J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 151 p.27 ～ 34 (2022)

次世代地球システムモデルに向けた統合陸域シミュレータの開発 ～ 土壌物理プロセスに着目して ～

芳村 圭[1]・新田友子[1]

Development of integrated land simulator for next generation earth system models

Kei YOSHIMURA[1] and Tomoko NITTA[1]

1. はじめに

人類は陸域で生活しており，気候がわずかに変化しただけでもその自然・社会影響は甚大になる．また陸域は，気候変動という現象において地球システムの中で影響が大きい．気候から陸域への影響と陸域から気候への影響を精確に推定するためには，陸域の現象をできるだけ正確に，かつ詳細にモデル化することが重要である．正確さとはすなわち，地質的・物理的・化学的・生物学的プロセスに加え人為的・社会的プロセス等をより正しく表現することであり，詳細さとはすなわち，より高い時空間分解能でそれらのプロセスを表現することである．近年では，そのような目的を持って，気候モデル（地球システムモデルとも呼ばれる）の一要素としての陸域モデルは開発されてきている．

従来気候モデルにおける陸域は，数ある物理過程パラメタリゼーションの一つとして表現され，大気モデルに従属する形でそのモデリングが進められてきた．しかしながら，気候モデルが高度化高解像度化してその精度にますますの信頼性が期待されているなか，本質的に大気よりも格段に不均一な存在である陸域を大気と同一の水平解像度で表現することには様々な問題があり，抜本的な改善が必要であった．また，大気モデルに従属したモデルであるため，陸域での水文過程，生物地球化学過程などに関するあらたな知見やそのモデルが，気候モデルそのものになかなか反映されないということも，大きな問題となっていた．そのため筆者を含む研究チームでは，これまで大気モデルの一部であった地表面過程パラメタリゼーションを，陸域モデルとして独立させ，これまでの気候モデルでは扱えてこなかった，もしくは過度に簡素化されていた様々な陸域での重要な要素，例えば河川，湖沼，積雪，植生，土壌，地下水，人間活動等について，別途研究されている知見やモデルをより簡易かつ物理的な整合性は担保した形で結合させることのできるフレームワークである「統合陸域シミュレータ（Integrated Land Simulator; ILS）」の構築に取り組んだ．本解説では，その取り組みについて記述する．

[1]Global Hydrological Prediction Center, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8574, Japan. Corresponding author: 芳村 圭，東京大学生産技術研究所グローバル水文予測センター．
2022 年 2 月 28 日受稿　2022 年 4 月 18 日受理

2. 統合陸域シミュレータ（ILS）の開発

2.1 歴史的経緯

気候モデルにおける陸域の挙動の表現は，2021 年にノーベル物理学賞を受賞した真鍋博士の「バケツモデル」（Manabe, 1969）に端を発し，いわゆる物理過程と分類されるパラメタリゼーション群の一つ，すなわち地表面パラメタリゼーション（land surface parameterization scheme; LSS）として発展してきた（別名として陸面モデル（land surface model; LSM）ともよく呼ばれるが，この稿では大気モデルの物理過程の一部であることを意味する場合は LSS で統一する）．物理過程とは，大気モデリング分野における慣用的な表現であり，大規模な流体の運動を表現した力学過程に対して，各グリッドないし鉛直一次元で表現できる現象のことを総称している．

その後，土壌が複数の層になったり，植生による光合成や蒸散が表現されたり，雪の表現が追加されたりと LSS は進歩していったが（Pitman, 2003），大気モデルの鉛直一次元で表現される物理過程の一部であるという制約はなかなか取り払えずにいた．その結果，1. 大気モデルと同一の水平空間解像度で表現されることが常態化することで，本来大気に対して不均一である地表面の物理過程が過度に簡素化されるようになり，2. 大気モデル開発の現場において陸域に関する専門家が不在もしくは極めて少数になることで，LSS の開発・改良の速度が遅くなるという問題が生じていた．

1 つ目の問題に関しては，モザイク化（タイル化とも呼ばれる）した上でグリッド内の面積割合で重み付けするという手法が一般的に実施されているが，それはあくまでも便宜的な対処であり，陸域の空間的不均一性やプロセスの複雑さを表現するには不十分である．2 つ目の

