

熱帯水田への SiB2 の適用と 水田スキームの導入

APPLICATION OF SIB2 TO A TROPICAL PADDY FIELD AND INCLUSION OF WATER BODY

新井 崇之*・金 元植†・沖 大幹‡・虫明 功臣§

Takashi ARAI, Wonsik KIM, Taikan OKI and Katumi MUSIAKE

*学生会員 東京大学工学系研究科社会基盤工学専攻 修士2年 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

† 博士 (農学) 東京大学生産技術研究所 博士研究員 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

‡正会員 博士 (工学) 東京大学生産技術研究所 助教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

§正会員 工学博士 東京大学生産技術研究所 教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

SiB2, one of the newest Land Surface Models was applied to observational data at a tropical paddy field. Under the case of small Leaf Area Index (LAI), latent heat flux (LE) was underestimated. Because under smaller LAI, evapotranspiration mainly occurs at land or water surface but not at the top of the canopy. Further, surface water is easily lost and evaporation decreases because of low capacity of surface water in SiB2. In order to make up for these defects, SiB2-Pad in which water body is taken into account was developed and applied. As a result, the simulation of the latent heat flux was improved significantly. Ground surface temperature was estimated fairly well, but during nighttime, water temperature was underestimated. Canopy temperature was also lower than observation during nighttime. As a result, slight underestimation of LE in the morning was not improved. Additionally, canopy temperature was sometimes overestimated in the simulations, that caused underestimation of LE. In order to avoid the underestimation, it was necessary to adjust a parameter representing dependency of stomatal-conductance on leaf temperature.

Key Words : land surface model, leaf area index, paddy field, canopy temperature, heat flux

1. はじめに

近年大陸スケールの地表面の乾湿が1ヶ月や2ヶ月といった中期の気象予測やアジアモンスーンの強弱の年々変動などに影響を持つことが数値実験などによって指摘されている。これを大気大循環モデル (GCM) で適切に再現、予測するためには、地表面におけるエネルギー・水収支を計算する陸面植生水文モデル (LSM) の精度を向上させることが必要であるとの認識が高まっている。SiB2¹⁾は最新のLSMのひとつであり、植物群落による二酸化炭素と水の伝達過程を現実的に表現するための光合成・気孔抵抗スキームが含まれており、植生の季節変化を考慮するため人工衛星データ (normalized difference vegetation index : NDVI) を利用していることに特徴がある。さらに、キャノピー及び土壌における水文過程と、雪面における融雪過程をより現実的に表現している。

ここでは、このSiB2を用いて、アジアモンスーン地域の地表面の熱、水収支を再現することを考える。ア

ジアモンスーン地域では土地利用において水田の占める割合が大きい。SiB2においては水田はC3植物の耕地として分類されており、水体による貯留熱が無視され、また土壌表層の乾燥によって蒸発が過小評価されるなど熱収支が適切に表現されないであろうと予想される。そこで本研究ではタイの水田における観測データを参照しSiB2のパフォーマンスを検証する。また必要であれば水田に対応できるようにSiB2の改良を試みることにする。

2. オリジナル SiB2 の熱帯水田への適用

(1) 熱帯水田における観測データ

観測対象となったスコタイ水田はタイ国のチャオプラヤ川流域の中流部 (経度: 99.7°E、緯度: 17.1°N、標高: 50 m) に位置しており、標高が低く灌漑されていない天水田地帯の一画である。この水田観測基地は、スコタイ市街から約西7kmに位置しており、南北に長い長方形 (約100m×36m) に区画整理されている。また、

10 m 以下の高さの孤立木が所々にあるものの平坦で同様に区画整理された天水田が広がっている。今回検証に用いたのは、1998 年 8 月 1 日から同年 10 月 31 日までのデータである。この付近では、種まきが 6 月末に行なわれており、葉面積指数 (LAI) に関しては、8 月の平均値が 1、9 月が 3、10 月が 5 程度であった。

SiB2 の計算に用いた外力データに関しては、短波放射量 (I_s , W m^{-2})、正味放射量 (R_n , W m^{-2}) は植物群落の平均高さから 2m 上部に設置された精密全天日射計 (MS - 62, 英弘精機)、放射収支計 (MF - 40, 英弘精機) の観測データを使用した。また、気温 (T_a , K)、水蒸気圧 (e_a , Pa)、風速 (u , m s^{-1}) は、植物群落の平均高さから 8m 上部に設置された通風乾湿計 (熱電対を用いて自作したもの) 及び風車型風向風速計 (KDC - S4, コーナシステム) の観測データを用いた。降水量 (P , mm) は転倒ます型雨量計により観測したが、計器の故障のためにデータが得られなかった。そのため、水深の変動データを参照して雨の降っていない時期を抽出し、その期間において計算を行うことにした。

SiB2 の算定結果を比較検証するための熱フラックスデータに関しては、地中熱流量 (G , W m^{-2}) は土壌表面下 0.01m に設置された熱流計 (MF - 81, 英弘精機) の測定値を用い、潜熱フラックス (LE , W m^{-2})、顕熱フラックス (H , W m^{-2}) は、植物群落の平均高さから 1m と 8m 上部に設置された通風乾湿計による 2 高度における温度差 (ΔT , K) と水蒸気圧差 (Δe , Pa)、 R_n 、 G の観測値、水温、水深観測値より求めた水体による貯留熱から熱収支ボーエン比法により算出した。また各層の温度データについては、キャノピー温度 (T_c , K) として赤外線温度計 (BA04T, オプテックス) による測定値、地温 (T_g , K)、水温 (T_w , K) は熱電対による測定値を用いた。

各観測データは 10 分間隔で観測した値であり、計算値との比較にはこれを平均した値を用いている。

(2) SiB2 の適用

LAI に関して小さい時期 (LAI=1) と大きい時期 (LAI=5) について SiB2 による計算を行った。計算期間は、1998 年 8 月 24 日から 31 日と 10 月 18 日から 30 日である。初期条件は、温度は観測値を利用し、土壌水分量は水田に水が存在した 8 月 24 日、10 月 18 日を計算の初日に選んだため、各層が飽和状態であるとした。空気力学的パラメータは植生の種類、成長度、気象条件等に依存するため、観測データ等を利用して求める必要があるが、LAI=5 の時期の値には、LAI=6.2 の小麦における値²⁾を用い、LAI=1 の時期の値には、SiB2 で用いられている空気力学モデルの算定値を用いた。

まず、LAI=1 の時期の算定結果を示す。図 1 は 8 月

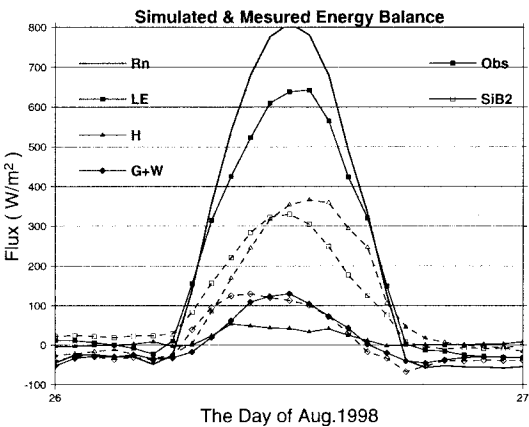


図-1 スコタイ水田 (LAI=1) におけるエネルギー収支の日変化の SiB2 算定値と観測値との比較、W:水体による貯留熱 (1998 年 8 月 26 日)

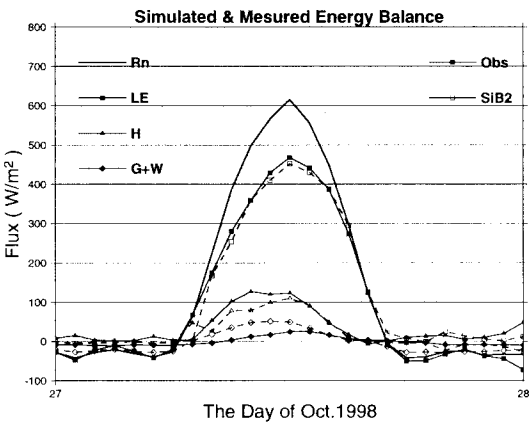


図-2 スコタイ水田 (LAI=5) におけるエネルギー収支の日変化の SiB2 算定値と観測値との比較 (1998 年 10 月 27 日)

