

## 特集「海洋気象業務に関する最新の技術的動向」

海面力学高度データを用いた  
太平洋表面海水中的新たな全アルカリ度推定式高谷 祐介<sup>1</sup>・延与 和敬<sup>2</sup>・飯田 洋介<sup>1</sup>・小嶋 惇<sup>1</sup>・中野 俊也<sup>1</sup>・  
石井 雅男<sup>3</sup>・笹野 大輔<sup>3</sup>・小杉 如央<sup>3</sup>・緑川 貴<sup>4</sup>・鈴木 亨<sup>5</sup>

## 要 旨

太平洋の表面海水中の全アルカリ度 (TA : Total Alkalinity) について、塩分で規格化した TA と海面力学高度 (SSDH : Sea Surface Dynamic Height) 間の関係から 5 つの海域に区分し、海面塩分と SSDH をパラメータとした推定式を作成した。推定値と測定値の差から計算される新たな推定式の平均 2 乗誤差は、 $7.8 \mu\text{mol/kg}$  と見積もられた。新たな推定式は、特に TA や他のパラメータも大きな時空間変動を示す北太平洋の亜熱帯-亜寒帯移行領域で、従来の推定式に比べ推定精度が向上した。

## 1. はじめに

全アルカリ度 (TA : Total Alkalinity) は、測定可能な海水中炭酸系パラメータの 1 つである (Dickson, 1992 ; Wolf-Gradrow *et al.*, 2007)。測定可能な海洋の炭酸系パラメータには、TA のほか、溶存無機炭素 (DIC : Dissolved Inorganic Carbon)、水素イオン濃度指数 (pH) 及び二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) 分圧 ( $p\text{CO}_2$  あるいは  $f\text{CO}_2$ ) の 4 つがある。これら 4 つパラメータの内 2 つが分かれば、海水中の炭酸系パラメータの化学平衡の関係から、残りの 2 つが算出可能である。近年、地球温暖化に加えて、人為起源  $\text{CO}_2$  の増加による海洋酸性化が“もう 1 つの二酸化炭素問題”として認識されている (Doney *et al.*, 2009)。海洋酸性化は、海洋生物の成長や繁殖に負の影響を及ぼす可能性があり、海洋生態系への影響が懸念されている (Orr *et al.*,

2005)。大気  $\text{CO}_2$  濃度の増加による海洋酸性化の傾向を評価するために、他の炭酸系パラメータ同様、TA の時空間変動を理解することはますます重要になっている (Feely *et al.*, 2004)。

海水中の TA は、温度や圧力の変化、淡水フラックス (降水量と蒸発量の差、河川水の流入、海水の形成や融解等) に伴う塩分の変化、及び海水混合に対して保存性がある。塩分 (S) で規格化した TA ( $\text{NTA} = \text{TA} \times 35/\text{S}$ ) の変化は、炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) の骨格の形成や分解のような生物活動によっても起こる (Zeebe and Wolf-Gladrow, 2001)。また、NTA の分布 (極域で高く、熱帯・亜熱帯域で低い) は、NTA の豊富な下層の海水との深い対流混合や水平移流の結果として、大規模な海洋循環を反映しているように見える。

<sup>1</sup> 地球環境・海洋部海洋環境解析センター

<sup>2</sup> 地球環境・海洋部海洋気象課

<sup>3</sup> 気象研究所海洋・地球化学研究部

<sup>4</sup> 東京管区気象台 (現 気象研究所海洋・地球化学研究部)

<sup>5</sup> 日本水路協会海洋情報研究センター

これまでの研究から、海面水温 (SST : Sea Surface Temperature) や 海面塩分 (SSS : Sea Surface Salinity) のような他の海洋パラメータによる表層 TA の経験的な関係が提唱されている (例えば, Millero *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2006). Millero *et al.* (1998) は, 全海洋表層を 6 つの海域に区分し, 大西洋と太平洋の熱帯・亜熱帯域では NTA が一定であることを報告している. また, その他の海域では, TA は, NTA と SST の関係から推定できるとした. Lee *et al.* (2006) は, SST と SSS をパラメータとした推定式を提案した. 彼らは, 全海洋表層を 5 つの海域に区分し, 太平洋は亜熱帯域・赤道湧昇域・30°N 以北の北太平洋・30°S 以南の南大洋の 4 つの海域に区分した. 北西太平洋の TA は, 同じ SSS における北東太平洋の TA に比べ大幅に高くなることから, 北太平洋域の推定式には, 経度を変数として追加している. 彼らの推定式では, SST あるいは SSS によるしきい値を定義しているが, 緯度・経度に基づいて海域が区分されている. そのため, 正確な海洋表層循環場を表しているとは言い難く, 特に TA と SST の時空間変化の大きい北西太平洋の亜熱帯-亜寒帯移行領域で大きな推定誤差が生じる.

1990 年代前半から, 海面高度計を搭載した衛星観測により, 全球の海面高度分布が得られるようになった. 衛星海面高度データ (海面高度偏差 (SSHA : Sea Surface Height Anomaly)) と高精度のジオイドデータを組み合わせることで, 広範囲の海面力学高度データ (SSDH : Sea Surface Dynamic Height) の取得が可能となった (Kuragano and Kamachi, 2000 など). 衛星観測から得られる SSDH の変動は, 中規模渦や風成循環の旬から月の変動, 季節変動や経年変動の把握に有用であることが知られている. 本研究では, 表面海水中の NTA と季節変動を除去した SSDH の間に良い相関があることを発見した. これらの関係に基づき, SSS と SSDH を変数とした太平洋における表面海水中の TA の新たな推定式を作成した.

## 2. データ

### 2.1 全アルカリ度

本研究では, 太平洋における 1993 年以降の

25 m 以浅の表層 TA データを使用した. 使用したデータセットは, GLODAP (Key *et al.*, 2004) 及び PACIFICA (Suzuki *et al.*, 2013) のデータプロダクトに収録されている二次品質管理によって航海間オフセットが調整された TA データである (<http://cdiac.ornl.gov/oceans/PACIFICA/>). ただし, PACIFICA 内の TA の補正值が  $\pm 10 \mu\text{mol/kg}$  を超える航海については, 観測値の品質に問題があるとし, 推定式の作成には使用しなかった. また, 縁辺海 (オホーツク海, ベーリング海及び日本海) は, TA データ数が非常に少ないため, 推定式作成の対象外とした. 南太平洋及び南大洋 (25°S 以南, 120°E - 60°W) においては, 二次品質管理が施されている CARINA (Tanhua *et al.*, 2008 ; <http://cdiac.ornl.gov/oceans/CARINA/>) に収録されている TA データも使用した.

