

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22310017

研究課題名（和文）太平洋赤道域における海洋 CO₂ の長期変動メカニズムに関する研究研究課題名（英文）On the mechanism of the long-term trend of the oceanic CO₂ in the equatorial Pacific Ocean

研究代表者

石井 雅男 (ISHII MASAO)

気象庁気象研究所・地球化学研究部・室長

研究者番号：70354553

研究成果の概要（和文）：海水中の炭酸系測定の方法を向上させながら、太平洋熱帯域の表面海水と海洋内部の炭酸系観測を行った。また、国内外の多くの研究者らと連携して、太平洋の炭酸系・化学データのデータベース PACIFICA を完成させた。これを使って、太平洋熱帯域でも海水中の CO₂ が顕著に増加しており、海洋酸性化が進んでいることを明らかにした。原因は、大気から南太平洋と北太平洋の亜熱帯域に吸収された人為起源 CO₂ が、海洋内部の赤道潜流などを經由して熱帯域に輸送されているためと考えられる。

研究成果の概要（英文）：While improving the methods for the measurement of ocean CO₂ system parameters, we made measurements of these parameters in the surface and in the interior of the equatorial Pacific. We also prepared the database “PACIFICA” for the ocean CO₂ system and biochemical parameters in the Pacific Ocean through the international cooperation under the North Pacific Marine Science Organization (PICES). Using the PACIFICA database, we have demonstrated that CO₂ content in seawater is increasing and ocean acidification is occurring significantly in the tropical zone of the Pacific Ocean due to anthropogenic CO₂ emissions. The transport of anthropogenic CO₂ from the subtropical zones in the North and South Pacific through the shallow meridional overturning circulation is considered to be a key process controlling the CO₂ increase and ocean acidification in the western Pacific tropical regions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2011年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2012年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：化学海洋

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球表面のおよそ70%を占める海洋は、化石燃料消費や森林破壊によって排出される二酸化炭素(CO₂)の約1/4を吸収することで、大気中のCO₂濃度の増加を遅らせ、地球温暖化の進行を和らげる重要な役割を担っている。

しかし、太平洋赤道域の東部から中部にかけての広大な海域は、大気にCO₂を多く放出している海域である。また、その放出量はエルニーニョ現象やラニーニャ現象の発生に伴って大きく変化しており、大気中CO₂濃度の増加速度に影響を及ぼしていると考えられる。

(2) 研究代表者らは、太平洋赤道域西部の表面海水中のCO₂分圧が長期的に増加しており、しかも増加速度がおよそ10年単位で変化していることを、観測によって明らかにした。しかし、こうした増加速度の変化は、赤道域の大気・海洋相互作用の変化による赤道湧昇の強さの変化に起因する可能性と、亜熱帯海域で大気から海に吸収され、海洋循環によって赤道域に運ばれてくるCO₂の量が変化した結果である可能性があり、そのメカニズムは明らかになっていない。

(3) 地球温暖化による太平洋の気候変化が、海洋のCO₂吸収・蓄積速度の変化によって、温暖化の進行にどんな影響を及ぼすかを予測することは、地球温暖化予測の信頼性を向上させる上で、重要な課題である。(1)(2)に記した現象のメカニズムを解明することは、そうした課題の解明に貢献する。

(4) また、化石燃料消費や森林破壊によって排出されたCO₂（人為起源CO₂）の海洋への吸収・蓄積は、化学的に海水の酸性化を引き起こすことから、海洋の生態系とそれに依存する社会にとって大きな脅威となっている。海水の酸性化は、特に炭酸カルシウムの殻を持つサンゴや貝類などの生存を強く脅かすと考えられる。本研究は、多くのサンゴ礁群が分布して海洋生物多様性の宝庫として知られ、その生態系に多くの人々が依存して生活している太平洋赤道域と亜熱帯域における海洋酸性化の進行状況を把握し、そのメカニズムを理解する観点からも、大きな意義がある。

