

中緯度北太平洋海洋循環の経年変動
の潜在的予測可能性について
と
OFES (OGCM for the Earth Simulator) の
短い紹介

野中正見
海洋研究開発機構
アプリケーションラボ



JAMSTEC

<http://www.jamstec.go.jp/>

OFESを用いた高解像度海洋 シミュレーションデータについて

海洋研究開発機構 アプリケーションラボ
佐々木 英治

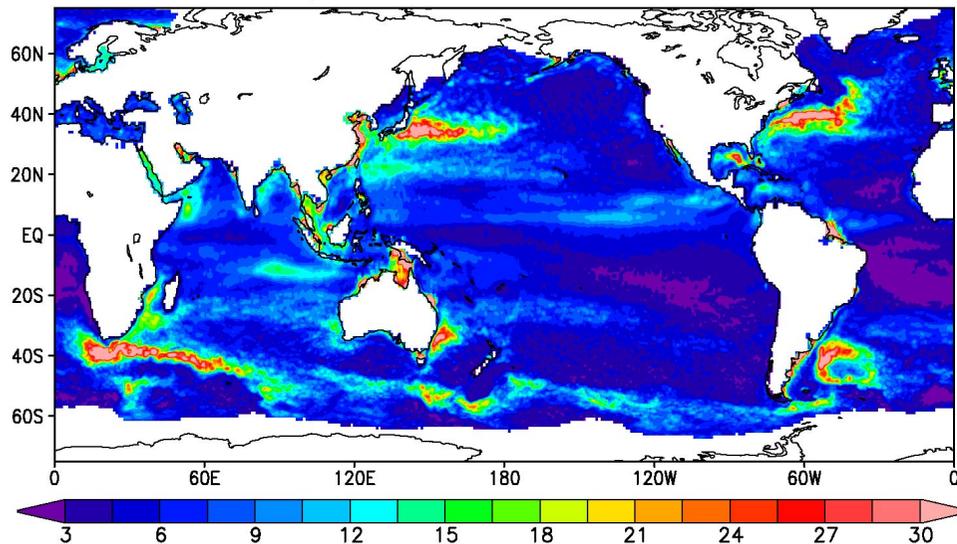
中規模渦を解像する高解像度で全球規模の海洋循環場を再現し、観測データを補完する高解像度のデータを提供して海洋および気候研究に貢献することを目的とする

黒潮など強い海流付近で活発な 100km～300kmスケールの中規模渦

渦の活動度

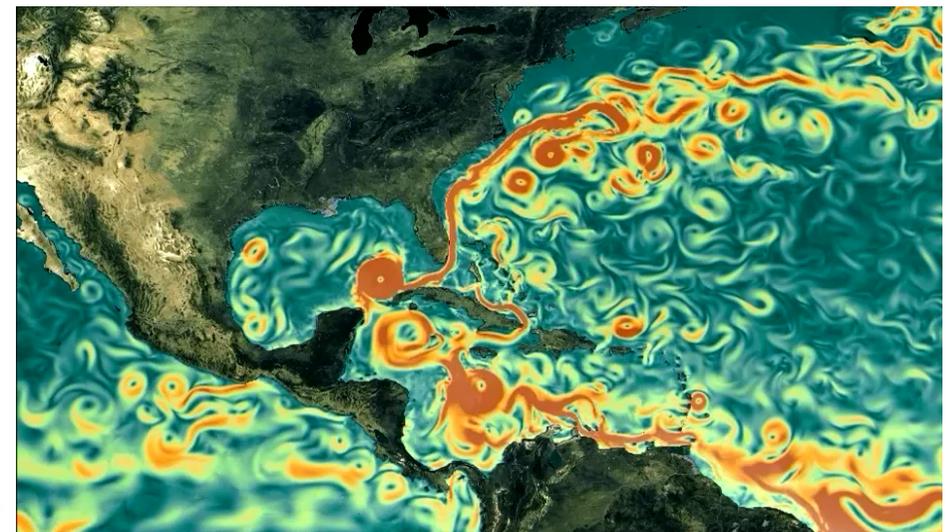
(解像度約100kmの衛星観測の海面高度変動)

TOPEX/POSEIDON-ERS for 1996-2000



海洋の熱の輸送

(解像度10kmシミュレーション結果)



**中規模渦は海流と共に熱・物質を輸送している
⇒ 全球規模の熱輸送・水産資源に大きな役割を担っている**

全球規模の高解像度海洋シミュレーション

100kmスケールの中規模渦を解像する全球規模規模の渦解像海洋シミュレーションを長期間実施することは、地球シミュレータ(2002年運用開始)によって初めて可能となった。

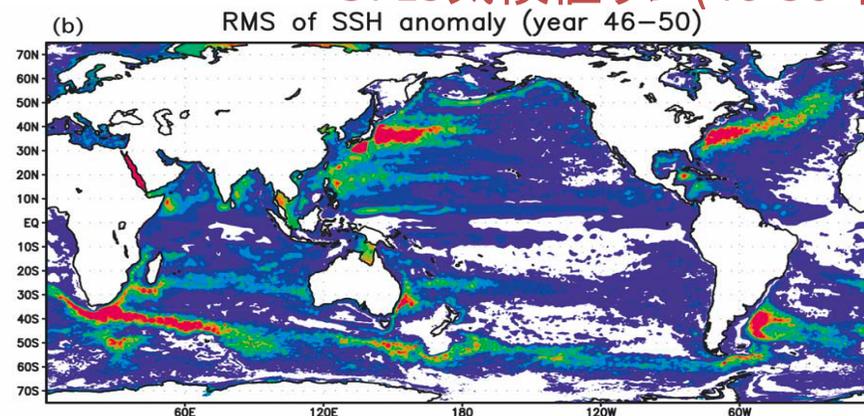
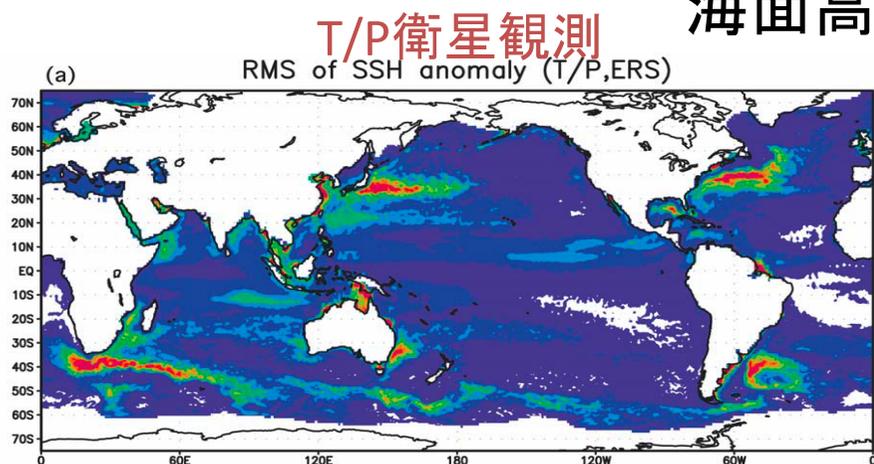
海洋モデル: OFES(OGCM for the ES, Masumoto et al., 2004)

領域: 75S~75N

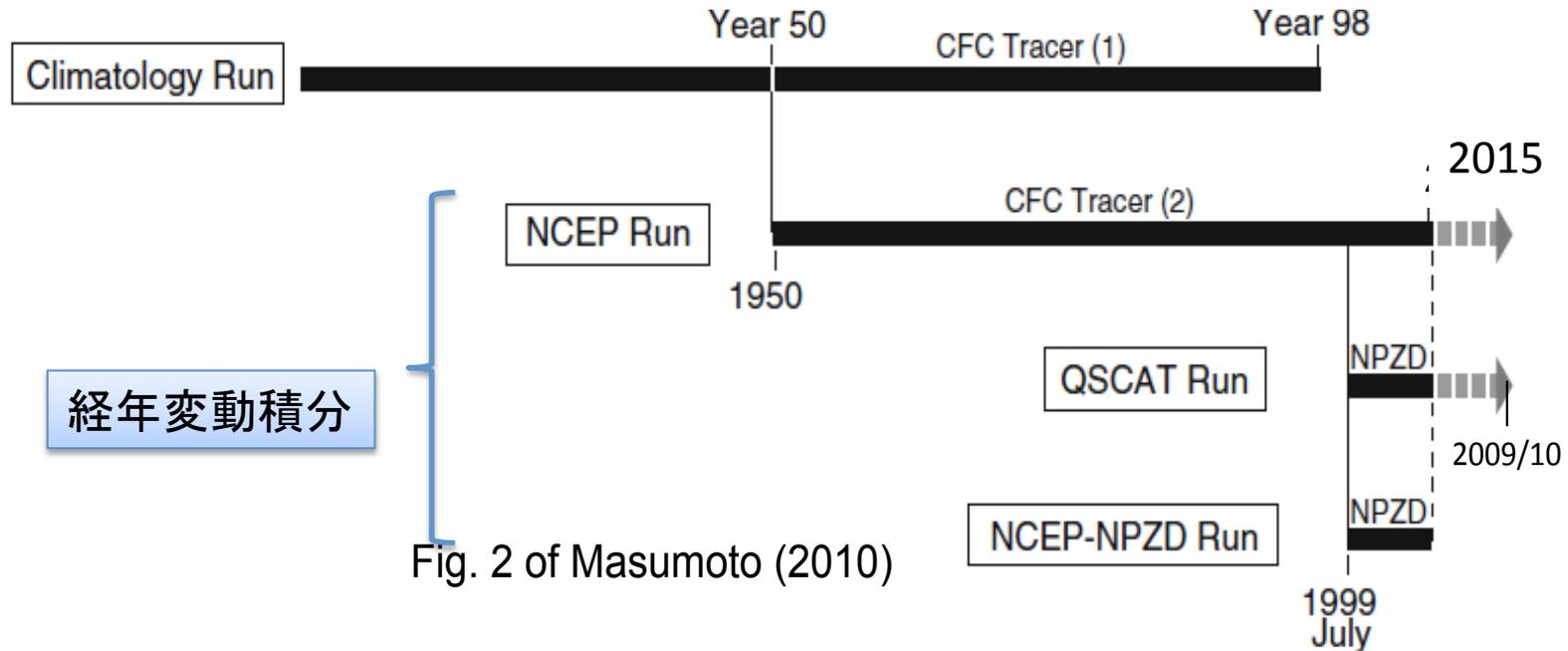
解像度: 水平0.1度(約10km)、鉛直54層

大気データ: NCEP再解析(過去再現実験の場合: 1950年から現在)

海面高度偏差のRMS



準全球渦解像海洋シミュレーション

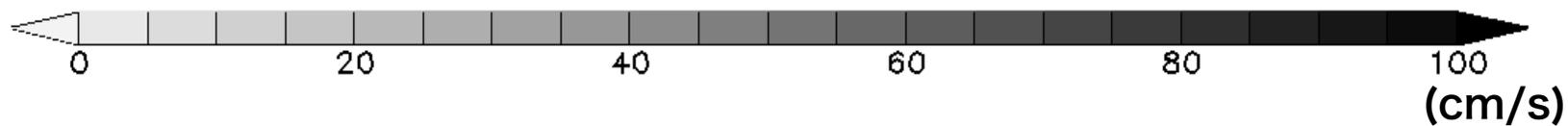
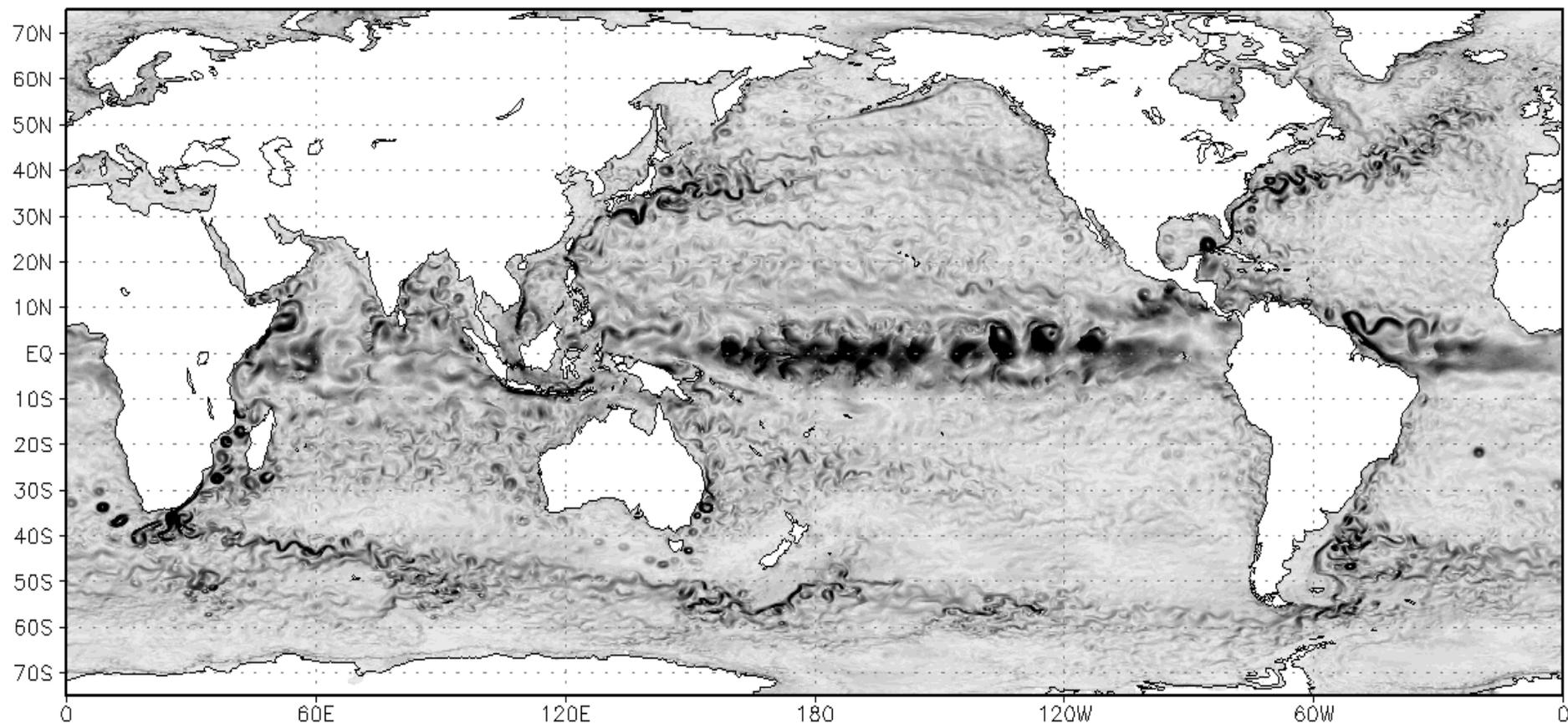


海洋モデルの概要

- 海洋大循環モデル : **OFES**(OGCM for the Earth Simulator, Masumoto et al.,2004)
GFDLのMOM3をベースにES向けに並列化、最適化
- モデル領域 : 南緯75度～北緯75度の準全球海洋
- 解像度 : 水平0.1度、鉛直54層(5m～330mの層厚)
- 水平粘性、拡散 : 倍調和関数
- 鉛直混合 : KPPスキーム (Large et al., 1994)
- 海面熱フラックス : Rosati and Miyakoda(1988)のバルク式で算出

