

# 高解像度海洋大循環モデルが再現する 海洋渦の抽出，追跡およびイベントの可視化

松岡大祐<sup>†1</sup> 荒木文明<sup>†1</sup> 井上由美<sup>†1</sup> 佐々木英治<sup>†1</sup>

**概要：**近年，高解像度モデルを用いた海洋渦のシミュレーション研究が進んでいる．一方で，膨大な情報量のシミュレーション結果から渦の運動を理解するためには，渦の位置だけでなく，渦が引き起こす“現象”を効果的に可視化する必要がある．本研究では，渦の特徴分類に基づく新しい渦抽出，追跡およびイベント可視化手法を提案する．提案手法では，海流およびストリーム構造との関係性から海洋渦を分類し，分類結果に基づいて時間発展を追跡する手法を新たに開発した．その結果，大きなスケールの渦同士の分離や併合，海流から切離による渦の生成等の現象を抽出し，直観的に理解可能な形で可視化することに成功した．

**キーワード：**海洋大循環モデル，海洋渦，可視化，特徴抽出・追跡

## Extraction, Tracking and Event Visualization of Ocean Eddies simulated by High-Resolution Ocean General Circulation Model

DAISUKE MATSUOKA<sup>†1</sup> FUMIAKI ARAKI<sup>†1</sup> YUMI INOUE<sup>†1</sup>  
HIDEHARU SASAKI<sup>†1</sup>

**Abstract:** Numerical studies of ocean eddies have been progressed using high-resolution ocean general circulation models. In order to understand ocean eddies from simulation results with large amount of information volume, it is necessary to visualize not only distribution of eddies in each time step, but also time-varying events of eddies. In the present study, we propose a new approach of eddy detection, tracking and event visualization based on eddies classification. The proposed method detects eddies as well as streams and currents, and tracking the time-varying changes of eddies. As a result of visualizing detected eddies and events, we succeeded in creating the time series of images which enables us to intuitively understand the region of interest hidden in data set.

**Keywords:** Ocean general circulation model, Ocean eddy, Visualization, Feature extraction and tracking

### 1. 序論

海洋渦は，熱輸送や物質輸送，エネルギー輸送において重要な役割を担っており，海洋変動だけでなく水産や気象にも影響を与えることが知られている．海洋渦を理解することは，地球システム全体や人類活動を考える上でも重要な課題である．近年では，スーパーコンピュータの性能向上によって，高解像度な海洋大循環モデルが開発されて，シミュレーション研究が進められている[1][2]．佐々木らは，100～300km 規模のメソスケールから 1～50km 規模のサブメソスケールの渦を再現し，渦が海洋循環の季節変動に与える影響を明らかにしている[3]．渦についてはその発生メカニズムや時間変化等，未知の部分が多く残っており，高解像度モデルを用いた研究が盛んに行われつつある．

一方で，シミュレーション結果を解析者が理解するためには，データの可視化が必要である．特に，高解像度モデルによるシミュレーション結果には，様々な種類の渦が再現されており，通常の可視化手法では「いつ，どこで，どのような」現象が起きているのかを理解するのが困難となる．解析者が渦の動きを直感的に把握するためには，単に

渦の分布を可視化するだけでなく，渦に関連したイベント（生成，消滅，分離，併合等）を可視化する必要がある．

渦に関連したイベントを可視化するためには，渦構造を抽出し，時間変化を追跡すればよい．これまで，渦を抽出する様々な手法が提案されている．渦度，Okubo-Weiss parameter[4][5]を用いた手法では，渦の中心を抽出することは可能であるが，渦の外側境界を抽出することができない．海面高度偏差[6]，Winding angle[7]やHybrid method[8]等は，渦の外側境界を抽出することが可能であるが，分離または併合状態にある渦を抽出することができない．これらの抽出手法を用いた既存の追跡手法では，渦の中心のみを追跡した例がほとんどである．そのため，渦の生成や消滅，移動を追跡することは可能であるが，分離や併合は二つの渦中心間の距離から推測しているに過ぎず，正確性に欠ける．また，これらの手法は，渦と海流との相互作用を自動的に抽出することができない．

