

5. THORPEX (観測システム研究・予測可能性実験計画)

余 田 成 男*

1. はじめに

THORPEX (THE Observing-system Research and Predictability EXperiment) は、社会的経済的に影響の大きい天気現象の1日~2週間先までの数値予報の精度向上を加速させることを目的とした国際研究プログラムである(第1図参照)。2003年5月のWMO (World Meteorological Organization; 世界気象機関) 総会で10年間の計画として承認され、具体的な国際共同研究が始まっている。エレクトロニクス技術の進歩にもなつて新たな気象観測方法が開発され、コンピュータ能力の飛躍的向上によってアンサンブル数値予報が本格化した今日において、天気予報のための世界気象観測網の再構築をはかり、ユーザーのニーズに合わせた双方向型気象予測システムを開発し、世界の各現業予報センターで出されるアンサンブル予報データの高度利用をはかることが、THORPEX 研究の中心的な課題となる。

我が国においても、気象庁内でTHORPEX 関連研究の推進に向けて精力的な取組みがなされると共に、気象庁と大学・研究機関とが連携して競争的研究資金を獲得し、我が国およびアジア域での関連研究の新たな展開をはかる予定である。

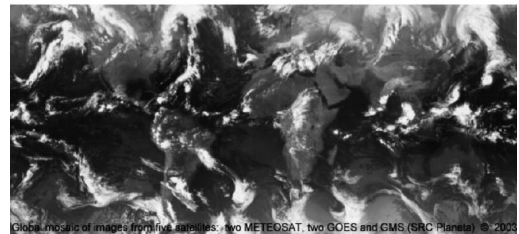
このシンポジウム講演では、国際的なTHORPEX 研究展開と我が国の積極的な参加・貢献を紹介するとともに、アジア域を中心とした国際研究展開での留意点について私見を述べる。

2. THORPEX の概要

2.1 研究計画立上げまでの国内状況

1980年代終盤、私は当時気象庁勤務であった木本・

THORPEX
A World Weather Research Programme



第1図 WMOのTHORPEX ホームページより。
<http://www.wmo.int/thorpeX/>

向川両氏と共同して予測可能性の理論的研究を開始した(Mukougawa *et al.*, 1991)。現業全球モデルを用いた応用事例研究(Kimoto *et al.*, 1992)を行い、予測誤差を予測する簡便法を提案したが、計算機資源を積極的に使うアンサンブル予報へと時代は速やかに推移した。その後、簡略化した力学モデルを用いて予測可能性の基礎的研究を学生さん達と行ってきた(Yoden and Nomura, 1993; Yamane and Yoden, 1997など)。これらの経緯もあり、私は2000年4月にフランス・ニースで開かれたTHORPEX 準備会議に出席して、我が国の関連研究を紹介し計画立案に加わった。その後、米国での2002年3月の第1回国際THORPEX ワークショップには気象研の中澤氏が、同年12月のTHORPEX 科学運営委員会ワークショップには気象庁の露木氏らが出席して、我が国のTHORPEX への積極的な関与が始まった。アジア域での研究推進に向けては、2003年2月に気象庁の故中村氏が中心となってその準備会合を東京で開催し、日本、中国、韓国、インド、ロシアの5か国の参加でアジア地域委員会が設置された(同年5月)。

* 京都大学大学院理学研究科,
yoden@kugi.kyoto-u.ac.jp

© 2007 日本気象学会

2.2 THORPEX の 主 な研究課題

数値天気予報は、20世紀における最も重要な科学的技術的社会的な成功の1つといえる。第2図に示すように、過去四半世紀にわたり予報スキルは目に見えてよくなっており、南北半球の差もほとんどなくなってきたが、更なる改善の必要性がある。とくに、社会的経済的環境的に影響の大きい天気現象の予報精度向上が重要な課題である。具体的には、洪水や土砂崩れを起こすような豪雨、寒冷地のブリザードや乾燥域の砂嵐、地表付近の破壊的な強風、などのほか、大気汚染

