

VR空間におけるモード水領域の形状比較のための視点選択

矢野緑里¹⁾ 伊藤貴之¹⁾ (正会員) 田中裕介²⁾ 松岡大祐²⁾
荒木文明²⁾ (正会員) Tobias Czauderna³⁾ Kingsley Stephens³⁾

1) お茶の水女子大学人間文化創成科学研究科 2) 海洋研究開発機構 3) モナッシュ大学

View Selection of Comparative for Mode Water Regions in a VR Space

Midori Yano¹⁾ Takayuki Itoh¹⁾(Member) Yuusuke Tanaka²⁾ Daisuke Matsuoka²⁾
Fumiaki Araki²⁾(Member) Tobias Czauderna³⁾ Kingsley Stephens³⁾

1) The Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University
2) Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
3) Monash University Scenic Blvd, Clayton VIC 3800, Australia

{drsn, itot} @ itolab.is.ocha.ac.jp, {tanakaysk, daisuke, arakif} @ jamstec.go.jp,
{tobias.czauderna, kingsley.stephens} @ monash.edu

アブストラクト

モード水は海水特性が一様な表層に位置する水の塊（表層水塊）である。その海水特性には大気の状態が反映されており、気候変動の分析に重要である。モード水はさまざまなパラメータで定義され、使用されるパラメータの閾値にもばらつきがあるため、同じモード水であっても定義の違いによって異なる形状として認識される可能性がある。そこで我々は、観測データとシミュレーションデータを対象としてパラメータの閾値別のモード水形状を生成し、その形状を比較する可視化手法を開発している。本論文では、VR空間でモード水形状の比較結果を観察するためのユーザインタフェースと、形状の特徴や差異を効率的に把握するための視点選択手法を提案する。本論文では、非類似度が小さい形状ペアと大きい形状ペアについての視点選択結果、およびそれを開始点としてVR空間を移動した実行結果を示す。本手法によって選択された視点を出発点としたVR空間の移動により、観察したい目的部位に簡易な移動操作で到達し、目的部位だけでなくその周囲も含めて容易に観察できることから、効率よくモード水形状ペアの特徴を比較できることを確認できた。

Abstract

Mode water is seawater mass that has similar physical characteristics. The physical characteristics are caused by the condition change of air on the seawater surfaces, and therefore mode water plays an important role in analyzing the climate change. Mode water has been defined with various parameters and different thresholds. They may cause different shapes of mode water even the same mode water is to be observed. Therefore, we are developing a visualization tool which extracts various shapes of mode water with various conditions from observation and simulation datasets respectively. This paper proposes a user interface for observation and comparison of mode water shapes in a VR space and a view selection technique for observation of similar/dissimilar parts of the mode water shape pairs. This paper introduces examples of mode water shape pairs which have small or large dissimilarity. By selecting a viewpoint, we walk through in a VR space to observe a target part with the intuitive simple operation. Moreover, we can observe the target part in detail and understand the characteristics of shape pairs efficiently.

1. はじめに

モード水とは海水特性（水温、塩分など）が一樣な表層に位置する水の塊（表層水塊）のことで、世界中に分布している（図1）。モード水の海水特性には大気の状態が反映されているので、モード水を分析することで、海の表層の流れのトレーサとしての役割だけでなく、気候変動の空間的・時間的分析にもつながると考えられる。日本が位置する太平洋には主に3つのモード水（亜熱帯モード水、中央モード水、東部亜熱帯モード水）があり、海洋物理学分野において数多くの研究が行われている。

モード水の定義にはさまざまなパラメータが用いられている。研究初期には観測データを用いた研究が多かったことから、モード水を定義するパラメータには水温や塩分の値が用いられていた[2]。しかし、シミュレーション技術によって海洋の各地点におけるスカラー値を簡単に計算できるようになったことから、現在では水温や塩分の他にもさまざまなパラメータがモード水の定義に用いられている[3, 4, 5, 6]。また、モード水を定義するパラメータの閾値は使用データごとに異なる[7, 8, 9]。したがって、パラメータやその閾値の設定によってモード水形状がどのように影響されるかを分析することは非常に重要である[10]。例えば、観測データから得られるモード水形状とシミュレーションデータから得られるモード水形状の類似度を計算することで、どのパラメータがどの閾値であれば両者が最も類似するか（または類似しないか）を特定できる。このような知見はシミュレーションの計算方法や観測データの取得方法の見直しなどにつながると考えられる。あるいは、モード水形状の時系列変化や異常の観察にも利用できると考えられる。

モード水の比較に関する研究は従来から多数発表されているが、その多くは緯度・経度・深度のうちの2軸を用いた2次元空間での可視化を利用している。しかし、例えばモード水領域の断面図だけで形状全体を把握するには複数の断面図が必要であり、その形状を適切に把握することが難しい場合も多い。したがって、モード水の全体形状を適切に把握するには3次元可視化が有効であると考えられる。なかでも本論文では、VR(Virtual Reality)技術を用いた3次元可視化に着目する。

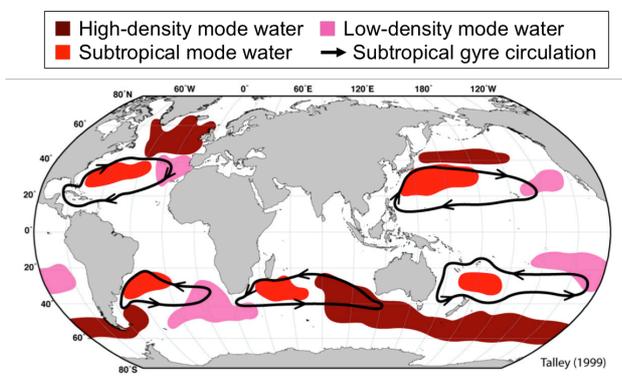


図1. 主要なモード水の分布 ([1]に加筆)。

VR 技術は旧来から科学系データの可視化に用いられてきた

が、近年の VR 装置の低価格化にともない、その適用事例は急速に拡大している。VR 技術が可視化に適用されている科学系データの例として、流体力学・構造力学・分子動力学の各種解析結果、宇宙空間の拡大の経緯、脳をはじめとする人体の構造があげられる。VR を用いた没入型空間における 3 次元可視化のメリットには以下のものが考えられる[11]。

- ユーザが分析対象と同じ空間にいるため、分析対象を動かすのではなく、ユーザが自分の興味に沿って空間内の分析対象を探索できる（ユーザ主体の操作）。
- ヘッドトラッキングと運動視差による奥行き空間と視覚情報（陰影）が提供された空間で、分析対象を観察できる（正確な形状把握）。

