

A D C P による流量観測精度向上の提案

- 低水流量精度向上に対する取組み -

札幌開発建設部 河川管理課 喜澤 一史
 田中 康寛
 北海道開発局 河川管理課 福田 勝之

河川基準点の多くは河口などに位置し、潮汐や背水影響を受けて低水流量の管理精度に苦慮しているのは全国共通の課題であり石狩川の石狩大橋基準点も例外ではない。そこで本論では精度低下要因に対して実用的な管理手法の提案のため、曳航A D C Pによる重積分流量Qと、河床固定及び河岸水平固定のA D C P鉛直水平流速分布VのV-Q回帰により、リアルタイムに流量を管理する手法を提案するとともに、水中植生等により流量観測精度に課題のある地点において曳航A D C Pを活用し、現行観測で一律に扱う流速測定数や水深、有効断面等を流況特性に応じて再設定する精度向上手法を提案するものである。

キーワード: ADCP, H-ADCP, V-Q回帰, 潮汐, 水中植生

1. はじめに

現行の流量管理手法は、観測時の水面幅に応じて図-1に示す区分断面を設定し、それぞれ2点法で平均流速を計測し面積を乗じ、横断方向に総和して観測流量Qを求める。流量は流量観測時の水位Hと観測流量Qの相関(H-Q式)に連続観測水位を与えて連続値としている。

ところが潮汐・背水区間や、水草などにより水理構造が刻々と変化する地点では、H-Qの偏差が大きく流量管理精度が低下しており、H-Q式で連続流量を算出する手法に起因するもの、流量観測の仕方に起因するものの2つの要因が考えられる。

そこでADCPとGPSを搭載したボートを横断方向に移動し(以降ADCP曳航観測)水理特性を調べるとともに、図-4式(1)による重積分で精密流量を求め比較することで、各事象に対する流量観測精度向上の実用案を検討した。

2. ADCPリアルタイム流量管理手法

(1) 石狩大橋基準点(図-2)の課題と現地観測

潮汐影響区間に位置するため図-3下段の低水時における水位-流速(H-V)の関係は、自流が強い時に正の相関を、潮汐影響が強い時に負の相関を示す。つまりH-V関係が成立しないとH-Q関係も成立しない。それが図-3上段に見られるH-Qのばらつき要因であり、流量管理精度の低下要因への取組みが必要となる。時間的な流れの構造を把握するために、全流量との相関が高く変動の少ない河床に固定型ADCP(以降V-ADCP)を設置し鉛直流速分布を、空間的な流れの構造を把握するために、河岸に水平固定型ADCP(以降H-ADCP)を設置し水平流速分布を、それぞれ連続的にモニタリングするとともに、10/25~12/16で10回ADCP曳航観測を行った(図-4)。

