

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610151

研究課題名(和文) 近慣性周期の内部重力波は日本海深層をどのように伝播するか？

研究課題名(英文) How do near-inertial internal gravity waves propagate in the abyssal Japan Sea?

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：海洋深層の海水混合に寄与する近慣性周期の内部重力波(NIW)の伝播過程を調べるため、日本海南東部の大和海盆と南西部の対馬海盆の深層に超音波流速計を係留し、測定時間間隔1分という非常に高い時間分解能で流れを計測した。大和海盆深層では、下層から上層にビーム状に伝播するNIWが観測された。一方、対馬海盆深層ではNIWの他に、反時計回りに流向が変化する日周期の変動が認められた。日本海深層におけるNIWの構造や伝播の特徴、時間変動特性に加え、大和海盆と対馬海盆では流速変動の状況が大きく異なることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：To investigate near-inertial internal waves (NIWs) in abyssal seas, acoustic current meters set at 1-min intervals were moored in the Yamato and Tsushima Basins in southeastern and southwestern part of the Japan Sea, respectively. In the Yamato Basin, NIWs propagating from the lower to upper layers with a beam-like structure were observed. On the other hand, in the Tsushima Basin, a diurnal flow variation with anti-clockwise rotation of the flow direction was observed, as well as NIWs. This study revealed not only the characteristics of structure, propagation, and temporal variability of NIWs in the abyssal Japan Sea, but also the difference of flow conditions between the Yamato and Tsushima Basins.

研究分野：海洋物理学

キーワード：近慣性内部重力波 日本海 深層流 係留観測 大和海盆 対馬海盆 伝播特性

1. 研究開始当初の背景

(1)海洋中の内部重力波の中でも慣性周期に近い周期をもつ波動(近慣性周期の内部重力波(near-inertial internal waves)、以後NIWと略記する)は、海水の混合過程に少なからず寄与していると考えられるが、深海でのNIWの発生・伝播過程には不明な点が多い。その理由の一つとして、これまで深海では時空間的に高い分解能で、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)申請者は2013年5月に日本海大和海盆の2600m深に超音波式多層流速計(ADCP)を係留し、2日間だけではあるが、10秒間隔で流れの鉛直分布を観測した。その結果、約40mの鉛直距離を上層から下層へ向かって位相伝播するNIWを捉えることに成功した。しかし計測期間の短さ故に、その詳細を明らかにすることができなかった。

2. 研究の目的

(1) NIWは世界中の海に存在するが、発生域よりも低緯度方向にしか伝播できないという物理的特性をもつ。したがって、北方に海が広がる日本海沿岸はNIWの観測に適した海域である。また日本海は潮流が小さいため、他の周期帯からの汚染の少ないピュアなNIWを観測することができる。そこで、日本海深層において、NIWの検出に特化した特別な観測を行い、深海におけるNIWの構造や伝播過程、時間変動特性等を明らかにする。

(2)日本海南部には南東部の大和海盆と、南西部の対馬海盆の二つの海盆が存在するが、それぞれ異なる海洋構造を有している。この違いを引き起こす原因を流速変動の観点から検討する。

3. 研究の方法

(1)大和海盆東縁のSta. SHと、対馬海盆南縁のSta. TBの深層に流速計を係留し、NIWの観測を行った(図1)。大和海盆(Sta. SH)においては、2645m深にADCP(RDI WorkHorse, 300 kHz)を設置し、鉛直空間解像度4m、時間間隔1分という非常に高い時空間分解能で流向・流速を測定した。さらにADCPの計測範囲(約40m)よりも上層の2560mと2475m深に超音波流速計を設置し、1分間隔で流れを測定することにより、約160mにわたるNIWの鉛直伝播を観測した。Sta. SHでの観測は、2014年5月と10月に実施した。一方、対馬海盆(Sta. TB)においても1583m深にADCPを、1525mと1417m深に超音波流速計を係留し、同様の観測を行った。Sta. TBでの観測は2015年5月と10月に実施した。係留系の設置・回収は、いずれも長崎大学の練習船「長崎丸」を用いて行った。

