

JAERI-M
90-128

1次元気象モデルの開発
(PHYD1V3)

1990年8月

山澤 弘実

JAERI-M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。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

1次元気象モデルの開発
(PHYDIV3)

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

山澤 弘実

(1990年7月12日受理)

本報告は、SPEEDIの高精度化研究の中で開発された1次元気象モデルPHYDIV3のモデル内容、数値解法、コード内容及び使用方法をまとめたものである。

本モデルは、地上から数 km 程度の気層及び1日程度の時間スケールを対象とし、風速、温位、乱流及びこれらの諸量から計算される気安定度、拡散係数の鉛直分布の予測計算を行う。モデルの中心となる予報方程式は、水平風速2成分と温位に関するものである。乱流輸送量については、Mellor-Yamadaの2次オーダー乱流クロージャーマデルを用いている。また、地中熱伝導方程式、地表面熱収支式、日射量計算モデル、気放射量計算モデル、気放射量計算モデルも組み込まれている。予報方程式は、Crank-Nicolson陰解法を用いて解かれる。

計算は、ある程度の制限の範囲内であれば、パラメータファイルに必要なパラメータを設定するだけで実行することができる。この制限を越えた計算を行う場合にはコードの修正が必要である。想定される計算仕様に対するコードの修正方法についての解説を行った。

Development of a One-Dimensional Atmospheric Model
(PHYD1V3)

Hiromi YAMAZAWA

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

(Received July 12, 1990)

A one-dimensional atmospheric model PHYD1V3 was developed in the study of high performance SPEEDI development. This report contains description of the model and methods of numerical solution as well as description and usage of the model code.

The present model covers the atmospheric layer with the vertical spatial scale of several kilometers and the temporal scale of one day. The objective items of the model are the horizontal wind velocity, the potential temperature and turbulence quantities as well as the relative quantities such as the atmospheric stability and the turbulence diffusivity. The model consists of prognostic equations for the wind velocity and the potential temperature, a second-order turbulence closure model by Mellor-Yamada, a ground surface heat budget equation, a soil layer heat conduction equation and models of solar radiation and atmospheric radiation. The solution method employed for the prognostic equations is Crank-Nicolson implicit method.

Model calculations can be performed only by setting relevant values to a parameter file. This usage has certain limitation. To perform calculations beyond the limitation, slight modification of the code is necessary. Explanations of code modification for possible model calculations were presented.

Keywords: Atmospheric Model, Numerical Solution Method, Simulation, Code, Turbulence Closure, Wind, Atmospheric Stability, Diffusivity

Contents

1. Introduction	1
2. Model	1
2.1 Outline of model	1
2.2 Basic equations	2
2.3 Turbulence closure model	3
2.3.1 Level 2.0 model	3
2.3.2 Level 2.5 model	4
2.4 Surface layer and boundary conditions	6
3. Numerical solution method	9
3.1 Grid points	9
3.2 Solution method for prognostic equations	9
3.3 Turbulence closure model level 2.0	12
3.4 Ground surface temperature	12
4. Code	13
4.1 Module structure	13
4.2 Constants and variables	14
4.3 Functions of modules	15
5. Usage of code	18
5.1 Outline	18
5.2 Calculation parameters	19
5.3 Methods of code modification	21
5.3.1 Modification of initialization function	21
5.3.2 Temporal change of calculation parameters	22
6. Summary	23
References	24

目 次

1. はじめに	1
2. モデル	1
2.1 概要	1
2.2 基本方程式	2
2.3 乱流クロージャーマデル	3
2.3.1 レベル 2.0 モデル	3
2.3.2 レベル 2.5 モデル	4
2.4 接地層の扱いと境界条件	6
3. 数値解法	9
3.1 格子点	9
3.2 予報方程式の解法	9
3.3 乱流クロージャーマデルレベル 2.0	12
3.4 地表面温度	12
4. 計算コード	13
4.1 構成	13
4.2 定数及び変数	14
4.3 モジュールの機能	15
5. 使用方法	18
5.1 概要	18
5.2 計算パラメータ	19
5.3 コードの修正方法	21
5.3.1 初期化に関する修正	21
5.3.2 計算パラメータの時間変化の考慮	22
6. まとめ	23
参考文献	24

1. はじめに

原子力施設を対象とした緊急時環境影響予測システム (SPEEDI: System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information)¹⁾ は、事故時に大気中に放出される放射性物質の大気中の拡散及び公衆への被ばくを実時間で予測するシステムである。放射性物質の大気拡散を評価する上で風速場及び乱流場の高精度予測が不可欠である。SPEEDIの風速場モデル (WIND04)²⁾ は観測された風を入力とした客観解析モデルであるため、予測精度は風の観測密度に大きく依存する。しかし、現在の地上風を中心とした観測網からのデータはSPEEDIの風速場モデルの入力データとしては必ずしも十分ではない。そこで、SPEEDIの高精度化研究では(1)少ない観測データから風速場及び乱流場の予測が可能であり、(2)数時間から1日程度先までの予報が可能である気象モデル (PHYSIC) の開発を行った^{3), 4)}。開発されたモデルは大気中の物理過程を表す予報方程式系からなり、これらを数値的に解くことにより風速3成分、温位(気温)等の平均量と、乱流拡散係数等の乱流諸量の3次元分布及びその時間変化を計算する。

上記3次元気象モデルの開発・改良の際に、個々の物理過程のモデル化及び数値計算方法のテストを行うための1次元気象モデル (PHYD1V3: PHYSIC, One-Dimensional, Version 3) を開発した。本モデルは、3次元モデル用のテストツールとしてだけでなく、風速、温位、乱流拡散係数等の鉛直分布の数値計算を行うためのモデルとして単体でも利用できる。そこで、計算コードの整理、計算条件設定の簡素化等を行い、利用し易い形にまとめた。本報告は、PHYD1V3のモデル内容、数値解法及びコード内容をまとめたものである。また、本モデルの利用の効率化を図るため、モデルの記述だけでなく使用方法及びコードの改良に必要となる情報も含めた。

2. モデル

2.1 概要

本モデルは主に大気界層に代表される空間スケールと日変化に代表される時間スケールを対象としている。予報方程式で扱われる物理量は、水平風速(2成分) u 及び v 、温位 θ 、乱流運動エネルギー $q^2/2$ 及び乱流長さスケール l である(2.2節参照)。これらの方程式に含まれる鉛直方向の乱流輸送量は、Mellor-Yamadaの2次オーダー乱流クロージャーモデル⁵⁾により計算される(2.3節参照)。比湿についての予報方程式は含まれていない。モデルから出力されるのは、上記の諸量及びそれらから計算される大気安定度、拡散係数等の1次元分布及びその時間変化である。

地面温度は、地表面熱収支式及び地中熱伝導方程式により計算される(2.4節参照)。熱収

1. はじめに

原子力施設を対象とした緊急時環境影響予測システム (SPEEDI: System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information)¹⁾ は、事故時に大気中に放出される放射性物質の大気中の拡散及び公衆への被ばくを実時間で予測するシステムである。放射性物質の大気拡散を評価する上で風速場及び乱流場の高精度予測が不可欠である。SPEEDIの風速場モデル (WIND04)²⁾ は観測された風を入力とした客観解析モデルであるため、予測精度は風の観測密度に大きく依存する。しかし、現在の地上風を中心とした観測網からのデータはSPEEDIの風速場モデルの入力データとしては必ずしも十分ではない。そこで、SPEEDIの高精度化研究では(1)少ない観測データから風速場及び乱流場の予測が可能であり、(2)数時間から1日程度先までの予報が可能である気象モデル (PHYSIC) の開発を行った^{3), 4)}。開発されたモデルは大気中の物理過程を表す予報方程式系からなり、これらを数値的に解くことにより風速3成分、温位(気温)等の平均量と、乱流拡散係数等の乱流諸量の3次元分布及びその時間変化を計算する。

上記3次元気象モデルの開発・改良の際に、個々の物理過程のモデル化及び数値計算方法のテストを行うための1次元気象モデル (PHYD1V3: PHYSIC, One-Dimensional, Version 3) を開発した。本モデルは、3次元モデル用のテストツールとしてだけでなく、風速、温位、乱流拡散係数等の鉛直分布の数値計算を行うためのモデルとして単体でも利用できる。そこで、計算コードの整理、計算条件設定の簡素化等を行い、利用し易い形にまとめた。本報告は、PHYD1V3のモデル内容、数値解法及びコード内容をまとめたものである。また、本モデルの利用の効率化を図るため、モデルの記述だけでなく使用方法及びコードの改良に必要となる情報も含めた。

2. モデル

2.1 概要

本モデルは主に大気界層に代表される空間スケールと日変化に代表される時間スケールを対象としている。予報方程式で扱われる物理量は、水平風速(2成分) u 及び v 、温位 θ 、乱流運動エネルギー $q^2/2$ 及び乱流長さスケール l である(2.2節参照)。これらの方程式に含まれる鉛直方向の乱流輸送量は、Mellor-Yamadaの2次オーダー乱流クロージャーモデル⁵⁾により計算される(2.3節参照)。比湿についての予報方程式は含まれていない。モデルから出力されるのは、上記の諸量及びそれらから計算される大気安定度、拡散係数等の1次元分布及びその時間変化である。

地面温度は、地表面熱収支式及び地中熱伝導方程式により計算される(2.4節参照)。熱収

支計算で必要となる日射量については、地方時、雲量、可降水量及び大気混濁係数の関数として計算するモデルが組み込まれている。但し、可降水量は一般に得にくい量であるため、地上の比湿から推定する方式を用いている。また、下向きの大気放射量は有効水蒸気量、雲量及び地上付近の気温から計算される（2.4節参照）。

2.2 基本方程式

1次元モデルの支配方程式系は3次元のブシネスク近似プリミティブ方程式系（例えば、文献3の式(2)、(3)、(12)-(14))で水平微分 ($\partial/\partial x = \partial/\partial y = 0$) 及び鉛直風 $w = 0$ とすることにより得られる。

水平風速の予報方程式（運動方程式）は下式で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f(v - v_g) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -f(u - u_g) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

ここで、 $-fv_g$ 及び fu_g は水平圧力勾配、 f はコリオリパラメータである。3次元モデルでは水平圧力勾配は温位分布からモデル内部で計算される量であるが、1次元モデルでは計算条件として外部から与えられる。その際、一般場の地衡風速 (u_g, v_g) として与えられるのが一般的である。

温位の予報方程式（熱エネルギー保存方程式）は、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (3)$$

で与えられる。また、乱流運動エネルギー及び乱流長さスケール（方程式では q^2 との積で扱う）の保存式は下式で与えられる。

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + P_q + D_q, \quad (4)$$

$$\frac{\partial q^2 l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial q^2 l}{\partial z} \right) + P_l + D_l. \quad (5)$$

ここで、 P_q 及び P_l はシア生成量と浮力生成量の和を表す生成項、 D_q 及び D_l は粘性消散項であり、下式で与えられる。

$$P_q = 2K_M \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} - 2K_H \beta g \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (6)$$

$$P_l = l E_1 K_M \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} - l E_1 K_H \beta g \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (7)$$

$$D_q = -\frac{2q^3}{\Lambda_1}, \quad (8)$$

$$D_l = -\frac{q^3 l}{\Lambda_1} \left\{ 1 + E_2 \left(\frac{l}{kz} \right)^2 \right\}. \quad (9)$$

但し、 β は空気の体膨張率 (Θ^{-1}) である。

2.3 乱流クロージャーモデル

式(1)-(5)を閉じるためには、これらの式に含まれる鉛直乱流輸送量(以下では輸送量と呼ぶ)を平均量で表す必要がある。本報告ではこれらの輸送量を(拡散係数) \times (平均量の勾配)の形で表すことにする。これに関して本モデルではMellor-Yamadaの2次オーダー乱流クロージャーモデル⁵⁾を用いている。Mellor-Yamadaの乱流クロージャーモデルは近似の程度によりレベル1からレベル4に分けられるが、本モデルでは初期条件設定用にレベル2を用い、通常の計算ではHelfand-Labraga⁶⁾により改良されたレベル2.5を用いている。

乱流クロージャーモデルで用いられる長さスケール $\Lambda_1, \Lambda_2, l_1, l_2$ 及び定数は下式で定義される。

$$(l_1, l_2, \Lambda_1, \Lambda_2) = (A_1, A_2, B_1, B_2) l, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, E_1, E_2) \\ = (0.92, 0.74, 16.6, 10.1, 0.08, 1.8, 1.33). \end{aligned} \quad (11)$$

2.3.1 レベル2.0モデル

レベル2.0では、全ての2次の乱流統計量は時間変化項、輸送項等を含まない代数方程式系で表される⁵⁾。乱流運動エネルギーは生成項と粘性消散項の局所平衡を仮定して得られる。即ち、式(4)で時間変化項及び輸送項を無視し、式(6)と(8)を代入することにより、

$$\frac{q^3}{\Lambda_1} = K_M \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} (1 - Rf), \quad (12)$$

を得る。ここで、 Rf はフラックスリチャードソン数と呼ばれ、乱流運動エネルギーの(浮力生成) / (シア-生成)を表す無次元量であり、リチャードソン数 Ri を用いて下式で定義される。

$$\begin{aligned} Rf &= \left(\beta g K_H \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) \left[K_M \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} \right]^{-1} \\ &= \frac{K_H}{K_M} Ri, \end{aligned} \quad (13)$$

$$Ri = \beta g \frac{\partial \Theta}{\partial z} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}^{-1} \quad (14)$$

乱流拡散係数 K_M 、 K_H は2次の乱流統計量に関する代数方程式系を整理することにより、

$$K_M = l q \bar{S}_M, \quad (15)$$

$$K_H = l q \bar{S}_H, \quad (16)$$

が得られる。ただし、

$$\tilde{S}_M = 3A_1(\gamma_1 - \gamma_2\Gamma) \{ \gamma_1 - C_1 - (6A_1 + 3A_2)\Gamma/B_1 \} (\gamma_1 - \gamma_2\Gamma + 3A_1\Gamma/B_1)^{-1}, \quad (17)$$

$$\tilde{S}_H = 3A_2(\gamma_1 - \gamma_2\Gamma), \quad (18)$$

$$\gamma_1 = 1/3 - 2A_1/B_1,$$

$$\gamma_2 = (B_2 + 6A_1)/B_1,$$

$$\Gamma = Rf/(1-Rf).$$

ここで、式(10)、(11)、(15)–(18)を式(13)に代入することにより Rf は Ri の関数として表される。

$$Rf = 0.659 \{ Ri + 0.178 - (Ri^2 - 0.322Ri + 0.0316)^{1/2} \}. \quad (19)$$

接地層を対象とした観測及び理論的研究によると、強安定時に Ri (又は Rf) は安定度の増加に対し単調には増加せず 0.2 程度の上限值 (臨界リチャードソン数) を持つことが知られている (例えば、文献7)。式(15)及び(16)では S_M 、 S_H は Rf の増加とともに単調に減少し、 $Rf = 0.191$ で $S_M = S_H = 0$ となる。そこで、本モデルでは Rf の上限値として 0.191 を設定している。また、式(14)からわかるように、Ri は平均量 (水平風速及び温位) の鉛直分布から計算できる量である。