本研究では，渦同士の分離・併合過程，さらに海流との併合・切離過程も取り扱うことが可能な新しい渦の抽出，追跡およびイベント抽出手法を提案する．また，発生したイベントに対して色付けすることによって，どのようなイ

<sup>†1</sup> 海洋研究開発機構  
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

イベントが発生したかを直観的に理解することが可能な可視化を行う。

## 2. データセット

本研究では、海洋大循環モデル OFES によるシミュレーション結果を用いた。OFES[1][2]は、ナビエ・ストークス方程式、連続の式、懸留拡散方程式、海水の状態方程式等を有限差分法で近似し、速度場や水温、圧力、密度、塩分等の時間変化を解き進める。オリジナル版の OFES は空間解像度 1/10 度の準全球モデルであるが、本研究ではより正確に渦を抽出するため、1/30 度の北西太平洋領域モデルを用いた。図 1 に、渦度の鉛直成分のシミュレーション結果を示す。日本南岸を流れる黒潮と呼ばれる海流の周辺に数多くの渦が見られる。本研究では、特に黒潮周辺にみられる渦を対象とするため、図中の黒い点線内を解析領域とする。

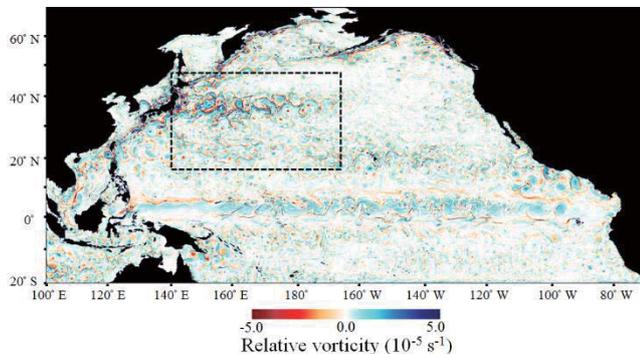


図 1 シミュレーション結果および解析領域  
Figure 1 Simulation result and analysis domain.

## 3. 手法

### 3.1 提案手法の概念

海洋渦は回転成分を伴った水の流れであり、周辺よりも暖かい暖水渦と、冷たい冷水渦に分けられる[9]。図 2 に、暖水渦の物理的特徴を示す。北半球では、暖水渦は時計回りの流れで上に凸、冷水渦は反時計回りで下に凸の構造を持っている。渦の中心は比較的容易に抽出することができるが、外側境界の部分抽出するのは容易ではない。渦の外側領域は直観的には流れの速い図 2(a)の赤い点線で表される。一方で、速度場のピークは黄色の線の位置に存在するため、渦を示す Okubo-Weiss parameter が負の値を示す領域は、実際の渦よりも小さく現れる(相対渦度も同様)。また、最も大きい閉じた等高線を渦領域とみなす Hybrid method と同様の手法では、二つの渦がどこまで両者が近付いても一つに重なることがなく、併合過程にある渦を正しく抽出することができない。これは、最も大きい閉じた等高線を抽出する Winding angle も同様である。本研究では、図 3 に示すように、渦の自然な形である「海面の盛り上がった領域」(赤色で示した領域)と渦の物理的な特徴である「回

転する流速の速い領域」(緑色で示した領域)の両者から渦を定義する。このようにすることで、渦と渦だけでなく、同様に速い流れをもつ海流との相互作用も抽出することが可能となる。

