

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月19日現在

機関番号：82109

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21740346

研究課題名（和文）データ同化による黒潮大蛇行の長期変動の実態解明

研究課題名（英文）Study on long-term variation of the Kuroshio large meander using an ocean data assimilation system

研究代表者

碓氷 典久（USUI NORIHISA）

気象庁気象研究所・海洋研究部・研究官

研究者番号：50370333

研究成果の概要（和文）：海洋データ同化システムを用いた感度実験、および海洋再解析データの解析から、黒潮大蛇行の長期変動のメカニズムを明らかにした。感度実験から、大蛇行は、低流量ほど長期間持続し、大蛇行の安定性が黒潮流量に強く依存することが分かった。また、流量に加えて、黒潮続流および台湾沖の渦活動の状態の3つの要素を考慮することにより、過去の大蛇行の履歴が概ね説明されることが分かった。

研究成果の概要（英文）：Sensitivity analyses and an ocean reanalysis experiment are conducted using an ocean data assimilation system to clarify the long-term variability of the Kuroshio large meander. The sensitivity analyses reveal that the lower Kuroshio transport leads to the longer duration of the large meander, indicating that the duration of the Kuroshio large meander strongly depends on the Kuroshio transport. It is also shown that the log history of the Kuroshio large meander is explained by considering the Kuroshio transport, Kuroshio extension state, and mesoscale eddy activity east of Taiwan.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	0	1,700,000
2010年度	900,000	0	900,000
2011年度	800,000	0	800,000
総計	3,400,000	0	3,400,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：黒潮大蛇行、データ同化、大蛇行インデックス、長期変動、流量、伊豆海嶺、黒潮続流、台湾沖

1. 研究開始当初の背景

北太平洋亜熱帯循環の西岸境界流である黒潮は、日本南岸において、沿岸に沿う直進路（非大蛇行流路）と、東海沖で大きく南方へ迂回する大蛇行流路の2種類の流路をとり、ともに1年から数年程度の持続性を持つことが知られている。このような流路の多重性は、世界の他の西岸境界流には見られない黒潮独自の特徴であり、そのメカニズム解明は、日本の海洋学にとって長年の課題となっている。

この黒潮流路の多重性の問題は、大きく分けて、2つの未解明な問題を含んでいる。1

つは、直進路と大蛇行流路の2つの流路間の遷移機構であり、もう一方は、流路の長期変動のメカニズムである。このうち、前者については、近年の高解像度モデルや衛星観測データを用いた研究から、特に大蛇行の形成機構に関して、黒潮再循環域を西方伝播してきた中規模渦と黒潮との相互作用の結果生じた傾圧不安定が重要な役割を担っていることが明らかとなってきた。

一方、長期的には、黒潮流路は、1970年代後半から1980年代にかけて大蛇行が頻発したが、その前後の10年程度は直進期間を示すなど、20年程度の周期性があることが、観

測から明らかとなっている。黒潮大蛇行を定在ロスビー波ととらえた場合、日本南岸での卓越流路が黒潮流量との間にある関係を持つことが期待され、過去の多くの研究により、流量と黒潮流路との対応が調べられてきた。しかし、明確な対応を見出すには至ってなく、流路の長期変動メカニズムについては依然として不明のままである。

上述の流路遷移は、数か月の時間スケールで生じる変動であり、現在の高解像度海洋モデルで高い精度で再現することが可能である。実際、流路遷移機構の多くの知見は、モデル研究から得られている。一方、黒潮流路の長期的な振る舞いに関しては、最新の海洋モデルを持ってしても再現が困難であるのが現状である。また、観測データに関して、黒潮流路変動の把握に有効である海面高度計データが得られるのが、1993年以降に限定されるため、長期変動を議論することが不可能である。これらの要因により、黒潮流路の長期変動に関して、目立った進展が見られない状況が続いていた。

2. 研究の目的

黒潮大蛇行の発生・維持過程と黒潮流量との関係に着目して、海洋データ同化システムを用いた感度実験及び海洋再解析データの解析から、黒潮大蛇行の長期変動の実態を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 現実的な風応力場の変動範囲内で、風が強い、弱い、及び平均的な状態のデータセットを作成し、各状態の下で海洋モデルを駆動し、亜熱帯循環系の強度（黒潮流量）が強い、弱い、及び平均的な状態を作成する。これらの各基本場に対して、2004年の黒潮大蛇行発生時の海面高度偏差を同化する。その後の蛇行の振る舞いの比較から、大蛇行と黒潮流量との関係を明らかにする。

