

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 Flux 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 flux 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 represented that observed by towed ADCP. The throughflow flux 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 flux 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。感潮域における流量は背水影響や塩水遡上により従来使われている水位-流量の関係式 (HQ 式) では正確に算出できないことが知られている (橋場・林, 2012)。

感潮域では、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) などにより、水路の断面における流速分布を長時間にわたって測定して流量が求められている。本研究では、H-ADCP、海底設置型 ADCP (B-ADCP)、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い、通過流量を定量化した。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。

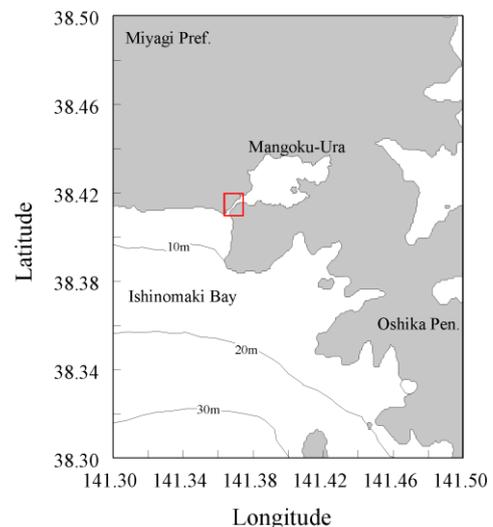


図-1 万石浦の位置。枠は水路付近を拡大した図-2の位置を示す。

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



図-2 万石浦水路に設けた観測線（実線）。

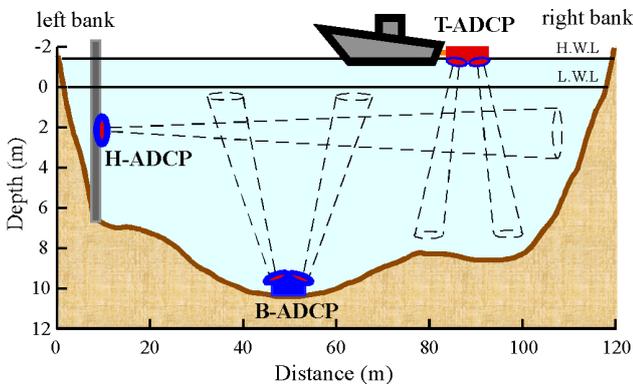


図-3 3種類のADCPを用いた観測の概念図。

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

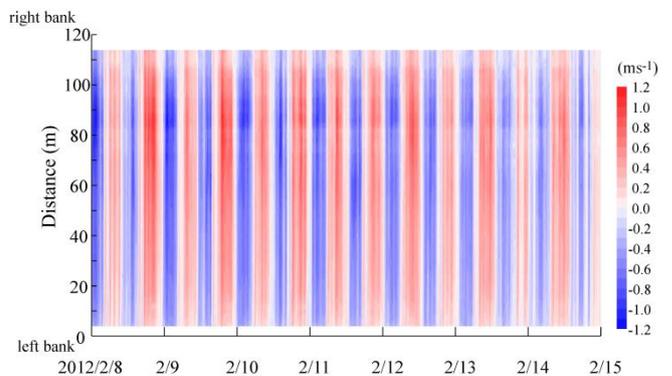


図-4 H-ADCPで測定した流速の水平分布の時間変化。正の流速は順流を示す。

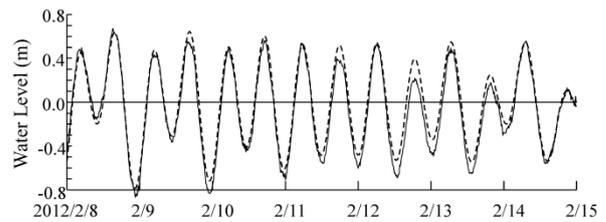


図-5 観測水位 (実線) および予報水位 (破線) の時間変化。

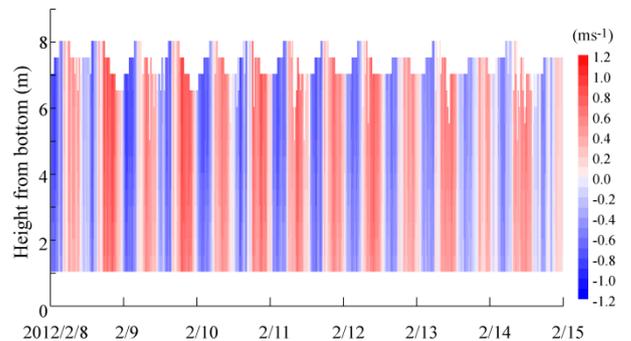


図-6 B-ADCPで測定した流下流速の鉛直分布の時間変化。正の流速は順流を示す。

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、水平流速と同様に、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6~8m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

