

## 地表面水文過程に基づいた作物生長モデルの構築

萬和明\*・藤園順哉\*・立川康人\*・椎葉充晴\*

\*京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

水資源管理上重要となる農業用水の把握を目的として、SWIM (Soil and Water Integrated Model) に組み込まれている作物生長モデルを既開発の陸面過程モデル SiBUC (Simple Biosphere including Urban Canopy) に組み込み、地表面水文過程に基づいた作物生長モデルを構築する。作物生長モデルでは気温と光合成有効放射 PAR (Photosynthetically Active Radiation) を入力とし、PAR に応じて増加するバイオマス量と、バイオマス量の関数で表現される葉面積指数 LAI (Leaf Area Index) を日単位で出力する。SiBUC で計算された PAR と、実蒸発散量と可能蒸発散量の比で定義する作物生長の水ストレス項を SWIM に与え、SWIM で計算された LAI を SiBUC に受け渡すことで両者を結合させ、地表面水文過程に基づいた作物生長モデルを構築した。

**キーワード**：地表面水文過程，作物生長モデル，陸面過程モデル，葉面積指数

### 1. 序論

今世紀は「水の世紀」と言われ、地球規模での水問題に注目が集まってきている。地球温暖化に起因して降水パターンが変化しつつあると指摘されており、局地的な洪水や渇水への対策、農業用水や生活用水の安定供給といった水資源管理の適応が急務となっている。Shiklomanov (2000) によると、現在、世界の水消費の 80% 以上が農業用水であり、Döll and Siebert (2002) によると、世界の食糧生産量の 40% 以上が灌漑農地で生産されていると推定されている。そのため、水資源問題に取り組むにあたり、農業用水、あるいは灌漑で消費される水量を正確に見積もることが不可欠であり、作物の成長過程を把握することが重要となる。

灌漑水量を推定するためのひとつの手法として、Yorozu et al. (2004) は陸面過程モデルを応用する手法を提案した。Yorozu et al. (2004) が用いた陸面過程モデルは、京都大学防災研究所で開発されてきた SiBUC (Simple Biosphere including Urban Canopy) (Tanaka, 2004) である。SiBUC はその名が示すように SiB (Simple Biosphere) (Sellers et al., 1986) をベースとしたモデルで、

植生の他に都市キャノピーと水体を考慮できるモデルである。また、SiBUC では、灌漑による水操作をモデル化しており、水田を地表面状態のひとつとして考慮できる。そこで Yorozu et al. (2004) は、灌漑操作をモデル化しているという SiBUC の特徴を活用し、作物を最適に生育させるために必要となる灌漑水量の全球分布を推定している。さらに萬ら(2006)は、陸面過程モデルの入力値である降水量、パラメータである植生指標、出力値である灌漑水量の相関分析から、気象変動に対する農業システムの耐性・脆弱性を指摘しうることを示している。

しかしながら、SiBUC では植生の季節変化は時間変化するパラメータで表現しており、作物も含めた植生全体の生長過程はそのパラメータに強く依存する。そのため、将来気候条件下での数値計算や気象条件などに対する感度実験に対して、植生の状態がどの程度変化するか、あるいは不変とするか、など、適切に条件設定する必要がある。

そこで本稿では、作物が時々刻々生長する過程を既開発の陸面過程モデルに組み込み、地表面水文過程に基づいた作物生長モデルを構築する。作物生長モデルが適用されれば、前述の問題が解消するだけ

Boundary Condition:  $T_m$   $e_m$   $u_m$   $F_{L,m(0)}$   $F_{t,d(0)}$   $P$   
 ●  $Z_m$  (Reference Height)