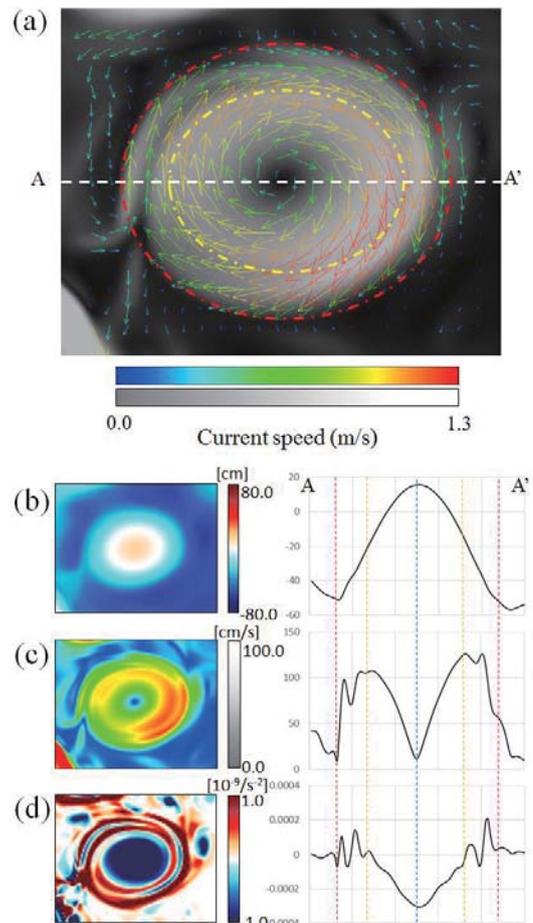


図 2 暖水渦の物理的特徴. (a)速度場, (b)海面高度, (c)流速, (d)Okubo-Weiss parameter  
Figure 2 Physical properties of warm eddy. (a) Velocity, (b) sea surface height, (c) current speed, and (d) Okubo-Weiss parameter

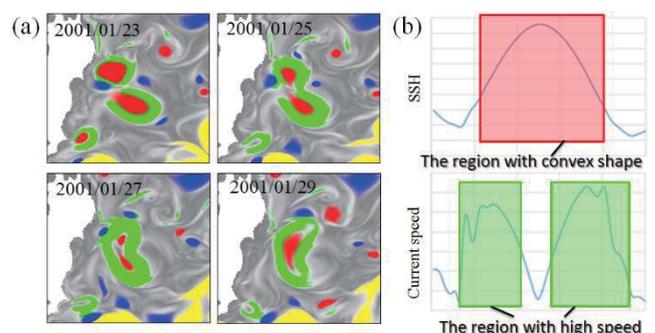


図 3 提案手法の概念図  
Figure 3 A conceptual image of the proposed method.

### 3.2 渦の抽出

最初のステップとして、海面高度データおよび速度場から渦の中心点を抽出する。ここでは、 $9 \times 9$  マスのフィルタを用いて、海面高度の極大値および極小値を抽出する。Li et al.[8]では  $5 \times 5$  マスのフィルタを用いているが、これはデータの解像度および対象とする渦の大きさを考慮して決定すればよい。本研究では 30km 以上の渦を対象とする。実際には渦中心以外の点も抽出されている場合があるため、Li et al.[8]と同様に Okubo-Weiss parameter が負の点のみを渦中心とする。図 4(a)に、渦中心の抽出結果を示す。赤は暖水渦の中心点を表す極大点を、青は冷水渦の中心点を表す極小点を表す。

次に、得られた渦中心をもとに、渦の内側領域を抽出する。ここでは、渦中心を含む最も大きい閉じた等高線を抽出する。最後に、流速の閾値を用いて、渦の外側領域を抽出する。ここでは、黒潮・黒潮統流の流速値から、流速の閾値を 0.6m/s とした。図 4(b)に、渦の内側および外側領域の抽出結果を示す。赤および青はそれぞれ断水渦および冷水渦の内側領域、緑は流れの速い外側領域（ここではストリームと呼ぶ）を示す。また、黄色は、特にサイズの大きいストリーム（海流）を示す。

