

JAERI-Data/Code  
99-024



JP9950384



大気—土壌—植生 1次元モデルの開発

1999年4月

永井晴康・山澤弘実

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。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

## 大気－土壌－植生 1 次元モデルの開発

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター環境安全研究部  
永井 晴康・山澤 弘実

(1999 年 3 月 16 日受理)

大気－土壌－植生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 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 PHVD 1 V 3 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及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。土壌部分は、温度、体積含水率および土壌空気中の比湿に関する予報方程式で構成される。大気－土壌間は、地表面熱収支式及び水収支式を用いて結合されている。植生部分は、葉面温度を計算する熱収支式、葉面液体水及び植生層内液体水鉛直フラックスの予報方程式で構成される。大気、土壌及び植生を多層に分割し、解法として差分法を用いた。

## Development of One-Dimensional Atmosphere-Soil-Vegetation Model

Haruyasu NAGAI and Hiromi YAMAZAWA

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

(Received March 16, 1999)

To study dynamical behaviors of air and water as media of radionuclide migration in the atmosphere-soil-vegetation system, a one-dimensional numerical model 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. The atmosphere and soil parts are interfaced with the ground surface water and heat budget equations. The vegetation part consists of a heat budget equation for the leaf surface temperature and prognostic equations for the leaf surface water and vertical water flux in the canopy. This model employs a finite difference scheme with multi-layer description for the atmosphere, vegetation, and soil parts.

**Keywords:** Atmosphere, Soil, Vegetation Canopy, Numerical Model, Heat, Water Vapor, Momentum, Exchange, Radiation Transfer, Soil Moisture, Evaporation, Heat Budget, Water Budget, Numerical Scheme

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 大気モデル .....	3
3. 土壌モデル .....	6
3.1 土壌中の熱伝導 .....	7
3.2 土壌中液体水 .....	8
3.3 土壌中水蒸気 .....	10
3.4 大気-土壌間の交換 .....	11
4. 植生モデル .....	14
4.1 葉面熱収支 .....	15
4.2 葉面水滴 .....	17
4.3 液体水フラックス .....	18
5. 放射モデル .....	20
5.1 日射伝達 .....	20
5.2 長波放射伝達 .....	22
6. 数値解法 .....	24
6.1 拡散方程式の数値解法 .....	24
6.2 大気中の拡散方程式の数値解法 .....	26
6.3 土壌中熱伝導方程式の数値解法 .....	27
6.4 土壌中液体水輸送方程式の数値解法 .....	28
6.5 土壌中水蒸気拡散方程式の数値解法 .....	32
6.6 葉面熱収支式の数値解法 .....	34
6.7 葉面水滴及び水滴フラックスの数値解法 .....	35
6.8 日射伝達式の数値解法 .....	36
6.9 長波放射伝達式の数値解法 .....	37
7. モデルコード .....	40
7.1 計算コード操作手順 .....	40
7.2 計算コードの構成 .....	49
7.3 パラメータ、定数及び変数 .....	51
7.4 計算の流れとサブルーチンの機能 .....	56
8. 試験計算 .....	81
8.1 計算条件 .....	81
8.2 計算結果 .....	82

9. まとめ .....	86
参考文献 .....	87
付 録 .....	88

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Atmosphere Model .....	3
3. Soil Model .....	6
3.1 Heat Conduction in Soil .....	7
3.2 Liquid Water in Soil .....	8
3.3 Water Vapor in Soil .....	10
3.4 Exchange between Atmosphere and Soil .....	11
4. Vegetation Model .....	14
4.1 Heat Budget on Leaves .....	15
4.2 Leaf Surface Liquid Water .....	17
4.3 Liquid Water Flux .....	18
5. Radiation Model .....	20
5.1 Solar Radiation Transfer .....	20
5.2 Long Wave Radiation Transfer .....	22
6. Numerical Schemes .....	24
6.1 Scheme for Diffusion Equations .....	24
6.2 Scheme for Diffusion Equations in the Atmosphere .....	26
6.3 Scheme for Heat Conduction Equation in the Soil .....	27
6.4 Scheme for Soil Liquid Water Transport Equation .....	28
6.5 Scheme for Soil Moisture Diffusion Equation .....	32
6.6 Scheme for Heat Budget Equation on Leaves .....	34
6.7 Scheme for Leaf Surface Liquid Water and Liquid Water Flux Equations .....	35
6.8 Scheme for Solar Radiation Transfer Equations .....	36
6.9 Scheme for Long Wave Radiation Transfer Equations .....	37
7. Model Codes .....	40
7.1 Usage of Model Code .....	40
7.2 Structure of Model Code .....	49
7.3 Parameters, Constants and Variables .....	51
7.4 Calculation Flow and Function of Subroutines .....	56
8. Example Calculation .....	81
8.1 Calculation Condition .....	81
8.2 Results .....	82

<b>9. Summary</b> .....	<b>86</b>
<b>References</b> .....	<b>87</b>
<b>Appendix</b> .....	<b>88</b>



## 1. はじめに

大気-土壌-植生の複合系での放射能を含めた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-土壌-植生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。

本研究では、このような複雑な現象の解明に利用する目的で、大気-土壌-植生複合系内での水、熱、運動量、及びその他の関連物理量の挙動を表す詳細なモデルの構築を行なっている。モデルで対象とする系の典型的な大きさは、土壌としては地上から最大深度1m程度の表層土壌、植生は地表から数m程度、大気は混合層及びその上の自由大気を含む地表から数kmである。このような大気-土壌-植生複合系をモデル化することの重要性は前報<sup>1)</sup>に詳しく記述してあるのでここでは省略する。

大気-土壌-植生複合系モデル開発の第一段階として1次元モデルのコード化を終了した。実際の自然環境を対象とする3次元モデルにおいては、本モデルの土壌及び植生部分をそのまま3次元大気モデルの地表面境界にタイル状に敷き詰めて用いることになる。また、本モデルは3次元モデルの前段階という位置づけではあるが、1次元モデル自体の利用価値も大きい。例えば、1次元モデルの計算では水平一様とした仮想的な系を扱うことになり必然的に水平方向の変動による効果を取り除いているので、大気、土壌及び植生中で起こる現象、あるいは各系間の相互作用等の理解が容易になる。さらに、本1次元モデルは、大気部分について地上付近のある高度の気象場を入力として与えその高度以下の大気のみ計算する機能も有している。この機能により、実際に測定された気象場を基に計算を行なうことで、土壌だけあるいは土壌と植生部分についての検証を行なうことができる。また、与えられた気象場に対する土壌と植生の応答を調べることで、土壌及び植生内の素過程や大気との相互作用の理解に役立てることも可能である。

本報告は、コード化を終了した1次元モデルについて、大気、土壌、植生の各モデルと植生中での放射伝達を計算するモデルの方程式系、各モデルの数値解法、モデルコードの利用法と詳細説明及び計算例を記述している。植生を含まない裸地土壌を対象としたモデル（大気及び土壌モデル）については前報<sup>1)</sup>でまとめているが、そのモデルに植生部分を追加し、土壌モデルについて一部修正したものが本モデルである。土壌モデルに行なった修正は、地表面で水が溜まる状態を考慮することである。修正

を行なった部分以外は前報と重複するが、モデルを用いる際のマニュアルとして使用する目的から、大気及び土壌モデルについても全て記述する。

## 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(2-1)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>2)</sup>。

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

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

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。

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

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

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、

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

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

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こと、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じ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。

これらのことを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)
- 土壌中空气の比湿

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

根及び幹を通じ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、地表面での顕熱フラックス、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。

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

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

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

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) での顕熱交換係数、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、本土壌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、土壌が乾燥状態に近くなると蒸発は土壌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℃当たり、降水強度1 mmh<sup>-1</sup>当たり約1.2 Wm<sup>-2</sup>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 cmから1 m程度で日変化は極めて小さいため、温度一定を式(4-1)の土壌最深層の境界条件とする。

### 3.2 土壌中液体水

土壌の体積含水率 $\eta_w$ は土壌水フラックス $E_w$ 、蒸散にともなう根による水の吸い上げ $\hat{E}_t$ 及び土壌中液体水の蒸発 $\hat{E}_b$ 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。土壌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>3)</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>4)</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。

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

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

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

ここで、 $T_{ss}$ は相変化後の地温、 $\hat{H}_g \delta t$ 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壌全体の昇温を起こすと仮定した。

下方への液体水フラックスは体積含水率が飽和の時に最大となる。その値を $E_{ws}$ とする。これ以上の地表面への入力、地表面に溜まるか地表面から流出する。このような現象を考慮するため、土壌表面水量 $R(\text{kg}/\text{m}^2)$ を定義する。

$$\frac{dR}{dt} = \begin{cases} -P_{r0} + E_r + E_{ws} & \eta_{w0} \geq \eta_{w0s} \\ 0 & \eta_{w0} < \eta_{w0s} \end{cases} \quad (3-19)$$

ここで $E_r$ は地表流出である。また、地表面の水フラックス収支は、

$$E_{w0} = \begin{cases} E_{w0s} & \eta_{w0} \geq \eta_{w0s} \\ -P_{r0} + E_r & \eta_{w0} < \eta_{w0s} \end{cases} \quad (3-20)$$

ここで、 $E_{w0s}$ は下式で与えられる。

$$E_{w0s} = -\rho_w K_s \quad (3-21)$$

土壌表面水量は、地表面の熱容量の計算にも反映される。

### 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。

$$\frac{\partial\{(\eta_{ws} - \eta_w)q_s\}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\eta_{ws} - \eta_w) D_w f(\eta_w) \frac{\partial q_s}{\partial z} \right] + \frac{\hat{E}_b}{\rho} \quad (3-22)$$

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>5)</sup>により次の式が提案されている。

$$f(\eta_w) = (\eta_{ws} - \eta_w)/1.5 \quad (3-23)$$

式(3-22)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。

$$-\rho D_w f(\eta_{sfc}) \left. \frac{\partial q_s}{\partial z} \right|_{sfc} + E_{b0} = E_0 \quad (3-24)$$

ここで、

$$E_{b0} = \int_{-\delta z_0}^0 \hat{E}_b dz \quad (3-25)$$

は地表面から深さ $\delta z_0$ までの層の土壤空隙は直接大気と接していて、その層からの蒸発は土壤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（土壤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、

$$E_0 = \rho c_{E0} |\mathbf{u}_r| (q_{sfc} - q_r) \quad (3-26)$$

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顕熱交換は式(3-4)、水蒸気交換は式(3-26)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。

$$(\tau_x, \tau_y) = \rho c_{M0} |\mathbf{u}_r| (u_r, v_r) \quad (3-27)$$

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6）により、次の式で表される。

$$c_{M0} = \frac{k^2}{\{\ln(z_r/z_0) + \psi_M(\zeta_r)\}^2} \quad (3-28)$$

$$c_{H0} = \frac{k}{\ln(z_r/z_0) + \psi_M(\zeta_r)} \cdot \frac{k}{\ln(z_r/z_T) + \psi_H(\zeta_r)} \quad (3-29)$$

$$c_{E0} = \frac{k}{\ln(z_r/z_0) + \psi_M(\zeta_r)} \cdot \frac{k}{\ln(z_r/z_q) + \psi_q(\zeta_r)} \quad (3-30)$$

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、接地層の普遍シア関数 $\phi_M, \phi_H, \phi_E$ を用いて次の式で定義される。

$$\psi_M(\zeta_r) = \int_{\zeta_0}^{\zeta_r} \frac{\phi_M(\zeta) - 1}{\zeta} d\zeta \quad (3-31)$$

$$\psi_H(\zeta_r) = \int_{\zeta_T}^{\zeta_r} \frac{\phi_H(\zeta) - 1}{\zeta} d\zeta \quad (3-32)$$

$$\psi_E(\zeta_r) = \int_{\zeta_q}^{\zeta_r} \frac{\phi_E(\zeta) - 1}{\zeta} d\zeta \quad (3-33)$$

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

$$\zeta = \frac{z}{L} \quad (3-34)$$

$$\zeta_0 = \frac{z_0}{L} \quad (3-35)$$

$$\zeta_T = \frac{z_T}{L} \quad (3-36)$$

$$\zeta_q = \frac{z_q}{L} \quad (3-37)$$

$$L = - \frac{\left(\frac{\tau}{\rho}\right)^{3/2}}{k \frac{g}{T_a} \frac{H_0}{C_p \rho}} \quad (3-38)$$

普遍シア関数は種々の関数形が提案されている。例えば、次の式<sup>6)7)</sup>は比較的広い安定度範囲で用いることができる。

$$\phi_M = \begin{cases} (1-16.4\zeta)^{-1/4} & -10 < \zeta < 0 \\ 1 + \frac{8\zeta}{1+\zeta} & \zeta \geq 0 \end{cases} \quad (3-39)$$

$$\phi_E = \phi_H = \begin{cases} (1-16.4\zeta)^{-1/2} & -10 < \zeta < 0 \\ 1 + \frac{8\zeta}{1+\zeta} & \zeta \geq 0 \end{cases} \quad (3-40)$$

## 4. 植生モデル

地表面は入射する日射及び大気からの長波放射（大気放射）を顕熱、潜熱及び長波放射に再分配する。地表付近での大気循環はこの熱再分配の様子に大きく影響される。地表面が植生に覆われている場合は、いくつかの理由により地表面の果たす役割は特に大きい。

理由の第一は熱再分配の内訳が変化する点にある。個々の葉が入力放射を吸収し顕熱及び潜熱に変換する熱交換体として働くため、植生に覆われている場合は一般的に熱交換の効率が高い。そのため、顕熱・潜熱への分配が増加する。さらに活動期の植物の場合、気孔からの蒸散が働くことにより、潜熱への分配が大きくなる。

第二の理由は、熱再分配が起こる高度が高くなる点にある。森林を考えた場合、熱再分配は主に樹冠部分で起こり、地表面を経由した熱交換は大幅に減少する。そのため、地表付近での大気環境は裸地とは全く異なる。

これらの議論は運動量交換にもあてはまる。植生が存在する場合は地上付近の風速場及び乱流場は変形を受け、一般的に風速は減少する。従って、大気-地表面間の物質交換も植生の影響を受けることになる。これも植生が重要である理由の一つである。植生層の存在により地表面-大気間の物質交換が促進されるかどうかは、植生層の特性、物質の種類、大気の状態等に依存するため一概には決まらない。少なくとも水の交換を考えた場合は、蒸散により植生層は物質交換を促進する。また、降水がある場合は樹冠部での遮断蒸発が発生し、水及び熱の再分配の様子を変える。

従って、大気環境、大気拡散及び地表-大気間の物質交換のモデル化では植生層の考慮は不可欠である。また、植生モデルは上記の熱再分配内訳及び高度の変化を考慮でき、物質交換に与える植生の影響も評価できるものである必要がある。さらに、人間の生活範囲は植生層より低い同程度であることから、植生層内部の構造も問題となる。

そこで、以下のモデル化では、植生層は厚みを持った層として取り扱う（多くのモデルでは、植生層は仮想的なもので厚みのない層として、地表面の特性を変化させて植生層を表す。ここではそのような取扱いをしない。）。また、植生層大気は容量を持った実体のある層として扱う。葉面は熱に関しては放射、顕熱及び潜熱の間の再分配を行なう容量のない物体とする。

具体的には、目的とする以下の物理量の空間分布及びその時間変化を評価するモデルとする。

植生体温度

植生表面（葉面）液体水分量

モデルで扱う植生内の素過程として以下を考慮する。

水循環

気孔からの蒸散（土壌からの水の吸い上げ）

葉面水滴からの蒸発及び凝結による葉面水滴形成（水蒸気交換）

葉面による降水の遮断、葉面水滴の滴下（液体水フラックス）

霧の発生・消散、霧水の葉面及び降水による捕捉

水滴からの蒸発

#### 熱循環

葉面－植生層内大気間の顕熱・潜熱交換

葉面による日射及び長波放射の吸収、反射、射出及び透過（放射伝達）

大気中の液体水（霧水及び雨水）の日射及び長波放射に対する影響

#### 運動量

葉面の空気力学的抵抗及び乱流生成

植生層の幹及び枝による水蒸気交換、顕熱交換及び空気抵抗は葉に比べてその表面積が小さいので無視する。また、幹枝の熱伝導は微小なため無視する。植生の構造及び放射、液体水の分布の水平方向の非均一性は鉛直方向に比べて極めて小さいので、放射フラックス及び液体水フラックスは鉛直方向のみを考慮する。固体相の水は含めない。また、植生層内外では、顕熱、水蒸気、液体水及び放射のフラックスの連続性を満たすものとする。

#### 4.1 葉面熱収支

植物体内での熱伝導と植生体の熱容量を無視し、植物－大気間の熱交換は全て葉面を通して行われると仮定した場合の単位葉面当たりの熱収支は次式で表される

$$R_c = H_c + IE_c + H_p \quad (4-1)$$

ここで、各項は左辺から単位時間単位葉面当たりの放射収支、顕熱交換量、潜熱交換量及び降水による冷却量である。光合成による太陽エネルギーから化学エネルギーへの変換は無視した。

$$R_c(z) = F_r \left\{ (1 - A_c) \{ S \uparrow(z) + S \downarrow(z) \} + \epsilon \{ L \uparrow(z) + L \downarrow(z) - 2\sigma(T_c(z))^4 \} \right\} \quad (4-2)$$

$$H_c(z) = \rho C_p c_H |u(z)| \{ T_c(z) - T_a(z) \} \quad (4-3)$$

$$E_c(z) = E_d(z) + E_s(z) \quad (4-4)$$

$$H_p(z) = C_w F_p P_r(z) \{ T_c(z) - T_p \} \quad (4-5)$$

葉面の日射反射率 $A_c$ 、長波放射の射出率 $\epsilon$ 及び放射に関する葉面投影係数 $F_r$ は植物の種類によって異なる値を持つが、各植生層内では一定と仮定する。 $F_r$ は葉面の法線が鉛直方向を向いていないことと葉面が互いに重なり合うことにより放射の鉛直フラックスに対する実効面積が実際の葉面積より小さくなる効果を表している。係数 $F_p$ は降水捕捉に関する葉面の投影係数で $F_r$ と同様の効果を表し、以下では両者は等しいと仮定する。例えば、

Kanemasu et al.<sup>8)</sup>によると、leaf area index (LAI)が $A$ の植生層に対する平均遮蔽係数 (shielding factor)は次式で与えられるので、

$$\sigma_s = 1 - \exp(-0.4A) \quad (4-6)$$

厚さ  $\delta z$ の層に対する平均的な投影係数は、

$$F_r = \frac{1 - \exp(-0.4\delta A)}{\delta A} \quad (4-7)$$

$$\delta A = \int_z^{z+\delta z} a dz \quad (4-8)$$

により与えられる。ここで $a$ は葉面積密度( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )である。 $T_p$ は高度によらず一定と仮定し、降水空間の平均気温に等しいとする。

葉面からの水蒸気フラックスは葉面直近の空気層を介して行われるとする。Kirchhoffの法則を用いて葉面直近—気孔内、葉面直近—葉面水滴、葉面直近—大気間のフラックス、その間の比湿差及びそれぞれの抵抗の関係は、

$$r_s E_s = \rho(q_{stomata} - q_{adj}) \quad (4-9)$$

$$r_d E_d = \rho(q_d - q_{adj}) \quad (4-10)$$

$$r_a (E_s + E_d) = \rho(q_{adj} - a_a) \quad (4-11)$$

と表すことができる。ここで、 $q_{stomata}$ 、 $q_d$ 及び $q_{adj}$ はそれぞれ気孔内、葉面水滴及び葉面直近大気の比湿であり、前二者については葉面温度での飽和比湿と等しいと仮定する。

$$q_{stomata} = q_d = q_{sat}(T_c) \quad (4-12)$$

蒸散に関する気孔抵抗 $r_s$ は日射及び土壌水分の関数、葉面水滴の蒸発抵抗 $r_d$ は葉面に占める水滴面割合の関数である。この割合は葉面水滴量の関数となるので、 $r_d$ も葉面水滴の関数となる。従って、 $q_{adj}$ は気孔及び葉面水滴からの水蒸気のavailabilityを表す量で、葉面有効比湿と呼ぶことにする。 $r_s$ と $r_d$ は例えばDeardorff<sup>9)</sup>によれば次式により表される。

$$r_s = r_{s,\min} \left( \frac{\bar{S} \downarrow}{S \downarrow + 0.03 \bar{S} \downarrow} + \left( \frac{\eta_{wilt}}{\eta_w} \right)^2 \right) \quad (4-13)$$

$$r_d = \begin{cases} (1 - x_d) x_d^{-1} r_a & q_{sat}(T_c) \geq q_a \\ 0 & q_{sat}(T_c) < q_a \end{cases} \quad \text{with } x_d = \min(1, (w_d/w_{dw})^{2/3}) \quad (4-14)$$



