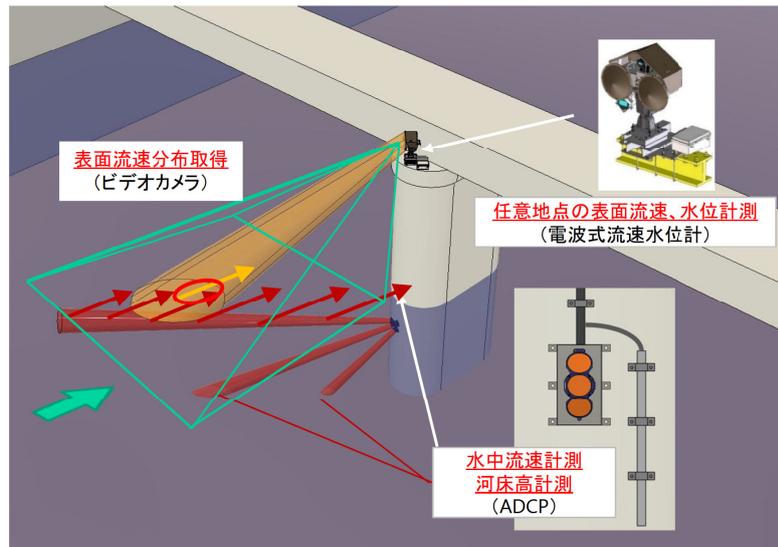


# 非接触型流速計を用いた流量観測ロボット



2024. 9.26

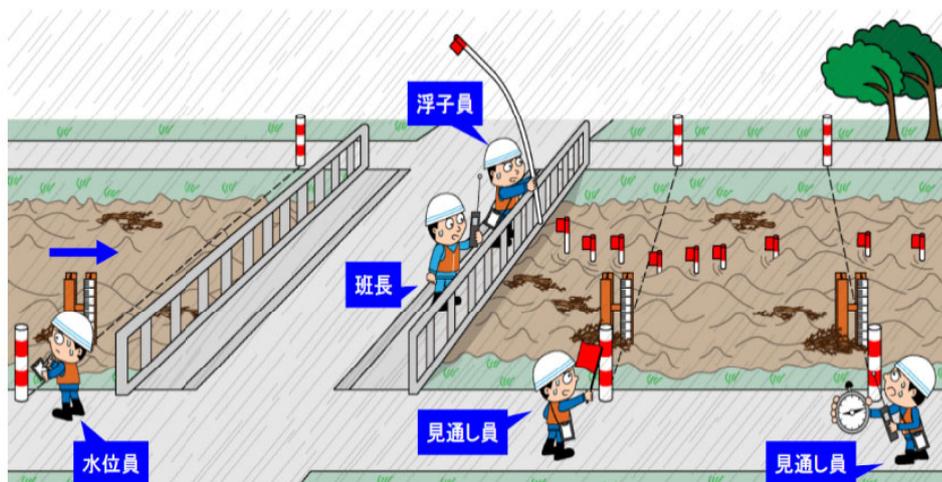
国立研究開発法人土木研究所

河道保全研究グループ

河道監視・水文チーム 山田浩次

1

# 人手不足による欠測／危険回避のための欠測



浮子観測は5人1班基本→人手不足による契約不調や欠測



危険が伴う浮子観測→やむなく観測中止・欠測

2

✓流木等の漂流物により、河道内に設置していた水位計が破損する事例

✓氾濫(内水・外水)や退去命令により作業員が流量観測地点に行けなくなり、観測が実施できない事例



複数測線の計測時間差  
→大川川ほど顕著

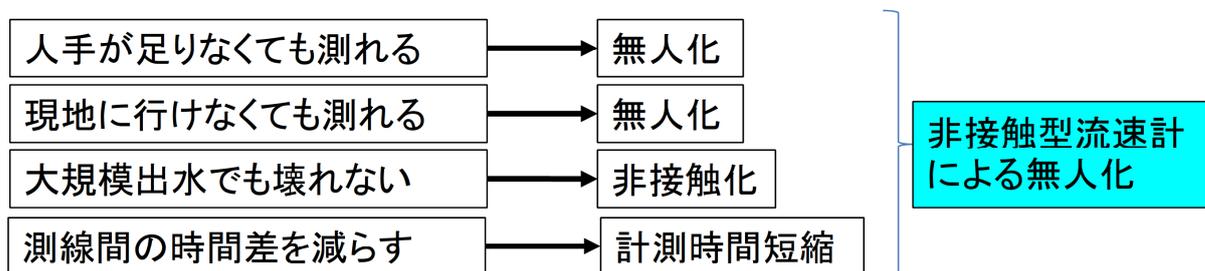
洪水時の流量観測は浮子を用いて5人1組を基本として実施されてきましたが、

- 技術者の減少・高齢化に伴い観測体制確保が困難。
- 洪水大規模化・局部的豪雨の多発を受け、現場の安全確保のためやむなく計測を断念する頻度が増加。
- 同じ理由から、水位計が破損する事例が多発。
- 急激な増水により観測態勢が構築できずピーク流量が計測できない(間に合わない)事例が多発。

などの理由から、**流量を確実に取得できない状況が年々深刻化**しています。

また浮子流観は原理上、測線間の計測時間差などが避けられません。

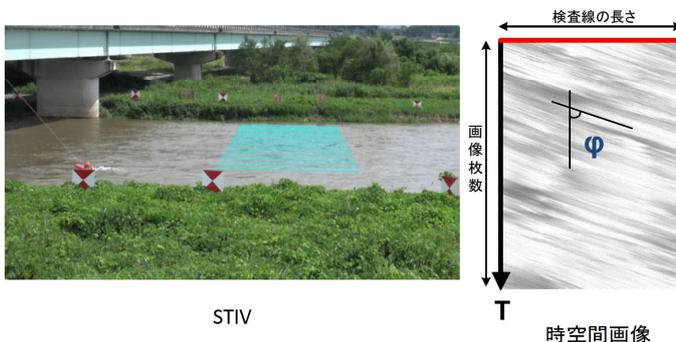
そこで、**電波式流速(水位)計**や**画像解析(STIV法)**による**非接触型の流速計測法**が導入され、現場への導入が進んでいます。



## 画像処理(STIV)による流量観測の特徴

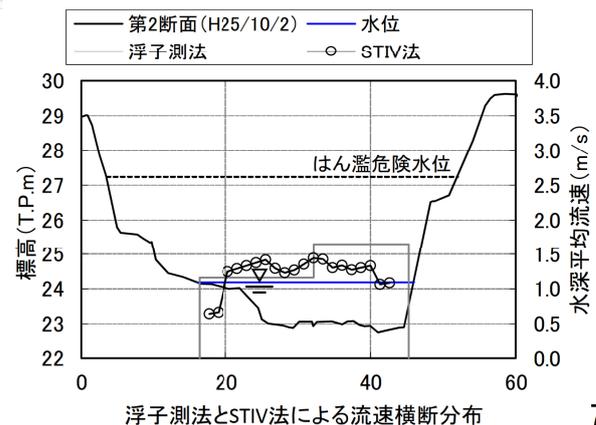
- ✓ 安定的な計測が可能  
(ノイズや遮断物の影響を受けにくく、レンズの雨滴付着に対して柔軟に対応、赤外線や高感度カメラなら夜間撮影可)
- ✓ 測定(撮影)後に解析が必要  
(幾何補正)
- ✓ **連続的な観測(無人・自動観測)が可能**  
(ゲリラ豪雨等、急激な洪水の立ち上がりやピークも把握)  
(観測者不足への対応、安全確実)  
←現状は3人~5人程度の経験豊富な観測者が必要
- ✓ 標定点が必要  
(画角に映り込んでいる必要)
- ✓ 予定測線からの逸脱や橋脚後流の影響を受けない

