

令和元年6月27日現在

機関番号：82109

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17765

研究課題名（和文）海底熱源が作る深層循環3次元構造の解明と物質循環への影響

研究課題名（英文）Investigation of 3D structure of deep circulation driven by the geothermal heat and its influence on ocean material cycles

研究代表者

浦川 昇吾（Urakawa, Shogo）

気象庁気象研究所・海洋・地球化学研究部・主任研究官

研究者番号：00733916

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：海洋大循環モデルを用いた数値実験を通して、海洋底プレートの冷却に伴う海洋への熱供給（海底熱源）の有無が海洋深層循環及び物質循環に与える影響について定量的に評価した。太平洋において深層循環が17%強化され、これに伴って太平洋底層の溶存酸素濃度やフロン類の濃度の再現性が向上した。底層だけでなく東部熱帯太平洋の数百m深に存在する貧酸素水の表現も僅かに改善した。一方で、植物プランクトンによる有機物の生産量への影響は限定的であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太平洋深層循環は毎秒1千万トンもの水の移動を伴う巨大な循環である。多量の水の移動は多くの物質の輸送を伴い、炭素循環などの海洋物質循環にも影響する。太平洋深層循環は海底熱源によって強化されることが先行研究からわかっているが、この循環の変化が物質循環に与える影響はこれまでほとんど研究されてこなかった。気候形成に強く関連する炭素循環に対する影響は限定的だが、溶存酸素やフロン類などの複数の化学物質に対して大きな影響を持つことがわかった。本研究は海底熱源の重要性を様々な海洋物質循環の観点から明らかにし、海洋物質循環シミュレーションの高精度化に資する情報を創出しており、その学術的・社会的意義は高い。

研究成果の概要（英文）：Influences of the geothermal heat on the ocean deep circulation and material cycles were quantitatively investigated with the use of an ocean general circulation model. The geothermal heat enhanced the Pacific deep circulation by 17%, which led to improvements in dissolved oxygen and CFC-11 concentration in the bottom of the Pacific ocean. It also resulted in the improved representation of hypoxic water in the Eastern Tropical Pacific. On the other hand, it is found that the geothermal heat had only a limited effect on the net primary production in the ocean.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海底熱源 熱塩循環 深層循環 物質循環 海洋大循環モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気候の成り立ちを知る上で、全球熱塩循環の駆動メカニズムを調査することは非常に重要である。全球熱塩循環は毎秒数千万トンにも及ぶ極域での深層水形成と、その他の広大な領域における深層水湧昇によって特徴付けられる全球規模の循環である。湧昇・低密度化した深層水は表層を極域に向かって移動し、1,000年規模の時間スケールを持つ大循環を構成する。表層水と深層水の間大きな温度差は多量の南北熱輸送につながり、特に長期の気候形成・維持に対し大きな影響を与えると考えられている。また多量の深層水輸送とともに、温室効果気体である二酸化炭素や海洋生物活動に重要な栄養塩など多くの物質輸送を伴うため、地球化学・生物地球化学的な観点から見ても非常に重要な現象である。

高密度な深層水の湧昇のためには海洋深層への浮力の供給が必要であり、その大部分は潮汐や風に起因して生じる深層乱流混合による上層からの浮力フラックスによると考えられている。一方で、深層水に浮力を与える他の要素として海底熱源(地熱)が存在する。海洋底では海洋プレートの冷却に伴い平均で約 100 mW/m² の熱が深層水に与えられる。この熱フラックス値は短波放射等による海面での加熱に比べて非常に小さいが、全球熱塩循環の強さに与える影響は大きい。全球熱塩循環の強さの指標には、全球若しくは海盆規模での南北流東西積算量から計算される、南北-鉛直断面(子午面)上の子午面流線関数の大きさがしばしば用いられる。これまでの研究では、50 mW/m² の地熱を全球一様に与えた数値モデル実験が実施され、太平洋の子午面循環量が 25%も強化されることが示されている(Adcroft et al, 2001)。また、海底熱源による循環強化は鉛直拡散係数の大きさに依存することが知られており、係数が小さく元々の循環量が小さい程、循環強化量は大きくなる(Urakawa and Hasumi, 2009)。空間分布を持つ海底熱源を与えた数値モデル実験では、南極底層水形成率が 33%増加し、東西平均された炭素同位体比分布の再現性が向上することが示されている(Hofmann and Morales Maqueda, 2009)。このように海底熱源は全球熱塩循環にとって大きなインパクトを持つが、その影響評価は常に子午面流線関数のように 2 次元的な描像に留まり、循環場の 3 次元構造に対する影響評価はあまり行われていない。また、炭素循環などの気候形成に重要な物質循環場への影響評価も行われていない。