26 日における熱フラックス算定値と観測値との比較である。各項目ごとに観測値は黒のぬりつぶし、算定値は白ぬきで示している。潜熱 (LE) 算定値は観測値と比べかなり小さく、顕熱 (H) 算定値はかなり大きい。オリジナルの SiB2 では地表面貯留の容量が小さいため、現実には貯留されているはずの水が表面流出として失われるように計算されてしまう。LAI の小さい時期はエネルギー、水の交換が主に地表面で行われるため、地表面からの蒸発が大きく、わずかな地表面貯留水はすぐに無くなり、土壌表層の乾燥が進むことになる。そのため地表面からの蒸発が減少し、潜熱が減少する。26 日は計算開始より 3 日目であるが、土壌表層の湿潤度の算定値は 0.45 から 0.30 であり土壌表層は乾燥した状態になっていた。

次に LAI=5 の時期の計算であるが、LAI=1 の時期で抽出した 8 月 26 日のように、蒸発により土壌表層が乾燥した状態になった 10 月 27 日を抽出して算定結果を示す。27 日の土壌表層の湿潤度の算定値は 0.55 から

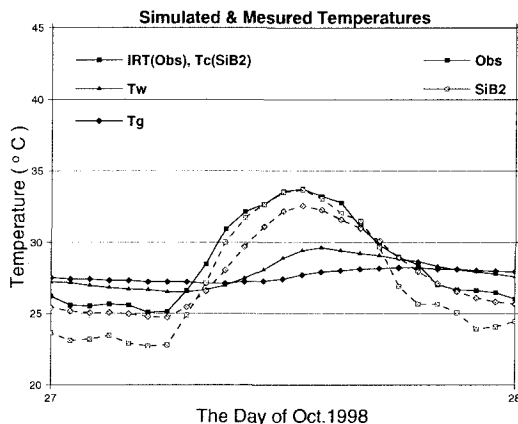


図-3 スコタイ水田 (LAI=5) における各層の温度の日変化のSiB2算定値と観測値との比較、 T_c :キャノピー温度、IRT:赤外放射温度計による地表面温度、 T_w :水温、 T_g :土壌表層の温度 (1998年10月27日)

0.51であった。図2は熱フラックス算定値と観測値との比較であるが、算定結果は良好である。算定値は、明け方に lE が小さく、 H が大きい時間が見られた。また午前中に H がやや小さく、地中熱フラックス(G)がやや大きい。図3は温度算定値と観測値との比較である。計算では表面貯留水がなく、水体による表面温度変化の抑制効果がないために、地温が大きく変動している。そのため G が大きくなっている。キャノピー温度算定値は、日中は観測値(IRT:赤外放射温度計による表面温度)に近いが、夕方から明け方にかけてやや小さい。夜間は熱フラックスがほぼ0であり、算定値と観測値とのずれによる影響はほとんど見られないが、午前中における算定値の過小評価が潜熱の過小評価、顕熱の過大評価に対応していると考えられる。LAI=5の場合がLAI=1の場合と比較して lE 、 H のずれが小さいのは、エネルギー、水の交換が主にキャノピー層で生じ、潜熱全体に占める地表面からの蒸発の割合が小さくなっているためであると考えられる。

3. 水田スキームの導入

以上より、地表面の影響の大きいLAIが小さい時期に、オリジナルのSiB2では熱フラックスの日変化を適切に再現できないことがわかった。そこでSiB2に水田スキームを組み込み水田対応モデル(SiB2-Pad)を構築した。まず地表面の水の貯留容量を大きくし、モデルが現実の水の貯留量を再現できるようにした。また、貯留水の水深が土壌表層と比べそれ以上の厚さを持つため、水体の温度を土壌表層の温度から独立した温度とした。水体の温度を導入することで水体による貯留熱が算定できるようになった。

