

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24710002

研究課題名(和文) 溶存酸素の安定同位体比解析による懸濁粒子内部での新しい酸素消費過程の解明

 研究課題名(英文) A novel dissolved O₂ consumption process in mesopelagic waters inferred from observation and model simulation of dissolved oxygen delta18O in open oceanic regions

研究代表者

中山 典子 (Nakayama, Noriko)

東京大学・大気海洋研究所・助教

研究者番号：60431772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：海洋観測および実験室実験から得られた海水中の溶存酸素濃度とその安定同位体比(δ -18O)の関係から、酸素飽和度が低い時に($<-60\%$)、同位体分別が非常に小さいもしくは分別を伴わない酸素消費プロセスが存在するという可能性を3-Dモデルにより検証した。これまで一般的に受け入れられている同位体分別効果($\sim 20\%$)よりも小さい値($\sim 10\%$)を中深層に適用した場合、全ての観測値をモデルで再現することができた。酸素が乏しい中深層では、酸素消費過程の際に生じる同位体分別効果がこれまで一般的に受け入れられている分別効果よりも小さくなるプロセスが作用していることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We explored how physical and biological processes affect to the O₂ concentrations and δ -18O of dissolved O₂ relationship in seawater applying a 3-D OGCM to data obtained field observations and laboratory experiment. It failed to reproduce when we adopted the previously reported isotopic fractionation factor ($\alpha = 0.98$), and prescribed physical parameters. The discrepancy became larger when oxygen saturation level decreased. Sensitivity experiments revealed that (1) the intensity of O₂ consumption rate nor physical processes (diffusion/advection) could explain the observed relationship, (2) applying a new kinetic isotope fractionation effect for deep waters rather than commonly used isotope effect could only reproduce the observed relationship. Current result suggests the unidentified deep metabolism process, such as complete O₂ consumption by diffusion process predominant process for O₂ distribution in the mesopelagic waters rather than that in the epipelagic zone.

研究分野：化学海洋

キーワード：溶存酸素 安定同位体比 酸素消費過程

1. 研究開始当初の背景

海洋の物質循環過程を解明する上で、海水中における光合成・呼吸、有機物分解といった生物過程や、海水の混合といった物理過程の寄与がどの程度なのかを明らかにすることが重要となる。海水中の溶存酸素の酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の分布にはこれらの過程が反映されているため、 $\delta^{18}\text{O}$ の変動を解析することは、海洋の物質循環を解明する上で有効な手段となる。海水中の溶存酸素の酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)が酸素自身の生成・消滅過程やその大きさを反映していることに着目して、北部中央太平洋、フィリピン海、世界三大貧酸素海域の一つであるインド洋アラビア海、日本海において、酸素濃度とその安定同位体比を観測し、その関係から海洋の基礎生産量の見積もりや深層への酸素供給システムの解明を試みてきた。これまで蓄積されてきた海域別の酸素濃度(DO)と $\delta^{18}\text{O}$ のデータから、両者には海域毎に大きな違いが見られなかった。世界三大貧酸素海域であるアラビア海貧酸素水塊から得られたデータにおいても、他の貧酸素でない海域とよく似た DO- $\delta^{18}\text{O}$ 相関関係が観測され、貧酸素水塊でも特殊な酸素消費プロセスが起きているわけではないことが示唆された。海洋の中深層における溶存酸素濃度とその安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の関係に一次元モデルを適用して酸素同位体分別係数を求めたところ、これまで実験室実験や海洋表層から得られている同位体分別係数よりも大きな値を持つ(=分別が小さい)ことが示された。この「同位体分別が非常に小さい - もしくは分別を伴わない酸素消費プロセス」はいったい何なのか、という疑問が本研究課題の出発点である。

