

惑星大気大循環モデルの設計と開発

学位論文内容の要旨

研究の背景と目的

大気大循環モデル (GCM) とは惑星大気の全球規模の大気循環を表現する数値モデルである。現在太陽系外にも惑星が発見され、惑星気候の多様性に関する知見の有用性が高まりつつある中で、惑星大気の多様性を GCM によって探ることは有意義と言える。この実験に際しては惑星半径や大気成分などの大気構造に影響するパラメタを様々な仮想的条件に設定して実施することとなる。このような数値実験を通じて、惑星大気の循環構造をパラメタ空間に位置づけて解の分岐構造を把握し、多様性をもたらす機構に関する知見が得られることが期待される。一方で GCM は本来観測データとの比較によりその妥当性を担保してきたが、仮想的条件においてはそれが困難である。この場合の GCM の計算結果の妥当性の考察を行う方法の一つとして、複雑度の異なる他の数値モデル、すなわち雲の生成消滅を陽に解く 2, 3 次元雲解像モデルや放射の効果を精密に解く鉛直 1 次元の放射対流モデル等との比較考察が考えられる。

本研究では、複雑度の異なるモデル同士の計算結果の比較を円滑に行うため、これらモデル群を階層的に整備した、惑星大気階層モデル群という概念を提唱した。この階層モデル群は、データ入出力やプログラム構造などの、従来の気象分野のモデルではモデルごとに異なってしまうプログラム技法的な方式について共通化することを目指すものである。これにより研究作業のうち、物理的理解や離散化手法といったものを除いたプログラム技法的な部分については、モデル群についてどれか一つを習熟するだけで他モデルの掌握をたやすく行うことが可能となる。

本研究ではプログラム技法に関する共通化を目指し、従来開発や策定が行われてきた 1) データ入出力ライブラリ 2) プログラム解説文書自動生成システム、3) 可読的ソースコード書法、4) 可変的プログラム構造、について GCM への適用性の検証と、適用性が不十分な点に関して GCM へ適用可能なよう改善を行った。その上でそれらの手法の GCM への適用と有効性に関する検証を行った。GCM という階層モデル群として想定するモデルの中でも物理的に、またプログラム構造的にハイエンドなモデルを対象とし、その適用性を検証することによって惑星大気階層モデル群の実現可能性を探ることとなる。

データ入出力ライブラリの設計と開発

地球惑星流体現象を表現する数値モデルの入出力データ形式および入出力インターフェースを統一すべく開発された Gtool4 Fortran 90 ツール/ライブラリ (Toyoda et al., 2002) の GCM への適用性を検討した。その結果現行のインターフェースでは GCM のように多数のファイルを出力するモデルに関しては、外部ファイルによる出力設定の変更のための処理により出力インターフェースの共通化が妨げられることが示された。本研究では外部ファイルによる出力設定の変更処理をライブラリに内包すべく Toyoda et al. (2002) を機能拡張した Gtool5 Fortran 90/95 ライブラリを設計および開発した。これにより出力ファイルの多寡にかかわらず、複雑度の異なるモデルの出力インターフェースの共通化が可能となった。

プログラム解説文書自動生成システムの構築

プログラム解説文書生成の定型化を目的として開発された解説文書自動生成ツール f90doc (Erik, 1997), f90tohtml (Fiedler et al., 1998), および気候モデルフレームワーク Flexible Modeling System (Balaji et al., 2002) における XML を用いた解説文書自動生成システムについて、本研究の GCM のプログラム解説文書生成システムへの導入を検討した。その結果、Fortran 90 の言語要素の解析機能も

しくは生成される文書の情報量が不十分、例えばモジュール中の変数が公開されるものか否かといった情報を解析できない、また生成される HTML 文書にハイパーリンクや見出しや箇条書きといった構造をもった文書が作成できないことが示された。本研究ではオブジェクト指向スクリプト言語 Ruby のドキュメント生成システム RDoc の Fortran 90/95 解析機能を強化し、規格上の言語要素全ての解釈を行うことを可能とした。この解析機能と RDoc が本来有している HTML 文書生成機能により、GCM のプログラム解説文書生成の定型化と自動化が可能となった。

