

気象研究所における沿岸同化モデルの開発

碓氷典久・藤井陽介・坂本圭・倉賀野連
(気象研究所 海洋・地球化学研究部)

内容

□ はじめに

- 現在の気象庁海況予報システム(MOVE/MRI.COM-WNP)
- 新しい沿岸同化モデルの目的

□ 沿岸同化モデルの概要

- 海洋モデル
- 同化手法
- 同化モデルの基本パフォーマンス

□ 流速データの同化に向けて

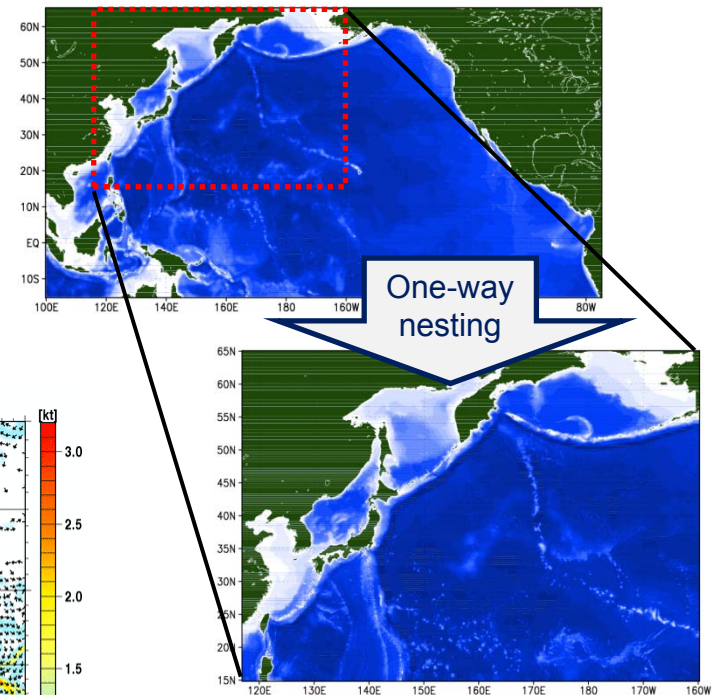
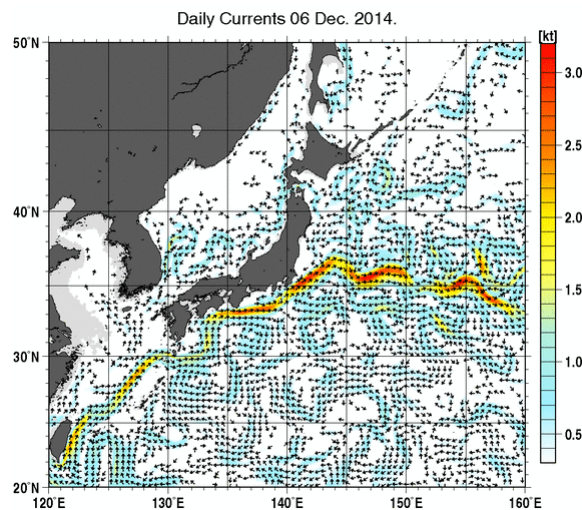
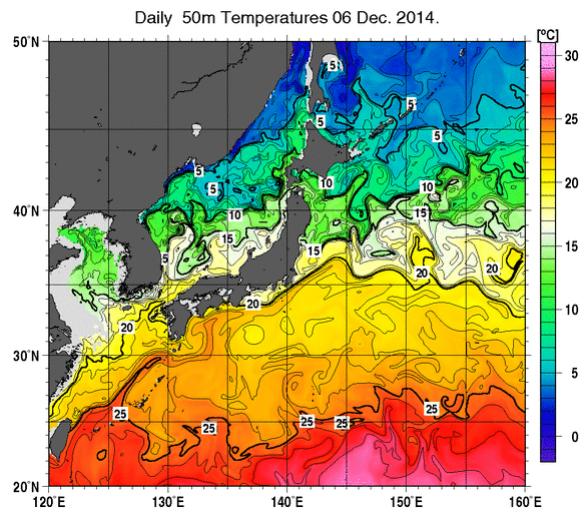
- 海洋同化における流速データの役割
- 流速同化のための技術的課題

□ まとめ

はじめに

□ 現行の気象庁海況予報システム(MOVE/MRI.COM-WNP)

- 水平解像度10km、3次元変分法によるデータ同化
- 黒潮・親潮や中規模渦が主対象
- 沿岸の再現性は不十分



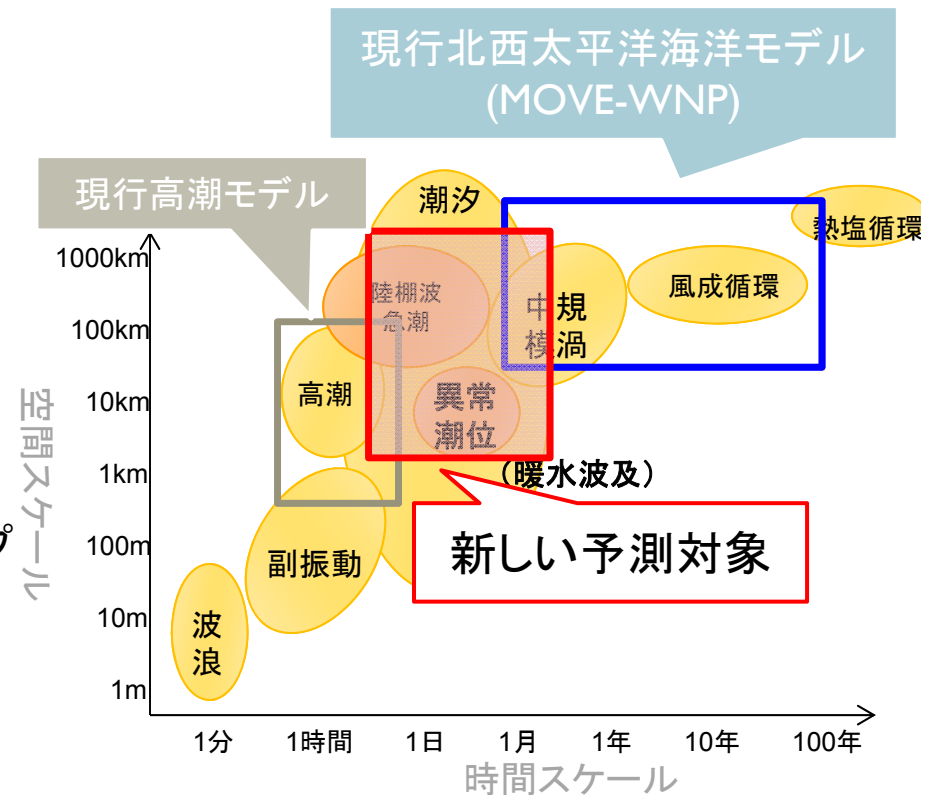
はじめに

□ 現行の気象庁海況予報システム(MOVE/MRI.COM-WNP)

- 水平解像度10km、3次元変分法によるデータ同化
- 黒潮・親潮や中規模渦が主対象
- 沿岸の再現性は不十分

□ 日本沿岸海況監視予測システム

- モデル解像度: 約**2km**
- データ同化手法: **4次元変分法**
- 瀬戸内海周辺に対象を絞ったプロトタイプシステムを今年度末より現業運用予定
- 対象とする沿岸現象:
異常潮位、陸棚波、急潮、...



沿岸海況監視予測におけるデータ同化の必要性

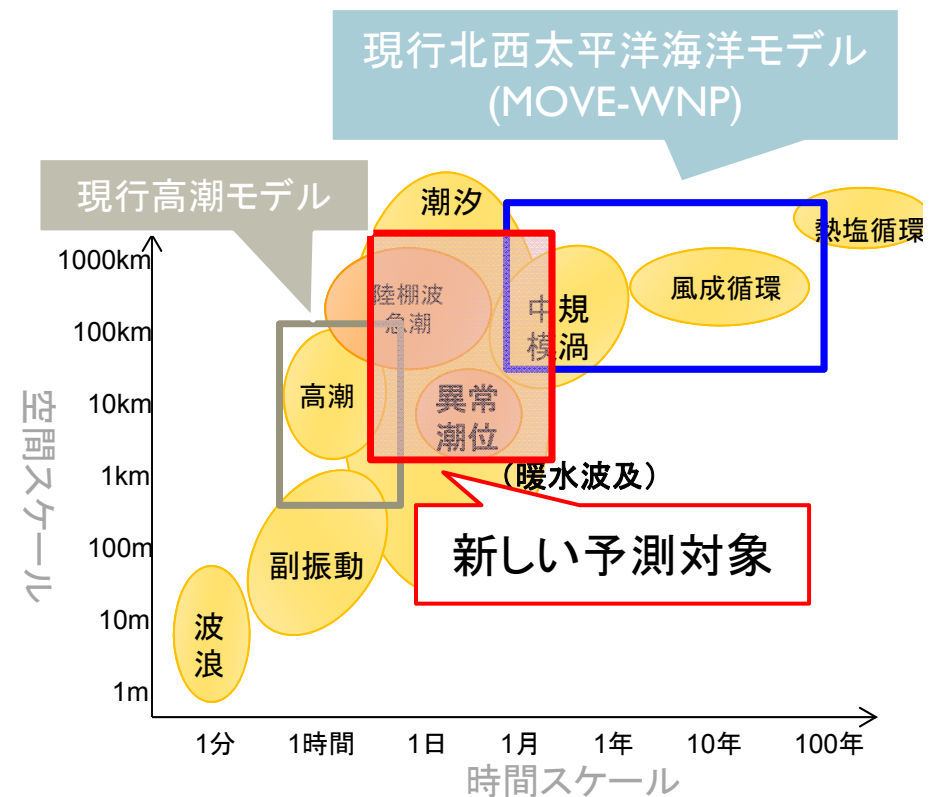
海洋データ同化の重要度は現象に応じて異なる:

□ 大気外力に起因した沿岸現象は、
外力と(必要な物理過程を含んだ)
モデルがあればある程度再現可能

- 高潮
- 気象擾乱による陸棚波 など

□ 外洋の海洋現象に起因した現象は、
データ同化が必須

- 暖水波及
- 黒潮変動や中規模渦などによる異常潮位



新システムが対象とする海洋現象

沿岸海況監視予測におけるデータ同化の必要性

海洋データ同化の重要度は現象に応じて異なる:

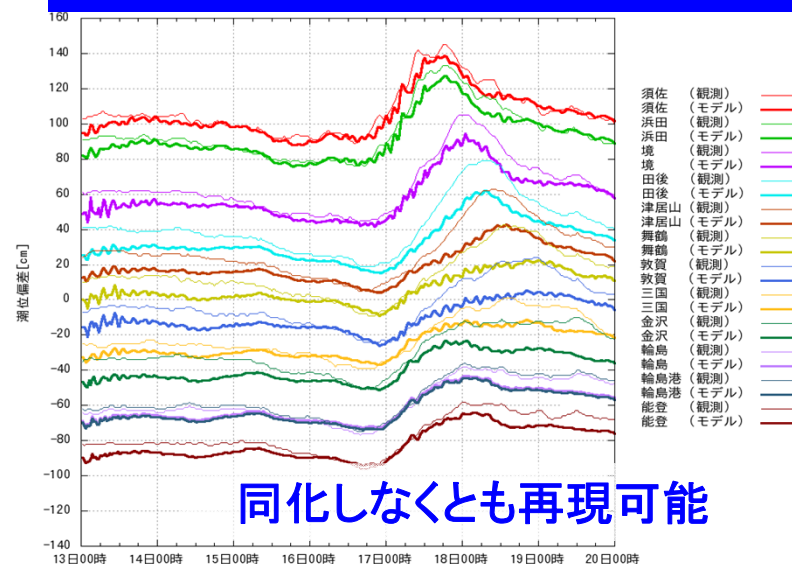
□ 大気外力に起因した沿岸現象は、
外力と(必要な物理過程を含んだ)
モデルがあればある程度再現可能

- ・ 高潮
- ・ 気象擾乱による陸棚波 など

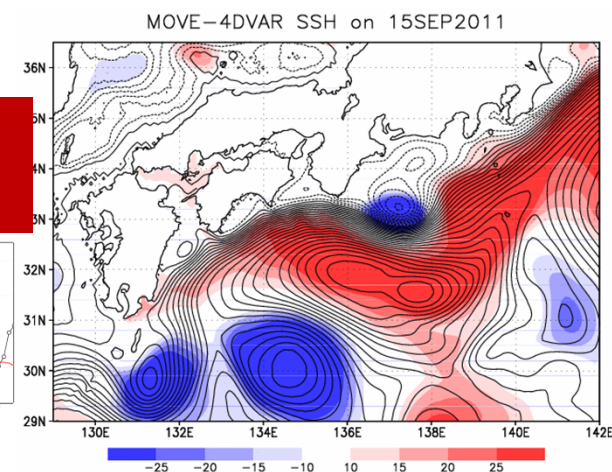
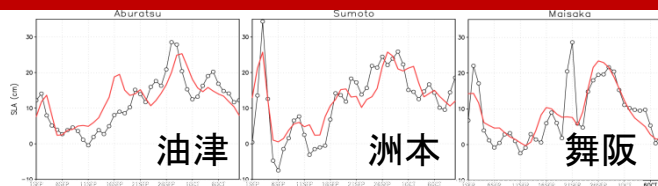
□ 外洋の海洋現象に起因した現象は、
データ同化が必須

- ・ 暖水波及
- ・ 黒潮変動や中規模渦などによる異常潮位

台風により励起された陸棚波による 山陰異常潮位(2012年9月)



2011年9月瀬戸内海周辺の 異常潮位(黒潮変動が起源)



沿岸海況監視予測のためのデータ同化の目的(ターゲット)

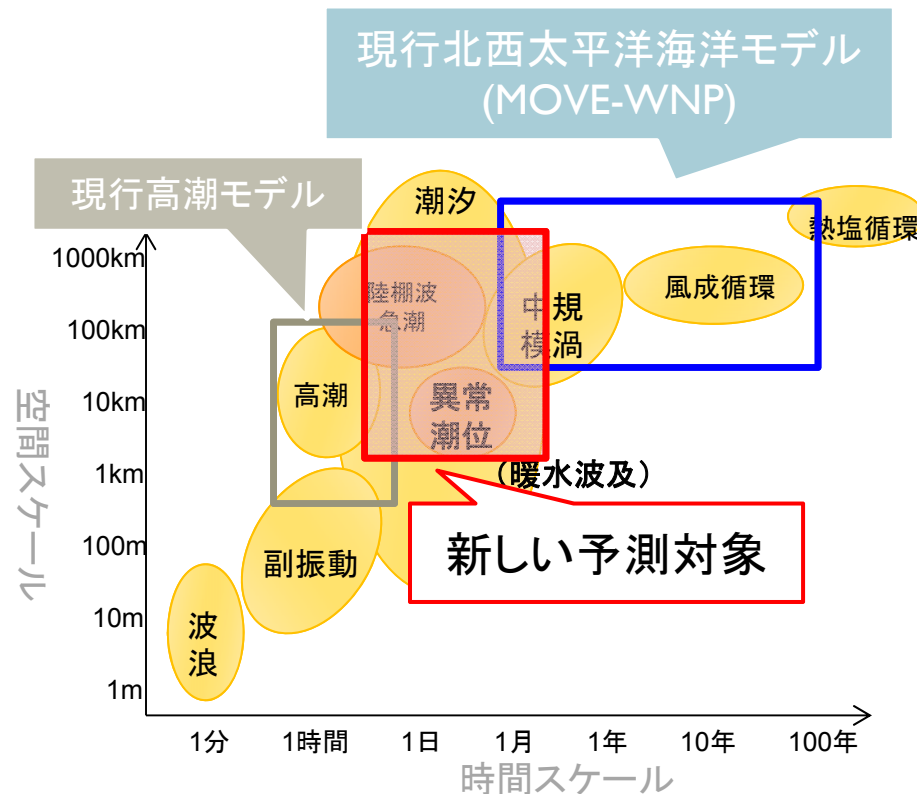
海洋データ同化の重要度は現象に応じて異なる:

□ 大気外力に起因した沿岸現象は、外力と(必要な物理過程を含んだ)モデルがあればある程度再現可能

- 高潮
- 気象擾乱による陸棚波 など

□ 外洋の海洋現象に起因した現象は、データ同化が必須

- 暖水波及
- 黒潮変動や中規模渦などによる異常潮位



- 最終目標は、沿岸現象そのものの高精度データ同化であるが、現状では観測不十分
- 我々の主ターゲットとする沿岸顕著現象は、外洋の中規模現象に起因することが多い

→まずは、外洋の中規模現象の再現性をさらに高精度化することにより沿岸現象(10km、数日~1か月のスケール)の再現性向上を図る

瀬戸内海周辺沿岸同化システム (MOVE/MRI.COM-Seto)

MOVE/MRI.COM-Seto

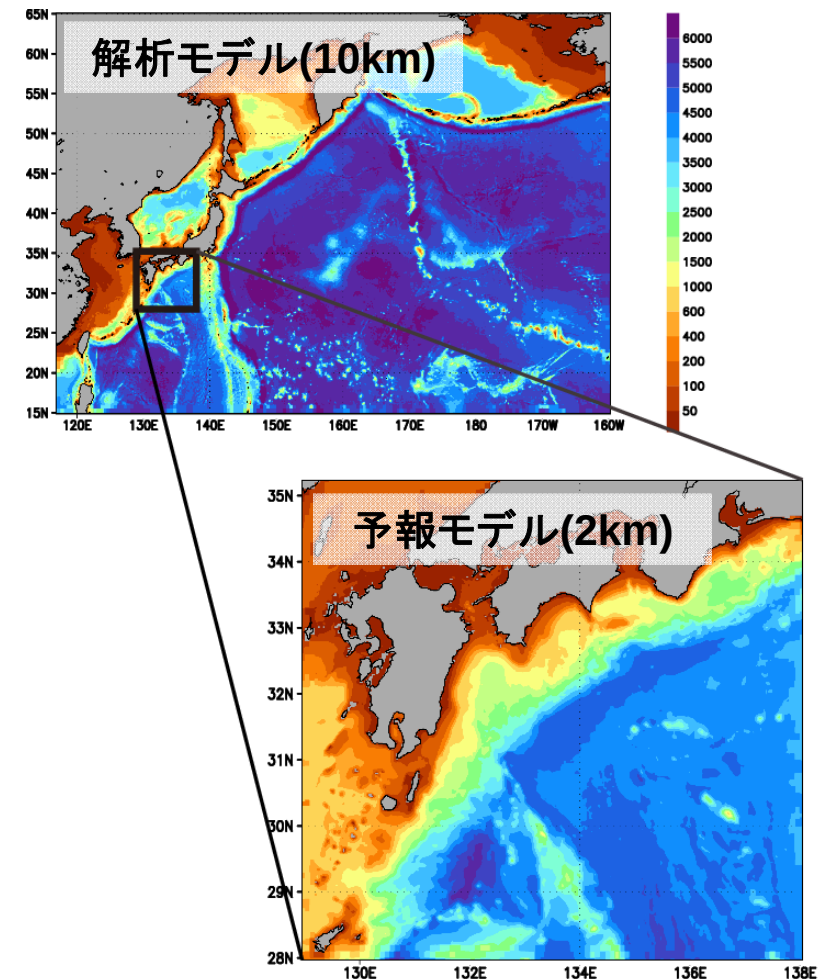
データ同化は、低解像度モデルで行い、その結果を用いて、高解像度モデルを初期化する

□ 解析モデル(MOVE-4DVAR)

- ✓ 北西太平洋モデル(MRI.COM-WNP)
- ✓ 水平解像度 10 km
- ✓ **4次元変分法**により解析(10日サイクル)
- ✓ 制御変数は**水温・塩分場**(の鉛直EOFモード)
- ✓ フォーシング: GSM(6時間データ)

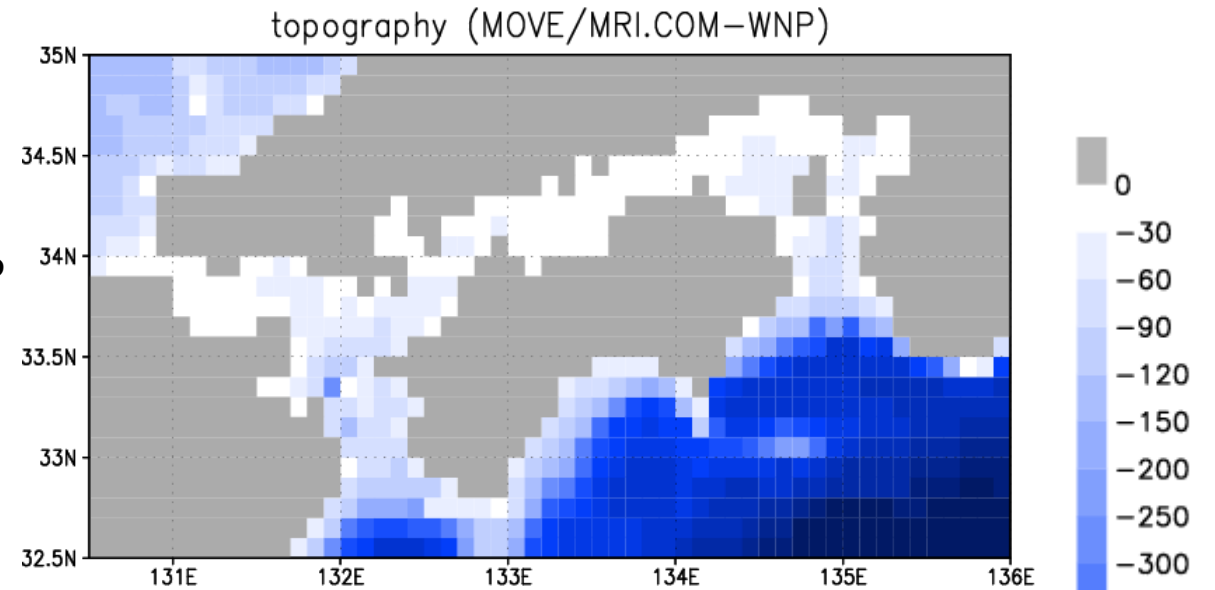
□ 予報モデル(MOVE-Seto)