長さスケール l は、Blackader の式

$$l = kz(1 + kz/l_0)^{-1}, \quad (20)$$

を用いて計算する。ここで、 l_0 は下式で定義される。

$$l_0 = \alpha \int_0^\infty zqdz \left(\int_0^\infty qdz \right)^{-1}, \quad \alpha = 0.01 \quad (21)$$

従って、 q 及び l の鉛直分布を各々独立に決めることはできなく、式(12)–(21)を同時に満たすように決定する必要がある。この問題を整理すると、まず l_0 に関する方程式

$$\int_0^\infty \frac{kz(l_0 - \alpha z)}{l_0 + kz} \left[\tilde{S}_M \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} - \beta g \tilde{S}_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right]^{1/2} dz = 0. \quad (22)$$

により l_0 を決定し、次に式(20)により l の鉛直分布を求める。 q は求まった l の分布により式(12)を用いて計算される (3.3 節参照)。以上に示されたようにレベル 2.0 は完全に診断的 (diagnostic) なモデルであり、与えられた風速分布及び温位分布から乱流場を計算することができる。従って、PHYD1V3 では初期条件として与えられた風速分布及び温位分布から乱流場の初期分布を計算するためにレベル 2.0 を用いている。

2.3.2 レベル 2.5 モデル

レベル 2.5 は、乱流運動エネルギーを式(4)を用いて評価する点でレベル 2.0 と異なる。また、本モデルでは乱流長さスケールについても式(4)の類似から導出された予報方程式式

(5)⁵⁾を用いている。従って、レベル2.5では乱流運動エネルギーの局所的な生成・消散だけでなく時間変化及び輸送を考慮できる点が特徴である。この様な特徴は1次元モデルでは顕著に現れないが、3次元モデルの場合海風前線周辺の乱流エネルギーの移流により特徴づけられる乱流場の再現に不可欠である。一方、予報方程式の数が増すことによる計算コストの増加という欠点もある。

乱流輸送量のクローズは、乱流運動エネルギーの方程式を除いてレベル2.0と同様に2次の乱流統計量に関する代数方程式系⁵⁾を整理することにより、

$$K_M = \frac{l_1 q^3 [q^2(1-3c_1) + G_2 \{ (\Lambda_2 - 3l_2) - 3c_1(4l_1 + \Lambda_2) \}]}{q^4 + G_1 l_1 q^2 + 3l_1 G_2 \{ q^2(7 + \Lambda_2/l_1) + G_1(\Lambda_2 - 3l_2) + 3G_2(4l_1 + \Lambda_2) \}}, \quad (23)$$

$$K_H = \frac{l_2 q^3 - l_2 G_1 K_M}{q^2 + G_2(4l_1 + \Lambda_2)}, \quad (24)$$

$$G_1 = 6l_1 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\},$$

$$G_2 = 3l_2 \beta g \frac{\partial \theta}{\partial z},$$

また、 K_q は下式で与えられる。

$$K_q = K_l = s_q q l, \quad s_q = 0.2, \quad (25)$$

以上のレベル2.5モデルでは、乱流運動エネルギー以外の2次オーダーの乱流統計量について近等方性を仮定して時間変化項、移流項、輸送項（以下ではこの3項を非等方項と呼ぶことにする）を無視することにより代数方程式系を導出している。この仮定は乱流が減衰する午後遅くから夜にかけては正しい仮定であると考えられるが、午前中から正午過ぎまでの乱流発達時には現実的でない。Helfand-Labrugaはこの問題点に関し、温位変動の分散の非等方項は乱流運動エネルギーの非等方項に比例しその比は各々の生成項の比に等しいとして、温位変動の分散に関する方程式でこれらの項を考慮に入れ非現実的な振舞いのないモデルを導出した⁶⁾。本モデルでは、Helfand-Labrugaのモデル及び式(5)による長さスケールを併用し、以下に示す方法で乱流輸送項をクローズする。

以下の全ての場合で乱流長さスケールは式(5)により計算するものとする。まず、式(12)を用いて局所的な生成・消散の平衡状態を仮定した乱流運動エネルギー q_e を計算する。この量は乱流運動エネルギー及び温位変動の分散の局所的な生成量を代表する量と考えることができる。またこれとは別に、式(4)により q を計算する。これは時間変化項等の全ての項がつり合った状態での乱流運動エネルギーであり、粘性消散項が q^3/Λ_1 で表されることから、粘性消散項を代表する量と考えられる。ここで、 q_e と q を比較し、以下の2つの場合に分ける。 $q > q_e$ の場合は減衰しつつある乱流であり、式(23)、(24)を適用する。一方、 $q < q_e$ の場合は発達しつつある乱流であり、局所的にみると(生成項) \gg (粘性消散項)となっている。この場合、Helfand-Labrugaの方法に従い、

$$K_M = \frac{q^2}{q_e} l \tilde{S}_M \quad (26)$$

$$K_H = \frac{q^2}{q_e} l \tilde{S}_H \quad (27)$$

を用いて乱流拡散係数を計算する。

2.4 接地層の扱いと境界条件

モデルの大気部分の最下層は接地層内に設定する。従ってモデル大気最下層と地表面との間の運動量交換量（抵抗） τ_x 及び τ_y ，顕熱交換量 H ，潜熱交換量（地表面からの蒸発または地表面への凝結） $l_w E$ は接地層内の Monin-Obukhov 相似則（例えば文献 7）を用いて表すことができる。 z_1 はモデル大気第 1 層（最下層）の地上高，添え字の 0 は地表面での値を表すとして，

$$(\tau_x, \tau_y) = \rho C_M |u_1| (u_1, v_1), \quad |u_1| = (u_1^2 + v_1^2)^{1/2} \quad (28)$$

$$H = -C_p \rho C_H |u_1| (\theta_1 - T_0) \quad (29)$$

$$l_w E = -l_w \rho \beta_w C_E |u_1| (q_{w1} - q_{w0}) \{q_{w1} - q_s(T_0)\} \quad (30)$$

ここで， C_p と ρ はそれぞれ空気 の 定 圧 比 熱 と 密 度 ， q_w は 比 湿 ， l_w は 水 の 蒸 発 の 潜 熱 ， β_w は 蒸 発 効 率 を 表 す 係 数 で 有 る 。 バ ル ク 係 数 C_D ， C_H ， C_E は 下 式 で 定 義 さ れ る 。

$$C_M = k^2 \{ \ln(z_1/z_0) + \psi_M(\xi_1) \}^{-2} \quad (31)$$

$$C_H = k^2 \{ \ln(z_1/z_0) + \psi_M(\xi_1) \}^{-1} \{ \ln(z_1/z_T) + \psi_H(\xi_1) \}^{-1} \quad (32)$$

$$C_E = k^2 \{ \ln(z_1/z_0) + \psi_M(\xi_1) \}^{-1} \{ \ln(z_1/z_q) + \psi_E(\xi_1) \}^{-1} \quad (33)$$

$$\psi_M(\xi) = \int_{\xi_0}^{\xi} \frac{\varphi_M(\xi') - 1}{\xi'} d\xi' \quad (34)$$

$$\psi_H(\xi) = \psi_E(\xi) = \int_{\xi_T}^{\xi} \frac{\varphi_H(\xi') - 1}{\xi'} d\xi', \quad z_T = z_q \quad (35)$$

ここで， k はカルマン定数（ $= 0.4$ ）， z_0 ， z_T ， z_q は各々風，温位，比湿に対する粗度長である。また，普遍関数（シア関数）は下式を用いた。

$$\varphi_M(\xi) = \begin{cases} (1-16.4\xi)^{-1/4} & \xi < 0 \\ 1+8\xi(1+\xi)^{-1} & \xi \geq 0, \end{cases} \quad (36)$$

$$\varphi_H(\xi) = \begin{cases} (1-16.4\xi)^{-1/2} & \xi < 0 \\ 1+8\xi(1+\xi)^{-1} & \xi \geq 0, \end{cases} \quad (37)$$

無次元安定度は下式で定義される安定度長 L を用いて $\zeta = z/L$, $\zeta_0 = z_0/L$, $\zeta_T = z_T/L$ で表される。

$$L = \frac{C_p \rho [(r_x^2 + r_y^2)^{1/2} / \rho]^3}{k \beta g H} \quad (38)$$

式 (28) は式 (1), (2) のモデル大気下端での境界条件として用いられる。また, 式 (29) は式 (3) の大気下端での境界条件として用いられる。ここで, 式 (29) の地表面温度 T_0 は地表面熱収支式により計算される。

$$(1-A)S + \epsilon L \downarrow - \epsilon \sigma T_0^4 = H + l_w E + G, \quad (39)$$

左辺第1項は水平地表面が吸収する日射量で A はアルビード (地表面の日射に対する反射率) である。第2項は下向きの大気放射 (赤外放射), 第3項は地表面からの赤外放射で ϵ は射出率である。地表面熱収支について模式的に表したのが Fig. 1 である。図中には関連する式番号を示してある。本モデルには比湿に関する予報方程式が含まれていないので, q_{w1} は外部から与える。 G は地表面での伝導熱で, 地中熱伝導方程式を解くことによって得られる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z_s} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial z_s} \right), \quad (40)$$

ここで, k_s は土の温度拡散係数である。本モデルでは日変化に代表される時間スケールを対象としているので, モデルで扱う土層の深さは数10cmで十分であり, その深さで一定温度の境界条件を与える。

式 (39) の日射量の計算方法³⁾ は以下のとおりである。まず, 水平面に入射する快晴日の全天日射量は下式により評価する。

$$S_0 = I_0 \cos \gamma (C_s + 0.7 \times 10^{-f_s \sec \gamma}) (1 - i_s) (1 + j_s), \quad (41)$$

$$f_s = 0.056 + 0.16 \beta_a^{1/2},$$

$$i_s = 0.014 (\sec \gamma + 7.0 + 2.0 x_r) x_r,$$

$$j_s = (0.066 + 0.34 \beta_a^{1/2}) (A - 0.15),$$

$$c_s = \begin{cases} 0.21 - 0.2 \beta_a, & \beta_a \leq 0.3 \\ 0.15, & \beta_a > 0.3, \end{cases}$$

$$x_r = \log_{10} w.$$

ここで, γ は太陽の天頂角, β_a は大気混濁係数, w は可降水量, I_0 は太陽常数である。大気混濁係数は0~0.4程度であり大気の濁りの程度から概略値を推定することができる (5.2節参照)。可降水量は, ラジオゾンデ観測による気温及び湿度の鉛直分布から計算される量であるため, ラジオゾンデ資料がない場合は正確な評価は困難である。しかし, 可降水量がファクター2で変わったとしても太陽高度が低い場合を除けば上式により評価される日射量の差は2~3%程度と日射量の可降水量に対する依存性は小さいので, 以下に示す推定式を用いて地上の露点温度 T_d から可降水量を評価する。

$$\log_{10} w = \begin{cases} 0.0350T_d - 0.031, & T_d < 18^\circ\text{C} \\ 0.0222T_d + 0.200, & T_d \geq 18^\circ\text{C} \end{cases} \quad (42)$$

露点温度は地上の比湿から計算する。この式は、日本国内及び近海上の多くのラジオゾンデ観測を基にして $-10^\circ\text{C} \leq T_d \leq 25^\circ\text{C}$ の露点温度範囲に対して得られた経験式である⁸⁾。最大でファクター 1.5 ~ 2 程度の誤差を含み得る。曇天時の日射量は式 (41) で計算される快晴日の日射量から下式で評価する。

$$S/S_0 = 1.70 \log_{10}(1.22 - 1.02x) + 0.521x + 0.846 \quad (43)$$

$$x = n - 0.4 \exp(-3n_1)$$

ここで、 n は全天曇量、 n_1 は中下層曇量である。Fig. 2 に式 (43) で計算される快晴日日射量に対する曇天日日射量の比 S/S_0 の全天曇量及び中下層曇量に対する依存性を示した。もともと式 (43) は日平均 (日積算) 日射量評価のための式であるが、本モデルでは瞬時値を計算するのに用いている。これは、日射量観測に見られるような中下層曇による急激な時間的変動を含む日射量よりは、それを均した日射量の方がモデルの入力として適しているからである。

下向きの大気放射量 L は以下に示す方法⁷⁾により評価する。快晴時 (O) 及び高層曇 (U)、中層曇 (M)、下層曇 (L) で全天が覆われている場合の射出率は下式で表される。

$$\frac{L \downarrow}{\sigma T_a^4} = \begin{cases} 0.91 + 0.03x_r, & \text{for L} \\ 0.87 + 0.05x_r + 0.03x_r^2, & \text{for M} \\ 0.82 + 0.09x_r + 0.05x_r^2, & \text{for U} \\ 0.73 + 0.20x_r + 0.06x_r^2, & \text{for O} \end{cases} \quad (44)$$

T_a は地上付近の気温である。曇量データから、全天のうち下層曇に覆われている部分の割合、下層曇がなく中層曇に覆われている部分の割合、中下層曇がなく高層曇に覆われている部分の割合、全く曇の無い部分の割合を各々求め、上式の評価結果をその割合に応じて荷重平均することにより下向きの大気放射量を求める。上式で用いる w は有効水蒸気量であるが、実用上可降水量と有効水蒸気量の差が問題になる程度の精度でこれらの値を推定することは困難であると考えられるため、本モデルでは両者は同じであると仮定して可降水量で代用することにする。可降水量は日射量と同様に地上比湿から推定する。

