

河川流量観測における新計測法の 提案について

THE SUGGESTION OF NEW OBSERVATION TECHNIQUES ABOUT RIVER DISCHARGE

喜澤 一史¹・井出 康郎²

Kazufumi KIZAWA, Yasurou IDE

¹正会員 開発土木研究所 環境水工部 河川研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工修 開発土木研究所 環境水工部 河川研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

HOKKAIDOU-DEVELOPMENT-OF-BUREAU makes periodical discharge observations of 215 points, totally about 5,600 times in a year. The observations are made in the way of measuring bed height and velocity observation by profiler system of revolution or float. The method of velocity measurement is calculation of average velocity of 1 or 2 points in the vertical line in the center of division flow area that is made according to the Standard of the bureau. However, the measurement is not accurate at the points that have sea water level and back river water level, because those points have complexity current structure and changing current in observing discharge. This report suggests observation techniques of the ADCP method, which enhances accuracy of the above cases, and investigates how it is effective and applicable in real.

Key Words : Discharge observation of river, Observation accuracy,

A.D.C.P(Acoustic Doppler Current Profilers), Velocity distribution

1. 現状の流量観測精度とADCP法観測精度

河川行政機関が実施する一般的な流量観測手法は河川砂防技術基準(案)に基づくもので、その方法は流下横断面を分割し、その両端をポールにより水深測定して断面積を求め、次にその中央で鉛直方向1~2点の流速を計測し平均流速を求め横断方向に積分する方法である。高水時には流速計の代わりに浮子が使われる。この方法は、従来から存在する計測器に限って言えば実用性・安全性を重視することで、幾分計測誤差を許容した方法であると考えられる。その理由は、測深については①流下断面幅の10~15%という粗い間隔で測定すること②流速計測を含む計測時間中の断面変化に対応していないこと。であり、流速測定については①二次曲線または対数曲線のような鉛直流速分布であるにもかかわらず、1~2点の流速平均値を平均流速としていること②分割断面の中央だけで計測すること、である。本論では、これら現状の観測方法による観測誤差の程度を把握するため、十勝川の6地点で、現状の観測法のほか回転式流速計による精密観測・電磁流速計・音響測深機・ADCP計測を同時に行った。ただしADCPは計測器の物理

的な特性により水面付近(50~60cm程度)の流速値が得られないため(以降「不感帯」と呼ぶ)、その補間法として①回転式流速計による実測値②定常流れを仮定し、ADCP実測値から k_s を最小二乗法で求めて対数理論式(式1)に当てはめた理論値、という2つの方法を用いた。

$$u = (8.5 + 2.5 \ln \frac{z}{k_s}) u_* (t) \quad (\text{完全粗面}) \quad (1)$$

u : z 水深地点の流速、 k_s : 相当粗度、 u_* : 摩擦速度

図-1はその代表的な流速分布である。▲は回転式流速計による0.2H毎の精密観測分布であり、実線は●で示したADCP値を式(1)に当てはめた対数理論分布である。□の電磁流速計は他の方法より大きい値となっているが、ADCP及び回転式流速計分布値はほぼその対数曲線上にある。次に流量算定結果を図-2に示す。横軸は測深法種別で、流速計測法は凡例のとおりである。なおADCP+P及び+logは、それぞれ実測、理論補間法を指す。これによると流速計測法別による差異はあるが、測深法の差異は殆ど見られない。そこで全6地点の流速計測法別の流量算定結果について、回転式流速計による精密法の値を基準とした誤差をプロットしたのが図-3である。

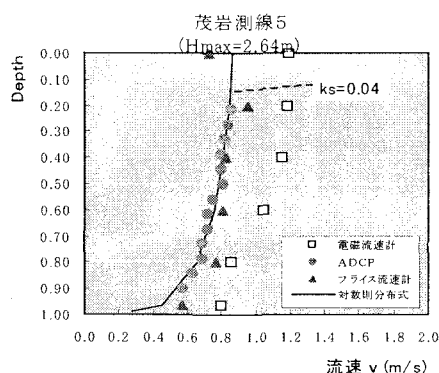


図-1 代表的な計測流速分布

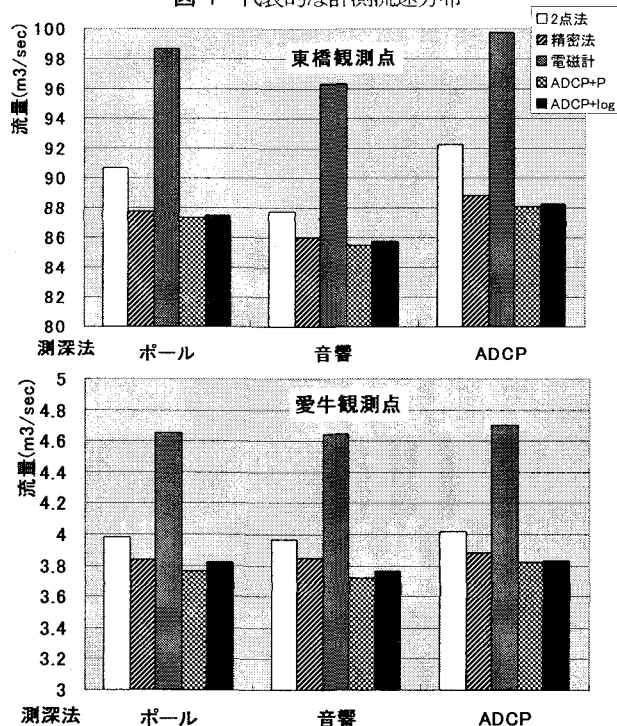


図-2 測定方法別、流量算定値の比較

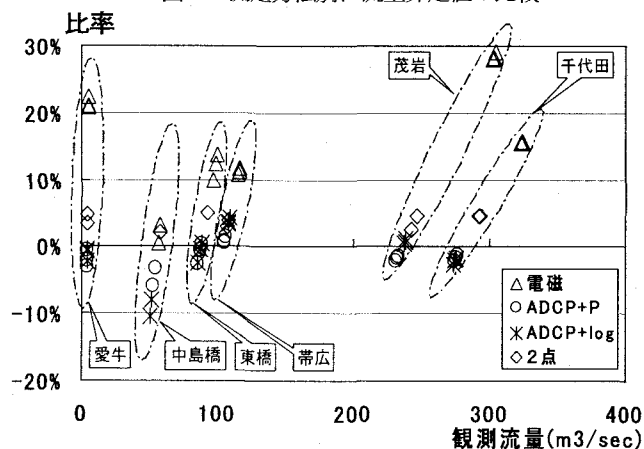


図-3 精密法を基準とした流速計測法別誤差の傾向

図-3によると現状観測法である2点法の誤差は、概ね+5%であり、ADCP法は中島橋地点を除いて2点法よりやや基準線(0%~精密法)寄りである。この傾向は河川流量や河川規模が変わっても同じである。したがって現状観測法による観測精度は、精密法やADCP法と比較して概ね+5%であり、ADCP法はより実流

量に近い値であると判断される。ところで中島橋地点では断面の7割以上が水深60~70cm程度である。当該水域ではADCP不感帯により実測値が河床付近に限られたため、ADCP法の算定誤差が生じたと考えられる。

2. ADCPによる観測手法の検討

(1) ADCP観測の特徴と観測方法

ADCPは超音波を使って水面付近から鉛直流速分布を一瞬のうちに計測する。したがってADCPを横断方向に移動させれば細かい間隔で計測が可能である。このことから、現状の観測法のように鉛直方向に測定点数を定める必要や、断面方向に分割断面を定める必要がなくなる。図-2,3では横断方向の観測条件を合わせて比較するため、ADCPも分割断面の中央だけで計測している。このように現状の観測法と同様、分割断面の中央だけで流速計測を行う方法を固定観測、分割断面を設けずに横断方向にADCPを常に移動させて計測する方法を移動観測と呼ぶ。移動観測の流量算定方法は、鉛直方向及び横断方向へ2重積分する式(2)により求められる。

$$Q = \int_0^n \int_0^h (V_f \cdot \cos(\theta)) dl \cdot dh \cdot dn \quad (2)$$

ここに n : 資料数, h : 水深

流量算定の概念図を図-5に示す。式(2)により流速値は船の移動方向に対して垂直な成分で計算される。移動観測の測定イメージが図-4である。D-GPSはADCPの位置を計測する。ADCPは、bottom-track(河床位置計測用の音波)で図-5に示す計測区間距離(l)を計測するが、断面流量算定では河岸座標との位置関係が必要となるためD-GPSを用いている。また図中にあるACM(超音波ポイント流向流速計)は、ADCP不感帯の補間用流速計である。この導入により不感帯及び浅水域計測が、導入前とまったく変わらない観測方法で実測補間できるようになった。ACM及びD-GPSは、ADCPコントロール用のプログラムで一元的に管理されるので、データ同期を心配する必要もない。

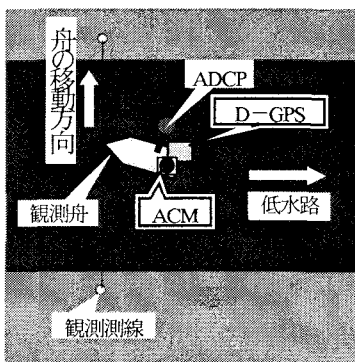


図-4 ADCP移動観測のイメージ

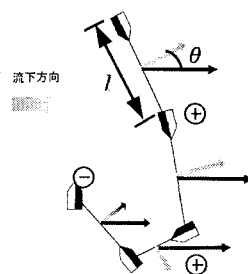


図-5 流量算定概念図

(2) ACMによるADCP不感帯及び浅水域での計測

a) ADCP不感帯の計測

ACMの計測位置、及びACMの仕様と設定値を図-6及び表-1, 2に示す。図-6中の実線は、式(1)による対数理論分布で、ACMをADCP不感帯の中間位置に設定する(表-2)。

b) 浅水域での計測

水深1m以下の場合、水深0.2m地点の流速をACMが計測し0.5m以上をADCPが計測するため、現状の観測法の水深1m以下に適用される1点法に対して、同等以上のデータ数が得られる。加えて移動観測により横断方向に細かく計測できるため(本観測では約1m間隔)、河岸や砂州近傍といった低流速域も実測される。特に浅い区域(図-7③)の場合は、隣接ACM値で補間する方法で現状観測より細部にわたる計測ができることになる。

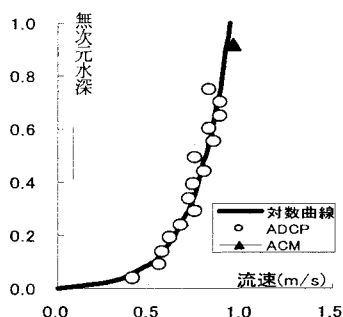


図-6 流速分布におけるACM補間

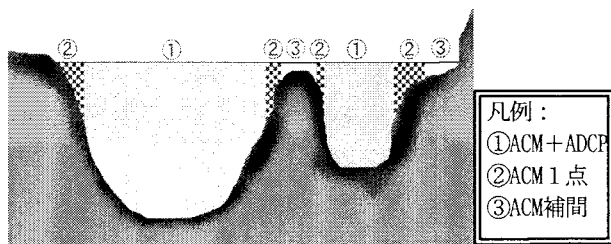


図-7 浅水域での観測

表-1 ACM-3Dの仕様

ACM	計測法	計測範囲	精度
流速	超音波	0-3m/s	1cm/s or $\pm 2\%$
流向	3軸磁気	360°	$\pm 1^\circ$
傾斜	2軸	45°	$\pm 0.2^\circ$
Sampling	2 Hz	—	—

表-2 ADCPとACMのセットアップ 単位:m

ADCP	Blank after transmit	Cell size	吃水	First cell depth
2400kHz	—	—	—	—
ADCPカタログ	0.25	0.12	—	—
ADCP設定	0.16	0.10	0.20	0.49
ACM	—	—	—	0.2