ここで  $\bar{S} \downarrow$  は快晴の場合に期待されるその日の最大全天日射量、 $\eta_{wilr}$  は土のしおれ体積含水率である。 $w_{dw}$  は葉面水滴からの蒸発が同面積の自由水面からの蒸発と等しいと見なせる葉面水滴量であり、葉面が保持できる最大水滴量  $w_{ds}$  とは必ずしも一致しない。葉面直近と大気との抵抗  $r_a$  は葉面の空気力学的特性にのみ依存するとして、顕熱交換と同様に、

$$r_a = (c_E |u|)^{-1} \quad (4-15)$$

と表す。顕熱と水蒸気は両者とも passive scaler であるため  $c_E = c_H$  とすることが可能であろうが、この段階では一般性を保つために両者は独立であるとする。

各水蒸気フラックスは大気に向かう方向を正とし、正負両方の値を取り得る。正の場合は気孔または葉面水滴からの蒸発、負の場合は気孔内への凝結または葉面水滴の形成（結露）を表す。

式(4-9)～(4-11)を  $q_{adj}$  について解くと次式を得る。

$$q_{adj} = R(r_a r_s q_d + r_a r_d q_s + r_s r_d q_a) \quad (4-16)$$

$$R = (r_a r_s + r_a r_d + r_s r_d)^{-1} \quad (4-17)$$

これを式(4-9)及び(4-10)に代入し、式(4-12)の仮定を用いると、それぞれ以下の式となる。

$$E_s = \rho R r_d \{q_{sat}(T_c) - q_a\} \quad (4-18)$$

$$E_d = \rho R r_s \{q_{sat}(T_c) - q_a\} \quad (4-19)$$

#### 4.2 葉面水滴

葉面水滴の発生源は降水捕捉、水微粒子捕捉及び結露で、減少要因は滴下及び蒸発である。蒸発（または結露）は式(4-19)によって表される。植生層内を下向きに通過する液体水フラックス  $P_r$  の一部は葉面により捕捉され残りは通過する。幅  $\delta_z$  の層で葉面により捕捉される水滴量は単位時間及び単位空間当たり、

$$aE_{int} = aF_p P_r \quad (4-20)$$

と表すこととする。水微粒子（霧水）の捕捉は、葉面積密度  $a$ 、水微粒子の移動速度（風速  $|u|$ ）、単位重量空気当たりの微粒子水重量  $w_f$  に比例するとして、

$$aE_{cap} = aF_f |u| \rho w_f \quad (4-21)$$

と表される。ここで、 $F_d$ は $F_p$ と同様の係数で、主に水平移動する水滴に対する係数である点が $F_p$ と異なる。

単位葉面当たりが保持できる水滴量には上限がある。単位葉面当たりの水滴量 $w_d$ が上限値 $w_{ds}$ に達した後は降水捕捉、霧水捕捉及び結露で生じる水滴は葉面から滴下する。この上限値は葉の形状、表面特性、向き、運動（風速）に依存する。

以上より、単位葉面当たりの水滴量の変化は、

$$\frac{dw_d}{dt} = E_{int} - E_d + E_{cap} - P_d \quad (4-22)$$

$$P_d = \begin{cases} 0 & w_d < w_{ds} \\ E_{int} - E_d + E_{cap} & w_d = w_{ds} \end{cases} \quad (4-23)$$

によって表される。ここで、 $P_d$ は葉面からの滴下を表す。

#### 4.3 液体水フラックス

液体水（水滴）フラックスの収支により次式が得られる。

$$\frac{dP_r}{dz} = a(E_{int} - P_d) + \hat{E}_{pr} - \hat{E}_{col} \quad (4-24)$$

ただし、 $P_r$ は下向きを正とする。ここで、大気中の水微粒子は鉛直方向に巨視的に運動しないとして、 $P_r$ には含めない。森林等では樹幹流も生じるが、これは $P_r$ に含まれるとする。 $P_r$ は植生層外では降雨強度と等しい。 $\hat{E}_{pr}$ は雨滴からの直接の蒸発、 $\hat{E}_{col}$ は雨滴による霧粒子の捕捉である。

水滴からの蒸発 $\hat{E}_{pr}$ は水滴表面と大気間の比湿差、大気との相対速度、水滴断面積の空間密度 $a_{pr}$ に比例すると考えられる。水滴の表面比湿はその高度の気温の飽和比湿とする。大気との相対速度は水滴の落下速度 $V_f$ とする。ここで $c_E$ を用いて $\hat{E}_{pr}$ を表すと、

$$\hat{E}_{pr} = \rho a_{pr} c_E V_f \{q_{sat}(T_p) - q_a\} \quad (4-25)$$

が得られる。水滴は半径が一様な球形であると仮定すると、水滴の半径 $r$ を用いて次の式が得られる。

$$\hat{E}_{pr} = \frac{3\rho c_E}{4r\rho_w} P_r \{q_{sat}(T_p) - q_a\} \quad (4-26)$$

降水による水微粒子捕捉は、雨滴が通過した空間に存在する水微粒子は全て雨滴によって捕捉されるとして、

$$\hat{E}_{col} = \rho a_{pr} V_f w_f \quad (4-27)$$

と表される。水滴に関して蒸発と同じ仮定を用いると、

$$\hat{E}_{col} = \frac{3\rho P_r w_f}{4r\rho_w} \quad (4-28)$$

が得られる。

葉面からの滴下、直接の蒸発及び水微粒子の捕捉を無視し、 $a$ が高度によらず一定であるとする、式(4-24)によって得られる $P_r$ は植生層上端から指数関数的に減少する。葉面積密度が高く葉面水滴がまだ飽和に達していない場合は、地表に達する降水は極めて少ない。すなわち、降水捕捉においても、放射の吸収と同様に、樹冠部が重要な働きをする。

## 5. 放射モデル

植生及び液体水が存在する大気層内での放射伝達はそれらの作用物体による反射、吸収及び射出の影響を受ける。一般には日射及び長波放射の両者とも等方的であるとは仮定できないが、本モデルで対象とする空間の鉛直-水平アスペクト比とその中に層状に存在する作用物体による反射、吸収等を考慮する場合、上下それぞれの半球からの水平面への寄与分の合計の鉛直方向での変化を考慮すれば十分に現実的な放射の評価が可能であると考えられる。すなわち、日射及び長波放射はそれぞれ上向きと下向きのフラックスとして取り扱う。

葉面による作用は波長依存性を持つが、以下では日射及び長波放射はそれぞれ単色光であるとして（波長依存性を考慮せずに）扱う。

### 5.1 日射伝達

高度 $z \sim z + \delta z$ 間の葉面を水平面に投影した場合の面積は $aF_r \delta z$ と表される。ここで、 $F_r$ は葉の傾き及び重なりを考慮するための係数で、例えば天頂からの直達日射に対して葉が全て水平で重なりがない場合 $F_r = 1$ 、葉が全て垂直の場合 $F_r = 0$ となる。平均的な値は式(3-7)で与えられる。 $\delta z$ または $a$ が大きい場合は重なりが大きくなり $F_r$ は小さい値を持ち、その極限では $aF_r \delta z = 1$ となる。一方、 $\delta z = 0$ の極限では葉の重なりはなく、 $F_r$ は葉の傾きのみ依存する（放射場の角度依存性を除けば）。

下向きの日射は $z \sim z + \delta z$ 間の葉面及び水滴により反射、吸収され、残りは透過する。それぞれの大きさは次式によって表される。

$$(\text{reflection}) = aF_r \delta z A_c S \downarrow_{z+\delta z} + (1 - aF_r \delta z) r_w S \downarrow_{z+\delta z} \quad (5-1)$$

$$(\text{absorption}) = aF_r \delta z (1 - A_c) S \downarrow_{z+\delta z} + (1 - aF_r \delta z) \alpha_w S \downarrow_{z+\delta z} \quad (5-2)$$

$$(\text{transmission}) = (1 - aF_r \delta z) (1 - r_w - \alpha_w) S \downarrow_{z+\delta z} \quad (5-3)$$

ここで、反射及び吸収の第1項及び第2項はそれぞれ葉面及び水滴による作用を表す。上向きについても全く同様に表す。

$$(\text{reflection}) = aF_r \delta z A_c S \uparrow_z + (1 - aF_r \delta z) r_w S \uparrow_z \quad (5-4)$$

$$(\text{absorption}) = aF_r \delta z (1 - A_c) S \uparrow_z + (1 - aF_r \delta z) \alpha_w S \uparrow_z \quad (5-5)$$

$$(\text{transmission}) = (1 - aF_r \delta z) (1 - r_w - \alpha_w) S \uparrow_z \quad (5-6)$$

ここで用いた日射の反射・吸収に関する葉面形状の仮定は、1) 傾きを持つ直達日射に対して正確でなく、2)  $\delta z$ の間の多重反射による効果が考慮されていない欠点がある。しか

し、これらを考慮するためには葉面の幾何学特性の分布を詳細に記述する必要があり、たとえモデル化が可能であっても適用する際に必要な植生パラメータを取得するのは困難である。もし基礎実験等により対象植生の日射に対する詳細な特性が得られれば、それを係数 $F_r$ に含めることにより上記の問題は解決できるため、この係数を用いた記述はモデルの枠組みとしては十分である。また、葉面の反射率はそれほど大きくないため、 $\delta z$ 間の多重反射の問題は重要ではない。

水滴による日射の吸収率及び反射率は、例えばStephens<sup>10)</sup>のモデルを用いて新たにパラメタライズされる。反射率は次式で与えられる。

$$r_w = \begin{cases} \frac{(0.01k_r)^{0.55}}{0.01} \frac{w_l \delta z}{\cos z_s} & \frac{w_l \delta z}{\cos z_s} < 0.01 \text{ kg/m}^2 \\ \left( \frac{k_r w_l \delta z}{\cos z_s} \right)^{0.55} & \frac{w_l \delta z}{\cos z_s} \geq 0.01 \text{ kg/m}^2 \end{cases} \quad (5-7)$$

$$w_l = \frac{1}{\delta z} \int_z^{z+\delta z} \left( \rho w_f + \frac{P_r}{V_f} \right) dz \quad (5-8)$$

ここで、 $Z_s$ は太陽天頂角、 $w_l$ は厚さ $\delta z$ の層内の平均液体水分量( $\text{kg/m}^3$ )で、後述の霧水量 $w_f$ 、液体水鉛直フラックス(植生層外では降水強度と等しい) $P_r$ 及び雨滴の平均鉛直速度 $V_f$ を用いて式(5-8)のように表される。係数 $k_r$ は単位気柱内の全液体水分量 $W_l$ ( $\text{kg/m}^2$ )を用いて、

$$k_r = \min \left( \frac{1.7 \times 10^2 W_l}{\cos z_s}, 2 \left( \frac{W_l}{\cos z_s} \right)^{-0.8}, 0.6 \right) \quad (5-9)$$

$$W_l = \int_{z_r}^H \left( \rho w_f + \frac{P_r}{V_f} \right) dz \quad (5-10)$$

と表される。

吸収率は次式で与えられる。

$$a_w = k_a w_l \quad (5-11)$$

係数 $k_a$ は $k_r$ と同様に単位気柱内の全液体水分量 $W_l$ の関数で、次の実験式で与えられる。

$$k_a = \begin{cases} \frac{2.7 \times 10^2 W_1}{\cos z_s} & \frac{W_1}{\cos z_s} < 6.3 \times 10^{-3} \\ a_4 x^4 + a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 & 6.3 \times 10^{-3} \leq \frac{W_1}{\cos z_s} < 0.1 \\ 1.5 \left( \frac{10 W_1}{\cos z_s} \right)^{-0.8} & 0.1 \leq \frac{W_1}{\cos z_s} \end{cases} \quad (5-12)$$

$$x = \log \frac{W_1}{\cos z_s}$$

$$a_4 = -0.6491, \quad a_3 = -1.406, \quad a_2 = 0.1871, \quad a_1 = -0.3135, \quad a_0 = 0.2420$$

以上の式を用いると、 $S \downarrow_z$ 及び $S \uparrow_{z+\delta z}$ はそれぞれ、

$$S \downarrow_z = (1 - aF, \delta z)(1 - r_w - a_w)S \downarrow_{z+\delta z} + aF, \delta z A_c S \uparrow_z + (1 - aF, \delta z)r_w S \uparrow_z \quad (5-13)$$

$$S \uparrow_{z+\delta z} = (1 - aF, \delta z)(1 - r_w - a_w)S \uparrow_z + aF, \delta z A_c S \downarrow_{z+\delta z} + (1 - aF, \delta z)r_w S \downarrow_{z+\delta z} \quad (5-14)$$

と表され、日射伝達方程式は、

$$\frac{dS \downarrow}{dz} = \lim_{\delta z \rightarrow 0} \frac{S \downarrow_{z+\delta z} - S \downarrow_z}{\delta z} = (aF_r + a'_w + r'_w)S \downarrow - (aF_r A_c + r'_w)S \uparrow \quad (5-15)$$

$$\frac{dS \uparrow}{dz} = -(aF_r + a'_w + r'_w)S \uparrow + (aF_r A_c + r'_w)S \downarrow \quad (5-16)$$

となる。ただし、 $r'_w = r_w / \delta z$ 、 $a'_w = a_w / \delta z$ である。

## 5.2 長波放射伝達

長波放射伝達で日射伝達と異なる点は、長波放射では反射、透過及び吸収に加えて葉面及び液体水からの長波放射（赤外線）の射出が含まれる点である。 $z \sim z + \delta z$ の層でのそれぞれの大きさは、上端から入射する下向き長波放射に関しては次式で表される。

$$(\text{reflection}) = aF, \delta z(1 - \epsilon)L \downarrow_{z+\delta z} \quad (5-17)$$

吸収成分及び透過成分は液体水の影響も考慮して次の式で表される。

$$(absorption) = \{aF_r \delta z \varepsilon + (1 - aF_r \delta z) \varepsilon_w\} L \downarrow_{z+\delta z} \quad (5-18)$$

$$(transmission) = (1 - aF_r \delta z)(1 - \varepsilon_w) L \downarrow_{z+\delta z} \quad (5-19)$$

下端から入射する放射についても全く同様に表す。

$$(reflection) = aF_r \delta z (1 - \varepsilon) L \uparrow_z \quad (5-20)$$

$$(absorption) = \{aF_r \delta z \varepsilon + (1 - aF_r \delta z) \varepsilon_w\} L \uparrow_z \quad (5-21)$$

$$(transmission) = (1 - aF_r \delta z)(1 - \varepsilon_w) L \uparrow_z \quad (5-22)$$

射出は上下方向等しく、次式で表される。

$$(emission) = aF_r \delta z \varepsilon \sigma T_c^4 + (1 - aF_r \delta z) \varepsilon_w \sigma T_a^4 \quad (5-23)$$

ここで、 $\varepsilon_w$  は  $z \sim z + \delta z$  の間に存在する液体水の射出率で、例えばStephensの放射モデル<sup>10)</sup>を用いると次の式で表される。

$$\varepsilon_w = 1 - \exp(-k_l w_l \delta z) \quad (5-24)$$

$k_l$  は定数で、 $k_l = 1.44 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{kg}$  である。

以上より高度  $z$  での下向き長波放射及び高度  $z + \delta z$  での上向き長波放射はそれぞれ、

$$L \downarrow_z = aF_r \delta z \{ (1 - \varepsilon) L \uparrow_z + \varepsilon \sigma T_c^4 \} + (1 - aF_r \delta z) \{ (1 - \varepsilon_w) L \downarrow_{z+\delta z} + \varepsilon_w \sigma T_a^4 \} \quad (5-25)$$

$$L \uparrow_{z+\delta z} = aF_r \delta z \{ (1 - \varepsilon) L \downarrow_{z+\delta z} + \varepsilon \sigma T_c^4 \} + (1 - aF_r \delta z) \{ (1 - \varepsilon_w) L \uparrow_z + \varepsilon_w \sigma T_a^4 \} \quad (5-26)$$

と表される。従って、長波放射伝達式は次の2式となる。

$$\frac{dL \downarrow}{dz} = \lim_{\delta z \rightarrow 0} \frac{L \downarrow_{z+\delta z} - L \downarrow_z}{\delta z} = aF_r \{ L \downarrow - (1 - \varepsilon) L \uparrow - \varepsilon \sigma T_c^4 \} + k_l w_l (L \downarrow - \sigma T_a^4) \quad (5-27)$$

$$\frac{dL \uparrow}{dz} = aF_r \{ -L \uparrow + (1 - \varepsilon) L \downarrow + \varepsilon \sigma T_c^4 \} + k_l w_l (-L \uparrow + \sigma T_a^4) \quad (5-28)$$

## 6. 数値解法

第2章から第5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、土壌中の格子点番号は負である。格子点番号の定義をFig. 6-1に示す。時間は括弧付き上付き添字で表す。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。

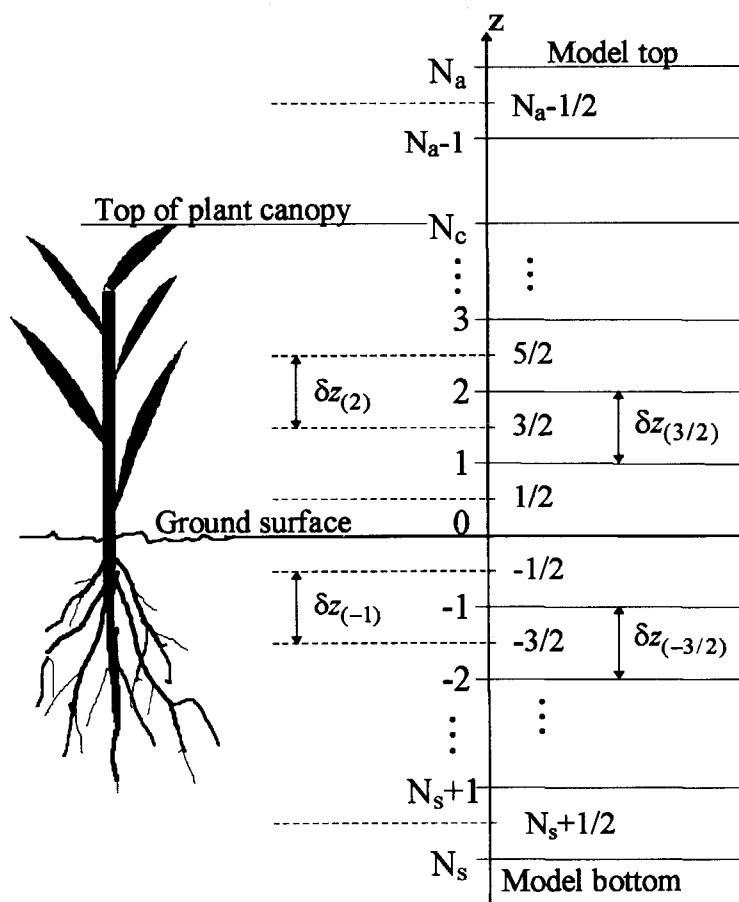


Fig. 6-1 Definition of vertical grid numbering system.

