

# 気象庁週間アンサンブル予報データを用いた ブロッキング形成期の予測可能性評価

竹村 和人 (京大・院理)・向川 均 (京大・防災研)

## 1 はじめに

ブロッキングは、中緯度域において卓越する偏西風が、数日～数週間にわたって南北に蛇行する状態として特徴づけられる。ブロッキングに関する先行研究により、準定常ロスビー波束の伝播といった低周波変動の力学や、移動性擾乱に伴う渦度フラックスの発散といった高周波変動の力学が、ブロッキングの形成・維持に重要であることが指摘されている (Nakamura *et al.* 1997, Shutts, 1983 など)。一方、ブロッキングの予測可能性に関する研究 (たとえば, Kimoto, 1992 など) により、ブロッキングの発生に伴って、予報誤差が増大することが指摘されているが、その原因は未解明であり、ブロッキングの発生に伴う予報誤差の変動の解明は、中期予報精度向上に関わる重要な問題である。このため、本研究では、気象庁週間アンサンブル予報データを用いて、2007年12月に北大西洋～ヨーロッパ域で発生したブロッキング、および2009年1月に北太平洋東部で発生したブロッキングの2事例について、その形成期における予測可能性の評価、および初期摂動場がブロッキングの予測に及ぼす影響について解析を行った。

## 2 使用データと解析手法

### 2.1 使用データ

1979年1月から2009年2月までのJRA25再解析/JCDASデータ(水平解像度は $1.25^\circ$ 、鉛直層は1000hPaから0.4hPaまでの23層:以下、解析値)、および、気象庁より提供された2007年11月から2009年2月までの週間アンサンブル予報データ(以下、予測値)を用いた。ここでは、気候値を1979年1月～2006年12月の日々の平均値に、60日のlow-pass filter(Duchon, 1979)を施したもので定義した。また、予測値のアンサンブルメンバー数は、摂動を加えないコントロールラン1個と、SV法により作成された摂動を含む50個の摂動ランの、合計51個であり、毎日9日間(216時間)の予測が実施されている。なお以下の解析では、解析値ならびに予測値の日平均値を用いた。また、両データについて、ブロッキングや準定常ロスビー波列に対応した低周波

変動成分を抽出するために、各変数に5日移動平均を施した値を用いた。一方、移動性擾乱に対応した高周波変動成分を抽出するために、元の日平均値より5日移動平均値を引いた値を用いた。ただし、予測値について、1日予測値までは予測値のみでは5日移動平均が計算できないため、初期値より前の期間については、解析値(コントロールランの初期値で代用)を用いて、移動平均値を求めた。

### 2.2 ブロッキングの検出方法

解析するブロッキングの事例の検出には、Pelly and Hoskins (2003)の力学的対流圏界面上の温位勾配の逆転を示すブロッキングインデックスを用い、2007年12月以降の冬季(12月～2月)に発生した事例を検出した。以下では、検出した事例のうち、2007年12月に北大西洋～ヨーロッパ域で発生したブロッキング事例と、2009年1月に北太平洋域で発生したブロッキング事例の解析結果について紹介する。

### 2.3 スプレッドを用いた予測可能性の評価

解析事例の予測精度の評価には、スプレッドを用いる。スプレッドは、各アンサンブルメンバーのばらつき指標であり、次式で定義される。

$$S \equiv \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - F_m)^2}. \quad (1)$$

ここで、 $N$ はアンサンブルメンバー数、 $F_i$ は各アンサンブルメンバーの予測値、 $F_m$ はアンサンブル平均を表す。一般に、スプレッドが大きければ予測可能性は低く、小さければ高い。ここでは、「ブロッキングの強さ」(定義については、後に述べる)の予測値のスプレッドを算出し、ブロッキング形成期の予測可能性の評価を行った。

### 2.4 簡易感度解析による高感度領域の検出

ブロッキング形成の予測に大きく影響する初期誤差場を求めるために、Enomoto *et al.*, (2007)の簡易感度解析を行った。この解析では、ある予報時刻(以下、検証日)の、ある領域(以下、検証領域)における摂動を最大にするような初期摂動場を、各アンサ

