船舶搭載型 ADCP で捉えた富山湾から佐渡海峡の流れの特徴

小関修治¹・千葉元²・道田豊³・橋本心太郎⁴

The Characteristics of the Flow Pattern at from Toyama Bay to Sado Channel by onboard ADCP Observations

Shuji OZEKI¹, Hajime CHIBA², Yutaka MICHIDA³ and Shintaro HASHIMOTO⁴

Abstract

The observations using Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) onboard the National Institute of Technology, Toyama College training ship “Wakashio-maru” have been done from 2004. In this study, the ocean current at the area, Toyama Bay to Sado channel, had been measured and analyzed for the characteristics. We also compared these ADCP observations with a numerical simulation results and satellite remote sensing data for chlorophyll-a concentration. ADCP data is only around ship’s track. So, with comparing these data, it would be able to know the situation of wide area. By the observations at summer seasons of 2014 and 2015, we have observed the main path of “Tsushima Warm Current” are flowing into Sado Channel, which the direction from North to NE and the speed about $0.6\sim 0.8\text{ms}^{-1}$. And, between Noto peninsula and Sado island, an eddy or U shape curve current was observed.

Keywords : navigation and earth environment, ADCP, ocean current, oceanographic observation, Tsushima warm current

キーワード: 航海・地球環境、ADCP、海潮流、海洋観測、対馬暖流

1. はじめに

太平洋を南から日本列島に向かって北上して流れる黒潮は九州南方で分岐し、対馬海峡を経て日本海には対馬暖流として流れこみ、200~300mほどの厚さを持つ。日本海沿岸部を北上する対馬暖流は能登半島北部を通過後、佐渡島を南北に迂回して北上すると同時に、一部が富山湾へと流れこむ。この日本海を北上する対馬暖流の下層には、深層水である日本海固有水が水深 100m 以下に広く分布している。また、富山湾沿岸部の大陸棚は狭く、沖に向かい急峻な地形となり、深さが約 1000m に達する海底谷を有する。また、富山湾には立山連峰を起源とする多くの河川水が流入している。これが塩分の低い沿岸表層水として湾内に広く分布している⁽¹⁾⁽²⁾。

こうした水塊の鉛直構造や海底地形の影響により、この海域は複雑な流れを形成すると思われる。本研究では、こうした富山湾東部から佐渡海峡にかけての海潮流のメカニズムを把握し、漁業、海洋汚染の監視と予測、船舶の安全運航、漂流物の調査と推測、海岸施設設計の基礎データ等に貢献することを目的としている。このため、富山高専が所有する練習船「若潮丸」(全長 54m, 総トン数 231t)に搭載された ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)を使用し、富山湾で海潮流観測を行ってきた。ここで、2014 年と 2015 年の練習船「若潮丸」の新潟港への入渠航海の際に観測した ADCP データを数値計算データ及び人工衛星リモートセンシングデータと比較検証し富山湾から佐渡海峡海域の海潮流の特性把握を行った。

¹ 学生会員 富山高等専門学校海事システム工学専攻 ms1412402@nc-toyama.ac.jp

² 正会員 富山高等専門学校商船学科 chiba@nc-toyama.ac.jp

³ 非会員 東京大学大気海洋研究所 ⁴ 正会員 国土交通省 北陸地方整備局 新潟港湾・空港整備事務所 (研究当時・富山高等専門学校 練習船「若潮丸」)

2. 富山湾周辺の流れの先行研究

富山湾から佐渡海峡は、古くから漁業・海上物流の拠点なので、多くの観測が実施されてきた。

富山県水産研究所では富山湾内外に34定点を定め、1953年より月一回のCTD観測をおこなっている。同所の内山⁽¹⁾は、このCTD観測データより力学的高低面図を作成し、約20~300m深度での流動パターンを推定した。また、相木ら⁽²⁾は、長期間に蓄積されたADCP、沿岸水位等のデータを用いて、富山湾周辺海域の流れの特性を考察している。これらでは、対馬暖流が能登半島北部から富山湾内や佐渡海峡に流れこむ状況と、その季節変動特性を分析している。一方、大西ら⁽⁴⁾、*Terauchi et al.*⁽⁵⁾は、人工衛星のクロロフィル a 濃度観測画像により、富山湾内のクロロフィル a 濃度分布の解析を行っている。ここで、クロロフィル a 分布の季節変動特性と河川水からの栄養塩供給との関連性の把握、また、この画像から海面表層の流動状況の把握が可能なが記されている。

千葉ら⁽²⁾は「若潮丸」による海洋観測により、富山湾の表層から約700m深までの水塊構造の季節変動特性を分析している。ここで、夏場は沿岸表層水が高温低塩分で成層するが、その下部に対馬暖流水が高塩分で存在し、冬場には沿岸表層水と対馬暖流水が鉛直混合することが示されている。また、ADCP観測により能登半島北部では対馬暖流が基本的に西から東へ流れ、流速が約 $0.5\sim0.8\text{ms}^{-1}$ であることが確認されている⁽⁶⁾。この流れは富山湾内に侵入し、夏場の湾南部では、大量に流入する河川水との相互作用により、直径約20~30海里の反時計回りの渦流が形成されることも観測されている⁽⁷⁾。

3. 観測手法について

本項では観測で用いたADCP、比較検証に用いた海流の数値計算データ、人工衛星リモートセンシングデータによる海表面観測の概要を示す。

3.1 ADCPによるデータ

ADCPは複数の超音波ビームを水中で発することにより、水塊の流向及び流速を多層に渡って観測できる。「若潮丸」には、船底設置型ADCP(RDI VM150)が搭載されている。発振中心周波数は150 kHz、最大測定距離は300m、8m層厚ごとの観測が可能である。ADCPで絶対流向流速の計算に用いる対地船速は水深約200m以内では海底反射波から精度よく得られるが、GPSから得ることも可能である。富山湾

は非常に水深が深いので、殆どGPSより対地船速を得ることとなる。これまでの観測実績^{(2),(6),(7)}により、GPSを用いた観測精度や限界は把握されている。

3.2 気象庁海洋データ(MOVE データ)

ADCP観測値との比較のため、気象庁海洋データ同化システム(MOVE/MRI.COM: Meteorological Research Institute Multivariate Ocean Variational Estimation System / Meteorological Research Institute Community Ocean Model)を使用している(本論ではMOVEとする)。これは、気象庁が開発したモデルの計算結果について、観測データを用いた客観解析を行うものである⁽⁸⁾。この計算モデルの外力は、風応力、熱などが考慮されているが、千葉ら⁽⁷⁾に示されている富山湾に強く影響を及ぼす河川水については含まれていない。富山高専は気象庁と共同研究を行い、データの提供を受け、これをCOLA(Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies)のGrADS(Grid Analysis and Display System)で描画することにより、観測値との比較を行っている。計算分解能は 0.1° 、各1日平均のデータとなっている。

千葉らの先行研究により、このMOVEデータとADCPデータの比較考察が行われている^{(2),(7)}。ここでは、MOVEの計算格子 0.1° のスケールで再現可能な渦や蛇行を含めた流れには、ADCPデータの精度検証や観測線周囲の流れの傾向の把握に、MOVEデータとの比較考察が有効であることが示されている⁽²⁾。ここで、この海域におけるMOVEデータでは0.5m~18m深までの流れの傾向がほぼ同一であることが確認されている。本観測で用いているADCPの最浅水深は約20mであり、このADCPデータと18m深のMOVEデータが良く一致している場合が多いことが確認されている⁽²⁾。

しかし、表層の流れは、顕著な吹送流や河川水影響があれば、約20m深とは異なった流れになることもあり得る⁽⁷⁾。ここで、先行研究から本論までの長年の観測において、経験から得た知見がある。「若潮丸」の船長・航海士が船を操船する際に、現場のADCP観測から、船の流され量を推測しているが、風力3以下程度の海面で、また河川水影響が小さい沖合においては、実際の船のドリフト状況と良く合致することが実感されている⁽²⁾。こうした現場で得た知見は、MOVEデータにおける0.5m~18m深における流れが同一傾向である場合の実証になるものである⁽²⁾。

3.3 人工衛星によるデータ

(公財) 環日本海環境協力センター (Northwest Pacific Region Environmental Cooperation Center、以下 NPEC とする) では、NASA の AQUA/TERRA 衛星搭載の MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) センサーにより解像度約 1km で海色観測され、NASA や JAXA により分析されたクロロフィル *a* 濃度分布画像をホームページで公開している⁹⁾。本研究では ADCP データとこの衛星画像との比較検証を行った。千葉らの分析²⁾によると、夏場で表層のクロロフィル *a* 濃度が明確な時期である時は、実際に富山湾に発生する渦や蛇行の一端を衛星画像データにより捉えている実例が多くあった²⁾。

4. ADCP 観測と流動状況の考察

4.1 観測航海(2014 年 8 月 28 日, 9 月 19 日)

2014年8月28日の富山新港から新潟港への航海で ADCP 観測を行った。この航海期間を通じて、船上観測による風力は2~4、波高は約1m以内といった状況であった。GPSリファレンスによる ADCP 観測結果と同日の MOVE データを重ね合わせた図を Fig.1 に示す。赤い線が ADCP データ、黒い矢印が MOVE データである。ADCP データについては、(1)20m 深、(2)52m 深、(3)100m 深を示している。尚、ADCP のトランスデューサからの観測距離は16m、48m、96m であるが、トランスデューサ設置位置が水面下約3~3.5m であるので、4m を加え(1)20m、(2)52m、(3)100m とした。MOVE はこれに近い(1)18m 深、(2)50m 深、(3)100m 深のデータを示している。まず、(1)の約20m 深では、ADCP データで上越沖から佐渡島南方において約 $0.7\sim0.8\text{ms}^{-1}$ 程度の東の流れが観測でき、これは対馬暖流が佐渡島南を抜けていく流れと考えられる。MOVE データにおいても能登半島沖から佐渡島にかけて約 $0.5\sim0.6\text{ms}^{-1}$ 程度の東の流れがみられる。しかし、新潟港へ向かう沿岸部においては、ADCP データは沖合とかわらない東の流れであるが、MOVE データは東から北東へと流れを変えているといった違いが見られる。

Fig.1 では、上越沖において、ADCP の観測結果が南東の流れから急に北東の流れに変化している部分があり、これは 20~98m 深で同傾向であることが分かる。また、Fig.2 には、観測日に近い 8 月 22 日の 3.3 で説明した、人工衛星によるクロロフィル *a* 濃度画像を示す⁹⁾。これより、ADCP 観測による流向の

急変部分と同じ位置に、クロロフィル *a* 濃度が高い場所が渦を巻くように分布していることがわかる。同図の MOVE データにおいては、上越沖に U 字型の流れがあることが確認できるが、ADCP データの流向が急変する部分は、この U 字型の流れの一端を捉えていたと思われる、Fig.2 に示す衛星画像データの渦を巻くような高濃度クロロフィル *a* の分布も、この U 字型の流れの影響と思える。これらのことから、千葉ら²⁾が示したように ADCP は表層から約 20m 深の流れの特徴をよくとらえていることがわかる。また、Fig.1(3)において図中心部の MOVE データの渦流と ADCP データの流れが渦に沿うように北西から南東へ変化する場所が良く一致しており、この約 100m 深の深層でもこうした渦の影響があることが双方から確認できる。

Fig.3 は Fig.1 と同様に 2014 年 9 月 19 日の新潟港から富山新港への航海の際に観測した ADCP データを MOVE データと重ね合わせた図である。この航海期間を通じて、風力は2~3、波高は約 1m 以内といった状況であった。

ADCP データにおいて、8 月 24 日の航海と比較して、佐渡海峡を北から北東へと抜ける対馬暖流の傾向は一致している。佐渡島から富山湾東部においては 8 月 24 日の傾向とは逆に、流れの向きが北西から南東へと急に変化していることがわかる。ここで、MOVE データに着目すると 8 月 24 日は U 字型の蛇行だった流れが約 20~50m 深において、反時計回りの渦を形成しているのがわかる。

双方のデータを比較すると、ADCP ではこの渦の一端を捉えていたといえる。一方で富山湾内に着目すると、千葉ら⁷⁾により報告された夏期に湾南部に発生する反時計回りの渦が ADCP により引き続き確認されており、約 20m~50m 深において顕著である。

Fig.4 に示す、Fig.3 と同日のクロロフィル *a* 濃度画像⁹⁾では、この反時計回りの渦の影響を明確に確認することができる。しかし、佐渡島から富山湾東部において発生している渦の影響は、衛星観測データが天候状況により欠落しているため確認できない。

4.2 観測航海(2015 年 9 月 14 日, 9 月 24 日)

2015 年 9 月 14 日の富山新港から新潟港への航海で ADCP 観測を行った。この期間を通じて風力は2~5、波高は約 1m 以内といった状況であった。Fig.5 は Fig.1,3 と同様に ADCP データと同日の MOVE データを重ね合わせた図である。

Fig 1 Comparison of MOVE data⁽⁸⁾ and the result of ADCP observation at Aug. 24, 2014.

Fig 3 Comparison of MOVE data⁽⁸⁾ and the result of ADCP observation at Sept. 19, 2014.

Fig. 2:
Chlorophyll-a
distribution around
Toyama Bay based
on MODIS images
of NASA's Aqua
satellite at 01:10
Aug. 22, 2014⁽⁹⁾.

Fig. 4:
Chlorophyll-a
distribution around
Toyama Bay based
on MODIS images
of NASA's Aqua
satellite at 01:34
Sept. 19, 2014⁽⁹⁾.

Fig 5 Comparison of MOVE data⁽⁸⁾ and the result of ADCP observation at Sept. 14, 2015.

Fig. 6:
Chlorophyll-a
distribution around
Toyama Bay based
on MODIS images
of NASA's Aqua
satellite at 01:20
Sept. 15, 2015⁽⁹⁾.

Fig 7 Comparison of MOVE data⁽⁸⁾ and the result of ADCP observation at Sept. 24, 2015.

Fig. 8:
Chlorophyll-a
distribution around
Toyama Bay based
on MODIS images
of NASA's Aqua
satellite at 01:34
Sept. 22, 2015⁽⁹⁾.

Fig.9 Comparison of MOVE data⁽⁸⁾ and the result of ADCP observation at 18m depth at Sept. 14, 2014. Blue arrows show the flow pattern.

Fig.5 の(1),(2)において佐渡海峡周辺で ADCP データが北東の流れを捉えており、MOVE データにおいても北東の流れを捉えている。特に佐渡海峡を通過した後で ADCP データと MOVE データの蛇行している傾向が非常に良く一致していることがわかる。

Fig.7 では 2015 年 9 月 24 日の新潟港から富山新港の航海での結果を示している。この期間を通じて風力は 4~5、波高は約 1m 以内であった。この航海においても Fig.5 と同様の北東の流れが ADCP データで示されており、これも MOVE データとよく一致している。この北東の流れは 4.1 で確認された流れの傾向ともよく一致している。このことから、夏期においては佐渡海峡通過後の新潟沖の流れが北東の流れであるのは一貫した傾向であると考えられる。この流れは能登半島北方を東進してきた対馬暖流が、上越沖を経て佐渡海峡を通過していく際の流れであると思われる。

Fig.6,8 を見ると、Fig.5,7 の ADCP データで確認できる富山湾東部での小規模な渦や蛇行と同位置に、こうした流れの影響と思える高クロロフィル *a* 濃度分布を確認することができる。しかし、これらの流れの分布状況は、Fig.2,4 のように明確には表示されていない。これは、Fig.2,4 では、富山湾沿岸部の黄色から茶色で表示される高濃度クロロフィル *a* 分布の存在が、流れの把握のトレーサーとして有効に作用しているためと思える。

Fig.9 には、特に ADCP と MOVE が良く一致している Fig.5(1)の佐渡海峡部分を拡大し、ここに想定される流線（青矢印線）を記入したものである。能登半島北方を東進してきた流れは、佐渡島の西で南東歩行にカーブし、佐渡海峡では北東の、斜めの逆 S

字型の流れとなっていることが良く確認できる。

4.3 全体考察

2014 年、2015 年の全体のデータを見た考察を行う。ADCP データと MOVE データによる、能登半島北方から上越沖を通り佐渡海峡へ抜けていく過程の流れの傾向は、特に約 20~50m 深において良く一致している。富山湾内においては、蛇行や渦流の傾向が一致しないことが多いが、これは MOVE の解像度が大きいことと、富山湾で顕著な河川水影響が計算に考慮されていないためと思える。

ここで判明した流れの傾向としては、能登半島北部を東進してきた対馬暖流は、佐渡島南西の上越沖では、流れが U 字型の半径曲率が 5~10 海里程度のカーブを描いていき、これが佐渡海峡を北から北東に、約 $0.6 \sim 0.8 \text{ ms}^{-1}$ で抜けていく。また、この U 字型のカーブは、Fig.1 のように、Fig.5,7 に比べて富山湾内に深く食い込む場合もあれば、Fig.3 に示すように蛇行が発達して、反時計回りの半径が約 10~20 海里程度の渦を形成する場合がある。

そして、こうした蛇行や渦流は、人工衛星リモートセンシング観測による高クロロフィル *a* 濃度分布からも確認できる。具体的には、Fig.2 の上越沖の直径約 30 海里の渦流の影響と思える高濃度分布、Fig.4 の富山湾北部直径約 10 海里の渦流の影響と思える高濃度分布である。

こうした流れの傾向は、先行研究である、同海域に対する、内山⁽¹⁾の約 20m 深の地衡流計算、相木ら⁽³⁾による表層流の長期間の蓄積データの分析における、夏期の分析結果とも良く傾向が一致している。

5. おわりに

2014 年、2015 年の夏季に 4 度の富山新港から新潟港への航海の際に行った ADCP 観測のデータを MOVE データ、人工衛星画像リモートセンシングデータと比較し、その妥当性と観測限界を確認した。

そして、能登半島北方から佐渡海峡における、夏期の海流の特性を把握できた。これは、漁業、漂流物の挙動、船舶の航行等に大きな影響を与えていると思える。今後、これらの影響について、流れの向きや速さに対する定量的な評価を行えるよう検討していきたい。また、本論で確認された、上越沖で発生している蛇行や渦の形成は、この海域における暖水塊と冷水塊のぶつかり具合、対馬暖流の強さ、海底地形に起因するものと思える。今後の同海域の航

海にて、CTD や音響測深機による探査を併用することにより、この発生メカニズムを究明したい。

6. 謝辞

気象庁・日本海海洋気象センターの皆様には MOVE データ使用について多大なご指導を頂きました。また、実船計測では富山高専の臨海実習場並びに「若潮丸」乗組員の皆様に多大なご協力をいただいております。(株)エス・イー・エイには「若潮丸」搭載の RDI 社 ADCP について多くの技術的サポートを頂きました。ここに謝意を表します。本研究の一部は(公財)環日本海環境協力センターの「富山湾プロジェクト」、平成 22 年度採択の科学研究費補助金(22560800)「富山県沿岸域の海潮流の発生メカニズムの解明と予測技術の確立」によるものです。

7. 参考文献

- (1) 内山勇：富山湾及び周辺海域の平均的流動パターン, 富山県水産試験場報告第 4 号, pp.11-30, 1993.8
- (2) 千葉元・浜田健史・道田豊・橋本心太郎：船舶搭載型 CTD・ADCP による富山湾の海洋環境調査, 日本航海学会論文集, 132, pp 86-96, 2015.
- (3) 相木智一・磯田豊・矢部いつか・黒田寛：「富山湾周辺海域における表層流の季節変化」, 海の研究 16(4), pp291-304, 2007.
- (4) 大西美奈・石坂丞二・笠原一世・長田宏・白山肇・内山勇・寺内元基：海色衛星によって観測された富山湾における 1998 年と 1999 年のクロロフィル α 濃度分布, 海の研究, 16(1), pp.7-22, 2007.1.
- (5) Genki TERAUHI, Ryo TSUJIMOTO, Joji ISHIZUKA and Hidetaka NAKATA: Influence of river discharge on seasonal and interannual variability of remotely sensed chlorophyll-A concentration in Toyama Bay, the Sea of Japan, *Limnology and Oceanography* 59, 49-60, 2014.
- (6) 千葉元・古山彰一・横井幸治：船舶搭載型 ADCP による対馬暖流の流向流速計測, 電気学会論文誌 C127(5), pp.694-704, 2007.5.
- (7) 千葉元・道田豊・古山彰一・橋本心太郎：船舶搭載型 ADCP で捉えられた富山湾の流れの特性－夏期湾奥部で発生する反時計回りの渦について－, 海洋調査技術 27(2), pp.1-14, 2015.9.
- (8) 石崎士郎・曾我太三・碓氷典久・藤井陽介・辻野博之・石川一郎・吉岡典哉・倉賀野連・蒲池政文：「MOVE/MRI.COM の概要と現業システムの構築」, 測候時報 76 特別号, pp.s1-s15, 2009.
- (9) NPEC：「環日本海環境ウォッチ」, <http://ocean.nowpap3.go.jp/>, 2015.1.11.