### 6.1 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

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial \phi}{\partial z} + A\phi + F \quad (6-1)$$

に対する差分式は、

$$\phi_{(k)}^{(t+\delta t)} - \phi_{(k)}^{(t)} = \delta t (\Delta_{(k)} + A_{(k)}) \{ \mu \phi_{(k)}^{(t+\delta t)} + (1-\mu) \phi_{(k)}^{(t)} \} + \delta t F_{(k)} \quad (6-2)$$

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。土壌層の格子番号は、地表面を0、地中最深層を $N_s$ と定義する。 $N_s$ は負の整数である。ここで、演算子 $\Delta_{(k)}$ は、

$$\Delta_{(k)} \phi = \delta_{k+} (\phi_{(k+1)} - \phi_{(k)}) - \delta_{k-} (\phi_{(k)} - \phi_{(k-1)}) \quad (6-3)$$

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

$$\delta_{k-} = \frac{\delta K_{(k-1/2)}}{\delta z_{(k)} \delta z_{(k-1/2)}} \quad (6-5)$$

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

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（土壌中では $-k+1$ 番目、 $k$ は負）の方程式は、

$$\alpha_{k,k-1} \phi_{(k-1)}^{(t+\delta t)} + \alpha_{k,k} \phi_{(k)}^{(t+\delta t)} + \alpha_{k,k+1} \phi_{(k+1)}^{(t+\delta t)} = \gamma_k \quad (6-7)$$

で表される。 $\alpha_{i,j}$ は係数行列（土壌中では0行0列から始まる）の $i$ 行 $j$ 列の要素で（土壌中では $-i$ 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。

$$\alpha_{k,k-1} = -\mu \delta_{k-} \quad (6-8)$$

$$\alpha_{k,k} = 1 - \mu A \delta t - \alpha_{k,k-1} - \alpha_{k,k+1} \quad (6-9)$$

$$\alpha_{k,k+1} = -\mu \delta_{k+} \quad (6-10)$$

$$\gamma_k = \phi_{(k)}^{(t)} + (1-\mu) \delta t \Delta_{(k)} \phi_{(k)}^{(t)} + (1-\mu) A_{(k)} \delta t \phi_{(k)}^{(t)} + \delta t F_{(k)} \quad (6-11)$$

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めることにより、解くべき方程式は次の式となる。

$$\phi_{(k)}^{(t+\delta)} + \alpha'_{k,k-1} \phi_{(k-1)}^{(t+\delta)} = \gamma'_k \quad (6-12)$$

ここで、

$$\alpha'_{k,k-1} = -\frac{\alpha_{k,k-1}}{\alpha_{k,k} - \alpha_{k,k+1} \alpha'_{k+1,k}} \quad (6-13)$$

$$\gamma'_k = -\frac{\gamma_k - \alpha_{k,k+1} \gamma'_{k+1}}{\alpha_{k,k} - \alpha_{k,k+1} \alpha'_{k+1,k}} \quad (6-14)$$

である。前進代入の初期値は、

(大気中)

$$\alpha'_{2,1} = \frac{\alpha_{2,1}}{\alpha_{1,1}} \quad (6-15)$$

$$\gamma'_1 = \frac{\gamma_1}{\alpha_{1,1}} \quad (6-16)$$

(土壌中)

$$\alpha'_{0,-1} = \frac{\alpha_{0,-1}}{\alpha_{0,0}} \quad (6-17)$$

$$\gamma'_0 = \frac{\gamma_0}{\alpha_{0,0}} \quad (6-18)$$

で得られる。

## 6.2 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>11)</sup>に詳細に記述されているので、本報告では省略する。

## 6.3 土壤中熱伝導方程式の数値解法

土壤中熱伝導方程式(3-1)は右辺第3項を無視すると式(6-1)と直接対応し、式(6-2)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。

$$\alpha_{k,k-1} = -\frac{\mu \delta K_{s,(k-1/2)}}{\delta z_{(k)} \delta z_{(k-1/2)}} \quad (6-19)$$

$$\alpha_{k,k} = 1 - \alpha_{k,k-1} - \alpha_{k,k+1} \quad (6-20)$$

$$\alpha_{k,k-1} = -\frac{\mu \delta K_{s,(k+1/2)}}{\delta z_{(k)} \delta z_{(k+1/2)}} \quad (6-21)$$

$$\gamma_k = T_{s,(k)}^{(t)} + (1 - \mu) \delta \Delta_{(k)} T_s^{(t)} - \frac{\delta l \hat{E}_{b,(k)}}{C_{s,(k)} \rho_{s,(k)}} \quad (6-22)$$

$k=0$ 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、

$$\alpha_{0,0} = \mu(4\epsilon_b \sigma T_{s,(0)}^{(t)3} + \beta_G + \beta_P) + \beta_H \quad (6-23)$$

$$\alpha_{0,-1} = -\mu \beta_G \quad (6-24)$$

$$\begin{aligned} \gamma_0 = & (1 - A_b) S \downarrow_0 + \epsilon_b L \downarrow_0 + (4\mu - 1) \epsilon_b \sigma T_{s,(0)}^{(t)4} + \beta_H T_r \\ & + \beta_G (\mu - 1) (T_{s,(0)}^{(t)} - T_{s,(-1)}^{(t)}) + \beta_P \{ (\mu - 1) T_{s,(0)}^{(t)} + T_p \} \end{aligned} \quad (6-25)$$

$$\beta_H = C_p \rho_{cH0} |\mathbf{u}_r| \quad (6-26)$$

$$\beta_G = \frac{C_{s,(-1/2)} \rho_{s,(-1/2)} K_{s,(-1/2)}}{\delta z_{(-1/2)}} \quad (6-27)$$

$$\beta_P = C_w P_{r0} \quad (6-28)$$

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。後退代入は地中最深層での温度を初期値として式(6-12)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、砂質土壌で土壌水が飽和に近い場合、この拡散係数は $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/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 ( $\eta_w \approx \eta_{ws} / 2$ ) 以下の場合には $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s のオーダーである。一方、土壌の熱拡散係数は $10^{-7}$  m<sup>2</sup>/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。

#### 6.4 土壌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。

$$\frac{\eta_{w,(k)}^{(t+\delta t)} - \eta_{w,(k)}^{(t)}}{\delta t} = \nabla_{(k)} \{ D(\eta_w^*) \nabla \eta_w^* \} + \nabla_{(k)} K(\eta_w^*) - \frac{\hat{E}_{t,(k)}(\eta_w)}{\rho_w} - \frac{\hat{E}_{b,(k)}(\eta_w^*)}{\rho_w} \quad (6-29)$$

ただし、

$$\nabla_{(k)} \phi = \frac{\phi_{(k+1/2)} - \phi_{(k-1/2)}}{\delta z_{(k)}} \quad (6-30)$$

$$\nabla_{(k)} (D \nabla \phi) = \frac{D_{(k+1/2)} \nabla_{(k+1/2)} \phi - D_{(k-1/2)} \nabla_{(k-1/2)} \phi}{\delta z_{(k)}} \quad (6-31)$$

$$\begin{aligned} \eta_{w,(k)}^* &= \mu \eta_{w,(k)}^{(t+\delta t)} + (1-\mu) \eta_{w,(k)}^{(t)} \\ &= \eta_{w,(k)}^{(t)} + \mu \delta \eta_{w,(k)} \end{aligned} \quad (6-32)$$

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。

$$\begin{aligned} \frac{\delta\eta_{(k)}}{\delta t} = & \nabla_{(k)} \{D(\eta_w) \nabla \eta_w + \mu \delta\eta_w D'(\eta_w) \nabla \eta_w + \mu D(\eta_w) \nabla \delta\eta_w\} \\ & + \nabla_{(k)} K(\eta_w) + \mu \nabla_{(k)} \{\delta\eta_w K'(\eta_w)\} - \frac{1}{\rho_w} \{\hat{E}_t(\eta_{w,(k)}) - \mu \delta\eta_{w,(k)} \hat{E}_t'(\eta_{w,(k)})\} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \{\hat{E}_b(\eta_{w,(k)}) + \mu \delta\eta_{w,(k)} \hat{E}_b'(\eta_{w,(k)})\} \end{aligned} \quad (6-33)$$

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、

$$D_{(k\pm 1/2)} = \frac{D(\eta_{w,(k\pm 1)}) + D(\eta_{w,(k)})}{2} \quad (6-34)$$

$$D'_{(k\pm 1/2)} = \frac{D'(\eta_{w,(k\pm 1)}) + D'(\eta_{w,(k)})}{2} \quad (6-35)$$

$$K'_{(k\pm 1/2)} = \frac{K'(\eta_{w,(k\pm 1)}) + K'(\eta_{w,(k)})}{2} \quad (6-36)$$

$$\delta\eta_{w,(k\pm 1/2)} = \frac{\delta\eta_{w,(k\pm 1)} + \delta\eta_{w,(k)}}{2} \quad (6-37)$$

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。

$$\begin{aligned} & \delta\eta_{w,(k)} \left[ 1 - \frac{\mu \delta t}{\rho_w} \{\hat{E}_t'(\eta_{w,(k)}) + \hat{E}_b'(\eta_{w,(k)})\} \right] \\ & - \frac{\mu \delta t}{\delta z_{(k)}} \left[ D'_{(k+1/2)} (\nabla_{(k+1/2)} \eta_w) \delta\eta_{w,(k+1/2)} - D'_{(k-1/2)} (\nabla_{(k-1/2)} \eta_w) \delta\eta_{w,(k-1/2)} \right. \\ & + D_{(k+1/2)} \frac{\delta\eta_{w,(k+1)} - \delta\eta_{w,(k)}}{\delta z_{(k+1/2)}} - D_{(k-1/2)} \frac{\delta\eta_{w,(k)} - \delta\eta_{w,(k-1)}}{\delta z_{(k-1/2)}} \\ & \left. + K'_{(k+1/2)} \delta\eta_{w,(k+1/2)} - K'_{(k-1/2)} \delta\eta_{w,(k-1/2)} \right] \\ & = \delta t \left[ \nabla_{(k)} \{D(\eta_w) \nabla \eta_w + K(\eta_w)\} - \frac{\hat{E}_t(\eta_{w,(k)}) + \hat{E}_b(\eta_{w,(k)})}{\rho_w} \right] \end{aligned} \quad (6-38)$$

これより、式(6-7)の係数は次のように得られる。

$$\alpha_{k,k+1} = -\frac{\mu\delta t}{\delta z_{(k)}} \left( \frac{D_{(k+1/2)}}{\delta z_{(k+1/2)}} + \frac{K'_{(k+1/2)}}{2} + \frac{D'_{(k+1/2)} \nabla_{(k+1/2)} \eta_w}{2} \right) \quad (6-39)$$

$$\alpha_{k,k} = 1 - \frac{\mu\delta t}{\rho_w} (\hat{E}'_{t,(k)} + \hat{E}'_{b,(k)}) + \frac{\mu\delta t}{\delta z_{(k)}} \left( \frac{D_{(k+1/2)}}{\delta z_{(k+1/2)}} - \frac{K'_{(k+1/2)}}{2} - \frac{D'_{(k+1/2)} \nabla_{(k+1/2)} \eta_w}{2} + \frac{D_{(k-1/2)}}{\delta z_{(k-1/2)}} + \frac{K'_{(k-1/2)}}{2} + \frac{D'_{(k-1/2)} \nabla_{(k-1/2)} \eta_w}{2} \right) \quad (6-40)$$

$$\alpha_{k,k-1} = -\frac{\mu\delta t}{\delta z_{(k)}} \left( \frac{D_{(k-1/2)}}{\delta z_{(k-1/2)}} - \frac{K'_{(k-1/2)}}{2} - \frac{D'_{(k-1/2)} \nabla_{(k-1/2)} \eta_w}{2} \right) \quad (6-41)$$

$$\gamma_k = \delta t \left( \nabla_{(k)} (D \nabla \eta_w + K) - \frac{\hat{E}'_t(\eta_{w,(k)}) + \hat{E}'_b(\eta_{w,(k)})}{\rho_w} \right) \quad (6-42)$$

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。

$$D(\eta_w) = -\frac{bK_s \psi_s}{\eta_{ws}} \left( \frac{\eta_w}{\eta_{ws}} \right)^{b+2} \quad (6-43)$$

$$D'(\eta_w) = -\frac{b(b+2)K_s \Psi_s}{\eta_{ws}^2} \left( \frac{\eta_w}{\eta_{ws}} \right)^{b+1} = \frac{b+2}{\eta_w} D(\eta_w) \quad (6-44)$$

$$K'(\eta_w) = \frac{(2b+3)K_s}{\eta_{ws}} \left( \frac{\eta_w}{\eta_{ws}} \right)^{2b+2} = \frac{2b+3}{\eta_w} K(\eta_w) \quad (6-45)$$

$\hat{E}'_b$ は式(3-14)及び(3-15)を用いて、

$$\begin{aligned}\hat{E}'_b &= \rho \{q_{sat}(T_s) - q_s\} \frac{\partial}{\partial \eta_w} \left( \frac{1}{r_b} \right) \\ &= \frac{F_2 \hat{E}_b}{\eta_{ws} - \eta_w}\end{aligned}\quad (6-46)$$

となる。また、 $\hat{E}_i$ 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（半乾燥土壌）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。

土壌中の液体含水率に関する地表面の境界条件は式(3-20)で与えられる。ここで、飽和になるかどうかの判断は $\delta z_1(\eta_{ws} - \eta_{w,1}^{(t)})$ と $\delta(-P_{r0} + E_r + E_{w0s}) + R$ の大小判断によって行なう。前者が大きい場合は式(3-20)の下の条件により、次の計算を行なう。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。

$$-\rho_w \{D(\eta_{w,(-1/2)}^*) \nabla_{(-1/2)} \eta_w^* + K(\eta_{w,(-1/2)}^*)\} = -P_{r0} + E_r \quad (6-47)$$

これを $\delta \eta_{w,(0)}$ と $\delta \eta_{w,(-1)}$ について整理すると、式(6-7)の係数は以下のとおりとなる。

$$\alpha_{0,0} = \mu \left( \frac{D'_{(-1/2)} \nabla_{(-1/2)} \eta_w + K'_{(-1/2)}}{2} + \frac{D_{(-1/2)}}{\delta z_{(-1/2)}} \right) \quad (6-48)$$

$$\alpha_{0,-1} = -\frac{\mu D_{(-1/2)}}{\delta z_{(-1/2)}} + \frac{\mu}{2} (D'_{(-1/2)} \nabla_{(-1/2)} \eta_w + K'_{(-1/2)}) \quad (6-49)$$

$$\gamma_0 = \frac{1}{\rho_w} (P_{r0} - E_r) - D_{(-1/2)} \nabla_{(-1/2)} \eta_w - K_{(-1/2)} \quad (6-50)$$

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。一方、後者が大きい場合は、

$$\delta \eta_{w,1} = \eta_{ws} - \eta_{w,1}^{(t)} \quad (6-51)$$

$$R^{(t+\delta)} = R^{(t)} + \delta R \quad (6-52)$$

$$\delta R = \delta(-P_{r0} + E_r + E_{w0s}) - \delta z_1 (\eta_{ws} - \eta_{w,1}^{(t)}) \quad (6-53)$$

により計算する。

### 6.5 土壌中水蒸気拡散方程式の数値解法

土壌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(3-22)の差分式として次の式を用いる。

$$\frac{(\eta_{ws} - \eta_{w,(k)}) (q_{s,(k)}^{(t+\delta)} - q_{s,(k)}^{(t)})}{\delta} = \nabla_{(k)} \{ D_w f(\eta_{w,(k)}) \nabla q_s^* \} + \frac{\hat{E}_b(q_{s,(k)}^*)}{\rho} \quad (6-54)$$

以下では $D_w$ は定数として扱う。ここで、

$$\begin{aligned} q_{s,(k)}^* &= \mu q_{s,(k)}^{(t+\delta)} + (1-\mu) q_{s,(k)}^{(t)} \\ &= q_{s,(k)}^{(t)} + \mu \delta q_{s,(k)} \end{aligned} \quad (6-55)$$

この差分式は未知数 $\delta q_{s,(k)} = q_{s,(k)}^{(t+\delta)} - q_{s,(k)}^{(t)}$ 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。

$$\begin{aligned} \frac{(\eta_{ws} - \eta_{w,(k)}) \delta q_{s,(k)}}{\delta} &= \frac{\mu D_w}{\delta z_{(k)}} \left\{ \frac{f(\eta_{w,(k+1/2)})}{\delta z_{(k+1/2)}} (\delta q_{s,(k+1)} - \delta q_{s,(k)}) \right. \\ &\quad \left. - \frac{f(\eta_{w,(k-1/2)})}{\delta z_{(k-1/2)}} (\delta q_{s,(k)} - \delta q_{s,(k-1)}) \right\} \\ &\quad + \frac{\mu \hat{E}_b'(q_{s,(k)}^{(t)}) \delta q_{s,(k)}}{\rho} + \nabla_{(k)} \{ D_w f(\eta_{w,(k)}) \nabla q_s^{(t)} \} + \frac{\hat{E}_b(q_{s,(k)}^{(t)})}{\rho} \end{aligned} \quad (6-56)$$

これより、式(6-7)の各係数は次のように得られる。

$$\alpha_{k,k+1} = - \frac{\mu \delta D_w f(\eta_{w,(k+1/2)})}{\delta z_{(k)} \delta z_{(k+1/2)}} \quad (6-57)$$

$$\alpha_{k,k} = \eta_{ws} - \eta_{w,(k)} - \frac{\mu \delta \hat{E}_b'(q_{s,(k)}^{(t)})}{\rho} - \alpha_{k,k-1} - \alpha_{k,k+1} \quad (6-58)$$



$$\alpha_{k,k-1} = -\frac{\mu \delta D_w f(\eta_{w,(k-1/2)})}{\delta z_{(k)} \delta z_{(k-1/2)}} \quad (6-59)$$

$$\gamma_k = \delta \nabla_{(k)} \{D_w f(\eta_w) \nabla q_s^{(t)}\} + \frac{\delta \hat{E}_b(q_{s,(k)}^{(t)})}{\rho} \quad (6-60)$$

$$\hat{E}'_b = \frac{\delta \hat{E}}{\delta q_s} = \begin{cases} -\rho(\eta_{ws} - \eta_w) & \text{if } \hat{E}_b > \rho(\eta_{ws} - \eta_w)(q_{sat}(T) - q_s) \\ -\frac{\rho}{r_b} & \text{else} \end{cases} \quad (6-61)$$

土壤中水蒸気量の地表面での境界条件は式(3-24)及び(3-25)で与えられる。この境界条件の差分表示は、

$$D_w f(\eta_{w,(-1/2)}) \frac{q_{s,(0)}^* - q_{s,(-1)}^*}{\delta z_{(-1/2)}} + \frac{\delta z_0}{r_b} \{q_{s,(0)}^{(t+\delta t)} - q_{sat}(T_{s,(0)})\} + c_{E0} |\mathbf{u}_r| (q_{s,(0)}^{(t+\delta)} - q_r) = 0 \quad (6-62)$$

となり、これより以下の係数が得られる。

$$\alpha_{0,0} = \frac{\mu D_w f(\eta_{w,(-1/2)})}{\delta z_{(-1/2)}} + \frac{\mu \delta z_0}{r_b} + \mu c_{E0} |\mathbf{u}_r| \quad (6-63)$$

$$\alpha_{0,-1} = -\frac{\mu D_w f(\eta_{w,(-1/2)})}{\delta z_{(-1/2)}} \quad (6-64)$$

$$\gamma_0 = -D_w f(\eta_{w,(-1/2)}) \nabla_{(-1/2)} q_s^{(t)} - \frac{\delta z_0}{r_b} \{q_{s,(0)}^{(t)} - q_{sat}(T_{s,(0)})\} - c_{E0} |\mathbf{u}_r| (q_{s,(0)}^{(t)} - q_r) \quad (6-65)$$

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

式(3-22)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。

### 6.6 葉面熱収支式の数値解法

葉面熱収支式は葉面温度  $T_c$  ( $i, j, k$ ) を求めるために各格子点ごと独立に診断的に解かれる。式(4-1)に式(4-2)～(4-5)、(4-18)及び(4-19)を代入して次式を得る。

$$C_p \rho c_H |u| (T_c - T_a) + C_w F_p P_r (T_c - T_a) + \rho R (r_d + r_s) q_{sat}(T_c) + 2F_r \varepsilon \sigma T_c^4 \\ = F_r \{ (1 - A_c) (S \downarrow + S \uparrow) + \varepsilon (L \downarrow + L \uparrow) \} + \rho R (r_d + r_s) q_a \quad (6-66)$$

ここでは表式を簡単化するため格子点番号は省略した。  $\delta T = T_c - T_a$  を用いて、  $|\delta T| \ll T_a$  として  $T_a$  の回りで Taylor 展開する。

$$q_{sat}(T_c) = q_{sat}(T_a) + q'_{sat}(T_a) \delta T + \dots \quad (6-67)$$

$$T_c^4 = T_a^4 + 4T_a^3 \delta T + \dots \quad (6-68)$$

これらを式(6-66)に代入して  $\delta T$  の 1 次の項まで取り次式を得る。

$$\delta T = \frac{F_r \{ (1 - A_c) (S \downarrow + S \uparrow) + \varepsilon (L \downarrow + L \uparrow - 2\sigma T_a^4) \} + \rho R (r_d + r_s) (q_a - q_{sat}(T_a)) - C_w F_p P_r (T_a - T_p)}{C_p \rho c_H |u| + \rho R (r_d + r_s) q'_{sat}(T_a) + C_w F_p P_r + 8F_r \varepsilon \sigma T_a^3} \quad (6-69)$$

$r_d$  及び  $r_s$  は無限大またはそれに近い値を取り得る。その場合は実際の数値計算においては式(4-18)、(4-19)と、

$$E_s = \frac{\rho l \{ q_{sat}(T_c) - q_a \}}{r_a + r_s + r_a r_s / r_d} \quad \text{for large } r_d \quad (6-70)$$

$$E_d = \frac{\rho l \{ q_{sat}(T_c) - q_a \}}{r_a + r_d + r_a r_d / r_s} \quad \text{for large } r_s \quad (6-71)$$

