

アンサンブル予報の利用に関するワークショップ出席報告*

楠 昌 司**

1. はじめに

2000年10月16日から20日まで中国の北京において、世界気象機関(WMO)主催による「アンサンブル予報の利用に関するワークショップ」が開催された。中国気象局がこの会議を招致し、中国気象局の講堂が会場となった。本会議の目的は、アンサンブル予報の出力結果の解釈、利用、応用に関する最新の知見を共有し、アンサンブル予報に関して今後の各国の気象業務や研究等の促進を図ることであった。数日の短期予報から季節予報までが主な対象であった。

開会式に続き9つの分科会があり、最後にパネルディスカッションによる全体討論とまとめがあった。各分科会では冒頭に約1時間の基調講演があり、その後1人あたり約20分の一般講演があった。

2. 参加者

参加者は、各国の気象業務に従事している現場の予報官、現業予報システムの開発・研究者がほとんどで、研究所や大学の研究者は少なかった。中国以外から参加した21名の内訳を第1表に示す。この中には講演の義務がなく、聴講のみの参加者もいた。この会議はアンサンブル予報の普及、啓蒙の場でもあった。なお、世界水準の数値予報システムを有するオーストラリアからの参加者がなかったことが不思議であった。これは同時期にメルボルン市のオーストラリア気象局で「系統誤差に関するワークショップ」が開催されていた為だと推察される。

中国側からは中国気象局本部関係者が約20名、中国気象局地方官署から約20名参加した。中国国外の参加

者も含めると、合計約60名が参加した(第1図)。中国西部の新疆維吾爾(シンチャンウイグル)自治区や中国南部の海南島からはるばる参加した人もいた。中国気象局としてもこの会議を、アンサンブル予報を知る研修の場と考えていたようである。

WMOの世界気象監視(WWW)計画のMartelletが会議の運営と纏め役を担当した。また、WWW計画の責任者であるSchieslも会議の後半から参加した。中国側の世話役は中国気象局のChengであった。

3. アンサンブル予報とは?

会議内容の報告の前に、アンサンブル予報の概念とそれに関係した用語を解説しておく。

数値予報システムで大気の前報を行うには、予報モデルと初期条件が必要である。予報には必ず不確実性がある。第1の原因として、初期条件の不確実性がある。気象庁などの数値予報センターでは、ある時刻における大気の3次元的な構造を把握するために、観測データを用いた客観解析を行っている。数値予報では、予報モデルの初期条件にこの客観解析を使っている。ところが客観解析は大気の真の状態の推定値にすぎず、誤差を必ず含む。初期条件がわずかでも異なっていると、その違いは予報時間とともに増大する。これは、大気のカオス性と呼ばれ、大気的非線形性に本質的に起因する。このような初期条件の不確実性による予報の不確実性を見積もるために、客観解析に複数の誤差を与えて初期値を作り、複数の予報を行うアンサンブル予報という手法がとられる。単一の予報による決定論的な予報とは異なり、気象現象の発現頻度ないし生起確率が得られる。個々の予報をメンバーと呼ぶ。メンバーの総数をアンサンブルサイズと呼ぶ。全メンバーの平均値はアンサンブル平均と呼ばれ、起こりうる大気状態の最も確からしい推定値となる。予報のばらつきはスプレッドと呼ばれ、全メンバーの標準偏差

* Report on "Workshop on Use of Ensemble Prediction".

** Shoji Kusunoki, 気象庁気候・海洋気象部,
E-mail: s-kusunoki@met. kishou. go. jp

© 2001 日本気象学会

第1表 中国以外からの21名の参加者. 氏名のアルファベット順.

氏名	国籍	所属	講演種
Abdou, A.	エジプト	エジプト気象局	
Akesson, B. O.	スウェーデン	スウェーデン気象水文研究所	一般
Ambar, B.	アルジェリア	国家気象局	
Cavalcanti, I.	ブラジル	天気予報・気候研究センター	一般
Cherifi, A.	モロッコ	国家気象局	
da Silveira, R.	ブラジル	国家気象研究所	
Garcia-Mendez, A.	スペイン	欧州中期予報センター	基調
Garcia Skabar, Y.	アルゼンチン	国家気象局	
Kasimova, F.	ウズベキスタン	水文気象管理局	
Kusunoki, S.	日本	気象庁	一般
Martellet, J.	フランス	世界気象機関	
Mungai, J. G.	ケニヤ	ケニヤ気象部	
Muravev, A.	ロシア	ロシア水文気象センター	一般
Mylne, K.	英国	英国気象局	基調
Nicolau, J.	フランス	フランス気象局	基調
Schiessl, D.	ドイツ	世界気象機関	
Simmers, A. G.	ニュージーランド	気象サービス	一般
Soman, M. K.	インド	インド熱帯気象研究所	一般
Tennant, W. J.	南アフリカ	南アフリカ気象局	基調
Tracton, S.	米国	米国環境予測センター	基調
Wilson, L. J.	カナダ	カナダ気象センター	



