

超音波式流速計の連続観測に基づく流量推定手法 —河川感潮域を対象として—

DISCHARGE ESTIMATION FOR TIDAL RIVER BASED ON CONTINUOUS MEASUREMENT USING ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER

横尾 啓介¹・中津川 誠²・羽山 早織³・大熊 正信⁴

Keisuke YOKOO, Makoto NAKATSUGAWA, Kaori HAYAMA and Masanobu OKUMA

¹正会員 (株) 福田水文センター 工部計画課 (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)

²正会員 博士(工学) 独立行政法人 北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³正会員 独立行政法人 北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴正会員 (株) 福田水文センター 工部 (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)

This paper addresses the estimation method of discharge for tidal river. Water level in the tidal river is greatly changed in response to the influence of a tide. Thus, the river flow near estuary is characterized by a density current. Consequently, the existing $H-Q$ rating curve gives a large error to estimate the discharge. In this research, time-series discharge has been observed by using the Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) to improve the discharge estimation. We proposed the new estimation method of discharge based on the analysis of measured flow velocity and water level variation, instead of the $H-Q$ rating curve method. Results of the observation and the discharge estimation is of practical use to verify the hydrologic process for the watershed and analyze the aquatic ecosystem.

Key Words : Tidal river, discharge estimation, ADCP, water level variation, $H-Q$ rating curve

1. はじめに

河川感潮域では、水位は潮汐の影響を受けて大きく変動し、さらに日本海側に河口を有する河川での流速は、淡塩水の密度流となり単純な開水路とは異なった流況を示す。その結果、水位の大小と流量を単純に対応させた $H-Q$ 式による推定¹⁾では流量に大きな誤差が生じる。そこで本研究では、超音波式流速計(ADCP)を用いた流速の連続観測と現地観測の結果から時系列流量の把握を行った。また、得られた流量と水位変動の解析から、 $H-Q$ 式に代わるより精度の高い新たな流量算定方法の検討を試みた。これにより、水生生物の生息域として重要な感潮域の流動把握、感潮域を有する流域の水循環解析に資することを目指す。

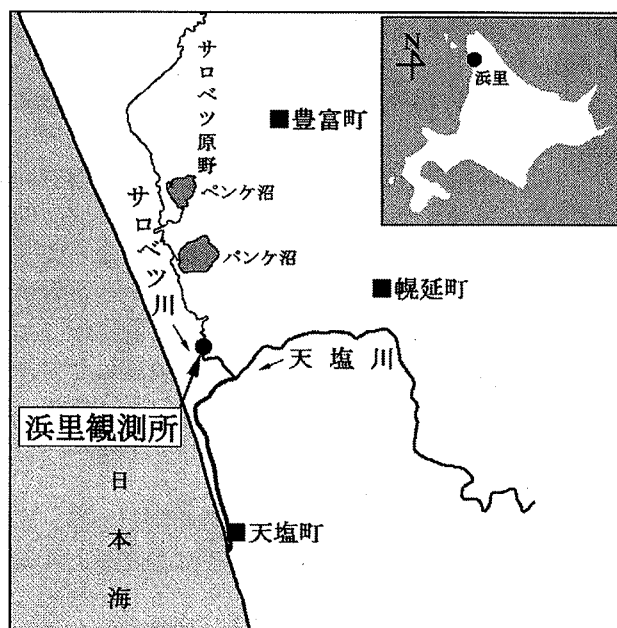


図-1 浜里箇所図

表-1 観測項目

観測項目	設置地点	型式	観測期間	観測間隔
水位	右岸河道内	KADEC-MIZU	通年	10分
流向・流速	河床最深部	RDI WorkHorse 1200kHz	2003/6/17～	10分
水温・塩分	-4.44m, -3.44m, -2.44m, -1.44m, -0.44m 5層	ALEC MDS-CT	2003/6/17～	10分
風向・風速	陸上部	KADEC KDC-S4	2003/6/3～	10分
大気圧	陸上部	KADEC PTB210	2003/6/3～	10分

