

第1回 UJCC-NCAS 気候モデルに関する サマースクール参加報告*

堀 E. 正 岳*¹・立 入 郁*²・杉 村 剛*³
大 西 領*³・大 楽 浩 司*⁴・東 塚 知 己*⁵
ロスビンタルティ カルティカ レスタリ*⁶・草 原 和 弥*⁷

1. はじめに

地球の気候について研究する研究者にとって気候モデルは必要不可欠なツールである。今後その進行が危惧されている地球温暖化の予測に向けた取り組みや古気候の再現、または気候システムの物理的な理解にむけた感度実験など、気候モデルは幅広いテーマの元で数多くの研究者に利用されている。

その一方で、気候モデルの開発と利用に必要となる知識・技術は年々膨大となって複雑さを増しているのに対して、若い研究者がそうしたスキルを獲得するための総合的なトレーニングの場は少なく、多くは現場でこうしたスキルを「拾い上げてゆく」しかない現状がある。

こうした状況をふまえ、若い研究者や学生を対象として気候モデルに関する理論と実践的なスキルを身につける集中講座として、第1回 UJCC-NCAS サマースクールが、英国ケンブリッジ大学応用数学研究棟

(第1図)において2007年9月10日～21日の2週間にわたって開講された。

本サマースクールは英国と日本の地球シミュレーションセンターとの日英気候共同研究(UK-Japan Climate Collaboration; UJCC)の一環であり、レディング大学の Julia Slingso 教授を中心としたグループによって企画され、英国外務省 Global Opportunities Fund (GOF)、UK-HiGEM プログラム、国立大気科学センター(NCAS)の出資によって運営された。英国側からは様々な分野から十数人の博士課程の学生やポストドクが参加し、日本側からも8名が参加した。

2週間の講義スケジュール(第1表)は文字通り朝から晩までの集中特訓となっており、受講者は午前には講義、午後にはコンピュータに向かっての実習、さらに夕方には講師を招いてのセミナーと、息をつく間もなく教材の吸収に努めなければならなかった。

忙しい毎日の楽しみとなったのが、講師や英国の学生たちとの交流だった。受講者と講師はケンブリッジ大学の一角にあるセルウィン・カレッジ(Selwyn

* A report of the First UJCC-NCAS Summer School on Climate Modelling 2007.

¹ Masatake E. HORI, 名古屋大学環境学研究科.

² Kaoru TACHIIRI, 海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター.

³ Ryo ONISHI, Takeshi SUGIMURA 海洋研究開発機構地球シミュレーションセンター.

⁴ Koji DAIRAKU, 防災科学技術研究所水・土砂防災研究部.

⁵ Tomoki TOZUKA, 東京大学理学系研究科.

⁶ Rosbintarti Kartika LESTARI, 東北大学地球物理学専攻.

⁷ Kazuya KUSAHARA, 東京大学気候システム研究センター.

© 2008 日本気象学会



第1図 講義と実習の会場となったケンブリッジ大学応用数学研究棟.

第1表 サマースクールのスケジュールと担当講師.

