

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE

**Documentation of the Meteorological Research Institute /
Numerical Prediction Division Unified Nonhydrostatic Model**

BY

**Kazuo Saito, Teruyuki Kato, Hisaki Eito
and
Chiashi Muroi**

気象研究所技術報告

第 42 号

気象研究所/数値予報課統一非静力学モデル

**斉藤和雄・加藤輝之・永戸久喜
室井ちあし**



気 象 研 究 所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

MARCH 2001

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE

Established in 1946

Director-General : Mr. Takashi Nakayama

Forecast Research Department	Director : Dr. Sadao Yoshizumi
Climate Research Department	Director : Mr. Hiroki Kondo
Typhoon Research Department	Director : Mr. Shouin Yagi
Physical Meteorology Research Department	Director : Mr. Tatekatsu Yoshida
Atmospheric Environment and Applied Meteorology Research Department	Director : Dr. Takayo Matsuo
Meteorological Satellite and Observation System Research Department	Director : Mr. Shigemichi Akagi
Seismology and Volcanology Research Department	Director : Dr. Akio Yoshida
Oceanographical Research Department	Director : Dr. Takeshi Uji
Geochemical Research Department	Director : Dr. Michio Hirota

1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 395-0052 Japan

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief : Shouin Yagi

Editors : Masakatsu Kato	Toshiro Inoue	Naoko Kitabatake
Kenichi Kusunoki	Naoko Seino	Yoshimasa Takaya
Takeyasu Yamamoto	Tamaki Yasuda	Hidekazu Matsueda
Managing Editors : Hiroshi Satoh, Takafumi Okada		

The *Technical Reports of the Meteorological Research Institute* has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute since 1978 as a medium for the publication of technical reports, data reports and comprehensive reports on meteorology, oceanography, seismology and related earth sciences (hereafter referred to as reports) contributed by the members of the MRI and the collaborating researches.

The Editing Committee reserves the right of decision on acceptability of manuscripts and is responsible for the final editing.

©2001 by the Meteorological Research Institute.

The copyright of reports in this journal belongs to the Meteorological Research Institute (MRI). Permission is granted to use figures, tables and short quotes from reports in this journal, provided that the source is acknowledged. Republication, reproduction, translation, and other uses of any extent of reports in this journal require written permission from the MRI.

In exception of this requirement, personal uses for research, study or educational purposes do not require permission from the MRI, provided that the source is acknowledged.

**Documentation of the Meteorological Research Institute /
Numerical Prediction Division Unified Nonhydrostatic Model**

BY

Kazuo Saito, Teruyuki Kato, and Hisaki Eito

*Forecast Research Department, Meteorological Research Institute
1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052 Japan*

and

Chiashi Muroi

*Numerical Prediction Division, Japan Meteorological Agency
1-3-4 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8122 Japan*

Contents

A. Preface	1
B. Overview of the model	2
C. Model equations	4
C-1. Governing equations	4
C-1-1 Basic equations in Cartesian coordinates	4
C-1-2 Mass-virtual potential temperature	5
C-1-3 Fundamental equations in conformal map projections	6
C-1-4 Fundamental equations in flux form	7
C-2. Fundamental equations in terrain-following coordinates	9
C-2-1 Equations in terrain-following coordinates	9
C-2-2 Quasi-compressible approximation	11
C-2-3 Anelastic approximation	12
C-2-4 Hydrostatic version of the anelastic model	12
C-3. Pressure equations	12
C-3-1 Pressure tendency equation in E-HI-VI scheme	13
C-3-2 Formulation of HE-VI scheme	15
C-3-3 Pressure diagnostic equation in anelastic version	17
C-3-4 Pressure equation in anelastic hydrostatic version	17
D. Finite discretization form and pressure equation solver	19
D-1. Grid structure	19
D-1-1 Structure of the staggered grid	19
D-1-2 Variable vertical grid	20
D-2. Finite discretization form	23
D-2-1 Finite discretization form for basic equations	23
D-2-2 Higher order discretization for advection terms	24
D-2-3 Modified centered difference scheme for advection	25
D-3. Pressure equation solver	27
D-3-1 Unified expression of the pressure equation	27
D-3-2 Finite discretization form for the pressure equation	28
D-3-3 Dimension Reduction Method	31
D-3-4 Pressure equation solver with the Gaussian elimination	33
E. Initiation of the model	35
E-1. Reference atmosphere and initial environmental field	35
E-1-1 Stand-alone case	35
E-1-2 Nested case	35
E-2. Start-up procedure	37

