

JAERI-Data/Code

98-039



湿潤大気力学モデルの開発

1998年12月

古野朗子・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。
入手の間合わせは、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）で複写による実費領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, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

湿潤大気力学モデルの開発

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
古野 朗子・山澤 弘実

(1998年11月30日受理)

世界版緊急時環境線量情報予測システムWSPEEDIは、大気拡散計算により万一の事故時における広域への放射線影響を迅速に予測するシステムである。WSPEEDIで入力とする気象庁の全球予報データには混合層や雲・降水の情報が殆ど含まれていないため、大気拡散計算モデルGEARNでは乱流拡散過程およびレインアウト・ウォッシュアウトのような降雨洗浄過程を単純にパラメタライズしている。そのため本研究では、GEARNにこれらの情報を提供できるように、混合層過程および湿潤過程を予測できる大気力学モデルPHYSICをWSPEEDIに導入することを目的とする。今回はその第一段階として、PHYSICに対して1) 水蒸気の移流拡散方程式、2) グリッドスケールで表現できる雲の形成消滅過程、3) 層状雲からの降水過程を導入した。本報告は、モデル内容、改良後の計算コードの詳細および試験計算例についてまとめたものである。

Development of Moist Atmospheric Dynamic Model

Akiko FURUNO and Hiromi YAMAZAWA

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

(Received November 30, 1998)

WSPEED (Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information) is a system for rapid prediction of long-range atmospheric dispersion and radiological impact due to a nuclear accident. At present, the atmospheric dispersion model GEARN in WSPEEDI simply parameterizes the turbulence diffusion and precipitation scavenging, i.e. rain-out and washout, because information on the boundary layer, cloud and precipitation is insufficient in global forecasts from Japan Meteorological Agency which are input data for WSPEEDI. Thus, to provide GEARN with such information, this study aims to introduce a hydrodynamic model into WSPEEDI, which can predict boundary layer processes and moist processes. As the first step, prognostic equations for hydrometeors, cloud formation and precipitation processes are added to the mesoscale atmospheric dynamic model PHYSIC. This report describes the detail of the modified model code and the results of test calculation.

Keywords: WSPEEDI, PHYSIC, Prognostic Model, Moist Process, Cloud Formation, Precipitaion

目 次

1. はじめに	1
2. PHYSIC の概要	2
2.1 座 標 系	2
2.2 モデル方程式	2
2.3 数値解法	3
2.4 初期条件	5
2.5 診断方程式	5
2.6 側面境界条件	6
2.7 上端境界条件	7
2.8 地表面境界条件	8
3. 雲物理モデル	10
3.1 概 要	10
3.2 水の相変化過程	13
3.3 雨雪形成に関するパラメタリゼーション	15
4. 計算コード	19
4.1 サブルーチンの概要	19
4.2 湿潤モデル独自の変数	21
4.3 湿潤過程導入に伴う変更点	22
4.4 湿潤過程用サブルーチンの解説	23
5. 試験計算	27
5.1 計算条件	27
5.2 結果及び考察	27
6. ま と め	35
参考文献	36

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of PHYSIC	2
2.1 Coordinates	2
2.2 Model Equations	2
2.3 Numerical Schemes	3
2.4 Initial Conditions	5
2.5 Diagnostic Equations	5
2.6 Lateral Boundary Conditions	6
2.7 Top Boundary Conditions	7
2.8 Bottom Boundary Conditions	8
3. Cloud Model	10
3.1 Outline	10
3.2 Phase Change Processes	13
3.3 Parameterization for Conversion Terms	15
4. Model Code	19
4.1 Outline of Subroutines	19
4.2 Independent Variables for Moist Model	21
4.3 Modified Subroutines	22
4.4 Function of Subroutines for Moist Model	23
5. Example Calculation	27
5.1 Calculation Conditions	27
5.2 Results and Discussions	27
6. Summary	35
References	36

1.はじめに

世界版緊急時環境線量情報予測システム WSPEEDI (Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information) は、チェルノブイリ原子力発電所事故を契機として、万一の放射能放出事故時における周辺諸国への影響評価のために開発されたシステムである^{1),2)}。近年アジア域で原子力発電所が増加しており、これらの地域における事故を想定したシミュレーションの重要性が増大している。アジア諸国は温暖かつ湿潤な熱帯・亜熱帯・モンスーン地域に属しているため、解析の際には境界層内の物理過程や湿潤過程が特に重要になる。ところが WSPEEDI で予測計算の入力として用いる全球気象予報データは時空間分解能が低く、大気拡散に大きな影響を与える境界層内の情報量が少ないため、物理過程の詳細な計算には適していない。また現状の WSPEEDI では、レインアウト、ウォッシュアウトの効果は極めて単純にパラメタライズされている。従って、WSPEEDI をアジア域の解析に用いるためには、境界層過程や湿潤過程をより詳細に考慮できるように改良を行う必要がある。

これらの点は欧州トレーサー実験 ETEX (European Tracer Experiment) の際にも指摘された³⁾。ETEX は、実際にトレーサガスを放出してヨーロッパ域約 2,000 km 四方の範囲での濃度分布を測定し、広域拡散モデルの性能評価を行うことを目的として 1994 年に行われた国際協力研究である。WSPEEDI は他の参加機関と比較してかなり良い成績を収めた。しかし混合層高度や拡散係数等を決める際に物理過程を考慮していないこと、スケールの小さい対流の効果を取り入れていないことなどが今後の課題として残された。アジアを対象とした解析を行うためにもこの点についての改良が必要である。

一方、メソスケール大気力学モデル PHYSIC (Prognostic Hydrostatic model Including turbulence Closure model) は、SPEEDI の予報機能の拡充及び拡散予測計算の高精度化を目的に開発された数値モデルである^{4),5)}。PHYSIC では気象庁のデータを初期条件として 1 日程度先までの予測計算を行い、大気拡散モデルの入力データを作成する。その際の格子間隔は気象庁のものよりかなり細かく、予測計算の信頼性の向上に貢献している⁶⁾。PHYSIC を改良・広域化して WSPEEDI に適用することにより、従来簡単なパラメタリゼーションを行っていた部分の物理的計算が一部可能になる。

従来の PHYSIC はドライモデルであり、水 (水蒸気、雲、降水) は地表面熱収支計算以外では扱っていない。そこで水蒸気及びその相変化をも扱えるように PHYSIC を改良し、更に広域化を行う。これによって解析領域の大小に関係なく詳細な予測計算が可能となる。今回はその第一段階として、1)水蒸気の移流拡散方程式の導入、2)グリッドスケールで表現できる雲の形成消滅過程の組み込み、3)層状雲からの降水過程の組み込みを行った。本報告ではモデルの内容及び導入後のテスト計算結果について述べる。

2. PHYSIC の概要

本研究のベースとして用いる PHYSIC は、大気中の物理過程を表す方程式系を数値的に解き、気象場の時間変化を予報的に求める気象場モデルである^{4), 5), 6)}。ブジネスク近似及び静水圧近似を用いた運動方程式、連続の式等の方程式系を中心としており、乱流量や境界条件などの計算には 2 次オーダーの乱流クロージャーモデル、地表面熱収支式、地中熱伝導方程式などを用いている。狭域 PHYSIC の対象領域は水平方向に 10 ~ 1,000 km、鉛直方向に 1~10 km であり、予報期間は 1 時間~数日程度である。将来的には広域の解析に適用できるように改良を行う予定である。

2.1 座標系

水平方向には直交座標系 (x,y)、鉛直方向には地形準拠 z^* 座標系を用いる。 z^* 座標系は

$$z^* = \frac{\bar{H}(z - z_g)}{h} \quad (2-1)$$

で表現される。ここで

$$h = H - z_g$$

である。 H はデカルト座標系で表されるモデル上端高度、 \bar{H} は z^* 座標系で表されるモデル上端、 z はデカルト座標系の鉛直座標、 z_g は地形標高である。 $z^* = 0$ は地表面を表し、地表に近い部分では等 z^* 面は地表にほぼ沿う形となる。

2.2 モデル方程式

一般に、各物理量 ϕ についての予報方程式は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\phi}{\partial t} = & -\frac{\partial hu\phi}{\partial x} - \frac{\partial hv\phi}{\partial y} - \frac{\partial hw^*\phi}{\partial z^*} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(hK_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hK_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \eta^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(hK_{z^*} \frac{\partial \phi}{\partial z^*} \right) + hS_\phi \end{aligned} \quad (2-2)$$

ここで、

$$\eta = \bar{H} / h \quad (2-3)$$

は座標変換に伴う係数である。また、 K_x 、 K_y 、 K_z は拡散係数、 S_ϕ は外力項、 w^* は z^* 座標

系における鉛直速度を表す。

予報変数 ϕ は

水平風速 (u, v)

温位 (θ)

乱流運動エネルギー (e^2)

乱流長さスケール ($e^2 l$)

の 5 個であり、今回開発した湿潤モデルには更に

比湿 (q_3)

雲水 (q_2^{cw})

雲氷 (q_1^{ci})

雨 (q_2^R)

雪 (q_1^s)

の 5 個が加わる (詳細は 3 章で述べる)。従って予報変数は合計 10 個となる。

水に関する変数以外の各変数の外力項は次の式で表現される。

$$S_\phi = \begin{cases} -\theta \frac{\partial \pi}{\partial x} - g \left(1 - \frac{z^*}{H} \right) \frac{\partial z_g}{\partial x} + f v & \text{for } u \\ -\theta \frac{\partial \pi}{\partial y} - g \left(1 - \frac{z^*}{H} \right) \frac{\partial z_g}{\partial y} + f u & \text{for } v \\ 2\eta^2 K_M \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z^*} \right)^2 \right] - 2\eta K_H \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z^*} - \frac{2e^{3/2}}{B_1 l} & \text{for } e \\ \eta^2 l E_1 K_M \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z^*} \right)^2 \right] - \eta l E_1 K_H \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z^*} - \frac{e^{3/2}}{B_1 l} \left[1 + E_2 \left(\frac{\eta l}{k z} \right)^2 \right] & \text{for } e^2 l \end{cases} \quad (2-4)$$

ここで π は Exner 関数、 B_1 、 E_1 、 E_2 は乱流クロージャーモデルの定数、 f はコリオリパラメータ、 g は重力加速度である。 u および v の式の第 1 項は水平圧力勾配、第 2 項は座標変換に伴う項、第 3 項はコリオリ項である。また e および $e^2 l$ の式の第 1 項はシアーによる生成、第 2 項は浮力による生成 (消失)、第 3 項は粘性による消散を表す。水に関する変数の外力項については第 3 章で述べる。

