河川砂防技術研究開発
【成果概要】

①研究代表者	氏　名（ふりがな）	所　属	役　職
	二瓶　泰雄（にへい　やすお）	東京理科大学理工学部土木工学科	教授

②研究テーマ				
	名称	画像解析法と水理解析の連携による安全・安定的な河川水位・流量観測システムの確立と実用化		
	政策領域	［分野］河川技術分野 ［公募課題］洪水時の水理現象を把握するための水理解析及び観測の高度化に関する技術研究開発「(B)観測」	融合技術	（リモートセンシング、非破壊検査、認知行動学　等）

③研究経費（単位：万円） ※端数切り捨て。	平成２８年度	平成２９年度	平成　年度	総 合 計
	１，２２２	７７４	－	１，９９６

④研究者氏名

氏　名	所属・役職（※平成30年3月31日現在）
藤田　一郎	神戸大学・教授
椿　涼太	名古屋大学・准教授
鬼束　幸樹	九州工業大学・准教授
柏田　仁	パシフィックコンサルタンツ株式会社・主任技師
梶　純也	パシフィックコンサルタンツ株式会社・技師
浜口　憲一郎	パシフィックコンサルタンツ株式会社・担当部長
山﨑　裕介	パシフィックコンサルタンツ株式会社・課長代理
本多　信二	パシフィックコンサルタンツ株式会社・室長

⑤研究の目的・目標

河川における計画立案や維持管理，環境保全，洪水や渇水などの水災害に対応するためには，雨量や河川水位，流量を連続モニタリングし，データを蓄積することは必須であり，河川管理者により長年継続的に実施されている．このうち雨量に関しては，最新の観測機器が適宜導入・展開されている．一方，水位・流量観測に関しては，様々な計測法や水理解析法の新技術が開発されているにも関わらず，観測体制は長年大きくは変わっていない．特に，橋上等から浮子（浮き）を投下し，その移動速度を目視で観測する「浮子観測」は戦後直後に標準化され，現在まで標準的な洪水流量観測法として使用されている．しかしながら，これらの従来手法では，作業の安全性，データ取得の確実性，観測精度の面で多くの問題を抱えており，施設能力を超える洪水時でも安全で確実にデータを取得でき，一定の観測精度を担保でき，かつ観測コスト増を極力抑制し得るリアルタイム水位・流量観測技術の確立が求められている．

このためには，河川に多数設置されている CCTV カメラなどの撮影画像から水位・流速の非接触計測が可能な画像解析法が極めて有用である．この画像解析法では，量水標付近の水面検出による水位計測法や，水表面の波紋を用いた水表面流速解析法（STIV，Space-Time Image Velocimetry）等が提案されている．また，STIV から得られた「線」流速データから，「面」流速や流量を算出する際には DIEX 法（Dynamic Interpolation and EXtrapolation method）が有用である．しかしながら，これらの水位・流速解析法は個別に作られているため，一連の水位～流速～流量計測・算出システムとして統合されておらず，かつ，観測誤差評価や観測異常値の検出・棄却など観測システムのロバスト化に必要な検討は十分になされていない．上記の課題を解決して，超過洪水時でも安全・安定的で，無人・自動連続的な水位・流量リアルタイム観測システムを確立するために，観測技術（画像解析法）と水理解析技術（DIEX法）の連携による水位・流量観測システムを確立し，実用化への道筋をつけることを目的とする．

⑥研究成果

1．本研究の目的と概要

従来の水位・流量観測手法 [1]について，以下に示す課題，技術開発の重要性が認識されている．

（委託研究仕様書より抜粋）
施設の能力を上回るような洪水時には，流れが激しくなり，水位や流量の急激な増大に伴い，特に急流河川や河川の合流部周辺等において，現在の観測体制や観測手法では水位や流量などの把握が困難となる事例が見られる．また，越水や決壊の発生に至るような場合における，河川流量や越流量の把握手法は，確立されていない状況にある．そのため，洪水時の防災対応はもとより，河川計画の立案，工事の実施等に関して重要な情報である水位や流量等を施設の能力を上回るような洪水時においても安定的に把握するための技術が求められる．

