

陸面過程モデルへの2種類の作物成長モデルの結合と灌漑要求水量の将来変化推定

COUPLING TWO CROP GROWTH MODELS WITH LAND SURFACE MODEL AND ITS APPLICATION TO ESTIMATING FUTURE CHANGE OF IRRIGATION WATER REQUIREMENT

萬 和明¹・松原 拓也²・立川 康人³・椎葉 充晴⁴

Kazuaki YOROZU, Takuya MATSUBARA, Yasuto TACHIKAWA and Michiharu SHIIBA

¹正会員 博(工) 京都大学大学院 助教 工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

³正会員 博(工) 京都大学大学院 准教授 工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁴正会員 工博 京都大学 名誉教授 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

It is essential to assess the crop growth state because the agricultural water usage is dominant to total water consumption whole the world. One crop model which is written by empirical formula and another crop model which is described by the basis on physiology are successfully coupled with the land surface scheme, SiBUC to assess the climate change impact on irrigation water requirement by MRI-AGCM3.2S. Simulated irrigation water requirement is larger than the statistic water withdrawal so the change tendency of irrigation water requirement by climate change is analyzed. It is assumed that the empirical crop model could be representative of crop which has shorter growth period and the physiological one could describe longer term crop growth.

Key Words : Land surface model, Crop growth model, Climate change, Irrigation water requirement

1. 序論

1960年代以降世界の人口は増加の一途をたどり、現在は70億人を突破している。今後も人口の増加傾向は続くと思われ、食料需要の増加が懸念されている。統計情報によれば世界の水消費のうち約70%が農業用水であり¹⁾、世界の約40%の食料が灌漑農地で生産されているとの報告がある。加えて、今後は地球温暖化に伴って降水の時空間分布が変化することが予測され、流域の水管理を変更する必要性が指摘されている(例えば立川ら²⁾)。したがって、食料の安定供給という観点からだけでなく、降水をどのように農業用水として安定供給していくか、という観点からも灌漑農地における灌漑要求水量を適切に見積もる必要性があると考えられる。

灌漑要求水量を見積もるために、水循環モデルに作物成長モデルを結合したモデルを用いた研究が行われている。辻本らは、分布型水循環モデルに作物成長モデルを組み込み、カンボジアのサンカー川流域を対象に水稲の収量予測モデルを構築し、LAI(Leaf Area Index: 葉面積指数)と土壌水分量について良好な精度が得られることを示した³⁾。Hanasaki *et al.* は、陸面過程モデル、流出モデル、作物成長モデルを結合し、農事歴と作付け作物種を決定し、灌漑を考慮した全球河川流量を

推定している⁴⁾。さらに、Hanasaki *et al.* の最新成果によると社会経済シナリオに準拠した水利用シナリオが示されている⁵⁾。また、小槻らは、作物成長モデルを組み込んだ水循環モデルを構築し日本全域を対象に、現在気候条件下と比較して将来気候条件下で水資源の需給バランスと作物の収量について議論している⁶⁾。

以上のように、水循環モデルに作物成長モデルを組み込んだモデルが開発されているが、多くは単一の作物成長モデルを選択的に組み込み、既定のパラメータを用いたシミュレーションを実施している。萬らによれば、作物成長モデルの挙動はそのパラメータに鋭敏であるため⁷⁾、作物成長モデルを使用する際にはモデルパラメータのチューニングが必要であると考えられる。しかし、作物成長モデルの状態量であるLAIの現地観測値は限られており、衛星観測から推定される水田のLAIは現地観測値と異なる時系列変化を示すことがある。そのため、水田を対象とした作物成長モデルの場合にはパラメータのチューニングは容易ではない。

そこで本論文では、灌漑要求水量の将来変化を適切に推定することを目的として、2種類の作物成長モデルを陸面過程モデルに導入しそれぞれのモデルの特徴を考察する。次に、作物モデルのパラメータチューニングを実施し、既定のパラメータとチューニングしたパラメータを使用する場合で、現在気候条件下だけでな

