

数値モデルを用いた惑星大気研究と地球流体電脳倶楽部 DCMODEL プロジェクト

竹広 真一^{*1}, 高橋 芳幸^{*2}, 西澤 誠也^{*3}, 林 祥介^{*2} 地球流体電脳倶楽部^{*4}

Researches on planetary atmospheres using numerical models and GFD-Dennou Club DCMODEL project

Shin-ichi Takehiro^{*1}, Yoshiyuki O. Takahashi^{*2}, Seiya Nishizawa^{*3}, Yoshi-Yuki Hayashi^{*2}, and GFD-Dennou Club^{*4}

Abstract

Space missions for planetary atmospheres and numerical simulations are fundamental components for researches on planetary atmospheres. Recently, numerical simulation models become essential to planning of missions, analyzing and providing observational data. On the other hand, the simulation models used in these researches have become so expanded and complicated that it is difficult for one researcher to understand, develop, maintain and provide their source codes.

“Model gap problem” is one of the difficulties with numerical simulation models. In order to check the validity of the simulation models and to develop them further, it is necessary to perform numerical calculations with numerical models with various complexities and to compare the numerical results mutually. Expansion of the simulation models makes difficult to perform such inter-comparison for checking of the validity. In an attempt to overcome the “model gap problem”, we have been proceeding “dcmode project”, where a series of hierarchical numerical models with various complexity is developed and maintained as a voluntary activity. The numerical models are developed with the following intentions: 1) Hierarchical models with various complexities. 2) Common “style” of programming in order to ensure readability. 3) Open source codes to the public. 4) Scalability of the models in order to ensure execution on various platforms. 5) Stressing the importance of documentation and presenting a method for producing reference manuals. The series of hierarchical models enable us to conduct multiple numerical experiments with multiple models easily, which will lead to a deeper understanding of various phenomena in planetary atmospheres.

概要

惑星大気探査と数値シミュレーションとは惑星大気研究に欠かせない手段である。さらに近年の惑星大気探査においては、数値シミュレーションモデルはその計画立案や観測データの整理提供において、不可欠な道具となりつつある。一方で、大気の数値シミュレーションモデルは複雑化巨大化しており、一個人の研究者が掌握し、開発・維持・提供していくことは困難なソフトウェアとなっている。その困難の一つに、いわゆる「モデルギャップ問題」がある。シミュレーションモデルの正当性を担保し維持向上させていくためには、様々な複雑度をもつ数値モデルによる数値計算を実行し相互比較することにより、計算の正当性を吟味することを行わなければならない。モデルの複雑化巨大化はこのような相互比較による検証作業を極めて困難にしている。「モデルギャップ問題」を克服することの試みとして、われわれは地球惑星流体研究のためのさまざまな複雑度を持つモデルを階層的に構築し、整備するボランティアベースの活動「dcmode プロジェクト」を行ってきた。ソフトウェア開発においては以下の点に留意している：1) 様々な複雑度のモデル群。2) 共通の「型」を持ったモデル群。3) 誰でも使えるモデル群。4) 様々な規模の計算機で実行できるモデル群。5) 解説文書の整備されたモデル群。このような階層的モデル群は、複数のモデルによる複数の数値実験実現を容易にし、惑星大気現象の理解と惑星大気シミュレーションモデルの開発につながる事が期待される。

*1 京都大学数理解析研究所 (Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University)

*2 神戸大学地球惑星科学専攻 / 惑星科学研究センター

(Department of Earth and Planetary Sciences/Center for Planetary Sciences, Kobe University)

*3 理化学研究所計算科学研究機構 (RIKEN Advanced Institute for Computational Science)

*4 <http://www.gfd-dennou.org/>

1. 数値モデルを用いた惑星大気研究

近年、多くの探査機による惑星の観測が実施され、惑星に関する新たな情報が得られるようになってきている。探査機観測に基づいた惑星固体・大気および周辺環境の研究は、通常はそれらの観測結果だけでなく、さまざまなレベルの数値モデルを相補的に用いることにより進められる。得られた観測データの量が少ない時代には、その観測結果をモデルにより解釈することがまず行われる。新たなデータが加わり、データ量が増加し蓄積されてくると、それらを取り込んで数値モデルの改良・精緻化が行われるようになる。その結果としてモデルが発達し数値シミュレーションがもっともらしい結果を与えるようになると、数値モデルの出力がデータベース化され、惑星の平均的描像を提供できるようになる。さらには、観測データをモデルに取り込んでデータの再解析、あるいは次に述べるデータ同化を行うことにより、観測の穴を埋めるデータが生成できて、より詳細な惑星の状態を知ることができるようになる。すなわち、数値シミュレーションモデルと観測データの整理解析は不可分な関係となってくる。このように発達し洗練されたモデルの出力は惑星の状況を記述するだけでなく、次期探査計画へとフィードバックされることにつながる。例えば疑似観測データを用いた同化実験を行うことにより、探査計画が効率的であるのか否かを評価することが可能となる。