本研究は，観測技術（画像解析法 [2)~4)]）と水理解析技術（DIEX 法 [5)~7)]）の統合によって，一連の水位～流速～流量計測・算出システムを開発し，超過洪水時でも安全・安定的で，無人・自動連続的な水位・流量のリアルタイム観測を確立するために，（1）水位・流量観測システムの統合化，（2）現地実証実験と（3）室内実験を行い，本システムの性能検証と（4）高度化を行うものである．

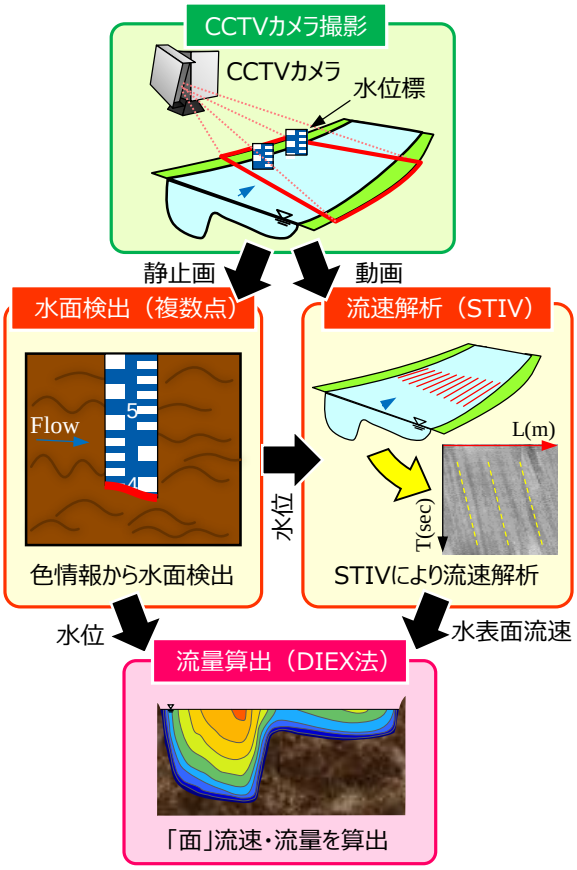


図 1　本システムの模式図

2．研究成果

以下に，主な研究成果を端的に述べる．

(1) サブシステムの統合化

本システムは，4 つのサブシステムから構成されることから，これらを統合化し，一連のシステムとして構築した．具体には，①CCTV カメラ撮影制御，②水面検出アルゴリズム，③流速計測用 STIV，④流量算出用 DIEX 法，という各サブシステムを個別に開発し，これらの結合を行った（図 1）．

(2) 現地実証試験

本システムのプロトタイプを遠賀川・勘六橋地点（河口から 19.9km，図 2）に試験導入した．レーザースキャナ搭載型高感度 CCTV カメラ（FV-2000，三菱電機エンジニアリング製）を右岸側建物屋上に設置し，30fps の設定で 10 分間隔で撮影した．撮影範囲は夜間にて街灯等の照明を考慮して勘六橋付近とした．