表-1 式 (1)-(4) と図-2 で使用されている変数

変数	定義
M_g	水田の水深
W_i	土壌 i 層の水分量
D_i	土壌 i 層の厚さ
θ_s	空隙率
ρ_w	水の密度
E_s	地表面からの直接蒸発
$E_{dc,i}$	蒸発散による土壌水分損失
P_0	地表面に到達する水分量
P_1	地表面からの降水の浸透
D_g	表面流出
$Q_{i,i+1}$	土層間の流量
Q_3	最下層からの重力排水

く将来気候条件下での灌漑要求水量の推定にどのような影響があるのかを考察する。

2. 使用するモデル

本論文では、地表面の水・熱循環を表現する陸面過程モデル SiBUC に、作物成長を表現するモデルを 2 種類組み込む。本節ではそれぞれのモデルを概説するとともに必要と思われる基礎式を記述し、SiBUC と作物成長モデルの結合方法について説明する。

(1) 陸面過程モデル SiBUC

SiBUC は SiB をベースに開発されてきた陸面過程モデルである。SiBUC が表現できる地表面構成要素は、複数の植生ばかりでなく、都市域や河川・湖沼等の水体にも及ぶ。特に灌漑農地では、最適な作物成長のために維持すべき土壌水分量（水田の場合は湛水深）をパラメータとして設定し、作物の生育期間中に土壌水分（水田では湛水深）がそれらの値を下回る場合には水供給されるようモデル化している。ただし水供給源については考慮しておらず、理想灌漑という条件下での人為的な水操作を表現している⁸⁾。この灌漑農地での水供給量を、灌漑要求水量として定義する。

図-1 に SiBUC の植生モデルにおける水収支概念図を示す。土壌は 3 層で表現され、各層の土壌水分量は Richards 式によって表現されている。式 (1) に水田における水位の支配方程式を、式 (2)-(4) に土壌水分量の支配方程式ををそれぞれ示し、また、同式と図-1 に使用されている変数の説明を表-1 に示す。

$$\frac{dM_g}{dt} = P_0 - D_g \quad (1)$$

$$\frac{dW_1}{dt} = \frac{1}{\theta_s D_1} \left[P_1 - Q_{1,2} - \frac{1}{\rho_w} (E_s + E_{dc,1}) \right] \quad (2)$$

$$\frac{dW_2}{dt} = \frac{1}{\theta_s D_2} \left[Q_{1,2} - Q_{2,3} - \frac{E_{dc,2}}{\rho_w} \right] \quad (3)$$

$$\frac{dW_3}{dt} = \frac{1}{\theta_s D_3} [Q_{2,3} - Q_3] \quad (4)$$

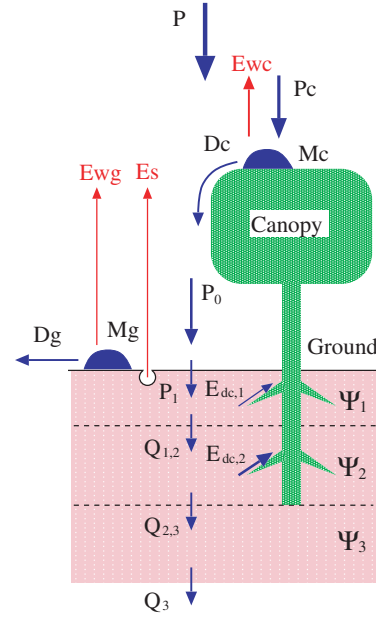


図-1 SiBUC の植生モデルにおける水収支概念図

(2) SWIM の作物成長モジュール

本論文で陸面過程モデルに導入した作物成長モデルの 1 つが、水文植生水質統合型モデル SWIM (Soil and Water Integrated Model)⁹⁾ で用いられている作物成長モジュールである。以後、便宜上 SIWIM に導入されている作物成長モジュールを単に SWIM と呼ぶことにする。SWIM では、作物の成育度合いは積算気温で、LAI の時間変化は地上のバイオマス量でそれぞれ表現されている。

$$I_s(t) = \frac{\sum_{i=1}^t \{T(i) - T_b\}}{T_p} \quad (5)$$

$$L_a(t) = \frac{L_m B_g(t)}{B_g(t) + \Delta_B \exp\{C_a - C_b B_g(t)\}} \quad (6)$$

