

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03741

研究課題名（和文）近慣性運動に起因する海洋内部の強鉛直混合域が海盆規模の循環と物質分布に及ぼす影響

研究課題名（英文）Effects of strong vertical mixing regions in the ocean interior caused by near-inertial motions on the basin scale circulation and material distributions

研究代表者

千手 智晴（Senjyu, Tomoharu）

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：60335982

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,600,000円

研究成果の概要（和文）：深海での海水混合を調べるため、日本海の深層に流速計を設置し、長期間にわたる流れを測定した。その結果、間欠的に流速が強まる期間が存在し、その期間中は深さ方向に流速が変化していた。これは風によって励起され、海中を上下に伝播する内部波が重なり合った結果で、深海での海水混合の一因と考えられる。また水温の長期観測データと数値モデル実験の結果から、鉛直混合の評価には地球温暖化の影響を考慮しなくてはならないことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海洋中の鉛直混合は気候変動を支配する重要な要素の一つであるが、それには風により励起された海中の内部波が大きく関わっている。しかし深海での内部波の構造や挙動には不明な点が多い。本研究では実際に深海に流速計を設置し、どのような仕組みで流れが強まり、混合が起こるのかを調べた。研究の結果、海底付近では上下に伝わる内部波が重なり合い、一時的に流れを強めることにより、局所的な混合が強化されるという新しいメカニズムが明らかになった。また放射性炭素などの化学トレーサー分布や、広域かつ長期間にわたる海洋観測データ、数値モデル実験の結果から、深海での海水混合の評価には地球温暖化の影響が無視できないことが示された。

研究成果の概要（英文）：Deep currents in the Japan Sea were observed for a long time to investigate mixing processes in the deep oceans. The observational results revealed intermittent occurrence of strong flow periods with vertically varying flow speed. The observed vertical flow structure is caused by a superposition of wind-generated, upward- and downward-propagating internal waves, which is a cause of deep sea mixing. In addition, long-term hydrographic data and numerical simulations showed that the influence of global warming should be taken into consideration in the evaluation of vertical mixing in the oceans.

研究分野：海洋物理学

キーワード：近慣性内部波 日本海 乱流混合 深層循環 係留観測 水塊変質 地球温暖化

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) 海洋中の内部波の中でも慣性周期に近い周期をもつ波動(近慣性内部重力波、以後 NIW と略記)は、海洋内部の混合に大きく寄与すると考えられるが、深海での NIW の構造や伝播過程、NIW が混合に寄与するプロセスには不明な点が多い。その理由の一つとして、深海では時空間的に高分解能かつ長期間にわたる観測が行われてこなかったことが挙げられる。

(2) 研究代表者は 2014~2016 年度に科研費(挑戦的萌芽研究)の補助を受け、日本海南部の大和海盆と対馬海盆において、観測時間間隔を短く(1 分間隔)セットした流速計を鉛直的に密に配置した係留観測を季節を変えて 4 回実施した。その結果、深海の NIW には数日間にわたって振幅が増大する期間(イベント)が間欠的に発生していること、鉛直的にも流速の振幅に変化が認められること等の特徴を見出した。しかしながら、高い時間分解能を実現するために観測期間を 10 日間程度に短縮せざるを得ず、また空間的にも振幅変化の全体像を捉えるほどの観測を実施することができなかった。

2. 研究の目的

海洋中の鉛直混合は全球的な熱塩循環のパターンや強度を規定する重要な因子であるが、空間的に一様ではなく、局所的な強混合域が偏在している。熱塩循環においては上層からの熱拡散と下層からの熱移流が本質的であることから、強鉛直混合域と大循環は一体的な系を成すと考えられるが、両者の関係は明らかではない。本研究では、風によって励起された NIW が深海に局所的な強鉛直混合域を形成するメカニズムと、ローカルな強鉛直混合域が海盆規模の海水循環や水塊変質、物質分布に与える影響を解明する。

3. 研究の方法

NIW は主に海上風によって励起され、世界中の海洋に普遍的に存在するが、本研究では潮汐の影響が小さく、南北方向に境界が存在し、さらに現場観測が可能な「日本海」に注目した。日本海には独自の熱塩循環機構が存在するため、深海での海水混合が水塊変質を通して熱塩循環に及ぼす影響を調べるのにも好都合である。

(1) 風起源の NIW が深海に強鉛直混合域を形成する機構を調べるために、超音波流速プロファイラー(ADCP)と複数の流速計を組み合わせた係留観測を実施した。研究開始時には、気象擾乱や表層の中規模擾乱が中・深層への NIW の伝播に与える影響を捉えることを目的とした長期係留観測(計測インターバル 30 分、係留期間 7 ヶ月)と、NIW の水平・鉛直伝播を捉えることを目的とした短期集中係留観測(計測インターバル 1 分で、2 地点での係留を数日間行う)を計画したが、新型コロナウイルス感染症拡大の影響で航海計画に中止・変更が生じたため、大和海盆における約 1 年間にわたる長期係留観測(2019 年 10 月~2020 年 11 月)と、5 ヶ月間にわたる 2 地点での短期係留観測(2021 年 5 月~10 月)を実施した。これらを補うため、2014~2016 年に大和海盆と対馬海盆で実施した深海係留観測データの解析も行った。また 2018 年 10 月には、大和海盆において乱流計と船舶搭載 ADCP による NIW 観測も実施した。

