

感潮域における河川流量連続モニタリング

OBSERVATION OF CONTINUOUS RIVER DISCHARGE MONITORING IN TIDALLY AFFECTED AREA

橋場 雅弘¹・林 克恭²
Masahiro HASHIBA and Katsuyasu HAYASHI

¹非会員 株式会社 福田水文センター (〒001-0024 北海道札幌市北区北24条西15丁目)
²非会員 工修 株式会社 福田水文センター (〒001-0024 北海道札幌市北区北24条西15丁目)

The H-Q equation is used to estimate the river discharge from level of river. Certainly, this provides acceptably accurate estimates in the upper reaches of rivers. In tidally affected area, however, its accuracy is fatally degraded. We observed the vertical distribution of the flow velocity using bed-mounted ADCP. We calculated the Discharge-Index from surface water to the riverbed. Next, we calculated the discharge from the correlation equation of the observed discharge and the Discharge-Index. As a result, the discharge using Vertical Discharge-Index was high accuracy. In addition, bed-mounted ADCP has been found to be effective in the natural river which was irregular cross-section, driftwood and river bank erosion. From the results of the study, we developed a continuous river discharge of real-time monitoring system in tidally affected area.

Key Words : Tidally affected area, discharge, Discharge-Index, ADCP, Real-Time monitoring

1. はじめに

河川の流量は、治水・利水とともに河川環境を考慮した河川計画及び河川管理を行う上で重要な基礎資料である。近年は集中豪雨による局地的な洪水の発生や、異常渇水による利水障害などが問題になっており、今後、気候変動に伴って予測されるさまざまな現象への適応策を立てる上で、流量を高精度にモニタリングすることが求められている。

河川下流部は資産・産業・人口が集中する地域が多く、防災面でも利水面でも重要な地域が多い。しかし、河川下流部は感潮域になっていることが多く、水位が潮汐の影響を受けることが知られている。図-1に示すように感潮域では、潮汐によって下流から水位が上昇すると、背水影響を受けるため流速が遅くなり、流量は減少する。逆に、下げ潮で水位が低下すると、流速が早くなり、流量が増加するという現象が日常的に発生する。

従来使われてきた水位流量曲線式 (H-Q式) は、水位と流量の関係が比例関係であることを前提としているため、感潮域では、正確な流量を算出できないという課題を抱えている。今年度改訂された河川砂防基準調査編 (2012) では、流量の連続データの算出にあた

て、感潮域のような条件では水位流量曲線を水位のみの一価関数として表現できないことから、水位流量曲線を用いず、このような水理条件下でも利用可能な固定式流量観測手法を活用することが望ましいとされている。

ここでは、河床固定したADCPを用いた感潮域における流量連続モニタリングの手法の紹介と、この手法を用いて構築したリアルタイム流量モニタリングのシステムについて報告する。

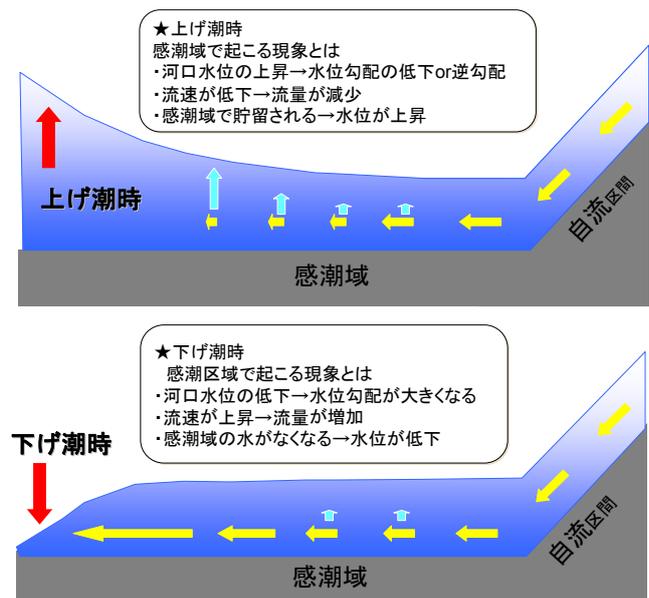


図-1 感潮域の水理現象

2. 現状の課題と解決方法

(1) 感潮域における流量観測の課題

感潮域の課題を表-1に示す。感潮域では自流通間にはみられない複雑な水理構造がある。一つは潮汐による背水影響、もう一つは塩水遡上である。潮汐による背水影響は低水流量の精度低下を引き起こすため、農業用水や工業用水、水道利用などの利水に影響する正常流量の管理が難しくなる。精度低下の原因は水位と流量が比例関係にならないためであるが、感潮域で水位に影響を及ぼす要因は、自流通の流量や潮汐変動だけでなく、風向風速や気圧などにも起因することや、その発生順序によって水位変動のパターンが異なることがさらに複雑にしている。¹²⁾

塩水遡上による塩水の侵入は樋門から農業用水路に侵入すると農作物に深刻なダメージを与え、工業用水や上水道では機能が一時停止してしまう事態となる。しかし、塩水は通常、渇水時に下層から侵入するため、洪水時のような気象条件の変化などが指標にならず、常設の塩分監視装置などがなければ判定は困難である。塩水遡上は上げ潮時に発生し、背水影響で流速が低下するのだが、河川水位は上昇するため、H-Q式で管理すると水位上昇を流量の増加という誤った判定をしてしまう。また、塩水が遡上すると弱混合の場合は侵入する層が逆流となることから、流速の変化をリアルタイムで観測できるシステムが必要である。

