

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18352

研究課題名(和文) 超高解像度陸面データ同化システムの開発

研究課題名(英文) A hyper-resolution land data assimilation system

研究代表者

澤田 洋平 (SAWADA, Yohei)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：30784475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：陸域の水・生態系・エネルギーの精緻なシミュレーションは、水文気象災害予測等の観点から重要である。正確なシミュレーションのためには、現地観測・人工衛星観測等を陸域モデルに統合する陸域データ同化技術の高度化が必要だ。本研究では、従来より100倍程度水平分解能の高い、「超高解像度陸面データ同化システム」の構築を行った。陸域モデルの高解像度化・精緻化がデータ同化の効率性に与える影響を調べたり、機械学習を用いて格子数の多いモデルにおいて効率的なモデルパラメータの最適化を行う技術等を新たに見出すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：陸域の水・生態系・エネルギーのシミュレーション精度向上のため、陸域モデルの高解像度化が近年の学問的トレンドである。しかし、陸域モデルに観測データを統合するデータ同化技術に関しての既往研究は、低解像度な陸域モデルを対象とするものが多かった。本研究は来るべき超高解像度陸域モデル時代にあるべきデータ同化研究を先取りし、次世代の陸面データ同化システムのデザインを世界に先駆けて行ったものである。

社会的意義：開発した「超高解像度陸面データ同化システム」は長期的には、陸域の洪水・干ばつ等の災害の様相を精緻に監視・予測するための基盤技術になることが期待され、安心・安全な社会の構築に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：It is important for hydrometeorologic disaster prediction to accurately simulate terrestrial water, ecosystem, and energy cycles. To improve the skill of the simulation, land data assimilation, in which in-situ and satellite observations are integrated into land surface models, should be investigated. In this study, we developed "hyper-resolution land data assimilation system" whose spatial resolution is 100 times as fine as the previous studies. We investigated how the increase of the resolution and associated model physics affected the efficiency of data assimilation. In addition, we proposed a new method to efficiently optimize unknown parameters of hyper-resolution land models by applying machine learning technology.

研究分野：水文気象学

キーワード：陸域モデル データ同化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

陸域の水・生態系・エネルギーのシミュレーションは、洪水・干ばつといった水文気象災害予測や気候変動影響評価といった目的で広く用いられる基盤技術である。プロセス駆動型モデルである陸域モデルを用いてシミュレーションが行われるが、その精度の向上にあたっては、現場で取得した現地観測データや、人工衛星による観測データをモデルに統合することが重要である。陸域におけるモデルとデータを統合する技術を陸域データ同化と総称する。陸域データ同化技術は陸域のシミュレーション精度向上に欠かせない。

近年では陸域モデルの高解像度化が進んでいる。100m から 1km 程度の水平分解能で陸域の水・生態系・エネルギーを解くことによって、より精緻な解析が可能になることが期待されている。一方で、陸域データ同化の研究においては、従来型の低解像度(25km 程度)の陸域モデルを対象としているものがほとんどである。そのため、姿を現しつつある「超高解像度陸域モデル時代」に適した新しい陸域データ同化の方法論を追求することが求められていた。

2. 研究の目的

本研究では水平方向の地下水・表面水の動きを陽に考慮した「超高解像度(100m~1km)」陸域モデルに対するデータ同化システム、「超高解像度陸面データ同化システム」を開発する。具体的な研究項目は以下の3つである。

(1) 超高解像度陸面データ同化システムの構築に向けた基礎研究 1: 水平方向流れがアンサンブルカルマンフィルタの精度に及ぼす影響

水平分解能が高い陸域モデルの特徴の一つが、水平方向の斜面流れを直接解像していることである。従来の鉛直 1 次元の低解像度な陸域モデルにはないこの特徴が既存のデータ同化手法のなかで代表的なアンサンブルカルマンフィルタの精度にどのように影響するか調べた。

(2) 超高解像度陸面データ同化システムの構築に向けた基礎研究 2: 機械学習を用いた効率的なモデルパラメータ最適化

陸域モデルには多くの未知パラメータが存在し、これを観測データと突き合わせてパラメータの値を調整することが、モデルの精度向上に必要である。このようなモデルパラメータ最適化は一般的に計算コストが非常に高く、既存の低解像度な陸域モデルに対しても全球規模で実施することは容易ではない。陸域モデルの高解像度化に伴いこの現状は悪化することが想定される。そのため「超高解像度陸域モデル時代」にも耐えうるモデルパラメータ最適化手法を探求した。

(3) その他の研究

上記 2 つの研究項目で得られた成果を取り込みつつ、研究代表者が従前より開発してきた陸面データ同化システムである Coupled Land and Vegetation Data Assimilation System (CLVDAS)を用いた応用研究を数多く実施した。

3. 研究の方法

(1) 超高解像度陸面データ同化システムの構築に向けた基礎研究 1: 水平方向流れがアンサンブルカルマンフィルタの精度に及ぼす影響

地表面から地下水までの陸域水動態を統合的に解くことができるソルバーである Parflow を超高解像度陸域モデルとして使用した。データ同化手法としてはアンサンブル変換カルマンフィルタ(Ensemble Transform Kalman Filter: ETKF)を用いた。数値実験は観測システムシミュレーション実験(Observation System Simulation Experiment: OSSE)による理想化実験とし、仮想的な土壌水分観測のネットワークを用いてデータ同化によりシミュレーションの不確かさがどのくらい低減できたかを定量的に解析した。