2.3 数値解法

従来の PHYSIC では、交互方向陰解法 (ADI) 及び風上一次差分法を用いて方程式を差分化していた。この方法は計算の安定性と経済面では優れているが、数値拡散が大きい

いために波形が平滑化される。HIFI 法はこの欠点をカバーするために開発されたスキームである⁷⁾。今回の湿度の導入に伴い、差分スキームを全て ADI から HIFI に置き換えた。式(2-2) を数値的に解く際、HIFI では一つのタイムステップを分割して以下の式で計算する。また格子構造を Fig.1 に示す。

$$\frac{\phi^{(1)} - \phi^t}{\delta t} = -\frac{1}{h\delta x} (h_E u_E \bar{\phi}_E^t - h_W u_W \bar{\phi}_W^t), \quad (\text{x-direction}) \quad (2-5)$$

$$\frac{\phi^{(2)} - \phi^{(1)}}{\delta t} = -\frac{1}{h\delta y} (h_N v_N \bar{\phi}_N^{(1)} - h_S v_S \bar{\phi}_S^{(1)}), \quad (\text{y-direction}) \quad (2-6)$$

$$\frac{\phi^{(3)} - \phi^{(2)}}{\delta t} = -\frac{1}{\delta z^*} (w_T \bar{\phi}_T^{(2)} - w_B \bar{\phi}_B^{(2)}), \quad (\text{z}^* \text{-direction}) \quad (2-7)$$

$$\frac{\phi^{(4)} - \phi^{(3)}}{\delta t} = \frac{1}{h} (D_x + D_y + hS_\phi), \quad (\text{diffusion}) \quad (2-8)$$

$$\frac{\phi^{t+\alpha} - \phi^{(4)}}{\delta t} = \frac{1}{h} \{ r D_z^{t+\alpha} + (1-r) D_z^{(4)} \}. \quad (2-9)$$

ここで、従属変数の右肩の添字は時間を表し、括弧付きの添字はその中間段階を意味する。また、係数 r は完全陽解法の場合 0、完全陰解法の場合 1 である。鉛直拡散計算時に陰解法を用いるほかは完全陽解法を用いている。

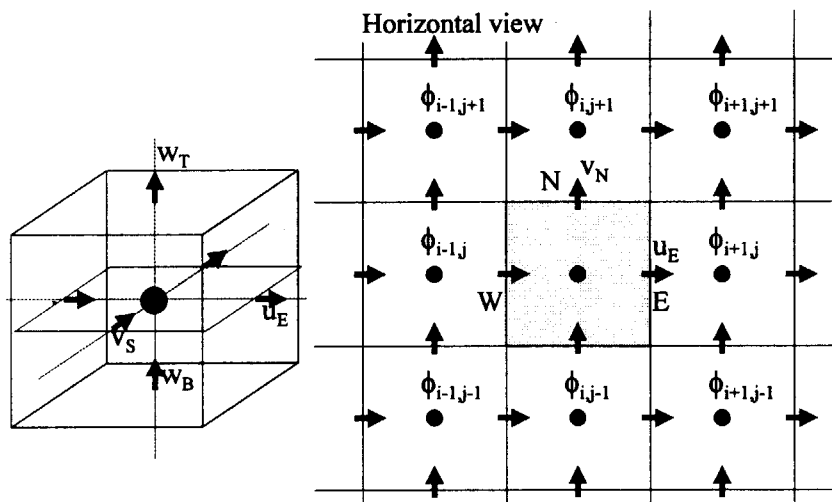


Fig.1 グリッド定義

ここで $\bar{\phi}_E$ 、 $\bar{\phi}_W$ 、 $\bar{\phi}_N$ 、 $\bar{\phi}_S$ 、 $\bar{\phi}_T$ 、 $\bar{\phi}_B$ は各従属変数のセル表面における内挿値である。

この値はタイムステップ内の時間平均で定義する。例えば西側境界では

$$\bar{\phi}_W = \frac{1}{\delta t} \int_t^{t+\delta t} \phi_W \delta t = \phi_W - \frac{u \delta t}{2} \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{t,W} = \phi_W - \frac{u \delta t}{2} \frac{\phi_0^i - \phi_{-1}^i}{\delta x} \quad (2-10)$$

で表される。ここで ϕ_W は三点内挿法で求める。

$$\phi_W = \alpha_W \phi_{-2} + \beta_W \phi_{-1} + \gamma_W \phi_0. \quad (2-11)$$

α 、 β 、 γ は Courant 数および着目波数の関数として対象に応じて決定する⁷⁾。この際、 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ である。

陰解法を用いているのは鉛直方向のみであるため、1次元の陰解法を考慮するのみでよい。鉛直拡散項の差分式 D_z は次の式で表される。

$$D_{z,k} = \frac{1}{\delta z_k^*} \frac{\bar{H}^2}{h} \left\{ \frac{2K_{k-1/2}}{\delta z_{k-1}^* + \delta z_k^*} (\phi_{k-1} - \phi_k) + \frac{2K_{k+1/2}}{\delta z_{k+1}^* + \delta z_k^*} (\phi_{k+1} - \phi_k) \right\}. \quad (2-12)$$

HIFI 法を用いることにより計算時間は幾分増加する。これは陽解法を使用することで時間ステップを小さく取る必要があるためである。

2.4 初期条件

モデルの初期値には気象庁からオンラインで送られる数値予報データ (GPV データ) を用いる⁶⁾。GPV データには全球予報とアジア域予報の2種類があり、狭域計算ではアジア域予報データを用いる。

アジア域の GPV データは1日2回 (09 JST 及び 21 JST) 初期化され、51 時間先までの予報が含まれる。データは地上と上層の2つに分かれており、地上データは上層データよりも時空間分解能が細かい。格子間隔は、地上で東西方向に15分 (北緯60度で約14 km)、南北方向に12分 (約22 km) であり、上層では東西方向に30分、南北方向に24分である。時間間隔は地上が1時間、上層は3時間である。気象要素は、地表面気圧、指定気圧面高度、風速、気温、相対湿度である。以上の気象要素について、時間方向・鉛直方向には線型内挿、水平方向には3次元スプライン内挿を行って初期条件とする。

2.5 診断方程式

風速の鉛直成分は質量保存則を用いて計算する。このモデルではブジネスク近似を用いているため、浅い対流に対する連続の式

$$\frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} + \frac{\partial hw^*}{\partial z^*} = 0 \quad (2-13)$$

を用いる。この式を鉛直方向に積分することにより w^* が求まる。

$$w^*(z^*) = -\frac{1}{h} \int_0^{z^*} \left(\frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} \right) dz^* \quad (2-14)$$

風速に対する移流拡散方程式の外力項中の圧力勾配項に含まれる Exner 関数は、静水圧の式

$$\frac{\partial \pi}{\partial z^*} = -\frac{g}{\eta \theta} \quad (2-15)$$

を鉛直方向に積分した式を用いて計算する。即ち、

$$\pi(z^*) = \pi_{top} + \frac{g}{\eta} \int_z^{\bar{H}} \theta^{-1} dz^* \quad (2-16)$$

である。ここで、 π_{top} はモデル上端での Exner 関数である。

2.6 側面境界条件

側面境界条件は、①内部の波を反射させず、②GPV データで与えられる総観場からの影響を領域内部に伝えるという二つの相反する役割を持つ。①については Oransky の radiation condition を採用することで表現する。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (2-17)$$

ここで、 C は波動の位相速度、 n は領域境界に対して垂直外向きの座標である。

この境界条件により計算される境界値を ϕ^+ 、GPV データから得た総観規模の外的条件を ϕ_{synop} とした時、新境界値は

$$\begin{aligned} \phi_{lateral} &= \phi^+ + \alpha(\phi_{synop} - \phi^+) \\ \alpha &= \min(1, \max(10^{\alpha(U_{IN}-U_0)/(U_1-U_0)}, 10^\alpha)) \\ (\alpha, U_0, U_1) &= (-3, 1m/s, -2m/s) \end{aligned} \quad (2-18)$$

で求める。ここで、 U_{IN} は領域境界に対して垂直内向きを正とする風速である。

2.7 上端境界条件

上部境界条件には、Klemp and Durran の radiation condition を用いる。この境界条件は、領域内部で発生して上方に伝わる重力波エネルギーを反射させないように、上部境界での圧力の値を決めるものである。

鉛直方向では、重力波の位相速度と群速度が異なる。ある条件下では両者は反対方向に伝播する。従って、上部境界でエネルギーが反射しないようにするためには、下向きに伝播する波動を与える必要がある。Klemp and Durran は、これを満たす鉛直風と圧力の関係を導出した。

境界での鉛直風のフーリエ変換

$$\hat{w}(k_x, k_y) = \iint w_{top} e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (2-19)$$

を用いて、波動エネルギーを反射しない圧力のフーリエ係数が次の式で与えられる。

$$\hat{\phi}(k_x, k_y) = \frac{N}{|k_x^2 + k_y^2|^{1/2}} \hat{w}(k_x, k_y), \quad N = \left(\frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta_{top}}{\partial z} \right)^{1/2} \quad (2-20)$$

ここで、 k_x 、 k_y は波数である。これより、圧力のフーリエ係数から圧力分布へのフーリエ逆変換を行って、モデル上端での静水圧を求める。

$$\phi(x, y, z_{top}) = \theta_0 \pi_b = \iint \hat{\phi}(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y. \quad (2-21)$$

ここで求めた π_b を用いて、 π_{top} を

$$\pi_{top} = \pi_{synop} + \pi_b \quad (2-22)$$

で求める。ここで π_{synop} はモデル上端において外部条件として与えられる圧力である。他の変数の境界条件は、総観規模のモデル上端での値を指定するか、勾配を指定する。

$$\phi_{top} = \phi_{synop}(H), \quad or \quad \left. \frac{\partial \phi}{\partial z^*} \right|_{top} = \left. \frac{\partial \phi_{synop}}{\partial z^*} \right|_{z=H} \quad (2-23)$$

特に、乱流量に対しては、

$$e_{top} = 0, \quad e^2 l_{top} = 0 \quad (2-24)$$

とする。

2.8 地表面境界条件

地表面境界条件は地表面からの乱流フラックスによって与えられる。各物理量 ϕ の地表面における鉛直方向の乱流フラックスは以下の式で表現される。

$$\begin{aligned} F_\phi &= U_* \phi_* \\ U_* &= (u_*^2 + v_*^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (2-25)$$