(2) 水温・塩分などの海水特性に加え、溶存酸素や栄養塩、放射性炭素(^{14}C)、トリチウム(^3H)等の化学トレーサの深海における鉛直分布を高解像度に測定し、鉛直移流 拡散バランスを仮定した一次元モデルから、鉛直拡散係数と鉛直移流速度を見積もった。サンプリングは 2018 年 10 月、2019 年 10 月、2021 年 5 月に実施したが、2010~2011 年に日本海盆、大和海盆で得られた観測データも解析した。

(3) 日本海全体の混合・水塊変質を明らかにするため、船舶観測および Argo フロートによって日本海の広域で得られた水温・塩分のプロファイルデータを解析した。当初は水温プロファイルのスペクトルに基づく鉛直拡散係数の推定を試みたが、Argo フロートの鉛直分解能に問題があり、この方法ではうまく行かなかった。そこで長期間にわたる海水特性(水温、塩分、密度)の変動から、逆に海盆スケールでの水塊変質を明らかにし、それに及ぼす鉛直拡散の影響を調べた。この方針変更にともない、水平過程に重きを置いた海水循環に関する数値実験の代わりに、鉛直過程に重点を置いた水温の鉛直分布に関する非定常数値実験を行い、鉛直移流 鉛直拡散に関するメカニズムを考察した。

4. 研究成果

(1) 深海での近慣性運動の鉛直構造と海水混合

初めに 2014~2016 年に日本海南部の大和海盆と対馬海盆で実施した係留観測の結果を解析した。慣性周期帯($0.9 \sim 1.2f$)の変動のみを透過する band-pass filter を用いて近慣性運動を抽出したところ、5 日程度の時間スケールをもつイベントが間欠的に生じていることが示された。イベント時の流速振幅には鉛直的な構造が認められ(Fig. 1)、これにともなう水平流の鉛直シアにより、イベントと同期した Richardson 数が小さな期間が現れることが示された(Fig. 2)。このことは、NIW のイベントが深海での鉛直混合を促進していることを示唆する。観測された

近慣性運動の鉛直構造を説明する仮説として、海上で励起され下向きに伝播する NIW と、それらが海底で反射することによって生じた上向きに伝播する NIW の部分的な重ね合わせによる振幅変調（干渉）が考えられる（Fig. 3）。この場合、干渉波の節では水平流速がゼロとなり、節を挟んだ上層と下層で流向が反転する構造が現れる。しかし、この時の観測は海底付近の流速構造に着目したものであったため、上記のような流速の鉛直構造を示すことができなかった。

そこで、5 台の流速計と 1 台の ADCP を組み合わせ、海底付近（2870m）から 1000m 深までの流れを捉えることのできる係留系を大和海盆西部に設置した。係留期間は 2019 年 10 月から、2020 年 11 月までの約 13 ヶ月間である。観測の結果、NIW イベントは周年にわたって発生しているが、冬季に振幅の大きなイベントが頻発することが示された。ほとんどの NIW イベントで流速分布に鉛直的な構造が認められ、いくつかのイベントでは上述の仮説を支持する結果が得られた。例として 2019 年 10 月 10 日～30 日の東西流速成分のホフメラー図を示す（Fig. 4 上段）。10 月 15 日頃より全体的に流速が強まっているが、1900m 深付近では逆に流速が小さな領域が現れ、10 月 23 日以降にはそれが上下に分離する様子がみられる。10 月 20 日（図中の黒い実線）における東西流速の鉛直分布を Fig. 4 の右側に示す。1900m 深付近では水平流速がほとんどゼロとなり、その上層と下層で流向が逆転している様子がわかる。流速の時空間変化に注目した 2 次元フーリエ変換・逆変換により、上向き・下向きに伝播する成分を分離した。

Fig. 4 の中段が下向き伝播成分、下段が上向き伝播成分であるが（連続成層下での内部波においては、位相速度と群速度の鉛直成分の方向は逆になるので注意）これらには流速が弱まる層（節）は存在せず、観測された 1900m 深付近の節の構造は上向き・下向きに伝播する NIW の流れが相殺した結果生じたものであることがわかる（Fig. 4 右図）。底層での流れが強化される直前（10 月 14 日）まで、上向き伝播成分の振幅が小さい（すなわち反射波が存在しない）ことも、この仮説を支持する。以上の観測結果は、海洋深層では上層から伝播した下向き NIW と海底反射した上向き NIW が重なり合うことによって一時的に流速の鉛直シアが強化され、それが深海での局所的な鉛直混合を強化する、という新しいメカニズムを示唆している。

