

# SWATモデルを活用した流域管理方法の提案：網走川流域を例に

寒地土木研究所水利基盤チーム      ○福井 宏和  
鵜木 啓二

営農活動は土砂や栄養塩の流出による環境負荷を伴うため、その対策が求められる。本研究は、作物の生産性向上と環境負荷低減の両立に向けて参考となるデータを提供すべく、SWATモデルを用いたシミュレーションを行い、作物収量と環境負荷の関係を明らかにすることを目的とした。その結果、異なる作付け体系によって、物質の流出特性が変化することがわかった。こうしたシミュレーションによる評価を行うことで、よりその土地に適合した、効果的な営農管理が可能になると考えられる。

キーワード：営農管理、作物種、土砂流出、栄養塩流出、SWATモデル

## 1. はじめに

農地流域においては耕作や施肥等の営農活動によって土砂や栄養塩が流失するため、周辺河川の水質や生態系への影響について配慮する必要がある。上流域から流出する土砂や養分は河川を通じて下流域の水資源や水生生物に影響を及ぼす可能性があり、その対策が求められる一方で、営農活動には作物生産性の向上や維持という目標がある。このため、作物生産と環境負荷の低減の両立に向けた取り組みを検討していかなくてはならない。

しかし、農業従事者や流域管理者が、営農管理や流域管理方法の効果を検証するには、物質移動の実態や対策効果を実測するためのモニタリング機器の設置と観測が必要で、その検証作業にも費用と時間がかかる。そこで本研究では、異なる作物種や営農管理による土砂と栄養塩の流出パターンの変化を捉えるため、SWATモデルに

よるシミュレーションを採用した。SWATモデルは流域レベルにおける水文過程や土地利用の変化を評価するために開発された水文流出モデルである。国内外において、物質の移動や循環に関する調査研究に活用されており、特にアメリカ合衆国においては、1980年代からアメリカ農務省（USDA）が中心となり、テキサスA&M大学など研究機関と共同で、フィールドでのSWATモデル活用に向けたシステムの構築を進めている。しかし、これまでに数多くの論文や報告書において発表されてきたが、その社会実装には計算による出力結果の妥当性やその利用方法を含めたモデルの理解が肝要である。本研究は、網走川流域を対象として、現状のSWATモデルの構造やキャリブレーションの重要性、およびその計算結果の利用可能性について議論することによりSWATモデルを用いた新しい効果的な流域管理手法についての検討を行った。

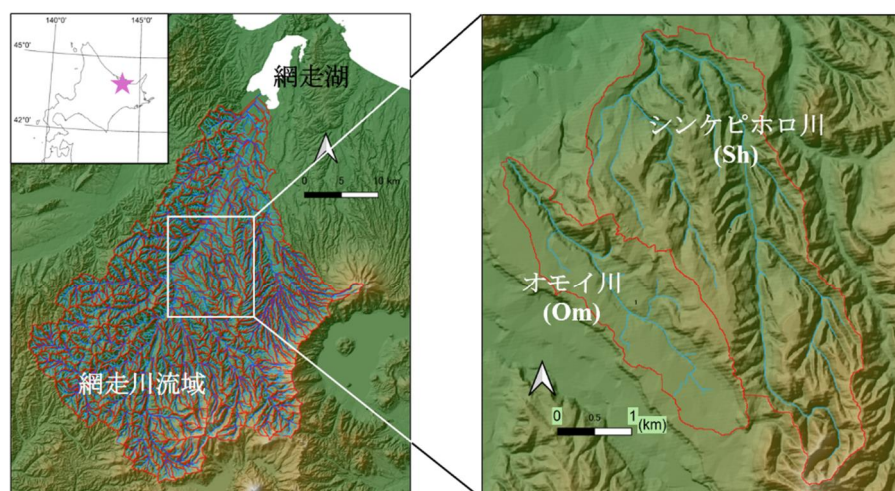


図-1 調査対象地

## 2. 研究方法

### (1) 研究対象地

研究対象とした北海道東部の網走川流域（図1）は、河口域及び沿岸域を中心に漁業が盛んな地域である。河口域に流入する土砂・栄養塩が漁業資源に与える影響を軽減するためには、上流域における土砂流出削減対策が必要である。その中流域に位置するシンケピホロ川（Sh、流域面積11.0 km<sup>2</sup>、農地率36%）とオモイ川（Om、流域面積4.5 km<sup>2</sup>、農地率74%）（図1）を対象とした。ここは、農地率が流域内の他の地域に比較して高く、主にコムギ、テンサイ、ダイズ、バレイショ、タマネギの栽培が盛んに行われている。また近年は、降雨強度の増加や降雨パターンの変化といった気候変動が観測されている。

