



Title	富山湾深層における近慣性内部重力波
Author(s)	越後, 友利果; Echigo, Yurika; 磯田, 豊 他
Citation	北海道大学水産科学研究彙報, 73(1), 33-40
Issue Date	2023-08-04
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/bull.fish.73.1.33">https://doi.org/10.14943/bull.fish.73.1.33</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/90245">https://hdl.handle.net/2115/90245</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	bull.fish.73.1.33.pdf



## 富山湾深層における近慣性内部重力波

越後友利果<sup>1)</sup>・磯田 豊<sup>1)</sup>・千手 智晴<sup>2)</sup>

(2023年1月26日受付, 2023年3月24日受理)

### Near-inertial Internal Gravity Waves in the Deep Layer of Toyama Bay

Yurika ECHIGO<sup>1)</sup>, Yutaka ISODA<sup>1)</sup> and Tomoharu SENJYU<sup>2)</sup>

#### Abstract

The present study analyses current velocity data moored in Toyama Bay, where the incidence of near-inertial waves is restricted to southward propagation from the north, and provides evidence of their southward propagation from the flattened shape of the observed velocity ellipse. The results support the existence of near-inertial waves in a 'non-traditional f-plane' as pointed out by Echigo *et al.* (2022). Furthermore, the ray-path of its southward propagating near-inertial waves was found to be almost identical to the upward angle of the reflected waves and the slope gradient of the seabed near the bay-head. The rotating oscillatory currents associated with these near-inertial waves are expected to roll up the seabed mud and generate the turbidity flows.

**Key words** : Near-inertial internal gravity waves, current velocity, non-traditional f-plane, Toyama Bay

#### 緒 言

近慣性周期の内部波は、密度成層が弱くなるほど、地球回転ベクトルの水平成分  $\Omega \cos \varphi$  ( $\varphi$  は緯度,  $\Omega$  は自転角速度) の影響が無視できなくなる (例えば, Haren and Millot, 2004; Gerkema and Shrira, 2005; 伊藤ほか, 2019)。特に、日本海深層の底層水 (Bottom Water) のように、浮力振動数 ( $N$ ) がほぼ零となる均一流体内に存在できる波は Gyroscopic Wave (GsW) とも呼ばれる慣性波 (inertio wave) に限られる (LeBlond and Mysak, 1978)。本論の先行研究である越後ほか (2022) では、GsW を含む内部慣性重力波の線形理論解析を行い、その研究成果は次の3点にまとめられる。(1) コリオリ力の水平成分を考慮した内部慣性重力波の分散関係から、南方へエネルギー伝播する近慣性周期の GsW (Gyroscopic Wave) が海底で反射する際、入射波の鉛直低波数から反射波の鉛直高波数へと非対称な伝播経路 (Ray path) を示す。(2) Polarization relation から、北半球の場合、反射波の水平流速楕円 (真の流速楕円の水平面射影) がほぼ円形で時計回りであるのに対し、入射波の水平流速楕円は時計回りから反時計回りへ遷移する。(3) これらの理論的知見と数値モデルを用いた GsW の再現実験を根拠として、日本海盆の海底近傍に設置された係留系の流速記録が示す特徴の中に、(GsW を含む) 近慣性内部重力波の入射及び海底反射を示唆する証拠がみつけら

れた。

しかしながら、その証拠とされた近慣性周期の流速楕円 (ホドグラフ表示) の長軸方向は様々であり、残念ながら、その原因が異なる伝播方向の入射波であったか否かの判断はできていない。そこで、近慣性波の入射がある特定方向に制限される海域での流向流速データ解析が必要と考えた。この目的のために選んだ海域が富山湾である。Fig. 1 の (a) は日本海全域の海底地形、(b) は北向きに開いた富山湾周辺を拡大した海底地形である。解析に使用した係留点は赤丸印の S07 であり、この地点の深層へ伝播できる近慣性内部重力波は北からの入射、すなわち、南方伝播に制限されると考えた。本研究では越後ほか (2022) で提案した解析方法を用いて、S07 の観測緯度で予測される近慣性波の流速楕円を作成し、実際に観測された流速楕円との比較から、南方伝播の証拠を提示したい。最後に、その南方伝播する近慣性波の Ray-path を解析的に描き、富山湾内への入射波及び反射波の伝播経路と海底地形勾配との関係について議論する。

#### 富山湾内の流向流速データと密度成層

解析に使用した流向流速データは、Senjyu (2022) で使用されたものであり、富山トラフ内の S07 (北緯 37 度 24.83 分, 東経 137 度 46.81 分) で観測された 2007 年 8 月 14 日

<sup>1)</sup> 北海道大学大学院水産科学研究院海洋環境学分野

(Laboratory of Marine Environmental Science, Faculty/Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University)

<sup>2)</sup> 九州大学応用力学研究所

(Research Institute for Applied Mechanics, Kyusyu University)