式 (4) 及び (5) のモデル大気下端での境界条件は、Monin-Obukhov の相似則に基づき Mellor-Yamada により導出された下式を用いる。

$$q^2 = B^{2/3} C_M |u|^2 \{ \varphi_M(\xi) - \xi \}^{2/3} \quad (45)$$

$$q^2 l = k z q^2. \quad (46)$$

モデル大気上端での境界条件は下式により与える。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad (47)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} = \Gamma_T, \quad (48)$$

$$q^2 = q^2 l = 0. \quad (49)$$

ここで、 Γ_T はモデル上端での温位勾配である。

3. 数 値 解 法

3.1 格子点

乱流拡散係数 K_M , K_H が平均量 u, v, Θ の格子の中央で定義されていると、式 (1)–(3) の乱流輸送項の差分化式を単純な形で表すことができる。従って、本コードでは3次元モデル³⁾と同様のスタッガードグリッドを用いる (Fig.3)。乱流統計量 (q^2 及び $q^2 l$) と平均量は鉛直方向に交互に定義される。また、地中温度を計算するための格子を設定する。

本報告では、格子点に関する記号等を以下のとおり定義する。格子点の地上高 z に図の中央に示したように番号をつける。平均量及び乱流統計量の格子番号は、各々 Fig.3 の左端及び右端の番号を用いる。添え字 N は大気上端での値を表す。温位は地表面での値 ($\Theta_0 = T_0$: 地表面温度) を持つ。また、 T_0 は地中温度 (T_1, \dots, T_{N_s}) の境界値でもある。格子点間隔 δz については以下の定義を用いる。

$$\delta z_n = \begin{cases} z_{2n} - z_{2n-2}, & \text{for } u, v \text{ and } \Theta, \\ z_{2n+1} - z_{2n-1}, & \text{for } q^2 \text{ and } q^2 l, \end{cases}$$

$$\delta z_{n+1/2} = \begin{cases} z_{2n+1} - z_{2n-1}, & \text{for } u, v \text{ and } \Theta, \\ z_{2n+2} - z_{2n}, & \text{for } q^2 \text{ and } q^2 l, \end{cases}$$

地中の格子点間隔に関しては、Fig.3 の番号付けに基づき、

$$\delta z_{s, n+1/2} = z_{s, n+1} - z_{s, n}$$

を用いる。

3.2 予報方程式の解法

予報方程式で扱う従属変数 (水平風速 u 及び v , 温位 Θ , 乱流運動エネルギー $q^2/2$ 及び乱流長さスケール l) を代表して ϕ で表すと、式 (1)–(5) は下記の一般形で表すことができる。

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} = \Gamma_T, \quad (48)$$

$$q^2 = q^2 l = 0. \quad (49)$$

ここで、 Γ_T はモデル上端での温位勾配である。

3. 数 値 解 法

3.1 格子点

乱流拡散係数 K_M , K_H が平均量 u, v, Θ の格子の中央で定義されていると、式 (1)–(3) の乱流輸送項の差分化式を単純な形で表すことができる。従って、本コードでは3次元モデル³⁾と同様のスタッガードグリッドを用いる (Fig.3)。乱流統計量 (q^2 及び $q^2 l$) と平均量は鉛直方向に交互に定義される。また、地中温度を計算するための格子を設定する。

本報告では、格子点に関する記号等を以下のとおり定義する。格子点の地上高 z に図の中央に示したように番号をつける。平均量及び乱流統計量の格子番号は、各々 Fig.3 の左端及び右端の番号を用いる。添え字 N は大気上端での値を表す。温位は地表面での値 ($\Theta_0 = T_0$: 地表面温度) を持つ。また、 T_0 は地中温度 (T_1, \dots, T_{N_s}) の境界値でもある。格子点間隔 δz については以下の定義を用いる。

$$\delta z_n = \begin{cases} z_{2n} - z_{2n-2}, & \text{for } u, v \text{ and } \Theta, \\ z_{2n+1} - z_{2n-1}, & \text{for } q^2 \text{ and } q^2 l, \end{cases}$$

$$\delta z_{n+1/2} = \begin{cases} z_{2n+1} - z_{2n-1}, & \text{for } u, v \text{ and } \Theta, \\ z_{2n+2} - z_{2n}, & \text{for } q^2 \text{ and } q^2 l, \end{cases}$$

地中の格子点間隔に関しては、Fig.3 の番号付けに基づき、

$$\delta z_{s, n+1/2} = z_{s, n+1} - z_{s, n}$$

を用いる。

3.2 予報方程式の解法

予報方程式で扱う従属変数 (水平風速 u 及び v , 温位 Θ , 乱流運動エネルギー $q^2/2$ 及び乱流長さスケール l) を代表して ϕ で表すと、式 (1)–(5) は下記の一般形で表すことができる。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \Delta \varphi + A\varphi + F \quad (50)$$

ここで右辺第1項は乱流輸送項を表し、 Δ は下式で定義される。

$$\Delta = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial}{\partial z}$$

K は K_M, K_H, K_Q 又は K_I を表すものとする。また、式(50)の右辺第2項は式(4)及び(5)の消散項に対応し、第3項は式(1)、(2)の外力項及び式(4)、(5)の生成項に対応する。本モデルで用いている解法は、一般にCrank-Nicolsonの陰解法と呼ばれるもので⁹⁾、 ϕ の右肩の括弧付添え字で時間ステップ数を表すとすると、

$$\frac{\varphi^{(i+1)} - \varphi^{(i)}}{\delta t} = \frac{1}{2} \Delta (\varphi^{(i+1)} + \varphi^{(i)}) + A\varphi^{(i+1)} + F, \quad (51)$$

により表現される。ここで δt は時間増分である。上式を時間ステップ i と $i+1$ の変数に分けて整理することにより下式を得る。

$$(1 - A\delta t - \frac{\delta t}{2} \Delta) \varphi^{(i+1)} = \frac{\delta t}{2} \Delta \varphi^{(i)} + \delta t F + \varphi^{(i)} \quad (52)$$

また、輸送項の空間差分は下式で与える。

$$(\Delta \varphi)_n = \frac{1}{\delta z_n} \left\{ \frac{K_{n+1/2}}{\delta z_{n+1/2}} (\varphi_{n+1} - \varphi_n) - \frac{K_{n-1/2}}{\delta z_{n-1/2}} (\varphi_n - \varphi_{n-1}) \right\}, \quad (53)$$

ただし、 ϕ の右下の添え字は格子点の番号を表している。式(52)に上式を代入すると、解くべき方程式は $\phi^{(i+1)}$ に関する連立方程式となり、その n 番目方程式は

$$a_{n,n-1} \varphi_{n-1}^{(i+1)} + a_{n,n} \varphi_n^{(i+1)} + a_{n,n+1} \varphi_{n+1}^{(i+1)} = \gamma_n \quad (54)$$

で表される。左辺の係数 $a_{i,j}$ は係数行列の i 行 j 列の要素で、この係数行列は3重対角行列になる。 n が1又は N 以外の場合の各係数は下式で表される。

$$a_{n,n-1} = -\frac{\delta t K_{n-1/2}}{2\delta z_n \delta z_{n-1/2}}$$

$$a_{n,n} = 1 - A\delta t - a_{n,n-1} - a_{n,n+1}$$

$$a_{n,n+1} = -\frac{\delta t K_{n+1/2}}{2\delta z_n \delta z_{n+1/2}}$$

$$\gamma_n = -\frac{\delta t}{2} (\Delta \varphi^{(i)})_n + \varphi_n^{(i)} + \delta t F$$

また、右辺の γ_n は全て時間ステップ i の変数のため $i+1$ の計算を行う場合は既知量として扱うことができる。

本コードでは、この連立方程式を直接消去法(Gauss消去法)により解く。対角成分 $a'_{i,j}$ が1であり、かつ、 $a'_{i,i-1} = 0$ となる係数行列 $A' = (a'_{i,j})$ を求めることにより、解くべき方程式は下式となる。

$$\varphi_n^{(i+1)} + \alpha'_{n,n+1} \varphi_{n+1}^{(i+1)} = \beta_n \quad (55)$$

ここで、 $\alpha'_{n,n+1}$ と β_n は

$$\alpha'_{n,n+1} = -\frac{\alpha_{n,n+1}}{\alpha_{n,n} - \alpha_{n,n-1} \alpha'_{n-1,n}} \quad (56)$$

$$\beta_n = -\frac{\gamma_n - \alpha_{n,n-1} \beta_{n-1}}{\alpha_{n,n} - \alpha_{n,n-1} \alpha'_{n-1,n}} \quad (57)$$

で表される。大気最下層の境界条件として、 $\alpha'_{1,2}$ と β_1 を与えることにより $\alpha'_{n,n+1}$ と β_n を順次計算し、次に大気上端で境界条件を与え順次後退代入を行い解 $\varphi^{(i+1)}$ を得る。

水平風速及び温位の大气最下層の境界条件は以下に示す方法で計算される。まず、式(1) - (3) の $n=1$ に対応する差分方程式の乱流輸送項で、地表面と第1層の間の輸送量は式(28)、(29)より、

$$\left(\frac{K_{1/2}}{\delta z_{1/2}} \right) (\varphi_1^{(i)} - \varphi_0^{(i)}) = C_x (\varphi_1^{(i)} - \varphi_0^{(i)}) |u_1^{(i)}|$$

と表すことができる。ここで C_x は、 ϕ が u 又は v の時 C_M を表し、 ϕ が Θ の時は C_H を表している。但し、 $u_0 = v_0 = 0$ である。これを、式(1) - (3) の $n=1$ に対応する差分方程式に代入することにより、下式を得る。

$$\alpha'_{1,2} = -\frac{1}{2DIV} \frac{\delta t}{2\delta z_1} \left(\frac{K_{3/2}}{\delta z_{3/2}} \right) \quad (58)$$

$$\beta_1 = -\frac{1}{DIV} \left\{ \varphi_1^{(i)} + \frac{\delta t}{2\delta z_1} \left\{ \left(\frac{K_{3/2}}{\delta z_{3/2}} \right) (\varphi_2^{(i)} - \varphi_1^{(i)}) - C_x |u_1^{(i)}| \varphi_1^{(i)} \right\} \right. \\ \left. + \frac{\delta t}{\delta z_1} C_x |u_1^{(i)}| \varphi_0^{(i)} \right\} \quad (59)$$

$$DIV = 1 + \frac{\delta t}{2\delta z_1} \left(\frac{K_{3/2}}{\delta z_{3/2}} + C_x |u_1^{(i)}| \right)$$

式(4)及び(5)の下部境界条件は、各々式(45)及び(46)で計算される値を β_1 に与え、また $\alpha'_{1,2} = 0$ とすることにより得られる。

モデル大気上端での境界条件は、鉛直勾配を与えるものと値そのものを与えるものの2種類に分類される。式(1) - (3) には前者が適用されており(式47, 48)、式(4)及び(5)には後者が適用されている(式49)。本コードでは、前者の計算式として下式を用いている。

$$\varphi_{N+1} = \frac{c(\delta z_{N+1/2} + \delta z_{N-1/2}) + \alpha'_{N-1,N} \beta_N + \beta_{N-1}}{1 - \alpha'_{N-1,N} \beta_N} \quad (60)$$

ここで、 c はモデル大気上端での鉛直勾配である。後者については、 ϕ_N に境界値をそのまま代入する。

3.3 乱流クロジャーマデルレベル 2.0

本コードでは、式(22)の解法としてNewton法を用いている。式(22)の左辺を $f(l_0)$ で表すと $f(l_0)$ の l_0 に関する微分は、

$$\frac{\partial f(l_0)}{\partial l_0} = \int_0^{\infty} \frac{kz^2(k+a)}{(l_0+kz)^2} F(z) dz \quad (61)$$

となる。ただし、

$$F(z) = \left\{ \tilde{S}_M \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|^2 - \beta g \tilde{S}_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right\}^{1/2}$$

は l_0 と独立であるため、これだけをNewton法の繰り返しとは別に事前に計算しておくことができる。 l_0 の初期値を $l_0^{(0)}$ で表し、Newton法で逐次計算される i 番目の l_0 を $l_0^{(i)}$ で表すと、本解法の初期値及び漸化式は下式で表される。

$$l_0^{(0)} = 5.0 \text{ m} \quad (62)$$

$$l_0^{(i+1)} = l_0^{(i)} - \frac{f(l_0^{(i)})}{f'(l_0^{(i)})} \quad (63)$$

収束条件は

$$\left| \frac{l_0^{(i+1)} - l_0^{(i)}}{l_0^{(i)}} \right| \leq 10^{-5}$$

を用いる。

3.4 地表面温度

3.2節と同様に本節でも時間ステップの番号(i 又は $i+1$)を変数の右肩に付けることとする。べき乗と時間ステップの番号を併用する場合は、時間ステップの番号を変数に直接付け、被べき乗数は括弧でくくることとする。式(39)の地表面熱収支式の地表面からの赤外放射量、顕熱フラックスと潜熱フラックスの和、及び地中伝導熱は下式で表される。

$$\varepsilon \sigma T_0^4 = \varepsilon \sigma \left\{ 4(T_0^{(i)})^3 T_0^{(i+1)} - 3(T_0^{(i)})^4 \right\} \quad (64)$$

$$-H - l_w E = r \left\{ \theta_1^{(i)} - T_0^{(i+1)} + \eta \beta_w \left\{ q_{w1} - q_s(T_0^{(i+1)}) \right\} \right\} \quad (65)$$

$$-G = c_s \rho_s k_s (T_1^{(i+1)} - T_0^{(i+1)}) / \delta z_{s,1/2} \quad (66)$$

$$q_s(T_0^{(i+1)}) = q_s(T_0^{(i)}) + q_s'(T_0^{(i)})(T_0^{(i+1)} - T_0^{(i)})$$

$$r = C_p \rho C_H |u_1^{(i)}|$$

$$\eta = l_w / C_p$$

ここで、 c_s は土の比熱、 ρ_s は土の密度、 $q_s(T)$ は温度 T での飽和比湿、 $q_s'(T)$ は q_s の T に関する導関数である。上式を得るのに式(29)、(30)を用い、時間ステップ $i+1$ の変数が非線形的に表されるものについては $T_0^{(i)}$ の周りのテーラー展開の1次の項まで取り線形化を行った。式(64)–(66)を式(39)に代入し、 $T_0^{(i+1)}$ について解くと

$$\alpha_{0,0}T_0^{(i+1)} + \alpha_{0,1}T_1^{(i+1)} = \gamma_0 \quad (67)$$

$$\alpha_{0,0} = 4\epsilon\sigma(T_0^{(i)})^3 + \frac{c_s\rho_s k_s}{\delta z_{s,1/2}} + r \{ 1 + \eta\beta_w q_s'(T_0^{(i)}) \} \quad (68)$$

$$\alpha_{0,1} = -\frac{c_s\rho_s k_s}{\delta z_{s,1/2}} \quad (69)$$

$$\gamma_0 = (1-A)S + \epsilon L + r \{ \theta_1^{(i)} + \eta\beta_w \{ q_{w1} - q_s(T_0^{(i)}) + T_0^{(i)} q_s'(T_0^{(i)}) \} \} \quad (70)$$

