

機関番号：10101

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2010

課題番号：18067002

研究課題名（和文）海洋の温室効果気体の長期変動と気候へのフィードバック効果

研究課題名（英文）Long-term changes of greenhouse gases in the ocean and their feedback effects on the climate

研究代表者

渡辺 豊 (WATANABE YUTAKA)

北海道大学・大学院地球環境科学研究所・准教授

研究者番号：90333640

研究成果の概要（和文）：北太平洋の長期変動メカニズム解明のための物理・生物・化学的な総合観測を実施し、大気海洋循環ならびに物質循環長期変動の定量化に成功した。また、海中の温室効果気体のアルゴリズム化に成功した。さらに、長期変動が海洋環境変動に与える影響を組み込んだ数値モデルを用いて、北太平洋亜寒帯海域での長期変動を復元した。

研究成果の概要（英文）：In order to clarify the long-term climate change in the North Pacific, we carried out the comprehensive ocean observations with physical-biological-chemical systems. Based on these observations, we had significant quantifications of ocean biogeochemical cycles with the parameterizations of greenhouse gases in this region. In addition, we could reconstruct the long-term climate change in this region by using improved ocean circulation models.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	23,800,000	0	23,800,000
2007年度	13,000,000	0	13,000,000
2008年度	8,800,000	0	8,800,000
2009年度	10,100,000	0	10,100,000
2010年度	7,400,000	0	7,400,000
総計	63,100,000	0	63,100,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境動態解析

キーワード：化学海洋学、海洋環境変動

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化予測モデルへの気候フィードバック効果の組み込みは、大気海洋物質循環モデルでは、物理諸過程の変動による二酸化炭素溶解度の変化のような単純なものが含まれているにすぎない。ところが、近年、高緯度高生産海域では海洋表層成層化による栄養塩供給の減少によって単に植物プランクトンの減少が起こるばかりでなく、植物プランクトンの種の急激な変遷が起き、モデルには現在組み込まれていない長期のフィードバック効果が急激にすすんでいるとの指摘

がある。

特に、栄養塩枯渇にともなうケイ藻などの大型植物プランクトンから円石藻などの小型プランクトンへの種の変遷で、大型であるケイ藻の減少に加えて、炭酸カルシウムの殻を持つ円石藻などが卓越すること（アルカリ度の減少）によって海洋の二酸化炭素吸収能を低下させて温暖化を加速するフィードバック効果（正のフィードバック）が生じる。一方、炭酸カルシウムの殻を持つ円石藻などの小型の種が卓越することで雲核となるジメチルサルファイド(DMS)が大量に放出さ



CH<sub>4</sub>のアルゴリズムの開発に着手する。特にセンサー観測・現場観測では網羅できない時空間分布をカバーするため、衛星利用を睨み水温やクロロフィル等の関数として表現できる炭酸物質・DMS・N<sub>2</sub>O・CH<sub>4</sub>に焦点をあてて開発を進める。

### ③海洋循環モデル実験：

20年変動が海洋環境変動に与える影響を単純化して組み込んだ数値モデルを用いて、北太平洋高緯度域への影響を評価し、観測で得られた結果と比較する。風の変動に起因する変動が同時に存在する場合の変動特性についても検討し、北太平洋で卓越する数10年規模変動への寄与を明らかにする。また、3層高解像度モデル作成にも着手する。

## 4. 研究成果

本研究における主な成果としては、

(1) 北太平洋の長期変動メカニズム解明のための物理・生物・化学的な総合観測を実施し、大気海洋循環ならびに物質循環の長期変動を定量化に成功したこと、

(2) 炭酸物質・DMS・N<sub>2</sub>O・CH<sub>4</sub>のアルゴリズムの開発に着手し、センサー観測・現場観測では網羅できない時空間分布をカバーするため、衛星利用を睨み水温やクロロフィル等の関数として表現できる炭酸物質・DMS・N<sub>2</sub>Oなどの海水中の温室効果気体のアルゴリズムの開発に成功したこと、

(3) 長期変動が海洋環境変動に与える影響を組み込んだ数値モデルを用いて、北太平洋への影響を評価し、観測で得られた結果と比較検討を行った結果、北太平洋の海洋環境長期変動が月活動に由来する潮汐変動によって支配されている可能性が高いことを明らかにしたこと、さらに高解像度の潮汐混合を組み込んだ数値モデルを開発し、北太平洋亜寒帯海域での長期変動を復元したことが成果である。