このように、数値シミュレーションモデルはいわば観測と種々の基礎過程に関する知見の集大成といえるだろう。

1.1 データ同化

上に述べたデータ同化とは、観測データと数値モデルから時間発展する系の状態を推定する方法のことである。良くできたシミュレーションモデルは、観測のない時空間領域における物理量や観測できない物理量の情報を提供できる。データ同化結果を用いてモデルの検証を行ったり、現象の理解を深化させることにつながる。そもそもデータ同化は数値天気予報の初期値生成のために開発・発達してきており、地球の気象海洋分野では同化されたデータが基本的なデータセットとして活用されてきている。過去約 50 年の長期間にわたる観測データの同化および再解析データは、それら自体を観測結果としてみなし、気象および気候研究に利用されている。その結果として研究者人口が拡大し、研究内容の進化につながっている。

惑星大気研究においても、次に紹介するように、火星大気同化データが公開されるようになって来ており、地球大気と同様、同化データセットを利用した研究が広がってくるだろうと思われる。

1.2 海外での研究例

数値シミュレーションモデルと観測データの積極的な協同による惑星大気研究は、海外では普通に行われるようになりつつある。その一例として、Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) (France) と Oxford Univ., Open Univ. (UK) のグループが協力して行ってきた活動が上げられる。火星の気候モデルデータベース、Mars Climate Database (MCD, <http://www-mars.lmd.jussief.fr/>)、は大気大循環モデルの計算結果をコンパイルしたものであり、様々な季節、地方時、緯度、経度、高度における物理量(風速、温度、密度、物質の量など)のデータを集約している。このデータセットはインターネットで一般に公開されている¹⁾。

火星大気データ同化、Mars Analysis Correction Data Assimilation (MACDA)、は欧米の火星(惑星)大気探査の観測データを用いた同化計算である。ダストストーム時のダスト量と平均子午面場の時間変化の様子を見ることができたりする²⁾。

このような海外の情勢に対して、日本国内の惑星大気研究は、残念ながら惑星探査観測と数値モデルとの協同が密ではない。数値モデルは観測データの解釈を行うためのツールとしてしか主に使われておらず、データ同化や探査計画へのフィードバックなどは行われていない。研究体制も組織化されているとはいえ、個人や小規模のグループが別々に小さな予算規模で研究している。

2. 地球流体電脳倶楽部の活動

以下では、国内の惑星大気研究活動の一例として、地球流体電脳倶楽部がここ 10 数年にわたって行ってきた数値モデル開発活動である DCMODEL プロジェクトを紹介する。

地球流体電脳倶楽部は、地球惑星科学研究に必要な計算機(電脳)資源の開発や収集を行ってきた。それを通じて研究基盤の維持、知識・技術の伝承を試みている。インターネット上に設置したサーバーにおいて描画(DCL)やデータ解析ツールなど(Dennou-ruby)、データ収集(衛星画像、数値予報・再解析データなど)、数値モデル(地球流体・惑星大気

モデルなど), 関連セミナー資料(発表資料, ビデオなど), その他メンバーが開発した電腦資源など, を提供している. このような活動は, 大学等の組織を越えた有志によりボランティア的に支えられている. ソフトウェア開発やサーバーの維持管理等の活動は恒常的かつ大規模な予算に裏付けされているわけではなく, 有志の獲得した小規模な科学研究費等の一部を運用することにより維持してきている.

