

海洋における データ同化の現状と将来展望

石川洋一

海洋研究開発機構

気候変動適応技術開発プロジェクトチーム

(兼)地球情報基盤センター 統融合情報研究開発グループ

データ同化とは

観測データと数値モデルを組み合わせて
データセットを作成すること

観測データからみると…

数値モデルを利用した4次元的な内挿／外挿／グリッド化
異なる種類の観測データの統合

数値モデルからみると…

モデルの入力パラメータ(初期条件、境界条件など)の
チューニングの自動化

データ同化で何ができるか？

- データ同化とは観測データと数値モデルを組み合わせて、現実的なデータセットを作るための手法
 - ▣ 複数の観測データを統合した時系列データセットを作成する
 - ▣ 数値モデルで用いているパラメータなどの最適化を観測データをもとにして行う
 - ▣ 数値予報のための初期条件、境界条件を作成する
 - ▣ 観測システムの設計のための評価、改善にむけた情報提供

データ同化とCFD/EFD融合

- 数値モデルに観測データを同化する
 - ▣ モデルが再現する空間に対して観測データを射影
 - ▣ 必ずしも現実を再現することを目的としない
 - ▣ 予測がうまくいくように
 - ▣ 数値モデルによる観測データのフィルタリング
- CFD/EFD融合とデータ同化は同じ？
 - ▣ データ同化手法は数値天気予報の初期値化のために発展してきた
 - ▣ 海洋では必ずしも予測のためだけでないデータ同化研究が行われてきた

海洋におけるEFD



産総研中国センター資料より

海洋におけるEFD

工業技術院中国工業技術試験場(現産業
技術総合研究所中国センター)@広島
昭和48年完成
平成22年閉鎖

水平1/2000・鉛直1/159模型

潮流の再現や染料を使った拡散実験など
が行われた

1年分を2日半できた



産総研中国センター資料より

データ同化で何ができるか？

- データ同化とは観測データと数値モデルを組み合わせて、現実的なデータセットを作るための手法
 - ▣ 複数の観測データを統合した時系列データセットを作成する
 - ▣ 数値モデルで用いているパラメータなどの最適化を観測データをもとにして行う
 - ▣ 数値予報のための初期条件、境界条件を作成する
 - ▣ 観測システムの設計のための評価、改善にむけた情報提供

