

奨励金No.1616

陸面モデルにおける丘陵斜面の気候不均一性の表現による 陸水推定の改善

李 庶平

東京大学 特任研究員

Improving terrestrial water estimation through the representation of hillslope climate variability in land model

Shuping Li

The University of Tokyo, Project researcher



本研究では、統合陸域シミュレータ（ILS）を用い、気候データのダウンスケーリングが陸域プロセスに及ぼす影響を米国全域を対象に評価した。高解像度気候データを入力することで、積雪水量の斜面分布や河川流量の季節パターンが変化し、観測データとの一致度が向上することを明らかにした。本結果は、陸面モデルにおける気候の空間的不均一性の表現が水・エネルギー循環の高精度な再現に不可欠であることを示している。

Fine-scale hillslope water dynamics and climate heterogeneity across elevations are yet to be sufficiently represented in land surface models (LSMs). This study downscaled coarse climate data (ERA5/ERA5-Land) to high resolution across ten height bands and incorporated it into the Integrated Land Simulator (ILS) through four experiments, considering land cover and climate heterogeneities. Applied over the contiguous United States, results show that representing climate heterogeneity substantially alters simulated snow water equivalent distributions and shifts river discharge seasonality, improving agreement with in-situ observations. These findings underscore the importance of considering spatial climate variability in future LSM development.

1. 研究内容

1.1 背景

陸域における水の貯留および流れは、大気と陸面の相互作用を支配する重要な要素である。水は、生態系の構造や機能、炭素・栄養塩などの生物地球化学循環に大きな影響を及ぼすとともに、人間社会における淡水資源の利用においても極めて重要な役割を果たしている。近年の気候変動の進行に伴い、水循環を介した様々な環境問題が顕在化している。特に、干ばつや洪水に代表される災害の発生頻度や強度が増加しており、これらの現象は水循環の変動と密接に関連している。

陸面モデル（Land Surface Model: LSM）は、地球システムモデルの基盤の一つであり、気候データや気候モデルの出力を入力として、陸域における物理的・生物地球化学的プロセスを数値的に再現する。数十年にわたり発展を遂げた結果、最新の LSM では灌漑などの人為的プロセスを含む複雑な陸面過程を表現できるようになっている。しかし、これらのプロセスを支配する水の動態については、依然として十分な考慮がなされていないのが現状である。特に、地形に依存する斜面流や地下水の再分配といった、空間スケールの小さな水移動プロセスは、モデル内で大幅に簡略化さ

れている。このため、LSM による陸域の水・エネルギー収支の推定には、無視できない誤差が生じる。

実際の陸域では、地形の勾配に沿って水が丘から谷へと小さな空間スケールで移動するが、従来の LSM は低い空間解像度の格子を用いているため、このような地形駆動の水動態を適切に表現できない。さらに、LSM への入力として用いられる気候データも低解像度であることが多く、標高差に伴う気温や降水量の空間的変動が十分に再現されない。例えば、山地では地形効果により、谷底に比べて斜面中上部で降水量が増加する傾向があるが、低解像度データではこうした降水の空間的不均一性が平滑化され、結果として陸域水循環、特に地下水動態の再現精度が低下する。

本研究では、低解像度の気候データに対して高解像度化（ダウンスケーリング）を施し、それを LSM の入力として用いることで、地形に起因する水・エネルギーの空間的不均一性をより適切に表現することを目的とする。これにより、陸域水循環およびエネルギー収支の高精度な再現を目指す。

1.2 方法

本研究では、陸面モデル MATSIRO と水動態モデル CaMa-Flood から構成される統合陸域シミュレータ（Integrated Land Simulator; ILS）を用いた。MATSIRO には、斜面に沿った地形・環境

の不均一性を表現するため、流域を基本単位とした計算手法が導入されている。この手法に基づき、斜面方向の植生分布および気候の空間的不均一性を段階的に考慮する 4 種類の数値実験（図 1）を設計した。これら 4 つの実験を MATSIRO に適用し、各条件が陸域環境変数のシミュレーション結果に及ぼす影響を評価した。

また、ERA5 および ERA5-Land の低解像度気候データに対し、統計的ダウンスケーリング手法を適用し、流域内の 10 標高バンドに対応した高解像度気候データを作成した。これにより、斜面に沿った気候の空間的不均一性を入力データとして表現した。さらに、作成した高解像度気候データについては、現地観測データを用いて精度検証を行った。

