

I x Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

2RF-1803 超高解像度気候予測値を用いた森林生態系の炭素収支の将来予測
と森林管理の効果の評価
(JPMEERF20182R03)
平成30年度～令和2年度

Future Projection and Estimation of Effects of Forest Management on Carbon Budget in Forest
Ecosystem Using Ultra-high Resolution Climate Projection Data

〈研究代表機関〉
長野県環境保全研究所

〈研究分担機関〉
信州大学

〈研究協力機関〉
国立環境研究所

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和3年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	14
II-1 カラマツ林の葉面積指数の連続観測による衛星のフェノロジー観測の検証 （長野県環境保全研究所）	14
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 土壌呼吸における根呼吸・微生物呼吸・菌糸呼吸の寄与と環境応答性の解析 （信州大学）	25
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-3 超高解像度気候予測値と陸域生態系モデルによる炭素収支の評価 （長野県環境保全研究所）	36
要旨	

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細 51

Ⅳ. 英文Abstract 55

I. 成果の概要

課題名 2RF-1803 超高解像度気候予測値を用いた森林生態系の炭素収支の将来予測と森林管理の効果の評価

課題代表者名 栗林 正俊 (長野県環境保全研究所自然環境部 研究員)

重点課題 主：【重点課題⑦】気候変動への適応策に係る研究・技術開発

副：【重点課題⑥】気候変動の緩和策に係る研究・技術開発

行政要請研究テーマ (行政ニーズ) 非該当

研究実施期間 平成30年度～令和2年度

研究経費 (千円)

	契約額	実績額 (前事業年度繰越分支出額含む)
平成30年度	5,400千円	5,400千円
令和元年度	5,726千円	5,726千円
令和2年度	3,451千円	3,451千円
合計額	14,577千円	14,577千円

本研究のキーワード カラマツ人工林、炭素収支、フェノロジー、土壌呼吸、陸域生態系モデル、力学的ダウンスケール、森林管理、CO₂施肥効果、森林吸収源、気候変動適応

研究体制

(サブテーマ1) カラマツ林の葉面積指数の連続観測による衛星のフェノロジー観測の検証
(長野県環境保全研究所)

(サブテーマ2) 土壌呼吸における根呼吸・微生物呼吸・菌糸呼吸の寄与と環境応答性の解析
(信州大学)

(サブテーマ3) 超高解像度気候予測値と陸域生態系モデルによる炭素収支の評価
(長野県環境保全研究所)

研究協力機関

国立環境研究所

1. はじめに（研究背景等）

2015年12月に採択されたパリ協定では、途上国も含む全ての主要排出国が独自に温室効果ガスの排出削減目標を設定して、世界の平均気温の上昇を産業革命前に比べて2℃より十分低く抑え、1.5℃に抑える努力を追求するという長期目標が示された。一方、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は2018年10月に1.5℃特別報告書を取りまとめ、世界の平均気温はすでに産業革命前に比べて約1℃上昇しており、現在のペースで地球温暖化が進行すれば、2030～2052年の間に1.5℃に達する可能性が高いことを報告している。このような状況の中で気候変動の緩和策と適応策を推進することは喫緊の課題となっており、我が国においても2016年5月に地球温暖化対策計画が閣議決定され、2018年6月に気候変動適応法が公布され同年12月に施行された。また、2020年10月には菅義偉首相が所信表明演説で2050年に温室効果ガスの排出量を実質ゼロ(2050年カーボンニュートラル)にすることを宣言し、同年11月には気候非常事態宣言が衆参両院で可決され、これまで以上に気候変動緩和策・適応策の重要度が増してきている。このため、国と地方自治体が足並みを揃えながら具体的な気候変動対策を打ち出し、社会全体として気候変動の問題に取り組んでいくことが求められている。長野県は、2019年12月に全国の都道府県で初となる気候非常事態を宣言し、2050年の温室効果ガスの排出量を実質ゼロにする決意(長野県2050ゼロカーボン)を示すとともに、2020年4月には長野県気候危機突破方針を策定して、長野県2050ゼロカーボンに向けた指針を示した。さらに、2020年10月には長野県議会で長野県脱炭素社会づくり条例が制定されて、長野県2050ゼロカーボンを念頭に持続可能な脱炭素社会づくりを推進する体制が整えられた。2021年度には長野県ゼロカーボン戦略を策定して、気候変動緩和策・適応策に関する各分野の具体的施策を打ち出していく予定である。

我が国の地球温暖化対策計画では、温室効果ガスの排出量を2030年度に2013年度比で26%削減する中期目標、および2050年度に80%削減する長期目標が定められているが、前述の2050年カーボンニュートラルに向けて中期目標も2030年度に46%削減に引き上げる方針が示されている。2050年カーボンニュートラルを実現するためには、エネルギー起源のCO₂排出量を抑えるとともに、森林のCO₂吸収量を確保することが重要となる。地球温暖化対策計画の中期目標では、森林のCO₂吸収量を2780万t確保する数値目標が定められていたが、この数値目標も約1000万t上積みされて約3800万tとなり森林吸収源対策にも期待がかけられている。一方、国土の約67%を森林が占める我が国では、森林の約41%が人工林であるが、この人工林の多くは戦後の拡大造林期に植林されたもので、林齢50年以上の高齢林が人工林の約65%を占めているため、CO₂吸収量の低下が指摘されている。ゆえに、適正な森林管理により森林の公益的機能を強化していかなければ、地球温暖化対策計画で中期・長期目標が定められている2030～2050年の森林のCO₂吸収量を現在の水準に維持することは難しいと考えられる。また、前述の長野県気候危機突破方針でも、削減しきれないCO₂排出量は森林によるCO₂吸収量と相殺する形で実質的なゼロカーボンの達成を見込んでいるが、長野県においても高齢林の面積割合が非常に高くなっており、森林資源の利活用と適正な森林管理によるCO₂吸収量の確保は重要な課題となっている。

森林は光合成により大気中のCO₂を吸収すると同時に、生態系呼吸により大気中にCO₂を放出している。将来の高温・高CO₂濃度環境下における森林生態系の炭素収支(CO₂吸収量－CO₂放出量)の応答は十分に明らかになっておらず、全球気候モデル(GCM)に生物地球化学スキームを導入した地球システムモデルの開発、それによる気候－炭素循環フィードバックの解析、モデル間相互比較による不確実性の評価がなされている。しかしながら、GCMは空間解像度が粗く複雑地形上の気候を十分に表現できないので、地形が複雑で森林の大部分が山岳域に分布している我が国を対象に森林生態系の炭素収支を予測するためには、空間解像度が数kmの気候予測値が必要になる(Kuribayashi et al., 2017)。高解像度の気候予測値は、GCMの気候予測値を統計的手法か力学的手法でダウンスケールすることで得られる。統計的手法は簡便であるが、炭素収支の予測に用いる陸域生態系モデルの入力に必要な日射量や積雪などの気象要素を網羅していない。一方、力学的手法は地域気候モデル(RCM)を利用するため膨大な計算を必要とするが、陸域生態系モデルの入力に必要な気象要素を全て取得することができる。ただし、力学的

手法により空間解像度が数kmの長期間の気候予測値を取得する場合、計算機資源の制約のため計算領域は都道府県スケールに限定される。

2018年11月に閣議決定された「気候変動適応計画」では、人工林への気候変動影響は重大性が特に高いとされる反面、確信度は低いとされており、さらなる研究が求められている。また、2020年12月に環境省が発行した気候変動影響評価報告書では、水ストレスの増大により一部の地域でスギ林が衰退していることなどが報告され、人工林への対策の緊急性が高いと評価されている。都道府県別の森林面積ベスト3である北海道、岩手県、長野県は、いずれもカラマツが広く人工林を形成しているが、カラマツは冷涼な気候を好む樹種であることから気候変動に対して脆弱な可能性がある。一方、カラマツは林業樹種で唯一の落葉樹であることから、生育適地が大きく変化しない程度の温暖化であれば生長期間が長期化して、近未来は炭素吸収量が増大する可能性もある。ゆえに、カラマツは主要な林業樹種であるスギやヒノキに比べて気候変動の影響に関する不確実性が大きい。森林生態系の炭素収支の予測精度を向上させるには、樹種毎に異なる光合成や生態系呼吸の生物季節(フェノロジー)や生理特性を陸域生態系モデルに組み込む必要があるが、カラマツについては国立環境研究所の富士北麓フラックス観測サイトなど一部の地点を除いて観測データが乏しい。一方、カラマツは我が国で唯一の落葉針葉樹であることから、人工衛星でカラマツの展葉・落葉のタイミングを大まかに捉えることが可能で、緯度帯・標高帯に応じた葉群フェノロジーと積算気温の関係が評価されている(Nagai et al., 2015)。この知見を陸域生態系モデルに組み込むことで、炭素収支の高精度な広域評価に応用できる可能性がある。ただし、標高1000 m以上の地域には気象観測地点が少なく、少数の観測地点の値から計算される積算気温は、実際にカラマツ林が分布する場所の積算気温からずれるリスクが高い。衛星観測に基づくフェノロジーと積算気温の関係を炭素収支の広域評価に利用する前に、まずはカラマツ林の地上観測に基づく葉群フェノロジーと積算気温の関係を評価し、衛星観測に基づく結果と比較して精度を検証する必要がある。一方、カラマツ林の生態系呼吸については未知のことが多く、特に生態系呼吸の約7割を占める土壌呼吸については、その温度依存性(Q_{10})を正しく評価することが将来気候下の生態系呼吸によるCO₂放出量を予測する上で重要である。森林土壌は根、菌根菌糸、微生物等から構成されており、それぞれの呼吸の合計が土壌呼吸となるが、各構成要素の呼吸速度の Q_{10} は一律ではないので、構成要素毎の Q_{10} を評価して陸域生態系モデルに組み込むことで、将来の森林生態系の炭素収支のより高精度な予測が可能になる。

国内随一の山岳地帯で地形の複雑な長野県は、全国3位の森林面積を有し人工林の約55%をカラマツが占めている。このカラマツの多くは標高700~2000 mの地域に分布しており、カラマツの気候変動影響を調査する上で長野県は絶好の土地柄である。また、近年はカラマツの木材価格がヒノキに比肩するまで上昇しており、主伐・再造林に踏み切る森林所有者も増える傾向にあることから、将来の気候を念頭に置いたカラマツ人工林の森林管理の方法を検討する上で、現在は絶好のタイミングである。そこで、長野県のカラマツ人工林に地上観測サイトを構築して、葉群フェノロジーと積算気温の関係や土壌呼吸の構成要素毎の Q_{10} を評価することで、陸域生態系モデルの高精度化が期待できる。また、長野県は平成27~31年度に文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラムにモデル自治体として参加していたので、RCMで長野県とその周辺地域を力学的に1 km格子まで高解像度化されたアンサンブル気候予測値を持っている。地上観測に基づいて高精度化した陸域生態系モデルに高解像度気候予測値を入力することで、カラマツ人工林の炭素収支の将来予測が可能になる。さらに、陸域生態系モデルの感度実験により、炭素収支の将来変化に寄与するCO₂施肥効果と気候変動効果を定量的に評価するとともに、間伐・植林やスギへの樹種転換などの森林管理やその施業時期の違いが2050年の炭素収支にもたらす効果を定量的に評価することができる。これらの評価は、人工林を活用した緩和策・適応策の具体的事例を創出していく上で貴重な基礎資料になることが期待される。

2. 研究開発目的

本課題では、近未来(2030～2050年)の気候・大気CO₂濃度環境下におけるカラマツ人工林の炭素収支を高精度に予測するとともに、モデル感度実験により間伐や樹種転換などの森林管理を行った場合の炭素収支を計算・比較することで、森林管理が将来の森林の炭素収支に与える効果を定量的に評価することを目的とする。これにより、地球温暖化対策計画の中期目標に掲げられた森林のCO₂吸収量の確保に資する森林管理方法を科学的な根拠に基づいて示すとともに、長野県をモデルケースとして将来気候下における林業分野の適応策オプションを提案すること、および2050年カーボンニュートラルに向けた行政施策の策定を支援することを目指す。

3. 研究目標

全体目標	長野県における2050ゼロカーボンを支援し、地球温暖化対策計画の中期目標に掲げられた森林のCO ₂ 吸収量の確保に貢献するため、将来の高温・高CO ₂ 濃度環境下におけるカラマツ人工林の炭素収支を高精度に予測して、緩和策・適応策として効果的な森林管理の方法を提示する。
サブテーマ1	カラマツ林の葉面積指数の連続観測による衛星のフェノロジー観測の検証
サブテームリーダー/所属機関	栗林正俊/長野県環境保全研究所
目標	標高850～1500 mの5箇所のカラマツ林にタイムラプスカメラと温度計を設置し、標高に応じた葉群フェノロジーと積算気温の関係の違いを評価して、衛星観測に基づく既往研究の結果を検証する。また、地上観測に基づく葉群フェノロジーと積算気温の関係式をサブテーマ3に提供する。
サブテーマ2	土壌呼吸における根呼吸・微生物呼吸・菌糸呼吸の寄与と環境応答性の解析
サブテームリーダー/所属機関	牧田直樹/信州大学
目標	カラマツ林の土壌呼吸の各構成要素(微生物・根・菌糸)について、6つのプロットにおいて2～4週間に1回の頻度で呼吸速度を評価する。各呼吸速度と土壌温度や土壌水分量との関係を解析することで、各構成要素の温度感受性(Q ₁₀)や水分応答性を明らかにする。得られた情報をサブテーマ3に提供する。
サブテーマ3	超高解像度気候予測値と陸域生態系モデルによる炭素収支の評価
サブテームリーダー/所属機関	栗林正俊/長野県環境保全研究所
目標	サブテーマ1と2の結果を陸域生態系モデルに組み込み、これに1 km格子の気候予測値を入力して、2030～2050年のカラマツ人工林の炭素収支を予測する。また、モデル感度解析により、炭素収支の将来変化に寄与するCO ₂ 施肥と気候変動の各影響、および、間伐や樹種転換が将来の炭素収支に与える効果を定量的に評価する。

4. 研究開発内容

図0.1に前述の3つのサブテーマの概要と全体の関係性を示す。サブテーマ1では光合成によるCO₂吸収

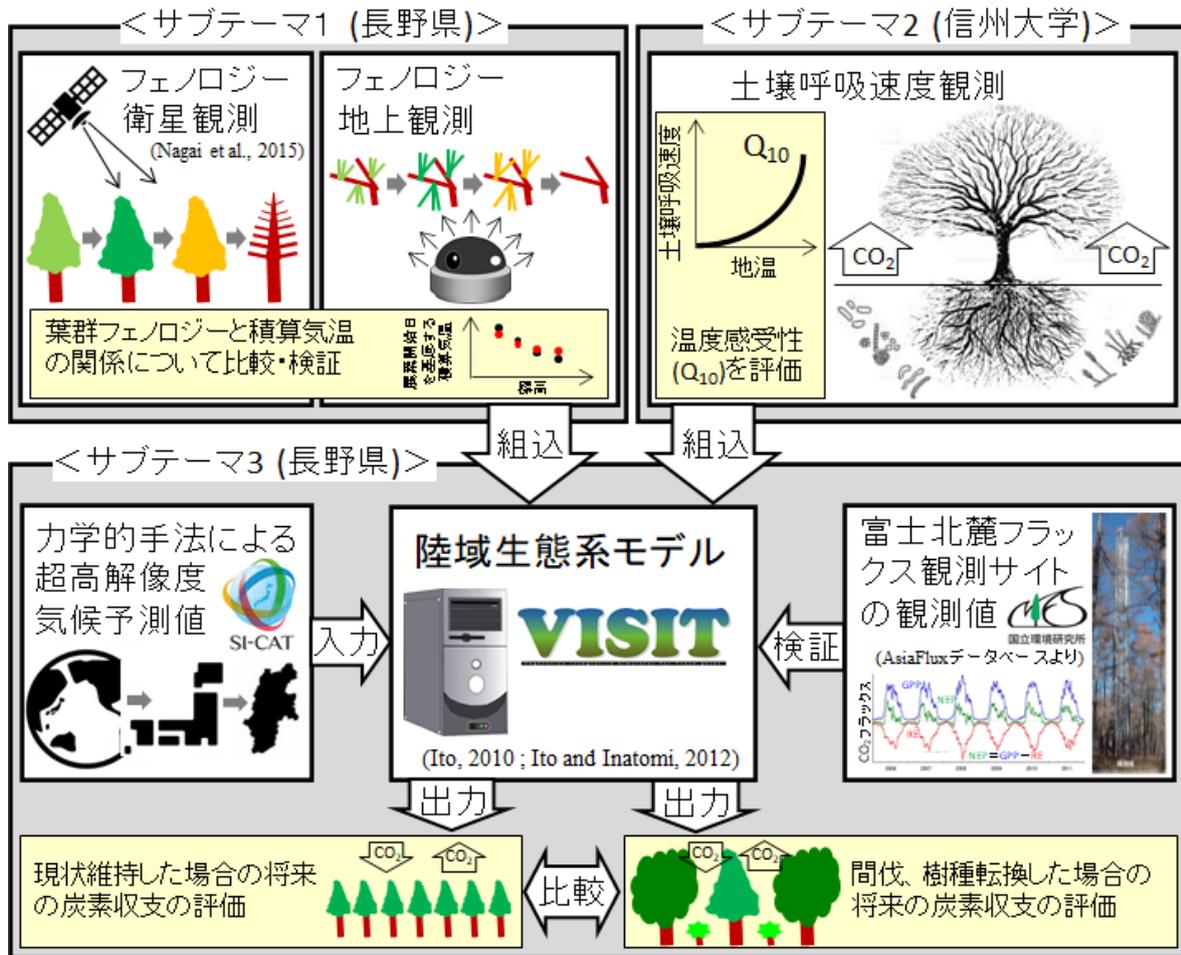


図0.1 本課題における各サブテーマの概要と全体の関係性。

量を計算する上で重要な葉群フェノロジーと積算気温の関係を、サブテーマ2では生態系呼吸量によるCO₂放出量を計算する上で重要な土壌呼吸速度の温度感受性を、それぞれ長野県のカラマツ人工林における地上観測に基づいて評価する。サブテーマ3では、サブテーマ1と2で得られた知見を陸域生態系モデルに組み込み、カラマツ林の炭素収支の再現精度を向上させた上で、力学的手法により高解像度化された気候予測値を入力して、近未来(2030~2050年)のカラマツ人工林の炭素収支を予測するとともに、森林管理が炭素収支に与える効果を定量的に評価する。このサブテーマ3で得られた知見を基にして、気候変動の緩和策・適応策として効果的な森林管理の方法を提示する。

サブテーマ1では、表1.1に示した長野県の標高が異なる5つのカラマツ林に2019年から温度計と魚眼レンズのタイムラプスカメラを設置して、気温を10分間隔で測定するとともに、地上から樹冠を撮影した画像を1日4回の頻度で撮影した。カメラの主な設定は、撮影モードを絞り優先モード(A)、絞り値をf8、ISO感度の制御上限感度を1600、ホワイトバランスを曇天に設定した。得られた画像は、ドーム窓

表1.1 本研究のカラマツ林観測サイトの位置、標高、林齢、年平均気温、年降水量、電源の有無。

観測サイト名	略称	北緯	東経	標高	林齢	年平均 気温	年降水量	電源
筑波大学川上演習林	川上	35° 55' 26"	138° 30' 1"	1559 m	47年	6.6°C	1429 mm	なし
筑波大学八ヶ岳演習林	八ヶ岳	35° 57' 12"	138° 27' 19"	1418 m	65年	7.0°C	1465 mm	なし
筑波大学菅平高原実験所	菅平	36° 31' 25"	138° 20' 50"	1348 m	60-70年	6.6°C	1343 mm	なし
長野県環境保全研究所飯綱庁舎	飯綱	36° 43' 31"	138° 9' 13"	1030 m	60-70年	8.3°C	1551 mm	あり
長野県林業総合センター	林総セ	36° 8' 27"	138° 0' 0"	888 m	60-70年	10.3°C	1218 mm	なし

への雨滴や落ち葉の付着の有無などを確認してスクリーニングし、植生画像解析ソフトLIA for Win32により、植物体(葉、枝、幹)と非植物体(間隙)に分ける二値化処理をして日々の植物面積指数(PAI; 葉面積に幹・枝面積を加えた指数)を計算した。展葉開始や落葉完了をPAIから評価する際は、まず、日々の観測条件に応じたPAIのばらつきを小さくするため、5日間移動平均をとった。この5日間移動平均したPAIが、7日以上連続で上昇する最初(最後)の日を展葉開始(完了)日、7日以上連続で減少する最初(最後)の日を落葉開始(完了)日と定義した。展葉や落葉の支配因子である積算気温の導出方法に関しては、Nagai et al. (2015)に基づいて、展葉季は日平均気温(T_a)が 2°C 以上の日の (T_a-2) の積算、落葉季は T_a が 18°C 以下の日の (T_a-18) の積算とした。これらの観測・解析から葉群フェノロジーと積算気温の関係式を表1.1の5つのカラマツ林について評価し、Nagai et al. (2015)が衛星観測による植生指数GRVI (Green Red Vegetation Index)に基づいて評価した葉群フェノロジーと積算気温の関係式と比較して、気象観測点が少ない標高1000 m以上の地域を中心に精度を検証した。また、長野県環境保全研究所飯綱庁舎(以下、飯綱)においては、手でLAI-2200によるPAIの観測と、ドローンによる空撮を実施し、空撮画像から2種類の植生指数(GRVIとGEI (Green Excess Index))を計算して、それぞれの季節変化を解析した。これにより、タイムラプスカメラの画像解析によるPAIとLAI-2200によるPAIの整合性を確認するとともに、GRVIとGEIの季節変化の特徴や葉群フェノロジーを評価する上での課題点について検討した。

サブテーマ2では、飯綱のカラマツ林の林床に $1\text{m}\times 1\text{m}$ のプロットを6箇所作成し、土壌呼吸の各構成要素を測定するために、1つのプロットあたりにコントロール区、根除去区、根・菌糸除去区の3種類の土壌カラー(土台:直径12 cmの円柱)を設置した(図2.1)。コントロール区は、塩ビ管(半径5.5 cm、長さ10 cm)を土壌表層のリター層の上から挿入し、地表面に到達するまで押し込んだ。根除去区は塩ビ管(半径5.5 cm、長さ10 cm)の下に長さ30 cmで $50\ \mu\text{m}$ の穴が開いたメッシュシートの筒を巻き付け、根は通さないが水や菌糸および微生物は侵入できる区とした。根・菌糸除去区は、塩ビ管(半径5.5 cm、長さ40 cm)を用いて、外からの侵入がないものである。出入りする生物はないが、土壌微生物が中に生息しているため、微生物のみの活動を評価することができる。土壌呼吸速度の測定の際には、土壌カラーの上にチャンバーを被せて5分間密閉することで、土壌カラー内の CO_2 濃度は土壌から放出された CO_2 により上昇するので、これを赤外線ガス分析計(GMP343, Vaisala, Helsinki, Finland)で測定する。土壌カラー内の CO_2 濃度の上昇率から土壌呼吸速度を計算することができ、各構成要素の呼吸速度は3種類の土壌カラーの差分から算出した。

土壌呼吸 = コントロール区の値

根呼吸 = コントロール区の値 - 根除去区の値

菌糸呼吸 = 根除去区の値 - 根・菌糸除去区の値

微生物呼吸 = 根・菌糸除去区の値

土壌の各構成要素の呼吸速度の温度感受性の指標である Q_{10} (任意の土壌温度から 10°C 上昇した時の土壌呼吸の増加率)は、観測された各構成要素の呼吸速度(R_s)や土壌温度(T_s)に基づいて、次の Q_{10} モデル式で計算した。

$$Q_{10} = \left(\frac{R_s}{R_1}\right)^{\frac{10}{T_s - T_1}}$$

R_s と R_1 は、それぞれ温度 T_s と T_1 の時($T_s > T_1$)の呼吸速度を示す。土壌の各構成要素の呼吸速度と土壌含水率との関係については、相関関係を解析して回帰分析を行った。

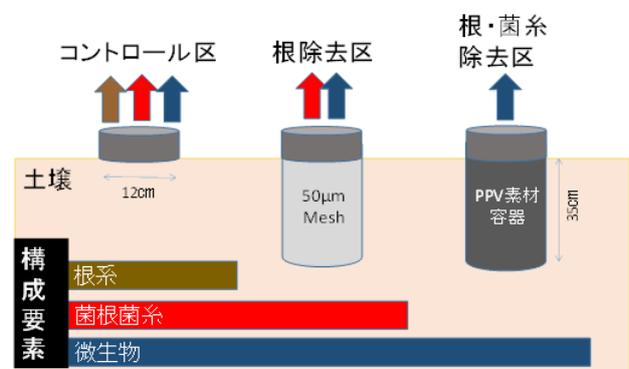


図2.1 土壌呼吸分離実験の概要図。土壌カラー側面の素材として $50\ \mu\text{m}$ メッシュ穴、孔穴無しのPPV素材を用いて、コントロール区、根除去区、根・菌糸除去区の3種類の処理区を設置。

サブテーマ3では、サブテーマ1から提供された地上観測に基づく葉群フェノロジーと積算気温の関係式、およびサブテーマ2から提供された土壌呼吸速度の温度感受性の指標 Q_{10} を陸域生態系モデルVISIT (Vegetation Integrated Simulator for Trace gases)に組み込む。まずは、このVISITで計算される炭素収支の再現精度を検証する必要があるが、このためには70年程度の気候再現計算が必要になる。そこで、気象庁55年長期再解析データ(JRA55)を非静力学地域気候モデルNHRCM (Non-Hydrostatic Regional Climate Model)の境界条件に用いて本州全体を5 km格子で1980~2015年の36年分計算した気候再現計算結果から、長野県の隣県である山梨県の富士北麓フラックス観測サイト(以下、富士北麓)について日別値を切り出した。このデータを繰り返し連結する形で1979年以前の気象データを補完し、疑似的な長期気候再現計算値を作成した。本来は全ての計算期間について、高解像度気候データがあることが望ましいが、50年を超える高解像度計算には膨大な計算負荷がかかるため、このような手法としている。この長期気候再現計算値をVISITに入力して、富士北麓のカラマツ林を対象に炭素収支の再現計算を実施し、渦相関法によるフラックス観測に基づいて推定された総光合成量(GPP: CO_2 吸収量)、生態系呼吸量(ER: CO_2 放出量)、生態系純生産量(NEP: CO_2 吸収量- CO_2 放出量)とモデル計算値を比較した。VISITによる富士北麓の炭素収支の再現計算では、スピナップを2000年分とり、本計算の期間は1948~2015年として、カラマツ人工林の造林を開始した年は1950年に設定した。また、VISITのフェノロジースキームにNagai et al. (2015)の衛星観測に基づく葉群フェノロジーと積算気温の関係式を組み込んだ場合の炭素収支の再現計算も実施し、地上観測に基づく関係式を組み込んだ場合と衛星観測に基づく関係式を組み込んだ場合で、フラックス観測値と各計算値との整合性がどの程度異なるのかも検討した。

VISITの炭素収支の再現精度が検証されたら、高解像度気候予測値を入力して炭素収支の将来予測を行う。高解像度気候予測値は、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)の計算結果(20 km格子)をNHRCMの境界条件に使用して、長野周辺地域を1 km格子まで力学的にダウンスケールしたデータとした。NHRCMでは、20世紀末から21世紀初頭の気候を対象にした”過去”と、21世紀中頃の気候を対象にした”産業革命前+2°C上昇時”の2つの時代について、それぞれ15年分ずつ1 km計算がされているので、各時代の計算結果を繰り返し連結する形で疑似的な長期気候データを作成し、VISITへの入力気象値とした。すなわち、VISITで各時代の炭素収支を計算する際には、気候は定常状態を仮定している。飯綱のカラマツ林を対象にVISITで炭素収支の過去計算、将来計算、感度計算をする際は、表3.2に示した気候、大気 CO_2 濃度、間伐・植林の有無を制御した数値計算を実施し、各計算の差分に基づき2050年頃の炭素収支の将来変化、それに対する CO_2 施肥と気候変動の各効果の寄与、および間伐・植林の効果それぞれを評価した。過去計算における本計算の期間は1948~2010年に設定し、将来計算や感度計算における本計算の期間は1948~2050年に設定して、いずれの計算においてもスピナップは2000年分とり、カラマツ人工林の造林を開始した年は1958年に設定した。大気 CO_2 濃度はRCP8.5シナリオに基づく値を使用した。大気 CO_2 濃度が

「過去」の場合は、2010年以降は389 ppmで固定し、「将来」の場合は2050年の値(541 ppm)まで漸増させた。なお、漸増といっても2030年は449 ppmで、2050年に向かって加速度的に増加している。間伐・植林の感度計算は、2020、2025、2030、2035、2040、2045年のいずれかのタイミングで、間伐率50%の間伐とカラマツ植林、皆伐とカラマツ植林、皆伐とスギ植林、のいずれかを1回施業して、2050年時点の炭素収支を比較することで、2050年カーボンニュートラルに向けた森林管理として最適な施業方法と施業時期を評価した。間伐・植林の感度計算でスギを植林する場合に