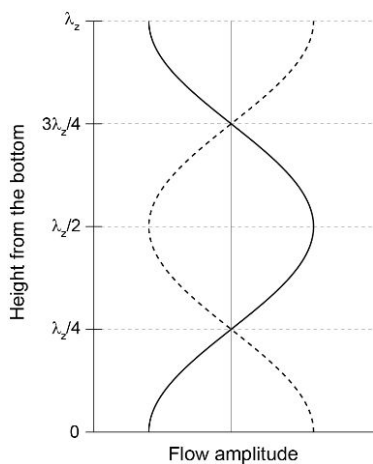


Fig. 3 上下に伝播する NIW が干渉した結果生じる水平流の振幅の鉛直分布の概念図。破線は 1/2 周期後の振幅分布を示す。

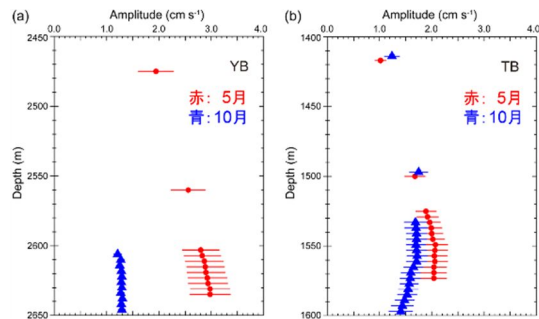


Fig. 1 大和海盆（左）と対馬海盆（右）の深層で観測された近慣性流の振幅の鉛直変化（2014～2016 年）

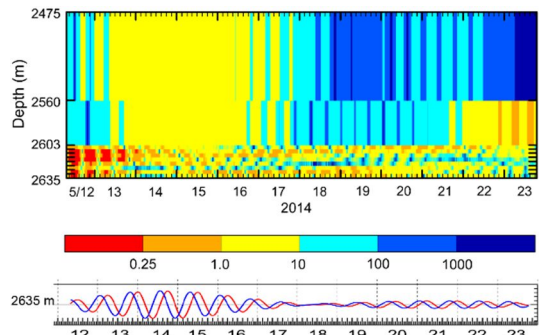


Fig. 2 大和海盆深層における Richardson 数の時間—深度図（上段）と 2635m 深での流速変化（下段）

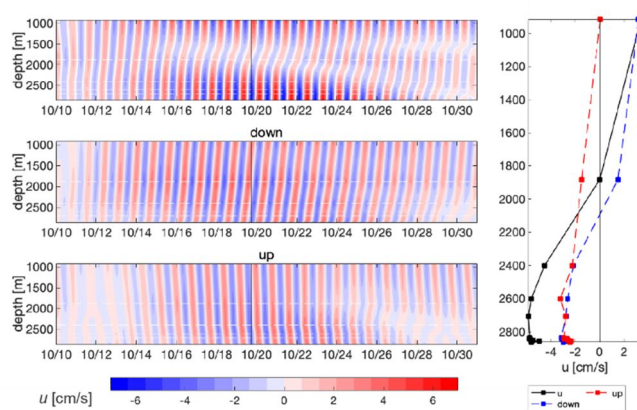


Fig. 4 大和海盆深層における近慣性流（東西成分）の時間—深度図。上段：観測値，中段：下向き伝播成分，下段：上向き伝播成分。右の図は 10 月 20 日における各成分の流速の鉛直分布（黒：観測値，赤：上向き伝播成分，青：下向き伝播成分）。

NIW の水平・鉛直的な伝播過程を調べるため、南北に約 9km 離れた大和海盆西部の 2 地点に流速計を係留し、2021 年 5 月 12 日～10 月 10 日の約 5 ヶ月間にわたって直接測流を行った。係留観測に先立ち、前年に観測された密度場のもとで、様々な周波数、水平波数をもつ NIW について伝播経路のシミュレーションを行い、その結果に基づいて流速計の配置やサンプリング間隔を決定した。南側測点 (PM5-S) で得られた近慣性流の東西成分のホフメラー図と北側測点 (PM5-N) の最上層 (1109m) の近慣性流速 (東西成分) の時系列図を比較すると (Fig. 5)、両測点とも観測期間の序盤と終盤に複数のイベントがみられるが、両地点のイベントの発生時期には時間差が認められる。事前のシミュレーションでは、PM5-N の 1000m 付近を通過した NIW は数日遅れて PM5-S の 2000m 以深に到達していた。観測結果は概ねこの特徴を示しているが、両地点のイベントは必ずしも一対一で対応していない。これは観測点の密度分布に時間変動が存在するためと考えられ、実際、観測期間中に当該海域を暖水渦が通過したことが人工衛星の海面高度計データから明らかにされている。躍層やフロントなどの密度変化の大きな領域では NIW の伝播経路は屈折し、さらに負の渦度領域では NIW のエネルギーがフロント域に捕捉されて、効率的に深層まで伝播することが知られている¹⁾。渦活動の活発な大和海盆では特にこの機構が重要と考えられ、これが深海での鉛直混合の hotspot の形成に寄与していると考えられる。

