

画像解析法による流量の算出

2020.9.23

(一財)建設工学研究所
神戸大学名誉教授

藤田 一郎

流量観測の目的

治水目的：対象は洪水時の大流量

- ・ **河川整備計画の基本としての流量**：リターンピリオド（一級河川では100~200年）に応じた整備計画
 - ⇒ 基本高水流量 治水対策前
 - ⇒ 計画高水流量 治水対策後（ダム、遊水地、地下河川）
 - ⇒ これらを決定するには、水文統計量（水位、流量、降雨）の充実が不可欠
- ・ **洪水流出モデルの検証**
 - ⇒ 水位・流量の実測データが不可欠：水位と比較して流量はデータが少ない
- ・ **河川工事後の流量把握**
 - ⇒ 河川断面形状（幅、勾配）を変えると既往の水位流量関係が使えなくなる

水資源管理目的（利水、発電）：対象は平水時の流量

- ・ 灌漑用水路の流量
- ・ 小水力発電に必要な流量の把握

環境目的：対象は平水時～低水時の流量

- ・ 河川の環境保全に必要な流量
 - ⇒ 正常流量、維持流量の把握

流量観測の方法

浮子観測（日本）：洪水時のみ

⇒ 区分断面積 × 区分断面を代表する浮子速度 × 表面流速係数（補正係数）

流速計による計測（海外）：プロペラ式、電磁式

⇒ 区分断面内での多水深（2点以上）における直接流速計測 × 区分面積

ADCPによる計測（Acoustic Doppler Current Profiler）

⇒ 不感帯を除く断面内の密な流速分布 × 区分面積

⇒ 最も正確と見なされる

電波流速計による表面流速計測：流速計は橋上常設か橋上移動、ドローン搭載型

⇒ 表面流速分布 × 区分面積 × 表面流速係数（補正係数）

画像解析による表面流速計測：河川監視カメラ、サーマルカメラ、ドローンのカメラ

⇒ 表面流速分布 × 区分面積 × 表面流速係数（補正係数）

海外のプロペラ流速計（フランス）



- ・最大流速3~4m/sまで計測可能
- ・車に取り付けたクレーン(伸縮性)で吊り下げる
- ・洪水中でも安定とのこと

最近の洪水流量観測の問題点

近年、計画高水流量相当の洪水が頻発

・ 浮子による流量観測を実行不可能なケースが多数

- ⇒ 観測作業が危険となる
- ⇒ 観測用の橋が閉鎖されて観測不可能となる
- ⇒ 内水氾濫で観測橋へのアクセスが不可能となる
- ⇒ 見通し用の指標も水没する可能性あり

・ ADCPによる流量観測の場合

- ⇒ 橋上での観測作業が危険となる
- ⇒ 実施しても、計測器を搭載したボートが転覆する可能性あり
- ⇒ 流木などの浮遊物で計測器が破損する可能性あり

・ 電波流速計による流量観測の場合

- ⇒ 波状水面が発生すると計測精度が低下する可能性あり
- ⇒ 橋が破損、流失する可能性あり

唯一、流量観測を安全に実施できるのは、監視カメラなどを使った画像解析による計測法

二級河川における問題点

- 流域面積や流路延長が短いために流出がはやく、ハイドログラフは先鋭化するため、人手による観測ではピーク流量を見逃すケースが多い
- 大部分の二級河川では、流量データの蓄積はほとんどない
- この傾向は、小規模の河川ほど顕著となる
- 水位観測のみの河川が大部分である
- 小規模河川では、河道データもない場合がある
- 中小河川は計画のリターン期間が短いため（10年程度）、河道断面が十分ではなく氾濫する可能性が高い
- 本川の水位上昇による背水の影響を受けやすく、水位から流量は推定できないため、流量の直接計測は重要となる

唯一、流量観測を実施できるのは、監視カメラなどを使った画像解析による計測法

画像を使った解析の特徴・利点

非接触で洪水流から離れたところから安全に計測できる

- ⇒ 越水しているような究極の洪水も観測可能
- ⇒ 水位と連動して自動計測も可能

ビデオ画像には活用できる大量の二次元情報が格納されている

- ⇒ 点計測では不可能な量の面的流速が求まる

ビデオ画像は誰でも撮影できる

- ⇒ 監視カメラだけでなく、家庭用ビデオ、スマートフォンも利用可能

ドローンからの撮影ビデオも使える

平水時・低水時の計測

- ⇒ トレーサーを散布することで可能となる

過去の情報も普遍的に利用できる

- ⇒ 古い報道ヘリビデオなど

画像を使った流量観測とは

基本は、河川表面流速とともに流下するものを画像解析手法で追跡すること

⇒ 解析法にはいろいろな種類がある：PTV, PIV, LSPIV, STIV, etc.

画像解析で追跡すべき対象

⇒ 浮遊物（ゴミ、泡、流木など）

⇒ 水面波紋（乱れによって生じる水面の微小波）

もう一つの基本は斜め画像の幾何補正

⇒ 一般には河川表面を河岸などから斜めに撮影した歪んだビデオ画像を使う

⇒ これを歪みのない画像に正確に変換することが重要

ドローンからの撮影の場合

⇒ 動画のブレ補正を精度よく行うことが重要

表面流速から平均流速への変換

⇒ 通常の洪水で情報がない場合は、 $\alpha = 0.85$ を使うことが多い

⇒ 水深が小さい場合、幅が狭い河川では鉛直流速分布などでチェック

ビデオ画像解析を使った流速計測手法の種類

Float PTV (Particle Tracking Velocimetry)

- ⇒ 個々の粒子（トレーサー）を追跡する
- ⇒ 浮子を追跡することも可能

LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry)

- ⇒ 水面画像を濃淡のあるテクスチャーとみなし、パターンマッチングの手法で局所的なパターンを追跡する

STIV (Space-time image velocimetry)

- ⇒ 流れ方向に想定した検査線上のテクスチャーの移動を時空間画像上で検出する

Optical Flow : 最近, ビジョンセンシング分野で発展, 多くのバージョン有

- ⇒ 密なモードでは, 1画素単位で流速を算出できる

使用可能なソフトウェア

Float PTV (Particle Tracking Velocimetry)

⇒ Hydro-STIV (有償)

LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry)

⇒ Fudda LSPIV (フランスERSTEA,フリーソフト)
東京建設コンサルタント (有償レンタル機器)