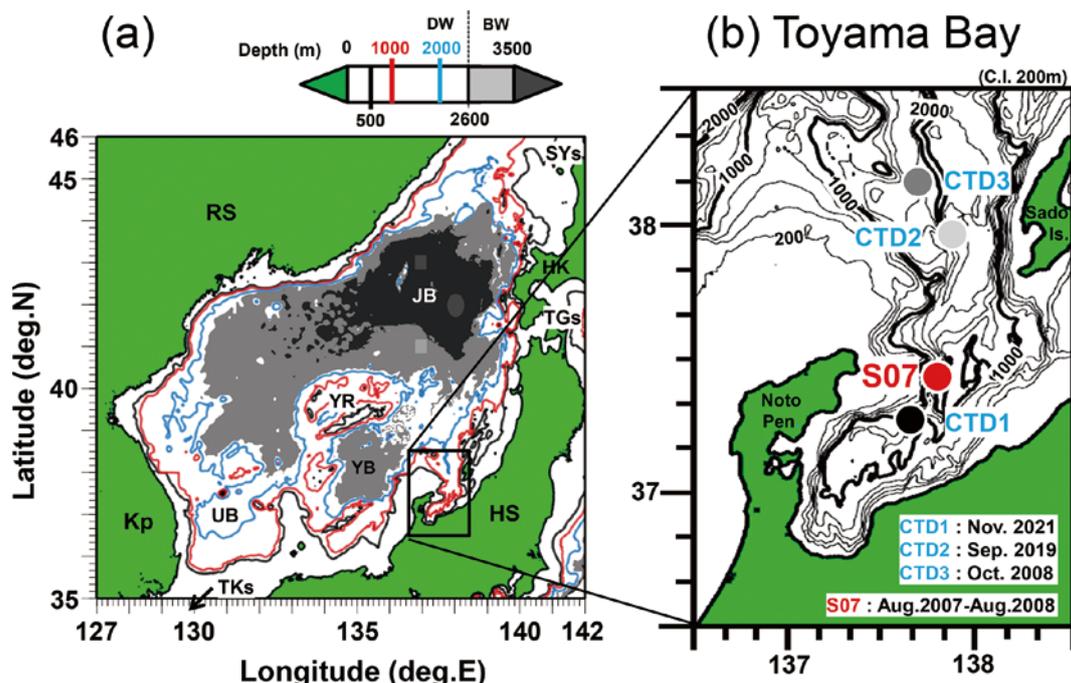


Fig. 1. (a) Bottom topography around the Japan Sea with three isobaths of 400 m (black ;  $N \sim 10f_s$ ), 1,000 m (red ;  $N \sim 4f_s$ ) and 1,800 m (blue ;  $N \sim 2f_s$ ). Bottom Water (BW) Areas deeper than 2,600 m ( $N \sim f_s$ ) and 3,500 m are highlighted by gray and black, respectively. Locations of the Japan Basin (JB), Yamato Basin (YB), Yamato Rise (YR), Ulleung Basin (UB), Tsushima/Korean Strait (TKs), Soya Strait (SYs), Tsugaru Strait (SGs), Hokkaido (HK), Honshu (HS), Korean peninsula (Kp) and Russia (RS) are shown. (b) Enlarged bottom topography around the Toyama Bay with isobaths every 200 m (black thin line) and every 1,000 m (black thick line). Red closed circle at S07 shows the site of mooring from August 2007 to August 2008 by Senju (2022). Black, dark gray and light gray circles mean the sites of CTD1, CTD2 and CTD3 respectively, around the Toyama Bay from 2008 to 2020 by the Japan Meteorological Agency or the observation accompanying Senju (2022).

15時から2008年8月13日7時までの毎時データで、流速計(アーンデラ社RCM-8)の係留深度は900mと1,380mの2層である。なお、この係留系の設置・回収は、長崎大学水産学部の附属練習船「長崎丸」によって行われた。

近慣性内部重力波の理論解を計算するためには、富山湾周辺の密度成層の情報が必要となる。この情報を得るために、Fig. 1(b)に黒丸(CTD1)、灰色丸(CTD2)、濃灰色丸(CTD3)で示した3地点のCTD資料([https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/vessel\\_obs/data-report/html/ship/cruise-data.php?id](https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/vessel_obs/data-report/html/ship/cruise-data.php?id))を用いた。CTD1はSenju(2022)で使用されていた2020年11月15日の観測で測定深度は1,327mまで、CTD2は気象庁が実施した2019年9月24日の観測で測定深度は1,836mまで、CTD3も気象庁が実施した2008年10月28日の観測で測定深度は1,618mまでであった。始めに、これら3つのCTDデータからポテンシャル水温を計算し、塩分値とともにポテンシャル密度を計算した。次に、それぞれの100m毎の密度勾配から最小2乗法により浮力振動数 $N$ を見積もり、 $N$ 値の鉛直プロファイルを図2に示した。図中の黒細線、灰色太線、濃灰色中太線はそれぞれCTD1、CTD2、CTD3に対応しており、3つのプロファイルは年や場所が異なるにも関わらず、概ね同じ傾向を示している。それゆえ、流速計の設置水深で

ある深度900mの $N$ 値は $4f_s \sim 7f_s$ 、深度1,380mの $N$ 値は $2f_s \sim 3f_s$ で代表することができる。

近慣性内部重力波の線形理論を用いてRay-pathを描くためには、本海域を代表する $N$ の理想的な鉛直プロファイルが必要である。ここでは、最も深い深度までの測定値があるCTD2の200m以深の $N$ 値(灰色太線)をべき乗関数 $N = 20.8P^{-1.56}$ (赤実線;  $P$ はm単位の深度)で近似した。

#### 近慣性波の入射波と反射波の流速楕円

S07の緯度は北緯37度24.83分なので、コリオリパラメータは $f_s = 8.86 \times 10^{-5} s^{-1}$ である。後述するように、富山湾のS07で観測された近慣性波の周波数は $\sigma = 1.03f_s$ である。この周波数を用いて、越後ほか(2022)の解析手法に従って計算された近慣性内部重力波の水平流速楕円がFig. 3である。(a)が入射波、(b)が反射波であり、それぞれ、入射及び反射角度は $\theta = 90^\circ, 67.5^\circ, 45^\circ, 0^\circ$ の4つ、成層強度は $N = 10f_s, 4f_s, 2f_s, f_s$ の4つで代表させた。よって、係留点S07の深度900mの流速楕円は $N = 10f_s$ と $N = 4f_s$ の間、深度1,380mの流速楕円は $N = 4f_s$ と $N = 2f_s$ の間にあると考えることができる。

