



学術情報

陸域生態系シミュレーションにおける可視化の役割と課題： DGVMを対象とした直感的ツール開発と利用評価

佐藤 永^{1,2}

¹ 国立研究開発法人海洋研究開発機構地球環境部門

² 東京大学大学院農学生命科学研究科

The role and challenges of visualisation in terrestrial ecosystem simulation:
Development and evaluation of an intuitive tool for a dynamic global vegetation model

Hisashi Sato^{1,2}

¹ Research Institute for Global Change (RIGC), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

² Department of Ecosystem Studies, The University of Tokyo

要旨：動的全球植生モデル (DGVM) は、気候変動に伴う植生の変化や、生物地球化学的・水文学的サイクルを数値的に再現・予測するためのシミュレーションモデルである。SEIB-DGVMはその一つで、植生の変化を詳細に再現できる点に特徴がある。この種のシミュレーションでは多様な入出力データが扱われるため、モデル内部の状態を把握するには、可視化や視覚的な分析が不可欠である。しかしながら、DGVMをはじめとする植生モデル分野においては、視覚化に関する取り組みが依然として不十分である。そこで、ゲームエンジン「Unity」を活用し、直感的な操作が可能なデータビューワー「SEIB-Explorer」を開発した。SEIB-DGVMは全球スケールでの植生変化や炭素循環の予測にも対応可能なモデルであるが、本ツールはその出力のうち、単一地点における森林構造と機能の可視化に焦点を当てている。こうしたローカルスケールでの可視化は、全球モデルの妥当性評価やプロセス理解の補完手段としても有効である。体験版のアンケート調査では、操作性やデザインについて概ね好意的な評価が得られた一方で、季節変化や植生内外の相互作用の表現には改良の余地があるという指摘も寄せられた。研究成果の魅力的な可視化は、研究の発展に寄与するのみならず、社会実装やビジネス、教育分野への展開にも資する。

キーワード：グラフィカルユーザーインターフェース (GUI)、生態系モデリング、動的全球植生モデル (DGVM)、陸面モデル (LSM)

Abstract: Dynamic global vegetation models (DGVMs) are simulation tools designed to numerically reproduce and predict vegetation changes associated with climate change, as well as biogeochemical and hydrological cycles. SEIB-DGVM is one such model, notable for its ability to represent vegetation dynamics in high detail. Given the wide variety of input and output data involved, visualisation and graphical analyses are essential for understanding a model's internal states. However, in the field of vegetation modelling, efforts toward effective visualisation remain limited. To address this gap, the SEIB-Explorer tool was developed, as an intuitive data viewer constructed using the Unity game engine. Although SEIB-DGVM can simulate vegetation and carbon cycle dynamics on a global scale, SEIB-Explorer focuses on visualising the structure and function of forest ecosystems at single-point locations. Such localised visualisation provides a valuable complement for the process-level understanding and validation of global models. During user testing of a trial version, the tool received generally positive feedback on usability

¹ 〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25 国立研究開発法人海洋研究開発機構地球環境部門
Research Institute for Global Change (RIGC), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama 236-0001, Japan
e-mail: hsatoscb@gmail.com 2025年7月11日受付、2025年12月25日早期公開 (J-STAGE)
著作権は著者に帰属する。Licensed under CC BY 4.0

and visual design. However, some respondents suggested that improvements are needed in the representation of seasonal changes and the depiction of interactions between vegetation and external environmental factors. Presenting research outputs clearly and engagingly holds considerable potential for advancing scientific understanding and for promoting applications in society, business, and education.

Keywords: dynamic global vegetation model (DGVM), ecosystem modelling, graphical user interface (GUI), land surface model (LSM)

はじめに

全球規模における植生分布は、主に気候の地理的な分布によって決定される。一方で、植生分布は、炭素や水の循環、さらにはそれに伴うエネルギー交換といった大気—陸面間の相互作用を通じて、地域的あるいは全球的な気候に影響を及ぼしている (Foley et al. 2003; 佐藤 2014)。このように、陸上生物圏と地球システムの間には相互作用が存在し、それが生態系の機能や気候予測に関する重要な不確実性をもたらしている。その背景には、多様な物理的・生物地球化学的・生態学的プロセスが関与しており、これらを理解するためには、総合的かつ統合的なモデリングが求められる (Byrne et al. 2024; 佐藤 2014)。そしてこうしたモデルの開発や活用においては、数値出力の解釈や検証を支援する手段として、視覚的な表現が一定の有効性を持ち得ることも注目されつつある。

動的全球植生モデル (Dynamic Global Vegetation Models: DGVMs) は、気候変動に伴う植生の変化や、それに関連する物質・水循環プロセスを再現するためのシミュレーションモデルである (佐藤ほか 2018)。これらのモデルは、気象や土壌に関するデータを入力とし、光合成や呼吸といった短期的な応答から、植生帯の地理的移動といった長期的な変化までを地球規模で予測することが可能である。DGVMsは、植生の時間的応答を動的に表現できるため、従来の相関モデルが前提とする「植生が気候分布に遅滞なく追従する」という平衡状態の仮定—特に10~100年のスケールで非現実的となるこの仮定—を回避できるという利点を持つ (Hartig et al. 2012; 佐藤 2008)。

とりわけ、植物個体群の動態を精緻に扱う高度なDGVMでは、群集形成、生活史戦略、攪乱からの回復、種間相互作用、機能的多様性の役割といった多様なプロセスを、より詳細に捉えることが可能となっている (Bugmann and Seidl 2022; Chitra-Tarak et al. 2021; Fisher and Koven 2020; Rogers et al. 2022)。ただし、モデル構造の高度化に伴い、新たな不確実性が生じやすくなる。そのため、モデルの信頼性を高めるには、実証的根拠に基

づいた構築と、各プロセス表現の妥当性に関する検証が不可欠である (Collier et al. 2018; Fisher and Koven 2020)。このような理由から、DGVMの設計および運用においては、生態学、気象学、土壌科学、情報科学など、異なる専門分野の知見を総合的に取り入れることが重要である (Dietze et al. 2014)。こうした学際的な協力により、プロセス理解の深化やモデル評価手法の充実が促進され、今後の開発・改善に向けた有益な示唆が広く共有されることが期待される。

異分野の研究者が協働してモデルを活用するためには、その挙動を誰もが直感的に理解できる環境の整備が重要である。DGVMをはじめとするシミュレーションモデルの入出力は通常、単なる数値データであるため、その解釈や分析には「可視化」が大きな役割を果たす。近年では、多次元にわたる科学データの可視化や、インタラクティブな視覚分析の重要性が、工学、医学、気候科学など幅広い分野で認識されつつある (Kehrer and Hauser 2013)。