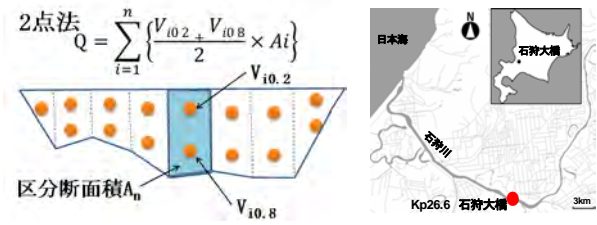


図-1 現行の流量観測(2点法) 図-2 石狩大橋位置図

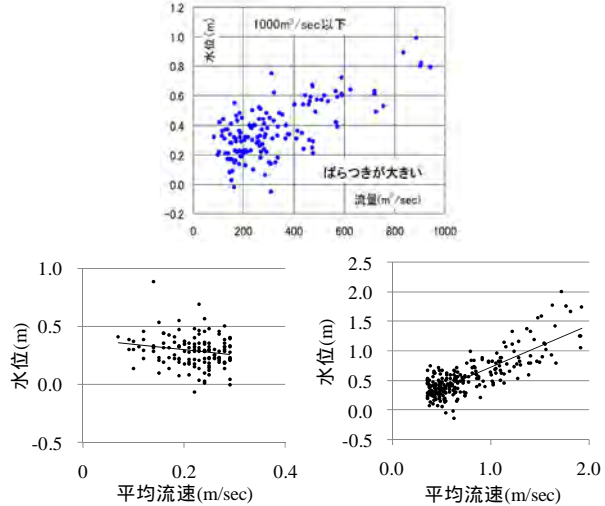


図-3 水位と流量のばらつき、水位と流速の関係

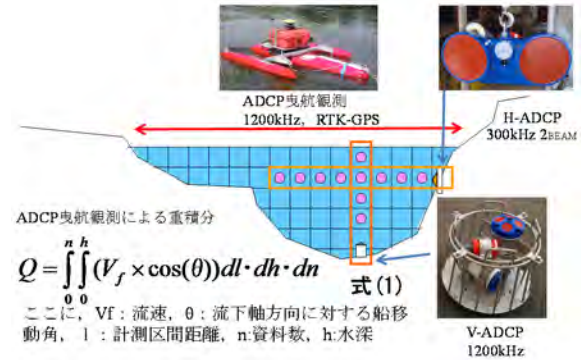


図-4 石狩大橋観測システム図

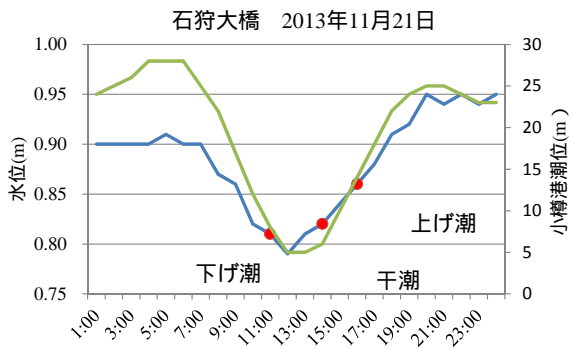


図-5 観測のタイミング (石狩大橋)

(2) 観測結果

V-ADCP, H-ADCP, ADCP曳航観測の代表的な観測結果を図-6に示す。上段はH-ADCPで縦軸が時間(11/21 11:06-14:12), 横軸が横断距離。中段はADCP曳航観測で縦軸が水深, 横軸が横断距離。右下段はV-ADCPで縦軸が水深標高, 横軸が時間(11:06-14:12), 何れも基準断面に垂直なベクトル変換値である。図-7上段は曳航観測時の横断ごとの鉛直流速分布である。自流量が強く潮汐の影響が小さいため特異な分布は見られなかったが, 下段のV-ADCP連続モニタリングの鉛直流速分布では, 潮汐の影響によって特異な分布が確認できた。

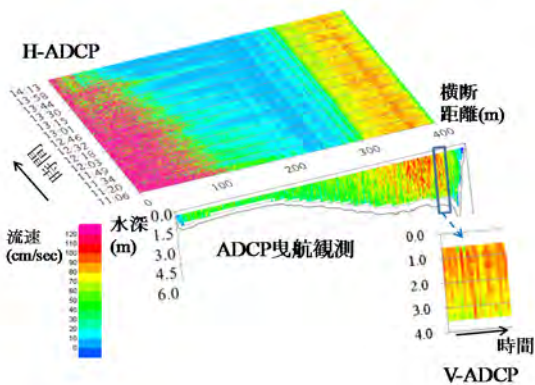


図-6 観測結果 (石狩大橋)

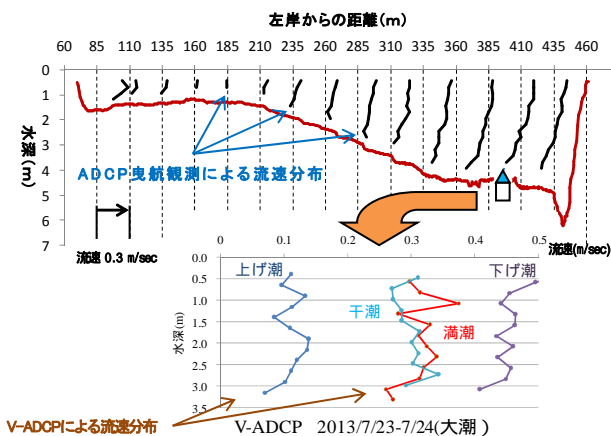


図-7 断面流速分布 (石狩大橋)

(3) 流量算出手法の検討

連続モニタリング値は, 水位と図-4の で示した十字メッシュの流速値 (以降流速クロス分布) である。

a) 重積分で求める方法(図-8)

