

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE NO.13

A DESCRIPTION OF THE MRI ATMOSPHERIC GENERAL
CIRCULATION MODEL (THE MRI · GCM— I)

BY

FORECAST RESEARCH DIVISION, MRI

気象研究所技術報告

第13号

気象研究所大気大循環モデル— I (MRI · GCM— I)

予報研究部

気象研究所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

DECEMBER 1984

Meteorological Research Institute

Established in 1946

Director : Dr. Kiyohide Takeuchi

Forecast Research Division	Head : Mr. Taiji Yoshida
Typhoon Research Division	Head : Dr. Masahiko Aihara
Physical Meteorology Research Division	Head : Dr. Toshio Okabayashi
Applied Meteorology Research Division	Head : Mr. Tsunehiro Majima
Meteorological Satellite Research Division	Head : Dr. Keikichi Naito
Seismology and Volcanology Research Division	Head : Dr. Masaharu Ichikawa
Oceanographical Research Division	Head : Dr. Hayato Iida
Upper Atmosphere Physical Research Division	Head : Dr. Muneyasu Kano
Geochemical Research Division	Head : Mr. Tsutomu Akiyama

1-1 Nagamine, Yatabe-Machi, Tsukuba-Gun, Ibaraki-Ken, 305 Japan

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief : Tsunehiro

Editors : Koji Yamazaki Hiroki Kondoh Tomoyuki Ito
 Tomoaki Yoshikawa Jiro Aoyagi Masami Okada
 Masahiro Endoh Kunihiko Kodera Katsuhiko Fushimi

Managing Editors : Keiko Nishida, Yusai Yuhara

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 MRI.

序

大気大循環の研究プロジェクトは、昭和53年から始められた。気象研究所に大型計算機が導入されるまでは、比較的簡単なモデルによる研究のほかは、理論的なまたは解析的な研究に限られていた。

大気大循環の研究は、大気運動の基本を理解する多くの知見を与えてきた。これからも、地球上に現れる気候とその変動、さらには長期間の大気運動の予測に対しても欠かすことのできない研究として、その重要性はますます高まるものと思われる。

長い間期待されていた本格的な大気大循環の力学モデルは、多くの方面の理解と支持とによって、予報研究部のスタッフが中心となり開発してきたものである。このモデルによるシミュレーション実験の成果は、平均的気候の再現、気候の長期変動の記述、気候変化をもたらすさまざまな原因の究明などとなって現われている。

しかし、気候変動には多くの未解決の問題が残されており、国際的にも重要な研究課題として提示されている。これらの諸問題の解決をめざして、これからもさまざまな実験をつみ上げ、その結果を評価する仕事をつづけながら、更にモデルを拡張し改善する努力を継続する必要がある。

この報告書は、気象研究所における大気大循環の歴史的記念碑として記録にとどめるばかりではなく、これからの発達の基礎となる資料を提供することを目的として発行されたものである。

昭和59年11月

気象研究所 予報研究部長

吉 田 泰 治

Foreword

The research project of developing an atmospheric general circulation model was commenced at the forecast research division of the Meteorological Research Institute (MRI) in 1978. In 1980 a high speed computation facility was installed for the first time at the MRI, which enhanced the activities of the project and prompted the research progress that follows.

Since the dawning of numerical investigations of weather prediction and general circulation in 1950's, the outcome from the studies have brought us a large amount of knowledge on the mechanism of the atmospheric evolutions. The important role of the dynamical simulation is still increasing in the fundamental researches of climate and climatic variations.

Although the first version of our global model was designed based on the widely recognized mathematical schemes of grid point method, various innovations developed by the staff members of the project are incorporated into the model. As described in this report, general features of the observed climate are mostly simulated by the model.

In order to understand the causes of climate variability and changes, however, unprecedented research subjects must remain to be solved. Establishment of methodology for long-range weather forecasting also confronts the worldwide meteorological community. The project activities should therefore be expanded further toward those problems through the accumulation of various experiments, analyses of the numerical results and improvement of the model.