第1図 中国気象局の正面玄関での記念撮影.

で定義されることが多い。アンサンブル平均の誤差は、アンサンブルサイズが大きくなるほど単一予報に比べ小さくなる傾向がある。これがアンサンブル予報の大きな利点の1つである。もう1つの利点は、スプレッドの大きさにより、事前に予報精度の評価ができることである。一般に、スプレッドが小さい場合、予報精度が高いと判断する。アンサンブル予報は世界各国で実用化されており、欧州中期予報センター(ECMWF)とカナダ気象センター(CMC)で10日予報、米国環境予測センター(NCEP)で14日予報、日本の気象庁で1か月予報が行われている。

予報に不確実性をもたらす第2の原因は、予報モデルの不確実性である。即ち予報モデルは完全でなく、

分解能の不足や物理過程が充分でないこと等から生ずる様々な誤差がある。予報モデルの不確実性を考慮するため、複数の予報モデルの予報結果を集めて使うマルチモデル・アンサンブル (multi-model ensemble) という手法が最近非常に注目されている。マルチモデル・アンサンブルの予報精度が、単独モデルの予報より良くなるという研究や報告が多数ある。第6節にマルチモデル・アンサンブルに関する最近の動向をまとめた。

4. 会議の内容

開会式では、会議の中国側運営役である中国気象局 Chen, 中国気象局次長 Yuen, WMO 側運営役 Martellet の挨拶があった。Yuen は中国でも2001年以降に力学的1か月予報、さらに力学的季節予報を実現したいとの抱負を述べた。

4.1 分科会1 アンサンブル予報システムの概要

基調講演としてECMWFのGarcia-MendezがECMWFのアンサンブル予報システム Ensemble Prediction System (EPS) を紹介した。51メンバーで10日予報を行っている。出力はAtger (1999a) によるチュービング Tubing というクラスター分析の一種を使用しており、予報の各日ごとにクラスタを求めている。モデルの水平分解能を上げると予報成績が向上するが、その為には客観解析の水平分解能も上げる必要

がある。初期値作成には未来の大気の誤差から求めた特異ベクトル (SV) を用いている。中高緯度を予報対象としているため、30°N~30°Sの熱帯には誤差を与えていない。熱帯低気圧の中期予報のために、熱帯にどのような初期誤差を与えるかは今後の研究課題である。

4.2 分科会2 アンサンブル予報出力の統計的解釈

基調講演としてCMCのWilsonが、アンサンブル予報の注意点を指摘した。アンサンブル平均は有用であるが、問題点や、利用に際し注意すべき点もある。

1. 日々のアンサンブル平均の時系列に、物理的意味はない。
2. 日々のアンサンブル平均の時系列は、モデルの軌跡ではない。
3. アンサンブル平均では、極端な現象を予測できない。

中国関係者、特に地方官署からの参加者でアンサンブル予報に馴染みがない人が多かったため、急遽NCEPのTractonが入門者用講演を行った。彼はアンサンブル予報の基本原理解説した。続いて英国気象局(UKMO)のMylneは1999年12月にフランスを襲った嵐の予報例を使って、アンサンブル予報の有用性を強調した。UKMOやECMWFのアンサンブル予報によるアンサンブル平均では予報に失敗したが、メンバーの中には嵐の到来を示唆するものがあった。即ち、アンサンブル予報は極端な気象現象の可能性を示唆していたのであり、警戒すべき情報を含む場合がある。これは、単一予報では不可能である。1997年当時、英国気象局は単一予報を行っていたが、同年に英国を襲った嵐を予測することができなかった。

