

第2回古気候モデリング相互比較プロジェクト (PMIP)

ワークショップに参加して*

小 出 寛**

1. PMIP について

日本においても、大循環モデル (GCM) や気候モデルを用いた古気候再現実験の報告が最近増えつつあるが、GCM の歴史を振り返ると、その当初から古気候分野への応用が期待されていたことが分かる。大気大循環モデル (AGCM) の境界条件として必要な、特定の古気候年代における SST やアルベドの全球分布を地質データから復元するプロジェクト (CLIMAP, 1981) が行われ、データの豊富な最終氷期以降を中心にモデル実験が盛んに行われてきた (例えば、COHMAP, 1988)。しかし、それらは各研究グループでターゲット年代や境界条件の設定などがまちまちで、互いに比較して議論ができにくいという状況があった。このため古気候モデリング相互比較プロジェクト (PMIP) が組織されて、90年代初めから実施されている (Joussaume and Taylor, 1995)。

これは直近の北半球での地上付近の気温の極大・極小である完新世中期 (約6000年前, 以下6 ka と略記) と最終氷期 (約21000年前, 以下21 ka) をターゲットとしており、世界の主な GCM 研究グループが、同じ条件の下にスナップショット的な感度実験を行ってモデル間で相互比較し、また地質データ解析とも照らして古気候再現の精度を上げようというものである。使用するモデルは現在のところ2種類で、1つは季節変化する海面水温 (SST) を与えた AGCM、もう1つは力学を含まないスラブ海洋混合層モデルと AGCM を結合して SST を計算するタイプのモデル (以下、スラブ結合モデルと略記) となっている。各モデルグループごとに、このうちのどちらかあるいは両方を用いて、太陽放射の季節分布、CO₂濃度、氷床の分布などの境界条

件を同様に变化させて積分し、準定常状態に達してから10年以上の積分結果を提出することになっている。PMIP は IGBP/PAGES と WCRP/CLIVAR の相乗りのサブプロジェクトであり、これまでに世界の約20種類のモデルが参加して (表1)、日本からは気象研究所 (MRI) と東京大学気候システム研究センター (CCSR) がエントリーしている。現在の進捗状況については、各モデルグループの積分の結果がほぼ出そろい、品質管理済みのデータベースが整備されて、色々なサブプロジェクトの結果が出始めたところである。この PMIP データベースは、寄与した各モデルグループが無条件に利用できるが、それ以外の研究者も特定のテーマでサブプロジェクトを申請して認められれば利用することができる。

PMIP に関連した最近の成果の情報交換のため、第2回の PMIP ワークショップが平成9年11月4日より7日にかけて米国カリフォルニア州ダンビルで開催された。筆者はこのワークショップに参加する機会を得たので、その内容について報告する。

2. ワークショップについて

PMIP ワークショップとしては、1995年に第1回がフランスで行われているが、今回はプロジェクトリーダーの1人であるローレンス・リバモア国立研究所モデル相互比較研究室 (LLNL/PCMDI) の Karl Taylor がホストとなり、サンフランシスコの約50km ほど東にある小さな町ダンビルで行われた。会場は昔の修道院の建物を利用した山荘 (第1図) ということで、美しい山並みと丘陵に囲まれた静かな場所であった。参加者は配布されたリストによれば44名で、小人数で議論を深められるように各モデルグループから原則1名が参加し、各種の古気候データ解析分野の研究者が残り半分を占めていた。もう1人のプロジェクトリーダーであるフランス気候環境モデリング研究所

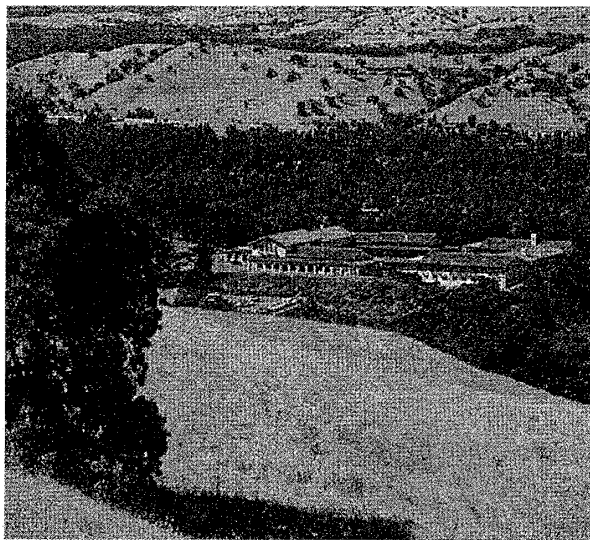
* Report on the Second Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP) Workshop.

