3種類のADCPを用いた万石浦水路における通過流量の定量化

Quantification of the Throughflow Transport by using 3 Types of ADCPs in Mangoku-Ura Channel

筧 茂穂¹・伊藤進一²・橘田隆史³・和川 拓⁴

Shigeho KAKEHI, Shin-ichi ITO, Takashi KITSUDA and Taku WAGAWA

The throughflow transport in Mangoku-Ura channel was measured by using 3 types of ADCPs (H-ADCP, bottom mounted ADCP and towed ADCP). Continuous observations of H-ADCP and bottom mounted ADCP were conducted to obtain the horizontal and vertical distribution of the throughflow. The cross sectional current distribution in the channel was measured by towed ADCP for 25 times. The current distribution across the channel estimated from H-ADCP and bottom mounted ADCP reasonably represented that observed by towed ADCP. The throughflow transport integrated cross sectional current distributions had high correlation with time derivative of tidal level and exceeded $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ in the spring tide. Harmonic constants for 13 tidal components were estimated by harmonic analysis to predict the transport in the future.

1. はじめに

万石浦は宮城県牡鹿半島の付け根にある表面積 7.2 km^2 の内海で、長さ 650 m 、幅 100 m の水路により石巻湾を介して仙台湾に接続している (図-1)。万石浦ではカキやアサリの養殖が盛んに行われているが、万石浦に流入する河川は小規模であるため、浦内の養殖生産を支える栄養塩は主に石巻湾から水路を通して流入した海起源のものに依存していると考えられる。また浦内の養殖貝類から出された排泄物が水路を通して流出することにより、浦内の水質が良好に保たれる。養殖に用いられるカキ幼生も水路を通じて石巻湾に流出し、周辺の養殖業者によって採苗されて利用されている。このように万石浦水路は石巻湾との物質および生物の輸送・交換が行われる経路であり、その通過流量を定量化することは浦内の海水交換速度、栄養塩供給量、カキ幼生流出量などを見積もる上で重要である。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下や津波の影響で、万石浦周辺の海底地形が変化していることが推測されることから、水路の通過流量を計測し、現状を把握することが急務であった。

万石浦は感潮域であり、水路の流量は潮汐の影響を強

く受ける。感潮域では上げ潮時に塩水が遡上して上下層の流向や流速が大きく異なることがあり、従来使われている水位-流量の関係式 (HQ式) では正確に流量を算出できないことが知られている (橋場・林, 2012)。感潮域の流量を正確に得るためには水路の断面における流速分布を測定することが不可欠であり、昇降式のH-ADCPを用いた方法 (岡田ら, 2005)、H-ADCPと海底設置型ADCPを組み合わせた方法 (橋場・林, 2012)、H-ADCPと数値計算を組み合わせた方法 (原田ら, 2008) などが行われている。本研究では、ある高さにおける流速の水平分布を長期にわたって連続測定できるH-ADCP、ある位置における流速の鉛直分布を長期にわたって連続測定できる海底設置型ADCP (B-ADCP)、断面における流速分布が測定できるが観測回数に限られる曳航式ADCP (T-ADCP) の3種類のADCPを用いて万石浦水路における測流を行った。B-ADCPの直上で得られたH-ADCPの流速からB-ADCPで得られる流速鉛直分布を再現する推定式を求め、この推定式とH-ADCPの流速水平分布から流速の断面分布を推定した。推定した流速断面分布を同時刻のT-ADCPで実測した断面流速分布と比較、検証し、実測をよく再現する断面流速分布の長期的な連続推定値を用いて通過流量の時間変動を明らかにした。また、通過流量と水位変動の関係を明らかにするとともに、流量予測を可能にするために通過流量の調和定数を算出した。

2. 観測

万石浦と石巻湾をつなぐ水路の上流から約 200 m の位置に水路を横切る観測線を設け (図-2)、3種類のADCPによる測流を行った (図-3)。観測は2012年1月25日～2月29日に実施した。

1	正会員	博 (農)	(独法) 水産総合研究センター東北区水産研究所資源海洋部海洋動態グループ主任研究員
2		博 (理)	(独法) 水産総合研究センター東北区水産研究所資源海洋部海洋動態グループグループ長
3	正会員	修 (農)	(株) ハイドロシステム開発代表取締役
4		博 (理)	(独法) 水産総合研究センター東北区水産研究所資源海洋部海洋動態グループ任期付研究員

