

国内スギ人工林動態シミュレーションに向けた植生動的モデル SEIB-DGVM の拡張

鄭 峻 介^{1,*}・佐 藤 永²・西 園 朋 広³・齋 藤 英 樹³・
高 橋 正 義³・北 原 文 章³・山 田 祐 亮³・細 田 和 男³

Modification of the dynamic global vegetation model SEIB-DGVM for simulation of planted Japanese cedar dynamics in Japan

Shunsuke Tei^{1,*}, Hisashi Sato², Tomohiro Nishizono³, Hideki Saito³,
Masayoshi Takahashi³, Fumiaki Kitahara³, Yusuke Yamada³ and Kazuo Hosoda³

鄭峻介・佐藤永・西園朋広・齋藤英樹・高橋正義・北原文章・山田祐亮・細田和男：国内スギ人工林動態シミュレーションに向けた植生動的モデル SEIB-DGVM の拡張, 森林計画誌59: 69~80, 2026 国内で開発された全球動態植生モデルである Spatially explicit individual-based Dynamic Global Vegetation Model (SEIB-DGVM) を, 気候変動の影響も考慮した長期的な視点で, 放置された人工林から二次林への過渡的な変化をシミュレート可能な次世代の森林管理ツールと拡張するために, 植栽・間伐のスキームを導入し, その再現性を茨城県高萩市の上君田試験地におけるスギ人工林動態の長期継続調査データとの比較から検討した。試験地内の間伐区・無間伐区のどちらにおいても, SEIB-DGVM はスギの胸高直径を過小評価するものの, スギ成長量の時間変化を妥当に再現できていた。また, 間伐によりスギの胸高直径成長が促進され, 間伐後において, 個体数分布のピークがより大きな胸高直径分布帯に移行する観測結果をモデルはおおむね再現した。SEIB-DGVM は国内のスギ人工林動態の長期予測に有益なシミュレーターになり得ると考えられる。

キーワード：スギ, 人工林, 植生動的モデル, SEIB-DGVM, 森林施業

Shunsuke Tei, Hisashi Sato, Tomohiro Nishizono, Hideki Saito, Masayoshi Takahashi, Fumiaki Kitahara, Yusuke Yamada and Kazuo Hosoda: Modification of the dynamic global vegetation model SEIB-DGVM for simulation of planted Japanese cedar dynamics in Japan. Jpn. J. For. Plann. Jpn. J. For. Plann. 59: 69~80, 2026 We modified the Japanese dynamic global vegetation model SEIB-DGVM to simulate the long-term transition from abandoned planted forests to secondary forests considering the effects of climate change. Specifically, we introduced planting and thinning schemes into the SEIB-DGVM and examined their reproducibility via comparison with the observed Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) dynamics at a long-term experimental monitoring site in Ibaraki Prefecture, Japan. The SEIB-DGVM

DOI: <https://doi.org/10.20659/jjfp.A20250903>

* 連絡先 (Corresponding author) E-mail: tei_shunsuke900@ffpri.go.jp

- 1 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所北海道支所 (062-8516 北海道札幌市豊平区羊ヶ丘7番地)
Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Forest Research and Management Organization, 7 Hitsujigaoka, Toyohira, Sapporo, Hokkaido, 062-8516, Japan
- 2 国立研究開発法人海洋研究開発機構地球環境部門 (236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25)
Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3173-25 Showamachi, Kanazawa-ku, Yokohama, 236-0001, Japan
- 3 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 (305-8687 茨城県つくば市松の里1)
Forestry and Forest Products Research Institute, Forest Research and Management Organization, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan



©2025 森林計画学会：本記事はクリエイティブ・コモンズ 表示-非営利-改変禁止 4.0 国際 (CC BY-NC-ND 4.0) ライセンスの下に提供されています (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>)。

underestimated tree diameter at breast height (DBH) in thinned and nonthinned plots but reasonably reproduced the temporal trends in Japanese cedar growth. The model reproduced the observational values showing that thinning promoted increases in the DBH and shifted the population distribution peak to a larger DBH distribution zone. These results suggest that the SEIB-DGVM could be a useful simulator for the long-term prediction of the forest dynamics in Japanese cedar plantations in Japan.

Keywords: Japanese cedar, planted forest, dynamic vegetation model, SEIB-DGVM, forest management

I. 背景

日本の森林は40 %以上が人工林であるが、林業が長期にわたり低迷する中、間伐の作業面積が減少傾向にある(林野庁, 2024)。そのような手入れが遅れた人工林には、CO₂吸収量の減少・保水機能の低下・土壌流出リスクの増加、などの公益上の問題が生じると指摘されている(三好, 2020)。このような現状を踏まえ、平成30年4月に施行された森林経営管理法の下では、林業経営に適さない人工林は、市町村が主体となって、針広混交林への誘導も含めた管理をすることとなっている。一方で、そのような管理に必要な知見は不足しており、また今後予測される急速な気候・環境変化の下では(環境省 2020)、気候変動に適応するための新たな管理手法の必要性も生じてくる。従って、気候変動の影響も考慮した長期的な視点で、放置された人工林から二次林への過渡的な変化をシミュレート可能な次世代の森林管理ツールが求められている。

我が国で開発された全球動態植生モデルである Spatially explicit individual-based Dynamic Global Vegetation Model (SEIB-DGVM; Sato et al., 2007) は森林の成長を個体ベースで扱い、森林の立地(傾斜度・緯度・標高)、気象環境(気温・降水量・雲量など)を入力として、森林の構造(サイズ分布)や生態系機能(炭素循環・水循環・放射収支)の時系列変化をシミュレートする。SEIB-DGVM は、様々な植生帯において、樹木・森林動態を的確に再現することが確かめられてきた。例えば、Sato et al (2023) では、SEIB-DGVM を北海道の針広混交林に適用し、樹木現存量や針葉樹と広葉樹の比率などについて、それらの観測結果をおおむね再現可能であることを示した。

SEIB-DGVM は次世代の森林管理ツールになり得ると考えられる。その根拠は、①所与の気候条件に応じて森林の構造と機能が規定されるため、日本の各地域への適用、そして今後見込まれる急速な気候変動の影響が検討可能である、②立木の個体間における空間と光を巡る局所的な競争を扱っているため、個体の成長にともなう個体間競争の変化をシミュレートでき、その競争が植生の構造や機能へ与える影響を定量的に検討可能である、の2点である。