2. 研究の目的

本研究では海洋大循環モデルを用いた数値実験をとおして、以下の 3 点について海底熱源の影響を定量的に評価する。

- (1) 深層循環場の 3 次元構造への影響
- (2) 炭素同位体比等の深層物質循環に対する影響
- (3) 炭素循環・海洋低次生態系への影響

3. 研究の方法

海洋大循環モデルを用い、海底熱源の有無によって 2 種類の数値実験を行う。海洋大循環モデルには気象庁気象研究所にて開発された気象研究所共用海洋モデル(MRI.COM)を用いる。モデルの解像度・設定には、第 6 次結合モデル相互比較計画(CMIP6)での利用を目的に気象研究所にて開発された全球渦非解像海洋モデル GONDOLA_100 の開発版を用いる。開発版は CMIP6 で実際に利用される最終版と厳密には一致しないが、ほぼ同等の性能を示すものになっている。例えば太平洋子午面循環強度に大きな影響を持つ鉛直拡散係数には、Declodt and Luther (2010) の経験式に基づき海底粗度から計算された 3 次元空間分布を与えている。この経験式は乱流混合強度観測と合うようにフィティングされたものであり、初歩的なものであるものの、荒い海底地形近傍での強い鉛直混合を良く表現する。

地熱フラックスデータセットには Hamza et al. (2008)を用いる。本データセットは複数存在する地熱フラックスデータセットのうち、熱量を最も小さく見積ったものになっている。そのため本研究で計算される海底熱源の影響は、控えめな見積りになる。以後、海底熱源を与えない実験を CTRL 実験、与える実験を GTHM 実験と呼ぶ。計算資源の都合上、実験は以下の 3 段階に分けて実施した。

- (1) 物理場の計算
大気外力として、Coordinated Ocean-ice Reference Experiments 第 2 版(COREv2)の較正済気候値外力を与えた。静止状態、観測気候値の温位・塩分分布を初期値とし、準定常状態に達するまで 1,840 年間の積分を行った。最後の 10 年間を解析対象とした。
- (2) 物質循環・海洋低次生態系場の計算
予め計算された物理場を用いてトレーサーの移流拡散過程のみを解くオフライントレーサーモデルを利用し、物質循環・海洋低次生態系場への海底熱源の影響を評価する。物理場には上記実験(1)最終 10 年間の日平均値を用いた。計算対象となるトレーサーは次の通りである:海面露出からの経過時間を示す水塊年齢、炭酸系トレーサー 4 種(溶存無機炭素、生物影響を受けない溶存無機炭素、生物影響を受けない溶存無機炭素 14、アルカリ度)、溶存酸素、リン酸塩、硝酸塩、植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス。大気中二酸化炭素濃度は産業革命前の濃度とし、大気中 ¹⁴C は 0‰とした。3,000 年間の積分を行い、最後の 10 年間を積分対象とした。
- (3) フロン類の経年変動計算

底層水のトレーサーとして良く使用されるフロン類(CFC-11, CFC-12, SF-6)について、オフライントレーサーモデルを用い、1936-2017の82年間を対象とした実験を行った。大気中濃度にはCMIP6/海洋モデル相互比較計画指定のものを用いた。物理場は実験(1)最終10年間の日平均値を用いた。

4. 研究成果

(1) 物理場への影響

CTRL 実験での太平洋における底層水の北上流量は、南緯 30 度において 6.3 Sv であった。Roemmich et al. (1996)は、主要な底層水の通り道であるサモア海峡周辺において、その北上流量を 10.6 ± 1.7 Sv と観測に基づいて見積っている。現実的な鉛直拡散係数分布を与えた場合に太平洋子午面循環を過小評価する傾向は、数多くの海洋モデルに共通して存在する課題であり、CTRL 実験も同様に大きく過小評価している。一方で GTHM 実験での北上流量は 7.4 Sv であり、海底熱源によって太平洋深層循環が 1.1 Sv 強化されたことになる。この強化量は CTRL 実験での流量の 17%に相当しており、この循環強化率は先行研究と比較しても妥当な値となっている。未だに観測に基づく見積りの下限値よりも低い流量となっているが、過小評価傾向を大きく緩和している。先行研究と同様に本研究においても海底熱源が子午面循環に大きな影響を与えることが確認された(図1)。