2. 観測方法及び観測結果

本研究において、対象とした地点は、図-1に示す北海道天塩川水系サロベツ川浜里水位観測所とした。当該箇所は、上流に広大かつ低平な、約23,000haの面積を誇る利尻礼文国立公園の一部にも指定されているサロベツ湿原を有している。サロベツ湿原には北方型の貴重な動植物が数多く生息しており、流域の水循環解析を行うためには、河川の最も重要な水理量の一つである流量の定量評価が欠かせない。しかしながら、下流部では、河口から日本海の潮汐影響や塩水遡上のほか²⁾³⁾、本川である天塩川の背水影響も受け、その水理構造は複雑であり、流量の同定には困難を極めている。これらの問題を解決するため、まず、表-1に示す項目について観測を行った。内容は、河川表面水位のほか、流向、流速を把握するため河床最深部に超音波式流速計 (ADCP WorkHorse 1200kHz 層厚0.25m, 60ping)、鉛直5層に1m間隔で水温・塩分計を配置した。また、気象観測として、陸上部に風向・風速計、気圧計を設置し、2003年6月より長期間観測を行った。観測項目のうち、河道内に設置したADCPと、水温塩分計の設置概略を図-2に示す。図には浜里観測所の河床横断形状も同時に示している。

これらの結果から一例として、最渇水期である7月15日から31日までの結果を図-3に、秋期11月1日から15日までの結果を図-4に示す。図は上から気圧、浜里水位、天塩川河口と同じ日本海にある留萌港潮位、設置したADCP観測結果から層厚と層流速によって得られた単位幅流量⁴⁾⁵⁾⁶⁾、全5層に設置した塩分計のうち、最上下層とその中間部3層の塩分濃度、風速・風向 (4方向分類) である。これらの結果からは、次の特徴が見出される。

- (1) 気圧と留萌港潮位の間には負の相関がある。すなわち、気圧が低下傾向にあるときは潮位が上昇傾向にある。
- (2) 下流域の水位は、留萌港潮位と連動した1日2回潮の変動を起こしている。これは、当該地点が河川感潮域であることに他ならない。
- (3) 単位幅流量を見ると、水位変動に呼応した順流逆

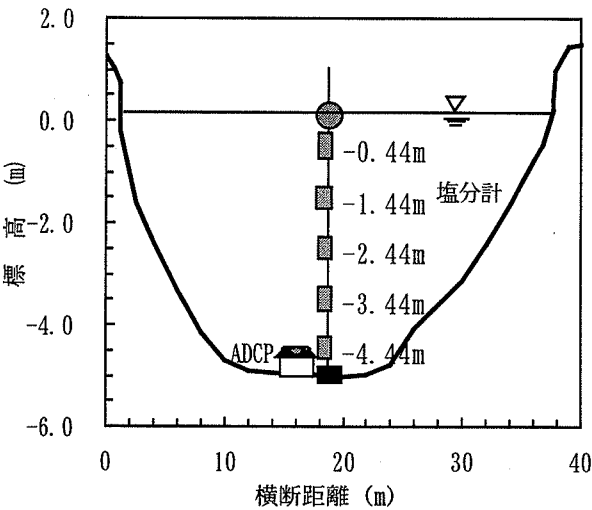


図-2 設置概略図

流を繰り返している。この件に関しては以下に詳細に検討する。

- (4) 多層に設置した自記塩分計の塩分濃度を見ると、塩分の流入、流出が認められ、下層の最大値はほぼ海水の塩分濃度と同等の30%以上となっている。
- (5) 鉛直分布を見ると、弱混合の、いわゆる塩水楔として遡上している期間や、緩混合の汽水性を有する期間、全く遡上していない期間など、潮位振動、単位幅流量によってその形態は多種複雑な構造となっている。また、7月の最渇水時には、表層塩分で10%前後と、かなり高濃度となっており、塩分が下層から上層に連行されている様子もうかがえる。
- (6) 風については、気圧の変化 (低気圧の通過) によって、風向は変化するが、期間中、7月にはNNE～E、11月にはSSW～Wが卓越し、風速は最大で約10m/sとなっている。風による河川水位の変化については、影響が生じている可能性はあるものの、浜里観測所だけが特異な挙動を示すものではなく、河川感潮域全域にわたって同様な影響が生じていると判断する。