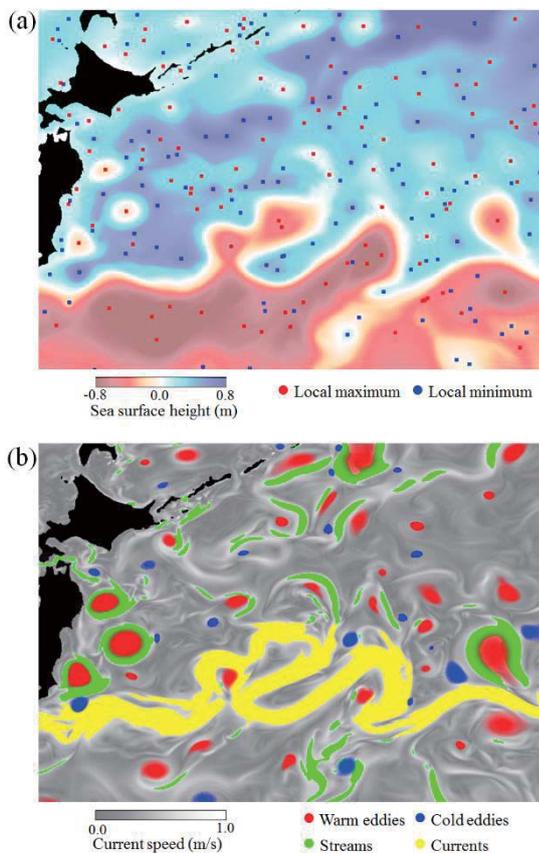


図 4 渦抽出の流れ。(a)渦中心の抽出、(b)渦、ストリームおよびカレント領域の抽出結果

Figure 4 Eddy detection results. (a) Eddy center and (b) eddy, stream and current region.

次に、抽出された渦領域を、ストリームおよびカレントとの関係性から図 5 に示すように 5 種類に分類する。(a)は通常の渦、(b)はその外側にストリームを有する渦、(c)は同一のストリームを共有する 2 つの渦、(d)はカレントにトラップされた状態の渦、(e)はストリームとカレントの両方を有する渦である。

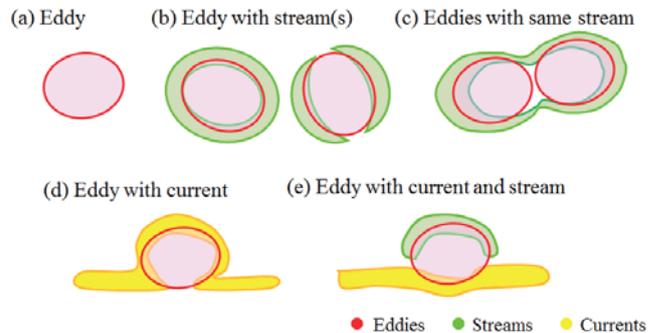


図 5 渦の分類。(a)渦、(b)ストリームを有する渦、(c)ストリームを共有する二つの渦、(d)カレントを有する渦、(e)ストリームとカレントを有する渦

Figure 5 Eddy classification. (a) Eddy, (b) eddy with stream(s), (c) eddies with same stream, (d) eddy with current, and (e) eddy with current and stream.

### 3.3 渦の追跡およびイベントの抽出

次に、抽出された個々の渦の時間変化を追跡し、渦に関するイベントを抽出する。これまで nearest neighbor[10]等の様々な特徴追跡手法が提案されているが、実装が容易であり計算コストの低い overlapping 法[11]を適用する。図 6 は overlapping 法のイメージ図である。overlapping 法では、前後のステップにおける空間的な重なり具合から次のように渦を関係づける。

- 持続 (continuation)・・・前のステップにおいて一つの渦が存在した場所に、現在のステップにおいても一つの渦が存在する場合。
- 生成 (creation or generation)・・・前のステップにおいて渦が存在しなかった場所に、現在のステップにおいて渦が存在する場合。
- 併合 (amalgamation or merge)・・・前のステップにおいて二つの渦が存在した場所に、現在のステップにおいて一つの渦が存在する場合。
- 消滅 (dissipation or death)・・・前のステップにおいて一つの渦が存在していた場所に、現在のステップにおいて渦が存在しなかった場合。
- 分離 (bifurcation or split)・・・前のステップにおいて一つの渦が存在した場所に、現在のステップにおいて二つの渦が存在する場合。

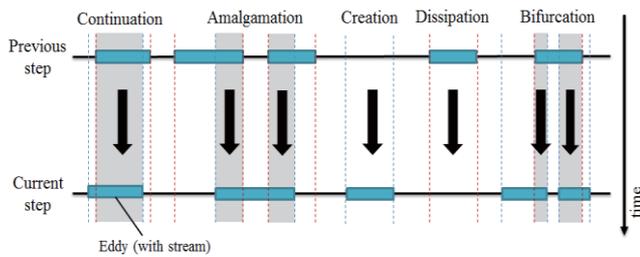


図 6 Overlapping 法 の 概 念 図

Figure 6 A conceptual representation of eddy tracking using the overlapping method.

