

## マルチセンターグランドアンサンブルでみる2005/2006年の冬

筑波大学生命環境科学研究科

(現所属：地球科学技術総合推進機構/気象研究所)

松枝未遠

気象庁数値予報課

(現所属：気象庁地球環境・海洋部気候情報課)

経田正幸

筑波大学計算科学研究センター

田中博

気象庁数値予報課

(現所属：気象庁予報部業務課)

露木義

### 1. はじめに

1990年代はじめに欧州中期予報センター(ECMWF; Molteni et al. 1996)と米国環境予測センター(NCEP; Toth and Kalnay 1997)がほぼ同時に中期予報を対象としたアンサンブル予報を始めたのを皮切りに、世界の様々な数値予報センターで中期アンサンブル予報が行われるようになった。また、近年では以下に挙げるような様々なアンサンブル手法が考案され、そのいくつかは現業化されている。Krishnamurti et al. (1999)に代表されるスーパーアンサンブルは、各数値予報センターから単独予報を集め、過去の予報成績に応じた重みによってそれらを重回帰し、もっとも確度の高い1つの決定論的予報の導出を目指している。Ziehmann (2001)やBuizza et al. (2003)に代表されるプアマンズアンサンブル(poor man's ensemble)は、スーパーアンサンブルとは異なり、各数値予報センターの単独予報をそのままアンサンブルメンバーとみなすことで、一つのアンサンブル予報を構築し、従来の決定論的予報では不可能であった確率予報を手軽に行うことを可能とした。さらに、Richardson (2001)やMylne et al. (2003)に代表されるようなmulti-model multi-analysis ensembleは、各数値予報センターの数値予報モデルや解析値を集め、それらを組み合わせることでアンサンブル予報を行おうという試みである。いずれのアンサンブル手法も、各センターの単独予報より予報精度がよいという利点はあるものの、取得可能な予報データの数が世界の数値予報センターの数程度(あるいはセンター数の数倍程度)しかなく、メンバー数を思うように増やせないという問題がある。そのような状況の中、情報科学や情報通信技術の急速な発展により、各数値予報センターの単独予報の予報値だけでなくアンサンブル予報値を集めることが容易になりつつある。いくつかの数値予報センターのアンサンブル予報データを集めることで、従来にはなかったメンバー数の非常に大きなアンサンブル予報を構築することが可能となる。たとえば、WMO(世界気象機関)の推進するTHORPEXプロジェクトの一部であるTIGGE (THORPEX Interactive GrandGlobal Ensemble)が本格的に稼動すれば、さまざまなアンサンブル予報データを今よりも容易に手に入れることができるようになる。

Matsueda et al. (2006)は、気象庁(JMA; JMA 2002)、NCEP、カナダ気象センター(CMC; Pellerin et al. 2005)の中期アンサンブル予報データからなるマルチセンターグラントアンサンブル(MCGE)を構築し、2005年9月の北半球(北緯20度以北) 500hPa等圧面高度(以下、Z500)および北半球850hPa等圧面温度に対して、決定論的および確率論的検証を行い、単独センターアンサンブルに対するMCGEの優位性を示した。しかしながら、彼らの検証は月平均スコアに対するものであり、日々の予報成績には注目していない。そこで本研究では、2005年8月から2006年2月までの日々の予報成績、および、3つの数値予報センターの予報成績が大きく異なった2005年12月15日のブロックングに対する予測について紹介する。

## 2. 各数値予報センターのアンサンブル予報および提供データの概要

中期アンサンブル予報データを国外に提供している数値予報センターは現時点で非常に少ないため、本研究では比較的容易に収集可能であったJMA、NCEP、CMCの3つの数値予報センターの中期アンサンブル予報データを用いた。MCGEの構築に用いた各数値予報センターのアンサンブル予報および提供データの概要を表1に示す。各数値予報センターのモデル解像度は同程度であり、初期摂動作成法は、JMA、NCEPはBGM法(Toth and Kalnay 1993, 1997)、CMCがアンサンブル・カルマンフィルタ(EnKF; Houtekamer and Mitchell 2005)となっている。1日に行うアンサンブル予報の回数は、JMA、CMCが1回(それぞれ12UTC、00UTC)、NCEPが4回(00、06、12、18UTC)となっており、1回あたりのメンバー数は、JMA、NCEP、CMCそれぞれ25、11、17である。提供データの格子間隔も数値予報センターによって異なっており、JMAは2.5度格子、NCEPは1.0度および2.5度格子、CMCは1.0度格子というように、3センターに共通する格子間隔がない。各数値予報センターのアンサンブル予報の精度比較、および、MCGEの構築の際にこの格子間隔の不一致が問題となるので、ここでは共通格子間隔として2.5度を採用することにした。その際、1.0度格子のアンサンブル予報値しかないCMCのアンサンブル予報値は、線形内挿により2.5度格子にした。

表1. JMA, NCEP, CMCのアンサンブル予報データの概要(2005年9月現在)。

	JMA	NCEP	CMC
モデル解像度	TL106L40	T126L28	TL149L23-41, 1.2degL28
初期摂動作成法	BGM	BGM	EnKF
初期時刻(UTC)	12	00, 06, 12, 18	00
メンバー数/初期時刻	25	11	17
メンバー数/日	25	44	17
データ格子間隔	2.5度×2.5度	2.5度×2.5度, 1.0度×1.0度	1.0度×1.0度
データ予報時間(間隔)	216hr(12hr)	0-180hr(6hr), 180-384(12hr)	240hr(12hr)

表2. 構築したMCGEとそれを構成するアンサンブルメンバーの数(括弧内の数字は初期時刻)。最左列は、単独センターアンサンブルおよびMCGEの略称。

略称	メンバー数(UTC)		
	JMA	NCEP	CMC
JMA25	25(12)	-	-
NCEP11	-	11(12)	-
CMC17	-	-	17(00)
J9N8C8	9(12)	8(12)	8(00)
J25N44C17	25(12)	44(18, 00, 06, 12)	17(00)

### 3. MCGEの構築

JMA, NCEP, CMCの各アンサンブル予報の精度は、月平均スコアではほぼ同程度であったので、各アンサンブルメンバーに対する重みを等しくしMCGEを構築した(表2)。また、簡単のためバイアス補正も行わなかった。今回構築したMCGEは、MCGEにおけるマルチモデルの効果を調べるためのJ9N8C8および最大メンバー数のJ25N44C17である。J9N8C8は、JMAのコントロールランと各数値予報センターの4組の摂動ランから構成され(JMA: 9メンバー、NCEP: 8メンバー、CMC: 8メンバー)、そのメンバー数はJMAのアンサンブル予報と同じ25である。

### 4. 結果

#### 4.1 2005年8月から2006年2月における日々の予報成績

図1(a)は、JMA(赤)、NCEP(緑)およびCMC(黄)の北半球Z500の120時間予報におけるアンサンブル平均のRMSEである(2005年8月から2006年2月)。縦軸は120時間予報のRMSEを表し、横軸は予報の初期日(0は2005年7月31日12UTCをあらわし、1目盛りが1日)を表す。CMCのアンサンブル予報は00UTCを初期値としているので、JMAやNCEPの時系列よりも左に0.5だけずれている。どのアンサンブル平均のRMSEも季節を通じてゆっくりと変化していることがわかる。日々の変動に注目すると、大気の状態に応じてRMSEが変動しているのと同時に、時折、特定のアンサンブル平均のRMSEが他のアンサンブル平均のRMSEに比べて大きくなっているのが分かる。これは、各数値予報センターのアンサンブル予報システムの違い(たとえば、初期値やモデルや初期摂動作成法の違い)に主に起因していると考えられる。

図1(b)は、JMA(赤)およびJ9N8C8(青)の北半球Z500の120時間予報におけるアンサンブル平均のRMSEである。図1(b)に示されたJMAアンサンブルに対する時系列は図1(a)に示されたものと同じである。2つのアンサンブルともメンバー数は同じ25である。この図から、多くの初期日において、J9N8C8がJMA25よりも予報精度が良いということが分かる。これはマルチモデルの効果によって、モデルの不完全性に起因する予報誤差を軽減することができたことを表す。J9N8C8がJMA25よりも予報精度が悪くなることは少なく、そのような場合、ある特定の数値予報センターのアンサンブル平均の予報誤差が他センターのものよりも大きくなっていることが分かる(図1(a)の赤丸は、J9N8C8が

## Z500 120hr Forecast Skill (200508-200602: NH)

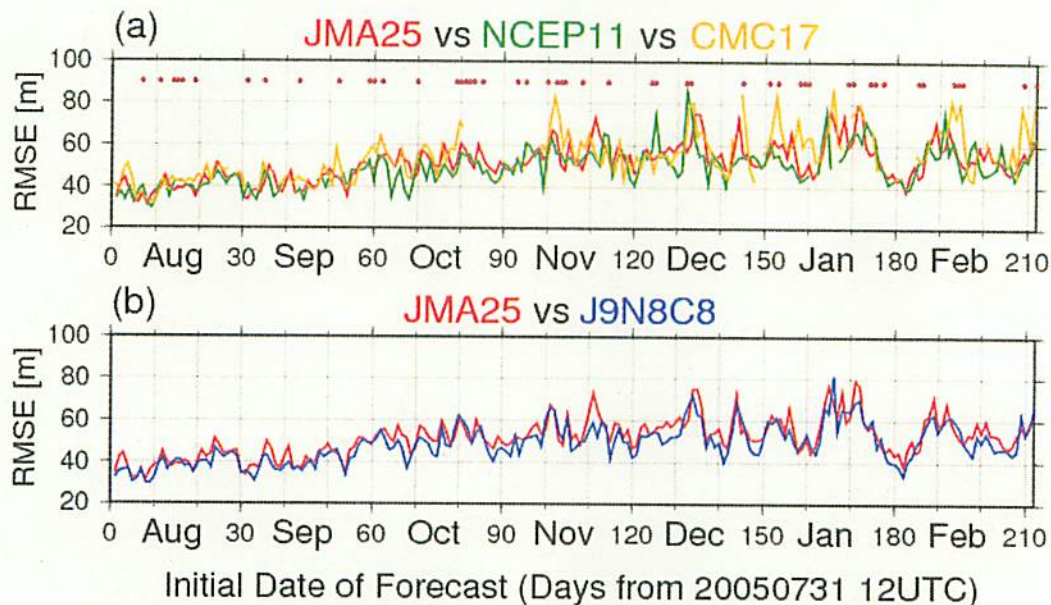


図1. 北半球500hPa高度場の120時間予報のRMSE (2005年8月から2006年2月)。(a) 各数値予報センター (JMA, NCEP, CMC) のアンサンブル平均 (赤: JMA25, 緑: NCEP11, 黄: CMC17) のRMSE。(b) 気象庁のアンサンブル平均 (赤: JMA25) とそれとメンバー数の等しいMCGE (青: J9N8C8) のRMSE。図 (a) の赤丸は、JMA25のほうがMCGE (J9N8C9) よりも予報精度が良かったときを示す (Matsueda et al. 2007より)。

JMA25よりも予報精度が悪かった事例を示す)。MCGEを構築することで誤差がどの程度軽減された (あるいは増加した) かを定量的に調べたものが図2である。

図2は、横軸がJMA25のRMSE、縦軸がJMA25のRMSEに対するJ9N8C8のRMSEの改善率 (以下、MIR) である (図中の白丸は、2005年8月から11月 (ASON) を、黒丸は2005年12月から2006年2月 (DJF) を表す)。改善率は、 $(RMSE_{JMA25} - RMSE_{J9N8C8}) / RMSE_{JMA25}$  と定義され、これが正 (負) ならJ9N8C8がJMA25よりもスキルがある (ない) ことを示し、その値はJMA25のRMSEをどの程度軽減できたかを表す。この図から、J9N8C8がJMA25よりも予報精度が良くなる割合は、秋季に76.5%、冬季に75.0%であることが分かる。また、JMA25のRMSEは最大で、秋季に28%、冬季に18%軽減され、JMA25のRMSEの大きさによらず、20%程度までの誤差を軽減できることが分かる。これは、大気の場合が予測しやすい場であるかどうかに関わらず、MCGEによって予報誤差を同程度軽減することが可能であることを表す。また、J9N8C8がJMA25よりも予報精度が悪くなったとしても、RMSEの増加は最大で秋季に18%、冬季に15%程度であり、図1 (b) から推測される、J9N8C8の予報精度がJMA25に比べて著しく良くなることはあっても著しく悪くなることはない、ということがこの図から改めて示された。特に冬季においては、JMA25のRMSEがとくに大きい場合 (65m以上)、MCGEを構築することで予報精度が改悪することがないことが分かる。

## JMA RMSE vs MCGE Improvement Rate 200508-200602: NH (+120hr)

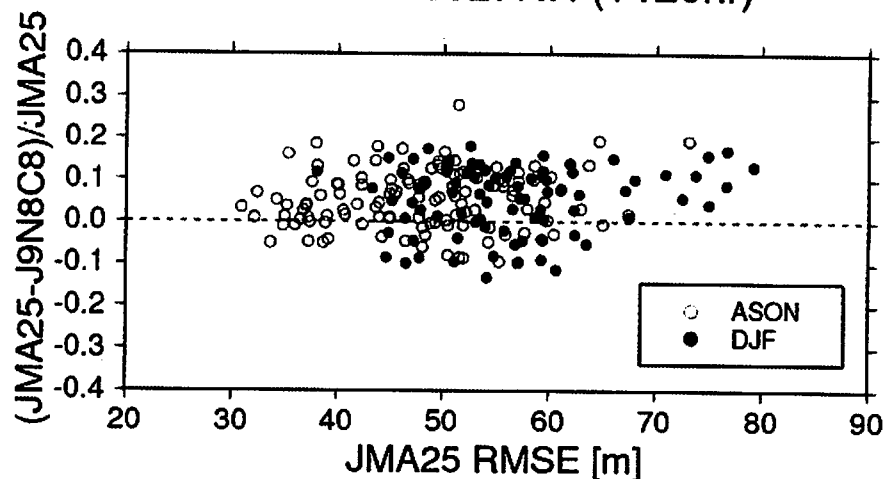


図2. 北半球500hPa高度場の120時間予報に対するJMA25のRMSEとそれに対するMCGE (J9N8C8)のRMSEの改善率 (2005年8月から2006年2月)。赤丸は2005年8月から2005年11月を、青丸は2005年12月から2006年2月を表す (Matsueda et al. 2007を一部修正)。

J9N8C8がJMA25よりも優っていた約75%のうち、メンバー数をさらに増やすことで(つまり、J9N8C8からJ25N44C17)、さらに予報精度が向上したものは、秋季61.6% (=47.1%/76.5%×100)、冬季65.2% (=48.9%/75.0%×100)であり、メンバー数を増やしたことで予報精度が低下したもののJMA25よりも予報精度が悪くなることはなかったものは、秋季31.9% (=24.4%/76.5%×100)、冬季28.7% (=21.5%/75.0%×100)であった(図3)。逆に、J9N8C8がJMA25よりも劣っていた約25%のうちの約半分(秋季: 13.4%/23.5%、冬季: 10.2%/25.0%)はメンバー数を増やすことでJ25N44C17がJMA25よりも予報精度が優るようになった。最大メンバーのアンサンブル平均を構築することで、秋季90.0%、冬季85.2%の頻度でJMA25よりも予報精度のよいアンサンブル平均予報を手に入れることができるが、これは主にマルチモデルの効果によるものである。

### 4.2 2005年12月15日にアラスカ上空で発生したブロッキングの予報

各数値予報センターの予報精度が大きく異なった事例として、2005年12月15日にアラスカ上空に発生したブロッキングの予測について取り上げる。図4は、2005年12月10日を初期値とする120時間予報(CMCについては132時間予報)のスパゲッティダイアグラム(2500、5500m)である。図4(a)、図4(b)、図4(c)は、それぞれJMA(25メンバー)、NCEP(11メンバー)、CMC(17メンバー)のスパゲッティダイアグラムである(いずれの図も実況を太線で表した)。図4から明らかなように、JMAのほとんどのメンバーとCMCの一部のメンバーは、ブロッキングの位置を正確に予測しており、一方、NCEPの全メンバーは、実況よりも上流にブロッキングを予測していた。JMAのメンバーはブロッキングの位置を正確に予測でき、NCEPのメンバーは正しく予測できなかったことをふまえて、はじめにJMAとNCEPのコントロールランに注目することにする。

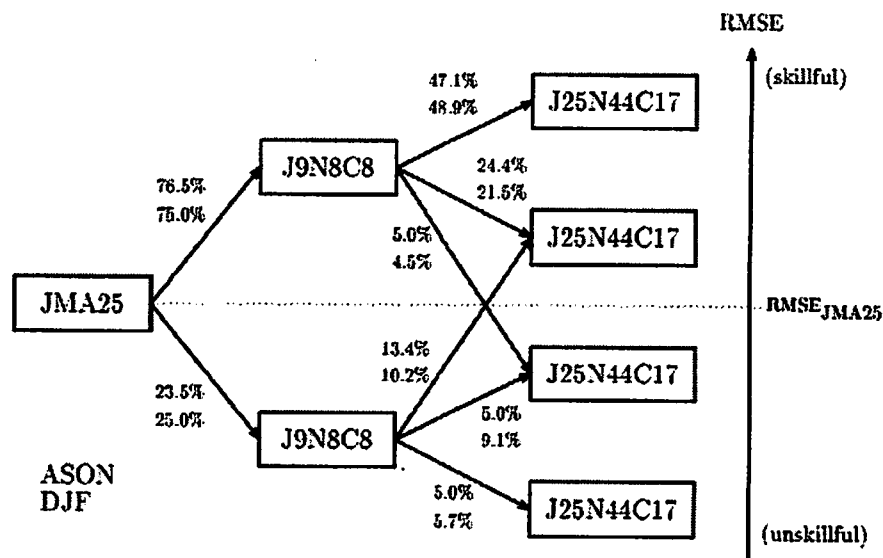
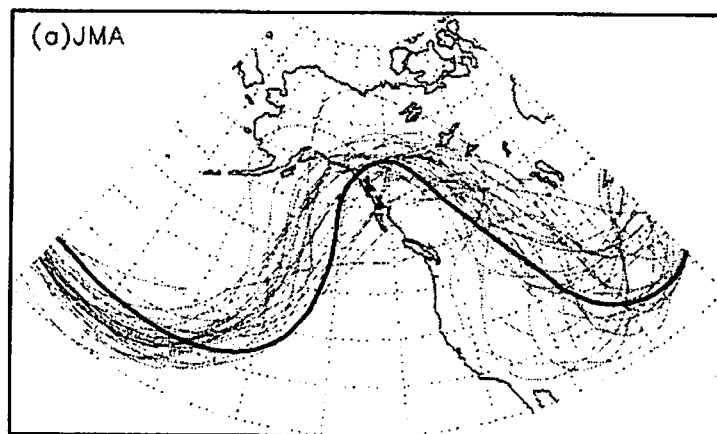


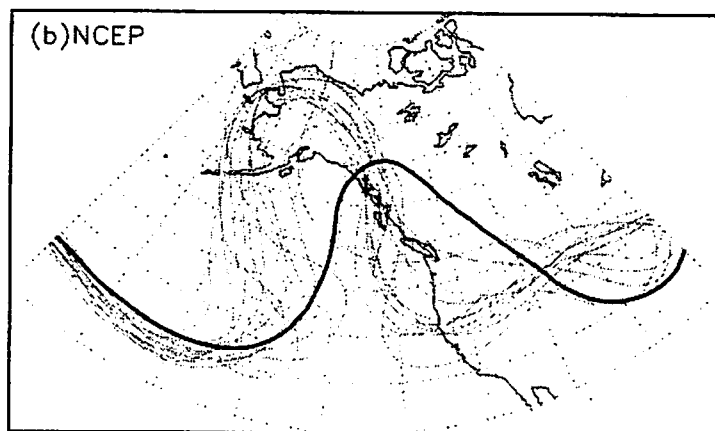
図3. JMA25、J9N8C8、J25N44C17に対するRMSEの比較。各四角の上下方向の位置はRMSEの相対的な大小を表しており(右軸参照)、図中の数字(%)は、各季節(上段: ASON、下段: DJF)において、隣り合う2つのアンサンブル平均(JMA25とJ9N8C8、および、J9N8C8とJ25N44C17)のRMSEを比較した際に、どのくらいの頻度で予報精度が改善あるいは改悪したのかを各季節における全予報数(ASON: 88日, DJF: 119日)に対する割合で表している(Matsueda et al. 2007より)。3つのアンサンブル平均の予報精度を比較しており、その優越(6通り)を矢印とボックスの上下(右軸)により表している。

