

◆ 特集：新しい流量観測への取り組み ◆

非接触型流速計測法の開発

大手方如^{*1} 深見和彦^{*2} 吉谷純一^{*3} 東 高德^{*4} 田村正秀^{*5} 和田信昭^{*6}
 淀川巳之助^{*7} 中島洋一^{*8} 小松 朗^{*9} 小林範之^{*10} 佐藤健次^{*11}

1. はじめに

我が国の洪水流量観測は、一般に浮子測法に基づいて実施されているが、浮子観測法を補完し、さらに将来的には流量観測のコスト縮減やリアルタイムの流量値配信などを行うことが出来るシステムを構築する目的で、独立行政法人土木研究所(前国土交通省土木研究所)、(財)土木研究センター、(株)アジア航測、(株)小糸製作所、(株)拓和、(株)横川電子機器、(株)東京建設コンサルタントの計7機関は非接触型流速計を用いた流量計測法に関する共同研究を平成11年度～平成13年度にかけて行ってきた。本共同研究では、各社のシーズとなる技術をブラッシュアップし、既存の流速計と同程度の性能を有するまでに改良し、それを実証した。本報文はその成果の一部をとりまとめたものである。

2. 各流速計の概略

本共同研究においては、ドップラー効果を用いた流速計2種類(電波型、超音波型)、画像処理を用いた流速計2種類(PIV型、オプティカルフロー型)の計4種類を、河川流量観測用流速計として研究・開発した。これらの機器の共通の特徴として、無人で連続的にリアルタイムの流量値を得ることができる、光ファイバ等を用いた情報電送装置との併用により、管理事務所等の遠隔地でも情報を入手することができるといったことがあげられる。以下に、これら装置の概要を示す。

2.1 電波型流速計

電波流速計は、橋梁等、河川横断方向に固定して設置された数台の電波受発信器を用いて、マイクロ波のドップラー効果により、表面流速を時間的に連続して無人観測する装置である。受発信器の台数を変えることにより、小河川から大河川まで対応することができる。

2.2 超音波流速計

超音波流速計は、橋梁等、河川横断方向に固定して設置された数台の超音波受発信器を用いて、超音波のドップラー効果により、表面流速を時間的に連続して無人観測する装置である。受発信器の台数を変えることにより、小河川から大河川まで対応することができる。

2.3 PIV 流速計

PIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像速度計測) 流速計は、河岸等に設置されたカメラを用いて、時間の経過に従って変化する水面を撮影した動画画像から、画像上の小領域パターンが Δt 時間後に移動した量をパターンマッチングにより検出することで表面流速を計測する装置である。河道幅が200m以下であれば、河道の兩岸にカメラを設置することで橋梁等の構造物がないところでも観測が可能である。

2.4 オプティカルフロー流速計

オプティカルフロー流速計は水面の動画画像から各点(画素)の濃淡の空間的変化と時間的変化を調べ、各点がどの方向へどのくらいの速さで移動したかを求める装置である。すなわち、撮影した画像上の画素は256段階の濃淡情報(白黒)に変換され、時刻 t の画面上における濃淡のパターン(勾配)が、次の画像(時刻 $t + \Delta t$)において、どこにどのくらい移動したかを求めることにより、流速を計測するものである。

3. 室内実験における表面流速精度の研究

3.1 実験1(表面流速の計測精度の評価)

まず、以下に示す室内実験によって、各流速計測法の表面流速の基本的な計測精度を検証した。使用する水路は、国土交通省国土技術政策総合研究所内の拡散実験水路とした(図-1)。

実験では、計測する流速規模として3ケースを設定し、各流速計測手法を用いた表面流速を、トレーサ(50mm×50mm×2.5mmのコルク片)の

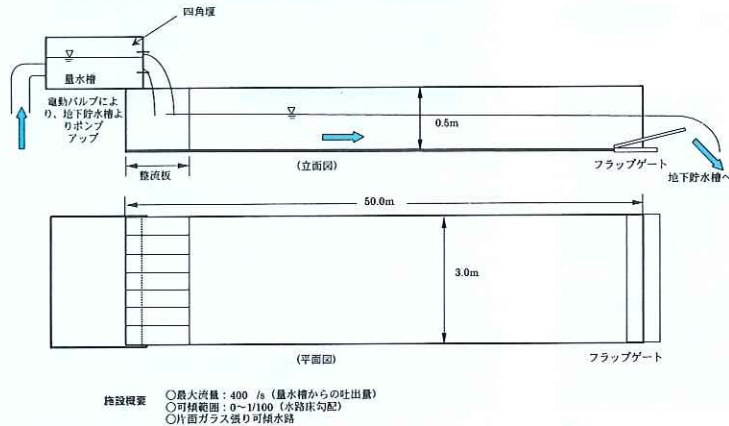


図-1 拡散水路概略図

速度と比較することにより検証した。図-2~5に各流速計の計測値の1分間の移動平均値とトレーサ流速の1分間の移動平均流速との相関を示す。これらより、ドップラー型の計測法が画像処理型