表層と中深層の間に見られる酸素全ての海域で共通して起きていることなどから、懸濁粒子の内部など局所的に無酸素に近い環境下での酸素消費プロセスが、この「同位体分別が非常に小さい - もしくは分別を伴わない」の原因ではないかとの仮説を打ち立てた。例えば、マリンスノーなどの凝集懸濁粒子の内部は、海水中からの溶存酸素供給が拡散律速となり制限されるため、内部は無酸素に近い状態になっている可能性が考えられる。低酸素状態である懸濁粒子内部で酸素消費がおこれば、生物代謝系では拡散によって供給される限られた酸素を同位体の差異で選り好みをすることなく直ちに利用するはずである。その結果、見かけ上同位体分別係数は1(分別がない)に近くなる。このようなプロセスが実際に懸濁粒子の内部で起きているならば、海水中の溶存酸素の同位体分別係数が中深層で小さくなることを説明することができる。本仮説が事実であると証明さ

れば、海洋内部での酸素消費プロセスについて新たな概念を加えることができると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、中深層での「同位体分別が非常に小さい - もしくは分別を伴わない」酸素消費プロセスの可能性を明らかにするために、これまで得られた海洋観測および実験室実験から得られた溶存酸素濃度とその酸素安定同位体比の変動の関係から、3次元モデルを適用して海水中の溶存酸素濃度変化を支配する要因について定量的に解明することを試みた。

3. 研究の方法

現場観測および実験室実験で得られた海水中の溶存酸素濃度とその酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)のデータをもとに、これらの関係を支配する要因を解明した。実験室実験については、ローリング装置を用いて人工的に海水中の粒子の凝集を生じさせ、生成した懸濁粒子を含んだ系内の溶存酸素濃度および酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の時間変化を捉えた。実験用の海水試料は、東京湾沿岸海水を用いた。溶存酸素同位体比測定用の海水試料は、真空ライン中で溶存ガスを脱気した後、ガラスライン前処理装置を用いて水蒸気などの不純物を冷媒法により吸着除去した後に分離精製して、酸素同位体比を安定同位体比質量分析計(Finngan DELTA plus XP)にて測定した。溶存酸素濃度は、Winkler 法により自動滴定装置(Metrohm, 793 MPT Titrimo)にて測定した。現場観測については、中央北太平洋(KH-05-2, $10^{\circ}\text{S} - 53.40^{\circ}\text{N}$, 160°W line)、インド洋北西部(KH-09-5, GEOTRACES cruise leg 2, $20^{\circ}\text{S} - 17^{\circ}\text{N}$, 70°E line)、およびフィリピン海(KH-06-2: leg 1, $30^{\circ}\text{N} - 15^{\circ}\text{N}$, 137°E line)で得られたデータを用いた。室内実験および現場観測で得られた海水中の溶存酸素濃度とその酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の関係を解析するために、本研究では3次元モデルを適用して、これらの関係へ影響を及ぼす因子についての感度実験を行った。

4. 研究成果

観測および実験室実験から得られた全データの関係から、酸素飽和度が減少するに従い溶存酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)が重くなる傾向が明確に示された。海洋観測および実験室実験で得られたデータの間には、溶存酸素飽和度とその酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の関係に違いは見られなかったことから、海水中の酸素飽和度と $\delta^{18}\text{O}$ の間には、特殊な酸素消費プロセスが存在していないことが示された。この関係について、3次元モデルで再現するこ