図5は、2005年12月10日12UTCにおけるJMAとNCEPのコントロールランの初期値(Z500)、および、それらの差を表す。日本の東の海上にNCEPよりJMAの方が高度場の高い領域がみられ、そのさらに東の海上にはやや広域にわたりJMAよりNCEPのほうが高度場の高い領域がみられる。図6は、2005年12月10日12UTCを初期値とするJMAとNCEPのコントロールランの予測である(上から順に、48、72、96、120時間予報)。予報時間48時間のときに、JMA、NCEPとも、北太平洋上(各図の中心付近)に南北2つの負の予報誤差およびその間に正の予報誤差が存在している(以下、これを「三つ玉構造」と呼ぶ)。JMAの正の予報誤差はNCEPの正の予報誤差よりも下流(東)に位置していた。予報時間48時間のときにアラスカの南にあった負の予報誤差が、この正の予報誤差によって、予報時間72時間以降異なる振る舞いをしていった。予報時間72時間以降、JMAの負の予報誤差は、北太平洋上の正の予報誤差(つまり、ブロッキングのトラフ)にブロックされるような形でそのままアラスカの南にとどまり続けていたのに対し、NCEPの負の予報誤差はロッキー山脈沿いに南下し、逆に北太平洋上の正の予報誤差(リッジ)の東進をブロックしていた。NCEPでは、負の予報誤差に対応する小低気圧のようなものが先回りして、本来のブロッキングの立ち上がりを妨げ、ブロッキングの位置を実況よりも上流に予測したと考えられる。予報時間48時間のときに北太平洋上に存在した正の予報誤差の位置の違いが、アラスカの南の負の予報誤差の振る舞いに影響を与え、結果としてブロッキングの予測の違いへとつながったと言えるだろう。初期時刻から予報時間48時間までの時間発展を見ると(図省略)、この正の予報誤差の位置の違いは、図5にみられ

Z500 (Spaghetti: 5500m)  
JMA 20051210 12UTC +120hr



NCEP 20051210 12UTC +120hr



CMC 20051210 00UTC +132hr

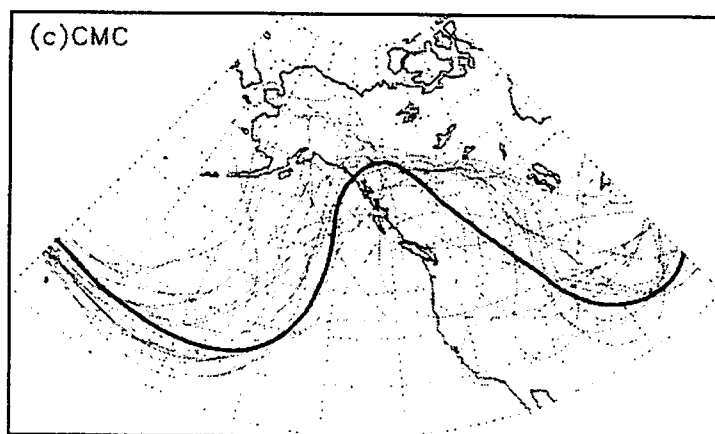


図4. 500hPa高度場(5500m)のspaghetti diagram。(a)JMA, (b)NCEP, (c)CMCの各アンサンブルメンバー(CMCは2005年12月10日00UTC初期値、JMAおよびNCEPは2005年12月10日12UTC初期値)を細線で表し、実況を太線で表した。

Difference between JMA and NCEP (Z500)

20051210 12UTC +000hr

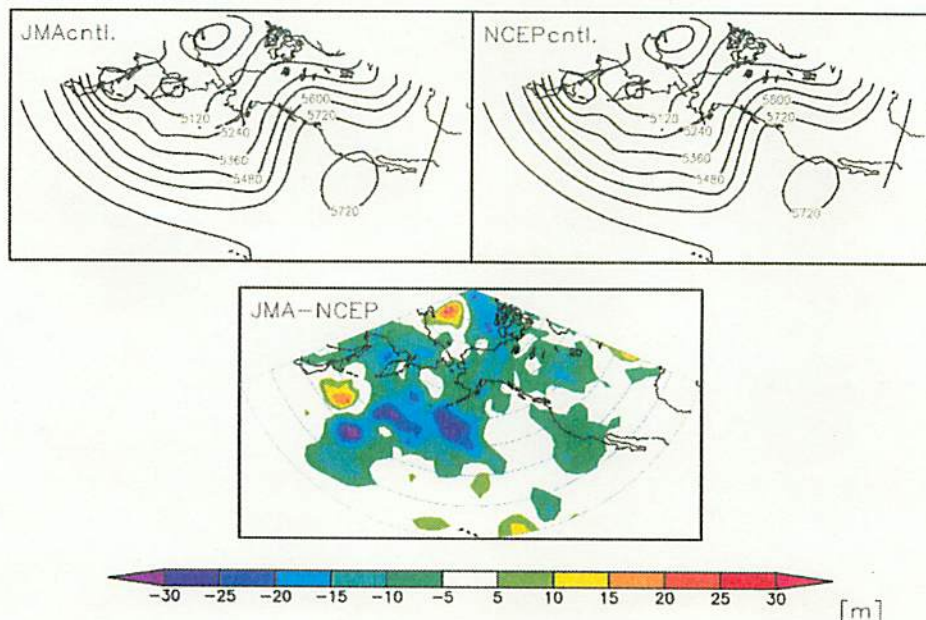


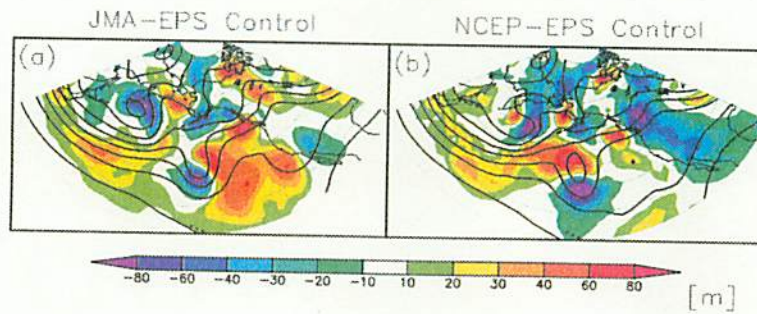
図5. 2005年12月10日12UTCにおけるJMA(左上)とNCEP(右上)のコントロールランの初期値(Z500)、および、それらの差(下)。

た日本に東の高度場の違いが原因であるかのようにみえるが、NCEPのブロッキングの誤予報が、初期値に問題があるのか、あるいはモデルに問題があるのかをこれらの状況から断言することはできないので、NCEPのコントロールランの初期値をもとに、気象庁の現業週間アンサンブル予報システムで利用されている全球スペクトルモデル(TL159L40)によるモデルランを行った。

