

熱帯太平洋での気候変動に関連した海洋データ 同化の最近の発展

蒲地 政文¹・藤井 陽介¹・石崎 士郎²・松本 聡¹・
中野 俊也¹・安田 珠幾³

(受付 2006年2月3日; 改訂 2006年7月31日)

要 旨

熱帯太平洋での主に気候変動に関連した海洋データ同化に関する研究の現状について報告する。海洋の現実の状態(海況)を知るために行われた研究の他に、縮小近似の方法、誤差評価・診断、観測システムの設計と評価についても簡略に報告する。

キーワード: データ同化, 熱帯太平洋, 気候変動。

1. はじめに

数年規模の気候変動で最も著しい現象は、熱帯太平洋のエルニーニョ及びそれに対応する大気の南方振動であり、あわせて ENSO と呼ばれている。この気候変動が地球環境と人類の生産活動に多大な影響を及ぼしていることはよく知られている。この ENSO 現象の理解の為に大気・海洋の観測と理論的・数値的な研究があい携えて発展してきており、また 1980 年代後半から大気と海洋を結合した数値モデル(大気海洋結合モデル)を用いて予測もなされている。

ENSO 現象を予測するためには、現象の理解はもちろんの事、予測システムを構築しなければならない。この予測システムには通常、現実の変動を再現する能力のある数値モデル、なるべく正確で時空間にわたって密でかつ均一な観測網、及びそれらを結びつけて予測のための最適な初期値を作成する技術であるデータ同化手法、の三つの要素が必要である。

海洋での数値モデルは、力学・熱力学の基礎方程式を有限差分法で数値的に解くものであり、1960 年代後半から開発され使用されてきた。数値モデルにはモデルのバイアス、サブグリッドスケールでの(格子点以下の現象による)混合過程の不完全なパラメーター化、そして大気からの外力のもつ誤差等の今後解決されるべき問題があるものの、この数値モデルの発展は著しく、現実的な表層の循環が求まるようになってきた。多くの研究・現業機関で用いられている。数値モデルの構成や使用されている各種スキームについては、Griffies et al. (2000)及び石川 他 (2005)を参照されたい。

一方海洋観測に関しては、従来船舶を用いた水温観測が主流であったが、この 20 年ほどの間に、超音波流速計(ADCP)、係留系ブイシステムや衛星観測、表層・中層フロートのような新しい測器が実用的になってきた(OCEANOBS99, 1999)。最近では、海面の情報をリモートセ

¹ 気象研究所 海洋研究部: 〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

² 気象庁 地球環境・海洋部: 〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4

³ 気象研究所 気候研究部: 〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

ンシングが、海面下ではフロートが中心になってデータを提供しつつある。しかし、たとえ上記のような全ての観測が得られたとしても、海面下では未だ粗くかつ不均一であり、異なった観測は異なった誤差を持つ。そのような観測が混在してデータセットを構成し、異なった物理量の間で整合性が取れていなかったり(力学的なバランスを欠いていたり)する。

上記のような特徴を持った数値モデルと観測システムの進歩はモデリングと観測を統合するシステム(すなわちデータ同化システム)を開発し利用するという方向に進んできている。更に、多くの研究グループと現業グループが、海洋への多様なニーズ(Flemming, 1999)の開拓や、現業機関での利用を目指した「オペレーショナル海洋学」という分野を確立してきている(Mooers, 2000)。

さて、データ同化とは、時空間で均一で力学的にも整合性のとれたデータセットを作成するために、数値モデルと観測を組み合わせた一連の手続きのことである。このデータ同化手法は、元来非線形最適化法、推定論、制御理論のような学問分野の成果を取り入れて発達してきたものである。この報告では、これらの数学の分野で発達した手法が、気候変動に関連した海洋現象にどのように応用されているかを示したい。紙数が限られているため、カルマンフィルターやアジョイント法などのデータ同化手法そのものには立ち入らない。興味のある読者は、以下のような文献を参考にされることをお勧めする：教科書(Daley, 1991; Bennett, 1992, 2002; Wunsch, 1996; Kalnay, 2003)、総説・解説(Ghil and Malanotte-Rizzoli, 1991; 蒲地, 1994; Malanotte-Rizzoli and Tziperman, 1996; Busalacchi, 1996; 露木, 1997; Fukumori, 2001; Kamachi et al., 2002; 中村他, 2005)、シンポジウムの成果刊行物(例えば Bengtsson et al., 1981; Brasseur and Nihoul, 1994; Malanotte-Rizzoli, 1996; Ghil et al., 1997; Courtier et al., 2000)、及び参考文献の一覧(Courtier et al., 1993)。

現在気候変動に関するデータ同化研究と現業の最も活発な分野はエルニーニョであるため、この報告では熱帯太平洋の ENSO 現象に関連した海洋データ同化研究のいくつかの主要なトピックスを報告するのが目的である。海洋での気候変動(それは季節から数十年までの時間スケールを持つが)に関連した海洋現象を理解するためにデータ同化が役立っていることをここでは示したい。また、塩分の再構築、誤差評価、縮小近似(低減空間)手法、観測システムの設計と評価方法等、データ同化手法に関連し最近重要性を増してきているトピックスについても報告する。本報告で引用した文献を、使用された数値モデル、観測データ、同化手法に従って分類した表をまとめとして掲載する(表1)。ただし、数値モデルを使用していない解析だけの研究、教科書や総合報告、大気の同化、同化手法のみの研究に関する文献は除く。なお、気候変動全般については鳥羽(1996)、熱帯太平洋での大規模な大気海洋相互作用についての観測と力学的な基礎については Philander(1990)を参照されることをお勧めする。

この報告を始める前にデータ同化研究(手法)の目的を列挙しよう：

- (1) 数値モデルを用いた予報を行う為の最適な初期条件を求めること。天気予報ではデータ同化がこの目的のために使用されている。
- (2) 数値モデリングを行うときの最適な境界条件(これには領域モデルに用いられる横の境界条件、及び海面での大気との運動量・熱・水の交換量が含まれる)を求めること。
- (3) 数値モデルで使用されている格子点以下の現象をパラメーター化したスキーム(例えば拡散と粘性)やそれで用いられているパラメーターの最適な値を求めること。これは特にパラメーター評価と呼ばれている。
- (4) 4次元の時空間で均一なデータセットである同化結果を用いて海洋現象を理解すること。
- (5) 観測データの誤差の分布を評価(推定)したり、各々の観測のインパクトを調べることでより効果的な観測システムを構築する仮想観測網シミュレーション実験、あるいは感度解析

表 1. 本報告で引用した文献の分類(ただし, 数値モデルを使用していない解析だけの研究, 教科書や総合報告, 大気同化, 同化手法のみの研究に関する文献は除く). 表中では以下のような略号を使用する: 数値モデルに関しては, SM: 簡易モデル(Burgers 方程式や海洋混合層モデルを含む), SW: 浅水波方程式, QG: 準地衡流方程式, PE: プリミティブ方程式, CM: 大気海洋結合モデル; 観測データに関しては, T:(海洋内部の)水温, S: 塩分, Rho: 密度, u: 流速, SSH: 海面高度(水位), SST: 海面水温, SSS: 海面塩分, Buoy: ブイの位置, Psi: 流線関数, ATOC: 音波伝播時間; 同化手法に関しては, SC: 逐次近似法, OI: 最適内挿法, GM: ガウスマルコフ過程, KF: カルマンフィルター, KS: カルマン smoother, SEEK: SEEK フィルター, SVD: 特異ベクトル解析, EnKF: アンサンブルカルマンフィルター, PE: パーティクルフィルター, RM: リプリゼンター法, 3DVAR: 3次元変分法, Adj: アジョイント法, Adp: 非線形適応変分法.

出典	数値モデル	観測データ	同化手法
Alves et al. (2001)	PE	SSH	OI
Behringer et al. (1998)	PE	T	3DVAR
Bell et al. (2000)	PE	T	OI
Bell et al. (2001)	PE	T	OI
Bennett (1990)	SW	T	RM
Bennett and Miller (1991)	QG	Psi	Adj
Bennett et al. (1998)	SW	T, SST	RM
Cane et al. (1996)	SW	SSH	KF
Carton et al. (1996)	PE	T, SSH	OI
Carton et al. (2000a)	PE	T, S, SST, SSH	OI
Carton et al. (2000b)	PE	T, S, SST, SSH	OI
Chen et al. (1997)	CM	SST	SVD
Chen et al. (1998)	SW	SSH	KF
Chepurin and Carton (1999)	PE	T, S, SST, SSH	OI
Chin et al. (1999)	SW	SSH	KF
Cooper (1988)	PE	T, S, SSH	OI
Cooper and Haines (1996)	PE	SST, SSH	OI
Derber and Rosati (1989)	PE	T, SST	3DVAR
Durand et al. (2003)	PE	SST, SSS, u	SEEK
Evensen (1994)	QG	Psi	EnKF
Fisher and Latif (1995)	PE	T, SST, SSH	SC
Fu et al. (1991)	SW	SSH	KF
Fu et al. (1993)	SW	SSH	KF
Fujii and Kamachi (2003)	PE	T, S, SST, SSH	3DVAR
Fukumori (1995)	SW	SSH	KF
Gordeau et al. (2000)	SW	T, SSH	SEEK
樋口 他 (2005)	CM	SSH	EnKF, PF
石井, 坂元 (2002)	PE	T, S, SST, SSH	3DVAR
Ishizaki et al. (2006)	PE	T, S, SST, SSH	3DVAR
Ji et al. (1995)	PE	T, SST	3DVAR
Ji and Leetmaa (1997)	PE	T, SST	3DVAR
Ji et al. (1998)	PE	T, SST	3DVAR
Ji et al. (2000)	PE	T, SST, SSH	3DVAR
Johnson et al. (2000)	SM	T, SST	GM
Kamachi and O'Brien (1995)	SW	Buoy	Adj
Kleeman et al. (1995)	CM	T	Adj
Lee et al. (2000)	CM	T, SST, SSH	Adj
Leetmaa and Ji (1989)	PE	T, SST	OI
Long and Thacker (1989a)	PE	Rho, SSH	Adj
Long and Thacker (1989b)	PE	Rho, SSH	Adj
Masuda et al. (2003)	PE	T, S, SST, SSH	Adj
Menemenlis and Chechelnitsky (2000)	PE	SSH, ATOC	OI

表1. (つづき)