データ同化プロダクトの作成

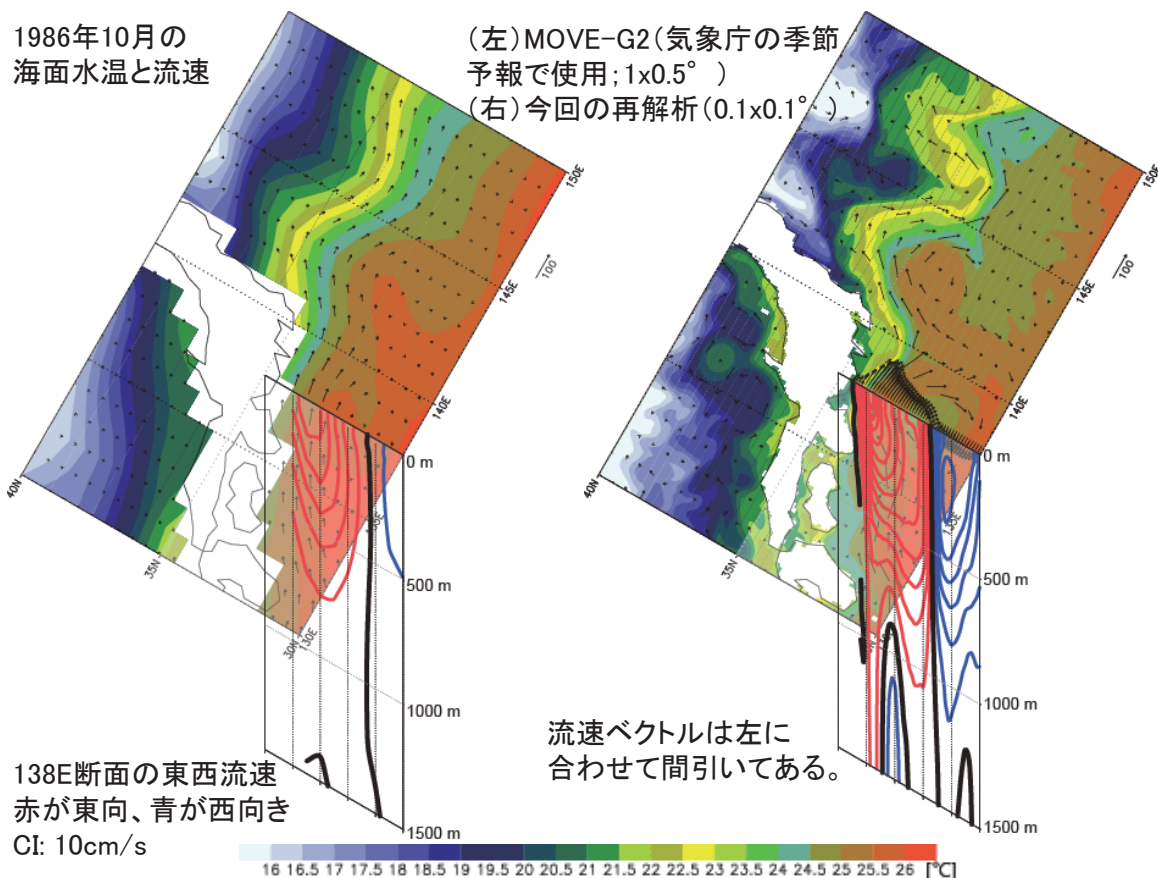
- 目的に応じて観測データ・数値モデル・同化手法を選択する必要がある
 - ▣ どのくらい観測データが使えるか
 - ▣ 再現したい現象のスケールはどのくらいか
 - ▣ 利用できる計算機資源はどれだけか
- 観測データが豊富にあれば簡単な同化手法でも良い推定値が得られることが多い
- 数値モデルが複雑になると、表現される現象が多様になるので、制御するのが難しい

過去の海洋を再現する

- 海洋のどのような特徴を重視するか？
- 主要な海流・特徴的な変動
 - ▣ 黒潮の幅、中規模変動の空間スケール: $O(100\text{km})$
 - ▣ 非線形性、時間スケール～予測可能性: $O(30\text{日})$
- 循環の駆動源は大気からの強制力
 - ▣ 海表面での運動量フラックス、熱フラックス
 - ▣ 内部での発熱・吸熱は無い
 - ▣ 熱、塩の保存

ESTOC vs. FORA-WNP30

- ESTOC (Estimated State of Global Ocean for Climate Research)
 - ▣ 4次元変分法海洋長期再解析(1957年～2011年)
 - ▣ 同化ウィンドウは55年間
 - ▣ 水平解像度1度(中規模変動を解像しない)
- FORA-WNP30 (4-dimensional ocean reanalysis western North Pacific 30years)
 - ▣ 4次元変分法海洋長期再解析(1982年～2012年)
 - ▣ 同化ウィンドウは10日間
 - ▣ 水平解像度1/10度(中規模変動を解像する)



FORAの概要

- FORA-WNP30
 - ▣ Four-dimensional variational Ocean ReAnalysis – Western North Pacific 30years
- 海洋長期再解析プロジェクト
 - ▣ JAMSTEC地球情報基盤センターと気象研究所海洋・地球化学研究部との共同研究
 - ▣ MOVE-4DVARを用いた約30年分の高解像度海洋長期再解析データを作成
- 地球シミュレータを使用。
 - ▣ H27地球シミュレータ特別推進課題として実施(128ノード占有)
 - ▣ 期間: Jan1982 – Dec2014 (33 years)

