

農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究
脱炭素・環境対応プロジェクト
人工林に係る気候変動の影響評価
令和2年度 最終年度報告書

個別課題番号	16808214
個別課題名	人工林に係る気候変動の影響評価

研究実施期間	平成28年度～令和2年度（5年間）
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
研究開発責任者	齊藤 哲
研究開発責任者 連絡先	TEL : 075-366-9913
	FAX : 075-611-1207
	E-mail : stetsu@affrc.go.jp
共同研究機関	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
普及・実用化 支援組織	

<別紙様式3>最終年度報告書

I-1. 年次計画

研究課題	研究年度					担当研究機関・研究室		
	H28	H29	H30	R1	R2	機関	研究室	
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	← 評価モデルの開発 →					国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所	土壌特性研究室	
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	← スギ林実際の成長反応 →						国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所	物質生産研究室
3. 樹木の肥大成長とフラックス観測データとの比較解析	← 年輪解析と別モデルによる比較 →							国立大学法人 信州大学・先鋭領域融合研究群 山岳科学研究所

I - 2. 実施体制

研究項目	担当研究機関・研究室		研究担当者
	機関	研究室	
研究開発責任者	国立研究開発法人 森 林研究・整備機構 森 林総合研究所	関西支所	◎ 齊藤哲
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	国立研究開発法人 森 林研究・整備機構 森 林総合研究所	森林立地研究領域 九州支所 四国支所	○ 橋本 昌司 山下 尚之 大曾根 陽子 阪田 匡司 釣田 竜也 鳥山 淳平 志知 幸治
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	国立研究開発法人 森 林研究・整備機構 森 林総合研究所	植物生態研究領域 森林管理研究領域 北海道支所	○ 荒木 眞岳 井上 裕太 壁谷 大介 (~2019.03) 田中 憲蔵 飛田 博順 細田 和男 (~2020.03) 西園 朋広 北尾 光俊
3. 樹木の肥大成長とフラッ クス観測データとの比較解析	国立大学法人 信州大 学 国立大学法人 東海国 立大学機構 岐阜大学	山岳科学研究拠点 流域圏科学研究セン ター	○ 安江 恒 斎藤琢

(注1) 研究開発責任者には◎、小課題責任者には○、実行課題責任者には△を付すこと。

I-3. 研究目的

平成 27 年 8 月に公表された「農林水産省気候変動適応計画」では気候変動が人工林に及ぼす影響のひとつとして大気乾燥化の水ストレスが指摘されている。気候変動により生育が不適になる地域が増加するとの報告があるなか、その科学的な知見や継続的なモニタリングが求められている。気候変動に対する取組として適応した品種開発が挙げられているが、その前段階として従来の品種において気候変動による立地環境の不適地がどの地域でどの程度増加するかについての正確な予測が必要となる。

スギ人工林への影響に関しては、Shigenaga et al. (2005) が気候変動に対する脆弱性の予測を行っている。ここでは蒸散/降水比を脆弱性の指標として用い全国スケールのマッピングを行っている(図-1)。しかし、気候変動の影響をよりの確に評価するためには蒸散/降水比だけでなく、他の環境条件の変化に対する樹木の生理的応答を介した実際の成長量への影響を評価する必要がある。また、Shigenaga et al. (2005)においてはマッピングの解像度を 2 次メッシュ(10km 間隔のグリッド)で示しているが、「農林水産省気候変動適応計画」においてはより正確で高解像度の解析が求められている。

そこで本課題は、気候変動が人工林に及ぼす影響を評価するため、気象環境の変動にともなう立地環境要因を抽出し、これら多様な環境条件に対する樹木の生理的応答特性を解明する。樹木の生理的応答を基に、様々な気象環境・立地環境下の林分スケールの成長を推定し、2100 年頃までの気候変動シナリオに対するスギ人工林への影響を高解像度で評価することを目的とする。以下 3 つの小課題、

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
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
3. 樹木の肥大成長とフラックス観測データとの比較解析

により、まず、様々な環境条件のうち造林樹種の成長や生残に影響する気象要因や土壌水分などの立地環境要因の中でとくに影響の大きい因子の抽出を行い、全国スケールで高解像度のマッピングを行う。次に乾燥実験に対するスギの生理的応答や長期モニタリングによる成長データから実際のスギの成長反応を明らかにする。そして年輪解析とフラックスデータから異なる手法(別の推定モデル)による生産量を複数の地点で推定する。最終的に実際のスギの成長反応や異なる手法による予測と比較しながらスギ人工林への影響を評価するモデルを開発し、その影響を評価する全国マップの作成を目標とする。

その結果、

1. 高精度の気候変動の影響評価による農林水産省気候変動適応計画への貢献
2. 高解像度の成果を市町村森林整備計画へ反映させることによる地域の安定した森林経営への寄与が期待される。

I-4. 研究方法

(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

人工林の気候変動影響を評価するモデルとして、Biome-BGCを利用し、日本のスギ林に適用可能なモデルに改良した。影響評価の指標として純生産量を用いた。最初に、基礎情報として過去の文献データからスギ・ヒノキの形質データを抽出し、データベースを作成した。続いて、探索的最適化手法により、フラックスタワーデータや作成したデータベースを基にスギ林に適合する生理パラメータの最適化を行った。生理パラメータは小課題(2)で実施する実際のスギの生理応答とも比較しながら調整した。さらに、土壌物理性や窒素降下物などの環境条件を全国スケールで推定する手法を適用し、モデル入力用の全国データを構築した。構築されたシミュレーションモデル、環境条件から40年生スギ林の純生産量の推定を行い、出力値を既存の成長データ(収穫試験地、作成したデータベースおよび林野庁の森林生態系多様性基礎調査)により検証した。将来気象予測として5つの気候モデル、2パターンの温暖化シナリオを用い将来のスギ林の純生産量を推定した。現在と将来気候下の純生産量の差分にもとづく気候影響評価について、全国1kmメッシュでマッピングを行った。

(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

森林総合研究所千代田苗畑にある約40年生のスギ人工林を対象とし降雨遮断実験を行った。乾燥処理区と降雨遮断していない対照区において、環境条件やスギ成木の生理特性と成長を測定した。環境条件として気温と相対湿度、および土壌の水分条件を、また生理特性として葉の水ポテンシャル、葉のガス交換特性(最大光合成速度・蒸散速度・気孔コンダクタンス)、光合成能力($V_{c_{max}} \cdot J_{max}$)、および個体蒸散速度を評価するための樹液流速についてデータを収集した。また、成長については、一次枝先端の伸長量、胸高直径成長量や樹高成長量を調べた。

各地方のスギ収穫試験地において樹高、胸高直径、生残、被害などの毎木調査データを追加し、全国のスギ収穫試験地で蓄積されたデータを整理した。これらのデータは小課題1や小課題3においてモデルの検証・調整や年輪解析対象試験地の選定に供した。

(3) 樹木の肥大成長とフラックス観測データとの比較解析

異なる気候条件となるよう全国から12地点の調査対象地点を選定し、各地の年輪クロノロジーを構築した。その地点の気候要素との相関解析から、各年輪構成要素の変動に影響する気候要素を明らかにした。また、岐阜大学流域圏研究センター高山試験地において、詳細な気象および各種フラックス観測を継続し、それまでの各種フラックスデータを整理した。そのデータを基に小課題(1)とは異なる生態系モデル(NCAR/LSM)をスギ人工林に適合するよう改良した。気象データも、全国12地点において、1990年から2016年までの27年間で一時間値を1kmメッシュで推定した。これを入力データとして、年輪を採取した全国12地点の炭素収支をNCAR/LSMにより推定し、年輪クロノロジーの結果とを比較・解析した。そして、NCAR/LSMによる12地点の推定値を小課題1におけるBiome-BGCモデルによる値との比較に供した。将来気候は小課題(1)と同じく5つの気候モデル、2パターンの温暖化シナリオで行った。

I-5. 研究結果

(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

まず、人工林樹種の生理特性を把握するため既往文献に報告されている論文から、合計で約22000レコードのスギ・ヒノキの形質データを収集しデータベース化した。そして探索的最適化手法(ベイジアンキャリブレーション)、作成した形質データベースの値、および小課題(2)の降雨遮断実験のスギの生理的応答の結果から、Biome-BGCの生理パラメータを最適化した。そ

の結果、モデルのデフォルトのパラメータで計算するより、鹿北流域試験地（熊本県山鹿市）、岐阜大学高山試験地（岐阜県高山市）のスギ林タワーフラックスの観測データとよく適合させることができた。

次に環境条件を全国で整理した。土層の深度は中部山岳地域で深く、中国地域や東北日本海側で浅い傾向がみられた。有効貯水容量も中部山岳地域で大きかった。また窒素降下物は日本海側で大きい傾向がみられた。

以上の生理パラメータ、環境条件からシミュレーションモデルを用いて各林齢における純生産量およびバイオマスの推定を行った。モデルによる出力値と林齢との関係は、作成したデータベースの観測値や森林生態系多様性基礎調査の観測値と林齢の関係と概ね同様の傾向を示した。現在（2000年）と将来気候（2100年）における純生産量を比較した結果、5つの気候モデルにもとづく全国平均値はRCP2.6（比較的穏やかな温暖化シナリオ）、RCP8.5（激しい温暖化シナリオ）ともに現在よりも将来で純生産量が大きかった。しかし、地域別にみると純生産量が増加する箇所、減少する箇所の両方が認められ、RCP2.6では純生産量が低下する地域がより多かった。特に西日本（瀬戸内、四国、九州）で純生産量の低下傾向を示す地域が多くみられた。また、気候モデルの違いによって純生産量が増加する箇所、減少する箇所のばらつきがみられた。特に5つの気候モデルのうち温度上昇が最も大きいモデルでは、RCP2.6で全国の半分以上、RCP8.5でも全国の約半分の地域で純生産量が減少すると予測された。純生産量の変化量は季節によっても異なり、年間の変化量がマイナスの箇所は夏のマイナスが大きく作用したと考えられた。以上の各地点の気温と純生産量の変化量との関係は、小課題（3）の推定結果と概ね一致した。

（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

約40年生のスギ人工林において、降雨遮断による土壤乾燥実験を3年間にわたり行い、スギ成木の生理的応答と成長への影響を調べた。スギ成木は、日中の水ポテンシャルの値は膨圧損失時の水ポテンシャルの値と同等まで低下すること、すなわち、葉がしおれるぎりぎりまで光合成活動を継続しており、水消費型の樹種であることが明らかとなった。水節約型の種の場合、成長はある程度犠牲になるものの、土壤の乾燥程度に応じて気孔を閉じることで水消費量を抑制し、枯死リスクを回避する戦略をとることができると考えられる。一方で、水消費型であるスギは、土壤が乾燥しても葉がしおれる限界まで光合成を継続するため、成長低下の度合いは小さいものの、土壤の乾燥がある閾値を超えると急激に吸水できなくなり枯死にいたるリスクが比較的高いと予想される。

実験による土壤の乾燥程度は非常に強く、長期間にわたるものであった。最も乾燥程度が強かった降雨遮断2年目において、特に水消費量の多い夏季にスギ成木の生理機能に顕著な低下が認められ、成長も減少することが示唆された。一方、土壤の乾燥にともなう光合成能力の向上、葉の浸透調節、および耐乾性の向上などの順化応答は認められなかった。将来気候下でもたらされる土壤の乾燥は、本実験における乾燥程度にいたることはほとんどないと予想されるため、気候変動による土壤の乾燥が壮齢のスギ人工林に及ぼす影響はそれほど大きくないと予測される。

各地方のスギ収穫試験地において、生残、被害などの毎木調査を行った。全国のスギ収穫試験地で蓄積されたデータを整理し、小課題1に提供した。また、小課題3の年輪解析用サンプルを採取するための試験地を選定して現地に案内してサンプル採取に協力した。小課題1と3と連携することで、全国各地のスギ林について林分成長特性を解明し、現在および将来気候下における林分生育ポテンシャルマップの作成に貢献した。

(3) 樹木の肥大成長とフラックス観測データとの比較解析

全国12地点におけるスギの年輪幅と早材幅のみを比較すると全ての地点において高い正の相関を示し、材積成長量の主要な指標として早材幅を用いた。

全国12地点の早材幅と気象条件との関係を見ると早材幅へは気温や日照時間が影響する結果がえられた。しかし、その影響の仕方は季節や地域により異なった。冷涼な地域では冬～春先の気温が主に肥大成長の制限要因となり、亜熱帯（奄美・沖縄）では冬の高温が制限要因となる傾向がみられた。また、年降水量の少ない地点では前年夏の日照時間が影響する可能性が示された。

高山試験地において、早材幅クロノロジー、フラックスタワーによる炭素収支、気候要素の3者間の関係について詳細に解析を行い、気候や炭素収支が早材幅変動におよぼす期間を解析した。高山試験地においては前年の春～夏、当年の冬～春の気温が早材幅に影響していた。総一次生産量、生態系呼吸量が多いと早材幅も大きい有意な関係がみられた。また、生態系モデルNCAR/LSMにおいて推定された炭素収支の値と気候要素の関係をみると、早材幅クロノロジーと気象値の解析結果と整合性がとれていた。これらの関係から木材生産につながる年輪成長には気候条件の季節性も影響することが示唆された。

1km気候メッシュデータと近隣アメダスの気象値と将来気象予測による差分から、全国12地点における2000年、2100年の一時間毎の気象データを整備した。それを基に生態系モデルNCAR/LSMを用いた炭素収支の将来予測を全国12地点で実施した。寒冷な地域ほど将来の純生産量の増加が大きい傾向がある点は、小課題（1）と一致した。RCP2.6で計算した場合の出力値は、概ね小課題（1）の計算結果のばらつきの範囲であった。

(4) 総括

本研究の開始以前では、将来水収支（蒸散量／降水量の低下）からスギの生育適地が減少するリスクが指摘されていた。しかし、本研究で、水収支以外の環境条件も考慮し、樹木のガス交換特性も組み込んだプロセスモデルにより推定した結果、気候モデルやシナリオによっては純生産量が増減する両方の地域が出現する可能性が示された。一般に気候変動の予測は複数の気候モデルで行われており、また、変動の程度も温暖化シナリオによって異なる。これらは気候変動のシナリオの不確実性を表しており、今回の結果もそれを反映したものといえる。気候モデルや温暖化シナリオによっては純生産量が減少する地域がみられた。特に、非常に大きな温度上昇を予測している気候モデル（GFDL-CM3）のように気候変動が進行した場合、約半数の地点で純生産量が減少すると予測された点は、将来的にも注意が必要である。

