

論文審査の結果の要旨

氏名 安田 勇輝

本論文は7章から成る。第1章は導入部で、本論文で扱う成層圏突然昇温 (SSW : Stratospheric Sudden Warming) 現象の数十年にわたる研究の歴史が概説されている。SSWは、冬季極域成層圏にて放射冷却が維持する寒冷な極渦とその周縁の強い西風 (極夜ジェット) が、対流圏起源の大規模波動 (Rossby 波) の増幅により激しく乱され、極渦が数日で崩壊し急激な気温上昇を伴う現象である。従来の理論・解析研究は極夜ジェットを表す東西平均流と微小振幅の大規模波動との相互作用という弱非線型理論に立脚しており、それを極渦の分裂を伴う強線型性現象である「スプリット型」SSWに適用することの限界を指摘している。これに対し、本研究は強非線型理論の1つである平衡統計力学に立脚し、エントロピー最大原理に基づきスプリット型SSW現象の理解の深化を目指すという目的が、近年の平衡統計力学の地球流体力学への適用例とともに述べられている。但し、平衡統計力学は系が到達する最終状態しか予測せず、系の時間発展を記述できないことを踏まえ、本研究では順圧大気モデルによる準静的実験の結果を平衡統計力学に基づき解釈するという方針が提示されている。

第2章では、最新の全球大気再解析データを用いて顕著なスプリット型SSWの10事例を抽出し、その合成図解析から、北極上空の極渦が分裂前後7日間は成層圏で等価順圧構造を持つことや、極渦の歪みをもたらす波動擾乱に東西波数2の成分が卓越することが確認された。こうした観測事実を踏まえ、第3章では極渦の時間変化を記述する一層の球面準地衡順圧モデルを構築した。合成図解析で得られた550 K 温位面高度の平年偏差場を順圧モデルの下部強制として与えつつ、極渦の分裂10日前の場を初期条件とした実験が、観測データの合成図解析で得られた極渦の分裂過程を良く再現することを確認した。但し、この実験では下部強制の時間変化が速すぎて、極渦の状態遷移の明瞭な観察は困難であった。そこで、順圧モデルの下部強制に与える東西波数2の成分の振幅を2.8万日かけてゼロから観測レベルに徐々に増大させる準静的実験を、成層圏で観測される絶対渦度の時間・鉛直平均場を初期条件として実施した。強制波動成分の振幅の増大につれ、3つの定常状態A, B, Cがこの順に現れ、状態の遷

移時にのみ渦位場が非定常となる。このうち、状態 A・B は極渦を表す低気圧性循環であり、B から高気圧性循環を表す C への遷移過程で、細長く歪んだ極渦が分裂せずに崩壊した。

第 4・5 章では、この準静的実験の結果を統計力学理論の 1 つである 2 次の Casimir 変分問題として解釈した。状態 C は微小擾乱に対して安定な平衡状態と解釈され、系のエネルギーと渦位の総量が一定という束縛条件の下で、ポテンシャルエントロフィーに負号を付して定義される系のエントロピーが最大となることが示された。実際、A から B への遷移では系のエントロピーの減少、B から C への遷移では顕著な増大が確認できた。一方、状態 A と B は系のエントロピーの鞍点に当たる準定常状態で、微小擾乱に対して必ずしも安定とは限らないと解釈できる。但し、A は系のエントロピーが極大となり得る唯一の鞍点に対応し、東西波数 1 の微小擾乱に対し不安定となる可能性があるものの、追加実験から実際には Lyapunov 安定（中立安定または漸近安定）であることが示唆された。一方、状態 A から下部強制の波動振幅を 1 週間で増大させる追加実験では、状態 B ではなく極渦の分裂を経て平衡状態 C へ至る現実的な遷移が再現された。第 6 章では、上記の全実験で無視してきた冬季成層圏で約 10 日の緩和時間をもつ放射冷却を Newton 冷却の形で順圧モデルに組み入れた実験を実施した。この実験では極渦の分裂は再現されたものの、平衡状態 C への遷移は起きないことから、現実大気では高気圧性の平衡状態 C へ遷移する前に、放射冷却により極渦の回復が効果的に起こることが示唆された。

第 7 章では上記の研究成果の気象力学的意義に関する包括的な議論が、今後の研究発展の方向性も含めてなされている。本研究は、平衡統計力学に基づき、相転移のアナロジーという観点から、非線型性の強いスプリット型 SSW 現象に対する斬新な力学的解釈を提示した。この学術的成果は、対流圏の気候状態にも影響を及ぼす SSW 現象に関する研究に新機軸を打ち立て、今後の研究の発展に大きく寄与し得るものと高く評価される。

なお、本論文の第 3～7 章及び付録は F. Bouchet, A. Venaille 両博士との共同研究に基づくが、いずれも論文提出者が主体となって理論構築や数値モデル実験の企画・実施、得られた結果の力学的解釈を行ったもので、論文提出者の寄与は十分と判断される。

従って、博士（理学）の学位を授与できると認める。