- ✓ 瀬戸内海周辺モデル(MRI.COM-Seto)
- ✓ 水平解像度 **2km**
- ✓ 解析モデルの結果で初期化
- ✓ フォーシング:
MSM(風、海上気象要素:3時間データ)
GSM(短波・長波放射:6時間)

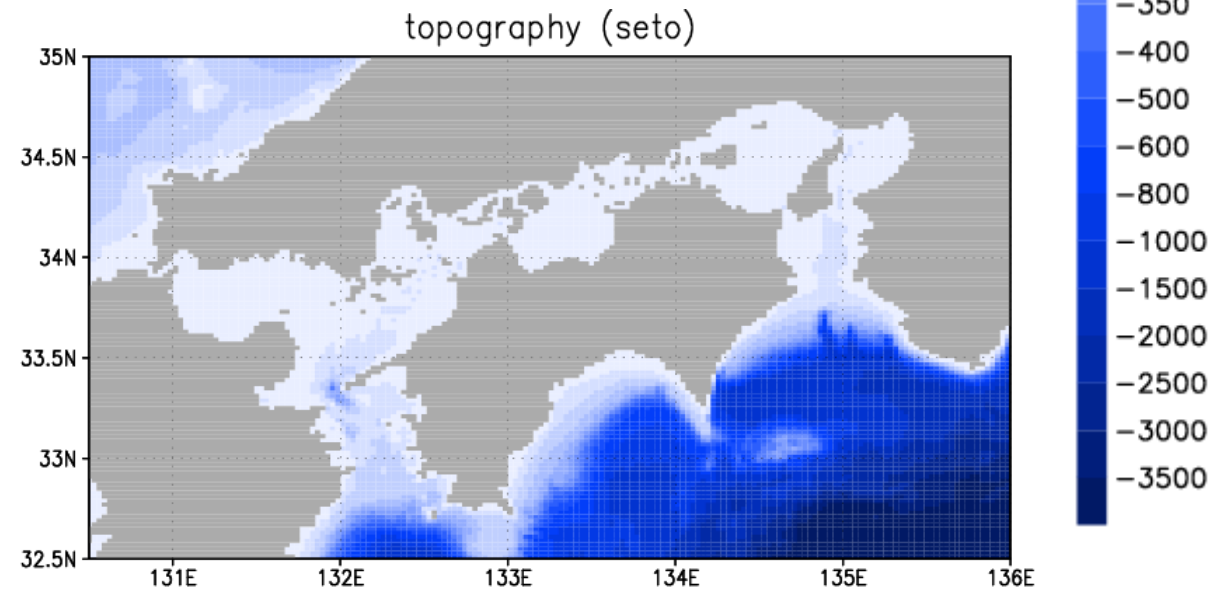


モデル地形

**MOVE/MRI.COM-WNP
(10km)**



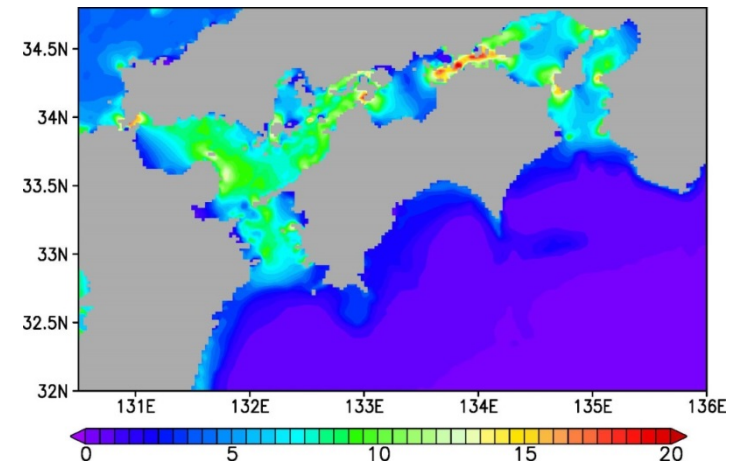
**MOVE/MRI.COM-Seto
(2km)**



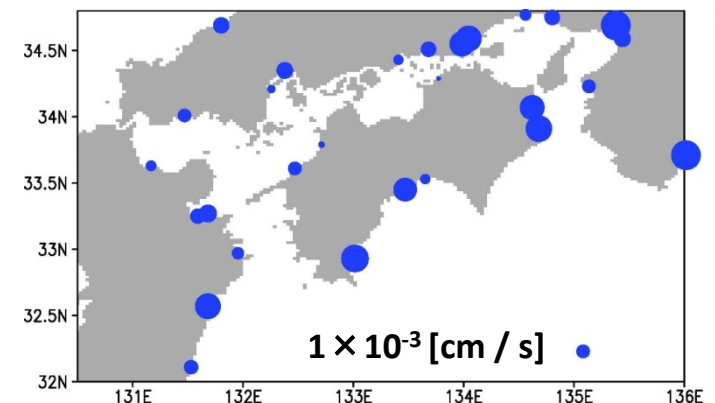
モデル設定

数値モデル	MRI.COM Ver.3.2 (静水圧)
座標系	自由海面 σ -z(鉛直)、極座標
水平解像度	$1/33^\circ \times 1/50^\circ$ (約2km, 301×364)
鉛直解像度	4-600m (50層)
トレーサー移流	SOM (Prather 1986, JGR)
水平混合	Smagrosinky 倍調和型
混合層スキーム	Noh and Kim (1999)
潮汐	なし。ただし、Lee et al. (2006)を簡略化した潮汐混合パラメタリゼーションを使用
側面境界	MOVE/MRI.COM-WNP 4DVAR
ネスティング	オフラインー方向
海面強制	GSM(放射、淡水) MSM(風、大気)
河川流入	一級河川流量(日本河川協会)
他	海面塩分を29.2日で平年値に緩和
時間ステップ	2.5分

背景鉛直拡散係数



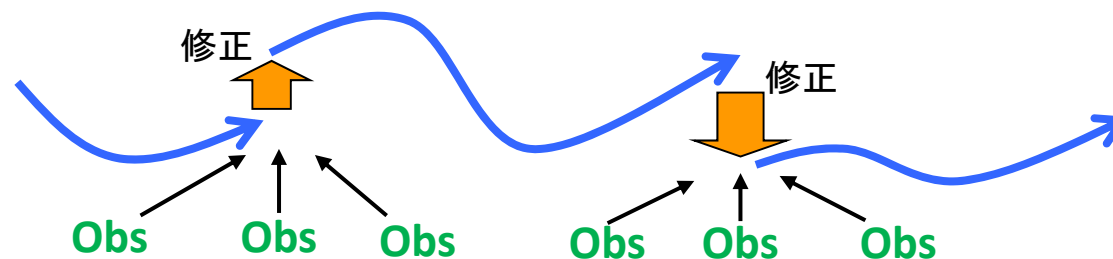
一級河川流出量(1994-2003平均)



データ同化手法: 4次元変分法

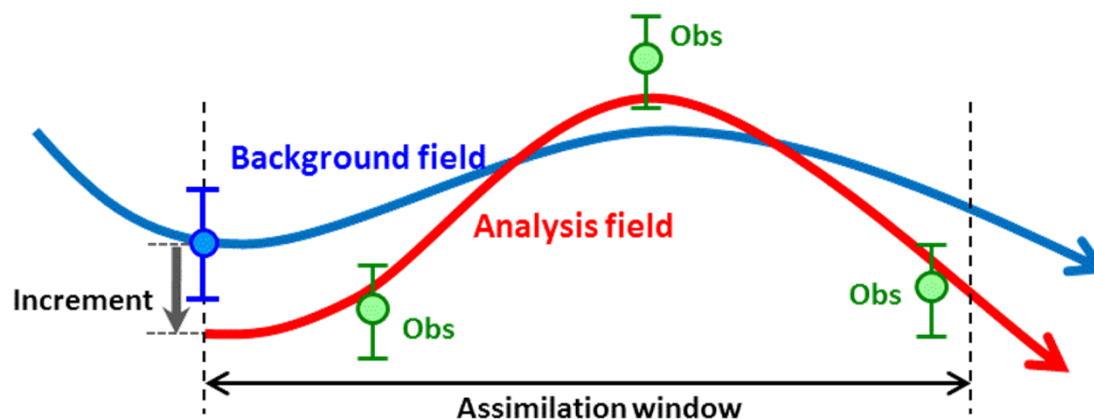
3次元変分法 (3DVAR)

- 解析の際はモデルを使用しない
- ある時刻の場(水温・塩分)を推定
- 解析時刻の前後の観測をすべて同時刻のものと見なす(観測時刻が考慮されない)
- 推定量(水温・塩分)以外の観測の同化が困難



4次元変分法 (4DVAR)

- 数値モデルを解析に利用
- 同化期間(assimilation window)内の場の時間発展を観測に合うように最適化
- 観測時刻が反映される(短周期変動の再現に有利)
- 推定量(水温・塩分)以外の観測(潮位偏差、流速など)も自然に同化が可能



同化に利用している観測データ

□ 衛星海面高度計

- TOPEX/Poseidon, Jason-1/2
- ERS-1/2, Envisat, Cryosat-2
- GFO, SARAL/AltiKa, HY-2



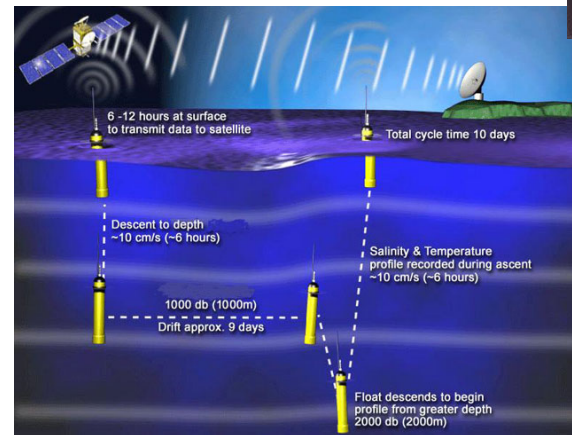
□ 海面水温 (MGDSST)

- 衛星、現場データを融合した日別格子点値



□ 現場観測 (水温・塩分プロファイル)