以上の2点が結合することで、科学系データのユーザの理解に没入型 VR 空間が有効となる[12]。しかし、分析対象となる空間を漠然と視点移動するだけでは、形状の全体像や特徴を把握するのに時間がかかるだけでなく、複雑な分析対象においてはその特徴の見落としが起こる可能性がある。また、VR 操作に慣れないユーザが操作をすることで、疲労や VR 酔いを引き起こすことも考えられる。そこで我々は、VR 空間で効率的にモード水形状の特徴や差異を観察するための視点選択手法を提案する。

本手法ではまず、2 種類のデータにおいてさまざまなパラメータの閾値を適用して生成したモード水形状を比較する。本手法では 2 つのモード水形状を同一の視点から投影し、2 形状間の対応点間の距離で色付けすることでモード水形状を描画する。この描画をいくつか（我々の実装では 20 か所）の視点から実施し、その色付け結果からユーザの興味に合う視点を推定してユーザに提案する。また本手法では、VR 空間で形状比較結果を観察するためのユーザインタフェースを提供する。これによりユーザは、選択視点を出発点とした効率よい視点操作によりモード水形状を把握することができる。なお、本研究における現段階でのシステムは、海洋物理学の研究者を主たるユーザとして想定する。主な用途として、観測値に対するシミュレーションデータの再現度を検証するために、観測データとシミュレーションデータからのモード水形状の比較結果を研究者が 3 次元的に詳しく観察する、という工程を想定する。

以降、2 章では関連研究、3 章では提案手法、4 章では実行結果、5 章ではまとめを述べる。本論文では海洋の観測データとシミュレーションデータを使用し、モード水を定義するパラメータに PV(Potential Vorticity)と密度の 2 種類を適用した事例を示す。また、実行例には北太平洋亜熱帯モード水の形状を用い、非類似度が小さい形状ペアと大きい形状ペアに関する可視化結果を示す。

2. 関連研究

2.1 モード水の定義

モード水はさまざまなパラメータを用いて定義されている。例として北太平洋亜熱帯モード水を定義するパラメータを表1に示す。PVは密度の勾配、密度は水温と圧力と塩分の値から求

められる[13]. 表1より, 同じモード水であっても異なるパラメータが用いられていることがわかる. このような定義の違いから異なったモード水形状が定義されることもある. よって, 同じモード水の研究結果であっても使用パラメータの種類が異なる場合には, その比較は簡単ではない.

北太平洋亜熱帯モード水を定義するパラメータ (PV, 密度) の閾値の条件を表2に示す. これらの条件を満たす地点を囲う閉空間を本研究ではモード水領域またはモード水形状と称する. 表2が示すデータには観測データとシミュレーションデータの両方が含まれており, データによって異なる閾値がモード水の定義に用いられている. このような閾値の違いによって, 異なるモード水形状が定義される可能性もある. しかし, パラメータの違いがモード水形状にどのくらい影響するかを議論している研究は少ない. そこで本研究では, モード水を定義するパラメータの閾値の違いに起因するモード水形状の違いを比較するツールを開発している.

表1. 北太平洋亜熱帯モード水の定義パラメータの種類.

参照	パラメータの種類
Gao [3]	PV, 密度
Oka [4]	PV, 水温
Douglass [5]	PV, 水温, 密度
Yasuda [6]	水温, 水温の勾配
Matsuzawa [2]	水温, 塩分

表2. 北太平洋亜熱帯モード水の定義パラメータの閾値.

参照	データ	PV (p)	密度 (d)
Xu [7]	ARGO	$p < 1.5 \times 10^{-10}$	$24.9 \leq d \leq 25.5$
Xu [7]	OFES	$p < 1.5 \times 10^{-10}$	$25.2 \leq d \leq 25.6$
Xu [7]	POPH	$p < 1.5 \times 10^{-10}$	$24.8 \leq d \leq 25.3$
Xu [7]	POPL	$p < 1.5 \times 10^{-10}$	$25.3 \leq d \leq 25.8$
Davis [8]	ECCO2	$p < 2.0 \times 10^{-10}$	$25.0 \leq d \leq 25.6$
Nishikawa [9]	OGCM	$p < 2.0 \times 10^{-10}$	$24.8 \leq d \leq 25.3$

2.2 モード水の分析手法

海洋物理学ではT-S ダイアグラムと呼ばれる2次元プロットを用いてモード水を分析することが多い. T-S ダイアグラムでは縦軸に水温, 横軸に塩分を割り当てて, その上に密度の等値線を描くことで3つのスカラー値の関係を表現できる. T-S ダイアグラムでは同一のモード水であれば近隣位置にプロットが集中することから, 自分が調べている領域にモード水が存在するかどうかの判定に用いられる. しかし, この分析手法ではモード水の形状に着目することが難しい.

また, 海洋の断面に等値線を描くという形でモード水形状を分析する事例[6, 14]もある. しかしこの方法では, モード水形状の立体性を一目で把握するのは難しい. この問題を解決するために本研究では, 緯度・経度・深度を軸とする3次元空間でのモード水形状の比較に取り組む.

2.3 3次元形状比較

3次元形状比較手法は形状検索技術を目的として活発に研究されてきた. 大きくわけて次の5種類の手法がある[15].

- Viewベース手法: 3次元の物体を2次元の画面に投影し, その投影した画像を比較する.
- Graphベース手法: 3次元の物体形状の骨格をグラフ表示し, そのグラフを比較する.
- Geometryベース手法: 3次元の物体形状の特徴的な部分を直接的に比較する.
- Staticsベース手法: 3次元の物体形状の特徴を統計値に置き換えて比較する.
- その他: 3次元の物体形状に関するユーザテストやフィードバックを用いて比較する.

View ベース手法は2次元画像処理技術を用いていることもあり, さまざまな種類の3次元の物体形状に使用されている. 3次元形状比較には幾何変換や形状表現などに対する不変性が重要で, 見かけの形状そのものを比較するView ベース手法はこれらの条件への不変性が強いことが報告されている[28]. 以上により, この手法は他の手法に比べて形状認識に長けているとされている[16, 17]. それに加えて, View ベース手法はGPUによる高速処理も容易に実現できる.

一方で, シルエット画像をベースとしたView ベース手法の問題点として, 3次元形状の凹部や空洞を見落とす可能性があげられる. 従来手法の海洋断面による等値線比較を用いたモード水の分析では, シミュレーションデータの観測値の再現度の指標としてモード水形状の断面の概略的な外形の観察[6], 他の海洋現象との関係性の議論[14]などがあるのに対して, モード水形状の凹部や空洞といった形状の詳細が考察されている事例は見当たらない. さらに, 本研究で用いたモード水領域のパラメータ(PV, 密度)の分布を海洋の観測データで確認すると, モード水形状の中心部分の断面では大きな凹部や空洞は形成されないことが確認されている[31]. よって上述のView ベースの問題点は本研究では重要な問題点ではないといえる.

