

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：平成20年度～平成22年度

課題番号：20310002

研究課題名（和文） 南極海の二酸化炭素吸収に関する研究

研究課題名（英文） Studies on the air-sea CO<sub>2</sub> exchange in the Southern Ocean

研究代表者

吉川（井上）久幸（YOSHIKAWA (INOUE) HISAYUKI）

北海道大学・大学院地球環境科学研究院・教授

研究者番号：60344496

研究成果の概要（和文）：

本研究は、南極海の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 吸収とその変動要因を観測により解明することを目的とし開始された。2009年度と2010年度の12月から1月に白鳳丸（海洋研究開発機構）及び海鷹丸（東京海洋大学）で南極海インド洋セクターでの炭酸系と溶存酸素の観測を行った。その結果、生物活動が大気海洋間二酸化炭素交換フラックスの分布と変動に大きな役割を果たしていることが明らかになった。一方、過去に観測された炭酸系データと本研究で得られた結果を解析した結果、二酸化炭素吸収が主要な原因である海洋二酸化炭素分圧の増加及び海洋酸性化が明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

We have conducted observational studies with the main objective of clarifying air-sea CO<sub>2</sub> flux and factors controlling it in the Southern Ocean. Measurements of partial pressure of CO<sub>2</sub>, dissolved inorganic carbon, pH, and dissolved oxygen were made in the Southern Ocean over the period from December to January in FY2009 and FY2010. Observed results indicate that biological activity plays an important role in determining temporal/spatial distribution of air-sea CO<sub>2</sub> flux. By combining historical data, we determined the long-term increase of partial pressure of CO<sub>2</sub> in surface seawater and decrease of pH, mainly due to the oceanic CO<sub>2</sub> uptake.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2009年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2010年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

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：物質循環

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、南極海の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 吸収とその変動要因を解明することを目的として開始された。これは南極海の二酸化炭素吸収

量評価が不確実であり、全球炭素循環理解の障壁となっていること、二酸化炭素吸収による長期的な海洋酸性化の実態を把握する必要があることから設定したものである。

大気・海洋間の二酸化炭素交換の方向と度合いを決める要素として、大気・海洋間の二酸化炭素分圧差がある。海洋の二酸化炭素分圧 ( $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ ) は、大気と比較して大きく変動する。従って、海洋が二酸化炭素を吸収するか放出するかを事実上決めていくと言って良い。我々は Takahashi らと共同で、1960 年代から測定された海洋二酸化炭素分圧データを統合し、2000 年単年度の二酸化炭素吸収量を評価した (Takahashi et al., 2009)。この論文で南極海 ( $50^\circ \text{S}$  より南側) の二酸化炭素吸収量は、約  $0.2 \text{ PgC}$  ( $\text{Pg}$  は  $10^{15} \text{ g}$ ) と評価された。一方、Takahashi らの以前の論文では、1995 年の評価で  $\sim 0.5 \text{ PgC/yr}$  の値を得ていた (Takahashi et al., 2002)。この大きな差は、南極海での炭素循環変動を示しているわけではなく、評価自体が変わったに過ぎない。また、大気中の二酸化炭素濃度とその炭素安定同位体を組み合わせた評価では、 $0.1 \text{ PgC/yr}$  程度の吸収が報告されている。このように南極海の二酸化炭素吸収量評価の不確かさは、現在の炭素循環像を描いていく上で看過できないほど大きい状態であった。二酸化炭素吸収量評価に差をもたらす要因のひとつに、大気・海洋間の二酸化炭素交換の季節変化 (つまりは海洋二酸化炭素分圧の季節変化) が十分に把握されていないことがある。南極海においては、表層の植物プランクトンの活動が、海洋の二酸化炭素分圧の分布と変動に大きな役割を果たしている (例えば Nakaoka et al., 2007)。しかし、その定量的理解が進んでいないことが、不一致の大きな原因のひとつである。

更に二酸化炭素は (海) 水に溶けると化学的には弱酸として働く。二酸化炭素吸収による酸性化の影響は、今後数十年の時間スケールで、先ず北極海や南極海において炭酸カルシウムを持つプランクトンに影響を及ぼすことが予測されている (Orr et al., 2005)。現在の海洋表層のカルシウムイオン濃度と炭酸系の化学平衡のもとでは、固体の炭酸カルシウムが溶け出すことはない。しかし、近い将来、酸性化によりプランクトンの炭酸カルシウムの殻が溶け出す可能性が示された。我々は、南極海の炭酸系の観測を、1983/84 年以降ほぼ数年おきに実施してきた。しかし、