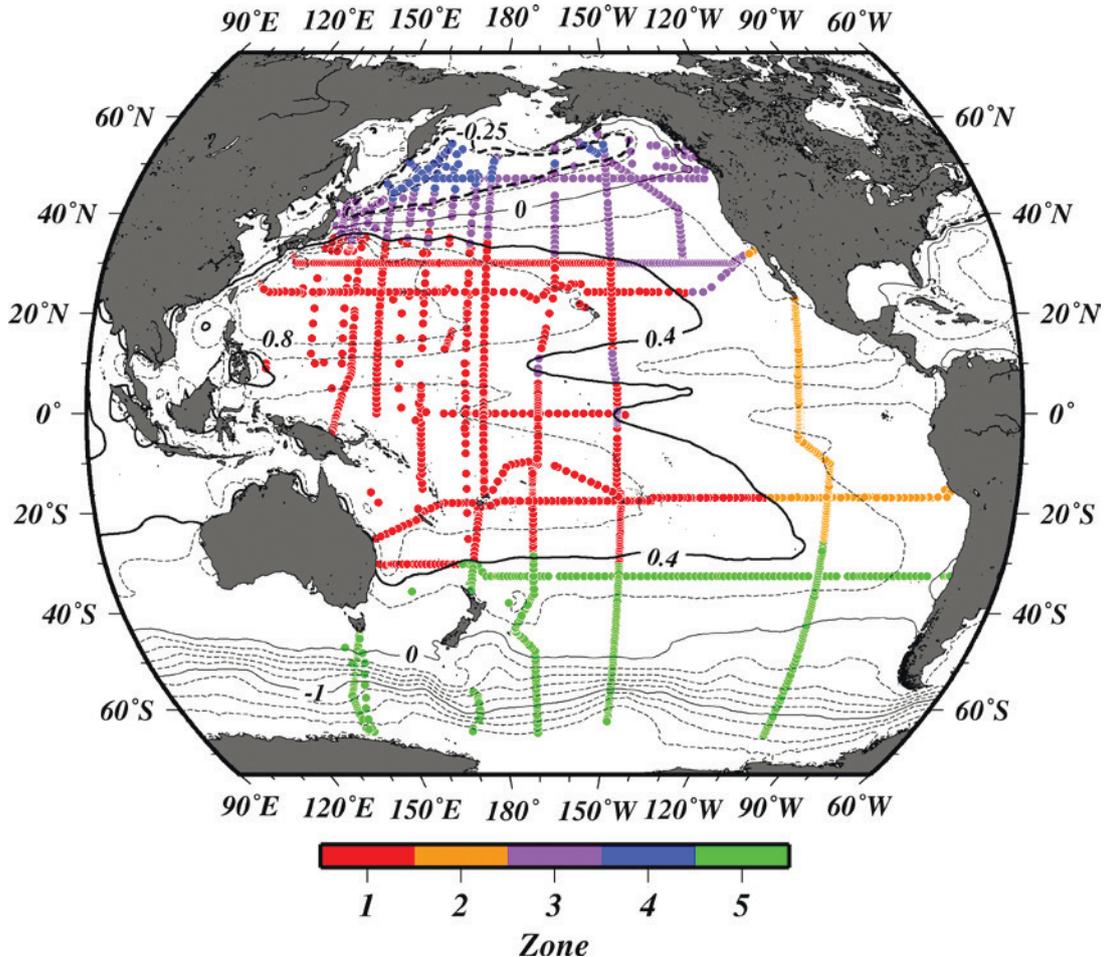
### 2.2 海面力学高度

SSDH は, 1993 年から 2012 年までの気象庁で解析されている  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  格子・5 日ごとのデータを使用した. このデータセットは, 北東アジア地域全球海洋観測システム (NEAR-GOOS : North-East Asian Regional Global Ocean Observing System ; [http://near-goos1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/near\\_goos\\_catalog](http://near-goos1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/near_goos_catalog)) に収録されている. SSDH は, Kuragano and Kamachi (2000) に基づく SSHA と, Kuragano and Shibata (1997) による平均海面力学高度 ( $\overline{\text{SSDH}}$ ) から, 以下の式で計算される.

$$\text{SSDH} = \text{SSHA} + \overline{\text{SSDH}}$$

本研究では, 5 日ごとの SSDH を月ごとに平均し, 月平均 SSDH 値を求めた. SSDH の季節変化や中規模渦に伴う変動は, 推定式作成の際にノイズとなる可能性がある. そこで推定式の作成には, 季節変動や局所的な中規模渦の影響を取り除くため, 13 か月移動平均値を使用した.

TA の観測位置に対応した SSDH 格子を選び, その TA データに対応する SSDH とした. 第 1 図に使用した TA データの観測点と 2001 - 2010 年の平均 SSDH の分布を示す. 本研究では, 太平洋における 4142 組の表層 NTA と SSDH のデータセットから, 海域特有の NTA と SSDH 間の経験



第1図 推定式作成に使用したの表層 TA の観測点と 2001 - 2010 年の平均海面力学高度場

図中のプロットの色は第1表の Zone の区分を示す。また、黒太線・黒太破線は SSDH = 0.4 m 及び -0.25 m を示し、今解析でそれぞれ熱帯・亜熱帯域、亜寒帯域の境界とした値である。

的な関係を調べた。

### 3. 新たな全アルカリ度推定式とその推定精度

#### 3.1 表層における NTA と SSDH の関係

第2図に、太平洋における表層 NTA の緯度分布と、NTA と SSDH 間の関係を示す。これらの関係に基づき、太平洋を5つの海域に区分し、SSDH と SSS を変数とした TA の推定式を導き出した(第1表)。区分した5つの海域毎の NTA と SSDH との関係の特徴、及び推定精度について述べる。

