

四次元変分法データ統合システムを用いた 全球長期海洋環境の再現

増田 周平、土居知将、長船哲史、杉浦望実

海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター

世界の海洋観測の現状

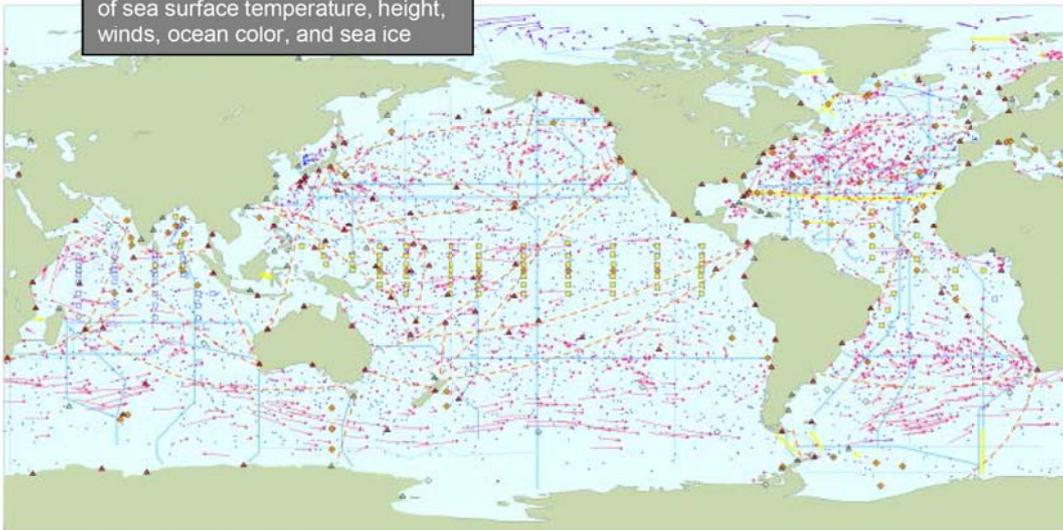
JCOMM 2014 Observing System Status

Total in situ networks

67%

Dec 2014

continuous satellite measurements
of sea surface temperature, height,
winds, ocean color, and sea ice



- 
100% Surface measurements from volunteer ships (VOS)
 250 ships in VOSclim pilot project
- 
100% Global drifting surface buoy array
 5' resolution array: 1250 floats
 ice buoys
- 
40% Tide gauge network (GLOSS committed)
 Fast data, Slow data, GPS
- 
39% XBT sub-surface temperature section network
 37000 XBTs deployed
- 
100% Argo profiling float network
 3' resolution array: 3200 floats
- 
62% Repeat hydrography and carbon inventory
 (Planned)
 Full ocean survey in 10 years

66% Global time series network
 87 combined sites

76% Global tropical moored buoy network
 125 moorings planned

本課題の研究スキーム

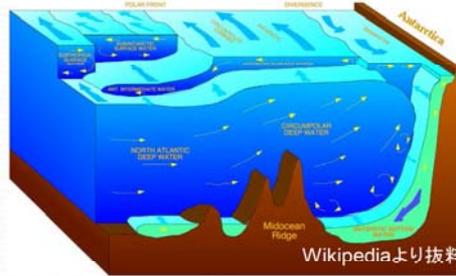
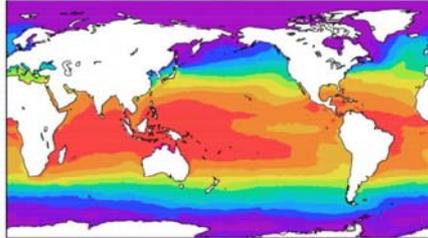