限られた観測のため、炭酸系の季節変化や年々～長期変動の把握が不十分であった。これまで開催されてきた国際会議 (ICDC7、SOLAS 会議、SOCOVV Symposium) などでは、南極海の炭素循環が多くの研究者により取り上げられ、国際的に共同して取り組むべき課題として指摘されきた。

## 2. 研究の目的

上述したように本研究の (狭義の) 目的は、南極海の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) 吸収とその変動要因を解明することである。このことにより全球の炭素循環理解に資することが最終的な目的である。

## 3. 研究の方法

本研究の目的達成のため、太平洋及びインド洋区南極海で、海洋観測を実施した。先ず、生物活動が盛んになる冬季から夏季にかけて南極海の二酸化炭素吸収量評価に取り組んだ。二酸化炭素吸収による二酸化炭素分圧増加・酸性化 (pH) は、過去の観測データと比較し長期変動を明らかにすることにした。海洋観測のため 2008 年度は、まず溶存酸素連続測定装置を整備した。本装置は、小型燃料電池式酸素濃度計 (Sable Systems 社製 Oxzilla II) ・平衡器・試料ハンドリングデータ処理系から成り立っている。酸素濃度計は空気中の酸素濃度 ( $\text{O}_2/\text{N}_2$ ) の変動を ppm レベル (大気酸素濃度は  $209,400 \text{ ppm}$ ) で検出することが可能な分析計である。観測機器は、2009 年度及び 2010 年度の南極海観測において使用した。これらの観測では、季節海氷の張り出しの少ない海域として太平洋区、張り出しの広い海域としてインド洋区で観測を行った。また、季節よりも長い時間スケールでは、過去の観測データと比較し、南極海の二酸化炭素吸収の年々変動・長期的な変化などを明らかにした。具体的には過去に得られた炭酸系パラメータを解析し、海洋がどれだけ酸性化 (pH が変化) したかを評価した。炭酸系観測データとして 2 パラメータを取得した航海では、温度 (SST)、塩分 (SSS)、海水中二酸化炭素分圧と全炭酸濃度 (もしくは全アルカリ度) の 4 要素の観測値から 熱力学的手法 (Lueker et al. 2000; DOE 1994) を用

いて pH を算出した。炭酸系パラメータ 1 要素（海水中二酸化炭素分圧もしくは全炭酸濃度）のみが得られた航海では、温度と塩分から全アルカリ度を経験的 (Lee et al., 2006)) に見積り、上述の方法により pH を算出した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 海洋観測

本研究で行った海洋観測のうち、白鳳丸による 2009 年度の観測結果について先ず説明する。2010 年度の結果は、観測が 1 月に終了したばかりであり、分析中の試料もあるので簡単な記述にとどめる。2009 年度は、12 月 19 日～1 月 26 日までの間、インド洋区における観測を行った (図 1)。

観測の結果、大気中の二酸化炭素分圧は、364-384  $\mu\text{atm}$  でほとんど一定であったが、表面海水の二酸化炭素分圧は、227-411  $\mu\text{atm}$  の間で大きく変動していた。この時期、ほとんどの海域で大気よりも表面海水の二酸化

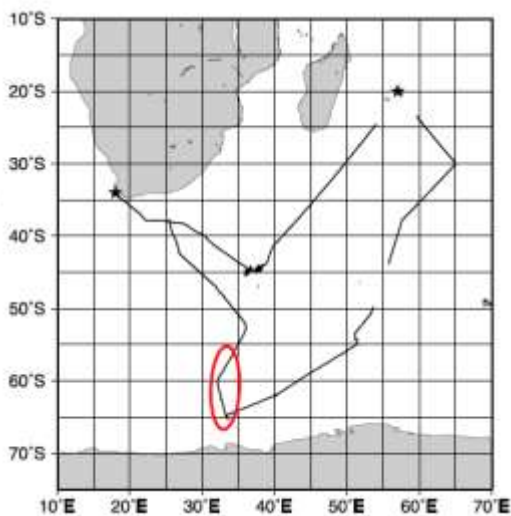


図 1 白鳳丸 KH-09-5 レグ 3、レグ 4 航海の航跡図。赤線で囲った海域で各層採水を実施した。

炭素分圧が低く、海洋が二酸化炭素を吸収していることが分かった。一方酸素分圧は、大気と比べて過飽和であり、表面海水の二酸化炭素分圧と逆相関の変動パターンを示した。簡単なモデル計算を行ったところ、生物活動