### (2) モデルのセットアップとキャリブレーション

計算にはSWAT+モデルを用いた。これは、従来のSWATモデルと比較して、HRU（Hydrological response unit）と呼ばれる流域水文単位における水や土砂の移動、および作物中における養分の転流や追跡など、より細分化した設定や解析が可能となる。

#### a) 基盤情報の整備

計算の準備段階として、最も基本となる3つの基盤データ（地形、土壌、及び土地利用に関する情報）をGIS上に入力し、そこからHRUの分布と各HRUの特性を決定した。基盤データは、それぞれ国土地理院発行の数値地図基盤情報、土壌分類図、及び土地利用図を参考にした。これに気象条件を与えることで流域の水文特性にうちて検討することが可能となる。これらの基盤地図と気象データをもとに、異なる作付け状況下における流域の水文特性変化について、次に述べる手順で分析を行った。

#### b) 生育状況と営農管理スケジュールの確認

本研究では、作物の生育状況と環境負荷の関係を検討するため、実際の計算にいたるまでのワークフローとし

て、Piniewski<sup>1)</sup>の方法を採用した。これは、作物の生育と営農管理に関する確認作業と作物キャリブレーションの2段階に分けられる。まず、作物の生育が正常に起きているかどうかを、バイオマス量の日変動等から確かめ、それにあわせて作物の植え付けや収穫、施肥が行われているかをキャリブレーションの前に確認した。この確認作業には、作物の生育と営農管理が計算に反映されているかを確認できるRパッケージ（SWATdoctR）を用いた<sup>2)</sup>。作付け体系については、各シナリオごとに、対象地域に1種類の作物を栽培させることにした。現実には、10 km<sup>2</sup>以上の範囲で作物が1種類のみ植え付けられることはほとんど考えられないが、本研究の目的である、作物種による物質移動特性の変化を検討するうえでは適切と考えた。

#### c) 収量キャリブレーション

この地域の主要作物である、ハルコムギ、フコムギ、バレイショ、テンサイ、タマネギ、ダイズの6作物を対象として、作物の生育と収量に関するキャリブレーションを行った。対象作物の収量や施肥量等に関する入力データを表1にまとめた。実収量データは農林水産省の市町村別作物統計調査の結果を用いた。播種日（植え付け日）と収穫日については、北海道オホーツク総合振興局がまとめた農作物生育状況を参考にした。なお、タマネギについては、育苗後の植え付け日とし、その時期の葉の長さや枚数を参考に、初期バイオマス（bm\_init）と初期葉面積指数（lai\_init）を入力した。施肥量については、北海道農政部が発行した北海道施肥ガイド2015を参考にし、施肥タイミングは植え付けの1週間前とし、営農管理の内容とスケジュールに関する入力ファイル（management.sch）を作成した。収穫操作は、フコムギ、ハルコムギ、ダイズは穀物、バレイショ、テンサイ、タマネギは塊茎作物とした。タマネギは鱗茎で、植物学的には葉に相当するが、SWAT+の操作マニュアルにタマネギの収穫操作に関する記載がなかったため、既往文献<sup>3)</sup>における記載内容になった。

