

ADCPを利用した水理・水文観測事例 —塩水楔と失水・得水量—

CASE STUDIES OF HYDRAULIC AND HYDROLOGIC OBSERVATION USING
THE ADCP —SALT WEDGE AND INFLUENT AND EFFLUENT DISCHARGE—

手計太一¹
Taichi TEBAKARI

¹正会員 博(工) 富山県立大学講師 工学部環境工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

This paper reports the example of the flow regime and discharges observation in the Uchikawa River and the Kurobe River using the ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).

The Uchikawa had been rich and varied river until 42 years ago. Water environment in the Uchikawa has been deteriorated caused by new port construction and well-drained paddy field development. Sanitization program for the Uchikawa has been carried out by national and local government. However, water environment in the Uchikawa did not reach to drastic improvement. In this study, flow regime in the Uchikawa was observed using the ADCP. As a result, the Uchikawa was effected by seawater regularly.

In order to estimated exchange between river discharge and groundwater, simultaneous measurement of river discharge was carried out using the ADCP in the Kurobe River in 2010 and 2011. In this paper, observation method and results were reported in detail.

Key Words : ADCP, salt wedge, influent discharge, effluent discharge, Uchikawa River
Kurobe River, Toyama Prefecture

1. はじめに

近年になって、水理・水文観測においてADCPが活発に利用されている¹⁾。元々は海洋での利用が目的で開発されたが、2011年に浅水深用が開発され、河川や湖沼などにも利用されている。水深が浅く、流速が遅い水域でも観測ができるため、様々な用途に利用できる。

本稿では、上述の特徴を利用して、河川感潮域における流況観測、そして高速流の河川における流量観測を実施した結果を報告するものである。

2. 塩水楔

河川感潮域における塩水浸入は、治水、利水、環境のいずれにおいても複合的に様々な問題を引き起こしている。塩水浸入の混合形態については、古くから多くの研究が実施され、大きく3種類に分けられている。特に、塩水楔は潮位差の小さい日本海側の河川で多く観測されてい

る。それらの観測方法は主に縦断・横断方向に塩分濃度や流速を連続的に計測するものである。また、密度流に関する理論的研究、数値実験や実験室レベルでの研究についても、数多くの既往研究がある。しかしながら、実際の河川における塩水遡上において、細かい時間分解能でかつ連続的な物理諸量の観測事例は極めて少ないのが実情である。本稿は、超音波ドップラー多層流向流速計(ADCP)を用いて塩水浸入時の鉛直方向の流速分布を観測したいくつかの事例を報告するものである。

(1) 観測概要

本研究では、富山県東部に位置する庄川の右支川の一つである内川(射水市)を対象に観測を実施した。流路延長は2.2km、庄川の分岐点から奈呉ノ浦までの西内川は0.7km、富山新港から奈呉ノ浦までの東内川は1.5kmである。本研究では、西内川における塩水浸入を観測した。西内川には、浄化用水として庄川から合計2.9m³/sを導水している。ただし、9時から17時までの運用であり、その他の時間帯は自然流下させている。塩水が遡上するのは17時から翌日9時までの間であるため、本稿ではこ

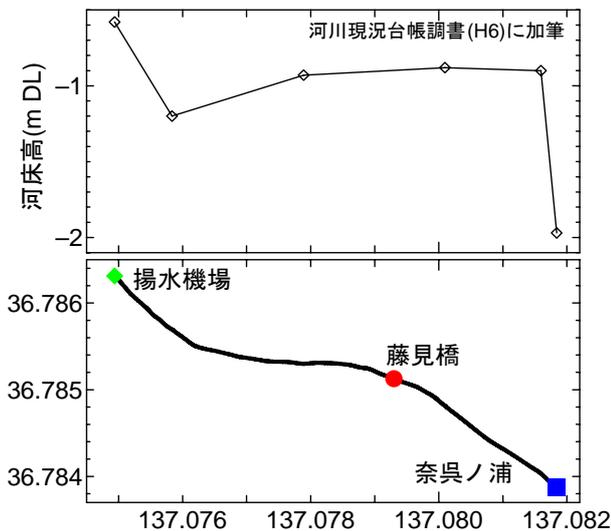


図-1 西内川の平面形状と河床高の縦断変化。

の時間帯の流速分布を示す

図-1に西内川の平面形状と河床高の縦断変化を示す。河口から流路延長267.1mに位置する「藤見橋」においてADCPを用いた鉛直方向の流速分布に関する定点観測を行った。また、図からもわかるように河床勾配は極めて緩勾配である。