既存のインフラであるCCTVカメラ画像から  
Space Time Image Velocimeter (STIV)を用いて  
河川水の表面流速を算出



評定点をセットしたCCTVカメラ画像の一例

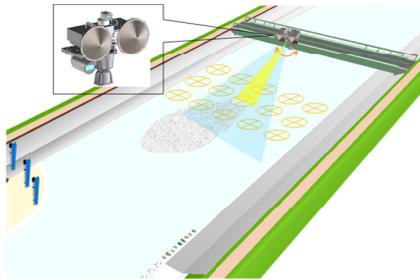
- ① 評定点と共に河川水の流れの映像を取得
- ② 横断面に直交に検査線を設定 (上左図)
- ③ 1本の検査線に注目し、横軸を検査線の長さ、縦軸を時間として時空間画像を作成 (上右図)
- ④ ③で作成される画像の縞模様から流速を算出する。



## 非接触型 (電波式) 流速水位計の特徴

- ✓ 安定的な計測が可能  
(支障物の影響小、流路変更に対して柔軟に対応)
- ✓ 測定時間が短い  
(例えば、テレメータ水位の10分単位と整合可能)
- ✓ 連続的な観測 (無人・自動観測) が可能  
(ゲリラ豪雨等、急激な洪水の立ち上がりやピークも把握)  
(観測者不足への対応、安全確実)  
← 現状は3人~5人程度の経験豊富な観測者が必要
- ✓ 橋梁や浮子投下装置がない場所でも計測可能  
(観測地点/範囲の自由度増大)
- ✓ 予定測線からの逸脱や橋脚後流の影響を受けない

※土研と民間企業との共同開発



橋上や水文観測所の観測塔に設置

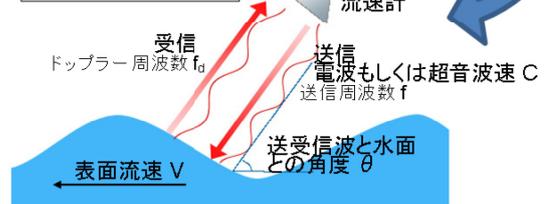


○ドップラー効果の利用  
 { 電波流速計(マイクロ波)  
 超音波流速計(超音波)

**測定方法**

ドップラータイプの測定原理

$$V = C f_d / (2f + f_d) / \cos \theta$$



## 現在導入されている方式

### 【電波(首振り式) + 画像(STIV)】

- 姫川山本観測所



右岸(局舎近く)から撮影

水管橋に機器を設置



山本観測所零点高  
T.P.63.04m

## 流況の変化の難しさと克服すべき課題



想定していた流況と計測点



ある流量における流れ場

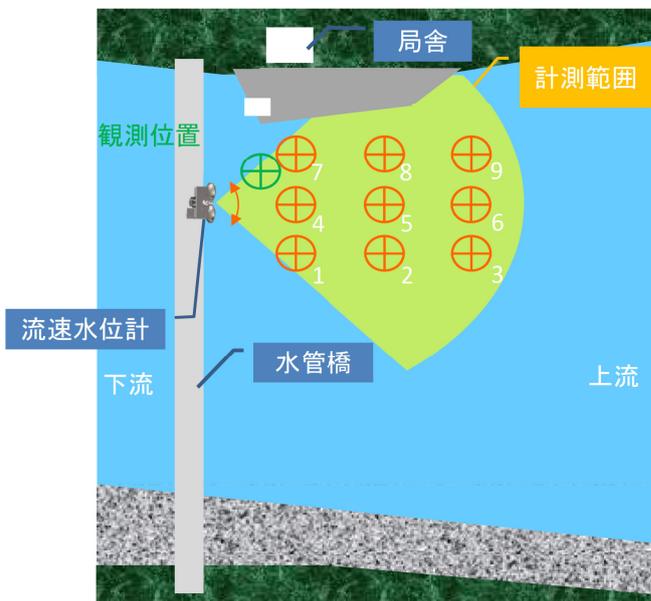
電波式の照射位置を平均流速に近い位置を自動調整する技術はまだない  
→複数位置を計測保存し  
後日判断



# 高水観測の手順

(高水観測時)

- 水防団待機水位を超えると、高水観測モードへ移行
- あらかじめ設定した測線の流速・水位を自動で計測
- 面的な計測が行えるほか、より安定した地点でバラツキの少ない流速・水位の把握が可能

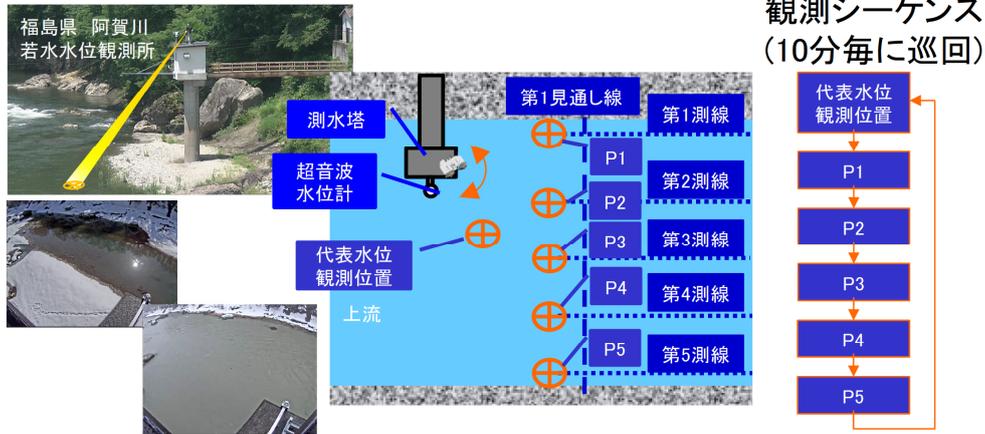


# 設置事例(阿賀川 若水水位観測所)



## 流量観測ロボットによる完全自動計測の一例

- 設定した値を超えると、水位観測から流量観測へ自動移行
- あらかじめ設定した測線の流速・水位を自動で計測
- 河川事務所から流速、水位、河川状況をリアルタイム監視