(1) 石狩川下流の特徴

具体例として、石狩川の石狩大橋地点(図-2)における取組みを紹介する。石狩大橋は石狩川の治水上の基準地点であり、基本高水のピーク流量(18000m³/sec)を基準として治水対策が行われている。同時に、流水の正常な機能を維持するため必要な流量を設定する基準点として、正常流量(103m³/sec)が定められており、低水管理が重要な観測所と位置づけられている。

石狩大橋は河口から26.6kmに位置するが、石狩川の下流は、図-3に横軸が河口からの距離、縦軸に平均水位を示すが、水位勾配が非常に緩やかである。石狩大橋の豊水位(1年を通じて95日はこれより低下しない水位)では、過去20年で1.0m以下となっており、日常的に潮汐の影響を受ける観測所であることが、低水流量の精度に大きな課題になっている。

(2) 感潮域における観測流量とH-Q式連続流量

はじめに、プライス式流速計などで測定される観測流量と、水位流量曲線式(H-Q式)で得られる連続流量を

表-1 感潮域の課題

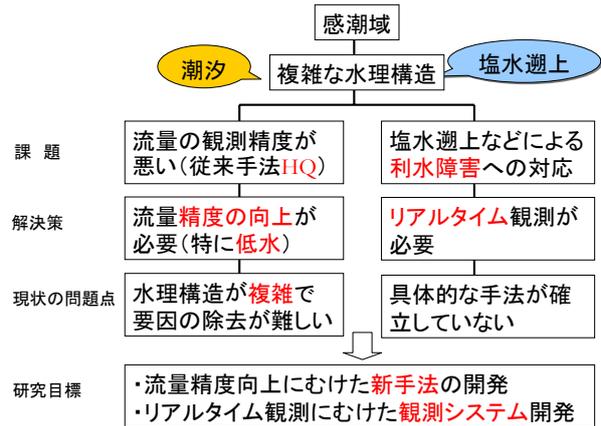


図-2 観測地点

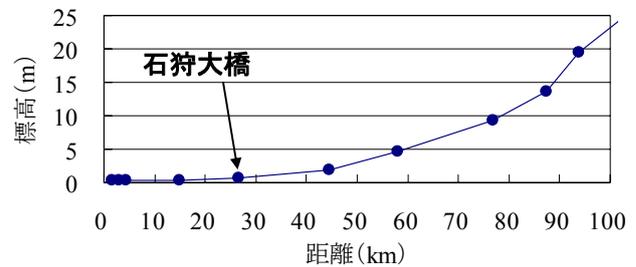


図-3 石狩川下流平均水位縦断面図

区別しておきたい。観測流量は、潮汐背水下の流れ場では、水位が上昇しても流速が遅くなるため、プロペラは回らないことから、流量は小さく観測される。これに対し、連続流量は、観測流量と観測水位から最小自乗法で得られた水位流量曲線式(H-Q式)に、水位観測所の時刻水位を入れて算出された流量で、これをまとめたものが流量資料の成果として整理保存される。図-4に2007年7月12日~13日の石狩大橋に実施した大潮時の水位・流量測定結果を示す。ここでは、プライス式の流速計を用いた流量観測と、ADCPを搭載したボートで河川を左岸から右岸に横断して算出した流量を併記する。ADCPはTeledyne RD Instruments社の1200kHzを用い、ハイスピード測定モード12、メインピング5、サブピング6、層厚0.25m、ボトムトラッキングBM5で観測し、ボートの移動速度は1m/sec以下とした。図-4より、石狩大橋の水位

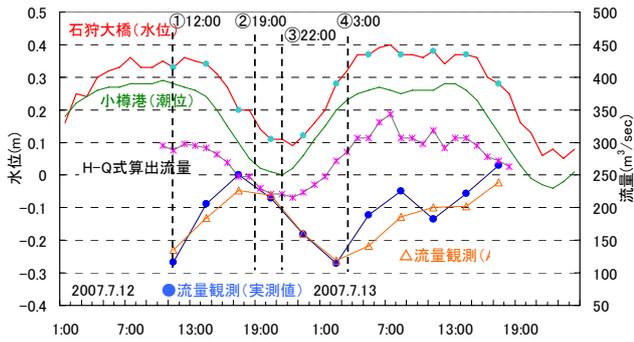


図-4 大潮時の流量観測 (石狩大橋)