図4に水体の有無による地表面エネルギー収支の違い

いを模式的に示したが、水体がある場合は、水体によって熱が貯留され、地温でなく水温によって熱フラックスが計算される。

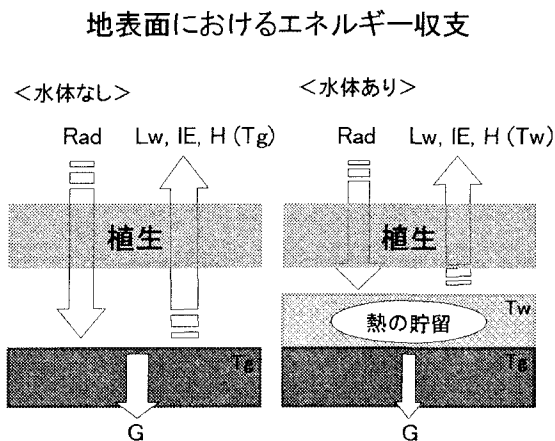


図-4 水体の有無による地表面エネルギー収支の違い、Rad: 地表面に入る正味放射、 L_w , lE , H : 地表面からの長波放射、潜熱、顕熱、 G : 地中熱フラックス、 T_w , T_g : 水温、土壌表層の温度

(1) 熱収支式の改良

オリジナルのSiB2における熱収支の計算は、熱的にはキャノピー層、土壌表層(表面貯留を含む)の2層になっており、各層に入る正味放射から潜熱、顕熱等の熱フラックスを差し引いた分が各層の温度上昇に使われる、という扱いになっている。

SiB2-Padでは、1層の土壌表層とは独立した温度の水体を加えた。田はかなり濁っていたため上からの短波、長波放射は水体で完全に吸収されると仮定した。対象とした水田は天水田であり、水の流れはほとんど見られなかったため、水の流れによる熱の移流は無視した。改良後の熱収支式は以下になる。

$$\begin{aligned}
 C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} &= Rn_c - H_c - lE_c - \xi_{cs} \\
 C_w D_w \frac{\partial T_w}{\partial t} &= Rn_w - H_w - lE_w - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \\
 C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} &= Rn_g + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{2\pi C_d}{\tau_d} (T_g - T_d) - \xi_{gs} \\
 Rn_c &= S \downarrow_c + L \downarrow_c - 2\sigma T_c^4 V \delta t + \sigma T_w^4 V \delta t \\
 H_c &= \rho C_p \frac{(T_c - T_a)}{r_b} \\
 lE_c &= \frac{\rho C_p}{\gamma} (e^*(T_c) - e_a) \left(\frac{1 - W_c}{r_c + 2r_b} + \frac{W_c}{2r_b} \right) \\
 Rn_w &= S \downarrow_w + L \downarrow_w + \sigma T_w^4 V \delta t - 2\sigma T_w^4 + \sigma T_g^4 \\
 H_w &= \rho C_p \frac{(T_w - T_a)}{r_d}
 \end{aligned}$$

$$lE_w = \frac{\rho C_p (e^*(T_w) - e_a)}{\gamma} \frac{r_d}{r_d}$$

$$Rn_g = \sigma T_w^4 - \sigma T_g^4$$

ただし、 T_c ：キャノピーの温度、 T_w ：水体の温度、 T_g ：地表面温度、 T_d ：土壌深層の温度、 C_i ：各層の熱容量、 Rn_i ：各層で吸収される正味放射、 H_i ：顕熱、 lE_i ：潜熱、 λ ：水体土壌間の熱伝導率、 τ_d ：1日、 ξ_{is} ：雪の融解熱、 σ ：ステファン＝ボルツマン定数、 V ：植生の被覆率、 δt ：植生の熱赤外線吸収率、 $S_{\downarrow i}$ ：各層で吸収される短波放射、 $L_{\downarrow i}$ ：各層で吸収される長波放射、 ρ ：空気の密度、 C_p ：定圧比熱、 γ ：乾湿計定数、 e_a, T_a ：キャノピー内空気の水蒸気圧、気温、 e^* ：飽和水蒸気圧、 r_d ：地面とキャノピー内空気との空気力学的抵抗、 r_b ：キャノピー境界層の抵抗、 W_c ：キャノピーの湿潤率。

