

THORPEX-PDP/WGNE 共催「モデル誤差の診断に 関するワークショップ」参加報告

堀 田 大 介*

1. はじめに

「モデル誤差の診断」を通じてモデル開発と関連分野（気象力学・観測研究・データ同化等）やモデル・ユーザ（現業予報や気候変動予測）のそれぞれのコミュニティの連携を強化しようという世界的な流れが盛んになりつつある（例えば Jakob 2010）。後述するようにこの連携スキームにはいずれのコミュニティにも利益があり、そのためこの流れを日本の気象研究コミュニティでも盛り上げていくことができれば非常に有益と思われる。このような思いから本報告を投稿することにした。

標記ワークショップは、数値モデルが持つ誤差を診断する手法について総合的に議論・情報交換することを目的とし、観測システム研究・予測可能性実験計画 (THORPEX) の予測可能性・力学的プロセス (PDP ; Predictability and Dynamical Processes) 作業部会と WMO-CAS/WCRP-JSC 数値実験作業部会 (WGNE) によって共催されたもので、コンバーナーが招待した講演者のみによる比較的小規模なものであった。ワークショップはスイス連邦・チューリッヒの連邦工科大学チューリッヒ校 (ETHZ) にて2010年7月7～9日の3日間行われた。参加者数24名のうち、欧州・北米の現業数値予報センターや大学の研究者が多数を占め、その他は豪州から大学の研究者1名、アジアからは気象庁から著者1名であった。規模の小ささを反映してか、長いコーヒープレイクが頻繁に設けられ、少人数による濃密な議論が行われたことが印象的であった。

会議では、コンバーナーである ECMWF の Thomas Jung 氏による趣旨説明のあと、現在モデル

が抱える問題点の極域・中緯度・亜熱帯・熱帯の各領域ごとのまとめ、モデル誤差を診断する既存の手法の紹介、なぜモデル開発が困難かについてのレビュー等の発表・質疑がつづいた。その後、最終日には総合討論の時間が設けられ、今後どのように診断手法を開拓していくか、コミュニティを形成していくかが議論された。

本稿では、会議の時間的な順序にこだわらず、「モデル誤差の診断」とは何か、モデル開発にとってなぜ重要なのか、どんな診断が期待されるかについて著者なりに再構成して記述し、最後に個人的所感を述べる。第2節にはコンバーナーによる趣旨説明に基づきワークショップ開催の背景を、第3節には「診断」の意味について、会議での議論を著者が自分なりに咀嚼した解説を、第4節にはモデル開発における重要な概念であるボトムアップおよびトップダウンのアプローチと compensating errors について UKMO の A. R. Brown 氏の発表に基づく解説を記した。第5節では既存の診断手法についていくつかの類型に分類して紹介し、第6節では総合討論での議論に基づいて決定したプロジェクト等の将来計画について記述した。最後に第7節には著者個人の所感・主観的意見を記した。

本稿は診断手法のレビューとコミュニティの形成に関する議論に焦点を置いて記述した。このため素晴らしい講演であっても紹介できなかったものが多くある。最終報告書および各講演の発表資料が以下のアドレスにて公開されているので、参照して頂きたい。

最終報告書 : http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/PDP_WGNE_WORKSHOP_REPORT_FINAL.pdf (2011.7.20 閲覧)。

発表資料 : http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/THORPEX_PDP_July_2010.html

* Daisuke HOTTA, 気象庁予報部数値予報課。

(2011.7.20閲覧)。

なお、本ワークショップを共催した WGNE については本稿の読者にはあまりなじみがないかもしれない。WGNE の目的と最近の取り組みについては室井・隈 (2011) を参照して頂きたい。

2. 背景

数値予報モデルや気候モデル (以下、モデルと呼ぶ) は、誕生以来の継続的な精度向上に伴い、気象業務や気象学・気候学研究のほとんどすべての領域で利用される基盤技術へと成長した。このため現在では多くの領域において、モデルの性能が業務や研究の性能の上限を規定しており、モデルのさらなる精度向上 (モデル誤差の軽減) が気象・気候に関わるコミュニティ全体の利益につながる重要な課題となっている。THORPEX の主題である「予測可能性」も、予報モデルの性能に強く依存している。

しかしながら、モデル開発は現業センターをはじめとする小さなコミュニティで行われている。モデル開発へ投資されている (人的・経済的) 資源は、その重要性に比べて非常に限定的であり、危機的状況にあるといえる (例えば Jakob (2010) は危機的状況に至った理由として、モデル開発、特に物理過程の開発には高い専門性と長い年月が必要とされる一方、開発の成果が論文になりにくい点、競争的資金を獲得しづらい点、モデル開発が科学というよりはエンジニアリングに近い性質のものであるという誤った認識が研究コミュニティに広がっている点等を挙げている)。気象学者、気候予測研究者、現場の予報官等のユーザー・コミュニティをモデル開発に取り込み、相互に有益な成果を交換し合うことが必要である。そのために何ができるか、それぞれのコミュニティに如何にしてモデル・ユーザー、モデル開発者双方に利益のあるような方法でモデル開発への貢献をエンカレッジすべきかを議論することが本ワークショップの目的である。

3. 「診断」とは?