表3.2 VISITによる炭素収支計算のデザイン。

計算	気候	CO_2 濃度	間伐・植林
過去計算(CTL)	過去	過去	なし
将来計算(FUT)	将来	将来	なし
感度計算(SEN_{Fclim})	将来	過去	なし
感度計算(SEN_{FCO_2})	過去	将来	なし
感度計算(SEN_{PL})	将来	将来	あり

$$\text{将来変化} = \text{FUT} - \text{CTL}$$

$$CO_2 \text{施肥効果} = \frac{(\text{FUT} - \text{SEN}_{Fclim}) + (\text{SEN}_{FCO_2} - \text{CTL})}{2}$$

$$\text{気候変動効果} = \frac{(\text{FUT} - \text{SEN}_{FCO_2}) + (\text{SEN}_{Fclim} - \text{CTL})}{2}$$

$$\text{植林効果} = \text{SEN}_{PL} - \text{FUT}$$

は、VISIT内の光合成や呼吸に関する生理生態パラメーターを隣県である岐阜県の高山常緑針葉樹林フラックス観測サイトでチューニングされた値に変更し、カラマツを植林する場合には、各パラメーターは変更しない。なお、地球温暖化対策計画の中期目標を念頭に置いた2030年時点の炭素収支についても森林管理の効果を評価したが、詳細はⅡ-3章に記載し、本章では2050年を対象に計算した結果の概要のみを示す。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

サブテーマ1で実施した飯綱におけるタイムラプスカメラやLAI-2200、ドローンを用いた地上観測では、カラマツ林の展葉開始から落葉完了までの様子を詳細に捉えることができた。展葉や落葉のタイミングと積算気温の関係を評価した結果、日平均気温 2°C 以上の日の積算値(T_a-2)が $150\sim 155$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$)で展葉開始、 $335\sim 381$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$)で展葉完了となり、日平均気温 18°C 以下の日の積算値(T_a-18)が $-248\sim -128$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$)で落葉開始、 $-444\sim -385$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$)で落葉完了となった。展葉の方が落葉に比べて年によるばらつきが小さく、展葉の方が落葉に比べてより敏感に気温に応答している可能性が示された。また、タイムラプスカメラやLAI-2200で捉えたPAIの季節変化とドローンの空撮画像から評価した植生指数(GRVIとGEI)の季節変化は概ね整合的であるが、GRVIはPAIやGEIに比べて落葉季により早い時期から値が低下した。GRVIはGEIに比べて緑バンドの画素値に対する感度が低いので、葉が黄葉してから葉が全て落ちる落葉季には、黄葉の影響を受けて値が低下すると考えられる。このため、GRVIの季節変化に基づいて落葉開始日や落葉完了日を評価すると、実際よりも落葉を早く検出してしまう可能性が示された。

タイムラプスカメラの樹冠画像から解析したPAIの季節変化に基づいて葉群フェノロジーと積算気温の関係式を表1.1の5つのカラマツ林について評価し、Nagai et al. (2015)が衛星観測によるGRVIに基づいて評価した葉群フェノロジーと積算気温の関係式と比較した結果を図1.8に示す。展葉開始日については、地上観測の方が衛星観測に比べて標高に応じたばらつきが大きいものの、落葉完了日に比べると整合性のある結果となった(図1.8)。落葉完了日については、どの標高帯も地上観測の方が衛星観測に比べて $120\sim 300$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$)低く、展葉開始日に比べると地上観測と衛星観測の違いが顕著に表れた。衛星観測の場合、GRVIの変化から展葉開始日や落葉完了日を捉えているので、黄葉の影響で実際よりも落葉完了日を早く検出し、(T_a-18)の積算値が高い値になっている可能性がある。一方、地上観測の場

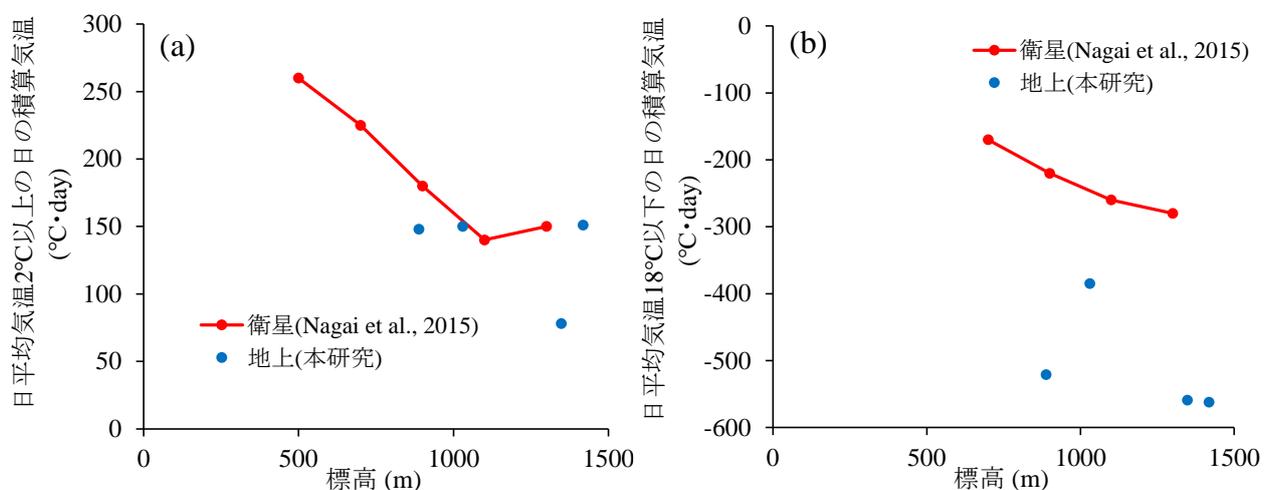


図1.8 本研究の地上観測とNagai et al. (2015)²⁾の衛星観測に基づいて評価された標高帯別の葉群フェノロジーと積算気温の関係に関する比較。(a)展葉開始日と日平均気温 2°C 以上の日の積算気温の関係。(b)落葉完了日と日平均気温 18°C 以下の日の積算気温の関係。

合は、PAIの変化から落葉完了日を捉えているので、黄葉による色の変化の影響は受けず、より正確に落葉完了日を捉えることができると考えられる。

サブテーマ2で実施した飯綱のカラマツ林における土壌の各構成要素の呼吸速度の観測からは、各要素が土壌呼吸に占める割合や季節変化の特徴の違いなどが明らかとなった。まず、土壌の各構成要素の土壌呼吸に対する年平均寄与率は、根呼吸が42%、菌糸呼吸が6%、微生物呼吸が52%だった。基本的には、どの構成要素も夏季の土壌温度が高い時期に呼吸速度が上昇する季節変化を示したが、根呼吸は7月から急激に呼吸速度が増加し、8月をピークに徐々に低下していく季節変化を示したのに対し、微生物呼吸は春季や秋季も比較的高い値を示し、根呼吸に比べると季節変化が小さかった。土壌の各構成要素の呼吸速度と土壌温度の関係を解析すると、 Q_{10} は菌糸呼吸が最も高く5.18となった(図2.4)。これは、菌糸呼吸は土壌呼吸に占める割合が6%でも温度感受性が高いので、将来、土壌温度が上昇すると土壌呼吸に占める割合がより増加する可能性があることを示唆している。一方、根呼吸の Q_{10} は3.84、微生物呼吸の Q_{10} は1.86で、全要素を含む土壌呼吸の Q_{10} は2.71だった。土壌呼吸の Q_{10} は先行研究で示された他のカラマツ林の Q_{10} と比べてやや高めであるが、より高い値を示した研究もあり、飯綱のカラマツ林は先行研究のカラマツ林と近い生態的な特徴を持つことが示唆される。土壌の各構成要素の呼吸速度と土壌含水率の関係を解析すると、どの要素も弱い負の相関を示したが、ばらつきが大きく、決定係数は低かった。このことから、飯綱のカラマツ林においては、土壌温度の方が土壌含水率よりも呼吸速度に強く影響していると考えられる。

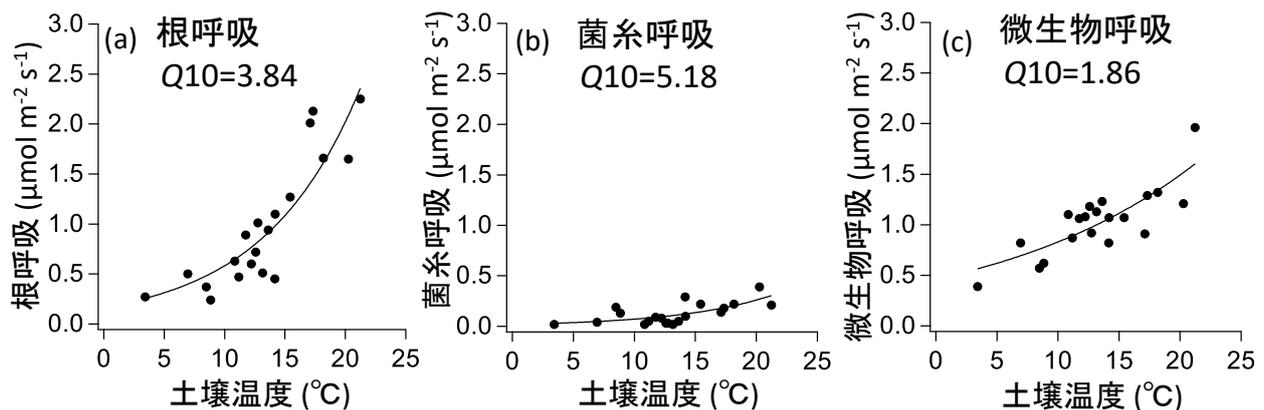


図2.4 飯綱のカラマツ林における(a)根呼吸、(b)菌糸呼吸、(c)微生物呼吸、と土壌温度の関係。図中には温度感受性の指標である Q_{10} 値を示している。

サブテーマ1とサブテーマ2から提供された葉群フェノロジーと積算気温の関係式や土壌呼吸速度の Q_{10} をVISITに組み込み、富士北麓フラックス観測サイトを対象にGPP、ER、NEPの再現計算を実施し、フラックス観測に基づく各推定値と比較した。この結果、どの要素も地上観測に基づく葉群フェノロジーと積算気温の関係式をVISITに組み込んだ方が、衛星観測に基づく関係式を組み込むよりも計算精度が高いことが示された。NEPの季節変化に着目すると、展葉季は地上観測と衛星観測のどちらのフェノロジー式を組み込んでもVISITはNEPが増加するタイミングを再現できているが、落葉季は衛星観測に基づくフェノロジー式を組み込むとVISITはNEPを過小評価するのに対し、地上観測に基づくフェノロジー式を組み込むとVISITはNEPが低下するタイミングを再現できている(図3.4c)。これは、サブテーマ1で指摘しているように、衛星観測に基づく葉群フェノロジーはGRVIに基づいて評価されているため、落葉季は黄葉の影響で実際よりも落葉を早く検出してしまう傾向がNEPの計算値に反映されたと考えられる。従って、地上観測に基づく葉群フェノロジーと積算気温の関係式を組み込んだVISITの方が炭素収支の再現性は高いと判断できる。

VISITで飯綱のカラマツ林の炭素収支を予測した結果、将来(2050年頃)は過去(2010年頃)に比べてGPP

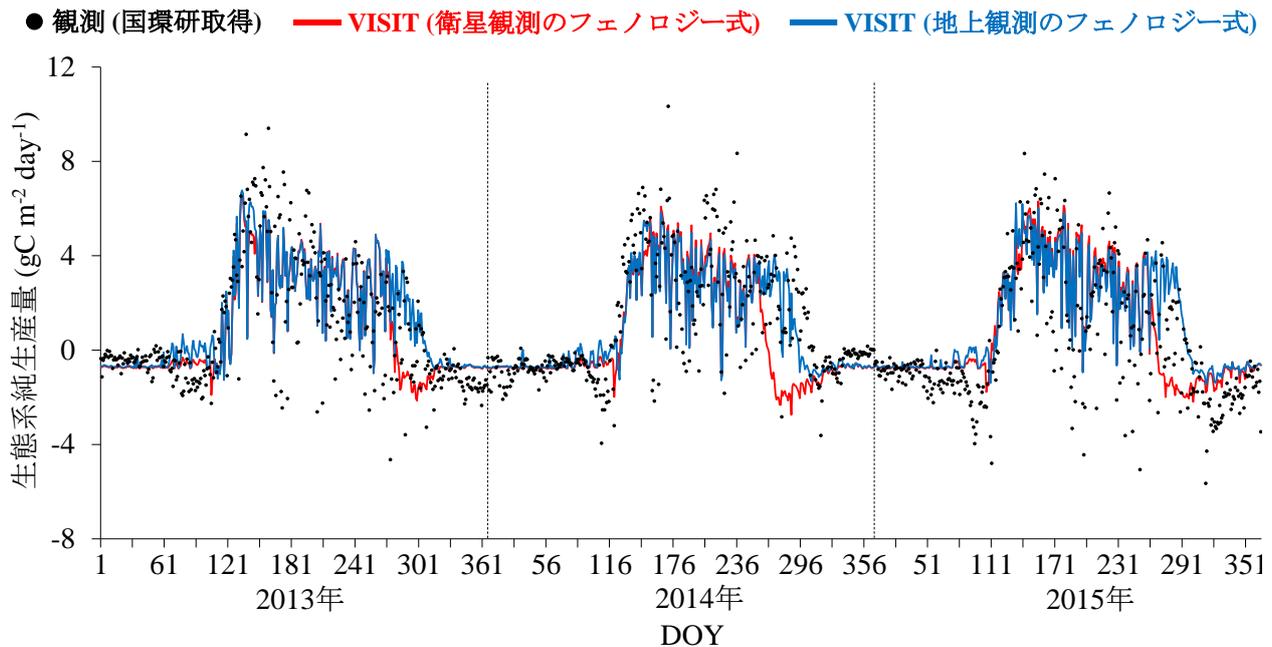


図3.4(c) 富士北麓フラックス観測サイトにおける生態系純生産量(NEP)の観測に基づく推定値とVISITによる計算値の比較。DOY (Day of year)は1月1日からの日数。

が21.6%、ERが26.1%、NEPが6.5%、それぞれ増加した。2050年頃にはカラマツ林の林齢が100年生近くに達するにも関わらずNEPが増加した理由として、気候変動に伴う光合成可能期間の長期化と大気CO₂濃度の上昇に伴う施肥効果が挙げられる。これらの寄与を月別に評価すると、CO₂施肥効果はカラマツが盛んに光合成をする5~9月に正の値を示したが、葉が着いていない月は僅かながら負の値を示した(図3.6d)。この負の値の原因として、植物体の成長に伴う維持呼吸量の増加が考えられる。気候変動効果は展葉季と落葉季に正の値を示したが、他の時期は6~9月を中心に負の値を示した(図3.6d)。これは、気候変動は光合成可能期間を延ばして展葉季と落葉季のGPPを増加させる反面、暑い時期ほど大きくERも増加させることを反映している。また、展葉季の方が落葉季よりも気候変動効果が大きいのは、日長の違いや葉の光合成能力の違いを反映していると考えられる。この解析により、年間のNEPの+6.5%の将来変化量の内訳は、CO₂施肥効果が4.6%で、気候変動効果が1.9%であることが明らかになった。

森林管理が2050年の飯綱のカラマツ林の炭素収支にもたらす効果について解析した結果、何もしない場合、2050年のNEPは3.9 (Mg C ha⁻¹ y⁻¹)であるが、2020~2045年に間伐率50%の間伐を実施してカラマツを植林すると2050年のNEPは1.13~1.41倍に増やすことができ、2020~2045年に皆伐してカラマツを植林すると、2050年のNEPは1.28~1.72倍に増やすことができる(図3.7f)。皆

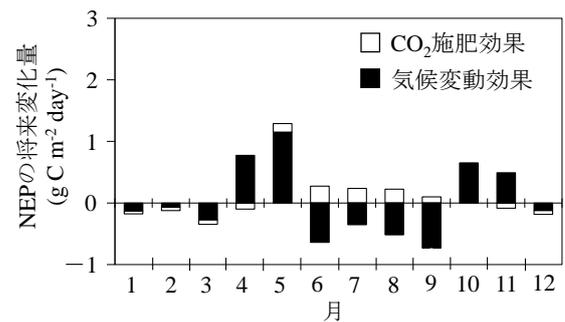


図3.6(d) 生態系純生産量(NEP)の将来変化量に寄与する各月のCO₂施肥効果と気候変動効果。

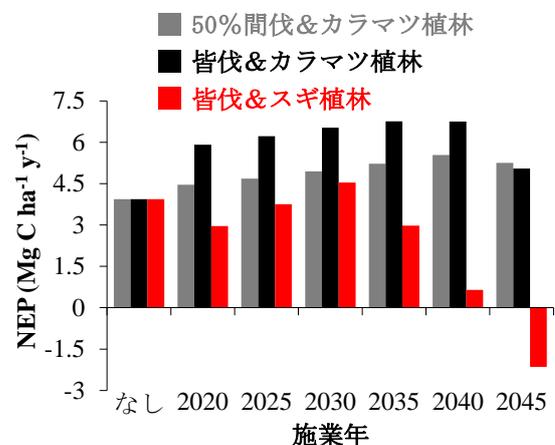


図3.7(f) 間伐・植林が2050年の生態系純生産量(NEP)に与える効果。

伐とカラマツ植林の施業時期は2035～2040年が最も効果的であるが、2045年以降に施業する場合には、皆伐してカラマツを植林するよりも間伐率50%の間伐をしてカラマツを植林する方が2050年のNEPを高める上で効果的である。一方、皆伐してスギを植林する場合、2030年に施業すれば、何もしない場合に比べて2050年のNEPを1.15倍に増やすことができるが、2025年以前や2035年以降の施業になると何もしない場合よりも2050年のNEPは低下することが示された(図3.7f)。これらの結果は、2050年カーボンニュートラルを念頭に置くと、飯綱と同じような気候条件の地域では2040年までに皆伐してカラマツを植林することが、2050年の正味の森林CO₂吸収量を増やす上で最も効果的な森林管理の方法であることを意味する。また、もしスギを植林する必要がある場合には、施業年を2030年にするすることで、2050年の正味の森林CO₂吸収量を確保でき、もし施業時期が2045年以降になる場合には、皆伐よりも間伐率50%の間伐を施業する方が2050年の正味の森林CO₂吸収量を増やす上で有効であることが評価された。ただし、飯綱よりも標高が低く暖かい地域のカラマツ林においては、産業革命前+2℃の水準まで気候変動が進行するとカラマツよりもスギの方がよく成長し、2050年のNEPを高める可能性があり、標高に応じた森林管理の炭素収支に対する効果の違いを評価することが今後の課題である。また、現在のペースで気候変動が進行すると21世紀末には産業革命前+4℃の水準まで気温が上昇すると考えられている。仮にパリ協定の長期目標が達成されず、21世紀末まで気温が上昇し続ける場合には、標高1000 m程度の地域においても21世紀末まで積算した森林CO₂吸収量としてはカラマツよりもスギの方が大きくなる可能性はあり、シナリオに応じた長期的な評価も今後の課題である。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

本研究の成果は、長野県林務部の信州の木活用課や長野県林業総合センターと共有し、林業従事者や市民ボランティアによる森林管理を支援する研究成果として評価されており、長野県林業総合センター基本計画(2021年3月発行)の「持続可能な形でのゼロカーボン施策の推進(p39～40)」に、気候変動に対応した森林の評価が盛り込まれた。また、同計画に長野県環境保全研究所との連携が初めて明記され、長野県における2050ゼロカーボンを念頭に置いた気候変動対策と林業の共便益を実現するための部局間連携事例の構築に貢献した。

本研究の成果は、長野県環境部の環境政策課と共有し、2021年に策定予定の長野県ゼロカーボン戦略の基礎資料として活用されている。本研究の結果と過去の長野県の森林CO₂吸収量の実績から、2050年のカラマツ人工林のCO₂吸収量を森林管理の有無に応じて試算したことで、長野県ゼロカーボン戦略(2021年6月策定)の「政策の重点方針(p33～36)」に、CO₂吸収量の増加に向けた森林整備が盛り込まれた。また、2050年の森林のCO₂吸収量の目標値には、2018年実績よりも8.7%多い200万t-CO₂が掲げられた。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

本研究の成果は、長野県環境科学技術者協議会報130号に研究報告(栗林・尾関(2021))として掲載され、長野県の環境関係の業務に携わる技術者に2050ゼロカーボンを実現する上での森林管理の重要性を発信するとともに、同研究報告を林業関係の企業組合にも提供した。また、国立環境研究所が主催する全国環境研究所交流シンポジウムでも2回講演するなど、国立環境研究所や他県の職員にも広く成果を発信した。さらに、本研究の成果に基づいて2本の査読付き論文を執筆中であり、地域特性を生かした気候変動緩和策・適応策の事例研究として国際的に成果を発信していく予定である。これらの活動により、長野県のカラマツ人工林における主伐・再生林の促進や岩手県や北海道のカラマツ人工林への研究成果の応用などが期待され、ひいては我が国の地球温暖化対策計画の中期目標に掲げられた森林のCO₂吸収量の確保や2050年カーボンニュートラルに多少なりとも貢献することが期待される。

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標に記載した将来の高温・高CO₂濃度環境下におけるカラマツ人工林の炭素収支の高精度予測は、サブテーマ1と2の地上観測に基づく知見をサブテーマ3で陸域生態系モデルに組み込むことで炭素収支の計算精度を向上させたこと、および、サブテーマ3でd4PDFをベースに力学的手法で1 km格子まで高解像度化したアンサンブル気候予測値を陸域生態系モデルの入力に用いて炭素収支の予測を行ったことで達成された。特に、長野県は複雑地形に特徴づけられており、従来の気候予測値では困難だった山岳域のカラマツ人工林を対象にした炭素収支の気候変動応答が本研究で評価され、2050年にはカラマツ人工林の林齢が100年生近くに達するにも関わらず炭素収支は僅かながら増加するという知見を得た点に科学的意義がある。また、この将来のカラマツ人工林における炭素収支の増加について、サブテーマ3では陸域生態系モデルの感度解析によりCO₂施肥効果と気候変動効果に分けて定量的な寄与評価を行い、2050年の炭素収支の増加分にはCO₂施肥効果の方が気候変動効果よりも強く影響しているという新しい知見を得た。この結果には、カラマツが落葉樹であるという他の林業樹種にない生態的な特性を持つこと、および、カラマツ林の土壌の温度感受性Q₁₀が他の林業樹種の土壌に比べて高めであること、が重要な意味を持っており、サブテーマ1と2の各目標がきちんと達成されなければ、CO₂施肥効果と気候変動効果の定量的な寄与評価も達成し得なかった。

全体目標に記載した緩和策・適応策として効果的な森林管理の方法の提示に関しては、サブテーマ3の間伐や樹種転換が将来の森林に与える効果の定量的な評価が合致し、2050年の炭素収支を最も高めることができる効果的な間伐・植林のタイミングと植林する樹種をシミュレーションしたことにより、この目標も達成された。本研究の結果からは、標高1000 m程度に立地するカラマツ人工林は、2040年までに主伐・再造林することが緩和策・適応策として効果的な森林管理の方法と解釈することができるが、より標高の低い地域に立地するカラマツ人工林に関してはスギへの樹種転換も有効な緩和策・適応策になる可能性があり、標高や緯度帯に応じた予測・評価は今後の課題である。本研究の成果は、長野県ゼロカーボン戦略の基礎資料として活用され、全体目標に記載した長野県の2050ゼロカーボンの支援は達成できたと考えられる。また、長野県の2050ゼロカーボンへの取り組みを通じて、我が国の地球温暖化対策計画の中期目標に挙げられたCO₂吸収量の確保に多少なりとも貢献できると思われ、「3. 研究目標」に掲げた内容は概ね達成された。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

1件

<主な査読付き論文>

Naoki Makita, Roma Fujimoto, Azusa Tamura (2021) The contribution of roots, mycorrhizal hyphae, and soil free-living microbes to soil respiration and its temperature sensitivity in a larch forest. *Forests*, 12(10), 1410, <https://doi.org/10.3390/f12101410>.

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
----------------	----

その他誌上発表（査読なし）	4件
口頭発表（学会等）	20件
「国民との科学・技術対話」の実施	11件
マスコミ等への公表・報道等	1件
本研究に関連する受賞	2件

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究者略歴

研究代表者

栗林 正俊

筑波大学生命環境科学研究科修了、環境学博士、岐阜大学流域圏科学研究センター学術研究補佐員、九州大学応用力学研究所学術研究員、現在、長野県環境保全研究所自然環境部研究員

サブテームリーダー

牧田 直樹

京都大学大学院農学研究科博士課程修了、博士（農学）、森林総合研究所日本学術振興会特別研究員PD、現在、信州大学理学部助教

II. 成果の詳細

II-1 カラマツ林の葉面積指数の連続観測による衛星のフェノロジー観測の検証

サブテマリーダー

長野県環境保全研究所

自然環境部 温暖化対策班

栗林 正俊

研究協力者

国立環境研究所

生物・生態系環境研究センター

小熊 宏之

長野県環境保全研究所

自然環境部 温暖化対策班

尾関 雅章

[要旨]

カラマツ林の炭素収支を予測する上で、展葉・落葉のタイミングを正確に評価して陸域生態系モデルに組み込むことは重要である。衛星観測に基づいて標高帯に応じた葉群フェノロジーと積算気温の関係を評価した先行研究があるが、高標高地域における結果は気象データが乏しいため、地上観測に基づき検証する必要がある。そこで、本研究では長野県内の標高850~1500 mの5つのカラマツ林にタイムラプスカメラと温度計を設置して、各標高における葉群フェノロジーを植物面積指数(PAI)の季節変化に基づき評価し、展葉・落葉のタイミングと有効積算気温の関係を解析した。また、得られた関係式を既往研究で示された衛星観測に基づく関係式と比較・検証した。この結果、展葉季は地上観測と衛星観測に基づく関係式はある程度整合していたのに対して、落葉季は地上観測に比べて衛星観測に基づく関係式の方が顕著に落葉完了日を早く評価していた。この原因として、衛星観測は植生指数(GRVI)に基づいて展葉開始日や落葉完了日を定義しているの、秋季は落葉だけでなく黄葉がGRVIの変化に影響を与えている可能性が示唆された。また、地上観測の結果は、葉群フェノロジーと積算気温の関係に地域間のばらつきがあり、特に落葉季は展葉季に比べて地点間のばらつきが大きく、気温以外の要因も落葉に影響している可能性が示唆された。

1. 研究開発目的

将来の高温・高CO₂濃度下におけるカラマツ人工林の炭素収支を予測する上で、光合成によるCO₂吸収量を高精度に評価することは非常に重要である。カラマツは落葉樹であるため、着葉期間に集中して光合成を行うことから、展葉・落葉のタイミングを正確に予測することが、光合成によるCO₂吸収量を高精度に評価する上で不可欠である。この展葉・落葉は生物季節(フェノロジー)の一種で、カラマツの葉群フェノロジーは有効積算気温に明敏に応答することが知られている¹⁾。有効積算気温とは、ある閾値を超えた気温の積算値のことで、これがある一定の値に達した時に展葉・落葉が生じる。長野県美ヶ原の標高600~2000 mに広がるカラマツ林で12年間に渡って観察を続けた研究によると、カラマツの展葉における閾値は日平均気温で2℃か3℃で、2℃の方が辛うじて優位とされている反面、落葉については3~17℃で仮閾値を設定して計算したが、明らかな結果は得られなかったとされている¹⁾。また、TerraとAquaの人工衛星に搭載された可視・赤外域の放射計MODISにより各画素の植生指数GRVI (Green Red Vegetation Index)を算出して、展葉開始日と落葉完了日を推定し、展葉に関する閾値を2℃、落葉に関する閾値を18℃と設定して有効積算気温を計算した研究では、緯度帯・標高帯に応じて展葉開始や落葉完了に必要な有効積算気温が異なることを示している²⁾。すなわち、この研究では高緯度や高標高域のような寒冷な地域の方が温暖な地域に比べて展葉開始や落葉完了に必要な有効積算気温は低いことが示

されている。この衛星観測に基づく知見を陸域生態系モデルに組み込むことで、カラマツ林の炭素収支の高精度な広域評価に応用できる可能性がある。しかしながら、この衛星観測による先行研究では有効積算気温の算出に気象庁のアメダスのデータを利用しており、アメダスは標高1000 m以上に地域には少なく、少数の観測点の値を平均して計算される積算気温は、実際にカラマツ林が分布する場所の積算気温からずれるリスクが高い。このため高標高地域における結果は、陸域生態系モデルに組み込む前に、まずは地上観測に基づくカラマツ林の葉群フェノロジーと積算気温の関係と比較・検証する必要がある。そこで、本課題のサブテーマ1はカラマツの展葉・落葉のタイミングと積算気温の関係を地上観測に基づいて評価し、既往研究で示された衛星観測に基づく関係式と比較・検証しつつ、サブテーマ3に得られた関係式を提供して、カラマツ林の光合成によるCO₂吸収量のモデル計算精度の向上に貢献することを目的とする。また、この目的に付随して、林内と林外の気象条件の違い、および、植物面積指数(PAI; 葉面積に幹・枝面積を加えた指数)や植生指数の季節変化の特徴についても解析・考察するとともに、取得した気象観測値や土壌データはサブテーマ2と共有する。

