

## 学位論文（要約）

### アンサンブル予報を用いた成層圏周極渦変動の力学と予測可能性の研究

野口 峻佑

#### 第1章 はじめに

大気運動自身に内在するカオスの性質により、大気運動の予測可能な期間には上限が存在する。例えば、中高緯度の対流圏循環については、その上限は2週間程度と見積もられている。その一方で、成層圏循環は対流圏循環変動に対して受動的に応答するだけと考えられてきたが、近年の研究により、成層圏周極渦が大きく時間変動する冬季には、逆に対流圏の大規模循環変動に有意な影響を及ぼすことがあることが明らかになってきた。成層圏循環偏差は対流圏循環偏差に比べてより長い時間スケールを持つことから、その情報が対流圏循環の予測可能期間の上限を超える期間を対象とする中長期予報の予測精度向上に寄与する可能性が指摘されている。このような背景から、近年、成層圏循環自体の予測可能性についても高い関心が寄せられている。

しかしながら、これまでの研究では、予報開始日の間隔が1週間程度と低頻度で実施された既存の現業アンサンブル予報データを用いた事例解析が主であったため、成層圏循環の予測可能性に関する知見は未だ断片的であり、成層圏循環の予測可能性の平均的描像さえも明らかになっていない。特に、冬季成層圏における顕著な季節進行に伴い予測可能期間がどのように変動するのか、あるいは、成層圏では予報誤差が平均的にどのような時間発展を示すのか等の予測可能性の基本的な知見も明らかではない。一方で、急激な時間発展を示す成層圏突然昇温（Stratospheric Sudden Warming; SSW）、特に極渦分裂型 SSW の、発生要因や予測特性も明らかではなかった。

そこで本研究では、これまで長期間にわたって蓄積されてきた現業アンサンブル予報データを用いた統計解析と、現業予報モデルと同等の予測性能を持つ大気大循環モデルを用いた高頻度アンサンブル予報実験を行い、冬季成層圏循環の平均的な予測可能性と、2009年1月に発生した顕著な極渦分裂型 SSW の生起要因や予測特性について吟味した。

#### 第2章 気象庁現業1ヶ月アンサンブル予報データを用いた各月での統計解析

本章では、冬季における成層圏周極渦の予測可能性の月毎の特性を明らかにするため、気象庁より提供された7冬季分の現業1ヶ月アンサンブル予報データセットを用いて、主として北極点温度予測値の系統的誤差とアンサンブルスプレッドについて解析した。

まず、各月の系統的誤差を、その月から開始された予報における、アンサンブル平均予測値の誤差の集団平均として定義し、その挙動を記述した。その結果、北極点温度の系統的誤差は、以下のように、高度に依存して特徴的な季節進行を示すことが初めて明らかになった。

- (1) 初冬には、有意な正の系統的誤差、すなわち高温バイアスが成層圏に存在する。この特徴は 11 月に特に明瞭である。
- (2) この系統的誤差は、予報期間が長くなるに従い、上部成層圏から下部成層圏へと下方伝播する。
- (3) 晩冬には、有意な負の系統的誤差、すなわち低温バイアスが上部成層圏に存在する。

なお、このような北極点温度の系統的誤差は、初冬の極渦形成期には予測された極夜ジェットが実際よりも弱く、晩冬の極渦消滅期には実際よりも強いことと対応している。

次いで、この系統的誤差の原因を吟味するために、波と平均流の相互作用の枠組みに基づき、Eliassen-Palm (E-P) フラックスの予測誤差について解析した。その結果、初冬、特に 11 月の高温バイアスは、予測では実際に比べて成層圏において惑星規模波が赤道方向に伝播しにくいことと関連することが明らかになった。また、この E-P フラックスの系統的誤差は、予報モデルの上部境界付近で明瞭であった。このため、予報モデルの上部境界条件が、成層圏での惑星規模波の伝播特性に無視できない影響を与えた結果、成層圏極域温度の高温バイアスをもたらした可能性が示唆される。一方で、晩冬の成層圏極域の低温バイアスは、E-P フラックスの系統的誤差では説明できない。このため、この低温バイアスは、予報モデルにおける、重力波抵抗などのパラメタリゼーションスキームや放射過程などの物理過程の表現の不完全性に起因すると考えられる。