週	トピック () 内は担当講師
Week1	理論：気候システムのモデリング <ul style="list-style-type: none"> ・大気力学 (J. Methven, Reading) ・海洋の力学と物理過程 (R. Wood) ・大気組成と大気物理 (T. Slingo, ESSC/WI) ・水循環 (J. Slingo, Reading) ・大気化学過程 (J. Pyle)
	手法：スケール・アナリシスと漸近法 (R. Klein, PIK) 基本方程式, 漸近展開と大気の運動の Reduced モデル式の導出
	実習：数値計算実習 (N. Nikiforakis, Cambridge) 差分スキーム, PDE を用いた格子生成法, 動的メッシュスキーム
	セミナー： <ul style="list-style-type: none"> ・有限要素法 (D. Marshall, Oxford) ・NERC の取り組みについて (A. Thorpe, NERC) ・ペタスケール気候モデリング (佐藤, 地球シミュレータセンター) ・地球観測システムとデータ同化 (A. O'Neill, NCEO)
Week2	理論：モデル内の相互作用 <ul style="list-style-type: none"> ・大気海洋相互作用 (R. Sutton, WI) ・気候感度 (J. Gregory, Hadley C./WI) ・大気陸面相互作用 (P. L. Vidale, NCAS / WI) ・スケール間相互作用, エネルギーカスケード (S. Woolnough, NCAS / WI) ・海洋の炭素循環 (河宮, FRCGC)
	手法：気候モデル解析法 <ul style="list-style-type: none"> ・アンサンブル手法 (J. Murphy, Hadley C.) ・モデル性能評価 (L. Shaffrey, NCAS/WI) ・統計解析 (D. Stephenson, Exeter) ・モデル解析手法 (J. Slingo, Reading)
	実習：気候モデル実習 HadAM3 を用いた気候モデルのグループ実習
	セミナー, その他： <ul style="list-style-type: none"> ・社会経済モデル (R. Tol, ESRI) ・炭素循環モデル (P. Cox, Exeter) ・特別講演 (Sir D. King, 英国政府首席科学顧問) ・参加者によるポスターセッション

PIK : Potsdam Institute for Climate Impact Research
 NCAS : National Centre for Atmospheric Science
 NCEO : National Centre for Earth Observation
 WI : Walker Institute
 ESRI : Economic and Social Research Institute
 ESSC : Environmental Systems Science Centre
 FRCGC : Frontier Research Center for Global Change



第2図 宿舎となったケンブリッジ大学セルウィン・カレッジ.

Collage, 第2図) で生活をともにし, 朝食から夜遅くまで, 活発な議論や交流が行われた.

以下, 今回のサマースクールのそれぞれのセッションについて詳しく紹介する. (堀 E. 正岳)

2. 第1週：気候の各要素・数値計算ファクトリー

2.1 講義 “Climate Components”

Julia Slingo 教授 (レディング大学) がコーディネータを務めた第1週1時限目の講義群 “Climate Components” では, 大気-海洋系に含まれる各要素の物理的基礎について学んだ.

まず, 最初の2日間に John Methven 博士 (レディング大学) と Richard Wood 博士 (ハドレーセンター) からそれぞれ大気・海洋物理の基礎についての講義がなされた. これは, (筆者を含め) 気象・海洋分野以外の出身者が気候モデルのユーザとなることが増えてきていることへの配

慮だと思われ, その後の講義・演習に対する適切な導入となっていた. 続いて, Tony Slingo 教授 (Environmental Systems Science Centre) によるさらに進んだ大気物理過程 (放射過程, 境界層に特に注目したものであった) とそのモデル化についての講義があった. さらに, Julia Slingo 教授による水循環 (モンスーンに注目している彼女らしく, 雲生成過程に特に焦点が当てられていた) についての講義の後, 金曜日には John Pyle 教授 (ケンブリッジ大学) により, 大気化学過程のモデル化について, 主にオゾンに着目した講義があった.

これらの講義は基礎に重点をおきつつも、(1) モデル化を強く意識したものであったこと、(2) 演者の研究歴に即した独自性を帯びていたこと、の2点において特徴的であった。(立入 郁)

2.2 講義 “Scale Analysis and asymptotic”

1週目の2時限目には、Rupert Klein 教授（ベルリン大学）による講義が行われた。ここでは、漸近展開法を用いることにより、スケール解析を数学的に取り扱う方法を学んだ。

1日目に方程式系の導出から方程式の規格化までを行った。2日目には、簡単な減衰振動モデルに対して漸近展開法を適用する方法を学んだ。これにより、擾乱を加えた際の方程式の安定性について学ぶことができた。3日目以降は、実際の大気現象のパラメーターを用いて Navier-Stokes 方程式の規格化を行い、変動のスケールを定義した。それぞれの擾乱スケールの方程式を考えることにより、静力学平衡近似、地衡流平衡近似、非弾性近似、Boussinesq 近似など、様々な近似モデルに対応した方程式を導き、各スケールにおける方程式の関係を知らることができた。