本ワークショップの主題は「モデル誤差の診断」である。ここでは、モデル開発における「診断」の意味・役割について述べる。気象学において「診断」(diagnosis) という言葉を使う場合、予報・予測 (prognosis) の対義語として用いられることが多い。しかし、「モデル誤差の診断」は、結果 (モデルの予測が持つ最終的な誤差) から原因 (素過程のレベルで

の定式化等の誤差) を解明することであり、この意味において、医学における「診断」の用法と共通するところがある。以下では、少々突飛ではあるが、臨床医療の典型的なプロセスとの対比 (第 1 図) により、モデル開発における「モデル誤差の診断」の役割について考える (なおこの比喻は著者が考案したもので、ワークショップで言及されたものではない)。

臨床医療においては、典型的には以下のプロセスが繰り返される (第 1 図左) :

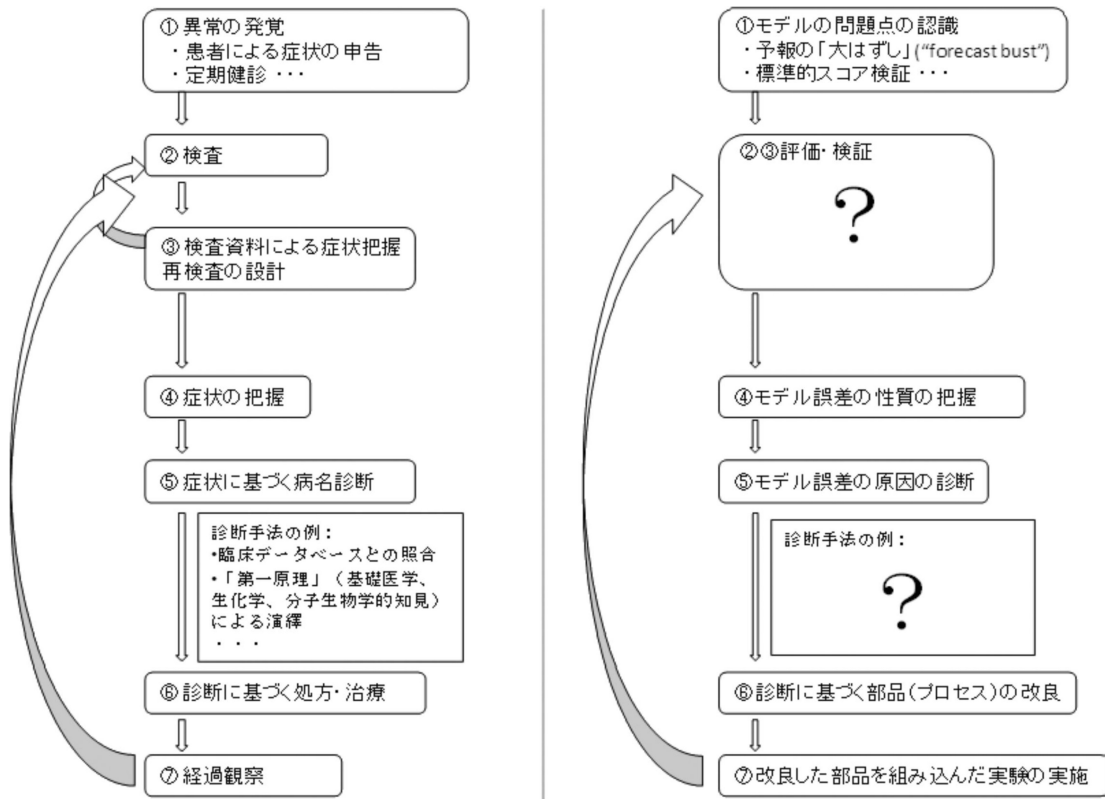
- ① 定期健診や患者による申告により、体の異常が発覚する。
- ② 医師は①での情報をもとにどんな検査をすべきか考え、検査を実行する。
- ③ さらに検査の結果をもとに新たに必要となる検査を設計することもある。
- ④ ②~③を繰り返すことを通じて得られた検査資料を総合して、症状を把握し、
- ⑤ 臨床データベースとの照合や基礎医学に基づく演繹によって病名を診断する。
- ⑥ 診断に基づき薬剤の処方や外科的方法等による治療を実施し、
- ⑦ 経過を観察する。

経過に応じて、また②の検査から一連の手続きを繰り返す。

このように、臨床医療においては診断がその後の治療の方針を決定する。この点において、正しく診断すること、そのために必要十分な検査を行うことが非常に重要である。この重要性に鑑み、医学においては、正しい診断を行うためにどんな検査が必要か、また検査結果からどのような診断が可能かについて、基礎医学 (生化学、遺伝学、分子生物学) からの演繹的方法、臨床データベースに基づく統計的 (帰納的) 方法を集大成した体系的なガイドラインが作成・共有され、またガイドラインを改良するため努力が続けられている。

モデル開発における一連のプロセスも、同様に考えることができる (第 1 図右) :

- ① 予報の「大はずし」や定常的なスコア検証等により、モデルの問題を認識する。
- ② 及び③適切な評価・検証を通じて
- ④ モデル誤差の性質を把握し、
- ⑤ モデル誤差の原因を診断する。
- ⑥ 診断の結果に基づき、モデルの部品 (物理過程など) を改良し、



第1図 臨床医療における「診断」(左)とモデル開発における「誤差の診断」(右)のアナロジー。

⑦ 改良を組み込んだ実験を行う。

新たな実験の結果をもとに②及び③の評価・検証から一連の手続きを繰り返す。

モデル開発においても、モデルの改良の方向性を決めるのは評価・検証を通じたモデル誤差の診断であり、モデル誤差を正しく診断することが非常に重要である。しかしながら、これまでモデル誤差の診断手法に関する情報共有や体系化の試みは十分行われてこなかった。臨床医療におけるガイドラインのように、モデル誤差の診断についても体系化された方法論をコミュニティ全体で確立し、共有し、また改良していく体制の構築が望まれる。本ワークショップでは、各センターが個別の事例に対し開拓してきた診断手法のレビューを通じてノウハウの共有が図られ、また、モデル誤差の診断に関する体系化された方法論を構築するために何ができるか、どのようにコミュニティを形成し、役割分担をしていくかが議論された。