ンブルメンバーの線形結合で推定する。ここで、摂動場は、コントロールランからのずれで定義し、解析に用いるメンバーは、コントロールランおよび反対符号の摂動ランを除く 25 メンバーを用いた。また、摂動のノルムは乾燥全エネルギーノルムで定義した。この解析によって、検証日の検証領域における乾燥全エネルギーノルムを最大にするような、初期摂動場（以下、高感度領域）が求められる。

### 3 解析結果

#### 3.1 2007 年 12 月に北大西洋～ヨーロッパ域で発生したブロッキング事例

この事例のブロッキングの形成日は、2007 年 12 月 12 日で、ブロッキングはその後約 10 日間持続した。この事例における、ブロッキング形成期である、12 月 8 日から 14 日までの、2 日ごとの 300hPa 高度の低周波変動成分の分布を、図 1 に示す。気候値からの偏差場（カラー）に着目すると、この期間、北太平洋東部～北米西岸、東岸～北大西洋～ヨーロッパ域にかけて、準定常ロスビー波列に対応した偏差が見られ、その下流側のヨーロッパ周辺でブロッキング高気圧が形成、強化しているように見える。このことは、低周波変動成分がブロッキングの形成に寄与していることを示唆している。ここで、ブロッキング領域を、ブロッキング高気圧が形成された  $50^{\circ}\text{N} \sim 75^{\circ}\text{N}$ 、 $20^{\circ}\text{W} \sim 30^{\circ}\text{E}$  と定義し、この領域における、300hPa 高度偏差の低周波変動成分の平均値をブロッキングの強さ（単位:gpm）と定義する。

まず、この事例の予測可能性を、ブロッキングの強さのスプレッド（単位:gpm）を用いて評価する。図 2 に、12 月 1 日から 20 日までの、初期日ごとの、ブロッキングの強さのスプレッドの変動を示す。この図より、ブロッキングの形成日である 12 月 12 日よりも前の数日間、特に 5 日予測（青線）、7 日予測（赤線）のスプレッドが増大していることが分かる。この結果は、先行研究で指摘されたブロッキング形成期における予報誤差の増大と整合的である。以下では、Enomoto *et al.*,(2007) の簡易感度解析により、スプレッドが大きな値を示した 12 月 8 日を初期日とするアンサンブル予測に着目し、どのような初期摂動場がブロッキング形成の予測に最も大きな影響を与えたのかについて調べる。ここで、検証日は 12 月 12 日（ブロッキング形成日）、すなわち 12 月 8 日からの 4 日予測日とし、検証領域はブロッキング領域とする。つまり、4 日予測日のブロッキング領域における乾燥全エネルギーノルムを最大にするような、初期摂動（高感度領域）を求める。

