

JAERI-Data/Code

97-041



## 大気-裸地土壤1次元モデルの開発

1997年10月

山澤弘実・永井晴康

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所

印 刷 核原子力資料サービス

## 大気・裸地土壤1次元モデルの開発

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

山澤 弘実・永井 晴康

(1997年10月1日受理)

大気一植生一土壤複合系内の放射性核種移行の媒体である空気および水の動的挙動を表す数値モデル構築の第一段階として、大気と裸地土壤を対象とした1次元モデルを開発した。大気部分は、既存の1次元気象モデルPHYD1V3を基礎として作成し、水平風速成分、温位、比湿、霧水量（雲水量）、乱流運動エネルギーおよび乱流長さスケールを予報的に解く。この中には、2次オーダーの乱流クロージャーモデルと、日射および大気放射モデルが含まれる。土壤部分は、温度、体積含水率および土壤空気中の比湿に関する予報方程式で構成される。大気一土壤間は、地表面熱収支式および水収支式を用いて結合されている。大気および土壤を多層に分割し、解法として差分方を用いた。

## Development of One-dimensional Atmosphere-Bare Soil Model

Hiromi YAMAZAWA and Haruyasu NAGAI

Department of Environmental Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 1, 1997)

As the first step of modeling of dynamical behaviors of air and water as media of radionuclide migration in the atmosphere-vegetation-soil system, a one-dimensional numerical model of atmosphere-bare soil system was developed. The atmospheric part, which is based on the existing one-dimensional meteorological model PHYD1V3, consists of prognostic equations for horizontal wind components, potential temperature, specific humidity, fog water, turbulence kinetic energy and turbulence length scale. This part also consists of a second-order turbulence closure model and solar-atmospheric radiation model. The soil part consists of prognostic equations for soil temperature, volumetric water content and specific humidity in soil air. Both parts are interfaced to each other with the ground surface water and heat budget equations. This model employs a finite difference scheme with multi-layer description for the both part.

**Keywords:** Atmosphere, Soil, Multi-layer, Numerical Model, Heat, Water Vapor, Momentum, Exchange, Radiation Transfer, Soil Water, Soil Moisture, Evaporation, Heat Budget, Water Budget, Diffusion, Numerical Scheme

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 大気モデル .....	3
3. 土壤モデル .....	6
3.1 土壤中の熱伝導 .....	7
3.2 土壤中液体水 .....	8
3.3 土壤中水蒸気 .....	10
3.4 土壤一大気間の交換 .....	11
4. 数値解法 .....	13
4.1 拡散方程式の数値解法 .....	13
4.2 大気中の拡散方程式の数値解法 .....	15
4.3 热伝導方程式の数値解法 .....	16
4.4 土壤中液体水輸送方程式の数値解法 .....	17
4.5 土壤中水蒸気拡散方程式の数値解法 .....	20
5. モデルコード .....	23
5.1 ファイル及びサブルーチンの構成 .....	23
5.2 パラメータ、定数及び変数 .....	24
5.3 計算の流れ .....	28
5.4 サブルーチンの機能 .....	30
6. 計 算 例 .....	49
6.1 計算条件 .....	49
6.2 計算結果 .....	50
7. ま と め .....	54
参考文献 .....	55

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Atmosphere-Vegetation Model .....	3
3. Soil Model .....	6
3.1 Heat Conduction in Soil .....	7
3.2 Liquid Water in Soil .....	8
3.3 Soil Moisture.....	10
3.4 Exchange between Atmosphere and Soil .....	11
4. Numerical Schemes .....	13
4.1 Scheme for Diffusion Equations .....	13
4.2 Scheme for Diffusion Equations in the Atmosphere .....	15
4.3 Scheme for Heat Conduction Equation.....	16
4.4 Scheme for Soil Liquid Water Transport Equation .....	17
4.5 Scheme for Soil Moisture Diffusion Equation.....	20
5. Mode Codes .....	23
5.1 Files and Subroutines .....,	23
5.2 Parameters, Constants and Variables .....	24
5.3 Calculation Flow .....	28
5.4 Function of Subroutines.....	30
6. Example Calculation .....	49
6.1 Calculation Condition.....	49
6.2 Results .....	50
7. Summary .....	54
References .....	55

## 1. はじめに

大気－植生－土壌の複合系での放射能を含む汚染物質の循環のほとんどは、媒体である空気および水の循環によって引き起こされる。大気－植生－土壌の複合系での水の動きは極めて複雑で、種々の要因により変化する。まず自然環境下では水の相として個体、液体、気体の三相が存在しうる。また、降水量、風速等の気象学的要因、植物の種類、成長段階、活動度等の生物学的要因、土壌の種類、状態等の地質学的要因が水の動きを支配している。さらに、水の動きの多くは相変化を伴うため、そのエネルギー源として日射、大気放射が重要な役割を果たし、熱の動きも無視できない。これらの要因の変動の時間的・空間的スケールが小さいことと、要因が相互に依存性を持つことも問題をさらに複雑にしている。

従来のこの複合系のモデル化には大きく分けて二つの流れがあった。一つは、種々の素過程をより精密に表すことを目的としたもので、理論や基礎的実験に立脚する基礎研究的モデル化である。これによって得られるモデルとは、新たな理論であったり、基礎データに裏付けられた基礎実験の作業モデルである。これらに相当するものとしては、地表面からの蒸発に対する大気の運動学的構造の影響を流体力学に基づいて理論的にモデル化した研究<sup>1)2)</sup>、水平一様性が仮定できる海水面や積雪面と大気との間の熱、水蒸気、及び運動量の交換効率に関する基礎実験に基づく研究<sup>3)4)</sup>、半乾燥土壌面からの蒸発に関する基礎実験に基づく研究<sup>5)6)</sup>、植物体と大気の間の熱及び運動量の交換に関する基礎数値実験<sup>7)8)</sup>、土壌中の水輸送に関する基礎的研究<sup>9)</sup>等多くの研究が行われてきた。しかし、これらのモデルは複合系内の水や熱の動きの一部を表すもので、系全体をカバーするものではなかった。

他方のモデル化は、各応用において目的とする出力に対する各素過程の相対的重要性、基礎的知見の制約、及び計算機及び計算技術の制約を考慮して、複合系全体のモデルを構築するもので、応用的性質が強い。この立場でのモデル化の多くは、気候及び局地気象に及ぼす地表面過程の影響を評価する目的でなされたものである<sup>10)11)</sup>。従って、幾つかの素過程は、その重要性を認識しつつも、かなり簡単化されおり、複合系そのものを評価対象とした場合には必ずしも十分なモデルではない。

最近では、気象学、環境科学（工学）、農学（林学）等の関連する分野で、この複合系の複雑さに正面から立ち向かうモデル化が見られるようになってきた。これは、一つには種々の素過程に関する知見が蓄積されつつあることによる<sup>12)13)</sup>。計算機の能力が年々飛躍的に向上し、その制約を考慮する必要がなくなりつつあることも理由の一つであろう。このような状況下では、できる限り詳細なモデルの枠組みを構築し、素過程については基礎的な実験と理論による知見を組み込むことにより、野外での総合的な実験と対置できる本来の意味での数値実験が可能になりつつあると思われる。このようなモデルは、濃度や線量などを評価する単目的な実用モデルとの役割を包

含しつつ、複合系の挙動を総合的に再現しその特性を明らかにするための種々の数値実験が可能な研究指向の性質を持つ。

素過程に関する知見が蓄積されつつあるとしても、現状ではそれは現存する地表面種類（植生、土壌）を網羅している訳ではない。従って、上記の方針で構築されたモデルはまさしくモデルの枠組みであって、実際にある対象に適用する場合にはその対象に関する基礎実験を組み合わせて数値実験を行う必要がある。言い換えれば、前述の基礎研究的モデル化においては、基礎実験での作業モデルまたは理論モデルをサブモデル（单一の過程を表す部分モデル）として組み込んで種々のテストを行うための器としての役割を果たす。

本報告は、以上の考えに基づいた大気－植生－土壌複合系内の水、熱、運動量、及びその他の関連物理量の挙動を表す3次元数値モデルの開発の第一段階として開発した裸地－大気系1次元モデルの内容をまとめたものである。本モデルで対象とする系の典型的な大きさは、土壌としては地表から数十cmまたは最大1m程度の表層土壌、大気は混合層およびその上の自由大気を含む地表から数kmである。大気モデルの多くの部分は1次元気象モデル（PHYD1V3）<sup>14)</sup>を用いている。

## 2. 大気モデル

以下で記述する大気モデルは、地表面と接して大気・地表間の物質および物理量交換過程を規定する接地層、鉛直方向の混合を規定する大気境界層およびその上の自由大気の運動および属性を記述したモデルであり、一般的には大気境界層モデルと呼ばれる。

大気の属性として、風速(水平2成分： $u, v$ )、温位  $\theta$ 、比湿  $q_a$ 、乱流運動エネルギー  $e (= u'^2 + v'^2 + w'^2: twice of the conventional definition)$ 、乱流長さスケールと乱流運動エネルギーの積  $e \lambda$ 、及び霧水量  $w_f$ を考える。属性を表す物理量を  $\phi$  で表すと、支配方程式は次の式になる。

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

式(2-29)の最終項は外力項を表し、より一般的には温位及び比湿に対して次のように表される<sup>15)</sup>。

$$\text{温位: } F = (\hat{H}_r + aH_c + \hat{H}_f + \hat{H}_{pr}) / (\rho C_p) \quad (2-2)$$

$$\text{比湿: } F = \{a(E_d + E_s) + \hat{E}_f + \hat{E}_{pr}\} / \rho \quad (2-3)$$

と表される。ここで、正の  $\hat{E}_f$  は大気中微水滴の蒸発を表す。 $\hat{H}_f$  はその時に大気中から奪われる潜熱を表す。正の  $\hat{E}_{pr}$  は雨滴からの蒸発を表し、その潜熱は  $\hat{H}_{pr}$  である。 $\hat{H}_r$  は水滴による放射の吸収及び射出にともなう加熱を表す。大気中水分(霧水、雨滴を含む)の相変化に伴う潜熱は大気から(に)奪われる(与えられる)と仮定した。また、 $E_d$  および  $E_s$  は、それぞれ葉面水滴からの蒸発、気孔からの蒸散を表す。

$$\hat{H}_f = -l\hat{E}_f \quad (2-4)$$

$$\hat{H}_{pr} = -l\hat{E}_{pr} \quad (2-5)$$

本報告で対象とするモデルでは植生層を含まないので、以下の記述も含めて全て単位体積当たりの葉面積密度は  $a=0$  である。また、雨滴からの蒸発と放射による加熱も無視する。

風速成分の外力項は、コリオリ力、圧力勾配力及び葉面の抵抗の和で

$$x\text{成分: } F = f(v - v_g) - ac_D |u| u \quad (2-6)$$

$$y\text{成分: } F = -f(u - u_g) - ac_D|\mathbf{u}|\nu \quad (2-7)$$

と表される。ここで、 $f$ はコリオリパラメータ、 $c_D$ は葉面の抵抗係数である。

乱流運動エネルギー $e$ 及び乱流長さスケールと乱流運動エネルギーの積 $e\lambda$ も式(2-1)で表される。それぞれに対する外力項は

$$e : \quad F = P_{es} + P_{eb} - D_{ev} + P_{ec} \quad (2-8)$$

$$e\lambda : \quad F = P_{\lambda s} + P_{\lambda b} - D_{\lambda v} + P_{\lambda c} \quad (2-9)$$

ここで、式(2-8)、(2-9)の右辺第1項はshearによる生成、第2項は浮力による生成・減衰、第3項は粘性消散、第4項は葉面による生成を表す。

$$P_{es} = 2K_M \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (2-10)$$

$$P_{eb} = 2K_H \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (2-11)$$

$$D_{ev} = 2e^{3/2} / (B_1 \lambda) \quad (2-12)$$

$$P_{ec} = 2ac_D|\mathbf{u}|^{3/2} \quad (2-13)$$

$$P_{\lambda s} = \lambda E_1 P_{es} / 2 \quad (2-14)$$

$$P_{\lambda b} = \lambda E_1 P_{eb} / 2 \quad (2-15)$$

$$D_{\lambda v} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + E_2 \left( \frac{\eta \lambda}{kz} \right)^2 \right\} \quad (2-16)$$

$$P_{\lambda c} = \lambda P_{ec} / 2 \quad (2-17)$$

$$(B_1, E_1, E_2) = (10.1, 1.8, 1.33)$$

ここで、 $g$ は重力加速度、 $B_1$ 、 $E_1$ 及び $E_2$ 乱流クロージャーモデルの定数、 $k=0.4$ はカルマン定数である。

大気中水蒸気のうち過飽和分は凝結し、大気に対する平均鉛直速度を持たない水滴微粒子(霧)を作るものと仮定する。また、水滴微粒子の生成・消失には大気中水蒸気の相変化(後述)、雨滴による捕集及び葉面による捕集が関与すると仮定する。大気中の水滴微粒子の量は単位重量空気に含まれる水微粒子の水分重量 $w_f$ で表すこととする。 $w_f$ の収支も同様に式(2-1)で表される。生成・消失を表す外力項は次式で表される。

$$w_f : \quad F = -(\hat{E}_f + \hat{E}_{col} + aE_{cap}) / \rho \quad (2-18)$$

大気中の水蒸気量が飽和しておらず水滴微粒子が存在するときには水滴微粒子からの蒸発が起こり、大気が過飽和の場合は水滴微粒子の生成・成長が起こる。これらの相変化は、微少時間 $\delta t$ の間に、以下の関係を満たすように速やかに起こるものとする。

$$\hat{E}_f \delta t = \rho \min(q_{sat}(T_{as}) - q_a, w_f) = -C_p \rho (T_{as} - T_a) / l \quad (2-19)$$

$$\hat{H}_f \delta t = \rho C_p (T_{as} - T_a) \quad (2-20)$$

ここで、 $T_a$ 及び $q_a$ は相変化前の気温及び比湿、 $T_{as}$ は相変化後の気温である。この式では相変化に伴う熱の開放・吸収によって気温が変化し、それにともない飽和比湿が変化することを表している。また $\min(q_{sat}(T_{as}) - q_a, w_f)$ はいくら大気の飽和欠損が大きくても蒸発の最大値は $w_f$ であることを表している。

### 3. 土壌モデル

裸地においては地表面での再配分過程は本質的に重要である。また、土壌では熱容量が大きいため、内訳及び空間的観点からの熱再配分に加えて時間的再配分を見る場合には土壌の蓄熱効果は無視し得ない。すなわち、日射・放射の吸収から昇温及び顕熱潜熱としての熱の放出まで時間的な遅れが生じるとともにその内訳も変化する。