こうしたモード水形状の特徴もふまえて, 本研究ではView ベース手法[16]を用いてモード水形状を比較する. 3.2節で後述する形状比較の際には, モード水形状のシルエット画像を生成する. 3.3節で後述するVR空間での視点選択処理では, 形状ペアのカラー画像(配色は形状ペア間の距離にもとづく)を生成する.

2.4 VR空間における可視化

VR技術はさまざまな科学データの可視化に応用されている. Mirhosseiniら[11]は大腸の内視鏡撮影画像からポリープ形状を正確に把握するためにVRを適用している. 没入型空間におけるポリープの観察は手術の事前計画に有効である. Donalekら[18]は火星の仮想歩行体験によってその地形に対する直感的理解を支援するためにVRを適用している. このように, VR空間は物体形状や位置関係の把握に適していると考えられる.

本研究が採用している等値面についても, VR空間で表示することで形状理解が促進されることがLahaら[12]によって報告されている. この報告ではボリュームデータを用いてVRシステムの性能を検証している. その結果, 等値面表示は立体視に適しており, 視野角の広さやヘッドトラッキング機能は空間を

判断するのに適しているということがまとめられている。このような結果もあって、VR 空間における科学データの形状表示には等値面がよく使われている[19, 20].

VR 技術を用いた海洋データの分析事例も多数あるが、モード水の比較に特化した VR 可視化の研究は我々が調べた限りでは見当たらない。

2.5 視点選択

3 次元データの観察において最適な視点選択は非常に重要であり、特にボリュームレンダリングのための視点選択は活発に議論されている。Bordoloi ら[21]はエントロピーの特性を用いて、ボリュームレンダリングのための有益な視点や全体の特徴がよく表現されている視点を提案している。Takahashi ら[22]は局所的に最適な視点を計算していくことで、ボリュームデータの内部を考慮した全体的に最適な視点を提案している。また、Ahrens ら[23]は大規模シミュレーションのデータの分析に視点選択を用い、データにおける重要な視点やユーザの興味に合う視点を提案している。

本研究ではモード水の形状ペア画像の色相を視点別に計算することで、形状ペアの類似している部位や異なる部位の観察に向けた視点を提案する。

3. 提案手法

本章ではモード水領域の形状比較結果を VR 空間で観察するための視点選択手法と、VR 空間で形状比較結果を観察するためのユーザインタフェースを提案する。処理手順を図 2 に示す。本手法ではまず、ボリュームデータからモード水領域を抽出する。ボリュームデータを構成する格子点のうち、モード水条件を満たすスカラ値をもつ格子点の集合で構成される 3 次元領域を、等値面として抽出する。そして多視点レンダリング手法を用いて等値面形状を比較し、非類似度を計算する。続いて、形状を比較した等値面ペア間の距離をもとに等値面を配色する。配色された等値面に対して多視点レンダリング手法を再度適用し、各視点画像に描画された形状部位の色相分布にもとづいて視点画像を選択することで、視点を選択する。

本研究では各ボリュームデータに対して複数のモード水条件を適用するので、1 個のボリュームデータから複数の等値面を生成する。

3.1 モード水領域の境界抽出

ボリュームデータを構成する格子点のスカラ値 S_i がモード水条件を満たす場合には正の属性値、満たさない場合には負の属性値を格子点に割り当てる。そして属性値ゼロとなる点の集合を等値面として抽出する。以上の処理によって抽出した領域を「モード水形状」として扱う。

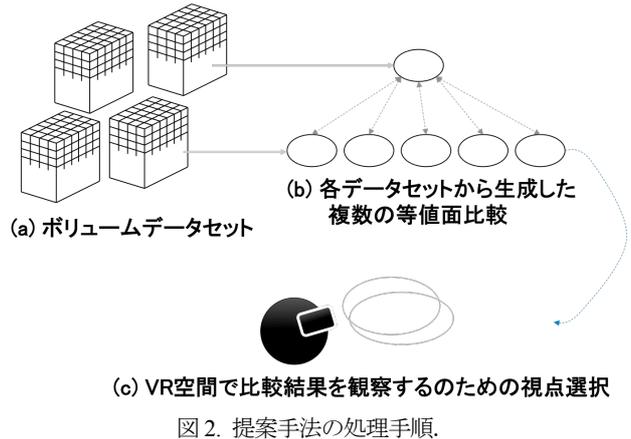


図 2. 提案手法の処理手順。

3.2 形状比較

まず多視点レンダリング手法を用いて多視点形状シルエット画像を取得する。正十二面体の中にモード水形状を配置し、その頂点を視点として、形状シルエット画像を 20 枚取得する。次に各々の形状シルエット画像に対して特徴量を計算する。ここで各視点画像に以下の処理を適用する (図 3)。

1. 形状シルエット画像の輪郭をラプラシアンフィルタで抽出する。
2. 画像の中心を通る軸を設定し、輪郭画素の座標 (x, y) を極座標 (r, θ) に変換する。
3. 変換した座標の距離 r と角度 θ にもとづく 2 次元ヒストグラムを作成する。
4. 2 次元ヒストグラムの頻度を特徴量とする。

本手法では形状の外形を比較するために、輪郭画素の距離 r と角度 θ を特徴量とする。

モード水形状 X の 20 枚のシルエット画像から生成した 20 個の特徴量ベクトルを $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i20}\}$ とする。ここで i 番目の視点から算出した特徴量ベクトルを x_i とする。同様に、形状 Y の特徴量ベクトルを $Y_j = \{y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{j20}\}$ とする。形状 Y の j 番目の視点から算出した特徴量ベクトルを y_j とする。このとき、形状 X と形状 Y の非類似度 $D(X, Y)$ を以下の手順で求める。

- 1) 形状 X と形状 Y の視点間のマンハッタン距離 $d(x_i, y_j) = |x_i - y_j|$ を求める。
- 2) 視点間のマンハッタン距離の平均を非類似度 $D(X, Y)$ とし、式(1)を用いて計算する。

$$D(X, Y) = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} d(x_i - y_i) \quad (1)$$