2. 研究の目的

(1) 太平洋赤道域の西部に広がる高温・低塩分の暖水域や、その周辺海域を対象に、表面海水中の炭酸系パラメーター（CO₂分圧、全炭酸濃度DIC・全アルカリ度）の観測データから、それらの長期変化と海洋酸性化の進行速度を解明する。

(2) 太平洋赤道下の海洋内部を東向きに流れる赤道潜流内の人為起源CO₂の増加速度を、全炭酸濃度や溶存酸素濃度の観測データから評価する。その結果を(1)で明らかにした表面海水中の全炭酸濃度の増加速度と比較し、赤道潜流が赤道域の表面海水中の全炭酸濃度増加や海洋酸性化に及ぼす影響を考察する。

(3) 海洋大循環・物質循環モデル(OBGCM)による太平洋赤道域の海洋CO₂増加のシミュレーション結果を、(1)(2)で評価した観測結果と比較する。これによって、太平洋赤道域における海洋CO₂増加のメカニズムを推定する。

3. 研究の方法

(1) 海水中の炭酸系のパラメーターのうち、全炭酸濃度、全アルカリ度、水素イオン濃度(pH)の測定データの精度を向上させるため、電量滴定装置の改良や、分光光度計の測定条件の最適化を進める。また、高速応答の溶存酸素センサーを導入し、データ計算のアルゴリズムを改良して、溶存酸素濃度の鉛直分布観測の高精度化・高分解能化を進める。学術研究船「白鳳丸」のKH11-10次航海とKH12-1次航海(2011.12~2012.2)で、これらの観測を大気・海洋CO₂分圧の航走観測と合わせて、北太平洋西部亜熱帯域・太平洋東部赤道域・南太平洋東部亜熱帯域の広域で実施する。

(2) 海洋の化学観測に携わる日本国内や海外の多くの研究者らと協力して、太平洋海洋科学機関(PICES)の炭素気候部会の活動の一環として、1980年代後半以降に太平洋で測定された海洋内部の炭酸系パラメーターや、同時に測定された溶存酸素濃度・栄養塩濃度などの海洋化学観測データを含むデータベースPACIFICAを完成させる。これを以下(3)(4)のデータ解析に活用する。

(3) 太平洋赤道域とその周辺海域を対象に、表面海水中の全アルカリ度の長期変化の有無を評価する。その結果を海洋表面水のCO₂分圧の観測データと合わせ、炭酸系変動の全体像を計算で求めることで、表面海水中の全炭酸濃度や炭酸カルシウム飽和度Ωの長期変化速度を評価し、海洋酸性化の現状を解明する。

(4) 海水中の全炭酸濃度は、海面での大気・海洋間CO₂交換と、植物プランクトンが海洋表層で生産した有機物や炭酸カルシウム殻が、海水が寒冷域で表面から海洋内部に沈降した後海洋循環の途上で分解・溶解することで、時間・空間的に変化する。前者は、人為起源CO₂の吸収によって長期に変化している。後者のうち有機物分解は、酸素を消費してCO₂を放出するので、同時に測定した溶存酸素の濃度と水温・塩分Sにおける酸素飽和濃度との差(AOU)に、呼吸商(r=CO₂/O₂)を掛けることで評価できる。炭酸カルシウム殻の溶解は全アルカリ度の変化から評価できるが、4.研究成果(3)で述べるように、亜熱帯域の表層では全アルカリ度が一定なので、その寄与は無視できる。これらのことから、人為起源CO₂の吸収・蓄積による海洋内部の全炭酸濃度の増加は”preformed sDIC”、すなわち海洋内部の海水が表面にあってAOU=0だった時の全炭酸濃度を次式で評価し、その増加速度から評価できる。

$$\text{Preformed sDIC} = \{\text{DIC} - r \cdot \text{AOU}\} \cdot 35/S$$

この式に基づいて、赤道域の海洋内部の水温躍層付近を東向きに流れる赤道潜流内で、人為起源CO₂の濃度が過去15年間にどう増えたか、PACIFICAの全炭酸濃度や溶存酸素濃度のデータを使って評価する。(3)で評価した表面水中の全炭酸濃度の増加速度と比較することで、亜熱帯域から赤道潜流を經由して熱帯域に運ばれる人為起源CO₂が、熱帯域の表面海水中のCO₂増加や海洋酸性化に及ぼす影響の重要性について考察する。