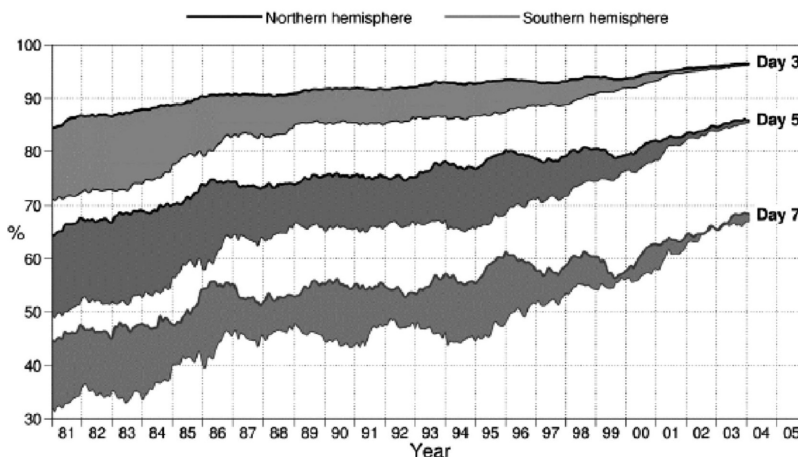
に影響を与える気象条件、異常高温・低温の持続、少雨旱魃、などである。これらは発生頻度こそ低いが、人間の社会経済活動にとって危険度の高い現象である。

これらの社会的経済的に影響の大きい天気現象の予測技術の向上は21世紀における重要な科学的課題のひとつであり、THORPEXがこの難問題に挑戦する。世界の大学・研究機関、現業予報センター、予報結果ユーザーの国際共同研究により、天気研究と予測問題に精力を傾注する組織の枠組みをつくる。

この挑戦を可能にしたのは、次のような大気科学の発展と関連する技術の進歩である：①大気の予測可能性の理論的実際の限界に関する認識の深化、②人工衛星・航空機・海上・陸上からの地球システム観測技術の進歩、③多種多様な観測データの同化を可能にした天気予報システムの新開発、④数値計算法・物理過程表現・アンサンブル予報法の改善とスーパーコンピュータ性能の指数関数的向上に基づく天気予報技術の高度化、⑤天気情報の社会的経済的利用を促進する情報処理システムの設計実装の革新。

THORPEXの主要課題は、(1) 予測可能性と力学過程、(2) 観測システム、(3) データ同化と観測戦略、(4) 社会的経済的応用、の4つからなる(Shapiro and Thorpe, 2004; 実行計画の概要 <http://>

Anomaly correlation of 500hPa height forecasts



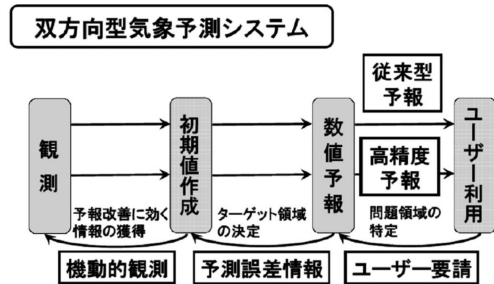
第2図 北半球および南半球の予報スキルの変遷。THORPEX International Science Plan (Shapiro and Thorpe, 2004) より。ECMWFによる500 hPa高度場の3日、5日、7日予報の北半球温帯域(上太線)および南半球温帯域(下細線)でのアノマリー相関。陰影部が北半球と南半球のスコアの差を示す。

www.wmo.int/thorpex/pdf/implementation_plan_1_outline.pdf 参照)。

(1) では、力学過程・物理過程の予報スキルへの影響を調べ、天候レジームとの関係を明らかにする。この課題ではアンサンブル予報研究が中心であり、双方向型 グランド・グローバル・アンサンブル (TIGGE: THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) 予報システムの構築を目指す。観測データ同化予報を双方向に行うシステム(第3図)を開発し、世界の多数の中期予報モデルによるグランド・アンサンブル予報システムを試作する。双方向型気象予測システムに関しては、次節で紹介するように、我々は台風予報に関するシステムの開発と実用性能評価を提案している。

(2) では、新型のバルーン、ゾンデ、無人飛行機、気象ロケットなどの新しい大気中現場観測手段の評価試験をする。また、衛星・航空機搭載の遠隔観測測器の試作品についてフィールド試験を行う。