ここで、 ϕ_* は風速に対しては摩擦速度、温位に対しては摩擦温位、比湿に対しては摩擦比湿を表す。また、 ϕ_* は大気第 1 層（高度 z_1 ）での値 ϕ_1 と地表面での値 ϕ_{sc} を用いて次の式で表される。

$$\begin{aligned} \phi_* &= \frac{k(\phi_1 - \phi_{sc})}{\ln \frac{z_1}{z_{0\phi}} + \psi_\phi(\zeta_1, \zeta_0)}, \\ \zeta_0 &= \frac{z_{0\phi}}{L}, \quad \zeta_1 = \frac{z_1}{L}. \end{aligned} \quad (2-26)$$

k は von Karman 定数 (=0.4)、 $z_{0\phi}$ は物理量 ϕ に対する粗度である。Monin-Obukhov の安定度長 L 、安定度依存性を表す関数 ψ は次の式で定義される。

$$L = \frac{\theta u_*^2}{kg\theta_*} \quad (2-27)$$

$$\psi_\phi(\zeta_1, \zeta_0) = \int_{\zeta_0}^{\zeta_1} \frac{\varphi_\phi(\zeta) - 1}{\zeta} d\zeta \quad (2-28)$$

被積分関数の中に現れる $\varphi_\phi(\zeta)$ は、無次元（普遍）シア関数 (non-dimensional [universal] shear function) と呼ばれるものであり、本モデルでは以下の関数形を用いる。

$$\varphi_M = \begin{cases} (1 - 16.4\zeta)^{-1/4} & \text{for } \zeta < 0, \\ 1 + 8\zeta(1 + \zeta)^{-1} & \text{for } \zeta \geq 0 \end{cases} \quad (2-29)$$

$$\varphi_H = \begin{cases} (1 - 16.4\zeta)^{-1/2} & \text{for } \zeta < 0, \\ 1 + 8\zeta(1 + \zeta)^{-1} & \text{for } \zeta \geq 0 \end{cases} \quad (2-30)$$

φ_M は水平風速成分に対するシア関数、 φ_H は温位に対するシア関数で、本モデルでは後者をその他のスカラー量に対しても適用する。

ϕ_{sfc} は先に述べたように各物理量の地表面での値を表現している。風速の各成分は 0、温位については地表面熱収支式と地中熱伝導方程式を解いて求める（式は省略）。比湿の場合は、地表面温度での飽和比湿を用いて次の式で求める。

$$q_{sfc} = \{ q_{sat}(T_{sfc}) - q_1 \} \cdot \beta \quad (2-31)$$

ここで q_1 は第 1 層目の比湿、 β は土壤の湿潤度を表すパラメータであり、水面、植生面、湿潤な土壤面については 1、半乾燥土壤面の場合は過去の降水履歴から経験的に決められる値を取る。

3.雲物理モデル

3.1 概要

雲の生成消滅を記述するモデルには、研究の目的、対象領域および使用する計算機の能力に応じて様々な段階のものがある。詳細なものは雲水量や雨水量をあらわに計算しており、現時点で最も複雑なものは各格子点上での水滴・水粒子の粒径分布と単位体積あたりの粒子数を予測する⁸⁾。それに対して単純なモデルでは原理的な諸過程を診断的に予測するのみである。例としては、気象データの指定気圧面高度における相対湿度と経験則を用いて雲量を予測する「診断型」モデルがある⁹⁾。前述したように PHYSIC への降水過程導入の主要目的はレインアウト・ウォッシュアウトであるため、個々の水粒子の振る舞いまでは必ずしも予測する必要はないが、各グリッドにおける雲・雨の定量的な情報は必要である。従って本モデルでは雲の微物理過程をパラメタライズした Pielke のパラメタリゼーションを参考にした¹⁰⁾。Pielke のパラメタリゼーションは Lin *et al.* を基本としてまとめたものである¹²⁾。

Lin *et al.* のパラメタリゼーションは特に層状雲のみを対象としているのではなく、全ての降水過程を包括している。しかし基本的にグリッドスケールの現象が前提となっているため、発達した積乱雲等のようなサブグリッドスケールの擾乱は扱えない。そこで Pielke は Lin らのパラメタリゼーションから積雲対流に関わる部分を省いて層状雲形成パラメタリゼーションとし、積雲対流については新たなパラメタリゼーションを導入した。どちらを適用するかはそのグリッドが対流的に安定かどうかで判断する。即ち飽和相当温位の鉛直勾配が正ならば層状雲形成の、0 以下ならば積雲のパラメタリゼーションを用いる。

本報告では層状雲のみを扱っており、積雲および対流性降水は対象外とした。また、改良が必要であると思われる点については随時変更を行った。Pielke のパラメタリゼーションのうち一般化出来ないと思われる部分については導入を避け、Grell¹¹⁾の方法を導入した。

Pielke の方式では、大気中の水分を水蒸気・雲水・雲氷・雨・雪の 5 つのカテゴリーで表現している。従って水に関する方程式は合計 5 つとなる。以下では各状態を q_1^g 、 q_1^s 、 q_2^w 、 q_2^r 、 q_3 と表記する。下付きの数字は 1 が固相、2 が液相、3 が気相を表し、上付き文字は順に cloud ice、snow、cloud water、rain を表している。なお、雲水-雨、雲氷-雪の区別を行っているのは、降下速度が上昇・下降気流に比べて無視できる場合とそうでない場合に分ける必要があるからである。霰や雹については積雲形成過程で考慮する。

水の各カテゴリーについての方程式は他の物理量と同様に式 (2.2) で表現され、雲形成についてのパラメーターは外力項として与える。具体的には

$$hS_\phi = \begin{cases} -S_{condensation} + S_{evaporation} - S_{sublimation} + S_{sublimation} - P_{s4} + P_{R3} & \text{for water vapor} \\ S_{freezing} - S_{melting} + S_{sublimation} - S_{sublimation} - P_{s1} - P_{s2} & \text{for cloud ice} \\ S_{condensation} - S_{evaporation} - S_{freezing} + S_{melting} - P_{R1} - P_{R2} - P_{s3} & \text{for cloud water} \\ P_{s1} + P_{s2} + P_{s3} + P_{s4} - P_{s5} & \text{for snow} \\ P_{R1} + P_{R2} + P_{R5} - P_{R3} & \text{for rain} \end{cases} \quad (3-1)$$

である。外力項の各項に対する説明を Table 1 に、それぞれの関係図を Fig.2 に示す。

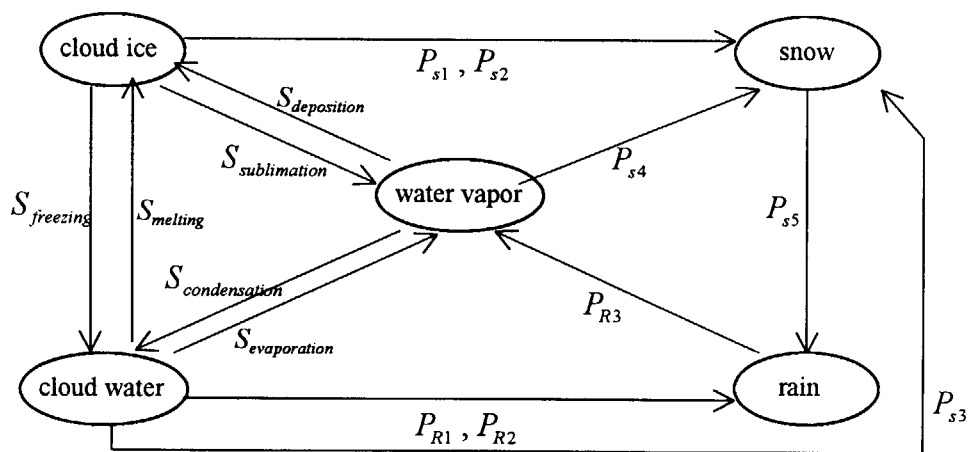


Fig.2 水についての各方程式の外力項関係図

Table 1(a) source-sink 項	
source-sink	
$S_{condensation}$: 凝結
$S_{evaporation}$: 蒸発
$S_{sublimation}$: 昇華
$S_{freezing}$: 凍結
$S_{melting}$: 融解

Table 1(b) パラメタリゼーションの説明	
雨雪形成に関するパラメタリゼーション	
P_{s1}	: 雲氷から雪へ
P_{s2}	: 雲氷の雪への付着
P_{s3}	: 雲水の雪への付着
P_{s4}	: 昇華による成長 (消滅)
P_{s5}	: 融解 (雨へ)
P_{R1}	: 雲水から雨へ
P_{R2}	: 雲水の雨への付着
P_{R3}	: 雨水からの蒸発

なお、雨および雪の式にはこのほかに重力降下項が加わり、

$$V_T \frac{\partial}{\partial z} q \quad ; \quad V_T = \frac{a \Gamma(d+4)}{6 (b_q)^{0.8}} \left(\frac{\rho_{zg}}{\rho} \right)^{1/2} \quad (3-2)$$

で表現される。 q は雨または雪の量 (kg kg^{-1})であり、 a および b_q は雨と雪それぞれに対応する定数である。この式では大気密度による降下速度の差が考慮されている。

雨および雪については更に降下速度による CFL 条件の破壊を考慮しなくてはならない。PHYSIC の鉛直グリッドは、境界層内の物理量を詳細に予報するため、地表に近いほど間隔が狭い不等間隔グリッドになっている。降雨雪を考慮しない場合は鉛直方向の運動は鉛直風のみであり、その絶対値が水平方向に比して小さく、また地表に近づくほど小さくなるために、地表面付近のグリッド間隔をかなり細かく取ることが可能であった。しかし激しい降雨時の降下速度は水平風速と同程度になるため、従来のグリッドを用いて計算すると下層で CFL 条件を満たさなくなる。そこで雨および雪に関しては通常の PHYSIC のグリッドとは異なるグリッド上で移流拡散計算を行う。

雨および雪に対する鉛直グリッド (雨雪グリッド) 決定は以下の方針で行う (Fig.3)。

- ・ CFL 条件を満たすために必要な ΔH を決める。今回の場合は $\Delta t = 30\text{sec}$ 、降下速度の最大値 (降雨の激しい場合) $\approx 10\text{m s}^{-1}$ であるため、 $\Delta H = 300\text{m}$ である。
- ・ 降雨および降雪以外は全て従来の PHYSIC のグリッド上で計算され、雨雪もこれらの要素と相互作用しているため、従来の PHYSIC グリッドのサブセットとして雨雪グリッドを定義する。
- ・ 基準グリッドから ΔH を越えた最初の PHYSIC グリッドを次の雨雪グリッドとする。従って雨雪グリッドも一般に不等間隔グリッドである。