(5) 亜熱帯域で大气から海洋に吸収された人為起源CO₂が、海洋循環によって亜熱帯域から赤道域に輸送される速度や、これが赤道域のCO₂増加・海洋酸性化に及ぼす影響の大きさを、プリンストン大学 K. Rodgers博士の協力により、海洋物質循環モデルを使って評価する。その結果を(4)の観測結果と比較する。(6) Rodgers博士はじめ、多くの国内外の研究者らの協力を得て、海洋CO₂分圧データの診断モデル、海洋CO₂インバージョン法、OBGCM、大気CO₂インバージョン法など、多様な手法の多様なモデルで評価された太平洋赤道域の大気・海洋間CO₂フラックスの評価結果を収集・解析・比較し、太平洋赤道域における大気・海洋間CO₂フラックス評価の現状を総括するとともに、OBGCMの性能を評価する。この評価結果の比較によって、Earth System Science Partnership (ESSP) が発起して進められているGlobal Carbon Project のプログラム Regional Carbon Cycle Assessment and Processes (RECCAP) に貢献する。

4. 研究成果

(1) 海水の全炭酸濃度の高精度(~1/2000)測定や、海水の全アルカリ度の高精度(~1/2000)測定に必要な 0.5N 塩酸溶液の濃度標定に使用する電量滴定装置について、滴定電流の大きさと滴定終点付近の電流制御を変更する、滴定セルの温度を恒温循環水で一定に保つ、滴定セルのカソード・アノード間のガラスフリットやセルの形状を変えるなどして、性能試験を繰り返した。1% CO₂ 標準ガスによる 50 回前後の繰返し測定で、±0.03%以内の高い測定精度を達成できた。また、全アルカリ度や pH の高精度測に使用している小型分光光度計の応答特性を調べ、測定条件の最適化を進めた。

学術研究船白鳳丸のKH11-10次・KH12-1次両航海で実施した大気・海洋CO₂分圧観測、海水中の全炭酸濃度・全アルカリ度・pHの各層観測及び高速応答酸素センサーによる溶存酸素の鉛直高解像度観測のデータセットを作

成した。南太平洋東部の亜熱帯域では、海洋CO₂分圧データの空白域で観測を実施できた。また、赤道域では、赤道湧昇域の東部で全アルカリ度が周辺海域より高い実態を明らかにできた。

(2) 太平洋の海洋観測で過去に取得された海洋内部の炭酸系・化学データの272航海分を収集した(図1)。書式をWHP Exchange Format に統一し、異常データに品質フラグを付けるなど、一次品質管理を進めた。さらに海洋深層(>2000m)では顕著な濃度変化がないと仮定して、個々の航海・観測パラメーターごとに系統誤差を評価し、これを補正したデータベースPACIFICAを完成させた。PACIFICAはホームページ上で公開した。
<http://pacific.pices.jp/>
<http://cdiac.ornl.gov/oceans/>