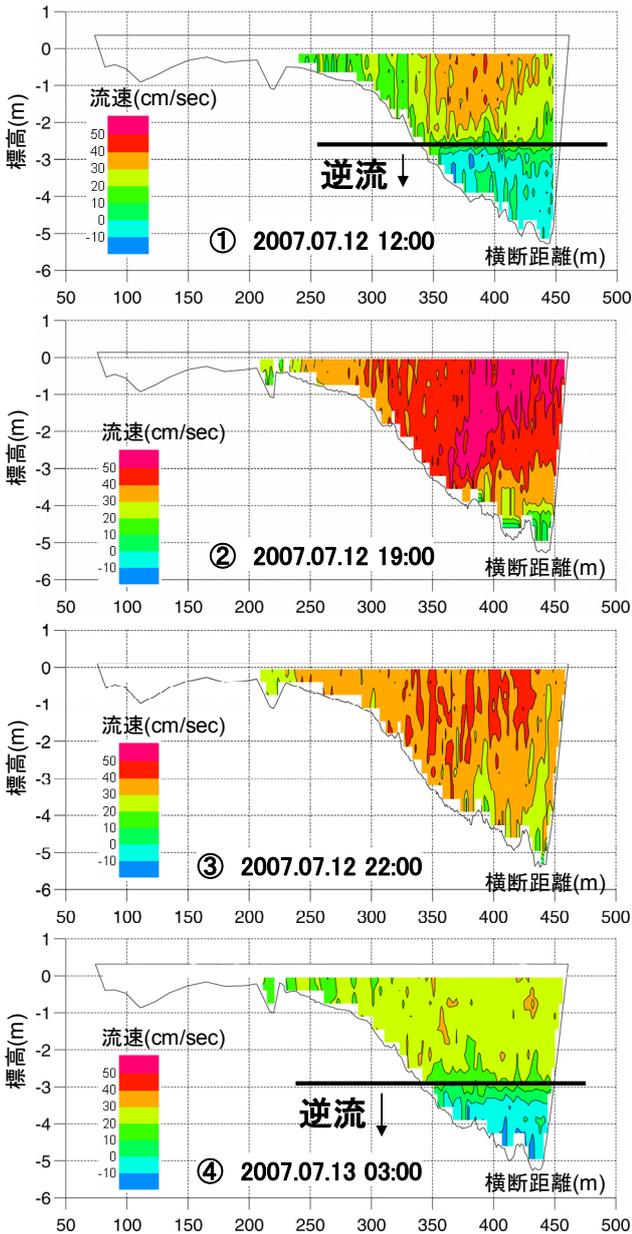


図-5 横断面流速分布

は河口付近の小樽港の潮位と約1hr遅れで連動しており、潮汐影響が明瞭に現れている。ブライス式での観測流量とADCP曳船による流量は概ね合致しているが、水位とは全く異なる変動を示す。観測流量の最大値は水位の下降時に、観測流量の最小値は水位の上昇時に発生してい

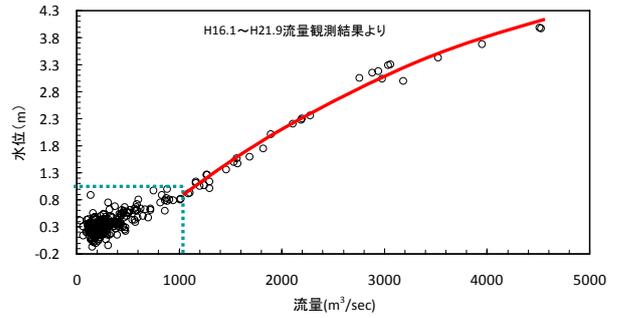


図-6 水位流量曲線式 (H-Q式)

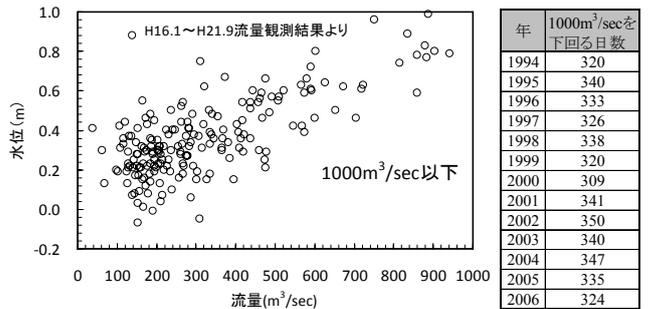


図-7 水位と流量の関係 (1000m³/sec) 以下

る。これは潮汐変動による水位勾配の変化に起因している。ところが、水位流量曲線式 (H-Q式) によって算出された連続流量は水位の変動と連動するため、観測流量とは乖離した結果になっている。

図-4の①満潮、②下げ潮、③干潮、④上げ潮に対するADCPによる流速の横断面分布を図-5に示す。①満潮と④上げ潮時には標高-3.0m付近に逆流の層が発生し、塩水の遡上が見られる。満潮時には0.4m/sec以上の順流の層が上層にあるが、上げ潮時は上層でも流速が0.2m/sec程度と停滞した状態に近い。逆に、②下げ潮と③干潮では逆流の層はみられず塩水は侵入していない。特に下げ潮では全層で0.5m/sec以上の流速が発生している。よって、最も流速が速いのは下げ潮時で、最も遅いのは上げ潮時となり、観測流量の最大最小と合致する。

これより、H-Q式連続流量は乖離するが、観測流量は概ね正確な流量を観測していることが推察できる。

(2) 感潮域における水位流量曲線の脆弱性

平成16年～平成21年の観測流量と水位をプロットすると図-6に示すとおり、1000m³/sec以上では相関がみられるが、1000m³/sec以下では大きくばらつく結果になる。図-7は流量1000m³/sec以下を拡大したもので、同じ水位でも400m³/sec以上の流量差が生じている。従来法では、これより最小自乗法によって水位流量曲線を作成するため、低水流量では、作成された式には相当の誤差が含まれる。また、観測流量が正しい値を測定したとしても、水位と流量が比例関係であることを前提としたH-Q式で管理する以上、上げ潮時には実際の流量は小さいが、水

位が上昇するため大きな流量として整理保存されるのが現状である。石狩大橋では、年間の約330日が1000m³/sec以下となるため、低水流量の精度向上は重要な課題である。