The main purpose of the report is not only to remark a mile-stone on the course of the general circulation research at the MRI, but also to provide the basic material for further development in future.

November 1984

Taiji Yoshida, Head
Forecast Research Division

Contents

Preface and Introduction	7
Chapter 0 : Governing equations in the continuous form	10
0.1 The vertical coordinate	10
0.2 The equation of state	11
0.3 The hydrostatic equation	11
0.4 Equation of continuity	11
0.5 Momentum equation	12
0.6 Thermodynamic equation	13
0.7 The continuity equation of water vapor and ozone	13
Chapter 1 : Vertical differencing	14
1.1 The vertical coordinate and the vertical index	14
1.2 Flux form of a variable	15
1.3 The equation of continuity	16
1.4 The acceleration term	16
1.5 The pressure gradient force	16
1.6 The first law of thermodynamics	17
1.7 Total energy conservation and the hydrostatic equation	17
Chapter 2 : Upper boundary condition	19
2.1 Introduction	19
2.2 The vertical structure equation	20
2.3 Effect of the upper boundary condition	22
2.4 Sponge layer formulation	23
2.4.1 Basic formulation	23
2.4.2 Estimation of equivalent depth and frequency	25
2.4.3 Extention of the sponge layer model to the non-isothermal case with a constant zonal wind	26
A2.1 Test examples of the sponge layer model	27
A2.1.1 Model	27
A2.1.2 Propagation of a mixed Rossby-gravity wave	30

A2.1.3	Propagation of a Kelvin wave.....	32
A2.1.4	Propagation of a Rossby wave	34
A2.1.5	Propagation of a semi-diurnal wave	34
A2.2	Stability check of Eq. (2.1) as an upper boundary condition.....	36
Chapter 3	: Horizontal differencing.....	40
3.1	Horizontal grid and indices.....	40
3.2	The equation of continuity	41
3.3	The pressure gradient force	42
3.4	Kinetic energy generation and the first law of thermodynamics.....	42
3.5	Momentum fluxes	44
3.6	Coriolis force	46
Chapter 4	: Special treatment near the poles	47
4.1	Modification of the difference equation	47
4.2	Introduction of averaging operator to selected terms.....	49
Chapter 5	: Time integration.....	50
Chapter 6	: Transport process of moisture and ozone	51
6.1	Vertical differencing of the moisture equation	51
6.2	Vertical interpolation of moisture and "CICK".....	53
6.3	Vertical differencing of the ozone equation	55
6.4	Horizontal differencing.....	55
Chapter 7	: Penetrative cumulus convection.....	57
7.1	Introduction	57
7.2	Cloud model I: modification of the large-scale environment by cumulus clouds	57
7.3	Cloud model II: Cloud ensemble model	62
7.4	The closure assumption: quasi-equilibrium assumption	65
7.5	The vertical structure of the discrete model and the discretized form of the cloud model	69
7.5.1	The vertical structure of the discrete model	69
7.5.2	The mass budget	70

7.5.3	The moist static energy budget	71
7.5.4	The total water budget	73
7.5.5	The solution procedure for $\lambda(i)$	74
7.6	The discrete form of the mass flux distribution equation	74
7.6.1	The discretized equation	74
7.6.2	The large-scale forcing	75
7.6.3	The mass flux kernel	76
7.6.4	The cloud work function	78
7.7	Solution of the mass flux distribution equation	78
7.8	The large-scale budget and cumulus cloud feedback on the large-scale fields	81
7.9	Ice phase parameterization	83
A7.1	Some results from simulation studies	83
A7.1.1	Precipitation	86
A7.1.2	Cumulus cloud base mass flux	88
A7.1.3	Comparison with Marshall Islands data	88
A7.1.4	Cloudiness	90
A7.2	Simple examples of the solution for the mass flux distribution equation	91
Chapter 8 : Planetary boundary layer		97
8.1	Introduction	97
8.2	Governing equations for the large-scale circulation	97
8.3	Diagnostic determination of the entrainment rate at the top of the PBL and of turbulent fluxes	100
8.4	Stratus layer	106
8.5	Vertical structure of the PBL model and the interpolation scheme	107
8.6	Numerical procedures	110
A8.1	Some examples of the PBL model performances	113
Chapter 9 : Convective adjustments and condensation		121
9.1	Some definitions of variables	122
9.2	Dry convective adjustment	123
9.3	Middle level convection	124