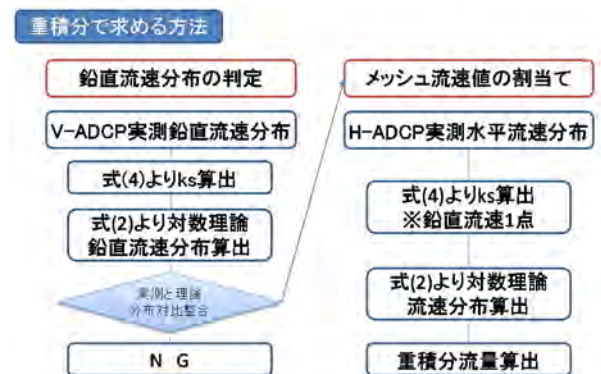


図-8 流量算出フロー：重積分で求める方法

重積分流量を得るには, 図-4の 流速クロス分布以外のメッシュ値が必要である。V-ADCP鉛直流速分布が対数則と整合しかつ全断面も同様と仮定すれば, 全断面の対数理論鉛直流速分布¹⁾が描かれ理論上の重積分流量が算出できる。基礎式を再記する。

相当粗度を用いた対数分布式は式(2)である。

$$u = (8.5 + 2.5 \ln \frac{z}{k_s}) u_* \quad \text{式(2)}$$

k_s = 相当粗度高、 z = 全水深、 u_* = 摩擦速度

$$\epsilon^2 = \sum \left[\bar{u}_i - \left(8.5 + 2.5 \ln \frac{z_i}{k_s} \right) u_* \right]^2 = \text{最小} \quad \text{式(3)}$$

式(3)に実測流速データを代入し、最小二乗近似する。M=実測流速のサンプリング数、 \bar{u}_i = 河床からの高さ、 z_i 地点の実測流速、 u_* = 摩擦速度
これを解くと式(4)となる。

$$k_s = \exp \left\{ - \frac{\sum \bar{u}_i}{2.5 M u_*} + 3.4 \right\} \left(\prod_{i=1}^M z_i \right)^{\frac{1}{M}} \quad \text{式(4)}$$

このような複雑な計算が必要になる。

上記により求めた理論重積分流量とADCP曳航流量を比較したところ20%以上の差異があった。またH-ADCPは上下0.5°のビーム指向角により石狩大橋では低水路幅400mのうち230m程度で実測限界となるため外挿が必

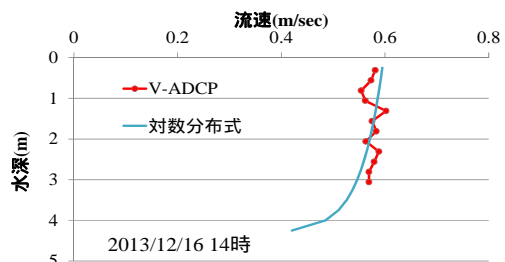


図-9 対数則分布の整合性

要となる．さらに図-9に示す鉛直流速分布が潮汐の影響により対数則と整合しない場合はNGとなることから重積分で求める方法は実用的ではないと考えている．

b)重回帰分析で求める方法

H-ADCP, V-ADCP, ADCP曳航の何れも実測値から図-10に示すフローによる重回帰分析で算出する．



図-10 流量算出フロー：重回帰分析で求める方法

まずV-ADCP, H-ADCPのそれぞれ鉛直, 水平流速分布からインデックス値²⁾ ($Index_V$, $Index_H$) 式(4), (5)を算出する(図-11)．

$$Index_V = \sum_{i=1}^n h_i \times V(x)_i \quad \text{式(4)}$$

$$Index_H = \sum_{i=1}^n d_i \times V(x)_i \quad \text{式(5)}$$

h_i : 区分水深(m), $V(x)$: 点流速(m/sec),
 d_i : 区分水平距離(m)

H-ADCPは実測範囲の $Index_H$ を, ADCP曳航流量は全断面流量を用いている． $Index_V$ と $Index_H$ を説明変数として, 式(6)に示す重回帰分析より流速クロス分布流量(Q_w)を求める．

$$Q_w = a_0 + a_1 \cdot Index_V + a_2 \cdot Index_H \quad \text{式(6)}$$

偏回帰係数 ($a_0=0, a_1=206.07, a_2=-6.84$)

