

# 可搬式ADVを用いた同時流量観測による 扇状地河川の流量変化と伏没量の定量化

阪田 義隆<sup>1), 2)</sup> 池田 隆司<sup>3)</sup>

1) 北海道大学大学院理学院

(〒060-0810 札幌市北区北10西8)

2) 株式会社ドーコン 環境事業本部地質部

(〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1-5)

3) 北海道大学大学院理学研究院

(〒060-0810 札幌市北区北10西8)

扇状地河川の流量変化を把握する同時流量観測では、複雑な水深や流速分布に対して精度と効率性の両立が課題となる。本研究では、可搬式ドップラー流速計 (ADV) と流量分布に応じた細密な測線分割を組み合わせた観測法を提案し、ISO748 (2007) が示す不確定値を精度評価の指標として、その有効性を示した。札幌市を貫流する豊平川への適用では、観測流量は不確定値2-3 %に留めつつ、日4-6地点の縦断的な連続観測が可能であり、その結果、流量減少は南19条大橋から南大橋までの約1.5 km間、その間の伏没量は約1 m<sup>3</sup>/sと特定できた。この伏没量は市の地下水揚水量の約8割に相当し、重要な地下水涵養源であることを改めて示した。一方、基準観測所である扇頂の藻岩観測所と扇端の雁来観測所間の流量変化は、途中の東橋付近で流量の増減傾向が逆転するため、扇頂から扇端へのトータルの伏没量は見かけ上小さくなった。同一地点・流況での現行法との比較では、現行法の不確定値は7-9 %と伏没量と同等となるため、豊平川に現行法を適用した伏没量評価は困難と言える。また流速プロファイラー (ADCP) の場合、水深が一定以上 (本観測の場合0.3 m以上) ある区間の流量は本観測法 (ADV) による結果とはほぼ一致したが、浅水深の区間では不感帯に起因する流量欠損が生じ、豊平川の低水流況では上下流を通じて全体に少なめの値となった。

キーワード：同時流量観測，扇状地，豊平川，伏没量，ドップラー流速計

## I. はじめに

わが国では、適正な利用及び正常な機能の維持のために確保すべき流量 (正常流量) が河川毎で設定される。この正常流量の設定に際しては、河川の流入量及び取水量を縦断的に設定する必要がある。特に伏没量や還元量はその量が無視できない場合、同時流量観測やシミュレーションにより可能な限り定量的に考慮することとされる (国土交通省河川局, 2008)。短期間で縦断的に流量観測を行う同時流量観測は、多数のパラメータ設定が必要なシミュレーションに比べ、上下流の流量変化から直接伏没量や還元量を評価できる利点がある一方、流量観測には誤差が伴うため、流量変化が十分大きくない場合、流量変化と観測誤差の分離が困難となる。例えば Weight (2008) は、同時流量観測の適用の目安とし

て、流量の10 %程度の流量変化が必要としている。

扇状地河川では、高透水性の礫床を通じた地下水交流が活発なため、その縦断的な流量変化と伏没量を把握するため、しばしば同時流量観測が実施される。これまで同時流量観測は、現行の観測法 (建設省河川局, 1997, 以下現行法と記す) の延長で実施されてきた。ただし扇状地河川の伏没量は概ね  $10^{-1}$  (m<sup>3</sup>/s)/kmオーダー (佐々木, 1974) とされ、必ずしも大きな値ではなく、更に網状流による複雑な水深、流速分布は大きな観測誤差を生むため、十分な成果に至らない例も多い (樫根・山本, 1971; 庄川扇状地水環境検討委員会, 2004など)。観測誤差を減らすには、流速や水深の観測密度 (測線分割数) を増やす方法が挙げられるが、1横断当たりの観測時間が必要以上に増大するほど、“同時”流量観測

としての定常性が損なわれる懸念もある。複雑な水深、流速分布を有する扇状地河川にて同時流量観測を行う場合、観測法の精度と効率の両立について改めて議論する必要がある。

本研究では、可搬式ドップラー流速計（Acoustic Doppler Velocimeter, 以下ADVと記す）と流量分布に応じた細密な測線分割を組み合わせた同時流量観測を提案する。観測精度を評価する指標としては、国際標準化機構（以下、ISOと記す）が示す不確定値を導入した。札幌市を流れる石狩川水系豊平川への適用結果から、本観測法の有効性を示すとともに、豊平川の流量変化と伏没量の実態について考察した。

## Ⅱ．観測方法

### 1. 流量の不確定値

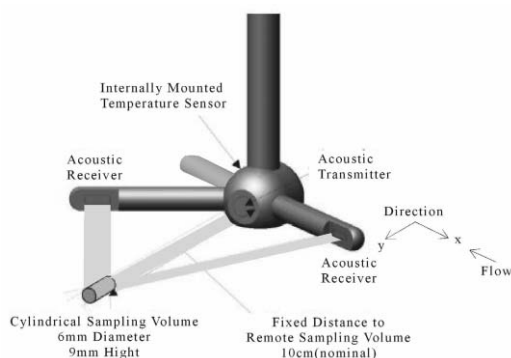
ISO748（2007）では、流量観測の流量値に含まれる不確定値の算出式を示している（(1)式）。各観測地点における流量の不確定値は、個々の測定条件や結果に応じて計算され、68%信頼区間（標準偏差）に相当する観測流量のパーセンテージで示される。

$$u(Q)^2 = u_m^2 + u_s^2 + \frac{\sum_{i=1}^m (b_i d_i \bar{v}_i)^2 \left( u_{b,i}^2 + u_{d,i}^2 + u_{p,i}^2 + \left( \frac{1}{n_i} \right) (u_{c,i}^2 + u_{e,i}^2) \right)}{\left( \sum_{i=1}^m (b_i d_i \bar{v}_i) \right)^2} \quad (1)$$

ここで、 $u(Q)$ ：観測流量の不確定値、 $u_m$ ：観測横断の流速測線数（測線分割数） $m$ に起因する不確定値、 $u_s$ ：流速計のキャリブレーションに起因する不確定値、 $b_i$ 、 $d_i$ 、 $\bar{v}_i$ ：流速測線 $i$  ( $i=1 \sim m$ )における水面幅、水深、平均流速、 $u_{b,i}$ ：流速測線 $i$ での水面幅に起因する不確定値、 $u_{d,i}$ ：測線 $i$ における水深測定に起因する不確定値、 $u_{p,i}$ ：測線 $i$ における流速測定点数 $n_i$ に起因する不確定値、 $u_{c,i}$ ：流速計の非再現性に起因する不確定値、 $u_{e,i}$ ：測定中の流速変動に起因する不確定値。

### 2. 可搬式ドップラー流速計（ADV）の採用

流量の不確定値を小さくするには、点流速を正確に測定できる（不確定値 $u_s$ の小さい）観測機器が必要である。例えば、現行法で用いる回転式流速計ではプロペラ部の摩擦や抵抗などによる誤差は避けられず、検定基準は誤差5%以内とされている。加えて、急勾配と礫床に起因する水深、流速の複雑な分



図一 可搬式ドップラー流速計“FlowTracker”模式図（SonTek/YSI, 2009に加筆）

Fig. 1 Diagram of the FlowTracker probe.

布に対し、観測横断に直交する点流速を指定した水深（6割水深など）で正確に測定できることも重要である。回転式流速計の場合、観測横断と斜交する最大流速を測定するため、直交流速への補正が必要となる。また中州や岸の周辺などの浅水深部では流速計自体が水深に比べ相対的に大きくなり、正確な点流速の測定が困難となる。

本研究では、SonTek/YSI社のADV“FlowTracker”を採用した（図一）。測定原理は、中心の発信部から周波数10MHzの音波を発射し、水平方向10 cm離れた円筒形のサンプリングボリューム（直径6 mm、高さ9 mm）からの反射、拡散した音を2つの受信部で受信し、その周波数変化（ドップラーシフト）から流体の2次元流速を求めるものである。測定範囲は0.001-4.0 m/sと広く、分解能は最小0.0001 m/sに達し、測定精度は±1.0%もしくは±0.0025 m/sと高い。この結果、観測機器に起因する不確定値 $u_s$ は1%に抑えられる（SonTek/YSI, 2009）。プライス流速計との相関も良好で（Rehmel, 2007）、メンテナンスやキャリブレーションも原則不要であり、USGSの観測マニュアルではADVの代表とされている（Turnipseed and Sauer, 2010）。

実際の測定ではFlowTrackerを点流速の測定箇所から10 cm水平にずらした位置に、流速計のy軸と観測横断が重なるようロッドで固定し、40秒間毎秒の流速を計測する。測定値は、流量計算に用いる観測横断と直交方向（x軸）の平均流速とともに、流線と横断との交角、反射強度（SN比）、標準偏差などが表示され、それらをチェックし、測定値として採用する。発信器の大きさはB35 mm×W25 mm×D20 mm

