

## 「4次元変分法とアンサンブル・カルマンフィルタの 相互比較に関するワークショップ」及び 「データ同化集中コース」参加報告\*

三好 建正\*\*

### 1. はじめに

数値天気予報は、現在の天気予報には欠かせない。初期値を与えて予報モデルを走らせ、将来の天気を数値的に予報する。初期値は、現在の大気状態を表し、モデル格子点での風、気温、湿度、気圧といった各変数の値の集合として与えられる。数値天気予報の精度向上には、より精緻な予報モデルと共に、より高精度な初期値が重要である。精度の高い初期値は、観測の情報を最大限生かす高度な初期値作成手法によって得られる。観測を予報モデルの世界に同化するという意味で、データ同化と呼ばれる。本会合のタイトルにある「4次元変分法(4D-Var)」と「アンサンブル・カルマンフィルタ(EnKF)」は、現在数値天気予報で実行可能な最も高度なデータ同化手法として知られている。4D-Varは、わが国の気象庁を含む世界の多くの数値天気予報センターで現業利用されており、従来の静的な手法と比べて優れていることが、長年にわたる現業経験から証明されている。一方、EnKFは比較的新しく、近年研究が盛んである。

EnKFは実装及び維持コストの点で4D-Varよりも優れており、期待されている。しかし、精度の面でどちらが優れているかは自明ではない。このため、将来どちらの手法を選ぶべきか、または両者のよい点を補い合いながら共存すべきか、といった議論が、近年現業及び研究コミュニティの双方で盛んに行われて

いる。実際、Kalnay *et al.* (2007a) は「4D-VarかEnKFか?」という論文を発表し、Lorenz (2003) によるEnKFと4D-Varの比較について、近年のEnKF研究の発展を取り入れて更新した。KalnayらのEnKF寄りの議論に対して、Gustafsson (2007) は両者共存の道を提示し、それについてKalnay *et al.* (2007b) は賛同しつつも、なおEnKFの利点を主張している。このような熱い議論が気象学専門誌 *Tellus* 上で繰り広げられたのは、ほんの氷山の一角に過ぎない。

4D-VarとEnKFという二つの高度なデータ同化手法をめぐる議論が活発となる中、世界気象機関(WMO)の世界天気研究計画(WWRP)の下で行われている数値天気予報の改善を目的としたTHORPEX(観測システム研究及び予測可能性実験)計画が主体となって、4D-Var及びEnKFの相互比較を主題として議論する場を初めて設けたのが本ワークショップである。現在最も広く実用されている4D-Var、実用化を視野に研究が盛んなEnKF、それぞれの分野の第一線で活躍する専門家を一同に介し、お互いの利点や欠点などを議論しながら、将来の現業システムの方向性を見出そうというのが目標である。

開催地はアルゼンチンの首都ブエノスアイレス、会期は2008年11月10日から13日までの4日間である。南米でこのような大規模なデータ同化の会合が開かれることは、なかなか例がない。これを契機に、本ワークショップに先立つ10月27日から11月7日までの2週間、主に南米の学生や研究者等を対象として、データ同化集中コースも合わせて開催された。データ同化に関する事前知識は仮定せず、全くの素人でも参加できるように組まれたプログラムの1週目は、このコース

\* A report on the Workshop on 4D-Var and Ensemble Kalman Filter Inter-Comparisons and Intensive Course on Data Assimilation.

\*\* Takemasa MIYOSHI, 気象庁予報部数値予報課(現: 米国メリーランド大学大気海洋科学部).