数式的表現力の高いプログラム書法の策定

階層的スペクトルモデル集 SPMODEL (Takehiro et al., 2006) において提案される、配列関数を積極的に活用した数式的表現力の高いソースコード書法の GCM への適用性を検証した結果、複数の物理素過程が組み合わさり多数の変数から成る計算式の表現、および差分法により連続系と離散系の表記が大きく異なる計算式の表現については、数式的表現力が低下することが示された。本研究では関数とサブルーチンの使い方を区分するとともに、ソースコード上の変数名と数式上の変数名を対応付けた文書を用意する方法を提案し、これにより物理素過程ごとにソースコードを適切に区分し、それぞれの物理素過程内において高い数式的表現力を維持することが可能となった。

オブジェクト指向プログラミングによる可変性向上の試み

Numaguti (1992) による、Fortran 77 で記述された可変的なプログラム構造を有した GCM である AGCM5 における変数名競合問題を、Fortran 90 でのオブジェクト指向プログラミング (Toyoda et al., 2002; Akin, 2003) によって解決すべく、GCM の実装と可変性に関する検証を行った。パラメタ等の全ての変数の局所化には成功し変数名競合問題を解決したものの、コンストラクタとしてのサブルーチン呼出の引数が非常に大きくなるとともに、オブジェクト型のモジュールの作成や維持管理に高度な知識の必要性が生じ、結果として数値モデルとして扱いづらいものとなることが示された。そこで変数名競合問題に関してはモジュールごとに変数を独立管理し、これを利用する際に変数名競合が生じる場合には仮称指定を用いることでこれを回避することとした。本研究では Numaguti (1992) のプログラム構造を基本としつつ、これを全て Fortran 90 に置き換え、全ての物理素過程をモジュール化するプログラム構造を提案した。これによりプログラムとしての過度な高度化と複雑化を避けつつ、プログラムの他物理素過程と独立に変更や着脱が可能となった。

大気大循環モデルの実装

上記の手法を導入した GCM である "dcpam5 (Dennou Club Planetary Atmospheric Model version 5)" を開発し、いくつかの基礎実験を実施した。これにより、まず Gtool5 Fortran 90/95 ライブラリによって GCM の入出力に必要な外部ファイルの処理の隠蔽がなされ、多数ファイルの出力に耐えうる機能を有することが確認された。次に RDoc Fortran 90/95 解析機能強化版によって、Fortran ソースコードとしての読みやすさを損なうことなく解説文書の完全な自動生成が行えることが確認された。最後に、3 次元 GCM と 2 次元軸対称モデルの比較実験を通じ、両者においてソースコードの数式的表現力を高く維持でき、また両者を切り替えるための設定変更は USE 文 1 行分の書換のみで済ませられることが確認された。

惑星大気階層モデル群の実現可能性について

本研究では、データ入出力ライブラリ、プログラム解説文書生成方式、ソースコード書法、プログラム構造の 4 点のプログラム技法に着目し、これらを 1 ~ 3 次元の大気モデルにおいて共通化した惑星大気階層モデル群の姿を模索すべく、プログラム技法に関する考察、および GCM の実装と基礎実験を通じた検証を行った。結果としてこの 4 点に関して共通化可能であること、すなわち惑星大気階層モデル群が実現可能であることが示唆された。これにより仮想的条件での GCM の妥当性の考察に際しての、比較に用いる複雑度の異なるモデルの分だけ必要とされたモデル把握の労力をほぼモデル 1 つ分に圧縮することが可能となった。これを以って、惑星大気パラメタスタディのためのツールセットとしてのモデル群のプログラムの基本構造が確立されたと言えよう。

今後の課題および展開として、まずソースコード書法に関して、数式的表現力を向上するために用いた関数の実行性能への影響の調査と検討が挙げられる。次に、プログラム構造に関しては物理素過程の独立性のさらなる向上を目的とした、放射や積雲過程などの実装の異なる複数のスキームが存在するものに対してそのスキームの交換を容易にするための物理素過程間のインターフェースの策定が挙げられ

る。最後に、本研究の GCM は従来の地球大気モデルをプログラム技法的に全面改訂したものであり、使用されているスキームのほとんどは地球大気用のものであるため、今後惑星大気階層モデル群として実際に機能していくためには、本研究において示されたプログラム技法に則った惑星大気用のスキームの導入と蓄積が必要となるだろう。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 石 渡 正 樹