と小型で、かつ受信部から水平10 cm離れた地点を観測対象とするため、数cmの浅水深でも流速場の乱れを抑え、より正確な点流速が測定可能である。なお機器の仕様上は最小2 cmの水深でも測定可能とされている。

### 3. 流量分布に応じた測線分割

測線分割数に起因する不確定値 $u_m$ は、観測機器自体の不確定値 $u_s$ と同様、流量の不確定値に対し大きな割合を占める。この不確定値 $u_m$ は測線分割数 $m$ が多くなるほど小さくなる。ISO748 (2007) によれば $m=10$  (現行法の基本分割数) で $u_m=4.5\%$ だが、 $m=35$ 以上で $u_m=1\%$ に収束する。また、(1) 式右辺第三項にかかる $\sum_{i=1}^m (b_i d_i \bar{v}_i)^2 / \left( \sum_{i=1}^m (b_i d_i \bar{v}_i) \right)^2$  は、シュワルツの不等式の等号成立条件から、各流速測線での区分流量 $q_i = b_i d_i \bar{v}_i$ が全て等しい場合、 $1/m$ で最小となる。更に測線分割数 $m$ が十分多ければ、第三項全体 (各流速測線での水面幅、水深、流速による不確定値) を相対的に小さくできる。しかし扇状地河川の場合、流量の横断分布の偏りが大きいので、区分流量 $b_i d_i \bar{v}_i$ が均等になる測線配置を予め設定することは、ほとんど不可能である。そこで、各区分流量の全流量との比 $b_i d_i \bar{v}_i / \sum_{i=1}^m (b_i d_i \bar{v}_i)$ を考え、測線分割数 $m$ を大きくしつつ、各区分流量の全流量との比が十分小さい目標値を下回るよう流速測線を配置する。流量が集中する流心部は測線分割を細かく (例えば0.5 mピッチ) する必要があるが、流量が相対的に少ない浅水深部は目標値の範囲で間隔を粗くできるため、不確定値を抑えつつ効率的な観測が可能となる。

本観測での流速測線は、ISO748 (2007) を参考に分割数 $m$ を22以上とし、各測線間の区分流量を全流量に対し5 %以内を目標、少なくとも10 %未満になるように設定した。流量計算法は、区分流量の評価に有利なISO748 (2007) のミッドセクション法を採用した。ミッドセクション法とは区分断面を矩形と

し、同一測線の流速と水深の対を区分断面の中心とする方法である。FlowTrackerにはミッドセクション法による区分流量を計算する機能が備わっており、効率的な区分流量のチェックと測線設定が可能である。

### 4. 各測線における水深、流速測定

扇状地河川での水深測定は、同一地点でも河床を構成する礫の形状や配置、分布によって数~10 cm以上変化することが頻繁にある。水深は流速に比べ測定が容易なことから、流速測線間で極力多点の水深を測定し、それらの平均水深を流量計算に用いるべきである。現行法でも水深は流速測定の倍の密度で測定するが、本研究では、流速測線と同一地点のほかに流速測線の水面幅 $b_i$ を等分割した前後2点 ( $\pm 0.4b_i$ および $\pm 0.2b_i$ ) の水深を測定し、これら5点の平均値を流量計算に用いる区分断面の平均水深とした (図-2)。

流速分布は鉛直方向にも複雑であるため、鉛直方向の測定点を増やすことが不確定値を抑える上で望ましい。ただし、測線 $i$ における流速測定点数 $n_i$ に起因する不確定値 $u_{p,i}$ は、ISO748 (2007) によれば2点法 ( $n_i=2$ ) で $u_{p,i}=3.5\%$ に対し、5点法 ( $n_i=5$ ) では $u_{p,i}=2.5\%$ と大きな改善は望めない。ISO748 (2007) では多点測定した鉛直流速分布を平均化する方法 ( $u_{p,i}=0.5\%$ ) を推奨しているが、測定時間が長時間となることも指摘しており、同時流量観測には不適切である。先述のとおり、横断方向の測線分割数 $m$ を多くし、区分流量の全流量の比を等しくなるよう測線配置することで、流速誤差の影響は相対的に小さくなると期待できる。このため、本観測では現行法と同様、2点法 ( $\bar{v}_i = 0.5v_{2i} + 0.5v_{8i}$ ; ただし $v_{2i}$ : 測線 $i$ における水面から2割水深での点流速、 $v_{8i}$ : 8割水深での点流速) を基本に、水深が浅い場合は1点法 ( $\bar{v}_i = v_{6i}$ ; ただし $v_{6i}$ : 6割水深での点流速) とした。1点法と2点法を分ける水深は0.45 m (1.5 ft) とした (Turnipseed and Sauer, 2010)。また2点法で $v_{2i}$ 、 $v_{8i}$ の流速差が大きい場合 (流速自体の50 %を超える場合) には、6割水深を加えた3点法 ( $\bar{v}_i = 0.25v_{2i} + 0.5v_{6i} + 0.25v_{8i}$ ) で測定した (SonTek/YSI, 2009)。

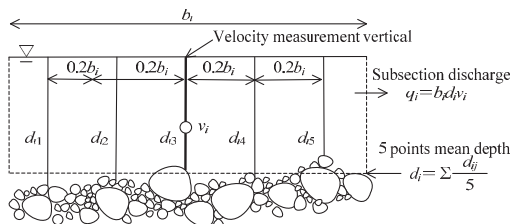


図-2 5点平均法による水深観測

Fig. 2 Diagram of 5-point mean depth measurements.

## Ⅲ. 豊平川における同時流量観測

### 1. 観測地点

石狩川水系豊平川は、道都札幌市のほぼ中心を南



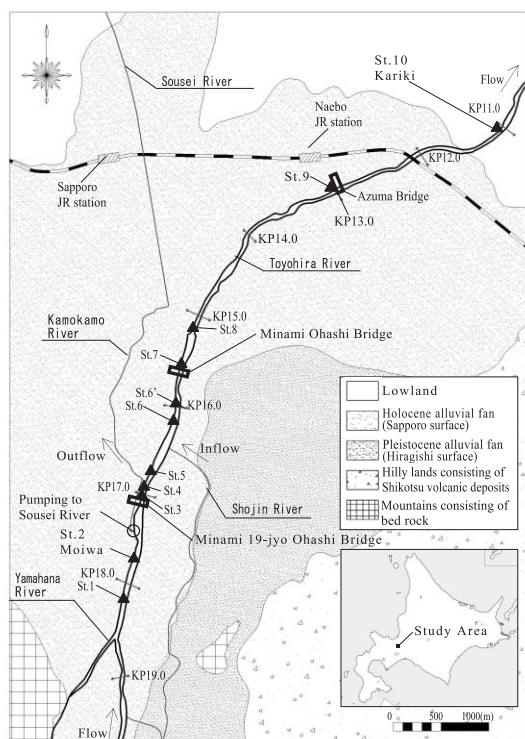


図-3 豊平川扇状地および同時流量観測地点 (▲:St.1-10) 位置図。KPは石狩川合流点からの距離 (km) を表す (図-5参照)

Fig. 3 Map of Toyohira alluvial fan and gauging stations for synoptic surveys.

北に貫流する，幹線延長72.5 km，流域面積902 km<sup>2</sup>の1級河川である (図-3)。その源は小漁山 (標高1,235 m) で途中，小樽内川，白井川と合流しながら札幌西南山地を東方に流れ，山地を抜けた後は北方に流路を変え，市街地が広がる扇状地を1/150-1/300の急勾配で流下して，最終的に石狩川と合流し日本海へ抜ける。豊平川扇状地は真駒内川との合流点付近を扇頂，JR線付近を扇端に，南北約7 kmに広がる。厚さ50 m前後の砂礫層が良好な帯水層を形成し，札幌市の地下水揚水量は11.6万 m<sup>3</sup>/日以上と報告されている (札幌市環境局，2008)。その主な涵養源は豊平川とされ (山口ほか，1965)，仮に地下水揚水量の大半が豊平川の伏没涵養によるとすれば，平均1 m<sup>3</sup>/s以上伏没していることになる。現在，豊平川の水は札幌市の上水道や水力発電など高度に利用され，近年取水施設下流の流量減少が指摘されている。更に豊平川の低水流況 (基準観測所である雁来観測所にて低水流量8.75 m<sup>3</sup>/s，渇水流量4.54 m<sup>3</sup>/s，1/10渇水流量3.76 m<sup>3</sup>/s，観測期間：1993～2002年)

に対し，1 m<sup>3</sup>/s前後の伏没量が与える影響は大きい。このため，扇状地流下過程での流量変化と伏没量の実態解明は，豊平川の河川整備計画上の課題の一つとなっている (国土交通省北海道開発局，2006)。