大気・海洋に限らず、シミュレーションを行う際、対象とするスケールでの安定性を得ることは重要である。また、大規模な計算を行う際には、スケール間の相互作用を知らすることも重要となる。本講義において漸近展開法を用いた解析方法を学んだことにより、安定性やスケール間相互作用を自ら調べる方法を身につけることができた。(杉村 剛)

2.3 実習 “The Numbers factory”

1週目の実習では、小規模な Fortran プログラムを実行することによって様々な数値スキームの特徴を理解することを目的とした。1, 2日目には代表的ないくつかの移流スキームを用いて移流方程式を解き、スキームによる精度の違いを調べた。スキームの中には、Scale analysis and asymptotic の講義で習った Godunov 法も含まれており、講義で習ったことをすぐに確かめることができた。3日目には、空隙流れの非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を解くプログラムを用いて格子解像度と精度の関係について調べた。4日目には浅水波方程式を解くプログラムを用いて、波の伝播の特徴を調べたり、移流スキームの違いによる衝撃波の伝播の違いを調べたりした。また、講義で習った well-balanced 法を用いると地形による非現実的

な流れの発生を抑えることができることを確かめた。5日目には、AMR (adaptive mesh refinement) を用いた球座標系におけるトレーサー移流実験を通して、AMR の有効性を確かめた。1週目の最終日である6日目にはグループ発表を行った。実習自体は個人単位で行われたが、発表は予め分けられたグループ毎に行われた。各人の得た結果・考察を持ち寄り、限られた時間の中でグループの発表資料を作成するという過程も貴重な経験となった。和やかな雰囲気の下、それぞれの発表に対する活発な討論が行われた。講義で習ったスキームを実際に“手で”動かす実習を通して、単なる知識ではなく、経験を伴った知識を獲得することができた。(大西 領)

3. 第2週：気候の相互作用・気候モデル実習

3.1 講義 “Modeling Climate Interactions”

1週目は気候モデルを理解する上において必要な各要素の基礎についての一連の講義・実習だったが、2週目は、実際に気候モデルによる実験及び結果の解析を行うことを念頭に置いた、より実践的な気候の相互作用や解析手法について講義が行われた。

Rowan Sutton 博士（レディング大学）は気候変動における海洋変動の重要性について、特に変動のスペクトル特性を中心に NAO や ENSO の例を挙げながら解説した。またデータ同化を行うことによる数十年先の近未来予測についての最新の研究紹介などを交えて講義が行われた。

Jonathan Gregory 博士（レディング大学、ハドレーセンター）は気候モデルの気候感度について講義を行い、特に気候が定常状態ではなく時間変化する時の気候感度の不確実性について話された。

Pier Luigi Vidale 博士（レディング大学）は、近年炭素循環を扱うようになった陸面過程モデリングの発展について視覚的に分かり易いイメージ図を用い、大気・陸面の相互作用について PRUDENCE, C4 MIP プロジェクトの研究を紹介しながら、ユーモアあふれる講義を行った。

Steve Woolnough 博士（レディング大学）はローレンツエネルギーサイクルなど、大気のエネギーを中心に話をし、また熱帯の気候システムにおける空間相互作用 (MJO と海面水温の日変化, MJO と El Niño) について講義を行った。

河宮未知生博士 (JAMSTEC 地球環境フロンティア研究センター) は、大気・海洋の CO₂ 交換に重要

な、海洋における生物地球化学過程を中心に講義を行い、海洋酸性化や、氷期・間氷期の CO₂ サイクル、IPCC の現況や今後についてなど最近のトピックについて話された。

これら一連の講義は相互作用について基礎的な解説を行いつつ、それぞれの専門分野における最新の研究トピックの紹介も交えて行われたため、興味を持って聴くことができ、気候変動の研究の大きな流れについて認識を深めることができたのではないと思う。また、2週間に及ぶスクール参加で、自分が如何に多くの大事なことをきちんと勉強していない、理解できていないかを認識することが出来たことも大きな収穫だった。(大楽浩司)