出典	数値モデル	観測データ	同化手法
Miller and Cane (1989)	SW	SSH	KF
Miller et al. (1995)	SW	SSH	KF
Moore, A. M. (1989)	SW	T	SC
Moore, A. M. (1990)	SW	T	SC
Moore and Anderson (1989)	SW	T	SC
Rosati et al. (1996)	PE	T, SST	3DVAR
Segschneider et al. (2000)	PE	T, S, SSH	OI
Segschneider et al. (2001)	PE	T, S, SSH	OI
Sheinbaum and Anderson (1990a)	SW	SSH	Adj
Sheinbaum and Anderson (1990b)	SW	SSH	Adj
Sirkes et al. (1996)	PE	T, S	Adj
Smedstadt and O'Brien (1991)	SW	SSH	Adj
Sugiura et al. (2006)	CM	T, S, SST, SSH	Adj
Syu and Neelin (2000)	CM	SST	SVD
Tang and Hsieh (2003)	CM	T, SST, SSH	3DVAR
Troccoli and Haines (1999)	PE	T	OI
Usui et al. (2006)	PE	T, S, SST, SSH	3DVAR
Verron et al. (1999)	PE	SSH	SEEK
Vossepoel (1999)	PE	T, S, SST, SSH	3DVAR
Vossepoel and Behringer (2000)	PE	T, S, SST, SSH	3DVAR
Wenzel et al. (2001)	PE	T, S, SSH	Adj
Zhu and Kamachi (2000)	SM	u	Adp
Zhu et al. (2002)	SM	T	Adp

を行うこと。

上記項目の目的に応じて、海洋の状態・変動を理解し予測したり、海洋数値モデルと観測システムの特性を把握し改良する研究、あるいは官庁での現業業務が行われている。

この報告では第2章で熱帯太平洋での海洋データ同化の有効性について述べる。その中で特に塩分分布の再現性について第3章で述べる。これは、海水の密度は主に水温と塩分で決定されるが、従来観測が極端に不足していたこともあり、従来の海洋データ同化では塩分分布の再現性が現実的でなかったことによる歴史的な背景がある。現実のデータ同化システムは巨大な行列を扱わねばならないが、計算機の容量・計算時間に制約があるので、その行列を低減空間に縮小する近似手法を第4章では紹介する。第5章ではデータ同化の事前・事後に行うことが推奨される誤差評価・診断・検証について紹介する。第5章までは、同化による海洋の状態の再現性と評価という同化システムとそのプロダクトに直接関連した話題に焦点をあてて述べたが、第6章では、今後いっそう重要性を増すと思われる観測システムの設計と評価をデータ同化手法を用いてどのように行えるかということについて述べる。最後に第7章でまとめて将来への展望とする。

2. 海洋の状態評価

海洋は大気と運動量・熱・水のフラックスを交換し、それに応じて応答している。基本的には赤道太平洋上は貿易風(東風)が吹き、太平洋の西部に暖水をためている(この状態をラニーニャと呼ぶ)。大気海洋相互作用の結果東風が弱まり、西部の暖水域が東へ移動する。簡単に述べれば、これがエルニーニョ現象である。その典型的な例としてデータ同化により得られた海面水温の分布を図1に示す。この図は気象研究所海洋データ同化システム(MOVE/MRI.COM, 詳細は Usui et al., 2006 を参照)を用いて作成した。図1上図はエルニーニョ, 下図はラニー

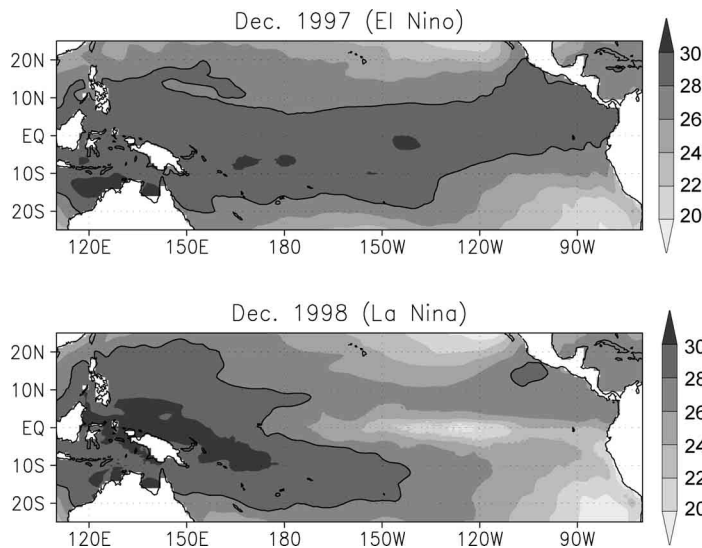


図 1. 海面水温分布．上図：エルニーニョの時期(1997 年 12 月)．下図：ラニーニャの時期(1998 年 12 月)．等値線は 28 度 C の等温線を表す．

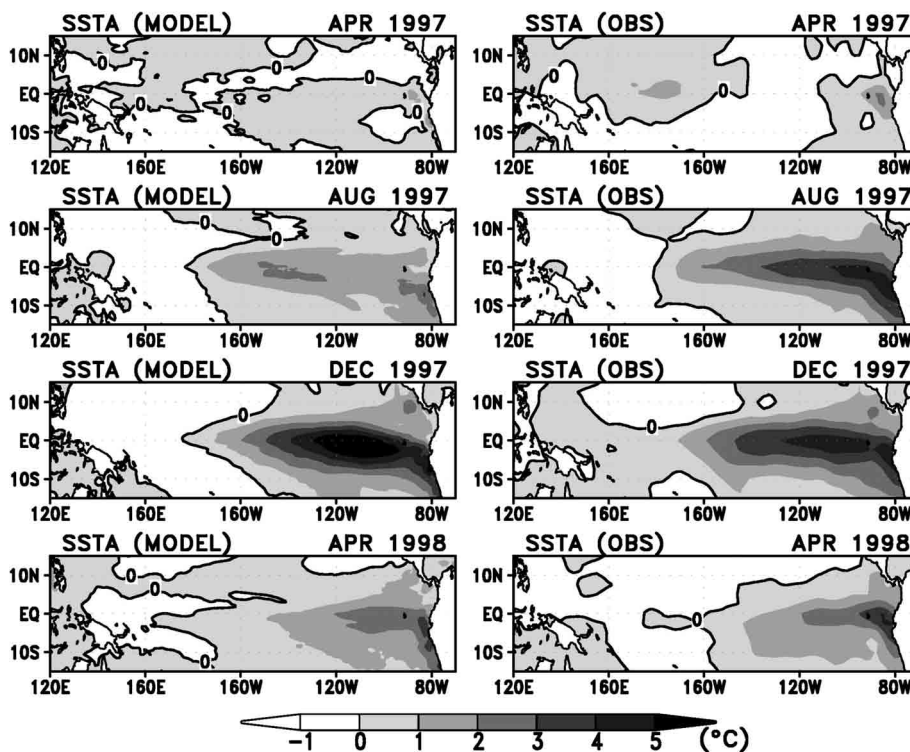


図 2. 熱帯太平洋の予測の例．海面水温の気候値からの偏差の水平分布を、予測結果(左列の図)と同じ時期の観測結果(右列の図)で示す．時期は上から 1997 年 4, 8, 12, 1998 年 4 月である．

ニヤの時期の海面水温の水平分布を示す。上図の場合、下図に比べて 28°C 以上の暖かい水が東部まで広がっているのがわかる。この図のようなデータ同化を用いて求められた海洋の現実的な状態を予測の初期値として使用する。気象研究所の大気海洋結合モデルで予測した海面水温の例を図2に示す。図2はデータ同化を用いて1997年1月1日の初期値を大気、海洋でそれぞれ作成し、その初期値を用いて予測した結果である。1997年12月に東部熱帯太平洋の海面水温偏差が正になりエルニーニョの発生が予測され、観測とよく合っているのがわかる。

熱帯海洋での大規模スケールの変動は、大気の変動に対して主に赤道波動によって応答し、変動の情報が伝えられる。いくつかのデータ同化研究では、これらの波動現象を用いて結果の解釈を行っている。観測データで修正された情報(たとえば観測と数値モデルの差: イノベーションベクトル)は赤道波動の形で伝播し、観測海域以外でも数値モデルの状態変数は修正される。その他に、観測データをモデルに挿入したとき、力学的にバランスしていないことによるショックがおき、非現実的な波も生成されるので、それを減衰させなければならない。そのショックが原因で発生した非現実的な赤道ケルビン波と混合ロスビー重力波を押さえる実験は逐次修正法(Moore, 1989)及びノーマルモードイニシャリゼーション法(Moore, 1990)を用いて議論された。また、アジョイント法で用いられる制約条件(例えば平滑化)は、最適化された初期の状態に含まれる細かい変動(ショック)を減少させるために重要であると認識されてきた(Long and Thacker, 1989a, 1989b; Bennett and Miller, 1991)。

さらに、アジョイント法で、赤道波動による熱帯太平洋の応答を再現するには海面水位だけの観測では不十分で海面下の観測データも必要であることが示されてきた(Long and Thacker, 1989a, 1989b)。Smedstadt and O'Brien (1991)は、長い予測期間にわたると熱帯太平洋での初期条件の影響が及ぶ時間は限定されるので、海洋数値モデルのパラメータ評価を行う方がより長い期間にわたって有効であることをアジョイント法を用いて示した。また、観測された海域から観測と数値モデルの差(イノベーションベクトル)によって生成された波動が、アジョイントモデルでは時間をさかのぼって通常と逆向きに伝播し、イノベーションベクトルの情報を伝えることを示した。カルマンフィルターを用いても衛星海面高度計データと簡略な浅水波近似(線形で鉛直に1つの力学モードのみを含む)の方程式(浅水波方程式)を用いた数値モデルで赤道ケルビン波の振幅と位相を再現できることも示されてきた(Fu, et al., 1991)。この時の振幅は現実より小さいが、鉛直方向により多くのモードを用いれば振幅が現実的になることも示されている(Busalacchi and Cane, 1985)し、最近の3次元の海洋大循環モデルでは再現性はより現実的になってきている。