本研究では，徒歩観測可能な渇水～低水流況時にかけて計4回 (2010年9月14-15日，9月24-25日，10月8-9日，2011年2月2-4日)，同時流量観測を実施した。観測地点は，水力発電の放流先となる山鼻川と合流する流量ピーク点から，扇端の基準地点である雁来観測所に至る計10地点 (St.1-10) を観測地点とした (図-3)。この内，藻岩観測所 (St.2) と雁来観測所 (St.10) が基準観測所であり，現行法との比較のため，同時流量観測とは別に2010年12月24日にも観測を行った。東橋 (St.9) は流量が減少から増加へ転じる変化点を確認するため，10月と2月の観測のみ追加した。幌平橋と南大橋の中間 (St.6) は直上流の中州による観測への影響を避け，2月の観測のみ250 m程下流のSt.6'に移設した。伏没量の詳細評価のため，南19条大橋 (St.3) と南大橋 (St.7) は2010年12月23日と2011年3月31日の2回の観測を追加した。観測地点間の支川には，創成川へ導水する鴨々川と流入する精進川とがある。この内，創成川の導水量は毎時管理されており，各観測期間中の平均値を伏没量の計算に用いた。また精進川の流量は0.1 m<sup>3</sup>/s以下と本川に比べ相対的に少なかったため，同時流量観測と並行して行われた現行法による値をそのまま伏没量の計算に用いた。

## 2. 観測結果

### 1) 観測流量

各観測地点の観測日，測線分割数，全水面幅，全断面積，流速 (平均，最大)，観測流量，ISOによる不確定値を，表-1にまとめる。本観測は9月の2回が1/10渇水流量以下，10月がほぼ渇水流量，2月が低水流量前後の観測に相当する。扇状地における豊平川の流量は山鼻川を通じた発電放流量が大半を占め，その放流量は渇水～低水流況時に安定することが多い。同時流量観測中はいずれの回も雁来，藻岩両観測所のテレメータ水位 (国交省HP) の変動は0.01 m以内で，かつ幌平橋および南22条橋付近の高水敷に設置された地下水観測孔中の地下水面の変動も0.01-0.03 m以内であった。以上より，各観測 (2-3日間) において同時流量観測に必要な安定した流況が確保されていたと考える。

各地点の測線分割数 $m$ は22-40で現行法の ( $m=10$

表-1 豊平川における同時流量観測結果  
Table 1 Measurement results by synoptic surveys using ADV in the Toyohira River, 2010-2011.

St.	Date	Number of Verticals	Total Width (m)	Total Area (m <sup>2</sup> )	Mean Depth (m)	Velocity (m/s)		Discharge (m <sup>3</sup> /s)	ISO Uncertainty	
						Mean	Max.		(%)	(m <sup>3</sup> /s)
1	15-Sep-10	31	47	8.67	0.18	0.43	1.16	3.71	2.7	0.10
2	15-Sep-10	35	56	12.01	0.21	0.28	0.77	3.36	2.2	0.07
3	14-Sep-10	33	31	7.19	0.23	0.46	0.70	3.32	2.8	0.09
4	15-Sep-10	27	17.8	4.56	0.26	0.66	1.10	2.99	2.9	0.09
5	14-Sep-10	24	22.3	6.55	0.29	0.41	0.74	2.67	3.1	0.08
6	14-Sep-10	28	26	8.98	0.35	0.31	0.52	2.81	2.5	0.07
7	14-Sep-10	25	34.4	23.45	0.68	0.12	0.17	2.78	2.4	0.07
8	14-Sep-10	25	21.9	11.14	0.51	0.26	0.41	2.85	2.6	0.07
10	15-Sep-10	33	38.2	9.89	0.26	0.29	0.59	2.87	2.7	0.08
1	24-Sep-10	37	47	8.80	0.19	0.34	1.08	3.03	2.5	0.08
2	24-Sep-10	37	56.2	10.92	0.19	0.28	0.72	3.08	2.5	0.08
3	25-Sep-10	34	32.3	7.91	0.25	0.39	0.66	3.10	2.5	0.08
4	25-Sep-10	27	18.2	4.11	0.23	0.71	1.11	2.92	2.9	0.08
5	25-Sep-10	23	22.2	6.47	0.29	0.43	0.73	2.79	3.1	0.09
6	25-Sep-10	27	25.3	9.20	0.36	0.30	0.50	2.80	2.6	0.07
7	24-Sep-10	26	34.4	23.14	0.67	0.11	0.17	2.62	2.4	0.06
8	24-Sep-10	25	22	11.02	0.50	0.23	0.37	2.51	2.6	0.07
10	24-Sep-10	33	38.1	9.76	0.26	0.27	0.55	2.66	2.7	0.07
1	8-Oct-10	38	47.4	11.43	0.24	0.46	1.16	5.29	2.3	0.12
2	9-Oct-10	40	56.2	13.61	0.24	0.35	0.82	4.75	2.0	0.09
3	9-Oct-10	32	32.8	10.34	0.32	0.48	0.78	4.99	2.5	0.12
4	9-Oct-10	26	18.7	5.82	0.31	0.76	1.35	4.44	2.6	0.12
5	9-Oct-10	31	24.5	8.23	0.34	0.49	0.76	4.06	2.6	0.11
6	9-Oct-10	30	26.6	10.85	0.41	0.39	0.67	4.22	2.3	0.10
7	8-Oct-10	25	34.5	25.38	0.74	0.16	0.24	4.08	2.4	0.10
8	8-Oct-10	25	22.5	12.96	0.58	0.31	0.54	3.99	2.5	0.10
9	9-Oct-10	22	34.6	21.91	0.63	0.18	0.26	4.04	2.7	0.11
10	8-Oct-10	34	38.3	11.65	0.30	0.39	0.66	4.49	2.4	0.11
2	24-Dec-10	33	56.80	23.60	0.42	0.61	1.18	14.38	2.2	0.32
3	23-Dec-10	36	34.30	17.33	0.51	0.79	1.26	13.61	1.9	0.26
7	23-Dec-10	27	52.10	30.86	0.59	0.42	0.65	12.90	2.3	0.30
10	24-Dec-10	32	43.70	19.11	0.44	0.74	1.35	14.07	2.1	0.30
1	4-Feb-11	30	36.9	15.52	0.42	0.57	1.12	8.91	2.4	0.21
2	4-Feb-11	35	57.1	18.83	0.33	0.47	1.07	8.80	2.1	0.18
3	2-Feb-11	38	33.3	13.91	0.42	0.65	1.09	9.10	2.0	0.18
5	2-Feb-11	30	34.6	13.88	0.40	0.63	1.02	8.70	2.3	0.20
6	4-Feb-11	33	49.2	21.56	0.44	0.40	0.65	8.52	2.1	0.18
7	2-Feb-11	22	35.3	32.29	0.92	0.25	0.36	7.94	2.7	0.21
8	4-Feb-11	26	23.3	14.96	0.64	0.54	0.78	8.08	2.4	0.19
9	4-Feb-11	30	44.7	35.39	0.79	0.22	0.33	7.84	2.1	0.16
10	3-Feb-11	39	43.8	15.37	0.35	0.55	1.05	8.49	1.9	0.16
3	31-Mar-11	36	33.7	14.66	0.44	0.67	1.18	9.82	2.0	0.20
7	31-Mar-11	28	34.5	31.34	0.91	0.28	0.40	8.88	2.2	0.20

程度)の2-4倍に相当する。FlowTrackerの採用( $u_s=1\%$ )と測線分割の細密化( $u_m=1-2.5\%$ )によって、観測流量の不確定値は2-3%にまで抑えることができた。また前述のFlowTrackerに内蔵するチェック機能を活用することで、日4-6測線の縦断的な連続観測が可能であった。図-4に結果の一例として、2011年2月3日における雁来観測所(St.10)の水深・流速分布図を示す。横断方向0.1 m毎で測定した水深は、河床礫の大小により隣接点間でも最大0.1 m以上も変化する。5点平均法による水深は、その移動平均と整合しており、区分流量計算に用いる水面幅 $d_i$ とする妥当性が示される。雁来観測所は礫が堆積した浅水深部(左岸基準杭からの距離40-50 m付近)を境に、左岸側と右岸側の2つの流心がある。本観測では流速測線を左岸側は1 m間隔、右岸側0.5 m間隔で細分化する一方、中央の浅水深部は最大4 m間隔にて設定した(測線分割数 $m=40$ )。点流速の分