$D(X, Y)$ が小さいほど形状ペア (形状 X と形状 Y) は類似しており、大きいほど形状ペアは類似していないことを意味する。

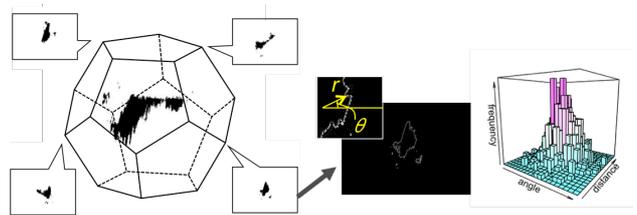


図 3. 形状比較の処理手順。

多視点レンダリング手法では原則として、画像を取得するための視点を一様に配置する。そこで物体を囲む正多面体の各頂点に視点を設置することが多い。正八面体を採用すれば視点の個数(視点数)は6個[27]、正十二面体なら20個[16]、正二十面体なら42個[28]となる。視点数が増加するほど正確な形状比較が可能ではあるが、一方で、計算量の増加や誤差の影響も考慮する必要がある。そうした中で[29]では、20個の視点からの画像があれば、ポリゴンモデル(うさぎや龍など)から十分な精度でイメージ駆動型の形状比較が可能であるとしている。また[30]では、レーザスキャナーで取得した3次元モデル(天使や小人の像など)について、15~20個の視点からの画像を用いることで、3次元構造を再現可能であると報告している。これらをふまえて[16]では、20個の視点からの画像を用いれば多くの3次元形状を適切に数値表現できるとし、かなり高い精度で3次元モデルの形状比較が可能であるとしている。これらの従来研究に倣って、本研究では20個の視点を採用し、等値面として抽出したモード水形状を比較する。

3.3 VR空間での形状ペアの比較表示

本手法では非類似度をもとにして形状ペアを選出した上で、VR空間で形状ペアを詳細に比較観察することを想定している。そこで、形状ペアに対して等値面間の距離にもとづいて色付けを施した後に、3.2節と同様に、多視点レンダリング手法を適用する。以下、形状Xと形状Yを形状ペアとして説明する。本手法ではまず、形状Xの等値面の各頂点について、形状Yの等値面の各頂点のうち距離が最小となるものを求め、その最小距離にもとづいて形状Xの各頂点の色を計算する。続いてこの色を用いて、多視点レンダリング手法を再度適用して多視点形状ペア画像を生成し、各視点画像に投影される形状部位の色相をもとに視点を評価する。そして最適と評価された視点を出発点として、等値面をVR空間にて表示する。

本研究ではゲーム開発エンジンであるUnityをVR空間の構築に採用する。Unityは開発環境・サポートともに充実していて幅広いユーザー層に支持されており、かつ多彩なVRデバイスと容易に接続可能であることから、さまざまなシステム構成が可能である。本研究の多様な発展の可能性の観点から、VR空間の開発にUnityを採用する。

3.3.1 形状ペアの視点画像の取得

形状Xの等値面を構成する点を $X_p = \{p_1, p_2, \dots, p_i\}$ 、形状Yの等値面を構成する点を $Y_q = \{q_1, q_2, \dots, q_j\}$ とする。形状Xの点 p_i と形状Yの点 q_j の最短距離を計算し、形状Xの点をもとにしたときの形状Yの点との最短距離を $L_i(p_i, q_j)$ とする。距離 L_i の最小値を $\text{Min}(L_p)$ 、最大値を $\text{Max}(L_p)$ とするとき、式(2)を用いて距離 L_i を正規化する。

$$D_i(p_i - q_j) = \frac{L_i(p_i, q_j) - \text{Min}(L_p)}{\text{Max}(L_p) - \text{Min}(L_p)} \quad (2)$$

図4(A)に示すカラーマップを適用する場合には、 $D_i(p_i, q_j)$ が0に近いほど青色、1に近いほど赤色になるように形状Xの等値面を色付けする。形状Yの点をもとにしたときの形状Xの点と

の最短距離 $L_j(q_j, p_i)$ も計算し、 L_j に対しても同様の処理を適用し、形状Yの等値面を色付けする。

図4(A)に示すカラーマップではうまく表現できない事例がある。例えば形状Yが形状Xを拡大・縮小・平行移動したような図形である場合、大半の部位が中程度の距離を示す緑色に色付けされてしまい、形状の違いの観察が難しくなる。そこで別のカラーマップとして、図4(B)に示す2色相のカラーマップも用意する。形状Xの重心をGとし、各形状の等値面を構成する点との距離を計算し、重心Gと形状Xの距離を $GD_i(p_i)$ 、重心Gと形状Yの距離を $GD_j(q_j)$ とする。そして、形状間の最短距離をもつ点での距離の差 $GD_i(p_i) - GD_j(q_j)$ を計算する。正值であれば絶対値が大きいほど鮮やかな青色、負値であれば絶対値が大きいほど鮮やかな赤色、0であれば灰色になるように形状Xの等値面を色付けする。形状Yについても同様に色付けする。



図4. 本研究で適用するカラーマップの例。

続いて、色付けした形状ペアに多視点レンダリング手法を適用する。対象となる形状ペアを正十二面体の中に配置し、その頂点を視点として、全部で20枚の視点別形状ペア画像を生成する。画像生成時にはVR空間内の照明計算を省略することで光反射の効果を排除する。この処理では図4(A)に示すカラーマップを採用し、背景は白色に固定する。画像の取得にはUnityのスクリーンショット機能を用いる。

3.3.2 画像処理にもとづく視点選択

取得した視点別形状ペア画像の各画素のHSB値を計算する。そして形状ペアの視点別画像の色相にもとづいて視点選択の候補を絞る。画像処理には背景色の白を除く画素を使用し、画素の色相は0~1に正規化した値を用いる。本研究では①色相の平均値、②特定の色相の2種類の視点選択に着目する。

① 色相の平均値

形状ペア画像の画素の色相の平均を視点別に計算する。等値面は距離にもとづいて色付けされていることから、形状ペアが類似しているほど青色、類似していないほど赤色に表示される。ある視点から形状ペアを観察した場合、全体的に類似している部位が多い場合には青色の画素の割合が多く、全く類似していない部位が多い場合には赤色の画素の割合が多いことが考えられる。したがって、色相の平均値が小さいほど全体的に類似している部位が多く観察できる視点、大きいほど類似していない部位が多く観察できる視点である。

② 特定の色相区間

形状ペア画像の色相の各区間に該当する画素数を視点別に集計する。この処理では、正規化した値を $1/n_h$ ごとに区切ることで n_h 個(現時点での実装では $n_h=10$)の色相の区間を設定し、各区間に該当する画素の総数を集計する。そして、ユーザが選択した色相区間に該当する画素数が多い順に視点をユーザに提案

する。この方法により、例えば「形状ペア間の距離が一定値である部位に着目したい」といった多様なユーザの興味を満たす視点を選択しやすくする。

3.4 VR空間における可視化

本研究ではUnityとOculus Riftを用いてVR空間を実装している。Oculus Riftは広く普及している高性能なヘッドマウントディスプレイ (HMD)の1つであり、Unityと組み合わせることで、簡単にVR環境を構築することができる。また、ユーザが違和感なくVR空間で対象形状を観察することを考え、VR空間における操作をマウスやキーボードといった固定位置からの操作だけではなく、Xboxコントローラを用いた操作も可能としている。