ADCP曳航流量と重回帰で求めた流速クロス分布流量(Q_w)の結果を図-12に示す．相関係数0.98, 誤差平均4.3%で, 図-3H-Qに比して格段に相関が高く, ばらつきが小さい．その理由は, H-Vの関係が一様でないのにQがHの関数(パラメータ1個)であることに対して, $Index$ は図-11のとおり微少区分の流量であり, V及びh(又はd)の2パラメータを内在するからと考えられる．

図-13に各 $Index$ 流量とADCP曳航流量の相関を示す． $Index_V$ との相関が高い．重回帰においても偏回帰係数が示すとおり a_1 が支配的である．石狩大橋の川幅水深比がd/h 200であることから $Index_H$ に内在するdと水平流速分布より, $Index_V$ に内在するhと鉛直流速分布の感度が高いと考えられる．しかしながら今回計測できなかった $Q=400\text{m}^3/\text{sec}$ 以下で潮汐の影響をより受ける領

域では, $Index_V$ に内在するhや鉛直流速分布の値が小さくなることで誤差が増大するとともに, 潮汐の堰上げ現象が空間的流速分布を内在する $Index_H$ に作用し, 係数 a_2 の感度を高めるものと考えられる．今後は検証を行うとともに, その領域については回帰式の分離が必要である．

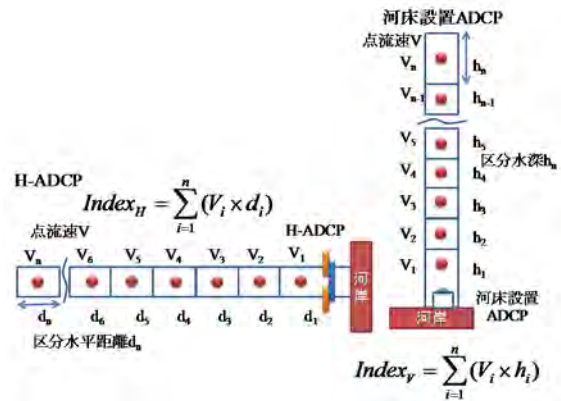


図-11 インデックス値の算出方法

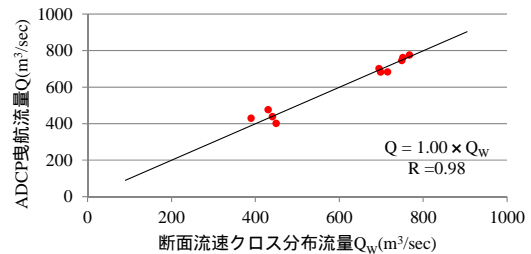


図-12 流速クロス分布流量の精度(石狩大橋)

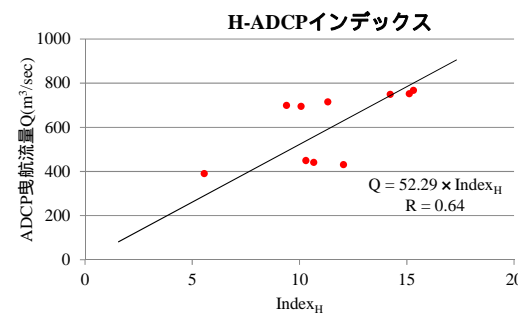
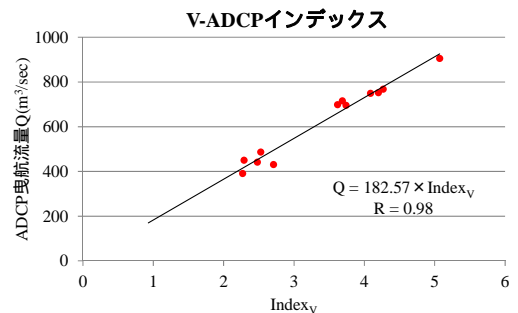


図-13 インデックス値とADCP流量相関(石狩大橋)

(4)感潮区間内におけるADCPによる今後の流量管理

河川流量管理は実務上, リアルタイム流量と統計流量に区分される．リアルタイム流量は前年の流量観測で得られたH-Q式を, 統計流量は当該年度の流量観測により得られたH-Q式を作成し算出している．