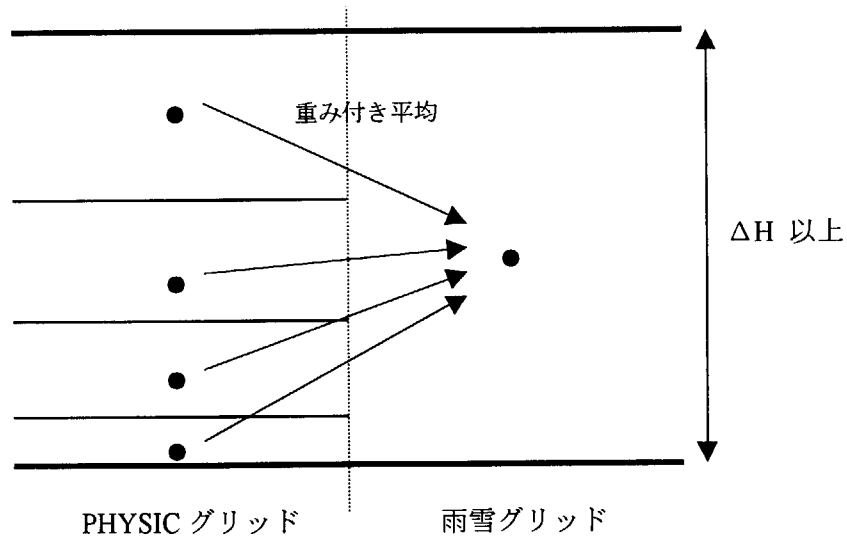


Fig.3 雨雪グリッドと PHYSIC グリッドの関係図

雨および雪 ($q \text{ kg kg}^{-1}$)に対する地表面フラックス F_q は

$$F_q = -V_q^T|_{z=0} \cdot q|_{z=1} \quad (3-3)$$

であり、計算開始からの積算降水量は

$$Precipitation = - \int_0^T (F_{q_1} + F_{q_2}) dt \quad (3-4)$$

で表現される。ここで、 T は計算開始からの時間を示す。

3.2 水の相変化過程

a) 凝結・昇華

凝結、昇華は以下の式を用いて計算する。

$$S = -\delta \left[u \cdot \left(\frac{\partial q_{sat}}{\partial x} \right)_z + v \cdot \left(\frac{\partial q_{sat}}{\partial y} \right)_z + w^* \cdot \left(\frac{\partial q_{sat}}{\partial z^*} \right) \right] \quad (3-5)$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{for } q_3 \geq q_{sat} \\ 0 & \text{for } q_3 < q_{sat} \end{cases}$$

q_{sat} は、凝結が起こる時は水に対する飽和比湿、昇華が起こる時は氷に対する飽和比湿を表す。この式は凝結・昇華は飽和比湿勾配と風速の符号が逆の時に起こることを意味している。即ち、凝結が起こるのは、飽和または過飽和の条件下で温暖湿潤な空気塊の低温領域への移流がある時である。Pielke は飽和比湿勾配の鉛直成分のみを取り入れており、水平成分は無視しているが、広域化を行う場合は水平勾配も無視できないため、新たに付け加えた。

本モデルでは凝結核および氷晶核の効果を考慮していないため、凝結と昇華の区別は温度しきい値を用いて行う。微小水滴は凝結核のない状態ではかなりの低温下でも過冷却の状態で存在するが、現実の雲物理過程では氷晶核が存在するために比較的高い温度でも雲氷となる。その温度は氷晶核の種類に依存する。これらの事情を考慮し、現在は温度しきい値を便宜上 -2°C に設定している。即ちグリッドの気温が -2°C 以上であれば雲水、 -2°C 未満であれば雲氷を生成するものとし、同時に双方を生成することはないものとする。この値は現実に基づいたものではないため、モデルの計算結果を左右する重要な要素となり得る。再現計算の際には降水量や雲量データと比較しながら試行錯誤して決定する必要がある。

凝結・昇華の際には潜熱が放出され、温度が上昇し、飽和比湿の値が変化する。これに伴って飽和比湿の勾配も変化するため、最終的な凝結・昇華量を求めるためには繰り返し計算を行う必要がある。

凝結時に放出される潜熱による温度上昇は以下の式で計算される。

$$\delta T = \frac{1}{c_p} [\delta_s L_s S_{sublimation} + \delta_c L_c S_{condensation}] \quad (3-6)$$

ここで計算した新しい温度の値を用いて再び凝結量を求め、凝結量の変化が無視できる量になるまで繰り返し計算を行う。この操作を行うことにより、各グリッドの過飽和状態はほぼ解消される。

b) 蒸発、昇華

Pielke のパラメタリゼーションでは考慮されていないが、高気圧性沈降等による雲の消滅を扱えるようにするため、凝結・昇華の逆プロセスである蒸発・昇華（固相→液相）を導入した。蒸発は未飽和かつ雲粒が存在するという条件下では必ず起こるものとし、そのグリッドが飽和になるか雲水が 0 になるかいずれかの状態になるまで行う。蒸発量は潜熱吸収による温度効果を考慮して求める。

蒸発前の気温、比湿、飽和比湿をそれぞれ T 、 q_3 、 q_{sat} 、蒸発後を T^* 、 q_3^* 、 q_{sat}^* とした時

$$l(q_3^* - q_3) = -c_p(T^* - T) \quad (3-7)$$

$$(q_3^* = q_{sat}(T^*))$$

が成り立つように q_3^* を求める。書き換えると

$$T^* = T - \frac{l}{c_p} [q_{sat}(T^*) - q_3] \quad (3-8)$$

となり、ニュートン法で解く。最終的な蒸発量は

$$S_{evaporation} = \min[q_3^* - q_3, q_2^{cw}] \quad (3-9)$$

で求められる。

c) 凍結、融解

種々の実験が示すとおり、水は約-40°C以下になると過冷却水滴の形で存在できず、自発的に凍結する。従って-40°C高度を越えた雲は全て氷粒子から成り立っているといえる。そこで本モデルでは-40°C以下で雲水が存在する場合には全て雲氷に変換することとした。

同様に、0°C以上で雲氷が存在する場合には全て雲水に変換することとする。現実には 0°Cを上回っても雲氷・雪が存在する場合もあるが、外的条件の定式化が不可能

であるため、 0°C をしきい値とした。

具体的には以下の式を用いて計算する。

$$S_{freezing} = \delta_f \frac{\delta q_{ci}}{\delta t}, \quad \delta_f = \begin{cases} 1; \text{temp} \leq -40^{\circ}\text{C} \text{ and } q_{cw} > 0 \\ 0; \text{otherwise} \end{cases}$$

$$S_{melting} = \delta_m \frac{\delta q_{cw}}{\delta t}, \quad \delta_m = \begin{cases} 1; \text{temp} > 0^{\circ}\text{C} \text{ and } q_{ci} > 0 \\ 0; \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-10)$$

温度上昇（降下）量は式 (3.6)と同様に計算する。なお、凍結・融解の場合は温位変化による繰り返し計算は行わない。その理由は、しきい値がどちらも便宜的なものであることと、潜熱解放・吸収による温度上昇・降下が起こっても元の相が存在可能であることである。

3.3 雨雪形成に関するパラメタリゼーション

以下に示すパラメタリゼーションは基本的に Lin *et al.* をまとめたものである。単位は全て s^{-1} である。雪に関するパラメタリゼーションは全て六角形の霰状の雪に対するものである。

a) P_{s1} : 雲氷から雪への変化

$$P_{s1} = \alpha_1 (q_1^{ci} - 0.0005)$$

$$\alpha_1 = 10^{-3} \exp(0.025(T - 273.16)) ; T < 0^{\circ}\text{C} \quad (3-11)$$

この項には雲の微物理過程は含まれておらず、雲氷が 0.5g kg^{-1} を越えた場合に温度に対応した量の雪に変換するという機械的なものである。Pielke の論文では auto conversion term と書かれている。Pielke はしきい値を 1g kg^{-1} にしているが、層状雲の場合に雲氷量がこの値を越えるのは稀であるために緩和した。なお、 0.5g kg^{-1} は層状雲の雲水量の平均的な値である。この項の効果により、雲氷量が非現実的に大きな値を取ることがなくなる。

b) P_{s2} : 雲氷の雪への併合

$$P_{s2} = \frac{0.79 E_s^{ci} n_{0s} c q_1^{ci} \Gamma(3+d)}{b_s^{3+d}} \left(\frac{\rho_{zg}}{\rho} \right)^{1/2},$$

$$E_s^{ci} = \exp(0.025(T - 273.16)). \quad (3-12)$$

この項は $T < 0^{\circ}\text{C}$ かつ雲氷量が 0 以上の時に計算される。 $(\rho_{zg} / \rho)^{1/2}$ は降下速度の変化に対応したもので、 ρ_{zg} は地表面における空気の密度を表す。また $d = 0.25$ 、 $c = 152.93 \text{ cm}^{0.75} \text{ s}^{-1} = 4.836 \text{ m}^{0.75} \text{ s}^{-1}$ である。 n_{0s} 、 b_s は Marshall - Palmer 分布と呼ばれる式

$$n_s = n_{0s} * \exp(-b_s D_s) \quad (3-13)$$

で定義される。ここで D_s は雪の直径、 n_s はある直径の値に対する単位体積あたりの雪の数である。 n_{0s} は観測で決められる値で、Pielke は $3 \times 10^6 \text{ m}^{-4}$ を採用した。また

$$b_s = (\pi \rho_s n_{0s} / \rho q_1^s) \quad (3-14)$$

であり、 ρ_s は雪の密度 (100 kg m^{-3} ; 六角形の霰状の雪に対する値) である。

c) P_{s3} : 雲水の雪への併合

$$P_{s3} = \frac{0.79 n_{0s} c q_2^{cw} \Gamma(3+d)}{b_s^{3+d}} \left(\frac{\rho_{zg}}{\rho} \right)^{1/2} \quad (3-15)$$