太平洋深層循環場 3 次元構造への影響を調査するため、3,450m 以深での平均水平流速分布を図2に示す。また図3には6つの分割領域で積算された湧昇量と水平流量を示す。CTRL 実験ではサモア海峡周辺から流入した底層水が、地形に沿う形で北太平洋西側を北上し、北緯 40 度付近で東進に転換して、湧昇しながら北太平洋東部を南下している。流量は過小評価しているものの、観測によって描かれた太平洋深層循環場の描像(Kawabe et al., 2010 など)とよく一致している。海底熱源による深層水平流速の強化は、もともと強い水平流が存在する場所で大きい。これはつまり、海底熱源は海盆規模の深層循環構造を変えるような働きはなく、構造を保ったまま流速を強化することを

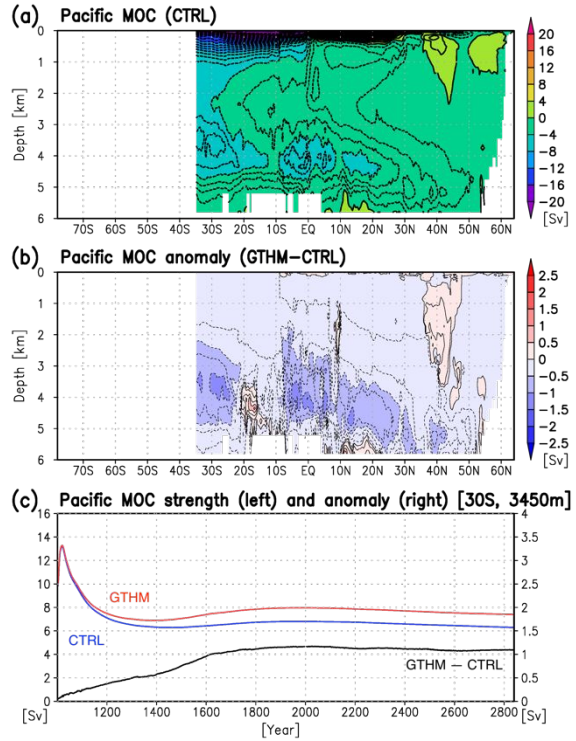


図 1. (a) CTRL 実験での太平洋子午面流線関数。正值が時計周りの循環を示す。(b) GTHM 実験での太平洋子午面循環偏差。(c) 南緯 30 度、3,450m 深での太平洋底層水北上流量時系列

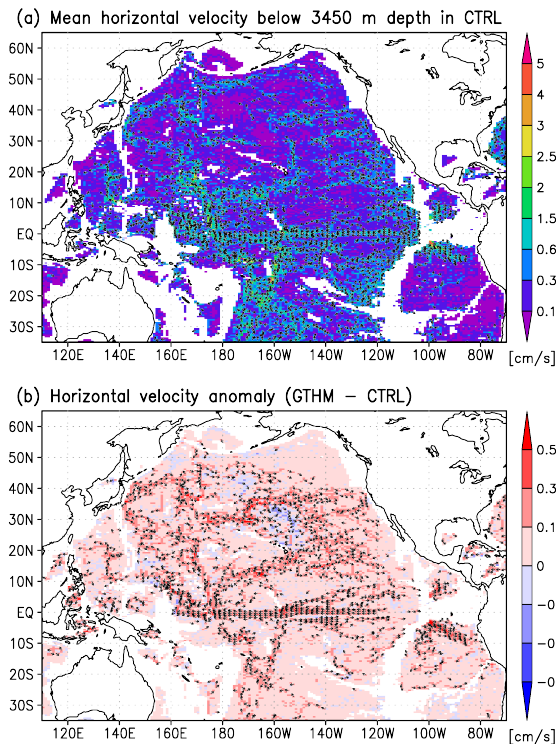


図 2. (a) CTRL 実験 3,450 m 以深での鉛直平均水平流速場。陰影が流速を示し、ベクトルは流向を示す(流速が 0.3 cm/s 以上の場合のみ描画)。(b) GTHM 実験での水平流速偏差。ベクトルは偏差の大きさが 0.1 cm/s 以上の場合のみ描画。

