

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25年 5月10日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540445

研究課題名（和文） 北太平洋亜熱帯循環におけるサブダクション過程と表層栄養塩濃度変動の関係

研究課題名（英文） Relation between subduction processes and surface-layer nutrient variations in the North Pacific subtropical gyre

研究代表者

須賀 利雄 (SUGA TOSHIO)

東北大学・大学院理学研究・教授

研究者番号：70211977

研究成果の概要（和文）：海洋気候値データ、定線海洋観測データおよび酸素センサー付きプロファイリングフロートデータの解析に基づき、北太平洋の主要水塊の形成域からの移流経路に沿った栄養塩濃度・溶存酸素濃度の変化を明らかにした。とくに、亜熱帯モード水分布域における酸素時間変化率の深度分布を明らかにした。さらに、太平洋十年規模変動に伴い水塊のサブダクション率が大きく変化し、亜表層栄養塩分布に影響を与えていることを示唆した。

研究成果の概要（英文）：Based on the analyses of ocean climatology, repeat hydrography and the data from profiling floats equipped with oxygen sensors, variations of nutrient and dissolved oxygen along the advection path from the formation region of major water masses in the North Pacific are described. In particular, a vertical profile of time rate of dissolved-oxygen-concentration change in the area dominated by the subtropical mode water is revealed. Significant change in the subduction rate associated with the Pacific Decadal Oscillation is detected, with suggesting its influence on subsurface nutrient distribution.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 ・ 気象・海洋物理・陸水学

キーワード：サブダクション・亜熱帯循環・栄養塩・溶存酸素・有機物・モード水・Argo

1. 研究開始当初の背景

亜熱帯循環における冬季混合層の底から深度数百メートルまでの層の海水分布は、第一義的には、冬季混合層からの等密度面に沿う海水の沈み込み、すなわち、サブダクション過程によって決まっている (Luyten et al., 1983)。これまでに、亜表層における水温・塩分・密度・渦位などの保存量の分布が、冬

季混合層の海水特性分布とサブダクション過程によって解釈されてきた (Talley, 1985; Huang and Qiu, 1994 など)。とくに、サブダクションによる北太平洋亜熱帯循環の海水の3次元構造の維持・変動過程は、各種モード水などの水塊の形成・分布過程およびそれらの変動という形で記述されてきた (Suga et al., 2000; 2004; 2008; Bingham et al.,

2002 など)。

サブダクション過程は、上記のような保存量を運ぶだけでなく、栄養塩などの非保存量も運んでおり、栄養塩の3次元構造の維持・変動過程にも本質的な役割を果たしているはずである (Sarmiento and Gluber, 2002)。しかし、水温・塩分などの変動が、水塊の変動と結びつけて解釈され、大気海洋間の熱・淡水フラックスや海洋循環の変動などとの間に因果関係が見出されているのに対して、このような物理的要因の変化が栄養塩の分布にどれほど影響をあたえるか、という基本的な知見は、一般に、確立されてはいなかった。

研究代表者らは、酸素センサー付プロファイリングフロートのデータを用いて溶存酸素濃度変動を考察する中で、酸素変動と表裏一体である栄養塩の変動について、そのような基本的な知見が欠如していることを認識した。さらに、これまでサブダクションによる海水の3次元構造の維持・変動過程の解明に用いてきた手法を応用し、代表的な水塊の形成・分布過程と栄養塩の分布の関係を示すことにより、栄養塩の分布の時空間変動のうち物理的要因によるものを明かにできるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究は、北太平洋亜熱帯域の永年密度躍層以浅について、代表的な水塊の形成・分布過程と栄養塩の分布の関係を示すことにより、まず、栄養塩の3次元分布に寄与する物理過程を明らかにする。次に、栄養塩濃度分布の年々～十年スケール変動を明らかにし、この変動に対する物理過程の寄与を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) World Ocean Atlas 2005 に収録されている北太平洋亜熱帯循環における水温・塩分・溶存酸素・栄養塩の気候値データを用いて、等密度面解析を行い、密度面ごと、海域ごとの主要水塊分布と栄養塩濃度および溶存酸素濃度の関係を調べる。とくに、回帰線水、東部亜熱帯モード水、亜熱帯モード水、中央モード水の形成域から、移流経路に沿った栄養塩濃度・溶存酸素濃度の変化を記述する (図1)。移流経路に沿った水温・塩分・渦位分布から、水平・鉛直拡散の大きさを、栄養塩濃度と溶存酸素濃度の比較から、海水が密度躍層に沈み込んだ後、有機物の分解によって再生される栄養塩の量を、それぞれ主要水塊の移流経路ごとに見積る。

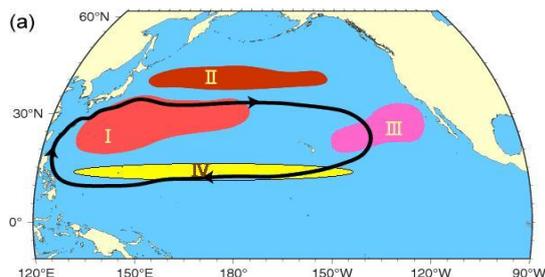


図1. 主要水塊の分布模式図。I: 亜熱帯モード水、II: 中央モード水、III: 東部亜熱帯モード水、IV: 回帰線水。気象庁 HP より。

(2) 研究協力者 Anne-Sophie Krémeur (フランス、気候・環境科学研究所) による生物-物理モデルによって北太平洋の主要水塊の形成・分布過程に伴う栄養塩濃度・溶存酸素濃度を再現し、これを(1)の観測データに基づく結果と比較して、栄養塩濃度変化に対する物理過程の寄与と生物過程の寄与について考察する。

(3) 研究代表者らがこれまでに投入してきた酸素センサー付きプロファイリングフロートによる溶存酸素時系列データを解析して、海域ごと、深度ごと、季節ごとの溶存酸素消費速度を見積もる。その結果を、(1)で求めた水塊の移流速度および移流経路に沿う溶存酸素の濃度変化と比較することにより、有機物の分解による栄養塩の再生の速さの時空間分布を考察する。

(4) Argo データによる月ごとの海洋格子化データセットおよび複数の海上風データセットに、ラグランジュ座標による力学的手法 (図2) を用いて、亜熱帯循環におけるサブダクション率の分布とその年々変動を見積もる。

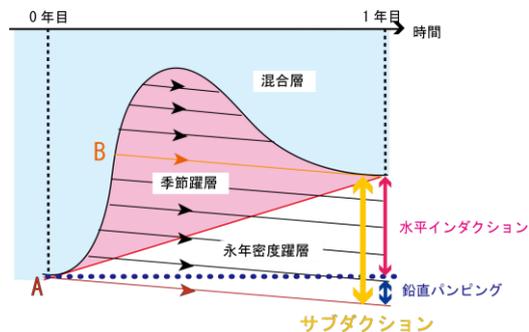


図2. サブダクションの見積り方法に関する概念図

(5) 気象庁の定線観測データおよび World Ocean Database 収録データによって栄養塩濃度の年々～十年スケールの変動を調べ、(4)の結果と総合して、サブダクション過程が栄養塩分布形成に果たす役割とその年々～十

年スケール変動について考察する。

4. 研究成果

(1) Word Ocean Atlas 2005 に収録されている北太平洋亜熱帯循環における水温・塩分・溶存酸素・栄養塩の気候値データを用いて、等密度面解析を行い、永年密度躍層を構成する4つの主要水塊である回帰線水、亜熱帯モード水、東部亜熱帯モード水、中央モード水に着目し、各水塊の等密度面に沿ったリン酸塩濃度・溶存酸素濃度の空間分布を調べた(図3、図4)。その結果、各水塊の形成域で低リン酸塩・高溶存酸素となる傾向を見出し、水塊の形成域は低栄養塩として特徴付けられることがわかった。この特徴は、これらの水塊が表層混合層で形成され、沈み込む前に、一次生産によりリン酸塩が消費され枯渇することによるものと解釈できる。また、各水塊の移流経路に沿ってリン酸塩(溶存酸素)濃度は上昇(低下)する傾向を示した。地衡流速場から各水塊の移流時間を計算し、各濃度のラグランジュ的な時間変化率を求めたところ、リン酸塩濃度変化率に対する溶存酸素濃度変化率の比は、Redfield比と1~2倍の範囲で一致していた。この結果から、水塊の移流過程におけるリン酸塩・溶存酸素濃度変化は生物による再無機化過程の影響を大きく受けていることが示唆された。