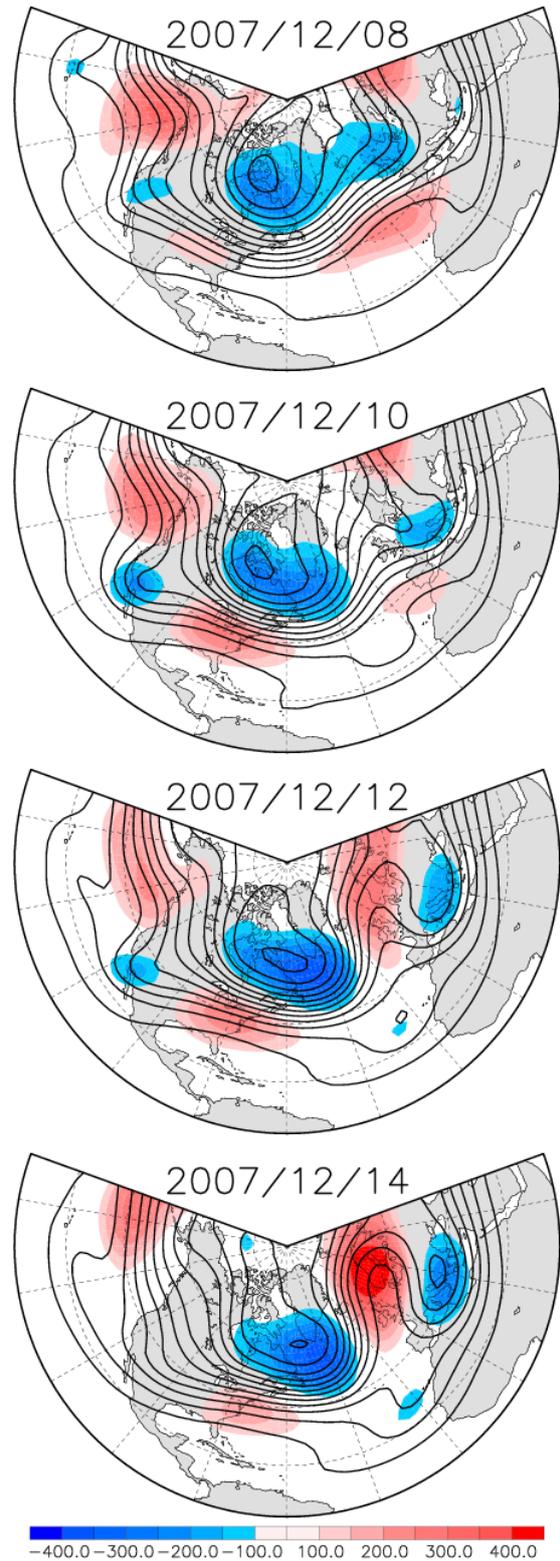


図 1: 2007 年 12 月 8 日～14 日の期間における 2 日毎の 300hPa 高度場の低周波変動成分（単位:gpm, コンター:120gpm 間隔）と、気候値からの偏差（カラー）。

解析結果を、図 3 に示す。この図で、高感度領域（カラー）と高度偏差の低周波変動成分（コンター）との対応を見ると、北太平洋東部の高気圧性偏差、および、北米西岸付近の低気圧性偏差の中心付近に高感度領域が分布していることが分かる。このよ

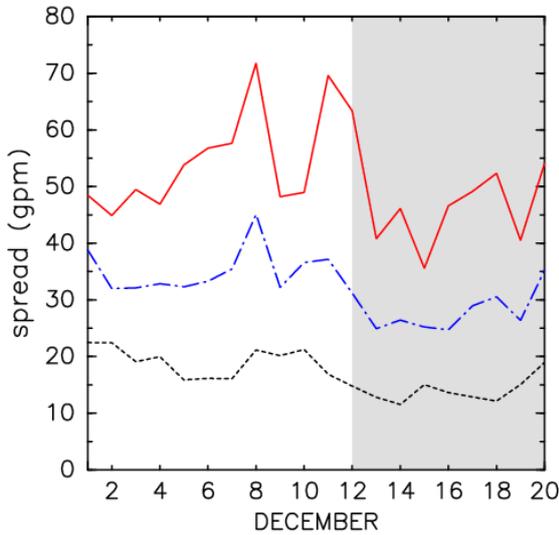


図 2: 12月1日から20日までの、ブロッキングの強さのスプレッドの初期日依存性(単位: gpm). 横軸は初期日, 縦軸はスプレッド. 黒線は3日予測, 青線は5日予測, 赤線は7日予測におけるスプレッドの変動を表している.

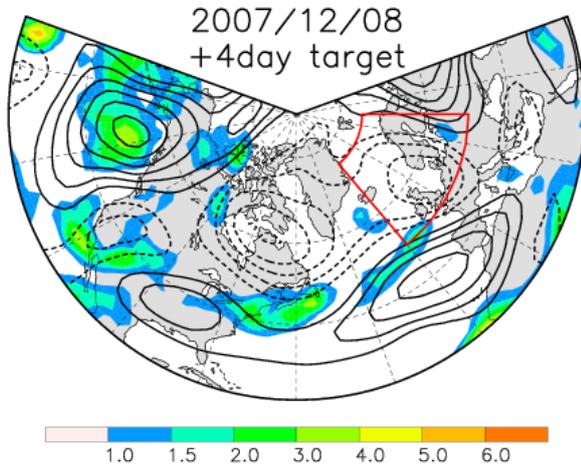


図 3: 2007年12月8日における, 4日予測日の検証領域に対する高感度領域(カラー). 乾燥全エネルギー(単位: J/kg)で表示している. 12月8日の300hPa高度場偏差の低周波変動成分をコンター(50gpm間隔)で表示した.

