

令和 2 年 5 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2015～2019

課題番号：15H05825

研究課題名（和文）鉛直混合を取り入れた海洋循環・物質循環・気候モデル開発と影響評価

研究課題名（英文）Model development and impact assessment for ocean circulation, marine material cycles and climate by incorporating the effect of oceanic vertical mixing

研究代表者

羽角 博康（Hasumi, Hiroyasu）

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：40311641

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 73,300,000 円

研究成果の概要（和文）：最新の観測的および理論的知見を数値モデルの鉛直混合パラメタリゼーションに反映させることを通して、鉛直混合が大規模な海洋循環や物質循環をどのようにコントロールするか、そして18.6年周期潮汐に伴う鉛直混合強度の変動が気候にどのような影響を及ぼすかを明らかにした。また、数値モデルで得られた北太平洋循環に関して仮想トレーサー実験や仮想粒子実験を通じた解析を行い、観測的知見と照らし合わせながら、北太平洋中深層循環に関する最新の描像を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粒子追跡により海洋循環の3次元構造を定量的に記述できるようになったことは画期的な進展である。深層循環はこれまで子午面循環という2次元イメージでとらえられることがほとんどであったが、循環と混合の間の物理的因果関係を解き明かす上でも、あるいは循環によって輸送される物質の挙動や動態を解き明かす上でも、3次元構造を詳細に記述することは欠かせない。今後、この手法を高解像度数値モデリングの結果に適用することにより、海洋循環や物質循環の実態把握が各段に進展するものと期待する。

研究成果の概要（英文）：We have clarified how micro-scale vertical mixing controls the global scale ocean circulation and material cycles and how the modulation of vertical mixing associated with 18.6-year period tides affects the climate by introducing new observational and theoretical findings into numerical models of the ocean and climate. We also proposed a new look on the Pacific deep- and intermediate-layer circulation by conducting virtual tracer release experiments and virtual particle tracking experiments.

研究分野：海洋物理学

キーワード：数値モデリング 太平洋熱塩循環 鉛直混合 気候変動 物質循環

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

全球海洋の表層から深層をつなぐ熱塩循環は、海洋による膨大な熱・溶存物質輸送の大部分を担い、気候の長期的な安定性や変動をコントロールする最重要要素のひとつであるが、その実態にはいまだ不明な点が多い。その中でも太平洋は、全球海洋に占める割合の大きさから重要性の高さは疑いない一方で、直接観測・間接推定・数値モデリングいずれの手法の面からも他の海盆と比べて困難が大きく、実態の理解が特に立ち後れていた。我々は従来の一連の研究の中で、太平洋深層の混合過程が太平洋深層循環を通して全球海洋熱塩循環を質的にも量的にも大きくコントロールすることを、先駆的な数値モデリング研究によって示してきた。またその結果として、太平洋深層における混合現象の実態に関する観測および理論的研究と密接に連携した数値モデリング研究を行うことこそが、太平洋深層循環、ひいては全球海洋熱塩循環の科学的理解を格段に深めるために不可欠な手段であることを実感するようになった。

混合過程の実態を直接知る最善の手法は、海洋中の微小規模乱流の状態を直接観測することである。こうした乱流直接観測を外洋の広範囲で密に行うことは容易ではないが、過去10年以上にわたる多くの観測・研究の蓄積によって、おおまかな全海洋的分布が明らかになりつつあった。一方、間接的な手法だが、全海洋を広く覆う観測システム Argo のデータから混合強度の全海洋的分布やその時間変動を得る試みもなされつつあった。さらに、混合のエネルギー源の大部分を占めると考えられる内部潮汐の発生量が数値モデルや理論によって信頼性高く求められるようになってきており、そのエネルギーがどこでどれだけの混合をもたらすかに関する研究の進展と併せて、混合過程の全海洋的な実態の把握が進展していた。これらの知見を最新の高解像度数値海洋モデルに採り入れることにより、太平洋深層循環の実態とそれが全球海洋熱塩循環に及ぼす影響について、科学的理解を格段に深化させられる段階に達した。

### 2. 研究の目的

観測と理論によって明らかにされた北太平洋の鉛直混合の実態に関する最新の知見を数値モデリングに採り入れ、北太平洋の表層から深層にわたる新たな循環像を物理と物質の両面について提示するとともに、それが全球海洋深層循環、長期海洋変動、気候形成・変動に及ぼす影響を評価することを目指してきた。具体的には以下の6個の研究項目を実施した。