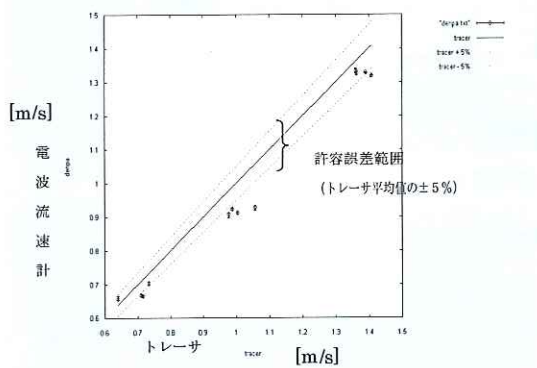


図-2 電波流速計とフロートの相関図

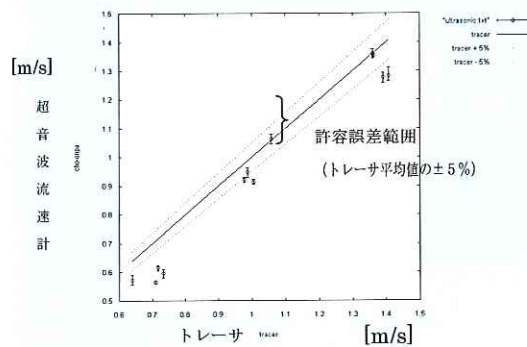


図-3 超音波流速計とフロートの相関図

の計測法よりも計測値の誤差が低く、計測値も安定していることがわかる。しかし、全ての流速値はトレーサの速度の±5%以内に計測値が収まっており、室内実験においては5%程度の精度が確保できていることが確認できた。

3.2 実験2 (風の影響に関する調査)

次に、風が吹いている状態における各流速計測法の精度について検討した。

図-6に示すように、風がある時には風の影響で水の流れの表面に吹送流が発生し、実際に測定される表面流速は、無風時の流速に吹送流が加わった値になると考えられる。

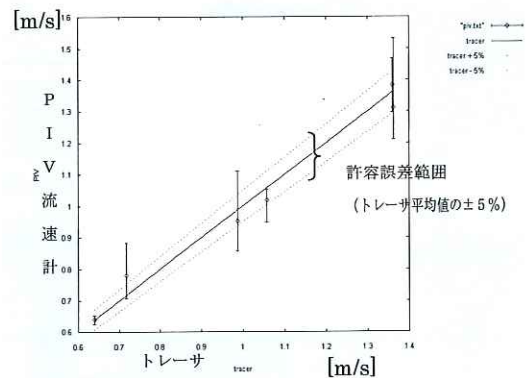


図-4 PIV 流速計とフロートの相関図

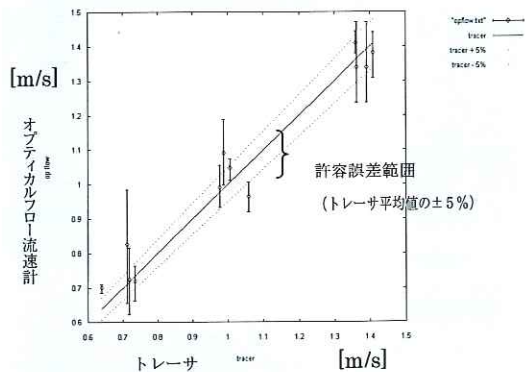


図-5 オプティカルフロー流速計とフロートの相関図

図-1~4内のエラーバーは各流速計の測定値のばらつきを、破線はトレーサの測定誤差を考慮した場合の±5%の範囲を示す。

そこで、土木研究所内の拡散実験水路に風洞を設置し、以下の実験を行った。なお、実験装置の概略図は図-8～9のとおりである。

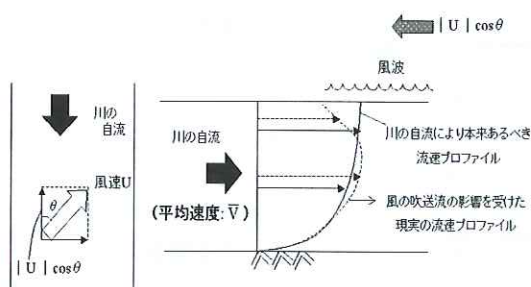


図-6 風の影響を受けた鉛直方向流速プロファイルの概念図(逆風の場合)