さらに、対流圏から成層圏にわたる大気の高高度領域における、各月の平均的予測可能期間の上限を推定するために、北極点温度のアンサンブルスプレッドを各月で集団平均した値を用いて解析を行った。この解析では、Lorenz (1982) が提案した初期誤差の時間発展を記述するロジスティック方程式をアンサンブルスプレッドの時間発展に適用した。この工夫により、対流圏循環変動とは異なり、アンサンブルスプレッドの飽和値の大きさが気候学的標準偏差と大きく乖離するという特徴を持つ成層圏循環変動について、その予測可能期間の上限を定量的に見積もることが初めて可能となった。そして、この解析の結果、成層圏での予測可能期間の上限は、初冬に最大 35 日に達した後、季節進行とともに徐々に減少し、晩冬には 20 日となることが明らかになった。なお、これらの値は、対流圏における予測可能期間の上限値である 14 日よりも長い。また、この解析により、成層圏におけるアンサンブルスプレッドの初期成長率も定量的に見積もることが可能となり、その値は、初冬では約  $0.15 \text{ day}^{-1}$  (倍化時間: 4.6 日) で、季節進行とともに大きくなり、晩冬には約  $0.3 \text{ day}^{-1}$  (倍化時間: 2.3 日) と対流圏における代表的な値とほぼ等しくなることが明らかとなった。

### 第3章 2009年1月の分裂型突然昇温に対するアンサンブル再予報実験

本章では、2009年1月に生じた極渦分裂型SSWの予測可能性を詳細に吟味するために、気象研究所大気大循環モデルを用いたアンサンブル予報実験を行った。この予報実験では、極渦分裂に伴って急激に時間変動する予測特性を正確に捉えるため、全25メンバーからなる予測期間2ヶ月のアンサンブル予報を、初期日間隔1日の高頻度で実施した。なお、成層圏循環の予測可能性を解明するために、このような多数メンバーの高頻度アンサンブル予報実験を実施したのは、本研究が初めてである。

この予報実験結果の解析から、まず、SSWに伴って2009年1月24日(以下、Day 0)に生じた帯状風の東風への逆転を、アンサンブル平均予測値が再現できたのは、その6日前(Day -6)以降に開始した予報だけであることが明らかになった。また、帯状風予測値のアンサンブルスプレッドの時間発展も、この初期日を境にその様相が不連続的に変化する。すなわち、Day -7以前を初期日とする予報ではアンサンブルスプレッドがDay 0以降の予報期間で急激に増大するが、Day -6以降を初期日とする予報では予報期間を通じてほとんど増大しない。以上の結果から、このSSWに伴う帯状風の東風への逆転は、その6日前から予測可能であることがわかった。さらに、Day -8とDay -7に開始した予報のアンサンブルスプレッドは、1月下旬から2月上旬の期間で、それ以前を初期日とする予報に比べ、より急速に大きくなることが示された。なお、極渦分裂型SSW期間中におけるこのような予測可能性の急激な変動は、初期日間隔が1週間と長い既存の現業予報データを用いた解析では捕捉不可能であり、本研究で実施した高頻度アンサンブル予報実験によって初めて検知可能となった。