ここで、 $I_s(t)$ は作物が成長を開始した日から t 日目の作物の生育段階、 $T(i)$ は i 日目における日平均気温、 T_b は作物の成長に必要な基準温度、 T_p は作物が成熟するための積算温度、 $L_a(t)$ は t 日目における LAI、 L_m は作物毎に決定される LAI の最大値、 $B_g(t)$ は地上のバイオマス量、 C_a および C_b は経験パラメータであり、それぞれ、 $C_a = 9.5$ 、 $C_b = 0.0006 \text{ ha}^{-1}\text{kg}$ で与えられ、また、 Δ_B は $B_g(t)$ と同じ単位を持つ大きさ 1 の物理量である。地上のバイオマス量 $B_g(t)$ は、 $B_t(t) = \sum_{i=1}^t (B_e R_p(i) F_s(i))$ で計算される総バイオマス量 $B_t(t)$ と作物の成育段階の関数で表される。ここで、 B_e は変換係数、 $R_p(i)$ は i 日目の光合成有効放射量、 $F_s(i)$ は i 日目の作物の成長ストレス項である。

SWIM を用いて LAI を推定する際に重要となるパラメータは、作物が成熟するための積算温度 T_p と光合成有効放射量を総バイオマス量に変換する際に乗じられる変換係数 B_e である。

総バイオマス量を求める際に、光合成有効放射量に成長ストレス項を掛け合わせることで、水不足や日照不足といった気象条件による作物成長の違いを考慮し

ている。SWIM では、成長ストレスとして、水分、気温、窒素、リンの4項目が考慮されている。窒素とリンのストレス項は将来気候条件下での適切な扱いが難しく、結果に対する不確実性の要因となるため本論文では省略し、水分と気温のストレス項のみを考慮する。

(3) Rfed v5 と ORYZA2000 を統合した水稻モデル

水稻を対象に開発され、世界的に広く用いられている作物成長モデルが ORYZA2000 である。ORYZA2000 は作物の生育を細部まで表現しようと試みたモデルであり、再現性が高いものの事前に設定する必要のあるパラメータ数が多い¹⁰⁾。一方で、必要なパラメータを少なくし簡易なモデル化を試みたモデルが Rfed v5¹¹⁾ 12) 13) である。菊島らは、作物生長量推定モジュールの大部分を Rfed v5 から、LAI を推定するプログラムは再現性の高い ORYZA2000 からそれぞれ引用し、パラメータの最適化を実施した上で作物モデルを作成している¹⁴⁾。本論文では、菊島らが開発した作物成長モデルを陸面過程モデル SiBUC に導入する。以後、菊島らが開発したモデルを水稻モデルと呼ぶことにする。

水稻モデルでは、作物の発育の進み具合を表す指標に DVI (Developmental Index) を用いている。DVI は、発芽から出穂、成熟に至る過程を、発芽時を DVI=0、幼穂分化期を DVI=1、出穂期を DVI=2、成熟期を DVI=3 と指標化したものである。

発芽後 t 日目の DVI は、毎日の発育速度と積算水ストレスの積を足しあわせていくことで、LAI は毎日の LAI 増加速度を積算することで、それぞれ求められる。

$$I_d(t) = \sum_{i=1}^t (R_d(i) \cdot W_{sc}(i-1)) \cdot dt \quad (7)$$

$$W_{sc}(0) = 0 \quad (8)$$

$$L_a(t) = \sum_{i=0}^t dL_a(i) \cdot dt \quad (9)$$

$$L_a(0) = 0.0212 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} \quad (10)$$

