

北海道における農業活動を考慮した陸面過程モデルの構築

Development of land surface model including an agricultural activity module over Hokkaido area

北海道大学大学院工学院修士課程 2 年

北海道大学大学院工学院准教授

Rutgers University

○学生員 河野剛典(Takenori Kono)

正員 山田朋人(Tomohito Yamada)

博士研究員 Yadu Pokhrel

1. はじめに

水資源の安定及び持続的な確保は農業をはじめとする人間活動にとって不可欠である。近年ではインドの地下水が減少傾向にあり、アラブ海が年々収縮していることが観測により明らかとなっている(Micklin, 2007)。これらの問題の主な原因として、農作による灌漑やダムへの貯水などの人間活動による影響が指摘されており、人間活動が地球上の水収支に及ぼす影響は非常に大きいとされている。このことから、農業活動、工業用水、生活用水等の人間活動がもたらす水資源への影響を全球規模で考慮した「人間活動を考慮した陸面モデル MATSIRO(Minimal Advanced Treatment of the Surface Interaction and Runoff)」が Pokhrel et al.(2011) によって開発された。全球規模を対象とした本モデルは既存の陸面モデル MATSIRO¹⁾と Hanasaki et al(2008) によって開発されたバケツモデル (GHM H08)²⁾を統合させて作成された。

一方、北海道では気候変動に伴い、融雪の早期化による夏季貯水量の減少が懸念されており、農業活動のための灌漑用水量等を適切に把握することが重要である。また、地域スケールでこれらの人間活動が陸面過程に与える影響を定量的に算出するモデルはこれまでに存在していない。本研究では、Pokhrel et al.(2012) により開発された人間活動を考慮した陸面モデルを地域スケールに適用させ、農業活動が陸面過程に与える影響を評価するとともに、持続的かつ効率的な水使用を提案すべく適切な農業用水灌漑量を推定することを目的としている。なお、解析対象地域は農業地帯が多く、観測データの豊富な北海道全域とした。

2. 人間活動を考慮した陸面モデル(MATSIRO)の概要

人間活動を考慮した陸面モデル MATSIRO の概略図を図 1 に記す。本モデルは既存の陸面過程モデルをベースに、以下の 4 つのモジュールを組み合わせて構成されている。

- ① 作物成長モジュール
- ② 取水モジュール
- ③ 貯水モジュール
- ④ 環境用水モジュール

2.1 陸面過程モデル (MATSIRO)³⁾

本研究において使用する陸面過程モデルは、MATSIRO である。MATSIRO が表現する水文過程は、気孔の開閉による蒸発の制御、植生群落内の放射過程と大気の渦運動

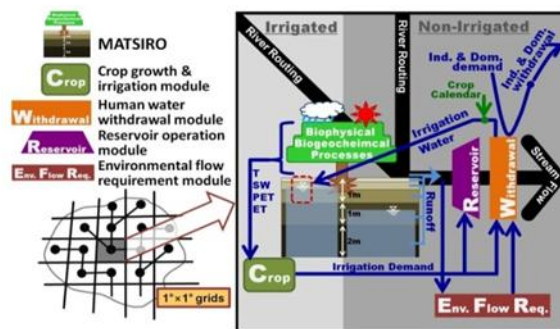


図 1 本モデルの概略図(Pokhrel et al.(2012)より)。

による熱水輸送、植生による降水の遮断とその蒸発、植生上・地面上の積雪と融雪、特に積雪内の熱伝導と融雪水の再凍結、雪の変質による日射反射率の変化、斜面の勾配を考慮した地表流出と地中流出、土壌の熱・水輸送、土壌中の熱、水輸送、土壌水分の変化等である。解析対象地域を任意のメッシュに分割し、各メッシュごとに熱収支式、水収支式を解くことで陸面過程における収支を計算している。

2.2 作物成長・灌漑モジュール

作物成長・灌漑モジュールは SWIM (Soil and Water Integrated Model: Kyrstanova et al. 1998)⁴⁾に基づいて構成されている。SWIM では、農作物の種類を 50 種類以上に分類し、放射量の合計値によって各作物の成長期間および灌漑期間を決定している。本モジュールでは 50 種類の作物種のうち 18 種類(大麦、トウモロコシ、雑穀、米、ライ麦、モロコシ、小麦、キャッサバ、ジャガイモ、砂糖大根、サトウキビ、大豆、落花生、ピーナッツ、菜種、キャノーラ、ヒマワリ、果物)を対象としている。本モジュールは第一種作物が収穫された直後に第二種作物が栽培されるという仮定のもと二期作、二毛作のモデリングにも適応している。このモデルでは灌漑面積、作物の種類および土壌水分量より灌漑用水量を求めている。本陸面モデルでは土壌を 5 層に分けて各層の土壌水分量を計算しているが、作物成長・灌漑モジュールでは地表面から 3 層目まで(地下 1m)の土壌水分量を計算対象とし、灌漑量は式(1)より算出される。

$$I = \frac{\rho_w}{\Delta t} \sum_{k=1}^3 \{ \max[(TSMC - \theta_k), 0] D_k \} \quad (1)$$

ここに、I は灌漑量(kg/s/m²)である。TSMC は $\alpha \times \theta_s$ で表され、 α は主作物が稲の場合には 1、その他の作物の場合には 0.5 が適用される。 θ_s は飽和土壌水分量、 θ_k は

土壌水分量を表している。 ρ_w は水の密度(kg/m^3), Δt はモデルのタイムステップ, D_k は第 k 層(m)の土壌厚をそれぞれ表している。

2.3 取水モジュール

取水モジュールでは各グリッドにおける農業用水灌漑量, 家庭用水量, 工業用水量を合計した総貯水量を算出し, 同グリッド上の河川より取水を行う。上記の取水量は環境用水モジュールによって上限が規制されており, 上限を超えた取水量については地下水から取水を行うこととしている。

2.4 貯水モジュール

貯水モジュールでは, 取水モジュールで算出された総取水量に応じてダムからの放流を行う。放流量はダムの主目的が灌漑か否かによって分けられ, 式(2)~式(4)によって算出される。

主目的を灌漑以外とするダム

$$r = i_{mean} \quad (2)$$

主目的を灌漑とするダム

($d_{mean} \geq 0.5 \times i_{mean}$ の時)

$$r = \frac{i_{mean}}{2} \times \left(1 + \frac{\sum area \{ kalc \times (d_{irg} + d_{ind} + d_{dom}) \}}{d_{mean}} \right) \quad (3)$$

($d_{mean} < 0.5 \times i_{mean}$ の時)

$$r = i_{mean} + (\sum area \{ kalc \times (d_{irg} + d_{ind} + d_{dom}) \} - d_{mean}) \quad (4)$$

ここに, r は放流量(m^3/s), i_{mean} は年平均流入量(m^3/s)を表している。 d_{mean} は $kalc \times (d_{irg} + d_{ind} + d_{dom})$ で表され, $kalc$ はダム配給率, d_{irg} はダムの下流における灌漑量(m^3), d_{ind} は工業用水取水量(m^3), d_{dom} は家庭用水取水量(m^3)をそれぞれ表している。

2.5 環境用水モジュール

環境用水モジュールでは, 各河川における年平均河川流量の 0%から 40%までを最小流出量として設定し, 人間活動による取水を制限することができる。

3. 本モデルの使用データ

本モデルにおいて必要とされるデータをモジュールごとに分類し, 以下に記した。

3.1 既存の陸面モデルで使用するデータ

① 土地利用データ

国土交通省により平成 18 年度に作成された国土情報数値データ⁵⁾を使用した。本データは土地利用の状況について, 3 次メッシュ (1km メッシュ) 毎に, 各利用区分 (田, 畑, 果樹園, 森林, 荒地, 建物用地, 幹線交通用地, 湖沼, 河川等) の面積を編集している。

② 地形データ

葉面積指数や標高, 平均傾斜角, 土質等の地形データ⁵⁾を 10km^2 に加重平均したものを用いる。

③ 気候データ

気候データは地上2m高さの気温・比湿・地表面気圧, 下向き短波放射, 下向き長波放射, 降水量, 風速の7種類を与えており, これらは各年月に応じたAMEDASの観測値

を 10km^2 に加重平均したものを用いている。

3.2 作物成長・灌漑モジュールで使用するデータ

① 各グリッドにおける農地面積および主作物

農業環境統合データセンターでは 1970 年から 5 年ごとに作物種別の農地面積メッシュデータ⁶⁾を作成している。本データは 1km^2 メッシュのデータであるため, これらを足し合わせることで本研究で使用する 10km^2 メッシュの農地面積データを作成した。また, このデータにおいて最も農地面積が大きかった作物をそのメッシュの主作物とした。また, 米, 小麦, ジャガイモ, 家畜飼料の 4 種類の作物が北海道における全農地面積の 8 割以上を占めていることが判明したため, 今回はこの 4 種類の作物のみを解析対象とした。

② 灌漑期間

北海道の地域や作物種によって栽培期間にばらつきがあるが, 灌漑期間は全ての作物において 5 月 10 日から 8 月 21 日までの 100 日間と設定した。

3.3 取水モジュールで使用するデータ

① 家庭用水取水量

北海道における一人あたりの一日の水使用量 (有効水量) は $267(\text{l}/\text{day})$ ⁷⁾とされており, これに各グリッドにおける人口数⁸⁾をかけることで一日当たりの家庭用水使用量を算出した。

② 工業用水取水量

経済産業省出版の工業統計データ⁹⁾には以下のデータが含まれている。

1 日当たりの工業用水取水量 (海水)

1 日当たりの工業用水取水量 (淡水)

① 回収水

② 井戸水等の地表水およびダムからの取水量

③ 公共水道からの取水

本研究では以下の式により, 一日当たりの工業用水使用量を算出した。

$$Ind = Ss + Sp - R \quad (5)$$

ここに, Ind は工業用水取水量(m^3) Ss は井戸水, 地表水及びダムからの取水量(m^3), Sp は公共水道からの取水(m^3), R は回収水の使用量(m^3)である。

3.4 貯水モジュールで使用するデータ

① ダムの貯水容量

ダムデータ一覧¹⁰⁾に記載されている内の, 総貯水量が 1000 万 m^3 以上のダム 36 カ所を計算対象とした。なお, 計算対象としたダムの総貯水量は北海道内の全てのダム貯水量を集計した値の 86%であった。

③ ダムの主要目的

ダムデータ一覧に記載されているデータを用いた。なお, 本モジュールではダムの目的として A (灌漑), P (発電), F (洪水調整), W (上水道用水), I (工業用水), N (環境用水) の 6 つの項目を設けている。

3.5 環境用水モジュールで用いるデータ

本来環境用水モジュールの役割は各河川において最小

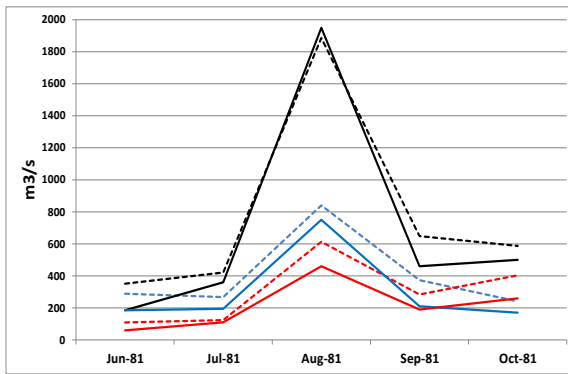


図2 1981年における3河川の河川流量(m³)
実線: モデル値 点線: 観測値
黒線: 石狩川 青線: 十勝川 赤線: 天塩川

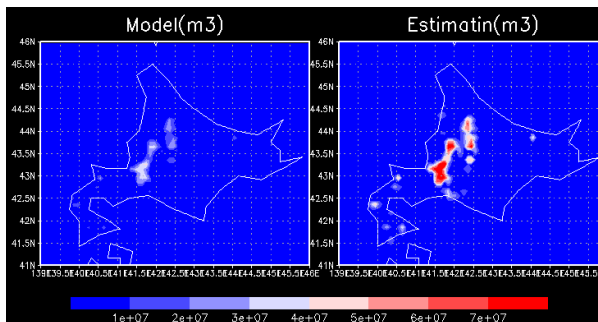


図3 1995年における水田灌漑量(m³)の合計値
左: モデル値 右: 推定値

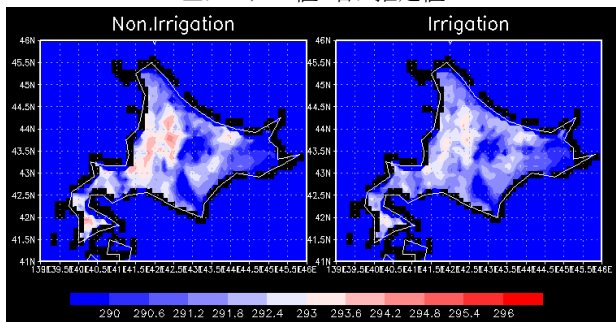


図4 灌漑期間(5/10~8/21)における LT および
LI モデルの地表面温度(degree)の平均値
右: 農業活動なし 左: 農業活動あり

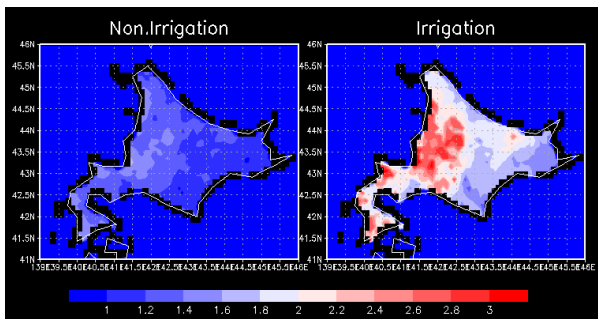


図5 灌漑期間(5/10~8/21)における LT および
LI モデルの蒸発量(mm/day)の平均値
右: 農業活動なし 左: 農業活動あり

河川流量を設定し、人間活動による河川からの取水を制限することであるが、北海道においては規制された河川流量を超過するような取水は行われていないため、今回は最小河川流量を考慮せず解析を行った。

4. モデルにおける解析結果の検証

本モデルでは考慮する人間活動の種類に応じてLTモデル, LIモデル, LTIDモデルの3つのモデルを使い分けることが可能である。3つのモデルは既存の陸面モデルMATSIRO (L) をベースに、LTモデルでは各グリッドにおいて河道網を考慮したTRIPモデル (T) ¹¹⁾を組み合わせることで河川流量を算出することができ、LIモデルでは上記の灌漑モジュール

(I) を組み込むことで農業活動における灌漑量を推定できる。LTIDモデルでは河川による水の運搬、灌漑効果、ダムによる水の貯水および放流 (D) , 家庭用水、工業用水の使用など本モデルに組み込まれているすべての人間活動を考慮している。これら3つのモデルを相互比較することで、各々の人間活動が水循環および気候変化に与える影響を分析することができる。

4.1 LTモデル(人間活動無し)における解析結果の検証

LTモデルの検証データとして、北海道を代表する河川である石狩川、十勝川、天塩川の河川流量を用いた。各地点の河川流量はそれぞれ石狩大橋観測所、藻岩観測所、天塩大橋観測所で一時間おきに計測されたものである¹²⁾。解析対象年度は1981年としており、この年は8月に記録的な豪雨が発生している。モデル結果、観測値は河川流用を月平均した値を比較している。モデル結果は3河川とも観測値よりも多少低く見積もられているものの、8月の豪雨におけるピーク流出量も検出できており、結果はおおむね良好であるといえる。

4.2 LIモデル(人間活動あり)における解析結果の検証

LIモデルの検証には灌漑量の検証が不可欠であるが、灌漑量は正確な値を計測することが非常に難しく、計測地点も少ない。そのため、灌漑量を推定する式(6)、(7)を考案し、モデルの結果と比較した。