が溶存無機炭素の変動に大きな役割を果たしていることが明らかとなった。また 2010 年の南極海観測は、2009 年度とほぼ同じ海域で行われ、表面海水の二酸化炭素分圧は 345-400  $\mu\text{atm}$  の範囲で変動し、ほとんどの海域で二酸化炭素の吸収域であった。特に季節海氷域付近で二酸化炭素の急激な減少と酸素分圧の増加が認められた。今後、海水試料の分析を進め、生物生産について評価する予定である。

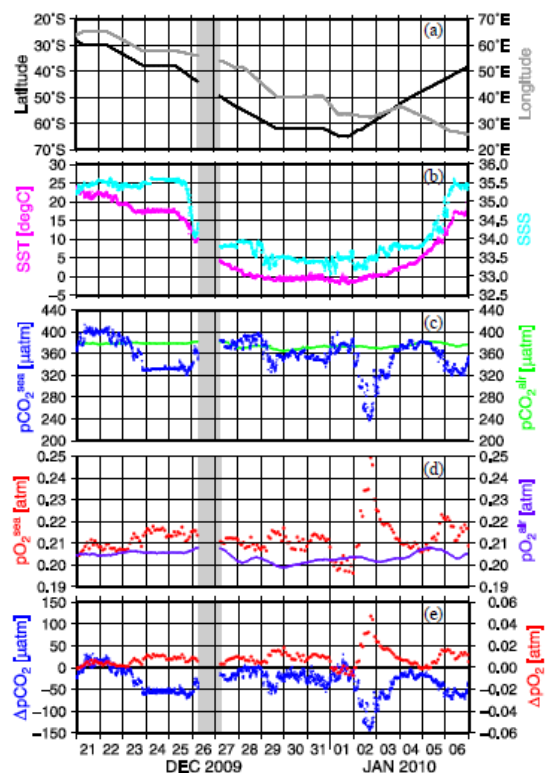


図 2 白鳳丸 KH-09-5 レグ 3 航海の結果。(A) は緯度、経度；(B) は温度、塩分；(C) は大気及び表面海水の二酸化炭素分圧；(D) は大気及び表面海水の酸素分圧；(E) は表面海水と大気との二酸化炭素及び酸素分圧差。

##### (2) 過去データとの比較

南大洋における炭酸系の観測は北半球の海域に比べれば非常に少ないが、長期にわたる観測データの解析から、海水中二酸化炭素分圧が季節海氷域の北側の広い海域で有意な増加傾向を示すことが見出されている (Yoshikawa-Inoue and Ishii, 2005; Takahashi et al., 2009; Metzl, 2009)。図

3 は 110°E に沿って評価した海洋の二酸化炭素濃度（海水と平衡になった「乾燥空気」中の二酸化炭素モル分率）を示す。

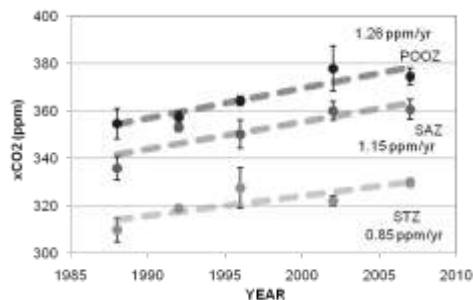


図 3. 110°E における Sub-Tropical Zone (STZ), Sub-Antarctic Zone (SAZ), Permanent Open Ocean Zone (P00Z) 内での xCO<sub>2</sub> の経年増加率。