4. なぜ診断が必要か？

上述のとおり、モデル開発において「診断」は重要なプロセスである。このことをより明確にするため、以下では A. R. Brown (UKMO) による発表をもとに、なぜ診断が必要となるのかを述べる。重要なキーワードであるボトムアップ・アプローチ、トップダウン・アプローチと“compensating errors”という概念が読者に上手く伝われば本節は成功である。

物理過程開発への取り組み方を考える際、開発の過程をボトムアップ・アプローチ(第2図)とトップダウン・アプローチ(第3図)の2つに分けて考えると見通しがよくなる。これらはモデル開発における車の両輪として機能するべきものである。

ボトムアップ・アプローチとは、モデル開発を個々の部品(典型的には個々の物理過程)の改良を通じて行うアプローチである。ボトムアップ・アプローチでは(第2図参照)、①まず各過程の開発者が理論や観測・雲解像モデルやLES等との比較により、物理過程の新しいスキームを開発し、シングルカラム・モデ

ル（鉛直1次元の単純化モデル）等により徹底的に単体としての性能評価を行い、②その結果を文書に残す。③そしてフルの3次元モデルに組み込み、総合的な性能を評価する。④必要があればチューニングし、モデル全体としてパフォーマンスが出るようにする。

ボトムアップ・アプローチは、物理過程開発における基本的な姿勢である。ボトムアップ・アプローチによるしっかりとした開発なくしてはモデルの改良は達成しえない。しかしながら、ボトムアップ・アプ

ローチのみに頼った開発では、以下のような難しい課題が残る：

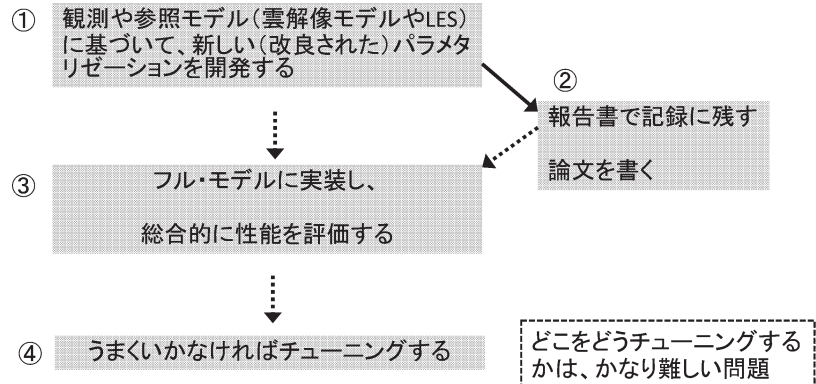
- (1) モデルが全体として抱える問題点の改善につなげることが難しい

後述のように、モデルの中では様々なプロセスの間で複雑な相互作用が生じる。この相互作用のメカニズムを明らかにしない限り、「結果」（モデルが全体として抱える問題点）から「原因」（個々のプロセスの問題点）を探することはほぼ不可能である。逆に、部品（個々のプロセス）を「改良」した場合、それが意図通りに3次元モデルに反映されるとは限らず、むしろ逆効果になってしまうことさえ頻繁に起こる。A. R. Brown氏は「単体としては良いはずのスキームであってもフルのモデルに組み込むとスコアが下がる」という、モデラーがよく経験するこの悲劇を皮肉って第2図③の説明に“get fingers crossed”（成功を神に祈る）という言葉を使い、会場を笑いで沸かせた。英国紳士らしいユーモアであるが、実に本質をついている。

- (2) チューニング（第2図④）にかかるコストが膨大な上、誤ったチューニングを排除できない

個々のプロセスを改良した場合でも、3次元モデルに組み込んでそのまま性能の向上につながることはほとんどない。モデルの中に「互いに打ち消し合う誤差」“compensating errors”が存在しているためである。さらに、モデル内の複雑な相互作用が

“ボトムアップ”のアプローチ

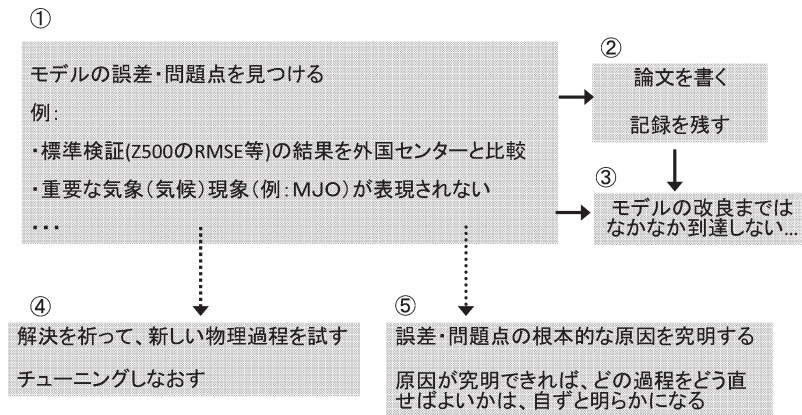


第2図 モデル開発における“ボトムアップ”のアプローチ。

compensating errorsの同定を困難にするため、あるプロセスを改良した場合に他のどのプロセスをどのように変更すればよいかを知ることができない。よって、モデルの挙動（とくに相互作用）の理解がなければ総当り的なチューニングに頼らざるを得なくなり、多くの場合ボトムアップ・アプローチはこの段階で止まってしまう。