この項も $T < 0^{\circ}\text{C}$ かつ雲氷量 0 以上の場合のみ計算される。変数は前述のものと同じである。

d) P_{s4} : 雪の昇華による成長 (消失)

$$P_{s4} = \frac{6.28 (S_i - 1)}{\rho (a_1 + a_2)} n_{0s} \left[0.78 b_s^{-0.2} + 0.31 s_c^{1/3} \Gamma\left(\frac{d+5}{2}\right) c^{0.5} \left(\frac{\rho_{zg}}{\rho}\right)^{1/4} \nu^{-0.5} b_s^{\frac{d+5}{2}} \right],$$

$$a_1 = \frac{L_s^2}{k_a R_v T^2}, \quad a_2 = \frac{1}{\rho q_{sati} \psi} \quad (3-16)$$

$T < 0^{\circ}\text{C}$ かつ雲氷量が 0 以上の時に計算され、過飽和の時は昇華による成長、そうでない場合は消失を表す。 S_i は相対湿度であり、 $S_i - 1$ は過飽和 (未飽和) 度を示す。また $d = 0.25$ であり、この d に対して $\Gamma(d+5/2) = 1.79$ である。また、 ν は空気の動粘性係数、 s_c はシュミット数、 ϕ は水蒸気の分子拡散係数、 k_a は空気の熱伝導率をそれぞれ示している。

e) P_{s5} : 雪の融解

$$P_{s5} = -\frac{6.28}{\rho L_f} [k_a T - L_c \psi \rho (q_{sati} - q_3)] n_{0s} \\ * \left[0.78 b_s^{-2} + 0.31 s_c^{1/3} \Gamma\left(\frac{d+5}{2}\right) c^{0.5} \left(\frac{\rho_{zg}}{\rho}\right)^{1/4} v^{-0.5} b_s^{-\frac{d+5}{2}} \right] - \frac{c_w T}{L_f} P_{s3} \quad (3-17)$$

雲氷量が 0 以上かつ $T > 0$ °C の時に計算される。 c_w は液体水の比熱を示し、その値は $c_w = 4.187 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ である。その他の変数は前述の通りである。

f) P_{R1} : 雲水から雨への変換

$$P_{R1} = 10^{-3} (q_2^{cw} - 0.0005) \quad (3-18)$$

この項のみ NCAR-MM5 のモデルを参考にした。この項も P_{s1} と同じく auto conversion term で、雲の微物理過程を含んでおらず、雲水量が 0.5 g kg^{-1} を越えた場合に機械的な変換を行う。Lin *et al.* ではこの項について雨の粒径をもとにした詳細なパラメタリゼーションを行っているが、全ての条件下で使用できるような一般的なパラメーターではないとしている。なお Lin *et al.* はこの項が降水過程に与える影響について言及している。この項を考慮しないでモデル計算を行うと、この項を含んだ場合の計算と比較して降水強度が増大し降雨開始が遅くなる¹²⁾。これはこの項が降水過程に与える影響が大きいことを示しているため、検証に応用できる可能性がある。

g) P_{R2} : 雲水の雨への併合

$$P_{R2} = \frac{0.79 n_{0R} a_3 q_2^{cw} \Gamma(3+f)}{b_R^{3+f}} \left(\frac{\rho_{zg}}{\rho}\right)^{1/2} \quad (3-19)$$

この項は雲水が存在する時に計算される。 n_{0R} 、 b_R は (3.13) 式と同じように Marshall - Palmer 分布の式

$$n_R = n_{0R} * \exp(-b_R D_R) \quad (3-20)$$

で定義される。ここで D_R は雨水滴の直径、 n_R はある直径の値に対する単位体積あたりの雨の数である。また、 $n_{0R} = 10^7 \text{ m}^{-4}$ を採用した。 b_R は

$$b_R = (\pi \rho_R n_{0R} / \rho q_2^R) \quad (3-21)$$

で計算される。 ρ_R は液体水の密度 ($1 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$) である。また $f=0.8$ 、 $a_3=841.997 \text{ m}^{0.2} \text{ s}^{-1}$ 、 $\Gamma(3+f)=5.59$ である。なお、凝結による雨滴の成長は併合による成長に比べてかなり小さいので、ここでは考慮に入れていない。

h) P_{R3} : 雨からの蒸発

$$P_{R3} = -\frac{6.28(S_w - 1)}{\rho(a_1 + a_2)} n_{0R} \left[0.78 b_R^{-0.2} + 0.31 s_c^{1/3} \Gamma\left(\frac{f+5}{2}\right) a_3^{0.5} \left(\frac{\rho_{zg}}{\rho}\right)^{1/4} v^{-0.5} b_s^{-\frac{f+5}{2}} \right],$$

$$a_1 = \frac{L_c^2}{k_a R_v T^2}, \quad a_2 = \frac{1}{\rho q_{satw} \Psi} \quad (3-22)$$

この項は雲水が 0 以上かつ未飽和 ($S_w < 1$) のときに計算する。前述の f の値に対して $\Gamma(f+5/2)=1.92$ である。

4. 計算コード

4.1 サブルーチンの概要

PHYSIC は現在、Local - Dry、Local - Wet、Regional の3種類のバージョンがある。今回整備を進めた Local - Wet Version を構成するプログラムのファイル名を以下に示す。ファイル名中の 42 という数字はバージョンを表し、数字の後に w のついたプログラムは湿潤モデル独自のモジュール（湿潤過程計算のための式およびパラメータが含まれているもの）を示す。一部の例外を除き、各ファイルはサブルーチン名が連想されるファイル名（サブルーチン名.f、サブルーチン名*.f 等）で収録されている。

- ・ メインプログラム

zroot42w.f

- ・ 計算下準備

pread42.f ネームリスト読み込み

tcal42.f 時間パラメータ計算

- ・ Block Data

blkd42w.f 主要定数の定義

- ・ グリッド関係

initms42.f 格子定義

initb42.f 地形データ、土地利用データ、粗度長データ読み込み

initzm42.f z*高度定義

rainzmsh42w.f 雨雪に対するグリッド定義

- ・ メインソルバおよびインターフェースサブルーチン

hifiivd42.f メインソルバルーチン

hifiu42.f 水平風速に対するインターフェースサブルーチン

hifit42.f 温位に対するインターフェースサブルーチン

hifie42.f 乱流量に対するインターフェースサブルーチン

hifiq42w.f 比湿に対するインターフェースサブルーチン

hifiqci42w.f 雲氷に対するインターフェースサブルーチン

hifiqcw42w.f 雲氷に対するインターフェースサブルーチン

hifiqr42w.f 雨に対するインターフェースサブルーチン

- hifiqs42w.f 雪に対するインターフェースサブルーチン
- ・ 入力気象データ関係
 - preadgpv42w.f 気象データ読み込み
 - uvmscn42w.f 気象データ内挿
 - ・ 境界条件
 - vslmn42w.f 地表面熱収支計算
 - saveod42w.f 境界条件計算
 - cmchcl42.f 地表面-大気 交換係数計算
 - ・ 物理量計算
 - pcal42w.f 気圧計算
 - rdtn42.f 放射計算
 - wcal42.f 鉛直風計算
 - initpf42.f 乱流量初期化計算
 - vsfpr42.f 乱流量計算
 - vtp42.f 静圧計算
 - yfft42.f 静圧計算用 FFT ルーチン
 - ・ 雲形成過程
 - convert42w.f 雨雪変換に関するパラメタリゼーション計算
 - eli2va42w.f 蒸発量計算
 - exforce42w.f 水の凝結、蒸発、昇華、凝固、融解の計算
 - ・ デバッグ出力
 - debugw42.f
 - outchk42.f
 - outpr42.f
 - outsdd42.f
 - ・ 関数
 - faipsy42w.f
 - ・ INCLUDE ファイル
 - INCLGLB0

INCLGLB1
 INCLGLBX
 INCLIPRF
 INCLMNVP
 INCLNUM
 INCLPARA
 INCLSF
 INCLSOIL
 INCSTFN1
 VINCLGLB
 VINCLSL

・文関数定義のためのインクルードファイル

SHMD
 SHMDD

4.2 湿潤モデル独自の変数

1) インクルードファイル INCLGLB0 で宣言された変数

RDAIR	乾燥空気に対する気体定数	[J K ⁻¹ kg ⁻¹]
CPAIR	乾燥空気の定圧比熱	[J K ⁻¹ kg ⁻¹]
CONDL	凝結の潜熱	[J kg ⁻¹]
SUBLL	昇華の潜熱	[J kg ⁻¹]
FREEZL	凝結の潜熱	[J kg ⁻¹]
THV	氷/水の変換に関する温度しきい値	[°C]

2) インクルードファイル INCLGLBX で宣言された変数

QQ	水蒸気 (単位質量の空気中の水蒸気重量)	[kg kg ⁻¹]
QQCI	雲氷量 (同 雲氷重量)	[kg kg ⁻¹]
QQCW	雲水量 (同 雲水重量)	[kg kg ⁻¹]
QQR	雨水量 (同 雨水重量)	[kg kg ⁻¹]
QQS	雪量 (同 雪重量)	[kg kg ⁻¹]
QST	摩擦比湿	[kg kg ⁻¹]
PHPA	各グリッドにおける気圧	[hPa]

3) インクルードファイル INCLIPRF で宣言された変数

AXQGPV	気象データから内挿した比湿の側面境界条件 (西側境界)
BXQGPV	同上 (東側境界)
AYQGPV	同上 (南側境界)

BYQGPV	同上 (北側境界)	
AXQGB	radiation condition の計算から得た比湿の側面境界条件 (西側境界)	
BXQGB	同上 (東側境界)	
AYQGB	同上 (南側境界)	
BYQGB	同上 (北側境界)	
CZQGPV	比湿の上部境界条件計算に必要なモデル最上層の気象データ内 挿値	
CZQGB	CZQGPV の時間内挿値	
4) インクルードファイル INCLSOIL で宣言された変数		
QS	地表面における比湿の値	[kg kg ⁻¹]