一方で、人工林の場合、植栽や間伐など人為のインパクトが発生するが、従来の SEIB-DGVM が天然林を対象としたモデルであるため(Sato et al., 2007)、こうした人為インパクトをどのようにモデルに取り込むのかについては定まっていない。従って、森林施業を含む人工林の再現性も検証されていないので、現行のモデルでは人工林動態を扱うために重要となる植栽や間伐などの森林施業を取り扱うことができない。放置された人工林から二次林への過渡的な変化をシミュレートするには、人工林と天然林の両方をシミュレートする必要があり、SEIB-DGVM への森林施業スキームの導入や、その再現性検証が求められている。

SEIB-DGVM は森林の成長を個体ベースで取り扱うため、植栽や間伐などの森林施業スキームの導入に適している。例えば、間伐について、特定の劣勢木を抽出して取り除く下層間伐に加えて、上層木・中層木を間伐の対象とする全層間伐(水井ら, 1987)にも対応可能である。また、空間明示的なモデルであるため、林分の一部区域を主として伐採する列状間伐にも対応できる。一斉林や混交林を対象としたプロセスベースモデルとしては、SEIB-DGVM のほかにも、3PG (Landsberg and Waring, 1997) や Biome-BGC (Running and Hunt 1993) などが挙げられ、どちらのモデルも国内のスギ人工林動態評価にも適用されてきた(3PG: Mitsuda 2018, Biome-BGC: Toriyama et al 2021)。一方で、これらのモデルは、森林の成長を個体ベースではなく、林分レベルでシミュレーションするため、複雑で多様な森林施業スキームの導入の難易度が高い。

森林施業スキーム導入後の再現性検証には、森林施業が樹木動態に与える影響について長期間にわたって観測が継続されているサイトが多地点存在することが望ましい。森林総合研究所では林野庁の各森林管理局と共同で、およそ160か所の収穫試験地等の固定試験地を全国の国有林に設定し、最長で80年以上にわたって長期継続調査データを収集している(西園ら, 2023)。調査方法の詳細については既報(細田ら, 2014, 西園ら, 2019)を参照して頂きたいが、概略を述べると、設定された試験区内の全個体について胸高帯と立木番号が付与され、胸高直径と樹高が測定されている。また、一部の試験地には通常の施業を実施する間伐区と原則

として無施業で推移させる無間伐区が設置されている。このような固定試験地における長期継続調査データを有効活用することで、森林施業スキームを導入した SEIB-DGVM の再現性を検証することが可能である。

本研究では、国内の人工林面積の多くを占め、日本の林業の根幹をなしている樹種のひとつであるスギ人工林に着目する。気候変動下でのスギ人工林の構造と機能の変化、それらに森林施業が与える影響を予測し、将来的には、放置された人工林から二次林への過渡的な変化をシミュレート可能とするため、SEIB-DGVM に植栽・間伐を取り扱うスキームを導入する。それら導入したスキームの再現性を、全国の国有林に設定されている固定試験地の一つである、茨城県高萩市の上君田試験地におけるスギ人工林動態の長期継続調査データとの比較から検討する。当該試験地は間伐区・無間伐区の両方が設けられており、調査の継続年数は50年を超える。そのため、SEIB-DGVM の再現性検証に適した試験地であると考えられる。

II. 長期継続調査データサイト

本研究では、茨城県高萩市に位置する上君田試験地の長期継続調査データを用いた。上君田試験地は、東京営林局管内のスギ人工林収獲試験地であり、1919年（大正8年）に植栽が実施され、1967年（昭和42年3月）に試験区が設定された。その後、ほぼ5年おきに調査が実施され、最新の調査は2022年の3月に実施されており、その時点での林齢は103年であった。試験区の合計面積は1ヘクタールであり、0.15ヘクタールの弱度・強度間

伐区がそれぞれ2プロット、0.2ヘクタールの無間伐区が2プロット設定されている（宮本ら、2002）。設定された試験区内におけるスギの全個体について胸高帯と立木番号が付与され、胸高直径と樹高が測定された。なお、本研究の目的である SEIB-DGVM の再現性を検証する観点からは、スギ成長量に対する間伐効果がより明確に検出されることが望ましい。そのため、本研究では、無間伐区と強度間伐区における調査データを解析に使用した。強度間伐区1（2）においては、林齢49年目と68年目にそれぞれ材積率21.5（18.5）・49.6（43.3）％、本数率36.1（32.7）・57.7（53.4）％の間伐が実施された（表-1、2）。

III. 方法

1. モデル

本研究における、すべてのシミュレーションは、SEIB-DGVM で実施した（Sato et al., 2007）。SEIB-DGVM のモデル構造を図-1に示す。シミュレーション単位は、空間構造を明示的に扱う30 m×30 m の仮想森林であり、そこでは個々の樹木が定着し、競合し、枯死する。仮想林分は東西南北方向に繰り返されると仮定している。樹木の幹と樹冠の形状は円柱で表現されており、また複数の樹冠が同じ空間を占めることが出来ない。この仕様は混み合った森林の再現を困難にする場合があるため、樹冠の中心は幹の中心から最も空間が開けた方向に水平移動する。その最大移動距離は、樹冠半径の半分としている。樹木は、胸高直径0.01 m の苗木として定着する。

表-1 上君田試験地・無間伐区における長期調査データ

調査年	林齢 (年)	無間伐区1					無間伐区2				
		胸高直径 (cm)		樹高 (m)		樹木密度 (本/ha)	胸高直径 (cm)		樹高 (m)		樹木密度 (本/ha)
		平均	標準 偏差	平均	標準 偏差		平均	標準 偏差	平均	標準 偏差	
1967	48	23.2	6.5	18.9	3.8	1760	22.9	6.9	20.6	4.2	1660
1972	53	23.6	6.9	19.8	3.8	1760	23.8	7.2	22.4	3.7	1633
1977	58	25.0	6.9	21.2	3.4	1653	25.3	7.4	23.9	3.7	1513
1982	63	26.8	6.8	23.1	2.6	1467	26.7	7.5	24.6	3.4	1367
1988	69	28.1	6.9	25.0	1.6	1360	28.2	8.0	26.1	3.1	1267
1992	73	29.5	7.2	25.3	1.6	1247	30.8	8.2	27.3	2.9	1060
1996	78	30.6	7.5	26.1	2.2	1173	32.0	8.7	28.2	3.2	1033
2002	83	31.7	8.0	26.8	2.6	1120	34.0	9.0	29.5	4.2	933
2012	93	34.0	9.1	28.0	3.9	1047	37.0	10.0	31.0	4.1	840
2022	103	36.7	10.3	30.2	4.1	947	40.2	11.3	32.7	4.7	780