の世話人の一人である Eugenia Kalnay 教授（メリーランド大学）によるスペイン語の講義と、コンピュータを使った実習に当てられた。2週目には、本ワークショップに参加する第一線の研究者による最先端の講義が盛り込まれた。筆者は、ブエノスアイレス大学大学院博士課程の学生 Juan Ruiz 氏と共に、コンピュータ実習を担当した。

なお、今回の会合に関しては、データ同化集中コースの実習で使ったソースコードも含め、すべての講演資料及び関連資料がインターネットから入手できる。以下のウェブページから辿ることができるので、適宜参照いただきたい。http://4dvarenkf.cima.fcen.uba.ar/ (2008.12.1閲覧)

以下、今回の会合に関して、随筆旅行記風に報告する。

## 2. データ同化集中コース (10月25日～11月7日)

10月25日土曜日の夕刻に成田を発ち、ワシントンDCに到着したのは同日の昼過ぎ。空港で9時間近くをボーっと過ごして、夜9時過ぎの便でワシントンDCを発って約11時間、ブエノスアイレスに到着したのは翌26日の午前中であった。さすがに地球の反対側、30時間を越える長旅である。データ同化集中コースの主催者である Celeste Saulo 教授（ブエノスアイレス大学）と Eugenia Kalnay 教授がブエノスアイレスの小さな空港で迎えてくれた。ブエノスアイレスでの挨拶はハグとキスである。互いの性別には関係なくキスで挨拶する。キスは通常1回である。イタリアでは2回だそうだが、キスの挨拶は男女間のみで、男同士では握手だそうだ。3回キスをする国もあるそうで、挨拶の仕方もお国柄、いろんな国の人と挨拶していると混乱する。さて、空港から車で約30分、約3週間過ごすことになるブエノスアイレス市街中心部のアパートへと直行した。ブエノスアイレスは2時間の夏時間補正をしており、10月末はまだ春だというのに朝7時ではまだ薄暗く、夜は9時頃まで薄明であった。

翌27日月曜日朝から、ブエノスアイレス大学の1号館 Aula Magna（アウラ・マグナと発音、大教室の意）にて、データ同化集中コースが始まった。ざっと300人程度は収容しそうな文字通り大教室である。ブエノスアイレス大学は、1箇所にとまとまったキャンパスがなく、市内のあちこちに点在している。その中でも今回の会場となった1号館は、唯一2号館、3号館

とまとまったキャンパスになっている。ブエノスアイレス市内でも外れの方に位置し、市街中心部からはタクシーで20分程度、ラ・プラタ川沿いを走って主に国内便向けの小さな空港を通り過ぎたところにある。ラ・プラタ川は、世界で最も川幅が広いと聞く。川の向こう岸は全く見えず、水平線を見て海かと思っていたが、川だと聞いて驚いた。川の色が褐色なのは、上流から流れてくる泥によるものだろう。ラ・プラタ川のすぐ上流には巨大なデルタがある。アルゼンチン気象局が用意してくれた1週目の小旅行は、このデルタを船で巡るツアーだった。この巨大なラ・プラタ川は、デルタのすぐ上流で、パラナ川とウルグアイ川に分かれる。パラナ川はアルゼンチンで最長の川で、アマゾンほどではないが大陸規模の川である。このため、ラ・プラタ川に注ぎ込む水の量は膨大で、局所的な旱魃にはびくともしない。本来雨が多い季節だそうだが、滞在した3週間のうち一日もブエノスアイレス市内では雨が降らず、これで水不足になったりしないのか心配したが、アルゼンチン人に言わせると、ラ・プラタ川から飲料水を取っているのだから、川の水位を左右する風向きは重要だけれど、雨が降るかどうかは重要ではないという。日本の感覚とは大違いである。連日の快晴で、まだ春だというのに日中は30度を超える日が続いた。会場の Aula Magna には冷房がなく、暑くてたまらない。長袖を多く用意して半袖が少なかったもので、衣服には困った。

さて、このコースの参加者は主に南米各国の学生や研究者たちで、約100名が集まった。もともと20～30名を想定していたようだが、想定をはるかに越える応募があり、その中で何とか100名を受け入れることにしたようだ。南米各国からの参加者が大多数だったが、数名ほどヨーロッパからの参加者もあった。南米で唯一の現業数値天気予報センターCPTECを擁するブラジルからの参加者は多かった。ブラジル人は、ポルトガル語を話す。聞くところによると、ポルトガル語とスペイン語は一方通行で、ブラジル人はスペイン語を理解できるらしいが、スペイン語を母国語とする他の人たちはポルトガル語が分からない。この原因は発音の違いにあるらしく、スペイン語の発音は分かりやすいのに対し、ポルトガル語は複雑な発音をするのだそうである。

