

マルチセンターグランドアンサンブルでみた 2005 年 12 月 15 日のブロッキング

松枝未遠 (筑波大学生命環境科学研究科)・経田正幸 (気象庁数値予報課)
田中博 (筑波大学計算科学研究センター)・露木義 (気象庁数値予報課)

1 はじめに

1990 年代はじめに欧州中期予報センター (ECMWF) と米国環境予測センター (NCEP) 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。これと並行して, superensemble, poor-man's ensemble, multi-analysis ensemble, multi-model multi-analysis ensemble のような様々なアンサンブル手法が考案されてきた (e.g., Krishnamurti et al. 1999; Ziehmann 2001; Buizza et al. 2003; Richardson 2001; Mylne et al. 2003)。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データ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。現時点では, 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非常に少ないが, 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, 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できる。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), 米国環境予測センター (NCEP), カナダ気象センター (CMC) の中期アンサンブル予報データを用いてマルチセンターグランドアンサンブル (MCGE) を構築し, 2005 年 9 月の北半球 (北緯 20° 以北) 500 hPa 等圧面高度 (以下, Z500) および北半球 850 hPa 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。そこで本発表では, 2005 年 8 月から 2006 年 2 月までの日々の予報成績, および, 3 つの数値予報機関の予報成績が大きく異なった 2005 年 12 月 15 日のブロッキングに対する予報について紹介する。

1.1 各センターのアンサンブル予報データの概要

アンサンブル予報データの概要を表 1 に示す。表から分かる通り, 提供データの格子間隔が異なっている。JMA は 2.5° 格子, NCEP は 1.0° および 2.5° 格子, CMC は 1.0° 格子となっており, 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° を採用することにした。その際, 1.0° 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を, 線形内挿により 2.5° 格子にした。

1.2 MCGE の構築

JMA, NCEP, CMC の各アンサンブル予報の精度が月平均スコアでほぼ同程度であることをうけて, 各アンサンブルメンバーに対する重みを等しくした (表 2)。また, 簡単のためバイアス補正も行わなかった。MCGE におけるマルチモデルの効果を調べるために, JMA のアンサンブル予報とメンバー数の等しい J9N8C8 を構築した。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る (JMA: 9 メンバー, NCEP: 8 メンバー, CMC: 8 メンバー)。また, 最大メンバー数は J25N44C17 の 86 である。

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	T106L40	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° × 2.5°	2.5° × 2.5°, 1.0° × 1.0°	1.0° × 1.0°
データ予報時間 (間隔)	216hr (12hr)	0-180hr (6hr) 180-384hr (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)

2 結果

2.1 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(赤実線)、NCEP(緑実線) および CMC(黄実線) 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 2006 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。

どの数値予報機関の 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、大気場に応じて RMSE が変動して

いるのとともに、時折、特定のセンターの RMSE が他センターの RMSE に比べて大きくなっているのが分かる。これは、主に各数値予報機関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) に起因していると考えられる。

図 1(b) は、JMA(赤実線) および J9N8C8(青実線) 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、モデルの不確実性に起因する予報誤差を削減することができたことを示す。J9N8C8 が JMA25 よりも予報精度が悪くなることはまれであり、そのような場合、ある特定の数値予報機関のアンサンブル平均の予報誤差が他機関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 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削減された (あるいは増加した) かを定量的に調べるために図 2 を作成した。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 (図中の青丸は、2005 年 8 月から 11 月 (ASON) を、赤丸は 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