(2)NIWのエネルギーパスは、観測点の慣性周期、NIWの振動数や成層、反射した際の海底

斜面の大きさ等に依存して変化する。そこで、観測された流速データと密度場のデータから、レイトレーシング(ray tracing)法によりNIWの挙動を解析した。

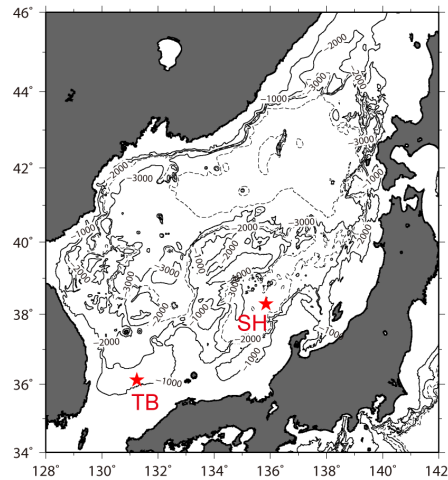


図1 観測点と日本海の海底地形

4. 研究成果

(1)大和海盆深層(Sta. SH)における流速変動の一例として、2014年5月12~23日に得られた代表的な深度における流れの東西成分と南北成分の時系列を示す(図2)。期間を通して約18時間(自己相関による見積もりでは17.7時間)の周期変動が卓越しているが、これは観測地点の慣性周期(19.3時間)に近い。また流向が時計回りに変化していることから、観測された流速変動はNIWによるものと考えられる。変動の振幅は観測期間の前半と後半で大きく異なっており、5月12日~16日午前中にかけては $\pm 5\text{cm/s}^{-1}$ に達していたが、16日午後から急速に減衰し、周期性も不明瞭になった。その後、19日より再び周期変動が卓越するようになったが、その振幅は $\pm 2\text{cm/s}^{-1}$ 程度と前半の半分以下であった。観測期間前半の振幅の大きな変動とその後の急速な減衰は、内部波がwave packetの形で観測点に到達したことを示している。また、観測期間前半の流速変動の振幅に注目すると、上層の振幅が下層に比べて有意に小さくなっていることがわかる。このような構造は、内部波のエネルギーがレイ(ray)の形で伝播したことを示唆している。

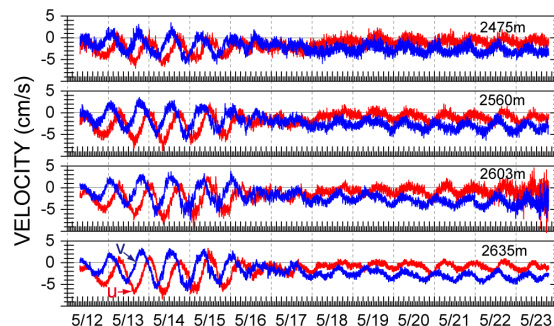


図2 Sta. SHの代表的な深度(2475, 2560, 2603, 2635m)における東西流速(赤)、南北流速(青)の時系列

(2) 振幅の大きな5月12日~16日について変動の様子を細かくみると、上層の変動の方が下層に比べて位相が先行していることがわかる。実際、最下層(2635m)の流速変動に対する各層流速の相互相関を調べると、最大相関を示すラグが正方向にシフトしており(図3)、上層から下層に向かう位相伝播(すなわち、下層から上層に向かうエネルギー伝播)を示している。タイムラグから見積もられる下層への位相速度は、約10m/分である。また、最下層の流速ベクトルに対する上層の流速ベクトルの相対角度に注目すると、上層に向かうにつれて時計回りに偏向していることがわかった。これは、上向きにエネルギー伝播する内部波の特徴であり、図3に示した上層から下層への位相伝播と矛盾しない。これらの事実は、観測されたNIWは海底で発生したか、あるいは上層からのNIWが海底で反射したものであることを示唆している。