1週目はデータ同化の基礎的な講義で、ほとんどの講義は Eugenia Kalnay 教授がスペイン語で行った。他に当地ブエノスアイレス大学の教授2名 (Celeste

Saulo 及び Ines Velasco) による衛星に関する講義も当然スペイン語で行われた。1週目では唯一、筆者による講義のみが英語だった。筆者も Aula Magna の片隅でスペイン語の講義を聞いたが、言葉はさっぱり分からなかったものの、講義に用いたスライドは英語で、数式は万国共通、さらには内容は著者が習熟するデータ同化に関するものだったので、講義の内容は良く分かった。そのおかげもあってか、だんだんと日を追うごとに専門用語が耳に残るようになり、テンパトウラ (気温)、アシミラシオン (同化)、プロノスティコ (予報) といった単語がいくらか聞こえるようになってきた。スペイン語の母音は日本語と同一であり、日本人にとっては発音しやすい。英語圏の人が話すスペイン語はおかしいのだそうだが、日本人が日本語っぽくスペイン語をまねると、発音はパーフェクトだと喜ばれた。とは言っても、市中での会話には全く使えず、タクシーに乗るにも恐る恐るであった。ある朝タクシーに一人で乗ることとなり、乗り込むと、「ブエンディア！」といわれ、何やら分からない顔をしているともう一度同じことを言われ、はっと、“Buenos Dias” (おはようの意) と言っているのだと分かった。とりあえず「ブエンディア！」と返すとほぼ同時に、事前に覚えこんでいた唯一と言っていいスペイン語の文「ノ アプロ エスパニョール」(No hablo espanol: 私はスペイン語を話しません) を使い、会話を断ち切らざるを得なかったのは、人のよさそうな運転手だっただけに残念だった。

1週目の講義でカバーしたのは、データ同化の基礎理論、最小二乗法、最適内挿法 (Optimum Interpolation: OI)、3次元変分法 (3D-Var)、4次元変分法 (4D-Var)、アンサンブル・カルマンフィルタ (EnKF)、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF, Hunt *et al.* 2007)、放射伝達、リモートセンシングである。各コマは90分の講義で、午前と午後それぞれ2コマずつあった。

講義のほかに、コンピュータ実習も行った。こちらは100人分の端末が用意できず、いくつかのグループに分けた。また、講師が2人いたので、部屋を二つに分け、一つはスペイン語の部屋、もう一つは英語の部屋とした。筆者が担当した英語の部屋には、スペイン語を母国語としない、主にブラジルとヨーロッパからの参加者が集まったが、中には英語を練習する良い機会と、スペイン語を母国語とする参加者もいくらか集まった。実習には、成果発表を課した。1週目の最後

にはいくつかのグループによる中間発表、2週目の最後にはすべてのグループによる最終発表を行った。単に実習を行うだけでなく、得られた結果を理解してまとめ、発表資料も用意する必要があり、たった2週間でもかなりのハードスケジュールとなった。しかし、ハードなだけ得るものも多かったようで、概ね好評であった。実習の内容は、Lorenz の 3 変数モデル (Lorenz 1963) 及び低解像度の全球モデル SPEEDY (Molteni 2003) を使った 3D-Var 及び EnKF の動作比較実験である。Lorenz モデルの方は MATLAB、SPEEDY モデルの方はシェルスクリプトと Fortran90 言語によるプログラムである。1から作り上げるほどの時間はないので、事前に用意して提供したスクリプトやプログラムをまずはブラックボックスとして動作させ、各グループの興味に合わせた実験をそれぞれ行うという形式とした。例えば、観測の位置や要素を変えることによる違いを見たり、3D-Var と EnKF の違いに着目したり、EnKF のアンサンブルメンバー数による違いを見たりするなど、各グループの興味は多岐にわたった。成果発表では、他のグループが行った実験を知ることができ、お互いに刺激になったようだ。時間が非常に限られており、消化不良気味の参加者もいたようだが、そこはグループ内での議論が助けになったし、限られた時間内で最大限学んだことには満足したようだ。