熱帯太平洋では、赤道に沿って西部と東部で同化結果に違いが生じることも報告されてきた。浅水波方程式の数値モデルを用いて、モデルシミュレーションとデータ同化(逐次修正法)を比較した結果、東部熱帯太平洋で早く同化による修正が消失しその消失する海域が西へ広がることが報告されている(Moore and Anderson, 1989)。これは、熱帯太平洋の主要な力学バランスである海上風応力の東西成分と海洋内部の東西圧力勾配とが東部で釣り合わなく、そのアンバランスがロスビー波で西へ伝播するためである。同様の簡略化された海洋数値モデルとそのアジョイントモデルを用いて、表層水温から換算された表層の厚さや漂流ブイの位置データを同化することにより、海面水位(あるいは表層の厚さ)の再現性が熱帯太平洋の西部と東部で異なることも示されている(Sheinbaum and Anderson, 1990a, 1990b; Kamachi and O'Brien, 1995)。これは西部では水温躍層が深く(つまり暖水が蓄積している量が多く)熱的に慣性が大いこと(Sheinbaum and Anderson, 1990a, 1990b)、また赤道ケルビン・ロスビー波による伝播と赤道での海流の方向が相まってイノベーションベクトルの情報(すなわち観測データで修正すべき情報)が、東部海域を通過せずその結果観測による修正が行われず、西部に集中すること(Kamachi and O'Brien, 1995)によって、西部熱帯海域が東部より修正されやすいことによ

るものである。最近、英国気象局で用いられている現業用全球海洋データ同化システム(水温の最適内挿法)で、海洋観測データを同化して得られる水温・塩分場から求められる赤道上で東西方向の圧力勾配は、海上風応力の東西成分にバランスする東西方向の圧力勾配と一致しないため、非現実的な鉛直循環が生じることが報告されている。この非現実的な鉛直循環を減じるために、英国気象局では圧力勾配を修正する方法を開発した(Bell et al., 2001)。同様な問題に対して、海上風応力そのものを最適化する3次元変分法も開発され、より現実的な海洋の状況が再現されるようになった(Ishizaki et al., 2006)。

上述の観測と数値モデルの差(イノベーションベクトル)の波動による伝搬や流れによる輸送についての情報は、作成された同化手法の中(例えばカルマンゲイン)に含まれているものである。一つの例は、カルマンゲインの水平構造が赤道ケルビンと赤道ロスビー波のパターンを持っており、これらの波動によってデータ同化での修正の情報が伝わることを示されている(Fukumori et al., 1999)。この論文では衛星海面高度計データを同化することによって、表層の水温・流速・水位の場がよく再現されることが示されているが、同化の妥当性は海域や数値モデルの解像度、およびその表現誤差に依存することを示した。しかし西部から中央熱帯太平洋では、水温場はよく再現されているが、短い時間スケール(例えば20日)の流速場の再現性はそれほどよくない。SEEK(Singular Evolutive Extended Kalman)フィルターを用いた実験では、衛星海面高度計による修正情報が海面から海面下に伝えられ、係留系(TAO)データと比較して海面下の水温場が改善されることが報告されている(Verron et al., 1999)。さらに1992-1996の期間で西部熱帯太平洋の暖水プールの東西・南北の熱の輸送(ひいてはエルニーニョの大きさへの)役割の示唆が得られている(Gourdeau et al., 2000)。1997-1998年のエルニーニョがなぜ非常に強かったか理解するためには、この東西・南北方向の熱の輸送量が重要であり(例えばMeinen and McPhaden, 2000)、今後このような輸送量について解析することは重要である。

第1章で述べたように、異なった観測手段は異なる観測網・誤差を持っているため、それらの同化結果への相対的なインパクトがいくつかの論文で報告されてきた。ここでは2例を紹介する。Fisher and Latif(1995)は、海面水温、海面水位、海洋内部の水温構造の相対的なインパクトの違いを、簡単な逐次修正法を用いて調べた。それぞれの観測は鉛直の密度成層に対して異なるインパクトを持つ。西部での海面水位を同化するとその情報が東部に移流され、その結果(海面水位の高低は内部の表層水温の高低とよい相関があるので)東部の表層水温も改善される。同化された情報(例えば表層水温)は、海域によっても異なるが、モデルによって2-5ヶ月保持されるようである。データ同化により現実的で気候学的な状態(言い換えれば平均場)が作り出され、それが数値モデルの中で維持されることにより、赤道波動の伝搬もより現実的になり、ひいてはその伝搬により同化された情報が保持される時間を決めていると考えられている。他の例として、衛星海面高度計による海面高度(水位)、TAO/TRITON プイ係留系による水温データ、船舶による表層水温データのインパクトの違いもCarton et al.(1996)によって調べられた。30-60日程度の時間スケールを持つ季節内変動は衛星海面高度計データで検出でき、季節変動の主な特徴も衛星海面高度計データあるいは船舶データを用いた同化システムで解像できることがわかってきた。最近では塩分データのインパクトも重要な要素であることがわかってきており、これについては、第3章で特に紹介する。

熱帯太平洋は全球データ同化システムによる同化結果を用いた議論もなされてきた(例えば、Derber and Rosati, 1989; Rosati et al., 1996; Bell et al., 2000)。Rosati et al.(1996)は、全球の水温観測データを3次元変分法で同化するシステム(Derber and Rosati, 1989)で得られた1979年から1988年までの10年間の同化実験結果を解析して、混合層・海面水温・東西流速の東西・南北分布・表層の厚さの平均と季節変動の大規模スケールの性質はよく再現されていることを報告している。しかしながら、いくつかの非現実的な結果も得られている。例えば東西流速が

非常に大きくそれが長く続くことなどがあり、改善の余地がある。最近 Ishizaki et al. (2006) は、気象研究所海洋データ同化システム MOVE/MRI.COM (Usui et al., 2006) を用いて、塩分場も修正することによりこの東西流速も現実的な分布を得ることに成功した。Ji et al. (1995) は、1982 年から 1993 年の同化結果を用いた熱収支解析から、熱帯以外では、水温の時間変化と水平移流、及び海面からのフラックスが釣り合っているが、熱帯では海面での熱フラックスの寄与が他の成分に比べてしばしば小さいことを報告している。海面での熱フラックスは海上風の大きさに依存するため、熱収支の海上風への感度を検討することが今後必要である。Chepurin and Carton (1999) は、Carton et al. (2000a, 2000b) による 1950 年から 1995 年にわたる 250 m 以浅の水温場のみ同化した長期の実験結果を用いて、表層の蓄熱量に焦点を絞った解析を行った。この蓄熱量の季節スケールの変動は、観測されている変動とよく合っている (Chepurin and Carton, 1999; Carton et al., 2005 の参考文献を参照のこと)。最近、ドイツのマックスプランク研究所と米国のスクリップス海洋研究所のグループは 1950 年代からの長期の水温場の同化実験をアジョイント法を用いて開始した (Koehl and Stammer, personal communication)。また、筆者らのグループでも 1960 年から 2004 年までの期間で表層 1500m の水温・塩分場を再現する実験を行い、太平洋の表層蓄熱量の場には、海上風の気候変動 (経年から 10 年スケールでの) に応じて、亜熱帯循環系の強弱と南北移動が卓越することが得られた。現在アジョイント法を用いて、米国、ドイツ、フランス、イギリス、日本の研究グループは全球の海洋データ同化システムの開発を行っている (例えば Sirkes et al., 1996; Wenzel et al., 2001; Masuda et al., 2003)。海面水温の気候値、熱の南北輸送、海面での大気とのフラックスのやりとり、水温・塩分の鉛直分布、表層蓄熱量等はよく再現されるようである。近い将来、長期間の同化実験と海洋変動の再現、同化結果の 4 次元データセットを用いた気候変動解析は急速に進展するものと思われる。

3. 塩分場の再構築

海洋では従来船舶による水温観測が主流であったため、第 2 章で述べたデータ同化研究でも水温データが主に使われてきたし、数値モデルの状態変数の中でも主に水温が修正されてきた。しかしながら、多くの海域でやはり塩分分布が無視できないことがわかってきた。例えば、西部熱帯太平洋は蒸発よりも降水が盛んなため正味の淡水フラックスは大気から海洋に入っている海域である。この状況は西部熱帯太平洋に広がる暖水の量に影響するため、西部熱帯太平洋を中心に塩分分布の重要性が認識されてきている (Ji et al., 2000)。海面における大気との淡水フラックスによりつくられた塩分の鉛直構造は、等塩分層とそれよりも深い等温層の間の水温では中立で塩分では安定な層 (バリアーレイヤーと呼ばれる) を作り出していることが近年報告されている。Fujii and Kamachi (2003) は、バリアーレイヤーの厚さと表層蓄熱量との間にはよい相関関係があることを示した。このように、バリアーレイヤーは暖水プールでの熱収支とエルニーニョに伴う海面水温や表層蓄熱量の大きさを理解するうえで、また ENSO 力学への塩分の寄与の可能性を理解するうえで重要である。

Ji et al. (2000) は、観測された水温のみ同化して数値モデルの水温を修正した結果と観測された水温と海面高度 (SSH) データを同化して数値モデルの水温を修正した結果を比較した。その結果、例えば 1996 年には、西太平洋で SSH に 8 cm の差が生じた。これは、西太平洋の低塩分の状態が効いているためである。水温・塩分両方で決まる密度場を鉛直積分することにより SSH は決まるので、塩分が現実的でなくかつ SSH を現実的に修正すると水温場は必然的に非現実的な値 (分布) になる。この結果は Maes (1998) でも支持されており、西太平洋での塩分場の変動は SSH の変動の中で 5–10 cm 位の寄与があることが示された。これらの場を正しく推定するために、Ji et al. (2000) は、水温・塩分両方を修正できる 2 変量の同化スキームを示

峻した。他の研究でも塩分の修正の重要性が指摘されてきた (Cooper, 1988; Woodgate, 1997; Vossepoel, 1999; Vossepoel and Behringer, 2000; Fujii and Kamachi, 2003)。この結果いくつかの 2 変量のスキームが提案されている: 渦位を保存するように水柱を鉛直に移動させて調整する方法 (Cooper and Haines, 1996; Troccoli and Haines, 1999)、SSH を水温・塩分を修正するように 3 次元変分法で使用する方法 (Vossepoel et al., 1999; Vossepoel and Behringer, 2000)、あらかじめ過去の水温・塩分の観測データから鉛直の水温・塩分で結合した主成分分析 (大気・海洋の分野ではよく経験的直交関数 (EOF) 展開と呼ぶ) を行い、その各成分に従って水温あるいは塩分が観測されたときに水温・塩分の両方を同時に修正する方法 (例えば, Maes, 1999; Maes et al., 2000; Maes and Behringer, 2000; Fujii and Kamachi, 2003)。最近 Ishizaki et al. (2006) は、上記 Fujii and Kamachi (2003) が提案した手法を組み込んだ気象研究所海洋データ同化システム MOVE/MRI.COM を用いて、水温場と塩分場を修正することにより、塩分場だけでなく、水温・海面高度、さらに東西流速も現実的な分布を得ることに成功した。この手法では鉛直方向の EOF 展開が用いられているが、今後水平・鉛直同時に展開する手法や、水温・塩分だけでなく他の状態変数 (例えば海面高度) も結合した EOF 展開を用いる等の発展が見込まれる。これまでの処、上述のように比較的簡便な同化手法の中で塩分を修正する方法が提案されてきた。熱帯の長期間にわたる監視と予測には、塩分の観測と同化、水温や海面高度からの塩分の推算が今後も重要である。ここで述べた手法は多変量間の解析をどのように行うかということであり、現在、より高度な同化手法の中で誤差共分散行列の取り扱いをより精密にしていく方向で研究が進展しており、更なる発展が期待される。