表-1 作物の営農管理と実収量

	施肥量 N (kg/ha)	尿素 (kg/ha)	施肥方法	施肥日	播種日 (移植日)	収穫日	実収量 (t/ha)	収穫操 作
フコムギ	180	385.7	side_dress	2023/9/15	2023/9/22	2024/7/30	5.259	grain
ハルコムギ	110	235.7	side_dress	2024/4/10	2024/4/17	2024/8/6	3.693	grain
ダイズ	20	42.9	side_dress	2024/5/16	2024/5/23	2024/10/4	3.036	grain
バレイショ	80	171.4	side_dress	2024/4/25	2024/5/2	2024/9/23	8.678	tuber
テンサイ	180	385.7	side_dress	2024/4/20	2024/4/27	2024/10/9	15.936	tuber
タマネギ	150	321.4	side_dress	2024/4/20	2024/4/27	2024/9/20	5.229	tuber

※たまねぎのみ移植：lai\_init=0.15、bm\_init=60 kg/ha(plant.ini)

※実収量は乾物換算

表-2 同定したパラメータと収量計算結果

作物	bm_e		harv_idx		lai_pot		tmp_base		収量 (t/ha)		誤差(%)
	初期値	同定値	初期値	同定値	初期値	同定値	初期値	同定値	実収量	計算値	
フユコムギ	30	26.2	0.4	0.38	4	4.5	0	0.16	5.26	5.26	-0.014
ハルコムギ	35	26.8	0.42	0.34	4	3.0	0	0.93	3.69	3.68	-0.364
ダイズ	25	25.9	0.31	0.38	5	5.6	10	9.22	3.04	3.08	1.501
バレイショ	30	31.8	1.05	0.81	5	3.6	4.4	3.47	8.68	8.65	-0.003
テンサイ	30	32.6	0.02	0.86	5	6.3	4	3.50	15.94	15.97	0.002
タマネギ	30	31.9	1.25	0.95	1.5	1.9	1.6	0.92	5.23	5.20	-0.005

作物の生育に関するパラメータの同定については、2024年の実収量データを用いて、Piniewskiらのワークフローに従い、次の4つのパラメータ、bm\_e（エネルギー利用効率係数）、harv\_idx（収穫指数）、tmp\_base（生育最小温度）、及びlai\_pot（潜在葉面積指数）をデフォルト値からそれぞれ特定のレンジ（bm\_e: +10%–30%、harv\_idx: ±30%、lai\_pot: ±30%、tmp\_base: ±1.5℃）において、ラテンハイパーキューブサンプリング法により値を動かし、実収量との誤差が最小となるよう最適化パラメータを求め、以後の計算に用いた。収穫指数（harv\_idx）の最適解を求めるにあたり、馬鈴薯、テンサイ、タマネギの3種については、他の穀物（grain crop）と異なり塊茎作物（tuber crop）であるため、収量計算ロジックが異なる。そのため、harv.ops（収穫操作設定ファイル）における収穫操作も異なるが、現状のSWAT+の塊茎作物の収量計算ロジックでは、塊茎への養分転流に関する計算が不十分で、実収量に対して計算結果が大幅に過小評価されることがわかったため、収量がバイオマスと収穫指数の積によって求まるようソースコード（mgt\_harvtuber.f90）を書き換えた。

### (3) 土砂と栄養塩の流出計算

上記のキャリブレーションによって同定された値を用いて、2024年における土砂と栄養塩（N）の流出特性を検討した。流出量サンプリング地点は、オモイ川とシンケビホロ川の流域出口とした。SWAT+モデルの計算結果から、硝酸態窒素とアンモニア態窒素の2024年における日変動を抽出し、対象とした6作物それぞれにおける土砂と硝酸態窒素の流出量について分析を行った。

## 3. 結果と考察

### (1) 収量キャリブレーション

作物収量のキャリブレーションによって同定されたパラメータと収量計算結果を表2に示した。穀物類については、4つのパラメータ値を所定のレンジで動かすことによって、実収量との誤差を2%以内に抑えることができた。一方、塊茎作物については計算ロジックの変更により、誤差が0.01%以内になった。塊茎作物の収穫指数（harv\_index）の同定値は、タマネギにおいて0.95と最も大きかった。これは計算過程の変更により、作物のどの