まず，本システムによる水位の時系列データを図 3 に示す．ここでは，基準・第一見通断面の結



図 2　観測サイトと測器設置概要

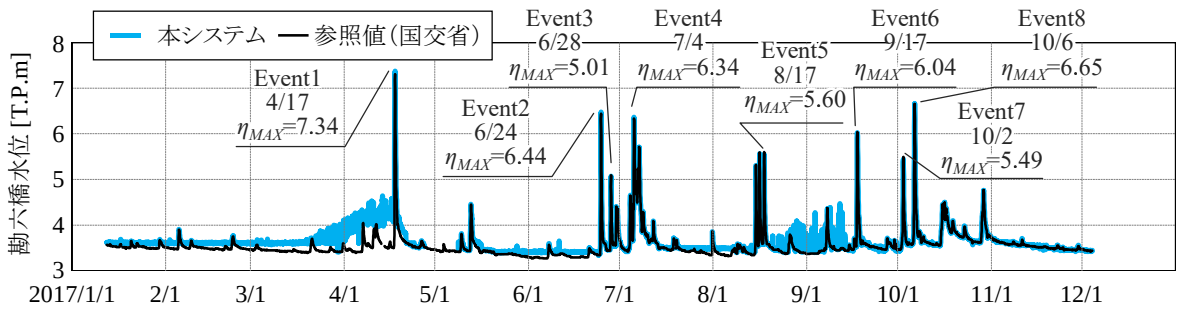


図 3　WDIC による長期水位解析結果（基準・第一見通断面）

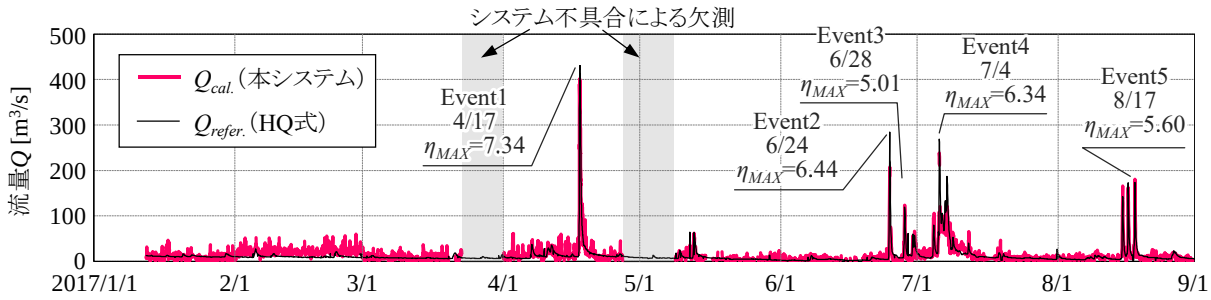
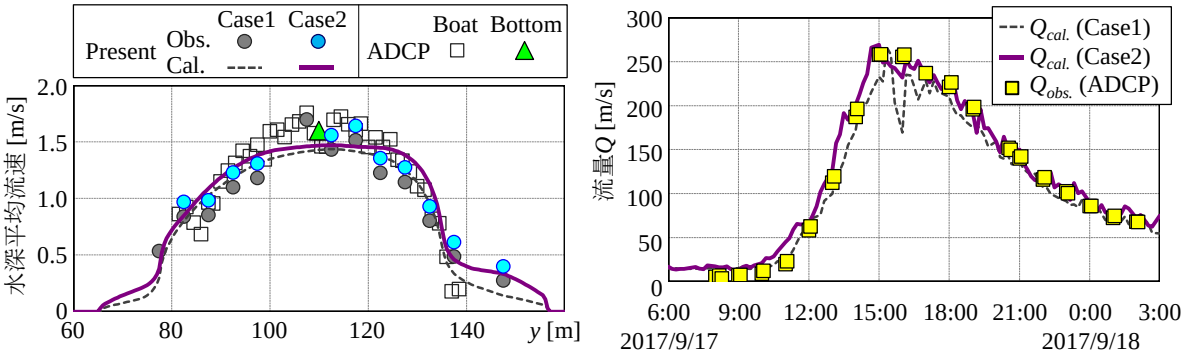


図 4　本システムによる長期連続流量算定結果（2017/1/12～2017/8/31）



(a) ピーク時における水深平均流速の横断分布　　(b) 流量の時間変化

図 5　Event6 における水位・流量の推定結果

果を示し，参照値として国交省による水位観測値（精度：1cm）を併せて表示した．これより，本システムは自動連続的に水位検出が可能であるが，参照値との乖離も認められる．具体には，計測レンジを下回る場合に下限値を出力している点や，3 月中旬～4 月中旬，8 月中旬～9 月中旬にかけて河道内植生の繁茂により量水板の視認が遮られ，植生上端を水面と誤判定した．一方，洪水時には自動連続かつ高精度で水位観測を行うことが可能であった．

本システムによる流量算出結果として，2017 年 1 月から 8 月末までの長期間にわたる流量時間変化を図 4 に示す．ここでは，参照値として平成 29 年度に実施した ADCP 観測流量データに基づく H-Q 流量を合わせて示しており，本システム・H-Q 式ともに 1 時間間隔のデータである．本システムは，システム不具合（所定画角外の撮影）を除いて，流量の算定ができており，ロバスト性が示された．