うに, 高感度領域が, 準定常ロスビー波列に対応した高度偏差の中心と対応していることから, 予測値におけるロスビー波束伝播の違いが, 検証領域の高度場のスプレッドに影響を及ぼしている可能性が考えられる. そこで以下では, 準定常ロスビー波列に沿った, 300hPa高度場のスプレッドの時間変動を調べる. ここで, 波列に沿った線は, 12月8日~15日, すなわち予測期間で平均した, 300hPa高度偏差の低周波変動成分より, 準定常ロスビー波列に対応した偏差(図4のコンター)の中心間を結ぶ直線(図4の太点線)と定義した. この線に沿った, 300hPa高

度場のスプレッドの経度-時間断面図を図5に示す. 一方, この期間における, 波列に沿った300hPa高度偏差の低周波変動成分の分布を図6に示す. 図5と図6の比較より, 初期日あるいは予測期間の前半には, 110°W付近の低気圧性偏差の領域にスプレッドの大きな領域が存在するが, 予測4日目では, より下流側の70°W付近, 予測6日目では, 20°W付近でスプレッドが拡大する. また, 予測6日目のスプレッドの極大域は, 検証領域(20°W~30°E)のやや上流側に位置してはいるが, 検証領域のスプレッドの拡大とほぼ対応している. また, 図6からは, 北太平洋東部域からヨーロッパ域への準定常ロスビー波束のエネルギー伝播(図6の矢印)が見られ, これと対応する群速度でスプレッドの大きな領域が下流側に伝播していることが分かる(図5の矢印). さらに, スプレッドの極大域におけるスプレッドの等値線は, 各経度でほぼ時間軸(縦軸)に平行である. このことは, スプレッドの個々の極大域が経度方向に移流してはいないことを示している. 従って, これらの比較から, 準定常ロスビー波束のエネルギー伝播の予測の可否が, 検証領域におけるブロッキングの予測に大きな影響を与えていることが示唆された.

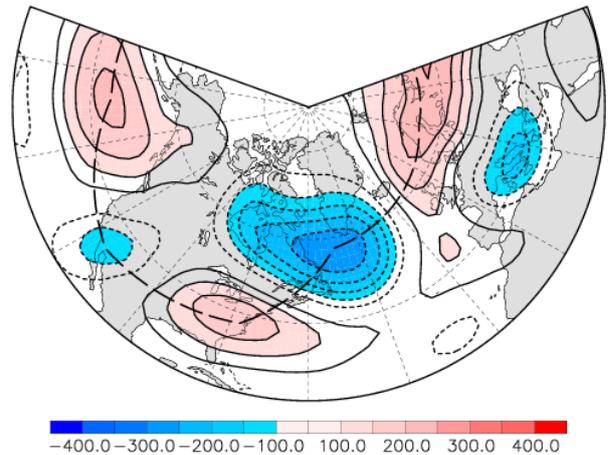


図 4: 2007年12月8日~15日の8日間で平均した, 300hPa高度場偏差の低周波変動成分(コンター: 50gpm間隔). 準定常ロスビー波列に対応させて, 高/低気圧性偏差の中心間を結んだ直線を太点線で示した.

### 3.2 2009年1月に北太平洋で発生した事例

この事例におけるブロッキングの形成日は, 2009年1月14日で, ブロッキングはその後約7日続いた. この事例における, ブロッキング形成期である, 1月10日から16日までの, 2日ごとの300hPa高度の低周波変動成分を図7に示す. 気候値からの偏差場(カラー)に着目すると, ブロッキング高気圧の形