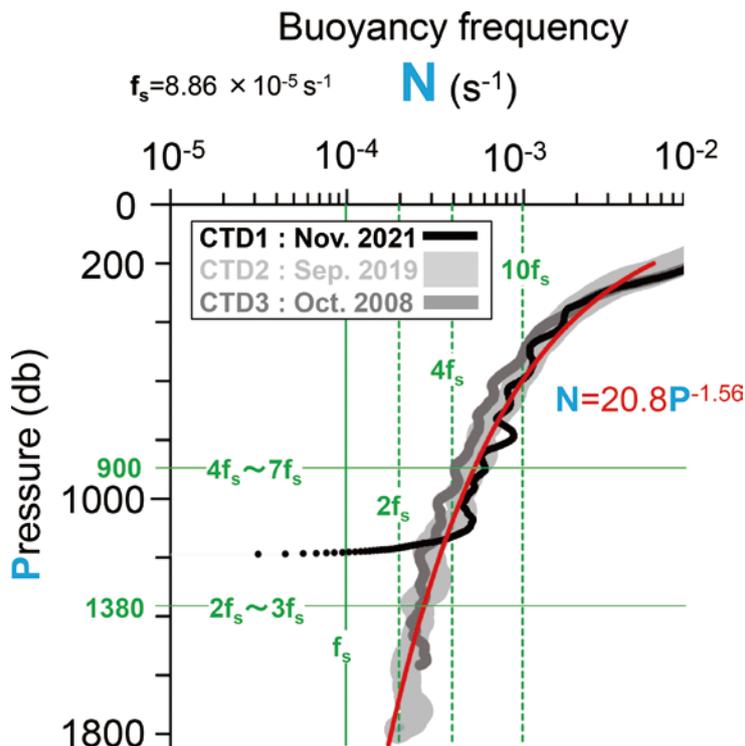


Fig. 2. Vertical profiles of buoyancy frequency ( $N$ ) computed from the potential density observed at CTD1 (black), CTD2 (dark gray) and CTD3 (light gray) shown in Fig.1 (b).  $f_s$  denotes the local inertial frequency. Red line is simplified vertical profile of buoyancy frequency ( $N$ ) from three observed  $N$ . It is expressed by power math function ;  $N = 20.8P^{-1.56}$ .

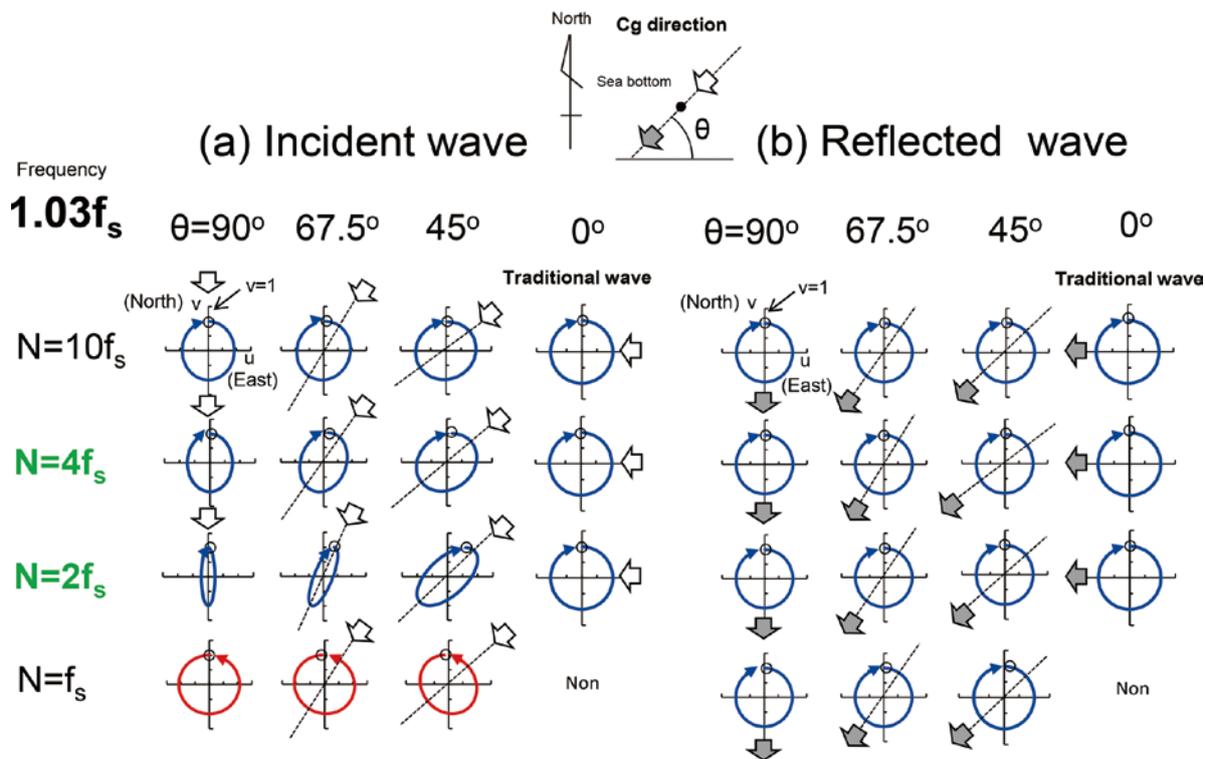


Fig. 3. The horizontal current ellipses at frequency  $\sigma = 1.03 f_s$ , which are divided into (a) incident wave and (b) reflected wave. The propagation angles are  $\theta = 90^\circ, 67.5^\circ, 45^\circ$  and  $0^\circ$  when  $N = 10 f_s, 4 f_s, 2 f_s$  and  $f_s$ . These were calculated using the analysis method proposed by Echigo et al. (2022). The top is the north side, and the propagation direction is shown by an arrow. Blue and red ellipses show clockwise and anti-clockwise rotation, respectively.