本研究では、大陸スケールおよび流域スケールの両方の観点から解析を実施した。大陸スケール解析では、観測データが豊富に整備されている米国全域を対象地域とした。一方、流域スケール解析では、現地観測データが利用可能な米国西部の流域を対象とし、モデルの再現性を確認するとともに、地形が陸域環境変数に与える影響を詳細に評価した。

1.3 結果

まず、米国全域を対象として気候データのダウンスケーリングを実施した。作成した高解像度気

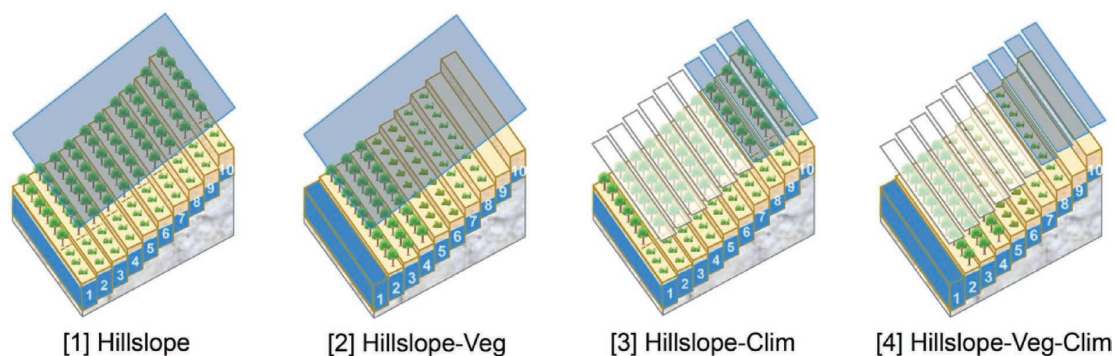


図 1. 斜面の植生分布と気候の不均一性の影響を調べるシミュレーション実験の概念図、[1] 斜面非依存植生・均一気候分布（Hillslope）、[2] 斜面依存植生・均一気候分布（Hillslope-Veg）、[3] 斜面非依存植生・不均一気候分布（Hillslope-Clim）、[4] 斜面依存植生・不均一気候分布（Hillslope-Veg-Clim）。

候データを地上観測データと比較した結果、気温および放射量はダウンスケーリング前後で高い再現性を維持した。一方、降水量および地表気圧は

ダウンスケーリング後に精度がわずかに低下したものの、風速については再現性が大きく向上した（図 2）。本研究では、ダウンスケーリング前の気

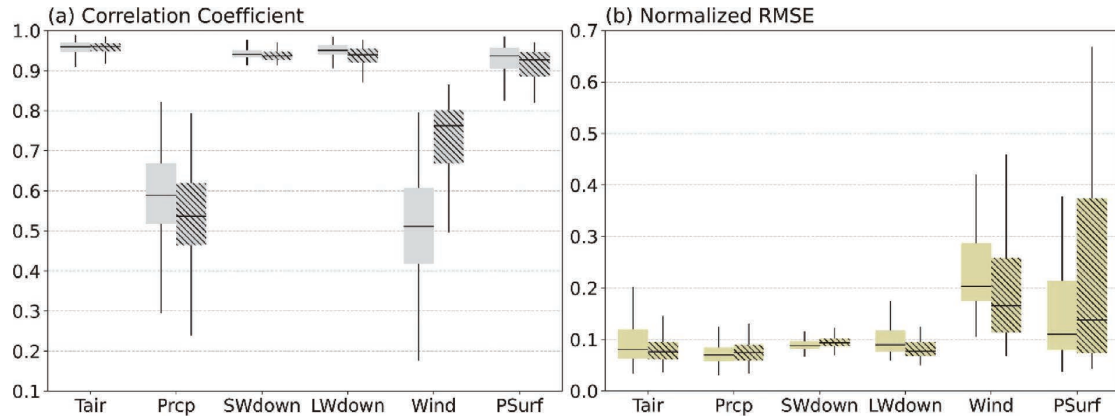


図 2. ダウンスケーリング後の高解像度気候データと現地観測データの比較による気象変数の精度検証。相関係数 (Correlation Coefficient) および二乗平均平方根誤差 (RMSE) を評価指標として示す。

