

大気大循環モデルによる湿潤惑星の数値実験

A numerical experiment of a moist planet with a general circulation model

森川 靖大, 北大理/神大理, 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail:morikawa@gfd-dennou.org

杉山 耕一朗, 北大理, 〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目, E-mail:sugiyama@gfd-dennou.org

高橋 芳幸, 神大理, 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail:yot@people.kobe-u.ac.jp

小高 正嗣, 北大理, 〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目, E-mail:odakker@gfd-dennou.org

石渡 正樹, 北大地球環境, 〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 5 丁目, E-mail:momoko@ees.hokudai.ac.jp

中島 健介, 九大理, 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1, E-mail:kensuke@geo.kyushu-u.ac.jp

林 祥介, 神大理, 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail:shosuke@gfd-dennou.org

Yasuhiro MORIKAWA, Dept. of CosmoSciences, Hokkaido Univ./

Dept. of Earth and Planetary Sciences, Kobe Univ., Kobe, 657-8501, Japan

Ko-ichiro SUGIYAMA, Dept. of CosmoSciences, Hokkaido Univ., Sapporo, 060-0810, Japan

Yoshiyuki O.TAKAHASHI, Dept. of Earth and Planetary Sciences, Kobe Univ., Kobe, 657-8501, Japan

Masatsugu ODAKA, Dept. of CosmoSciences, Hokkaido Univ., Sapporo, 060-0810, Japan

Masaki ISHIWATARI, Graduate School of Environmental Sci., Hokkaido Univ., Sapporo, 060-0810, Japan

Kensuke NAKAJIMA, Dept. of Earth and Planetary Sciences, Kyushu Univ., Fukuoka, 812-8581, Japan

Yoshi-Yuki HAYASHI, Dept. of Earth and Planetary Sciences, Kobe Univ., Kobe, 657-8501, Japan

Aiming for constructing an atmospheric general circulation model (GCM) with high readability and flexibility, desired program structures have been considered and their implementation tests have been performed. A flexible GCM whose programs can be easily changed is useful for investigating the structures of various planetary atmospheres from the viewpoint of comparative planetary science. In order to consider moist atmospheric circulations such as Earth and Jupiter, we have performed following attempts for facilitating exchanges of physical processes; (1) a design of physical process modules, (2) a development of a library for the production of test programs, (3) an improvement of document auto-generation library RDoc.

1. はじめに

モデル設定の変換性とソースコードの可読性を合わせ持った大気大循環モデル (GCM) の姿を模索するべく、我々はそのプログラムの設計と実装を行ってきている (森川 他, 2005, 流体力学会 年会). 可読性の向上によりプログラムの編集のコストの削減が期待され、変換性の向上により新たなプログラムの追加や既に組み込まれているプログラムの分離を容易にすることが期待できる。モデル設定の切り替えが簡単な GCM が提供されることにより、さまざまな惑星大気の状態に応じた数値計算の実行が容易になり、比較惑星科学的な見地からの惑星大気構造の考察の進展が期待される。

これまでに、データ入出力ライブラリ `gt4f90io`⁽¹⁾ の整備と、変数命名規則などのプログラム書法をまとめた `dcmmodel` プログラミングガイドライン⁽²⁾ の策定を進め、FORTRAN 77 を基盤とする AGCM5⁽³⁾⁽⁴⁾ を参考に、Fortran 90/95 の機能を積極的に活用した陽解法力学コアの作成と実装実験をおこなってきた。これらの試みにより、従来は煩雑となっていたデータ入出力部分のコードを簡素な形に統一すること、および Fortran 90/95 で利用可能になった配列演算関数を積極的に利用して演算部分のコードを従来より支配方程式に近い形で記述することで、ソースコードの可読性向上が可能であることを示した。

今回は、地球や木星大気といった湿潤大気循環計算を念頭におき、物理過程の計算スキームの交換を容易にするための工夫を行った。具体的には、(1) 物理過程モジュールの設計、(2) テストプログラムの作成支援ライブラリの作成、(3) ドキュメント自動生成ライブラリ RDoc を用いたモデルドキュメントの整備である。以下の各節では、これらの試行の目的および詳細に関する記述を行う。

本研究のモデルは DCPAM (Dennou-Club Planetary Atmospheric Model) として、インターネット上 (URL: <http://www.gfd-dennou.org>) に公開している。

2. 物理過程モジュールの設計

放射、サブグリッドスケールの乱流拡散など各物理過程のモジュールにおいて初期設定ルーチンと演算ルーチンとを区別して用意するように設計した。この設計により、各物理過程においてどの物理定数 (重力加速度や比熱など) が使用されているかがソースコード上において明瞭となり、物理過程の計算スキームの交換が容易に行えるようになった。また、GCM と別のモデル間での物理過程の移植の作業コストの低減を図ることもできる。