表-1はADCPの計測設定条件である。本研究では、河川の流速を3次元で計測できる超音波ドップラー多層流向流速計(ADCP; Teledyne RD Instruments社製)を利用した。

写真-1は定点観測の設置風景である。写真のように、河川中央部にロープで係船し約3日間設置した。この日数は内部メモリーとバッテリーの容量に依存する。

(2) 観測結果

図-2はこれまでに観測を実施した14回の富山湾観測潮位である。2010年8月11日は年間で最も潮位が高い日であり、2月から3月は潮位が最も低い時期である。観測した中で最も潮位の高い2010年8月11日と最も低い2011年2月22日、そして上げ潮時のデータの一つである2010年6月21日の鉛直方向の流速分布の時系列を図-3に示す。図中の赤色系は順流、青色系は逆流(河口からの遡上)を示している。前述したように8月11日は年間最高の潮位があるため、庄川からの揚水を行っていない。そのため、表層塩分と低層塩分の比が大きく、強混合形態で遡上している。一方、他の2つについては、明瞭な楔状に塩水が遡上していることがわかる。これまでの観測においては、8月11日を除いた全ての観測で同様の流速分布が観測された。特に、上げ潮時には極めて明瞭な楔形状が認められる。さらに、塩水が浸入し始めてから約2時間後、順流と逆流を周期的に繰り返すような挙動が認められる。このような周期性は翌日9時まで続いている。

次に、図-4は水深22cm, 55cm, 85cmにおける流速の時系列である。水深22cmは上層の順流、85cmは下層の

表-1 ADCPの計測設定条件。

Workhorse ADCP 1200kHz			
計測モード	WM11	ウォーターピング数	3
計測層厚	0.05~0.03m	ボトムトラック機能	ON
計測層数	50	ボトムピング数	3
アンサンブルタイム	0.43~1.37s	固定観測における流速誤差の標準偏差	0.77cm/s



写真-1 藤見橋における定点観測の様子。

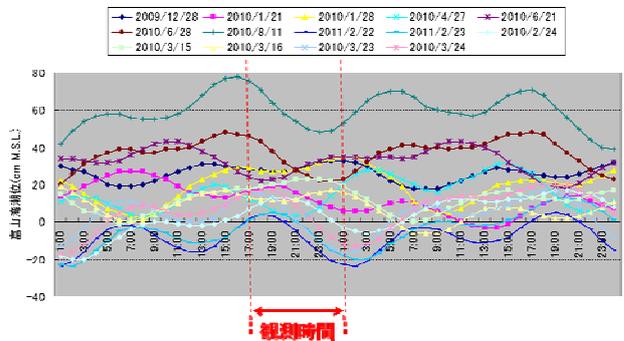


図-2 富山湾観測潮位。

逆流、そして55cmは界面付近を想定している。ここからもわかるように、19時以降はいずれの断面においても、全体的に周期性を持った流速変化をしている。塩水が遡上し始めてから5時間程度経過すると、いずれの断面も流速値は同程度になっている。図-5は長時間の観測を実施した8回の観測について、それぞれ水深50cmの流速の時系列である。前述したような周期特性は、振幅の大小はあるものの、いずれの観測においても認められる。図-4中の水深55cmにおける流速についてスペクトル解析を行った結果を図-6に示す。35.53分に顕著な周期性が認められた。