### (1) 北太平洋の長期変動メカニズム解明のための物理・生物・化学的な総合観測：

地球温暖化予測モデルへの気候フィードバック効果の組み込みは、大気海洋物質循環モデルでは、諸過程の変動による二酸化炭素溶解度の変化のような単純なものが含まれているにすぎない。ところが、近年、高緯度高生産海域では海洋表層成層化による栄養塩供給の減少によって単に植物プランクトンの減少が起こるばかりでなく、植物プランクトン種の急激な変遷が起きて、モデルには現在組み込まれていない長期のフィードバック効果が急激にすすんでいるとの指摘があった。

特に、栄養塩枯渇ともなうケイ藻などの

大型植物プランクトンから円石藻などの小型プランクトンへの種の変遷で、大型であるケイ藻の減少に加えて、炭酸カルシウムの殻を持つ円石藻などが卓越すること(アルカリ度の減少)によって海洋の二酸化炭素吸収能を低下させて温暖化を加速するフィードバック効果(正のフィードバック)と、小型の種が卓越することで雲核となるジメチルサルファイド(DMS)が大量に放出され、温暖化を抑制するフィードバック効果(負のフィードバック)が大きい。また、海洋成層化にともない、亜表層では温暖化物質であるN<sub>2</sub>OやCH<sub>4</sub>生成が活発になり、大気への放出が増え正のフィードバックが促進される可能性もある。これらのフィードバック効果のモデルへの組み込みはまだ開発が始まったばかりであり、十分な信頼性を持つに至っていない。

その最大の原因は、温暖化に伴う物質循環の長期トレンドと気候変動成分の判別が未だ定量化されていないこと、植物プランクトン種・サイズや海水中のアルカリ度の変動との関係が不明な点、大気海洋循環の変動メカニズムが未だ不明なことにある。また、CO<sub>2</sub>以外では、長期変動を明らかにするための綿密に計画された時空間的に密なDMS・N<sub>2</sub>O・CH<sub>4</sub>の実測データが極めて少なく、植物プランクトン生産や炭素循環変動にともなう気候へのフィードバック効果について、現場データに基づいた定量化・定式化を充分に行うことが不可能だった点に求められる。

このため、高緯度海域から亜熱帯海域の広範囲を対象領域として、長期変動メカニズム解明のための物理・生物・化学的な総合観測を実施し、大気海洋循環ならびに物質循環の長期変動メカニズムについて明らかにすると同時に、物理・生物学的な変動をとおしての温室効果気体である温室効果気体などの増減が気候へのフィードバックに与える効果を総合的に定量化し、定式化することが求められていた。

そこで、本研究では全球と同様に、地球温暖化による数十年スケールでの海洋表層・中層での水温上昇・塩分低下・AOU (apparent oxygen utilization: 見かけ上の酸素消費量)の増加・栄養塩変動傾向が見えてきた北太平洋に焦点を絞り、北太平洋亜表層・中層水形成海域付近の西部北太平洋高緯度海域ならびに中緯度亜熱帯海域において、水深2000m程度までの採水観測調査を実施し、温室効果気体の基礎データ(炭酸物質、DMS、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、水温、塩分、クロロフィル、珪酸塩、リン酸塩、硝酸塩、溶存酸素、乱流・混合等)を取得し、これらをもとに総合的に北太平洋の長期変動解析を行った(図2, 3, 4, 5, 6)。

