

結氷河川での河川流量観測手法の検討

RIVER FLOW OBSERVATION METHOD ICE-COVERED RIVERS

鈴木優一¹・渡邊康玄²・桑村貴志³

Yuichi SUZUKI, Yasuharu WATANABE and Takashi KUWAMURA

¹正会員 (独) 北海道開発土木研究所 河川研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 (独) 北海道開発土木研究所 河川研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³正会員 (独) 北海道開発土木研究所 河川研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

There are approximately 210 observation stations on Class A rivers in Hokkaido, at which water depth and river discharge are measured. At approximately 70% of these stations, the river freezes over, and fluctuations of river discharge are small during winter. Although improvement of discharge measurement at ice-covered rivers has been attempted, no effective measurement methods have been developed for winter. Instead, the same method is employed all year round.

Based on onsite survey results, this paper proposes a new method of measuring discharge at ice-covered rivers. The method is time-efficient, cost-efficient, and as accurate as existing methods. In addition, the applicability of Acoustic Doppler Current Profiler, a device capable of discharge measurement in shallow water, at ice-covered rivers is assessed.

Key words: ice-covered rivers, river discharge measurement, flow velocity distribution, current meter, ADCP

1. はじめに

北海道内には国が管理する河川において約210箇所の水位流量観測所がある。これらの観測所の内約70%の箇所は冬期間完全結氷すること、あるいは、冬期間は夏期間に比べ流量変化が少ないこと等を理由に、従来から結氷時の流量観測手法の改良が試みられてきた。しかし、具体的に改良方法の採用には至らず、年間を通して同じ観測方法で河川流量観測が実施されている。

河川流量観測は現在可搬型流速計を用いて行われている。流速測定のための水深方向の測点の配置¹⁾により、2点法と1点法とに大別される。2点法は、水深方向に水深の2割と8割で測定した流速を用いて測線の流速を算定するものである。水深が浅く2点法で測定出来ない場合は6割の深さで測定する1点法が用いられている。また、流速測定時間は20秒以上¹⁾と定められているが、測定時間は観測所ごとに異なり、20秒、60秒、120秒の3種類が採用されている。なお、下流に位置する観測所ほど測定時間が長くなっている。この測定時間は、1981年に北

海道内での夏期間の流量観測結果について、乱流特性²⁾を考慮して定められた。それ以降夏期間、冬期間とも同じ測定時間が用いられ、現在に至っている。

その河川を代表する様な重要な観測所は、そのほとんどが下流に位置しているため、流速測定が120秒間行われている。しかし、河川が結氷する1月から2月にかけての厳冬期には年間での最小流量が度々出現するなど、一年の中で河川流量の最も少なくなる時期であり、流量変化も夏期間に比べ比較的安定している。このため、夏期間よりも観測時間が短時間であっても問題が無い場合が多いと考えられる。

完全結氷時における河川流量観測は、-10℃を下回る極低温や吹雪等厳しい気象条件の中、水深及び流速測線用の氷穴である約50cm四方の氷割り作業から始まり、観測所の河幅にもよるが観測終了まで5~6時間を要している。この内、観測自体に要する時間は、2~3時間である。

近年は、観測所によっては正常流量が設定されており、河川管理上から河川流量観測の精度を保持することは夏期間、冬期間とも重要となっている。このため、本論文は、完全結氷下での流量観測について、現在の観測精度を低



図-1 観測所位置図

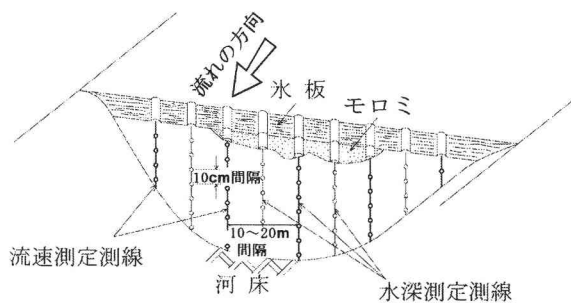


図-2 現地観測模式図

下させることなく、より短時間で経済的な観測方法を検討したものであり、今後の結氷河川での河川流量観測への提言を目的としたものである。

また、近年水深の比較的浅いところでも測定可能な ADCP が登場している。結氷河川での ADCP の使用は、可搬型流速計と同様に氷穴を必要とするが、ADCP を氷穴に固定するのみで短時間で安定して行えるため、夏期間での舟に ADCP を搭載して使用する場合に比べ比較的容易である。このため、結氷河川での ADCP の適用性についても同時に検討した。