水の再配分についても全く同様である。降水または結露によって地表面に与えられた水は土壌中の輸送過程によって土壌内部に輸送・蓄積され、それが蒸発するためには土壌中の輸送または根を通した輸送を再度経由する必要がある。従って、時間的再配分も起こることになる。

これらのことと現実的に表現するためには、地表面での熱、水蒸気、及び液体水の交換だけでなく、土壌を実体(厚み)のある層として土壌中の熱伝導及び水輸送を考慮したモデルを構築する必要がある。

日変化程度の時間スケールを対象とした場合、数10cmから1mより深い層では変化の振幅が極めて小さい。一方、水平方向の不均一性が問題になるのはこれより数桁大きい空間スケールである。従って、土壌中の過程は実質的には水平勾配(水平方向の輸送過程)を無視した鉛直方向(深さ方向)の1次元問題として扱うことができる。

以上に示した土壌過程の特性を考慮して、以下のモデル化では以下の物理量の空間分布及び時間変化を評価するモデルとする。

土壌の温度(地温)

土壌の体積含水率(液体水)

土壌中空気の比湿

これらに関連する土壌中の物理過程として以下を考慮する。

土壌中の熱伝導及び水分(液相及び気相)輸送と相変化

根による水分の吸い上げ(蒸散)

地表面での日射及び長波放射の吸収、反射、射出(長波放射のみ)

大気-地表面間の顕熱交換及び水蒸気交換(結露を含む)

地表面への降水

根及び幹を通した熱輸送は微少なため無視する。地表面には土壌の飽和含水率を越えた水分(過剰水分)が存在することができるが、地表面での流出(水平方向のフラックス)は無いものと仮定する。ただし都市域等の特殊な場合は過剰水分の全部または一定割合は消失すると仮定するのが現実的であろう。これは排水溝による排水等の過程を表す。また、現在のところ本モデルには積雪またはその他の個体相の水は含めない。

鉛直座標は大気層の座標系と連続性を持たせるため、地表面を $z=0$ とし、下向きを負とする。

### 3.1 土壌中の熱伝導

土壌は温度の変化にともない熱を蓄積し、または放出することにより熱の時間的再配分に直接的に関与する。また、温度の鉛直勾配は水蒸気のavailabilityの勾配に大きく関与し、土壌と大気の間の水蒸気交換に影響する。

土壌温度（地温）は以下の1次元熱伝導方程式で表される。

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K_s \frac{\partial T_s}{\partial z} + \frac{\hat{H}_b}{C_s \rho_s} - \frac{C_w E_w}{C_s \rho_s} \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad (3-1)$$

ここで、右辺第2項は土壌中水分の相変化にともなって開放（吸収）される潜熱、第3項は液体水の移動に伴う熱の移動を表す。この方程式の地表面での境界条件は熱収支式

$$R_0 = H_0 + G_0 + H_{p0} \quad (3-2)$$

である。ここで、 $R_0$ は地表面での放射収支である。

$$R_0 = (1 - A_b) S \downarrow_0 + \varepsilon_b (L \downarrow_0 - \sigma T_{sfc}^4) \quad (3-3)$$

式(3-2)の右辺は、地表面での顯熱フラックス、伝導熱フラックス、及び降水に伴う冷却で、それぞれ次の式で表される。

$$H_0 = C_p \rho c_{H0} |\mathbf{u}_r| (T_{sfc} - T_r) \quad (3-4)$$

$$G_0 = C_s \rho_s K_s \left. \frac{\partial T_s}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (3-5)$$

$$H_{p0} = C_w P_{r0} (T_{sfc} - T_p) \quad (3-6)$$

ここで、 $c_{H0}$ 、 $|\mathbf{u}_r|$ 、及び $T_r$ はそれぞれある基準地上高度(reference height: 数値モデルでは大気最下層の高度)での顯熱交換係数、風速、及び気温である。

通常の地表面熱収支式では土壌水分の蒸発は地表面で起こるとして熱収支式の右辺に潜熱項を含むが、本モデルでは土壌水分の蒸発による潜熱は実際に蒸発が起こっている深さの土壌から奪われるとして地表面熱収支式には潜熱項を含めない。湿潤土壌の場合、地表面からの水蒸気フラックスのほとんどは地表近傍の土壌からの蒸発によるので、本土壤モデルの熱収支式と従来のそれとは結果は大きく異なることはない。

しかし、土壤が乾燥状態に近くなると蒸発は土壤のより深い部分で起こるため、地表面熱収支に潜熱項を含めた従来のモデルに比べ本モデルではより現実的な再現が可能となる。

降水による冷却・加熱の大きさは、降水の温度と地表面温度の差が1 °C当たり、降水強度 $1 \text{ mmh}^{-1}$ 当たり約 $1.2 \text{ Wm}^{-2}$ に相当するため、無視することはできない。この熱は全て地表面に与えられる（または地表面から奪われる）と仮定する。

地温日変化の振幅は深さとともに指数関数的に減少し、深さ数 $10 \text{ cm}$ から $1 \text{ m}$ 程度での日変化は極めて小さいため、温度一定を式(3-1)の土壤最深層の境界条件とする。

### 3.2 土壤中液体水

土壤の体積含水率 $\eta_w$ は土壤水フラックス $E_w$ 、蒸散にともなう根による水の吸い上げ $\hat{E}_t$ 及び土壤中液体水の蒸発 $\hat{E}_b$ を用いて

$$\frac{\partial \eta_w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial E_w}{\partial z} + \hat{E}_t + \hat{E}_b \right) \quad (3-7)$$

によって予報的に求められる。土壤水フラックスは次の式で与えられる。

$$E_w = -\rho_w \left( D \frac{\partial \eta_w}{\partial z} + K \right) \quad (3-8)$$

ここで、hydraulic conductivity  $K$ とmoisture potential  $\Psi$ を用いて、 $D$ は次式で定義される。

$$D = K \frac{\partial \Psi}{\partial \eta_w} \quad (3-9)$$

例えばClapp and Hornberger<sup>16)</sup>の経験式によると、

$$\Psi = \Psi_s \left( \frac{\eta_w}{\eta_{ws}} \right)^{-b} \quad (3-10)$$

$$K = K_s \left( \frac{\eta_w}{\eta_{ws}} \right)^{2b+3} \quad (3-11)$$

である。ここで、 $\Psi_s$ 、 $K_s$ 、 $\eta_{ws}$ 、 $b$ は土壤種類ごとに異なる値を持つ定数である。

蒸散にともなう根による水の吸い上げ $\hat{E}_t$ は次式で定義される。

$$\hat{E}_t(z) = \int_0^{H_c} R_w(z; z') a(z') E_s(z') dz' \quad (3-12)$$

ここで  $R_w(z; z')$  は、高度  $z'$  の葉面から蒸散する水蒸気のうちで地中の  $z \sim z + dz$  の間の層から吸い上げられる割合が  $R_w(z; z') dz$  であることを表す。従って、 $R_w(z; z')$  は次式を満たす。

$$\int_{H_B}^0 R_w(z; z') dz = 1 \quad (3-13)$$

$H_c$  及び  $H_B$  はそれぞれ植生層の上端及び土壤最深層の  $z$  座標である。

$\hat{E}_b$  は土壤中液体水から土壤中空気への蒸発であり、次の式になる。

$$r_b \hat{E}_b = \rho \{ q_{sat}(T_s) - q_s \} \quad (3-14)$$

ここで、 $r_b$  は土壤中蒸発の抵抗で体積含水率の関数であり、例えば Kondo and Saigusa<sup>6)</sup> により

$$r_b = 0.02 F_1 (\eta_{ws} - \eta_w)^{F_2} D_w^{-1} \quad (3-15)$$

の実験式が得られている。 $F_1$  及び  $F_2$  は土壤種類により異なる定数である。上の式で表された抵抗には、含水率が小さい場合に水分は土壤中の微小な空隙にのみ存在し蒸発が抑制される効果が含まれている。

しかし  $q_{sat}(T_s) < q_s$  の場合（土壤中空気の温度は土壤温度と等しいとしてあつかうので、これは土壤中空気が過飽和である場合と同じ意味である）は、水蒸気の凝結は小空隙以外でも直接空気に触れている土壤粒子表面に対して起こると考えられるので、式(3-15)の抵抗値は過大評価である。そこで本モデルではこの場合、土壤への凝結は微小時間  $\delta t$  の間に以下の関係を満たすように速やかに起こるものと仮定する。

$$\hat{H}_b = -l \hat{E}_b \quad (3-16)$$

$$\hat{E}_b \delta t = \rho (\eta_{ws} - \eta_w) (q_{sat}(T_{ss}) - q_s) \quad (3-17)$$

$$\hat{H}_b \delta t = C_s \rho_s (T_{ss} - T_s) \quad (3-18)$$

ここで、 $T_{ss}$  は相変化後の地温、 $\hat{H}_b \delta t$  は微小時間の間に凝結によって開放される潜熱であり、それは空気を含む土壤全体の昇温を起こすと仮定した。

式(3-7)の地表面での境界条件は次式よって与えられる。

$$E_{w0} = -P_{r0} + E_r \quad (3-19)$$

### 3.3 土壌中水蒸気

土壌中の水分輸送過程として前節の液体水輸送の他に土壌中空気に含まれる水蒸気の拡散を考慮する。地表面が半乾燥状態の場合、地表面から大気に向かう水蒸気フラックスの中で土壌中で蒸発し地表面まで拡散により輸送される水蒸気の割合が相対的に大きくなり、この過程は大気-土壌間水蒸気交換の律速過程として重要となる。

土壌中の水蒸気拡散は次の1次元拡散方程式により表される。

$$\frac{\partial \{(\eta_{ws} - \eta_w)q_s\}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} D_w f(\eta_w) \frac{\partial q_s}{\partial z} + \hat{E}_b \quad (3-20)$$

ここで、左辺の括弧内の差は土壌中の空隙率を表す。右辺の係数  $f(\eta_w)$  は土壌空隙のねじれ度を表し、例えばJackson et al.<sup>[7]</sup> により次の式が提案されている。

$$f(\eta_w) = (\eta_{ws} - \eta_w)/15 \quad (3-21)$$

式(3-20)の境界条件は、地表面で大気中の水蒸気フラックスとの連続性を満たすように次の式で与える。

$$-\rho D_w f(\eta_{sfc}) \left. \frac{\partial q_s}{\partial z} \right|_{sfc} + E_{b0} = E_0 \quad (3-22)$$

ここで、

$$E_{b0} = \int_{-\delta z_0}^0 \hat{E}_b dz \quad (3-23)$$

は地表面から深さ  $\delta z_0$  までの層の土壌空隙は直接大気と接していて、その層からの蒸発は土壌による拡散抑制を受けないことを表している。 $E_0$  は地表面から大気に向かう水蒸気フラックスで、地表面の比湿（土壌中空気の比湿の地表面での値）とreference heightでの大気の比湿の差を用いて

$$E_0 = \rho c_{E0} |\mathbf{u}_r| (q_{sfc} - q_r) \quad (3-24)$$

により表される。土壤最深層ではフラックスは無いとする。

### 3.4 大気-土壤間の交換

大気と土壤との間の顯熱交換は式(3-4), 水蒸気交換は式(3-24)によって表される。これらと同様に、水平運動量の交換(地表面の摩擦抵抗,  $\tau_x, \tau_y$ )は次の式で表される。

$$(\tau_x, \tau_y) = \rho c_{M0} |\mathbf{u}_r| (u_r, v_r) \quad (3-25)$$

これらの表式で用いられている係数(バルク係数)はMonin-Obukhovの相似則(例えば文献19)により、次の式で表される。

$$c_{M0} = \frac{k^2}{\{\ln(z_r/z_0) + \psi_M(\zeta_r)\}^2} \quad (3-26)$$

$$c_{H0} = \frac{k}{\ln(z_r/z_0) + \psi_M(\zeta_r)} \cdot \frac{k}{\ln(z_r/z_T) + \psi_H(\zeta_r)} \quad (3-27)$$

$$c_{E0} = \frac{k}{\ln(z_r/z_0) + \psi_M(\zeta_r)} \cdot \frac{k}{\ln(z_r/z_q) + \psi_E(\zeta_r)} \quad (3-28)$$

ここで、 $z_0, z_T, z_q$ はそれぞれ運動量、温位、比湿に対する粗度長で、地表面の凹凸等に依存する。分母の第2項は係数の安定度依存性を表す部分で、接地層の普遍シーアー関数 $\phi_M, \phi_H, \phi_E$ を用いて次の式で定義される。

$$\psi_M(\zeta_r) = \int_{\zeta_0}^{\zeta_r} \frac{\phi_M(\zeta) - 1}{\zeta} d\zeta \quad (3-29)$$

$$\psi_H(\zeta_r) = \int_{\zeta_T}^{\zeta_r} \frac{\phi_H(\zeta) - 1}{\zeta} d\zeta \quad (3-30)$$

$$\psi_E(\zeta_r) = \int_{\zeta_q}^{\zeta_r} \frac{\phi_E(\zeta) - 1}{\zeta} d\zeta \quad (3-31)$$

ここで、 $\zeta$ は無次元安定度で、Monin-Obukhovの安定度長 $L$ を用いて次の式で定義される。

$$\zeta = \frac{z}{L} \quad (3-32)$$

$$\zeta_0 = \frac{z_0}{L} \quad (3-33)$$

$$\zeta_T = \frac{z_T}{L} \quad (3-34)$$

$$\zeta_q = \frac{z_q}{L} \quad (3-35)$$

$$L = -\frac{\left(\frac{\tau}{\rho}\right)^{3/2}}{k \frac{g}{T_a} \frac{H_0}{C_p \rho}} \quad (3-36)$$

普遍シアー関数は種々の関数形が提案されている。例えば、次の式<sup>18)19)</sup>は比較的広い安定度範囲で用いることができる。

$$\phi_M = \begin{cases} (1 - 16.4\zeta)^{-1/4} & -10 < \zeta < 0 \\ 1 + \frac{8\zeta}{1 + \zeta} & \zeta \geq 0 \end{cases} \quad (3-37)$$

$$\phi_E = \phi_H = \begin{cases} (1 - 16.4\zeta)^{-1/2} & -10 < \zeta < 0 \\ 1 + \frac{8\zeta}{1 + \zeta} & \zeta \geq 0 \end{cases} \quad (3-38)$$

## 4. 数値解法

第2章および第3章でモデルの基本方程式系を構築した。本章では基本方程式系を数値的に解くための方法を論じる。

本モデルでは差分法を用いて解く。鉛直格子点番号を  $k$  とし、各変数に括弧付きの下付き添字として付す。格子点の中間の値は(整数  $\pm 1/2$ )で表す。また、鉛直方向については地表面を0とし、上向きを正とする。従って、土壤中の格子点番号は負である。格子点番号の定義をFig. 4-1に示す。時間は括弧付き上付添字で表す。ただし、局所的な関係を扱う場合、または時間に関する表示が必要ない場合は添え字の一部または全部を省略する場合がある。

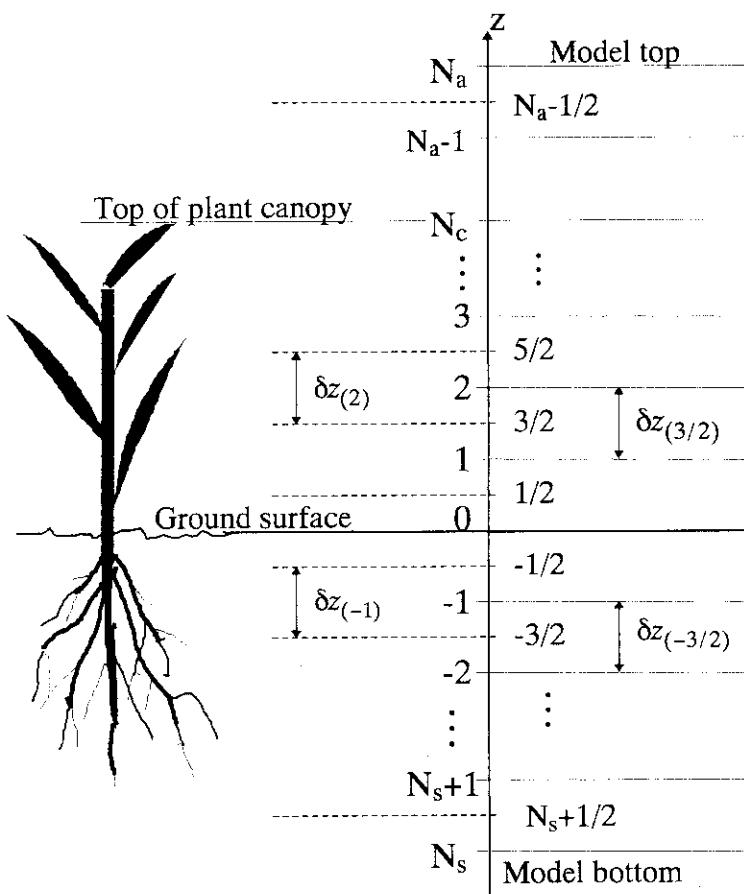


Fig. 4-1 Definition of vertical grid numbering system.