(3) 感潮域における流量算出の指標

既往の流量観測データ（平成16年～平成21年）から、水位、観測流量、断面平均流速の相関を図-8に示す。

水位と流量にはばらつきがみられ、相関関係はみられなかったが、断面平均流速と流量は一義的な関係がみられた。これより、感潮域では流量の支配因子が水位ではなく、流速であることが推察できる。また、前述したADCP曳船観測での断面流速分布から、感潮域では塩水遡上などによって上層と下層で2層流になることがわかったため、流速の鉛直分布が重要な指標になることが示唆された。そこで、水位の代わりに、流速の時系列データを取得して流量を算出する方法を試みた。

3. 河床設置ADCPによる流量算出

(1) ADCPの設置箇所

感潮域での流速鉛直分布を時系列で得るためには、水深方向に多点の流向流速データが必要である。そこで、非接触で多層の流向流速を得ることができるADCPを観測機器として選定した。設置する箇所の条件は、図-9に示すように、過去10カ年で全流量と区分流量の相関係数の最も高い箇所、かつ河床変動の少ない箇所とした。全流量と区分流量は既往の流量観測計算書から抽出し、河床変動については、既往の横断測量結果の重ね合わせで、最も変動の少ない箇所を選定した。

(2) ADCPの設定

ADCPはTeledyne RD Instruments社の1200kHzを用い、ハイスピード測定モード12、メインピング10、サブピング6、層厚0.25m、時間間隔10分とした。ハイスピード測定モードを使用した理由は、精度の確保と電力の消費量である。ハイスピード測定モードは、1メインピングに対して複数のサブピングを同時発射することによって、短時間で通常モードから多数のピングを発射するものと同一精度が得られる。今回は測定誤差1.76cm/secとした。通常モード1で60ピング、層厚0.25mで40層、10分インターバル測定の場合の電力消費量は365日で607.55Whである。しかし、同精度をハイスピード測定モード12で行うと、219.23Whと約1/3の消費電力である。ADCPセンテネルのバッテリーは標準で400Wh程度のため、設置後1年以上は稼働可能である。これは、河床設置の場合、

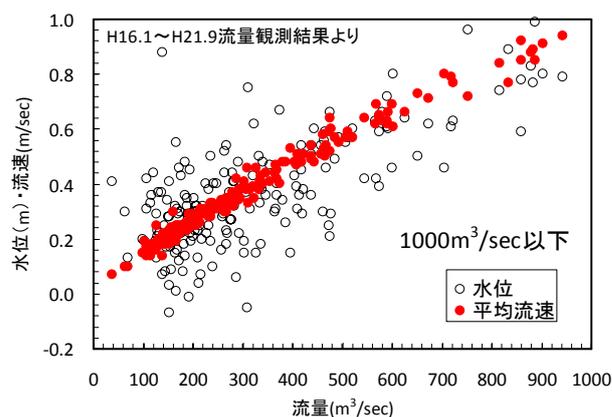


図-8 平均流速と流量の関係

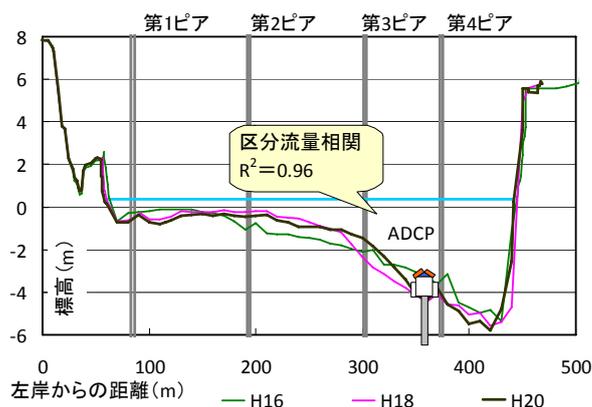


図-9 ADCP設置箇所の選定

表-2 ADCP流量観測施設の種類の種類

型式	自動昇降式 河岸水平設置		河床鉛直設置
	自動昇降・首振り式 水平方向(H-ADCP)		鉛直方向 (ADCP)
概要			
河川名	鶴見川	大橋川	石狩川
所轄	京浜河川事務所	出雲河川事務所	札幌開発建設部
設置箇所	河口より5.9km	中海と穴道湖の間	河口より26.6km
断面適用	矩形護岸		不整形(自然河川)
設置箇所	河岸		河床

メンテナンスが潜水作業になることから、維持管理コストを考えると有利な設定である。

(3) 河床設置の選択

国内外のADCPを用いた流量観測施設はH-ADCP（水平方向）が一般的であるが、表-2に示す国内の既設2カ所は、河岸から全断面を照射できる矩形に近い形状で、出水時には隣接する湖や海の緩衝効果で直接的な影響が少ないと考えられる。これに対し、石狩大橋は流心が右岸に偏った不整形な断面の自然河川であることや、出水で河岸浸食や流木が発生しやすく、河岸への施設設置はリスクが大きい。よって、河床に設置することで、出水時に想定される外力から直接的なダメージを受けにくい

と想定し、河床設置にアドバンテージがあると判断した。

(4) 流量算出方法

河床に設置したADCPにより、鉛直方向に多層の流速を測定し、インデックス流量を算出した。図-10より、水面直下のデータは乱れがあるため、カットし、第2層のデータを補完した。また、ADCPの直上第1層のデータで河床までを補完した。

インデックス流量は式(1)となる。

$$q = \sum_{i=1}^n h_i \cdot V(x)_i \quad (1)$$

h_i : 水深幅[m], $V(x)_i$: 点流速[m/sec]

