

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19510021

研究課題名 (和文) 北太平洋の溶存酸素時系列データによる物質循環変動の解析

研究課題名 (英文) Analysis of biogeochemical changes in the North Pacific using long-term time-series data of dissolved oxygen

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・主任研究官

研究者番号：70354553

研究成果の概要 (和文)：北太平洋西部において、長期にわたって観測されてきた海水中の酸素濃度のデータをまとめ、酸素センサーの導入や統計的手法によってデータの品質をチェックした後に、酸素濃度が長期にどう変化してきたかを調べた。東経 165 度の亜熱帯域北部から亜寒帯域の水深 500m～2000m 付近などで、酸素濃度が減少していることが分かった。こうした減少傾向は海洋温暖化にともなう密度低下の効果である程度説明できるが、酸素濃度が最も低い水深 1000m 付近における酸素の低下傾向は、海洋の循環が変化しているためと考えられる。

研究成果の概要 (英文)：Data of dissolved oxygen in the western North Pacific were compiled and quality-checked by a statistical technique. The errors due to interpolation of discrete oxygen data were also evaluated by comparing with vertical continuous data obtained by a new rapid-response oxygen sensor that was introduced and examined in this study. In the northern subtropical and subarctic zones, significant trend of oxygen decreases were determined at depths between 500m and 2000m. These decreasing trend are mainly attributable to the decrease in density that is associated with ocean warming, but those at the depth around 1000m is ascribed to the changes in the ocean circulation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	0	2,000,000
2008年度	700,000	0	700,000
2009年度	700,000	0	700,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	0	3,400,000

研究分野：海洋物質循環

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：溶存酸素・酸素センサー・物質循環・気候変動

## 1. 研究開始当初の背景

海洋の表層には、大気からの溶け込みや植物プランクトンの光合成によって溶存酸素が供給される。多くの場合、海洋表層の溶存

酸素は物理化学的な飽和状態に近い濃度を示すが、飽和濃度を左右する水温や塩分の変化、大気・海洋間の酸素交換速度を左右する海面状態の変化、海水の混合や生物活動の状

況などに応じて、時空間的に変化している。一方、太陽光の届かない海洋の深層では、微生物による有機物分解などによって酸素が消費されるため、表層にあった海水が物理的な循環によって中深層に沈んだ後は、沈降後の経過時間や有機物の分解速度に応じて、溶存酸素濃度は低下してゆく。しかし、溶存酸素濃度の観測は、最近まで観測船による各層採水・分析の他に手段がなく、しかも空間変化の大きなそのデータは、鉛直混合の度合いや水塊の古さを示す指標として専ら半定性的に利用されてきたために、時間変動については詳細に解析されてこなかったのが実情である。

そうした中で、最近、海水中の溶存酸素が様々な海域や水深で減少傾向にあるとの報告がなされている (Emerson et al., 2004; Garcia et al., 2005 など)。原因として、地球温暖化に伴う海洋の成層化、すなわち中・高緯度海域で、高濃度の酸素を含む低温の表層水が、水温上昇のために中層や深層に沈降しにくくなっていることが候補に挙げられる。しかし、上に述べた観測の制約から、これまでの研究では、著しく低い空間分解能の観測データや、同一海域でも少数のデータの比較に基づいて溶存酸素濃度の減少が論じられており、それが「離散的な観測事実の時間・空間的に不完全な内挿」によって生じた、虚偽的な結果である危険性も否定できない。

一方、本課題の研究代表者らは、化石燃料の消費によって排出された  $\text{CO}_2$  が海洋に蓄積されてゆく速度を評価する先端的な研究を行う中で、海水中の溶存無機炭素濃度 (DIC) の時空間変化を高い精度で観測し、DIC と溶存酸素の濃度が強くリンクしながら著しく時間変化していることを、様々な海域で見出した (Ishii et al., 2005; 2006)。このことは、産業活動によって排出された  $\text{CO}_2$  の吸収という人為的な原因だけでなく、有機物分解や海洋循環の変化のような溶存酸素濃度の変化を伴う自然要因的な過程もが、海洋における  $\text{CO}_2$  の動態に強く影響していることを示している。すなわち海洋は、人為的に排出された  $\text{CO}_2$  を多量に吸収する一方で、気候変化による自然要因の変化によって DIC の分布を大きく変化させ、大気中の  $\text{CO}_2$  濃度に正か負の著しいフィードバック効果を及ぼす可能性をもっているのである。

