

— 論 文 —

## 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\*

大慶 則之<sup>1\*\*</sup>・奥野 充一<sup>1</sup>・辻 俊宏<sup>1</sup>・千手 智晴<sup>2</sup>

### 要 旨

3つの台風が日本海上を相次いで通過した2004年秋季に能登半島東岸では大きな振幅を持つ周期的な流速変動が約1ヶ月間にわたって続いた。特に、台風0418号通過後の10日間の流速は、19.0～19.5時間の周期、 $50\text{ cm s}^{-1}$ 以上の振幅で変動した。この流速変動は半島東岸を北から南に伝播していた。水位と各層の水温は流速と同じ位相で変化し、南下流(北上流)時に上昇・昇温(下降・降温)していた。また、変動の卓越周期は各観測点の慣性周期に近く、1周期の間の流向の時間変化は時計回りであった。本論文では、半島東岸北部の変動には沖合で発生した近慣性内部重力波に起因する沿岸捕捉波の伝播のみが寄与しているが、半島東岸南部の変動には沿岸捕捉波の伝播のみならず富山湾から入射する回折波の寄与が大きいことを示す。また、連続して通過した台風により生じた近慣性周期運動が重なり合って、広い範囲で振幅が大きくなったことを示す。

キーワード：急潮、能登半島、近慣性周期、定置網漁業

### 1. はじめに

富山湾に面する石川県能登半島東岸では、台風や発達した低気圧が能登半島沖を通過した後に、沿岸の流れが突然強まる現象(急潮)が発生し、地域の基幹的漁業である定置網漁業にしばしば大きな被害を与えている。近

年では、台風の接近・上陸が相次いだ2003年から2005年に、定置網漁具の破損や流失など、合わせて20億円に達する甚大な被害が発生した(大慶ら, 2009)。

石川県水産試験場(現、石川県水産総合センター)は、1991年に台風19号が通過した直後に発生した急潮で多数の定置網に壊滅的な被害が生じたことを受けて、1993年から半島東岸で流れの連続観測を開始し、さらに2001年からはサーミスターチェーンによる水温の鉛直構造の連続観測を開始した。その結果、能登半島周辺の急潮は季節水温躍層の発達する時期に、台風や低気圧の通過にともなう強い南西風の後に発生しやすいことや、水温と水位の上昇をとまなう強い南下流として能登半島東岸を北から南に伝播することなどの特徴が明らかとなった(大慶・奥野, 2005; 大慶ら, 2009)。

一方、大慶ら(2009)は、2003年に能登半島東岸で得

\* 2013年3月28日受理; 2015年4月30日受理

著作権: 日本海洋学会, 2015

1 石川県水産総合センター

〒927-0435 石川県鳳珠郡能登町字宇出津新港3-7

2 九州大学応用力学研究所

〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1

\*\* 連絡著者: 大慶 則之

TEL: 0768-62-1324

e-mail: ookei@pref.ishikawa.lg.jp

られた急潮の観測データに慣性周期に近い流速変動を見出し、急潮には台風の通過に伴うイベント的な強流の他に、近慣性周期で繰り返し発生するタイプの強流が存在することを指摘している。日本海岸においては、北海道石狩湾(金成ら, 1987)や青森県へナシ崎沖(坂田・磯田, 2004), 佐渡両津湾(丸山, 2009), 京都府沿岸(熊木ら, 2010)など、多くの地点で近慣性周期の水温・流速変動が報告されている。これに対して太平洋岸では、著者の知る限り、相模湾での一事例(北出ら, 1996)しか見あたらない。これは、近慣性周期の内部重力波は発生域よりも低緯度側にしか伝播し得ないため(例えば Gill, 1982), 高緯度側に海が開けている日本海岸の方が、太平洋岸よりも近慣性周期の内部波の影響を受けやすいと考えられる。一般に日本海沿岸では潮汐・潮流が小さい(宇野木, 1993)。このため、日周期以下の流速変動のほとんどは近慣性周期変動によるものと考えられるが、その実態については不明な点が多い。

日本海上を3つの強い台風が相次いで通過した2004年8月下旬から9月中旬に、能登半島東岸では近慣性周期で変動する強流が約1ヶ月間にわたって継続するという特異な現象が発生した。この近慣性周期の流速変動の特徴は、過去に報告された事例と比較して振幅や継続時間が著しく大きいことである。浅ら(2007)は、この現象には能登半島北東沖で励起された慣性振動が関連していることを数値モデル実験による再現の試みから指摘している。しかしながら、この研究は台風通過直後の第1波の強流(後述)や現象のメカニズムに注目したものであったため、繰り返し発生する急潮に関しての詳細な検討はおこなわれていない。

定置網漁業者は、急潮の発生が予測されるときには定置網の一部(通常は魚を寄せて取る箱網と呼ばれる部分など)を事前に撤去して、網にかかる抵抗を減らすことで漁具の破損を回避しようとする。そして、急潮の終息を待って撤去した網の復旧作業を行う。しかし、繰り返し起こるタイプの急潮は、この操業再開に向けた作業や被害が発生した場合の修復作業の大きな障害となり、場合によっては作業者に危険をもたらす可能性がある。したがって、現場観測データを取りまとめて海況変動の全体像を明らかにすることは、現象の更なる理解に役立つばかりでなく、防災対策上も重要な意義を持つと考える。

そこで本報では、2004年9月に台風0418号が通過した後に繰り返し発生した急潮について、流速や水温、水位などにみられる近慣性周期変動の特徴を整理し、このタイプの急潮の発生・伝播機構について考察する。

## 2. 観測とデータ処理

観測点の位置を Fig. 1 に、観測内容を Table 1 に示す。能登半島北端の高屋と半島東岸の長手埼、小木、前波、大野木に係留系を設置し、長手埼、小木、前波、大野木では流向・流速、高屋、小木、前波では水温の連続観測を実施した。流向・流速観測にはメモリー式流速計(アレック電子(株)製 ACM-8M, COMPACT-EM)を用い、10 m 層の流向と流速を30分間隔で計測した。一方、水温観測にはメモリー式水温計(アレック電子(株)製 MDS-Mk V/t)で構成したサーミスターチェーンを使用し、表層から底層までの4層の水温を10分間隔で測定した。

この他に、能登半島沿岸の風と水位の変化を調べるた

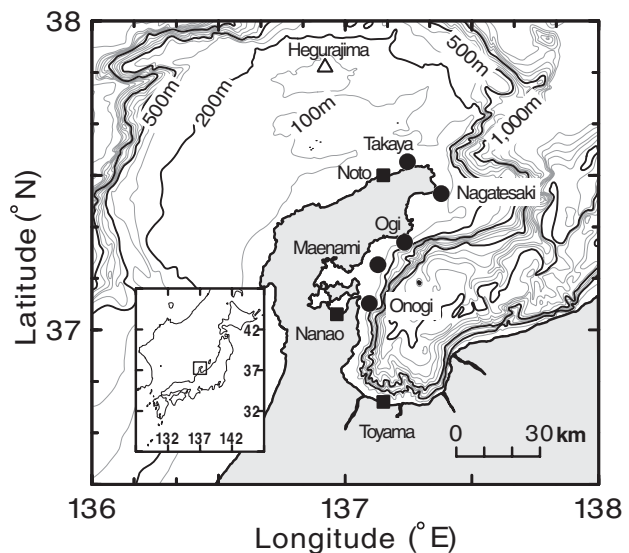


Fig. 1. Bottom topography around the Noto Peninsula and the locations of observation sites. Large solid circles, an open triangle and solid squares indicate mooring observation stations, a meteorological station, and tide stations, respectively.

