

CO₂交換過程を含む大気—土壌—植生モデル： SOLVEG2の開発データベース整備

Development of Atmosphere-soil-vegetation Model Including CO₂ Exchange Processes: SOLVEG2

日本原子力研究所東海研究所
環境科学研究部

永井 晴康

大気と陸面間の熱、水及びCO₂交換を研究するために、新しい大気—土壌—植生モデル SOLVEG 2 (SOLVEGバージョン2) の開発を行った。モデルは、大気、土壌、植生それぞれについての1次元多層サブモデルからなる。また、モデルは、植生層内の日射及び長波放射の伝達、及び大気、土壌、植生間のCO₂交換を計算する精緻な過程も含んでいる。本モデルは、通常の使用では気象データを上部境界条件として接地層大気、土壌及び植生層変数の鉛直分布を計算するだけであるが、3次元の大気モデルと結合して計算を行う機能も有する。

1. はじめに

気候変動などの環境研究においては、大気—陸面間の熱、水及びCO₂交換過程が重要であるが、未解明な部分が多く残っている。これらの過程の解明とモデル化により、気候変動と陸面過程の変動の相互作用を予測することは環境研究における大きな挑戦である。また、陸面過程は、大気汚染物質の植物及び土壌への沈着を決定する主要因であり、環境汚染問題を考える上でも重要である。

日本原子力研究所では、大気—陸面間の熱及び水交換の解明及び予測を目的として、大気—土壌—植生モデル (SOLVEG)^{1,2)} の開発を行ってきた。本モデルの特徴は、大気—土壌—植生の複雑系での熱及び水交換過程について、各系を多層モデルで表現することで現実に近い形で詳細に再現することができるという点である。また、これらの過程のエネルギー源として日射及び長波放射の吸収量が

重要となるが、植生層内の日射及び長波放射伝達過程についても詳細なモデル化を行っている。このような陸面モデルの開発は世界的にも行われているが、多くのモデル³⁻⁹⁾ は、大気モデルへ陸面境界条件を提供することを目的としており、土壌は多層で扱っているが、植生については地表面と合わせてバルク的な扱いをしている。一方、植生層を多層で表現しているモデル¹⁰⁻¹⁵⁾ もあるが、植生層内外での運動量、熱及び水分の乱流輸送について研究することを目的としており、SOLVEGのように土壌まで含めて多層モデルで相互作用を明示的に表すモデルはこれまでに開発されていない。

SOLVEGの性能評価^{16,17)} は、米国カンザス州における野外観測 (the Cooperative Atmosphere -Surface Exchange Study: CASES-97¹⁸⁾) の観測データを用いて行われ、上記の多層モデルを用いた詳細な熱及び水交

換計算の妥当性と有効性が示された。この性能評価の中で、放射伝達計算における日射の当たる葉と陰の葉を別々に扱う手法¹⁹⁾を導入し精度向上を図った。世界的に実績のある陸面モデル (OSU-LSM⁹⁾、NCAR-LSM²⁰⁾ との相互比較^{21), 22)}においても、SOLVEGは良好な性能を示した。

上記SOLVEGにおいては大気—陸面間の交換として熱、水、運動量及び放射を考慮しているが、さらにCO₂交換過程の導入を行った²³⁾。CO₂交換過程には植物の光合成によるCO₂の同化作用が含まれるが、この過程により葉面からの蒸散が規定され、その結果として大気—植生間の熱及び水交換が決定する。従って、CO₂交換過程の導入により、大気—陸面間相互作用のより現実的な扱いが可能となった。光合成の考慮は他のモデル^{20, 24, 25)}でも行われており、その有効性を示した研究²⁶⁾もあるが、植生を多層で現した精緻なモデル化は行われていなかった。このCO₂交換過程を導入したSOLVEGの新バージョンが、SOLVEG 2である。

通常SOLVEG 2の計算は気象データを上部境界条件として用いて鉛直1次元で行うが、3次元の大気モデルとカップリングして計算する機能も有している。SOLVEG 2を大気モデルと結合する際には、鉛直1次元のモデル変数を水平方向も含めた3次元配列に拡張するが、水平格子間の相互作用は考慮しない。大気モデルとしては、ペンシルバニア州立大学と米国大気研究センターNCARが開発した非静力大気力学モデル (PSU/NCAR-MM 5)²⁷⁾を用いている。モデル結合においては、各モデルを並行計算し、並列計算通信ライブラリMPI (Message Passing Interface) を用いてモデル間相互作用のデータを交換する手法²⁸⁾を用いている。この手法は、各モデルコードの修正が簡単であること、各モデルの計算格子及び時間ステップを独立して設定できるなど柔軟な適用ができ

るといった利点がある。

本稿では、SOLVEG 2の概要、大気モデルとの結合機能及び試験計算例について記述する。

2. モデル概要

モデルは、大気、土壌、植生それぞれについての1次元多層サブモデル及び植生層内の日射及び長波放射伝達を計算するルーチンにより構成されている。また、CO₂交換過程は各サブモデルに含まれている。モデルは、地上気象データを上部境界条件として用いて、大気接地層 (地上10m程度)、表層土壌 (深さ2m程度) 及び植生層 (大気層内で可変) における熱、水、運動量、放射、CO₂等の変数及び交換量の日変化と季節変化をシミュレートする。モデルで考慮している過程を図1に示す。ここでは、各サブモデルの概要と基本方程式系についてのみ記述する。基本方程式中の変数及び境界条件を計算する方程式については、SOLVEG 2の技術報告書²⁹⁾に詳細に記載されている。

2.1 大気サブモデル

大気サブモデルは、鉛直1次元拡散方程式を数値的に解くことにより、大気変数：水平風速成分 u 及び v [m s^{-1}]、温位 θ [K]、比湿 q_a [kg kg^{-1}]、霧水 w_f [kg kg^{-1}]、乱流運動エネルギー e [$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$]、乱流長さスケール λ [m] 及びCO₂濃度 c_{co_2} [ppmv] を計算する。各変数を ϕ で表すと1次元拡散方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} + F_\phi \quad (2-1)$$

ここで、 K_z [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] は鉛直拡散係数で乱流クロージャーモデル³⁰⁾で求められる。右辺第2項の F_ϕ は外力項で、大気—植生間の運動量、熱、水蒸気、液体水、乱流エネルギー及びCO₂交換が生成/消滅項として拡散計算に導入される。各変数についての外力項は以