(3) では、衛星観測など莫大大量データの高度利用をはかり、総観場の状況に応じた機動的な品質管理・データ同化法を開発する。また、予報を改善する鍵となるターゲット領域を求めて、そこで速やかに新たな情報を獲得するための機動的観測の手法を確立する。(2) で開発される新しい観測機器の投入も計画する。



第3図 双方向型気象予測システムの概念図。観測からユーザー利用にわたる従来型予報に加えて、ユーザーの要請で問題領域を特定し、予報誤差情報を解析して問題領域の予報を改善する鍵となるターゲット領域を決定する。そして、そこで速やかに機動的観測を展開して、予報改善に有効な情報を獲得する。この新たな情報を取り込んでもう1度初期値を作成し、再度、アンサンブル予測を行って高精度予報を実現する。

(4) では、社会的経済的に影響の大きい天気現象を同定し、それらの予報のために改良された予報システムの費用対効果を見積もる。また、ユーザーを特定した天気予報プロダクトを新開発する。

2.3 国際共同研究の開始状況

2003年にWMO総会で承認された後、国際研究実施計画の具体案作りが行われ、2005年2月には完成版が出版された (Rogers *et al.*, 2005)。2004年12月にカナダで第1回 THORPEX 国際科学会議が、2005年3月には英国で第1回 TIGGE ワークショップが相次いで開催され、我が国からも何名かずつ参加して議論に加わっているが、欧米では関連共同研究が本格化しつつある。

THORPEX の観測キャンペーンに関連する部分は、ヨーロッパ、北米、アジア、などの地域に分かれて委員会を作り、それらが中心となって計画立案、実施する予定である。2003年10～12月には THORPEX 大西洋領域キャンペーンが試みられ、ルーチン現業観測以外のドロップゾンデ・ラジオゾンデ、高頻度民間航空機観測、静止衛星の高速スキャンなどを追加して、それらの予報へのインパクト評価実験が行われた。また、2005年6月には、太平洋域予測可能性実験 (問題領域は北米) に関するワークショップが米国で開かれ、風上側の我が国からは中澤氏が参加した。

アジア地域で社会的経済的に大きな影響を与える天気現象は、梅雨、台風、モンスーン、熱帯の積雲活

動、寒波の吹出し、黄砂、などである。2004年3月にソウルで第1回アジア地域委員会が、そして、同年11月と2005年8月には北京で第2・3回アジア地域委員会が開催されて、アジア域での THORPEX 研究の具体化と実施促進について議論された。まず、上記の諸現象についてレビューを行い、梅雨・台風・モンスーンをアジア地域 THORPEX 共通の対象とすることに合意した。そして、参加各国が既に計画しているキャンペーン観測計画、および予測可能性・アンサンブル予報・高分解能モデルなどの数値予報モデル関連の研究計画について討議し、今後、観測計画の連携を進めることや数値モデル研究計画を協力して行うことで合意した。

また、世界気候研究計画 (WCRP: World Climate Research Programme) の戦略的枠組みとして、統合的地球システム観測・予測 (COPEX: Coordinated Observation and Prediction of the Earth System) が2005年からの10年計画で始まったが、そのなかでも THORPEX との共同研究が謳われている。THORPEX では2週間までの時間スケールに焦点を当てているが、WCRP が扱う時間スケールの季節内変動から季節予報へと、継ぎ目のない多階層連結予報システムを構築することが共通の目標となる。

3. 我が国における THORPEX 関連研究の推進

3.1 気象庁内の研究推進計画

THORPEX 関連研究は、週間予報～季節予報の向上、次世代の最適観測システムの検討促進など、気象庁業務へのメリットが極めて大きい。そこで、気象庁内に THORPEX 推進委員会を作り、国内外の現状を把握し、日常業務のなかでの取組みを検討して、全庁的な視野で対応している。検討・計画され、実施予定の課題を箇条書きすると次のようになる：

- ① 観測システム：現地観測、衛星観測、機動的観測
- ② データ同化：現地・衛星観測データ、4次元データ
- ③ 数値予報：モデル、アンサンブル予報、季節予報
- ④ 顕著気象の予測：台風、豪雨、季節内変動
- ⑤ 展望課題：観測網の最適化、衛星データ利用、新観測システム、双方向型数値予報システム、機動的観測、社会・経済活動への影響評価
- ⑥ 他機関との連携：国外、国内