# 設置事例(阿賀川 若水水位観測所)



## 機器の設置状況



持ち運び可能なポータブルタイプ

## 計測結果の表示



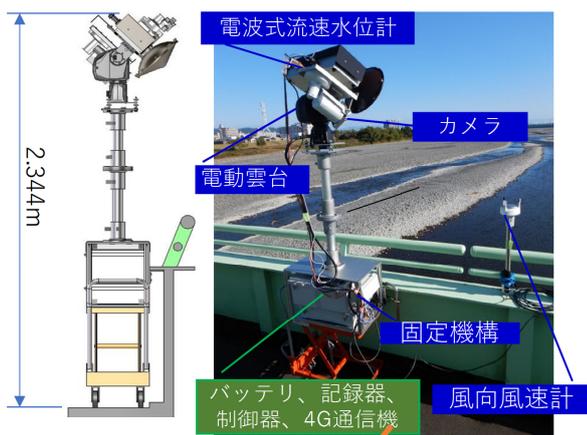
定点の流速と水位を常時計測

**流速、水位の自動観測が可能**

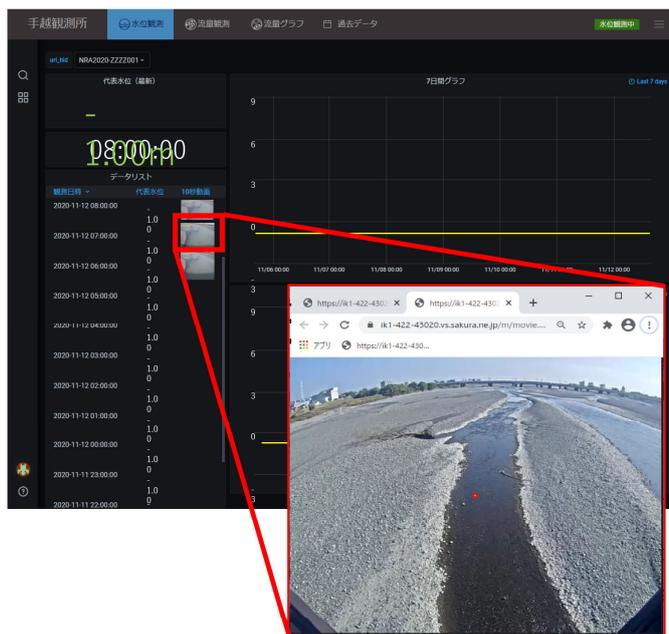
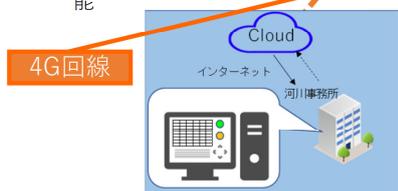
今後、幅の広い河川において最小限の機器台数で観測を行うため、悪天候下での計測可能距離、角度等の適用条件を把握

設定した水位を超えると測線毎の流速と水位を計測

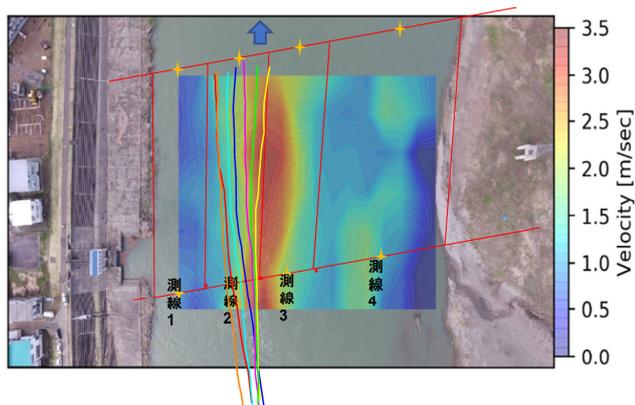
⑫ 移動型電波式流速水位計による災害支援（電波式流速水位計単独の活用事例）：安信川手越における実装事例



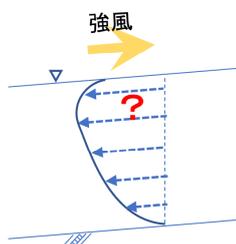
はクラウドから操作可能



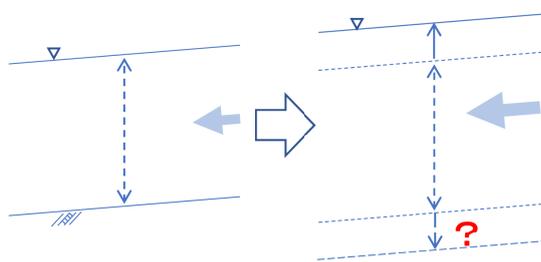
## 残された課題：計測値の信頼性確保



どこをとれば(その測線の)平均流速と言えるか？



強風時の流速分布



出水時の河床高

電波式流速計でより確実に精度良く高水流量観測を行うために残された課題として

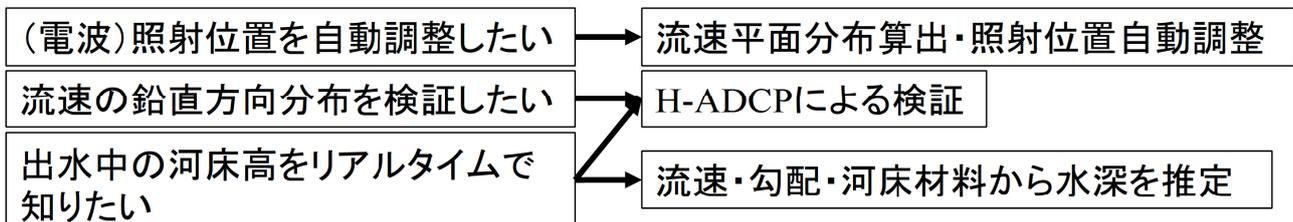
- 流れの乱れが激しい急流河川等においては、複数の照射位置の流速データから、管理者が最適な照射位置を映像を確認して判断する必要がある。

ことが挙げられます。また高水流量観測の従来からの課題として

- 流速の鉛直方向分布の検証(特に強風時)
- 出水中の河床高変化の把握

が挙げられます。

そこで、画像解析(PIV法)により流速の平面分布を算出するプログラムを開発するとともに、電波式流速計の照射位置を最適な場所に自動で調整する手法や、出水中の河床高を推定する手法を開発しており、あわせてH-ADCPによる流速鉛直方向分布や河床高の検証に取り組んでいます。これらを観測所の条件やニーズに合わせて組み合わせた流量観測ロボットによる、高水流量観測の完全な自動化・リアルタイム化と精度のさらなる向上を目指しています。



## 開発中の技術を用いた流量観測ロボット

### 【観測システムの構成】

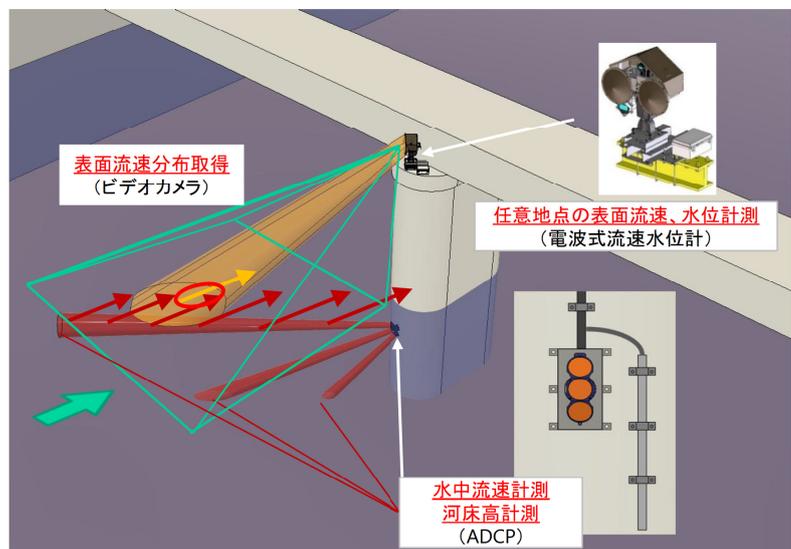
- 電波式流速水位計: 電波照射地点の表面流速および水位をリアルタイム計測。  
照射地点を変更することで、任意地点の表面流速、水位を取得可能。
- ビデオカメラ: 撮影映像を画像解析にかけることにより、流速の空間分布を取得可能。