以上の成果は、北太平洋上層の主要水塊の形成・分布と栄養塩の大洋規模の分布をはじめて系統的に結び付けたものであり、栄養塩場の経年変動を考察する際の基準となるほか、生態系モデルによる再現結果の比較対象として活用されると期待される。

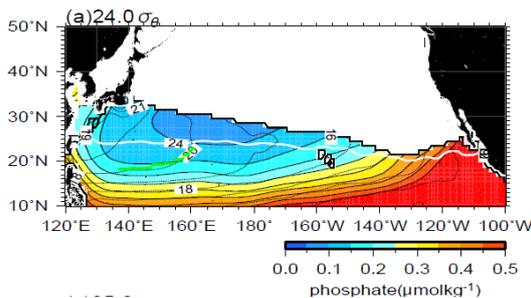


図3. 回帰線水を代表する密度面上リン酸塩分布。

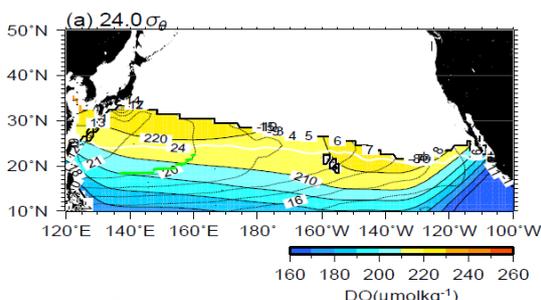


図4. 回帰線水を代表する密度面上の溶存酸素分。

(2) (1)で明らかにした特徴を北大西洋亜熱帯循環と比較するために、生物-物理モデル(NEMO-PISCES)の出力を解析した。その結果、北太平洋亜熱帯モード水が形成時に保持している栄養塩は、北大西洋亜熱帯モード水よりも豊富であるため、北太平洋亜熱帯循環亜表層の栄養塩濃度・酸素濃度の分布形成には、亜熱帯モード水が形成時に保持している栄養塩の寄与も重要であることが示唆された。

この結果は、亜熱帯モード水の生物地球化学的役割をはじめて大洋間で比較したものであり、物理過程と栄養塩分布の関係を一般化する上で、重要な成果といえる。

(3) 東北大学および海洋研究開発機構が2005~2009年に共同で北太平洋亜熱帯域に展開した酸素センサー付プロファイリングフロート16台のうち、亜熱帯モード水形成・分布域を数カ月以上漂流したフロート3台を抽出し、さらに、100%に近いと想定される表層10dbarの酸素飽和度の時間変化の考察および時空間的に近接する高精度船舶観測データとの比較から、酸素センサーのドリフトとバイアスを評価して、そのうちの2台が溶存酸素の時間発展の解析に有効であることを確認した。フロートの観測深度は海面から500mまで、観測間隔は5日である。フロートによる観測は厳密にはラグランジュ的ではないが、水温・塩分・渦位特性に基づき、同一水塊中のものとみなせるプロファイルのみを抽出し、その時間発展を用いて、有光層より深い層(およそ100m以深)について、等密度面ごとの溶存酸素の減少トレンドを求め、酸素時間変化率を見積もった(図5)。その結果、亜熱帯モード水の存在する密度帯($\sigma_\theta=25.0\sim25.4\text{ kg m}^{-3}$ 、深度範囲約100~350m)で大きな減少率($-35\sim-60\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}\text{ yr}^{-1}$)が示された。これは、亜熱帯モード水が沈み込む直前に保持する大量の溶存態有機物が移流過程で再無機化されるとした物理-生物モデルによる先行研究の結果と整合する結果である。また、溶存酸素減少率が亜熱帯モード水内で下方に向かって単調に減少していることを明らかにし、溶存態有機物と粒子状有機物の酸素消費への寄与を分離できる可能を示した。