さて2週目は、実習と成果発表の時間以外はすべて招待講師による講義である。月曜の朝にまず口火を切ったのが筆者による気象庁の EnKF に関する講義である。引き続き、Oliver Talagrand (フランス気象研究所) による客観的な性能評価、Carla Cardinali (ECMWF) による観測の情報量、Dirceu Herdies (CPTEC) による観測データインパクトに関する講義があった。2日目は、Hanea (デルフト大学) によるモデル誤差、Shu-Chih Yang (台湾中央大学) による大気海洋結合データ同化、Carla Cardinali (ECMWF) による ECMWF のデータ同化システムに関する講義があった。Carla Cardinali は、イギリスからわざわざこの講義のためにアルゼンチンへ来たそうで、木曜日には帰途に着いて一旦イギリスの自宅へ帰り、翌週に予定されていた韓国済州島での別の会合へ参加するためすぐに反対方向へ旅立つとのことだった。水曜の夜に老舗のカフェ・トルトニでアルゼンチン・タンゴのショーを共に鑑賞するなど、短いブエノスアイレス滞在を最大限楽しんだようだ。

さて3日目は、Dale Barker (イギリス気象局) による3D-VarとEnKFのハイブリッド法及びOliver Talagrandによるアジョイントモデルに関する講義、4日目は、Polavarapu (カナダ環境省) によるバランスに関する講義があった。4日目午後の後半は質問の時間に当てられたが、SPEEDYモデルを使った3D-Varでは地表面気圧と気温の間の相関を考慮していないことから派生して、主にAndrew Lorenc (イギリス気象局)、Dale Barker、Olivier Talagrand、Eugenia Kalnay、及び筆者が中心となって議論となり、3D-Varの背景誤差が静的なものとするのは3D-Varの定義にはないから、ハイブリッド法や、場合によってはMLEF (Maximum Likelihood Ensemble Filter, Zupanski 2005) のようなEnKF法であっても、変分法的な解法を用いる限り、3D-Varと呼べるのではないか、といった変分法対EnKFに関する激しい論争が始まり、受講者一同、目が点になってしまった。「翌週のワークショップではどんな戦いになるかかと思いやられる」と思う人も、「いよいよ楽しくなってきた」と思う人もいたようだ。

本コース最後の5日目には、午前中、Chris Snyder (NCAR) による非ガウス・非線形のデータ同化、Andrew Lorencによるベイズ法のデータ同化及び観測品質管理に関する講義があった。午後には受講者による最終成果発表があり、皆がお互いを称える拍手の中、終了した。

朝は忙しく、先にも述べたように行きはラ・プラタ川沿いをタクシーで会場に向かったが、帰りは大学近くの駅から汽車に乗った。線路はラ・プラタ川とは空港をはさんで反対側を通り、プエノスアイレス中央駅であるレティーロ駅までは2駅、約10分の鉄道の旅である。ドアは手動、開いたままでも走り出す。安全に関しては自己責任である。乗る前に切符を券売機で買い、レティーロ駅を出るときに、出口で駅員に渡

す。券売機は、コインしか使えず、いくつかのコインは受け付けない。25セント玉は、金色のものと銀色のものがあり、銀色のものしか受け付けないことが分かった。汽車は約10分おきに走っており、とても便利。その上、レティーロ駅までの運賃は60セント (約20円) と格安である。タクシーの25ペソ (約800円) とは比較にならない。なお、タクシーの初乗りは3ペソ程度 (約100円) と、もともと物価は低いわけだが、市内の地下鉄が1ペソであることを思えば、それと比べてもなお安い。