を使い分ける必要がある。その場合式(6-69)の  $R(r_d + r_s)$  は、

$$R(r_d + r_s) = \begin{cases} (r_a + r_d)^{-1} & \text{for } r_d \ll \infty, r_s = \infty \\ (r_a + r_s)^{-1} & \text{for } r_d = \infty, r_s \ll \infty \\ 0 & \text{for } r_d = r_s = \infty \end{cases} \quad (6-72)$$

により評価する必要がある。

## 6.7 葉面水滴及び水滴フラックスの数値解法

葉面水滴の時間変化は、式(4-22)により局所的（他の格子点とは無関係）に解かれるため、格子点番号は省略する。時刻  $t$  の値であることを括弧を付した上付き添字で表し、時間増分を  $\delta t$  で表すと、式(4-22)の差分式は、

$$w_d^{(t+\delta)} = w_d^{(t)} + \delta t (F_p P_r^{(t)} - E_d^{(t)} + E_{cap}^{(t)} - P_d^{(t)}) \quad (6-73)$$

となる。従って、 $P_r$  の分布が与えられれば、各格子点の  $w_d$  は独立に解くことができる。 $w_d$  が  $w_{ds}$  を越えないようにするためには、まず、

$$w_d^* = w_d^{(t)} + \delta t (F_p P_r^{(t)} - E_d^{(t)} + E_{cap}^{(t)}) \quad (6-74)$$

により暫定値  $w_d^*$  を求め、

$$\begin{aligned} w_d^{(t+\delta)} &= w_d^*, & P_d^{(t)} &= 0 & \text{for } w_d^* < w_{ds} \\ \text{or } w_d^{(t+\delta)} &= w_{ds}, & P_d^{(t)} &= \frac{(w_d^* - w_{ds})}{\delta t} & \text{for } w_d^* \geq w_{ds} \end{aligned} \quad (6-75)$$

を用いて  $w_d^{(t+\delta)}$  及び  $P_d^{(t)}$  を評価する。

液体水フラックスは、得られた  $P_d^{(t)}$  から式(4-24)の差分式を用いて、

$$P_{r,(k+1/2)} - P_{r,(k-1/2)} = \delta z_{(k)} \{ \alpha_{(k)} (F_p P_{r,(k+1/2)} - P_{d,(k)}) + E_{pr,(k)} - E_{col,(k)} \} \quad (6-76)$$

と表される。従って、植生層外での降水強度を境界値として下向きに順次水滴フラックスを評価することができる。ただし、式(6-74)と(6-76)をexplicitに解くためには、式(6-76)の  $P_d$  として1時刻ステップ前の値を用いる必要がある。それは、 $P_d$  は式(6-74)によって評価されるからである。両者をiterativeに解く方法も可能である。

## 6.8 日射伝達式の数値解法

日射伝達式の差分式は、式(5-15)及び(5-16)の導出過程で直接与えられている。式(5-13)及び(5-14)を整理し、各変数の高度依存性を格子点番号を付して表すと次の差分式を得る。

$$S_{(k-1/2)}^{\downarrow} = (1 - \bar{a}_{(k)}) (1 - r_{w,(k)} - a_{w,(k)}) S_{(k+1/2)}^{\downarrow} + \{ \bar{a}_{(k)} A_c + r_{w,(k)} (1 - \bar{a}_{(k)}) \} S_{(k-1/2)}^{\uparrow} \quad (6-77)$$

$$S_{(k-1/2)}^{\uparrow} = \frac{S_{(k+1/2)}^{\uparrow} - \bar{a}_{(k)} A_c S_{(k-1/2)}^{\downarrow} - (1 - \bar{a}_{(k)}) r_{w,(k)} S_{(k+1/2)}^{\downarrow}}{(1 - \bar{a}_{(k)}) (1 - r_{w,(k)} - a_{w,(k)})} \quad (6-78)$$

$$\bar{a}_{(k)} = a_{(k)} F_{r,(k)} \delta z_{(k)} \quad (6-79)$$

モデル領域上端での下向き日射は気象モデルにより与えられるので、上端での上向き日射が得られれば上式を用いて上から下に向かって順次日射量を求めることができる。

以下では、各層の間での多重反射を考慮する。第 $k$ 層単独の反射率を $R_{(k)}$ 、透過率を $T_{(k)}$ とする。また、第 $k$ 層上端から入射する日射 $S_{(k+1/2)}^{\downarrow}$ に対して出ていく日射 $S_{(k+1/2)}^{\uparrow}$ の割合を $r_{(k)}$ と表すことにする。 $r_{(k)}$ には第 $k$ 層以下の全ての層での反射が関与する。この反射日射は、第 $k$ 層での反射成分 $S_{r0}$ 、第 $k$ 層を通過し第 $k-1$ 層以下の層で反射し再度第 $k$ 層を透過する成分 $S_{r1}$ 、さらに第 $k$ 層と第 $k-1$ 層以下の層での反射を複数回繰り返して第 $k$ 層上端に達する成分( $S_{r2}$ ,  $S_{r3}$ , ...)の和である。

$$\begin{aligned} S_{(k+1/2)}^{\uparrow} &= r_{(k)} S_{(k+1/2)}^{\downarrow} \\ &= S_{r0} + S_{r1} + S_{r2} + \dots \end{aligned} \quad (6-80)$$

ここで、各項は以下のように表される。

$$S_{r0} = R_{(k)} S_{(k+1/2)}^{\downarrow} \quad (6-81)$$

$$S_{r1} = r_{(k-1)} T_{(k)}^2 S_{(k+1/2)}^{\downarrow} \quad (6-82)$$

$$S_{r2} = r_{(k-1)}^2 R_{(k)} T_{(k)}^2 S_{(k+1/2)}^{\downarrow} \quad (6-83)$$

$$\vdots$$

$$S_{rn} = r_{(k-1)}^n T_{(k)}^2 (r_{(k-1)} R_{(k)})^{n-1} S_{(k+1/2)}^{\downarrow} \quad (6-84)$$

従って、第 $k$ 層以下での層間の多重反射を考慮した反射率 $r_{(k)}$ は $r_{(k-1)}$ を用いて次式で表される。

$$\begin{aligned}
 r_{(k)} &= R_{(k)} + r_{(k-1)} T_{(k)}^2 \sum_{i=0}^{\infty} (r_{(k-i)} R_{(k)})^i \\
 &= R_{(k)} + \frac{r_{(k-1)} T_{(k)}^2}{1 - r_{(k-1)} R_{(k)}}
 \end{aligned}
 \tag{6-85}$$

この式に式(5-1)及び(5-3)で定義された反射率及び透過率

$$R_{(k)} = \bar{a}_{(k)} A_c + (1 - \bar{a}_{(k)}) \epsilon_{w,(k)} \tag{6-86}$$

$$T_{(k)} = (1 - \bar{a}_{(k)}) (1 - r_{w,(k)} - \alpha_{w,(k)}) \tag{6-87}$$

を代入すれば、地表面の反射率

$$r_{(0)} = A_b \tag{6-88}$$

を境界値として順次 $r_{(k)}$ を求めることができる。従って、式(6-78)の領域上端の境界値は、

$$S_{(top)}^{\uparrow} = r_{(top)} S_{(top)}^{\downarrow} \tag{6-89}$$

で与えられる。

### 6.9 長波放射伝達式の数値解法

長波放射の差分式は、式(5-25)と(5-26)から直接求められ、

$$\begin{aligned}
 L_{(k-1/2)}^{\downarrow} &= \bar{a}_{(k)} \left\{ (1 - \epsilon) L_{(k-1/2)}^{\uparrow} + \epsilon \sigma T_{c,(k)}^4 \right\} \\
 &\quad + (1 - \bar{a}_{(k)}) \left\{ (1 - \epsilon_{w,(k)}) L_{(k+1/2)}^{\downarrow} + \epsilon_{w,(k)} \sigma T_{a,(k)}^4 \right\}
 \end{aligned}
 \tag{6-90}$$

$$L_{(k-1/2)}^{\uparrow} = \frac{L_{(k+1/2)}^{\downarrow} - \bar{a}_{(k)} \left\{ (1 - \epsilon) L_{(k+1/2)}^{\downarrow} + \epsilon \sigma T_{c,(k)}^4 \right\} - (1 - \bar{a}_{(k)}) \epsilon_{w,(k)} \sigma T_{a,(k)}^4}{(1 - \bar{a}_{(k)}) (1 - \epsilon_{w,(k)})} \tag{6-91}$$

となる。モデル領域上端での下向き長波放射は気象モデルにより与えられるので、モデル領域上端での上向き長波放射が得られれば領域内全層での長波放射が得られる。

以下では、モデル領域上端での上向き長波放射を求める。その際、第 $k$ 層より上の射

出源から射出されて第 $k$ 層上端を下向きに通過した放射 $\bar{L}_{(k+1/2)}^\downarrow$ が第 $k$ 層以下の層内での透過及び反射（層間多重反射を含む）を経て、最終的に第 $k$ 層上端から上向きの放射として出てゆく成分 $L_{r,(k+1/2)}^\uparrow$ 、及び第 $k$ 層以下の葉面及び地表面を射出源として同様に第 $k$ 層内での透過及び反射（層間多重反射を含む）を経て、最終的に第 $k$ 層上端から上向きの放射として出てゆく成分 $L_{e,(k+1/2)}^\uparrow$ に分けて考える。

$$L_{(k+1/2)}^\uparrow = L_{r,(k+1/2)}^\uparrow + L_{e,(k+1/2)}^\uparrow \quad (6-92)$$

まず、前者は日射の多重反射と同様に求めることができる。式(6-85)の各層の反射率と透過率を式(5-17)と(5-19)の定義を用いて次の式で表すことにより、長波放射の多重反射率を得る。

$$R_{(k)} = \bar{a}_{(k)}(1 - \varepsilon) \quad (6-93)$$

$$T_{(k)} = (1 - \bar{a}_{(k)})(1 - \varepsilon_{w,(k)}) \quad (6-94)$$

境界値は地表面の反射率を用いて、

$$r_{(0)} = 1 - \varepsilon_b \quad (6-95)$$

と表される。この多重反射率を用いて、

$$L_{r,(k+1/2)}^\uparrow = r_{(k)} \bar{L}_{(k+1/2)}^\downarrow \quad (6-96)$$

が得られる。 $L_{(k+1/2)}^\downarrow$ には第 $k$ 層以下を射出源とし第 $k+1$ 層以上で反射して第 $k$ 層上端を下向きに通過する成分が含まれるので、一般的に $\bar{L}_{(k+1/2)}^\downarrow$ は $L_{(k+1/2)}^\downarrow$ とは異なる。しかし、植生層上端または液体水が存在する場合は、その上端で $\bar{L}_{(k)}^\downarrow = L_{(k)}^\downarrow$ である。

次に後者を求める。 $L_{e,(k-1/2)}^\uparrow$ が与えられているとしたとき、 $L_{(k+1/2)}^\uparrow$ は1)  $L_{e,(k-1/2)}^\uparrow$ が第 $k$ 層を通過した成分 $L_1$ 、2)第 $k$ 層から下向きに射出されて第 $k$ 層とそれ以下の層での多重反射を経由して最終的に第 $k$ 層上端を上向きに通過する成分 $L_2$ 、及び3)第 $k$ 層から上向きに射出される成分 $L_3$ の和に、さらに第 $k+1$ 層以上の層と第 $k$ 層以下の層の間での多重反射の効果を考慮したものである。

第 $k$ 層の反射率を $R_{(k)}$ 、透過率を $T_{(k)}$ としたとき、上記各成分は、

$$L_1 = T_{(k+1/2)}^\uparrow L_{e,(k-1/2)}^\uparrow \quad (6-97)$$

$$L_2 = \frac{L_3}{T_{(k)}r_{(k-1)}(1-r_{(k-1/2)})} \quad (6-98)$$

$$L_3 = \bar{a}_{(k)}\varepsilon\sigma T_{c,(k)}^4 + (1-\bar{a}_{(k)})\varepsilon_{w,(k)}\sigma T_{a,(k)}^4 \quad (6-99)$$

で与えられる。従って、

$$L_{e,(k+1/2)}^\uparrow = \frac{\left\{1 + \frac{T_{r,(k)}r_{(k-1)}}{1-R_{(k)}r_{(k-1)}}\right\}L_3 + T_{(k)}L_{e,(k-1/2)}^\uparrow}{1-\bar{r}_{(k)}r_{(k)}} \quad (6-100)$$

となり、地表面での値

$$L_{e,(1/2)}^\uparrow = \frac{\varepsilon_b\sigma T_b^4}{1-\bar{r}_{(0)}r_{(0)}} \quad (6-101)$$

を境界値として順次 $L_e^\uparrow$ を求めることができる。ここで、 $\bar{r}_{(k)}$ は第 $k$ 層上端を上向きに通過した長波放射に対する第 $k+1$ 層以上での多重反射率で、 $r_{(k)}$ と同様の方法により求めることができる。 $\bar{r}_{(k)}$ が与えられているとして $\bar{r}_{(k-1)}$ は次の式で得られる。

$$\bar{r}_{(k-1)} = R_{(k)} + \bar{r}_{(k)}T_{(k)}^2(1-\bar{r}_{(k)}R_{(k)}) \quad (6-102)$$

植生層上端または液体水が存在する場合は、その上端ではそれより上での反射がないので、

$$\bar{r}_{(top)} = 0 \quad (6-103)$$

である。

## 7. モデルコード

大気-土壌-植生モデルの計算コード SOLVEG は、FORTRAN 言語により記述され UNIX-OS 環境で実行できる形式となっている。SOLVEG 計算は、通常大気及び土壌変数の初期値と大気モデルの外部条件を入力して大気、土壌及び植生変数の全てを予報的に求める予報計算を行なう。付加機能として、大気変数に関しては観測データを上部境界値に用いて地上 10m 程度までの接地層のみの計算を行ない土壌及び植生変数を予報的に求める解析計算も実施することができる。現在までに、原研のベクトル並列スーパーコンピュータ-VPP500、同じく共用 UNIX サーバーAP3000 及び富士通ワークステーション S-7 上で実行環境の整備を行ない動作確認を終了した。ただし、ベクトル並列型計算機での動作試験を行なっているが、計算コードにベクトル計算及び並列計算用のチューニングは施していない。土壌と植生部分については、モデルを直ちに 3 次元化できるように、変数は 3 次元配列で、空間に関する DO ループも 3 次元構造であるが、現時点では 1 次元大気モデルに合わせて水平方向の大きさを 1 として、鉛直 1 次元モデルとして用いている。1 次元モデルではベクトル計算機での運用には適さない構造となっているが、3 次元化された際にはベクトル化が有効になる。以下に原研の共用 UNIX サーバーAP3000 に構築した SOLVEG の操作手順について、また、計算コードの詳細な説明を記述する。

### 7.1 計算コード操作手順

#### 1) 計算環境

SOLVEG 計算コード、諸設定ファイル、入力データ等の計算環境一式は、原研の共用 UNIX サーバーAP3000 の SOLVEG 運用ディレクトリ（以下 SOLVEG ディレクトリ）に格納してある。SOLVEG ディレクトリ内には、

- ・ 計算実行ファイル（予報計算：zsolveg.go、解析計算：zsolveg-a.go）
- ・ 計算条件設定ファイル（param）
- ・ 気象条件入力ファイル（予報計算：met.data、解析計算：met-a.data）
- ・ 土壌タイプ及び変数初期値入力ファイル（soil.init）
- ・ 植生分布設定ファイル（vege.init）
- ・ 計算実行シェルスクリプト（予報計算：go.sh、解析計算：go-a.sh）
- ・ ソースプログラム格納ディレクトリ（SRC）
- ・ 結果出力格納ディレクトリ（予報計算：OUTPUT、解析計算：OUTPUT-A）

が含まれている。プログラムの修正及びコンパイルはソースプログラム格納ディレクトリ内で、計算の実行は SOLVEG ディレクトリ内で行ない、計算結果は結果出力格納ディレクトリ内のファイルに出力される。計算環境を構築するために必要なディスク容量は、コン



パイル時の作業用領域も含めて 1 MB 程度である。計算結果出力ファイルは、1 時間間隔の出力で 10 日間計算を実施した場合 2MB 程度である。計算に必要なメモリー量は、約 20MB である。10 日間計算にかかる CPU 時間は、植生層の設定により変化するが、予報計算で十数分、解析計算で 6 分程度である。

## 2) モデル設定

予報計算と解析計算では、大気格子数が異なるだけで同一の計算コードを使用しており、コンパイル時に大気格子数を設定して使い分けられることができるように、各計算用のコンパイル実行シェルスクリプトを用意してある。以下にモデル設定ファイルの修正及びコンパイル手順を記述する。ファイルの修正及びコンパイルは、ソースプログラム格納ディレクトリ内で行なう。

### モデル格子数設定

大気格子数の基本設定は、予報計算では 49 層、解析計算で 4 層となっている。土壌及び植生層の基本設定は、予報計算と解析計算のどちらも 10 層である。これらの設定を変更する必要がある場合は、以下のファイルの大気層数 N1、土壌層数 NS 及び植生層数 NC を修正する。また、入力気象データ時刻数の最大値の変更が必要な場合 NTMET を修正する。

- ① Inclnum-p : 予報計算用モデル格子数設定ファイル
- ② Inclnum-a : 解析計算用モデル格子数設定ファイル

### モデル格子座標設定

大気、土壌及び植生層格子の座標設定は、モデル格子設定ファイル (zmesh.model) で行なう。基本設定を以下に示す。

```
***** zmesh.model *****
SOLVEG Z-MESH DATA: 1998/02/23 CREATED BY NAGAI
ATMOSPHERE(PHYSIC) Z(2*K) K=1, M1 : M1=50(N1=49, N2=100)
  1.0   3.0   6.0  10.0  20.0  40.0  60.0  80.0 100.0 120.0
 160.0 200.0 240.0 280.0 320.0 360.0 400.0 450.0 500.0 550.0
 600.0 650.0 700.0 750.0 800.0 850.0 900.0 950.0 1000.0 1100.0
1200.0 1300.0 1400.0 1500.0 1600.0 1700.0 1800.0 1900.0 2000.0 2100.0
2200.0 2300.0 2400.0 2500.0 2600.0 2700.0 2800.0 2900.0 3000.0 3100.0
SOIL LAYER      ZS(K) K=0, NS+1 : NS=10
-0.0 -0.0 -0.005 -0.010 -0.020 -0.040 -0.080 -0.160 -0.320 -0.500 -0.700 -1.000
CANOPY LAYER    ZC(K) K=0, NC+1 : NC=10
  0.0  0.0   0.2   0.4   0.6   0.8   1.0   1.4   1.8   2.2   2.6   3.0
*****
```

モデル座標は、コメント 2 行の次に大気格子、1 行のコメントを入れて土壌格子、またコメント 1 行の後に植生格子の順にそれぞれ 1 行で記述する。設定する座標は、大気、土壌及び植生モデルの各層の境界高度（深度）である。大気は地上第 1 層の上部境界から始め、土壌及び植生は地表面（0m）から始める。大気層には上部境界にインターフェイス層があり、設定する高度の数は  $N+1$  ( $M_1$ ) である。一方、土壌及び植生層には地表面に厚さのないインターフェイス層があり、値が 0 である初めの 2 高度（深度）に加えて土壌層数  $NS$  及び植生層数  $NC$  の高度（深度）を設定する。植生層高度については、層の厚さに対応する高度の大気層の厚さ以下で 2 つの大気層にまたがらないように設定する。解析計算においても同じファイルを用いて、大気格子については必要な高度までを読み込む。

### 土壌及び植生パラメータの設定

土壌及び植生パラメータは、土壌パラメータテーブルファイル (zsoil. table) 及び植生パラメータテーブルファイル (zvege. table) で設定する。現時点では、土壌については 13 種類の土壌タイプのパラメータが用意されているが、植生パラメータは試験的な値が数種類の植生タイプとして与えられているだけである。土壌、植生ともに最大 20 種類になるまで追加可能である。各ファイルを以下に示す。

\*\*\*\*\* zsoil. table \*\*\*\*\*

SOIL TYPE TABLE (MAX=20, FORMAT=I2, 1X, A15, 6E10. 3)