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

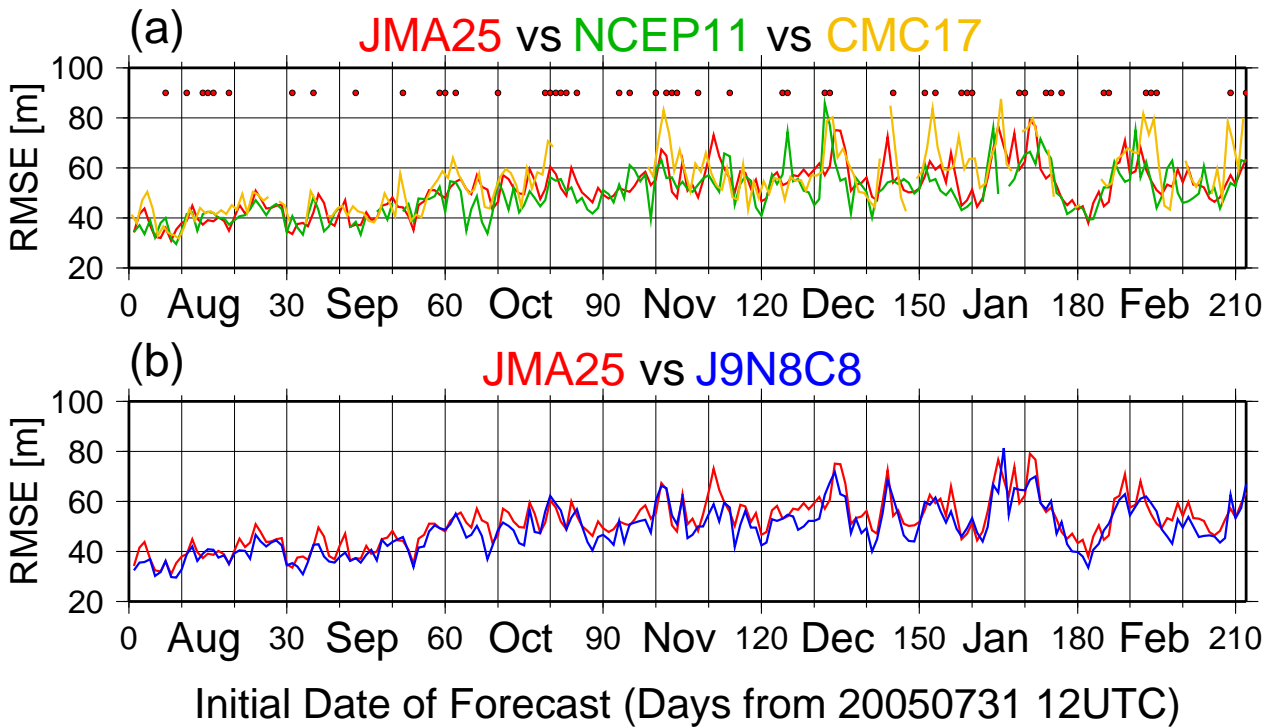


図 1: 北半球 500 hPa 高度場の 120 時間予報の RMSE (2005 年 8 月から 2006 年 2 月)。(a) 各数値予報センター (JMA, NCEP, CMC) のアンサンブル平均 (赤: JMA25, 緑: NCEP11, 黄: CMC17) の RMSE。(b) 気象庁のアンサンブル平均 (JMA25) とそれとメンバー数の等しい MCGE (J9N8C8) の RMSE。図 (a) の赤丸は, JMA25 のほうが MCGE (J9N8C9) よりも予報精度が良かったときを示す (Matsueda et al. 2007 より引用)。

よりもスキルがある (ない) ことを示し, その値は JMA25 の RMSE をどの程度削減できたかを表す。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% 削減され, JMA25 の RMSE の大きさによらず, 20% 程度までの誤差を削減できることが分かる。これは, 大気の状態が予測しやすい場であるかどうかに関わらず, MCGE を構築することで, 予報誤差を同程度削減することができることを表す。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。

2.2 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

各数値予報機関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 3 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 (Z500, 5500 m) である。図 3 (a) は, 各アンサンブル平均に対するスパゲッティダイアグラム, 図 3 (b) は各数値予報機関の各メンバー (JMA: 25 メンバー, NCEP: 11 メンバー, CMC: 17 メンバー) に対するスパゲッティダイアグラムである (いずれの図も実況を黒線で表した)。図 3 (b) から明らかのように, 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いたにもかかわらず, NCEP の全メンバーは, 実況よりも上流にブロッキングを

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

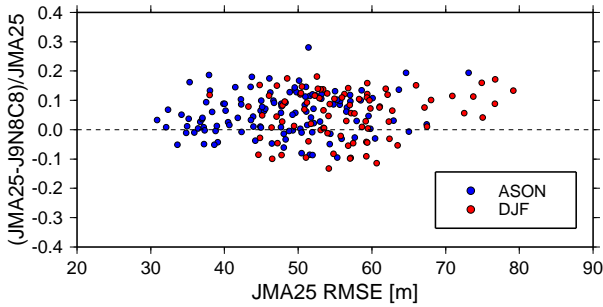


図 2: 北半球 500hPa 高度場の 120 時間予報に対する JMA25 の RMSE とそれに対する MCGE (J9N8C8) の RMSE の改善率 (2005 年 8 月から 2006 年 2 月)。赤丸は 2005 年 8 月から 2005 年 11 月を、青丸は 2005 年 12 月から 2006 年 2 月を表す (Matsueda et al. 2007 より引用)。

予測していた。図 3 (a) のアンサンブル平均に対するスパゲッティダイアグラムからも、NCEP が他センターに比べ、より上流にブロッキングを予報していたのが明瞭にわかる。JMA のメンバーはブロッキングの位置を正確に予報でき、NCEP のメンバーは正しく予報できなかったため、以下、JMA と NCEP のコントロールランに注目する。

図 4 は、2005 年 12 月 10 日 12 UTC (初期値) における JMA と NCEP のコントロールラン (Z500)、および、それらの差を表す。このときは、日本の東に NCEP より JMA の方が高度場が高い領域があり、アメリカ大陸上では、ロッキー山脈付近を中心に全体的に NCEP の高度場が低い傾向にあった。図 5 は、2005 年 12 月 10 日 12 UTC を初期値とする JMA と NCEP のコントロールランの予報である (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 とともに、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

20051210 12UTC +120hr
500hPa Height (Spaghetti: 5500m)

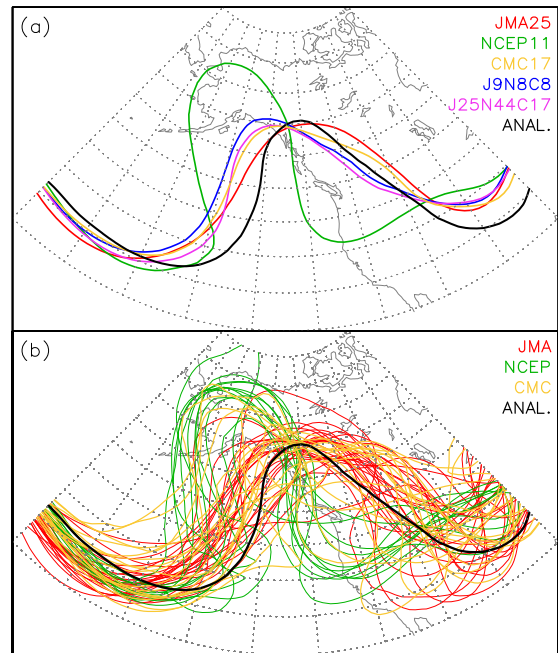


図 3: 500hPa 高度場 (5500m) の spaghetti diagram。(a) 各数値予報センターおよび MCGE のアンサンブル平均 (JMA25, NCEP11, CMC17, J9N8C8, J25N44C17)。(b) JMA, NCEP, CMC のアンサンブルメンバー (CMC は 2005 年 12 月 10 日 00 UTC 初期値, JMA および NCEP は 2005 年 12 月 10 日 12 UTC 初期値)。色細線は書くアンサンブル平均あるいは各メンバーを表し、太黒線は実況を表す (Matsueda et al. 2007 より引用)。

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 4 にみられた日本に東の高度場の違いが原因であるかのように見え

Comparison of Control Run (Z500)
20051210 12UTC +000hr

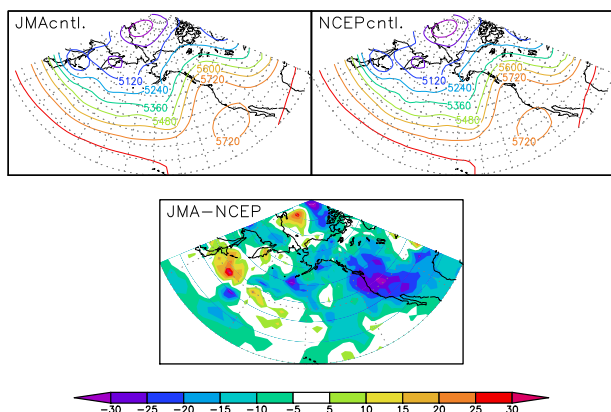


図 4: 2005 年 12 月 10 日 12 UTC (初期値) における JMA(左上) と NCEP(右上) のコントロールラン (Z500), および, それらの差 (下図)。

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現段階で断言することはできない。ただ, 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, 予報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報できるようになっているので, 今回の事例に関しては, 少なくとも NCEP モデルに問題があったとは言い難いように思う。これについては, たとえば, NCEP の初期値を用いた JMA のモデルランを行うことで, NCEP の誤予報の原因がモデルにあったかどうかを断定することができるだろう。

