# 研究課題名:地球流体中の秩序渦構造と3次元スカラー輸送現象

課題代表者:電気通信大学大学院電気通信学研究科 共同研究者:電気通信大学大学院電気通信学研究科 実施年度:平成 20 年度~平成 20 年度

### 1. 研究目的

大気や海洋等の地球流体現象では秩序渦構造が長く 安定を保ち、その相互作用が乱流動力学やスカラー輸 送を支配する。大規模な地球流体運動は地球の自転と 密度成層効果のために準二次元的なものと見なすこと ができ、鉛直高さの異なる層間の相互作用を考慮した 準地衡風近似で記述される。我々は秩序渦構造に着目 した乱流渦モデル(Li et al., 2006)を構築したが、そ の中では慣性重力波の影響を考慮することは出来ない。 そこで、本研究では慣性重力波の影響を考慮した「最 適バランス近似」のもとでの秩序渦構造の性質を調べ、 乱流渦・波動モデルを開発する。

### 2. 研究計画

2006 年度まではCASL(Contour Advective Semi Lagrangian)法を用いて直接数値計算を行なった。そし て2007 年度よりCASL法を拡張した「最適化バランス 法」への取り組みを開始し、それによって慣性重力波 の存在を取り込むことが可能となった。年度当初は、 開発・動作確認が終了した後、2007 年度末を目処にス ーパーコンピュータで稼動させる予定であった。しか し確認作業が予定どおり進まず、2007 年度中の稼動は 実現することが出来なかった。2007 度末に動作確認が 終了したため、2008 年度中にスーパーコンピュータで の実行を開始する予定である。

#### 3. 進捗状況

最適バランス法について、最新版のコードを一般的 な Linux マシンでの動作テストを行い、問題がないこ とを確認した。これにより並列化前での実行は、基本 サブルーチン (FFT など)を含めておおむね問題がな いことがわかった。また、このコードの元になった CASL コードの MPI による並列化も完了した。今後は、 両者のコードを比較・修正を行うことにより、環境研 スーパーコンピュータ環境下での MPI による並列化 を行う。これにより高解像かつ高速度での実行が期待 できる。

一方、準地衡風乱流渦モデルを用いた多自由度系で の模擬乱流数値シミュレーションを昨年度より継続し て行い、さまざまな状況における統計的性質を調べた。

我々は前報で報告したように、無限領域中の立方体 (2.444)領域に、点渦(渦数N = 2000、循環  $\Gamma_{i=1,2...,N}$  =1) をランダムに一様分布させミクロカノニカル統計的に サンプル数 10<sup>6</sup>個の系を用意し、エネルギー最頻度(E = Ec)となる場合で数値計算を行った(以降'Case A')。 今回は'Case A'に対して、鉛直方向に渦度領域を約 4 倍とした場合('Case B')、およびエネルギーの低い 状態('Case C')・エネルギーの高い状態('Case D')に おける統計性について調べた。ここで保存量はエネル ギー、渦重心、角運動量であり、長さのスケールは角 運動量を用いて規格化し(Lundgren and Pointin, 1997)、 時間tはポテンシャル渦度で無次元化した。平衡状態の 渦分布は渦重心に対してほぼ軸対称であったため、周 方向は一様であるとみなして平均を取り、対称軸から の距離をr、鉛直方向の座標zとした平衡分布F(r, z)を 調べた。 $t = 10 \sim 50$ で平衡状態となるため、数値計算 結果はt = 50以降を時間平均している。

宮嵜 武

高橋直也·岡田拓也

'Case B'では初期状態として図1(a)に示すように直 方体内部にランダムかつ一様に渦を配置した。平衡状 態の渦分布は図1(b)及び図2のようになった。図3に 示す鉛直方向角運動分布より'Case A'に対して'Case B'ではより狭い鉛直方向渦度領域で角運動量が減少し、 対称軸に対して渦分布が集中する現象('end-effect')が より顕著に確認された。



図1 三次元渦分布(Case B): (a)初期状態、(b)平衡状態





図3 鉛直方向角運動量分布: Case AとCase Bの比較

図4に平衡状態の角運動量分布のエネルギー依存性、 図5にy方向より見た平衡渦分布('Case A'・'Case B') を示す。'Case A'に対して'Case C'で角運動量は中心層 で大きくなり上下層で小さくなった。よっ て'end-effect'がより顕著となる平衡渦分布となっ た。'Case D'で角運動量分布は中心層で小さくなり上 下層で大きくなった。図5に示す平衡渦分布からも対 称軸に対して渦が中心層では集中し上下層では拡散し ている様子がわかる。これは'Case A'・'Case C'とは上 下層と中心層の分布が逆転した全く異なる分布であ り'inverse-end-effect'とも呼べる分布となった。



図4 鉛直方向角運動量分布:エネルギー依存性



図 5 y 方向より見た平衡渦分布: (a) Case A (b)Case D

また、最大エントロピー理論を用いて'Case A~D' の条件の下で理論解析を行った。最大エントロピー理 論を用いて平衡状態の連続分布解を予測するのは変数 が多いため収束解を得るのが難しい。そこで連続分布 を"top hat"型に近似した"Patch Model"の仮定の下に鉛 直方向の角運動量分布を調べた。'Case A'に対応する場 合の鉛直方向角運動量分布を図3の破線で、"Case B" に対応する(鉛直方向に渦度領域を約4倍とした)場 合を実線で示す。直接数値計算結果と同様に、より狭 い鉛直方向渦度領域で角運動量が減少し"end-effect"が より顕著に現れた。また図6に鉛直方向角運動量分布 のエネルギー依存性を示す。直接数値計算結果と定性 的な一致が見られ、エネルギーが低いほど角運動量は 中心層で大きくなり、上下層で小さくなる。つま り"end-effect"はより顕著となる。一方、エネルギーを 高くすると角運動量分布はエネルギーが低い場合と対 照的な分布となる。角運動量は中心層において小さく なり上下層において大きくなる。

角運動量分布とエネルギーの関係は次のように考え ることが出来る。中心層における渦分布がエネルギー を支配するため、よりエネルギーが低い場合は中心層 における分布は対称軸に対して広がり角運動量は大き くなる。しかし角運動量の制約条件により上下層では 分布が対称軸に対して収縮し、角運動量は小さくなる。 同様にエネルギーが高い場合では中心層での角運動量 は小さくなり、上下層での角運動量は大きくなると考 えられる。



図 6 最大エントロピー理論による鉛直方向角運動量 分布:エネルギー依存性

#### 4. **今後の計画**

CASL法コードの並列化結果と共に、最適バランス 法の汎用並列コード(MPI)による並列化を進める。ま たもっとも計算量の多い部分(FFT)をSX用の並列サ ブルーチンと入れ替え、効率の上昇を図る。

## 5. 計算機資源の利用状況(2008 年 4 月から 10 月まで)

実行ユーザ数:3 CPU時間 1ノード未満:0 hour,

1 ノード: 0 hour, 2 ノード: 0 hour, 計 0 hour

#### 6. 昨年度研究課題のまとめ

#### 6.1. 昨年度研究課題名

地球流体中の秩序渦構造と3次元スカラー輸送現象

#### 6.2. 昨年度研究課題の目的

今年度と同じ。

#### 6.3. 昨年度研究課題の成果概要

数値計算のパラメータ領域を拡大し、さまざまなア スペクト比やエネルギーレベルでの平衡状態を得た。 また最大エントロピー理論を展開し数値計算結果との 一致をみた。

#### 6.4. 昨年度計算機資源の利用状況

実行ユーザ数:2 CPU時間 1 ノード未満:0 hour,

1 / -ド: 0 hour, 2 / - ド: 0 hour, 計 0 hour

#### 参考文献

Li Y., Taita H., Takahashi N., Miyazaki T. (2006) Refinements on the Quasi-geostrophic Ellipsoidal Vortex Model. Phys. Fluids, 18 (7), 076604 1-8

Lundgren T.S., Pointin Y.B. (1997) Statistical Mechanics of Two-Dimensional Vortices. J. Stat. Phys., 17(5), 323-355