海洋における高精度の DIC 観測が 1990 年代初めに始まったのに対し、同等の精度による溶存酸素濃度の観測は 1960 年代から行われている。したがって、溶存酸素濃度の変化を長期に詳しく解析することは、海洋成層化の実態を評価するだけでなく、DIC の自然要因的な変動を推定し、海洋の物質循環と気候変化との関連をより長期的な視野から考察するためのプロキシとしても意義深いと考え

られる。

## 2. 研究の目的

(1) 国内業者が開発した世界に類を見ない高速応答型の溶存酸素センサーを海洋観測に実用化する。その鉛直方向に連続的なデータを、これまで行われてきた各層採水による離散的な鉛直分布の内挿値と比較することで、各層データの内挿値に基づく過去の長期変化の評価結果の信頼性を向上させる。さらに、今後の溶存酸素観測の空間密度を大幅に向上させ、その動態の詳細な把握を可能にして、海洋における物質循環の研究をいっそう発展させる。

(2) 西部北太平洋を縦断する東経 137 度と東経 165 度の観測線の海洋各層で長期に観測されてきた溶存酸素濃度のデータを時系列的に解析し、北太平洋の物質循環の非定常的な動態を明らかにするとともに、その原因を究明する。これにより、地球温暖化などによる気候変化が海洋の物理循環や物質循環に及ぼす影響や、それらが、大気中の  $\text{CO}_2$  の濃度に影響を及ぼすフィードバック効果の解明に貢献する。

## 3. 研究の方法

(1) 国内業者 (JFEアレック社) が開発した高速応答型の酸素センサー RINKO を購入し、海洋表層～深層の観測のために観測船に搭載されている Sea Bird 社の CTD (塩分・水温・深度) センサーに取り付けて、西部北太平洋の熱帯域から亜寒帯域、日本海、南大洋といった環境の異なるさまざまな海域で運用試験を行った。センサーの応答速度などの性能や、経時変化、圧力ヒステリシスなどの問題を検証し、業者に改良を促しながら、各層採水の酸素分析データや水温・圧力データを使ったアルゴリズムを開発した。得られた鉛直方向に連続的なデータを、秋間法によって各層データを内挿した連続データと比較して、その内挿誤差を評価した。

(2) 気象庁が 1967 年から年 1 回～4 回行ってきた東経 137 度の観測データや 1996 年から年 1 回～3 回行ってきた東経 165 度に加え、同海域で他機関が観測したデータを収集した。収集した大量のデータを対象として、溶存酸素濃度の鉛直分布や密度との関係などを統計的に処理し、異常値を除外した。次に、観測点ごとに深度方向や密度方向に離散的な各層採水の溶存酸素データを内挿した。(1) で評価した内挿誤差を考慮しながら、内挿値に基づいて東経 137 度と東経 165 度の各緯度帯の各密度における溶存酸素濃度の長期変化を評価した。有意な長期変化が見つかった領域については、他の海洋物理データと比較

しながら、特徴や変動の要因について考察した。

#### 4. 研究成果

(1) 酸素センサーの応答速度は 1 秒以内であり、このセンサーを CTD に取り付けて深海から表面方向に通常速度 (~1m 毎秒) で上げながら、酸素濃度が鉛直的に急変する様子や、微細な鉛直構造を把握することができた。使用にともなって出力が徐々に経時変化するドリフトの問題や、深海で最大 600 気圧程度の水圧がかかることによる出力へのメモリー効果 (圧力ヒステリシス) が見られたが、各層採水による酸素の分析データや水温データなどを使ったアルゴリズムを開発し、 $\pm 1 \mu\text{mol kg}^{-1}$  (表層で約 0.4%、深層で約 2%) の高い精度で、溶存酸素の鉛直分布を空間的に高い密度で観測することに成功した (図 1)。

