

# 準一様格子を用いた全球雲解像大気モデルの開発と それによる熱帯対流雲集団のシミュレーション

—2007年度日本気象学会賞受賞記念講演—

佐藤 正樹\*・富田 浩文\*\*

## 1. はじめに

このたび日本気象学会賞を受賞することとなりました。本研究を支援してくださった多くの方々に感謝を申し上げます。受賞講演原稿を依頼されましたが、我々の研究の内容は、創立125周年記念解説「全球非静力学モデルへの道」(佐藤 2007) とほとんど重複しますので、本稿では研究の途上で考えたことや出来事を中心に述べていきたいと思ひます。主に佐藤から見一側面についてのみ書きますが、富田氏からの見方に関しては、日本流体力学会竜門賞受賞原稿(富田 2006) を参照ください。

## 2. プロジェクト開始まで

私が1986年に東京大学の修士課程に進学した頃は、林 祥介助手や住 明正助教授(肩書は当時)が気象庁から導入した大気大循環モデル(GCM)を用いて、水惑星によるスーパークラウドクラスターの実験を行っていた頃でした(Hayashi and Sumi 1986)。その後、東京大学では、借りてきたモデルをそのまま使うわけにはいかないということで、気象庁モデルのリバースエンジニアリングを行い、自前のGCMを作らんとしました。結局は、私の同級生の故沼口 敦君が主に一人でこの作業を行い、博士課程を費やしてGCMの開発をなしとげました。このモデルが、その

後の気候システム研究センターの気候モデルMIROCや他の研究グループで用いられているGCMの母体になります。私は修士課程の際の「GCMゼミ」において、GCMの理論的背景についての基本を勉強しました。このゼミは、担当者である私が、GCMの各パーツについてテーマごとに毎週調べて発表し、これに対しすでにGCM実験の経験のある林さんと沼口君が突っ込みを入れるというもので、たいへんでしたがよい経験になりました。このときのノートがSatoh(2004)のpart 3の元になっています。

私が学位を取得したのは1993年で、軸対称モデルを使ってハドレー循環の力学を調べました(Satoh 1994)。GCMの力学スキームを参考に、静力学平衡のプリミティブ方程式系の2次元の格子モデルを自分で作りました。特に軸対称系なので角運動量を保存するスキームの構築に工夫をしました。もちろんGCMの東西波数成分をゼロにするだけで軸対称モデルができるのですが、私自身スペクトルモデルがきちんとワークしているのか懐疑的で、格子モデルで試してみたいという衝動がありました。その後、沼口君が自分の作ったGCMで似たような実験を行ったところ、同じ結果になったので、スペクトルモデルでも問題ないのだと納得することになりました。

学位取得後はしばらくハドレー循環の研究を進めていました。軸対称モデルではなく、GCMを使って3次元性、特に傾圧不安定とハドレー循環との相互作用という観点からいろいろ調べました。しかし、ハドレー循環を駆動する赤道の積雲(赤道収束帯ITCZ)のふるまいが、GCMに導入される積雲パラメタリゼーションに大きく依存するということから、どうもこの先、本質的な進展は難しいという思いを持ちながら研究を進めていました。