### 4.1 拡散方程式の数値解法

本モデルの1次元拡散方程式では陰解法によって解かれる。ここでは、全ての方程

式に共通な部分について記述する。各方程式毎の記述は次節以降に述べる。一般的な  
1次元拡散方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial \phi}{\partial z} + A \phi + F \quad (4-1)$$

に対する差分式は、

$$\phi_{(k)}^{(t+\delta t)} - \phi_{(k)}^{(t)} = \delta t (\Delta_{(k)} + A_{(k)}) \{ \mu \phi_{(k)}^{(t+\delta t)} + (1 - \mu) \phi_{(k)}^{(t)} \} + \delta t F_{(k)} \quad (4-2)$$

で与えられる。 $\mu = 0$ では完全陽解法、 $\mu = 1$ では完全陰解法、 $\mu = 1/2$ ではCrank-Nicolson法になる。大気層の格子番号 $k$ は、地表を0、上端を $N_a$ とする。土壤層の格子番号は、地表面を0、地中 deepest 層を $N_s$ と定義する。 $N_s$ は負の整数である。ここで、演算子 $\Delta_{(k)}$ は

$$\Delta_{(k)} \phi = \delta_{k+} (\phi_{(k+1)} - \phi_{(k)}) - \delta_{k-} (\phi_{(k)} - \phi_{(k-1)}) \quad (4-3)$$

$$\delta_{k+} = \frac{\delta t K_{(k+1/2)}}{\delta z_{(k)} \delta z_{(k+1/2)}} \quad (4-4)$$

$$\delta_{k-} = \frac{\delta t K_{(k-1/2)}}{\delta z_{(k)} \delta z_{(k-1/2)}} \quad (4-5)$$

$$\delta z_{(k)} = z_{(k+1/2)} - z_{(k-1/2)} \quad (4-6)$$

である。この方法によると、解くべき方程式は $\phi^{(t+\delta t)}$ に関する連立方程式となり、その $k$ 番目（土壤中では $-k+1$ 番目、 $k$ は負）の方程式は

$$\alpha_{k,k-1} \phi_{(k-1)}^{(t+\delta t)} + \alpha_{k,k} \phi_{(k)}^{(t+\delta t)} + \alpha_{k,k+1} \phi_{(k+1)}^{(t+\delta t)} = \gamma_k \quad (4-7)$$

で表される。 $\alpha_{i,j}$ は係数行列（土壤中では0行0列から始まる）の*i*行*j*列の要素で（土壤中では*i*行 $-j$ 列、*i*及び*j*は負である）、この係数行列は3重対角行列になる。境界（ $k$ が0、1、 $N$ または $N_s$ ）以外では各係数は次の式で表される。

$$\alpha_{k,k-1} = -\mu \delta_{k-} \quad (4-8)$$

$$\alpha_{k,k} = 1 - \mu A \delta t - \alpha_{k,k-1} - \alpha_{k,k+1} \quad (4-9)$$

$$\alpha_{k,k+1} = -\mu \delta_{k+} \quad (4-10)$$

$$\gamma_k = \phi_{(k)}^{(t)} + (1 - \mu) \delta t \Delta_{(k)} \phi_{(k)}^{(t)} + (1 - \mu) A_{(k)} \delta t \phi_{(k)}^{(t)} + \delta t F_{(k)} \quad (4-11)$$

この連立方程式はGauss消去法によって解く。対角成分 $\alpha'_{k,k}$ が1であり、かつ左隣の対角成分 $\alpha'_{k,k-1}$ が0である係数行列を求ることにより、解くべき方程式は次の式となる。

$$\phi_{(k)}^{(t+\delta t)} + \alpha'_{k,k-1} \phi_{(k-1)}^{(t+\delta t)} = \gamma'_k \quad (4-12)$$

ここで、

$$\alpha'_{k,k-1} = -\frac{\alpha_{k,k-1}}{\alpha_{k,k} - \alpha_{k,k+1}\alpha'_{k+1,k}} \quad (4-13)$$

$$\gamma'_k = -\frac{\gamma_k - \alpha_{k,k+1}\gamma'_{k+1}}{\alpha_{k,k} - \alpha_{k,k+1}\alpha'_{k+1,k}} \quad (4-14)$$

である。前進代入の初期値は

(大気中)

$$\alpha'_{2,1} = \frac{\alpha_{2,1}}{\alpha_{1,1}} \quad (4-15)$$

$$\gamma'_1 = \frac{\gamma_1}{\alpha_{1,1}} \quad (4-16)$$

(土壤中)

$$\alpha'_{0,-1} = \frac{\alpha_{0,-1}}{\alpha_{0,0}} \quad (4-17)$$

$$\gamma'_0 = \frac{\gamma_0}{\alpha_{0,0}} \quad (4-18)$$

で得られる。

#### 4.2 大気中の拡散方程式の数値解法

大気中の1次元拡散方程式の数値解法については、上記方法に基づいた差分式が境界条件の取り扱い方を含めて別文献<sup>14)</sup>に詳細に記述されているので、本報告では省略する。

### 4.3 热伝導方程式の数値解法

热伝導方程式(3-1)は右辺第3項を無視すると式(4-1)と直接対応し、式(4-2)の $K$ は温度伝導度と直接対応する。また $A$ は0、 $F$ は凝結の潜熱解放にともなう温度上昇に対応する。

$$\alpha_{k,k-1} = -\frac{\mu \delta t K_{s,(k-1/2)}}{\delta z_{(k)} \delta z_{(k-1/2)}} \quad (4-19)$$

$$\alpha_{k,k} = 1 - \alpha_{k,k-1} - \alpha_{k,k+1} \quad (4-20)$$

$$\alpha_{k,k-1} = -\frac{\mu \delta t K_{s,(k+1/2)}}{\delta z_{(k)} \delta z_{(k+1/2)}} \quad (4-21)$$

$$\gamma_k = T_{s,(k)}^{(t)} + (1-\mu) \delta t \Delta_{(k)} T_s^{(t)} - \frac{\delta t l \hat{E}_{b,(k)}}{C_{s,(k)} \rho_{s,(k)}} \quad (4-22)$$

$k=0$ での境界条件は式(3-2)により与えられる。まず、式(3-3)-(3-6)を式(3-2)に代入し、 $T_{s,(0)}^{(t+\delta t)}$ 及び $T_{s,(-1)}^{(t+\delta t)}$ について整理すると、

$$\alpha_{0,0} = \mu (4 \varepsilon_b \sigma T_{s,(0)}^{(t)} )^3 + \beta_G + \beta_P + \beta_H \quad (4-23)$$

$$\alpha_{0,-1} = -\mu \beta_G \quad (4-24)$$

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= (1 - A_b) S_{(0)} + \varepsilon_b L_{(0)} + (4\mu - 1) \varepsilon_b \sigma T_{s,(0)}^{(t)} + \beta_H T_r \\ &\quad + \beta_G (\mu - 1) (T_{s,(0)}^{(t)} - T_{s,(-1)}^{(t)}) + \beta_P \{(\mu - 1) T_{s,(0)}^{(t)} + T_p\} \end{aligned} \quad (4-25)$$

$$\beta_H = C_p \rho c_{H0} |\mathbf{u}_r| \quad (4-26)$$

$$\beta_G = \frac{C_{s,(-1/2)} \rho_{s,(-1/2)} K_{s,(-1/2)}}{\delta z_{(-1/2)}} \quad (4-27)$$

$$\beta_P = C_w P_{r0} \quad (4-28)$$

を得る。ここで、 $T_{s,(0)}^{(t+\delta t)}$ に関して非線形なものは、1時刻ステップ前の値 $T_{s,(0)}^{(t)}$ の回りのTaylor展開の1次の項まで取り線形化した。後退代入は地中深層での温度を初期値として式(4-12)により順次地温を評価する。

式(3-1)の右辺第3項は形式上は移流項に相当するため、これを風上1次差分で表した場合の数値拡散は、拡散係数が

$$K = \frac{\delta z}{2} \left| \frac{C_w E_w}{C_s \rho_s} \right| \approx \frac{\delta z}{2} \left( D \left| \frac{\delta \eta_w}{\delta z} \right| + K_s \right)$$

の大きさを持つと見積もられる。格子間隔 $\delta z$ が0.1mの場合、砂質土壌で土壤水が飽和に近い場合、この拡散係数は $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  のオーダーである。その他の土壌や砂質土壌でも半湿潤 ( $\eta_w \approx \eta_{ws}/2$ ) 以下の場合は $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  のオーダーである。一方、土壤の熱拡散係数は $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  のオーダーであるため、湿潤砂質土壌以外では数値拡散が無視できる。従って、本研究で目的とする一般的なモデルの枠組みとしては、1次差分で十分であると考えられる。

#### 4.4 土壤中液体水輸送方程式の数値解法

体積含水率の計算は熱伝導方程式と同じ数値解法を用いる。ただし、以下のように係数の従属変数依存性を考慮する。式(3-7)の差分式として次式を用いる。

$$\frac{\eta_{w,(k)}^{(t+\delta t)} - \eta_{w,(k)}^{(t)}}{\delta t} = \nabla_{(k)} \{ D(\eta_w^*) \nabla \eta_w^* \} + \nabla_{(k)} K(\eta_w^*) - \frac{\hat{E}_{t,(k)}(\eta_w)}{\rho_w} - \frac{\hat{E}_{b,(k)}(\eta_w^*)}{\rho_w} \quad (4-29)$$

ただし、

$$\nabla_{(k)} \phi = \frac{\phi_{(k+1/2)} - \phi_{(k-1/2)}}{\delta z_{(k)}} \quad (4-30)$$

$$\nabla_{(k)} (D \nabla \phi) = \frac{D_{(k+1/2)} \nabla_{(k+1/2)} \phi - D_{(k-1/2)} \nabla_{(k-1/2)} \phi}{\delta z_{(k)}} \quad (4-31)$$

$$\begin{aligned} \eta_{w,(k)}^* &= \mu \eta_{w,(k)}^{(t+\delta t)} + (1-\mu) \eta_{w,(k)}^{(t)} \\ &= \eta_{w,(k)}^{(t)} + \mu \delta \eta_{w,(k)} \end{aligned} \quad (4-32)$$

ここで、 $\delta \eta_{w,(k)} = \eta_{w,(k)}^{(t+\delta t)} - \eta_{w,(k)}^{(t)}$  である。 $D$ 、 $K$ 等を $\eta_{w,(k)}^{(t)}$ の回りでTaylor展開し、1次の項まで取ると差分式として次式を得る。

$$\begin{aligned}
\frac{\delta \eta_{w,(k)}}{\delta t} = & \nabla_{(k)} \{ D(\eta_w) \nabla \eta_w + \mu \delta \eta_w D'(\eta_w) \nabla \eta_w + \mu D(\eta_w) \nabla \delta \eta_w \} \\
& + \nabla_{(k)} K(\eta_w) + \mu \nabla_{(k)} \{ \delta \eta_w K'(\eta_w) \} - \frac{1}{\rho_w} \{ \hat{E}_t(\eta_{w,(k)}) - \mu \delta \eta_{w,(k)} \hat{E}'_t(\eta_{w,(k)}) \} \\
& - \frac{1}{\rho_w} \{ \hat{E}_b(\eta_{w,(k)}) + \mu \delta \eta_{w,(k)} \hat{E}'_b(\eta_{w,(k)}) \}
\end{aligned} \tag{4-33}$$

ここで、 $D'$ 及び $K'$ は $D$ 及び $K$ の $\eta$ に関する微分を表す。また、 $\eta_{w,(k)}^{(t)}$ の上添え字は省略した。この差分式は $\delta \eta_{w,(k)}$ に関する連立方程式を構成する。ここで、

$$D_{(k \pm 1/2)} = \frac{D(\eta_{w,(k \pm 1)}) + D(\eta_{w,(k)})}{2} \tag{4-34}$$

$$D'_{(k \pm 1/2)} = \frac{D'(\eta_{w,(k \pm 1)}) + D'(\eta_{w,(k)})}{2} \tag{4-35}$$

$$K'_{(k \pm 1/2)} = \frac{K'(\eta_{w,(k \pm 1)}) + K'(\eta_{w,(k)})}{2} \tag{4-36}$$

$$\delta \eta_{w,(k \pm 1/2)} = \frac{\delta \eta_{w,(k \pm 1)} + \delta \eta_{w,(k)}}{2} \tag{4-37}$$