9.4	Large-scale condensation.....	126
Chapter 10	: Ground hydrology and thermodynamics	130
10.1	Types of the earth's surface and related constants	130
10.1.1	Roughness	130
10.1.2	Thermal conductivity	130
10.1.3	Heat capacity	131
10.1.4	Bulk heat capacity	131
10.2	Land surface temperature and heat balance	131
10.3	Surface hydrology and soil water budget	132
10.3.1	Surface evapotranspiration	132
10.3.2	Snow	133
10.3.3	Interstitial moisture and interstitial ice	134
10.3.4	Runoff	134
Chapter 11	: Vertical and horizontal sub-grid-scale transports	135
11.1	Cumulus transport of momentum	135
11.2	Vertical diffusion	137
11.3	Horizontal diffusion.....	137
Chapter 12	: Photochemical process of ozone	139
12.1	Photochemical reactions.....	139
12.2	Governing equations for the photochemical reactions	140
12.3	Vertical distribution of absorber amounts	141
12.4	Ozone destruction at the earth's surface	142
Chapter 13	: Radiation	143
13.1	Introduction	143
13.2	Terrestrial radiation	144
13.2.1	Basic equations.....	144
13.2.2	Simplification : Weighted mean transmission functions	145
13.2.3	Cloudless atmosphere	146
13.2.4	Cloudy atmosphere	149
13.2.5	Effective absorber amounts	150
13.2.6	Empirical transmission function equations	151

13.2.7	Long wave radiative cooling in the upper stratosphere	153
13.3	Solar radiation	154
13.3.1	Basic quantities	154
13.3.2	Absorptivity of water vapor	155
13.3.3	Absorptivity of ozone	156
13.3.4	Cloudless atmosphere	157
13.3.5	Cloudy atmosphere	159
13.3.6	The reflectivity and absorptivity of clouds	162
A13.1	Calculation of earth-sun distance and solar zenith angle	162
A13.1.1	Earth-sun distance	162
A13.1.2	Solar zenith angle	163
A13.2	Water vapor absorptivity function for the total solar spectrum, $A'_{H_2O}(X)$	164
A13.3	Ozone absorptivity function for the total solar spectrum, $A'_{O_3}(X)$	168
Appendix I	: Tree diagram of the MRI • GCM- I	170
Appendix II	: Surface boundary conditions and numerical constants used in the MRI • GCM-I	171
Appendix III	: Selected monthly mean fields produced by the MRI • GCM-I	178

概 要*

気象研究所大気大循環モデル (MRI・GCM-I) は、UCLAモデル (Arakawa and Mintz, 1974; Arawawa and Lamb, 1977) を基に開発したものである。モデルで予報している変数は、風の水平成分、気温、水蒸気とオゾンの混合比、地面温度、土壌層の湿潤度、積雪の深さ、境界層の厚さおよび境界層の上端における物理量のギャップである。地表のアルベドは表面状態の簡単な関数として与えている。雲量はモデルで診断的に決め、放射の計算を通して大気加熱率に影響を与える。モデルには現実に対応する海陸分布と地形がある。海面水温と海水の分布は気候値に基づいて外部データとして与えている。モデル大気のトップに入射する太陽光は季節変化と日変化をしており、このためモデル大気には季節変化と同様に日変化が再現される。以下の節では本論に従ってモデルの概略を述べる。