とを試みた。まず初めに3次元モデルで溶存酸素濃度およびその飽和度の関係を再現できることを確認し、次に酸素飽和度と酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の関係について解析を行った。モデル計算からも、酸素飽和度が減少するに従い酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)が重くなる傾向が再現された。しかし、モデル計算値と実測値との比較において、酸素飽和度が~60%よりも高い場合には、モデル計算値は実測値を再現していたが、飽和度が~60%よりも低い場合には、酸素飽和度が小さくなるにつれて、実測値とモデル計算値の差は大きくなり、実測値の係数に比べてモデル計算値の係数の傾きが大きくなる傾向が生じた。例えば、酸素飽和度が20%では、酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)がモデル値の方が観測値よりも+7%以上重くなっていた。この酸素飽和度が低い所で生じる観測値とモデル計算値の違いの原因を明らかにするために、感度実験を行った。まず初めに、有機物分解や呼吸による酸素消費プロセスの強弱について調べた。酸素消費速度を0.5から1.5倍まで変化させた結果、酸素速度を大きくすると酸素飽和度が再現されたが、酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)を再現することは不可能であった。次に物理場(移流・拡散)についての感度実験を行った。移流・拡散係数を変化させて物理場を変えた場合でも、中深層でのモデル-観測データ間の酸素飽和度と酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の関係の相違は説明できないことが明らかとなった。これまでの報告で、Nakayama et al., 2007, 2008は、日本海およびフィリピン海における現場観測の結果に1次元モデルを適用させて、中深層での酸素消費過程における酸素同位体分別効果を求めた結果、酸素同位体分別効果はこれまで実験的に報告されている値(~20%)よりも小さい(~10%)ことを明らかにしている。そこで、これらの報告値を考慮して、酸素同位体分別効果の大きさについて感度実験を行った。その結果、表層での同位体分別効果はこれまでの報告通り20%とし、一方、中深層での同位体分別効果を10%に変化させてモデルを動かした場合に、酸素飽和度<~60%の酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の実測値を含む全ての観測値を再現することが可能になった。これらの実験結果は、比較的酸素飽和度が大きい海洋表層などでは、酸素消費過程における同位体分別はこれまで報告されている20%で酸素消費プロセスが行われているが、酸素が乏しい中深層においては酸素消費過程において、その際に生じる同位体分別効果がこれまで一般的に受け入れられている分別効果よりも小さくなるプロセスが作用している可能性を示す結果である。同位体分別効果は、酸素消費のプロセスを現しているため、表層と中深層では酸素消費におい

て異なるプロセスが働いていると考えられる。そこで、酸素同位体分別効果が表層と中深層で変わる要因について考察を行った。表層では、溶存酸素が十分残っている状態にあるため、いわゆる通常の同位体分別(20%)を伴った酸素呼吸が起こっているといえる。しかし、それより深い場所では、この通常の酸素呼吸に加えて、同位体分別を伴わない(もしくは非常に小さい)酸素消費プロセスが起きていることが考えられる。例えば、懸濁粒子内の局所的に酸素濃度が低い環境下で酸素消費が起これば、酸素消費は拡散律速となるため、いわゆる生物の代謝系での同位体分別ではなく、見かけ上の分別は起こらない状態で行われる。酸素濃度だけが減少する結果、同位体分別が見かけ上小さくなることは十分考えられる。Brandes and Devol, 1997は、海底チャンバー設置により閉鎖系で酸素消費分別効果を求める実験を行った結果、同位体分別効果が~3%という極めて小さな分別効果を報告している。本研究における海洋観測および実験室実験から得られたデータと3次元モデルにおける感度実験の結果から、海水中では表層および中深層間では支配している酸素消費プロセスが異なっていることが明らかになった。海水中でも沈降粒子内等の局所的に無酸素に近い環境で酸素消費が行われれば見かけ上同位体分別効果が小さくなり、表層よりも酸素消費全体に占めるその酸素消費の比率が高い中深層でその効果が高くなっている可能性が示された。

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)

[雑誌論文](計1件)

Gamo, T., N. Nakayama, N. Takahata, Y. Sano, J. Zhang, E. Yamazaki, S. Taniyasu and N. Yamashita (2014) The Sea of Japan and its Unique Chemistry Revealed by Time-Series observations over the Last 30 Years, Monogr. Environ. Earth Planets, 2, 1-22.

[学会発表](計1件)

Nakayama, N., A. Oka and T. Gamo (2012), A novel isotopic fractionation during dissolved oxygen consumption in mesopelagic waters inferred from observation and model simulation of dissolved oxygen $\delta^{18}\text{O}$ in open oceanic regions, Eos Trans., AGU Fall Meet., San Francisco, USA, Suppl., Abstract OS41A-1694. 3-7December.

[図書](計2件)

蒲生俊敬・中山典子(2013)「同位体環境分析」馬淵久夫・宮崎章・山下信義編,丸善出版,(7.1項-海洋における同位体比の変動要因,7.2項-軽元素の安定同位体比を利

用した海洋研究(水素と酸素,炭素,窒素), pp. 169-182) .

中山典子 (2012) 「地球と宇宙の化学事典」
日本地球学会編, 朝倉書店, (72 項 - 酸素極
小層, pp. 114) .

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

中山 典子

東京大学・大気海洋研究所・助教

研究者番号 : 60431772

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし