

中規模渦近傍での Lagrange 粒子追跡による解析

課題責任者

杉山 徹 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター

著者

杉山 徹^{*1}

^{*1} 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター

キーワード：中規模渦, MRI.COM, 粒子追跡, LCS, FTLE

1. はじめに

海洋における渦構造は物質輸送と循環の主要素を成していると考えられている。特に、水平スケールが 100 km 程度のメソスケール渦 (= 中規模渦) は世界中の海域で観測されることもあり、生態系の基礎生産量との関連に注目され解析されている。長寿命の中規模渦は、発生場所から遠く離れた場所まで伝播する間に、その移動や構造変化を通じて周囲の水塊との吸収と放出を行い、結果として、渦内の水塊の特性は生成時とは大きく異なってくる。この混合過程を解析する手法としては、ラグランジュ粒子追跡手法が有効である。本課題では、大量の粒子を用いた解析を長期間の連続計算で行い、長寿命渦の生涯において周囲の水の獲得、保持、放出のプロセスを明らかにし、対象海域での熱と物質移動度の定量評価を試みる。特に、深層の栄養塩を表層の有光層に移送する鉛直方向のポンプ機構を明らかにすることを目指す。本年度は、作成した粒子追跡コードからの結果を報告する。今後の地球シミュレータのシステム構成を鑑み、GPUにて実行できるコードを作成した。

2. 粒子追跡手法

ラグランジュ粒子を与えられた海流場の中でテスト粒子として追跡する。テスト粒子とは、粒子の存在が海流場に影響を与えない粒子のことである。そのため、あらかじめ計算された海流場を用いるオフライン計算で対応可能となる。海流場は、気象庁気象研究所で開発されている汎用的な海洋大循環モデルコード MRI.COM を用いて計算し準備する。初期値など各種設定は、所内課題（気候変動適応策の検討に資する近未来海洋予測データの作成とダウンスケール技術の開発）にて実行されている計算解像度 2 km の計算と同じであるため、そちらを参照ねがいたい。海流場は、3次元出力値（緯度、経度、深さ）を用いる。初年度の本報告では拡散係数を考慮していないが、次年度以降は考慮する。与えられた 3次元流速場 (u, v, w) を用いて 4 次精度の Jamson-Baker の Runge-Kutta 法を用いて時間積分する。本アルゴリズムは、通常の Runge-Kutta 法に比べて使用するメモリが少ないが同程度の精度を持つことから、多量の粒子追跡計算をする際には、使用メモリ節約という視点から有効である。用いた粒子追跡コードは、本課題のために ES4GPU 用にクラッシュから作成したものをを用いている。

3. 有限時間 Lyapunov 指数 (FTLE) による解析

4次元空間での水塊の移流拡散を明らかにし、水塊運動の特徴を解析することを本課題は目標としている。そのため、得られた粒子軌道データから、Coherent 構造、すなわち LCS (=Lagrange Coherent structure) を見出し解析する。LCS は、stable manifolds と unstable manifolds の境界 (Separator) を明瞭化できる。特に、非定常な系においては、流線では見出せない境界が明らかになるため、物質輸送を解析する目的に適した解析方法である。ここでは、LCS を見出すために FTLE (=Finite Time Lyapunov Exponent) を使用する。FTLE は、隣接する粒子 (水塊) が時間とともに離れていく程度を測る指数である。

まず、図 1 上にあるような定常双極渦で得られる例を示す。この流速場における FTLE の値は図 1 下に示す通りである。図 1 上の青い点同士の粒子対は、同じ渦の中にあり時間が経過しても近い位置にいるため FTLE の値は小さいが、青と黄色の粒子対は、異なる渦の中にいるため互いに離れ FTLE の値が大きくなる。よって、渦の境目における FTLE 値は大きくなり、図 1 下のようなる。