図 3 の観測データは、亜熱帯前線 (STF) の北側 (STZ)、STF と亜南極域 (SAF) の間の亜南極域 (SAZ)、SAF と南極前線 (PF) に挟まれた狭い前線帯 (PFZ)、南極前線から季節海水域 (SSIZ) 北辺の間の南極域 (P00Z) に分けて、平均化した海洋の CO<sub>2</sub> 濃度の経年変化の一部を示したものである。110°E に沿っては 38~40°S に亜熱帯前線南緯 48°S 付近に亜南極前線 (SAF)、51~52°S に極前線 (PF) が存在しており、xCO<sub>2</sub> は上記の前線間は比較的一様な値である。二酸化炭素増加率の値は、いずれも近年の大気中の二酸化炭素濃度の増加率約 2.0 ppmv/yr よりも小さく、Inoue and Ishii (2005) や Metzl et al. (2009) が得た南大洋他海域の値よりも小さい。Le Quéré et al. (2007) は過去 20 年の Southern Annular Mode の正偏差に伴う南大洋の平均風速の増加が、表層・亜表層間の鉛直混合を促進し、海洋の二酸化炭素吸収力を低下させるとしている。この仮説は、表層海洋中の二酸化炭素濃度が、大気海洋間の非平衡を解消すべく先行して増加する大気中二酸化炭素濃度に追従して増加することに加え、表層よりも高濃度の二酸化炭素濃度を持つ亜表層との混合の影響を受け、大気中二酸化炭素濃度増加率よりも大きくなることを意味する。本研究はこの仮説と逆の結果を示しており、本研究と他研究を同時に説明するには、増加率の算

出における観測期間やその長さの違いという統計上の取扱いや、表層と亜表層との交換などの物理過程以外のプロセス、たとえば生物活動に年々の変化がある可能性、あるいは鉛直混合に地域性が存在している可能性を検討する必要がある。

次に南大洋の主に太平洋セクターにおいてこれまでに取得・蓄積されてきた海水中二酸化炭素分圧等の炭酸系観測データを使用して (表 1)、南大洋の各海域における pH 時系列を推定し、その低下傾向を比較検討した結果について報告する (図 4)。

Cruise	Year/Month	Observed parameters
KH68-4	1969/Jan.	SST, SSS, pCO <sub>2</sub> <sup>sw</sup> , TA
KH63-4	1983/Dec., 1984/Jan.	SST, SSS, pCO <sub>2</sub> <sup>sw</sup>
JARE34	1992/Dec., 1993/Feb.	SST, SSS, DIC
KH94-4	1994/Dec., 1995/Jan.	SST, SSS, pCO <sub>2</sub> <sup>sw</sup> , DIC
KH01-3	2002/Jan.	SST, SSS, pCO <sub>2</sub> <sup>sw</sup> , DIC
JARE43	2002/Feb.	SST, SSS, pCO <sub>2</sub> <sup>sw</sup> , DIC
JARE44	2003/Mar.	SST, SSS, DIC
KH09-5	2009/Dec., 2010/Jan.	SST, SSS, pCO <sub>2</sub> <sup>sw</sup> , DIC

SST, sea surface temperature; SSS, sea surface salinity; pCO<sub>2</sub><sup>sw</sup>, oceanic CO<sub>2</sub> partial pressure; DIC, dissolved inorganic carbon; TA, total alkalinity

表 1 海洋炭酸系パラメータと観測期間

図 4 に示すようにいずれの海域でも、海面水温、塩分および全アルカリ度 (塩分 34 に規格化) の各平均値に有意な変化傾向が見られないのに対し、海水中二酸化炭素分圧および全炭酸濃度 (塩分 34 に規格化) は長期的に有意な増加傾向を示し、pH には逆に 0.001 ~ 0.002 yr<sup>-1</sup> の低下傾向が見出された。特に、季節海水域に近い PZ で相対的に大きな変化傾向が検出された。その原因として、当該域における風速が強まって、下層からの全炭酸の供給量が増加していると考えられることも可能であるが、今後の系統的な観測が必要である。また、本研究で実施した、2009 年 12 月 ~ 2010 年 1 月のインド洋セクターにおける観測結果との比較を行った。1969~2003 年の観測データから見積られた pH の低下傾向は、いずれの海域においても、最新の観測結果と整合的であり、海洋酸性化が進行していることが示された。

