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_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博　士（農学）　　氏名　三　原　州　人

審査担当者　主　査　教　授　当　真　要
副　査　教　授　濱　本　昌　一　郎
副　査　准教授　山　本　忠　男
副　査　講　師　倉　持　寛　太
副　査　名誉教授　波　多　野　隆　介

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

本論文は邦文 158 頁、図 28、表 31、7 章からなり、参考文献 2 編が付されている。

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等の非特定汚濁負荷（NPSP）を助長し、農地の生産性低下や水圏生態系の汚濁を引き起こす。分布型生態水文モデルは環境変動による流域物質循環系の応答を時間的・空間的に高い解像度で定量評価でき、気候変動下で生じる汚濁負荷リスクの予測や土地利用及び土地管理の適正化への科学的根拠を提供できる。特に気候変動の影響を強く受ける積雪寒冷地では、凍結融解現象が長期的な NPSP 変動予測における不確実性を高めている。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、準分布型水文モデル Soil and Water Assessment Tool（SWAT）を用いた長期物質循環の予測精度向上と、予測結果の頑健性および不確実性要因の解明を行った。

１．凍結土壌プロセス推定の改良

土壌凍結の発達に伴う透水性低下が融雪出水レジームを制御する重要因子との仮説を設け、凍結土壌中の水移動を考慮しないオリジナル SWAT に対し凍土透水性の動的変化を考慮した SWAT-FSP を開発した。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、凍結層の厚さと各凍結層による透水間隙遮断確率で近似した浸透率を用い、凍結土壌中の水移動を再現した。モデル改良により融雪初期に生じる土壌中の水移動を再現でき、河川流量推定値と実測値の適合度が向上した結果、可変的透水スキームの SWAT への実装でより現実的な水循環推定が可能となった。

２．非特定汚濁負荷の空間変動推定における不確実性評価

流域で生じる複雑な自然現象の数式での再現では、モデル作成者の物質循環系に対する知識や情報不足で不確実性が生じ、複数のパラメータセットで同等の精度の予測値が得られ唯一の最適パラメータセットに収束しないことがおこる。本研究では、複数の最適パラメータセットを許容した SWAT-FSP を用い、2001-2020 年の常呂川流域における土壌流亡、全リン流亡、全窒素流亡、及び硝酸溶脱の重要負荷源分布推定における不確実性分析を行った。パラメータ校正では河川流量、河川流出土砂負荷量、全リン負荷量、全窒素負荷量の実測値を用い、推定精度基準値を満たす 31 パラメータセットを抽出し、これらのシミュレーション結果を不確実性分析に用いた。その結果、それぞれのシミュレーションで NPSP の重要負荷源分布は必ずしも一致せず、特に全窒素流亡や硝酸溶脱の推定結果は大きな不確実性を伴っていた。各パラメータの感度比較から、表面流出－土壌浸入分配、地下水涵養、及び土壌の養分保持、の 3 つのプロセスに関するパラメータが不確実性に大きく寄与していた。これらの重要プロセスを記述するサブモデルの高度化や校正スキームの改善が不確実性低減に有効であることが示された。

３．気候変動の影響評価

本研究では、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における将来的な NPSP 変動を予測し、SWAT-FSP 及び気候予測に起因する不確実性を評価した。2001-2020 年との比較から、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～-26.3 Mg km^{-2} yr^{-1}、-0.7～91.4 kg km^{-2} yr^{-1}、143.9～293.6 kg km^{-2} yr^{-1}、及び 46.3～59.1 kg km^{-2} yr^{-1} と見積もられた。流域全体では土壌流亡が減少するが、農耕地では増加すると予測された。全リン流亡は農耕地が分布するエリアでの局所的な増加が予測され、全窒素流亡及び硝酸溶脱は流域全体での増加特に上流部の森林域での増加の予測が示された。土壌流亡及び全リン流亡の予測結果は気候モデル間での気候予測値のばらつきが大きく気候予測に起因する不確実性が大きくなった一方で、全窒素流亡及び硝酸溶脱の予測結果にはモデルパラメータ値のばらつきが強く影響し SWAT-FSP に起因する不確実性が大きくなり、先述した重要プロセスの再現性向上が必要であることが示された。

以上の研究は、既存の分布型生態水文モデルの改良により積雪寒冷地域への適用精度を向上させ、大規模農業を中心とする北海道の非特定汚濁負荷源の特定さらに将来の気候変動に伴う変化予測とその不確実性について高い精度で評価し重要な研究成果と評価できる。

よって、審査員一同は、三原州人が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。