モデルの推定値については、形質データベースに収録された純生産量や森林生態系多様性基礎調査のバイオマスデータとの検証結果や、別のアプローチ（生態系モデルNCAR/LSM）による推定結果と比較しても、大きな較差はみられなかったことから概ね妥当な結果と考える。また、温暖な地域において夏季の高温化が生産力抑制の一因となり得ることは小課題（1）、（3）で共通の現象として検出された。従来危惧されていた水収支の影響が顕著にあらわれなかったことは、小課題（2）において降雨遮断によって強度の長期の乾燥状態を持続した環境下でも顕著な衰退や成長停止がみられなかった結果とも整合性がとれている。ただ、今回のシミュレーションは個体サイズの大きい林齢40年生前後のスギ林を対象としたが、植栽直後の幼齢木では乾燥の影響が出やすい可能性がある点に注意が必要である。

本研究では従来の10kmメッシュを高解像度化し、光合成プロセスも組み込んだ、高度化されたシミュレーションモデルを構築した。将来的な木材生産や二酸化炭素固定能力を考えるうえ

でも、今回明らかにしたスギ人工林の1kmメッシュのポテンシャルとしての生産能力は全国的な傾向を把握するうえで重要な結果といえる。

I-6. 今後の課題

本研究の結果では、強風や冠雪による幹折れ・根返り、寒風害による枯死などの不可逆的な気象害は評価出来ていない。気候変動により、極端気象現象の増加が予測されており、人工林経営を考えるためには、今回明らかにしたポテンシャルとしての純生産量に加え、極端気象現象による不可逆的なリスクの評価も必要である。

既存の文献では、光合成に関するダウンレギュレーション（高CO₂環境下における光合成能力の低下）の可能性を指摘する報告もある。また、現段階では長期間の乾燥気候下における生理特性の変化については十分明らかになっておらず、その定量化も出来ていない。本研究の小課題（2）の3年間の長期降雨遮断実験では光合成能力を表すパラメータに大きな変化はみられず、構築したモデルにおいても生理パラメータを変動させずにシミュレーションを行った。今後長期的な順化現象（新たな環境で生理特性が変化する現象）の有無を明らかにし、必要に応じて定量化しモデルに組み込んでいくことが重要である。

小課題（3）では、光合成生産量の季節性によって直径成長にも影響することを示したが、その定量化およびシミュレーションモデルの反映までは至らなかった。木材生産を考える上で今後検討すべき点と考えられる。

本研究はスギ人工林を対象とした。ヒノキ、カラマツなど他の造林樹種へ適用するにあたっては、本モデルの他樹種との共通性、相違性を明らかにすることが重要である。モデルの改良点を抽出することで、幅広い人工林への影響評価が可能となる。

小課題番号	A1100	小課題 研究期間	平成28～令和2年度
小課題名	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 代表研究機関・研究室・研究者 名	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所・土壌資源研究室・橋本昌司		

II. 小課題ごとの研究目的等

1) 研究目的

物質循環モデルをスギ用に改良し、気候シナリオを入力として将来のスギの成長を予測し、気候変動によりスギ人工林の成長がどのように変化する可能性があるか広域で予測する。

2) 研究方法

スギ人工林の気候変動影響を評価するモデルとして、アメリカで開発され、利用実績も多いBiome-BGCを選択した(Thornton et al., 2002) (図1-1)。Biome-BGCをスギに精度良く適用するために、本研究では、1) スギの生理パラメータの収集・整備、2) スギ林のフラックスデータとスギの生理パラメータを活用したモデルの調整、3) より現実に即したシミュレーションのための入力データの整備、4) 既存の報告から得られたデータを用いたモデルの出力結果の検証を行った。

以上を通じてモデルを日本のスギ林に最適な状態に調整し、5) 気候変動シナリオを入力として将来のスギ林の成長量を予測し、気候変動がスギ人工林の成長に与える影響の評価を行った。

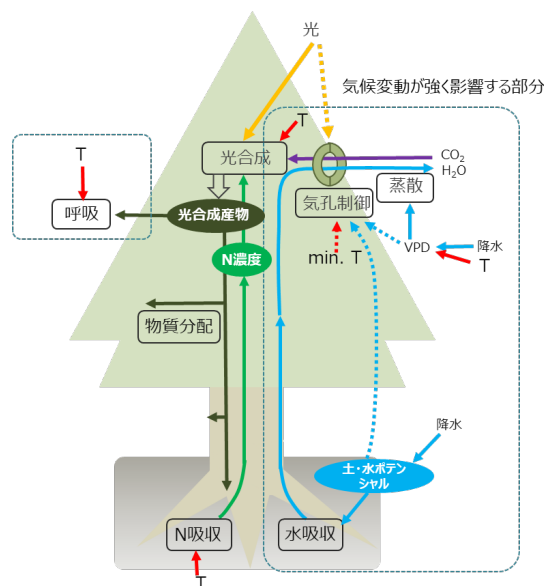


図1-1 気候変動が樹木の成長に与える影響の模式図(Biome-BGCモデルの構造から抜粋して作成)

気候シナリオは、気候モデルの国際的なプロジェクトであるCMIP5（第5次結合モデル相互比較プロジェクト）で用いられている5つのモデルの結果から、RCP（代表濃度経路シナリオ）の2.6（低位安定化シナリオ：排出が最も少なく気温上昇も小さい）と8.5（高位参照シナリオ：最大排出に相当）を用いて行った(西森 et al., 2019)（表1-1）。また二酸化炭素の増加シナリオはRCP Databaseを用いた(Riahi et al., 2007; van Vuuren et al., 2007)。成長の指標として純一次生産量(NPP)を指標として採用した。計算量が膨大となるため、全国1kmメッシュの全対象メッシュでの計算（約20万点）と、1/100の地点で計算したものを、両方で大きな違いが無いことを確認した後、併用して解析を行った。また、スギ人工林は北海道地域にはほとんど存在しないため、今回は北海道を除外して評価を行った。

表1-1 用いた気候モデル一覧と各RCPでの温度上昇（日本地域の平均）

気候モデル	開発国	RCP2.6での温度上昇	RCP8.5での温度上昇
CSIRO-Mk3-6-0	豪州	中	高
GFDL-CM3	米国	高	非常に高
HadGEM2-ES	英国	低	高
MIROC5	日本	中	高
MRI-CGCM3	日本	中	高

3) 研究結果

1) スギの生理パラメータの収集整備

既往文献に報告されているスギ/ヒノキの生理パラメータを収集・整理し、データベース化した。データ数は論文308本から、スギ・ヒノキの合計で約22000レコードとなっている（表1-2）。世界最大級の形質データベース(TRYデータベース)(Kattge et al., 2020)に収録されているデータと比較しても、本データベースはスギ・ヒノキがそれぞれ5位、8位に位置するほどのレコード数である。クオリティーチェックは各パラメータの分布を確認し、4分位範囲（IQR）を用いた外れ値の検出を行った。データベースを学術雑誌にオープンアクセスのデータペーパーとして投稿し、データはオープンアクセスのデータベースとして公開した(Osone et al., 2020)。

表1-2 スギ/ヒノキ形質データベースのレコード数

	論文数	項目数	データ数	
スギ	207	169	14,662	No.5 in TRY
ヒノキ	146	143	7,689	No.8 in TRY
計	308	189	22,351	

▲
重要な形質を幅広くカバー

2) スギ林のフラックスデータ、およびスギの生理パラメータを活用したモデルの調整

Biome-BGCの主要なパラメータをスギ林用に調整するために、森林総合研究所の熊本県鹿北流域試験地および岐阜大学の高山試験地のスギ林タワーフラックスの炭素フラックスデータを取り寄せ、ベイジアンキャリブレーション（ベイズの定理と乱数を用いて最適なパラメータを探索する手法）(Hashimoto et al., 2011)を適用した。加えて、構築したデータベースを用いて、Biome-BGCモデルのパラメータを調整/検証した。具体的には、葉、細根、枯死木のCN比、比葉面積 (Specific leaf area)、最大の気候コンダクタンス (Maximum stomatal conductance) に関して、データベースに収録されるパラメータの頻度分布の中央値を利用した。その結果、モデルに付属していた常緑針葉樹林のパラメータではタワーフラックスサイトで観測された炭素フラックスの季節性が再現できず、また循環量も適切に表現できていなかったが、パラメータの調整後は総一次生産量、生態系呼吸、生態系炭素交換量や土壌呼吸が適切に表現できるようになった(鳥山 et al., 2018) (図1-2)。

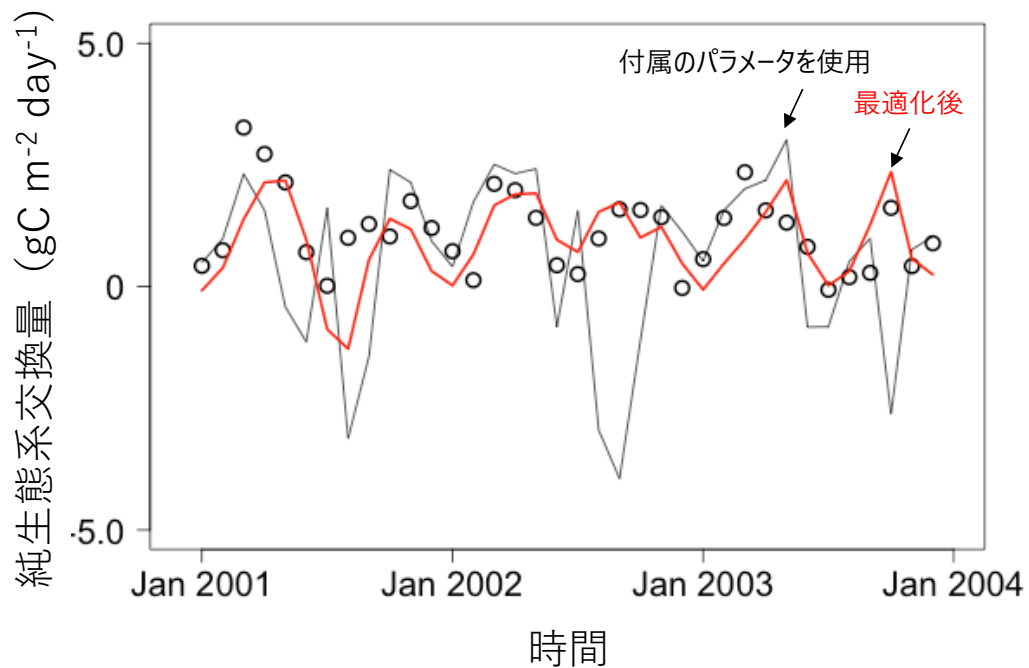


図1-2 モデルに付属していたパラメータと最適化後のモデルの挙動の違い。純生態系交換量 (○は観測値、灰色が付属のパラメータを用いた結果、赤が最適化後)

3) 入力データの整備

より現実に即した入力データを整備するために、a) 土層厚、b) 有効貯水容量、c) 窒素降下量を整えた(図1-3)。土層厚は、既存の土壌深度に関するデータを集約し(N=671)、クリギング(地理情報の分野で一般に利用される、空間的内挿外挿の手法)を用いて1kmグリッドの土壌深度マップを構築した。有効貯水容量は、既存の報告から土壌の水分に関するデータを収集し(N=1009)、国内の主要な土壌型について平均的な土壌水分特性曲線を作成、国土数値情報の土壌型分布と結合し、1kmグリッドの土壌水分特性マップを作成して推定した。窒素降下物に関しては、Morinoらのデータを取り寄せ、1km解像度にクリギングで内挿/外挿してモデルの入力とした(Morino et al., 2011)。

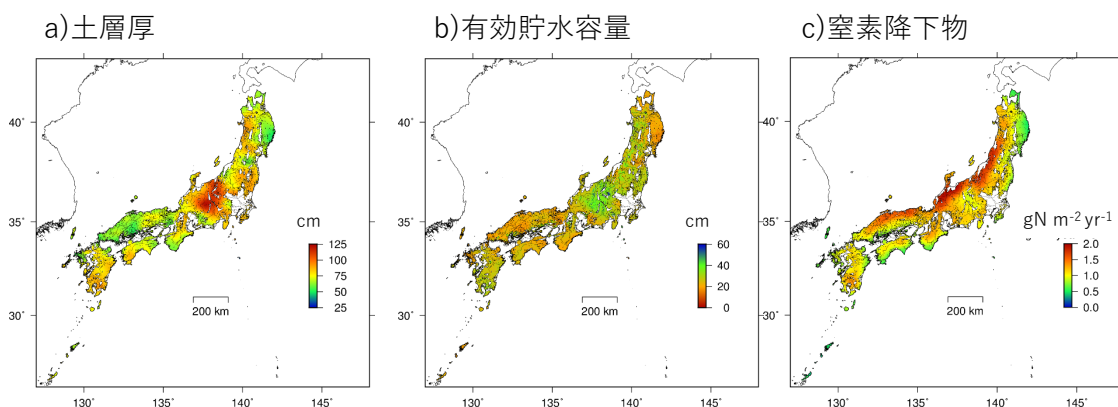


図1-3 構築した土壌と窒素降下物の入力データ。a) 土層厚、b) 有効貯水容量、c) 窒素降下量

4) モデル結果の検証と小課題間の連携

構築したモデルが適切な結果を出力しているかを確認するため、2) で構築したスギ/ヒノキ形質データベースからこれまでのNPPの観測事例を収集し、また森林総合研究所の収穫試験地データ (<http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/shukakushiken/01hokoku/>)、および森林生態系多様性基礎調査(林野庁: <https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/tayouseichousa/index.html>)のデータからバイオマスデータを抽出してモデルの結果と比較した(図1-4、1-5)。その結果、本研究が対象とする40年生林分について、NPP、およびバイオマス量は、検証データと同程度のレンジを示しモデルの出力値が観測データと整合していることが確認できた。ただしより高齢の林分については、モデルの出力と観測データの差が大きく、さらなるモデルの調整が必要と考えられた。