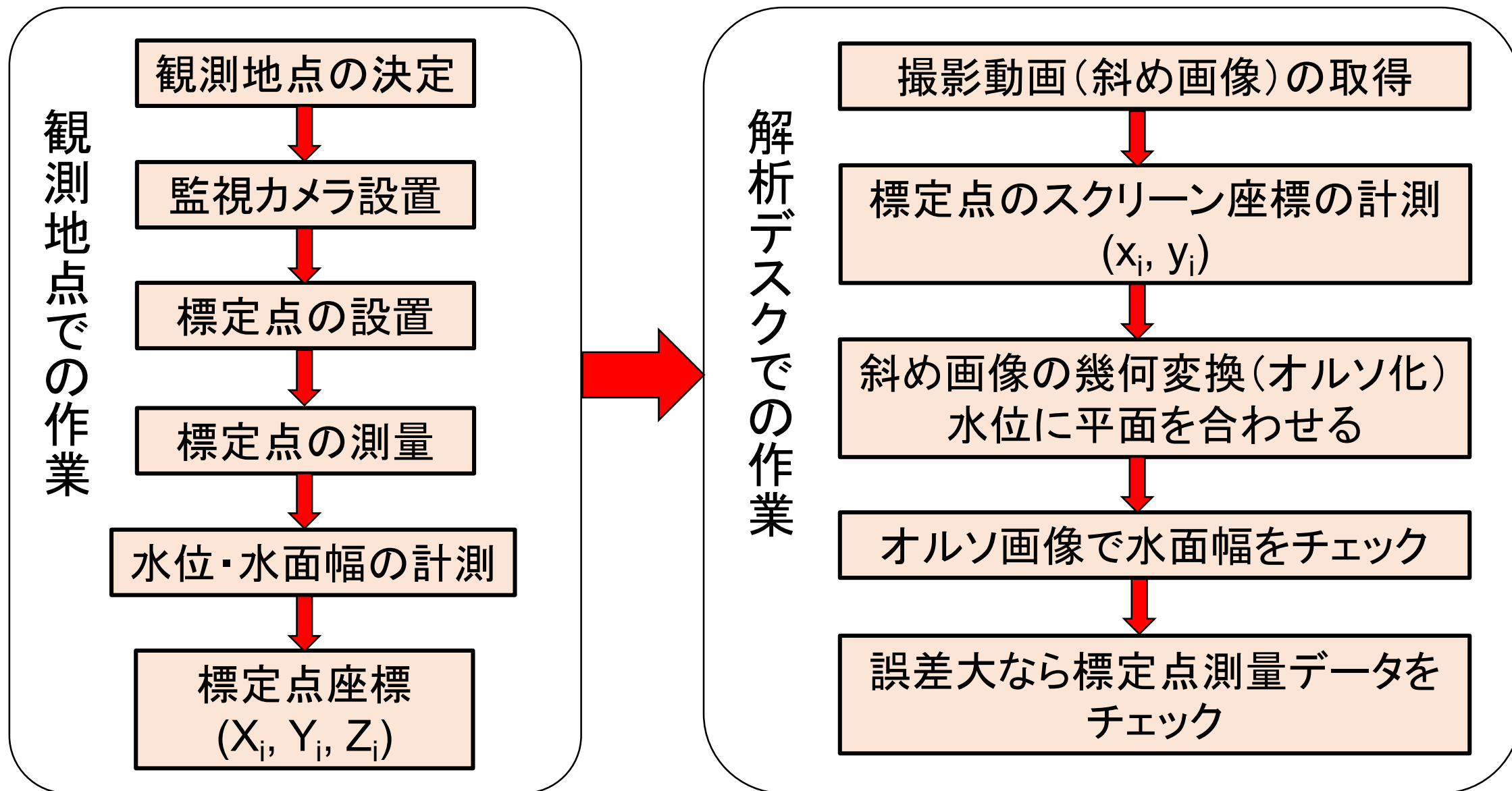
STIV (Space-time image velocimetry)

⇒ Hydro-STIV (有償)

Optical Flow

⇒ フリーのコンピュータービジョン関連のソフトウェア群
Open CV 4 で使えるが、プログラミング能力必須 (C++,C#,python)

ビデオ画像解析を使った流量観測の準備手順



ビデオ画像解析を使った流量観測の準備手順

観測地点での作業

観測地点の決定

- ・直線区間で、両岸が見通せる場所
- ・川幅が広い場所(200m以上)では両岸から対岸が見通せる場所

監視カメラ設置

- ・水位上昇した状況を考え、水面幅が入るアングルを設定、空は入れない
- ・流れを真横からみる撮影アングルが好ましい
- ・撮影俯角は計測の最遠点で2度程度以上にする
- ・通常のカメラでは河川幅最大200m程度まで

標定点の設置

- ・撮影アングル内の両岸に標定点(パネル等)を設置(左右岸で計8点以上)
- ・動かない特徴点(階段、岩、橋桁、など)も可
- ・一直線上に乗らないように平面、鉛直面でジグザグに配置
- ・標定点は、左岸、右岸でL01,L02..., R01,R02..などと命名
- ・設置後、アングルを固定した監視カメラで標定点を撮影(設置作業を録画)

標定点の測量

- ・標定点の3次元座標を測量 $[X(i), Y(i), Z(i)]$
- ・カメラの座標も測量

水位・水面幅の計測

- ・斜め画像の幾何変換(オルソ化)のチェックのため
- ・水位は標定点測量の座標系で計測

ビデオ画像解析を使った流量観測の準備手順

解析デスクでの作業

撮影動画(斜め画像)の取得

- ・動画の保存形式は様々、mpg, avi, m2ts, mov, etc.
- ・1ファイルが長い場合は10秒程度をクリッピング

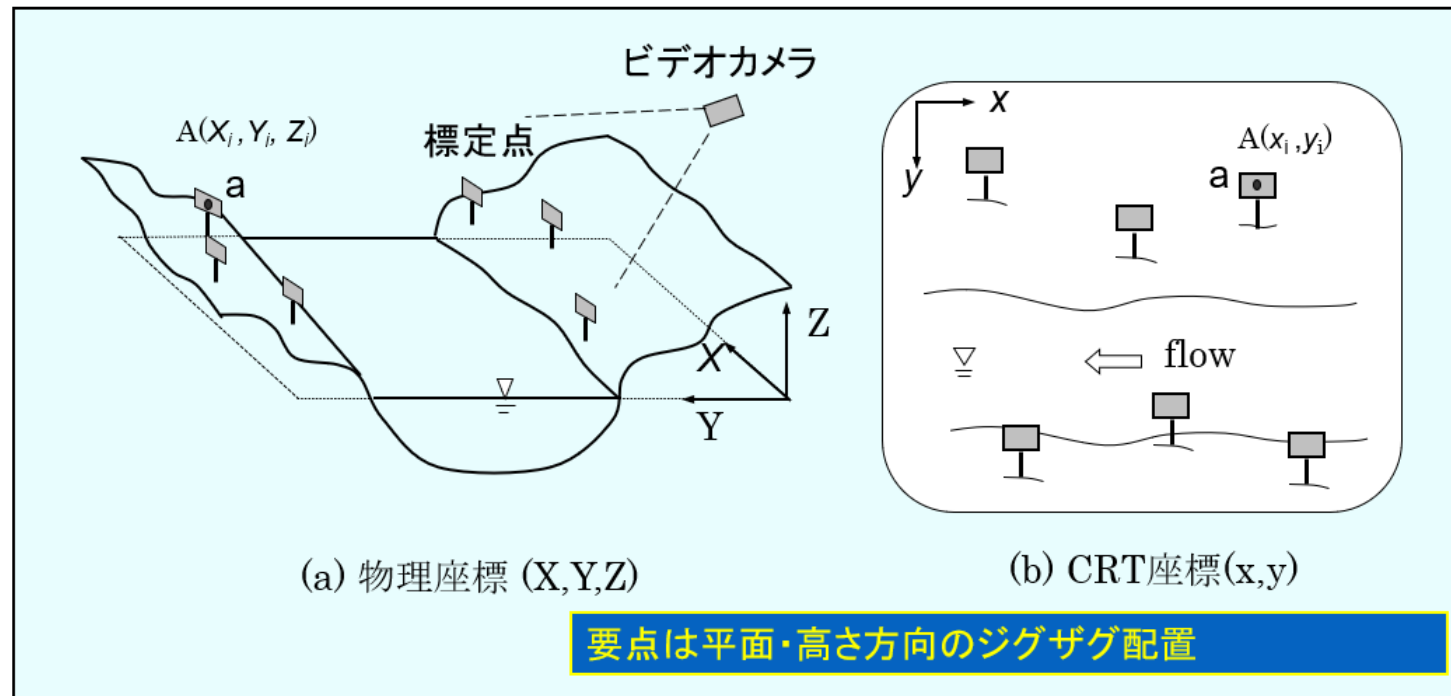
標定点のスクリーン座標の計測
(x_i, y_i)