\* 東京大学気候システム研究センター/海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター。

satoh@ccsr.u-tokyo.ac.jp

\*\* 海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター。

—2008年2月12日受領—

—2008年3月28日受理—

その頃、非静力学モデルに関する気象研究所の技術報告(猪川・斉藤 1991)が出版されたので、入手して手にとって眺めていました。いずれ非静力学モデルを作りたいものだと感じながら、年月が流れていきます。学位を取得後、私立大学に就職し、毎日を講義や卒研、学務に追われつつ、暇々に論文を書く日々をししばらく過ごした後、1998年に気分転換にイギリス・ケンブリッジ大学に1年間滞在する機会を得ることができました。GCMを基本的な力学研究に使うという点でPeter Haynesと共通の興味があり、彼の研究室にお邪魔することになりました。ケンブリッジの中になると、GCMを使うことでもずいぶん曇りの雰囲気がありました。Reading大学のグループの研究についてもいろいろと耳に入ってきました。高解像度GCMによる傾圧不安定の実験(Methven and Hoskins 1998)や非静力学モデルによる放射対流平衡実験(Tompkins and Craig 1998)をきき、だんだんと高解像度モデリングへの憧憬がわきあがってきました。またReading大学を訪れたときにホストを務めてくださったLouis Steenman-Clark氏にGCMの並列化プログラミングの文献をいただき(Barros *et al.* 1995)、無性に自ら手を動かして並列コードを書きたくなりました。そんな中、ケンブリッジのセミナーで自分のGCMによる傾圧不安定実験の話の際に、M. McIntyreから解像度についてきかれ、T42だと答えたところ、“too coarse”(粗すぎる)の一言をもらいました。あまり覚えていませんが、成層圏との物質交換を論じるには解像度が低すぎるということで、別にT42モデルが悪いというわけではなかったと思います。しかし、この一言が胸にいつまでもひっかかっていました。

その頃、日本からの情報で、地球シミュレータプロジェクトが始動したというニュースや、それに関する松野太郎先生(当時地球フロンティア研究システム)の今後の高解像度モデリングに対する展望などのコメントをきくようになりました。高解像度モデリングといっても当初の見積もりでは全球10 kmメッシュモデルくらいまでしか実現できないだろうということでしたが、私自身は傾圧波の微細構造や亜熱帯の混合がより詳細に計算ができそうだとということで、大変な魅力を感じました。新しいモデルを開発するとしたら、沼口君だろうと思っていたものです。ところが、その年の11月、彼がたまたまケンブリッジまで訪ねて来る機会があり、きいてみたところ、自分はモデル開発をも

うやりたくない、観測の方がよい、ということを知っていたので、日本で他に開発を進める人はいるのだろうかと思いつつ英国滞在を終えました。

### 3. 地球フロンティアでの開発

さて、日本に帰る直前の頃、地球フロンティアにすでに参加していた東京大学の中村 尚さんや山形俊男さんから、私にも地球フロンティアに来て研究をしないかというお誘いをいただきました。私立大学での個人営業的な研究にいくぶん慢性化を感じていたので、地球フロンティアでのプロジェクト的研究に少なからぬ魅力を感じました。おそらく、山形さんらが当時進めていたインド洋ダイポール現象のGCMによる検証を期待していたと思われるが、いろいろあって松野先生の研究グループに属することになりました。といっても、当時は佐久間弘文さんが立ち上がったばかりの地球フロンティアをなんとか実質のあるものにしてようと努力されており、私も佐久間さんのもとで研究をはじめることになりました。面白いことに、当初は別にやることははっきりと決まっていなかったのです。地球フロンティアのいろいろな人に話をきいてみると、従来のGCMを高解像度化するという話はあっても、新しいモデルを作っている人は誰もいないということでした。また高解像度モデルについても、すでに何か使えるわけではないので、既存のGCMを使って研究している人がほとんどでした。佐久間さんは、そういう状況に危機感を感じていたので、我々自身の手で新しいモデルを開発するということに焦点を定めることとしました。最初に紹介されたのが、航空工学科を卒業したばかりの富田浩文さんと天文学科を卒業した津川元彦さんでした。両氏とも、新しいモデル作りに非常に興味をもってくくださったので、それではさっそく勉強会を開いて進めようということになりました。私が東大時代に行っていたGCMゼミにならって、富田さんらを担当者とするダイナミカルコア(DC)ゼミを開始したのが1999年7月頃です。

Stuhne and Peltier (1996)の正20面体格子の文献やMcGregor (1996)の立方格子モデルの文献から読み始め、それぞれの格子系で球面上の浅水波モデルをつくることにしました。富田さんは作業が早く、さっさと格子モデルを作りあげ、さっそく壁にぶつかることになりました。正20面体を分割した格子を用いて球面浅水波モデルを作ったところ、計算不安定になって長時間の計算ができないということでした。計算の安定