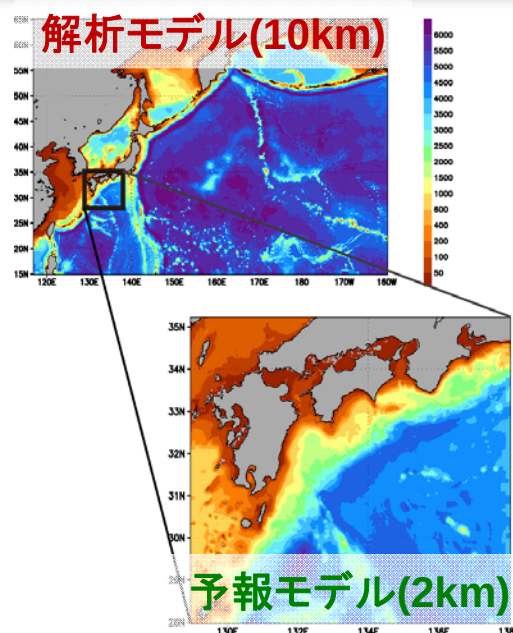
- Argoフロート
- 船舶
- ブイ ... etc



- 水温・塩分場 (密度場) に関わる観測値を同化に利用
- 流速データの利用は今後の課題

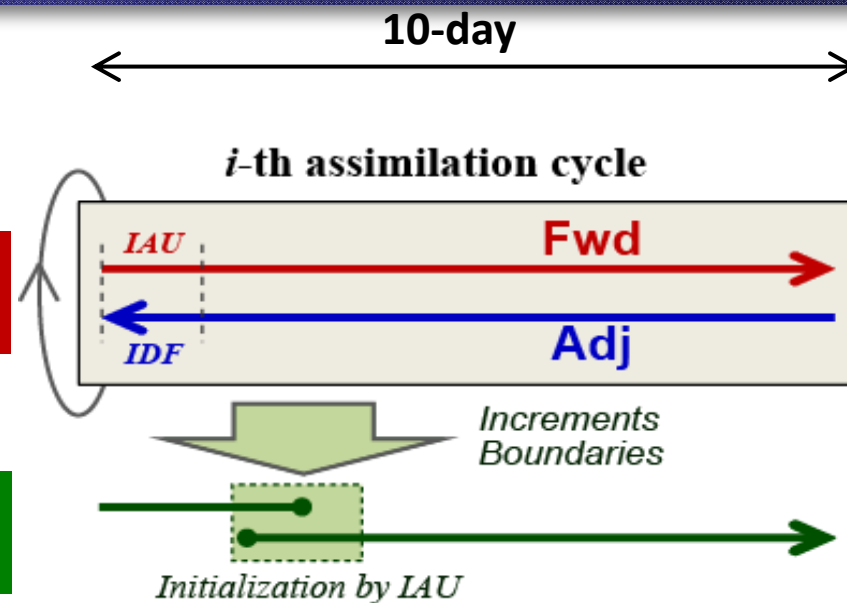


MOVE-Seto初期化手法



解析モデル[10km]
(MOVE-4DVAR)

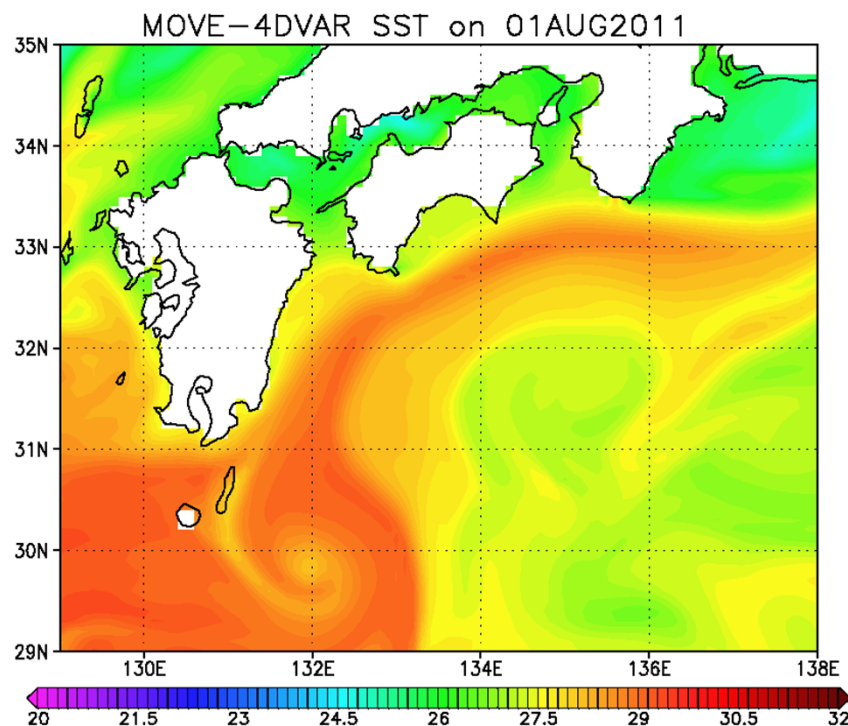
予報モデル[2km]
(MOVE-Seto)



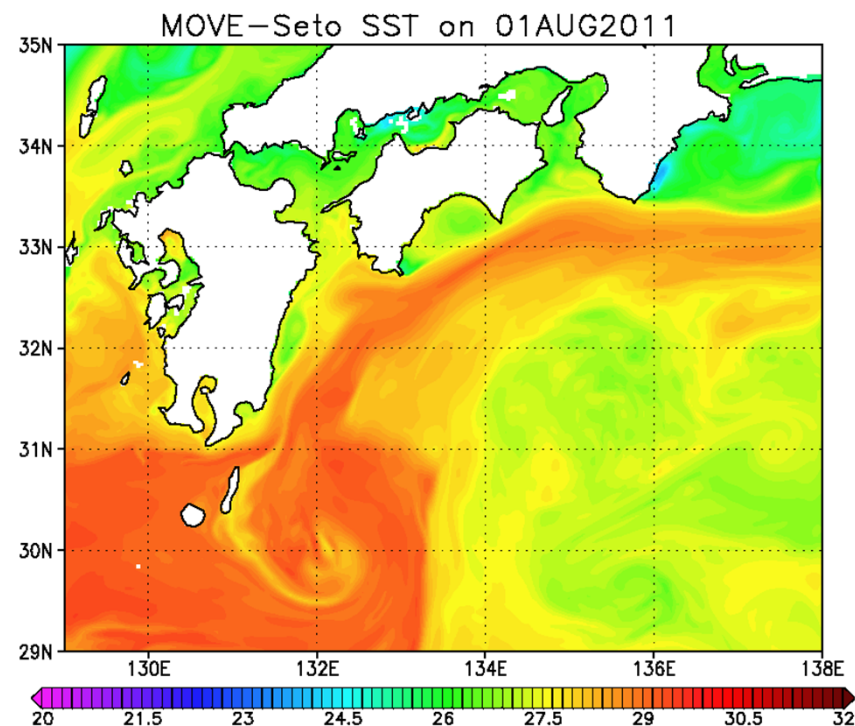
- 各同化サイクルの4~6日目の3日間で2kmを初期化
(初期化期間は同化サイクル内で任意に変更可)
- 初期化手順:
 1. 初期化期間中央(5日目)の2kmモデルのTS場を10km格子の内挿
 2. 5日目のMOVE-4DVAR結果と10km格子に内挿した結果の差(インクリメント)を求める
 3. 10kmで求めたインクリメントを2km格子に内挿
 4. インクリメントを初期化期間(3日)の時間ステップ数で割る
 5. この修正量を水温・塩分の時間発展式に毎ステップ足しこむ

MOVE-Seto初期化の妥当性

MOVE-4DVAR (10km)

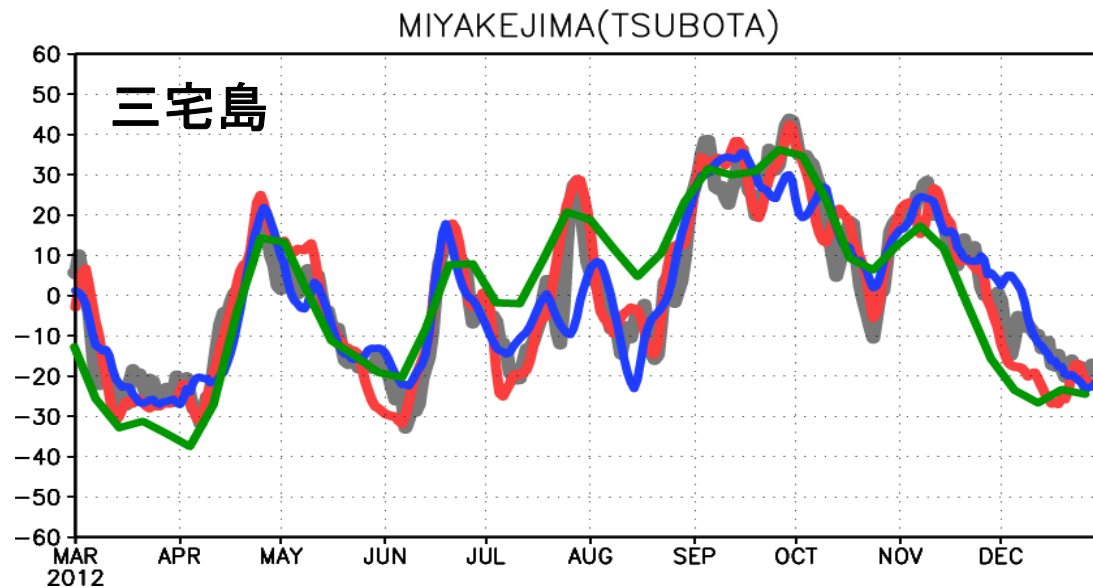


MOVE-Seto (2km)



- ✓ MOVE-4DVARの場が、2kmモデルに適切に反映されている。
- ✓ MOVE-Setoでは、細かい前線波動や地形の影響を受けた流れがよく再現されている。