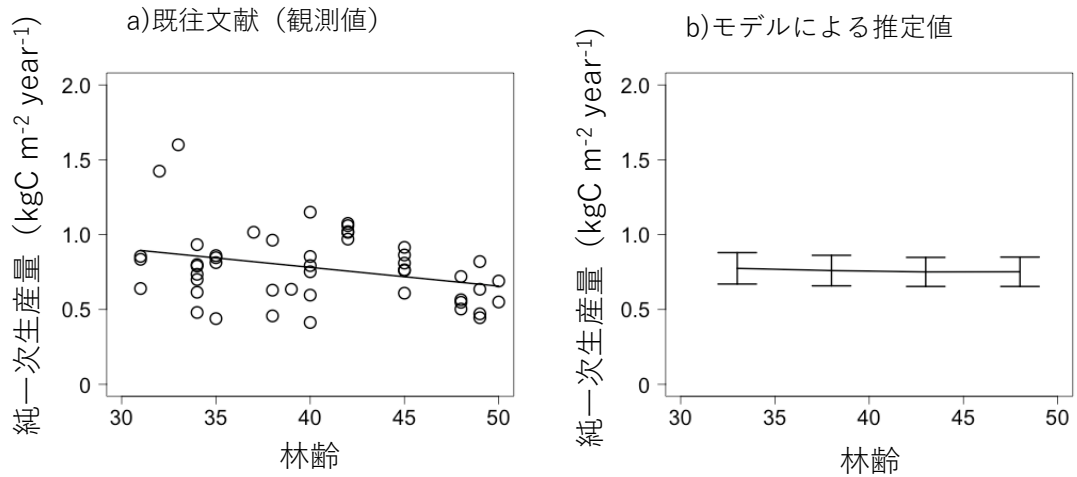


図1-4 既往文献で報告されている純一次生産量(a)とモデルの出力値(b)の比較

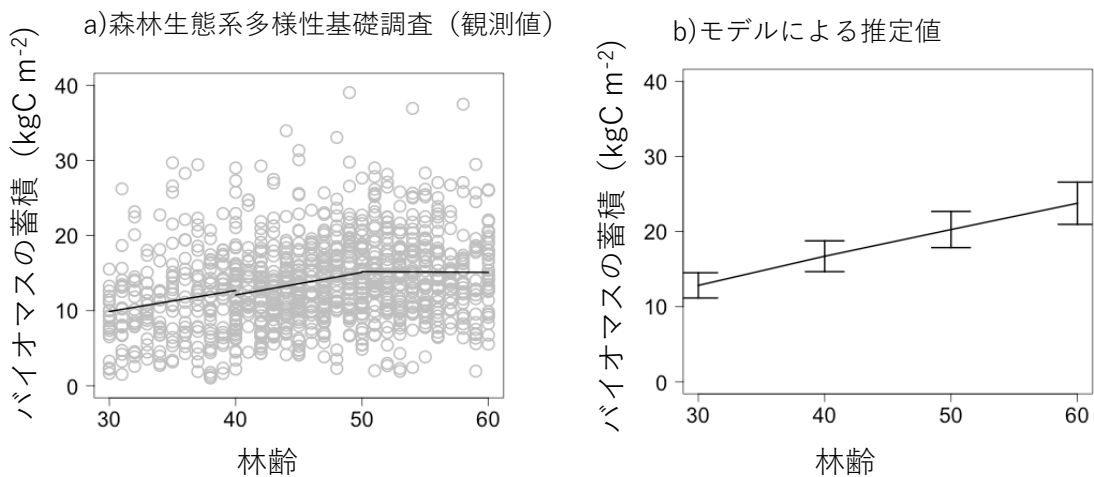


図1-5 森林生態系多様性基礎調査の林齢とバイオマス量の関係(a)とモデルの出力(b)の比較。a)の直線は10年ごとの回帰直線。b)のエラーバーは地点間のばらつきに起因する標準偏差。

また、小課題2の乾燥実験で得られたVPD（飽差）-気候コンダクタンスの関係に、既往研究の関係も加えたスギの応答に関して、Biome-BGCの関係を比較し、調整を行った。加えて、小課題3のNCAR/LSMモデルと全国10地点を対象にモデルの結果を出力した結果、気温の増加とNPPの変化量の傾向が、概ね一致したことを確認した。

5) 将来のスギの成長予測とスギ人工林に係る気候変動影響

スギ林に調整されたBiome-BGCモデルに気候シナリオを入力し、現気候の成長量のマップ、および将来気候下での成長量マップを出力し、空間分布および地域ごとの変化量を解析した。図1-6に5つのモデルから出力された将来気候下でのNPPの平均値のマップを示し、図1-7では現気候下でのNPPとの差分を示した。図1-8では各メッシュの値をボックスプロットで示した。さらに、気候変動の影響を夏季と冬季で分けて考えるために、5月から10月、11月から4月に分けて、NPPの変化量の平均値を計算した（図1-9）。NPPの変化量

と土層厚や有効貯水容量の関係を温度帯などで区分して検討したが、明瞭で一貫した傾向は見られなかった。

これらの結果から、以下のことが明らかとなった。

まず、全国平均(2100年頃)に関して、

- ・ 平均で見ると RCP2.6 でも RCP8.5 でも NPP は上昇した (図 1-6、7、8)。
- ・ しかし RCP2.6 では NPP が低下する地域も多く見られる (図 1-7、8)。
- ・ 夏 (5 月から 10 月) と冬 (11 月から 4 月) に分けて変化量を見た場合、南西地域の夏に NPP の低下が見られる (図 1-9)。
- ・ RCP8.5 では全体に概ね NPP 上昇した。(図 1-7 右、図 1-8)。これは、高 CO₂ の光合成に対するプラスの影響が大きくなるためと考えられる。これを検証するため、MIROC5 の RCP8.5 の気候シナリオにおいて、実験的に RCP2.6 の CO₂ 濃度を利用した。この場合、RCP8.5 の気候と CO₂ 濃度にもとづく NPP の増加量に対して平均値で 5 分の 1 程度になった。同様に現在の CO₂ 濃度を利用した場合、NPP は平均で減少となった。RCP2.6 のシナリオよりは小さいが、夏季に NPP の低下も見られた。しかし、冬季の成長が大きいため平均としてはプラスになった (図 1-9)。
- ・ 気候モデルで傾向は一致しているが、非常に大きな温度上昇を予測しているモデル (GFDL-CM3) では減少が大きい (図 1-8)。

次に、地域別に見ると、

- ・ RCP2.6 では 2050 年頃には見られないが 2100 年頃には西日本 (瀬戸内、四国、九州) で低下が起きることを示唆した (図 1-7)。しかし、低下の割合は平均で温暖化前の NPP の 4%程度であり、低下したとしても大きなインパクトはない可能性もある。
- ・ 中央から東日本では NPP は増加する (図 1-7)。
- ・ ただし、非常に大きな温度上昇を予測している気候シナリオ (GFDL-CM3) では減少地域も広く、減少も大きい (図 1-10)。

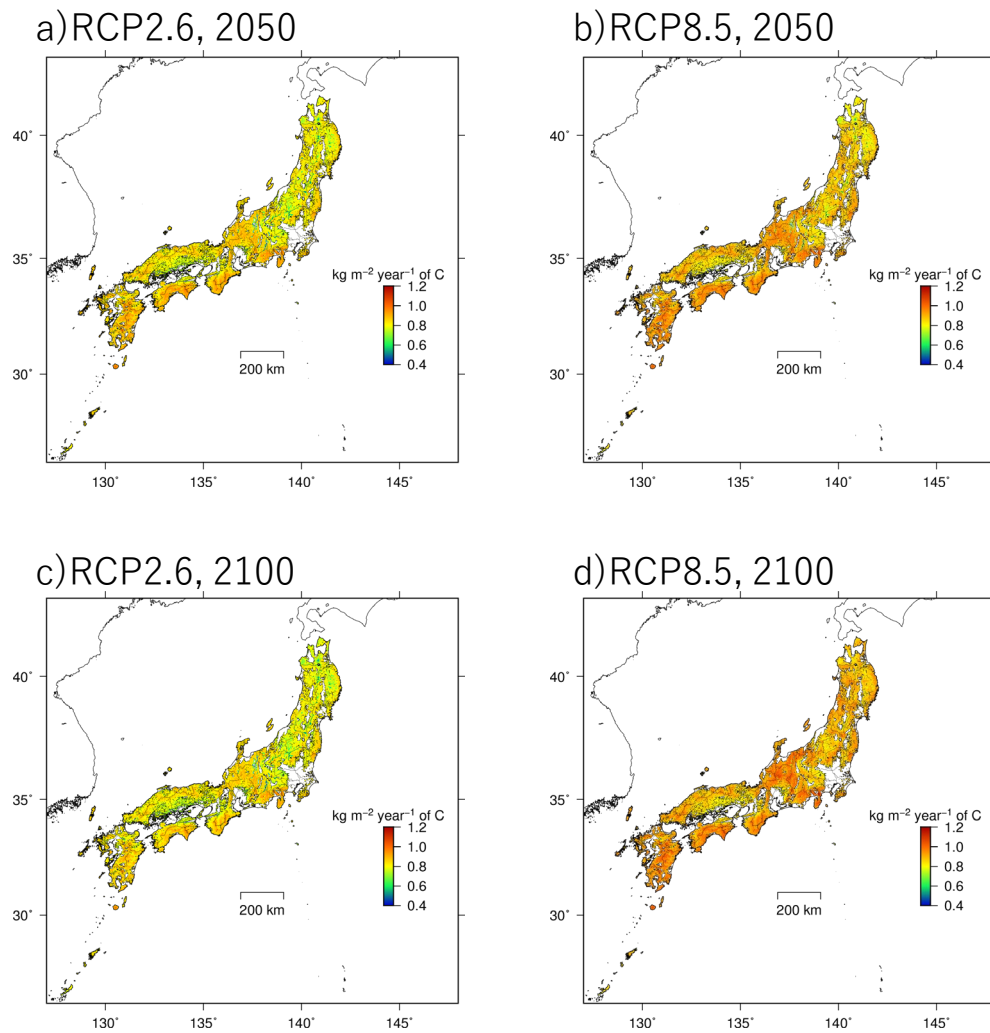
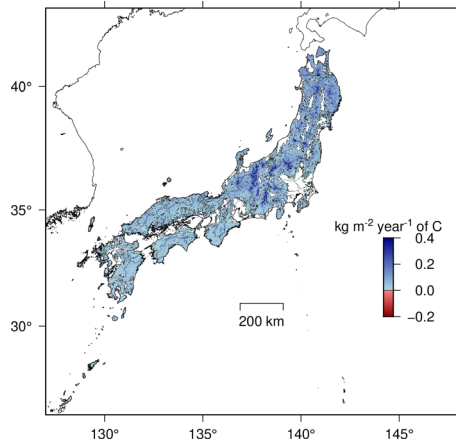
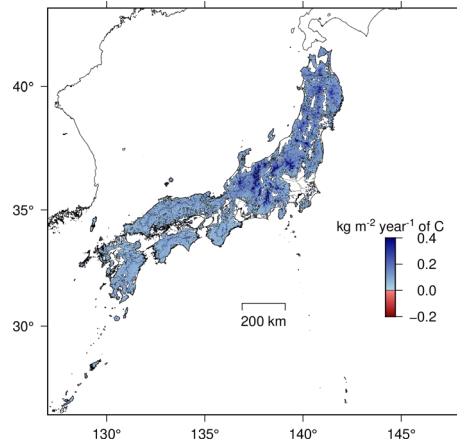


図1-6 Biome-BGCモデルに5つのモデルの気候シナリオを入力して予測した将来の純一次生産量の分布。5つのモデルの平均値を示した。2050年は2046年から2050年の平均値、2100年は2096年から2100年の平均値（左上：RCP2.6、2050年；右上：RCP8.5、2050年；左下：RCP2.6、2100年；右下：RCP8.5、2100年）

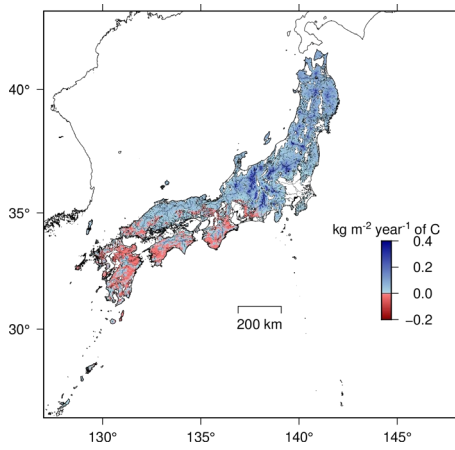
a)RCP2.6, 2050



b)RCP8.5, 2050



c)RCP2.6, 2100



d)RCP8.5, 2100

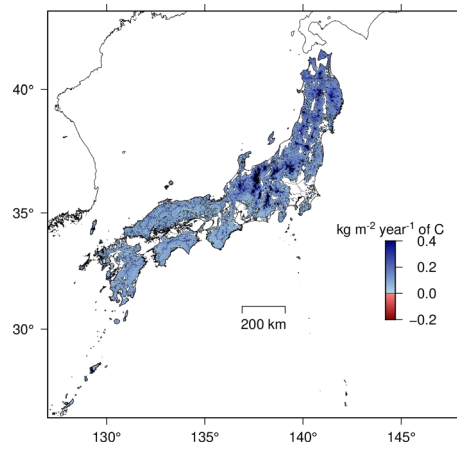


図 1-7 現気候下からの純一次生産量の変化量の分布。2050年は2046年から2050年の平均値、2100年は2096年から2100年の平均値（左上：RCP2.6、2050年；右上：RCP8.5、2050年；左下：RCP2.6、2100年；右下：RCP8.5、2100年）。