3. 横断観測結果と単位幅流量の関係

上記観測のほかに、大潮時6月30日から7月1日と、小潮時7月21から22日の2回、潮汐変動に合わせ3時

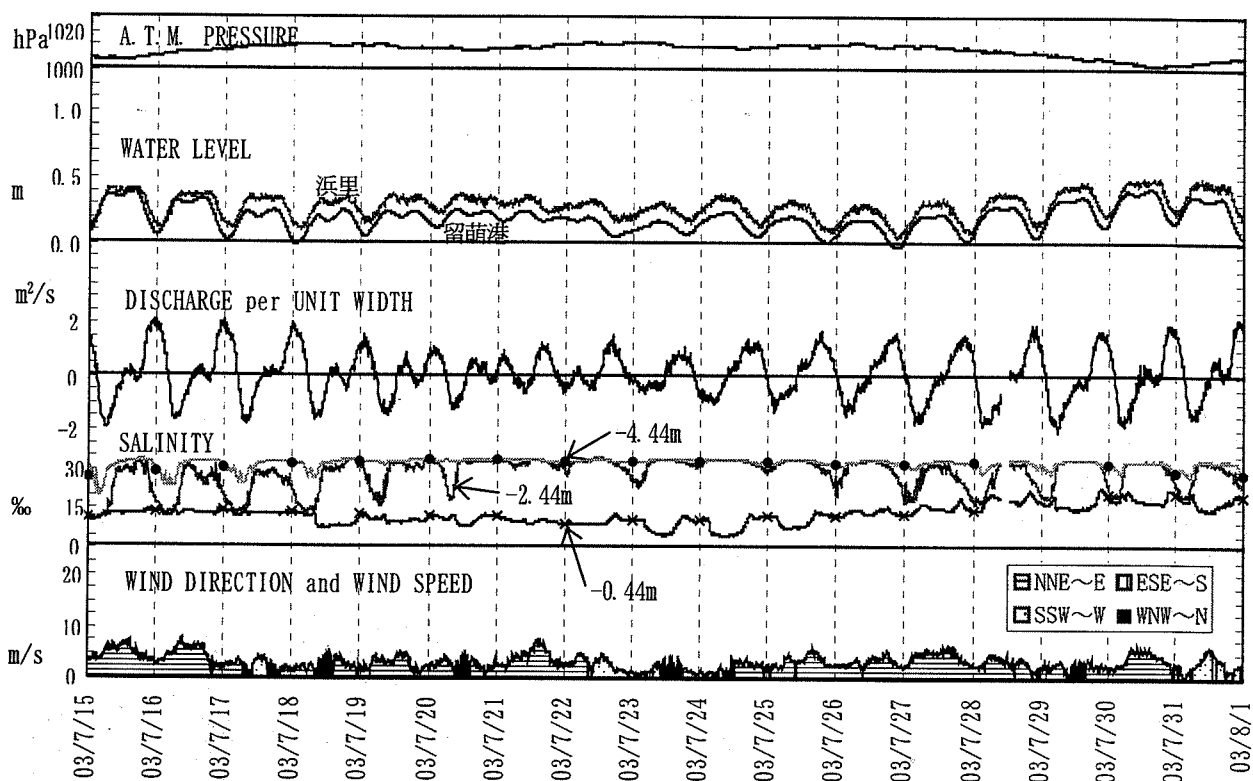


図-3 観測結果 (7月)