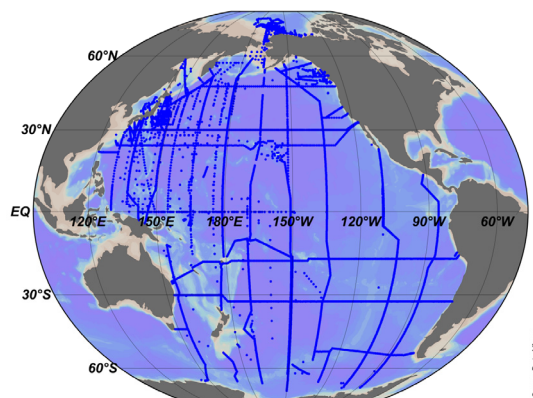


図1 PACIFICA のデータ分布

(3) PACIFICAを使って、太平洋赤道域西部の暖水域やその周辺の亜熱帯域の海洋表層で、塩分変化を補正した全アルカリ度が一定値(2295 $\mu\text{mol kg}^{-1}$)と見なすことができ、しかも、過去20年間、有意に変化していないことを確かめた。この結果をLDEO2009やSOCATv1.5の海洋表層CO₂分圧データと組み合わせて炭酸系計算を行い、1985年から2011年の27年間の平均で、海洋CO₂分圧が $+1.31 \pm 0.14 \mu\text{atm yr}^{-1}$ 、全炭酸濃度が $+0.77 \pm 0.08 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{yr}^{-1}$ 、pHが $-0.0013 \pm 0.0001 \text{yr}^{-1}$ 、炭酸カルシウム(サンゴ殻を作るアラレ石)飽和指数 Ω_a が $-0.008 \pm 0.001 \text{yr}^{-1}$ の速度で、それぞれ顕著に長期変化していることが分かった。これらの速度は、大気中のCO₂濃度の同じ期間の平均増加速度($+1.64 \pm 0.01 \mu\text{atm yr}^{-1}$)から予想される速度に比べて少し遅い。しかし、サンゴ礁が発達した生物多様性の宝庫に隣接する太平洋赤道域の暖水域や亜熱帯域で、海水中のCO₂が増加し、海洋酸性化が進行していることを

立証できた。

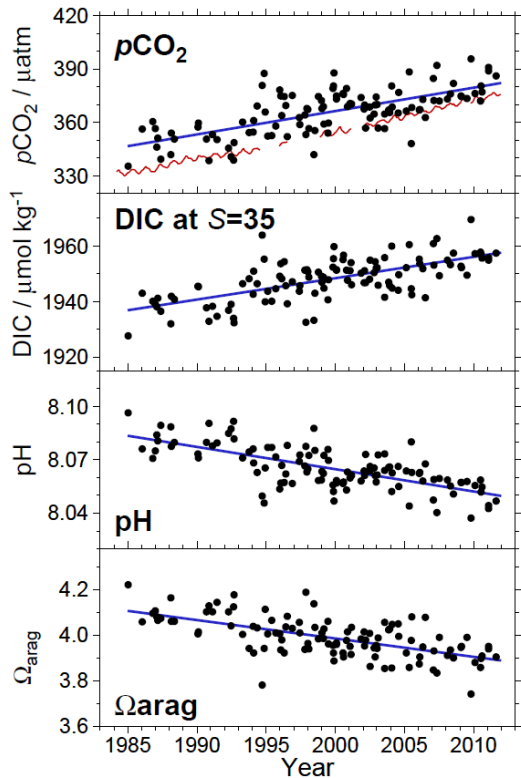


図2 太平洋赤道域西部の暖水域における炭酸系パラメーターの長期変化（青線は平均変化速度を、 CO_2 分圧($p\text{CO}_2$)の図中の赤線は大気中の CO_2 分圧の長期変化を表す。）

(4) 赤道潜流の上層に位置するポテンシャル密度24.0~25.5の水深(100~200m)では、人為起源 CO_2 の濃度が $+0.41 \sim +0.62 \mu\text{mol kg yr}^{-1}$ の範囲の速度で、顕著に増加していることが分かった。これらの速度は、(4)で明らかにした暖水域の表面水の全炭酸濃度の増加速度に比べて少し遅いが、それに近い速度である。

南太平洋と北太平洋の亜熱帯域の表層水は、冬季の冷却によって沈降し、海洋亜表層を循環して一部は赤道域に至り、赤道潜流によって赤道直下を東進する。その後、赤道域中部・東部で赤道湧昇によって海洋表面に戻った後、西や南北に発散し、赤道域西部の暖水域や、その周辺海域に至る。本研究で、赤道潜流内の人為起源 CO_2 増加が確認されたことから、亜熱帯域の海洋表面で大気から海洋に吸収された人為起源 CO_2 は、海洋循環によって赤道域に輸送されており、赤道域の海洋表層水中の全炭酸濃度の増加や、海洋酸性化の要因になっていると考えられる。