機構内外で取得されるさまざまな海洋観測データ

アプローチ

ESの資源を最大限活かして**全球全層データ統合システム**を構築・運用する。

ESTOC2 SST



Wikipediaより抜粋

目的

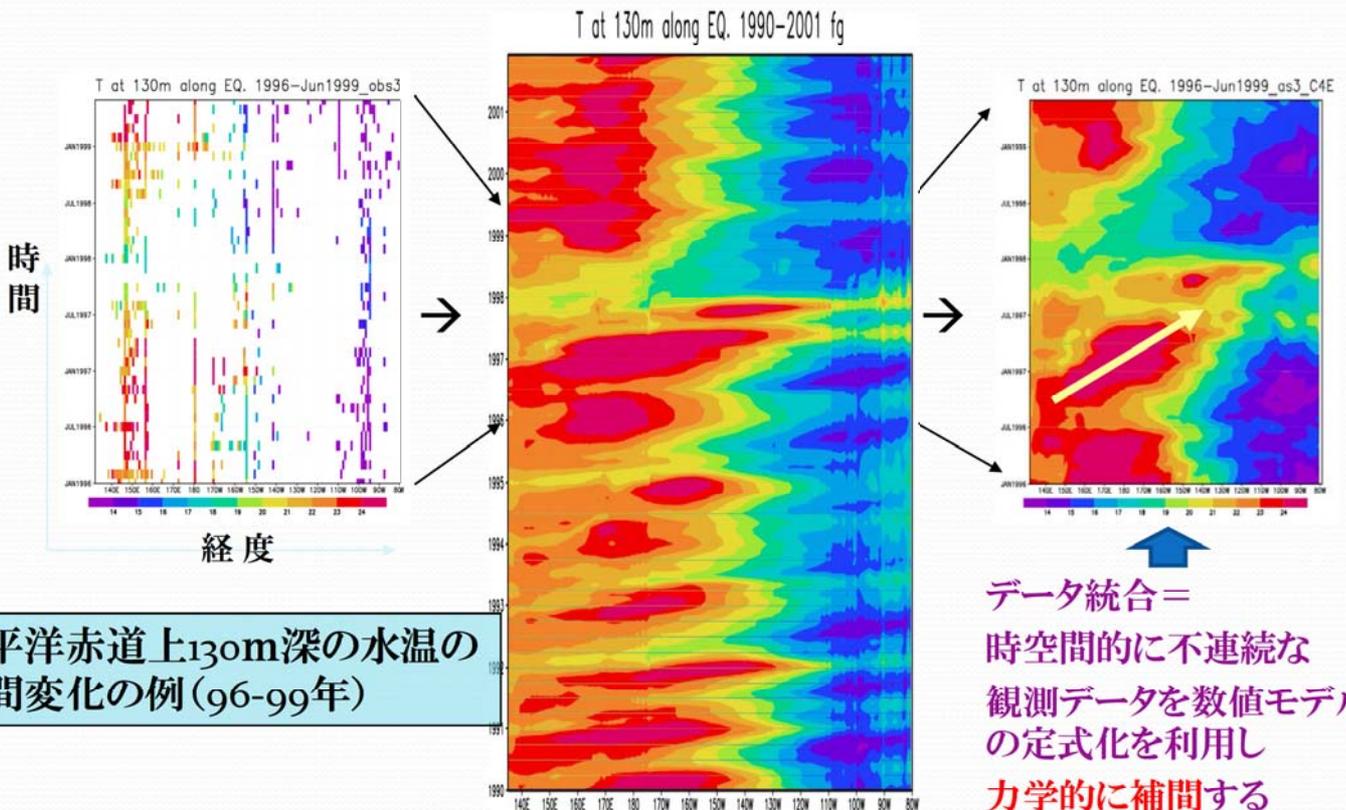
データ統合システム、データセットを用い新たな科学的知見の発見に結びつける。=>**力学の解明・現象の予測**

データ統合とは

観測データ
(離散的)

モデルの出力
(連続)

同化の出力
(連続)