Index流量を用いた重回帰分析においても同様に、精度維持のため定期的な流量観測による係数更新が必要である。観測方法としては空間的流速分布を精密に計測できるADCP曳航観測が望ましいが、図-14で現行観測法（プライス）でも相当精度が得られている。

さて、これらの提案は潮汐の影響による流れの現象を捕らえて通過流量の観測精度を向上させるのが目標である。一方、石狩川基準点に求められる低水管理に要する流量は、事実上潮汐の影響下にあっても潮汐の影響を排除した自流量と思われる。つまり図-15に示す上げ潮時は通過流量に上流の河道内に貯留された貯留成分を加えた流量、下げ潮時には通過流量から貯留成分を除いた流量である。通過流量の観測精度と低水管理に要する流量精度向上はセットで取り組む必要がある。後者については水面形の計測により河道内貯留量を把握する方法、潮汐周期や日平均で管理する方法、を提案する。

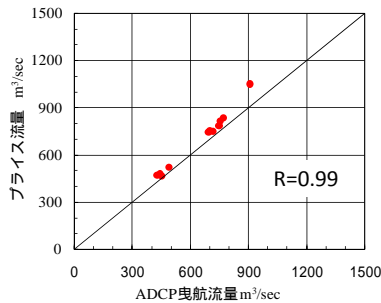


図-14 プライスとADCP曳航流量（石狩大橋）

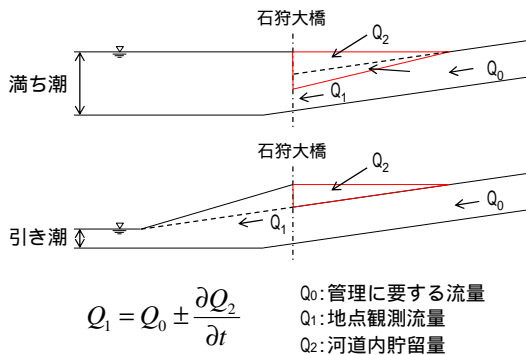


図-15 観測流量のイメージ

3. 流量観測精度向上手法の提案

(1) 水中植生の影響を受ける地点

a) 植生の状況

舞鶴地点は図-16に示すとおりH-Qのばらつきが大きい。夏にかけて草丈が2m以上に成長するミクリ類が河床全面かつ縦断的に数十kmに渡り繁茂し流れに影響を及ぼしているからである。草丈は水深を上回り、河床から立ち上がった葉が水面で流下方向に折れ曲がりながら揺動している(図-17)。こうした水中植生は2つの水理現象を引き起こす。水草は流れの抵抗として作用するため平均流速が減少し、葉の乱舞により流れの乱れを助長³⁾。水草による抵抗によって流量と