「任意地点の流速から、勾配(水面勾配またはエネルギー勾配)、河床材料を組み合わせることで、任意地点の河床高推定。」

- ADCP: 超音波照射方向の水中流速および河床高を計測し、表面流速への風の影響や、推定河床高の検証に用いることで、精度担保。

### 【開発中の技術】

任意地点の流速・河床高を計測(推定)できるシステムであることが特徴  
(従来: あらかじめ設定した測線の流速に基づく流量を算出)



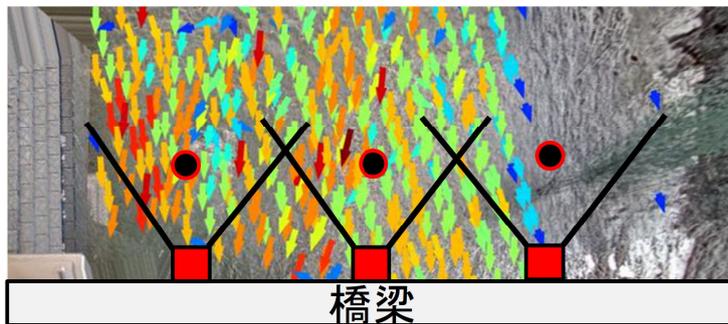
※赤字下線:各構成の役割

# 各計測手法の特徴と位置づけ



計測手法	計測項目	無人観測	リアルタイム	当該手法固有の長所	観測システムにおける位置付け
電波式流速水位計	<ul style="list-style-type: none"> <li>表面流速</li> <li>水位</li> </ul>	○	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>リアルタイムで、かつ解析者の解析技術によらない値を取得可能</li> <li>昼夜問わず安定した品質で計測</li> <li>降雨など天候の影響を受けにくい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>流速、水位の観測値を流量算出に使用</li> </ul>
ビデオカメラ(画像解析)	<ul style="list-style-type: none"> <li>表面流速</li> </ul>	○	△(解析処理高速化を検討中)	<ul style="list-style-type: none"> <li>表面流速の平面分布を取得可能</li> </ul> <p>(本研究の取組みに限定せず)河道全体の流速分布計測 →測線によらない観測、流域内の水循環把握</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>電波照射地点の判定</li> <li>電波流速の欠測時のバックアップ</li> </ul>
ADCP	<ul style="list-style-type: none"> <li>水中流速</li> <li>河床高</li> </ul>	○	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>水中の流速、河床高を取得可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>表面流速を鉛直平均に変換する際の検証</li> <li>洪水中の河床高検証</li> </ul>

【電波式流速水位計、ビデオカメラによる面的観測のイメージ】



- 電波式流速水位計、ビデオカメラ
- 電波照射点(任意に変更可)
- ∖ / カメラの撮影画角

## H-ADCP流速計の特徴



- ✓ 出水中の流速分布・河床高・濁度計測可能  
(非接触型流速計の検証用として利用可)
- ✓ 測定時間が短い  
(例えば、テレメータ水位の10分単位と整合可能)
- ✓ 連続的な観測(無人・自動観測)が可能  
(ゲリラ豪雨等、急激な洪水の立ち上がりやピークも把握)  
(観測者不足への対応、安全確実)  
←現状は3人~5人程度の経験豊富な観測者が必要
- ✓ 固定式・接触式  
(流路変更に弱い / ビーム方向のみ観測 / 破損のおそれ)
- ✓ 予定測線からの逸脱や橋脚後流の影響を受けない

- 超音波のドップラー効果を利用して、センサー設置高さにおける流速の横断方向分布が測定する固定式・接触式の流速計測方法。
- 水中懸濁物質の反射から濁度を計測可能
- 河床の反射から河床高を計測可能

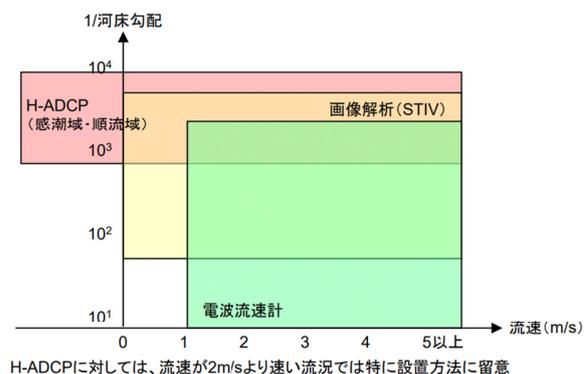
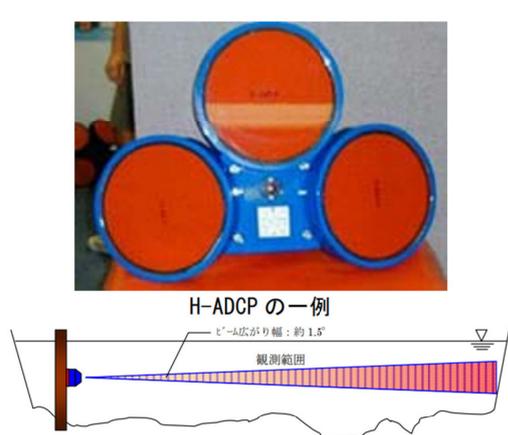


図 3-2 各固定設置型流速計の適用範囲イメージ

流量観測の高度化マニュアル(高水流量観測編) Ver1.2 (2016年6月 土木研究所) 21

## H-ADCP設置状況(例)

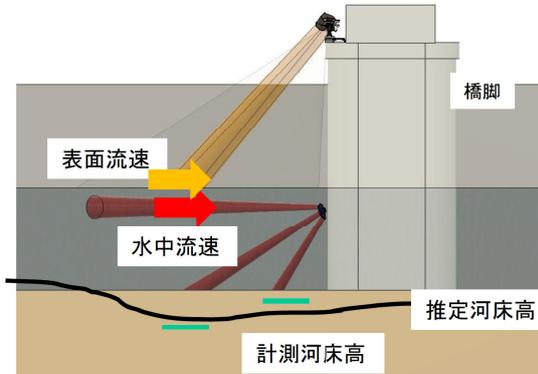


- 2方向にビームを照射し、
- ・上側でビーム照射方向の水中流速
  - ・下側でビーム照射方向の水中流速 + 照射点の河床高を計測している。(センサーが水中に浸かった時に計測)

## 電波式とADCPそれぞれは何を測っているか

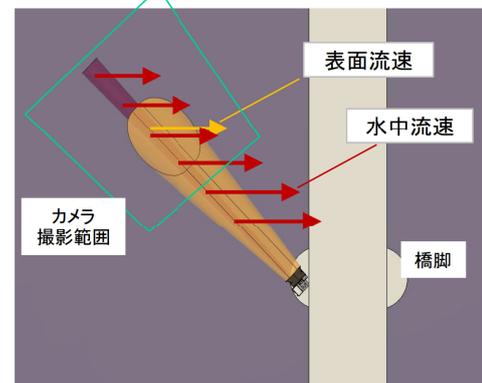
- ・一部地点の河床高をADCPで計測
- ・測線毎の表面流速と水中流速、一部地点の河床高から河床形状を推定