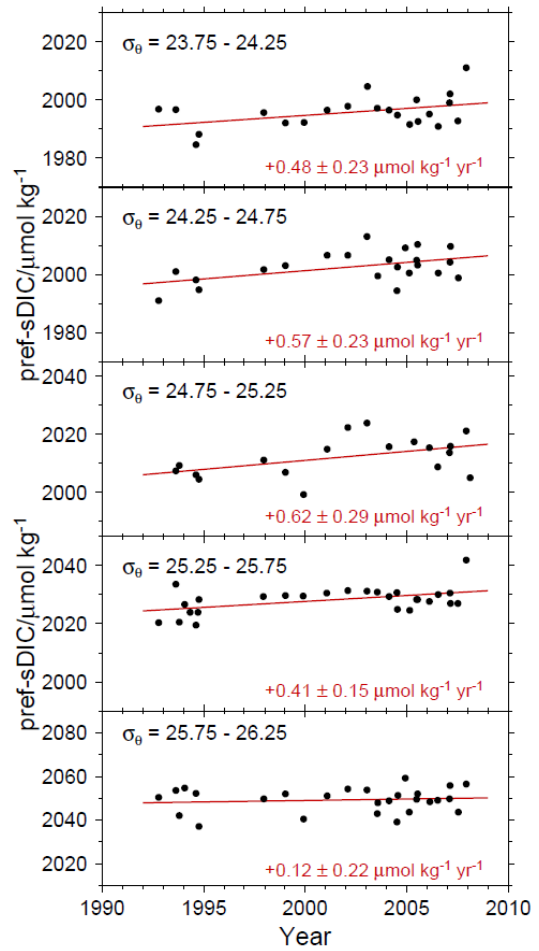


図3 赤道潜流の各ポテンシャル密度帯(σ_θ)におけるpreformed sDICの長期変化。図中の赤線は平均的な長期変化傾向を表す。

(5) 気象研のNPZD-MRI.COMやフランスのORCA-PISCESといった海洋物質循環・大循環モデル(OBGCM)によれば、赤道潜流のポテンシャル密度25.0 - 26.0の水深では、人為起源 CO_2 が、南太平洋の亜熱帯域と北太平洋の亜熱帯域の両方から赤道域に輸送されている。亜熱帯域から南緯15度と北緯15度をそれぞれ通過して赤道域に供給されている人為起源 CO_2 は、合わせて年に0.5 PgCと見積もられた。一方、表層では、ほぼ同じ速度で、人為起源 CO_2 が赤道域から亜熱帯域やインドネシア通過流を通じてインド洋に輸送されている。これらのことから、(3)(4)の観測結果と同様に、OBGCMでも、赤道域の人為起源 CO_2 増加に、海洋大循環による亜熱帯域から赤道域への CO_2 輸送が重要な役割を果たしていることが示唆された。しかしOBGCMでは、赤道潜流内の全炭酸濃度の増加速度が、観測データから評価した速度より速く、より高い密度(深い水深)でも顕著に

なっており、人為起源 CO₂の輸送を過大評価している可能性がある。こうした傾向は米国のNCARやGFDLのOBGCMにも見られた。(6) 過去20年間(1990-2009年)の太平洋赤道域の海面から大気への年間CO₂放出量の平均値は、気象庁と米国海洋大気庁のCO₂分圧診断モデルによる評価の平均値が+0.52±0.09 PgC (ペタグラム炭素)、Gruber et al. 2009 によって報告された9つの海洋CO₂インバージョン法の平均値が+0.37±0.12 PgC、気象研など8つのOBGCMの中央値が+0.39±0.09 PgC、気象庁やNICAM-niwaなど10の大気CO₂インバージョン法の中央値が +0.53±0.16PgC であり、どれも海洋から大気へ顕著なCO₂放出を示し、手法間で大きな差はなかった(図4)。また、CO₂分圧の診断モデル・OBGCMともに、エルニーニョ時に海洋からのCO₂放出が減り、ラニーニャ時に増える年々変動パターンはよく一致した。しかし、OBGCMはCO₂分圧の診断モデルに比べて、エルニーニョ・ラニーニャに伴う変動の幅が大きく、使用する風速場によっても著しく変化することが分かった。こうした総合的な比較は過去に例がなく、個々の手法を改善し、より確からしい評価値を得る上で、有意義な情報を発信できた。