布は左岸流心部の最大1.05 m/sから中央浅水深部の0.18 m/sまで大きく変化するが、その変化は連続的であり、全体の流速分布をよく捉えていると考えられる。ただし右岸側の河床付近(8割水深流速)は河床礫の影響と考えられる乱れが認められる。各区分流量の全流量との比は箇所毎に0.4-5.3%で、大半は5%以内に収まっている。得られた全流量は8.49 m<sup>3</sup>/s、その不確定値は1.9%であった。この不確定値は流量換算すると0.16 m<sup>3</sup>/sに過ぎず、真値に近いと期待できる。

## 2) 流量の分布と変化

図-5に、山鼻川合流後(KP18.2)から雁来観測所(KP11.1)に至る、豊平川の縦断的な流量分布(破線)を示す。KPは豊平川と石狩川との合流点からの距離(km)である。また参考として、2010年6月28-29日に観測した河川水位の縦断分布(実線)を示す。

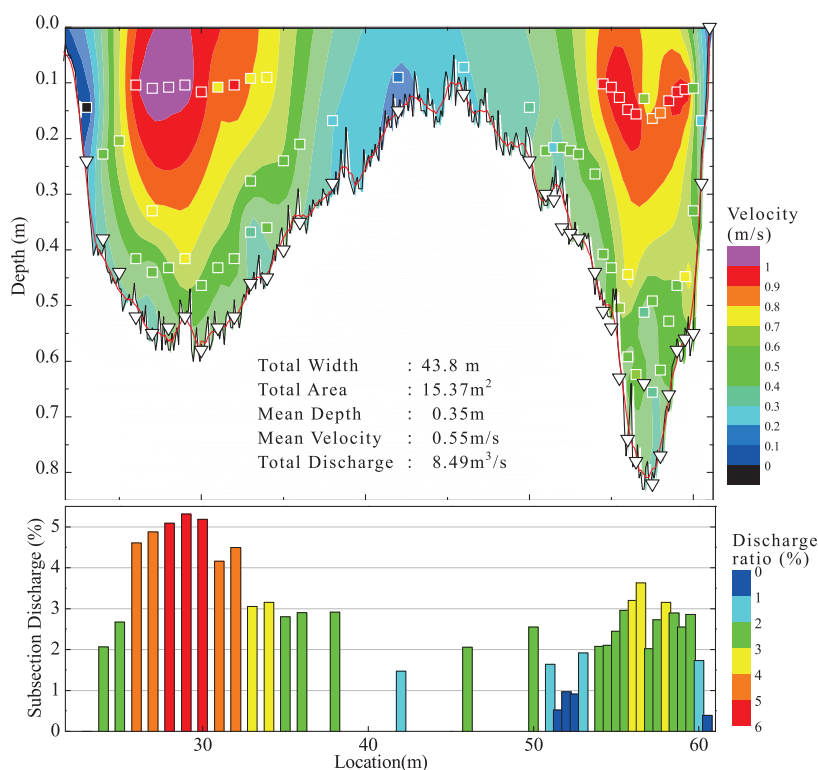


図-4 流量観測結果の一例 (St.10雁来観測所, 2011年2月3日観測), 上図: 水深・流速分布図, 黒実線が0.1 m毎に測定した水深, 赤実線が1 m毎の移動平均した水深,  $\nabla$ が本観測法(5点平均法)による水深,  $\square$ が点流速と、それより補間作成した流速コンター, 下図: 各流速測線における区分流量((1)式中の $b_i$ ,  $d_i$ ,  $\bar{v}_i$ )の全流量に対する比

Fig. 4 Example of measurement results of the Kariki Station (St.10) for 3 Feb. 2011. Upper shows the cross sectional distribution of water depth (0.1 m interval, 1 m moving average, and 5-point mean) and velocity (points by ADV and estimated contour). Lower shows each subsection discharge ratio to the total discharge (8.49 m<sup>3</sup>/s) at each vertical.

流量変化を上流から下流へ見ると、山鼻川合流後 (St.1) から南19条大橋 (St.3) までは、流量が減少するものの、KP17.4左岸での創成川への導水 (0.3-0.4 m<sup>3</sup>/s) を考慮すれば、さほど大きな変化ではない。中間の藻岩観測所 (St.2) は流量が一時少なくなる傾向があるが、粗礫が集積した浅水深区間が河道断面の半分以上 (約30 m) を占めており、こうした浅水深区間を一部伏流し、流量が見かけ上少なくなっている可能性がある。南19条大橋 (St.3) から下流へは一貫して流量が減少する。この減少傾向は、支川の精進川の流入 (KP16.5, 0.1 m<sup>3</sup>/s程度) にも係わらず、南大橋 (St.7) まで続く。下流の南7条大橋 (St.8) の流量は南大橋 (St.7) の流量とほぼ同じである。このため、流量減少区間は南19条大橋から南大橋までの約1.5 kmと特定される。南大橋 (St.7) から扇端の雁来観測所 (St.10) までは流量は一定かやや増加の傾向がある。特に東橋 (St.9) から雁来観測所 (St.10) 間では10月と2月の2回の観測のみだが、いずれも流量増加の傾向が認められるため、東橋付近が流量増減の変化点になっていると推測される。

### 3) 伏没量の評価

河川から地下水へ浸透する伏没量は河道の水収支

式を用いて推定できる (Scanlon *et al.*, 2002; Healy, 2010)。本研究では、伏没量を対象区間の上流流量から下流流量を差し引き、その間の支川の流出入を補正して推定する。

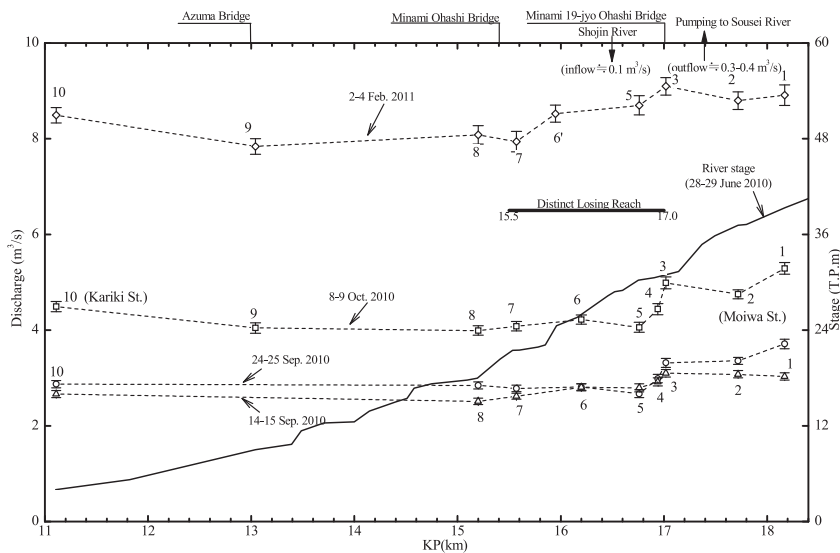
$$dQ_{i \rightarrow j} = Q_i - Q_j - Q_{\text{Sousei}} + Q_{\text{Shojin}} \quad (2)$$

ここで、 $dQ_{i \rightarrow j}$ ：上流地点*i*から下流地点*j*までの伏没量、負の場合は涵養量、 $Q_i$ ：上流地点*i*の観測流量、 $Q_j$ ：下流地点*j*の観測流量、 $Q_{\text{Sousei}}$ ：創成川への導水量、ただし*i*が3以上もしくは*j*が2以下の場合には考慮しない、 $Q_{\text{Shojin}}$ ：精進川からの流入量、ただし*i*が6以上もしくは*j*が5以下の場合には考慮しない。

伏没量 $dQ_{i \rightarrow j}$ の不確定値 $U_{i \rightarrow j}$ は、観測流量自体に含まれる不確定値以外にも、(1) 式で考慮しなかった水収支成分に起因する不確定値が含まれる。二乗和で示すと、

$$U_{i \rightarrow j}^2 = U^{(1)}_{i \rightarrow j}^2 + U^{(2)}_{i \rightarrow j}^2 + U^{(3)}_{i \rightarrow j}^2 + U^{(4)}_{i \rightarrow j}^2 \quad (3)$$

ここで、 $U^{(1)}_{i \rightarrow j}$ ：観測流量自体に含まれる不確定値、 $U^{(2)}_{i \rightarrow j}$ ：観測中の河川および地下水の水位変化 (貯留量変化) に伴う不確定値、 $U^{(3)}_{i \rightarrow j}$ ：他の支川や用排水路など表流水の流出入による不確定値、 $U^{(4)}_{i \rightarrow j}$ ：降雨や蒸発散など鉛直上向きの流出入によ



図ー5 豊平川の流量縦断分布、2010年9月14-15日、9月24-25日、10月8-9日、2011年2月2-4日の同時流量観測による。エラーバーは流量換算した不確定値 (68 %信頼区間)。横軸 (KP) は石狩川合流点からの距離。実線は2010年6月28-29日に測定した河川水位。

Fig. 5 Measurement results for the longitudinal discharge distributions of the Toyohira River. KP is the distance from the confluence of the Toyohira and the Ishikari Rivers. Error bar represents the discharge uncertainty calculated using the ISO method.