ここで、 $I_d(t)$ は発芽後 t 日目の DVI、 $R_d(t)$ は発芽後 t 日目の発育速度、 $W_{sc}(t)$ は発芽後 t 日目の積算水ストレス、 $dL_a(t)$ は発芽後 t 日目の LAI 増加速度、 $dt=1\text{day}$ である。積算水ストレスは、毎日の土壌水分量に応じて決定される水ストレスを積算することで求められる。湛水している場合には土壌は飽和するため、水ストレスはゼロとなる。発育速度 $R_d(t)$ は、発育相に応じて気温および日照時間の関数として与えられる。LAI 増加速度 $dL_a(t)$ は

$$dL_a(t) = \begin{cases} (R_{RE}(t) - R_{RD}(t)) \cdot L_a(t-1) & (L_a(t-1) \leq 1) \\ S_{LA} \cdot dDml(t) - R_{RD}(t) \cdot L_a(t-1) & (L_a(t-1) > 1) \end{cases} \quad (11)$$

で与えられる。ここで、 $R_{RE}(t)$ 、 $R_{RD}(t)$ 、 S_{LA} および $dDml(t)$ は、それぞれ発芽後 t 日目の LAI 増加速度、

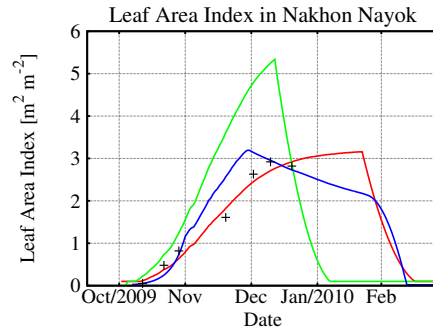


図-2 作物成長モデルによる LAI 推定値と観測値の比較。黒点が観測値、赤線が SWIM の修正パラメータによる推定値を、緑線が SWIM の既定のパラメータによる推定値を、青線が水稻モデルによる推定値をそれぞれ示す。

発芽後 t 日目の LAI 減少速度、比葉面積および発芽後 t 日目の葉乾物生産速度である。比葉面積とは、単位葉重あたりの葉面積で、ここでは $S_{LA}=0.0124 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ である。発芽後 t 日目の LAI 増加速度、LAI 減少速度、葉乾物生産速度は、DVI、気温、窒素含有量の関数で表現される。

(4) 作物成長モデルと陸面過程モデルの結合

陸面過程モデルでは、蒸発散量、可能蒸発散量、土壌水分が計算されている。SWIM では蒸発散量と可能蒸発散量の比で、水稻モデルでは土壌水分に応じて、それぞれ作物成長の水ストレスが決定されていることから、作物成長モデルの水ストレス項に SiBUC の推定値を用いることにする。また、作物モデルからは LAI 推定値が SiBUC に渡される。以上のようにして、作物成長モデルと陸面過程モデルの結合を実現した。

3. LAI 観測値を用いたパラメータ設定

(1) LAI 観測の概要

筆者らは、タイ国の Nakhon Nayok 県の Khun Dan Prakan Chon Dam 下流のダム事務所 (東経 101.197 度、北緯 14.190 度) で水文気象観測を実施し、気温と日射量を 2009 年 3 月から継続観測している。また、付近の灌漑水田で 2009 年 10 月 1 日から同年 12 月 20 日まで LAI-2000 を用いて LAI の現地観測を実施している。LAI の観測は播種から出穂までの期間実施され、出穂後は観測されていない。現地で観測した気象データを入力値として作物成長モデルを単独で駆動し、モデルの挙動を確認した。降水量データは観測地点から最寄りに設置されているタイ気象局の Prachin Buri 地点の観測データを使用した。本論文では、乾季に得られた LAI の観測値を元に作物成長モデルのパラメータを検証・設定し、雨季の水稻の成長は乾季のそれと同一のものとして扱った。

