

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23241014

研究課題名(和文) 高頻度観測による南極海ケルゲレン海台付近の大気海洋間二酸化炭素収支解析

研究課題名(英文) Estimate of uptake CO₂ near the Kerguelen Plateau, Sothern Ocean by the high frequency observation

研究代表者

渡邊 修一 (WATANABE, Shuichi)

独立行政法人海洋研究開発機構・むつ研究所・研究所長

研究者番号：00167131

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,400,000円

研究成果の概要(和文)：南極海において3カ月間隔で経度方向に30度、緯度方向に3度での観測を行えば二酸化炭素収支を±1.0Pg-C/yrで見積ることができるとしたLentonら(2006)の示唆を検証するため二酸化炭素分圧測定装置を製作し、南極海に展開した。装置の不調により十分な結果が得られなかったが東西で急激な変動を示さなかった。これはLentonらを支持するものである。「地球観測システム構築推進プラン」による先行研究ではケルゲレン海台付近で二酸化炭素分圧の急激な変化が見られたが、収支に影響を与えるには小さいようである。なお、二酸化炭素分圧測定装置はドログを有しないため風の影響を強く受けて予想より速く移動した。

研究成果の概要(英文)：Lenton, Matear and Tilbrook (2006) suggested sampling regularly every 3 months, at every 30 degree in longitude and 3 degree in latitude in the Southern Ocean is sufficient to determine the net Southern Ocean CO₂ uptake which uncertainty has less than 0.1PgC/yr. The in-site pCO₂ autonomous measuring buoys were made and deployed in the Southern Ocean to verify the suggestion of Lenton et al. The results from the buoys were not sufficient for analysis, but rapid change of pCO₂ was not observed. This results were supported that suggestion. Previous study near the Kerguelen Plateau was indicated that pCO₂ was quickly increasing towards the outside of the Kerguelen Plateau. However, it would be smaller as to affect the CO₂ uptake. The buoys attached no drogue strongly affected with wind and were moved faster than expected.

研究分野：化学海洋学

キーワード：二酸化炭素 地球温暖化 海洋酸性化 南極海 二酸化炭素分圧測定 現場高頻度観測 漂流ブイ

1. 研究開始当初の背景

大気中の二酸化炭素の増加は温暖化や海洋の酸性化をもたらすため多くの関心を集めている。IPCC AR4 レポートには大気組成の精度の高い観測から 2000-2005 年の間に大気中二酸化炭素が $4.1 \pm 0.1 \text{GtC/年}$ で増加していることが示されている。これに対し、化石燃料の消費やセメント工業等の人間活動による大気への二酸化炭素の放出量は $7.2 \pm 0.3 \text{GtC/年}$ 、大気から海洋への総移動量は $2.2 \pm 0.5 \text{GtC/年}$ 、大気から陸域生物圏への移動量は $0.9 \pm 0.6 \text{GtC/年}$ と大気の変動と比較して不確実性のある見積りがなされている。収支の不確実性は、地球上の炭素循環像を正確に作り、予測につなげるにも、今後二酸化炭素削減の施策を実施したときの効果を評価するにも不十分である。温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」は大気中の存在量の僅かな変動から二酸化炭素収支を推定するものであるが、それぞれの二酸化炭素を貯留する場(リザーバー)の間の状況がより明確になっていないと正しい推定は出来ないと推量する。

不確実性のおもな要因は、それぞれの二酸化炭素のリザーバー間の多様性や観測頻度の不足によっている。大気-生物圏間の二酸化炭素の輸送に関しては、地域間の多様性が大きく、陸上とはいえ、観測を充実させることは不可能に近い。大気-海洋間については海洋表面の二酸化炭素分圧の測定頻度を時空間的に増すことによりかなり不確実性を小さくすることが可能である。Sweeney ら(2002)は、海域によって異なるが、年間に 6-15 回、200-1500km (緯度・経度で 2-20 度)で観測値が得られれば、大気海洋間の二酸化炭素収支を大気中二酸化炭素増加と同じ程度の不確実性 ($\pm 0.1 \text{GtC/年}$) で推定が可能となることを示している。近年、観測船で行うだけでなく、商船等を使って観測頻度を増加させる試みがなされ、成果を上げている。しかし、商船を利用すると北半球に偏り空間的に空白域が出来る。