が得られる。

式(40)の解法は3.2節のCrank-Nicolson陰解法を用い、上式を境界条件として用いる。即ち、前進代入の初期値として下式を用いる。

$$\alpha'_0 = \alpha_{0,1} / \alpha_{0,0} \quad (71)$$

$$\beta_0 = \gamma_0 / \alpha_{0,0} \quad (72)$$

地中最深層では一定の温度を与える。その他の部分は3.2節と同じである。但し、格子点番号の初期値は0である。

4. 計算コード

4.1 構成

本モデルの計算コードは全てFORTRAN77で書かれており、メインプログラム、18個のサブルーチン副プログラム、8個の関数副プログラム及び初期値設定副プログラム(BLOCK DATA)から成る。ステップ数は約2000行である。これらの中で主要なものについては4.3節でその内容を説明する。これらのプログラムはその機能により以下の6個の種別に分類される。

- ① メインルーチン : 計算全体の流れ及び時刻に関する情報を管理する(PHY1V3)。
- ② 主計算ルーチン : モデルに基づき実際の計算を行う(UMAIN, TMAIN, EMAIN, CLSL2A, KMHCAL, SFPR13, FLXCAL, SOILT, SAV EOD)。
- ③ 汎用計算ルーチン : いくつかのルーチンに共通な計算を行う。主計算ルーチンから引用される(GENER, DIREC1, DIREC2)。
- ④ 汎用関数ルーチン : 本コードに限らず、他のモデルでも使用することのできる汎用的な関数(飽和比湿、普遍関数等)の計算を行う(FAIM, FAIH, PSYM, PSYH, SHMD, SHMDD, RSOL, RINF, DEWTEMP)。

$$\alpha_{0,0}T_0^{(i+1)} + \alpha_{0,1}T_1^{(i+1)} = \gamma_0 \quad (67)$$

$$\alpha_{0,0} = 4\epsilon\sigma(T_0^{(i)})^3 + \frac{c_s\rho_s k_s}{\delta z_{s,1/2}} + r \{ 1 + \eta\beta_w q_s'(T_0^{(i)}) \} \quad (68)$$

$$\alpha_{0,1} = -\frac{c_s\rho_s k_s}{\delta z_{s,1/2}} \quad (69)$$

$$\gamma_0 = (1-A)S + \epsilon L + r \{ \theta_1^{(i)} + \eta\beta_w \{ q_{w1} - q_s(T_0^{(i)}) + T_0^{(i)} q_s'(T_0^{(i)}) \} \} \quad (70)$$

が得られる。

式(40)の解法は3.2節のCrank-Nicolson陰解法を用い、上式を境界条件として用いる。即ち、前進代入の初期値として下式を用いる。

$$\alpha'_0 = \alpha_{0,1} / \alpha_{0,0} \quad (71)$$

$$\beta_0 = \gamma_0 / \alpha_{0,0} \quad (72)$$

地中最深層では一定の温度を与える。その他の部分は3.2節と同じである。但し、格子点番号の初期値は0である。

4. 計算コード

4.1 構成

本モデルの計算コードは全てFORTRAN77で書かれており、メインプログラム、18個のサブルーチン副プログラム、8個の関数副プログラム及び初期値設定副プログラム(BLOCK DATA)から成る。ステップ数は約2000行である。これらの中で主要なものについては4.3節でその内容を説明する。これらのプログラムはその機能により以下の6個の種別に分類される。

- ① メインルーチン : 計算全体の流れ及び時刻に関する情報を管理する(PHY1V3)。
- ② 主計算ルーチン : モデルに基づき実際の計算を行う(UMAIN, TMAIN, EMAIN, CLSL2A, KMHCAL, SFPR13, FLXCAL, SOILT, SAV EOD)。
- ③ 汎用計算ルーチン : いくつかのルーチンに共通な計算を行う。主計算ルーチンから引用される(GENER, DIREC1, DIREC2)。
- ④ 汎用関数ルーチン : 本コードに限らず、他のモデルでも使用することのできる汎用的な関数(飽和比湿、普遍関数等)の計算を行う(FAIM, FAIH, PSYM, PSYH, SHMD, SHMDD, RSOL, RINF, DEWTEMP)。

- ⑤ 初期化ルーチン : 変数, 定数等の初期化を行う (BLOCK DATA, INITPF, MSHINT, SOILIN)。
- ⑥ 入出力ルーチン : 計算パラメータの入力及び計算結果の出力を行う (PREAD, DEBUGW)。

各モジュールの引用関係を Fig.4 に示した。図では, メインルーチンは二重四角, 主計算ルーチン, 初期化ルーチン, 入出力ルーチンは実線の四角, 汎用計算ルーチン及び汎用関数ルーチンは破線の四角で表されている。計算全体の流れを Fig.5 に示した。Fig.5 - a は初期化の流れ, Fig.5 - b は時間に関するループ内の計算の流れを表している。括弧内の英字名はメインルーチンにより引用されるサブルーチン名である。

初期化の手順は以下のとおりである。計算条件設定に必要なパラメータは PREAD によりパラメータファイルから読み込まれる。このパラメータに基づき時刻関連データの初期化が行われる。次に, 格子点の地上高の設定等の格子点に関する定数の初期化が行われる。次の土層初期化では, 地中格子点の深さの設定, 土の熱伝導率及び熱容量の設定が行われる。鉛直分布初期化では, PREAD により入力された計算条件に基づき風速, 温位の初期鉛直分布の設定が行われる。また, 地中温度及び地表面温度の初期化も行われる。このサブルーチン (INITPF) では, 乱流量初期化のためのサブルーチン (CLSL2A) が引用される。最後のその他の初期化は, 次の時間ループに接続するために必要な準備計算を行う。

時間に関するループでは, Fig.5 - b に示した手順が計算パラメータで設定された時間分だけ繰り返される。まず, 前ステップで計算された乱流運動エネルギー, 乱流長さスケール, 風速, 温位から乱流拡散係数及び乱流輸送量の計算を行う。次に, 地表面温度及び地中温度の計算を行い, 計算された地表面温度から接地層パラメータの計算を行う。ここまでの計算により, 予報方程式の計算を行うのに必要なデータが準備されたことになる。次の3個のサブルーチンでは, 上で準備されたデータを用いて, 風速, 温位, 乱流運動エネルギー, 乱流長さスケールの計算が 3.2 節の Crank-Nicolson 陰解法を用いて行われる。予報方程式で対象となる変数 (風速等) は, 前ステップでの値 (旧値) と現在のステップでの値 (新値) の両方を保持する必要があるため, 本コードでは各々別の配列を用いて表している。次ステップの準備では, 上で計算されて新値用の配列に保持されている値を旧値用の配列に入れられる。同時に, 乱流運動エネルギーの平方根 (Q), 乱流長さスケール単独の値 (RL) 等が計算される。時間に関するループの最後では, 時刻の判断が行われ, 計算パラメータに設定された時刻であれば計算結果の出力が行われる。

4.2 定数及び変数

メインルーチン及びサブルーチン副プログラム間のデータの受渡しは, ほとんどの場合コモン領域を用いて行われる (一部のサブルーチン副プログラム及び関数副プログラムでは引数により行われる)。

コモン領域の定義文を Fig.6 に示した。変数は基本的に倍精度を用いている。大気中及び地中の格子点数 (N1 及び NS) はパラメータ文により定義され, 配列の宣言分及び DO ループ

の実行回数として用いられる。このコモン文で定義されている変数のうち上半分はT0を除き定数（プログラム上は変数の扱い）の部分であり、計算の途中で値変更されることはない。この中で、コモン領域名GLBLCn(n=1~4)の定数は乱流クロージャモデル及び大気に関する定数で、初期値設定副プログラムで定義されており、計算条件設定の際にも変更する必要のない定数である。下半分は変数であり、時間ステップ毎に値が更新される。これらの定数及び変数の中で主要なものについてTable 1に内容、単位等をまとめた。風速、温位、乱流運動エネルギー、乱流長さスケールを表す配列名でU, V, T, E2, ELは前ステップの旧値を保持し、UN, VN, TN, E2N, ELNは当該時間ステップで計算される新値を保持する。各モジュール間での変数の参照関係をANALYSISにより解析した結果をTable 2に示した。+印は、そのモジュールで実際に値が与えられているものを示している。

4.3 モジュールの機能

主要なモジュールについて以下に説明する。見出しの英字名はサブルーチン副プログラム又は関数副プログラムの名前である。以下に示すモジュールでは、引数がある場合はサブルーチンDEWTMPの場合を除いてその引数は全て入力データである。

(1) PHY1V3

種別：メインルーチン

引数：なし

機能：時刻管理及び計算全体の流れの管理を行う。

(2) UMAIN, TMAIN, EMAIN

種別：主計算ルーチン（サブルーチン副プログラム）

引数：なし

機能：各々風速、温位、乱流運動エネルギー及び乱流長さスケールの計算を行う。旧値（配列名U, V, T, E2, EL）から3.2節の計算方法により1ステップ分の計算を行い、結果を新値用の配列（UN, VN, TN, E2N, ELN）に格納する。

(3) KMHCAL

種別：主計算ルーチン（サブルーチン副プログラム）

引数：なし

機能：乱流運動エネルギー、乱流長さスケール、風速、温位の分布から運動量に関する乱流拡散係数DKM及び熱に関する乱流拡散係数DKHを2.3節に示した乱流クロージャモデルレベル2.5により計算する。本サブルーチンでは、Helfand-Labrugaにより修正されたモデルの他にMellor-Yamadaのオリジナルモデルによる計算も可能である。この切り換えは、プログラム固定のフラグIOPにより行う。IOP=0の場合はHelfand-Labrugaのモデルにより計算、IOP=1の時はMellor-Yamadaのオリジナルモデルによる計算を行う。

(4) CLSL2A

種別：主計算ルーチン（サブルーチン副プログラム）

引数：なし

機能：与えられた風速及び温位の分布から乱流拡散係数DKM, DKHを2.3.1項及び3.3節に示した乱流クロージャーモデルレベル2.0により計算する。式(17) - (19)の S_M, S_H, Γ, R_f は各々文関数SM(X), SH(X), GM(X), FRF(X)で与えられている。引数は, SMとSHは Γ , GMとFRFは R_f である。また, これらの文関数はKMHCALでも用いられているため定義文はINCLUDEファイルに納められている。

(5) FAIM(Z, STB), FAIH(Z, STB)

種別：汎用関数ルーチン（倍精度関数副プログラム）

引数：Z 地上高 単位m

STB 安定度長 単位m

機能：各々式(36), (37)の普遍関数 ϕ_M, ϕ_H の計算を行う。

(6) PSYM(Z, STB, ZZER), PSYH(Z, STB, ZZER)

種別：汎用関数ルーチン（倍精度関数副プログラム）

引数：Z 地上高 単位m

STB 安定度長 単位m

ZZER 粗度長 (PSYMでは z_0 , PSYHでは z_T) 単位m

機能：各々式(34), (35)の普遍関数の積分 Ψ_M, Ψ_H の計算を行う。

(7) SHMD(TEMP), SHMDD(TEMP)

種別：汎用関数ルーチン（倍精度関数副プログラム）

引数：TEMP 絶対温度 単位K

機能：各々温度TEMPでの飽和比湿 q_s 及びその温度に関する微係数 q_s' を計算する。TEMPが氷点以下の場合は氷に対する値を計算する。プログラムではまずTEMPに対する飽和水蒸気圧 e_s (mb)を求め, $q_s = e_s * 0.622 / 1013.25$ により飽和比湿を計算する。飽和水蒸気圧は, TEMPの6次の多項式により計算される。微係数についても同様である。

(8) DEWTMP(QA, TDEW)

種別：汎用関数ルーチン（サブルーチン副プログラム）

引用：QA 比湿 (入力) 無次元

TDEW 露点温度 (出力) 単位K

機能：比湿QAに対応する露点温度を計算しTDEWに返す。本サブルーチンはSHMD及びSHMDDを引用する。

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

種別：汎用計算ルーチン（倍精度関数副プログラム）

引数：TIME 標準時（通常は日本標準時） 単位 h

PRECIP 可降水量 単位 cm

TURBID 大気混濁係数 無次元

ALBEDO 地表面の反射能 無次元

DSLAT 太陽の赤緯 単位度

DFLAT 対象地点の緯度 単位度

TLAGL 時差 単位 h

CNL 下層雲量（0～1）

CNM 中層雲量（0～1）

CNH 高層雲量（0～1）

機能：与えられたパラメータにより地方時（TIME+TLAGL）における地上の水平面日射量を計算する。太陽高度の計算に対象地点の地方時が必要であるため、TLAGLにより標準時からの時差を入力データとして与える。地方時の方が進んでいる場合には正の値を与える。雲量の指定方法についてはRINFを参照。

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

種別：汎用計算ルーチン（倍精度関数副プログラム）

引数：PRECIP 有効水蒸気量 単位 cm

TEMP 大気下層の気温 単位 K

CNL 下層雲量（0～1）

CNM 中層雲量（0～1）

CNH 高層雲量（0～1）

機能：与えられたパラメータにより下向き大気放射量を計算する。中層雲量は、下層雲がある部分にも中層雲があると仮定して与える。高層雲量は、中下層雲がある部分にも高層雲があると仮定して与える。即ち、 $0 \leq CNL \leq CNM \leq CNH \leq 1$ となるようにCNL, CNM, CNHを与える。

(11) DEBUG (IS, IE, N, K1, K2, K3, K4, IPG)

種別：入出力ルーチン（サブルーチン副プログラム）

引数：IS 出力する格子点範囲（初期値）

IE 出力する格子点範囲（最終値）

N 出力する格子点間隔（ステップ値）

K1 平均量出力フラグ（= 1：出力）

K2 乱流運動エネルギー等出力フラグ（= 1：出力）

K3 乱流拡散係数出力フラグ（= 1：出力）

K 4 乱流関係諸量出力フラグ (= 1 : 出力)

I P F ページがえフラグ (= 1 : ページがえする)