2. 研究目標

標高850～1500mの5箇所のカラマツ林にタイムラプスカメラと温度計を設置し、標高に応じた葉群フェノロジーと積算気温の関係の違いを評価して、衛星観測に基づく既往研究の結果を検証する。また、地上観測に基づく葉群フェノロジーと積算気温の関係式をサブテーマ3に提供する。

3. 研究開発内容

3-1. 地上観測サイト

環境省植生図に基づく長野県周辺の各林業樹種の空間分布図からは、長野県では比較的標高の低い地域にアカマツ、標高の高い地域にカラマツが分布していることが見てとれる(図1.1)。地上観測サイトは、表1.1に示した標高が異なる5つのカラマツ林とした。各観測サイトの写真を図1.2に示す。これらの観測サイトのうち、長野県

環境保全研究所飯綱庁舎(以下、飯綱)のカラマツ林は2018年に電源工事を実施して、自動気象観測機器やタイムラプスカメラを設置するとともに、サブテーマ2の土壌呼吸に関する観測機器も設置して、本課題のコアサイトとした。

飯綱の観測サイトは、飯縄山(標高1917 m)の中腹の南東向きの緩やかな斜面上に位置し、周囲には高原状の小起伏火山麓斜面が発達し、周辺の植生は林床にクマイザサが密生したカラマツ人工林である。カラマツの林齢は60～70年生で、2009年に間伐(本数調整伐)が行われたが、植林はされていない³⁾。この本数調整伐は事業地全体での間伐率32%

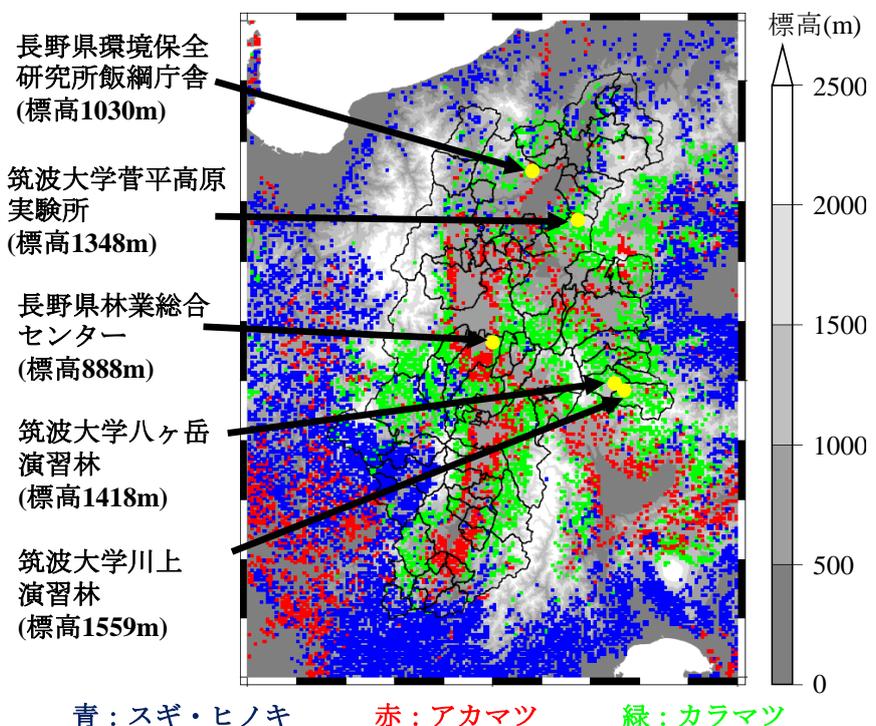


図1.1 環境省植生図に基づく長野県周辺の各林業樹種の空間分布と地上観測サイトの位置(黄色い点)。シェードは標高、黒線は県境界と市町村境界。

表1.1 本研究のカラマツ林観測サイトの位置、標高、林齢、年平均気温、年降水量、電源の有無。

観測サイト名	略称	北緯	東経	標高	林齢	年平均 気温	年降水量	電源
筑波大学川上演習林	川上	35° 55' 26"	138° 30' 1"	1559 m	47年	6.6°C	1429 mm	なし
筑波大学八ヶ岳演習林	八ヶ岳	35° 57' 12"	138° 27' 19"	1418 m	65年	7.0°C	1465 mm	なし
筑波大学菅平高原実験所	菅平	36° 31' 25"	138° 20' 50"	1348 m	60-70年	6.6°C	1343 mm	なし
長野県環境保全研究所飯綱庁舎	飯綱	36° 43' 31"	138° 9' 13"	1030 m	60-70年	8.3°C	1551 mm	あり
長野県林業総合センター	林総セ	36° 8' 27"	138° 0' 0"	888 m	60-70年	10.3°C	1218 mm	なし

であったが、この7年前の2002年に2つの調査区(40 m×40 m)を設けて毎木調査が行われている⁴⁾。調査区Aは林齢が68年(2018年時点)で間伐率は33%、調査区Bは林齢が61年(2018年時点)で間伐率は41%と、調査区AとBで間伐率に8%の差があり、2018年に16年ぶりに毎木調査を実施して間伐強度の高い調査区Bの方が有意にカラマツの直径成長量が大きいことが確認されている³⁾。土壌は表層にカラマツなどのリター、その下は火山灰質粘性土であり、表層から約60 cm深まで(A層)は比較的有機物が多い⁵⁾。年平均気温は8.3°Cで、最も暑い7、8月でも月平均気温が22°C程度である。また、年降水量は1551 mmで、梅雨と秋雨の時期に極大をとる季節変化をし

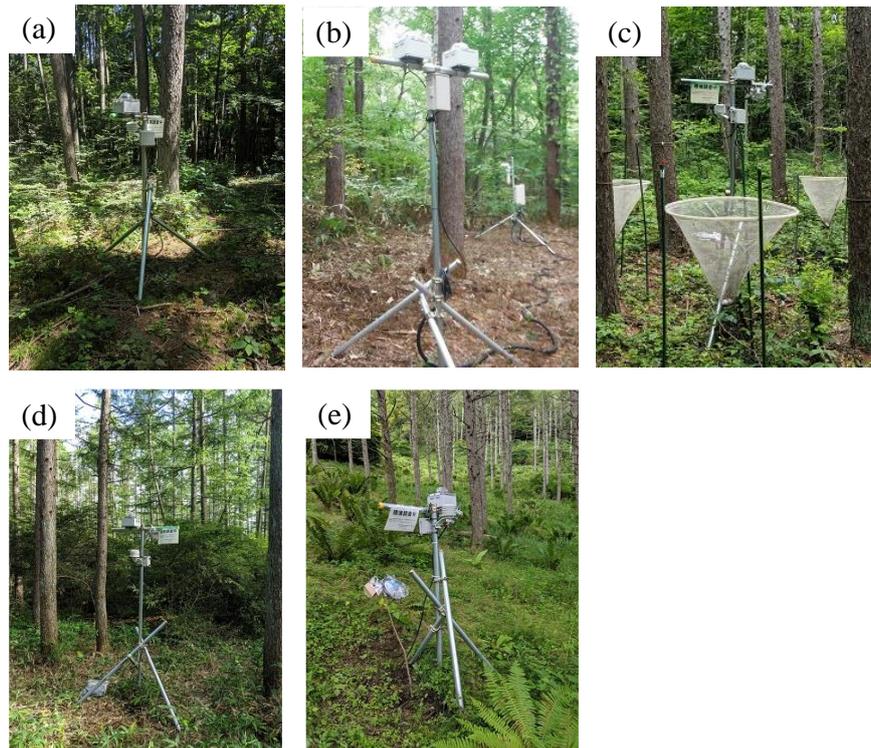


図1.2 各観測サイトの写真。(a)長野県林業総合センター、(b)長野県環境保全研究所飯綱庁舎、(c)筑波大学菅平高原実験所、(d)筑波大学八ヶ岳演習林、(e)筑波大学川上演習林。

ているが、冬季も一定量の降水があり12月から3月は積雪に覆われる。また、年最深積雪は100 cmを超えることもしばしばあり、月平均気温が氷点下となる冬季も地温は0°C以下にならない⁵⁾。

飯綱を除く4つのカラマツ林については、概要のみ記載する。長野県林業総合センター(以下、林総セ)の観測サイトはほぼ平坦な地形上に位置し、年平均気温は10.3°C、年降水量は1218 mmである(表1.1)。カラマツの林齢は65年生で、林床には様々な低木が繁茂している。筑波大学菅平高原実験所(以下、菅平)の観測サイトは、四阿山(標高2354 m)の中腹の西向きの緩やかな斜面上に位置し、年平均気温は6.6°C、年降水量は1343 mmである。カラマツの林齢は65年生で、林床には低木やシダ類が繁茂している。筑波大学八ヶ岳演習林(以下、八ヶ岳)の観測サイトは、赤岳(標高2899 m)の麓の緩やかな東向き斜面上に位置し、年平均気温は7.0°C、年降水量は1465 mmである。カラマツの林齢は65年生で、林床にはササが繁茂している。筑波大学川上演習林(以下、川上)の観測サイトは、横尾山(標高1818 m)の中腹の北西向きの斜面上に位置し、年平均気温は6.6°C、年降水量は1429 mmである。カラマツの林齢は47年生で、林床にはシダ類や草本が繁茂している。

表1.2 長野県環境保全研究所飯綱庁舎のカラマツ林内に設置した観測機器。

測定要素	品名	メーカー	型番	測定間隔	記録	備考
気温 相対湿度	温湿度センサー	VAISALA社	HMP155	1秒	10分平均	地上高1.8mに設置 強制通風式
降水量	転倒ます型雨量計 (一転倒0.2 mm)	Davis社	7852-II	—	10分積算	地上高0.45mに設置 助炭なし、ヒーターなし 無雪期のみ稼働
地温 電気伝導度 土壌含水率	土壌センサー	A・R・P社	WD3-WET -L5CS	1秒	10分平均	深さ10, 21, 37cm の3深度に設置
積雪深	超音波式 レベルセンサー	NovaLynx社	260-700	60秒	10分平均	地上高2.08mに設置

3-2. 地上観測

飯綱のカラマツ林内には、データロガー(CR1000X; Campbell Scientific社製)と表1.2に記載した各観測機器を設置して、2018年8月に自動気象観測を開始し10分間隔でデータを記録した。温湿度センサーを格納する強制通風筒も白く塗装した塩ビ管やプロペラファンを加工して自作した。雨量計には受水口の上にゴミ除け網が設置されているが、カラマツの葉は細かいためこのゴミ除け網をすり抜けるので、雨水口の上に目の細かい金網を設置した。なお、積雪深の観測は11月中旬から4月下旬、降水量の観測は4月上旬から12月上旬、をそれぞれ目途に実施した。

飯綱のカラマツ林には、各気象観測機器と併せて林床から樹冠を自動的に撮影するタイムラプスカメラを設置した。タイムラプスカメラとカメラケースは、Nikon社製のデジタル一眼レフカメラ(D5600)にシグマ光機社製の魚眼レンズ、エツミ社製のタイマーリモートスイッチ、タカチ電機工業社製のプラボックス、日東工業社製のドーム窓などを組んで作成した。デジタル一眼レフカメラの主な設定は、表1.3のとおりである。タイマーの間隔は2018年の設置当初は6時間としたが、商用電源が確保できていることなどを考慮して2020年から3時間間隔とした。撮影時刻は、基本的に0:00, 3:00, 6:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00としている。ただし、カメラの樹冠画像から葉面積指数を推定する場合、太陽が入らず一定の明るさがある時刻に撮影することが望ましいので、日が短い秋には太陽が飯縄山の陰に隠れる17:00の画像を狙って撮影時刻を1時間ずつ早めた。タイムラプスカメラは、気象観測塔から水平距離で約10 mの位置に単管パイプを組んで作った地上高2.3 mの台の上に設置した(図1.2b)。これは、林床の低木やクマイザサが画像に入らないようにするためである。タイムラプスカメラのデータ回収、およびドーム窓の清掃やタイマーの時刻のズレの補正や電池交換等のメンテナンスは2週間に1回程度の頻度で行った。

飯綱のカラマツ林では、上記の自動観測に加えて、LAI-2200(LI-COR社製)によるPAIの手動観測やドローンによる空撮も実施した。LAI-2200によるPAIの手動観測は、2018年9月から開始し、休日や雨天日などを除き毎日17:00前後の日没直後の直達光がない時刻を狙って行った。ただし、夕方に悪天候が予報されている日や曇天日は、日中でも観測を行った。LAI-2200による観測の際は、林外の空が開けた空間で全天光を1回、林内の空が樹木の枝葉で覆われた空間で場所を少しずつ変えながら群落内光を4回、それぞれ測定する

表1.3 カメラの主な設定。

設定オプション	本研究の設定
撮影モード	絞り優先モード(A)
絞り値	f8
ISO感度	ON
感度自動制御	ON
制御上限感度	1600
低速限界設定	AUTO
測光モード	中央重点測光
ホワイトバランス	曇天
画質モード	RAW+F
色空間	sRGB

サイクルを2セット実施して、その日のPAIを取得した。LAI-2200は、魚眼レンズセンサーが林外と林内の放射光を測定して、この比から放射光遮蔽値を計算し、枝葉によって遮蔽されていない光の比率に基づいてPAIを求めている。ドローンによる空撮の際の撮影機材はMavic2 Pro(DJI社)とその標準搭載カメラを用いた。撮影期間は2019年と2020年の4月下旬から12月上旬までとし、2019年は13回、2020年は19回撮影した。なお、展葉季と落葉季には植生指数が大きく変化するので、撮影頻度を高めている。撮影は自動航行ソフト(DJI社 GS Pro)を用いて行った。同ソフトでの設定は、撮影高度を対地高度80 m(樹上約50 m)、撮影される写真間のオーバーラップを90%、サイドラップを70%とし、撮影高度、飛行コースは毎回同一とした。撮影時のカメラ設定は、ISO感度を100、露出を-1.0EV、シャッタースピードをオートとした。また、ドローンによる撮影画像は、SfM-MVS(Structure from Motion - Multi View Stereo; 多数・多方向の写真からの撮影対象物の三次元モデル構築)により、樹高や樹冠形状等を詳細に把握することが可能になるが、このSfM-MVSでは直下視画像に斜め視画像を加えることにより、作成されるモデルでの死角(直下視だけでは植生が重なり合い影になってしまう部分)を低減できるとされることから、撮影では直下視と斜め視(60°で飛行コースの前方視と後方視)を行った。

飯綱を除く4つのカラマツ林には、2019年に飯綱と同じタイムラプスカメラを表1.3の設定で設置するとともに、おんどとりJr.(T&D社)を自然通風シェルターにセンサー部を入れて設置した。各観測点におけるカメラの撮影時刻は、基本的に0:00, 6:00, 12:00, 18:00としたが、前述の飯綱における撮影と同様に日の短い秋には1時間ずつ早めた。なお、撮影頻度を飯綱と同じ3時間間隔ではなく6時間間隔にしたのは、電池で稼働しているためである。おんどとりJr.による気温のデータは10分平均値を記録するようにした。タイムラプスカメラのデータ回収やメンテナンスは1ヵ月に1回程度の頻度で行った。

3-3. 画像解析

表1.1の5地点に設置したタイムラプスカメラの樹冠画像は、幅4000ピクセル、高さ6000ピクセルで、水平方向の解像度と垂直方向の解像度は300dpi、ビットの深さは24bitカラーのJPG形式である。基本的に日没時の直達光が入らない樹冠画像を、森林生態学分野での利用を目的に開発された植生画像解析ソフトLIA for Win32(以下、LIA32)により、植物体(葉、枝、幹)と非植物体(間隙)に分ける二値化処理をして日々のPAIを計算した(図1.3)。ただし、日没時の樹冠画像に雨滴が付いている場合や結露している場合などは、降水発生前の曇天時の樹冠画像や日の出頃の樹冠画像を選択した。LIA32で二値化処理する際は、魚眼レンズが捉えた円形の画像全体を解析対象範囲に指定し、Intermeansアルゴリズムを用いて画像の青(B)の画素値から閾値を算出する方法⁶⁾を選択した。また、PAIは解析対象範囲の天頂角0~74°の範囲に対して計算されるようにした。

展葉開始や落葉完了をPAIから評価す

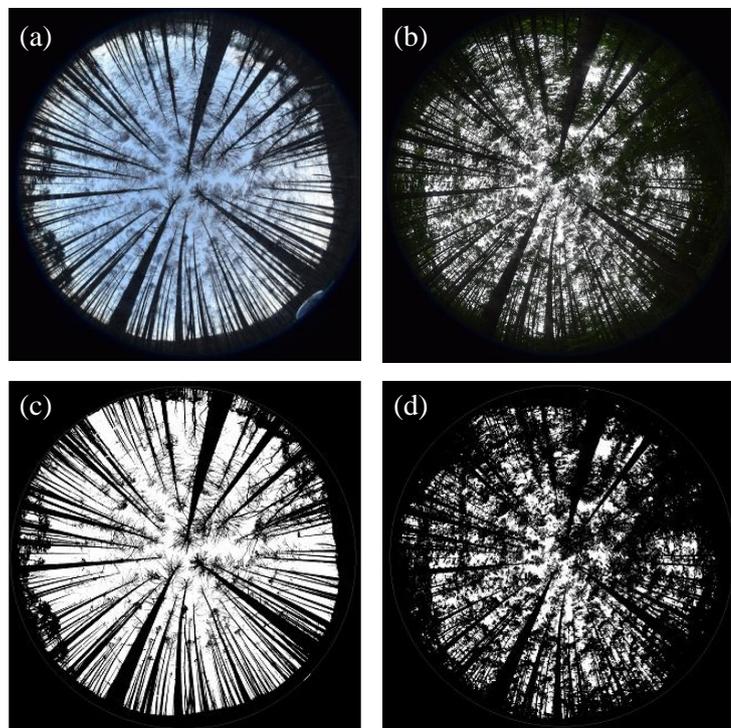


図1.3 (a)展葉前(2019/4/20)の樹冠画像、(b)展葉後(2019/7/1)の樹冠画像、(c)二値化処理した展葉前(2019/4/20)の樹冠画像、(d)二値化処理した展葉後(2019/7/1)の樹冠画像。

る際は、まず、日々の観測条件に応じたPAIのばらつきを小さくするため、5日間移動平均をとった。この5日間移動平均したPAIが、7日以上連続で上昇する最初(最後)の日を展葉開始(完了)日、7日以上連続で減少する最初(最後)の日を落葉開始(完了)日と定義した。これらの観測・解析から葉群フェノロジーと積算気温の関係式を評価する。積算気温はNagai et al. (2015)に基づいて、展葉季は日平均気温(T_a)が 2°C 以上の日の($T_a - 2$)の積算、落葉季は T_a が 18°C 以下の日の($T_a - 18$)の積算とした²⁾。

飯綱におけるドローンの空撮画像は、SfM-MVSソフトウェアのMetaShape (Agisoft社)により画像の配列、高密度クラウドの構築を行い、DSM (Digital Surface Model; 数値表層モデル)、オルソモザイク画像 (解像度2 cm)を作成した。ドローンによる空撮では単一の可視光画像のみが得られることから、植生指数には単一可視画像から推定可能なGRVI(式(1))とGEI (Green Excess Index; 式(2))を用いた。

$$\text{GRVI} = \frac{G - R}{G + R} \quad \dots \text{式(1)}$$

$$\text{GEI} = \frac{2G - R - B}{G + R + B} \quad \dots \text{式(2)}$$

ここで、G、R、Bは、それぞれ画像の緑バンド、赤バンド、青バンドの画素値を指す。GRVIは-1.0から+1.0、GEIは-1.0から+2.0までの値をとり、いずれも緑色光が強い(緑色が濃い)ほど、指数が大きくなる。算出された各画素の植生指数から、飯綱のタイムラプスカメラ周辺の林冠を構成するカラマツ(87本)毎に樹冠範囲内の平均値を求め、各立木の植生指数とした。これらを撮影日毎に平均値と標準偏差を算出した。

4. 結果及び考察

4-1. 長野県環境保全研究所飯綱庁舎における観測結果

飯綱の林内の気象観測結果によると、年平均気温は2019年に 8.7°C 、2020年に 9.0°C だった。また、年平均地温は2019年に $12.2 \sim 12.6^{\circ}\text{C}$ 、2020年に $12.7 \sim 13.7^{\circ}\text{C}$ で、いずれも深度が深い方が高い。気温に比べて地温の方が高い理由は、飯綱では冬季に積雪が地表を覆うので地温はほぼ 0°C で安定しているのに対し、気温は氷点下まで低下するからである。年平均土壌含水率は2019年に $31.8\% \sim 39.6\%$ 、2020年に $35.1\% \sim 38.9\%$ で、いずれも深度が深い方が高かった。年最大積雪深は2018/19年冬季に 78.7 cm で、2019/20年冬季に 53.1 cm で、2019/20年冬季は記録的暖冬により雪が少なかった。また、観測期間中の特異的なイベントとして令和元年東日本台風の襲来があり、2019年10月12日に日降水量 104 mm (林外では 155 mm)を記録した。この台風に伴う暴風雨により、カラマツ林では大量の落枝があったが、観測サイト周辺における目立った倒木などはなかった。

飯綱における林内と林外の気象観測値を比較した結果、日平均気温と日最低気温には大きな差はなかったが、日最高気温は林外の方が林内よりも高く、最大 2°C 程度高い日があった⁷⁾。これは、葉群フェノロジーと積算気温の関係を評価する上で、日平均気温や日最低気温を用いる場合は林内と林外の違いは問題にならないが、日最高気温を用いる場合には林内と林外の違いも考慮する必要があることを示唆している。林内と林外の降水量を比較した結果、積雪期を除く観測期間全体としての樹冠透過割合は 65.7% で、カラマツ林では 34.3% が遮断蒸発されていた⁷⁾。また、最大積雪深は若干林内の方が林外よりも少ないが、消雪は林内の方が林外よりも遅かった⁷⁾。飯綱のサイトでは下層植生が常緑草本のクマイザサであることから、消雪のタイミングが林内と林外で異なることは春先の炭素収支を評価する上で重要な知見と考えられる。

飯綱におけるタイムラプスカメラとLAI-2200で観測されたPAIの季節変化によると、カラマツは4月下旬から5月上旬に展葉を開始して5月下旬から6月上旬に展葉を完了し、10月中旬から下旬に落葉を開始して11月中旬から下旬に落葉を完了していることが分かる(図1.4)。タイムラプスカメラの画像を解析して取得したPAIとLAI-2200による手動観測で取得したPAIは、季節変化の仕方は同期しているが絶対

表1.4 長野県環境保全研究所飯綱庁舎における展葉・落葉の開始日・完了日と積算気温。

年	展葉季の(T_a-2)		落葉季の(T_a-18)	
	開始日 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)	完了日 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)	開始日 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)	完了日 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)
2018	-	-	10/26 -248	11/14 -444
2019	5/1 155	5/19 335	10/21 -148	11/13 -385
2020	4/30 150	5/20 381	10/14 -128	11/13 -478

値は異なる。この絶対値の違いは、観測手法やPAIの推定手法の違いを反映していると考えられる。LAI-2200のPAIは2018年と2019年に比べて2020年は低く推移しているが、これは2019年10月12日の令和元年東日本台風襲来による落枝の影響である。一方、この落枝の影響がタイムラプスカメラのPAIには現れていない。LAI-2200の方がタイムラプスカメラよりも感度が高く真値により近い

可能性があるが、タイムラプスカメラは観測頻度が密で値が比較的安定しているため、展葉や落葉のタイミングを評価する上ではタイムラプスカメラによるPAIを用いる方が良いと考えられる。タイムラプスカメラによるPAIに基づいて、展葉の開始日と完了日、および日平均気温 2°C 以上の日の積算値(T_a-2)を評価した結果、展葉開始は積算気温 $150\sim 155$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)、展葉完了は $335\sim 381$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)となった(表1.4)。同様に、落葉の開始日と完了日、および日平均気温 18°C 以下の日の積算値(T_a-18)を評価した結果、落葉開始は積算気温 $-248\sim -128$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)、落葉完了は $-444\sim -385$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)となった(表1.4)。展葉季の観測の方が落葉季の観測に比べて1年少ないとはいえ、展葉季に比べて落葉季の方が積算気温との関係にばらつきが大きいことは、気温に対するフェノロジーの感度が展葉に比べて落葉の方が小さい可能性を示している。このことは、只木ら(1994)¹⁾やNagai et al. (2015)²⁾でも報告されており、落葉には気温以外の要因も寄与している可能性がある。

図1.5に2019年と2020年のドローンによる空撮画像を解析して得た植生指数の季節変化を示す。

GRVI、GEIともに、5月上旬から6月上旬(DOY120～DOY150付近)にかけてカラマツの展葉に伴う急速な増加、10月中旬(DOY285付近)以降のカラマツ林の黄葉・落葉に伴う急速な低下を示した(図1.5)。ただし、2020年のGRVIは8月中旬(DOY230付近)以降に低下しているのに対して、GEIやPAIは8月中旬から10月中旬の時期に大きく変化していないので、GRVIはカラマツの黄葉の

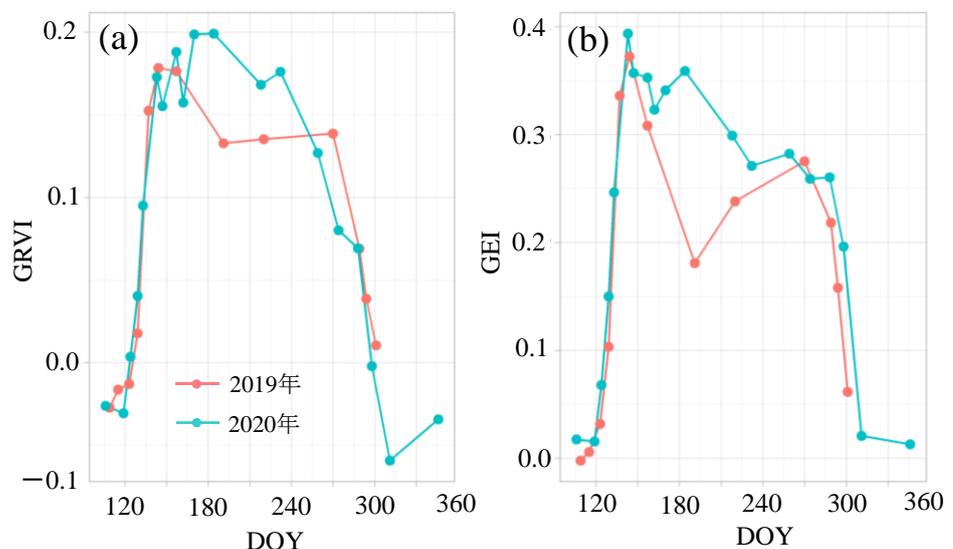


図1.5 ドローンの空撮画像による植生指数((a) GRVI, (b) GEI)の季節変化。DOY (Day of year)は1月1日からの日数。

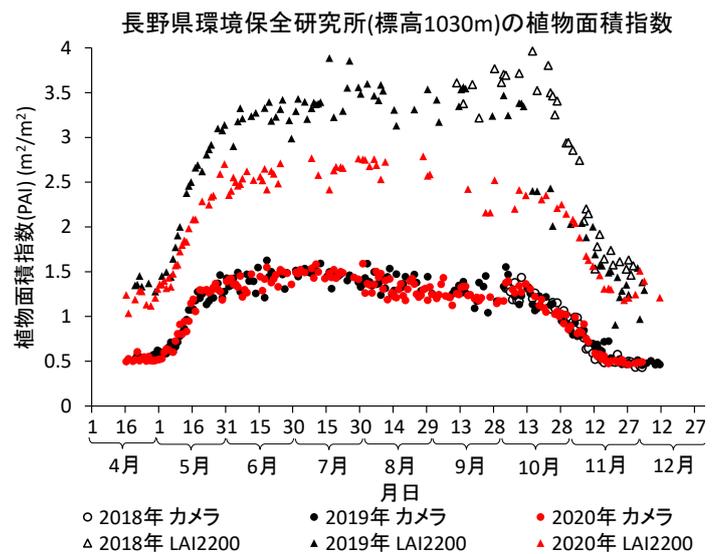


図1.4 長野県環境保全研究所飯綱庁舎におけるタイムラプスカメラとLAI-2200による植物面積指数の季節変化。

影響が入りやすいと考えられる(図1.4; 図1.5)。一方、GEIは2019年7月10日(DOYは191)に一旦減少しているが、この日は晴天下で撮影したため、露出オーバーによる画像の白飛びが発生したことがGEIの低下に影響した(図1.5b)。GEIは2019年の方が2020年に比べて1週間程度早く低下しているのに対して、GRVIは2019年と2020年で顕著な違いが見られず、この違いはGEIの方がGRVIに比べて緑バンドの画素値に対する感度が高いことを反映している可能性がある。すなわち、GEIは式(2)に示したように、分子項の緑バンドが赤バンド、青バンドの2倍に重みづけられ、また葉における分光反射特性が低い赤バンドと青バンドとの差分をとっているため、GRVIよりも葉の葉緑素の光吸収をより強調した植生指数であり、影領域の植生への誤検出が少ないなど植生域検出の優位性が高いことが考えられる。また、2020年のGRVIとGEIの季節変化は、GRVIは展葉開始前と展葉完了後で値が異なるのに対して、GEIは展葉開始前と展葉完了後で値が同じであり、GRVIよりもGEIの方が展葉や落葉の検出に適していると考えられる(図1.5)。GRVIとGEIはともに展葉完了の直後に極大値をとり、落葉開始までの期間に徐々に減少する季節変化を示している(図1.5)、この変化傾向はタイムラプスカメラの画像から得たPAIにも見られるが、植生指数の変化の方が急である(図1.4)。このことは、着葉期間におけるGRVIとEVIの低下は、強風による落枝などによるカラマツの葉量の減少だけでなく、カラマツの葉緑素の量の変化を示している可能性を示唆している。