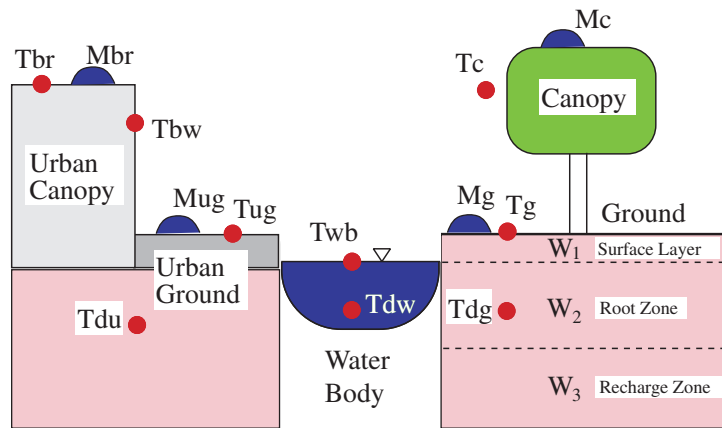


Fig. 1 Schematic image including prognostic variables of SiBUC

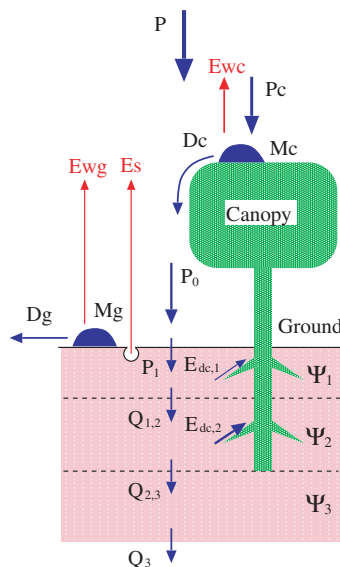


Fig. 2 Schematic image of water budget in vegetation sub model of SiBUC

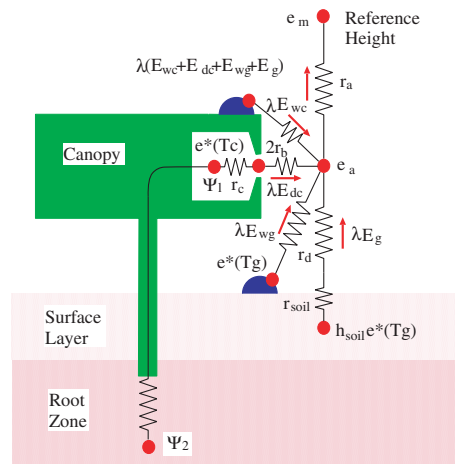


Fig. 3 Schematic image of latent heat fluxes transfer in SiBUC

でなく、水資源量のみならず作物生産量に関する議論も可能となる。

## 2. 陸面過程モデル SiBUC

### 2.1 概要

SiBUCはSiB (Simple Biosphere)をベースに開発されてきた陸面過程モデルである。SiBUCで表現される地表面要素は、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。FAO統計値 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, available at <http://faostat.fao.org/>)とTurner et al. (1993)によると、全

球規模で考えれば、陸域に占める都市・水体の割合は、それぞれ約1.8%、2.7%であり、植生割合に比べ都市・水体の割合は小さく、従来の陸面過程モデルでは都市や水体は表現されずに省略されてきた。しかし、都市・水体の水・熱収支特性は植生地とは全く異なるため、水・熱収支へ与える影響が小さいとは言いきれない。

そこで、陸面過程モデルの精度を向上させることを目的に、従来まで考えられてきた植生モデルに都市・水体の効果を加えたモザイクモデルとして開発されたのがSiBUCである。Fig. 1にSiBUCの概念図と予報変数を示す。

Table. 1 List of variables used in eq. (1)-(5)

Variable	Definition	Unit
$W_i$	soil moisture of $i$ th layer	–
$D_i$	soil depth of $i$ th layer	m
$\theta_s$	soil porosity	–
$\rho_w$	density of water	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho$	density of air	$\text{kg m}^{-3}$
$E_s$	direct evaporation from surface soil layer	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$E_{\text{dc},i}$	abstraction of soil moisture by transpiration	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$P_1$	infiltration of precipitation into surface soil layer	$\text{m s}^{-1}$
$Q_{i,i+1}$	water flow between soil layer	$\text{m s}^{-1}$
$Q_3$	gravitational drainage from recharge layer	$\text{m s}^{-1}$
$C_p$	heat capacity of air	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\gamma$	psychrometric constant	$\text{hPa K}^{-1}$
$e_*(T)$	saturated water vapor pressure on $T$	$\text{hPa K}^{-1}$
$W_c$	moistening ratio of canopy	–
$W_g$	moistening ratio of soil ground	–
$r_b$	bulk canopy boundary layer resistance	$\text{m s}^{-1}$
$r_c$	bulk canopy resistance	$\text{m s}^{-1}$
$r_d$	aerodynamic resistance between ground and canopy air space	$\text{m s}^{-1}$
$r_{\text{soil}}$	bare soil surface resistance	$\text{m s}^{-1}$
$h_{\text{soil}}$	relative humidity on soil surface	–