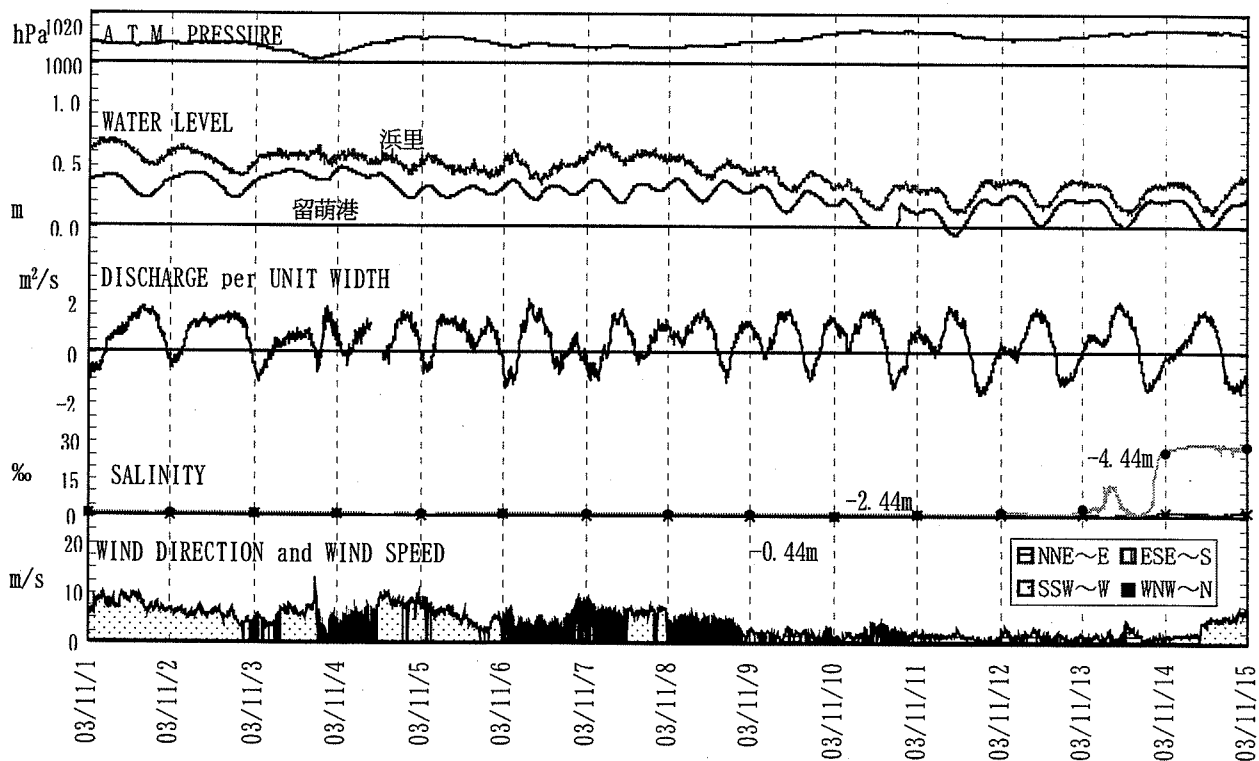


図-4 観測結果 (11月)

間隔で、ADCPを観測船に設置し横断方向に曳航して流向、流速観測を行った。その結果から算出され

る浜里観測所における横断観測結果と、河床に設置したADCPから得られる層流速と層厚を鉛直方向に積

分し算出される単位幅流量の結果から、浜里観測所における全流量の定量評価を行った。

まず、大潮、小潮時に計18回行った横断観測結果から得られる全断面流量 (Q , m^3/s) と、設置したADCP 定点観測結果から得られた単位幅流量 (q , m^2/s) の結果から、該当する時刻を抽出し、その関係を示すと図-5を得る。符号の正負はそれぞれ、順流、逆流を表している。なお、不感帯となる表面近傍の区分流量算出については、観測値の散乱度合いから、水位より-0.75mの流速値を用い、断面積は、水位換算より算出し、採用している。同図より、 q と Q の関係は、順流から逆流まで、広範囲にわたり良い相関が得られており、潮位変動に合わせて、横断観測を3時間間隔で行ったことの妥当性も評価できる。