$$I_{est} = I_{rd} - P \quad (6)$$

$$I_{rd} = A \times (D_{max} + D_{day} \times I_{day}) \quad (7)$$

ここに、 I_{est} は灌漑量推定量(m³), I_{rd} は水田における水需要量(m³), P は灌漑期間中の降水量(m³), A は水田面積(m²), D_{max} は湛水深の最大上昇量(m), D_{day} は一日当たりの減水深(m/day), I_{day} は灌漑期間(day)をそれぞれ表している。湛水深は稲の発育に応じて上昇させ、最大湛水深はおよそ 20cm となる。また、一日当たりの減水深は北海道ではおよそ 2(cm/day)程度¹³⁾であり、灌漑期間は5月10日から8月21日までの100日間とした。モデル値と推定値の比較結果を図3に示す。どの地域においてもモデル結果は推定値の半分程度となった。年間を通した全水田における灌漑量の合計値は、モデル値が11億(m³/year), 推定値が24億(m³/year)と全体的に見てもおよそ半分となった。モデルの灌漑量が過小評価される主な原因として、モデルでは湛水深を考慮していないことが挙げられる。実際の水田では、式(7)のように稲の成長

に応じた湛水深の上昇および水面、稲からの蒸発散や地下への浸透を合わせた日々の減水深の補足により灌漑量が決定されるが、湛水深を考慮していない本モデルでは湛水深の上昇分および減水深を決定する上記の2つの要素がともに過小評価されるため、灌漑量が減少するものと考えられる。

5. 農業活動が水収支、熱収支に及ぼす影響

LT モデルおよび LI モデルの結果を比較することにより、農業活動が陸面過程に与える影響を分析することができる。今回は灌漑期間中の地温および蒸発散量を比較対象とした。両者の結果を図 4 および図 5 に記す。両モデルの違いは水田面積が広く、灌漑量の多い石狩流域において特に顕著にみられた。灌漑期間を通して、地温においては LI モデルでは LT モデルよりも 0.5℃程度低く、蒸発散量は 1.5(mm/day)程度増加するという結果が得られた。

6. 今後の課題

人間活動を考慮した全球規模の陸面過程モデルを小地域に適用したのは本研究が初めてである。そのため人間活動を定量的に評価する物理式は全球規模に対応しており、これを地域スケールに適応させるには地域特性を考慮する必要があった。例えば 4.2 で述べたように、モデルによる灌漑用水量の計算値は推定値の約半分となっており、両者にかなりの差がある。グリッド面積の大きな全球規模の計算では結果に大きく影響しないようなパラメタであれ、詳細な解析が可能な小地域での計算においてはその土地の地域特性が計算結果に影響しやすい。このため、小地域スケールの解析を行う際は、地域特性を考慮した解析手法を新たに提案する必要がある。今回モ

デルの解析値と推定値の間で大きな差が生じた灌漑用水量の計算式をはじめ、今後はモデルの解析結果を考察しながら地域特性を考慮した新たな解析手法を模索していく。また、ダムモジュール及び家庭用水、工業用水を考慮した LTID モデルを構築させ、農業以外の人間活動が陸面過程に及ぼす影響についても解析を行うとともに、より精度の陸面過程モデルの確立を目指す。

参考文献

- 1) Yadu, Pokhrel 2011: Incorporating Anthropogenic Water Regulation Modules into a Land Surface Model
- 2) Hanasaki, Naota 2008 : An integrated model for the assessment of global water resources
- 3) Takata, K. , S. Emori, and T. Watanabe. : Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff (matsiro). Global Planetary Change. , Vol. 38, pp. 209-222, 2003
- 4) Kyrstanova 1998: Soil and Water Integrated Model
- 5)国土交通省 2005: 国土情報数値データ <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- 6)農業環境統合データセンター 1995: 農業統計データ <http://agrimesh.dc.affrc.go.jp/>
- 7) 国土交通省 2006: 生活用水使用量の推移 http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/c_actual/actual03.html
- 8)国土交通省 2006: 平成 17 年度国勢調査 人口 地域メッシュ統計(世界測地系 1km メッシュ)
- 9)経済産業省 2008: 工業統計データ <http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/Library/index.html>
- 10) 国土交通省: 北海道ダムデータ一覧
- 11) Taikan, Oki 1997: Total Runoff Integrating Pathway
- 12) 国土交通省 2003: 水文水質データベース <http://www1.river.go.jp/>
- 13)及川水慶一: 田転換畑の基盤整備技術 <http://to-noken.ac.affrc.go.jp/DB/DATA/022/022-003.pdf>