ここで「互いに打ち消し合う誤差」“compensating errors”について、例を挙げて補足しておこう。例えばあるモデルでは地表面抵抗が弱い重力波抵抗が過剰であり、正味で見ると見かけ上、大気下層の風が観測とよく合っていたとする。開発者がボトムアップ・アプローチにより、地表面抵抗の問題に気が付き、適切に直すことができたでしょう。しかし、フルのモデルに実装した場合、過剰な重力波抵抗により下層風の風速に負のバイアスが出てしまい、予報成績は悪化することになってしまいます。したがって、開発者は何らかの方法により重力波抵抗に存在するcompensating error(s)を見つけ出すことが必要になるが、これは難しい問題である。下層の風速に影響する過程には重力波抵抗の他に乱流による鉛直拡散もあるし、鉛直拡散には静的安定度等を通じて下部境界からの潜熱・顕熱フラックス等、非常に多様な要因が関与しており、様々な候補のなかのどこにcompensating error(s)があるかを見つけ出すことは容易ではない。この点において有用たりうるのが次に述べるトップダウン・アプ

“トップダウン”のアプローチ



第3図 モデル開発における“トップダウン”のアプローチ。

ローチである。

トップダウン・アプローチは、モデル全体としての性能(モデルの出力)の問題点をスタートとして開発を進めていくアプローチである。このアプローチでは(第3図参照)、まず①モデルの出力の問題点を探り、(例:標準的スコアを他センターと比較する、太平洋の風が強すぎる、インド・モンスーンの表現が弱い…)②論文を執筆する(文書に残す)。そして(理想的には後述の③および④に陥ることなく)⑤問題点の原因を突き止め(診断し)、その結果をもとに物理過程を改良する。⑤の「問題点の原因を突き止め」ることは、即ち compensating error(s)を突き止めることでもある。

このように、トップダウン・アプローチは上述のボトムアップ・アプローチの欠点を補うアプローチである。ただし、現在のところ方法論が確立されておらず、実行に移すのは難しい。これまでのところ、多くの場合の③段階(問題点を見つけた段階)で思考停止してしまうか、良くて④問題点が解決することを祈って新しいスキームを試したり既存のスキームをチューニングし直したりするにとどまってきた。トップダウン・アプローチの方法論の確立は、現在、多くのモデリング・センターが取り組んでいる重要かつ先進的な課題である。

5. どんな診断手法があるか?

本ワークショップでは各センター・大学から既存の

診断手法について多くの報告があり、最終日の総合討論の時間でそれらのレビューが行われた。この節では、レビューでの議論をもとに、まず既存の診断手法に共通する考え方を述べ、次に具体的な診断手法をいくつかの類型に分けて紹介する。

5.1 診断手法に共通する考え方

モデル誤差の診断(すなわちトップダウン・アプローチ)を最も困難にしている要因は、複雑な相互作用の存在である。冒頭の医療

療の例でいえば、人体において何らかの異常が生じると、細胞内のシグナル伝達のようなマイクロな相互作用から神経系・免疫系統の反応のようなマクロな相互作用まで、さまざまな「飛び道具」が存在するために、現象・症状から原因を突き止めることが難しくなっている。この事情は、モデル開発でも同様である。モデル内には次のような様々な「飛び道具」が存在する:

- ・鉛直カラム内の物理過程間の相互作用
- ・大気波動による力学的な相互作用(移流による伝播と波動による伝播)
- ・移動性擾乱から長周期波動へのフィードバック

このため、症状(モデルの出力から見える誤差)から原因(各プロセスのモデリングが持つ誤差)を突き止めることは難しい。さらに、上記の相互作用の過程には摂動(ゆらぎ)の振幅を増大させるような不安定過程が多く含まれるため、相互作用初期の微小なノイズが増幅されてしまい、統計的に有意なシグナルを抽出することがさらに困難になるという問題もある。

したがって、これらの複雑な相互作用を如何にして「解きほぐす(disentangle)」かが、モデル誤差の診断における鍵となる。

モデル誤差の診断に関するもう一つのアプローチは、モデルの部品(各プロセス)の挙動によりfocusした診断を目指す、というものである。各プロセスは背景場の条件に応じて発動したりしなかったりするし、背景場へのフィードバックが特定の時間・空間スケールにのみ効率的に働いたりする。これらの性質を

上手に利用することで、より対象とするプロセスに迫った評価・検証が可能となり、プロセスの改良へ導く洞察が得られる。

5.2 “initial tendency”による診断

複雑な相互作用によってモデル誤差の診断が困難なることを避ける一つの方法は、相互作用の影響を受ける前の状態に注目することである。即ち、短い予報時間（数時間～1慣性周期程度）の予報の誤差に注目することが有効である。地衡流調節前のごく短時間の誤差に着目することで大規模な大気波動による相互作用が起きる前の誤差を見ることができ、さらに、現在の数値予報においては短い時間の予報値（第一推定値）を大量の観測データにより修正し、大気の状態の最も確からしい推定値（解析値）を得ること（データ同化サイクル）がルーチン的に行われている。このことを利用し、第一推定値と解析値の違いから予報モデルの持つ誤差を診断することができる。この考え方に基づく診断手法を“initial tendency method”（初期傾向診断法）という。この診断方法の大きな利点の一つは、モデル誤差（解析値と第一推定値の系統的なズレ）を各物理過程による寄与に分解できる点にある（Rodwell and Palmer 2007; Rodwell and Jung 2008）。実装が容易な上に、モデル誤差と物理過程との直接の対応付けが行いやすく、非常に有望な手法である。本ワークショップでは多くのセンターがこの手法に関する発表を行った。