定性的には越後ほか (2022) と同様な特徴を示し、東西伝播 ( $\theta = 0^\circ$ ) の入射波は「慣習的な  $f$  平面」と同じで円形時計回り、入射角度が南北方向に近づき ( $\theta \rightarrow 90^\circ$ )、成層強度が弱くなる ( $N \rightarrow f_s$ ) ほど、楕円はおおきく扁平、さらに逆回転へ移行する。その一方、反射波は伝播方向や成層強度によらず、円形時計回りのままである。この結果は、 $N \sim 4f_s$  や  $N \sim 2f_s$  付近にある係留流速計が入射波を捉えたならば、その流速楕円の長軸方向が入射方向になることを予測している。

#### 富山湾で観測された近慣性周期変動と長周期変動

流向流速データの解析方法も越後ほか (2022) に従い、回転スペクトル解析、HAB 法を用いた近慣性周期変動の抽出を行った。本論では、海底近傍で卓越する近慣性周期変動が海底泥を巻き上げ、乱泥流を駆動する可能性を検討するため、数日周期以上の長周期変動も調べた。

Fig. 4 は深度 (a) 900 m と (b) 1,380 m で観測された流速値の東西成分  $u$  (赤実線) と南北成分  $v$  (青実線) の時系列である。この時系列の 8 月 13 日 7 時から 7 月 20 日 22 時までの 8,192 個 (時間) のデータを用いて計算した回転スペクトル (FFT 法) を Fig. 5 の (a) と (b) に示す。時計回り (反時計回り) の回転成分を青 (赤) 実線で表示し、観測緯度における慣性周波数  $f_i (= 8.86 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1})$  とその 2 倍と 3 倍の周波数、潮汐の主要 4 大分潮の各周波数を緑縦線で示している。深度 900 m (Fig. 5a) では、近慣性周波数 ( $1.03f_i$ ) に時計回り成分 (青表示) のピークがみられるものの、反時計回り成分 (赤表示) も決して小さくはない。深度 1,380 m (Fig. 5b) の近慣性周波数には明瞭なピークはみられず、時計回り成分と反時計回り成分は同程度の大きさをもっている。この結果は、両深度とも近慣性周期の流速楕円が大きく扁平することを示している。なお、4 大分潮付近や  $2f_s$  や  $3f_s$  の周波数にピークはみられない。

HAB 法のパラメータである中心周期は  $T = 19.7$  時間の慣性周期、調和解析幅は  $L = 157.6$  時間 (8 慣性周期) とし、その周波数応答関数を Fig. 5 の (c) に示した。この HAB 法によりバンドパスされた慣性周期変動の時系列を Fig. 6 の下段 (c) ~ (e) に示した。深度 900 m を赤色、深度 1,380 m を青色表示とし、(c) は振幅値  $\sqrt{u_a^2 + v_a^2}$ 、(d) は慣性周期変動のホドグラフ表示、(e) は深度 1,380 m の位相から深度 900 m の位相を差し引いた位相差  $\alpha$  の各時系列である。(b) のホドグラフは緑の縦線で区切ったように 30 日毎に描き、振幅の大きな時期の楕円が強調される。(e) の位相差の値では両深度の振幅値が両方とも  $1 \text{ cm s}^{-1}$  以上のときに黒丸印、片方が  $1 \text{ cm s}^{-1}$  のときに中抜き丸印、両方とも  $1 \text{ cm s}^{-1}$  以下のときにバツ印とした。

まず、振幅の時系列 (Fig. 6c) を両深度で比較すると、120 ~ 150 日目の時期に限って、どちらの振幅も大きく、位相差  $\alpha$  (Fig. 6e) もばらつかず、零度付近に揃っている。このとき、両深度では同じ擾乱を捉えている可能性があり、流速楕円 (Fig. 6d) も同様な形状を示し、南方伝播を示唆する南北方向に扁平した長軸をもっている。しかし、他のほとんど時期では位相差  $\alpha$  が大きくばらつき、振幅の時間変化の様子も両深度では異なっている。にもかかわらず、振幅が比較的大きな時期の流速楕円の形状だけは、常に南北方向に扁平した長軸をもっている。これらの結果から、狭いトラフ上の S07 点で捉えられた近慣性周期変動には北からの入射波 (南方伝播) が支配的と判断されるが、振幅や位相差が示す大きなばらつきは、トラフ地形による海底斜面や側壁による複雑な入射反射過程を想像させる。

S07 点を含む富山トラフ内の係留観測 (Senjyu, 2022) によれば、上述した近慣性周期変動よりも数日周期以上の長周期変動の方が卓越している。それゆえ、長周期変動による近慣性周期変動への影響 (主に移流)、そしてその逆の影響 (海底泥を巻き上げによる乱泥流の駆動) が推測