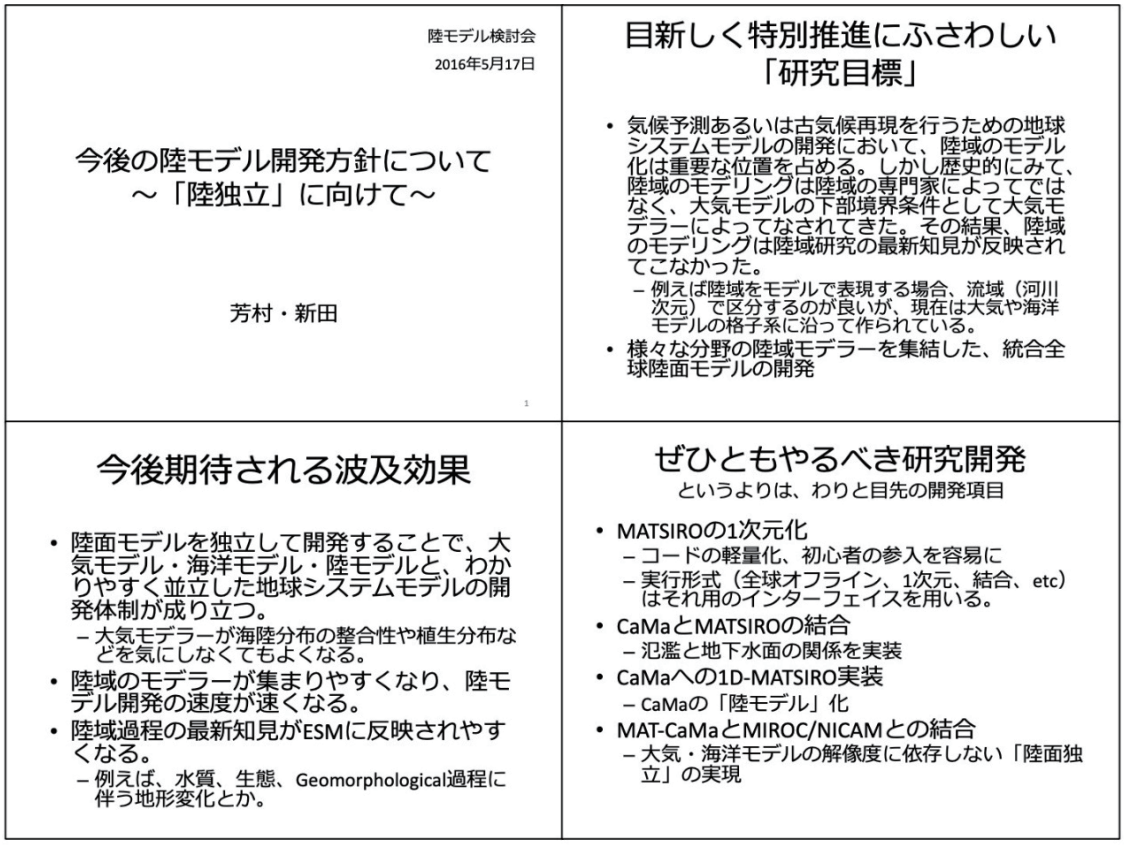


Fig. 1 2016 年度第 1 回次世代陸モデル開発検討会にて著者が使用したスライドの冒頭部分の抜粋.

問題は，特に日本において，次段落に示すようなオフラインモデルの進化型など，陸域の表現をより正確かつ詳細にするためのモデルは存在しているにも関わらず，気候モデルの物理過程には実装されにくいという形で顕在化していた．

2 つ目の点についての解説をもう少し試みる．特に水文分野や森林分野を中心に，LSS を単体で用いて，地表からの潜熱 · 顕熱フラックスや土壌水分等の状態量の再現性を検証する研究が発展してきた．そのような研究では，地表面付近の気温 · 風速 · 気圧 · 水蒸気量 · 短波放射 · 長波放射 · 降水量等を大気からの外力として与え LSS を動かす「オフライン実験」という手法が用いられてきた．そうしたオフライン実験によってモデル比較を行う PILPS（Project for Intercomparison of Land surface Parameterization Schemes; Henderson-Sellers et al., 1993）や GSWP（Global Soil Wetness Project; Dirmeyer et al., 1999）といった大型プロジェクトも 1990 年代以降行われるようになり，LSS の改良が進んでいった．しかしながら，本来気候モデルの LSS の改良を目的としていたはずが，気候影響評価用のモデル開発に目的がシフトし，オフライン専用モデルとして独自の進化を遂げたり，そもそも気候モデルとの結合を想定していないモデルが生まれたりと，当初とは異なる方向でも発展していったことも，興味深い事実である．いまでは，ISI-MIP（Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project; Warszawski et al., 2014）など，気候モデルの一部としての機能は無いが，水問題 · 食糧問題 · エネルギー問題等様々なセクターにおける気候変動影響を評価することのできるモデルも含めての相互比較が行われている．

そのような発展の方向性自体は，科学の深化 · 多様化の上ではむしろ歓迎するべきものである．しかし，少なくとも日本においては，オフラインモデルに新たに実装した機能が，タイムリーに気候モデルに反映されない，すなわち気候モデルの LSS とオフラインモデルの乖離が大きくなりすぎて合流できない状況になってしまっていた．これは，前述の 2 つ目の問題，大気モデルあるいは気候モデルの開発現場に，こうしたオフラインモデルを用いた陸域での気候影響評価に関わる研究者が，深く関与していなかったことが一因だと考えられた．

2.2 新たな陸域モデルの開発方針

そのような問題意識を背景に，著者を含む研究チームでは，従来の LSS とは異なる新たな陸域モデルの開発を構想し，2016 年 5 月に「2016 年度第 1 回次世代陸モデル開発検討会」を開催した（http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/TiMiNG/?page_id=234）．筆者がそこでの発表に使ったスライドの冒頭が Fig. 1 である．前述の問題点を解決する手段として「陸独立」というスローガンを掲げ，開発を進めていくという主旨が述べられている．より具体的には，Fig. 2 に示すように，陸域の各要素を司るモデ