図より得られる近似式は、式 (I) で示す単純な1次式によって導かれる。

$$Q = 23.73q + 0.15 \tag{I}$$

この結果から、河床に設置したADCP1台の観測結果のみによって、浜里における全体の流量を推定できることがわかった。すなわち、ADCPの設置位置が観測所の流況を良く表す場の代表点である、という要求を満たすことができれば、今回得られた手法を用いることによって、他の観測地点においても十分な精度で流量が算定できると考えられる。

4. 河川水位と流量の関係

前述観測結果より、河川水位と、単位幅流量には何らかの相関があることが認められた。その関係を把握するため、まずは、浜里水位と単位幅流量 (q) の関係を図-6に示す。

同図より、水位と流量の関係は大きな散乱を有している。これは単に、水位 (H) と流量 (Q) が一義的な関係となっていないことを意味しており、この傾向は、観測期間を通じて共通している。

従って、次に水位の時系列変動に着目し、水位変化速度 (単位時間当たりの水位変化、 $\Delta H/\Delta t$) を用いて検討を行った。

まず、水位変化速度の算出方法について説明する。水位データは10分間隔で測定されているが、図-3、4からわかるように、波浪、その他の影響による高周波成分が含まれている。また、10分間隔ではあまりにも変動量が小さい。従って、まず時間移動平均を取ることによって高周波成分を除去した。時間移動平均は前後30分、計1時間分から算出し、ある程度の水位差が生じる変動として評価するために、単位時間は1時間 (毎正時) とした。

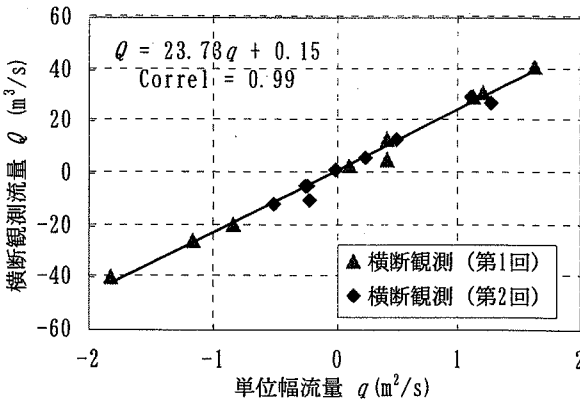


図-5 単位幅流量と横断観測流量の関係

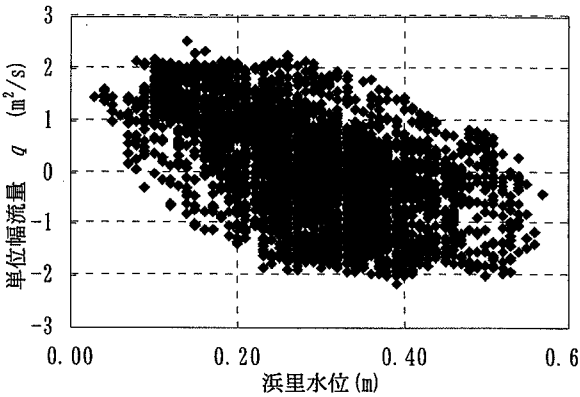


図-6 水位と単位幅流量の関係

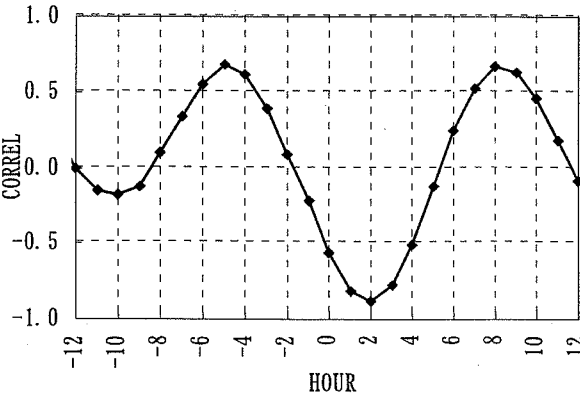


図-7 水位変化速度と単位幅流量の相互相関解析

上述の手法により得られた水位変化速度 ($\Delta H/\Delta t$) と単位幅流量 (q) の相互相関解析を行ったものを図-7に示す。図の横軸は時間を表し、水位から流量を1時間毎に前後に位相差を持たせ、その相関関係を示している。