(2) 過去の研究から、黒潮再循環域、及び台湾東方域における中規模渦が黒潮の流路変動に影響を及ぼすことが明らかになっている。また、黒潮統流の状態が日本南岸の黒潮流路に影響を及ぼしている可能性も考えられる。これらの周囲の海洋の状態の変動の実態を海洋再解析データから明らかにし、黒潮流路変動との関連について調べる。

(3) 上記の結果を総合して、黒潮大蛇行の長期変動の実態を説明する新たなシナリオを構築する。

4. 研究成果

(1) データ同化手法の高度化 (Usui et al. 2011b)

同化再解析実験に先立って、黒潮等による海洋フロント構造をより良く再現するため

の新たなデータ同化スキームを開発した。

ほとんどのデータ同化手法は、モデル予報値および観測値を確率変数と見なして、それぞれの誤差がガウス分布に従うという仮定の基に定式化されている。多くの海域では、この仮定は良い近似で成り立つと考えられているが、異なる水塊が近接する海洋フロント域では、明らかにガウス分布から逸脱した誤差特性を示す。この誤差の仮定に起因して、黒潮統流や混合水域におけるデータ同化結果は、過度に冷たい親潮水が解析され、垂表層水温の頻度分布を見ると黒潮・親潮水に対応したピークが過度に平滑化されてしまう

(図 1a) など、幾つかの欠点があることが分かった。これらの欠点を改善するために、非ガウスの誤差特性を考慮した2種類の拘束条件を開発した。1つは、過度に冷たい水温を防止するもので、もう1つは、垂表層水温の2つ山の頻度分布を再現するためのものである。これらを用いた結果、垂表層水温の出現頻度分布は大きく改善された(図 1b-c)。また、同化手法に水温・塩分の結合鉛直 EOF モードを用いた多変数解析手法を用いることにより、垂表層水温のみならず、全層の水温・塩分特性に大きなインパクトが得られた。

このスキームを用いて、海洋再解析データを作成した。

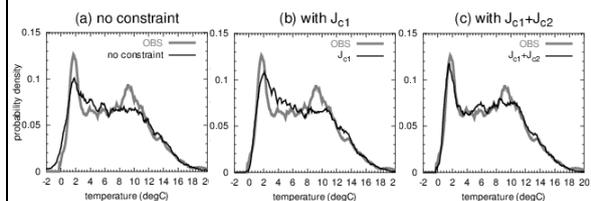


図 1 : 黒潮・親潮混合水域の 100m 水温の頻度分布。灰色が観測、黒色が同化結果を示す。(a) 新しいスキームを入れない場合、(b) 低水温を防止する拘束条件のみを適用した場合、(c) (b) の拘束条件とともに 2 つ山の頻度分布を模した拘束条件を適用した場合。

(2) 大蛇行の解消機構と伊豆海嶺の地形効果 (Usui et al. 2011a)

いったん形成された大蛇行流路が安定して存在できるか否か、すなわち大蛇行の安定性も長期変動を理解する上で重要な要素であると考えられる。そのためには、大蛇行がどのように解消されるかの理解が重要であるとの認識に立ち、2004-05 年の黒潮大蛇行の消滅機構を (1) で作成した、海洋再解析値および再解析値を初期値とした予報実験結果を用いて調べた。