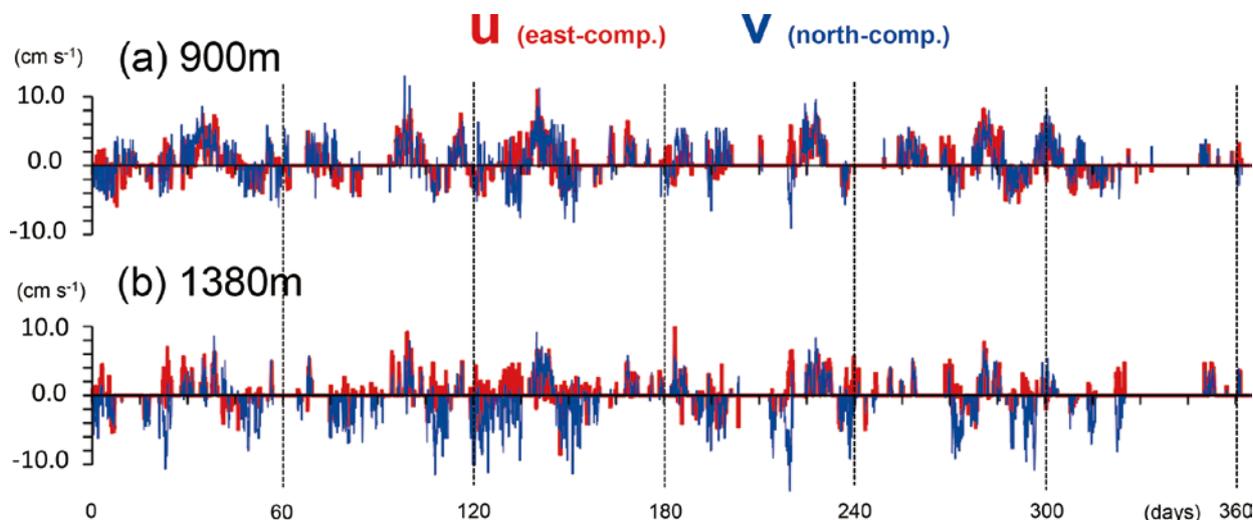


Fig. 4. Time series of raw velocity for EW (blue) and NS (red) components ( $u, v$ ) of (a) 900 m and (b) 1,380 m at S07.

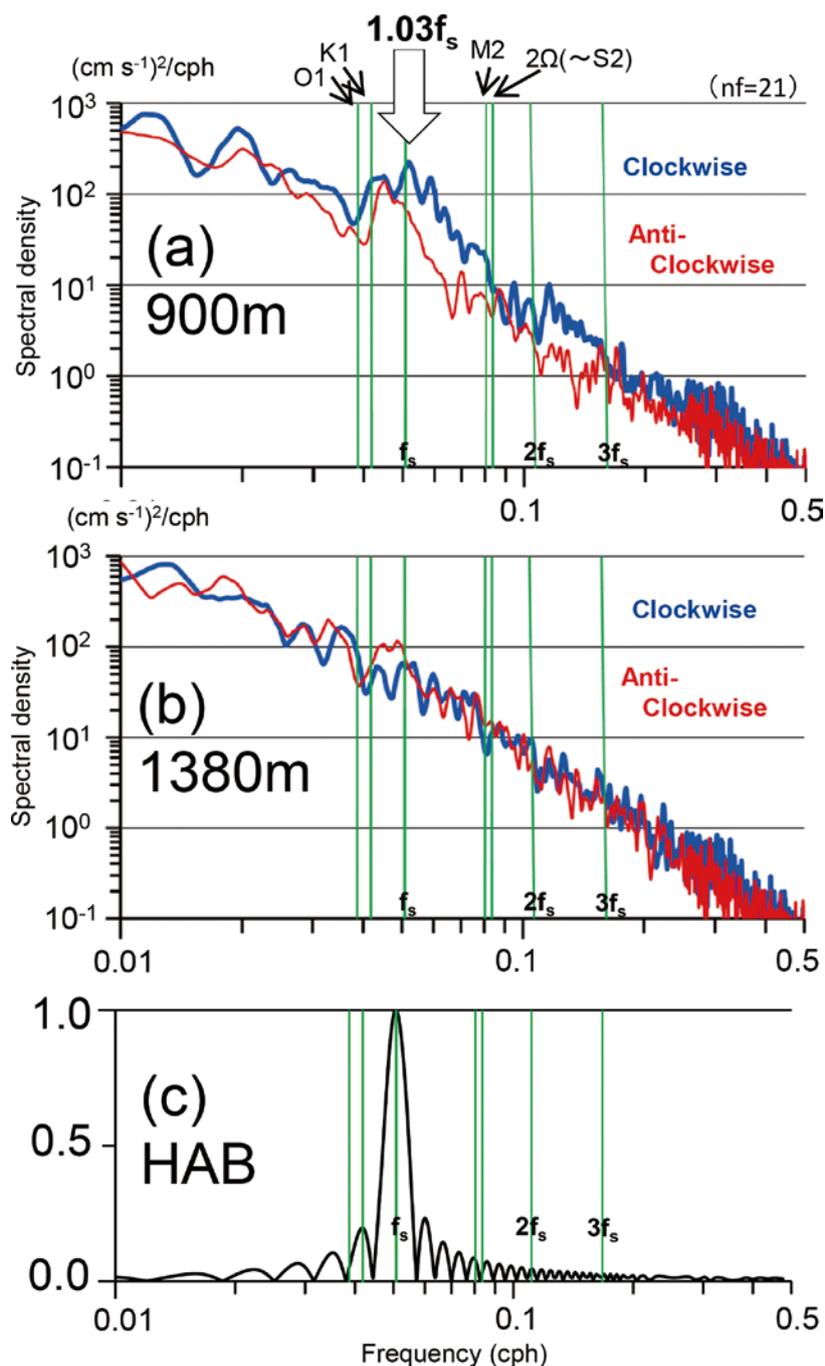


Fig. 5. Rotary frequency spectra for horizontal current of (a) 900 m and (b) 1,380 m (August 13, 2007, to July 20, 2008). Blue and red lines represent the components of clockwise and anti-clockwise rotation respectively. Symbols of K1, O1, M2, and S2 are four major tidal constituents. (c) Response function to frequency by the HAB method used for the near-inertial variation with 19.7-hour period.