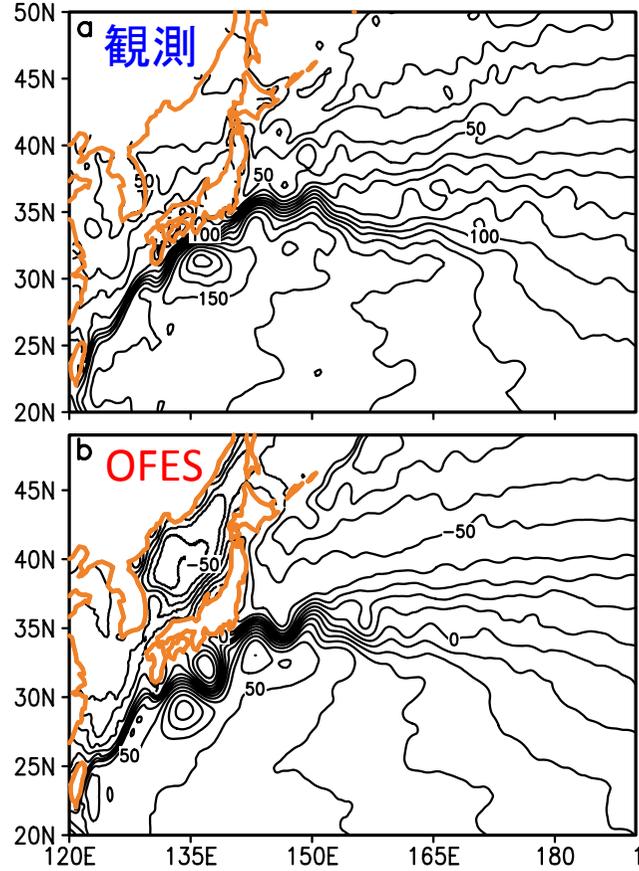
海表面の流速分布

2008/JAN/03

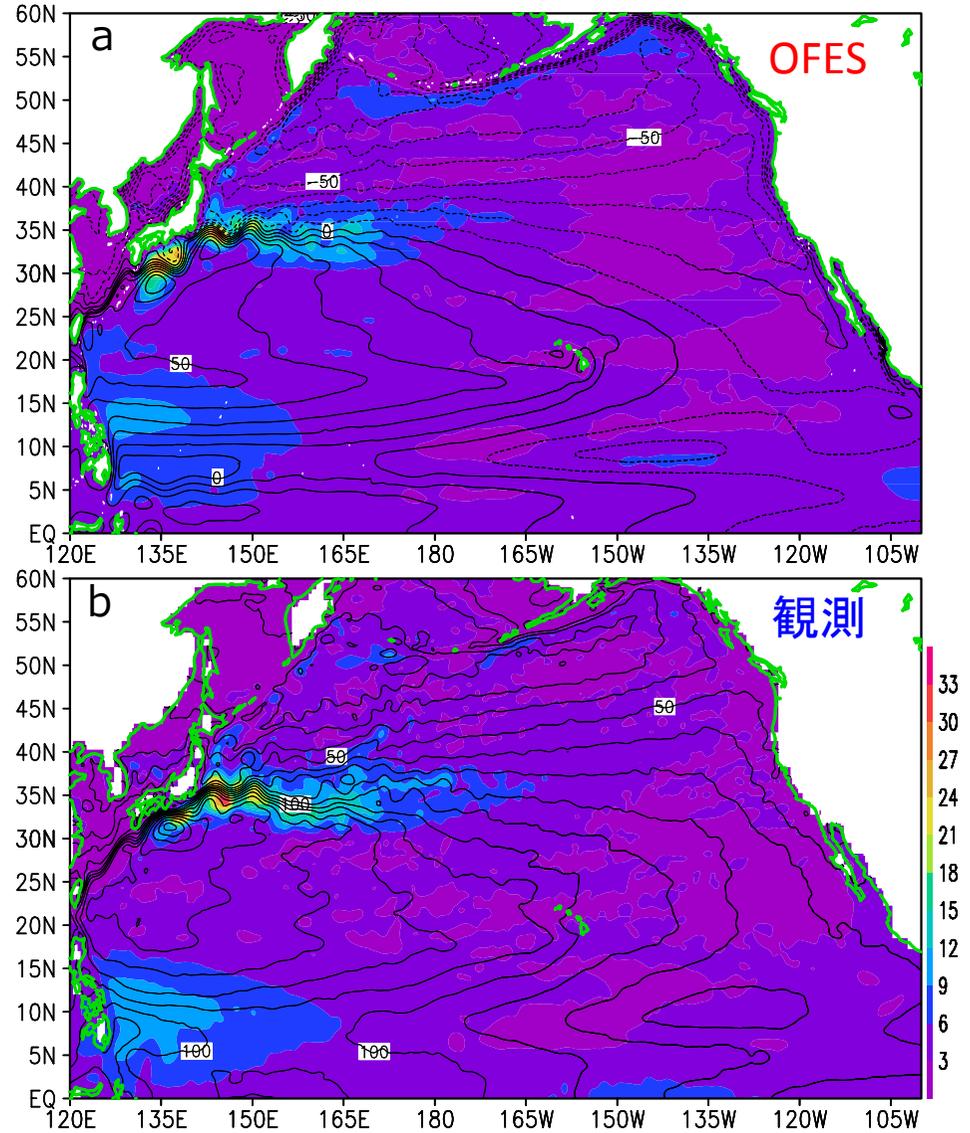


海面高度分布

長期平均海面高度分布



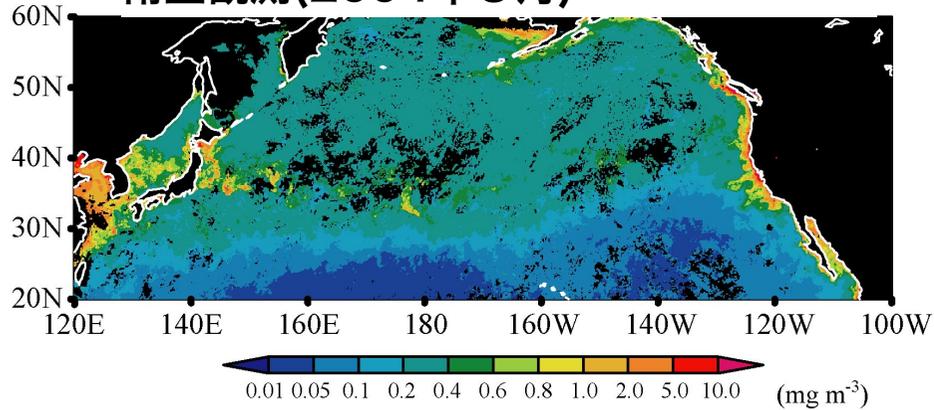
海面高度経年変動標準偏差分布



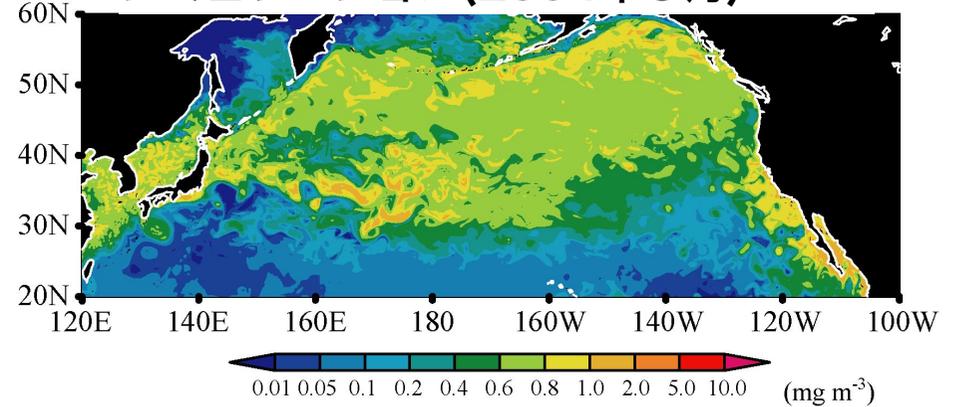
海洋生態系シミュレーション

海面クロロフィル(植物プランクトン)分布 (mg m^{-3})の比較

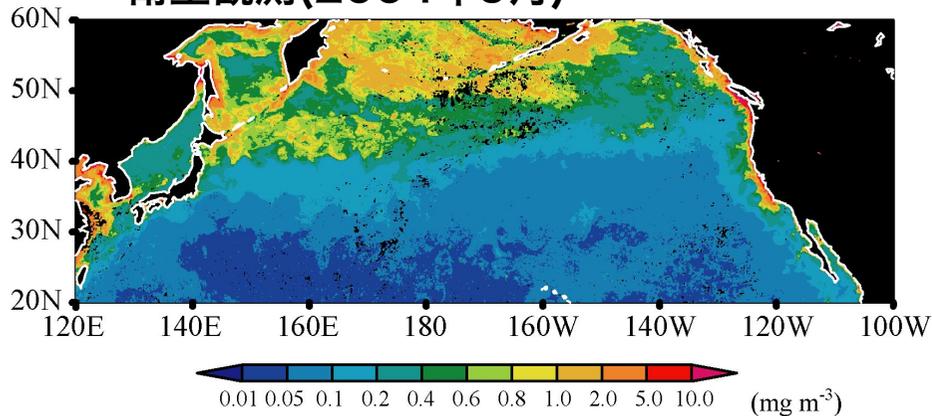
衛星観測(2004年3月)



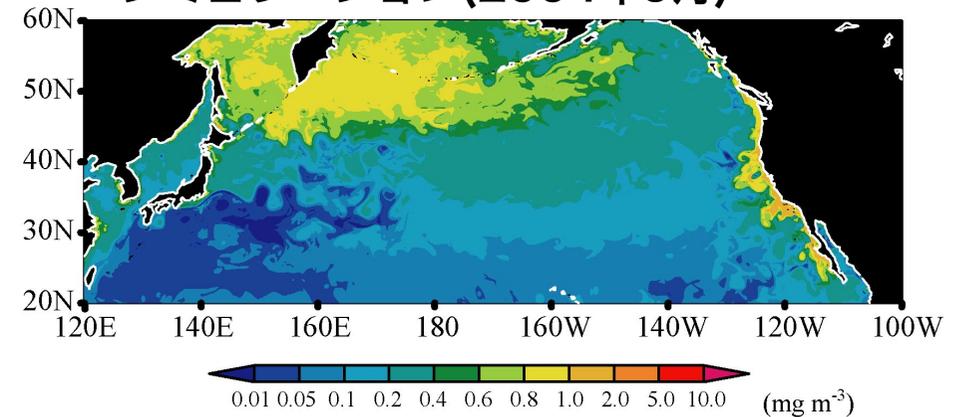
シミュレーション(2004年3月)



衛星観測(2004年9月)



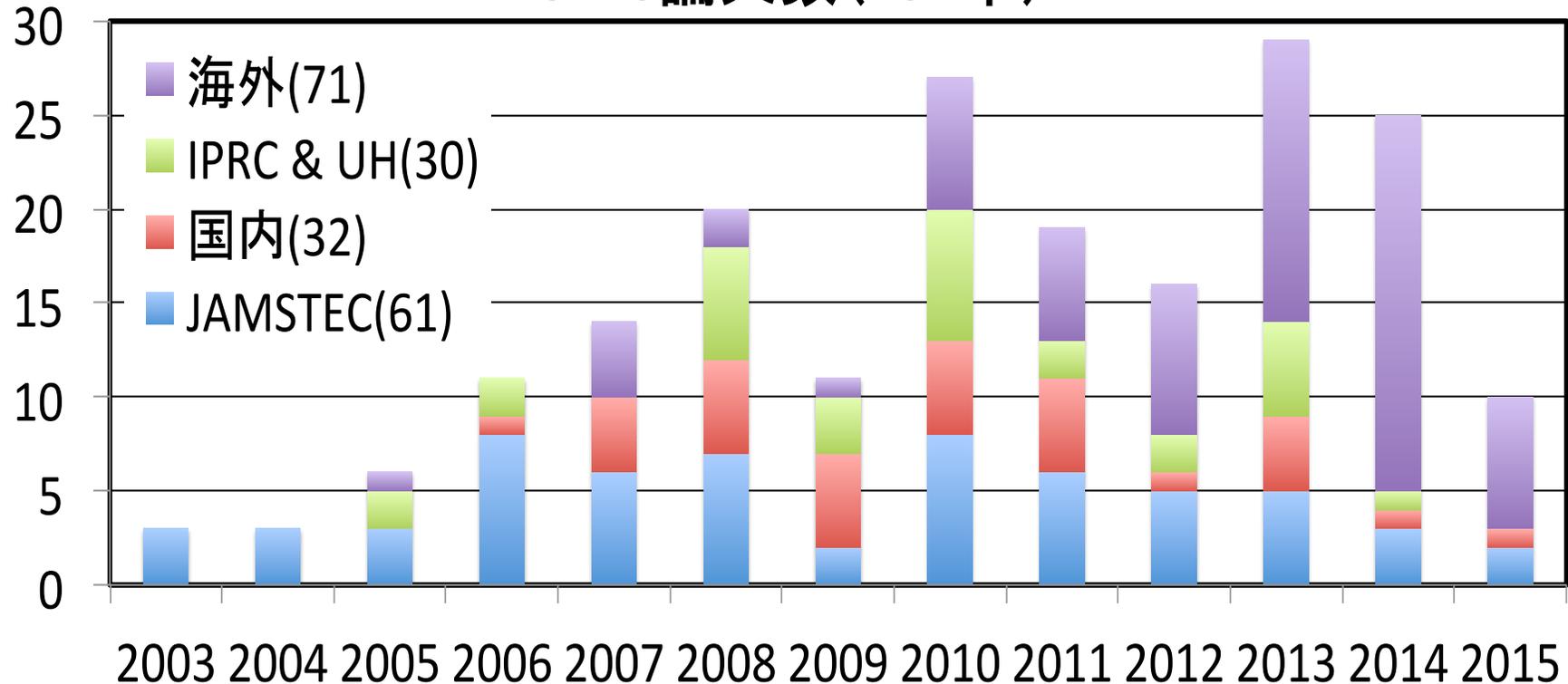
シミュレーション(2004年9月)