NO	NAME=====>	HWST	SATPOTT	CONDUCT	POWER	HWWILTT	ROUCT
1	SAND	0.395e+0	-0.121e+0	1.760e-4	0.405e+1	0.677e-1	0.147e+7
2	LOAMY-SAND	0.410e+0	-0.090e+0	1.563e-4	0.438e+1	0.750e-1	0.141e+7
3	SANDY-LOAM	0.435e+0	-0.218e+0	0.341e-4	0.490e+1	1.142e-1	0.134e+7
4	SILT-LOAM	0.485e+0	-0.786e+0	0.072e-4	0.530e+1	1.794e-1	0.127e+7
5	LOAM	0.490e+0	-0.478e+0	0.070e-4	0.539e+1	1.547e-1	0.121e+7
6	SANDY-CLAY-LOAM	0.420e+0	-0.299e+0	0.063e-4	0.712e+1	1.749e-1	0.118e+7
7	SILTY-CLAY-LOAM	0.477e+0	-0.356e+0	0.017e-4	0.775e+1	2.181e-1	0.132e+7
8	CLAY-LOAM	0.476e+0	-0.630e+0	0.025e-4	0.852e+1	2.498e-1	0.123e+7
9	SANDY-CLAY	0.426e+0	-0.153e+0	0.022e-4	1.040e+1	2.193e-1	0.118e+7
10	SILTY-CLAY	0.492e+0	-0.490e+0	0.010e-4	1.040e+1	2.832e-1	0.115e+7
11	CLAY	0.482e+0	-0.405e+0	0.013e-4	1.140e+1	2.864e-1	0.109e+7
12	PEAT	0.863e+0	-0.356e+0	0.080e-4	0.775e+1	3.947e-1	0.084e+7
13	NARITA-SAND	0.400e+0	-0.050e+0	0.350e-4	0.600e+1	1.500e-1	0.126e+7

\*\*\*\*\*  
 土壌パラメータテーブルファイルには、コメント 2 行の次から土壌タイプ番号順にそれぞれ 1 行でコメントの 1 行目に指定してある書式に従ってデータを記述する。HWST は飽和体積含水率( $m^3/m^3$ )、SATPOTT は飽和毛管ポテンシャル(m)、CONDUCT は飽和透水係数(m/s)、POWER は Clapp and Hornberger の式の定数、HWWILTT はしおれ体

積含水率( $m^3/m^3$ )、ROUCT は乾燥土壌の熱容量( $J/m^3$ )である。現在用意されているデータのうち、土壌タイプ 1~12 は、米国農務省 (USDA) の textural classes に Clapp and Hornberger<sup>3)</sup> と McCumber<sup>12)</sup> のデータを合わせて Pielke<sup>2)</sup> により作成されたものを、土壌タイプ 13 には Kondo and Saigusa<sup>4)</sup> のデータを用いている。

\*\*\*\*\* zvege.table \*\*\*\*\*

VEGETATION TYPE TABLE (MAX=20, FORMAT=I2, 1X, A15, 7F7.3, F7.1)

NO TYPE=====>|REFLECT EMISSIV WDSAT WDEVP CHANGED CHANGEH CHANGE E RSSTMIN

1	STEM	0.300	0.980	0.100	0.100	0.200	0.100	0.100	9000.0
2	LEAF-1	0.300	0.980	0.500	0.500	0.200	0.100	0.100	200.0
3	LEAF-2	0.300	0.980	0.500	0.500	0.200	0.100	0.100	100.0
4	LEAF-3	0.300	0.980	0.500	0.500	0.200	0.100	0.100	50.0

\*\*\*\*\*

植生パラメータテーブルファイルには、コメント 2 行の次から植生タイプ番号順にそれぞれ 1 行でコメントの 1 行目に指定してある書式に従ってデータを記述する。REFLECT は葉面反射率、EMISSIV は葉面射出率、WDSAT は最大葉面液体水量( $kg/m^2$ )、WDEVP は自由水面と蒸発が同等な葉面水滴量( $kg/m^2$ )、CHANGED は葉面抵抗係数、CHANGEH は葉面熱交換係数、CHANGE E は葉面水蒸気交換係数、RSSTMIN は最小気孔抵抗( $s/m$ )である。

### コンパイル

ソースプログラム格納ディレクトリ内で以下のコマンドを実行するとプログラムのコンパイルが実施され、実行ファイル (zsolveg.go) が計算実行ディレクトリ内に作成される。

- ①zmake : 予報計算用コンパイル
- ②zmake-a : 解析計算用コンパイル

モデル格子数設定ファイルの修正はコンパイル前に行なわなければならないが、モデル格子、土壌パラメータ及び植生パラメータ設定ファイルの修正は、コンパイル後に行なうこともできる。

### 3) 計算実行

計算の実行は、SOLVEG ディレクトリ内で行なう。

- ・気象条件入力ファイル (予報計算 : met.data、解析計算 : met-a.data)
- ・土壌タイプ及び変数初期値入力ファイル (soil.init)
- ・植生分布ファイル (vege.init)
- ・計算条件設定ファイル (param)

を作成あるいは修正し、

- ・計算実行シェルスクリプト (予報計算 : go.sh、解析計算 : go-a.sh)

を起動する。コマンド “go.sh” 及び “go-a.sh” で会話型処理、“qsub go.sh” 及び “qsub

go-a.sh” でバッチジョブにより計算を実行する。以下に各ファイルの詳細を記述する。

#### 計算条件設定ファイル (param)

計算条件設定ファイルのサンプルを以下に示す。

```

***** param *****
IPRINT =      3600<===== ( S ) PRINT OUT INTERVAL *
GRTOP  =  3.5000000000D-03 (K/M) V. P. T. G. AT MODEL TOP *
ROU    =  1.2000000000D+00 (KG/M3) AIR DENSITY *
EMSVTY =  0.9800000000D-00 ( ) EMISSIVITY OF G. SFC. *
ALBEDO =  0.2500000000D-00 ( ) ALBEDO OF G. SFC. *
TURBID =  0.1000000000D-00 ( ) TURBIDITY OF AIR *
ZO     =  1.0000000000D-04 (M) SURFACE ROUGHNESS (WIND)*
ZT     =  1.0000000000D-05 (M) SURFACE ROUGHNESS (TEMP)*
DELT   =  1.0000000000D+00 (S) TIME INCREAMENT *
LDATES =  970501<===== (YYMMDD) INITIAL DATE *
STIME  =  00.0000000000D+00 (H. JST) INITIAL TIME (J. S. T.) *
TINTEG = 240.0000000000D+00 (H) INTEGRATION PERIOD *
FLON   = 135.0000000000D+00 (DEG) LONGITUDE *
FLAT   =  36.0000000000D+00 (DEG) LATITUDE *
STDLON = 135.0000000000D+00 (DEG) LON. of STANDARD TIME *

```

出力時間間隔 (IPRINT)、計算開始日 (LDATES)、は、整数値を矢印の左側にブランクを空けずに入力する。その他の変数は指数形式で小数点以下 10 桁まで入力する。

#### 気象条件入力ファイル (予報計算 : met.data、解析計算 : met-a.data)

以下に予報計算用及び解析計算用の気象条件入力ファイルのデータ並びを示す。

```

***** met.data format *****
DATE(1) TIME(1) NZ(1)
PSF(1) UG(1) VG(1) CL(1) CM(1) CH(1) RAIN(1)
Z(1,1) U(1,1) V(1,1) T(1,1) Q(1,1) WL(1,1)
Z(2,1) U(2,1) V(2,1) T(2,1) Q(2,1) WL(2,1)
. . .
Z(NZ,1) U(NZ,1) V(NZ,1) T(NZ,1) Q(NZ,1) WL(NZ,1)
DATE(2) TIME(2) NZ(2)
PSF(2) UG(2) VG(2) CL(2) CM(2) CH(2) RAIN(2)
Z(1,2) U(1,2) V(1,2) T(1,2) Q(1,2) WL(1,2)

```

```

Z(2, 2)  U(2, 2)  V(2, 2)  T(2, 2)  Q(2, 2)  WL(2, 2)
. . .
Z(NZ, 2) U(NZ, 2) V(NZ, 2) T(NZ, 2) Q(NZ, 2) WL(NZ, 2)
. . .

DATE(NT) TIME(NT) NZ(NT)
PSF(NT) UG(NT)  VG(NT)  CL(NT)  CM(NT)  CH(NT)  RAIN(NT)
Z(1, NT) U(1, NT) V(1, NT) T(1, NT) Q(1, NT) WL(1, NT)
Z(2, NT) U(2, NT) V(2, NT) T(2, NT) Q(2, NT) WL(2, NT)
. . .

Z(NZ, NT) U(NZ, NT) V(NZ, NT) T(NZ, NT) Q(NZ, NT) WL(NZ, NT)
*****
***** met-a. data format *****
DATE(1) TIME(1) NZ(1)
PSF(1)  UG(1)  VG(1)  RS(1)  RL(1)  RAIN(1)
Z(1, 1)  U(1, 1) V(1, 1) T(1, 1) Q(1, 1) WL(1, 1)
DATE(2) TIME(2) NZ(2)
PSF(2)  UG(2)  VG(2)  RS(2)  RL(2)  RAIN(2)
Z(1, 2)  U(1, 2) V(1, 2) T(1, 2) Q(1, 2) WL(1, 2)
. . .

DATE(NT) TIME(NT) NZ(NT)
PSF(NT) UG(NT)  VG(NT)  RS(NT)  RL(NT)  RAIN(NT)
Z(1, NT) U(1, NT) V(1, NT) T(1, NT) Q(1, NT) WL(1, NT)
*****

```

DATA : データ日付 (年月日の6桁整数)  
 TIME : データ時刻 (時分秒の6桁整数)  
 NZ : 鉛直分布データ高度数 (1 ~ 10)  
 PSF : 地上気圧 (hPa)  
 UG : 地衡風東西成分 (m/s)  
 VG : 地衡風南北成分 (m/s)  
 CL : 低層雲量 (0 to 1 fraction)  
 CM : 中層雲量 (0 to 1 fraction)  
 CH : 高層雲量 (0 to 1 fraction)  
 RS : 日射量 ( $W/m^2$ )  
 RL : 大気放射量 ( $W/m^2$ )  
 RAIN : 降水強度 (mm/h)

Z : データ高度 (m)  
 U : 風速東西成分 (m/s)  
 V : 風速南北成分 (m/s)  
 T : 温位 (°C)  
 Q : 比湿 (kg/kg)  
 WL : 大気中液体水 (kg/kg)  
 NT : データ時刻数 (1~2401)

ファイルの書式は、日付 (DATE)、(TIME) 及びデータ高度数 (NZ) の行については FORMAT=I8, I8, I4 で記述するが、それ以外のデータについてはブランクで区切った自由形式である。予報計算では雲量を入力するのに対して解析計算では日射及び大気放射量を入力する点が異なるだけで、他の部分は同じである。また、解析計算において入力通常 1 高度であるが、複数の高度の入力も可能である。第 1 時刻のデータ日付及び時刻は、計算開始日時と一致していなければならない。データ時刻数は、基本設定で 1 から最大 2401 まで入力可能である。データ時刻数の最大値を増やす必要がある場合は、モデル格子設定ファイルの NTMET を修正する (2) モデル設定—モデル格子数設定参照)。計算終了時刻までのデータがない場合は、最終時刻データの条件が計算終了時まで継続するとして処理される。従って、データ時刻数が 1 で初期値だけの入力の場合は、計算期間中の気象条件は初期状態が継続することになる。鉛直分布データの高度数は時刻毎に異なってもよい。

#### 土壌タイプ及び変数初期値入力ファイル (soil.init)

土壌タイプ及び変数初期値入力ファイルのデータ並びを以下に示す。

```
***** soil.init format *****
IS(1)  IS(2)  IS(3)  IS(4)  IS(5)  IS(6)  IS(7)  IS(8)  IS(9)  IS(10)
TS(1)  TS(2)  TS(3)  TS(4)  TS(5)  TS(6)  TS(7)  TS(8)  TS(9)  TS(10)
HW(1)  HW(2)  HW(3)  HW(4)  HW(5)  HW(6)  HW(7)  HW(8)  HW(9)  HW(10)
*****
IS      : 土壌タイプ (1~20)
TS      : 土壌温度 (°C)
HW      : 土壌体積含水率 (m3/m3)
```

変数の並びは、地表直下の層から始め最深層まで各変数 1 行で記述する。データの書式はブランクで区切られた自由形式である。土壌タイプについては、土壌パラメータテーブルファイルに記述してある土壌タイプから選んで番号を整数で記述する。入力した土壌体積含水率が設定した土壌タイプの飽和含水率よりも大きい場合、初期値として飽和含水率が用いられる。

植生分布入力ファイル (vege. init)

植生分布入力ファイルのデータ並びを以下に示す。

```
***** vege. init format *****
IV(1)  IV(2)  IV(3)  IV(4)  IV(5)  IV(6)  IV(7)  IV(8)  IV(9)  IV(10)
AZ(1)  AZ(2)  AZ(3)  AZ(4)  AZ(5)  AZ(6)  AZ(7)  AZ(8)  AZ(9)  AZ(10)
RZ(1)  RZ(2)  RZ(3)  RZ(4)  RZ(5)  RZ(6)  RZ(7)  RZ(8)  RZ(9)  RZ(10)
```

```
*****
```

```
IV      : 植生タイプ (1~20)
AZ      : 葉面積密度 (m2/m3)
RZ      : 根の深度分布 (根全体に対する各層内の根の割合)
```

植生タイプ及び葉面積密度の並びは地表に接する層から始め上端の層まで1行で記述する。データの書式はブランクで区切られた自由形式である。植生タイプについては、植生パラメータテーブルファイルに記述してある植生タイプから選んで番号を整数で記述する。根の深度分布については、前述の土壌層変数初期分布と同様に記述する。

計算実行シェルスクリプト (予報計算 : go. sh、解析計算 : go-a. sh)

予報計算用計算実行シェルスクリプトを以下に示す。解析計算については、計算実行ファイルと結果出力格納ディレクトリが異なるだけである。

```
***** go. sh *****
#!/bin/csh -f
#####
#@$-C solveg      # program name
#@$-q sm          # submit batch job class
#@$-lM 40mb       # memory limit
#@$-lT 6:00:00    # CPU time limit
#@$-r SOL-P      # batch request name
#@$-eo           # error output to standard output dev.
#@$-me           # mail when end
#####
set hmdir="/dg03/g0941/j4916/SOLVEG"
set sdir="/dg03/g0941/j4916/SOLVEG/SRC"
set indir="/dg03/g0941/j4916/SOLVEG"
set otdir="/dg03/g0941/j4916/SOLVEG/OUTPUT"
#Time monitor
setenv fu09 ${otdir}/Timer
#input files
```

```

setenv ful0 ${indir}/param
setenv ful1 ${indir}/met.data
setenv ful2 ${indir}/soil.init
setenv ful3 ${indir}/vege.init
setenv ful4 ${srdir}/zmesh.model
setenv ful5 ${srdir}/zsoil.table
setenv ful6 ${srdir}/zvege.table
#output files
setenv fu20 ${otdir}/dbout
setenv fu21 ${otdir}/mnout
setenv fu30 ${otdir}/TSout
setenv fu31 ${otdir}/HWout
setenv fu33 ${otdir}/QSout
setenv fu34 ${otdir}/EBout
setenv fu36 ${otdir}/SFout
setenv fu50 ${otdir}/VGout
setenv fu51 ${otdir}/VWout
setenv fu52 ${otdir}/VAout
setenv fu53 ${otdir}/VTout
setenv fu60 ${otdir}/METout
#go
cd ${hmdir}
/bin/rm SOL-P*
/bin/rm OUTPUT/outlist
/bin/rm OUTPUT/Timer
/bin/rm OUTPUT/*out
timex zsolveg.go >& OUTPUT/outlist

```

```
*****
```

通常バッチジョブクラスは小ジョブで、CPU 時間に応じて小デバッグ “sd” 10分、小ショート “ss” 1時間、小ミドル “sm” 6時間、小ロング “sl” 48時間を指定する。

#### 4) 結果出力

計算結果は、結果出力格納ディレクトリ内のファイルに出力される。既存の出力ファイルは新しい結果で上書きされるため、古い計算結果を保存する場合は格納ディレクトリ名を変更し、新規に結果出力格納ディレクトリを作成する。出力ファイルについて、出力装置番号、出力を行なうプログラムファイル名及び出力内容を以下に示す（付録参照）。



dbout	20	pdebugw0.f	大気変数；風速、気温、比湿、霧水
mnout	21	solveg.f	土壌変数；温度、含水率、間隙比湿、蒸発量
TSout	30	solveg.f	土壌温度
HWout	31	solveg.f	土壌体積含水率
QSout	33	solveg.f	土壌間隙比湿
EBout	34	solveg.f	土壌中蒸発量
SFout	36	solveg.f	地表面フラックス
VGout	50	solveg.f	植生層変数；日射、大気放射、葉面温度、熱交換
VWout	51	solveg.f	植生層水収支
VAout	52	solveg.f	植生層大気変数；風速、気温、比湿、霧水
VTout	53	solveg.f	植生・大気間フラックス
METout	60	pzroot02.f	解析計算用気象データ出力

## 7.2 計算コードの構成

計算コードは、FORTRAN 言語により記述され、大気、植生及び土壌中での物理現象を素過程単位でサブルーチン化したプログラムファイル及び計算条件入力、パラメータ設定等に用いるデータファイルから構成されている。プログラムファイルのうち、ファイル名が“e”で始まるものは土壌及び植生のパラメータを設定するサブルーチン、“f”で始まるものは大気特性に関する関数副プログラム、“g”で始まるものは土壌及び植生格子の設定とパラメータテーブルの読み込みを行なうサブルーチン、“p”で始まるものは大気変数を計算するサブルーチン及びメインルーチン、“s”で始まるものは土壌及び植生の変数と植生層内の放射伝達を計算するサブルーチンである。データファイルには、コンパイル用メイクファイル、コンパイル実行用シェルスクリプト、モデル格子設定、土壌パラメータ設定、植生パラメータ設定（以上プログラムファイルと同じディレクトリに格納されファイル名が“z”で始まる）、計算条件設定、気象条件入力、土壌タイプ及び変数初期値入力、植生分布設定及び計算実行シェルスクリプトのファイルがある。以下に計算コードを構成する全ファイル名をファイルの内容または含まれるサブルーチンとともに記述する。

### 1) Include Files

- Inclcon1 : common blocks for constants and input meteorological data
- Inclcon2 : common blocks for constants defined in BLOCK DATA
- Inclnum : parameter statements for variables in atmosphere
- Inclnum-p : Inclnum file for prediction calculation
- Inclnum-a : Inclnum file for analysis calculation
- Inclvari : common blocks for variables

## 2) Program Files

- efalbedo.f : SUBROUTINE EALBED
- ehws.f : SUBROUTINE EHWS
- eli2va.f : SUBROUTINE ELI2VA
- eppara.f : SUBROUTINE EPPARA
- 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
- gvtable.f : SUBROUTINE GVTABLE
- gzsolveg.f : SUBROUTINE GZSOLVEG
- pblkd01.f : BLOCK DATA
- pdebugw0.f : SUBROUTINE DEBUGW
- pfluxcal.f : SUBROUTINE SFPR13, FLXCAL, KMHCAL, SAVEOD
- pgener.f : SUBROUTINE GENER, DIREC1, DIREC2
- pgener-a.f : SUBROUTINE GENER, DIREC1, DIREC2
- pinit01.f : SUBROUTINE MSHINT
- pinitpf.f : SUBROUTINE INITPF, CLSL2A
- pmain03.f : SUBROUTINE UMAIN, TMAIN, EMAIN
- ppcal.f : SUBROUTINE PCAL
- ppread.f : SUBROUTINE PREAD, DEWTMP
- ppread-a.f : SUBROUTINE PREAD, DEWTMP
- ptint.f : SUBROUTINE TIMEINT
- pzroot02.f : PROGRAM PHYIV4
- sliqu.f : SUBROUTINE SLIQU
- solveg.f : SUBROUTINE SLVGIN, SOLVEG
- solver1.f : SUBROUTINE SOLV1
- solver2.f : SUBROUTINE SOLV2
- srad.f : SUBROUTINE SFCRAD
- sradiatn.f : SUBROUTINE RADIATION
- stemp.f : SUBROUTINE STEMP

- svapo. f : SUBROUTINE SVAPO
- svliqu. f : SUBROUTINE VLIQU
- svrsst. f : SUBROUTINE RESISTS
- svtemp. f : SUBROUTINE VTEMP

### 3) Data Files

- zmakefile : compile make file for prediction calculation
- zmakefile-a : compile make file for analysis calculation
- zmake : compile shell script for prediction calculation
- zmake-a : compile shell script for analysis calculation
- zmesh.model : model grid
- zsoil.table : soil parameter table
- zvege.table : vegetation parameter table
- param : calculation condition
- met.data : meteorological input for prediction calculation
- met-a.data : meteorological input for analysis calculation
- soil.init : distribution of soil type and soil layer initial values
- vege.init : distributions of vegetation type, leaf area density, and root
- go.sh : shell script for prediction calculation
- go-a.sh : shell script for analysis calculation

