

2023年1月の日本の寒波事例に対するアンサンブル随伴感度解析

Ensemble Adjoint Sensitivity Analysis for the Cold Wave over Japan in January 2023

福島実⁽¹⁾・榎本剛・高谷怜⁽²⁾・西村浩一⁽²⁾

Minori FUKUSHIMA⁽¹⁾, Takeshi ENOMOTO, Rei TAKATANI⁽²⁾ and Koichi NISHIMURA⁽²⁾

(1) 京都大学大学院 理学研究科

(2) 先端技術研究所

(1) Graduate School of Science, Kyoto University, Japan

(2) Advanced Technology Institute

Synopsis

Heavy snow in Japan in late January 2023 was analyzed using ensemble adjoint sensitivity analysis with JMA's global ensemble forecast data, focusing on the mean temperature over Japan at 1200 UTC, 24 January. Sensitivity, based on forecasts initialized about one week earlier, revealed significant regions near the Bering Sea and around 90°E over northern Eurasia. The Bering Sea sensitivity corresponded to a blocking high formed by an anticyclonic vortex detached from the subpolar jet two days before the cold surge, while the Eurasian sensitivity appeared four days earlier and migrated eastward toward Japan. The results highlight wave packet propagation along the subtropical jet and identify the blocking high near the Bering Sea as a key factor. The combined effect of these factors is suggested to have driven a southward surge of cold air from Mongolia and southern Central Siberia, leading to a widespread drop in temperature across Japan.

キーワード: 寒波, アンサンブル随伴感度解析, 接線形, 局在化

Keywords: cold wave, ensemble adjoint sensitivity analysis, tangent-liner, localization

1. はじめに

2023年1月24日から25日にかけて日本列島を襲った寒波は、関西地方を中心に記録的な大雪をもたらした。JR京都線・琵琶湖線の立ち往生や高速道路での車両滞留など、社会・経済活動に深刻な影響を与えた。鉄道では約7,000人が一晩車内に留め置かれ、道路交通の寸断も長時間に及んだ。このような寒波事例は、エネルギー需要を急増させることで電力の需給ひっ迫や価格高騰を引き起こす要因ともなるため、事前兆候の把握と早期予測は、防災・減災に加えてエネルギー政策上もきわめて重要である。

気象庁の異常気象分析検討会は、当該事例の要因として亜熱帯ジェット気流に沿った波束伝播やベンガル湾～南シナ海付近の対流活動を挙げ、これらが日本付近のトラフやベーリング海付近のリッジの発達に寄与した可能性を指摘している。しかしながら、個別事例における力学的過程の詳細整理や、特定時刻・特定領域の気象量に対して、どの場所の摂動がどの程度寄与したのかを体系的に追跡することは容易ではない。

本研究では、2023年1月24日から25日にかけての寒波の発生要因や前兆現象を特定することを目的とし、気象庁の全球アンサンブル数値予報 (GPV) を用い、

アンサンブル随伴感度解析 (Ensemble Adjoint Sensitivity Analysis; 以下EnASA)を行った。さらに、本研究ではEnASAを長期間適用する際に生じる解析精度の低下を軽減することを目的として Sliding Window Method (以下SWM)を導入した。SWMでは、ウィンドウごとにアンサンブルに基づく共分散を再推定することで高感度領域を適切に局在化できるとともに、予報時間幅を細分化することで摂動の線形成長という仮定をより保つことが可能となると考えられる。

本論文の残りの構成は以下の通りである。第2節では、EnASAの理論的背景と課題について述べ、それを克服するために導入したSWMを説明する。第3節では、解析に用いたデータおよび実験設定をまとめる。第4節では、2023年1月寒波事例に対する感度解析の結果を示す。第5節では結果を考察し、最後に第6節で本研究のまとめを述べる。

2. 解析手法

2.1 アンサンブル随伴感度解析

EnASAは、随伴感度解析のアンサンブル予報による近似であり、随伴モデルの代わりにアンサンブル予報を用いることで感度を求める手法である。ある時刻における検証変数の予報誤差が、初期時刻におけるどの予報変数の誤差に起因するかを定量的に評価する手法である。アンサンブル予報に適用することで、非線形な擾乱の振る舞いをより適切に評価できるという利点がある。

ある場の状態ベクトルが非線形時間発展するとし、擾乱は線形時間発展すると仮定する。検証領域・検証時刻でアンサンブル予報 (メンバー数: M , $t = 0$ で摂動 $\delta \mathbf{u}_m$ を与えた) が示す擾乱 $\delta \mathbf{V}$ は、摂動のメンバーの線形な組み合わせで表せる。ここで最も成長する摂動の係数を求めることが感度解析であり、その係数を $\mathbf{p}^T = (p_1, p_2, \dots, p_M)$ とすると

$$\delta \mathbf{V} = p_1 \delta \mathbf{v}_1 + p_2 \delta \mathbf{v}_2 + \dots + p_M \delta \mathbf{v}_M \quad (1)$$