4. 縮小近似

第 2, 3 章で述べてきたデータ同化研究の中でも、高度なデータ同化手法であるアジョイント法やカルマンフィルターを 3 次元の海洋大循環モデルと共に海洋のデータ同化システムとして導入する場合には、同化システム (例えば誤差共分散行列等) が巨大なものとなるため多くの工夫がなされてきた。実装上の問題点の一つは誤差共分散行列の大きさが莫大であるということである。この行列の要素の数は制御変数の数の 2 乗である。例えば、最近の海洋大循環モデル (石川 他, 2005) で、全球水平の解像度が東西南北で $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ 、鉛直 40 レベルの場合、この行列の大きさは $O(10^8) \times O(10^8)$ となる。この行列の計算に要するメモリと計算時間に関して、計算機の負荷は非常に大きい。そのため、縮小近似された空間で上記行列に関する演算を行う手法が開発されてきた。ここでは、簡略にそれらの手法を紹介しよう。

変分法で反復的に最適な解を求める場合、初期の反復計算の時は簡略化した数値モデルとそのアジョイントモデルを用い、反復計算が進むにつれてモデルを複雑なものに変えていく (それによって制御変数の数も増大し、力学的なバランスも現実により近づく) incremental な方法 (例えば Courtier et al., 1994; Zhu et al., 2002) や解析の途中で粗い解像度から細かい解像度に変更する多スケールの最適内挿法 (Menemenlis et al., 1997) が提案されている。また、カルマンフィルターで予報誤差共分散行列 (予報を行うときの数値モデルの状態変数の初期分散やカルマンフィルターで逐次的に計算する状態変数の分散を要素とする行列) の計算の場合のみ数値モデルを粗い解像度のものに変えて計算する手法 (Miller and Cane, 1989; Fukumori, 1995) も提案されている。計算機負荷の小さい方法として、モンテカルロ法を用いて予報誤差共分散行列を計算するアンサンブルカルマンフィルター (EnKF, Evensen, 1994) も近年多用されている。粗い解像度の数値モデルを用いたり、定常近似を用いて予報誤差共分散行列を計算する手法 (Fukumori and Malanotte-Rizzoli, 1995) もよく用いられている。そのほか、行列をより小さな次元のモードで展開する手法も提案されている: 多変量の経験直交関数展開を用いて予報誤

差共分散行列を縮小する手法(Cane et al., 1996; Maes, 1999; Fujii and Kamachi, 2003), 経験直交関数展開を用いるフィルター(例えば Verron et al., 1999) ウェーブレット変換を施して低次のモードのみ使用する手法(Chin et al., 1999). 非線形の適応フィルター(あるいは適応変分法: カルマンゲインをアジョイント法で改善する手法)で, カルマンゲインの次元を減らす為の行列の要素のパラメーター化の採用(De Mey, 1997; Hoang et al., 1997; Zhu and Kamachi, 2000).

これらの縮小近似を用いた手法は, 巨大なデータ同化システムを構築する場合に, 計算機資源の制約を満たすために考案された手法である. 広い海域で細かい解像度を持った数値モデルを用いて同化システムを構築し研究を行う場合には不可欠であるが, 上記のような手法で用いられている仮定により, 誤差共分散行列がもつ膨大な情報量を極端に減らしてしまうことは, 一般に誤差共分散の再現性を損なっているといえよう. それは例えば: 1. incremental な方法では非線形の局所的な最適解を避けることができない. 2. 小さな次元のモードで展開する手法では有限個数の低次のモードのみを使用することによる. 局所的な現象(例えば, 鉛直方向のモードを扱う場合の海面水温と混合層の構造・変動)を再現するには, 有限個の低次のモード(すなわち相対的に大きな空間的な構造をもつモード)では不十分である. このような問題点を今後解決し, データ同化の精度向上のためにさらなる研究が望まれる.

5. 事前・事後の誤差評価, 診断, 検証

前章までに示したように, 現実の海洋の状態を再現するために多くのグループで種々の仮定を行い巨大なデータ同化システムをなるべく簡便に構築し, 異なる観測データを同化している. それらにより得られたデータ同化のプロダクトは現実的な海洋現象を表しており有用であるが, そのプロダクトがもつ誤差はどの程度のものであるか算出することは重要である. 同化の事前あるいは事後の誤差評価はどのようなデータ同化システムでもそのプロダクトの信頼性を決定する本質的なものと考えられ(例えば Miller and Cane, 1996; Fukumori, 2001; LeProvost et al., 2002), またデータ同化システムの改良のために重要である. この章では誤差の評価や同化結果の検証方法についてのいくつかの例を報告する.

従来, 予報誤差共分散行列(予報を行うときの数値モデルの状態変数の初期分散やカルマンフィルターで逐次的に計算する状態変数の分散を要素とする行列)の各要素を求めるために, カルマンフィルターでは非対角成分も含めて逐次的に計算されるが, 最適内挿法や変分法を用いたデータ同化手法では非対角成分は数値モデルの格子点間の距離に依存し正規分布を仮定して算出することがよく行われてきており, その分布を決める典型的なスケールとして影響スケール(decorrelation scale)が用いられてきた(例えば, Miller and Cane, 1989; Leetma and Ji, 1989; Derber and Rosati, 1989; Bennett, 1990; Hao and Ghil, 1994; Miller et al., 1995; Rosati et al., 1996; Carton et al., 2000a, 2000b). Fu et al. (1993)と Kuragano and Kamachi (2000)は, 最適内挿法でア prioriに与えられる状態変数の分散を要素とする行列(予報誤差共分散行列)に空間非一様・非等方な要素を用いている数少ない例である. 更に, 誤差共分散行列の要素を算出する為に, モデル変数と観測の状態ベクトルの統計量を使用して評価できることも提案されている. これは共分散マッチングと呼ばれており簡便で有用な方法である(Fu et al., 1993; Fukumori et al., 1999; Menemenlis and Chechelnitsky, 2000).

上記の事前の誤差評価と同様に事後(同化後)の誤差評価もまた重要であり, いくつかの方法が報告されてきた. カルマンフィルターでは自己整合性チェックが提案されている. このチェックでは, 同化前の計算で, 数値モデルによるシミュレーションと同化からの予測値についてそれぞれ観測値からの差を計算し, その差から誤差共分散行列を作成し, 誤差がどの程度あるか見積もる. 一方, カルマンフィルターの誤差の計算結果で期待した誤差(の共分散行列)を計算

し、それぞれが一致するかを、同化前と同化後の値を用いて算出して整合性を確認するものである。数式は省くが、このチェックの有用性が Fukumori et al. (1999) で報告されている。

一方、変分法に関しては、以下のような報告がなされている。最適な状態では、変分法でのイノベーションベクトルに対する評価関数の値はランダム変数であり、もし誤差が正規分布に従えば、それは独立な観測の数に等しい自由度を持ったカイ自乗分布に従う (Bennett, 1992)。もし観測値と数値モデルの出力値をランダム変数と見なすと、最適な状態の時の評価関数の期待値はイノベーションベクトルの次元 (すなわち独立な観測の数) の半分に等しい。さらに、評価関数の分散は上期期待値に一致する (Talagrand, 1998)。これらの性質を同化後の事後評価として用いることが提案されている。なお、一般にカイ²乗分布の期待値・分散はそれぞれ自由度・自由度の2倍であるが、大気・海洋で用いられている評価関数は通常のカイ²乗分布の定義式に1/2の係数がかかっているため、2倍の差が生じることに注意を要する。

データ同化システムを開発する場合、上記の評価・診断方法は重要であるが、海洋データ同化の研究者の間ではそれほど使用されていないので、これからの利用が望まれる。

6. 観測システムの設計と評価

前章までは、観測データを同化して現実的な海洋の状態を求めることを主眼に報告してきた。この章では、逆にデータ同化で発達した手法を用いて、データ同化に用いられる観測はどのようなものが効率的であるかを求める研究について報告する。

TAO/TRITON 係留系システムは、ENSO 予測を行う上で必要不可欠な観測データを提供している。このシステムは1980年代に、ENSOに関するメカニズムの理解と予測のために国際研究計画 Tropical Ocean Global Atmosphere program (TOGA) の中で設計された。しかし、当時は未だ ENSO に関する研究は十分に進展しておらず、その設計は乏しい知識のもとで行われた。現在では ENSO に関する理解が著しく進展し、また、コンピューター技術の発達により観測の有効性の評価に関する新たな手法が実行可能となった。さらに、第3回地球観測サミットで承認された全球地球観測システム(GEOSS)10年実施計画の中では、世界全域を対象とした包括的な観測システムの構築が謳われており、そのためには有効かつ経済的な観測システムを設計する必要がある。そのような状況の下、熱帯太平洋についても、科学的な手法に基づき、ENSO 及びそれに伴う気候予測の精度向上のために有効な観測システムを、再設計する必要性に迫られている。

観測システムの評価で、もっとも頻繁に用いられるのは、既存のデータ同化システムを用いて、過去の ENSO に伴う変動を再現する実験(ハインドキャスト実験)の中で、一部の観測データを利用したり無視したりしてその観測データの予報スキルに対する感度を調べるような方法である。このような方法は、過去に様々なモデルや同化システムにおいて用いられてきた。一部の例外(Johnson et al., 2000 では、海面水温の観測データに比べ、亜表層の水温構造に関する情報はそれほど重要で無いという結果を出している)はあるものの、その結果の多くは亜表層の水温構造を反映したデータの重要性を示している(Ji and Leetmaa, 1997; Rosati et al., 1997; Ji et al., 1998; Segsneider et al., 2001; Wang et al., 2002; Fisher et al., 1997; Syu and Neelin, 2000; Kleeman et al., 1995; Chen et al., 1998; Xue et al., 2000; Tang and Hsieh, 2003)。これは、短周期変動が卓越する大気の影響を強く受けている海面水温に比べ、海洋内部の水温は、比較的長期的の変動を反映しているからであるとよく説明される。しかし、上記のような手法による評価の結果は、モデルや同化システムの性能に大きく左右される。例えば、一部のシステムで亜表層のデータが重要なのは、温度躍層がシャープでないという海洋モデルのバイアスを観測データで修正する必要があるためとも考えられる(Rosati et al., 1997; Ji and Leetmaa, 1997)。

また、同化システムによっては、海面水温を同化することにより亜表層の変動を十分に再現できると考えられ(例えば Durand et al., 2003 など), そのようなシステムでは海面と亜表層のデータでインパクトの差は無くなるかもしれない. さらに, 上記のような方法で検証が可能なのは, 既存の観測データについてであり, また, 十分に観測データがあるここ数 10 年の現象を対象にした場合のみである.