4.3 湿潤過程導入に伴う変更点

1) zroot42w.f

- ・層状雲形成に係るサブルーチンの呼び出しを追加した。
- ・水の5つのカテゴリーの計算結果出力の部分を追加した。

2) preadgvp42w.f

- ・側面境界値定義の部分に比湿を追加した。

3) uvmscn42w.f

- ・内挿する気象データに比湿、気圧、ジオポテンシャルを追加した。
- ・気圧計算ルーチン呼び出し、その後定義式通りの温位計算を行う。

4) vslmn42w.f

- ・地表面フラックス計算に必要な地表面の物理量の計算に比湿を追加した。

5) saveod42w.f

- ・各気象要素の側面境界条件計算に比湿を追加した。

6) blk42w.f

- ・層状雲形成過程で頻繁に使用する潜熱や定圧比熱などを追加した。

7) faipsy42w.f

- ・関数 SHMD、SHMDD を削除し、代わりに組み込み関数 SHMD、SHMDD を定義した。

4.4 湿潤過程用サブルーチンの解説

1) SUBROUTINE PCAL

ソースファイル名 pcal42.f

機能概要 各グリッドにおける気圧の値を計算する。これにより、上層での飽和比湿および定義式による温位計算が可能になる。

引用関係 UVMSCN から引用される。

引数

TTST2	(NX,NY,NZ)	水平・鉛直内挿終了後の温度	[°C]
PPST1	(NX,NY,7)	水平内挿終了後の気圧	[hPa]

ファイルの入出力 なし。

主要な変数

PHPA	(NX,NY,NZ)	各グリッドにおける気圧	[hPa]
------	------------	-------------	-------

計算の内容

UVMSCN で内挿した地表面気圧の値を境界条件とし、静水圧の式を変形して得られる式

$$\frac{P_k}{P_{k+1}} = \exp\left(\frac{g}{\eta RT_{k+1/2}} \delta z_{k+1/2}^*\right) \quad (4-1)$$

を上方に向かって順次積分する。ここで、 $T_{k+1/2}$ は第 k 層と $k+1$ 層の平均気温、 δz^* はその間隔である。なお、UVMSCN から渡ってくる地表面気圧は海面補正值であるため、高度にあわせて補正を行う。

現在は計算継続時間が最高 1 日間であるため、気圧の時間変化を考慮していない。広域化に伴い計算時間が長くなる場合は、時間内挿できるようにプログラムを改良する必要がある。

2) SUBROUTINE RAINZMSH

ソースファイル名 rainzmsh.f

機能概要 INITZMSH により定義された PHYSIC グリッドを用いて降雨雪グリッドの定義を行う。

引用関係 MAIN から引用される。

引数

ZRAIN	出力	雨雪グリッドの各高度	[m]
DZRAIN	出力	雨雪グリッド間隔	[m]
NZFLG	出力	各雨雪グリッドの PHYSIC グリッドにおける位置	
NZRAIN	出力	雨雪グリッド総数	

ファイルの入出力 なし。

主要な変数

ZRAIN	(NZ)	雨雪グリッド高度 (z*系) [m]
ZST	(NZ*2)	PHYSIC グリッド高度 [m]
DZRAIN	(NZ)	雨雪グリッド間隔 [m]
NZFLG	INTEGER(NZ)	雨雪グリッドの PHYSIC グリッドにおける位置
NZRAIN	INTEGER	雨雪グリッド総数

計算の内容

雨雪グリッド定義のコンセプトは、前章に示したとおり、①グリッド間隔は最低 300m である②計算の最初で定義される PHYSIC グリッドを用いる の 2 点である。従って、任意の雨雪グリッドから 300m を越えた最初の PHYSIC グリッドを次の雨雪グリッドとして下から順に決定していく。なお、ZRAIN、NZFLG の第 1 番目は 0 とする。

3) SUBROUTINE EXFORCE

ソースファイル名 exforce.f

機能概要 雲形成消滅過程である凝結、蒸発、昇華、凍結、融解の計算を行う。

引用関係 MAIN から引用される。

ELI2VA を引用する。

引数 なし。

ファイルの入出力 なし。

主要な変数

QQ	(NX, NY, NZ)	比湿 (水蒸気)	[kg kg ⁻¹]
QQCW	(NX, NY, NZ)	雲水量	[kg kg ⁻¹]
QQCI	(NX, NY, NZ)	雲氷量	[kg kg ⁻¹]
COND	(NX, NY, NZ)	凝結量	
SUBL	(NX, NY, NZ)	昇華量	

計算の内容

計算の流れを Fig.4 に示す。

プログラムの最初で比湿と温度を計算し、まず凍結量と融解量を計算する。気温が -40°C 以下で雲水が存在するか、あるいは 0°C 以上で雲氷が存在する場合、その全量を凍結・融解させる。この時解放・吸収される潜熱による温度の上昇・降下も計算する。

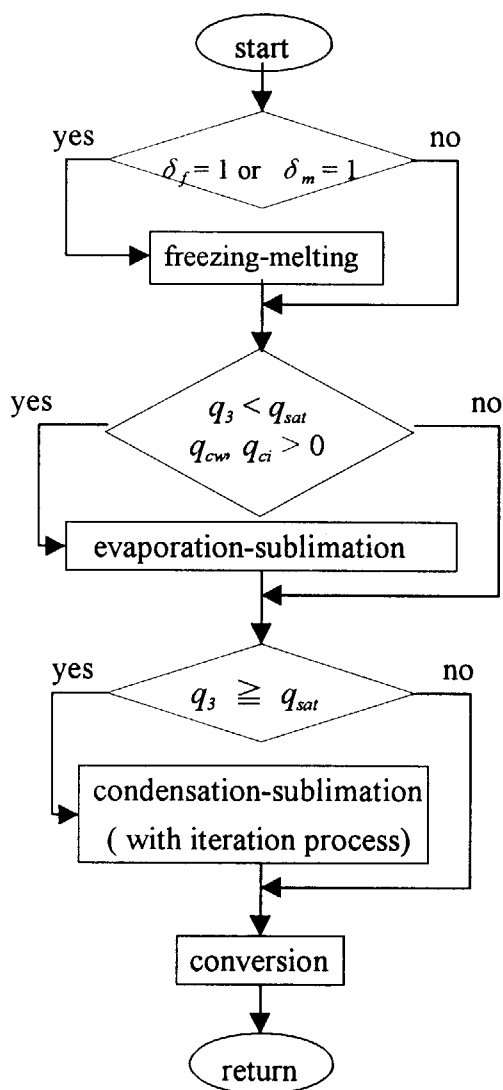


Fig.4 exforce.f のフローチャート

次に蒸発量を計算する。未飽和で雲水あるいは雲氷が存在する場合、飽和になるか雲水雲氷が 0 になるまで蒸発させる。最初に雲水について、次に雲氷についての計算を行う。水に対する飽和比湿の方が氷に対する飽和比湿より大きいため、0°C以下では水が先に蒸発するためである。この結果氷に対して過飽和になると氷粒子が成長する。この事情を考慮して計算の順序を決定した。最後に凝結量および昇華量を計算する。これらは飽和比湿の水平・鉛直勾配と風速の積から求めており、凝結・昇華による昇温量から再び飽和比湿勾配を求めるという繰り返し計算を行う。最後に、凝結量あるいは昇華量が正であり過飽和であるという条件を満たしたグリッドにおいて、水蒸気-雲水、水蒸気-雲氷の変換を行う。

4) SUBROUTINE CONVERT

ソースファイル名 convert.f

機能概要 雨雪形成に関するパラメーターの計算を行う。

引用関係 MAIN から引用される。
関数 SHMD を引用する。

引数

ZRAIN	入力	雨雪グリッド高度	[m]
DZRAIN	入力	雨雪グリッド間隔	[m]
NZFLG	入力	雨雪グリッドの PHYSIC グリッドにおける位置	
NZRAIN	入力	雨雪グリッド総数	
VTR	出力	降雨速度	[m s ⁻¹]

VTS	出力	降雪速度	[m s ⁻¹]
PS1	出力	雲氷から雪への変換量	[s ⁻¹]
PS2	出力	雲氷の雪への付着	[s ⁻¹]
PS3	出力	雲水の雪への付着	[s ⁻¹]
PS4	出力	昇華による雪の成長/消滅	[s ⁻¹]
PS5	出力	雪の融解量	[s ⁻¹]
PR1	出力	雲水から雨への変換量	[s ⁻¹]
PR2	出力	雲水の雨への付着	[s ⁻¹]
PR3	出力	雨水の蒸発量	[s ⁻¹]

ファイルの入出力 なし。

主要な変数

QQ	(NX,NY,NZ)	水蒸気	[kg kg ⁻¹]
QQCI	(NX,NY,NZ)	雲氷	[kg kg ⁻¹]
QQCW	(NX,NY,NZ)	雲水	[kg kg ⁻¹]
QQS	(NX,NY,NZRAIN)	雪	[kg kg ⁻¹]
QQR	(NX,NY,NZRAIN)	雨	[kg kg ⁻¹]
VTR	(NX,NY,NZRAIN)	降雨速度	[m s ⁻¹]
VTS	(NX,NY,NZRAIN)	降雪速度	[m s ⁻¹]
PS1	(NX,NY,NZ)	雲氷から雪への変換量	[s ⁻¹]
PS2	(NX,NY,NZ)	雲氷の雪への付着	[s ⁻¹]
PS3	(NX,NY,NZ)	雲水の雪への付着	[s ⁻¹]
PS4	(NX,NY,NZ)	昇華による雪の成長/消滅	[s ⁻¹]
PS5	(NX,NY,NZ)	雪の融解量	[s ⁻¹]
PR1	(NX,NY,NZ)	雲水から雨への変換量	[s ⁻¹]
PR2	(NX,NY,NZ)	雲水の雨への付着	[s ⁻¹]
PR3	(NX,NY,NZ)	雨水の蒸発量	[s ⁻¹]

計算の内容

ps1 から pr3 のうち、温度や雲水雲氷の有無などの条件を満たすものの計算を行う。計算は一般の PHYSIC グリッドで行い、プログラムの最後で全体の変換を行う。雨と雪に関しては雨グリッドの中に含まれる PHYSIC グリッド上の値の総和を取る。対象とするタイムステップの雨と雪の量が求められた後、降下速度の計算を行う。

5. 試験計算

5.1 計算条件

前章までに述べてきた層状雲形成過程をモデルに組み込み、以下に示す単純な条件で計算を行った。

- ・ 格子数 : 水平方向 50×50、鉛直方向 30
- ・ 計算領域 : 水平方向 100×100 km、鉛直方向 3,400 m
- ・ 地形 : y 方向に一様、x 軸中央を頂上とする山を設定
(詳細は Fig.5 を参照)
- ・ 計算継続時間 : 12 時間
- ・ 初期値 : 風速 : $u = 10.0 \text{ m s}^{-1}$ 、 $v = w = 0.0 \text{ m s}^{-1}$
 温位 : 25°C (領域内一定)
 地表面温位 : 25°C
 比湿 : 各グリッドの気温に対応する飽和比湿
 以後 $x = 100 \text{ km}$ (東側境界) から飽和空気の流入あり
 拡散係数 : 水平、鉛直ともに $0.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