Unityでは三角ポリゴンメッシュとして等値面を表示する。また、本研究が対象とする北太平洋領域内でスカラ値が欠損値となっている部位は陸地であるとして、陸地をハイトマップで表示する。

3.4.1 視点選択

視点別色相の平均値が小さい順（または大きい順）に視点を提案することで、VR空間における形状ペアが類似している部位（またはそうでない部位）を重点的に観察できる。また、ユーザが指定する色相を多く含む視点を提案することで、形状ペアの詳細な特徴をユーザの興味に沿って観察できる。

3.4.2 比較可視化

選択された視線から形状ペアを観察することができる。形状が類似しているほど寒色、類似していないほど暖色で表示している。中性色（緑系の色）は、形状ペアが拡大・縮小・平行移動のいずれの関係なのか判断がつかない。そこで、形状の重心からの距離にもとづく配色を用いて形状ペアを表示する。拡大・縮小の関係の場合には赤色または青色のいずれかで色付けされ、平行移動の関係の場合には、重なっている部位は灰色、それ以外は赤色と青色で色付けされる。

3.4.3 ユーザインタフェース

Unity上での実装画面を図5（上）に、Oculus Riftの画面を図5（下）に示す。図5（上）の中央に表示されている形状がモード水で、陸地との位置関係からモード水の位置を確認できる。また、右側の操作パネルをユーザが操作することで、比較したい形状データの選択、選択した形状ペアの等値面の配色の計算、多視点レンダリングの開始などを設定できる。多視点レンダリングの適用時には操作パネルや陸地などを非表示にし、光反射を考慮しないシェーダに切り替えて形状ペアを表示し、視点別形状ペア画像を取得する。ユーザは提案された視点を出発点にして自在に移動することで、モード水形状を効率よく、かつ効果的に観察できる。さらに、移動中のフレームを記録する機能を活用することで、ユーザによるウォークスルー操作の過程で各視点からの描画結果を画像として保存できる。この画像群から、色相平均値が最大または最小である画像を生成する視点、あるいは特定の色相を有する部位が大きい画像を生成する視点、

といった観点で視点選択候補をあげることもできる。

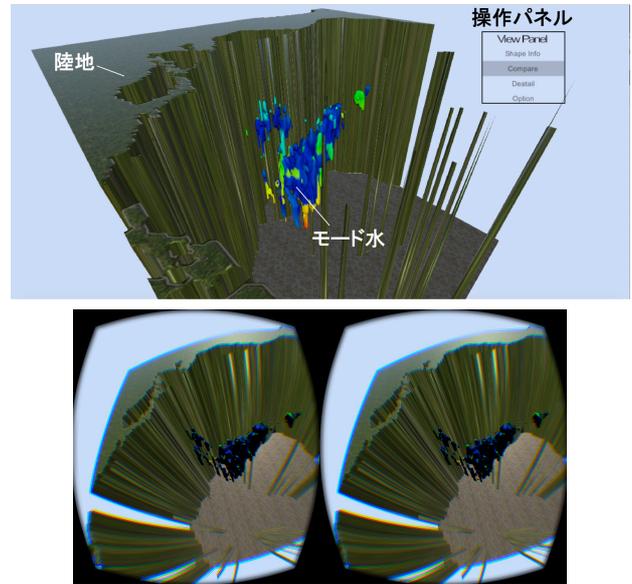


図5. 実装画面（上：Unityの画面 下：Oculus Riftの画面）。

4. 実行結果

4.1 適用データ

本研究では、海洋観測データ WOA13 (World Ocean Atlas 2013)[24, 25]とシミュレーションデータ OFES (Ocean general circulation model simulation For Earth Simulator)[26]からモード水形状データを作成して比較した。いずれも不等間隔の格子構造のボリュームデータセットであり、WOA13の緯度および経度の解像度は0.25度、OFESの解像度は0.1度とした。WOA13では2005～2012年の年平均値、OFESでは10年分の月平均値を用いた。

モード水の条件にはPVと密度の2種類のパラメータを用いた。表3に示す2種類の閾値の組み合わせにより、1ヶ月のデータから20パターンのモード水形状を生成した。WOA13からは4ヶ月分（7月から10月）のデータを用いて80個のモード水形状データを、OFESからは3ヶ月分（7月から9月）のデータを用いて600個のモード水形状データを生成した。

表3. パラメータの閾値.

パラメータ	閾値
PV (p)	$p < 1.5 \times 10^{-10}$, $p < 2.0 \times 10^{-10}$, $p < 2.5 \times 10^{-10}$, $p < 3.0 \times 10^{-10}$
密度 (d)	$25.1 \leq d \leq 25.4$, $25.2 \leq d \leq 25.4$, $25.2 \leq d \leq 25.5$, $25.3 \leq d \leq 25.4$, $25.3 \leq d \leq 25.5$

4.2 非類似度にもとづく視点別色相の平均値

WOA13から抽出したモード水形状とOFESから抽出したモード水形状について48,000通りのペアを比較した。以下、非類似度が最小および最大であったペアを「最小非類似度ペア」「最大非類似度ペア」と呼ぶ。各ペアの条件を表4に示す。比較結果

を色付けするカラーマップは図4(A)に示したものをを用いた。

表4. 最小非類似度ペアおよび最大非類似度ペアの条件.

データ	最小非類似度ペア	最大非類似度ペア
WOA13	8月のデータ $p < 2.0 \times 10^{-10}$ $25.2 \leq d \leq 25.4$	7月のデータ $p < 1.5 \times 10^{-10}$ $25.3 \leq d \leq 25.5$
OFES	10年目の9月のデータ $p < 1.5 \times 10^{-10}$ $25.3 \leq d \leq 25.4$	5年目の7月のデータ $p < 3.0 \times 10^{-10}$ $25.2 \leq d \leq 25.5$

最小非類似度ペアと最大非類似度ペアの各々について、20枚の視点別画像の色相平均値を算出した結果を図6に示す。この図では横軸が視点番号、縦軸が色相平均値を示し、最小非類似度ペアの色相を青丸、最大非類似度ペアの色相を赤四角で表示している。なお本章での色相平均値は0または1が赤、1/3が緑、2/3が青に対応するものとする。どの視点においても、最小非類似度ペアは最大非類似度ペアよりも常に色相平均値が大きく、いずれの視点画像も寒色の割合が多い。逆に、最大非類似度ペアではいずれの視点画像も寒色の割合が少ないため、色相平均値も小さい。

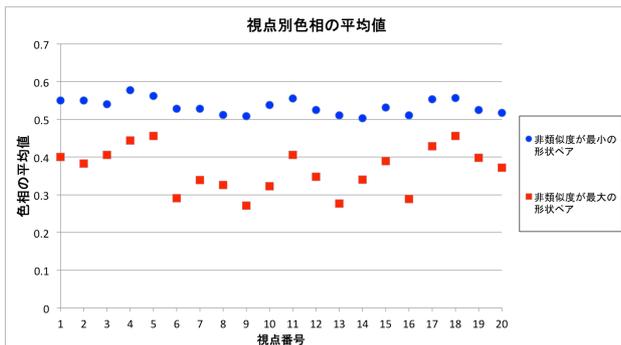


図6. 視点別色相の平均値.