固定座標系から見た風波の速度 C は、以下のように構成される。

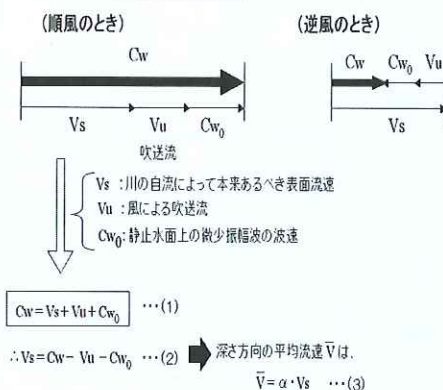


図-7 風の影響の除去方法

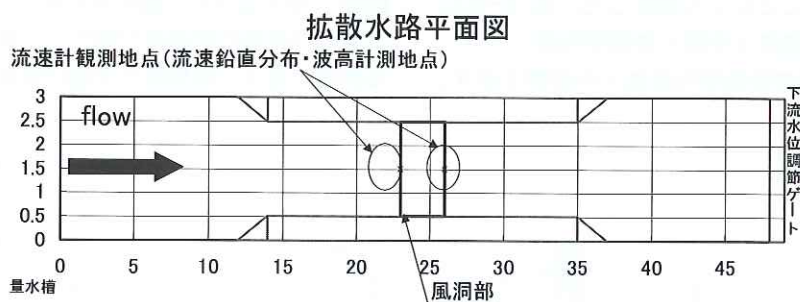


図-8 実験水路概略図 1

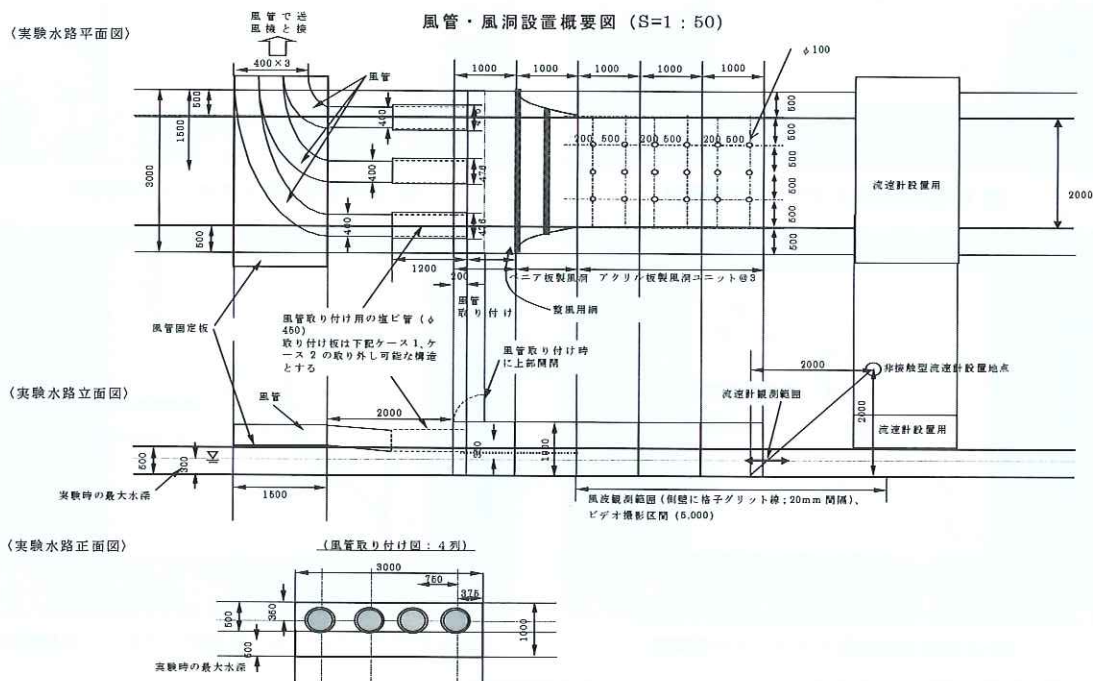


図-9 実験水路概略図 2

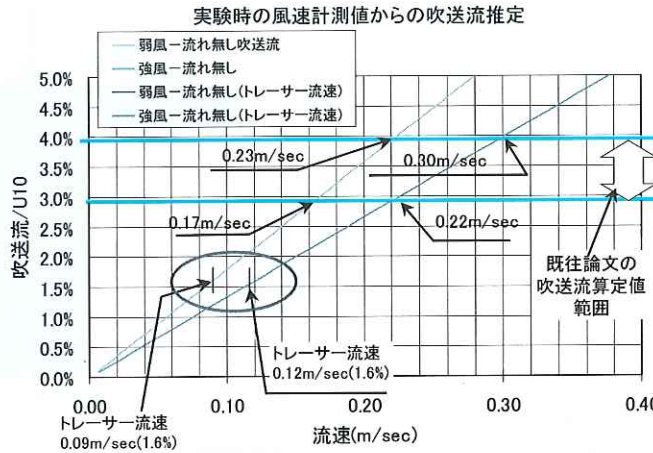


図-10 盛衰時における風の影響の比較

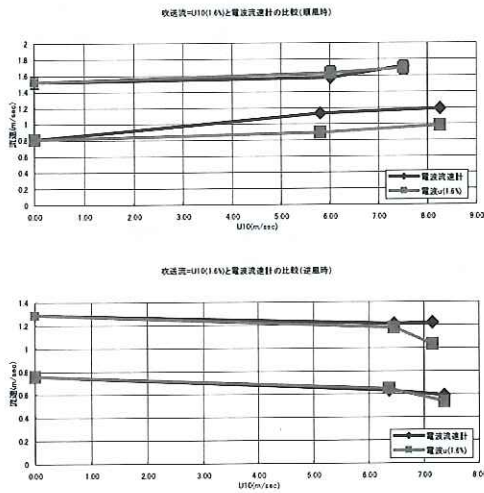


図-11 電波流速計の吹送流除去結果

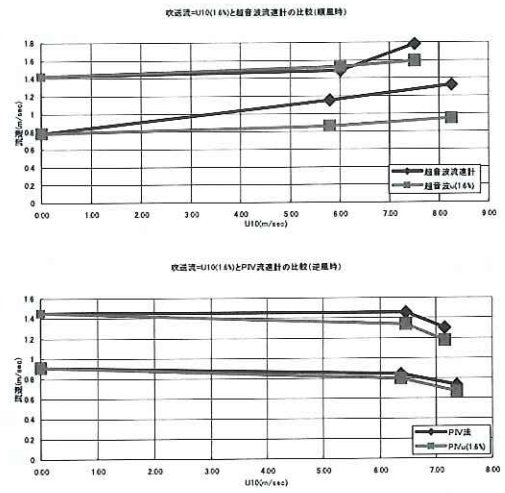


図-13 PIV 流速計の吹送流除去結果

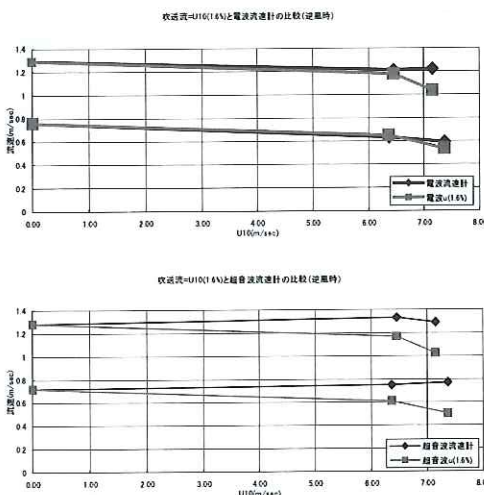


図-12 超音波流速計の吹送流除去結果

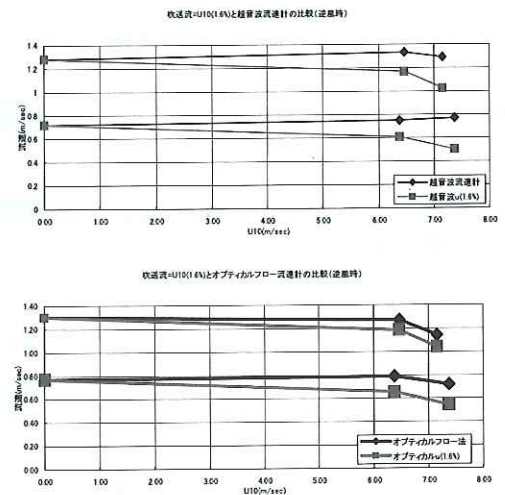


図-14 オプティカルフロー流速計の吹送流除去結果

(1) 静水時における風の影響について

図-10 に静水時のトレーサ流速と吹送流の関係を求めた実験結果を、既往文献の結果とともに示したものである。なお、風速は弱風時 ($U =$ 平均 5.6m/s) と強風時 ($U =$ 平均 7.53m/s) の2種類で実験している。

既往論文による吹送流速は風速の3~4% (弱風時で $0.17\sim 0.22\text{m/s}$ 、強風時で $0.23\sim 0.30\text{m/s}$) であるのに対し、今回の吹送流速の実測値は弱風時で 0.09m/s 、強風時で 0.12m/s と風速 U の平均1.6%程度となっている。このような結果となった理由として、本実験では既往論文で検討されている吹送距離 (海上) よりも水槽が短かったことが考えられる。

(2) 流れがある場合の計測精度

水の流れがあるときの表面流速は、無風時の表面流速に吹送流による速度が加算された値と考えることができる。そこで、送風時に計測した表面流速計測結果と、無風時に計測した表面流速の計測結果に静水時の実験から推定した吹送流の計算値 (地上10mの風速の1.6%) を加算した値 (以下、計算値という) とを比較検討することとした。その結果を図-11~14 に示す。その結果を要約すると以下のとおりである。