SSDH が 0.4 m 以上の太平洋西部の熱帯・亜熱帯域では (Zone 1)、表層 NTA は低く、また、その時空間変動も小さい(第2図)。これらの海域における NTA の平均と標準偏差は  $2299 \pm 5 \mu\text{mol/kg}$  である。この標準偏差は、測定の不確かさと同程

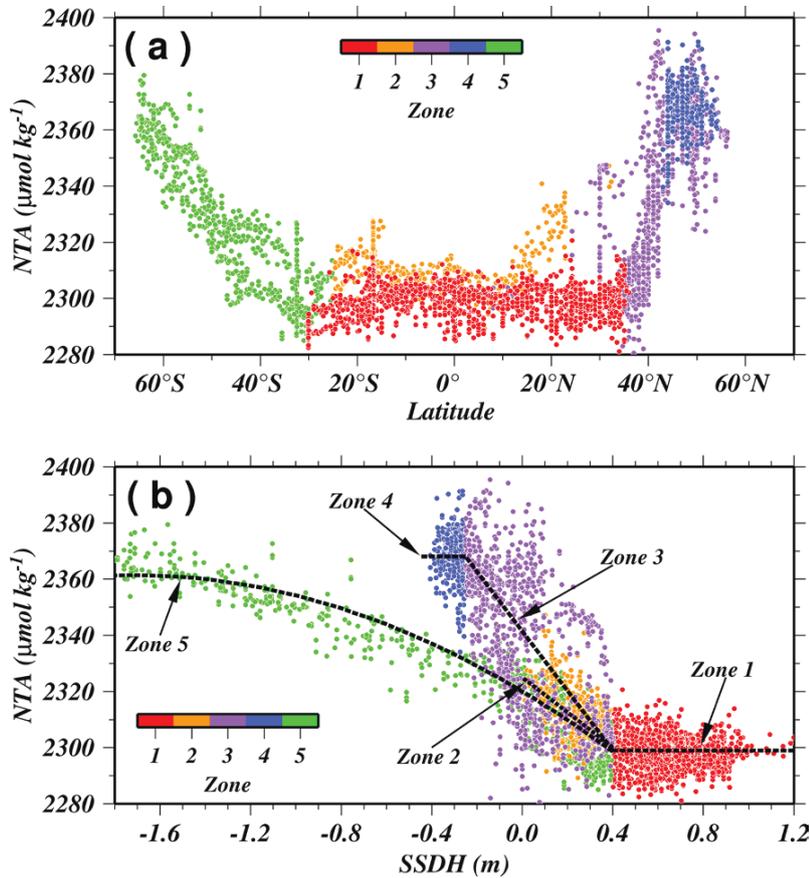
度である。この結果は、太平洋東部熱帯域の湧昇域を除く太平洋熱帯・亜熱帯域における表層 TA の変動は、塩分の変動と密接に関連しており、主に降水/蒸発による海水の希釈/濃縮の変動によって制御されているというこれまでの報告と矛盾しない (Millero *et al.*, 1998 ; Lee *et al.*, 2006 ; Midorikawa *et al.*, 2010)。

ペルー湧昇域やコスタリカドームを含む太平洋東部の熱帯域 (Zone 2) では、下層からの湧昇によって太平洋西部の同緯度帯に比べ、SSDH は低く、表層 NTA は高い (Millero *et al.*, 1998) (第1, 2図)。25°S 以北、120°W 以東の  $-0.25 \text{ m} < \text{SSDH} < 0.4 \text{ m}$  の海域と定義した東部熱帯域での表層 NTA は、SSDH との間におおむね線形関係がみられ、SSDH の1次関数で推定が可能である。Zone1 と Zone2 の境界間での移行をスムーズ

にするため、これらの Zone の推定式の係数は、SSDH = 0.4 m で NTA = 2299  $\mu\text{mol/kg}$  となるように決定した。

35°N - 45°N 付近の北太平洋亜熱帯 - 亜寒帯

移行領域 (Zone 3) では、SSDH が 0.4 m から -0.25 m に減少する間に、表層 NTA は高緯度方向に向かって約 2295  $\mu\text{mol/kg}$  から約 2370  $\mu\text{mol/kg}$  まで急激に増加する (第 1, 2 図)。海面高度計デ



第 2 図 表層 NTA と (a) 緯度及び (b) SSDH との関係

赤, 橙, 紫, 青, 緑のプロットの色はそれぞれ, Zone 1, 2, 3, 4, 5 の海域のデータを示す. (b) 中の破線は, 各 Zone での推定曲線を示す. ただし, Zone 3 の破線については, NTA と SSDH 間の線形直線である.

第 1 表 太平洋の表面海水中の全アルカリ度推定式

Zone	海域	条件	TA ( $\mu\text{mol/kg}$ )	$\sigma^a$	$N^b$
1	熱帯・亜熱帯域	$\text{SSDH} \geq 0.40\text{ m}$	$2299 \times (\text{SSS}/35)$	5.4	1627
2	東部熱帯域	North of 25°S, East of 120°W, $-0.25\text{ m} < \text{SSDH} < 0.40\text{ m}$	$(2325 - 62.50 \times \text{SSDH}) \times (\text{SSS}/35)$	9.1	410
3	亜熱帯 - 亜寒帯 移行領域	North of 25°S, West of 120°W, $-0.25\text{ m} < \text{SSDH} < 0.40\text{ m}$	$\{2370 - 106.2 \times \text{SSDH} - 24.10 \times (\text{SSS} - 32) + 39.81 \times (\text{SSS} - 32) \times \text{SSDH}\} \times (\text{SSS}/35)$	11.2	956
4	西部亜寒帯域	North of 25°S, $\text{SSDH} \leq -0.25\text{ m}$	$2368 \times (\text{SSS}/35)$	7.8	430
5	南太平洋・南大洋	South of 25°S, $\text{SSDH} < 0.40\text{ m}$	$(2320 - 48.15 \times \text{SSDH} - 14.00 \times \text{SSDH}^2) \times (\text{SSS}/35)$	7.8	719

<sup>a</sup> 平均 2 乗誤差 =  $\{\Delta^2/(N - 1)\}^{0.5}$ ,  $\Delta$  は測定値と推定値との差を示す.

<sup>b</sup> 推定式作成に使用したデータ数.

<sup>c</sup> SSDH の単位: メートル (m).