E-2-1	Adjustment of horizontal wind components	37
E-2-1	Vertical wind component	38
E-2-3	Mass-consistent variational calculus	38
E-2-4	Initialization of pressure in elastic models	39
F.	Boundary Conditions	40
F-1.	Boundary conditions for pressure equation.....	40
F-1-1	E-HI-VI scheme	40
F-1-2	AE scheme	41
F-2.	Lateral boundary conditions	42
F-2-1	Cyclic boundary condition	42
F-2-2	Open boundary condition.....	42
F-2-3	Mass flux adjustment for radiative nesting	44
F-2-4	Boundary relaxation.....	45
F-3.	Upper and lower boundary conditions	45
F-3-1	For velocity and potential temperature	45
F-3-2	Absorbing layer	46
G.	Physical processes and diffusion	47
G-1.	Cloud microphysics.....	47
G-1-1	General features of cloud microphysics	47
G-1-2	Box-Lagrangian rain drop scheme	47
G-1-3	Moist convective adjustment	49
G-1-4	Cloud amount prediction scheme	50
G-2.	Surface Boundary layer	51
G-2-1	Surface fluxes.....	51
G-2-2	Ground temperature	52
G-3.	Turbulent closure model	53
G-4.	Computational diffusion	54
G-5.	Atmospheric Radiation.....	54
G-5-1	Atmospheric radiation calculated using relative humidity	54
G-5-2	Atmospheric radiation for cloud resolving model	56
H.	Examples of numerical simulations	58
H-1.	Basic verification against 3-D linear mountain waves	58
H-1-1	Linear analytic solution of 3-D mountain waves	58
H-1-2	Comparison between numerical model and analytic solutions.....	59
H-2.	Forecast experiment of the 1993 Kagoshima torrential rain	62
H-2-1	Observation.....	62
H-2-2	Forecast with 25 km horizontal resolution	62
H-2-3	Forecast with 5 km horizontal resolution	62
H-3.	Statistical verification of rainfall prediction	67

H-3-1	Background and design of verification	67
H-3-2	Verification method	68
H-3-3	Verification results	70
H-4.	Cloud resolving simulation -- winter marine stratocumulus	73
H-4-1	Outline of numerical experiment	74
H-4-2	Results	74
I.	Model code structure	76
I-1.	Model structure and job steps	76
I-2.	Members and subroutine list of Job Step 3	76
I-2-1	Member list	76
I-2-2	Subroutine list	77
I-3.	Flow chart of Job Step 3	84
I-3-1	Initial declaration and setting	84
I-3-2	Model initiation	84
I-3-3	Time integration	87
J.	Relevant utilities	89
J-1.	Setting orography	89
J-1-1	Format of the orography file	89
J-1-2	Simple orography for idealized test	89
J-1-3	Real orography for arbitrary conformal projection	89
J-1-4	Subroutine list of Job step 1	90
J-2.	File conversion for nesting with RSM	92
J-2-1	Input and output files	92
J-2-2	Flowchart of Job step 2	94
J-2-3	Subroutine list of Job step 2	95
J-3.	Plot job	95
J-3-1	Model output file (1)	95
J-3-2	Model output file compressed by using integer* 2	96
K.	User's guide to running the model	98
K-1.	Getting started	98
K-2.	Setting the orography file	98
K-2-1	Simple orography for ideal test	98
K-2-2	Real orography for arbitrary conformal projection	99
K-3.	File conversion for nesting	101
K-3-1	Nesting with RSM	101
K-3-2	Self-nesting	105
K-4.	Model run	105
K-4-1	Stand-alone run	105
K-4-2	Nesting run with RSM	106

K-4-3 Control parameter card	107
K-5. Visualization	114
K-5-1 Plot job (1)	114
K-5-2 Plot job (2)	117
L. Remarks on developments underway	125
L-1. Code parallelization	125
L-2. Development for an operational NWP model at JMA	127
L-3. Spherical coordinate version for a global nonhydrostatic model	128
M. References	130

気象研究所/数値予報課統一非静力学モデル

斉藤和雄*・加藤輝之*・永戸久喜*

室井ちあし†

この技術報告は気象研究所予報研究部と気象庁数値予報課が共同開発している多目的非静力学モデルについて記述する。このモデルは、気象研究所予報研究部で開発された非静力学メソスケールモデルと気象庁数値予報課で開発された非静力モデルの統合モデルの第一歩として作成されたものである。

気象研究所予報研究部では、1991年に技術報告「気象研究所予報研究部で開発された非静水圧モデル (Ikawa and Saito, 1991)」を刊行した後、モデルを用いたメソスケール現象の機構解明についての研究とモデルの改良に取り組んできた。モデルはまず、気象庁領域モデルとのネスティングにより再現実験が可能なモデルに改良された。当初は支配方程式系として非弾性方程式系が用いられていたが、その後マップファクターを含む完全圧縮方程式系に改良され、さらに物理過程の強化や新しい工夫の追加などにより、本格的なメソスケールモデル (MRI-NHM) へと発展してきている (斉藤・加藤, 1999)。

気象庁数値予報課では、1997年から格子点法を用いる非静力学予報モデルの開発を開始し、データ同化手法や新しい計算機環境の下で現業に適した高い実行効率を達成するための計算手法などに配慮しながら、モデル開発を行ってきた (室井, 1998; 1999a)。

