

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE No. 28

**DESCRIPTION OF A NONHYDROSTATIC MODEL
DEVELOPED AT THE FORECAST RESEARCH DEPARTMENT
OF THE MRI**

BY

Motohki IKAWA and Kazuo SAITO

気象研究所技術報告

第28号

気象研究所・予報研究部で開発された
非静水圧モデル

猪川元興・斉藤和雄

気 象 研 究 所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

DECEMBER 1991

Meteorological Research Institute

Established in 1946

Director-General: Mr. Toshiyoshi Tada

Forecast Research Department	Director: Mr. Ryuji Hasegawa
Climate Research Department	Director: Mr. Harushige Koga
Typhoon Research Department	Director: Mr. Shin Ohtsuka
Physical Meteorology Research Department	Director: Mr. Takenori Noumi
Applied Meteorology Research Department	Director: Dr. Koji Shigehara
Meteorological Satellite and Observation System Research Department	Director: Mr. Toyoaki Tanaka
Seismology and Volcanology Research Department	Director: Dr. Masaaki Seino
Oceanographical Research Department	Director: Mr. Masatake Kikuchi
Geochemical Research Department	Director: Mr. Toshiyoshi Tada

1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief: Masatake Kikuchi

Editors:	Yukio Misumi	Isamu Yagai	Masahiro Hara
	Shigeru Chubachi	Takahisa Kobayashi	Hiroshi Nirasawa
	Hidemichi Ito	Hiroshi Ishizaki	Yoshimi Suzuki
Managing Editors:	Yoshitsugu Nagasawa	Yukihisa Nakajima	

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 survey articles, technical reports, data reports and review articles on meteorology, oceanography, seismology and related geosciences, contributed by the members of the Meteorological Research Institute.

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

© 1991 by the Meteorological Research Institute.

The copyright of articles in this journal belongs to the Meteorological Research Institute (MRI). Permission is granted to use figures, tables and short quotes from articles in this journal, provided that the source is acknowledged. Republication, reproduction, translation, and other uses of any extent of articles in this journal, that are not for personal use in research, study, or teaching, require permission from the MRI.

序

本報告には、気象研究所予報研究部の猪川元興主任研究官により1980年に開発が始められ、1988年から斉藤和雄研究官が開発に参加して作成された、非静水圧モデルが記述されており、これは10年にわたるモデル開発の集大成である。

今日、日本の天気予報のベースになっている数値予報モデルは、鉛直方向に静力学近似を行ったプリミティブ方程式を用いており、これは総観規模の現象を主対象としたものである。

プリミティブ方程式は高周波内部重力波（音波）を解として持たないので、時間積分のステップが長くとれ、計算時間の節約ができるという利点がある。しかし、静力学近似は小さいスケールでは低周波内部重力波を正確に表現できないため、数 km 程度の小スケールの現象、例えば山岳波等を扱う場合には、静力学近似をしない方程式を用いることが望ましい。

近年、電子計算機の進展に伴い、数値モデルも格子間隔や鉛直方向の層を細かくとり、小さいスケールの現象も取り扱えるモデルが実用化されてきている。そして、今や、メソβスケールの現象についてもかなりよく表現できるようになってきた。

しかし、静水圧モデルで更に細かい現象を取り扱うモデルに発展させるには限界がある。これを打開するものとして、非静水圧モデルの開発が期待されるところである。

このような背景のもとに、本報告で述べられたモデルは、2つの目標をもって開発された。

一つは研究の道具として使用するため、対流雲の数値実験や山越え気流の数値実験として実行された。もう一つは、局地的な天気予報を行う将来の数値予報モデル構築への技術的情報を提供することである。

電子計算機が更に能力アップされるのに伴い、短時間、狭領域の数値予報において、近い将来、非静水圧モデルが静水圧モデルにとって変わるであろう。

すでに、イギリス気象局では非静水圧モデルが準ルーチンベースにのっており、カナダでも開発が進んでいるという。

本報告はモデルの3種のスキーム、境界条件の設定、乱流混合過程、雲物理過程のパラメタリゼーション、モデルの数値計算例、実際にモデルを走らせる場合の手法に至るまで、懇切丁寧に述べられている。

しかし、力学フレームや物理過程等について、今後、開発・改良すべき課題はまだ沢山ある。

本報告により、非静水圧モデルについての理解が深まり、開発・改良に携わる人が続き、種々の数値実験（メソモデルの構築）や今後の数値予報の展望が大きく開かれることを期待する。

最後に、本研究を実施した猪川主任研究官、斉藤研究官の功労を多とするとともに、建設的な意見・批判や有用な情報を提供して頂いた関係諸氏に心から感謝の意を表す。本研究の一層の