これらの観測によって、西部北太平洋の亜熱帯域の広い海域で、秋季に生物生産に起因する酸素の極大層が水深 50-100m 付近に出現していることや、高解像度の海洋大循環モデルでその存在が示唆されていた海洋深層の東西流に起因すると考えられる溶存酸素濃度の縞状構造を、明確に把握できた。

各層採水サンプルの酸素分析データを

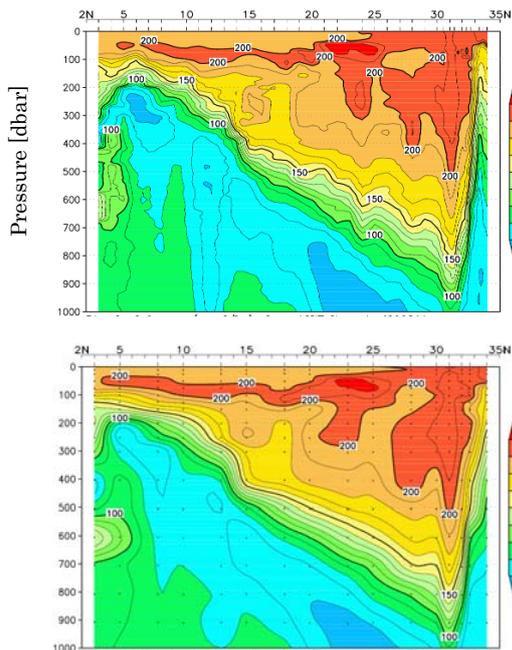


図 1 東経 137 度における溶存酸素濃度の分布断面図 (2008 年 11 月、気象庁凌風丸による観測)。センサーによる観測結果 (上) と従前の各層採水による観測結果 (下)。単位は  $\mu\text{mol kg}^{-1}$

使って検定した鉛直に連続的な酸素センサーのデータと、各層採水サンプルの分析デー

タを秋間法で内挿したデータを比較し、後者の内挿誤差を評価した (図 2)。誤差は一般に変動の小さな深層で小さく、表層で大きい傾向にあり、表層 1000m 以浅では多くの場合、 $\pm 5 \mu\text{mol kg}^{-1}$  未満だった。しかし、西部赤道域や三陸沖のように異なる水塊が混合して酸素の鉛直分布が大きく急激に変動するような海域では、内挿誤差が  $\pm 20 \mu\text{mol kg}^{-1}$  を超えることもあり、過去の各層データの内挿値による時系列解析において注意が必要なが

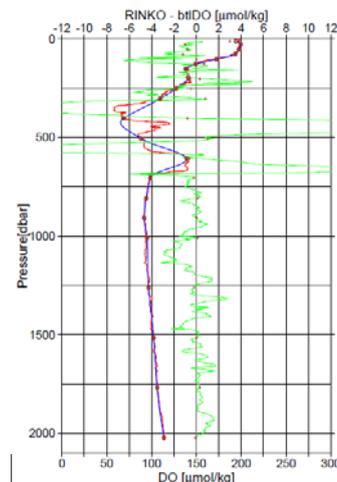


図 2 酸素センサーによる鉛直分布の観測データと各層採水分析データの秋間法内挿値の比較。赤：酸素センサーデータ、(青)西部北太平洋の東経 165 度、北緯 50 度、南緯 5 度の水深 2000m 以浅を対象に、異常値を除去した後に鉛直内挿したデータセットを用い、溶存酸素濃度の平均分布 (図 3) と海洋各層 (ポテンシャル密度 25.0~27.6) における溶存酸素濃度の長期変動 (図 4) を解析した。