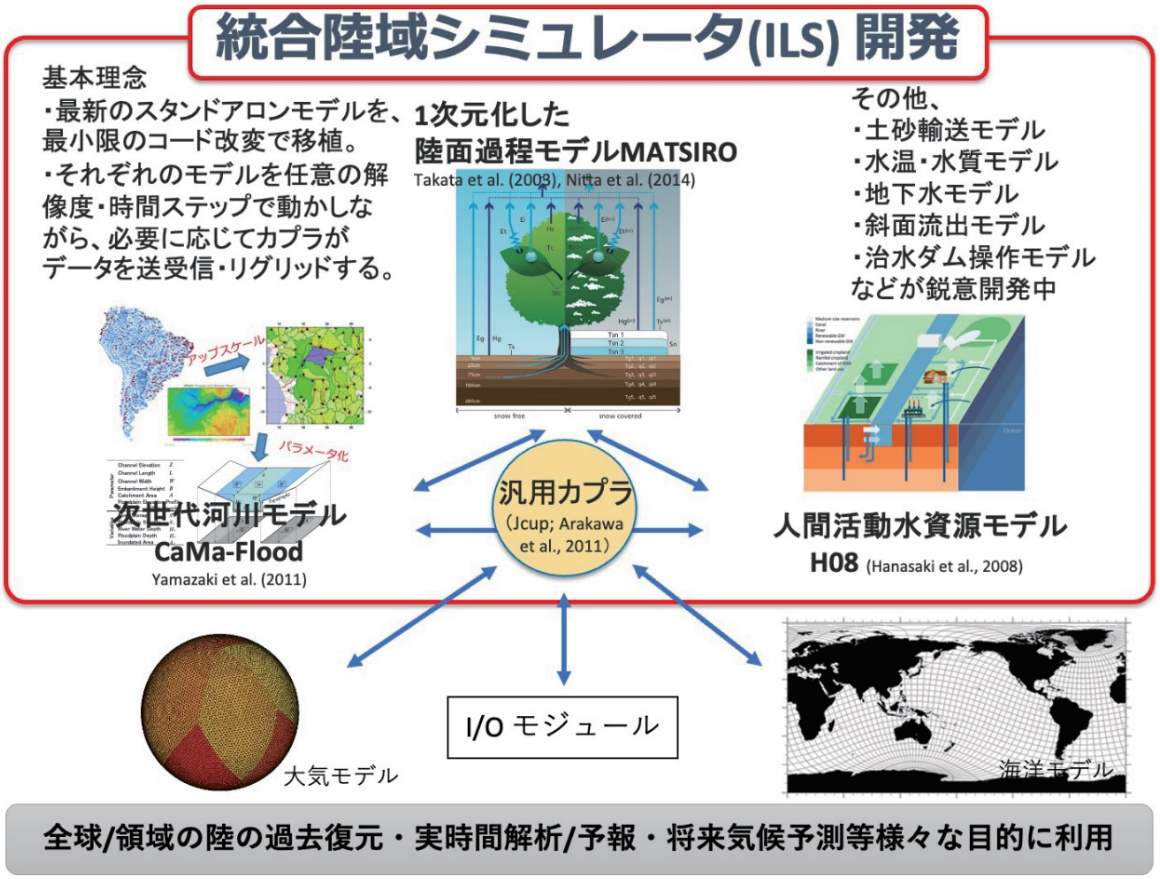


Fig. 2 統合陸域シミュレータの構成概念図.

ル群を一つのプログラムにまとめようとせず，なるべくそのまま複数の実行体として用い，MPMD（マルチプログラム・マルチデータ）での並列実行で結合を実現するという方針を定めた．その並列実行での結合体を，さらに大気・海洋と並列実行することで，最終目標である気候モデルも構築される．言わば，これまでの LSS は，気候モデルの一部として開発され，必要に応じて大気から切り離して検証していたが，新たな陸域モデルは，もともと大気から切り離された形で開発を進め，よく検証されたあとに気候モデルと結合する方針に切り替えようということになる．すなわち「陸独立」とは，あらたなプロセスを正確かつ詳細に表現することによって性能の向上を図るのではなく，そうした性能向上をより行いやすくするための土台を整備しようという取り組みであり，そのことはよく強調しておきたい．繰り返しになるが，気候変動予測の高度化の必要性が高まるに従い，これまでの陸域モデリングの問題点が顕在化してきたことが動機となっている．また余談であるが，2017 年 1 月ごろ，その新たな陸域モデルを「統合陸域シミュレータ」と呼ぶことを決めたようである．