** Hiroshi Koide, 気象研究所気候研究部.

© 1998 日本気象学会

第1表 PMIP 参加モデル

MODEL	国	参加機関またはモデル開発機関
bmrc	オーストラリア	Bureau of Meteorology Research Centre
ccc 2.0	カナダ	Canadian Climate Center
ccm 1	アメリカ	NCAR (National Center for Atmospheric Research)
ccm 3	アメリカ	同上
ccsr 1	日本	Center for Climate System Research (東京大学気候システム研究センター)
cnrm-2	フランス	Centre National de Recherches Météorologiques
csiro	オーストラリア	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
echam 3	ドイツ	Max-Planck-Institut für Meteorologie
gen 1	アメリカ	NCAR (National Center for Atmospheric Research) など
gen 2	アメリカ	同上
gfdl	アメリカ	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
giss-iip	アメリカ	Goddard Institute for Space Studies/NASA
lmcelmd 4	フランス	Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement Laboratoire de Météorologie Dynamique
lmcelmd 5	フランス	Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement Laboratoire de Météorologie Dynamique
mri 2	日本	Meteorological Research Institute (気象研究所)
ugamp	イギリス	The UK Universities' Global Atmospheric Modelling Programme
uiuc 11	アメリカ	University of Illinois at Urbana-Champaign
ukmo	イギリス	UKMO (United Kingdom Meteorological Office)
yonu	韓国	Yonsei University



第1図 会議場となったサン・デミアノ山荘の遠景

(LMCE) の Sylvie Joussanme が、院生らしい若い女性研究者を大勢引き連れて来ており、データ解析の研究者も含めるとフランス勢が半分を占めている印象だった。日本からは CCSR の阿部彩子さんが都合で参加できなかったため、筆者がただ1人の参加であった。ワークショップの日程は11月4日朝から7日昼まで

で、4日、5日がそれぞれ6 ka と21 ka のサブプロジェクトの報告に当てられ、6日から7日午前にかけて6 ka, 21 ka についての最新の感度実験や古気候データ解析などの結果が発表された。なお今回のワークショップのスポンサーは NSF, IGBP/PAGES などであった。

さて、以下にその内容について述べていくが、地質データによる古気候の復元については、筆者の付け焼き刃の知識ではとてもフォローできなかったため、内容にかなりの偏りがあることをはじめにお断わりしておかなければならない。

2.1 現状報告 (全般), 6 ka の気候

まず Karl Taylor が歓迎の挨拶を述べた後、PMIP 各モデルの基準実験の気候値について、観測と対比して概観した。ある気候要素の観測値と各モデル気候値の、標準偏差を動径方向に、それらの時空間的相関を角度方向に極座標でプロットすると互いの距離が RMS エラー (平均二乗誤差) になるという面白い図を使っていた (この方法は PCMDI の若手研究者 Charles Doutriaux による)。続いて Sylvie Joussanme は 6 ka と21 ka の実験ごとに各モデルの結果がどこでばらついていて、どこで共通している (ロバスト) かを

簡単に示した。6 ka では各モデルともアフロ・アジアモンスーンの強化が見られ、モデルの間でユーラシアの夏の地上気温と、北インド域の降水、気圧低下が比例する関係が見られる。北アフリカの雨も増えているが、モデルの P-E (降水-蒸発) と観測の湖水準と比べると、モデルが過小評価であること、その原因は植生のフィードバックではないかとの推測をしていた。

続いて LMCE の Pascale Braconnot から各モデルの出力を収めた ftp データベースの現在の状況について報告があった。現在作業中のものを含め、約20のモデルの月、季節、年ごとの水平2次元53要素、帯状平均場7要素についての平均値と分散が集められている。モデル比較プロジェクトにありがちな問題として、送られてくる各モデルごとのデータの品質管理が話題に上り、どのようなミスやエラーがこれまで含まれていたかが例示された。またモデルごとのスキームやサブモデルの記述についても LMCE の Celine Bonfils が担当しており、早い時期に完成させて、PCMDI のレポートで出版すると同時に、PMIP の公式ウェブサイト (<http://www-pcmdi.llnl.gov/pmip/index.html>) にのせたいとのことであった (平成10年3月時点で既に公開中)。