この手法の「創始者」である M. J. Rodwell (ECMWF) は、initial tendency method の基本的な考え方を解説した後、Rodwell and Palmer (2007) にもとづき initial tendency method を気候モデルの成績の評価に利用する方法を示し、Rodwell and Jung (2008) にもとづき① initial tendency method と②熱帯波動の力学 (Matsuno-Gill 応答)、③ Rossby Wave Source (Sardeshmukh and Hoskins 1988) により熱帯から中高緯度の循環場への影響を診断する手法の3つを組み合わせることにより物理過程の変更がモデルの循環場に与える影響をあらゆる時間・空間スケールにわたって診断できることを紹介した。

堀田（気象庁）は、発表の前半において気象庁における initial tendency method を応用する試みについて報告した。まず、initial tendency method がモデルの欠点の把握や、ある過程の変更が他の過程に及ぼす影響の理解に有効であることを示し、その後、新しい陸面過程をデータ同化サイクルに導入する実験にお

いて4次元変分法のアウターモデルとインナーモデルの陸面過程に不整合があったため正しく診断ができなかった例を紹介し、initial tendency method はデータ同化システムの整合性を前提とした手法であるためデータ同化システムに不整合があると解釈が困難になること、逆に、モデル誤差ではなくデータ同化システムの問題点を検出することにも役立てられることを指摘した。

A. R. Brown (UKMO) は、前述のトップダウン・アプローチの一例として、モデルが持つ運動量収支の誤差を診断するため、運動量収支を24時間予報における力学過程・各物理過程からのテンデンスに分解した診断 (Brown 2004) について報告した。また、海上風の風向に見られる解析値とマイクロ波散乱風観測の差について、下層風が極向きで境界層が不安定化しつつある場合と、下層風が赤道向きで境界層が安定化しつつある場合に分けて統計をとることにより、モデルの境界層過程において地表面抵抗と鉛直拡散のどちらがより不適切かを診断できた例を紹介した (Brown *et al.* 2005, 2006)。この方法は次項に述べる“conditional sampling”と“initial tendency method”の「合わせ技」と考えることができる。なお、この研究では解析値と観測値の比較を行っているが、解析値は第一推定値（予報値）と観測値の按分であるため、解析値と観測値の差からモデルと観測の差（モデル誤差）の性質を診断することができる。

S. Milton (UKMO) は、UKMO における、モデル誤差の時間発展を予報の初期から長期予報まで“trace”する試み (Martin *et al.* 2010) について紹介し、季節予報やモデル気候値（気候学平衡状態）にみられる誤差のほとんどが予報初期（1日予報）の段階までさかのぼれること、また1日予報から季節予報・モデル気候値に至るまであらゆるタイムスケールにわたってモデルを改善することは可能であると指摘し、“initial tendency”による診断は promising であると述べた。ただし、今のところ initial tendency を用いてもモデル誤差の原因を各プロセスにまで遡ることは難しいことをインド・モンスーンの表現に見られる問題を例に説明し、プロセスまで遡るためにポテンシャル渦度等の気象力学的概念を用いた診断手法に着手する予定であると述べた。

5.3 ラグランジュ的追跡による診断・気候力学的診断手法の応用

モデル内に存在する相互作用のうち力学的な相互作

用、即ち、移流や大気波動による伝播については、気象力学・気候力学の分野で開拓されてきた手法を応用することで「解きほぐす」ことができる場合がある。移流による伝播をその他のメカニズムによる伝播から分離するには、ラグランジュ的な保存量（化学トレーサーや断熱的保存量）の追跡を利用することができる。非断熱加熱に対する熱帯大気への応答については、Matsuno-Gill 応答や局所的ハドレー循環・局所的ウォーカー循環の診断が役立つ。また熱帯から中・高緯度の大規模場への影響については Sardeshmukh and Hoskins (1988) の Rossby Wave Source の概念など、力学的な理解が進んでいる。これらのテクニックをモデルの誤差の診断に役立てる試みは、最近始まったばかりであるが、本ワークショップの本題でもあり、これに関連した多くの発表があった。

H. Wernli (ETHZ) は、ECMWF の現業予報における温帯低気圧に伴うウォーム・コンベイヤー・ベルト (WCB) の表現の誤差とその下流への伝播を、等温位面ポテンシャル渦度 (IPV) を用いて診断した例を紹介した。IPV は断熱・非粘性流体における保存量であり、モデルの力学過程ではラグランジュ的に保存される。よって IPV の時間発展をラグランジュ的に追跡すると IPV の source, sink は物理過程のみに起因することになり、モデル誤差への直接的（瞬間的）な寄与を物理過程と力学過程との間で分離することができる。また、IPV の勾配は、大気中の主要な「飛び道具」であるロスビー波の性質を規定するものであり、IPV の勾配から誤差の伝播の仕方に関する洞察を得ることもできる。この発表では、上記の診断に加えライダーによる雲・水物質の観測との比較も行い、中緯度の短期予報で特に問題となる WCB の表現の誤差の原因が前線における湿潤過程のパラメタリゼーションにあるとし、さらなる診断の必要性を訴えた。

J. Methven (レディング大学) は、ラグランジュ的追跡を用いた診断に関する多くの先進的なアイデアを発表した。予報で大西洋上の温帯低気圧を検知した際、前方追跡モデル・後方追跡モデルで現象の前後での気塊の軌跡を大まかに見積る。これをもとに、軌跡を複数回横切るように航空機を用いて特別観測を行いラグランジュ的トレーサー量（オゾン濃度、二酸化炭素濃度、相当温位など）を高密度に観測する。それぞれの断面の観測をマッチアップする（組成や相当温位の比較から同一の気塊を観測したとみなせるものを