一般講演としてロシアのMuravevがロシアの30日予報システムとその出力プロダクトについて紹介した。初期時刻が異なる複数の客観解析値を初期条件に用いるLagged Average Forecast (LAF)法を用いた5メンバーによるアンサンブル予報で、まだ実験段階にある。

4.3 分科会3 アンサンブル予報の検証

基調講演としてCMCのWilsonが検証の手法について解説した。アンサンブル予報では確率的な予報表現となるため、ブライアー・スコア、信頼度(Reliability), Relative Operating Characteristics (ROC)等の検証法が必要であることを述べ、その手法を解説した。

4.4 分科会4 予報官のためのアンサンブル予報の出力、確率予報、信頼度の最大限利用

基調講演としてフランス気象局のNicolauがフランス気象局の7日予報で使用しているクラスタ分析の一種であるチューピングを解説した。チューピングは極端な現象(Extreme Events)の可能性を見積もることが、予報の信頼性(Confidence level)を与えることができる。フランス気象局では、予報の信頼性も発表している。

一般講演としてUKMOのMylneは、ECMWFの10日予報の英国気象局による現業表示システムを紹介した。特定の等高度線や等温線を全51メンバー分表示したスパゲッティのように見えるスパゲッティ図(Spaghetti Charts)、全51メンバーの分布図を示した郵便切手のシートのように見える郵便切手図(Postage Stamp Charts)等がある。確率予報は信頼度曲線で修正している。気温が低くかつ風が強いという結合確率も表示できる。ある程度の確率で、極端な現象の可能性が表現されていれば、警報を公表する。

一般講演としてスウェーデン気象局のAkeessonは、ECMWFの10日予報のスウェーデン気象局による現業表示システムを紹介した。気温、降水量等の時系列では、各予報時刻において最大値、最小値、アンサンブル平均値の他に、スプレッドから計算した予報の信頼性も表示している。

4.5 分科会5 利用者のためのアンサンブル予報とその信頼度(経済的応用)

基調講演としてUKMOのMylneはアンサンブル予報の持つ経済効果について報告した。アンサンブル予報は確率予報が可能である。確率予報は、ユーザーがその確率に応じて対処行動を取ることでより経済的な利益を得ることができる。確率予報の信頼度、ROC、費用損失モデルによる損失総額の軽減効果などを解説した。

4.6 分科会6 マルチモデル・アンサンブル、スーパー・アンサンブルをどう最大限利用するか?

基調講演としてUKMOのMylneはマルチモデル・アンサンブル実験について報告した(Evans *et al.*, 2000; Mylne *et al.*, 2000)。UKMOとECMWFの全球モデルを用いて10日予報を行った。各モデルで独自のデータ同化を行い2種類の客観解析値を作った。これをマルチ解析(multi-analysis)とも言う。特異ベク

トル法で UKMO のモデルでは27, ECMWF のモデルでは51メンバーの予報を行った。両者を合わせた78メンバーの予報成績が最も良かった。その効果は冬の北大西洋と欧州域で大きかった。

Mylne はブアマンズ・アンサンブル (Poor man's ensemble) についても紹介した。独自の予報システムを持たない者が、複数の数値予報センターによる単一予報の結果を集め、マルチモデル・アンサンブル予報を行おうという試みである。「安価」、「低価格」ないし「経済的」アンサンブル、あるいはそのままブアマンズ・アンサンブルと言うべきであろう。利点は、(1) スーパーコンピュータなどの高価な計算機資源が不要で安価。(2) マルチモデル・アンサンブルなので予報モデルの不確実性が考慮される。(3) マルチ解析なので初期条件の不確実性が考慮される。(4) 極端な現象の予測に有効である。欠点は、(1) 予報の提供機関が少ないので、アンサンブルサイズが小さい。(2) 初期条件の違いが小さく、予報期間が長くなってもスプレッドが大きくなる。 (3) モデルによって予報精度が大きく違う場合は等確率では扱えない。何らかの重みが必要。

Mylne はスーパー・アンサンブル (Super ensemble) についても紹介した。これは米国フロリダ州立大学の Krishnamurti が提唱している方法である (Krishnamurti *et al.*, 1999)。多数のモデルの予報結果を集める点では、マルチモデル・アンサンブルに似ているが、確率予報ではなくアンサンブル平均による決定論的予報を行うこと、過去の予報と観測値により重回帰を行い Model Output Statistics (MOS) 的な修正を行うことが異なる。重回帰により最良の決定論的予報を目指す。

