

## 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 24 年 6 月 30 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21310018

研究課題名（和文） 核実験起源炭素 14 の観測とモデルによる海洋人為起源 CO<sub>2</sub> の 10 年規模変動の解明研究課題名（英文） Studies on decadal variation of the anthropogenic CO<sub>2</sub> in the ocean by means of observed and simulated radiocarbon.

研究代表者

熊本 雄一郎（KUMAMOTO YUICHIRO）

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・技術研究副主幹

研究者番号：70359157

研究成果の概要（和文）：海洋モデル再現実験で得られた核実験起源炭素 14 及び人為起源 CO<sub>2</sub> の結果と、それらの観測データとの比較を行った。その結果、定性的にはモデル結果は観測結果をよく再現している一方で、定量的にはモデル結果が過小または過大評価されている海域が存在していることが示された。この原因について、モデル中の（1）大気海洋気液境界面における二酸化炭素ガス交換、及び（2）海洋表層の風成循環のパラメタライゼーションに改良の余地があることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：We compared the observational and model simulation results of the bomb-produced radiocarbon and anthropogenic carbon in the ocean. The model simulation results agree well with the observational ones qualitatively. However the ocean model overestimates or underestimates the bomb radiocarbon in some regions. This implies that the CO<sub>2</sub> gas exchange at sea surface and thermocline circulation in the ocean model could be improved.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2010 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2011 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：化学海洋学

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：人為起源二酸化炭素、海洋炭素循環、炭素 14、化学トレーサ

## 1. 研究開始当初の背景

人類の化石燃料の利用によって、大気 CO<sub>2</sub> 濃度は確実に上昇し続けている。大気中に放出された人為起源 CO<sub>2</sub> は、およそ半分しか大気中に残留しておらず、残りの約半分は海洋と陸上生態系によって吸収されている。従って、化石燃料起源 CO<sub>2</sub> の大気への蓄積率、すなわち CO<sub>2</sub> 濃度の上昇率は、それら 2 つのリザーバーの CO<sub>2</sub> 吸収量に大きく依存してい

る。このことは、将来の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度上昇に伴う地球温暖化を予測するためには、海洋及び陸上生態系の CO<sub>2</sub> 吸収メカニズムに関する理解を深めることが必要不可欠であることを示唆している。これまでの研究により、陸上生態系による吸収は年々変化が大きいものに対して、海洋の吸収量は 10 年規模で変動していることが明らかになりつつあるが、その定量的な議論は不十分である。海洋の

CO<sub>2</sub> 吸収量を正確に把握するためには、少なくとも 10 年以上の期間にわたる、時間的に高密度な時系列データが必要である。しかしながら、そのような時系列観測点は、全海洋でわずか数点しか存在しない。そのため、CO<sub>2</sub> 吸収量の 10 年規模変動とそのメカニズムを解明するためには、過去の海上風等の歴史データを境界条件とした海洋大循環モデルによる再現実験が有効な方法となる。しかしながら、モデル実験結果と比較検討することのできる人為起源 CO<sub>2</sub>、及び人為起源 CO<sub>2</sub> の有効なトレーサである核実験起源炭素 14 などの観測データの絶対的な不足が、研究推進の大きな障害となっている。