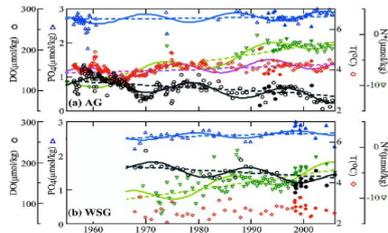


図 2: 北太平洋における栄養塩 (リン酸塩、硝酸塩)、酸素、水温の時系列変化。上段が東部海域、下段が西部海域。

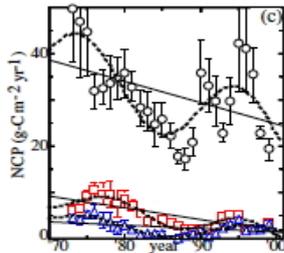


図 3: 北太平洋亜熱帯域における純総生産量の時系列変化 ( $g-C/m^2/y$ )。

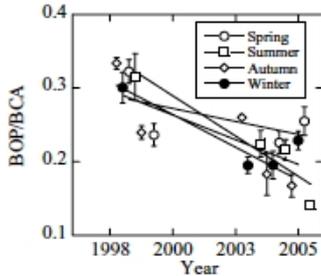


図 4: 北太平洋における珪藻種と炭酸カルシウム種の組成の時系列

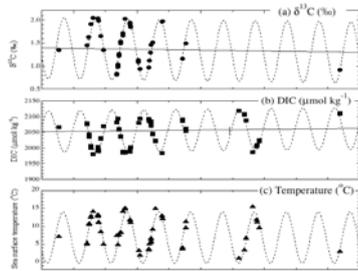


図 5: 北太平洋における海水中の  $C-13$ 、全炭酸(DIC)、水温の時系列変化

その結果、北太平洋全域で地球温暖化に伴う水温上昇により、海水中の酸素減少、表層への栄養塩供給の減少、窒素循環の変動が見られ、その変動は 18.6 年周期の長期変動のうえで起こっていることが定量的に明らかとなった(図 2)

栄養塩と生物生産の関係に注目すると、表層水への栄養塩の減少に伴い北太平洋では年間平均  $0.08-0.48 g-C/m^2/y$  の生物生産量がここ 30 年で減少していた(図 3)。それだけでなく、その植物プランクトンの種類も珪藻種 (BOP) から炭酸カルシウムの殻を持つ種

類 (BCA) へと近年変化していることを明らかとなった(図 4)。生物生産量が減少する一方、海水中の全炭酸濃度は表面水温と同期して、周期性を伴いながら年間  $0.86 \mu mol/kg/y$  の増加をしていることも明らかとした(図 5)。

しかし、この全炭酸増加量は大気中の  $CO_2$  増加に比べて 20%ほど高く、これは、地球温暖化等に伴う陸域からのアルカリ度流入量の増加がもたらしているもので、炭酸系物質循環による  $CO_2$  増加に対する負のフィードバック効果の程度をはじめて明らかとしたものとなった(図 6)。

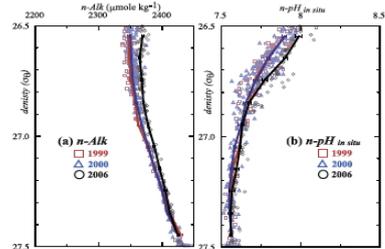


図 6: オホーツク海におけるアルカリ度 (Alk) と pH の鉛直分布の時系列変化

さらに、地球温暖化傾向とともに表れる長周期変動のメカニズムを明らかにするため、各成分の変動を大気海洋パラメータと比較した。その結果、オホーツク海・ベーリング海で起こる強い潮汐変動が 18.6 年周期をもたらし、北太平洋全域の気候を支配していることをはじめて明らかとした。

上記の示したように北太平洋における物理・生物・化学的な総合観測により、北太平洋における温暖化に伴う物質循環の変動と生物生産変動の定量化な評価、ならびに潮汐混合による長周期変動のメカニズムを解明した。

## (2) 温室効果気体の動態の定式化:

船舶観測により得られる詳細な基礎観測データおよび、これまでに得られている既存のデータをもとに、炭酸物質・DMS・ $N_2O$ ・ $CH_4$  のアルゴリズムの開発を進めてきた。特にセンサー観測・現場観測では網羅できない時空間分布をカバーするため、衛星利用を睨み、水温やクロロフィル等の関数として表現できる炭酸系物質・DMS・ $N_2O$ ・ $CH_4$  に焦点をあてて開発を進めてきた。その結果、北太平洋海洋表層におけるアルカリ度・pH・DMS・ $N_2O$  について、水温やクロロフィル等の関数としてこれらの時空間分布を表現できることを明らかとした。その代表的なものとして本研究で開発した海水中の DMS 濃度のアルゴリズムを用いた結果を示す。

一般に生物由来の物質濃度は植物プランクトン成長速度の指数関数として表現できる。そこで、以下のように表現できるものとした。

$$DMS = B_0 \exp(f(T, I, N)) \quad (式1)$$

ここで、 $B_0$ ,  $T$ ,  $I$ ,  $N$  はそれぞれ、DMS を生成する生物初期値、表層水温、光強度、栄養塩濃度。

DMS 観測時には、 $B_0$ ,  $I$  を測定していることはこれまで希であるので、ここでは、これらの代わりにそれぞれ  $Chl$  と緯度( $L$ )で代替し、 $N$  については硝酸( $SSN$ )を使うことにする。このため、(1)式は以下ようになる。

$$DMS = Chl \exp(f(T, \cos(L), SSN)) (式2)$$

さらに、 $\ln(DMS)$  に対して、 $\ln(Chl)$ ,  $T$ ,  $\cos(L)$ ,  $SSN$  が多変量直線回帰できるものと仮定した。(2)式に対して観測値を代入し、F 検定を行った結果、以下のような結果を得た。

$$\ln(DMS) = 0.072 T - 13.23 \cos(L) - 0.119 SSN - 9.53$$

( $n = 244$ ,  $p < 0.001$ ,  $R = 0.8$ ,  $RMSE = 1.7 \text{ nmol/l}$ ) (式3)

上記の式による推定値と、アルゴリズム作成時に未使用の DMS の季節毎の実測データを比較すると、誤差の範囲でよく一致し、これまでに提案されているアルゴリズムより良い結果  $R=0.8$  が得られ、北太平洋における表層 DMS の時空間解析の高いものとなった。そこで、このアルゴリズムを使用して北太平洋海洋表層の DMS 濃度の気候値復元を試みた(図7)。その結果、DMS 濃度は夏期以降に沿岸部で高く、また外洋でも、夏期以降に全域で高くなっていることが初めて明らかになった。

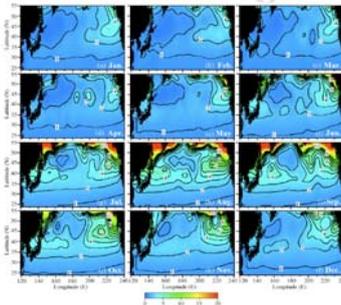


図7: 生物化学物理パラメータより推定された月別毎の北太平洋表面の DMS 濃度

このアルゴリズムを必要なパラメータが揃っている亜寒帯域と亜熱帯域の定点に適用したところ、明瞭な周期性と増加傾向が明瞭に見出され、北太平洋における表層混合層の成層化の強化と、それに伴う生物種の変化をもたらした結果であることが示唆された(図8)。これは世界で初めて明らかにした DMS 濃度の増加傾向を示すものであり、国内外に大きな反響を呼んだ。

さらに、これを海洋の鉛直方向にも適用できる DMS 濃度のアルゴリズムを同様に開発した。その結果、明瞭な年変動を伴い、観測値

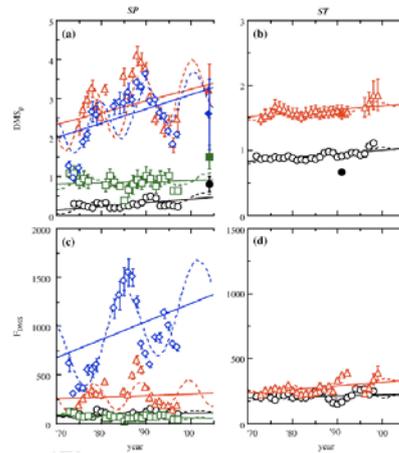


図8: 北太平洋亜極域(SP)と亜熱帯域(ST)における表面水中の DMS 濃度 (nM) と大気への DMS 逃散速度 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{year}$ )。赤△(7-9月)、青○(10-12月)、緑□(4-6月)、黒○(1-3月)。上段が DMS 濃度、下段が DMS

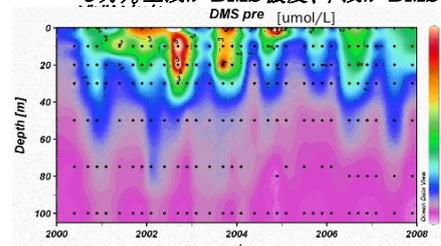


図9: 生物化学パラメータにより推定された DMS 濃度の鉛直分布の時系列変化

を十分復元出来るものであることが分かった(図9)。

これらのアルゴリズム開発とその応用は現場で、DMS 生成がどの生物活動優占種によって行われているかを推定する上で非常に重要な知見であり、今後の気候変動における DMS 濃度の推移を知る上で欠かせない情報となっている。今後の展望としては、現場の生物種とこの情報を海域毎につきあわせ、その検証を広く行う必要があることが示唆された。

### (3) 海洋循環モデル実験:

海洋環境変動に与える影響を考慮して組み込んだ数値モデルを用いて、北太平洋高緯度域への影響を評価し、観測で得られた結果と比較を行った。潮汐 18.6 年周期を与えた数値モデル結果は、表層塩分は観測された変動周期と整合性を持っており(図10)、混合が強い時期に高塩分になる領域が、強混合域から下流へ広がっていることを示していた(図11)。