縦断面図



表面流速、水中流速、一部地点の河床高を計測  
計測結果より河床形状を推定

平面図



水中流速は超音波照射方向の連続的な計測が可能  
表面流速は自動または遠隔操作で水中流速と同じ地点のものを計測

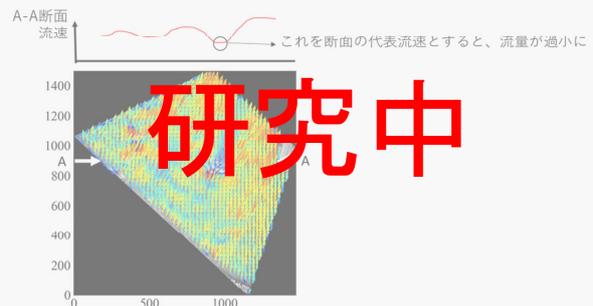
※ADCPも首振り可能にして同一横断面での計測を行うことも視野

# 流量観測ロボットによる計測の手順

- (1) 定量的な計測をリアルタイムで実施できる電波の流速・水位を活用

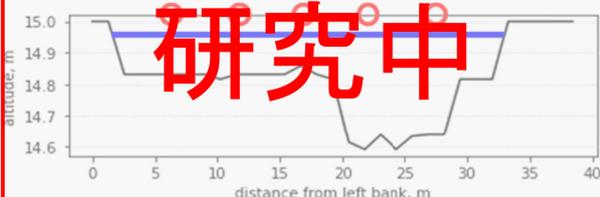


- (1') 画像解析を用いて、計測点の最適箇所を判定し、必要に応じて電波の計測点を修正

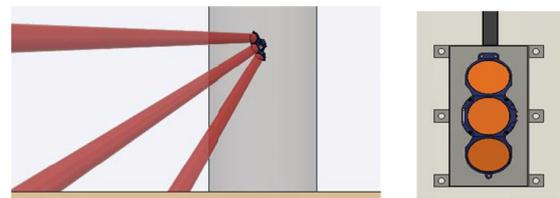


- (2) 河床変動の影響が小さい地点  
→ 既存の横断測量結果を使用

- (2') 洪水時の河床変動が懸念される地点  
→ 流速、河床材料、勾配(水面勾配またはエネルギー勾配)から河床高を推定

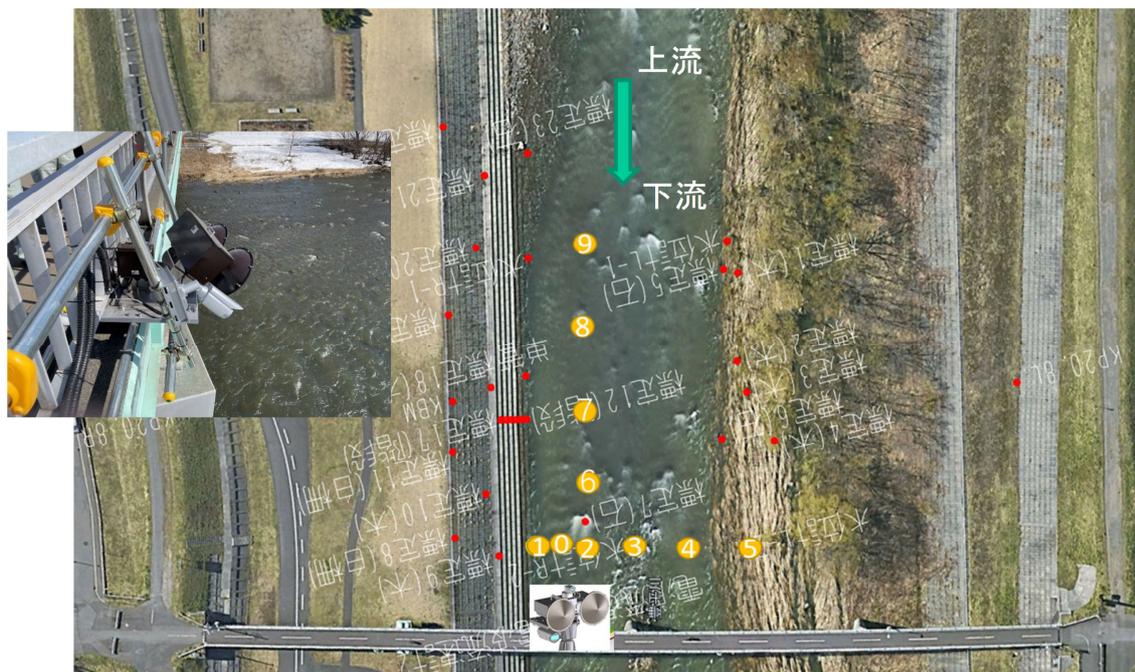


- (3) ADCPを用いて、表面流速を鉛直平均流速に変換する際の検証、洪水時の河床高の検証



- (4) 鉛直平均流速、水位、河床高の横断分布から、流量を算出

## 豊平川、藻岩上の橋 流量観測ロボットによる撮影画像による解析



【画角①】



【画角②】



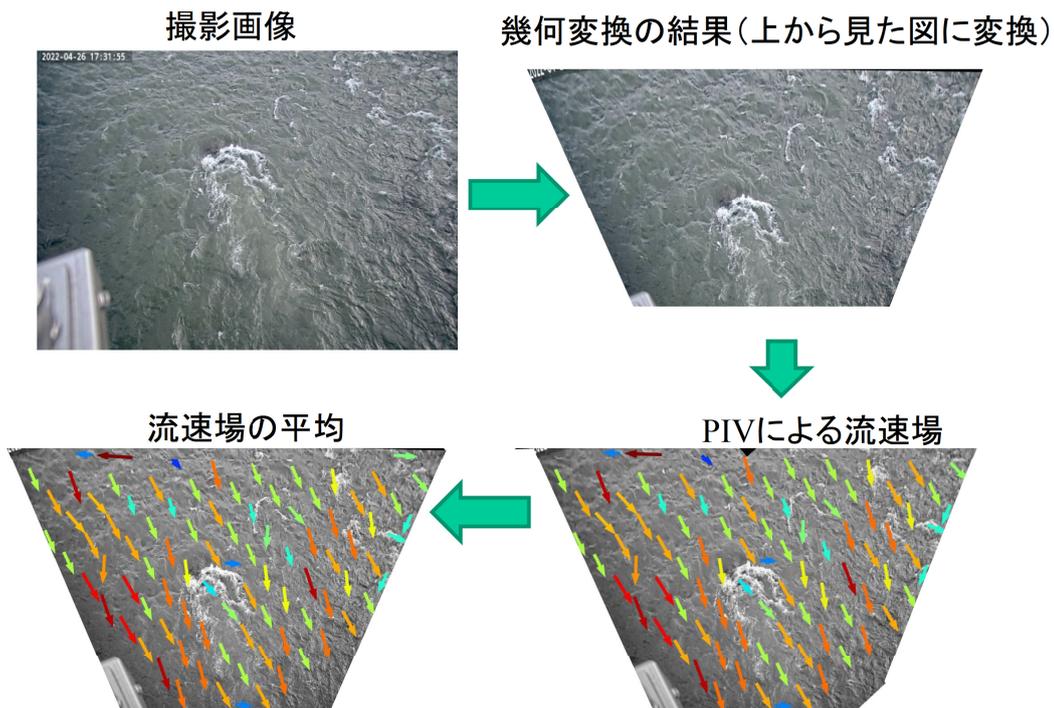
【画角③】



【画角④】



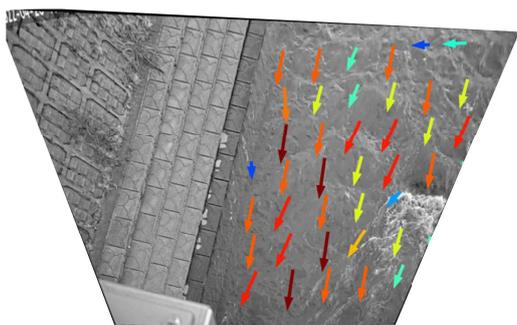
- 画角②の中心は岩の下流で流速減
- 画角②と画角③は構造物の近くを計測しており、画角④の流速が最も大きい