以上の結果は、当該海域における酸素消費・栄養塩再生の鉛直分布を酸素時系列データからはじめて明らかにしたものである。同様の手法を広域に展開することに、有機物の分解過程の空間分布を明らかにできると期待される。

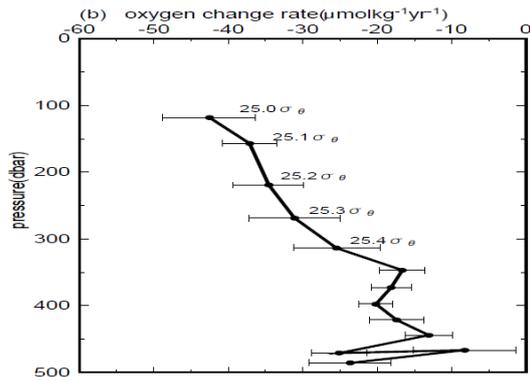


図5. 有光層よりも深い層における溶存酸素時間変化率。

(4) Argo データに基づく月ごとの水温・塩分の格子データセット (MOAA-GPV) と気象庁による再解析データ (JRA-25/JCDAS) を用いて、北太平洋亜熱帯循環について、2005~2010 年の各年のサブダクション率およびオブダクション率をラグランジュ・フレームワークで見積もった (図6)。サブダクション率には大きな年々変動があり、いずれの年の空間分布も、気候値データによる分布とは大きく異なっていた。亜熱帯循環全体の年平均サブダクション率の値は 25 Sv から 50 Sv まで変動し、対応する密度帯の体積分布の変動と整合していた (図7)。とくに注目すべき年々変動として、2005 年および 2010 年に中央モード水のサブダクションがほとんどなかったこと、および、亜熱帯モード水と東部亜熱帯モード水のサブダクション率の変動には負の相関があることがあげられる。また、後者の変動は、北太平洋十年振動 (PDO) と連動しており、PDO 指数が正 (負) のときに、亜熱帯モード水 (東部亜熱帯モード水) のサブダクションが増加していた。

この結果は、はじめて観測データに基づいてサブダクション率の経年変動を記述したものであり、今後、サブダクション過程と熱・淡水貯蔵の関係を明らかにするための基礎となるほか、数値モデルの検証にも有用である。

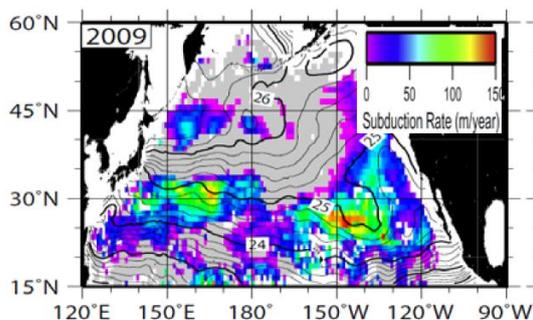


図6. 2009年のサブダクション率。

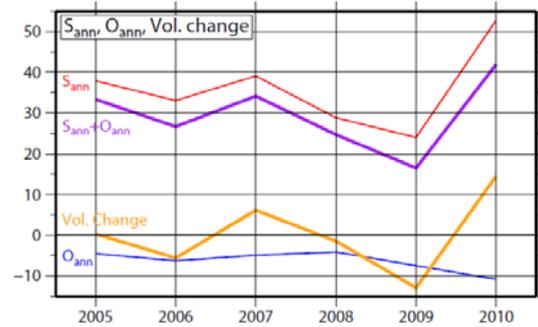


図7. サブダクション率 (S_{ann})、オブダクション率 (O_{ann})、永年密度躍層の体積変化 (Vol. Change) の時系列。

(5) 気象庁による東経 137 度定線のデータによって栄養塩 (リン酸塩) の濃度変動を記述した。亜熱帯モード水に相当する密度面上のリン酸塩には十年スケールの変動が見られ、1980 年ごろに濃度が減少していた (図8)。この変化は、太平洋十年規模変動 (PDO) 指数の負から正への変化と 2~3 年のラグを持って生じていることから、亜熱帯モード水のサブダクション率が増加し、対応する密度層のベンチレーションが強まったことと関係している可能性が示唆された。