下の式で表される。

$$u: F_u = f(v - v_g) - ac_D |u| u \quad (2-2)$$

$$v: F_v = -f(u - u_g) - ac_D |u| v \quad (2-3)$$

$$\theta: F_\theta = (H_r + aH_c - lE_f - lE_{pr}) / (\rho C_p) \quad (2-4)$$

$$q_a: F_q = [a(E_d + E_s) + E_f + E_{pr}] / \rho \quad (2-5)$$

$$e: F_e = P_{es} + P_{eb} - D_{ev} + P_{ec} \quad (2-6)$$

$$\lambda: F_\lambda = P_{\lambda s} + P_{\lambda b} - D_{\lambda v} + P_{\lambda c} \quad (2-7)$$

$$w_f: F_w = -(E_f + E_{col} + aE_{cap}) / \rho \quad (2-8)$$

$$c_{co2}: F_{co2} = -M_a a A_n / \rho \quad (2-9)$$

ここで、 $f [s^{-1}]$ はコリオリパラメータ、 u_g

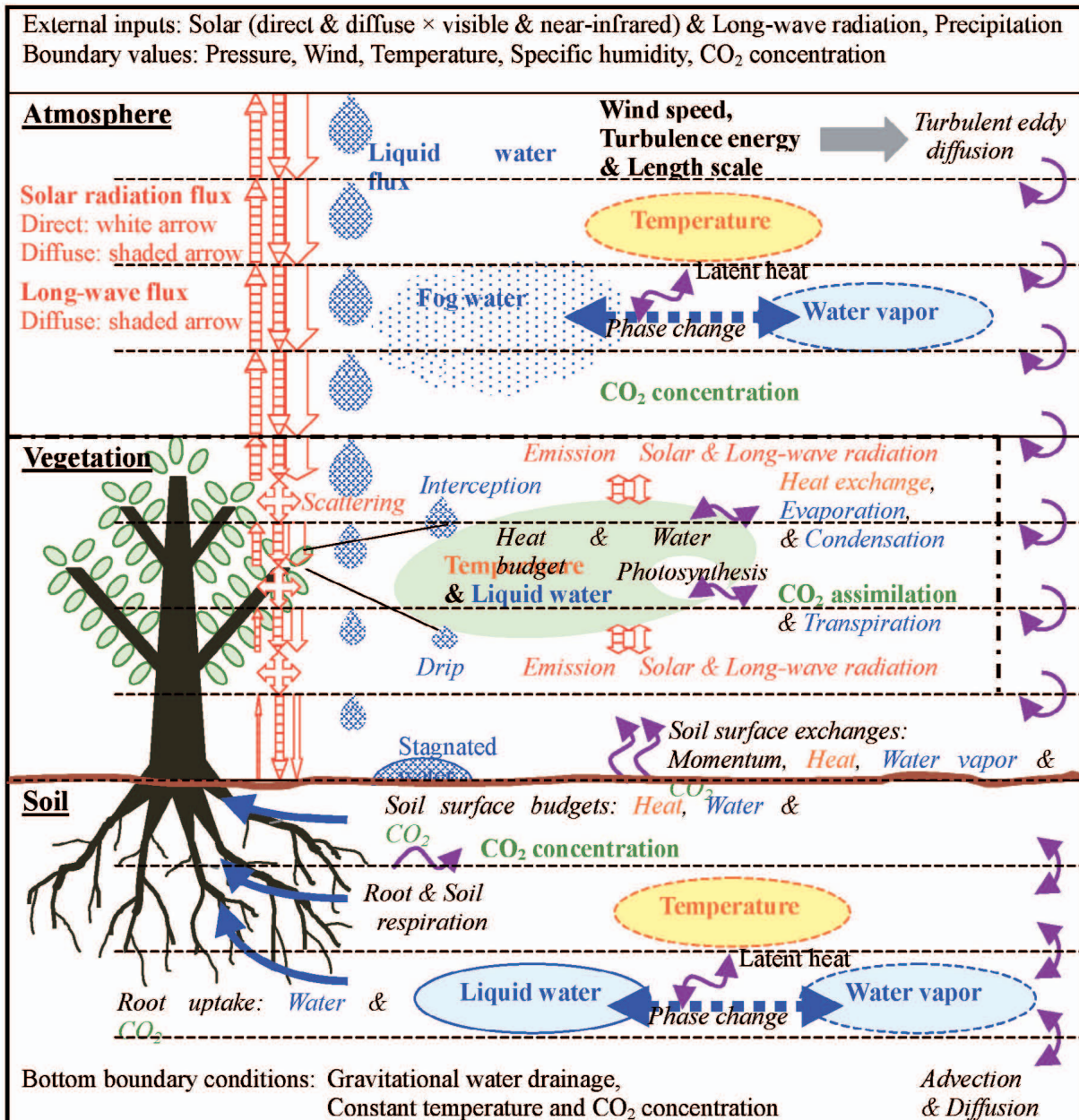


図1 大気—土壌—植生複雑系におけるモデル計算過程の模式図。太字は基礎方程式系 (2-1) から (2-23) の主要変数、斜字はモデル計算で考慮する素過程を表している。

$[\text{m s}^{-1}]$ 及び $v_g [\text{m s}^{-1}]$ は地衡風成分、 c_D は葉の空気力学抵抗係数、 $|u| [\text{m s}^{-1}]$ は風速、 $a [\text{m}^2 \text{m}^{-3}]$ は葉面積密度、 $l [\text{J kg}^{-1}]$ は蒸発の潜熱、 $\rho [\text{kg m}^{-3}]$ は空気密度、 $C_p [\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$ 空気の比熱、 $M_a [\text{kg mol}^{-1}]$ は空気の分子量、 $A_n [\mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ は光合成による CO_2 同化率である。(2-6) 及び (2-7) 式の右辺の各項は、シャー、浮力、粘性消散及び葉面による乱流生成項である。(2-1) 式の上部境界条件は、入力として与えられる。土壌表面の下部境界条件は、土壌サブモデルで計算される土壌表面温度、比湿及び CO_2 濃度と大気第1層との間の勾配から、Monin-Obukhov相似則による交換係数を用いてフラックスを求めて与えている。