見つけ出す作業を行う）ことで、実際の気塊のラグランジュ的追跡ができる。これを使うと、モデルでの非断熱加熱、IPV の source, sink の観測との比較が容易に出来る。

このアイデアは既に北大西洋を渡る大気の輸送過程および組成の遷移の解明を目的に2004年に行われた ICARTT キャンペーン（航空機特別観測で試行され期待通りの結果が得られており、2011年以降実施される T-NAWDEX 特別観測キャンペーン（北大西洋でのロスビー波の導波管と上流での観測の下流へのインパクトを明らかにすることを目的とした THORPEX 主導の特別観測プロジェクト）で本格的に採用したいとのことである。

このほか、第5.2節で述べた Rodwell の方法は気候力学的診断手法が実際の現業モデルの評価に有効であることを示した点で画期的であり、重要である。

5.4 “conditional sampling” による診断

第5.1節で述べたとおり、物理過程による環境場へのフィードバックの大きさは環境場の条件によって異なる。例えば重力波抵抗はサブグリッドの地形が粗く下層で風が強いときによく働くし、積雲は環境場が安定成層な場合には発動しない。境界層は成層の安定・不安定により挙動が全く違うことも知られている。よって、ある特定の物理過程（スキーム）の問題点を診断したい場合、そのスキームの性質に応じて環境場がある条件をみたしている事例のみを抽出して統計をとることは有効である。注目している現象に関連性の薄い (irrelevant な) サンプルを含まないことにより、注目している現象の S/N 比を高め、より統計的有意性の高い議論をすることにもつながる。このような手法を“conditional sampling”（条件付抽出法）という。conditional sampling を用いた診断の例としては、第5.1節で述べた A. R. Brown (UKMO) による地表面抵抗の診断の他、以下のような発表があった。

J. Teixeira (NASA/JPL) は、気候モデルにおける雲の表現がモデル間で大きく異なっており未だ不確実性が高いことをレビューした後、CloudSat による衛星観測とモデルを比較する際、500 hPa の鉛直 p 速度 (ω_{500}) の大きさに従いサンプリングを分けることで、 $\omega_{500} < 0$ の場合に生じやすい深い積雲から $\omega_{500} > 0$ の場合に生じやすい境界層雲に至る広いスペクトルにわたって観測とモデルを現象に即して比較することができることを示した (Lee *et al.* 2010)。この手法によ

り、例えば NCAR のモデル (CAM) では安定成層時の境界層雲が高すぎることを、不安定な場で生じる積雲が十分な高度まで発達できていないことなどを明瞭に診断できる。

F. Yang (NCEP) は、NCEP・GFS の陸面モデルにおける直達光・散乱光に対する地表面アルベドの定式化を、ARM 特別観測との比較で診断した。観測サイトでの雲量の条件に応じて場合分けすることで直達光・散乱光それぞれに対するアルベドの見積り誤差を分けて検証した結果、従前の検証では観測とよく一致していた地表における上向き短波放射が、実際には直達光の場合と散乱光の場合とで打ち消し合う誤差を持っていたための見かけ上のものであったことが明らかになり、この診断を通じてよりよい経験式の導出に成功したことを報告した。

5.5 その他の診断手法

上記の分類には当てはまらない診断手法もいくつか紹介された。

T. Jung (ECMWF) や P. Arbogast (フランス気象局) は、いわゆる relaxation experiment (緩和実験) によるモデル誤差の起源の診断について報告した (Jung *et al.* 2010)。この手法ではモデルの時間積分中、ある領域 (例: 中高緯度成層圏、熱帯対流圏等) で予報変数を解析値にナッジングさせる実験を行う。ある注目する領域 (例: 北半球中緯度対流圏) での予報精度、あるいは注目する現象 (例: 北大西洋振動) の予報精度のナッジング領域による違いを比較することにより予報誤差の原因 (origin) がどの領域にあるのかを診断することができる。

堀田 (気象庁) は、発表の後半において、予報の「活発さ」(活動度) の劣化を空間スケールに分けて評価することでモデル誤差の原因を絞り込めた例を示した。ここでいう予報の活動度とは、各瞬間の予報値の気候値からの偏差を空間方向に二乗平均したものであり、理想的な予報では活動度は空間スケールによらず予報時間の進行に対して保存される。気象庁の予報では活動度が予報時間の進行とともに減衰し、この減衰は東西波数 4 以下の大きい空間スケールにおいて顕著である。活動度を失う原因がもしも (人工粘性や移流スキームに伴う) 数値拡散であったとすれば、活動度の劣化は小さい空間スケールでより強く起きるはずであるから、この結果は活動度劣化の原因が数値拡散ではないことを示唆する。大きな空間スケールでの活動度の減衰は、物理過程からのエネルギーの注入に空間

的なコヒーレンスが不足していることを示唆しており、原因としては、例えば、海陸の違いによる非断熱加熱コントラストの表現不足、MJO の再現性の不足などが考えられる。

M. Boisserie (フランス気象局) は、解析アンサンブル (EnDA) による初期値のばらつきが初期値誤差を表すことを利用し、予報誤差を、初期値誤差に起因する成分とモデル誤差成分に分解する試みを紹介した。この診断は数学的に高度で解釈が難しい面もあるが、モデル誤差にともなう分散を 3 次元的に得ることができ、特に鉛直プロファイルはモデラーにとって有用な情報になりうるとのことで、今後、物理過程開発部門と連携していくとのことである。