## 2.2 基礎式

SiBUCにおける大気境界条件は他の陸面過程モデルと同じである。すなわち、参照高度における気温、比湿、気圧、風速、降水量、短波放射量、長波放射量である。それらを入力値として、温度、遮断水分量、土壌水分量に関する支配方程式を解く。本稿では、主に議論の対象となる土壌水分量に関する支配方程式について以下に記す。

SiBUCでは土壌は3層で表現され、各層の土壌水分量はRichards式(Richards, 1931)によって表現されており、各層における支配方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial W_1}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_1} \left\{ P_1 - Q_{1,2} - \frac{1}{\rho_w} (E_s + E_{\text{dc},1}) \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_2} \left( Q_{1,2} - Q_{2,3} - \frac{E_{\text{dc},2}}{\rho_w} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial W_3}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_3} (Q_{2,3} - Q_3) \quad (3)$$

ただし、使用されている変数の説明は、式(4)、(5)で使用されている変数とともにTable. 1に示す。式(1)-(3)から、土壌水分  $W_i$  は、地表面からの土壌への浸透  $P_1$ 、土壌中の浸透  $Q_{1,2}$ 、 $Q_{2,3}$ 、基底流出  $Q_3$ 、地表面からの蒸発  $E_s$ 、蒸散に伴って根から吸い上げられる水分  $E_{\text{dc},1}$ 、 $E_{\text{dc},2}$  によって決定されることがわか

る。ここで、蒸発散量は、抵抗に反比例しポテンシャル差(水蒸気圧差)に比例する形で定式化されており、次のように表現されている。

$$\lambda E_s = \left( \frac{r_{\text{soil}} + r_d}{1 - W_g} \right)^{-1} \times \frac{\rho c_p}{\gamma} \left\{ h_{\text{soil}} e_*(T_g) - e_a \right\} \quad (4)$$

$$\lambda E_{\text{dc}} = \left( \frac{r_c + 2r_b}{1 - W_c} \right)^{-1} \frac{\rho c_p}{\gamma} \left\{ (e_*(T_c) - e_a) \right\} \quad (5)$$

ただし、使用されている変数の説明は、式(1)-(2)で使用されている変数とともにTable. 1に示す。なお、 $r_b$ 、 $r_c$ 、 $r_d$ については、計算時点での気象条件と植生の活性度合いを示すパラメータであるLAI(Leaf Area Index: 葉面積指数)に従って決定される。

SiBUCの植生モデルにおける水収支と潜熱フラックス輸送を概念的に図示すると、それぞれFig. 2, Fig. 3のようになる。

## 3. 作物生長モデル

### 3.1 概要

本稿では、作物生長モデルとして、水文植生水質統合型モデルSWIM (Soil and Water Integrated Model)

(Krysanova et al, 2000) で用いられている作物生長モデルを用いる。SWIM は数百から数万 km<sup>2</sup> の流域を対象とした分布型水文植生水質モデルである。蒸発散、表面流出、融雪過程などを含む水文過程、作物生長過程、窒素動態、土壌浸食、河道流出の5つのサブモデルから構成されている。

### 3.2 基礎式

SWIM における作物生長モデルでは、積算気温で作物の生育度合いを表現しており、光合成有効放射量の積算量からバイオマス量を推定している。

作物の生育段階  $I_s$  は次式で表される。

$$I_s = \frac{\sum_t \{T(t) - T_b\}}{P_h} \quad (6)$$

ここで、 $T(t)$  は日時  $t$  における日平均気温 [K]、 $T_b$  は作物の生長に必要な基準温度 [K]、 $P_h$  は作物が成熟するための積算温度 [K] である。