表-2 上君田試験地・強度間伐区における長期調査データ

調査年	林齢 (年)	強度間伐区1							強度間伐区2									
		胸高直径 (cm)		樹高 (m)		樹木密度 (本 /ha)	間伐		胸高直径 (cm)		樹高 (m)		樹木密度 (本 /ha)	間伐				
		平均	標準 偏差	平均	標準 偏差		材積率 (%)	本数 (%)	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差		材積率 (%)	本数 (%)			
1967	48	23.7	6.2	21.2	3.0	1787	21.5	36.1	23.5	6.0	19.5	2.9	1713	18.5	32.7			
1968	49																	
1972	53	27.7	5.6	24.0	1.9	1120			27.0	5.2	22.4	2.4	1113					
1977	58	28.7	6.0	25.0	2.0	1120			28.1	5.6	22.9	2.4	1113					
1982	63	29.4	6.4	25.3	1.9	1113			29.0	6.1	23.3	2.5	1113					
1983	68								49.6	57.7							43.3	53.4
1988	69	33.7	6.76	27.1	1.80	460			33.3	5.3	25.9	1.8	507					
1992	73	34.9	7.3	28.0	1.8	460			34.6	5.8	26.4	1.9	507					
1996	78	36.9	8.0	28.4	2.1	460			36.2	6.1	27.3	2.1	500					
2002	83	39.0	8.9	29.5	2.7	447			37.9	6.7	28.5	2.6	500					
2012	93	42.8	10.7	30.9	2.9	447	41.1	8.2	29.8	2.7	500							
2022	103	45.9	12.8	33.1	3.5	447	43.9	9.8	31.8	3.2	500							

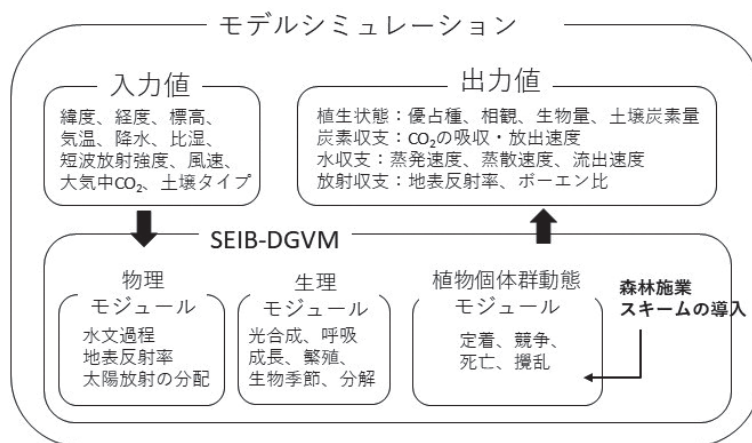


図-1 モデルシミュレーションの概略（佐藤（2008）図-2を改定）。
本研究では、従来は天然林向けの全球動態植生モデルである SEIB-DGVM
による人工林動態シミュレーションを可能とするために、植物個体群動態
モジュール内に森林施業（植栽・間伐）スキームを導入した。

仮想森林における植物の動態は、炭素および水のサイクルと連動している。地面は、それぞれ深さ0.1 mの20の土壌層に垂直に分割されている。本研究におけるシミュレーションでは、SEIB-DGVM バージョン3.1 (Sato et al., 2016) をベースに、モデルの拡張を行った。SEIB-DGVM には林野火災レジームが実装されているが、本研究のシミュレーションでは林野火災を発生させなかった。

2. モデルへの植栽・間伐スキームの導入

Mori (2011) の手法をベースにして、SEIB-DGVM

に植栽・間伐スキームを導入した。植栽については、植栽する年とその際の植栽密度を指定することができるスキームを導入した（図-2）。苗木を等間隔に正方形で植えると、SEIB-DGVM では真南にある樹木の被陰効果が大きくなり、光を巡る競争が実際よりも大きくなってしまったため、樹木の植栽間隔の半分の距離分だけ東西方向に一律ずつずらして植栽し、その影響が小さくなるようにした。すなわち、太陽方向に対して三角植えとなるように初期に植栽することになる。植栽する苗木は、胸高直径及び樹高に関しては数パーセントのランダムな個体差がつけられている。

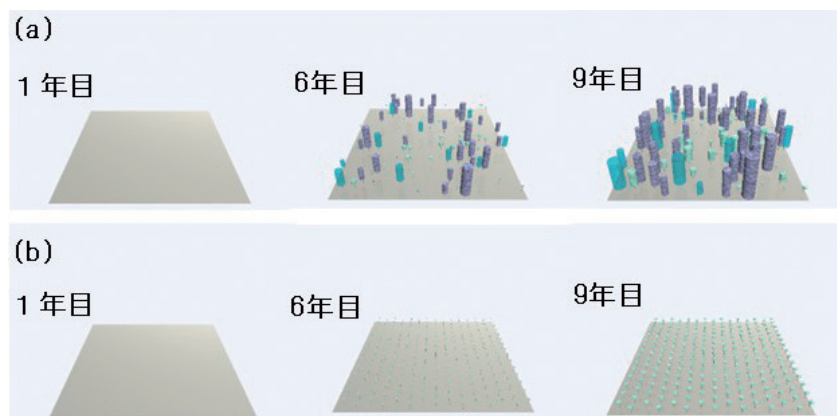


図-2 SEIB-DGVM に導入した植栽スキーム

(a) 従来の SEIB-DGVM では、対象サイトの気候・土壌環境において、定着可能な複数種の PFT（図中の円柱で表現された樹木個体の色や模様の違いは異なる PFT を示す）が確率論的に定着し、個体間における空間と光を巡る局所的な競争とともに成長していく。(b) 本研究で植栽スキームを導入した SEIB-DGVM では、指定された単一の PFT が、指定された密度で等間隔の列状に植栽される。本研究では、植栽密度を2500本/haとした。

間伐については、間伐する年とその際の間伐割合を本数ベースで指定することができる下層間伐を想定したスキームを導入した（図-3）。具体的には、樹冠距離が近い2本の樹木のペアを順番にリストアップし、近い順番に胸高直径が小さいものから順番に間伐し、間伐本数に達するまで間伐を続けることとなる。