表-2 同時流量観測結果から計算する伏没量（正值：失水（伏没），負値：得水，単位は全て $\text{m}^3/\text{s}$ ）。Table 2 River leakage calculated using the stream water budget method with measurement results of the synoptic survey, positive value at water losing and negative value at gaining.  $Q$ ,  $U$ ,  $dQ$ , and  $dQ/U$  respectively denote discharge, ISO uncertainty, rate of leakage, and uncertainty of leakage.

date	Measurement Results										Tributary Discharge		River Leakage					
	St.2 Moiwa		St.3 Minami 19- jyo Ohashi		St.7 Minami Ohashi		St.9 Azuma		St.10 Kariki		Pumping to Sousei River (outflow)	Shojin River (inflow)	St.2 to St.10 (losing)		St.3 to St.7 (distinct losing)		St.9 to St.10 (gaining)	
	$Q_2$	$U_2$	$Q_3$	$U_3$	$Q_7$	$U_7$	$Q_9$	$U_9$	$Q_{10}$	$U_{10}$	$Q_{\text{Sousei}}$	$Q_{\text{shojin}}$	$dQ_{2\text{to}10}$	$dQ/U$	$dQ_{3\text{to}7}$	$dQ/U$	$dQ_{9\text{to}10}$	$dQ/U$
14-15 Sep. 2010	3.36	0.07	3.32	0.09	2.78	0.07			2.87	0.08	0.42	0.08	0.15	0.11	0.62	0.11		
24-25 Sep. 2010	3.08	0.08	3.10	0.08	2.62	0.06			2.66	0.07	0.38	0.05	0.09	0.11	0.53	0.10		
8 - 9 Oct. 2010	4.75	0.10	4.99	0.12	4.08	0.11	4.04	0.11	4.49	0.11	0.33	0.07	0.00	0.14	0.98	0.17	-0.45	0.15
23 Dec. 2010			13.61	0.34	12.90	0.30					0.29	0.13			0.84	0.45		
24 Dec. 2010	14.38	0.32							14.07	0.30	0.29	0.13	0.15	0.43				
2 - 4 Feb. 2011	8.80	0.18	9.10	0.18	7.94	0.21	7.84	0.16	8.49	0.16	0.28	0.11	0.14	0.25	1.27	0.28	-0.65	0.23
31 May. 2011			9.82	0.20	8.88	0.20					0.37	0.11			1.05	0.28		

unit :  $\text{m}^3/\text{s}$ 

る不確定値。

本観測では、 $U^{(2)}_{i \text{ to } j}$ は安定した流況および水位条件で観測していること、 $U^{(3)}_{i \text{ to } j}$ は創成川や精進川以外の流出入は確認されないことから、いずれも無視する。また $U^{(4)}_{i \text{ to } j}$ も河川の場合、実質的に十分小さいとみなせる(Healy, 2010)。そこで、伏没量の不確定値 $U_{i \text{ to } j}$ を観測流量自体の不確定値 $U^{(1)}_{i \text{ to } j}$ のみに依存するとし、かつ支川流量の不確定値を無視すれば、上下流の流量 $Q_i$ 、 $Q_j$ および不確定値 $U_i$ 、 $U_j$ を用いて、伏没量の不確定値 $U_{i \text{ to } j}$ は次式で推定される。

$$U_{i \text{ to } j} = U^{(1)}_{i \text{ to } j} = \frac{\sqrt{(U_i \cdot Q_j)^2 + (U_j \cdot Q_i)^2}}{dQ_{i \text{ to } j}} \times 100 \quad (4)$$

表-2に、藻岩観測所( $i=2$ )から雁来観測所( $j=10$ )間、流量減少区間に対応する南19条大橋( $i=3$ )から南大橋( $j=7$ )間、流量が増加に転じる東橋( $i=9$ )から雁来観測所( $j=10$ )間の各伏没量 $dQ_{i \text{ to } j}$ と、それらの不確定値( $U_{i \text{ to } j} \cdot dQ_{i \text{ to } j}$ による流量換算値)をまとめた。

藻岩観測所(St.2)から雁来観測所(St.10)間の伏没量 $dQ_{2\text{to}10}$ は $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下の小さい値となった。これは流量の縦断分布の傾向から、東橋(St.9)付近を境に流量の増減傾向が逆転し、前後の変化量が互いに相殺されるためである。不確定値 $U_{2\text{to}10}$ も相対的に大きいことから、本観測の精度(不確定値2-3%)をもってしても、両観測所間の流量変化の量的評価は難しいと言える。

流量減少が顕著な南19条大橋(St.3)から南大橋(St.7)間の伏没量 $dQ_{3\text{to}7}$ は $0.53\text{-}1.27 \text{ m}^3/\text{s}$ で幅がある。

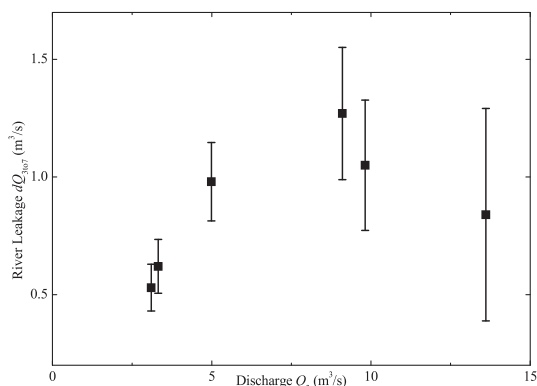


図-6 流量と伏没量の関係、横軸はSt.3での観測流量、縦軸はSt.3からSt.7間の推定伏没量、エラーバーは流量換算した不確定値（68%信頼区間）。

Fig. 6 Relation between river discharge and leakage.  $Q_3$  and  $dQ_{3\text{to}7}$  are discharge at St.3 and leakage between St.3 and St.7.

そこで横軸に区間上流である南19条大橋(St.3)の流量 $Q_3$ 、縦軸に伏没量 $dQ_{3\text{to}7}$ を不確定値とともにプロットすると(図-6)、1/10濁水流量以下であった9月の2回の観測による伏没量は $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度でやや少ないが、それ以上の流量の伏没量については不確定値(68%信頼区間)も考慮すれば、ほぼ一定に見える。9月の2回の観測による伏没量も信頼区間を大きく(例えば95%信頼区間)すれば同様な値に近く可能性もあり、本観測結果のみからは9月の2回の観測値を真として伏没量が急減すると断言することは難しい。しかしながら全観測結果の平均伏没量は $0.88 \text{ m}^3/\text{s}$ 、9月の2回の観測を除いた平均伏没量は



表-3 藻岩(St.2)・雁来観測所(St.10)における本観測法と現行法との比較

Table 3 Comparison between results of synoptic surveys by ADV and conventional measurements by propeller at the Moiwa (St.2) and Kariki (St.10) stations.

St.	Date	Synoptic Surveys by ADV					Conventional Measurements by Propeller					Discharge Ratio $Q_{ADV}/Q_{ADV}$
		Number of Verticals	Total Area(m <sup>2</sup> )	Mean Velocity(m/s)	Discharge $Q_{ADV}$ (m <sup>3</sup> /s)	Uncertainty $U_{ADV}$ (%)	Number of Verticals	Total Area(m <sup>2</sup> )	Mean Velocity(m/s)	Discharge $Q_{PRO}$ (m <sup>3</sup> /s)	Uncertainty $U_{PRO}$ (%)	
Moiwa (St.2)	15-Sep-10	35	12.01	0.280	3.36	2.2	12	12.03	0.33	4.02	8.1	1.20
	24-Sep-10	37	10.92	0.282	3.08	2.5	12	11.30	0.33	3.71	8.1	1.21
	24-Dec-10	33	23.60	0.610	14.38	2.2	12	24.63	0.61	15.05	7.2	1.05
Kariki (St.10)	15-Sep-10	33	9.89	0.290	2.87	2.7	9	12.52	0.25	3.16	8.9	1.10
	24-Sep-10	33	9.76	0.273	2.66	2.7	9	12.69	0.35	3.30	8.8	1.24
	8-Oct-10	34	11.65	0.386	4.49	2.3	9	11.29	0.44	4.95	8.9	1.10
	24-Dec-10	32	19.11	0.736	14.07	2.1	11	20.06	0.62	15.25	7.4	1.08
	3-Feb-11	39	15.37	0.553	8.49	1.9	9	16.12	0.64	9.48	8.5	1.12