FORTRAN77 を基盤とする AGCM5 においては、ファイルを交換することによって物理過程の交換を行うよう設計がなされていた。この場合には、格子点情報や物理定数といったモデル設定のパラメータをあるファイルで一括管理し、個々の演算ルーチンはそのファイルを参照することでパラメータを読み込んでいる (Fig.1 参照)。このようにパラメータ管理を行うことで、格子点や物理定数を変更する場合にはそのファイルを編集すればよく、個々の演算ルーチンが使用するパラメータの一貫性も保つことができる。しかし、パラメータを 1 つのファイルで一括管理する方式では、GCM のプログラムの一部を取り外して別のモデルで用いたり、GCM の物理過程を増やそうとする際に、物理過程内のソースコードについて一通り読み解く必要が生じること、またパラメータ管理や整理が煩雑になるという問題がある。

今回行った試みでは、まず物理過程 1 つにつきモジュールを 1 つ用意する。そしてそれぞれのモジュールには 1 つの初期設定ルーチンと複数の演算ルーチンを用意する (Fig.2 参照)。初期設

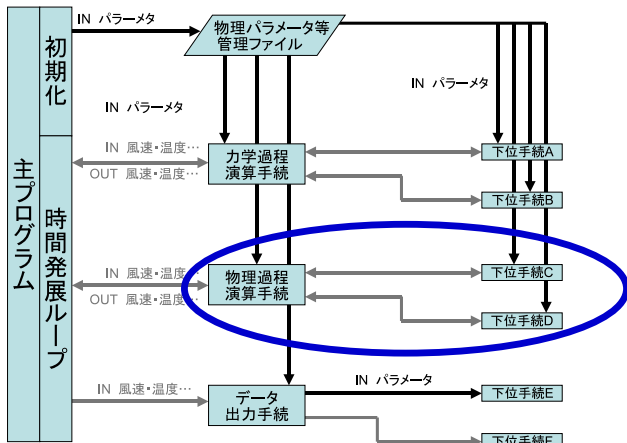


Fig. 1 The program structure of AGCM5 based on FORTRAN 77

定ルーチンの引数は格子点情報や物理定数などのパラメータであり、初期設定ルーチンが呼び出された際に渡されたパラメータはモジュール内で保持する。演算ルーチンの引数はいわゆる予報変数のみである。演算ルーチンでは初期設定ルーチンによって保持されたパラメータを使用する。このようなモジュール設計により、どのパラメータがどの演算で使用されるのかは個々のモジュールの各初期設定ルーチンを見れば明らかとなるので、それぞれの物理過程モジュールを GCM から切り離して他のモデルで使用したり、他のモデルのプログラムを移植する際にも、パラメータ群の管理のコストが低減できる。これらの利点から、GCM 内の物理過程計算スキームの交換だけでなく、他のモデルとのプログラムのパーツの交換もスムーズに行えるようになる。

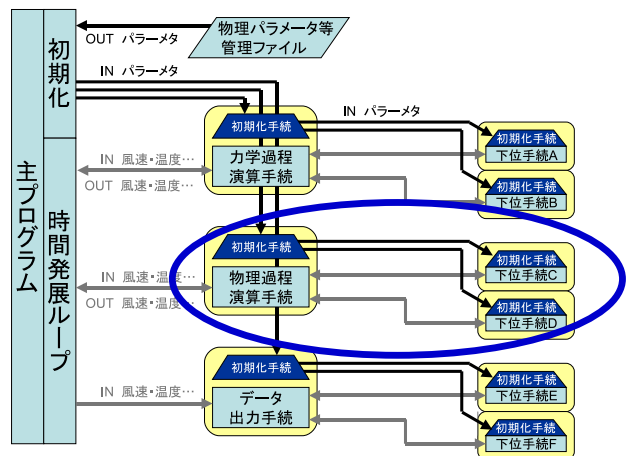


Fig. 2 The program structure of DCPAM based on Fortran 90/95

3. テストプログラムの作成支援ライブラリの開発

Fortran 90/95 におけるテストプログラム作成支援ライブラリを開発するとともに、テストプログラムの実行手順を定めることで、デバッグ作業の効率化を図った。これによりモデルを改変しようとする際のプログラム編集の時間を短縮することが可能となり、広い意味でのモデルの可変性を高めることにつながる。