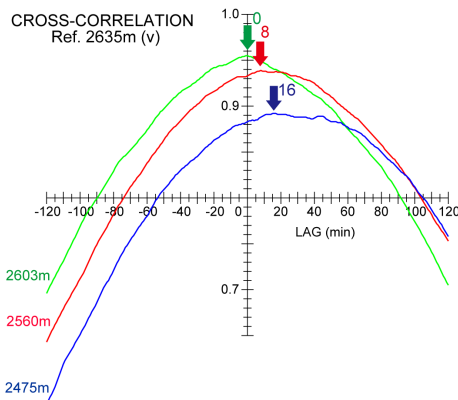


図3 2635m 深の南北流速変動に対する各層の相互相関。矢印は最大相関の位置を示し、数字はラグ(分)を示す。

(3) 対馬海盆深層(Sta. TB)における流速変動の例を図4に示す(2015年5月19~30日)。代表的な深度の流れを示したものが、東西流速、南北流速成分とも半日~1日程度の周期変動が卓越している。ただし、東西成分ではほぼ1日周期で流向が反転しているのに対して、南北成分には1日に2回のピークが認められ、特に期間前半で顕著である。また、観測期間前半の方が流速変動の振幅が大きいという特徴が認められる。

大和海盆深層では近慣性周期変動が卓越していたが、対馬海盆では複数の周期変動が混在しているように見える。そこで各層の流速データに対して、回転スペクトルを計算した。例として最深層(1573m)における回転スペクトルの分布を図5に示す。時計回り成分には、大和海盆同様、慣性周期帯にエネルギーピークが認められ、NIWの存在がうかがわれる。しかしながら、反時計回り成分の日周期帯にもエネルギーピークが現れており、日周潮流が混在していることがわかる。観測を開始した5月19日は大潮、5月25日は小

潮、観測終了直後の5月31日は大潮にあたることから、観測期間前半に流速変動の振幅が大きいという特徴は、この大潮・小潮周期によるものと考えられる(図4)。

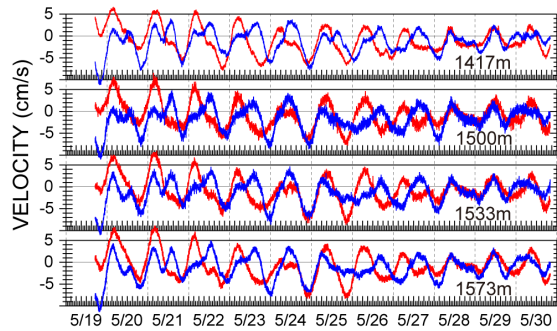


図4 Sta. TBの代表的な深度(1417, 1500, 1533, 1573m)における東西流速(赤)、南北流速(青)の時系列

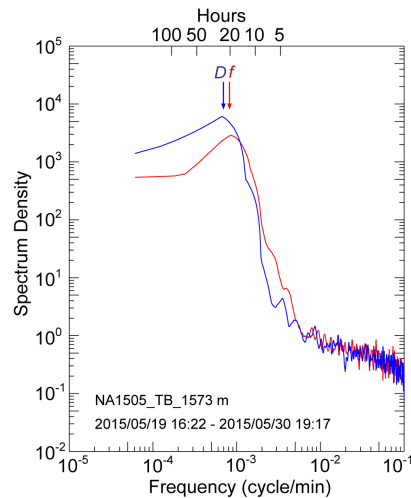


図5 Sta. TBの1573m 深における流れの回転スペクトル。赤線が時計回り、青線が反時計回り成分を示す。またfの矢印は慣性周期、Dの矢印は日周期を表す。

(4) 対馬海盆における二つの卓越周期変動の特徴を調べるため、エネルギーピークの現れた近慣性周期(19.52時間)と日周期(24.84時間)の変動に対して調和分析を行った。代表的な深度における、それぞれの周期変動のホドグラフを図6に示す。

近慣性周期変動については、ホドグラフの軌跡は円に近いが、反時計回りに回転している。また下層ほど振幅が大きく、位相も先行していることから、NIWのみによる変動ではないことがわかる。このことは、慣性周期帯のエネルギーは反時計回り成分の方が大きいことと符合する(図5)。

日周期変動については、振幅も位相も鉛直的にはほぼ一定であり、回転方向も反時計回りで一貫している。ホドグラフの長軸の向きは東北東-西南西にあるが、この方向は係留観測点付近の等深線方向とほぼ一致している。また、日周期(24.84時間)は係留点における慣性周期(20.30時間)よりも長いこと、日本海における独立潮汐は小さいことが