1.04 m<sup>3</sup>/sであることから、同区間の伏没量を約1 m<sup>3</sup>/sとみなすことは妥当と考える。

東橋 ( $i=9$ ) から雁来観測所 ( $j=10$ ) 間の伏没量  $dQ_{910}$  は -0.5 m<sup>3</sup>/s 前後の負の値 (涵養量) となった。本観測では10月と2月の2回の観測のみであるが、0.2 m<sup>3</sup>/s 前後の不確定値  $U_{910}$  を考慮しても負の値は変わらない。このため、同区間では流量は下流に向かって増加しており、地下水が河川へ流入している可能性が高いと考える。

#### 4) 現行法との比較

藻岩観測所 (St.2) と雁来観測所 (St.10) では、北海道開発局による現行法の流量観測が定期的に実施されている。表-3に、本観測とほぼ同時刻に同一測線で行った本観測と現行法 (現地測定直後の照査前の値) による観測結果を比較した。現行法の不確定値は、流速計自体に起因する不確定値  $u_c$  を検定時の誤差基準5%とし、本観測法と同様に計算した。両観測所とも現行法が本観測に比べ水深、流速とも大きめの値で観測されており、その結果、流量も現行法が本観測法より10-20%前後大きくなる傾向があった。現行法の水深は礫の上を特異値とみなし、礫間を選択的に観測する傾向があり、本観測 (5点平均法) に比べ大きな水深を観測しやすい。また現行法の回転式流速計 (三映式流速計1型Pタイプ) は全流速を測定するため、流線が斜行する場合、本来測定すべき直交流速に対し大きな値となりやすい。更に浅水深部においては、流速計が測定できる水深 (三映式1型Pタイプの場合9 cm) が得られる礫間にて選択的に測定することも、より大きな流速を観測する要因となる。現行法の不確定値を計算すると7-9%に達する。これは流速測線の分割数  $m$  が7-10と少ないことに加え、流速計自体の不確定値  $m_s$  (5%と想定) も大きいためであり、本観測法 (2-3%) の2-3

倍以上に相当する。

#### 5) 流速プロファイラー (ADCP) との比較

実用化が進む流速プロファイラー (Acoustic Doppler Current Profiler, 以下ADCPと記す) は、河道横断面の流速分布を高い分解能で連続的に捉えることができるため、精度と効率性の観点から同時流量観測への適用が期待され、近年その試みも報告されている (手計, 2010)。本研究では、ADCPによる流量観測を2011年2月3日に7地点 (St.2,3,5,6,7,9,10) で行い、2011年2月2-4日における本観測結果と比較した。特に雁来観測所 (St.10) では同一時刻、同一測線で本観測と併せてADCPの観測を行った。用いたADCPはTeledyne RD Instruments社の浅水深 (水深2 m以下) 用ADCP “Stream Pro” で、本観測と同一測線を徒歩で曳航し、各測線往復2回の観測を行った。Stream ProはADCPの中では比較的高い周波数 (2MHz) の音波を用いるため、浅水深で高分解能の流速分布が得られ、ADCP特有の水面や河床付近の不感帯を小さくできる。諏訪湖へ流入する浅水深河川への適用事例も報告されている (豊田ほか, 2010)。流量計算はWinRiver (Teledyne RD Instruments社) を使い、その際、不感帯の流速については水面付近が観測第1層目の流速、河床付近は鉛直流速分布を対数則で推定した外挿値を入力している。

図-7に、雁来観測所 (St.10) でのADCPによる水深・流速断面図を示す。Stream Proの測定限界水深は0.15 mの仕様だが、本観測では礫床の影響により水深が0.3 m程度を下回る河道中央 (40.5-47.5 m) の流量が欠測となった。ADCPによる流速分布は、ADVによる本観測結果 (図-4) に比べて細密であるが非連続的な乱れが目立つ。この乱れは、実際の流速分布を捉えている可能性のほかに、ADCPが毎秒の細かいサンプリング (ADVは40秒平均) のた

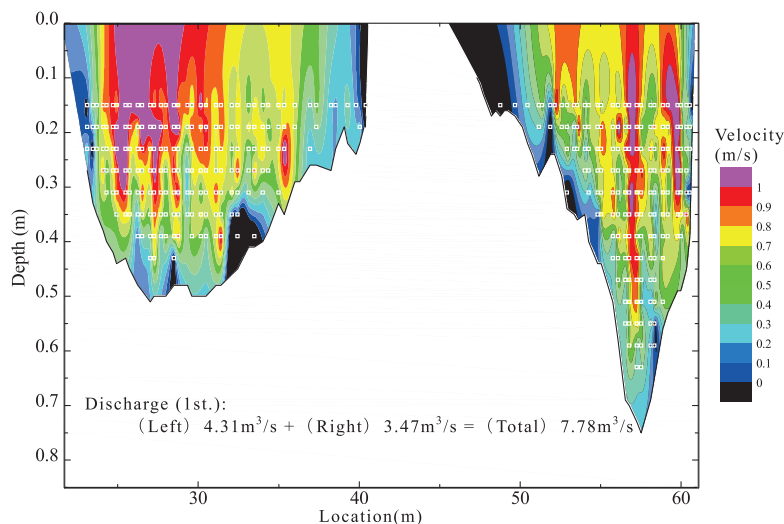


図-7 ADCPによる観測結果の例(St.10雁来観測所, 2011年2月3日観測), 本観測(図-4)と同時に実施した往復2回の観測の内の1回目の観測結果. □は測定流速(観測横断に対する直交成分), 流速コンターはそれより補間し作成. 中央部分(41-50 m)は浅水深に伴う流量欠損.

Fig. 7 Example of measurement results obtained using ADCP, at Kariki Station (St.10) for 3 Feb. 2011.

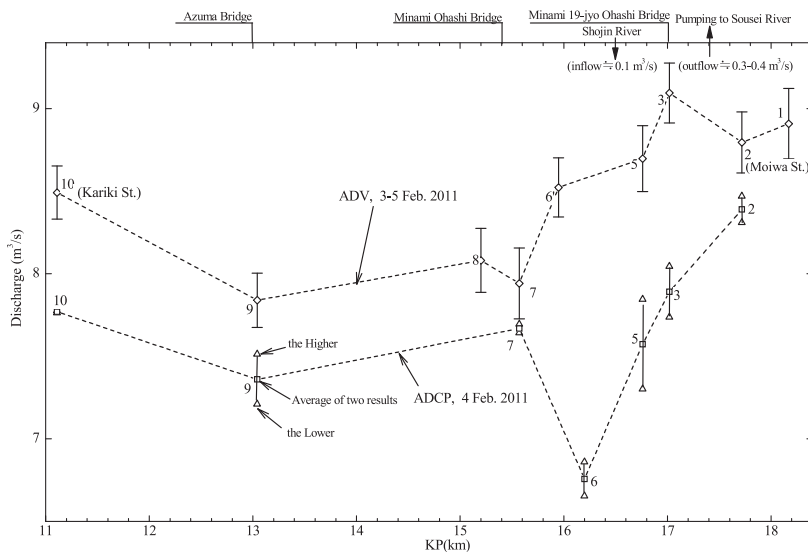


図-8 本観測(ADV)と流速プロファイラーADCPとの比較, ◇: ADVによる観測結果, エラーバーは流量換算した不確定値(68%信頼区間), △: ADCPによる各測線往復2回の観測結果, □: 同往復2回の平均.

Fig. 8 Comparison of ADV and ADCP results.

め流速変動の偏差を反映した可能性や, FlowTrackerが水平に離れた点流速を測定するのにに対しADCPは観測機器の真下を観測するため, 浅水深では観測機器自体が流速場を乱した可能性もある. またStream Proはコンパスを内蔵しておらず, 曳航時の観測横断に対する向きがずれが影響した可

能性もある. このようにADVに比べADCPは流速の標準偏差が大きくなりやすい事例は他の浅水深の河川でも報告されている(Stone and Hotchkiss, 2007). ADCPによる観測流量は, 観測1回目(図-7)では左岸側4.31 m³/s, 右岸側3.47 m³/sで合計7.78 m³/sとなった. 観測2回目も合計7.77 m³/sで, ADCPによる

往復2回の再現性は非常に良い。ただし、本観測法 (ADV) による流量  $8.49 \text{ m}^3/\text{s}$  (不確定値  $1.9 \%$ ) は ADCP の結果より  $0.72 \text{ m}^3/\text{s}$  も多い。ADCP が観測できた左右岸それぞれで比較すると、本観測法 (ADV) では左岸側  $4.59 \text{ m}^3/\text{s}$ 、右岸側  $3.46 \text{ m}^3/\text{s}$  で、これは ADCP の結果とほぼ一致する。このため、両観測による流量差の大半は浅水深部 (中央部) における ADCP の流量欠損によることが分かる。一方、浅水深部を除く ADV と ADCP の観測流量は一致することから、ADCP の流速分布の乱れ (図-7) は平均流速に対する偏差を示しており、高密度の観測によって偏差が相殺されたと推測される。

