

論文の内容の要旨

論文題目

Vortex-Split Stratospheric Sudden Warmings: An Understanding Based on Equilibrium Statistical Mechanics

(スプリット型成層圏突然昇温：
平衡統計力学に基づく理解)

氏名 安田 勇輝

北半球冬季の成層圏 (高度 10 – 50 km) には、極渦と呼ばれる世界最大の孤立渦の 1 つが存在する (e.g., Waugh and Polvani 2013)。極渦は対流圏起源の Rossby 波により乱されており、この乱れが大きくなると温度上昇と共に崩壊する。この現象は成層圏突然昇温 (SSW) と呼ばれ、対流圏の気象システムにも影響を及ぼすことが知られている (e.g., Kidston et al. 2015)。SSW は、極渦が南にずれて崩壊するディスプレイacement型 (D-SSW) と、極渦が 2 つに分離して崩壊するスプリット型 (S-SSW) に分類される (Charlton and Polvani 2007)。

SSW のメカニズムは、Matsuno (1971) を始めとし、ダイナミクスの観点から弱非線形理論を用いて研究されてきた。S-SSW に限って言えば、東西波数 2 の等価順圧 Rossby 波が共鳴により増幅し、その後、Love 型の力学的不安定 (Love 1893) により極渦が 2 つに分離すると考えられている (Esler and Scott 2005; Mitchell and Rossi 2008; Matthewman and Esler 2011)。これらの弱非線形理論は微小振幅擾乱の仮定に基づいているが、SSW のような強非線形現象に対して、この仮定は必ずしもよくは満たされていない可能性がある。

強非線形理論の 1 つとして平衡統計力学が挙げられる。地球流体系における統計力学はここ 20 年で大きく発展し (e.g., Bouchet and Venaille 2012)、特に、ミクロカノニカル分布と呼ばれる確率モデルから最大エントロピー問題が数学的に導出された (Michel and Robert 1994; Bouchet et al. 2000; Ellis et al. 2000)。統計力学は微小振幅擾乱の仮定に基づかないため、強非線形系に適用可能である。その反面、スタティックな理論であり、系の時間発展に関する情報を全く与えないという欠点もある。すなわち、上記の弱非線形理論と正反対の長所と短

所を持つ。本研究では、気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55)、球面準地衡 (QG) 順圧モデル、および統計力学を用いて、エントロピーの観点から S-SSW の理解を試みた。

本研究では、S-SSW を QG 順圧モデルに基づいて調べる。最初にこのことの合理性を示すために、Seviour et al. (2013) に従い、JRA-55 から S-SSW の平均像をコンポジット解析により求めた。そして、Matthewman et al. (2009) と同様の解析により、極渦の分離前後の高度 20–40 km において、極渦が等価順圧構造を持つことを確認した。そこで、以下では、極渦の時間変化を一層の球面 QG 順圧モデルで記述することにした。

まず、順圧モデルの有効性を確認するために、コンポジット解析で得られた S-SSW の渦位 (PV) の時間発展が順圧モデルにより再現可能であるか調べた。この比較実験を行うために、順圧モデルの下部強制 h は、JRA-55 のコンポジット 550 K 温位面 (高度約 20 km に存在) の高度偏差とした。そして、初期条件は、ある基準時刻の JRA-55 のコンポジット PV とし、その後の PV の時間発展を数値積分により求めた。比較対象であるコンポジット PV は、JRA-55 の絶対渦度の鉛直平均から求めた。積分開始から約 15 日目までは、順圧モデルは JRA-55 の PV 場をよく再現することが分かった。15 日目以降は、コンポジット場の傾圧性が強くなり、順圧モデルによる PV 場の再現性が悪くなる。

次に、初期条件は変化させず、強制 h の東西波数 0, 1, 2 成分のいずれかのみを抽出し、それを強制とした実験を行った。その結果、 h の波数 2 成分を使用した場合のみ、極渦の分離が再現された。これは、強制 h の波数 2 成分が S-SSW にとって最も本質的であることを示唆している。従って、以下では、波数 2 の強制のみを考慮した。

コンポジット PV 場との比較実験では、強制 h の時間変化が速いため、極渦の状態遷移はあまり明瞭ではなかった。そこで h の振幅をゆっくり増大させる準静的 (quasi-static) 実験を行い、状態遷移を調べることにした。初期条件は JRA-55 の絶対渦度の時間・鉛直平均場とした。強制 h の波数 2 の構造は固定し、その振幅 a を 2.8 万日かけて $a = 0$ から 1 に線形に増大させた。その結果、 a の増大と共に、3 つの状態 A, B, C がこの順に現れた。各状態は定常と見なせ、状態の遷移時にのみ、PV 場は非定常となった。A と B は低気圧性、C は高気圧性の流れ場である。B から C の遷移時には、細長く伸びた極渦から PV フィラメントが剥離し、極渦は 2 つに分離することなく崩壊した。