春と秋の植物プランクトンのblooming

全球規模の高解像度海洋シミュレーション

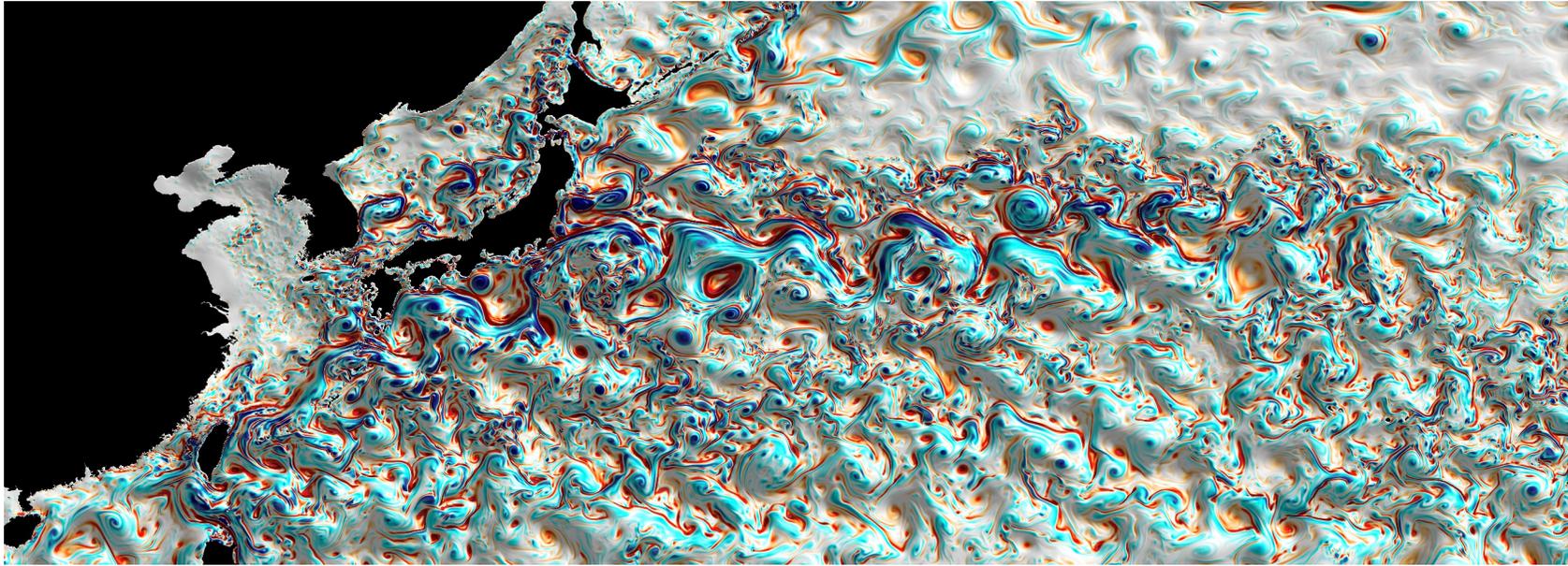
OFES論文数(194本)



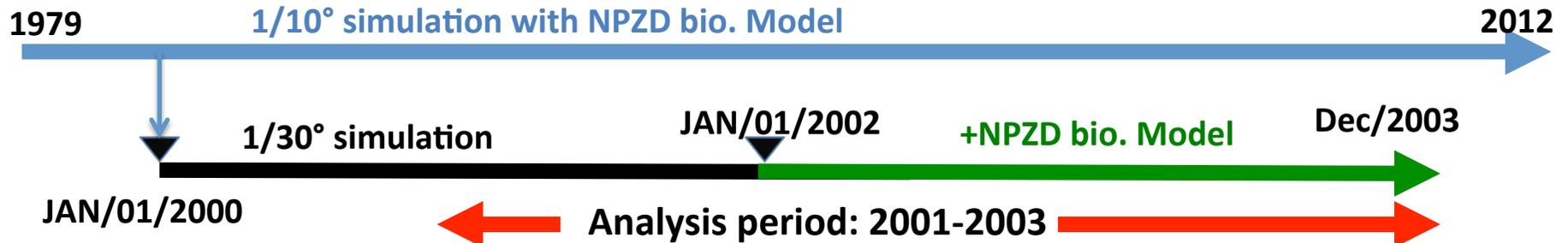
シミュレーションデータの研究コミュニティへの貢献

- ・共同研究
- ・JAMSTECのWEBサイトからのデータ公開
- ・IPRC/APDRCのWEBサイトからのデータ公開

OFES 北太平洋シミュレーション



モデル: OFES (OGCM for the Earth Simulator based on MOM3, Masumoto et al., 2004)
領域: 北太平洋 (20S-68N, 100E-70W)
水平解像度: $1/30^\circ$ ($1/10^\circ$) **鉛直層の層数:** 100 (54)
水平混合スキーム: Bi-harmonic, **鉛直混合スキーム:** Noh and Kim (1999)
大気外力: 6 hourly reanalysis data of JRA-25(Onogi et al., 2007)

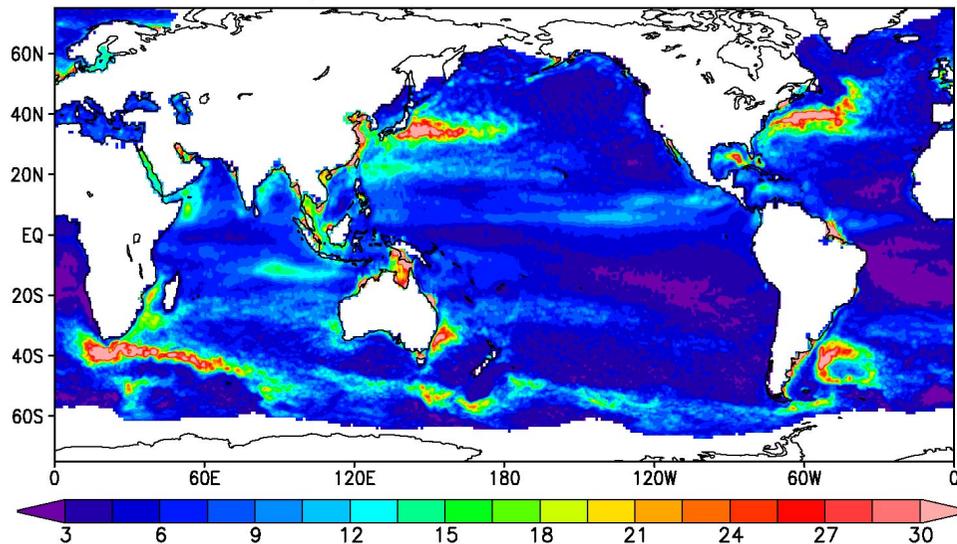


黒潮など強い海流付近で活発な 100km～300kmスケールの中規模渦

渦の活動度

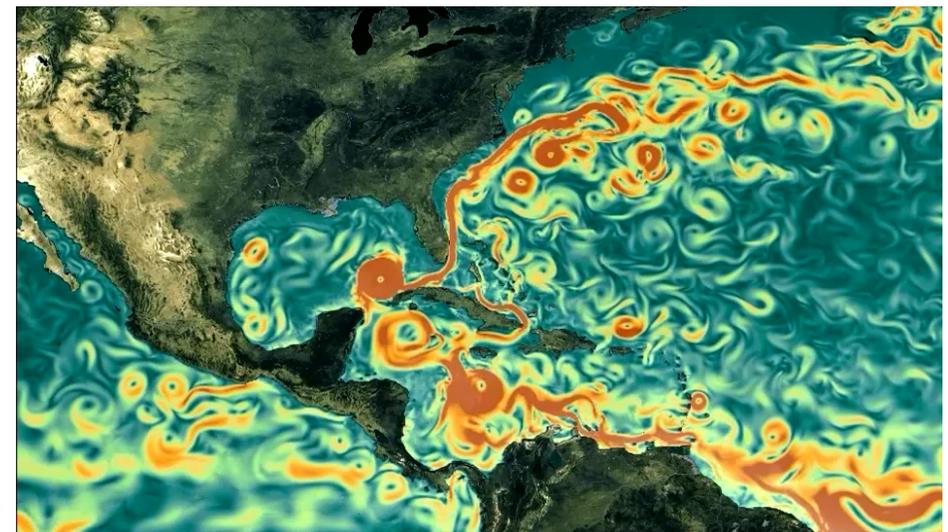
(解像度約100kmの衛星観測の海面高度変動)

TOPEX/POSEIDON-ERS for 1996-2000



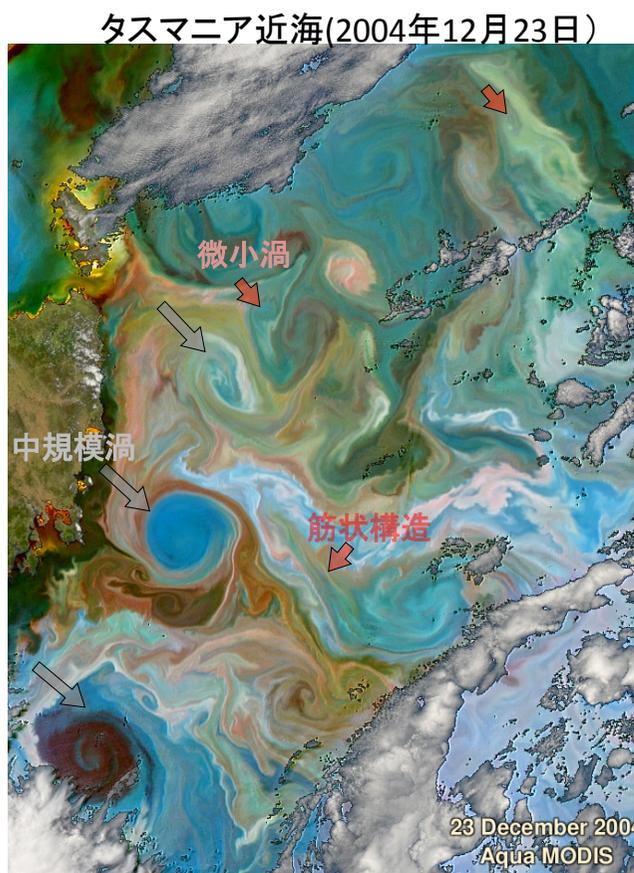
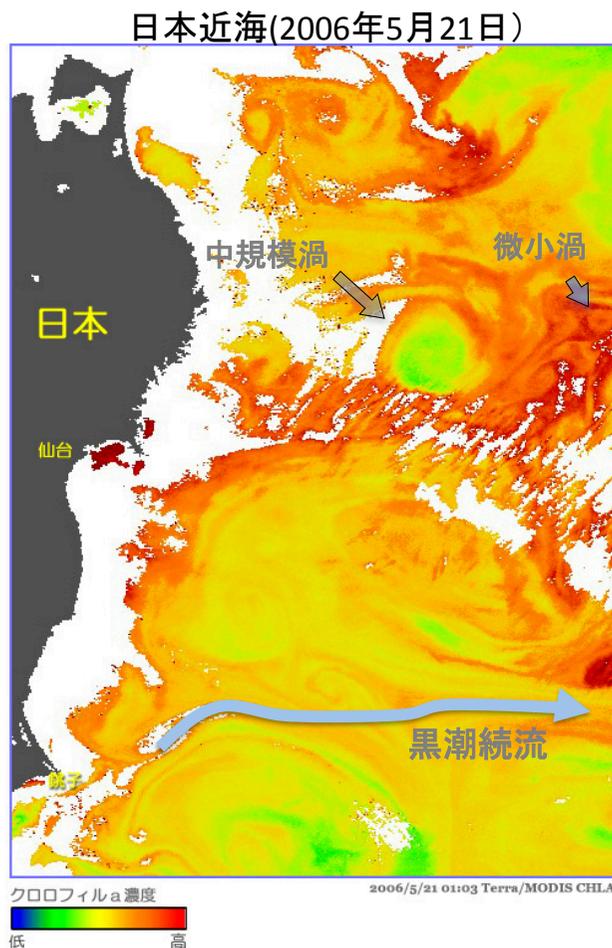
海洋の熱の輸送

(解像度10kmシミュレーション結果)