一般講演としてニュージーランド気象サービスの Simmers は、独自の予報システムを持たない国の予報業務の苦勞を紹介した。現在 NCEP のプロダクトをインターネットでダウンロードして利用している。ブアマンズ・アンサンブルに興味を持っている。

4.7 分科会7 アンサンブル予報の短期予報への応用

基調講演として NCEP の Tracton はアンサンブル予報の短期予報への応用について論じた (Hamill and Colucci, 1997, 1998)。NCEP の2つの領域モデルを使ったマルチモデル・アンサンブル実験を行った。初期条件は、全球モデルのブリーディングモード (BGM) を境界値として与えて、領域 BGM を作った。BGM は

過去の大気の誤差成長から初期誤差を見積もる方法である。2000年1月に NCEP があるワシントンは大雪に見舞われたが、単一予報である現業領域モデルは予報できなかった。ところが、このマルチモデル・アンサンブル実験ではいくつかのメンバーがこの大雪を予報していた。今後、短期アンサンブル予報では、極端な現象の出現確率を示すことにより、警報を発表することが可能となろう。ただ、その警報に対する対処方針を決めるのは政策決定者であり、我々気象関係者の役割ではない。

一般講演としてフランス気象局の Nicolau は、フランス気象局でも短期アンサンブル予報システムを実験中であるとの報告した。初期条件の作り方としては BGM だが、それに高周波数で小さいスケールを取り出すデジタルフィルターを組み合わせた方法を開発している。

4.8 分科会8 中期アンサンブル予報の応用

基調講演として南アフリカ気象局の Tennant は南アフリカ気象局の予報システムの紹介を行った。モデルは米国の海・陸・大気研究センター (COLA) から移植した。BGM 法で16メンバーの14日予報、LAF 法で9メンバーの30日予報を行っている。初期条件は ECMWF の客観解析を使用している。季節予報は以下の複数の手順で行っている。(1) 統計的に海面水温 (SST) を予報。(2) SST 偏差を固定し大気モデルを積分。(3) 統計的に南アフリカの気温、降水量、確率予報などを予報。日本の気象庁の1か月と同じように気温と降水量に関して、平年以下、平年並、平年以上の3カテゴリの確率を発表している。

一般講演として中国気象局の Yang は、中国気象局の週間アンサンブル予報の業務実験を紹介した。SV 法で32メンバーを作っているが、予報のスプレッドが小さすぎる問題がある。

一般講演として CMC の Wilson は、CMC で現在進行中のアンサンブル予報実験を紹介した。2つの全球モデルで10日予報を行う。各全球モデルは積雲対流などの物理過程を様々に変えて、8つの種類を作った。それぞれのモデルでデータ同化を行い、全部で16個の客観解析値を作った。即ち、16メンバーのマルチモデル、マルチ解析・アンサンブル実験である。結果は解析中である。

4.9 分科会9 延長、長期アンサンブル予報の応用

基調講演として ECMWF の Garcia-Mendez は、ECMWF が実験的に行っている大気海洋結合モデル

による季節予報実験の紹介を行った。LAF法による約30メンバーのアンサンブル予報である。1997、98年のエルニーニョ、ラニーニャ時の予報が好成績であったことを示した。

一般講演として筆者は、気象庁の1か月予報、エルニーニョ予報、大気の詳細予測可能性実験、長期予報の将来計画について紹介した。1か月予報の精度は気候値より良く、第1週の寄与が大きいことを述べた。NCEPのTractonよりNCEPでも同様な傾向がある事が報告された。

中国気象局のGongは、初期条件に付加する誤差について発表した。彼は初期条件以前の大気状態の軌跡に近づくような誤差を選ぶべきだと主張した。これは4次元変分法に近い概念で、その意味を巡って大論争が起こった。最終的には、BGM法やSV法概念と本質的に同じであろうという見解に落ち着いた。

ブラジル天気予報・気候研究センター(CPTEC)のCavalcantiは、同センターの予報システムを紹介した。短期予報では、CPTECとCOLAで共同開発した大気モデルを使用している。領域モデルはNCEPのモデルを使用している。実験的な季節予報はLAF法による25メンバーのアンサンブル予報である。大気に与えるSSTは、太平洋についてはNCEPの予報値、大西洋は統計的に求めたもの、他の海域は持続予報を使用している。