次に，ADCP 観測データによる詳細な精度評価が可能な Event 6 を対象に，流速・流量の算定結果について記述する．まず，出水のピーク時の水深平均流速横断分布を図 5(a)に示す．ここでは，STI 分割法による異常値棄却を施す Case1 と，STI 分割に加えて風向風速補正と DIEX 法解析に基づく異常値棄却を施す Case2 の結果を表示している．Case2 の流速分布推定結果は ADCP 観測値と概ね良好に一致した．図 5(b)には流量時間変化を示しており，本システムによる流量推定値は検証用 ADCP 観測データと良好に一致し，昼間帯・夜間帯を問わず，概ね高い精度で流量が観測されていることが分かる．

（3）室内実験

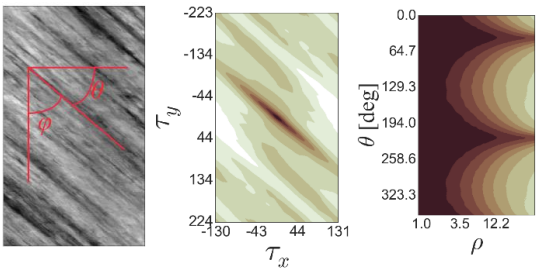
STIV の計測対象である水面波紋の移流現象及びその撮影は，観測サイトの環境の影響を受けると考えられる．具体には，照度や降雨・霧などは水面波紋の撮影品質に影響を与え，風は水面波紋移流現

象に影響を与えることが想定されるが，様々な要因が重なる現地観測データからSTIV解析結果に各々が与える影響を分離して評価することは容易ではない．そこで，光環境・視程・風向風速それぞれがSTIV解析に与える影響を定量評価するために，室内実験を行った．

東京理科大学所有の小型水路（長さ9.0m, 幅0.60m, 高さ0.44m，勾配1/1000）を用い表面流速横断分布を計測する（**図-5**）．撮影区間（長さ2.08m）の上流にさん粗度を設置し波紋を起こし，CCTVカメラ（FF-200, ㈱三菱電機エンジニアリング製）により撮影した．撮影条件はFULL HD，30FPS，撮影時間は30秒である．流量Qは照度実験では0.021m^3/s，その他では0.022m^3/sで一定とし，区間平均水深は0.077mとした．検証用にピトー管を用いた．標定点を24点，長さ0.60mの検査線を9本を設けた．STIVではBand pass filter（BPF）使用の有無と，STI分割法使用の有無を選定した．

表 1　室内実験のケース一覧

環境項目		設定
光	照度	130lx，10lx，2lx
	照明	直接照射あり，なし
視程		良好，やや不良，不良
風向風速		順風（+2.4m/s）， 無風（0.0m/s） 逆風（-2.6m/s，-3.3m/s）



(a) STI　(b) 自己相関関数　(c) 対数極座標変換

図 6　QESTAの概念図

実験ケースは**表 1** に示すとおりに設定し，ピトー管計測値との比較検証を行うことで，以下の結果を得た．まず，STI分割法とBPFの併用により，低照度環境でも水面に照明が直接照射されていれば，STIV流速はピトー管と良好に一致した．また，視程低下に伴って有効な流速解析データ数が減少するが，流速解析ができた測線については概ね良好な流速データが得られた．風向風速に対しては，本実験のような低風速条件（＜約3m/s）では風速依存性がほぼないことが示された．一方，現地実証試験ではSTIV流速解析値に吹送流が作用していること示唆されており，広範な風向・風速条件下で行うことによって，風向風速による影響および影響除去方法を検討する必要がある．

(4) 異常値棄却法の提案

a) 簡便な異常値棄却手法

STIVでは， STIに見られる縞模様の傾きを輝度勾配テンソル法により求め，それを流速とする．これで流速を求めると計測異常値がたびたび見られた．そこで新たな異常値棄却法として，以下の手順で行う．