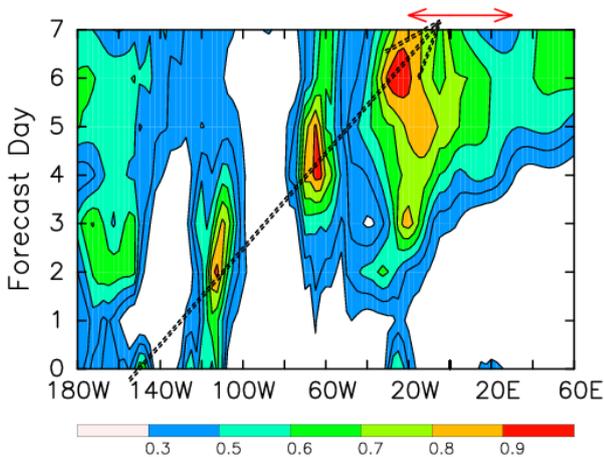


図 5: 2007 年 12 月 8 日を初期日とする, アンサンブル予報での, 初期日から 7 日予測までの, スプレッド(カラー)の経度-時間断面図. 横軸は準定常ロスビー波列(図 4 の太点線)に沿った経度, 縦軸は予測日. スプレッドは予測日とともに大きく増加するため, 各予測日ごとに北半球域(20°N~90°N)におけるスプレッドの最大値で規格化した. 検証領域は, 図の赤矢印で示した経度範囲に対応する.

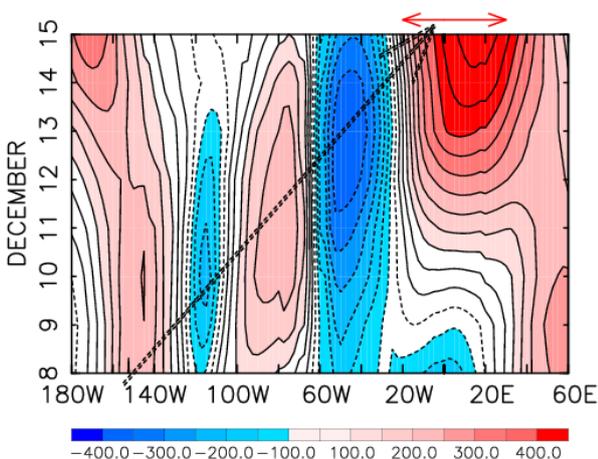


図 6: 2007 年 12 月 8 日から 15 日までの, 準定常ロスビー波列(図 4 の太点線)に沿った, 解析値における 300hPa 高度場偏差の低周波変動成分の経度-時間断面図(コンター: 50gpm 間隔). 検証領域は, 図の赤矢印で示した経度範囲に対応する.

成域(北太平洋東部~北米西岸周辺)よりも上流域において, 2007 年 12 月の事例で見られたような, 準定常ロスビー波束の伝播は明瞭ではない. 従って, ブロッキングの形成に対する, 低周波変動成分の寄与は小さいことが示唆される. 以下では, ブロッキング領域(検証領域)を, ブロッキング高気圧が形成された 40°N~80°N, 210°E~260°E と定義し, この領域における, 300hPa 高度偏差の低周波変動成分の平均値をブロッキングの強さ(単位:gpm)と定義する.