3. 流れに存在する乱れとADCPの設定

(1) ADCPの設定項目と計測精度

ADCPの設定には表-2に示した計測条件と、データの精度に関連する時間軸の設定がある。ADCPはセンサーから超音波を水中に発射し、反射波のドップラシフトを使って流速分布と河床高さを計測する。その超音波のパルス1回分をpingという。計測精度や計測効率を上げるために、ping毎の計測結果をADCPのCPUで平均処理した結果をデータとしてファイルする。この設定をping per ensemble、そのファイルされたデータをraw dataと呼ぶ。ping per ensembleの設定によっては、まったく同じ時間を計測してもデータの量及び計測精度が異なってくる。理論上の精度はsingle pingで3cm/secである。例えばensembleを9 pingに設定すると、式(3)によってraw dataの精度は1cm/secになる。

$$S = 3/\sqrt{e} \quad (3)$$

S : 精度 (cm/sec) e : ping per ensemble

(2) 流れに存在する乱れとADCPの設定

a) 流速分布のばらつきとping per ensembleの設定

図-8はADCP固定観測による、ping per ensemble別のraw dataのばらつきである。比較条件は計測時間より、全データを構成する総ping数を揃える方が適当であることから概ね200pingとしている。このように低水時には滑らかに見える流れであっても、実際には短い時間間隔で乱れが存在している。表-3は各ensemble設定によるraw dataの測定時間である。つまり計測時間の間隔が大きくなるとデータがより平滑化されるため、図-8ではensembleが大きくなるとばらつきが小さくなっている。

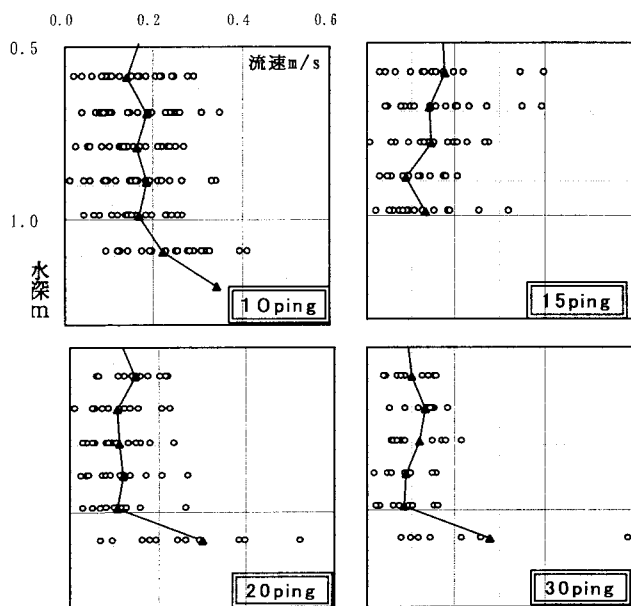


図-8 ping per ensembleによるraw dataの比較

固定観測では結局raw dataを時間平均するため、どの設定であっても結果は同じとなる。一方、移動観測ではping per ensembleと船の移動速度で計測幅の間隔が決定されるため観測精度に影響する。

表-3 ping per ensemble の設定別測定時間間隔

ping per ensemble	測定間隔
10 ping	3.95 sec
15 ping	5.75 sec
20 ping	7.55 sec
30 ping	11.15 sec

b) 計測時間の設定

流量観測の目的はより平均的な流れを的確に捉えることで、乱流を計測することではない。つまり計測時間を設定し、その時間に対する平均流速を求めればよこととなる。図-9は計測時間内の累計平均流速値をプロットした一例である。raw data のばらつきが概ね40秒平均で収束しているため、今度は1000データ余りの現地計測値について、60秒平均値を基準として平均時間毎の値を比較したのが図-10 である。流速の規模により収束時間が異なっているため、流速1m/secを目安にして40、60秒/点に計測時間を設定するのが妥当である。