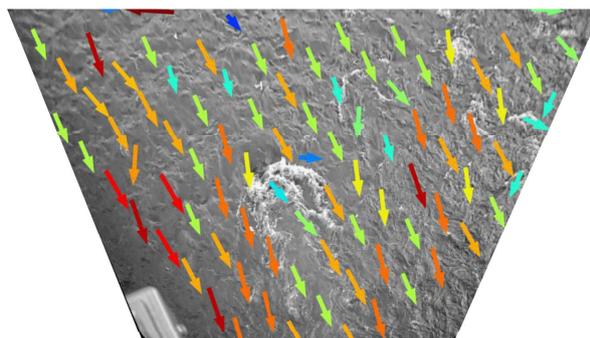
7

27

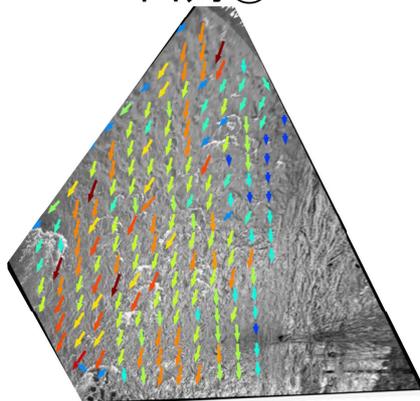
画角①



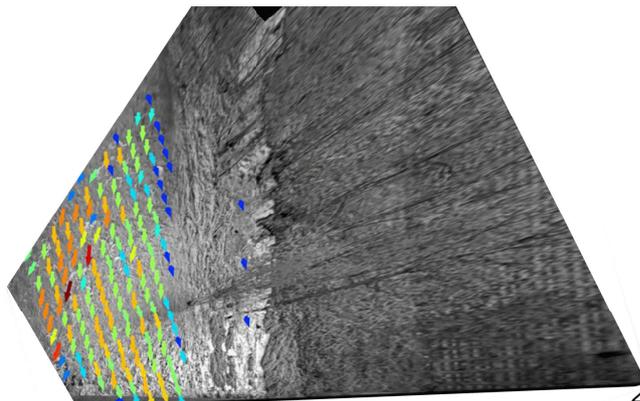
画角②



画角③

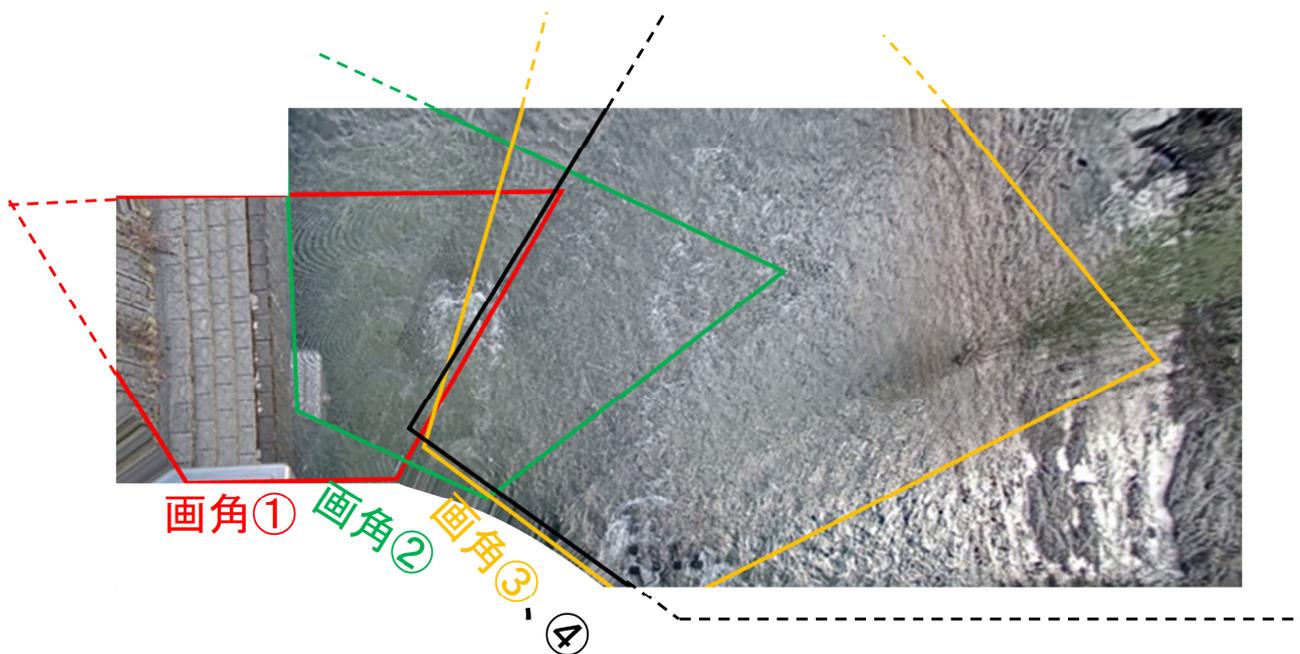


画角④



28

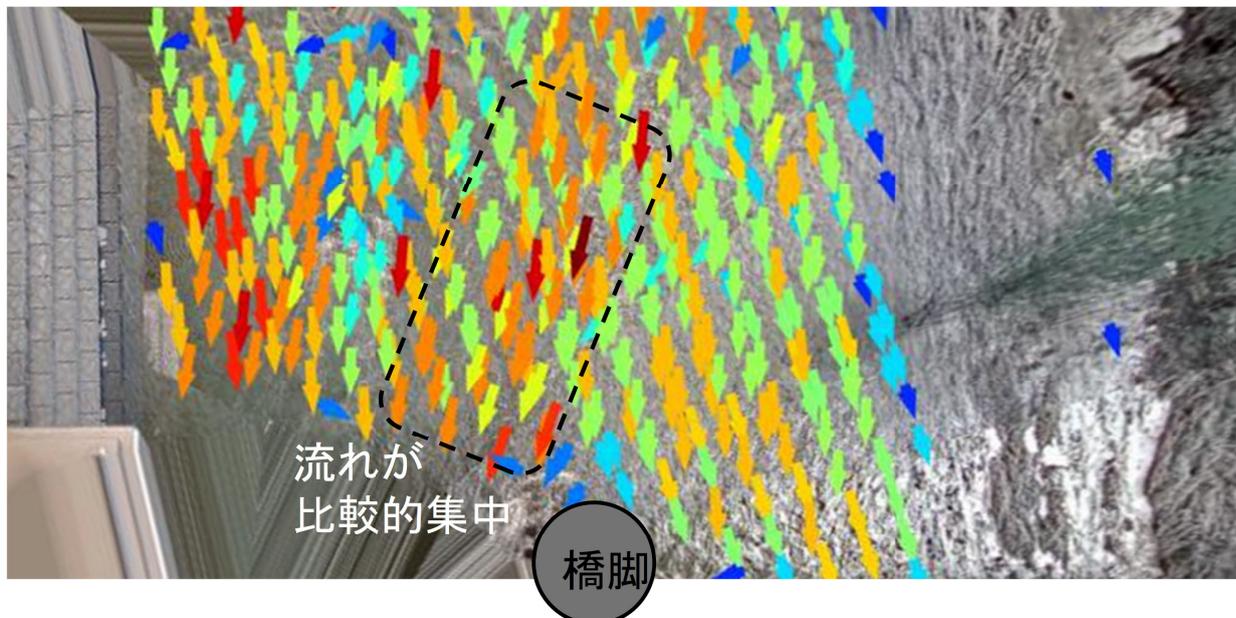
## 各画角から撮影した画像の合成



画角毎に幾何変換した画像を合成

29

## 合成画像に流速場を表示

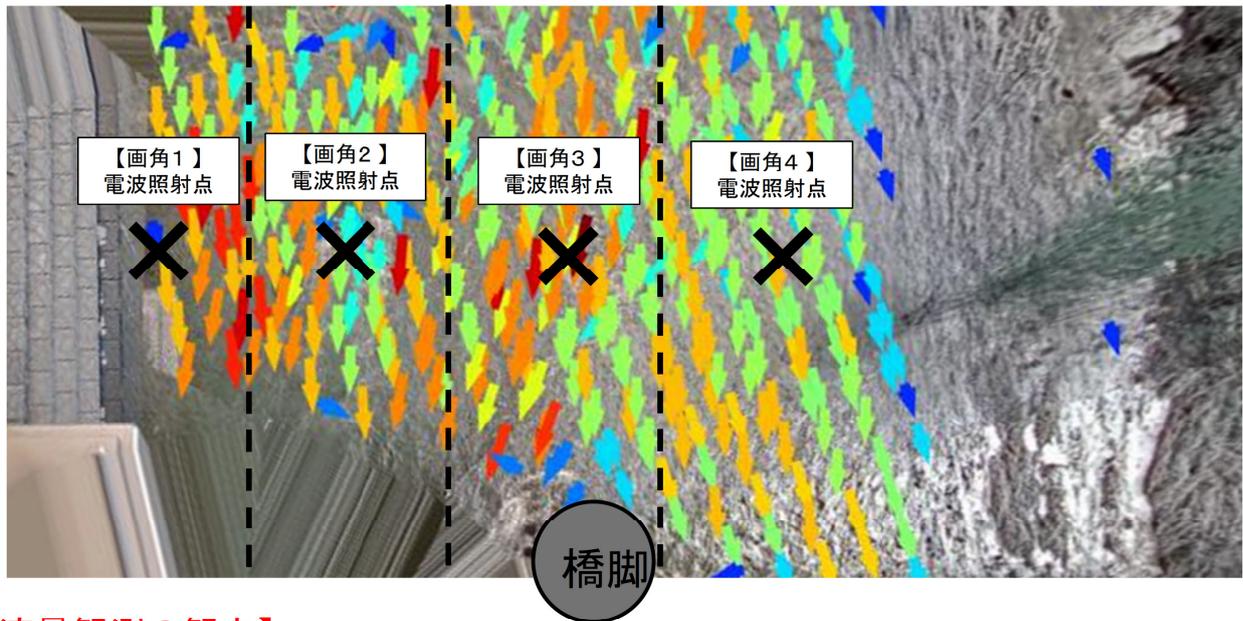


### 【河道監視の観点】

- 橋脚を避ける流れをとらえており、それによって右岸側に流れが比較的集中していることがわかる。
- このことを踏まえて【画角3】の動画を改めて確認すると、流れの集中をはっきりと認識できる(動画だけぼんやり見ても気づきにくい)

30

## 合成画像に流速場を表示



### 【流量観測の観点】

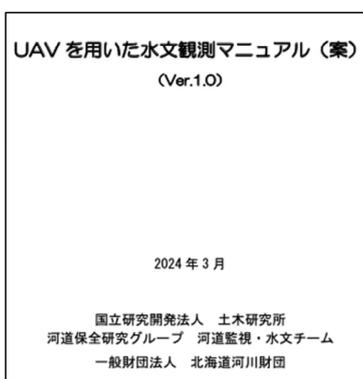
- 現在の技術基準：測線内の代表流速を計測する  
→代表流速は断面の平均的な値であることが前提であるが、画角2は明らかに小さい流速を取っている
- (対応策1) 画像から適切な電波照射点を判断
- (対応策2) 測線の考え方から脱却し、詳細な横断分布をそのまま使用

31

## PIVのための撮影、解析に関する講習



- 出水中に時期を逃さず、適切な手順で動画を撮影することが最も重要。
- PIV解析用の(通常の状態把握用・点群取得用の撮影とは異なる)動画撮影手順や解析の講習会も実施している。