連動しない水位上昇現象。

水中植生の草丈及び本数の計測結果を図-18に示す。8月から9月上旬にかけて増加し、10月以降は徐々に減少し12月以降に枯れ果てる。

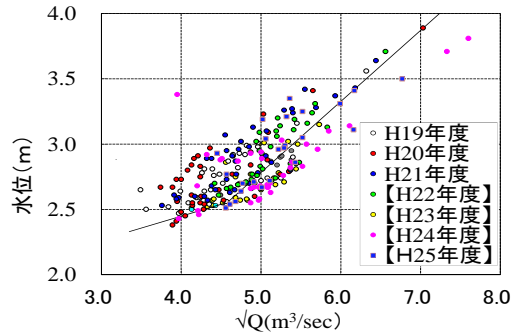


図-16 水位と流量の関係（舞鶴）



図-17 観測所の水草繁茂状況（舞鶴）

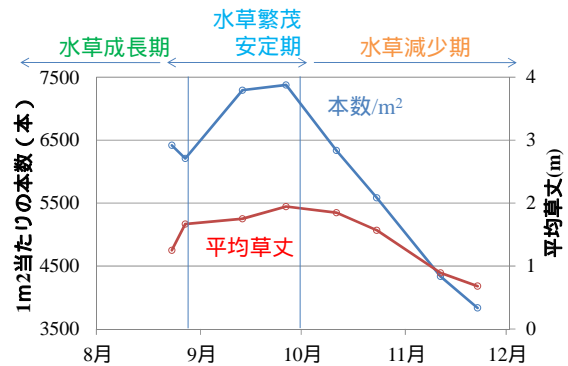


図-18 水草本数・平均草丈（舞鶴）

b) 流速分布特性

図-19はADCP曳航観測による流速鉛直分布とプライス流速計による2割・8割点流速である。ADCP流速分布によると8/23の水草繁茂安定期(図-18)は水深層別に乱れが大きく流速差は0.3m/sec～0.8m/secと2倍以上となっている。11/22の水草減少期は流れの乱れが少なくなり通常の開水路流れに近い分布になっている。水草が繁茂した流れ場では、水中植生の葉、茎、根茎すべてが粗度要因になるため鉛直流速分布に乱れが生じ、通常の開水路流れに用いられる2割・8割水深流速値の代表性が成立しないと考えられる。つまり2。(1)で述べた流量管理精度の低下要因への取組みとして、流速測定方法の再設定について提案する。

c) 観測精度向上の手法の提案

観測方法：鉛直流速鉛直分布が非線形の場合、鉛直方向の流速分布を詳細に計測する精密法(図-20)が適している。図-21はADCP曳航観測の流量を横軸とし、図-20の区分断面積にプライス2点法による平均流速を乗じて横断方向に積分した流量と、ADCP曳航観測から図-20に示す区分断面中央付近の鉛直流速分布だけを抽出した精密測定による流量を縦軸にとって比較したものである。相関係数は精密測定で0.92、プライス2点法で0.74である。2点法は精密測定に比して水中植生の現存量が多い8月にばらつきが大きくなる。観測時間：プライス2点法では1点60秒計測している。日野ら³⁾によると、水草影響下における乱流の速度変動を時系列データとして扱ってスペクトル解析を行った結果、明瞭な周期性は見られなかったと結論付けている。つまり水草影響下で一定時間計測しても、時間平均的な流速を計測しているとは限らないことになる。提案：よって観測方法はできるだけ短時間で、かつ水草影響下における乱流を精密に捕えられる、ADCP曳航観測が有効と考えられる。

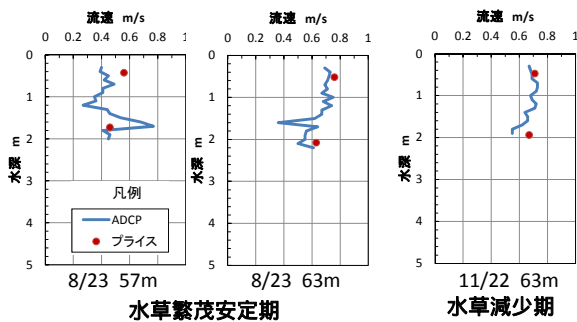


図-19 流速鉛直分布(舞鶴)

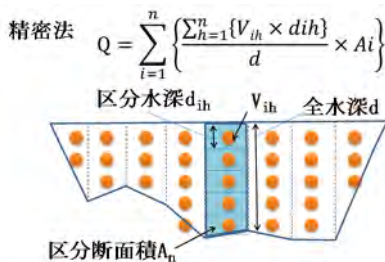


図-20 精密法による流量観測

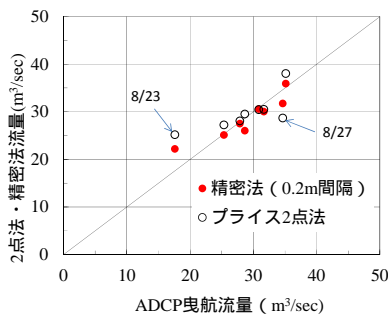


図-21 2点法と精密法(鉛直流速測定)流量比較

d) H-Qによる管理の課題

水中植生が引き起こす流れの乱れと水位上昇現象は、H-Qの関係に直接的な影響を与える。図-22のH-Qで見られる3つの挙動である。6月～8月頃：水草成長期、水草の急激な成長とともに、その抵抗により水位上昇変動が生じる。8月～10月：水草繁茂安定期、水位上昇は継続するが成長が止まるため上昇変動は収まる。