観測線の左岸側の干潮時水面下 2 m に H-ADCP (Teledyne RD Instruments 社製 300 kHz H-ADCP) を設置し、流速の水平分布を測定した。水平層厚 2 m で 10 分ご

図-1 万石浦の位置。枠は水路付近の拡大図(図-2)を示す。

図-2 万石浦水路に設けた観測線(実線)。

図-3 3種類の ADCP を用いた観測の概念図。

とに4秒間隔で60サンプル測定し、36日間連続観測を行った。解析には10分ごとに得られる240秒のデータを平均して用いた。またH-ADCPに内蔵された圧力式水位計を用いて10分ごとの水位(4秒間隔で60サンプルの平均値)を観測した。観測した水位は近傍で測定した大気圧のデータを用いて気圧補正を施して解析に用いた。観測線の中央部(水深10 m)の海底にはB-ADCP (Teledyne RD Instruments 社製 1200 kHz Workhorse Sentinel) を TRBM (Trawl Resistant Bottom Mount) を用いて設置し、流速の鉛直分布を測定した。鉛直層厚 0.5 m で 10 分ごとに4秒間隔で60サンプルの計測(解析には240秒平均値を使用)を行い、28日間連続観測を行った。

2月1～2日の昼間にはT-ADCP (Teledyne RD Instruments 社製 1200 kHz Workhorse Monitorを曳航体にとりつけたもの)を船外機船により観測線上で曳航し、0.35秒ごとに鉛直層厚0.25 mの断面流速分布を測定した。1時間に1往復の頻度で合計25往復の観測を実施した。得られた流速は水平距離2 mごとに平均し、これを断面で積分して通過流量とした。

3. 観測結果

H-ADCPで測定した流速の水平分布の時間変化を図-4に示す。図において、正(暖色)の流速は順流(万石浦から石巻湾への流れ)を示す。流速水平分布には明瞭な半日周期の変動が見られた。各時刻における流速は、左岸から80～100 m付近でやや強くなる傾向にあるものの、概ね水平一様に一方向に流れていた。最強流時の流

図-4 H-ADCPで測定した流速の水平分布の時間変化。正の流速は順流を示す。

図-5 観測水位(実線)および予報水位(破線)の時間変化。

速は、順流、逆流ともに 1.0 ms^{-1} 以上であった。

図-5に観測した水位の時間変動(実線)を示す。破線は最小二乗法調和分解によって求めた13分潮の調和定数から算出した予報水位である。両者はよく一致しており、観測された水位の変動は主に潮汐によるものである。水位変動とH-ADCPによる水位変動を比較すると、下げ潮時には正の流速、上げ潮時には負の流速となっており、水位変化に伴い水路の流速も変動する。図に示した時期は大潮から小潮に至る時期であり、流速絶対値が徐々に小さくなっている。

B-ADCPで測定した流速の鉛直分布を図-6に示す。ここで示した流速は流下成分、すなわち観測線に直交する成分であり、流速水平分布と同様に、正の流速は順流を示す。なお、B-ADCPで得られた観測線に平行な流速成分は、流下成分に比べると非常に小さかった。流下流速は、海底から6~8 m付近で強く、海底付近で弱くなる傾向にあるものの、概ね鉛直一様に一方向に流れていた。最強流時の流速は、順流、逆流ともに 1.0 ms^{-1} 以上であった。このような水平および鉛直方向にほぼ一様の半日周期の往復流は観測期間を通じて発生していた。

4. 通過流量の推定と検証

流量を算出するには断面流速分布を得る必要がある。本研究では、B-ADCPによる流速鉛直分布をその直上で測定されたH-ADCPの流速で推定する式を求め、H-ADCPの流速水平分布をこの推定式に適用して、断面流速分布を得る。万石浦水路は水面幅が水深よりも十分大きい水路であり、観測された流速鉛直分布はほぼ鉛直一様であったことから、春日屋(1955)による二次曲線形流速分布

$$v(z) = \frac{V_m}{p} \left\{ pk + 2a \left(\frac{z}{h} \right) - \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right\}, \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$p = \frac{1-3a}{3(k-1)}, k = \frac{V_s}{V_m}$$

図-6 B-ADCPで測定した流下流速の鉛直分布の時間変化。正の流速は順流を示す。

を仮定し、H-ADCPの流速からB-ADCPの流速鉛直分布を推定した。ここで、 $v(z)$ は流下流速の鉛直分布、 z は水面からの深さ、 V_m は鉛直平均流速、 a は流速ピーク位置の相対水深、 h は水深、 V_s は表面流速である。 V_m 、 V_s は

$$V_m = bV_{H-ADCP} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$V_s = cV_{H-ADCP} \quad \dots\dots\dots (3)$$