Table 1. Summary of observation sites supplying data for this study.

Observation sites	Item	Sensor depth (m)	Time interval (min)	Bottom depth (m)
Takaya	Temperature	3,20,40,60	10	63
Nagatesaki	Current	10	30	63
Ogi	Current	10	30	75
Maenami	Temperature	9,27,45,65	10	83
	Current	10	30	
Onogi	Temperature	9,27,45,65	10	73
	Current	10	30	
Hegurajima	Wind	—	60	—
Noto	Sea level	—	60	—
Nanao	Sea level	—	60	—
Toyama	Sea level	—	60	—

め、輪島市沖約 50 km に位置する舳倉島で海上保安庁が観測した風向・風速データ、および気象庁による能登と富山、国土交通省北陸地方整備局による七尾の水位データを利用した。風向・風速と水位の観測間隔は 60 分である。能登と富山の水位は、各々、気象庁提供の水位偏差に気象庁輪島測候所と気象庁富山地方気象台で観測された海面気圧を用いた気圧補正を施したデータを解析した。七尾の水位は、気象庁伏木特別地域気象観測所で観測された海面気圧を用いて気圧補正した観測水位から潮時表 WSIO21 (酒巻輝幸, 2003) より求めた推算潮位を差し引いて算出した水位偏差を解析した。

### 3. 観測結果

#### 3.1 風と流れの変動の概要

2004 年夏季から秋季の風と流れの変動の特徴を概観するため、2004 年 7～9 月に舳倉島で観測された風ベクトルと、半島東岸の小木、前波、大野木で観測された流速ベクトルのスティックダイアグラムを作成した (Fig. 2)。流速ベクトルについては急潮時に卓越する岸を右手に見る方向を、風ベクトルについては急潮を励起する南西風の向き (大慶ら, 2009) をそれぞれ図の上方としている。7 月には顕著な気象擾乱の通過はなかったが、8 月には 3

日に台風 0410 号、5 日に台風 0411 号が勢力を弱めて能登半島沖を通過した。いずれも舳倉島では  $12 \text{ m s}^{-1}$  の南西風が観測されたが、これらに対応する強流は観測されていない。これに対して能登半島沖を台風 0415 号、0416 号、0418 号が相次いで通過した 8 月 19 日、8 月 31 日、9 月 8 日には、舳倉島で  $25 \text{ m s}^{-1}$  を超える南西寄りの強風が観測されている。台風通過後には各測点での流れが急に強まり、急潮が発生している。興味深いのは、各測点とも 8 月 20 日から約 1 ヶ月間にわたって  $50 \sim 100 \text{ cm s}^{-1}$  の強流が繰り返し発生していた点である。特に、小木では東西双方向に強流が反復して現れ、その振幅も  $100 \text{ cm s}^{-1}$  程度にまで達していた。しかし、9 月中旬以降は時間の経過とともに振幅が小さくなる傾向が認められる。強流が反復した約 1 ヶ月の期間中でも、特に振幅の大きな周期変動は台風 0418 号の通過後に現われていた。そこで次節以降では、台風 0418 号通過後の急潮に注目し、風と流れ、水温、水位変動について詳述する。

#### 3.2 台風 0418 号に伴う流速変動

台風 0418 号の経路を Fig. 3 に示す。台風 0418 号は、9 月 5 日に大型で非常に強い勢力 (中心気圧 925 hPa, 中心付近の最大風速  $50 \text{ m s}^{-1}$ ) で沖縄本島北部を通過した後、東シナ海で進路を北東に変え、7 日朝に長崎市付近

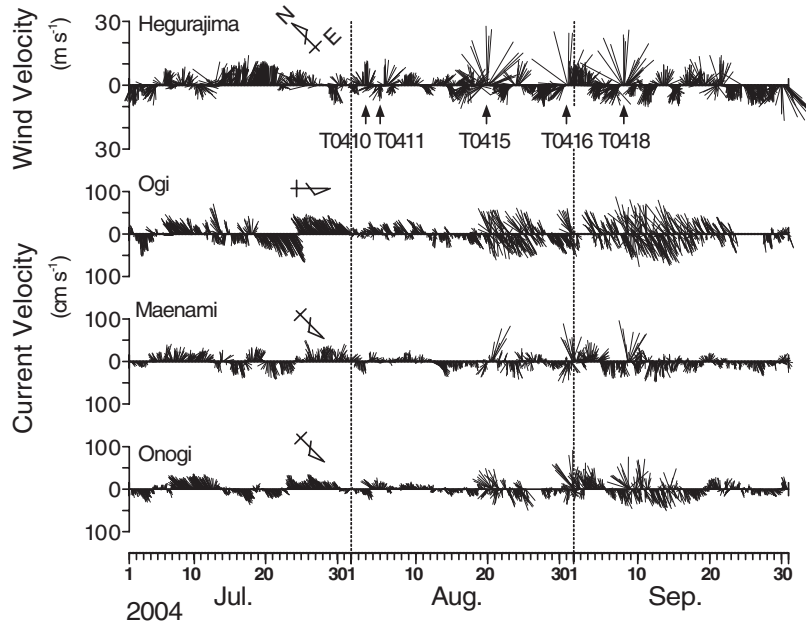


Fig. 2. Time series of wind vector at Hegurajima and current vectors at Ogi, Maenami, and Onogi during the period from July 1 to September 30, 2004. Arrows in the top panel indicate the events of strong southwesterly winds by typhoons. Ticks with numeral indicate 00:00 JST (UTC +09:00) of each day.

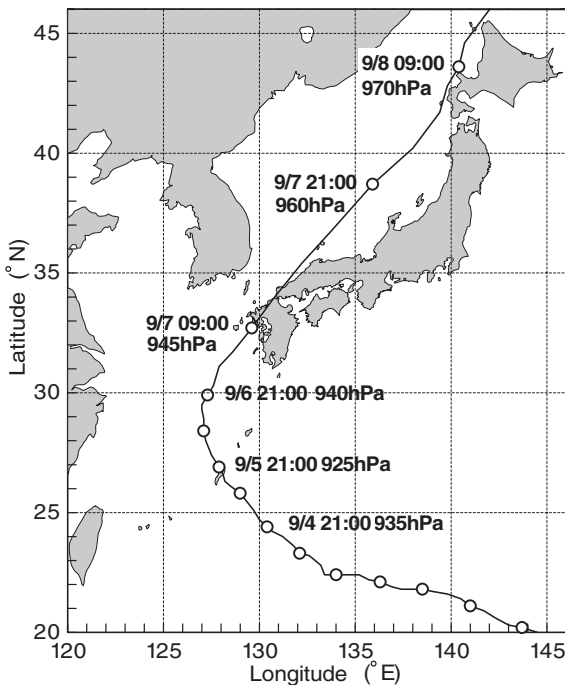


Fig. 3. Track of the Typhoon 0418. Circles indicate the positions every 12 hours from 21:00 on September 1, 2004, JST (UTC +09:00).

に上陸して九州北部を横断した。その後、7日午後には山陰沖に達し、暴風域を伴ったまま日本海を北東に進み、8日朝に北海道西海上で温帯低気圧となった。

Fig. 4 上段に、台風通過前後の9月5～19日に舢倉島で観測された風の時間変化を示す。台風が東シナ海上にあった9月6日には、舢倉島では3～11 m s<sup>-1</sup>の北～南東の風が吹いていたが、7日に台風が九州北部に接近すると東寄りの風が強まり、さらに山陰沖から北海道西岸に達した7日夕方から8日未明には、20 m s<sup>-1</sup>を超える南東から西南西の強風が観測されている。その後、風は8日午後から急速に弱まり、9～19日にかけては最大10 m s<sup>-1</sup>前後の北東風と南西風が2～3日周期で吹いていた。

同期間に長手埼、小木、前波、大野木で観測された卓越流向成分の流速変動を Fig. 4 の2段目以降に示す。台風0418号にともなう最大風速(南西風26 m s<sup>-1</sup>)は8日03:00に観測されているが(Fig. 4の上向き矢印)、各測点とも強風が吹き始める前の9月5～7日午前中にも周期的な流速変動を示していた(長手埼、小木では50 cm s<sup>-1</sup>程度の流れが周期的に流向を反転し、前波、大野木では北東方向の流れが周期的に強弱を繰り返していた)。



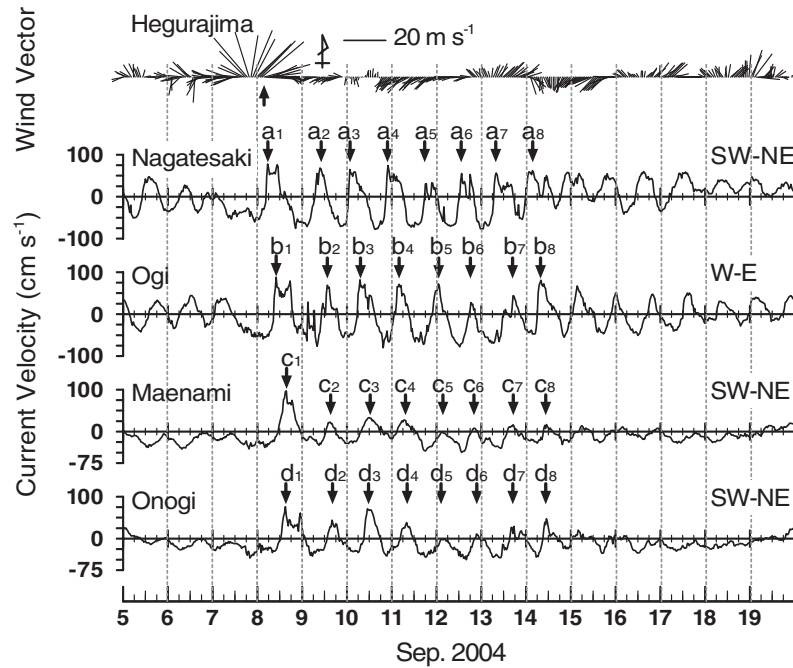


Fig. 4. Time series of wind vector at Hegurajima and the main-axis component of current variations at Nagatesaki, Ogi, Maenami, and Onogi, in September 5–19, 2004. An upward arrow indicates the time of the maximum wind. Downward arrows indicate the times of current velocity maxima. Ticks with numeral indicate 00:00 JST (UTC +09:00) of each day.

舳倉島での最大風速に対応して、能登半島東端の長手崎では9月8日05:00から突然南西方向の流れが強まり、05:30に $78 \text{ cm s}^{-1}$ の強流を記録した (Fig. 4の $a_1$ )。この岸を右手に見る方向の強流は、小木 (同日10:00, 西向き $88 \text{ cm s}^{-1}$ , Fig. 4の $b_1$ )、前波 (同日15:30, 南西向き $97 \text{ cm s}^{-1}$ , Fig. 4の $c_1$ ) と、半島東岸に沿って北から南に伝播しており、最も南の測点である大野木でも、これに対応すると思われる強流が観測されている (同日15:00, 南西向き $76 \text{ cm s}^{-1}$ , Fig. 4の $d_1$ )。本研究では、これらの強流を第1波の強流と呼ぶことにする。

第1波の強流の発生後には、各測点とも流れが反転し、さらに第1波の強流から23.5～28.0時間後には再び岸を右手に見る方向の強流が観測されている (Fig. 4の $a_2 \sim d_2$ )。同様の反復流は、徐々に振幅を減じつつも、台風0418号の通過から11日後の9月19日まで続いていた。これら $a_2 \sim d_2$ 以降の反復する強流を、本研究では第2波以降の強流と呼ぶ (便宜上, Fig. 4ではピークが明瞭な第2～8波を $a_2 \sim a_8$ ,  $b_2 \sim b_8$ ,  $c_2 \sim c_8$ ,  $d_2 \sim d_8$

と名付けている)。第2波以降の強流の振幅には、半島北東部の長手崎や小木で大きく、半島南部の前波や大野木では小さいという特徴がある。

第2波以降の強流は、沖合域で励起された慣性振動との関連が指摘されているが (浅ら, 2007), その沿岸域での挙動には不明な点が多い。そこで以下では、第1節で述べたように、第2波以降の強流に注目して解析を進める。

第2波以降の強流の卓越周期を見積もるため、各測点の卓越流向成分について9月9～18日の10日間のデータを抽出し、自己相関関数を計算した (Fig. 5)。最大相関は長手崎、小木、大野木では19.0時間、前波では19.5時間に現われており、各測点ともほぼ同様の周期で変動していたことがわかる。この周期は、各観測点の緯度 ( $37^{\circ}27' \sim 36^{\circ}45'N$ ) の慣性周期 (19.7～20.1時間) よりもわずかに短い。したがって、各測点では近慣性周期変動が卓越していたと言える。

次に、測点間の変動の位相差を見積もるために、観測

値から19時間移動平均値を差し引いた短周期変動成分を求め、隣り合う測点間で相互相関関数を計算した (Fig. 6)。その結果、小木は長手埼より4.5時間の遅れ、前波は小木より2.0時間の遅れ、大野木は前波より0.5時間の遅れに最大相関が現れた。このことは、第2波以降の強流についても、長手埼から大野木に向かって変動が伝播していたことを意味する。見積もられたタイムラグと測点間の距離から計算される変動の伝播速度を Table 2に示す。長手埼～小木では  $1.3 \text{ m s}^{-1}$ 、小木～前波では  $1.9 \text{ m s}^{-1}$  であった伝播速度が、前波～大野木では  $7.5 \text{ m}$

$\text{s}^{-1}$  と極端に大きくなっている。これは、前波～大野木のタイムラグが0.5時間と極端に短くなっていることに起因するが、流速のサンプリング間隔が30分であることを考えると、実質的には両測点の変動は同位相であったと判断される。

### 3.3 水温と水位の変動

台風通過前後の9月5～19日に高屋、小木、前波で観測された水温変動を Fig. 7に示す。流速変動と同様に、

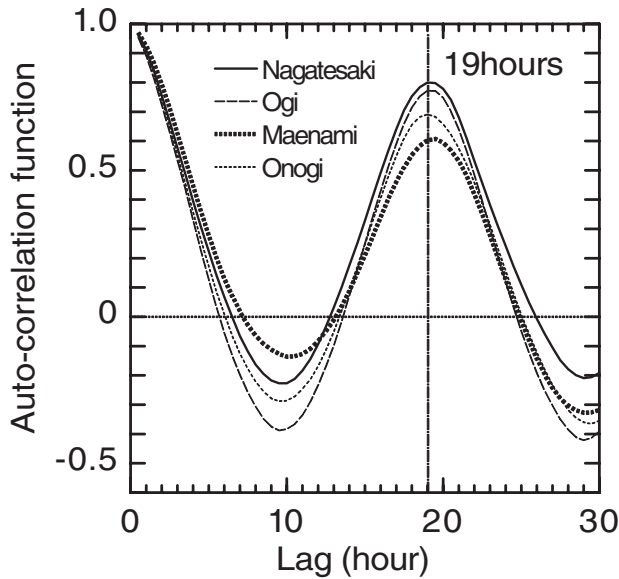


Fig. 5. Auto-correlation functions of main-axis components of current variations at Nagatesaki (SW-NE), Ogi (W-E), Maenami (SW-NE), and Onogi (SW-NE) in September 9-18, 2004.

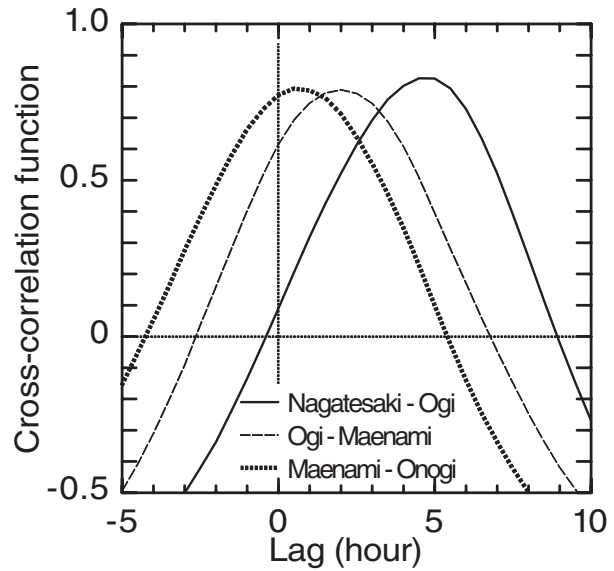


Fig. 6. Cross-correlation functions between variations of currents at Nagatesaki-Ogi, Ogi-Maenami, and Maenami-Onogi in September 9-18, 2004, calculated from the main-axis component of current variation anomalies from 19-hour running mean.

Table 2. Propagation speeds of near-inertial strong currents estimated from time lags between pairs of observation sites.

Sites	Distance (km)	Lags (hours)	Speed ( $\text{m s}^{-1}$ )
Nagatesaki-Ogi	21.4	4.5	1.32
Ogi-Maenami	13.6	2.0	1.89
Maenami-Onogi	13.5	0.5	7.50

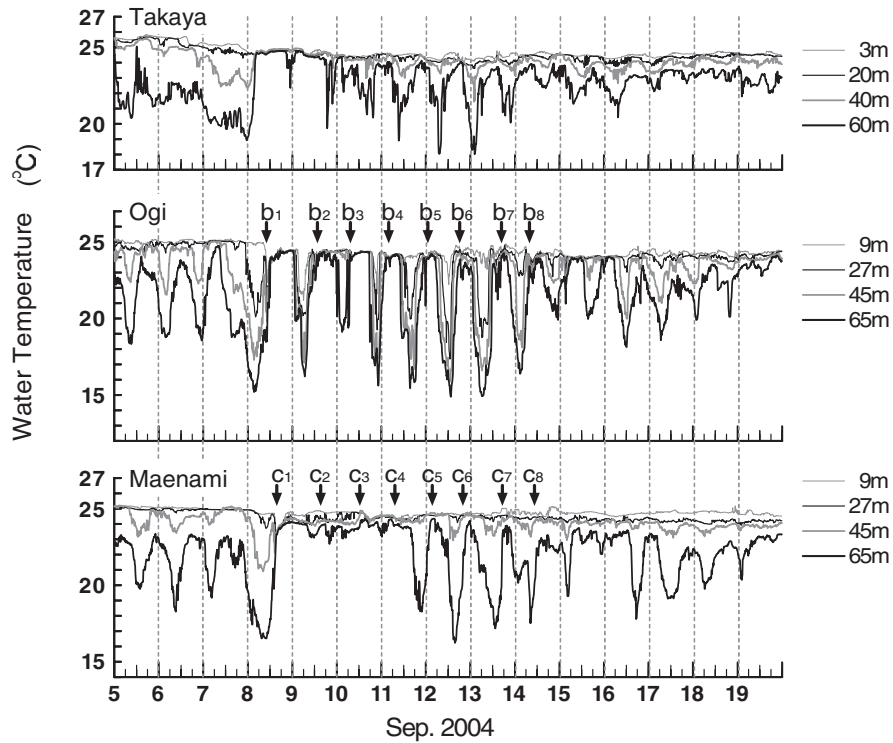


Fig. 7. Time series of temperature at Takaya, Ogi, and Maenami in September 5-19, 2004. Arrows labeled  $b_1$ - $b_8$  and  $c_1$ - $c_8$  indicate the times of current velocity maxima shown in Fig. 4. Ticks with numeral indicate 00:00 JST (UTC +09:00) of each day.

小木と前波では台風接近前の9月5日～7日午前中にも顕著な周期変動が認められる。台風接近にともなう南西風の強まりに対応して、高屋では8日00:00前後、小木では同日04:00過ぎ、前波でも同日09:00を境に各層の水温が急上昇し、全層の水温がほぼ同じ値（高屋：24.2～24.5℃、小木：24.0～24.1℃、前波：22.4～23.2℃）を示した。この状態が、高屋では約2日間、小木では約12時間、前波では約3日間継続し、その後、顕著な周期変動が現れた。各測点とも変動の振幅は下層ほど大きく、11～14日を中心に大きな振幅を示していた。その後、水温変動の振幅は徐々に小さくなるが、小木と前波では18日になっても明瞭な周期変動が認められた。

注目されるのは、第1波の強流 (Fig. 7の  $b_1$  と  $c_1$ ) は各層の水温が急上昇する時期に発生しているのに対して、第2波以降の強流 (Fig. 7の  $b_2 \sim b_8$ ,  $c_2 \sim c_8$ ) は各層の水温がほぼ上昇きった時期に観測されていることである。また Fig. 4 と Fig. 7 を比較すると、小木と前波で流

れが極小を示す時期と、水温が最低値を示す時期が対応していることがわかる。同様の特徴は、台風接近前の9月5日～7日に小木と前波で観測された周期変動にも認められる。

第2波以降の水温変動の卓越周期を見積もるため、最も振幅が大きい小木と前波の65m層のデータを用いて、9月9～18日の10日間の変動について自己相関関数を求めた (Fig. 8)。小木では19.2時間、前波では19.3時間で最大相関を示している。この値は流速変動の卓越周期 (19.0～19.5時間) と一致している。

同時期に能登、七尾、富山で観測された水位偏差を Fig. 9 に示す。半島北端の能登では、南西寄りの風が強まった7日深夜から8日未明にかけて水位が急上昇し、舳倉島で最大風速が観測された時刻から2時間後の8日05:00に最大水位を記録している。その後、水位は8日午後一旦低下したが、9日未明には再び極大を示し、その後は振幅を弱めながらも13日まで明瞭な振動を繰り返

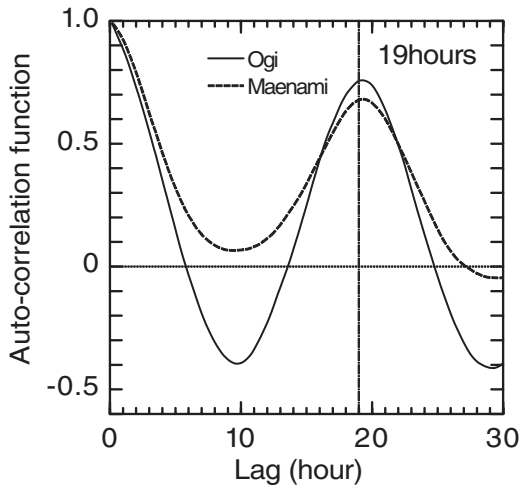


Fig. 8. Auto-correlation functions of temperature variations at 65 m depth off Ogi and Maenami in September 9-18, 2004.

していた。類似の周期変動は七尾や富山の水位にも認められる。そこで、9月9～18日の水位変動について自己相関関数を求め卓越周期を見積もったところ、最大相関はいずれも19時間に現れた (Fig. 10)。この周期は、流速や水温変動の卓越周期とほぼ一致している。

Fig. 9 中段の七尾の水位変動には、距離的に近い前波で強流が観測された時刻 ( $c_1 \sim c_8$ ) を矢印で示してある。水位と流速はほぼ同位相で変動しており、前波での南西 (北東) 向きの流れに対応して七尾の水位が上昇 (下降) していたことがわかる。なお、Fig. 9 からは、能登の水位変動が七尾、富山へ伝播している様子が読み取れる。そこで、測点間の相互相関を調べると、七尾では能登に対して8時間、富山では七尾に対して4時間の位相の遅れが見積もられた。

水温、水位変動で興味深いのは、近慣性周期の変動に

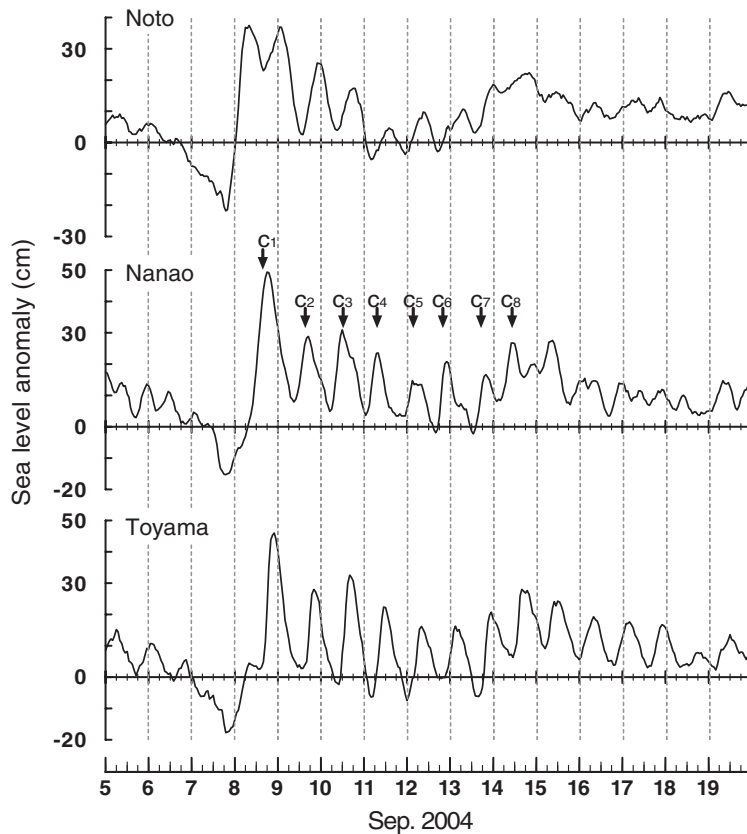


Fig. 9. Time series of sea-level anomalies from predicted sea levels at Noto, Nanao, and Toyama in September 5-19, 2004. Arrows labeled  $c_1$ - $c_8$  in the middle panel (Nanao) show the times of current velocity maxima observed at Maenami (Fig. 4). Ticks with numeral indicate 00:00 JST (UTC +09:00) of each day.



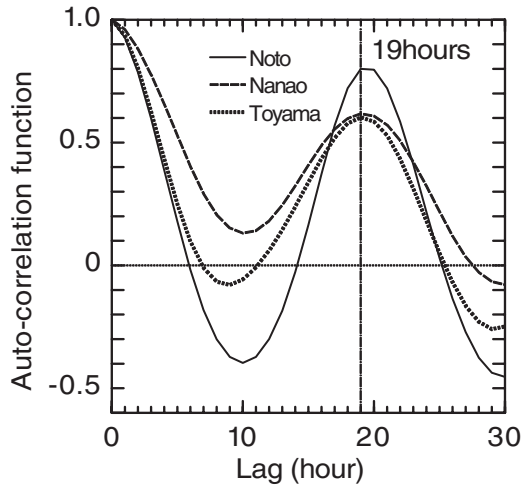


Fig. 10. Auto-correlation functions of sea-level anomalies from predicted sea levels at Noto, Nanao, and Toyama in September 9-18, 2004.

加えて、数日（5～6日）周期の変動が現れていることである。七尾の水位偏差（Fig. 9）に注目すると、前波で第1～3波の強流が観測された9月8～10日は高水位な時期となっているが、引き続き9月11～13日は比較的低水位な時期となっており、さらにその後の9月14～15日には再び水位が上昇している。同様の数日周期変動は、能登と富山にも現れている。水位偏差の小さい時期（9月11～13日）は、中層で深層の水温が大きく変動した期間（すなわち底層に低温な海水が現れ、成層が強化された期間）と対応している（Fig. 7）。一方、水位偏差の大きな時期（9月8～10日および14～15日）は、表層と底層の水温差が小さい期間（すなわち亜表層の水温が比較的高い期間）となっている。このような数日周期変動は、流速変動には認められない（Fig. 4）。

## 4. 考察

### 4.1 流速、水温、水位の変動特性

台風0418号の通過とともに周期的な流速、水温、水位変動の特徴をまとめると、以下ようになる。台風0418号が能登半島沖を通過した2004年9月8日未明から午前中にかけて、第1波の強流が発生し、水温と水位

の上昇をともなう強流が半島東岸を北から南に向かって伝播した。その後、半島東岸の各測点では  $50 \text{ cm s}^{-1}$  以上の振幅をもつ19.0～19.5時間周期の顕著な流速変動（第2波以降の強流）が現れ、少なくとも9月18日まで継続した。第2波以降の強流も半島東岸を北から南に向かって伝播していた。また、流速変動の振幅には時空間的な特徴がみられ、空間的には半島北東部の長手埼、小木で大きく、時間的には徐々に減衰する傾向が認められた。水温も流速とほぼ同位相で周期的に変化し、小木では西（東）向きの流れ、前波では南西（北東）向きの流れに対応して各層の水温が上昇（下降）していた。また、水位も流速変動に同期して昇降しており、前波の南西（北東）向きの流れに対応して七尾の水位が上昇（下降）していた。さらに、水位と水温には5～6日周期の変動も認められた。

### 4.2 近慣性周期変動の伝播過程

第2波以降の強流にみられた流速、水温、水位変動の卓越周期（19.0～19.5時間）は、各観測点の緯度（ $37^{\circ}27' \sim 36^{\circ}45' \text{N}$ ）の慣性周期（19.7～20.1時間）よりもわずかに短いものであった。このことは、能登半島よりも北（高緯度域）で発生した近慣性周期の内部重力波が南（低緯度域）に伝播し、それが能登半島沿岸に波及したことを示唆している。そこで、振幅の大きな長手埼、小木の流速の東西、南北成分について、観測値から19時間移動平均値を差し引いた19時間以下の周期成分についてホドグラフを作成し、流速変動のパターンを調べた。台風通過後の9月9～11日におけるほぼ1周期ごとの流速変動の様子をFig. 11に示す。数時間程度の短周期変動のためホドグラフの軌跡にばらつきがみられるが、1周期を通してみると、流向が時計回りに変化している様子が見えてくる。これらは近慣性周期の内部重力波の特徴を表しているが、軌跡が等深線の方向に長軸をもつ楕円を示していることは、円に近い軌跡をもつ近慣性周期の内部重力波がそのまま波及したのではないことを意味している。Igeta *et al.* (2009)の数値実験によると、高緯度域から伝播してきた近慣性周期の内部重力波は、能登半島の先端付近で散乱と回折を起こし、散乱によって生じた波は、沿岸捕捉波として半島東岸を北から南へと伝播す

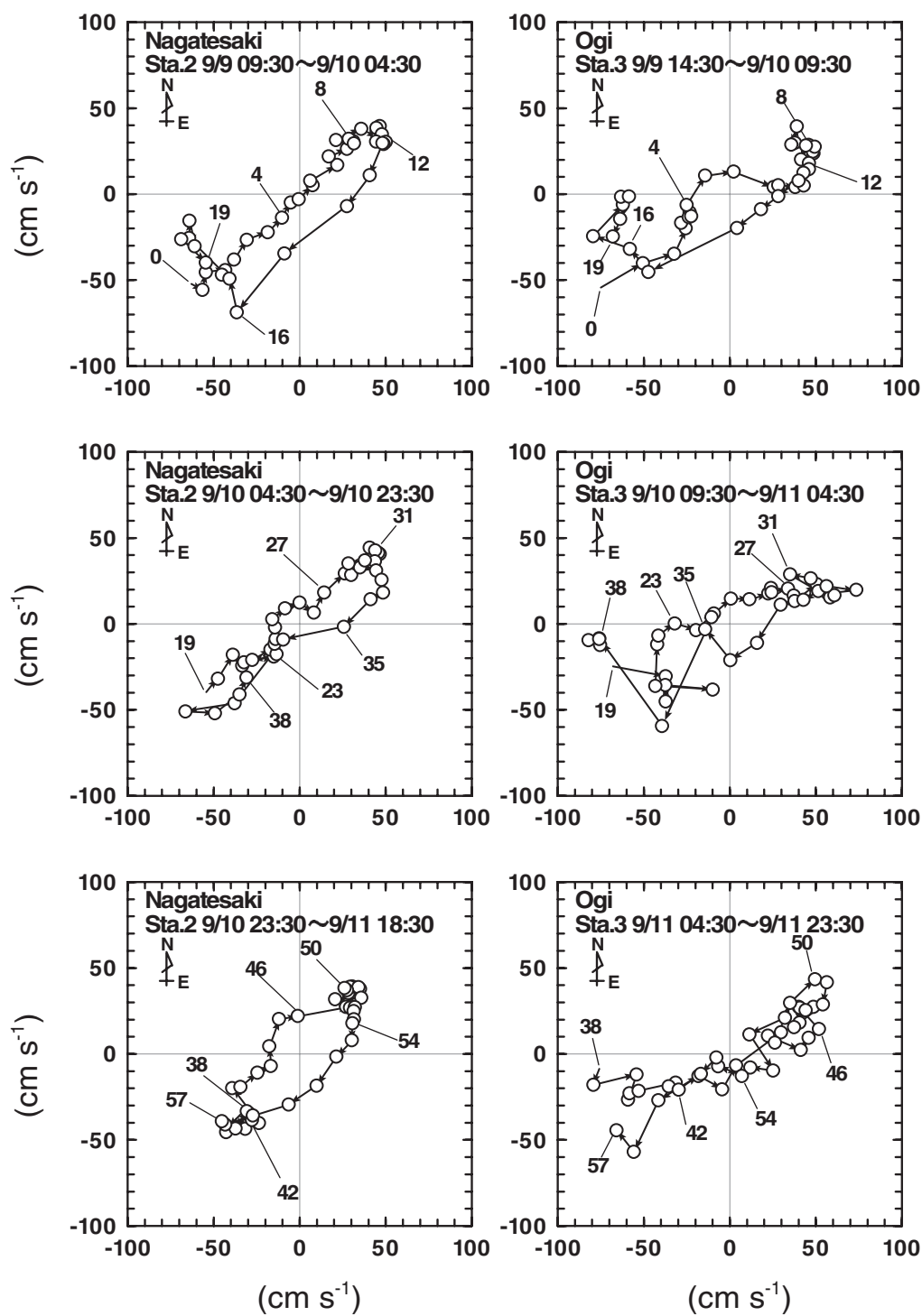


Fig. 11. Hodographs of current velocity anomalies from 19-hour running mean at Nagatesaki and Ogi in September 9-11, 2004. Open circles indicate ends of current velocity vectors at every 30 minutes. Numerals indicate elapsed time (hours) from the second strong currents.

る。しかし、夏季のこの海域の成層パラメータ（ロスピーの内部変形半径と陸棚幅の比）は2.0程度であり、内部ケルビン波タイプの沿岸捕捉波が発生することが考えられる（浅ら, 2007）。観測された流速と水温、水位がほぼ同位相で変動していたこと、すなわち第2波以降の強流は進行波の特徴を示すことから、長手埼から前波にかけての強流の伝播は、近慣性周期の内部ケルビン波によるものと言える。

次に、第2波以降の強流の伝播速度（Table 2）について考察する。第2波以降の強流も半島東岸を北から南へと伝播し、その伝播速度は、長手埼～小木では $1.3 \text{ m s}^{-1}$ 、小木～前波では $1.9 \text{ m s}^{-1}$ であった。前波～大野木では $7.5 \text{ m s}^{-1}$ と見積もられたが、能登半島周辺海域で、これほど大きな位相速度をもつ内部モードの現象があるとは考えにくい。このことから、前波と大野木には沖合からほぼ同時に強流が到達したと考えるのが妥当であろう。

先に、高緯度域から伝播した近慣性周期の内部重力波は能登半島の先端付近で散乱と回折を起こすことを述べた。しかし、半島先端で回折した内部重力波は、その波面を南北方向に変え、半島の東方（富山湾）から西向きに半島東岸に入射することが数値実験により示されている（Igeta *et al.*, 2009）。また、岸に沿って伝播してきた沿岸捕捉波（内部ケルビン波）は、伝播の過程で沖向きにエネルギーを放射して急速に減衰する（Igeta *et al.*, 2009）。

したがって、半島南部の前波と大野木では、沖合から直接入射する近慣性内部重力波の影響を強く受ける。前波と大野木の強流伝播のタイムラグが小さく見積もられたのは、この沖合から直接入射する波の影響と考えられる。

### 4.3 大規模な近慣性周期変動の発生理由

続いて、2004年秋季に、なぜこのような大規模な近慣性周期変動が発生したのかについて検討する。近慣性周期の運動は、成層状態や急激な風速変化（広瀬ら, 2010）、運動を励起する風のエネルギーの大きさ（風速と吹送時間）と深く関連しているが（Mori *et al.*, 2005; 浅ら, 2007）、これに加えて風向が時計回りに変化する場合に発達しやすいことが知られている（広瀬ら, 2010; Igeta *et al.*, 2011）。そこで、2004年8～9月に日本海を通過した台風について、舳倉島における最大風速発生時刻の前後10時間の風速の hodograph を作成し、風の変化傾向を調べた（Fig. 12）。比較のために、8月上旬に日本海を通過した2つの台風（0410号と0411号）と急潮の発生に関与した台風0415号、0416号、0418号に分けて hodograph を示す。能登半島付近では、台風や低気圧が沖合を通過すると風向が時計回りに変化し、最大風速時には吹き返しの南西風が卓越するケースが多い。2004年のケースでも時計回りの風向変化が認められるが、台風0415号、

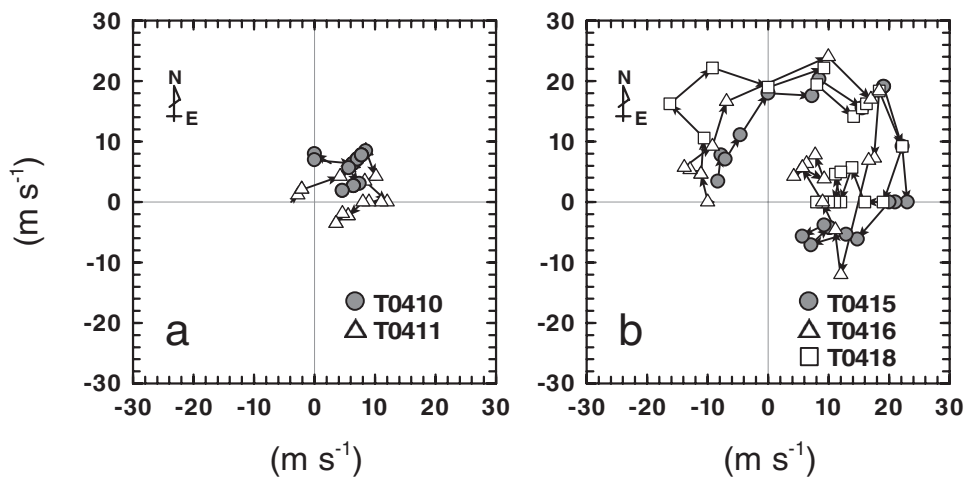


Fig. 12. Hodographs of the wind at Hegurajima for (a) Typhoons 0410 and 0411 and (b) Typhoons 0415, 0416, and 0418 from 10 hours before to 10 hours after the time when the maximum wind velocity was observed. Marks indicate ends of wind velocity vectors at every one hour.

0416号, 0418号の場合は, 最大風速が  $26 \sim 27 \text{ m s}^{-1}$  に達する急激な変動を示しており, 台風0410号や0411号と比較して軌跡は大きな円弧を描いている。このことは, 台風0415号, 0416号, 0418号のケースでは, 強風が時計回りに向きを変えながら長時間連吹していたことを示している。能登半島沿岸の成層構造は8~9月に最も強まること(千手・大慶, 2011)を考え合わせると, 2004年秋季とは, 「季節躍層が発達した時期に, 近慣性周期運動を励起しやすい特徴を備えた台風が相次いで通過した期間」と捉えることができる。各測点とも台風0418号の通過前から近慣性周期変動が観測されていたことを考えると(Fig. 4), 一連の台風の通過によって次々に近慣性周期の内部波が励起され, それらが重なり合うことによって, 振幅が増幅された可能性がある。

#### 4.4 5~6日周期の変動

水位偏差には, 海洋内部の成層構造と関連した5~6日周期の変動が認められたが, これは風により励起された長周期の沿岸捕捉波(陸棚波)と考えられる。Igeta *et al.* (2011)は, 近慣性周期の変動に陸棚波が重なることにより強流が発生するメカニズムについて議論している。今回のケースでも, 一連の台風によって発生した陸棚波が, 能登半島東岸の水位や水温構造に影響を与えていたと考えられる。しかしながら, 数日周期の水温変動は, 小木では27m以深, 前波では65m深にのみ認められ, 流速計の設置水深(10m)に近い9m深の記録にはほとんど現れていない(Fig. 7)。このことから, 陸棚波にともなう流速変動は比較的深いところに限られていたと考えられ, これが数日周期の明瞭な流速変動が観測されなかった原因と考えられる。

#### 4.5 第1波の強流の位相伝播

本論文の主題は第2波以降の強流であるが, 以下では, 第1波の強流の位相伝播について考察する。本研究では, 第1波の強流は, 台風にもなう南西風によって能登半島北西岸に堆積した沖合暖水が, 風の弱まりとともに回転系での沿岸密度流として伝播する現象(大慶ら, 2009)と考え, 第2波以降の強流とは区別した。この根

拠は, 3.3節に示した通り, 第1波の強流は各層の水温が急上昇する時期に観測されていたのに対して, 第2波以降の強流は各層の水温がほぼ上昇しきった時期に観測されていたことにある。水温の時間変化が躍層の鉛直変位を反映したものと考えると, 第2波以降の強流は進行波的な性質をもつものに対して, 第1波の強流は密度流的な性質を示している(千手・大慶, 2014)。

第1波の強流が密度流に起因するのであれば, 最初の流速のピークは小木, 前波, 大野木の順に現れるはずである。ところが, 前波の最大流速は9月8日15:30に記録されているのに対し(Fig. 4の  $c_1$ ), 大野木では同日15:00に観測されている(Fig. 4の  $d_1$ )。この理由として, 今回の観測では, 前波では第1波の強流を捉えていなかった可能性が考えられる。実際, 前波の観測データを無視すると, 小木から大野木までの第1波の強流の伝播速度は, 直線距離(25.6 km)とタイムラグ(5時間)から  $1.4 \text{ m s}^{-1}$  と見積もられ, 長手埼から小木までの伝播速度( $1.3 \text{ m s}^{-1}$ )に近いものとなる。能登半島東岸の海底地形(Fig. 1)をみると, 小木と大野木では陸棚(200 m 等深線で示される)の幅が狭く, 観測点も陸棚縁付近に位置していることがわかる。これに対して前波周辺は陸棚の幅が広く, 比較的平坦な場所である。このため, 強流が観測される場所は狭い範囲に限定されないことが予想される。過去の急潮を統計的にまとめた大慶ら(2012)によると, 前波では最大流速時の流向が比較的広い範囲(南南西~西)に分布しており, また舳倉島で最大風速を観測してから最大流速が発生するまでのタイムラグも, 小木や大野木に比べてばらつきが大きいことが報告されている。これらの事実は, 前波では強流が出現する場所が不安定であることを示唆している。さらに, 同海域の急潮を扱った大慶ら(2009)や千手・大慶(2014)では, 第1波の強流は, 小木から前波, 大野木の順に陸岸に沿って伝播していることから, 今回のケースでも, 前波沖を強流が通過したのは実際にはもう少し早い時刻であった可能性があり, 今後, 検証が必要である。

## 5. おわりに

本研究では, 2004年9月の台風0418号通過後に能登半島東岸で発生した, 大きな振幅を持つ流速の周期変動



について、現場観測データにみられる特徴を整理し、その発生・伝播機構を調べた。台風0418号が能登半島沖を通過した2004年9月8日には、水温と水位の上昇を伴う第1波の強流が能登半島東岸を北から南へと伝播した。その後、各測点で強い反復流(第2波以降の強流)が発生し、台風の通過から11日後まで継続した。第2波以降の強流は、観測点の慣性周期に近い19.0~19.5時間の卓越周期と、 $50 \text{ cm s}^{-1}$ 以上に達する振幅をもち、さらに半島東岸を北から南に伝播するという特徴を示した。水温と水位も流速と同位相で変化し、南下流(北上流)に対応して各層の水温と水位が上昇(下降)していた。本研究では、半島東岸北部の第2波以降の強流は、1周期の間に流速ベクトルが時計回りに1回転したことや夏季の成層状況から、沖合で発生した近慣性重力波に起因する内部ケルビン波による可能性が高いのに対し、半島東岸南部では、これに加えて富山湾から直接入射する回折波の寄与も大きいことを示した。また、連続して通過した台風により生じた近慣性周期運動が重なり合って、広い範囲で振幅が大きくなった可能性を示した。

石川県水産総合センターでは、台風や低気圧の接近によって能登半島周辺で急潮の発生が予見される場合には、過去の現場観測データから統計的に見積られる第1波の強流の規模や発生時刻を「急潮情報」の形で定置網漁業者に配信し、防災への注意喚起を行っている(大慶ら, 2012)。しかしながら、繰り返し発生するタイプの急潮(第2波以降の強流)は長期間継続するため、被災した定置網漁具の復旧作業や操業の停止期間を長期化させるだけでなく、海上作業の安全を脅かす危険性の高い流れと考えられる。今後は、繰り返し発生するタイプの急潮についても、その規模や継続期間を精度良く予測できるような観測データの蓄積と予測技術の開発を進める必要がある。

## 謝辞

係留観測を始めとする各種観測の実施に多大な尽力をいただいた石川県漁業指導調査船「禄剛丸」又多敏昭船長(当時)、「白山丸」白田光司船長(当時)をはじめとする乗組員の方々に心から感謝申し上げます。舩倉島の気象観測データは第九管区海上保安本部七尾海上保安部か

ら提供していただきました。厚く御礼申し上げます。本研究の一部は、農林水産省「農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業」より援助を受けました。

## References

- 浅 勇輔, 広瀬 直毅, 千手 智晴 (2007): 能登半島東岸において2004年に発生した急潮の数値実験. 海の研究, **16**, 39–50.
- Gill, A. E. (1982): *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, New York, 662 pp.
- 広瀬直毅, 北出裕二郎, 井桁庸介, セルゲイ バルラモフ (2010): 日本海における急潮の再現と予測の数値シミュレーション. ていち, **117**, 1–13.
- Igeta, Y., Y. Kumaki, Y. Kitade, T. Senjyu, H. Yamada, T. Watanabe, O. Katoh and M. Matsuyama (2009): Scattering of near-inertial internal waves along the Japanese coast of the Japan Sea. *J. Geophys. Res.*, **114**, C10002.
- Igeta, Y., T. Watanabe, H. Yamada, K. Takayama, and O. Katoh (2011): Coastal currents caused by superposition of coastal-trapped waves and near-inertial oscillations observed near the Noto Peninsula, Japan. *Cont. Shelf Res.*, **31**, 1739–1749.
- 金成誠一, 小賀百樹, 竹内謙介, 辻正明 (1987): 北海道余市沿岸の近慣性内部波. 北海道大学地球物理学研究報告, **49**, 369–379.
- 北出裕二郎, 松山優治, 岩田静夫, 石戸谷博範, 清水顕太郎, 渡部勲 (1996): 台風の通過に伴う相模湾の水温・流動変動. 沿岸海洋研究, **33** (2), 191–202.
- 熊木豊, 戸嶋孝, 上野陽一郎, 傍島直樹 (2010): 低気圧の日本海通過に伴い京都府沿岸で発生した急潮. 京都府農林水産技術センター海洋センター研究報告, **32**, 1–6.
- 丸山克彦 (2009): 台風0613号通過に伴う両津湾における流れと水温の変化. 新潟県水産海洋研究所研究報告, **2**, 45–49.
- Mori, K., T. Matsuno, and T. Senjyu (2005): Seasonal/Spatial Variations of the Near-Inertial Oscillations in the Deep Water of the Japan Sea. *J. Oceanogr.*, **61**, 761–773.
- 大慶則之・奥野充一 (2005): 能登半島東岸で観測された急潮の特性. ていち, **108**, 1–10.
- 大慶則之, 奥野充一, 千手智晴 (2009): 気象擾乱通過後に能登半島沿岸で観測された急潮. 海の研究, **18**, 57–69.
- 大慶則之, 奥野充一, 辻俊宏, 千手智晴 (2012): 能登半島周辺に急潮を引き起こす気象条件の特徴の解明—急潮防災を目指して. 水産海洋研究, **76** (3), 131–140.
- 酒巻輝幸 (2003): 潮時表ソフト21世紀バージョン WSIO21. <https://www.twin.ne.jp/~sakamaki/> (2015年4月30日最終閲覧)
- 坂田陽一郎・磯田豊 (2004): 青森県ヘナシ崎沖で観測された近慣性振動流. 北大水産彙報, **55** (2), 121–137.
- 千手智晴・大慶則之 (2011): 日本海能登半島沖海域の海洋構造と対馬海流モニタリングに対する重要性. 海と空, **87** (2), 33–48.
- 千手智晴・大慶則之 (2014): 沿岸密度流としての日本海の急潮. 九州大学応用力学研究所所報, **146**, 115–122.
- 宇野木早苗 (1993): 沿岸の海洋物理学. 東海大学出版会, 672 pp.



## Large-scale periodic strong currents off the eastern coast of the Noto Peninsula observed in autumn 2004

Noriyuki Okei<sup>1\*</sup>, Junichi Okuno<sup>1</sup>, Toshihiro Tsuji<sup>1</sup> and Tomoharu Senju<sup>2</sup>

### Abstract

Three typhoons successively passed the Noto Peninsula over a period of approximately one month in autumn 2004, and the strong currents produced by the typhoons periodically attacked the eastern coast of the peninsula. The current records for 10 days following the passage of Typhoon 0418 showed notable periodic variations with amplitudes exceeding  $50 \text{ cm s}^{-1}$  and periods of 19.0–19.5 hours. The periodic current variations were observed to propagate from the north to the south along the eastern coast of the peninsula. The southward (northward) currents were accompanied by an increase (decrease) in the subsurface temperature and by sea level anomalies at the observation sites. All of the predominant periods of current, temperature, and sea level variations approximated the inertial periods at the observation sites, and the current vectors completed one clockwise rotation during one period. This study shows that the periodic current variations in the vicinity of the northern part of the peninsula are caused by the propagation of coastal trapped waves derived from near-inertial internal waves in the offshore area, whereas those in the vicinity of the southern part of the peninsula are caused by the direct incident of diffracted waves from Toyama Bay. The large-scale near-inertial motions with large amplitudes can be attributed to the superposition of near-inertial waves caused by each of the successive three typhoons.

**Key words** : Kyucho, Noto Peninsula, near-inertial period, set-net fishery

(Corresponding author's e-mail address : ookei@pref.ishikawa.lg.jp)

(Received 28 March 2013; accepted 30 April 2015)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2015)

---

1 Ishikawa Prefecture Fisheries Research Center

3-7 Ushitsu Notochou, Housugun, Ishikawa, 927-0435, Japan

2 Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

6-1 Kasuga-koen, Kasuga city, Fukuoka, 816-8580, Japan

\* Corresponding author : Noriyuki Okei

TEL : +81768621324

e-mail : ookei@pref.ishikawa.lg.jp