この傾向は、計算能力の向上、観測技術の発展、そして複合的なデータの利用拡大によって支えられている。特に気象学の分野では、可視化技術の有用性が早くから広く認識されており、異種データソースを統合しつつ、大規模かつ複雑な情報を直感的に伝える手法が多く開発されてきた (Rautenhaus et al. 2018)。その結果、可視化は、気象現象の理解、意思決定支援、さらには研究成果の伝達において不可欠な役割を果たしている。これに対して、植生シミュレーション研究では、可視化手法の多くが時系列グラフや地図といった静的な形式にとどまっており、インタラクティブに操作できる事例は限られている。特にDGVMのように、植生動態と物質循環の連動や、それらに対する気候環境の影響といった複雑なプロセスを扱う、植生モデルの中でも最も複雑な部類に属するモデルにおいては、本来可視化技術の重要性が特に高いと期待されるが、異種データを統合的かつ視覚的に探索できる手法の導入は依然として発展途上にある。こうした課題を踏まえた実装例については、本稿後半で詳述する。

先進的なプロセスベースの植生動態モデルを、より多くの研究者が直感的に理解・活用できるようにすることを目的として、本研究では、ゲームエンジンUnityを活用した可視化ソフトウェア「SEIB-Explorer」を開発した。本ツールは、当初は研究者間の相互理解と共同研究の支援を目的として構築されたが、試用評価を通じて、教育現場や市民参加型科学、森林管理など、研究現場を超えた分野でも有用な応用可能性が見いだされつつある。本稿では、こうした広がりを含めてSEIB-Explorerの役割と展望について検討する。

シミュレーションモデルと 可視化ソフトウェアについて

SEIB-DGVM

本稿が紹介するSEIB-Explorerは、現在も開発が進められているSEIB-DGVM (Spatially Explicit Individual-Based Dynamic Global Vegetation Model) (Sato et al. 2007)の入出力を可視化するソフトウェアである。SEIB-DGVMは、森林の空間構造を個体ベース(ただし木本に限る)で明示的に再現できることを特徴とするDGVMであり、Fortran90で構築されている。「個体ベースモデル」とは、個々の植物個体をモデルの構成単位とし、その成長、競争、枯死といった挙動を時間の経過とともに追跡する手法である。広域スケールで植生動態を扱うモデルでは、個体を明示的に扱わず、植生タイプや植物群集ごとの平均的な特性に基づいて記述する手法が一般的である。一方、個体ベースモデルでは、樹木ごとのサイズや位置、局所的な環境条件に基づいた動態の再現が可能であり、これにより植生の不均質性や空間構造の形成過程をより詳細に捉えることができる。原稿執筆時の最新バージョンであるSEIB-DGVM3.15においては、維管束植物種を22種の植物機能タイプ(PFT: Plant Functional Types)に分類し、PFTごとに光合成速度や最適生育温度などの植物生理パラメータを与えている(seib-dgvm.com/en/)。各グリッドには仮想的な森林プロットが配置され、木本個体は局所的な光環境や空間制約のもとで、定着・成長・枯死をシミュレートする。この仕組みにより、森林構造の形成や遷移といった植物個体群動態の再現が可能となり、気候変動に対する植生応答の遅延や空間パターンの解析にも対応できる。

SEIB-DGVMは、日平均気温、気温日較差、降水量、相対湿度、下向き短波・長波放射、風速といった日単位の気象データを入力とする。土壌に関しては、圃場容水

量、萎れ点、粒度などの物理特性を用いて、水分保持や流出を再現する。計算の時間解像度はプロセスごとに異なり、土壌中の水および熱の移動は30分ステップ、植物個体群動態(定着や枯死など)は年ステップ、それ以外の各種プロセスは日ステップで実行される。空間解像度は通常0.5度メッシュであるが、より細かな地理スケールでの運用も可能である。出力項目には、優占PFT、個体サイズ分布、バイオマス、炭素貯留量、純一次生産量(NPP)、蒸発散量、土壌水分量、流出量などが含まれる。種子散布についてはプロセスベースではなく、ユーザーが複数のシナリオから選択できる仕組みとなっており、たとえば、気候的に適合するPFTの種子が常に供給されているという設定も可能である。

SEIB-DGVMは、これまでに多様な陸域生態系研究や気候影響評価に用いられてきた。例えば、シベリアにおける大規模火災とそれに伴うエアロゾル放出量の将来予測(Nurrohman et al. 2024)や、アフリカにおける生態系光合成の降水パターンに対する感度分析(Guan et al. 2018)などがある。また、IPCC第5次評価報告書では、SEIB-DGVMが地球システムモデルMIROC-ESMに統合され、複数のCO₂排出シナリオにおける植生変化と気候応答の予測に貢献した(Watanabe et al. 2011)。SEIB-DGVMは自然植生の再現を主眼に開発されたモデルであるが、ゴム人工林への適用事例も報告されている(Zhang et al. 2024)。また、現在は筆者も参加する共同研究において、日本のスギ人工林への適用も進行中である(鄭ほか 印刷中)。

可視化ソフトウェアSEIB-Explorerの設計方針

SEIB-Explorerの開発にあたっては、教育現場などへのアウトリーチ展開も視野に入れ、シミュレーションの入出力を直感的かつ楽しく閲覧できることを目標とした。そのため、「グラフィックス」「システムパフォーマンス」「操作性」「演出性」の4点を主要な設計要件として、当初から重視している。以下では、それぞれの要件について詳述する。

グラフィックスに関しては、SEIB-DGVMが扱う空間構造を明示的に可視化し、森林内で木本個体が光や空間をめぐって局所的に競争する森林動態を、さまざまな視点から自由に閲覧できるように設計した(図1)。密な森林生態系では、大型木本の枯死によって生じる明るい空間(ギャップ)に一次遷移種が進入・優占し、その後より陰性の樹種へと遷移する「ギャップ動態」が観察される。