副 査 教 授 渡 部 重 十

副 査 教 授 倉 本 圭

副 査 教 授 林 祥 介 (神戸大学大学院

理学研究科)

学 位 論 文 題 名

惑星大気大循環モデルの設計と開発

近年、大気大循環モデルを用いた惑星大気に関する理論研究が盛んに行われている。しかし、広範なパラメータ実験を実施する、あるいは仮想的な惑星大気設定における数値計算結果の妥当性に関する検討するのに適した大気モデルが開発されているとは言い難い。これに対して、本論文はモデル設定の変更がしやすく、スタイルのそろった異なる複雑度をもつモデルを階層的に整備することを目指して、データ入出力インターフェースの設計および解説文書整備の方法の策定を行い、これを大気大循環モデルへの実装を行ったものである。

データ入出力のインターフェースは、これまで大気大循環モデルのように比較的複雑で大規模なモデルと簡単なモデルとでは共通化されてこなかった。なぜなら、大気大循環モデルにおいて必要とされる並列化や出力設定の動的変更 (プログラムを再コンパイルせずに変数ごとの出力のオン/オフや時間間隔等の変更を行うこと) の処理に関しては、従来はモデルごとにソースコードを有し、その上に各自でインターフェースを用意するという方法が一般的だったためである。本研究では、並列化および出力設定の動的変更は大気に関する様々なモデルに共通の処理として、そのための汎用ライブラリを整備してインターフェースを共通化する方法を提案した。そしてそれを実現するためのソフトウェアとして、gtool4 Fortran90 Tools/Library (Toyoda et al., 2002) を発展、改良した gtool5 ライブラリを開発を行った。

プログラムの使用方法や支配方程式中の変数とソースコード中の変数の対応に関する解説文書はプログラムに追随して同時に変更されねばならないが、これを逐次行うことは現実的に困難である。Ruby などのプログラミング言語では、RDoc といったライブラリにより、ソースコード内のクラスやメソッドなどの文法を解釈するとともに、付随するコメント文とを併合し、それらから Web ブラウザで参照可能な HTML 文書を作成する。この方法はソースコードと解説文書 2 度書きする必要がなく、少ない負担感で解説文書の整備が可能である。しかしながら従来の手法には、Fortran という言語に則した形態であり、さらに数式を表現可能な HTML 文書を作成できるものは見当たらない。本研究では、Fortran ソースコード内のサブルーチンやその引数などを自動解釈するとともに、ソースコード上で TeX 書式で記述した文書を Web ブラウザ上で数式として表現可能な形式へ変換する手法を提案した。そして、これを実現するために Ruby によるドキュメント生成ライブラリ RDoc の Fortran 90/95 解析ツールの大幅な改良を行った (Morikawa et al., 2007)。

更に、上記を基礎として、惑星大気階層モデルのプロトタイプとなる大気大循環モデルとして、dcpam5 の設計と開発を行った。dcpam5 は、Fortran 77 で記述された大気大循環モデル

AGCM5 (Numaguchi, 1992) において実装されている球面 3 次元プリミティブ方程式である力学過程と放射や積雲パラメタリゼーションなどの物理過程を Fortran 90/95 で新たに書き直す形で実装を行った。実装に際しては、上記の手法に加え、これまでに試みられてきた Takehiro et al. (2006) などの手法を効果的にモデルへと適用するためにプログラミングガイドラインを設けた。基礎実験として水惑星実験を行い、それと並行して、解析データの出力に対して上記で提案した手法を gtool5 ライブラリによって実現可能であるかを検証した。同時に、力学過程や物理過程に関連する解説文書の管理手法についても RDoc Fortran 90/95 解析機能強化版によって実現可能であるかを検証した。その結果、並列化や出力の動的設定の有無にかかわらず入出力インターフェースを共通化すること、そして大気大循環モデルを構成する全てのプログラムにおいて解説文書をソースコードと一緒に、かつその可読性を向上する形で管理すること、さらにそれらから数式を表現可能な HTML 文書を自動的に生成可能であることが示された。

これを要するに、著者は、比較惑星大気科学に供せられる惑星大気階層モデル群のプロトタイプとしての大気大循環モデルを提案したものであり、惑星大気構造の理解に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。