1. 鉛直差分モデル

鉛直方向の各層への物理量は、波の分散関係等からFig. 1.1のスキームCに基づいて配置されている (Tokioaka, 1978)。層の位置はFig. 1.2のように与えている。 $p=p_i$ より上の層は $\ln p$ に関して等間隔になるように選んでいる。大気を等温大気とみなした場合、これが内部波を最もうまく表現する層の選び方になっているからである (Tokioaka, 1978)。現在、MRI・GCM-Iとして、対流圏の5層モデルと成層圏を含んだ12層モデルを採用している。

鉛直差分形の決定に際しては、全エネルギーが保存すると同時に、静力学平衡の式の精度を上げるよう配慮している。

2. 上部境界条件

通常、モデルの上端における境界条件として、 $p=p_t$ ($\neq 0$) で $\dot{\sigma}=0$ が用いられている。これは $p=p_t$ に剛体の壁を置いて上下方向の空気の出入りを禁じたことになり、波のニセの反射をもたらす。 $p_t=0$ にした場合でもこの状況は変わらない。その場合、モデル最上層の厚さはZ座標系で見ると非常に厚くなり、この中で起こる上下方向のサブグリッドスケールの物理過程をモデルに取り入れられない限り波のニセの反射が起きてしまう。

MRI・GCM-Iでは上部境界条件として、 $p=p_t$ で $\dot{\sigma}=0$ を採用している。そして、波のニセの反射を防ぐためにモデルの最上層にスポンジ層を設定している。スポンジ層では、熱力学の第一法則の式にニュートン冷却の形の補正項を導入している。このニュートン冷却率は複素数であるの

* 時岡達志・山崎孝治・谷貝勇・鬼頭昭雄：予報研究部

が特徴で、モード、特に振動数に強く依存する。ニュートン冷却率の実数部分は波を減衰させ、虚数部分は鉛直波長を変える働きをする。

3. 水平差分

モデルでは球面座標が用いられ、緯度方向 ϕ と経度方向 λ に一定の間隔で変数が配置されている。(標準のモデルでは $\Delta\phi = 4^\circ$ 、 $\Delta\lambda = 5^\circ$) 各変数をどのように配置するかは波の分散と密接に関係しており、Fig. 3.1の5つの場合の中で、スキームCが現実大気を考える限り最も適切であることが知られている (Winninghoph 1968, Arakawa and Mintz 1974, Arakawa and Lamb 1977)。この結果に基づきMRI・GCM-IではスキームC (Fig.3. 2) を採用している。

運動量の水平移流の表現は、曲率のない二次元非発散流に対してエネルギーおよびエンストロフィ (渦度の二乗の半分) を保存するスキーム (Arakawa and Mintz, 1974, Arakawa and Lamb, 1977) になっている。気圧傾度力の差分表現は、地形が存在していても気柱の循環に偽の加速を与えないものになっている。

4. 極付近での取り扱い

極は球面座標を用いると特異点になり、ベクトル量である風は定義できない。このため、運動方程式における移流項は極付近で特別に扱う必要がある。モデルではFig.4. 2のように極から半グリッドずれた所に南北風 v を定義している。

極付近では東西方向のグリッド間隔がせまくなる。一定の積分時間間隔 Δt を用いても計算不安定を生じさせないためには、いくつかの項に対して東西方向の平滑化を行なえばよいことが示されている (Arakawa, 1972)。ここではこの考えに基づいて、さらに渦度に対する偽の加速を生じさせないような平滑化を行なっている。

5. 時間積分

Fig.5. 1に示したように、leapfrogスキーム (図中、Lと表示) とMatsunoスキーム (M) を併用した時間積分法を用いている。非断熱項の計算はQで表わした時点で実行し、その直後にMatsunoステップを行なう。

6. 水蒸気とオゾンの輸送

水蒸気とオゾン、生成・消滅過程を除いて、風によって受動的に流されて変化する。ただし、水蒸気量、オゾン量は常に正であるべき量である。このため、これらの移流の計算スキームには運動量の移流スキームとは別の工夫を施している。