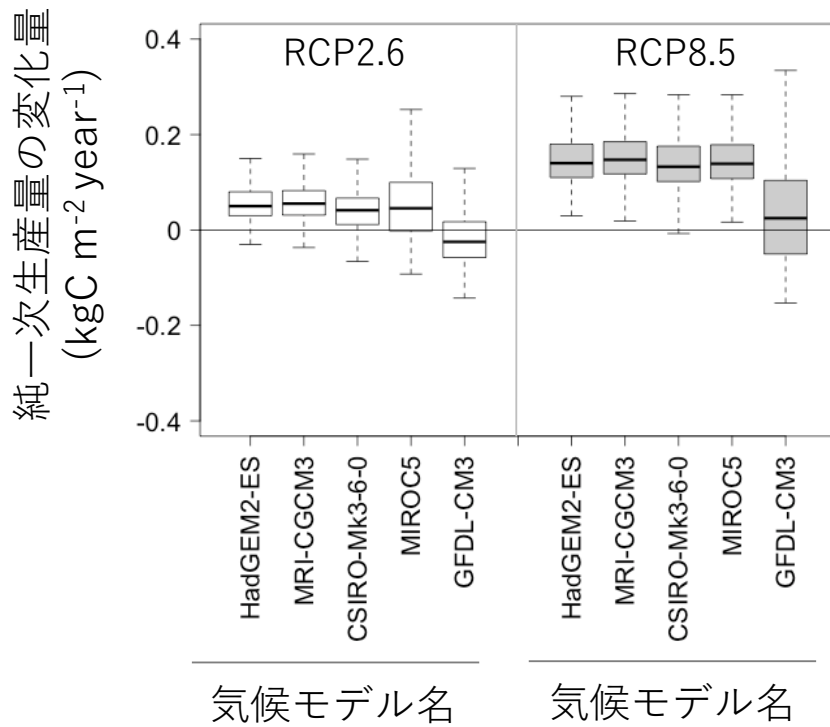


図1-8 5つの気候モデルおよびRCPシナリオごとの純一次生産量の変化量。それぞれ1996-2000年の平均と2096-2100の平均の差分をとった。

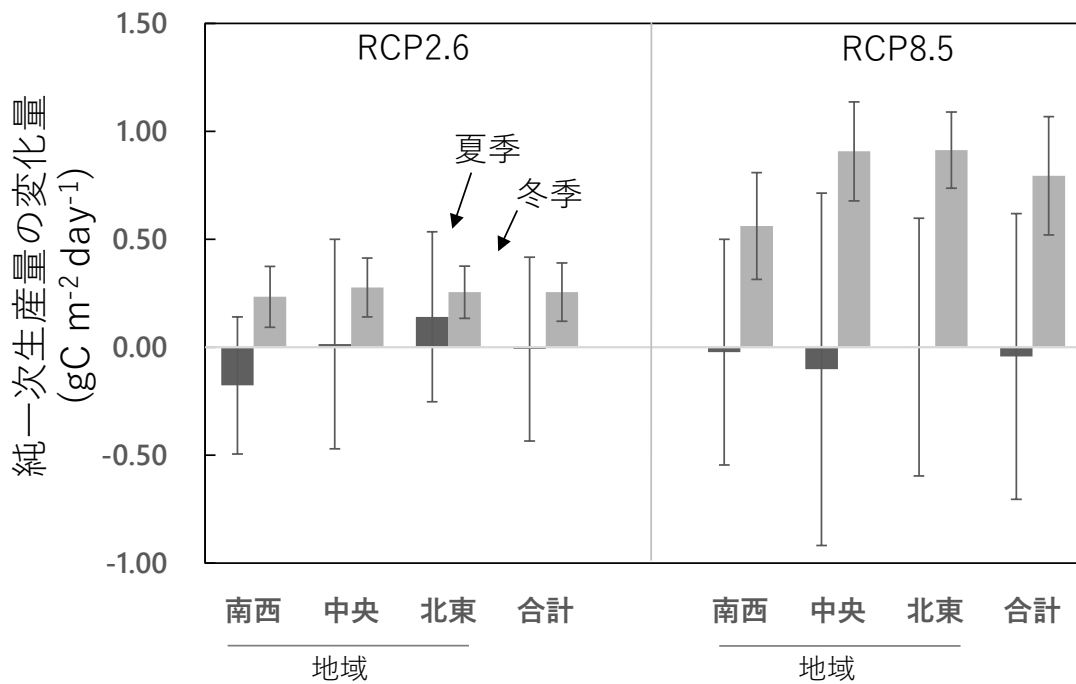


図1-9 地域別、夏冬別、RCPシナリオ別の純一次生産量の変化量。南西は九州沖縄・中国・四国、中央は近畿・中部、北東は関東・東北地方をそれぞれ含む。

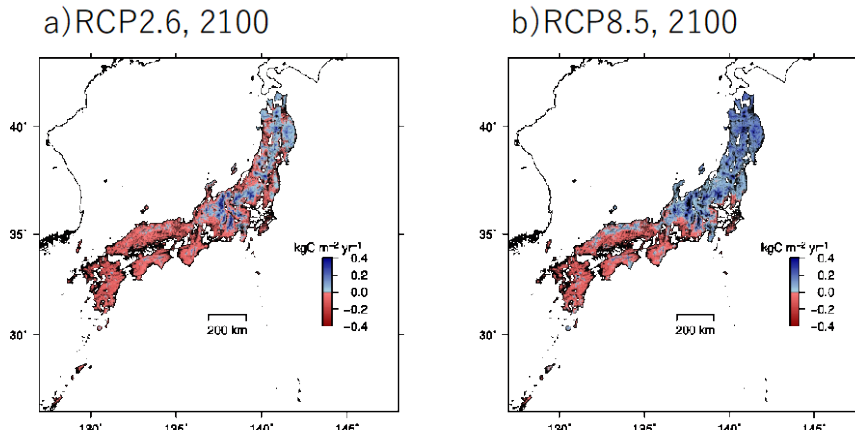


図1-10 温度上昇の大きいシナリオを用いた現気候下からの純一次生産量の変化量の分布。2100年は2096年から2100年の平均値（左：RCP2.6、2100年；右：RCP8.5、2100年）。RCP2.6シナリオでは東日本を含め広い範囲で低下が見られる。RCP8.5シナリオでも関東と中部以西で低下が見られる。

以上の結果をまとめると、気候変動がスギの成長に与える影響は以下のように考えられる。

- ・ 西日本のスギ林は成長が低下する可能性がある。特に温度上昇が高いシナリオが現実となったときは、低下する地域も広がり、低下の度合いも大きい。
- ・ しかし、同時に二酸化炭素濃度が上昇する場合、高二酸化炭素濃度の影響により、全国的に成長が現在よりも増加する可能性もある。
- ・ 二酸化炭素濃度の上昇トレンドによらず、東日本は（夏期のNPP低下を免れつつ、冬季の低温緩和によるNPP上昇を享受）成長が良くなる可能性が高い。
ただし、温度上昇が非常に激しい予測モデルの結果では二酸化炭素濃度によらず全国の大半で成長が低下する。
- ・ 今後の温暖化および大気中二酸化炭素濃度のシナリオによって西日本の結果はプラスにもマイナスにもなり得る。
- ・ ただしマイナスとなっても成長へのインパクトは限定的である可能性もある一方、シナリオによっては東日本も含むほぼ全域で低下し、低下度合いも大きい。
- ・ また、将来の高CO₂濃度下でスギの光合成能力がモデルでの想定以上に高まらない場合は、将来のスギの純一次生産量は下方修正される可能性がある。

4) 成果活用における留意点

シミュレーションの結果を活用する際に留意すべき点について、1) 気候シナリオ間の大きなばらつき、2) 高CO₂濃度下での光合成能力の変化の可能性、3) モデルの空間解像度、4) 今回の研究で対象としなかったインパクト、があげられる。

1点目は、そもそも将来の気候変動シナリオに大きな幅がある点には留意が必要である。二酸化炭素の排出シナリオ(RCP)に加え、それぞれに基づいた排出シナリオであっても気候モデルの予測する将来予測は大きく異なる。そのため、今回の用いた予測モデルのどの入力シナリオが現実に近い値となるかは、人類の今後の温暖化ガス排出の不確実性と併せて、現時点では不明である。そのため実際の温暖化の進行具合をみながら、本研究の結果を参照することが推奨される。

2点目は、高CO₂濃度下での光合成能力の変化の可能性である。海外における森林の高CO₂暴露野外実験や、スギの苗木を用いた実験などから、高CO₂濃度では光合成の能力が一時的には増大するものの、やがて増大が収まる可能性が示唆されている。そのメカニズムや程度は未だ不明な点が多く、実際に将来の高CO₂濃度が現実となったときに、光合成能力の低下がどの程度現れるのかは現時点では明らかではない。今回の予測結果は、高CO₂濃度下でもスギの光合成能力は現在のパラメータから変化しないと仮定しており、かつ予測結果は高CO₂濃度の光合成の増長によって、将来のスギの純一次生産力の低下を免れている。そのため、今後のスギの高CO₂濃度下での応答が明らかとなった際には将来予測が下方修正される可能性がある。

3点目は、1キロメートルというモデルの空間解像度である。1キロメートルは、広域評価に必要なデータが整備可能であり、広域評価に最適な解像度であり、日本全国から地域レベルでマップ化した際に十分に細かい解像度である。一方で、市町村内の細かい地域や、同じ地域の細かい地形などの影響や違いを見るには十分な解像度ではない。また用いた気候シナリオもそこまで詳細な解像度は有していない。おおまかな地域傾向を捉えている、として考えるのが適している。

4点目は、実際のスギ林への気候変動影響はさらに複雑であることである。本研究では、純一次生産量を指標に、スギが気候変動に生理的に応答した影響を評価している。これはスギの成長を考える上で、もっとも重要な指標である。一方で、気候変動が人工林に与える影響はさらに多様であることがわかっており、それらは本評価では対象としなかった。具体的には、気候変動による病虫害の拡散 (Hirata et al., 2017)、巨大な台風による風害 (Ito, 2010)、極端な乾燥による枯死 (吉藤 et al., 2019) などである。今後は、成長が受ける影響を評価することに加えて、それらを組み込んでより総合的なリスク評価/影響評価をすることがより総合的な森林管理の策定に資すると考える。

5) 今後の課題

留意事項でも述べたが、今後は高解像度化、他樹種への展開、より統合的なインパクトの評価が重要になってくると考えられる。加えて、温暖化によるアロケーション（光合成産物の分配）の変化、高二酸化炭素環境における光合成能力の変化（ダウンレギュレーション）等、可能性が指摘されている応答に関してより精緻な調査データがとられモデルに組み込まれる必要がある。スギは代表的な樹種とは言え、人工林をすべてカバーしているわけではない。他の樹種も対象として影響評価していくことが重要と考える。また実際の気候変動への応答を観測し、モデルの予測を検証しながらモデルに組み込んでいく必要がある。

<引用文献>

- Hashimoto, S., Morishita, T., Sakata, T., Ishizuka, S., Kaneko, S., Takahashi, M., 2011. Simple models for soil CO₂, CH₄, and N₂O fluxes calibrated using a Bayesian approach and multi-site data. *Ecological Modelling* 222, 1283-1292. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.01.013>
- Hirata, A., Nakamura, K., Nakao, K., Kominami, Y., Tanaka, N., Ohashi, H., Takano, K.T., Takeuchi, W., Matsui, T., 2017. Potential distribution of pine wilt disease under future climate change scenarios. *PLoS ONE* 12, e0182837.

- <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182837>
- Ito, A., 2010. Evaluation of the impacts of defoliation by tropical cyclones on a Japanese forests carbon budget using flux data and a processbased model. *Journal of Geophysical Research* 115, G04013.
<https://doi.org/10.1029/2010JG001314>
- Kattge, J., 2020. TRY plant trait database - enhanced coverage and open access 26, 119-188. <https://doi.org/10.1111/gcb.14904>
- Morino, Y., Ohara, T., Kurokawa, J., Kuribayashi, M., Uno, I., Hara, H., 2011. Temporal variations of nitrogen wet deposition across Japan from 1989 to 2008. *J. Geophys. Res.* 116, D06307. <https://doi.org/10.1029/2010JD015205>
- Osone, Y., Hashimoto, S., Kenzo, T., Araki, M.G., Inoue, Y., Shichi, K., Toriyama, J., Yamashita, N., Tsuruta, K., Ishizuka, S., Nagakura, J., Noguchi, K., Ono, K., Sakai, H., Sakai, Y., Sano, T., Shigenaga, H., Shinohara, Y., Yazaki, K., 2020. Plant trait database for *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* (SugiHinoki DB): Their physiology, morphology, anatomy and biochemistry. *Ecological Research* 35, 274-275.
<https://doi.org/10.1111/1440-1703.12062>
- Riahi, K., Grübler, A., Nakicenovic, N., 2007. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting* 49.
- Thornton, P.E., Law, B.E., Gholz, H.L., Clark, K.L., Falge, E., Ellsworth, D.S., Goldstein, A.H., Monson, R.K., Hollinger, D., Falk, M., Chen, J., Sparks, J.P., 2002. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 113, 185-222.
[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00108-9)
- van Vuuren, D.P., den Elzen, M.G.J., Lucas, P.L., Eickhout, B., Strengers, B.J., van Ruijven, B., Wonink, S., van Houdt, R., 2007. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change* 81, 119-159. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9172-9>
- 吉藤奈津子, 鈴木寛, 玉井幸治, 2019. 統計資料に基づく 36 年間の日本の民有人工林における 干害被害の推移と地域性. *森林総合研究所研究報告* 18, 289-299.
- 西森基貴, 石郷岡康史, 桑形恒男, 滝本貴弘, 遠藤伸彦, 2019. 農業利用のための SI-CAT 日本全国 1km 地域気候予測シナリオデータセット(農研機構シナリオ 2017)について. *シミュレーション* 38, 1-5.
- 鳥山淳平, 橋本昌司, 清水貴範, 澤野真治, 大曾根陽子, 2018. プロセスモデルを利用した九州のスギ林生産力のマップ化. *九州森林研究* 71, 33-37.

小課題番号	A1200	小課題 研究期間	平成28～令和2年度
小課題名	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 代表研究機関・研究室・研究者名	国立研究開発法人 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		

II. 小課題ごとの研究目的等

1) 研究目的

気候変動にともなう環境条件の変化として、降雨現象の極端化が引き起こす土壌の乾燥に着目する。スギ人工林において降雨遮断による土壌乾燥実験を行い、土壌の乾燥がスギ成木の生理特性と成長に及ぼす影響を明らかにする。これらは、小課題1の評価マップの科学的根拠として提示する。また、全国各地で継続調査されている収穫試験地からスギ林のデータを抽出して整理し、各地域における林分成長特性を明らかにする。課題1、3と連携して、林分成長特性と気象要因・立地要因との関係を明らかにする。

2) 研究方法

森林総合研究所千代田苗畑にある約40年生のスギ人工林を調査地とした。初年度（平成28年度）に、林冠観測タワーを建設し、測定準備を行った。平成29年度は、環境条件とスギの生理特性（具体的な項目は後述）について、自然条件下における季節変化を測定した。平成30年5月20日に、調査地内に約10m四方の屋根を地上4m程度の高さに設置し（図2-1）、降雨遮断による土壌の乾燥処理を開始した（乾燥処理区）。また、隣接して屋根を設置しない対照区を設定した。なお、乾燥処理区では、幹を通すために屋根に穴をあけたが、強い降雨があると樹幹流が流入して土壌の乾燥状態が緩和されることが観察された。そこで、平成31年6月5日に屋根直上の幹にビニルをスカート状に巻き付けた。これにより、樹幹流の流入は、完全には防げなかったものの、かなり改善された。

両処理区において、以下に示す環境条件とスギ成木の生理特性および成長特性を、頻度は異なるが4年間を通じて定期的に測定した。環境条件として、気温と相対湿度、および土壌の水分条件（水ポテンシャル・体積含水率）を3深度（10cm、40cm、80cm）で連続観測した。生理特性として、グラニエ法を用いて樹液流速を測定し、個体蒸散速度を評価した。プレッシャーチャンバーを用いて夜明け前と日中におけるスギシュートの木部圧ポテンシャルを測定し、これを葉の水ポテンシャルとした。また、P-V曲線法により膨圧損失時（原形質分離時）の水ポテンシャル、葉の搾汁液から浸透ポテンシャルを測定した。携帯型光合成蒸散測定装置（LI-6400）を用いて、葉のガス交換特性（最大光合成速度・蒸散速度・気孔コンダクタンス）、光合成能力（ $V_{c_{max}}$ ・ J_{max} ）をインタクトで測定した。成長特性として、一次枝先端の伸長量、胸高直径成長量、および樹高成長量を調べた。

各地方のスギ収穫試験地から、前回調査より原則として5年以上が経過した試験地を選定し、樹高、胸高直径、生残、被害などの毎木調査を行った。全国のスギ収穫試験地で蓄積されたデータを整理し、小課題1に提供した。小課題3の年輪解析用サンプルを採取するための試験地を選定し、現地に案内してサンプル採取に協力した。