この準静的実験の結果を、統計力学理論の一つである二次の Casimir 変分問題 [Quadratic Casimir Variational Problem, QCVP (e.g., Venaille and Bouchet 2009, 2011b)] で解釈する。QCVP において、エントロピー S はポテンシャルエントロフィーのマイナス倍で与えられる。そして、エネルギー E と PV の総量 Γ を一定とする拘束条件の下で、エントロピー S は最大化される。この S 最大の状態は平衡状態と呼ばれ、微小擾乱に対し安定な定常場である (e.g., Ellis et al. 2002)。この解は E と Γ だけでなく、PV の定義式を通して強制 h の振幅 a に依存する。準静的実験のパラメータ (E, Γ, a) の全範囲において、平衡状態は高気圧性の流れ場であった。そのため、状態 C は平衡状態と解釈できる。

次に、A と B に対応する低気圧性の状態を議論するために、エントロピーの鞍点である準定常状態 (QSS) を調べた。QSS は定常場であるが、微小擾乱に対し安定とは限らない。QSS は無数に存在するが、最も大規模な構造を持つ QSS 1 に着目する。この状態は回転対称性

を持たない領域内 (e.g., 正方形領域) で、エントロピーの極大点 (すなわち、微小擾乱に対し安定な状態) となり得る唯一の状態である。一方、回転対称な円盤領域内では、東西波数 1 の基底モードに対してのみ QSS 1 は不安定になり得る。この QSS 1 は低気圧性で、その PV 場は状態 A と同様の空間構造を持つ。よって、状態 A は QSS 1 と解釈できる。次に、3 番目に大きな構造を持つ QSS 3 に着目した。QSS 3 の PV 場は、QSS 1 (また QSS 2) の PV 場と直交する方向に伸びており、状態 B の空間構造に類似している。よって、状態 B は QSS 3 と解釈できる。

より定量的な比較を行うため、遷移の瞬間が理論予測と整合的であるかも調べた。ここでは極渦の崩壊を伴う B から C の遷移に着目する。準静的実験の各時刻において、 Γ と a を与えて、状態 B に対応する QSS 3 の存在に必要な最小エネルギー E を理論的に求めた。そして、その最小 E と準静的実験の E の時系列を比較した。結果、1.8 万日目付近で、理論による最小 E よりも実験の E が小さくなった。これは、QSS 3 が存在できないパラメータ領域へ状態が移行することを意味し、その周辺の時刻において遷移が起こる可能性を示唆する。実際に、ほぼ同じ時刻において、エントロピーの急増と共に極渦は崩壊し、B から C への遷移が起こる。すなわち、PV 場の構造という定性的な点だけでなく、遷移のタイミングという定量的な点からも、状態 B を QSS 3 と解釈する妥当性が示された。同様の結果は、A から B の遷移に対しても得られ、初期状態 A を QSS 1 と解釈する妥当性が確認された。

次に、実験設定をより現実的にするため、強制 h の振幅 a を 1 週間で増加させた。その結果、状態は A から C へ遷移し、その過程で極渦の分離が起こった。これは、S-SSW を低気圧性の QSS 1 から高気圧性の平衡状態へ向かおうとする遷移と理解できる可能性を示唆する。

平衡状態は任意の微小擾乱に対して力学的に安定であるが、QSS 1 は東西波数 1 の微小擾乱に対してのみ不安定となる可能性がある。そこで QSS 1 の安定性を調べるため、QSS 1 と見なされる準静的実験の流れ場に波数 1 の微小擾乱を加えて、その後の時間発展を球面 QG 順圧モデルの数値積分により調べた。結果、波数 1 の擾乱は急激に減衰後、小振幅を保ったまま振動した。この結果は、波数 1 の擾乱が成長しないこと、すなわち QSS 1 が Lyapunov 安定 (中立安定または漸近安定) であることを示唆する。

冬季成層圏において、放射冷却は約 10 日の緩和時間をもち (Newman and Rosenfield 1997)、S-SSW 後の極渦の再形成に寄与する (e.g., Scott and Polvani 2006)。そこで、さらに現実的な実験を行うため、Newton 冷却を模した線形緩和を順圧モデルに組み込んだ。その結果、極渦の分離は見られたが、高気圧性の平衡状態は確認できなかった。これは、平衡状態への遷移時間が約 200 日と十分長く、線形緩和による極渦の回復が先に起こるためと考えられる。

一方、東西平均東西風は、S-SSW の期間内に、西風から東風へ一時的に変化することがある。この軸対称成分の低気圧から高気圧性への一時的な変化は、コンポジット S-SSW と線形緩和を入れた数値実験の両方で確認できた。これらの結果は、成層圏の状態が高気圧性の平衡状態へ一時的に近づくことを示唆する。

以上の結果から「S-SSW がエントロピーの鞍点 (QSS 1) から最大点 (平衡状態) へ向かおうとする遷移」と理解できることが分かった。QSS 1 は低気圧性の流れ場で、極渦の崩壊前

に対応する。また QSS 1 はエントロピーの極大点になり得る唯一の特別な鞍点である。平衡状態は高気圧性の流れ場で、極渦の崩壊後に対応する。遷移を起こす主要因は Rossby 波の増幅であり、遷移途中で極渦は分離する。放射冷却による極渦の回復のため、平衡状態は実現されないと考えられるが、成層圏の状態は一時的に平衡状態へ向かおうとする。東西平均東西風の逆転は、平衡状態に向かおうとする途中状態を反映していると考えられる。