開発・改良にあたり今後とも御協力・御支援をお願いしたい。

平成3年7月

予報研究部長 長谷川 隆 司

追 記

本原稿が完成し、主執筆者の猪川主任研究官から「序」の執筆を依頼されてから、半年間が経過し、発刊が間近に迫った平成3年12月23日、突如として全く予期せぬ病（急性心不全）で猪川主任研究官が急逝された。生前、氏は健康そのものであっただけにその余りに急な鬼籍入りは今だに信じられない思いである。

研究者として脂の乗り切った時の氏の突然の逝去は気象研究所のみならず、世界の気象学の発展のためにも大きな損失であり、御遺族の深い悲しみを思うにつけ、誠に残念でならない。

非静水圧モデルの開発は氏のライフワークとも言えるもので、まさに氏が手塩にかけて畑を耕し、肥料をやり、種子を蒔き、若い樹木として育ててきたものである。今回に至るまでの道のりは決して平坦なものではなかったが、氏の持前の忍耐力と卓越した物理的・数学的センスをもってやりとおしたものであった。氏なくして、この若木を茂り実らせ立派な大樹として成長させていくことは並大抵ではないが、本稿の執筆者の一人であり、氏から直接指導を受けてきた斉藤研究官等の若い研究官がその衣鉢を継いでいくことが、氏への最大の報恩になることと信ずる。

刊行が遅れ遺稿の形になってしまい、完成本をお見せすることができなかったことを深く謝するとともに、慎んで御霊前に献げ、ここに猪川主任研究官の功労にあらためて深い敬意と哀悼の意を表し、御冥福を心よりお祈りする次第である。

平成3年12月

予報研究部長 長谷川 隆 司

気象研究所・予報研究部で開発された非静水圧モデル

猪川元興[†]・斉藤和雄[†]

この技術報告に書かれている非静水圧モデルは、気象研究所・予報研究部において1980年より猪川元興により開発がはじめられ、1984年山を取り扱えるように、1987年音波を包含する方程式も取り扱えるように拡張され、1988年斉藤和雄が開発に参加、1990年に一応の完成をみたものである。このモデルは、一つには研究の道具として使用するために、一つには、局地的な天気予報を行なう将来の数値予報モデル構築に対する有益な技術的情報を提供するために開発されてきた。研究の道具として、このモデルは、対流雲の数値実験（猪川他、1987；猪川、1988）や、山越え気流の数値実験（猪川・永沢、1989；猪川、1990；斉藤・猪川、1991）に使用されてきた。

電子計算機の進歩に伴い、短時間・狭領域数値予報においては、近い将来、非静水圧モデルが静水圧モデルにとってかわるであろう。ところで、非静水圧モデルの基本的計算スキームにはいくつか種類がある。このモデルでは、音波が除去された非弾性方程式（anelastic : AE）を用いる方式、音波を包含する弾性方程式を用い、水平・鉛直方向ともインプリシットに時間積分する方式（elastic-horizontally and vertically implicit : E-HI-VI）、弾性方程式を用い、水平方向にはイクスプリシットに、鉛直方向にはインプリシットに時間積分する方式（elastic-horizontally explicit-vertically implicit : E-HE-VI）が使用できて、3種のスキームが容易に相互比較できるようになっている。このモデルは3種のスキームのうち、どのスキームが将来の数値予報モデルにとって一番いいのか評価するのに便利である。

この技術報告の構成は次のようになっている。B章では、モデルの基本方程式とその差分表現が述べられる。3つのスキーム（AE, E-HI-VI, E-HE-VI）の定式化及び、その線形安定性解析がB-1～B-4で述べられる。可変格子上の気圧方程式の解法がB-6で、各種境界条件の設定の仕方が、B-7～B-9で述べられる。B-10では、乱流混合過程のパラメタリゼーションが示される。水蒸気、雲水、雨水、氷晶、雪、あられの混合比と、氷晶、雪、あられの数密度を予報変数に持つ雲物理過程のパラメタリゼーション法がB-11で述べられる。

C章では、モデルの数値計算例が示される。今まで印刷発表されてきた計算例は、ほとんど2次元の計算であったが、ここで示されるのは、3次元の計算例である。C-1では、3次元の非静水圧山岳波の線形解析解と数値解とを比較することによるモデルの検定がおこなわれる。C-2では、日本における局地風（関東地方の海陸風、四国のやまじ風）の計算例が示される。C-3では、