① STIを時間・空間方向に複数に分割する．
② 分割後の各STIに対して輝度勾配テンソル法を適用し，分割STI毎の流速値を求める．
③ 全データの中央値を流速とし，それ以外のデータを棄却する．なお，中央値判定時には，明らかに異常な流速範囲（ここでは負の流速）は除外する．

b) 新しいSTI品質指標の提案

QESTA（Quality Evaluation of STI by using Two dimensional Autocorrelation function）と称する新たなSTIの品質評価手法を開発した．本手法では，STI（**図 6(a)**）の自己相関画像（**図 6(b)**）を生成する．この画像には，STIに現れている平均的に傾いたパターンに対応する自己相関分布が現れる．この自己相関画像の別表現として，自己相関画像の中心点を基準とし，放射方向に中心点付近の情報を重要視しながら相関分布を展開する対数極座標による表示を行う（**図 6(c)**）．理想的なSTIでは，「方向軸相関の平均が最大値となる角度と最小値となる角度が直交する」・「自己相関関数の等高線で構成される楕円形は細長くなる」ため，これらを定量化したGTI・NTIを新たなSTIの品質指標とした．

3．今後の展望

本研究では，遠賀川・勘六橋に自動連続観測システムを試験導入し，河川を対象とする画像解析システムとしては前例のない長期連続の現地観測を実施した．さらに，詳細を分析するための室内実験を通して，簡便かつ有効な異常値棄却法を提案し，本システムのロバスト化・高精度化を達成した．さらなる観測事例の蓄積によるロバスト化や風向風速補正法の確立が急務であるが，本システムにより，従来の観測限界を突破し，安全・安定的な自動連続の水位・流量モニタリングの実現が期待される．また，本システムの最大の特徴であるCCTVの有効活用という観点では，従来の管理用の用途に

加え，水位や流量計測用に CCTV カメラを利用することを提言する．

また，本研究では，現地実証試験サイトとして下流域を選定したが，観測橋梁がなく浮子投下機を用いているような山間部の観測所では，中小規模出水の観測でも大変な労力がかかっている．このような観測所では，本システムの導入により，すぐさま安全性・安定性・確実性の向上が期待でき，導入効果が大きいことを付記しておく．

４．河川等政策への質の向上への寄与

本研究では，河川水位・流量観測にて実際に適用される可能性を考慮し，実用化を念頭に置いた検討・開発を行った．近年，超過洪水の多発化によって，水位・流量ともに計測が困難となる事例が多数見られることに加え，観測作業の負担や安全性の問題から流量観測業務の業務不調が生じている．従来法に代わる安全・安定的で無人・自動連続的な水位・流量リアルタイム観測システムの構築が急務であり，本研究成果がこれに合致する．本システムは，画像解析による非接触計測と水理解析を組み合わせることによって，従来の浮子観測のように，観測員が現場に急行する必要や，H.W.L.以上の危険な状況で観測作業を行う必要がない．また，上記の組み合わせによって，データ取得の確実性，観測精度を高めることができる．さらに，河川監視のために無数に存在する CCTV カメラネットワークをベースとすることで，導入にかかるコストは低廉である．現在でも画像解析・水理解析のソフトウエアが個別に販売され，広く普及しているが，本研究を通してこれらが統合され，かつ，観測システムとして確立したことで，河川流量観測業務にも取り込みやすくなったものと考えられる．

５．主な発表論文及びホームページ等

1） 能登谷祐一，藤田一郎，建口沙彩：河川表面流画像計測STIVにおける新手法とSTI画質評価法の開発，土木学会論文集B1（水工学），Vol.73，No.4，I_505-I_510，2017.
2） 柏田仁，二瓶泰雄，中西徹真，鈴木佑弥，平謙二，上田英滋，梶純也，藤田一郎：非接触計測と水理解析による河川水位・流量観測システムの確立に向けた検討，河川技術論文集，Vol.23，pp.263-268，2017.
3） 中西徹真，二瓶泰雄，柏田仁：画像解析法（STIV）の汎用化・自動化のための流速異常値棄却法の提案，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.72，Ⅱ-163，2017.
4） 椿涼太，二瓶泰雄，藤田一郎：スマートフォンを利用した可視化流量観測アプリケーションの開発，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.72，CS15-001，2017.
5） 鈴木佑弥，柏田仁，二瓶泰雄，藤井倫仁，平謙二，上田英滋，梶純也，藤田一郎：STIV-DIEX法統合型システムの長期連続流量モニタリングへの適用，土木学会論文集B1（水工学），Vol.74，No.4，I_667-I_672，2018.