図-7は17時から9時まで1時間毎の流速の鉛直プロファイルである。17時の時点では、揚水の影響を受けている

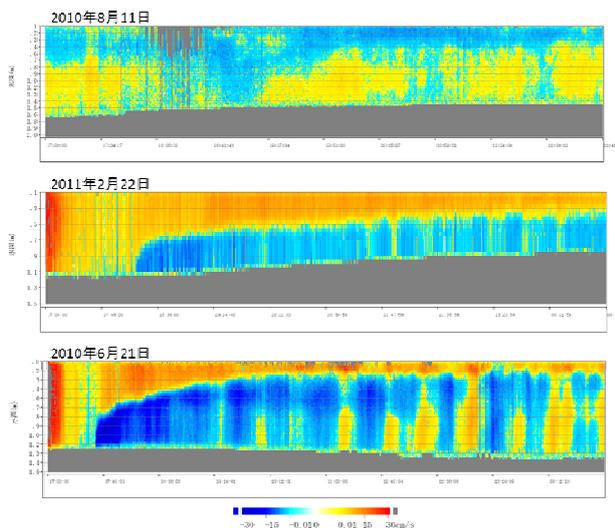


図-3 鉛直方向の流速分布の時系列。

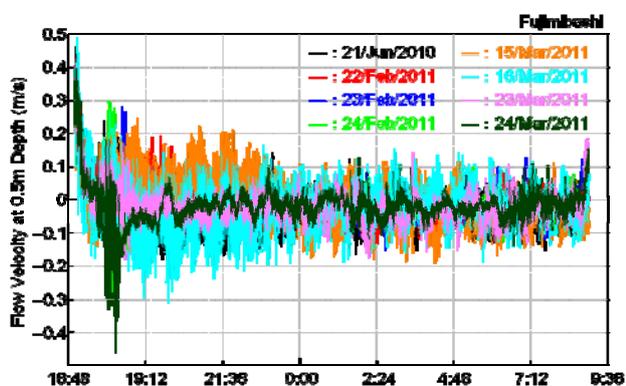


図-4 水深22cm, 55cm, 85cmにおける流速の時系列。

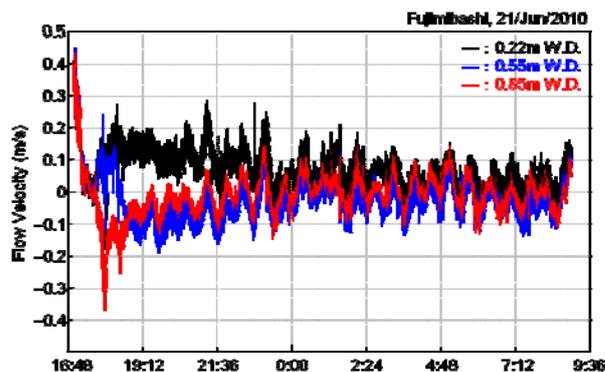


図-5 8回の観測について、水深50cmの流速の時系列。

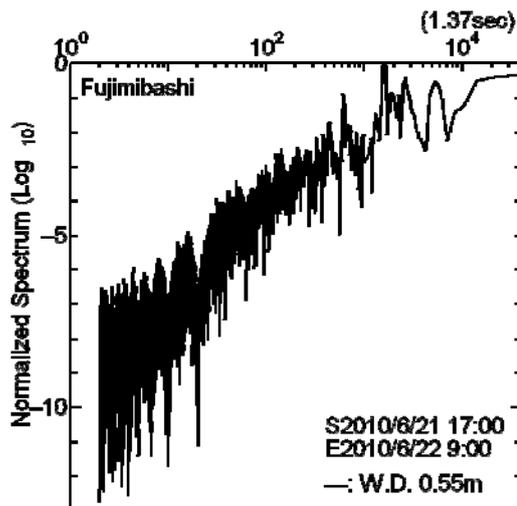


図-6 図-4中の水深55cmにおける流速についてのスペクトル強度。

ため全断面において順流である。18時に下層で最大0.27m/sの逆流が観測されており、塩水が遡上していることがわかる。塩水遡上の先端以降は、分布形状がゆるやかになり、逆流の最大流速は50cm付近に位置している。前述したように、周期的に流速分布が変化していることを反映して、流速値の変動はあるものの、表層付近と水深50cm付近と水深80cm付近の3箇所に変曲点を持つような流速分布形状をしている。