海洋観測データの統合による 精度の向上、空間補間

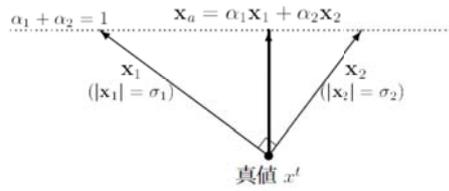


図 1.1: 不偏推定値 x_1, x_2 とそれらの線形結合から成る最適推定値 x_a の関係

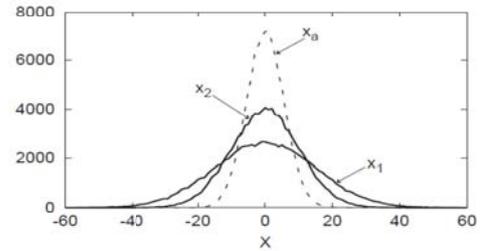


図 1.2: 試行を 100,000 回行ったときの疑似乱数 x_1, x_2 と最適値 x_a のヒストグラム
データ同化: 京大出版より

ある仮定もとで2つの推定値 (たとえば観測値とシミュレーション結果) から真値を推定すると一般的に精度は向上する

*** 貴重なデータを活かすためのアプローチとして有効**

目的: 海洋環境変動・気候変動の力学の解明・現象の予測

船舶
高精度観測、正確な位置
空間的にスパース

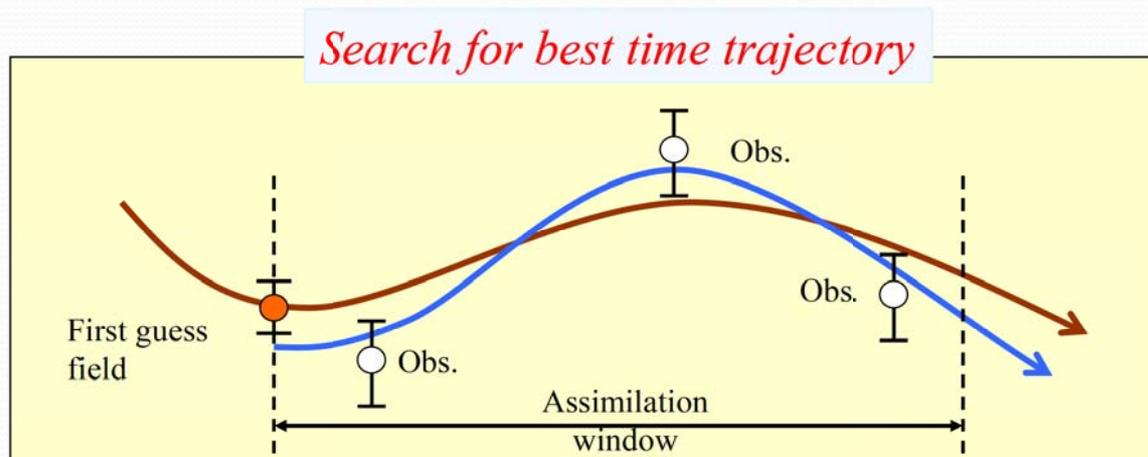
自動昇降型漂流フロート
コストパフォーマンス、長期、広範
精度、海域の不確定性

衛星
広範、長期
精度、海面のみ

数値シミュレーション
方程式(過去の知見)に則ってる、時空間的に均一
現実と違う

四次元変分法 の概念図

- 4D-VAR data assimilation approach seeks for optimized 4-dimensional model states by minimizing a cost function (differences between observed and model analysis fields).



観測を反映させ、最も現実に近いモデルの時間変化を探索する。

「海洋環境変動・気候変動の力学の解明・現象の予測」に都合が良い。

所内課題として

JAMSTEC中期計画との関係:

「研究船を始め、漂流ブイ、係留ブイ等、機構が有する高度な観測技術や4次元データ同化技術等の先駆的な技術を最大限に活用し「世界をリードしながら」地球環境研究を推進する。

・機構がこれまでノウハウを蓄積してきた四次元変分データ同化手法を用いた**海洋観測データの統合研究**を実施する。

・これによって得られた統合データセットを用いて海洋の循環や海洋の環境変動及び海盆スケールでの熱や物質分布とそれらの**中長期変動**についての理解を進めることを目的とする。

世界の状況と独自性

長期全球・4DVARはJPL/MIT,Hamburg大の2拠点だけ:

- ECCO-v4(Wunsch & Heimbach, 2013; Speer & Forget, 2013)
- GECCO2 (Köhl et al., 2012)

研究課題の独自性:

表層の貯熱量変化、海洋環境変動とともに・・・、
 ・深層の長期変動
 ・生物化学変量、特に炭素循環の動態の把握

=> GECCO、ECCOではカバーできていない
ユニークな研究を推進できる。

計算機資源とコーディング技術が必須

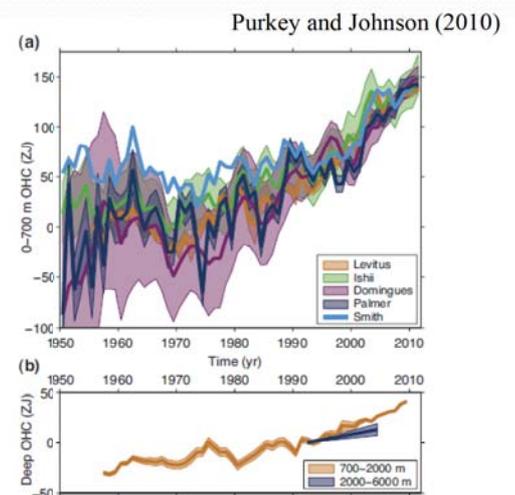
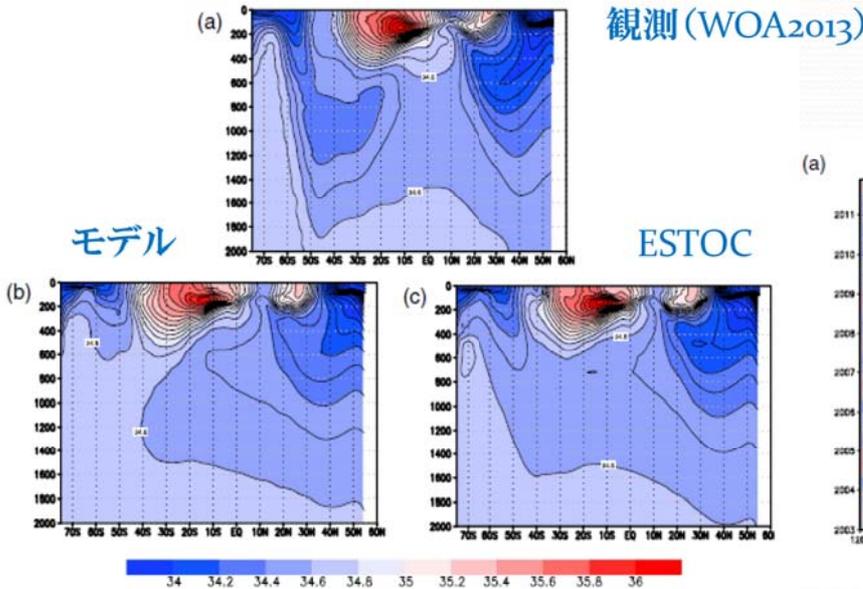