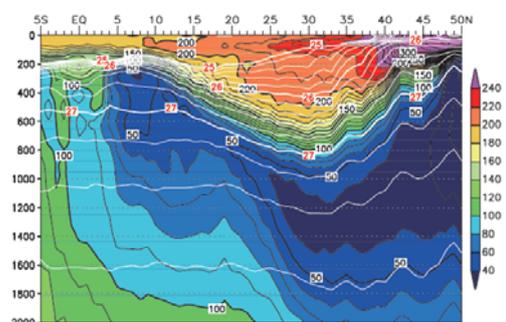


図 3 東経 165 度北緯 50 度~南緯 5 度における溶存酸素濃度の気候値分布 (白線はポテンシャル密度の等値線)。

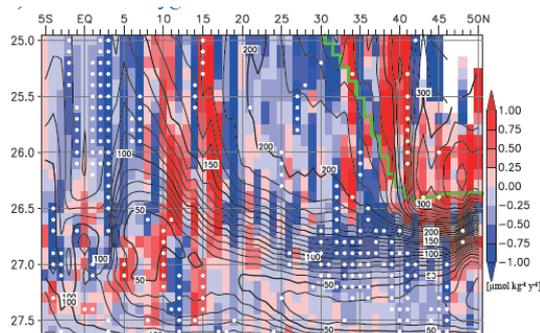


図4 東経165度北緯50度～南緯5度の各等ポテンシャル密度層における過去約20年間の溶存酸素濃度の平均年々変化速度の分布。白点は統計的に有意な変化があった緯度・密度域を、等値線は酸素の平均濃度を示す。

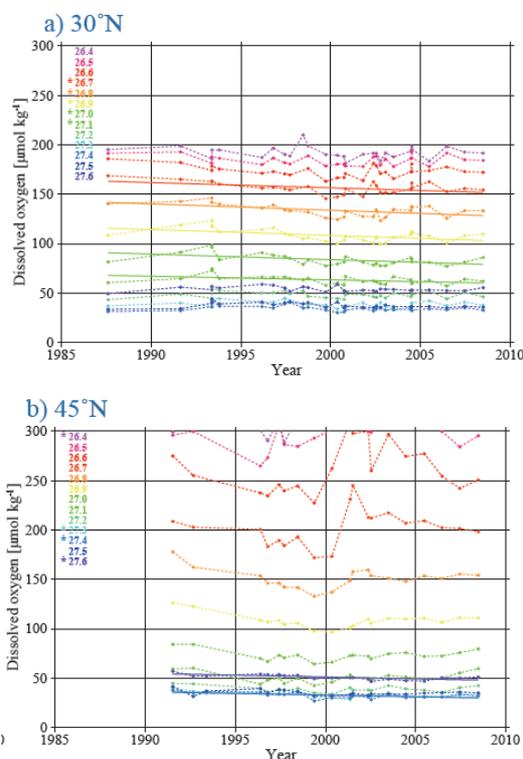


図5 東経165度の北緯30度 a)と北緯45度 b)における各ポテンシャル密度における酸素濃度の長期変化。

亜熱帯循環域北部から亜寒帯域南部に位置する北緯30度～40度のポテンシャル密度26.5～27.2付近(水深500m～1000m付近)や、北緯40度～45度のポテンシャル密度26.8～27.6(水深500m～1600m付近)では、統計的に有意な酸素濃度の減少傾向が検出された(図4、図5)。

前者は、北太平洋中層水と呼ばれる塩分極小層の領域に対応している。北太平洋中層水

の上部の密度層では、表層の高温化の影響で、等密度層が低温・低塩分化する傾向が見られることや、これらの密度層において溶存酸素濃度が鉛直的に急激に減少することから、これらの領域の酸素減少は、海洋の温暖化にともなう密度面深度の変化による、見かけの変化である可能性が高い。

一方、北緯40度～45度付近のポテンシャル密度26.8～27.6は、塩分極小層の下部で酸素極小層に位置することから、海洋温暖化による見かけの効果では説明できない。この領域では、海洋循環の変化によって酸素が実際に減少していると考えられるが、そのメカニズムはまだ解明できていない。