図 2 - 1 林冠観測タワーと降雨遮断のために設置した屋根

3) 研究結果

(1) 自然条件下における土壌水分条件とスギ成木の生理特性の季節変化

2017年は、6月前半を除くと比較的安定した降雨があり、土壌の水ポテンシャルは $-0.02 \sim -0.05$ MPa程度（土壌体積含水率は $0.30 \sim 0.45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 程度）の範囲で季節変化した。しかし、6月前半に無降雨が17日間続き、10cm深の土壌水ポテンシャルは -0.2 MPa 程度まで低下し、軽度な土壌の乾燥が観察された。この間、スギ成木の蒸散速度（樹液流速度）に変化は見られず、無降雨期間における土壌水ポテンシャルの低下、すなわち土壌の乾燥は、スギの蒸散が主な原因であると考えられた。

葉の水ポテンシャル（夜明け前・日中・膨圧損失時）の季節変化を図 2 - 2 に示す。葉の水ポテンシャルは、夜間の吸水によって夜明け前に最大となり、夜明け後の光合成活動にともなう蒸散によって水が消費されて日中の値まで低下する。膨圧損失時の水ポテンシャルは、葉がしおれる限界値を示し、耐乾性の指標とされる(Bartlett et al. 2012)。

夜明け前の水ポテンシャルは5、7月と比べると6月にやや低かった。これは、無降雨による土壌乾燥の影響が示唆され、夜明け前の葉の水ポテンシャルは土壌の乾燥ストレスの指標になると考えられた。膨圧損失時の水ポテンシャルは5～7月にかけて -1.5 MPa 程度と他の月より高く、この季節に葉の耐乾性が相対的に低いことがわかった。日中の水ポテンシャルは、スギの成長期にあたる4～8月に、夜明け前の値から膨圧損失時の値とほぼ同等まで低下した。このことは、葉がしおれるぎりぎりまで光合成にともなう蒸散が継続することを示しており、スギは水節約型ではなく水消費型の特性を持つことが示唆された(Meinzer et al. 2014)。

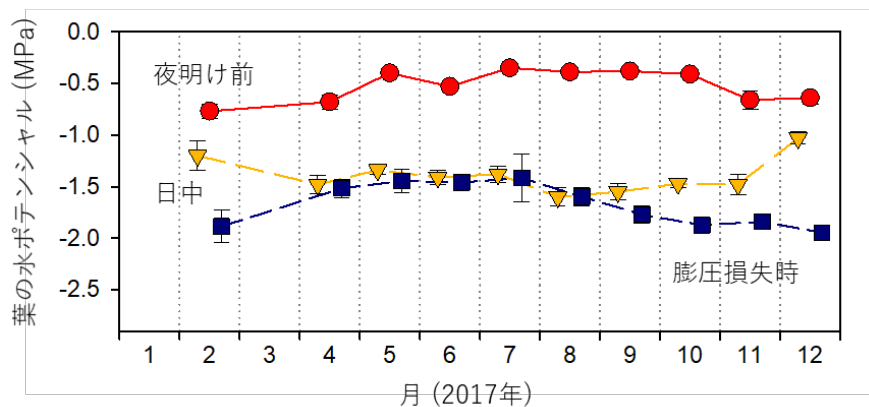


図 2 - 2 自然条件下での葉の水ポテンシャル（夜明け前・日中・膨圧損失時）の季節変化

また、自然条件下における葉のガス交換特性と光合成能力の季節変化から、8月に蒸散速度が高く水利用効率が低いこと、潜在的な光合成能力は11月に最大となることが明らかとなった。以上の結果から、降雨遮断による土壤乾燥処理を行う季節や期間、および強度を決定する上で有用な情報が得られた。

(2) 降雨遮断による土壤の乾燥がスギ成木の生理特性と成長におよぼす影響

[土壤の乾燥] 2018年5月20日に開始した降雨遮断後約3年間にわたる、乾燥処理区(赤線)と対照区(青線)における土壤深さ(10cm、40cm、80cm)ごとの土壤水ポテンシャルの時間変化を図2-3に示す。対照区における土壤水ポテンシャルは、全期間を通じて、いずれの深度においても-0.2MPaを下回ることはなかった。一方、乾燥処理区では、降雨遮断開始から土壤の乾燥が進み、10cm深さの土壤水ポテンシャルは降雨遮断1年目の夏に-0.4MPa程度まで低下し、やや強い土壤の乾燥が観察された。その後、降雨によりやや増加したものの、秋から冬にかけて-0.8MPaまで低下した。降雨遮断2年目は、4月から10月末にかけて10cm深さの土壤水ポテンシャルは概ね-0.6から-0.8MPaの間で推移し、スギの成長期間を通じて非常に強い土壤の乾燥が維持された。3年目は、4月から10月末にかけて10cm深さの土壤水ポテンシャルは概ね-0.6MPa前後で推移し、2年目ほどではないもののスギの成長期間を通じて強い土壤の乾燥が維持された。



図2-3 土壤水ポテンシャルと日降水量の時間変化(降雨遮断後約3年間)

[葉の水ポテンシャル] 降雨遮断後約3年間にわたる、葉の水ポテンシャルの時間変化を図2-4に示す。夜明け前の葉の水ポテンシャルは、いずれの年においても概ね夏から秋にかけて乾燥処理区で有意に低く、光合成活動が盛んな時期に土壤の乾燥による水ストレスがスギ成木にかかっていることが示唆された。日中の水ポテンシャルは、夏に乾燥処理区でやや低い傾向が認められた。一方、膨圧損失時の水ポテンシャルに処理間差は認められず、土壤の乾燥にともなう葉の耐乾性の向上はみられなかった。また、スギの成長期間において、日中の水ポテンシャルの値は膨圧損失時の値と同等程度まで低下していた。

一般に、水節約型といわれる樹種では、日中の水ポテンシャルの値が限界まで下がる前に気孔が閉じることで光合成にともなう蒸散が停止し、膨圧損失時の値との間にある程度のマージンを残すとされている(McDowell et al. 2008)。一方で、スギ成木では土壤が強く乾燥した場合でも、自然条件下で観察されたのと同様に、葉がしおれるぎりぎりまで光合成にともなう蒸散が継続することが明らかとなり、スギは水消費型の種であるといえる。

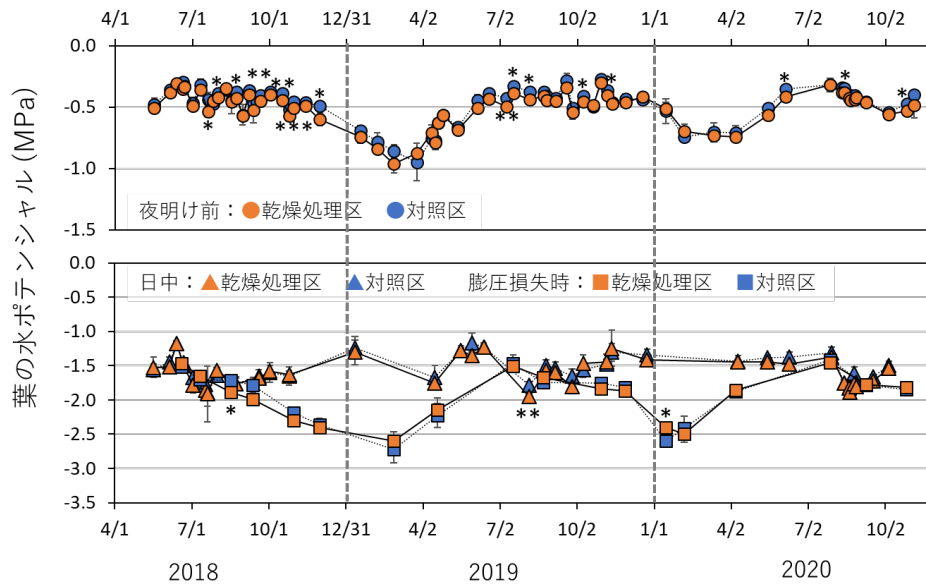


図 2-4 葉の水ポテンシャルの時間変化（降雨遮断後約3年間）。上段が夜明け前の水ポテンシャル、下段が日中と膨圧損失時の水ポテンシャルを示す。

【個体の蒸散速度と葉のガス交換特性】 個体の蒸散速度（樹液流速度）は、降雨遮断1年目には処理間で差は認められなかったが、2年目には乾燥処理区の個体の方が蒸散速度は小さく、特に8月でその差は顕著であった（data not shown）。降雨遮断2年目、3年目に測定したガス交換特性の結果の一部を図2-5に示す。土壌が非常に強く乾燥した2019年の8月に、気孔コンダクタンスと光合成速度は乾燥処理区で有意に低かった。他の測定月においても、処理間差は有意ではないものの同様の傾向が認められた。これらから、スギ成木では、強い土壌の乾燥によって気孔閉鎖が早く起こり、そのため光合成速度と個体蒸散速度が低下したと考えられた。特に、夏にその影響が大きいことがわかった。

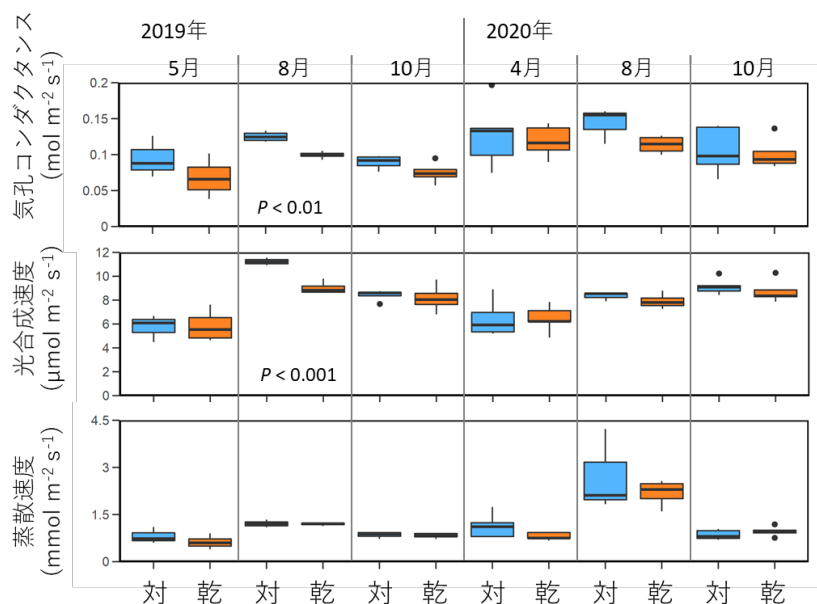


図 2-5 午前中における葉のガス交換特性（降雨遮断2年目、3年目）

以上を葉の水ポテンシャルの結果とあわせてまとめると、乾燥処理区のスギ個体では、強い土壌の乾燥によって、夜間に水を吸い上げきれずに夜明け前の葉の水ポテンシャルが対照区の個体より低いこと、葉がしおれるぎりぎりまで光合成を継続するものの日中も葉への水の供給が不足するため早めに気孔を閉鎖すること、気孔閉鎖にともない光合成速度も低下することなどが明らかとなり、土壌乾燥の影響は特に水消費量の大きい夏に顕著であった。

【光合成能力】 葉の潜在的な光合成能力を示す指標である $V_{c_{max}}$ と J_{max} を図2-6に示す。2019年の8月に、 $V_{c_{max}}$ は乾燥処理区で有意に低かった。しかし、他の月における $V_{c_{max}}$ と J_{max} は、有意差はないものの、乾燥処理区の方が高い傾向があるようにも見える。仮に、これらの指標が乾燥処理区で高くなっている場合には、土壌の乾燥に対して水消費を抑制するために気孔制御を行っても、光合成速度を低下させないような順化が起こっていることが示唆されるが、そこまでの明瞭な証拠は得られなかった。

また、葉の浸透ポテンシャルに処理間差は認められず、前述のとおり膨圧損失時の水ポテンシャルにも処理間差がなかった。したがって、今回の3年間の降雨遮断実験の結果からは、土壌の乾燥に対して光合成能力の向上、葉の浸透調節、および耐乾性の向上などの順化応答は起きていないと考えられた。

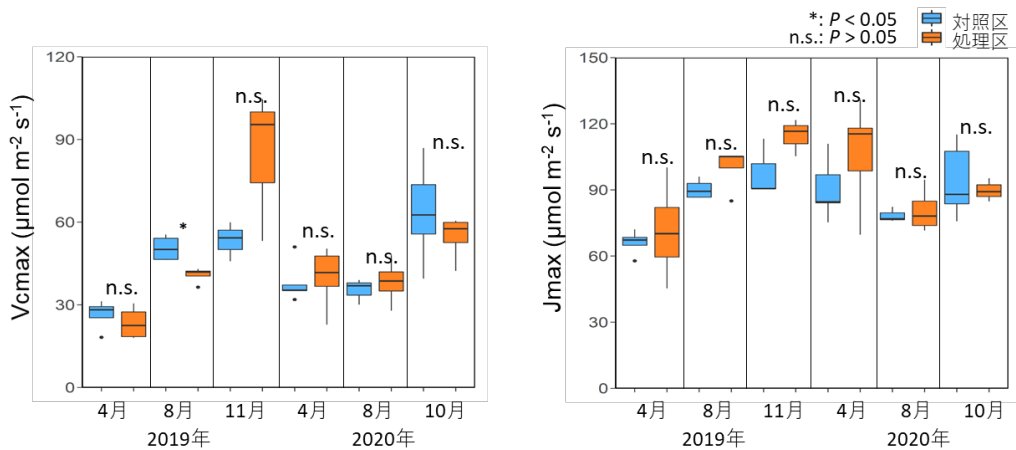


図2-6 葉の潜在的な光合成能力を示す指標（降雨遮断2年目、3年目）

【成長への影響】 プロジェクト期間を通じた5年間におけるスギ成木の年間の胸高直径成長量と樹高成長量、および降雨遮断後3年間のシュートの伸長量を図2-7に示す。降雨遮断前2年間の直径成長量と樹高成長量には処理区差は認められなかった。一方、降雨遮断後の3年間は、直径成長量、樹高成長量およびシュート伸長量のいずれにおいても乾燥処理区の個体の方が小さい傾向にあり、2019年の直径成長量とシュート伸長量は乾燥処理区で有意に小さかった。これらの結果から、土壌の乾燥によってスギ成木の成長が低下したことが示唆される。

シュート伸長量と樹高成長量の低下は、個体葉量の減少を示唆すると考えられる。また、上述したように、夏季には葉面積あたりの光合成速度の低下も認められた。これらは、どちらも個体あたりの光合成生産量が減少することを意味している。したがって、これらの要因を通じてスギ成木の成長量は低下するものと考察される。しかしながら、3年