## 7.3 パラメータ、定数及び変数

サブルーチン間で共通な定数及び変数は、サブルーチンの引数及びコモン文を介して授受される。大気変数計算部と土壌及び植生パラメーターを除いて、サブルーチン間のデータの授受は引数で行なわれる。これらの引数の詳細は、各サブルーチンの機能の中に記述する。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 (4) : grid number for mean values (or fluxes) in atmosphere
- NA = 5 : grid number for meteorological data output
- M1 = N1 + 1 : same as N1 but including upper interface layer
- N2 = 2\*M1 : total grid number in atmosphere
- NX = 1 : longitudinal grid number

NY = 1 : meridional grid number  
 NS = 10 : number of soil layer  
 NC = 10 : number of canopy layer  
 NZMET = 10 : maximum height number of input meteorological data  
 NTMET = 2401 : maximum time number of input meteorological data

## 2) 定数

Inclcon1 内

DELT : time increment (s)  
 TINTEG : integration period (h)  
 STIME : initial local standard time (h)  
 LDATES : initial date (yymmhh)  
 FLAT : latitude (deg.)  
 TLAGL : difference of local time from local standard time (h)  
 IPRINT : print out interval (s)  
 GRTOP : vertical potential temperature gradient at model top (K/m)  
 BET : thermal expansion coefficient (1/K)  
 EMSVTY : emmissivity of ground surface  
 ALBEDO : albedo of the ground surface  
 PRECIP : precipitability (cm)  
 TURBID : turbidity of air  
 CF : Coriolis parameter (1/s)  
 ZO : 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)  
 NTIN : time number of input meteorological data  
 NZIN(NTMET) : height number of input meteorological data  
 UTIME(M1, NTMET) : input wind speed u-component interpolated on model grid (m/s)  
 VTIME(M1, NTMET) : input wind speed v-component interpolated on model grid (m/s)  
 TTIME(M1, NTMET) : input temperature interpolated on model grid (°C)  
 QTIME(M1, NTMET) : input specific humidity interpolated on model grid (kg/kg)  
 WLTIME(M1, NTMET) : input fog water interpolated on model grid (kg/kg)  
 TIMER(NTMET) : time of input meteorological data (h)  
 CNLI(NTMET) : input cloudiness low (0 to 1 fraction)  
 CNMI(NTMET) : input cloudiness middle (0 to 1 fraction)

CNHI (NTMET) : input cloudiness high (0 to 1 fraction)  
 RSOLI (NTMET) : input solar radiation ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )  
 RINFI (NTMET) : input atmospheric radiation ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )  
 RRI (NTMET) : input precipitation intensity (mm/h)  
 UGI (NTMET) : input geostrophic wind speed u-component (m/s)  
 VGI (NTMET) : input geostrophic wind speed v-component (m/s)  
 PHPI (NTMET) : input ground surface air pressure (hPa)  
 ZI (NZMET, NTMET) : input meteorological data height (m)  
 UI (NZMET, NTMET) : input wind speed u-component (m/s)  
 VI (NZMET, NTMET) : input wind speed v-component (m/s)  
 TI (NZMET, NTMET) : input temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 QI (NZMET, NTMET) : input specific humidity (kg/kg)  
 WLI (NZMET, NTMET) : input fog water (kg/kg)

## 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 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )  
 CK : von Karman constant  
 GRDA : adiabatic lapse rate (K/m)  
 RAIR : gas constant ( $\text{J}/\text{kg}/\text{K}$ )  
 TOO : exchange constant between Celsius and Kelvin scale (K)

## COMMON ブロック SOILTAB 内 (土壌パラメータ)

HWST(20) : saturated volumetric soil water content ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )  
 SATPOTT(20) : saturated matric potential (m)  
 CONDUCT(20) : saturated hydraulic conductivity (m/s)

POWER(20) : soil constant in Clapp and Hornberger equation  
 HWWILTT(20) : wilting volumetric soil water content ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )  
 ROUCT(20) : dry soil heat capacity ( $\text{J}/\text{m}^3$ )

## COMMON ブロック VEGETAB 内 (植生パラメータ)

REFLECT(20) : reflectivity of leaf surface  
 EMISSIV(20) : emissivity of leaf surface  
 WDSAT(20) : maximum leaf surface water content ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )  
 WDEVP(20) : leaf surface water content for maximum evaporation ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )  
 CHANGED(20) : aerodynamic resistance of leaf  
 CHANGEH(20) : heat exchange coefficient between leaf and canopy air  
 CHANGEE(20) : water vapor exchange coefficient between leaf and canopy air  
 RSSTMIN(20) : minimum stomata resistance ( $\text{s}/\text{m}$ )

## 3) 変数

## Inclvari 内

TIMEH : model time (h)  
 TIMET : calculation time (h)  
 ITIME : calculation time (s)  
 LDATE : model date (yymmdd)  
 UST : friction speed ( $\text{m}/\text{s}$ )  
 TST : friction potential temperature (K)  
 RSOL : solar radiation ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )  
 RINF : atmospheric radiation ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )  
 RNET : net radiation ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )  
 STBL : Monin-Obukhov stability length (m)  
 QST : specific humidity in surface layer ( $\text{kg}/\text{kg}$ )  
 TO : soil surface temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 QSO : specific humidity at soil surface ( $\text{kg}/\text{kg}$ )  
 ROU : air density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 CNL : cloudiness low (0 to 1 fraction)  
 CNM : cloudiness middle (0 to 1 fraction)  
 CNH : cloudiness high (0 to 1 fraction)  
 RRATE : precipitation intensity ( $\text{mm}/\text{h}$ )  
 PHPS : ground surface air pressure (hPa)  
 PHPA(M1) : air pressure at the height of model grid (hPa)

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.) ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )
EL(M1)	: turbulence length scale multiplied by E2 ( $\text{m}^3/\text{s}^2$ )
UN(M1)	: predicted U (m/s)
VN(M1)	: predicted V (m/s)
TN(M1)	: predicted T (°C)
E2N(M1)	: predicted E2 ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )
ELN(M1)	: predicted EL ( $\text{m}^3/\text{s}^2$ )
UOUT(M1)	: external condition of wind speed u-component (m/s)
VOOUT(M1)	: external condition of wind speed v-component (m/s)
TOOUT(M1)	: external condition of temperature (°C)
QOOUT(M1)	: external condition of specific humidity (kg/kg)
WLOOUT(M1)	: external condition of liquid water in atmosphere (kg/kg)
RL1(M1)	: turbulence length scale (m)
RL2(M1)	: = $RL1^2$ ( $\text{m}^2$ )
E1(M1)	: = $E2^{1/2}$ (m/s)
DKM(M1)	: eddy diffusivity of momentum ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
DKH(M1)	: eddy diffusivity of heat ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
RIG(M1)	: Richardson number
TAX(M1)	: turbulence momentum flux of U ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )
TAY(M1)	: turbulence momentum flux of V ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )
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)

COMMON ブロック LCL02 (pgener.f, pmain03.f) 内

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

## 7.4 計算の流れとサブルーチンの機能

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. 7-1 に示す。また、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         : モデル計算時刻 (h)
  - LDATE         : モデル計算日付 (年月日)
- ・ データ出力タイミングの管理
  - IFDBG         : モデル出力フラグ

### 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, TOO, GRDA

#### 機能

- ・ 乱流クロージャモデル及び大気のパラメータ設定



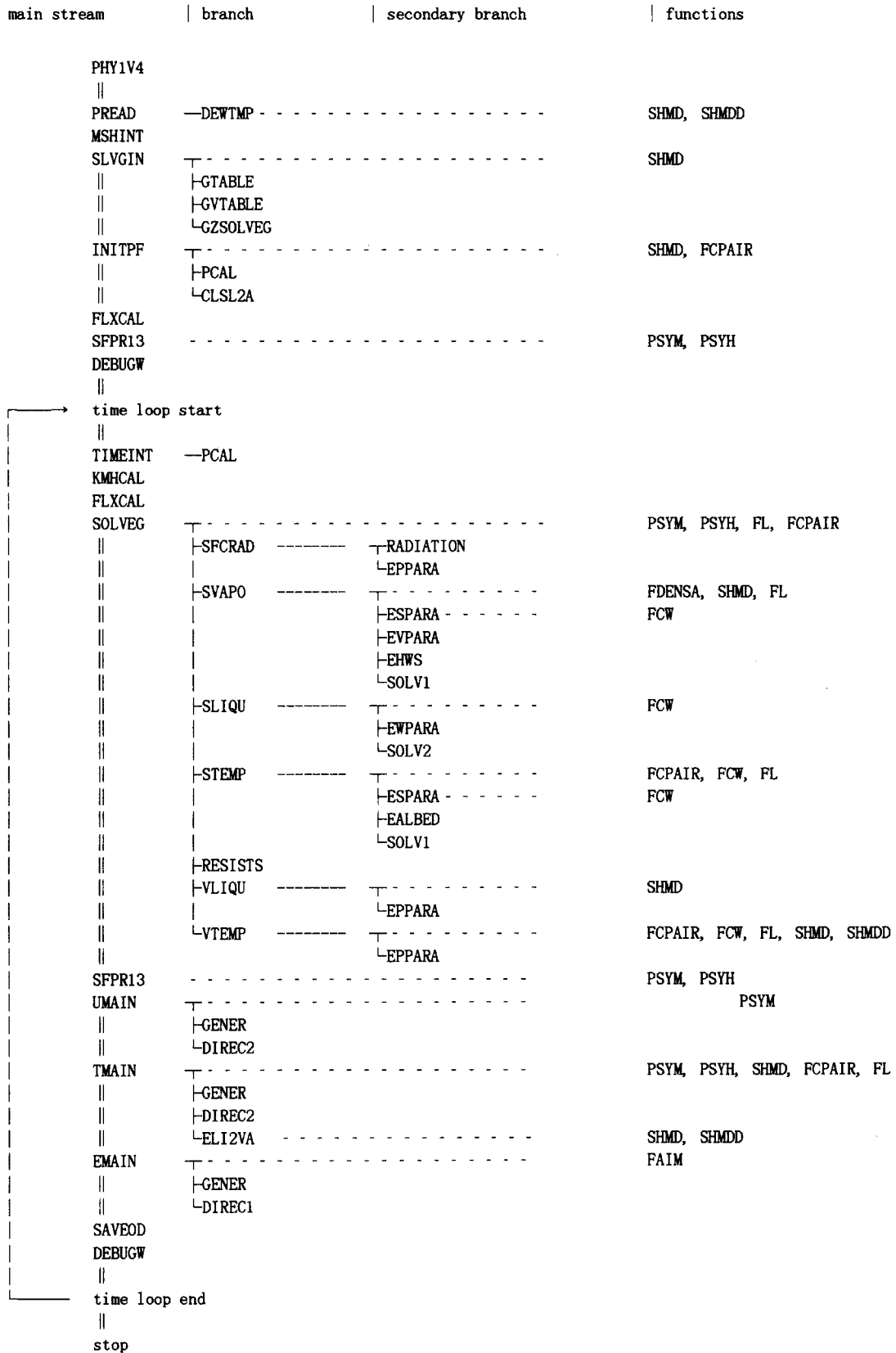


Fig. 7-1 Calculation Flow

PREAD

引き数           無し

コモン文       Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari

・入力         Inclcon2/ T00

・出力         Inclcon1/ DELT, TINTEG, STIME, LDATES, FLAT, TLAGL, IPRINT, GRTOP,  
                   BET, EMSVTY, ALBEDO, PRECIP, TURBID, CF, ZO, ZT, NTIN,  
                   NZIN, TIMER, CNLI, CNMI, CNHI, RSOLI, RINFI, RRI, UGI, VGI,  
                   PHPI, ZI, UI, VI, TI, QI, WLI

                  Inclvari/ T0, ROU, PHPS

## 機能

- ・基盤 1 0 : param から以下の計算条件を読み込む  
 IPRINT, GRTOP, ROU, EMSVTY, ALBEDO, TURBID, ZO, ZT, DELT, LDATES, STIME, TINTEG,  
 FLON, FLAT, STDLON
- ・基盤 1 1 : met. data または met-a. data から気象データを読み込む  
 NTIN, NZIN, TIMER, PHPI, UGI, VGI, CNLI, CNMI, CNHI, RSOLI, RINFI, RRI, ZI, UI,  
 VI, TI, QI, WLI
- ・パラメータの設定  
 CF, BET, PRECIP
- ・引用サブルーチン  
 DEWTMP           : 露点温度計算

## 3) 初期条件の設定

MSHINT(N2, Z, ZZD)

引き数           N2       入力    大気鉛直格子数

                  Z        出力    大気鉛直格子座標 (m)

                  ZZD   出力    大気鉛直格子間隔の逆数 (1/m)

コモン文       無し

## 機能

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

SLVGIN(Z, DELT, FLAT, TLAGL, ZO, ZT, EMSVTY, ALBEDO, PRECIP, TURBID, PHPS,  
 TOI, QS0I)

引き数           Z        入力    大気鉛直格子座標 (m)

                  DELTA 入力    時間増分 (s)

FLAT	入力	計算対象地の緯度 (deg.)
TLAGL	入力	地方標準時と地方時との差 (h)
ZO	入力	風速に対する地表面粗度 (m)
ZT	入力	温位に対する地表面粗度 (m)
EMSVTY	入力	地表面射出率
ALBEDO	入力	地表面アルベド
PRECIP	入力	可降水量 (cm)
TURBID	入力	大気混濁度
PHPS	入力	地表面気圧 (hPa)
TOI	出力	地表面温度初期値 (°C)
QSOI	出力	地表面比湿初期値 (kg/kg)

## コモン文

## ・入力

Inclnum, SOILTAB, VEGETAB  
 Inclnum/ M1, NX, NY, NS, NC  
 SOILTAB/ HWST

## 機能

## ・ 土壌及び植生のパラメータ及び変数の初期化

TEXTURE, VEGTYPE, TS, HW, QS, ET, EB, AZ, RZ, TC, PR, WDL, MYU, TOI, QSOI

## ・ 引用サブルーチン

GTABLE : 土壌パラメータの入力 ==> SOILTAB  
 GVTABLE : 植生パラメータの入力 ==> VEGETAB  
 SZSOLVEG : 土壌及び植生格子の設定 (ZS, ZC)

INITPF

## 引き数

無し

## コモン文

Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari

## ・入力

Inclnum/ M1, N1  
 Inclcon1/ GRTOP, BET, ZO, ZT, Z, ZZD, NTIN, NZIN, CNLI, CNMI, CNHI,  
 RSOLI, RINFI, RRI, UGI, VGI, ZI, UI, VI, TI, QI, WLI  
 Inclcon2/ CK, T00  
 Inclvari/ T0, QSO, PHPS, PHPA

## ・出力

Inclcon1/ UTIME, VTIME, TTIME, QTIME, WLTIME  
 Inclvari/ UST, TST, QST, CNL, CNM, CNH, RSOL, RINF, RRATE, VG, UG,  
 V, U, T, Q, WL

## 機能

- ・ 入力気象データのモデル格子点への内挿
- ・ 大気中のパラメータ及び変数の初期化

VG, UG, V, U, T, Q, WL, UST, TST, QST, CNL, CNM, CNH, RSOL, RINF, RRATE

・引用サブルーチン

PCAL : 大気格子高度の気圧計算 (PHPA)  
 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/ BET, Z, Z0, ZT  
 Inclcon2/ G, CK  
 Inclvari/ T0, 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

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, BET  
 Inclcon2/ CK, G, SE1  
 Inclvari/ STBL, UST, TST, TO, 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 (初期値出力)
  - 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

## 4) 時間ステップ内の処理

TIMEINT

引数 無し

コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari

・入力 Inclnum/ M1  
 Inclcon1/ NTIN, TIMER, PHPI, CNLI, CNMI, CNHI, RSOLI, RINFI, RRI,  
 UGI, VGI, UTIME, VTIME, TTIME, QTIME, WLTIME  
 Inclvari/ TIMET

・出力 Inclvari/ CNL, CNM, CNH, RSOL, RINF, RRATE, PHPS, PHPA, UG, VG, UOUT,  
 VOUT, TOUT, QOUT, WLOUT, UN, VN, TN, QN, WLN

## 機能

- ・ モデル格子に内挿された入力気象データを時間内挿して外部条件を設定  
 CNL, CNM, CNH, RSOL, RINF, RRATE, PHPS, UG, VG, UOUT, VOUT, TOUT, QOUT, WLOUT
- ・ 次時間ステップの上部境界値設定 (解析計算用)  
 UN, VN, TN, QN, WLN
- ・ 引用サブルーチン  
 PCAL : 大気格子点の気圧計算 (PHPA)

KMHCAL

引き数 無し

コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari

・入力 Inclnum/ N1  
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

## 機能

- ・乱流クロージャモデルレベル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, LDATE, TIMEH, TIMET, ROU, PHPS, U, V, T, Q, WL, STBL, CNL, CNM, CNH, RSOL, RINF, RRATE, RSOLX, RINFX, RNET, TO, QSO, SOUU, SOVV, SOTT, SOQQ, SOWL, SOE2)

引き数	IFDBG	入力	結果出力制御フラグ
	LDATE	入力	モデル計算日付 (年月日)
	TIMEH	入力	モデル計算時刻 (h)
	TIMET	入力	計算継続時間 (h)
	ROU	入力	大気密度 (kg/m <sup>3</sup> )
	PHPS	入力	地表面気圧 (hPa)
	U	入力	風速東西成分 (m/s)
	V	入力	風速南北成分 (m/s)
	T	入力	温位 (°C)
	Q	入力	比湿 (kg/kg)

WL	入力	大気中液体水 (kg/kg)
STBL	入力	M-0 長さスケール (m)
CNL	入力	低層雲量 (0 to 1 fraction)
CNM	入力	中層雲量 (0 to 1 fraction)
CNH	入力	高層雲量 (0 to 1 fraction)
RSOL	入力	日射量 ( $J/m^2/s$ )
RINF	入力	大気放射量 ( $J/m^2/s$ )
RRATE	入力	降水強度 (mm/h)
RSOLX	出力	モデル計算日射量 ( $J/m^2/s$ )
RINFX	出力	モデル計算大気放射量 ( $J/m^2/s$ )
RNET	出力	地表面正味放射量 ( $J/m^2/s$ )
TO	出力	地表面温度 ( $^{\circ}C$ )
QSO	出力	地表面比湿 (kg/kg)
SOUU	出力	植生による風速東西成分の減速 ( $m/s^2$ )
SOVV	出力	植生による風速南北成分の減速 ( $m/s^2$ )
SOTT	出力	植生から大気への顕熱輸送 (K/s)
SOQQ	出力	植生から大気への水蒸気輸送 (kg/kg/s)
SOWL	出力	植生から大気への液体水輸送 (kg/kg/s)
SOE2	出力	植生による大気の乱流運動エネルギー生成 ( $m^2/s^3$ )

## コモン文

Inclnum, VEGETAB

## ・入力

Inclnum/ M1, NX, NY, NS, NC

VEGETAB/ CHANGED

## 機能

- ・放射伝達、土壌及び植生モデルの計算制御
- ・大気モデルと土壌及び植生モデルの接続  
TO, QSO, SOUU, SOVV, SOTT, SOQQ, SOWL, SOE2
- ・引用サブルーチン

SFCRAD : 植生層内放射伝達計算

SVAPO : 地中水蒸気計算

SLIQU : 地中液体水計算

STEMP : 地中温度計算

RESISTS : 気孔抵抗計算

VLIQU : 植生層液体水計算

VTEMP : 葉面温度計算

SFPR13

引き数 無し

コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari

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

・出力 Inclvari/ STBL, UST, TST

## 機能

- ・接地層パラメータ計算  
STBL, UST, TST

U MAIN(SOUU, SOVV)

引き数 SOUU 入力 植生による風速東西成分の減速 ( $\text{m/s}^2$ )  
SOVV 入力 植生による風速南北成分の減速 ( $\text{m/s}^2$ )

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 => UN, V => VN
- ・引用サブルーチン  
GENER : 鉛直微分係数計算  
DIREC2 : 次ステップ値計算

T MAIN(SOTT, SOQQ, SOWL)

引き数 SOTT 入力 植生から大気への顕熱輸送 (K/s)  
SOQQ 入力 植生から大気への水蒸気輸送 (kg/kg/s)  
SOWL 入力 植生から大気への液体水輸送 (kg/kg/s)

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

・入力 Inclnum/ N1, M1  
Inclcon1/ DELT, ZZD, Z, Z0, ZT, GRTOP  
Inclcon2/ CK, T00



- Inclvari/ T0, QS0, DKH, Q, STBL, U, V, T, WL  
 ・出力 Inclvari/ QN, TN, WLN  
 LCL02/ DL