(3) まとめ

感潮河川における塩水の浸入形状をADCPを用いて観測した。その結果、時間分解能が小さくかつ連続的に塩水遡上中の鉛直方向の流速分布を捉えることができ、簡易的にも塩水浸入の混合形態を判別できる可能性が高い。本稿では、塩水楔が浸入中の鉛直方向の流速分布を明らかにし、さらに、塩水浸入時において周期的な流速変化があることがわかった。

3. 黒部川下流部における失水量と得水量

著者らのグループでは、黒部川の河川流量がどの程度黒部川扇状地地下水へ涵養されているかの定量評価を行うため、定期的に同時流量観測を実施している³⁾。ここでの「同時流量観測」とは、本当に同時刻に複数断面において同時にADCPを利用して流量観測をすることである。決して、河川の定常性を仮定して異なる時刻に順番に流量観測を実施することではない。

これまでに2010年6月8日、2010年9月21日、2011年7月3日の3回実施した。観測の概略については既報を参照されたい³⁾。本稿では、得られた観測流量データを報告するとともに、新たに発生した観測の課題について詳述する。

(1) 黒部川流域

図-8は本研究対象である黒部川水系と流域界である。本稿では黒部川扇状地も黒部川流域内として流域界を描いている。黒部川は北アルプスのほぼ中央に位置する鷲羽岳を源とし、3000m級の山々が連なる立山連峰と後立山連峰を流域にもつため、平均河床勾配が1/5~1/119と