流量算出に使用する点流速 $V(x)$ は、横断面に直交した流下軸方向の流速に補正した流速を使用する。

得られたインデックス流量 q とプライス式流速計による観測流量 Q の相関式 (q - Q 式) を図-11に示す。これより10分インターバルで得られたインデックス流量 q から連続流量を算出する。ここで流量 $1000\text{m}^3/\text{sec}$ を境界に式が2つに分岐される。これは水位に置き換えると約 1.0m であるが、図-9の横断形状には変化点はみられない。しかし、図-6より、 H - Q 式による水位と流量の関係が成立するのが $1000\text{m}^3/\text{sec}$ 以上であることから、 $1000\text{m}^3/\text{sec}$ 以下の潮汐影響を受けるI式と潮汐影響を受けず自流となるII式の分岐点は妥当性があると推察できる。

図-11のインデックス流量と観測流量の図は、既往の流量管理図に類似する。流量管理図は流量観測毎に図上にプロットし、観測流量の妥当性を確認する。そこで、出水後の河床変動によって横断面形状が変化した場合、プロットされる点の傾向が変化するため、式に分岐点となる。これと同様に、図-11はADCPの「線」断面が全流量との一定の相関が維持されているかを定期的に検証することが可能で、横断面の変化などで、インデックス流量と観測流量の傾向が変化した場合、 H - Q 式同様に、 q - Q 式を立て直すことによって精度管理が可能になる。

(5) データ精度の検証

現在、リアルタイム流量の算出に使われている洪水予報システム水位流量曲線式 (H - Q 式) の流量と河床設置ADCPの流量の精度を、観測流量を基準として比較 ($H21$. 1月~9月) した結果を図-12, 13に示す。

H - Q 流量は $500\text{m}^3/\text{sec}$ 以下の低水部分を中心に大きくばらつきがみられる。 $1000\text{m}^3/\text{sec}$ 以上では95%信頼限界内に収まるが、 $3000\text{m}^3/\text{sec}$ を超える流量では再びはずれている。これに対し、ADCP流量は低水から高水まで95%

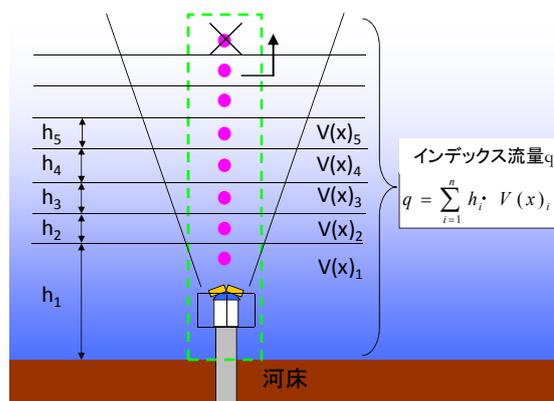


図-10 インデックス流量の算出

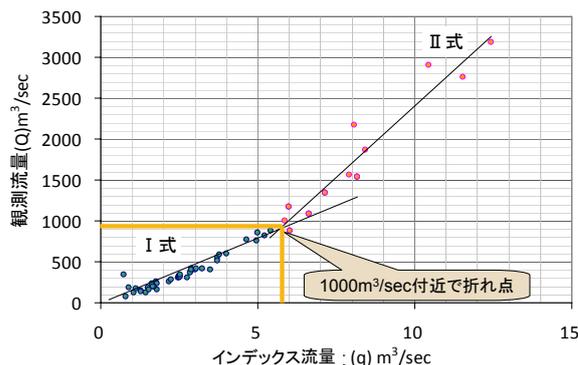


図-11 q - Q 式の算出

信頼限界内に収まっており、どの規模の流量でも精度よく測定されているのがわかる。

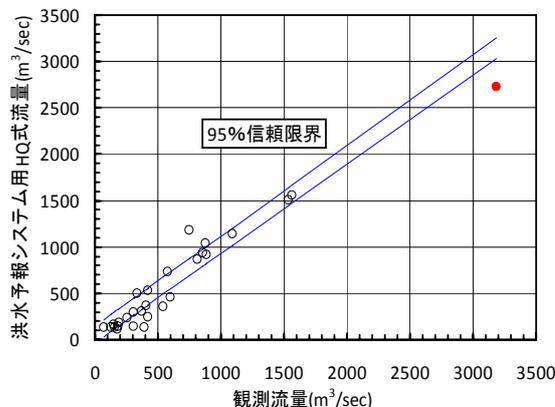


図-12 流量精度 (H - Q 式)

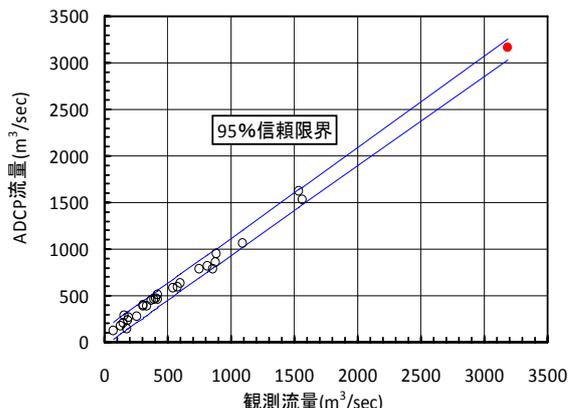


図-13 流量精度 (ADCP)

