

データ同化による 海洋環境の再現とその活用

石川洋一 海洋研究開発機構

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ための手法

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

データ同化でできること

- ▶ 複数の観測データを統合して、現実の気象・海洋場を再現した時系列データセットを作成する
- ▶ 数値予報のための初期条件、境界条件を作成する
- ▶ 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
- ▶ 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

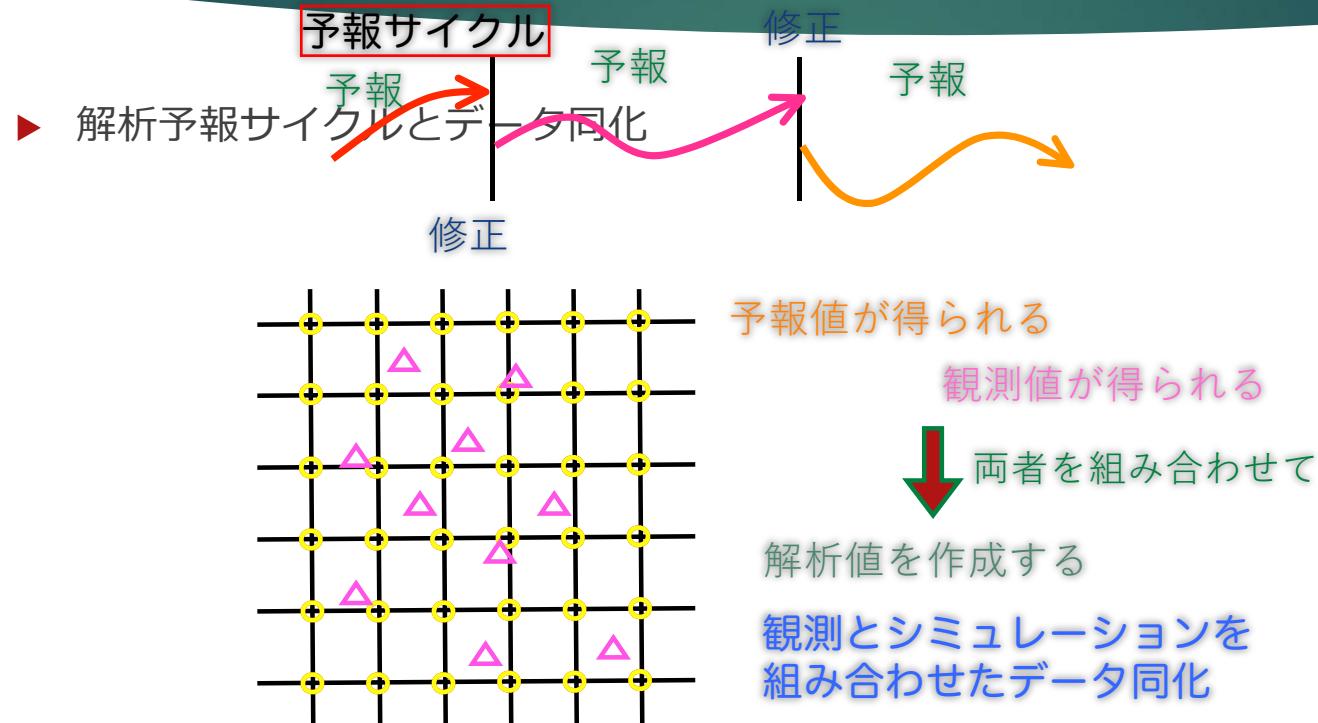
海を再現する？

- ▶ コンピュータの中に海をつくる
- ▶ コンピュータ：数字の集合
- ✗ 魚・イルカ・クジラ
- ✗ 船・潜水艇
- 水温・塩分・流速などの値：物理環境
- 植物プランクトン・動物プランクトン・栄養塩の量

何のために？

- ▶ 海で行われている活動の基本情報を得るため
 - ▶ 海運業：海流、波浪
 - ▶ 水産業：水温、餌環境、海流
 - ▶ 沿岸防災：高波・高潮、潮位、海流
- ▶ 海が気候に与える影響を評価するため
 - ▶ 大気全体を 1°C あげるのに必要な熱エネルギーと 2.5m の海水を 1°C あげるのに必要なエネルギーがほぼ等しい
 - ▶ 大気の1600倍のエネルギーを蓄えることができる

再解析(reanalysis)とは？



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

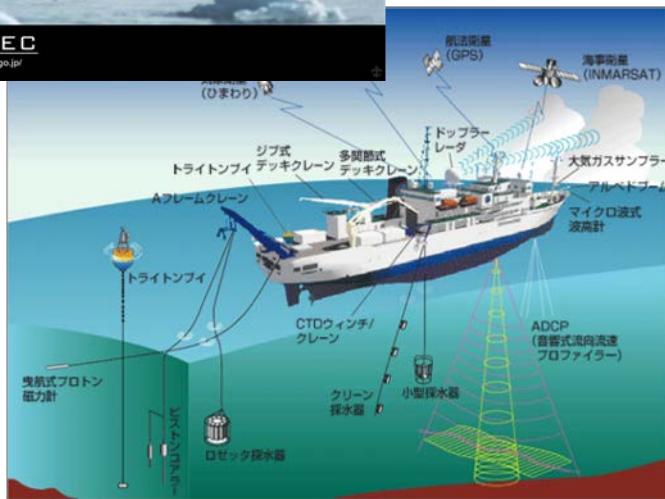
海洋循環場再現のためのデータ同化

- ▶ 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)
- ▶ <http://www.godac.jamstec.go.jp/fora/j/>

観測データ

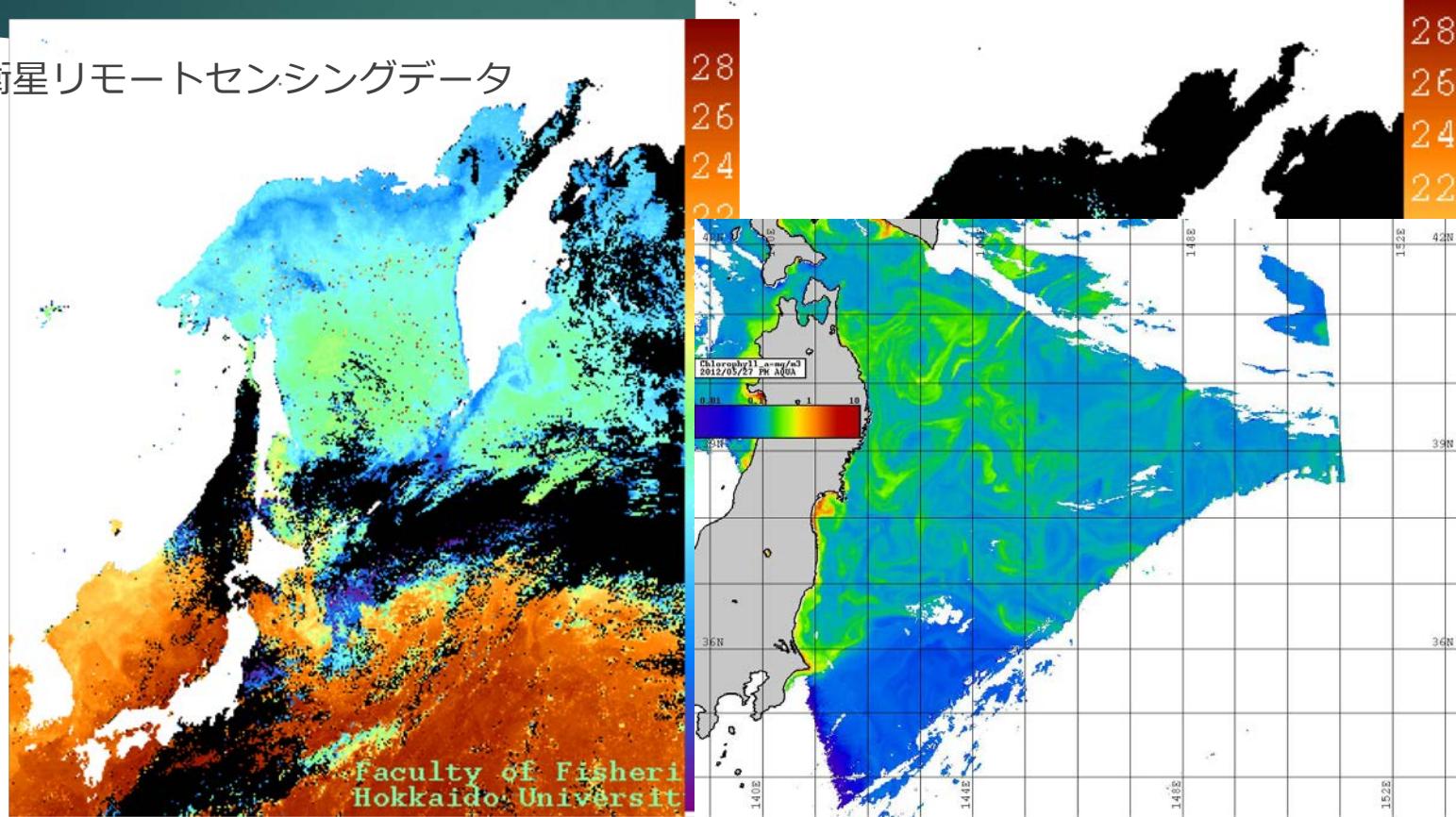


JAMSTEC
<http://www.jamstec.go.jp/>



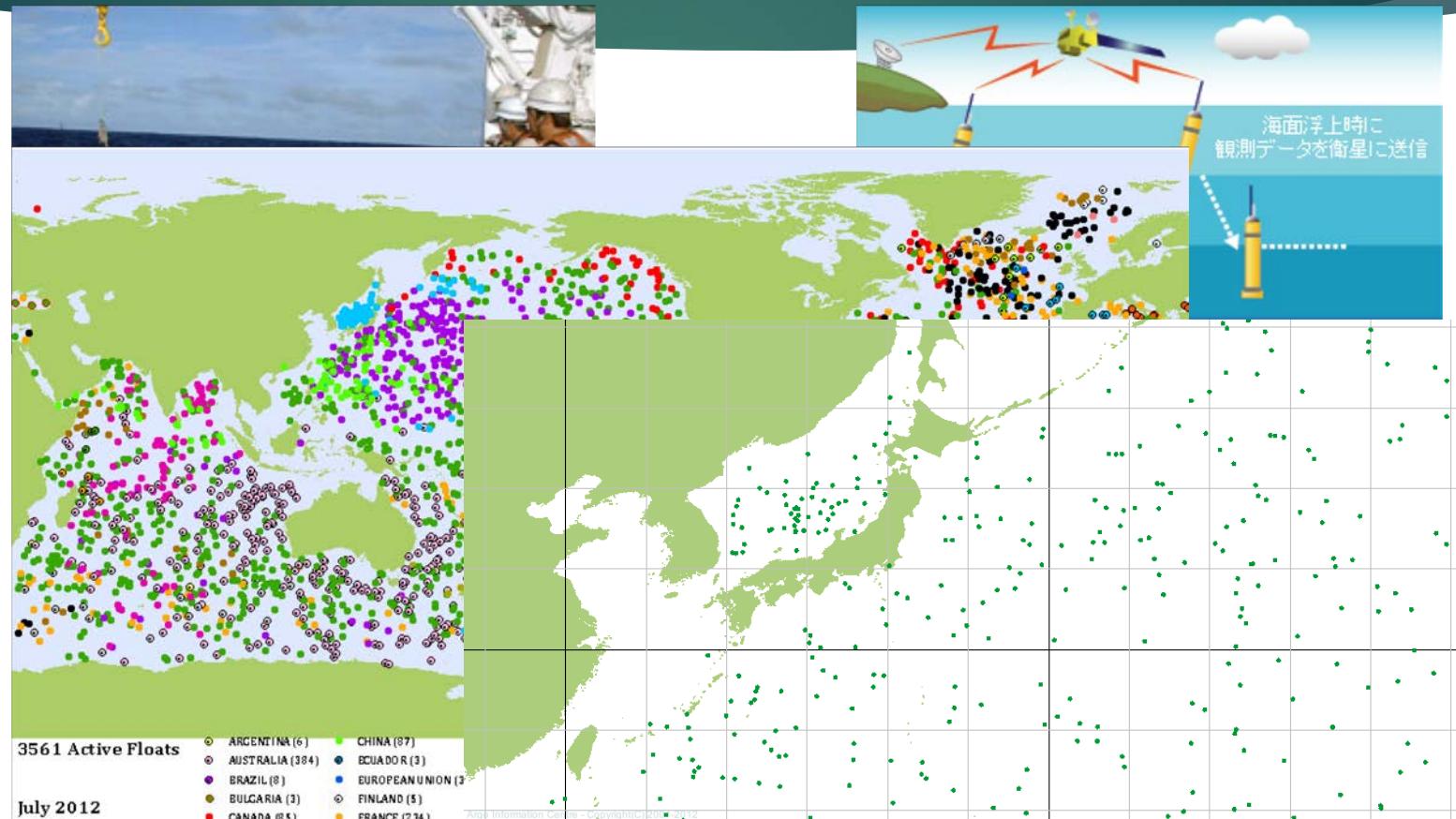
観測データ

- ▶ 人工衛星リモートセンシングデータ

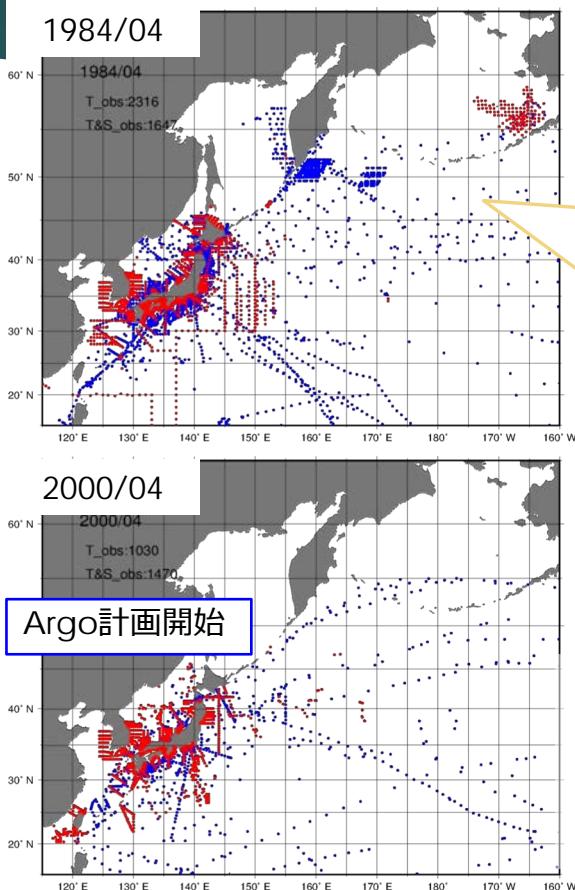


観測データ

▶ ARGOフロート：自動昇降式の観測



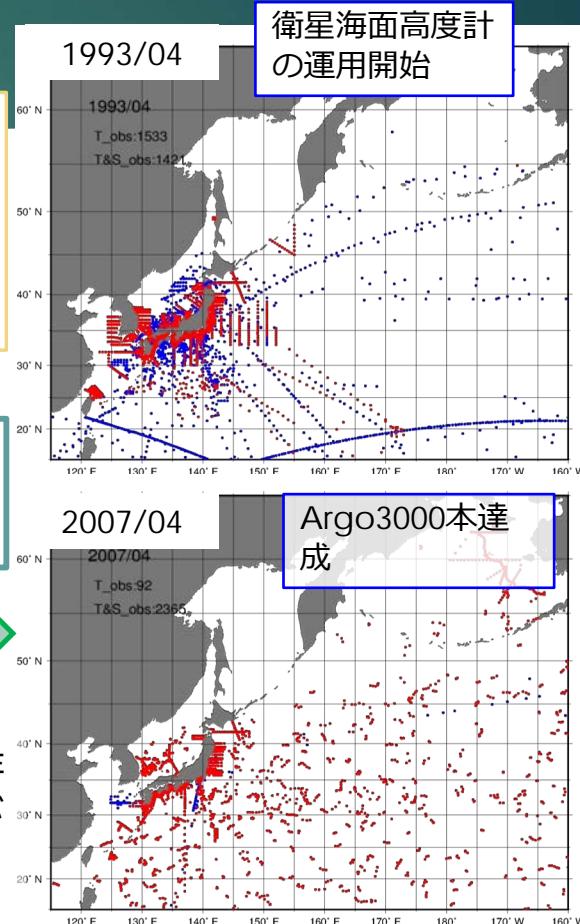
現場観測データ数



日本近海は、
1980年代
も現場観測
のデータは
多い。

- Tのみ
- TS

Argoフロー
トによる外洋
のTS観測数が
増加



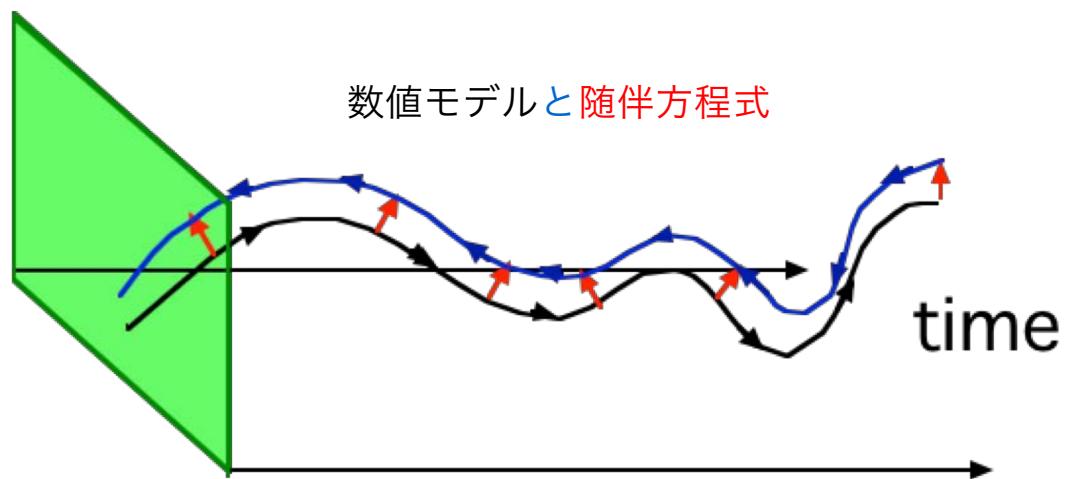
4次元変分法(adjoint法)

$$J = (c - c^f)^T B^{-1} (c - c^f) + (Hx - y)^T R^{-1} (Hx - y)$$

$$L = J + \langle \lambda, Ax \rangle$$

(制御変数cは初期・境界条件、パラメータなど)

数値モデルの前方積分とadjoint方程式($\lambda^n = A^* \lambda^{n+1}$)
の後方積分を繰り返して、制御変数の最適解を求める。