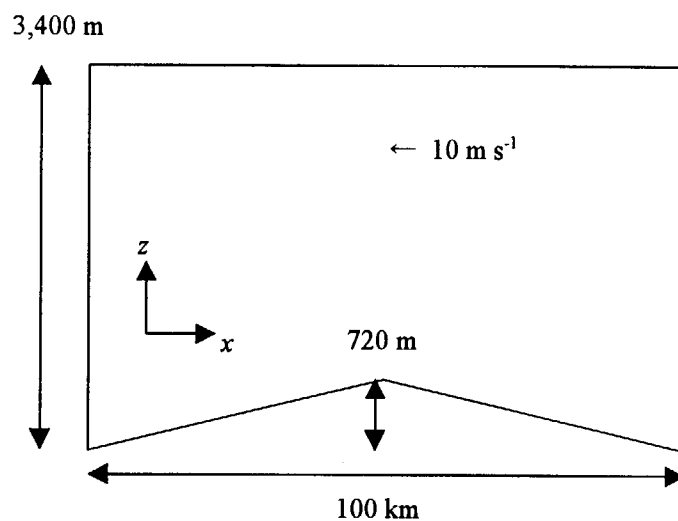


Fig.5 試験計算解析領域

5.2 結果および考察

前節で述べた条件に基づいて計算を行った結果を Fig.6 に示す。図は全て計算開始か

ら 12 時間後のもので、順に水蒸気、相対湿度、温度、雲水、雲氷、雨、雪の x-z 断面上の分布図である。同様に、8 種類の雨雪形成パラメーターの 12 時間の積算値も示した。各パラメーターの次元は s^{-1} であるため、図の値は無次元である。

雲の分布 (Fig.6(d), (e)) を見ると、中央の山に向かって雲が発生し、風下側で消えている。また雲と湿度の分布図はほぼ対応しており (Fig.6(b))、相対湿度 98% では雲は存在しない。温度の分布図では風下側で高温となっているが、これは雲物理過程で解放される潜熱に対応して温度上昇が起きているためである (Fig.6(a), (c))。また、風上側山頂付近で降水が見られる (Fig.6(f), (g))。上空の 0°C 以下の領域では雪として存在し、 0°C 高度で融解して雨となっている。

雨および雪形成のプロセスは以下の通りである。飽和した空気塊が斜面を登るにつれて雲水が発生し、山頂に向かうほど雲水量が増加する。雲水量が雨の形成のしきい値を越えると雨が形成される。PR1 (雨水の生成; Fig.6(h)) の分布は雲水量のピークに対応している。落下の過程で雲水を併合し (PR2; 雲水の雨への併合; Fig.6(i))、併合の量は降下速度に比例するため、PR2 の計算条件を満たす点においては下層ほど雲水量の減少が激しい。山頂付近の下層領域で雲水量が少なくなっているのはこのような理由による。

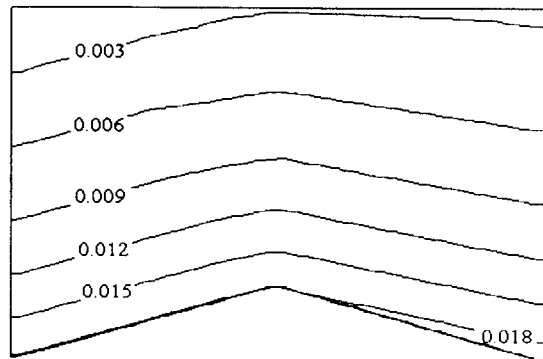
PR3 (雨水の蒸発; Fig.6(j)) の分布をみると、山頂より風下側で蒸発が起こっているのがわかる。なお、風上側上空にも蒸発している領域があるが、これはあるタイムステップにおいて水の相変化を考える際に一時的に未飽和状態になる場合があることによる。

雲氷、雪は風上側上層部に分布している。雲水量がしきい値を越えると雪が生成され (PS1; Fig.6(k))、雲氷や雲水を併合 (PS2; Fig.6(l)、PS3; Fig.6(m)) しながら、あるいは昇華により成長しながら (PS4; Fig.6(n)) 落下する。そして温度が 0°C を上回ると融解して (PS5; Fig.6(o)) 雨に変化する。雪の生成のピークと消滅のピークの出現高度が異なるのは、雲氷生成の温度しきい値と雪の融解温度に差があるためである。

1 時間毎に算出した積算降水量の分布を Fig.7 に示す。図の x 軸は x 方向のグリッドを示しており、 $x=25$ が山頂である。降水量のピークは山頂より風上側 ($x=33$ 付近) にあり、1 時間毎の降水量はほぼ一定でありながら次第に $x=33$ 付近のピークを増大させる形に移行している。これは上に述べた雲水の併合のプロセスによるものと思われる。即ち、雨ができはじめた時には降水は斜面の風上側に一様に分布しているが、併合が進行するにしたがって山頂近くの下層の雲水が消費されて降水量が減少し、移流による雲水の供給が十分である風上側に降水量ピークが移動していくと考えられる。

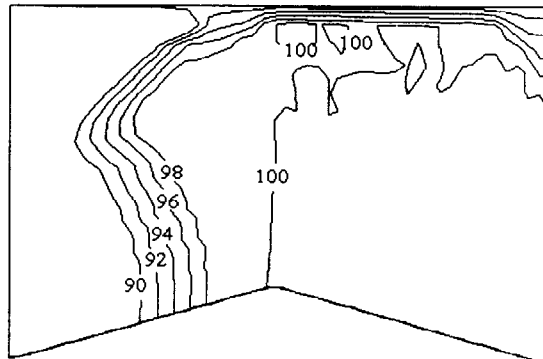
以上により、外力項としてモデルに挿入した各過程が矛盾なく計算されていることが示された。

なお、原研のベクトル並列計算機 VPP500 の 1CPU で 12 時間の計算を行った場合、CPU 時間は約 35 分であった。実際の地形データ、気象データを用いて計算を行う際には更に時間がかかることが予想されるため、ベクトル化・並列化などで高速化を図る必要がある。



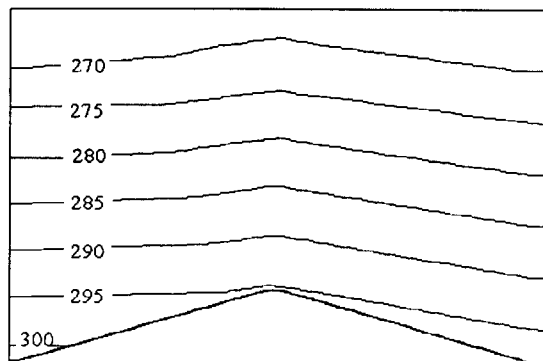
Water Vapor (kg/kg)

Fig.6 (a) 試験計算結果 (水蒸気)



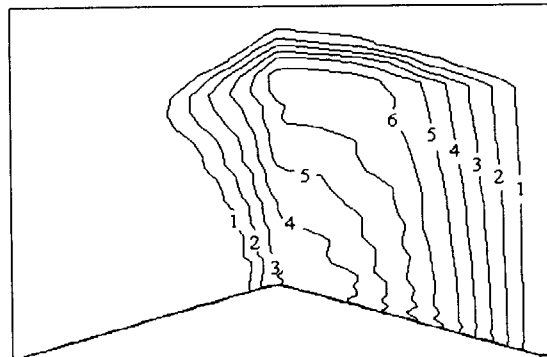
Relative Humidity (%)

Fig.6 (b) 試験計算結果 (相对湿度)



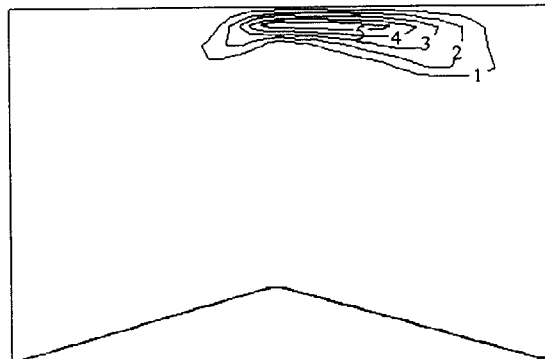
Temperature (K)

Fig.6 (c) 試験計算結果 (温度)



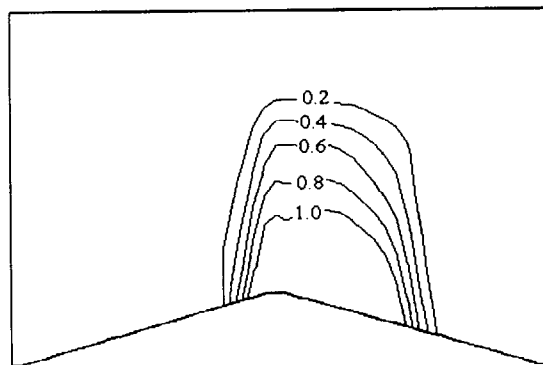
Cloud Water ($\times 10^{-4}$ kg/kg)

Fig.6(d) 試験計算結果 (雲水)



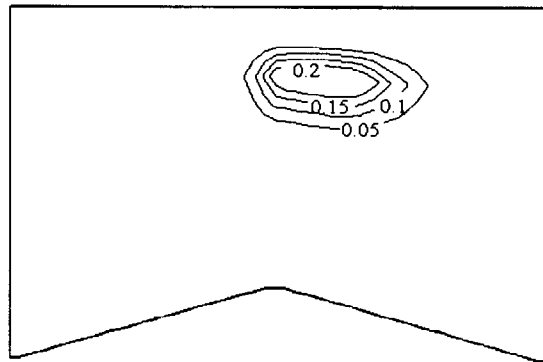
Cloud Ice ($\times 10^{-4}$ kg/kg)

Fig.6(e) 試験計算結果 (雲氷)



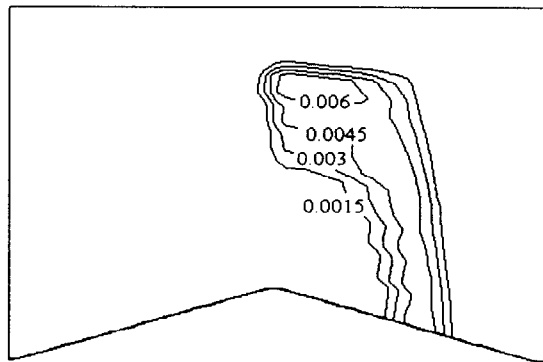
Rain ($\times 10^{-4}$ kg/kg)