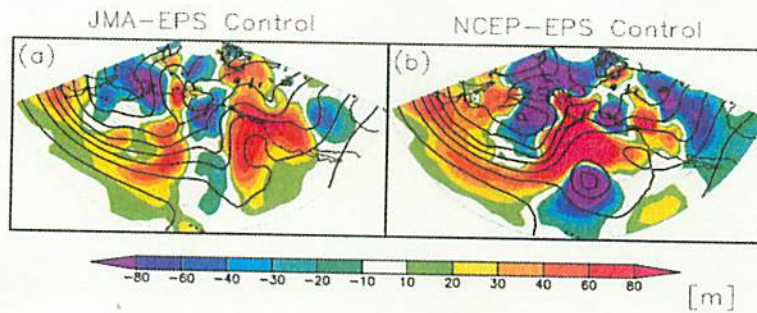
図7は、12月15日のZ500を表しており、(a)解析値、(b)JMAオリジナルのコントロールランの予報値、(c)NCEPオリジナルのコントロールランの予報値、および、(d)NCEPのコントロールランの初期値を用いたJMAモデルランである。モデルが異なるにもかかわらず、NCEPオリジナルのコントロールラン(図7(c))同様、NCEPの初期値からのJMAモデルラン(図7(d))は、ブロッキングの位置を実況よりも上流に予報していた。このことから、NCEPのコントロールランがブロッキングの位置を正しく予測できなかった原因は初期値にあると結論付けることができる。ちなみに、1日4回行われているNCEPのアンサンブル予報のスパゲッティダイアグラム(初期値:12月11日、図省略)をみると、予測の初期時刻が新しくなるにつれて徐々にブロッキングの位置を正しく予測できるようになっており、このことからNCEPの初期値に問題があったと示唆される。さらに、NCEPの摂動ランの初期値に対しても同様のモデルランを行ったところ、いくつかのメンバーはブロッキングの位置がオリジナルのメンバーよりも下流にシフトしていた(実況に近づいていた)ものの、依然としてすべてのメンバーが実況よりも上流にブロッキングを予測していた(図8)。



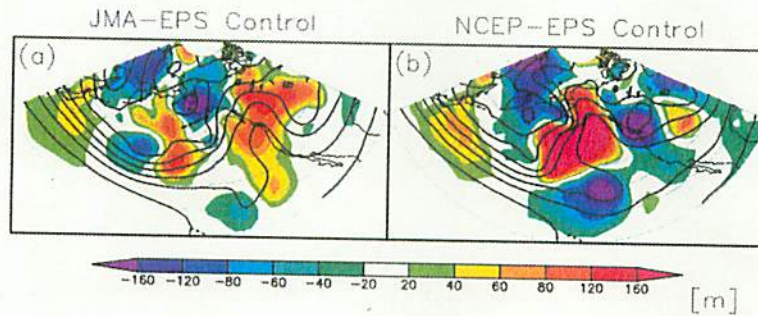
Comparison of JMA and NCEP (Z500)  
 Init: 2005121012UTC Valid: 2005121212UTC



Init: 2005121012UTC Valid: 2005121312UTC



Init: 2005121012UTC Valid: 2005121412UTC



Init: 2005121012UTC Valid: 2005121512UTC

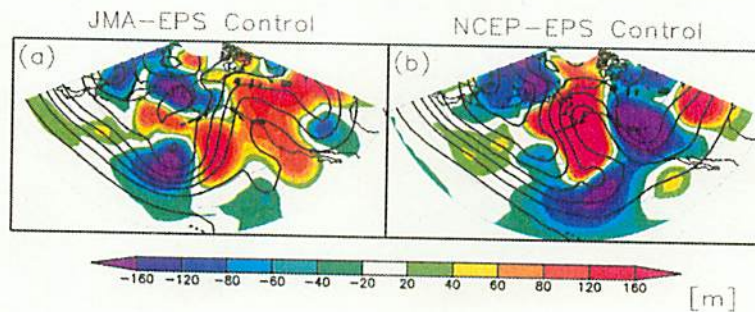


図6. 2005年12月10日12UTCを初期値とするJMAとNCEPのコントロールランの予報 (Z500)。上から順に、48時間予報、72時間予報、96時間予報、120時間予報。コンターは高度場 (120m間隔) を、シェイドは各センターの解析値に対する予報誤差を表す。

Single-Center vs Multi-Analysis (Z500)  
 Init: 2005121012UTC Valid: 2005121512UTC

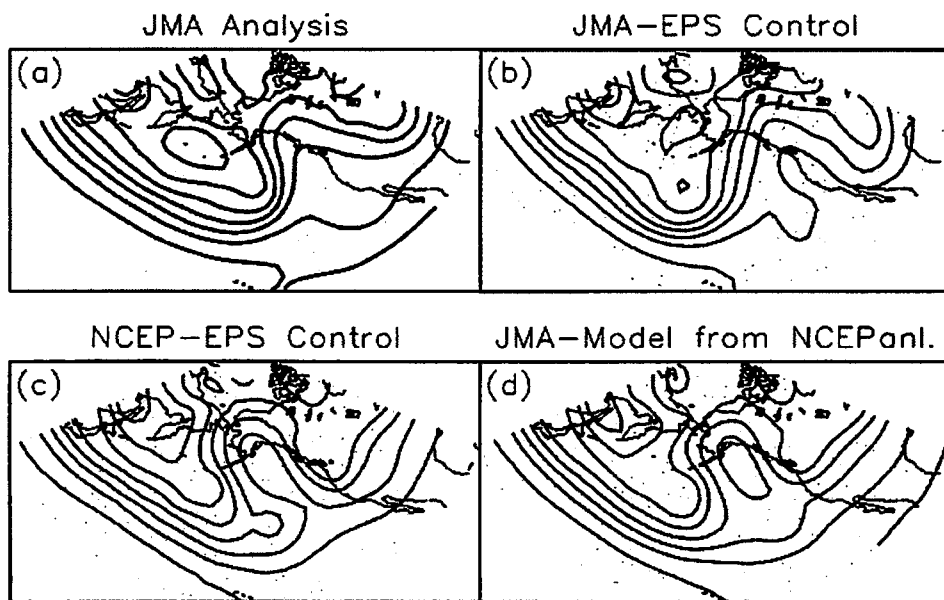


図7. 2005年12月15日12UTCの(a)解析値および2005年12月10日12UTCを初期値とする5日予報  
 ((b) : JMAコントロールラン、(c) : NCEPコントロールラン、(d) : NCEPの解析値を用いた  
 JMA/GSM(TL159L40)によるモデルラン)。

NCEP Multi-Analysis Ensemble  
 500hPa Height (Spaghetti: 5500m)  
 20051210 12UTC +120hr