ドローンによる空撮は、タイムラプスカメラによる自動観測に比べて観測頻度が低く、撮影日の気象条件の影響も受けやすいが、展葉や落葉だけでなく黄葉も含めた葉緑素の量の季節変化を推定して、群落がもつ光合成能力の季節変化の評価にも応用していける可能性がある。葉緑素計による直接観測の季節変化と画像解析による植生指数の季節変化を比較することが今後の課題である。

4-2. 葉群フェノロジーの地域性

図1.6に各観測サイトにおける2019年の落葉季と2020年の展葉季の二値化処理した樹冠画像を示す。

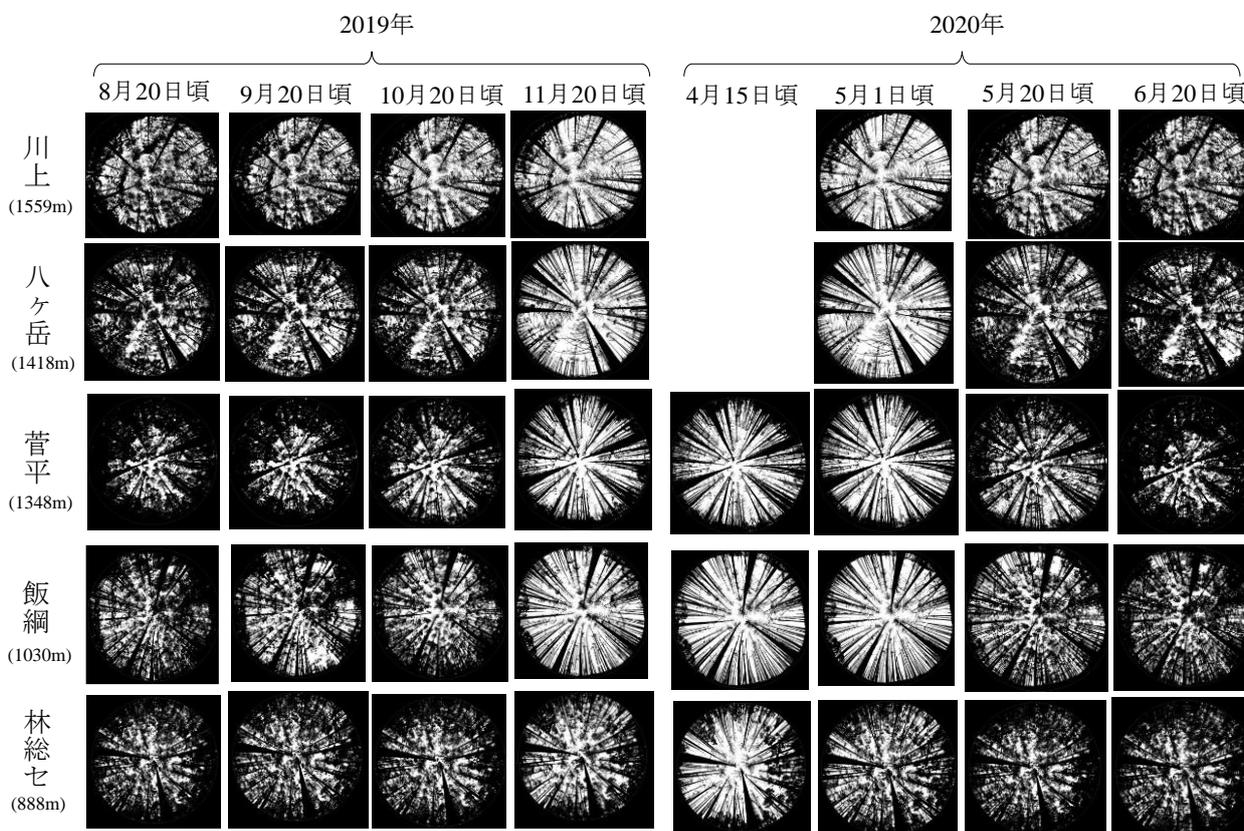


図1.6 各カラマツ林における2019年落葉季と2020年展葉季の二値化処理した樹冠画像。

表1.5 各観測サイトにおける展葉・落葉の開始日・完了日と積算気温。

地点	標高 (m)	2019年落葉季の(T_a-18)		2020年展葉季の(T_a-2)	
		開始日 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)	完了日 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)	開始日 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)	完了日 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)
川上	1559	9/21 -57	11/1 -334	5/13 224	6/1 392
八ヶ岳	1418	10/23 -216	11/20 -562	5/3 151	5/22 319
菅平	1348	10/26 -261	11/18 -559	4/26 78	5/28 370
飯綱	1030	10/21 -148	11/13 -385	4/30 150	5/20 381
林総セ	888	11/7 -259	11/29 -521	4/17 ^{a)} 148 ^{a)}	5/23 573

a) 2020年の値が欠測となったため2019年の値を使用。

これらの画像からは、季節が進むに従い各観測サイトで落葉や展葉により葉の量が増減する様子が見てとれる。また、標高が低い林総セでは他の標高が高い観測サイトに比べて落葉が遅く、展葉が早いことも見てとれる。

タイムラプスカメラで観測されたPAIの季節変化によると、どの観測サイトも2020年の展葉季のカラマツは4月中旬から5月中旬に展葉を開始して5月下旬から6月上旬に展葉を完了している(表1.5; 図1.7)。ただし、2020年の4月下旬に林総セのタイマーリモートスイッチが電池不足により止まってしまい、林総セの展葉開始のデータを取得できなかったため、2019年の展葉開始のデータで代用した(表1.5)。2019年の林総セの展葉開始は4月中旬で他の観測サイトに比べて早いことや2019年と2020年のPAIがほぼ同じように推移していることを考慮すると(図1.7)、2020年の展葉開始も林総セが最も早い可能性が高い。標高が高い川上では展葉開始日が全観測サイトの中で最も遅い5/13であったので(表1.5)、林総セと川上の間で展葉開始日には1ヵ月程度の差があったと推察される。2020年の展葉完了日は全ての観測サイトが5/20~6/1の2週間足らずの期間内に収まった(表1.5)。展葉開始日に比べて展葉完了日の方が地点間のばらつきが小さい理由として、飯綱や八ヶ岳は林総セに比べると急激に展葉が進んだことや、菅平では2019年に比べて2020年は顕著に早く展葉していること、川上ではPAIの上限が小さいことなどが考えられる(図1.7)。日平均気温 2°C 以上の日の積算値(T_a-2)は、菅平の2020年の展葉開始日は78 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)で他の観測サイトに比べてかなり低い反面、林総セの2020年の展葉完了日は573 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)で他の観測サイトに比べてかなり高い(表1.5)。この原因は不明であるが、標高差に対して展葉のタイミングのばらつきを小さくする要因になっている。

2019年の落葉は、前述の2020年の展葉に比べると地点間のばらつきが非常に大きく、落葉開始日は川上が9/21なのに対して、林総セは11/7だった(図1.7; 表1.5)。飯綱、菅平、八ヶ岳の落葉開始日が10/21~10/26の5日間の期間内に収まっており(表1.5)、川上はこれらの地点に比べても1ヵ月早く落葉が開始された。川上は落葉開始が非常に早い、落葉の進行する速度は遅く、落葉完了日は11/1となっ

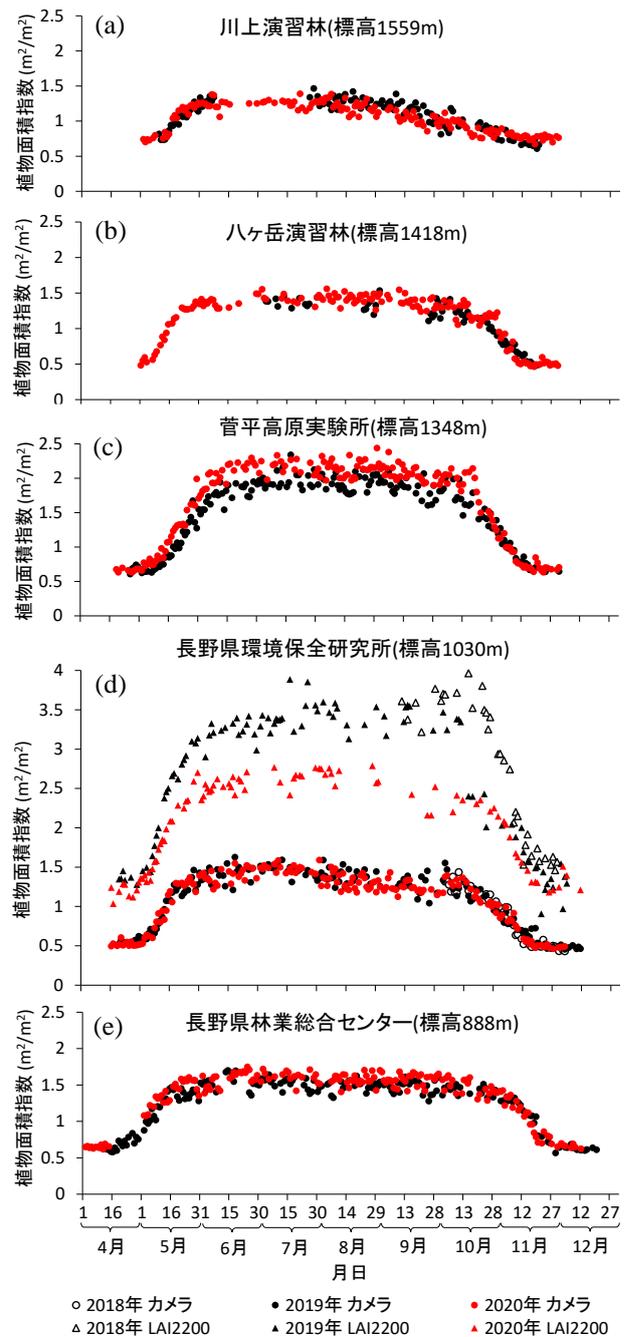


図1.7 各観測サイトにおけるタイムラプスカメラによる植物面積指数の季節変化。長野県環境保全研究所飯綱庁舎(d)のみLAI-2200による観測値も記載。

ていて、この特徴は2019年も2020年も同じであったことから、何らかの地域特性を反映していると考えられる(図1.7; 表1.5)。落葉開始日は川上と林総で1ヵ月半の違いがあったが、落葉完了日は全ての観測サイトが11月中となり1ヵ月以内に収まった。日平均気温 18°C 以下の日の積算値(T_a-18)は、川上の落葉開始日は -57 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)で他の観測サイトに比べてかなり高いことから、川上の落葉開始の早さは単純に標高が高く気温が低いだけではないことが分かる(表1.5)。また、各観測サイトにおける落葉完了日の(T_a-18)も地点間のばらつきが大きく、気温以外の要因も落葉に影響している可能性があり、今後の課題である。

4-3. 衛星観測との比較・検証

本研究で観測された展葉開始日と日平均気温 2°C 以上の日の積算値(T_a-2)の関係、および、落葉完了日と日平均気温 18°C 以下の日の積算値(T_a-18)の関係について、Nagai et al. (2015)²⁾の衛星観測に基づく評価結果と比較した。展葉開始日については、地上観測と衛星観測で $20\sim 60$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)程度の差があり、地上観測の方が衛星観測に比べて標高に応じたばらつきが大きいものの、ある程度整合性のある結果となった(図1.8)。一方、落葉完了日については、地上観測の方が衛星観測に比べて $120\sim 300$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)低く、地上観測の方が衛星観測に比べて標高に応じたばらつきが大きく、展葉開始日に比べると地上観測と衛星観測の違いが顕著に表れた(図1.8)。

Nagai et al. (2015)²⁾の衛星観測の場合、葉群フェノロジーを面的に捉えているので、各標高帯の領域で平均化されて標高に応じたばらつきは小さくなるのに対し、本研究の地上観測の場合は点で捉えているので、タイムラプスカメラが捉えている個体の特徴や斜面方位など、標高以外の因子も強く影響して標高に応じたばらつきが大きくなることが考えられる。展葉開始日は落葉完了日に比べると積算気温に対する応答性が高いことや、展葉開始は葉がない空間的に一様な状態をベースに変化することなどから、展葉開始日の方が落葉完了日より積算気温との関係において空間的な一様性が高く、展葉開始日に関しては地上観測と衛星観測である程度の整合性が得られたと思われる。一方、落葉完了日に関しては、空間的なばらつきが地上観測の標高に応じたばらつきに影響していると考えられるが、衛星観測に比べて地上観測は一貫して積算気温が低いことから、衛星観測で捉えられた落葉完了日は早すぎる可能性がある。衛星観測の場合、GRVIの変化から展葉開始日や落葉完了日を捉えているので、葉がない状態から葉が芽吹いて緑になる展葉開始はGRVIの変化が顕著に表れやすいが、葉が黄葉してから葉が全て落ちる落葉完了はGRVIの変化が不明瞭になり、黄葉と落葉を区別することが難しいと考えられる。地上

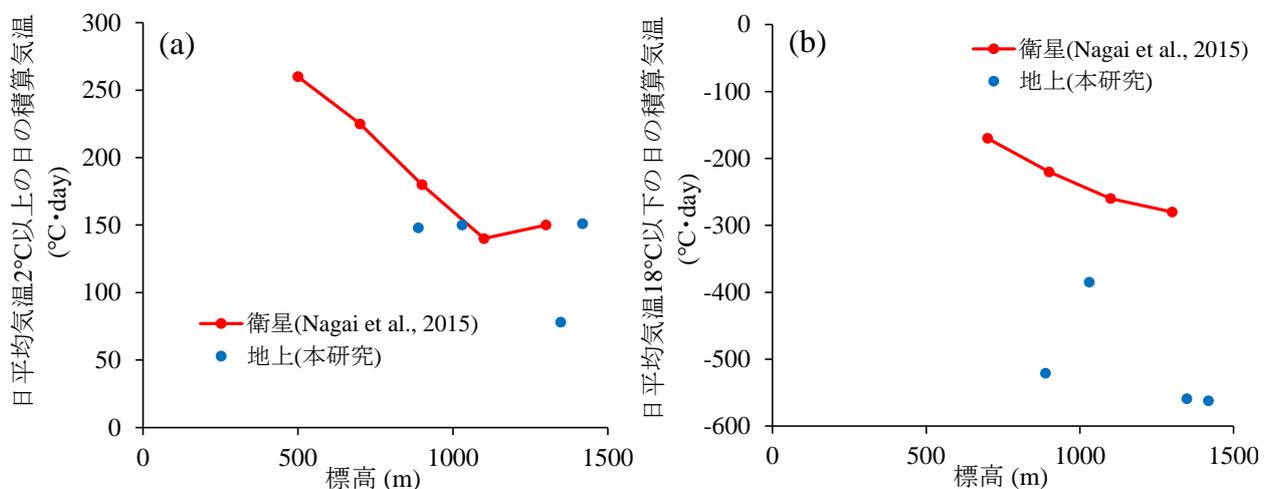


図1.8 本研究の地上観測とNagai et al. (2015)²⁾の衛星観測に基づいて評価された標高帯別の葉群フェノロジーと積算気温の関係に関する比較。(a)展葉開始日と日平均気温 2°C 以上の日の積算気温の関係。(b)落葉完了日と日平均気温 18°C 以下の日の積算気温の関係。

観測の場合は、PAIの変化から落葉完了日を捉えているので、黄葉による色の変化の影響は受けず、より正確に落葉完了日を捉えることができると考えられる。また、積算気温を計算するための気象データも地上観測の場合は現地の林内で観測しているため、積算気温の精度も良いと考えられ、衛星観測に基づく落葉完了日と積算気温の関係式は陸域生態系モデルに組み込む前に補正する必要があると思われる。

5. 研究目標の達成状況

飯綱の観測サイトをコアサイトにしてカラマツ林の葉群フェノロジーと積算気温の関係、および植生指数の季節変化を評価できた。また、林総セ、菅平、八ヶ岳、川上の標高850～1500 mの各観測サイトにおいてもタイムラプスカメラと温度計のデータを基に葉群フェノロジーと積算気温の関係を評価し、標高に応じた違いを比較できた。また、Nagai et al. (2015)²⁾の衛星観測に基づく葉群フェノロジーと積算気温の関係を本研究の5地点の地上観測に基づく結果と比較・検証したところ、人工衛星で捉えたGRVIの変化から葉群フェノロジーを評価すると、秋季に黄葉と落葉を区別することが難しく、落葉完了日を実際よりも早く検出してしまいう可能性が示唆された。地上観測に基づく葉群フェノロジーと積算気温の関係式はサブテーマ3にも提供し、「2. 研究目標」に掲げた内容は全て達成された。

6. 引用文献

- 1) 只木良也, 北村秀夫, 蟹江清丞, 佐野弘美, 重松明子, 大津慎一 (1994) 標高に伴うカラマツの葉の開葉と落葉の挙動. 日本生態学会誌, 44: 305-314.
- 2) Shin Nagai, Taku M. Saitoh, Kenlo Nishida Nasahara, Rikie Suzuki (2015) Spatio-temporal distribution of the timing of start and end of growing season along vertical and horizontal gradients in Japan. *International Journal of Biometeorology*, 59: 47-54.
- 3) 尾関雅章, 栗林正俊 (2019) 長野市飯綱高原におけるカラマツ高齢人工林の樹木成長. 長野県環境保全研究所研究報告, 15: 45-49.
- 4) 尾関雅章, 大塚孝一, 浜田崇 (2003) 長野市飯綱高原のカラマツ人工林の森林構造. 長野県自然保護研究所紀要, 6: 45-48.
- 5) 浜田崇, 北野聡, 富樫均 (2005) 2002年～2004年の飯綱高原における気象観測結果. 長野県環境保全研究所研究報告, 1: 57-61.
- 6) Kazukiyo Yamamoto (2000) Estimation of the canopy-gap size using two photographs taken at different heights. *Ecological Research*, 15: 203-208.
- 7) 栗林正俊, 浜田崇 (2020) 飯綱高原のカラマツ人工林における2018～2019年の気象観測. 長野県環境保全研究所研究報告, 16: 59-64.

II-2 土壌呼吸における根呼吸・微生物呼吸・菌糸呼吸の寄与と環境応答性の解析

サブテーマリーダー

信州大学理学部 物質循環学コース 牧田直樹

研究協力者

信州大学理学部 物質循環学コース 藤本稜真 (平成30年度～令和1年度)

信州大学理学部 物質循環学コース 田村梓 (平成30年度～令和2年度)

[要旨]

長野市北西部の長野県環境保全研究所飯綱庁舎(標高1030 m)のカラマツ人工林において、土壌呼吸速度の観測、土壌呼吸の各構成要素(根呼吸・微生物呼吸・菌糸呼吸)の分類と土壌温度・土壌含水率との相関解析、および、根系成長の季節変化の解析を行った。カラマツ林の調査地において土壌呼吸の各構成要素の呼吸速度を測定するために、コントロール区、根除去区、根・菌糸除去区を構築し、定期的に測定を行った。飯綱のカラマツ林の土壌呼吸における構成要素の平均寄与率は、それぞれ根が42%、菌糸が6%、微生物が52%であった。また、土壌呼吸およびその構成要素ごとの呼吸速度は、すべて土壌温度の増加に伴って指数関数的に増加した。各構成要素の呼吸における温度感受性(Q_{10})は、根呼吸と菌糸呼吸で高く、微生物呼吸で低かった。この結果から、根呼吸と菌糸呼吸の独立栄養呼吸は、微生物呼吸に比べて温度に敏感に反応することが明らかとなった。さらに、土壌呼吸速度の時系列変化と根系の季節変化の連動を同時に解析する研究から、土壌呼吸の高い時期と地下部の成長量が多い時期が重なることが明らかとなった。細根の連続画像を自動撮影し、生理的機能や生長段階に関係する色の季節変化に着目した画像解析を行った結果、樹木の根系の成長については、7～8月と9月に2度の成長増加ピークを確認し、9月以降減少する結果となった。このことから、根呼吸と菌糸呼吸の独立栄養呼吸の Q_{10} の高さは、土壌温度とともに生産性を増加させる根の成長と関連する可能性が示唆された。今後の研究では、土壌呼吸の構成要素を分離し様々な環境要因および生物的要因を複合的に理解していくことが、土壌呼吸の真値の理解に繋がると考えられる。

1. 研究開発目的

世界全体の陸域土壌中には有機炭素が1550 Pg貯留されており、これは大気中の炭素量の約2倍、植物体の約3倍と推定されている¹⁾。そのうち森林土壌の炭素貯留量はおよそ45%を占めることから、地球規模の炭素循環において森林土壌は重要な役割を果たしていると考えられる。森林土壌は炭素を貯留するだけでなく、毎年 98 ± 12 Pgもの二酸化炭素(CO_2)を土壌から放出しており²⁾、その CO_2 放出量は、化石燃料の燃焼に由来する人為起源の CO_2 放出の10倍以上に達するとされている。森林土壌から放出される CO_2 は、植物の根や菌糸由来の独立栄養呼吸と微生物を主とした有機物分解による従属栄養呼吸とで構成されており、合わせて土壌呼吸と呼ばれている。この土壌呼吸は、非常に大きな炭素の放出源であるため、正確な測定及び推定が求められている。

土壌呼吸は様々な環境要因に影響を受け、中でも土壌温度に強く影響されることが知られている。これまでに多くの陸域生態系における研究において、土壌呼吸速度は土壌温度の変化とともに指数関数的に変動することが報告されている^{3), 4)}。そのため、今後の温暖化によって土壌呼吸の放出が促進され、大気中の CO_2 濃度の上昇を加速し、地球上の炭素収支は著しく影響を受け、さらに温暖化が進む可能性が危惧されている¹⁾。従って、森林における土壌呼吸の温度変化に伴う動態を理解することは、気候変動の将来予測において極めて重要である。

土壌呼吸と環境要因の関係は、土壌内の構成要素によって変化することが報告されている。森林の土壌中では、主に樹木の根(粗根・細根)、菌根菌糸、土壌動物、微生物などの呼吸によりCO₂が発生し、大気中へと放出される。土壌呼吸の構成要素の内、根と菌根菌糸は「根圏」としてまとめられ、光合成によって植物由来の炭素を作り出す独立栄養呼吸を行っている。一方、微生物については土壌有機物から炭素を摂取する従属栄養呼吸を行う。このように、炭素の起源の違いから独立栄養呼吸と従属栄養呼吸に分けることができる。その中で、独立栄養呼吸は、温度変化に対して感度高く反応することが示されている^{3), 4)}。この理由として、植物地下部の呼吸活性は光合成由来の炭素供給に大きく影響を受けるため、より温度に敏感となることが指摘されている^{5), 6)}。しかし、Liang et al. (2010)の研究では、北海道のカラマツ林において土壌呼吸の構成要素を測定した際、温度が10°C変化したときの反応速度の変化率であるQ₁₀は、土壌全体でQ₁₀=3.1、根でQ₁₀=2.9、微生物でQ₁₀=3.5を示し、従来の研究とは異なる結果を示した⁷⁾。このLiang et al. (2010)の研究の独立栄養呼吸が従属栄養呼吸よりも低くなった原因は、いまだ多くの疑問が残されているが、落葉針葉樹という特徴をもつカラマツ林の性質の可能性が一つ挙げられる。従って、落葉針葉樹のデータの蓄積が、土壌呼吸の環境応答性研究の大きな課題として挙げられる。

また近年、独立栄養呼吸のうち、菌根菌糸の呼吸速度の寄与を考慮する必要性が報告されている⁸⁾。菌根菌糸は地上部の同化産物により生産され、土壌中からの養水分の吸収機能に貢献している⁹⁾。一方、フィールド調査で菌根菌糸を根から分離することが困難なため菌糸由来の呼吸は土壌からの「根呼吸」としてまとめられていた。しかし、Heinemeyer et al. (2007)は、イギリスの森林で地下部の外生菌糸の呼吸の寄与を直接測定し、土壌呼吸の60%が微生物呼吸、25%が菌根菌糸呼吸、15%が根呼吸の寄与であることを示した¹⁰⁾。この結果は、根呼吸として計算されていたものは、厳密に言えば菌根菌糸の寄与が多分にあり、今までの根呼吸は過大評価していたという可能性を示唆する。また、土壌呼吸の主要な構成要素である根圏の成長動態を評価することは、土壌呼吸の変動を理解する上で重要である。根および菌糸は養水分の吸収を担う器官であり、短いサイクルで生産から枯死までを繰り返すことから、多くの陸域生態系で純一次生産量の3割から7割程度を占め、成長—枯死—分解のサイクルが早いことが知られている^{11), 12)}。

そこで、サブテーマ2では、カラマツ林の土壌呼吸における樹木根・菌糸・土壌微生物といった各構成要素の寄与を求め、樹木根や菌糸、土壌微生物の構成要素毎に呼吸速度のQ₁₀を評価することを目的とする。特に、落葉針葉樹の菌根菌糸のQ₁₀を求めたものは国際的に見ても稀有であり、落葉針葉樹としての温度感受性の特性を発見できると期待される。さらに、土壌呼吸の主要な構成要素である根系の成長動態を把握し、長野県カラマツ林における根系の成長と土壌呼吸の関連を追及することにも挑戦するため、カラマツ林における根圏の成長動態を捉える連続した画像を用いて、生産量と機能の季節変化を明らかにし、落葉針葉樹林のフェノロジーを抽出することも目的とした。

2. 研究目標

カラマツ林の土壌呼吸の各構成要素(微生物・根・菌糸)について、6つのプロットにおいて2~4週間に1回の頻度で呼吸速度を評価する。各呼吸速度と土壌温度や土壌水分量との関係を解析することで、各構成要素の温度感受性(Q₁₀)や水分応答性を明らかにする。得られた情報をサブテーマ3に提供する。

3. 研究開発内容

3-1. 調査地

調査は長野県長野市の飯綱高原に位置する長野県環境保全研究所飯綱庁舎(標高1030 m、北緯36°43' 32"、東経 138° 9' 13")の敷地林内で行った。同敷地内の植生は落葉針葉樹であるカラマツの植林が卓越するが、湿潤地や流水縁にはハンノキ、ハルニレ、ヤチダモなどからなる湿性落葉広葉樹林がみられるほか、一部にはミズナラ林、ドイツトウヒ植林もみられる¹³⁾。本研究の調査対象の樹種はカラ

マツ (*Larix kaempferi*) で、2018年時点のカラマツ林の林齢は61年、立木密度は616本/ha、平均胸高直径は30.0 cm、平均樹高は27.6 mであった¹³⁾。土壌表層のpHは4.37、電気伝導度(EC)は77.7 mS/m、土壌のC/N比は18.3であった。

3-2. ソイルカラーの設置

調査地の20 m×20 mの範囲内で土壌呼吸の各構成要素を測定するため、コントロール区、根除去区、根・菌糸除去区の合計3タイプの土壌(ソイル)カラー(土台:直径12 cmの円柱)を設置し調査環境を構築した(図2.1)。2018年秋季に1 m×1 mのプロットを6箇所作成し、各プロットの中に3種類のソイルカラーを設置した。ソイルカラーとは、呼吸速度を測定するために地中に埋設する枠組であり、設置することにより内部に侵入する土壌呼吸の構成要素を制限することができる。コントロール区は、半径5.5 cm、長さ10 cmの塩ビ管を土壌表層のリター層の上から挿入し、地表面に到達するまで押し込んだ(図2.1)。根除去区は半径5.5 cm、長さ10 cmの塩ビ管の下に長さ30 cmで50 μmの穴が開いたメッシュシートの筒を巻き付け、50 μmの網目の小ささにより根は通さないが水や菌糸および微生物は侵入できる区とした。根・菌糸除去区は、半径5.5 cm、長さ40 cm(地中の深さ35 cm)の塩ビ管を用いて、外からの侵入がないものである。出入りする生物はないが、土壌微生物が中に生息しているため、微生物のみの活動を評価することができる。設置個所について、カラマツの樹幹の下に設置し、プロット間は1 m以上の間隔を設けた。

3-3. 土壌呼吸速度の測定

土壌呼吸の測定には赤外線ガス分析計(GMP343, Vaisala, Helsinki, Finland)を備えた閉鎖型静的システムを用いた。この測定システムは、ソイルカラーの上に被せられる蓋のような構造になっており、ソイルカラー内の土壌から放出されたCO₂の変化をとらえることができる。土壌呼吸速度(R_s)は下記の式1を用いて計算された。

$$R_s = \frac{dc}{dt} \times \frac{V}{A} \times \rho_{airmol} \quad (\text{式1})$$

dc/dt は単位時間あたりのCO₂濃度 c (ppm)の増加率、 V はチャンバーの体積、 A はチャンバー表面の土壌表面積、 ρ_{airmol} は空気密度 (mol m^{-3})を示す。