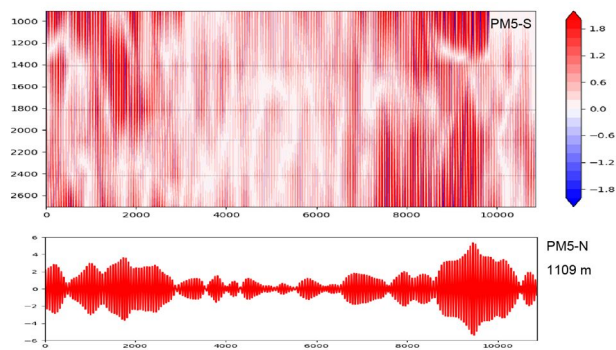


Fig. 5 南側測点 (PM5-S) における近慣性流 (東西成分) の時間-深度図 (上段) と北側測点 (PM5-N) の 1109m における東西流速時系列。

(2) 海水特性分布からの鉛直拡散の評価

初めに 2010～2011 年に日本海盆と大和海盆で得られた観測結果を解析した。定常な鉛直一次元の移流 拡散バランスを仮定し、各海盆の 1000～2500m で得られたポテンシャル水温の平均プロファイルと ¹⁴C の鉛直分布から鉛直拡散係数 (κ) と鉛直移流速度 (w) を見積もった²⁾。その結果、鉛直拡散係数については大和海盆の方が日本海盆に比べて一桁小さな値となり、それに対応して鉛直移流速度も大和海盆の方が小さくなった (Table 1)。この結果は当初の「大和海盆の方が日本海盆よりも鉛直拡散が大きい」という予測を裏切るものであるが、鉛直拡散係数、鉛直移流速度とも、既往の研究から推測される値の 1/10 程度となっている。このような結果が得られた原因として、水平移流の影響が考えられる。実際、2018 年、2019 年に大和海盆で得られた ¹⁴C のプロファイルを見ると、これまで一様とされてきた 2000m 以深の領域においてすら水平的な異水塊の貫入を示唆する分布が認められる (Fig. 6)。また、日本海は温暖化の影響で深層水・底層水の形成が停滞していることが報告されており³⁾、前提となる定常な鉛直一次元の過程が正確には成り立っていない。

Table 1 推定された鉛直拡散係数と鉛直移流速度

	鉛直拡散係数 κ ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	鉛直流速 w (m s^{-1})
日本海盆	0.334×10^{-4}	0.715×10^{-7}
大和海盆	0.570×10^{-5}	0.152×10^{-7}

そこで、鉛直移流速度をパラメータとした水温鉛直分布に関する非定常な数値実験を行った。鉛直移流と鉛直拡散がバランスした状態から鉛直移流速度を 1/4 に減少させたときの水温の鉛直分布の時間変化を Fig. 7 に示す。プロファイルの形は κ と w の比 (w/κ) で決まるので、これは鉛直拡散係数を大きくしたことに対応する。実験 1 は $t = 0$ で w を 1/4 にした場合、実験 2 は 30 年かけて直線的に w を 1/4 まで減少させた場合である。実験 1 では最初の 10 年間に大きな水温上昇を示した後、別の定常状態に漸近していくが、実験 2 では各層の水温上昇が加速してゆき、30 年後でも定常状態には達しない。後述するように、実際の水温変動は両者を組み合わせたとような変動を示すことから、海水混合 (鉛直拡散) の評価に温暖化の影響が無視できないことが示された。

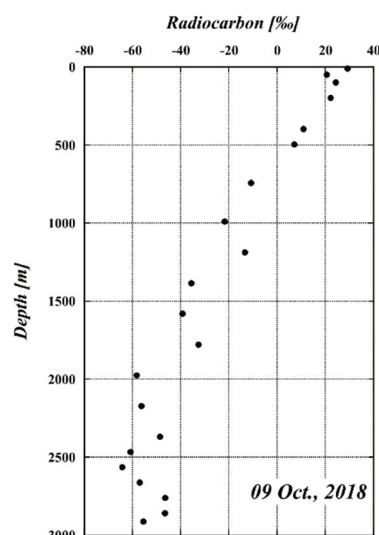


Fig. 6 大和海盆の測点 PM5 で観測された放射性炭素 (¹⁴C) の鉛直分布 (2019 年 10 月)