インド熱帯気象研究所のSomanは、夏のインドモンスーンの季節予報可能性について発表した。風などの循環場の予報可能性は高いが、降水量は困難である。

5. パネルディスカッションと勧告

パネリストは、数値予報センターを代表してNCEPのTracton、UKMOのMylne、日本の気象庁の筆者、独自の数値予報システムを持たない国を代表してニュージーランド気象サービスのSimmers、エジプト気象局のAbdouが選ばれた。司会はWMOのMartelletであった。会議の成果としてWMOに提出される勧告(Recommendation)について議論し、以下の素案がまとめられた。

(1) 気象予報と言えばアンサンブル予報を指す時代が来ている。職業的予報官や一般大衆の革命的な意識改革が必要である。特に、決定論的な単一予報に長く慣れ親しんでいる世代の意識改革が重要である。国内での研修、普及活動の推進、国際的な研修、普及活動の推進が重要である。

(2) 新しいアンサンブル予報の概念が注目されている。

マルチモデル・アンサンブル：モデルの不確定性
マルチ解析・アンサンブル：客観解析の不確定性
プアマズ・アンサンブル：安価なアンサンブル予報

スーパー・アンサンブル：重回帰による最良の決定論的予報

これらの手法を発展させ高度化するには、データの効率的な交換が不可欠である。そのための通信手段を開発し、国際的な協力体制を構築する必要がある。

(3) アンサンブル予報の情報量は多量である。また、その確率的表現も様々な形式が可能である。従って、各国がそれぞれのユーザーの要求に合ったプロダクトを開発することが必要である。

6. マルチモデル・アンサンブルに関する最近の動向

本会議での議論を含め、マルチモデル・アンサンブルに関する最近の動向をまとめた。マルチモデル・アンサンブルにも様々な種類がある。

単独の数値予報センターで行う場合、予報モデルの物理過程などを変えて複数のバージョンを作る方法が取られる。カナダのCMCで研究と実験が行われている。元になるオリジナルの予報モデルを1つ使う場合と2つ使う場合がある。

(1) 1つのモデルを使う方法。Houtekamer *et al.* (1996)は、CMCのモデルで水平拡散、対流と放射、重力波抵抗、地形などの方式が異なる8つのバージョンを作り、それぞれのバージョンでデータ同化を行い8つの客観解析を行った。それぞれの客観解析を初期条件として8つのバージョンで8メンバーの15日予報を行った。得られた予報のスプレッドはあまり大きくなかった。この方式は複数の客観解析値を作っていることから、マルチ解析・アンサンブルでもある。

(2) 2つのモデルを使う方法。Houtekamer *et al.* (1996)の方法を拡張したもので、元となるモデルを2つ使用する。第4.8節のWilsonの講演内容を参照。

複数の数値予報センターの予報結果を使用する場合、2つの方法がある。異なる数値予報センターの客観解析を初期値とするので、マルチ解析・アンサンブルでもある。

(3) プアマズ・アンサンブル。各センターからただ1つの予報を集める方法である。安価だが、アンサ

ンブルサイズが小さい問題がある。第4.6節の Mylne の講演内容を参照。Atger (1999b) と Ziehmann (2000) は ECMWF, NCEP, UKMO, ドイツ気象局の 4 メンバーのマルチモデル。アンサンブルによる 6 日予報を行ない、欧州域における 500 hPa 高度の予報精度を調べた。Atger (1999b) は、マルチモデル・アンサンブルは、ブライアー・スコアや ROC による検証では個々のモデルより優れていることを示した。Ziehmann (2000) もマルチモデル。アンサンブルでは高度の誤差が個々のモデルより小さくなることを示した。Goerss (2000) は数か国の予報を合わせて使うと、大西洋のハリケーンや太平洋の台風の進路予測の精度が向上することを示した。

(4) 複数の数値予報センターのアンサンブル予報を使う方法。第4.6節の Mylne の講演内容を参照。Evans *et al.* (2000) と Mylne *et al.* (2000) によれば、ECMWF と UKMO の 2 つのアンサンブル予報システムを集めた 10 日予報では、個々のシステムより良い精度が得られる。現在、このシステムは試験運用段階にある。