2.1 DCMODEL プロジェクト

先に述べたように, 近年の惑星大気の研究においては数値実験あるいはシミュレーションによるアプローチが盛んに行われるようになってきている. そこで用いられている数値モデルは単純な流体計算に加えて, 放射・乱流過程, あるいは雲・降水に代表される構成物質の相変化などの多くの物理素過程を取り入れている. そのため, 今やシミュレーション数値モデルは一人の研究者が容易には掌握できない大きさと複雑さを持ったソフトウェアとなっている. その結果として, 複雑なモデルによる計算結果の正当性の検討と現象をより深く理解するための, 簡略な概念モデルや素過程による比較計算を行うことが難しくなっておりモデルギャップ問題として認識されつつある³⁾. 複雑なシミュレーションモデルと簡単な概念モデルあるいは素過程モデルのギャップを埋めるためには, 素過程モデルや概念モデルを種々の複雑度で階層的に用意する必要がある. これらによる数値実験を並列的に行って, それらの結果を比較検討していく研究を行う必要がある. このような背景を鑑み, われわれは地球惑星流体研究のためのさまざまな複雑度を持つモデルを階層的に構築・整備する活動「dcmode1 プロジェクト」⁴⁾を行ってきている.

2.2 dcmode1 のモデルの特徴

dcmode1 プロジェクトでは, 次のような特徴を持つモデル群を構築することを目指している

1. 様々な複雑度のモデル

現象の理解と複雑なモデルの正当性のチェックのために, 簡単なモデル(素過程モデル・概念モデル)から複雑なモデルまでさまざまな複雑度をもつモデル群を階層的に用意する.

2. 共通の「型」を持ったモデル

複雑度の異なる多数のプログラムを用いた数値実験を同時に効率的に行うためには, それらのプログラムコードの可読性が重要な要素となる. dcmode1 プロジェクトのモデル群では共通の書式・変数名規則・入出力ルーチン・データ書式を用いている. 共通のスタイルを持ったプログラムコードにしておくことで, 一つのプログラムを学習すれば他のプログラムの理解が速く進むことが期待される. また, データ形式を共通にしておくことで, 複数のモデルの数値計算結果の後処理や可視化を同じような操作で行なうことができる.

プログラムの維持管理だけでなくモデルのユーザーにとっても可読性は重要な要件である. すなわち, 数値計算ソフトウェアのソースコードがその元となる物理モデルをどのように体现しているかを, かならずしもソフトウェアの専門家ではないユーザーが確認できるように, プログラム構造を設計することが必要である.

3. 誰でも使えるモデル・プログラム

dcmode1 プロジェクトのモデル群はソースコードから全てインターネット上で公開されており, 自由に利用・改変・再配布が可能である. このことは単に利用者の利便を図っているだけでなく, 数値モデルを用いた科学研究において必須の事項だからである. 他の研究者の結果を誰でも追試できることが科学研究を進める上で重要な点である. しかしながら, 近年の数値実験やシミュレーションによる研究を追試することは困難である. そもそも数値実験の追試を行うためには, 実験に用いられたモデルが誰でも使えるようになっていなければならない.

4. 様々な規模の計算機で実行できるモデル

パソコンによる低解像度計算からスーパーコンピュータによる大規模計算まで同じプログラムで使用できるようにモデルを設計・構築することをめざしている. 学生が学部・大学院教育で用いた教材を, そのまま最先端の研究として用いることができる. 大学で学習したことを社会人になっても生かすことができる.

5. 解説文書の整備されたモデル

dcmodel プロジェクトのモデル群では、初心者向けのチュートリアル文書、中級者向けの参考書および開発者向けのモデル解説書をモデル開発と共通の形式で整備することをめざしている。モデルのユーザーだけでなくプログラムの維持管理にとってもモデルの解説文書は重要である。すなわち、数値計算ソフトウェアのソースコードが記述しようとしていた元の物理モデルを確認する必要があるからである。

2.3 dcmodel プロジェクトのモデル群の構成要素

2.3.1 spmodel

spmodel⁶⁾ は比較的簡単な地球流体数値実験用のスペクトルモデル集である。内部で Fortran77 のスペクトル変換ライブラリである ISPACK⁵⁾ を用いている。1次元 KdV方程式から2次元順圧・浅水モデル・ブシネスク流体モデル、3次元回転球殻磁気流体ダイナモモデルまでそろえている。図1に spmodel による流体計算の出力例を示している。

spmodel では内部で用いている独特の書法のお陰で、支配方程式から容易に想像できる表現をもったプログラムソースコードを構築することができている。例えば1次元 KdV 方程式、

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\zeta \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^3}$$

を spmodel 書法でプログラムをかくと

```
e_DZetaDt = -e_g(g_e(e_Zeta)*g_e(e_Dx_e(e_Zeta))) &
            -e_Dx_e(e_Dx_e(e_Dx_e(e_Zeta)))
```