図-8に、ADCPによる観測と本観測の結果を流量の縦断分布として比較する。ADCPの各測線往復2回の流量差は、先述の雁来観測所 (St.10) と同様、流量比の2-4 % (St.6のみ7 %) に留まり、各地点の再現性は高い。流量の縦断分布は藻岩観測所 (St.2) から東橋 (St.9) まで流量減少、東橋から雁来観測所 (St.10) まで流量増加の傾向を示し、本観測 (ADV) の結果 (図-5) と整合する。しかしながら、ADCPの結果は本観測 (ADV) に比べ様に少ない傾向がある。特に幌平橋と南大橋の中間地点 (St.6) は上下流に比べて流量の減少が顕著である。低水流況時におけるADCPの観測では、0.3 m前後の浅水深部において流量欠損が発生しており、浅水深区間の割合が特に大きいSt.6において一段と流量が少なくなったものと考えられる。

## IV. 考 察

### 1. 本観測法の有効性と課題

扇状地河川における同時流量観測としての本観測法の有効性について、豊平川への適用結果から精度および効率性の観点より考察する。観測精度については、自然河川における流量の真値の把握が困難なことを踏まえ、本研究ではISO748 (2007) の不確定値を評価の指標とした。本観測法で得られた流量の不確定値は豊平川の場合、2-3 % 以下に留めることができた。これは、可搬式ドップラー流速計自体の高い精度 ( $u_s=1\%$ ) に加え、各地点の測線分割数を22-40に設定し、かつ区分流量の全流量に対する比が5 % 以内を目標に設定したことによる。更にISOの推定式には直接評価されないが、観測横断と斜行する流線分布や水深数cmの浅水深部に対しFlowTrackerにより正確な点流速を測定したことや、変化の大きい水深分

布に対し5点平均法を適用したことで、精度向上を図った。雁来観測所 (St.10) におけるADCPとの比較では、ADCPの測定可能水深における流量はほぼ一致することも、本観測法の精度を裏付けている。またFlowTrackerの区分流量や不確定値の計算機能を活用することで、低い不確定値を保ちつつ一日4-6地点の観測が可能であり、全10地点を2-3日で実施できた。比較したADCP (一日7地点) と比べても効率性に遜色はないと言える。以上から、精度と効率性の点からの本観測法の有効性が示された。

本観測の課題として、各地点の流量自体の不確定値が小さくとも、上下流の変化量である伏没量の不確定値は相対的に大きくなることが挙げられる。伏没が卓越した区間でも伏没量  $dQ_{307}$  (約  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) の不確定値は10-50 % に達する。このため、水位や流況などの同一条件での繰り返し観測によって平均値としての精度を高めることが重要である。また藻岩観測所 (St.2) と雁来観測所 (St.10) 間のように流量の増減が相殺されトータルの流量変化が少なくなる場合、本観測法の精度でも流量変化よりも不確定値が相対的に大きくなる。ただし、その間 (例えば St.3~7 など) の流量変化が明らかに認められれば、観測法の精度 (不確定値) の範囲において、トータルの流量変化は少ないということは言える。このため縦断的な流量分布が不明な初期段階では多数の観測地点を設定し、流量変化の傾向を見定めた上で、必要な観測地点へ絞り込むのがよい。また水深方向の流速測定点数  $n_i$  に起因する不確定値は、ISO748 (2007) 上は2点法も5点法も大きな差はないが、実際の礫床河川では河床付近 (8割水深) で乱れが大きくなりやすい。効率性とのバランスを考慮しつつ、測線分割数  $m$  を増やすだけでなく、流速測定点数  $n_i$  も増やすことが望ましい。

本観測法と比較した現行法とADCPについても、同時流量観測の適用性について考察する。現行法による観測流量は本観測に比べ10-20 % 程度大きく、その不確定値も7-9 % ( $u_s=5 \%$  と仮定) に達する。この不確定値であれば伏没量との分離は困難であり、現行法を用いて豊平川の伏没量を評価することは難しいと言える。ただし、現行法でも本川流量に対して伏没量が十分多い (例えば10 % 以上) 河川においては、不確定値を考慮した上で十分適用可能であろう。一方、本研究で用いた浅水深用のADCPは上下流の流量の変化傾向は捉えられるが、不感帯に起因する浅水深部の欠損に伴い各地点の流量は少

なめに観測されるため、豊平川での伏没量自体の評価は難しかった。しかしながら、ADCPは河道全体で水深が確保できれば、本観測以上の精度と効率性が期待できる。例えば、流況変化が大きく更に短期間で多点の観測が必要な場合、あるいは渡搬できない水深や流速の場合などでは、ADCPはより有効になると予想される。

## 2. 豊平川における流量変化と伏没量

豊平川の流量減少区間は南19条大橋 (St.3) から南大橋 (St.7) 間の1.5 kmと特定された。この1.5 kmは扇状地の流下距離 (約10 km) の限られた区間であり、伏没が地下水と河川水の水位の連続性や河床付近の透水性など微妙なバランスで成り立つことを示唆する。また同区間の伏没量 (約1 m<sup>3</sup>/s) は、札幌市の地下水揚水量 (11.6万 m<sup>3</sup>/日) の約8割に相当しており、特定区間の伏没涵養が扇状地の重要な地下水涵養源になっていることが示された。また、観測法は異なるものの、過去の同時流量観測においても伏没量は0.8-1.3 m<sup>3</sup>/sと見積もられている (山口ほか, 1965)。このことは40年以上経過し河川整備や都市化が進んでも、伏没量に大きな変化がなかった可能性を示しており、大変興味深い。

また扇端部の東橋から下流で逆に地下水が河川へ流入する結果、扇状地全体では見かけ上流量変化が少ないことも明らかとなった。こうした地下水の湧出区間ではサケの産卵床も多く確認されている (岡本, 2000)。豊平川は市街地の基盤となる扇状地をつくり、今なお地下水との交流を通じ扇状地全体の水循環系や生態系に大きな役割を果たしている。その意味からも、まさに札幌の母なる川 (鮫島, 1983) と言ってよい。

本観測の内、1/10渇水流量を下回る9月の2回の観測での伏没量は0.5 m<sup>3</sup>/s前後と、他観測に比べて少ない傾向があった。本観測の回数のみからは渇水時に伏没量が少なくなると断定できないが、その要因として渇水により地下水が低下し河川水と分離した (不飽和帯が形成された) 可能性や、流速低下に伴う河床の細粒分の沈積や藻など微生物による目詰まりが進行した可能性などが推測される (例えば、片貝ほか, 2006; Ryan and Packman, 2006; Goldschneider *et al.*, 2007)。渇水流況における伏没量の変化があるとすれば、河川環境や地下水系の保全、低水管理計画に大きな影響を及ぼす可能性がある。このため、異なる流況での観測の蓄積や、

周辺の地下水その他の調査によるメカニズムの解明が今後の課題である。

過去の同時流量観測 (尾崎ほか, 1965; 田中ほか, 2009) では、伏没量はその時の流量に応じて増大する可能性を指摘している。河川流量の増加は、地下水への動水勾配や側方への浸透面積の増加、河床の目詰まりの解消など、伏没量増加に繋がる可能性はありうる。ただし、本観測では1/10渇水流量を下回る9月の2回の観測を除けば、伏没量と流量の相関は明瞭でなかった。低水流況を対象とした本観測では、観測時の河川水位の最大最小の差が0.2 m程度であったため、この程度の変化であれば伏没量の変化は明瞭に現れなかったと考えられる。また現行法による過去の観測では、本研究での比較から水深や流速の複雑な分布が影響し流量が大きめに観測される傾向があった。この傾向は流量が多くなるほど、あるいは礫床が粗く急勾配な上流ほど大きくなるため、過去の観測において流量が多くなるほど上下流の流量差 (伏没量) が大きくなる関係は説明される。なお、本観測法は渡搬可能な低水流況時を対象としたが、融雪時や出水時には河川水位が数m以上上昇するため、伏没条件は大きく異なると予想され、こうした融雪時や出水時の伏没量の評価も今後の課題である。

## V. おわりに

地下水との交流が活発な扇状地河川において、流量変化と伏没量を把握する同時流量観測を行う際には、伏没量を把握できる観測精度と定常性を確保する効率性の両立が課題となる。ISOによる観測流量の不確定値は精度の高い流速計と適切な流速測線の配置によって低く抑えることができる。本研究では、可搬式ドップラー流速計 (ADV) の採用と、流量分布に応じた細密な測線分割 (22以上の測線分割数と区分流量の全流量との比5 %以下を目標) を組み合わせた同時流量観測を提案した。