データ同化について何も知らなかった人が、たった2週間で、最先端の講義を理解することは、大変難しいはずである。しかし、受講者の学ぼうとする姿勢、少しでも多くを吸収しようとする姿勢には、目を見張るものがあった。これが、今回のデータ同化コースの成功に最も大きな役割を果たしたと言えよう。学ぼうとする意欲が高い学生に対して、講師はより多くの知識を供給できる。受講者たちがどれほどデータ同化に関する理解を深めたかは、講師たちも目を見張るほどの質の高い成果発表で一目瞭然であった。主催したEugenia Kalnay及びCeleste Sauloをはじめ、多くの講師がその成果に喜びを噛み締めることができた。筆者にも第1図のような感謝状を頂き、とてもうれし



Mediante el presente agradecemos a

**Takemasa Miyoshi**

Por el importante aporte al Curso Intensivo de Asimilación de Datos  
realizado entre los días 27 de Octubre al 7 de Noviembre de 2008 en la  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos  
Aires, Argentina.

Dra. Celeste Saulo  
Co-directora

Dra. Eugenia Kalnay  
Co-directora

第1図 データ同化集中コースの講師に対する感謝状。

く思う。

さて、本コースとは直接関係はしないが、本コース最終日の昼すぎ、午後の最終成果発表が始まる前に、ブエノスアイレス大学大気海洋研究センター(CIMA)のセミナー講演に招待された。先方の要望は、気象庁における現業数値予報についてである。先進国の現業数値予報がどのようなものか、どのようなプロダクトをどのように作っているのか、どのような開発をしているのか、といった大局的な視点で、興味を示していた。アルゼンチンは軍事政権が長く続いたせいで、気象局もごく最近までは軍事統制下、つまり空軍部隊の一部として存在していたそうである。2006年末になって、国防省傘下ではあるものの、文民統制への移行が始まった。自由を手に入れ、今後は隣国のブラジルのように、自ら技術開発を行い、数値予報プロダクトを出して天気予報等を行っていきたいという希望と気概が感じられた。大学でのセミナーではあるが、気象局の職員何人かも聴講していた。このセミナー講演は事前の予定にはなく、筆者がブエノスアイレスに到着してから突然招待されたもので、十分な資料を持ち合わせていなかった。このため、気象庁数値予報課の上司や同僚にお願いして、急遽資料を取り寄せた。急な資料要求にも関わらず、数値予報課の小泉数値予報班長をはじめ、小森技官や門脇技術専門官、また米国マイアミ大学滞在中の山口技官にも迅速に資料を寄せていただき、何とか先方も満足する講演ができた。アルゼンチン気象界の今後の発展へ向けたモチベーションの向上に役立てば、これほど嬉しいことはない。今後の発展に期待したい。

### 3. 4次元変分法とアンサンブル・カルマンフィルタの相互比較に関するワークショップ(11月10日~13日)

前節で述べたデータ同化集中コースに引き続き、11月10日から13日の4日間、市街中心部にあるアルゼンチン科学協会にて本ワークショップが開催された。参加者は約130人、うち約40人が南米各国からの参加者である。南米各国からの参加者の多くが、コース受講者であった。日本からは筆者のほか、上野玄太(統計数理研究所)、宮崎和幸(地球フロンティア)、川畑拓也(気象研究所)、本田有機(気象庁数値予報課)、佐藤芳昭(気象庁数値予報課、NCEP滞在中)の各氏が参加した。歴史を感じさせる古い建物で、会場は2階の大講堂、同じ場所で初日のセッション終了後の夜

にはオペラが催されたようで、壁の装飾や舞台のつくりなど、観劇にも適した趣き深い会場であった。しかしながら、ブエノスアイレス大学と同様、冷房機器がなく、余りの暑さに辟易した。2日目からは、開催側の配慮で扇風機が数台設置され、多少快適になった。