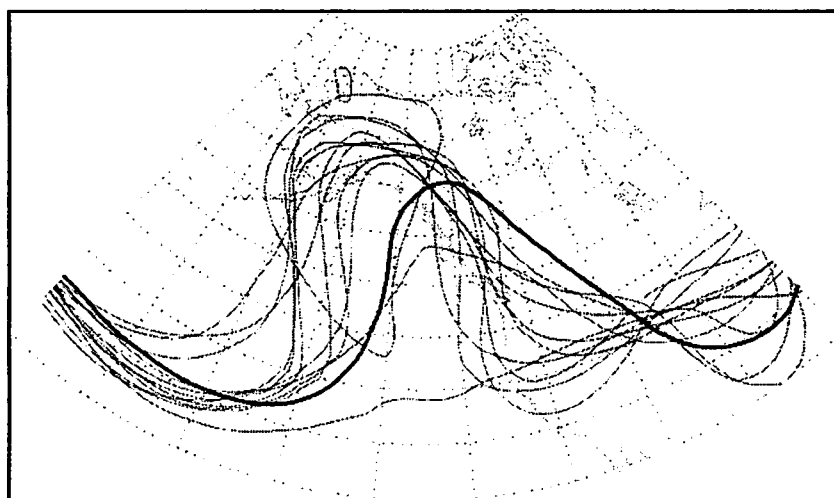


図8. 2005年12月10日12UTCのNCEPアンサンブルの初期値(11メンバー)を用いたJMA/GSM(TL159L40)に  
 よるモデルランの結果(予報対象日: 2005年12月15日12UTC)。

次に、NCEPの初期値のどの領域に問題があったかを特定するために、Enomoto et al. (2004, 2006)によるアンサンブル予報データによる感度解析を行った。ノルムには乾燥全エネルギー・ノルム (Talagrand 1981, Ehrendorfer et al. 1999)を採用した：

$$TE = \frac{1}{2} \iint [u'^2 + v'^2 + \frac{c_p}{T_r} T'^2 + RT_r \left( \frac{p_s'}{p_r} \right)^2] dAdp$$

ここで、擾乱( )' はコントロールランからの偏差を表し、

$$c_p = 1005.7[J/kgK], T_r = 270[K], R = 287.04[J/kgK], p_r = 1000[hPa]$$

である。 $u$ ,  $v$ ,  $T$ は、それぞれ、各等圧面での東西風、南北風、温度を表し、 $p_s$ は地表面気圧を表す。これらの物理量のエネルギーを水平(領域A)、および、鉛直積分(地表から200hPa)することで、乾燥全エネルギー・ノルムを得る。ブロックの位置を正確に予測できたかどうかの分かれ目になった48時間後(2005年12月12日12UTC)の北太平洋領域(東経180度-220度、北緯20度-60度、図9太枠内)をターゲット領域として設定した。2005年12月10日12UTC初期値のJMAのアンサンブル予報データを用いて感度解析を行ったところ、日本の東の海上に高感度領域がみられた(図9)。ちなみに、12月15日のブロックそのものをターゲット領域とした場合でも、同じような高感度領域がみられた。JMAとNCEPのコントロールランの初期値の差に対して、その乾燥全エネルギー・ノルムを計算したところ、図10のように、高感度領域にシグナルがみられ、この領域ではJMAとNCEPの初期値の差が大きかったことが分かる。この領域には、地上に低気圧が存在しており、NCEPはこの低気圧をJMAよりも弱く解析していた(図省略)。12月9日を初期値とする各センターのアンサンブルスプレッドみると、他の領域に比べ低気圧の周辺ではスプレッドが相対的に大きく(図省略)、低気圧の周辺の解析場は不確実性が大きかったことが分かる。つまり、NCEPは低気圧の周辺の場合をうまくとらえることができず、その結果NCEPはブロックの予測を失敗してしまった可能性が考えられる。

アンサンブル予報が初期値に含まれる不確実性を初期擾動によって捉えることを目指している以上、たとえNCEPのコントロールランがブロックの位置を正しく予測できなかったとしても、擾動ランが正しく予測できていても良いはずである。しかしながら、今回の事例ではすべての擾動ランがコントロールランと同じようにブロックを上流に予測していた。NCEPの初期擾動に対してその乾燥全エネルギー・ノルムをみると(図11)、高感度領域(太枠内)ではNCEPの初期擾動のシグナルがほとんどない、あるいは、シグナルがあってもJMAとのコントロールランの差を埋めるのほど小さくなく、初期擾動が効果的に与えられていなかったことが分かる。NCEPの初期擾動の大きさはJMAのそれのおよそ半分程度であり、そのノルムの小ささゆえ、コントロールランに引っ張られる形ですべての擾動ランがブロックの位置を実況よりも上流に予測してしまったと考えられる。

今回取り上げた2005年12月15日に発生したブロックに対する予測には、このほかにも興味深いことがある。2005年12月11日12UTC(CMCについては00UTC)を初期値とする

Ensemble based Sensitive Analysis (JMA)

Valid: 2005121012UTC +048hr (SV1: 44.7%)

TARGET AREA: 180-220E,30-60N,1000-200hPa(Total Dry Energy)

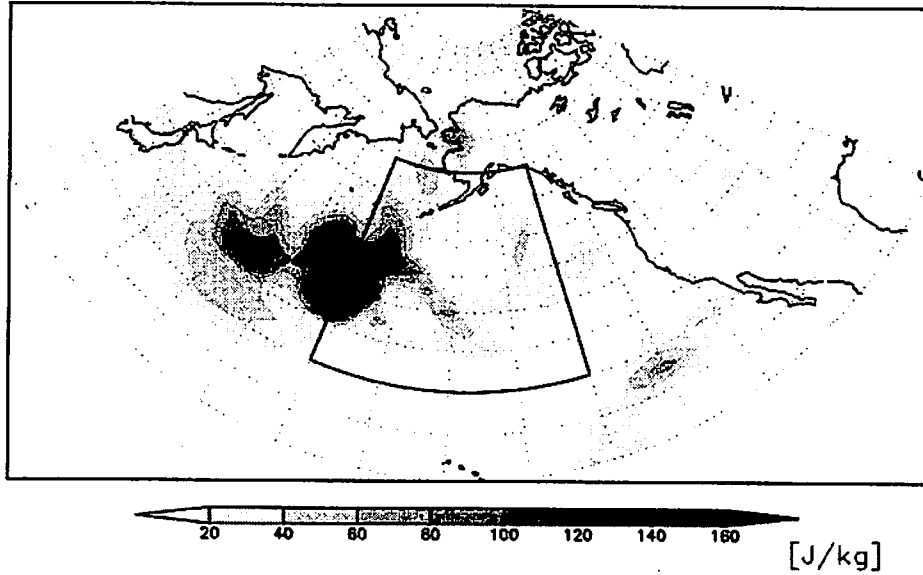


図9. 2005年12月10日12UTCを初期値とするJMAのアンサンブル予報データによる感度解析。2005年12月10日12UTCの48時間後の北太平洋領域(枠内)に対する高感度領域。

Total Dry Energy of Initial Difference (1000-200hPa)