## 2. 研究の目的

1960/70 年代に実施された大気中核実験によって、大気の炭素 14 濃度はほぼ倍増した。その後、核実験起源炭素 14 は大気から海洋及び陸上生態系へ次第に移行しつつある。1990 年代の WOCE (World Ocean Circulation Experiment) 観測と 2000 年代の再観測のデータの比較から、過去約 10 年の間に核実験起源炭素 14 は海洋表層で減少し、中層で増加したことが明らかとなった。このことは、実験起源炭素 14 が大気海洋気体交換と海洋炭素循環の有効なトレーサであることを示唆している。核実験起源炭素 14 と人為起源 CO<sub>2</sub> は、大気海洋気体交換及び海洋内部の移流拡散においてほぼ同じように挙動する。また、約 50 年間の時間スケールを持つ核実験起源炭素 14 は、同じく過去約 50 年分のデータ蓄積履歴を持つ人為起源 CO<sub>2</sub> の理想的なトレーサである。従って、核実験起源炭素 14 の変動をうまく再現できているモデルでは、人為起源 CO<sub>2</sub> のそれも適正に再現できている蓋然性が高いと考えられる。さらに海洋炭素循環の変動を考える上で海洋生態系は物理・化学場と同程度に重要な要素であり、生態系を含む海洋大循環モデルを用いることで、より正確に海洋による人為起源 CO<sub>2</sub> 吸収量の変動を捉えることができる。このような背景を踏まえ、本研究では人為起源 CO<sub>2</sub> の有効なトレーサである核実験起源炭素 14 観測データを用いて生態系を含む海洋大循環モデルを改善することで、10 年規模変動を含む海洋の CO<sub>2</sub> 吸収量推定の確度と精度を向上させることを研究目的とした。

## 3. 研究の方法

研究目的を達成するため、下記の 2 つのサブテーマを実施した。

(1) 炭素 14 観測データのデータベースの構築：海洋大循環モデルにおける炭素循環の妥当性を評価するため、核実験炭素 14 のモデル再現実験結果と比較できる核実験炭素

14 データベースを構築した。1990 年代の WOCE で測定された炭素 14 は、Key et al.(2004)によってデータベース化されている。そのデータベースに 2000 年代の我々の再観測データ、さらに他の歴史的データを加えることで、過去約 50 年間の全球規模の炭素 14 観測データベースを整備した。

(2) 観測データとモデル再現実験の比較：核実験起源炭素 14 の観測データとモデル再現実験の結果を比較することで、海洋大循環モデルの妥当性を評価した。海洋大循環モデルは、水平解像度：緯度 1 度×経度 1 度の COCO-CCSR Ocean Component Model (Hasumi, 2000) に生態系モデル NEMURO (Kishi et al., 2007) を結合したものをを用いた。このモデルは高解像度ではないものの、栄養塩、溶存無機炭素濃度だけでなく、炭酸カルシウム殻、植物プランクトン、動物プランクトンなど多くのパラメーターを包含しており、生態系のみならず海洋炭素循環の再現実験に有効なモデルである。海上風等の境界条件は、最新版の NCEP/NCAR の再解析データを使用した。数値モデル実験 (計算) は、海洋研究開発機構の横浜研究所地球シミュレータセンターの「地球シミュレータ」で行った。そのモデルにおける人為起源 CO<sub>2</sub> 再現結果と、再観測で得られた海盆規模人為起源 CO<sub>2</sub> 吸収量及び時系列観測点データを比較検討し、海洋における人為起源 CO<sub>2</sub> 吸収量の 10 年規模変動とそのメカニズムを議論した。

なお、炭素 14 濃度は極めて低いため、その濃度は標準物質との比で表す。すなわち、標準物質の <sup>14</sup>C/<sup>12</sup>C 比に対する試料のその比率を千分率で求め、同位体希釈効果等を補正した値を Δ<sup>14</sup>C として‰表示する。

## 4. 研究成果

(1) 炭素 14 観測データのデータベースの構築

Key et al. (2004) は、1990 年代に全球規模で実施された WOCE、及び 1970 年代に実施された GEOSECS (Geochemical Ocean Section Study) の炭素 14 データをまとめ、データベース (GLODAP: Global Data Analysis Project) を作成した。その GLODAP に含まれていない炭素 14 歴史データが記載されている論文、報告書等を検索して、データベースに追加し品質管理を行った。太平洋域については、同様の手順によりすでに炭素 14 データベースが研究代表者によって作成されているため本研究課題では主に大西洋及びインド洋でのデータ収集を行った。図 1 に、データベースから作成した、南大西洋亜熱帯、南インド洋、南太平洋亜熱帯における炭素 14 存在量の経時変化を示した。この結果、南大西洋と南太平洋亜熱帯では、1950 年代から 1990 年