JAMSTEC

国立研究開発法人
海洋研究開発機構

JAPAN AGENCY FOR MARINE-EARTH SCIENCE AND TECHNOLOGY

● アクセス ● お問い合わせ

ENGLISH

Google カスタム検索



トップページ

JAMSTECについて

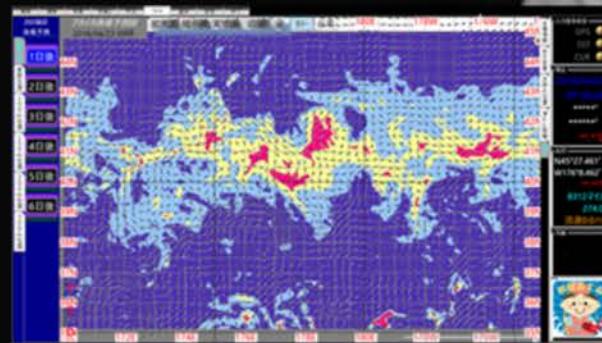
プレスリリース

広報活動

ミュージアム

データベース

キッズ



提供: JAFIC

プレス
リリース

2018/05/31

アカイカ漁場の予測システムを共同開発、漁業者へ配信開始
～学術研究成果の社会実装によりスマート漁業を実現へ～



レイアウト選択

一般の方

研究者・学生の方

メディアの方

企業の方

サムネル検索

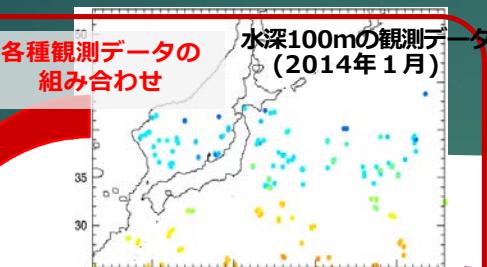
Team KUROSHIO

今週の一物

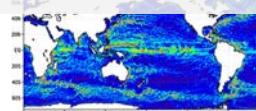
漁場探索シミュレーションの社会実装実現（地域との連携）

〈予測技術開発～産業活性化と水産資源保全へ一気通貫展開〉

観測データと大規模シミュレーションから
海洋環境データセットを構築



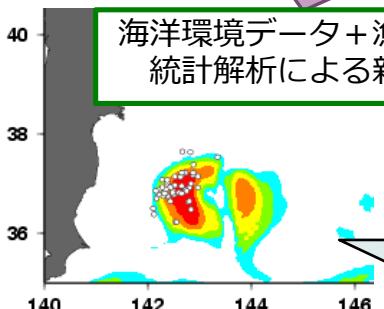
大規模シミュレーション



(2014年1月)