- ・ピクセル単位で標定点座標を計測

斜め画像の幾何変換(オルソ化)
水位に平面を合わせる

オルソ画像で水面幅をチェック

誤差大なら標定点測量データを
チェック



ビデオ画像解析を使った流量観測の準備手順

解析デスクでの作業

撮影動画(斜め画像)の取得

- ・動画の保存形式は様々、mpg, avi, m2ts, mov, etc.
- ・1ファイルが長い場合は10秒程度をクリッピング

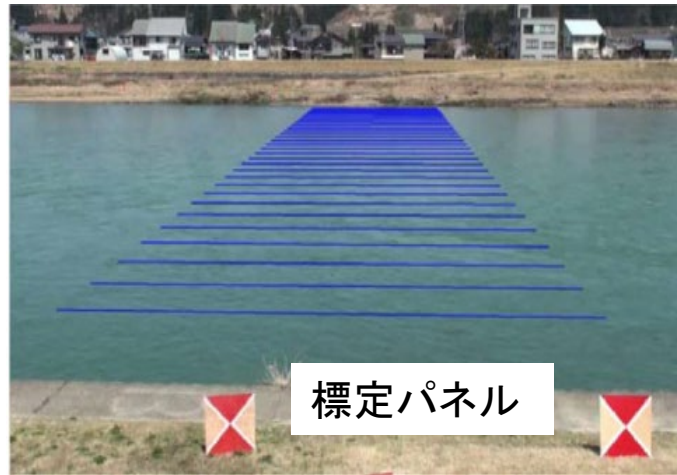
標定点のスクリーン座標の計測
(x_i, y_i)

- ・ピクセル単位で標定点座標を計測

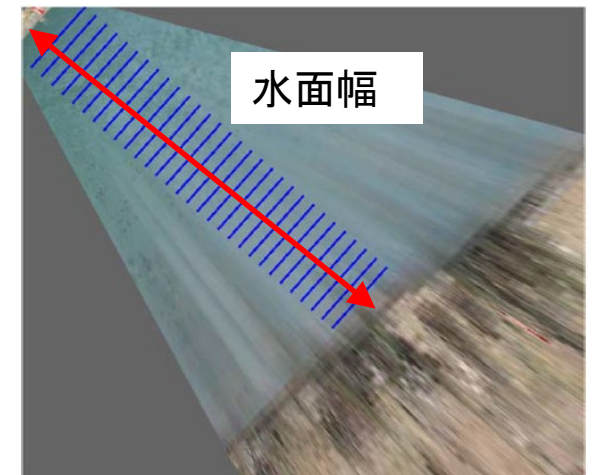
斜め画像の幾何変換(オルソ化)
水位に平面を合わせる

オルソ画像で水面幅をチェック

誤差大なら標定点測量データを
チェック



斜め画像(オリジナル)



オルソ画像(変換後)

ビデオ画像解析を使った流量観測の準備手順

解析デスクでの作業

撮影動画(斜め画像)の取得

- ・動画の保存形式は様々、mpg, avi, m2ts, mov, etc.
- ・1ファイルが長い場合は10秒程度をクリッピング

標定点のスクリーン座標の計測
(x_i, y_i)

