

CASL 法と点渦法による準地衡風渦の数値シミュレーション

堀 祐輔・星 伸太郎・李 英太・宮 寄 武
電気通信大学大学院電気通信学研究科知能機械工学専攻

1. 研究目的

地球流体現象はコリオリ力と安定密度成層の影響を受けて準 2 次元的になる。そのため、寿命の長い大規模渦構造が出現し、運動量・エネルギー・物質の現象を支配する。これまで準地衡風近似のもとに、これらの渦構造の安定性を調べるとともに (Miyazaki *et al.* ⁽¹⁾)、その相互作用を取り入れた「乱流渦モデル」を構築してきた (Miyazaki *et al.* ⁽²⁾, Li *et al.* ⁽³⁾)。本研究では、もっとも単純な「乱流点渦モデル」に基づいて、準地衡風乱流の統計的な性質を解明するとともに、高速数値計算としての「点渦法」の有効性を検証する。

2. 点渦系の統計性

点渦系の保存量は総エネルギー、渦重心、角運動量である。渦重心を原点にし、長さスケールは角運動量を用いて規格化した。鉛直方向には「連続層」 ($-2.432 \leq z \leq 2.432$)、「一層」 ($z=0$)、「三層」 ($z=0, \pm 1/2$) に点渦を配置し、各々の時間発展と統計性を調べた。「一層」、「三層」は最大エントロピー理論を用いて平衡分布の理論解を求め、数値計算結果と比較した。「連続層」は、 $t=10 \sim 20$ で平衡状態となった。平衡分布は軸対称となるため、対称軸中心からの距離 r と鉛直方向成分 $|z|$ における平衡分布 $F(r, z)$ を調べた (図 1)。どの鉛直座標でも、分布は対称軸に集中した。また鉛直方向について、上下層は中心層に比べさらに対称軸に集中する現象「End-effect」が見られた。中心層は 2 次元渦糸系の場合に相当する。最大エントロピー理論による解析によって、「一層」の場合には数値計算結果と理論曲線がよく一致し、「三層」の場合「End-effect」を捉えることができた。

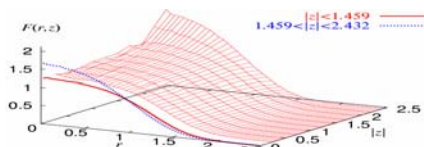


図 1 Equilibrium distribution $F(r, z)$

3. 高速数値計算としての「点渦法」

これまでの研究から ⁽¹⁾、一様ポテンシャル渦度領域を持つ傾斜回転楕円体渦は線形安定性理論で安定な場合に時間発展後も剛体回転し続け、不安定な場合に非

線形効果を伴う大変形をすることが CASL 法の直接数値計算によって分かっている (Miyazaki *et al.* ⁽⁴⁾)。この CASL 法による数値計算と「点渦法」による計算結果を比較した。扁長傾斜回転楕円体渦の半主軸長を $\alpha, \beta, \gamma (\alpha = \beta)$ 、アスペクト比を α/γ とした。点渦法ではポテンシャル渦度を一様にするため初期の点渦を格子点上に配置し、渦数 N を約 2000~8000 まで変えて計算した。一方、CASL 法は計算領域を $(2\pi)^3$ にし、解像度を $128^3, 256^3$ で行った。

今回は線形安定性理論から渦の変形の仕方が顕著に出るアスペクト比 $\alpha/\gamma = 0.125$ 、鉛直軸からの傾き角 $\theta = 0.96$ [rad] の場合を計算した。CASL 法での回転楕円体内の格子数は、解像度 128^3 の場合 1180、解像度 256^3 の場合 9440 である。点渦法・CASL 法の結果はともに不安定となった。点渦数が少ない、CASL 法の解像度が 128^3 の場合は 2 体に分裂したのに対し、点渦数が多い、CASL 法の解像度が 256^3 の場合は 3 体に分裂した (図 2: 左図は点渦法 (点渦数 8003, $t=14$)、右図は CASL 法 (解像度 256^3 , $t=14$))。点渦法で分裂した渦は一様分布ではなく、熱平衡分布となった。

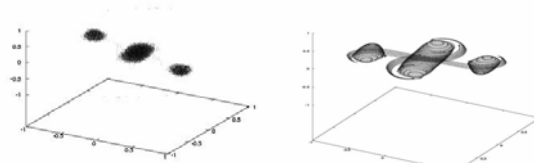


図 2 Nonlinear evolution of instability

(left: Point-Vortex Method, right: CASL Algorithm)

4. 結言

・点渦系の平衡分布には「End-effect」が見られた。また、最大エントロピー理論による平衡分布が数値計算結果とよく一致した。

・線形安定理論により不安定とされた傾斜回転楕円体渦の時間発展は CASL 法では解像度 256^3 以上、点渦法では渦数を約 8000 本以上にしないと捉えられない。

参考文献

- (1) T. Miyazaki *et al.* : 2003, J.Phys.Soc.Jpn, 72, 2786
- (2) T. Miyazaki *et al.* : 2001, J.Phys.Soc.Jpn, 70, 1942
- (3) Y. Li *et al.*: 2006, Phys. Fluids, 18, 076604
- (4) T. Miyazaki *et al.* :2002, J.Phys.Soc.Jpn, 71, 2687