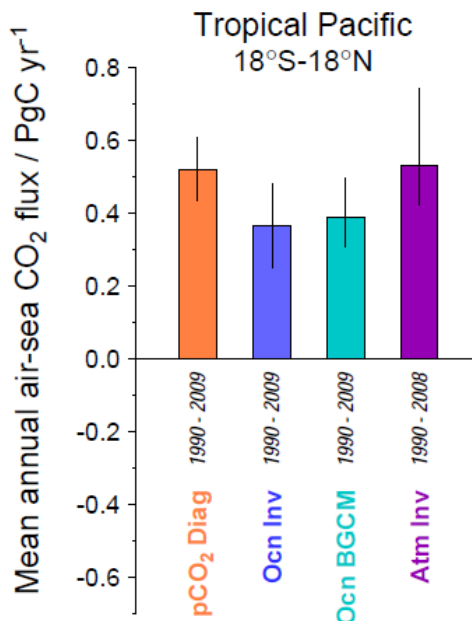


図4 太平洋赤道域の海洋から大気へのCO₂放出量の平均値または中央値。CO₂分圧診断モデル(pCO₂ Diag)、海洋CO₂インバージョン(Ocn Inv)、海洋大循環・物質循環モデル(Ocn BGCMM)、海洋CO₂インバージョン(Atm Inv)。

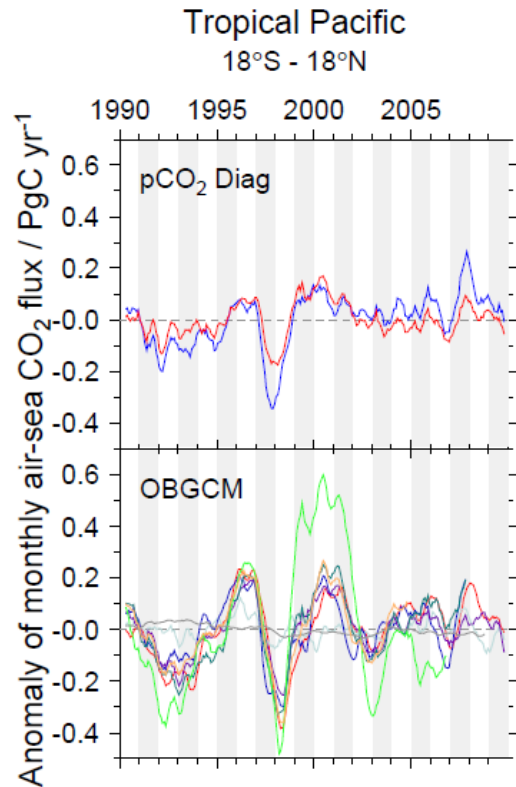


図5 太平洋赤道域の海洋から大気へのCO₂放出量の月偏差の時間変化。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① Midorikawa, T., M. Ishii, N. Kosugi, D. Sasano 他5名, Recent deceleration of oceanic pCO₂ increase in the western North Pacific in winter. *Geophys. Res. Lett.*, 39, 2012. 査読有 doi:10.1029/2012GL051665
- ② Takatani, Y., D. Sasano, T. Nakano, T. Midorikawa, M. Ishii, Decrease of dissolved oxygen after the mid-1980s in the western North Pacific subtropical gyre along the 137°E repeat section. *Global Biogeochem. Cycles*, 26, 2012, 査読有, doi:10.1029/2011GB004227
- ③ Ishii, M., N. Kosugi, D. Sasano 他3名, Ocean acidification off the south coast of Japan: a result from time series observations of CO₂ parameters from 1994 to 2008, *J. Geophys. Res.*, 116, C06022, 2011, 査読有, doi:10.1029/2010JC006831.
- ④ Sasano, D., M. Ishii, T. 他3名, Testing a new quick response oxygen sensor RINKO, *Pap. Meteor. Geophys.*, 62, 47-56, 2011 査読有, doi: 10.2467/mripapers.62.63.