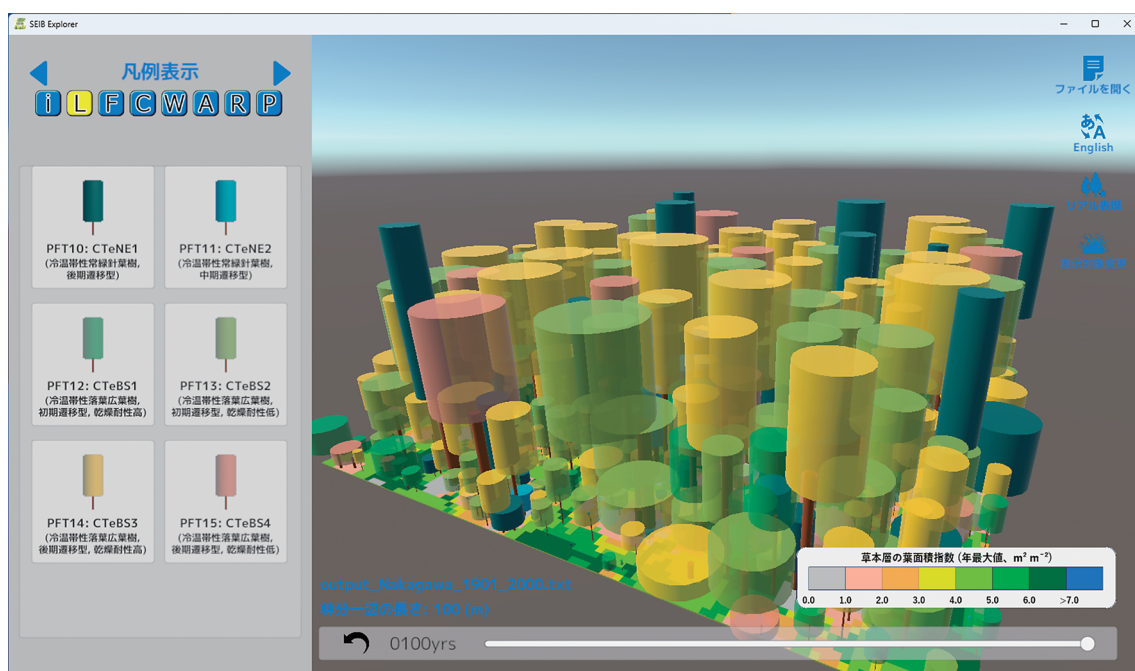


図1. SEIB-Explorerの実行画面（標準表示モード）。北海道北部の針広混交林地帯において、1901年～2000年の気候条件を繰り返し与え、更地から開始された100年目のシミュレーション結果を示している。

Fig. 1. SEIB-Explorer execution screen in standard display mode. The screen shows the 100th year of a simulation that started from bare ground under repeated climate conditions during 1901–2000 in the boreal mixed conifer–broadleaf forest region of northern Hokkaido.

SEIB-DGVMでもこの動態が再現されており、このような局所的な森林の崩壊と再生は、樹種構成や炭素動態に大きな影響を及ぼす重要なプロセスである (Pacala and Deutschman 1995)。したがって、森林の空間構造の時間的変化を視覚的に把握できる機能は極めて重要である。

システムパフォーマンスにおいては、一般的なパーソナルコンピュータやタブレット端末上でもストレスなく動作することを目指して開発を行った。そのため、時系列グラフに用いるデータを日次 (daily) から月次 (monthly) に変更するなど、軽量化の工夫を施している。一方で、研究用途においては、操作性がやや低下しても、モデル本来の時間解像度でのデータ閲覧が望まれる場面も想定される。この点については、今後のアップデートでの対応を検討している。

操作性の面では、マウスによる直感的な操作のみで全機能が利用可能となるよう設計した。また、ジョイスティックなど他のインターフェース機器への対応も見据え、キー入力による操作にも対応させている。

演出性については、木本のリアル表示 (後述) や効果音の導入を行っており、これらは楽しさや没入感を高めるための工夫である。研究用途では必ずしも必要ではないものの、教育やアウトリーチへの展開においては重要

な要素であると考えた。

SEIB-Explorerの開発環境

本開発には、ゲームエンジンであるUnity (Unity Technologies 2022) を使用した。Unityは基本的に無償で利用可能である (ただし、年間収益が10万米ドルを超える場合は有償ライセンスが必要)。また、Windows、Mac、スマートフォン、Nintendo Switch 1/2、PlayStation 4/5、Xboxなど、複数のプラットフォームに対して同一のコードベースから展開できる点が大きな利点である。Unityは世界で最も広く利用されているゲーム開発環境の一つであり、個人の趣味利用から産業・研究用途に至るまで、多様なユーザー層に支持されている。そのため、入門書やオンラインチュートリアルなど、開発支援情報も非常に充実している。さらに、有償・無償を問わず多数の開発用素材 (Asset) が提供されており、開発を支えるエコシステムが確立されている。近年ではゲーム開発にとどまらず、Unityを活用した応用事例は、産業 (Sorensen 2025)、教育 (Kazmierczak et al. 2024)、科学研究 (Kiss and Pusztai 2022) など多岐にわたって広がっている。

SEIB-Explorerの機能とその操作体系

以下に、可視化ソフトウェアSEIB-Explorerの主な機能を概説する。SEIB-Explorerのメイン画面では、SEIB-DGVMによってシミュレートされた単一地点の森林構造がインタラクティブに可視化される(図1)。画面下部のスライダーを操作することで、表示されるシミュレーション年を1年単位で変更可能である。SEIB-DGVMでは、各木本個体の樹冠と幹を円筒形として表現しており、本ソフトウェアでは、木本PFTごとに異なる色を割り当てて識別可能としている。視点は常に仮想植生の中心を向いているが、マウス操作により視点位置(ドラッグ)や視点までの距離(ホイール)を調整できる。SEIB-DGVMのシミュレーション単位は1林分であり、その水平サイズ(一辺の長さ)は任意に設定可能である。初期には30 mでのシミュレーションが主であったが、確率的変動の影響を低減するため、近年は100 mとする設定が多く用いられている。SEIB-Explorerは、これら異なる林分サイズに基づくシミュレーション出力に対しても、適切に可視化を行うことができる。

画面右側には各種ボタンが配置されており、「表示対象変更」ボタンを押すことで、表示対象を「木本のみ」→「草本のみ」→「木本と草本」の順に切り替えることができる。草本については、年最大の葉面積指数がカラース

ケールで表示される。「言語」ボタンでは、表示言語を日本語と英語の間で切り替え可能である。

また、「リアル表示」ボタンを押すことで、木本を「リアル」に表示する機能も実装している(図2)。前述のとおりに、SEIB-DGVMでは各木本を円筒形で近似しており、標準表示モードではそのデータ構造に基づいた表示が行われる。一方、リアル表示モードでは、ゲーム開発用の素材(Asset)を利用し、より写実的な木本を表示することで、シミュレーション出力をより楽しんで閲覧できる演出効果を提供する。図1と図2は、これら2つの表示モードで同じ林分を同一アングルから比較したものである。ここでは針広混交林が出力されており、リアル表示モードでは針葉樹と広葉樹が混在する様子を、より直感的に把握できることがわかる。

画面左側には情報パネルが設置されており、ボタン操作によって8種類の表示モード(シミュレーション情報、凡例表示、フラックス年集計値、炭素循環、水循環、大気環境、放射収支、植生プロパティ)を切り替えることができる(図3)。「シミュレーション情報」モードでは、表示しているシミュレーションにおける各種実行条件(地点、土壤の物理特性、CO₂濃度変化、年平均気温および年降水量の変化)が示される。「凡例表示」では、仮想林分に表示される樹種の凡例が表示される。「フラッ



図2. SEIB-Explorerの実行画面(「リアル」表示モード)。図1と異なるのは表示モードのみであり、同一のシミュレーション出力を同じ視点から表示している。

Fig. 2. SEIB-Explorer execution screen in realistic display mode. The simulation output and viewpoint are the same as those shown in Fig. 1.