性の問題は当事者でないと本当の問題の所在はわかりません。はたでみていると、数値拡散を大きくすればよいでしょうと一言で片付けがちですが、何とかごまかした計算はできたとしても、それでは使い物にならないというのがわかるのはモデルを開発した本人しかいません。富田さんは、その後けっこう進展がないように見えたのですが、ある日、格子の面積がこんなにジグザグですよというグラフをもってきて、これが悪さをしているのですと断言しました。これをスムーズにすれば解決しますとまでいったのですが、私自身は多少懐疑的でした。例えば1次元問題で格子が不等間隔の場合、格子ごとの長さを考慮して差分化すれば精度は保たれる。格子をいじるのはあまり気にくわない、差分法の改良で対応できないかといいましたが、富田さんは気にも留めずに、格子の間をバネでつないで格子間隔を滑らかにする方法を考案し、さらにそのポテンシャル解析、計算結果のハフモード展開解析まで行って、最適な格子配置を求めました。これが、ばね力学法による正20面体格子生成法です (Tomita *et al.* 2001, 2002)。

新しいモデルのダイナミカルコアには球面上の格子系と非静力学モデリングが必要でした。球面上の格子の切り方に関しては安心して富田さんに任せることができたので、私自身は非静力学スキームの検討を担当することにしました。私としては既存の非静力学スキームに関しては、保存性に配慮したスキームがほとんどないことに不満をもっていました。唯一、斉藤和雄さんによる気象研の非静力学モデルが質量を保存する定式化を行っていたので、共感をもつことができます。しかし、エネルギーに関しては、既存のスキームには保存性などに問題があるように見えました。そこで、新しい非静力学数値スキームを開発するとともにカーチアン座標系のテストモデルとして、非静力学領域モデルを別途つくることにしました。質量とエネルギーを保存するという目的のため、いろいろ考えましたが、結局、それぞれの式をフラックス形式で積分するという事に帰着して、スキームを完成させることができました。それが Satoh (2002)、湿潤過程に拡張したのが Satoh (2003) です。

プロジェクト開始の段階からは、外国の研究者からは好意的に迎えられました。日本では地球シミュレータというのが2002年頃にできるということは知られており、いったいどういうモデルをその上で走らせるのかという好奇心を皆もっていたようです。地球フロン

ティアでの最初の講演者として1999年12月に McIntyre が来たときに、私が携わっている新しいモデルの話をする、それは本当に挑戦的で多くの問題にぶつかるだろうといていました。2000年9月には、富田さんと共に我々の作った浅水波モデルの結果をたずさえて、当時正20面体格子モデルを現業の全球予報モデル GME とし動かしているドイツ気象局の D. Majewski のところを訪ねていきました。Majewski 氏には自宅にまで招待され、歓待していただきました。ドイツ気象局では、Lokal Model という非静力学モデルを新しく開発したばかりで、我々の2本立ての研究とマッチした話ができました。その後も、マックスプランク研究所を交えた形で緊密な情報交換を続けています。2000年11月には GCSS (GEWEX Cloud System Study 全球エネルギー・水循環実験 雲システム研究) の会議のため D. Randall が地球フロンティアに来ました。コロラド州立大学 (CSU) のグループでも Heikes and Randall (1995) によってすでに正20面体モデルの開発が進められていました。Randall に議論したいと持ちかけると、好意的に対応していただき、会食の際に富田さんが隣に座って我々の研究の紹介をすることができました。これがその後の CSU を中心とする CMMAP (The Center for Multi-Scale Modeling of Atmospheric Processes) に参加するといった交流の元になります。

プロジェクト研究は、計画をたててそれに向かって進行するということにはなりますが、科学的な研究がからむので実際にもものになるかどうかは誰にもわかりません。その中で、多くの研究会が助けになりました。非静力学モデルに関するワークショップは、2000年ごろから定期的で開催され、特に気象庁の人たちと詳細な部分にまでの議論を行うことができました。国際ワークショップ「球面上の偏微分方程式解」(PDEs on the sphere) にも定期的に参加し、2004年には地球フロンティア主催でワークショップを開くなど、プレゼンスを高めてきました。