作物の総バイオマス量  $B_t$  [ $10^4$  kg m<sup>-2</sup>] は以下のように表される。

$$B_t = \sum_t B_e R_{pa} S_g \quad (7)$$

$$R_{pa} = 0.5 S_d \{1 - \exp(-0.65 I_1)\} \quad (8)$$

ここで、 $B_e$  はエネルギーとバイオマスの変換効率 [ $10^{10}$  J<sup>-1</sup> kg] で作物毎に固有の値であり、 $R_{pa}$  は光合成有効放射量 [ $10^6$  J m<sup>-2</sup>]、 $S_g$  は生長ストレス、 $S_d$  は短波放射量 [ $W$  m<sup>-2</sup>]、 $I_1$  は葉面積指数 LAI である。

LAI は  $0 \leq I_s \leq I_m$  では単調増加関数 (式9)、 $I_m \leq I_s \leq 1$  では単調減少関数 (式10) で表現される。ここで、 $I_m$  は作物が成熟し LAI が減少し始める段階を表す。

$$I_1 = \frac{I_m B_g}{B_g + \exp(9.5 - 0.0006 B_g)} \quad (9)$$

$$I_1 = 16 I_m (1 - I_s)^2 \quad (10)$$

ここで、 $I_m$  は作物毎に決定される LAI の最大値、 $B_g$  は地上のバイオマス量 [ $10^{-4}$  kg m<sup>-2</sup>] である。 $B_g$  は  $B_t$  と  $I_s$  の関数として表される。

$$B_g = \{1 - (0.4 - 0.2 I_s)\} B_t \quad (11)$$

### 3.3 生長ストレス

作物生長モデルでは、生長ストレス項を導入することにより、水不足や日照不足といった気象条件による作物生長の違いを考慮することが可能である。SWIM の作物生長モデルでは、生長ストレスとして、水分、気温、窒素、リンの4項目が考慮されている。本項では気象要素に着目し、水分と気温ストレスを扱う。

水分ストレス  $S_w$  は蒸発散量と可能蒸発散量の比で定義される。

気温ストレス  $S_t$  は、作物の生育に最適な温度  $T_o$  を定義し、 $T(t) \leq T_o$  の場合は式(12)で、 $T(t) > T_o$  の場合は式(13)を用いてそれぞれ求める。

$$S_t = \exp\left\{\ln(0.9) \left(\frac{T_o + T_b}{T_o - T_b} \times \frac{T_o - T(t)}{T(t)}\right)^2\right\} \quad (12)$$

$$S_t = \exp\left\{\ln(0.9) \left(\frac{T_o - T(t)}{2T_o - T(t) - T_b}\right)^2\right\} \quad (13)$$

## 4. 地表面水文過程に基づいた作物生長モデル

本稿では、陸面過程モデル SiBUC と水文植生水質統合型モデル SWIM の作物生長モデルとを結合し、地表面水文過程に基づいた作物生長モデルを構築する。以下にその手順を示す。

SiBUC に対する大気境界条件は、気温、比湿、気圧、風速、降水量、短波放射量、長波放射量である。このうち、短波放射量の可視波長成分 (SiBUC では短波放射量の半分として計算する) が光合成有効放射量である。また、式(4)、(5)から蒸発量、蒸散量が計算されるが、土壌水分が飽和状態にあるとしてこれらの式を解くことで、可能蒸発散量を求めることができる。

SWIM の作物生長モデルにおける入力気象要素は、日平均気温と短波放射量である。ただし、短波放射量は式(8)にしたがって光合成有効放射量に変換される。そこで、本稿で構築する作物生長モデルでは、光合成有効放射量は式(8)は使用せずに SiBUC で計算する値を用いる。さらに、作物生長の水分ストレス項は、SiBUC で計算される蒸発散量と可能蒸発散量の比で与える。作物生長モデルからは、バイオマス量から計算される LAI が SiBUC に与えられる。

## 5. 構築したモデルの適用例

### 5.1 対象地と使用するデータ

本節では、本稿で構築したモデルの適用例を示す。詳細な気象データを得ることができることから、対象地域を日本の農地に定める。モデルによる LAI 推定値の検証のためには、広大な農地が展開している地域が適切であるので、本稿では新潟県の水田地帯を対象とする。新潟県では、概ね5月中旬に田植えを実施し、9月中旬に収穫することが知られている。

入力する気象データは、新潟気象台の観測値から、椎葉ら (1999) が提案した手法に基づいて作成する。対象とする期間は2003年から2007年である。LAI 推定値の検証には、MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) センサから得られる推定値を用