3.2 講義 “Model Analysis”

このセクションでは大量の気候モデルデータを統一的に扱うためのデータ解析の手法について実践的な講義がされた。

James Murphy 博士 (ハドレーセンター) は気候モデルに内在する不確実性と、それを多数のモデルのアンサンブルによって評価する手法について解説した。David Stephenson 教授 (エクセター大学) は気候学における統計学の利用方法を、時系列解析と多変量解析 (EOF など) の両面から紹介した。また、Len Shaffrey 博士 (レディング大学) は最新の気候モデルの出力を観測と比較した上で、観測と気候モデルの両者の限界を意識した気候モデルの性能評価の手法について講義を行った。Julia Slingo 教授は観測から求められた気候システムの理論を、気候モデルに適用して研究を進める方法について今後の展望を解説した。

特に Stephenson 教授はユーモアたっぷりの講義を通して統計的手法の強さと落とし穴について強調し、気候研究者にとって正しい統計学の適用がいかに重要であるかについて強い印象を受講生に与えた。

また、Julia Slingo 教授はモデルの高解像度化が進むにつれ、現在リモートセンシングで明らかになっているような雲の微細構造や日変化のプロセス、あるいは熱帯波動の構造などについても気候モデルで再現することが可能となりつつあることを強調し、モデルが観測と肩を並べ、真実を知るためのツールとして活かされる日が近いことを情熱的に語ってくださった。

(堀 E. 正岳)

3.3 実習 “The Climate Laboratory”

2週目の実習では、2～3人のグループに分かれて、6つのテーマ [(1) 大気中の二酸化炭素濃度を2倍及び4倍にした実験、(2) 全球の植生をなくした実験、(3) 海面水温を全球一様に2度高くした実験及び2度低くした実験、(4) 6000年前と同じ太陽放射で強制した実験、(5) 最終氷期の大陸氷床、海面水温、太陽パラメーター等を用いた実験、(6) 地形を平坦にした実験] の中から1つ選び、イギリスの大気大循環モデル (HadAM3) で実際にシミュレーションを行った (第3図)。

また、このシミュレーションが行われている間に、アンサンブル実験の結果をいただき、モデルデータの解析手法を学んだ。そして、シミュレーション終了後、その結果をコントロール実験と比較しながら解析した。最終日には、それぞれのグループの代表者がその成果を発表し、活発な議論が行われた。この実習を通して、本サマースクールの主目的の1つである「大気大循環モデルを走らせる」ことを体験できた。

(東塚知己)

4. セミナー

4.1 セミナー (第1週)

第1週のセミナーでは気候モデルの開発・運用の現状についての発表が行われた。David Marshall 教授 (オックスフォード大学) は現在開発中の有限要素法による動的メッシュを用いた次世代の海洋モデル Imperial College Ocean Model (ICOM) について紹介した。Alan Thorpe 教授 (Natural Environment Research Council ; NERC) は NERC のビジョンについて説明した上で、2007-2012年において実施する



第3図 気候モデル実習風景。

予定の7つの研究分野（気候システム、生態系多様性、持続的な資源利用、地球システム科学、自然災害、環境・人為的汚染と健康、技術開発）について包括的な紹介を行った。佐藤哲也教授（JAMSTEC地球シミュレータセンター）は地球シミュレーターによって可能になった高解像度の気候モデリングについて紹介するとともに、マクロスケールとミクロスケールを個別に計算し連携させることによってスケール間の相互作用が重要な問題であっても合理的にシミュレーションし、「科学的事実」を導けることを強調した。Alan O'Neill 教授（National Center for Earth Observation ; NCEO）は NCEO における地球観測衛星を通じた地球全体及び地域的な環境の変化のモニタリングの取り組みについて紹介するとともに、こうした情報を理解し、将来予測に向けて利用する手法について講演した。同センターはすでにオゾンの減少、大気汚染、海水の減少など重要な環境の変化を同定し、継続的なモニタリングを行っている。