この結果は、物理場の長期変動が生態系変動に及ぼす影響を明らかにするための重要な情報といえる。

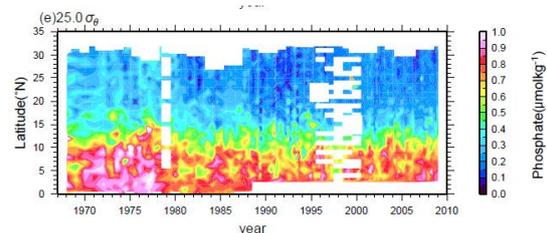


図8. 亜熱帯モード水に相当する密度面上における東経 137 度に沿ったリン酸塩南北分布の時系列。

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 8 件)

- ① 須賀利雄・齊藤寛子・遠山勝也・渡邊朝生、北太平洋亜寒帯前線帯とその周辺における水塊の形成・変質と沈み込み、沿岸海洋研究、査読有、50 巻、2013 年、103-118
http://ci.nii.ac.jp/vol_issue/nels/A/N10492259_ja.html
- ② Toyama, K., and T. Suga, Roles of mode waters in formation and maintenance of central water in the North Pacific, Journal of Oceanography, 査読有, 68 巻, 2012 年, 79-92
DOI: 10.1007/s10872-011-0040-5

- ③□Saito, H., T. Suga, K. Hanawa, and N. Shikama, The Transition Region Mode Water of the North Pacific and its rapid modification, Journal of Physical Oceanography, 査読有, 41 巻, 2011 年, 1639-1658
DOI: 10.1175/2011JP04346.1
- ④□須賀利雄、亜熱帯モード水と一次生産、海洋と生物、査読無、32 巻、2010 年、218-225
<http://aquabiology.m78.com/publications/aquabiology/aquabiology2010.html>

[学会発表] (計 13 件)

- ①□須賀利雄、黒潮続流及びその周辺域における中規模以下の物理過程と栄養塩供給、東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「黒潮・黒潮続流域における前線・水塊・混合・輸送の実態と海洋生態系・魚種交替へのインパクト」、2012 年 12 月 14 日、東京大学大気海洋研究所
- ②□Suga, T., S. Hosoda, K. Sato, 他 8 名, Western North Pacific Integrated Physical-Biogeochemical Ocean Observation Experiment (INBOX): Biogeochemical Impact of mesoscale disturbance, AGU Fall Meeting, 2012 年 12 月 5 日, モスコーンセンター, サンフランシスコ (アメリカ)
- ③□Suga, T., H. Saito, K. Hanawa and N. Shikama, The transition region mode water of the North Pacific and its rapid modification, WCRP Open Science Conference, 2011 年 10 月 24 日, シェラトン・デンバー・ダウンタウン・ホテル(アメリカ)
- ④□Suga T., A. Iwasaki, K. Toyama, Ventilation of the North Pacific and its interannual variation, XXV IUGG General Assembly, 2011 年 7 月 2 日, Melbourne Convention and Exhibition Centre(オーストラリア)
- ⑤□Tsubono, K., T. Suga, C. Sukigara, T. Kobayashi, S. Hosoda, Oxygen production/consumption rates in the upper layer of the northwestern subtropical North Pacific, AGU Fall Meeting, 2010 年 12 月 15 日, モスコーンセンター, サンフランシスコ (アメリカ)

[図書] (計 1 件)

- ①□須賀利雄、地人書館、「海は地球をめぐる一人と生命を支える海の科学」、2012 年、41-60 ページ

[その他]

アウトリーチ活動情報 (一般向け講演)

- ①□須賀利雄、アルゴ計画、シンポジウム「気候予測のための海洋観測の最前線 ～ 3500 台の小型自動観測ロボット「アルゴフロート」が明かす地球の姿～」、2012 年 12 月 2 日、一橋大学一橋講堂、東京
- ②□須賀利雄、気候を支える海、気候講演会「気候変動と海洋」、2011 年 7 月 20 日、気象庁講堂、東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

須賀 利雄 (SUGA TOSHIO)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 70211977