開発体制としては，要素モデル同士の結合に用いる汎用結合モジュール Jcup（Arakawa et al., 2020）及びその API（Application Programming Interface）の開発には高度情報科学技術研究機構（当時）の荒川隆氏が，Jcup が必要とするリグリッディングテーブル（任意の格子変換のためのマップ群）を作成するツール SPRING （SPheroidal grid system Regridding INterpolation table Generator; http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~akira/page/Works/contents/SPRING/）の開発には東京大学大学院生の竹島滉氏が，そして，要素モデル群及び気候モデルとの結合部分のコーディングを含めた ILS 全体の構築及びそのコード管理は東京大学生産技術研究所助教の新田友子氏がそれぞれ担当し，膨大な作業を伴う研究開発が進められていった．

2.3 統合陸域シミュレータ v1.0 の完成

その後数年を経て，Nitta et al.（2020）にて ILS のバージョン 1.0（ILSv1）の完成が宣言された．ILSv1 は，MIROC5（Watanabe et al., 2010）で実際に動いていた LSS である MATSIRO5（Nitta et al., 2014）をベースに，単体でも実行可能なようにコードを全面的に書き換えて軽量化した水・エネルギー輸送モデルである MAT-1D と，近年開発され利用者が増加している河川動態モデルである CaMa-Flood（Yamazaki et al., 2013）の 2 つを，陸域の物理過程を表現するモデル群として持たせたものである．それらを Jcup で結合することで全球陸域オフライン実験など，様々なシミュレーションを実施することができる．ILSv1 で採用された結合の特徴として，地形に応じた集水域の形状を持つ CaMa-Flood の格子ごと



Fig. 3　陸面水文量シミュレーションシステム Today's Earth の概要.

に，MAT-1D が鉛直 1 次元の水・エネルギー輸送過程の動きを表現していることが挙げられる．現在（2022 年 2 月）は，次代の気候モデル MIROC7 の開発のさなかにあり，従来型の LSS ではなく，ILS を用いて大気と海洋のそれぞれと陸域との結合を実現し，新たな気候モデルとして物理性能・計算性能を高めていくべく開発が進められている．

3. 統合陸域シミュレータを使った事例紹介

3.1 Today's Earth 及び実時間陸域水文予測によるベンチマーキング

東京大学生産技術研究所と JAXA/EORC の共同研究グループでは，ILS を用いて全球や日本域の陸上の水循環に関わる物理量（土壌中の水分量や河川流量など）を統合的に推定するシミュレーションシステム「Today's Earth」を運用している（芳村, 2021）．その日本域バージョン「Today's Earth - Japan」として，気象庁が提供する全国合成レーダー降雨量及び数値気象予測データを入力値として用い，降雨流出過程モデルと河川流下過程モデルを組み合わせた数値モデルに与え，日本全国 1 分（約 2 km）の格子で，1 日 8 回（3 時間毎）土壌水分量や蒸発散量，河川流量，河川水位等の陸域水文量の現況解析及び 39 時間後までの予測を行う数値洪水予測システムを構築した（Fig. 3）．特に，河川水位については，過去 10 数年間のシミュレーションについて日本全国約 850 箇所の水位観測所において予測精度を検証した上で，すべての格子において過去のシミュレーションに基づき，統計的な「珍しさ」を示す再帰年数（リターンピリオド）を示すことで，予測された河川水位の危険性を示すようなシステムになっている（Ma et al., 2021）．

このような実時間予測システムを運用する理由は，もちろん洪水等に関する社会に対する情報提供が一つである．しかし，それに匹敵するもう一つの理由として，実時間運用することで，ILS の性能の時系列変化が記録できるということがある．そのようなベンチマーキングを行うことは，モデル開発の動機づけになるほか，チームの士気を高めるために大いに必要であると考えている．

加えて，気候スケールでのハザードリスクの予測の評価にもつながることも指摘しておきたい．前述のように，LSS から派生したモデルを用いた気候変動影響評価は世界中で盛んに行われており，そうして推計された情報はいわゆる「気候サービス」の一部として，例えば TCFD（気候関連財務情報開示タスクフォース）が求める物理的リスク指標などに利用されてきている．その手法で得られた将来気候における物理的リスクが信用にた