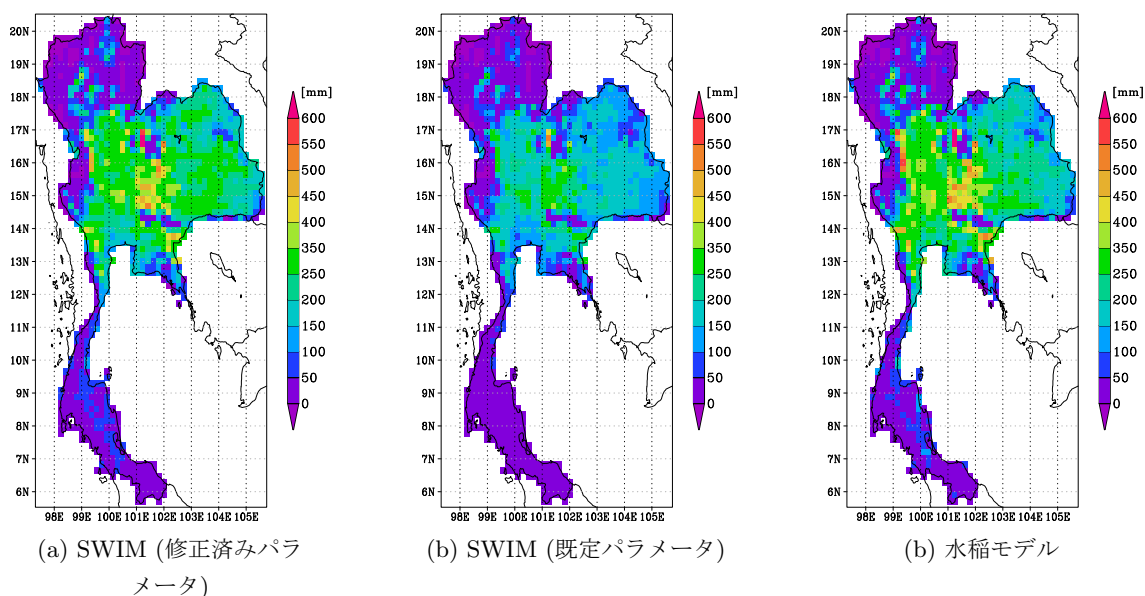


図-3 SiBUC と結合した作物成長モデルによる灌漑要求水量の推定値。

(2) SWIM のパラメータ設定

SWIM による LAI の推定結果を図-2 に示す。同図では、黒点が観測値を、緑線が既定のパラメータによる推定値を、赤線が最適パラメータによる推定値をそれぞれ示している。既定のパラメータを用いた場合は観測値と比べ LAI の立ち上がりが速く、播種から 70 日程度という短い期間で LAI は最大となり、最大値は観測値と比べて極めて大きい。そこで、SWIM のパラメータのうち、LAI の最大値、LAI の成長速度を減少させるために、光合成有効放射量をバイオマス量に変換する変換係数、LAI が最大となるまでの期間を長くするために作物が成熟するための積算温度をそれぞれ変化させ、LAI の推定値と観測値の RMSE が最小となるパラメータを新たに修正済みパラメータとして得た。修正済みパラメータはタイ全土に適用できる保証はないが、既定パラメータを用いるよりも適切であると判断し、次節以降では修正済みパラメータをタイ全土に適用する。

(3) 水稻モデルの再現結果

水稻モデルによる LAI 推定結果は図-2 に青線で示されている。同図をみると、11 月以降に水稻モデルの推定値が過大評価であるが、LAI の時系列変化を概ねとらえられている。これは、水稻モデルのパラメータは本節で使用している LAI 観測値に基づいて最適化されているためと考えられる¹⁴⁾。

4. 将来気候条件下における灌漑要求水量の変化

(1) 計算条件

現在および将来の気象強制力として、気象庁気象研究所が提供する MRI-AGCM3.2S の出力値を用いる¹⁵⁾。

空間解像度は約 20km、降水、気温、風速は 1 時間値、気圧、比湿、放射の各成分は 3 時間値が提供されている。本論文では、現在気候と将来気候のそれぞれの条件下で灌漑要求水量がどのように変化するかを焦点を絞って考察するため、MRI-AGCM3.2S 出力はバイアス補正を行わずに使用した。標高データには HydroSHEDS の 1km 格子データを、土壌パラメータには Ecoclimap の 1km 格子データをそれぞれ気象強制力の格子サイズと適合するように集約して用いた。土地利用条件は、GLCC の USGS2 カテゴリーを元にタイ全土の水田面積が FAO の統計値と一致するように、各計算格子の水田の 37%が天水田、46%が灌漑 1 期作水田、17%が灌漑 2 期作水田と修正して使用した。計算期間は、現在気候実験が 1979 年から 2008 年、近未来気候実験が 2015 年から 2044 年、世紀末気候実験が 2075 年から 2104 年である。作物の作付け日は農家によって異なるのが実状であるが、現在および将来気候条件下でのモデルの挙動の違いに着目するため、天水田および灌漑水田の雨季作は 6 月 1 日、灌漑水田の乾季作は 12 月 1 日を作物の作付け日としてタイ全土で同一の値を設定した。