当初、ADCPは出水時などの高水への適用が懸念されており、高水流量はH-Q式との結合によって算出することも検討されていたが⁴⁾、3000m³/secを超える高水にも十分な精度があることが確認できたため、ADCPで低水から高水まで十分測定が可能であるという新たな知見が得られたことになる。なお、石狩川では超音波障害になりやすい濁度1000以上になりにくいことも適用できた要因と推察できる。

高水適用については今後、データを重ねて検証していく必要はあるものの、石狩大橋の年間の標準的な出水規模（最大流量の平均（H14～H20）：約2700m³/sec）では、一年を通して精度の高い流量をリアルタイム配信できることが確認できた。

4. リアルタイム流量配信システムの構築

ADCPを用いたリアルタイム流量観測システムの概要を以下に示す。

(1) 機器のシステム配置

システム構成は図-14に示すように、石狩大橋の橋梁の上流側、右岸流心部河床にADCPを設置した。ADCP内には水圧センサーを配置し、リアルタイムの水位を流速・流量とともに測定することとした。

観測機器を固定するために、河床にステンレス管を打ち込み、図-15のADCPと送信用のモデムを入れたステンレス籠で流下物などの衝撃から機器を保護した。

水中は水中音響モデムでの水中無線通信とした。通信の信頼性は有線接続の方が高いが、設置箇所が流心部にあたるため、施工性と出水時の河床変動による断線リスクを考慮し、水中音響モデムを使った無線方式を採用した。受信用のモデムは橋脚側面の水中に設置しており、橋脚上まで有線接続とした。

橋脚上のインターフェイス接続箱内でデータは光に変換され、光ケーブルによって橋梁から局舎まで伝送される。光ファイバを選択した理由は、橋上の多い交通量によるノイズや通信障害などに強いことと、多量のデータを速く、安定して伝送できる能力があるからである。

また、通信は石狩大橋既設の塩分監視装置を利用し、可能な限り既存施設の有効利用と施工コストの削減を図った。

システムの概要を図-16に示す。ADCPで観測したデータは橋脚下の光ファイバを経由して石狩大橋局舎内のADCPサーバに伝送される。

サーバはデータ保守とトラブルを防ぐため、ハードディスクの5台による同期と、サーバ電源の冗長化を行っている。現在約4カ年連続稼働しているがサーバにトラブルは発生していない。

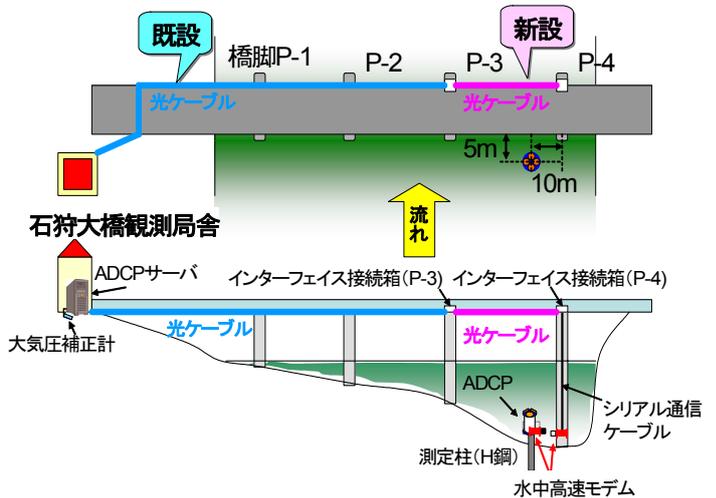


図-14 観測施設概要

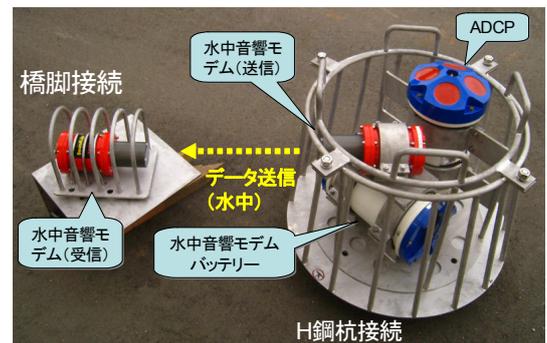


図-15 水中設置機器

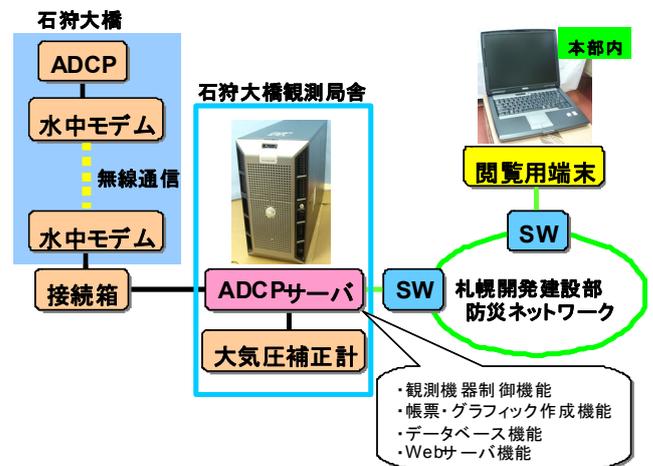


図-16 システム概要

サーバではADCPから送られる流向流速データおよび圧力センサーと大気圧補正計のデータから流量を算出し、データベースに保存されると同時に帳票作成とグラフィック処理が行われる。このようにして得られた情報はWebサーバ機能を使って、札幌開発建設部防災ネットワーク内に配信される。アクセス方法は簡単で、ネットワーク内の端末機であれば、WebブラウザにURLを入れるだけで、複数台でも同時に表示が可能のため、閲覧用に専用のソフトウェアを入れる必要がなく、機器の交換などにも柔軟に対応できるシステムとした。