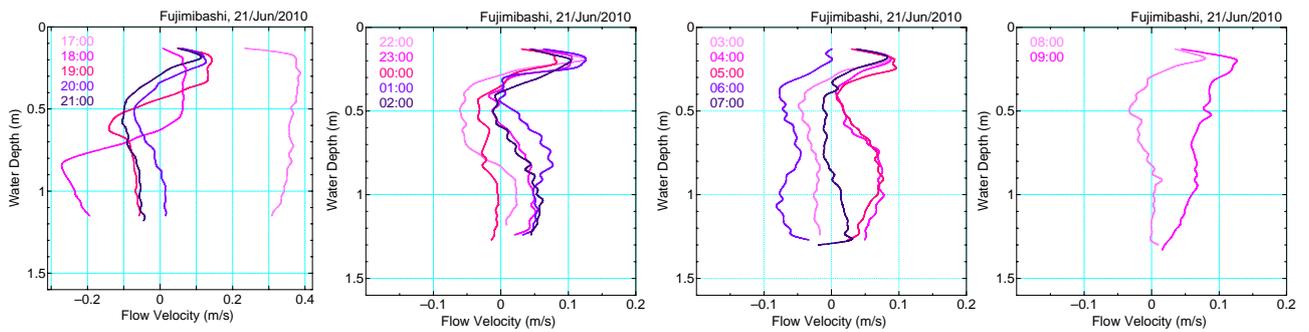


図-7 17時から9時まで1時間毎の流速の鉛直プロファイル。

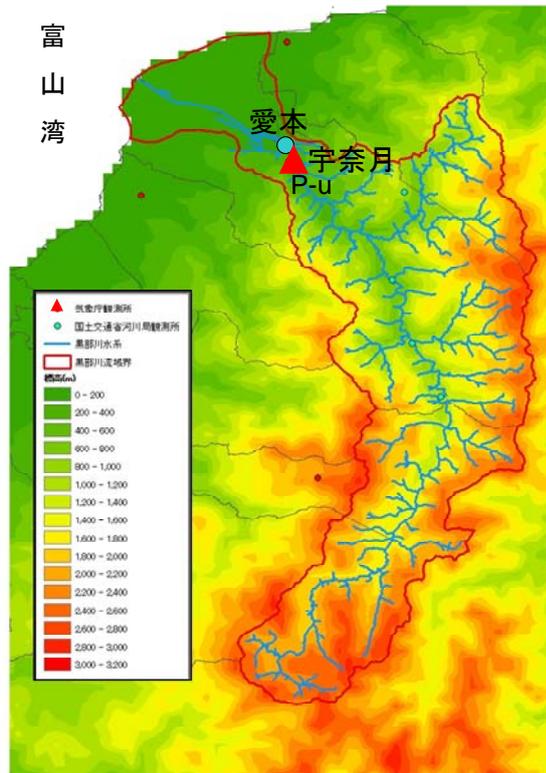


図-8 黒部川水系と流域界。

いう我が国屈指の急流河川の一つである。深い峡谷を流下し、黒部ダム、仙人ダム、小屋平ダムを経て宇奈月町に達する。宇奈月から下流の川幅は広くなり、大きく蛇行しながら愛本にいたる。愛本には1932年に建設された合口頭首工があり、両岸に広がる扇状地に向けて灌漑用水が取水されている。右岸に7用水、左岸に6用水を合口し、最大取水量は $75.4\text{m}^3/\text{s}$ である⁴⁾。

黒部川は宇奈月町愛本で山間地から平野部に抜け、そこから黒部市、入善町にかけて黒部川扇状地と呼ばれる美しい扇状地を形成している。この大扇状地を抜けると富山湾にいたる。黒部川の幹川流路延長は85km、そのうち83.5%を占める71kmは山地を流れ、残り14kmは平地を流下している。流域面積は 682km^2 、そのうち97.1%は山地である。

黒部川流域は全国有数の多雨多雪地域であり、流域の年平均降水量が非常に多く、平野部にある黒部市では約



図-9 黒部川における流量観測地点。

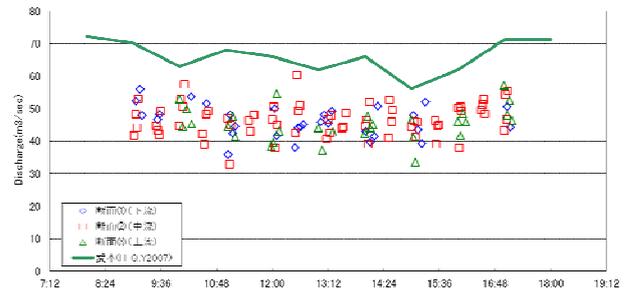


図-10 2010年6月8日の流量観測の結果。

2300mm、中流部にあたる宇奈月では約3500mm、上流部にある仙人谷観測所では約4000mmの降水量がある。

黒部川扇状地は山間部から抜け出た河川が河床の傾斜が緩やかになることによって、流れも緩やかになり、土砂が堆積して形成された地形である。黒部川の扇状地は上流の花崗岩地帯から流出してきた透水性の良い土砂を含むため、黒部川の水が伏流水となって地下水を涵養している。したがって、この扇状地では黒部川の伏流水を水源とした湧水がいたるところで湧き出ている。

黒部平野の地形は、扇状地東側の愛本新から金山にかけて旧扇状地からなる砂礫台地が分布し、その西端では崖を形成し新扇状地と接しており、この台地の東側には小川流域の平野がある⁵⁾。一方、扇状地の南側には下立から浦山にかかる部分と前沢周辺とに砂礫からなる洪積台地が分布しており、その背後にはかなり開析の進んだ高位の砂礫からなる洪積台地がある。