課題⑥の国外連携に関して、気象庁はWMOの委員会活動に積極的に関与している。THORPEX国際運営委員会には露木氏、同国際科学運営委員会には中澤氏を委員として出し、その中澤氏がアジア地域委員会議長を務めている。研究活動の連携では、これまでも韓国気象研究所と梅雨前線の強化観測データの交換や、韓国気象局やNOAA/NCEPとアンサンブル予報結果の相互交換を行ってきた。また、アジア地域THORPEXの実施に際しては、個別に実施していた特別観測から参加国が連携した観測への発展、未交換データの交換・共有、予報結果の相互比較、などが検討されている。

国内他機関との連携では、これまで気象庁が開催してきたTHORPEX準備会議に大学や他の研究機関からの参加者を加えて、意見交換を行ってきた。2005年7月には、日本気象学会のなかにTHORPEX研究連絡会の設立が認められ、気象学会員間で関連した情報・意見を日常的に交換し合う仕組みができた。同年11月にはTHORPEX研究連絡会第2回研究集会所が開かれ、「アンサンブル予報とその高度利用」についての研究発表・討論・意見交換が行なわれた。

また、次節で紹介するように、気象庁と大学や他の研究機関とが連携して「実験的気象予測研究コンソーシアム」をつくる計画がある。気象庁の現業予報モデル・解析システムや全アンサンブル予報結果データなどの研究利用促進の提案をはじめとして、官学の研究者の連携強化がはかれる状況になりつつある。

3.2 競争的研究資金獲得への道

21世紀になって、中央省庁再編で文部科学省が誕生したり、首相をトップとする総合科学技術会議が内閣府に設置されたり、学術行政関連の政府組織が大きく変わってきているが、その影響はプロジェクト型研究の進め方にも及んでいる。2003年には総合科学技術会議で競争的研究資金制度改革について諮られ、改革の基本的視点には、競争の促進、若手研究者の活性化、大学の改革、研究者システム改革、戦略性・機動性の確保、マネジメント体制の確立、効率性と多様性の両立、などの文言が並んでいる。

身近なところでは、旧文部省系の科学研究費補助金と旧科学技術庁系の科学技術振興調整費の垣根が取り払われて、国・地方公共団体や民間の研究所からも科学研究費が申請でき、一方、大学からも科学技術振興調整費が申請できるようになった。

我々は、気象庁と大学や他の研究機関とが連携して

THORPEX関連の研究を推進するために、競争的研究資金を獲得する努力をここ2年ちかく続けている。2005年度の科学技術振興調整費の募集では、「重要課題解決型研究」の「減災対策技術の研究開発」関連課題枠で最終ヒアリングまで進んだが、残念ながら不採択に終わった。次年度に捲土重来を期すべく再び準備を進めているところであるが、以下はその提案内容の概要紹介である。シンポジウム参加者の皆さんのコメントをはじめ、諸々のご協力ご支援を賜りたく思う。

3.3 提案「災害気象早期予測技術の開発と影響評価」

課題の概要：日本では、近年台風襲来や集中豪雨が増加し、災害の低減が急務となっている。これらの社会的影響の大きい災害気象をより早期に予測可能なシステムを実現するため、予測誤差成長理論に基づく初期値作成手法、多階層数値モデルを用いた確率的予測手法、および新しい観測機器を駆使した機動的観測手法からなる、新予測システムを構築し、実証実験を行う。さらに予測データの高度利用法を開発し、新手法の社会的インパクトを評価する。

研究の重要性、緊急性：近年の台風・豪雨災害の増加と社会の脆弱化により、自然災害リスクは高まっている。そのため、被害を最小化するために、災害気象の早期予測技術の向上は重要な課題である。国際的にも、一層の天気予報精度の改善を目指した観測システム研究・予測可能性実験（THORPEX）が2003年から10年計画で始まっており、我が国における機動的観測を含む予測システムの構築は緊急の課題である。

ミッションステートメント：本研究の1～2年目では、予測誤差成長理論に基づく確率的予測手法と機動的観測手法を取り入れた災害気象早期予測システムを構築する。また、3年目には、実際の台風に対して機動的観測による集中重点観測を実施し、このシステムの実用性能と社会的経済的な波及効果を評価する。さらに、その後の2年間は、国際THORPEX観測実験（2008-9）に参加することを通じて、実用的な予測システムの構築を目指す。