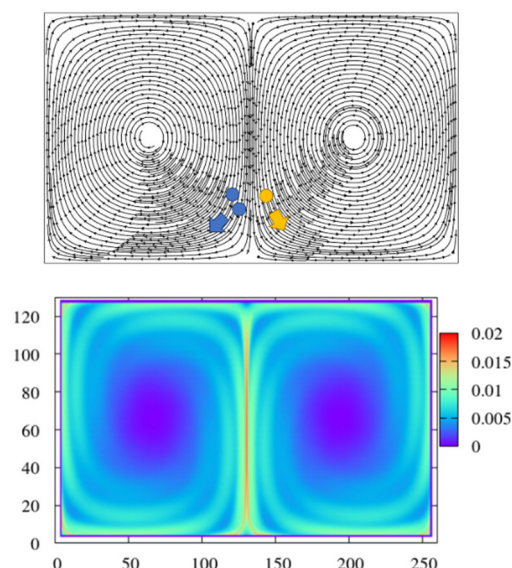


図 1 双極渦 (上) を例に LCS と FTLE を考察する例。青の粒子対は時間が経過しても近傍にいるが、青と黄色の粒子は異なる渦内にいるため離れていく。結果として FTLE の値が大きくなり、下図の FTLE 値を得る。

4. 計算例

このような手法で、初期（2011 年 2 月 1 日 12 時と設定）に、経度 146E~151E、緯度 36N~41N、深さ 0.1m に一様に粒子を置き 10 日間追跡した。図 2 に初期時刻の流線を示す。求めた FTLE 値をカラーコンターで図 3 に示す。図 3 中央付近に南北に FTLE 値が高くなる separator 線が見つかった。つまり、水塊が分かれていく境界線を見出したということである。この値の高い separator 位置と流線を重ねた図を、図 4 に示す。黒点で高い FTLE 値の位置を示す。背景の流線を横切るように順方向の FTLE 値が高い点が分布しており、黒点の東側（右側）にあった水塊は、この後、渦から出ていくこととなる。なお、FTLE 値は、その相対的な大小値に意味がある。

FTLE 値は、順方向の時間に対しては時間とともに離れていく程度を、逆方向の時間に対しては時間とともに集まってくる程度を示す。図 4 に示す赤点は、逆方向の時間に対して高い FTLE 値を示した位置を示し attractor となる、図中央付近に、両者が交わり存在しており、非定常な渦構造の変化が水塊の集積と共に生じることが示されている。

5. 今後

粒子の運動は 3 次元の流速場で 3 次元位置に対して計算されている。水平方向の可視化が容易なため、図 2~4 に示すように、水平方向の解析から行ったが、本課題の目標は 3 次元の解析である。鉛直方向のポンプ機構に注目した結果を示していきたい。

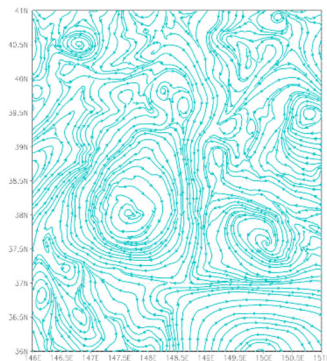


図 2 粒子追跡を行う初期時刻での流線。図中央左に存在する渦に注目する。

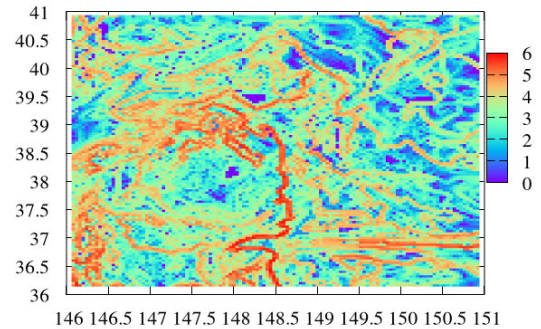


図 3 図 2 の領域に粒子を分布させ軌跡を追跡したことで得られた FTLE 値の分布。図中央付近に南北に続く値の高い線が separator となる。

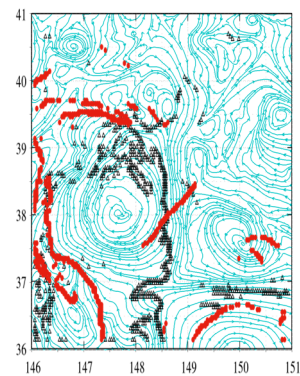


図 4 初期時刻の流線と FTLE 値の高さ領域を重ねた図。黒点：順時間方向の FTLE に対して値の高い位置。すなわち、この separator を境に水塊は離れていくため、西側（左側）の水塊は渦の中に留まり、東側（右側）の水塊は、渦から出て東側の領域に移動する。赤点：逆時間方向の FTLE 値に対して値の高い位置。すなわち、水塊が集まってくる attractor となる。