(2) 情報管理システム

局舎内のサーバからWeb配信される情報管理システムは防災ネットワーク上の端末から閲覧可能で、主にグラフィック、帳票、ダウンロードの3機能があり、画面上、流速等の状況が一目で判るように工夫し作成した。

図-17はホーム画面で、4つの大きなメニューが表示される。システムの更新情報やq-Q式の更新、メンテナンス時などがインフォメーションの中で表示される。

図-18の流速コンターグラフィックでは横軸が時間軸で、水位、流量、流速分布コンターの3要素を時系列で表示できる。また、時間軸、縦軸ともに切り替えが可能で、1日～1ヶ月、低水～計画高水まで表示できる。

図-19の水位・流量帳票はADCPで観測した水位と算出された流量の帳票を10分ごと、1時間ごとに切り替えて表示できる。図-20では、水深標高別に流速が帳票形式で時系列の表示が可能になっている。図-21では、水位・流量・水深別流速の10分データを月ごとにテキスト(CSV形式)でダウンロードでき、汎用されている表計算ソフトなどで簡単にデータを利用可能である。

この情報管理システムは、図-22に示すとおり、潮汐影響による水位の日変動やそれに伴う流量変動の把握が可能で、潮汐背水による流速の鉛直変化や、塩水遡上による逆流など、感潮区域特有の現象がビジュアル的に把握できるようになっている。