総合的な推進体制で実施する必要性：我が国に影響を与える災害気象は、水蒸気の影響が極めて大きいのでその影響を考慮した予測技術の確立が急務である。しかし、現業の初期値作成法では、水蒸気の効果は考慮されておらず、新しい予測システムを構築するには、大学などの基礎科学分野の研究者の参画が不可欠である。また、新予測システムがもたらす社会的影響を評

価するためにも、本研究は、大学・研究機関と気象庁との密接な連携のもとに推進する必要がある。

研究内容：本提案の内容の全体像を、第4図の台風予報を例にした概念図を用いて説明する。現行のアンサンブル予報システムは、観測から得られた初期値から数値予報モデルを時間積分する(①)だけであるため、台風の進路予測が大きく2つに分かれた場合でも、予測されたいずれのクラスターがより確からしいかを判断することは不可能であった。

また、台風のような大雨をもたらす気象擾乱の予測には、水蒸気や雲など、擾乱の周りの広い(多くは海上)領域における大気中の「水」を観測、初期値化することが重要である。しかし、現行のアンサンブル予報システムでは、複数の初期値摂動を作成する際に「水」のからむ湿潤過程が考慮されていないことから、4、5日先までの台風の進路予測に大きな誤差が生じる可能性があった。そこで、本研究で構築する災害気象早期予測システムでは、まず、湿潤過程を含む新しい初期値化法を開発することにより、広域をカバーする全球大気モデルによるアンサンブル予報の信頼性を大きく向上させる。

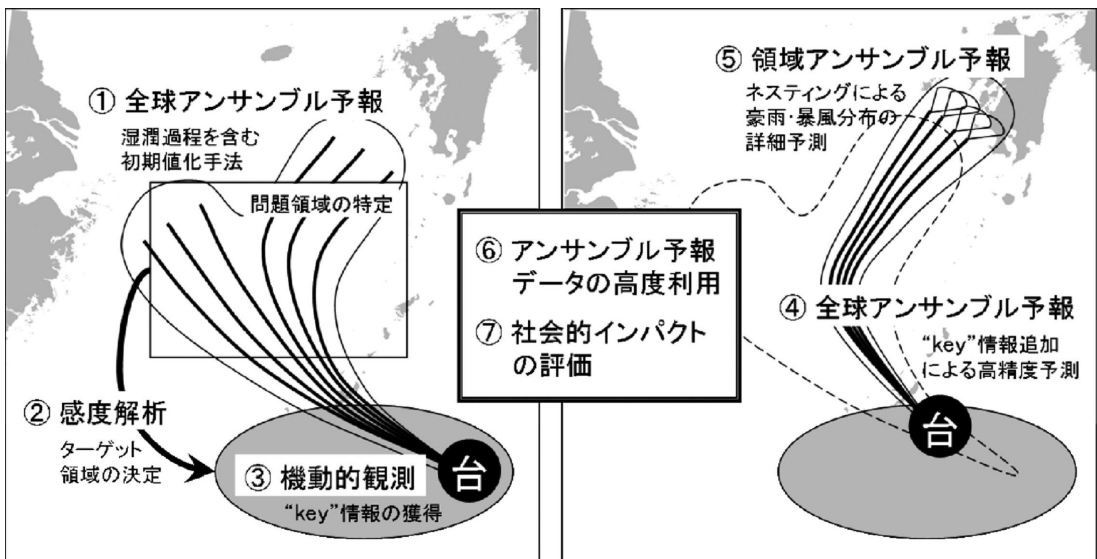
さらに、従来であれば、どこで観測を行えば興味を持っている領域(問題領域)の予報精度を向上できるかを、観測を実施する以前に知ることはできず、広範囲を観測領域とする必要があった。しかし、本災害気

象早期予測システムでは、予め実施されたアンサンブル予報の結果を用いて、台風の進路予測で大きな予報誤差を生じた東向き進路への転向点付近の問題領域を特定し(①)、感度解析の手法を用いて問題領域の予報を改善する鍵となるターゲット領域を決定する(②)。そして、速やかに航空機や新測器を用いた機動的観測を展開し、ターゲット領域での“key”情報を獲得する(③)。この観測結果から獲得される、予測改善への鍵となる“key”情報を取り込んで新たな初期値を作成し、再度、高精度のアンサンブル予報を実施する(④)。