現実には観測網の有効性を検証する方法としては, 仮想観測網シミュレーション実験(Observing System Simulation Experiment: OSSE)が挙げられる. OSSE は一般的に次のような手順により行われる. まず, 現実の再現性が高いモデルを利用し, そのモデルを長期間積分して, その結果を真の状態とみなす. 次に異なる初期値や外力あるいはモデルの誤差を表現するためモデルのパラメーターを変更したり各時間ステップでノイズを加えたりして同じモデルを積分し, その結果を, 観測データを同化する前の数値モデルによるシミュレーションの結果と見なす. このシミュレーション結果に真の状態から取り出した仮想的な観測データを同化して, その結果がどれだけ真の状態に近づくかを調べることににより, その観測データのインパクトを判断する. このような手法は, Morss and Battisti (2004)で採用されているが, 彼らが利用したモデルは, 比較的単純な Zebiak and Cane (1987)のモデルを線形化したものであり, その結果も, 南太平洋の海面水温が比較的重要であると主張するなど, 他の研究と食い違いがある. そのため, 今後は, より精緻なモデルを用いて, この手法により観測システムのインパクトを調べていくことが必要である.

上記の二つの方法は, 実際に観測データを同化するシミュレーションを行い, その結果から観測データの有効性を判断するだけであり, その結果が力学的, 物理的にどのようなメカニズムに基づくのかについては, 何ら情報を与えない. また, その結果は同化スキームの性能に大きく依存する. そこで, 同化スキームの性能に依存せずに, 力学的, 物理的な知見に基づき, 観測データのインパクトについて検討する方法としては, まずアジョイントモデルを用いた感度解析が挙げられる. ここで, 感度解析の方法について簡単に解析する(詳しくは Cacuci, 2003; Cacuci et al., 2003 を参照). 今, 例えば, NINO3 海域の海面水温など, 予測したい現象の指標となる指数をその時刻 T の数値モデルの状態変数 x_T の関数 $J(x_T)$ で表現する. ここで, x_T は全ての状態変数を縦一列に並べたベクトルであることに注意する. また, それより前の時刻 t における状態変数を x_t とし, 時刻 t の値から時刻 T の値を計算する数値モデルの時間発展を記述する演算子を $M_{t,T}(x_t)$ とする. この時, 関数 $J(x_T)$ の変分は, δx_t を用いて,

$$(6.1) \quad \delta J = \langle \delta J / \delta x_t, \delta x_t \rangle$$

と書くことができる. ここで $\langle \bullet, \bullet \rangle$ は内積を表す. さらに,

$$(6.2) \quad \delta J = \langle \delta J / \partial x_T, \delta x_T \rangle = \langle \partial J / \partial x_T, \delta \{M_{t,T}(x_t)\} \rangle = \langle M_{t,T}^* \partial J / \partial x_T, \delta x_t \rangle$$

とも書くことができるので, 結局, $\partial J / \partial x_t = M_{t,T}^* \partial J / \partial x_T$ となる. ここで, $M_{t,T}$ は数値モデル $M_{t,T}$ の接線型演算子であり, 上付 * は, そのアジョイント演算子であることを示す. いま, 時刻 i における接線型モデルの時間積分を M_i とすると, $M_{t,T} = M_T \cdots M_{t+1} M_t$ となるので, $M_{t,T}^* = M_t^* M_{t+1}^* \cdots M_T^*$ と表すことができ, 積分を行うのに時間反転していることがわかる. また, $\partial J / \partial x_t$ は x_t の各要素が変化すると J がどれだけ変化するかという, いわば, x_t の J に対するインパクトを示す. すなわち, 時刻 t におけるインパクトを計算するためには, 時刻 T におけるインパクトを初期値として, アジョイントモデル $M_{t,T}^*$ を時刻 T から t まで時間方向逆向きに時間積分しなければいけない. このようにアジョイントモデルを利用することにより, 各予報変数のある指数へのインパクトが時間を遡るに従いどのように変化するか計算することが可能である.

アジョイントモデルを用いて、エルニーニョの発現の原因を特定するような研究は、過去にいくつか行われている(Fukumori et al., 2004; Galanti et al., 2002; Galanti and Tziperman, 2003). この手法を用いて、ENSO 予測に必要な観測データを検討するような研究も今後盛んになると思われる。

また、行列 $M_{t,T}$ の特異ベクトルを計算するのも、観測システムを評価する有効な方法である。例えば時刻 T における予報の誤差 ε_T のノルムをそれより前の時刻 t の誤差 ε_t のノルムで規格化した、予報誤差の成長率 r は、以下のように表される。

$$(6.3) \quad r^2 = \frac{\langle \varepsilon_T, \varepsilon_T \rangle}{\langle \varepsilon_t, \varepsilon_t \rangle} = \frac{\langle \varepsilon_t, M_{t,T}^* M_{t,T} \varepsilon_t \rangle}{\langle \varepsilon_t, \varepsilon_t \rangle}$$

即ち、最も成長する(r が大きくなるような)予報誤差は、 $M_{t,T}^* M_{t,T}$ の第一固有ベクトルであり、内積が自然内積で定義される場合、接線形演算子 $M_{t,T}$ の第一右特異ベクトルと一致する。このベクトルは、通常、接線形コードとアジョイントモデルを用いて、ランチョス法(Golub and Van Loan, 1996 参照)などで求められる。予報誤差を小さく抑えるためには、初期値の誤差のうち、この第一特異ベクトルと平行な成分を小さく抑えればよい。実際にMorss and Battisti (2004)では、OSSEにより観測のインパクトが大きかった海域と第一右特異ベクトルの類似性について指摘している。

ENSOに関連した第一右特異ベクトルについては、過去にいくつかの研究で、比較的単純化された大気海洋結合モデルを用いて計算されている(Blumenthal, 1991; Xue et al., 1994, 1997a, 1997b; Chen et al., 1997; Thompson, 1998; Fan et al., 2000; Moore and Kleeman, 1996, 1997a, 1997b; Eckert, 1999; Moore et al., 2003)。しかしながら、これらの研究では、第一右特異ベクトルにより表現されるエルニーニョ発生の原因となる初期値の偏差が、利用するモデルにより、太平洋赤道域西部にある場合と、南太平洋亜熱帯域東部にある場合で分かれている。Moore et al. (2003)は、潜熱の効果を検討した場合とそうでない場合でこのような違いが生じ、考慮した場合は原因となる偏差は太平洋熱帯域西部の偏差となると指摘している。このように、物理過程、力学過程を正しく表現するか省略するかで、第一右特異ベクトルが大きく異なってしまうことが考えられる。これまでの研究では、大気モデルと海洋モデルの両方について詳細な鉛直構造や時間変動の表現が可能な大循環モデルを用いて、第一右特異ベクトルを計算した例はなく、今後はより現実に近い数値モデルを用いて従来の研究結果の正当性について検討する必要がある。

7. まとめと俯瞰

この報告では、気候変動に関連した熱帯太平洋での海洋データ同化に関する研究の現状について報告した。海洋の現実の状態(海況)を知るために行われた研究の他に、塩分場の再構築、縮小近似の手法、誤差評価・診断方法、観測システムの設計と評価についても簡略に紹介した。紙数の関係で、データ同化手法そのものについては説明を控えた。また、ここでは説明しなかったが、将来発展性のある手法としては、アジョイント法に適用できる弱制約条件を用いた手法(例えば、Zupanski, 1997; Ishikawa et al., 2001)、カルマンフィルターで誤差統計量を算出しそれをアジョイント法で使用するデュアルシステム(Stammer et al., 2000)、予測誤差共分散行列の算出が比較的簡便で、かつ流れに依存する統計量が得られるアンサンブルカルマンフィルター・スムーザー(Evensen and van Leeuwen, 2000)、あるいはHoang et al. (1997)やZhu and Kamachi (2000)が提案している適応フィルター(又は非線形適応変分法)等が挙げられる。

この報告が対象とする熱帯での気候変動は、大気と海洋が相互作用する系である。大気海洋結合モデルを用いた研究だけでなくデータ同化に関して大気海洋結合モデルを用いて、大気

と海洋を同時に観測データで修正することが必要ではないかと考えられ、それを実行しようとするグループがいくつかある(例えば, Bennett et al., 1998; Lee et al., 2000; 樋口 他 2005; Sugiura et al., 2006). これは大気(海洋)の観測データが大気(海洋)の状態変数を修正するのはもちろんのこと, 大気と海洋の数値モデルをつなぎフラックスをやりとりするカプラーを通じて, 互いに海洋(大気)の状態を修正するという, 大気・海洋を一体化して最適化するという試みである. 数日規模の天気に関する情報の落とし方に工夫が必要であり, 大気的气候変動に関するシグナルをうまく取り出せば, このシステムを用いて気候変動の予測は飛躍的に向上するのではないと思われる.

この報告では気候変動に関連した熱帯太平洋の海洋データ同化に焦点を絞って紹介した. 最近インド洋でもエルニーニョ現象と同様に海面水温の東西の顕著なコントラストがつく現象(インド洋ダイポールモード)が発見され, 気候変動に大きな役割を果たしていることが明らかになってきた. 現在まで数値モデリングと観測を主体にした研究が主であり, データ同化・予測に関してはこれからの発展が見込まれる. この現象についての総合報告としては Yamagata et al. (2004)を参照されたい.