また、モデル誤差の診断手法そのものではないが、K. Williams (UKMO) は気候モデルの評価をプロセススペースで行う試みとして Transpose-AMIP を紹介した。Transpose-AMIP とは、複数の大気モデル (主に気候モデル) を共通の条件のもと数値予報モデルとして実行し、プロセスの再現性を重視した共通の診断 (どのような診断をすればよいかについては公募中) を施すことで各モデルに共通する問題点、各モデル固有の問題点等を探ろうというものである。Transpose-AMIP は新たな診断手法を開発した場合にその手法を様々なモデルに適用できるテストベッド (試験台) として活用でき、診断手法の開拓において重要な役割を担うであろうと期待される。

6. 関連コミュニティ間の連携と次期プロジェクト

冒頭で述べたとおり、本ワークショップの重要な目的の一つは、広い意味でのモデル・ユーザ (気候・気象力学や観測研究・データ同化等) コミュニティへ如何にしてモデル開発への貢献を促すべきかを議論することである。モデル開発の側からみれば、隣接分野の研究者にモデル誤差への関心を持ってもらい、様々な専門的な視点で診てもらうことには明らかなメリットがある。一方、隣接分野の研究者にとってもモデル誤差の診断は魅力的なテーマたりうる。たとえばモデル誤差の伝播のプロセスを解明することはそれ自体、気象力学的に興味深いテーマであるし、モデルによる再現が不十分な物理過程やそれが卓越する地理的な場所を知ることは特別観測プロジェクトのアウトカムを最大化するために役立つ。データ同化においてもモデル誤差の取り扱いが重要なテーマとなってきた (例えば Trémolet 2007)。また、より広い視野で考えれ

ば、モデル開発への貢献は現業予報や気候変動予測の精度改善を通じて研究成果の社会貢献につながるという点で魅力的であろう。しかしながら、これらの潜在的なメリットは隣接分野のコミュニティに広く認知されているわけではなく、したがって積極的に宣伝していくことが必要である。

これらを踏まえ、WGNE および THORPEX-PDP として (1) 夏のインド・モンスーン (Indian Summer Monsoon; ISM) および (2) 低気圧システムの表現におけるモデル誤差に焦点を当てたプロジェクトを立ち上げることが決定された。(1) では CINDY/DYNAMO プロジェクト (熱帯の季節内変動, 特に MJO の力学の解明を目的としたインド洋における特別観測プロジェクト) および YOTC キャンペーン (熱帯の組織化した積雲対流を対象とした WCRP/WWRP/THORPEX の合同プロジェクト) と, (2) では T-NAWDEX 特別観測キャンペーンとの連携が図られる予定である。

7. 所感

ワークショップの期間中は南アフリカで FIFA ワールドカップが行われていた。初日の夜に地元の酒場で行われたウェルカム・ディナーでは、ちょうど生中継されていたドイツ対スペインの準決勝を参加者ほぼ全員で観戦し、コンビーナーの T. Jung 氏の出身国であるドイツをみんなで応援した (参加者にスペイン関係者はいなかった)。なお、準決勝では 1-0 でスペインが勝利している。一方、ECMWF の M. Miller 氏や WMO の D. Burridge 氏, NCAR/MMM の M. Moncrieff 氏ら英国紳士たちは試合などお構いなしにひたすらビールを飲み続けていたのが印象的であった (ちなみに著者は後者のグループでエールやスタウト等のビールについてレクチャーを受けていた)。2 日目の会議終了後 M. Miller 氏に「ビールでもどうだ?」と誘われチューリッヒダウンタウンのビア・ハーレへついで行ったところ、本当にビール以外何も頼まなかったのに驚き (著者は夕食に誘われたつもりだったので、おつまみくらいは頼むのではないかと思っていた)、M. J. Rodwell 氏と苦笑いしながらこっそりソーセージをオーダーしたりしたのは著者の楽しい思い出である。今回のワークショップの参加者らは既に結束の強いコミュニティを築いていること、そしてこのコミュニティにどうやらこれまで日本人が誰も入っていなかったらしいことへの悔しい気持ちを

伝えたかったため、以上、少々冗談めかした話を紹介した。

話を本題に戻そう。最終日の総合討論では、著名な研究者らからたくさんの鋭い発言があったが、Craig Bishop 氏による次のような発言が強烈に著者の印象に残っている。

「気候変動予測研究は新しいステージに入りつつある。社会からの要請は、気温や降水量の気候平均場 (1 次モーメント) のようなシンプルな統計量の予測から、顕著現象の頻度の予測等より高度な (高次のモーメントの) 予測へとシフトしてきている。このようなニーズにこたえるためには気候モデルは個別の現象をよく再現できなくてはならない。この点において、気候モデルの数値予報モデルとしての性能を見ることが最良の指標を与えるだろう。」

この発言は、数値予報のような短い時間スケールから気候変動予測に至るまであらゆる時間スケールで通用するモデルを「シームレス」に開発することの重要性を端的に示していると思う。

諸外国ではモデルの特性や誤差の診断において現業機関と大学等研究機関の連携が活発であり、本ワークショップではこうした連携から得られた多くの成果が発表された。中でも ECMWF と英国気象局は研究機関と非常に密接な連携関係を持っており、これが両センターの高い開発力を支えているように思われる。日本においても同様に気象庁と研究コミュニティでよい連携関係を構築することができれば理想的と思う。