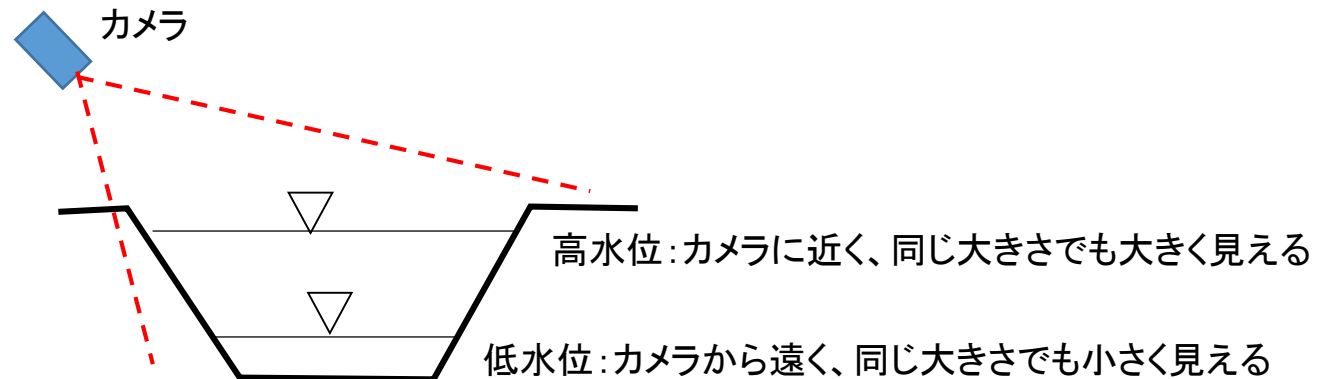
- ・ピクセル単位で標定点座標を計測

斜め画像の幾何変換(オルソ化)
水位に平面を合わせる

- ・水位が異なるとオルソ画像のサイズが変化するので注意が必要
- ・あくまでも3次元空間を水面の高さの平面で切り取った画像なので見たままの平面図にはならない

オルソ画像で水面幅をチェック

誤差大なら標定点測量データを
チェック



ビデオ画像解析を使った流量の算出

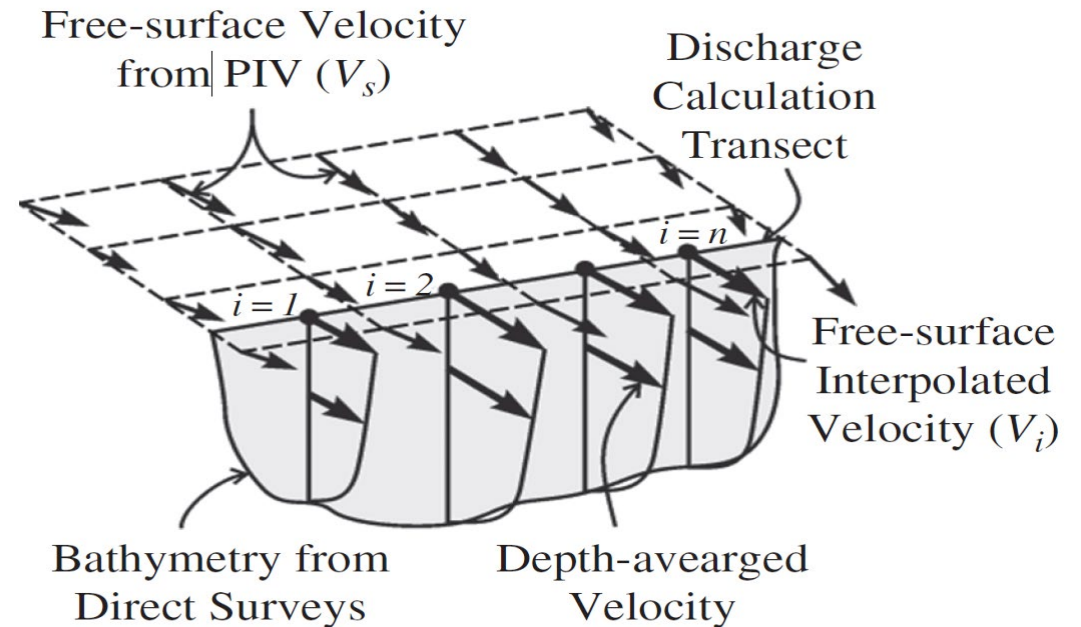
画像解析で求まるのは表面流速分布: $V_S(i)$

α : 表面流速係数 (Surface Velocity Coefficient) を設定

水深平均流速: $V_m(i) = \alpha V_S(i)$

通常流量は区分求積法で算出

$$Q = \sum \Delta Q(i) = \sum \Delta A(i) \times V_m(i)$$



表面流速係数 α の推定

十分発達した一様な流れの鉛直流速分布は対数分布で表せるが、底面の粗度によって分布形は変化する

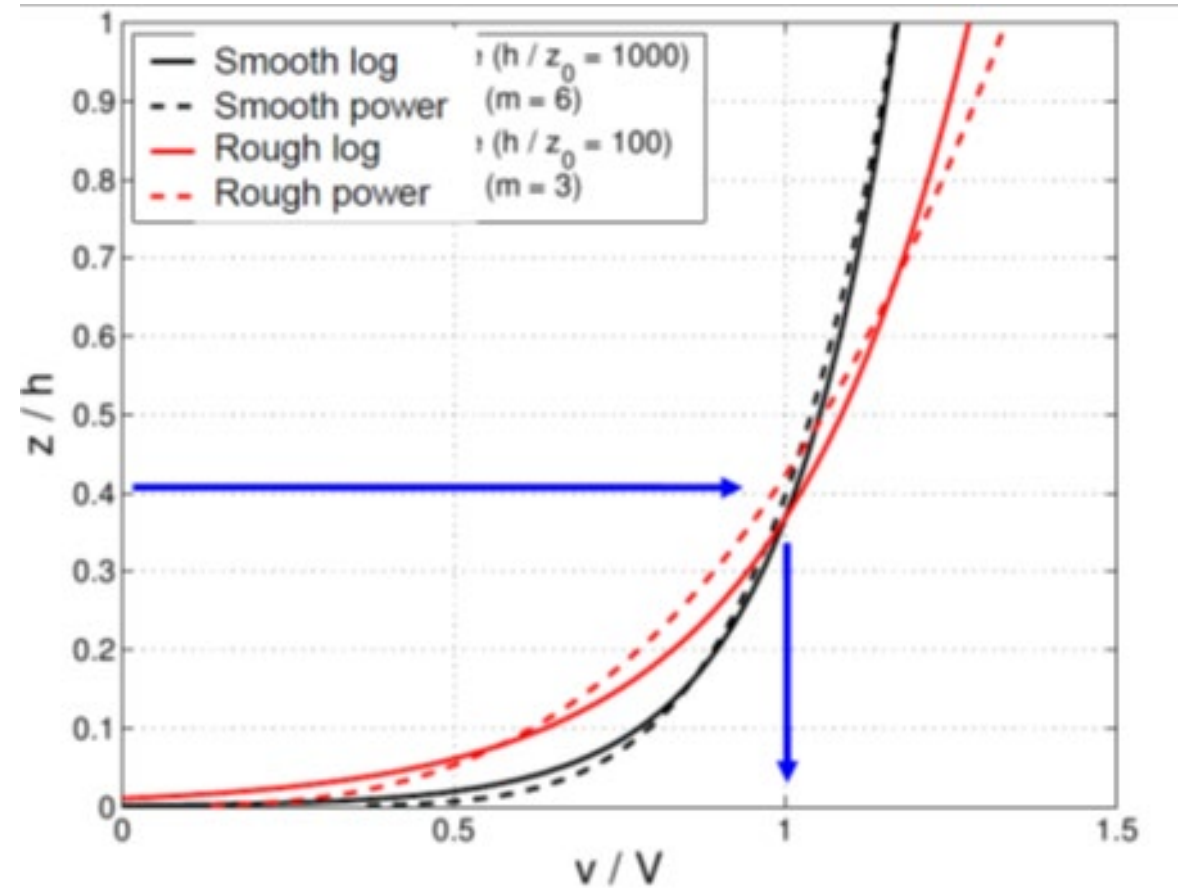
$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} = \sqrt{ghS}$$

$$\kappa = 0.41$$

$$z_0 = \frac{k_s}{10}$$

u_* : 摩擦速度, S : 河床勾配,
 κ : カルマン定数, k_s : 粗度高さ

$$\alpha_{\log} = \frac{V_m}{V_{surface}} = \frac{h}{h - z_0} \left[\ln \frac{z}{z_0} \right]^{-1}$$



表面流速係数 α の推定

十分発達した一様な流れの鉛直流速分布は、**べき乗分布**でも表せるが底面の粗度によって分布形は変化する

$$\frac{u(z)}{V_{Surface}} = \left(\frac{z}{h} \right)^{1/m}$$

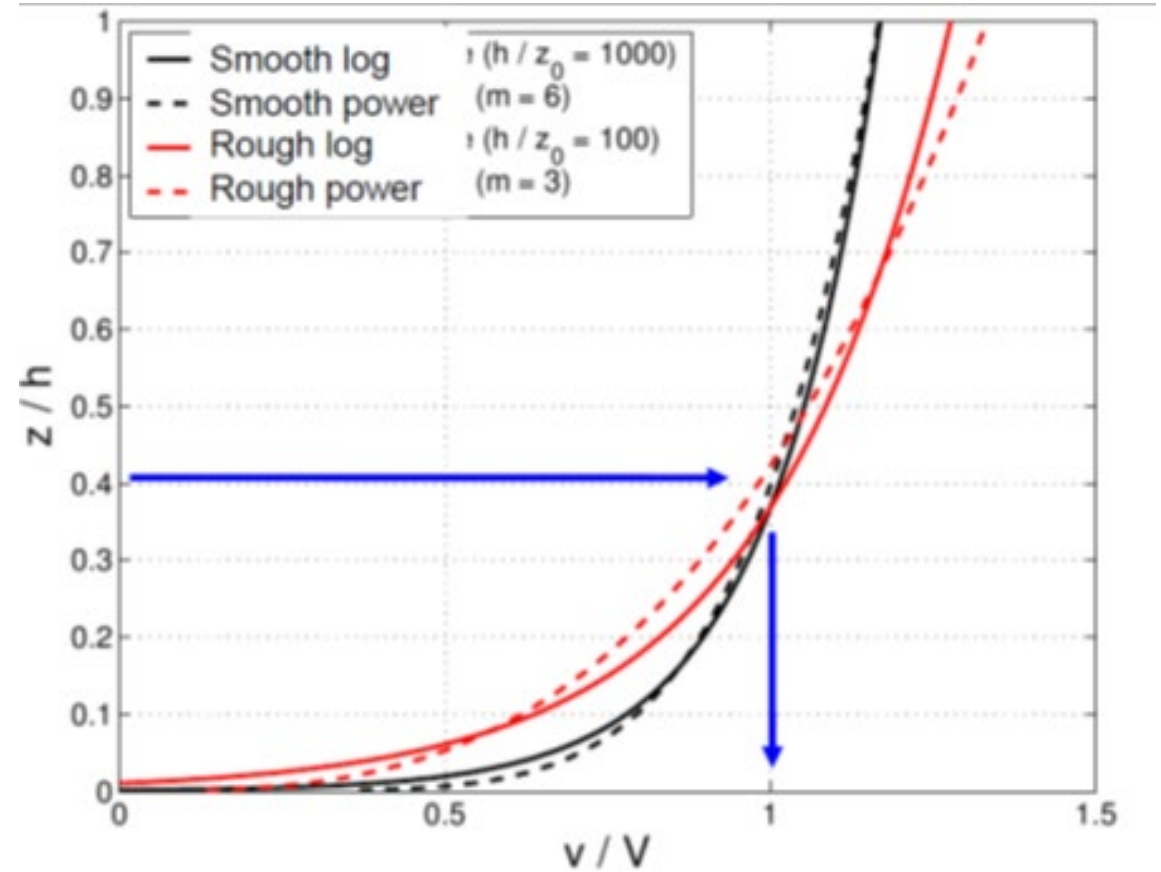
m: 粗度パラメータ

$$\alpha_{power} = \frac{V_m}{V_{surface}} = \frac{m}{m+1}$$

ex.