この報告で紹介した同化手法を用いて, 主に熱帯太平洋を対象として現業運用する海洋データ同化システムが係留系の TAO/TRITON ブイや衛星観測による観測システムの発展と相まって発達してきた. その成果を気象庁のような現業官庁では随時取り入れて現業運用するシステムを構築し, 監視・予報等の業務を行ってきた. 米国, ヨーロッパ, 日本での主だったシステムの例としては, 例えば Ji and Leetmaa (1997), Behringer et al. (1998), Ji et al. (2000), Alves et al. (2001), Segsneider et al. (2000), 石井・坂元(2002)を参照されたい. また, これらのシステムによるプロダクトと予測の情報は, 米国海洋大気庁 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) が発行する Climate Diagnostics Bulletin に定期的に紹介されている. これらの現業機関での監視・予測業務の発展により, 現業業務からのアウトプットが研究への種となり進展する側面も無視できない. そのため, 各国の現業機関と大学等の研究機関との緊密な連携は, 気候・海洋学を進展させるために今後ますます重要になってくると思われ, 互いの協力体制の確立が望まれている. このような連携・協力についての最近の問題点と解決に向けての取り組みは, Derber et al. (2006)に報告されている.

謝 辞

この報告を丁寧に査読し, 数々の改良点を指摘された査読者に感謝いたします. この報告の一部は人・自然・地球共生プロジェクト RR2002 「先端的四次元大気海洋陸域結合データ同化システムの開発と高精度気候変動予測に必要な初期値化・再解析統合データセットの構築」の研究の一環として行われたものです. ここに記して感謝いたします.

参 考 文 献

- Alves, J. O. S., Haines, K. and Anderson, D. L. T. (2001) Sea level assimilation experiments in the tropical Pacific, *Journal of Physical Oceanography*, **31**, 305–323.
- Behringer, D. W., Ji, M. and Leetmaa, A. (1998) An improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization. Part I: The ocean data assimilation system, *Monthly Weather Review*, **126**, 1013–1021.
- Bell, M. J., Forbes, R. M. and Hines, A. (2000) Assessment of the FOAM global data assimilation system for real-time operational ocean forecasting, *Journal of Marine System*, **24**, 249–275.

- Bell, M. J., Martin, M. J. and Nichols, N. K. (2001). Assimilation of data into an ocean model with systematic errors near the equator, *Ocean Applications Technical Note*, No. 27, UK Met Office, Bracknell.
- Bengtsson, L., Ghil, M. and Kallen, E. (ed.) (1981). *Dynamic Meteorology: Data Assimilation Methods*, Springer Verlag, New York.
- Bennett, A. F. (1990). Inverse methods for assessing ship-of-opportunity networks and estimating circulation and winds from tropical expendable bathythermograph data, *Journal of Geophysical Research*, **95**, 16111–16148.
- Bennett, A. F. (1992). *Inverse Methods in Physical Oceanography*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Bennett, A. F. (2002). *Inverse Modeling of the Ocean and Atmosphere*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Bennett, A. F. and Miller, R. N. (1991). Weighting initial conditions in variational assimilation schemes, *Monthly Weather Review*, **119**, 1098–1102.
- Bennett, A. F., Chua, B. S., Harrison, D. E. and McPhaden, M. J. (1998). Generalized inversion of tropical atmosphere-ocean data and a coupled model of the tropical Pacific, *Journal of Climate*, **11**, 1768–1792.
- Blumenthal, M. B. (1991). Predictability of a coupled ocean-atmosphere model, *Journal of Climate*, **4**, 766–784.
- Brasseur, P. P. and Nihoul, J. C. J. (ed.) (1994). *Data Assimilation: Tools for Modelling the Ocean in a Global Change Perspective*, Springer Verlag, New York.
- Busalacchi, A. J. (1996). Data assimilation in support of tropical ocean circulation, *Modern Approaches to Data Assimilation in Ocean Modeling* (ed. P. Malanotte-Rizzoli), 235–270, Elsevier, Amsterdam.
- Busalacchi, A. J. and Cane, M. A. (1985). Hindcasts of sea level variations during the 1982–83 El Niño, *Journal of Physical Oceanography*, **15**, 213–221.
- Cacuci, D. G. (2003). *Sensitivity and Uncertainty Analysis*, Vol. I, Chapman & Hall/CRC, New York.
- Cacuci, D. G., Ionescu-Bujor, M. and Navon, I. M. (2003). *Sensitivity and Uncertainty Analysis*, Vol. II, Chapman & Hall/CRC, New York.
- Cane, M. A., Kaplan, A., Miller, R. N., Tang, B., Hackert, E. C. and Busalacchi, A. J. (1996). Mapping tropical Pacific sea level: Data assimilation via a reduced state space Kalman filter, *Journal of Geophysical Research*, **101**, 22599–22617.
- Carton, J. A., Giese, B. S., Cao, X. and Miller, L. (1996). Impact of altimeter, thermister, and expendable bathythermograph data on retrospective analyses of the tropical Pacific Ocean, *Journal of Geophysical Research*, **101**, 14147–14159.
- Carton, J. A., Chepurin, G. and Cao, X. (2000a). A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950–95. Part I: Methodology, *Journal of Physical Oceanography*, **30**, 294–309.
- Carton, J. A., Chepurin, G. and Cao, X. (2000b). A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950–95. Part II: Results, *Journal of Physical Oceanography*, **30**, 311–326.
- Carton, J. A., Giese, B. S. and Grodsky, S. A. (2005). Sea level rise and the warming of the oceans in the simple ocean data assimilation (SODA) ocean reanalysis, *Journal of Geophysical Research*, **110**, C09006, doi:10.1029/2004JC002817.
- Chen, D., Cane, M. A., Zebiak, S. E. and Kaplan, A. (1998). The impact of sea level data assimilation on the Lamont model prediction of the 1997/98 El Niño, *Geophysical Research Letters*, **25**, 2837–2840.

- Chen, Y.-Q., Battisti, D. S., Palmer, T. N., Barsugli, J. and Sarachik, E. S. (1997). A study of the predictability of tropical Pacific SST in a coupled atmosphere/ocean model using singular vector analysis: The role of the annual cycle and ENSO cycle, *Monthly Weather Review*, **125**, 831–845.
- Chepurin, G. A. and Carton, J. A. (1999). Comparison of retrospective analyses of the global ocean heat content, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **29**, 119–145.
- Chin, T. M., Mariano, A. J. and Chassignet, E. P. (1999). Spatial regression and multiscale approximations for sequential data assimilation in ocean model, *Journal of Geophysical Research*, **104**, 7991–8014.
- Cooper, M. (1988). The effect of salinity in tropical ocean model, *Journal of Physical Oceanography*, **18**, 697–707.
- Cooper, M. and Haines, K. (1996). Altimetric assimilation with water property conservation, *Journal of Geophysical Research*, **101**, 14147–14159.
- Courtier, P., Derber, J., Errico, R., Louis, J.-F. and Vukicevic, T. (1993). Important literature on the use of adjoint, variational methods and the Kalman filter in meteorology, *Tellus*, **45A**, 342–357.
- Courtier, P., Thepaut, J.-N. and Hollingsworth, A. (1994). A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **120**, 1367–1387.
- Courtier, P., Busalacchi, A., Gauthier, P., Ghil, M., Hollingsworth, A., Ide, K., Kamachi, M., O'Brien, J., O'Neil, A., Planton, S. and Steenbergen, D. (ed.) (2000). *Proceedings of the Third International Symposium on Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography*, WMO Technical Document, WMO/TD-No. 986, World Meteorological Organization, Geneva.
- Daley, R. (1991). *Atmospheric Data Analysis*, Cambridge University Press, Cambridge.
- De Mey, P. (1997). Data assimilation at the oceanic mesoscale: A review, *Journal of Meteorological Society of Japan*, **75**, 415–427.
- Derber, J. D. and Rosati, A. (1989). A global oceanic data assimilation system, *Journal of Physical Oceanography*, **19**, 1333–1347.
- Derber, J. D., McLaughlin, D., O'Neil, A. and Kamachi, M. (2006). Opportunities for enhanced collaboration within the data assimilation community, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **131**, 3683–3693.
- Durand, F., Gourdeau, L., Delcroix, T. and Verron, J. (2003). Can we improve the representation of modeled ocean mixed layer by assimilating surface-only satellite-derived data? A case study for the tropical Pacific during the 1997–1998 El Nino, *Journal of Geophysical Research*, **108**, 3200, doi:10.1029/2002JC001603.
- Eckert, C. (1999). On predictability limits of ENSO. A study performed with a simplified model of the tropical Pacific ocean-atmosphere system, Report, No. 55, Max Planck Institute für Meteorologie, Hamburg.
- Evensen, G. (1994). Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics, *Journal of Geophysical Research*, **99**, 10143–10162.
- Evensen, G. and van Leeuwen, P. J. (2000). An ensemble Kalman smoother for nonlinear dynamics, *Monthly Weather Review*, **128**, 1852–1867.
- Fan, Y., Allen, M. R., Anderson, D. L. T. and Balmaseda, M. A. (2000). How predictability depends on the nature of uncertainty in initial conditions in a coupled model of ENSO, *Journal of Climate*, **13**, 3298–3313.
- Fisher, M. and Latif, M. (1995). Assimilation of temperature and sea level observations into a prim-