ら、観測された変動は東シナ海から入射した日周期の潮汐波が、ケルビン波的に海底地形に沿って伝播したものと推測される。

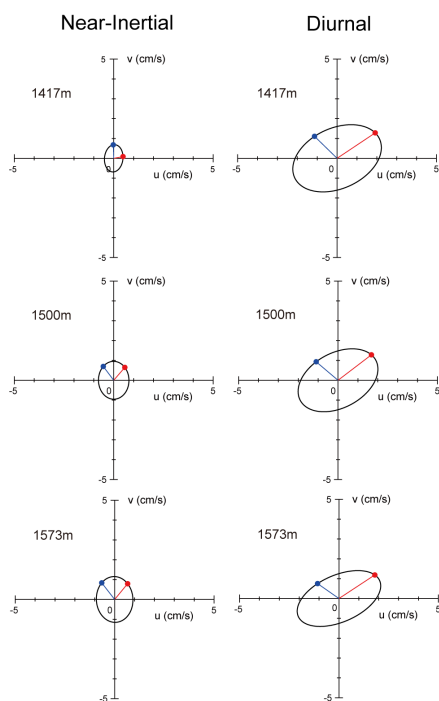


図6 代表的な深度(1417, 1500, 1573m)における近慣性周期変動(左列)と日周期変動(右列)のホドグラフ。赤丸は  $t=0$ 、青丸は  $t= \pi/2$  における位相を示す。

(5)大和海盆(Sta. SH)において2013年5月に観測されたNIWの発生地点を推測するため、レイトレーシング法によるエネルギーパスの逆追跡を行った。観測点を原点とする平面を考え、 $135^{\circ} 50' E$  に沿った南北断面内で、観測点の2620m深を通過するレイの経路を計算した(図7)。位相伝播が上層から下層であることからわかるように、群速度は下層から上層に向かっており、これは観測点の北方約1kmの海底でレイが反射した結果であることがわかる。さらにレイの経路を追跡すると、大和堆( $39^{\circ} 30' N$ )付近の主温度躍層に達していた。このことは、観測されたNIWは大和堆付近の表層で励起されたことを示唆している。

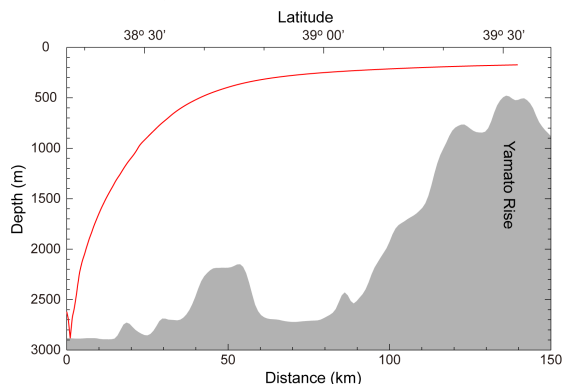


図7 逆追跡されたNIWのレイパス

(6)大和海盆深層では、NIWに起因する流速変動が卓越していた。12日間の観測期間中に振幅が大きく変化したこと、およびレイトレーシング法によるエネルギーパスの逆追跡の結果から、NIWの発生には海底地形(大和堆)と表層の状況(風況)が大きく関わっていると推測された。これに対して対馬海盆深層の流速変動には、近慣性周期変動の他に、日周期潮汐波の影響が認められた。また近慣性周期変動には、NIWとは異なる変動も混在していることがわかった。これらを分離し、物理的な意味を明らかにするためには、より長期間にわたる観測データが必要であり、今後の課題である。

大和海盆深層(約2000m以深)には海水特性の鉛直一様性で特徴づけられる底層水が分布している。一方、対馬海盆においては底層付近で急激に溶存酸素量が減少するという特徴がみられ、その成因については不明な点が多い。本研究で明らかとなった両海盆における深層流の変動特性の違いが、底層での海水混合の相違を通して、異なる海洋構造を作り出している可能性がある。

日本海深層では、地球温暖化の影響とされる昇温と溶存酸素量の漸減が報告されている。本研究の成果は、温暖化や気候変動の影響を正確に評価するための、深海での水塊変質過程の解明に寄与するものでもある。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