の省略表記を用いると、未知量 $\delta \eta_{w,(k)}$ を含む演算子 $\nabla$ の展開により次式を得る。

$$\begin{aligned}
& \delta \eta_{w,(k)} \left[ 1 - \frac{\mu \delta t}{\rho_w} \{ \hat{E}'_t(\eta_{w,(k)}) + \hat{E}'_b(\eta_{w,(k)}) \} \right] \\
& - \frac{\mu \delta t}{\delta z_{(k)}} \left[ D'_{(k+1/2)} (\nabla_{(k+1/2)} \eta_w) \delta \eta_{w,(k+1/2)} - D'_{(k-1/2)} (\nabla_{(k-1/2)} \eta_w) \delta \eta_{w,(k-1/2)} \right. \\
& + D_{(k+1/2)} \frac{\delta \eta_{w,(k+1)} - \delta \eta_{w,(k)}}{\delta z_{(k+1/2)}} - D_{(k-1/2)} \frac{\delta \eta_{w,(k)} - \delta \eta_{w,(k-1)}}{\delta z_{(k-1/2)}} \\
& \left. + K'_{(k+1/2)} \delta \eta_{w,(k+1/2)} - K'_{(k-1/2)} \delta \eta_{w,(k-1/2)} \right] \\
& = \delta t \left[ \nabla_{(k)} \{ D(\eta_w) \nabla \eta_w + K(\eta_w) \} - \frac{\hat{E}_t(\eta_{w,(k)}) + \hat{E}_b(\eta_{w,(k)})}{\rho_w} \right]
\end{aligned} \tag{4-38}$$

これより、式(4-7)の係数は次のように得られる。

$$\alpha_{k,k+1} = - \frac{\mu \delta t}{\delta z_{(k)}} \left( \frac{D_{(k+1/2)}}{\delta z_{(k+1/2)}} + \frac{K'_{(k+1/2)}}{2} + \frac{D'_{(k+1/2)} \nabla_{(k+1/2)} \eta_w}{2} \right) \tag{4-39}$$

$$\alpha_{k,k} = 1 - \frac{\mu\delta t}{\rho_w} (\hat{E}'_{t,(k)} + \hat{E}'_{b,(k)}) + \frac{\mu\delta t}{\delta z_{(k)}} \left( \frac{D_{(k+1/2)}}{\delta z_{(k+1/2)}} - \frac{K'_{(k+1/2)}}{2} \right. \\ \left. - \frac{D'_{(k+1/2)} \nabla_{(k+1/2)} \eta_w}{2} + \frac{D_{(k-1/2)}}{\delta z_{(k-1/2)}} + \frac{K'_{(k-1/2)}}{2} + \frac{D'_{(k-1/2)} \nabla_{(k-1/2)} \eta_w}{2} \right) \quad (4-40)$$

$$\alpha_{k,k-1} = - \frac{\mu\delta t}{\delta z_{(k)}} \left( \frac{D_{(k-1/2)}}{\delta z_{(k-1/2)}} - \frac{K'_{(k-1/2)}}{2} - \frac{D'_{(k-1/2)} \nabla_{(k-1/2)} \eta_w}{2} \right) \quad (4-41)$$

$$\gamma_k = \delta t \left( \nabla_{(k)} (D \nabla \eta_w + K) - \frac{\hat{E}_t(\eta_{w,(k)}) + \hat{E}_b(\eta_{w,(k)})}{\rho_w} \right) \quad (4-42)$$

ここで、式(3-9)-(3-11)を用いると、 $D(\eta_w)$ 、 $D'(\eta_w)$ 及び $K'(\eta_w)$ は次の式で与えられる。

$$D(\eta_w) = - \frac{b K_s \Psi_s}{\eta_{ws}} \left( \frac{\eta_w}{\eta_{ws}} \right)^{b+2} \quad (4-43)$$

$$D'(\eta_w) = - \frac{b(b+2) K_s \Psi_s}{\eta_{ws}^2} \left( \frac{\eta_w}{\eta_{ws}} \right)^{b+1} = \frac{b-2}{\eta_{ws}} D(\eta_w) \quad (4-44)$$

$$K'(\eta_w) = \frac{(2b+3) K_s}{\eta_{ws}} \left( \frac{\eta_w}{\eta_{ws}} \right)^{2b+2} = \frac{2b+3}{\eta_w} K(\eta_w) \quad (4-45)$$

$\hat{E}'_b$ は式(3-14)及び(3-15)を用いて

$$\hat{E}'_b = \rho \{ q_{sat}(T_s) - q_s \} \frac{\partial}{\partial \eta_w} \left( \frac{1}{r_b} \right) \\ = \frac{F_2 \hat{E}_b}{\eta_{ws} - \eta_w} \quad (4-46)$$

となる。また、 $\hat{E}_t$ は植生を含めない場合には0である。

テスト計算によると、以上の解法で  $E_{b,(0)}$  を  $\delta z_0$  の層からの蒸発として地表面水収支式に入れてかつ  $r_b$  を  $\eta_{w,(0)}$  から求めると、 $r_b$  が律速プロセス（半乾燥土壤）の場合には  $E_{b,(0)}$  と  $\eta_{w,(0)}$  が振動する。 $E_{b,(0)}$  は第1層 ( $\delta z_1$ ) からの蒸発として扱うと振動を回避できる。

土壤中の液体含水率に関する地表面の境界条件は式(3-19)で与えられる。左辺のフラックスを式(3-8)を用いて表すとこの式は次の式で表される。

$$-\rho_w \{ D(\eta_{w,(-1/2)}^*) \nabla_{(-1/2)} \eta_w^* + K(\eta_{w,(-1/2)}^*) \} = -P_{r0} + E_r \quad (4-47)$$

これを  $\delta \eta_{w,(0)}$  と  $\delta \eta_{w,(-1)}$  について整理すると、式(4-7)の係数は以下のとおりとなる。

$$\alpha_{0,0} = \mu \left( \frac{D'_{(-1/2)} \nabla_{(-1/2)} \eta_w + K'_{(-1/2)}}{2} + \frac{D_{(-1/2)}}{\delta z_{(-1/2)}} \right) \quad (4-48)$$

$$\alpha_{0,-1} = -\frac{\mu D_{(-1/2)}}{\delta z_{(-1/2)}} + \frac{\mu}{2} (D'_{(-1/2)} \nabla_{(-1/2)} \eta_w + K'_{(-1/2)}) \quad (4-49)$$

$$\gamma_0 = \frac{1}{\rho_w} (P_{r0} - E_r) - D_{(-1/2)} \nabla_{(-1/2)} \eta_w - K_{(-1/2)} \quad (4-50)$$

これを用いて地温と同様の計算方法により  $\delta \eta_w$  が評価される。

#### 4.5 土壤中水蒸気拡散方程式の数値解法

土壤中水蒸気量についても地温及び液体含水率と同様の解法を用いる。式(3-20)の差分式として次の式を用いる。

$$\frac{(\eta_{ws} - \eta_{w,(k)})(q_{s,(k)}^{(t+\delta t)} - q_{s,(k)}^{(t)})}{\delta t} = \nabla_{(k)} \{ D_w f(\eta_{w,(k)}) \nabla q_s^* \} + \frac{\hat{E}_b(q_{s,(k)}^*)}{\rho} \quad (4-51)$$

以下では  $D_w$  は定数として扱う。ここで、

$$\begin{aligned} q_{s,(k)}^* &= \mu q_{s,(k)}^{(t+\delta t)} + (1 - \mu) q_{s,(k)}^{(t)} \\ &= q_{s,(k)}^{(t)} + \mu \delta q_{s,(k)} \end{aligned} \quad (4-52)$$

この差分式は未知数  $\delta q_{s,(k)} = q_{s,(k)}^{(t+\delta t)} - q_{s,(k)}^{(t)}$  の連立方程式を構成する。差分式を  $\delta q_{s,(k)}$  に着目して線形化と演算子の展開を行うと次の式を得る。

$$\begin{aligned}
\frac{(\eta_{ws} - \eta_{w,(k)})\delta q_{s,(k)}}{\delta t} = & \frac{\mu D_w}{\delta z_{(k)}} \left\{ \frac{f(\eta_{w,(k+1/2)})}{\delta z_{(k+1/2)}} (\delta q_{s,(k+1)} - \delta q_{s,(k)}) \right. \\
& \left. - \frac{f(\eta_{w,(k-1/2)})}{\delta z_{(k-1/2)}} (\delta q_{s,(k)} - \delta q_{s,(k-1)}) \right\} \\
& + \frac{\mu \hat{E}'_b(q_{s,(k)}^{(t)}) \delta q_{s,(k)}}{\rho} + \nabla_{(k)} \{ D_w f(\eta_{w,(k)}) \nabla q_s^{(t)} \} + \frac{\hat{E}_b(q_{s,(k)}^{(t)})}{\rho}
\end{aligned} \tag{4-53}$$

これより、式(4-7)の各係数は次のように得られる。

$$\alpha_{k,k+1} = -\frac{\mu \delta t D_w f(\eta_{w,(k+1/2)})}{\delta z_{(k)} \delta z_{(k+1/2)}} \tag{4-54}$$

$$\alpha_{k,k} = \eta_{ws} - \eta_{w,(k)} - \frac{\mu \delta t \hat{E}'_b(q_{s,(k)}^{(t)})}{\rho} - \alpha_{k,k-1} - \alpha_{k,k+1} \tag{4-55}$$

$$\alpha_{k,k-1} = -\frac{\mu \delta t D_w f(\eta_{w,(k-1/2)})}{\delta z_{(k)} \delta z_{(k-1/2)}} \tag{4-56}$$

$$\gamma_k = \delta t \nabla_{(k)} \{ D_w f(\eta_w) \nabla q_s^{(t)} \} + \frac{\delta t \hat{E}_b(q_{s,(k)}^{(t)})}{\rho} \tag{4-57}$$

$$\hat{E}'_b = \frac{\partial \hat{E}}{\partial q_s} = \begin{cases} -\rho(\eta_{ws} - \eta_w) & \text{if } \hat{E}_b > \rho(\eta_{ws} - \eta_w)(q_{sat}(T) - q_s) \\ -\frac{\rho}{r_b} & \text{else} \end{cases} \tag{4-58}$$

土壤中水蒸気量の地表面での境界条件は式(3-22)及び(3-23)で与えられる。この境界条件の差分表示は

$$D_w f(\eta_{w,(-1/2)}) \frac{q_{s,(0)}^* - q_{s,(-1)}^*}{\delta z_{(-1/2)}} + \frac{\delta z_0}{r_b} \left\{ q_{s,(0)}^{(t+\delta t)} - q_{sat}(T_{s,(0)}) \right\} + c_{E0} |\mathbf{u}_r| (q_{s,(0)}^{(t+\delta t)} - q_r) = 0 \tag{4-59}$$

となり、これより以下の係数が得られる。

$$\alpha_{0,0} = \frac{\mu D_w f(\eta_{w,(-1/2)})}{\delta z_{(-1/2)}} + \frac{\mu \delta z_0}{r_b} + \mu c_{E0} |\mathbf{u}_r| \quad (4-60)$$

$$\alpha_{0,-1} = -\frac{\mu D_w f(\eta_{w,(-1/2)})}{\delta z_{(-1/2)}} \quad (4-61)$$

$$\gamma_0 = -D_w f(\eta_{w,(-1/2)}) \nabla_{(-1/2)} q_s^{(t)} - \frac{\delta z_0}{r_b} \left\{ q_{s,(0)}^{(t)} - q_{sat}(T_{s,(0)}) \right\} - c_{E0} |\mathbf{u}_r| (q_{s,(0)}^{(t)} - q_r) \quad (4-62)$$

これを出発点として前進代入を行う。後退代入は地中 deepest 層を出発点とする。そこでは一定の値または勾配無しの何れかを用いる。

式(3-20)の土壤中水蒸気拡散方程式には左辺に土壤の空隙率を表す係数( $\eta_{ws} - \eta_w$ )が含まれるため、土壤水が飽和か飽和に近い場合は桁落ちによる精度の低下または解法の不安定化が起こる可能性があり、解法のテスト計算ではそのような兆候が見られた。今後この点に関して検討が必要である。一方、飽和に近い場合は土壤中水循環に対する水蒸気輸送の寄与は極めて小さいため、そのような場合には水蒸気輸送を無視することも検討に値する。

## 5. モデルコード

大気－植生－土壌複合系内の水の動的挙動を表す数値モデルのうち、開発を終了した大気－裸地土壌1次元モデルの計算コードの詳細を記述する。

### 5.1 ファイル及びサブルーチンの構成

計算コードは、FORTRAN言語により記述され、大気及び土壌中での物理現象を素過程単位でプログラム化した複数のサブルーチンから構成されている。以下に計算コードを構成する全サブルーチン名をファイル毎にまとめて記述する。

#### 1) Include Files

- Inclcon1 : common blocks for constants and initial values
- Inclcon2 : common blocks for constants defined in BLOCK DATA
- Inclnum : parameters for dimensions
- Inclvari : common blocks for variables

#### 2) Program Files

- efalbedo.f : SUBROUTINE EALBED
- ehws.f : SUBROUTINE EHWS
- elizva.f : SUBROUTINE ELIZVA
- espara.f : SUBROUTINE ESPARA
- evpara.f : SUBROUTINE EVPARA
- ewpara.f : SUBROUTINE EWPARA
- faipsy.f : FUNCTION FAIM, FAIH, PSYM, PSYH, SHMD, SHMDD
- fcpair.f : FUNCTION FCPAIR
- fcw.f : FUNCTION FCW
- fdensa.f : FUNCTION FDENSA
- fl.f : FUNCTION FL
- gtable.f : SUBROUTINE GTABLE
- gzsoil.f : SUBROUTINE GZSOIL
- pblkd01.f : BLOCK DATA
- pdebugf.f : SUBROUTINE DEBUGF
- pdebugw0.f : SUBROUTINE DEBUGW
- pfluxcal.f : SUBROUTINE SFPR13, FLXCAL, KMHCAL, SAVEOD
- pgener.f : SUBROUTINE GENER, DIREC1, DIREC2

• pinit01.f	: SUBROUTINE MSHINT
• pinitpf.f	: SUBROUTINE INITPF, CLSL2A
• pmain01.f	: SUBROUTINE UMAIN, TMAIN, EMAIN
• ppread.f	: SUBROUTINE PREAD, DEWTMP
• pradiatn.f	: FUNCTION RSOL, RINF
• psurface.f	: SUBROUTINE SFCRAD
• pvarian.f	: SUBROUTINE VARIAV
• pzroot02.f	: PROGRAM PHY1V4
• sliqu.f	: SUBROUTINE SLIQU
• solveg.f	: SUBROUTINE SLVGIN, ENTRY SOLVEG
• solver1.f	: SUBROUTINE SOLV1
• solver2.f	: SUBROUTINE SOLV2
• stemp.f	: SUBROUTINE STEMP
• svapo.f	: SUBROUTINE SVAPO
• total.f	: SUBROUTINE TOTAL