水体と地表面の間の熱伝導の項は次の様にした。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = -\lambda \frac{T_w - T_g}{(D_w + D_1)/2}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_{water} * D_w + \lambda_{soil} * D_1}{D_w + D_1}$$

ただし、 λ_{water} ：水の熱伝導率、 λ_{soil} ：土壌の熱伝導率、 D_w ：水深、 D_1 ：土壌表層の厚さ。

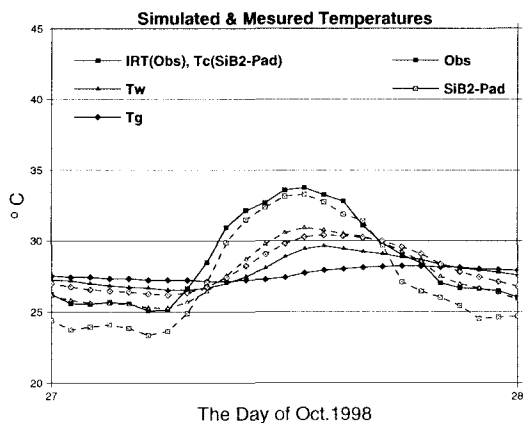


図-5 スコタイ水田 (LAI=5) における各層の温度の日変化の SiB2-Pad 算定値と観測値との比較、 T_c ：キャノピー温度、IRT：赤外放射温度計による地表面温度、 T_w ：水体の温度、 T_g ：土壌表層の温度 (1998 年 10 月 27 日)

図 5 は改良モデルによる 10 月 27 日 (LAI=5) の各層の温度算定値と観測値の比較である。算定値では水温と地温の差がやや小さいが、この差のずれは水温算定値の観測値とのずれと関係していることも考えられる。また差のずれが顕著でないことより、上記のモデルをそのまま利用した。

4. SiB2-Pad(水田対応モデル) の適用

オリジナルの SiB2 による計算と同時期 (LAI=1、LAI=5) のデータについて、SiB2-Pad による計算を行った。入力パラメータは、空気力学モデルによって求めた LAI=1 の時期の空気力学パラメータについては、水面の粗度を入力して再計算した値を用いたが、その他はオリジナルの SiB2 に用いたものと同様のパラメータを用いた。

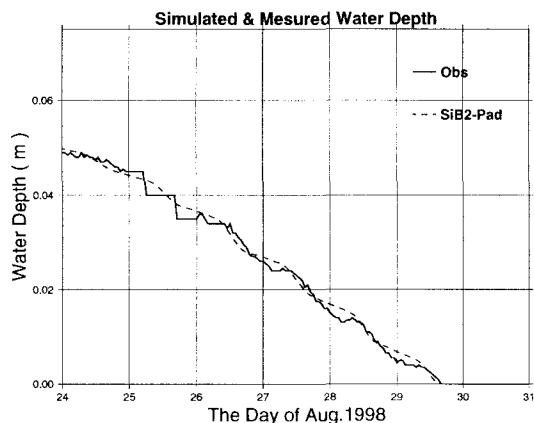


図-6 スコタイ水田における水深変化の SiB2-Pad 算定値と観測値との比較

図 6 は SiB2-Pad による水深算定値と観測値との比較である。主に日中に蒸発によって減少する日変動が良好に再現されており、蒸発量の算定結果も良好であることが確認できる。

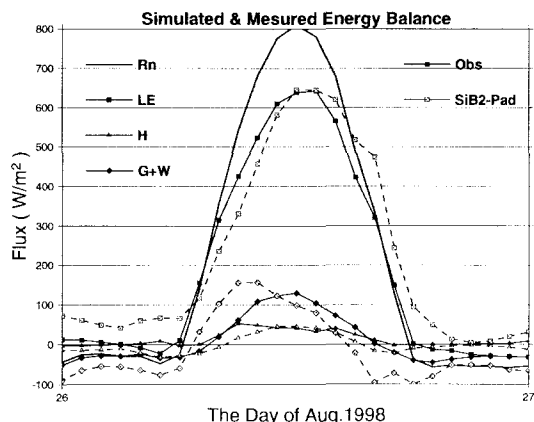


図-7 スコタイ水田 (LAI=1) におけるエネルギー収支の日変化の SiB2-Pad 算定値と観測値との比較 (1998 年 8 月 26 日)