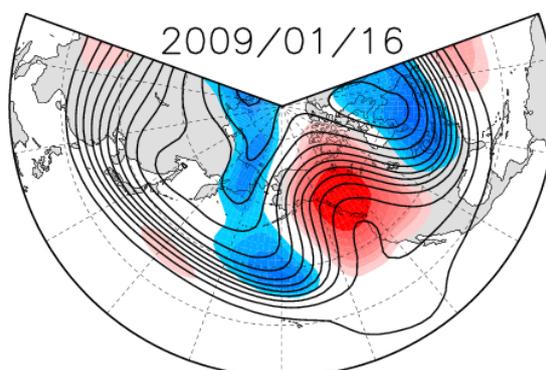
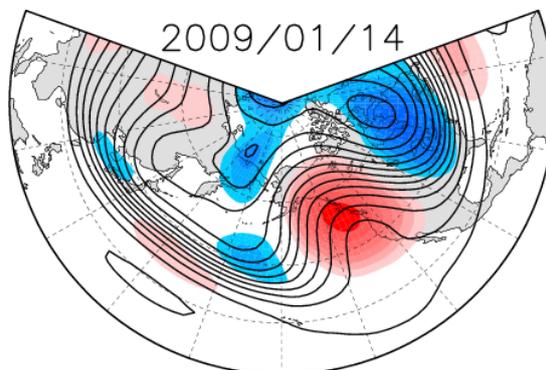
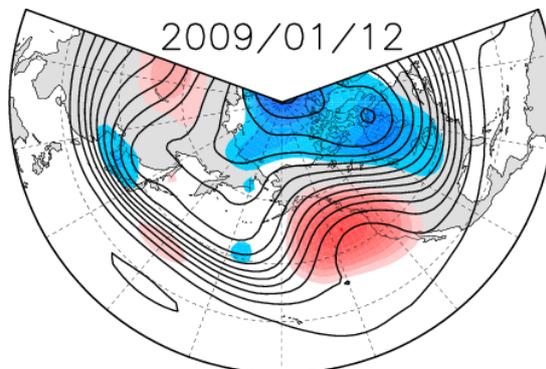
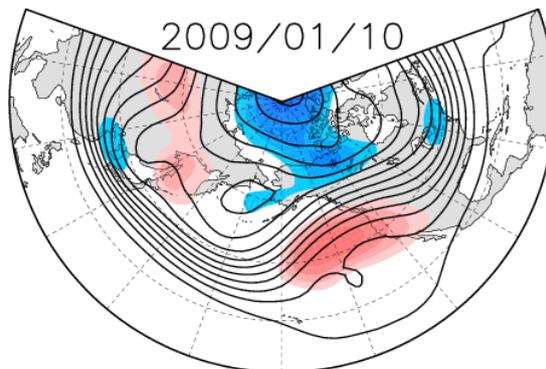


図 7: 図 1 と同じ. 但し, 2009 年 1 月 10 日~16 日の期間.

まず, この事例の予測可能性を, ブロッキングの強さのスプレッド(単位:gpm)を用いて評価する. 図 8 に, 1 月 4 日から 20 日までの, 初期日ごとの, ブロッキングの強さのスプレッドの変動を示す. この図より, ブロッキング形成日である, 1 月 14 日より前の数日間, 2007 年 12 月の事例ほど顕著ではないが, ス

ブレットがやや増加していることが分かる。以下では、スプレッドが大きな値を示した1月10日を初期日とするアンサンブル予報に着目し、Enomoto *et al.*,(2007)の簡易感度解析を用いて、どのような初期擾動場がブロッキング領域の予測に影響していたのかを調べる。ここで、検証日は1月14日(ブロッ

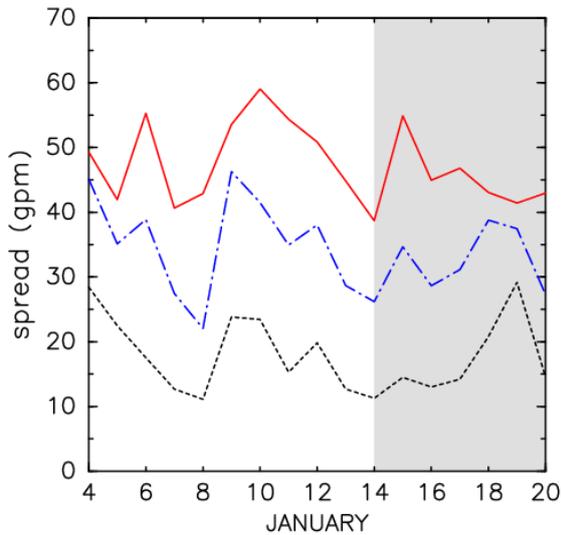


図 8: 図 2 と同じ。但し、1月4日から20日までの、検証領域におけるブロッキングの強さのスプレッド(単位: gpm)の初期日依存性。

キング形成日), すなわち1月10日からの4日予測日とし、検証領域はブロッキング領域とする。解析結果を、図9に示す。この図より、検証領域(図の赤枠で囲った領域)の上流側の、日本の東海上の移動性擾乱(コンター)の周辺に、強い高感度領域(カラー)が存在していることが分かる。