機能：計算結果を表の形で出力する。格子番号 I S から I E まで N おきの格子点の値が出力される。出力する項目は K 1 から K 4 までのフラグにより指定する。K 1 = 1 の場合には風速 (U, V), 温位の分布が出力される。K 2 = 1 の場合にはリチャードソン数, 乱流運動エネルギー, 乱流長さスケール, 風速及び温位の鉛直勾配が出力される。K 3 = 1 の場合には, 乱流運動エネルギーの平方根, 乱流長さスケール (単独の値), 乱流拡散係数 (DKM, DKH) が出力される。K 4 = 1 の場合は, 式 (4) 及び (5) の各項の値が出力される。複数のフラグを同時に 1 にすることも可能である。またフラグの値に関係なく, 時刻データ, 安定度長, 地表面温度等が出力される。

(12) PREAD

種別：入出力ルーチン (サブルーチン副プログラム)

引数：なし

機能：計算条件を設定するためのパラメータをファイル (機番10) から入力する。入力されたデータから, コリオリのパラメータ, 露点温度及び可降水量の計算 [式 (42)] を行う。

5. 使用 方 法

5.1 概要

本コードを用いて計算を行う場合の手順は以下のとおりである。

- ① 計算対象に対し適切な格子点の設定
- ② 初期条件の設定
- ③ 計算条件の設定
- ④ 出力データの選定
- ⑤ 計算実行

一般的に以上の手順の内容は計算対象により異なるため, 対象毎にコードの修正及び入力パラメータの変更が必要となる。初期条件の設定は風速 2 成分, 温位及び地温について行う。乱流運動エネルギー及び乱流長さスケールについては風速及び温位の初期条件からモデル内で計算される。計算条件の設定は, 時間に関するパラメータ, 境界条件に関するパラメータ, 放射条件に関するパラメータ及び地表面・地中の特性に関するパラメータについて行う。

標準的な使用を想定し, 本コードでは以下の制約を全て満たす場合には, パラメータファイルに計算条件を設定するだけでコードの修正を行うことなしに計算を実行できるようになっている。

K 4 乱流関係諸量出力フラグ (= 1 : 出力)

I P F ページがえフラグ (= 1 : ページがえする)

機能：計算結果を表の形で出力する。格子番号 I S から I E まで N おきの格子点の値が出力される。出力する項目は K 1 から K 4 までのフラグにより指定する。K 1 = 1 の場合には風速 (U, V), 温位の分布が出力される。K 2 = 1 の場合にはリチャードソン数, 乱流運動エネルギー, 乱流長さスケール, 風速及び温位の鉛直勾配が出力される。K 3 = 1 の場合には, 乱流運動エネルギーの平方根, 乱流長さスケール (単独の値), 乱流拡散係数 (DKM, DKH) が出力される。K 4 = 1 の場合は, 式 (4) 及び (5) の各項の値が出力される。複数のフラグを同時に 1 にすることも可能である。またフラグの値に関係なく, 時刻データ, 安定度長, 地表面温度等が出力される。

(12) PREAD

種別：入出力ルーチン (サブルーチン副プログラム)

引数：なし

機能：計算条件を設定するためのパラメータをファイル (機番10) から入力する。入力されたデータから, コリオリのパラメータ, 露点温度及び可降水量の計算 [式 (42)] を行う。

5. 使用 方 法

5.1 概要

本コードを用いて計算を行う場合の手順は以下のとおりである。

- ① 計算対象に対し適切な格子点の設定
- ② 初期条件の設定
- ③ 計算条件の設定
- ④ 出力データの選定
- ⑤ 計算実行

一般的に以上の手順の内容は計算対象により異なるため, 対象毎にコードの修正及び入力パラメータの変更が必要となる。初期条件の設定は風速 2 成分, 温位及び地温について行う。乱流運動エネルギー及び乱流長さスケールについては風速及び温位の初期条件からモデル内で計算される。計算条件の設定は, 時間に関するパラメータ, 境界条件に関するパラメータ, 放射条件に関するパラメータ及び地表面・地中の特性に関するパラメータについて行う。

標準的な使用を想定し, 本コードでは以下の制約を全て満たす場合には, パラメータファイルに計算条件を設定するだけでコードの修正を行うことなしに計算を実行できるようになっている。

- ・ 格子点数，格子点の地上高及び地中深については標準値を用いる。これらのプログラム内固定の標準値を Table 3 に示す。
- ・ 風速の初期値は全層一定である。5.2 節 (2) 参照。
- ・ 温位の初期値の鉛直勾配は一定である。5.2 節 (5)，(6) 参照。
- ・ 地温の初期値は全層一定である。
- ・ 一般場の圧力勾配（地衡風）は全層一定である。
- ・ 5.2 節 (3)，(4)，(6)–(17)のパラメータの時間変化はない。
- ・ 計算結果の出力はサブルーチン DEBUGW だけを用いる（フラグは全て 1 である）。4.3 節及び 5.4 節参照。

パラメータファイルの内容及び設定方法は 5.2 節で述べる。パラメータファイルを用いることにより，計算条件のみでなく単純な形の初期条件を与えることができる。上記の制限を越えた計算を行う場合はコードの修正が必要である（5.3 節参照）。標準の格子点数を用いた場合の計算コストは，実行時の主記憶が 276 k バイト，時間ステップを 30 秒とした時の 24 時間分の計算時間はコンパイル及びリンクを含めて FACOM M-780 上で 3.2 秒（実行のみは 2.3 秒）である。

5.2 計算パラメータ

本コードでは，計算条件を設定するためのパラメータのうち頻繁に変更されるものについては，パラメータファイル（機番 10）から入力されるようになっている。パラメータファイルの内容を Fig. 7 に示した。ファイルにはパラメータの値の他にコード内での変数名（パラメータ値の左側），単位及び説明（右側）が入っている。1 個のパラメータに対して 1 レコードを用いている。パラメータの値のための領域は，実数に関しては 16 桁目から始まる 20 桁で変換（A 15，D 20.10，A 35）を用いて読み込まれる。整数（IPRINT のみ）に関しては，16 桁目から始まる 10 桁で変換（A 15，I 10，10 X，A 35）で読み込まれる。

各パラメータがどのように計算に用いられるかの関連を Fig. 8 に示した。2 重四角で示されているのがパラメータファイルにより設定されるパラメータである。各パラメータの内容及び留意点を以下にまとめる。

(1) IPRINT（計算結果出力間隔）

計算結果の出力時間間隔を秒単位の整数で指定する。この時間間隔毎にサブルーチン DEBUGW がコールされる。DELTA（時間ステップ）の倍数である必要がある。例では，2 時間間隔の出力を指定している。

(2) UI, VI（風速初期分布）

風速の初期分布の u 成分， v 成分を m/s 単位で指定する。本コードでは，全層一様な初期分布が与えられる。分布を持った初期条件を与える場合はコードの変更が必要である（5.3 節参照）。

(3) UGI, VGI（一般場地衡風速）

一般場の地衡風の u 成分， v 成分を m/s 単位で指定する。式 (1)，(2) の u_g, v_g に対応する。分布を持った地衡風を与える場合にはコードの変更が必要である（5.3 節参照）。

(4) TBOTM (地中最深層温度)

地中最深層の温度を°C単位で指定する。この値は地中熱伝導方程式の境界条件として用いられ、計算を通して一定値である。このパラメータが少々変わっても全体の計算には大きな影響を与えないため、観測値が無ければ、対象とする時期の日平均気温を用いるのも一方法である。

(5) T0 (地表面温度)

地表面温度の初期値を°C単位で指定する。この値は温位初期分布の地上での値及び地温初期分布(全層一定)としても使用される。

(6) GRDX (温位初期分布の鉛直勾配)

温位初期分布の鉛直勾配を K/m 単位で指定する。本コードでは、全層一定の温位勾配を持つ初期分布 ($T_0 + GRDX * Z$ で計算される分布) が与えられる。これ以外の初期分布を与える場合にはコードの変更が必要である。

(7) GRTOP (モデル大気上端での温位鉛直勾配)

式(3)のモデル大気上端での境界条件である温位の鉛直勾配を K/m 単位で指定する。計算を通して一定値として扱われる。観測値が無い場合には対流圏での標準大気の温位勾配に近い値 (3.5 K/km 程度) が用いられることが多い。モデル上端の高度を十分高く取った場合、TBOTM と同様にこのパラメータが少々変わっても全体の計算には大きな影響を与えない。

(8) RO (空気密度)

空気の密度を kg/m^3 単位で指定する。本モデルでは地表面熱収支の計算以外で空気の密度を陽に用いている部分が無いため、地上での値を与える。

(9) QHA (地上比湿)

温位の第1層高度 z_1 での比湿を kg/kg 単位で指定する。計算を通して一定値として扱われ、地表面熱収支の計算及び可降水量の推定に用いられる。式(30)等の q_w に対応する。

(10) CNL, CNM, CNH (雲量)

各々低層雲量、中層雲量、高層雲量を 0 ~ 1 の実数で指定する。中層雲量は、下層雲がある部分にも中層雲があると仮定して与える。高層雲量は、中下層雲がある部分にも高層雲があると仮定して与える。即ち、 $0 \leq CNL \leq CNM \leq CNH \leq 1$ となるようにする。日射量及び大気放射量の計算に用いられる。

(11) SMOIST (地表面蒸発効率)

式(30)、(65)の β_w に対応する地表面の蒸発効率を 0 (乾燥) ~ 1 (湿潤) の実数で指定する。

(12) EMSVTY (地表面射出率)

式(39)の ϵ に対応する地表面の赤外放射に対する射出率を実数で指定する。地表面の射出率の典型的な値を Table 4 に示す¹⁰⁾⁻¹²⁾。例で指定している 0.96 は、ほとんどの地表面に共通する平均的な値であり、特殊な地表面を対象とする場合を除けば変更する必要はない。

(13) ALBEDO (地表面アルビード)

式(39)の A に対応する地表面の日射に対する反射率(アルビード)を実数で指定する。典型的な値を Table 4 に示す¹⁰⁾⁻¹²⁾。

(14) TURBID (大気混濁係数)

式(41)の β_a に対応する大気混濁係数を実数で指定する。大気の状態と大気混濁係数の関係をTable 5に示す⁸⁾。降雨直後のように大気が澄んでいる状態を対象とする場合は0~0.05、数日以上降雨がなく大気が濁っている状態を対象とする場合は0.2以上を与える。大都市域を除けば、通常0.05~1.5程度を与える。

(15) CONDCTV (土の温度拡散係数)

式(40)の k_s に対応する土の温度拡散係数を m^2/s 単位で指定する。典型的な値をTable 4に示す^{7),10),12)}。

(16) CAPCTY (土の体積熱容量)

式(40)の $\rho_s c_s$ に対応する土の単位体積当りの熱容量を $J/m^3/K$ 単位の実数で指定する。典型的な値をTable 4に示す^{7),10),12)}。

(17) Z0, ZT (地表面粗度)

地表面の風に対する粗度と温位に対する粗度を m 単位の実数で指定する。種々の地表面状態に対する代表的な値をTable 6に示す^{10),12)-14)}。

(18) DELT (時間増分)

式(51)等の ∂t に対応する時間増分を秒単位の実数で指定する。IPRINTとの整合を取るため5又は10秒単位の切れのよい値が望ましい。

(19) STIME (計算開始時刻)

計算開始の標準時(通常は日本標準時)を時間単位の実数で指定する。例えば、午後3時45分から計算を開始する場合は、STIMEに15.75を指定する。

(20) TINTEG (計算時間)

何時間分の計算を行うかを時間単位の実数で指定する。

(21) TLAGL (時差)

(地方時) - (標準時)の値を時間単位の実数で指定する。東経を正、西経を負で表したとき、TLAGLは(対象地点の経度 - 標準時の基準経度)/ 15° により計算される。このパラメータは日射の計算で太陽天頂角を計算する時にだけ使われ、それ以外では時刻はすべて標準時を用いて管理される。

(22) SLAT (太陽赤緯), FLAT (対象地点の緯度)

太陽の赤緯及び対象地点の緯度を度単位の実数で指定する。北緯を正、南緯を負で表すこととする。両者は太陽天頂角の計算に用いられる他に、FLATはコリオリパラメータCFを計算するのに用いられる。

5.3 コードの修正方法

5.3.1 初期化に関する修正

格子点数N1, NSはPARAMETER文により定義されている。ここで定義された値は、配列の宣言文及びDO文の繰り返し回数として用いられる。このPARAMETER文は他の宣言文と共にINCLUDEファイルに含まれているため修正は1カ所だけである。大気中の格子

点の地上高はサブルーチンMSINIT内で定義されている。格子点の高度はFig.3の z に対する番号付けに従い、配列 $Z(1)$ か $Z(2 * N1 + 2)$ まで値を与える。但し、 $Z(2 * N1 + 2)$ はダミーである。ここで、 $Z(2 * I)$ の値(乱流量に対する格子点の地上高)は、 $Z(2 * I - 1)$ と $Z(2 * I + 1)$ の間になるようにするのが望ましい。地中格子点の深さは、サブルーチンSOILINで定義されている。格子点の深さは、Fig.3の番号付けに従い、 $ZSL(0)$ から $ZSL(NS)$ に対し与える。 $ZSL(0)$ は常に0.0である。地温の日変化の振幅は深さと共に指数的に小さくなるため、Table 3に示した標準値は地表近くほど間隔が小さくなっている。新たに値を与える場合も格子点の深さの対数がほぼ等間隔になるようにするのが望ましい。

風速、温位、地温の初期分布はサブルーチンINITPF内で設定されている。標準では、パラメータファイルに設定された値により、風速は鉛直方向に一定な値、温位は一定の勾配を持つ分布を与えられる。観測等で得られたデータを基に上記の分布形で表しきれない初期値を用いる場合は、サブルーチンINITPF内で配列 U 、 V 、 T に対し格子点1から $M = N1 + 1$ までその分布を与える。一般場の圧力勾配についても同様にINITPF内で配列 UG 、 VG に分布を与えることにより一様以外の場合の計算が可能である。地温の初期分布については、同サブルーチン内で配列 $TSL(0)$ から $TSL(NS)$ に与える。単位については、Table 1参照。