- ① 水の表面流速が大きく、風速が小さい場合、当然のことながら、両者の結果はよく一致する。
- ② 電波流速計では、いずれのケースとも実測と計算値はよく一致している。
- ③ 超音波流速計では、逆風、高風速時に両者に差異が認められる。
- ④ PIV 流速計では、順風、高風速時に両者に差異が認められる。
- ⑤ オプティカルフロー流速計では、順風、高風速時に両者に差異が認められる。

4. フィールドにおける表面流速の観測精度に関する評価

4.1 実験目的

次に、フィールドにおいて、トレーサ (50mm × 50mm × 2.5mm の発泡緩衝材) による表面流速の観測結果と各流速計の計測結果を比較することで、各流速計の観測精度を把握することとした。また、フィールドにおける風の影響についてもあわせて調査した。



図-15 PIV 流速計の吹送流除去結果

4.2 実験概要

4.2.1 魚野川における実験

フィールド試験は、信濃川水系魚野川堀之内地区 (根小屋橋) において、平成12年4月12日および平成13年4月10日に行われた。

現地の観測地点の河道特性は下記のとおりである。

- ① 河床勾配: 1/430 程度
- ② 低水路幅および堤間幅: 約190m
- ③ 観測地点横断形: 単断面

実験では、トレーサ投下装置を用いてトレーサを水面に投下し、表面流速を観測した。また、観測時に橋梁上に設置した風向・風速計により、風向・風速についても記録した。

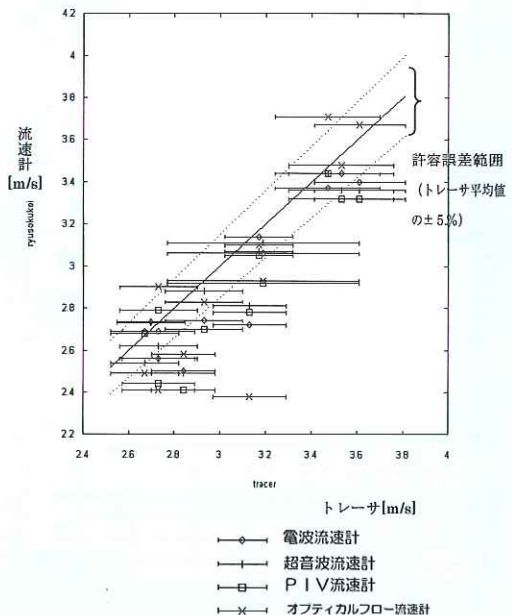


図-16 各流速計と浮子の相関図

4.2.2 利根川における実験

フィールド試験は、利根川水系利根川下流栄橋地点（布川観測所）において、平成 13 年 8 月 23 日に行われた。現地の観測地点の河道特性は下記のとおりである。

- ①河床勾配：1/1,640 程度
- ②低水路幅および堤間幅：約 192m
- ③観測地点横断形：単断面

実験では、トレーサ投下装置を用いてトレーサを水面に投下し、表面流速を観測した。また、観測時に橋梁上に設置した風向・風速計により、風向・風速についても記録した。なお、観測時刻が遅くなったため、画像型の流速計の観測は行わなかった。

4.3 実験結果

図-15 に根小屋橋（魚野川）および布川観測所（利根川）におけるトレーサ流速と各流速計により計測された流速との相関図を示す。なお、図にはトレーサ流速との誤差が 5% になるライン破線で示してある。各流速計の測定値のエラーバーは、トレーサの標準偏差を示す。

グラフより、フィールドにおける観測精度はほぼ、トレーサより求めた流速の 5% 程度に収まっていることがわかった。なお、誤差 5% 以下に収まるデータの割合は、画像型の計測器よりもドップラー型の計測値の方がやや多くなった。また、誤差が 10% を超えるような特に誤差の大きいデータは、すべての計測法でほぼ同じ時刻に発生していることから、この誤差の要因として、トレーサの流下が偏流した、風の影響でトレーサが表面流速と異なる動きをしたなどの理由によるものと考えられる。

4.3.1 実験結果 2(風の影響分析)

次に、図-16～19 に、各フィールド、各計測器における時系列流速分布を示す。なお、図中に示した風速はその流下方向成分（風速コンポーネント）を示している。これらの図によれば、流速の計測値と風速コンポーネントのばらつきの程度には関連性見られない。なお、今回の結果では、風速コンポーネントが $\pm 5\text{m/s}$ を超えるようなデータがほとんどなかったことから、風による影響が見られ