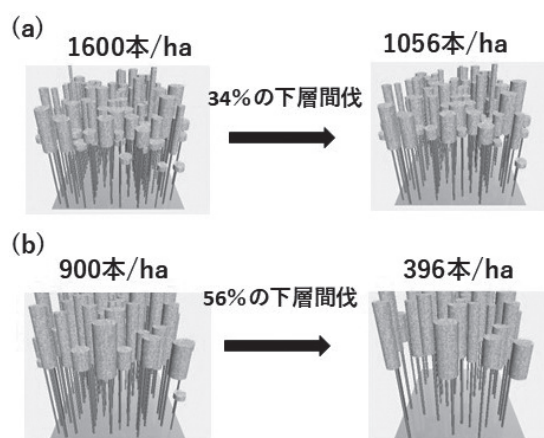


図-3 SEIB-DGVM に導入した間伐スキーム

本研究では、間伐する年とその際の間伐割合を本数ベースで指定することができる下層間伐を想定したスキームを SEIB-DGVM に導入した。(a) 間伐率34%、(b) 間伐率56%、のシミュレーション例を示す。

3. 幹のアロメトリーに関する関数の改良

樹高成長は樹種の特長や立地条件に依存して、その最大値が決まり、その最大値に到達すると、樹高成長は停止する（鍋島，石井，2008）。一方で、最大値に到達するまでの樹高成長は光をめぐる資源獲得競争であり、その優位性を確保するために、競争の激しい状況では肥大成長よりも樹高成長が優先される（King, 1981; Kohyama, 1991）。

SEIB-DGVM では、従来、樹高（H）は胸高直径（DBH）のみの関数で表現されていた（式（1）；但し、樹冠上端が近接している木本の樹冠に抑えられ樹高成長できないケースは生じる）。本研究では、上述の樹高成長における光をめぐる資源獲得競争を考慮するために、樹高を胸高直径と光環境の関数へと改良した（式（2））。具体的には、式（3）から樹冠の込み具合を推定し、混みあっている時には、樹高成長を優先させる仕様とした。樹冠の込み具合は、各個体において実現された樹冠半径（ CD_{real_n} ）と、周辺の木本による空間制約が存在しない場合に、その個体の胸高直径で実現可能な最大樹冠半径（ $CD_{potential_n}$ ）との比に比例する関数とした。また、観測データ（密度・平均樹高・平均胸高直径）との整合性を考慮し、樹冠の込み具合の影響は、胸高直径 $\times \alpha$ に比例するとして、胸高直径が大きな個体ほど影響が大きくなるものとした。 α については、0～1.0の間において0.05刻みで検討し、本研究では $\alpha=0.15$ とした。本アロメトリー式の導入により、個々の樹高と胸高直径との関係に、個体の経験する光条件に応じた可塑性を加えたことになる。

$$H = \left[\frac{1}{(H_s + DBH)} + \frac{1}{H_{max}} \right]^{-1} \quad (1)$$

$$H = \left[\frac{1}{(H_s + DBH \times \beta)} + \frac{1}{H_{max}} \right]^{-1} \quad (2)$$

$$\beta = \left(\frac{CD_{potential_n}}{CD_{real_n}} \right) \times DBH \times 0.15 \quad (3)$$

$$CD_{potential_n} = ALM_2 \times (CD_n)^{1.6} \quad (4)$$

ここで、Hs, Hmax, ALM₂はPFTに固有のパラメータ値（本研究では、温帯性針葉常緑樹：Temperate needle-leaved evergreenのデフォルト値を使用）であり、CD_nは各個体における調整前（あらゆる制約が考慮されない）の樹冠半径である。

4. モデルシミュレーション

上君田試験地において、スギ人工林の成長動態をシミュレートするために必要な気象データは、同試験地が含まれるグリッド（0.5°×0.5°）における1981年から1990年までのものを現在気候環境として繰り返し入力した。地温と風速はNCEP/NCAR（Kalnay et al., 1996）の日再解析データを使用し、それら以外の気象変数は、NCEP/NCAR日再解析データをCRU-JRA2.4（Harris, 2023）の月観測データに合わせて補間されたものを適用した。大気中CO₂濃度は、2000年の全球平均値である368.9ppmで固定した。また、入力する土壌パラメータはFAO soil data set（FAO 1991）から取得し、地表面アルベド、圃場容水量、しおれ点、飽和容水量は、それぞれ0.18355, 0.46500 m³/m³, 0.10300 m³/m³, 0.46500 m³/m³である。

SEIB-DGVMでは、いくつかの植物機能型（Plant Functional Type; PFT）毎にモデル計算を行う。本研究では、スギが含まれるPFTである温帯性針葉常緑樹（Temperate needle-leaved evergreen）のみが植栽されるように設定し、シミュレーション期間は108年、裸地の状態から行われるものとした。裸地からシミュレーションを開始させ、6年目に植栽を実施し、その後、

林齢が103年になるまでシミュレーションを継続させた（実際の植栽年から最新の試験地調査が実施された年までの期間と一致させた）。シミュレーションは異なる乱数系列を用いて10回繰り返し、その平均値を基に、その後の解析を行った。

植物生理・個体群動態パラメータ値の多くについては、温帯性針葉常緑樹（Temperate needle-leaved evergreen）PFTのデフォルト値を使用しているが、一部のパラメータ値についてはMori（2011）で使用されている九州地方のスギの値を使用した（表-3）。

IV. 結 果

1. 植栽・間伐スキームの動作

本研究でSEIB-DGVMに導入した植栽と間伐のスキームが想定通りに動作することを確認した。植栽スキームにより、30 m×30 mの仮想森林上では、裸地からシミュレーションを開始させて6年目に、等間隔の列状で指定された単一のPFT（温帯性針葉常緑樹：Temperate needle-leaved evergreen）が定着・成長していた（図-2）。本研究における植栽密度は、林齢49年時（第一回目の調査）の樹木密度が調査データとSEIB-DGVM計算結果で同程度となるように、2500本/haとした。

間伐スキームにより、林齢49年目と68年目にそれぞれ間伐率34 %、56 %の下層間伐が実施され、胸高直径が小さい樹木から順番に、間伐本数に達するまで間伐が続けられたことを確認した（図-3）。間伐率34 %と