Fig.6(f) 試験計算結果 (雨水)



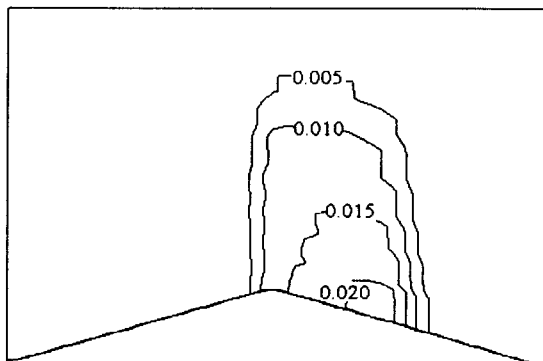
Snow ($\times 10^{-4}$ kg/kg)

Fig.6(g) 試験計算結果 (雪)



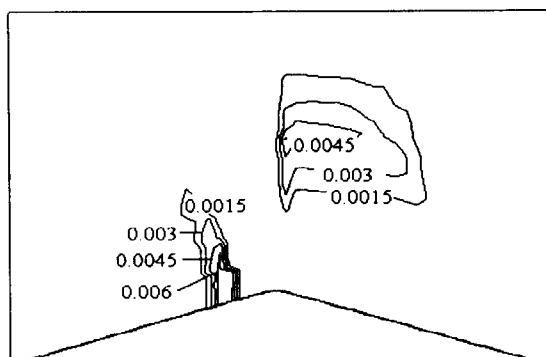
PR1

Fig.6(h) 試験計算結果 (PR1 ; 12 時間積算値、無次元)



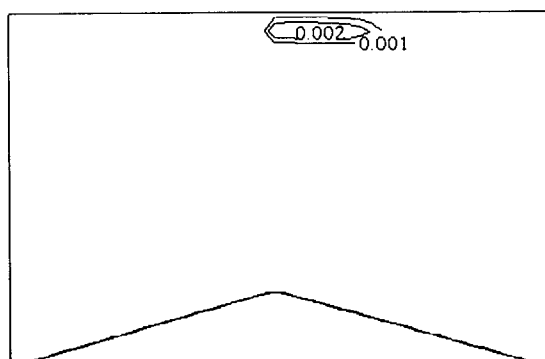
PR2

Fig.6(i) 試験計算結果 (PR2 ; 12 時間積算値、無次元)



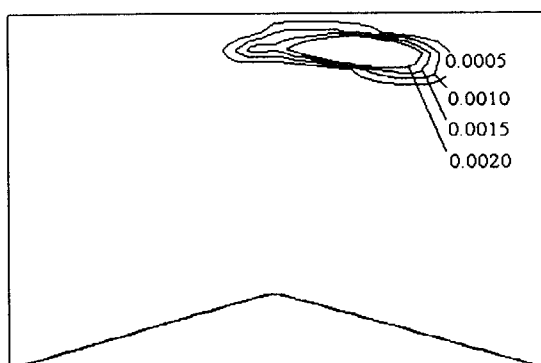
PR3

Fig.6(j) 試験計算結果 (PR3 ; 12 時間積算値、無次元)



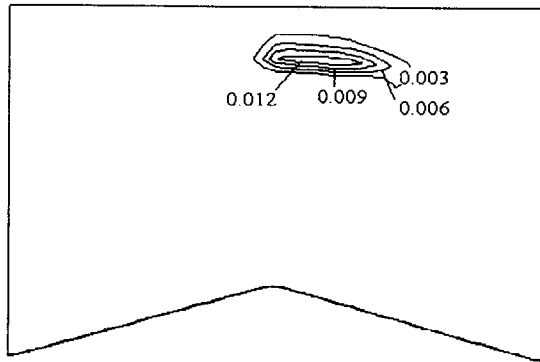
Ps1

Fig.6(k) 試験計算結果 (Ps1 ; 12 時間積算値、無次元)



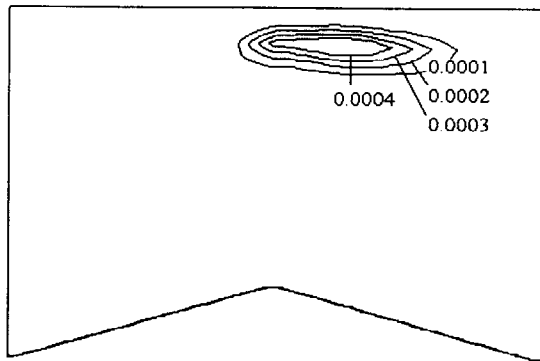
Ps2

Fig.6(l) 試験計算結果 (Ps2 ; 12 時間積算値、無次元)



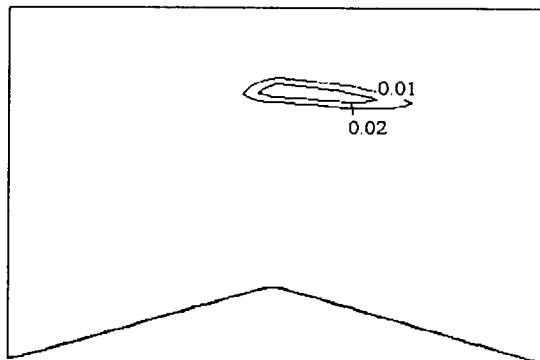
Ps3

Fig.6(m) 試験計算結果 (Ps3 ; 12 時間積算値、無次元)



Ps4

Fig.6(n) 試験計算結果 (Ps4 ; 12 時間積算値、無次元)



Ps5

Fig.6(o) 試験計算結果 (Ps5 ; 12 時間積算値、無次元)

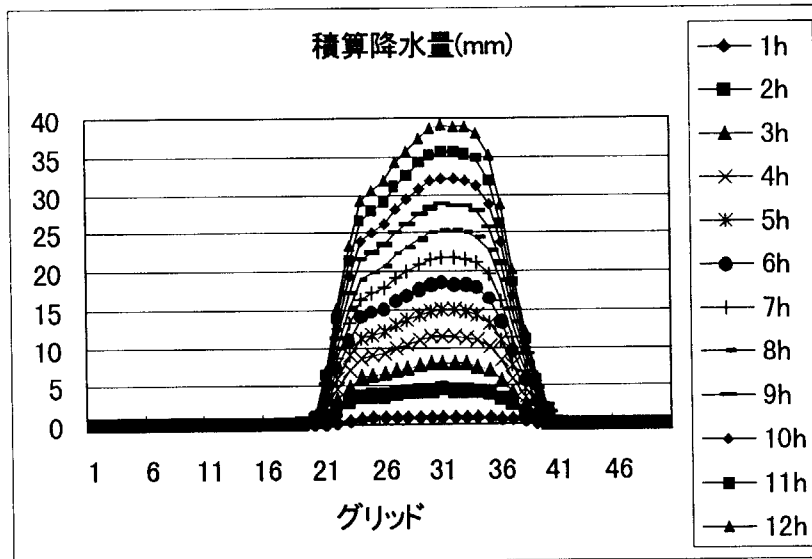


Fig.7 試験計算における積算降水量

6.まとめ

メソスケール大気力学モデル PHYSIC の改良の第一段階として、湿潤過程、層状雲形成消滅過程および降水過程の導入を行った。

外力項としてモデルに挿入した層状雲形成消滅過程および降水過程の試験を行うために、簡単な地形を用いた計算を行った。その結果、各過程が矛盾なく計算されていることが示された。

今後の課題としては、本モデルを実際の拡散計算の予報として用いるための準備が挙げられる。具体的には実際の地形および気象データを用いて種々の計算を行い、パラメータのチューニングおよび改良を行う。また、積雲形成過程および対流性降水過程の組み込みも検討している。

参考文献

1. Chino, M., H. Ishikawa, H. Yamazawa, H. Nagai, S. Moriuchi : WSPEEDI (Worldwide version of SPEEDI) : A Computer Code System for the Prediction of Radiological Impacts on Japanese due to a Nuclear Accident in Foreign Countries, JAERI 1334, (1995).
2. 山澤 弘実、茅野 政道、永井 晴康、古野 朗子 : 緊急時環境線量情報予測システム (世界版) WSPEEDI の開発と検証、日本原子力学会誌、**39**, 881 - 892, (1997).
3. Nodop, K., R. Connolly, F. Girardi : *Proc. ETEX Symposium on Long-Range Atmospheric Transport, Model Verification and Emergency Response*, Vienna, 59, (1997).
4. Yamazawa, H. : Development of a Three-Dimensional Local Scale Atmospheric Model With Turbulence Closure Model , *JAERI-M* , 89 - 062, (1989).
5. 山澤 弘実 : 高精度拡散評価モデル PHYSIC、*JAERI-M* , 92 - 102, (1992).
6. Nagai, H., H. Yamazawa : Utilization of Mesoscale Atmospheric Dynamic Model PHYSIC as a Meteorological Forecast Model in Nuclear Emergency Response System , *J. Nuc. Sci. Tec.* , **34**, 835 - 846, (1997).
7. Yamazawa, H. : Development of a Numerical Solution Method for Advection Terms and Its Application to the Atmospheric Dynamic Model, PHYSIC , *J. Nuc. Sci. Tec.* , **33**, 69 - 77, (1996).
8. 小倉 義光 : メソ気象の基礎理論、東京大学出版会、215, (1997).
9. Slingo, J. M. : The Development and verification of a cloud prediction scheme for the ECMWF model , *Q. J. R. Meteor. Soc.* , **113**, 899 - 927, (1987).
10. Pielke, R. A. : Mesoscale Meteorological Modeling , *Academic Press* , 612, (1984).
11. Grell, G. A. , J. Dudhia, D. R. Stauffer : A Description of the Fifth - Generation Penn State / NCAR Mesoscale Model (MM5) , *NCAR Technical Note* , 122, (1994).
12. Lin, Y. L , R. D. Farley, H. D. Orville : Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model , *J. Cli. Appl. Meteor.* , **22**, 1065 - 1092, (1983).

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 ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
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 ²
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 ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	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 × 10⁻¹⁹ J
 1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
 1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
 1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
 1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
 1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
 1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
 1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
 1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	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, 1 eV および 1 u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。
- EC閣僚理事会指令では 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 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁸	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

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

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