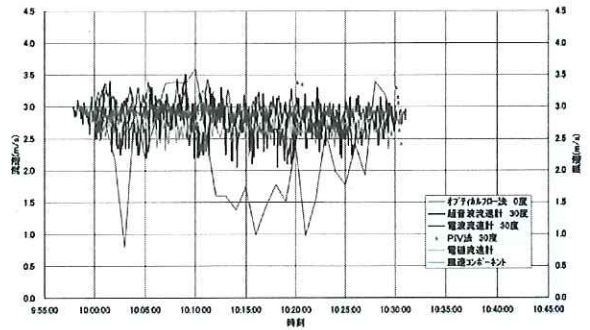


図-17 魚野川での各流速計測定値と風速コンポーネントとの比較 1

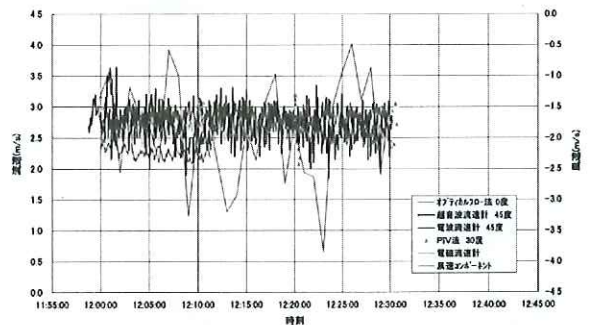


図-18 魚野川での各流速計測定値と風速コンポーネントとの比較 2

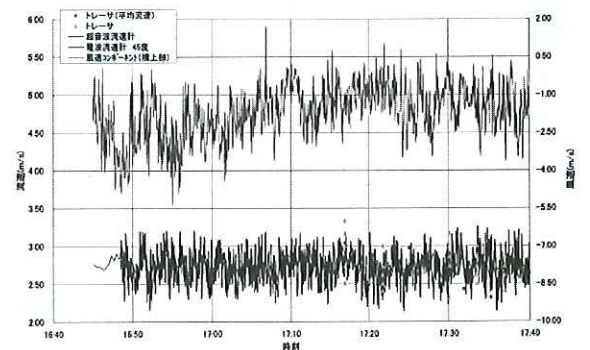


図-19 利根川での各流速計測定値と風速コンポーネントとの比較 1

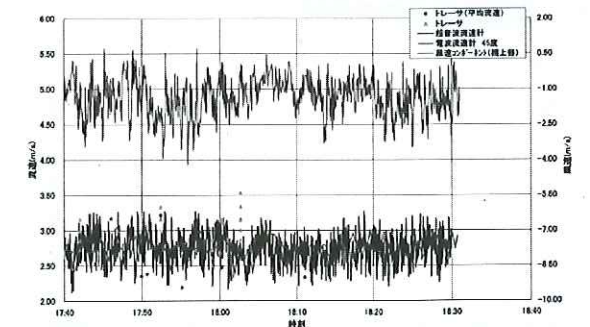


図-20 利根川での各流速計測定値と風速コンポーネントとの比較 2

①電波流速計相關図

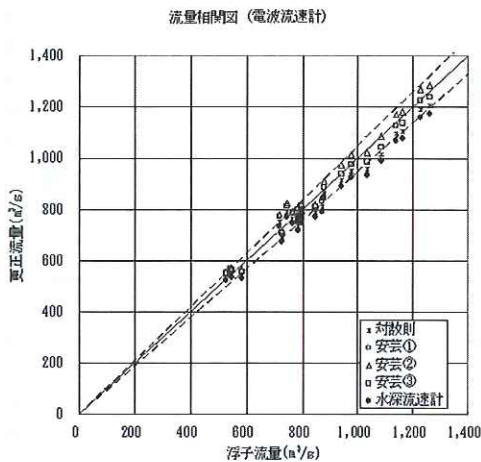


図-21 魚野川での結果

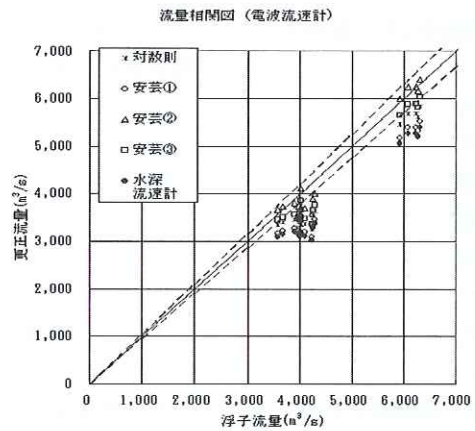


図-22 利根川での結果

②超音波流速計相關図

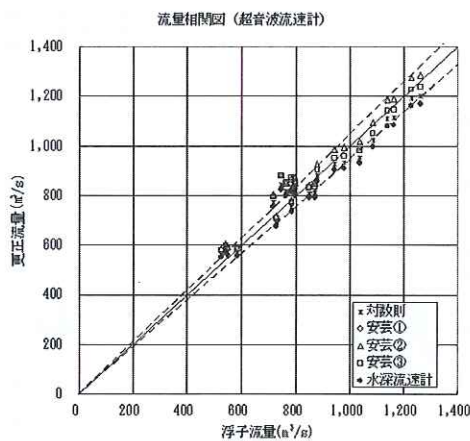


図-23 魚野川での結果

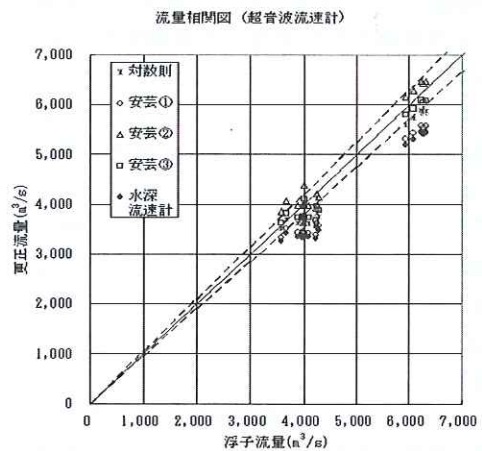


図-24 利根川での結果

注) “水深流速計”と示しているのは、水深流速計の観測結果から算定した更正係数を用いて更正した流量のことである。

なかったといえる。

5. 流量換算係数の検討

5.1 実験の目的

本研究の最終的な目的は、「非接触型流速計測法」を用いて計測された河川の各表面流速値から河川の流量値を算出することである。そこで、次に、河川の流量値を算出するために必要な河川の平均流速を求める更正係数について検討する。

5.2 実験の概要

魚野川堀之内地区 (平成 12 年 4 月 12 日、平成 13 年 4 月 11～12 日) および利根川下流栄橋地点

(平成 13 年 8 月 23 日、9 月 12 日) のフィールド試験においては、各非接触型流速計による計測とともに、水圧式水深流速計による流速測定、ならびに浮子による流量観測をあわせて行った。これより、各流速計で測定した流速と浮子によって求めた流量値を比較検討した。

平均流速と表面流速の比を表す更正係数は、以下の 4 種類の方法で算出した。

1) 対数式

対数式から、更正係数は下式で表せる。

$$\text{更正係数} = \frac{\bar{V}}{V_s} = \frac{6.0 + 5.75 \log(h/ks)}{8.5 + 5.75 \log(h/ks)} \quad (1)$$