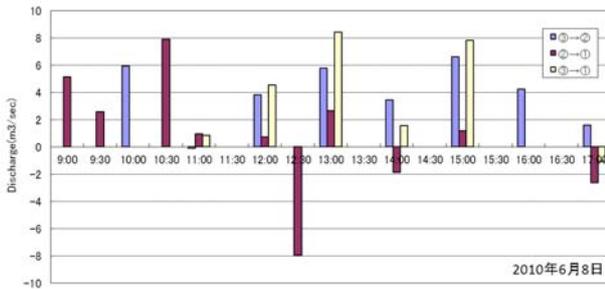


図-11 30分毎平均流量観測データの変化。

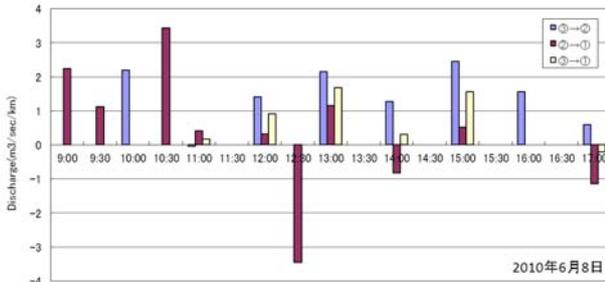


図-12 1kmあたりの失水量と得水量の変化。

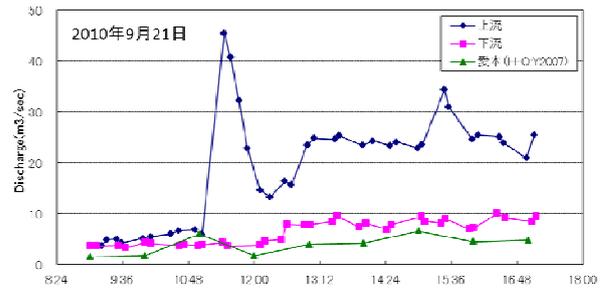


図-13 2010年9月21日の流量観測の結果。

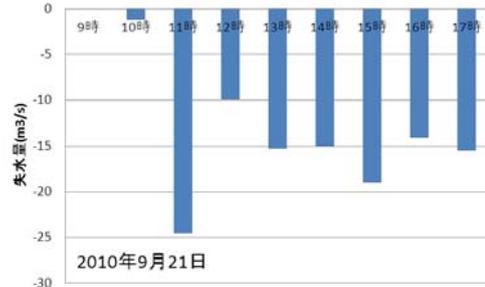


図-14 2010年9月21日の流量変化の時系列。

(2) 流量観測結果

図-9は同時流量観測を実施した観測断面を示している。図中の数字は河口からの距離を示している。断面①と断面②の間の距離は2.3km、断面②と断面③の間の距離は2.7kmである。それぞれの区間の流量変化を捉えようという試みである。いずれの地点においても、河床勾配は約1/90であり、非常に急峻である。

図-10は2010年6月8日に実施した同時流量観測の結果である。図中の太線は、国土交通省の愛本観測所における水位データから2007年のH-Q関係を利用して算出した流量の時系列である。愛本での流量は60~70m³/s程度であるのに対して、そこから約1.1km下流の断面③は40~50m³/s程度であり30~10m³/s程度が失水している計算になる。しかし、黒部川が極めて大きい透水性の河床であっても、この失水量は過大であろう。いずれかの流量観測結果が過大もしくは過小であったことが考えられる。これまでのところ、どちらが過大/過小であるのかを評価できていない。

次に、ADCPだけで流量観測を行った断面①、②、③の流量データに着目する。断面①の平均値は46.1m³/s、最大値55.9m³/s、最小値は35.8m³/s、断面②の平均値は46.6m³/s、最大値は60.4m³/s、最小値は33.0m³/s、断面③の平均値は45.3m³/s、最大値は57.2m³/s、最小値は33.6m³/sである。各断面の最大値と最小値の差は25.6~20.1m³/sである。半日の中でも、これだけ大きい流量の変動があるのは、扇状地性河川に依るものであろう。黒部川は扇頂部から河口に至るまで、河道内はいくつもの網状河川になっており、流量の算出が非常に難しい。本

研究では、河道内を一本の川道になっている箇所を選んで流量観測を行っているが、季節によっては観測には不適切な断面になることもある。

図-11は9時から30分毎に観測した2~4観測データ(1往復もしくは2往復したデータ)の平均値を時系列にしたものである。図中の縦軸のプラスは得水量、マイナスは失水量を意味している。全体的に、下流にしたがって得水している傾向にある。しかし、時間帯によっては、断面②から断面①の区間では失水している。一方、断面③から断面②にかけては観測時間を通して得水している。