再解析(reanalysis)とは

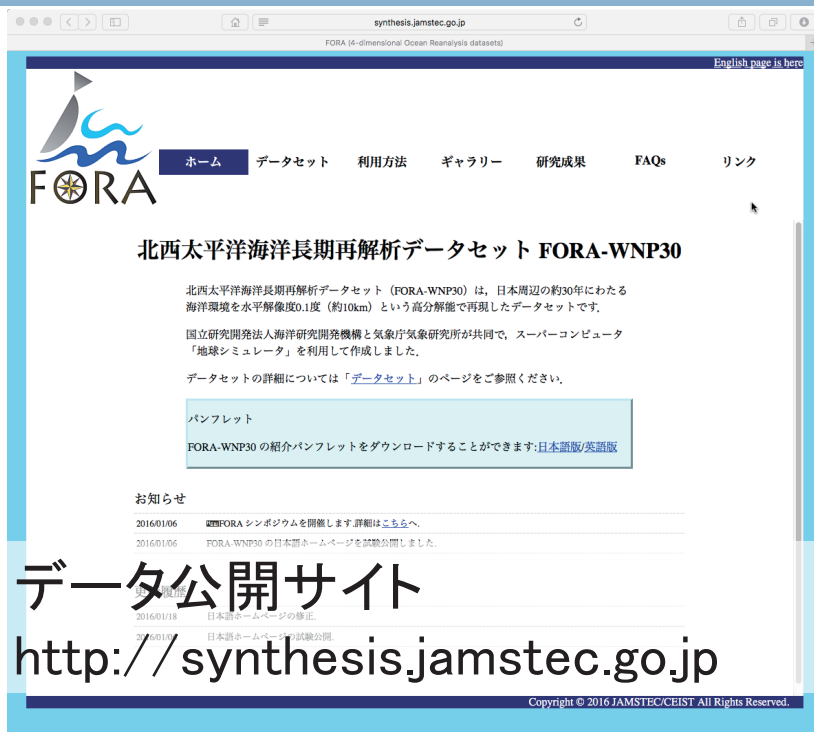
- 現業的な予報では解析予報サイクルを一定間隔でまわす
 - ▣ 観測データを一定量ためて最新のデータを使った予報をくりかえす
- 再解析とは過去のデータに対して解析予報サイクルを適用する
 - ▣ つまり解析を過去にさかのぼってやり直すから“再”解析

ここでは気象庁気象研究所が開発した現業むけ海洋データ同化・予測システムを利用して日本周辺の**高分解能長期再解析**を行い、データセットを作成する

同化システムの概要

- MOVE-4DVAR WNP (Usui et al., 2015):
 - ▣ 鉛直結合EOFモード (Fujii&Kamachi 2003)
 - ▣ 1500mまでの水温、塩分を最適化
 - ▣ 同化手法: 4DVAR, 同化期間: 10日
 - ▣ 前処理付き準ニュートン法 (POpULar; Fujii 2005)
 - ▣ Incremental Analysis Updates (IAU) (Bloom et al. 1996)
 - 3-day IAU period
- 観測データ:
 - ・現場水温・塩分 (WOD13, GTSP)
 - Argo フロート、船舶、ブイなど
 - ・海面水温 (MGDSST)
 - 衛星、現場データを融合した日別格子点値。
0.25° × 0.25° (1982~)
 - ・衛星海面高度アノマリー
 - Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2,
ERS-1, ERS-2, Envisat, GFO, Cryosat-2
(1993~)