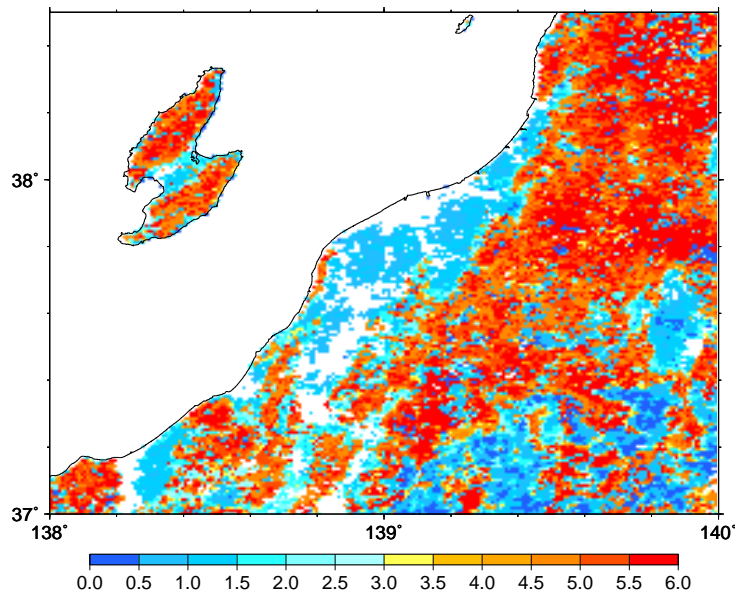


Fig. 4 Leaf Area Index around Niigata prefecture

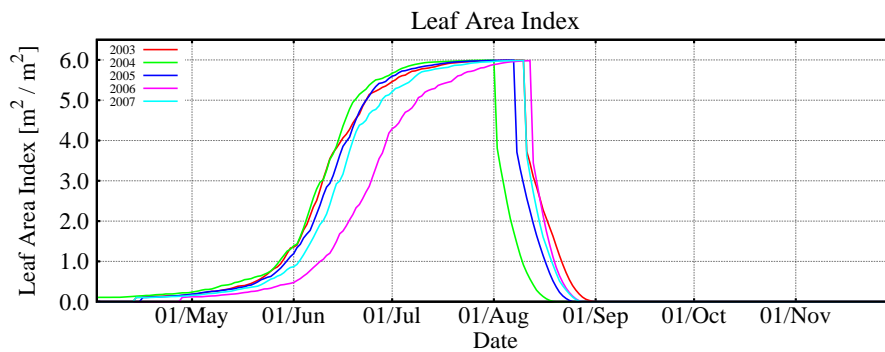


Fig. 5 LAI estimation using original parameter derived from user manual

いる。本稿では Terra 衛星と Aqua 衛星に搭載された MODIS センサから得られた LAI 推定値の 8-days composite である MCD13A2 プロダクト（空間解像度 1km）を使用する。ただし、プロダクトの作成過程では、土地利用として水田が考慮されていないため、解析時には注意が必要である。モデルの適用に先立ち、国土地理院の国土数値情報を元に新潟気象台近辺で水田が広がっている地点を特定し、北緯 37 度 55.6 分、東経 139 度 16.7 分の地点における LAI の衛星推定値を検証に用いる。Fig. 4 に、新潟県付近における LAI の分布を示す。

## 5.2 オリジナルパラメータを用いた適用例

3.2 項で述べたように、SWIM では作物の生長を表現するために複数のパラメータを設定する必要がある。本節では、SWIM の User Manual に記載されているパラメータ (Krysanova et al., 2000) を用いて LAI を推定した。具体的には、作物の生長に必要な基準温

度  $T_b = 283.15$  [K]、作物が成熟するための積算温度  $P_h = 1500$  [K]、エネルギーとバイオマスの変換効率  $B_e = 25$  [ $10^{10} \text{ J}^{-1} \text{ kg}$ ]、作物が成熟し LAI が減少し始める段階  $I_m = 0.8$ 、LAI の最大値  $I_{lm} = 6.0$ 、作物の生育に最適な温度  $T_o = 293.15$  [K] である。これらの値を用いて推定した LAI の結果を Fig. 5 に示す。同図で、線色の違いは年による違いを表している。