間にわたる本実験において、土壌の乾燥によってスギ成木の成長量は低下することが示唆されたものの、成長低下に対する葉面積あたりの光合成速度の低下と個体葉量の減少のそれぞれの貢献度は明らかにならなかった。

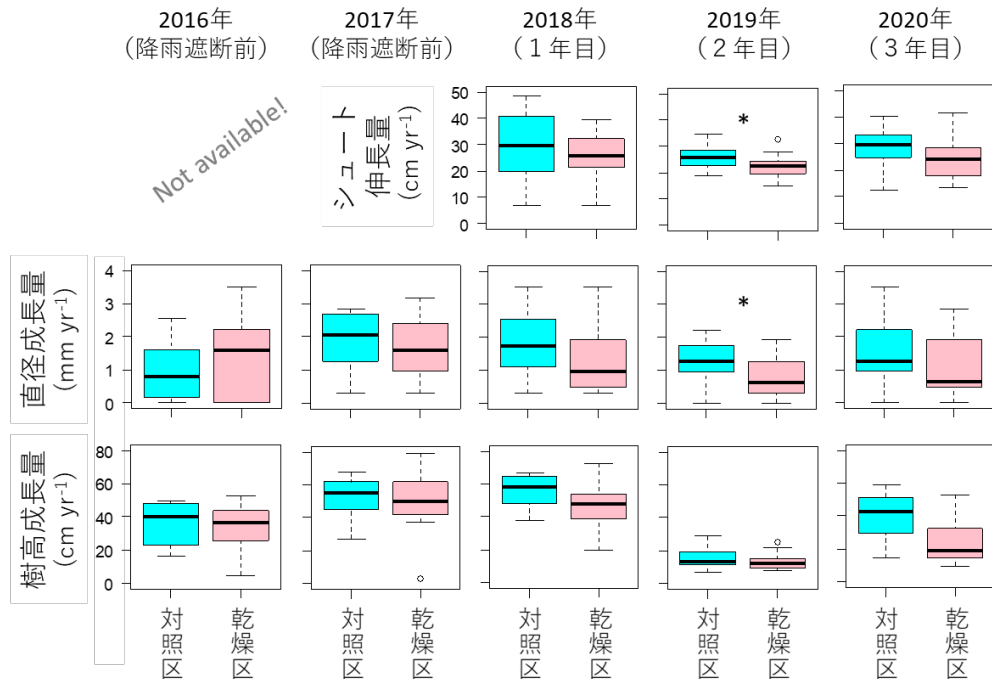


図 2-7 土壌の乾燥によるスギ成木の成長への影響（降雨遮断前を含む5年間）

【まとめ】約40年生のスギ人工林において、降雨遮断による土壌乾燥実験を3年間にわたり行い、スギ成木の生理的応答と成長への影響を調べた。一般に、樹木では、光合成活動にともなう蒸散によって葉の水が消費されて日中の葉の水ポテンシャルが低下する。水節約型といわれる樹種は、日中の水ポテンシャルの値は葉がしおれる限界の値（膨圧損失時の水ポテンシャル）まで下がる前に気孔が閉じ、日中の値と膨圧損失時の値との間にある程度のマージンを残すとされている (McDowell et al. 2008)。一方で、スギは水消費型の樹種であり、日中の水ポテンシャルの値は膨圧損失時の水ポテンシャルの値と同等まで低下すること、すなわち、葉がしおれるぎりぎりまで光合成活動を継続することが明らかとなった。その振る舞いは、土壌が乾燥しても変わらなかった。水節約型の種の場合、成長はある程度犠牲になるものの、土壌の乾燥程度に応じて気孔を閉じることで水消費量を抑制し、枯死リスクを回避する戦略をとることができると考えられる。一方で、水消費型であるスギは、土壌が乾燥しても葉がしおれる限界まで光合成を継続するため成長低下の度合いは小さいものの、土壌の乾燥がある閾値を超えると急激に吸水できなくなり枯死にいたるリスクが比較的高いと予想される。

実験によりもたらされた土壌の乾燥程度は非常に強く、長期間にわたるものであった。最も乾燥程度が強かった降雨遮断2年目において、特に水消費量の多い夏季にスギ成木の生理機能に顕著な低下が認められ、成長も減少することが示唆された。一方、本実験期間においては、土壌の乾燥にともなう光合成能力の向上、葉の浸透調節、および耐乾性の向上などの順化応答は認められなかった。

将来気候下でもたらされる土壌の乾燥は、本実験における乾燥程度にいたることはほとんどないと予想される。したがって、気候変動による土壌の乾燥が壮齢のスギ人工林に及ぼす影響はそれほど大きくないと予測される。しかし、以下の4)で述べる点に注意が必要である。

4) 成果活用における留意点

今回の実験による土壌の乾燥は非常に強い物であったにもかかわらず、スギは枯死にいたらなかった。これは、土壌水分センサーが検知できないところからスギが吸水していたことを強く示唆している。すなわち、本課題で示した土壌水ポテンシャルの値が、スギが枯死にいたる閾値ではないことに注意が必要である。また、大気の乾燥（飽差）は直接的に気孔コンダクタンスに影響を及ぼすことが知られているが、本実験は大気の乾燥の影響を評価していない。さらに、今回得られた結果は比較的大きなスギの成木が対象であり、植栽後間もない小さな幼齢木の場合は、土壌の乾燥の影響を受けやすいと予想されることにも留意が必要である。

5) 今後の課題

成木に比べて、土壌の乾燥に対して敏感であり枯死リスクも高いと予想されるスギ幼齢木についても、乾燥の影響を調べる必要がある。また、気候変動が日本の人工林に及ぼす影響をより深く解明し、林業における適応策を講じていくためには、全国で植栽されているスギの地方系統や品種、あるいはヒノキなどの他樹種についても乾燥の影響を調べることが重要であろう。

<引用文献>

- Bartlett MK, Scoffoni C, Sack L (2012) The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes: a global meta-analysis. *Ecol Lett* 15: 393-405
- McDowell N, Pockman WT, Allen CD, Breshears DD, Cobb N, Kolb T, Plaut J, Sperry J, West A, Williams DG, Yezzer EA (2008) Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytol* 178: 719-739
- Meinzer FC, Woodruff DR, Marias DE, McCulloh KA, Sevanto S (2014) Dynamics of leaf water relations components in co-occurring iso- and anisohydric conifer species. *Plant Cell Environ* 37: 2577-2586

小課題番号	A1300	小課題 研究期間	平成28～令和2年度
小課題名	3. 樹木の肥大成長とフラックス観測データとの比較解析		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	国立大学法人 信州大学・先鋭領域融合研究群 山岳科学研究所・安江恒		

II. 小課題ごとの研究目的等

1) 研究目的

肥大成長過程や年輪構造の変動と気象観測データやフラックス観測データとの比較を行い両者の関係を定量的に表すとともに、生態系モデルを利用して気温、乾燥及びそれらの季節変化など多様な気象条件の中で成長量への影響が大きい気象因子を抽出する。さらに、日本各地における過去の年輪幅や年輪構造変化を把握する事により、得られたモデルの整合性を相互比較すると共に、モデルパラメータ調整の検討に用いることを可能とする。

2) 研究方法

1) 日本各地における肥大成長の気候応答の解明

予測モデルによる成長推定値との比較、検証のための年輪クロノロジーを構築し、気候要素との相関解析を行った。全国における試料採取地の選定にあたり、予測モデルとの比較を前提に、a. 管理履歴の明確な収穫試験地、b. アメダス観測点からの距離が50km以内、c. 地域性、暖かさ指数、標高を考慮し、なるべく大きな環境傾度を有する、d. 統計年数を確保するための高林齢の条件をなるべく満たす12地点を選択した。

各地点につき30個体以上より成長錐コア試料を採取し、軟X線デンシトメトリーにより、年輪幅、早材幅、晩材幅を測定した。標準化および自己回帰モデリングを経て生育地を代

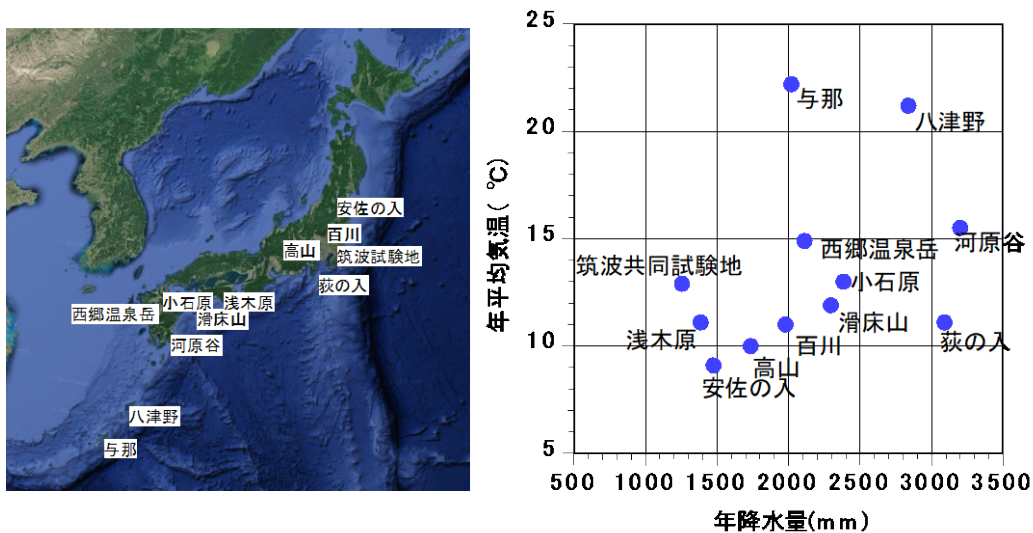


図3—1 年輪クロノロジーの構築とNCAR/LSMモデルによる炭素収支推定地点
生育地の年平均気温、年降水量はMeshアメダスの日データ（1978-2015）より算出した。

表する年輪幅等の時系列であるクロノロジーを作成した。クロノロジーと、気温、降水量、日照時間などの気候要素との相関分析を行い、各年輪構成要素の変動に影響する気候要素を明らかにした。

2) フラックス観測に基づく生態系モデル (NCAR/LSM) の調整と炭素収支計算

岐阜大学流域圏研究センター高山試験地において、気象および各種フラックス観測を継続した。年輪採取地に該当する全国12地点を対象に、生態系モデル (NCAR/LSM) を用いて炭素収支の計算を実施した。各解析地点の生態系モデル入力用の気象値は、農研機構1kmメッシュ気象データ (日値) と近隣アメダスの気象値 (1時値) をもとに、1990年から2016年までの27年間の各気象値 (気温、降水量、日射量、水蒸気圧、大気圧、風速) の1時間値を推定した。これを入力データとして、炭素収支を推定した。これらの値を、年輪データとの相互比較および小課題1におけるBiome-BCGモデルによる値との比較に供した。また、5つの気候モデル (HadGEM2-ES、MRI-CGCM3、CSIRO-Mk3-6-0、MIROC5、GFDL-CM3) の将来予測値データ (RCP2.6およびHistorical) を用いて、生態系モデルを用いた炭素収支の将来予測を全国12地点で実施し、現在気候での炭素収支との比較に供した。

3) 研究結果

1) 日本各地における肥大成長の気候応答の解明

全国12地点におけるスギの早材幅、晩材幅、年輪幅クロノロジーを作成した。年輪幅の変動と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変動は早材幅変動に規定されていることが明らかになった。最寄りの気象観測点の月平均気温、最高気温の月平均、最低気温の月平均、月降水量、月日照時間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た (図3-2)。温暖な生育地においては有意な相関は認められなかった。光合成が行われうる日平均気温が 5°C 以上の日数との間について最も高い相関係数が得られた (図3-3)。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、その制限要因が無くなる温暖地との間にしきい値が存在することが示唆される (図3-4)。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あきらかになった (図3-2)。春の形成層活動の観察結果と併せると、最寒月である1月の低温不足により休眠打破が遅れ、結果的に早材幅については年輪幅に負の影響をおよぼしている可能性が示唆され、今後の温暖化の進行によっては、冬季の気温上昇が南九州での肥大成長量の抑制につながる可能性が示唆された。年降水量が比較的少ない生育地では、前年夏の日照時間と早材幅との負の相関が認められた。このことは、水ストレスも翌年の肥大成長量に寄与することを示唆している。晩材幅の気候応答については、地点による違いが大きく、生育条件による制限要因が大きく異なることが示された。

2) 年輪クロノロジーの気候応答とフラックス観測データの比較

高山試験地において、早材幅クロノロジー、炭素収支、気候要素の3者間の関係について1990-2013年を対象に相関分析を行った。その際、30日間の炭素収支および気候要素の平均値を求め一日ごとの移動相関を算出することにより、気候や炭素収支が早材幅変動におよぼす期間を精密に把握した。前年の春～夏、当年の冬～春の気温と早材幅の間に有意な正の相関が認められた。同様の期間の総一次生産量 (GPP)、生態系呼吸量 (RE) と早材幅

の間にも有意な正の相関が認められた（図3-5）。気温とGPP、REの間について、冬～春にそれぞれ有意な正の相関が認められた。これらの関係から、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の変動することにより、早材幅が増加することが示唆された。前年の成長期の気温の影響については、光合成量が葉の生産量を変動させ翌年の光合成能力に影響を与える可能性が示唆された。

++,+:正の相関(p<0.01, 0,05)
--, -:負の相関(p<0.01, 0,05)

早材幅 vs 平均気温	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
安佐の入(福島)	9.1						--	--					++	++	++	+								+	++
高山TKC(岐阜)	10.0														++										
① 百川(栃木)	11.0			+		-								++	++	++								+	+
浅木原(香川)	11.1													++	++	++	+								
萩の入(静岡)	11.1												+	++	+										+
滑床山(愛媛)	11.9				++			-				+	++	+	++	++									
筑波試験地(茨城)	12.9							--																	
② 小石原(福岡)	13.0		-																						
西郷温泉岳(長崎)	14.9			-	-																				
河原谷(宮崎)	15.5																								-
③ 八津野(奄美)	21.2								-																+
与那(沖縄)	21.6																								+

図3-2 気候帯が異なる各地域における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無い地域、③最寒月の気温上昇により肥大成長量が減る地域

	年平均気温	11月	12月	1月	2月	3月	4月	12-3月	11-4月
安佐の入(福島)	9.1						++	0.28	0.37
高山TKC(岐阜)	10.0					++	++	0.34	0.30
百川(栃木)	11.0			+	+	++		0.42	0.40
浅木原(香川)	11.1				++	++		0.40	0.40
萩の入(静岡)	11.1		++	++		+		0.40	0.34
滑床山(愛媛)	11.9	+	++		++		+	0.36	0.30
筑波試験地(茨城)	12.9			+				0.18	0.12
小石原(福岡)	13.0							0.15	0.15
西郷温泉岳(長崎)	14.9							0.05	0.01
河原谷(宮崎)	15.5							-0.06	-0.09