③ PIV 流速計相関図

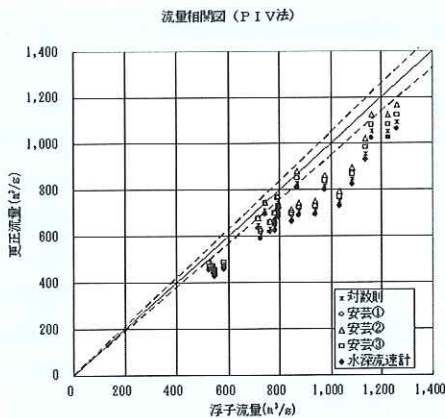


図-25 魚野川での結果

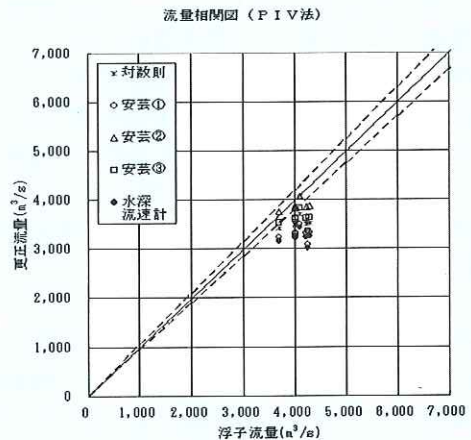


図-26 利根川での結果

④ オプティカルフロー流速計相関図

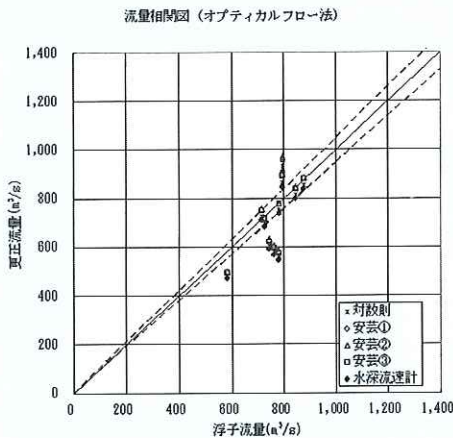


図-27 魚野川での結果

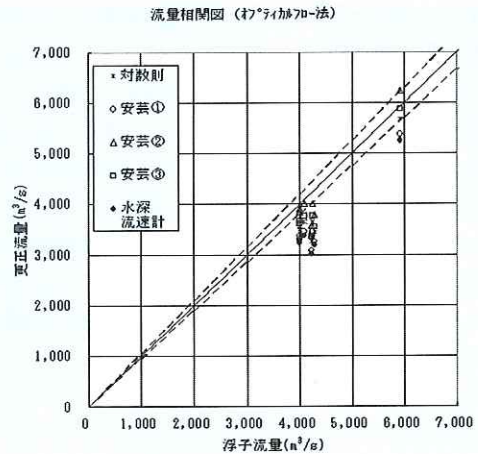


図-28 利根川での結果

注) “水深流速計”と示しているのは、水深流速計の観測結果から算定した更正係数を用いて更正した流量のことである。

このとき、 h ：水深 (m)

ks ：粗度

ここで、上式の粗度には魚野川の根小屋橋地点付近の河道計画逆算粗度係数 0.028 を用いた。

2) 安芸の式①

更正係数 = 0.85 (表面浮子の更正係数) で固定化した。

3) 安芸の式②

各測線毎の水深に応じて表-1 に示す更正係数を用いた。

4) 安芸の式③

$$\text{更正係数} = C / (C + 14/3) \quad (2)$$

表-1 安芸の式による更正係数表

h (水深)	a	C	更正係数
0~1m	0.0	30	0.8181 (0.818)
1~2m	0.1	34	0.8793 (0.879)
2~4m	0.2	38	0.9344 (0.934)

$$\text{このとき、} C = \left(\frac{1}{n} \right) \times R^{1/6}$$

n ：粗度係数

R ：経深

ここで、水圧式水深流速計の観測結果より水深方向の最大流速発生位置 0.1 とし、河道計画逆算粗度係数 0.028 を用いて係数を算出した。

5) 水深流速計の観測結果による更正係数

水圧式水深流速計による鉛直方向流速プロファイルの多数の実測値に基づく更正係数の平均値として、魚野川において 0.85、利根川において 0.83 を算出した。魚野川については、安芸の式①と同じ値になっている。

5.3 実験結果

各手法による更正流量の算定結果を、図-21～28 に示す。図中の破線は、浮子流量に対し、換算流量の誤差が±5%となる境界線を示している。流速計の検定では誤差 5%を合格の基準としていることを考慮すると、この範囲内にあるデータは許容される計測精度の中にあるといえる。

図-21～28 によれば、根小屋橋(魚野川)の結果では、電波流速計と、オブティカルフローは安芸③、超音波と PIV は安芸②において、浮子との相関が最も相関がよくなっている。また、布川観測所(利根川)の結果では、いずれの場合も安芸の②がもっとも浮子との相関がよくなっている。これらを総合的に考慮すると、どの流速計の場合も安芸②すなわち、安芸の式において、 $a = 0$ 、 $C = 30$ としたときの流量換算係数を用いて補正するのが妥当と考えられる。

6. まとめ

今回の共同研究の成果を総括すると、以下のとおりである。

- ①水路での室内実験では、各流速計で計測した流速値はトレーサの流速と比較してほぼ 5%程度の誤差範囲内に収まっていることがわかった。
- ②今回のフィールド実験によれば、各流速計から流量を算出する場合、安芸式②を用いるのがよいと考えられる。この流量換算係数を用いて流量を計算することにより、浮子観測から求める流量値との差異を 5%程度以内に収めることができる。

なお、今後は、より多くのフィールドにおいて実測データを積み重ねることにより、さらなる精度向上を確保していきたいと考えている。

大手方如 *1



独立行政法人土木研究所水工研究グループ水理水文チーム研究員
Masayuki OHTE

深見和彦 *2



同 水理水文チーム主任研究員
Kazuhiko FUKAMI

吉谷純一 *3



同 水理水文チーム上席研究員
Junichi YOSHITANI

東 高德 *4



国土交通省九州地方整備局川辺川工事事務所調査設計課地域整備係長
Koutoku HIGASHI

田村正秀 *5



財団法人土木研究センター専務理事
Masahide TAMURA

和田信昭 *6



財団法人土木研究センター研究開発一部長
Nobuaki WADA

淀川巳之助 *7



小糸工業株式会社情報システム部システム担当次長
Minosuke YODOGAWA

中島洋一 *8



横川電子機器株式会社営業技術本部課長
Youichi NAKAJIMA

小松 朗 *9



株式会社拓和営業統轄本部水測営業部技術担当次長
Akira KOMATSU

小林範之 *10



アジア航測株式会社防災部ウォーター・シビック・デザイン課長
Noriyuki KOBAYASHI

佐藤健次 *11



東京建設コンサルタント技術管理本部プロジェクトマネージャー
Kenji SATO