**中規模渦は海流と共に熱・物質を輸送している
⇒ 全球規模の熱輸送・水産資源に大きな役割を担っている**

1～50kmスケールの小さなサブメソスケール現象 地球観測衛星が観測した海色



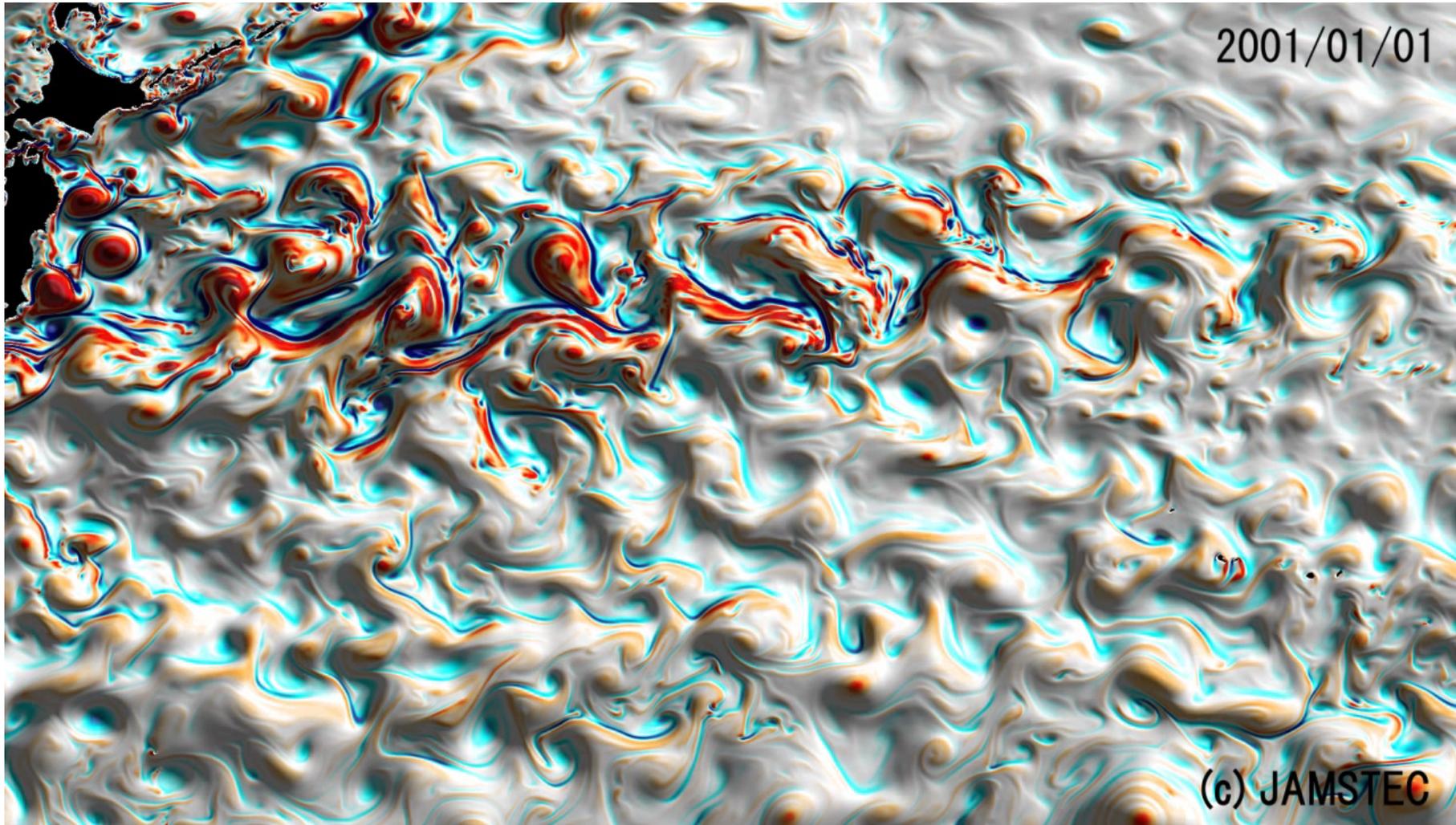
衛星の海色データ

雲による影響で
鮮明な画像は
数少ない

衛星による海色データで微小渦や筋状構造のサブメソスケール現象を観測
船舶・ブイの観測は困難でサブメソスケール現象と中規模渦の関係の理解は不十分

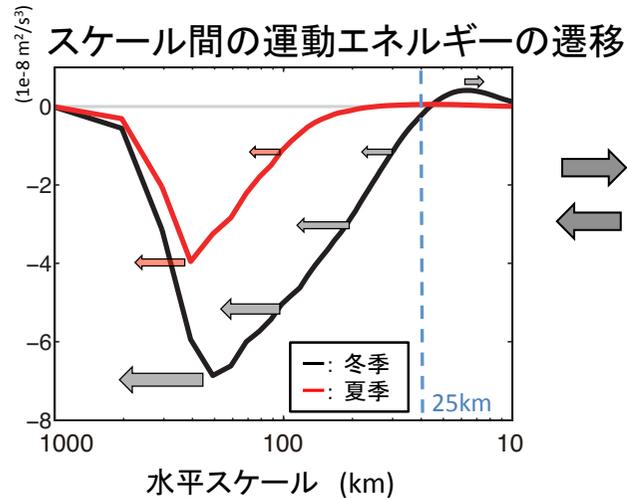
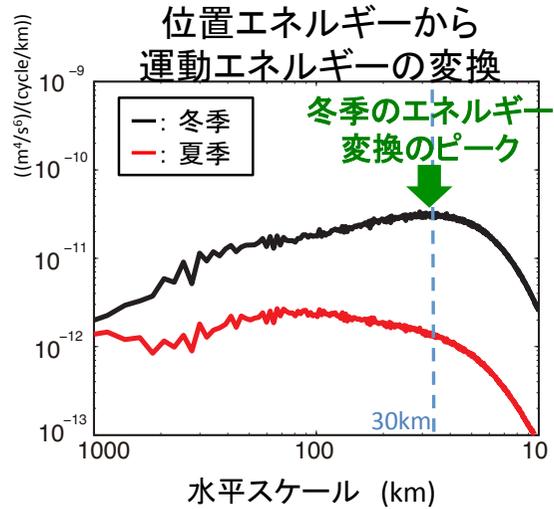
Sasaki et al. (2014, *Nature Communications*)

サブメソスケール現象の季節変動

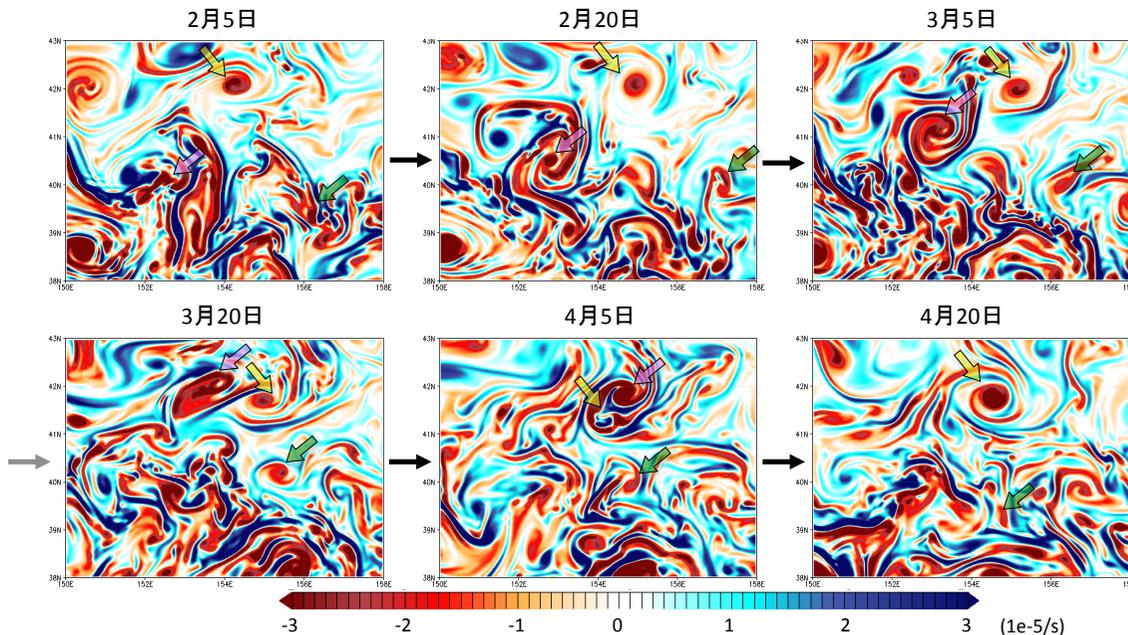


色: 流れの回転成分(赤が時計回り), 凸凹: 海面高度

サブメソスケール現象と中規模渦の相互作用



⇒ 大スケールから小スケール
 ⇐ 小スケールから大スケール



冬季に活発になった サブメソスケール現象
 渦の合体などでスケールが大きくなる

Sasaki *et al.* (2014, *Nature Communications*)

高解像度の北太平洋数値実験の結果から1-50kmのサブメソスケール現象と100-300kmの中規模渦との関係を明かにした

黒潮続流域で冬季に活発なサブメソスケール現象の季節変動を再現

冬季に活発なサブメソスケール現象は、その後数ヶ月におよび規模の大きな中規模渦にゆっくりかつ多大な影響を及ぼすことが明らかになった。

温暖化など気候変動によるサブメソスケール現象の変調が中規模渦に影響を及ぼし、全球規模の熱輸送・物質輸送に影響を及ぼす可能性がある

将来の衛星ミッションで観測される高精度の海面高度データにより、本研究の検証が可能、更にサブメソスケール現象を含む全球規模の海洋循環場の研究が期待される

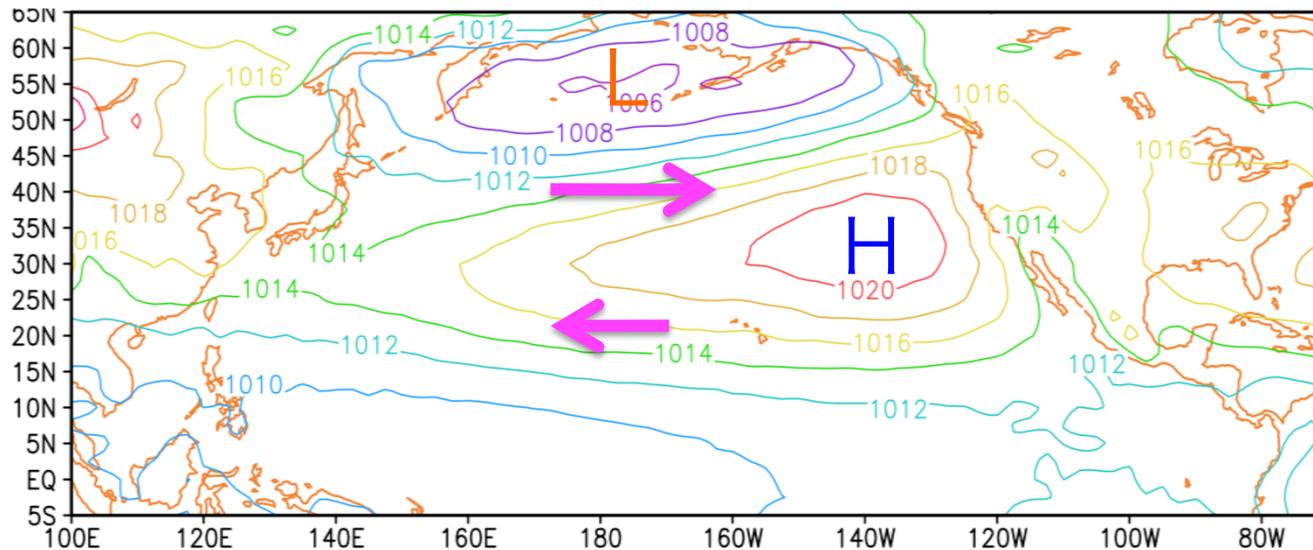
今後のOFESシミュレーション予定

- 準全球0.1度OFESを改良⇒ (準)全球OFES2 ?
- 北太平洋1/30度OFES ⇒ 準全球1/30度OFES

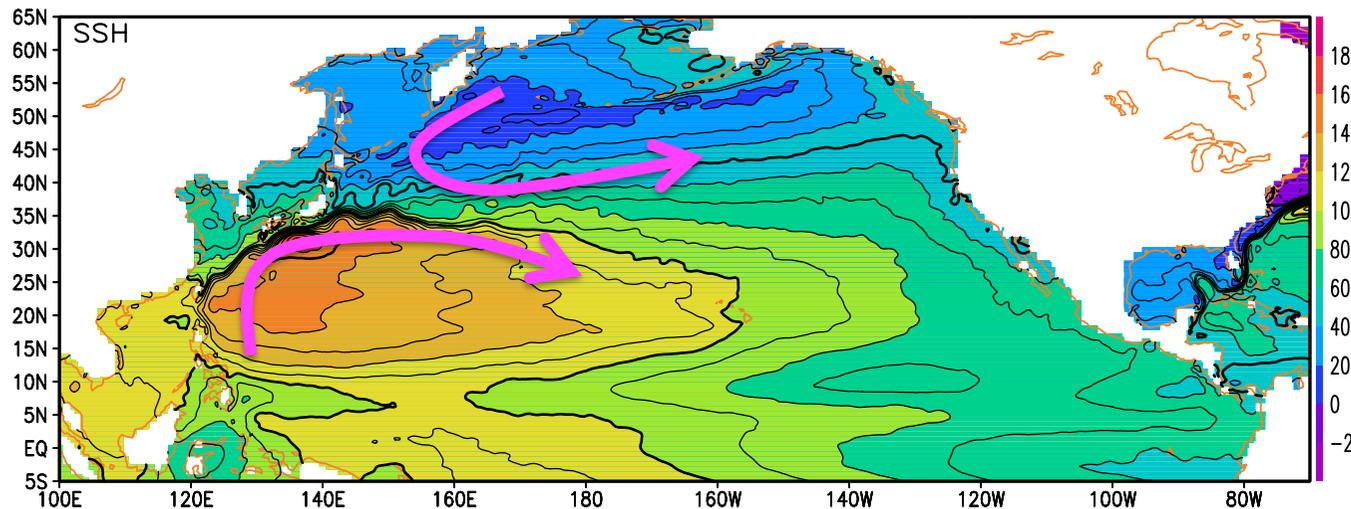
中緯度北太平洋海洋循環の経年変動の 潜在的予測可能性について

経年変動の intrinsic variability について、大気では既に極めて当たり前になっていることですが、海洋では、大気変動という支配的な外力があるために、ほとんど調べられていませんでした。
それを調べるための積分が、計算機的に非常に重たい（海盆規模の渦解像モデルが必要）ということも理由としてあるかも知れません。

北太平洋の海洋と大気の大規模な循環



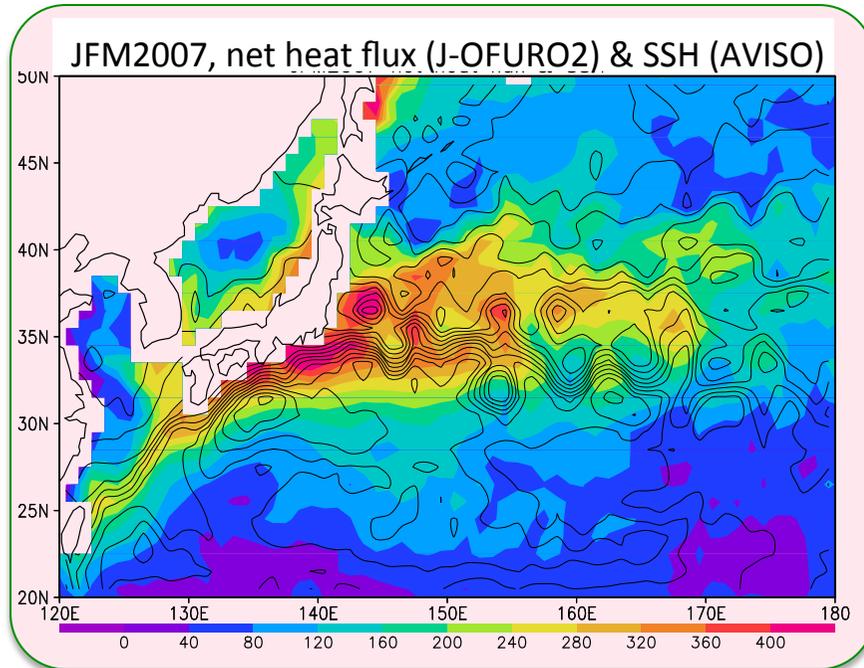
年平均海面気圧
の長期平均場



北太平洋における
平均海面高度

北太平洋年平均の海面気圧：亜熱帯高気圧とアリューシャン低気圧。熱帯域に東からの貿易風、中緯度では西からの偏西風。
海洋では、時計回りの亜熱帯循環と、北側に反時計回りの亜寒帯循環。

はじめに：黒潮続流の重要性



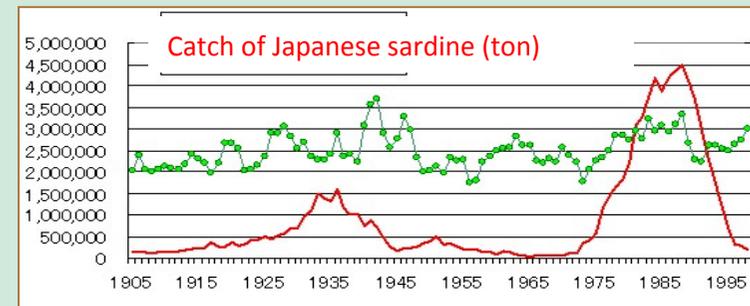
黒潮続流域は多くの熱を大気へ放出し、強い海面水温勾配を伴うことで気候形成、その変動に影響を及ぼす可能性が指摘されている（例えば、Qiu et al. 2007）。

また、生態系へも影響を及ぼす可能性が指摘されている。例えば、Nishikawa and Yasuda (2011) は、黒潮・黒潮続流上流域の流軸上の流速が、マイワシの生残率と相関する流軸上の海面水温や混合層深変動に強く影響することを示している。