図3-3 早材幅と日平均気温5℃以上の日数との相関。++、+:それぞれp<0.01、0.05にて有意な相関

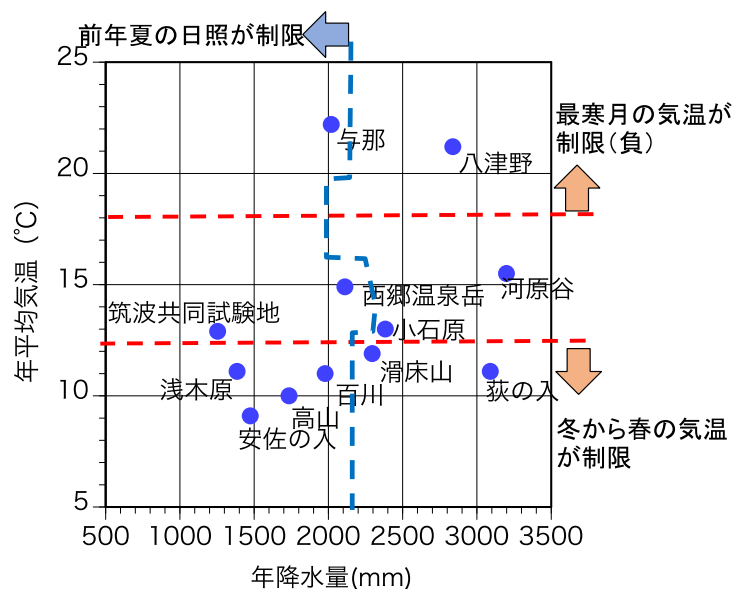


図 3-4 気候帯が異なる各地域における早材幅変動を制限する気候要素

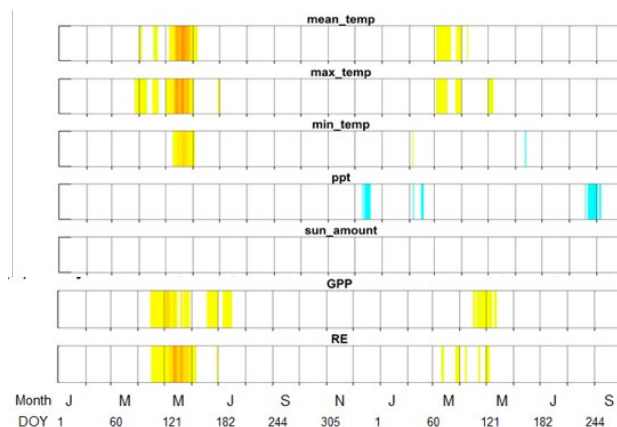


図 3-5 高山試験地における早材幅と気候要素、GPP、REとの相関
30日間移動平均値との相関を1日間隔にて算出した。色つき線は15日目について表示される相関が $p < 0.05$ にて有意であることを示す。

3) NCAR/LSMモデルによる将来予測

10地点について、27年分(1990 - 2016年)の炭素収支モデル推定値と気象要素の相関分析を実施した。とくに、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った(図 3-6、Tochigi、Kagawa、Ehime、Gifu、Fukushima)。一方、温暖な地域(Miyazaki、Nagasaki、Shizuoka、Fukuoka、Ibaraki)においては春の生産量と気温との関係性が低かった。この結果は、早材幅クロノロジーと気象値の相関解析の結果と整合性がとれており、寒冷地ほど冬から春先の生産量の気温依存性が高い傾向が示唆された。

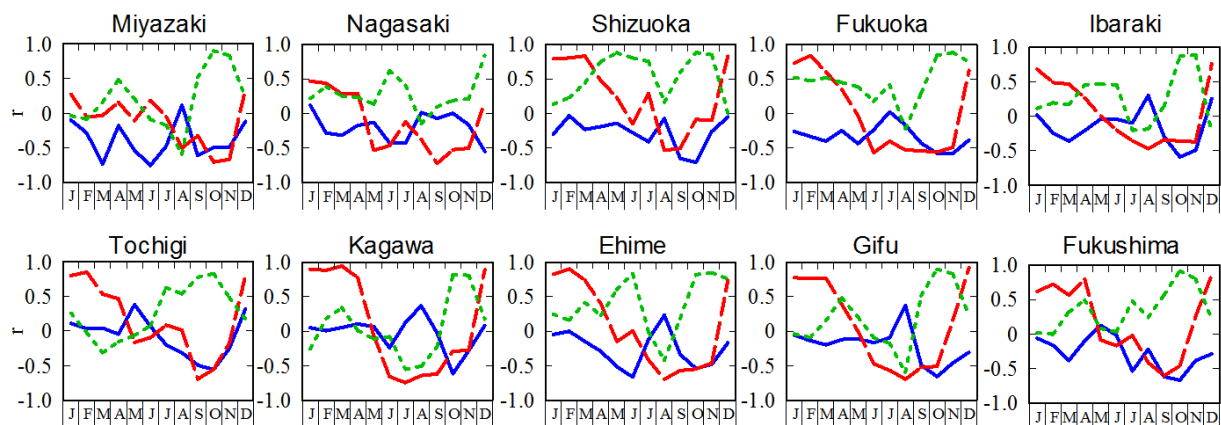


図3-6 気候帯が異なる異なる各地域における純一次生産量のモデル推定値と気象要素（降水量（青線）、気温（赤線）、日射量（緑線））の相関係数の季節変化。

農研機構1kmメッシュ気象データ（日値）と近隣アメダスの気象値（1時値）をもとに、1996年から2000年までの5年間の各気象値（気温、降水量、日射量、水蒸気圧、大気圧、風速）の1時間推定値を2000年時の純生産量の推定に利用した。さらに、5つの気候モデル（HadGEM2-ES、MRI-CGCM3、CSIRO-Mk 3-6-0、MIROC5、GFDL-CM3）の将来予測値データ（PCP2.6およびHistorical）を利用し、RCO2.6およびHistoricalの各気象要素の差または比を1996年から2000年までの5年間の各気象値（気温、降水量、日射量）の1時間値に上乘せする形の差分法により、全国12地点の将来気候（2096-2100、RCP2.6シナリオ）における一時間毎の気象データの整備を行った。これらの将来予測値、現在気候値データを入力データとして、生態系モデルを用いた炭素収支の将来予測を全国12地点で実施した。なお、推定期間については、小課題1の対象期間にあわせた。また推定の際には、CO2濃度上昇を考慮した場合としなかった場合の2通りの推定を行いCO2施肥の影響についても確認した。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た。また、その傾向は小課題1の結果と概ね一致した（図3-7）。

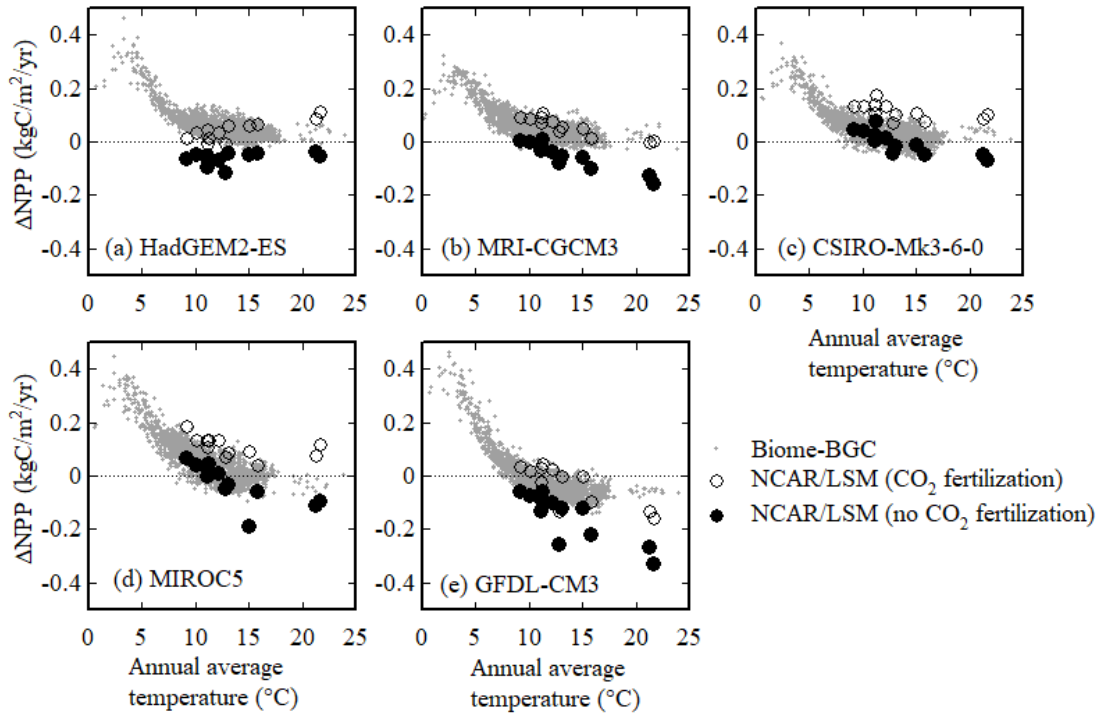


図3-7 5つの気候モデル（HadGEM2-ES、MRI-CGCM3、CSIRO-Mk3-6-0、MIROC5、GFDL-CM3）を利用して推定された年積算純一次生産量（NPP：tC/ha/year）の気候変動応答と年平均気温の関係。ΔNPPは、将来気候（2096-2100年）と現在気候（1996-2000）の差分。

4) 成果活用における留意点

モデル計算によって示される純一次生産量と材積成長量の間に関係性はあるものの、同一では無いことに留意する必要がある。林業的に重視される材積成長量の年変動を規定する早材幅変動には、冬から春にかけての光合成量が大きく関与していることが示されたが、一方で夏以降の気候要素や光合成、呼吸の顕著な寄与が認められなかった。すなわち、夏以降の季節の気候が材積成長量におよぼす影響は相対的に小さいことが示唆される。従って、モデル計算によって予想される夏期の気温上昇や降水変化に伴う純一次生産量の低下は材積成長量以外の炭素収支に負うところが大きいのかもしれない。

5) 今後の課題

留意事項でも述べた問題点であるモデル計算によって材積成長量を予測するためには、ある時点で光合成によって固定さ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である。一方、樹体全体にわたる成長量の季節変動に関する観測はほとんどなされていないのが実情であり、今後の観測が必要である。

Ⅲ 研究成果一覧【公表可】

課題番号 16808214

中課題名 人工林に係る気候変動の影響評価

成果等の集計数

課題番号	学術論文		学会等発表(口頭またはポスター)		出版図書	国内特許権等		国際特許権等		PCT	報道件数	普及しうる成果	発表会の主催(シンポジウム・セミナー等)	アウトリーチ活動
	和文	欧文	国内	国際		出願	取得	出願	取得					
16808214	10	6	47	10	2	0	0	0	0	0	0	0	1	17

(1)学術論文

区分:①原著論文、②その他論文

整理番号	区分	タイトル	著者	機関名	掲載誌	掲載論文のDOI	発行年	発行月	巻(号)	掲載ページ
1	①	Vertical and seasonal variations in temperature responses of leaf respiration in a <i>Chamaecyparis obtusa</i> canopy	Araki, MG ら	森林総合研究所	Tree Physiology	https://doi.org/10.1093/treephys/tpx012	2017	10	37	1269-1284
2	①	Effects of rainfall exclusion on leaf gas exchange traits and osmotic adjustment in mature canopy trees of <i>Dryobalanops aromatica</i> (Dipterocarpaceae) in a Malaysian tropical rain forest	Inoue, Y ら	森林総合研究所	Tree Physiology	https://doi.org/10.1093/treephys/tpx053	2017	10	37	1301-1311
3	①	多地点・多時期データによる樹高曲線のモデル選択	細田和男 ら	森林総合研究所	関東森林研究	なし	2017	11	68	137-140
4	①	異なる乾燥条件下で育苗した南米半乾燥地のマメ科3樹種の当年生実生の耐乾性評価	井上裕太 ら	森林総合研究所	日本緑化工学会誌	https://doi.org/10.7211/jjsrt.43.499	2018	2	43	499-508
5	①	Canopy nitrogen distribution is optimized to prevent photoinhibition throughout the canopy during sun flecks	Kitao, M ら	森林総合研究所	Scientific Reports	https://doi.org/10.1038/s41598-017-18766-0	2018	1	8	online
6	①	Latitudinal variation in radial growth phenology of <i>Cryptomeria japonica</i> D. Don trees in Japan	Nishizono, T. ら	森林総合研究所	Forestry	https://doi.org/10.1093/forestry/cpx055	2018	4	91	206-216
7	①	スギ成木の樹幹上部の葉の水ポテンシャルと光合成・蒸散速度の季節変化	井上裕太 ら	森林総合研究所	関東森林研究	なし	2018	3	69	19-22

8	②	茨城県のスギ人工林における林分蒸散量に及ぼす飽差と土壤水分条件の影響	荒木眞岳ら	森林総合研究所	関東森林研究	なし	2018	3	69	97-98
9	②	茨城県のスギ人工林における異なる樹冠部位の光合成活性の評価	北岡哲ら	森林総合研究所	関東森林研究	なし	2018	3	69	99-100
10	②	乾燥処理が根・リター・土壌からのCO2放出速度の温度依存性におよぼす影響	阪田匡司ら	森林総合研究所	関東森林研究	なし	2018	3	69	107-108
11	①	極端気象現象の林分への影響と強風及び乾燥化の近年の傾向	齊藤哲	森林総合研究所	関東森林研究	なし	2018	10	69	155-158
12	①	降雨遮断による土壌の乾燥がスギ成木の葉の水利用特性に与える影響	井上裕太ら	森林総合研究所	関東森林研究	なし	2019	3	70	53-56
13	①	Plant trait database for Cryptomeria japonica and Chamaecyparis obtusa (SugiHinoki DB): Their physiology, morphology, anatomy and biochemistry	大曾根陽子	森林総合研究所	Ecological Research	10.1111/1440-1703.12062	2019	11	Online	
14	①	スギにおけるシュート投影面積と針葉投影面積との関係	井上裕太	森林総合研究所	日本森林学会誌	なし	2020	2	102	7-14
15	①	Predicting effects of climate change on productivity and persistence of forest trees	荒木眞岳ら	森林総合研究所	Ecological Research	https://doi.org/10.1111/1440-1703.12127	2020	5	35	562-574
16	①	中部地方に生育するスギの年輪構造と気候要素との関係	安江恒ら	信州大学	木材学会誌	https://doi.org/10.2488/iwrs.66.117	2020	7	66	117-127
17	①									

(2) 学会等発表(口頭またはポスター)