## 5.2 パラメータ、定数及び変数

サブルーチン間で共通なパラメータとコモン文を介して授受される定数及び変数を以下に列挙する。単位のないものは、無次元であるか、または、共通解法ルーチンで用いられている係数等である。

### 1) パラメータ

Inclnum 内

N1 = 49	: grid number for mean values (or fluxes) in atmosphere
NS = 10	: grid number in soil
M1 = N1 + 1	: same as N1 but including upper interface layer
N2 = 2*M1	: total grid number in atmosphere

### 2) 定数

Inclcon1 内

DELT	: time increment (s)
STIME	: initial local standard time (h)
TINTEG	: integration period (h)
TLAGL	: difference of local time from local standard time (h)
IPRINT	: print out interval (s)

UI	: initial u-component (m/s)
VI	: initial v-component (m/s)
UGI	: geostrophic wind u-component (m/s)
VGI	: geostrophic wind v-component (m/s)
T0	: temperature at the bottom of air layer (°C)
TBOTM	: temperature at the bottom of soil layer (°C)
T0B	: = T0
Qs0	: specific humidity in surface layer (kg/kg)
WLO	: liquid water in surface layer (kg/kg)
R0	: air density (kg/m³)
GRD	: no use
GRTOP	: vertical potential temperature gradient at model top (K/m)
GRDX	: vertical potential temperature gradient (K/m)
ROU	: air density (kg/m³)
BET	: thermal expansion coefficient (1/K)
CNDCTV	: thermal conductivity of soil (m²/s)
CAPCTY	: heat capacity of soil (J/m³/K)
EMSVTY	: emissivity of ground surface
ALBEDO	: albedo of the ground surface
PRECIP	: precipitability (cm)
TURBID	: turbidity of air
QHA	: specific humidity in surface layer (kg/kg)
SMOIST	: evaporation coefficient
SLAT	: solar latitude (deg.)
FLAT	: latitude (deg.)
CNL	: cloudiness low (0 to 1 fraction)
CNM	: cloudiness middle (0 to 1 fraction)
CNH	: cloudiness high (0 to 1 fraction)
CF	: Coriolis parameter (1/s)
Z0	: surface roughness for momentum (m)
ZT	: surface roughness for heat (m)
Z(N2)	: vertical coordinate of grid points in atmosphere (m)
ZZD(N2)	: = 1/dz (1/m)
ZSL(0:NS)	: no use
CKSL(0:NS)	: no use
ZDSL(0:NS)	: no use

## Inclcon2 内

A1	: closure model constant
A2	: closure model constant
B1	: closure model constant
B2	: closure model constant
C1	: closure model constant
B123	: closure model constant
SQ	: closure model constant
SL	: closure model constant
SE1	: closure model constant
SE2	: closure model constant
SQSL	: closure model constant
G	: gravitational acceleration (m/s <sup>2</sup> )
CK	: von Karman constant
GRDA	: adiabatic lapse rate (K/m)
RAIR	: gas constant (J/kg/K)
T00	: exchange constant between Celsius and Kelvin scale (K)

## その他の COMMON block 内

ISTY	: soil type index number
HWST(20)	: saturated volumetric soil water content (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
SATPOTT(20)	: saturated matric potential (m)
CONDUCT(20)	: saturated hydraulic conductivity (m/s)
POWERT(20)	: soil constant in Clapp and Hornberger equation
HWWILTT(20)	: wilting volumetric soil water content (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
ROUCT(20)	: dry soil heat capacity (J/m <sup>3</sup> )

## 3) 変数

## Inclvari 内

TIMEH	: model time (h)
TIMET	: calculation time (h)
ITIME	: calculation time (s)
UST	: friction speed (m/s)
TST	: friction potential temperature (K)
RSOLX	: solar radiation (J/m <sup>2</sup> /s)
RINFX	: atmospheric radiation (J/m <sup>2</sup> /s)

RNET	: net radiation (J/m <sup>2</sup> /s)
STBL	: Monin-Obukhov stability length (m)
QST	: specific humidity in surface layer (kg/kg)
Q(M1)	: specific humidity in atmosphere (kg/kg)
QN(M1)	: predicted Q (kg/kg)
WL(M1)	: liquid water in atmosphere (kg/kg)
WLN(M1)	: predicted WL (kg/kg)
U(M1)	: wind speed u-component (m/s)
V(M1)	: wind speed v-component (m/s)
T(M1)	: potential temperature in atmosphere (°C)
E2(M1)	: turbulence kinetic energy (T.K.E.) (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
EL(M1)	: turbulence length scale multiplied by E2 (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )
UN(M1)	: predicted U (m/s)
VN(M1)	: predicted V (m/s)
TN(M1)	: predicted T (°C)
E2N(M1)	: predicted E2 (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
ELN(M1)	: predicted EL (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )
RL1(M1)	: turbulence length scale (m)
RL2(M1)	: = RL1 <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )
E1(M1)	: = E2 <sup>1/2</sup> (m/s)
DKM(M1)	: eddy diffusivity of momentum (m <sup>2</sup> /s)
DKH(M1)	: eddy diffusivity of heat (m <sup>2</sup> /s)
RIG(M1)	: Richardson number
TSL(0:NS)	: temperature in soil layer (K)
TAX(M1)	: turbulence momentum flux of U (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
TAY(M1)	: turbulence momentum flux of V (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
HEA(M1)	: turbulence heat flux (K m/s)
UG(M1)	: geostrophic wind speed u-component (m/s)
VG(M1)	: geostrophic wind speed v-component (m/s)
TA1B	: temperature of the first layer in atmosphere (K)
TS1B	: temperature of the first layer in soil (K)
IDEBUGW	: output flag
IDEBUGWV	: output flag

## その他の COMMON block 内

SIGU(M1)	: standard deviation of U (m/s)
SIGV(M1)	: standard deviation of V (m/s)
SIGW(M1)	: standard deviation of W (m/s)
RAT(M1)	: ratio of T.K.E. to equilibrium T.K.E.
AL(M1)	: general coefficient for numerical algorithm
BL(M1)	: general coefficient for numerical algorithm
CL(M1)	: general coefficient for numerical algorithm
DL(M1)	: general coefficient for numerical algorithm
ZENITH	: solar zenith angle (deg.)
CH0 (CH00)	: exchange coefficient for water vapor
WLIQU	: total water content in soil layer (kg/m <sup>2</sup> )
WBOTF	: liquid water flux at the bottom of soil layer (kg/m <sup>2</sup> /s)
HWLSF	: heat loss due to decrease of heat capacity of soil (J/m <sup>2</sup> /s)
HEAT	: total heat amount in soil layer (J/m <sup>2</sup> )
HBOTF	: heat flux at the bottom of soil layer (J/m <sup>2</sup> /s)
HTOPF	: heat flux at the top of soil layer (J/m <sup>2</sup> /s)
HRADF	: net radiation at the ground surface (J/m <sup>2</sup> /s)
HTOPL	: latent heat flux at the top of soil layer (J/m <sup>2</sup> /s)
HTOTL	: total latent heat released or absorbed in soil layer (J/m <sup>2</sup> /s)
VAPOR	: total water vapor in soil layer (kg/m <sup>2</sup> )
VTOPF	: water vapor flux at the top of soil layer (kg/m <sup>2</sup> /s)
VBOTF	: water vapor flux at the bottom of soil layer (kg/m <sup>2</sup> /s)
VISEV	: total evaporation in soil layer (kg/m <sup>2</sup> /s)

## 5.3 計算の流れ

サブルーチンには、メインルーチンにより制御され主要な計算を行うもの、その主要なサブルーチンからコールされるもの、さらにその中でコールされるものがある。また、これらのサブルーチンの中で共通な計算は関数ルーチンとして独立させているので、サブルーチンの結合は四重の階層を持つ複雑な構造となっている。計算コードの構造を計算の流れに従った樹形図として Fig. 5-1 に示す。

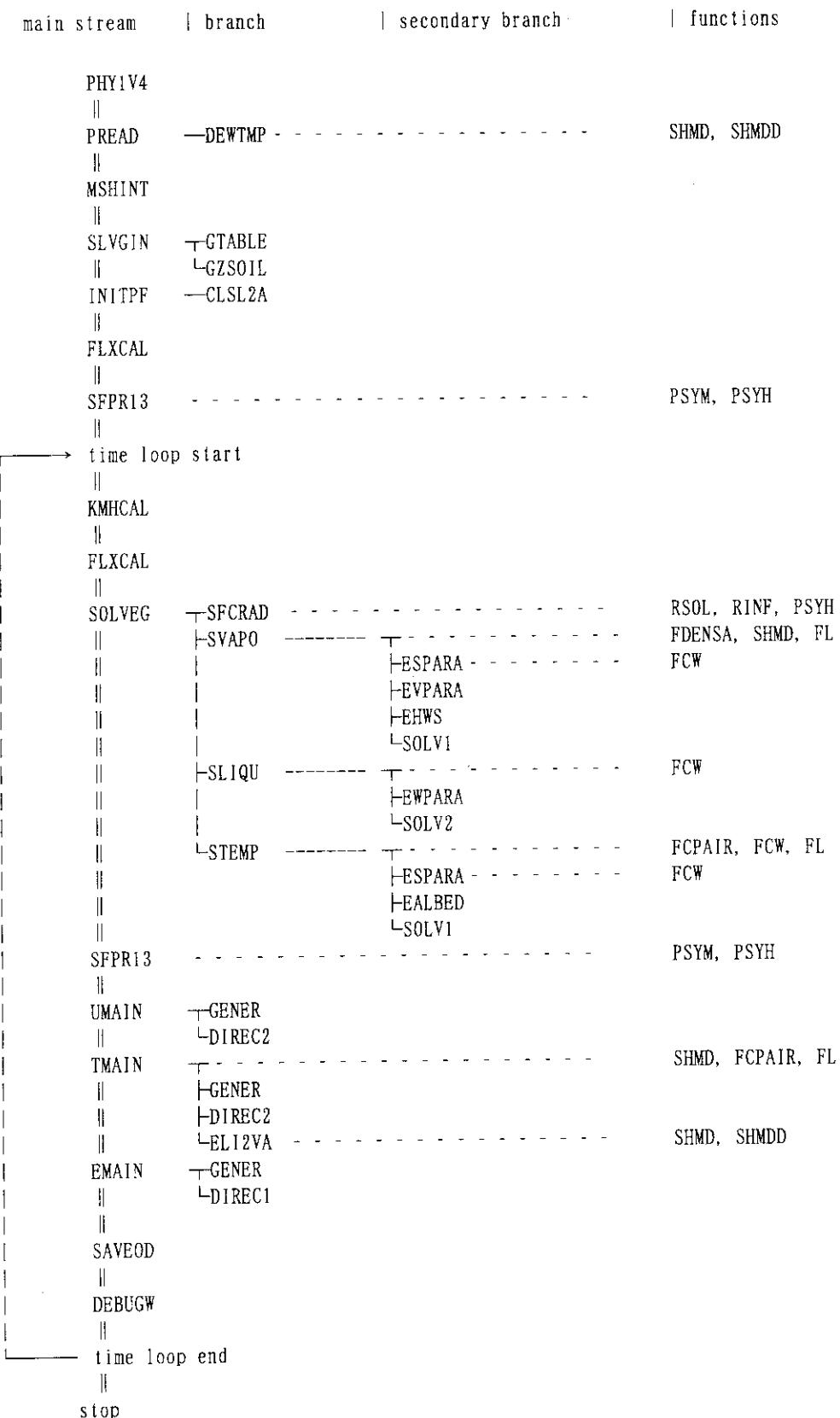


Fig. 5-1 Calculation Flow

### 5.4 サブルーチンの機能

各サブルーチンの機能及び入出力を計算の流れに従って以下に記す。

#### 1) メインルーチン

##### PHY1V4

コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari

##### 機能

- ・計算の流れの制御

- ・時間積分の時刻管理

STIME	: 計算開始時刻 (h)
-------	--------------

DELT	: 時間増分 (s)
------	------------

TINTEG	: 積分時間 (h)
--------	------------

TIMET	: 計算継続時間 (h)
-------	--------------

ITIME	: 計算継続時間 (s)
-------	--------------

TIMEH	: モデル内時刻 (h)
-------	--------------

- ・データ出力タイミングの管理

IFDBG	: 土壌モデル出力フラグ
-------	--------------

IDEBUGWV	: 出力フラグ (未使用)
----------	---------------

IDEBUGW	: 出力フラグ (未使用)
---------	---------------

#### 2) 計算条件の入力

##### BLOCK DATA

コモン文 Inclcon2

・出力 Inclcon2/ A1, A2, B1, B2, C1, B123, SQ, SL, SE1, SE2, SQSL, G, CK,  
RAIR, T00, GRDA

##### 機能

- ・乱流クロージャーモデル及び大気のパラメータ設定

##### PREAD

引き数 無し

コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari, SOILTY

・入力 Inclcon2/ T00

・出力 Inclcon1/ IPRINT, UI, VI, UGI, VGI, TBOTM, T0, GRDX, GRTOP, R0,  
QHA, CNL, CNM, CNH, SMOIST, EMSVTY, ALBEDO,

TURBID, CNDCTV, CAPACTY, Z0, ZT, DELT, STIME, TINTEG,  
TLAGL, SLAT, FLAT, CF, BET, ROU, PRECIP

SOILTY/ ISTY

#### 機能

- ・基盤 1 0 : param000 から以下の計算条件を読み込む  
IPRINT, UI, VI, UGI, VGI, TBOTM, T0, GRDX, GRTOP, R0, QHA, CNL, CNM,  
CNH, SMOIST, EMSVTY, ALBEDO, TURBID, CNDCTV, CAPACTY, Z0, ZT, DELT,  
STIME, TINTEG, TLAGL, SLAT, FLAT, ISTY
- ・パラメータの設定  
CF, BET, ROU, PRECIP
- CALL DEWTMP : 露点温度計算

#### 3) 初期条件の設定

##### MSHINT

引き数	無し
コモン文	Inclnum, Inclcon1
・入力	Inclnum/ N2
・出力	Inclcon1/ Z, ZZD

#### 機能

- ・大気鉛直格子の設定  
 $Z(N2), ZZD(N2) = 1/dZ$

##### SLVGIN(WDELT)

引き数	WDELT	入力	時間増分 (DELT)
共通変数(SOLVEG) TEXTURE, Ts, HW, QS, ET, EB, MYU, Zs			
コモン文	Inclnum, SOLAR, SOILTY, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari, PSFC, HEATB, WATERB, VAPORB		
・入力	SOILTY/ ISTY Inclcon1/ T0		

#### 機能

- ・地中のパラメータ及び変数の初期化  
TEXTURE, Ts, HW, QS, ET, EB, MYU
- CALL GTABLE : 土壤パラメータの入力
- CALL SZSOIL(Zs) : 地中鉛直格子の設定