**研究項目** 従来よりも格段に高い空間解像度(水平格子幅0.25度以下)の数値海洋モデルにおいて混合過程を適切に表現するためのパラメータ化手法を開発する。

**研究項目** で開発した混合過程パラメータ化を適用した高解像度太平洋モデルを構築し、その長期積分を通して水塊混合の実態とそれに伴う北太平洋深層循環の形成過程を明らかにする。

**研究項目** で実施したモデリング結果を取り込む形で高解像度全球海洋モデルを構築し、それを用いて全球海洋熱塩循環とその変動における北太平洋混合過程の影響を評価する。

**研究項目** で実施したモデリング結果を取り込む形で高解像度大気海洋結合モデルを構築し、それを用いて潮汐起源混合の長周期変動が気候変動に及ぼす影響をより正確に評価する。

**研究項目** 生物起源粒子の過程に着目して、従来とは異なる手法に基づく生物地球化学過程の新たなモデル化の枠組みを開発する。

**研究項目** に基づいて新奇的な太平洋物質循環モデルを構築し、太平洋の二酸化炭素吸収および酸性化の実態を評価する。

### 3. 研究の方法

**研究項目** 最新の観測的・理論的知見に基づいて混合過程をパラメータ化し、それを採り入れた数値海洋モデルを構築する。高解像度数値潮汐モデルの結果に基づいて内部潮汐生成量の水平分布を見積もる。また、生成された内部潮汐エネルギーの散逸が鉛直方向にどのように分配されるかについて、数値海洋モデルによるパラメータ感度実験を実施し、最新の観測的知見との比較によってパラメータ値を確定する。

**研究項目** における混合過程パラメータ化を取り込んで太平洋モデリングを実施し、北太平洋の熱塩循環と水塊混合過程に関して成果を得る。結果を に随時反映させて、混合過程パラメータ化改良につなげる。

**研究項目** の成果を受けて全球海洋モデリングを実施し、全球海洋熱塩循環における北太平洋域の混合過程が果たす役割に関して成果を得る。

**研究項目** 最新の高解像度海洋モデルおよび最新の大気大循環モデルに基づく気候モデル(大気海洋結合モデル)を開発し、潮汐起源混合の長周期変動が気候変動に及ぼす影響に関して成果を得る。

**研究項目** 太平洋による二酸化炭素の取り込みおよび酸性化を扱うモデリングに適用するための、粒子追跡法に基づく新奇的な海洋生物地球化学過程モデルを開発する。

**研究項目** の成果を受けてモデリングを実施し、太平洋の二酸化炭素吸収および酸性化に関して成果を得る。

### 4. 研究成果

(1) 最新の鉛直混合パラメタリゼーションに基づく太平洋深層子午面循環

最新の観測的・理論的知見に基づき、我々は以下の要素を考慮して内部潮汐起源乱流エネルギー散逸率の3次元マッピングをした(高解像度潮汐モデルはすべて Niwa and Hibiya, 2014 に

基づく)。1) 高解像度潮汐モデルにおける順圧潮汐から内部潮汐へのエネルギー変換率に基づく、内部潮汐エネルギーの局所的散逸率。2) 1)のエネルギー散逸率を鉛直方向に分配する際に仮定している海底から上方へ向かっての指数関数的減少におけるスケール長(250, 500, 1000 m)。3) 高解像度潮汐モデルにおける各水平位置での全乱流エネルギー散逸率から1)を減じたものとして求めた遠方伝播内部潮汐のエネルギー散逸率(鉛直方向の分配は、A01-1班成果に基づき、浮力振動数の2乗に比例)。4) 高解像度潮汐モデルから見積もった海盆縁(大陸斜面)で散乱され散逸する内部潮汐エネルギー(鉛直方向には一様に分配)。5) モデルの海底地形が解像しない海底起伏の影響を考慮して、2)の指数関数的減少において始点を海底よりも上方に設定。6) 高解像度潮汐モデルの解像度不足を考慮して、エネルギー散逸率を20%増加。

この乱流エネルギー散逸率マッピングを用いて、水平解像度1度の全球海洋大循環モデルにより我々がこれまでに実施したモデリング結果では、太平洋深層子午面循環として十分な流量が得られないことが課題であった。この「十分な流量」を評価するにあたって比較対象としてきたのは、Roemmich et al. (1996)の観測結果である。これは、1992年9月から1994年3月までの17ヶ月間のサモア海峡(およそ南緯10度)における流速計係留と1994年1~2月に実施されたその周辺海域でのCTD観測に基づいており、結果としてサモア海峡を北上する深層水の流量が $6.0 \pm 0.5$  Sv、サモア海峡以外の周辺海域を含めた深層水北上流量が $10.6 \pm 1.7$  Svであると示されている。一方、我々のモデリング結果では、太平洋南緯10度の深層水北上流量は最大で6 Sv程度であった。なお、この6 Svの中には地熱フラックス(Davies, 2013)の寄与1.5 Sv程度を含む。

この、太平洋南緯10度の深層水北上流量が6 Sv程度となった流速場を用いて、 $\Delta 14C$ の分布を計算したトレーサー実験を実施した。トレーサー実験における北太平洋深層の $\Delta 14C$ は、空間分布としては観測をよく再現しており、値は観測より若干低い(負値が大きい)ものの観測にかなり近い。 $\Delta 14C$ の値が低いということは、海水が海面から離れてから経過した時間が長いということを示す。もし北太平洋深層に流入する深層水の流量がもっと大きければ、南半球深層水形成起源の水塊年齢が低い海水をより多く北太平洋深層に引き込むため、北太平洋深層の水塊年齢は低くなる。実際のところ、北太平洋深層の混合を大きくして10 Sv程度の深層水が北太平洋に流入するようにモデリングを行い、その流速場のもとで $\Delta 14C$ 分布を計算すると、北太平洋深層の値は観測よりもかなり高くなり、水塊年齢は低すぎるという結果になる。すなわち、 $\Delta 14C$ の観点からは、太平洋南緯10度を北上する深層水の流量が6 Sv程度で適当であると言える。