- itive equation model of the tropical Pacific, *Journal of Marine System*, **6**, 31–46.
- Fisher, M., Latif, M., Flugel, M. and Ji, M. (1997). The impact of data assimilation on ENSO simulations and predictions, *Monthly Weather Review*, **125**, 819–829.
- Flemming, N. C. (1999). Dividends from investing in ocean observations: A European perspective, *Proceedings of the International Conference on the Ocean Observing System for Climate, Solicited Papers*, Vol. 1, 429–447.
- Fu, L.-L., Vazquez, J. and Perigaud, C. (1991). Fitting dynamic models to the Geosat sea level observations in the tropical Pacific Ocean. Part I: A free wave model, *Journal of Physical Oceanography*, **21**, 798–809.
- Fu, L.-L., Fukumori, I. and Miller, R. N. (1993). Fitting dynamic models to the Geosat sea level observations in the tropical Pacific Ocean. Part II: A linear, wind-driven model, *Journal of Physical Oceanography*, **23**, 2162–2181.
- Fujii, Y. and Kamachi, M. (2003). Three dimensional analysis of temperature and salinity in the equatorial Pacific using a variational method with vertical coupled temperature-Salinity empirical orthogonal function modes, *Journal of Geophysical Research*, **108**(C9), 3297, doi: 10.1029/2002JC001745.
- Fukumori, I. (1995). Assimilation of TOPEX sea level measurements with a reduced-gravity, shallow water model of the tropical Pacific ocean, *Journal of Geophysical Research*, **100**, 25027–25039.
- Fukumori, I. (2001). Data assimilation by models, *Satellite Altimetry and Earth Sciences* (eds. L.-L. Fu and A. Cazenave), 237–265, Academic Press, San Diego.
- Fukumori, I. and Malanotte-Rizzoli, P. (1995). An approximate Kalman filter for ocean data assimilation: An example with an idealized Gulf stream model, *Journal of Geophysical Research*, **100**, 6777–6793.
- Fukumori, I., Raghunath, R., Fu, L.-L. and Chao, Y. (1999). Assimilation of TOPEX/POSEIDON altimeter data into a global ocean circulation model: How good are the results?, *Journal of Geophysical Research*, **104**, 25647–25655.
- Fukumori, I., Lee, T., Cheng, B. and Menemenlis, D. (2004). The origin, pathway, and destination of Nino-3 water estimated by a simulated passive tracer and its adjoint, *Journal of Physical Oceanography*, **34**, 582–604.
- Galanti, E. and Tziperman, E. (2003). A midlatitude-ENSO teleconnection mechanism via Baroclinically unstable long Rossby waves, *Journal of Physical Oceanography*, **33**, 1877–1888.
- Galanti, E., Tziperman, E., Harrison, M. and Rosati, A. (2002). The equatorial thermocline outcropping. A seasonal control on the tropical Pacific Ocean-Atmosphere instability strength, *Journal of Climate*, **15**, 2721–2739.
- Ghil, M. and Malanotte-Rizzoli, P. (1991). Data assimilation in meteorology and oceanography, *Advances in Geophysics*, **33**, 141–266.
- Ghil, M., Ide, K., Bennett, A., Courtier, P., Kimoto, M., Nagata, M., Saiki, M. and Sato, N. (ed.) (1997). Data assimilation in meteorology and oceanography: Theory and practice, *Journal of Meteorological Society of Japan*, **75**, 111–496.
- Golub, G. H. and Van Loan, C. F. (1996). *Matrix Computations*, 3rd ed., The Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland.
- Griffies, S. M., Boning, C., Bryan, F. O., Chassignet, E. P., Gerdes, R., Hasumi, H., Hirst, A., Treguier, A.-M. and Webb, D. (2000). Developments in ocean climate modeling, *Ocean Modeling*, **2**, 123–192.
- Guordeal, L., Verron, J., Delcroix, T., Busalacchi, A. J. and Murtugudde, R. (2000). Assimilation of TOPEX/Poseidon altimetric data in a primitive equation model of the tropical Pacific Ocean during the 1992–1996 El Nino—Southern Oscillation period, *Journal of Geophysical Research*,

- 105, 8473–8488.
- Hao, Z. and Ghil, M. (1994). Data assimilation in a simple tropical ocean model with wind stress errors, *Journal of Physical Oceanography*, **24**, 2111–2128.
- 樋口知之, 上野玄太, 川崎能典, 中村和幸 (2005). 高次元非線形・非ガウス型フィルタに関する研究とその四次元データ同化システムへの適用, 先端的四次元大気海洋陸域結合データ同化システムの開発と高精度気候変動予測に必要な初期値化・再解析統合データセットの構築, 平成16年度研究成果報告書, 120–127, 文部科学省・海洋研究開発機構.
- Hoang, H. S., Baraille, R., Talagrand, O., Carton, X. and De Mey, P. (1997). Adaptive filtering: Application to assimilation of satellite data assimilation in oceanography, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **27**, 257–281.
- 石井正好, 坂元賢治 (2002). 全球海洋データ同化システム『季節予報(3か月予報, 暖・寒候期予報)の改善』, 78–82, 気象庁気候・海洋気象部.
- 石川一郎, 辻野博之, 平原幹俊, 中野英之, 安田珠幾, 石崎廣 (2005). 気象研究所共用海洋モデル(MRI.COM)解説, 気象研究所技術報告, 第47号, 気象研究所, つくば.
- Ishikawa, Y., Awaji, T. and Komori, N. (2001). Dynamical initialization for the numerical forecasting of ocean surface circulations using a variational assimilation system, *Journal of Physical Oceanography*, **31**, 75–93.
- Ishizaki, S., Yasuda, T., Fujii, Y., Usui, N. and Kamachi, M. (2006). Global temperature and salinity reanalysis experiment using MRI Multivariate Ocean Variational Estimation (MOVE) System, *WMO Technical Document*, WMO, Geneva (in press).
- Ji, M. and Leetmaa, A. (1997). Impact of data assimilation on ocean initialization and El Niño prediction, *Monthly Weather Review*, **125**, 742–753.
- Ji, M., Leetmaa, A. and Derber, J. (1995). An ocean analysis system for seasonal to interannual climate studies, *Monthly Weather Review*, **123**, 460–481.
- Ji, M., Behringer, D. W. and Leetmaa, A. (1998). An improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization, *Monthly Weather Review*, **126**, 1022–1034.
- Ji, M., Reynolds, R. W. and Behringer, D. (2000). Use of TOPEX/Poseidon sea level data for ocean analyses and ENSO prediction: Some early results, *Journal of Climate*, **13**, 216–231.
- Johnson, S. D., Battisti, D. S. and Sarachik, E. S. (2000). Empirically derived Markov models and prediction of tropical Pacific sea surface temperature anomalies, *Journal of Climate*, **13**, 3–17.
- Kalnay, E. (2003). *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*, Cambridge University Press, Cambridge.
- 蒲地政文 (1994). 変分法による随伴方程式を用いたデータ同化作用, *ながれ*, **13**, 440–451.
- Kamachi, M. and O'Brien, J. J. (1995). Continuous data assimilation of drifting buoy trajectory into an equatorial Pacific Ocean model, *Journal of Marine System*, **6**, 159–178.
- Kamachi, M., Fujii, Y. and Zhou, X. (2002). Ocean data assimilation in the tropical Pacific: A short survey, *Journal of Oceanography*, **58**, 45–55.
- Kleeman, R., Moore, A. M. and Smith, N. R. (1995). Assimilation of subsurface thermal data into a simple ocean model for the initialization of an intermediate tropical coupled ocean-atmosphere forecast model, *Monthly Weather Review*, **123**, 3103–3113.
- Kuragano, T. and Kamachi, M. (2000). Global statistical space-time scales of oceanic variability estimated from the TOPEX/POSEIDON altimeter data, *Journal of Geophysical Research*, **105**, 955–974.
- Le Provost, C., Bell, M., Chassignet, E., Cummings, J., Fukumori, I., Hurlburt, H. and Kamachi, M. (2002). Assessment and testing of GODAE products, *Proceedings of the International Symposium "En route to GODAE"*, 61–67.
- Lee, T., Boulanger, J.-P., Fu, L.-L., Foo, A. and Giering, R. (2000). Data assimilation by a simple

- coupled ocean-atmosphere model: Application to 1997–1998 El Nino, *Journal of Geophysical Research*, **105**, 26063–26087.
- Leetmaa, A. and Ji, M. (1989). Operational hindcasting of the tropical Pacific, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **13**, 465–490.
- Long, R. B. and Thacker, W. C. (1989a). Data assimilation into a numerical equatorial ocean model. I. The model and the assimilation algorithm, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **13**, 379–412.
- Long, R. B. and Thacker, W. C. (1989b). Data assimilation into a numerical equatorial ocean model. II. Assimilation experiments, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **13**, 413–439.
- Malanotte-Rizzoli, P. (ed.) (1996). *Modern Approaches to Data Assimilation in Ocean Modeling*, Elsevier, Amsterdam.
- Malanotte-Rizzoli, P. and Tziperman, E. (1996). The oceanographic data assimilation problem: Overview, motivation and purposes, *Modern Approaches to Data Assimilation in Ocean Modeling* (ed. P. Malanotte-Rizzoli), 3–17, Elsevier, Amsterdam.
- Maes, C. (1998). Estimating the influence of salinity on sea level anomaly in the ocean, *Geophysical Research Letters*, **25**, 3551–3554.
- Maes, C. (1999). A note on the vertical scales of temperature and salinity on sea level anomaly in the ocean, *Journal of Geophysical Research*, **104**, 11037–11048.
- Maes, C. and Behringer, D. (2000). Using satellite-derived sea level and temperature profiles for determining the salinity variability, *Journal of Geophysical Research*, **105**, 8537–8548.
- Maes, C., Behringer, D., Reynolds, R. W. and Ji, M. (2000). Retrospective analysis of the salinity variability in the western tropical Pacific Ocean using an indirect minimization approach, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **17**, 512–524.
- Masuda, S., Awaji, T., Sugiura, N., Ishikawa, Y., Baba, K., Horiuchi, K. and Komori, N. (2003). Improved estimates of the dynamical state of the North Pacific Ocean from a 4 dimensional variational data assimilation, *Geophysical Research Letters*, **30**(16), 1868, doi:10.1029/2003GL017604.
- Meinen, C. S. and McPhaden, M. J. (2000). Observations of warm water volume changes in the Equatorial Pacific and their relationship to El Nino and La Nina, *Journal of Climate*, **13**, 3551–3559.
- Menemenlis, D. and Chechelnitsky, M. (2000). Error estimates for an ocean general circulation model from altimeter and acoustic tomography data, *Monthly Weather Review*, **128**, 763–778.
- Menemenlis, D., Fieguth, P., Wunsch, C. and Willsky, A. (1997). Adaptation of a fast optimal interpolation algorithm to the mapping of oceanographic data, *Journal of Geophysical Research*, **102**, 10573–10584.
- Miller, R. N. and Cane, M. A. (1989). A Kalman filter analysis of sea level height in the tropical Pacific, *Journal of Physical Oceanography*, **19**, 773–790.
- Miller, R. N. and Cane, M. A. (1996). Tropical data assimilation: Theoretical aspects, *Modern Approaches to Data Assimilation in Ocean Modeling* (ed. P. Malanotte-Rizzoli), 207–233, Elsevier, Amsterdam.
- Miller, R. N., Busalacchi, A. J. and Hackert, E. C. (1995). Sea surface topography fields of the tropical Pacific from data assimilation, *Journal of Geophysical Research*, **100**, 13389–13425.
- Mooers, C. N. K. (2000). Operational oceanography: Shall we dance?, *EOS AGU Transactions*, March 14, 115–116.
- Moore, A. M. (1989). Aspects of geostrophic adjustment during tropical ocean data assimilation, *Journal of Physical Oceanography*, **19**, 435–461.
- Moore, A. M. (1990). Linear equatorial wave mode initialization in a model of the tropical Pacific