INITPF

引き数 無し

コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari

・入力 Inclnum/ M1, N1, NS  
Inclcon1/ T0, VGI, UGI, VI, UI, GRDX, Z, QHA, Z0, Qs0, ZT  
Inclcon2/ CK, T00

・出力 Inclcon1/ T0B  
Inclvari/ STBL, VG, UG, V, U, T, Q, WL, UST, TST, QST, TSL, TA1B,  
TS1B, RINFX, RSOLX, RNET,

## 機能

- ・大気中のパラメータ及び変数の初期化  
T0B, STBL, VG, UG, V, U, T, Q, WL, UST, VST, TST, QST, TSL, TA1B, TS1B,  
RINFX, RSOLX, RNET
- CALL CLSL2A :乱流クロージャーモデルレベル2. 0による乱流量初期化  
RL1, RL2, E2, E1, EL, DKM, DKH

FLXCAL

引き数 無し

コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari

・入力 Inclnum/ N1  
Inclcon1/ ZZD  
Inclvari/ DKM, DKH, U, V, T

・出力 Inclvari/ TAX, TAY, HEA

## 機能

- ・大気中乱流フラックス初期化  
TAX, TAY, HEA

SFPR13

引き数 無し

コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari

・入力 Inclcon1/ T0, BET, Z, Z0, ZT  
Inclcon2/ G, CK  
Inclvari/ U, V, T

・出力 Inclvari/ STBL, UST, TST

**機能**

- ・接地層パラメータ初期化

STBL, UST, TST

**4) 時間ステップ内の処理****KMHCAL**

引き数 無し

コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari, RATIO

- ・入力 Inclnum/ N1, M1

Inclcon1/ ZZD, BET

Inclcon2/ A1, A2, B1, B2, C1, G

Inclvari/ U, V, T, RL2, E1, RL1, E2, EL, DKM

- ・出力 Inclvari/ DKM, DKH

RATIO/ RAT

**機能**

- ・乱流クロージャーモデルレベル2.5による拡散係数計算

RAT, DKM, DKH

**FLXCAL**

引き数 無し

コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari

- ・入力 Inclnum/ N1

Inclcon1/ ZZD

Inclvari/ DKM, DKH, U, V, T

- ・出力 Inclvari/ TAX, TAY, HEA

**機能**

- ・大気中乱流フラックス計算

TAX, TAY, HEA

**SOLVEG(IFDBG)**

引き数 IFDBG 入力 結果出力制御フラグ

共通変数(SLVGIN) TEXTURE, Ts, HW, QS, ET, EB, MYU, Zs

コモン文 Inclnum, SOLAR, SOILTY, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari, PSFC, HEATB,

WATERB, VAPORB

- ・入力      Inclcon1/ DELT, QHA  
 Inclcon2/ T00  
 Inclvari/ U, V, T (TA), Q, TIMET, RSOLX, RINFX, TSL, TIMEH, STBL  
 PSFC/ CH00  
 HEATB/ HTOPF, HTOPL, HRADF
- ・出力      Inclcon1/ T0, Qs0

**機能**

- ・土壤モデルの計算制御

CALL SFCRAD            : 地表面風速、放射量計算  
 CALL SVAPO            : 地中水蒸気計算  
 CALL SLIQU            : 地中液体水計算  
 CALL STEMP            : 地中温度計算

- ・大気モデルの境界条件（接地層）出力

T0, Qs0

**SFPR13**

- 引き数      無し
- コモン文      Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari
- ・入力      Inclcon1/ T0, BET, Z, Z0, ZT  
 Inclcon2/ G, CK  
 Inclvari/ U, V, T
  - ・出力      Inclvari/ STBL, UST, TST

**機能**

- ・接地層パラメータ計算

STBL, UST, TST

**UMAIN**

- 引き数      無し
- コモン文      Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari, LCL02
- ・入力      Inclnum/ N1, M1  
 Inclcon1/ DELT, ZZD, Z, Z0  
 Inclcon2/ CF, CK  
 Inclvari/ U, V, UG, VG, DKM

・出力 Inclvari/ UN, VN  
LCL02/ DL

## 機能

・風速計算

$$U \Rightarrow UN, V \Rightarrow VN$$

CALL GENER : 鉛直微分係数計算

CALL DIREC2 : 次ステップ値計算

TMAIN

引き数 無し

コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari, LCL02

・入力 Inclnum/ N1, M1

Inclcon1/ DELT, ZZD, Z, Z0, ZT, Qs0, T0, GRTOP

Inclcon2/ CK, T00, GRDA

Inclvari/ DKH, Q, STBL, U, V, T, WL

・出力 Inclvari/ QN, TN, WLN

LCL02/ DL

## 機能

・大気比湿計算

$$Q \Rightarrow QN$$

CALL GENER : 鉛直微分係数計算

CALL DIREC2 : 次ステップ値計算

CALL ELI2VA : 饱和比湿計算

・大気温位計算

$$T \Rightarrow TN$$

CALL GENER : 鉛直微分係数計算

CALL DIREC2 : 次ステップ値計算

・大気霧水計算

$$WL \Rightarrow WLN$$

CALL GENER : 鉛直微分係数計算

CALL DIREC2 : 次ステップ値計算

EMAIN

引き数 無し  
 コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari, LCL02  
 ・入力 Inclnum/ N1, M1  
     Inclcon1/ DELT, ZZD, BET, Z  
     Inclcon2/ B1, G, SQSL, SE2, SE1, CK  
     Inclvari/ DKM, E1, RL1, TAX, TAY, U, V, HEA, E2, UST, STBL, EL  
 ・出力 Inclvari/ E2N, ELN  
     LCL02/ DL

## 機能

・乱流運動エネルギー及び長さスケール計算

E2 => E2N, EL => ELN

CALL GENER : 鉛直微分係数計算

CALL DIREC1 : 次ステップ値計算

SAVEOD

引き数 無し  
 コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari  
 ・入力 Inclnum/ N1, M1  
     Inclcon1/ Z  
     Inclcon2/ T00  
     Inclvari/ T, UN, VN, TN, E2N, ELN, RL1, RL2, QN, WLN  
 ・出力 Inclvari/ U, V, T, E2, EL, Q, WL, RL1, RL2, E1

## 機能

・次ステップ境界値設定

UN => U, VN => V, TN => T, E2N => E2, ELN => EL, QN => Q, WLN => WL,  
 RL1, RL2, E1

DEBUGW(IU, IS, IE, N, K1, K2, K3, K4, IPG)

引き数	IU	入力	出力装置番号
	IS	入力	出力開始格子点番号
	IE	入力	出力終了格子点番号
	N	入力	出力格子間隔
	K1	入力	平均値出力制御フラグ

	K2	入力	乱流量出力制御フラグ
	K3	入力	拡散係数出力制御フラグ
	K4	入力	乱流方程式の項出力制御フラグ
	IPG	入力	出力ページ制御フラグ
コモン文		Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari	
・入力		Inclnum/ N1, M1	
		Inclcon1/ ZZD, Z, T0, BET	
		Inclcon2/ CK, G, SE1	
		Inclvari/ STBL, UST, TST, U, V, T, Q, E1, RL1, RIG, E2, EL, TAX, TAY, HEA, DKM, DKH	
・出力		Inclvari/ RIG	
機能			
・指定時刻の計算値出力			
平均量 : U, V, T, QLS, Q			
乱流量 : RIG, E2, EL, DU, DV, DT, TAX, TAY, HEA			
拡散係数 : RIG, E1, RL1, DKM, DKH			
乱流方程式の項 : RIG, TQ, PQ, DQ, FQ, TL, PL, DL, FL			

VARIAN(IUNIT) . . . 未使用

引き数	IUNIT	入力	出力装置番号
コモン文		Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari, SIGMA	
・入力		Inclnum/ N1, M1	
		Inclcon1/ ZZD, Z	
		Inclcon2/ A1, B1	
		Inclvari/ E1, RL1, DKM, U, V, E2, DKH, T, TIMEH, TIMET	
・出力		SIGMA/ SIGU, SIGV, SIGW	
		LCL02/ DL	
機能			
・風速の標準偏差計算			
	SIGU, SIGV, SIGW		

DEBUGF(IUNIT) . . . 未使用

引き数	IUNIT	入力	出力装置番号
コモン文		Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari, SIGMA	

・入力      Inclnum/ N1, M1  
               Inclcon1/ Z  
               Inclvari/ TIMEH, TIMET, RSOLX, RINFX, RNET, STBL, TSL, U, V, T,  
                  E2, DKM, DKH  
               SIGMA/ SIGU, SIGV, SIGW

## 機能

・拡散計算用出力  
     U, V, T, E2, SIGU, SIGV, SIGW, DKM, DKH

## 5) 土壤モデル

SFCRAD

引き数      無し  
 コモン文      Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari, PSFC  
 ・入力      Inclcon1/ Z, Z0, ZT, PRECIP, TURBID, ALBEDO, SLAT, FLAT, TLAGL,  
                  CNL, CNM, CNH  
               Inclcon2/ CK, T00  
               Inclvari/ U, V, T, STBL, TIMEH  
 ・出力      Inclvari/ UST, RSOLX, RINFX  
               PSFC/ CH0

## 機能

・地表面風速、放射量計算  
     UST, RSOLX, RINFX, CH0

SVAPO(Z, TEXTURE, MYU, DELT, TR, UR, QR, CE0, AIRDEN, HW, EB, T, QS)

引き数	Z	入力	地中の鉛直座標
	TEXTURE	入力	土壤の種類の指標
	MY	入力	時間差分パラメータ (0 : 陽解法、 1 : 陰解法)
	DELT	入力	時間増分 (s)
	TR	入力	大気第1層気温 (K)
	UR	入力	大気第1層風速 (m/s)
	QR	入力	大気第1層比湿 (kg/kg)
	CE0	入力	水蒸気交換係数
	AIRDEN	入力	空気密度 (kg/m <sup>3</sup> )
	HW	入力	体積含水率 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )

EB 出力 土壤水分蒸発量 ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )  
 T 入力 土壤温度 (K)  
 QS 出力 土壤中比湿 (kg/kg)  
 コモン文 FLUGS, AWORK, VAPORB  
 ・出力 VAPORB/ VAPOR, VTOPF, VBOTF, VISEV  
 機能  
 ・地中水蒸気計算  
 CALL ESPARA : 热容量、热伝導度設定  
 CALL EVPARA : 蒸発抵抗設定  
 CALL EHWS : 饱和体積含水率設定  
 CALL SOLV1 : ガウス消去法

SLIQU(Z, TEXTURE, MYU, DELT, ET, PRO, HW, EB, ER, T)

引き数 Z 入力 地中の鉛直座標  
 TEXTURE 入力 土壤の種類の指標  
 MY 入力 時間差分パラメータ (0 : 陽解法、1 : 陰解法)  
 DELT 入力 時間増分 (s)  
 ET 入力 蒸散率 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 PRO 入力 降雨強度 ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )  
 HW 入力 体積含水率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )  
 EB 出力 土壤水分蒸発量 ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )  
 T 入力 土壤温度 (K)  
 コモン文 FLUGS, AWORK, WATERB  
 ・出力 WATERB/ WLIQU, WBOTF, HWLSF  
 機能  
 ・地中液体水計算  
 CALL EWPARA : 热容量、热伝導度設定  
 CALL SOLV2 : ガウス消去法

STEMP(Z, TEXTURE, ZENITH, MYU, DELT, RS, RL, TR, UR, QR, CH0, AIRDEN,  
PRO, TP, HW, EB, T)

引き数 Z 入力 地中の鉛直座標  
 TEXTURE 入力 土壤の種類の指標  
 ZENITH 入力 太陽天頂角 (deg.)

MY	入力	時間差分パラメータ (0 : 陽解法、 1 : 陰解法)
DELT	入力	時間増分 (s)
RS	入力	日射量 ( $J/m^2/s$ )
RL	入力	大気放射 ( $J/m^2/s$ )
TR	入力	大気第1層気温 (K)
UR	入力	大気第1層風速 (m/s)
QR	入力	大気第1層比湿 (kg/kg)
CHO	入力	熱交換係数
AIRDEN	入力	空気密度 ( $kg/m^3$ )
PRO	入力	降雨強度 ( $kg/m^2/s$ )
TP	入力	雨水温度 (K)
HW	入力	体積含水率 ( $m^3/m^3$ )
EB	出力	土壤水分蒸発量 ( $kg/m^2/s$ )
T	入力	土壤温度 (K)
コモン文		FLUGS, AWORK, HEATB
・出力		HEATB/ HEAT, HBOTF, HTOPF, HRADF, HTOPL, HTOTL
機能		
・地中温度計算		
CALL ESPARA		: 熱容量、熱伝導度設定
CALL EALBED		: アルベド設定
CALL SOLV1		: ガウス消去法

## 6) 共通処理ルーチン

GENER(ID, DK, A)

引き数	ID	入力	格子点パラメータ
	DK	入力	拡散係数
	A	入力	
コモン文	Inclnum, Inclcon1, LCL02		
・入力	Inclnum/ N1, M1 Inclcon1/ ZZD, DELT		
・出力	LCL02/ AL, BL, CL		
機能	・鉛直拡散項の微分係数計算		

DIREC1(N, TOP, PE1, PF1, Q)

引き数	N	入力	鉛直格子数 (N1)
	TOP	入力	上部境界での変数の鉛直勾配
	PE1	入力	大気第1層の計算値
	PF1	入力	大気第1層の計算値
	Q	出力	時間積分値
コモン文		Inclnum, Inclcon1, LCL02	
・入力		Inclnum/ M1	
		LCL02/ AL, BL, CL, DL	
機能			
・鉛直1次元時間積分計算			

DIREC2(N, TOP, PE1, PF1, Q)

引き数	N	入力	鉛直格子数 (N1)
	TOP	入力	上部境界での変数の鉛直勾配
	PE1	入力	大気第1層の計算値
	PF1	入力	大気第1層の計算値
	Q	出力	時間積分値
コモン文		Inclnum, Inclcon1, LCL02	
・入力		Inclnum/ M1	
		Inclcon1/ Z	
		LCL02/ AL, BL, CL, DL	
機能			
・鉛直1次元時間積分計算			

ELI2VA(TA, QA, R0, CP, CL, QASS, EFDT)

引き数	TA	入力	気温 (K)
	QA	入力	比湿 (kg/kg)
	R0	入力	大気密度 (kg/m <sup>3</sup> )
	CP	入力	大気比熱 (J/kg/K)
	CL	入力	気化熱 (J/kg)
	QASS	出力	飽和比湿 (kg/kg)
	EFDT	出力	蒸発可能な水蒸気量 (kg/m <sup>3</sup> )
コモン文		無し	

## 機能

- ・蒸発による気温及び比湿変化の計算

SOLV1(NX, NY, NZ, A, B, C, D, Q, WK1, WK2)