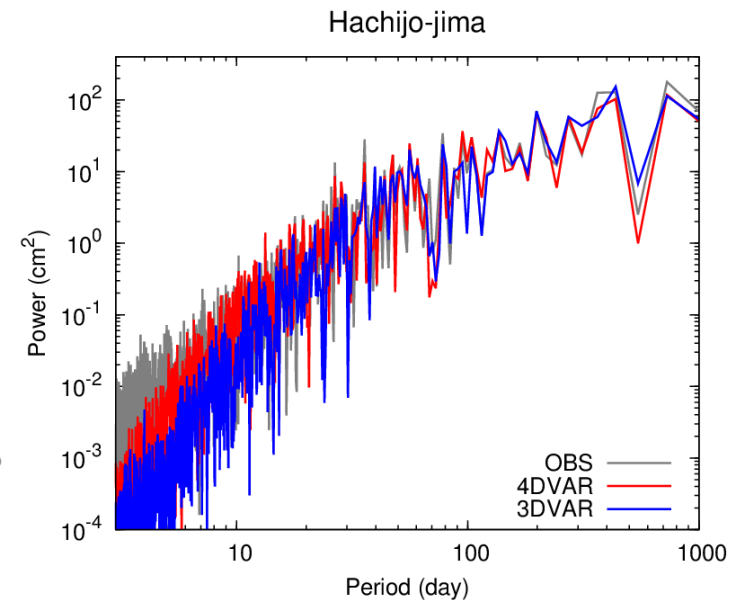
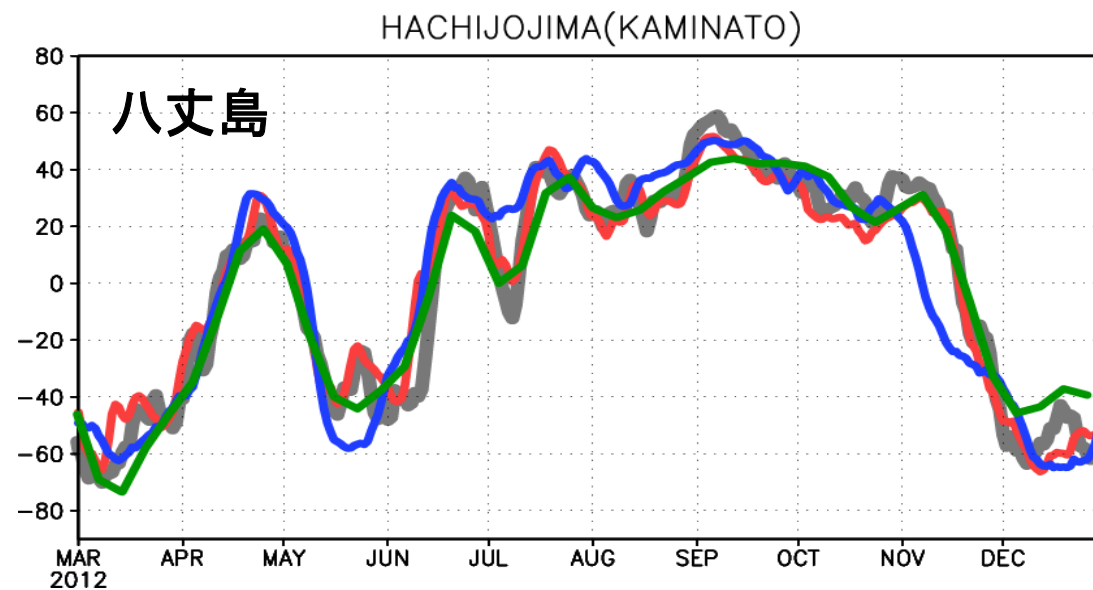
MOVE-4DVAR (10km解析モデル) の再現性



潮位計データは同化に用いていない

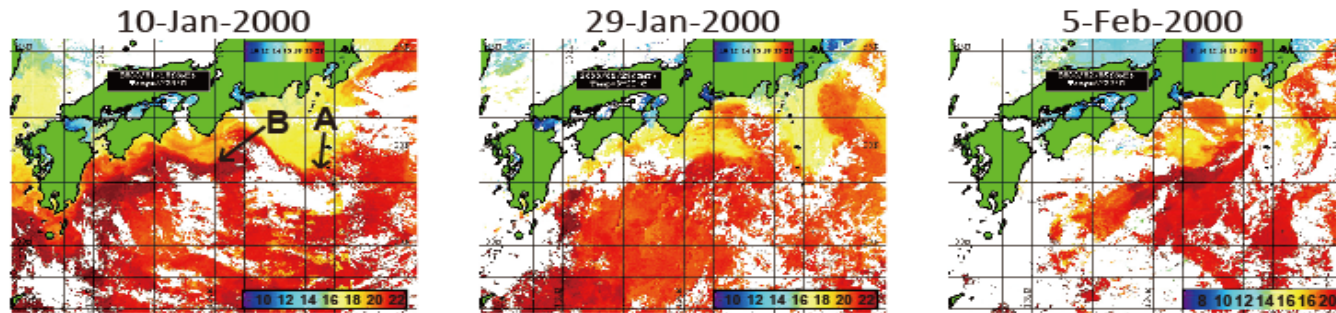
Tide gauge
AVISO GPV
MOVE-3DVAR
MOVE-4DVAR

水位変動のパワースペクトル
(八丈島)

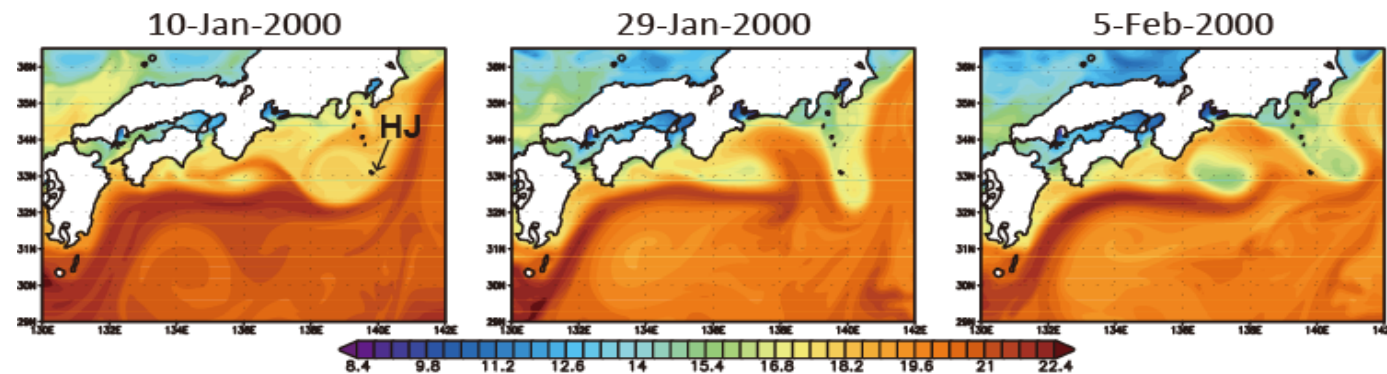


伊勢湾沖への暖水波及(2000年1月)

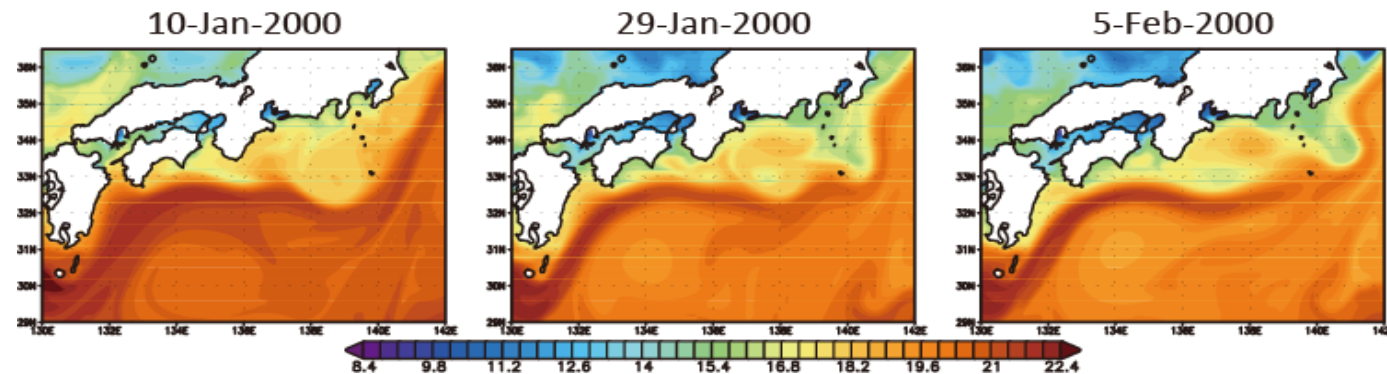
(a) Observation



(b) MOVE-4DVAR



(c) MOVE-3DVAR

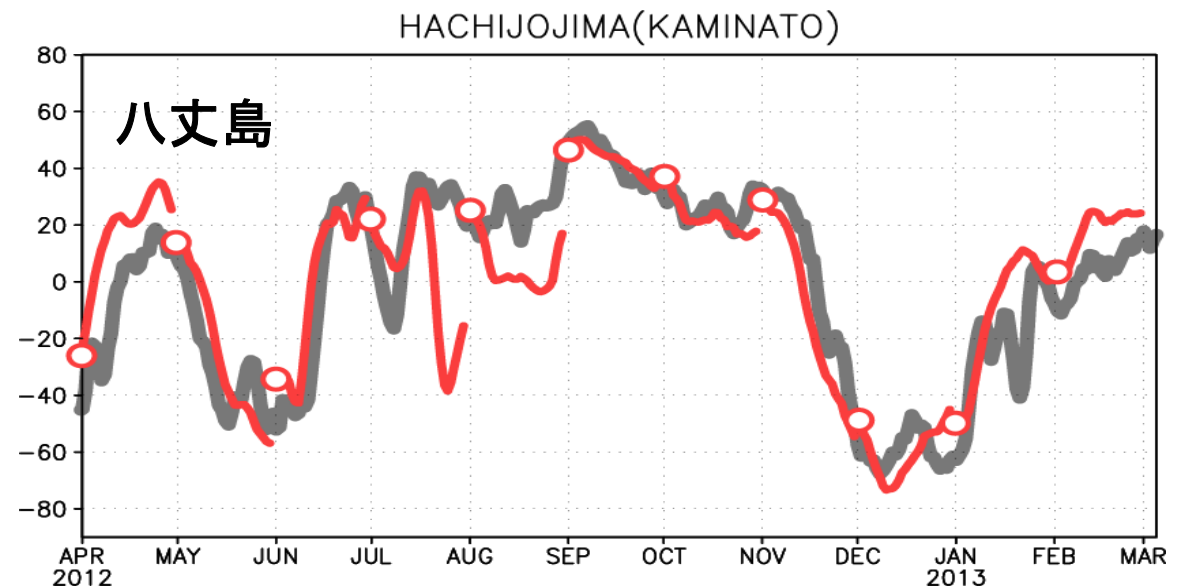
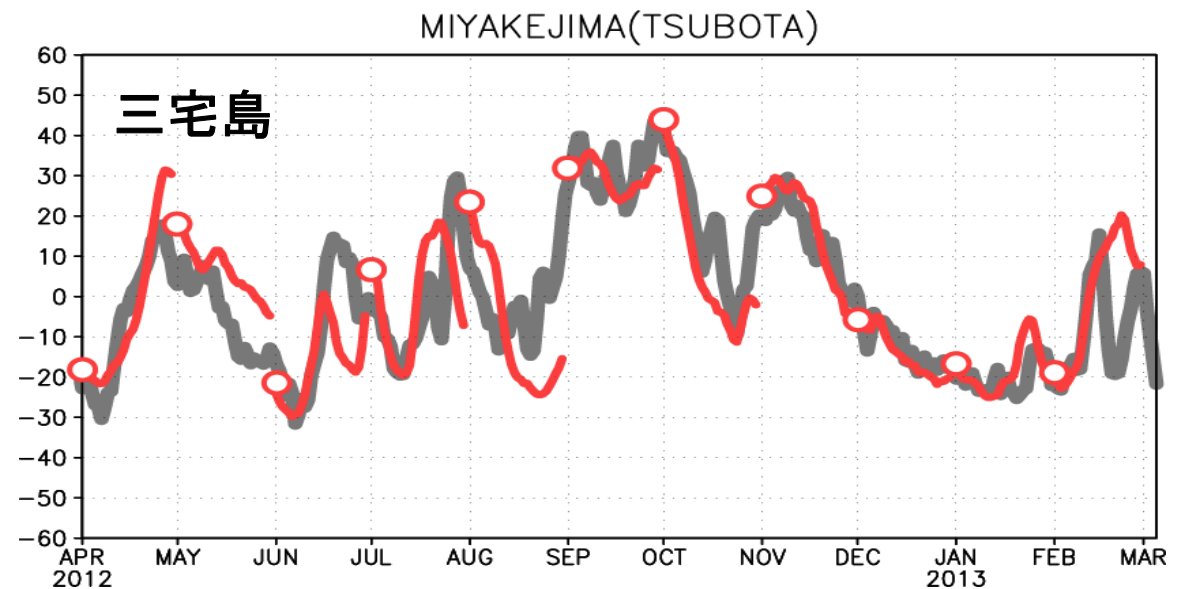