2. 現地調査

(1) 現地調査観測所の概要

検討結果の一般性を確保するため、現地調査観測所を様々な条件の下に選定することとした。選定条件は、完全結氷し水板とモロミを除いて有効水深が十分に確保できることを第一条件として、河道の直線部やわん曲部に位置していること、上流発電ダムの放流の影響で比較的短時間に流量変化する箇所とした。その結果、河道の直線部に位置している天塩川普平観測所と十勝川茂岩観測所、河道のわん曲部に位置する穂川穂別観測所、上流にダムがある天塩川恩根内観測所の 4 つの観測所を選定した。現地調査観測所の位置図を図-1 に示す。

現地調査は、普平、茂岩観測所が 2002 年 1 月から 2 月にかけてそれぞれ 8 回、恩根内、穂別観測所は 2003 年の 1 月から 2 月にそれぞれ 7 回実施した。各観測所とも 1 月か

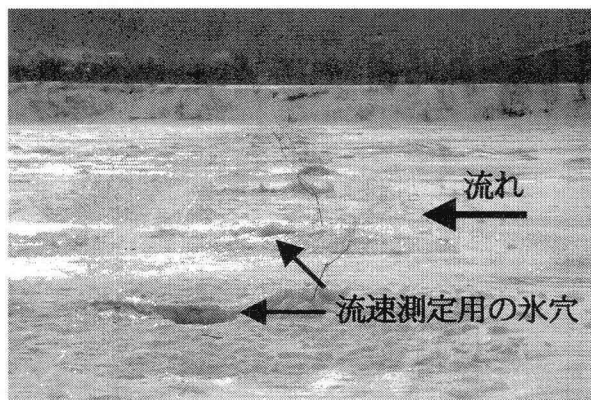


図-3 茂岩観測所の状況

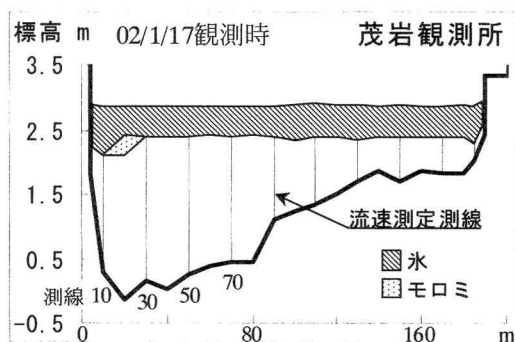


図-4 観測時の横断面図

ら 2 月の間には毎年完全結氷しているが、2002 年 2 月には季節はずれの気温の上昇により、茂岩観測所で一時的に河川の氷が融けて開水状態となった。このため、この間のデータは検討に用いなかった。

(2) 現地調査方法

現地調査は、水深方向に密に配置した測点の流速を測定する精密測定とし、水板とモロミを除いた有効水深部分について可搬型流速計と ADCP の両方を用いて行った。

可搬型流速計を用いた水深方向の測定間隔は 10cm とし、測定時間は、20 秒、40 秒、60 秒及び 120 秒の 4 種類で行った。現地調査方法の模式図を図-2 に示す。

また、茂岩観測所を代表例として図-3 に現地の状況を、図-4 に観測時の横断面図を示す。

穂別観測所を除く 3 観測所では有効水深が 2m 程度の部分が存在するが、穂別観測所では、2002 年 11 月に発生した出水の影響で、観測断面中央付近の中州が発達し、水深の深い部分は両岸寄りに分散し、有効水深も 1m 以下であった。

一方、可搬型流速計での測定時に合わせて ADCP を用い、流速測定測線で普平、茂岩観測所は 120 秒間、恩根内、穂別観測所は 300 秒間測定し、流速測定層厚は 10cm とした。