Roemmich et al. (1996)の係留観測によるサモア海峡通過流量は、観測期間で17ヶ月の間に2 Sv程度から11 Sv程度まで大きく変動する。深層流が様々な時間スケールで大きな変動性を示すことが近年知られるようになっており、Roemmich et al. (1996)が示した流量は必ずしも長期間の代表性が良いものではないのかもしれない。より最近に行われたサモア海峡の観測結果(Voet et al., 2016)においても、流量は大きな時間変動を示している。観測値の時間代表性という問題を考慮した上で、モデリング結果の評価を再検討する必要がある。

## (2) 粒子追跡モデリングによる北太平洋深層循環3次元構造の定量的解析

(1)で用いたトレーサー実験は流れを追跡するために有効な手段であり、観測量に対応する実験を行えばモデリング結果を検証できるという利点がある。その一方で、計算されるトレーサー分布から流れの量や経路を特定することには困難がある。そこで、モデルで得られた流速によって仮想的な粒子を流してそれを追跡する実験を行い、北太平洋深層循環の3次元構造を定量的に記述することを試みた。(1)のモデル実験(TEDケース)に加えて、同じ水平解像度1度の全球海洋大循環モデルにおいて海洋鉛直混合として従来の経験的な鉛直混合係数(Tsujino et al., 2000)を与える実験(CTLケース)を行い、それぞれのケースの定常状態における1ヶ月平均流速を使用して仮想粒子の動きを計算した。なお、ここで用いる粒子追跡手法では、粒子はモデル流速によってラグランジュ的に流されるのに加えて、モデルで与えた拡散係数に対応した酔歩によっても移動する。粒子は、最初の1年間にわたり、北太平洋へ流入する深層水の主要経路となるサモア海峡の深さ3690 m以深において与える。断面上の各モデル格子においてそこを通過する流量を時間とともに積算していき、それが $1 \times 10^8$  m<sup>3</sup>に達するごとに1個の粒子をその格子内に投入する。1個の粒子はこの体積を代表することになり、流路を量的に追跡することができる。断面上の各格子における投入粒子の初期配置は、格子を $5 \times 5$ に分割した25個の小格子の中心に順次配置する。これにより、1年間総計で、CTLケースでは3,260,725個(=  $2.24205 \times 10^{14}$  m<sup>3</sup>/yr = 10.5 Sv)粒子追跡モデルでは1年 = 360日として計算している)TEDケースでは2,242,050個(= 7.21 Sv)の粒子が投入される。この粒子によって流体体積を追跡するに際して、海面では蒸発の影響により体積が減少することを考慮する必要がある。海洋大循環モデルを動かす際に境界条件として与える蒸発フラックスを用い、各粒子が最上層(厚さ2 m)に存在する間その粒子について蒸発量を積算し、積算量が最上層厚の半分になった時点でその粒子を除去する。

サモア海峡を北上した粒子のうち、一部は北太平洋に入ることなく南下するが、大部分は赤道を越えて北太平洋に流入する。これら粒子は、最終的には太平洋外へ流出していく。いずれのケースでも、1000年後に80%以上、1500年後に95%以上、3000年後には99.8~99.9%の粒子が太平洋外へ流出する。3000年時点までに粒子がどの海盆へ流出したかを見ると、いずれのケー

スでも流出量は南大洋、インド洋、北極海、蒸発の順に大きい。一方、CTL に比べて TED では、南大洋に到達する割合が小さく、インド洋に到達する割合が大きい。これは、太平洋深層子午面循環の 3 次元構造が両者の間で定性的に異なることを示唆する。

深さ 3500 m および 2500 m を粒子が通過した場所を見ると、CTL ケースにおいては北太平洋に流入した深層水が水平一様に上昇するのに対し、TED ケースでは上昇場所が偏在している。上昇が集中しているのは、千島列島・アリューシャン列島・伊豆小笠原海嶺・ハワイ海嶺といった、混合エネルギー強度が大きい場所に対応している。3500 m 以深の粒子軌跡からは、TED において深層水がより集中して流れており、主流路がより明瞭であることがわかる。

### (3) 南大洋深層鉛直混合が気候に及ぼす影響

(2) で述べた CTL ケースと TED ケースに相当する海洋大循環モデルを用いて、比較的低解像度の気候海洋結合大循環モデリングを実施した。外部強制力は 1850 年条件(産業革命前)である。CTL ケースでは十分な長期スピナップを行った状態を初期状態としてさらに 1000 年程度のモデル積分を行い、TED ケースでは同じ初期状態から 1500 年以上の積分を行った。