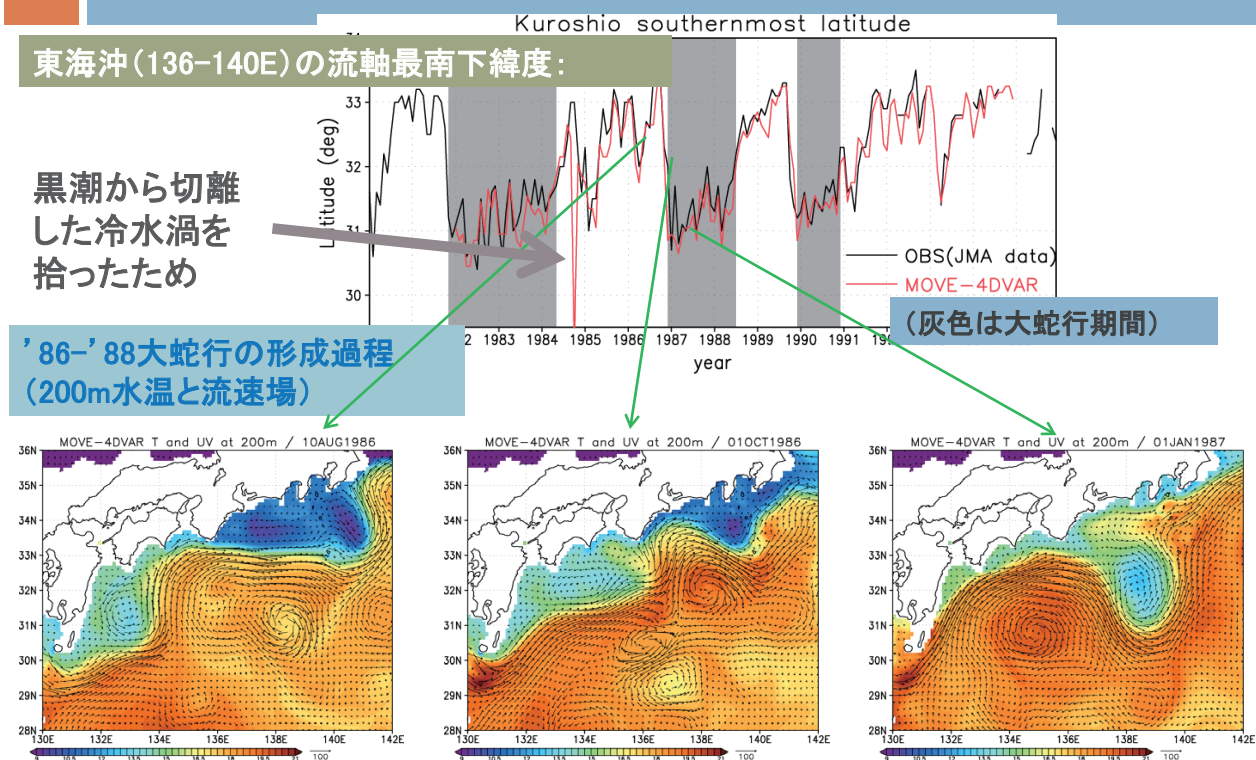
FORAの概要



データ公開サイト

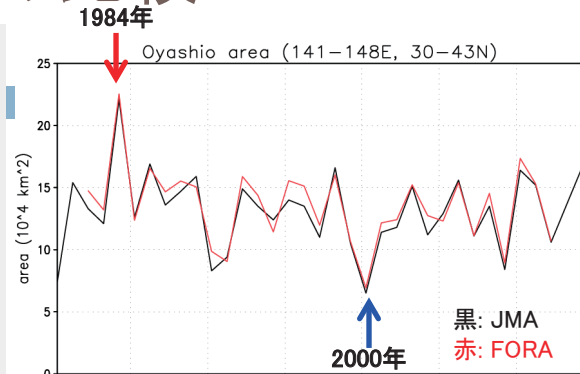
<http://synthesis.jamstec.go.jp>

日本南岸黒潮



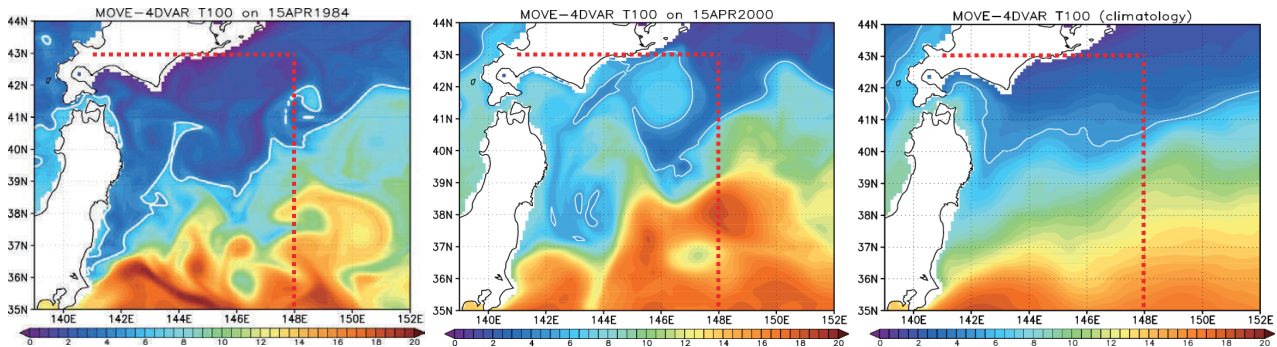
親潮面積の比較

- 親潮面積(右図)と比較。
 - 定義は、148° E以西、43° N以南の領域で、水深100m水温が、5°C以下の面積。
- 1984年は異常南下。親潮面積が最も大きかった年。
- 2000年は、親潮面積が小さい。
- 両年の水温分布を比較(下図)
 - 1984年は三陸沿岸まで低温の水塊が南下して広がる
 - 2000年は、釧路沖でとどまる。



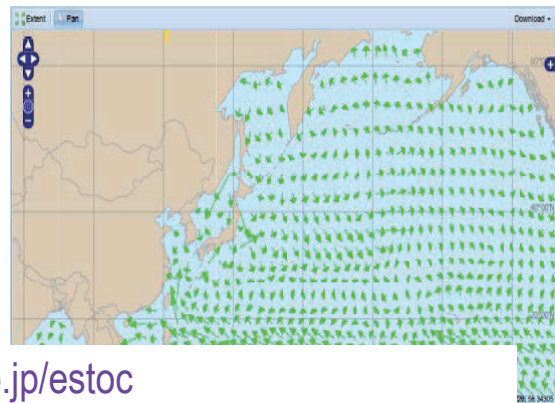
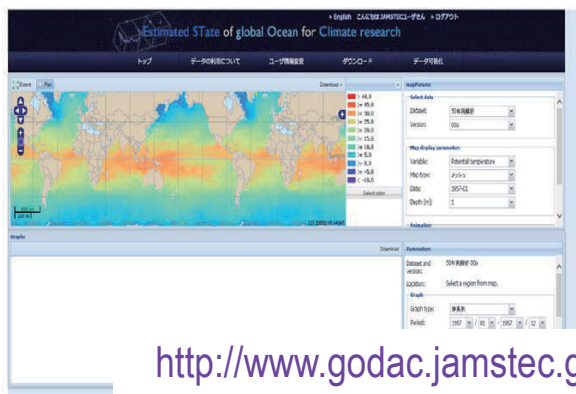
親潮面積は、JMAと同程度