一タの解析から、この Zone の南端の境界となる黒潮続流の流路は、数年ごとに安定や不安定となる流路変動をしていることが知られている (Qiu and Chen, 2005). また、移行領域では、フロントが存在している (Yasuda, 2004). このことから、この Zone での NTA の分布も黒潮続流の流路やフロントの変動に伴って大きく変動することが考えられる. この海域の NTA は SSDH の 1 次関数で推定可能であるが、その推定式の平均 2 乗誤差 (RMSE : Root Mean Square Error) は他の海域の RMSE に比べ 2 倍以上大きくなる (RMSE > 18.0  $\mu\text{mol/kg}$ ) (第 1 表). 観測値から推定値を差し引いた残差は、塩分の低い太平洋東部で正、塩分の高い太平洋西部で負となる傾向がある (第 3 図). この東西差は、東部亜寒帯域の高 NTA と低塩分水の影響による可能性がある. そのため、第 1 表に示すように、この東西勾配を補正するための塩分の項を Zone3 の推定式に加えることとした. これにより、RMSE は 11.2  $\mu\text{mol/kg}$  に改善された.

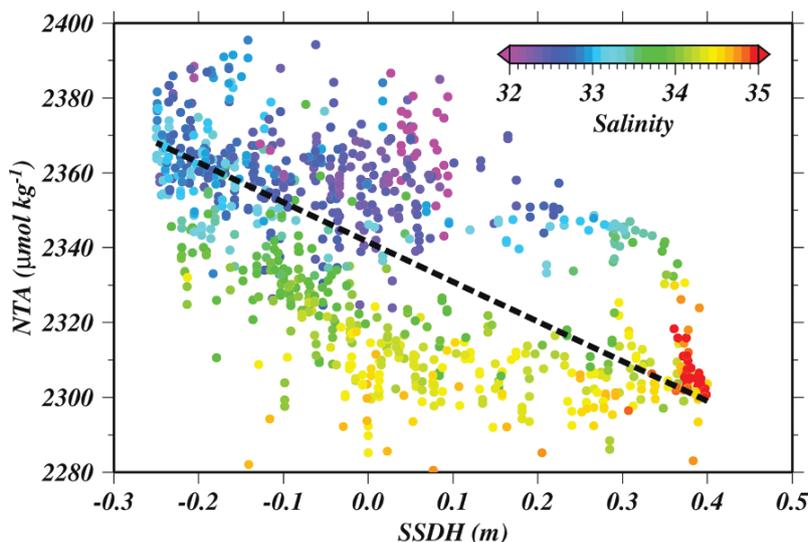
SSDH が  $-0.25$  m 以下の北太平洋西部亜寒帯循環域 (Zone 4) では、再び NTA の変動はかなり小さくなる ( $2368 \pm 8 \mu\text{mol/kg}$ ) (第 2 図). この海域では、 $\text{CaCO}_3$  粒子の下方への沈降フラックスが非常に大きいと見積もられている ( $> 0.1 \text{ mol C/m}^2/\text{year}$ ) (Tsunogai *et al.*, 1991 ; Dunne *et al.*, 2007). したがって、亜寒帯域での表層 NTA の変

動は、 $\text{CaCO}_3$  の生物生産に起因する可能性がある. この Zone では、植物色素の濃度も高く ( $> 5 \text{ mg/m}^3$ )、植物プランクトンのブルームにより夏季には変動しやすい (Glover *et al.*, 1994). それにより  $10 \mu\text{mol/kg}$  規模の表面海水中の硝酸濃度の低下を引き起こし (Murata *et al.*, 2002), NTA の分布にも影響する可能性がある.

$25^\circ\text{S}$  以南の南太平洋・南大洋 (Zone 5) では、SSDH が  $0.4$  m から  $-1.8$  m に減少する間に、表層 NTA は高緯度方向に向かって約  $2295 \mu\text{mol/kg}$  から約  $2370 \mu\text{mol/kg}$  まで増加する (第 1, 2 図). 南極大陸に近い最も南の海域では、SSDH は最も低く、より低緯度の海域に比べ、SSDH の変化に対して NTA の変化は小さい. この海域では、NTA は SSDH の 2 次関数で推定が可能である. この推定式による RMSE は  $7.8 \mu\text{mol/kg}$  と見積もられた. Zone1 と Zone5 の境界間での移行をスムーズにするため、これらの Zone の推定式の係数は、SSDH =  $0.4$  m で NTA =  $2299 \mu\text{mol/kg}$  となるように決定した.

### 3.2 新しい推定式の推定精度

新たな全アルカリ度推定式の推定精度を確認するため、PACIFICA に収録されている推定式の作成に使用した観測値と第 1 表から求められる推定値との差を求めた (第 4 図). 北東太平洋など、



第 3 図 亜熱帯-亜寒帯移行領域 (Zone 3) における表層 NTA, SSDH 及び SSS との関係  
図中の破線は、NTA と SSDH 間の線形直線を表す.

局所的に大きな差がみられる海域が存在するが、おおむね測定誤差と同程度の推定精度である。各 Zone における RMSE は 5.4 ~ 11.2  $\mu\text{mol}/\text{kg}$  であり (第 1 表), 全体での RMSE は 8.1  $\mu\text{mol}/\text{kg}$  と見積もられた。

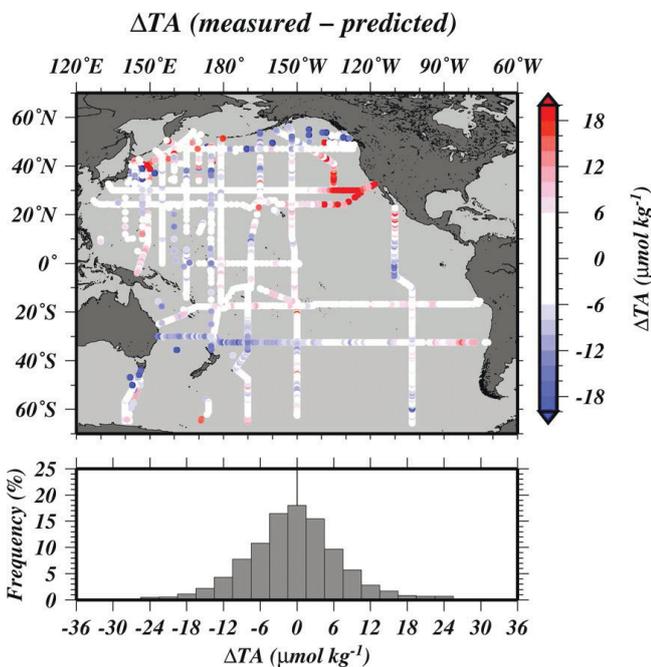
PACIFICA のデータ収集が終了した 2011 年以降, 新たに太平洋のいくつかの測線で高精度に測定された TA データの利用が可能となった (<http://cchdo.ucsd.edu/>)。第 2 表に PACIFICA のデータ収集終了後に使用可能となった新たな測線のリストを示す。新推定式の妥当性を確認するために, これらの独立なデータを使用して, 推定精度を見積もった (第 5 図)。これらのデータから見積もられた RMSE は 7.8  $\mu\text{mol}/\text{kg}$  であり, PACIFICA から見積もられた RMSE と同程度であった。このことは, 本研究で作成した推定式の適用性を示すものである。