ブエノスアイレスの7月9日通りは、世界で最も広い通りなのだそうで、1度の青信号では歩いて渡りきれない。ブエノスアイレスには世界一広い通りと川がある、とブエノスアイレス生まれのEugenia Kalnay教授は誇らしげに言う。サンタフェ通りはいつも人通りも交通量も多く、にぎやかな通りである。会場はサンタフェ通り沿いの7月9日通りと交わったあたりに位置する。筆者が滞在したアパートはサンタフェ通りを挟んで会場の真向かいにあって、ブエノスアイレス大学にはタクシーが必要だったが、今やサンタフェ通りを渡るだけ、徒歩で30秒という至近となった。昼にはアパートに戻って昼食を自分で調理できるほどである。

さて、今回のワークショップは、筆者がこれまで参加したものとは異なり、コンピーナーの力が強い。講演は招待講演のみで、タイトルも与えられており、招待されているのに話題を選ぶこともできない。筆者にも招待状が来たが、与えられたタイトルに関して科学的知見を述べる場であって、自身の研究発表の場ではない、と念を押すものであった。このようにして統制されたプログラムは、非常に見通しの良いものである(第1表)。各セッションは、概ね、座長による概要解説に引き続き、4D-Varサイドの講演、EnKFサイドの講演、という構成になっている。このほか、第1表では省略したが、セッションごとにポスター発表の時間が講演開始前にあり、また講演後には、1時間程度の議論の時間が設けられているのも特徴的である。あたかも4D-VarサイドとEnKFサイドに分かれてディベートを行っているようである。議論は1時間でも足りないほど活発だったが、両サイド間で戦うというよりは、お互いの意見を尊重しながら、情報交換を密に行っているようであった。

ここでは各講演の詳細よりも、全体を通した結論が肝要と心得る。各セッション様々なテーマで、4D-Var対EnKFという観点でお互いの言い分を存分に言い合ったのは、本ワークショップの果実である。結論は、当面共存し、相互に学びあいながらそれぞれ成長するステージにある、ということである。カナダ環境省のMark Buehnerは、カナダの現業システムを

第1表 ワークショップ・プログラム。

|  |  |
|--|--|
| 11月10日月曜日  |  |
| Session 1 : Introductory review  |  |
|  | Status of 4 D-Var E. Andersson (ECMWF)   |
|  | Status of EnKF P. Heutkemer (EC)   |
| Session 2 : Balance Chair : R. Errico (NASA)   |  |
|  | Consideration of dynamical balances R. Errico  |
|  | Balance in 4 D-Var S. Polavarapu (EC)  |
|  | Balance in EnKF J. Kepert (BOM)  |
| 11月11日火曜日  |  |
| Session 3 : Issues of nonlinearity and non-gaussianity Chair : M. Bocquet (Universite Paris-Est and INRIA) |  |
|  | Issues of nonlinearity and non-gaussianity M. Bocquet                                      |
|  | How does 4 D-Var handle this? M. Fisher (ECMWF)  |
|  | How do Kalman Filters handle this? SC. Yang (National Central University, Taiwan)          |
| Session 4 : Model error and data assimilation Chair : Chris Snyder (NCAR)                                  |  |
|  | Treatment of model error in 4 D-Var Y. Tremolet (ECMWF)                                    |
|  | Treatment of model error in EnKF E. Kalnay (U of Maryland)                                 |
| 11月12日水曜日  |  |
| Session 5 : Background error estimation Chair : R. Todling (NASA)  |  |
|  | Filtering of variances and correlations by local spatial averaging L. Berre (Meteo-France) |
|  | Schur product techniques T. Hamill (NOAA)  |
|  | Flow adaptive correlation localization C. Bishop (NRL)                                     |
| Session 6 : Computational Issues Chair : R. Gelaro (NASA)  |  |
|  | Computational issues in general A. Lorenc (Met Office)                                     |
|  | Computational issues for a variational system Y. Sato (NCEP)                               |
|  | An EnKF perspective (any fundamental issues or pitfalls?) J. Whitaker (NOAA)               |
| 11月13日木曜日  |  |
| Session 7 : Validation and intercomparisons Chair : F. Zhang (Penn State University)                       |  |
|  | Validation (proper interpretation of various metrics) O. Talagrand                         |
|  | VAR/EnKF intercomparison for limited area mesoscale models F. Zhang                        |
|  | Appropriate comparisons of full systems M. Buehner (EC)                                    |
| Session 8 : Synergistic Chair : I. Szunyogh (U of Maryland)  |  |
|  | Synergistic approaches I. Szunyogh   |
|  | How 4 DVAR can benefit from or contribute to EnKF (a 4 DVAR perspective) D. Barker         |
|  | How EnKF can benefit from or contribute to 4 D-Var (an EnKF perspective) T. Miyoshi (JMA)  |