JMA と NCEP のコントロールランの予報が大きく異なった原因はさておき, アンサンブル予報が初期値に含まれる不確定性を初期摂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キングの位置を正しく予報できなかったとしても, 摂動ランが正しく予報できていても良いはずである。しかしながら, 今回の事例では全摂動ランがコントロールランと同じようにブロッキングを上流に予測していた。調べてみると, 予報時間 48 時間のときに, すべての摂動ランにおいて, コントロールランと同様の「三つ玉構造」の予報誤差が含まれており, その後もコントロールランと同じ時間発展をしていた。つま

Multi-Center Grand Ensemble
20051211 12UTC +096hr
500hPa Height (Spaghetti: 5500m)

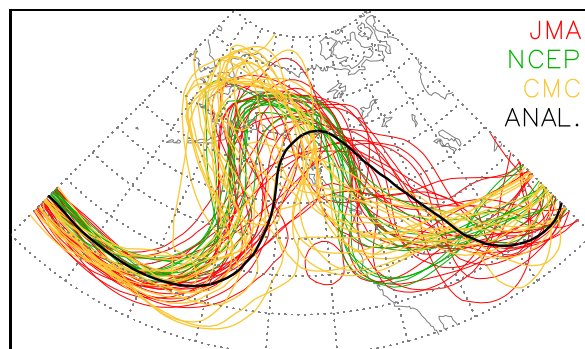


図 6: 2005 年 12 月 11 日 12 UTC を初期値とする 96 時間予報 (Z500) の spaghetti diagram (5500m)。CMC については, 2005 年 12 月 11 日 00 UTC を初期値とする 108 時間予報。

り, 効果的な摂動が与えられていなかった, あるいは, 摂動の大きさが小さかった可能性が考えられる。図 4 の初期値の差, とくに日本の東の初期値の差, を (少しではあるが) 埋めるような初期摂動が, 03m と 04m に含まれていたが (図省略), この摂動 (擾乱) は初期値の予報誤差を打ち消すように予報時間 48 時間まで成長したものの, 予報時間 60 時間以降, 予報誤差の急成長に追いつく (打ち消す) ことができず, 結果としてこれらの摂動ランもコントロールランと同様の振る舞いをしてしまった (とはいえ, 03m (04m) のブロッキングに対する RMSE は, NCEP のメンバー中で最も (二番目に) 小さかった)。このことから, NCEP の摂動の大きさが小さかったことが, NCEP の「集団自殺」の要因の一つであるといえるかもしれない。NCEP の摂動の大きさは JMA のその半分程度なので, 仮に NCEP の摂動を大きくした場合, 03m, 04m のような摂動ランでブロッキングの位置を正しく予報できるようになるのかは興味のあるところである。

今回取り上げた 2005 年 12 月 15 日に発生したブロッキングに対する予報には, このほかにも興味深いことがある。2005 年 12 月 11 日 12 UTC (CMC については 00 UTC) を初期値とする予報では, 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 日のブロッキングを実況よりも上流に予測していた (図 6)。面白いことにこれらのメンバーは, 先にあげた北太平洋上の「三つ玉構

造」の予報誤差を12月12日に伴っていた。NCEPについては12月10日初期値のメンバーほどではないが、依然としてプロッキングを実況よりも上流に予報していた。また、JMAのアンサンブルについては、Breeding法の制約から、12月12日初期値の一部のメンバー(10p, 11p)の初期摂動にこの「三つ玉構造」が含まれており(Breedingサイクルが12時間である上に初期摂動同士を直交化してはいるが、11日初期値の24時間予報誤差と同様の「三つ玉構造」が12月12日の初期摂動に含まれていた)、これらのメンバーは12月11日初期値の10p, 11pと同様、12月15日のプロッキングを“自動的に”上流に予報してしまっていた。

3 まとめ

図3(a)にみられるように、MCGEのメリットは、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」をなくすことにある。大気の場合が予報しやすいかどうかに関わらず、MCGEを構築することで、初期値の不確実性やモデルの不完全性に起因する予報誤差を削減することができるようになる。

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報を取り上げた。12月15日に発生したプロッキングに関する予報がJMAとNCEPで大きく異なった原因は、モデルではなく初期値にある可能性が高く、NCEPの初期値を用いてJMAのモデルランを行うなど更なる解析を行う必要があるだろう。