図 7 は 8 月 26 日 (LAI=1) における熱フラックス算定値と観測値との比較であるが、オリジナルの SiB2 による算定値 (図 1) と比べ lE 、 H が観測値に近い。また lE が夜間にやや大きなプラスである。 G 、 W を分離してみると (図 8)、 G 算定値は夜間にやや大きなマイナ

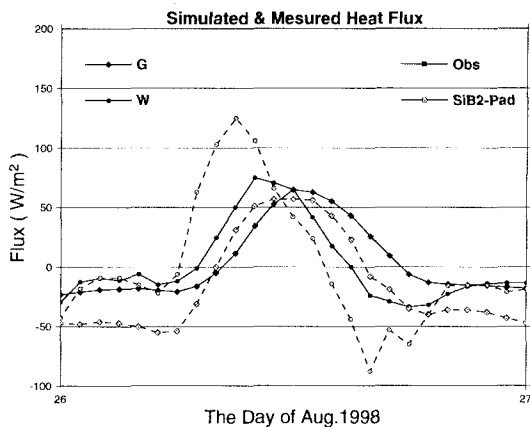


図-8 スコタイ水田 (LAI=1) における地中熱フラックスと水体による貯留熱 (W) の日変化の SiB2-Pad 算定値と観測値との比較 (1998 年 8 月 26 日)

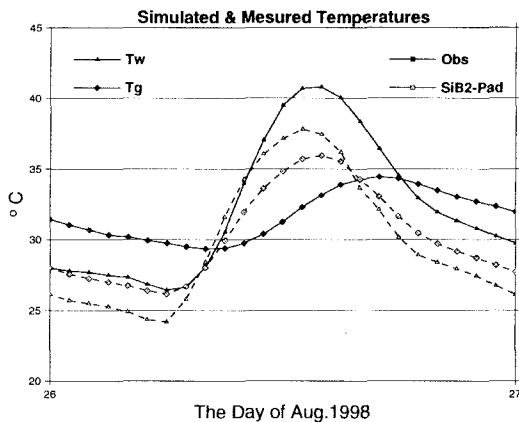


図-9 スコタイ水田 (LAI=1) における各層の温度の日変化の SiB2-Pad 算定値と観測値との比較、 T_w : 水体の温度、 T_g : 土壌表層の温度 (1998 年 8 月 26 日)

スであり、 W 算定値は変動が大きい。夜間における LE のやや大きなプラスと G のやや大きなマイナスは、計算の中で夜間に土壌の熱が失われ、水面からの蒸発に使われていることになる。

図 9 は同時期における各層の温度算定値と観測値との比較である。新たに導入した水温算定値は変動がやや大きく、全体的に低めである。この水温算定値の変動のずれが、 W 算定値のずれに関係している。地温算定値は変動がやや大きい、日中の G の算定値は観測値と近い。

図 10 は 10 月 27 日 (LAI=5) における熱フラックス算定値と観測値との比較であるが、オリジナルの SiB2 による算定値 (図 2) とほとんど一致している。図 5 に各層の温度算定値と観測値との比較を示しているが、水温算定値は観測値と比べ変動が大きい、水面からの熱フラックスの算定に使われる温度としてはオリジナルの SiB2 における T_g (図 4) より観測値 (T_w) に近づいている。

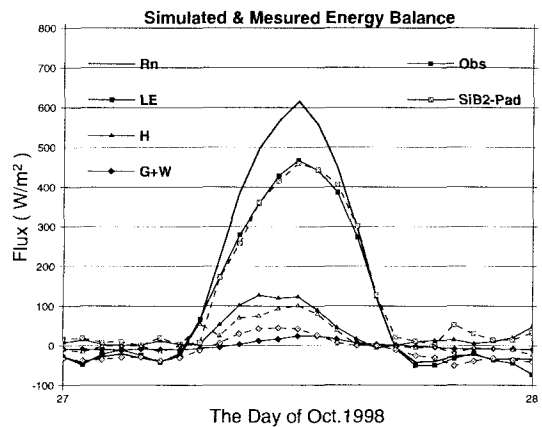


図-10 スコタイ水田 (LAI=5) におけるエネルギー収支の日変化の SiB2-Pad 算定値と観測値との比較 (1998 年 10 月 27 日)