実は日本においても、JRA-25再解析を用いた解析をはじめ、多くの研究者により気象庁のモデルのアウトプットについての調査が行われているが、気象庁の開発者はこれまで、必ずしもこうした研究にモデル開発者としての視点からは十分注意を払ってこなかったように思う。気象庁の開発者がより積極的に研究コミュニティの成果に注意を向け自らの開発に取り入れるようになれば現業システムの診断が研究者にとってもより魅力的なものとなり、気象庁と研究コミュニティとの連携の活発化につながるかもしれない。その際、再解析やモデルの予想が決して真値ではなく、まだまだ改良の余地があることを現業センターが示していくことも重要であろう。一方、日本気象学会2011年度春季大会での専門分科会の開催等、気象学会と気象庁が締結している気象研究コンソーシアムを通じた連携をトップダウン的に促進する動きも高まりつつある。気象庁と研究コミュニティの連携が双方に有益な

成果をもたらすことを期待したい。

謝 辞

本ワークショップへ著者を招待して下さった ECMWF の Thomas Jung 氏 (現所属は独ウエゲナー研究所)をはじめ, WGNE 委員の室井ちあし氏 (気象庁), THORPEX-PDP 委員の前田修平氏 (気象庁) 他, 多くの方のご協力を頂きました。榎本 剛氏 (京都大学) には, 本稿執筆の推薦を頂き, 本稿への有益なコメントも頂きました。また「天気」編集委員会の藤部文昭委員長には原稿を丁寧にチェックして頂きました。記して感謝申し上げます。

略語一覧

ARM : Atmospheric Radiation Measurement
 CAM : Community Atmosphere Model NCAR が開発し研究コミュニティに提供している全球大気モデル
 CINDY/DYNAMO : Cooperative Indian Ocean experiment on intraseasonal variability in the Year of 2011 / Dynamics of the MJO
 CloudSat : Cloud Satellite
 ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 欧州中期予報センター
 EnDA : Ensembles of Data Assimilation 解析アンサンブル (観測値にランダムな摂動を与えた独立した複数の解析予報サイクルにより解析値のアンサンブルを得る手法)
 ETHZ : Eidgenössische Technische Hochschule Zürich 連邦工科大学チューリッヒ校
 GFS : Global Forecast System NCEP が運用する全球数値予報システム
 ICARTT : International Consortium for Atmospheric Research on Transport and Transformation
 IPV : Isentropic Potential Vorticity 等温位面 (等エントロピー面) ポテンシャル渦度
 ISM : Indian Summer Monsoon 夏季インド・モンスーン
 JPL : Jet Propulsion Laboratory ジェット推進研究所
 LES : Large Eddy Simulation
 MJO : Madden-Julian Oscillation マッデン・ジュリアン振動
 MMM : Mesoscale and Microscale Meteorology メソ気象学と微気象学を扱う NCAR の部局
 NASA : National Aeronautics and Space Administration 米国航空宇宙局
 NCAR : National Center for Atmospheric Research 米国大気科学研究所

NCEP : National Centers for Environmental Prediction 米国環境予測センター
 THORPEX : The Observing System Research and Predictability Experiment 観測システム研究・予測可能性実験計画
 T-NAWDEX : THORPEX North Atlantic Waveguide and Downstream Impact Experiment
 Transpose-AMIP : AMIP は Atmospheric Model Inter-comparison Project (大気大循環モデル相互比較プロジェクト) の略
 UKMO : the United Kingdom MetOffice 英国気象局
 WCB : Warm Conveyor Belt
 WCRP : World Climate Research Programme 世界気候研究計画
 WGNE : Working Group on Numerical Experimentation 数値実験作業部会
 WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関
 WWRP : World Weather Research Programme 世界天気研究計画
 YOTC : Year of Tropical Convection 熱帯対流年

参 考 文 献

Brown, A. R., 2004 : Resolution dependence of orographic torques. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 3029-3046.
 Brown, A. R., A. C. M. Beljaars, H. Hersbach, A. Hollingsworth, M. Miller and D. Vasiljevic, 2005 : Wind turning across the marine atmospheric boundary layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 1233-1250.
 Brown, A. R., A. C. M. Beljaars and H. Hersbach, 2006 : Errors in parametrizations of convective boundary-layer turbulent momentum mixing. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 1859-1876.
 Jakob, C., 2010 : Accelerating progress in global atmospheric model development through improved parameterizations : Challenges, opportunities, and strategies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 869-875.
 Jung, T., T. N. Palmer, M. J. Rodwell and S. Serran, 2010 : Understanding the anomalously cold European winter of 2005/06 using relaxation experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 3157-3174.
 Lee, S., B. H. Kahn and J. Teixeira, 2010 : Characterization of cloud liquid water content distributions from CloudSat. *J. Geophys. Res.*, **115**, D20203, doi : 10.1029/2009JD013272.
 Martin, G. M., S. F. Milton, C. A. Senior, M. E. Brooks, S. Ineson, T. Reichler and J. Kim, 2010 : Analysis and reduction of systematic errors through a seamless

- approach to modeling weather and climate. *J. Climate*, **23**, 5933-5957.
- 室井ちあし, 隈 健一, 2011 : 「CAS/JSC 数値実験作業部会 (WGNE) 第26回会合」開催報告. *天気*, **58**, 533-538.
- Rodwell, M. J. and T. N. Palmer, 2007 : Using numerical weather prediction to assess climate models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **133**, 129-146.
- Rodwell, M. J. and T. Jung, 2008 : Understanding the local and global impacts of model physics changes : An aerosol example. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 1479-1497.
- Sardeshmukh, P. D. and B. J. Hoskins, 1988 : The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1228-1251.
- Trémolet, Y, 2007 : Model-error estimation in 4D-Var. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **133**, 1267-1280.
-