Takahashi らが 1995 年時と 2000 年時の全球の海洋-大気間の二酸化炭素収支を求めている。2000 年の収支見積もりでは、2000 年代初めまでに得られたエルニーニョ期を除いた約 3 億のデータを南北方向に 4 度、東西方向に 5 度のピクセルごとに処理を行い、海洋の吸収量は $2.0 \pm 1.0 \text{PgC/年}$ としている (Takahashi et al, 2002)。1995 年の収支見積もり ($2.2 \pm 0.2 \text{PgC/年}$) よりも、商船等を用いたデータが加わり、データ数が格段に増加している。しかし、その多くは北半球に集中している。特に、南半球、特に東部インド洋、南太平洋、南極海ではほとんどデータのない状況が続いている。彼らの見積もりは、同一時期に全観測データを該当時期に内挿していることにも注意を払う必要がある。

Takahashi らが行った様にこれまでに集

積データをすべて用い、気候値的な収支を求めることは温暖化の実態を掴むためには必要なことである。しかし、エルニーニョ・ラニーニャ現象をはじめとする短い気候変動と大気中に残る二酸化炭素量の年々変動との関わりを明らかにするためには、全球的な同時観測も必要である。これを進めることが出来れば、気候変動による大気-海洋間の二酸化炭素の移動量を機構により深く知ることが出来る。Wakita ら (2010) は北部北太平洋で得られた観測値を詳細に検討し、その変化量を見積もるとともに 10-20 年後には同海域の冬季の二酸化炭素輸送の仕組みが放出から吸収へ変わることを予測している。これらの機構についてもより深く理解するためにはより頻度の高い観測が求められる。

【参考文献】

1. Takahashi, T., et al., (2002) Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. Deep-Sea Res. II, 49, 1601-1622.
2. Lenton, A., Matear, R.J., Tilbrook, B., (2006) Design of an observational strategy for quantifying the Southern Ocean uptake of CO₂. Glob. Biogeochem. Cycles, 20, GB4010.
3. Takahashi, T., et al., (2009) Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. Deep-Sea Res. II, 56, 554-577.
4. Wakita, M., S. Watanabe, A. Murata, N. Tsurushima and M. Honda (2010) Decadal change of dissolved inorganic carbon in the subarctic western North Pacific Ocean. Tellus B, 62, 608-620.

2. 研究の目的

Takahashi ら(2002)が見積もった 2000 年の大気海洋間の二酸化炭素収支の精度は $2.0 \pm 1.0 \text{PgC/年}$ であった (T. Takahashi ら (2009))。見積もり精度を $\pm 0.1 \text{PgC/年}$ には観測データの不足している海域において時空間的に高密度のデータを収集し、季節変動等についての知見を深めなければならない。本研究では、大気・海洋間の二酸化炭素収支見積もりで現在最も不確実性の低い南極海において現場自動測定装置を用いた南北に 3 度の空間密度をもつ高頻度観測を実施し、時空間変動を求める。その結果を用いて、Lenton ら(2006)が示した南極海域において南北 3 度、東西 30 度の空間スケールで 3 ヶ月ごとの頻度で観測することによって南極海では二酸化炭素収支を $\pm 0.1 \text{PgC/年}$ の誤差で見積もることが可能であるという提示を検証する。

なお、研究期間内の目標として下記のことを上げた。

- (1) Takahashi (2009)の大気-海洋間の全海

洋の二酸化炭素収支見積もりでもデータの少ない南極海域で半年から1年の連続データを取得する。その結果を用いて、まず、Lentonら(2006)が提示した3カ月ごとに緯度方向に3度、経度方向に30度の範囲でデータを取得できれば南極海の二酸化炭素収支を $\pm 0.1\text{GtC/年}$ の精度で求めることが可能であることを検証する。Takahashi(2009)も見積もりでは、Takahashi(2002)による見積り時に比較して約3倍の1.1万個のデータが集積・用いられたが、一部海域を除いてLentonら(2006)の時空間頻度を実現していない。本研究により南極海東部インド洋セクター(ケルゲレン海台付近)の一部についてこれが実現するとともにこの海域の二酸化炭素分圧の季節変動について明らかにする。なお、本研究には海洋研究開発機構が開発した漂流ブイシステムを製作して当たる。

(2)ケルゲレン海台付近は生物生産の盛んな海域である。観測によって得られたデータを用い、この海域の炭素収支を見積もり、また、衛星から得られる情報と比較検討し、南極海域での二酸化炭素分圧の変動を広範に広げることが可能かを検討する。