この手法は時間解像度が低い場合は同一構造が重ならないため用いることができない。しかし、1日での渦の移動量は渦の大きさよりも遥かに小さいため、同一の渦であれば前後のステップにおいて空間的に重なることが保障される。

前述の5種類の渦分類に基づいて overlapping 法を実行することで、持続・生成・併合・消滅・分離以外の情報を抽出することも可能である。図 5(c)の“ストリームを共有する二つの渦”を図 7(a)または(b)に示した併合または分離しそうな状態にある渦を抽出することができる。さらに、図 5(d)および(e)に示した海流にトラップされた状態の渦を用いることで、図 7(c)および(d)に示すような、海流への渦の併合および海流からの渦の切離を追跡することも可能になる。

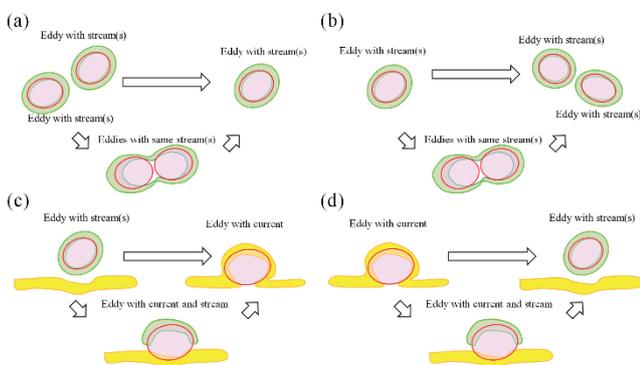


図 7 渦の分類と追跡に基づくイベントの抽出。

(a)渦の併合, (b)渦の分離, (c)海流による渦のトラップ, (d)海流からの渦の切離

Figure 7 Event detection based on eddy classification and tracking. (a) Amalgamation, (b) bifurcation, (c) merge to current, and (d) separation from current.

#### 4. 実験結果

本節では提案手法を超高解像度 OFES によるデータ（北西太平洋領域）に適用した結果について述べる。高解像モデルによるシミュレーション結果には、数多くの渦が再現されるため、それら多量の情報を視覚的に認識するのが困

難となる。そこで本研究では、何らかのイベントが発生した領域を注視領域 (ROI) としてハイライト表示することによって、解析者が現象を直観的に理解するための可視化を行う。ここでは、イベントが発生していない状態の暖水渦、冷水渦、stream および current 領域を、明度 50%の赤、青、黄緑および黄色で表示する。また、渦の生成、分離、併合、海流への併合、海流からの切離といったイベント発生時には、渦（渦周辺の stream 構造含む）の明度を 100%として強調して可視化する。渦の消滅時には、前のステップの渦の位置に明度 10%として渦を表示する。併合または分離しそうな状態にある渦（図 6(c)）も同様に注視領域として明度を 100%とする。

図 8 に渦同士の併合イベントの可視化結果を示す。2001 年 1 月 22 日に東北沖に位置する二つの渦が、1 月 27 日には一つのストリーム構造を共有する状態に変化し、2 月 1 日には一つの渦に併合しているのが分かる。この期間において、併合しそうな状態の渦および併合後の渦が明るく強調されて可視化されていることが分かる。

一方、図 9 は黒潮から切離された暖水渦を表している。2001 年 7 月 29 日において図中央に見られる海流にトラップされた暖水渦が、7 月 30 日には海流から切離された状態になり、7 月 30 日には単独して存在していることが分かる。こちらも同様に、切離された瞬間の暖水渦が明るい赤色でハイライト表示されているのが分かる。この結果では、図 9(b)中の白い点線で示した領域において海流が分断されている様子や、暖かい海水が海流を乗り越えて北に運ばれている様子が見える。