（ロスビンタルティ カルティカ レスタリ）

4.2 セミナー（第2週）・ポスターセッション

第2週の夕方の時間では第1週と同様にセミナーが行われる他に、サマースクールの参加者が事前に用意したポスターセッションもあった。夕方のセミナーでは R. Tol 氏（The Economic and Social Research Institute）と Peter Cox 教授（エクセター大学）の発表があった。R. Tol 氏は気候変動に対するいくつかの経済シナリオの変化に関する研究を紹介し、Peter Cox 教授は陸面-大気-海洋間における炭素循環が気候変動に与えるフィードバックについての研究を紹介した。

ポスターセッションでは、用意された掲示板に所狭しと張られたポスターの前で、サマースクールの学生達が、各々の研究について講師陣を交え、熱い討論を繰り広げた。ポスターは期間中、常に掲示されており、互いの異なるバックグラウンドを知る上で良い材料となっていた。（草原和弥）

5. おわりに

サマースクールの期間中には、この他にも催しがいくつも企画された。ある晩には Julia Slingo 教授の呼びかけで2007年のイギリスの冷夏について図を紹介しながら議論する会が催され、日本側も急遽日本における2007年夏の猛暑について紹介するなど、北半球の反対側に住む者同士、今年の異常気象について意見を交わし合った。また、最終日の前日には、英国政府首席科学顧問 Sir David King を迎えてのフォーラム・ディナーが開催され、将来の気候変動の予測においてモデル研究者に期待される役割について講演があった。

英国側の参加者との交流もサマースクールの大きな収穫となった（第4図に参加者全員の写真を示す）。最初の数日は緊張からか互いに別々に行動していた日英の生徒たちも、日を迫うにつれてうち解け合うようになり、食事をともにしたり、互いに議論をしたりする光景が自然に見られるようになった。一日の講義と作業が終わったあとはケンブリッジ市中のバブに連れだつて行き、研究やお互いの文化について飽きることなく語りあった時間は貴重な思い出となった。

また、一部の参加者は週末の自由時間を利用してケンブリッジに流れるケム川をパントと呼ばれる小舟でさかのぼって隣村まで行った（第5図）。イギリスは



第4図 サマースクール参加者の集合写真。



第5図 自由時間でのパンティングの様子。

ちょうど夏の終わりの余韻あふれる快適な季節で、豊かな自然に恵まれたイギリスの郊外を満喫できた楽しいひとときとなった。

こうした恵まれた環境でレベルの高い講義と実習とを時間をかけて受講できたことは、参加者全員にとってスキルを磨く良いチャンスとなった。また、英国の将来有望な学生たちと交流し、おおぜいの友人を作ることができたことも、大きな財産となった。

本サマースクールの開催にむけて尽力して下さった Julia Slingso 教授, Nikos Nikiforakis 教授, Pier Luigi Vidale 博士, ならびに実習のあいだ付きっきりでサポートして下さったレディング大学のポスドク

・フェローの皆様には深い感謝の意を表したい。また、サマースクール開催前に壮行会を開催していただき、帰国後も Sir David King の特別講演にご招待いただくなど、多大なるご支援を賜った駐日英国大使館科学技術部の皆様にもあわせて感謝の意を表したい。

今回の第1回 UJCC/NCAS サマースクールは今後少なくとも2年に1度の開催が予定されているサマースクールの先駆けでもあり、今回の成功は2年後に向けて活かされる予定である。今回は日本側からの参加者が少なめであったので、次回はより多くの方が参加し、日英の気候モデル研究の結びつきを強めてくれることに期待したい。
(堀 E. 正岳)

謝 辞

The authors would like to thank Professor Julia Slingso, Professor Nikos Nikiforakis, Dr. Pier Luigi Vidale and all the staffs and tutors for their effort in organizing the UJCC/NCAS Summer School. The authors are also grateful for the courtesy given by the Selwyn Collage, the Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, and the University of Cambridge. The authors would also like to thank all the attending students from the UK for their warm friendship, which has made our stay particularly delightful.