

## 論文の内容の要旨

論文題目 Numerical study on energy cascades in stratified turbulence with  
the application to the atmospheric mesoscales  
(成層乱流におけるエネルギーカスケードに関する数値的研究と  
そのメソスケール大気への適用)

氏名 北村 祐二

### 1. 序

飛行機観測により、対流圏での 10 km から数百 km でのエネルギースペクトルが  $-5/3$  乗の水平波数依存性を持つことが知られている (Nastrom *et al.*; 1984, Nastrom and Gage; 1985 など). また, Koshyk and Hamilton (1999) は高解像度 GCM を用いてメソスケールでの  $-5/3$  乗のスペクトルの再現に成功しており, 彼らの結果は, この波数領域において鉛直渦度成分と水平発散成分のスペクトルの振幅が同程度であることを示唆している. 一方で, このようなスペクトルを形成維持するメカニズムについて, 主に密度成層流体中の乱流の立場から議論されており, その原因を 3 次元乱流的な小スケールへのエネルギーカスケードとする意見と 2 次元乱流的なエネルギー逆カスケードとする意見とがある. これらの議論の妥当性を成層乱流の数値実験を通して検証した研究は Métais and Herring (1989) をはじめとていくつか存在しているが, 一連の研究によって得られた知見は, 非現実的な回転を与えない限りエネルギー逆カスケードが起こらないという否定的な結果に留まっており, 結局のところ得られている観測事実を解釈するものとはなっていないのが現状である. これは, これらの研究が逆カスケードの実現性にのみ注目していたことに起因するようと思われる. 本研究では, 単純な力学モデルを用いた成層乱流の数値実験を行い, 力学過程の範囲で観測から知られているべき乗則をどの程度説明し得るかを検討し, エネルギー輸送過程についての解析を行った. また, 用いた乱流パラメタリゼーションによって見積もられるエネルギー輸送がグリッドスケールで陽に表されるエネルギー輸送と整合するかを検討した.

### 2. 数値モデルの概要

本研究では Boussinesq 近似を施した  $f$  面上の 3 次元非静力学モデルを用い,  $400 \times 400 \times 10$  (km) の領域で計算を行った. 水平方向の境界条件は周期境界条件で, 上下にはいずれも剛体壁を仮定した. エネルギー逆カスケード, エネルギーカスケードの両者について注目する目的で, 水平スケール 20 km にスペク

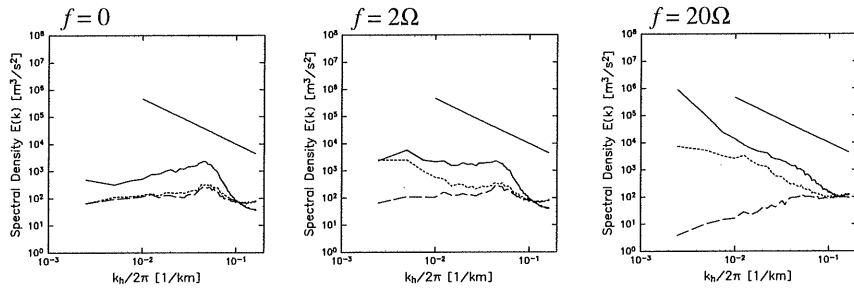


図 1: Type I の強制を用いたときの 15 日後でのエネルギースペクトル. 実線は鉛直渦度成分, 破線は水平発散成分, 点線は位置エネルギーを表す. プラントバイサラ周期はともに 20 分で, 左からコリオリパラメーターが  $0, 2\Omega, 20\Omega$  の場合を示している. ただし  $\Omega$  は地球の自転角速度である.

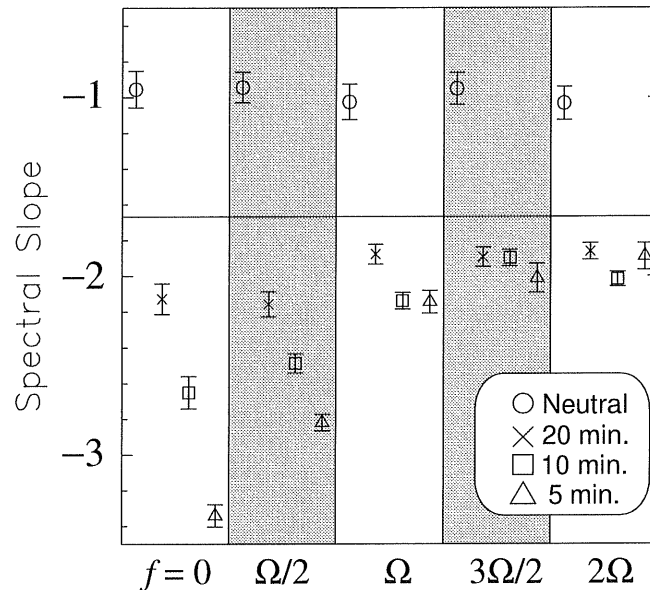


図 2: Type II の強制を用いたときに得られた, 水平波長 10–100km での最小二乗法から推定されるエネルギースペクトルの傾き. エラーバーは傾きの標準偏差の推定量の 2 倍で表している.