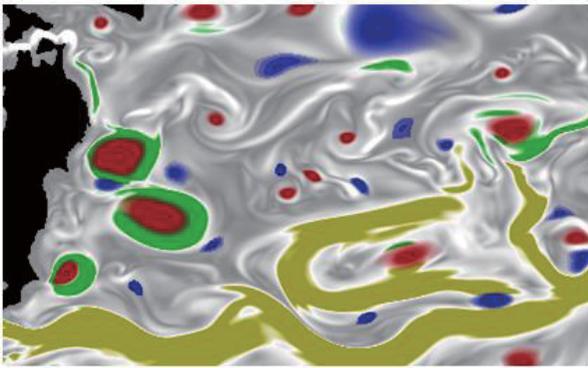
#### 5. 結論

本研究では、海面高度と流速値を用いた渦の新しい定義を行い、海洋渦の新しい抽出、追跡、イベント抽出および可視化手法を提案した。提案手法を高解像シミュレーションデータに応用し、北西太平洋における渦の生成および消滅、渦と渦の併合および分離イベントの抽出および可視化に成功した。さらに、海流からの渦の切離や海流への併合といった渦と海流の相互作用の抽出も実現した。その結果、興味領域をハイライト表示するイベント可視化により、渦に関連した現象を容易に理解することが可能になった。

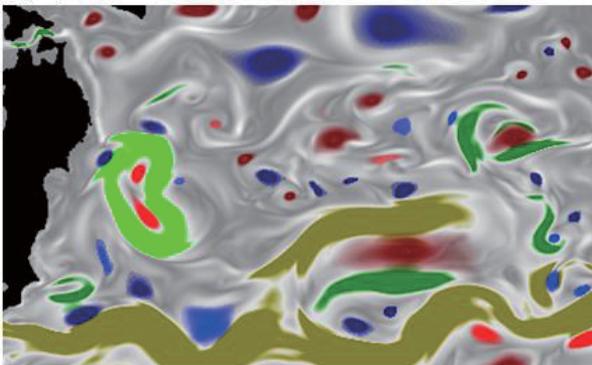
一方で、流速の閾値を用いてストリームおよびカレントを行っているため、特定の海域または特定の渦のみにしか応用することができない。全球規模のデータに適用するには、閾値に頼らないストリームおよびカレントの抽出が必要である。また、既存手法との比較による提案手法の評価も今後の課題としてあげられる。

提案手法による渦のイベント抽出結果は、可視化するだけでなく、時間変化の情報を蓄積することにより、任意の現象の検索が可能になる。例えば、渦の生成率（または消

(a) 2001/01/22



(b) 2001/01/27



(c) 2001/02/01

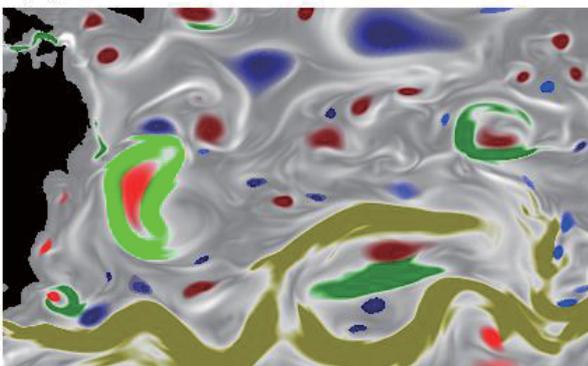


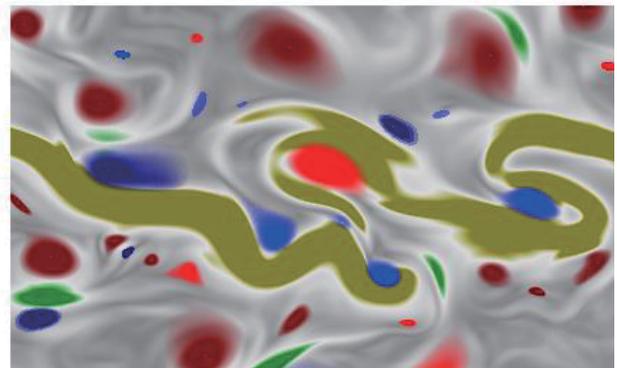
図 8 断水渦同士の併合イベントの可視化結果

Figure 8 Visualization results of an amalgamation event of warm eddies.