同図より、LAI のモデル推定値は 5 月中旬以降に大きく増加していることから、作物の生長開始時期については妥当な結果が得られた。しかしながら、LAI 推定値は 7 月下旬から 8 月上旬にかけてピークに達しており、成熟時期が早く推定されていることが分かる。加えて、ピークに達した後、LAI は急激に減少し 1 ヶ月程度の期間で 0 になる様子がみとれるが、実際は 2 ヶ月程度の期間で減少していく。これらは、作物生長モデルのパラメータを調整することで改善が見込まれるため、次項でパラメータの再設定を実施する。

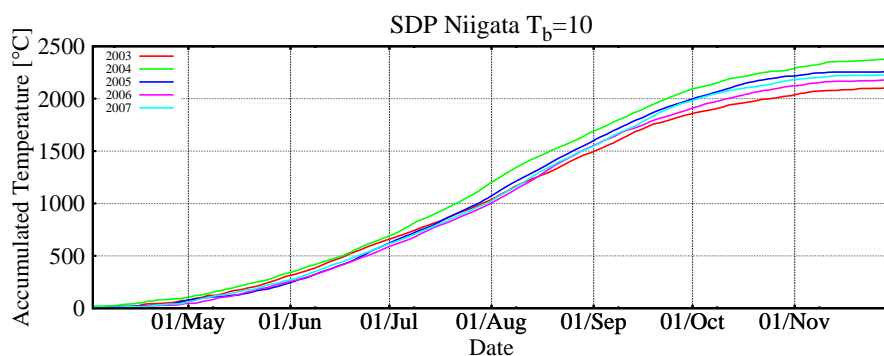


Fig. 6 Accumulated daily average temperature more than 10 °C

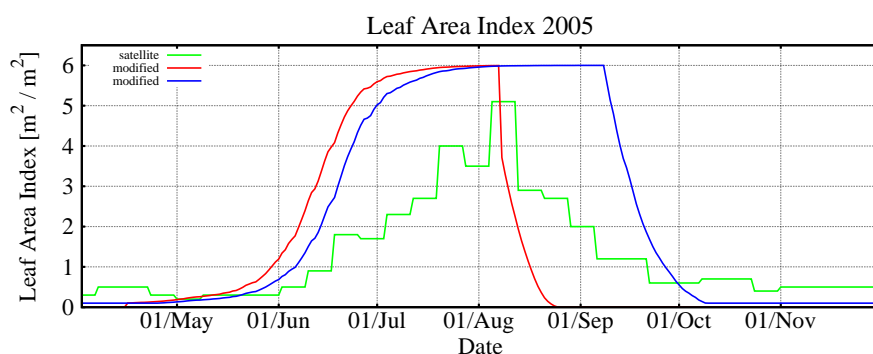


Fig. 7 LAI estimation using improved parameter

### 5.3 パラメータの再設定

LAIがピークに達するまでの時間に関するパラメータは $P_h$ ,  $I_m$ , そして $B_e$ である。Fig. 6に、解析対象期間における日平均気温が $T_b$ 以上の積算温度を示す。本稿では、 $I_m$ と $B_e$ はSWIMのUser Manualの値を用い、LAIモデル推定値のピーク時期が9月中旬となるように $P_h$ の値を調整することとした。Fig. 6から、9月上旬から中旬の積算温度の値に基づいて、 $I_s = I_m$ において積算温度が1700 [K]となるよう、 $P_h = 1700/I_m$  [K]とした。また、式(9)と式(10)の不連続性を解消するために、式(10)における $I_m$ はパラメータとして与えるのではなく、 $I_s = I_m$ において式(9)で推定されるLAIの値を与える。

以上のように修正したパラメータならびに基礎式を用いて、LAIを再推定した結果がFig. 7である。同図は2005年を対象に、衛星推定値を緑線で、パラメータにSWIMのUser Manualの値を用いた推定結果を赤線で、修正したパラメータを用いた推定結果を青線で、それぞれ示している。同図から、LAIのピーク時期が9月以降となり、また、LAIの減少速度が緩やかになっていることがわかる。紙面の都合上、2005年の結果のみを示すが、他の年でも同様に良好なLAIの推定結果が得られている。なお、5.1で述べたよう