また、数日先の全球アンサンブル予報結果にネスティングした高分解能領域モデルによるダウンスケーリング・アンサンブル予報手法を開発し、局地的な豪雨や強風・暴風の分布に関する予測を行う(⑤)。さらに、「実験的気象予測研究コンソーシアム」(4.2節参照)を立上げて、アンサンブル予報データの高度利用法を試験開発する(⑥)とともに、ユーザーのニーズに応える気象予測情報の提供方法を提案して、アンサンブル予報情報の社会的インパクトを評価する(⑦)。

本研究では、以下のような項目について研究を実施し、災害気象早期予測システムを構築する：

- (1) 多階層数値モデルを用いた確率的予報
- ・ 全球モデルによるアンサンブル予報実験



第4図 台風予報を例にとった、本提案「災害気象早期予測技術の開発と影響評価」のねらいの概念図。

- ・領域モデルによるアンサンブル予報実験
- (2) 機動的観測対象域のターゲットング手法
 - ・新しい初期値推定法・データ同化手法の開発
 - ・4次元変分法データ同化・感度解析の高度化
- (3) 新しい観測機器を用いた機動的観測
 - ・航空機観測
 - ・新開発測器を用いた試験観測
- (4) アンサンブル予報データの高度利用
 - ・災害気象のプロセス研究
 - ・アンサンブル予報データの高度利用法の開発
 - ・分散型データマネージメントシステムの開発
 - ・データ交換の標準化
- (5) 社会的インパクト評価
 - ・社会的ニーズに応える災害気象予報情報
 - ・国際技術移転
 - ・アウトリーチ活動

また、本研究期間中に予定されている集中観測実験では、実際に日本に接近すると予想される強い台風に対して機動的観測を実施し、本システムの実用性能を検証する。さらに、これらと平行して、観測データベースと実験的予測システムからなる「実験的気象予測研究コンソーシアム」を組織し、国内の研究コミュニティが実際のデータを用いた予測研究を行う研究基盤を整備する。

4. むすびにかえて

4.1 国際的大競争時代の Japan passing 問題

経済のグローバル化が進み、研究や高等教育の分野でも国際的大競争時代に入った感のある現在、気象学分野でも国際的コミュニティのなかで日本の存在感が希薄になる、いわゆる“Japan passing”問題が起きつつある。我が国の、人、モデル・データを介した国際的影響力について、順に考察する。

20世紀後半、米国内の気象研究コミュニティにおいて、いわゆる「正野スクール」のメンバーの大活躍(Lewis, 1993a, b)があり、我々も陰に陽にその恩恵を受けてきたといえよう。しかし、彼らが退職し一線を退いて、国際的研究コミュニティの中で「日本人」の顔が見えにくくなりつつある今日、次の世代は何をどうしていけばよいのだろうか？ まずは、個人々の国際競争力をあげ存在感を増す必要がある。しかし、その中味も重要である。国際的な研究の流行に追随するのではなく、流れを作り影響を及ぼすような立場を築くには、どのようにしていけばよいのであろうか？

THORPEX のような気象予測研究の場合には、観測から数値予報、ユーザー利用まで、複雑精緻で巨大な現業システムを使った研究が中心的となる。そのような分野では、気象庁の現業組織としての存在感も重要である。これまで気象庁は欧米の先端的な予報センターと伍する技術レベルを誇り、世界に先駆けた手法開発でも成果をあげてきた。限られた人的物的資源でこれからそのようなレベルをさらに向上させていくには、どのようにしていけばよいのであろうか？

また、計算機性能が飛躍的に向上し通信事情も一変した今日、数値予報システムをアジアやアフリカの国々に技術移転できる状況になりつつある。地域の特徴を把握した気象庁の現業予報解析システム・データが使われ、各国の気象災害の低減に資するならば、国際社会において名誉ある地位を占めることができるであろう。