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、特定の数値予報機関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、各数値予報機関が協力することで、たとえば、図4に示した日本の東の初期値の差は、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。

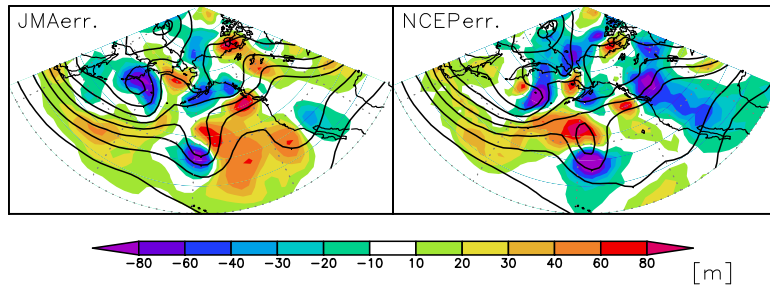
謝辞

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。

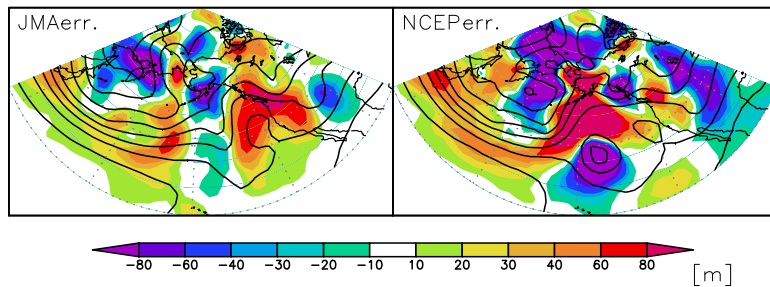
参考文献

- 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.
- Krishnamurti, T.N., C.M. Kishtawal, T.E. LaRow, D.R. Bachiocchi, 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*, submitted.
- 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.
- Ziehmann, C., 2001: Comparison of a single-model EPS with a multi-model ensemble consisting of a few operational model. *Tellus*, **52A**, 280–299.

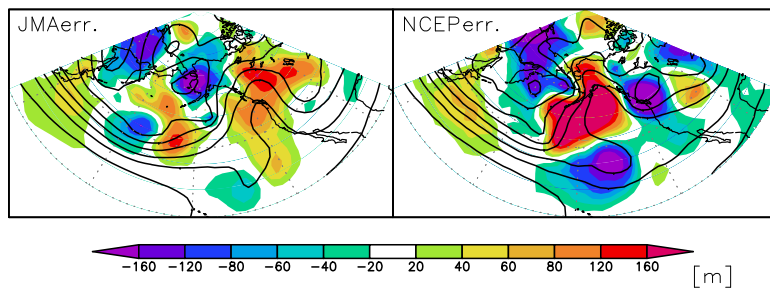
Comparison of JMA and NCEP (Z500)
20051210 12UTC +048hr



Comparison of JMA and NCEP (Z500)
20051210 12UTC +072hr



Comparison of JMA and NCEP (Z500)
20051210 12UTC +096hr



Comparison of JMA and NCEP (Z500)
20051210 12UTC +120hr

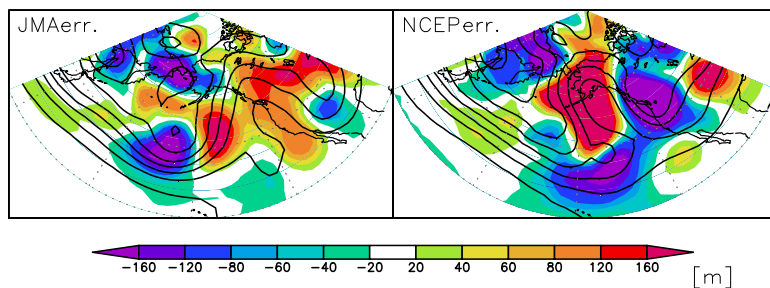


図 5: 2005 年 12 月 10 日 12 UTC を初期値とする JMA と NCEP のコントロールランの予報 (Z500)。上から順に, 48 時間予報, 72 時間予報, 96 時間予報, 120 時間予報。コンターは高度場 (120 m 間隔) を, シェイドは各センターの解析値に対する予報誤差を表す。