T. Senjyu, T. Aramaki, Volume transport from the Japan Basin to the Yamato Basin in the abyssal Japan Sea inferred from direct current observations, *Journal of Oceanography*, 73, 235-247, 2017.  
DOI: 10.1007/s10872-016-0399-4(査読有)

K. Fukudome, Y. Igeta, T. Senjyu, N. Okei, T. Watanabe, Spatiotemporal current variation of coastal-trapped waves west of the Noto Peninsula measured by using fishing boats, *Continental Shelf Research*, 115, 1-13, 2016.  
DOI: 10.1016/csr2015.12.013(査読有)

T. Senjyu, Observation of near-inertial internal waves in the abyssal Japan Sea, *La mer*, 53, 43-51, 2015.  
<http://www.sfjo-lamer.org/lamer.html>  
(査読有)

山崎 恵一, 北出 裕二郎, 井桁 庸介, 渡邊 達郎, 千手 智晴, 山田 東也, 大慶 則之, 池田 怜, 能登半島北東端沖で観測された近慣性内部波, *海の研究*, 24, 203-226, 2015.  
<http://kaiyo-gakkai.jp/jos/vol24>(査読有)

T. Matsuno, T. Endoh, T. Hibiya, T. Senjyu, M. Watanabe, Formation of the well mixed homogeneous layer in the bottom water of the Japan Sea, Journal of Oceanography, 71, 441-447, 2015.  
DOI: 10.1007/s10872-015-0303-7( 査読有 )

大慶 則之, 奥野 充一, 辻 俊宏, 千手 智晴, 能登半島東岸で 2004 年秋季に観測された大規模強流反復現象, 海の研究, 24, 133-146, 2015.  
<http://kaiyo-gakkai.jp/jos/vol24>( 査読有 )

[学会発表](計 18 件)

T. Senjyu, H.-R. Shin, Near-inertial internal waves in the Yamato and Tsushima/Ulleung Basins in the abyssal Japan/East Sea, The 19th Pacific-Asian Marginal Seas (PAMS) Meeting, 2017.4.12, Jeju (Korea)

T. Senjyu, T. Aramaki, Evaluation of vertical eddy diffusivity in the abyssal Japan/East Sea based on the one-dimensional advection-diffusion model in temperature and  $^{14}\text{C}$  profiles, International Workshop on Mixing and Water Mass Modification in the East Asian Marginal Seas, 2017.02.13, 九州大学応用力学研究所(福岡県春日市)

千手 智晴, 荒巻能史, 大和海盆は日本海における乱流混合の Hotspot か?, 金沢大学環日本海域環境研究センター共同利用シンポジウム「対馬暖流系の変動機構の解明に向けて」, 2016.11.24, 四校記念館(石川県金沢市)

千手 智晴, 申 弘烈, 大和海盆南縁で観測された深層流の数日周期変動, 日本海洋学会 2016 年度秋季大会, 2016.09.12, 鹿児島大学水産学部(鹿児島県鹿児島市)

T. Senjyu, Mixing and inter-basin water mass exchange in the abyssal Japan Sea, The 8th PEACE Ocean Science Workshop, 2016.08.30, Vladivostok (Russia)

千手 智晴, 申 弘烈, 対馬海盆深層における近慣性内部波と潮汐周期変動, 日本海洋学会 2016 年度春季大会, 2016.03.17, 東京大学本郷キャンパス(東京都)

千手 智晴, 底層フロントの南北変位にもなう日本海深層の溶存酸素量変動, 日本海洋学会 2015 年度秋季大会, 2015.09.29, 愛媛大学(愛媛県松山市)

千手 智晴, 日本海の深層水の形成・循環・変質過程に関する研究, 日仏海洋学会賞受賞記念講演, 日仏海洋学会, 2015.06.27, 日仏会館(東京都)

千手 智晴, 申 弘烈, 馬田 俊雄, 日本海深層で観測された近慣性内部波の振幅変動, 日本海洋学会 2015 年度春季大会, 2015.03.22, 東京海洋大学(東京都)

千手 智晴, 日本海深層における近慣性内部波, 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」, 2014.07.08, 北海道大学低温科学研究所(北海道札幌市)

## 6. 研究組織

### (1) 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