気象研究所と数値予報課では、これまでもソースプログラムを含む様々な技術情報の交換を積極的に行ってきたが、メソモデル開発については上記のようにそれぞれの機関である程度独立して行われてきた歴史的経緯があった。限られた人的資源の中で、近年の数値モデルの巨大化と計算機環境の急速な変化に対応していくために、モデルを出来る限り共有することによって両機関でより密接な協力体制を持つことが望まれるようになっていた。

このような情勢に鑑み、非静力学モデルについては、1999年2月に両機関のモデルを統合する方向で基本合意が成立し、いくつかのプランが検討された。最初のステップとして、MRI-NHMに数値予報課非静力モデルで開発されたスプリットイクスプリシット時間積分法 (HE-VIスキーム)を組み込むことにより統合モデル (MRI/NPD-NHM)を作成した (室井ほか, 1999)。今後、このモデルをベースに、次世代の計算機環境にも対応した現業予報と研究の双方に資する統一メソモデルを共同開発していくことで作業が始まっている。これらの意味において、この技術報告に記述されているモデルは、その一部は気象研究所予報研究部で開発されてきたMRI-NHMのいわば最後のバージョンであり、また一方で、全体としては両機関でのモデル共同開発のスタートラインとしての統合モデルの最初のバージョンでもある。

本モデルにはまだ多くの改良すべき点が残されている。分散主記憶型並列計算機への対応と最適化、現業予報モデルとしても用いるための環境の整備や高速化と計算安定性の保証、など喫緊なテーマがある。標準的コーディングルールに準拠したFORTRAN90への書き換えなども必要になってくるだろう。また力学フレームや境界条件、物理過程についても、多くの改良課題が残っている。これらのいくつかについては既に取り組みが始まっている。気象庁のモデル公開の方針を受けて、近い将来、このモデル

*気象研究所予報研究部

†気象庁数値予報課 (気象研究所予報研究部に併任)

は所定の手続きを経て気象庁内外の気象官署や大学などでも研究用に利用できるように体制が整備される予定になっている。今後、このモデルがより多くの人に利用され新しい研究成果を生み出す助けになるとともに、更にグレードアップしたモデルが将来新たな報告として刊行されることを期待している。

このモデルの開発にあたっては、非常に多くの方の協力・助力を頂いた。気象研究所では、長谷川隆司、古賀晴成、大塚伸、吉住禎夫の歴代の予報研究部長、および近藤洋輝(現気候研究部長)、丸山健人(現東京学芸大学)、和田美鈴(故人)の前予報研究部第一研究室長にいろいろお世話になった。吉崎正憲現予報研究部第一研究室長には、モデル開発とメソ現象の理解について特に多くのご指導を頂いた。さらに中村一、青梨和正、瀬古弘、栗原和夫(現気象庁気候情報課)、田宮久一郎、藤部文昭、金久博忠、上野充、村田昭彦、益子涉、清野直子、山本哲、村上正隆の各氏にも多くのご助力を頂いた。気象庁数値予報課では、佐藤信夫、岩崎俊樹、露木義の歴代の数値予報班長にいろいろお世話になったほか、中村誠臣、永田雅、郷田治稔、山田和孝の各氏にも、さまざまなご助力を頂いた。このモデルの物理過程のいくつかは、気象庁数値予報課で開発された JSM や RSM のソースプログラムを参考にしている。このモデルの力学コアや物理過程の重要な部分のいくつかは、1991年に急逝された気象研究所の故猪川元興主任研究官の仕事が基になっている。故人のご功勞に改めて深い敬意を表するものである。

本書の構成は以下のとおりとなっている。B章では、総説としてモデルの現時点での仕様が述べられる。C章では、モデルの基礎方程式系と気圧方程式の定式化が述べられる。D章では、モデルの差分表現と気圧方程式の数値解法が述べられる。E章とF章では、モデルの初期条件と境界条件についてを記述している。G章では、Ikawa and Saito (1991) より後に新たに追加された物理過程について説明している。H章ではモデルの検証と計算例をいくつか示した。I章ではモデルの構造を、J章では関連するユーティリティを記述した。K章は、モデルを実際に走らせるためのユーザーガイドである。L章には、現在進行中の取り組みのうち、分散主記憶型並列計算機への対応するための並列化の取り組みについてと気象庁の現業用メソモデルの開発についての数値予報課との共同の取り組みについて簡単に言及した。また最近開始した将来の全球非静力学モデルに向けての開発のための取り組みとしての球面直交曲線座標系バージョンについても簡単に紹介した。本報告は、C-2-4, C-3-4, D-2-3, G-1-2, G-1-3, G-1-4, G-2-2, G-5-1, H-3, J-3-2, K-5-2を主に加藤が、G-5-2, H-4を主に永戸が、C-3-2, L-2を主に室井が、I-2を全員が、それ以外を主に斉藤が書いた。図の作成に関して、筑波大学の佐藤友徳氏の協力を頂いた。

最後に、本原稿を精読して有益なコメントを下された査読者の方々にも感謝したい。