10月以降：水草減少期、水草が徐々に枯死し成長前に戻る。3つの期別変化を水草の繁茂状況にあてはめたのが図-18である。水草の繁茂状況と流況挙動のタイミングが一致している。図-23のとおり期別でH-Qを分割すると高い相関となるので分割が適当と考える。課題は、3つの期別を繋ぐ方法と、水草成長期の水位上昇現象をH-Qで的確に表現する方法である。

水草の繁茂状況と流況の挙動が連動していることから、水草の成長をモニタリングして適期に観測を行う、水草成長期に観測頻度を多くするなど考えられる。

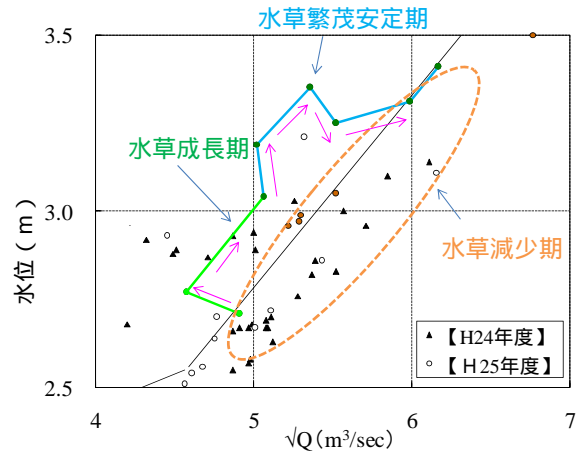


図-22 H-Q式(舞鶴)

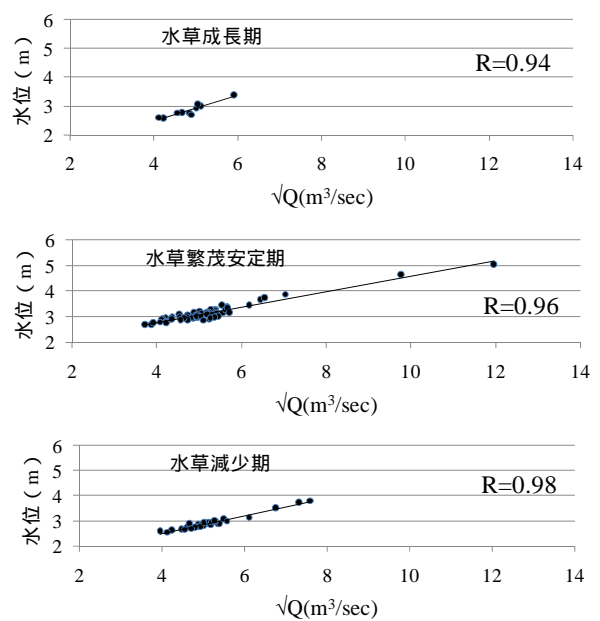


図-23 水草繁茂状況別の水位流量相関(舞鶴)

(2) 潮汐や背水の影響を受ける地点の流量観測精度向上

a) 強い潮汐影響を受ける観測地点の課題

篠路観測地点は河口から14.2km上流に位置し、河床勾配は1/8400とほぼレベルのため潮汐の影響を大きく受けて、図-24のとおりH-Qのばらつきが大きくなる。

b) 流速分布特性

下げ潮時上げ潮時の断面流速コンターを図-25に、断面流速鉛直分布を図-26に示す。潮汐により流れ場が変化しても低水時の流速分布は表層から下層にかけて直立形状となっている(図-27)。

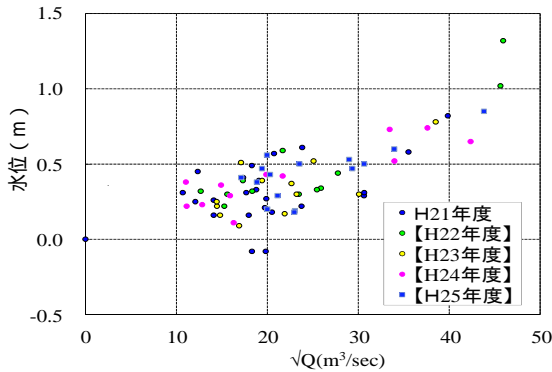


図-24 水位と流量の関係(篠路)