## 機能

- ・大気比湿計算  
Q => QN
- ・大気温位計算  
T => TN
- ・大気霧水計算  
WL => WLN
- ・引用サブルーチン
  - GENER : 鉛直微分係数計算
  - DIREC2 : 次ステップ値計算
  - ELI2VA : 飽和比湿計算

EMAIN(SOE2)

- 引き数 SOE2 入力 植生による大気の乱流運動エネルギー生成 ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ )  
 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
- ・引用サブルーチン
  - GENER : 鉛直微分係数計算
  - 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

Inclvari/ UN, VN, TN, E2N, ELN, RL1, RL2, QN, WLN, UOUT, VOUT, TOUT,  
QOUT, WLOUT

・出力 Inclvari/ U, V, T, E2, EL, Q, WL, RL1, RL2, E1, E2N, ELN

機能

・計算値の更新

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

RL1, RL2, E1

・次時間ステップの乱流運動エネルギー及び長さスケール上部境界値設定 (解析計算用)

E2N, ELN

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, BET

Inclcon2/ CK, G, SE1

Inclvari/ TO, 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

## 5) 放射伝達、土壌及び植生モデル

SFCRAD(Z, ZC, AZ, VEGTYPE, FLAT, TLAGL, LDATE, TIMEH, CNL, CNM, CNH, RSOL, RINF, EMSVTY, ALBEDO, PRECIP, TURBID, ROU, T, WL, TTC, WLC, TC, TO, PR, VF, RSDN, RSUP, RLDN, RLUP, HR, ZENITH, RSMX, RSOLX, RINFX)

引き数	Z	入力	大気鉛直格子座標 (m)
	ZC	入力	植生層鉛直格子座標 (m)
	AZ	入力	葉面積密度 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )
	VEGTYPE	入力	植生タイプ
	FLAT	入力	計算対象地の緯度 (deg.)
	TLAGL	入力	地方標準時と地方時の差 (h)
	LDATE	入力	モデル計算日付 (年月日)
	TIMEH	入力	モデル計算時刻 (h)
	CNL	入力	低層雲量 (0 to 1 fraction)
	CNM	入力	中層雲量 (0 to 1 fraction)
	CNH	入力	高層雲量 (0 to 1 fraction)
	RSOL	入力	日射量 ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	RINF	入力	大気放射量 ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	EMSVTY	入力	地表面射出率
	ALBEDO	入力	地表面アルベド
	PRECIP	入力	可降水量 (cm)
	TURBID	入力	大気混濁度
	ROU	入力	大気密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
	T	入力	気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )
	WL	入力	大気中液体水 ( $\text{kg}/\text{kg}$ )
	TTC	入力	植生層気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )
	WLC	入力	植生層大気中液体水 ( $\text{kg}/\text{kg}$ )
	TC	入力	葉面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
	TO	入力	地表面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
	PR	入力	植生層内降水フラックス ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	VF	入力	降水鉛直速度 (m/s)
	RSDN	出力	植生層内下向き日射フラックス ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	RSUP	出力	植生層内上向き日射フラックス ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	RLDN	出力	植生層内下向き長波放射フラックス ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	RLUP	出力	植生層内上向き長波放射フラックス ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	HR	出力	大気の放射吸収による昇温率 ( $\text{J}/\text{m}^3/\text{s}$ )

	ZENITH	出力	太陽天頂角 (deg.)
	RSMX	出力	最大日射量 ( $J/m^2/s$ )
	RSOLX	出力	モデル計算日射量 ( $J/m^2/s$ )
	RINFX	出力	モデル計算大気放射量 ( $J/m^2/s$ )
コモン文	Inclnum, VEGETAB		
・入力	Inclnum/ M1, NX, NY, NC		
	VEGETAB/ REFLECT, EMISSIVE		

## 機能

- ・植生層内放射伝達計算
  - ・引用サブルーチン
- RADIATION : 日射及び大気放射計算  
EPPARA : 葉面投影係数設定

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

引き数	Z	入力	土壌層鉛直格子座標 (m)
	TEXTURE	入力	土壌タイプ
	MYU	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)
	PHPS	入力	地上気圧 (hPa)
	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)
	CEO	入力	水蒸気交換係数
	AIRDEN	入力	空気密度 ( $kg/m^3$ )
	HW	入力	土壌体積含水率 ( $m^3/m^3$ )
	EB	出力	土壌水分蒸発量 ( $kg/m^2/s$ )
	T	入力	土壌温度 (K)
	QS	入出力	土壌中比湿 (kg/kg)
	VFS	出力	土壌中水蒸気フラックス ( $kg/m^2/s$ )

コモン文 Inclnum  
・入力 Inclnum/ NX, NY, NS

## 機能

- ・地中水蒸気計算
  - ・引用サブルーチン
- ESPARA : 熱容量、熱伝導度設定

EVPARA : 蒸発抵抗設定  
 EHWS : 飽和体積含水率設定  
 SOLV1 : ガウス消去法

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

引き数	Z	入力	土壌層鉛直格子座標 (m)
	TEXTURE	入力	土壌タイプ
	MYU	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	降水強度 ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	HW	入出力	土壌体積含水率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )
	EB	入力	土壌水分蒸発量 ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	T	入力	土壌温度 (K)
	RES	入出力	地表面液体水 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )
	VFS	入力	土壌中水蒸気フラックス ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	WF	出力	土壌中液体水フラックス ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )

コモン文      Inclnum  
 ・入力        Inclnum/ NX, NY, NS

機能

- ・地中液体水計算
- ・引用サブルーチン

EWPARA : 熱容量、熱伝導度設定  
 SOLV2 : ガウス消去法

STEMP(Z, TEXTURE, MYU, DELT, ZENITH, RS, RL, TR, UR, QR, CHO, AIRDEN, PRO, TP, HTOPF, HRADF, HTOPL, HGTOP, HW, EB, T, RES, VFS)

引き数	Z	入力	土壌層鉛直格子座標 (m)
	TEXTURE	入力	土壌タイプ
	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)
	ZENITH	入力	太陽天頂角 (deg.)
	RS	入力	日射量 ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	RL	入力	大気放射 ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	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 <sup>3</sup> )
PRO	入力	降水強度 (kg/m <sup>2</sup> /s)
TP	入力	降水温度 (K)
HTOPF	出力	地表面顕熱フラックス (J/m <sup>2</sup> /s)
HRADF	出力	地表面正味放射量 (J/m <sup>2</sup> /s)
HTOPL	出力	地表面潜熱フラックス (J/m <sup>2</sup> /s)
HGTOP	出力	地中熱伝導フラックス (J/m <sup>2</sup> /s)
HW	入力	土壌体積含水率 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
EB	入力	土壌水分蒸発量 (kg/m <sup>2</sup> /s)
T	入出力	土壌温度 (K)
RES	入力	地表面液体水 (kg/m <sup>2</sup> )
VFS	入力	土壌中水蒸気フラックス (kg/m <sup>2</sup> /s)

## コモン文

Inclnum

## ・入力

Inclnum/ NX, NY, NS

## 機能

## ・地中温度計算

## ・引用サブルーチン

ESPARA : 熱容量、熱伝導度設定

EALBED : アルベド設定

SOLV1 : ガウス消去法

RESISTS(NX, NY, NS, NC, ZS, TEXTURE, VEGTYPE, SMX, SDN, HW, RS)

引き数	NX	入力	東西方向格子数
	NY	入力	南北方向格子数
	NS	入力	土壌層数
	NC	入力	植生層数
	ZS	入力	土壌層鉛直格子座標 (m)
	TEXTURE	入力	土壌タイプ
	VEGTYPE	入力	植生タイプ
	SMX	入力	最大日射量 (J/m <sup>2</sup> /s)
	SDN	入力	下向き日射量 (J/m <sup>2</sup> /s)
	HW	入力	土壌体積含水率 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
	RS	出力	気孔抵抗 (s/m)

## コモン文

SOILTAB, VEGETAB

・入力 SOLTAB/ HWWILTT  
VEGETAB/ RSSTMIN

## 機能

・気孔抵抗計算

VLIIQU(ZC, AZ, DELT, VEGTYPE, ROU, PHPS, UUC, VVC, TTC, QQC, WLC, PRT,  
TP, RP, TC, WDL, RS, PD, ED, ES, RRDS, EPR, ECL, ECP, PR, WDLN)

引き数	ZC	入力	植生層鉛直格子座標 (m)
	AZ	入力	葉面積密度 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )
	DELT	入力	時間増分 (s)
	VEGTYPE	入力	植生タイプ
	ROU	入力	大気密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
	PHPS	入力	地表面気圧 (hPa)
	UUC	入力	植生層風速東西成分 (m/s)
	VVC	入力	植生層風速南北成分 (m/s)
	TTC	入力	植生層気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )
	QQC	入力	植生層比湿 ( $\text{kg}/\text{kg}$ )
	WLC	入力	植生層大気中液体水 ( $\text{kg}/\text{kg}$ )
	PRT	入力	降水強度 ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	TP	入力	降水温度 (K)
	RP	入力	雨粒半径 (m)
	TC	入力	葉面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
	WDL	入力	葉面水滴量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )
	RS	入力	気孔抵抗 (s/m)
	PD	入出力	葉面からの滴下量 ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	ED	出力	葉面水滴からの蒸発量 ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	ES	出力	蒸散量 ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	RRDS	出力	葉面の蒸発抵抗の逆数 (m/s)
	EPR	出力	雨滴からの蒸発量 ( $\text{kg}/\text{m}^3/\text{s}$ )
	ECL	出力	雨滴による霧水捕捉量 ( $\text{kg}/\text{m}^3/\text{s}$ )
	ECP	出力	葉面水滴への霧水の付着量 ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	PR	出力	植生層内降水フラックス ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	WDLN	出力	次時間ステップの葉面水滴量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )
コモン文	Inclnum, VEGETAB		
・入力	Inclnum/ NX, NY, NC		
	VEGETAB/ WDSAT, WDEVP, CHANGE		

## 機能

- ・植生層内降水フラックス及び葉面水滴量計算
- ・引用サブルーチン

EPPARA : 葉面投影係数設定

VTEMP (ZC, AZ, DELT, VEGTYPE, ROU, PHPS, UUC, VVC, TTC, QQC, WLC, PR, TP,  
RSDN, RSUP, RLDN, RLUP, RRDS, ES, TET, HS, HC, TC)

引き数	ZC	入力	植生層鉛直格子座標 (m)
	AZ	入力	葉面積密度 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )
	DELT	入力	時間増分 (s)
	VEGTYPE	入力	植生タイプ
	ROU	入力	大気密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
	PHPS	入力	地表面気圧 (hPa)
	UUC	入力	植生層風速東西成分 (m/s)
	VVC	入力	植生層風速南北成分 (m/s)
	TTC	入力	植生層気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )
	QQC	入力	植生層比湿 ( $\text{kg}/\text{kg}$ )
	WLC	入力	植生層大気中液体水 ( $\text{kg}/\text{kg}$ )
	PR	入力	植生層内降水フラックス ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	TP	入力	降水温度 (K)
	RSDN	入力	植生層内下向き日射フラックス ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	RSUP	入力	植生層内上向き日射フラックス ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	RLDN	入力	植生層内下向き長波放射フラックス ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	RLUP	入力	植生層内上向き長波放射フラックス ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	RRDS	入力	葉面の蒸発抵抗の逆数 (m/s)
	ES	入力	蒸散量 ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	TET	入力	根域土壌水平平均温度 (K)
	HS	出力	降雨及び吸上げた水による植生の冷却率 ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	HC	出力	葉面から大気への顕熱フラックス ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ )
	TC	出力	葉面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

コモン文 Inclnum, VEGETAB

・入力 Inclnum/ NX, NY, NC

VEGETAB/ REFLECT, EMISSIV, CHANGEH

## 機能

- ・葉面温度計算
- ・引用サブルーチン



EPPARA : 葉面投影係数設定

## 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 (解析計算では入出力)

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 (解析計算では入出力)

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, RO, CP, CL, QASS, EFDT)

引き数	TA	入力	気温 (K)
	QA	入力	比湿 (kg/kg)
	RO	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

PCAL

引き数	無し
コモン文	Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari
・入力	Inclnum/ M1 Inclcon1/ Z Inclcon2/ G, RAIR, T00 Inclvari/ PHPS
・出力	Inclvari/ PHPA

## 機能

- ・大気格子点高度の気圧計算

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

RADIATION(DFLAT, TLAGL, DSLAT, TIME, PRECIP, TURBID, ALBEDO, TEMP, CNL, CNM, CNH, ZENITH, RSMX, RSOLX, RINFX)

引き数	DFLAT	入力	計算対象地の緯度 (deg.)
	TLAGL	入力	地方標準時と地方時の差 (h)
	DSLAT	入力	太陽赤緯 (deg.)
	TIME	入力	モデル計算時刻 (h)
	PRECIP	入力	可降水量 (cm)
	TURBID	入力	大気混濁度
	ALBEDO	入力	地表面アルベド
	TEMP	入力	接地層気温 (K)
	CNL	入力	低層雲量 (0 to 1 fraction)
	CNM	入力	中層雲量 (0 to 1 fraction)
	CNH	入力	高層雲量 (0 to 1 fraction)
	ZENITH	出力	太陽天頂角 (deg.)
	RSMX	出力	最大日射量 (J/m <sup>2</sup> /s)

	RSOLX	出力	モデル計算日射量 (J/m <sup>2</sup> /s)
	RINFX	出力	モデル計算大気放射量 (J/m <sup>2</sup> /s)
コモン文		無し	

## 機能

- ・日射量及び大気放射量計算

## 7) 設定ルーチン

DEWTMP(QA, PHPS, TDEW)

引き数	QA	入力	比湿 (kg/kg)
	PHPS	入力	気圧 (hPa)
	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, HWWILT, ROUCT

## 機能

- ・土壌パラメータテーブル (zsoil. table) の入力

GVTABLE

引き数 無し

コモン文 VEGETAB

- ・出力 VEGETAB/ REFLECT, EMISSIV, WDSAT, WDEVP, CHANGED, CHANGEH, CHANGE, RSSTMIN

## 機能

- ・植生パラメータテーブル (zvege. table) の入力

GZSOLVEG(NS, NC, ZS, ZC)

引き数	NS	入力	土壌層数
	NC	入力	植生層数
	ZS	出力	土壌層鉛直格子座標 (m)
	ZC	出力	植生層鉛直格子座標 (m)

コモン文 無し

機能

- ・ 土壌層及び植生層鉛直格子の設定

CLSL2A

引き数 無し

コモン文 Inclnum, Inclcon1, Inclcon2, Inclvari

- ・ 入力  
Inclnum/ N1, M1  
Inclcon1/ GRTOP, ZZD, BET, Z  
Inclcon2/ A1, A2, B1, B2, C1, G, CK  
Inclvari/ ROU, U, V, T
- ・ 出力  
Inclvari/ RL1, RL2, E2, E1, EL, DKM, DKH

機能

- ・ 乱流クロージャーマデルレベル2. 0による乱流の初期設定

ESPARA(N, NIN, TEXTURE, HW, T, RES, 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 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )
	T	入力	土壌温度 (K)
	RES	入力	地表面液体水 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )
	CSRS	出力	土壌の熱容量 ( $\text{J}/\text{m}^3/\text{K}$ )
	KS	出力	温度伝導度 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
	WORK	出力	温度伝導度 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

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	土壌の種類
	HW	入力	体積含水率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )
	T	入力	土壌温度 (K)

	CDIF	出力	土壤中水蒸気拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
	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 ( $\text{kg}/\text{kg}$ )

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 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )
	DW	出力	土壤液体水拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
	DDW	出力	DWの微分 ( $\text{m}/\text{s}$ )
	KW	出力	透水係数 ( $\text{m}/\text{s}$ )
	DKW	出力	KWの微分 ( $1/\text{s}$ )

コモン文	FLUGS, SOILTAB		
・入力	SOILTAB/ HWST, SATPOTT, CONDUCT, POWER		

## 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 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )
	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

EPPARA (NX, NY, NC, DZC, AZ, IX, IY, FR)

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)
	NC	入力	植生層数
	DZC	入力	植生層の厚さ (m)
	AZ	入力	葉面積密度 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
	IX	入力	東西方向格子番号
	IY	入力	南北方向格子番号
	FR	出力	葉面投影係数

コモン文 無し

## 機能

- ・葉面投影係数の設定

## 8) 関数ルーチン

SHMD (TEMP, PRESSURE, JFLG)

引き数	TEMP	気温 (K)
	PRESSURE	気圧 (hPa)
	JFLG	水の状態フラグ (1: liquid, 2: ice)
出力	SHMD	飽和比湿 (kg/kg)

SHMDD (TEMP, PRESSURE, JFLG)

引き数	TEMP	気温 (K)
	PRESSURE	気圧 (hPa)
	JFLG	水の状態フラグ (1: liquid, 2: ice)
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関数の積分

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	温度に関するシア関数の積分

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)
出力	FL	蒸発の潜熱 (J/kg)

FCPAIR(Q)

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

FCW(T)

引き数	T	水温 (K)
出力	FCW	水の比熱 (J/kg/K)

FAIM(Z, STB)

引き数	Z	高度 (m)
	STB	モニン・オブコフの長さ (m)
出力	FAIM	無次元風速シア関数



## 8. 試験計算

計算コードの妥当性を調べる目的で、仮想的な条件の下に試験計算を実施した。予報計算では、地表面の熱収支で典型的な日変化が再現できるかどうかを中心に調べた。解析計算では、予報計算の出力を用いて作成した気象条件を入力として計算を行ない、結果が予報計算と一致するかどうかを調べた。

### 8.1 計算条件

降水がなく晴れた日が続き土壌が乾燥していく状態を想定して、10日間の計算を行った。

#### 設定条件

対象地点緯度 : 36 度  
 対象地点経度 : 135 度  
 計算開始時刻 : 5 月 1 日 00:00 (Local Time)  
 計算継続時間 : 240 時間 (10 日間)  
 土壌タイプ : Silt-Loam  
 植生タイプ : 植生なし  
 仮想的植生 (高さ 1m、LAI=4.0、植生タイプ 3、  
 根の分布は深度 16cm まで一様)

#### 気象条件

地上気圧 : 1,013 hPa  
 地衡風 : UG = 6.0 m/s, VG = 0.0 m/s  
 雲量 : CL = 0.0, CM = 0.0, CH = 0.0  
 降水強度 : 0.0 mm/h  
 鉛直分布 :

Z(m)	U(m/s)	V(m/s)	T(°C)	Q(kg/kg)	WL(kg/kg)
10	3.0	0.0	16.50	6.0e-3	0.0
1000	5.0	0.0	20.00	4.0e-3	0.0
1500	6.0	0.0	21.75	1.0e-3	0.0
2000	6.0	0.0	23.50	1.0e-3	0.0
4000	6.0	0.0	30.50	1.0e-3	0.0

#### 土壌変数初期値

土壌温度 : 全層 15 °C  
 土壌水分量 : 0.300 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
 土壌比湿 : 土壌温度に対する飽和比湿

## 8.2 計算結果

### 1) 予報計算

原研の共用 UNIX サーバーAP3000 で計算を行なったところ、CPU 時間は植生なしで 760 秒、仮想的植生で 800 秒であった。植生を入れることにより計算時間が 40 秒程度増加しており、植生部分の計算時間は全計算時間の 5%程度である。裸地計算についての土壌表面熱収支を Fig. 8-1 に、仮想的植生計算についての植生を含めた地表面熱収支を Fig. 8-2 に、その内訳である土壌表面熱収支及び植生層熱収支をそれぞれ Fig. 8-3 及び Fig. 8-4 に示す。

裸地土壌表面の熱収支 (Fig. 8-1) については、日変化に関して次のような特徴が見られる。放射収支に対して地中への熱伝導は数時間先にピークに達し、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。また、日数が経過するとともに土壌が乾燥し、潜熱輸送が減少し顕熱輸送が増加する傾向も再現されている。