測定は、日内変化の影響を除外するために毎回11時から13時の日中に測定を行う形で時刻をほぼ統一させた。土壌呼吸の測定と同時にプロット内の土壌0~10 cm区間の土壌温度と土壌含水率も測定した。土壌温度と土壌含水率はソイルカラー1本につき3か所のデータを取り、平均値を算出した。土壌呼吸の各構成要素の呼吸は以下のように、3種類の処理区で観測された呼吸速度の差分として算出した。

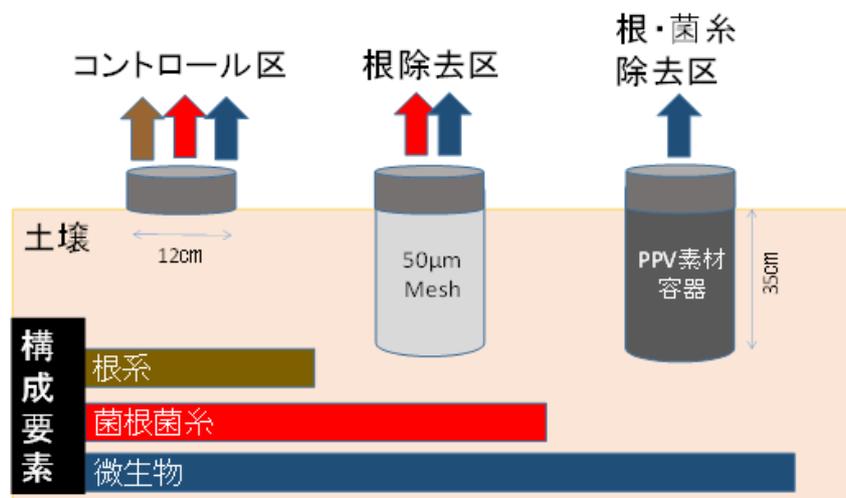


図2.1 土壌呼吸分離実験の概要図。土壌カラー側面の素材として50 μmメッシュ穴、孔穴無しのPPV素材を用いて、コントロール区、根除去区、根・菌糸除去区の3種類の処理区を設置。

土壌呼吸＝コントロール区の値

根呼吸＝コントロール区の値－根除去区の値

菌糸呼吸＝根除去区の値－根・菌糸除去区の値

根圏呼吸(独立栄養呼吸)＝コントロール区の値－根・菌糸除去区の値

微生物呼吸(従属栄養呼吸)＝根・菌糸除去区の値

3－4．温度感受性 Q_{10} の算出

土壌呼吸における各構成要素の温度感受性の指標である Q_{10} も算出した。 Q_{10} とは、任意の土壌温度 T_1 から 10°C 増加した時の土壌呼吸(R_s)の増加速度を示し、 Q_{10} が高いほど温度変化に対して敏感に反応すると評価される。 Q_{10} は、下記の式2を用いて計算された¹⁴⁾。

$$Q_{10} = \left(\frac{R_s}{R_1}\right)^{\frac{10}{T_s - T_1}} \quad (\text{式2; } Q_{10} \text{ model})$$

R_s と R_1 は、それぞれ温度 T_s と T_1 の時($T_s > T_1$)の呼吸速度を示す。

3－5．コアサンプリング法による根現存量の測定

2019年夏季に地下部の根量を調べるためにコアサンプリング法を用いて土壌を採取した。プロット内のカラマツの樹木から1 m離れた地点に採取場所を設定し、地表から40 cmまでの土壌を回収した。これを12地点において1サンプルずつ、合計12サンプル採取した。直径5 cmの円柱状に採取した土壌は0～10 cm、10～20 cm、20～30 cm、30～40 cmの深さごとに区分した。根量の分析では、直径2 mmの篩を用いて水道水で根を洗浄し、根直径が0.5 mm以下、0.5～2 mm、2 mm以上、ササの項目に分けた後、 50°C で48時間乾燥させた後、乾燥重量を測定した。

3－6．根の成長

本研究では、地面に直方体の透明容器を埋設し、その中に市販のイメージスキャナを設置することで、透明容器の表面に分布する根の生育状態を非破壊的に観察する方法であるイメージスキャナ法を用いて調査を行った。2018年秋季に、3個体のカラマツを選定し、その近傍にスキャナを防水するためのアクリル製の箱を3つ埋設し、それぞれスキャナA・B・Cと名称した。埋設する際、横幅50 cm×縦15 cmの穴を深さ約30 cmまで掘り、穴の中にアクリル製の箱を約10 cmは地上に出して設置した。スキャナの周りの空間は、穴を掘った際の土壌で埋め直した。スキャナの撮影面側となる空間を埋め直す際は、土壌を直径2 mmの篩にかけたものを使用した。この後、土壌の攪乱の影響を考慮し、半年間、回復期間とした。2019年5月にアクリル箱の中にA4フラットベッドスキャナ(GT-S640、EPSON、長野県、日本)をアクリル箱の中に設置した。スキャナは外部電源及びPCと接続し、PC自動化ソフトウェアUWSC 5.3.0.2を使用して、1日4回(0時、6時、12時、18時)自動で撮影を行った。画像は解像度400dpi、48bitカラー、TIFF形式で取得した。今回は色に着目した調査を行うため、アクリル製の箱の土壌接地面にカラーチャートを貼付け、画像の色の基準とした。

スキャナで撮影した連続画像から生きた根系のみを抽出するために、画像解析ソフトウェアImageJ (Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA,

<http://rsb.info.nih.gov/ij/>, 1997-2012)を用いてグレースケール画像を作成し、二値化により根系(共生菌糸を含む)と土壤背景の判別を行った。次に、OpenCV 4.1.2 (<http://opencv.jp>)を用いて、二値化により細根と判別された領域のみを抽出した画像を作成した。細根の生産量を評価するために、画像の解析範囲における細根の占める割合である細根面積指数を算出した。また、細根の色の変化を評価するために、OpenCVにより作成した画像の各画素のRGB値を抽出し、ImageJを使用した二値化を行うことで、細根を生長段階の異なる白根(共生菌糸を含む)と茶根の2つに分類し、それぞれの細根面積指数を算出した。

4. 結果及び考察

4-1. 土壤呼吸における各構成要素の寄与

サブテーマ1から提供された測定期間中の土壤温度と土壤含水率の時間変化を図2.2に示した。土壤温度について、5月ごろは10℃前後、8月をピークに22℃まで上昇し、12月には5℃近くまで落ち込む山型の季節変化を示した(図2.2a)。土壤含水率は、梅雨の7月および台風直後の10月に25%まで上昇して高い水分状態を示し、土壤温度が最も高い8月に10%まで低下して低い水分状態を示した(図2.2b)。

土壤呼吸、根呼吸、菌糸呼吸、微生物呼吸は、それぞれ夏場に高い値を示し秋冬にかけて低下する山型の季節変化を示した(図2.2c)。各構成要素の特徴を見ていくと、根呼吸は、春に低い値であったが、夏季の7月から急激に呼吸速度が増加し、秋になるにつれて呼吸速度は低下した。菌糸呼吸は、夏季に高い傾向はみとれたが、他の構成要素よりも明瞭な季節性は確認できなかった。微生物呼吸は根呼吸とは異なり、春季から高い値を示し7月半ばまで横ばいであった。また8月をピークに徐々に低下していき、なだらかな山型の季節変化となった。各構成要素の呼吸である根呼吸・菌糸呼吸、微生物呼吸の平均値(範囲)は、それぞれ42%(24~66%)、6%(1~18%)、52%(30~68%)であった。

土壤呼吸における根、菌糸および微生物の呼吸速度の寄与は、根呼吸と菌糸呼吸よりも微生物呼吸の方が高かった(図2.2d)。北海道のカラマツ林の根圏呼吸は、土壤呼吸の43%を占め、微生物呼吸は57%を占めると報告されており⁷⁾、本研究の傾向と一致した。一方、土壤呼吸の各構成要素の変動幅は、根呼吸と菌糸呼吸よりも微生物呼吸の方が低かった。このことから、カラマツ林の土壤呼吸の構成要素は、微生物呼吸が多くを占める一方、根呼吸お

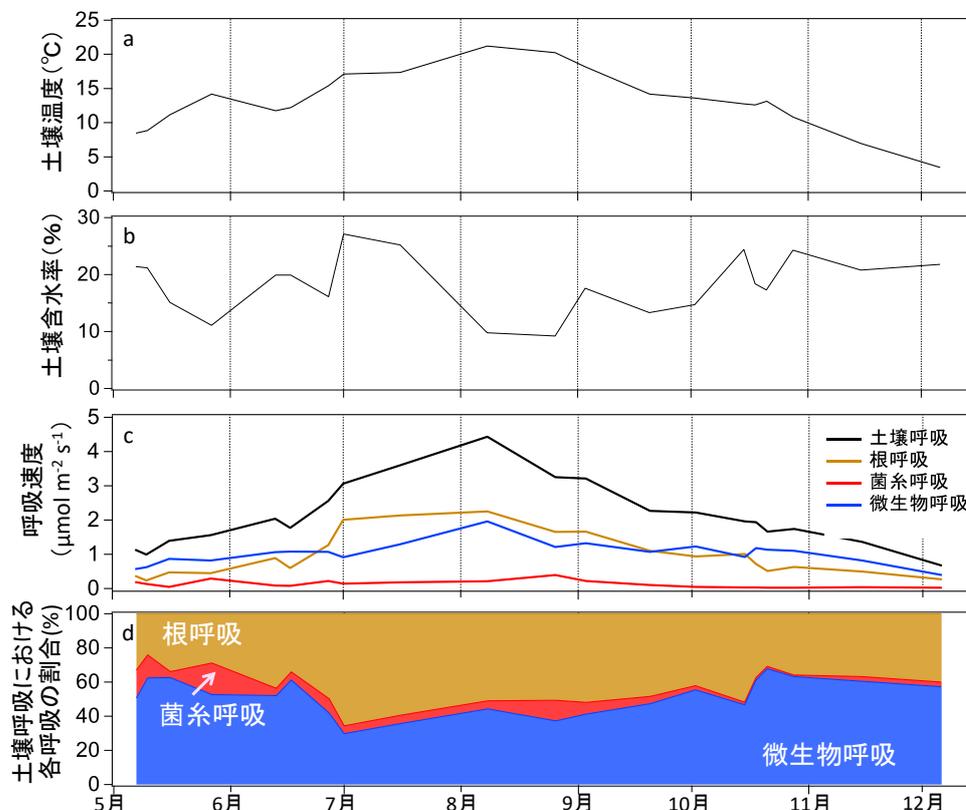


図2.2 長野県飯綱のカラマツ林調査地における(a)土壤温度、(b)土壤含水率、(c)呼吸速度(土壤呼吸、根呼吸、菌糸呼吸、微生物呼吸)、および(d)各構成要素の呼吸の割合、の季節変化。

よび菌糸呼吸を含む独立栄養呼吸は変動幅が大きく、季節変化を示すことが明らかとなった¹⁵⁾。

独立栄養呼吸の多くを根呼吸が占めることが明らかとなったが、菌糸呼吸の寄与は小さいながらも寄与することが確認できた(図2.2c)。Moyano et al. (2008)はブナ林およびトウヒ林で測定を行い、土壌呼吸における寄与は根呼吸が45%、菌糸呼吸が5%という結果を得ており、本研究の測定と近い結果を示した¹⁶⁾。一方、Heinemeyer et al. (2007)はマツ林で土壌呼吸の分離測定を行い、土壌呼吸における寄与は根呼吸が10%、菌糸呼吸が25%であったことを示した¹⁰⁾。Heinemeyer et al. (2012)の研究では草原で測定が行われ、土壌呼吸における寄与は根呼吸が11%、菌糸呼吸が27%であり、菌根菌糸の寄与が高い値であった¹⁷⁾。菌根菌糸の生産は、根系と共生する菌根菌の種類および感染率によって変化することが知られている¹⁸⁾。本研究は、菌根菌の種類および感染率を調べることはできていないが、根呼吸の寄与42%、菌糸呼吸の寄与6%であることから、Moyano et al. (2008)¹⁶⁾と近い菌根菌群集構造であることが予想され、結果の傾向が似たものと考えられる。菌根菌糸の呼吸の寄与および変動を理解するためには、菌根菌の種類や感染率の定性評価を行うことが今後の課題として挙げられる。

4-2. 土壌呼吸と環境要因の関係

土壌呼吸速度と土壌温度および土壌含水率の関係を図2.3に示した。調査期間の土壌呼吸速度は、土壌温度の増加とともに指数関数的に増加した(図2.3a)。また、土壌呼吸速度は、土壌含水率との間に弱い負の相関を示した(図2.3b)。

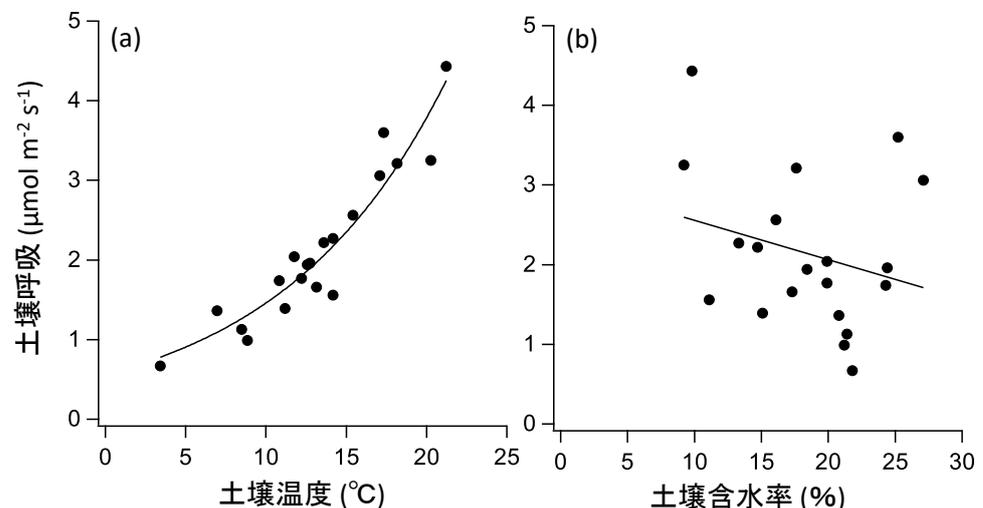


図2.3 土壌呼吸速度と(a)土壌温度、および(b)土壌含水率の関係。

本研究で観測した土壌呼吸速度の Q_{10}

は、2.7であった。複数の先行研究によると、カラマツ林の土壌呼吸速度の Q_{10} は、2.3~3.1の値が報告されており、本研究の結果と整合的であるが、Liang et al. (2010)の3.1が突出して高いことを考慮すると、本研究の結果はやや高めと考えられる(表2.1)。また、ヒノキ、スギ、アカマツといった他の針葉樹林の Q_{10} に比べると、カラマツ林の Q_{10} はやや高い値となった(表2.1)。これらのことから、本調査地の土壌呼吸速度の温度感受性は、先行研究でのカラマツ林と近い生態的な特徴を持つことが示唆される。

表2.1 針葉樹林の先行研究の Q_{10} のまとめ

樹種	Q_{10}	引用文献
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	1.6	Mitani et al. (2003) ¹⁹⁾
ヒノキ	2.4	Makita et al. (2018) ²⁰⁾
	1.8~2.0	Shimono et al. (1989) ²¹⁾
<i>Cryptomeria japonica</i>	1.4	Chiba and Tasumi (1967) ²²⁾
スギ	2.0~2.4	Nakane (1995) ²³⁾
	2.0~2.5	Ohashi et al. (1999) ²⁴⁾
	1.8~1.9	Ohashi et al. (2000) ²⁵⁾
<i>Pinus densiflora</i>	1.3	Chiba and Tasumi (1967) ²²⁾
アカマツ	1.8~2.5	Nakane et al. (1983) ²⁶⁾
	2.0~2.4	Nakane et al. (1984) ²⁷⁾
<i>Larix kaempferi</i>	2.3	Liang et al. (2004) ²⁸⁾
カラマツ	3.1	Liang et al. (2010) ⁷⁾
	2.3	Inoue and Koizumi (2012) ²⁹⁾
	2.4	Teramoto et al. (2019) ³⁰⁾

4-3. 土壌呼吸における各構成要素の呼吸速度と環境要因の関係

土壌呼吸における各構成要素の呼吸速度と土壌温度の関係を図2.4に示した。根呼吸、菌糸呼吸、微生物呼吸はそれぞれ、温度に対して指数関数的な増加を示した。これらの関係性をもとに、 Q_{10} を算出すると、根、菌糸、微生物の Q_{10} は、それぞれ3.84、5.18、1.86であった。本研究の調査地における温度感受性が高い構成要素は、菌糸>根>微生物の順になった。中でも菌糸呼吸は、全体の CO_2 放出量は小さいが、温度に対する感受性が極めて高いことが示された(図2.4b)。この結果は、温度変化に対する応答は、土壌中の根、菌糸、微生物でそれぞれ異なり、独立栄養呼吸の温度感受性は従属栄養呼吸よりも高いことが明らかとなった。

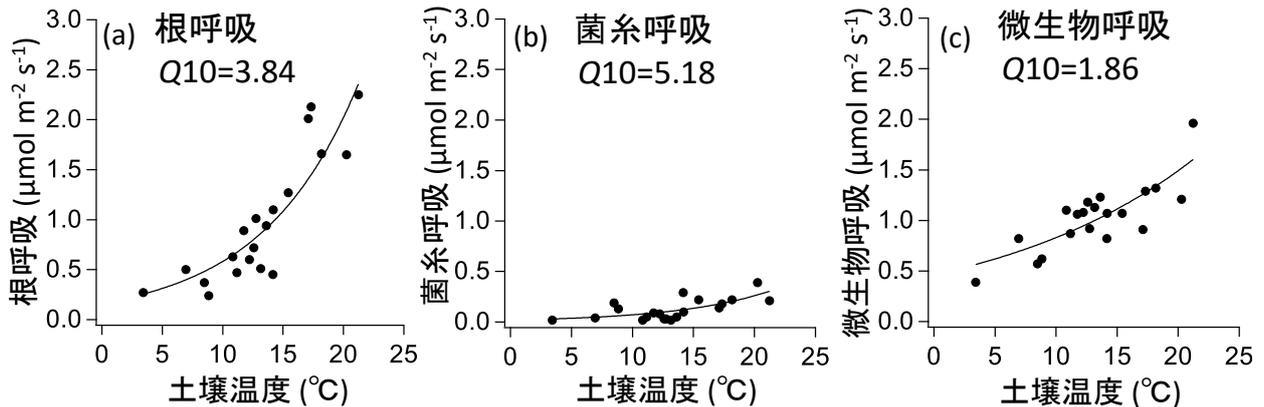


図2.4 飯綱のカラマツ林における(a)根呼吸、(b)菌糸呼吸、(c)微生物呼吸、と土壌温度の関係。図中には温度感受性の指標である Q_{10} 値を示している。

根呼吸、菌糸呼吸、微生物呼吸と土壌含水率の関係をみると、それぞれ負の関係性の傾向が確認できた(図2.5)。しかし、ばらつきが大きく、回帰線の決定係数は低く、強い関係性を示さなかった。Liang et al. (2010)では、カラマツの根呼吸は含水率と明確な相関はないと報告している⁷⁾。一方、Heinemeyer et al. (2007)は、根呼吸や菌糸呼吸の独立栄養呼吸が、土壌温度の変化にあまり影響を受けず、土壌の含水率に強く影響を受けることを示した¹⁰⁾。このように、先行研究によっても統一的な見解があまり得られておらず、樹種や気候帯でのデータ蓄積が求められる。以上より、構成要素によってわずかな差が見られたが、本研究の調査地においては、土壌含水率より土壌温度が優先的に呼吸速度に影響していると考えられる。

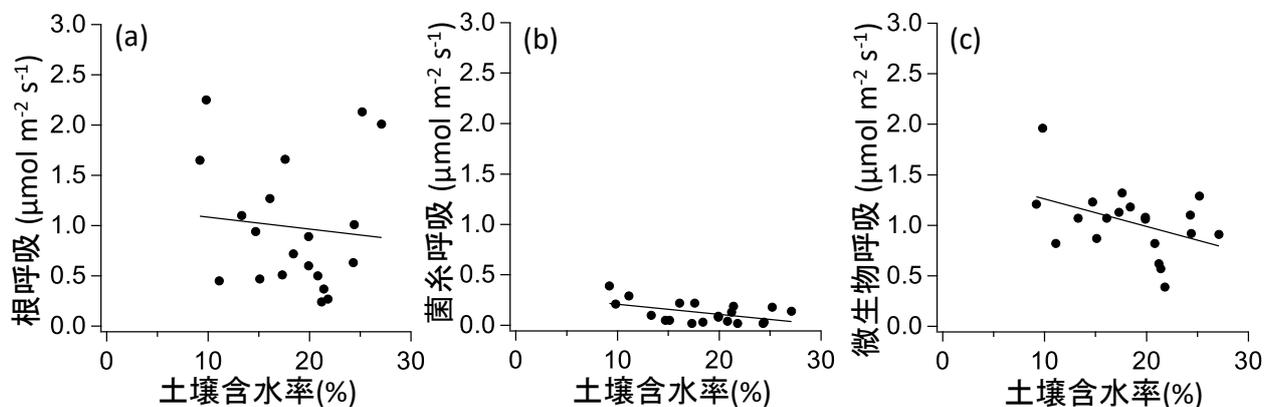


図2.5 飯綱のカラマツ林における(a)根呼吸、(b)菌糸呼吸、(c)微生物呼吸、と土壌含水率の関係。

4-4. 根系の現存量と成長速度

土壌コアを用いた根現存量の評価では、土壌深度が深くなるほど根現存量が小さくなった。つまり多くの根系は、土壌の表層に集中していることが確認できた。カラマツの細根を撮影画像から抽出した細根面積指数の時系列変化について、スキャナAとスキャナBの2個体の画像については、夏季にピークとなる細根面積指数の季節による増減が見られた(図2.6a)。一方、スキャナCについては大きな変動は見られなかった。さらに画像上の根系を白根(共生菌糸を含む)と茶根に分類すると、スキャナAの白根は撮影開始後から徐々に増加し、9月前半に最大となった後、同月下旬には大きく減少した(図2.6b)。その後は11月上旬まで増減を繰り返すが、11月中旬には殆ど白根は見られなくなった。一方でスキャナAの茶根は7月中旬から増加した後、9月上旬から半ばに一度減少するが、その後増加し、11月上旬に最大となり白根の値を上回った。スキャナBの白根は8月上旬まで緩やかに増加した後、8月下旬から10月上旬まで大きく増減を繰り返し、10月下旬に減少した(図2.6c)。スキャナBの茶根は、9月中旬まで緩やかに増加した後、一度減少し、9月下旬に約10%まで大きく増加した。スキャナCの白根については、10月末までは増減を繰り返しながらも大きな変動は見られず、11月以降に白根は減少した(図2.6d)。スキャナCの茶根は9月末までは減少傾向にあったが、10月中旬に増加し、以降緩やかに減少した。

本研究では、自動スキャナ法を用いることにより、連続観測を可能とした。大きな季節変化があったカラマツ2個体(スキャナA, B)については、白根(共生菌糸を含む)の生産は7~8月と9月の2度の成長ピークが見られ、特に2度目のピークが大きくなった(図2.6b, c)。多樹種の細根生産パターンを比較したMcCormack et al. (2014)の結果では、*Pinus strobus*や*Juglans nigra*も同様に二峰性のパターンを示した³¹⁾。二峰性のパターンは、細根生産に好ましい環境条件が複数期間ある場合に生まれる可能性がある³¹⁾。また同一個体の白根と茶根の生産パターンを比較すると、茶根は白根の生産がピークに達した後の10~11月に増加する傾向が見られ、9月までに増加した白根の一部が10~11月に二次成長を経ることで、茶根の増加に繋がったと考えられる。また、白根が減少したのと同量の茶根は生産されてはならず、一部は二次成長することなく枯死したと考えられる。

カラマツの根系成長の結果は、土壌呼吸における根呼吸や菌糸呼吸の季節変化および Q_{10} の大きさと一致する可能性がある。土壌温度の高い夏季にカラマツの根系成長が

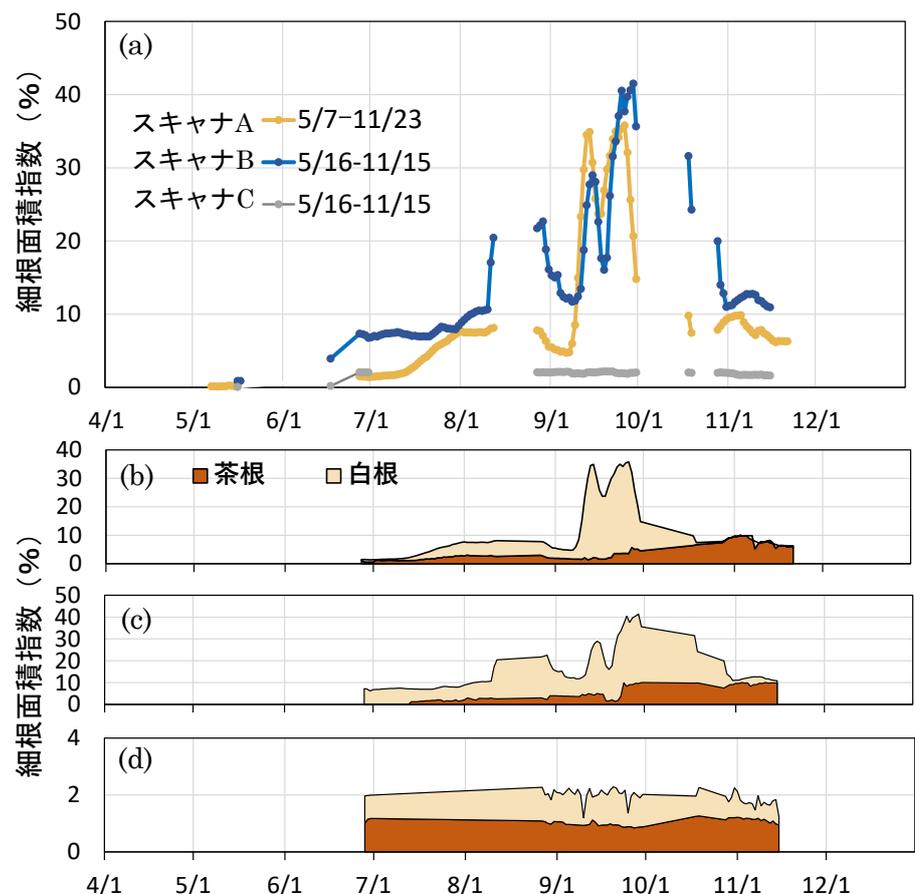


図2.6 スキャナ法を用いた細根面積指数(画像解析範囲における細根の占める割合)の季節変化。(a)細根全体の面積の割合、(b)スキャナA・(c)スキャナB・(c)スキャナCの白根と茶根の細根の面積の割合。

盛んになることにより、樹木内の同化産物エネルギーが消費され、その結果、呼吸速度の高さに反映される。根系のフェノロジーをコントロールする要因としては、土壌温度や光環境、および光合成などの生物要因も関係すると知られている³²⁾。従って、特に独立栄養呼吸を駆動する要因と、根系の成長を規定する要因は重複しており、ともに相互関係をもっている²⁰⁾。今後の研究では、土壌呼吸の構成要素を分離し様々な環境要因および生物的要因を複合的に考えていくことが、土壌呼吸の真値の理解に繋がると考えられる。

5. 研究目標の達成状況

本研究を通して長野県におけるカラマツ林の土壌呼吸の構成要素の実態が明らかになった。土壌呼吸における根呼吸の寄与は42%、菌糸呼吸の寄与は6%、微生物呼吸の寄与は52%であった。また、土壌呼吸およびその構成要素ごとの呼吸速度は、すべて温度増加に伴って指数関数的に増加した。各構成要素の呼吸の温度感受性 Q_{10} は、根呼吸と菌糸呼吸で高く、微生物呼吸は低かった。特に、菌糸呼吸の放出量自体は多くはないが、温度感受性が極めて高かった。本研究の成果は、国内では初めての成果であり、国際的にみても稀有なデータとなる。この結果から、根呼吸と菌糸呼吸の独立栄養呼吸は、微生物呼吸に比べて温度に敏感に反応することが明らかとなった。従来の森林生態系の炭素循環のモデルでは、本研究の菌糸呼吸までを分離した詳細な測定値および Q_{10} のデータを十分に考慮できていなかったため、森林生態系の炭素循環の値および将来予測の過小評価の原因のひとつを招いてしまっていた可能性がある。本研究のカラマツ林の成果は、樹種の特徴を明確にし、危惧される地球温暖化に対する森林の適応評価をより正確な予測にする上で、貴重な観測結果を得ることができたと考える。

6. 引用文献

- 1) IPCC (2013) Climate Change 2013. The physical science basis. Contribution of WG1 -5 assesment report of the IPCC. Cambridge University Press.
- 2) Bond-Lamberty B, Thomson A (2010) Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 464: 579-582.
- 3) Boone RD, Nadelhoffer KJ, Canary JD, Kaye JP (1998) Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 396: 370-372.
- 4) Subke JA, Bahn M (2010) On the 'temperature sensitivity' of soil respiration: Can we use the immeasurable to predict the unknown? *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 1653-1656.
- 5) Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, Taylor A, Ekblad A et al (2001) Large - scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, 411: 789-792.
- 6) Lipp CC, Andersen CP (2003) Role of carbohydrate supply in white and brown root respiration of ponderosa pine. *New Phytologist*, 160: 523-531.
- 7) Liang N, Hirano T, Zheng ZM, Tang J, Fujimura Y et al (2010) Soil CO₂ efflux of a larch forest in northern Japan. *Biogeosciences*, 7: 3447-3457.
- 8) Luo Y, Wan S, Hui D, Wallac LL (2001) Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 413: 622-625.
- 9) Read DJ, Leake JR, Moreno JP (2004) Mycorrhizal fungi as drivers of ecosystem processes in heathland and boreal forest biomes. *Canadian Journal of Botany*, 82: 1243-1263.