引き数	NX	入力	水平格子数（東西方向）
	NY	入力	水平格子数（南北方向）
	NZ	入力	鉛直格子数
	A	入力	係数
	B	入力	係数
	C	入力	係数
	D	入力	係数
	Q	入出力	ガウス消去法による解
	WK1	出力	係数
	WK2	出力	係数

コモン文 無し

## 機能

- ・ガウス消去法

SOLV2(NX, NY, NZ, A, B, C, D, Q, WK1, WK2)

引き数	NX	入力	水平格子数（東西方向）
	NY	入力	水平格子数（南北方向）
	NZ	入力	鉛直格子数
	A	入力	係数
	B	入力	係数
	C	入力	係数
	D	入力	係数
	Q	入出力	ガウス消去法による解
	WK1	出力	係数
	WK2	出力	係数

コモン文 無し

## 機能

- ・ガウス消去法

## 7) 設定ルーチン

DEWTMP (QA, TDEW)

引き数 QA 入力 比湿 (kg/kg)  
           TDEW 出力 露点温度 (K)  
 コモン文 無し  
 機能  
   ・比湿から露点温度を計算

GTABLE

引き数 無し  
 コモン文 SOILTAB  
 ・出力 SOILTAB/ HWST, SATPOTT, CONDUCT, POWERT, HWWILTT, ROUCT  
 機能  
   ・土壤パラメータの入力 (Table 5-1)

Table 5-1 List of soil parameters

Soil type	Index number	HWST (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	SATPOTT (m)	CONDUCT (m/s)	POWERT	HWWILTT (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	ROUCT (J/m <sup>3</sup> )
SAND*	1	0.395	-0.121	$1.760 \times 10^{-4}$	4.05	0.0677	$1.47 \times 10^6$
LOAMY SAND*	2	0.410	-0.090	$1.563 \times 10^{-4}$	4.38	0.0750	$1.41 \times 10^6$
SANDY LOAM*	3	0.435	-0.218	$0.341 \times 10^{-4}$	4.90	0.1142	$1.34 \times 10^6$
SILT LOAM*	4	0.485	-0.786	$0.072 \times 10^{-4}$	5.30	0.1794	$1.27 \times 10^6$
LOAM*	5	0.490	-0.478	$0.070 \times 10^{-4}$	5.39	0.1547	$1.21 \times 10^6$
SANDY CLAY LOAM*	6	0.420	-0.299	$0.063 \times 10^{-4}$	7.12	0.1749	$1.18 \times 10^6$
SILTY CLAY LOAM*	7	0.477	-0.356	$0.017 \times 10^{-4}$	7.75	0.2181	$1.32 \times 10^6$
CLAY LOAM*	8	0.476	-0.630	$0.025 \times 10^{-4}$	8.52	0.2498	$1.23 \times 10^6$
SANDY CLAY*	9	0.426	-0.153	$0.022 \times 10^{-4}$	10.40	0.2193	$1.18 \times 10^6$
SILTY CLAY*	10	0.492	-0.490	$0.010 \times 10^{-4}$	10.40	0.2832	$1.15 \times 10^6$
CLAY*	11	0.482	-0.405	$0.013 \times 10^{-4}$	11.40	0.2864	$1.09 \times 10^6$
PEAT*	12	0.863	-0.356	$0.080 \times 10^{-4}$	7.75	0.3947	$0.84 \times 10^6$
NARITA-SAND**	13	0.400	-0.050	$0.350 \times 10^{-4}$	6.00	0.1500	$1.26 \times 10^6$

\* Summarized by Pielke<sup>15)</sup> according to the United States Department of Agriculture (USDA) textural classes, with data by Clapp and Hornberger<sup>16)</sup> and McCumber<sup>20)</sup>

\*\* Kondo and Saigusa<sup>6)</sup>.

GZSOIL(Z)

引き数 Z 出力 地中鉛直格子 (m)

コモン文 無し

## 機能

- 地中鉛直格子の設定

CLSL2A

引き数 無し

コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari

・入力 Inclnum/ N1, M1

Inclcon1/ ROU, GRTOP, ZZD, BET, Z

Inclcon2/ A1, A2, B1, B2, C1, G, CK

Inclvari/ U, V, T

・出力 Inclvari/ RL1, RL2, E2, E1, EL, DKM, DKH

## 機能

- 乱流クローラー モデル レベル 2.0 による乱流の初期設定

ESPARA(N, NIN, TEXTURE, HW, T, CSRS, KS, WORK)

引き数 N 入力 地中 3 次元格子点数

NIN 入力 地中水平面格子点数

TEXTURE 入力 土壌の種類

HW 入力 体積含水率 (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

T 入力 土壌温度 (K)

CSRS 出力 土壌の熱容量 (J/m<sup>3</sup>/K)KS 出力 温度伝導度 (m<sup>2</sup>/s)

WORK 出力

コモン文 SOILTAB

・入力 SOILTAB/ HWST, SATPOTT, POWERT, ROUCT

## 機能

- 土壌の熱容量及び熱伝導度の設定

EVPARA(N, NIN, TEXTURE, HW, T, CDIF, RB)

引き数 N 入力 地中 3 次元格子点数

NIN	入力	地中水平面格子点数
TEXTURE	入力	土壤の種類
HW	入力	体積含水率 ( $m^3/m^3$ )
T	入力	土壤温度 (K)
CDIF	出力	土壤中水蒸気拡散係数 ( $m^2/s$ )
RB	出力	蒸発抵抗
コモン文	SOILTAB	
・入力	SOILTAB/ HWST	
機能		
・	土壤の水蒸気拡散係数及び蒸発抵抗の設定	

EHWS(N, TEXTURE, HWS)

引き数	N	入力	地中 3 次元格子点数
	TEXTURE	入力	土壤の種類
	HWS	出力	飽和体積含水率 (kg/kg)
コモン文	SOILTAB		
・入力	SOILTAB/ HWST		
機能			
・	土壤の飽和体積含水率の設定		

EWPARA(N, NIN, TEXTURE, HW, DW, DDW, KW, DKW)

引き数	N	入力	地中 3 次元格子点数
	NIN	入力	地中水平面格子点数
	TEXTURE	入力	土壤の種類
	HW	入力	体積含水率 ( $m^3/m^3$ )
	DW	出力	土壤液体水拡散係数 ( $m^2/s$ )
	DDW	出力	DW の微分 (m/s)
	KW	出力	透水係数 (m/s)
	DKW	出力	KW の微分 (l/s)
コモン文	FLUGS, SOILTAB		
・入力	SOILTAB/ HWST, SATPOTT, CONDUCT, POWERT		
機能			
・	土壤の液体水拡散係数及び透水係数の設定		

EALBED(N, TEXTURE, HW, ZENITH, ALBD, EMIS)

引き数	N	入力	地表面格子点数
	TEXTURE	入力	土壤の種類
	HW	入力	体積含水率 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
	ZENITH	入力	太陽天頂角 (deg.)
	ALBD	出力	アルベド
	EMIS	出力	射出率
コモン文	SOILTAB		
・入力	SOILTAB/ HWST		
機能			
・地表面アルベド及び射出率の設定			

## 8) 関数ルーチン

SHMD(TEMP)

引き数	TEMP	気温 (K)
出力	SHMD	飽和比湿 (kg/kg)

SHMDD(TEMP)

引き数	TEMP	気温 (K)
出力	SHMDD	飽和比湿の微分 (kg/kg/K)

PSYM(Z, STB, ZZER)

引き数	Z	高度 (m)
	STB	モニン・オブコフの長さ (m)
	ZZER	粗度高 (m)
出力	PSYM	運動量に関するシアーカンソの積分

PSYH(Z, STB, ZZER)

引き数	Z	高度 (m)
	STB	モニン・オブコフの長さ (m)
	ZZER	粗度高 (m)
出力	PSYM	温度に関するシアーカンソの積分

FDENSA(D, Q, T, QQ, TT)

引き数      D      空気密度 (at Q and T)  
               Q      比湿 (kg/kg)  
               T      気温 (K)  
               QQ     比湿 (kg/kg)  
               TT     気温 (K)

出力      FDENSA 空気密度 (at QQ and TT)

FL(T)

引き数      T      水温 (K)  
               FL     蒸発の潜熱 (J/kg)

FCPAIR(Q)

引き数      Q      比湿 (kg/kg)  
               FCPAIR 空気比熱 (J/kg/K)

FCW(T)

引き数      T      水温 (K)  
               FCW    水の比熱 (J/kg/K)

RSOL(TIME, PRECIP, TURBID, ALBEDO, DSLAT, DFLAT, TLAGL, CNL, CNM, CNH)

引き数      TIME    地方時  
               PRECIP 可降水量 (cm)  
               TURBID 大気混濁度  
               ALBEDO アルベド  
               DSLAT 太陽赤緯 (deg.)  
               DFLAT 緯度 (deg.)  
               TLAGL 地方時とのずれ (h)  
               CNL    低層雲量 (0 to 1 fraction)  
               CNM    中層雲量 (0 to 1 fraction)  
               CNH    高層雲量 (0 to 1 fraction)

出力      RSOL 日射量 (J/m<sup>2</sup>/s)

コモン文 SOLAR  
・出力 SOLAR/ ZENITH

RINF(PRECIP, TEMP, CNL, CNM, CNH)

引き数	PRECIP	可降水量 (cm)
	TEMP	気温 (K)
	CNL	低層雲量 (0 to 1 fraction)
	CNM	中層雲量 (0 to 1 fraction)
	CNH	高層雲量 (0 to 1 fraction)
出力	RINF	大気放射量 (J/m <sup>2</sup> /s)

## 6. 計算例

### 6. 1 計算条件

モデルの妥当性を調べるために、以下に示す仮想条件でモデルの試験計算を実施した。想定した気象条件は、日本付近の春分または秋分のころ、降水がなく晴れた日が続き土壤が乾燥していく状態であり、100日間の計算を行なったが、その間太陽赤緯は変化しないものとした。

#### 1) 設定条件

##### <モデル格子>

大気層数	:	50
大気上端高度	:	3300 m
大気層の厚さ	:	1m (第1層) ~ 100m (上端)
土壤層数	:	10
土壤層深度	:	0~0.5, 0.5~1.0, 1.0~2.0, 2.0~4.0, 4.0~6.0, 6.0~9.0, 9.0~13.0, 13.0~17.0, 17.0~23.0, 23.0~37.0cm

##### <計算条件>

対象地点緯度	:	36 度
太陽赤緯	:	0 度
計算開始時刻	:	21:00 (Local Time)
計算継続時間	:	2400 時間 (100 日間)
土壤タイプ	:	砂
雲量	:	なし
降水	:	なし

#### 2) 初期値

風速 (U, V)	:	3.0 m/s, 0.0 m/s
気温 (1層)	:	20 ° C
温位勾配	:	3.5 K/km
大気比湿	:	8.0 g/kg
土壤温度	:	20 ° C
土壤水分量	:	0.2 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
土壤比湿	:	土壤温度に対する飽和比湿

## 6. 2 計算結果

原研大型計算機 VPP500 の 1 CPU で計算を行なったところ、CPU Time は 20503 秒であった。土壤表面の熱収支、土壤温度及び体積含水率の計算結果をそれぞれ Fig. 6-1、Fig. 6-2 及び Fig. 6-3 に示す。

土壤表面の熱収支 (Fig. 6-1) については、計算開始後 120 時間から 240 時間 (6~10 日) 及び 1080 時間から 1200 時間 (46~50 日) のそれぞれ 5 日間について、日射、大気放射、放射収支、顕熱輸送、潜熱輸送及び地中への熱伝導の時間変化を示した。日変化については、日射及び放射収支に対して、地中への熱伝導は数時間前にピークに達し、顕熱及び潜熱輸送の最大は遅れている。また、地中への熱伝導が日没直後に最小になり夜間少し増加している。このような傾向は、観測により得られた結果から一般的と考えられている熱収支の傾向と矛盾がなく、量的にも妥当な値となっている。日々の変動については、初期の土壤はある程度の水分を含んでおり、日中に蒸発による潜熱輸送が顕熱輸送より大きくなっているが、土壤が乾燥した 50 日後ころ潜熱輸送はほとんどなくなり、顕熱輸送が大きくなつた。地中への熱伝導は、初期の温度上昇段階では地中の温度勾配が大きくなるだけでなく土壤の乾燥とともに温度伝導度も大きくなるために増加しているが、50 日後ころには初期段階より小さくなっている。これは、温度上昇の鈍化により温度勾配が小さくなつたためと考えられる。また、50 日後ころの放射収支が初期のころより小さくなっているのは、地表面温度の上昇にともない地表からの長波放射が増加したためである。

土壤温度 (Fig. 6-2) 及び体積含水率 (Fig. 6-3) の時間変化については、深度 0~0.5cm、1~2cm、6~9cm 及び 17~23cm の層の計算値を示した。土壤温度の日変化の振幅は、深度が大きくなるに連れて小さくなっている。また、各層とも土壤の体積含水率が減少するとともに日変化の振幅は大きくなっている。体積含水率は、1 日の周期で振動しながら減少しており、振幅と減少の割合はどちらも地表に近いほど大きい。1 日周期の振動は、土壤の温度変化にともない蒸発と凝結が繰り返しここつてていることを示している。土壤と大気の間でも蒸発と凝結を繰り返しているが、潜熱輸送の時間変化からわかるように、1 日の総計では土壤から大気に輸送されているので、土壤の体積含水率は日々減少することになる。体積含水率の変化に関して、深度 1~2cm の層での日々の減少傾向は、480 時間 (20 日) 後くらいに減少が緩やかになった後、720 時間 (30 日) 後くらいから再び減少の割合が大きくなるという特異な変化をしている。土壤から大気への水分輸送は、土壤が湿っている間は地表近傍の土壤からの蒸発が大部分を占め、土壤中の水分は主に拡散により地表面に輸送されるが、土壤が乾燥状態になるとより深い層の湿った土壤からの蒸発量が増え、拡散の場合より水分の減少量が多くなる。深度 0~0.5cm の層が 720 時間後くらいから乾燥状態になっており、このころからより深い層からの蒸発量が増加し始めるたとえると、深度 1~2cm の層の水分減少傾向をうまく説明できる。