黒潮続流の経年変動機構や予測可能性を考えたい。

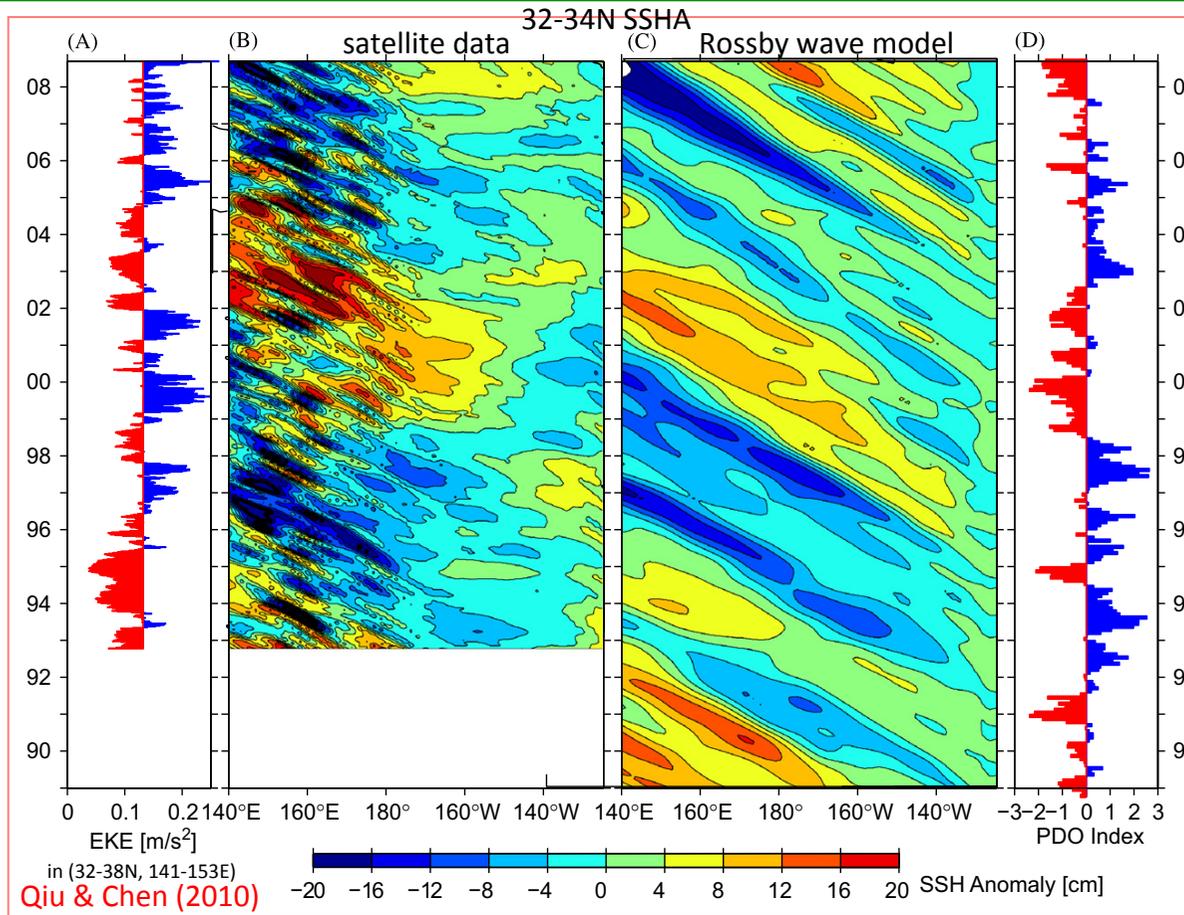


<http://www.nagoyaaqua.jp/aqua/life/japa/index.html>



<http://abchan.job.affrc.go.jp/pr/Maiwashi0302/F1-3.jpg>

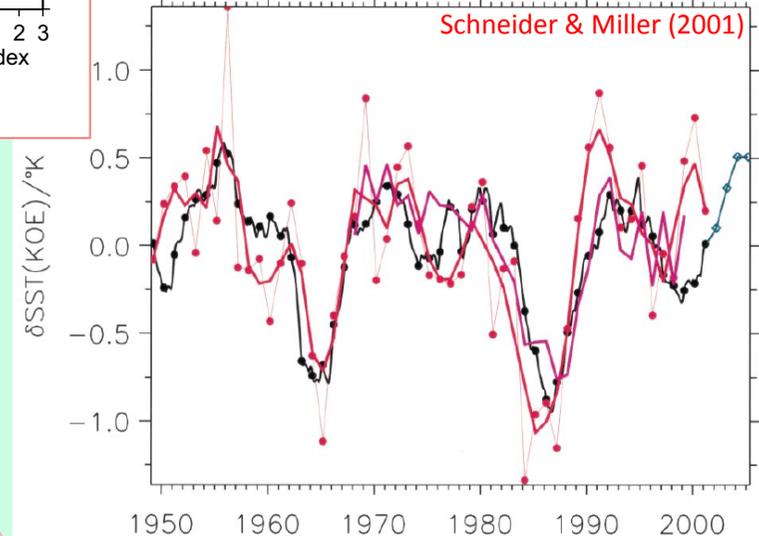
黒潮続流 jet の変動機構



一方で、

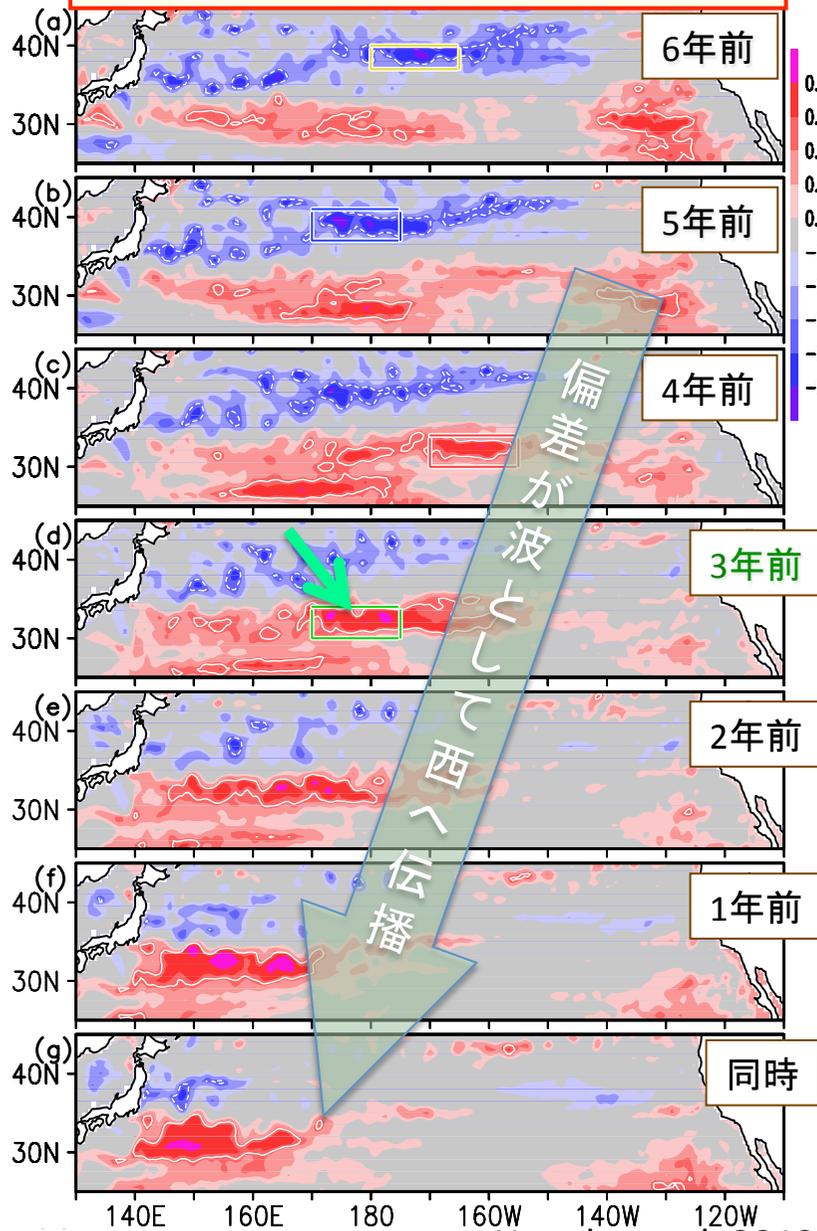
黒潮続流の経年変動には大気変動によって駆動された北太平洋中央部の変動が Rossby 波として西方へ伝播することが重要であることが衛星観測データから示されている。

黒潮続流~亜寒帯前線域の広域での SST, 水温躍層深については、Schneider & Miller (2001) によって線形モデルでの数年の予測可能性が示されている。。



黒潮続流流速の経年変動の予測可能性 (OFES)

黒潮続流流速と海面高度のラグ相関分布

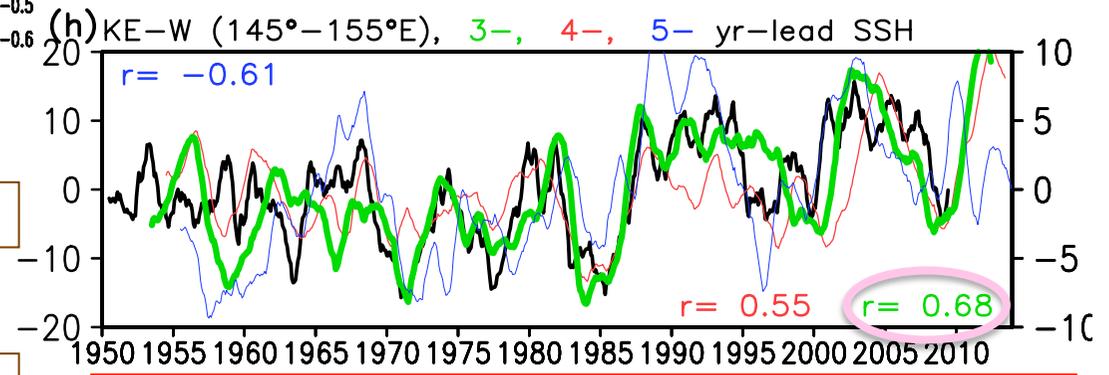


Nonaka et al. 2012

北太平洋中央部でおきた変動が西方への伝播



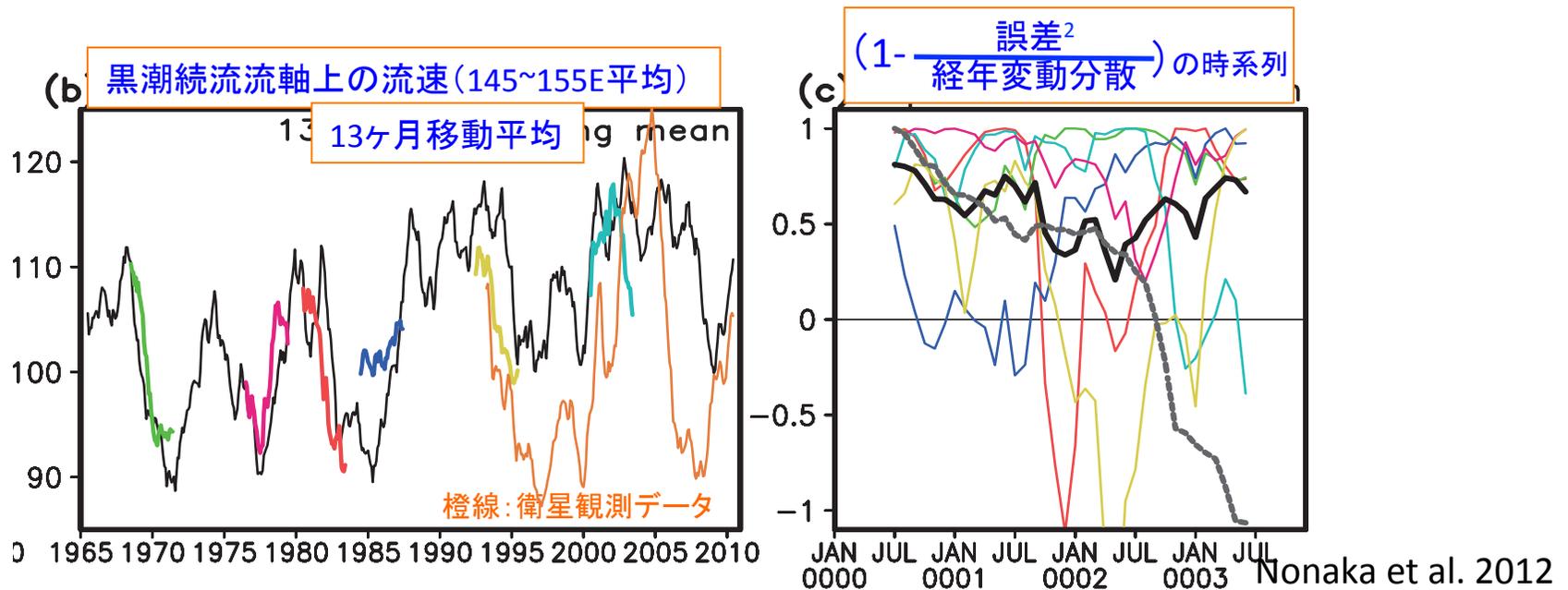
北太平洋中央部での変動から黒潮続流の流速の変動を予測できるか？



145~155E平均の黒潮続流流速 (黒) と 3年前の北太平洋中央部 (30-34N, 170E-175W) 領域平均海面高度の偏差 (緑) の時系列

北太平洋中央部での海面高度偏差と3年後の黒潮続流の流速に高い相関 ($r=0.68$)
衛星観測データも同様の傾向を示すが観測期間がまだ限られる

黒潮続流流速の経年変動:モデル中での過去予測実験



ある年の海の状態から、気候値の風分布を与えて、その後の変動を予測出来るか、海洋モデルで実験。

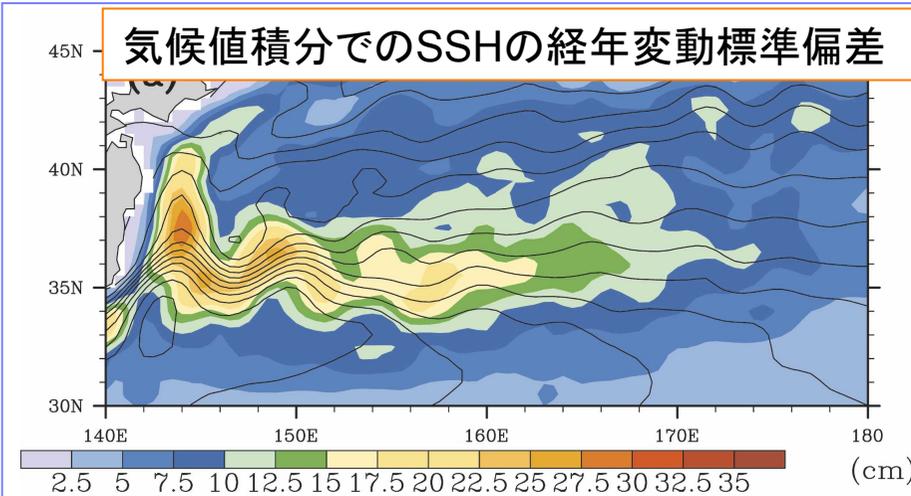
予測実験で説明される経年変動の分散の大きさを示す。
 色線は各実験、太黒線は6実験の誤差の二乗の平均から計算。太灰点線は持続性に基づく予測の結果。

- 予測結果はモデルの経年変動を数年にわたり良く追従する。
- 予測3年目にも予測結果は経年変動の半分以上を説明(右図)。
- 但し、実験数(6つ)が少なく、ばらつきも大きい。
- 北太平洋中央部で励起された変動の西岸への伝播が、黒潮続流の変動の予測につながる。

もう一方で、

黒潮続流 jet の変動機構

黒潮続流 jet は、海洋の内部変動によっても経年変動しうるということが知られている。この成分は外力に依存しないので予測は不可能。



SSHの標準偏差の比 気候値積分／経年変動積分

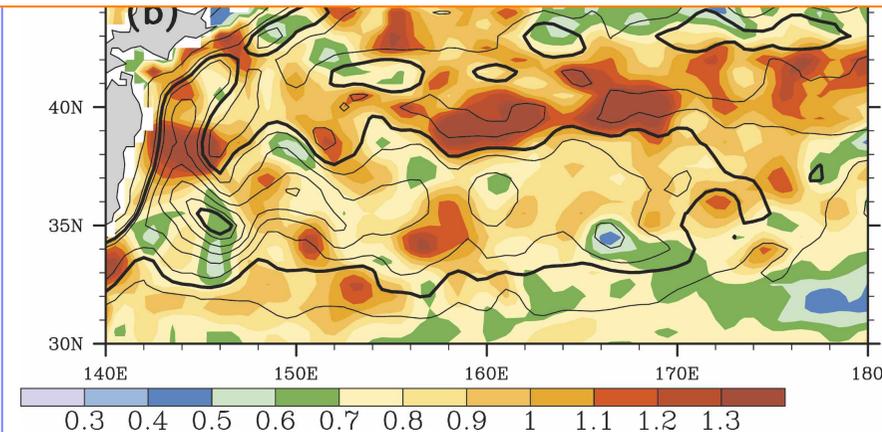


FIG. 10. (a) Climatological-mean SSH (contours at intervals of 10 cm) and standard deviation of annual-mean SSH anomalies (shading in cm) in the OFES climatological run for 48 yr. (b) Ratio (color shaded) of SSH standard deviation (climatological to the hindcast run) for 1962-2003, and standard deviation in the hindcast (contours at intervals of 2.5 cm with the 10-cm contour thickened).