5.3.2 計算パラメータの時間変化の考慮

観測データを対象としたシミュレーション計算では、計算パラメータに観測で得られるデータの様に時間変化する値を用いる場合が多い。本コードでは、計算パラメータは計算を通して一定として扱われるが、サブルーチンの追加及びメインルーチンの一部の修正により計算パラメータの時間変化の考慮が可能となる。時間変化考慮の対象となるパラメータとしては、地中最深層温度 $TBOTM$ 、地上比湿 QA 、雲量 CNL 、 CNM 、 CNH 、地衡風速 UG 、 VG 等が考えられる。基本的なコードの修正の方法としては、メインルーチンの時間ループ内で計算パラメータが引用される前に、そのパラメータの当該時刻における値を対応する変数に与えればよい。具体的には、対象計算パラメータの当該時刻における値を計算し、対応する変数又は配列に値を与えるサブルーチンを作り、時間ループの先頭(サブルーチン $KMHCAL$ をコールする前)でそのサブルーチンをコールするようにする。

標準的に本コードを使用した場合にモデル内で計算される量の中にはモデルの外部から直接入力する方が適当なものがある場合がある。例としては、日射量又は地表面温度等に観測から直接得られた値を用いてシミュレーション計算する場合である。この様な計算を行うためのコードの修正方法を、日射量・下向きの大気放射量を外部から与える場合及び地温を外部から与える場合の2個の列について以下に述べる。

日射量及び下向きの大気放射量を直接用いているモジュールは地温計算のサブルーチン $SOILT$ のみである。従って、これらの量を外部から直接与えるためには、 $SOILT$ 内で日射計算の関数副プログラム $RSOL$ 及び下向き大気放射計算の関数副プログラム $RINF$ をコールしている部分を削除し、代わりにその部分で $RSOLX$ 及び $RINF X$ に当該時刻の値を与

えるようにすればよい。この修正を行った場合場合、パラメータファイルに指定したCNL, CNM, CNH, TURBIDは無効となり、副関数プログラムRSOL, RINFは不要となる (Figs. 4,8 参照)。

地温を外部から直接与えるためには、メインルーチンの時間ループ内でサブルーチンSOLITをコールしている部分を削除し、代わりにその部分で変数T0に当該時刻の地表面温度を°C単位で与えるようにする。この修正を行った場合、変数RSOLX, RINFX, RNETの値は計算されないため、サブルーチンDEBUGWで出力されるこれらの値は無意味である。サブルーチン副プログラムSOLIT及び副関数プログラムRSOL, RINFは不要となる。また、配列ZSL, TSLは使われることはなくなるため、その初期化のためのサブルーチンSOLILINも不必要である。パラメータファイルに指定したTBOTM, CNL, CNM, CNH, QHA, SMOIST, EMSVTY, ALBEDO, TURBID, CNDCTV, CAPCTYは無効となる。

6. ま と め

本報告は、SPEEDIの高精度化研究の中で開発された1次元気象モデルPHYD1V3のモデル内容、数値解法、コード内容及び使用方法をまとめたものである。本数値モデルは地表面付近の大気中の物理過程を表す方程式系からなり、これに引続き開発された同種の3次元気象モデルPHYSICのテストツールとして利用されてきたものを整理し、使用し易い形に改良したものである。

本モデルでは、地上から数km程度の大気層及び1日程度の時間スケールを対象としている。モデルの中心となる予報方程式は、水平風速2成分(運動方程式)と温位(熱エネルギー保存方程式)に対するものである。これらの方程式に含まれる乱流輸送量に関しては、Mellor-Yamadaの2次オーダー乱流クロージャモデルを用いている。地表面温度は、地表面熱収支式及び地中熱伝導方程式を解くことによって計算される。日射量及び大気放射量を計算するモデルも組み込まれている。予報方程式は、Crank-Nicolson陰解法を用いて数値的に解かれる。

計算の実行は、5.1節に示した制約の範囲内であれば、パラメータファイルに必要なパラメータを設定するだけで行うことができる。本モデルを実行するのに必要な主記憶は標準の格子点数を用いた場合276kバイト(実行時)であり、24時間分の計算を行うのにFACOM M-780上で2.3秒のCPU時間を要する。標準的な使用法を越えて計算を行うにはコードの修正が必要となる。格子点配置の変更、初期条件に複雑な分布形を用いる場合の変更、計算パラメータの時間変化の導入に伴う変更についての解説を行った。

えるようにすればよい。この修正を行った場合場合、パラメータファイルに指定したCNL, CNM, CNH, TURBIDは無効となり、副関数プログラムRSOL, RINFは不要となる (Figs. 4,8 参照)。

地温を外部から直接与えるためには、メインルーチンの時間ループ内でサブルーチンSOLITをコールしている部分を削除し、代わりにその部分で変数T0に当該時刻の地表面温度を°C単位で与えるようにする。この修正を行った場合、変数RSOLX, RINFX, RNETの値は計算されないため、サブルーチンDEBUGWで出力されるこれらの値は無意味である。サブルーチン副プログラムSOLIT及び副関数プログラムRSOL, RINFは不要となる。また、配列ZSL, TSLは使われることはなくなるため、その初期化のためのサブルーチンSOLILINも不必要である。パラメータファイルに指定したTBOTM, CNL, CNM, CNH, QHA, SMOIST, EMSVTY, ALBEDO, TURBID, CNDCTV, CAPCTYは無効となる。

6. ま と め

本報告は、SPEEDIの高精度化研究の中で開発された1次元気象モデルPHYD1V3のモデル内容、数値解法、コード内容及び使用方法をまとめたものである。本数値モデルは地表面付近の大気中の物理過程を表す方程式系からなり、これに引続き開発された同種の3次元気象モデルPHYSICのテストツールとして利用されてきたものを整理し、使用し易い形に改良したものである。

本モデルでは、地上から数km程度の大気層及び1日程度の時間スケールを対象としている。モデルの中心となる予報方程式は、水平風速2成分(運動方程式)と温位(熱エネルギー保存方程式)に対するものである。これらの方程式に含まれる乱流輸送量に関しては、Mellor-Yamadaの2次オーダー乱流クロージャーモデルを用いている。地表面温度は、地表面熱収支式及び地中熱伝導方程式を解くことによって計算される。日射量及び大気放射量を計算するモデルも組み込まれている。予報方程式は、Crank-Nicolson陰解法を用いて数値的に解かれる。

計算の実行は、5.1節に示した制約の範囲内であれば、パラメータファイルに必要なパラメータを設定するだけで行うことができる。本モデルを実行するのに必要な主記憶は標準の格子点数を用いた場合276kバイト(実行時)であり、24時間分の計算を行うのにFACOM M-780上で2.3秒のCPU時間を要する。標準的な使用法を越えて計算を行うにはコードの修正が必要となる。格子点配置の変更、初期条件に複雑な分布形を用いる場合の変更、計算パラメータの時間変化の導入に伴う変更についての解説を行った。

参 考 文 献

- 1) Imai, K. et al.: SPEEDI: A Computer Code System for the Real-Time Prediction of Radiation Dose to the Public due to an Accidental Release, JAERI 1297 (1985).
- 2) 石川裕彦: 変分法を応用した3次元風速場計算コード(WIND04), JAERI-M 83-113 (1983).
- 3) Yamazawa, H.: Development of a Three-Dimensional Local Scale Atmospheric Model with Turbulence Closure Model, JAERI-M 89-062 (1989).
- 4) idem: Performance Examination of Atmospheric Model at Seacoast Region, J. Nucl. Sci. Technol., 26, 459 (1989).
- 5) Mellor, G. L. and Yamada, T.: A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layer, J. Atmos. Sci., 31, 1971 (1974).
- 6) Helfand, H. M. and Labraga, J. C.: Design of a Nonsingular Level 2.5 Second-Order Closure Model for the Prediction of Atmospheric Turbulence, J. Atmos. Sci., 45, 113 (1988).
- 7) 竹内清秀, 近藤純正: "大気科学講座1", 東京大学出版会, 226 (1981).
- 8) 近藤純正, 三浦章: 地表面日射量の実験式と日射計をチェックする簡便な方法, 天気, 30, 469 (1983).
- 9) Smith, G. D.: "偏微分方程式の解法" (日本記訳), サイエンス社, 191 (1981).
- 10) Brutsaert, W. H.: "Evaporation into the Atmosphere", D. Reidel Pub., 299 (1982).
- 11) 会田勝: "大気と放射過程", 東京堂出版, 280 (1982).
- 12) Pielke, R. A.: "Mesoscale Meteorological Modeling", Academic Press, 612 (1984).
- 13) Kondo, J. and Yamazawa, H.: Aerodynamic Roughness over an Inhomogeneous Ground Surface, Boundry-Layer Meteo., 35, 331 (1986).
- 14) 近藤純正, 山澤弘実: 局地風速と現実複雑値表面の粗度, 天気, 30, 553 (1983).

Table 1 List of variables. The first, second and third characters in the column 'Type' respectively indicate Real/Integer, Constant/Variable and Parameter/Array.

Name	Type		Unit	Description
DELT	RC	δt	s	Time increment
STIME	RC		h	Start time (standard time)
TINTEG	RC		h	Calculation period
TLAGL	RC		h	Time lag between local time and standard time
TIMEH	RV		h	Present standard time
TIMET	RV		h	Time from start time
ITIME	IV		s	Time from start time
N1	ICP	N		Number of grids in the air
NS	ICP	N_s		Number of grids in soil
Z	RCA	z	m	Grid height
ZZD	RCA	δz^{-1}	m^{-1}	Inverse of grid interval
ZSL	RCA	z_s	m	Depth of grid in soil
ZDSL	RCA	δz_s	m	Grid interval in soil
RSOLX	RV	S	Wm^{-2}	Solar radiation
RINFX	RV	$L \downarrow$	Wm^{-2}	Atmospheric radiation
RNET	RV	R_{net}	Wm^{-2}	Net radiation
STBL	RV	L	m	Stability length
UST	RV	u_*	ms^{-1}	Friction velocity
TST	RV	θ_*	K	Friction temperature
U(N)	RVA	u	ms^{-1}	Wind velocity (u -component)
V(N)	RVA	v	ms^{-1}	Wind velocity (v -component)
T(N)	RVA	θ	$^{\circ}C$	Potential temperature
E2(N)	RVA	q^2	m^2s^{-2}	Turbulence kinetic energy
EL(N)	RVA	$q^2 l$	m^3s^{-2}	Turbulence length scale $\times q^2$
DKM	RVA	K_M	m^2s^{-1}	Turbulence diffusivity of momentum
DKH	RVA	K_H	m^2s^{-1}	Turbulence diffusivity of temperature
TSL	RVA	T_s	K	Soil temperature

Table 2 Common block reference. The marks + and = respectively indicate the assignment and reference of values of the common block in the module. The mark - indicates that the common block is declared but no reference occurs.

	P B M I C	U T E S F	K S G D D	D S S P
	H L S N L	M M M F L	M A E I I	E O O R
	Y O H I S	A A A P X	H V N R R	B I I E
	1 C I T L	I I I R C	C E E E E	U L L A
	V K N P 2	N N N 1 A	A O R C C	G T I D
	3 D T F A	3 L	L D 1 2	W N
CLOUDI	- - - -	- - - - -	- - - - -	- = - +
CSOIL1	- - - -	- - - - -	- - - - -	- = - +
CSOIL2	- - - -	- - - - -	- - - - -	- = - +
GDIF	- - +	= = = - =	+ -	+ - -
GFLX	- - -	- - - - +	- -	= - -
GLBLCT	+ - -	- - - - -	- -	= = -
GLBLC0	= - - -	= = = - -	- - - - -	- = - +
GLBLC1	= + - =	- - = - -	= -	- - -
GLBLC2	= + - =	- - = - -	= -	- - -
GLBLC3	= + - =	= = = - -	= -	= = -
GLBLC4	= + = -	- - - - -	- -	- = -
GLBLV1	- - -	= = = + -	- -	= + -
GLNG	- - - +	- - = - -	= +	- - -
GMSH	- + = =	= = = = =	= - = = =	= = - -
GNEW	- + -	+ + + - -	- =	- - -
GOLD	- + =	= = = = =	= +	= = -
GPDF	- + -	= = - - -	- -	- - -
GTSL	- + -	- - = = -	- -	- + -
LCL02		+ + +	+ = =	
OUTPUT	= - - -	- - - - -	- - - - -	- - - +
RADDAT	- - - -	- - - - -	- - - - -	- = - +
SOIL	- - - -	- - - - -	- - - - -	- = + -
TMPDAT	= - = =	- = = = -	= - - - -	- = - +
TMPINT	= - = -	- = - = -	- - - - -	- + - +
WNDDAT	= - - -	= = - - -	- - - - -	- = - +
WNDINT	- - = -	- - - - -	- - - - -	- - - +

Table 3 Standard grid configuration.

Grid number	
Air	$N1(N)=28$
Soil	$NS(N_s)=7$
Grid height (m)	$z_{2i-1} = 10, 40, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400,$ $z_{2i} = 25, 55, 85, 125, 175, 225, 275, 325, 375, 425,$ <hr/> 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 475, 550, 650, 750, 850, 950, 1100, 1300, 1500, 1700, 1900, <hr/> 2000, 2400, 2800, 3200, 3600, 4000, 4400, 4800 2200, 2600, 3000, 3400, 3800, 4200, 4600, 5000
Grid depth (m)	$z_s = 0.0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64$

Table 4 Ground surface properties.

Nature of surface (Soil type)	Albedo A	Emissivity ϵ	Capacity $c_s \rho_s$ $10^6 \text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	Diffusivity h_s $10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Urban land	0.18	0.88		
Sand (wet)	0.20	0.91	2.8	0.7
(dry)	0.45	0.84	1.2	0.2
Bare soil (wet)	0.05-0.25	0.92-0.98		
(dry)	0.20-0.40	0.90-0.97		
Grass, short vegetation	0.15-0.25	0.90-0.98		
Coniferous forest	0.05-0.15	0.95-0.99		
Deciduous forest	0.15-0.25	0.93-0.98		
Water surface	0.03-0.10	0.92-0.97		
Snow surface (old)	0.35-0.65	0.82-0.97	0.8	0.4
(fresh)	0.80-0.95	0.99	0.2	0.1
Clay (wet)			3.1	0.5
(dry)			1.4	0.2
Marl (wet)			4.0	0.1
(dry)			0.6	0.1

Table 5 Typical value of air turbidity β_a .

β_a	Atmospheric situation
≤ 0.05	Blue clear sky without haze, rural area, visibility ≥ 50 km.
0.1	Slightly hazy sky, visibility=30 to 50 km.
0.2	Hazy sky in urban area, visibility=10 km.
≥ 0.3	White hazy sky, visibility < 10 km.

Table 6 Typical values of roughness length parameters.