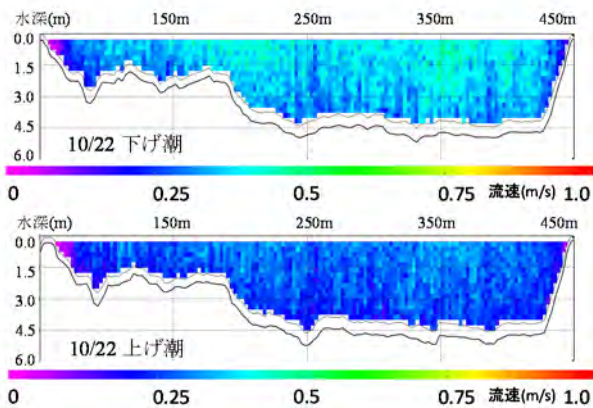


図-25 流速コンター図(篠路)

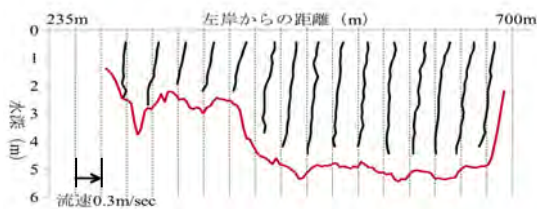


図-26 断面の流速鉛直分布(篠路)

c) 観測精度向上の手法の提案

石狩大橋観測地点は、石狩川の基準点で河川計画及び管理上の最重要地点である。一方篠路地点は、豊平川及び当別川合流地点下流にある石狩川の最下流の観測地点で、石狩大橋地点と目的・役割が異なっている。

潮汐や背水の影響を受け観測精度に課題のある地点では、目的に応じた精度向上レベル目標を各々設定すること。事前にADCP曳航観測など機動性のある観測

方法により流況特性を調べて適合する観測手法を選択することが重要と考えている。

篠路地点は石狩大橋地点と似た現象だが、低水時流速分布の直立特性がわかっているため、H-ADCPを設置しIndex_H回帰による管理手法が適当と考える。

今回の計測では塩水遡上が発生していないが、6~7月の湧水期には下層断面に塩水が遡上するため、塩水モニタリングと連動させて有効断面を再設定することが必要と考えている。

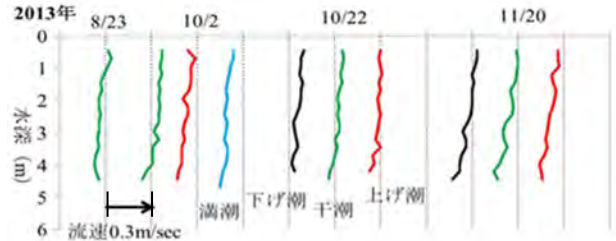


図-27 潮汐による流速分布の違い(篠路)

4. おわりに

優れた観測機器により水理現象のモニタリングが可能となっても、低水管理の精度向上の施策に用いるには、測定方法や求積方法などの手法開発が必要である。本論が全河川に共通する低水管理精度の課題解消に向けた始動のきっかけになることを期待したい。

- (1) 潮汐の影響で流量管理に課題のある基準点における実用的な観測精度向上対策として、鉛直及び水平固定型ADCPリアルタイム観測を行い、インデックス値を用いた重回帰による流量管理手法を提案した。
- (2) 水中植生で流量管理に課題がある地点における実用的な観測精度向上対策として、鉛直精密測定のプロットと、H-Q管理においては植生の成長と流れ場への影響を分析し期別で分離するのが適当とした。
- (3) 河口付近や背水域に位置し流量精度に課題のある地点の観測精度向上対策として、一律な手法の展開ではなく、目的に応じた精度向上レベル目標の設定。

ADCP曳航観測等で事前に地点の課題や流況特性を調査し、適した手法を選択すべきことを提案した。

なお高水流量域では精度が得られている現行H-Q管理が便利であるが、本論で提案した低水流量管理手法との接続方法については、地点ごとに工夫が必要である。

参考文献

- 1) 喜澤一史・山下彰司・鳥谷部寿人・長谷川和義：洪水流における水理構造の変化について、土木学会北海道支部、論文報告集、第54号(B)、1998。
- 2) V.A. Levesque, K.A. Oberg : Computer Discharge Using the Index Velocity Method, Techniques and Methods 3-A23, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2012。
- 3) 日野幹雄・歌原英明：水草のある流れの水理学的研究、土木学会論文報告集、第266号、1977。