される。そこで、Low-pass フィルター (40 時間の移動平均) により作成した長周期変動の流速ベクトルを Fig. 6 の (a) に示した。これらの主軸方向は、深度 900 m が北から 41 度東向き、深度 1,380 m が北から 16.8 度東向きである (Senjyu, 2022)。Fig. 6 の (b) はその主軸方向成分を抽出した時系列であり、(a) と同様、赤色が深度 900 m、青色が深度 1,380 m の表示である。ここでは長周期変動の (b) と近

慣性周期変動の (c) の両時間変化を見比べると、両者の因果関係の特定は困難なため、統計的な議論は行わなかった。まず、長周期変動 (Fig. 6b) は両深度で似たような変化を示し、斜面を降りる方向 (正の値) に大きな値 (以下、傾斜流と呼ぶ) が 7 ~ 10 回程度出現している。この傾斜流の出現と (主に深度 900 m の) 近慣性周期変動 (Fig. 6c) とは似たような半月から一か月程度の発生頻度を持ち、

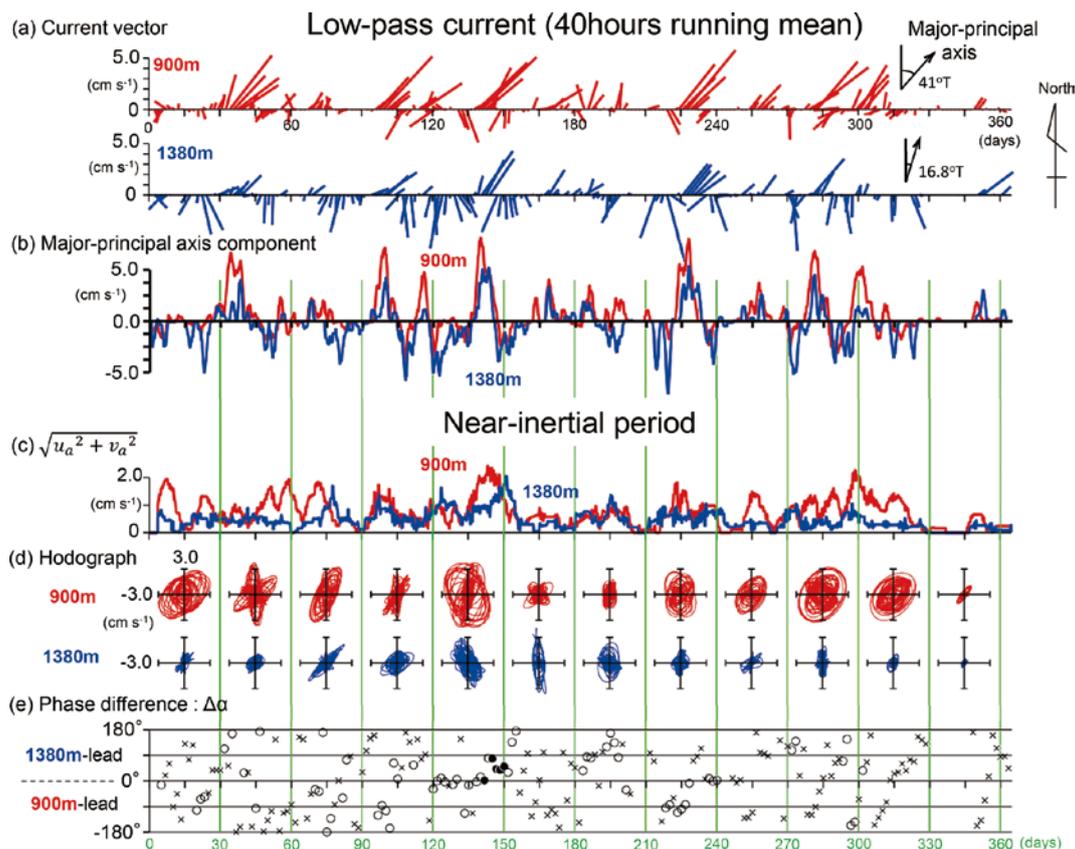


Fig. 6. (a) Time series of 40-hour running mean current vector at 900 m (red) and 1,380 m (blue). Senjyu (2022) defined the major principal axis in the direction which the standard deviations are maximal in a hodograph, and then estimated the predominant direction, i.e., 41° and 16.8° from north for 900 m and 1,380 m, respectively. Time series of axis component for each predominant direction are shown in (b). Time series for the “near-inertial” band-passed currents of 900 m (red) and 1,380 m (blue); (c) amplitude and (e) phase difference  $\Delta\alpha$  between both sites (black). Values with a cross mark (circle) in (e) mean that the corresponding amplitude is less than 0.5 (1.0)  $\text{cm s}^{-1}$ , and thus their reliability is somewhat low. A black circle is marked when both amplitude values at both depths are above 1  $\text{cm s}^{-1}$  and an open circle when one of the two is above 1  $\text{cm s}^{-1}$ . For convenience, the disturbances of near-inertial variation are divided every 30 days for 12 periods. (d) Hodograph of the “near-inertial” band-passed currents at each site for every 12 periods.