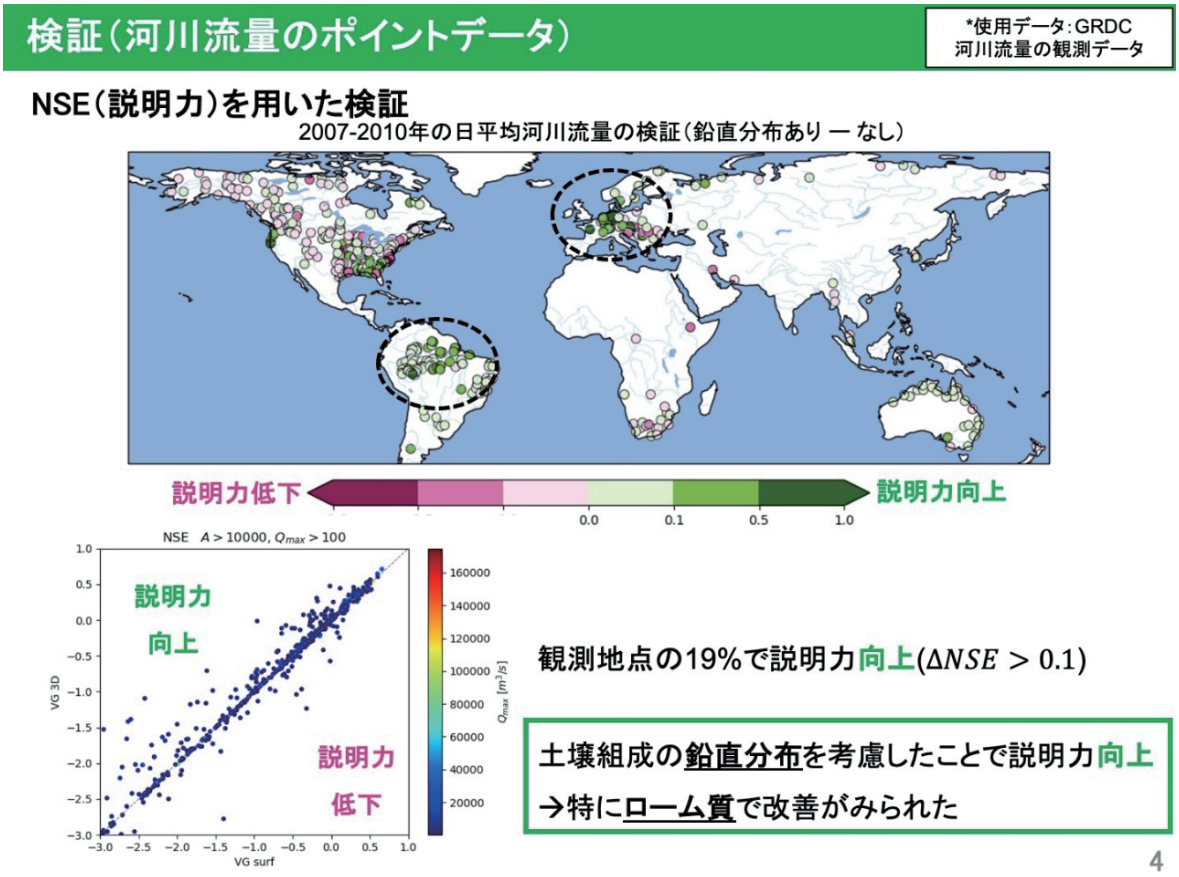


Fig. 4　ILS 内の土壌スキームの改良による河川流量への影響（浜田ら（2021）を改変した発表資料より，本人の了承を取って掲載）．

るものであると納得させる一つが，実時間運用によるハザード予測であり，それによるベンチマーキングであると考えている．実時間予測と気候変動予測を同じモデルで行う，いわゆるシームレス予測を行うことで，気候変動のより確かな物理的リスク指標を提供できるようになるといえよう．

3.2 土壌特性パラメタリゼーション及び土壌タイプデータの更新

土壌水分量は，陸域の水循環において重要な要素であり，流出と地下浸透の配分は土壌水分量によって決定されるほか，大気陸面相互作用などを介して気候システムにも影響を及ぼす．この研究事例では，ILS の土壌水分動態を表現した部分（以降土壌スキームと呼ぶ）において，水分特性曲線を改良し，さらに土壌パラメータの 3 次元分布を考慮することで，土壌水分量分布及び蒸発量や河川流量などの陸域水循環要素をより適切に表現できるか否かを確認した．なお本研究は，浜田ら（2021）としてすでに発表済みであるため，詳細については原典を参照してもらいたい．

具体的には，ILS の水分特性モデルを Clapp and Hornberger 式（CH 式）から van Genuchten 式（VG 式）に変更した．また，最新の土壌データセット SoilGrids250m（Hengl et al., 2017）と，機械学習を用いたペドトランスファー関数 Rosetta3（Zhang and Schaap, 2017）を用いて，土壌パラメータの水平・鉛直分布を全球 0.5 度四方の格子ごとに推定した．その上で，土壌スキーム改良における各要素（水分特性モデルの変更，土壌特性の空間分布の考慮，土壌特性の鉛直分布の考慮）が計算結果に与える影響を切り分けるシミュレーションを行い，観測に基づいた土壌水分量や流出量・河川流量等のデータとの比較を行った．

その結果，各土壌スキームの改良によって，土壌水分量推定の決定係数が上昇したほか，流出量や河川流量も改善した．特に，水分特性モデルを VG 式に変更したことで，砂質での土壌の保水力が増加した影響が大きく，土壌水分量の過小評価が改善した．また，河川流量のポイントデータ GRDC を用いた検証を行ったところ，土壌特性の鉛直分布を考慮したことで，観測地点の 19 % で説明力が向上したことが確認された（Fig. 4）．特に，中央ヨーロッパやアマゾン川流域のローム質において改善が見られた．

3.3 サブグリッド地中水輸送パラメタリゼーション

前述の通り，伝統的に LSS では鉛直一次元のモデル化がされている．陸域での水平方向の水・エネルギー輸送量は，鉛直のそれに比べると無視できる程度であろうという暗黙の仮定に基づくものであるが，その仮定の妥当

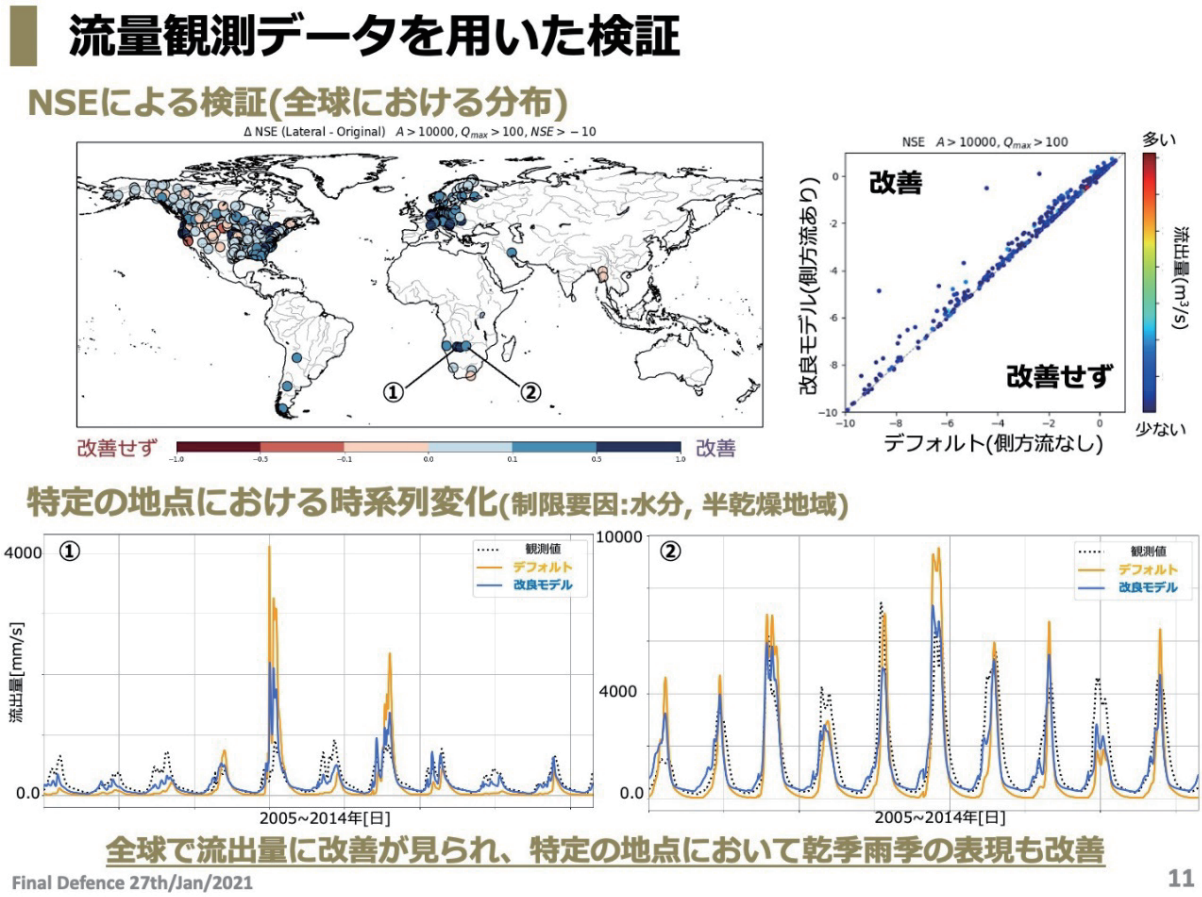


Fig. 5　ILS 内のサブグリッド側方流スキームの導入による河川流量への影響（足立ら（2021）を改変した発表資料より，本人の了承を取って掲載）．

性は実は明らかになっていない．複雑な標高分布に合わせた植生分布の違いなどからみても，それなりの規模で水とエネルギーの水平輸送は行われていると考えるほうがより自然である．この研究事例では，ILS の 1 格子の中で，標高差による水平水輸送がどれくらい起こっているのか，そしてその格子内輸送により，全球規模での陸域水循環がどの様に変化するかを検討した．なお本研究は，足立ら（2021）としてすでに発表済みであるため，詳細については原典を参照してもらいたい．

具体的には，高解像度標高データを基に 1 格子を 10 の標高ビンに分割し，それぞれのビンで計算される地下水面に基づく水頭勾配を用いて，Darcy 則により飽和側方流を表現し，各ビンからの流出から河川流量をシミュレートした．その結果を，観測に基づいた河川流量データと比較した．

その結果，土壌水分量と蒸散量は全球平均の広い範囲で減少傾向が見られた．これは，標高の高いビンから低いビンに土壌水分が移動することで標高の高いビンで蒸発量が減少する一方，低いビンでは土壌水分が増えても蒸発量が増加しないということを示していることがわかった．また，全球での河川流量の再現性がよくなったことが確認された（Fig. 5）．

4. おわりに

地球規模あるいは国レベルから地域スケールの，具体的な気候変動適応策が立案及び実施されるにあたり，気候予測には，これまでのような大気 · 海洋情報だけではなく，陸域及びその周辺のより多様なきめ細やかな情報提供へのニーズが高まってきている．気候変動メカニズムの解明及び気候予測精度の向上に加えて，こうしたニーズにも応えるべく，これまで大気モデルの一部であった地表面過程パラメタリゼーションを陸域モデルとして独立させ，これまでの気候モデルでは扱えてこなかった，もしくは過度に簡素化されていた様々な陸域での重要な要素について，別途研究されている知見やモデルをより簡易かつ物理的な整合性は担保した形で結合させることのできる統合陸域シミュレータを構築した．これにより，気候モデルの全体的な性能の改善と同時に，近未来の洪水などの自然災害の予測精度の向上が期待される．

こうした動きは日本だけではない．それどころか諸外国では，近年の激甚災害の頻発も鑑みて，陸域モデル開発体制の集中化がより進んでいる研究組織も存在する．日本においても，陸域に関する様々な研究分野がうまく

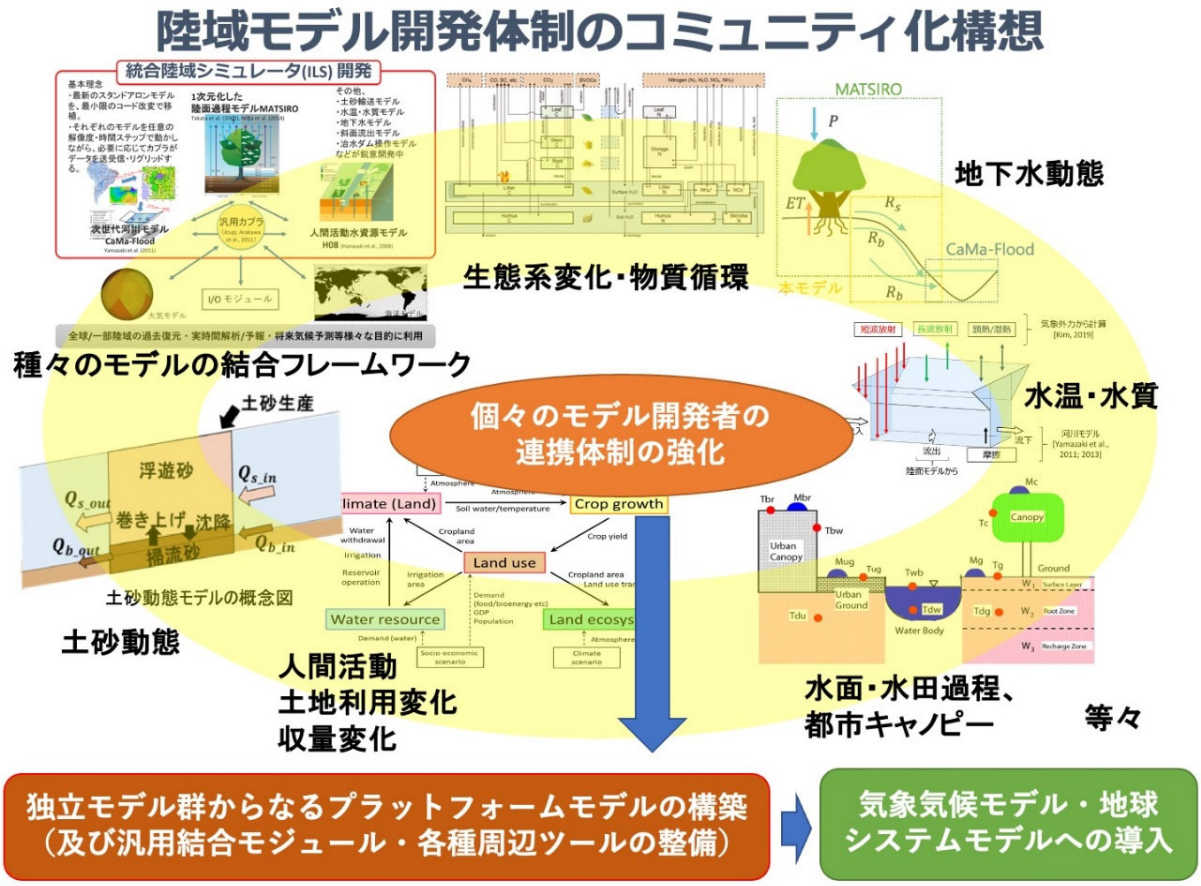


Fig. 6 陸域モデル開発体制のコミュニティ化についての概念図.

連携して研究開発を加速させる必要性が顕在化してきている.

日本において，全体の研究開発の強化及び効率化を図るにはどうすればよいか．そのためには，1）国内の陸域モデリングを行う個人ないしグループの情報交換や議論促進の場を形成し，既存のモデルの結合や新規モデルの開発を行うための連携体制を構築し，2）独立したモデル群をサブモデルとして扱うための汎用結合モジュールや周辺ツールからなるプラットフォームモデルを開発・整備し，3）そのプラットフォームモデルを気候モデル等へ導入するとともに，プラットフォーム自体及び中のモデル群の改良・高度化を進めるという，陸域モデル開発体制のコミュニティ（共同体）化が必要である（Fig. 6）.

前述の通り，2016 年頃より「陸モデル開発検討会」が発足し，機関を横断したゆるい共同体を形成し，陸域モデリングにおける研究担当者間の意思疎通が図られている．土壌物理学会の諸賢におかれても，この取り組みにぜひ積極的に関わっていただきたいと考えている.

謝辞

東京大学沖大幹教授代表の科学研究費補助金特別推進研究「グローバル水文学の新展開」（2016 年 4 月 ～ 2021 年 3 月）及び東京大学渡部雅浩教授代表の文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム「全球規模の気候変動予測と基盤的モデル開発」（2017 年 4 月 ～ 2022 年 3 月），九州大学竹村俊彦教授代表の環境省環境研究総合推進費（S-20）「短寿命気候強制因子による気候変動・環境影響に対応する緩和策推進のための研究」（2021 年 4 月 ～ ）による支援を得て，統合陸域シミュレータ開発が進められた.

引用文献

足立幸太, 山崎 大, 新田友子 (2021): 斜面流れを考慮した全球陸域モデルによる丘 – 谷間水分コントラストの再現. 土木学会論文集 B1（水工学）, 77: I_229–I_234.

Arakawa, T., Inoue, T., Yashiro, H. and Satoh, M. (2020): Coupling library Jcup3: its philosophy and application. Prog. Earth Planet Sci., 7(6), doi:10.1186/s40645-019-0320-z.

Dirmeyer, P.A., Dolman, A.J. and Sato, N. (1999): The pilot phase of the global soil wetness project. Bulletin of the American Meteorological Society, 80(5): 851–878.

浜田光太郎, 山崎 大, 新田友子 (2021): 陸域モデルの土壌水

分スキームの高度化と土壌パラメータの水平・鉛直分布の考慮. 土木学会論文集 B1 (水工学）, 77: I_223–I_228.

Henderson-Sellers, A., Yang, Z.-L. and Dickinson, R.E. (1993): The Project for intercomparison of land-surface parameterization schemes. Bulletin of the American Meteorological Society, 74(7): 1335–1350.

Hengl, T., de Jesus, J.M., Heuvelink, G.B.M. et al. (2017): SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. PLoS One, 12, doi:10.1371/journal.pone.0169748.

Ma, W., Ishitsuka, Y., Takeshima, A., Hibino, K., Yamazaki, D., Yamamoto, K., Kachi, M., Oki, R., Oki, T. and Yoshimura, K. (2021): Applicability of a nationwide flood forecasting system for Typhoon Hagibis 2019. Sci. Rep., 11: 10213.

Manabe, S. (1969): Climate and the ocean circulation. Monthly Weather Review, 97(11): 739–774.

Nitta, T., Arakawa, T., Hatono, M., Takeshima, A. and Yoshimura K.(2020): Development of integrated land simulator. PEPS, doi:10.1186/s40645-020-00383-7.

Nitta, T., Yoshimura, K., Takata, K., O'ishi, R., Sueyoshi, T., Kanae, S., Oki, T., Abe-Ouchi, A. and Liston G.E. (2014): Representing variability in subgrid snow cover and snow depth in a global land model: offline validation. J. Climate, 27: 3318–3330.

Pitman, A.J. (2003): The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. Int. J. Climatol., 23: 479–510.

Warszawski, L., Frieler, K., Huber, V., Piontek, F., Serdeczny, O. and Schewe, J. (2014): The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP): Project framework. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111 (9): 3228-3232, doi:10.1073/pnas.1312330110.

Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K, Yamazaki, D., Yokohatam, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H. and Kimoto, M. (2010): Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. Journal of Climate, 23: 6312–6335.

Yamazaki, D., de Almeida, G.A.M. and Bates, P.D. (2013): Improving computational efficiency in global river models by implementing the local inertial flow equation and a vector-based river network map. Water Resour. Res., 49: 7221–7235.

芳村 圭 (2021): 数値洪水予測の改善に向けた衛星からの水面域抽出とシミュレーションとの融合. 日本リモートセンシング学会誌, 41, 2: 224-227, doi:10.11440/rssj.41.224.

Zhang, Y. and Schaap, M.G. (2017): Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). J. Hydrol., 547: 39–53.

要　　旨

これまで大気モデルの一部であった地表面パラメタリゼーションを，大気モデルから独立させ，統合陸域シミュレータ（ILS）を開発した．ILS とは，モデル単体ではなく，開発の枠組みに対する名称である．本解説では，その開発経緯と，ILS を用いた 3 つの事例を紹介した．実時間陸域水文予測への応用，3 次元土壌分類パラメタセットの実装，そしてサブグリッドスケールでの水平方向の土壌水分輸送の実装である．諸外国の研究速度も鑑み，本研究並びに気候変動及び影響評価研究のさらなる進展のためには，陸域モデル開発体制のコミュニティ化（共同体化）が必要である．

キーワード：統合陸域シミュレータ，気候モデル，MPMD，格子変換ツール，コミュニティモデル



This article is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY-NC-ND) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).