$$m=6 \Rightarrow \alpha=0.857$$

$$m=7 \Rightarrow \alpha=0.875$$

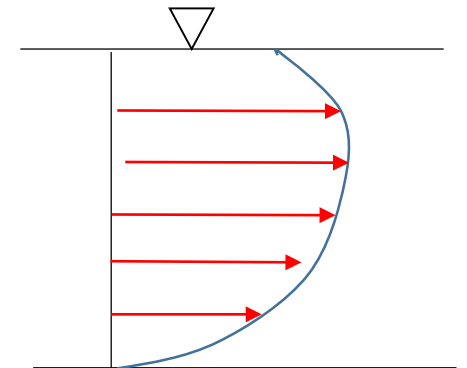


表面流速係数の目安 (ISO748)

	通常	滑らか	粗い	非常に粗い	極端なケース
m	6~7	10	4	2~3	
α	0.86~0.87	0.91	0.80	0.67~0.75	0.60~1.2

⇒ $\alpha=0.85$ が標準的な洪水時の値

⇒ **Velocity dip**が生じる場合は、 α は1以上となることがある
これは、幅の狭い河川や河岸近くで生じる二次流に起因する現象



ビデオ画像による表面流速計測の可能性

- 河川表面に現れる凹凸パターンは、視覚的には移動する濃淡画像のテクスチャー（波紋）と認識でき、その移動速度は表面流速を代表する
- 明るい部分は凹凸の山、暗い部分は谷の部分に対応する
- 電波流速計はこの凹凸パターンの移動速度をドップラー効果を用いて計測

1993 淀川



2012 魚野川



2018 信濃川



主流速分布の画像計測手法として開発されたSTIV

STIV: Space-Time Image Velocimetry: 時空間画像流速計測法

開発公表時期: 神戸大学において

国内: 藤田一郎・椿涼太: 小俯角のビデオ画像に対応した河川表面流計測手法の開発, 河川技術論文集, 7巻, pp.475-478, **2001**.

海外: Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique:

The space time image velocimetry (STIV), International Journal of River Basin Management, Vol.5, No.2, pp.105-114, **2007**.

商品化:

2014.5: KU-STIV (日本語版+英語版)

2020.6: Hydro-STIV (日本語版+英語版) ⇒ 国内コンサルタント、オーストラリア、クイーンズランド州政府が採用

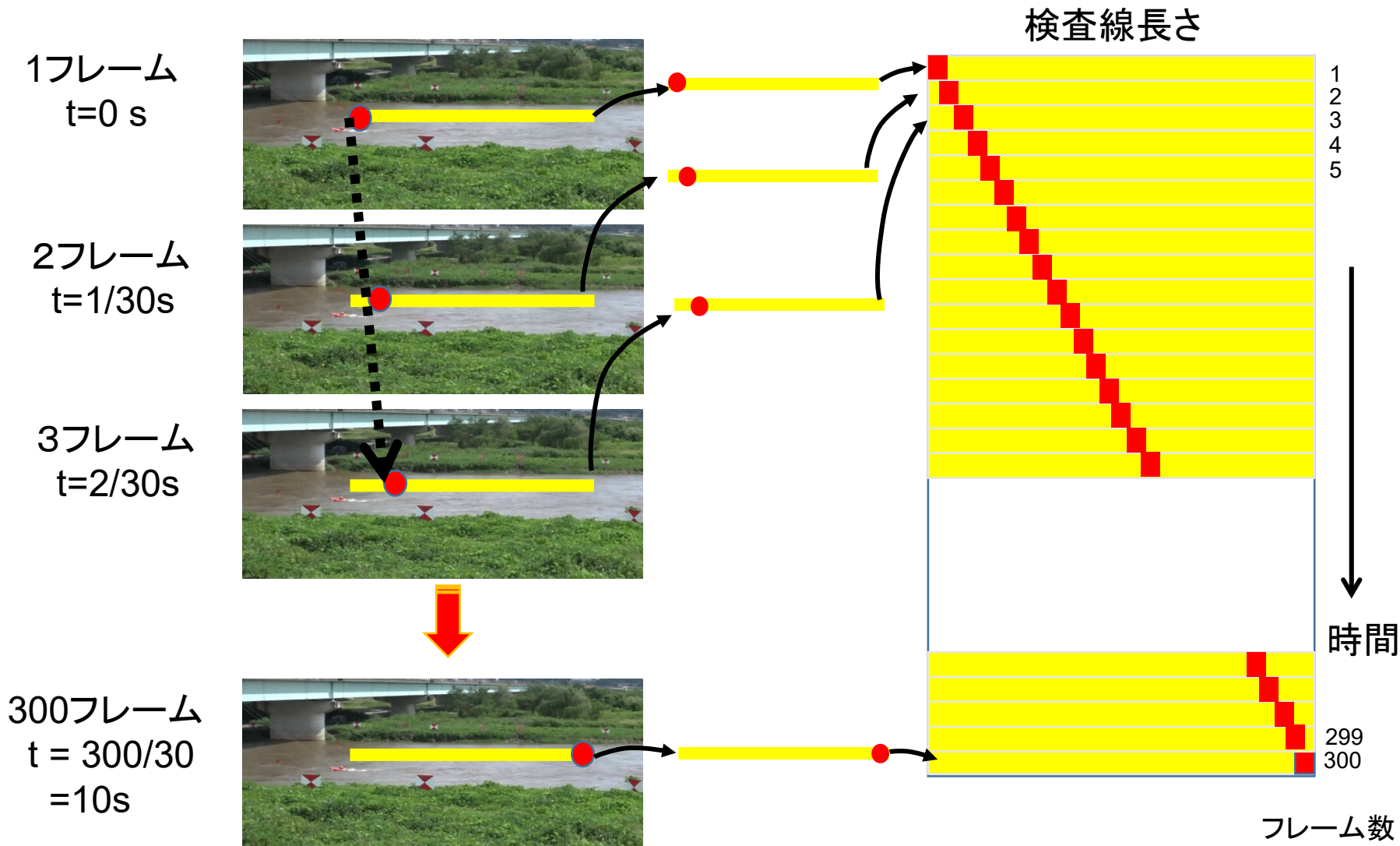
基本的考え方:

1. 流れの主流方向に検査線(数m~数10m)を想定する。
2. 各検査線上の輝度分布の時間変化を時空間画像(STI:Space-Time Image)として表現する
3. STIに現れるパターン勾配を自動検出する
4. パターン勾配から主流速を算出する(時間平均+検査線上平均)

仮定:

1. 検査線は主流方向に設置される
2. 検査線上で主流速は変化しない

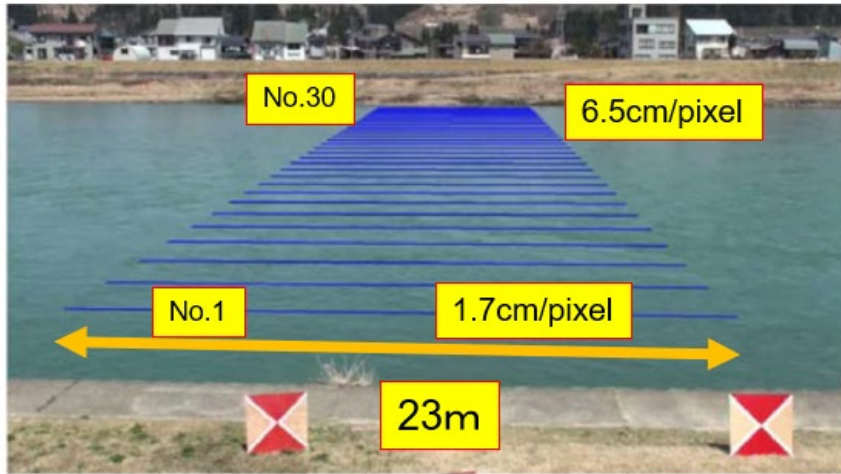
時空間画像STIの生成法



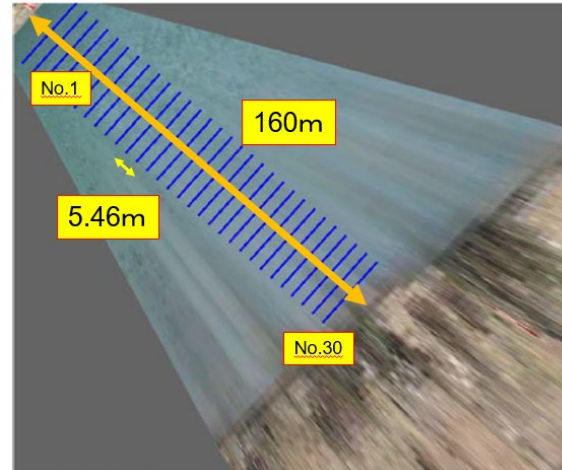
連続するすべての画像を使っているのが特徴

- ⇒ この例では10秒間で縦軸300ピクセルの画像が得られる
- ⇒ 浮遊物の軌跡が斜めの筋となって現れている
- ⇒ この軌跡の傾きは明らかに浮遊物の速度を表す
- ⇒ 浮遊物以外のテクスチャーも移動速度が同じなら平行な斜めのパターンとなって現れる
- ⇒ 実際のSTIにはノイズが大量に含まれる場合もあるので、正確に効率よく、パターン勾配を自動検出できることが流速計としての条件である

STIV解析の具体例（魚野川融雪洪水）



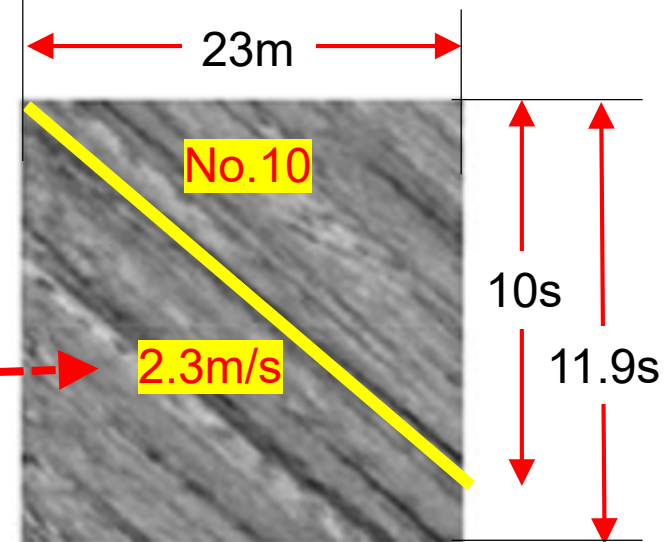
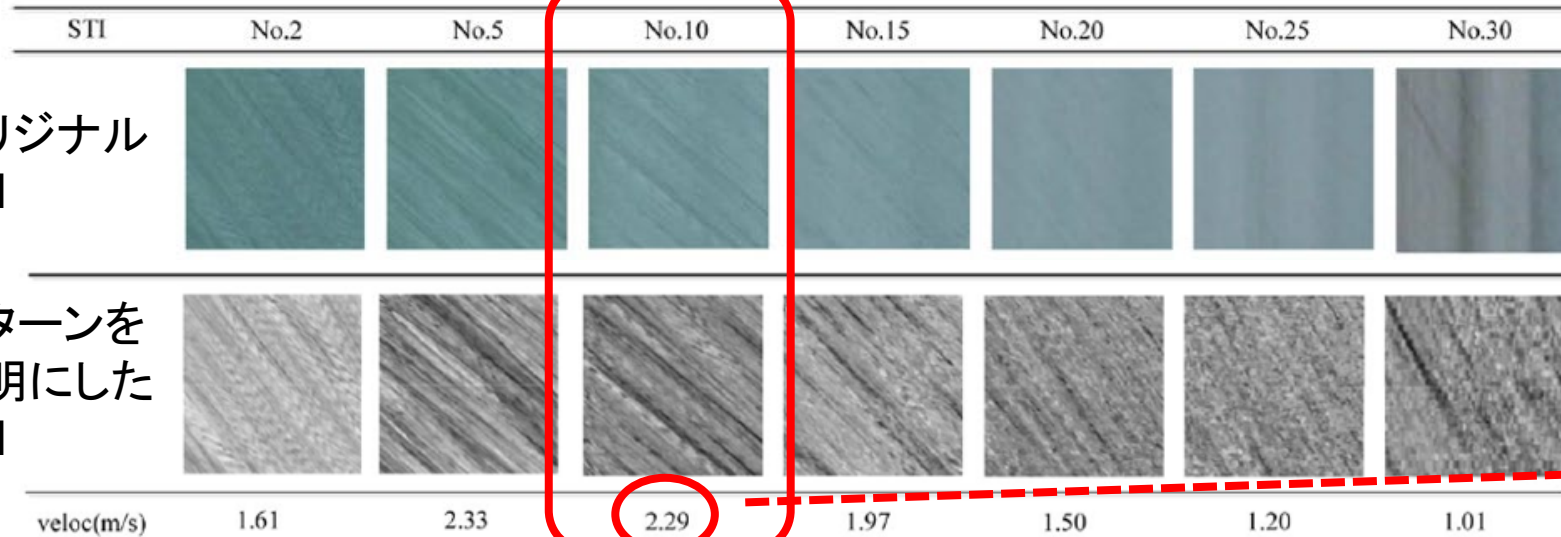
オルソ化