H-ADCP で得られた流速は一定高さにおける流速の水平分布であるため、流量を算出するにはこれを元に断面流速分布を求める必要がある。B-ADCP で得られた流下流速の鉛直分布を、同時刻に測定された H-ADCP の流速を用いて推定するために二次曲線形流速分布

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

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

を仮定した (春日屋, 1955)。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

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

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

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 に順流最強流時における B-ADCP および H-ADCP から推定した流速の鉛直分布を示す。推定した流速は水深 0~4m 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} 程度遅い。逆流最強流時、順流から逆流への転流時および逆流から順流への転流時などさまざまな潮時においても、推定した鉛直流速は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鉛直流速推定式(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。そ

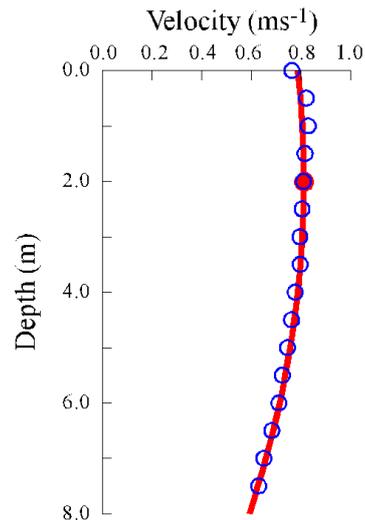


図-7 B-ADCP (○) および H-ADCP (●) から推定した流速鉛直分布 (実線)。

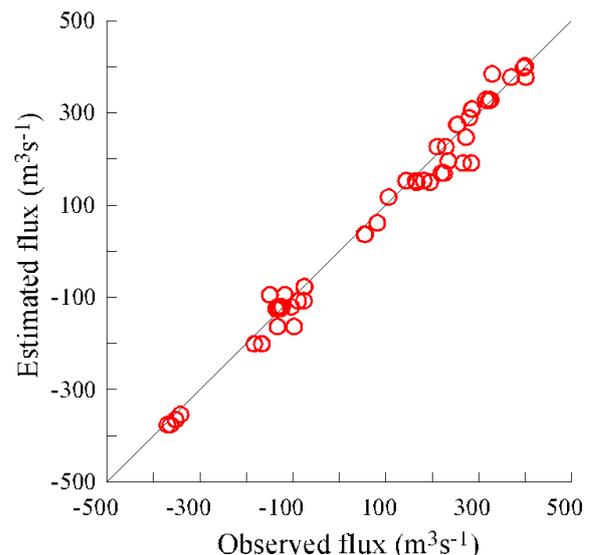


図-8 T-ADCPで実測した流量と推定流量の散布図。

こ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フラックスとなっていた (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

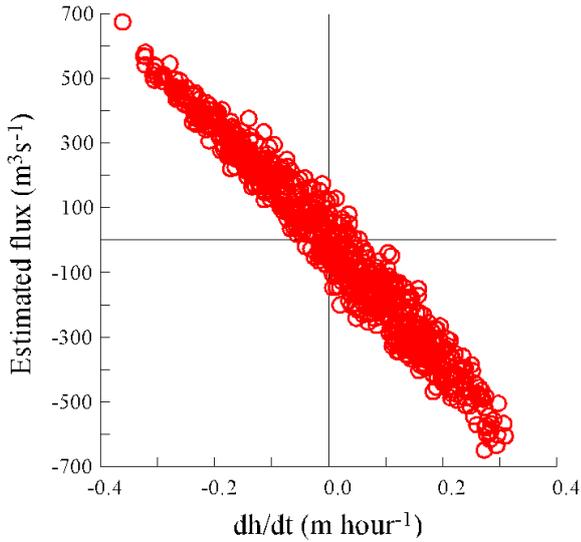


図-9 水位の時間変化量と推定流量の散布図 (1時間平均値)。

(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、流量の変動も潮汐と密接に関わっている。そこで、推定流量の調和定数を最小二乗法調和分解により算出した。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