トルのピークを持つ力学的強制 (以下 Type I の強制), 400 km にピークを持つ強制 (Type II の強制) について数値実験を行った. 初期状態は静止大気とし, 15 日間の積分を行い, 解析にはほぼ定常に達した最後の 5 日分を用いた. 渦粘性項は Smagorinsky 型のスキームに基づいて決定し, 成層の効果を Richardson 数の関数を用いることで陽に表現した. ここでは, 成層の効果を表す関数の形は Ueda *et al.* (1981) の境界層の観測および風洞実験から得られた半経験式に基づいて決定した.

### 3. 結果

まず, Type I の強制を用いたときに得られるエネルギースペクトルとエネルギー輸送が回転と成層にどう依存するかを調べた. その結果, 成層が強くなるほど 3 つの渦モードからなる相互作用を通じて低波数側へのエネルギー逆カスケードが起こるものの,  $0 \leq f \leq 2\Omega$  の範囲では回転の効果はほとんど現れず,  $-5/3$  乗のスペクトルを形成するのに十分なエネルギー輸送は得られなかった. 図 1 左および中央のように, 現実的なパラメーターレンジでは低波数域で渦度成分が卓越するものの,  $-5/3$  乗のスペクトルは形成

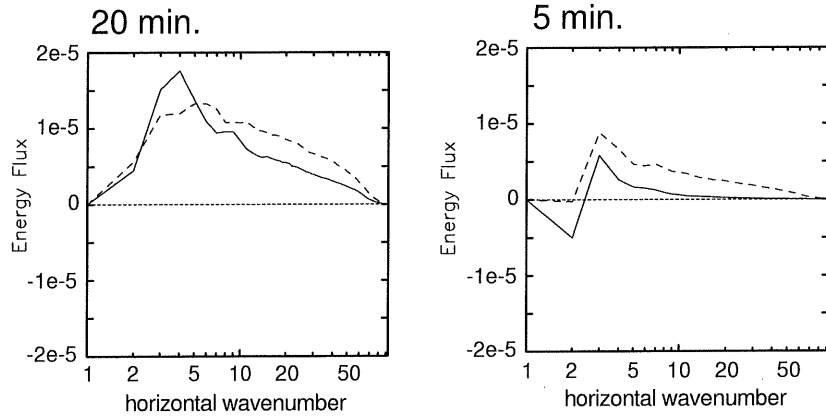


図 3: Type II の強制でのエネルギーフラックスの 10 日目から 15 日目までの時間平均. 左はプラントバイサラ周期が 20 分の場合, 右は 5 分の場合で, 実線は  $f = 0$  の場合, 破線は  $f = 2\Omega$  の場合をそれぞれ表している. 図において, エネルギーフラックスは正の値がダウンスケールのエネルギーカスケードとなるように定義されている.

されない. また, Métais (1994) らの結果の検証のために  $f = 20\Omega$  とした数値計算も行った. この場合は図 1 右のように低波数側に  $-5/3$  乘に近いスペクトルがエネルギー逆カスケードを通じて形成される. これらの結果は過去の数値実験の研究結果と整合する.