スウェーデンの Lund 大学の古気候研究グループから巨漢 Dominique Jolly が、6 ka の地質データベース BIOME6000 の花粉分析による気候復元と、月平均地上気温と降水量、雲量の気候値を入力として植生を診断する BIOME1 モデルに、各 GCM の PMIP 実験の出力を与えた結果を示したが、彼らの結果では PMIP 参加モデルの間でほとんど違いが見られなかったとのことであった。このモデルは古いバージョンで、食事時に彼らは時間発展をも含む植生モデルを現在開発中だと話していた。仙人のような風貌の Colin Prentice は同じデータセットを使って、統計的なキャリブレーションに依存せず、全球に適用可能であるような客観的解析法で気候再現を試み、最寒月の月平均気温の現在との差 (ΔT_c)、生育期度日の差 (ΔGDD)、蒸発比の差 ($\Delta \alpha$) などの結果を示した (Cheddadi *et al.*, 1997)。Sandy Harrison は花粉などから推測される植生による温度、湿度とモデルの結果を領域ごとに比較して示し、PMIP の各モデル出力との系統的な差がどこに見られるかを指摘した (Yu and Harrison, 1996)。

LMCE の Pascale Braconnot は6ka の熱帯域サブプロジェクトの担当で、現在準備中の幾つかの論文の内容について示した。北アフリカ域の応答に焦点をし

ばった一編、アフロ・アジアモンスーンの強さとユーラシアの地面温度の関係、全てのモデルの結果を比較した「ビッグ・ピクチャー」型論文、モデル・データ比較と盛りだくさんの内容だった。

2.2 21 ka の気候

翌日は21 ka についてのモデル、地質データ双方からの報告が中心となった。

Sandy Harrison は PMIP モデルの出力を彼女らの植生モデル BIOME3 に入力して得た結果を示し、共通した結果として冰雪・ツンドラの南下、北方林の減少と南へのシフト、熱帯の乾燥帯の増大を指摘した。また、モデルでロバストでない結果として熱帯林の減少と断片化、北半球の砂漠の変化、内陸の glass land の変化を挙げていた。Warren Prell は CLIMAP データの問題点を列挙し、従来の古気候データ再現に改善を加えた新しい推定による21 ka の SST 再現値を示したが、中高緯度の大部分が4°C以上の SST 降下を示し、熱帯は現在とそれほど変わらない値となっていた。Ralph Schneider はアルケノン (海中の微生物が生成する有機物の一種) による SST 再現について話し、Martin Stute は解像度や平均の取り方の異なる様々なプロキシデータによる21 ka の気候再現値を比較して統合するという困難な仕事に取り組んでいた。これらの再現データの比較では、現在でも最終氷期の熱帯域 SST の評価には大きなばらつきが見られるという点が印象的だった。

LMCE の Sophie Pinot は PMIP にエントリーしたスラブ海洋結合モデルによる21 ka の SST 応答を調べ、北太平洋の低下がもっとも大きく-4~-6°C、南太平洋と熱帯大西洋は-2~-4°C程度、陸平均が海平均の約2倍程度冷えることを示した。Tony Broccoli も単独のスラブ海洋結合モデルの結果を使って、モデルには海洋フロントのシフトによると考えられる南インド洋の温度低下が見られないことや、現実には亜熱帯ジャイアの比較的暖かい表層水のエクマン収束のあるところが力学を含まないスラブ海洋モデルだと冷えすぎていることを示した。また、依然として地質データが質量共に不足していること、一方気候モデルはここ20年に長足の進歩を遂げて、次第に境界条件を必要とする部分が少なくなっていることを指摘した。

午後は21 ka の中・高緯度のセッションで、Reading 大学の Paul Valdes が学生と共に、プラネタリー波やストームトラックのモデルにおける応答を報告した