用いた対等な条件での詳細な比較について発表した。両者はほぼ同等の性能を示しており、どちらが優れているとは言い切れなかった。カナダでは、4 D-Varを高解像度決定論的予報のデータ同化システムとして現業運用すると同時に、観測に乱数を与える EnKF

(PO法)もアンサンブル予報システムとして現業運用している。解像度の違いなどがあり、現業システムでは両者を対等に比較できないので、Buehnerらは条件を可能な限りそろえて、対等な比較を試みたのである。このような現業システムを用いた対等な比較は例がなく、本ワークショップの中でも大変貴重な結果であった。4 D-Varには現業経験で培われた実績があり、変分法バイアス補正のような高度な技術も適用されている。EnKF開発において、このような周辺技術の適用は、4 D-Varから学びながら成長していく好例であると、本ワークショップ最後の講演で著者が主張したところである。

現時点で、4 D-VarとEnKFのどちらがよいとは言いきれない。各セッションでお互いの特徴、利点や欠点を確認した。また、Dale Barkerが講演したような両者のハイブリッドもありうる。現時点では、両方のシステムを現業レベルで維持開発していくのも止むを得まい。また、それにはコストがかかるが、両方維持開発すること自体が相乗効果を生み出すので、必ずしも余計なコストをかけているとも言いきれない。

しかしながら、一方を選んだほうが明らかに効率的だから、いつかの時点で、どちらか一方の選択に迫られるだろう。その際に、様々な状況や理由から、4 D-Varを選ぶセンター、EnKFを選ぶセンターが出てきても不思議はない。4 D-Varを持たない CPTEC

などのセンターは、初期開発コストが低い EnKF に対象を絞っている。気象庁を含む、既に 4D-Var を運用しているセンターは、当面 4D-Var の維持を選ぶ可能性が高い。というのも、アジョイントモデルの開発には多大な初期投資が必要だが、既に構築してしまえば、比較的低コストで維持できるからである。大幅な予報モデルの更新等により、再度アジョイントモデルを 1 から開発するとなったとき、そのようなセンターでも 4D-Var から EnKF への乗り換えが起こるかもしれない。その時期を予測することは難しいが、大体 10 年以内には選択に迫られるのではなかろうか。今後も、4D-Var と EnKF 双方の専門家を集め、最先端の情報や意見の交換を行うこのような会議は、重要な役割を果たすだろう。その意味で、今回のワークショップは、お互いにお互いの意見を尊重する、良いスタートになったと思う。

#### 4. 所感

一つの会議に出席するために、3 週間もの長期の出張をしたのは初めてだった。滞在先も、通常のホテルではなく、アパートの一室を借り、ブエノスアイレスの住人となったように、スーパーで買い物をし、時には自分で料理した。食材の違いに驚いたり、マテ茶の旨味に気づいたり、文化を感じることもできた。