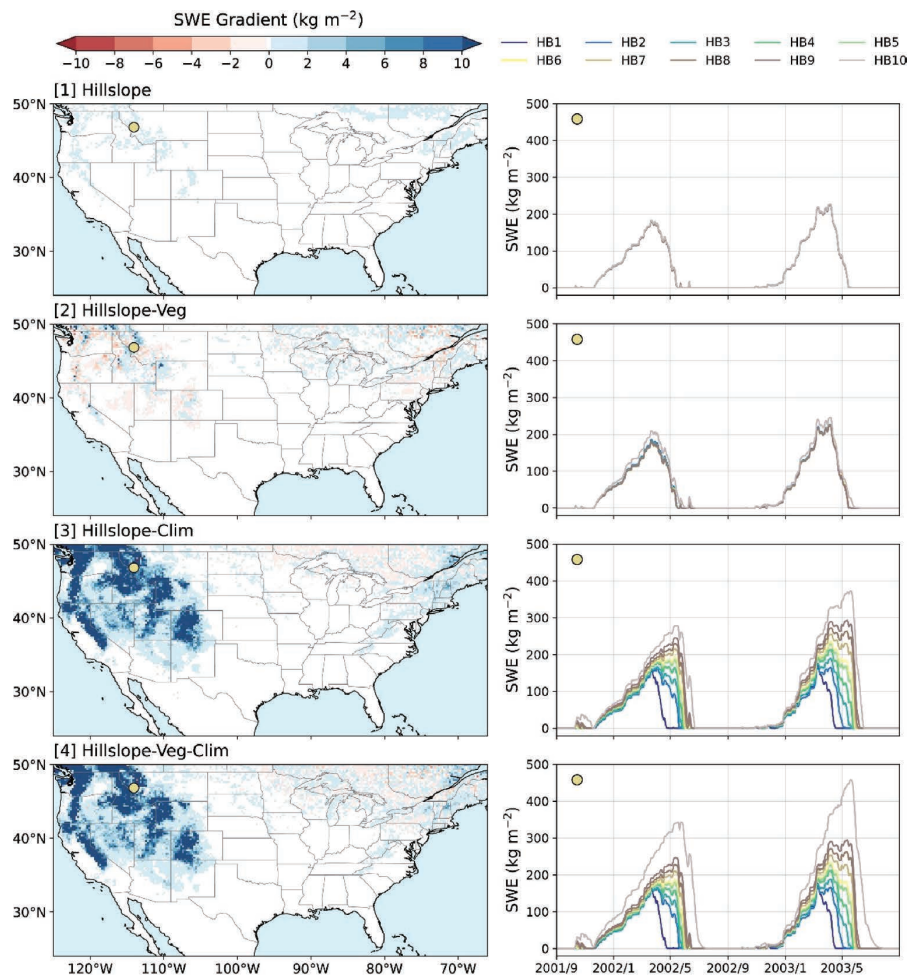


図 3. 北米大陸における各実験から再現された SWE（積雪水量）の斜面方向分布、および代表流域の各標高バンドにおける SWE 時系列。

候データを実験 [1] および [2] の入力データとして使用し、ダウンスケーリング後の高解像度気候データを実験 [3] および [4] に適用した。

続いて、ILS によるシミュレーション結果を解析した。積雪水量（Snow Water Equivalent: SWE）の解析結果（図 3）から、多くの高山地域を有する米国西部では、気候の空間的不均一性を考慮することにより、斜面上部では SWE が増加し、斜面下部では減少することが確認された。この傾向は、流域スケールにおいても同様に認められた。これは、ダウンスケーリング後の気候データでは標高の上昇に伴って気温が低下し、降雪量が増加するため、斜面上部でより多くの積雪が形成されることに起因する。

さらに、河川流量にも顕著な変化がみられた。米国西部では、気候の空間的不均一性を考慮することで河川流量の季節パターンが変化し、特に高

山地域では流量のピーク時期が 5 月から 6 月へと最大で約 1 か月遅れることが確認された（図 4）。また、大陸スケールで解析した結果においても、気候の空間的不均一性を考慮した場合、河川流量のピーク時期は 3 月下旬から 4 月上旬へと遅延した。その結果、再現された流量の季節変化は GRDC の観測データとの一致度が向上した。この改善は主として、積雪分布および融雪過程の変化によるものである。

1.4 まとめ

本研究では、陸面モデルにおいて気候の空間的不均一性を考慮することが陸域プロセスに及ぼす影響を評価した。その結果、高解像度気候データを陸面モデルに入力することで、積雪や河川流量をはじめとする陸域プロセスのシミュレーション結果が大きく変化することを明らかにした。また、

