **年輪年代学**：年輪が形成された年を決定し、年輪幅や年輪内密度値などの時系列変動を解析することにより過去の環境の変遷を解明する学問。
- *28 **休眠期**：肥大成長が休止している期間。スギの場合生育地によって異なるが、休眠の開始が9～11月、休眠の終了が3～5月の報告がある。高山では9月はじめから4月おわり。

編集委員

齊藤 哲（森林総合研究所 関西支所）

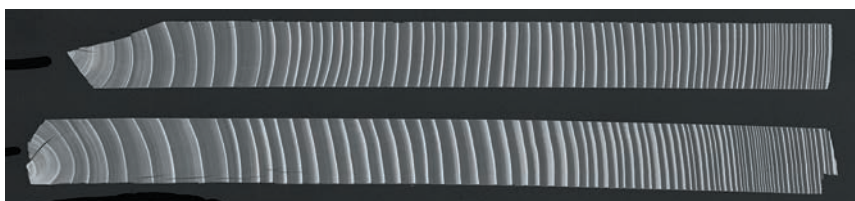
橋本昌司（森林総合研究所 立地環境研究領域）

荒木眞岳（森林総合研究所 植物生態研究領域）

鳥山淳平（森林総合研究所 九州支所）

安江 恒（信州大学 山岳科学研究領域）

斎藤 琢（岐阜大学 流域圏科学研究センター）



本誌に関するお問い合わせは、下記までお願いします



国立研究開発法人 森林研究・整備機構

森林総合研究所

〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

編集・発行 | 森林総合研究所

発 行 日 | 2021年3月17日

問い合わせ | 広報普及科編集刊行係

電話 | 029-829-8373

e-mail | kanko@ffpri.affrc.go.jp

※本誌掲載内容の無断転載を禁じます