(3) 観測機器

可搬型流速計は、プロペラの回転軸が河川の流れに平行なものを、2002 年は 10 台、2003 年には 15 台を使

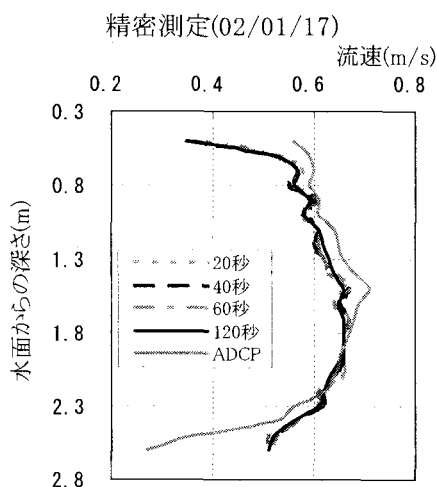


図-5 茂岩観測所測線 30m

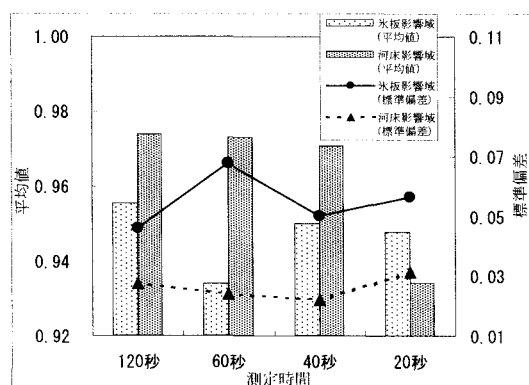


図-6 相関係数の平均値と標準偏差(全観測所)

用した。また、流速変換のための回帰式の精度を保つため、年に1度流速計の検定が義務付けされている。この検定での試験成績書に基づく誤差を全ての流速計について調べると、最大で2002年は $\pm 3\text{cm/s}$ 、2003年では $\pm 5\text{cm/s}$ であった。

一方、今回使用したADCP(ワークス2, 400kHz)は2台で、メーカー提示³⁾による器械誤差は $\pm 2\text{cm/s}$ 程度である。

3. 可搬型流速計を用いた河川流量の評価

可搬型流速計を用い、流速の測定時間や測定個所の違いによる河川流量の評価を行うに当たっては、基準となる流量を定める必要がある。このため、まず流速測定測線で基準となる流速を求め、その流速から算出した河川流量を基準河川流量として、各観測方法の比較に用いた。

(1) 流速分布の基準値

結氷河川の流れは、氷板やモロミの存在により非結氷時と比べ径深が低下し、乱れの縦方向のスケールやその周期も低下していると思われる。結氷河川の水深方向の流れの分布は、最大流速が発生した箇所を境として氷板

表-1 基準河川流量一覧表

菅平観測所(m^3/s)		恩根内観測所(m^3/s)	
1月17日	72.21	1月24日	83.22
1月22日	75.64	1月30日	78.55
1月29日	60.08	1月31日	76.22
1月30日	67.97	2月7日	68.61
2月4日	61.61	2月14日	56.39
2月14日	75.34	2月21日	59.88
2月19日	49.60	2月25日	54.27
2月20日	63.51	穂別観測所(m^3/s)	
茂岩観測所(m^3/s)		1月10日	5.95
1月17日	115.89	1月17日	5.55
1月24日	134.07	1月24日	4.97
1月29日	119.74	2月6日	3.90
1月30日	112.69	2月7日	3.85
2月5日	99.85	2月14日	3.76
2月14日	85.06	2月19日	2.88

影響域(上層)と河床影響域(下層)とに分けて、それぞれの領域で対数分布となることが知られている⁴⁾。そこで、精密測定を行った20秒から120秒までの4ケースにおいて、流速分布の近似対数分布式(対数則による水深と流速分布の回帰式)を上層と下層でそれぞれ算出した。その回帰式の相関係数と相関係数の標準偏差を評価し、その水深方向の分布が最も対数分布に近いケースを基準とした。そこで、基準となる流速分布を水深方向で平均することによって得られる流速を基準流速とした。なお、既往調査⁴⁾によれば近似対数分布式から求めた計算流速値と実測流速値の差は、5%程度となっている。

水深が浅いと氷板やモロミと河床の影響を大きく受け流速分布が複雑な形状をしていることが考えられる。そこで、近似対数分布式の算出に用いる測線は、有効水深が2m程度確保できる測線を対象とした。ここで、菅平観測所5測線、茂岩観測所4測線、恩根内観測所3測線、穂別観測所2測線を選出した。可搬型流速計とADCPを用いて観測した流速分布の代表例を図-5に示す。

各観測所において、全ての調査日にそれぞれ対象とした測線での、20秒から120秒までの各測定時間における氷板影響域と河床影響域での近似対数分布式の相関係数を求めた。それらを測定時間ごとに平均したものを算出し、また相関係数の標準偏差も求めた。さらに、これら測定時間ごとの相関係数の平均値と標準偏差を4観測所全てで平均したものを図-6に示す。

この図から、氷板及び河床影響域の両方で相関係数の平均値が最も大きくなったのは120秒測定のケースであった。また、相関係数の標準偏差の値が小さくなったのは、氷板影響域が120秒測定、河床影響域では40秒測定のケースであった。120秒測定のケースが最も相関係数の値が高く、標準偏差の値も小さい場合が多いため、120秒の精密測定によるケースを流速の基準とする。

また、120秒精密測定から得られた基準流速を用いて算出した河川流量を基準河川流量とした。各観測所の基準河川流量を表-1に示す。

(2) 流速の測定時間と測定位置による河川流量の比較

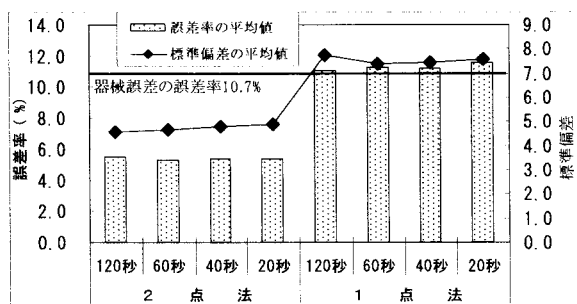


図-7 誤差率と標準偏差

測定時間が20秒、40秒、60秒及び120秒で、水深平均流速の算定法について1点法（有効水深の6割の深さの流速を用いて算出する方法）と2点法（有効水深の2割と8割の深さの流速を用いて算出する方法）とした場合の河川流量の比較を行った。表-1を基に、各観測所の各調査日ごとに基準河川流量から各測定時間（20秒から120秒まで）各点法（1点法と2点法）での河川流量の差（誤差）を絶対値で求め、その誤差を用いて基準河川流量からの誤差率（誤差／基準河川流量を百分率表示）を求めた。この誤差率を平均したものと誤差率の標準偏差を各観測所全てで平均したものを図-7に示す。

この結果、誤差率の平均値は2点法の測定時間60秒、標準偏差では2点法測定時間120秒が最も値が少なかった。この結果からは、2点法60秒測定と120秒測定が誤差率、標準偏差とも少ないため両方法が最も基準河川流量に近いことになる。

(3) 可搬型流速計の器械誤差

今回現地調査で使用した可搬型流速計には、測定する流速の大きさにもよるが、上述したように、2002年は±3cm/s、2003年では±5cm/sの誤差が含まれていた。このことは、基準流量とした120秒精密測定にも器械誤差が含まれていることを示している。このため、各現地観測で求められた流下断面積に器械誤差の流速を乗じて器械誤差による流量を算出し、その誤差率を求めて全観測所で平均したものも図-7に合わせて示した。

(4) 流量観測方法の評価

器械誤差の誤差率から図-7を見ると、1点法は多くの測定で器械誤差の誤差率以上の誤差率が含まれていることになるが、2点法ではほとんどの測定で器械誤差の誤差率の範囲内に誤差率が納まっている。平均値や標準偏差の値からは2点法60秒、120秒測定が優れているが、図-7に示されるよう、2点法による値は測定時間による大きな差はなく、どの測定時間のケースも同程度の精度を有しているものと言える。

測定時間が短い程経済的である。ここでは、2点法20秒測定によるケースが最も経済的である。また、このケースは図-7に示される様に、現在現地観測で主に用いられている2点法60秒や120秒測定と同様に、十分な観測