(Kageyama *et al.*, 1998). モデルのジェット軸の元の気候値の位置によって、同じ地形(氷床分布)を置いても応答が異なり、ジェットが分流するか、北を迂回するかの違いが出てくることを簡単なモデル実験で示し、各 PMIP モデルの応答と対比して見せていた。また結合モデルの海水について、CLIMAP の再現値と比較して南大洋では全体に少ないこと、北半球については海水が張った際にモデルの Q-flux (スラブ海洋モデルで海洋の力学による熱輸送に相当するものを各格子点のフラックスの形で与えたもの) をどう扱うかが統一されていないことなどで差異が大きいことを示した。

モントリオール大学の Anne de Vernal はとても上品な小柄の女性だったが、CLIMAP の SST と氷床分布の再現値について、変換関数が今日ではまったく使われていないものであることや、重回帰分析についても問題があることを指摘し、dinoflagellate(べん毛藻)の化石の分布を使った最新の評価では、最終氷期の夏の北大西洋北東部がノルウェー海まで Open Water であった可能性が高いこと、そこでの SST は冬には従来の評価とあまり変わりなく冷えているが、夏には現在とそれほど変わらない温かさであっただろうと主張した。また、海洋の異なるプロキシデータを全球で統合して、CLIMAP に代わるデータセットを作成することの必要性を強く訴えた。これに対して Sylvie Jouassame から海洋学者のコミュニティとしてそのようなプロジェクトを遂行する意志があるかという質問がなされたのだが、出席者の中での反応は今一つ鈍いようだった。

ペンシルバニア大学の Dave Pollard は PMIP の出力データを入力とする別のモデルで氷床の質量収支の計算を行った。グリーンランドとローレンタイド氷床の結果を示したが、これに対して東シベリア海はどうかという質問が出た。Pollard は残念ながらまだ見ていないと答えたが、PMIP の地形と氷床分布はトロント大学の W. R. Peltier が彼の氷床・地殻モデルで作成したもので、その存在に異論の多い東シベリア海に氷床をのせている (Peltier 本人は、今回参加なし)。

2.3 各種感度実験など

3 日目は前日の予定がずれこんで、プロジェクトの運用や各サブプロジェクトの役割などについての議論が交わされた。PMIP の結果を使った論文の著者表記の扱い、内容にどこまで責任を持つかといった現実的な問題についても、かなり激しいやりとりが交わされ

た。一旦パブリックドメインに収められたモデルデータについては、実際に積分を行った側の意向によらず自由に使用できることが原則であり、論文の著者表記はまったく必要ない、という極端な意見もあったが、今後原則として各サブプロジェクトの著者名に主要な執筆者の他 PMIP 参加者グループという表記を必ず加え、さらにタイトルかサブタイトルに PMIP の文字を入れることが望ましいとの結論になった。目的に応じて選んだ複数のモデルの結果を使って議論する「サブプロジェクト型」の論文と、すべてのモデルの結果を列挙する「ビッグ・ピクチャー型」論文についての現状報告と今後についての議論があった。

3 日目午前の途中から最終日までは、6 ka と 21 ka それぞれについて、主に海洋の力学の役割、地表面(植生)の役割を主眼とした新しい感度実験や、データによる古気候復元などの短い報告が多数なされた。UKMO の John Mitchell は過去の最終氷期実験と自分達の結果を、未来の温暖化と対比させながら気候感度の問題として論じた (Hewitt and Mitchell, 1997)。大気 GCM 実験から得られた表層での物理量を用いて駆動した海洋 GCM 実験が複数報告された他、UKMO, NCAR, LMCE はいずれも大気海洋結合 GCM による 6 ka 実験を報告しており、CSIRO の Jozef Syktus も深層を除いた混合層までの海洋力学モデルを大気 GCM と結合したモデルによる 6 ka の結果を示していた。話題には出なかったが、ヨーロッパ勢を中心に 6 ka の結合モデルでの相互比較をやろうとしているように感じられた。UKMO の Chris Hewitt に、結合モデルを使うなら 21 ka の方が面白いのではないかと尋ねると、スピニアップが大変なので、まず 6 ka から始めた、とのことであった。彼らは深層の加速積分なしで、標準実験を 1500 年、6 ka 実験を 260 年積分したという (Hewitt and Mitchell, 1998)。結合モデルによる 21 ka 実験の計画も話題に出たが、現在の標準的な解像度の気候モデルでは海洋のスピニアップの計算コストが桁はずれに高くつく点が問題になる。