表-3 本研究において使用した植物生理・個体群動態パラメータ値

パラメーター名	パラメーターの説明	単位	デフォルト値	Mori (2011)
ALM ₃	材密度	g 乾重/cm ²	0.374	0.314
ALM ₄	樹冠の枯れ上がりを制御するパラメーター	—	0.38	0
LAm _{ax}	樹冠表面における最大葉面積	m ² /m ²	4	2
SLA	葉面積比重	投影 m ² /乾重 g	0.004	0.007
Pmax	最適条件における光飽和光合成速度	μmolCO ₂ /m ² /s	9	7.8
Lue0	最適な条件における光合成の光利用効率	mol CO ₂ /mol 光量子	0.05	0.023
M ₁	炭素飢餓枯死に関わるパラメーター	—	0.018	0.006
M ₂	炭素飢餓枯死に関わるパラメーター	—	1	2
PAR _{min}	稚樹の定着に必要となる光合成有効放射強度（南中時の年平均値）	μmol 光量子 m ⁻² s ⁻¹	0	200

* 温帯性針葉常緑樹 PFT のデフォルト値から Mori (2011) の値へと変更したパラメータについてのみ表記した

56 %は、林齢49年目と68年目のそれぞれについて、強度間伐区1と2での実際の（本数ベースでの）間伐率（表-2）の平均値として算出した値である。

2. スギ成長の時間変化

上君田試験地での直近の調査時（林齢103年）における、それぞれの試験区での樹木密度と平均樹高・胸高直径は、無間伐区1で947本/ha、30.2±4.1 m、36.7±10.3 cm、無間伐区2では780本/ha、32.7±4.7 m、40.2±11.3 cm、強度間伐区1では447本/ha、33.1±3.5 m、45.9±12.8 cm、強度間伐区2では500本/ha、31.8±3.2 m、43.9±9.8 cmであった（表-1、2）。

上君田試験地の強度間伐区と無間伐区のそれぞれで、樹木密度と平均樹高・胸高直径の時間変化について、長期調査データによる観測結果と SEIB-DGVM 計算結果を比較した（図-4）。樹木密度の時間変化については、SEIB-DGVM は比較的高い再現性を示した。無間伐区・強度間伐区のどちらにおいても、観測値はモデル

計算値と大きくかけ離れておらず、無間伐区2については、観測値の多くがモデル計算結果の標準偏差（±1σ）範囲内（10回分のシミュレーションを集計した全個体群におけるσ）に収まっていた。また、スギの平均樹高の時間変化についても、SEIB-DGVM は観測結果をやや過小評価（1.8-20.8 %）するものの（表-4）、無間伐区と強度間伐区において、多くの観測値がモデル計算結果の±1σ範囲内に収まっており、SEIB-DGVM は比較的高い再現性を示したと考えている。最後に、スギの平均胸高直径の時間変化であるが、時間変化の傾向は観測結果と SEIB-DGVM で大きくかけ離れていないものの、無間伐区と強度間伐区のどちらにおいても、多くの観測値が SEIB-DGVM の±1σ範囲内には収まっておらず、SEIB-DGVM は観測結果を過小評価（12.2-28.8 %）していた（表-4）。

3. スギ人工林動態に間伐が与える影響

間伐に対するスギ成長応答について、SEIB-DGVM

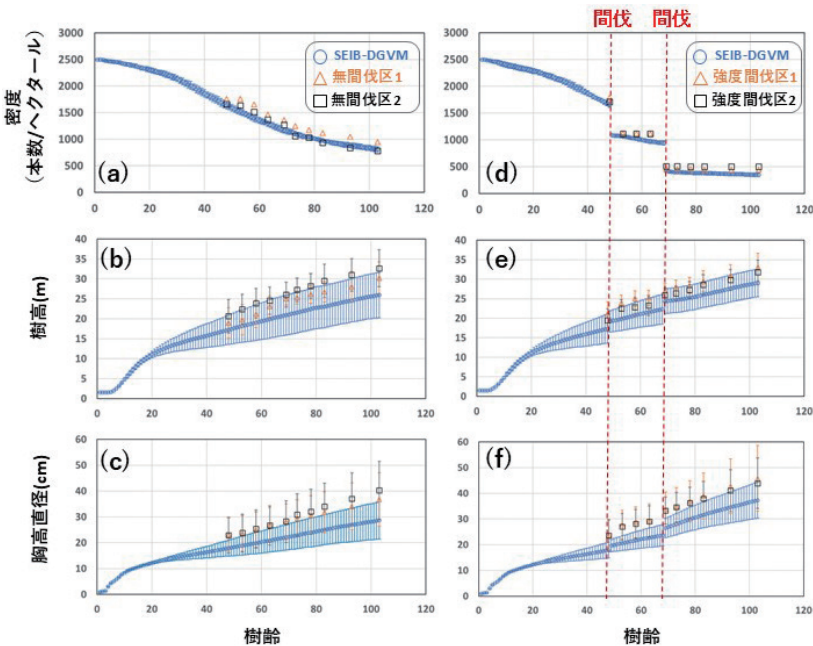


図-4 長期調査データと SEIB-DGVM によるスギ成長量の時間変化
(a-c) 無間伐区、及び (d-f) 強度間伐区での、長期調査データと SEIB-DGVM シミュレーションに基づく、林齢1年から103年における密度・樹高・胸高直径の時間変化。観測値・モデル計算には、標準偏差（±1σ）の誤差線を示している（モデル計算においては、10回分のシミュレーションを集計した全個体群における標準偏差）。また、強度間伐区（d-f）における赤い点線は、間伐が実施された林齢49年目と68年目を示す。

表-4 スギの平均樹高・胸高直径における長期調査データとモデルの差

樹木成長量	長期調査データ -SEIB-DVGM (%)			
	対象区1	対象区2	強度間伐区1	強度間伐区2
樹高 (m)	7.8～15.5	15.8～20.8	7.4～18.1	1.8～11.5
胸高直径 (cm)	20.1～22.6	20.6～28.8	13.8～25.8	12.2～24.0

の再現性を検証した（図-5）。なお、図-5におけるSEIB-DGVM 計算結果については、10回のシミュレーションの平均で示すのが難しいため、すべてのシミュレーション結果を、また、長期調査データについては、無間伐区1-2及び強度間伐区1-2の全データを使用した結果を示している。林齢68年目に実施された間伐の前、および間伐5・25年後の期首胸高直径とその後10年間の定期胸高直径成長量の関係性を定量的に評価するため