- 10) Heinemeyer A, Hartley IP, Evans SP, Fuente JA, Ineson P (2007) Forest soil CO₂ flux : uncovering the contribution and environmental responses of ectomycorrhizas. *Global Change Biology*, 13: 1786-1797.
- 11) Grier CC, Vogt KA, Keyes MR, Edmonds RL (1981) Biomass distribution and above- and below-ground production in young and mature *Abies amabilis* zone ecosystems of the Washington Cascades. *Canadian Journal of Forest Research*, 11: 155-167.
- 12) Jackson RB, Mooney HA, Schulze ED (1997) A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Ecology*, 94: 7362-7366.
- 13) 尾関 雅章, 栗林 正俊 (2019) 長野市飯綱高原におけるカラマツ高齢人工林の樹木成長. 長野県環境保全研究所研究報告, 15: 45-49.
- 14) Luo Y, Zhou X (2006) *Soil Respiration and the Environment*. Elsevier Academic Press, San Diego, CA.
- 15) Sun L, Takagi K, Teramoto M, Hayakashi S, Liang N (2020) Inter-annual variation of soil respiration and its spatial heterogeneity in a cool-temperate young larch plantation in northern Japan. *J. Agric. Meteorol.*, 76: 119-127.
- 16) Moyano FE, Kutsch LW, Rebmann C (2008) Soil respiration fluxes in relation to photosynthetic activity in broad-leaf and needle-leaf forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 135-143.
- 17) Heinemeyer A, Tortorella D, Petrovicova B, Gelsomino A (2012) Partitioning of soil CO₂ flux components in a temperate grassland ecosystem. *European Journal of Soil Science*, 63: 249-260.
- 18) Wallander H, Ekblad A, Godbold DL, Johnson D, Bahr A, et al (2013) Evaluation of methods to estimate production, biomass and turnover of ectomycorrhizal mycelium in forests soils - a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 57: 1034-1047.
- 19) Mitani T, Kosugi Y, Tani M, Takahashi S, Katayama T, Wada T (2003) Spatial and temporal variation of soil respiration rate in an artificial forest of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*). *J Jpn Soc. Revegetat Technol.*, 29: 153-158.
- 20) Makita N, Kosugi Y, Sakabe A, Kanazawa A, Ohkubo S, Tani M (2018) Seasonal and diurnal patterns of soil respiration in an evergreen coniferous forest: evidence from six years of observation with automatic chambers. *PLoS One*, 13: e0192622.
- 21) Shimono T, Takeda H, Iwatsubo G, Tsutsumi T (1989) Seasonal changes in soil respiration rates from the floor of *Chamaecyparis obtusa* and *Cryptomeria japonica* plantations. *Bull Kyoto Univ. Forest*, 61: 46-59.
- 22) Chiba K, Tsutsumi T (1967) A study on the soil respiration of forests (1). The relationships between soil respiration and air temperature. *Bull Kyoto Univ. Forest*, 39: 91-99.
- 23) Nakane (1995) Nakane K (1995) Soil carbon cycling in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) *Forest Ecol. Manag.*, 72: 185-197.
- 24) Ohashi M, Gyokusen K, Saito A (1999) Measurement of carbon dioxide evolution from a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest floor using an open-flow chamber method. *Forest Ecol. Manag.*, 123: 105-114.
- 25) Ohashi M, Gyokusen K, Saito A (2000) Contribution of root respiration to total soil respiration in a Japanese cedar (*Cryptomeria Japonica* D. Don) artificial forest. *Ecol. Res.*, 15: 323-333.
- 26) Nakane K, Yamamoto M, Tsubota H (1983) Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem. *Jpn. J. Ecol.*, 33: 397-408.

- 27) Nakane K, Yamamoto M, Tsubota H (1984) Cycling of soil carbon in a Japanese red pine forest I. Before clear-felling. *The Botanical Magazine Tokyo*, 97: 39-60.
- 28) Liang N, Nakadai T, Hirano T, Qu L, Koike T, Fujinuma Y, Inoue G (2004) In situ comparison of four approaches to estimating soil CO₂ efflux in a northern larch (*Larix kaempferi* Sarg.) forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123: 97-117.
- 29) Inoue T, Koizumi H (2012) Effects of environmental factors upon variation in soil respiration of a *Zoysia japonica* grassland, central Japan. *Ecol. Res.*, 27: 445-452.
- 30) Teramoto M, Liang N, Takahashi Y, Zeng J, Saigusa N, Ide R, Zhao X (2019) Enhanced understory carbon flux components and robustness of net CO₂ exchange after thinning in a larch forest in central Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 274: 106-117.
- 31) McCormack M. L., Adams T. S., Smithwick E. A. H., Eissenstat D. M. (2014) Variability in root production, phenology, and turnover rate among 12 temperate tree species. *Ecology*, 95: 2224-2235.
- 32) Radville L, McCormack ML, Post E, Eissenstat DM. (2016) Root phenology in a changing climate. *Journal of Experimental Botany* 67: 3617-3628.

II-3 超高解像度気候予測値と陸域生態系モデルによる炭素収支の評価

サブテーマリーダー

長野県環境保全研究所

自然環境部 温暖化対策班

栗林 正俊

〔要旨〕

2050年カーボンニュートラルを達成するためには、森林のCO₂吸収量を確保する必要があるが、我が国の森林の多くは高齢林でCO₂吸収量の低下が懸念されている。本研究では、力学的手法で高解像度化された1 km格子の気候予測値を陸域生態系モデルに入力して、近未来(2030~2050年)の気候・大気CO₂濃度環境下における長野県のカラマツ人工林の炭素収支を将来予測すること、将来の炭素収支に寄与する気候変動効果とCO₂施肥効果を定量的に評価すること、森林管理が将来の炭素収支に与える効果を定量的に評価すること、を目的とする。富士北麓フラックス観測サイトのカラマツ林を対象に陸域生態系モデルで計算された炭素収支をフラックス観測値と比較した結果、陸域生態系モデルに地上観測に基づく葉群フェノロジーと積算気温の関係を組み込むと、落葉季を中心に炭素収支の計算精度が向上し、生態系純生産量(NEP)の季節変化を良く再現することが示された。この陸域生態系モデルで長野県飯綱高原のカラマツ林における炭素収支を将来予測すると、林齢が100年生近くに達するにも関わらず、2050年頃は過去に比べて総光合成生産量(GPP)が21.6%、生態系呼吸量(ER)が26.1%、NEPが6.5%、それぞれ増加すると評価された。陸域生態系モデルの感度解析により、GPPの+21.6%の将来変化量の内訳は、CO₂施肥効果が6.7%で、気候変動効果が14.9%であること、ERの+26.1%の将来変化量の内訳は、CO₂施肥効果が7.4%で、気候変動効果が18.7%であること、NEPの+6.5%の将来変化量の内訳は、CO₂施肥効果が4.6%で、気候変動効果が1.9%であること、が明らかになった。また、2030年の炭素収支は、2020年に皆伐してカラマツを植林することで何もしない場合に比べて1.49倍に増加し、2025年に間伐率50%の間伐をしてカラマツを植林しても1.29倍に増加すると評価された。2050年の炭素収支は、2045年までに皆伐してカラマツを植林することで何もしない場合に比べて1.28~1.72倍に増加するが、カラマツの代わりにスギを植林すると何もしない場合と同程度か減少すると評価された。

1. 研究開発目的

2050年カーボンニュートラルに向けて地球温暖化対策計画の中期目標に掲げられた数値目標が2030年度に2013年度比で温室効果ガスの排出量を46%削減に引き上げられ、森林のCO₂吸収量の目標も約3800万tに引き上げられた。一方、国土の約67%を森林が占める我が国では、森林の約41%が人工林であるが、この人工林の多くは戦後の拡大造林期に植林されたもので、林齢50年以上の高齢林が人工林の約65%を占めているため、CO₂吸収量の低下が懸念されている。ゆえに、適正な森林管理により森林の公益的機能を強化していかなければ、2030~2050年の森林のCO₂吸収量を現在の水準に維持することは難しいと考えられる。

いかに温室効果ガスの排出削減を行ったとしても2030~2050年頃の大気CO₂濃度や気温の上昇は不可避であり、将来の高温・高CO₂濃度環境下における森林生態系の炭素収支を予測することは重要である。炭素収支を予測する上で、陸域生態系モデルは有効なツールである。陸域生態系モデルは、これまでも全球気候モデル(GCM)と結合されて、全球の炭素循環の気候変動応答が評価されるなど多くの重要な知見をもたらしてきた。しかし、GCMは空間解像度が粗く複雑地形上の気候を十分に表現できないので、地形が複雑で森林の大部分が山岳域に分布している我が国を対象に、将来の森林生態系の炭素収支を陸域生態系モデルで予測するためには、空間分解能が数kmの気候予測値が必要になる¹⁾。高解像度の気候予測値は、GCMの気候予測値を統計的手法か力学的手法でダウンスケールすることで得られる。統

計的手法は簡便であるが、炭素収支の予測に用いる陸域生態系モデルの入力に必要な日射量や積雪などの気象要素を網羅していない。一方、力学的手法は地域気候モデル(RCM)を利用するため膨大な計算を必要とするが、陸域生態系モデルの入力に必要な気象要素を全て取得することができる。ただし、力学的手法により空間解像度が数kmの長期間の気候予測値を取得する場合、計算機資源の制約のため計算領域は都道府県スケールに限定される。

国内随一の山岳地帯で地形の複雑な長野県は、全国3位の森林面積を有し人工林の約55%をカラマツが占めている。カラマツは冷涼な気候を好む樹種であることから気候変動に対して脆弱な可能性がある。一方、カラマツは林業樹種で唯一の落葉樹であることから、温暖化すると生長期間の長期化に伴う炭素吸収量の増大を予測した研究もあり²⁾、主要な林業樹種であるスギやヒノキに比べて気候変動の影響に関する不確実性が大きい。そこで、本研究ではRCMで力学的手法により1 km格子まで高解像度化した気候予測値を陸域生態系モデルに入力して、近未来(2030~2050年)の気候・大気CO₂濃度環境下における長野県のカラマツ人工林の炭素収支を将来予測することを目的とする。さらに、陸域生態系モデルの感度実験により、炭素収支の将来変化に寄与するCO₂施肥効果と気候変動効果を定量的に評価するとともに、皆伐とカラマツの植林、皆伐とスギの植林といった森林管理が2050年の炭素収支にもたらす効果を定量的に評価することも目的とする。

2. 研究目標

サブテーマ1と2の結果を陸域生態系モデルに組み込み、これに1 km格子の気候予測値を入力して、2030~2050年のカラマツ人工林の炭素収支を予測する。また、モデル感度解析により、炭素収支の将来変化に寄与するCO₂施肥と気候変動の各影響、および、間伐や樹種転換が将来の炭素収支に与える効果を定量的に評価する。

3. 研究開発内容

3-1. 観測サイト

本研究で利用する観測サイトを表3.1と図3.1に示す。サブテーマ1と2では長野県環境保全研究所飯綱庁舎(以下、飯綱)のカラマツ林において、気象要素、葉群フェノロジー、土壌呼吸などの観測が実施され、葉群フェノロジーと積算気温の関係式や土壌呼吸の温度感受性を示す Q_{10} が本研究に提供された。本研究では、サブテーマ1と2の観測に基づく知見を陸域生態系モデルに組み込んでカラマツ林の炭素収支を予測するが、長野県内のカラマツ林にフラックス観測サイトがないので、再現性の検証は隣県である山梨県の富士北麓フラックス観測サイト(以下、富士北麓)のカラマツ林を対象に実施し、渦相関法による

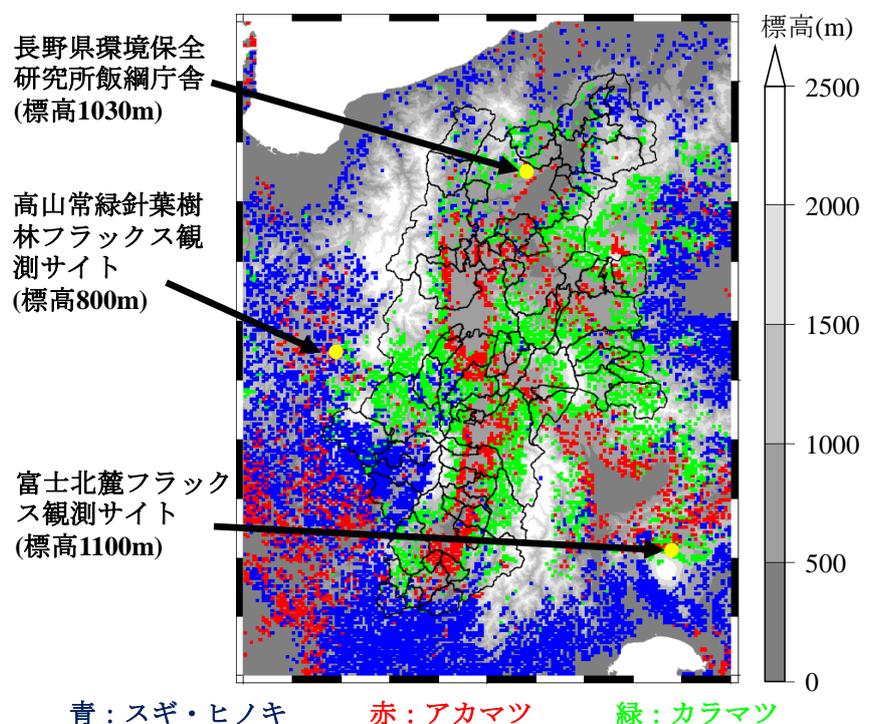


図3.1 環境省植生図に基づく長野県周辺の各林業樹種の空間分布と観測サイトの位置(黄色い点)。シェードは標高、黒線は県境界と市町村境界。

表3.1 観測サイトの位置、標高、林冠木、林齢、年平均気温、年降水量。

観測サイト名	略称	北緯	東経	標高	林冠木	林齢	年平均 気温	年降水量
長野県環境保全研究所 飯綱庁舎	飯綱	36° 43' 31"	138° 9' 13"	1030 m	カラマツ	60-70年	8.3°C	1551 mm
高山常緑針葉樹林 フラックス観測サイト	高山	36° 8' 23"	137° 22' 15"	800 m	スギ	50-60年	9.4°C	1700 mm
富士北麓フラックス 観測サイト	富士北麓	35° 26' 37"	138° 45' 53"	1100 m	カラマツ	60-70年	8.7°C	1844 mm

フラックス観測に基づいて推定された総光合成生産量(GPP)、生態系呼吸量(ER)、生態系純生産量(NEP)とモデルで再現された各要素の計算値を比較した。また、陸域生態系モデルで皆伐とスギの植林による感度実験を実施する際、カラマツとスギでは光合成や呼吸などの生理生態特性が異なるので、スギの生理生態特性に関する情報が必要になる。スギの生理生態特性に関する情報は、文献値^{3), 4)}をベースにしているが、中部山岳域のスギの特性に合うよう隣県である岐阜県の高山常緑針葉樹林フラックス観測サイト(以下、高山)を対象にチューニングした値を利用した。

3-2. 高解像度気候データ

高解像度気候データは、長野県環境保全研究所が平成27～31年に参画していた文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)にて開発されたもので、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)の計算結果(20 km格子)⁵⁾を気象研究所の非静力学地域気候モデル(Non-Hydrostatic Regional Climate Model: NHRCM)の境界条件に使用して、長野周辺地域を5 km格子、1 km格子と段階的にダウンスケールして得られたものである。図3.2にNHRCMによる20 km格子、5 km格子、1 km格子の各計算の計算領域を示す。これらの計算は、“過去”、“産業革命前+2°C上昇時”、“産業革命前+4°C上昇時”、の3つの時代について行われ、各時代について5 km格子の計算は1時代あたり372年分、1 km格子の計算は1時代あたり15年分が実行された。各時代は、“過去”が20世紀末から21世紀初頭、“産業革命前+2°C上昇時”が21世紀中頃、“産業革命前+4°C上昇時”が21世紀末、にそれぞれ相当する。なお、d4PDFは未来と過去で極端現象の発生頻度や強度の違いを評価することを目的に作られたデータセットなので、気候モデルに入力する海水面温度の空間分布などの条件に摂動を与えてアンサンブルメンバー数を確保している。ゆえに、“過去”といっても現実的な過去を再現したものではなく、仮想的な過去を意味している。水平解像度の高い計算ほど計算領域が狭く、アンサンブルメンバー数が少ないのは、水平解像度が高くなるほど指数関数的に計算負荷が大きくなるためである。5 km格子の372年分の計算結果から1 km格子の15年分の計算事例を選択する際は、長野周辺地域の積雪深で順位付けし、多雪年、平均年、少雪年を5事例ずつ抽出して、1 km格子の計算の対象とした⁶⁾。これは、積雪は陸域生態系のフェノロジーを決める上で重要な気象要素であることに加え、防災や水資源などの点でも重要だからである。

d4PDFをNHRCMの境界条件に用いた計算の他に、気象庁55年長期再解析データ(JRA55)⁷⁾をNHRCMの境界条件に用いた再現計算も5 km格子で1980～2015年の36年分実行された。本研究では、陸域生態系モデルの計算精度を検証するために

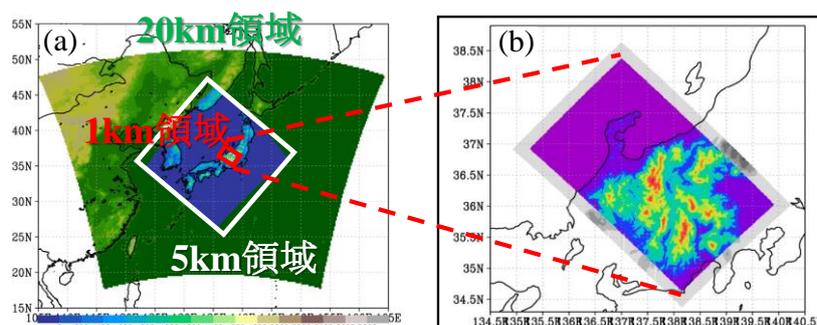


図3.2 地域気候モデル(NHRCM)の計算領域。(a)計算領域全体、(b)1km格子の計算領域を拡大。

富士北麓の炭素収支を再現計算する際には、JRA55をNHRCMの境界条件に用いた過去の気候再現計算結果を陸域生態系モデルの入力に利用した。一方、炭素収支の将来予測計算や感度計算などを行う際には、d4PDFを境界条件に用いた仮想的な過去や産業革命前+2℃上昇時の1 km格子の計算結果を利用した。

3-3. 陸域生態系モデル

陸域生態系モデルはVISIT (Vegetation Integrated Simulator for Trace gases) を用いた^{8), 9)}。VISITは、個葉の光-光合成曲線から群落の光合成速度を計算した物質生産理論¹⁰⁾などの植物生理生態プロセスに基づくモデルで、炭素循環などの生物地球化学的過程や熱・水収支などの生物物理学的過程を統合的に扱うことができる。VISITの構造としては、陸域生態系を葉、幹・枝、根、枯死物、鉱物質土壌の計5つのコンパートメントに分けて、各コンパートメントへの炭素の貯留と移動を生化学的プロセスに基づいて計算する¹¹⁾。VISITは、CO₂以外にもCH₄やN₂Oなど温室効果ガスとして重要な微量成分気体の動態も計算することができるだけでなく、空間規模もサイトレベル⁸⁾から全球レベル⁹⁾まで対応することができる。サイトレベルの計算の場合、落葉樹に関しては気象条件に明敏に応答する葉群フェノロジーを正確に表現することで、光合成生産可能な期間の長さを捉えることが可能になり、光合成によるCO₂吸収量の計算精度を高度化することにつながる。本研究では、基本的にサブテーマ1の地上観測に基づく葉群フェノロジーと積算気温の関係式をVISITのフェノロジースキームに組み込んだ。また、冷温帯落葉広葉樹林を対象に土壌呼吸量が生態系呼吸量に占める割合をVISITで感度評価した研究では、土壌呼吸量が生態系呼吸量の67%を占めたことを報告しており¹²⁾、土壌呼吸の温度感受性を示すQ₁₀をサイトの土壌の特性に合った値にすることで、土壌呼吸による大気中へのCO₂放出量の計算精度を高度化することにつながる。本研究では、基本的にサブテーマ2で観測されたQ₁₀をVISITに組み込むが、富士北麓における再現計算をする際には、富士北麓における土壌呼吸観測¹³⁾により得られたQ₁₀をVISITに組み込んだ。

3-4. 炭素収支シミュレーション

富士北麓のカラマツ林を対象にVISITで炭素収支の再現計算を実施する際には、VISITのフェノロジースキームに地上観測に基づく葉群フェノロジーと積算気温の関係式を組み込んだ場合と、Nagai et al. (2015)¹⁴⁾の衛星観測に基づく葉群フェノロジーと積算気温の関係式を組み込んだ場合の2種類の計算を行い、それぞれ再現精度をフラックス観測値と比較・検証した。この炭素収支の再現計算では、VISITのスピナップを2000年分とり、本計算の期間は1948~2015年として、カラマツ人工林の造林を開始した年は1950年に設定した。気象データはJRA55をNHRCMの境界条件に用いた5 km再現計算の日別値を用いるが、1979年以前の部分については1980~2015年のNHRCM計算結果を繰り返し連結する形で疑似的な長期気候データとした。すなわち、このVISITによる炭素収支の再現計算では、過去の気候は1980~2015年の水準で定常状態を仮定した。本来は全ての計算期間について、高解像度気候データがあることが望ましいが、50年を超える高解像度計算には膨大な計算負荷がかかるため、このような手法としている。

次に、飯綱のカラマツ林を対象にVISITで炭素収支の過去計算、将来計算、感度計算をす

表3.2 VISITによる炭素収支計算のデザイン。

計算	気候	CO ₂ 濃度	間伐・植林
過去計算(CTL)	過去	過去	なし
将来計算(FUT)	将来	将来	なし
感度計算(SEN _{Fclim})	将来	過去	なし
感度計算(SEN _{Fco2})	過去	将来	なし
感度計算(SEN _{PL})	将来	将来	あり

将来変化 = FUT - CTL

$$\text{CO}_2\text{施肥効果} = \frac{(\text{FUT} - \text{SEN}_{\text{Fclim}}) + (\text{SEN}_{\text{Fco2}} - \text{CTL})}{2}$$

$$\text{気候変動効果} = \frac{(\text{FUT} - \text{SEN}_{\text{Fco2}}) + (\text{SEN}_{\text{Fclim}} - \text{CTL})}{2}$$

$$\text{植林効果} = \text{SEN}_{\text{PL}} - \text{FUT}$$

る際は、表3.2に示した気候、大気CO₂濃度、間伐・植林の有無を制御した数値計算を実施し、各計算の差分に基づき2050年頃の炭素収支の将来変化、それに対するCO₂施肥と気候変動の各効果の寄与、および間伐・植林の効果をそれぞれ評価した。過去計算における本計算の期間は1948～2010年に設定し、将来計算や感度計算における本計算の期間は1948～2050年に設定して、いずれの計算においてもスピニングは2000年分とり、カラマツ人工林の造林を開始した年は1958年に設定した。過去計算の気候データはd4PDFをNHRCMの境界条件に用いた1 km格子の過去計算、将来計算や感度計算の気候データはd4PDFをNHRCMの境界条件に用いた1 km格子の産業革命前+2°C上昇時の計算をそれぞれ用いた。気候データの不足する期間は、同じ気候データを繰り返し連結する形で疑似的な長期気候データとしたので、過去計算や将来計算ではそれぞれ過去の気候や産業革命前+2°Cの気候での定常状態を仮定している。大気CO₂濃度はRCP8.5シナリオに基づく値を使用した。大気CO₂濃度が「過去」の場合は、2010年以降は389 ppmで固定し、「将来」の場合は2050年の値(541 ppm)まで漸増させた。なお、漸増といっても2030年は449 ppmで、2050年に向かって加速的に増加している。間伐・植林の感度計算は、2020、2025、2030、2035、2040、2045年のいずれかのタイミングで、間伐率50%の間伐とカラマツ植林、皆伐とカラマツ植林、皆伐とスギ植林、のいずれかを1回施業して、2030年と2050年時点の炭素収支を比較することで、これらの年の森林CO₂吸収量を増やすのに最適な森林管理の方法と施業時期を評価した。皆伐・植林の感度計算でスギを植林する場合には、VISIT内の光合成や呼吸に関する生理生態パラメーターを高山でチューニングされた値に変更し、カラマツを植林する場合には、各パラメーターは変更しない。本研究で用いたカラマツとスギの光合成や呼吸に関する主な生理生態パラメーターは表3.3に示したとおりである。

表3.3 VISITによる間伐・植林の感度計算の際のカラマツとスギの光合成と呼吸に関する主な生理生態パラメーターの設定。

パラメーター	単位	カラマツ	スギ
最大光合成速度	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	14	14
葉の炭素配分係数		0.10	0.35
地上部の炭素配分係数		0.67	0.67
比葉面積	$\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$	150	110
最適温度	°C	18	20
葉の成長呼吸係数	g C g C^{-1}	0.40	0.30
幹の成長呼吸係数	g C g C^{-1}	0.18	0.10
根の成長呼吸係数	g C g C^{-1}	0.32	0.20
葉の維持呼吸係数	$\text{mg C g C}^{-1} \text{ day}^{-1} (15^\circ\text{C})$	1.30	1.80
細根の維持呼吸係数	$\text{mg C g C}^{-1} \text{ day}^{-1} (15^\circ\text{C})$	0.50	0.60
粗根の維持呼吸係数	$\text{mg C g C}^{-1} \text{ day}^{-1} (15^\circ\text{C})$	0.16	0.02
辺材の維持呼吸係数	$\text{mg C g C}^{-1} \text{ day}^{-1} (15^\circ\text{C})$	0.03	0.08
心材の維持呼吸係数	$\text{mg C g C}^{-1} \text{ day}^{-1} (15^\circ\text{C})$	0.004	0.003

4. 結果及び考察

4-1. 気象データのモデル再現性

図3.3に富士北麓における気象観測値とJRA55をNHRCMの境界条件に用いて5 km格子で各気象要素を再現計算したモデル値を比較した結果を示す。日平均気温に関しては、冬季にモデルがやや過小評価する傾向があるもののモデルは日々の気温変化をよく再現しており、地上2 mの観測値とはよく一致している(図3.3a)。観測値同士でも温度計の設置してある地上高度により値は異なり、地上高が高くなるほど日平均気温は高い。一般的には、標高が100 m上昇すると気温は0.65°C程度低下することから、フラックスタワーに設置した温度計の高度差(30 m)では高いところに設置した温度計の方が約0.2°C気温が低くなるはずである。しかし、低いところに設置した温度計は晴天日の夜間に発達する接地逆転層の影響と、樹冠の下が日中は日陰になりやすい影響を受けるので、日平均気温の観測値は地上高度が高い場所ほど高くなったと考えられる。

降水量に関しては、2015年の観測値に欠測が多かったため累加降水量を計算できていないが、2013

年と2014年はいずれもモデル値が観測値に比べて年間500 mm程度大きい傾向がある(図3. 3b)。ただし、これは必ずしもモデルの過大評価とは言えず、観測値が実際の降水量を過小評価している可能性もある。例えば、2014年のDOY50頃に注目すると、モデルの降水量が大きく増加しているのに対して、観測の降水量はほとんど増えておらず、大きな差が生じている。同時期の日最大積雪深を見ると、モデルも観測も150 cmを超える程度まで大幅に増加しており、大雪が降ったことが伺える(図3. 3d)。積雪深の観測値が大幅に増加しているのに、降水量の観測値がほとんど増えていないのは矛盾であり、雨量計が雪を捕捉できていない可能性がある。風速が強くなると雨量計の降水の捕捉率は指数関数的に減少し、雪