６．参考文献

1） 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準　調査編，pp.51-85，2012.
2） 前原秀明，長瀬百代，平謙二：渇水時の量水板画像を利用したCCTVカメラ映像からの水位計測方法，写真測量とリモートセンシング，Vol.55，No.1，pp.66-68，2016.
3） 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.
4） 原浩気・藤田一郎：実河川の流れ計測におけるSTIV法の改良について，可視化情報学会誌, Vol.29, No.1, pp369-369, 2009.
5） 二瓶泰雄，木水啓 : H-ADCP観測と河川流量計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築，土木学会論文集B，Vol.63 No.4，pp.295-310，2007.
6） Nihei, Y. and Kimizu, A.：A new monitoring system for river discharge with H-ADCP measurements and river-flow simulation, Water Resources Research, Vol.44, W00D20, doi:10.1029/2008WR006970, 2008.
7） 柏田仁，藤田一郎，本永良樹，萬矢敦啓，二瓶泰雄，中島洋一，山﨑裕介：統一された流速内外挿法に基づく様々な流速計測技術の流量推定精度，土木学会論文集B1（水工学），Vol.69，No.4，I_739-I-744，2013.

⑦研究成果の発表状況

（本研究の成果について、予定しているものも積極的に記入して下さい。（以下記入例）
・これまでに発表した代表的な論文
・著書（教科書、学会妙録、講演要旨は除く）
・国際会議、学会等における発表状況
・主要雑誌・新聞等への成果発表
・学術誌へ投稿中の論文（掲載が決定しているものに限る）
・究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況
・企業とのタイアップ状況
・特許など、知的財産権の取得状況
・技術研究開発成果による受賞、表彰等）

1) 能登谷祐一，藤田一郎，建口沙彩：河川表面流画像計測STIVにおける新手法とSTI画質評価法の開発，土木学会論文集B1（水工学），Vol.73，No.4，pp.I_505-I_510，2017.
2) 能登谷祐一, 藤田一郎, 建口沙彩: 三次元検査空間を用いた河川表面流ベクトルの計測手法STVVの開発，土木学会論文集B1（水工学），Vol.73，No.4，pp.I_511-I_516，2017.
3) 柏田仁，二瓶泰雄，中西徹真，鈴木佑弥，平謙二，上田英滋，梶純也，藤田一郎：非接触計測と水理解析による河川水位・流量観測システムの確立に向けた検討，河川技術論文集，Vol.23，pp.263-268，2017. **（優秀発表者賞受賞）**
4) 中西徹真，二瓶泰雄，柏田仁：画像解析法（STIV）の汎用化・自動化のための流速異常値棄却法の提案，平成29年度土木学会年次学術講演会概要集，Vol.72，Ⅱ-163，2017.
5) 椿凉太，二瓶泰雄，藤田一郎：スマートフォンを利用した可視化流量観測アプリケーションの開発，平成29年度土木学会年次学術講演会概要集，Vol.72，CS15-001，2017.
6) 鈴木佑弥，柏田仁，二瓶泰雄，藤井倫仁，平謙二，上田英滋，梶純也，藤田一郎：STIV-DIEX法統合型システムの長期連続流量モニタリングへの適用，土木学会論文集B1（水工学），Vol.74，No.4，I_667-I_672，2018.
7) Yuya SUZUKI, Jin KASHIWADA, Yasuo NIHEI, Tomohito FUJII, Kenji TAIRA, Eiji UEDA, Junya KAJI and Ichiro FUJITA: Automatic and continuous discharge monitoring with space-time image velocimetry (STIV) and dynamic interpolation and extrapolation (DIEX) method, Proceedings of 21th congress of International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, Asia Pacific Division (IAHR-APD), 2018. （掲載決定）
8) ㈱ネクストパブリッシング：既存のインフラを使って河川の水位・流量のリアルタイムモニタリングを実現，GIS NEXT（特集：精密環境観測の最前線），pp.20-23，2018.