3. 研究の方法

研究代表者らは、文部科学省海洋開発及地球科学技術調査研究促進費「地球観測システム構築推進プラン」(1)地球温暖化・炭素循環観測研究プロジェクト、海洋表層における二酸化炭素分圧の全球観測の実現に資する技術開発において「海洋二酸化炭素センサー開発と観測基盤構築」で測器の研究開発を行った。そのプロジェクトで開発した漂流型現場海洋二酸化炭素分圧測定装置を製作し、ケルゲレン海台付近を中心とする海域で、緯度方向に3度の分解能を持つ観測を実施する。漂流型現場海洋二酸化炭素分圧測定装置から得られたデータは品質管理を行い、データセットとするとともに南極海域の二酸化炭素分圧の季節変動把握に用いる。また、得られたデータをもとに植物プランクトン量と二酸化炭素分圧変動の関係を見出す試みを行う。得られた知見は南極海域全域へ外挿し、南極海域の全域の二酸化炭素収支を推定することが可能かを1990年代の交換量、 $0.6 \pm 0.1\text{GtC/年}$ と比較する。これらの検討によってLentonら(2006)が示唆した時空間頻度での観測で十分であるかを検討する。本研究の鍵を握る研究代表者らが開発した漂流型現場海洋二酸化炭素分圧測定装置を図1に示す。なお、開発した漂流型現場測定装置には、温度、塩分の測定装置も有しており、それらの分解能は、0.01、0.01である。しかし、塩分は付着物の影響を受けて数日で値がずれることが知られている。

右の装置の大きさは径245mm x高さ600mmとなった。Lentonら(2006)が用いたデータの大半はケルゲレン海台付近のような生物によって分圧の変動が大きい海域を除い

た海域から得られたものであると思われる。ケルゲレン海台や氷縁域やケルゲレン海台のような回帰では分圧の変動が大きいと思われるので、それらの寄与を考慮に収支を見積る必要がある。

本研究では、ケルゲレン海台を南北に縦断する様に緯度方向に3度間隔に漂流型現場自動測定装置を2台ずつ漂流させる。また、漂流型現場自動測定装置は低価格化を実施するためにデザイン等を検討する。

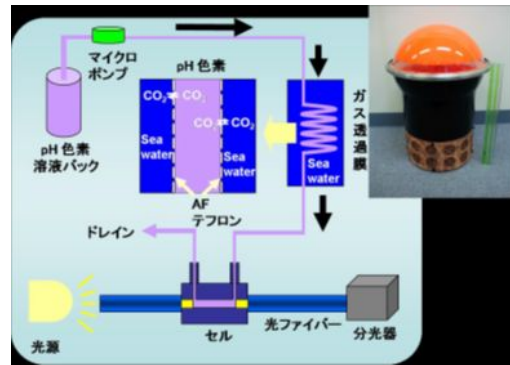


図1 海洋開発及地球科学技術調査研究促進費の資金により製作された漂流型現場二酸化炭素測定装置の原理と外観
週1度の測定で1年間の運用が可能で、 $3\ \mu\text{atm}$ 以下の分解能をもっている。

4. 研究成果

(1)現場型二酸化炭素分圧測定装置

「地球観測システム構築推進プラン」で開発した現場型二酸化炭素分圧測定装置はゼニライト社製のオーブコムブイを改造した浮体を用いたが、合成樹脂のカバーが大きく、水等との接触により破損し易いためカバーを局力小さくし、経費を押さえるため寸胴型とした。また、測定溶液の流れるマニホールドの形状を工夫し、扱い易いデッドスペースのないものを再設計して作製した(図2、3)。なお、ここで得られた知見は本装置の市販化やpHセンサー開発に生かした。



図2 本事業で設計製作した現場型二酸化炭素分圧測定装置(左)と地球観測システム構築推進プランで設計製作した装置(右)



図3 バルブ、光学セルを一体化したマニホールド

(2) 観測

観測には作成した現場型二酸化炭素分圧測定装置 11 台を 2012 年 12 月に南極海へ放流した。予定測定項目、観測間隔、放流時期を表 1、2 に示す。

表 1 機器の大きさ、測定項目及び観測間隔

・大きさ	245 mm x さ 600 mm
・重さ	約 15kg
・測定項目	温度・塩分(数日間) 二酸化炭素分圧
・予定精度	< 2 μatm
・予定感度	< 1 μatm
・予定観測期間	約 1 年
・測定頻度	5 日間隔、1 日 8 回