同図より、その相関関係は、2時間で負の極大となっている。これは、水位下降時 ($\Delta H/\Delta t < 0$) は2時間遅れの順流量 ($Q > 0$)、水位上昇時 ($\Delta H/\Delta t > 0$) は2時間遅れの逆流量 ($Q < 0$) と相関が高いことを意味し

ている。この関係を用いて、時間当たりの水位変化速度 η ($\Delta H/\Delta t = \eta$ とす)と、2時間位相差を持たせた q との関係を示すと図-8、9を得る。

図より η と q は、前述図-6で示した関係よりも、はるかに高い相関を有していることがわかる。この結果から最小2乗法で求めた回帰式を月ごとに整理したものを表-2に示す。この結果から推定される単位幅流量 q_c と、観測結果 q を時系列的に示すと図-10、図-11を得る。

図より、 q と q_c は、非常に良好な対応関係を示し、時刻流量の算定においても、十分な精度で定量化が可能となっている。

これらの結果から、浜里観測所における式(1)と単位幅流量から全流量を求め、観測開始6月17日を起点として累加流出量を算出したものを図-12に示す。図には、ADCP、 η から算出される流出量のほか、参考として、現況 H - Q 式における流出量も同時に示している。

図より、ADCPと η は、流出量についても非常に良い相関を示している。しかしながら同図に示した単一式(全ての期間の η と q を用いた回帰式、表-2参照)との比較をすると9月から10月前後の精度が若干低く、この原因の分析については今のところ今後の課題といわざるを得ない。次に、 H - Q 式で推定された流出量は大きな誤差を持ち、流出量を3倍以上も過大評価している可能性が指摘される。これらの結果から、今回のADCPによる流向、流速観測および、水位変化速度との関係手法を用いることによって、河川感潮域における流量が従来の方法と比較して格段に高い精度で得られたことを示した。また、この方法は、水位の時系列データがあれば流量を推定できることも示しており、過去の水文資料についても、現況の H - Q 式に替わり再評価が行えると考えられる。

5. おわりに

本研究の観測及び検討結果を以下のように要約する。

- (1) 横断方向・鉛直方向に測定して得られた全流量と、河床に設置したADCPから得られる層厚と層流速から算出される単位幅流量は、非常に良い相関が見られ、単純な1次式によって関係づけられる。
- (2) ADCPの設置位置が場の代表点であれば、他の観測地点においても十分な精度で流量の算定が可能と考えられる。
- (3) 水位変化速度($\Delta H/\Delta t$)と単位幅流量(q)は位相差2時間で負の相関となっていた。
- (4) ADCP観測結果と水位変化速度から算出される流量は、全期間を通じて非常に良好な関係を示し、時刻

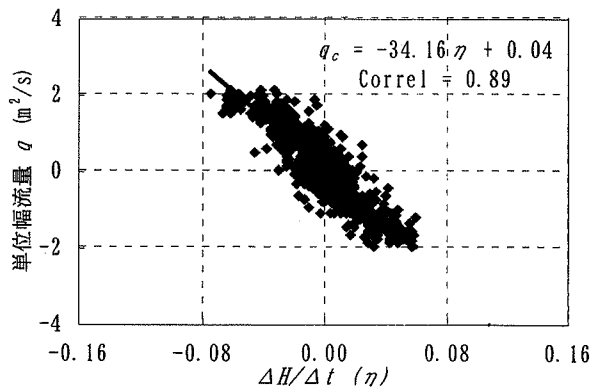


図-8 η と q の関係 (7月)