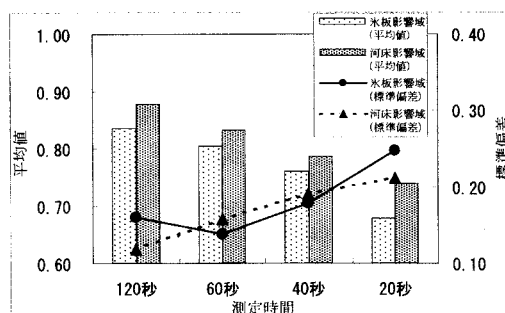


図-8 相関係数の平均値と標準偏差（3観測所）

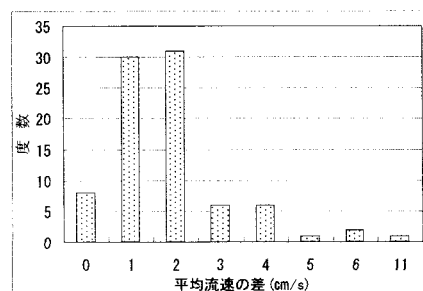


図-9 ADCPによる平均流速の差

精度を有した方法であることが理解できる。

4. ADCPの結氷河川への適用性の評価

今回使用したADCPは浅水域用であるが、ADCPで計測可能な水深方向の範囲は、ADCP自体の水没や観測不能域⁵⁾、河床付近に生じる計測不可能な層⁵⁾が除かれる。このため、適用性評価の対象としては、有効水深が2m程度は確保できる測線とし、穂別観測所を除く3観測所とも可搬型流速計の検討に用いた測線とした。穂別観測所は有効水深が深い場合でも1m以下のため、ADCPの検討では除外することとした。

(1) 測定時間の違いによる流速分布の比較

ADCPによる流速測定は観測所により120秒間または300秒間測定したが、測定時間の違いにより得られる流速の値を比較するため、これらの測定データから20秒、40秒、60秒及び120秒間の連続したデータを取り出し、各測定時間のデータとして、それぞれ水深方向の流速分布を求めた。

この流速分布を用い可搬型流速計での検討と同様に、最大流速が発生した箇所を境として氷板影響域（上層）と河床影響域（下層）でそれぞれ近似対数分布式を算出し、その相関係数と相関係数の標準偏差を求め、測定時間ごとに3観測所で平均し、その結果を図-8に示す。この図から、120秒測定のケースが相関係数の値が最も高く、標準偏差の値も小さいことが分かる。

(2) 測定時間の違いによる平均流速の比較

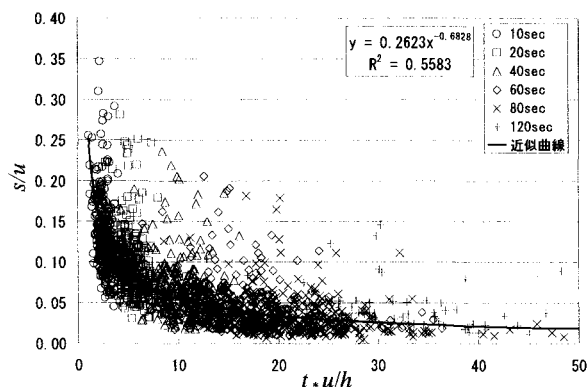


図-10 平均流速の測定時間と精度の関係(結氷時)

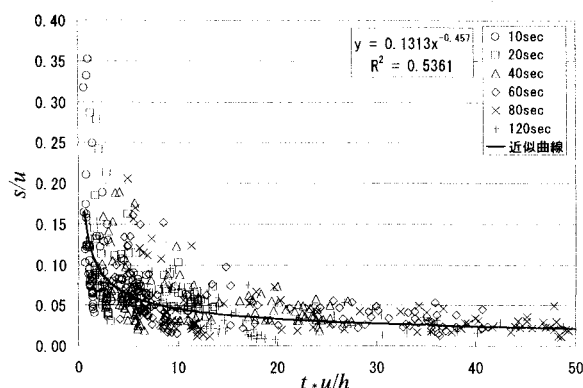


図-11 平均流速の測定時間と精度の関係(非結氷時)

ADCP20 秒,40 秒,60 秒及び 120 秒測定について,これらの測定時間による対象測線での平均流速の違いを把握するため,測定時間の違いによる最大値と最小値の差を求めた.その結果を差の値ごとに度数で表したものを図-9 に示す.測定時間の違いによる平均流速の差は,茂岩観測所の 1 月 30 日調査の測線 10m で 11 cm/s の大きな差が発生している.この直接的な原因は不明であるが,流速を測定していた 120 秒間の流速変化が,他の測定時に比べ大きかったために生じたものと推定される.これを除くと,各測線とも ADCP の器械誤差 2 cm/s 程度の場合がほとんどである.

(3) 平均流速の測定時間と精度の関係

平均流速の測定時間と精度の関係を ADCP の測定結果を用いて検討を行う.また,参考として非結氷時においても,今回現地調査を行った 3 観測所と石狩川の石狩大橋観測所(河口から 26.6 km の地点)で ADCP による測定を行ったので,その結果も合わせて用いた.