とかける。そしてこの係数 $\mathbf{p}$ を用いて成長する摂動に対応する初期摂動 $\delta \mathbf{U}$ が(2)のように求まる。

$$\delta \mathbf{U} = p_1 \delta \mathbf{u}_1 + p_2 \delta \mathbf{u}_2 + \dots + p_M \delta \mathbf{u}_M \quad (2)$$

すなわち、検証時刻の予報誤差に最も影響を及ぼす初期摂動が得られる。初期時刻・検証時刻のアンサンブル摂動の行列はそれぞれ

$$\mathbf{U} = (\delta \mathbf{u}_1, \delta \mathbf{u}_2, \dots, \delta \mathbf{u}_M), \mathbf{V} = (\delta \mathbf{v}_1, \delta \mathbf{v}_2, \dots, \delta \mathbf{v}_M) \quad (3)$$

と表す。

コスト関数 J の摂動をアンサンブル予報から得る。

$$\delta \mathbf{j}^T = (\delta j_1, \delta j_2, \dots, \delta j_M) \quad (4)$$

この線型結合を(5)のように表す。

$$\delta j = \delta \mathbf{j}^T \mathbf{p} \quad (5)$$

そして $\delta \mathbf{U}^T \mathbf{G} \delta \mathbf{U} = \mathbf{p}^T \mathbf{U}^T \mathbf{G} \mathbf{U} \mathbf{p} = 1$ という条件で係数 $\mathbf{p}$ を最大化させる。ここで $\mathbf{G}$ は非負の対称行列で摂動の大きさの定義における重みを表している。

Lagrangeの未定乗数法より

$$\mathbf{p} = \frac{1}{2\lambda} (\mathbf{U}^T \mathbf{G} \mathbf{U})^{-1} \delta \mathbf{j} \quad (6)$$

よって $\mathbf{p}$ が $\delta \mathbf{j}$ に比例するので、最適摂動は(7)のようになる。

$$\delta \mathbf{U} = \delta j_1 \delta \mathbf{u}_1 + \delta j_2 \delta \mathbf{u}_2 + \dots + \delta j_M \delta \mathbf{u}_M \quad (7)$$

2.2 Sliding Window Method

EnASAでは、予報時間が長くなると予報変数と検証変数の関係に非線形性が現れ、解析精度が低下する。これは、摂動の線形性を仮定していること、またEnASAによって計算される感度場が広範囲に拡散し、高感度領域の特定が困難になるためである。これらのことから、従来の設定では寒波のような時間発展を持つ現象に対し、因果的な構造を安定して捉えることが難しい。これを補う工夫として導入したのが、SWMである。

SWMは、接線形の考え方に基づいており、一定の時間幅で初期時刻と検証時刻を変更することでEnASAに適用する。さらにウィンドウごとに得られた感度を、次ウィンドウに移る際に局在化することでコスト関数を更新する。つまり2.1節の形式に従えば、予報時刻におけるアンサンブル摂動の行列 $\mathbf{U}$ を局在化した行列 $\mathbf{U}'$ に置き換え、次ウィンドウでの検証時刻のアンサンブル摂動の行列 $\mathbf{V}$ として扱う操作に対応する。これを繰り返していくことで移動・変形する高感度領域を追跡する (Fig. 1)。またSWM適用際には $\mathbf{G}$ に局在化効果を示す投影行列が含まれる。

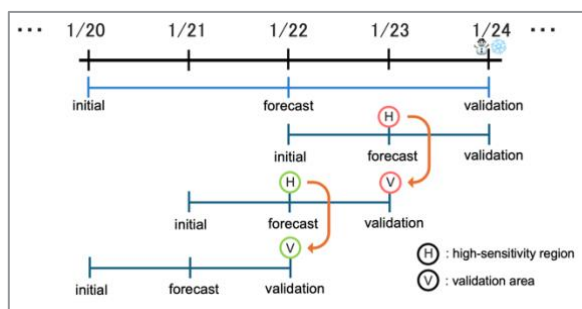


Fig. 1 Conceptual diagram of SWM.