に、本稿の事例では衛星推定値は植生の季節変化を適切にできていないことがわかる。

### 6. 結論

本稿では、陸面過程モデルSiBUCと水文植生水質統合型モデルSWIM (Soil and Water Integrated Model)の作物生長モデルとを結合させ、地表面水文過程を考慮した作物生長モデルを構築した。

両モデルの結合は、SiBUCで計算される蒸発散量と可能蒸発散量の比を作物生長の水分ストレス項として、また、光合成有効放射量を気象入力として作物生長モデルに与え、作物生長モデルは受け取った値を基にLAIを計算しSiBUCに渡すことで実現している。

構築した結合モデルを日本の新潟県の水田を対象に適用したところ、SWIMのオリジナルパラメータを用いる場合には、LAIの推定精度は十分ではなかった。そこで、作物生長モデルの基礎式を修正し、パラメータのチューニングを実施したことで、精度よいLAIモデル推定値を得ることができた。

今後の課題としては、作物生長モデルによって推定されるバイオマス量を収穫量に換算し、作物収穫

量への応用を目指すこと、他の地域や他の作物へ適用することなどが挙げられる。

### 謝辞

京都大学大学院工学研究科 Kim Sunmin 講師には深い議論を通して有意義なコメントをいただきました。

### 参考文献

- 椎葉充晴, 立川康人, 田中賢治, 市川温, 金澤瑞樹: 大気・陸面過程モデルと山腹斜面水文モデルの結合, 京都大学防災研究所年報, 第42号, pp.169-176, 1999.
- 萬和明, 田中賢治, 池淵周一: 全球灌漑要求水量と降水量の相関分析, 水工学論文集, 第50巻, pp.535-540, 2006.
- Döll, P., and S. Siebert: Global modeling of irrigation water requirements, *Water Resour. Res.*, Vol.38, No.4, pp.8.1-8.10, 2002.
- Krysanova, V., D-I Muller-Wohlfeil, A. Becker: Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds., *Ecol.Model.*, Vol.106, pp.261-289, 1998.

- Krysanova, V., F. Wechsung, J. Arnold, R. Srinivasan and J. Williams: SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual, 2000.
- Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud, and A. Dalcher: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, *J. Atmos. Sci.*, Vol.43, pp.505-531, 1986.
- Shiklomanov, I. A.: Appraisal and assessment of world water resources, *Water Int.*, Vol.25, pp.11-32, 2000.
- Tanaka, K. (2004): Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model, doctoral dissertation, Kyoto University.
- Turner, B.L., R. H. Moss and D. L. Skole (1993): Relating Land Use and Global Land-Cover Change: A Proposal for an IGBP-HDP Core Project, *IGBP Report*, No. 24.
- Yorozu, K., K. Tanaka, S. Ikebuchi (2005): Creating a global 1-degree dataset of crop type and cropping calendar through the time series analysis of NDVI for GSWP2 simulation considering irrigation effect, Proc. of 85th AMS Annual Meeting, 19th conference of Hydrology, 6.8 (CD-ROM).

## Development of Crop Growth Model Based on Land Surface Hydrological Processes

Kazuaki YOROZU\*, Jyunya FUJIZONO\*, Yasuto TACHIKAWA\* and Michiharu SHIIBA\*

\*Graduate school of engineering, Kyoto University

### Synopsis

Land surface scheme (SiBUC: Simple Biosphere including Urban Canopy) is applied to discuss water resources vulnerability by previous studies. In these studies, it is important to assess crop growth state because agricultural water use is dominant to total water consumption whole the world. To describe crop growth by numerical simulation, we develop and introduce crop growth model into land surface scheme. Introduced crop growth model (SWIM: Soil and Water Integrated Model) is able to estimate the state of crop growth and calculate LAI seasonal and inter-annual variation. PAR (Photosynthetically Active Radiation) which is input data for SWIM is calculated by SiBUC considering the reflection, transmission, absorption and emission of direct and diffuse radiation in the visible wavelength intervals. The ratio of evapotranspiration to potential evapotranspiration which is time-varying parameter for SWIM is also calculated by SiBUC considering transfer of the soil moisture to the atmosphere through the root-stem-leaf system of the vegetation. Exchanging PAR, potential evapotranspiration, evapotranspiration and LAI, connection SiBUC with SWIM is achieved.

**Keywords:** Land Surface Processes, Crop Growth Model, Land Surface Scheme, Leaf Area Index