### 3.3 太平洋における表層 TA 及び NTA の分布の特徴

太平洋の表層での NTA と TA の分布, 及びその時空間変動について, 本研究で作成した推定式を用いることでより詳細な理解が可能となる。第 6 図に 2010 年 1 月における海面の NTA と TA の分布を示す。NTA と TA の算出には, SSDH

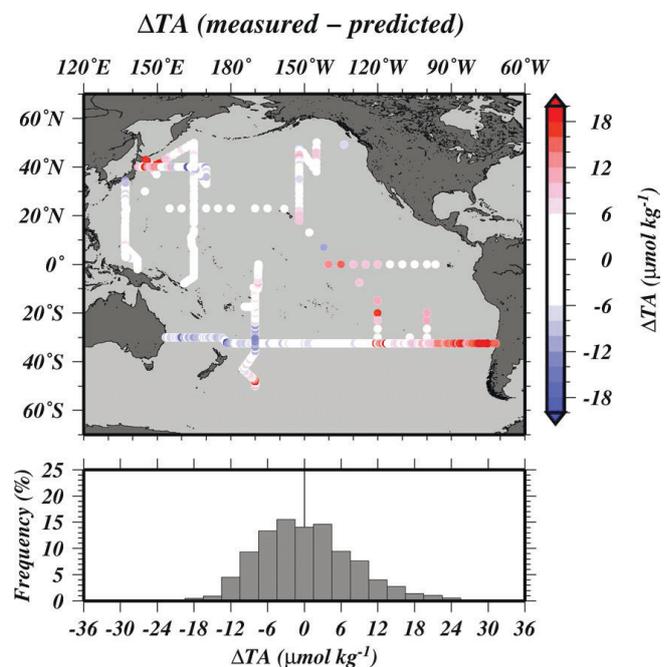
第 2 表 PACIFICA 以降に利用可能となった太平洋での新たな測線

観測ライン (航海名)	観測年	観測機関
P6	2009	ウッズホール海洋研究所 (米国)
P9	2010	気象庁
P13	2011	気象庁
P15S	2009	オーストラリア 連邦科学産業研究機構 (豪州)
P16N	2008	ワシントン大学 (米国)
40°N線	2012	気象庁
KH11-10	2011	東京大学
KH12-01	2012	東京大学



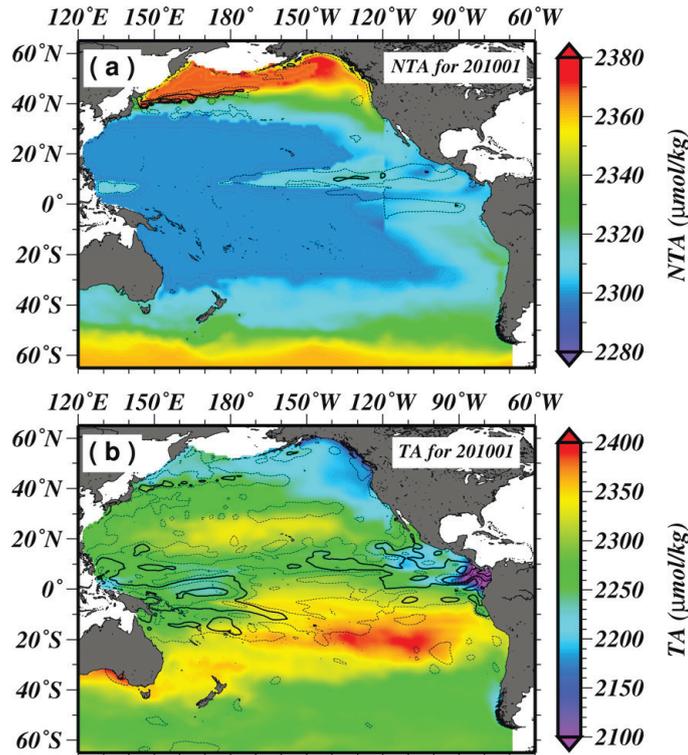
第 4 図 推定式作成に使用した PACIFICA の表層 TA 観測値と第 1 表の推定式から求められた TA 推定値との比較

(上) 観測値-推定値の差の分布, (下) 観測値-推定値の差のヒストグラム。



第 5 図 第 2 表の測線の表層 TA 観測値と第 1 表の推定式から求められた TA 値との比較

(上) 観測値-推定値の差の分布, (下) 観測値-推定値の差のヒストグラム。



第6図 2010年1月における表面海水中の (a) NTA と (b) TA の分布図  
 (a) 中の実線 (破線) は標準偏差 10 (5)  $\mu\text{mol/kg}$ , (b) 中の実線 (破線)  
 は標準偏差 20 (10)  $\mu\text{mol/kg}$  を示す。

と気象庁海洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM-G ; Usui *et al.*, 2006) の月平均 SSS を使用した。また、図中のコンターは、1993年から2010年の間の NTA と TA の標準偏差を示している。

海面の NTA の濃度は、一般的に高緯度に向かうほど高くなり、北東太平洋で最も高濃度となる。また、NTA の標準偏差は  $35^{\circ}\text{N} - 45^{\circ}\text{N}$  付近の亜熱帯-亜寒帯移行領域で大きく、これは黒潮続流及び西部亜寒帯循環の流路の時空間変動の大きさと関連している。一方、南太平洋では、NTA の時間変動は小さいことが分かる。