Figure 3.2: a) Observation-based estimates of annual global mean upper (0–700 m) ocean heat content in ZJ ($1 \text{ ZJ} = 10^{21} \text{ Joules}$) updated from (see legend): (Levitus et al., 2012), (Ishii and Kimoto, 2009), (Domingues et al., 2008), (Palmer et al., 2007), and (Smith and Murphy, 2007). Uncertainties are shaded, and plotted as published (at the one standard error level, except one standard deviation for Levitus, with no uncertainties provided for Smith). Estimates are shifted to align for 2006–2010, five years that are well measured by Argo, and then plotted relative to the resulting mean of all curves for 1971, the starting year for trend calculations. b) Observation-based estimates of annual five-year running mean global mean mid-depth (700–2000 m) ocean heat content in ZJ (Levitus et al., 2012) and the deep (2000–6000 m) global ocean heat content trend from 1992–2005 (Purkey and Johnson, 2010), both with one standard error uncertainties shaded (see legend).

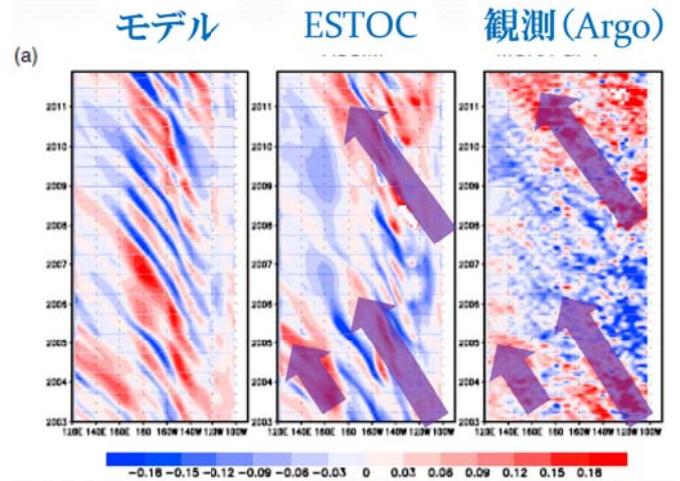
<http://www.ipcc.ch/> (IPCC 5th assessment report)

ESTOC:

力学的整合性を保持=>メカニズムの解明



1980-2011年の平均的描像

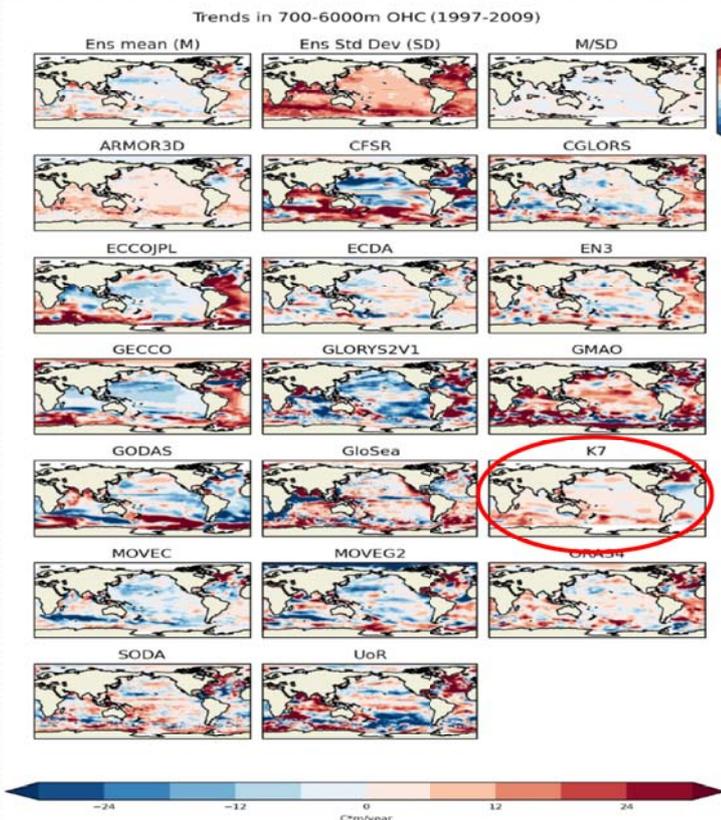


17° Nにおける24.000面上の時間変動

亜表層塩分分布、時間変動の再現

Osafune et al. (2015)

海洋再解析データ、海洋環境再現データとの比較



中深層の貯熱量変化の評価

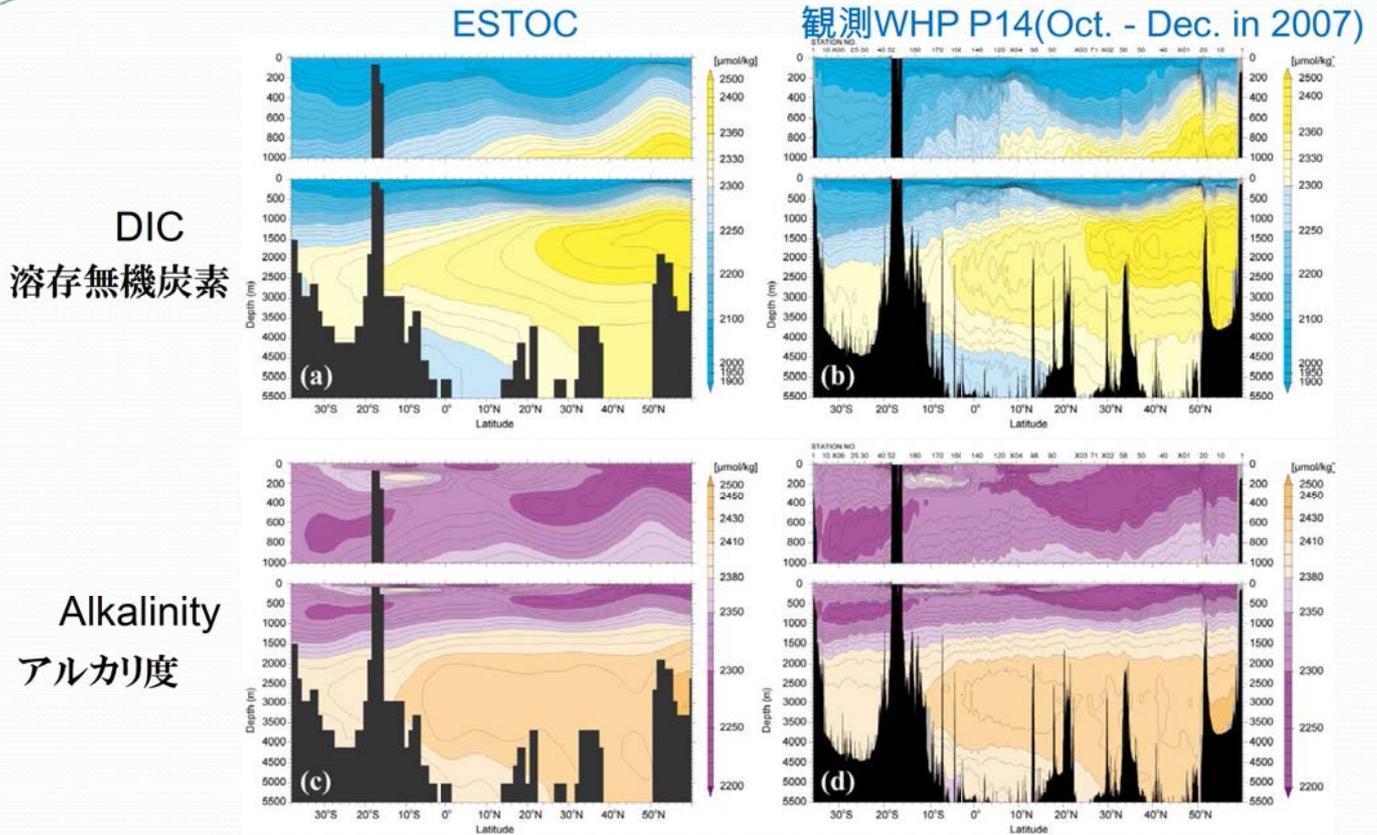
Palmer et al. (2015)