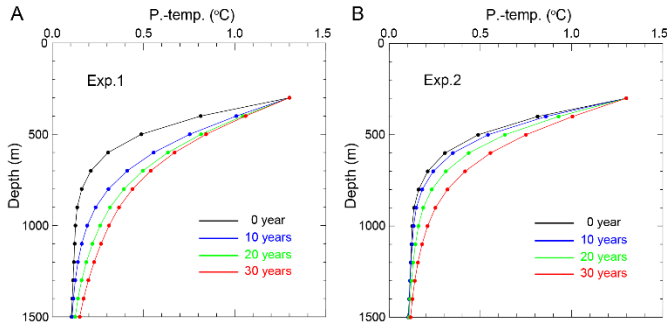


Fig. 7 鉛直移流速度をパラメータとした水温鉛直分布の数値実験結果：(左)実験1, (右)実験2。鉛直流を減少させてからの経過年数を色で示す。

(3) 日本海全域の水塊変質過程

海盆規模での深層水の変質状況を明らかにするため、2001~2019年に得られた Argo フロートによる水温・塩分プロファイルデータ(約16000点)を解析した(Fig. 8)。用いたのは、海洋研究開発機構から提供された AQC Argo data ver. 1.2a である。データのスクリーニングと簡単な塩分補正の後、各海盆・海域を代表する4つの領域(JW, JE, YB, TB)を設定し、各領域の400~700m深のポテンシャル水温、密度の経年変化を調べた。解析の結果、各海域とも有意な水温上昇が認められ(Fig. 9)。それとともに深層水の密度の低下が明らかとなった。これは、基本的には、上述した鉛直熱拡散と鉛直熱移流のアンバランスによるもので、近年の上部固有水の形成の停滞によるものと考えられる。さらに興味深いのは、日本海南部(YB, TB)の水温上昇率が、北部(JW, JE)の上昇率よりも2~3倍大きくなっていったことである。このことは、日本海南部への低温な深層水の供給が弱まっていることを示唆している。

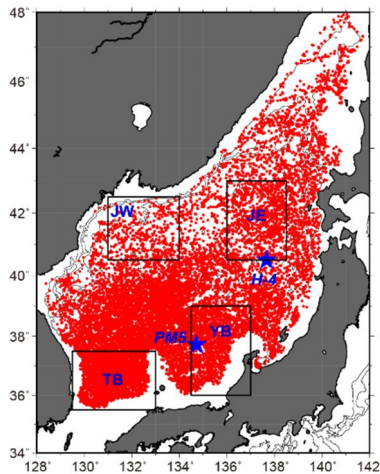


Fig. 8 Argo フロートデータの分布(2001~2019年:赤点)。四角領域は日本海を代表する各領域(JW, JE, YB, TB)。青星印は気象庁による観測定点(H-4, PM5)。

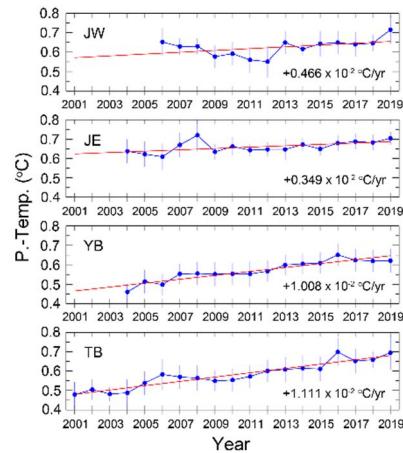


Fig. 9 各領域(JW, JE, YB, TB, Fig. 8 参照)の500m深におけるポテンシャル水温の経年変化。赤線はトレンドで、右下に昇温率を示す。

より長期的な深層水の変質過程を調べるため、気象庁によって日本海盆(H-4)と大和海盆(PM5)で50年間にわたって観測されてきた水温データを解析した(各測点の位置はFig. 8参照)。500m深における水温上昇率の時間変化(Fig. 10上段)をみると、両地点ともほとんどの期間で正の値(昇温)を示しており、特に1980年代末から1990年代半ばにかけて水温上昇が加速している。Fig. 10下段は、(2)で述べた水温鉛直分布の数値実験から得られた水温上昇率の時間変化であるが、現実の水温上昇率の変化の特徴をよく表している。なおこの実験では、上部固有水への水平移流量に対応して鉛直移流速度を変化させているが、先述したように水温プロファイルの形(すなわち各層での水温)は鉛直移流速度と鉛直拡散係数の比に依存している。このことは、将来的に渦活動の増大などによって鉛直拡散係数が増加すると、同様の水温上昇が生じ得ることを示唆している。