といった具合である。ここで e_Zeta は ζ をスペクトル変換したデータ、e_g, g_e はスペクトルデータと格子点データの間の変換関数、e_Dx_e は空間微分演算を行う関数である。

2.3.2 deepconv

deepconv⁷⁾ は地球を含めた惑星大気的应用を想定した、非静力学流体モデルである。順圧縮系を採用し、複数の大気構成分子の化学変化と相変化を導入しており、惑星大気の雲対流をシミュレートすることができる。計算設定の変更によって2次元計算と3次元計算を容易に切り替えることができるようになっている。表1に deepconv の主な仕様を、図2に deepconv による木星の雲対流の計算例を示している。

表1 雲解像度モデル deepconv の主な仕様

| | |
|----------|---|
| 力学過程 | 準圧縮系 (Klemp and Wilhelmson, 1978) 水平: 等間隔格子点 鉛直: 等間隔格子点 |
| 物理過程 | |
| 乱流過程 | 1.5 次のクロージャ (Klemp and Wilhelmson, 1978) |
| 湿潤過程 | 複数凝結成分, 主成分凝結を考慮 Kessler (1969) のパラメタリゼーション 雲粒の拡散成長 |
| 放射過程 | 一様冷却/加熱 地球用放射モデル |
| 地表面フラックス | バルク法 拡散 |

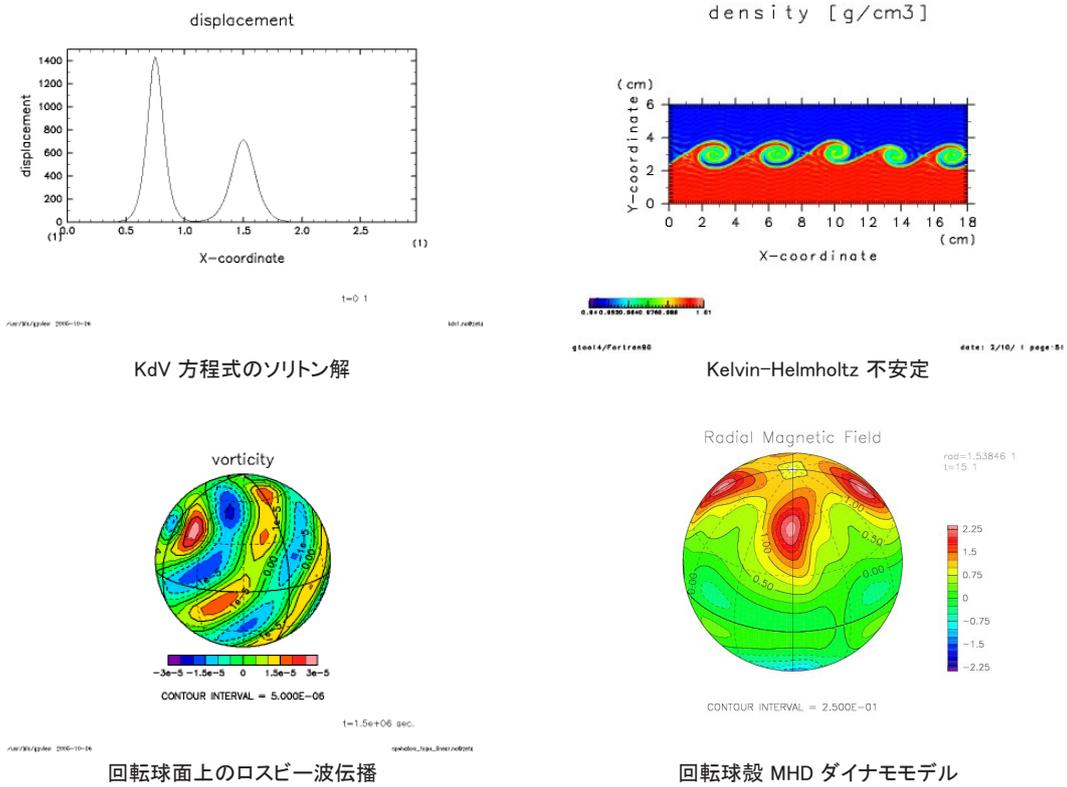


図 1 spmodel の計算例

2.3.3 dcpam

dcpam⁸⁾ は汎用惑星大気大循環モデル (GCM) である。プリミティブ方程式に基づいており、力学部分は ISPACK を用いたスペクトル計算で行われる。放射・乱流・降水過程ならびに地表面過程が導入されている。設定によって、地球・火星および簡略化された金星および木星大気の大気大循環を計算できるようになっている。また、鉛直 1 次元計算と 2 次元軸対称計算も可能である。表 2 に dcpam の主な仕様を、図 3 に dcpam による地球側惑星大気大循環の計算例を示している。

