

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289165

研究課題名(和文)革新的な水中音響技術を用いた河川流量観測法の高度化

研究課題名(英文) Sophistication of streamflow measurement method using an innovative underwater acoustic technique

研究代表者

川西 澄(Kawanisi, Kiyosi)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40144878

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、申請者が開発した河川音響トモグラフィシステム(FATS)を改良し、河川流量の長期連続観測を実現したものである。高感度・高精度タイミングGPSモジュールを用いて改良したFATSの性能試験を、江の川(川幅110 m、平均水深0.8～2.5 m)で行った。GPSモジュールが出力する正確な10 MHz信号をFATSのベースクロックとして使用した。258日間の連続観測から、FATSの信頼性と良好な観測精度を確認した。さらに、河川の両岸に4個ずつのトランスデューサーを配置して音線網を形成し、インバース解析による河川蛇行部における水深平均流速ベクトルの水平分布を連続的に推定することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Acquiring streamflow estimates is crucial in hydrological studies, extreme event analyses and water resources management. This study demonstrates the improved fluvial acoustic tomography system (FATS), which are equipped with new GPS receivers that provide two accurate timing signals. The signal of 10 MHz, which has excellent long-term frequency accuracy and stability, is used as the base clock of FATS for high-precision transmitting/receiving signal processing. These improvements make the previous FATS more stable and allow the long-term running of the system. Streamflow measurements were performed in a mountainous river (mean depth: 0.8～2.5 m, width: 115 m) during 258 days. The results show the FATS enables us to collect reliable and accurate discharge data for long periods. Moreover, an array of acoustic stations is deployed and a depth-averaged flow velocity distribution pattern is continuously reconstructed using inversion schemes.

研究分野：土木工学

キーワード：河川流量 洪水 水資源 水循環 音響トモグラフィ法

### 1. 研究開始当初の背景

申請者らは感潮河川流量の自動計測を実現するために、革新的な音響トモグラフィ技術を用いた次世代超音波流速計(以下、河川音響トモグラフィシステム:FATS)を開発し、これまで流量観測が困難であった、塩水遡上のある水位変化の大きな感潮域でも流量の自動連続観測が可能であることを実証した。また、浅い礫床河川に対するFATSの適用性を三次市の江の川で検証しており、流量と断面平均水温の連続計測に成功している。

最近はADCP(超音波ドップラー流向流速分布計)による横断観測も行われるようになり、高精度な流量データが取得できるようになったが、長期にわたる連続観測や洪水時の観測は依然として困難である。

FATSは、河床と水面をウェーブガイドとして伝わる音波を利用し、断面内の流速分布に対する更正係数を必要としない画期的な観測装置で、河川流量観測における問題点を克服できることが期待される。

### 2. 研究の目的

上記の背景とこれまでの研究成果をもとに、本研究では以下の事項を明らかにし、安全で確実な河川流量観測法を確立する。

(1) 確実な流量計測を実現するためには、受信波に対する十分高い信号対雑音比(SNR)を確保することが重要である。そこで、計測システム(FATS)と河川の物理環境に起因するSNRの低下機構の解明を進める。

トランスデューサーの発振周波数に含まれている誤差をなくすため、新たに高精度タイミングGPSモジュールを用いて正確な発振周波数を生成し、SNRの改善効果を調べる。

音波の伝播に必要な最小水深は、主に音波の波長に関係すると考えられる。SNRの長期連続観測から、FATSの計測に支障が生じない水深限界を明らかにする。

(2) 時間的に流向が変化する河川の流量精度を向上させるため、複数の送受信ラインを用いたクロス音線法による流向計測やインバース解析による水深平均流速ベクトルの水平分布の推定を行い、流量の計測精度の改善効果を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 河川音響トモグラフィ法においては、十分な信号対雑音比(SNR)を確保し、正確な音波の伝搬時間を計測する必要がある。そのため、以下のサブ項目を実施する。

トランスデューサー発振周波数の高精度化

従来のFATSを改良し、u-blox社の高精度タイミングGPSモジュール(LEA-6T)が出力する正確な10MHzの信号をもとに必要な周波数を発生させ、これを利用してトランスデューサーを発振させる。

複数周期のM系列信号の使用とプリアン

プの改良によるSNRの向上

発信パルスとして複数周期のM系列で位相変調した音波を用い、SNRの向上効果を検討する。設定パラメーターファイルの内容に応じてM系列の次数と周期の数を変えられるようFATSの制御プログラムを改良する。また、トランスデューサーで受信した信号を増幅するプリアンプに、ノイズ低減用フィルターを設け、SNRの低下を軽減する。