代にかけて核実験起源炭素 14 が継続して増加してきたのに対して、南インド洋亜熱帯では他の二海盆に先駆けて 1970 年代までにその存在量が最大になり、それ以降は増加していないことが分かった。本研究で得られたデータベースから、海盆によって核実験起源炭素 14 の挙動が異なることが明らかにされたが、その原因については明らかではない。

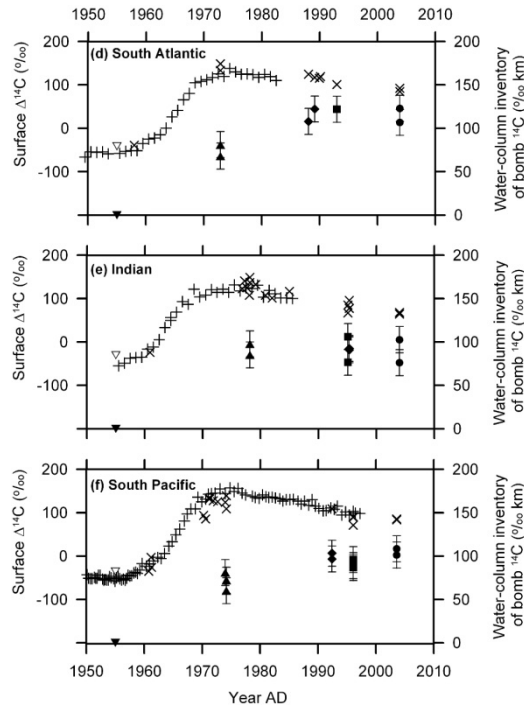


図1 南大西洋亜熱帯（南緯約 30 度）、南インド洋亜熱帯（南緯約 20 度）、南太平洋亜熱帯（南緯約 30 度）における炭素 14 の鉛直積算存在量（‰ km）の経時間変化。サンゴ骨格に記録された各海盆の表面海水中炭素 14 濃度（‰）も合わせて示している（Kumamoto et al., 2011）。

## (2) 観測データとモデル再現実験の比較

海洋循環モデルによる炭素 14 のシミュレーション結果はほぼ全海域で得られているが、ここでは比較的観測データの多い南大西洋、南インド洋、及び南太平洋の亜熱帯におけるシミュレーションと観測結果を比べる。

図2に西暦 2003 年の三海盆における観測で得られた炭素 14 の分布、および海洋循環モデルによるシミュレーションの結果を示す。観測結果は三海盆ともに、水深 500m 程度までで 60~80‰と高く、水深深くなるにつれて漸減していくという鉛直的な分布をしていた。海盆間の違いとして最も顕著な特徴は、南緯約 30 度の南大西洋及び南太平洋に比べて、南緯約 20 度の南インド洋の表層 500m 付近までの炭素 14 濃度が低いことである。これは、平均滞留時間の長い、南緯 30 度中心とした中緯度亜熱帯海域に炭素 14 が蓄積されるというこれまでの知見と整合的であ

る。一方、水深 1000m までの分布に関しては、南大西洋及び南インド洋では西高東低の傾向が見られるのに対して、南太平洋では日付変更線をはさんで概ね 2 つの極大が観測された。これらは三海盆における表層循環、すなわち西岸強化流を伴う風成循環の支配されているものと考察された。

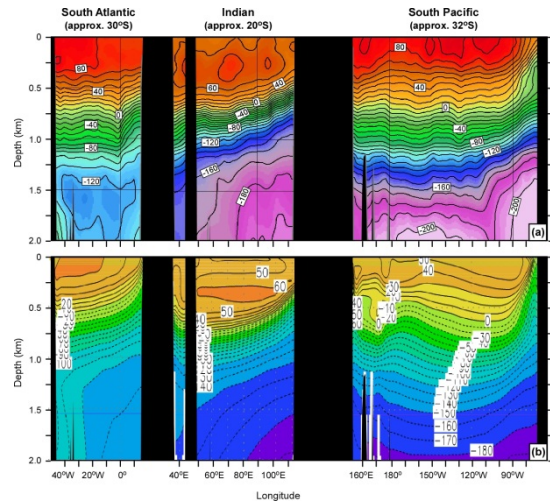


図2 2003 年の南大西洋亜熱帯（南緯約 30 度）、南インド洋亜熱帯（南緯約 20 度）、南太平洋亜熱帯（南緯約 30 度）における炭素 14 濃度（ $\Delta^{14}\text{C}$ , ‰）の水深 2000m までの断面図。上図 (a) は観測結果（JAMSTEC BEAGLE2003 Cruise）を、下図 (b) はモデルシミュレーションの結果を示す。