再解析データから、大蛇行期間に伊豆海嶺上において 2 度のマイナーな流路遷移が生じていたことが分かった。これらは、黒潮上流域から伝播してきた小規模な擾乱により引

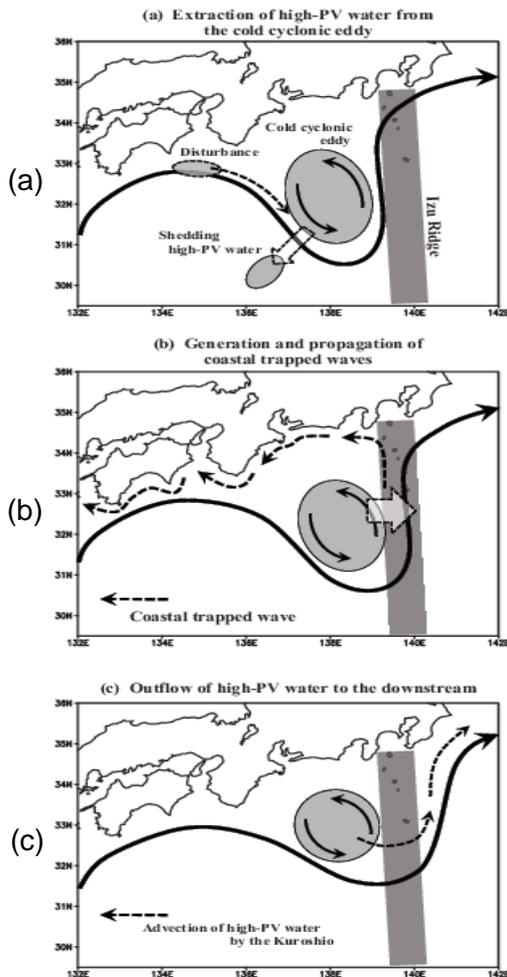


図2：大蛇行を消滅させる3つのメカニズム

き起こされていた。また、2005年1月末に生じた最初の流路遷移をきっかけとして大蛇行の弱化が始まり、大蛇行の弱化と同期するようにして、日本南岸の潮位が低下していることも分かった。

この流路遷移、大蛇行の弱化、および日本南岸の潮位低下は、予報計算においても良好に再現され、その結果から、大蛇行の弱化メカニズムとして以下の3つを提案した。

- ① 黒潮上を上流域から伝播してくる小規模擾乱が不安定により発達する際に、黒潮流軸を横切る海水交換が生じ、その結果、大蛇行の内側域の冷水渦に伴う高渦位水が放出され、蛇行が弱化する(図2a)。
- ② 蛇行路が東進し、内側域の冷水渦が海嶺上に乗り上げると、その結果として、地形に補足された沿岸波動が励起され、低水位のシグナルが地形に沿って、日本南岸に伝播する。この時の、大蛇行内側域の冷水渦の有効位置エネルギーの変化

を見積もると、エネルギーが低下し、逆に日本南岸で増大しており、このプロセスも大蛇行の弱化に寄与していることが分かった(図2b)。

- ③ 大蛇行流路がさらに東進し、蛇行が伊豆海嶺を跨ぐようになると、八丈島の南にある、伊豆海嶺上の比較的水深の深い部分を通じて、冷水渦に伴う高渦位水が下流へ流去し、大蛇行は急速に弱化する(図2c)。

上記のメカニズムの内、②と③は、伊豆海嶺の効果によるものである。したがって、蛇行路が伊豆海嶺に接近するにつれて、大蛇行は不安定となり、解消しやすくなると言える。このことは、大蛇行の東西位置が大蛇行の安定性に深く関与していることを示唆している。実際、1975年に生じ、5年程度持続した大蛇行は、伊豆海嶺から十分西に離れた、紀伊半島の南で形成・維持されていた。

(3) 黒潮流量と大蛇行の関係

研究の方法(2)で示した感度実験を実施し、その結果から黒潮流量と大蛇行の関係を明らかにした。

NCEP/NCAR 大気再解析データによる気候値風応力場(TAU10)、および、この風応力を2割増/減した場(TAU12, TAU08)を用いて、モデルを25年積分し、基本場を作成した。11年目以降の各年の場に対して、2004年の海面高度偏差を同化し、その後、19か月同化なしでモデルを積分し(15メンバーのアンサンブル実験)、流量によって蛇行の振る舞いがどのように異なるかを比較した(図3)。

その結果、高流量時(TAU12)には、蛇行路は、形成後も東進を続け、やがて伊豆海嶺に達してしまい、大蛇行は安定して維持されない。一方、低流量時(TAU08)には、大蛇行は、長期間安定して維持された。

次に、NCEP/NCAR 再解析データの風応力場を元に、1.5層線形渦度モデルから、1958年以降の黒潮域(132°-136°E, 28°-32°N)におけるスベルドラップ流量を求めた(図4：黒実線)。1993年以降について、渦解像海洋データ同化システムの結果から見積もった黒潮流量(ここでは、 $27\sigma_0$ 面よりも上層の体積を流量の指標とした)と比較すると、線形モデルの結果は、概ね、同化結果を追従していることが分かる。

