



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	SWAT を用いた気候変動下の積雪寒冷農業流域における水循環及び非特定汚濁負荷の長期変動予測と不確実性分析 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	三原, 州人
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第16273号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/94976
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	MIHARA_Kunihito_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称： 博 士（農学）

氏名 三 原 州 人

学 位 論 文 題 名

SWAT を用いた気候変動下の積雪寒冷農業流域における水循環及び
非特定汚濁負荷の長期変動予測と不確実性分析

1. 背景と目的

現在も進行する気候変動による流域物質循環レジームの変化は、土壌侵食や栄養塩類流亡などの非特定汚濁負荷（Non-Point Source Pollution, NPSP）を助長し、農耕地の生産性低下や水圏生態系の汚濁を引き起こしうる。そのため、変動する環境に対して土地利用や土地管理を適正化するには、集水域単位でのリスクを予測することが重要である。気候モデルによる将来の気候予測値と、分布型生態水文モデルを組み合わせた統合モデリングシステムによる物質循環シミュレーションは、将来生じうる NPSP リスクを時間的空間的に高い解像度で予測することで、土地利用や土地管理を適正化する意思決定の支援ツールとして期待される。しかし、予測結果にはモデル入力値やモデル構造、キャリブレーション手法などに起因する不確実性が伴っており、最終的な評価結果の信憑性低下や潜在するリスクの見落としを引き起こす。積雪寒冷地では、気温や降雨パターンの変化に加えて凍結融解挙動が関わって水循環のダイナミックな変動が予想されており、NPSP 変動のメカニズムも多様な因子が複雑に作用することで予測不確実性が大きくなると考えられる。本研究では、積雪寒冷農業流域である北海道常呂川流域を対象として、準分布型生態水文モデルである Soil and Water Assessment Tool (SWAT) を用いた長期物質循環予測の精度を向上すること及び、予測結果の頑健性と不確実性要因を明らかにすることを目的とした。

2. SWAT の凍結土壌プロセス推定の改良

これまで SWAT は融雪期の水循環推定パフォーマンスが低いことが指摘されてきた。そこで、デフォルトでは凍結土壌中の水移動を考慮しない SWAT に対して、凍結の発達に伴う土壌透水性の動的変化を考慮できるように修正した SWAT with frozen soil permeability (SWAT-FSP) を開発し、融雪期間の水循環推定精度向上を試みた。具体的には、オリジナル SWAT に以下の2つの修正を施した。まず、土壌氷の分布を適切に推定するため、積雪層及び土壌層の熱移動と凍結融解潜熱を考慮した物理的地温式を実装した。次に、凍結深と単位深さあたりの凍結層による透水間隙遮断確率を用いて近似した凍結土壌の浸透率を、非凍結状態でオリジナル SWAT によって推定される土壌水分フラックスに乗じることで凍結土壌中の水移動を求めた。モデル改良によって、土壌凍結の発達が弱い年の融雪初期に生じる土壌中の水移動を再現することができるようになった結果、河川流量推定値と実測値の適合度が向上した。このことから、積雪寒冷流域では気候条件に応じた土壌凍結の挙動が融雪洪水の強度やタイミングを制御する重要因子であることが実証され、土壌凍結挙動に応じた可変的な透水スキームを SWAT に実装することで、より現実的な長期水循環推定をすることができる事が明らかになった。

3. 非特定汚濁負荷重要負荷源推定における認識論的不確実性の評価

今のところ、流域で生じる様々な自然現象を数式で完璧に再現することは不可能であり、モデル作成者の物質循環システムに対する知識や情報の不足によって不確実性が生じる（認識論的不確実性）。その結果、流域物質循環モデルは、流域最下流部の河川観測値などの実測値を用いたパ