7. 積雲対流のパラメタ化

積雲対流のモデルはArakawa and Schubert (1974)の理論を基に作られていて、積雲それ自身のモデル化と積雲のマスフラックスの決定 (closure assumption) の二つの部分に分けることができる。

積雲モデルでは雲頂高度によって積雲の型を分類する。雲頂高度は、取り込み率(entrainment rate) λ が雲中の高度によらないとして決定される。 λ の大きい雲は周囲の空気とよく混合し背の低い雲になり、 λ の小さい雲は背の高い雲に対応する。積雲はそれが誘起する補償下降流によって周囲を昇温、乾燥化させる。また、雲頂で放出する飽和した気塊の蒸発、混合によって周囲の場を冷却、湿潤化する(式(7.31)参照)。積雲の根は大気境界層(PBL)にあり、PBL内の気塊を取り込む。この取り込みによってPBLの厚さは薄くなるようになっている(式(8.1)参照)。

雲頂が -20°C より低い気温の層に達した場合、 -20°C 以下の層で氷相になると仮定して氷晶過程を取り入れている。

積雲のマスフラックスの決定は次のような考えに基づいている。すなわち大規模場が湿潤不安定な状態を作ると積雲の集団が発生して、主に補償下降流の作用で不安定状態を解消する。そして大規模場が安定になると積雲の発達を抑えられる。このような相反する作用間の準平衡状態としてグリッドスケールの場合が決定されていると考えて、各型の積雲対流のマスフラックスを決定する。具体的には、積雲内の浮力による雲仕事関数(式7.48)が、大規模スケールの時間内に変化しないという準平衡の仮定を用いている。マスフラックスが決まると積雲モデルによって大規模場の気温・水蒸気量に及ぼす影響が計算される。

8. 大気境界層(PBL)のパラメタ化

Arakawa and Mintz (1974), Randall (1976)を基にしたモデルになっている。基本的に、PBL内の乱流は保存量の分布を上下に一様化するような乱流輸送を行なうと仮定している。地表面でのフラックスは、外部境界層まで拡張した相似則に基づくバルク法(Deardorff, 1972)で決定している。PBL上端でのフラックスを決めるにはPBL上端での自由大気を取り込み率(E)が必要となる。EはPBL内の乱流運動エネルギー収支に基づいて決定する方式を採っている。モデルを閉じさせるためには、PBLの深さ及びPBL内の平均的物理量を知る必要がある。このために、PBLの深さ及びPBL上端での物理量のギャップ量を予報変数につけ加えている。PBL内で凝結が生じた場合は層雲、それが地上まで達した場合は霧とみなしている。層雲(霧)が及ぼす放射への影響は、PBLの発達や乱流輸送量を決定する上で考慮するが、格子点の雲量には反映させていない。又、雨滴として落下することもないとしている。

9. 対流調節と凝結

大循環モデルの中では次の順序で調節過程を行なう。まず第1番目に乾燥対流調節を行なう。乾燥対流調節は各点で成層が絶対不安定にならないようにチェックし、不安定になった場合は乾燥静的エネルギーを保存するように中立な状態に調節する。

2番目に自由大気中の湿潤対流 (Middle level convection) の可能性を調べる。上下の2層を考えた場合、下層の湿潤静的エネルギーが上層の飽和湿潤静的エネルギーを越えると湿潤不安定な状態になる。下層がPBL内にあれば、7で述べた積雲が発生するが、自由大気中で湿潤不安定が起こると積雲対流と同様な方式で湿潤対流調節を行なう。ただし、準平衡の仮定を用いず緩和時間 τ を60分と仮定して閉じさせている。この結果、上層では対流雲から放出される湿った気塊で湿潤化され、下層では水蒸気を失い、同時に上層では対流雲の補償下降流で暖められて気層は安定化する。こうして湿潤対流に対して中立な状態に調節する。