3. 実験設定

本研究では、気象庁の2週間アンサンブル数値予報モデルGPV（高分解能全球域）を使用し、50メンバーのアンサンブルデータを用いた。解析にはEnASAを適用し、SWMを導入した。

解析手順は以下の通りである。まず、初期時刻と検証時刻を2日間隔で固定し、検証時刻側から予報時刻を初期時刻側へ遡るように解析を進めた。予報時刻は初期時刻までは遡らず、検証時刻から1日前の時点までと設定した。そして検証時刻から1日前の時点に対応する高感度領域を特定し、これを新たな検証時刻と検証領域に設定した。この操作を、高感度領域が確認できなくなるまで遡って繰り返した。感度場の判定は、空間的なコントラストや時系列的な一貫性を考慮して行った。

最初の解析では、検証時刻を2023年1月24日12UTCとし、検証領域を日本域（東経120度-150度、北緯20度-50度）とした。検証変数にはT850を用い、予報変数z500に回帰させた。しかしT850は局所性が強く、時間発展に伴いシグナルが拡散して追跡が困難となったため、安定的に捉えられる大規模場を表現でき

るz500を採用した。その後は、z500で得られた感度分布の中から高感度領域のみを抽出し、新たな検証領域として設定するとともに、検証変数もz500に切り替えて同様の解析を繰り返し行った。

4. 実験結果

2023年1月24日12UTCにおける日本域のT850を検証変数としてEnASAを実施した。その結果、検証時刻の3日前である1月21日12UTCの予報時刻において、ユーラシア大陸側と太平洋側に広範な高感度領域が確認された (Fig. 2(a), (b))。この領域を検証領域として、さらに遡る解析を行った。

4.1 ユーラシア大陸側の高感度領域

ユーラシア大陸側の高感度領域は、1月19日12UTCまでの遡ることができ、東経80度付近に明瞭な感度が確認された (Fig. 3)。1月19日以降、東経80度付近を南向きに徐々に移動する傾向が見られた。

4.2 太平洋側の高感度領域

太平洋上では、南北で異なる挙動を示す高感度領域が確認された。

北側の高感度領域について、1月22日12UTCの解析では、国際日付変更線付近の太平洋上に大きな擾乱が確認された。さらに遡ると、1月19日12UTCにはベーリング海付近（東経167.5度-180度、北緯45度-52.5度）に高感度領域が現れ、ほとんど動きは見られなかった (Fig. 4(a), (b))。

南側の高感度領域は1月19日12UTCまで、西側から東へ移動する様子が確認された (Fig. 5(a), (b))。

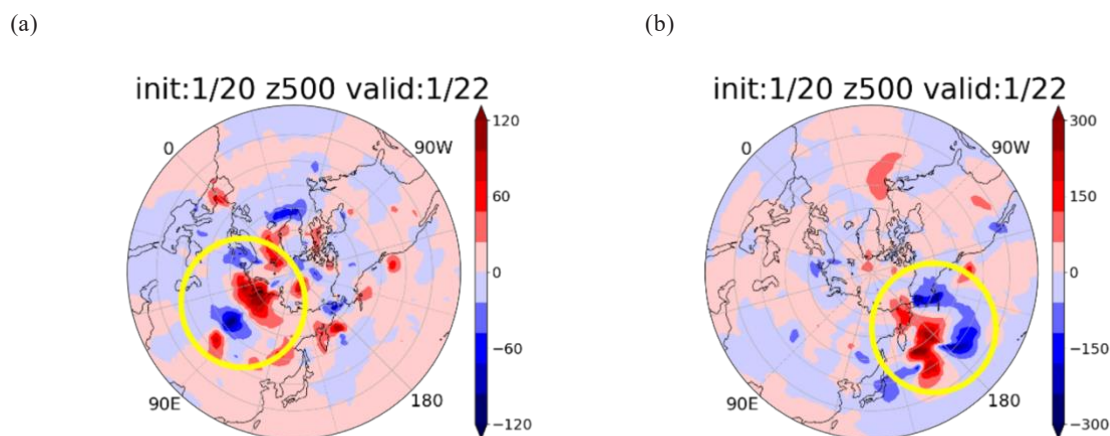


Fig. 2 Each panel shows the high-sensitivity regions of z500 at 12 UTC on January 21, 2023, (a) over the Eurasian continent and (b) the Pacific Ocean.

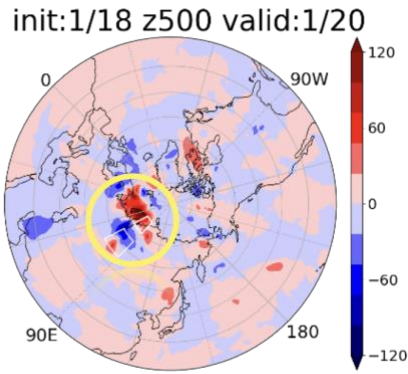
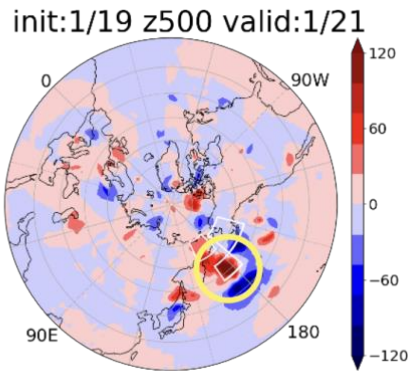


Fig. 3 High-sensitivity regions over the Eurasian continent at 12 UTC on 19 January.