力学的季節予報でも複数の数値予報センターのアンサンブル予報を用いると、予報精度が向上する可能性があることが報告されている (Palmer *et al.*, 2000; 鬼頭, 1999; Mo and Straus, 1999; Doblas-Reyes *et al.*, 2000)。Palmer *et al.* (2000) の見積もりによれば、マルチモデル・アンサンブルによる精度の向上の内、1/3 が異なったモデルを使用した寄与で、残りの 2/3 がアンサンブルサイズを増加したことによる寄与である。確かに熱帯では異なったモデルを使用する効果が顕著だが、中高緯度ではアンサンブルサイズが小さすぎて、統計的に有意な議論ができないという研究結果もある (Doblas-Reyes, 2000)。なお既に、マルチモデル・アンサンブルにより準ルーチ的な季節予報を公表している機関もある (Mason *et al.*, 1999)。

大気海洋結合モデルによるエルニーニョ予報でも、複数の結合モデルによる SST 予報の結果のアンサンブル平均が最良の予報となるという報告もある (Kirtman and Shukla, 2000)。

短期予報の分野では既に 1970 年代から複数の単独予報を集めて使うと、予報精度が向上することが知られていた。Vislocky and Fritsch (1995) の冒頭にレビューがあるので参照されたい。1990 年代にも重回帰 (Brown and Murphy, 1996) や領域モデルの MOS (Vislocky and Fritsch, 1995) を用いたマルチモデル・アンサンブルの研究がなされた。Hamill and Colucci

(1997, 1998) は NCEP の 2 つの領域モデルを使い、それぞれでアンサンブル予報を行うマルチモデル。アンサンブルを試みた。詳しくは第4.7節の Tracton の講演内容を参照。

スーパー・アンサンブル (第4.6節) は、プアマンズ・アンサンブルの一種でもある。過去の予報と観測値による重回帰分析により、予報を修正して最良の決定論的予報を目指す。Krishnamurti *et al.* (1999) によれば、アジアモンスーン域の季節予報、全球の下層風の 3 日予報、ハリケーンの 3 日予報の精度が向上する。

予報モデルの不確定性を単一のモデルで導入する方法がある。Buizza *et al.* (1999) は ECMWF のアンサンブル予報において、モデルの数値積分の途中で物理過程に時間的および空間的ランダムな揺らぎを与えた。その結果、雨の 10 日予報の精度が向上した。ECMWF ではすでに 1998 年 10 月からこの方法を現業化している。

マルチモデル・アンサンブルは決して万能ではない。複数のモデルの結果を集めさえすれば、必ず精度が向上するというわけではない。予報の対象領域を欧州などに限定すると、マルチモデル・アンサンブルの方が逆に個々のモデルより精度が落ちることがある (Doblas-Reyes, 2000)。何よりも単独モデルの精度向上が、最も重要であることを心に銘記すべきである。そのためには、物理過程の改良などの基礎的な研究開発をおろそかにしてはならない。

7. 見学

中国気象局内を見学する機会を得た。衛星センター、計算機センター内にある IBM, CRAY, 中国国産等の膨大な数のスーパーコンピュータに圧倒された。予算はかなりあるらしい。予報の現業室は体育館のような大部屋で、短期予報、台風予報、中期予報までのセッションが入っていた。4 m×3 m ぐらいの巨大なスクリーンの前にはこれまた大きな楕円卓があって、予報会報に使うらしい。各人の作業机はパネルで仕切られ、主にシリコングラフィックスのワークステーションで作業が行われていた。

8. 所感

予報プロダクトに関する実務的な議論が中心であろうと予想していたが、話題はかなり広く思っていたよりも科学的な会議であった。講演時間がゆったり取っており、実にアットホームな雰囲気の中で議論が進め

られた。これは、参加者のアンサンブルサイズが小さかったことによる。中国以外から参加の十数名とは会議中、食事中を問わず議論したり世間話をする機会があり、楽しい時間を過ごすことができた。

略語表

BGM : Breeding of Growing Mode, 初期値の作成方法の1つ

CMC : Canadian Meteorological Centre, カナダ気象センター

COLA : Center for Ocean-Land Atmosphere studies, 海・陸・大気研究センター, 米国

CPTEC : Centre de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos ブラジル天気予報・気候予報センター