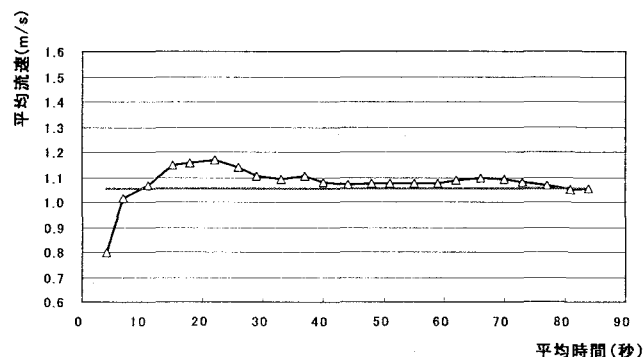


図-9 平均時間によるばらつきの収束

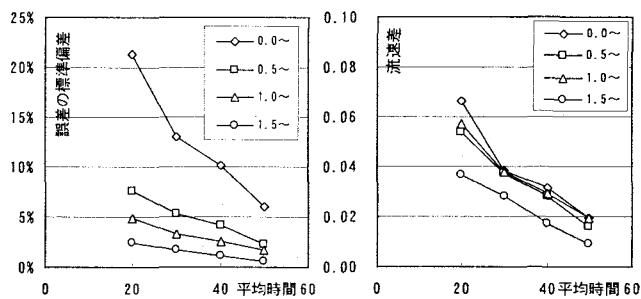


図-10 60秒を基準とした平均時間別誤差と計測値差

(2) ADCP移動観測における設定

(a) ping per ensembleの設定

各ensembleによるraw dataのばらつきと観測流量の比較を図-11, 12に示す。図-12の横軸はensemble数である。同図によると、5, 10 pingでほぼ同じ流量となっている。

したがって設定値は、raw dataのばらつきが少なく流量算定に影響のない10ping程度が適当である。

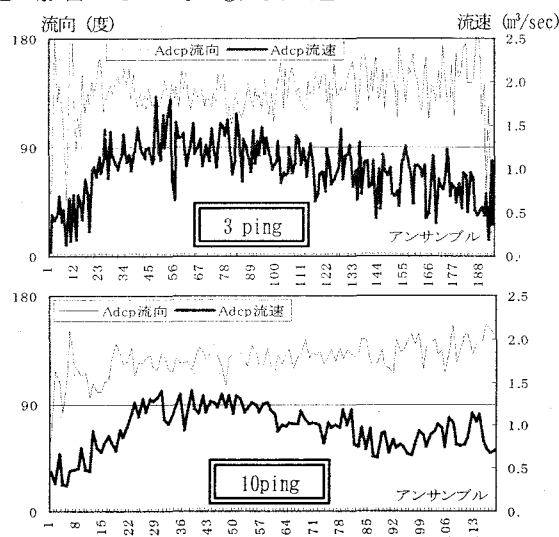


図-11 raw dataの分散

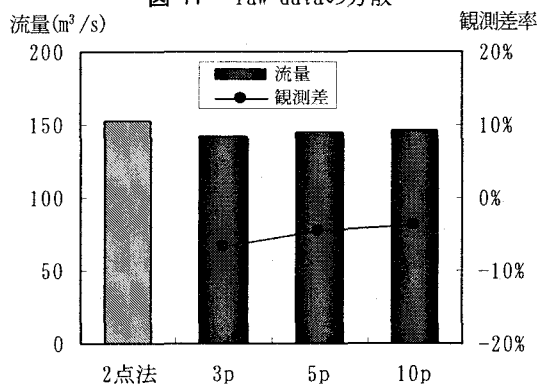


図-12 ensemble別の流量結果

(b) 船の移動速度の設定

移動観測では、raw dataと微小断面の積を鉛直・横断方向に2重積分して求めるので、断面全体もしくは分割断面では計測時間を平均することと同じ意味を持つ。そこで固定観測で得られた流れの乱れが区分断面を代表する結果であると考え、その計測時間を遵守すれば固定観測と同程度の観測精度が維持できるし、さらに空間的な流れの変動値も得られるとした。つまり固定観測の精度に必要な計測時間を要して全断面を移動させるという意味である。例えば固定観測を想定し、40秒/点程度の計測精度で幅100mの断面を10点計測するような設定の場合、速度100m/400sec=0.25m/sec以下で移動させればよい。