4.3 非類似度が最小の形状ペアの事例

最小非類似度ペアの視点別の色相平均値が最小となるのは14番目の視点、最大となるのは4番目の視点である(図6)。14番目の視点から見た形状ペアを図7(左)、4番目の視点から見た形状ペアを図7(右)に示す。4番目の視点からは、オレンジ色の部位がわずかに見えるだけで、青色の部位が大部分を占めていることがわかる。14番目の視点からもやはり青色の部位が多いことがわかるが、形状の凸部(突起部分)には赤色やオレンジ色といった暖色の部位が見られた。したがって、全体的に類似している形状ペアと言えるものの、4番目の視点から見る形状ペアの状態と14番目の視点から見る形状ペアの状態には違いがあり、14番目の視点からは形状ペアの非類似な部位を観察できることがわかる。全体的な非類似度が小さいペアにおける非類似な部位の観察は、シミュレーションの精度向上に貢献する可能性や、観測における異常値の発生(気候変動)の検討材料となる可能性が考えられる。

4番目の視点を出発点として暖色の部位に向かってVR空間を

移動した様子を図8に示す。視点が適切に設定されていたことから、図8(a)→(b)→(c)の順に、簡易な操作によって暖色の部位に近づくことができた。さらに、暖色の部位の周囲の状態(図8(e))についても簡単に観察することができた。この暖色の部位は寒色の部位と接していることから、類似部位と非類似な部位の境界部分であることがわかった。

4番目の視点を出発点として暖色の部位(目的部位)を観察する一連の操作は、その部位におよそ近づく方向に直線移動する操作を数秒続けるだけでよい。しかし他の視点、例えば14番目の視点を出発点として、4番目の視点を出発点とした場合と同様の暖色の部位を観察するには、まず形状全体を把握するためにまんべんなく周回しなければならない。操作としては、進行方向を変えては直線移動する操作を繰り返すので、ある程度の操作時間が必要である。したがって、視点の適切な選択は目的部位を簡単に発見する効果的な探索を促進し、効率のよい観察につながる。

最小非類似度ペアの視点別の色相の割合を図9(左)に示す。図9(左)では、縦軸が視点番号、横軸が色相hの割合、棒グラフの色は色相に対応している。どの視点においても青色($0.5 < h \leq 0.7$)の割合が多いことが確認できる。

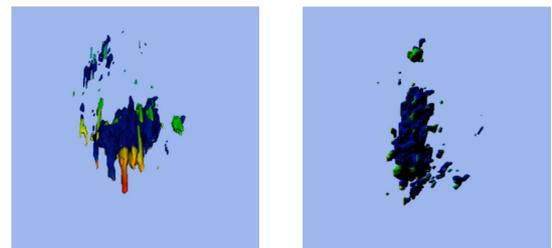


図7. 最小非類似度ペアの視点別形状

(左: 色相平均値が最小となる14番目の視点から見た形状
右: 色相平均値が最大となる4番目の視点から見た形状) .

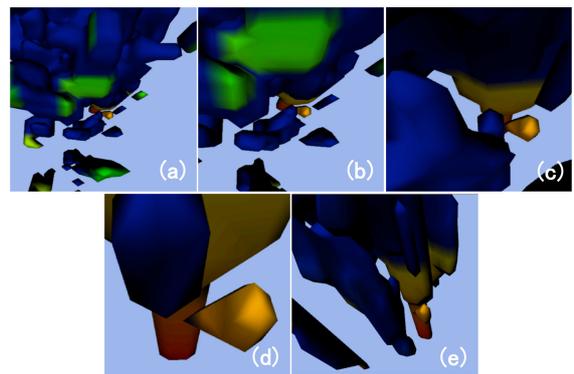


図8. 暖色部位の観察過程.

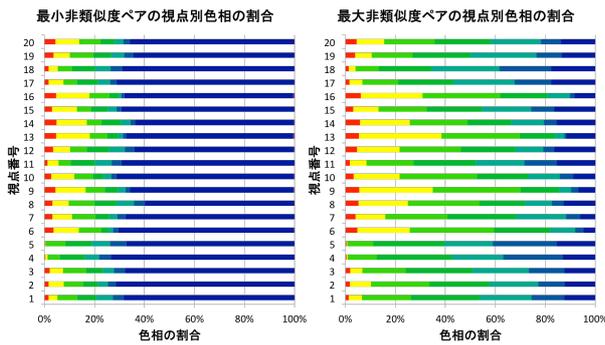


図9. 視点別色相の割合

(左：最小非類似度ペア 右：最大非類似度ペア) .

4.4 非類似度が最大となる形状ペアの事例

最大非類似度ペアの視点別の色相平均値のうち、色相平均値が最小となるのは9番目の視点、最大となるのは5番目の視点である(図6)。9番目の視点から見た形状ペアを図10(左)、5番目の視点から見た形状を図10(真ん中)に示す。5番目の視点からはほとんど暖色の部位が見られず、青色、水色、緑色の部位が大部分を占めている。一方、9番目の視点からは形状の一部に青色の部位が見られるだけで、赤色、黄色、緑色の部位が大部分を占めている。したがって、5番目の視点から見る形状ペアの状態と9番目の視点から見る形状ペアの状態には大きな違いがあり、形状ペアの特徴を捉えるには他の視点からの形状観察が必要である。そこで、例えば色相平均値の中央値に最も近い20番目の視点から形状ペア(図10(右))を観察すると、緑色の部位が大部分を占めるが、暖色や寒色の部位も見られることがわかった。また、9番目の視点からは青色の部位が暖色の部位と接しているが、20番目の視点からは寒色の部位と接している。このようなペアの類似性・非類似性を網羅的に観察するには、多様な視線の方向から観察することが有効であるが、それでも視点をある程度選択しておいた方が効率よく観察できると考えられる。

最大非類似度ペアの視点別色相の割合を図9(右)に示す。図9(左)と同様に、縦軸が視点番号、横軸が色相hの割合、棒グラフの色は色相に対応しており、どの視点も寒色($0.2 < h \leq 0.5$)の割合が少なく、暖色($h \leq 0.2$)や緑色($0.2 < h \leq 0.5$)の割合が多いことが確認できる。

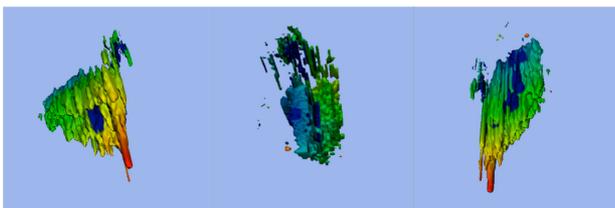


図10. 最大非類似度ペアの視点別形状

(左から、色相平均値が最小となる9番目の視点から見た形状、最大となる5番目の視点から見た形状、中央値となる20番目の視点から見た形状) .