- ⑤ Tanhua, T., R. M. Key, M. Hoppema, A. Olsen, M. Ishii, C. L. Sabine, Expanding carbon data collection from the ocean's interior. *Eos*, 91(48), 457-458, 2011. 査読なし, doi:10.1029/2010EO480002

〔学会発表〕 (計 35 件)

- ① Ishii, M. et al., Ocean acidification in the tropical Pacific from below, *9th International Carbon Dioxide Conference*. 2013年6月6日, 北京 (中国)
- ② Suzuki, T. et al., PACIFICA: Pacific Ocean interior carbon data synthesis. *PICES 2012 Annual Meeting*, 2012年10月16日. 広島
- ③ Rodgers, K., M. Ishii, et al., Re-emergence of anthropogenic carbon and Pacific warm pool acidification. *PICES 2012 Annual Meeting*. 2012年10月16日, 広島
- ④ Ishii, M. et al., Decadal change in the rate of ocean acidification in the western Pacific equatorial zone. *Third symposium in the ocean in a high-CO₂ world*. 2012年9月25日, モントレー (アメリカ)
- ⑤ Kosugi, N. et al., Decadal trend of acidification in the North Pacific subtropical mode water and its connection with climate variability. *Third symposium in the ocean in a high-CO₂ world*. 2012年9月25日, モントレー (アメリカ)
- ⑥ Ishii, M. et al., An overview of the ocean CO₂ increase in the western North Pacific subtropical and tropical zones. *2nd International Symposium Effects of Climate Change on the World's Oceans*. 2012年05月19日, 麗水 (韓国)
- ⑦ Sasano, D. et al., Oxygen decrease in the western Pacific along 165°E. *International Symposium Effects of Climate Change on the World's Oceans*. 2012年05月19日, 麗水 (韓国)
- ⑧ Ishii, M. et al., Mode waters: the uptake window of natural and anthropogenic CO₂ into the ocean interior. *Ocean Sciences Meeting 2012*. 2012年2月24日, ソルトレイクシティ (アメリカ)
- ⑨ Ishii, M., Interior carbon changes in the Pacific. *Joint SOLAS/IMBER/IOCCP Carbon synthesis meeting, The ocean carbon cycle at a time of change: synthesis and vulnerabilities*. 2011年9月14日, パリ (フランス)
- ⑩ Ishii, M., Air-Sea CO₂ flux and CO₂ storage in the equatorial and North Pacific Ocean. *Workshop "Regional Carbon Cycle Assessment on Land and Oceans"*. 2010年10月7日, ビヴェルボ (イタリア)

〔図書〕 (計 1 件)

- ① 石井雅男 (共同執筆), 図説地球環境, 朝倉書店【出版確定】

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 雅男 (ISHII MASAO)
気象研究所・地球化学研究部・室長
研究者番号: 70354553

(2) 研究分担者

笹野 大輔 (SASANO DAISUKE)
気象研究所・地球化学研究部・研究官
研究者番号: 10462524
小杉 如央 (KOSUGI NAOHIRO)
気象研究所・地球化学研究部・研究官
研究者番号: 20553168
鈴木 亨 (SUZUKI TORU)
(財)日本水路協会海洋情報研究センター・研究開発部・部長
研究者番号: 10360736

(3) 連携研究者 (平成 22-23 年度)

緑川 貴 (MIDORIKAWA TAKASHI)
気象研究所・地球化学研究部・部長
研究者番号: 10414517