モデルで再現された炭素 14 の分布パターンは、定性的には観測結果とよく一致していた。すなわち、南大西洋及び南インド洋で観測された西高東低の傾向、南太平洋の 2 つの極大、および南インド洋における亜表層（水深 300~400m 程度）の極大が良く再現されている。また、南大西洋の西端（アメリカ大陸側）の水深 2000m 付近で観測された、炭素 14 濃度の高い北大西洋深層水もシミュレーションでうまく再現されている。一方でシミュレーションでは、水深 1000m 以浅の結果が観測値に比べて過少評価されている。水深 500m 以浅におけるその差は南太平洋、南大西洋、南インド洋でそれぞれ 30~40‰、約 20‰、約 10‰と海盆間による違いも見られる。観測された炭素 14 は、核実験起源炭素 14 と宇宙線由来の天然起源炭素 14 を足し合わせたものである。観測値においてもモデルシミュレーションにおいても、天然起源炭素 14 は観測データから経験的に求められたものを用いている。すなわち、いずれにおいても核実験起源炭素 14 は、観測もしくはモデルで再現された結果から天然起源炭素 14 を差し引いて求められる。従って、モデルシミュレーションにおいて天然起源炭素 14 の分布が適正に再現されているならば、図2で見られる

炭素 14 の観測値とモデルシミュレーションの差は、海洋循環モデルにおける核実験起源炭素 14 が過小評価されている可能性を示唆している。

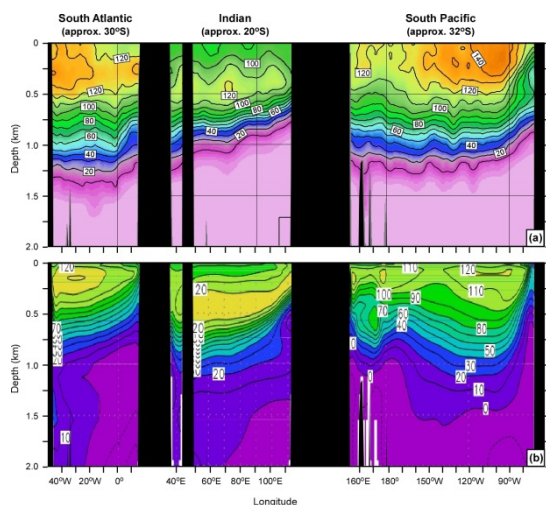


図3 図2と同じ。ただし、核実験起源炭素 14 濃度 ( $\Delta^{14}\text{C}$ , ‰) の結果を示す。

モデルシミュレーションによる核実験起源炭素 14 の分布は、観測結果と概ね整合的であった (図 3)。しかし、炭素 14 の場合と同様に 1000m 以浅においてはモデルシミュレーションの結果が観測値に比べて低い傾向が見られる。500m 以浅におけるその差は南太平洋と南大西洋でそれぞれ約 20‰と約 10‰であるが、南インド洋ではわずかではあるがモデルシミュレーションが過大評価となっている。上で述べたように、もしもモデルシミュレーションにおける天然起源炭素 14 が適正に再現されているならば、炭素 14 に見られる差 (図 2) と核実験起源炭素 14 に見られる差 (図 3) は一致しなければならない。しかし後者の差は前者の差に比べて、三海盆ともに約 10‰程度小さい。このことは、モデルシミュレーションにおける天然起源炭素 14 も約 10‰程度過小評価されている可能性を示唆している。海洋における炭素 14 の海洋における分布は、大気海洋気体交換及び表層の風成循環の影響を受けている。海洋循環モデルにおける天然起源炭素 14 の過小評価が三海盆において約 10‰と等しくなっていることから、この要因としては海域ごとに大きくその特徴が異なる表層風成循環ではなく、海域ごとに大きな相違が少ないと考えられる大気海洋間気体交換の過小評価である可能性が高い。海洋表面における気体交換については、二酸化炭素ガスの気液平衡はほぼ解明されているので、NCEP/NCAR の再解析データによる海上風速を再検討する必要があると考えられる。

