

論文審査の結果の要旨

氏名 北村 祐二

地表から高度 10-15km を占める対流圏の大気擾乱のエネルギースペクトルは、水平スケールが 10km から数百 km のメソスケール領域で、緯度に依らず水平波数のほぼ $-5/3$ 乗に比例していることが航空機観測等から知られている。最近、高解像度の大気大循環モデルによって同様のスペクトルが得られたとの報告もあるが、何故このようスペクトルが形成されるかについては現在もわかっていない。メソスケール領域では密度成層の効果が重要となると思われるが、これまで $-5/3$ 乗スペクトルの形成機構としては、成層流体中でも 3次元乱流的な小スケールへのエネルギーカスケードが起きるとする説と成層流体における鉛直運動の抑制効果により 2次元乱流的なエネルギー逆カスケードが起きるとする説とがあった。このうち、後者の可能性が数値実験により探られているが、非現実的に大きな回転を与えない限り逆カスケードが起らないという否定的な結果に留まっている。

論文提出者は、この $-5/3$ 乗スペクトルの形成機構を解明するために、単純化した設定の回転成層流体の数値実験を行った。用いたモデルはブシネスク近似を施した f 平面上の 3次元非静力学モデルである。計算領域は水平方向 400km \times 400km、鉛直方向 10km で、水平境界では周期境界条件、上下境界は free-slip の剛体壁を用いた。渦粘性項には成層の効果を考慮した Smagorinsky 型のスキームを用いた。エネルギーのカスケード・逆カスケードの両方の可能性について調べるために、積乱雲を意識した水平スケール 20km にスペクトルのピークを持つ力学的強制 (以下タイプ I の強制) と大規模運動からのエネルギー注入を意識した 400km にピークを持つ強制 (タイプ II の強制) を与えた場合について、様々な成層と回転に対する実験を行い、定常状態で得られたエネルギースペクトル形とその中でエネルギー輸送の実態を詳細に解析した。

その結果、タイプ I の強制を用いたときには、成層が強くなるに

つれて、渦モード間の相互作用を介したエネルギー逆カスケードが起きるものの、コリオリ係数 f が $0 \sim 2\Omega$ (Ω は地球の回転角速度) という現実的な回転の範囲では $-5/3$ 乗のスペクトルは形成されず、このようなスペクトルを得るためには地球の 10 倍程度の回転が必要であることがわかった。

次に、タイプ II の強制を用いたときには、水平発散を伴うモードの寄与が大きく、中立成層の場合にスペクトルの傾きがほぼ -1 となることを除き、スペクトルの傾きは回転や成層に大きく依存することがわかった。すなわち、低緯度の状況にあたる回転の効果が小さい場合には、成層への依存性が特に大きく、成層が強い程スペクトルは急勾配になる。一方、中高緯度の状況にあたる回転の大きな場合には、スペクトルの傾きはほぼ -2 と成層に依存しなくなることがわかった。この際、高波数域へのエネルギー輸送は主として 1 つの渦モードと 2 つの発散モードを通じて行われており、回転と共に増大することもわかった。

なお、主要な数値実験では渦モードと水平発散を伴うモードに均等にエネルギーを強制しているが、この比率を変えても上述の主要な結果はほとんど影響を受けないことも確認されている。

論文申請者は更に、数値実験で陽に計算された格子スケールの運動と渦粘性モデルでパラメタライズされたサブグリッドスケールの運動との相互作用の見積もりを行い、渦粘性モデルが格子スケールでの非線形相互作用やエネルギー輸送と整合し得るかを調べた。その結果、今回用いた渦粘性モデルは高波数域でエネルギーの溜まりを生じない点では合理的であったものの、低波数域から高波数域への直接的なエネルギー散逸を過大評価しており、この傾向は成層が強くなるほど顕著となることが明らかとなった。この結果は、成層流体中の乱流パラメタリゼーションの研究の必要性を明確に示したものとなっている。

以上のように、論文提出者の研究は、観測されるメソスケール大気の普遍的なエネルギースペクトルが、回転の効果の大きい中高緯度では成層乱流のエネルギーカスケードによって説明できる可能性が高いことを初めて明確に実証したもので、優れた研究と評価できる。一方、回転の効果の小さい低緯度側ではスペクトルの傾きが成層に

強く依存し、本研究で考慮されていない何らかの効果が普遍的なスペクトルを得るためには必要であるという結果も、今後のメソスケール乱流スペクトルの研究に重要な糸口を与えるもので、高く評価できる。

したがって、論文提出者に博士（理学）の学位を授与できると認める。