いま,営平,茂岩観測所の ADCP120 秒測定結果を用いて,平均流速を求める時間を 10 秒,20 秒,40 秒,60 秒及び 80 秒間として,測定結果の 1 秒から 120 秒内で 1 秒ごとに時間を移動させて各時間での移動平均流速値を算出する.恩根内観測所においても ADCP300 秒測定結果から,10 秒,20 秒,40 秒,60 秒,80 秒及び 120 秒間の移動平均流速値を算出する.こうして求めた各時間での移動平均流速値の

表-2 測定時間の精度

測定時間 (秒)	精 度(%)	
	結氷	非結氷
10	13.0	7.7
20	8.1	5.6
40	5.1	4.1
60	3.8	3.4
80	3.2	3.0
120	2.5	2.5

分散値 s^2 を求め,さらに,その分散値から標準偏差 s を求める.次に,標準偏差 s を 120 秒測定と 300 秒測定で求められた平均流速を u として, s を u で除して無次元化し,さらに,平均流速を求める時間 t を有効水深 h と平均流速 u を用いて無次元化したものも求める.これらを,全調査日について有効水深の十分確保できる営平観測所 5 測線,茂岩観測所 4 測線,恩根内観測所 4 測線において,有効水深の 2 割,5 割,8 割の測点でそれぞれ求め,グラフ化したものが図-10 である.また,非結氷時データも同様に扱い算出した結果を図-11 に示す.

これらの図の Y 軸は,標準偏差の値を営平,茂岩観測所は ADCP120 秒測定,恩根内観測所では ADCP300 秒測定の平均流速で除しているため,それぞれの平均流速を仮に真の平均流速とした場合,平均流速からの精度を現すことになる.図からは,平均流速の測定時間が短いと測定時間が長い場合に比べ精度が低下する傾向が伺える.これは,河川の流況が時間的に変化していることに起因し,測定値が大きくばらつくことを現している.また,結氷時の図-10 と非結氷時の図-11 で近似曲線の相関係数の値を比較すると,結氷時が $r=0.75$,非結氷時が $r=0.73$ であり,データのばらつきは同程度であるが,両図ともデータ数が少ないことや使用したデータ数に違いがあるため,定性的な傾向である.

近似曲線から大きく外れたデータを詳しく調べると,ADCP での測定時間が 1 秒異なると次の 1 秒では流速が 10 倍以上異なる場合があることが分かる.この傾向は,水深が 2m 程度より浅い測線で発生しており,各観測所とも同じ結果であった.石狩大橋観測所では,水深が 3~5m ある測線があるが,これらの測線ではこのような現象は生じていない.

また,各測定時間ごとに X 軸の値を平均して求めた値から図中の近似曲線を用いて算出した精度を表-2 に示す.この表から,結氷時では測定時間が 10 秒では精度が 10%以上に低下していることが分かる.また,非結氷時の方が全般的に精度が良いように見えるが,非結氷時の測定では結氷時に比べ水深の大きな測線が多かったために,このような傾向になったものと推定される.

(4) 河川基準流量との比較

図-9 から ADCP20 秒から 120 秒測定で平均流速に大きな差がなかったため,20 秒測定を用いて可搬型流速計

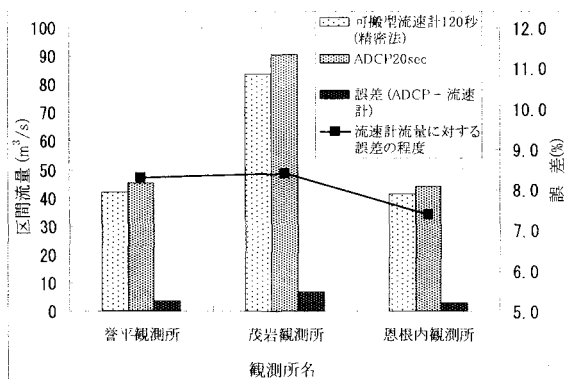


図-12 河川基準流量との比較

120 秒精密測定による河川基準流量との流量比較を行う。比較は、3 観測所ごとに対象とした測線間で各調査日の区間流量を求めて行った。120 秒精密測定と ADCP20 秒測定で各観測所でそれぞれ算出した区間流量の平均値と両測定での差（誤差）の流量を図-12 に示してある。この図から ADCP の測定から求めた区間流量は、可搬型流速計による基準流量よりほとんどの場合で大きな値（3 観測所の 21 調査の内 19 例で大きくなる）となっている。また、ADCP による測定では、可搬式流速計による測定に比べ流量に換算すると平均で 8% 程度の誤差を含んでいることになる。