4. 感潮・背水区間におけるADCP法の効果

(1) 観測地点と条件

石狩川河口付近に位置し潮位の影響を受ける石狩大橋地点と、石狩川の背水影響を受ける創成・発寒地点で、現状の観測法とADCP法の観測を行った。図-13が観測条件である。石狩大橋は大潮・小潮時の2回行った。

(2) 流速分布の比較

同時計測の結果を図-14に示す。注目する点は、背水の影響を受ける発寒地点において、回転式流速計の流速値がほぼ零であるのに対し、ADCPが逆流を捕らえている点である。回転式流速計は一般的に流向を測定する機能がないため、測定者が測線に対して垂直な方向に向けて測定する。一方ADCPは、2方位の流速ベクトルから合成流速を求めるので、微流速でかつ流向が刻々変化するという瞬間流れでも、流向と流速を精密に計測することができる。石狩大橋の大潮時に見られる両者の差異も同じ理由と考えられる。発寒地点はもともと微流量なので流量差自体は小さいが、逆流・順流といった根本的な現象を正確に把握することは重要なことである。

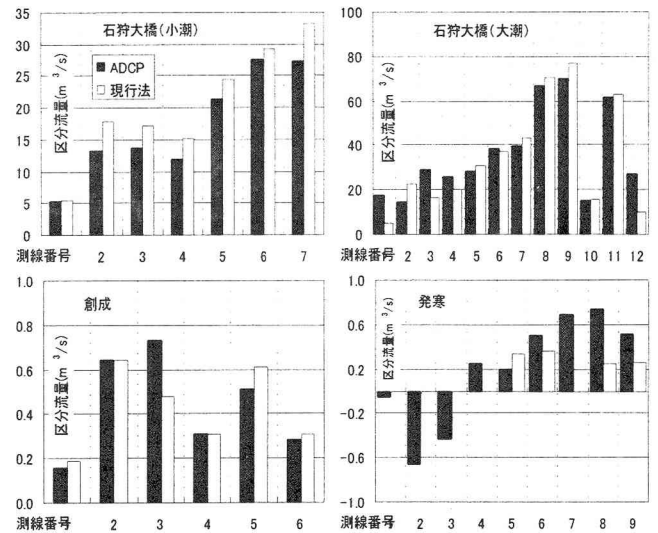


図-15 観測流量の比較

(3) 観測流量結果の比較

図-15は分割断面毎の流量算定値である。小潮時の固

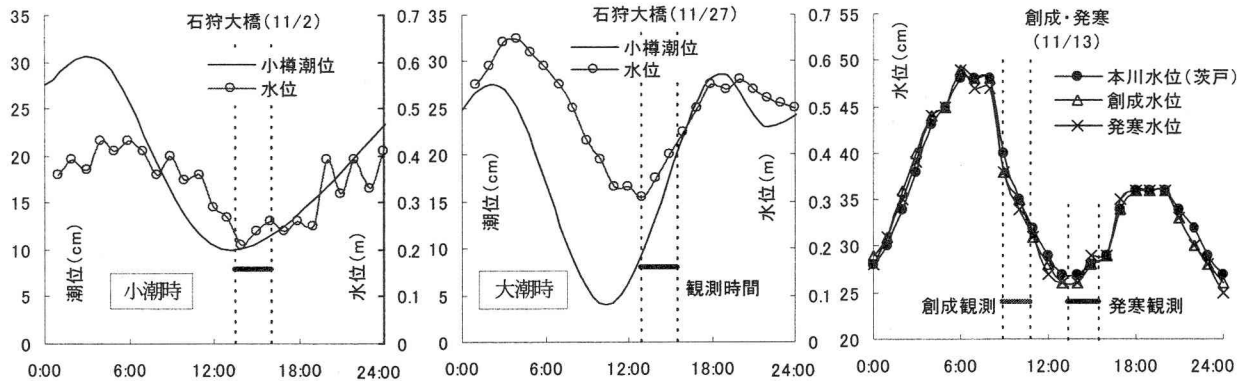


図-13 観測時の潮位と水位変動

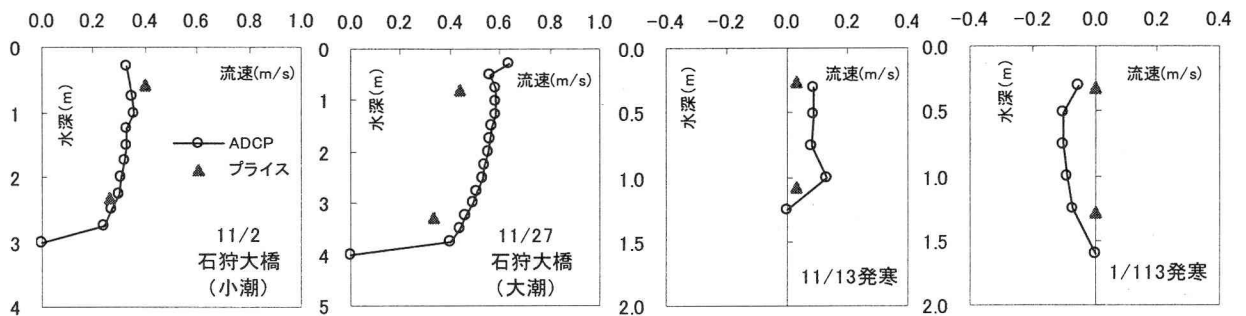