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

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日の小潮期には1~数時間程度の短周期の変動により、予報流量との残差が $100 \sim$ 数 $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ にもなる大きな流量が観測された。

同じ時期に観測された水位でも、予報水位との残差が約0.1mの数時間周期の短周期変動が頻繁に観測された。このような短周期の水位変動の成因として、セイシュや

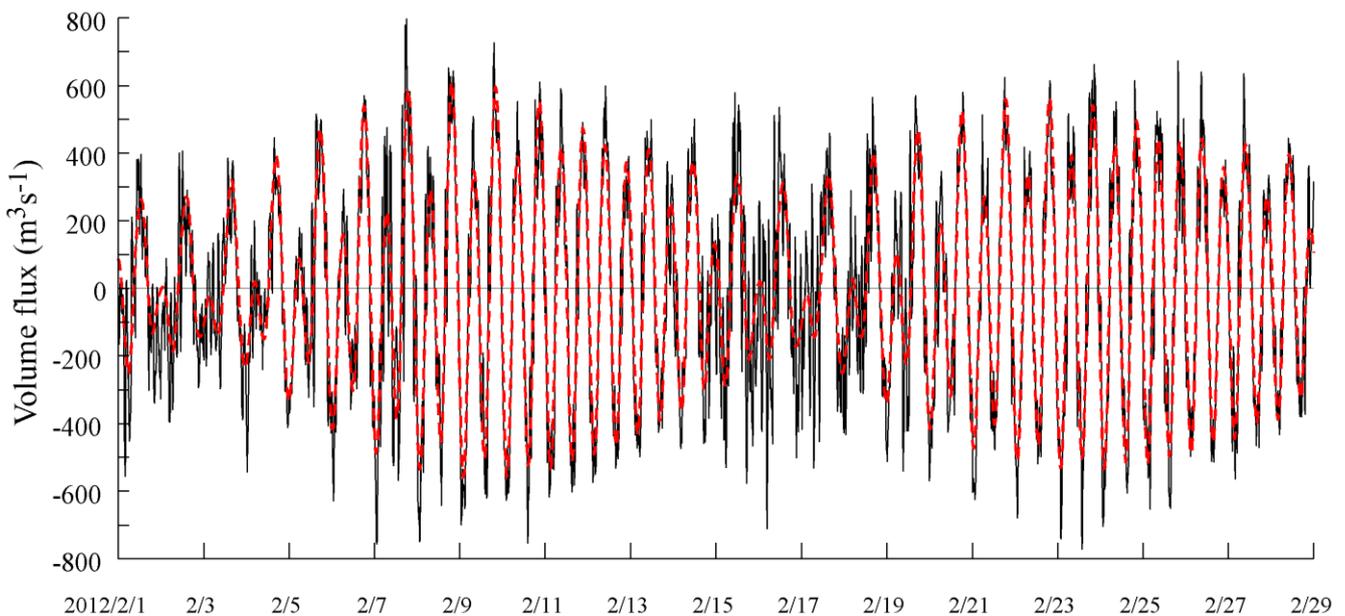


図-10 推定流量 (実線) と調和定数から求めた予報流量 (破線)

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

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

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, 小潮期に見られた数時間周期の短期変動の周期と一致する。

図-9 に示した水位の時間変化量と推定流量の関係は, 短周期変動によって予報流量との残差が大きくなる時期でも短周期変動の影響がなく潮汐のみで水位が変動している時期と同様に高い相関を持っていた。このことから, 流量の変動は, 水路の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。通過流量を精度よく予測することにより, 石巻湾沿岸のカキ養殖業者はカキ幼生の万石浦から石巻湾への流出が最大となる潮時にあわせて採苗を行うことが可能となり, 効率的な漁業を行うことができる。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。

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りうる潮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 (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.