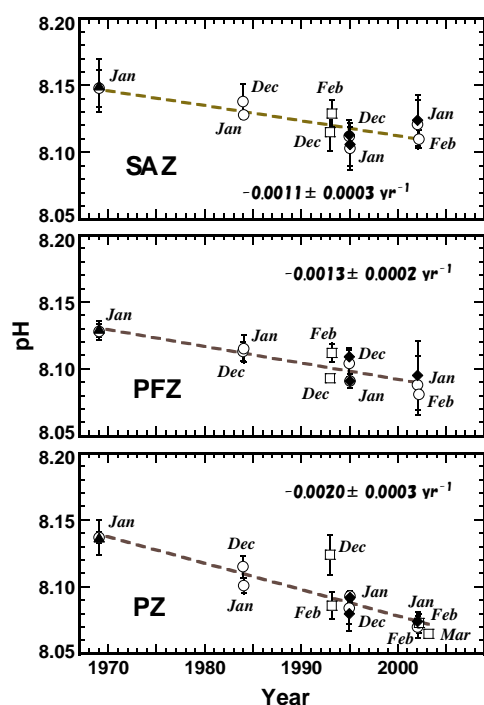


図4 各海域で見積られたpH時系列とトレンド。◆, CO<sub>2</sub>分圧と全炭酸からの見積り; ▲, CO<sub>2</sub>分圧と全アルカリ度からの見積り; ○, CO<sub>2</sub>分圧からの見積り; □, 全炭酸からの見積り; エラーバーは1σ。

#### 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 Ishii, M., Kosugi, N., Sasano, D., Saito, S., Midorikawa, T., and Inoue, H. Y. (2011) Ocean acidification in the coastal zone off the south coast of Honshu, Japan. *J. Geophys. Res.*, accepted. 査読有
- ② Yoshida O., Inoue, H. Y., Suzuki, K., Watanabe, S., and Noriki, D. (2011) Biogenic methane distribution in the South Pacific and the Southern Ocean in austral summer, 2001-2002, *J. Geophys. Res.*, accepted. 査読有
- ③ Midorikawa, T., Ishii, M., Saito, S., Sasano, D., Kosugi, N., Motoi, T., Kamiya, H., Nakadate, A., Nemoto, K., and Inoue, H. Y. (2010). Decreasing trend of pH estimated from the time series of carbonate parameters observed in the western North Pacific for a quarter century, *Tellus*, 62B, 649-659. 査読有
- ④ Takamura, T., Inoue, H. Y., Midorikawa, T., Ishii, M., and Nojiri, Y. (2010) Air-sea CO<sub>2</sub> flux in the mid-latitude western and eastern North Pacific, *J. Met. Soc. Jpn.*, 88, No6, 899-914. 査読有
- ⑤ Nomura, D., Inoue, H. Y., Toyota, T., and Shirasawa, K. (2010), Effect of snow, snow melting, and re-freezing processes on air-sea ice CO<sub>2</sub> flux., *J. Glaciol.*, 56, No196, 262-270. 査読有
- ⑥ Fujii, M., Chai, F., Shi, L., Inoue, H. Y., and Ishii, M. (2009) Seasonal and interannual variation of oceanic carbon cycling in the western and eastern tropical-subtropical North Pacific: a physical-biological modeling study. *J. Oceanogr.*, 65, No5, 689-701. 査読有
- ⑦ Nakaoka, S., Nakazawa, T., Inoue, H. Y., Aoki, S., Hashida, G., Ishii, M., Yamanouchi, T., Odate, T., and Fukuchi, M. (2009) Variations of oceanic pCO<sub>2</sub> and air-sea CO<sub>2</sub> flux in the eastern Indian sector of the Southern Ocean for the austral summer of 2001-2002, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L14610, doi:10.1029/2009GL038467. 査読有
- ⑧ Isada T., Kuwata, A., Saito., H., Ono, T., Ishii, M., Inoue, H. Y., and Suzuki, K. (2009) Photosynthetic features and primary productivity of phytoplankton in the Oyashio and Kuroshio-Oyashio transition regions of the northwest Pacific, *J. Plankton Res.*, 31, 1009-1025. 査読有
- ⑨ Ishii, M., Inoue, H. Y., Saito, S., Tokieda, T., Sasano, D., Midorikawa, T., Nakadate, A., Nemoto, K., Metzl, N., Sabine, C., R., Feely, R., Wanninkhof, R., Wong, C. S. (2009) Spatial variability and decadal trend of the oceanic CO<sub>2</sub> in the western equatorial Pacific warm/fresh water. *Deep-Sea Res.*, II, 56, 591-606. 査読有
- ⑩ Nemoto, K., Midorikawa, T., Ogawa, K., Takatani, S., Wada, A., Ishii, M., and Inoue, H. Y. (2009) Continuous observations of atmospheric and oceanic CO<sub>2</sub> using the moored buoy in the East China Sea: Variations during the passage typhoons. *Deep-Sea Research II*, 56, 542-553. 査読有
- ⑪ Nomura, D., Ishikawa, M., Takatsuka, T., Kawamura, T., Shirasawa, K., and Inoue, H. Y. (2009) Transport of chemical components in sea ice and under-ice water during melting in the seasonally ice-covered Saroma-ko Lagoon, Hokkaido, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81, 201-209. 査読有
- ⑫ Takahashi, T., Sutherland, S. C., Inoue, H. Y. (他23名14番目), Ishii, M., (他23名15番目), Midorikawa, T., (他23名16番目).