図-14 ADCP固定観測と回転式流速計による2点法の流速比較～120秒計測

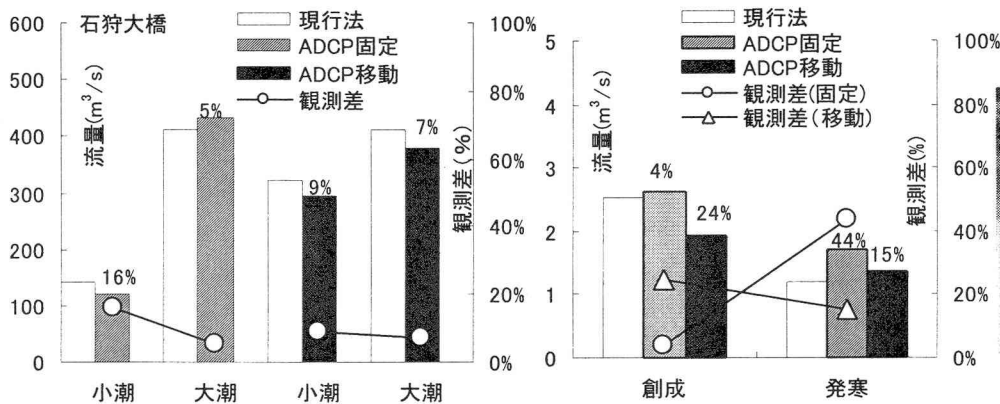


図-16 現状観測法を基準とした各観測流量との観測差

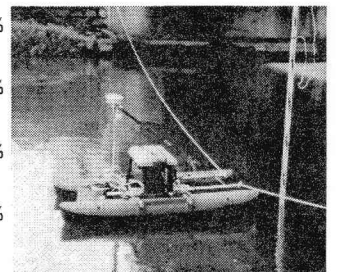


図-17 ADCP観測状況

定観測は1～7測線のみである。現状の観測法による流量は、前述のとおりADCPの流量より多い傾向となっている。一方、大潮時の低流速測線（測線1, 3, 4, 6, 12）や創成・発寒では、ADCP流量の方が多くなっている。これは図-14の流速分布と同様、ADCPが潮位変動や背水影響による流向の乱れに敏感に反応した結果と考えることができる。発寒の逆流はマイナス流量として扱う。

図-16は、現状の観測法を基準としたADCP法との流量比較である。創成・発寒の観測差は最大40%を超えている。もともと微流量であるため、計算過程の有効数字の影響も否定できないが、図-14に見られた流速分布の差は必ず現れるはずである。次に、創成・発寒ではADCPの固定観測値と移動観測値で差が見られる。これは観測の仕方による違い、つまり横断方向の空間的な流れの差異によると考えることができる。したがって微流速でかつ複雑な流れであればあるほど横断方向に詳細な計測が必要であり、ADCP移動観測はその要求を満たす観測法であるということができる。