100m水温 白線は5°Cの等温線を示す(親潮の指標水温)左:1984/04, 中:2000/04, 右:平年値4月



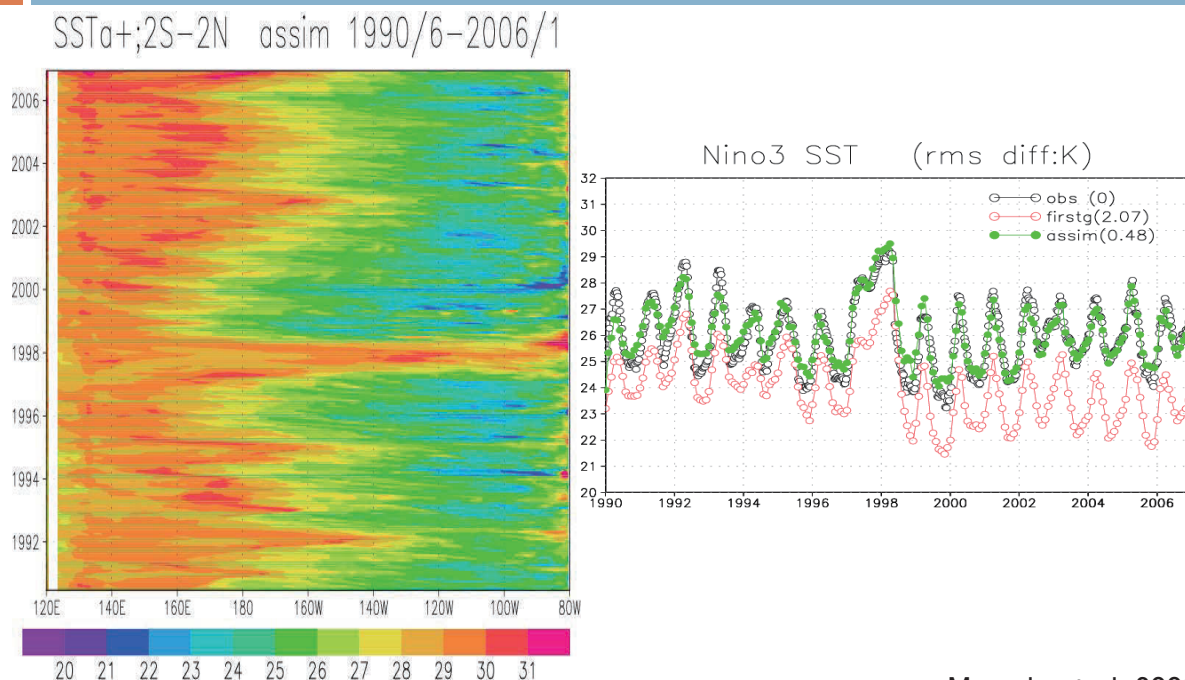
ESTOCの概略

- Estimated State of Global Ocean for Climate Research
- 気候変動研究のための四次元変分法海洋環境再現データセット