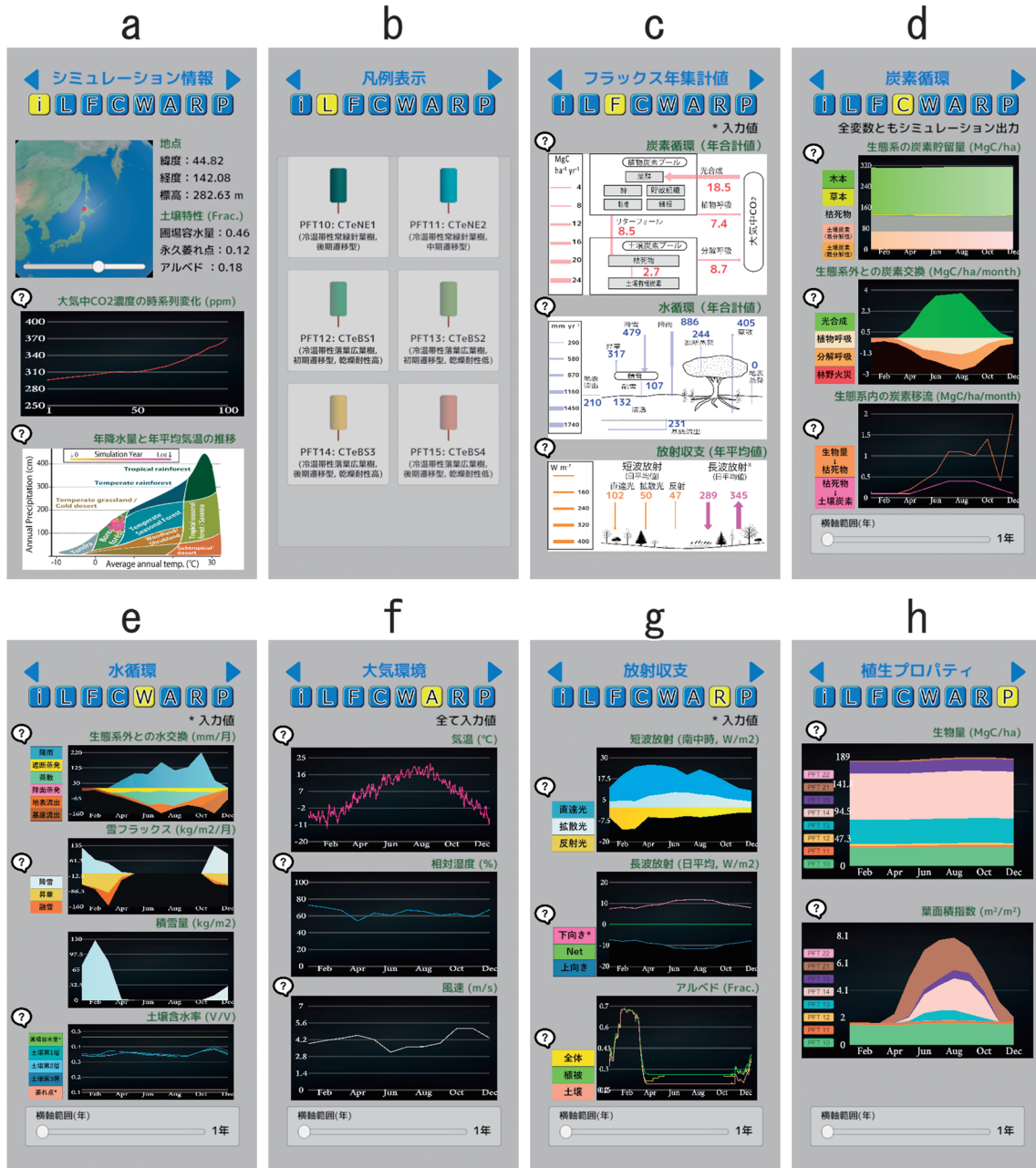


図3. SEIB-Explorerの左側情報パネル8種類の表示例。図1・2と同じシミュレーション出力に基づき、同一年のデータを各パネルに表示している。(a)シミュレーションの実行条件(地点、CO₂濃度変化、年平均気温および年降水量の変化)に関する情報、(b)表示されている木本の凡例、(c)年間フラックス集計値、(d)炭素循環の季節変化、(e)水循環の季節変化、(f)大気環境の季節変化、(g)放射収支の季節変化、(h)PFTごとのバイオマスおよび葉面積指数の季節変化。

Fig. 3. Examples of the eight information panels displayed on the left side of SEIB-Explorer. All panels are based on the same simulation output and year as shown in Figs. 1 and 2. (a) Information on simulation settings (site, changes in carbon dioxide concentration, mean annual temperature, and precipitation); (b) legend for the displayed tree species; (c) annual flux totals. Seasonal variation in the (d) carbon cycle, (e) water cycle, (f) atmospheric environment, (g) radiation budget, and (h) biomass and leaf area index by plant functional type (PFT).

クス年集計値」モードでは、1年間の炭素・水・放射フラックスの平均値が、概略図上に矢印の太さと数値で示される。その他のモードでは、各種フラックスや物質

の時系列変化を示すグラフが表示される。これらの時系列グラフ表示モードでは、情報パネル下部に表示されるスライダーを操作することで、グラフに表示される年数

を1~10年の間で調整可能である。この機能は、年ごとの変動幅を把握する上で有効であると考えられる。また図の各所に配置されたヘルプボタン(「?」マーク付き)をクリックすると、当該グラフで表示する変数に関する解説ウィンドウが表示される。

SEIB-DGVMおよびSEIB-Explorerの公開状況

SEIB-DGVMの本体コードはオープンソースとして公開されており(<https://seib-dgvm.com/en/>)、地点ベースでの実行に必要な気象データの抽出システムも併せて提供されている。マニュアル類も整備されており、これまでに教育プログラムでの使用実績もある。一方、SEIB-Explorerについてはコード本体は非公開であるが、Windows版の実行環境(インストーラー)を無償で提供している。SEIB-Explorerは、SEIB-DGVMバージョン2.80以降の出力ファイルを読み込むことが可能である。ただし、出力仕様に一部差異があるため、Explorerの全機能(たとえば草本層の葉面積指数の表示など)に完全に対応しているのは、最新バージョン(SEIB-DGVM v3.15)の出力ファイルに限られる。さらに、ブラウザ上で動作するデモンストレーション版も用意しており、いずれも研究・教育用途であれば開発者の許可なしに自由に利用可能である。現在はWindows向けビルドのみを提供しているが、Unityはマルチプラットフォームに対応しており、Mac OSやLinux環境への展開も技術的には容易である。ただし、現時点では多様な環境での動作確認を行うための人的リソースが限られていることから、Mac OSおよびLinux向けの提供にはまだ着手できていない。今後は、ユーザー層の広がりや協力体制の構築状況を見ながら、他のOSへの対応も段階的に進めていく予定である。