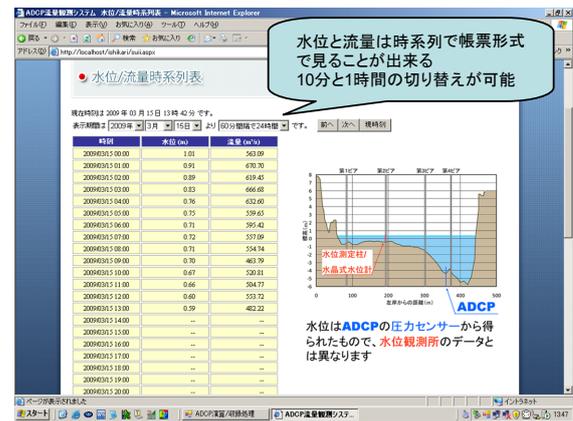


図-19 水位流量データ

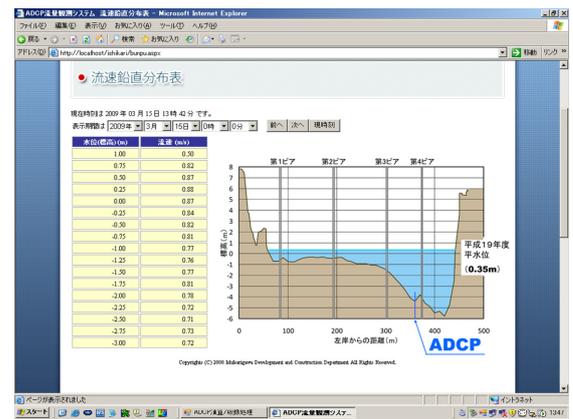


図-20 鉛直流速データ



図-17 ホーム画面

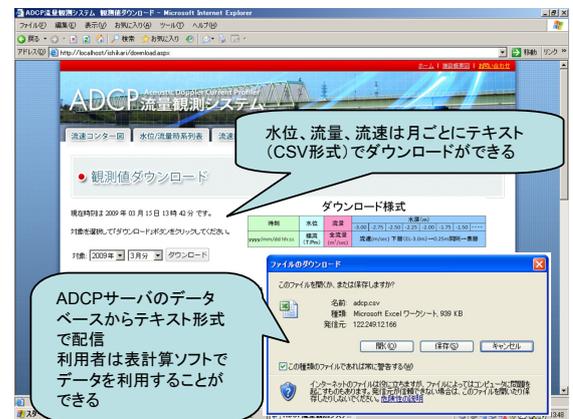


図-21 データダウンロード

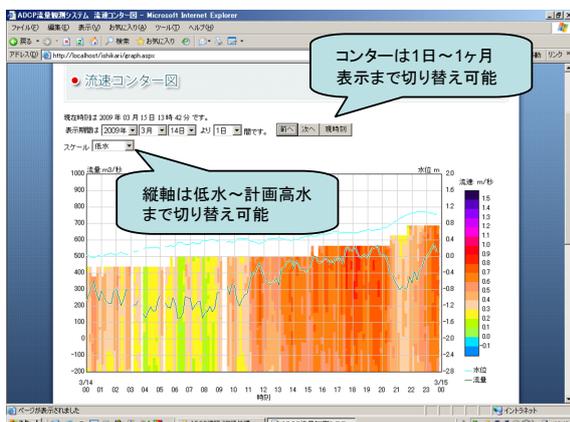


図-18 流速コンター図

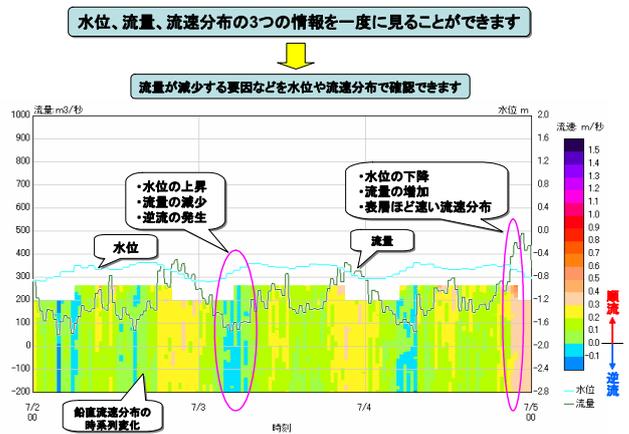


図-22 グラフィックの見方

5. 観測システムの課題と対策

本システムは平成20年に試験運転が開始され、平成21年から現在まで4年程度稼働している。その中で発生したトラブルやその対応策などを記述する。

(1) 河床変動などによる欠測

河床設置型のリスクとして考えられるのは河床変動による流出、埋没である。平成22年の5月の融雪出水時（流量規模3000m³/sec）に一時大きな河床変動が発生し、河床に設置していたADCPが3ヶ月近く埋没した。リアルタイムでデータは配信されているため、埋没時期は事務所内で判定できたが、水位が高い状態が続き、潜水での掘り出し作業を安全に行うことができなかつたため、埋没期間が長期化してしまった。これ以降は、大きな河床変動はみられていないが、河床設置型の最大の課題は、河床変動と河床設置という維持管理の難しさである。多少の河床変動については、q-Q式の修正によって管理が可能であるが、想定外の変動もあり得るので今後とも注視していかなければならない。

また、河床設置では、ADCP架台をパイプ単管で河床から立ち上げ、河床とADCP架台の間にできるだけ隙間を作り、架台が抵抗になって局所的な洗掘などが起こらないような構造にする必要がある。

(2) 維持管理

河床設置型機器のメンテナンスは潜水土による水中作業が必要である。この点で河岸に設置するH-ADCP等に比べて保守点検作業に負担がかかる。そこで、現地作業の負担を少なくするため、ADCPは消費電力のオプションモード（WM12）を使用し、潜水メンテナンスの回数を極力少なくしているが、前述したようにトラブルが発生しても、潜水して安全に作業ができる状態にならないと復旧できないため、放置期間が長くなるのが課題である。システム障害時の保守対策として、機器単体のメモリにも記録しており、データの連続性が確保できるような二重化対策を行っているが、ADCP本体にトラブルが生じた場合は対処できないのが現状である。今後も土砂や流木などによる障害の影響等の検討を行っていくと同時に、流れ場における、抵抗の少ない設置架台の設計に取り組む必要がある。

6. まとめ

従来の観測手法である水位流量曲線式（H-Q式）による流量管理では、感潮域における精度が低い。このよう

な地点での流量観測手法として、ADCPを用いて流速観測を行い流量算出するリアルタイム流量観測手法の有効性が確認された。これは河床から水表面までのインデックス流量と観測流量の相関式によって流量を算出する方法で、USGSのIndex Velocity Method⁶⁾と類似する。Index Velocity Methodは、測定した多層の流速と平均流速の相関式から連続した平均流速を算出し、水位一断面積の関係から流量を算出するものであるが、本手法は感潮域でのあいまいな水位をインデックス流量と観測流量の相関式の中に内在させているものといえる。また、手法はサンプルで単純であることから、感潮区域以外でも背水影響のある河川の合流点付近や正逆の流速が発生しやすい遊水地などの管理にも応用活用できると考えられる。

また、河床設置型のADCPを用いることにより断面が不整形で河岸浸食や流木が懸念される自然河川でのリアルタイム流量システムの適用性と課題を明らかにした。

しかし、現在のところ従来法（H-Q式）以外は水文資料として蓄積が認められていないことから、本手法で算出した流量を、再びH-Q式流量に戻して水文資料成果としているのが現状である。今後、新しい手法を適用していくためには、観測手法や精度管理手法などの標準化に向けて、関係機関などとの協議を重ねていくことが望まれる。

謝辞：本研究は北海道開発局札幌開発建設部より資料提供のご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

7. 参考文献

- 1) 横尾啓介, 吉田静男, 荒川範彦: 河口二層流に与える風の影響, 土木学会, 海岸工学講演会論文集, 第51巻, pp361-365, 2004.
- 2) 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, 水工学論文集, 第47巻, pp.961-996, 2003.
- 3) 横尾啓介, 吉田静男, 岡田幸七, 野村佐和美: 感潮域におけるADCPを用いた河川流量の推定, 土木学会, 水工学論文集, 第52巻, pp.931-936, 2008.
- 4) 野村佐和美 山崎猛 佐々木誠: 感潮区域における流量観測-石狩大橋地点でのADCPリアルタイム観測-, 平成19年度北海道開発局技術研究発表会, 技術一般(技5治) 2007.
- 5) 大田見 定・天野 直哉・舘ヶ沢 恵: 感潮区域における流量観測手法について—石狩大橋地点でのリアルタイム流量観測—, 平成22年度国土交通省国土技術研究会, 自由課題(イノベーション部門), 2010.
- 6) Catherine A. Ruhl, Michael R. Simpson: Computation of Discharge Using the Index-Velocity Method in Tidally Affected Areas, Scientific Investigations Report 2005-5004, U.S. Department of Interior, U.S. Geological Survey, 2005.

(2012. 9. 10受付)