MOVE-4DVAR(10km解析モデル)の再現性

予報実験

- 初期値: 毎月1日(図の○印)
- 予報期間: 30日

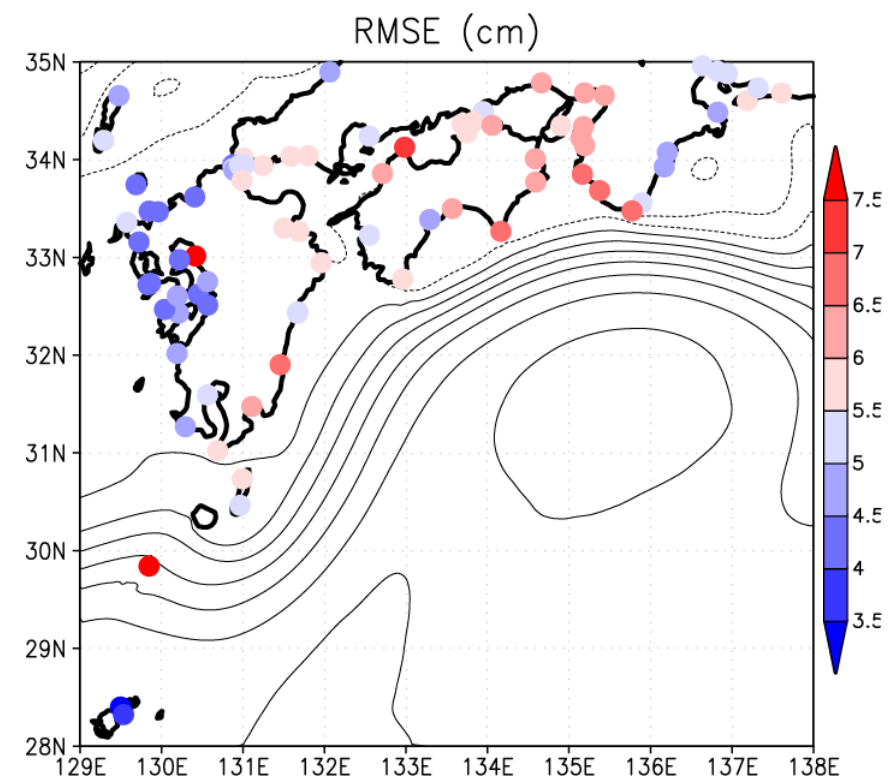
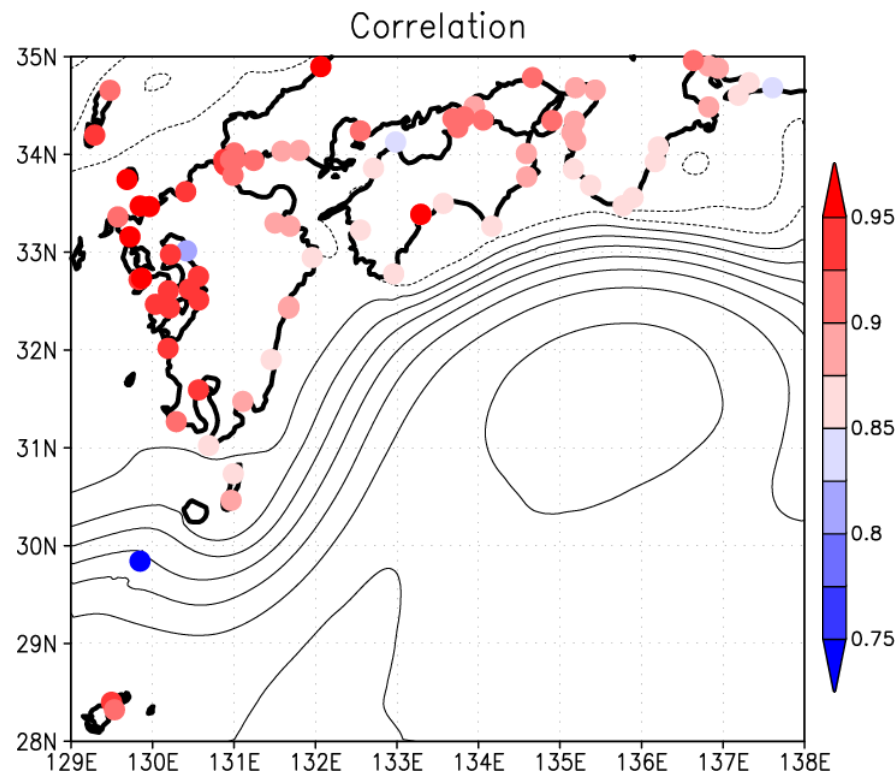
#大気フォーシングは予報値でなく、「解析値」を使用



MOVE-Seto (2km 予報モデル) の再現性

沿岸水位

潮位データに対して気圧補正と48時間tide-killer filterを適用



MOVE-Seto (2km 予報モデル) の再現性

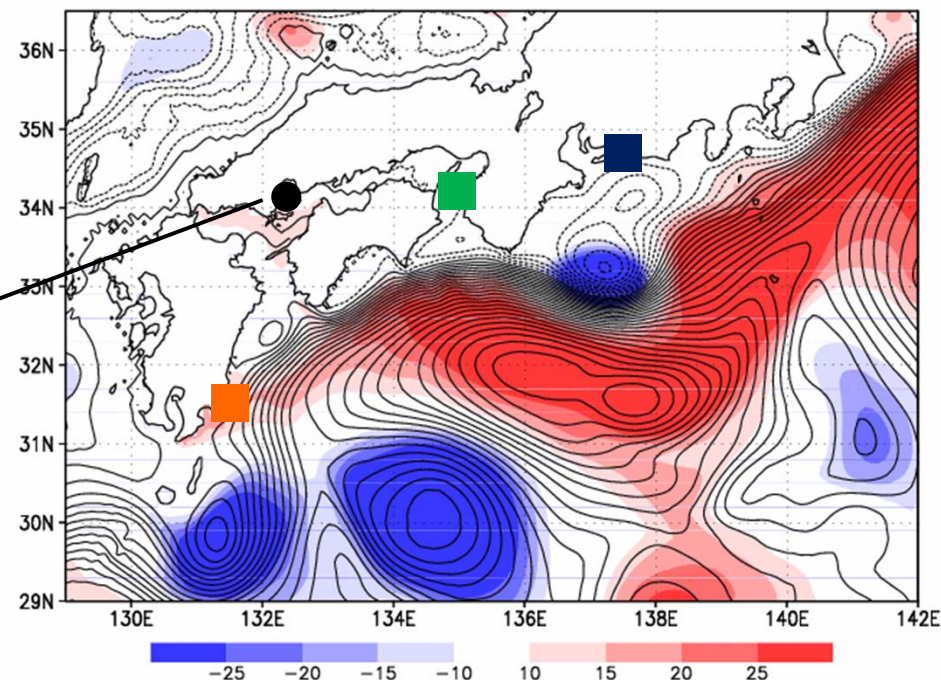
異常潮位 (2011年9月)

瀬戸内海を中心に日本南岸に広範囲で30cm前後の潮位偏差を記録

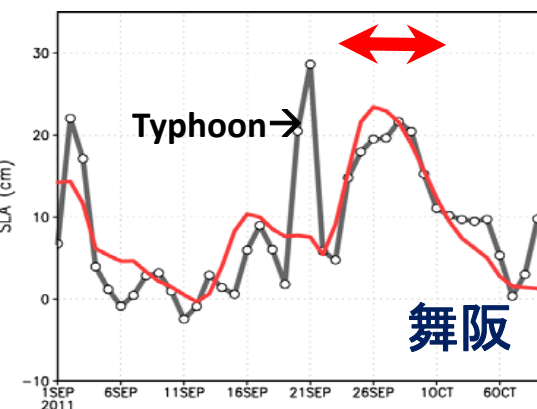
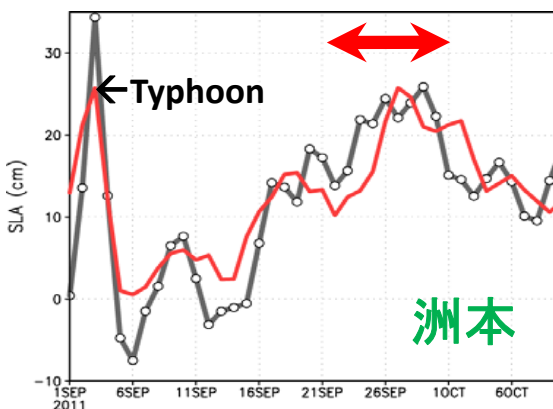
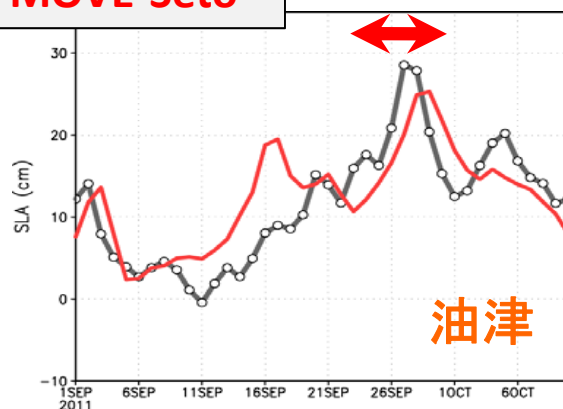
厳島神社