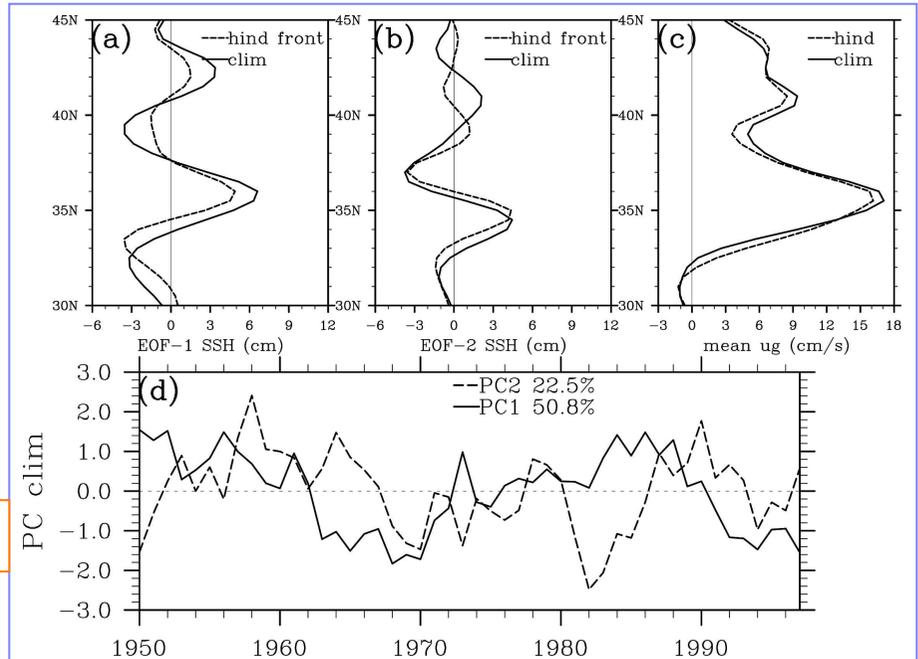


FIG. 11. (a) SSH EOF-1 in the climatological run (solid line), and for frontal-scale variability in the hindcast (dashed). (b) Same as in (a), but for EOF-2. (c) Mean geostrophic zonal velocities averaged over 142°E-180° in the climatological run (solid line) and the hindcast (dashed). (d) First two PCs in the climatological run.

Taguchi et al. (2007)

(経年変動の無い) 長期平均大気場で駆動した渦解像OGCMで黒潮続流 jet は (経年変動する大気場で駆動した場合と同程度の) 顕著な経年変動を持ちうる。

目的

黒潮続流 jet の経年変動には、
海洋内部変動による成分、と
風応力変動に起因する成分、がある
と考えられる。前者は不確実性をもたらす、後者は予測可能性をもたらす。

本研究の目的:

- 現実的な条件下で観測された大気場の経年変動によって駆動した場合に、海洋内部変動に起因する不確実性がどの程度生じるのかを明らかにする。
- 海洋循環の自励的変動に関する過去の研究では、定常的な(経年変動を含まない)外力が用いられており、経年変動する外力が海洋の自励的な変動にどのように影響しうるかは明らかになっていない。

渦解像モデルOFES北太平洋版を用いて、
僅かに条件の異なる3つの経年変動積分を行い、そこでの経年変動を比較する。

モデル: 北太平洋版 OFES (Ocean model for the Earth Simulator)

OFESの詳細は、Masumoto et al. (2004), Sasaki et al. (2008)

MOM3 (GFDL/NOAA)を基に、地球シミュレータに最適化するように、ベクトル化、並列化等に関して多くの書き換え。

Primitive 方程式を球面座標上で解く。

Boussinesq、静水圧近似。

水平混合は bi-harmonic、鉛直混合は KPP scheme.

モデル領域は北太平洋: 20° S- 68° N, $100-290^{\circ}$ E.
全領域で水平解像度 0.1° . 54層(最深部は 6065m).

海面熱 flux は、bulk 式で与える (SSTはモデル結果を用いる) .

淡水 flux に加え、SSS を月毎気候値へ restoring する。

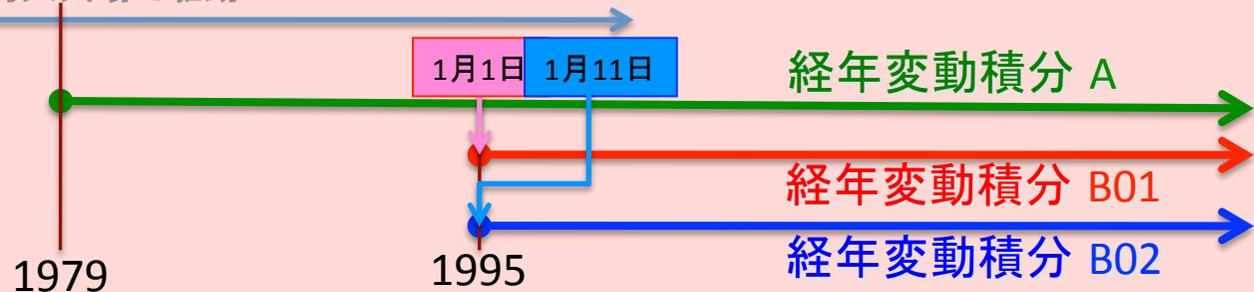
風応力と、flux 計算に必要な大気変数は、JRA25 を使用。

月毎気候値を用いた15年の spin-up の後、それを初期値として
6時間毎 data を用いた1979-2006年の経年変動の経年変動積分。
今回、1995年-2012年の2つの積分を追加。

実験

気候値積分: 月毎長期平均大気場で駆動

経年変動
積分



経年変動積分 A: 1979年1月1日～2006年初期値: 気候値積分16年目1月1日 ($\Delta t=120s$)

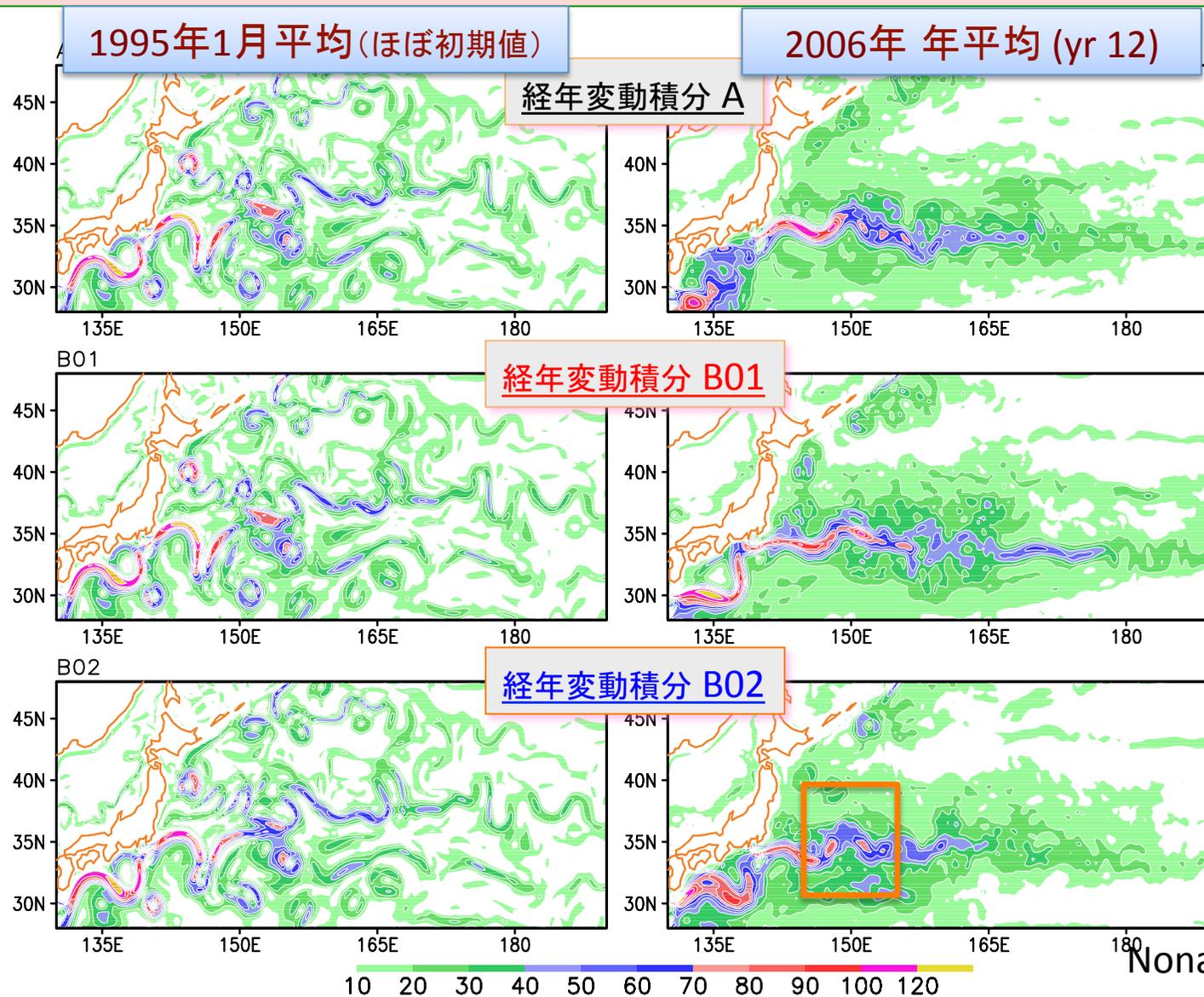
経年変動積分 B01: 1995年1月1日～2012年初期値: 経年変動積分A 1995年1月1日 ($\Delta t=160s$)

経年変動積分 B02: 1995年1月1日～2012年初期値: 経年変動積分A 1995年1月11日 ($\Delta t=160s$)

10日分だけ異なる場を初期値として与え、全く同じ経年変動大気場で駆動したとき、2つの経年変動積分はどの程度異なる場になって行くのか？

ここでは、これらの3つの（僅かな条件の相違の下で全く同じ大気場で駆動された）経年変動積分間で発達した相違を、海洋の自励的変動によるものとする。

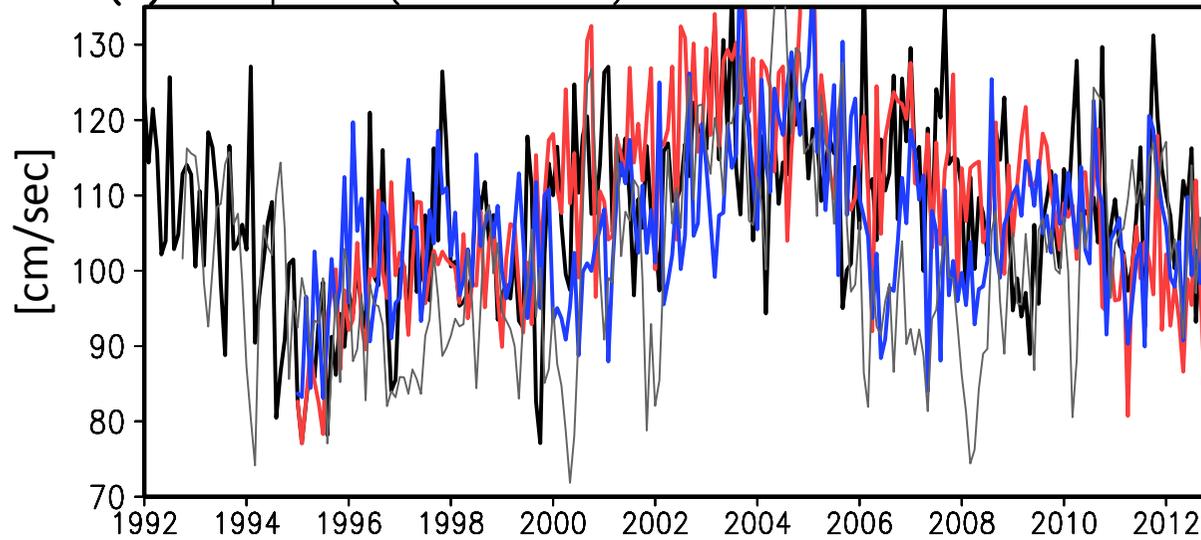
経年変動積分結果: 100-m 深 流速場



10日離れた初期値：ほぼ同様の分布から同一の大気場で駆動。
数年後には、渦だけでなく続流の流速や東西幅にも相違。

経年変動積分結果: 黒潮続流流軸上の流速 (100-m 深)

(a) KE speed (145-155E)