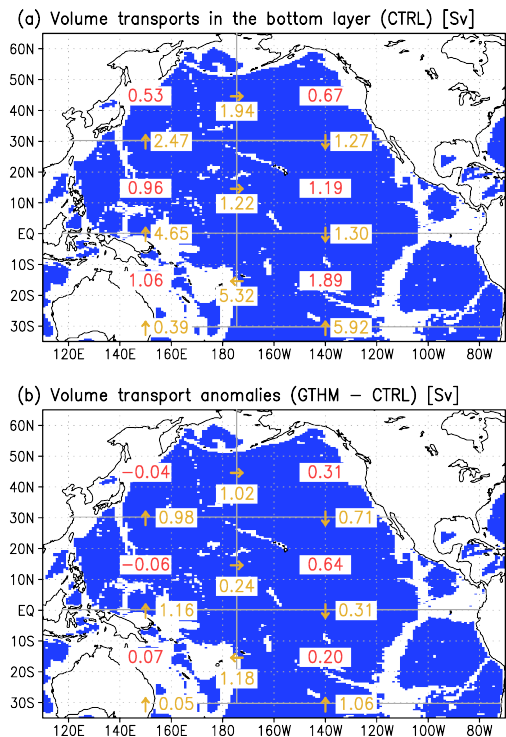


図 3. (a) CTRL 実験 3,450 m 以深での積算流量。赤字は湧昇量を黄色字は水平流量を示す。(b) GTHM 実験での積算流量偏差。

意味する。

(2) 物質循環場への影響

海底熱源による太平洋深層循環の強化は、太平洋深層の換気強化につながる。北太平洋底層での ^{14}C 値は5から10%程度の増加を示しており、海面に露出してから経過年数を示す水塊年齢も40年から100年程度若くなる。海面露出からの経過時間が短い水塊が流れ込むため、北太平洋底層の溶存酸素濃度が増加する。特に東部熱帯太平洋域の底層で影響が大きく、増加量・増加率は $30\ \mu\text{mol/L}$ 以上、80%以上にも及ぶ。CTRL 実験では同領域において観測に比べて貧酸素に傾くバイアスがあるが、海底熱源による溶存酸素濃度増加はその低減につながっている(図4a)。

溶存酸素への影響は底層深層に留まらない。東部熱帯太平洋では亜表層から中層にかけて溶存酸素濃度が $30\ \mu\text{mol/L}$ を下回る貧酸素水塊が存在している。CTRL 実験では貧酸素水塊の厚さを過大評価しているが、海底熱源の導入により、その厚さが100m程度薄くなる(図4b)。これは元々の厚さの約7%に相当する量であり、バイアスを低減している。

底層水のトレーサーとしてしばしば用いられる化学物質にフロン類が存在する。2018年度に気象庁海洋気象観測船によって、世界で初めて北太平洋底層においてフロン類が検出された。一方で気象研究所では第6次結合モデル相互比較計画における海洋モデル相互比較計画(OMIP)実験において、海洋中のフロン類の濃度を計算している。同実験ではフロン類の濃度が上記の観測結果よりも小さく、底層循環の強度が現実よりも弱いことが示唆される。OMIP 実験では海底熱源が考慮されていない。フロン類濃度の過小評価バイアスは、海底熱源による底層循環強化によって説明できる可能性がある。フロン類の経年変動実験においては、2018年観測地点近傍における GTHM 実験でのフロン類濃度が、2017年時点で CTRL 実験の2倍にも至ることがわかった。観測と OMIP 実験の差を完全に説明するには至らないが、海底熱源の導入によってバイアスが大きく低減することが示唆される。

(3) 炭素循環・海洋低次生態系への影響

海底熱源による深層循環の変化は、溶存無機炭素や栄養塩などの分布にはほとんど影響しないことがわかった。植物プランクトンによる純一次生産量は GTHM 実験において1%しか増加せず、海洋低次生態系モデリングの不確実性を考慮すると、無視できる程度の大きさである。その一方で東部熱帯太平洋のように局所的には比較的大きな純一次生産増加を示す海域も存在し、増加率は1割程度に及ぶ。今回使用した海洋低次生態系モデルは、鉄制限や窒素固定・脱窒といった過程を考慮しない非常に単純なモデルである。上述の局所的な影響に対する評価に関しては、より精緻なモデルを用いた検証が今後必要になる。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計5件)

1 浦川 昇吾, 辻野 博之, 中野 英之, 坂本 圭, 山中 吾郎, 深層循環に対する海底熱源の影響についての再検証, 日本海洋学会 2016 年度秋季大会, 2016-09-13, 鹿児島県鹿児島市。