大蛇行期間内のスベルドラップ流量の変化に着目すると、多くの事例において、大蛇行期間の後半に流量が増加していることが分かった。このことは、(2)の大蛇行の消滅機構を踏まえると、流量の増加による移流効果の増大により、大蛇行が下流方向、すな

わち、伊豆海嶺に接近し、その結果、大蛇行が解消に至ったと推察される。また、大蛇行期間内の平均スベルドラップ流量と大蛇行期間の間には、非常に高い負の相関（相関係数： -0.92 ）が見られ、このことは、アンサンブル実験の結果とも整合的である。

これらのことから、大蛇行の安定性（持続期間）は、黒潮流量に強く依存することが分かった。しかし、過去の大蛇行事例は、必ずしも低流量時に発生しているわけではなく、大蛇行の発生条件には、黒潮流量以外の要素も考慮する必要がある。

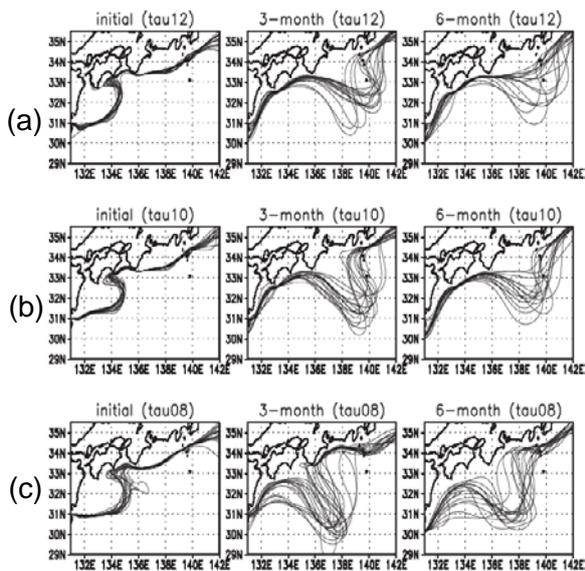


図3：アンサンブル実験における黒潮流軸の時間発展。黒潮が(a)高流量 (TAU12)、(b)平均的 (TAU10)、(c)低流量 (TAU08) の状態を比較する。図は、左から初期値、3か月後、6か月後の状態を示す。

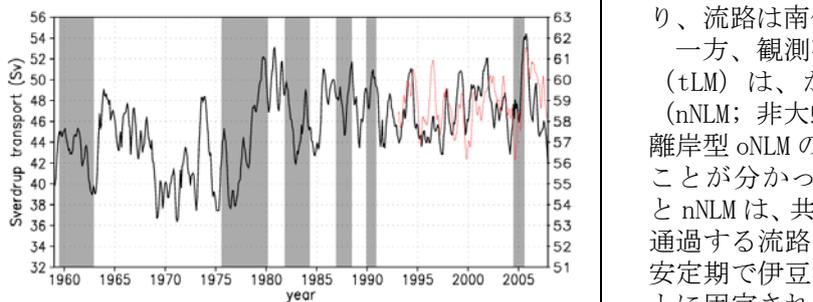


図4：線形モデルから見積もられた黒潮域（ $132^{\circ}\text{--}136^{\circ}\text{E}$, $28^{\circ}\text{--}32^{\circ}\text{N}$ ）におけるスベルドラップ流量。赤線で、渦解像海洋同化システムから見積もられた黒潮域の上層の体積（ $130\text{--}140^{\circ}\text{E}$, $26\text{--}34^{\circ}\text{N}$ における $27\sigma_{\theta}$ 面より上の体積）を示す（右軸；単位 10^{13}m^3 ）。

(4) 黒潮大蛇行インデックスによる大蛇行履歴の解釈

本課題では、(3) で検討した黒潮流量に加えて、黒潮統流の状態および台湾沖の渦活動の3つの要素から、大蛇行の発生のしやすさの指標となる「大蛇行インデックス」を定義し、過去の大蛇行の履歴の説明を試みた。

① 黒潮流量 (図5a)