気候状態を表す代表的指標である全球平均地上気温の時系列を見ると、CTL ケースではこの積分期間を通して 0.2 程度の振幅を持った年々変動を伴うほぼ定常な状態が実現されている(この初期状態を得る前の長期スピナップでも同様である)。一方 TED ケースでは、同程度の年々変動振幅を持ちつつも積分開始からしばらく長期的な寒冷化傾向が見られ、積分開始から 600 年ほど経過した時点で急激に寒冷化し、その後はほぼ定常な状態になっている。長期平均を両ケースの定常状態間で比べると TED ケースの方が 0.5 ほど低く、この差はそれぞれのケースにおける年々変動の幅を超えているという意味で非常に有意である。長期平均した地上気温の両ケース間での違いを見ると、南半球冬季のロス海沖からの寄与が顕著である。

地球温暖化などの気候研究に用いられる気候モデルの多くには共通して南大洋に温暖バイアスが存在しており、その原因としては南大洋上での雲の再現性に伴う放射収支のバイアスがこれまで主に指摘されている(Previdi et al., 2015)。本研究で用いた気候モデル MIROC にも南大洋の温暖バイアスが存在するが、CTL ケースと比べると TED ケースではその温暖バイアスが顕著に改善されている。その主要因となっている南半球冬季ロス海沖での気温低下は、海水被覆拡大を原因としている。CTL ケースではロス海沖で現実には見られない大規模な外洋型深層対流が生じており、それが深層の比較的高温な海水を海面付近に引き上げることによって海水生成が阻害されている(顕熱ポリニヤ生成)。TED ケースでロス海沖の顕熱ポリニヤ生成が抑制されている原因は、南大洋中深層で成層が強化されていることに求められる。

このインパクトは気候の過渡応答においても有意に現れる。外部強制力を 1850 年条件で固定して気候モデルを長期積分した後、毎年 1% の割合で大気中二酸化炭素濃度を増加させた気候温暖化実験を CTL ケースと TED ケースについて行ったところ、全球平均地上気温の上昇度合いは TED ケースの方が有意に大きかった。二酸化炭素濃度倍増時点(およそ 70 年目)での両者の差は 0.25 であるが、これは CMIP5 に参加したモデル間の差である 0.6 と比べても無視できないほどの大きさを持つ。

CTL ケースに比べて TED ケースの方で南大洋中深層の成層が強い原因を確かめるために、南大洋のみで乱流エネルギー散逸率マッピングを適用したケース(TED-S0)および南大洋以外のみで乱流エネルギー散逸率マッピングを適用したケース(TED-exS0)を実施したところ、TED-S0 ケースは CTL と同様の結果に、TED-exS0 ケースは TED と同様の結果になった。すなわち、南大洋以外の混合の違いが南大洋の成層に影響して海水の有無に作用していることが示された。CTL ケース以外の実験は、CTL ケースのある時点での状態を初期値として、与える鉛直混合を切り替えて実施している。TED ケースでは実験開始後 700 年程度で、TED-exS0 ケースでは実験開始後 1000 年程度で海水被覆や地上気温に急激な変化が現れる。海洋中では、その変化が現れるまでの期間にわたり、太平洋の深層子午面循環が緩やかに弱化し、それに伴ってロス海沖を中心として南大洋深層が高密度化していく。そして、南大洋深層が十分に高密度化して深層対流が抑制されると、ロス海沖を海水が覆い、地上気温が顕著に低下する。すなわち、太平洋深層の混合が太平洋深層子午面循環に影響を及ぼした結果としてこれらの変化がもたらされていることが示された(Tatebe et al., 2018)。

南大洋中深層における鉛直混合の実態把握は他の海盆と比べても特に立ち後れているが、その理解が南大洋自体の問題にとどまらず全球気候にとっても大きな重要性を持つことが示唆された結果と言える。

### (4) 18.6 年周期潮汐に伴う鉛直混合変動が気候に及ぼす影響

比較的低解像度の気候海洋結合モデルを用いて、潮汐 18.6 年周期変動の影響を取り込んだ数値実験を実施した。同様の実験はこれまでも幾度か行われている。Hasumi et al. (2008) は気候海洋結合モデル MIROC 3.2(海洋水平格子幅約 1.4 度、大気水平格子幅約 2.8 度)を用いて、千島列島の海峡部で特に大きな鉛直拡散係数(0.02 m<sup>2</sup>/s)を与えた実験、およびその大きな鉛直拡散係数に対して 15% の振幅で 18.6 年周期変動を与えた実験を実施した。実験結果の年平均太平洋海面水温にはいずれの場合も IPO(interdecadal Pacific oscillation)に相当する空間パターンが EOF 第 1 モードとして現れ、18.6 年周期変動を考慮した実験にのみその EOF 第 1 モードの時系列に有意な 18.6 年周期のシグナルが認められた。この結果においては、千島列島周