今回、4D-Var 対 EnKF という昨今現業開発でも研究でも熱い議論となっている話題を正面から扱う初めての会議だった。世界から第一線の研究者が集まると共に、WMO 主催ということで世界の現業センターの開発者も多く集まり、分野を限定しているだけに中身の濃い議論ができた。今後も双方の発展と共に繰り返し議論されていくテーマだけに、今回の開催は、最初のスタートとして良いマイルストーンとなったと思う。結論としては、現時点でいろんな立場の人が合意できる点に達したと思う。つまり、実用経験豊富な 4D-Var、開発コストの面で大きな利点がある今後期待されている EnKF の双方とも、まだ多くの改善の余地があって、当面は両方を維持開発することで相乗効果が期待できる、というものである。今回のワークショップでの結論は、わが国の気象庁がこれまで取り組んできた開発の方向性の正しさを裏付けると共に、今後もこの体制を維持していくことの重要性を訴えるものだと見えるだろう。

最後に、本出張に際して、国際学術交流委員会より渡航費用を援助いただいたことに対し、深く感謝いた

します。また、本出張を実現するためにご尽力いただいた気象庁の皆様には、心より感謝いたします。

#### 略語一覧

- BOM : Bureau of Meteorology オーストラリア気象局  
 CIMA : Centro de Investigaciones del Mar y la Atmosfera ブエノスアイレス大学海洋大気研究センター  
 CPTEC : Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos ブラジル数値予報センター  
 EC : Environment Canada カナダ環境省  
 ECMWF : European Center for Medium range Weather Forecasting 欧州中期気象予報センター  
 EnKF : Ensemble Kalman Filter アンサンブルカルマンフィルタ  
 INRIA : Institut National de Recherche en Informatique フランス国立計算機科学と制御研究所  
 JMA : Japan Meteorological Agency 気象庁  
 NASA : National Aeronautics and Space Administration 米国航空宇宙局  
 NCAR : National Center for Atmospheric Research 米国大気研究センター  
 NCEP : National Centers for Environmental Prediction 米国環境予測センター  
 NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration 米国海洋大気庁  
 NRL : Naval Research Laboratory 米国海軍研究所  
 LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ  
 SPEEDY : Simplified Parametrization, primitive-Equation Dynamics (簡略な物理過程を用いたプリミティブ方程式全球モデルの名称)  
 MATLAB : MATrix LABoratory (数値解析ソフトウェアの名称)  
 PO : Perturbed Observation 摂動観測  
 THORPEX : The Observing System Research and Predictability Experiment 観測システム研究及び予測可能性実験  
 WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関  
 WWRP : World Weather Research Programme 世界天気研究計画  
 3D-Var : 3-Dimensional Variational method 3次元変分法  
 4D-Var : 4-Dimensional Variational method 4次元変分法

#### 参考文献

Gustafsson, N., 2007 : Discussion on '4D-Var or EnKF?'

- Tellus, **59A**, 774-777.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich and I. Szunyogh, 2007 : Efficient Data Assimilation for Spatiotemporal Chaos : A Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Physica D*, **230**, 112-126.
- Kalnay, E., H. Li, T. Miyoshi, S.-C. Yang and J. Ballabrera-Poy, 2007 a : 4D-Var or Ensemble Kalman Filter? *Tellus*, **59A**, 758-773.
- Kalnay, E., H. Li, T. Miyoshi, S.-C. Yang and J. Ballabrera-Poy, 2007 b : Response to the discussion on “4 D-Var or EnKF?” by Nils Gustafsson. *Tellus*, **59A**, 778-780.
- Lorenz, A., 2003 : The potential of the ensemble Kalman filter for NWP—a comparison with 4D-Var. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 3183-3203.
- Lorenz, E. N., 1963 : Deterministic Nonperiodic Flow. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130-141.
- Molteni, F., 2003 : Atmospheric simulations using a GCM with simplified physical parameterizations. I : model climatology and variability in multi-decadal experiments. *Clim. Dyn.*, **20**, 175-191.
- Zupanski, M., 2005 : Maximum likelihood ensemble filter : Theoretical aspects. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1710-1726.
-