デバッグ効率化の手段として広く知られている方法は、プログラムの個々の部品ごとにテストプログラムを作成し、プログラムの作成や変更を行う際には必ずそのテストプログラムによって機能や性能をチェックするという手法である。この手法は、デバッグの際のバグ探査のための時間の短縮を可能とする。し

かしながら当然テストプログラムをわざわざ用意する必要があり、その作成にのたためにかかる手間と時間は少なくない。Java⁽⁵⁾ や Ruby⁽⁶⁾ といったプログラミング言語では、テストプログラムの作成の手間を軽減するためのライブラリとして JUnit や Test::Unit が用意されている。

一方で Fortran で記述され、数多くのプログラムによって構成される GCM においては、モデル全体の計算結果の正当性を保証するため、個々のプログラムに関してテストプログラムを作成し、それぞれにその正当性をチェックするという事は行われている。しかしながら、テストプログラム作成コストを軽減するようなライブラリや、テストの実行手順についての一般的な方式は存在せず、実際にテストプログラムを作成したり、それを利用してテストを行うのには大きなコストがかかってしまう。例えば、流体計算の際には多次元配列が多用されるわけであるが、配列に代入された値同士の比較を行うためのコードは、難解ではないがかなり煩雑になってしまう。

今回行った試みでは、Ruby の Test::Unit の機能の一部を模倣し、Fortran 90/95 でテストプログラム作成を支援するためのライブラリ `dc.test` を作成した。このライブラリは Fortran 90/95 における組み込み型 (文字型、整数型、実数型、論理型) の変数もしくは配列に関して 2 つの値を比較するサブルーチン `AssertEqual`, `AssertGreaterThan`, `AssertLessThan` を提供することにより、テストプログラム作成の手間を軽減する。テストの実行手順は以下のように定めた。まずテストプログラムとして、モジュールファイル名の末尾に `_test` を付加したファイルを用意する。例えばモジュールファイル名が `radiation.f90` である場合、テストプログラムは `radiation_test.f90` である。テストプログラム内では、`AssertEqual` などのサブルーチンを用い、演算ルーチンによって得られる値の正当性をチェックする。そして、このプログラムをコンパイルおよび実行することでテストは行われる。実際のテストプログラムの実行は `make test` コマンドによって行われるようにし、演算ルーチンなどを書き換えた際にはこのコマンドを実行することでテストを行えるようにした。テストプログラム作成支援ライブラリの整備とテストプログラムの実行手順の制定により、本研究で開発している GCM においてもデバッグの時間の軽減が図られつつある。またこのテストプログラムは個々のモジュールを個別に使用するためのサンプルプログラムとしての役割を果たすこともでき、低次モデルあるいはプロセスモデルの作成においても利用することができる。

4. ドキュメント自動生成ライブラリ RDoc の改良

Ruby によるドキュメント自動生成ライブラリ RDoc の Fortran 90/95 解析機能を強化し、ソースコードからドキュメントを自動生成することにより、ドキュメント生成のコストダウンを図った。その結果、プログラムが頻繁に変更されるような場合でもほとんど手間をかけることなく最新のソースコードに対応したドキュメントが自動的に整備されるため、プログラムを読み解く上での助けとなる。

物理過程の交換や変更を行う上で、サブルーチンや関数など、プログラム単位の機能や使用法の詳細を記述したドキュメントの整備を行うことは必須な作業である。しかし、モデルの開発に合わせて常に最新のドキュメントを整備しておくことは大変に手間のかかる作業である。その主な原因は、モデルで記述した内容とほぼ同じ内容 (サブルーチンの名前や引数など) を再度ドキュメントとしても記述せねばならない点にある。ドキュメントとモデルとを別々のファイルで管理する場合にはこの作業はさらに煩雑となる。そのためドキュメントの整備はつついお

るそかになり、結果としてモデル本体の開発にも支障をきたすこととなる。ドキュメント作成の手間を軽減し、ドキュメント整備を促進させる手法は、ソースコードのコメント行にドキュメント用の文書を埋め込むことによってモデルとドキュメントの一元管理を実現し、かつ、ドキュメント生成をソースコード解析用のソフトウェアによって自動化することである。例えば、Java⁽⁵⁾やRuby⁽⁶⁾では、それぞれ Javadoc, RDoc といったドキュメント自動生成用のライブラリが用意されており、これらは Java, Ruby などのソースコードから HTML ドキュメントを生成する。