に、長期調査データと SEIB-DGVM 計算結果のそれぞれについて、各林齢（53・73・93年）における無間伐区・強度間伐区のすべてのデータから直線回帰式を求め、それから推定される定期胸高直径成長量と観測値・モデル計算値との差分、さらにはその差分の無間伐区と強度間伐区での差を算出した（表-5）。長期調査データによる観測結果では、間伐前と間伐25年後においては無間伐区と強度間伐区で有意な差が検出されな

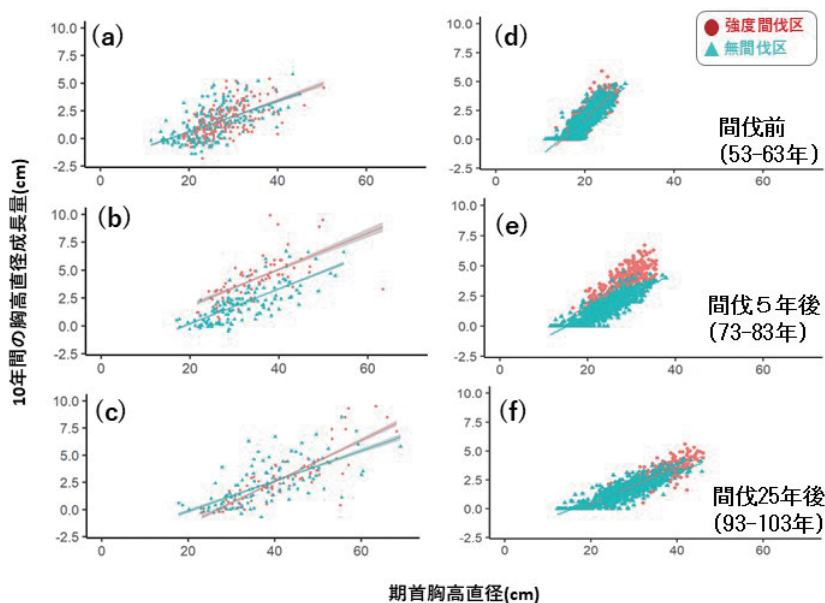


図-5 間伐に対するスギ成長応答

(a-c) 長期調査データ、及び (d-f) SEIB-DGVM シミュレーションに基づく、(a, d) 間伐前、(b, e) 間伐5年後、(c, f) 間伐25年後の期首胸高直径とその後10年間の定期胸高直径成長量の関係性。図中の直線は期首胸高直径と10年間の胸高直径成長量との単回帰直線を示す。

表-5 期首胸高直径との直線回帰式から推定される定期胸高直径成長量とその観測値・モデル計算値との差分

手法	期間	対象区	回帰直線からの差分		回帰直線からの差分の差 (無間伐区 - 強度間伐区)	
			平均値	標準誤差	t 値	p 値
長期調査 データ	間伐前 (53-63)	無間伐区	-0.007	1.223	0.423	0.672
		強度間伐区	0.011	1.128		
	間伐5年後 (73-83)	無間伐区	-0.582	1.131	24.22	2.20×10^{-16}
		強度間伐区	1.151	1.669		
	間伐25年後 (93-103)	無間伐区	0.012	1.478	-0.515	0.606
		強度間伐区	-0.021	1.331		
SEIB-DGVM	間伐前 (53-63)	無間伐区	-0.034	0.539	32.66	2.20×10^{-16}
		強度間伐区	0.053	0.567		
	間伐5年後 (73-83)	無間伐区	-0.029	0.544	226.98	2.20×10^{-16}
		強度間伐区	0.743	0.781		
	間伐25年後 (93-103)	無間伐区	-0.051	0.491	45.32	2.20×10^{-16}
		強度間伐区	0.121	0.598		

かったが、間伐5年後において無間伐区と強度間伐区において有意な差が検出され、強度間伐区において定期胸高直径成長が有意に促進されていたことが示された。一方で、SEIB-DGVM 計算結果では、全ての期間において無間伐区と強度間伐区の差が有意であったが、間伐5年後における両区の差の t 値が極めて大きく、長期調査データの結果と同様に定期胸高直径成長が強度間伐区においてより促進されていたことが示された。

長期観測データでは、間伐5年後の林齢73年目において、無間伐区と強度間伐区の回帰直線がほぼ平行であり、両区において胸高直径サイズに無関係な間伐効果が観測された(図-5b)。一方で、SEIB-DGVM では、無間伐区と強度間伐区の回帰直線の傾きが平行ではなく、期首胸高直径が大きい場合により大きな間伐効果が推定される傾向がみられた(図-5e)。間伐5年後の林齢73年目において、SEIB-DGVM 計算結果を期首胸高直径が25 cm 以下と以上の場合に分けて、それぞれの全データから期首胸高直径とその後10年間の定期胸高直径成長量の直線回帰式を求め、それから推定される定期胸高直径成長量とモデル計算値との差分、さらにはその差分の無間伐区と強度間伐区での差を算出した。その結果、どちらの期首胸高直径グループにおいても有意な差が検出されたが(25 cm 以下: $t=124.08$, $p=2.2 \times 10^{-16}$, 25 cm 以上: $t=210.14$, $p=2.2 \times 10^{-16}$)、期首胸高直径が25 cm 以下のグループで t 値はより低い値を示した。SEIB-DGVM は、間伐5年後の林齢73年目に

において、胸高直径が小さな個体群に対して有意な間伐効果を再現しているものの、その効果は過小評価されている可能性がある。

長期調査データによる観測結果からは、林齢68年目に実施された間伐後、強度間伐区において個体数分布のピークがより大きな胸高直径分布帯に移動する傾向が認められ、その傾向はSEIB-DGVM においてもおおむね再現されていた(図-6)。一方で、観測結果では個体数分布が大きな胸高直径側に裾野が広く、SEIB-DGVM では逆に小さな胸高直径側に裾野が広がる傾向が観測された。

V. 考 察

植栽・間伐のスキームを導入したSEIB-DGVM は茨城県高萩市の上君田試験地内の無間伐区と強度間伐区において、スギの胸高直径については過小評価しているものの、密度と樹高の時間変化の推定は妥当であり、スギの成長変化をおおむね再現できていた。スギの胸高直径が過小評価された要因については、(1) 本研究で導入した幹のアロメトリー関数による影響、(2) 使用している植物生理・個体群動態パラメータ値の影響、が考えられる。(1)については、今後さらなる試験地での検証を進め、関数の妥当性を高めていく必要があると考えている。特に、式(3)において、樹冠の込み具合が樹高成長に与える影響量に対する調整パラメー