今回の会議は異なるモデル同士をある側面から比較するサブプロジェクトからの報告が中心で、時間の関係上、各モデル単独の結果は基本的に発表を認めないという方針であった。しかし、せっかく日本から参加したので少々無理を言って、気象研究所の単独の結果も発表させてもらうことにした。内容はこれまでほとんど注目されていない、6 ka の東アジア～北太平洋域

の春から夏の季節進行についてだったが、初日に内容を Paul Valdes に説明したところ興味を持ったらしく、翌日各モデルの結果を対比した OHP を用意してくれて、発表では即席のモデル相互比較を示すことができた。この山奥でいったいどうやってこの OHP を用意したのか、とたずねると、なんと彼は PMIP データベースを2枚の jaz ディスクに収めてカラープリンターと共に持ち歩いているという。PMIP のアーカイブの時間解像度は年、季節、月平均値まででありかさばらないとはいえ、これには驚いてしまった。自分の発表を済ませてすぐ空港に向かったので、最後に予定されていた今後のプロジェクトの方向についての議論を聞けなかったのが残念だった。

3. おわりに

PMIP 実験の6 ka, 21 ka の主要な結果は、既に以前の研究によって示されているものと共通している。それぞれのモデルでシミュレートされた気候が、同じ外部強制力に対してどの程度の幅で応答するのか、という気候感度の問題に、より興味の中心が移ってきていることが会場での議論からも感じられた。

日本人参加者が1人だけというのは初めての体験で、会議場では機関銃のように飛び出す英語での議論についていこうとするので精一杯だったが、電子メールのやりとりだけで直接面識のなかった若手研究者と直接会って話せたことは有益であった。テレビもない修道院暮らしではあったが、周辺の景観は素晴らしく早朝の散歩を楽しむことができた。

今回の参加に当たっては、気候研究部の鬼頭昭雄室長をはじめ関係諸官に大変お世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。

略語一覧

AGCM : Atmospheric General Circulation Model (大気大循環モデル)
CLIMAP : Climate, Long-range Investigation, Mapping, Analysis and Prediction
CLIVAR : Climate Variability and Predictability Programme (気候変動と予測可能性に関する研究計画)
COHMAP : Cooperative Holocene Mapping Project
GCM : General Circulation Model (大循環モデル)

IGBP : International Geosphere-Biosphere Programme (地球圏・生物圏国際協同研究計画)
NSF : National Science Foundation (米国科学基金)
PAGES : Past Global Changes
PMIP : Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (古気候モデリング相互比較プロジェクト)
SST : Sea Surface Temperature (海面水温)
WCRP : World Climate Research Programme (世界気候研究計画)

参考文献

- CLIMAP project members, 1981 : Seasonal reconstruction of the earth's surface at the last glacial maximum, Geol. Soc. Amer., Boulder, Colo., Map Chart Ser., MC-36.
- COHMAP members, 1988 : Climate changes of the last 18,000 years : Observations and model simulations, Science, **241**, 1043-1052.
- Cheddadi, R., G. Yu, J. Guiot, S. P. Harrison and I. C. Prentice, 1997 : The climate of Europe 6000 years ago, Clim. Dyn., **13**, 1-9.
- Hewitt, C. D. and J. F. B. Mitchell, 1997 : Radiative forcing and response of a GCM to ice age boundary conditions : cloudfeedback and climate sensitivity, Clim. Dyn., **13**, 821-834.
- Hewitt, C. D. and J. F. B. Mitchell, 1998 : A Fully coupled GCM simulation of the climate of the mid-Holocene, Geophys. Res. Lett., **25**, 361-364.
- Joussame, S. and K. Taylor, 1995 : Status of the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project, Proceedings of the First International AMIP Scientific Conference, Monterey, USA, WCRP-92, 425-430.
- Kageyama, M., P. J. Valdes, G. Ramstein, C. Hewitt and U. Wyputta, 1998 : Northern Hemisphere storm-tracks in present day and last glacial maximum climate simulations : a comparison of the European PMIP models, J. Climate, submitted.
- Yu, G. and S. P. Harrison, 1996 : An evaluation of the simulated water balance of Eurasia and northern Africa at 6000y BP using lake status data, Clim. Dyn., **12**, 723-735.