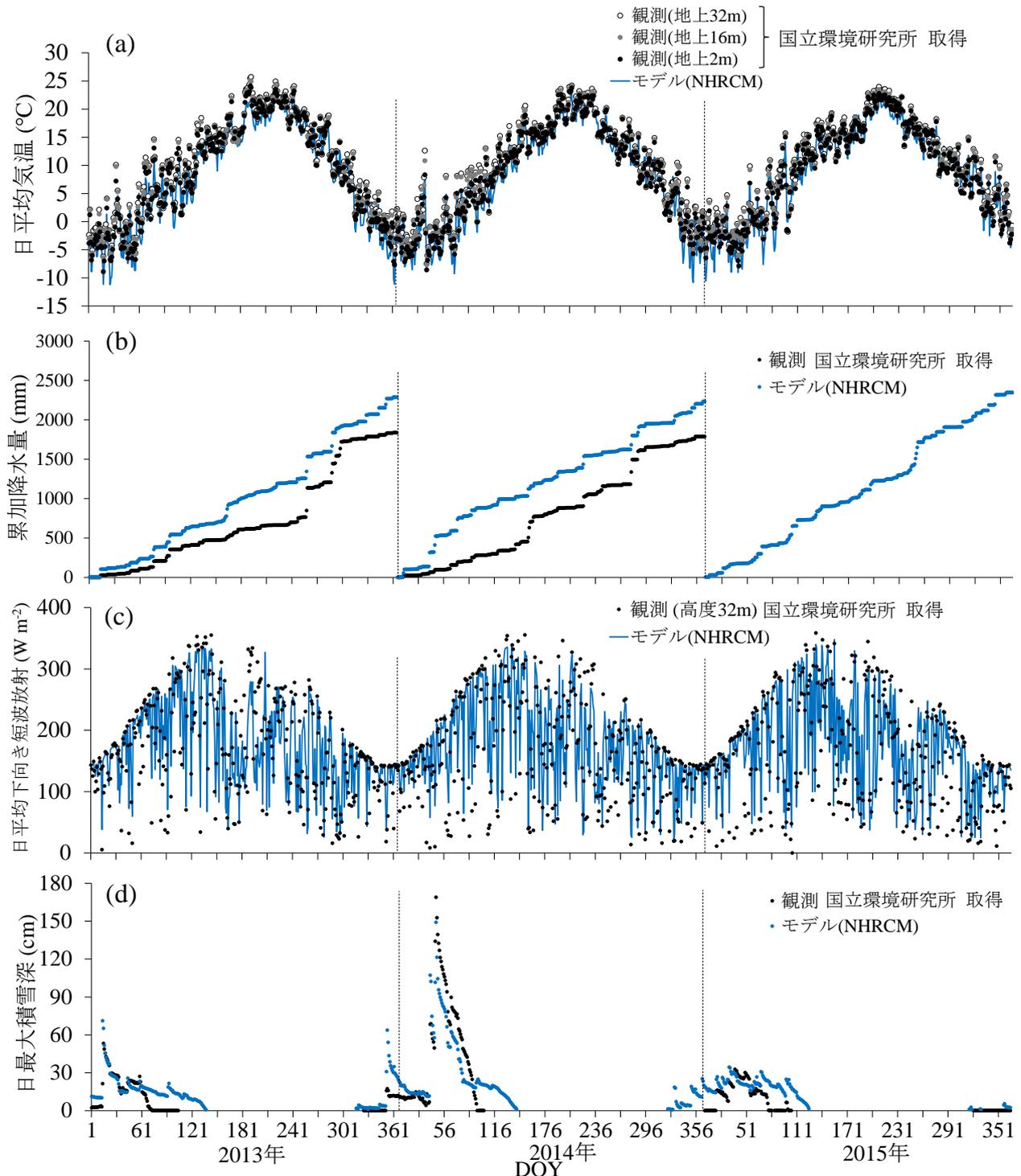


図3. 3 富士北麓フラックス観測サイトにおける各気象要素の観測値とモデル値の比較。(a) 日平均気温、(b) 累加降水量(2015年は欠測)、(c) 日平均下向き短波放射、(d) 日最大積雪深。DOY (Day of year)は1月1日からの日数。

は雨に比べてより風速に反応して急激に捕捉率が低下するので、雨量計による降水量の観測値の大きな誤差要因である¹⁵⁾。ゆえに、降水量が観測に比べてモデルの方が大きいのは妥当な結果と考えられる。累加降水量が増加しているタイミングに着目すると、モデルと観測でよく一致していることからモデルは降水現象が発生したかどうかを再現できていると考えられる。

日平均下向き短波放射に関しては、モデルと観測で季節変化はよく一致しているが、経日変化は変動幅が大きく必ずしも一致しているとは言えない(図3.3c)。季節変化は基本的に太陽高度で決まるので、どの時期も晴天日にモデルと観測がよく一致するのは当然のことと言える。一方、DOY180前後の梅雨時期に観測値が低くなるのをモデルが再現できていることは、このモデル値をVISITに入力して光合成を計算することを念頭において考えると非常に重要なことである。日々の下向き短波放射は、モデルが日中の雲量を正確に再現できなければ観測と一致しないと考えられる。再現できていない日に関しては、水平解像度5 kmのNHRCMでは局地的な雲を再現できずに過大評価することや、曇天日に観測地点周辺だけが局地的に晴れている時にモデルは過小評価になることなどが考えられる。仮に水平解像度1 kmに高解像度化しても、モデルが雲の発生する位置を正確にシミュレーションするのは困難なことから、日々の下向き短波放射に関しては高解像度化するだけでは精度が向上するか分からない。

日最大積雪深に関しては、モデルと観測で各年の最大値はよく一致しているが、消雪日はモデルが観測に比べて遅い(図3.3d)。これは、モデルは降雪量をきちんと再現できているのに対して、春先の融雪量を過小評価していることを示唆している。モデルは冬季の日平均気温をやや過小評価していたことから、日平均気温0℃付近の日が続く時期には、気温の過小評価が影響してモデルの中では融雪が進まないと考えられる。モデルは観測に比べてどの年も消雪日が1ヵ月以上遅いので、このモデル値をVISITに入力して光合成を計算すると、下層植生が常緑低木や常緑草本で構成されるような森林においては下層植生の光合成量を過小評価してしまうことや、春先の土壌呼吸量を過小評価してしまうことなどが懸念される。富士北麓フラックス観測サイトのような山の斜面では、モデルの水平解像度を高めることで標高や斜面の向きなどがより現実に近くなることが期待できるので、今回明らかになった消雪日が遅い問題もモデルの水平解像度を1 kmにすることで改善する可能性がある。

4-2. 炭素収支のモデル再現性

図3.4にフラックス観測値に基づいて推定されたGPP、ER、NEPと、NHRCMの気候再現計算結果をVISITに入力してGPP、ER、NEPを再現計算したモデル値を比較した結果を示す。なお、VISITの計算値は2種類あり、1つはVISITのフェノロジースキームにNagai et al. (2015)¹⁴⁾の衛星観測に基づく式を組み込んだケース、もう1つはフェノロジースキームにサブテーマ1の地上観測に基づく式を組み込んだケースで、それぞれ積算気温の閾値は図1.8の1000~1200 mの標高帯における値を利用した。

GPPに関しては、VISITのフェノロジースキームにサブテーマ1の地上観測に基づく式を組み込んだ再現計算は、展葉季、落葉季ともに観測値とよく整合している(図3.4a)。一方、VISITのフェノロジースキームに衛星観測に基づく式を組み込んだ再現計算は、展葉季は観測値と整合しているものの落葉季のGPPを過小評価している。これは、衛星観測では植生指数GRVI (Green Red Vegetation Index)から展葉開始日と落葉完了日を定義しているので、秋季にはカラマツの黄葉に伴うGRVIの変化を捉えてしまい、落葉完了日を実際よりも早く検出してしまうことが反映された結果と考えられる。なお、VISITの2種類の再現計算結果はどちらも夏季のGPPの極大値を過小評価しているが、この原因の1つにVISITはカラマツの光合成能力の季節変化を考慮していないことが考えられる。また、GPPの観測値は経日変化の変動幅が計算値に比べて大きい、これは日々のGPPが下向き短波放射量に強く依存していることに起因しており(図3.3c)、VISITに入力するNHRCMの下向き短波放射量の精度が向上すれば、VISITによるGPPの再現精度の向上が期待できる。

ERについても、衛星観測に基づくフェノロジーと積算気温の関係式をVISITに組み込んだ計算より、地上観測に基づくフェノロジーと積算気温の関係式をVISITに組み込んだ計算の方が、落葉季に観測値

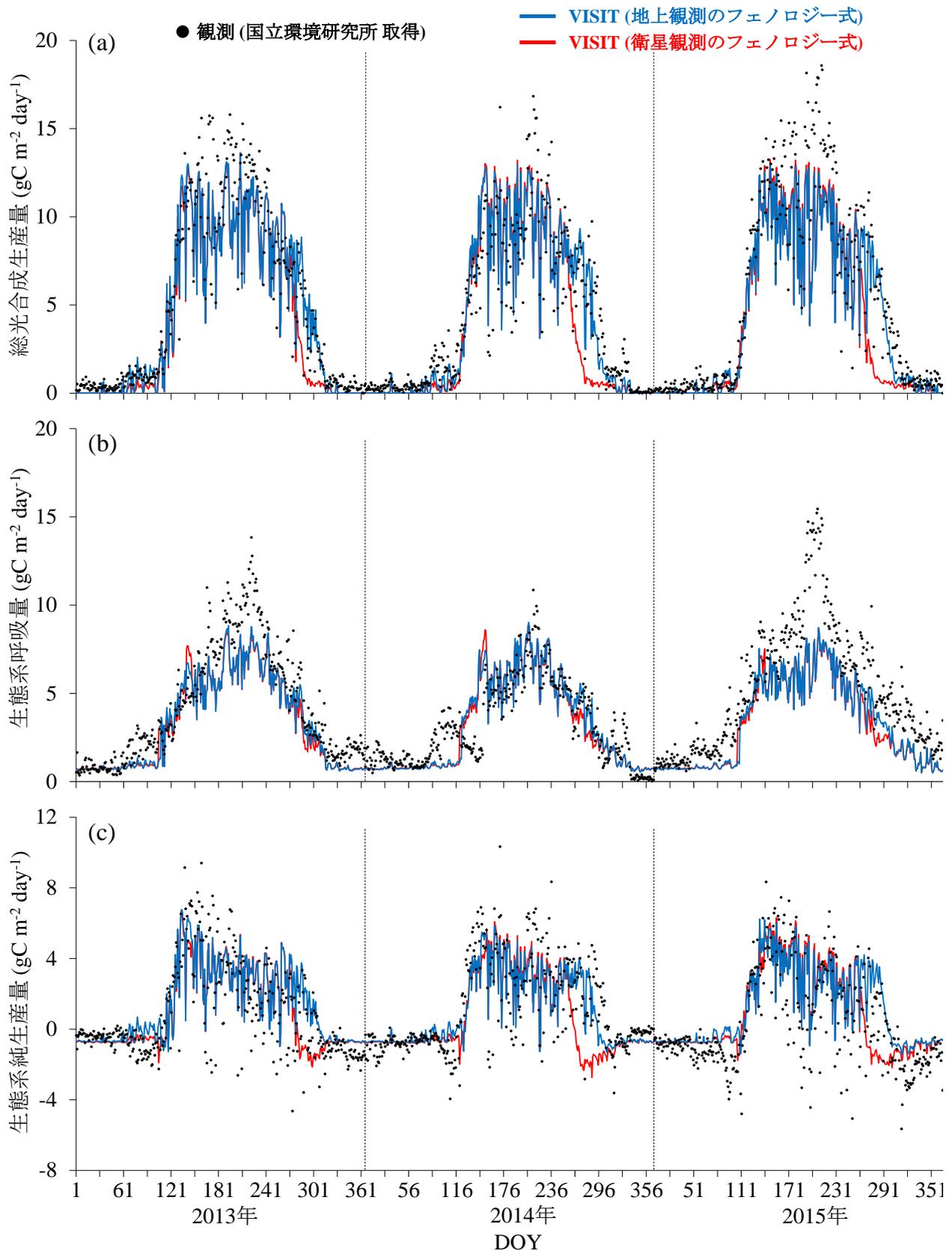


図3.4 富士北麓フラックス観測サイトにおける(a)総光合成生産量(GPP)、(b)生態系呼吸量(ER)、(c)生態系純生産量(NEP)、の観測に基づく推定値とVISITによる計算値の比較。DOY (Day of year)は1月1日からの日数。

と近い値を示している(図3.4b)。これは、前者は後者に比べて落葉季に早く成長が止まってしまう分だけ、成長呼吸量を過小評価することと、落葉により葉の維持呼吸量を過小評価することが原因と考えられる。一方、後者は光合成可能な期間が現実に近いので、落葉季の成長呼吸量と葉の維持呼吸量が現実に近くなり、結果としてERの過小評価が緩和されたと考えられる。2つのモデル値はどちらも春先のERを過小評価するが、これは図3.3dのとおりNHRCMの積雪の計算値は消雪日が遅いため土壌温度が上昇し始めるタイミングも遅れていることが考えられる。また、2015年は夏季にERの観測値の極大が2014年の1.5倍程あるが、これは2014年に富士北麓フラックス観測サイトで間伐が行われたことと関係している可能性がある¹³⁾。すなわち、間伐後に一部の材が利用されずに残置され、これが夏季の高温条件下で分解された可能性がある。

NEPについても、衛星観測に基づくフェノロジーと積算気温の関係式をVISITに組み込んだ計算よりも、地上観測に基づくフェノロジーと積算気温の関係式をVISITに組み込んだ計算の方が、落葉季の再現精度が高い(図3.4c)。この理由は、NEPがGPPからERを引いた値であることから、GPPとERのモデルの再現性について記載したことと同じである。NEPの観測値の季節変化を詳細に見ると、葉が着いていない非成長期間は0よりやや低い値で推移し、展葉が始まると一気に増加して梅雨入り前のDOY150(5月末頃)に極大があり、秋に向かって徐々に低下し、落葉が始まると一気に低下して、次の展葉を迎えるまでは0よりやや低い値で安定している。モデルはこのNEPの季節変化を概ね良く再現できている。なお、NEPの極大がDOY150頃になる理由として、この時期の日長が長く好天に恵まれやすいことと、梅雨明け後の盛夏季は暑くなり梅雨入り前に比べてERが高いことが挙げられる。

4-3. 過去と将来の炭素収支

表3.2に示したVISITによる再現計算、予測計算、感度計算で得られた葉面積指数(LAI)、GPP、ER、NEPの季節変化を図3.5に示す。GPP、ER、NEPは経日変化の変動幅が大きいため、CTLは2005~2010年の6年分の計算結果、FUTとSEN_{Fclim}とSEN_{Fco2}は2045~2050年の6年分の計算結果を、それぞれ日毎に平均して平滑化した。

GPPを計算する上で重要なパラメーターであるLAIは、将来気候下における気温の上昇を反映して、FUTやSEN_{Fclim}はCTLやSEN_{Fco2}に比べて展葉開始が9日早く落葉完了が13日遅い(図3.5a)。また、将来はカラマツが成長する分だけ葉量も多くなり、FUTはCTLに比べて最大LAIが約1.39高い。一方、非着葉期のLAIは将来の方が過去に比べて僅かに減少しているが、これは林冠木であるカラマ

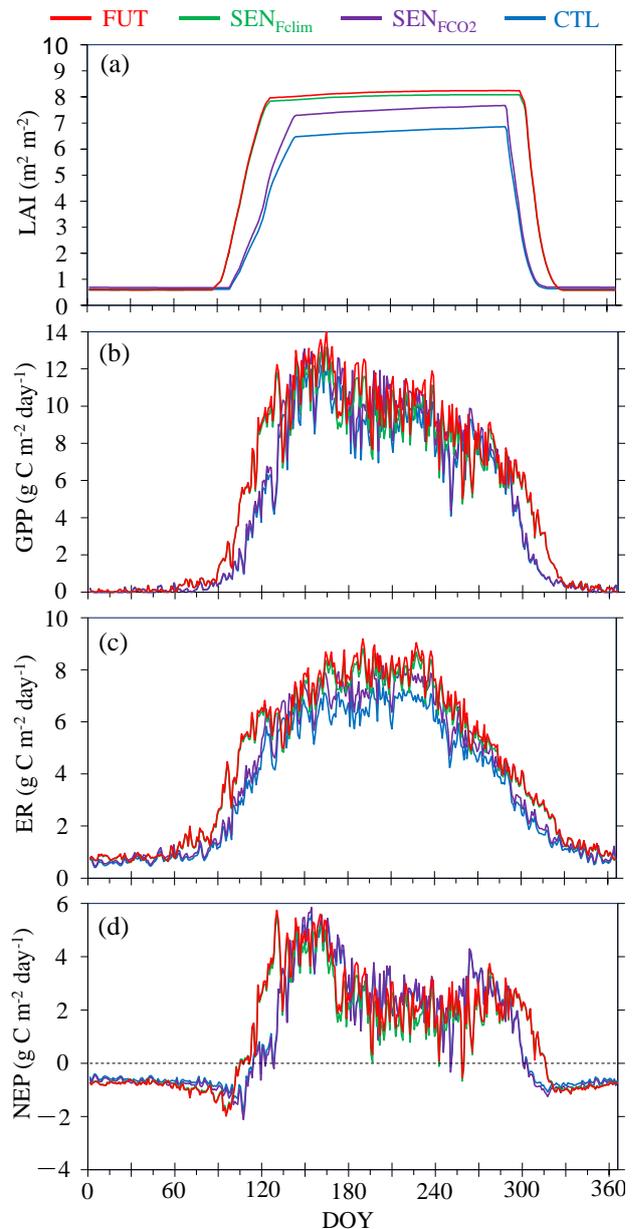


図3.5 VISITによる各計算(表3.2)の(a)葉面積指数(LAI)、(b)総光合成生産量(GPP)、(c)生態系呼吸量(ER)、(d)生態系純生産量(NEP)、の季節変化。

ツの最大LAIが増加することにより、林床に差し込む光量が減少し、下層植生のクマイザサが僅かに衰退した結果と考えられる。

将来気候下のGPPは、展葉の早期化と落葉の晩期化を反映して、FUTや SEN_{Fc1im} はCTLや SEN_{Fc02} に比べて展葉季と落葉季に高い(図3.5b)。特に、展葉季は落葉季に比べて日長が長く気温も高い上、葉も老化していないので、相対的にGPPの増加量がより多い。一方、FUTはCTLに比べて最大LAIが高いのに対して、盛夏季のGPPは僅かにFUTの方がCTLより高い程度である。これは、高齢林においては成長して葉量が増加したとしても、相互被陰により群落全体としての物質生産性は向上しないことを示唆している。また、FUTと SEN_{Fc1im} を比べると、盛夏季はFUTの方が SEN_{Fc1im} よりGPPが少し高く、将来の大気 CO_2 濃度の上昇は盛夏季のカラマツの成長を促進していると考えられる。

将来気候下のERも、展葉の早期化に伴う葉の成長呼吸や維持呼吸の増加を反映して、FUTや SEN_{Fc1im} はCTLや SEN_{Fc02} に比べて展葉季に高いが、落葉季については気温や地温が低いこともあり落葉が晩期化してもERは少し増加する程度である(図3.5c)。一方、FUTはCTLに比べて盛夏季のERが高い。ERは温度が上がると指数関数的に増加するので、もともと気温や地温が高い盛夏季は温暖化するとERが顕著に増加すると考えられる。また、DOY60~90の展葉前の時期もFUTはCTLに比べてERが少し高いが、これは将来気候下では消雪が早まることで春先に地温が上昇するタイミングも早まり、この時期の土壌呼吸量が増加したと考えられる。

将来気候下のNEPは、展葉季と落葉季のGPPの増加によりFUTや SEN_{Fc1im} はCTLや SEN_{Fc02} に比べて展葉季と落葉季に高いが、盛夏季や春先の展葉前の時期はERの増加によりFUTや SEN_{Fc1im} はCTLや SEN_{Fc02} に比べて少し低い(図3.5d)。年間通してのCTLとFUTを定量的に比較すると、FUTはCTLに比べてGPPが21.6%、ERが26.1%、NEPが6.5%それぞれ高い。すなわち、カラマツ林は林齢が100年生近くに達する2050年頃でもある程度の炭素吸収能力があり、林齢を重ねたとしても気候変動に伴う光合成可能期間の長期化や大気 CO_2 濃度の上昇に伴う施肥効果によって将来は過去よりも炭素収支が6.5%増加すると解釈できる。なお、長野県川上村の114年生のカラマツ人工林における伐倒木9個体の年輪解析では、80年生代前半より90年生前後で成長量が高まり、以降は徐々に低下していく傾向が見られるものの樹高成長は114年生まで継続されたことが確認されている¹⁶⁾。

4-4. CO_2 施肥効果と気候変動効果

図3.6にGPP、ER、土壌呼吸量、NEPについて、表3.2に示した式に基づき CO_2 施肥効果と気候変動効果を月毎に評価した結果を示す。GPPは3~11月に増加するが、 CO_2 施肥効果の寄与は5~9月にほぼ集中した(図3.6a)。一方、気候変動効果は4、5月の展葉季と10、11月の落葉季に顕著な寄与を示すが、7月にもある程度の寄与を示した(図3.6a)。 CO_2 施肥効果が集中している5~9月は過去気候(CTLや SEN_{Fc02})において光合成が盛んに行われる期間と一致する(図3.5b)。気候変動効果によるGPPの増加は、時期に応じてメカニズムが異なり、将来気候(FUTや SEN_{Fc1im})でも展葉開始前の3月は消雪の早期化に伴う下層植生(クマイザサ)の光合成の増加、4、5月は展葉の早期化に伴うカラマツの光合成の増加、10、11月は落葉の晩期化に伴うカラマツの光合成の増加、をそれぞれ反映している(図3.5b)。7月については明確な理由は分からないが、梅雨期間の変化に伴う日射量の変化などを反映している可能性があり、今後、検証する必要がある。

ERは温度が上昇すると指数関数的に増加する性質があるので、基本的に暖かい月ほど増加量が多く、 CO_2 施肥効果の寄与は4~10月、気候変動効果の寄与は3~11月にほぼ集中した(図3.6b)。 CO_2 施肥効果は、将来の高い大気 CO_2 濃度下で光合成が促進されて植物体が成長することにより、成長呼吸量が増えることを反映している。また、植物体が成長してバイオマス量が増加することで、維持呼吸量も増えると考えられ、非生長期間である冬季もERの将来変化量に僅かな CO_2 施肥効果の寄与があるのは、維持

呼吸量の増加を裏付けている(図3.6b)。土壌呼吸量のCO₂施肥効果もERと類似しており(図3.6c)、根の成長呼吸量と維持呼吸量の増加や、CO₂施肥効果でリターフォール量が増えることに伴う微生物呼吸量の増加を反映していると考えられる。一方、ERの将来変化量に対する気候変動効果も基本的には温度の高い時期に大きいが、CO₂施肥効果ほど温度との関係が明瞭ではない(図3.6b)。例えば、気候変動効果は4月が最も大きく、3月や11月も温度が低いにも関わらず5月や9月と同程度の寄与である。4月は気温上昇に伴う展葉の早期化で葉の成長呼吸量が増加したことを反映していると考えられる。このことは、土壌呼吸量の将来変化量に対する気候変動効果が4月に大きくないことも整合的である(図3.6c)。3月や11月は将来気候下での消雪の早まりや積雪開始時期の遅れにより地温が上昇し、土壌呼吸量が増加することを反映していると考えられる(図3.6b-c)。

NEPの将来変化量は4, 5, 10, 11月に正の値で、展葉季の方が落葉季よりも増加量が多い(図3.6d)。これは、展葉季の方が落葉季に比べて日射量が多いことや葉の光合成能力が高いことなどを反映していると考えられる。一方、他の月は負の値で、特に6~9月はERが温度に対して指数関数的に増加することを反映して、NEPの減少量が比較的大きい(図3.6d)。CO₂施肥効果はカラマツが盛んに光合成をする5~9月に正の値を示したが、葉が着いていない月は僅かながら負の値を示した。これは、前述の植物体の成長に伴う維持呼吸量の増加に加えて(図3.6b)、CO₂施肥効果で林冠木であるカラマツが成長することで着葉期間は林床が暗くなり、下層植生のクマイザサが僅かに衰退したことも影響していると考えられる(図3.5a)。気候変動効果は展葉季と落葉季に正の値を示したが、他の時期は6~9月を中心に負の値を示した(図3.6d)。これは、気候変動は光合成可能期間を延ばしてGPPを増加させても夏季を中心にERを増加させるので、気候変動がNEPを増加させる時期は展葉季と落葉季に限定されることを意味する。

これらの解析の結果、4-3節で示した年間のGPPの+21.6%の将来変化量の内訳は、CO₂施肥効果が6.7%で、気候変動効果が14.9%であること、年間のERの+26.1%の将来変化量の内訳は、CO₂施肥効果が7.4%で、気候変動効果が18.7%であること、年間のNEPの+6.5%の将来変化量の内訳は、CO₂施肥効果が4.6%で、気候変動効果が1.9%であること、が明らかになった。すなわち、2050年頃のカラマツ林の炭素収支の増加には、気候変動効果よりもCO₂施肥効果の方が大きく寄与している。ただし、本研究における大気CO₂濃度はRCP8.5シナリオに基づく値を使用しているため、CO₂施肥効果は大きく評価されており、RCP2.6シナリオに基づく値を使用すると大気CO₂濃度があまり上昇しないためCO₂施肥効果の寄与は気候変動効果の寄与より

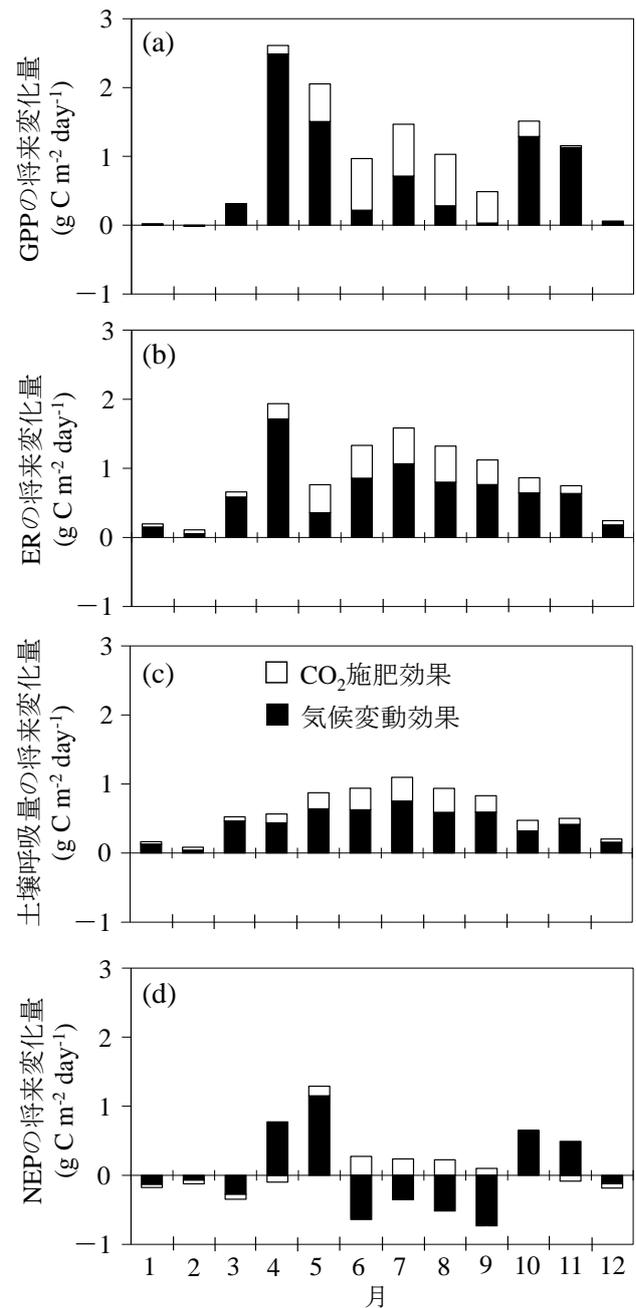


図3.6 VISITで評価された(a)総光合成生産量(GPP)、(b)生態系呼吸量(ER)、(c)土壌呼吸量、(d)生態系純生産量(NEP)、の将来変化量に寄与する各月のCO₂施肥効果と気候変動効果。

も小さくなる。また、Ito (2010)⁸⁾では苫小牧のカラマツ林を対象にVISITで長期的な高CO₂濃度下における光合成のダウンレギュレーションについて感度解析し、葉の窒素含有量が制限される条件下ではCO₂施肥効果で葉量が増加すると葉1枚あたりの窒素含有量は低下するので、光合成のダウンレギュレーションが生じてCO₂施肥効果は継続しないことを指摘している。本研究の結果に関しても、将来の飯網のカラマツ林が窒素制限下にあるか否かでCO₂施肥効果の寄与は変わると考えられ、VISITでの炭素循環プロセスと窒素循環プロセスのカップリングや、それを用いた森林生態系の炭素収支への気候変動応答の評価が今後の課題である。

4-5. 森林管理の効果

図3.7に間伐・植林が2030年と2050年のGPP、ER、NEPに与える影響について、表3.2に示した式に基づき評価した結果を示す。何もしない場合、2030年のGPPは18.5 (Mg C ha⁻¹ y⁻¹)であるが、2020年や2025年に間伐・植林をした場合、2030年のGPPは低下する(図3.7a)。この低下幅は、間伐率50%の間伐とカラマツ植林の施業であれば僅かだが、皆伐してカラマツやスギを植林する施業では大きく、スギを植林する方がカラマツを植林するよりも顕著に低下する。例えば、2025年に皆伐してカラマツを植林すると、