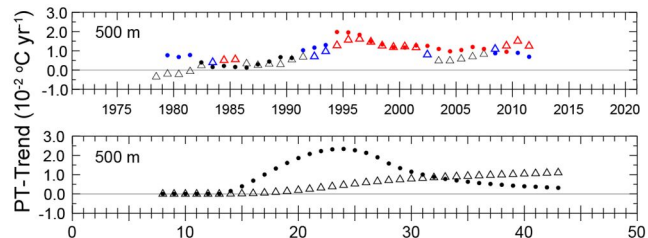


Fig. 10 昇温率の時間変化。上段:観測値(○:H-4, △:PM5),下段:Fig. 7の数値実験による結果(○:実験1, △:実験2)。

参考文献

- 1) Kunze, E. (1985) JPO, 15, 544-565.
- 2) Munk, W.H. (1966) Deep-Sea Res, 13, 707-730.
- 3) Minami, H. et al. (1999) JO, 55, 197-205.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Tomoharu Senjyu	4. 巻 8
2. 論文標題 Changes in mid-depth water mass ventilation in the Japan Sea deduced from long-term spatiotemporal variations of warming trends	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmars.2021.766042	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 Tomoharu Senjyu	4. 巻 78
2. 論文標題 Deep current structure in the Toyama Deep-Sea Channel in the Japan Sea	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 25 - 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-021-00622-5	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 Akie Sakai, Tomoharu Senjyu, Takeshi Matsuno, Eisuke Tsutsumi, and Takahiro Endoh	4. 巻 77
2. 論文標題 Internal waves with high vertical wavenumber structure generated by diurnal tidal flow over the eastern ridge of Luzon Strait	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 703 - 718
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-021-00615-4	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 Takeyoshi Nagai, Daisuke Hasegawa, Eisuke Tsutsumi, Hirohiko Nakamura, Ayako Nishina, Tomoharu Senjyu, Takahiro Endoh, Takeshi Matsuno, Ruyichiro Inoue, and Amit Tandon	4. 巻 2
2. 論文標題 The Kuroshio flowing over seamounts and associated submesoscale flows drive 100-km-wide 100-1000-fold enhancement of turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications earth & environment	6. 最初と最後の頁 1 - 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43247-021-00230-7	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 酒井秋絵・千手智晴	4. 巻 53(7)
2. 論文標題 日本海長期観測定点PM5における深層流の特徴	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 月刊海洋 総特集：日本海研究の最前線	6. 最初と最後の頁 386 - 391
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 荒巻能史	4. 巻 53(7)
2. 論文標題 日本海の放射性炭素の分布	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 月刊海洋 総特集：日本海研究の最前線	6. 最初と最後の頁 351 - 358
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 千手智晴・川口悠介	4. 巻 53(7)
2. 論文標題 総論：日本海研究の最前線	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 月刊海洋 総特集：日本海研究の最前線	6. 最初と最後の頁 339 - 342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Tomoharu Senjyu and Hong-Ryeol Shin	4. 巻 126
2. 論文標題 Flow intensification due to the superposition of near-inertial internal waves in the abyssal Yamato and Tsushima Basins of the Japan Sea (East Sea)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research, Oceans	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JC016647	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 Yusuke Kawaguchi, Taku Wagawa, Itsuka Yabe, Daiki Ito, Tomoharu Senjyu, Sachihiko Itoh, and Yusuke Igeta	4. 巻 77
2. 論文標題 Mesoscale-dependent near-inertial internal waves and microscale turbulence in the Tsushima Warm Current	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 155-171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-020-00583-1	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 Tomoharu Senjyu	4. 巻 -
2. 論文標題 The Japan Sea: a changing Pacific Asian marginal sea	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Evolution of Marine Coastal Ecosystems under the Pressure of Global Changes, Ceccaldi HJ., Henocque Y., Komatsu T., Prouzet P., Sautour B., Yoshida J. (eds)	6. 最初と最後の頁 41-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-43484-7_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 -