辺における混合の変動が励起する擾乱がケルビン波として赤道へ伝播し、赤道潜流を通じて東部熱帯太平洋の海面水温に影響を及ぼし、その影響が大気を介してさらに中緯度へ及ぶというプロセスが重要であると論じている。一方、Tanaka et al. (2012) は Hasumi et al. (2008) と同じ大気海洋結合モデルを用いたが、鉛直拡散係数は高解像度潮汐モデルの結果に基づいた内部潮汐の局所的散逸によって決定し、潮汐 18.6 年周期変動の混合への影響は千島列島周辺に限らず全海洋に対して主要分潮ごとに考慮した。その結果では、熱帯に 18.6 年周期の顕著なシグナルは現れない一方、黒潮続流域の海面水温やアリューシャン低気圧に 18.6 年周期のシグナルが現れた。そのため、中高緯度で閉じた大気相互作用プロセスが重要であると論じている。このように、実験設定の違いによって 18.6 年周期シグナルの現れ方が異なり、そのシグナルを支配するプロセスも違っているように見えるため、現実の 18.6 年周期気候変動がどのようなプロセスによるかについての決着はまだついていないというのが現状である。

今回はより新しい大気海洋結合モデル MIROC 5.2 (海洋水平格子幅 1 度、大気水平格子幅約 2.8 度) を用いて、鉛直混合の与え方を変えた 3 通りの実験を実施した。TED500.VAR ケースでは、内部潮汐の局所的散逸のみに基づく乱流エネルギー散逸率から鉛直分配のスケール長を 500 m として鉛直混合を与え、そのエネルギー散逸率を分潮ごとに 18.6 年周期で変動させた。TED500NF.VAR ケースでは、これに遠隔伝播する内部波の散逸に基づく乱流エネルギー散逸率も加えた。TED1000NF.VAR ケースでは、TED500NF.VAR を元に、局所散逸の鉛直スケール長を 1000 m にした。

いずれのケースでも年平均太平洋海面水温の EOF 第 1 モードには IPO に相当する空間パターンが現れた。この EOF 第 1 モードの時系列のパワースペクトル密度には、TED1000NF.VAR ケースにおいてのみ 18.6 年周期 (付近) にピークが見られる。このケースは赤道を通じた応答が見られるという点において Hasumi et al. (2008) と整合的である。ただし、潮汐と IPO の位相差が Hasumi et al. (2008) とは違っており、より具体的なプロセスの相違は今後確かめる必要がある。TED500NF.VAR では IPO に 18.6 年周期シグナルが見られないことについては、このケースでは千島列島周囲における強い鉛直混合が海面付近にまで達していないためと考えられる。

数値モデルにおける海洋中の波動伝播や黒潮・黒潮続流の構造の再現性は水平解像度に大きく依存する。1 度程度の水平解像度では、現実的な成層のもとでの傾圧第 1 モードのケルビン波の伝播速度には大きな誤差が生じ、また黒潮の離岸緯度が北緯 40 度程度という高緯度になり、黒潮続流の位置もそれに応じた誤差を持つ。こうした問題のため、18.6 年周期潮汐の気候影響を扱う上では、より高解像度の海洋モデルを用いた評価もする必要がある。ここでは水平解像度 1/4 度という、いわゆる渦許容海洋モデルを用いて大気海洋結合モデルを構築し、潮汐振動を導入した実験を実施した。IPO 指数のパワースペクトルには 18.6 年周期あたりに有意ではないもののピークが検出された。しかし、IPO と潮汐との位相関係は観測や先行モデリング研究とは逆であり、潮汐最大時期から数年遅れて IPO が正の位相となってしまう。観測と不整合なこの位相関係は、上述した低解像度のモデル実験での結果と同じである。北太平洋中緯度で励起される水温偏差の分布、熱帯での海洋波動伝搬速度など、原因となりそうなプロセスに着目して解析や追加実験を実施しているが、現状、問題の解決には至っていない