#### 4. 地球シミュレータ誕生

日本の中でわれわれの研究は、グループ以外の人たちには半信半疑で、あまり期待もされていないようでした。当初は、期限のしほりも特になく、自分たちが好きなように計画をすすめていたものです。2000年から2001年にかけて浅水波モデル、非静力学コアを作り、2002年から2003年頃にそれを結合した3次元のダイナ

ミカルコア、2004年に物理過程導入、2005年以降海陸分布の入った計算ができるだろうという図を示していたところ、最初の頃はぜひぶん無謀な計画ですね、といわれたものです。ところがその後、成果が徐々に出てくると、進み方が遅いという声が、我々の知らないところで起こってきたようです。我々は、必要不可欠なプロセスを経ながら進めてきたので、そういった声についてはあまり気にとめずに進めてきました。

2002年に地球シミュレータが稼動しました。われわれの牧歌的な研究の一方で、世間では共生プログラムがスタートし、気候変動に関する政府間パネル第4次報告書 (IPCC AR4) に向けた実験が優先的に行われるようになりました。全球雲解像モデルはもちろん、共生プログラムとは関係ありません。我々は予定通り進めて、その頃3次元ダイナミカルコアができていたので3.5 km メッシュの力学実験を行いました (Iga *et al.* 2007 a)。同時に、降水過程などの物理過程の導入も進めました。物理過程のテストとして、3.5 km の全球雲解像実験のテスト実験を数多く行うのは、地球シミュレータをもってしても難しい。そこで領域モデル的な使い方ができないかと、格子系をシュミット変換して一部領域に集中させたストレッチ格子モデルを開発し、スコールライン実験などを行いました。また、惑星の半径を小さくして、球面を全域熱帯だと考えた実験 (小惑星実験) などを行って研究発表しました。この実験は、従来、非静力学モデルを用いた気候状態の研究として、カーチアン座標系のモデルで2重周期条件を課すなどして行なわれていた放射対流平衡直接数値実験 (Tompkins and Craig 1998) を球面上で行なうことに対応します。地球シミュレータを用いて、徐々に半径を大きくしていくことで、全球雲解像実験に収敛していきます。計算してみると、深い対流に伴うコールドプールや上層雲の拡がりなど、メソ循環が再現され、積雲クラスターの形成をみることができました。今から振り返ると、数値的な安定性の確認や、長時間積分におけるメソ対流系のふるまいを見ることができたことから、小惑星実験は次に進む水惑星実験 (地球の陸地を取り除き下端境界条件をすべて海とした理想実験) のための必要不可欠なステップであったといえます。今でも、物理過程のテスト等のために小惑星実験は多用しています。

2002年頃から、ドイツのマックスプランク研究所やドイツ気象局の連携のもとでも、新しい大気大循環モデルの開発が始まりました。彼らは、新しい正20面体

格子モデルの名前をICON (ICOsahedral Nonhydrostatic model) とするということなので、我々のモデルにも名前をつけることを考えました。結局、順番をひっくり返してNICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) としました。正20面体の三角形を次々と分割して、11回分割すれば、格子間隔約3.5 km の格子ができます。力学コアの実験の経験から、全球3.5 km 格子間隔の実験は可能だろうと見積もっていました。一般には5 km 格子間隔以下であれば、非静力学効果が重要になり、積雲パラメタリゼーションを使わなくとも、ある程度深い積雲の表現が可能であると考えられています。そこで、3.5 km 格子の実験を全球雲解像実験と称しています。「雲解像」の名前は人によってイメージが異なるので、研究会で不毛な議論がしばしばおこったものです。