2.2 土壌サブモデル

土壌サブモデルは、熱伝導方程式により土壌温度 $T_s [\text{K}]$ を、Richards'方程式³¹⁾により土壌液体水分量 $\eta_w [\text{m}^3 \text{m}^{-3}]$ を、拡散方程式により土壌間隙比湿 $q_s [\text{kg kg}^{-1}]$ を、そして CO_2 保存方程式^{32,33)}により土壌間隙空気中 CO_2 濃度 $c_{sg} [\text{ppmv}]$ を計算する。各方程式は、それぞれ以下のように表される。

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K_T \frac{\partial T_s}{\partial z} - \frac{l E_b}{C_s \rho_s} - \frac{C_w E_w}{C_s \rho_s} \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad (2-10)$$

$$\frac{\partial \eta_w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial E_w}{\partial z} + E_t + E_b \right) \quad (2-11)$$

$$\frac{\partial [(\eta_{ws} - \eta_w) q_s]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} D_w f_a(\eta_w) \frac{\partial q_s}{\partial z} + \frac{E_b}{\rho} \quad (2-12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} V_E c_{sg} &= \frac{\partial}{\partial z} D_E \frac{\partial c_{sg}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} E_E^* c_{sg} \\ &\quad - E_t^* K_H R T_s c_{sg} + S_{CO_2} \end{aligned} \quad (2-13)$$

ここで、 $KT [\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$ 、 $l [\text{J kg}^{-1}]$ 、 $D_w [\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$ 及び $\eta_{ws} [\text{m}^3 \text{m}^{-3}]$ はそれぞれ熱伝導度、蒸発の潜熱、水蒸気の分子拡散係数及び飽和土壌水分量、 ρ 、 ρ_s 及び $\rho_w [\text{kg m}^{-3}]$ はそれぞれ空気、土壌及び水の密度、 C_s 及び $C_w [\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}]$ はそれぞれ土壌及び水の体積熱容量、 $f(\eta_w)$ は土壌間隙の屈曲度、 $V_E [\text{m}^3 \text{m}^{-3}]$ 、 $D_E [\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$ 及び $E_E^* [\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ はそれぞれ気相及び液相の CO_2 を総合した仮想体積、拡散係数及び移流速度、 $E_t^* [\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ は根の水吸い上げ率、 $KH [\text{mol m}^{-3} \text{Pa}^{-1}]$ はHenry定数、 $S_{CO_2} [\text{ppmv s}^{-1}]$ は CO_2 生成項である。熱、液体水及び水蒸気の方程式は、土壌水の相変化(蒸発率 $E_b [\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}]$)を通じて密接に影響しあっている。液体水フラックス $E_w [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ もまた(2-10)式右辺第3項により熱の輸送に関与している。(2-11)式右辺第2項の根の水吸い上げ率 $E_t [\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}]$ は、植生サブモデルにより計算される蒸散量から求められる。土壌サブモデルと大気サブモデルは、土壌表面で熱、水及び CO_2 収支が満たされるように境界条件により結合している。

2.3 植生サブモデル

植生サブモデルは、各植生層における葉面温度 $T_c [\text{K}]$ 、葉面液体水 $w_d [\text{kg m}^{-2}]$ 及び光合成による CO_2 同化率 $A_n [\mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ 、及び植生層内液体水フラックス $P_r [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ を計算する。葉面温度は、各植生層について次の葉面熱収支式により計算する。

$$R_c = H_c + l(E_d + E_s) + H_p \quad (2-14)$$

ここで、 $R_c, H_c [\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ 、 $E_d, E_s [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ 及び $H_p [\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ はそれぞれ放射収支、顕熱フラックス、葉面水蒸発率、蒸散率及び降水による冷却率であり、葉面温度と大気サブモデル及び後述の放射伝達計算により得られる変数により求められる。光合成によ

るCO₂同化率は次式³⁴⁾により計算される。

$$A_n = \min(w_c, w_e, w_s) - R_d \quad (2-15)$$

ここで、 w_c 、 w_e 及び w_s [$\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] はそれぞれ光合成物質 (Rubisco) による律速、光合成有効放射PARの吸収量による律速及び光合成生成物の輸送にかかわる律速、 R_d [$\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] は葉の呼吸率である。光合成によるCO₂同化率は、蒸散率を規定する気孔抵抗 r_s^* [$\text{m}^2 \text{ s } \mu \text{ mol}^{-1}$] (気孔コンダクタンス g_s [$\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] の逆数) と密接に関連しており^{35,36)}、次式により気孔抵抗計算に用いられる。

$$\frac{1}{r_s^*} = g_s = m \frac{A_n}{c_s} \frac{e_s}{e_{\text{sat}}(T_c)} p_a + g_{s,\text{min}} \quad (2-16)$$

ここで、 c_s 、 e_s 、 $e_{\text{sat}}(T_c)$ 及び p_a [Pa] はそれぞれ葉面におけるCO₂分圧、水蒸気圧、葉面温度 T_c [K] における飽和水蒸気圧及び大気圧である。係数 m 及び最小気孔コンダクタンス $g_{s,\text{min}}$ [$\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] は植生毎に実験で決める定数である。

葉面液体水及び植生層内液体水フラックスは以下の式で計算される。

$$\frac{dw_d}{dt} = E_{\text{int}} - E_d + E_{\text{cap}} - P_d \quad (2-17)$$

$$\frac{dP_r}{dz} = a(E_{\text{int}} - P_d) + E_{\text{pr}} - E_{\text{col}} \quad (2-18)$$

ここで、 a [$\text{m}^2 \text{ m}^{-3}$] は葉面積密度、 E_{int} 、 E_{cap} [$\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]、 E_{pr} 及び E_{col} [$\text{kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$] はそれぞれ葉面による降水の遮断、霧水の捕捉、雨滴の蒸発及び雨滴による霧水の捕捉に起因する水交換率、 P_d [$\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] は葉面からの滴下である。植生層内液体水フラックスについては、入力 of 降水強度が植生層上端の境界条件となり、最下層の計算値が土壌サブモデルの地表面水収支計算に用いられる。