#### < 引用文献 >

1. Davies, J. H., 2013. Global map of solid Earth surface heat flow. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14, 4508-4622.
2. Hasumi, H., I. Yasuda, H. Tatebe and M. Kimoto, 2008. Pacific bidecadal climate variability regulated by tidal mixing around the Kuril Islands. *Geophysical Research Letters*, 35, L14601.
3. Niwa, Y., and T. Hibiya, 2014. Generation of baroclinic tide energy in a global three-dimensional numerical model with different spatial grid resolutions. *Ocean Modelling*, 80, 59-73.
4. Roemmich, D., S. Hautala and D. Rudnick, 1996. Northward abyssal transport through the Samoan passage and adjacent regions. *Journal of Geophysical Research*, 101, 14039-14055.
5. Tanaka, Y., I. Yasuda, H. Hasumi, H. Tatebe and S. Osafune, 2012. Effects of the 18.6-yr modulation of tidal mixing on the North Pacific bidecadal climate variability in a coupled climate model. *Journal of Climate*, 25, 7625-7642.
6. Voet, G., M. H. Alford, J. B. Girton, G. S. Carter, J. B. Mickett and J. M. Klymak, 2016. Warming and weakening of the abyssal flow through Samoan Passage. *Journal of Physical Oceanography*, 46, 2389-2401.
7. Previdi, M., K. L. Smith and L. M. Polvani, 2015. How well do the CMIP5 models simulate the Antarctic atmospheric energy budget? *Journal of Climate*, 28, 7933-7942.
8. Tsujino, H., H. Hasumi and N. Sugihara, 2000. Deep Pacific circulation controlled by vertical diffusivity at the lower thermocline depths. *Journal of Physical Oceanography*, 30, 2853-2865.
9. Tatebe, H., Y. Tanaka, Y. Komuro and H. Hasumi, 2018. Impact of deep ocean mixing on the climatic mean state in the Southern Ocean. *Scientific Reports*, 8, 14479.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Kusahara Kazuya, Williams Guy D., Massom Robert, Reid Philip, Hasumi Hiroyasu	4. 巻 52
2. 論文標題 Spatiotemporal dependence of Antarctic sea ice variability to dynamic and thermodynamic forcing: a coupled ocean?sea ice model study	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Climate Dynamics	6. 最初と最後の頁 3791 ~ 3807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00382-018-4348-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kusahara Kazuya, Reid Phillip, Williams Guy D, Massom Robert, Hasumi Hiroyasu	4. 巻 13
2. 論文標題 An ocean-sea ice model study of the unprecedented Antarctic sea ice minimum in 2016	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Environmental Research Letters	6. 最初と最後の頁 084020 ~ 084020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-9326/aad624	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Tatebe Hiroaki, Tanaka Yuki, Komuro Yoshiki, Hasumi Hiroyasu	4. 巻 8
2. 論文標題 Impact of deep ocean mixing on the climatic mean state in the Southern Ocean	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-32768-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hirota Nagio, Ogura Tomoo, Tatebe Hiroaki, Shiogama Hideo, Kimoto Masahide, Watanabe Masahiro	4. 巻 31
2. 論文標題 Roles of Shallow Convective Moistening in the Eastward Propagation of the MJO in MIROC6	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 3033 ~ 3047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JCLI-D-17-0246.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ono J., Tatebe H., Komuro Y.	4. 巻 32
2. 論文標題 Mechanisms for and Predictability of a Drastic Reduction in the Arctic Sea Ice: APPOSITE Data with Climate Model MIROC	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 1361 ~ 1380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JCLI-D-18-0195.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Abe Hiroto, Ebuchi Naoto, Ueno Hiromichi, Ishiyama Hiromu, Matsumura Yoshimasa	4. 巻 75
2. 論文標題 Aquarius reveals eddy stirring after a heavy precipitation event in the subtropical North Pacific	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 37 ~ 50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-018-0482-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujiwara Yasushi, Yoshikawa Yutaka, Matsumura Yoshimasa	4. 巻 48
2. 論文標題 A Wave-Resolving Simulation of Langmuir Circulations with a Nonhydrostatic Free-Surface Model: Comparison with Craik-Leibovich Theory and an Alternative Eulerian View of the Driving Mechanism	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physical Oceanography	6. 最初と最後の頁 1691 ~ 1708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JPO-D-17-0199.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatebe Hiroaki and co-authors	4. 巻 -
2. 論文標題 Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development Discussions	6. 最初と最後の頁 1 ~ 92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/gmd-2018-155	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatebe Hiroaki, Kurogi Masao, and Hasumi Hiroyasu	4. 巻 30
2. 論文標題 Atmospheric responses and feedback to the meridional ocean heat transport in the North Pacific	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 5715-5728
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JCLI-D-16-0055.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyakawa, H., Yashiro, H., Suzuki, T., Tatebe, H., and Satoh, M.	4. 巻 44
2. 論文標題 A Madden-Julian Oscillation event remotely accelerates ocean upwelling to abruptly terminate the 1997/1998 super El Nino	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 9489-9495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL074683	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogura Tomoo, Shiogama Hideo, Watanabe Masahiro, Yoshimori Masakazu, Yokohata Tokuta, Annan James D., Hargreaves Julia C., Ushigami Naoto, Hirota Kazuya, Someya Yu, Kamae Youichi, Tatebe Hiroaki, Kimoto Masahide	4. 巻 10