- Ocean: An initialization scheme for tropical ocean models, *Journal of Physical Oceanography*, **20**, 423–445.
- Moore, A. M. and Anderson, D. L. T. (1989). The assimilation of XBT data into a layer model of the tropical Pacific Ocean, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **13**, 441–464.
- Moore, A. M. and Kleeman, R. (1996). The dynamics of error growth and predictability in a coupled model of ENSO, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **122**, 1405–1446.
- Moore, A. M. and Kleeman, R. (1997a). The singular vectors of a coupled ocean-atmosphere model of ENSO. Part I: Thermodynamics, energetics and error growth, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **123**, 953–981.
- Moore, A. M. and Kleeman, R. (1997b). The singular vectors of a coupled ocean-atmosphere model of ENSO. Part II: Sensitivity studies and dynamical significance, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **123**, 983–1006.
- Moore, A. M., Vialard, J., Weaver, A. T., Anderson, D. L. T., Kleeman, R. and Johnson, R. (2003). The role of air-sea interaction in controlling the optimal perturbations of low-frequency tropical coupled ocean-atmosphere models, *Journal of Climate*, **16**, 951–968.
- Morss, R. E. and Battisti, D. S. (2004). Evaluating observing requirements for ENSO prediction: Experiments with an intermediate coupled model, *Journal of Climate*, **17**, 3057–3073.
- 中村和幸, 上野玄太, 樋口知之 (2005). データ同化: その概念と計算アルゴリズム, *統計数理*, **53**, 211–229.
- OCEANOBS99 (1999). Ocean observing system for climate, *Proceedings of the International Conference on the Ocean Observing System for Climate, Solicited Papers*, Vol. 1.
- Philander, S. G. (1990). *El Nino, La Nina, and the Southern Oscillation*, Academic Press, San Diego, California.
- Rosati, A., Gudgel, R. and Miyakoda, K. (1996). Global ocean data assimilation system, *Modern Approaches to Data Assimilation in Ocean Modeling* (ed. P. Malanotte-Rizzoli), 181–203, Elsevier, Amsterdam.
- Rosati, A., Miyakoda, K. and Gudgel, R. (1997). The impact of ocean initial conditions on ENSO forecasting with a couple model, *Monthly Weather Review*, **125**, 754–772.
- Segsneider, J., Anderson, D. L. T. and Stockdale, T. N. (2000). Towards the use of altimetry for operational seasonal forecasting, ECMWF Technical Memorandum, No. 303.
- Segsneider, J., Anderson, D. L. T., Vialard, J., Balmaseda, M., Stockdale, T. N., Troccoli, A. and Haines, K. (2001). Initialization of seasonal forecasts assimilating sea level and temperature observations, *Journal of Climate*, **14**, 4292–4307.
- Sheinbaum, J. and Anderson, D. L. T. (1990a). Variational assimilation of XBT data. Part I, *Journal of Physical Oceanography*, **20**, 672–688.
- Sheinbaum, J. and Anderson, D. L. T. (1990b). Variational assimilation of XBT data. Part II: Sensitivity studies and use of smoothing constraints, *Journal of Physical Oceanography*, **20**, 689–704.
- Sirkes, Z., Tziperman, E. and Thacker, W. C. (1996). Combining data and a global primitive equation ocean general circulation model using the adjoint method, *Modern Approaches to Data Assimilation in Ocean Modeling* (ed. P. Malanotte-Rizzoli), 119–145, Elsevier, Amsterdam.
- Smedstadt, O. M. and O'Brien, J. J. (1991). Variational data assimilation and parameter estimation in an equatorial Pacific ocean model, *Progress in Oceanography*, **26**, 179–241.
- Stammer, D., Davis, R., Fu, L.-L., Fukumori, I., Gierling, R., Lee, T., Marotzke, J., Marshall, J., Menemenlis, D., Niiler, P., Wunsch, C. and Zlotnicki, V. (2000). Ocean state estimation in support of CLIVAR and GODAE, *Clivar Exchange*, **5**, 3–5 & 15.
- Sugiura, N., Awaji, T., Masuda, S., Ishida, N., Miyama, T., Mochizuki, T., Igarashi, H., Ishikawa,

- Y., Komori, N., Horiuchi, K., Nakamura, T., Sasaki, Y. and Toyoda, T. (2006). Improved estimates of climatological seasonal change from a 4D-Var coupled data assimilation, WMO Technical Document, Geneva, Swiss (in press).
- Syu, H.-H. and Neelin, J. D. (2000). ENSO in a hybrid coupled model. Part II: Prediction with piggyback data assimilation, *Climate Dynamics*, **16**, 35–48.
- Talagrand, O. (1998). A posteriori evaluation and verification of analysis and assimilation algorithms, *Proceedings of ECMWF Workshop on Diagnosis of Data Assimilation System, Reading*, 17–28, World Meteorological Organization, Geneva.
- Tang, Y. and Hsieh, W. W. (2003). ENSO simulation and prediction in a hybrid coupled model with data assimilation, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **81**, 1–19.
- Thompson, C. J. (1998). Initial conditions for optimal growth in a coupled ocean-atmosphere model of ENSO, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **55**, 537–557.
- 鳥羽良明 (編) (1996). 『大気・海洋の相互作用』, 東京大学出版会, 東京.
- Troccoli, A. and Haines, K. (1999). Use of the temperature-salinity relation in a data assimilation context, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **16**, 2011–2025.
- 露木 義 (1997). 第5章変分法によるデータ同化, 数値予報課報告, 別冊43号「データ同化の現状と展望」(巽 保夫 編), 102–165, 気象庁予報部, 東京.
- Usui, N., Fujii, Y., Ishizaki, S., Tsujino, H., Yasuda, T. and Kamachi, M. (2006). Introduction of the Meteorological Research Institute Multi-Variate Ocean Variational Estimation System (MOVE-System), *Journal of the Advanced Space Research* (in press).
- Verron, J., Gourdeau, L., Pham, D. T., Murtugudde, R. and Busalacchi, A. J. (1999). An extended Kalman filter to assimilate satellite altimeter data into a nonlinear numerical model of the tropical Pacific Ocean: Method and validation, *Journal of Geophysical Research*, **104**, 5441–5458.
- Vossepoel, F. C. (1999). Sea-level data assimilation for estimating salinity variability in the Tropical Pacific, Ph.D. Thesis, Delft Institute for Earth-Oriented Space Research, Delft University Press, Delft, Holland.
- Vossepoel, F. C. and Behringer, D. (2000). Impact of sea level assimilation on salinity variability in the western equatorial Pacific, *Journal of Physical Oceanography*, **30**, 1706–1721.
- Vossepoel, F. C., Reynolds, R. W. and Miller, L. (1999). Use of the sea level observations to estimate salinity variability in the tropical Pacific, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **16**, 1401–1415.
- Wang, G., Kleeman, R., Smith, N. and Tseitkin, F. (2002). The BMRC coupled general circulation model ENSO forecast system, *Monthly Weather Review*, **130**, 975–991.
- Wenzel, M., Scroter, J. and Olbers, D. (2001). The annual cycle of the global ocean circulation as determined by 4DVAR data assimilation, *Progress in Oceanography*, **48**, 73–119.
- Woodgate, R. A. (1997). Can we assimilate temperature data alone into a full equation of state model?, *Ocean Modelling*, **114**, 4–5.
- Wunsch, C. (1996). *The Ocean Circulation Inverse Problem*, Cambridge University Press, New York.
- Xue, Y., Cane, M. A., Zebiak, S. E. and Blumenthal, M. B. (1994). On the prediction of ENSO: A study with a low order Markov model, *Tellus*, **46A**, 512–528.
- Xue, Y., Cane, M. A. and Zebiak, S. E. (1997a). Predictability of a coupled model of ENSO using singular vector analysis. Part I: Optimal growth in seasonal background and ENSO cycle, *Monthly Weather Review*, **125**, 2043–2056.
- Xue, Y., Cane, M. A. and Zebiak, S. E. (1997b). Predictability of a coupled model of ENSO using singular vector analysis. Part II: Optimal growth and forecast skill, *Monthly Weather Review*, **125**, 2057–2073.

- Xue, Y., Leetmaa, A. and Ji, M. (2000) ENSO prediction with Markov models: The impact of sea level, *Journal of Climate*, **13**, 849–871.
- Yamagata, T., Behera, S. K., Luo, J.-J., Masson, S., Jury, M. R. and Rao, S. A. (2004) Coupled ocean-atmosphere variability in the tropical Indian Ocean, *Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction*, Geophysical Monograph Series, Vol.147, American Geophysical Union, Washington D.C.
- Zebiak, S. E. and Cane, M. A. (1987) A model El Nino-Southern Oscillation, *Monthly Weather Review*, **115**, 2262–2278.
- Zhu, J. and Kamachi, M. (2000) An adaptive variational method for data assimilation with imperfect models, *Tellus*, **52A**, 265–279.
- Zhu, J., Kamachi, M. and Wang, D. (2002) Estimation of air-sea heat flux by variational assimilation of oceanic data: A study based on simulated data and a Mellor-Yamada mixed layer model, *Journal of Geophysical Research*, **107**(C10), 3159, doi:10.1029/2001JC000995.
- Zupanski, D. (1997) A general weak constraint applicable to operational 4DVAR data assimilation systems, *Monthly Weather Review*, **125**, 2274–2292.

Recent Progress in Ocean Data Assimilation on Climate in Tropical Pacific

Masafumi Kamachi¹, Yosuke Fujii¹, Shirou Ishizaki², Satoshi Matsumoto¹,
Toshiya Nakano¹ and Tamaki Yasuda³

¹Oceanographic Research Department, Meteorological Research Institute

²Global Environment and Marine Department, Japan Meteorological Agency

³Climate Research Department, Meteorological Research Institute

This review article presents several research developments in ocean data assimilation in the tropical Pacific, primarily regarding climate-scale phenomena. Aspects of ocean state estimation, reduced space techniques, theoretical error estimations, diagnostics and estimation of observing system are also briefly reported.