2030年のGPPは何もしない場合に対して0.70倍であるが、スギを植林すると0.17倍である。何もしない場合、2050年のGPPは20.2 (Mg C ha⁻¹ y⁻¹)であるが、2020~2045年の間に1回間伐・植林をした場合、施業年が2050年に近くなるほど急激に2050年のGPPは低下する(図3.7b)。この低下幅は、間伐率50%の間伐とカラマツ植林の施業であれば僅かだが、皆伐してカラマツやスギを植林する施業では大きく、スギを植林する方がカラマツを植林するよりも顕著に低下する。この皆伐してカラマツやスギを植林する施業による2050年のGPPの低下は、植林してから成熟した林が形成されるまでに長い時間を要することを意味しており、飯網のような寒冷地においては、産業革命前+2°Cの水準まで気候変動が進行したとしても、スギに比べてカラマツの方がよく成長すると解釈できる。

何もしない場合、2030年のERは15.0 (Mg C ha⁻¹ y⁻¹)であるが、2020年や2025年に間伐・植林をした場合、2030年のERは低下する(図3.7c)。このERの低下幅もGPPと同様に、間伐率50%の間伐とカ

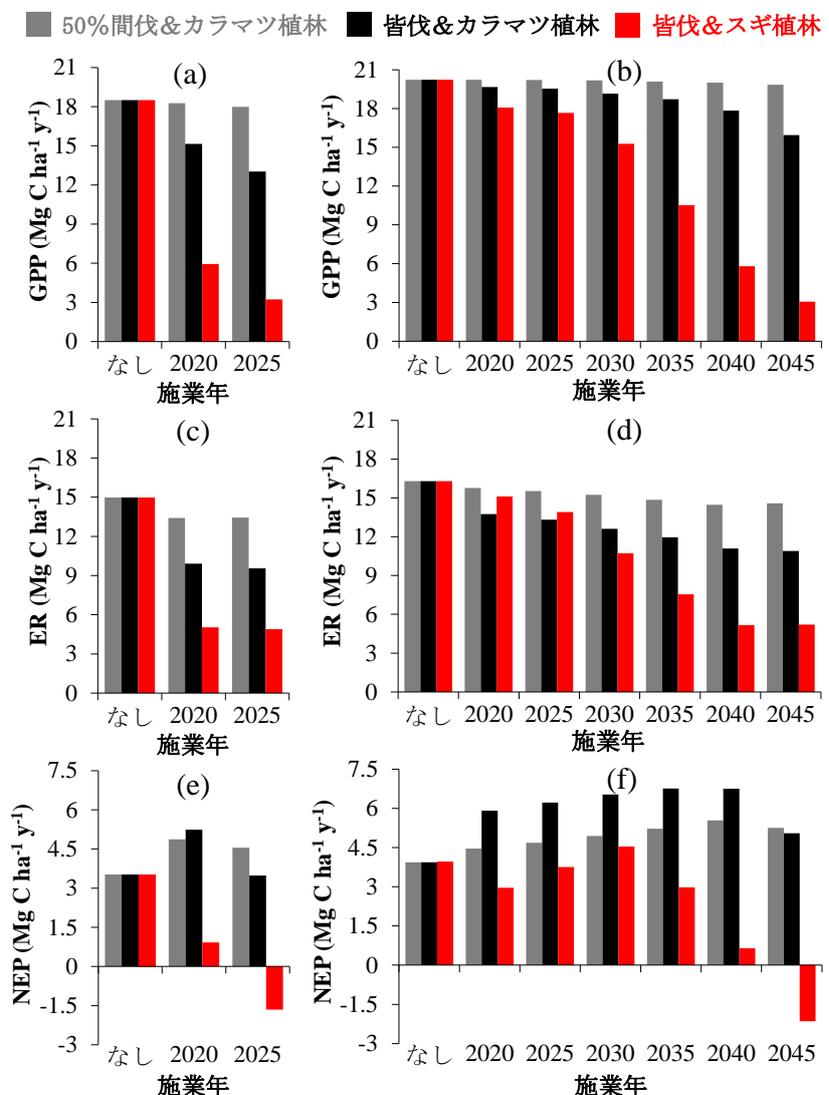


図3.7 間伐・植林が2030年と2050年の総光合成生産量(GPP)、生態系呼吸量(ER)、生態系純生産量(NEP)に与える効果。(a) 2030年のGPP、(b) 2050年のGPP、(c) 2030年のER、(d) 2050年のER、(e) 2030年のNEP、(f) 2050年のNEP。

ラマツ植林の施業であれば小さいが、皆伐してカラマツやスギを植林する施業では大きく、スギを植林する方がカラマツを植林するよりも顕著に低下する。ただし、カラマツを植林する場合は、GPPに比べてERの低下幅の方が大きいのに対し、スギを植林する場合は、2025年に施業するとGPPの低下幅の方がERの低下幅よりも大きい(図3.7a, c)。何もしない場合、2050年のERは $16.3 \text{ (Mg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1})$ であるが、2020~2045年の間に1回間伐・植林をした場合、施業年が2050年に近くなるに従い2050年のERは低下する(図3.7d)。このERの低下幅と施業年の関係は、GPPの低下幅と施業年の関係とは異なり、施業年が2050年に近くなるほど緩やかに2050年のERは低下する(図3.7b, d)。ただし、この傾向は森林管理方法によっても異なり、間伐率50%の間伐や皆伐をしてカラマツを植林する施業では、何もしない場合と2020年に施業する場合の間で2050年のERに比較的大きな差がある(図3.7d)。一方、皆伐をしてスギを植林する施業では、2025~2035年の時期に施業する場合は他の時期に施業するよりも2050年のERの低下幅が比較的大きい。また、スギに比べてカラマツの方が、2050年のERの低下幅と施業年の関係が緩やかで、2025年以前の施業であればERの低下幅はカラマツの方が大きい、2030年以降の施業であればERの低下幅はスギの方が大きい。この理由は2つ考えられ、1つはスギに比べてカラマツは成長呼吸係数が大きいので(表3.3)、植林してから20年程度はカラマツの方がスギに比べてERが大きいことである。もう1つは、植林してから20年程度はカラマツの方がスギに比べてGPPが大きいので(図3.7b)、植物体のバイオマス量もカラマツの方がスギに比べて大きくなり、維持呼吸量が大きくなっていることである。

何もしない場合、2030年のNEPは $3.5 \text{ (Mg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1})$ であるが、2020年や2025年に間伐・植林をした場合、森林管理方法に応じて2030年のNEPは異なる(図3.7e)。2020年に施業する場合は、皆伐してカラマツを植林すると2030年のNEPは最も大きくなり、何もしない場合に比べて1.49倍になる。間伐率50%の間伐をしてカラマツを植林しても、2030年のNEPは何もしない場合に比べて1.38倍になる。一方、皆伐してスギを植林すると0.26倍になり、何もしない場合よりも2030年のNEPは低下する。2025年に施業する場合は、間伐率50%の間伐をしてカラマツを植林すると2030年のNEPは最も大きくなり、何もしない場合に比べて1.29倍になる。一方、皆伐してカラマツを植林すると、2030年のNEPは何もしない場合に比べて0.99倍になり、炭素収支は何もしない場合よりも僅かに小さくなる。また、皆伐してスギを植林すると、2030年のNEPは何もしない場合に比べて-0.47倍になり、正味で森林から大気中へ CO_2 を放出する負の炭素収支となる。これらのことは、地球温暖化対策計画の中期目標に掲げられた2030年の森林 CO_2 吸収量を確保することを念頭に置くと、適度な間伐をして植林する方が皆伐して植林するよりも安定的に2030年の炭素収支の増加が見込める森林施業であることを示唆している。

何もしない場合、2050年のNEPは $3.9 \text{ (Mg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1})$ であるが、2020~2045年に間伐率50%の間伐をしてカラマツを植林すると、2050年のNEPは1.13~1.41倍に増やすことができ、2020~2045年に皆伐してカラマツを植林すると、2050年のNEPは1.28~1.72倍に増やすことができる(図3.7f)。2050年のNEPを最も高めることができる施業時期としては、間伐率50%の間伐とカラマツの植林を施業する場合は2040年、皆伐してカラマツを植林する場合は2035~2040年であった。2040年以前の施業であれば、皆伐してカラマツを植林することが2050年のNEPを高める上で最も効果的であるが、2045年以降の施業であれば、皆伐よりも間伐してカラマツを植林する方が、2050年のNEPを高めることができる。一方、皆伐してスギを植林する場合は、2030年の施業であれば2050年のNEPは何もしない場合に比べて1.15倍になるが、他の施業年だと何もしない場合よりも2050年のNEPは低下する。特に、2045年の施業だと2050年のNEPは何もしない場合に比べて-0.55倍になり、正味で森林から大気中へ CO_2 を放出する負の炭素収支となる。これらの結果は、2050年カーボンニュートラルを念頭に置くと、飯綱と同じような気候条件の地域では2040年までに皆伐してカラマツを植林することで、2050年の森林 CO_2 吸収量は増えるが、もしスギを植林する必要がある場合には、施業年を2030年にすることで、2050年の森林 CO_2 吸収量を確保できることを意味する。また、皆伐が困難であれば、間伐して植林することも効果的で、特に2040年以降の施業であれば皆伐よりも間伐の方が2050年の森林 CO_2 吸収量をより多く確保できることを示唆している。ただし、飯綱よりも標高が低く暖かい地域のカラマツ林においては、産業革命前+ 2°C の水準まで気候変動が進行するとカラマツよりもスギの方がよく成長し、2050年のNEPを高める可能性があり、標

高に応じた森林管理の炭素収支に対する効果の違いを評価することが今後の課題である。また、仮に2050年カーボンニュートラルやパリ協定の長期目標が達成されず、21世紀末に産業革命前+4℃の水準まで気温が上昇し続ける場合には、標高1000 m程度の地域においても21世紀末まで積算した森林CO₂吸収量としてはカラマツよりもスギの方が大きくなる可能性はあり、シナリオに応じた長期的な評価も今後の課題である。

飯綱のカラマツ林は2009年に間伐(本数調整伐)が行われているが、2002年に毎木調査が実施されているので、2018年にも毎木調査を実施し、間伐率33%と41%の調査区でカラマツ成長量の違いを比較した結果、直径成長量は間伐率の高い調査区の方が有意に高かった¹⁷⁾。このことは、本研究の結果と整合的であるが、本研究で扱った強度間伐や皆伐だけでなく、林業経営としてよく実施されている中度間伐や弱度間伐が炭素収支をどの程度増加させるのかを評価することも今後の課題である。近年は人工林資源の充実により主伐・再造林の動きが加速しているものの、皆伐は一時的に森林の多面的機能を損なうことになるので、各地域の森林が持つ多面的機能をきちんと評価することも今後の課題である。炭素収支は気候変動緩和策としての森林管理方法を考えるのに有効な指標であるが、森林所有者が経営判断をする上では森林の生態系サービスなども重要な資料になると考えられる。その他、林業政策という観点での課題は多いが、間伐材の利活用や林業の担い手の確保などの根本的な課題を克服して、主伐に踏み切る森林所有者を増やす政策をとることが、林業と気候変動緩和策の共便益を実現する上で重要である。

5. 研究目標の達成状況

サブテーマ1から提供された葉群フェノロジーと積算気温の関係式、およびサブテーマ2から提供された土壌呼吸速度の温度感受性 Q_{10} を陸域生態系モデルVISITに組み込んだ。このVISITに、d4PDFを地域気候モデルNHRCMの境界条件に用いて力学的に1 km格子まで高解像度化した気候予測値を入力して、2030～2050年のカラマツ人工林の炭素収支を予測した。この結果、2050年のカラマツ人工林の炭素収支は、林齢が100年生近くに達するにも関わらず、過去よりも6.5%増加することが示された。この将来変化量の内訳は、CO₂施肥効果が4.6%で、気候変動効果が1.9%であること、がVISITの感度解析により明らかになった。さらに、2030年の炭素収支は、2020年に皆伐してカラマツを植林することで1.49倍になり、2050年の炭素収支は、2045年までに皆伐してカラマツを植林することで1.28～1.72倍にできると評価された。また、2045年以降の施業であれば、皆伐よりも間伐してカラマツを植林する方が、2050年の炭素収支を高めることができることが示された。一方、標高1000 m程度のカラマツ林においては、産業革命前+2℃の水準まで気候変動が進行しても、カラマツに比べてスギは成長が遅く、もし皆伐してスギを植林すると、何もしない場合に比べて2050年の炭素収支は低下してしまう可能性があるとして評価された。以上のとおり、「2. 研究目標」に掲げた内容は全て達成された。

6. 引用文献

- 1) Masatoshi Kuribayashi, Namjin Noh, Taku M. Saitoh, Akihiko Ito, Yasutaka Wakazuki, and Hiroyuki Muraoka (2017) Current and future carbon budget at Takayama site, Japan, evaluated by a regional climate model and a process-based ecosystem model. *International Journal of Biometeorology*, 61(6): 989–1001.
- 2) Hisashi Sato, Hideki Kobayashi, Go Iwahana, and Takeshi Ohta (2016) Endurance of larch forest ecosystems in eastern Siberia under warming trends. *Ecology and Evolution*, 6(16): 5690–5704.
- 3) Jeffrey S. Amthor (1989) *Respiration and crop production*. Springer-Verlag, New York, 232pp.
- 4) Walter Larcher (2003) *Physiological plant ecology: Ecophysiology and stress physiology*

of functional groups, 4th edition. Springer-Verlag, 534pp.

- 5) Ryo Mizuta, Akihiko Murata, Masayoshi Ishii, Hideo Shiogama, Kenshi Hibino, Nobuhito Mori, Osamu Arakawa, Yukiko Imada, Kohei Yoshida, Toshinori Aoyagi, Hiroaki Kawase, Masato Mori, Yasuko Okada, Tomoya Shimura, Toshiharu Nagatomo, Mikiko Ikeda, Hirokazu Endo, Masaya Nosaka, Miki Arai, Chiharu Yakahashi, Kenji Tanaka, Tetsuya Takemi, Yasuto Tachikawa, Khujanazarov Temur, Youichi Kamae, Masahiro Watanabe, Hidetaka Sasaki, Akio Kitoh, Izuru Takayabu, Eiichi Nakakita, and Masahide Kimoto (2017) Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98:1383-1398.
- 6) Hiroaki Kawase, Takeshi Yamazaki, Shiori Sugimoto, Takahiro Sasai, Rui Ito, Takashi Hamada, Masatoshi Kuribayashi, Mikiko Fujita, Akihiko Murata, Masaya Nosaka, and Hidetaka Sasaki (2020) Changes in extremely heavy and light snow-cover winters due to global warming over high mountainous area in central Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7:10.
- 7) Shinya Kobayashi, Yukinari Ota, Yayoi Harada, Ayataka Ebita, Masami Moriya, Hirokatsu Onoda, Kazutoshi Onogi, Hirotaka Kamahori, Chiaki Kobayashi, Hirokazu Endo, Kengo Miyaoka, and Kiyotoshi Takahashi (2015) The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 93(1): 5-48.
- 8) Akihiko Ito (2010) Changing ecophysiological progresses and carbon budget in East Asian ecosystems under near-future changes in climate: implications for long-term monitoring from a process-based model. *Journal of Plant Research*, 123: 577-588.
- 9) Akihiko Ito, and Motoko Inatomi (2012) Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosciences*, 9: 759-773.
- 10) Masami Monsi, and Toshiro Saeki (1953) Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, 14: 22-52.
- 11) Akihiko Ito, and Takehisa Oikawa (2002) A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): a description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecological Modelling*, 151: 143-176.
- 12) Akihiko Ito, Motoko Inatomi, Wenhon Mo, Misun Lee, Hiroshi Koizumi, Nobuko Saigusa, Shohei Murayama, and Susumu Yamamoto (2007) Examination of model-estimated ecosystem respiration using flux measurements from a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in central Japan. *Tellus* 59B: 616-624.
- 13) Munemasa Teramoto, Naishen Liang, Yoshiyuki Takahashi, Jiye Zeng, Nobuko Saigusa, Reiko Ide, and Xin Zhao (2019) Enhanced understory carbon flux components and robustness of net CO₂ exchange after thinning in a larch forest in central Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 274: 106-117.
- 14) Shin Nagai, Taku M. Saitoh, Kenlo Nishida Nasahara, Rikie Suzuki (2015) Spatio-temporal distribution of the timing of start and end of growing season along vertical and horizontal gradients in Japan. *International Journal of Biometeorology*, 59: 47-54.
- 15) 横山宏太郎, 大野宏之, 小南靖弘, 井上聡, 川方俊和 (2003) 冬期における降水量計の捕捉特性. 雪氷, 65(3): 303-316.
- 16) 大矢信次郎, 戸田堅一郎, 柳澤賢一, 西岡泰久 (2020) 高齢級人工林の管理技術に関する研究. 長野県林業総合センター研究報告, 34: 1-10.
- 17) 尾関雅章, 栗林正俊 (2019) 長野市飯綱高原におけるカラマツ高齢人工林の樹木成長. 長野県環境保全研究所研究報告, 15: 45-49.

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ2】

Naoki Makita, Roma Fujimoto, Azusa Tamura (2021) The contribution of roots, mycorrhizal hyphae, and soil free-living microbes to soil respiration and its temperature sensitivity in a larch forest. *Forests*, 12(10), 1410, <https://doi.org/10.3390/f12101410>.

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

【サブテーマ1】

- 1) 栗林正俊, 浜田崇: 長野県環境保全研究所研究報告, 16, 59-64 (2020年)
「飯綱高原のカラマツ人工林における2018~2019年の気象観測」
- 2) 尾関雅章, 栗林正俊: 長野県環境保全研究所研究報告, 17, 67-71 (2021年)
「UAVを用いたカラマツ人工林の葉フェノロジーの観測」

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

- 1) 尾関雅章, 栗林正俊: 長野県環境保全研究所研究報告, 15, 45-49 (2019年)
「長野市飯綱高原におけるカラマツ高齢人工林の樹木成長」
- 2) 栗林正俊, 尾関雅章: 長野県環境科学技術者協議会報, 130, 6-9 (2021年)
「信州カラマツの炭素収支の気候変動応答に関するモデル解析」

(2) 口頭発表（学会等）

【サブテーマ1】

- 1) 栗林正俊, 浜田崇, 牧田直樹: 日本山の科学会2018年秋季研究大会 (2018)
「カラマツ人工林における林内と林外の気象観測値の比較」
- 2) 栗林正俊, 高橋善幸, 浜田崇, 伊藤昭彦: 雪氷研究大会(2019・山形) (2019)
「積雪期間がカラマツ林の生態系の炭素収支に及ぼす影響のモデル解析」
- 3) 栗林正俊, 浜田崇: 日本山の科学会2019年秋季研究大会(川崎) (2019)
「中部山岳域における積雪期間の観測とモデリングの課題」
- 4) 栗林正俊, 小熊宏之, 佐々木博行, 家合浩明, 高橋善幸, 清水英幸: 第61回大気環境学会年会 (誌上開催) (2020)
「気候変動と地上オゾンが飯綱高原のカラマツ・ブナに及ぼす影響を評価する試み」
- 5) 栗林正俊, 小熊宏之, 井波明宏, 田中健太, 金井隆治: 日本気象学会2020年度秋季大会 (オンライン開催) (2020)
「長野県のカラマツ林における葉群フェノロジーと積算気温の関係の地域性」

【サブテーマ2】

- 1) 田村梓, 小熊宏之, 藤本稜真, 栗林正俊, 牧田直樹: 日本山の科学会2019年秋季研究大会 (2019) 「飯綱山カラマツ林における葉と細根のフェノロジー」
- 2) 田村梓, 小熊宏之, 藤本稜真, 栗林正俊, 牧田直樹: 第50回記念根研究集会 (2019)
「長野県カラマツ林における細根とシュートの動態および色情報」
- 3) 藤本稜真, 田村梓, 栗林正俊, 牧田直樹: 第50回記念根研究集会 (2019)
「長野県飯綱高原のカラマツ林における土壌呼吸速度の構成要素の分離」

- 4) 田村梓、小熊宏之、藤本稜真、栗林正俊、牧田直樹：第131回日本森林学会（2020）
「長野県カラマツ林におけるシュートと細根の動態と色変化の関係の解明」
- 5) 田村 梓、小熊宏之、栗林正俊、牧田直樹：第10回中部森林学会大会（オンライン開催）（2020）
「カラマツ林のシュートと細根のフェノロジー観測：シュートと細根の色の変化はいつ起きるのか？」
- 6) 牧田直樹、藤本稜真、田村 梓、栗林正俊：第10回中部森林学会大会（オンライン開催）（2020）
「長野県飯綱高原のカラマツ林における土壌呼吸速度の構成要素の寄与」
- 7) 田村 梓、小熊宏之、藤本稜真、栗林正俊、牧田直樹：第132回日本森林学会大会（オンライン開催）（2021）「カラマツのシュートと細根のフェノロジーは同期するのか？」

【サブテーマ3】

- 1) 栗林正俊、高橋善幸、伊藤昭彦：第60回大気環境学会年会（2019）
「長野県の気候変動と森林生態系の応答を評価する試み」
- 2) 栗林正俊、高橋善幸、伊藤昭彦：気象学会2019年度秋季大会（2019）
「中部山岳域におけるカラマツ林のフェノロジー観測と陸域生態系モデルへの導入」
- 3) Masatoshi Kuribayashi、Yoshiyuki Takahashi、Akihiko Ito、Naoki Makita、Hiroyuki Oguma：AGU Fall Meeting 2019（2019）
「Phenological Observation of Japanese Larch on a Mountainous Landscape in Central Japan, and Application to Carbon Budget Simulation by Using a Process-based Terrestrial Ecosystem Model」
- 4) 栗林正俊、伊藤昭彦、高橋善幸：日本農業気象学会2020年全国大会（誌上開催）（2020）
「中部山岳域におけるカラマツ人工林の炭素収支の気候変動応答」
- 5) 栗林正俊、伊藤昭彦：第61回大気環境学会年会（誌上開催）（2020）
「大気CO₂濃度の上昇と気候変動が中部山岳域におけるカラマツ人工林の炭素収支の将来変化に与える影響のモデル解析」
- 6) 栗林正俊、伊藤昭彦：第25回大気化学討論会（オンライン開催）（2020）
「中部山岳域におけるカラマツ人工林の炭素収支の気候変動応答と森林管理の効果に関するモデル解析」
- 7) 栗林正俊、伊藤昭彦：日本農業気象学会2021年全国大会（オンライン開催）（2021）
「森林管理が近未来の信州カラマツの炭素収支にもたらす効果の評価」
- 8) 栗林正俊、伊藤昭彦：第62回大気環境学会年会（オンライン開催）（2021）
「長野県の2050ゼロカーボンに向けたカラマツ人工林の森林管理」

（3）「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 第34回全国環境研究所交流シンポジウム「気候変動影響とその適応へのアプローチ」（主催：国立環境研究所、2019年2月14、15日、国立環境研究所大山記念ホール、観客約170名）にて講演
演題：長野県における気候変動とカラマツ人工林を活用した緩和策・適応策の検討
- 2) 長野県環境保全研究所友の会総会記念講演（主催：長野県環境保全研究所友の会、2019年4月13日、ホテル信濃路「浅間の間」、観客数約30人）にて講演
演題：長野県における気候変動とカラマツ人工林を活用した緩和策・適応策
- 3) 大気環境学会中部支部公開講演会（主催：大気環境学会中部支部、2019年5月26日、信州大学医学部旭総合研究棟修士講義室、観客数約20人）にて講演
演題：気候変動の適応策・緩和策に資する森林の活用に向けた取組

- 4) 第46回長野県環境科学研究発表会（主催：長野県環境部・長野県環境科学技術者協議会、2019年6月14日、ホテル信濃路「飯綱の間」、観客数約60人）にて講演
演題：中部山岳域のカラマツ林のフェノロジーに関する衛星観測の検証と応用
- 5) 第47回長野県環境科学研究発表会（主催：長野県環境部・長野県環境科学技術者協議会、2020年6月16日、誌上開催、講演要旨配布数約180人）にて講演
演題：UAVを用いたカラマツ林の葉フェノロジーの観測

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

- 1) 令和元年度信州自然講座「南信州の身近な自然と地域づくり」（主催：長野県環境保全研究所、2019年11月30日、豊丘村交流学习センターゆめあて、観客数55人）にて講演
演題：陸域生態系モデルによるカラマツ人工林のCO₂吸収量の評価
- 2) 第47回長野県環境科学研究発表会（主催：長野県環境部・長野県環境科学技術者協議会、2020年6月16日、誌上開催、講演要旨配布数約180人）にて講演
演題：中部山岳域におけるカラマツ人工林の炭素収支の将来予測
- 3) 令和2年度信州自然講座「中央アルプスがはぐくむ自然とその保全」（主催：長野県環境保全研究所、2020年11月21日、駒ヶ根市地域交流センター（赤穂公民館）、観客数57人）にて講演
演題：信州カラマツの炭素収支の気候変動応答と森林管理の効果の評価
- 4) 第36回全国環境研究所交流シンポジウム「現場から考える環境研究」（主催：国立環境研究所、2021年2月17日、オンライン開催、観客数約300人）にて講演
演題：長野県のゼロカーボンに向けたカラマツ人工林の炭素収支の気候変動応答評価
- 5) 第51回山と自然のサイエンスカフェ@信州（主催：長野県環境保全研究所、2021年2月20日、オンライン開催、アクセス数30人）にて講演
演題：気候非常事態と長野県の森林
- 6) 第52回山と自然のサイエンスカフェ@信州（主催：長野県環境保全研究所、2021年11月10日、県立長野図書館、観客数20人）にて講演
演題：2050ゼロカーボンへの鍵：信州のカラマツ林

（4）マスコミ等への公表・報道等＞

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

SBC信越放送、エコロジー最前線「地球温暖化と信州の動植物 ～県環境保全研究所飯綱庁舎の研究から～」、2021年8月21日放送

（5）本研究費の研究成果による受賞

【サブテーマ1】

若手優秀発表賞、日本山の科学会、2019年10月26日、栗林正俊（長野県環境保全研究所）
「中部山岳域における積雪期間の観測とモデリングの課題」

【サブテーマ2】

第10回中部森林学会学生発表奨励賞、中部森林学会、2020年12月6日、田村 梓（信州大学）
「カラマツ林のシュートと細根のフェノロジー観測：シュートと細根の色の変化はいつ起きるのか？」

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

IV. 英文Abstract

Future Projection and Estimation of Effects of Forest Management on Carbon Budget in Forest Ecosystem using Ultra-high Resolution Climate Projection Data

Principal Investigator: Masatoshi KURIBAYASHI

Institution: Nagano Environmental Conservation Research Institute

2054-120, Kitago, Nagano City, Nagano Prefecture 381-0075, JAPAN

Tel: +81-26-239-1031 / Fax: +81-26-239-2929

E-mail: kuribayashi-masatoshi-r@pref.nagano.lg.jp

Cooperated by: Faculty of Science, Shinshu University

[Abstract]

Key Words: Larch plantation, Carbon budget, Phenology, Soil respiration, Terrestrial ecosystem model, Dynamical downscale, Forest management, CO₂ fertilization effect, Forest sink, Climate change adaptation

Carbon neutral by 2050 is a common goal of Japan and Nagano prefecture, and local governments are required to promote climate change adaptation strategies in recent years. Effective plantation managements can function as mitigation and adaptation strategies for climate change. However, little is known about the response of carbon budget of plantations over complex terrain to future climate and elevated atmospheric CO₂ concentration, and about to what extent forest management can enhance carbon uptake. In this study, we projected the future carbon budget of a Japanese larch plantation in the central mountainous region of Japan, and estimated the effects of forest management on the carbon budget, by using a process-based terrestrial ecosystem model driven by ultra-high resolution climate projection data. First, we observed leaf phenology of larch plantations by fisheye lens time lapse cameras, and assessed the relationships between the timings of leaf flush and leaf shedding and effective cumulative temperatures (ECT) at 5 different altitude sites in Nagano prefecture, because leaf phenology which controls the photosynthetic period, changes depending on climate conditions. Second, we observed soil respiration rate and the contributions of root, mycorrhiza, and microbe to soil respiration at a larch plantation in Iizuna plateau, and estimated the temperature sensitivity (Q_{10}) of soil respiration rate, because soil respiration accounts for about 70% of total ecosystem respiration. Third, we incorporated the equation of ECT-leaf phenology relationship, and the Q_{10} value based on in-situ observation into a process-based terrestrial ecosystem model, in order to improve model reliability to capture the carbon budget of the larch plantation. As a result, the simulated carbon budget using the improved model at the larch plantation of Fujihokuroku flux observation site was consistent with observed data by the eddy-covariance method at the flux tower. Then, the model driven by ultra-high resolution climate data projected that gross primary production, ecosystem respiration, and net ecosystem production (NEP) of a larch plantation in Iizuna plateau would increase by 21.6%, 26.1%, and 6.5%, respectively, although the forest age would be nearly 100 years

old. Sensitivity simulation showed that the 6.5% increase in NEP was attributable to the CO₂ fertilization effect by 4.6% and to the climate change effect by 1.9%. Additionally, the simulation showed that NEP in 2050 could be increased by 1.28 to 1.72 times as a result of clear-cutting and planting larch by 2045, but the increased sink would not occur if the forest was replaced by Japanese cedar.