整理番号	タイトル	発表者名	機関名	学会等名	発行年	発行月
1	Some findings from on-going construction of database for functional traits of Sugi and Hinoki	大曾根陽子ら	森林総合研究所	JpGU-AGU Joint Meeting	2017	5
2	Bayesian calibration of a process-based model for estimating the growth of Japanese cedar plantations	鳥山淳平ら	森林総合研究所	JpGU-AGU Joint Meeting	2017	5
3	森林土壌の保水性データから有効水分を推定する—水分保持曲線モデルの選択が推定結果に及ぼす影響—	釣田竜也ら	森林総合研究所	土壤物理学大会	2017	10

4	茨城県のスギ人工林における樹液流速、幹の収縮および土壌水分の経時変化	荒木眞岳ら	森林総合研究所	関東森林学会大会	2017	10
5	茨城県のスギ人工林における葉の水利用特性の季節変化	井上裕太ら	森林総合研究所	関東森林学会大会	2017	10
6	茨城県のスギ人工林における異なる樹冠部位の光合成活性の評価	北岡哲ら	森林総合研究所	関東森林学会大会	2017	10
7	強風および降水状況の近年の傾向と林分成長量との比較	齊藤哲	森林総合研究所	関東森林学会大会	2017	10
8	降雨遮断処理による土壌水分変動が土壌呼吸におよぼす影響－室内培養による根・リター・土壌からのCO2発生速度の温度依存測定－	阪田匡司ら	森林総合研究所	関東森林学会大会	2017	10
9	さまざまな定義による上層樹高の差違と間伐前後の変化	細田和男ら	森林総合研究所	関東森林学会大会	2017	10
10	プロセスモデルを利用した九州のスギ林生産力のマップ化	鳥山淳平ら	森林総合研究所	九州森林学会大会	2017	10
11	無降雨時の土壌水分減少量は樹木蒸散量と細根分布で説明できるか？	荒木眞岳ら	森林総合研究所	日本森林学会大会	2018	3
12	スギ成木の針葉の水ポテンシャルと光合成・蒸散速度の季節変化	井上裕太ら	森林総合研究所	日本森林学会大会	2018	3
13	本数密度が針葉樹人工林の樹高成長に及ぼす影響の再考	細田和男ら	森林総合研究所	日本森林学会大会	2018	3
14	スギ・ヒノキの生理特性データベースの構築	大曾根陽子ら	森林総合研究所	日本森林学会大会	2018	3
15	森林土壌の有効孔隙率の推定に適した保水性モデルの検討事例	釣田竜也ら	森林総合研究所	日本森林学会大会	2018	3
16	土壌の乾燥が土壌呼吸の温度依存性におよぼす影響	阪田匡司ら	森林総合研究所	日本森林学会大会	2018	3
17	Carbon budget and their environmental control factors in evergreen coniferous forest among different climate regions across Japan	斎藤琢	岐阜大学	2nd international symposium of river basin studies	2018	3
18	日本各地の異なる環境に生育するスギの年輪構造に影響を及ぼす気候要素	安江恒	信州大学	第68回日本木材学会大会	2018	3
19	A database of plant traits for major planting tree species in Japan(日本の主要植林樹種の生理特性データベースの構築)	大曾根陽子ら	森林総合研究所	Geophysical Research Abstracts	2018	4
20	降雨遮断による土壌の乾燥がスギ成木の葉の水利用に与える初期影響	井上裕太ら	森林総合研究所	関東森林学会大会	2018	10
21	雪害によるスギの樹冠欠損が幹表面呼吸の季節変化へ及ぼす影響	斎藤琢ら	岐阜大学	日本生態学会中部支部会	2019	3
22	All about Sugi and Hinoki? -Analysis of functional trait database for these major planting species-	大曾根陽子ら	森林総合研究所	日本生態学会 第66回大会	2019	3

23	Temperature acclimation in leaf respiration may mitigate response of canopy respiration to climate warming in a hinoki cypress stand	荒木眞岳ら	森林総合研究所	日本生態学会 第66回大会	2019	3
24	Leaf physiological and morphological responses to artificial soil drought by rainfall exclusion experiment in mature Japanese cedar (<i>Cryptomeria japonica</i>)	井上裕太ら	森林総合研究所	日本生態学会 第66回大会	2019	3
25	日本の気候傾度に沿った常緑針葉樹林の炭素収支とその環境制御要因	斎藤琢ら	岐阜大学	日本生態学会 第66回大会	2019	3
26	機械学習を用いたスギ収穫試験地の成長要因解析	山下尚之ら	森林総合研究所	第130回日本森林学会	2019	3
27	人工林を対象とした気候変動の影響評価モデル	烏山淳平ら	森林総合研究所	第130回日本森林学会	2019	3
28	スギ人工林における土壌乾燥実験 I. 葉の水利用特性に及ぼす影響	井上裕太ら	森林総合研究所	第130回日本森林学会	2019	3
29	スギ人工林における土壌乾燥実験 II. 光合成能力に与える影響	田中憲蔵ら	森林総合研究所	第130回日本森林学会	2019	3
30	スギ人工林における土壌乾燥実験 III. 幹やシュートの成長に対する影響	荒木眞岳ら	森林総合研究所	第130回日本森林学会	2019	3
31	土壌タイプ別の保水性曲線の推定—新たに集約した保水性データによる検討—	釣田竜也ら	森林総合研究所	第130回日本森林学会	2019	3
32	降雨遮断による土壌乾燥処理に伴う土壌水分の挙動	阪田匡司ら	森林総合研究所	第130回日本森林学会	2019	3
33	日本の人工林における気候変動適応策の現状	齊藤哲ら	森林総合研究所	第130回日本森林学会	2019	3
34	スギ・ヒノキ一斉林の直径分布の遷移について	田中邦宏、齋藤和彦、田中真哉、近口貞介、檜山真司	森林総合研究所	応用森林学会	2019	9
35	The effect of canopy phenology and canopy surface physical phenomena on carbon budget in evergreen coniferous and deciduous broad-leaf forests in a cool-temperate region under ongoing climate change	斎藤琢	岐阜大学	AsiaFlux 2019	2019	10
36	The effect of lost canopy on the seasonal variation of stem surface respiration in Japanese cedar	斎藤琢	岐阜大学	AsiaFlux 2019	2019	10
37	スギ成木の枝木部における乾燥ストレスに対する通水機能の脆弱性	井上裕太	森林総合研究所	関東森林学会	2019	10
38	土壌保水性モデルを使って推定した有効水分に生じる誤差の検討	釣田竜也	森林総合研究所	土壌物理学会	2019	10
39	奄美大島におけるスギ肥大成長の気候応答	森健吾, 安江恒	信州大学	2019年度樹木年輪研究会	2019	11
40	国内10地点におけるスギの早材幅・晩材幅の気候応答	安江恒, 斎藤琢	信州大学, 岐阜大学	2019年度樹木年輪研究会	2019	11

41	降雨遮断2年目の土壌乾燥に対するスギ成木の応答 I. 葉の水利用特性	井上裕太	森林総合研究所	日本森林学会	2020	3
42	降雨遮断2年目の土壌乾燥に対するスギ成木の応答 II. 光合成特性	田中憲蔵ら	森林総合研究所	日本森林学会	2020	3
43	スギの直径生長と伸長成長の季節変化	齊藤哲	森林総合研究所	日本森林学会	2020	3
44	降雨遮断2年目の土壌乾燥に対するスギ成木の応答 III. 樹液流速	荒木眞岳	森林総合研究所	日本森林学会	2020	3
45	形質データベースによるスギ形質の種内変異の解析	大曾根陽子	森林総合研究所	生態学会	2020	3
46	堀田(1997)データを用いた九州地域の土壌タイプ別の保水特性比較	釣田竜也	森林総合研究所	日本森林学会	2020	3
47	雪害による樹冠欠損がスギの樹液流速に与える影響	齋藤琢	岐阜大学	日本生態学会	2020	3
48	雪害による樹冠欠損がスギの幹表面呼吸の鉛直変化へ与える影響	齋藤琢	岐阜大学	日本生態学会	2020	3
49	気候変動が日本のスギ林生態系の炭素循環に及ぼす影響	齋藤琢	岐阜大学	日本生態学会	2020	3
50	降雨遮断2年目の土壌乾燥に対するスギ成木の応答 II. 光合成特性	田中憲蔵、井上裕太、川崎達郎、北岡哲、荒木眞岳、齊藤哲	森林総合研究所	日本森林学会	2020	3
51	針葉樹人工林における直径分布のばらつきの推移について	田中邦宏、齋藤和彦、田中真哉、近口貞介、檜山真司	森林総合研究所	日本森林学会	2020	3
52	奄美・沖縄に生育するスギの肥大成長におよぼす気候要素の影響	森健吾、安江恒	信州大学	日本木材学会	2020	3
53	2生育期間におよぶ降雨遮断をおこなったスギ人工林の土壌水分変動	阪田匡司	森林総合研究所	日本森林学会	2020	3
54	Prediction of the productivity of cedar plantation in Japan under changing climate	鳥山淳平ら	森林総合研究所	American Geophysical Union 2020 Fall Meeting	2020	12
55	3成長期間の土壌乾燥に対するスギ成木の応答 I. 葉の水利用特性	井上裕太ら	森林総合研究所	日本森林学会	2121	3
56	3成長期間の土壌乾燥に対するスギ成木の応答 II. 光合成特性	田中憲蔵ら	森林総合研究所	日本森林学会	2121	3
57	3年間にわたる土壌の乾燥がスギ成木の蒸散と成長に及ぼす影響	荒木眞岳ら	森林総合研究所	日本森林学会	2121	3

(3) 出版図書

区分: ①出版著書、②雑誌(学術論文に記載したものを除く、重複記載をしない。)、③年報、④広報誌、⑤その他

整理番号	区分	著書名(タイトル)	著者名	機関名	出版社	発行年	発行月
1	④	研究情報 No. 131 森林総合研究所関西支所のプロジェクト研究の紹介2	齊藤哲	森林総合研究所関西支所		2019	2
2	②	森林学の百科事典(ISBN: 978-4-621-30584-3)、人工林への影響と適応策	齊藤哲	森林総合研究所関西支所	丸善出版	2020	1

(4) 国内特許権等

区分: ①育成者権、②特許権、③実用新案権、④意匠権、⑤回路配置利用権

整理番号	区分	特許権等の名称	発明者	権利者(出願人等)	機関名	出願番号	出願年月日	取得年月日
		該当なし						

(5) 国際特許権等

区分: ①育成者権、②特許権、③実用新案権、④意匠権、⑤回路配置利用権

整理番号	区分	特許権等の名称	発明者	権利者(出願人等)	機関名	出願番号	出願年月日	取得年月日	出願国
1		該当なし							

(6) 報道等

区分:①プレスリリース、②新聞記事、③テレビ放映、④その他

整理番号	区分	記事等の名称	機関名	掲載紙・放送社名等	掲載年月日	備考
1		該当なし				

(7) 普及に移しうる成果

区分:①普及に移されたもの・製品化して普及できるもの、②普及のめどがたったもの、製品化して普及のめどがたったもの、③主要成果として外部評価を受けたもの(複数選択可)。

整理番号	区分	成果の名称	機関名	普及(製品化)年月	主な利用場面	普及状況
1		該当なし				

(8) 発表会の主催(シンポジウム・セミナー等)の状況

整理番号	発表会の名称	機関名	開催場所	年月日	参加者数	備考
1	日本の人工林における気候変動の適応策を考える	森林総合研究所	朱鷺メッセ(新潟)	2019/3/20	80	

(9) アウトリーチ活動の状況

区分:①一般市民向けのシンポジウム・講演会及び公開講座・サイエンスカフェ等、②展示会及びフェアへの出展・大学及び研究所等の一般公開への参画、③その他(子供向け出前授業等)

整理番号	区分	アウトリーチ活動	機関名	開催場所	年月日	参加者数	主な参加者	備考
1	①	森林総合監理士育成研修	一般社団法人 林業人材育成支援普及センター	森林技術総合研修所	2017/5/9	100	国家公務員、県職員、森林組合職員	研修講師
2	①	International Symposium on the Advanced Nursery and Silvicultural Practice Responding to the Climate Change	韓国国立森林研究所	韓国国立森林研究所	2017/6/13	150	韓国国立森林研究所、大学教員、一般林業関係者	依頼公演
3	①	林業技士育成研修 森林造成	一般社団法人 日本森林技術協会	主婦会館プラザエフ	2017/12/12	130	国家公務員、県職員、森林組合職員	研修講師
4	①	林業技士育成研修 間伐技術	一般社団法人 日本森林技術協会	主婦会館プラザエフ	2017/12/13	130	国家公務員、県職員、森林組合職員	研修講師
5	①	森林総合監理士育成研修(後期)1研修	関東森林管理局	利根・沼田森林管理署	2018/7/24	30	国家公務員、県職員、森林組合職員	研修講師
6	③	生物資源科学実習「地球温暖化と森林の炭素固定機能」	筑波大学生物資源学類	森林総合研究所	2018/9/28	30	大学生	講師
7	①	路網整備推進技術者育成研修(関東ブロック研修)	一般社団法人 国土林業改良普及協会	利根・沼田森林管理署	2018/10/31	30	国家公務員、県職員、森林組合職員	研修講師
8	①	森林講座	森林総合研究所	森林総合研究所 多摩森林科学園	2018/11/10	30	一般	講師
9	①	林業技士育成研修 間伐技術	一般社団法人 日本森林技術協会	主婦会館プラザエフ	2018/12/12	120	国家公務員、県職員、森林組合職員	研修講師
10	①	林業技士育成研修 森林造成	一般社団法人 日本森林技術協会	主婦会館プラザエフ	2018/12/13	120	国家公務員、県職員、森林組合職員	研修講師
11	②	農林水産省6F廊下でのパネル展示	森林総合研究所	農林水産省	2019/2月			
12	①	森林総合研究所一般公開	森林総合研究所	森林総合研究所	2019/7/27	2161	一般市民	http://www.ffpri.affrc.go.jp/event/2019/20190727natsukoukai/index.html
13	①	林業技士育成研修 間伐技術	一般社団法人 日本森林技術協会	主婦会館プラザエフ	2019/12/10	120	国家公務員、県職員、森林組合職員	研修講師
14	①	林業技士育成研修 森林造成	一般社団法人 日本森林技術協会	主婦会館プラザエフ	2019/12/11	120	国家公務員、県職員、森林組合職員	研修講師
15	②	森林総合研究所一般公開	森林総合研究所	森林総合研究所	2019/7/27	2161	一般市民	http://www.ffpri.affrc.go.jp/event/2019/20190727natsukoukai/index.html
16	①	林業技士育成研修 間伐技術	一般社団法人 日本森林技術協会	主婦会館プラザエフ	2020/12/8	30	国家公務員、県職員、森林組合職員	研修講師
17	①	林業技士育成研修 森林造成	一般社団法人 日本森林技術協会	主婦会館プラザエフ	2020/12/9	30	国家公務員、県職員、森林組合職員	研修講師