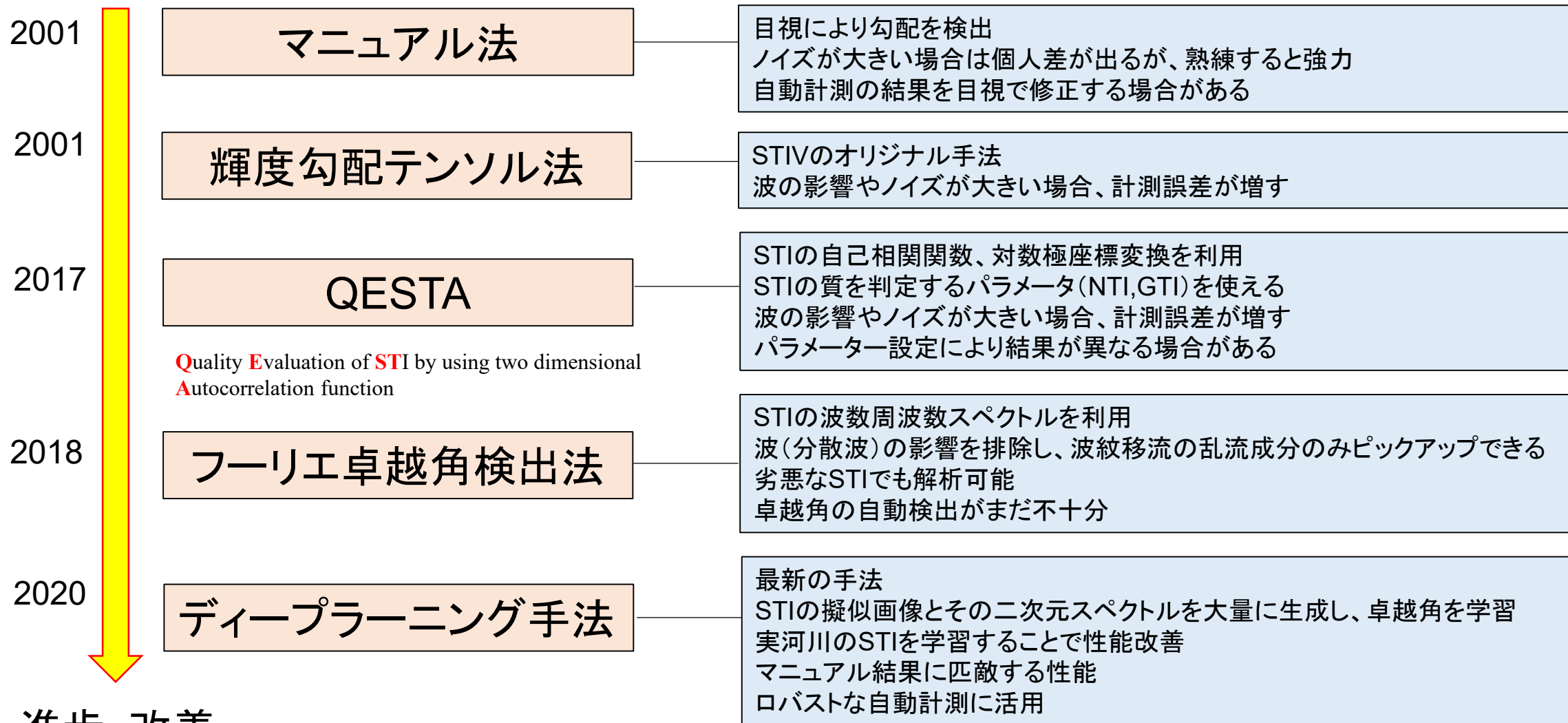
- ⇒ 実河川の洪水でもSTIにはトレーサーがなくても明瞭な傾斜パターンが現れる
- ⇒ このケースの検査線長さは23mで河川幅160mをカバーしている
- ⇒ 縦軸は11.9秒(358 frames)に相当
- ⇒ 流速は手動でも計算可

オリジナル
STI

パターンを
鮮明にした
STI



STI上のパターン勾配の検出手法



進歩・改善

既設の河川監視カメラの問題点と対策

夜間の撮影画像の画質が悪い

- ⇒ 画像がほぼ真っ暗
- ⇒ 動画が静止画的になる（フレーム蓄積モード）

動画データの記録状態

- ⇒ 記録期間が短い
- ⇒ 数日で上書きされるケースが多い
- ⇒ ウェブカメラ(IPカメラ)の場合はフレームが不安定で推奨できない

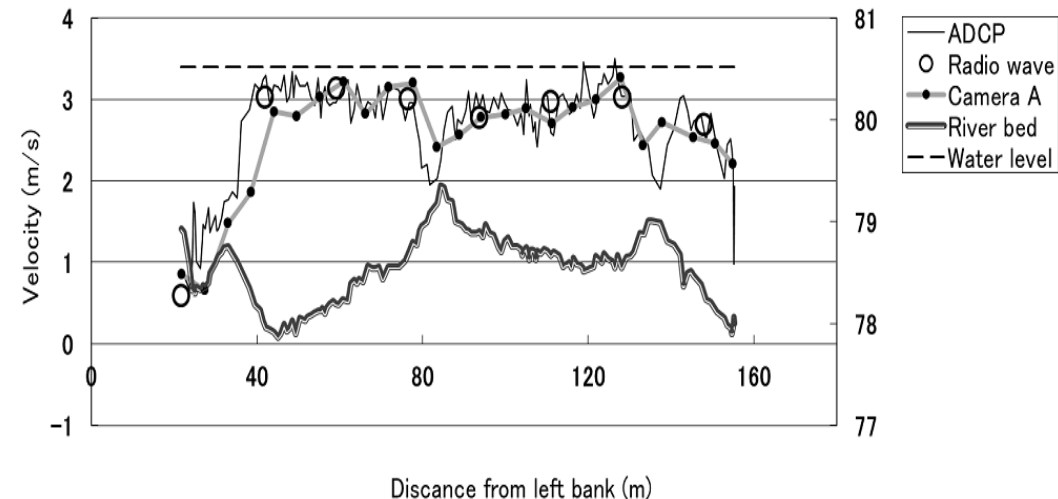
解決策

- ⇒ **遠赤外線カメラ**(サーマルカメラ)(+画像鮮明装置を推奨)
- ⇒ 高圧縮高画質のDVRの導入(1TBで2か月程度連続記録可能)
- ⇒ 中小河川なら**トレイルカメラ**も利用可能（夜間には近赤外線モードに切り替わる）