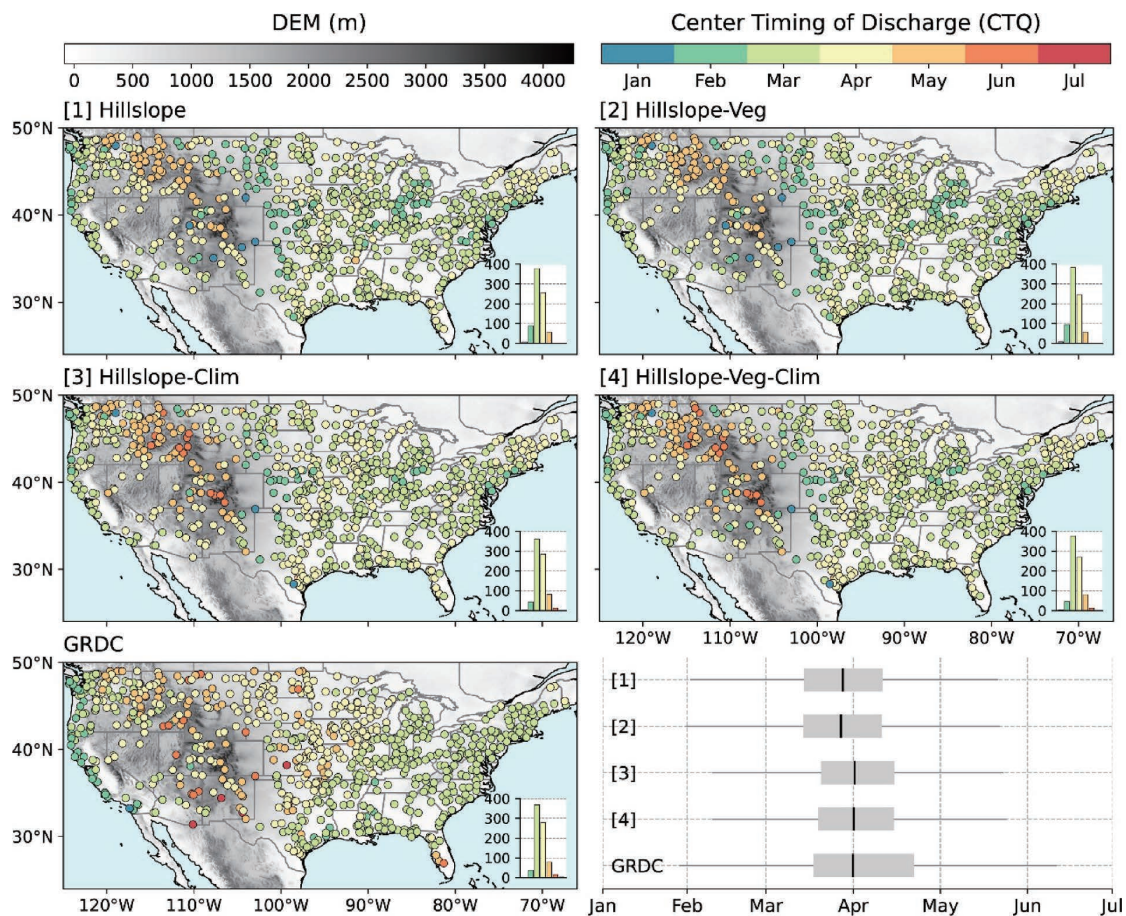


図 4. 各実験によるシミュレーションおよび観測データに基づく河川流量の季節パターンの比較。

観測データとの一致度が向上し、これらの物理量がより高い精度で再現されることが確認された。

以上の結果は、陸面モデルにおいて気候の空間的不均一性を適切に表現することの重要性を示すとともに、今後の陸面モデルの高度化および高精度な水・エネルギー循環シミュレーションの実現に向けた有用な知見を提供するものである。

2. 発表（研究成果の発表）

1. Li, S., Revisiting Land-Atmosphere Coupling Across Spatial Scales: From Coarse to Kilometer-Scale Simulations, EALSA meeting, Jeju, South Korea, 2026, Oral
2. 李 庶平、山崎 大、新田 友子、芳村 圭、「丘から谷への水の流れが気候を変える？——斜面水動態・植生分布・水とエネルギー循環の新たなつながりを発見——」東京大学生産技術研究所、記者発表、2025 年
3. Li, S., Yamazaki, D., Tozawa, T., Adachi, K., Nitta, T., Zhao, G., Zhou, X., Yoshimura, K, Resolving Land Cover Heterogeneity along Hillslope Improves Simulation of Terrestrial Water and Energy Budgets, Water Resour. Res., 61(9), 2025
4. Li, S., Yamazaki, Nitta, T., Yoshimura, K, Resolving Land Cover Heterogeneity Along Hillslope Improves Simulation of Terrestrial Water and Energy Budgets, AOGS Annual meeting, Singapore, 2025, Oral