TA は、北半球・南半球とも  $20^{\circ}\text{N}$  付近の亜熱帯循環中央部で極大となる。これらの海域では降水よりも蒸発が盛んなため、表面海水は高塩分である。一方、TA の極小は北東太平洋及び東部熱帯域で見られる。TA の標準偏差は、熱帯付近で特に大きいことが分かる。

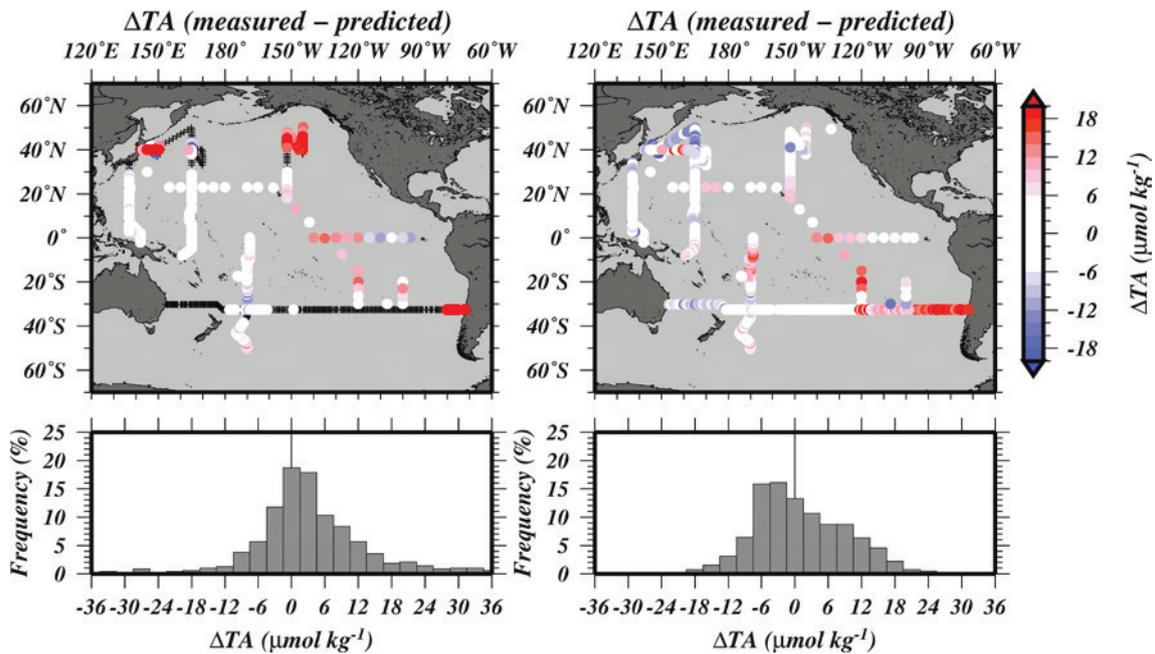
#### 4. これまでの推定式との比較

現在まで TA の推定式には、NTA と SST の経験的な関係から求めた Millero *et al.* (1998) や、SST と SSS を主な変数として関係式を導き出した Lee *et al.* (2006) などが報告されている。これらの推定式と本研究で作成した SSDH に基づく新たな推定式を比較するため、第2表のデータを使用し、測定値と推定値の差から計算される RMSE の比較を行った。第7図に Millero *et al.* (1998) と Lee *et al.* (2006) の推定式から計算された推定値と観測値の差の分布と、差のヒストグラムを示す。Millero *et al.* (1998) 及び Lee *et al.* (2006) の推定式から見積もられた RMSE はそれぞれ  $14.7 \mu\text{mol/kg}$ ,  $8.3 \mu\text{mol/kg}$  であった。SSDH を用いた新たな推定式は RMSE が  $7.8 \mu\text{mol/kg}$  で、これまでの推定式と比較して推定精度が向上した。また、彼らの推定式では、海域区分の条件として SST あるいは SSS によるしきい値を定義として取り入れ工夫しているものの、緯度・経度に基づいて区分されている。そのため、正確な海洋表層

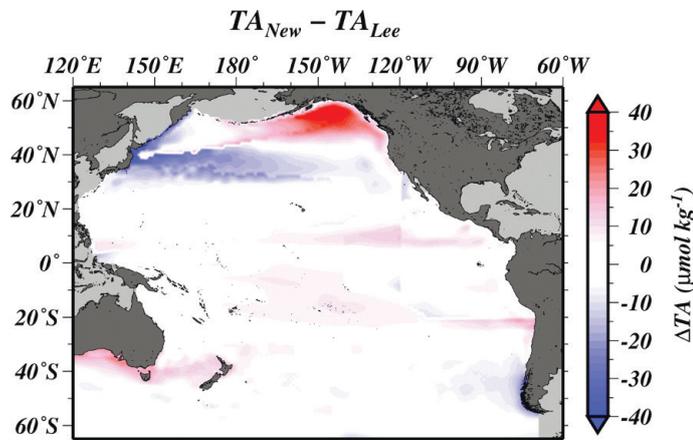
の循環場を反映した推定が行われているとは言い難く、特に TA と SST の時空間変化の大きい北西太平洋の亜熱帯－亜寒帯移行領域で大きな推定誤差が生じている。

これまでの推定式で推定誤差の大きかった北西太平洋の亜熱帯－亜寒帯移行領域での推定精度の改善を確認するため、新たな推定式から求められた TA と Lee *et al.* (2006) の推定式から求められた TA の比較を行った。第 8 図に、2010

年 1 月における新たな推定式による TA と Lee *et al.* (2006) の推定式による TA の比較を示す。それぞれの TA の推定値算出には、SSDH, MOVE/MRI.COM-G の月平均 SSS, 及び気象庁全球日別海面水温解析 (MGDSST : Merged satellite and in situ data Global Daily Sea Surface Temperature) の月平均 SST (栗原ほか, 2006) を使用した。北太平洋の 30°N－50°N 付近の亜熱帯－亜寒帯移行領域で大きな違いがあることが分かる。次に、それ



第 7 図 第 2 表の測線の表層 TA 観測値と、(左) Millero *et al.* (1998), 及び (右) Lee *et al.* (2006) の推定式から求められた TA 推定値との比較  
(上) 観測値－推定値の差の分布, (下) 観測値－推定値の差のヒストグラム. 左図中の+は, Millero *et al.* (1998) の海域条件に当てはまらない観測点を示す.