2015に公表された相互比較論文

- Storto et al. (2015), Steric sea level variability (1993–2010) in an ensemble of ocean reanalyses and objective analyses, *Clim. Dyn.*, **45**, 10.1007/s00382-015-2554-9, 1-21.
- Toyoda et al. (2015), Intercomparison and validation of the mixed layer depth fields of global ocean syntheses, *Clim. Dyn.*, **45**, 1-21, DOI 10.1007/s00382-015-2637-7.
- Balmaseda et al. (2015), The Ocean Reanalyses Intercomparison Project (ORA-IP), *Journal of Operational Oceanography*, Vol. 8, No. S1, s80–s97, <http://dx.doi.org/10.1080/1755876X.2015.1022329>.
- Toyoda et al. (2015), Interannual-decadal variability of wintertime mixed layer depths in the North Pacific detected by an ensemble of ocean syntheses, *Clim. Dyn.*, **45**, 1-17, DOI 10.1007/s00382-015-2762-3.
- Palmer et al. (2015), Ocean heat content variability and change in an ensemble of ocean reanalyses, *Clim. Dyn.*, **45**, 1-22, DOI 10.1007/s00382-015-2801-0.
- Shi et al. (2015), An Assessment of Upper Ocean Salinity Content from the Ocean Reanalyses Inter-Comparison Project (ORA-IP), *Climate Dynamics*, **45**, 1-21, DOI 10.1007/s00382-015-2868-7

ESTOC:

生物化学変量まで含んだ全球全層の海洋観測データを統合したデータセット

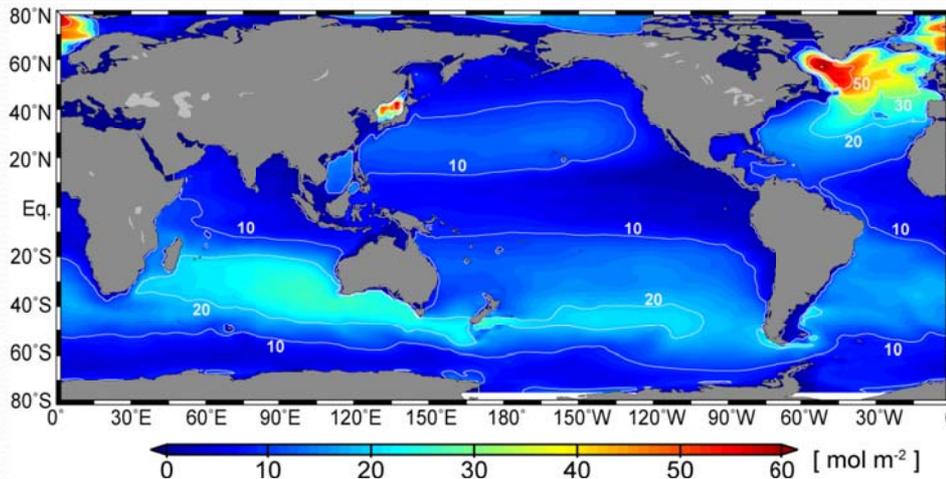


Doi et al. (2015)

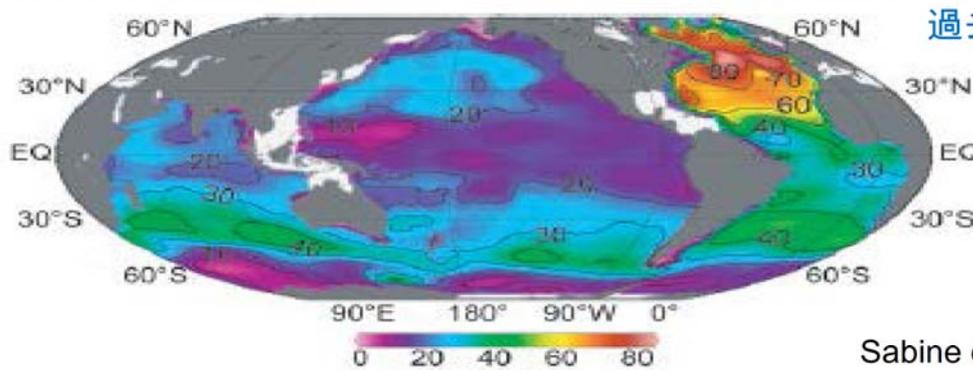
ESTOC:

力学的整合性を保持=>メカニズムの解明

溶存無機炭素の増加量の見積もり

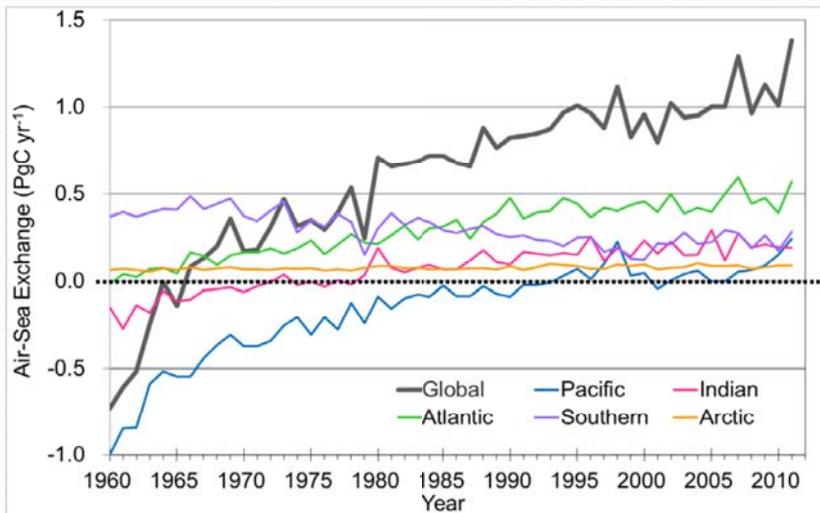


Horizontal distribution of the column inventory of DIC increases



Sabine et al. [2004]

ESTOCを用いた炭素循環の動態把握



ESTOCから見積もった大気海洋間で交換されるCO₂の時間変化。(1960年から2011年)

Doi et al. (2015)

Each basin distribution of total absorption by the global ocean after 1995.

Pacific : 8–10 %

Atlantic : 43 %

Indian : 19 %

Southern : 20–22 %

On the same order as the estimates of *Takahashi et al.* [2002].

Absorption by the global ocean since 2000 : 1 Pg C yr⁻¹

Recent model-based estimations: 1-3 Pg C yr⁻¹

Estimate of ESTOC is slightly smaller but it is within the range of these recent estimates.

地球シミュレータによる社会貢献と イノベーションの創造に向けて

科学的に新しい知見の獲得

IPCC AR5報告などで注目されている地球温暖化等に伴う深層まで含んだ熱・物質の再配分、海面高度変化などを観測情報をベースに精緻に再現・診断することができ、地球システムのメカニズム解明に貢献できる。

⇒ 太平洋10年規模変動への海洋の役割に関して力学解析を進めています (Ocean Science Meetingなどで一報を発表; **ポスター: 四次元変分法データ統合システムを用いた全球長期海洋環境の再現**)

リソースの効率的運用の促進

新しいセンサー、観測機器開発などに伴うデータ統合を介した情報の有効利用 (**ポスター: 海洋鉛直混合観測データを用いた全球海洋環境再現実験**)、国際的な観測システム網の最適 (cost-effective) 化への寄与 (国際DeepArgo計画、国際BioGeoChemicalArgo計画)。

総合的な社会への貢献

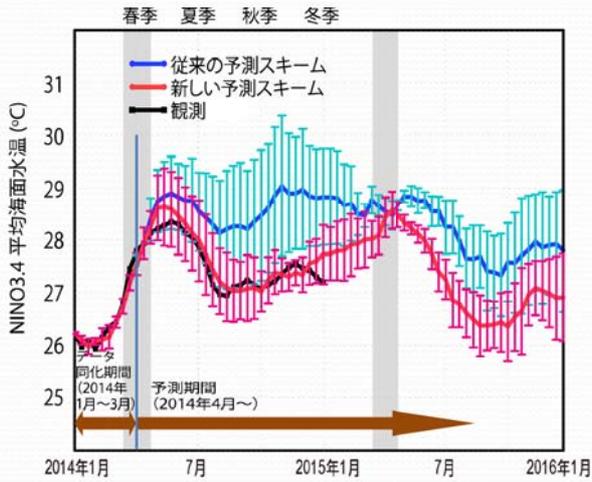
予測研究への応用。



NAVIS PROVOR
海洋酸性化の切り札
BGC-Argo

ESTOCを応用したエルニーニョ予測研究

Masuda et al. (2015)