(1) SiB2-Pad の評価

SiB2-Pad を適用することで、LAI=1 の時期においても観測値に近い熱フラックスを算定できるようになった。水温を独立に計算することで、水体に貯留される熱 (W) を地中熱フラックスとは別に算定できるようになったが、図 5、図 9 のように水温算定値の変動がやや大きく W はやや大きく算定されることとなった。しかし、顕熱、潜熱フラックス等の観測値の誤差は $\pm 10\%$ 程度であり、 W 算定値の誤差はエネルギー収支としては誤差と同様の大きさである。

(2) その他の観測データに対する SiB2-Pad の適用

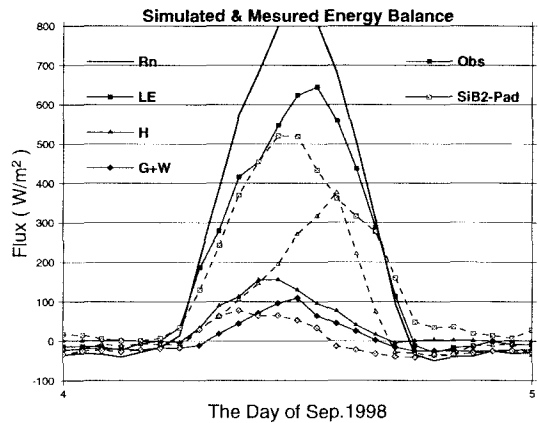


図-11 スコタイ水田 (LAI=3) における熱収支の日変化の SiB2-Pad 算定値と観測値との比較 (1998 年 9 月 4 日)

さらに、LAI=3 程度であった 1998 年 9 月 4 日について SiB2-Pad を適用した結果を図 11 に示す。午後に LE の算定値が小さくなり、 H の算定値が大きくなっている。また図 12 は各層の温度の算定値と観測値との比較であるが、 LE の算定値が小さい午後にキャノピー温度の算定値が、35 度をこえて高い値になっている。す

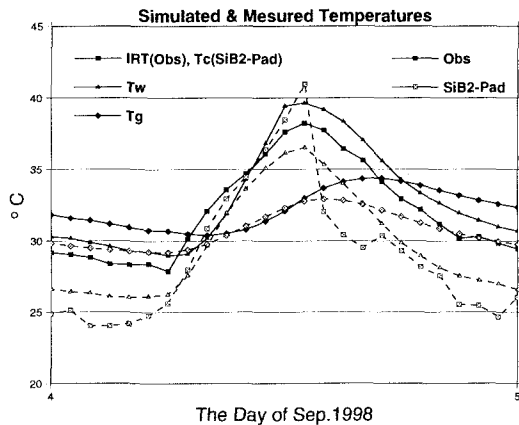


図-12 スコタイ水田 (LAI=3) における各層の温度の日変化の SiB2-Pad 算定値と観測値との比較、 T_c :キャノピー温度、IRT:赤外放射温度計による地表面温度、 T_w :水体の温度、 T_g :土壌表層の温度 (1998 年 9 月 4 日)

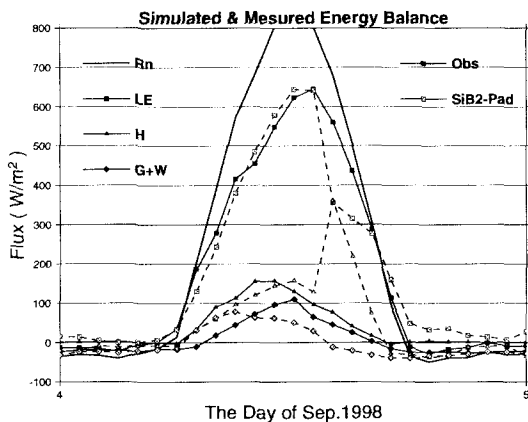


図-13 スコタイ水田 (LAI=3) における熱収支の日変化の SiB2-Pad 算定値 (気孔抵抗が最小になる温度=40 度) と観測値との比較 (1998 年 9 月 4 日)