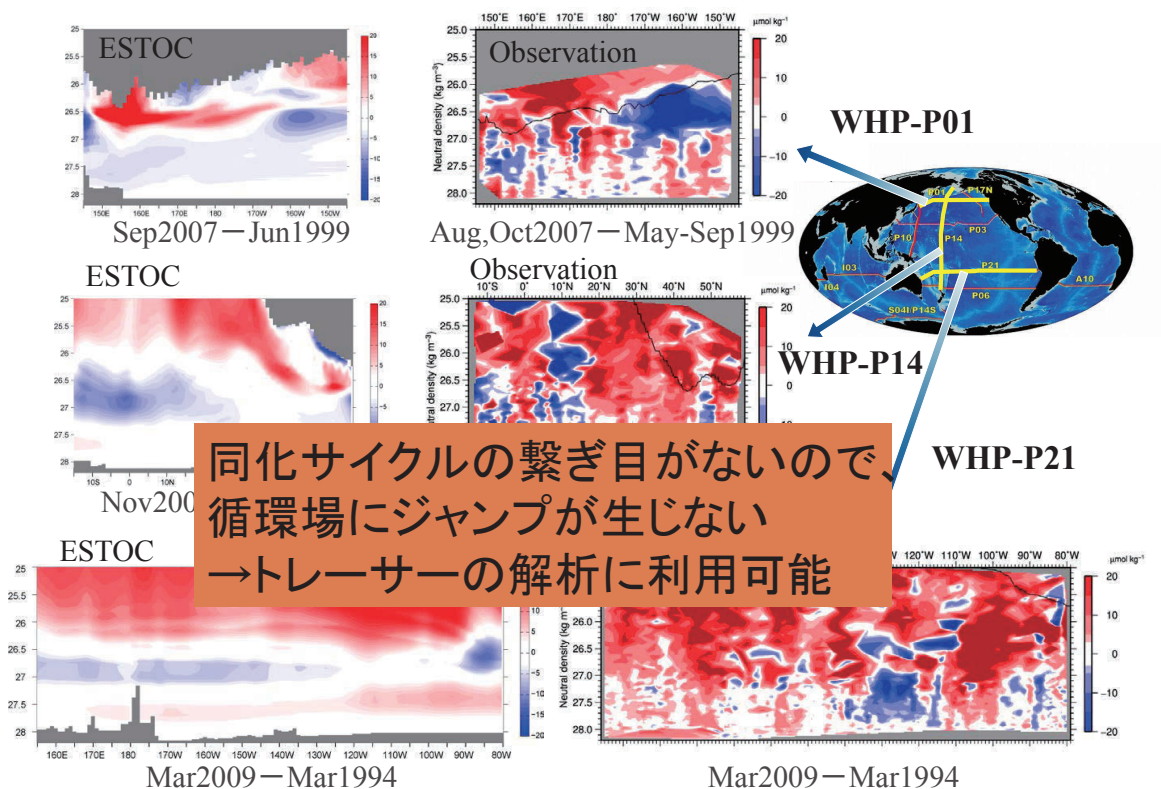
<http://www.godac.jamstec.go.jp/estoc>

太平洋熱帯域における海面水温の時系列



Masuda et al. 2008

ESTOC:溶存無機炭素の分布



FORA vs. ESTOC

- 数値モデルの方程式系と同化手法はほぼ同じ
- 観測データもほぼ似たようなものを利用
- モデルの解像度と同化期間が異なる
- 制御変数も異なる
 - ▣ FORA:10日毎の初期条件
 - ▣ ESTOC:海面フラックスの時系列
- 特長が違うデータセットができる

| | 中規模変動 | 熱などの保存性 |
|-------|-------|---------|
| FORA | ○ | × |
| ESTOC | × | ○ |

今後の展開

- 予測のための利用
 - ▣ 高分解能化:沿岸域の再現性向上
 - ▣ 確率的な表現:アンサンブル予測・同化手法
 - ▣ 気象における利用に近くなる
- 過去再現のための利用
 - ▣ 高分解能化?:非線形性が強くなると制御が難しい
 - ▣ 保存性をどこまで追求するか?
 - ▣ グリーン関数法によるパラメータ推定

グリーン関数法

Menemenlis et al. (2005) optimized some important parameters in OGCMs by using the Green's function approach.

✓少数のパラメータ推定には向いている

✓評価関数の勾配をパラメータ摂動を与えて計算:

$$\frac{\partial M}{\partial a} = \frac{M(a^0 + a) - M(a^0)}{|a|}$$

✓Control experiment (by using a^0) and perturbation experiments give the right hand side.

✓The cost function is rewritten as

$$J \equiv \frac{1}{2} a^T B^{-1} a + \frac{1}{2} (M(a^0 + a) - y)^T R^{-1} (M(a^0 + a) - y)$$

✓For J to be minimum,

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial a} &= B^{-1} a + \left(\frac{\partial M}{\partial a} \right)^T R^{-1} (M(a^0 + a) - y) \\ &= B^{-1} a + \left(\frac{\partial M}{\partial a} \right)^T R^{-1} \left(M(a^0) + \frac{\partial M}{\partial a} a - y \right) = 0 \end{aligned}$$

✓パラメータの修正量は解析的に求められる

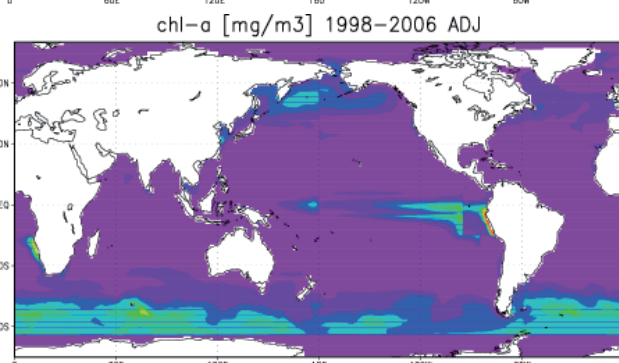
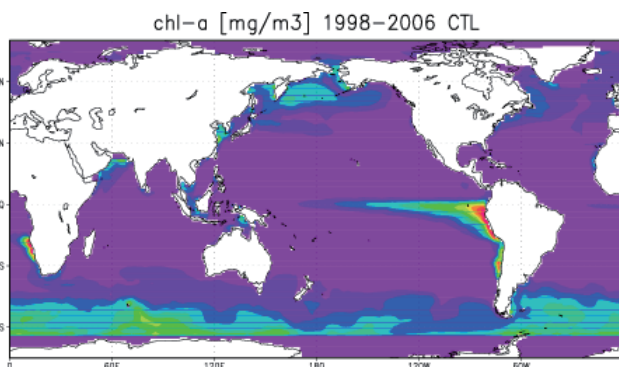
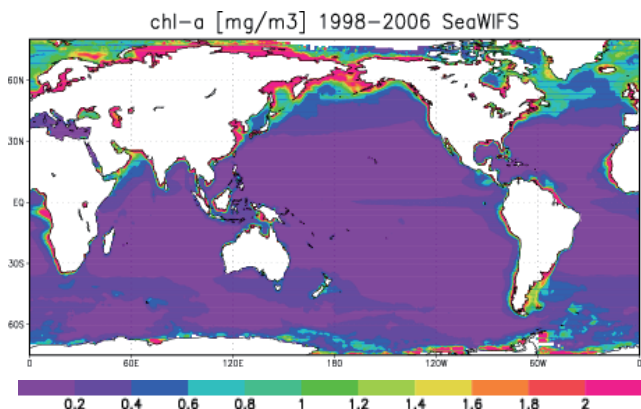
$$a^1 = - \left[B^{-1} + \left(\frac{\partial M}{\partial a} \right)^T R^{-1} \left(\frac{\partial M}{\partial a} \right) \right]^{-1} \left[\left(\frac{\partial M}{\partial a} \right)^T R^{-1} (M(a^0) - y) \right]$$

M: model state, a: increments of parameters, a^0 : initial values of parameters, B/R: error covariant matrices, y: observations, a^1 : optimized values for a

海洋低次生態系に適用した例:

(left) SeaWiFS data, (right) control and optimized experiments

- Broad improvement (although small)
- Large bias in the eastern equatorial Pacific seen in the control experiment is reduced in the optimized case.
- RMSEs of time series decrease by $\sim 30\%$ in the tropics and by $\sim 15\%$ in the subtropics.



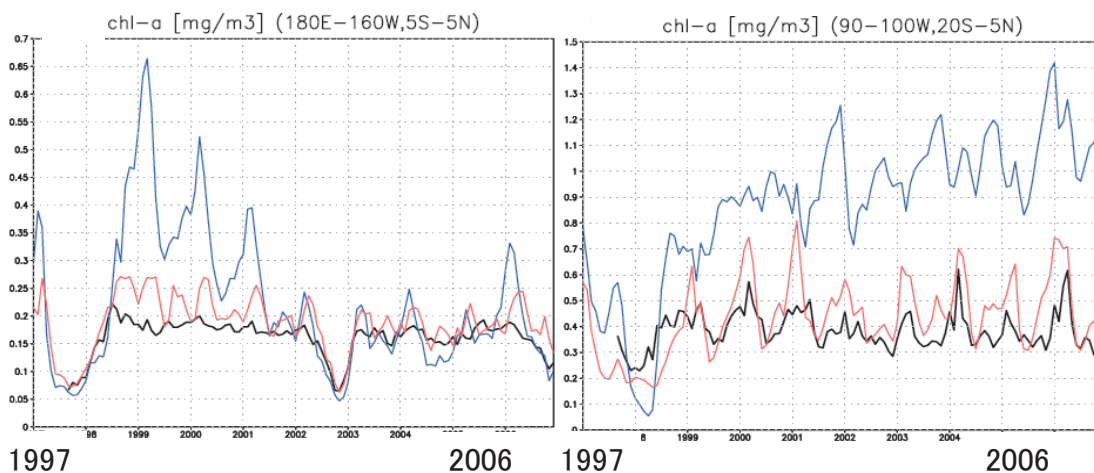
海洋生態系モデルに適用した例:

(left) central ant (right) eastern tropical Pacific (180°E–160°W, 5°S–5°N; 90–100°W, 20°S–5°N)

blue: control experiment, red: optimized experiment, black: SeaWiFS data

• In these regions (ones of the most improved regions), the mean and interannual variability of the surface chlorophyll concentration are quantitatively reproduced in the optimized experiment.

• By analyzing the NEMURO variables and the physical fields in the 4DVAR reanalysis, the interannual variability in phytoplankton in these regions is generated by the variability in nutrients, which is attributed mainly by the zonal advection change, not by the vertical one.



今後の展望

□ パラメータ推定

- ▣ モデルの改善を通じて、過去再現の精度向上
- ▣ 予測精度も間接的に向上
- ▣ 大量のパラメータ推定はグリーン関数法では難しい？

□ どのような観測データが得られるか？

- ▣ 新しい観測ツール(人工衛星やARGOなど)が計画されると同化手法の改良も進む
- ▣ データ同化から観測への提案