## 5. 全球雲解像実験

力学コア実験、小惑星放射対流平衡実験、ストレッチ格子スコールライン実験などの基礎実験を一通り行ったので、いよいよ「全球雲解像実験」に取り組むこととしました。まだモデル開発の途上で、海陸分布や地表面過程の導入前だったので、最初は全球を海洋と仮定した「水惑星実験」に取り組むことにしました。ちょうど Neale and Hoskins (2001) の実験プロトコルの論文が出て、水惑星ワークショップがReading 大学で2004年4月に計画された時期でした。まず、14 km 格子モデルからはじめて、7 km 格子、3.5 km 格子へと進みました。格子間隔が14 km 以下であれば、積雲パラメタリゼーションを使わなくてもモデルが動くことがわかったので、スピンアップ実験や基礎的な感度実験は14 km 格子のモデルを使うこととしました。このようないくつかの解像度を組み合わせる実験スタイルは今でも続いています。世間では14 km 格子モデルで積雲パラメタリゼーションを使わないということは考えられないのですが、我々はあくまでも3.5 km 格子モデルのための参照用として利用しています。低解像度の気候大循環モデルで数年積分をして平衡場を作り、それを東西平均した初期値を用いて14 km 格子実験を行いました。積分時間60日でおおむね統計的な平衡状態になったので、そこから7 km 実験を30日積分、最後の10日について3.5 km 実験を行いました。富田さんが2005年の正月休み前にジョブを投入して、休み明けに見てみたら計算が完了していたということです。水惑星実験の結果によると、クラウド

クラスター、スーパークラウドクラスターの積雲のマルチスケール構造が表現されており、Hayashi and Sumi (1986) のようにスーパークラウドクラスターが1か月かけて東進する様子が再現されていました。さっそく *Geophysical Research Letters* に論文を投稿したところ、レビューから landmark paper (画期的論文) であるとの高い評価を得て、ハイライト欄に取り上げられました (Tomita *et al.* 2005)。

今回の学会賞の対象になったのはこの頃までの論文です。水惑星実験だけではまだ非現実的で、実際的な計算を行うために早急に海陸分布、陸面過程を導入した実験を行う必要がありました。海陸配置を導入した実験は、試行錯誤もありましたが (Miura *et al.* 2007 a ; Iga *et al.* 2007 b), 2007年に行ったマッデンジュリアン振動 (MJO) の再現実験で、成功例を示すことができたと思います (Miura *et al.* 2007 b)。今後はより多くの事例にとり組むことができるでしょう。

## 6. 今後

ちょうど初めの全球雲解像度実験を行った頃 (2005年), 私自身は東京大学気候システム研究センターに移ることになりました。温暖化予測に使われている大気海洋結合気候予測モデル MIROC に NICAM を並行して開発を進める体制ができることとなります。ようやくこの段階で、業界へ認知されるようになったということでしょうか。

全球雲解像度モデルは、まだ実験例も少なく、出てくる結果は皆、新奇性のある情報を含んでいます。MJO や熱帯低気圧など熱帯気象、1か月から数か月の季節予報の向上、気候予測の不確実性の低減、高解像度衛星データとの連携などへの利用が今後の方向性でしょう。また、現実からのバイアスを小さくするようなモデルの改良が必要になります。雲物理過程や境界層過程が特に結果に影響するので、これらスキームの改良が課題です。次世代10ペタフロップスコンピュータ (京速計算機) の開発が進められており、全球400 m 格子の実験が可能であろうと見積もられています。仮にそれはチャンピオン実験としても、今後全球雲解像度実験はより手軽になっていくと思います。特に、私自身は、全球雲解像度モデルを使って再度ハドレー循環等の熱帯の力学の理解を深めたいと考えています。モデルはツールであり、それでどれだけ科学的な進展があったかを自ら問いつつ、今後も研究を進め