2. 論文標題 Effectiveness and limitations of parameter tuning in reducing biases of top-of-atmosphere radiation and clouds in MIROC version 5	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development	6. 最初と最後の頁 4647 ~ 4664
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/gmd-10-4647-2017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kusahara Kazuya, Williams Guy D., Massom Robert, Reid Phillip, Hasumi Hiroyasu	4. 巻 158
2. 論文標題 Roles of wind stress and thermodynamic forcing in recent trends in Antarctic sea ice and Southern Ocean SST: An ocean-sea ice model study	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Global and Planetary Change	6. 最初と最後の頁 103 ~ 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gloplacha.2017.09.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Obase, T., Abe-Ouchi, A., Kusahara, K., Hasumi, H., and Ohgaito, R.	4. 巻 30
2. 論文標題 Responses of basal melting of Antarctic ice shelves to the climatic forcing of the Last Glacial Maximum and CO2 doubling	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 3473-3497
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JCLI-D-15-0908.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyamoto Masatoshi, Oka Eitarou, Yanagimoto Daigo, Fujio Shinzou, Mizuta Genta, Imawaki Shiro, Kurogi Masao, Hasumi Hiroyasu	4. 巻 123
2. 論文標題 Characteristics and mechanism of deep mesoscale variability south of the Kuroshio Extension	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Deep Sea Research I	6. 最初と最後の頁 110 ~ 117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dsr.2017.04.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujimori Shinichiro, Abe Manabu, Kinoshita Tsuguki, Hasegawa Tomoko, Kawase Hiroaki, Kushida Kazuhide, Masui Toshihiko, Oka Kazutaka, Shiogama Hideo, Takahashi Kiyoshi, Tatebe Hiroaki, Yoshikawa Minoru	4. 巻 12
2. 論文標題 Downscaling Global Emissions and Its Implications Derived from Climate Model Experiments	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PLOS One	6. 最初と最後の頁 e0169733
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0169733	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Imada Yukiko, Tatebe Hiroaki, Watanabe Masahiro, Ishii Masayoshi, Kimoto Masahide	4. 巻 6
2. 論文標題 South Pacific influence on the termination of El Nino in 2014	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 30341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/srep30341	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Griffies Stephen M. 他38名 (Komuro Yoshiki を含む)	4. 巻 9
2. 論文標題 OMIP contribution to CMIP6: experimental and diagnostic protocol for the physical component of the Ocean Model Intercomparison Project	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development	6. 最初と最後の頁 3231 ~ 3296
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/gmd-9-3231-2016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yokoyama Yusuke, Anderson John B., Yamane Masako, Simkins Lauren M., Miyairi Yosuke, Yamazaki Takahiro, Koizumi Mamito, Suga Hisami, Kusahara Kazuya, Prothro Lindsay, Hasumi Hiroyasu, Southon John R., Ohkouchi Naohiko	4. 巻 113
2. 論文標題 Widespread collapse of the Ross Ice Shelf during the late Holocene	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Science	6. 最初と最後の頁 2354 ~ 2359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.1516908113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiraike Yuri, and Hasumi Hiroyasu	4. 巻 121
2. 論文標題 Subduction of Pacific Antarctic Intermediate Water in an eddy resolving model	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research Oceans	6. 最初と最後の頁 133-147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2015JC010802	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawasaki Takao, and Hasumi Hiroyasu	4. 巻 121
2. 論文標題 The inflow of Atlantic water at the Fram Strait and its interannual variability	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research Oceans	6. 最初と最後の頁 502-519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2015JC011375	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Imada, Y., H. Tatebe, M. Ishii, Y. Chikamoto, M. Mori, M. Arai, M. Watanabe and M. Kimoto	4. 巻 143
2. 論文標題 Predictability of two types of El Nino assessed using an extended seasonal prediction system by MIROC	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Monthly Weather Review	6. 最初と最後の頁 4597-4617
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/MWR-D-15-0007.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuda, J., H. Mitsudera, T. Nakamura, Y. Sasajima, H. Hasumi and M. Wakatsuchi	4. 巻 120
2. 論文標題 Overturning circulation that ventilates the intermediate layer of the Sea of Okhotsk and the North Pacific: the role of salinity advection	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research Oceans	6. 最初と最後の頁 1462-1489
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2014JC009995	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Urakawa, L. S., M. Kurogi, K. Yoshimura and H. Hasumi	4. 巻 71
2. 論文標題 Modeling low salinity waters along the coast around Japan using a high resolution river discharge data set	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 715-739
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-015-0314-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakanowatari, T., T. Nakamura, K. Uchimoto, H. Uehara, H. Mitsudera, K. I. Ohshima, H. Hasumi and M. Wakatsuchi	4. 巻 28
2. 論文標題 Causes of the multidecadal-scale warming of the intermediate water in the Okhotsk Sea and western subarctic North Pacific	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 714-736
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JCLI-D-14-00172.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計31件(うち招待講演 0件/うち国際学会 22件)