[†]気象研究所予報研究部

雲物理過程のパラメタリゼーション法の性能評価の為に行なった、冬期日本海上で発生する対流性降雪雲の数値実験結果が示される。D章、E章では、ジョブの流れ図、プログラムの流れ図、入力パラメーターの与え方、計算結果の出力法等、実際にモデルを走らせる場合に必要な事項が示される。B章にも、実際にモデルのプログラムを解説する人の便を考えて簡単な「Program Guide」が挿入されている。モデルの概要だけ知りたい読者にとってはB章の「Program Guide」とD及びE章は無視してもよい。

このモデルは多くの改良すべき点がある。力学フレームに関しては、①現在の2次のオーダーの精度から4次の精度をもつ差分法への変更、②ネスティング、③上端境界条件に放射条件を採用すること、④混成鉛直座標系（下層Z*系、上層Z系）の導入、⑤格子点モデルからスペクトルモデルへの変更などがある。物理過程については、①雲物理過程や乱流混合過程のパラメタリゼーション法の精密化、②放射過程の導入があげられる。さらにプログラムの虫とり、高速化、省記憶容量化などがある。

これらの点の開発・改良は、もはや1人や2人の力では困難である。モデルの詳細が書かれているこの技術報告により、モデルの改良がより多くの人の協力の下で行われることになれば幸いである。又、全く新しいモデルを初めから作り上げる場合にも、この技術報告がなんらかの役に立つことを期待している。

このモデルの開発にあたり、多くの人の協力・助力を得たことに、猪川・斉藤の2人の数値モデラーは感謝したい。内田英治、片山 昭、吉田泰治、相原正彦、久保田 効、嘉味田宗治の前予報研究部長の方々、増田善信、吉住禎夫、近藤洋輝、野口晋孝の前予報研究部・第1研究室長、広瀬元孝、野本真一前第2研究室長の方々、二宮洗三現気象庁海洋気象部長、長谷川隆司現予報研究部長及び丸山健人現第1研究室長にはいろいろお世話になった。特にモデルの力学フレームに関し、相原正彦、吉崎正憲の両氏から貴重なご意見をいただいた。又、雲物理過程のパラメタリゼーション法に関しては、物理気象研究部の松尾敬世、村上正隆、水野 量の三氏にいろいろ教えていただき、建設的な批判をいただいた。水野氏には、プログラムのいくつかのバグを発見・修正していただいた。応用気象研究部の木村富士男（現東北大）、高橋俊二の両氏からは日本の地形データを提供してもらった。さらに、気象研・電子計算機の整備・改善にあたられた歴代、企画室・電計管理班の方々（杉村秀夫、畠山太郎、重久陽亮、青木寿雄、山岬正紀）、本技術報告の印刷発行の事務をしていただいた企画室・調査官、永沢義嗣氏に御礼を申し上げる。

なお、この報告のB-10節以外のB章、C-3節、D及びE章は猪川が、B-10、C-1、C-2節は斉藤が書いた。

Description of a Nonhydrostatic Model
Developed at the Forecast Research Department
of the MRI

by

Motohki Ikawa and Kazuo Saito

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

Contents

A. Preface	1
B. Model equations and finite discretization form	5
B-1. Governing equations	7
B-1-1. Fundamental equations in Cartesian coordinates	7
B-1-2. Reference atmosphere and approximate equations	9
B-1-3. Governing equations in terrain following coordinates	11
B-1-4. Summary	13
B-2. AE (anelastic) scheme	15
B-2-1. Pressure equation for AE scheme	15
B-2-2. Hydrostatic approximation of the anelastic nonhydrostatic model	17
B-3. E-HI-VI (elastic-horizontally implicit-vertically implicit) scheme	19
B-3-1. Formulation with \bar{P}^t as unknown variables	19
B-3-2. A linear stability analysis of E-HI-VI-PI with orography	22
B-3-3. E-HI-VI-PI with $\Delta^2 P$ adopted as an unknown variable	26
B-3-4. Implicit treatment of gravity waves in addition to sound waves	28
B-4. E-HE-VI (elastic-horizontally explicit-vertically implicit) scheme	32
B-4-1. Formulation of E-HE-VI scheme with \bar{P}^r as unknown	32