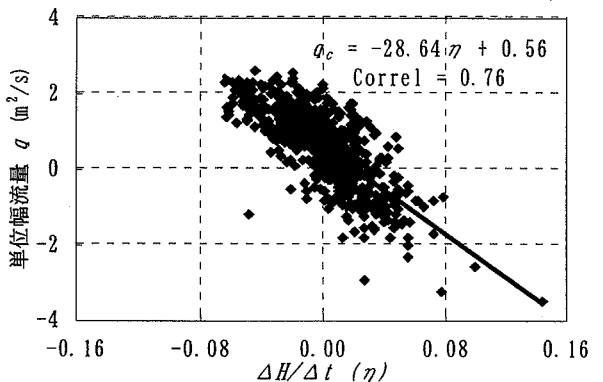


図-9 η と q の関係 (11月)

表-2 単位幅流量算定式

月	式	Correl
6	$q_c = -32.38 \eta + 0.10$	0.84
7	$q_c = -34.16 \eta + 0.04$	0.89
8	$q_c = -34.33 \eta + 0.20$	0.72
9	$q_c = -35.57 \eta + 0.15$	0.87
10	$q_c = -31.26 \eta + 0.76$	0.79
11	$q_c = -28.64 \eta + 0.56$	0.76
12	$q_c = -28.60 \eta + 0.39$	0.76
1	$q_c = -33.00 \eta + 0.20$	0.87
単一式	$q_c = -32.24 \eta + 0.30$	0.81

流量の算定においても、十分な精度で定量化が可能となった。

また、今後の課題としては以下のように要約できる。

- (1) 今回の調査期間では、融雪期や大雨による出水時の観測結果が反映されていない。今後は降雨や、融雪による出水時の観測結果を通じて流速構造を把握する必要がある。
- (2) 水位変化速度から得られる流量は良い相関を得たが、期間全体を通した単一式の精度には問題が生じた。今後は、他の影響要因(上流地点の流量、下流

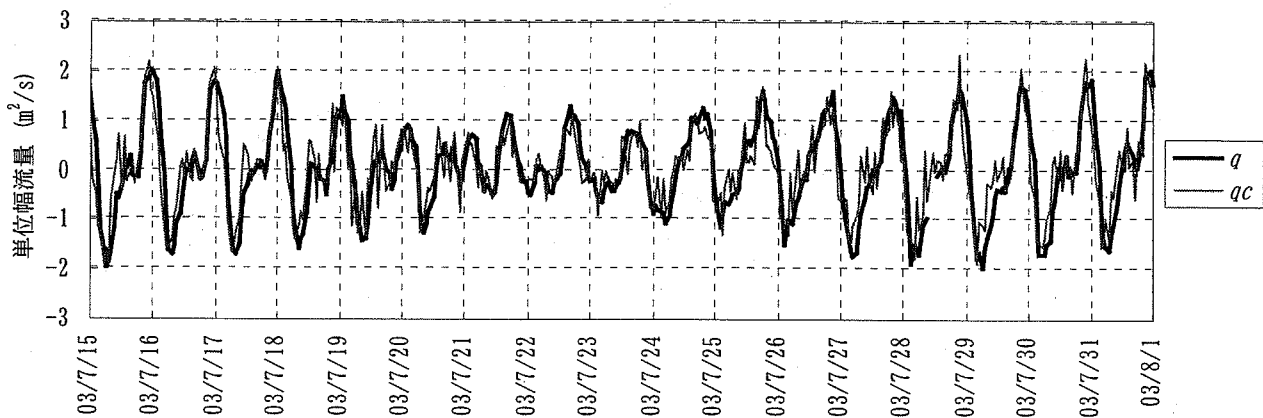


図-10 実測(q)と計算(q_c)単位幅流量の関係 (7月)