Surface type	z_0 (m)	z_T (m)
Snow surface (smooth)	2×10^{-4}	7×10^{-5}
(rugged)	2×10^{-3}	3×10^{-6}
Sand, soil (smooth)	3×10^{-4}	8×10^{-5}
(rugged)	5×10^{-3}	1×10^{-4}
vegetation (2cm high)	3×10^{-3}	4×10^{-4}
(10cm high)	1.5×10^{-2}	2×10^{-3}
(50cm high)	5×10^{-2}	7×10^{-3}
(1m high)	1×10^{-1}	1.5×10^{-3}
Orchard	6×10^{-1}	9×10^{-2}
Forest	0.8-2.0	1.5×10^{-1}
Rural town	0.2-0.6	2×10^{-2}
Suburbs	0.8	1.5×10^{-2}
Urban area	1.6	3×10^{-2}

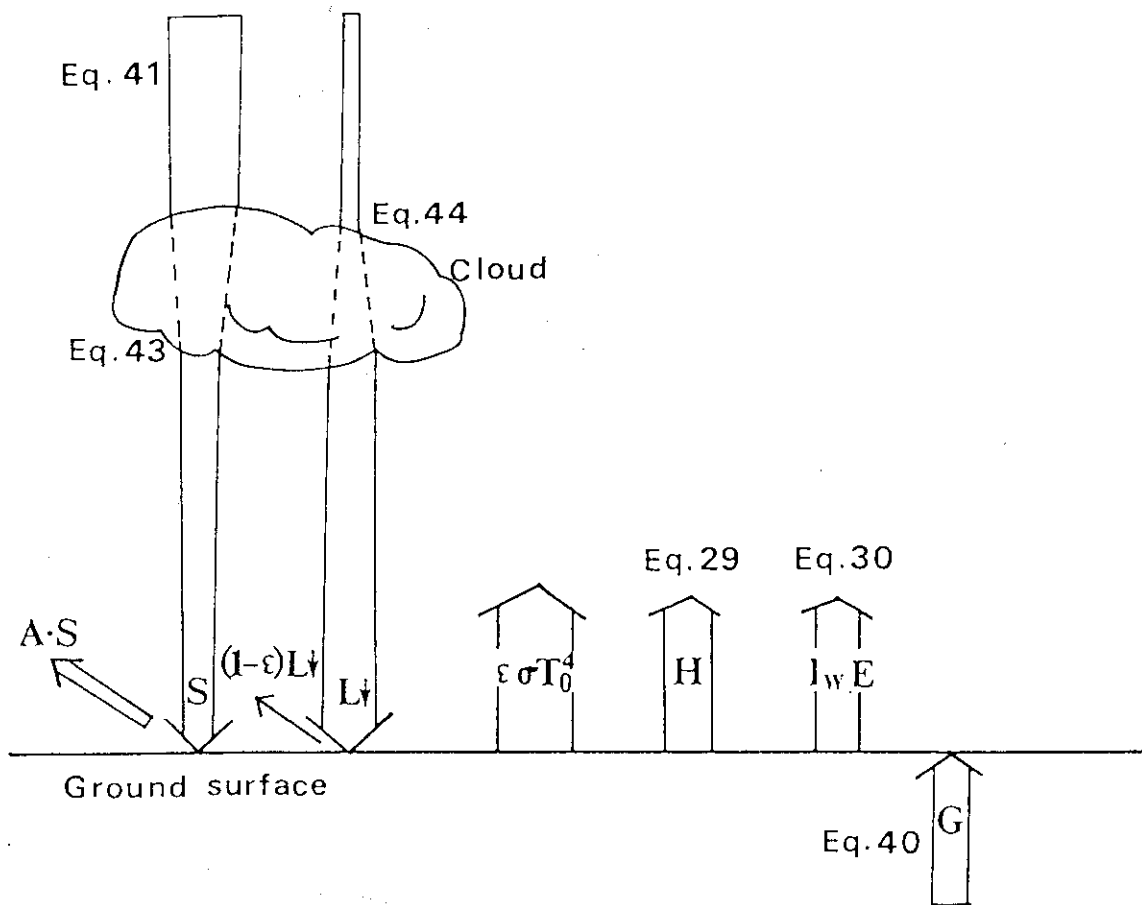


Fig.1 Schematic illustration of ground surface heat budget. Equation numbers corresponding to each processes are shown.

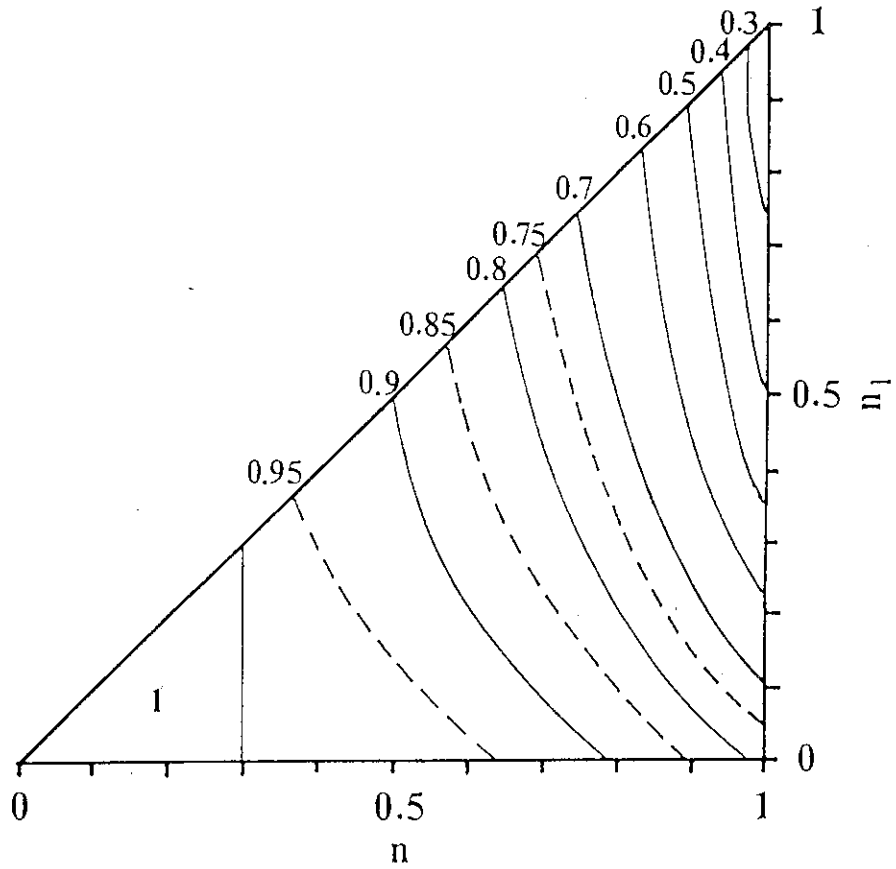


Fig.2 Ratio of global solar radiation from cloudy sky to that from clear sky as a function of total cloudiness n and low level and medium level cloudiness n_l ; Eq.(43).

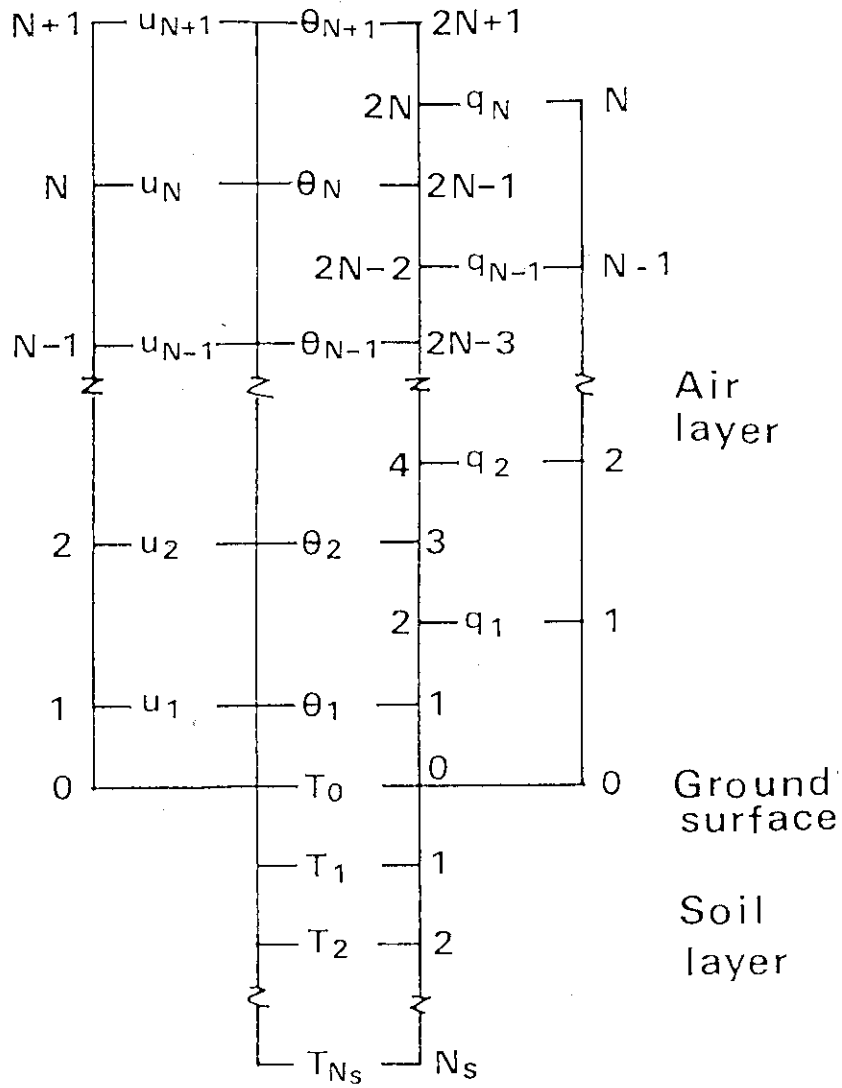


Fig.3 Schematic illustration of grid system.

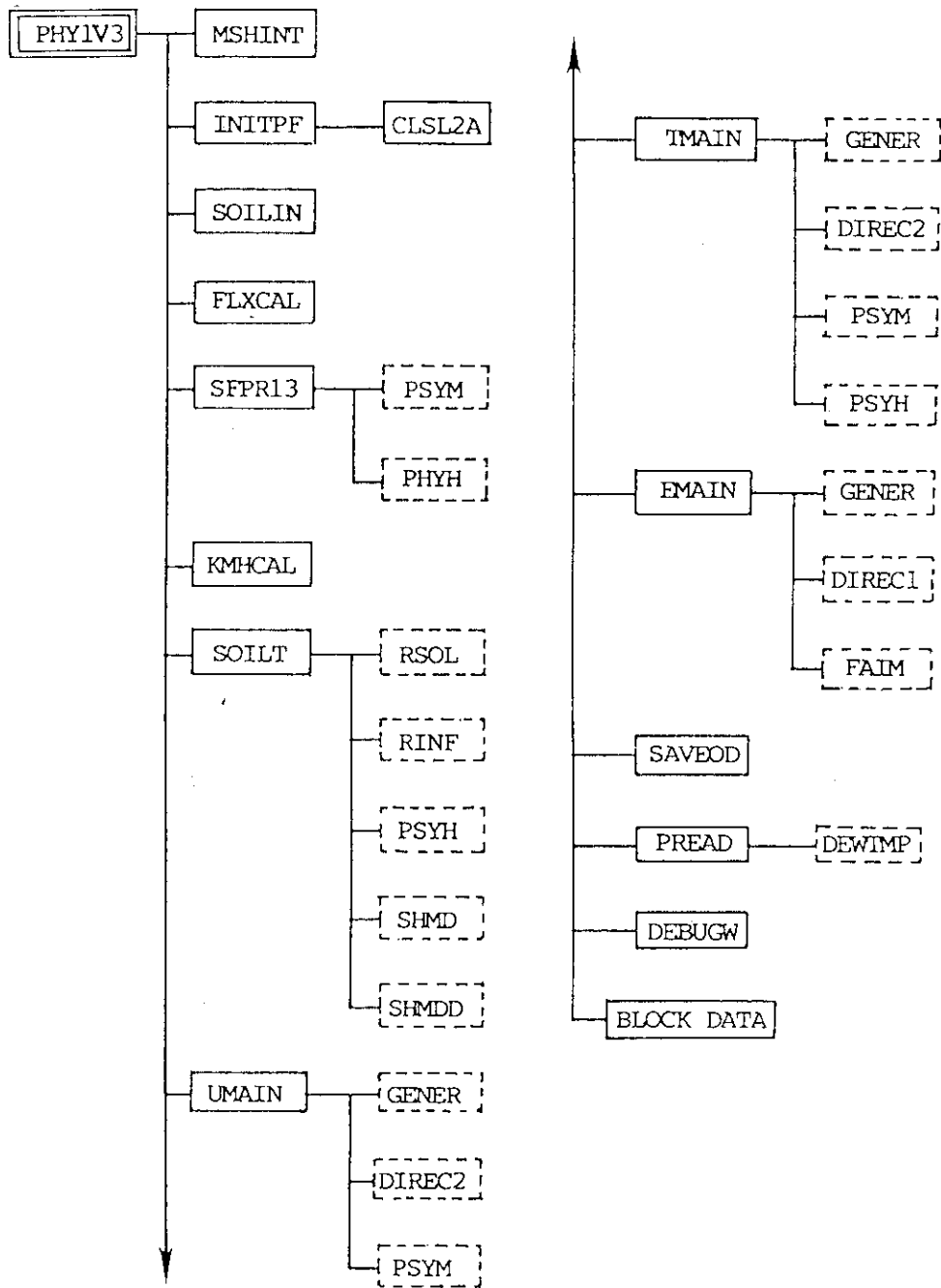


Fig.4 Diagram of module reference.