1. 発表者名 Kawasaki Takao
2. 発表標題 Effect of remote tidal mixing on the Pacific meridional overturning circulation
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Matsumura Yoshimasa
2. 発表標題 An application of a Lagrangian-Eulerian dispersed multiphase flow model to riverine discharge
3. 学会等名 JpGU annual meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatebe Hiroaki
2. 発表標題 Tropical air-sea flux variations in two ESMs with an ocean data assimilation system
3. 学会等名 CMIP6 model analysis workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浦川昇吾
2. 発表標題 海洋大循環のエネルギー収支に関する数値モデリング研究
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 建部洋晶
2. 発表標題 気候モデルの典型的系統誤差と海洋微細過程との関連及びその含意
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Komuro Yoshiki
2. 発表標題 A preliminary hindcast experiment for CMIP6/OMIP using COC04.9: comparison with a case forced by a new dataset JRA55-do
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Urakawa Shogo
2. 発表標題 Global ocean model development for CMIP6 in Meteorological Research Institute and its performance in reproducing ocean general circulation
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kawasaki Takao
2. 発表標題 Effect of tide-induced mixing on shallow Pacific Ocean circulation
3. 学会等名 IAPSO-IAMAS-IAGA Joing Assembly (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hasumi Hiroyasu
2. 発表標題 Prediction and predictability of the Arctic climate
3. 学会等名 Arctic Circle Assembly (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kawasaki Takao
2. 発表標題 The Arctic water inflow through the Fram Strait in a climate model
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Arctic Research (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Urakawa Shogo
2. 発表標題 Reproducibility of BMOC in a global ocean model: sensitivity on isopycnal diffusion scheme
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川崎高雄
2. 発表標題 太平洋深層循環のモデリング研究
3. 学会等名 国際沿岸海洋研究センター研究集会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浦川昇吾
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kawasaki Takao
2. 発表標題 Modeling the Atlantic water inflow to the Arctic Ocean through the Fram Strait and the Barents Sea
3. 学会等名 Japan-Norway Arctic Science & Innovation Week (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Matsumura Yoshimasa
2. 発表標題 Lagrangian frazil ice model and its application to a coastal polynya simulation
3. 学会等名 Japan-Norway Air-Sea Interaction Workshop (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kawasaki Takao
2. 発表標題 Ocean modeling study on Atlantic Water inflow to the Arctic Ocean
3. 学会等名 Japan-Norway Air-Sea Interaction Workshop (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hasumi Hiroyasu
2. 発表標題 Arctic physical oceanography in Japan
3. 学会等名 Japan-Norway Air-Sea Interaction Workshop (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tatebe Hiroaki
2. 発表標題 Centennial climate reanalysis using a climate model MIROC with LETKF system
3. 学会等名 International workshop on coupled data assimilation (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hasumi Hiroyasu
2. 発表標題 Sea ice representation in climate models
3. 学会等名 Workshop on Sea Ice Remote Sensing and Modeling (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kawasaki Takao
2. 発表標題 High resolution modeling on deep Pacific Ocean circulation
3. 学会等名 Internal Symposium "Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate and Ecosystem" (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hasumi Hiroyasu
2. 発表標題 Model development and impact assessment for ocean circulation, marine material cycles and climate by incorporating the effect of oceanic vertical mixing
3. 学会等名 Internal Symposium "Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate and Ecosystem" (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川崎高雄
2. 発表標題 バレンツ海における水塊変質とその経年変動に関するモデリング研究
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 川崎高雄
2. 発表標題 太平洋深層循環の高解像度モデリング
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 浦川昇吾
2. 発表標題 深層循環に対する海底熱源の影響についての再検証
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 建部洋晶
2. 発表標題 地球温暖化の進行から予期される異常気象発生頻度の変化
3. 学会等名 第22回ビジュアルイゼーションカンファレンス
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Matsumura, Y., M. Ito and K. I. Ohshima
2. 発表標題 Modeling sediment entrainment into newly formed sea ice
3. 学会等名 The 6th Symposium on Polar Sciences (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Hasumi, H.
2. 発表標題 Coordinated observational and modeling studies on the basic structure and variability of the Arctic sea ice-ocean system
3. 学会等名 The 6th Symposium on Polar Sciences (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Kawasaki, T., and H. Hasumi
2. 発表標題 Interannual variability of Atlantic Water inflow and modification in the Barents Sea
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 松村義正、大橋良彦、青木茂、杉山慎
2. 発表標題 グリーンランド氷河融解水を起源とする高濁度水ブルームのモデリング
3. 学会等名 日本海洋学会春季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tatebe, H., Y. Kosaka, K. Lestari and Y. Imada
2. 発表標題 Slowdown and accelerations of surface global warming due to tropical Pacific internal variability: A multi-model intercomparison
3. 学会等名 Workshop on CMIP5 model analysis and scientific plans for CMIP6 (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Tatebe, H.
2. 発表標題 On the development of MIROC6 for the IPCC AR6
3. 学会等名 Joint US-Japan workshop on climate change and variability (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	建部 洋晶  (Tatebe Hiroaki)  (40466876)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・気候モデル高度化研究プロジェクトチーム・ユニットリーダー   (82706)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	松村 義正  (Matsumura Yoshimasa)  (70631399)	東京大学・大気海洋研究所・助教    (12601)	
研究 分担者	小室 芳樹  (Komuro Yoshiki)  (90396945)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究 センター・ユニットリーダー    (82706)	
連携 研究者	川崎 高雄  (Kawasaki Takao)  (00716764)	東京大学・大気海洋研究所・特任助教    (12601)	
連携 研究者	浦川 昇吾  (Urakawa Shogo)  (00733916)	気象庁気象研究所・海洋研究部・研究官    (82109)	