(2) 超高解像度陸面データ同化システムの構築に向けた基礎研究 2: 機械学習を用いた効率的なモデルパラメータ最適化

高速なモデルパラメータ最適化を実現するため、パラメータの値と、シミュレーションと観測データの差の関係を統計モデルで模擬する surrogate model を導入した。Surrogate model の構築には機械学習の一種であるガウス過程を用いた。並列計算機で行った大規模アンサンブル計算の結果を機械学習で模擬し、構築した surrogate model 上でマルコフ連鎖モンテカルロ法を実行することでパラメータの事後確率分布をサンプリングした。モデルとしては低解像度な陸域モデルを用い、数値実験は OSSE による理想化実験と、AMSR-E によって観測されたマイクロ波輝度温度の実データを用いた実験の両方を行った。

(3) その他の研究

CLVDAS をブラジル北東部、北アフリカ、モンゴル、パキスタンに応用し、現地の干ばつの様

相を解析するとともに、過去の大規模干ばつの予測可能性について議論した。加えて、CLVDAS を全球規模に適用することで、マイクロ波人工衛星観測と陸域モデルの統合による長期の土壌水分・植生水分データセットである陸域再解析の構築を行う研究を行った。また、陸面データ同化研究にとって重要なマイクロ波リモートセンシングによる土壌水分観測のアルゴリズムの高度化に関する研究も行った。

4. 研究成果

(1) 超高解像度陸面データ同化システムの構築に向けた基礎研究 1: 水平方向流れがアンサンブルカルマンフィルタの精度に及ぼす影響

数値実験の結果、水平方向の流れを適切に解像できるモデルで土壌水分データ同化を行うと、従来の鉛直 1 次元のモデルよりも遥かに多くの情報量を土壌水分観測から引き出すことができ、シミュレーション精度の改善に大きく貢献できることが分かった。一方で、水平方向の表面流れを生み出す物理過程は非線形性が強く、モデルが線形で誤差分布が正規分布するとき最適解を与える ETKF では、必ずしも最適な状態推定が得られない場合があるということも分かった。これは鉛直 1 次元の低解像度な陸域モデルにおいては見られない性質である。以上の知見は、陸域モデルの高解像度化は、既存の陸域データ同化研究の在り方に重大な変化をもたらすことを示唆している。

以上の成果は研究期間中に学術論文としてまとめ、学術誌に投稿し、現在査読中である [1]。

(2) 超高解像度陸面データ同化システムの構築に向けた基礎研究 2: 機械学習を用いた効率的なモデルパラメータ最適化

ガウス過程による surrogate model を用いることで、モデルパラメータ最適化に要する計算時間を大幅に削減することに成功した。Surrogate model を用いずに陸域モデルを直接逐次的に時間積分することでマルコフ連鎖モンテカルロ法を実行した場合に比べて、本提案手法では必要な計算時間を 5 万分の 1 に圧縮することができた。これにより現実的に運用可能な計算コストでモデルパラメータの性質を分析するとともに、迅速なパラメータ最適化を行って陸域モデルの精度を向上させることができた。これらの結果は OSSE による理想化実験と、実データ実験の両方で確認することができた。

以上の成果は研究期間中に学術論文としてまとめ、学術誌に投稿し、現在査読中である [2]。

(3) その他の研究

CLVDAS をブラジル北東部と北アフリカに適用し、人工衛星観測マイクロ波輝度温度を逐次的に陸域モデルに同化していくことで、農業干ばつの監視と予測を実現した。現地の穀物生産量等とシミュレーション結果を突き合わせることで、CLVDAS が農業干ばつの早期警戒システムとして有用であることが示された。

また、モンゴルでの応用では、これまでに得られた高解像度化の知見を一部用いて、陸域モデルの水平分解能を 100m と高解像度とし、非常に分解能の高い合成開口レーダによる観測を用いて、土壌水分と陸域生態系のモニタリングを行った。現地の土壌水分観測網を用いた検証により、手法の有効性を確認することができた。

パキスタンでの応用では、動学的な経済モデルと CLVDAS を結合することで、農業干ばつが長期的な経済成長に及ぼす影響を定量化し、灌漑設備等への公共投資の効率性について議論する枠組みを構築した。

CLVDAS を全球規模、かつ長期に走らせることで、陸域再解析プロダクトを構築した。このデータセットを解析することで、多様な地域の様々な干ばつにおいて、降水量減少が、土壌水分や植生動態にどのような時間スケールで悪影響を及ぼすのかを定量的に解析した。全球レベルでの干ばつ波及の描像を、生態系のダイナミクスを含めて明らかにすることができた。

また、長期的なフィールド観測に基づいて、受動型マイクロ波輝度温度観測から、土壌水分と植生水分量を適切に推定するアルゴリズムを構築した。これによって得た知見の一部は陸域データ同化システム本体にも実装された。

以上の成果はこれまでの実績報告書で報告した査読付き論文 7 本において発表済みである。

[1] Sawada, Y.: Do surface lateral flows matter for data assimilation of soil moisture observations into hyperresolution land models?, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/hess-2020-106>, in review, 2020.