100-m 深での黒潮続流流軸上での流速の時系列。

145°~155°Eの平均。

上図: 月平均値、

下図: 13ヶ月移動平均

黒線: 経年変動積分 A

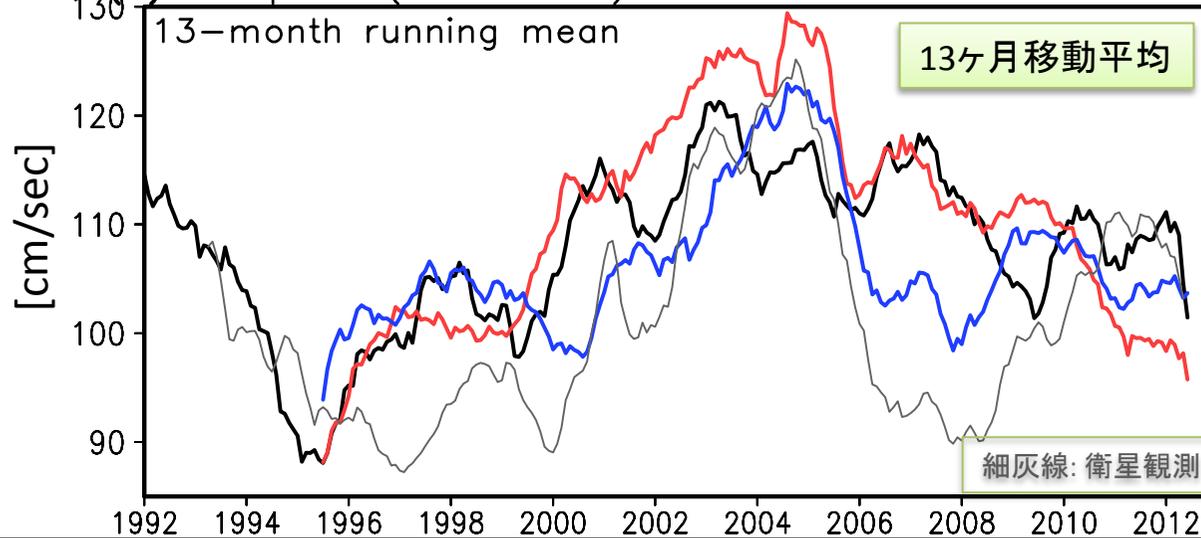
赤線: 経年変動積分 B01

青線: 経年変動積分 B02

細灰線: 衛星観測データ

黒潮続流の流軸は、東西方向各格子上で 30°~40°Nの間で流速最大の点と定義。

(b) KE speed (145-155E)



経年変動積分 B02 は、衛星観測の結果と比較的良くあう。

(が、経年変動積分 B01との相違は初期値のみ)

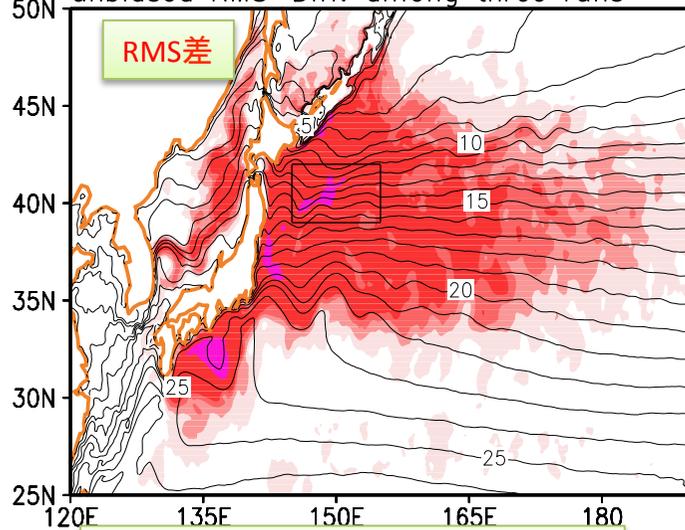
僅かに異なる場から時間発展の顕著な相違。

観測値も 1つの実現値 と考えるべきと思われる。

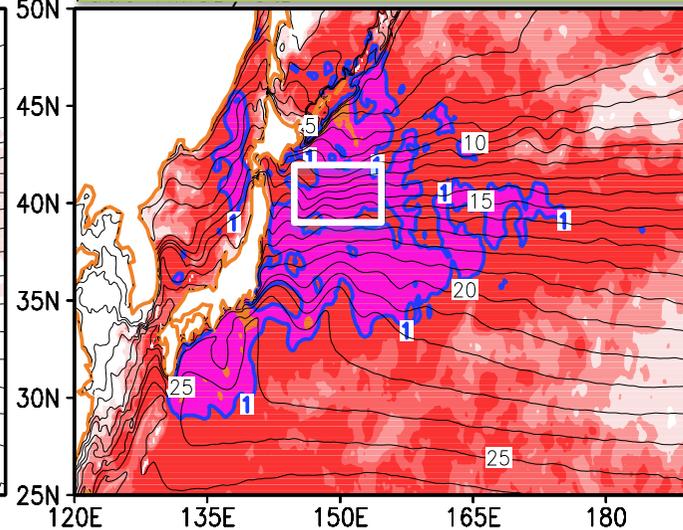
黒潮続流流軸上速度の経年変動には顕著な差。極大・極小の年などにも相違。ただし、十年規模で見るとおおよそ似た傾向の変動。

3つの経年変動積分間の相違 (海面水温)

unbiased RMS-Diff. among three runs



RMS差(左上)と経年変動標準偏差(左下)の比



月毎気候値からのSST偏差を13ヶ月移動平均した場における:

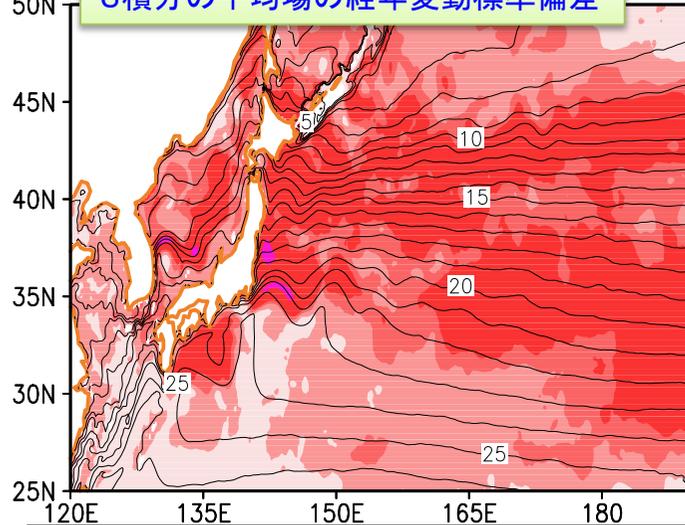
(左上)3つの積分のRMS差。

(左下)3つの積分の平均場の経年変動標準偏差。

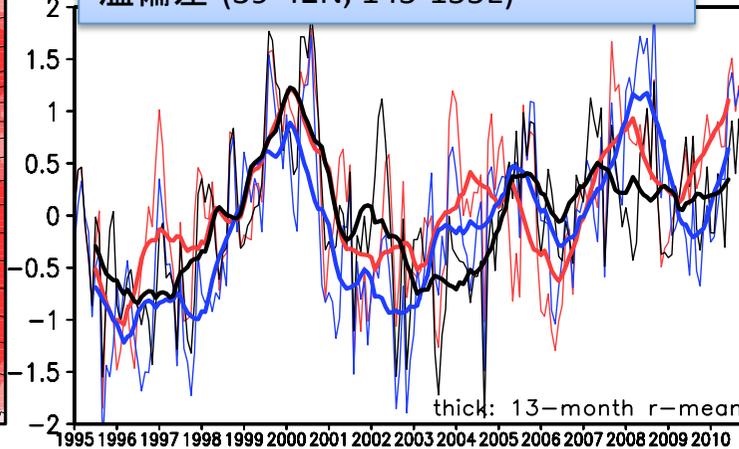
(右上)RMS差と経年変動標準偏差の比。

(右下)亜寒帯前線域での領域平均SST偏差の時系列。細い実線は移動平均をしていない月毎偏差の時系列。

3積分の平均場の経年変動標準偏差

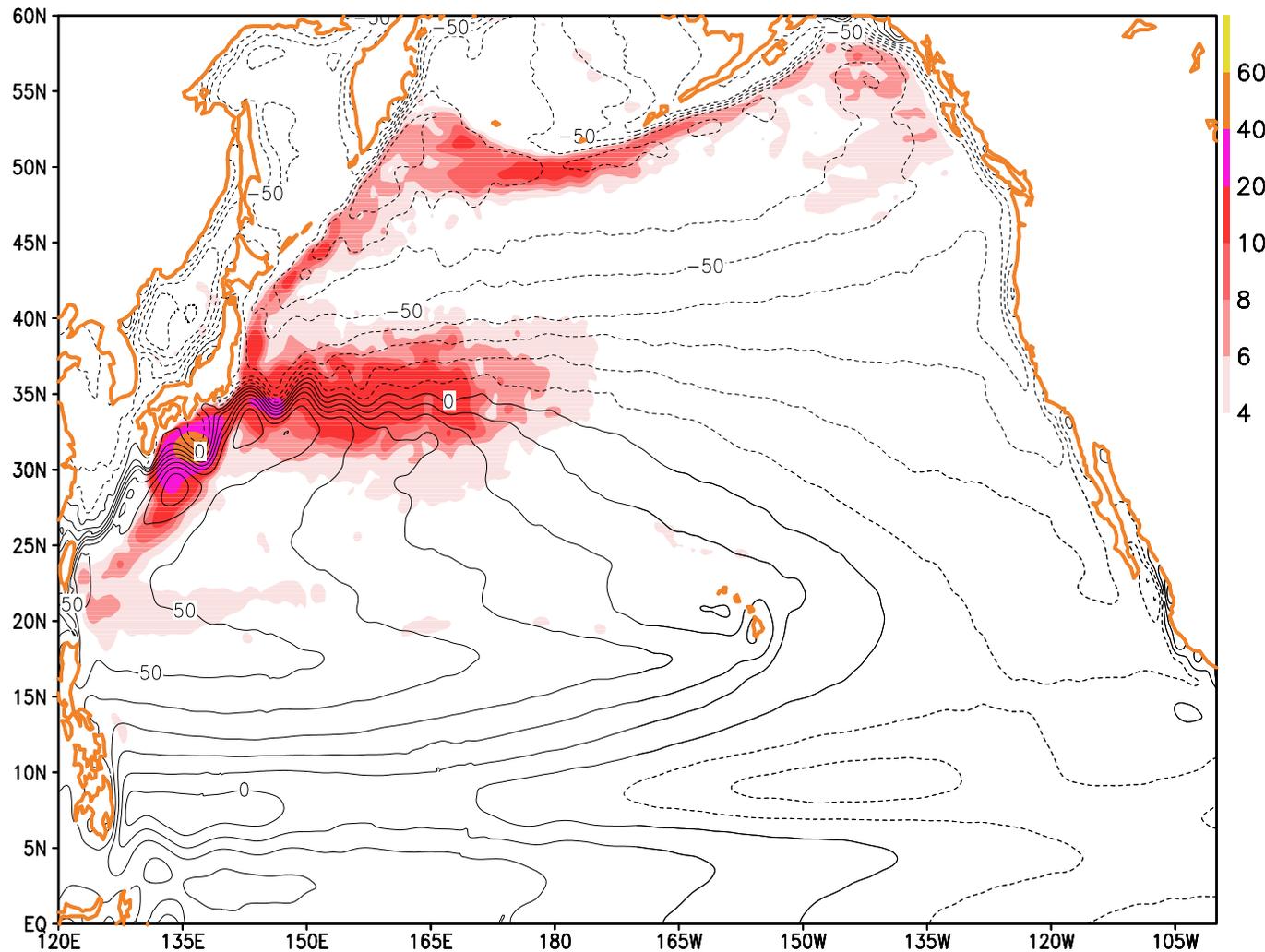


亜寒帯前線域での領域平均海面水温偏差 (39-42N, 145-155E)