(2) 結果と考察

現在気候実験での年平均灌漑要求水量の推定結果を図-3 に示す。同図で示す灌漑要求水量は、灌漑水田において最適な作物成長のために維持すべき湛水深を下回った場合に供給源を考慮せずにモデル上で追加される水分量のことである。同図 (a) は修正済みパラメータを用いた SWIM による推定結果、(b) は既定のパラメータを用いた SWIM による推定結果、(c) は水稻モデルによる推定結果をそれぞれ表している。同図から、修正済みパラメータを用いた SWIM の推定値と水稻モデルの推定値は、空間分布と絶対値がともに似通っている。一方、既定のパラメータを用いた SWIM の推定

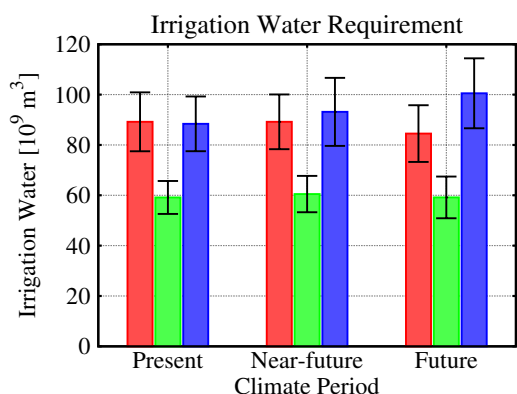
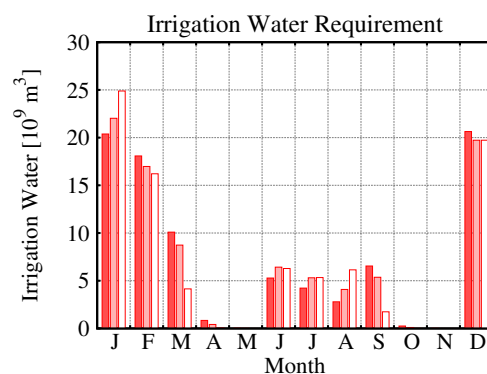


図-4 作物成長モデルと結合した SiBUC による年積算灌漑要求水量の各気候実験の平均値と標準偏差.. 赤棒が修正パラメータを用いた SWIM と、緑棒が既定パラメータを用いた SWIM と、青棒が水稲モデルと、それぞれ結合した推定値を示している。

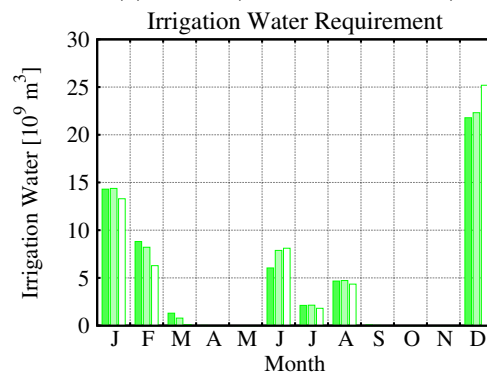
値は他の 2 つの結果と比較すると全体的に推定量が少ない。これは、既定のパラメータを用いた LAI 推定では、作物の生育期間が短くなるために灌漑要求水量が発生する機会が減少することが原因であると考えられる。本論文では、タイ全土の水田面積の内訳が統計値にあうように土地利用を設定している。そのため、天水田しかない地域に灌漑水田が存在するよう設定されている可能性がある。現在、県単位の収穫面積などの統計値を取得しているところであり、同図で示される灌漑要求水量の空間分布が現実状態を表しているかの検証は今後の課題としたい。