モデルシミュレーション中で南大西洋及

び南太平洋の核実験炭素 14 が 10~20‰程度過小評価となっていることは、2つの要因が考えられる。一つは、天然起源炭素 14 の場合と同じく大気海洋気体交換係数が過小評価されている可能性であり、もう一つは各海盆における海洋表層の亜熱帯循環が過小評価されている可能性である。一方、インド洋において核実験起源炭素 14 が過大評価されている原因は、各海盆間で大気海洋気体交換に大きな差があるとは考えにくいため、同海域における海洋表層の風成循環が過大評価されている可能性が高い。図 4 には、1992 年から 2003 年の約 11 年間の炭素 14 濃度の変動を示している。もしも、この 11 年間に天然起源炭素 14 の分布に大きな変化がないとすれば、図 4 に見られる変動は核実験起源炭素 14 の変動を表しているとみなせる。ただし、観測結果については南太平洋においては 1992 年と 2003 年の結果から求められているもの、南インド洋は 1995 年と 2003 年の差、南大西洋では 1988 年と 2003 年の差をそれぞれ 1992 年から 2003 年の変化量に換算して求められている (図 1 参照)。したがって、特に南大西洋の観測により求められた変化量は、モデルシミュレーションのそれとは直接比較することが難しい。しかしながら、その南大西洋においても観測で見られた変化量の西高東低の分布傾向、及び水深 500m 以浅で減少し 500m~1500m では増加するという傾向はモデル中でも再現されている。

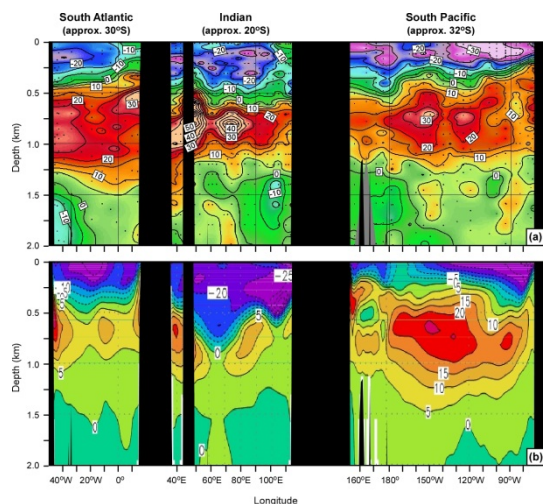


図4 図2と同じ。ただし、1992 年から 2003 年までの炭素 14 濃度の変化量 ( $\Delta^{14}\text{C}$ , ‰) の結果を示す。

南太平洋における 1992 年から 2003 年の間の炭素 14 変化量の分布は、定性的には観測とモデルでよく一致している (図 4)。同海盆の亜熱帯循環中央部 (日付変更線~西経 90 度) の水深 500m~1500m は南太平洋亜熱帯モード水及び南極中層水に相当するが、炭素 14 はそれら中層水で増加し、500m 以浅の表層水