B-4-2.	A linear stability analysis of a whole time step integration of E-HE-VI with orography	34
B-5.	Grid structure, variable grid and finite discretization form	39
B-5-1.	Grid structure	39
B-5-2.	Variable grid	41
B-5-3.	Finite discretization form on the variable staggered grid	41
B-6.	Pressure equation solver on variable grid	46
B-6-1.	The case of open (noncyclic) lateral boundary conditions	46
B-6-2.	The solvability condition and the constraint of mass conservation	53
B-6-3.	The case of cyclic lateral boundary conditions	54
B-7.	Lateral boundary conditions	56
B-7-1.	Cyclic boundary conditions	56
B-7-2.	Open boundary conditons	56
B-7-3.	Wall lateral boundary conditions	61
B-7-4.	Sponge layer	61
B-8.	Lower boundary conditions	63
B-8-1.	For velocity	63
B-8-2.	For Θ and Qv	63
B-8-3.	For pressure	64
B-9.	Upper boundary conditions	66
B-9-1.	For velocity	66
B-9-2.	For Θ and Qv	66
B-9-3.	For pressure	66
B-9-4.	Absorption layer	67
B-10.	Subgrid-scale turbulence	68
B-10-1.	Turbulent closure model	68
B-10-2.	Surface fluxes	70
B-11.	Cloud microphysics	72
B-11-1.	General features of cloud microphysics	72
B-11-2.	Production terms for cloud ice	77
B-11-3.	Production terms for snow	80
B-11-4.	Production terms for graupel	83
B-11-5.	Production terms for cloud water	90

B-11-6.	Production terms for rain	91
B-11-7.	Some numerical artifices	92
Appendix B-11-1.	List of symbols	93
Appendix B-11-2.	Figures of production terms for elementary cloud microphysical processes	100
B-12.	Computational diffusion	105
B-13.	Initial set-up procedures	107
B-13-1.	Preparation of eigen-vectors and eigen-values	107
B-13-2.	Initial environmental fields	107
B-13-3.	Reference atmosphere	107
B-13-4.	Reduction methods of initial shocks in the presence of mountains	108
B-13-5.	Initialization of pressure in elastic models	110
C.	Examples of numerical simulation by the model	111
C-1.	Verification of the model against 3-dimensional linear analytic solutions of nonhydrostatic mountain waves	113
C-1-1.	Linear analytic solutions of 3-D nonhydrostatic mountain waves	113
C-1-2.	Description of the numerical model	114
C-1-3.	Comparison between numerical and analytic solutions	115
C-2.	3-dimensional simulations of local winds in Japan	122
C-2-1.	Land-sea breeze in the Kanto district	122
C-2-2.	Local downslope wind "Yamaji-kaze" in Shikoku Island	126
C-3.	3-dimensional simulation of the convective snow cloud observed over the Sea of Japan — Sensitivity to ice crystal nucleation rates —	134
C-3-1.	Introduction	134
C-3-2.	Observations of the convective cloud	136
C-3-3.	Numerical model and parameterization of cloud microphysics	140
C-3-4.	Experimental design	140
C-3-5.	Results of reference experiment (EXDS1)	142
C-3-6.	Sensitivity experiments	155
C-3-7.	Comparison with observations	179
C-3-8.	Summary and conclusion	184

D.	Guide to running the model	189
D-1.	Flow charts of the program	191
D-1-1.	Job step	191
D-1-2.	Flow chart of the main program "SIMAIN" for the job step 2	191
D-1-3.	Flow chart of the subroutine CADVC3	193
D-1-4.	Flow chart of the subroutine SVELC	193
D-1-5.	Flow chart of sub.SCPI	195
D-1-6.	Flow chart of the subroutine FTVELC	195
D-1-7.	Flow chart of sub.CPTQVS	197
D-1-8.	Flow chart of sub.CQS3	198
D-2.	Specification of system parameters	200
D-2-1.	P1	200
D-2-2.	P2	200
D-2-3.	P3	201
D-2-4.	P4	203
D-3.	Scheme selection among AE, E-HI-VI and E-HE-VI	204
D-4.	Size of the domain, grid indexing and variable grid generation	205
D-5.	Specification of the boundary conditions	208
D-5-1.	Lateral boundary conditions	208
D-5-2.	Lower boundary conditions	209
D-5-3.	Upper boundary conditions	211
D-6.	Specification of initial environmental fields	212
D-7.	Initiation method of convection	213
D-7-1.	Thermal bubble initiation	213
D-7-2.	Cold dome initiation	213
D-8.	Generation of mountain shape and metric tensors	214
D-9.	Specification of computational diffusion	215
D-9-1.	Nonlinear damping Dn	215
D-9-2.	Fourth-order linear damping	215
D-9-3.	Rayleigh damping near the upper boundary	216
D-9-4.	Rayleigh damping near the lateral boundary	216
D-9-5.	Damping in the time integrations schemes	217
D-10.	Store of the results and restart	218

E.	Plotting of the model results	219
E-1.	Format of the stored results in magnetic tape	221
E-2.	Plot of the $(x-z, y-z, x-y)$ cross sections at the fixed time	224
E-3.	Plot of the $(x-t, y-t, z-t)$ cross sections for the fixed plane	227
E-4.	An example of input parameter list for the program "PLPMN"	228
F.	References	231