(2009) Climatological Mean and Decadal Change in Surface Ocean pCO<sub>2</sub>, and Net Sea-air CO<sub>2</sub> Flux over the Global Oceans, Deep-Sea Res., II, 56, 554-577. 査読有

〔学会発表〕 (計 20 件)

- ① Hashida, G., Nakazawa, T., Aoki, S., Nakaoka, S., Inoue, H. Y., Yamanouchi, T., Odate, T., and Fukuchi, M. Ocean Acidification States in the Indian Sector of the Southern Ocean relating to the secular trend and seasonal variation of Oceanic Carbon Dioxide. IPY Oslo Science Conference, June 8-12, 2010, Oslo, Norway.
- ② Nakaoka, S., Inoue, H. Y., Nakazawa, T., Hashida, G., Koitabashi, M., Ishimaru, T., Nojiri, Y., and Fukuchi, M. Temporal and Spatial Variations of Oceanic Inorganic Carbonates and Biological Activities in the Southern Ocean at Umitaka-maru cruises from 2005/06 to 2008/09. IPY Oslo Science Conference, June 8-12, 2010. Oslo, Norway.
- ③ Midorikawa, T., Inoue, H. Y., Ishii, M., Sasano, D., Hashida, G., Nakaoka, S., Kosugi, N., and Suzuki, T. Long-term trends of surface ocean acidification in the Southern Ocean. IPY Oslo Science Conference, June 8-12, 2010. Oslo, Norway.
- ④ Hashida, G., Ono, H., Inoue, H. Y., Nakaoka, S., Nakazawa, T., Aoki S., Ishii, M., Fukuchi, M., Odate, T., Yamanouchi, T. Seasonal variation of dissolved inorganic carbon based on repeat observations in marginal ice zone along 140°E during austral spring 2001/02, 9th International Carbon Dioxide Conference, September 13-19, 2009, Jena, Germany.
- ⑤ Ishii, M., Sasano, D., Kosugi, N., Midorikawa, T., Takatani, Y., Tokieda, T., Nakano, T., Inoue, H. Y. Trend of carbon increase and oxygen decrease in the interior of the western North Pacific subtropical gyre. 9th International Carbon Dioxide Conference, September 13-19, 2009, Jena, Germany.
- ⑥ Ishii, M., Midorikawa, T., Saito, S., Tokieda, T., Sasano, D., Nakadate, A., and Inoue, H. Y. Trend of Acidification in the western North Pacific. 2<sup>nd</sup> Symposium on the Ocean in High-CO<sub>2</sub> world, October 6-9, 2008, Monaco

〔図書〕 (計 2 件)

橋田 元、中岡慎一郎、小野 恒、中澤高清、吉川久幸、青木周司、森本真司、山内 恭、小達恒夫、福地光男. 南大洋オーストラリア

区における表層海洋中の二酸化炭素分圧の経年変化と季節変化. 南極資料. 印刷中. 2011.

吉川久幸 (分担執筆) 地球変動研究の最前線を訪ねる 人間と大気・生物・土壌の環境清水弘文堂書房 pp439. 2009

〔その他〕

ホームページ等

<http://geos.ees.hokudai.ac.jp/hyoshika/index.html>

<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/ge/ge-sjis.html>

<http://www.nipr.ac.jp/group/glaciology.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉川 (井上) 久幸 (YOSHIKAWA (INOUE) HISAYUKI) 北海道大学・大学院地球環境科学研究院・教授  
研究者番号：60344496

### (2) 研究分担者

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

橋田 元 (HASHIDA GEN)  
国立極地研究所・気水圏研究グループ・助教  
研究者番号：00280537

### (3) 連携研究者

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

笹野 大輔 (SASANO DAISUKE)  
気象庁気象研究所・地球化学研究部・研究官  
研究者番号：10462524