亜寒帯前線、黒潮続流前線帯では (13ヶ月の移動平均で渦の影響を減らしても) 内部変動は外力による変動より大きい。

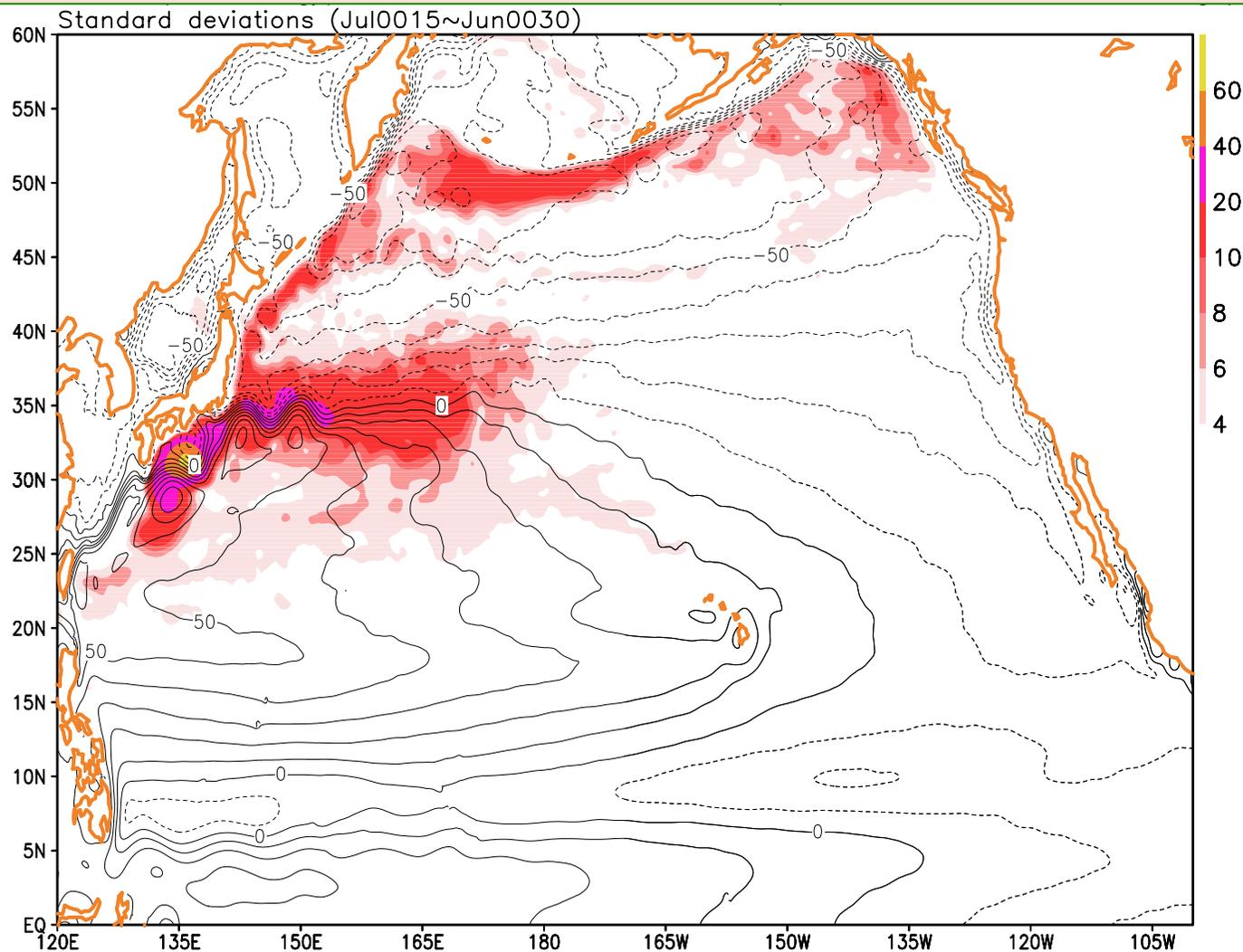
3つの経年変動積分間の相違（海面高度）



月毎気候値からの海面高度偏差を13ヶ月移動平均した場における3積分間のRMS差。

内部変動の影響は、西部北太平洋（西岸境界流域）で顕著。
一方で、熱帯域では内部変動による経年変動の不確定性は小さく、大気からの外力の影響が支配的。

気候値積分における経年変動の標準偏差（海面高度）

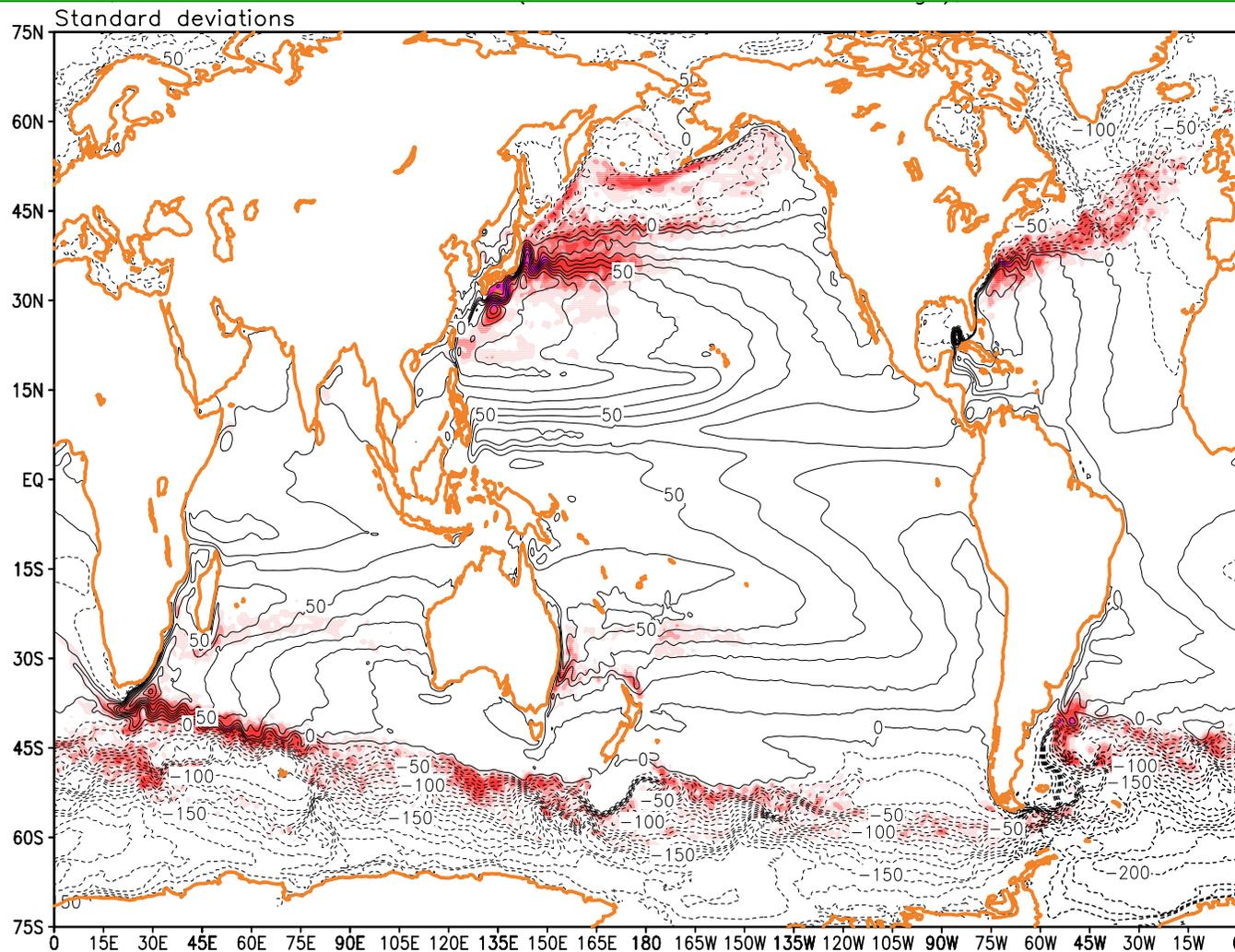


気候値積分における月毎気候値からの海面高度偏差を13ヶ月移動平均した場における(経年変動の)標準偏差。

内部変動の影響の分布は、気候値積分での経年変動標準偏差の分布によく一致する。

内部変動の影響の分布は、長期平均大気場で駆動した海洋の経年変動標準偏差分布から推測可能と考えられる。

準全球気候値積分における経年変動の標準偏差（海面高度）



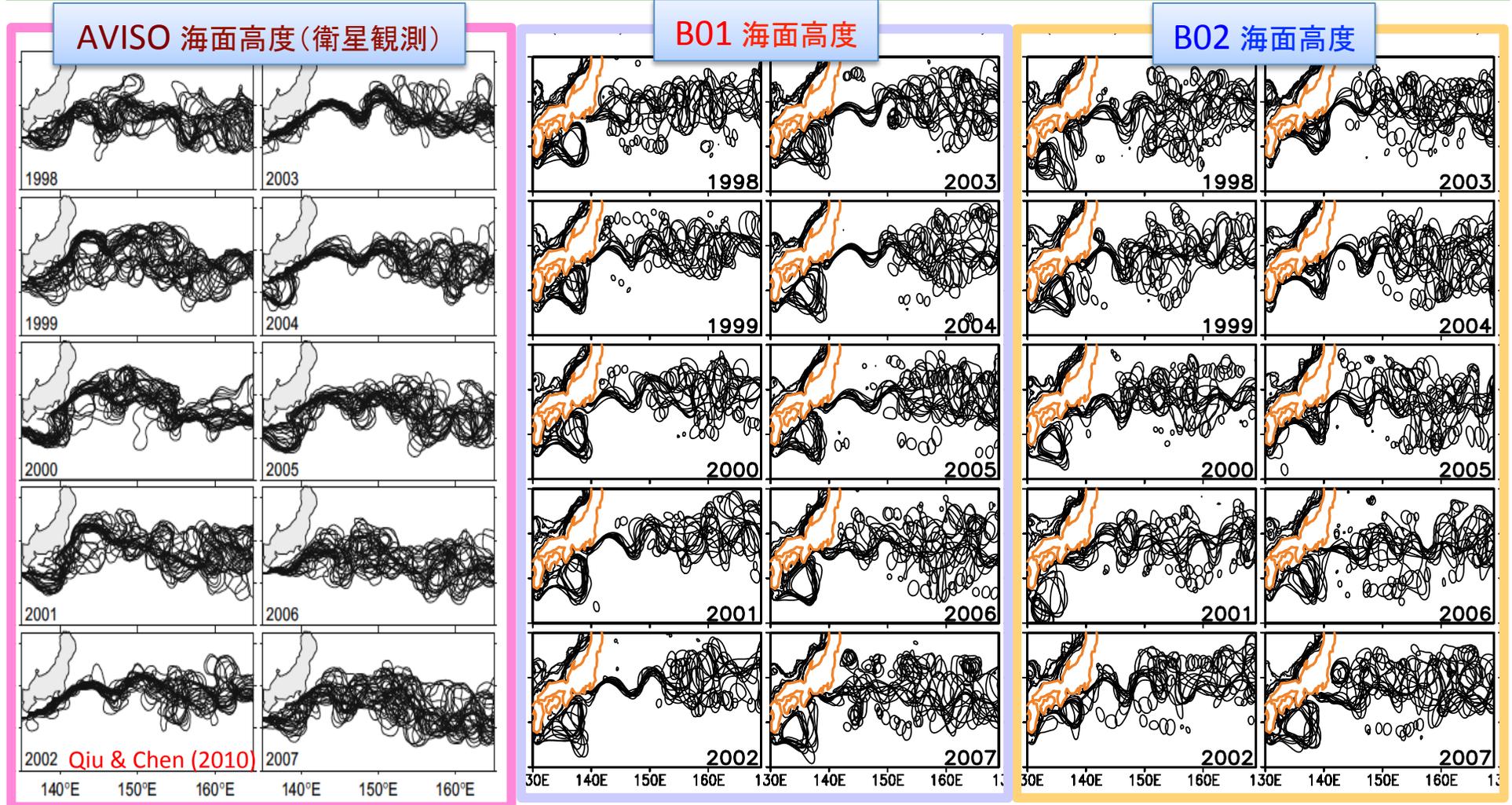
渦解像準全球OFES(を気候値大気場で駆動した)気候値積分における月毎気候値からの海面高度偏差を13ヶ月移動平均した場における(経年変動の)標準偏差。

仮に（前のスライドで見たように）気候値積分の経年変動標準偏差が海洋の内部変動の分布を示すのであれば、その全球分布は上の図のように推測される：自励的な経年変動は熱帯では弱く、西岸境界流域に主に生じる。

黒潮続流ジェットの安定性(及び渦の活動度) の経年変動

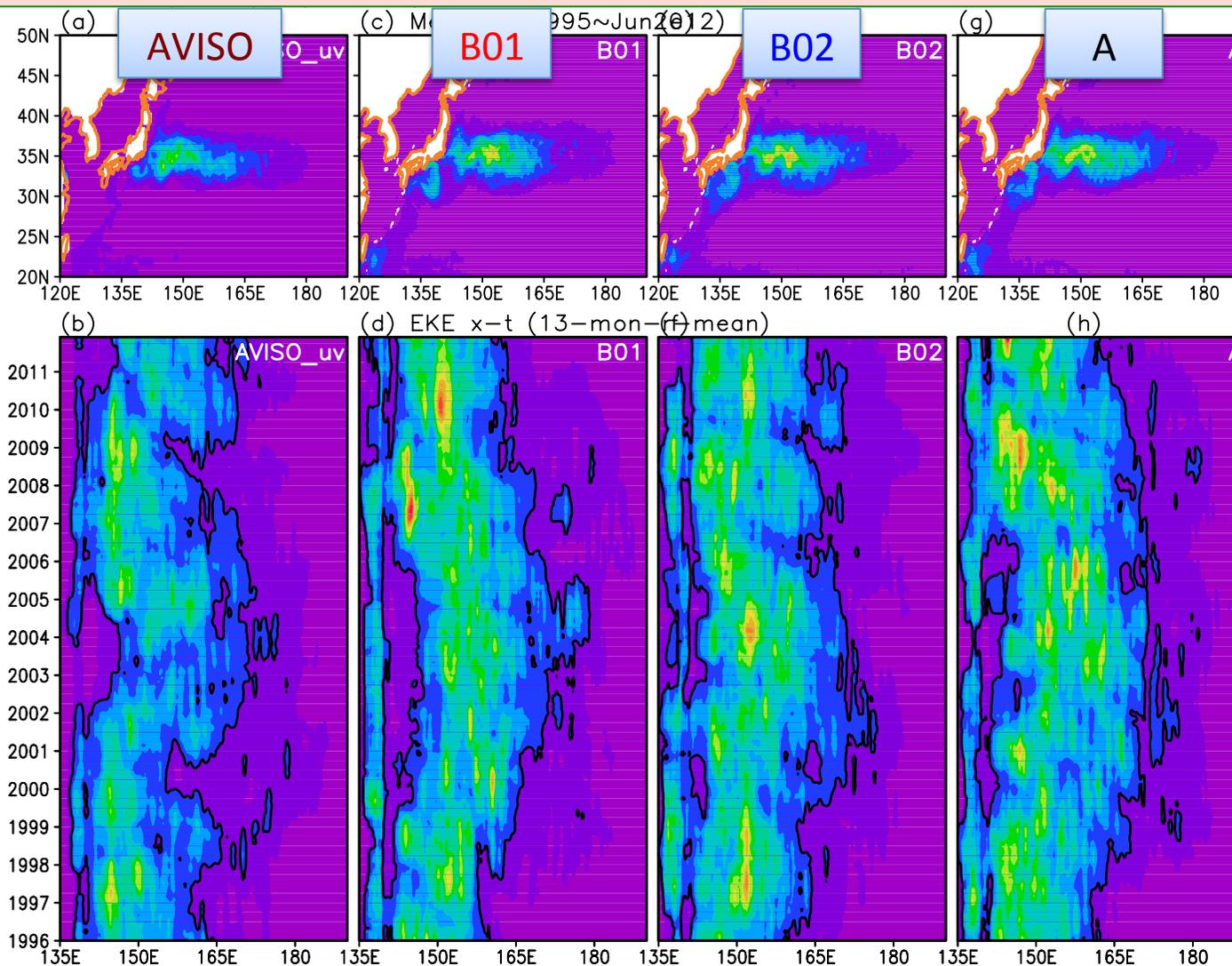
海洋中規模渦は主に自励的に生じるため、渦活動が3つの積分間で異なるのは当然なので、ここまでの解析では渦の影響を除いて、長い時間スケールの変動に注目した。
渦の活動度に、ここまでの話とは逆に、外力(大気場)変動によって決まる成分があるのかどうか注目した解析も行った。

黒潮続流ジェットの安定性 (海面高度の等値線で示したジェット軸の変動)



- 黒潮続流ジェットの安定性には十年規模の変動が存在 (Qiu & Chen 2005).
- Qiu & Chen は風変動によって駆動されたRossby波の伝播の影響を示した.
- B01 (& B02) 経年変動積分では、観測同様に2003年頃に流路が安定. 黒潮続流ジェットの安定性が、ある程度風変動によって決められていることを示唆.

黒潮続流域の渦活動度



$(u'^2+v'^2)/2$ で評価した渦活動度.

u' , v' は13ヶ月の移動平均を除いてハイパスフィルターを施した海面流速。

(上図) 長期平均分布。

(下図) 32-37N平均の経度-時間断面。13ヶ月の移動平均を施している。

- 2003年頃の安定期には、下流側で渦活動が活発化 (Qiu & Chen 2005). この傾向は経年変動積分B01でも再現 (B02とAでも示唆される) .
- この結果は、渦活動度にも外力によって規定される部分があることを示すが、各積分間の相違は内部的な変動の影響も強く受けることを示す.

まとめ

- 僅かに異なる条件の下で同一の**経年変動する**大気場で駆動したときに、**黒潮続流域の流速場に顕著な相違**が生じる。
 - この結果は、現実的な条件で、黒潮続流ジェットが大気変動の影響とともに、海洋の自励的（内部的）変動の影響を強く受けることを示す。
- **海洋前線帯においては、海面水温や海面高度**も海洋の自励的変動の影響を強く受ける。
 - 海洋の自励的変動の影響は西岸境界流域で顕著であるが、熱帯域ではほとんど見られない。
- **黒潮続流域の渦活動度（黒潮続流ジェットの安定性）**は自励的変動の影響を強く受けるが、ある程度外力に規定される部分が有る。
- 自励的変動の生じ方には**モデル依存性**があることが予期される。**モデル間比較**が今後必要であると考えている。

The result implies...

- The observed variability in the KE region may be one realization of possible variability.
- Hindcast integrations with eddy-resolving OGCMs are better to be multi-ensemble integration to show possibly included uncertainty.