2.4 放射伝達計算

放射伝達計算では、植生層内における日射

及び長波放射の下向き及び上向きフラックスを求め、土壌表面及び各植生層における熱収支計算で用いる放射エネルギー吸収量を提供する。日射伝達計算においては、直達光と散乱光を別々に計算している。下向き直達日射フラックス S_d^\downarrow [W m^{-2}]、下向き及び上向き散乱日射フラックス S_s^\downarrow 及び S_s^\uparrow [$\text{W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]、下向き及び上向き長波放射フラックス L^\downarrow 及び L^\uparrow [W m^{-2}] は、以下の伝達式によりそれぞれ計算される。

$$\frac{dS_d^\downarrow}{dz} = (aF_{rd} + a'_w + A'_w)S_d^\downarrow \quad (2-19)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_s^\downarrow}{dz} = & [aF_{rs}(1 - f_{sf}) + a'_w + A'_w]S_s^\downarrow \\ & - (aF_{rs}f_{sb} + A'_w)S_s^\uparrow - aF_{rd}f_{df}S_d^\downarrow \end{aligned} \quad (2-20)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_s^\uparrow}{dz} = & -[aF_{rs}(1 - f_{sf}) + a'_w + A'_w]S_s^\uparrow \\ & + (aF_{rs}f_{sb} + A'_w)S_s^\downarrow + aF_{rd}f_{db}S_d^\downarrow \end{aligned} \quad (2-21)$$

$$\begin{aligned} \frac{dL^\downarrow}{dz} = & aF_{rs}[(1 - f_{sf})L^\downarrow - f_{sb}L^\uparrow - \varepsilon_c \sigma T_c^4] \\ & + k_l w_l (L^\downarrow - \sigma T_a^4) \end{aligned} \quad (2-22)$$

$$\begin{aligned} \frac{dL^\uparrow}{dz} = & -aF_{rs}[(1 - f_{sf})L^\uparrow - f_{sb}L^\downarrow - \varepsilon_c \sigma T_c^4] \\ & - k_l w_l (L^\uparrow - \sigma T_a^4) \end{aligned} \quad (2-23)$$

ここで、 f_{db} 、 f_{df} 、 f_{sb} 及び f_{sf} は散乱係数、 $a'_w (= a_w/\delta z)$ 及び $A'_w (= A_w/\delta z)$ はそれぞれ植生層大気中液体水の日射吸収率及び反射率、 ε_c は葉面射出率、 $\sigma [= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}]$ はStephan-Boltzmann定数、 T_c 及び T_a [K] はそれぞれ葉面及び植生層大気の温度、 w_l [kg m^{-3}] は霧水量、定数 $k_l = 1.44 \times 10^{-4} [\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}]$ である。可視光と近赤外成分は葉面における反射率及び透過率が異なるため、

直達日射及び散乱日射計算においてそれぞれ別々に計算される。各放射成分についての散乱係数は、放射の入射角度と葉面の傾きの関係から幾何学的手法^{37,38)}により計算される。

また、直達日射が当たる葉と陰の葉を独立させた計算を行っており、植生サブモデルにおける葉面熱収支計算(2-14)及び光合成計算(2-15)においてもこれらの葉の独立計算を適用している。

3. 数値解法

モデルの方程式系は、有限差分法により数値的に解き、入力気象変数を大気サブモデルの上部境界条件として時間発展を計算している。空間差分の格子点の定義を図2に示す。鉛直格子番号(k)は、括弧つきの下付き文字で表されており、大気、土壌、植生を多層に分割した各層の中間点を風速、温度など各層での平均物理量の定義点としている。格子点番号($k \pm 1/2$)は、各層の境界上の点を意味し、放射、熱フラックスなど各層間の交換

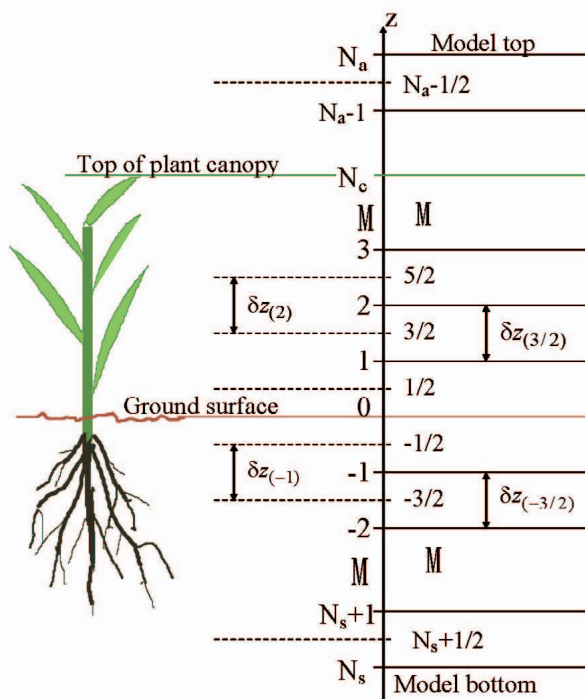


図2 鉛直格子の定義

量の定義点である。鉛直格子番号は、地表面で0、上向きが正、地中は負の値となり、大気上端で N_a 、植生層上端で N_c 、土壌下端で N_s (負の値)である。前述のように、各サブモデルは密接な相互作用を含んでおり、方程式を厳密に解くためには時間ステップ内でサブモデル間の繰り返し計算が必要であるが、本モデルでは短い時間ステップ(例えば5秒)を採用することで繰り返し計算を省いている。

4. 大気モデルとの結合

大気モデルと陸面モデルを結合する場合、陸面モデルをサブルーチン化し大気モデルに組み込んで1つの計算コードを作成するのが一般的であるが、ここでは全く異なる結合手法²⁸⁾を用いている。ペンシルバニア州立大学と米国大気研究センターNCARが開発した非静力大気力学モデル(PSU/NCAR-MM5²⁷⁾)を大気モデルに用いて、SOLVEG2とカップリングを行う機能について以下に記述する。

本結合手法では、MM5とSOLVEG2を別々のプロセッサで独立して並行計算し、モデル間相互作用を規定する計算値を、図3に示すように並列計算通信ライブラリMPI(Message Passing Interface)を利用してモデル間で交換することにより、両モデルを一体化したのと同様な結合を実現している。

まず、MM5計算を開始し、そこからSOLVEG2計算が起動される。MM5の境界層計算サブルーチン(PBL)で計算された接地層気象データ：気圧、放射、降水、風速、気温、湿度等がSOLVEG2に送信され、初期値及び境界条件として用いられる。一方、SOLVEG2で計算された地表面状態：地表面温度、アルベド、熱及び水蒸気フラックスがMM5に送信され、境界層過程の地表面境界条件として用いられる。これらのデータ交換は、MM5の各時間ステップで行われる。