UAV飛行のための事前準備、飛行時の留意事項、撮影手順、解析手順を解説したマニュアル



PIV解析を行うための、具体的な撮影手順なども記載



UAVによる撮影方法実習



プログラムの解説

地整職員・受託業者向け講習会を開催している

- 撮影手順、解析手順を解説
- 参加者がそれぞれPCを持ち込み、ハンズオン形式の実習→Pythonによる環境構築から指導し、自らのPCでPIV解析できるように

32

- 松山河川国道事務所 2022/7/21
- 千曲川河川事務所 2022/8/29, 10/27, 2023/3/7
- 富山河川国道事務所、黒部河川事務所 2022/9/15, 12/13, 2023/2/14, 7/19, 9/19
- 札幌開発建設部 2023/3/1, 11/7
- 高田河川国道事務所 2023/5/21
- 天竜川ダム統合管理事務所 2023/6/15
- 利根川上流河川事務所 2023/8/30, 12/14
- 静岡河川事務所 2023/10/10
- 中部地方整備局 2024/6/3
- 沼津河川国道事務所 2024/6/7
- 帯広開発建設部 2024/6/14

※流量観測に係る技術指導、試験観測の中でPIV技術を伝達させて頂いたもの、PIV講習会を実施して参加者が自ら解析できるところまで至ったものを挙げている

事務所にグリップして頂きながら、事務所の受注業者にも直接指導できるように実施している。

### 新型（電波・STIV）による流量算出に関する課題認識

#### 【現状：新型流量観測への移行】

- 「新型（電波・画像）と浮子の計測差」が0～20%の範囲内に収まっていることを確認した観測所から、順次新型に移行。
- 現行の流量算定は区分求積法を採用している。すなわち、流速は区分中央の表面流速を計測し、それに0.85（表面流速係数）を乗じた値を区分の代表流速としている。