1. 著者名 Tomoharu Senjyu	4. 巻 -
2. 論文標題 Long-Term Changes in the Abyssal Japan Sea (East Sea): A Physical View	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Changing Asia-Pacific Marginal Seas, C.-T. A. Chen and X. Guo (eds.)	6. 最初と最後の頁 69-85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-15-4886-4_5	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 D. Hasegawa, T. Matsuno, E. Tsutsumi, T. Senjyu, T. Endoh, T. Tanaka, N. Yoshie, H. Nakamura, A. Nishina, T. Kobari, T. Nagai, and X. Guo	4. 巻 48
2. 論文標題 How a small reef in the Kuroshio cultivates the ocean	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	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) 10.1029/2020GL092063	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 Eisuke Tsutsumi, Takeshi Matsuno, Sachihiko Itoh, Jing Zhang, Tomoharu Senjyu, Akie Sakai, Keunjong Lee, Daigo Yanagimoto, Ichiro Yasuda, Hiroshi Ogawa, and Cesar Villanoy	4. 巻 -
2. 論文標題 Vertical fluxes of nutrients enhanced by strong turbulence and phytoplankton bloom around the ocean ridge in the Luzon Strait	5. 発行年 2020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/s41598-020-74938-5	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 Fang X., Isoda Y., Kudo I., Aramaki T., Imai K., Ebuchi N.	4. 巻 12
2. 論文標題 Behavior of water mass beneath the Tsushima Warm Current in the Japan Sea	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Water	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) 10.3390/w12082184	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 磯田豊, 荒巻能史	4. 巻 70
2. 論文標題 日本海深層水の海水年齢	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 北海道大学水産科学研究彙報	6. 最初と最後の頁 119-132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14943/bull.fish.70.2.119	査読の有無 無
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 Mutsuo Inoue, Ryosei Takehara, Shiori Yamashita, Tomoharu Senjyu, Takami Morita, Shizuho Miki, Seiya Nagao	4. 巻 214
2. 論文標題 Convection of surface water in the northeastern Japan Sea: Implications from vertical profiles of ^{134}Cs concentrations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Marine Chemistry	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j-marchem.2019.05.004	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 長谷川大介、田中雄大、松野健、千手智晴、堤英輔、中村啓彦、仁科文子、小針統、佳枝直樹、郭新宇、長井健容、奥西武、安田一郎	4. 巻 57
2. 論文標題 センサによる硝酸塩鉛直乱流拡散フラックスの計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 沿岸海洋研究	6. 最初と最後の頁 59-64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 伊藤海彦、磯田豊、千手智晴	4. 巻 69
2. 論文標題 日本海深層 Bottom Water 内における Gyroscopic Wave の3波共鳴	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 北大水産彙報	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14943/bull.fish.69.1.1	査読の有無 無
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 千手智晴	4. 巻 83
2. 論文標題 日本海盆東部における深層流の弱化について	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 水産海洋研究	6. 最初と最後の頁 134-135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Atsushi Kaneda, Kouta Ayukawa, Naoki Hirose, Tomoharu Senjyu, Yutaka Kumaki, Yosuke Igeta, Ken-ichi Fukudome, Tatsuro Watanabe	4. 巻 75
2. 論文標題 Intensification of current in coastal waters around Cape Echizen in summer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 157-169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-018-0492-y	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 荒巻能史	4. 巻 83
2. 論文標題 気候変動に伴う日本海の海洋環境変動に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 水産海洋研究	6. 最初と最後の頁 128-129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 荒巻能史	4. 巻 56
2. 論文標題 日本海で進行する気候変動の影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 水産工学	6. 最初と最後の頁 181-184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Tomoharu Senjyu, Jiro Yoshida	4. 巻 5・6
2. 論文標題 A note on the abyssal circulation in the Japan Sea: suggestion from rotating-tank experiments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 La mer	6. 最初と最後の頁 113-123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32211/lamer.56.3-4_113	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 千手智晴、荒巻能史	4. 巻 61
2. 論文標題 ポテンシャル水温と放射性炭素の鉛直分布に基づく日本海深層の鉛直拡散係数の推定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 号外海洋「海洋システムの謎に挑む化学ー蒲生俊敬教授退職記念号」	6. 最初と最後の頁 132-139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計36件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Akie Sakai, Tomoharu Senjyu
2. 発表標題 The vertical structure of near inertial internal waves in the Japan Sea
3. 学会等名 JpGU 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoharu Senjyu
2. 発表標題 Long-term variations in the marginal sea surrounded by Japan, Korea, and Russia
3. 学会等名 WESTPAC: Nothing marginal about the Asian Marginal Seas: the AMS as the central point for unveiling marine environment and productivity changes in a changing climates (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井秋絵、千手智晴
2. 発表標題 日本海大和海盆深層で観測された近慣性内部波の鉛直構造
3. 学会等名 2021年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塩田幸平、千手智晴
2. 発表標題 日本海固有水形成域における温暖化の影響
3. 学会等名 2021年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千手智晴
2. 発表標題 富山深海長谷内部の流れと海水特性
3. 学会等名 2021年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塩田幸平、千手智晴
2. 発表標題 日本海固有水形成域における温暖化について
3. 学会等名 北海道大学低温科学研究所研究集会「縁辺海と外洋とを繋ぐ対馬暖流系の物理・化学・生物過程」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井秋絵、千手智晴
2. 発表標題 大和海盆で観測された近慣性内部波の鉛直・時間構造
3. 学会等名 北海道大学低温科学研究所研究集会「縁辺海と外洋とを繋ぐ対馬暖流系の物理・化学・生物過程」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塩田幸平、千手智晴