以上のように、試験計算により得られた地表面熱収支、土壤温度及び体積含水率の時間変化から、モデルは妥当であると考えられる。

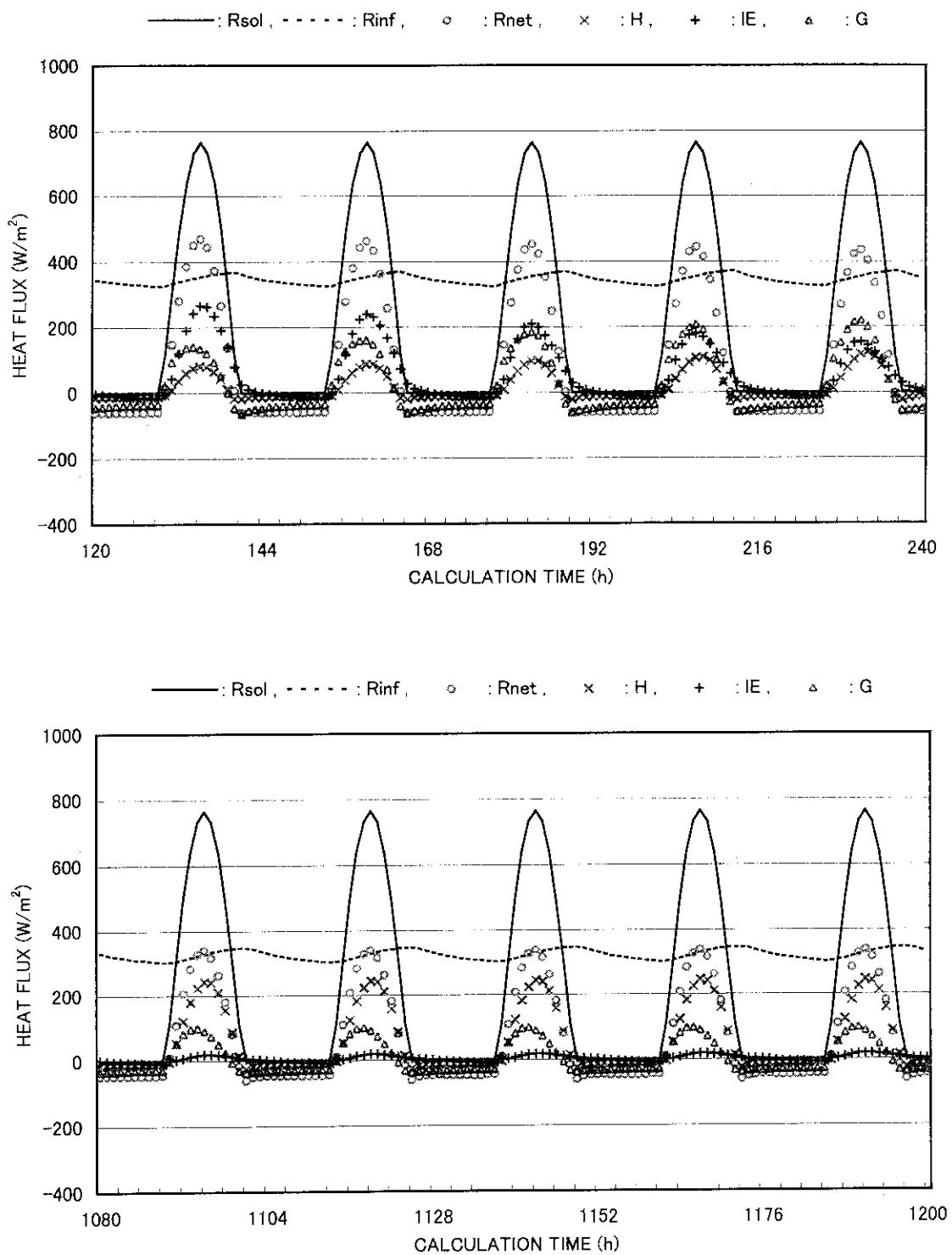


Fig. 6-1 Temporal changes of heat fluxes at ground surface.  $\text{Rsol}$ : solar radiation,  $\text{Rinf}$ : atmospheric radiation,  $\text{Rnet}$ : net radiation,  $\text{H}$ : sensible heat flux,  $\text{IE}$ : latent heat flux,  $\text{G}$ : heat conduction to the ground.

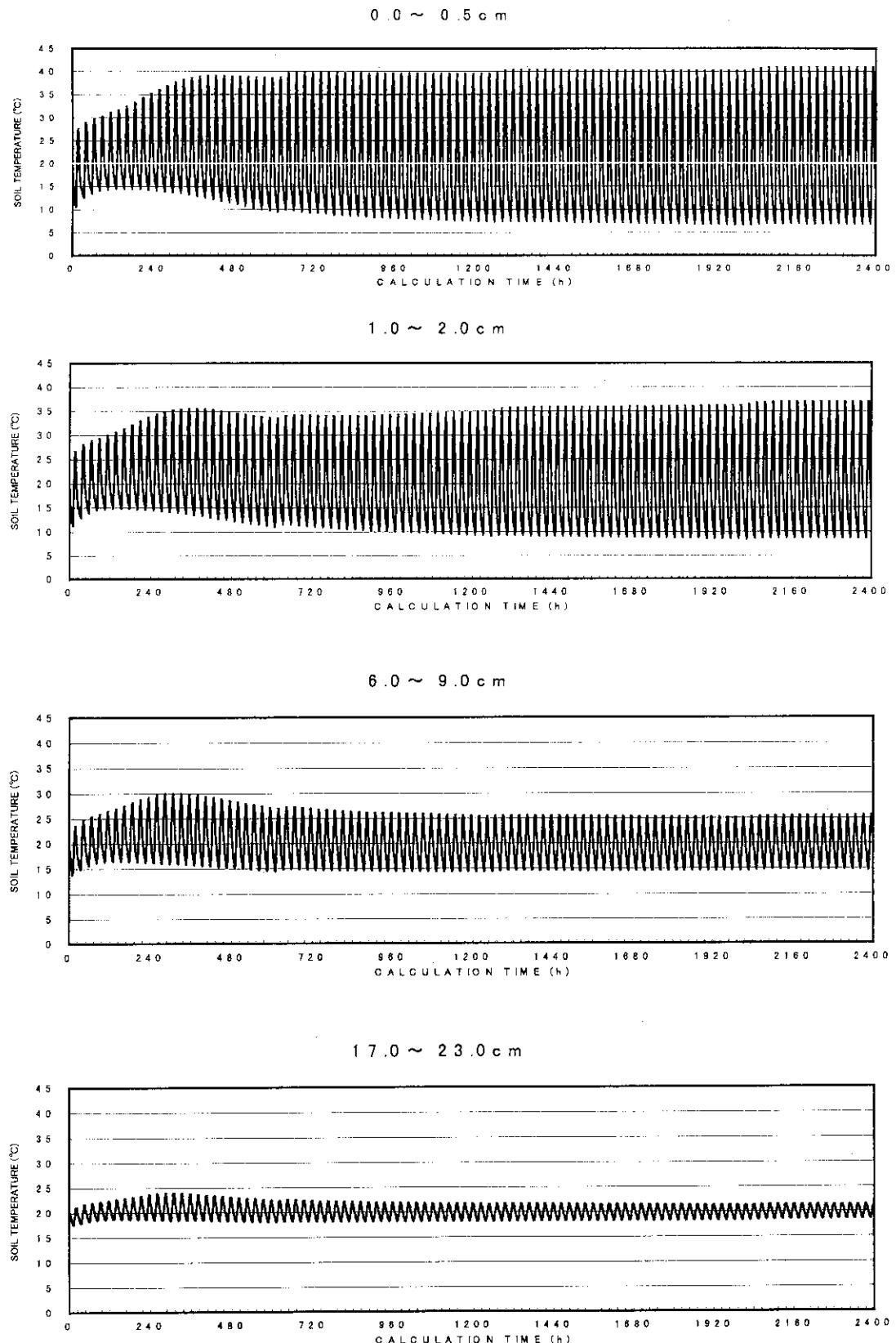


Fig. 6-2 Temporal changes of soil temperature.

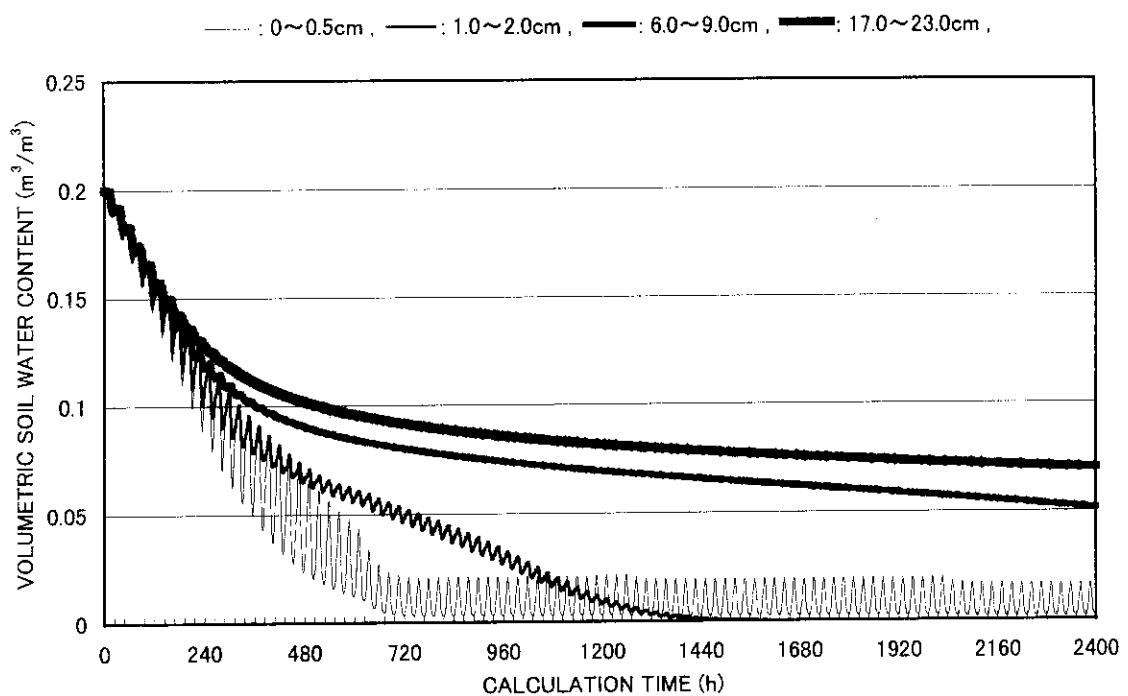


Fig. 6-3 Temporal changes of volumetric soil water content.

## 7. まとめ

本報告は、大気－植生－土壤複合系内の放射性核種移行の媒体である空気及び水の動的挙動を表す数値モデルの第一段階として開発した大気－裸地土壤 1 次元モデルの内容をまとめたものである。

本モデルは、計算の対象となる大気及び土壤についてそれぞれ独立したモデルを持ち、大気と土壤が接する地表面の境界条件により 2 つのモデルは結合している。大気モデルは、1 次元気象モデル PHYD1V3 の機能を拡張したもので、大気の状態を表す物理量である風速、温位、比湿、乱流運動エネルギー、乱流長さスケール、及び霧水量を予報するモデルである。旧モデルからの拡張機能は、比湿及び霧水量の計算過程、水の相変化にともなう潜熱の交換過程等である。土壤モデルは、土壤を厚みのある複数の層に分割し、各層での温度、体積含水率及び空隙の比湿の時間変化を計算するモデルである。これらの物理量を計算するための土壤中物理過程としては、土壤中の熱伝導、液状及び気体状の水分輸送、水の相変化を考慮している。地表面物理過程としては、日射及び長波放射の吸収、反射及び射出、大気との顯熱及び潜熱の交換及び降水を考慮している。大気モデルと土壤モデルを結合するための地表面境界条件では、顯熱、潜熱及び水平運動量の交換を考慮しており、これらの計算には Monin-Obukhov の相似則を用いた。

モデルの妥当性を評価するために試験計算を行なった。晴天日が続き土壤が乾燥していく過程について、モデルは 100 日間の計算を安定して行なうことができた。地表面の熱収支、土壤温度及び土壤の体積含水率の時間変化から、モデル計算は妥当なものであることが示された。今後、異なる条件での試験計算、実測値の再現計算等により、モデルの検証を行なう予定である。

## 参 考 文 献

- 1) Brutsaert, W. H.: A theory for local evaporation (or heat transfer) from rough and smooth surface at ground level, *Water Resour. Res.*, **11**, 543-550, (1975).
- 2) Brutsaert, W. H.: "Evaporation into the atmosphere", D. Reidel Pub., (1982).
- 3) Kondo, J.: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Boundary-Layer Meteor.*, **9**, 91-112, (1975).
- 4) Kondo, J. and H. Yamazawa: Bulk transfer coefficient over a snow surface. *Boundary-Layer Meteor.*, **34**, 123-135, (1986).
- 5) Kondo, J., N. Saigusa and T. Sato: A parameterization of evaporation from bare soil surface, *J. Appl. Meteor.*, **29**, 383-387, (1990).
- 6) Kondo, J. and N. Saigusa: Modelling the evaporation from bare soil with a formula for vaporization in the soil pores, *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 413-421, (1994).
- 7) Kondo, J. and A. Kawanaka: Numerical study on the bulk heat transfer coefficient for a variety of vegetation types and densities, *Boundary-Layer Meteor.*, **37**, 285-296, (1986).
- 8) Watanabe, T.: *Studies on momentum and heat exchange between vegetation and the atmosphere*, Doctoral dissertation, Tohoku Univ., (1991).
- 9) Hopmans, J. and J. H. Dane: Effect of temperature-dependent hydraulic properties on soil water movement, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49**, 51-58, (1985).
- 10) Manabe, S.: The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 739-774, (1969).
- 11) Schädler, G., N. Kalthoff, F. Fiedler: Validation of a model for heat, mass, and momentum over vegetated surface using LOTREX-10E/HIBE88 data, *Beitr. Phys. Atmosph.*, **63**, 85-110, (1990).
- 12) Jones, H. G.: "Plants and microclimate (second edition)", Cambridge Univ. Press, (1992).
- 13) 近藤純正 (編) : "水環境の気象学", 朝倉書店, (1994).
- 14) 山澤弘実 : 1次元気象モデルの開発 (PHYD1V3) , JAERI-M 90-128, (1990).
- 15) Pielke, R. A.: "Mesoscale meteorological modeling", Academic Press, (1984).
- 16) Clapp, R. and G. Hornberger: Empirical equations for some soil hydraulic properties, *Water*

*Resour. Res.*, **14**, 601-604, (1978).

- 17) Jackson, R. D. R. J. Reginato, B. A. Kimball and F. S. Nakayama: Diurnal soil-water evaporation: Comparison of measured and calculated soil water fluxes, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **38**, 861-866, (1974).
- 18) 近藤純正（竹内清秀共著）："大気科学講座1 地表に近い大気", 東京大学出版会, (1981).
- 19) Yasuda, N.: Turbulent diffusivity and diurnal variations in the atmospheric boundary layer, *Boundary-Layer Meteor.*, **43**, 209-221, (1988).
- 20) McCumber, M. C.: "A numerical simulation of the influence of heat and moisture fluxes upon mesoscale circulations" , Ph.D. Dissertation, University of Virginia, Charlottesville, (1980).