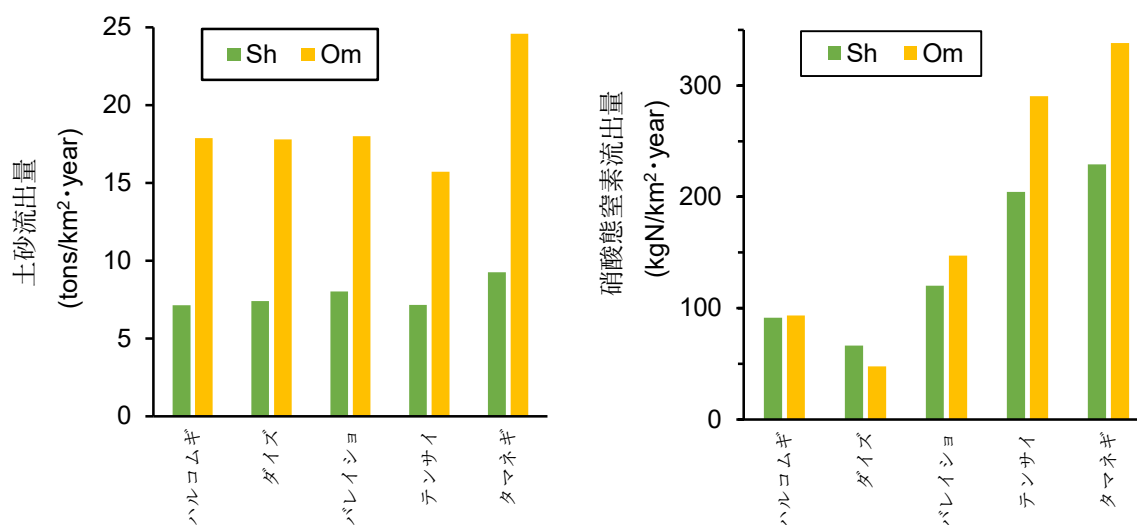


図-2 2024 年における土砂流出量（左）と硝酸態窒素流出量（右）

部位を収穫するかという収穫部位の設定を変更したためであると考えられる。

## (2) 土砂と栄養塩の流出量

異なる作物を栽培したと仮定したときの、SWAT+モデルによる土砂と硝酸態窒素の流出量の計算結果を図2に示した。フユコムギについては、栽培期間が異なるためここでは比較していない。流域出口における流出量を流域面積で除しているため、単位面積あたりの流出量として読み取ることができる。

土砂量は農地率の高いオモイ川流域において流出量が大きかった。また、オモイ川では作物による流出土砂量の相違が顕著であった。これは、作物種の地表被覆による表面浸食が異なり、これが土砂流出量の変化させる要因になっているためであると考えられる。特に、タマネギは葉面積指数（単位地面積あたりの葉の総面積（ $\text{m}^2/\text{m}^2$ ））が他の作物に比べ小さいため、雨滴浸食や表面流による土壌侵食が発生しやすいと考えられる。

硝酸態窒素流出量は、土砂流出特性と異なり、作物ごとに变化した。施肥量は作物によって異なるが、その量が必ずしも流出量に直結しているとは考えにくい。例えば、ダイズのN施肥量はテンサイに比べ11%と少ないが、流出量も同じ割合で変化しているわけではなく、ダイズ流域における流出量（ $47.6 \text{ kgN/km}^2 \cdot \text{year}$ ）は、テンサイ流域（ $290.7 \text{ kgN/km}^2 \cdot \text{year}$ ）に比較して、17%とわずかであるが高かった。これは、作物の生育における養分吸収特性や降雨の時期等によって、このような差異が生じると考えられる。今後、この作物の生育と栄養塩流出特性の変化についてさらに検討する予定である。

## 4. まとめ

本研究では明示していないが、SWAT+を用いることによって、HRUにおける水や養分の不足による作物の生育ストレスを計算することもできるため、最適な施肥量やタイミングについての検討、および気候変動による作物生育への影響についても計算することができる。近年の気候変動下にあつて、集中豪雨の強度や無降雨期間の長期化、夏の気温上昇など、さまざまな気象条件に対応した営農管理を行うには、現場の状況を即座に反映したリアルタイムシミュレーションも必要になると思われる。こうした現場のニーズに対応できるよう、筆者らは衛星画像から作物生育状況や圃場水分などの情報収集を行い、これらを入力データとしてSWATモデルの計算を随時行うことにより、営農管理の参考になるデータを提供しようと考えている。