Valid.: 2005121012UTC

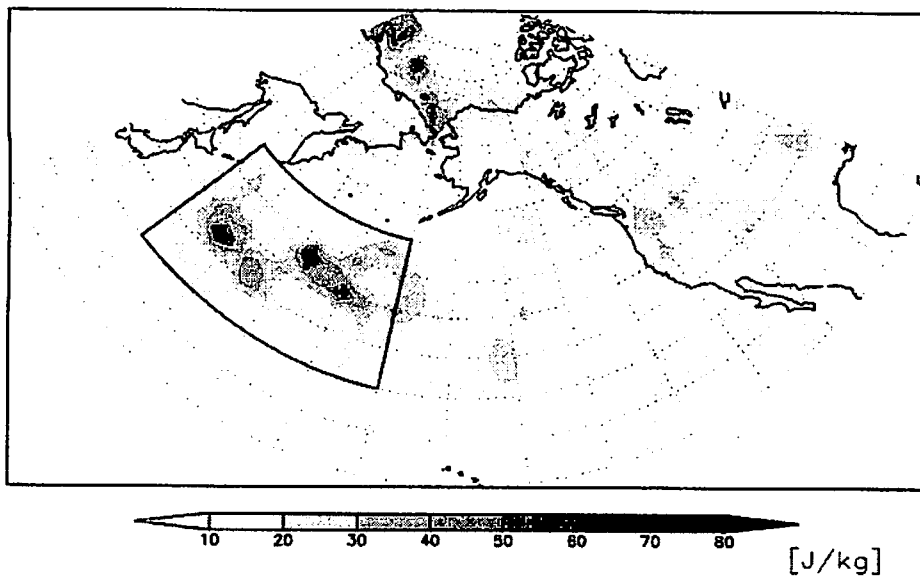


図10. JMAおよびNCEPのコントロールランの初期値の差に対する乾燥全エネルギー・ノルム(初期値: 2005年12月10日12UTC)。

Total Dry Energy (1000–200hPa)  
NCEP Initial Perturbations (2005121012UTC)

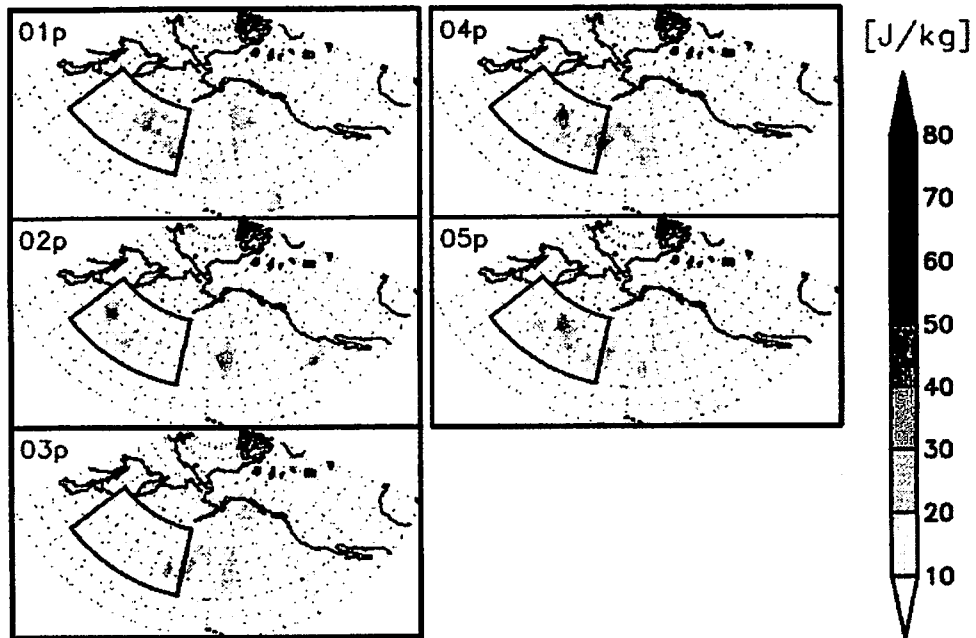


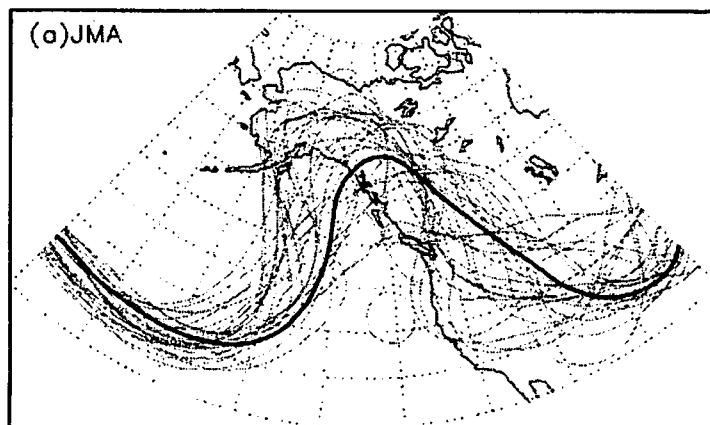
図11. 2005年12月10日12UTCを初期値とするNCEPの初期擾動の乾燥全エネルギー・ノルム。太枠は、図9に示されたものと同じでJMAとNCEPのコントロールランの差が大きかった領域。

予測では、CMCのほとんどのメンバーとJMAの一部のメンバーが12月15日のプロッキングを実況よりも上流に予測していた(図12)。CMCのアンサンブル予報データについては、十分な要素と鉛直解像度が手元にないため詳細な解析ができないが、12月10日前後の大気の状態が非常にchaoticな場であったことを示しているだろう。

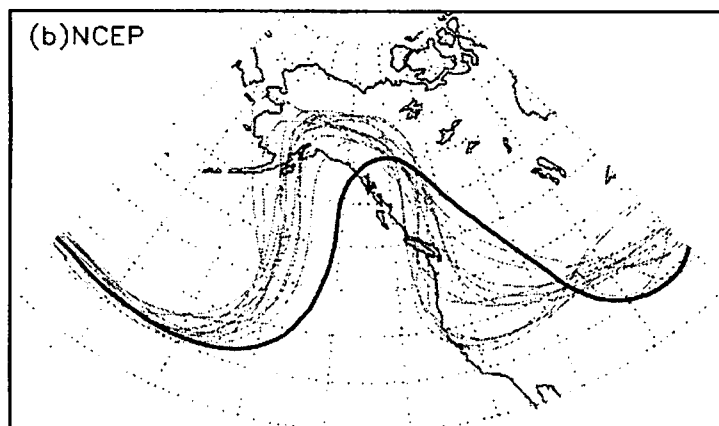
### 5. まとめ

MCGEを構築するメリットの一つは、単独センターのアンサンブルでは回避できない可能性のある「おおはずし」をなくすことである。MCGEを構築することで、大気の状態が予測しやすいかどうかに関わらず、初期値の不確定性やモデルの不完全性に起因する予報誤差を軽減することができるようになる。今回はバイアス補正やメンバー間の重みを考慮しないMCGEを構築したが、Johnson(2006)で示されているように、本来ならばこれらを考慮したうえでMCGEを構築するほうが好ましいことは言うまでもない。バイアス補正やメンバー間の重みを考慮することで、とくに確率予報においてより予報精度のよいMCGEが構築できるであろう。