(5) 測定時間の評価

上記の結果を評価すると、流速分布の特性からは 120 秒測定が対数分布に近いが、測線の平均流速は図-9 に示すように測定時間による違いは少なく、また、表-2 の測定時間による精度結果や流量比較による図-12 から、測定時間 20 秒の精度（誤差）は 10% 以下であることが明らかとなった。ADCP は瞬時に流速を測定する機器であることや流量を算出するには平均流速を用いていることを考えると、測定時間の短い 20 秒測定が最も経済的で精度も有している方法である。

(6) 結氷河川における ADCP の適用性

ADCP は、それ自体の水没水深分や観測不能域が存在するため、結氷河川の測定では氷厚やモロミがそれに相当するため、この点に関しては非結氷時の流速測定に比べ条件が良い。

上記調査結果から、ADCP による測定では可搬型流速計に比べ流速が大きな値となることが明らかとなった。これは、有効水深が 2m 程度と浅いため、河床付近に生じる計測不可能な層と同様に、トランスデューサーから鉛直方向にも放出される弱い超音波（サイドローブ）が河床付近で強く反射され、メインローブ音波の反射で行われる通常の計測値にサイドローブ音波が混入するために生じた誤差と推定される。

ADCP の結氷河川での適用は、10% 程度の誤差を許容するのであれば、有効水深 2m 程度の箇所では可搬型流速計より短時間に流速測定が可能で経済的である。

5. まとめ

今回現地調査を行った菅平観測所、茂岩観測所は、河道のほぼ直線部分に位置し観測条件の良い観測所であったが、恩根内観測所は上流発電ダムからの放流の影響で 1 日に 30~40 cm の水位変化があり、穂別観測所はわん曲部に位置し直上流では支川が流入している箇所であった。これら種々の観測条件下での現地調査結果から、可搬式流速計を用いた流速の測定では、2 点法 20 秒測定が最も経済的で、現在行われている観測方法の精度も有した観測方法であることが明らかとなった。このため、今後は、現地において観測地点の完全結氷を確認すれば、測定時間を 20 秒に変更しても現在の精度を十分に確保できることとなる。また、今回現地調査の対象とした 4 観測所のように、中流部から下流部に位置する観測所では水面幅が 100m を越えるため、測定時間を 20 秒とすることで 1 回の観測で 1 時間以上 $((120 \text{ 秒} - 20 \text{ 秒}) \times 4 \text{ 点/測線} \times 10 \text{ 測線} \div 60 \text{ 秒} = 66 \text{ 分})$ の時間短縮となる。これを実際の観測に仮に当てはめてみると、2001 年 12 月から 2002 年 3 月かけ北海道内での完全結氷時の観測回数は約 200 回になるため、200 時間のコスト削減となり、かなりの経済性の向上が期待できることになる。

ADCP の結氷河川での適用は、有効水深が浅いためか測定値が大きめの値となったと推定されるが、10% 程度の誤差を許容するのであれば、有効水深 2m 程度の箇所では可搬型流速計より短時間に流速測定が可能である。

また、現在水深が浅く、流速の小さな流れにおいても測定可能な最新型の ADCP が登場しており、結氷下の流れを連続的に調べることにより、流れの乱れに基づいた検討を行い測定時間を設定することやこの ADCP を用いた結氷河川での適用範囲の設定が、今後の課題と考えられる。

謝辞：本研究は、国土交通省石狩川開発建設部、旭川開発建設部、室蘭開発建設部及び帯広開発建設部など多くの方々の協力によって行われた、ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 社団法人全日本建設技術協会：水文観測，pp.122（平成 14 年度版）。
- 2) 岸 力，森 明巨，平山健一：河川の流れと流量測定の精度に関する研究，第 25 回年次学術講演会講演集第 2 部，I 1 -114，pp.329，1970。
- 3) RD Instruments 社，基本仕様。
- 4) 株式会社福田水文センター：寒冷地河川調査検討業務，pp.33（平成 4 年 3 月）。
- 5) 社団法人全日本建設技術協会：水文観測，pp.192（平成 14 年度版）。

（2003. 4. 11 受付）