CRAY : コンピューターメーカー

ECMWF : European Centre for Medium-range Weather Forecasts, 欧州中期予報センター

EPS : Ensemble Prediction System, アンサンブル予報システム

IBM : コンピューターメーカー

LAF : Lagged Average Forecast, 初期値の作成方法の1つ

MOS : Model Output Statistics

NCEP : National Center for Environment Prediction, 米国環境予測センター

ROC : Relative Operating Characteristics

SST : Sea Surface Temperature, 海面水温

SV : Singular Vector, 特異ベクトル, 初期値の作成方法の1つ

UKMO : United Kingdom Meteorological Office, 英国気象局

WMO : World Meteorological Organization, 世界気象機関

WWW : World Weather Watch, 世界気象監視

参考文献

- Atger, F., 1999a : Tubing : An alternative to clustering for the classification of ensemble forecasts, *Wea. Forecasting*, **14**, 741-757.
- Atger, F., 1999b : The skill of ensemble prediction systems, *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 1941-1953.
- Brown, B. G. and H. Murphy, 1996 : Improving forecasting performance by combining forecasts : the example of road-surface temperature forecasts, *Meteor. Appl.*, **3**, 257-265.
- Buizza, R., M. Miller and T. N. Palmer, 1999 : Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 2887-2908.
- Doblas-Reyes, F. J., M. Déqué and J. -P. Pielieuvre, 2000 : Multi-model spread and probabilistic seasonal forecast in PROVOST, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 2069-2087.
- Evans, R. E., M. S. J. Harrison, R. J. Graham and K. R. Mylne, 2000 : Joint medium-range ensemble from the Met. Office and ECMWF systems, *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3104-3127.
- Goerss, J. S., 2000 : Tropical cyclone track forecasts using an ensemble of dynamical models, *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1187-1193.
- Graham, R. J., A. D. L. Evans, K. R. Mylne, M. S. J. Harrison and K. B. Robertson, 2000 : An assessment of seasonal predictability using atmospheric general circulation models, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 2211-2240.
- Hamill, T. M. and S. J. Colucci, 1997 : Verification of Eta-RSM short-range ensemble forecasts, *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1312-1327.
- Hamill, T. M. and S. J. Colucci, 1998 : Evaluation of Eta-RSM ensemble probabilistic precipitation forecasts, *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 711-724.
- Houtekamer, P. L., L. Lefaire, J. Derome, H. Ritchie and H. L. Mitchell, 1996 : A system simulation approach to ensemble prediction, *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1225-1242.
- Kirtman, B. P. and J. Shukla, 2000 : Current status of ENSO forecast skill. A report on the Climate Variability and Predictability (CLIVAR) Numerical Experimentation Group (NEG), http://www.clivar.org/publications/wg_reports/wgsip/nino3/report.htm
- 鬼頭昭雄, J. Shukla, T. Palmer, K. Sperber, 1999 : 季節予報モデル相互比較実験 (SMIP) 結果, 1999年秋季大会講演予稿集, 日本気象学会, B308.
- Krishnamurti, T. N., C. M. Kishtawal, T. E. LaRow, D. R. Bachiochi, Z. Zhang, C. E. Willford, S. Gadgil and S. Surendan, 1999 : Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble, *Science*, **285**, 1548-1550.
- Mason, S. J., L. Goddard, N. E. Graham, E. Yulaeva, L. Sun and P. A. Arkin, 1999 : The IRI seasonal climate prediction system and the 1997/98 El Niño event, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 1853-1873.
- Mo, R., and D. M. Straus, 1999 : Statistical verification of dynamical seasonal prediction, COLA Technical Report 73, 73pp.
- Mylne, K. R., R. E. Evans and R. T. Clark, 2000 :

- Multi-model multi-analysis ensembles in quasi-operational medium range forecasting, Forecasting Research Scientific Paper No. 60, The United Kingdom Meteorological Office, 25pp.
- Palmer, T., Čedo Branković and D. S. Richardson, 2000 : A probability and decision-model analysis of PROVOST seasonal multi-model ensemble integrations, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 2013-2033.
- Vislocky, R. L. and J. M. Fritsch, 1995 : Improved model output statistics forecasts through model consensus, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **76**, 1157-1164.
- Ziehmann, C., 2000 : Comparison of a single-model EPS with a multi-model ensemble consisting of a few operational models, *Tellus*, **52A**, 280-299.
-
-