で減少している。これらの結果は、主に 1960～1970 年代に海洋表層にもたらされた核実験起源炭素 14 が、亜熱帯循環中央部を中心に海洋表層から中層に次第に移行していることで説明できる。一方、モデルシミュレーションの中層水中炭素 14 濃度の増加率は、観測値に比べて 10～20%程度低い。ほぼ同じような傾向が核実験起源炭素 14 の分布 (図 3) にも見られた。その 50 年程度の履歴をもつ核実験起源炭素 14 と過去約 10 年間の炭素 14 の観測とモデルの差がほぼ等しいということは、この差をもたらす要因が時間に依存していない可能性を示唆している。南太平洋の中層を含めた風成循環は数十年規模である。もしもこれらの差が同海域における風成循環の過小評価に起因するものであれば、50 年程度の履歴をもつ核実験起源炭素 14 に見られる差は過去約 10 年間の炭素 14 の差に比べてより大きくなることが予想される。従って、海洋循環モデルにおける核実験起源炭素 14 濃度の過小評価は、天然起源炭素 14 と同様に、大気海洋気体交換の過小評価が原因である可能性が高い。

モデルシミュレーションの南インド洋における核実験起源炭素 14 の過大評価 (図 3) の原因を特定することは困難であるが、1992 年から 2003 年の変化量 (図 4) から、同海域における複雑な海洋循環が原因である可能性が示唆される。観測で得られた南インド洋の 1992 年～2003 年間の炭素 14 変化量は、南太平洋および南大西洋の場合と同じくおおよそ水深 500m～1500m で増加し、500m 以浅の表層水で減少している。しかしながら、東経約 50 度と約 70 度を中心として炭素 14 が大きく増加している。ここには示していないが、この炭素 14 の増加は、溶存酸素濃度の上昇と栄養塩濃度の低下を伴っており、観測データが得られた 1995 年と 2003 年では同海域における中層水循環が大きく異なっていたことが推察される。一般的に、インド洋の表層循環流は、モンスーンによる季節的な変動だけでなくその年々変動の影響を大きく受けることが知られている。従って、モデルシミュレーションによる核実験起源炭素 14 の過大評価は、過去約 50 年スケールで見たときに、南インド洋の表層・中層循環が南大西洋及び南太平洋のそれらに比べて活発したことが原因である可能性がある。定量的な議論は今後の課題であるが、このことは南インド洋亜熱帯では他の二海盆に先駆けて 1970 年代までにその核実験炭素 14 存在量が最大になったことと関連があるかもしれない。

本研究で得られた成果は、次のようにまとめることができる。海洋モデル再現実験で得られた核実験起源炭素 14 と観測データとの比較を行った結果、定性的にはモデル結果は

観測結果をよく再現している一方で、定量的にはモデル結果が過小または過大評価されている海域が存在していることが示された。この原因について、モデル中の (1) 大気海洋気液境界面における二酸化炭素ガス交換、及び (2) 海洋表層の風成循環のパラメタライゼーションに改良の余地があることが明らかになった。海洋モデルと観測による人為起源二酸化炭素の定量的な比較は今後の課題であるが、本研究で得られた成果は、10 年規模変動を含む海洋の CO<sub>2</sub> 吸収量推定の確度と精度の向上を通じて今後の IPCC (気候変動に関する政府間パネル) による「大気中 CO<sub>2</sub> 濃度上昇に伴う地球温暖化の予測」に資することが期待される。

#### 引用文献

- Hasumi, CCSR Ocean Component Model (COCO). CCSR Report, 13, 68pp (2000).
- Key et al., A global ocean carbon climatology: Results from Global Data Analysis Project (GLODAP). *Global Biogeochem. Cycles* 18: GB4031, doi:10.1029/2004GB002247 (2004).
- Kishi et al., NEMURO-Introduction to a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. *Ecological Modelling*, 202, 81-94 (2007).
- Kumamoto, Y., A. Murata, S. Watanabe, M. Fukasawa, Temporal and spatial variations in bomb-produced radiocarbon along BEAGLE2003 lines-revisits of WHP P06, A10, and I03/I04 in the Southern Hemisphere, *Prog. Oceanogr.*, 89, 49-60 (2011).