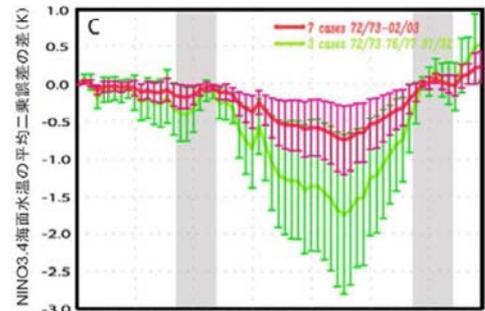


ESTOCから気候フェーズを検出

2014年のエルニーニョ現象の春先からのハインドキャストの精度が向上

2014年のエルニーニョイベントを予測した実証実験の結果。エルニーニョ現象の指標となるNINO_{3.4}海域の海面水温の時間変化。

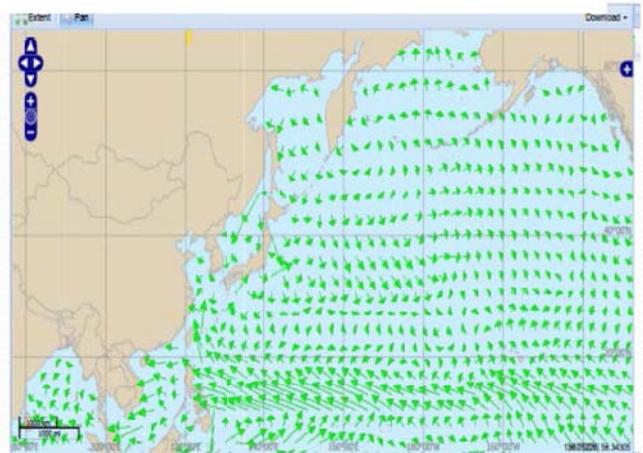
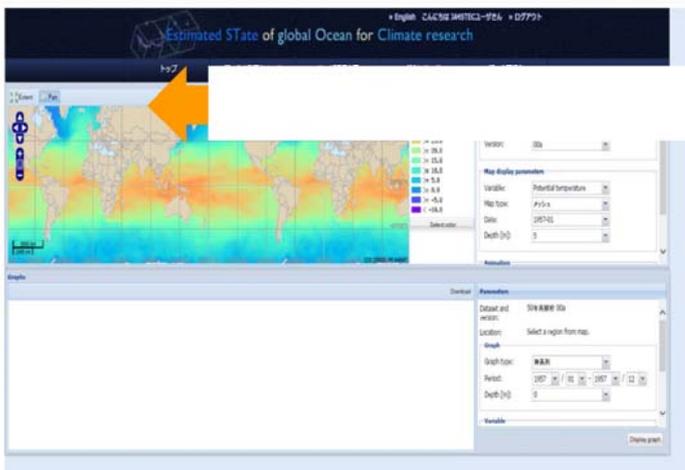
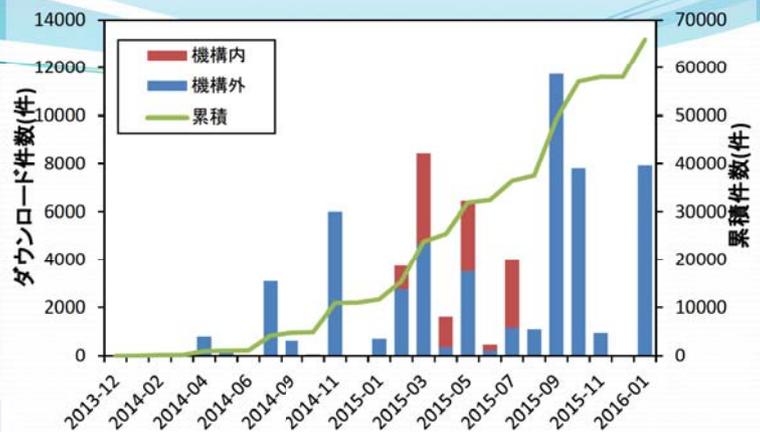
海洋の長期変動に関する知見の重要性に
ハイライトする成果。



予報のスタート(10月) 春先 1年後(10月)

1年予測で約0.6°Cのエラー低減

ESTOC 公開



まとめと今後

- 作成したデータセットESTOCは <http://www.godac.jamstec.go.jp/estoc/j/>から一般に公開されている。H27年度は多くの学術論文が公表された。国際的な相互比較プロジェクトにも参加しており、海洋観測データの新しい利用方法として、今後需要が増えるものと思われる。
- 生物化学変量のデータ統合に関しては、ESTOCが世界的にみても稀有なデータセットであることは確かだが、より確度の高い気候変動研究に資するためには不確実性をもつ数値モデルや少ない観測データの制約のもとでよりよい状態推定ができるよう研究開発を進めていく必要がある。また、今後国際的に展開されていくであろうBGCフロート研究などと、有機的に結びつけた研究開発が新たな展開を生む。
- 今後、統合する期間の延長や、淡水収支に関する新しいスキームの導入などを計画しており、海洋全層における中長期の気候変動研究に資する貴重な統合データセットとして、新たな観測データの統合も含め、さらなる高精度化を進めていく予定である。