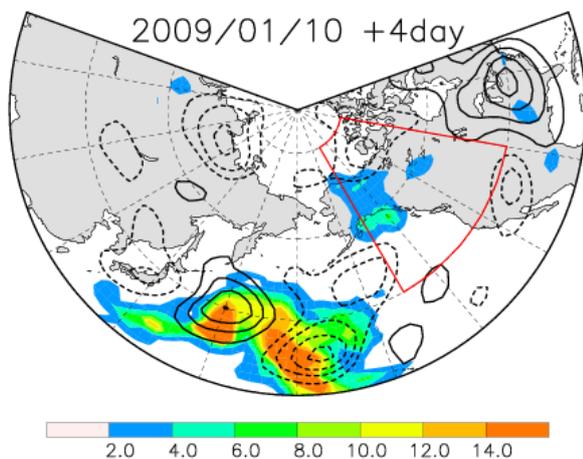


図 9: 図 3 と同じ。但し、2009年1月10日の初期擾動の、4日予測日の検証領域に対する高感度領域を示す。1月10日初期日の300hPa高度場偏差の高周波変動成分をコンター(実線を50gpm間隔)で示した。

そこで、この塊状の高感度領域に着目し、どのように検証領域のスプレッドに影響を与えるのかについて、300hPa高度場のスプレッドの分布を用いて調べた。1月10日初期日からの、初期日、1日~3日予測における、300hPa高度場のスプレッドの分布を、図10に示す。この図より、高感度領域の見られた北太平洋中部域に存在するスプレッドの極大域が、予測日とともに、移動性擾乱とともに東進、北上し、検証領域に達していることが分かる。ここで、1日予測日(上から2段目の図)に着目すると、スプレッドの極大域と低気圧性擾乱がよく対応していることから、予測された移動性擾乱の振幅のスプレッドが、ブロッキング形成の予測に影響を与えている可能性が示唆される。しかしながら、スプレッドの極大域と移動性擾乱の中心とは常に対応していないため(たとえば、2日予測日)、スプレッドと移動性擾乱の対応については、今後詳細な解析が必要である。

#### 4 まとめ

気象庁週間アンサンブル予報データを用いて、2007年12月に北大西洋~ヨーロッパ域で発生したブロッキングと、2009年1月に北太平洋域で発生したブロッキングについて、その形成の予測可能性を検討した。

はじめに、ブロッキングの強さ(ブロッキング形成域における、300hPa高度偏差の低周波成分の平均値)のスプレッドの初期日依存性を調べた。その結果、両事例ともに、ブロッキング形成日よりも前の数日間、スプレッドが大きな値を示していた。次に、スプレッドが大きな値を示していた初期日に着目し、どのような初期擾動場がブロッキング形成の予測に影響していたのかを調べるために、Enomoto *et al.*,(2007)の簡易感度解析を行った。

その結果、2007年12月に北大西洋~ヨーロッパ域で発生した事例については、北太平洋東部~北米西部に高感度領域が検出され、その付近では準定常ロスビー波列が発達していた。また、300hPa高度場のスプレッドの時間発展より、準定常ロスビー波束伝播の予測の可否が、ブロッキング形成域の予測に影響を与えていることが示唆された。この結果は、低周波変動成分が、この事例におけるブロッキング形成の予測に大きな影響を与えていたことを示している。