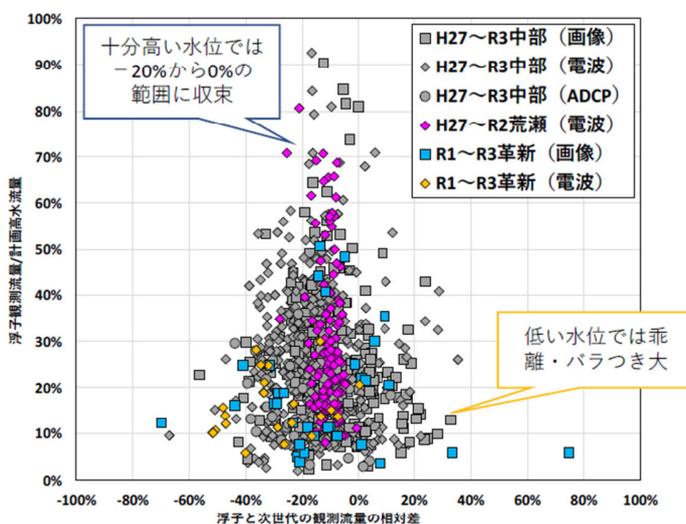
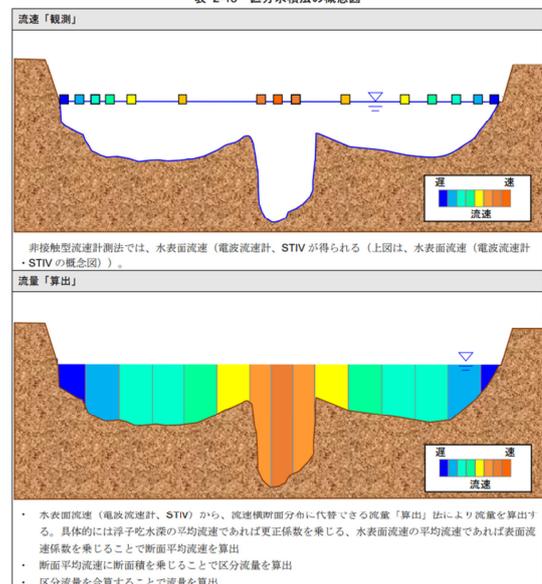


図-1 (観測流量の相対差) - (出水規模)

浮子測法と非接触型流速計測法の観測流量の相対差 = (非接触型流速計測法 - 浮子観測流量) / 浮子観測流量

表 2-13 区分求積法の概念図



非接触型流速計測法では、水面流速（電波流速計、STIV が得られる（上図は、水面流速（電波流速計・STIV の概念図））。

流量「算出」

- 水面流速（電波流速計、STIV）から、流速横断断面分布に代替できる流速「算出」法により流量を算出する。具体的には浮子吃水深の平均流速であれば更正係数を乗じる、水面流速の平均流速であれば表面流速係数を乗じることで断面平均流速を算出
- 断面平均流速に断面積を乗じることで区分流量を算出
- 区分流量を合算することで流量を算出

## 流量の定義、流速変動の捉え方

河道の流れは、さまざまなスケールの時空間変動を含んでいる



**【実際の流れ】**

=

=

= ① 中規模河床波による浮子の蛇行

② 大規模平面渦による流速の局所的变化  
周期: 数分~十数分

③ 橋脚の後流による流速の局所的变化

④ 並列せん流により高速流箇所に浮子が寄せられる流れが発生  
周期: 数秒~十数秒

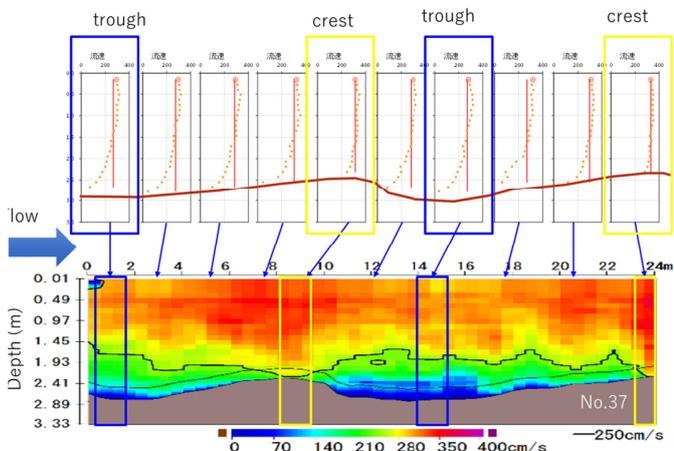
⑤ 小規模河床波による鉛直流速分布の縦断的な変化

⑥ 風による鉛直流速分布の変化  
周期: 数デシ秒~数秒

## 鉛直流速分布

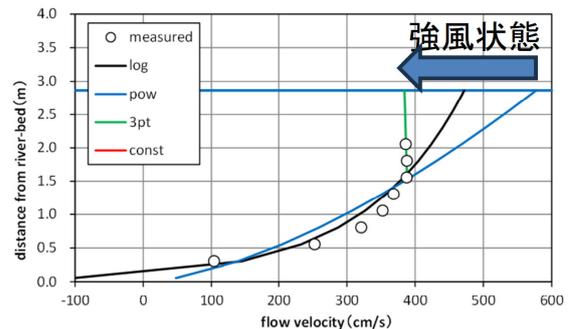
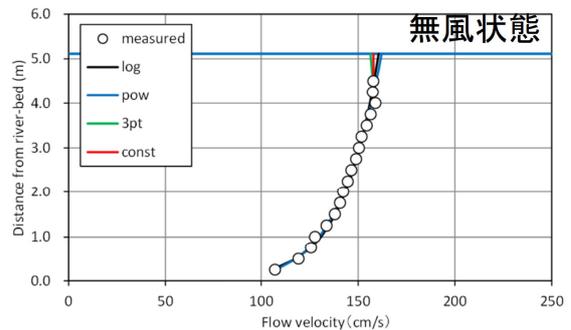
### 【鉛直流速分布を左右する要因】

一般的に流速の鉛直分布は対数則に従うとされているが、実際の観測現場では、「河床形状(主に小規模河床波)」と「風の影響」が主要な要因となって鉛直分布が変化する。



河床の形状による流速鉛直分布の変化

非接触型流速計測法の手引きでは、表面流速係数について「**暫定的に0.85**を使用しても良い」とした上で、「今後、多くの観測所で様々な洪水規模で検証されることが望まれる」ことが示されており、**技術的課題**である。



風の有無による鉛直流速分布の違い

# 河川特性に応じた電波式流速水位計等の適切な配置、計測手法の確立

精度を担保する計測手順の検討、体制整備

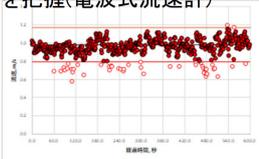
## 【(1) 現地計測】

### ○表面流速の空間分布を把握(画像解析:PIV)

現場事務所でPIVを実施した事例はないため、現場でも実施できるように、**R5年度は配布プログラム開発、実際の観測所での撮影試行、解析試行、現場事務所への技術指導を実施**

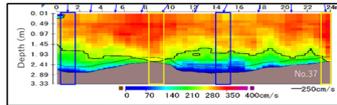


### ○表面流速の点の時間分布を把握(電波式流速計)



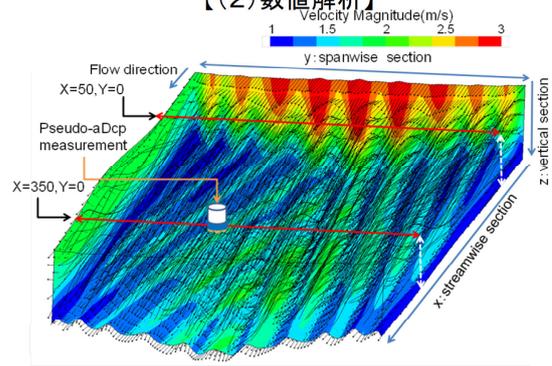
既に現場でも観測実施例あり

### ○水中流速を把握(ADCP)



既に現場事務所でも実施例あり

## 【(2) 数値解析】



### 三次元乱流計算 (iRIC, NaysCUBE) の実施例

数値解析を実施し、観測結果と突合  
→流れ場の全容把握をした上で、原理的に最も精度が高い計測手順を提示

### 【提示する計測手順の項目】

- ・測線の設定
- ・計測時間の設定
- ・風の影響排除を含めた鉛直平均流速への変換方法の設定