次に、アンサンブルスプレッドが1月下旬から2月上旬の期間に急激に大きくなった、Day -8とDay -7を初期日とするアンサンブル予報を用いて、極渦分裂の生起プロセスと、その生起に関わる前駆現象について解析を行った。このため、これらのアンサンブル予報のメンバーから、極渦の分裂と帯状風の東風への逆転を予測したメンバー(大昇温; MAJOR 集団)と、分裂が生じずに西風の再強化を予測したメンバー(小昇温; MINOR 集団)を取り出し、それぞれについて合成図解析を行った。その結果、MAJOR 集団では、極渦分裂の前後で、対流圏から上方伝播してきた惑星規模波が成層圏で吸収され、対流圏からの上方伝播が持続するのに対し、MINOR 集団では、惑星規模波が成層圏で反射されて、対流圏へと下方伝播することがわかった。このように、MAJOR 集団とMINOR 集団との違いは、惑星規模波の成層圏での伝播の様子の違いとしても特徴付けられる。

さらに、各集団での惑星規模波束の3次元伝播を解析し、両集団で惑星規模波の伝播に違いが生じた要因について吟味した。その結果、両集団で、以下のような有意な違いが存在することが見出された。

- (1) MINOR 集団では MAJOR 集団に比べ、予報初期にアラスカ域に存在していたブロッキング高気圧の下流域で、惑星規模波束の成層圏への上方伝播が有意に弱い。これと整合的に、MINOR 集団では、その直後のヨーロッパ域上空の上部成層圏における東西風の減速が有意に弱く、比較的強い西風が維持される。
- (2) このヨーロッパ域の上部成層圏に存在する比較的強い西風より、MINOR 集団では MAJOR 集団に比べ、極渦分裂の直前に対流圏から上方伝播する惑星規模波束をより反射しやすい。このため、MINOR 集団では、反射された惑星規模波束がシベリア域で局所的に下方伝播する。
- (3) MINOR 集団では、このような惑星規模波束の下方伝播に伴い、対流圏北太平洋西部で気圧の峰が新たに形成される。また、それに付随して、西半球で惑星規模波の位相が高度とともに東傾し、惑星規模波の下方伝播が顕著となる。一方、MAJOR 集団では、対流圏においてヨーロッパ域の高気圧性偏差とユーラシア大陸中央部の低気圧性偏差が持続する。それに伴って東半球で惑星規模波の上方伝播も持続し、大昇温が発生する。

このように、予報初期での両集団の違いは西半球の対流圏に存在するが、極渦分裂と直接関連する成層圏での惑星規模波の伝播経路に有意な影響を及ぼしたのは、極渦分裂直前でのヨーロッパ域上空の上部成層圏における帯状風構造であると考えられる。したがって、2009年1月に発現した極渦分裂型SSWでは、極渦分裂直前の成層圏循環がその生起に重要な役割を果たしていたことが示唆される。

なお、気象庁現業1ヶ月アンサンブル予報データを用いた解析から、2001年12月に生起した極渦変位型SSWの予測可能期間は少なくとも2週間以上で、そのSSWの生起には対流圏での惑星規模波の波源の持続性が重要な役割を果たしていたことを示した先行研究(Mukougawa et al. 2005)と本研究を比較すると、2009年1月の極渦分裂型SSWの6日という予測可能期間は極端に短いことがわかる。また、SSWの生起に重要な力学要因も、両者で全く異なっていることが明らかになった。したがって、SSWの生起メカニズムやその予測可能性が、極渦崩壊の形態的特徴に依存する可能性が示唆される。

#### 第4章 まとめ

本研究では、長期間の気象庁現業1ヶ月アンサンブル予報データや、新たに実施した高頻度アンサンブル予報実験結果の解析から、冬季成層圏循環の予測可能性の平均的な特徴と、2009年1月に生起した極渦分裂型SSWの予測可能性変動とその生起メカニズムが初めて明らかになった。特に、現業アンサンブル予報で検出された初冬での成層圏極域における高温バイアスの発現や、極渦分裂型SSWの予測に、成層圏内での惑星規模波の伝播の再現性が重要な役割を果たしていることが示されたことは、中長期予報における成層圏の役割を考えるうえで大変興味深く、重要な知見を与えるものである。