3番目に大規模凝結の可能性を調べる。グリッドの水蒸気が過飽和になった場合、大規模凝結が起こる。この時、湿潤静的エネルギーを保存し、かつ湿潤曲線上にのるように状態を調節する。雨はすぐ下の層に落下させ、そこで一旦蒸発させる。この手順を上層から下の層に向かって繰り返していく。

最後に7で述べた積雲対流の可能性を調べる。以上4種の過程によって対流調節は完了する。

10. 地表面の水文過程と熱収支

モデルの中で地球の表面は、海洋、海水、陸水、湖そして陸地の5つに分類して取扱っている。海面温度及び海水分布は、気候値に基づいて与えている。海水、陸水、陸地、雪の表層温度は予報変数である。表面温度の予報は片山の方式 (Arakawa and Mintz, 1974) に基づいており、媒質中の伝導も考慮している。海水の場合は厚さが3mと仮定している。

水文過程の取扱いは、基本的にManabeの方式 (Holloway and Manabe, 1971) に基づいている。土壌中に含みうる最大含水量をデータとして与え、これを越えた水分は流出として扱おう。地面からの蒸発量は、表面がぬれているとした時の蒸発量に湿潤度 (土壌水分/最大含水量) の関数である効率因数を掛けて求める。湖の場合は湿潤度が常に1である陸地とみなして取扱っている。地面温度が氷点 ($T_i = 273.1^{\circ}\text{K}$) 以下になった場合、凍結水分量も予報している。地表面気温が T_i より低い場合、降水は雪であるとみなし、陸上では積雪量を予報している。

11. サブグリッドスケールの輸送

大気境界層中の鉛直方向のサブグリッドスケールの輸送は8で述べたように扱っている。自由大気中の積雲対流による熱及び水蒸気量輸送は7で述べた通りである。積雲対流による運動量輸送は、7で求められる各型の積雲のマスフラックスに従って保存量として、再配分されると考え

てその効果を取り入れている。その他の鉛直拡散は一切入っていない。

水平方向のサブグリッドスケールの輸送は運動量に対して、Holloway and Manabe (1971)の方式による非線型渦動拡散効果を入れている。他の物理量に対する水平拡散は一切入っていない。

12. オゾン光化学反応

オゾン光化学反応のパラメタリゼーションはCunnold et al. (1975)およびSchlesinger and Mintz (1979)のモデルに基づいている。100mbより上の成層圏でChapman反応および、簡単なNO-NO₂サイクルを考慮してオゾン量の生成/消滅量を求めている。オゾンは地表付近の化学反応によって破壊されるが、この過程はPBLにおける鉛直方向のオゾン乱流フラックスが地表に到達して、そこで破壊されると仮定してパラメタ化している。

13. 放 射

Katayama (1972), Schlesinger (1976)によるモデルを採用している。モデルは地球放射によって生じる冷却率を求める部分と、太陽放射の吸収による加熱率を求める部分に分けられる。この放射モデルで用いる水蒸気とオゾン量は予報されたものを用いているが、炭酸ガスは一定の混合比を与えている。このモデルの一つの特徴は、計算が効率よく行なえるために、日変化を考慮し得る点である。

30kmより下の層での地球放射の計算ではKatayama (1972)の方式に従っている。この方式では、計算時間の効率化のため、Yamamoto (1952)に従った荷重平均の透過関数を導入している。さらに、水蒸気、炭酸ガスそしてオゾンが同時に存在する場合、全体の透過関数はそれぞれの透過関数の積で近似している。

MRI・GCM-IではFig.13. 4に模式的に示したように5種類の雲が発生する。1)大規模場の凝結による雲 2)背の高い積雲が発生した時に伴う巻雲 3)積雲 4)中層対流による凝結 5)PBLで発生する層雲

この内、最初の2つのみが現在、放射と相互作用を持つ。雲は赤外放射に対して黒体とみなすが、巻雲の場合は灰色として扱い、黒体度0.5をかけている。

上部成層圏では、平均の透過関数を用いたKatayamaの方法は精度が低下するため、モデルの30km以上ではDickinson (1973)によるパラメタリゼーションを採用している。