[2] Sawada, Y.: Machine learning accelerates parameter optimization and uncertainty assessment of a land surface model, <https://arxiv.org/abs/1909.04196>, in review, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Sawada Yohei, Koike Toshio, Ikoma Eiji, Kitsuregawa Masaru	4. 巻 58
2. 論文標題 Monitoring and Predicting Agricultural Droughts for a Water-Limited Subcontinental Region by Integrating a Land Surface Model and Microwave Remote Sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 14 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2019.2927342	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kinya Toride, Yohei Sawada, Kentaro Aida, Toshio Koike	4. 巻 19
2. 論文標題 Toward High-Resolution Soil Moisture Monitoring by Combining Active-Passive Microwave and Optical Vegetation Remote Sensing Products with Land Surface Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3924 ~ 3924
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s19183924	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 筒井 浩行、澤田 洋平、生駒 英司、喜連川 優、小池 俊雄	4. 巻 64
2. 論文標題 ブラジル北東域における植生動態-陸面結合データ同化手法による長期湯水解析に基づく穀物生産量・必要灌漑水量の推定に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 水工学論文集	6. 最初と最後の頁 I_283-288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yokomatsu Muneta, Ishiwata Hiroaki, Sawada Yohei, Suzuki Yushi, Koike Toshio, Naseer Asif, Cheema Muhammad Jehanzeb Masud	4. 巻 43
2. 論文標題 A multi-sector multi-region economic growth model of drought and the value of water: A case study in Pakistan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Disaster Risk Reduction	6. 最初と最後の頁 101368 ~ 101368
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijdrr.2019.101368	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sawada Yohei	4. 巻 10
2. 論文標題 Quantifying Drought Propagation from Soil Moisture to Vegetation Dynamics Using a Newly Developed Ecohydrological Land Reanalysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1197 ~ 1197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs10081197	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sawada Yohei, Koike Toshio, Aida Kentaro, Toride Kinya, Walker Jeffrey P.	4. 巻 55
2. 論文標題 Fusing Microwave and Optical Satellite Observations to Simultaneously Retrieve Surface Soil Moisture, Vegetation Water Content, and Surface Soil Roughness	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 6195 ~ 6206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2017.2722468	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sawada Yohei, Tsutsui Hiroyuki, Koike Toshio	4. 巻 9
2. 論文標題 Ground Truth of Passive Microwave Radiative Transfer on Vegetated Land Surfaces	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 655 ~ 655
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs9070655	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Yohei Sawada
2. 発表標題 Do surface lateral flows matter for land data assimilation?: Implication for hyper-resolution land modeling and observation
3. 学会等名 JpGU annual meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sawada, Y., T. Nakaegawa, K. Okamoto, and H. Fujii
2. 発表標題 An ecohydrological land reanalysis by integrating simulation and satellite observations
3. 学会等名 JpGU annual meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤田 洋平
2. 発表標題 データ駆動型アプローチが加速する地球科学シミュレーションの不確実性定量化
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sawada, Yohei
2. 発表標題 Machine learning accelerates parameter optimization and uncertainty quantification of a land surface model
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sawada, Y., H. Tsutsui, T. Koike, E. Ikoma, and M. Kitsuregawa
2. 発表標題 Satellite microwave observation to monitor and predict ecohydrological conditions: a land data assimilation approach
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤田 洋平
2. 発表標題 生態水文モデリングと衛星データ同化による陸域再解析
3. 学会等名 次世代陸モデル開発・応用・社会実装に関する合同ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤田 洋平
2. 発表標題 衛星観測マイクロ波放射輝度を同化した陸域水文・生態系の再解析
3. 学会等名 日本気象学会春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yohei Sawada
2. 発表標題 Eco-hydrological land data assimilation to monitor terrestrial water, ecosystem, and hydrological disasters
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Annual meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yohei Sawada
2. 発表標題 Ecohydrological Land Analysis: Assimilating satellite microwave observations into a land surface model to simultaneously simulate soil moisture and vegetation dynamics
3. 学会等名 Joint Workshoup of the 2nd International Surface Working Group (ISWG) and 8th Land Surface Analysis Satellite Application Facility (LSA-SAF) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yohei Sawada
2. 発表標題 Do lateral flows matter for data assimilation of soil moisture observation into hyperresolution hydrological models?
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yohei Sawada
2. 発表標題 Toward hyperresolution land data assimilation to monitor terrestrial water, energy, ecosystem, and hydrological disasters
3. 学会等名 International Symposium on Data Assimilation 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohei Sawada
2. 発表標題 Towards ecohydrological drought monitoring and prediction using a land data assimilation system
3. 学会等名 Hydrology delivers Earth System Sciences to Society 4 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yohei Sawada
2. 発表標題 Ecohydrological drought monitoring and prediction using a land data assimilation system
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----