水深100mの海洋環境データ

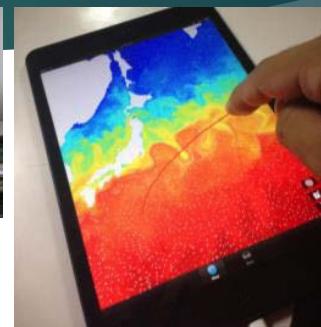
海洋環境データ+漁獲量データから
統計解析による新価値情報創出



海洋環境情報と
漁獲量情報を組
み合わせた好適
漁場の推定
(機械学習を含む)

2018.5.31 プレスリリース
アカイカ漁場の予測システムを共同開発、漁業者へ配信開始
～学術研究成果の社会実装によりスマート漁業を実現へ～

漁業者にむけた情報提供



アカイカweb
サイト



海のDIOT

衛星通信
(インマルサットFB)
アカイカ漁船

操業位置、漁獲量

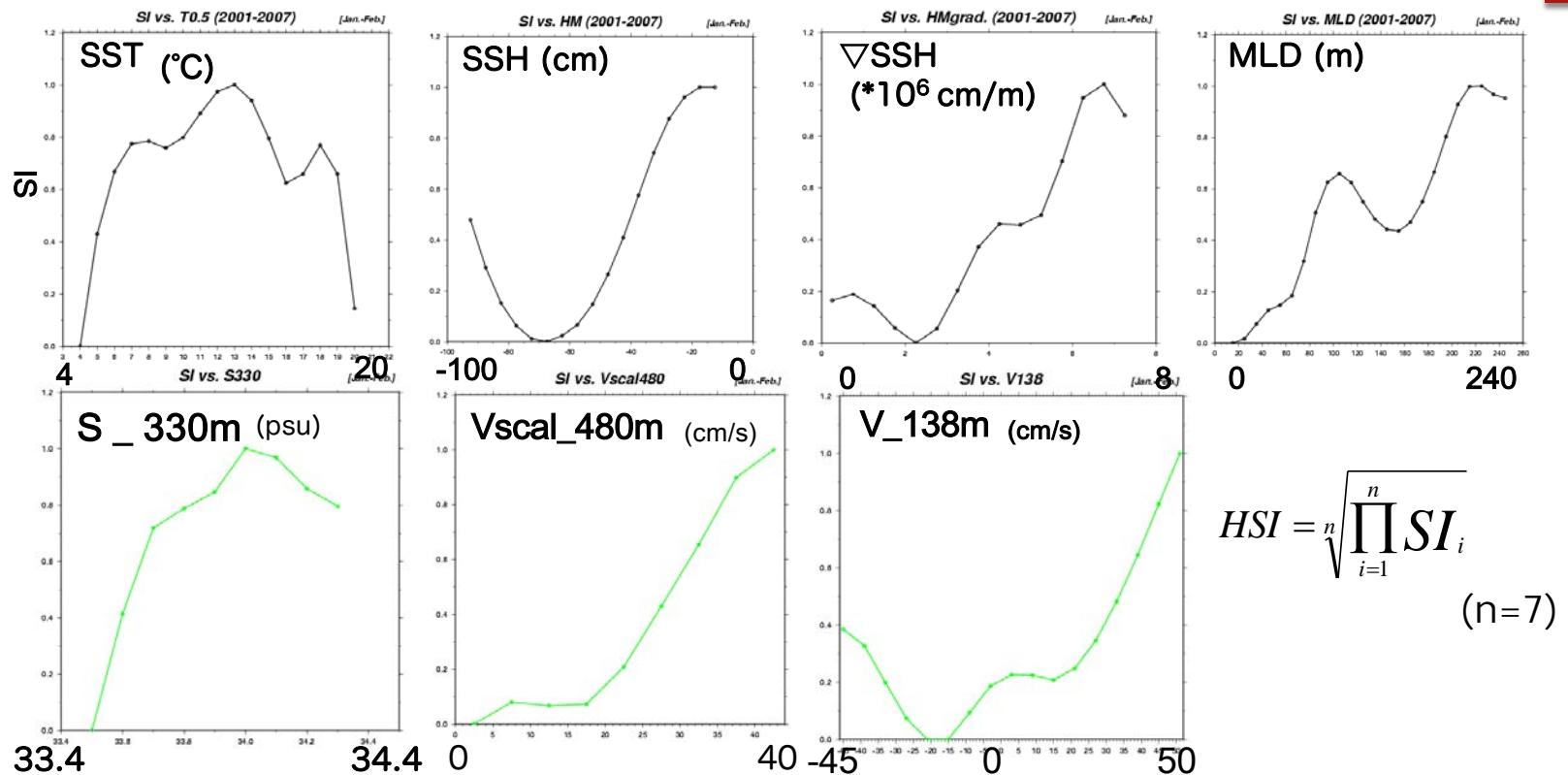
漁業の効率化が図られることにより、
漁船の燃油消費量の削減につながった。

漁業情報サービスにおける海洋データの活用

- ▶ 外洋における漁船漁業のコストのうち燃油代の占める割合は非常に高く、なかでも漁場探索にかけるコストの低減は重要な課題である
- ▶ 漁場探索の効率化において、海洋環境情報は役割を果たすことが期待され、好適漁場マップなどはその好例である
- ▶ 一方で、海洋観測データから得られる情報はそのままでは十分な質・量とは言い難く、使える情報を提供するためにはいくつかの知見を加えた加工が必要である
- ▶ 有益な情報として利用されるためには、海洋現象や生物の行動様式などを考慮して、適切な時空間解像度、予測期間などいくつかの条件を満たす必要がある
 - ▶ 今回のケースでは、空間解像度（10km程度）、時間解像度(1日)、予測期間（数日）、亜表層水温も必要

段階的なモデル・データの統合

- ▶ 最終プロダクトはアカイカの好適漁場を10km・1日スケールの解像度で数日先まで予測したマップ
 - ▶ 利用可能なモデル・データを単純に統合してもマッピング・予測は難しい
- ▶ Step1: 海洋環境データと物理法則に従った数値モデルを組み合わせて統合
 - ▶ データ同化による過去の海洋環境の再現
- ▶ Step2: 統合された海洋環境データと水産データを組み合わせて好適漁場推定モデルの構築
- ▶ Step3: 観測データを用いた海洋環境の現況解析(初期値化)と数値モデルによる物理環境の予測
- ▶ Step4 : 予測された海洋環境場をもとにした数日先の好適漁場の推定



表面水温(SST)、海面高度 (SSH)、海面高度の偏差(∇SSH)、混合層深度 (MLD)、さらに統計的に選択した変数 (330m深の塩分、480m深の水平絶対流速、138m深のv方向流速を用いたモデルを作成

データ同化でできること

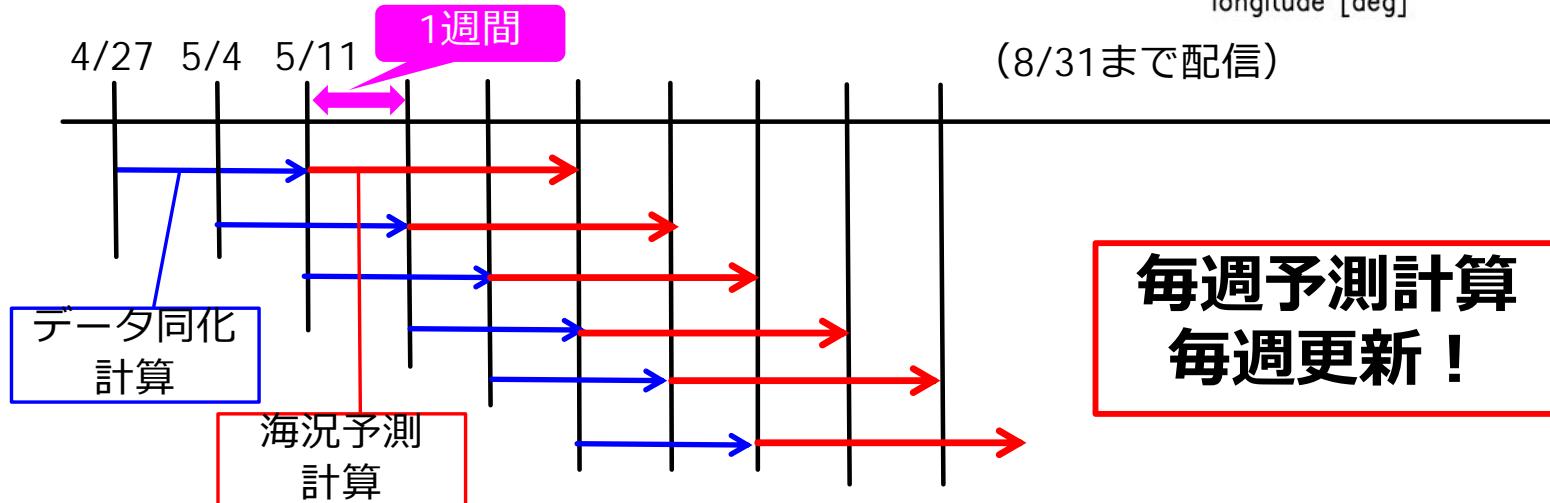
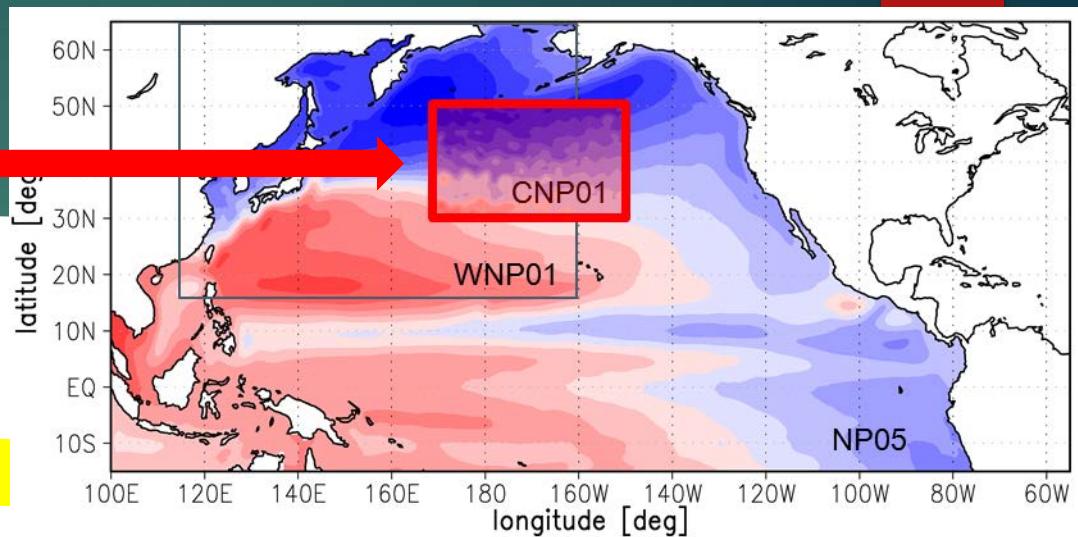
- ▶ 複数の観測データを統合して、現実の気象・海洋場を再現した時系列データセットを作成する
- ▶ 数値予報のための初期条件、境界条件を作成する
- ▶ 数値モデルで用いているパラメータなどの最適化を観測データをもとにして行う
- ▶ 観測システムの設計のための評価、改善にむけた情報提供

海況予測システムSKUIDs

予測領域

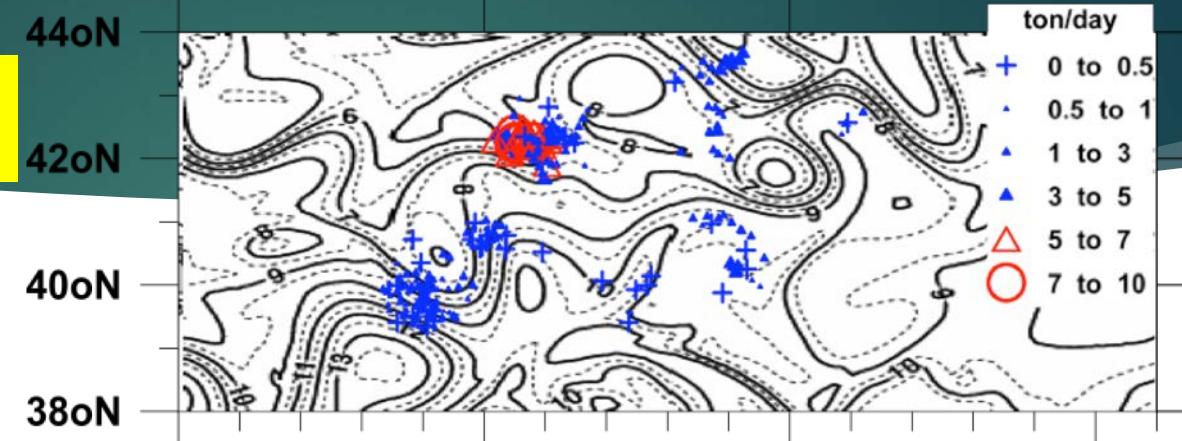
[170E-150W(210E),
30N-50N] 0.1度格子

2016年夏イカ漁配信スケジュール

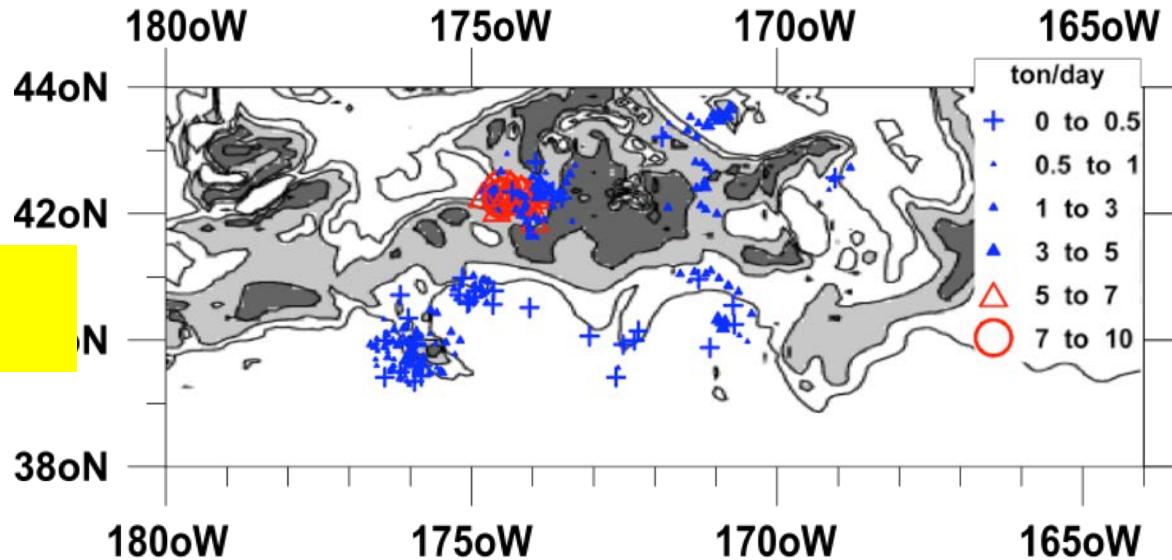


答え合わせ (2012年夏イカ漁)

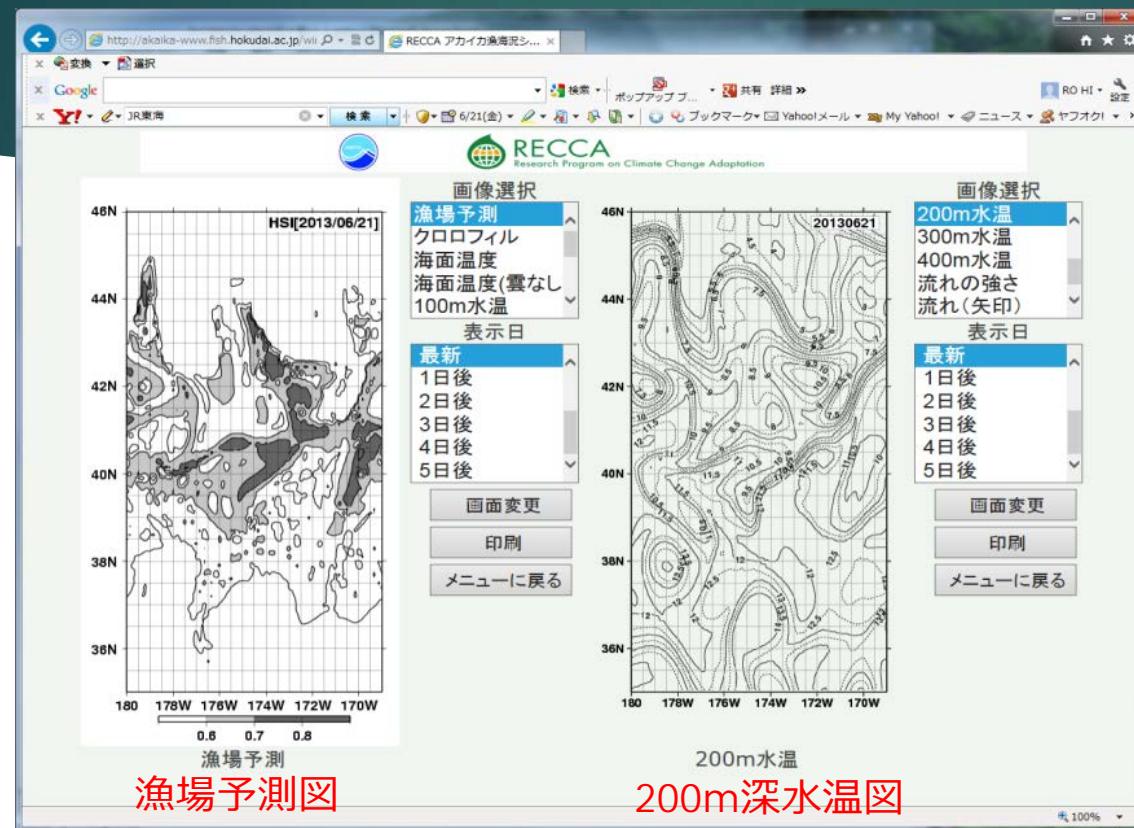
深さ400m 水温
(2012年7月20日)



HSI予測マップ
(2012年7月20日)