第 8 図 2010 年 1 月における新しい推定式から求められた TA 推定値と Lee *et al.* (2006) から求められた TA 推定値の差

ぞれの推定式から求められる TA と PACIFICA に含まれていない 2010 年から 2012 年の間に気象庁 凌風丸・啓風丸によって得られた北西太平洋での 表層 TA の観測値との比較を示す (第 9 図). Lee *et al.* (2006) から計算される推定値は, RMSE = 16.7  $\mu\text{mol}/\text{kg}$  であり, 亜熱帯-亜寒帯移行領域で 顕著な負のバイアスが生じていることが分かる. 一方, 本研究での推定式は観測値と大きな差はな く (RMSE = 6.2  $\mu\text{mol}/\text{kg}$ ), 北西太平洋表層の TA 分布をよく表現できていることが分かる.

5. まとめ

本研究での推定式は, SSDH に基づく海域区分 を採用しているため, 海域区分に時空間的な可変 性があり, 海洋表層循環場の年々及び季節変動を より正確に表すことが可能となった. これにより, 従来までの水温・塩分を基本とした推定式では推 定誤差の大きかった北太平洋の亜熱帯-亜寒帯移 行領域での推定精度に改善がみられた. 高い精度 での TA の推定が可能となれば, 現在海洋表層で 広く進行している海洋酸性化の進行状況のより正

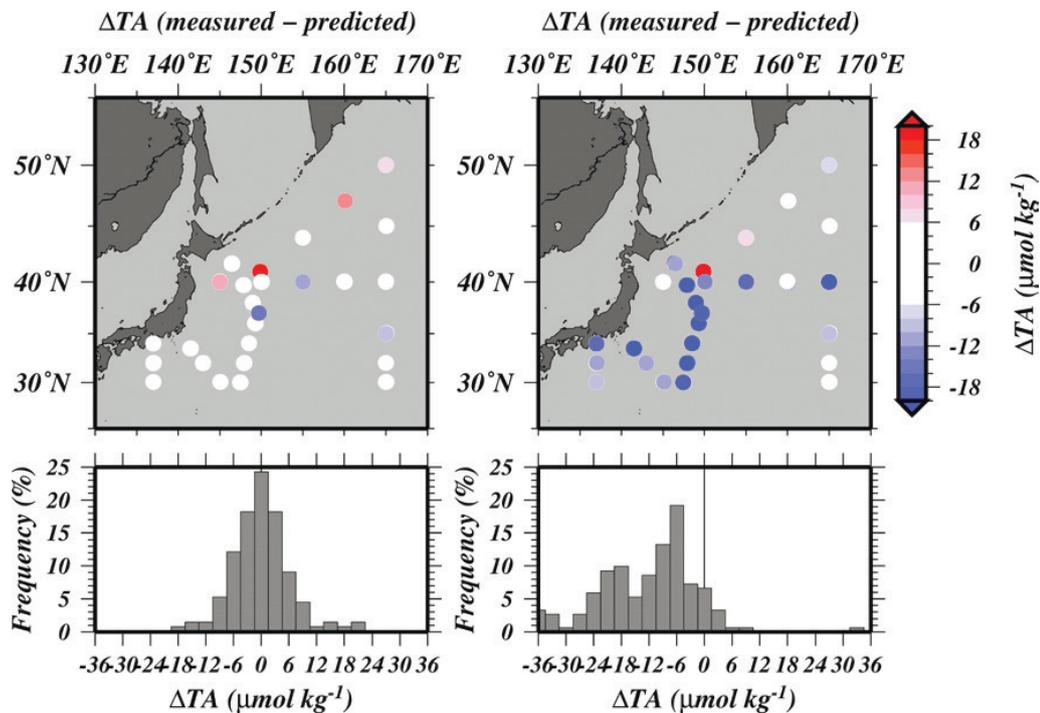
確な把握が可能になると考える. 今後は, 同様の 手法を全海洋表面に拡大するとともに, その他の 炭酸系パラメータ (DIC,  $p\text{CO}_2$ ) と組み合わせる ことで, 海洋酸性化の進行状況の把握や将来予測 の不確実性低減のため, さらなる解析を進める予 定である.

謝辞

全アルカリ度の観測・測定を継続していただ いている凌風丸・啓風丸をはじめとする多くの観 測船の船長, 乗組員及び観測員の全ての方々と, PACIFICA データ統合プロジェクトに参加した研 究者の皆様に感謝いたします. また, 査読者から いただいた多くの有益なコメントに感謝いたしま す.

参 考 文 献

Dickson, A. G. (1992) : The development of the alkalinity concept in marine chemistry, *Mar. Chem.*, **40**, 49-63.  
 Doney, S. C., V. J. Fabry, R. A. Feely, and J. A. Kleyapas (2009) : Ocean acidification: the other CO<sub>2</sub> problem,



第 9 図 気象庁凌風丸・啓風丸によって 2010 年から 2012 年に得られた北西太平洋域 (30°N 以北, 180° 以西, 日本海除く) における表層 TA 観測値と, (左) 第 1 表の推定式から求められた TA 推定値, 及び (右) Lee *et al.* (2006) から求められた TA 推定値との比較 (上) 観測値-推定値の差の分布, (下) 観測値-推定値の差のヒストグラム