次に, Type II の強制を用いたときの結果を示す. この場合は, 中立成層の場合を除き, 水平発散成分の寄与が大きく, スペクトルの傾きは回転や成層に大きく依存する結果となった. 水平波長 10–100km の範囲でのエネルギースペクトルの傾きを最小二乗法を用いて推定した結果を図 2 に示した. この図から, 回転のない場合には成層度の依存性が強く, 成層が強い程スペクトルは急勾配になるのに対し,  $f$  が大きくなるにつれて, スペクトルの傾きは成層に依存しなくなっていくのが見て取れる. 中立成層の場合にはどの場合でも傾きは  $-1$  程度であり, 成層を含む場合には  $f \geq \Omega$  では  $-1.9 \sim -2.1$  の範囲に収まっている. これらの結果から考えると, 中高緯度ではメソスケール大気エネルギースペクトルが成層乱流のエネルギーカスケードによって説明し得ることを示唆している. 一方, 低緯度側ではスペクトルの傾きが成層度に強く依存するため, 本研究の枠組では観測されるような普遍的なスペクトルを得ることは難しいと考えられる. このときのエネルギー輸送に着目すると, 図 3 にあるようにエネルギー輸送は成層が強い程小さくなり, 回転が含まれると高波数域でのエネルギー輸送が増大する傾向が見られた. また, この高波数領域へのエネルギー輸送は 1 つの渦モードと 2 つの発散モードを通じて主に行われており, 回転の効果はこのタイプの相互作用にのみ表れることが分かった. スペクトルの傾きが  $-2$  前後となったケースでのエネルギー輸送量は  $10^{-5} [\text{m}^2 \text{s}^{-3}]$  のオーダーとなっており, これは Lilly (1983) の見積もりとほぼ一致する.

さらに, 乱流パラメタリゼーション (渦粘性モデル) によって評価されているサブグリッドスケールとの相互作用の見積もりを行い, それがグリッドスケールでの主要な非線型相互作用やエネルギー輸送と整合し得るかの検討を試みた. その結果, グリッドスケールでは  $k_l \ll k_m \simeq k_h$  のような波数空間で非局所的な相互作用が卓越するが, 実質的には  $k_m$  から  $k_h$  の局所的なエネルギー輸送がほとんどであることが分かった (図 4a). 一方, パラメタライズされた相互作用は, 非局所的な波数の組合せが主要部である点は同じであるが, 低波数域でのエネルギー散逸が過大評価されており, 結果的に想定されるエネルギー輸送は図 4b のような  $k_l$  から  $k_h$  への非局所的な成分が卓越することになる. このような不整合は成層が強くなるほど顕著に現れる結果となり, 成層流体中の乱流パラメタリゼーションのさらなる改善が必要であることを示唆している.

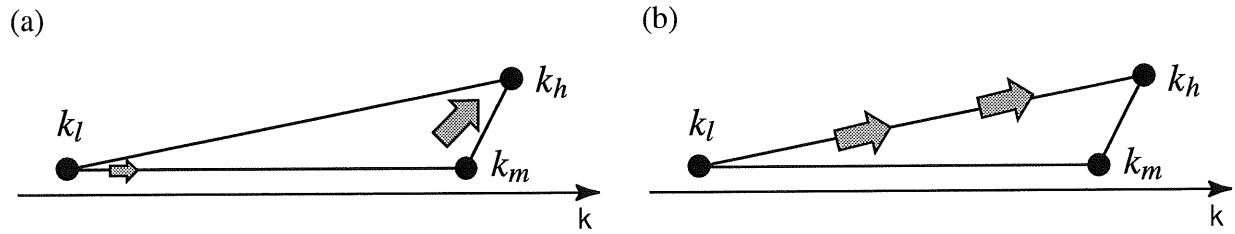


図 4: グリッドスケールでの主要なエネルギー輸送 (a) と乱流パラメタリゼーションによって表されたサブグリッドスケールでの主要なエネルギー輸送 (b) の概念図. いずれも波数の組合せは非局所的であるが, 主要なエネルギー輸送は両者で異なっている.

#### 4. まとめ

本研究では, 成層流体での乱流の立場から観測から知られているメソスケール大気のエネルギースペクトルの解釈を試みた. 一連の数値実験の結果, 従来行われてきた成層乱流の数値実験の研究結果との整合性を得るとともに, 低波数域からのエネルギーカスケードによってメソスケールでの  $-5/3$  乗則に近いエネルギースペクトルが得られることが分かった. しかしながら, 観測や高解像度 GCM との結果と比較すると, 今回の結果では低緯度側では普遍的なスペクトルの傾きが得られないことや, 水平発散成分が卓越する点に違いが見られる. 本研究の枠組では, 大規模擾乱からの寄与は仮想的な強制によってのみ表現されているに過ぎないので, 現実的な大気の再現という点では不十分な部分も多く存在するが, 本研究によって初めて力学モデルから観測結果の解釈を支持し得る結果が得られたことは, より複雑なモデルでの結果を解釈する上での指針となるものと思われる. また, グリッドスケールでのエネルギー輸送過程の特徴が示されたことは, 乱流パラメタリゼーションの寄与を検討する上で有用な情報となるといえる. 大規模擾乱からの寄与を直接与えるためにより規模の大きな数値計算を行うことや, より適切な乱流パラメタリゼーションを検討することなどが力学的枠組において考えられる課題である.