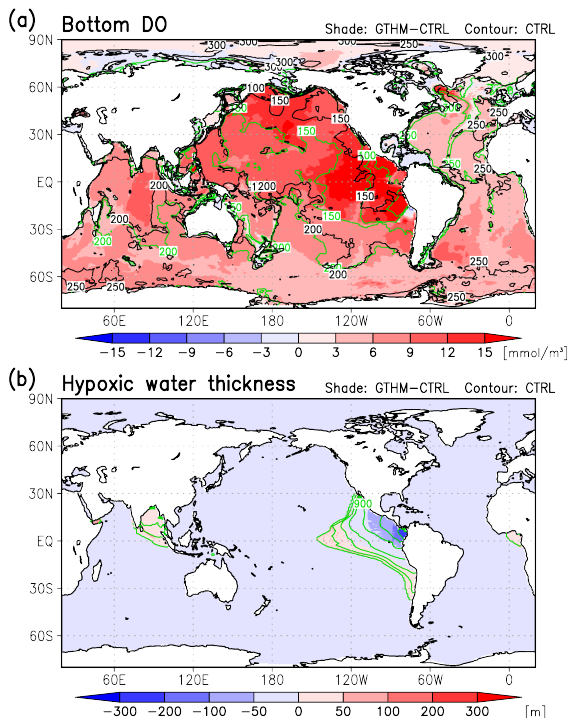


図4. (a)モデル底層での溶存酸素濃度。黒の等値線は観測値、緑の等値線はCTRL実験結果、陰影はGTHM実験での偏差を示す。(b) $30\ \mu\text{mol/L}$ を下回る貧酸素水塊の層厚。緑の等値線はCTRL実験結果、陰影はGTHM実験での偏差を示す。等値線間隔は300 m。

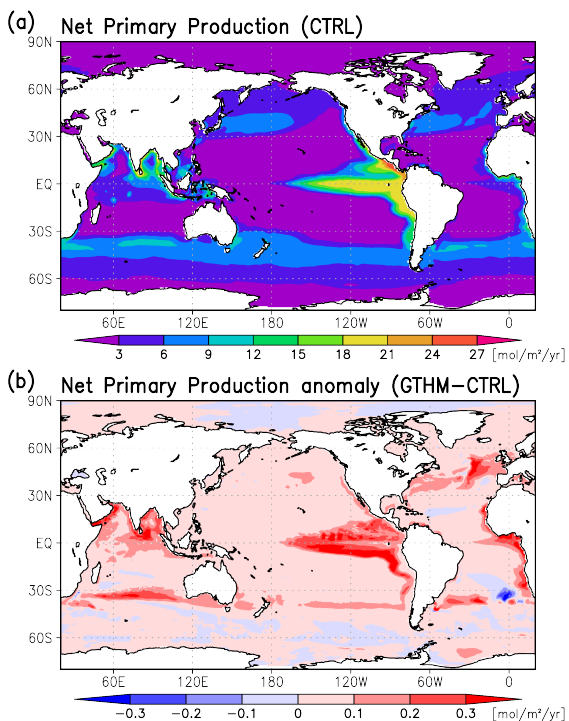


図5. (a)CTRL実験での純一次生産。(b)GTHM実験での偏差。

² Urakawa, L. S., H. Tsujino, H. Nakano, K. Sakamoto and G. Yamanaka, Global ocean model development for CMIP6 in Meteorological Research Institute and its performance in reproducing ocean general circulation, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017-05-21, 千葉県千葉市.

³ 浦川 昇吾, 辻野 博之, 中野 英之, 坂本 圭, 豊田 隆寛, 山中 吾郎, S. Yeager, W. Kim and G. Danabasoglu, 気候値外力実験における気象研全球海洋モデル GONDOLA_100 の深層循環再現性評価, 日本海洋学会 2017 年度秋季大会, 2017-10-16, 宮城県仙台市.

⁴ Urakawa, L. S., H. Tsujino, H. Nakano, K. Sakamoto, G. Yamanaka and T. Toyoda, Reproducibility of BMOc in a global ocean model: sensitivity on isopycnal diffusion scheme, 2018 Ocean Sciences Meeting, 2018-02-12, Portland.

⁵ Urakawa, S., H. Nakano, H. Tsujino, K. Sakamoto, T. Toyoda and G. Yamanaka, Influence of enhanced deep circulation due to geothermal heat on biogeochemical cycle in the Pacific Ocean, Japan Geoscience Union Meeting 2019, 2019-05-26, 千葉県千葉市.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。