アカイカ漁海況情報配信ウェブサイト



漁場予測図

200m深水温図

いか釣り漁船から
ウェブページを閲
覧



階層的な観測データの活用

水産データ

海洋環境の関数として漁獲量モデルを構築することにより、観測数の少なさをカバー
環境データのマッピング・予測を活用することで、漁場のマッピング・予測ができる

観測データの数: $O(10^3) \sim O(10^4)$ → モデル化 → マッピング・予測: $O(10^6) \sim O(10^7)$

海洋環境観測データ

数値モデルと組み合わせることにより、離散的に得られた海洋観測データの時空間的な
補完・マッピング

観測データの数: $O(10^5) \sim O(10^6)$ → データ同化によるマッピング : $O(10^8) \sim O(10^9)$

階層的な観測データの活用

水産データ

海洋環境の関数として漁獲量モデルを構築することにより、観測数の少なさをカバー
環境データのマッピング・予測を活用することで、漁場のマッピング・予測ができる

民間企業による水産情報サービスへ

海洋環境観測データ

数値モデルと組み合わせることにより、離散的に得られた海洋観測データの時空間的な
補完・マッピング

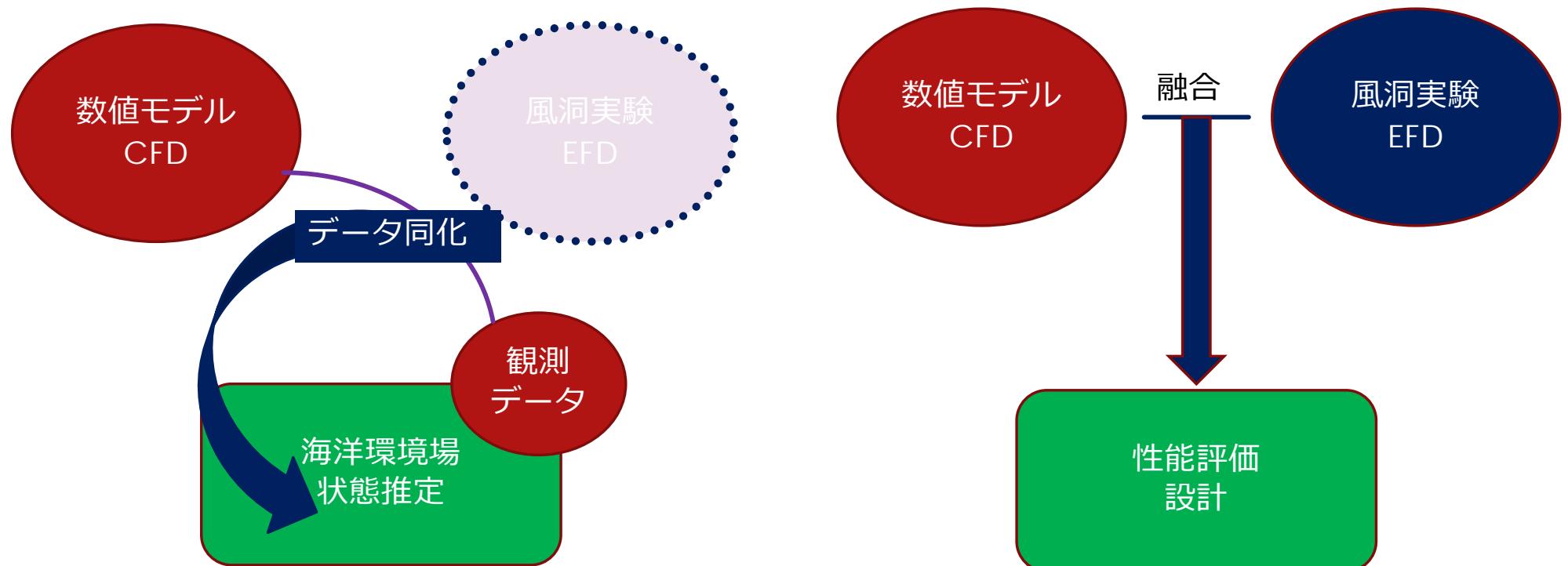
国内外の現業機関による情報提供



データ同化でできること

- ▶ 複数の観測データを統合して、現実の気象・海洋場を再現した時系列データセットを作成する
- ▶ 数値予報のための初期条件、境界条件を作成する
- ▶ 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
- ▶ 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



海洋物理学でのEFD

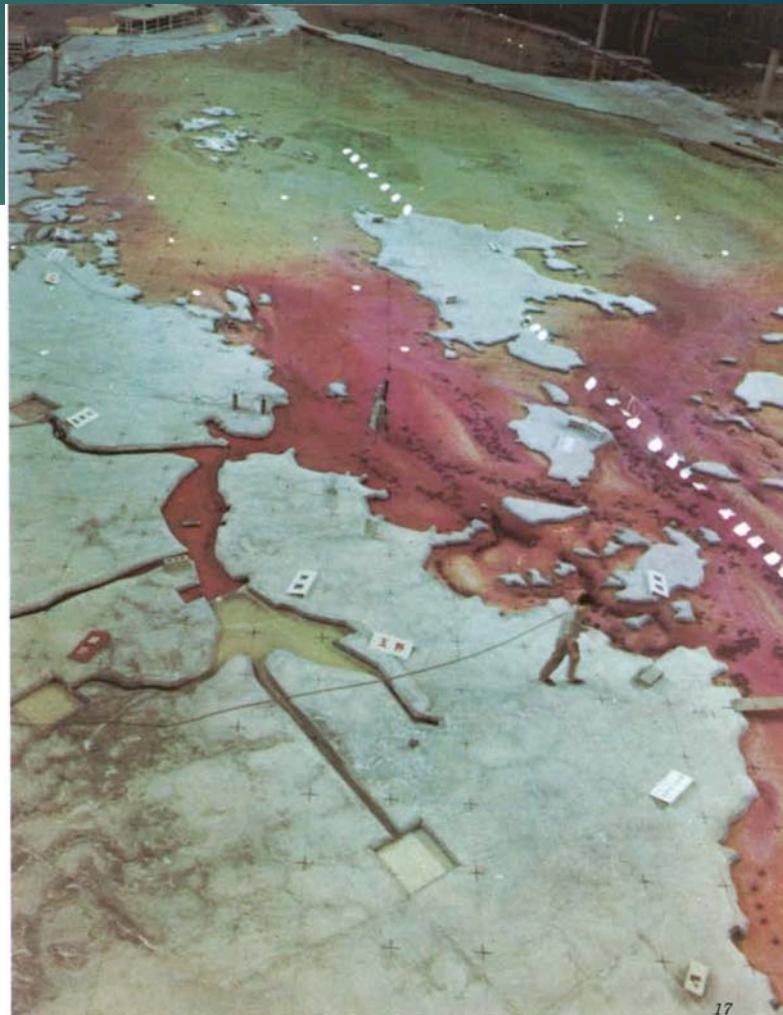
工業技術院中国工業技術試験場(現産業
技術総合研究所中国センター)@広島
昭和48年完成
平成22年閉鎖

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



逆問題としてのデータ同化

$$Ax = b$$

制御変数 → Ax
観測データ → b

モデルの初期条件、境界条件、パラメータなど

制御変数をどのように選ぶかによって
いろいろな問題設定を行うことができる

データ同化でできること

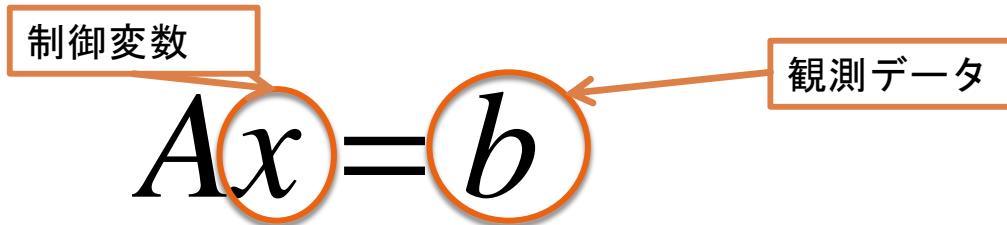
- ▶ 複数の観測データを統合して、現実の気象・海洋場を再現した時系列データセットを作成する
- ▶ 数値予報のための初期条件、境界条件を作成する
- ▶ 数値モデルで用いているパラメータなどの最適化を観測データをもとにして行う
- ▶ 観測システムの設計のための評価、改善にむけた情報提供

パラメータ最適化と観測システム設計

$$Ax = b$$

制御変数

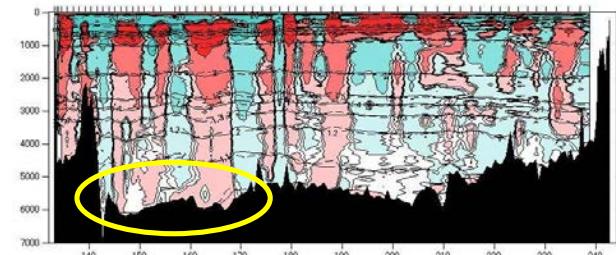
観測データ



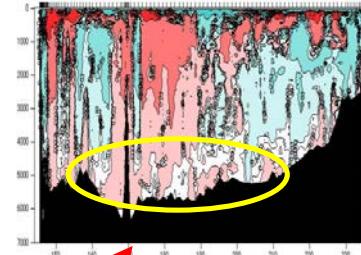
- ▶ 数値天気予報など時間変化の予測を行うとき、数値モデルの初期条件を制御変数として推定する
- ▶ 数値モデルの改良を目的とする場合、制御変数としてモデル内の経験的パラメータを設定することで、最適化を行う→CFD/EFD融合への応用
- ▶ どのような観測データが制御変数の推定に有効かは、逆問題の数理構造を解析したり、観測データを意図的に追加・削除することで、調べることができる
 - ▶ 観測システム実験(Observation System Experiment)とよばれる

Target: Deep water warming ($0.01\text{--}0.003^\circ\text{C}$) detected in the recent decade (WOCE-WOCE revisit) by JAMSTEC group

P02 (30N: 2004 - 1994)



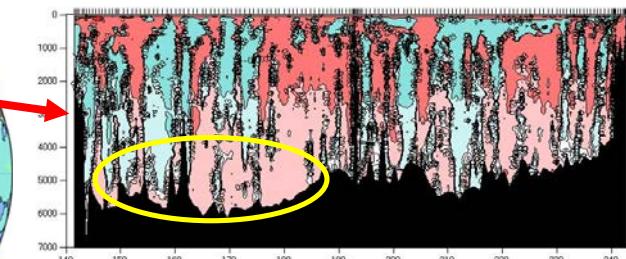
P01 (47N: 1999 - 1985)



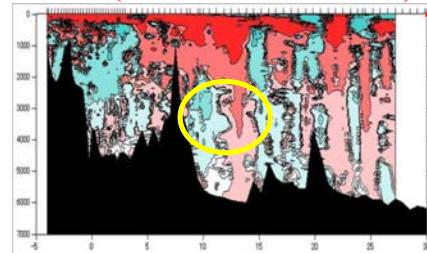
Fukasawa et al.,
Nature, 2004

Kawano et al., GRL,
2006

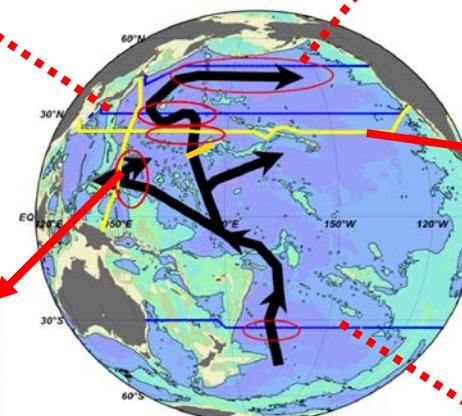
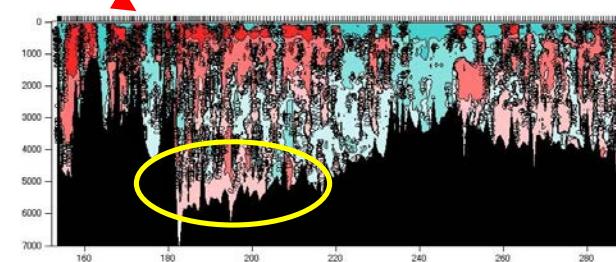
P03 (24N: 2005/6 - 1985)



P10 (149E: 2005 – 1993)

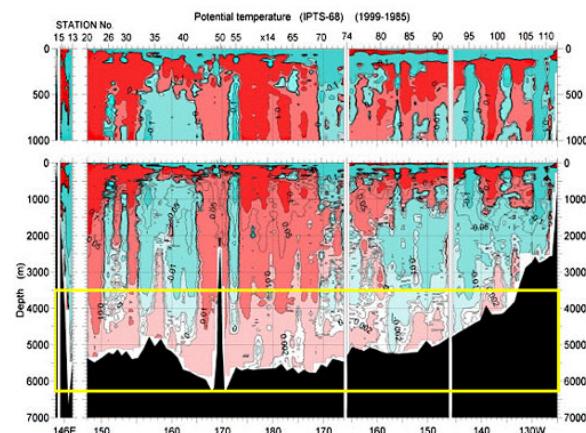


P06 (32S: 2003 - 1992)

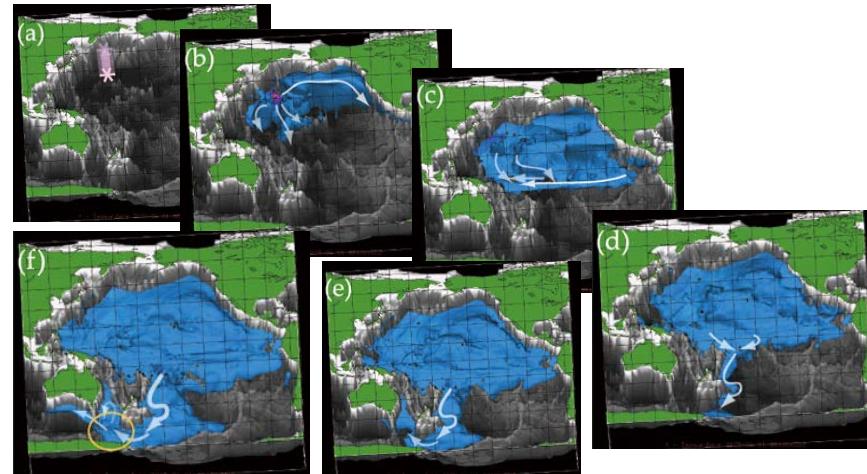


北太平洋最深層部の昇温メカニズム解明

- ▶ 4D-VAR海洋長期再解析データセット(1957-2006年)を用いると共に、アジョイントモデルによる感度実験を行うことにより、北太平洋最深層部の昇温メカニズムの解明研究を行いScienceに掲載された。
- ▶ 北太平洋（北緯47度）の底層でJAMSTECが発見した水温上昇は、時間を遡って解析するとおよそ40年前の南極アデリーコースト沖周辺での海面フラックス変動の影響であることがわかった。



47Nに沿った船舶観測による1999年と1985年の水温差(Fukasawa et al., 2004)



海洋50年再解析データセットを基にした4D-VAR全球全層海洋同化システムによる感度解析結果

設計への応用例

Othmer *Journal of Mathematics in Industry* 2014, 4:6
<http://www.mathematicsinindustry.com/content/4/1/6>

 **Journal of Mathematics in Industry**
a SpringerOpen Journal

RESEARCH

Open Access

Adjoint methods for car aerodynamics

Carsten Othmer*

*Correspondence:
carsten.othmer@volkswagen.de
Vehicle Technology, Group
Research, Volkswagen AG, 38436
Wolfsburg, Germany

Abstract

The adjoint method has long been considered as the tool of choice for gradient-based optimisation in computational fluid dynamics (CFD). It is the independence of the computational cost from the number of design variables that makes it particularly attractive for problems with large design spaces. Originally

おわりに

- ▶ 海洋におけるデータ同化の活用例を紹介しました。
- ▶ データ同化によって様々な観測データを組み合わせて統合的なデータセットを作成することができます。
 - ▶ 海洋環境データセットと漁獲データセットを組み合わせることで水産向けの情報サービスに展開することができました。
- ▶ 逆問題としてのデータ同化の応用として、海洋深層の水温上昇に関する逆追跡を紹介しました。
 - ▶ 自動車の設計でも似たような応用例があり、ほぼ同じ手法が使われています。