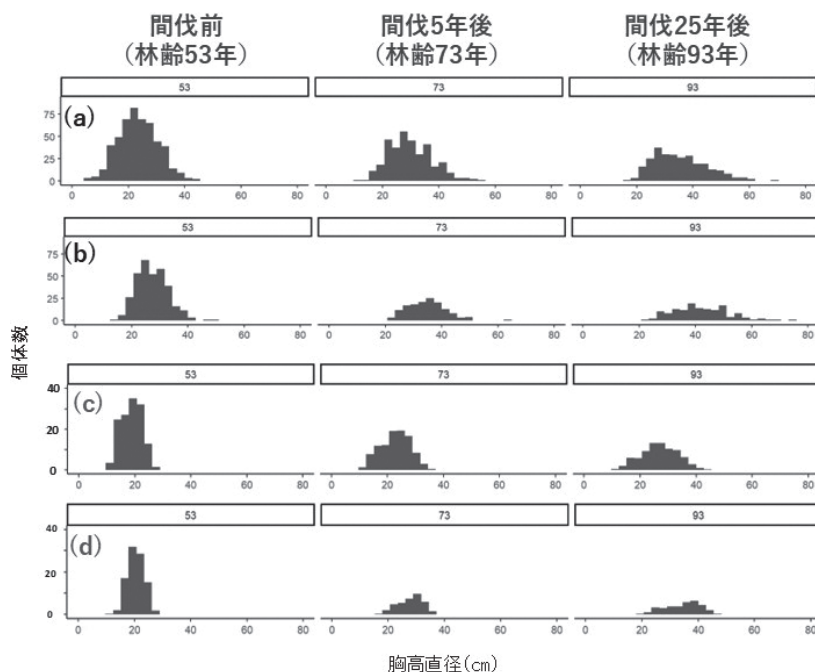


図-6 間伐前後における胸高直径頻度分布の変化

長期調査データに基づく、(a) 無間伐区と (b) 強度間伐区における、胸高直径頻度分布の時間変化。(c) と (d) はそれぞれ (a) と (b) と同様であるが、SEIB-DGVM シミュレーション結果を示す。

タとして導入した α については、本研究では観測データとの整合性を考慮して $\alpha=0.15$ としたが、この値が国内の他試験地・地域でも広く適応可能な値なのか否かについては調べていく必要がある。(2)について、本研究で採用している植物生理・個体群動態パラメータ値は、温帯性針葉常緑樹 (Temperate needle-leaved evergreen) PFT のデフォルト値を主として、一部に Mori (2011) で使用されている九州地方のスギのパラメータ値を使用しているが、関東地方のスギの動態を表現するには適当ではない可能性がある。今後、過去約70年間に及ぶスギ・ヒノキに関する文献1000本以上を精査し、植物の生活史や適応戦略・環境応答に関わる177形質を取りまとめた、オープンアクセスのデータベースである SugiHinokiDB (Osone et al., 2020) などを活用し、国内の各地域における、SEIB-DGVM シミュレーション用のスギの植物生理・個体群動態パラメータセットの構築が必要であるように思われる。より適切な植物生理・個体群動態パラメータを使用することで、本研究で観測された胸高直径の過小評価が解消されることが期待される。

スギ成長動態に与える間伐効果について、SEIB-DGVM は一定の再現性を示した (図-5, 6)。間伐5年後の林齢73年目における定期胸高直径成長が強度間伐区において促進される長期調査データによる観測結果を SEIB-DGVM はおおむね再現できていた。間伐25年後の林齢93年目になると、観測結果からは有意な間伐効果は認められず、SEIB-DGVM でも間伐効果は小さくなっていた。一方で、SEIB-DGVM では、期首胸高直径が小さな個体群に対する間伐効果が過小評価されている可能性が示された。この過小評価により、長期観測データによる観測結果では個体数分布が大きな胸高直径側に裾野が広く、SEIB-DGVM では逆に小さな胸高直径側に裾野が広がっていた可能性もあると考えている (図-6)。SEIB-DGVM における樹木成長においては、周辺の木本による空間制約が明示的に存在している。間伐によるその空間制約の解除が、胸高直径サイズの大きな個体群でより顕著に作用する可能性もあると考えており、その詳細把握については今後の課題としたい。

本研究で導入した間伐スキームでは、下層間伐のみが想定されている。下層間伐の場合には、間伐木が点状に配置されることが多いが、近年、高性能林業機械の普及も含めた間伐作業の効率化により列状間伐も広く行われるようになってきている (植木, 2007)。また、混交林化を指向する際には、帯状・群状伐採が採用される傾向にある (國崎, 2024)。そのような状況下においては、下層間伐以外の様々な間伐手法を SEIB-DGVM へ導入していく必要があると考えている。帯状

伐採については、伐採幅と帯長がそれぞれ40 m や100 m を超えるケースも考えられる。本研究におけるシミュレーション単位は、空間構造を明示的に扱う30 m × 30 m の仮想森林であったが、SEIB-DGVM では100 m × 100 m の仮想森林のような面的な拡張が可能であり、帯状・群状伐採の導入も十分に検討可能と考えている。

本研究は、日本で開発された全球植生モデル SEIB-DGVM を、気候変動の影響を考慮し、個体ベースで汎用性が高い成長予測を与える次世代の森林管理ツールとして、より具体的には、放置された人工林から二次林への過渡的な変化をシミュレート可能とするための第一歩として、同モデルでは従来扱うことが難しかった人工林を取り扱えるように拡張したものである。これまで述べてきたように、スギの平均胸高直径の過小評価、小さな個体群に対する間伐効果の過小評価、さらには、間伐スキームにおける間伐手法の多様化などの課題は残っているものの、SEIB-DGVM はスギ成長の時間変化の傾向を妥当に推定し、また、間伐効果もおおむね再現できていた。今後のさらなる検証・拡張が必要であるが、SEIB-DGVM は国内のスギ人工林動態の長期予測に有益なシミュレーターになり得ると考えられる。

VI. 結 論

本研究で植栽・間伐のスキームを導入した SEIB-DGVM は茨城県高萩市の上君田試験地内の無間伐区と強度間伐区において、スギの平均胸高直径を過小評価するものの、スギ成長量の時間変化を妥当に推定できていた。また、間伐5年後に強度間伐区において定期胸高直径成長が促進される観測結果、さらには、間伐後、強度間伐区において個体数分布のピークがより大きな胸高直径分布帯に移動する傾向を示す観測結果を SEIB-DGVM はおおむね再現できていた。これらの結果から、SEIB-DGVM は国内のスギ人工林動態の長期予測に有益なシミュレーターになり得るものと考えられる。一方で、今後の課題としては、より適切なパラメータ推定、他の試験地での比較、様々な間伐手法の適用などが挙げられ、今後取り組んでいきたい。

謝 辞

上君田固定試験地の維持管理・調査実施のために、関東森林管理局の技術普及課、森林技術・支援センター、茨城森林管理署の各位、ならびに森林総合研究所の歴代の調査担当者をはじめとして、多くの方々のご尽力されました。関係の方々に厚く御礼申し上げます。

開示する利益相反はない。

引用文献

- FAO (1991) The Digitized Soil Map of the World (Release 1.0). In, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Harris, I.C. (2023) CRU JRA v2.4: A forcings dataset of gridded land surface blend of Climatic Research Unit (CRU) and Japanese reanalysis (JRA) data; Jan.1901 - Dec.2022. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, *date of citation*. <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/aed8e269513f446fb1b5d2512bb387ad/> (2025年2月10日参照)
- 細田和男・家原敏郎・鷹尾元・西園朋広・高橋與明・石橋聡・高橋正義・古家直行・小谷英司・田中邦宏他 (2014) 平成18～22年度に調査した収穫試験地等固定試験地の経年成長データ (収穫試験報告 第25号). 森林総研研報443, 225-254.
- Kalnay, E., and Coauthors (1996) The NCEP/NCAR 40-year reanalyses project. Bull. Am. Meteorol. Soc. 77, 437-470.
- 環境省 (2020) 気候変動影響評価報告書 (総説). 9pp-32pp.
- King, D. (1981) Tree dimensions: maximizing the rate of height growth in dense stands. Oecologia 51, 351-356.
- Kohyama, T. (1991) A functional model describing sapling growth under a tropical forest canopy. Func. Ecol. 5, 82-90.
- 國崎貴嗣 (2024) 針葉樹人工林の針広混交林への誘導 — 古典的な森林経理学からみた研究課題 — . 森林計画誌58巻1号, 13-26
- Landsberg, J.J., Waring, R.H., (1997) A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. For. Ecol. Manag. 95(3), 209-228.
- Mitsuda Y. (2018) Evaluating the effects of climate change on the potential site productivity of Sugi (*Cryptomeria japonica*) planted forests in Kyushu Island, Japan. J. For. Plan. 22(2), 47-53.
- 宮本麻子・天野正博 (2002) 立木の空間分布および生育条件が個体成長に及ぼす影響. 森林総研研報, 2, 163-178.
- 三好規正 (2020) 森林管理法の現状と課題～森林の多面的機能の維持に向けて～. 自治総研 (504), 39-64.
- 水井憲雄・菊沢喜八郎・浅井達弘・清和研二 (1987) トドマツ人工林の間伐試験 (I) — 間伐後4年間の生長量と葉量の回復 — . 北海道林誌研報25: 18-27.
- Mori, Y. (2011) Modeling of tree population dynamics of coniferous plantations in Japan using the individual-based vegetation model SEIB-DGVM. 名古屋大学大学院環境科学科修士論文.
- 鍋嶋絵里・石井弘明 (2008) 樹高成長の制限とそのメカニズム. 日林誌90巻6号, 420-430.
- 西園朋広・細田和男・家原敏郎・鷹尾元・齋藤英樹・石橋聡・高橋正義・古家直行・小谷英司・齋藤和彦他 (2019) 平成23～27年度に調査した収穫試験地等固定試験地の経年成長データ (収穫試験報告 第26号). 森林総研研報18(2), 231-273.
- 西園朋広・細田和男・齋藤英樹・高橋正義・北原文章・山田祐亮・鄭峻介・志水克人・石橋聡・古家直行他 (2023) 平成28～令和2年度に調査した収穫試験地等固定試験地の経年成長データ (収穫試験報告 第27号). 森林総研研報22巻3号, 141-190.
- Osone, Y., Hashimoto, S., Kenzo, T., Araki, M.G., Inoue, Y., Shichi, K., Toriyama, J., Yamashita, N., Tsuruta, K., Ishizuka, S. et al. (2020) Plant trait database for *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* (SugiHinoki DB): Their physiology, morphology, anatomy and biochemistry. Ecol. Res. 35(1), 274-275.
- 林野庁 (2024) 令和5年度 森林・林業白書. 85pp, 全文 (PDF 版).
- Running, S.W., Hunt, E.R.J. (1993) Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for Global-Scale-Models.
- J.R. Ehleringer, C.B. Field (Eds.), Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe, Academic Press, San Diego, CA, USA, 141pp-157pp.
- Sato, H., Itoh, A., Kohyama, T. (2007) SEIB-DGVM: A New Dynamic Global Vegetation Model using a Spatially Explicit Individual-Based Approach. Ecol. Model. 200(3-4), 279-307.
- 佐藤永 (2008) 生物地球化学モデルの現状と未来 ～静的モデルから動的モデルへの展開～. 日生態誌 58(1), 11-21
- Sato, H., Kobayashi, H., Iwahana, G., Ohta, T. (2016) Endurance of larch forest ecosystems in eastern Siberia under warming trends. Ecol. Evol. 6(16), 5690-5704.

Sato, H., Shibuya, M., Hiura, T. (2023) Reconstructing spatiotemporal dynamics of mixed conifer and broad-leaved forests with a spatially explicit individual-based dynamic vegetation model. *Ecol. Res.* 38(3), 465–478.

Toriyama, J., Hashimoto, S., Osone, Y., Yamashita, N., Tsurita, T., Shimizu, T., Saitoh, T.M., Sawano, S., Lehtonen, A., Ishizuka, S. (2021) Estimating

spatial variation in the effects of climate change on the net primary production of Japanese cedar plantations based on modeled carbon dynamics. *PLoS One*, 16(2), Article e0247165.

植木達人 (2007) 列状間伐の考え方と実践. 全国林業改良普及協会, 東京.

(2025年2月14日受付)

(2025年9月29日受理)