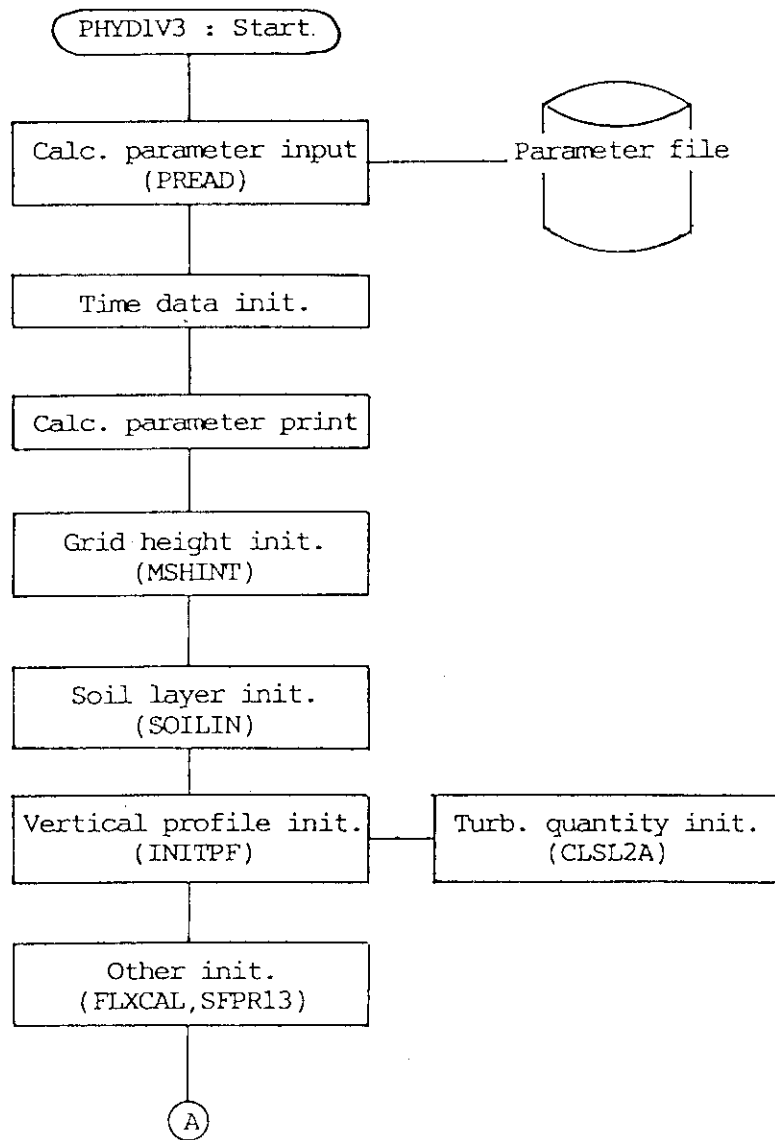


Fig.5 (a) Flow chart of PHYD1V3 code (initialization).

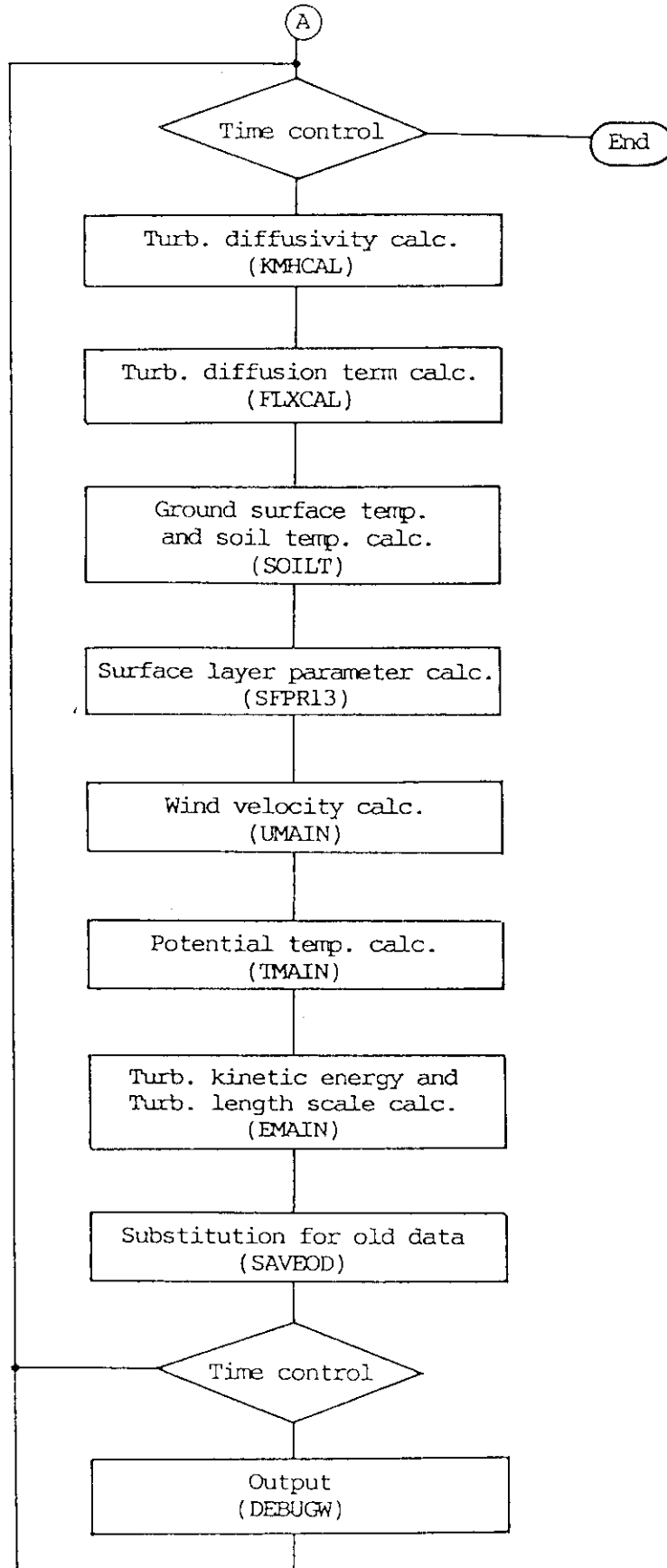


Fig.5 (b) Flow chart of PHYD1V3 code (time loop).

```

IMPLICIT DOUBLEPRECISION ( A-H , 0-Z )
PARAMETER ( N1=28 , NS=7 )
PARAMETER ( M1=N1+1 , N2=2*M1 )
C
C**** CONSTANT SECTION
C
COMMON /GLBLCO/ DELT , STIME , TINTEG, TLAGL
COMMON /OUTPUT/ IPRINT
COMMON /WNDINT/ UI , VI , UGI , VGI
COMMON /TMPINT/ TO , TBTM , TOB
COMMON /TMPDAT/ RO , GRD , GRTOP , GRDX , ROU , BET
COMMON /CSOIL1/ CNDCTV , CAPCTY
COMMON /CSOIL2/ EMSVTY , ALBEDO , PRECIP , TURBID , QHA , SMOIST
COMMON /RADDAT/ SLAT , FLAT
COMMON /CLOUDI/ CNL , CNM , CNH
COMMON /WNDDAT/ CF , ZO , ZT
COMMON /GMSH/ Z(N2) , ZZD(N2)
COMMON /SOIL/ ZSL(O:NS)
COMMON /CKSL(O:NS) , ZDSL(O:NS)
C
C**** CONSTANTS DEFINED IN BLOCK DATA
C
COMMON /GLBLC1/ A1 , A2 , B1 , B2 , C1 , B123
COMMON /GLBLC2/ SQ , SL , SE1 , SE2 , SQSL
COMMON /GLBLC3/ G , CK
COMMON /GLBLC4/ GRDA , RAIR , TOO
C
C**** END OF CONSTANT SECTION
C
C**** VARIABLE SECTION
C
COMMON /GLBLCT/ TIMEH , TIMET , ITIME
COMMON /GLBLV1/ UST , TST , RSOLX , RINFX , RNET , STBL
COMMON /GOLD/ U(M1) , V(M1) , T(M1) , E2(M1) , EL(M1)
COMMON /GNEW/ UN(M1) , VN(M1) , TN(M1) , E2N(M1) , ELN(M1)
COMMON /GLNG/ RL1(M1) , RL2(M1) , E1(M1)
COMMON /GDIF/ DKM(M1) , DKH(M1) , RIG(M1)
COMMON /GTSL/ TSL(O:NS)
COMMON /GFLX/ TAX(M1) , TAY(M1) , HEA(M1)
COMMON /GPDF/ UG(M1) , VG(M1)
C
C**** END OF VARIABLE SECTION
C

```

Fig.6 Definition of common blocks.

IPRINT	=	7200	(S)	PRINT OUT INTERVAL	*
UI	=	4.0000000000D-00	(M/S)	INITIAL U-COMPONENT	*
VI	=	0.0000000000D-00	(M/S)	INITIAL V-COMPONENT	*
UGI	=	4.0000000000D-00	(M/S)	GESTROPHIC WIND U-COMP.*	
VGI	=	0.0000000000D-00	(M/S)	GESTROPHIC WIND V-COMP.*	
TBOTM	=	1.5000000000D+01	(D.C)	TEMP. AT BOT. OF SOIL L.*	
TO	=	1.5000000000D+01	(D.C)	TEMP. AT BOT. OF AIR L.*	
GRDX	=	3.5000000000D-03	(C/KM)	VERT. POTENT. TEMP.GRAD.*	
GRTOP	=	3.5000000000D-03	(C/KM)	V.P.T.G. AT MODEL TOP	*
RO	=	1.2000000000D+00	(KG/M3)	AIR DENSITY	*
QHA	=	8.0000000000D-03	(KG/KG)	SPECIFIC HUMID. SFC.LYR.*	
CNL	=	0.3000000000D-00	()	CLOUDINESS LOW	*
CNM	=	0.5000000000D-00	()	CLOUDINESS MID .GE. CNL	*
CNH	=	0.7000000000D-00	()	CLOUDINESS HGH .GE. CNM	*
SMDIST	=	0.5000000000D-00	()	EVAPORATION COEFFICIENT	*
EMSVTY	=	0.9800000000D-00	()	EMMISSIVITY OF G. SFC.	*
ALBEDO	=	0.2000000000D-00	()	ALBEDO OF G. SFC.	*
TURBID	=	0.1000000000D-00	()	TURBIDITY OF AIR	*
CNDCTV	=	0.2000000000D-06	(M2/S)	SOIL HEAT CONDUCTIVITY	*
CAPCTY	=	1.5000000000D+06	(J/M3/K)	SOIL HEAT CAPACITY	*
ZO	=	0.3000000000D+00	(M)	SURFACE ROUGHNESS (WIND)*	
ZT	=	0.0200000000D+00	(M)	SURFACE ROUGHNESS (TEMP)*	
DELT	=	3.0000000000D+01	(S)	TIME INCREAMENT	*
STIME	=	3.0000000000D+00	(H.JST)	INITIAL TIME (J.S.T.)	*
TINTEG	=	24.0000000000D+00	(H)	INTEGRATION PERIOD	*
TLAGL	=	0.3670000000D+00	(H)	(LOCAL TIME) - (J.S.T.)	*
SLAT	=	5.0000000000D+00	(DEG)	SOLAR LATITUDE	*
FLAT	=	38.0000000000D+00	(DEG)	LATITUDE	*

Fig.7 Contents of the parameter file.

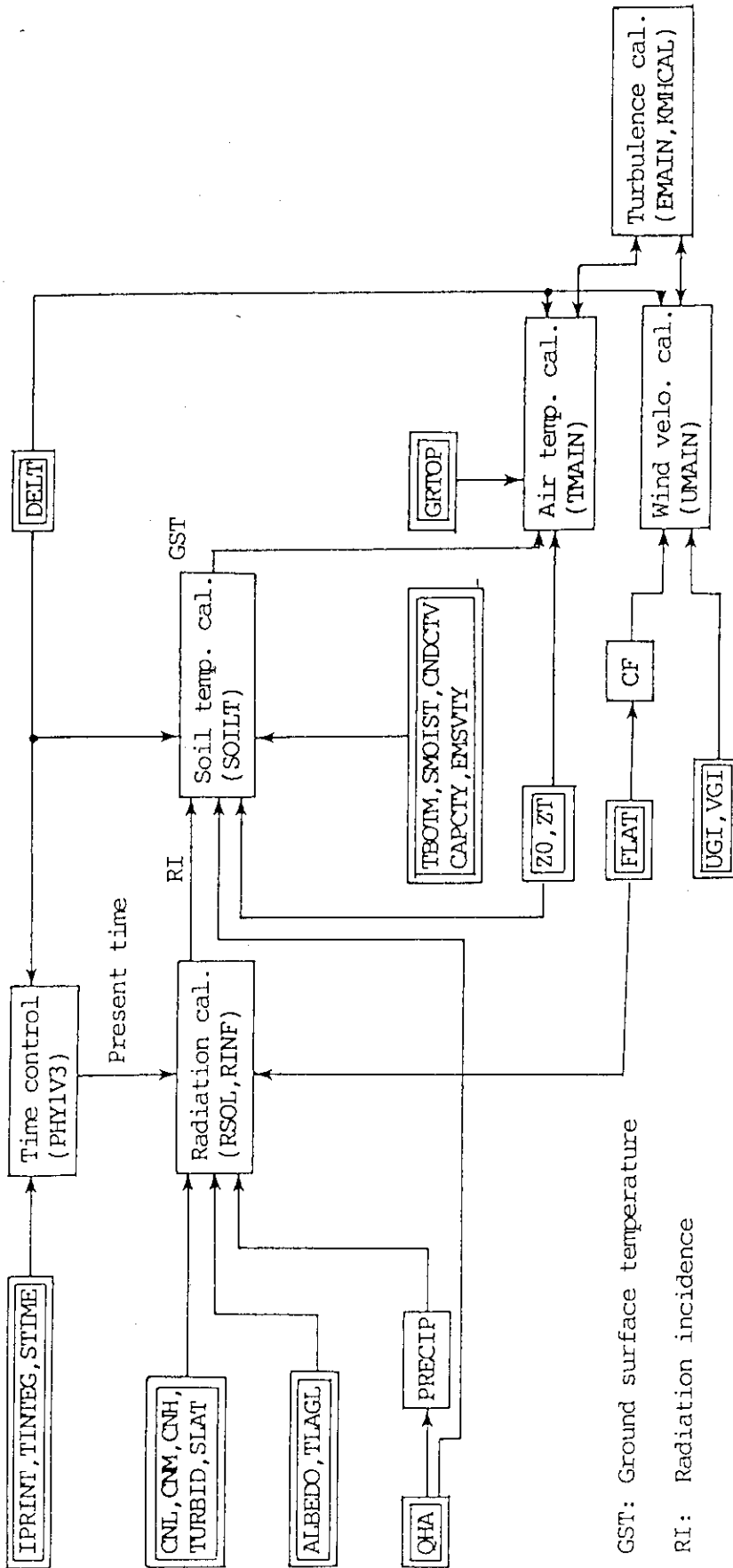


Fig. 8 Diagram of parameter reference.