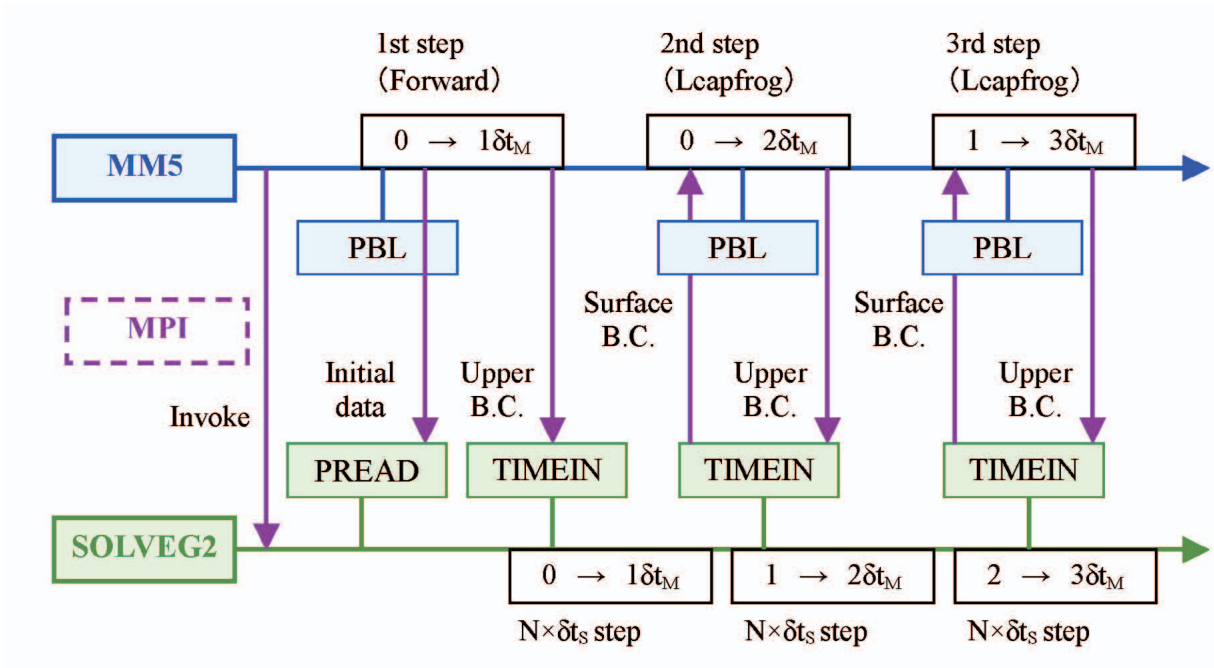


図3 MM5とSOLVEG2のカップリングにおけるデータ交換。PBLはMM5境界層計算サブルーチン、PREAD及びTIMEINTはSOLVEG2の初期値及び境界値入力サブルーチン、 δt_M 及び δt_s はMM5及びSOLVEG2計算の時間ステップをそれぞれ表す。

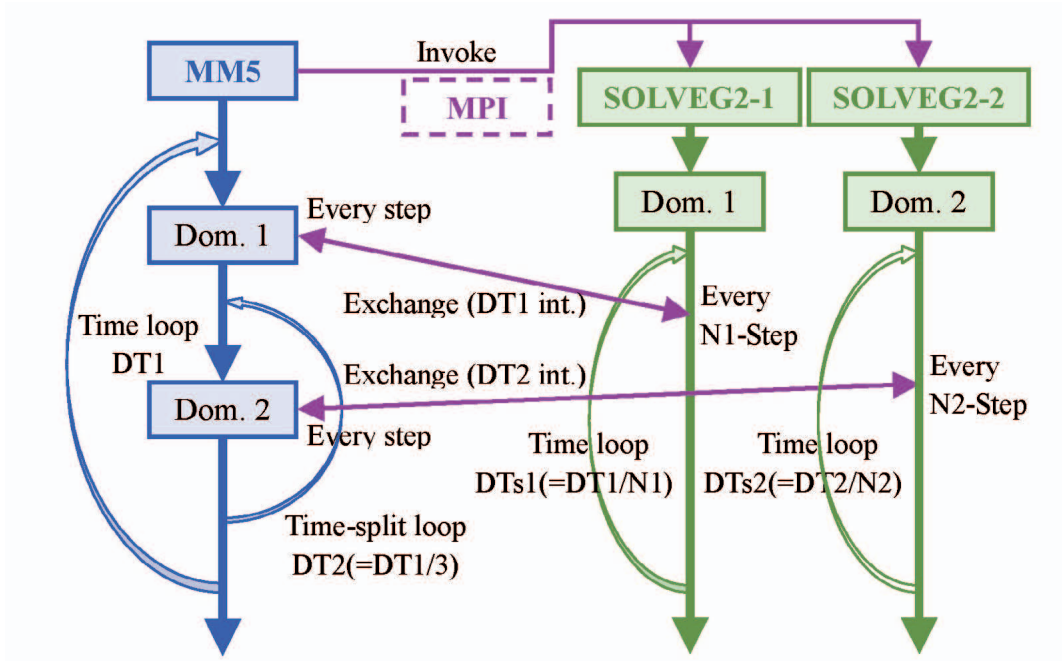


図4 ネスティング計算におけるデータ交換。DT1/2及びDTs1/2は各計算領域でのMM5及びSOLVEG2の時間ステップをそれぞれ表す。

SOLVEG 2の時間ステップは通常MM5より小さく、MM5の各時間ステップで送信されてくる気象データはその時間ステップを細分したSOLVEG 2の各時間ステップに直線内挿されて用いられ、逆にMM5時間ステップで平均したSOLVEG 2計算値がMM5に返される。

この結合手法は柔軟な適用が可能であり、MM5の有用な機能であるネスティング計算にも適用できる。MM5のネスティング計算では、一次計算領域（広域）の内部に高分解能領域（狭域）を任意に設定できる。また、狭域の内部にさらに高分解能の領域を入れる多重ネスティングや、1つの領域内に同じ分解能の複数領域を設けるなど任意の組み合わせで5領域まで同時に計算できる。ここでは、SOLVEG 2との結合方法を2領域の場合について図4に示すが、領域が増えた場合でも同様にして結合が可能である。MM5では広域と狭域を各時間ステップで逐次計算するのに対して、SOLVEG 2では、各領域を独立させ別々のプロセッサで計算し、それぞれの領域毎にMM5とデータ交換を行う。広域と狭域の計算結果が双方向に反映される2Wayネスティングでは、狭域の格子間隔及び時間ステップはともに広域の1/3に固定されている。従って、狭域計算間のデータ交換は、広域の3倍の頻度で行われることになる。