(4) 観測時間内の流量変化

現状の観測方法で石狩大橋地点の流量観測を行うと、所要時間は通常約3時間である。その間、特に大潮時には図-13に示す水位変動があり、その水位変動量をH-Q算定式に当てはめると、 $Q=34\text{m}^3/\text{sec}$ （+10%）の流量増となる。実際の流量変動を調べるために、回転式流速計の観測と並行してADCP移動観測を実施した。図-18の横軸範囲が回転式流速計による観測1回当たりの所要時間で、その間にADCP移動観測を12回行った。ADCP移動観測流量結果は、水位の上昇と反比例する形で減少傾向にあり、上昇量+9cmに対する流量は-10%（ $Q=40\text{m}^3/\text{s}$ ）である。H-Q式算定流量とは符号が逆転している。現状の観測法で得た流量は結局、ADCP移動観測の12回平均値とほぼ同じ流量（ $Q=412\text{m}^3/\text{sec}$ ）となったが、現状の観測法は観測時間内の流量変動を考慮した方法ではないので常に一致するとは限らない。

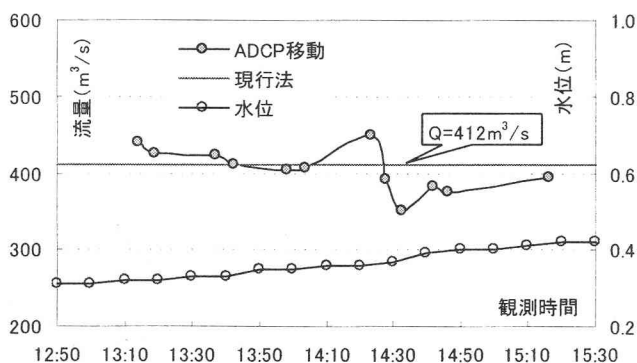


図-18 計測時間内のADCP移動観測流量

(4) 船外機による観測への影響の有無

船外機による影響の有無を確認するため、ロープワークによる観測と船外機観測を石狩大橋の隣接断面で行っ

た。観測時の平均流速は、影響の有無が現れ易い40cm/secという好条件である。図-19によると観測流量にほぼ違いがないことから船外機の影響は無視できると考えられる。ところで、石狩大橋のように川幅が大きく観測ワイヤーの設置が困難な地点では通常橋上観測となる。石狩大橋での観測は下流側に歩道がなく、さらに交通量が多いため危険な作業である（図-21）。船外機によるADCP移動観測（図-20）は、このような観測環境における作業の安全性としての効果も期待できる。

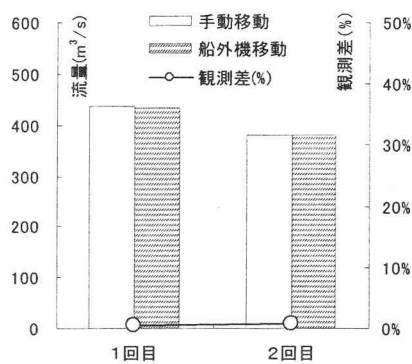


図-19 観測流量の比較



図-20 船外機観測



図-21 石狩大橋の観測状況

5. 流量観測における新計測法の提案

近年、計測機器の技術向上にもかかわらず、流量観測は依然として従来の方が続けられている。ADCPは流量測定機能を備えているが、河川管理者が定期流量観測で実施するレベルの設定方法や計測手法は確立されていない。本論の検討内容はADCP導入に限るものではなく、流量観測の基本的な方法を提案するものである。

今後、より高度な河川計画策定・河川管理を行っていくためには、最も基礎的な情報である河川流量や流況を的確に把握することが必要である。本論が観測精度の向上及びコスト・労力の縮減を目的とした新しい流量観測技術開発の資料として活用されることを望むものである。

参考文献

- 1) 水文観測：建設省水文研究会，社団法人 全日本建設技術協会，平成8年改訂版
- 2) 建設省河川砂防技術基準（案）同解説：調査編，平成9年改訂版

（2001. 4. 16 受付）