太陽放射の計算では、波長0.9 μ を境にしてオゾンによる吸収はあるが対流圏では主としてRayleigh散乱のみを受ける“散乱部分”(短波長側)と、より波長が長く水蒸気によって吸収を受けるがRayleigh散乱が無視できる“吸収部分”に分けて計算している。

太陽放射に関して、診断的に決定した先ほどの2種類の雲の効果を取り入れている。それらの雲のアルベドは高度と厚さの関数として与えている。これらの値は“散乱部分”と“吸収部分”

で別々の値を与えている。また、雲があった場合、雲と雲、あるいは雲と地表の間における多重反射も考慮している。エアロゾルによるMie散乱と吸収は現在のところ組み込まれていない。

5層モデルの1月、4月、7月、10月のパフォーマンスをAppendixに示す。

Preface and Introduction*

A description of the general circulation model of the Earth's atmosphere currently used at the Meteorological Research Institute (*i. e.* the MRI • GCM- I) is given in this report. The main reason for us to present this description is not because we have developed an original GCM. The MRI • GCM- I is based on the previous version of the UCLA • GCM, the description of which is given by Arakawa and Mintz (1974). Mathematical part of the model is also detailed by Arakawa and Lamb (1977). Modeling principles described in both of the descriptions are closely followed by the MRI • GCM- I . Thus it might seem to be needless for us to write a description again, although revisions of the model have been made in several respects. As the description by Arakawa and Mintz (1974) has not been distributed widely, especially in Japan, physical part of the UCLA • GCM, except possibly cumulus part, has not been known widely compared to the mathematical part of it. This is the main reason for us to present this description without fearing repetitions of explanations found in Arakawa and Mintz (1974) or Arakawa and Lamb (1977). To summarize details of the MRI • GCM- I , including boundary conditions and empirical constants adopted, is another purpose of this description.

This report can be separated into two parts. One is the mathematical part, where the treatment of adiabatic fluid motions is described. Chapters 1 through 6 are devoted to this end. Chapter 1 describes vertical differencing. In Chapter 2, problems related to the upper boundary condition is discussed. Horizontal differencing is described in Chapter 3. In Chapter 4, special treatments of the horizontal differencing near the poles are given. Chapter 5 describes time differencing. In Chapter 6 is found a description of advective process of water vapor and ozone.

The other is the physical part, where diabatic processes as well as sub-grid-scale processes important for the global atmospheric circulation are described. The processes included are schematically shown in Fig. P1. They are covered in Chapters 7 through 13. Chapter 7 describes a parameterization of penetrative cumulus convection. In Chapter 8 is given a parameterization of the planetary boundary layer. Convective adjustment other than that by penetrative cumulus and condensation processes are treated in Chapter 9. In Chapter

* Presented by T. Tokioka, K. Yamazaki, I. Yagai and A. Kitoh.: Forecast Research Division.