このことは、潮汐 18.6 年振動に伴って局所的な強い潮汐混合が変動することで、水塊の長期変動を引き起こしている可能性が強いことを指示していた。この数値モデルの結果

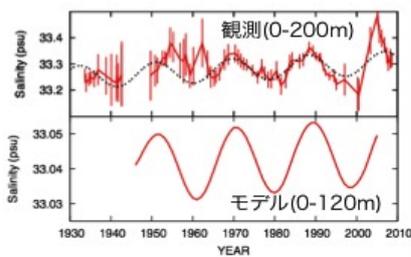


図 10：本研究の数値モデル結果と観測値の時系列変化の比較

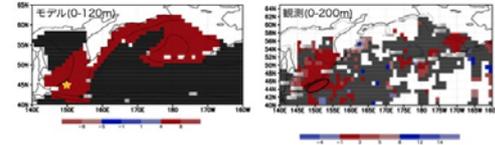


図 11：潮汐 18.6 年振動に対する表層塩分変動のラグの図。左図：モデル(0-120m)、右図：観測(0-200m)。赤色が混合が強い時期に恒温であることを表す。

は、長期変動を組み込み海洋環境復元したはじめてのモデルであり、国内外で大きな反響を呼んだ。今後、これが全海洋に広く見られる共通の減少なのかどうかを詳細に検証していき、温室効果気体にどのような影響を与えるのかを定量化する必要があると示唆された。

#### 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)

- ① [雑誌論文] (計26件)  
Watanabe, Y. W., et al. (2011): Recent change in the oceanic uptake rate of anthropogenic carbon in the North Pacific subpolar region determined by using a C-13 time series. *J. Geophys. Res.* 116, C02006, DOI:10.1029/2010JC006199. 査読有.
- ② Osafune, S., and Yasuda, I. (2010): Bidecadal variability in the Bering Sea and the relation with 18.6year period nodal tidal cycle. *J. Geophys. Res.* 115, DOI: 10.1029/2008JC005110. 査読有.
- ③ Watanabe, Y. W., et al. (2009): Influence of riverine alkalinity on carbon species in the Okhotsk Sea. *Geophys. Res. Lett.* 36, doi:10.1029/2009GL038672. 査読有.
- ④ Yasuda, I. (2009): The 18.6-year period moon-tidal cycle in Pacific Decadal Oscillation reconstructed from tree-rings in western North America *Geophys. Res. Lett.* 36, L05605, DOI: 10.1029/2008GL036880. 査読有.
- ⑤ Watanabe, Y. W., Shigemitsu, M., Tadokoro, K., (2008), Evidence of a change in oceanic fixed nitrogen with decadal climate change in the North Pacific subpolar region, *Geophys. Res. Lett.* 35,

L01602, DOI: 10.1029/2007GL032188. 査読有.

[学会発表] (計 35 件)

- ① Itoh, M., Watanabe, Y. W., et al.: Estimate of denitrification in the Okhotsk Sea by using oceanic excess nitrogen. European Geophysical Union 2011 meeting. Vienna, Austria, April 2011.
- ② 渡辺豊：北太平洋の炭素循環に対するオホーツク海の影響。2010 年度日本海洋学会秋季大会シンポジウム「オホーツク海を起源とする熱塩・物質循環システムとその変動」、東京農業大学オホーツクキャンパス、網走、2010 年 9 月。
- ③ 安田一郎：潮汐混合過程と水塊変質・長期変動.2010 年度日本海洋学会春季大会シンポジウム「太平洋における物質循環のキープロセス」東京海洋大学、東京、2010 年 3 月。
- ④ Watanabe, Y. W., et al.: Remarkable increases of Alkalinity and pH in the Okhotsk Sea during the 1990s and 2000s. Remarkable increases of Alkalinity and pH in the Okhotsk Sea during the 1990s and 2000s. The Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society, Busan, Korea, 16-20 Jun. 2008.

[その他]

朝日新聞 2007 年 8 月 31 日 科学欄「温暖化でやせる海」

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 豊 (WATANABE YUTAKA)

北海道大学大学院地球環境科学研究院・准教授

研究者番号：90333640

(2) 研究分担者

安田 一郎 (YASUDA ICHIRO)

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：80270792

鶴島 修夫 (TSURUSHIMA NOBUO)

独立行政法人 産業技術総合研究所・研究員

研究者番号：40357538

(3) 連携研究者

なし