しかし、現状では欧米のメソ気象モデルが導入されている場合が多いと聞く。他人のことを言うまでもなく、私自身、我々の研究室に半年間滞在したラオスの気象水文局の研究者と、米国製のメソ気象モデルを使って東南アジア地域の予報実験を進めてきた。英語マニュアルや各種ツールの利便性などの言い訳はあるものの、技術的に外国に隷属した状況である。「国際」的というよりは「植民地」的である。

また、APEC (Asia-Pacific Economic Cooperation) Climate Network の本部や TIGGE アジア地域データセンターが我が国の外に置かれて、データがそこに集積される状況になりつつある。長期再解析 Japanese 25-year Reanalysis Project (JRA-25) など我が国独自の取組みもあるが、データを介した国際的影響力についてもよく考えて実行していく必要がある。

4.2 「実験的気象予測研究コンソーシアム」試案

前述のような隷属状況を打破し、国際的な活動を主導していくには、3年～5年といった研究プロジェクトより長い時間規模での業界基盤づくりが必要である。国の行財政改革が進む中、気象予測の基盤作りを気象庁だけに頼りきれない状況ではない。気象庁の現業システム・データを使い、大学などの基礎科学分野の研究者も参画する、気象庁と大学・研究機関とが密接に連携する拠点「実験的気象予測研究コンソーシアム」を提案する(第5図参照)。

気象庁モデルについては、既に数値予報研究開発プラットフォーム (<http://pfi.kishou.go.jp/>) という仕



第5図 実験的気象予測研究コンソーシアムの提案。

組みがあり、非静力学モデル (NHM: Non-Hydrostatic Model) の共同利用などの実績がある。また、実験的予報に直結する予報用初期値データや、アンサンブル予報の詳細データなど、研究用の気象庁データの活用に関する要請書を気象学会から気象庁に提出し、データ利用の新たな仕組みを模索しているところである。データ同化やアンサンブル初期値作成、感度解析のツール群についても、モデルと同様な扱いができるようにしたい。

コンソーシアムで実験的実践的な予測研究を柔軟に展開し、その研究成果を現システムの改良や次期システムへの提案として気象庁にフィードバックする。新しい観測機器のデータや特別観測キャンペーンのデータが日々の数値予報にどのようなインパクトを与えるかを調べる観測システム実験も、気象庁現業の人手を煩わせることなくできるようになる。英語マニュアルや解析ツールの作成、海外への技術移転や高度化教育、国際共同研究の推進などを通して、これまでになく国際貢献も可能となろう。

コンソーシアムでは独自の人的資源 (研究者・ポストドク) や計算機資源を確保する必要がある、そのため

にも研究資金の重点投資が必要となる。関連する各研究プロジェクトの緩やかな協力の下に、より長い時間的視野で我々気象業界の官学連携拠点を形成して、実効性のある研究を推進していく態勢をつくりたいと思う。今春、久しぶりに訪ねたレディング大学気象学科には英国気象局の分室もあり、大学と現業機関研究部門との連携のあり方の一形態を具現していた。我々のコンソーシアムづくりの参考になるかもしれない。

参考文献

- Kimoto, M., H. Mukougawa and S. Yoden, 1992: Medium-range forecast skill variation and blocking transition: A case study, *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1616-1627.
- Lewis, J. M., 1993a: Meteorologists from University of Tokyo: Exodus to the United States following World War II, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 1351-1360.
- Lewis, J. M., 1993b: 正野重方—The uncelebrated teacher—, *天気*, **40**, 503-511.
- Mukougawa, H., M. Kimoto and S. Yoden, 1991: A relationship between local error growth and quasi-stationary states: Case study in the Lorenz system, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1231-1237.
- Rogers, D. P. *et al*, 2005: THORPEX International Research Implementation Plan. Version 1. 14 February 2005, WMO/TD-No. 1258, WWRP/THORPEX No. 4, 95pp.
- Shapiro, M. A. and A. J. Thorpe, 2004: THORPEX International Science Plan. Version 3. 2 November 2004, WMO/TD-No. 1246, WWRP/THORPEX No. 2, 51pp.
- Yamane, S. and S. Yoden, 1997: Predictability variation and quasi-stationary states in simple non-linear systems, *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 557-568.
- Yoden, S. and M. Nomura, 1993: Finite-time Lyapunov stability analysis and its application to atmospheric predictability, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1531-1543.