次に、各気候実験期間を対象にしたタイ全土での灌漑要求水量の平均値と標準偏差を図-4 に示す。まず、絶対量は AQUASTAT の 2007 年農業取水統計値 (約 $51 \times 10^9 \text{ m}^3$) と比べると全体的に過大評価である。この要因としては、SiBUC の灌漑スキームが理想灌漑、つまり灌漑のための水供給源を考慮していないこと、灌漑水田がタイ全土に均一に分布する土地利用条件として設定しており現実状態を反映していない可能性があること、気象強制力として用いた降水データに少雨のバイアスが存在すること、などが考えられる。第 1 の要因については、現在陸面過程モデルと流出モデルの結合を進めているところであり、水需給バランスをふまえて灌漑要求水量を推定できるように検討している。第 2 の要因については、先の段落で述べたことと関連するが、県単位の統計値が入手でき次第検討を進める。第 3 の要因については、降水観測プロダクト APHRODITE と MRI-AGCM3.2S の比較によれば MRI-AGCM3.2S の方が過大評価気味との結果がえられているが、更なる分析を実施したい。

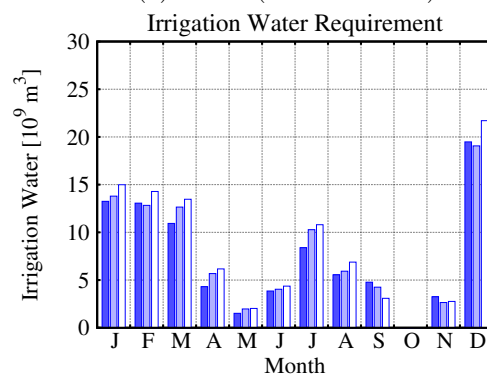
現在気候条件下での灌漑要求水量は過大算定であったため、本論文ではタイ全土での灌漑要求水量の将来変化傾向について考察する。図-4 によれば、気候変動条件下では灌漑要求水量の推定値は、修正パラメータを用いた SWIM の場合は減少傾向を示し、既定パラメータ



(a) SWIM (修正済みパラメータ)



(b) SWIM (既定パラメータ)



(c) 水稲モデル

図-5 作物成長モデルと結合した SiBUC による灌漑要求水量の月別推定値。色塗り棒が現在、網掛け棒が近未来、白抜き棒が世紀末の各気候条件下での灌漑要求水量を示している。

タを用いた SWIM の場合は変化なし、水稲モデルの場合は増加傾向を示し、それぞれが異なる傾向を示した。なぜそのように異なる傾向を示すかを月別の灌漑要求水量の推定値を示しながら考察する。

図-5 に、灌漑要求水量の月別推定値を気候実験毎に示す。SWIM では、雨季の灌漑要求水量は少なく、作付け開始と設定した 12 月や 1 月に多くの灌漑要求水量がある。特に既存のパラメータを用いた場合はその傾向が顕著である。したがって、SWIM は短期集中的な生育状態を表現した作物成長モデルであるとの見方ができる。一方水稲モデルでは、雨季に比較的多くの灌漑要求水量があり、乾季の終わりまで灌漑要求水量が

計算されている。雨季に灌漑要求水量が多くなるのは LAI のピークが成長の初期段階になるようモデル化されているために蒸発散量が多くなったことが要因だと考えられる。また、作物の生育期間が SWIM よりも長いために乾季の終わりにも灌漑要求水量が存在するものと考えられる。よって、水稻モデルは長期間作付けする状態を表現した作物成長モデルであるとの見方ができる。

5. 結論

陸面過程モデル SiBUC に、作物成長モデルとして経験式で記述された SWIM の作物成長モジュールと、水稻の生理を考慮し物理的に記述された Rfed v5 と ORYZA2000 を統合した水稻モデルをそれぞれ組み込んだ。SWIM の作物モジュールについてはタイの Nakhon Nayok 県で現地観測した LAI をもとに作物モデルのパラメータを修正した。構築したモデルを、気象強制力に MRI-AGCM3.2S の出力値を使用してタイ全土を対象に灌漑要求水量を求めた。現在気候条件下での灌漑要求水量は統計値と比べて過大評価であったため、さらなるモデルや計算条件の改善が必要である。