MOVE-4DVAR SSH on 15SEP2011



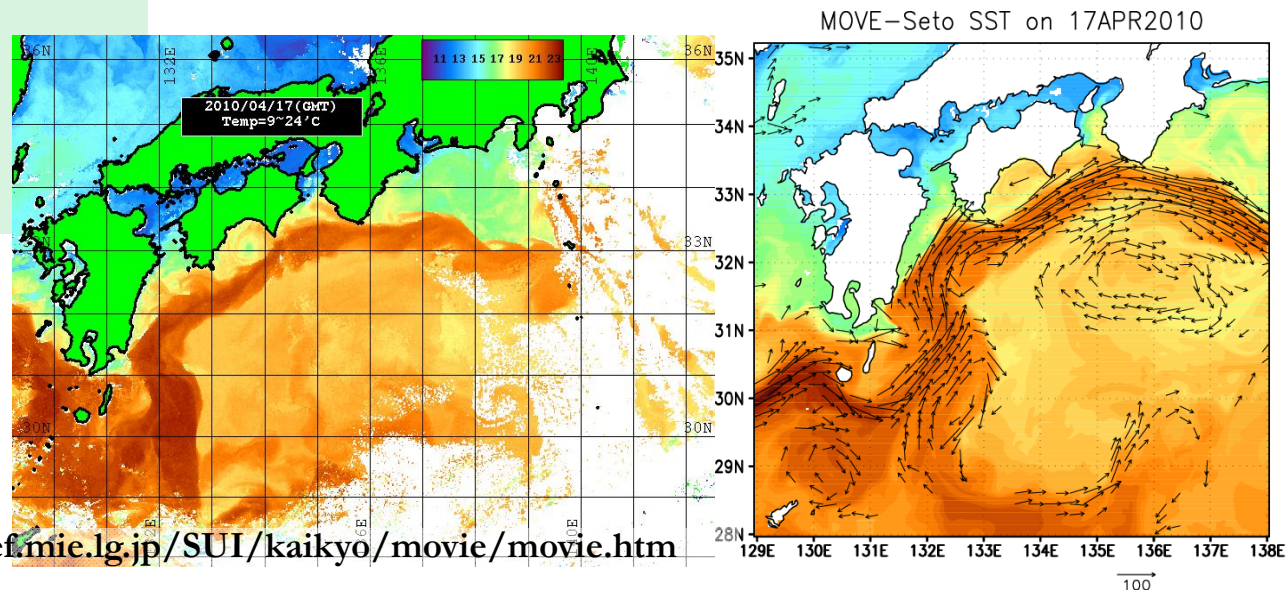
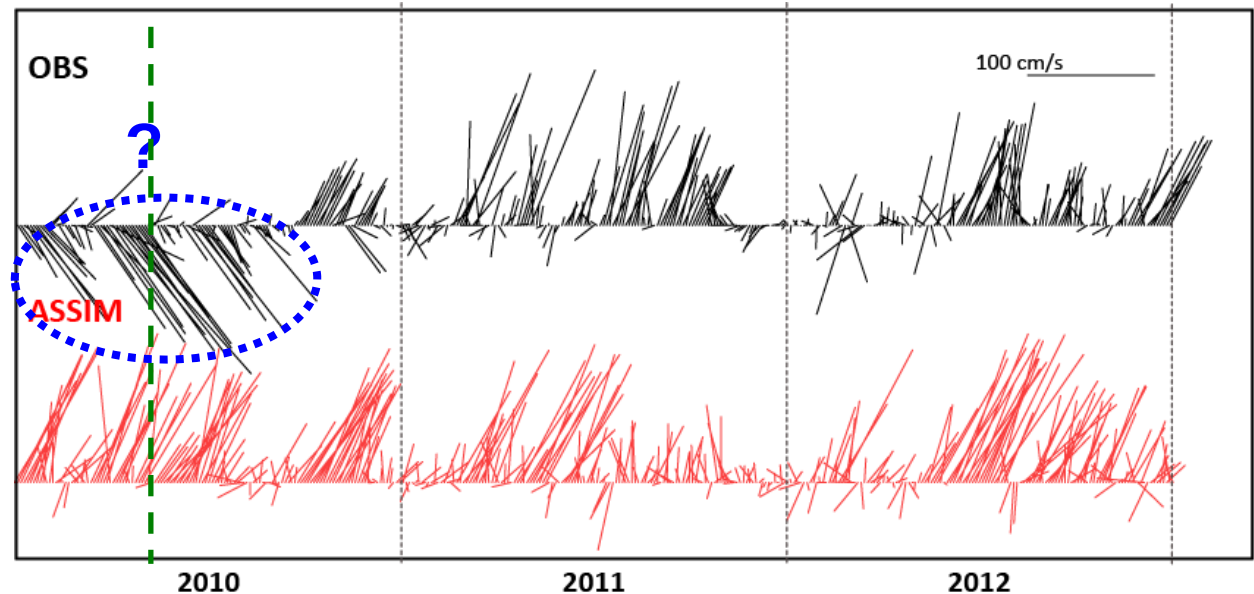
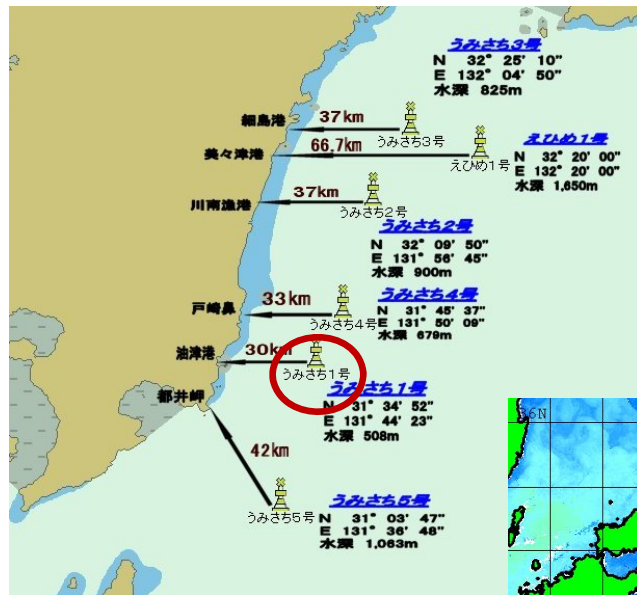
Obs
MOVE-Seto



MOVE-Seto (2km予報モデル)の再現性

流速場

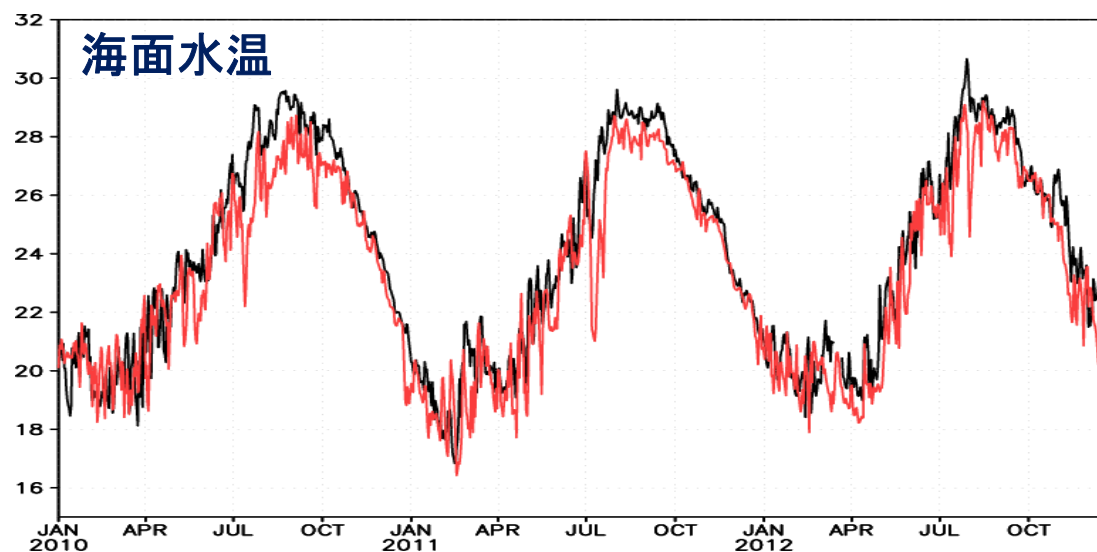
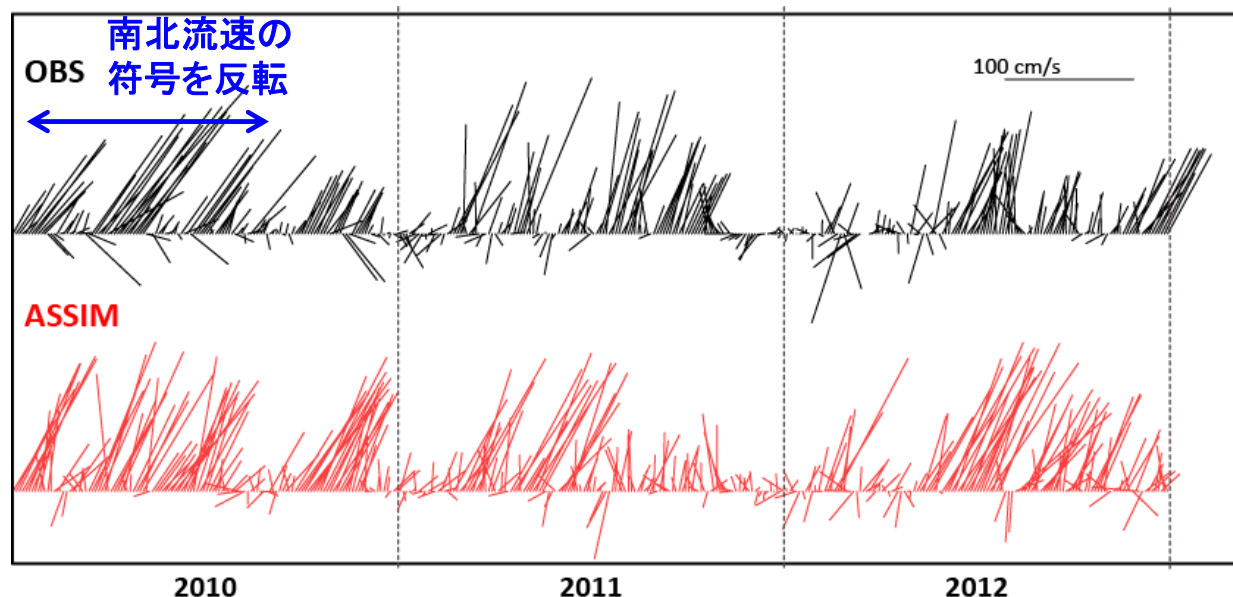
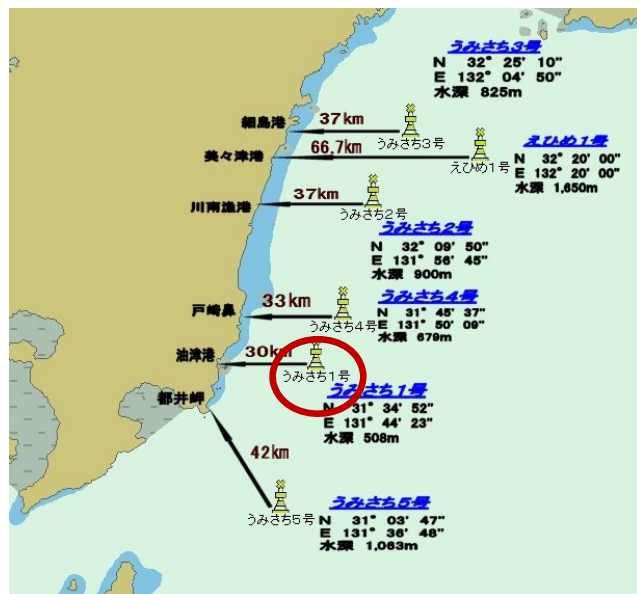
黒: 観測(うみさちブイ)
赤: MOVE-Seto