豊平川への適用結果から、得られた流量は不確定値2-3 %に留めつつ、日4-6地点連続的に観測可能なことから、その有効性が実証された。豊平川の流量減少は、南19条大橋から南大橋までの約1.5 kmで顕著で、その間の伏没量は約1 m<sup>3</sup>/sと札幌市の地下水揚水量の約8割に達し、扇状地の重要な地下水涵養源であることを改めて示した。一方、扇状地全体を流れる過程では、東橋付近を境として流量の増減が



相殺されるため、流量変化が見かけ上小さくなることも分かった。また1/10濁水流量を下回る流況では伏没量が減少する可能性が指摘され、今後、その実態把握とメカニズムの解明が望まれる。同一地点・流況での現行法との比較では、現行法の不確定値は7-9 %に達し、伏没量と同等となるため、豊平川に現行法を適用した伏没量評価は難しくなる。また流速プロファイラー (ADCP) の場合、水深が一定以上 (本観測の場合0.3 m以上) ある区間の流量は本観測法 (ADV) による結果とほぼ一致したが、浅水深の区間では不感帯に起因する流量欠損が生じ、豊平川では上下流を通じて全体に少なめの値となった。比較した観測条件では本観測法がより適する結果となったが、現行法も伏没量が相対的に多い河川では不確定値を考慮した上で適用可能である。またADCPもより短期間で多点の観測が必要な場合や、渡搬できない水深や流速の場合などでは有効性がより高まると考えられる。

## 謝辞

国土交通省北海道開発局札幌開発建設部の関係各位には観測に際して便宜を図るとともに、現行法による流量観測データなど貴重な資料を提供して頂きました。北海道河川開発 (株) には同時流量観測に際して多大なご協力を頂きました。(株) 北開水工コンサルタントには流速プロファイラーの観測にご協力頂きました。ここに記して謝辞といたします。

## 引用文献

- Goldschneider AA, Haralampides KA, MacQuarrie KTB. 2007. River sediment and flow characteristics near a bank filtration water supply: implications for riverbed clogging. *Journal of Hydrology* 344: 55-69. DOI: 10.1061/j.jhydrol.2007.06.031.
- Healy RW. 2010. *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge University Press: Cambridge; 74-96.
- ISO748. 2007. *Hydrometry - Measurement of Liquid Flow in Open Channels Using Current Meters or Floats, Fourth edition*. ISO: Geneva; 46.
- 片貝武史・萩田章仁・鷺見哲也・辻本哲郎 2006. 水際河床間隙の目詰まりに関する実験的研究. 水工学論文集 50: 241-246.
- 榎根 勇・山本荘毅 1971. 扇状地の水循環. 古今書院; 94-96.
- 建設省河川局 1997. 改訂新版国土交通省河川砂防技術基準同解説調査編. 山海堂; 591.

- 国土交通省河川局 2008. 正常流量検討の手引き (案). 国土交通省; 51-52.
- 国土交通省北海道開発局 2006. 石狩川水系豊平川河川整備計画. 国土交通省; 77.
- 岡本康寿 2000. 豊平川におけるシロザケ産卵床の分布 (1988, 1999年度) 一魚道の設置による分布状況の変化一. 札幌市豊平川さけ科学館館報 12: 20-32.
- 尾崎次男・岸 和男・狛 武・横田節也 1965. 豊平川扇状地および登寒川扇状地の地下水一主として地下水供給量について一. 地質調査所月報 16 (1): 1-24.
- Rehmel M. 2007. Application of acoustic doppler velocimeters for streamflow. *Journal of Hydraul Engineering* 133: 1433-1438. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9429(2007) 133:12 (1433).
- Ryan RJ, Packman AI. 2006. Changes in streambed sediment characteristics and solute transport in the headwaters of Valley Creek, an urbanizing watershed. *Journal of Hydrology* 323: 74-91. DOI: 10.1061/j.jhydrol.2005.06.042.
- 鮫島惇一郎 1983. 水と緑. 札幌文庫24 札幌と水 (札幌市教育委員会編), 北海道新聞社; 64-78.
- 札幌市環境局 2008. 札幌市の環境一大気・水質・騒音等のデータ集一 (平成20年度測定結果). 札幌市; 159-160.
- 佐々木崇二 1974. 扇状地河川の伏没量について. ハイドロロジー 6: 35-38.
- Scanlon BR, Healy RW, Cook PG. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10: 18-39. DOI: 10.1007/s10040-0010176-2.
- SonTek/YSI. 2009. *FlowTracker Handheld ADV Technical Manual*. SonTek/YSI: San Diego; 2.
- Stone MC, Hotchkiss RH. 2007. Evaluating velocity measurement techniques in shallow streams. *Journal of Hydraulic Research* 45: 752-762. DOI: 10.1080/00221686.2007.9521813.
- 庄川扇状地水環境検討委員会 2004. 流域における健全な水循環系の構築に向けて一富山県庄川扇状地一総括報告書概要版. 国土交通省; 33-35.
- 田中雅基・吉田晃啓・西村弘之 2009. “豊平川の低水管理に向けた伏没現象解明への取り組み一扇状地における地表水と地下水の交流について一”, 第52回 (平成20年度) 北海道開発技術研究発表会, [http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/gijyutu/giken/h20\\_pre\\_intra/pdf\\_files\\_h20/gijyutu/GT-4.pdf](http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/gijyutu/giken/h20_pre_intra/pdf_files_h20/gijyutu/GT-4.pdf). (参照: 2011/05/18).
- Turnipseed DP, Sauer VB. 2010. *Discharge Measurements at Gaging Stations*. USDI/USGS: Reston; 87.
- 手計太一 2010. ADCPを利用した流況・流量観測事例一内川と黒部川一. 河川流量観測の新時代 (水文・水資源学会研究グループ「河川流量観測高精度研究会」編), 水文・水資源学会; 56-65.
- 豊田政史・平良綾子・正田 真・宮原裕一 2010. ADCPを用いた諏訪湖における流動観測. 陸水学雑誌71: 45-52.
- Weight WD. 2008. *Hydrogeology Field Manual, Second Edition*. McGraw-Hill: New York; 242-249.
- 山口久之助・小山内 照・佐藤 巖・二間瀬 洸・小原常弘・早川福利・横山英二 1965. 北海道地理地質図幅説明書 第8号 札幌別冊 札幌周辺の地盤と地下水. 北海道立地下資源調査所; 52-54.

(受付: 2011年5月19日, 受理: 2011年12月6日)

## Quantification of Longitudinal River Discharge and Leakage in an Alluvial Fan by Synoptic Survey Using Handheld ADV

Yoshitaka SAKATA <sup>1), 2)</sup>     Ryuji IKEDA <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Graduate School of Science, Hokkaido University  
(Kita-10 nishi-8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan)

<sup>2)</sup> Environmental Engineering Division, Geotechnical Department, Docon Corporation  
(Atsubetsu-Chuo 1-5, Atsubetsu-ku, Sapporo, Hokkaido 004-8585, Japan)

<sup>3)</sup> Faculty of Science, Hokkaido University  
(Kita-10 nishi-8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan)

Synoptic surveys, conducted using stream gauging at several stream cross sections during a short period, are often applied to quantify rates of river loss and gain. In the alluvial fan, the complexity and variation of depth and velocity distributions cause unacceptable uncertainty of river discharge. A synoptic survey was developed for this study to obtain greater accuracy and efficiency using a handheld acoustic doppler velocimeter (ADV) and proper arrangements of verticals for discharge distribution in each cross section. Applied to the Toyohira River in Sapporo City, continuous measurements were taken at 4-6 stations each day, yielding ISO uncertainties of discharge of approximately 2-3 %. The synoptic survey showed its required accuracy and practical availability. It revealed the longitudinal river discharge and leakage of the Toyohira River. The distinct losing reach was only about 1.5 km between the Minami 19-jo Ohashi Bridge and the Minami Ohashi Bridge. The mean leakage was about 1 m<sup>3</sup>/s, showing agreement with about 80 % of the pumping rate in the city. The total budget between the Kariki and the Moiwa Stations was too little to be observed because of a change in a river-leakage pattern from loss to gain around the Azuma Bridge. Compared with consistent flow conditions, the measurements using conventional methods with a propeller-type current meter included high uncertainties of no less than 7-9 %. Measurements obtained using the acoustic doppler current profiler (ADCP) showed agreement with the measurements obtained using ADV in deep water conditions: depth greater than 0.3 m. In the low discharge condition of the Toyohira River, however, the total discharge by ADCP was lower in each section for this study because of the shallow water limitation of the instrument.

**Key words :** synoptic survey, alluvial fan, Toyohira River, river leakage, acoustic doppler velocimeter