図-12は図-11を1kmあたりの得水量/失水量に換算したグラフである。全体に、得水量、失水量ともに最大で約3m³/s/kmである。断面③から断面②の区間では平均すると1kmあたり1.5m³/sが得水している。既往研究によっても、黒部川は全域にわたって河川と地下水の交流が盛んであり、特に渇水期には極めて多くの河川水が地下水を涵養していることが報告されている⁹⁾。

図-13は2010年9月21日の流量観測データである。ここでも同様に愛本観測所における流量データは2007年のH-Q関係から算出したものである。この観測では、観測スタッフ数の問題から、断面③(上流)と断面①(下流)の2断面での観測を実施した。午前11時頃に大きな出水を観測しているが、これは上流ダムの放流に依るものである。愛本観測所のデータは1時間値であるため、この出水を反映できていない。出水前後の上流と下流の流量を比較すると、出水前は上流と下流の流量に大きな差はないものの、出水後はその差が非常に大きい。

図-14は図-13のデータを毎正時に平均して、上流と下流の流量変化を算出したものである。上流のダムからの

放流があったという特殊な事情はあるものの、全時間を通してこの区間では失水していることがわかる。最大で約25m³/sにも達し、1kmあたりに換算すると約5m³/sである。極めて大量の河川水が地下へ涵養されていることがわかる。

(3) 観測方法における新たな問題点

2011年7月3日に実施した同時流量観測では、大きな問題が発生した。当初、総勢15名のスタッフを揃え、前年と同様に各断面7名体制で臨んだ。しかしながら、想定以上の流量、流速を観測し、1断面に10名以上のスタッフが必要となった。その観測風景を写真-2に示す。片岸に6名が必要であった。この現場のように、橋桁等の河川横断構造物がない場合には、両岸から牽引しなければならない。川幅が広くなると、牽引ロープが川の流れに巻き込まれ、極めて大きい流体力が掛り重たい負担になる。また、流速が早くなると、ADCPのボートの揺動が大きくなり、バッテリー接続部の接触不良でデータ欠測が発生した。

このように、観測機材の性能が高くても、それを使う状況が異常であると、その性能を活かすことができない。観測そのものの態勢づくりを強化しないとより精度の高い観測データは得られない。

4. 最後に

本稿では、著者らのグループが実施している内川における流況観測の結果の一部と黒部川における同時流量観測の結果の一部を報告した。いずれにおいても、まだ多くの解析が必要であり、検討、議論の余地がある。

一方、観測手法に着目すると、これまでにない観測結果が得られる方法を明示したとともに、新たな観測の問題点が得られた。今後、特に、新たに得られた問題点を克服し、新しい科学的発見に寄与したい。

謝辞：本研究の一部は、(財)河川環境管理財団の河川整備基金助成事業と科学研究費助成事業(若手研究B)の支援を受けた。また、観測においては、富山県立大学環境



写真-2 2011年7月3日の観測風景。

工学科と中央大学河川・水文研究室の学生諸氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 水文・水資源学会研究グループ「河川流量観測高精度化研究会」編：河川流量観測の新時代, 93pp, 2010.
- 2) 小松利光, 孫双科, 安達貴浩, 松岡弘文, 大和則夫, 朝位孝二: 川内川河口部における塩水遡上について, 水工学論文集, 第40巻, pp.493-498, 1996.
- 3) 中村宏, 稲松敏夫: 神通川河口の塩水くさびについて, 第13回海岸工学講演会講演集, pp.295-301, 1966.
- 4) 手計太一: ADCPを利用した流況・流量観測事例～内川と黒部川～, 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化研究会」編, pp.56-65, 2010.
- 5) 富山県立大学工学部環境工学科編: 新富山の水環境, (有)TC出版プロジェクト, 2009.
- 6) 藤井昭二: 黒部川扇状地の形成と富山湾周辺部の埋没林について, 地球科学, 78, pp.11-20, 1965.
- 7) 根勇編著: 実例による新しい地下水調査法, 山海堂, 171pp, 1991.

(2011. 7. 31受付)