5. まとめ

本論文では、さまざまな条件(データ・パラメータ・閾値)のモード水形状の比較結果をVR空間で観察するためのユーザインタフェースを開発し、形状ペアの特徴や差異を効率的にユーザが把握するための視点選択手法を提案した。ユーザは選択した視点を出発点として、VR空間で観察したい目的部位に向かって簡単に移動し、目的部位だけでなくその周囲にも簡単に移動して観察できる。このような適切な視点選択によって、複数のモード水形状を効率よく比較することが可能になった。

本研究のシステムを用いてモード水形状を比較することで、次のような分析ができると考えられる。観測データからの形状を基準に比較した場合には、シミュレーションデータからの形状との違いはシミュレーションデータの観測値の再現度の問題があると考えられる。この場合の対策として、シミュレーションの計算方法や観測値に近づけるためのパラメータの調整方法の再考が考えられる。一方で、シミュレーションデータからの形状を基準に比較した場合には、観測データからの形状との違いは観測データの計測不備や異常気象に起因することが考えられる。この知見は、観測方法の見直しや気候変動の分析の寄与につながる可能性がある。したがって、シミュレーションの精度向上や観測における欠損値・異常値の発生分析などに有効だと考える。さらに、モード水形状の立体的な把握はこのような分析の信頼性向上につながると思う。

今後の課題として、最小非類似度ペアにおける非類似な部位や最大非類似度ペアにおける類似部位を中心に海洋物理学の研究者と議論を行いたいと考えている。また、他の海洋データを用いたモード水形状やモード水の条件を増やしてさまざまな形状ペアの考察を行いたいと考えている。どのくらい効率がよくなったのかといったVR空間における視点選択に関するユーザテストや海洋物理学の研究者の意見をもとに、ユーザインタフェースの改良を検討していきたい。形状比較結果をさらに強化するために、深さ方向を考慮することも考えている。

本研究のシステムはあくまでも試作段階であることから、現段階では広く普及している一般的なVR機材(Oculus RiftとXboxコントローラ)とUnityを採用した。また、現時点ではターゲットユーザには海洋物理学の研究者を想定しているが、非専門家への教育ツールとしての発展も考えられる。この場合の課題として、まず操作の自動化が考えられる。例えば、類似形状ペア(非類似度が最小の形状ペア)における非類似な部位の観察までの視点移動の流れを自動化することで、本論文で提案した視点選択手法にもとづく効率的な視点移動を体験できると考える。また、関心が高い利用者のために海洋物理学の研究者との議論内容を解説として、パネル表示や音声ガイドなどに盛り込みたい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 16K13885 および JST さきがけ JPMJPR1777 の助成を受けたものです。