ていきたいと思っています。

## 参考文献

- Barros, S. R. M., D. Dent, L. Isaksen and G. Robinson, 1995: The IFS model overview and parallel strategies. Proceedings of the sixth ECMWF workshop on the Use of Parallel Processors in Meteorology, ECMWF, November 1994. Editors Geerd Hoffmann and Norbert Kreitz.
- Hayashi, Y.-Y. and A. Sumi, 1986: The 30-40 day oscillations simulated in an "aqua-planet" model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 451-467.
- Heikes, R. and D. A. Randall, 1995: Numerical integration of the shallow-water equations on a twisted icosahedral grid. Part I: Basic design and results of tests. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 1862-1880.
- Iga, S., H. Tomita, M. Satoh and K. Goto, 2007 a: Mountain-wave-like spurious waves associated with simulated cold fronts due to inconsistencies between horizontal and vertical resolutions. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2629-2641.
- Iga, S., H. Tomita, Y. Tsushima and M. Satoh, 2007 b: Climatology of a nonhydrostatic global model with explicit cloud processes. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L22814, doi: 10.1029/2007 GL031048.
- 猪川元興, 齊藤和雄, 1991: 気象研究所・予報研究部で開発された非静水圧モデル, 気象研究所技術報告, (28).
- McGregor, J. L., 1996: Semi-Lagrangian advection on conformal-cubic grids. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1311-1322.
- Methven, J. and B. Hoskins, 1998: Spirals in potential vorticity. Part I: Measures of structure. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 2053-2066.
- Miura, H., M. Satoh, H. Tomita, A. T. Noda, T. Nasuno and S. Iga, 2007 a: A short-duration global cloud-resolving simulation with a realistic land and sea distribution. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L02804, doi: 10.1029/2006 GL027448.
- Miura, H., M. Satoh, T. Nasuno, A. T. Noda and K. Oouchi, 2007 b: A Madden-Julian Oscillation event realistically simulated by a global cloud-resolving model. *Science*, **318**, 1763-1765.
- Neale, R. B. and B. J. Hoskins, 2001: A standard test for AGCMs including their physical parametrizations: I: The proposal. *Atmos. Sci. Lett.*, **1**, doi: 10.1006/asle.2000.0022.
- Satoh, M., 1994: Hadley circulations in radiative-convective equilibrium in an axially symmetric atmo-

- sphere. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 1947-1968.
- Satoh, M., 2002 : Conservative scheme for the compressible nonhydrostatic models with the horizontally explicit and vertically implicit time integration scheme. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1227-1245.
- Satoh, M., 2003 : Conservative scheme for a compressible nonhydrostatic model with moist processes. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1033-1050.
- Satoh, M., 2004 : *Atmospheric Circulation Dynamics and General Circulation Models*. Springer-Praxis, 643 pp.
- 佐藤正樹, 2007 : 全球非静力学モデルへの道. *天気*, **54**, 769-772.
- Stuhne, G. R. and W. R. Peltier, 1996 : Vortex erosion and amalgamation in a new model of large scale flow on the sphere. *J. Comp. Phys.*, **128**, 58-81.
- 富田浩文, 2006 : 正20面体準一様格子を用いた非静力学大気大循環モデルの開発. *ながれ*, **25**, 181-186.
- Tomita, H., M. Tsugawa, M. Satoh and K. Goto, 2001 : Shallow water model on a modified icosahedral geodesic grid by using spring dynamics. *J. Comp. Phys.*, **174**, 579-613.
- Tomita, H., M. Satoh and K. Goto, 2002 : An optimization of the icosahedral grid modified by spring dynamics. *J. Comp. Phys.*, **183**, 307-331.
- Tomita, H., H. Miura, S. Iga, T. Nasuno and M. Satoh, 2005 : A global cloud-resolving simulation : Preliminary results from an aqua planet experiment. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L08805, doi : 10.1029/2005GL022459.
- Tompkins, A. M. and G. C. Craig, 1998 : Time-scales of adjustment to radiative-convective equilibrium in the tropical atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **124**, 2693-2713.

---

## Development of a Global Cloud-Resolving Atmospheric Model with a Quasi-Uniform Grid and Numerical Simulation of Tropical Cloud Clusters

Masaki SATOH\* and Hirofumi TOMITA\*\*

\* *Center for Climate System Research, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8568, Japan.*

\*\* *Frontier Research Center for Global Change.*

(Received 12 February 2008 ; Accepted 28 March 2008)

---