⑧研究成果の社会への情報発信

（ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。）

1) 東京理科大学によるプレスリリース（2017/06/13）
高感度CCTVカメラ撮影・画像解析・水理解析の融合による河川水位・流量のリアルタイムモニタリングシステムを開発～2020年の実用化を目指して実証試験中～
http://www.tus.ac.jp/today/20170614001.pdf
2) 神戸大学によるプレスリリース（2017/06/15）
洪水時も安全に水位・流量が計測可能なシステムを開発 ―2020年の実用化を目指して実証試験中―
http://www.kobe-u.ac.jp/research_at_kobe/NEWS/news/2017_06_14_01.html
3) マイナビニュースによる記事掲載（2017/06/26）
理科大など、河川水位・流量のリアルタイムモニタリングシステムを開発
https://news.mynavi.jp/article/20170626-a038/
4) 日刊工業新聞による記事掲載（2017/07/17）
東京理科大など、川の流量−即時観測するシステム開発、監視カメラで水位解析
https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00435984
5) パシフィックコンサルタンツによるプレスリリース（2017/08/25）
「2017年度河川技術に関するシンポジウム」で「優秀発表者賞」を受賞しました
https://www.pacific.co.jp/news/2017/20170825-000348.html

⑨表彰、受領歴

（単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。）

2017年　河川技術に関するシンポジウム優秀発表者賞　受賞
柏田仁　「非接触計測と水理解析による河川水位・流量観測システムの確立に向けた検討」

⑩研究の今後の課題・展望等

（研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。）

本研究では，河川水位・流量の自動連続・リアルタイム観測システムを構築し，河川向けの画像解析システムとしては前例のない長期現地実証試験を行った．実証試験により，システムのロバスト性が向上し安定的な動作が確立され，実運用が可能な段階に達している．本システムの性能評価や改良のためには，様々な河川・観測所への導入を進め，知見をシステムに反映していく必要がある．また，水表面流速に対する風向風速の与える影響については，全国各地での単発的な観測事例も見られるが，一般化に至るまでの蓄積，とりまとめがなされているとは言い難い．国土交通省主導による観測・とりまとめが必須である．

平成28年の水文観測業務規程の改定により，浮子以外の流速計の使用や，更正係数・区分断面内流速一様の仮定以外の流量算出法の適用が可能となっているが，流量観測の現場に十分に落とし込みがされていない状況にある．特に，観測用の橋梁がなく浮子投下機を用いるような山間部の観測所では，中小規模出水の観測でも大変な労力がかかっており，本システムの導入によって，すぐさま安全性・安定性・確実性の向上が期待できるため，所管事務所による積極導入を期待する．

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

（本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。）

本研究では，河川水位・流量観測にて実際に適用される可能性を考慮し，実用化を念頭に置いた検討・開発を行っている．近年，超過洪水の多発によって，水位・流量ともに計測が困難となる事例が多数見られることに加え，観測作業の負担や安全性の問題から流量観測の業務不調が生じており，従来法に代わる安全・安定的で無人・自動連続的な水位・流量リアルタイム観測システムの構築が急務となっており，本研究成果がこれに合致する．

本システムは，画像解析による非接触計測と水理解析を組み合わせることによって，従来の浮子観測のように，観測員が現場に急行する必要や，H.W.L.以上の危険な状況で観測作業を行う必要がない．また，上記の組み合わせによって，データ取得の確実性，観測精度を高めることができる．さらに，河川監視のために無数に存在するCCTVカメラネットワークをベースとすることで，導入にかかるコストは低廉である．

現在でも画像解析・水理解析のソフトウエアが個別に販売され，広く普及しているが，本研究を通してこれらの統合が図られ，かつ，観測システムとして確立したことで，河川流量観測業務にも取り込みやすくなるものと考えられる．