のようにH-ADCPの測定値 V_{H-ADCP} に比例する (b 、 c は定数)と仮定し、係数 a 、 b 、 c を0.01刻みで変化させ、推定した流速分布とB-ADCPによる鉛直流速との誤差が最小となる a 、 b 、 c を求めた。 $a = 0.25$ 、 $b = 0.96$ 、 $c = 1.00$ で最も再現性がよく、観測期間を通じての推定値と観測値のRMSEは 0.04 ms^{-1} であった。

図-7にB-ADCPおよびH-ADCPから推定した流速の鉛直分布を示す。憩流時の推定流速は鉛直一様となる。最強流時では、水深0~4 m付近ではほぼ鉛直一様で、それより下層で徐々に減速し、海底付近の流速は上層よりも 0.2 ms^{-1} 程度遅くなる。このように、推定した鉛直流速はさまざまな潮時における実測の鉛直流速をよく再現した。

H-ADCPによる水平流速分布と流速鉛直分布推定式(1)を用いて流速の断面分布を推定した。推定した流速断面分布はT-ADCPで実測した流速断面分布とよく一致した。

図-7 B-ADCP (○) およびH-ADCP (●) から推定した流速鉛直分布(実線)。左から下げ潮最強流時、下げ潮憩流時、上げ潮憩流時、上げ潮最強流時を示す。

図-8 T-ADCPで実測した流量と推定流量の散布図。

そこで推定した流速断面分布を積分することにより通過流量を求めた。推定により求めた通過流量（以下では推定流量と呼ぶ）を T-ADCP で実測した通過流量と比較することにより検証したところ、両者はよく一致した（図-8）。実測流量と推定流量の RMSE は $30.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ であり、実測流量の絶対値平均値の 14 % に相当した。

流量の推定に用いた H-ADCP および B-ADCP の流速分布は水位の時間変化と対応し、下げ潮時には正の流速、上げ潮時には負の流速となっていたことから、推定流量も水位の時間変化との対応が見られ、下げ潮時には順流、上げ潮時には逆流の流量となっていた（図-9）。大潮最強流時における流量は $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 以上となっていた。推定流量を時間積分した積算流量は、小潮期のピーク時（干潮時あるいは満潮時）には $2.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、大潮期のピーク時には $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ であった。大潮期のピーク時の積算流量は、万石浦の体積の約 25 % に相当する。

5. 考察

水位の変動は潮汐によるものであることから、流量の

図-9 水位の時間変化量と推定流量の散布図（1時間平均値）。

図-10 推定流量（実線）と調和定数から求めた予報流量（破線）

表-1 推定流量の調和定数。

Comp.	Amp. (m^3s^{-1})	Phase (degree)
M_2	312.1	211.4
S_2	160.3	249.9
K_1	109.9	282.5
O_1	93.8	250.2
K_2	43.6	249.9
P_1	36.6	282.5
N_2	35.3	203.4
MS_4	14.8	318.9
Q_1	13.1	245.0
M_4	11.6	215.2
L_2	9.1	193.4
ν_2	6.8	203.4
μ_2	5.1	208.0

変動も潮汐と密接に関わっている。そこで、36日間の H-ADCP 観測から得られた推定流量を最小二乗法調和分解し、調和定数を算出した。算出した調和定数を表-1に示す。流量の振幅は M_2 分潮が最も大きく、ついで S_2 分潮となっており、半日周潮成分が卓越した。日周潮と半日周潮の振幅比 (F) は 43 % であった。主要四分潮 (M_2 , S_2 , K_1 , O_1) の振幅の和は振幅の総和の 79 % であった。

推定流量と調和定数から求めた予報流量の時系列を図-10に示す。観測期間を通して予報流量は推定流量をよく再現した。ただし、2月1～4日および2月15～18日は、予報流量の再現性が悪く、小潮期にもかかわらずピーク時には $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ を越える大潮期並みの大きな流量となっていた。この大きな流量は周期約3時間の短周期で変動していた（図-11）。

同じ時期に観測された水位でも、予報水位との残差が約 0.1 m の周期約3時間の短周期変動が頻繁に観測された

図-11 短期周期変動が顕著であった時期の残差流量および残差水位の時系列。

(図-11). このような短周期の水位変動の成因として, セイシュや風の短周期変動などの影響が挙げられる. 湾セイシュの周期 T (s) は

$$T = 4L/\sqrt{gh} \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる (宇野木, 1993). ここで, L は湾の長さ, g は重力加速度, h は水深である. 仙台湾規模 (図-1) でセイシュが発生していると仮定し, L を 5×10^4 m, h を 30 ~ 50 m とすると, 湾セイシュの周期は 2.5 ~ 3.2 時間となり, 小潮期に見られた周期約 3 時間の短期変動の周期と一致する.