大蛇行が形成されるためには、通常、九州沖に小蛇行が形成され、それが発達しながら東進し、数か月後に大蛇行流路となる。2004年の大蛇行発生時には、風応力起源の顕著な低海面高度偏差が西方伝播して、小蛇行の形成およびその後の大蛇行の形成に深く関わっていたことが指摘されている (Usui et al. 2008)。

このような、小蛇行の形成に関わる西方伝播するシグナルを強調するために、線形モデルから見積もられたスベルドラップ流量にハイパスフィルター（6年移動平均成分を除去）を施して、おもに経年スケールの成分からなる短周期変動を抽出した（図5a）。その結果、2004年の事例以外にも、大蛇行発生前に流量が低下している事例が複数確認された。

② 黒潮統流の状態 (図5b)

黒潮統流の流路は、安定と不安定の2つの形態を取り、それらは、10年スケールで交互に出現することが知られている (Qiu and Chen 2005)。この統流流路と伊豆海嶺上の黒潮流路の位置に良い対応があることが近年の研究で報告されている (Sugimoto and Hanawa 2012)。統流安定期には、伊豆海嶺上の流路は、三宅島の南 (伊豆海嶺において黒潮が通過できる2つのゲートのうち、北側ゲート) に安定して存在し、統流不安定期には、海嶺上の黒潮も不安定となり、流路は南偏傾向となる。

一方、観測事実として、黒潮大蛇行流路 (tLM) は、かならず、非大蛇行接岸流路 (nNLM; 非大蛇行流路には、接岸型 nNLM と離岸型 oNLM の2種類ある) から形成されることが分かっている (Kawabe 1995)。tLM と nNLM は、共に伊豆海嶺上で北側ゲートを通過する流路であることから、黒潮統流が安定期で伊豆海嶺上の黒潮流路が北側ゲートに固定されることが、大蛇行の発生条件の1つと考えることができる。実際、2004年の大蛇行の発生に先立って、2002年ころから、黒潮統流は非常に安定した状態が持続し、伊豆海嶺上の流路も北側ゲートに固定された状態が維持されていた。

海洋長期再解析データから、過去の大蛇行期間に黒潮統流の状態を推定すると (図5b)、過去の多くの大蛇行期間に黒潮統流は安定期であ

ったことが推察された。

③ 台湾沖の海面高度 (図 5c)

九州沖小蛇行の形成には、黒潮再循環域を西方伝播してくる中規模渦に加えて、台湾沖を主な起源とする黒潮上流域からの擾乱の寄与も重要であることが指摘されている (例えば、Ichikawa 2001, Usui et al. 2008, Miyazawa et al. 2008)。そこで、海洋長期再解析データをもとに、台湾沖 (122°-128°E, 20°-25°N) における海面高度偏差を見ると、過去の多くの大蛇行事例が正のフェーズで生じていたことが分かった。また、1960年代後半から、1970年代前半にかけて、負偏差が持続しており、このことがこの期間に大蛇行が生じなかった原因である可能性が示唆された。

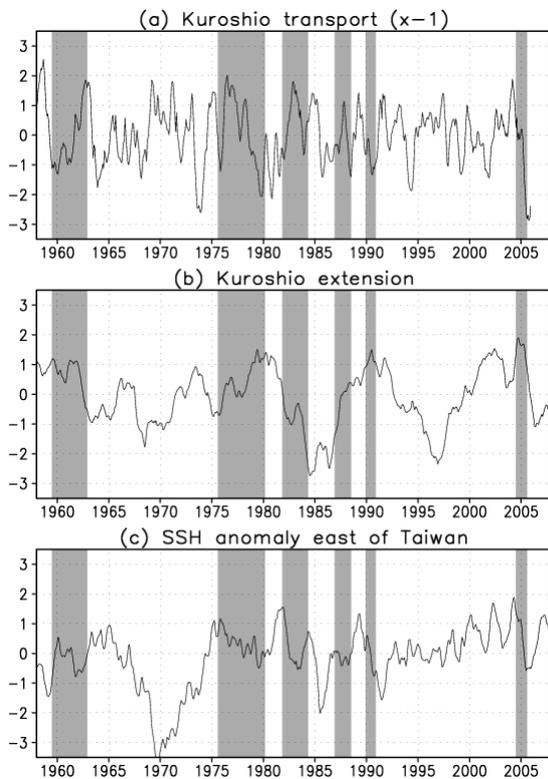


図 5 : 過去の大蛇行事例 (陰影期間) と (a) 黒潮流量 (符号を反転)、(b) 黒潮続流、および (c) 台湾沖海面高度偏差 (122-128, 20-25N) との関係。黒潮流量は、線形モデルによるスベドラップ流量から長周期成分 (6 年移動平均) を除去。黒潮続流の状態は、再循環域 (140-155E, 31-26N) の平均海面高度偏差とした (正偏差が黒潮続流安定期に対応する)。いずれの量も規格化してある。

以上の 3 つの要素を基に、それらの和を規格化した「大蛇行インデックス」を提案した

(図 6)。その結果、過去の多くの大蛇行期間に値は正となり、10 年程度、非大蛇行期間が続いた 1970 年前後と 1990 年代に負のフェーズを示し、このインデックスで過去の大蛇行事例が概ね説明されることが分かった。

上記の成果は、長年未解決の問題であった、日本南岸黒潮流路の長期変動に対する回答を与えたものと考えられる。これまで、第 1 節で述べた様に、モデル、観測ともに黒潮流路の長期変動を扱うのが困難な状況であったが、両者の欠点を補う、海洋データ同化手法を用いることで、初めて現実の黒潮の長期変動を扱うことが可能となった。

大蛇行インデックスで考慮した、黒潮続流と台湾沖は、日本南岸から見て、黒潮の下流と上流に位置する海域である。これらは、北太平洋において、特に大きな海洋変動を示す 2 大海域であり、そこでの変動が黒潮を通じて、日本南岸の流路変動に影響を及ぼしていると考えられる。また、黒潮続流の変動は、黒潮流量とともに偏西風の変動と密接に関連していることが多くの研究で指摘されている (e. g., Yasuda and Kitamura 2003, Qiu and Chen 2005)。一方、台湾沖での変動は、中緯度の大気場のみならず、ENSO に代表される熱帯域の変動とも関連している可能性がある。したがって、今後、大蛇行インデックスの各要素の変動要因を調べることで、北太平洋の気候変動と日本南岸黒潮流路変動との関係の理解がより一層深まるものと考えられる。

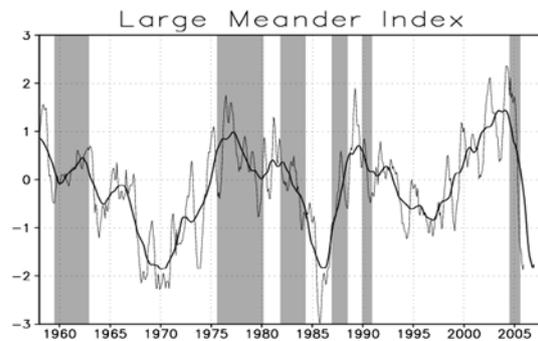


図 6 : 大蛇行インデックス。図 5 の 3 つの値の和を規格化した値として定義。陰影は大蛇行期間を表す。細線は、月別値、太線は、その 25 か月移動平均を表す。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Usui, N., H. Tsujino, H. Nakano, Y. Fujii and M. Kamachi (2011a): Decay mechanism of the 2004/05 Kuroshio large meander, *J. Geophys. Res.*, 査読有り, 116, C10010, doi:

- 10.1029/2011JC007009.
- ② Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii and M. Kamachi (2011b): Improving strategies with constraints regarding non-Gaussian statistics in a three-dimensional variational assimilation method. *J. Oceanogr.*, 査読有り, 67, 253-262, doi: 10.1007/s10872-011-0024-5.
- ③ Hurlburt, H. E., N. Usui (18 番目), 他 17 人 (2009): High-Resolution Global and Basin-Scale Ocean Analyses and Forecasts. *Oceanography*, 査読有り, 22, 110-127.
http://www.tos.org/oceanography/issue_s/issue_archive/issue_pdfs/22_3/22-3_hurlburt.pdf
- ④ Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii and M. Kamachi (2009): Improving strategies with constraints regarding non-Gaussian statistics in MOVE/MRI.COM, 5th WMO Data Assimilation Symposium Extended Abstract, 査読無し, 1-8.
http://www.cawcr.gov.au/staff/pxs/wmo_da5/ExtendedAbstracts/Usui_etal.pdf