表 2 放流時期及び地点

放流位置	50° 35.78' S、110° 04.69' E
放流日時	2012 年 12 月 4 日 03:13 (GMT)
放流台数	2 台
放流位置	52° 59.61' S、110° 00.74' E
放流日時	2012 年 12 月 4 日 14:32 (GMT)
放流台数	2 台
放流位置	55° 59.47' S、109° 57.75' E
放流日時	2012 年 12 月 5 日 04:47 (GMT)
放流台数	2 台
放流位置	58° 59.99' S、109° 59.91' E
放流日時	2012 年 12 月 5 日 17:23 (GMT)
放流台数	2 台
放流位置	60° 29.70' S、69° 59.70' E
放流日時	2012 年 12 月 11 日 00:18 (GMT)
放流台数	3 台

(3) 観測結果

観測結果を図 4、5、6、7 に示す。得られた二酸化炭素分圧の値は 300 から 450 μatm であった。また、移動速度は予想より速く、東に移動した。なお、漂流位置のケルゲレン付近に放流した装置からは良い結果が得られなかった。また、製作放流した現場型二酸化炭素分圧測定装置は東日本大震災の影響を受け、物品の調達に難が生じたため検査が不十分であった。約半数の装置ではデータが得られなかった。また、得られたものについても様々な補正を加えている。これを考慮した取り扱いが必要である。

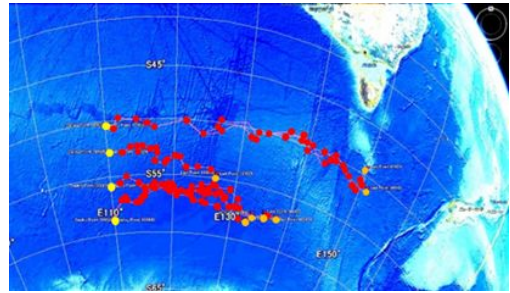


図 4 Google マップ上にプロットされた現場型二酸化炭素分圧測定装置(赤色)の軌跡と漂流位置(黄色)

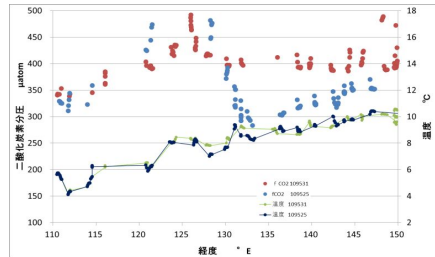


図 5 放流位置から流された 2 台の装置から得られた温度と二酸化炭素分圧

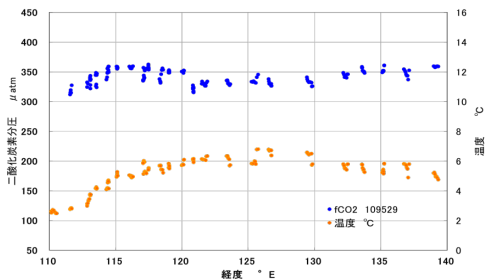


図 6 放流位置から流された装置から得られた温度と二酸化炭素分圧

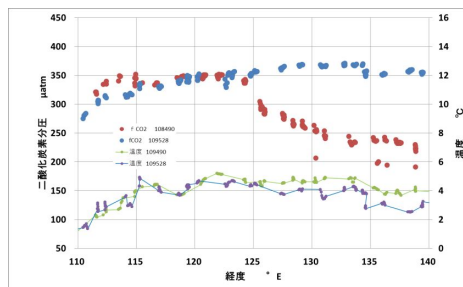


図 7 放流位置から流された 2 台の装置から得られた温度と二酸化炭素分圧

(4) 考察

得られたデータについては種々の計算上の補正を加えているためその計算に困っていることを考慮しながら下記の考察を行った。

装置の東方向への移動はかなり早く、当初見積もった海域を大幅に超えた。これは南極周極流に加え、かなり風の影響を受けたものと考えられる。そのため得られたデータからは類似水塊の季節変動より東西の変動についての情報が得られることになった。なお、