今回行った試みでは Fortran 90/95 プログラムからのドキュメント自動生成が可能となるように、RDoc の Fortran 90/95 ソースコード解析機能の強化を行った⁽⁷⁾⁽⁸⁾。この改良により Fortran 90/95 ソースコードのほとんどの言語要素、すなわち主プログラム、モジュール、サブルーチン、関数、変数、定数、構造データ型、利用者定義演算子、利用者定義代入、NAMELIST 文を解析することが可能となった。さらに、それらの言語要素の直後(行末もしくは直後に続く行)に書かれたコメント行は、その言語要素の解説文章として識別される。この他にもモジュール間の依存関係、総称名を用いた多重定義、PRIVATE 文によるモジュール中の言語要素の参照不許可の指定なども解析可能である。サブルーチンや関数に関しては、その引数のデータ型、INTENT 属性(授受特性)、引数キーワードをソースコードから自動的に解析すると共に、引数の宣言文の直後に書かれたコメントをその引数に関するドキュメントとして識別する。例えば Fig.3 に示すようなソースコードに対し、我々が改良を施した RDoc を用いることで、Fig.4 に示すような HTML ドキュメントが生成される。本研究の GCM では、我々が強化を施した RDoc によってドキュメントの自動生成を行っており、コメント行にはサブルーチンや引数の解説を書き込み、ソースコード自体の可読性の向上と、HTML ドキュメントの充実を図っている。

```

(a) calc.f90
program calc
  use integral
  integer :: n
  real :: a, b
  read(*,*) a,b,n
  s = trapezoid(a,b,n)
  write(*,*) s
end program calc

(b) integral.f90
module integral
  private
  public trapezoid
  contains
  function trapezoid(a,b,n) result(s)
    real, intent(in) :: a,b
    integer, intent(in), optional :: n
    real :: s
  end function trapezoid

  function f(x) result(res)
  end function f
end module integral
    
```

Fig. 3 Sample Fortran 90/95 source codes

Fig. 4 HTML documents generated by enhanced version of RDoc Fortran 90/95 parser from source codes in Fig.3

5. 木星大気を念頭においた湿潤大気循環計算にむけて

これまで述べた試行のもとに、我々は、木星の対流(杉山 2007, 博士論文⁽⁹⁾)を球面上において計算することを目指している。予定している計算設定は以下の通りである。杉山(2007)に従い、重力加速度は木星のものとし、地表面気圧は 30 気圧、大気主成分は水素とする。放射に関しては、2 から 0.1 気圧までの層において一様冷却率を与える。この放射計算の実装においては、2 節のモジュール設計を有効に活用する予定である。凝結成分としては水蒸気のみを考え、地球的な状況と木星的な状況での湿潤対流の振る舞いの相違に関して力学的考察を行うことをめざす。今回の講演では、この計算を行うための予備的な実験結果を示す予定である。

参考文献

- (1) 森川靖大, 乙部直人, 小高正嗣, 石渡正樹, 竹広真一, 堀之内武, 林祥介, 豊田英司, 2007: "gt4f90io: gtool4 規約に基づく Fortran90 netCDF I/O ライブラリ," <http://www.gfd-dennou.org/library/gtool4/>, 地球流体電脳倶楽部.
- (2) 地球流体電脳倶楽部 数値モデリングプロジェクト dcmmodel, 2007: "dcmmodel プログラミングガイドライン," <http://www.gfd-dennou.org/library/dcmmodel/>, 地球流体電脳倶楽部.
- (3) SWAMP Project, 1998: "AGCM5," <http://www.gfd-dennou.org/library/agcm5/>, GFD Dennou Club.
- (4) 沼口, 1992: "熱帯における積雲活動の大規模構造に関する数値実験," 博士論文, 東京大学.
- (5) サン・マイクロシステムズ: "オブジェクト指向プログラミング言語 Java," <http://jp.sun.com/java/>.
- (6) まつもと ゆきひろ: "オブジェクト指向スクリプト言語 Ruby," <http://www.ruby-lang.org>.
- (7) 森川靖大, 石渡正樹, 堀之内武, 小高正嗣, 林祥介, 2007: "RDoc を用いた数値モデルのドキュメント生成," 天気, 54, 185-190.
- (8) 森川靖大, 石渡正樹, 堀之内武, 小高正嗣, 林祥介, 地球流体電脳倶楽部 数値モデリングプロジェクト dcmmodel, 2007: "RDoc Fortran 90/95 ソースコード解析機能強化版," <http://www.gfd-dennou.org/library/dcmmodel/>, 地球流体電脳倶楽部.
- (9) 杉山, 2007: "H₂O, NH₃ の凝結と NH₄SH の生成反応を考慮した木星大気の雲対流ならびにその直接数値計算," 博士論文, 北海道大学.