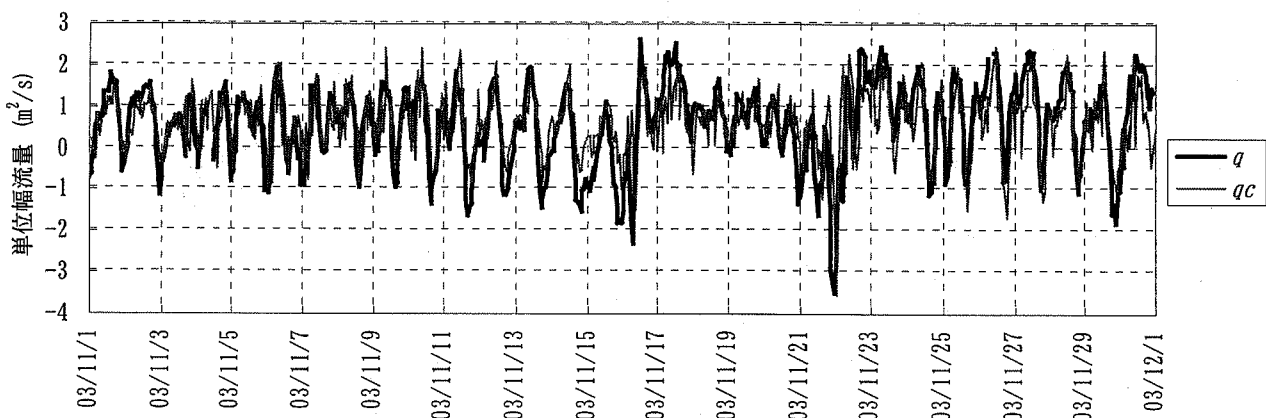


図-11 実測(q)と計算(q_c)単位幅流量の関係 (11月)

地点の水位など)を勘案し、より汎用性の高い算定式の評価が必要である。

(3) 他の緩勾配区間や感潮域、背水影響など流量観測精度の悪い観測所について、今回の提案した手法を用いて、流量が定量的に把握し得るかを検討する必要がある。

(4) 過去の水文資料について、今回の手法を用いて再検討を行い、比較する必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり北海道開発局留萌開発建設部にデータの提供をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 建設省水文研究会著：水文観測（平成8年度版），全日本建設技術協会
- 2) 吉田静男 谷藤康造：天塩河口二層流と潮汐，土木学会水理委員会 水理講演会論文集 pp51-57, 1984
- 3) 吉田静男 西田修三：天塩河口密度流における鉛直流速分布，土木学会水理委員会 水理講演会論文集 pp527-532, 1987
- 4) 西田修三 吉田静男：ADCPを用いた河口二層流の観測，土木学会水理委員会 水工学論文集 pp1029-1034, 1997

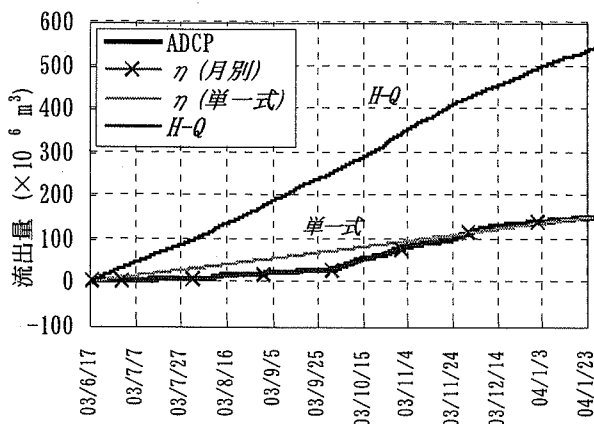


図-12 累加流出量の算定
(2003/6/17～2004/1/23)

- 5) 西田修三 中辻啓二：緩混合河川における流量と塩分輸送量の算定，土木学会水理委員会 水工学論文集 pp869-874, 1999
- 6) 横尾啓介 吉田静男 西田修三 荒川範彦：感潮域における河川水位決定要因の定量的評価，土木学会水理委員会 水工学論文集 pp961-966, 2003

(2004. 4. 7受付)