近慣性周期変動が大きくなる時期が傾斜流出現時よりも少し先行している場合が多い。ただし、近慣性周期変動が卓越すると傾斜流が必ず出現、または、その逆のきれいな関係があるとは言いえない。

### 海底反射した近慣性内部重力波が乱泥流を駆動する可能性の考察

Fig. 7は越後ほか(2022)の解析解を用いて計算した、富山湾の緯度及び成層状態における近慣性波の入射波と反射波のRay-pathである。計算に使用した $N$ 値の鉛直プロファイルはFig. 2の赤実線、コリオリ力の鉛直成分は $f_s = 8.86 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、水平成分は $f_e = 1.16 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、周波数は $\sigma = 1.03 f_s$ である。表示範囲の深度は200~1,400 m、伝播方向は $\theta = 90^\circ, 45^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 0^\circ$ (それぞれ赤色、桃色、黒色、緑色、青色の実線)とした。また、図の中央零点の海底で近慣性波が反射するので、その反射部分(深度1,300~1,400 m、零点から前後250 mの範囲)をその下に拡大表

示した。越後ほか(2022)ですでに議論されているように、 $\theta = 0^\circ$ の東西伝播以外、北からの入射波の下向き角度は、反射波の上向き角度よりも大きく、その傾向は南北伝播の $\theta = 90^\circ$ が最も顕著である。そのゆえ、入射波では上方から下方へ $\theta = 90^\circ, 45^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 0^\circ$ の順であったRay pathは、反射波では逆の順序になっている。

前節の係留流速解析では、北側から南方伝播する近慣性波の存在が示唆された。そこで、Fig. 7のRay-pathの中から、南方伝播する $\theta = 90^\circ$ の近慣性波のみを選択し、富山トラフの現実的な海底斜面とその理論的なRay-pathを比較した。Fig. 8(a)は富山湾周辺の海底地形データを用いて緯度方向に最も深い水深(ほぼトラフに対応)を抽出した結果であり、その位置を水色丸印で表示した。Fig. 8(b)はそのトラフに沿った海底深度(水色表示)を示し、この図に $\theta = 90^\circ$ の近慣性波のRay-path(入射波は赤点線、反射波は赤実線)を重ねて描いた。描いたRay-pathは係留点S07を含む7地点を適当に選択した(反射地点は(a)で赤丸表示)。なお、Ray-path(赤色)の非対称性を強調

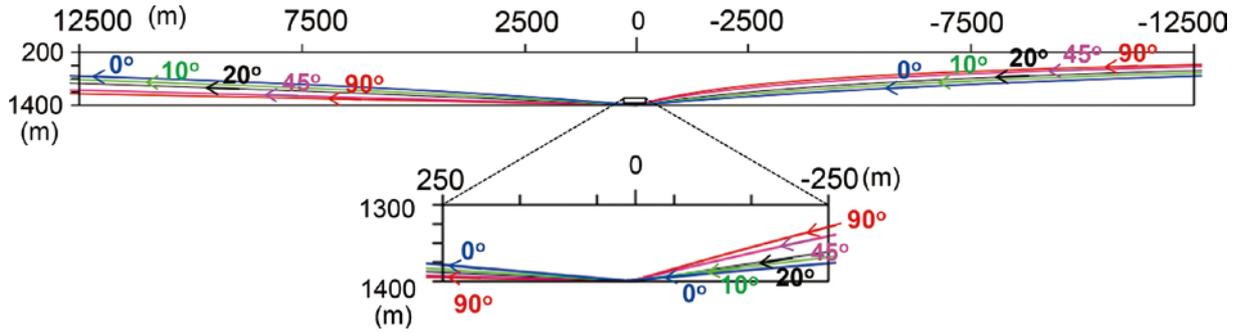


Fig. 7. Ray paths for a wave whose properties vary with vertical coordinate  $z$  under the simple stratification in Fig. 2 (red line). Wave packets are set to reflect at center point of the figure, showing the incident/reflected near-inertial waves ( $\sigma = 1.03 f_s$ ) for various propagation angles from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ . Around the reflected point is enlarged.