この結合手法では、MPIライブラリとして原研で開発した異機種並列計算機間通信ライブラリ（Stampi³⁹⁾）を採用することにより、並列計算機の使用においても柔軟性を備えている。通常のMPIでは同一の並列計算機間でのみ通信を行うことができるが、Stampiでは異なる並列計算機間でも通信を行うことができる。Stampiを用いたモデル結合においては、各モデル計算を異なる計算機に割り当てることで計算のロードバランスを最適化して、計算資源を有効に利用できる。

5. 試験計算

SOLVEG 2の計算例として、米国カンザス州において1997年に実施された野外実験（the Cooperative Atmosphere-Surface Exchange Study: CASES-97¹⁸⁾）における小麦畑での観測データを用いた試験計算について以下に記述する。

CASES-97の小麦畑地上観測では、風速、気温、放射等の気象変数測定に加えて、熱、水及びCO₂フラックス測定が実施された。SOLVEG 2試験計算においては、測定された気象変数を境界条件として入力して計算された熱、水及びCO₂フラックスを測定値と比較して、計算精度の評価を行った。この計算におけるSOLVEG 2の設定を図5に示す。計算期間は、1997年4月20日から5月21日までの32日間で、計算に要した時間は、富士通スカラ並列計算機Primepowerの1 CPUで70秒であった。

図6に顕熱フラックス、潜熱フラックス（水蒸気フラックス）及びCO₂フラックスについて、測定と計算値の時系列での比較を示す。SOLVEG 2は、各測定値の日変化及び日毎の変動を良好に再現していることがわかる。モデルの性能評価試験については、他の文献^{16,17,21,22,23)}に詳しく記述されている。

6. おわりに

地表面における熱、水及びCO₂交換過程の解明及び予測を目的として、新しい大気—土壌—植生モデルSOLVEG 2の開発を行った。本モデルは、大気—陸面間の汚染物質等の交換過程の研究にも適用可能である。これらの目的から、モデルは、大気—土壌—植生複雑系内での素過程を、多層モデルを用いてより現実的に再現するように設計されている。現状は、気象観測値を上部境界条件として入力し、大気接地層（地上10m程度）から表層土壌（深さ2m程度）まで鉛直1次元分布の日変化及び季節変動を再現する。並列計算の通

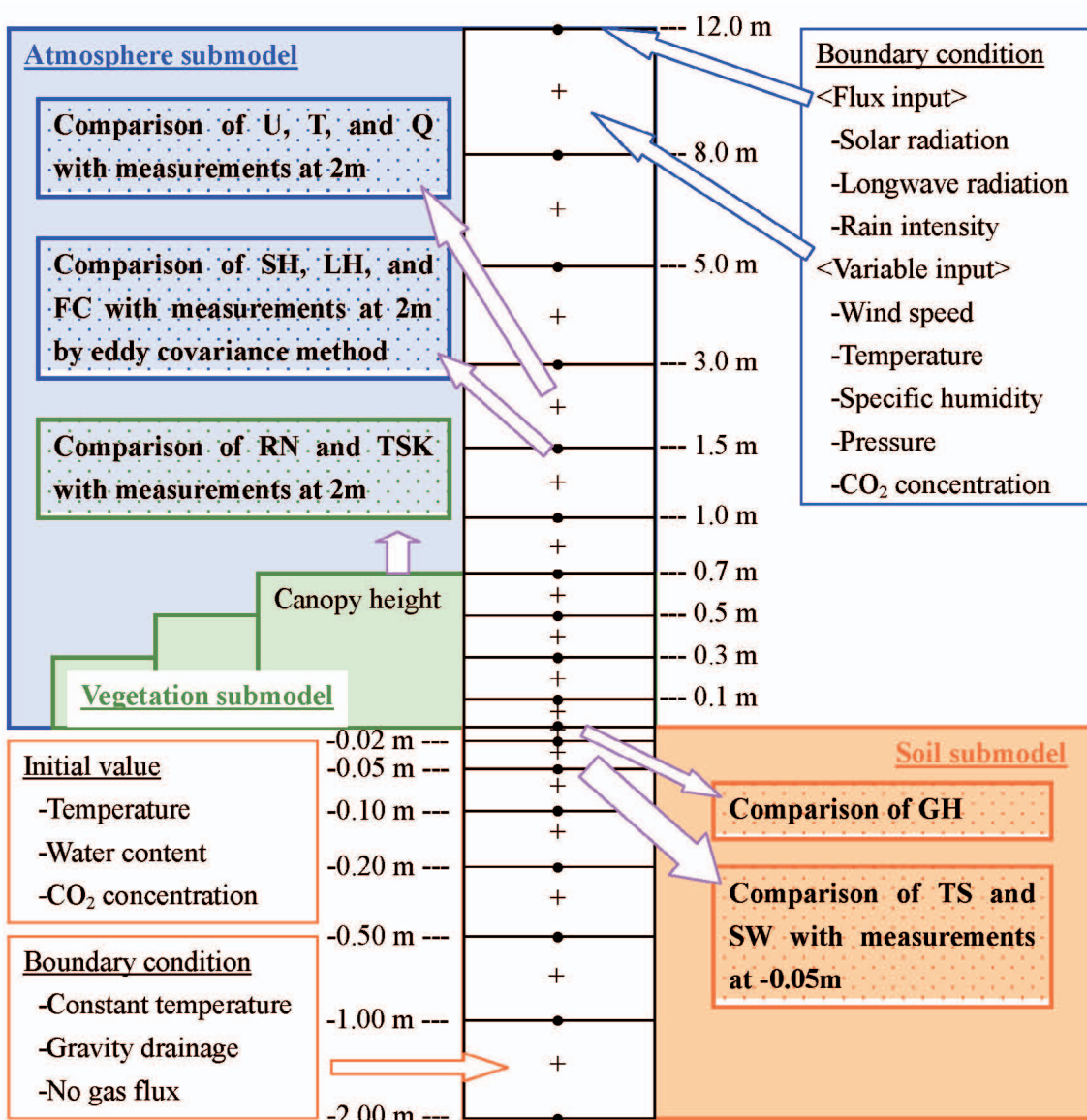


図5 CASES-97小麦畑観測データを用いたSOLVEG 2 試験計算のモデル設定。大気層は10層（地上12m）、土壌層は7層（深さ2m）、植生層は大気層のうち下から4層まで（0.3から0.7mまで時間変化）とした。モデル計算の平均量はプラス印で示した各層の中心で、フラックスはドット印で示した各層の境界で定義される。枠内の変数はモデルの入力（網掛けなし）及び測定との比較に用いた出力（網掛け）である。

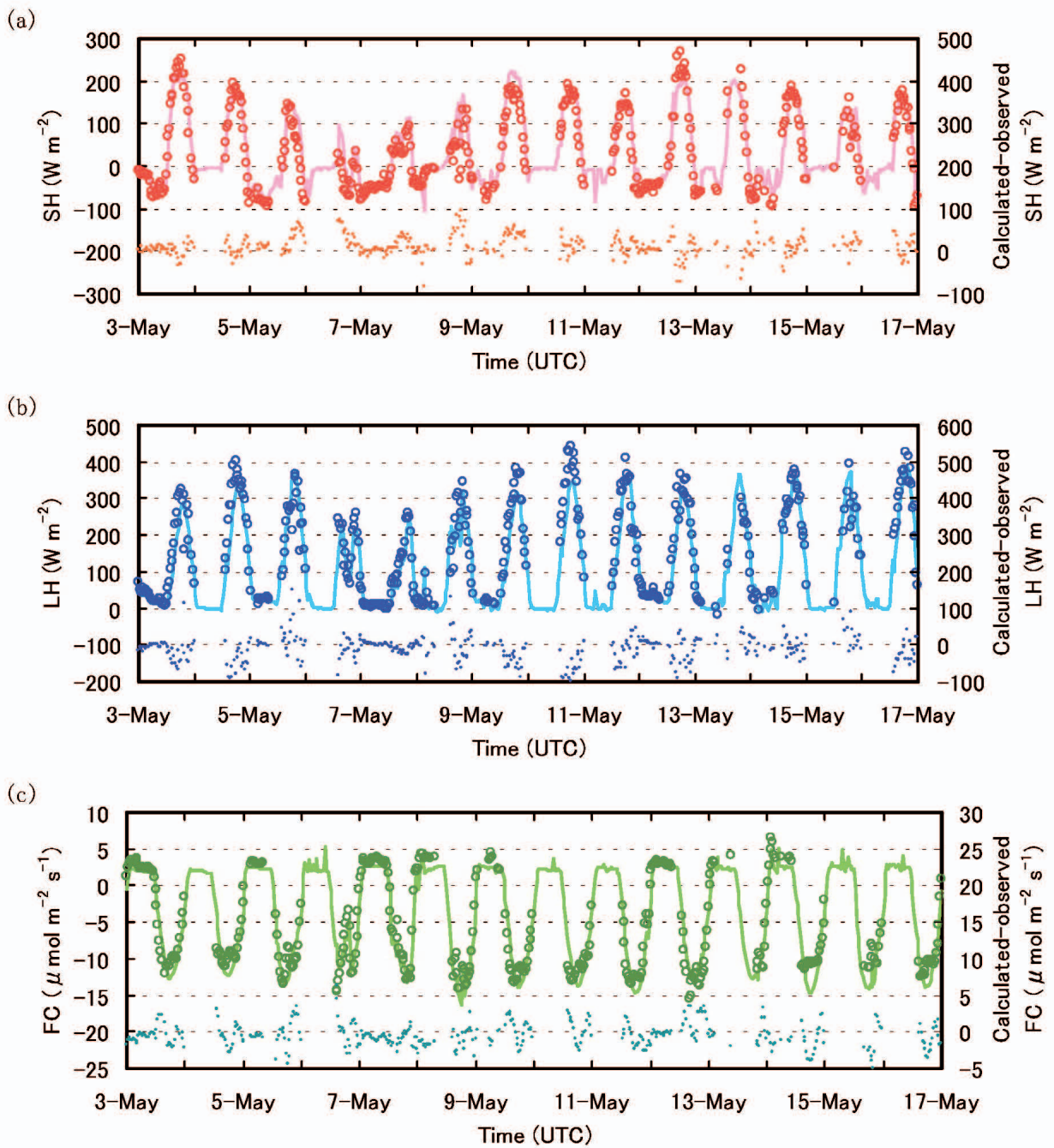


図6 CASE-97小麦畑測定値（白丸）とSOLVEG 2計算値（実線）の比較：(a)顕熱フラックスSH、(b)潜熱フラックスLH及び(c) CO_2 フラックス。ドットは計算値と測定値の差（計算値－測定値）を表す。

信ライブラリMPIを利用した3次元の大気モデルとカップリングする機能も有する。米国の小麦畑での観測データを用いたモデルの試験計算では、地表面での熱、水及びCO₂フラックス測定値を良好に再現した。

今後の課題としては、大気との結合モデルに、さらに陸域の水文モデル、海洋モデル、波浪モデルを結合し、大気、陸域、海洋を連続的かつ統合的に扱うことができる領域水循環結合モデルを開発する計画である。この結合モデルは、現在原研で開発を進めている数値環境システムSPEEDI-MP⁴⁰⁾における数値実験ツールの中核として位置づけられ、汚染物質循環の媒体となる水循環の解明と予測に用いる以外にも、砂漠化、旱魃、洪水など水循環に関する様々な環境問題についても適用する計画である。また、SOLVEG 2の精緻なCO₂交換過程は、地球温暖化において重要な陸面生態系での炭素収支の解明に資することが期待できる。

参考文献

- 1) 山澤弘実、永井晴康：1次元大気—裸地—土壤モデルの開発、JAERI-Data/Code 97-041 (1997).
- 2) 永井晴康、山澤弘実：1次元大気—土壌—植生モデルの開発、JAERI-Data/Code 99-024 (1999).
- 3) Deardorff, J. W.: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation. *J. Geophys. Res.*, **83**, 1889-190 (1978).
- 4) Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud, A. Dalcher: A Simple Biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 505-531 (1986).
- 5) Pan, H.-L., and L. Mahrt: Interaction between soil hydrology and boundary-layer development. *Bound.-Layer Meteor.*, **38**, 185-202 (1987).
- 6) Noilhan, J., and S. Planton: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536-549 (1989).
- 7) Dickinson, R. E., A. Henderson-Sellers, and P. J. Kennedy: Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Tech. Note NCAR/TN-387 +STR (1993).
- 8) Pleim, J. E., and A. Xiu: Development and testing of a surface flux and planetary boundary layer model for application in mesoscale models. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 16-32 (1995).
- 9) Chen, F., K. Mitchell, J. Schaake, Y. Xue, H. L. Pan, V. Koren, Q. Y. Duan, M. Ek, and A. Betts: Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *J. Geophys. Res.*, **101**, 7251-7268 (1996).
- 10) Willson, N. R., and R. H. Shaw: A higher order closure model for canopy flow. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 1197-1205 (1977).
- 11) Yamada, T.: A numerical model study of turbulent airflow in and above a forest canopy. *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 439-454 (1982).
- 12) Meyers, T. P., and K. T. Paw U: Testing of a higher-order closure model for modeling airflow within and above plant canopies. *Bound.-Layer Meteor.*, **37**, 297-311 (1986).
- 13) Meyers, T. P., and K. T. Paw U: Modeling the plant canopy micrometeorology with higher-order closure principles. *Agri. and Forest Meteor.*, **41**, 143-163

- (1987).
- 14) Raupach, M. R.: A lagrangian analysis of scalar transfer in vegetation canopies. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **113**, 107–120 (1987).
 - 15) Shaw, R. H., and U. Schumann: Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest. *Bound.-Layer Meteor.*, **61**, 47–64 (1992).
 - 16) Nagai, H.: Validation and sensitivity analysis of a new atmosphere-soil-vegetation model. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 160–176 (2002).
 - 17) Nagai, H.: Validation and sensitivity analysis of a new atmosphere-soil-vegetation model. Part II: Impacts on in-canopy latent heat flux over a winter wheat field determined by detailed calculation of canopy radiation transmission and stomatal resistance. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 434–351 (2003).
 - 18) LeMone, M. A., R. L. Grossman, R. L. Coulter, M. L. Wesely, G. E. Klazura, G. S. Poulos, W. Blumen, J. K. Lundquist, R. H. Cuenca, S. F. Kelly, E. A. Brandes, S. P. Oncley, R. T. McMillen, and B. B. Hicks: Land-atmosphere interaction research, early results, and opportunities in the Walnut river watershed in southeast Kansas: CASES and ABLE. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 757–779 (2000).
 - 19) DePury, D. G. G., and G. D. Farquhar: Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant, Cell Environ.*, **20**, 537–557 (1997).
 - 20) Bonan, G. B.: Land-atmosphere CO₂ exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **100**, 2817–2831 (1995).
 - 21) Chen, F., D. N. Yates, H. Nagai, M. A. LeMone, K. Ikeda, and R. L. Grossman: Land surface heterogeneity in the Cooperative Atmosphere Surface Exchange Study (CASES-97). Part I: Comparing modeled surface flux maps with surface-flux tower and aircraft measurements. *J. Hydrometeor.*, **4**, 196–218 (2003).
 - 22) Yates, D. N., F. Chen, and H. Nagai: Land surface heterogeneity in the Cooperative Atmosphere Surface Exchange Study (CASES-97). Part II: Analysis of spatial heterogeneity and its scaling. *J. Hydrometeor.*, **4**, 219–234 (2003).
 - 23) Nagai, H.: Incorporation of CO₂ Exchange Processes into a Multilayer Atmosphere-Soil-Vegetation Model. *J. Appl. Meteor.* (2004 submitted).
 - 24) Sellers, P. J., 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 I: Model formulation. *J. Climate*, **9**, 676–705 (1996).
 - 25) Dickinson, R. E., M. Shaikh, R. Bryant, L. Graumlich: Interactive canopies for a climate model. *J. Climate*, **11**, 2823–2836 (1998).
 - 26) Niyogi, D. S., and S. Raman: Comparison of four different stomatal resistance schemes using FIFE observations. *J. Appl. Meteor.*, **36**, 903–917 (1997).
 - 27) Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Tech. Note, NCAR/TN-398+STR (1994).
 - 28) Nagai, H.: New Method for Model Coupling Using Stampi: Application to the

- Coupling of Atmosphere Model (MM5) and Land-surface Model (SOLVEG). JAERI-Data/Code 2003-021 (2003).
- 29) Nagai, H.: Atmosphere-soil-vegetation model including CO₂ exchange processes: SOLVEG2. JAERI-Data/Code 2004-014 (2004).
- 30) Yamada, T.: A numerical simulation of nocturnal drainage flow. *J. Meteor. Soc. Japan*, **59**, 108-122 (1981).
- 31) Richards, L. A.: Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, **1**, 318-333 (1931).
- 32) Simunek, J., and D. L. Suarez: Modeling of carbon dioxide transport and production in soil 1: Model development. *Water Resour. Res.*, **29**, 487-497 (1993).
- 33) Suarez, D. L., and J. Simunek: Modeling of carbon dioxide transport and production in soil 2: Parameter selection, sensitivity analysis, and comparison of model predictions to field data. *Water Resour. Res.*, **29**, 499-513 (1993).
- 34) Farquhar, G. D., S. von Caemmerer, and J. A. Berry: A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta*, **149**, 78-90 (1980).
- 35) Collatz, G. J., J. T. Ball, C. Grivet, and J. A. Berry: Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis, and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agric. For. Meteorol.*, **54**, 107-136 (1991).
- 36) Collatz, G. J., M. Ribas-Carbo, and J. A. Berry: Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants. *Aust. J. Plant Physiol.*, **19**, 519-538 (1992).
- 37) Verstraete, M. M.: Radiation transfer in plant canopies: Transmission of direct solar radiation and the role of leaf orientation. *J. Geophys. Res.*, **92**, 10985-10995 (1987).
- 38) Verstraete, M. M.: Radiation transfer in plant canopies: Scattering of solar radiation and canopy reflectance. *J. Geophys. Res.*, **93**, 9483-9494 (1988).
- 39) 今村俊幸、小出洋、武宮博：異機種並列計算機間通信ライブラリ：Stampi—利用手引書、JAERI-Data/Code 98-034 (1998)。
- 40) 茅野政道、安達武雄：緊急時環境線量情報予測システムSPEEDIの現状と今後の展開、日本原子力学会誌，**45**，296-301 (2003)。