500hPa Height (Spaghetti: 5500m)  
JMA 20051211 12UTC +096hr



NCEP 20051211 12UTC +096hr



CMC 20051211 00UTC +108hr

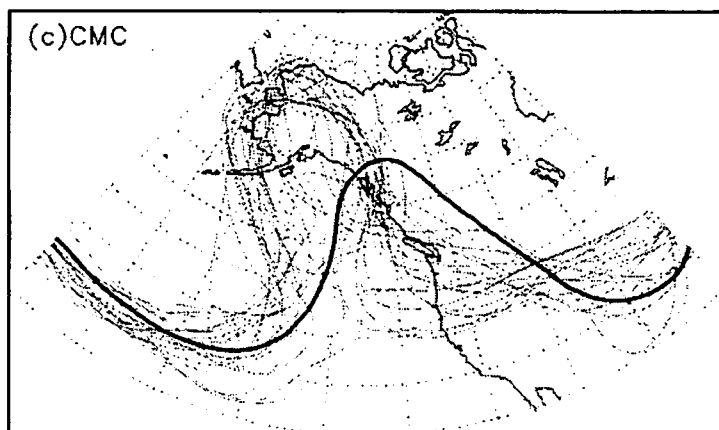


図12. 500hPa高度場(5500m)のspaghetti diagram。(a)JMA, (b)NCEP, (c)CMCの各アンサンブルメンバー(CMCは2005年12月11日00UTC初期値、JMAおよびNCEPは2005年12月11日12UTC初期値)を細線で表し、実況を太線で表した。

また、JMA、NCEP、CMCの予報精度が多く異なった例として2005年12月10日を初期値とする予測を取り上げた。JMAのほとんどのメンバーがブロッキングの位置を正確に予測していたのにも関わらず、NCEPのすべてのメンバーがブロッキングの位置を実況よりも上流に予測していたという非常に珍しい事例である。NCEPの全メンバーの初期値を用いてJMA全球スペクトルモデル(TL159L40)による数値実験を行ったところ、やはりブロッキングの位置を実況よりも上流に予測しており、今回のNCEPの「集団はずし」の主な原因が初期値にあったと結論付けられる。

さらに、アンサンブル予報データを用いた簡易感度解析により、12月10日の日本の東の海上にこのブロッキングの予測に対する高感度領域があり、確かにNCEPとJMAのコントロールランの解析値の差がこの領域で相対的に大きかったことが分かった。この領域には低気圧が存在しており、12月9日を初期値とする各センターのアンサンブルブレッドから、この低気圧の周辺の場合は不確実性が大きかったことも分かっている。この領域でコントロールランの解析値の差が大きかった原因については、各センターのデータ同化システムの違いや、データ同化に利用した衛星データや観測データ等の違いなどが考えられる。

たとえ高感度領域でのコントロールランの解析値の差が大きくても、効果的な初期摂動が与えられればNCEPは「集団はずし」を避けることができてもよいはずだが、NCEPの初期摂動には高感度領域にシグナルが見られなかった、あるいは、シグナルがあってもその大きさが小さかった(NCEPの初期摂動の大きさは常にJMAの半分程度)ために、初期摂動が効果的に成長せず、コントロールランに引きずられる形で「集団はずし」せざるを得なかったと考えられる。

現業中期アンサンブル予報データは、過去にさかのぼってデータを取得することができないため、解析の幅が狭まってしまうデメリットもあるが、膨大なアンサンブル予報データを丹念に見てゆくことで、場合によっては、特定の数値予報センターの精度が悪かった理由を特定することが可能かもしれない。また、各数値予報センターが協力することで、たとえば、図9に示した日本の東の海上における初期値の違いは、あるデータを同化しなかった(あるいは同化してしまった)ことによってもたらされた、というようなことを知ることもできるだろう。TIGGEの本格稼働により、これらのことが今より少しでも容易になってゆくことを期待する。

## 謝辞

MCGEの構築にあたり、NCEPとCMCの中期アンサンブル予報データを用いた。各提供機関に感謝致します。特にNCEPのZoltan Toth博士、Richard Wobus博士の両氏には、数値実験および感度解析を行うのに必要な高解像度データを提供していただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

## 参考文献

Buizza, R., D.S. Richardson, and T.N. Palmer, 2003: Benefits of increased resolution in the ECMWF ensemble system and comparison with poor-man's ensembles. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129, 1269-1288.

Enomoto, T., S. Yamane, W. Ohfuchi, and H. Nakamura, 2004: Simple sensitivity analysis using ensemble forecasts and its application to simulations of high-impact weather. Workshop on Ensemble Methods. 18-21 October 2004, Met Office, Exeter, United Kingdom.

Enomoto, T., W. Ohfuchi, H. Nakamura, and M. A. Shapiro, 2007: Remote effects of tropical storm Cristobal upon a cut-off cyclone over Europe in August 2002. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **96**, 29-41.

Ehrendorfer, M., R. M. Errico and K. D. Raeder, 1999: Singular-vector perturbation growth in a primitive equation model with moist physics. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1627-1648.

JMA, 2002: *Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency*. Japan Meteorological Agency, 158 pp.

Johnson, C., 2006: On the benefits of multi-model ensembles: idealized studies using the Lorenz 1963 model. *MetOffice Fore. Res. Tech. Rep.*, **492**, 47pp.

Houtekamer, P. L., and H. L. Mitchell, 2005: Ensemble Kalman filtering. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3269-3289.

Krishnamurti, T. N., C. M. Kishtawal, T. E. LaRow, D. R. Bachiochi, Z. Zhang, C. E. Williford, S. Gadgil, and S. Surendran, 1999: Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble. *Science*, **285**, 1548-1550.

Matsueda, M., M. Kyouda, H. L. Tanaka, and T. Tsuyuki, 2006: Multi-Center Grand Ensemble using Three Operational Ensemble forecasts. *SOLA*, **2**, 33-36.

Matsueda, M., M. Kyouda, H. L. Tanaka, and T. Tsuyuki, 2007: Daily Forecast Skill of Multi-Center Grand Ensemble. *SOLA*, **3**, 29-32.

Molteni, F., R. Buizza, T. N. Palmer, and T. Petroliaqis, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 73-119.

Mylne, K. R., R. E. Evans, and R. T. Clark, 2002: Multi-model multi-analysis ensembles in quasi-operational medium-range forecasting. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 361-384.

Richardson, D. S., 2001: Ensembles using multiple models and analyses. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 1847-1864.

Pellerin, G., M. Charron, P. L. Houtekamer, L. Lefaivre, and H. L. Mitchell, 2005: Reviewing the Ensemble Prediction System at the Canadian Meteorological Centre. *Proceedings, ECMWF Tenth Workshop on Meteorological Operational Systems*, Reading, U.K., ECMWF, 63-71.

Talagrand, O., 1981: A study of the dynamics of four-dimensional data assimilation. *Tellus* **33**, 43-60.

Toth, Z. and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317-2330.

Toth, Z. and E. Kalnay, 1997: Ensemble forecasting at NCEP and the Breeding Method. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3297-3319.

Ziehmann, C., 2001: Comparison of a single-model EPS with a multi-model ensemble consisting of a few operational model. *Tellus*, **52A**, 280-299.