2. 発表標題 日本海域のアルゴフロートデータと上部固有水の温暖化
3. 学会等名 水産海洋学会 第10回日本海研究集会「水中グライダー等の新しいモニタリング手法を活用した日本海中部海域における水産海洋研究」 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塩田幸平、千手智晴
2. 発表標題 日本海のArgoフロートと上部固有水の温暖化について
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「東アジア縁辺海の海水循環と生物化学過程」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 付悦、遠藤貴洋、堤英輔、井上龍一郎、長井健容、中村啓彦、仁科文子
2. 発表標題 構造関数法を用いた乱流運動エネルギー散逸率の時系列観測
3. 学会等名 名古屋大学宇宙地球環境研究所共同利用研究集会「海洋乱流の観測およびモデリングに関する研究集会」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千手智晴・銭 玉
2. 発表標題 Argoフロートデータにみられる日本海上部固有水の温暖化
3. 学会等名 日本海洋学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 酒井秋絵・千手智晴
2. 発表標題 気象庁長期観測定点PM5における深層流の特徴
3. 学会等名 日本海洋学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒巻能史・千手智晴・熊本雄一郎
2. 発表標題 日本海のトリチウムを利用した海水循環の解析
3. 学会等名 日本海洋学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊本雄一郎、田副博文、浜島靖典、井上睦夫、千手智晴、荒巻能史
2. 発表標題 日本海深層水中の放射性セシウム/ストロンチウム濃度の2000年代以降の変化
3. 学会等名 日本海洋学会2020年度秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川口悠介・和川拓・矢部いつか・伊藤大樹・井桁庸介・千手智晴・伊藤幸彦
2. 発表標題 日本海佐渡沖集中観測FAT0'19 part-1:多波長物理現象間の相互作用とその可視化
3. 学会等名 日本海洋学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 矢部いつか・川口悠介・和川拓・井桁庸介・伊藤大樹・千手智晴
2. 発表標題 日本海佐渡沖集中観測FAT0'19 part-2:複数の擾乱により発生した近慣性内部波
3. 学会等名 日本海洋学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Qian Yu, Tomoharu Senjyu
2. 発表標題 Long-term Variations in Potential Temperature in the Upper Portion of the Japan Sea Proper Water
3. 学会等名 2020年度日仏海洋学会学術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoharu Senjyu and Hong-Ryeol Shin
2. 発表標題 Flow intensification by the superposition of near-inertial internal waves in the abyssal Japan Sea (East Sea),
3. 学会等名 Ocean Science Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akie Sakai and Tomoharu Senjyu
2. 発表標題 Observation of vertically propagating near-inertial internal waves into the Japan Sea proper water
3. 学会等名 Ocean Science Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeyoshi Nagai, Daisuke Hasegawa, Eisuke Tsutsumi, Hirohiko Nakamura, Tomoharu Senjyu, Takahiro Endoh, Takeshi Matsuno, Ryuichiro Inoue, Amit Tandon, Naoki Yoshie, Kazuki Ohgi, Ayako Nishina, Toru Kobari, Gloria Silvana Duran Gomez and Diego Andre Otero
2. 発表標題 Nutrient Supply Caused by Submesoscale and Microscale Mixing Processes in the Upstream Kuroshio
3. 学会等名 Ocean Science Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi Matsuno, Xinyu Guo, Hirohiko Nakamura, Eisuke Tsutsumi, Tomoharu Senjyu, 他17名
2. 発表標題 Intensified vertical mixing around various sea mounts along the Kuroshio and its contribution to the ecosystem
3. 学会等名 Ocean Science Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千手智晴
2. 発表標題 富山深海長谷の流れについて
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「東アジア縁辺海の海水循環と生物化学過程」,
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千手智晴
2. 発表標題 富山深海長谷の中の流れについて
3. 学会等名 2019年度北海道大学低温科学研究所研究集会「縁辺海と外洋とを繋ぐ対馬暖流系の物理・化学・生物過程」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoharu Senjyu
2. 発表標題 Weakening of deep flow in the eastern Japan Basin
3. 学会等名 The 3rd workshop of WESTPAC W06 on "A framework for cooperative studies in the Western Pacific Marginal Seas: Energy and materials exchange between land and open ocean" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千手智晴
2. 発表標題 富山深海長谷の深層流
3. 学会等名 2019年度日仏海洋学会学術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒巻能史
2. 発表標題 日本海で進行する気候変動の影響
3. 学会等名 2019年度日本水産工学会学術講演会春季シンポジウム「気候変動に対応できる水産工学イノベーションを探る」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千手智晴、吉田次郎
2. 発表標題 回転水槽実験からみた日本海の深層循環
3. 学会等名 金沢大学環日本海域環境研究センター共同利用研究集会「海流が繋ぐ日本周辺縁辺海の海洋循環・物質循環の変動機構」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoharu Senjyu
2. 発表標題 Weakening of deep flow in the eastern Japan Basin in the Japan Sea
3. 学会等名 The 20th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting (PAMS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千手智晴、吉田次郎
2. 発表標題 回転水槽実験によるStommel-Arons型深層循環に対する鉛直壁の効果の検討：日本海深層流分布の解釈への応用
3. 学会等名 2019年度 地球流体力学研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千手智晴、吉田次郎
2. 発表標題 日本海の深層循環に関する一考察：回転水槽実験からの示唆
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「東シナ海と日本海の海水循環と生物化学過程」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千手智晴
2. 発表標題 ローター式流速計と超音波ドップラー流速計の比較実験
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千手智晴
2. 発表標題 日本海盆東部における深層流の弱化について
3. 学会等名 2018年度九州沖縄地区合同シンポジウム「日本海研究の現状と今後について」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千手智晴、磯田豊、申弘烈
2. 発表標題 日本海盆と大和海盆における深層流のrevisit観測
3. 学会等名 日本海洋学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千手智晴、申弘烈
2. 発表標題 日本海大和海盆南縁で観測された地形性ロスビー波の伝播と構造
3. 学会等名 北海道大学低温科学研究所研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒巻能史、久保篤史、中岡慎一郎、熊本雄一郎
2. 発表標題 日本海における人為起源二酸化炭素濃度の推定
3. 学会等名 日本海洋学会2018年度秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒巻能史
2. 発表標題 気候変動に伴う日本海の海洋環境変動に関する研究
3. 学会等名 2018年度九州沖縄地区合同シンポジウム「日本海研究の現状と今後について」（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州大学・研究者情報・千手智晴
<https://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K001842/research.html>

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	荒巻 能史 (Aramaki Takafumi) (00354994)	国立研究開発法人国立環境研究所・地球システム領域・主幹 研究員 (82101)	
研究分担者	遠藤 貴洋 (Endoh Takahiro) (10422362)	九州大学・応用力学研究所・准教授 (17102)	

	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
連携研究者	広瀬 直毅 (Hirose Naoki) (70335983)	九州大学・応用力学研究所・教授 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------