アンケート調査による評価

実施要領と回答者プロフィール

本ソフトウェアの有用性を評価することを目的として、複数の自然科学系コミュニティを対象に試用を実施し、無記名形式によるアンケート調査を行った。そのために、インストール不要でブラウザ上で実行可能な試用版SEIB-Explorerを用意し、熱帯域(半島マレーシアのパソ実験林)・冷温帯域(北海道の道北地域)・亜寒帯域(東シベリアのヤクーツク市近郊)を対象に行ったシミュレーションの出力を閲覧できるようにした。調査は2025年2月から3月にかけて実施した。回答の利便性を

高めるとともに、同一人物による複数回答を避ける目的で、アンケートはGoogleフォームを用いてオンラインで実施した。回答者には、上記の試用版SEIB-ExplorerのアクセスURLを併せて提供し、以下の国内メーリングリスト(ML)を通じて協力を依頼した:

- ・ Jeconet (日本生態学ML)
- ・ JapanFlux ML および iLEAPS-Japan (統合陸域生態系—大気プロセス研究計画) ML
- ・ JAMSTEC-RIGC (海洋研究開発機構 地球環境変動領域) ML

各メーリングリストにおける回答者数は、Jeconetが9名、JapanFlux/iLEAPS-Japanが7名、JAMSTEC-RIGCが6名であり、合計で22名からの回答を得た。コミュニティ間における回答傾向の差異を分析する目的としていたため、各回答がどのメーリングリストを通じて得られたものであるかを識別可能な設計とした。しかしながら、回答数が22名と限られていたことに加え、設問間で同一回答者による一貫した傾向が見られる可能性もあることから、各設問を統計的に独立とみなすことには慎重さが求められる。また、当初はコミュニティ間の比較分析も検討していたが、サンプルサイズの制約により、本稿では統計的推論を伴う分析は行わず、得られた回答傾向を定性的に整理するとどめている。本調査結果は、本ソフトウェアの試用に対する予備的な反応を捉えるものとして位置づけており、より広範かつ多様なユーザー層を対象とした評価は今後の課題である。

アンケート回答者の属性は以下の通りであった。

- ・ 所属(選択肢4つ): 大学・大学院・高等専門学校が10名、研究機関が11名、企業が1名、その他は0名。
- ・ 職位(選択肢4つ): パーマネント職が17名、ポスドク相当が2名、学生が1名、その他が2名。
- ・ 専門分野(複数選択可、選択肢4つ): 広義の植物生態学が6名、それ以外の生態学が8名、生態学以外の自然科学が8名、その他が1名。
- ・ DGVM (Dynamic Global Vegetation Model) に関する知識レベル(選択肢4つ): 利用経験ありが4名、基本的な知識ありが9名、存在は知っているが未経験が5名、初めて知ったが6名。

回答者の約3/4が、大学・研究機関等のアカデミアに所属するパーマネント職であった。専門分野については、生態学関連(植物生態学6名、それ以外の生態学8名)が22名中14名(約64%)を占めており、生態学者が中心であった。DGVMに関する知識レベルは、「利用経験あり」が4名、「基本的な知識あり」が9名、「存在は

知っている」が5名、「初めて知った」が6名と分布しており、知見の程度にはばらつきが見られた。本調査は、SEIB-Explorerの主たる目的である研究者間の協働支援ツールとしての有用性を評価することを念頭に実施された。そのため、対象者は自然科学系の研究者を中心としており、教育やアウトリーチ分野における利用については、本調査では直接的には評価対象としていない。ただし、調査結果の中には、教育や学際的コミュニケーションに対する期待を示す自由記述も含まれており、こうした応用可能性については今後の検討課題として位置づけている。

アンケートの設問

本ソフトウェアの評価にあたっては、必須回答項目として3つのカテゴリーに分類された合計10項目に対し、5段階評価（非常にそう思う～まったくそう思わない）による回答を求めた。各カテゴリーの構成は以下の通りである。

1) デザインと操作性

このカテゴリーでは、ユーザーインターフェースやシステム全体の使い勝手に関する評価を目的として、以下の4項目を設定した：

- ・ソフトウェアの全体的な設計思想とデザインはいかがでしたか？
- ・操作は直感的かつ合理的でしたか？
- ・情報パネルの表示（項目種類・カテゴリー分け）は妥当でしたか？
- ・実装は適切でしたか（深刻な遅延やちらつきがない、バグがないなど）？

2) 現象の理解

このカテゴリーでは、ソフトウェアの使用体験を通じて、植生と気候環境との関係性、ならびに幅広い時空間スケールにおける現象理解の深化に関する評価を対象とした。設問は以下の3項目である：

- ・本ソフトウェアの体験を通じて、植生の動態と機能が、所与の気候環境に制限される一方で、それが外部環境にも影響を与えることが実感された。
- ・本ソフトウェアの体験を通じて、植生と外部環境との間における物質循環の季節変化は、気候環境に応じてパターンも程度も大きく異なることが実感された。
- ・本ソフトウェアの体験を通じて、100年という時間軸において植生はダイナミックに変動する存在であり、かつそのパターンが気候環境に応じて大きく異なるこ

とが実感された。

3) 有用性と応用可能性

このカテゴリーでは、本ソフトウェアの研究・教育・アウトリーチ等への応用可能性に関する評価を行った。設問は以下の3項目である：

- ・本ソフトウェアはDGVMの開発研究の役に立つと思いますか？
- ・本ソフトウェアは研究のアウトリーチ活動の役に立つと思いますか？
- ・本ソフトウェアは植物生態学や大気陸面相互作用の教育に有用であると思いますか？

4) 任意回答項目

また、本アンケートには自由記述形式の設問を2項目設け、任意回答として以下の内容について意見を募った。

- ・ソフトウェアのデザインや操作性、また追加すべき機能に関して、ご意見があればお聞かせください。
- ・ソフトウェアの応用可能性について、アイデアや提案があればご記入ください。

アンケート結果（採点式の必須回答項目）

カテゴリー「デザインと操作性」「現象の理解」「有用性と応用可能性」に関する評価結果を、それぞれ表1、表2、表3に示す。各カテゴリーにおける各設問の平均スコアは、それぞれ1.68～1.77、1.82～2.23、1.41～1.96の範囲に分布しており、全体としては概ね好意的な評価が得られたと考えられる。一方で、「気候と植生の相互作用」（平均スコア2.18）および「季節変化の気候依存性」（平均スコア2.23）については、相対的に評価が低く（表2）、本ソフトウェアがこれらの現象の表現において課題を残していることが示唆された。他方、「アウトリーチへの有用性」（平均スコア1.41）および「教育への有用性」（平均スコア1.55）は高い評価を得ており（表3）、非専門家や教育現場に向けた情報提供の手段として、本ソフトウェアが有用であるという肯定的な評価が示された。なお、各設問において、評価5（最も否定的な評価）が一貫して2名の回答者によって付けられており、これが平均スコアを押し下げる要因となっていた。しかし、該当する両名の自由記述欄には、いずれも本ソフトウェアに対する好意的な内容の長文コメントが記されていた。このことから、両名は評価尺度を逆に解釈して回答した可能性が否定できず、その場合、実際の評価は本集計結果よりも高かったと推察される。

表1. デザインおよび操作性に関するアンケート結果の集計。数値は回答者数を示す。スコアは1が「非常に良い」、5が「非常に悪い」を意味する。設問の具体的な文言については本文中に記載している。

Table 1. Summary of questionnaire results regarding design and usability. Numbers indicate the number of respondents. Scores range from 1 (very good) to 5 (very poor). The exact wording of each question is provided in the main text.

スコア	1	2	3	4	5	平均
(1)全体のデザインと操作性	11人	8人	1人	1人	1人	1.77
(2)直感的な操作性	13人	6人	1人	0人	2人	1.72
(3)情報パネルの表示の妥当性	12人	7人	1人	0人	2人	1.77
(4)実装の適切性	12人	8人	0人	1人	1人	1.68

表2. SEIB-Explorerの体験を通じた現象の理解に関するアンケート結果の集計。数値は回答者数を示す。スコアは1が「非常に良い」、5が「非常に悪い」を意味する。設問の具体的な文言については本文中に記載している。

Table 2. Summary of questionnaire results regarding understanding of phenomena through the SEIB-Explorer experience. Numbers indicate the number of respondents. Scores range from 1 (very good) to 5 (very poor). The exact wording of each question is provided in the main text.

スコア	1	2	3	4	5	平均
気候と植生の相互作用	7人	5人	9人	1人	0人	2.18
季節変化の気候依存性	6人	6人	9人	1人	0人	2.23
植生の長期変動と気候差	10人	9人	1人	1人	1人	1.82

表3. SEIB-Explorerの有用性と応用可能性に関するアンケート結果の集計。数値は回答者数を示す。スコアは1が「非常に良い」、5が「非常に悪い」を意味する。設問の具体的な文言については本文中に記載している。

Table 3. Summary of questionnaire results regarding the usefulness and applicability of SEIB-Explorer. Numbers indicate the number of respondents. Scores range from 1 (very good) to 5 (very poor). The exact wording of each question is provided in the main text.

スコア	1	2	3	4	5	平均
DGVM研究への有用性	11人	5人	3人	2人	1人	1.96
アウトリーチへの有用性	19人	1人	0人	0人	2人	1.41
教育への有用性	16人	4人	0人	0人	2人	1.55

アンケート結果（記述式の任意回答項目）

自由記述式で設けたソフトウェアのデザインや操作性、追加機能に関する設問に対しては、以下のような回答が寄せられた。なかでも季節変化の可視化に関する要望は、季節変化に関する定量的評価設問での低評価と整合的であった。

- ・季節変化を可視化する機能が欲しい。
- ・出力値に信頼区間を表示してほしい。
- ・全球面積で換算した値が分かるとうい。
- ・複数のシミュレーション条件間で結果を比較できる機能が望ましい。特に、極端な環境条件下においてどのような影響が生じるかを確認したい。

また、本ソフトウェアの応用可能性に関する設問には、以下のような意見が寄せられた。いずれもアウトリーチや教育目的での活用に関する提案であり、上記の定量的評価結果を支持する内容であった。なお、類似す

る複数の回答は一文に集約している。

- ・授業で使用したい。視覚的情報は学生の興味を引くうえで非常に有効である。
- ・アウトリーチに有効であり、研究者のみならず一般市民にも関心を持ってもらえる有意義な取り組みであると考えられる。
- ・森林環境税を活用した森林管理が100年後の森林にどのような影響を与えるかを、納税者や地域住民に直感的に伝えるための仕組みに利用できないか。

記述式回答の区分を問わず、SEIB-Explorerにモデル本体を統合することで、既存のシミュレーションデータの可視化に加えて、モデルの実行も可能とすることを提案する意見が複数寄せられた。加えて、そうした統合なしには実現が困難と考えられる機能（ゲーム化など）についても要望があった。具体的な回答は以下のとおりである。

- ・ユーザーが意図的に攪乱（例：伐採、森林火災）を加えるオプションがあると興味深い。
- ・生態系サービスに優れた森林の創出を競う、ゲーム形式の森林管理コンテストの開催。
- ・植生の初期設定や途中での人為的改変（例：間伐）がその後の植生発達および大気-陸面間相互作用に与える影響を、ゲーム的要素を通じて学ぶことができれば、植生・大気環境・攪乱の関係を主体的に考察する機会となり、学習効果の向上が期待できるのでは。

本可視化技術の位置づけ、課題、 今後の発展可能性

SEIB-Explorerの意義と、既存取り組みとの比較

本研究で開発したSEIB-Explorerは、動的全球植生モデルSEIB-DGVMの出力を3次元空間で視覚的に再現し、森林構造や関連する生態系機能の変化を直感的に理解するためのツールである。従来の可視化手法が静的なグラフや二次元地図にとどまっていたのに対し、本ソフトウェアは、三次元で表現された森林動態をインタラクティブに閲覧できる点において、高い新規性を有する。特に、モデル内での植生遷移とそれに伴う物質循環の変化を視覚的に確認できる機能は、気候-植生相互作用の理解に寄与すると同時に、非専門家を含む広範な層への情報伝達手段としても有効である。

すでにいくつかのソフトウェア開発の取り組みが、DGVMを含む陸面過程モデル (LSM; Land Surface Model) の可用性と解釈を支援し、教育も視野に入れた環境を提供している。例えば、スウェーデンのルンド大学が開発したDGVMであるLPJ-GUESS (Smith et al. 2001) の教育用バージョンであるLPJ-GUESS Educationは、環境科学の中級から上級レベルの大学講義での使用を目的としており、気候変動が陸上生態系に与える影響をシミュレーションするための学習支援ツールとして設計されている。このパッケージにはモデル本体と気象データ抽出ツールが含まれ、地球上の任意の地点において植生動態のシミュレーションを実行し、シミュレートされた物質循環を時系列グラフとして表示する機能を有する (LPJ-GUESS Education 3.0 User's Guide, <https://web.nateko.lu.se/lpj-guess/education/docs/quickstart.html>, 最終確認日2025年6月5日)。

近年では、Keetz et al. (2023) が、動的植生モデル (DGVMの単一地点版) であるCLM-FATEに、GUIによる操作性の向上とAPI (Application Programming

Interface) による統合性を付加したシステム「Land Sites Platform (LSP)」を開発した。LSPはバージョン管理されたコンテナ形式で配布されており、低スペックのPCや各種OS上でもシミュレーションの実行が可能である。また、このソフトウェアにはノルウェーの20地点に関する入力データが同梱されており、さらに全球データセットを用いた地点の追加も可能である。

しかしながら、これら従来の取り組みの多くはインタラクティブ性に制約があり、さらに実行環境の構築や結果の解釈にも一定の専門知識を要する。その点において、SEIB-Explorerは操作性・没入性・アクセス性の三点において競争優位性があり、教育・研究・アウトリーチの適用範囲を大幅に拡張する可能性があると考えられる。なお、本ツールが対応するSEIB-DGVM本体は、木本個体間における光環境および空間を巡る局所的な競争を、主要なDGVMの中でも最も詳細にプロセスベースで扱っている点において独自性を有している。また、コード本体だけでなく技術資料もオープンソースとして継続的に保守・公開されており、この点でも高い優位性を備えている。こうしたモデルの発展と普及には、ユーザー支援ツールやインターフェースの整備も不可欠であり、SEIB-Explorerはその一端を担うものとして設計された。モデル本体の価値を最大限に引き出すうえで、可視化の果たす役割は決して付随的なものではなく、全体の実用性や発展性を高める基盤の一部と位置づけられる。

今後克服すべき課題

一方で、SEIB-Explorerにはいくつかの課題も残されている。第一に、モデル本体 (SEIB-DGVM) との統合運用が実現されておらず、現在は既存出力の可視化にとどまっている。将来的には、ユーザーが可視化画面上で条件を変更し、そのままモデルを再実行できる統合型の環境も望まれる。これは、教育現場や市民参加型科学において、「もしこうだったら」という仮想条件を容易に試せることが、学習意欲の向上や理解深化に直結すると期待されるためである。

第二に、モデルの不確実性に対する認識をどのように伝えるかという問題がある。たとえば、モデルで使用されているPFT (Plant Functional Type) による生物多様性の要約や、簡略化された物理過程の表現は、現実世界の複雑性を大きく単純化したものである。この点は、教育的応用のみならず、異分野との協働研究の場においても注意が必要である。視覚的に説得力のある出力であるがゆえに、誤った理解を防ぐためのドキュメント整備や、

可視化そのものの不確実性表示（例：信頼区間の表示）も今後の課題となるだろう。

第三に、リアル表示モードにおいて樹木のフェノロジー（展葉・紅葉・落葉など）の季節変化を表現できていない点がある。現状では、3D樹木モデルの表示には汎用ゲームアセットを利用しているため、葉の状態変化を段階的に表現できていない。独自の3Dモデル開発には相応の人的リソースが必要となるため、現在のところ実装は見送られているが、アンケート調査でも複数の回答者からこの点に関する要望が寄せられており、将来的には対応が望まれる重要な課題である。

社会実装・アウトリーチへの可能性

本ツールの最大の可能性は、研究シーズの「見える化」によって、科学知の社会実装を促進し得る点にある。アンケート結果でも示されたように、教育現場や森林管理、さらには政策形成においても、視覚的な理解促進は極めて重要である。たとえば、森林環境税の用途や温暖化による森林構成の変化を、市民が直感的に理解するための媒介装置として、本ソフトウェアは極めて有効である。さらに、近年注目される「ゲーム化」や「インタラクティブ・サイエンス」の潮流に呼応し、SEIB-Explorerを基盤とした教育用コンテンツの開発や、参加型科学イベントでの実演利用といった展開も期待される。これにより、気候変動と森林生態系の関係に対する理解と関心を、専門家のみならず一般市民にも広げることができる。

DGVMは地球システムにおける植生の役割を理解するうえで非常に有用なツールである。従来のDGVMでは、植生の機能や応答の多くが静的かつ経験的にパラメタライズされて表現されていたが、近年では、それらをより動的かつプロセスベースで記述する方向へと発展しつつある。こうした高度化に伴い、モデルの信頼性を高めるためには、生態学、気象・気候学、水文学など、さまざまな分野の研究者による共同研究の強化が不可欠となっている（Dietze et al. 2014; Fisher and Koven 2020; Pugh et al. 2020）。Kyker-Snowman et al. (2022) は、実験生態学者とモデル開発者の橋渡しを進め、モデル利用の障壁を下げるためのロードマップを提案しており、本研究の開発もその趣旨に沿うものである。モデルへのアクセスが高まれば、新たなユーザーの参入が促され、結果として地球システムにおける生態学的理解の深化にもつながる。さらにそれは、地球環境変化に対する私たちの集団的理解の向上にも資すると期待される。SEIB-

Explorerは、可視化とインタラクティブ性を融合させた新たな科学的表現の可能性を示しており、科学的コンテンツを感覚的に「体験」させるこのようなアプローチは、複雑な環境問題の認識を高め、長期的には行動変容を促す有力な手段となると考えられる。

謝 辞

アンケート調査にご協力くださった皆さま、本稿を原著論文区分で投稿した際に査読をご担当くださった2名の研究者の方々、そして本稿をご担当いただいた永光輝義さま（編集委員長）と鈴木重雄さま（担当編集委員）に、心より御礼申し上げます。Unityプログラムの開発にあたっては、佐藤可庵さまより多大なるご助力を賜りました。SEIB-Explorerは著者が個人として開発したソフトウェアですが、その学会発表ならびに本論文の執筆および出版に関わる費用には、Arctic Challenge for Sustainability II (ArCS II, Grant No. JPMXD1420318865) と Arctic Challenge for Sustainability III (ArCS III, Grant No. JPMXD1720251001) の予算を使用いたしました。

引用文献

- Bugmann H, Seidl R (2022) The evolution, complexity and diversity of models of long-term forest dynamics. *Journal of Ecology*, 110:2288-2307. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13989>
- Byrne MP, Hegerl GC, Scheff J, Adam O, Berg A, Biasutti M, Bordoni S, Dai A, Geen R, Henry M, Hill SA, Hohenegger C, Humphrey V, Joshi M, Konings AG, Laguë MM, Lambert FH, Lehner F, Mankin JS, McColl KA, McKinnon KA, Pendergrass AG, Pietschnig M, Schmidt L, Schurer AP, Scott EM, Sexton D, Sherwood SC, Vargas Zeppetello LR, Zhang Y (2024) Theory and the future of land-climate science. *Nature Geoscience*, 17:1079-1086. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01553-8>
- Chitra-Tarak R, Xu C, Aguilar S, Anderson-Teixeira KJ, Chambers J, Detto M, Faybishenko B, Fisher RA, Knox RG, Koven CD, Kueppers LM, Kunert N, Kupers SJ, McDowell NG, Newman BD, Paton SR, Perez R, Ruiz L, Sack L, Warren JM, Wolfe BT, Wright C, Wright SJ, Zailaa J, McMahon SM (2021) Hydraulically-vulnerable trees survive on deep-water access during droughts in a tropical forest. *The New Phytologist*, 231:1798-1813. <https://doi.org/10.1111/nph.17464>
- Collier N, Hoffman FM, Lawrence DM, Keppel-Aleks G, Koven CD, Riley WJ, Mu M, Randerson JT (2018) The International Land Model Benchmarking (ILAMB)