水位の時間変化量と推定流量の関係を示した図-9 には, 短周期変動が顕著な時期のプロットも含まれているが, 短周期変動の影響がない時期のプロットとは区別できない. つまり, 短周期変動による水位の時間変化量と推定流量の関係は, 短周期変動の影響がない時期と同じ関係にある. このことは水位変動が生じると, その時間変化量に比例して流量が変動することを示しており, 流量変動は潮汐あるいはセイシュといった水位変動の要因や周期には依存しないことが示唆される.

水路の水位変動の主たる要因は潮汐周期成分によるものであるため, この成分による流量については本研究で求めた調和定数を用いて予測を行うことが可能となる. 万石浦から石巻湾への積算流量が最大となる潮時を精度よく予測することで, 石巻湾沿岸のカキ養殖業者はカキ幼生の分布密度が高い時間帯に効率的にカキ幼生を採苗することが可能となる. 一方, 潮汐以外の要因も含めた流量変動を把握するためには, 水路あるいはその周辺での水位の観測が不可欠である.

最後に東日本大震災に伴う地盤沈下の影響について考察する. 震災前の万石浦水路では大潮期に 1.3 ms^{-1} となり, 断面平均最大流速は 0.8 ms^{-1} と報告されている (渡辺・小林, 1985). 本研究でも同程度の流速が観測されており, 仮に震災前後で流速に変化がないとすると, 震災後は地盤沈下の影響で水路の断面積が大きくなったことにより, 流量が増大している可能性がある.

6. まとめ

東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下や津波の影響によって万石浦の地形が変化し, これにより海水交換や物質・生物輸送に重要な通過流量にも影響が及ぶことが懸念されたため, 3種類のADCPを用いた測流を行い, 実態把握を行った. 万石浦水路に設置したH-ADCPとB-ADCPの測流データから水路の横断面における流速分布を推定し, これを断面で積分することにより通過流量を推定した. 推定流量をT-ADCPによって実測した流量と比較することにより検証したところ, 推定流量は実測流量をよく再現しており, 両者のRMSEは実測流量の絶対値平均値の14%程度であった.

流量は主として潮汐周期成分によって変動し, なかでも半日周潮成分が卓越した. 大潮最強流時における流量は $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 以上にもなり, 大潮期の最大積算流量は万石浦の体積の25%に相当していた. 13分潮における通過流量の調和定数が求まったことから, 通過流量が大きくなる時期, 時間を精度よく予測することが可能となり, カキ幼生の万石浦から石巻湾への流出が最大となる積算流量最大時にあわせて採苗を行うなどの効率的な漁業に貢献する結果が得られた.

謝辞: 観測を実施していただきました株式会社ハイドロシステム開発の下田 力氏に感謝いたします. 本研究は平成23年度第3次水産関係補正予算「種苗発生状況等調査事業」のもと実施されました. 震災対応の激務の中, 本事業の提案, 実施, とりまとめにご尽力いただいた(独)水産総合研究センター増養殖研究所資源生産部長 栗田 博氏に深く感謝いたします.

参 考 文 献

- 岡田将治・森 彰彦・海野修司・昆 敏之・山田 正 (2005): 鶴見川感潮域におけるH-ADCPを用いた流量観測, 河川技術論文集, 第11巻, pp. 243-248.
- 橋場雅弘・林 克恭 (2012): 感潮域における河川流量連続モニタリング, 河川流量観測の新時代, 第3巻, pp. 23-30.
- 原田靖生・二瓶泰雄・北山秀飛・高崎忠勝 (2008): H-ADCP計測と数値計算に基づく感潮域の河川流量モニタリング～隅田川を例として～, 水工学論文集, 第52巻, pp. 943-948.
- 春日屋伸昌 (1955): 開水路の垂直流速曲線における平均流速の位置の分布性について, 土木学会誌, 第40巻, 第5号, pp. 24-29.
- 宇野木早苗 (1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, p. 31.
- 渡辺 競・小林一郎 (1985): 仙台湾 II 物理, 日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会, p. 268.