異なるモデル、異なるパラメータを用いた将来気候条件下での灌漑要求水量の推定値はそれぞれ異なる傾向を示したことから、将来の水需要推定には大きな不確実性が内在していることが示唆される。推定された灌漑要求水量を月別に分析した結果、SWIM は短期集中的な生育状態を表現した作物成長モデルであり、将来気候条件下では灌漑要求水量が減少傾向となること、また、水稻モデルは長期間の作付けを表現した作物成長モデルであり、将来気候条件下では灌漑要求水量が増加傾向となることが示された。

謝辞: 本論文を執筆するにあたり、京都大学大学院工学研究科牧雅康助教には、有益なコメントをいただきました。また、本論文で使用した LAI 観測値は同氏より提供いただきました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) AQUASTAT: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm, 2013/09/30 参照。
- 2) 立川康人, 藤田勇樹, 椎葉充晴, 萬和明, キムスンミン: 気候変化によるタイ国パサック川流域の水資源変化の予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, pp.I.445-I.450, 2013.
- 3) 辻本久美子, 本間香貴, 小池俊雄, 太田哲: 天水農業に必要な水文気象情報の把握のための分布型水循環-水稻生育結合モデルの開発, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, pp.I.511-I.517, 2013.
- 4) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K.: An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and

input meteorological forcing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol.12, pp.1007-1025, 2008.

- 5) Hanasaki, N., Fujimori, S., Yamamoto, T., Yoshikawa, S., Masaki, Y., Hijioka, Y., Kainuma, M., Kanamori, Y., Masui, T., Takahashi, K., and Kanae, S.: A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways Part 1 Water use, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol.17, pp.2375-2391, 2013.
- 6) 小槻峻司, 田中賢治, 小尻利治: 気候変動が日本の水資源に与える影響推計 (II) -水需給・米生産変化と適応策-, 水文・水資源学会誌, 第 26 巻, pp.143-152, 2013.
- 7) 萬和明, 藤園順哉, 立川康人, 椎葉充晴: 地表面水文過程に基づいた作物生長モデルの構築, 京都大学防災研究所年報, 第 53 号 B, pp.507-513, 2010.
- 8) Tanaka, K.: Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model, *doctoral dissertation*, Kyoto University, 2004.
- 9) Krysanova, V., Muller-Wohlfeil, D.-I. and Becker, A.: Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds, *Ecol. Model.*, Vol.106, No.2-3, pp.261-289, 1998.
- 10) Van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., Van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L. and Goudriaan, J.: On approaches and applications of the Wageningen crop models, *Europ. J. Agronomy*, Vol.18, pp.201-234, 2003.
- 11) Homma, K., Horie, T., Shiraiwa, T., Supapoj, N., Matsumoto, N. and Kabaki, N.: Toposequential variation in soil fertility and rice productivity of rainfed lowland paddy fields in mini-watershed (Nong) in Northeast Thailand, *Plant Prod, Sci6*, pp.147-153, 2003.
- 12) Homma, K., Horie, T., Shiraiwa, T., Sripodok, S. and Supapoj, N.: Delay of heading date as an index of water stress in rainfed rice in mini-watersheds in Northeast Thailand, *Field Crop, Res*, Vol.88, pp.11-19, 2004
- 13) Homma, K., Horie, T., Shiraiwa, T., Supapoj, N.: Analysis of rainfed rice yield in relation to toposenquence, nitrogen fertilization and transplanting time in a mini-watersheds in Northeast Thailand, 2005
- 14) 菊島宏太, 牧雅康, 田村正行: 水田におけるリモートセンシングを用いた LAI 推定と作物生長モデルの最適化, 日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, Vol.47, pp.205-206.
- 15) Mizuta, R., Yoshimura, H., Murakami, H., Matsueda, M., Endo, H., Ose, T., Kamiguchi, K., Hosaka, M., Sugi, M., Yukimoto, S., Kusunoki, S. and Kitoh, A.: Climate Simulations Using MRI-AGCM3.2 with 20-km Grid, *J. Meteor. Soc. Japan.*, Vol.90A, pp.233-258, 2012.

(2013. 9. 30 受付)