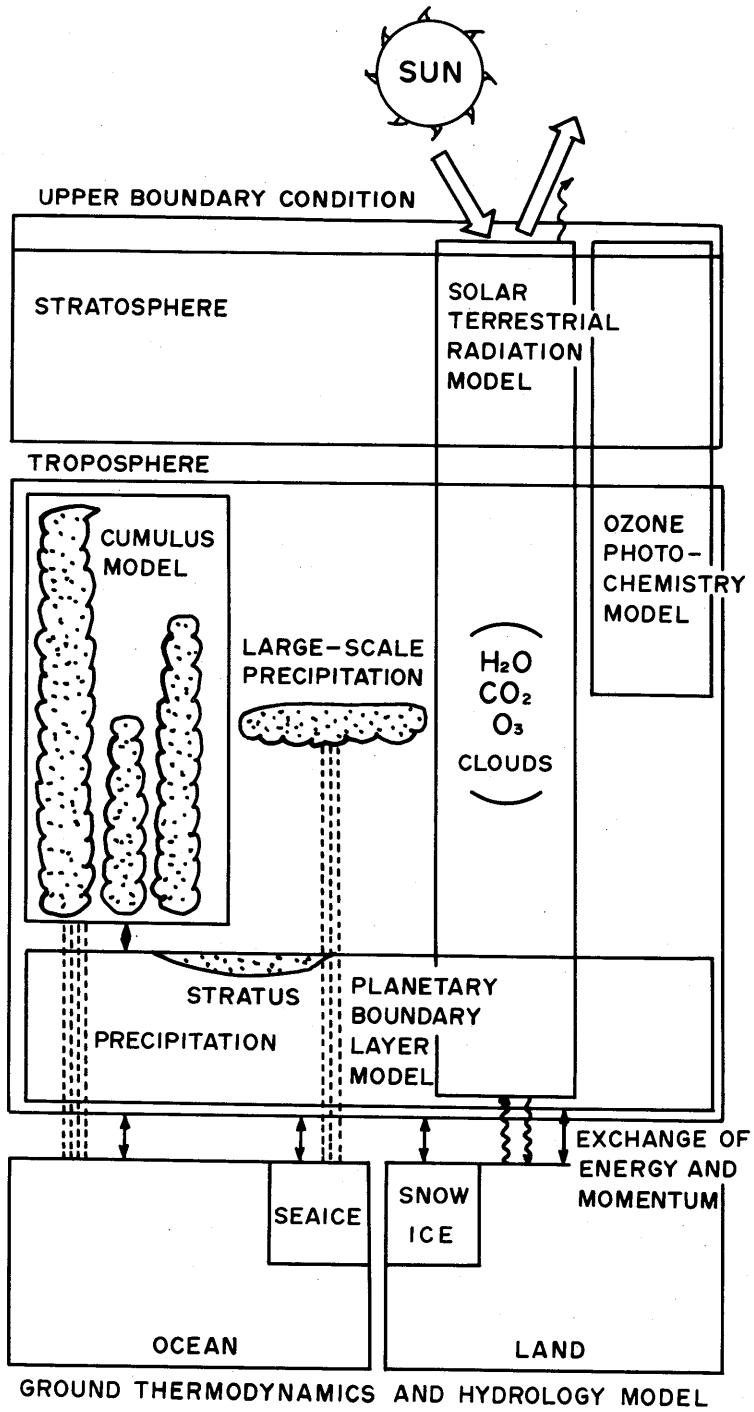


Fig. P1 Physical processes included in the GCM.

10 a description of both ground hydrology and ground thermodynamics is given. Sub-grid-scale mixing is described in Chapter 11. Source and sink of ozone is treated in Chapter 12. Finally in Chapter 13 is given a description of both solar and terrestrial radiation. In some of the chapters are included appendices to help readers understand the details and the performance of each sub-model.

At the end of this volume, another appendices are included, where selected examples of model results taken from a simulation of annual cycle with the five layer tropospheric version are shown as well as boundary conditions and list of parameters and constants currently assigned.

The authors thank Prof. Akio Arakawa of the UCLA for making the basic UCLA model available to the MRI, for giving them useful suggestions and for providing some of the members opportunities to visit the UCLA. We also thank Dr. Akira Katayama, the former head of the forecast research division of the MRI, for his encouragement and his warm support throughout this work. Thanks are due to Dr. Robert Schiffer, Office of Space & Terrestrial Applications/NASA, for offering us the Nimbus 7 ERB data. Thanks are extended to Mr. Taiji Yoshida, the head of the forecast research division, and to the former heads of the division, Mr. Hiroshi Ito and Dr. Eiji Uchida, for their continuous encouragement and patience through this work. The excellent job of drafting by Miss Hiroko Imai is also appreciated.

The numerical time integrations of the model were made on the HITAC M-200H Computer of the Meteorological Research Institute.