- Annu. Rev. Mar. Sci.* **1**, 169-192, doi:10.1146/annurev.marine.010908.163834.
- Dunne, J. P., J. L. Sarmiento, and A. Gnanadesikan (2007) : A synthesis of global particle export from the surface ocean and cycling through the ocean interior and on the seafloor, *Global Biogeochem. Cycles*, **21**, GB4006, doi:10.1029/2006GB002907.
- Feely, R. A., C. L. Sabine, K. Lee, W. Berelson, J. Kleypas, V. J. Fabry, and F. J. Millero (2004) : Impact of anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> system in the ocean, *Science*, **305**, 362-366, doi:10.1126/science.1097329.
- Friis, K., A. Kortzinger, and D. W. R. Wallace (2003) : The salinity normalization of marine inorganic carbon chemistry data, *Geophys. Res. Lett.*, **30** (2) , 1085, doi:10.1029/2002GL015898.
- Glover, D. M., J. S. Wroblewski, C. R. McClain (1994) : Dynamics of the transition zone in coastal zone color scanner-sensed ocean color in the North Pacific during oceanographic spring, *J. Geophys. Res.*, **99**, 7501-7511.
- Key, R. M., A. Kozyr, C. L. Sabine, K. Lee, R. Wanninkhof, J. L. Bullister, R. A. Feely, F. J. Millero, C. Mordy, and T.-H. Peng (2004) : A global ocean carbon climatology: Results from Global Data Analysis Project (GLODAP) , *Global Biogeochem. Cycles*, **18**, GB4031, doi:10.1029/2004GB002247.
- Kuragano, T. and A. Shibata (1997) : Sea surface dynamic height of the Pacific Ocean derived from TOPEX/POSEIDON altimeter data: calculation method and accuracy, *J. Oceanogr.*, **53**, 585-599.
- Kuragano, T. and M. Kamachi (2000) : Global statistical space-time scales of oceanic variability estimated from the TOPEX/POSEIDON altimeter data, *J. Geophys. Res.*, **105**, 955-974, doi:10.1029/1999JC900247.
- 栗原幸雄・桜井敏之・倉賀野連 (2006) : 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析, 測候時報, **73**, 特別号, S1-S18.
- Lee, K., L. T. Tong, F. J. Millero, C. L. Sabine, A. G. Dickson, C. Goyet, G. H. Park, R. Wanninkhof, R. A. Feely, and R. M. Key (2006) : Global relationships of total alkalinity with salinity and temperature in surface waters of the world's oceans, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L19605, doi:10.1029/2006GL027207.
- Midorikawa, T., M. Ishii, S. Saito, D. Sasano, N. Kosugi, T. Motoi, H. Kamiya, A. Nakadate, K. Nemoto, and H. Y. Inoue (2010) : Decreasing pH trend estimated from 25-yr time series of carbonate parameters in the western North Pacific, *Tellus Ser. B*, **62**, 649-659, doi:10.1111/j.1600-0889.2010.00474.x.
- Millero, F. J., K. Lee, and M. Roche (1998) : Distribution of alkalinity in the surface waters of the major oceans, *Mar. Chem.*, **60**, 111-130.
- Murata, A., Y. Kumamoto, C. Saito, H. Kawakami, I. Asanuma, M. Kusakabe, H.Y. Inoue (2002) : Impact of a spring phytoplankton bloom on the CO<sub>2</sub> system in the mixed layer of the northwestern North Pacific, *Deep-Sea Res.*, **49**, 5531-5555.
- Orr, J. C., V. J. Fabry, O. Aumont, L. Bopp, S. C. Doney, R. A. Feely, A. Gnanadesikan, N. Gruber, A. Ishida, F. Joos, R. M. Key, K. Lindsay, E. Maier-Reimer, R. Matear, P. Monfray, A. Mouchet, R.G. Najjar, G. K. Plattner, K. B. Rodgers, C. L. Sabine, J. L. Sarmiento, R. Schlitzer, R. D. Slater, I. J. Totterdell, M. F. Weirig, Y. Yamanaka, and A. Yool (2005) : Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms, *Nature*, **437**, 681-686, doi:10.1038/nature04095.
- Qiu, B. and S. Chen (2005) : Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre and mesoscale eddies on decadal timescales, *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 2090-2103.
- Suzuki, T., M. Ishii, M. Aoyama, J. R. Christian, K. Enyo, T. Kawano, R. M. Key, N. Kosugi, A. Kozyr, L. A. Miller, A. Murata, T. Nakano, T. Ono, T. Saino, K. Sasaki, D. Sasano, Y. Takatani, M. Wakita and C. Sabine (2013) : PACIFICA Data Synthesis Project. ORNL/CDIAC-159, NDP-092. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee. doi:10.3334/CDIAC/OTG.PACIFICA\_NDP092.
- Tanhua, T., A. Olsen, M. Hoppema, S. Jutterström, C. Schirnic, S. van Heuven, A. Velo, X. Lin, A. Kozyr, M. Alvarez, D.C.E. Bakker, P. Brown, E. Falck, E. Jeansson, C. Lo Monaco, J. Olafsson, F.F. Perez,

- D. Pierrot, A.F. Rios, C.L. Sabine, U. Schuster, R. Steinfeldt, I. Stendardo, L.G. Anderson, N.R. Bates, R.G.J. Bellerby, J. Blindheim, J.L. Bullister, N. Gruber, M. Ishii, T. Johannessen, E.P. Jones, J. Köhler, A. Körtzinger, N. Metzl, A. Murata, S. Musielewicz, A.M. Omar, K.A. Olsson, M. de la Paz, B. Pfeil, F. Rey, M. Rhein, I. Skjelvan, B. Tilbrook, R. Wanninkhof, L. Mintrop, D.W.R. Wallace, and R.M. Key (2008) : CARINA Data Synthesis Project, ORNL/CDIAC-157, NDP-091, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee, doi:10.3334/CDIAC/otg.ndp091.
- Tsunogai, S. and S. Noriki (1991) : Particulate fluxes of carbonate and organic carbon in the ocean. Is the marine biological activity working as a sink of the atmospheric carbon? *Tellus*, **43B**, 256-266.
- Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda, and M. Kamachi (2006) : Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results, *Advances in Space Research*, **37**, 806-822.
- Wolf-Gladrow, D. A., R. E. Zeebe, C. Klaas, A. Körtzinger, and A.G. Dickson (2007) : Total alkalinity: The explicit conservative expression and its application to biogeochemical processes, *Mar. Chem.*, **106**, 287-300, doi:16/j.marchem.2007.01.006
- Yasuda, I (2004) : North Pacific Intermediate Water: Progress in SAGE (SubArctic Gyre Experiment) and Related Projects, *J. Oceanogr.*, **60**, 385-395.
- Zeebe, R. E. and D. Wolf-Gladrow (2001) : CO<sub>2</sub> in seawater: Equilibrium, kinetics, isotopes, *Elsevier Oceanography Series*, **65**, Elsevier Science, B.V., Amsterdam, 346 pp.