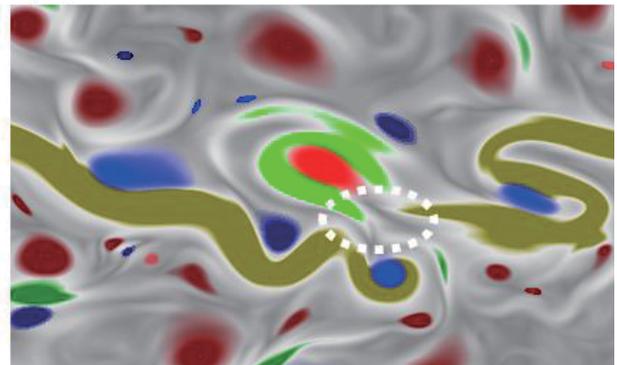
滅率) の高い時期や海域の推定や、夏期に黒潮続流の南から黒潮を乗り越えて北に移動する渦等、特定の構造の抽出が可能になる。より多くの情報を蓄積すれば、より高度な統計解析を自動的に行うことも可能になると思われる。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 若手研究(A)「地球流体シミュレーションのための多変量データ可視化手法の開発と応用 (代表: 松岡大祐)」の助成を受けたものである。

(a) 2001/07/29



(b) 2001/07/30



(c) 2001/07/31

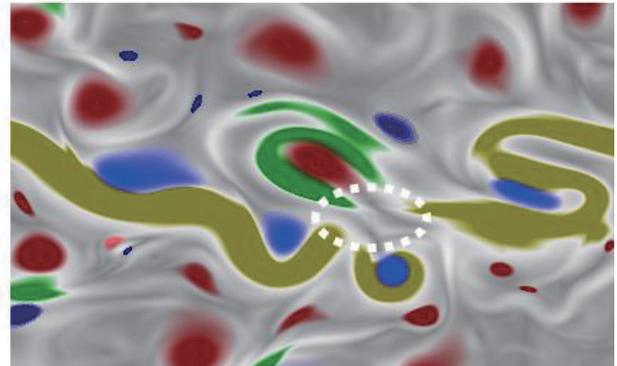


図 9 断水渦の黒潮からの切離イベントの可視化結果

Figure 9 Visualization results of a separation event of warm eddy from the Kuroshio Current.

### 参考文献

- [1] Masumoto, Y. et al., A Fifty-year Eddy-Resolving Simulation of the World Ocean: Preliminary Outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator). *Journal of the Earth Simulator*, Vol.1, pp.35-56 (2004).
- [2] Sasaki, H. et al., An Eddy-Resolving Hindcast Simulation of the Quasi-Global Ocean from 1950 to 2003 on the Earth Simulator. *High Resolution Numerical Modeling of the Atmosphere and Ocean*, pp.157-186 (2008)
- [3] Sasaki, H. et al., Impact of oceanic scale-interactions on the seasonal modulation of ocean dynamics by the atmosphere. *Nature Communications*, Vol. 5, No. 5636 (2014)
- [4] Okubo, A., Horizontal dispersion of floatable particles in the

- vicinity of velocity singularities such as convergences. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, Vol.17, pp.445-454 (1970).
- [5] Weiss, J., The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics. Physica D, Vol.48, pp.273-294 (1991).
  - [6] Fang, F. and Morrow, R., Evolution, movement and decay of warm-core leewind current eddies. Deep-Sea Research II, Vol.50, No.12, pp.2245-2261 (2003).
  - [7] Ari Sadarjoen, I., and Post. Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry. Computers & Graphics, Vol.24, No.3, pp.333-341 (2000).
  - [8] Yi, J. et al., Enhancing the accuracy of automatic eddy detection and the capability of recognizing the multi-core structures from maps of sea level anomaly. Ocean Science, Vol. 10, pp.39-48 (2014).
  - [9] McWilliams, J. C., The nature and consequence of oceanic eddies. Eddy-Resolving Ocean Modeling, edited by M. Hecht and H. Hasumi, AGU Monograph, pp.5-15 (2008).
  - [10] Mason, E. et al., A new sea surface height-based code for oceanic mesoscale eddy tracking. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol.32, pp.1181-1426 (2014).
  - [11] Silver, D. and Wang, X., Volume tracking. In Proceedings on IEEE Visualization '96, October (1996).