ラメータ校正において、異なる系統のパラメータセットを使用した場合でも同等の精度が得られる“等結果性”という性質を持ち、予測値の収束が困難となる。そこで、複数の最適パラメータセットを許容した SWAT-FSP を用いて、2001-2020 年の常呂川流域における NPSP の重要負荷源（Critical Source Area, CSA）分布推定を行い、認識論的不確実性の評価と不確実性の要因となる重要プロセス特定を試みた。キャリブレーションには、河川流量、河川流出土砂負荷量、全窒素負荷量、及び全リン負荷量の実測値を用い、これらの推定精度指標の基準値を同時に満たすパラメータセットを最適パラメータセットとして抽出した。その結果、31 組の最適パラメータセットが抽出され、これらのパラメータセットを用いた 31 組のシミュレーションメンバを解析の対象とした。NPSP の CSA 分布推定結果は、パラメータ選択の影響を受けてバイアスが生じており、栄養塩類流亡の推定結果は特に不確実性が大きかった。アンサンブル平均を用いた推定結果に対する一致度を信頼度とすると、土壌流亡、全リン流亡、全窒素流亡、及び硝酸溶脱の CSA 分布推定結果の信頼度は、それぞれ 92 %, 80 %, 81 %, 及び 53 %であった。NPSP 推定の不確実性に大きく寄与する重要プロセスとして、降雨や融雪に応じた表面流出－土壌浸入分配、地下水涵養及び土壌の養分保持が特定され、これらのプロセスを記述するサブモデルの高度化やキャリブレーションスキームの改善が不確実性低減に有効であると考えられた。

4. 気候変動の影響評価

常呂川流域のような積雪寒冷流域では、将来的な気温上昇や降水パターン変化に加えて凍結融解に関わる複雑な物質循環レジームの変容が予想される。気候モデルによる気候予測値と流域物質循環モデルを組み合わせた統合モデリング手法は、複雑な物質循環プロセスの連関を再現し、将来的な NPSP リスク発生のメカニズムを理解するツールとして期待される。一方、気候予測値とカップリングする物質循環モデルの不確実性については検討された事例が少なく、他の不確実性要因に対する相対的な重要度もよく分かっていない。そこで、前課題にて抽出された 31 組の最適パラメータセットを与えた SWAT-FSP と、バイアス補正済みの 5 つの全球気候モデル(MIROC6, MRI-ESM2.0, ACCESS-CM2, IPSL-CM6A-LR, 及び MPI-ESM1-2-HR) による 2041-2100 年の気候予測値を組み合わせた統合モデリングシステムを用いて、3 つの共有社会経済経路－代表濃度経路シナリオ (SSP1-2.6, SSP2-4.5, 及び SSP5-8.5) における将来的な NPSP 変動を予測した。また、パラメータ選択及び気候モデル選択に起因する不確実性を評価した。全シミュレーションメンバのアンサンブル平均から、2001-2020 年の推定流亡量をベースラインとしたとき、各シナリオにおける将来的な土壌流亡、全リン流亡、全窒素流亡、及び硝酸溶脱の変化量はそれぞれ、 $-48.8 \sim -26.3 \text{ Mg km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, $-0.7 \sim 91.4 \text{ kg km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, $143.9 \sim 293.6 \text{ kg km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 及び $46.3 \sim 59.1 \text{ kg km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ の範囲で見積もられた。流域の大半を占める森林では土壌流亡が減少すると予測されたが、一部のシナリオでは降雨強度の増加によって農耕地の土壌流亡増加が予測された。全リン流亡量予測値はいずれのシナリオにおいても将来期間が進行するにつれて増加する傾向があり、農耕地が広く分布するエリアでの局所的な増加が見込まれた。全窒素流亡及び硝酸溶脱は流域全体での増加が見込まれたが、特に上流部の森林域での増加量が大きく、降水量増加に伴って湿性沈着窒素が増加したことや無機態窒素の流亡駆動力となる土壌内部排水量が増加したことに起因すると考えられた。土壌流亡及び全リン流亡の予測結果はパラメータ選択よりも気候モデル選択の影響が大きく、気候変数の予測精度向上が不確実性の低減に有効であると考えられた。全窒素流亡及び硝酸溶脱の予測結果は、パラメータ選択の影響を受けて大きくばらつき、不確実性範囲の中で一貫した増減の傾向を把握することが難しかった。そのため、慣行的な手法のように一組の最適パラメータセットのみを解析対象とすると、評価結果に大きな偏りを生じる可能性が高く、前課題で特定された重要プロセスの再現性を向上することが必要である。