(2) FATSの現地適用条件を明らかにするため、SNRの長期連続計測を行い、伝搬損失に関係する水深と浮遊土砂の影響を調べる。音波の送受信ラインに沿った水深分布は、ADCPを移動させて計測する。浮遊土砂濃度は濁度計による濁度計測および採水、濾過による重量濃度測定を実施して測定する。

(3) 河川流の流向が水位とともに変化する場合を想定し、断面平均流速に加えて、クロス音線法により流向を連続計測し、流量観測精度の向上効果を検討する。

(4) 河川の蛇行部の両岸に複数のトランスデューサーを配置し、インバース解析を行って水深平均流速ベクトルの水平分布を推定する。

### 4. 研究成果

(1) 改良型FATSを用いた長期連続観測

長期に渡って安定した計測を行うために、高感度・高精度タイミングGPSモジュール(u-blox社LEA-6T)を用いて改良したFATSの性能試験を、広島県三次市を流れる江の川で行った。高精度タイミングGPSモジュールが出力する正確な10MHz信号をFATSのベースクロックとして用い、さらにプリアンプを改良した結果、SNRを5~10dB増加させることに成功した。改良型FATSは、高感度LEA-6Tを使うことにより天候に左右されることなく、長期間安定した流量観測を可能にした。

図1は2015年11月24日から2016年8月10日までの258日間の連続観測結果を示したものである。観測地点の川幅は110m、河川を斜めに横断する音線の長さは約294mである。観測期間中、音線に沿った平均水深は0.8~2.5m、FATSで計測された断面平均流速と流量はそれぞれ、0.15~2.3m/sと15~580m<sup>3</sup>/sである。図1(d)の流量時系列には、FATSで計測した流量とともに、祝橋地点で行った横断ADCPによる流量から作成した水位流量曲線(RC)による流量を緑線で、ADCPによる流量を赤点で示している。観測期間中の最大水位が発生した6月23日は、水位が148T.P.m程度以上となる期間で欠測となった。欠測の原因は、増水にともない、トランスデューサーとFATS本体をつないでいる水中ケーブルに強い張力が働いたため、正常に電気信号が流れなくなったためだと考えている。流速の減少によりFATS観測システムは一旦復旧したものの、最終的にはケーブルコネクタに発生した亀裂からケーブル内に漏水して計測不能となった。このため、10月にケ

ケーブルの設置方法を見直してケーブル交換を行った結果、FATS は完全に復旧した。

図2はFATS流量を、横断 ADCP 流量、流観（河川事務所が実施）と比較した結果を示したものである。緑線は相対差  $\pm 10\%$  の範囲を示している。350 $m^3/s$  を超える流量で FATS 流量が ADCP 流量、流観データよりやや小さくなっているのは、水位上昇により水面幅が拡大し、FATS で計測していない左岸トランスデューサー背後の流量が増加したためだと思われる。低水時の流観データは、ADCP 流量、FATS 流量に対して過大評価となっており、相対差 10% を超えるデータが多数存在している。

真の流量を知ることはできないが、FATS の流量は、横断 ADCP の流量とよく一致していることから、FATS を用いた連続流量観測結果は信頼できるものとする。

以上の結果は、1 周期の 9 次 M 系列で位相変調した音波を用いたものであるが、平均的な SNR は計測に十分な 30 dB 程度の大きさであった。4 周期分の 9 次 M 系列で位相変調した音波を使っても SNR の増加はほとんど無かったが、受信状態が悪い状況下では SNR の改善効果が見込める可能性があるため、今後、様々な条件下で複数周期の M 系列変調による SNR の改善効果を検討する予定である。

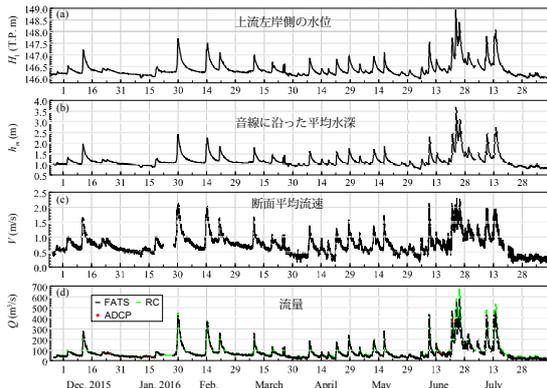


図1 観測データの時系列 (2015年11月24日~2016年8月10日): (a) 左岸上流側のトランスデューサー地点の水位、(b) 音線に沿った平均水深、(c) FATS による断面平均流速、(d) 流量