#### 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 3 件)

① Kumamoto, Yuichiro, Akihiko Murata, Shuichi Watanabe, Masao Fukasawa, Temporal and spatial variations in bomb-produced radiocarbon along BEAGLE2003 lines-revisits of WHP P06, A10, and I03/I04 in the Southern Hemisphere, *Prog. Oceanogr.*, 89, 49-60 (2011) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S007966111000159X>. 査読有

② Murata Akihiko, Yuichiro. Kumamoto, Ken'ichi Sasaki, Shuichi Watanabe and Masao Fukasawa (2010) Decadal increases in anthropogenic CO<sub>2</sub> along 20°S in the South Indian Ocean, *J. Geophys. Res.*, 115, doi: 10.1029/2010JC006250 (2010). 査読有

③ Murata, Akihiko, Yuichiro Kumamoto, Ken'ichi Sasaki, Shuichi Watanabe and Masao Fukasawa, Decadal increases of anthropogenic CO<sub>2</sub> along 149° E in the western North Pacific. J. Geophys. Res., 114, doi: 10.1029/2008JC0004920 (2009). 査読有

〔学会発表〕(計 1 1 件)

① 村田 昌彦、温室効果気体の循環と気候応答、生態系への影響の解明、2012 年度日本海洋学会春季大会、2012 年 3 月 30 日、筑波大学、つくば市

② Akio Ishida, Interannual variability of anthropogenic and natural air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in the Pacific Ocean, Ocean Sciences Meeting 2012, 20 Feb. 2012, Salt Palace Convention Center, Salt Lake City

③ 熊本 雄一郎、1990 年代から 2000 年代かけての太平洋における核実験起源炭素 14 の変動、2011 年度日本海洋学会秋季大会、2011 年 9 月 28 日、九州大学、春日市

④ 中山 典子、海水中溶存窒素安定同位体比を用いたアラビア海酸素極小層における脱窒素量の見積もり、2011 年度日本海洋学会秋季大会、2011 年 9 月 28 日、九州大学、春日市

⑤ 中山 典子、アラビア海における溶存酸素の酸素安定同位体比  $\delta^{18}O$  からみた生物および物理過程、2011 年度日本地球化学会、2011 年 9 月 14 日、北海道大学、札幌市

⑥ Yuichiro Kumamoto, Decadal changes in the bomb-produced radiocarbon in the Pacific Ocean from the 1990s to 2000s, ICNC11-FSKD11, 28 July 2011, Galaxy Hotel, Shanghai

⑦ Akihiko Murata, Development of non-toxic reference material for oceanic inorganic carbonate system parameters, ICAS2011, 22 May 2011, Kyoto International Conference Center, Kyoto

⑧ 熊本 雄一郎、北太平洋における溶存無機炭素中の核実験起源炭素 14—2005/2007 年の観測結果から、第 13 回 AMS シンポジウム、2011 年 1 月 28 日、山形市、ホテルキャッスル

⑨ Yuichiro Kumamoto, A comparison of dissolved oxygen concentration in

intermediate layer between the western and eastern subarctic gyres of the North Pacific from 1985 to 2007, 2010 PICES Annual Meeting, 28 Oct. 2010, the Oregon Convention Center, Portland

⑩ 熊本 雄一郎、南半球亜熱帯における核実験起源炭素 14 とセシウム 137 の分布、2009 年度日本地球化学会年会、2009 年 9 月 15 日、広島大学、東広島市

⑪ Akihiko Murata, Decadal increases of anthropogenic CO<sub>2</sub> along 20S in the South India, 8th International Carbon Dioxide Conference, 13 Sep. 2009, the Friedrich Schiller University, Jena

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

熊本 雄一郎 (KUMAMOTO YUICHIRO)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・技術研究副主任  
研究者番号：70359157

### (2) 研究分担者

村田 昌彦 (MURATA AKIHIKO)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・チームリーダー  
研究者番号：60359156

石田 明生 (ISHIDA AKIO)  
富士常葉大学・社会環境学部・教授  
研究者番号：60359148

相田 真希 (AITA MAKI)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・技術研究副主任  
研究者番号：90463091

中山 典子 (NAKAYAMA NORIKO)  
東京大学大気海洋研究所・海洋化学部門・海洋無機化学分野・助教  
研究者番号：60431772

### (3) 連携研究者

該当なし