仮想的な植生での植生層を含めた地表面の熱収支 (Fig. 8-2) では、各熱輸送量のピーク時刻のずれについては地中への熱伝導では裸地土壌と同様な傾向が見られるが、ずれ幅が小さくなっている。顕熱及び潜熱輸送については、放射収支のピークとほぼ同時である。この説明は、土壌表面の熱収支 (Fig. 8-3) と植生層の熱収支 (Fig. 8-4) に分けて見るとわかり易い。土壌表面では顕熱輸送と潜熱輸送がほとんどなく、植生層を透過してきた放射に対して地中への熱伝導と釣り合うようになる。これは、土壌が熱交換を行なう植生層大気が植生の存在により風速が小さくなり、植生からの顕熱及び潜熱輸送により高温多湿になっていることで、顕熱及び潜熱輸送が抑制されることが原因と考えられる。一方、植生層では、夜間の凝結及びそれにより形成された葉面水滴の蒸発による潜熱輸送が僅かにあるが、葉面が吸収した放射は顕熱輸送と蒸散による潜熱輸送の合計に釣り合っている。これは、モデルでは植生には熱容量及び幹を通しての熱伝導がないと仮定しているので、葉面が吸収した放射は即座に大気への顕熱及び潜熱輸送に変換されるからである。また、裸地土壌では土壌の乾燥により潜熱輸送が日々減少していくのに対して、植生がある場合に潜熱輸送はむしろ増加している。計算を行なった期間は太陽高度が日々高くなるので、日射量の増加により蒸散が活発になったと考えられる。

以上の計算結果は、モデル構築の際に想定した過程をよく再現しており、計算コードが設計通りに構築されていると考えられる。ここでは仮想的な植生での計算を実施したが、モデルの妥当性を検証するためには、実際の植生地を対象として測定された実データとの比較を行なう必要がある。

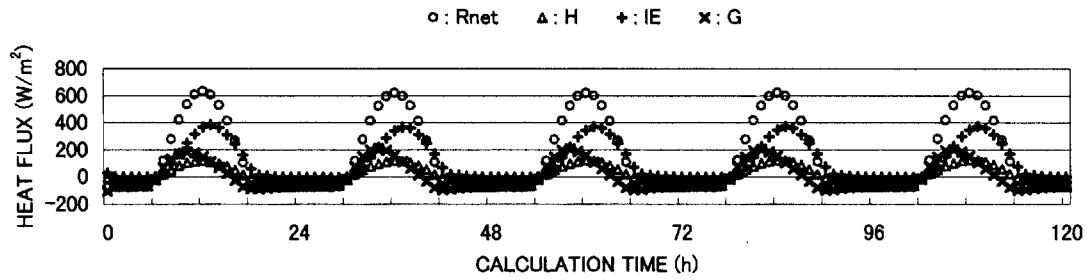
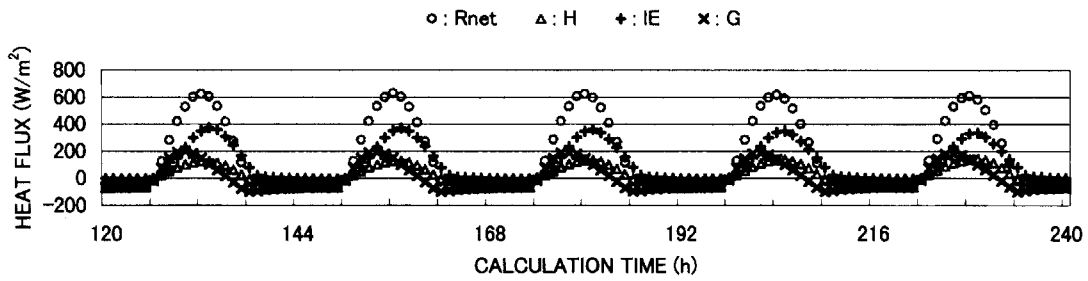


Fig. 8-1 Temporal changes of heat fluxes at ground surface for the bare soil calculation. Rnet: net radiation, H: sensible heat flux, IE: latent heat flux, G: heat conduction to the ground.

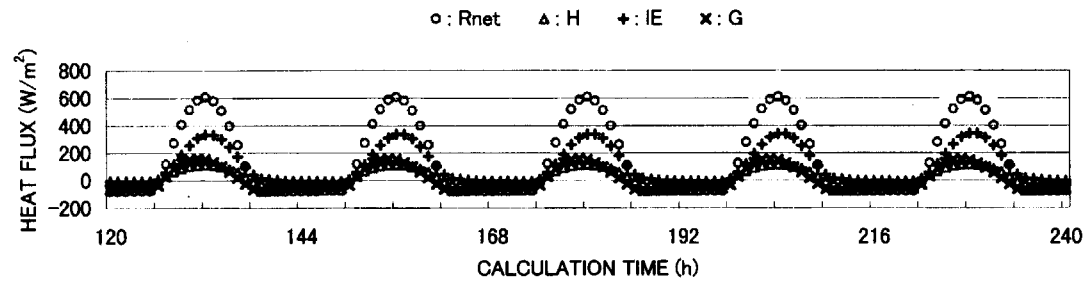
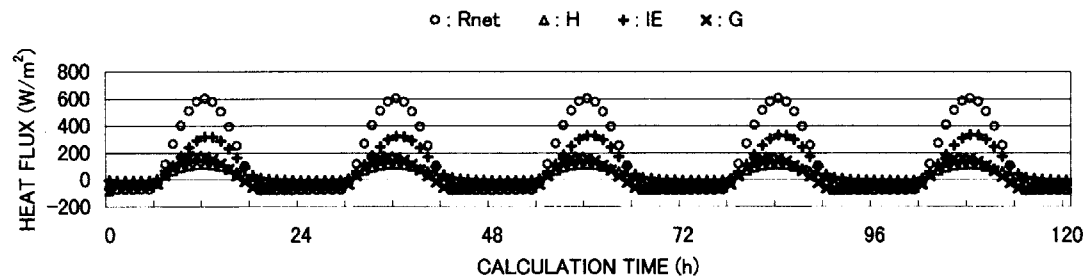


Fig. 8-2 Temporal changes of heat fluxes at ground surface (including vegetation) for the vegetated surface calculation. Rnet: net radiation, H: sensible heat flux, IE: latent heat flux, G: heat conduction to the ground.

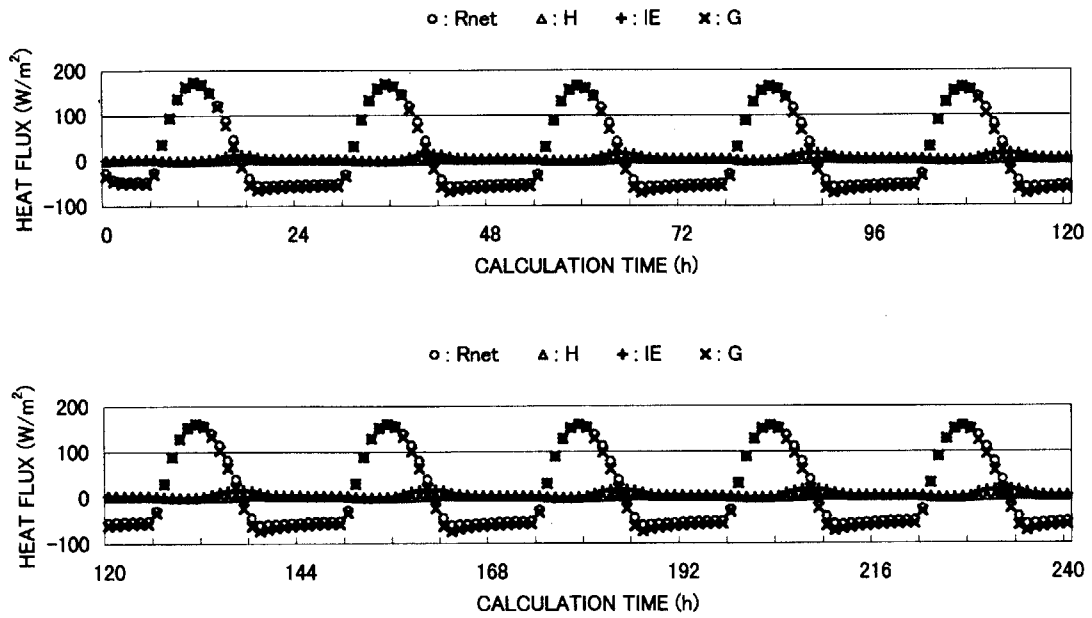


Fig. 8-3 Temporal changes of heat fluxes at ground surface for the vegetated surface calculation. Rnet: net radiation, H: sensible heat flux, IE: latent heat flux, G: heat conduction to the ground.

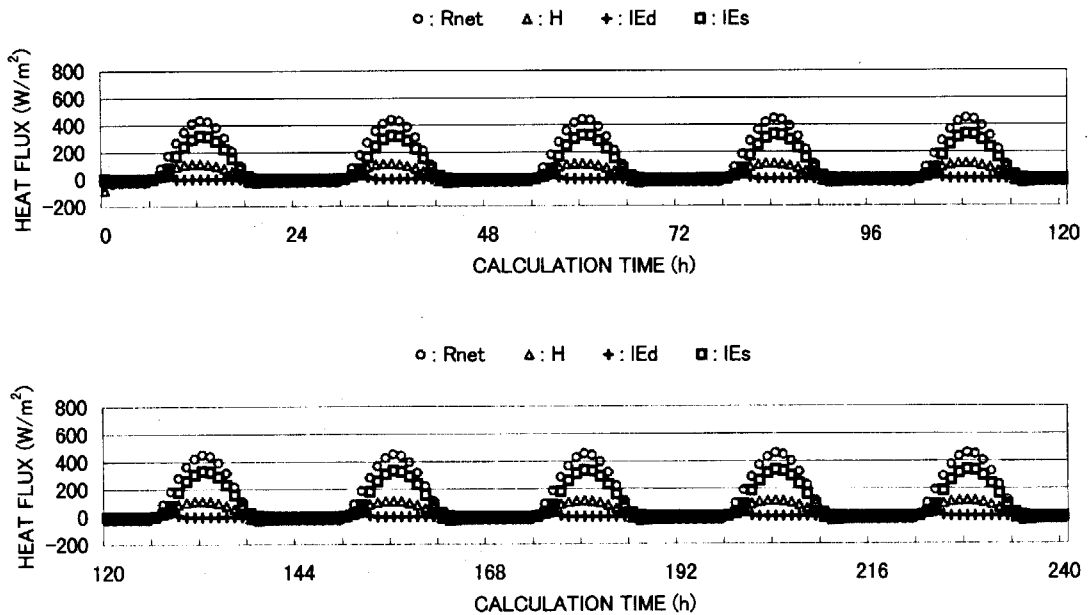


Fig. 8-4 Temporal changes of total heat fluxes from vegetation to the atmosphere for the vegetated surface calculation. Rnet: net radiation, H: sensible heat flux, IEd: latent heat flux by evaporation from leaf surface liquid water, IEs: latent heat flux by transpiration.

## 2) 解析計算

予報計算の出力 (METout) を用いて作成した気象条件で解析計算を実施した。原研の共用 UNIX サーバー AP3000 での CPU 時間は植生なしで 340 秒、仮想的植生で 380 秒であった。予報計算との計算時間の差は、植生なしと仮想的植生どちらも 420 秒であり、予報計算では解析計算で行わない上層大気部分に半分以上の計算時間を費やしていることがわかる。

予報計算で結果を示した各熱輸送量について、予報計算に対する解析計算のずれの範囲、ずれの平均及び Root Mean Square Error (RMSE) を裸地計算は Table 8-1 に、仮想植生計算は Table 8-2 にまとめた。裸地計算では、潜熱輸送と地中への熱伝導で計算結果のずれが大きく、最大のずれは地中への熱伝導で  $8.55 \text{ W/m}^2$  異なっている。また、解析計算は、放射収支、顕熱輸送及び潜熱輸送は過小評価、地中への熱伝導は過大評価する傾向が僅かではあるが見られる。一方、仮想植生計算では、放射収支と顕熱輸送のずれが大きく、顕熱輸送が最大で  $8.83 \text{ W/m}^2$  異なっている。また、解析計算は、放射収支及び顕熱輸送で過大評価、潜熱輸送及び地中への熱伝導で過小評価する傾向がある。このようなずれの傾向はあるが全体的には僅であり、予報計算と解析計算の結果は一致していると思なすことができる。

この結果から、測定された風速、気温、湿度等の大気変数を入力として解析計算を行なうことで、土壌及び植生層過程についての検証を実施できると考えられる。

Table 8-1 Comparison of heat fluxes between prediction calculation and analysis calculation for bare soil. Error range, average error, and root mean square error (RMSE) are summarized.

Item	Error range ( $\text{W/m}^2$ )	Average error ( $\text{W/m}^2$ )	RMSE ( $\text{W/m}^2$ )
Net radiation	-1.73~0.83	-0.36	0.638
Sensible heat flux	-2.41~2.07	-0.31	0.922
Latent heat flux	-5.06~6.90	-0.10	2.225
Heat conduction to the ground	-8.55~6.82	0.06	2.858

Table 8-2 Same as Table 8-1, but calculations for vegetated surface.

Item	Error range ( $\text{W/m}^2$ )	Average error ( $\text{W/m}^2$ )	RMSE ( $\text{W/m}^2$ )
Net radiation	-0.42~6.01	2.50	3.072
Sensible heat flux	-1.18~8.83	3.11	4.227
Latent heat flux	-6.16~2.01	-0.26	1.675
Heat conduction to the ground	-2.53~1.75	-0.36	1.142

## 9. まとめ

本報告は、大気-土壌-植生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うちコード化を行なった1次元モデルの内容をまとめたものである。

本モデルは、計算の対象としている大気、土壌及び植生についてそれぞれ独立したモデルを持ち、各系間の境界条件、または運動量、熱及び水分の交換量を介して各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。大気モデルの拡張機能は、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。土壌モデルは、土壌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壌中物理過程としては、土壌中の熱伝導、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、大気との顕熱及び潜熱の交換、降水及び水の溜まりを考慮している。植生モデルは、植生を含む大気層を土壌と同じく厚みのある複数の層に分割し、各層内の葉面の温度及び水滴量、各層を鉛直方向に通過する水滴量の時間変化を計算するモデルである。葉面での物理過程としては、日射及び長波放射の吸収、反射、射出及び透過、大気との顕熱交換、気孔からの蒸散、葉面水滴からの蒸発及び凝結による葉面水滴形成、降水の遮断、霧水の捕捉及び大気との運動量交換を考慮している。大気モデルと土壌モデルを結合するための地表面境界条件では、顕熱、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の試験として、晴天日が続く土壌が乾燥していく過程について 10 日間の計算を行なった。地表面の熱収支及び植生層の熱収支時間変化から、モデル計算は妥当なものであることが示された。また、解析計算については、予報計算の出力を入力気象条件として用いて計算を行い、結果が予報計算と一致することを確認した。今後、実測値を用いての再現計算により、モデルの検証を行なう予定である。

## 参 考 文 献

- 1) 山澤弘実、永井晴康：大気－裸地 1 次元モデルの開発、JAERI-Data/Code 97-041、(1997).
- 2) Pielke, R. A.: "Mesoscale meteorological modeling", Academic Press, (1984).
- 3) Clapp, R. and G. Hornberger: Empirical equations for some soil hydraulic properties, *Water Resour. Res.*, **14**, 601-604, (1978).
- 4) 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).
- 5) 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).
- 6) 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).
- 7) Yasuda, N.: Turbulent diffusivity and diurnal variations in the atmospheric boundary layer, *Boundary-Layer Meteor.*, **43**, 209-221, (1988).
- 8) Kanemasu, E. T., L. R. Stone and W. L. Powers: Evapotranspiration model tested for soybean and sorghum, *Agronomy J.*, **68**, 569-611, (1976).
- 9) Deardorff, J. W.: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation, *J. Geophys. Res.*, **83**, 1889-1903, (1978).
- 10) Stephens, G. L.: Radiation profiles in extended water clouds II Parameterization schemes, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 2123-2132, (1978).
- 11) 山澤弘実：1 次元気象モデルの開発 (PHYD1V3) 、JAERI-M 90-128、(1990).
- 12) 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).

付録 SOLVEG により標準的に出力される項目

以下の記述で（プロファイル）とあるものは、1時刻の複数項目を表形式で出力したものである。その他のファイルは、1時刻分を1行に出力したものである。単位および詳細な定義については、本文中の関連箇所を参照。

ファイル名	機番	内容
mnout	21	（プロファイル） 地方標準時、計算開始後時間、安定度長、バルク係数 大気第1,2層の風速および温位、 土壌全層の温度、体積含水率、比湿、土壌内蒸発量、根による吸い上げ
TSout	30	地方標準時、計算開始後時間、大気第1層温位、土壌表面温度、土壌第1層温度、...、土壌最深層温度
HWout	31	地方標準時、計算開始後時間、大気第1層温位、土壌表面含水率、土壌第1層含水率、...、土壌最深層含水率
QSout	33	地方標準時、計算開始後時間、大気第1層比湿、土壌表面比湿、土壌第1層比湿、...、土壌最深層比湿
EBout	34	地方標準時、計算開始後時間、大気第1層比湿、土壌表面蒸発量（単位地表当たり）、土壌第1層蒸発量（単位体積当たり）、...、土壌最深層蒸発量
SFout	36	計算開始後時間、土壌表面温度、日射量、大気放射量、放射収支量、顕熱量、潜熱量、地表伝導熱量
VGout	50	（プロファイル） 地方標準時、計算開始後時間 格子番号、高度、下向日射 <sup>1)</sup> 、上向日射 <sup>1)</sup> 、上向放射 <sup>1)</sup> 、下向放射 <sup>1)</sup> 、葉面温度、葉面からの顕熱 <sup>2)</sup> 、葉面水滴蒸発潜熱 <sup>2)</sup> 、蒸散潜熱 <sup>2)</sup> 、降水冷却 <sup>2)</sup>
VWout	51	（プロファイル） 地方標準時、計算開始後時間 格子番号、高度、液体水フラックス <sup>2)</sup> 、葉面水滴量、滴下量 <sup>2)</sup> 、蒸散潜熱 <sup>2)</sup> 、葉面水滴蒸発量 <sup>2)</sup> 、蒸散量 <sup>2)</sup>
VAout	52	（プロファイル） 地方標準時、計算開始後時間 格子番号、高度、風速U成分、風速V成分、風速W成分、キャノピー内気温、（同左）比湿、（同左）霧水量
VTout	53	地方標準時、計算開始後時間、キャノピー全層放射収支 <sup>3)</sup> 、（同左）顕熱 <sup>3)</sup> 、（同左）葉面水滴蒸発潜熱 <sup>3)</sup> 、（同左）蒸散潜熱 <sup>3)</sup> 、（同左）降水冷却 <sup>3)</sup>
METout	60	YYMMDD, HHMMSS, 第NA層の諸量：高度、地表面気圧、地衡風(U,V)成分、日射量、大気放射量、降水量、風速(U,V)成分、温位、比湿、液体水分量

1)単位地表面当たりの鉛直フラックス。2)単位葉面積当たりの交換量等。3)単位地表面当たりという点では1)と同様であるが、鉛直フラックスではない量。



# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射線量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10<sup>-19</sup>J

1 u=1.66054×10<sup>-27</sup>kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オンGSTローム	A
バー	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10<sup>-10</sup>m

1 b=100fm=10<sup>-28</sup>m<sup>2</sup>

1 bar=0.1MPa=10<sup>5</sup>Pa

1 Gal=1cm/s<sup>2</sup>=10<sup>-2</sup>m/s<sup>2</sup>

1 Ci=3.7×10<sup>10</sup>Bq

1 R=2.58×10<sup>-4</sup>C/kg

1 rad=1cGy=10<sup>-2</sup>Gy

1 rem=1cSv=10<sup>-2</sup>Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C関係理事會指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>)=10P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m<sup>2</sup>/s=10<sup>4</sup>St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 <sup>1</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 <sup>-4</sup>	1.35951×10 <sup>-3</sup>	1.31579×10 <sup>-3</sup>	1	1.93368×10 <sup>-2</sup>
	6.89476×10 <sup>-3</sup>	7.03070×10 <sup>-2</sup>	6.80460×10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813×10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150×10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407×10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487×10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082×10 <sup>19</sup>
	3.6×10 <sup>6</sup>	3.67098×10 <sup>5</sup>	1	8.59999×10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522×10 <sup>6</sup>	2.24694×10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279×10 <sup>-6</sup>	1	3.96759×10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272×10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072×10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515×10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616×10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506×10 <sup>-3</sup>	1	8.46233×10 <sup>18</sup>
	1.60218×10 <sup>19</sup>	1.63377×10 <sup>20</sup>	4.45050×10 <sup>26</sup>	3.82743×10 <sup>20</sup>	1.51857×10 <sup>22</sup>	1.18171×10 <sup>19</sup>	1

1 cal= 4.18605J (計量法)  
 = 4.184J (熱化学)  
 = 4.1855J (15°C)  
 = 4.1868J (国際蒸気表)  
 仕事率 1 PS(馬力)  
 = 75 kgf·m/s  
 = 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 <sup>-11</sup>
	3.7×10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

大気—土壤—植生—次元モデルの開発