図3にSWATモデルの活用による流域および農地管理への応用についてフローチャートを示した。SWATモデルはあくまでも計算ツールであるため、質の高いできる限り多くのデータを用いたパラメータの同定と検証によるモデルパフォーマンスの向上に努める必要がある。それには、本研究で用いた収量データや流量データ以外に、窒素やリンなどの土壌への蓄積や地下水の滞留といった物質移動の途中過程についても調べる必要がある。そして、パラメータが同定されたモデルの利用により、集中豪雨の強度や頻度、夏の高湿といった極端化する気象条件をインプットし試算することによって、将来起こりう

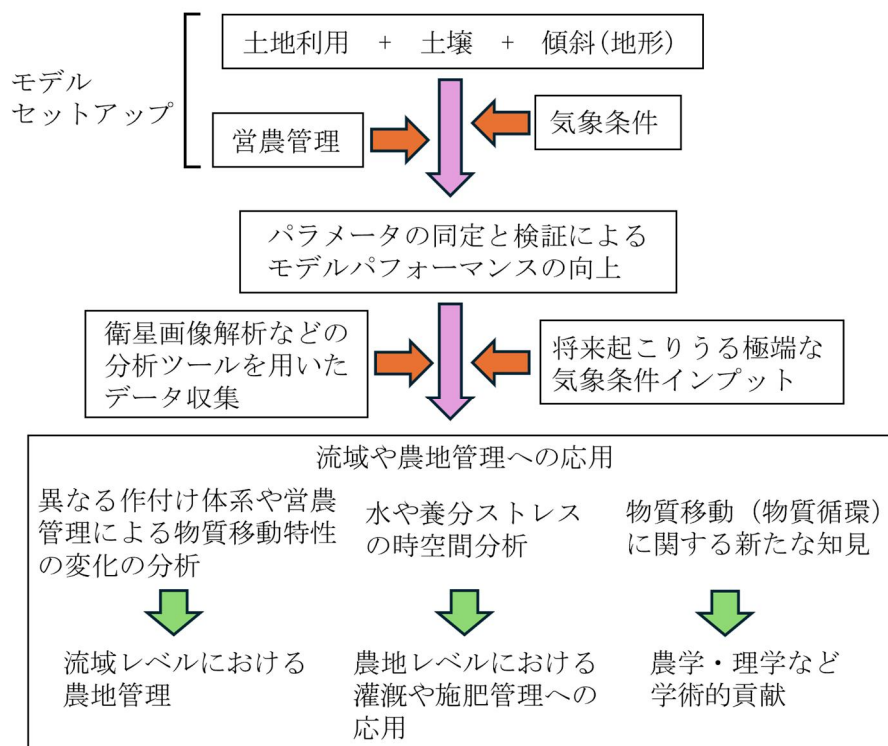


図-3 SWATモデルの活用による流域および農地管理への応用

る流域や農地における物質移動特性の変化を分析が可能となり、流域レベルにおける農地管理のあるべき姿を予測できるはずである。また、農地における水や養分ストレスの時空間分析により、農地レベルにおける灌漑や施肥管理への応用にも活用できる。そして、さまざまな条件における計算や実測との相違について検討することにより、物質移動や循環に関する新たな知見をもたらし、農学や理学などの他分野における学術的貢献も可能であると考えている。

謝辞：本研究は、2025年10月に行われた国際SWAT会議

における発表内容を発展させることによって得られた見解である。モデルに関する情報を提供してくれたコロラド州立大学やテキサスA&M大学の教員、および参加の手続きにおいてお世話になった寒地土木研究所の関係者の方々に厚く御礼を申し上げる。

#### 参考文献

- 1) Piniewski et al. : Enhanced crop calibration for SWAT+: evaluating water, sediment and nutrient impacts across ten European catchments, *Environmental Modelling and Software* 196 (2026) 106794.
- 2) Plunge et al. : SWAT+ model setup verification tool: SWATdoctR, *Environmental Modelling and Software* 171 (2024) 105878.