参考文献

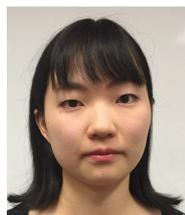
- [1] L. D. Talley, Some Aspects of Ocean Heat Transport by the Shallow, Intermediate and Deep Overturning Circulations, Mechanisms of Global Climate Change at Millennial Time Scales, 1-22, 1999.
- [2] J. Masuzawa, Subtropical Mode Water, In Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, Elsevier, 16(5), 463-468, 1969.
- [3] W. Gao, P. Li, S. P. Xie, L. Xu, C. Liu, Multicore Structure of the North Pacific Subtropical Mode Water from Enhanced Argo Observations, Geophysical Research Letters, 43(3), 1249-1255, 2016.
- [4] E. Oka, B. Qiu, Y. Takatani, K. Enyo, D. Sasano, N. Kosugi, M. Ishii, T. Nakano, T. Suga, Decadal Variability of Subtropical Mode Water Subduction and Its Impact on Biogeochemistry, Journal of Oceanography, 71(4), 389-400, 2015.
- [5] E. M. Douglass, S. R. Jayne, S. Peacock, F. O. Bryan, M. E. Maltrud, Subtropical Mode Water Variability in a Climatologically Forced Model in the Northwestern Pacific Ocean, Journal of Physical Oceanography, 42(1), 126-140, 2012.
- [6] T. Yasuda, Y. Kitamura, Long-Term Variability of North Pacific Subtropical Mode Water in Response to Spin-Up of the Subtropical Gyre, Journal of Oceanography, 59(3), 279-290, 2003.
- [7] L. Xu, S. P. Xie, J. L. McClean, Q. Liu, H. Sasaki, Mesoscale Eddy Effects on the Subduction of North Pacific Mode Waters, Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(8), 4867-4886, 2014.
- [8] X. J. Davis, L. M. Rothstein, W. K. Dewar, D. Menemenlis, Numerical Investigations of Seasonal and Interannual Variability of North Pacific Subtropical Mode Water and Its Implications for Pacific Climate Variability, Journal of Climate, 24(11), 2648-2665, 2011.
- [9] S. Nishikawa, H. Tsujino, K. Sakamoto, H. Nakano, Effects of Mesoscale Eddies on Subduction and Distribution of Subtropical Mode Water in an Eddy-Resolving OGCM of the Western North Pacific, Journal of Physical Oceanography, 40(8), 1748-1765, 2010.
- [10] M. Yano, T. Itoh, Y. Tanaka, D. Matsuoka, F. Araki, Comparative 3D Visualization Tool for Observation of Mode Water, IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis), 230-234, 2018.
- [11] K. Mirhosseini, Q. Sun, K. C. Gurijala, B. Laha, A. E. Kaufman, Benefits of 3D Immersion for Virtual Colonoscopy, IEEE VIS International Workshop, 75-79, 2014.
- [12] B. Laha, D. A. Bowman, J. J. Socha, Effects of VR System Fidelity on Analyzing Isosurface Visualization of Volume Datasets, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 20(4), 513-522, 2014.
- [13] Tenth Report of the Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards, UNESCO Technical Papers in Marine Science, 36, 1981.
- [14] I. Stendardo, D. Kieke, M. Rhein, N. Gruber, R. Steinfeldt, Interannual to Decadal Oxygen Variability in the Mid-Depth Water Masses of the Eastern North Atlantic, Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 95, 85-98, 2015.
- [15] H. ElNaghy, S. Hamad, M. E. Khalifa, Taxonomy for 3D Content-Based Object Retrieval Methods, International Journal of Recent Research and Applied Studies (IJRRAS), 14(2), 412-446, 2013.
- [16] D. Y. Chen, X. P. Tian, Y. T. Shen, M. Ouhyoung, On Visual Similarity Based 3D Model Retrieval, Computer Graphics Forum, 22(3), 223-232, 2003.
- [17] P. Shilane, P. Min, M. Kazhdan, T. Funkhouser, The Princeton Shape Benchmark, Shape Modeling Applications (SMI), 167-178, 2004.
- [18] C. Donalek, S. G. Djorgovski, A. Cioc, A. Wang, J. Zhang, E. Lawler, Y. Stacy, S. Davidoff, J. S. Norris, G. Longo, Immersive and Collaborative Data Visualization Using Virtual Reality Platforms, IEEE International Conference, 609-614 2014.
- [19] S. Zhang, C. Demiralp, D. F. Keefe, M. DaSilva, D. H. Laidlaw, B. D. Greenberg, C. Pierpaoli, T. S. Deisboeck, An Immersive Virtual Environment for DT-MRI Volume Visualization Applications: a Case Study, IEEE Visualization, 437-584 2001.
- [20] C. Erolin, C. Lamb, R. Soames, C. Wilkinson, Does Virtual Haptic Dissection Improve Student Learning? A Multi-Year Comparative Study, Medicine Meets Virtual Reality (MMVR), 110-117, 2016.
- [21] U. D. Bordoloi, H. W. Shen, View Selection for Volume Rendering, IEEE Visualization, 487-494, 2005.
- [22] S. Takahashi, I. Fujishiro, Y. Takeshima, T. Nishita, A Feature-Driven Approach to Locating Optimal Viewpoints for Volume Visualization, IEEE Visualization, 495-502, 2005.
- [23] J. Ahrens, S. Jourdain, P. O'Leary, J. Patchett, D. H. Rogers, D. H. M. Petersen, An Image-Based Approach to Extreme Scale in Situ Visualization and Analysis, the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, 424-434, 2014.
- [24] R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, C. R. Paver, J. R. Reagan, D. R. Johnson, M. Hamilton, D. Seidov, World Ocean Atlas 2013 Volume 1: Temperature, NOAA Atlas NESDIS 73, Silver Spring, MD, 40, 2013.
- [25] M. M. Zweng, J. R. Reagan, J. I. Antonov, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, O. K. Baranova, D. R. Johnson, D. Seidov, M. M. Biddle, World Ocean Atlas 2013 Volume 2: Salinity, NOAA Atlas NESDIS 74, Silver Spring, MD, 39, 2013.
- [26] Y. Masumoto, H. Sasaki, T. Kagimoto, N. Komori, A. Ishida, Y. Sasai, T. Miyama, T. Motoi, H. Mitsudera, K. Takahashi, H. Sakuma, T. Yamagata, A Fifty-Year Eddy-Resolving Simulation of the World Ocean -Preliminary Outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator)-, Journal of the Earth Simulator, 1, 35-56, 2004.
- [27] D. V. Vranic, D. Saupe, 3D Model Retrieval, Doctoral Dissertation, University of Leipzig, 1-227, 2004.
- [28] R. Ohbuchi, K. Osada, T. Furuya, T. Banno, Salient Local Visual Features for Shape-Based 3D Model Retrieval. In Shape Modeling and Applications, 93-102, 2008.

[29] P. Lindstrom, G. Turk, Image-Driven Simplification, ACM Transactions on Graphics (ToG), 19(3), 204-241, 2000.

[30] D. F. Huber, M. Hebert, Fully Automatic Registration of Multiple 3D Data Sets, Image and Vision Computing, 21(7), 637-650, 2003.

[31] L. Xu, S. P. Xie, Q. Liu, C. Liu, P. Li, X. Lin, Evolution of the North Pacific Subtropical Mode Water in Anticyclonic Eddies, Journal of Geophysical Research: Oceans, 122(12), 10118-10130, 2017.

矢野 緑里



2013 年お茶の水女子大学理学部情報科学科卒業。2015 年お茶の水女子大学人間文化創成科学研究科理学専攻博士前期課程修了。現在、お茶の水女子大学人間文化創成科学研究科理学専攻博士後期課程に在学中。

伊藤 貴之



1992 年早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了，日本アイ・ビー・エム (株) 東京基礎研究所研究員。1997 年博士 (工学)。2005 年お茶の水女子大学理学部情報科学科助教授。2011 年同大学教授。2017 年まで同大学シミュレーション科学教育研究センター長兼任。2014 年より 2016 年まで芸術科学会会長。情報可視化，マルチメディア，インタラクション，コンピュータグラフィックスなどの研究に従事。

田中 裕介



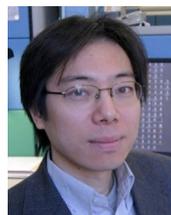
2009 年京都大学大学院理学研究科修士課程修了。修士 (理学)。同年ダイキン工業 (株) 入社。2011 年 (株) 気象工学研究所入社。2013 年より独立行政法人海洋研究開発機構特任技術職員。主に数値モデルを使った海洋シミュレーションの研究開発に従事。日本海洋学会。

松岡 大祐



2008 年愛媛大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。2009 年より国立研究開発法人海洋研究開発機構技術研究員。2015 年より 2016 年まで東京工業大学大学院情報理工学研究科客員准教授，2017 年より国立研究開発法人科学技術振興機構さきがけ研究者を兼任。アメリカ地球物理学連合，日本地球惑星科学連合，日本気象学会，日本海洋学会，可視化情報学会，日本シミュレーション学会，日本計算工学会，各会員。

荒木 文明



1995 年大阪大学理学部物理学科卒業，2000 年大阪大学大学院理学研究科物理学専攻博士後期課程修了，博士 (理学)。1998 年大阪産業大学非常勤講師，2000 年京都女子大学非常勤講師，2001 年核融合科学研究所 COE 研究員，2002 年海洋科学技術センター研究員，2008 年海洋研究開発機構主任研究員・グループリーダー。大規模地球流体データ可視化の研究に従事。日本シミュレーション学会理事，可視化情報学会 JOV Associate Editor, IEEE Computer Society, 日本物理学会，芸術科学会，他会員。