さらに長期にわたる溶存酸素の観測データがある本州南方の東経137度でも、亜熱帯循環域に位置する北緯20度～25度付近で、1980年代の半ば以後に、溶存酸素が統計的に有意な速度で減少していることが分かった。その速度はポテンシャル密度25.5、26.8、27.3でそれぞれ年に-0.28、-0.41、-0.24  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ だった。

亜表層のポテンシャル密度25.5における低下傾向は、東経165度の北緯30度～40度付近の北太平洋中層水上部と同様に、海洋温暖化の効果と考えられる。一方、塩分極小層のポテンシャル密度26.8以深における酸素の減少は、塩分極小層の起源となっている西部亜寒帯循環やオホーツク海における酸素減少かそれらの混合比の変化、もしくは亜熱帯循環流の強化にともなう東の海域からの低酸素水の供給強化に起因すると考えられるが、その詳しいメカニズムは分かっていない。現在、より広域の酸素濃度の変動や、海洋物質循環モデルによる数値シミュレーション結果を見ながら、さらに考察を進めている。

## 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7件)

- ① Shinya Kouketsu, Masao Fukasawa, Daisuke Sasano, Yuichiro Kumamoto, Takeshi Kawano, Hiroshi Uchida, Toshimasa Doi, Changes in water properties around North Pacific intermediate water between the 1980s, 1990s and 2000s. *Deep-Sea Research II*, in press.

〔学会発表〕(計22件)

- ① 笹野大輔、親潮・黒潮における溶存酸素の長期トレンド、2009日本海洋学会秋季大会、2009年9月27日、京都大学吉田キャンパス(京都市)。
- ② Masao Ishii, Trend of carbon increase

and oxygen decrease in the interior of the western North Pacific subtropical gyre, 8<sup>th</sup> International Carbon Dioxide Conference, 2009年9月13日, イエナ(ドイツ).

- ③ Daisuke Sasano, Oxygen decrease in the western North Pacific along 165E. 8<sup>th</sup> International Carbon Dioxide Conference, 2009年9月13日, イエナ(ドイツ).
- ④ Masao Ishii, Trend of DIC increase in the western North Pacific subtropical gyre during 1994 – 2008. Decadal Variations of the Ocean's Interior Carbon Cycle: Synthesis and Vulnerabilities, 2009年7月13日, アスコナ(スイス).
- ⑤ 笹野大輔、溶存酸素量の長期計測データの品質管理、2008年度日本海洋学会春季大会、2008年3月26日、東京海洋大学品川キャンパス(東京)
- ⑥ 高谷祐介、東経137度線における溶存酸素量の長期トレンドについて、2008年度日本海洋学会春季大会、2008年3月26日、東京海洋大学品川キャンパス(東京)
- ⑦ Daisuke Sasano, A result of an efficiency test on new high-response DO sensor "RINKO" in the western North Pacific. Asia-Pacific Workshop on Carbon Cycle Observations, 2008年3月18日, 国立環境研究所(つくば市).
- ⑧ Daisuke Sasano, Decadal Trend of Dissolved Oxygen in the western Pacific along 165° E, 2008 Ocean Sciences Meeting, 2008年3月5日, オーランド(米国).

[図書] (計2件)

- ① Daisuke Sasano, Oyashio: Water properties; Oxygen. In: North Pacific Ecosystem Status Report II. North Pacific Marine Science Organization, in press.
- ② 石井雅男 炭素循環. 秋元肇他編: 図説地球環境—観測・予測— 朝倉書店(編集).

## 6. 研究組織

### (1) 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・主任研究官  
研究者番号: 70354553

### (2) 研究分担者

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  
時枝隆之 (TOKIEDA TAKAYUKI)

気象庁気象研究所・地球化学研究部・主任研究官

研究者番号: 90354555

(H20→H21: 研究協力者)

中野俊之 (NAKANO TOSHIYA)

気象庁気象研究所・海洋研究部・主任研究官

研究者番号: 40354550

(H19→H20: 研究協力者)

### (3) 連携研究者

松枝 秀和 (MATSUEDA HIDEKAZU)

気象庁気象研究所・地球化学研究部・室長  
研究者番号: 60354552