一方、2009年1月に北太平洋東部で発生した事例については、北太平洋西部に強い高感度領域が検出され、その領域は移動性擾乱の活動の大きい領域と

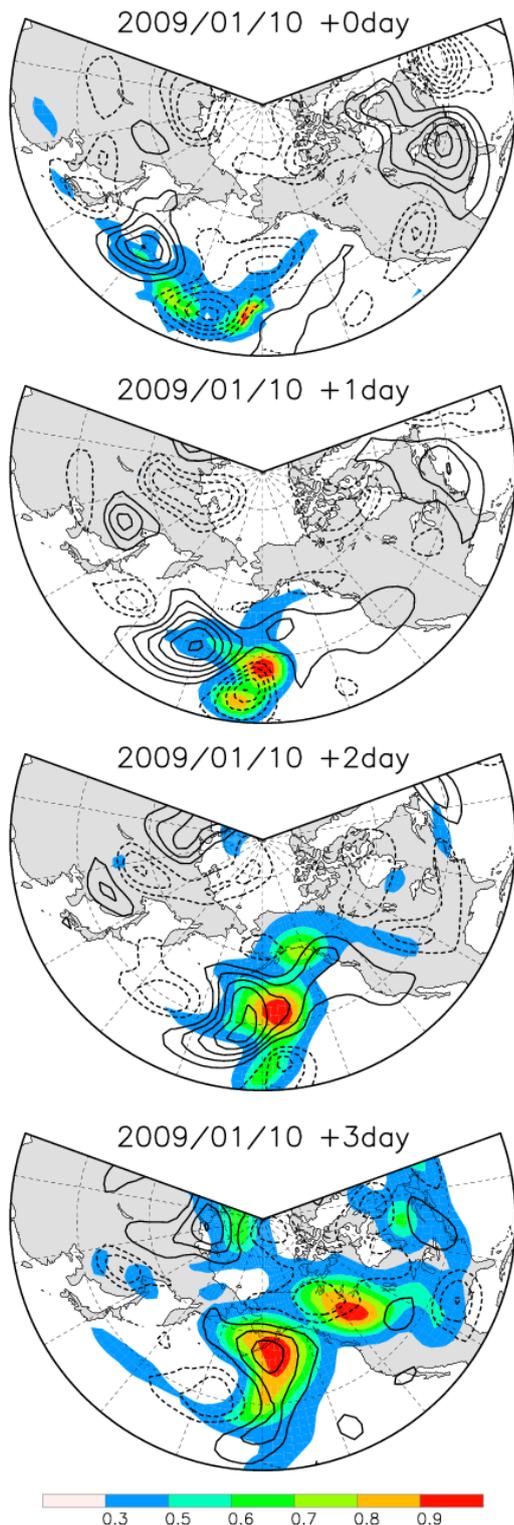


図 10: 1月10日初期日からの、初期日、および1~3日予測日における、300hPa 高度場のスプレッド (カラー, 単位:gpm) の分布. スプレッドは、予測日とともに大きく増加するため、各予測日ごとに、北半球域 (20°N ~ 90°N) におけるスプレッドの最大値で規格化した. 各予測日の、解析値における 300hPa 高度偏差の高周波変動成分を、コンター (40gpm 間隔) で示した.

一致していた. 300hPa 高度場のスプレッドを用いた解析より、高感度領域周辺に分布していた、初期日におけるスプレッドの大きな領域は、移動性擾乱

の東進とともに、東へシフトし、ブロッキング形成域に侵入していく様子が捉えられた. この結果は、予測における移動性擾乱の振幅のスプレッドが、移動性擾乱とともに東進することにより、ブロッキング形成の予測に影響を与えている可能性を示唆している. しかし、スプレッドの極大域と移動性擾乱との対応関係については、今後詳細な解析が必要である.

以上で示した結果は、ブロッキング形成の予測に対する、低/高周波変動成分の寄与を定性的に示したものである. 今後の研究では、両者のいずれが、ブロッキング形成の予測により大きく影響するのかについて、低/高周波変動の渦度収支に基づく相関解析によって定量的に明らかにしていきたい.

## 謝辞

発表の際に、多くの貴重な意見を頂けたことをお礼申し上げます. なお、図の作成には DCL(地球流体電脳ライブラリ) を用いました.

## 参考文献

Duchon, C. E., 1979: Lanczos filtering in one and two dimensions. *J. Applied Met.*, **18**, 1016-1022.

Kimoto, M., and H. Mukougawa, and S. Yoden, 1992: Medium-Range Forecast Skill Variation and Blocking Transition: A case study. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1616-1627

Nakamura, H., M. Nakamura, and J. L. Anderson, 1997: The role of high- and low-frequency dynamics in blocking formation. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2074-2093

Pelly, J.L. and B.J. Hoskins, 2003: A new perspective on blocking. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 743-755

Shutts, G.J., 1983: The propagation of eddies in diffuent jet stream: Eddy forcing of 'blocking' flow fields. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **109**, 737-762