なわち LE の算定値が小さいのは、葉温がある値を越えて上昇した時に気孔抵抗が増大するメカニズムが SiB2 内で働き、蒸散が抑制されたためと考えられる。SiB2 では葉温としてキャノピー温度を利用しているが、これは葉温の平均温度であり、上層の葉の蒸散機能が落ち、下層の機能が維持されている場合には、たとえ葉温の平均値が正確に再現されていたとしても、蒸散量を小さく見積もってしまうことが考えられる。またモデルにおいてキャノピー温度を正確に再現できず、実際と比べ大きく計算された場合においても蒸散量が小さく見積もられてしまうことが考えられる。このような葉温における計算値のずれを補うためには、葉温依存性の制限を緩くするのが適当と考えられる。葉温依存性に関する係数に s_2 がある。 s_2 は気孔抵抗が最小になる葉面の温度であり、葉温が s_2 を越えると気孔抵抗は増加する。したがって、葉温の算定値が実際の葉温を上回り s_2 を越えた場合に、計算される気孔抵抗が実際より

り大きくなってしまいます。水稻が分類される耕作地の C3 植物における値は、 $s_2=35^{\circ}\text{C}$ であるが、葉温依存性の制限を緩めるために、 $s_2=40^{\circ}\text{C}$ に設定し計算した。その結果が図 13 である。 LE 、 H とともに観測値により近い結果が得られていることがわかる。

5. まとめ

熱帯水田に SiB2 を適用したが、LAI の小さい時期はエネルギー、水の交換が主として地表面で行われるため、窪地貯留程度の小さな貯水容量しか計算できないオリジナル SiB2 では、地面が乾燥し潜熱が過小評価されることがわかった。水体を考慮した SiB2-Pad を開発して適用した結果、潜熱の過小評価が解消され、熱フラックス算定値が観測値に近くなった。また、明け方に潜熱が小さく顕熱が大きく算定される時間が見られた。この時間はキャノピー温度算定値が低めであり、それによるずれではないかと考えられる。水温算定値は観測値と比べやや変動が大きく、絶対値も異なる場合が見られた。それによって、水体による貯留熱がやや大きく算定された。

またモデルにおいてキャノピー温度が実際より大きく計算された場合、モデルにおける葉温依存性の効果によって、潜熱が抑制され顕熱が大きくなる結果がみられたが、それを防ぐためには葉温依存性のパラメータを調整する必要があることがわかった。

謝辞： 本研究は文部省科学研究費『グローバルな陸面水収支算定値の検証とデータベースの構築』（代表:東京大学生産技術研究所、沖 大幹）ならびに日本学術振興会 未来開拓研究推進事業『環境負荷の影響評価と軽減』（代表:東京大学生産技術研究所、虫明功臣）の成果の一部である。またタイ、スコタイ水田の観測データは特定領域研究 (B) 『熱帯エネルギー/水循環過程』（代表:東京大学生産技術研究所、虫明功臣）(GAME-T) において東京農工大学の青木正敏先生らが観測、取得されたデータを利用しました。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) P. J. Sellers, D. A. Randall, G.J. Collatz, J. A. Berry, C. B. Field, D. A. Dazlich, C. Zhang, G. D. Collelo, and L. Bounoua. A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMs. Part 1: Model Formulation. *J. Climate*, Vol. 9, pp. 676-705, 1996.
- 2) P. J. Sellers and J. L. Dorman. Testing the Simple Biosphere Model (SiB) Using Point Micrometeorological and Biophysical Data. *J. Climate, Appl. Meteor.*, Vol. 26, pp. 622-651, 1986.
- 3) 生駒 栄司, 金 元植, 新井 崇之, 喜連川 優, 沖 大幹. 陸面植生ワークベンチの開発と熱帯水田に対する最適植生/土壌パラメータの同定. 投稿準備中.

(1999.9.30受付)