(a)



(b)

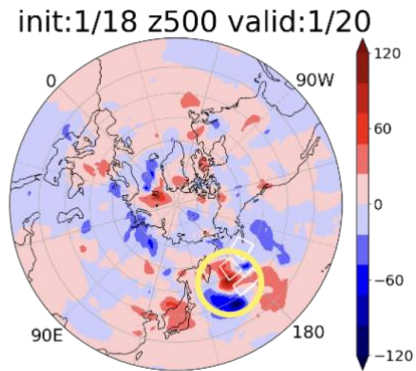
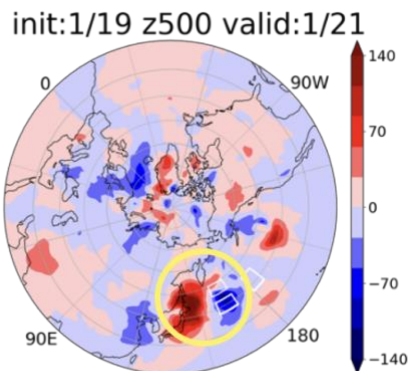


Fig. 4 High-sensitivity regions over the northern Pacific. (a) 12 UTC on 20 January and (b) 12 UTC on 19 January.

(a)



(b)

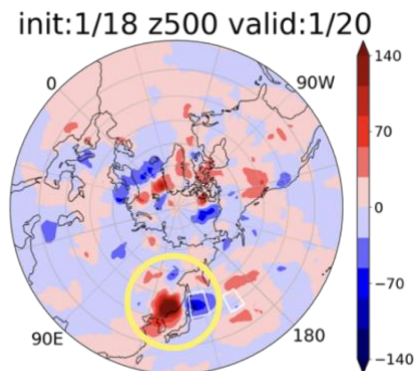


Fig. 5 High-sensitivity regions over the southern Pacific. (a) 12 UTC on 20 January and (b) 12 UTC on 19 January.

5. 考察

本研究で得られた解析結果は、2023年1月下旬の日本における寒波が複数の先行要因の複合作用によって発生したことを示唆する。

ユーラシア大陸側の高感度領域は、亜寒帯ジェット気流に沿った波束伝播に対応すると考えられる。この波束伝播がシベリア高気圧を強め、冷気の蓄積を促進した可能性がある。

一方、太平洋上空の北側の高感度領域は、1月23日頃にz500解析で確認されたベーリング海付近のブロッキング高気圧の切離に対応しているとみられる。この切離が、シベリアやモンゴル付近に蓄積された寒気を東アジア方面へ押し出す要因となったと考えられる。南側の高感度領域は、亜熱帯ジェット気流沿いの波束伝播に起因したものと推測される。

本研究では、気象庁が要因の一つとして挙げるベンガル湾・南シナ海付近での対流活動については有意なシグナルを検出できなかった。この点は、本解析手法および変数設定では捉えきれなかった可能性を示唆しており、今後の課題として、これらの地域との関連性をより詳細に検討する必要がある。さらに、得られた感度の局在化手法を工夫することで、より初期の時刻における感度分布を抽出できた可能性がある。局在化の際に変数や領域ごとに適切な重みづけを導入することで、弱い物理的に意味を持つシグナルを強調し、解析の有効性を高められることが期待される。

6. まとめ

本研究では、2023年1月24日・25日に発生した寒波を対象に EnASA を適用し、SWM を用いて高感度領域の時空間的な変化を追跡した。その結果、ユーラシア大陸および北太平洋上空に顕著な高感度領域が確認され、大陸側の感度場は亜寒帯ジェット気流に沿った波束伝播、北太平洋側の感度場はブロッキング高気圧の形成と切離、南側の感度場は亜熱帯ジェット気流沿いの波束伝播に対応していることが確認された。

参考文献

- 気象庁, 2022/2023 年冬の天候の特徴と大気循環場の特徴,
https://www.data.jma.go.jp/extreme/kaigi/2023/0302/r04_2nd_kentoukai_202303.html, 2025年8月29日閲覧.
- Enomoto, T., Yamane, S., Ohfuchi, W. (2015): Simple sensitivity analysis using ensemble forecasts, J. Meteorol. Soc. Jpn., Vol. 93, pp. 199–213.

(論文受理日：2025年8月29日)