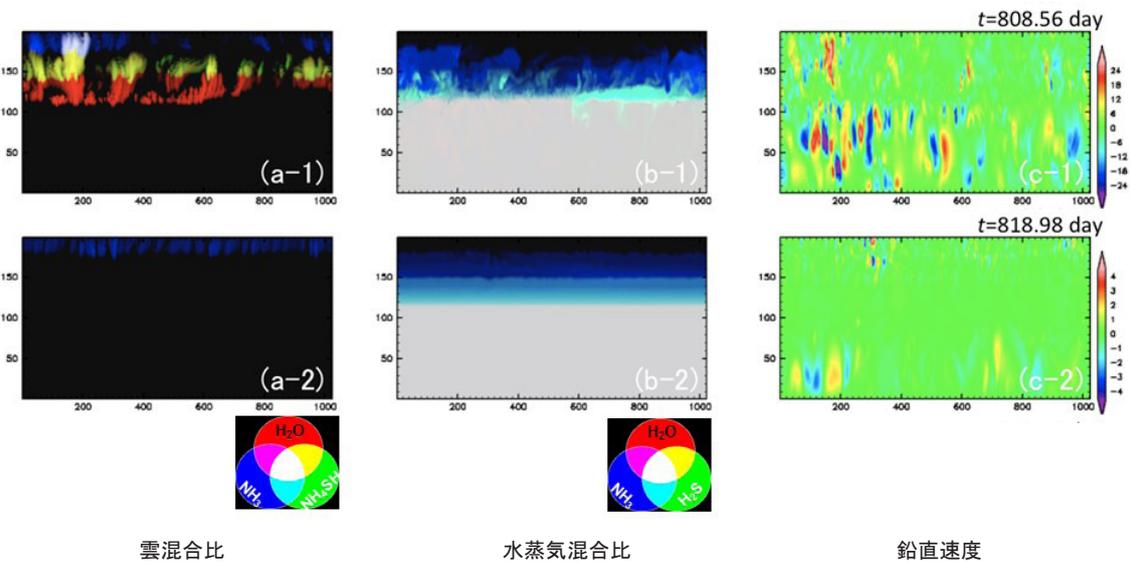


図 2 deepconv の計算例。上段が対流活動の活発期，下段が静穏期。

表 2 汎用惑星大気大循環モデル (GCM) dcpam の主な仕様

| | |
|-------|---|
| 力学過程 | プリミティブ方程式系 水平：スペクトル変換法 (ISPACK 使用) 鉛直：Arakawa and Suarez (1983) の鉛直差分法 |
| 物理過程 | |
| 放射過程 | 地球大気放射モデル：CO ₂ , H ₂ O, O ₃ , 雲 (Chou et al, 2001) 火星大気放射モデル：CO ₂ , ダスト 灰色放射モデル |
| 乱流混合 | 乱流：Mellor and Yamada (1974, 1982) 惑星表面フラックス：Louis et al. (1982) |
| 凝結過程 | 積雲対流：Relaxed Arakawa-Schubert (Moorthi and Suarez, 1992) 大規模凝結：Manabe et al. (1965) CO ₂ 凝結過程 |
| 陸面モデル | バケツモデル (Manabe, 1969) 土壌熱伝導モデル |
| 雲モデル | 簡単な予報方程式により雲水密度を予報 雲氷を無視 積雲対流と大規模凝結による生成, 定数寿命による消失, 乱流混合を考慮, サブグリッドスケールの部分雲は考慮しない (雲量 1) |