- System: Design, theory, and implementation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10:2731-2754. <https://doi.org/10.1029/2018MS001354>
- Dietze MC, Serbin SP, Davidson C, Desai AR, Feng X, Kelly R, Kooper R, LeBauer D, Mantoath J, McHenry K, Wang D (2014) A quantitative assessment of a terrestrial biosphere model's data needs across North American biomes. *Journal of Geophysical Research. Biogeosciences*, 119:286-300. <https://doi.org/10.1002/2013JG002392>
- Fisher RA, Koven CD (2020) Perspectives on the future of land surface models and the challenges of representing complex terrestrial systems. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12:e2018MS001453. <https://doi.org/10.1029/2018MS001453>
- Foley JA, Costa MH, Delire C, Ramankutty N, Snyder P (2003) Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect Earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1:38-44. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0038:GSHTEC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0038:GSHTEC]2.0.CO;2)
- Guan K, Good SP, Caylor KK, Medvigy D, Pan M, Wood EF, Sato H, Biasutti M, Chen M, Ahlström A, Xu X (2018) Simulated sensitivity of African terrestrial ecosystem photosynthesis to rainfall frequency, intensity, and rainy season length. *Environmental Research Letters*, 13:025013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f30>
- Hartig F, Dyke J, Hickler T, Higgins SI, O'Hara RB, Scheiter S, Huth A (2012) Connecting dynamic vegetation models to data—An inverse perspective. *Journal of Biogeography*, 39:2240-2252. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2012.02745.x>
- Kazmierczak R, Skowroński R, Kowalczyk C, Grunwald G (2024) Creating interactive scenes in 3D educational games: Using narrative and technology to explore history and culture. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 14:4795. <https://doi.org/10.3390/app14114795>
- Keetz LT, Lieungh E, Karimi-Asli K, Geange SR, Gelati E, Tang H, Yilmaz YA, Aas KS, Althuisen IHJ, Bryn A, Falk S, Fisher R, Fouilloux A, Horvath P, Indrehus S, Lee H, Lombardozi D, Parmentier FW, Pirk N, Vandvik V, Vollsnes AV, Skarpaas O, Stordal F, Tallaksen LM (2023) Climate-ecosystem modelling made easy: The Land Sites Platform. *Global Change Biology*, 29:4440-4452. <https://doi.org/10.1111/gcb.16808>
- Kehrer J, Hauser H (2013) Visualization and visual analysis of multifaceted scientific data: A survey. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19:495-513. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2012.110>
- Kiss A, Pusztai G (2022) Using the Unity game engine to develop a 3D simulated ecological system based on a predator-prey model extended by gene evolution. *Informatics (MDPI)*, 9:9. <https://doi.org/10.3390/informatics9010009>
- Kyker-Snowman E, Lombardozi DL, Bonan GB, Cheng SJ, Dukes JS, Frey SD, Jacobs EM, McNellis R, Rady JM, Smith NG, Thomas RQ, Wieder WR, Grandy AS (2022) Increasing the spatial and temporal impact of ecological research: A roadmap for integrating a novel terrestrial process into an Earth system model. *Global Change Biology*, 28:665-684. <https://doi.org/10.1111/gcb.15894>
- Nurrohman RK, Kato T, Ninomiya H, Végh L, Delbart N, Miyauchi T, Sato H, Shiraishi T, Hirata R (2024) Future projections of Siberian wildfire and aerosol emissions. *Biogeosciences*, 21:4195-4227. <https://doi.org/10.5194/bg-21-4195-2024>
- Pacala SW, Deutschman DH (1995) Details that matter: The spatial distribution of individual trees maintains forest ecosystem function. *Oikos*, 74:357-365. <https://doi.org/10.2307/3545980>
- Pugh TAM, Rademacher TT, Shafer SL, Steinkamp J, Barichivich J, Beckage B, Haverd V, Harper A, Heinke J, Nishina K, Rammig A, Sato H, Arneith A, Hantson S, Hickler T, Kautz M, Quesada B, Smith B, Thonicke K (2020) Understanding the uncertainty in global forest carbon turnover. *Biogeosciences*, 17:3961-3989. <https://doi.org/10.5194/bg-17-3961-2020>
- Rautenhaus M, Bottinger M, Siemen S, Hoffman R, Kirby RM, Mirzargar M, Rober N, Westermann R (2018) Visualization in meteorology—A survey of techniques and tools for data analysis tasks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24:3268-3296. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2779501>
- Rogers A, Serbin SP, Way DA (2022) Reducing model uncertainty of climate change impacts on high latitude carbon assimilation. *Global Change Biology*, 28:1222-1247. <https://doi.org/10.1111/gcb.15958>
- 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. *日本生態学会誌*, 58:11-21. https://doi.org/10.18960/seitai.58.1_11
- 佐藤 永 (2014) 植生と気候の相互作用と、動的全球モデル. (原 登志彦編) *地球環境変動の生態学*, 129-147. 共立出版, 東京
- 佐藤 永, 伊藤 昭彦, 橋本 昌司 (2018) モニタリングに基づく物質動態広域評価の最前線—広域における炭素・窒素・水の動態を探る8. *全球スケールの陸域物質動態シミュレーション*. *日本土壌肥科学雑誌*, 89:152-160. https://doi.org/10.20710/dojo.89.2_152
- Sato H, Itoh A, Kohyama T (2007) SEIB-DGVM: A new dynamic global vegetation model using a spatially explicit individual-based approach. *Ecological Modelling*, 200:279-307. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.09.006>
- Smith B, Prentice IC, Sykes MT (2001) Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems: comparing two contrasting approaches within European climate space. *Global Ecology and Biogeography*, 10:621-637. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2001.t01-1-00256.x>
- Sorensen E (2025) Development of a virtual simulation system for industrial robot kinematics based on Unity 3D.

- Journal of Computer Technology and Software, 4. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14785239>
- 鄭 峻介, 佐藤 永, 西園 朋広, 斎藤 英樹, 高橋 正義, 北原 文章, 山田 祐亮, 細田 和男 (印刷中) 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. 森林計画学会誌
- Unity Technologies (2022) Unity (Version 2022.3) [Computer software]. <https://unity.com/>, 2025年7月8日確認
- Watanabe S, Hajima T, Sudo K, Nagashima T, Takemura T, Okajima H, Nozawa T, Kawase H, Abe M, Yokohata T, Ise T, Sato H, Kato E, Takata K, Emori S, Kawamiya M (2011) MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4:845-872. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011>
- Zhang REX, Ma Z, An Y, Bao Q, Wu Z, Wu L, Sun Z (2024) Drought sensitivity and vulnerability of rubber plantation GPP—Insights from flux site-based simulation. *Land (Basel)*, 13:745. <https://doi.org/10.3390/land13060745>