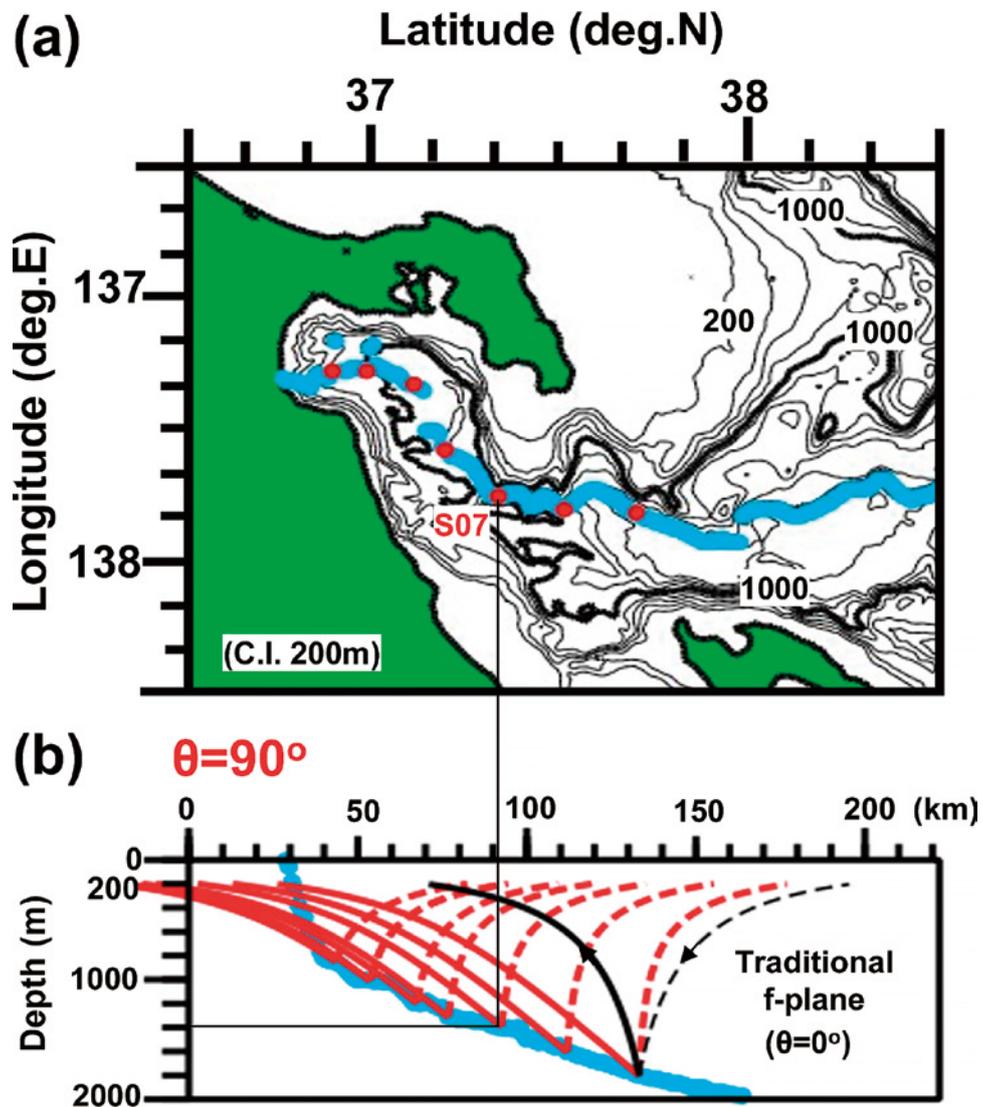


Fig. 8. (a) Bottom topography around the Toyama Bay same as Fig.1 (b) but dotted in light blue at the deepest site every 0.5 minutes in latitude. Sea bottom slope is illustrated in (b) by putting light blue dots to correspond with the horizontal distance and depth. Seven points including S07 (red dots in (a)) are selected to show ray path reflecting at each site. Its propagation angle is  $\theta = 90^\circ$ , showing the incident (red dotted line)/reflected (red solid line) near-inertial waves ( $\sigma = 1.03 f_s$ ). To confirm asymmetry of meridional southward propagation easily, west-ward propagation ( $\theta = 0^\circ$ ) is illustrated for the most offshore point.

するため、コリオリ力の水平成分を無視したときの慣習的な Ray-path ( $\theta = 0^\circ$  の近慣性波) を黒色で示している。

S07 を含め、富山湾の沖合側の反射波の上向き角度は、海底斜面勾配よりも常に大きい。ところが、湾奥へ近づくほど、水深が浅くなることによって、反射波の上向き角度と海底斜面勾配が次第に一致するようになる。線形理論(越後ほか, 2022)における近慣性波の流速場は Ray-path 方向に沿い、その位相は Ray-path の直交方向に上方から下方へ移動する。すなわち、湾奥では海底斜面にほぼ沿った流速場が時計回りに回転しながら、近慣性周期で流向を変える様子が推測される。このような回転振動流は海底泥を容易に巻き上げ、その海底泥が粘土状の細かい粒子であれば、周辺海水よりも密度が高くなる乱泥流、一種の密度流の発生が期待される。なお、Fig. 8(b) を作成した結果、係留点 S07 の場所では乱泥流は発生できず、それよりも湾奥側で発生した乱泥流の通過地点にかなり得ないことがわかった。それが理由で、前節で記述したように、S07 の近慣性周期変動と長周期変動との間には、きれいな関係がみえなかったのかもしれない。

#### おわりに

本研究では近慣性波の入射が北側からの南方伝播に制限される富山湾内に係留された流向流速データの解析を行い、観測された流速楕円の扁平形状から、その南方伝播の証拠を提示した。この結果は、越後ほか(2022)で指摘された「非慣習的な  $f$  平面」における近慣性波の存在を支持するものである。さらに、その南方伝播する近慣性波の Ray-path は、湾奥付近において、反射波の上向き角度と海底斜面勾配がほぼ一致することがわかった。この

ような近慣性波に伴う回転振動流は海底泥を巻き上げ、乱泥流の発生を期待させる。解析した係留点 S07 は湾奥ではなかったものの、近慣性周期変動が大きくなる時期に対応した傾斜流(長周期変動)の出現をいくつか認めることができた。今後は富山湾の湾奥における係留流速観測を実施し、近慣性波と乱泥流の関係を調べていきたいと考えている。

#### 謝 辞

本論文を改訂するにあたり、本文及び図面のキャプションに対して、適切なコメントを数多く頂いた査読者に心より感謝致します。

#### 参 考 文 献

- 越後友利果・磯田 豊・伊藤海彦(2022) 日本海深層における近慣性周期 Gyroscopic Wave の海底反射. 海の研究, **31**, 71-98.
- Gerkema, T. and Shrira, V.I. (2005) Near-inertial waves in the ocean: beyond the 'traditional approximation'. *J.Fluid Mech.*, **529**, 195-219.
- Haren, V.H. and Millot, C. (2004) Recti-linear and circular inertial motions in the Western Mediterranean Sea. *Deep Sea Res.*, **51**, 1441-1455.
- 伊藤海彦・磯田 豊・千手智晴(2019) 日本海深層 Bottom Water 内における Gyroscopic Wave の 3 波共鳴. 北大水産研究彙報, **69**, 1-17.
- LeBlond, P.H. and Mysak, L.A. (1978) *Waves in the ocean.* Elsevier, New York.
- Senjyu, T. (2022) Deep current structure in the Toyama Deep-Sea Channel in the Japan Sea. *J. Oceanogr.*, **78**, 25-34.