MOVE-Setoの再現性：流速場 & 海面水温

流速場・海面水温

黒：観測(うみさちブイ)
赤：MOVE-Seto

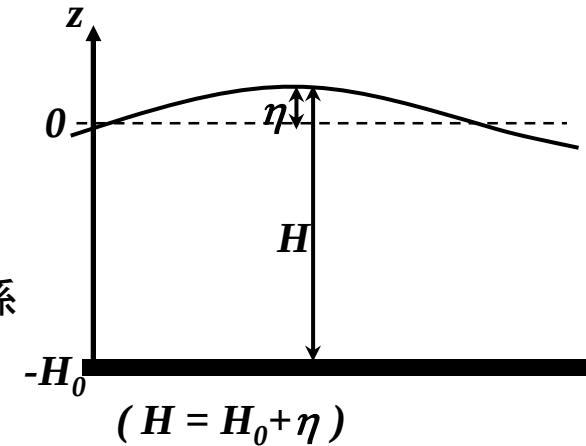


沿岸同化モデルのさらなる高度化に向けて： 流速データの同化

海洋同化における流速データの有効性(1)

渦位保存: $\Pi = \frac{f + \zeta}{H} \sim \frac{f + \zeta - \frac{f}{H_0}\eta}{H_0}$

$$\left\{ \begin{array}{l} f: \text{コリオリパラメータ} \\ \zeta: \text{相対渦度} \rightarrow \text{流速場に関係} \\ \eta: \text{海面高度} \rightarrow \text{圧力場(密度場)に関係} \end{array} \right.$$



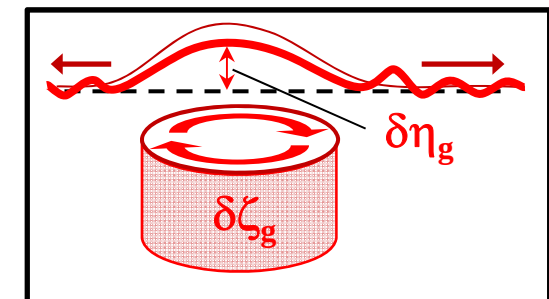
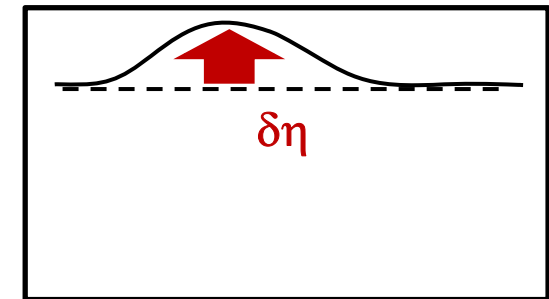
圧力場 η のみを $\delta\eta$ だけ修正(T,Sのみを同化した事に対応)すると、
 $\eta \rightarrow \eta + \delta\eta = \eta + (\delta\eta_g + \delta\eta_{ag})$

一部 $\delta\eta_g$ はその圧力に釣り合う流れ(地衡流)を作って残ることができるが、それ以外 $\delta\eta_{ag}$ は波(重力波)として消えてしまう

$$\delta\zeta_g = \frac{g}{f} \nabla^2 \delta\eta_g$$

もとの修正量 $\delta\eta$ と $\delta\eta_g$ との関係を渦位保存から考察する

$$\begin{aligned} \frac{f + \zeta - \frac{f}{H_0}(\eta + \delta\eta)}{H_0} &= \frac{f + \zeta + \delta\zeta_g - \frac{f}{H_0}(\eta + \delta\eta_g)}{H_0} \\ -\frac{f}{H_0}\delta\eta &= \frac{g}{f}\nabla^2\delta\eta_g - \frac{f}{H_0}\delta\eta_g \end{aligned}$$



海洋同化における流速データの有効性(2)

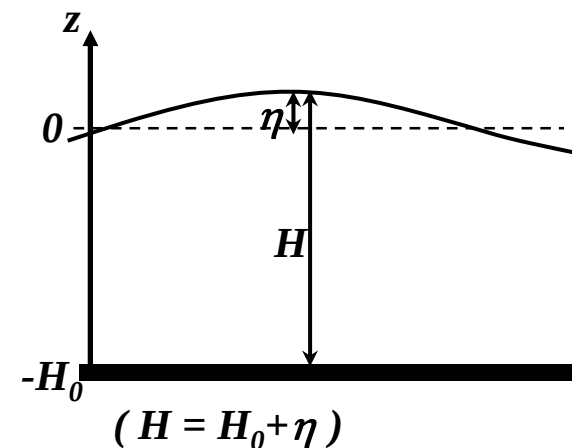
$\delta\eta_g = A \exp(ikx)$ を仮定すると、

$$-\frac{f}{H_0}\delta\eta = \frac{g}{f}\nabla^2\delta\eta_g - \frac{f}{H_0}\delta\eta_g$$

$$\Rightarrow \delta\eta_g = \frac{\delta\eta}{R^2k^2 + 1}$$

$$\text{ロスビーの変形半径: } R = \frac{\sqrt{gH_0}}{f}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 1/k \gg R & \text{のとき} & \delta\eta_g \sim \delta\eta \\ 1/k \ll R & \text{のとき} & \delta\eta_g \sim 0 \end{cases}$$



現象のスケールが**Rより十分大きい場合**、元の修正量 $\delta\eta$ は地衡流調節を通じて留まることができる(**T, Sの同化が有効**)

一方、流線関数 ψ を $\delta\psi$ だけ修正(流速場のみを同化した事に対応)した場合、

$$\psi \rightarrow \psi + \delta\psi = \psi + (\delta\psi_g + \delta\psi_{ag}) \quad \zeta = \nabla^2\psi$$

$$\text{渦位保存から、} \delta\psi_g = \frac{R^2k^2}{R^2k^2 + 1}\delta\psi$$

$$\begin{cases} 1/k \gg R & \text{のとき} & \delta\psi_g \sim 0 \\ 1/k \ll R & \text{のとき} & \delta\psi_g \sim \delta\psi \end{cases}$$

外洋の中規模現象(~100km)にはT,S同化が有効だが、沿岸スケール(~10km)では流速場の同化が重要になってくる

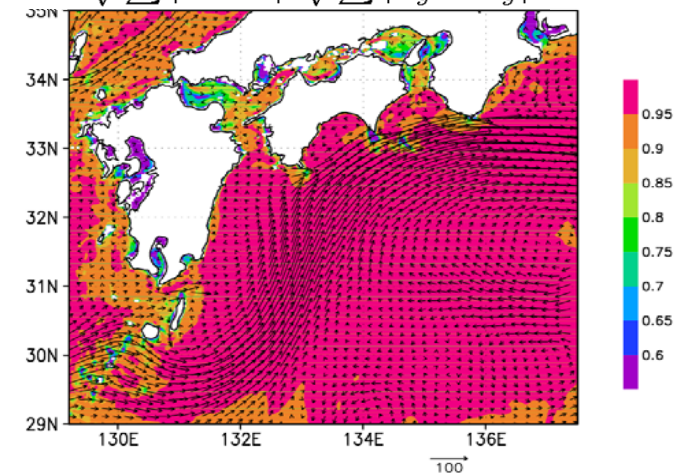
流速場の修正は、現象のスケールが**Rより十分小さい場合に有効**

流速場のデータ同化へ向けて

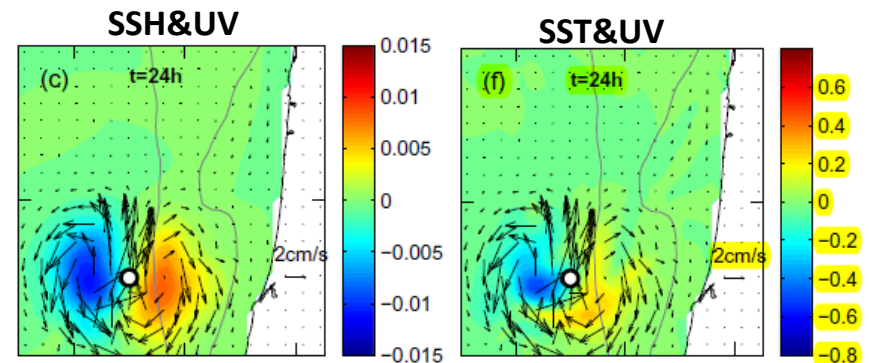
- 中規模スケール ($O(100)\text{km}$) に関しては、
水温・塩分同化が有効
→ 地衡流の推定
- 沿岸スケール現象 ($O(10)\text{km}$) については
流速データの同化が有効
→ 非地衡流の推定
- 流速同化のための検討課題
 - 制御変数の拡張 (現状はTSのみ)
#制御変数はTSのみにしてUVを同化するのもfirst stepとしてはありかも (地衡流推定のままであるが)
 - 同化サイクル (数日程度か?)
 - 外力 (風応力など) も推定すべきか?
 - 観測データの前処理
 - 適切なQC手法の確立
 - 観測誤差の与え方
 - ...etc

2kmモデル (潮汐なし) 海面流速場 ($\mathbf{v}$) と
地衡流 ($\mathbf{v}_g$) とのベクトル相関

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_g + \mathbf{v}_{ag}$$
$$\rho = \frac{\sum (\mathbf{v} - \bar{\mathbf{v}}) \cdot (\mathbf{v}_g - \bar{\mathbf{v}}_g)}{\sqrt{\sum |\mathbf{v} - \bar{\mathbf{v}}|^2} \sqrt{\sum |\mathbf{v}_g - \bar{\mathbf{v}}_g|^2}}$$



○点で北向きの流れが観測された時の
同化修正量の分布 (Yu et al. 2012)



まとめ

- 沿岸海況監視予測に向けた新しい同化システムを開発
 - MOVE-4DVAR(10km解析モデル)
 - 同化手法を4次元変分法へ拡張
 - 黒潮蛇行などの中規模変動の再現性が向上
 - 4DVARを用いることにより1か月以内の短周期変動の再現性が向上
 - MOVE-Seto(2km予報モデル)
 - MOVE-4DVAR解析値を用いてIAUにより初期化
 - 外洋の中規模現象は解析モデル(MOVE-4DVAR)の場を良く反映し、さらに2km特有の沿岸現象を表現
 - 異常潮位の再現にも成功
- データ同化の対象は依然として外洋中規模現象
- 沿岸域のさらなる高精度化のためには沿岸スケールのデータ同化が必要
 - 流速場推定が重要 → 地衡流推定から非地衡流推定へ
 - 未活用データの利用
 - 流速データ(HFLレーダ、ブイ)の活用
 - 潮位計
 - 海底圧力計
 - 新型衛星海面高度計(SWOT, COMPIRA)