風の影響を強く受けたのは生物付着による二酸化炭素分圧影響を極力少なくするために一般に表面漂流ブイに用いられるドロークを用いていないためである。

主に南極海の夏季のデータが得られた。得られた値は 300 から 450 μatm でこれまで得られている南極海の分圧とは大きな違いがなかった。放流時期からの分圧上昇は、水温が徐々に増加と呼応している。温度変化による分圧変動よりは大きい、温度変化によるものと考えられる。東西（測定時期も変化）に大きな変化が見られるが場所的にも時間的にも急激な変化でないと思われる。なお、温度の変化は見られないため装置からくる問題を捨てきれない。これらの状況を考えると当初目的にした南極海における二酸化炭素収支を $\pm 0.1 \text{PgC/年}$ の誤差で見積もるために必要であると Lenton ら(2006)が示した時空間頻度で十分であるという提示を示唆している。なお、本研究で得られたデータが十分でなかったため加えての種々の解析はできなかった。

2 台の観測結果が得られている 2 地点で 2 台の分圧差が大きくなった場合があるがこの原因については今のところ特定できていない。

ケルゲレン海台の付近での観測データは得られなかったが、先行研究（文部科学省海洋開発及地球科学技術調査研究促進費「地球観測システム構築推進プラン」(1)地球温暖化・炭素循環観測研究プロジェクト、海洋表層における二酸化炭素分圧の全球観測の実現に資する技術開発において「海洋二酸化炭素センサー開発と観測基盤構築」)で南極海と同様の装置を用いて観測を実施している。その結果を図 8、9 に引用する。ケルゲレン海台付近では低い二酸化炭素分圧が観測される。しかし、それを外れると高くなる。ケルゲレン海台付近には湧昇流があり、生物生産が高いことが知られている。今回の結果と

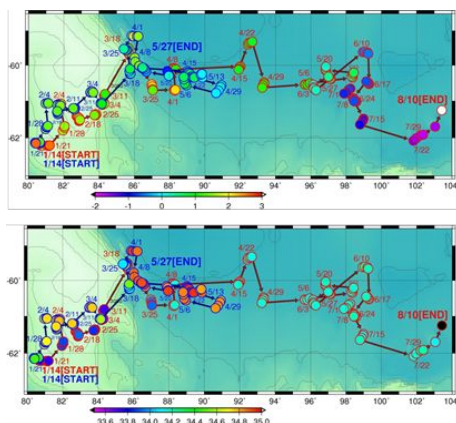


図 8 ケルゲレン海台付近での漂流ブイの軌跡と表面水温（上段）、塩分分布（下段）
（「地球観測システム構築推進プラン」報告書からの引用）

合わせるとこの生物生産による二酸化炭素分圧の現象は地域に限られ、南極海域全体としての二酸化炭素の収支には大きな影響を与えていないと考えられる。

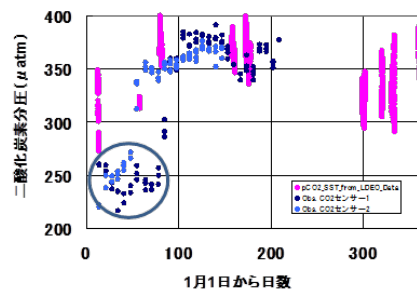


図 9 ケルゲレン海台付近で得られた二酸化炭素の変動（補正入り）
丸で囲んだ部分がケルゲレン海台から得られた値を示す。
（「地球観測システム構築推進プラン」報告書からの引用）

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 3 件)

渡邊修一、中野善之、飯田高大、高村友海、脇田昌英（2013）現場型二酸化炭素分圧測定ブイを用いた南極海域の予備的結果、第 4 回極域科学シンポジウム、2013 年 11 月 15 日、国立極地研究所（東京都国立市）

渡邊修一、中野善之、脇田昌英、飯田高大、高村友海（2013）現場型二酸化炭素分圧測定装置を用いた南極海域における高頻度観測、2013 年日本海洋学会秋季大会、2013 年 9 月 19 日、北海道大学学術交流会館（北海道札幌市）

脇田昌英、中野善之、飯田高大、渡邊修一（2011）二酸化炭素分圧測定ブイを用いた南極海域の観測、第 2 回極域科学シンポジウム、2011 年 11 月 16 日、国立極地研究所（東京都国立市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 修一（WATANABE, Shuichi）

独立行政法人海洋研究開発機構・むつ研究所・研究所長

研究者番号：00167131

(2) 研究分担者

中野 善之（NAKNO, Yoshiyuki）

独立行政法人海洋研究開発機構・海洋工学センター・技術研究員

研究者番号：20566103

脇田 昌英（WAKITA, Masahide）

独立行政法人海洋研究開発機構・むつ研究所・技術研究員

研究者番号：30415989

(3)連携研究者

飯田 高大 (IIDA, Takahiro)

国立極地研究所・研究教育系・助教

研究者番号：90455189