市販ビデオカメラ



遠赤外線カメラ

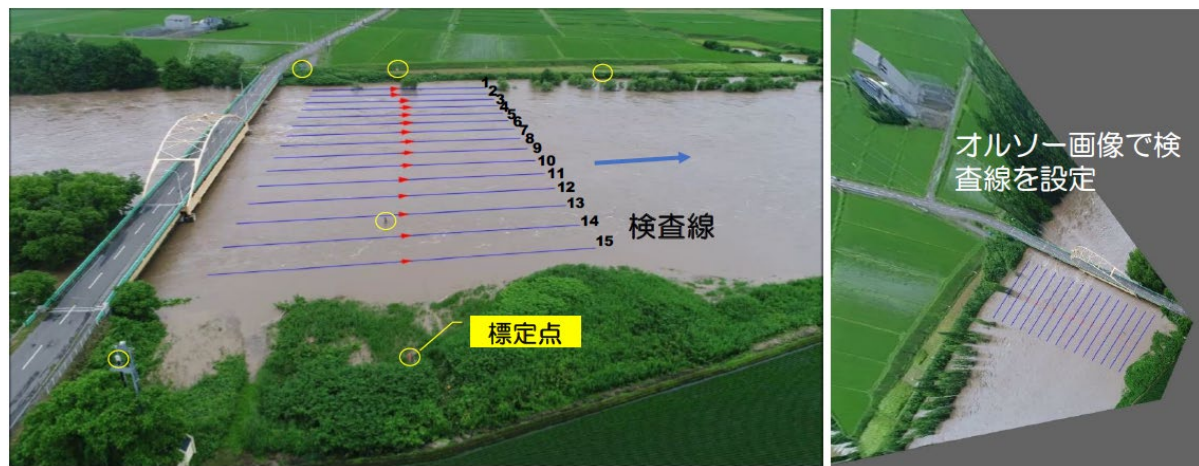


ドローンを使った計測例の紹介：Aerial STIV

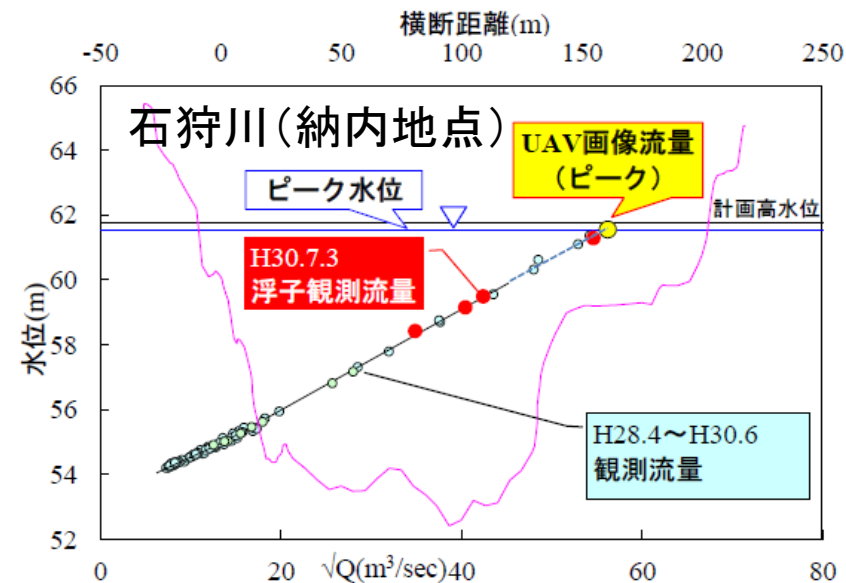
橋場雅弘・藤田一郎・萬矢敦啓・西山典志・太田陽子:大規模洪水時におけるUAVを用いたエアリアルSTIV法による流量観測の検証, 河川技術論文集, 第25巻, 157-162, 2019.



堤防が高くないため、撮影俯角が不十分



ドローンを高度50mで30秒間ホバリングさせ録画



計画高水流量に匹敵する流量の計測に成功

神戸市内急流都市河川の流量観測

河川監視と流量観測のために、妙法寺川水系の3カ所に監視カメラを設置
平成30年には20分で1.72mの水位上昇が観測された
河川幅は10~20m程度
河床勾配は、1/100のオーダー

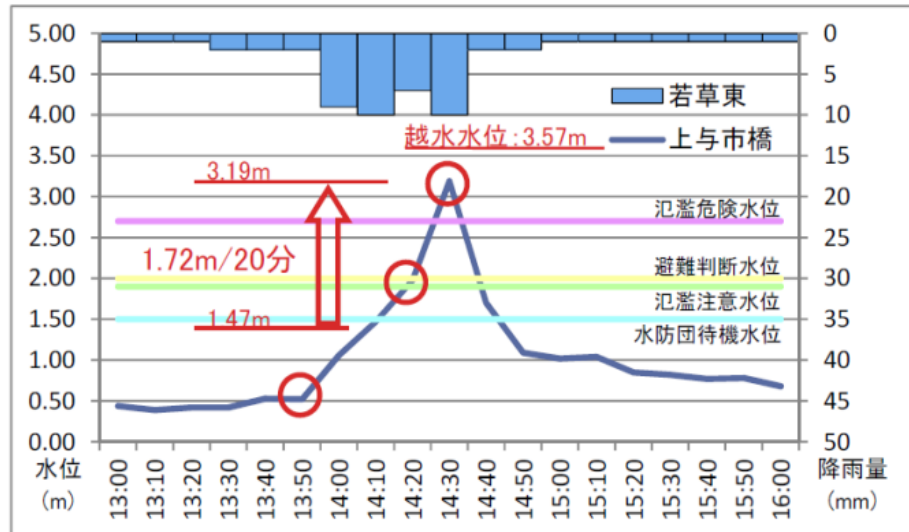


図-1 平成30年7月6日の出水



カメラ C (上与市橋上流)

取得されたビデオ映像：2018.9.4, 台風21号

妙法寺川, 上与市橋



早送り再生

妙法寺川, 獅子堀川



早送り再生

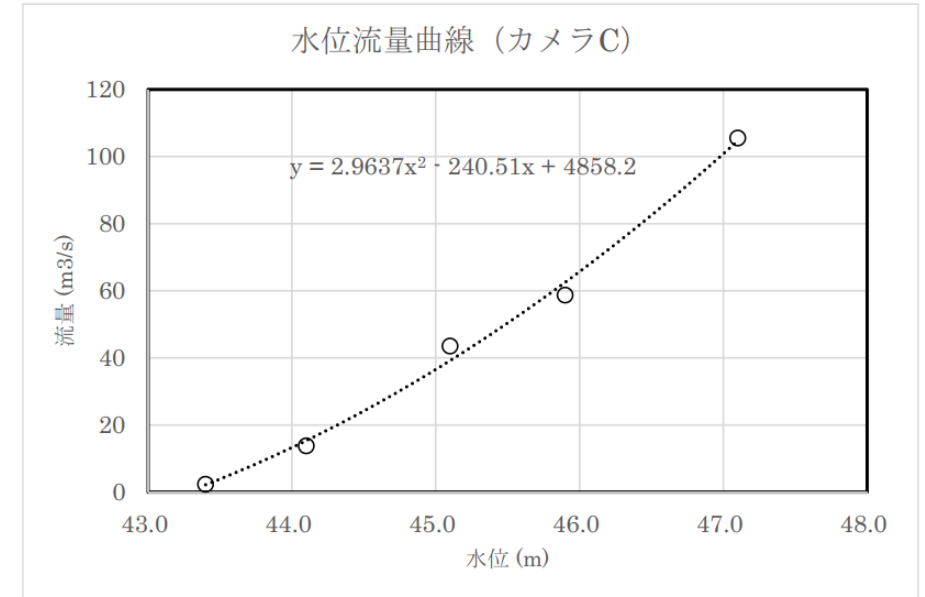


図-85 カメラ C 地点 (上与市橋上流) での水位流量関係

- ・ 中小都市河川の急激な水位上昇に伴う流量の変化をSTIVで計測した
- ・ 流速が5m/sを超える流れに対しても解析可能であった
- ・ 良好な水位流量曲線が得られた

まとめと今後の課題・展望

- ・ STIV解析にディープラーニングの手法を取り入れることで、解析の安定性や信頼性が高まり、リアルタイム計測システムの構築が現実的になった。
- ・ 悪天候時の映像によっては解析困難なケースもあり、ビデオ画像の収集は今後も不可欠である。
- ・ 昼夜を問わない流量観測をするためには、遠赤外線カメラの導入が非常に有効であり、重要な基準点などにはこの種のカメラを用いた流量観測専用の施設の導入が望ましい
- ・ 風の影響については不明な点もあり、今後の実測データの蓄積が必要である
- ・ 表面流速分布から流量を推定する際に用いる表面流速係数は通常は0.85が使われるが、ADCP等との同時計測で場所ごとの特性値を調べておくことが有用である。
- ・ アスペクト比の小さな河川では、velocity dipが生じる可能性が高いため、今後はエントロピー法による流量推定も検討する必要がある。
- ・ 全天候型ドローンが実用化されれば、小型カメラを搭載させ、低空でホバリングさせることにより、河川幅によらない表面流速計測を行える可能性がある