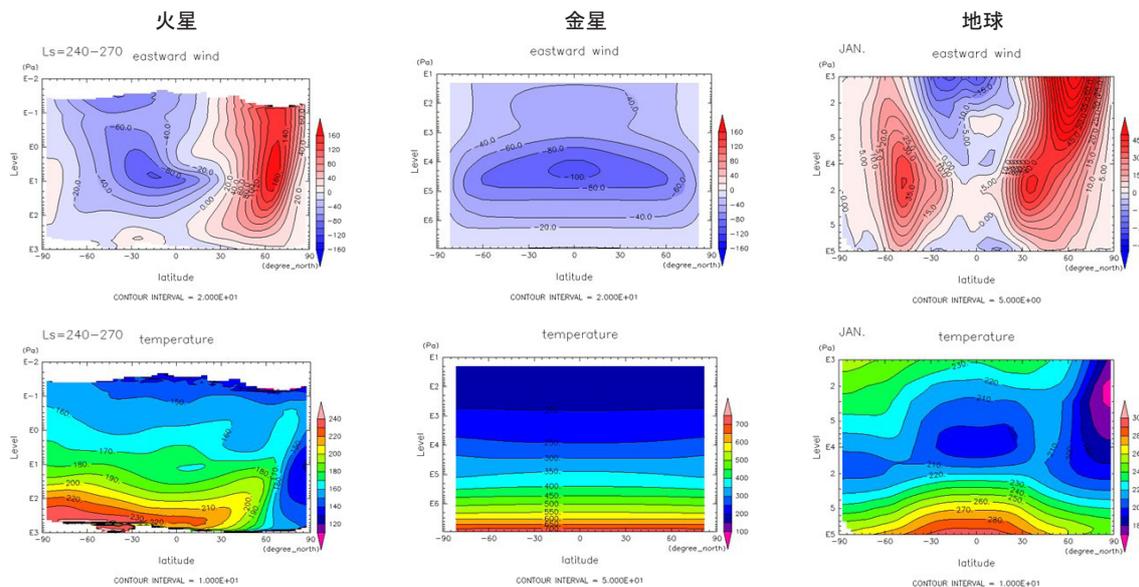


図 3 dcpam の計算例. 上段が東西風, 下段が温度

3. まとめ

惑星大気探査に基づいた研究を遂行するには、いまや数値シミュレーションモデルが必須である時代となった。惑星探査観測と有機的に結合でき、かつ、惑星科学分野で専有できる、地球をも含めた惑星科学の知見集積としてのシミュレーションモデルが必要である。一方で、用いられるシミュレーションモデルはソースコードが巨大化し、個人で開発維持することが困難になってきている。したがって、数値モデルの開発維持運用に専従するスタッフをそろえた中核となるグループが必要である。既存の地球環境科学(天気予報, 気候予測)とは独立した組織で惑星大気科学のためのシミュレーション/データ解析のソフトウェアチームを編成し、惑星科学分野へサービスを提供するようにしなければならない。こ

のような傾向は惑星大気研究に限らず惑星科学のあらゆる分野で顕著となり、それぞれの分野で洗練されたシミュレーションモデルとその開発維持体制が必要となるだろう。

参考文献

- [1] Lewis, S. R., Collins, M., Read, P. L., Forget, F., Hourdin, F., Fournier, R., Hourdin, C., Talagrand, O. Huot, J.-P., 1999 : A climate database for Mars. *J. Geophys. Res.*, 104, 24177–24194.
- [2] Montabone, L., Lewis, S. R., Read, P. L., 2005: Interannual variability of Martian dust storms in assimilation of several years of Mars global surveyor observations. *Advances in Space Research*, 36, 2146–2155.
- [3] Held, I. M.: The gap between simulation and understanding in climate modeling. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 86, 1609–1614, 2005.
- [4] 地球流体電脳倶楽部 dcmo del プロジェクト . <http://www.gfd-dennou.org/library/dcmo del/>, 地球流体電脳倶楽部 .
- [5] 石岡圭一 , ispack-1.0.0, <http://www.gfd-dennou.org/arch/ispack/>, (2013), 地球流体電脳倶楽部 .
- [6] Takehiro, S., Odaka, M., Ishioka, K., Ishiwatari, M., Hayashi, Y.-Y., and SPMODEL Development Group: SPMODEL: A series of hierarchical spectral models for geophysical fluid dynamics, Nagare Multimedia, available at: <http://www2.nagare.or.jp/mm/2006/spmo del/index.htm>, (2006).
- [7] 杉山耕一郎, 小高正嗣, 山下達也, 中島健介, 林祥介, deepconv 開発グループ, 非静力学モデル deepconv, <http://www.gfd-dennou.org/library/deep conv/>, (2010), 地球流体電脳倶楽部 .
- [8] 高橋 芳幸, 竹広 真一, 石渡 正樹, 納多 哲史, 小高 正嗣, 堀之内 武, 森川 靖大, 林 祥介, DCPAM 開発グループ, 惑星大気モデル DCPAM, <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>, (2011), 地球流体電脳倶楽部 .