[学会発表] (計 14 件)

- ① 碓氷典久, 辻野博之, 中野英之, 黒潮大蛇行の長期変動の実態, 2012 年度日本海洋学会春季大会, 2012 年 3 月 30 日, 筑波大学
- ② Usui, N., H. Tsujino and H. Nakano, Long-term Variability of the Kuroshio Large Meander, 2012 Ocean Sciences Meeting, 2012 年 2 月 21 日, 米国, ソルトレイクシティ
- ③ 碓氷典久, 辻野博之, 中野英之, 日本南岸黒潮流路の長期変動: 黒潮流量と大蛇行の関係, 2011 年度日本海洋学会秋季大会, 2011 年 9 月 27 日, 九州大学筑紫キャンパス
- ④ Usui, N., H. Tsujino and H. Nakano, Long-term Variations of the Kuroshio Path South of Japan, IUGG2011, 2011 年 6 月 29 日, オーストラリア, メルボルン
- ⑤ 碓氷典久, 辻野博之, 中野英之, 藤井陽介, 蒲地政文, 黒潮大蛇行の消滅機構, 2011 年度日本海洋学会春季大会, 2011 年 3 月 25 日, 東京大学柏キャンパス (震災により要旨による発表)
- ⑥ Usui, N., H. Tsujino, H. Nakano, Y. Fujii and M. Kamachi, Decay mechanism of the 2004/05 Kuroshio large meander revealed by MOVE/MRI.COM, 2010 AGU Fall Meeting, 2010 年 12 月 17 日, 米国, サンフランシスコ
- ⑦ Usui, N., Decay mechanism of the 2004/05

- Kuroshio large meander revealed by MOVE/MRI.COM, Workshop on Ocean Modeling in the Regional Marine Systems, 2010 年 7 月 15 日, 東京大学柏キャンパス
- ⑧ 碓氷典久, 石崎士郎, 藤井陽介, 蒲地政文, 非ガウス統計を考慮した拘束条件による MOVE/MRI.COM の改良, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 28 日, 幕張メッセ
- ⑨ 碓氷典久, 非ガウス統計を考慮した変分法同化システムの改良, 気象研究所・統計数理研究所共同ワークショップ, 2010 年 4 月 15 日, 統計数理研究所 (立川)
- ⑩ Usui, N., H. Tsujino, H. Nakano, Y. Fujii and M. Kamachi, Decay mechanism of the 2004/05 Kuroshio large meander, 2010 Ocean Sciences Meeting, 2010 年 2 月 23 日, 米国, ポートランド
- ⑪ Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii and M. Kamachi, Improving strategies with constraints regarding non-Gaussian statistics in MOVE/MRI.COM, 5th WMO Data Assimilation Symposium, 2009 年 10 月 7 日, オーストラリア, メルボルン
- ⑫ 碓氷典久, 石崎士郎, 藤井陽介, 蒲地政文, 非ガウス統計を考慮した拘束条件を用いた 3 次元変分法の改良, 2009 年度日本海洋学会秋季大会, 2009 年 9 月 28 日, 京都大学
- ⑬ 碓氷典久, 石崎士郎, 藤井陽介, 蒲地政文, 非ガウス統計を考慮した変分法同化システムの改良, 2009 年データ同化夏の学校, 2009 年 8 月 25 日, 青森県下北文化会館
- ⑭ 碓氷典久, 石崎士郎, 藤井陽介, 蒲地政文, 渦解像海洋データ同化システムの表現する混乱水域の特徴, 国際沿岸海洋研究センター研究集会「北海道周辺から本州東方海域の諸現象とその時間的変動」, 2009 年 8 月 20 日, 東京大学海洋研究所 国際沿岸海洋研究センター (岩手県大槌町)

[図書] (計 1 件)

- ① 碓氷典久 (分担執筆), 京都大学学術出版会, データ同化. 観測・実験とモデルを融合するイノベーション, 2009, 284

6. 研究組織

(1) 研究代表者

碓氷 典久 (USUI NORIHISA)

気象庁気象研究所・海洋研究部・研究官

研究者番号: 50370333