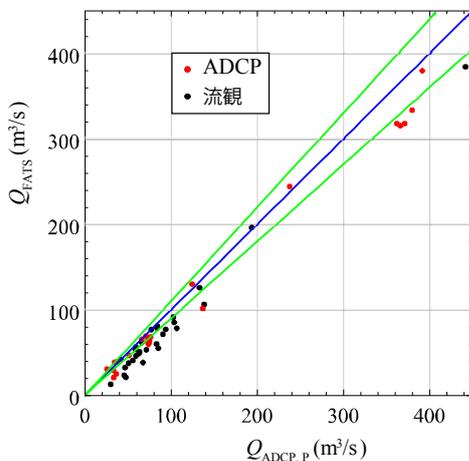


図2 FATS 流量  $Q_{FATS}$  と横断 ADCP 流量  $Q_{ADCP}$ 、流観  $Q_P$  との比較

## (2) FATS の現地適用条件

FATS は、河床と水面で反射しながら伝播する音線群を利用して、流量計測に必要な断面平均流速を直接計測するが、水深が浅くなりすぎると、音波の伝播障害が発生する。江の川での実験結果から、FATS の計測限界水深は、音波の波長の 10 倍程度であることが明らかとなった。本研究の長期連続観測に使用した 30 kHz の周波数の場合、限界水深は約 0.5 m となる。

観測期間中の最大浮遊土砂濃度は約 400 ppm、平均粒径は 25  $\mu m$  であった。この条件下での、音線長 294 m に対する音波の減衰量は、約 3 dB に過ぎず、浮遊土砂が FATS 計測の障害となることはなかった。

## (3) クロス音線法による流向の連続計測

断面平均流速と同時に流向を計測するため、長期観測用の音線 (S1-S2) に加えて新たな音線 (S3-S4) を設けた。図3に江の川に形成したクロス音線を示す。現地実験の期間は2016年1月13日~20日である。追加音線の長さは約 161 m と短かったので、流速分解能を上げるために 53 kHz の音波を使用した。

連続条件から、2つの音線からそれぞれ求める流量が等しくなることを利用して流向を連続観測した結果を図4(a)に示す。図4(a)にはトランスデューサーの位置誤差と流速誤差から評価したエラーバーが示してある。FATS のクロス音線によって求められた流向は、S1-S2 音線の中央部に固定した ADCP によって計測された水深平均流速の流向と同程度で、17日の降雨による流速(水位)の増加とともにやや増加していることがわかる。図4(b)は FATS と ADCP の流向の関係を示したものであるが、両者の相関は良好である。

図5はクロス音線法によって流向の変化を考慮して観測された流量と水位流量曲線法で求められた流量との相対差の経日変化である。クロス音線法で観測された流量は横断 ADCP と水位流量曲線法による流量と良く一致しており、相対差は、ほぼ  $\pm 10\%$  以内に収まっている。

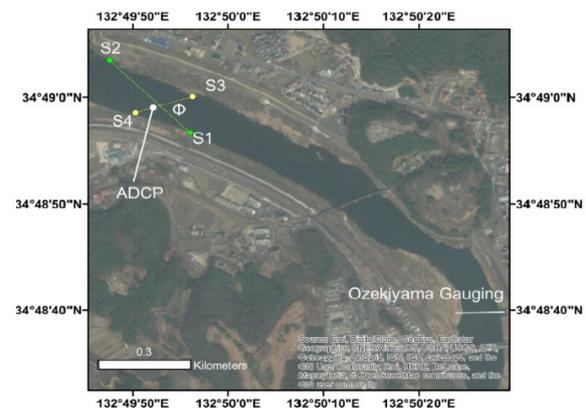


図3 クロス音線と固定 ADCP の配置

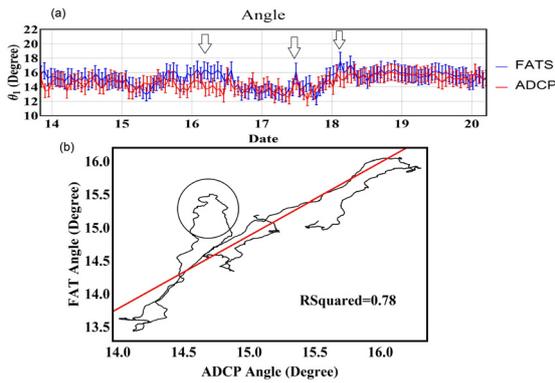


図4 クロス音線法による流向；(a) 流向の経日変化、(b) 固定 ADCP の水深平均流速の流向と FATS クロス音線による流向の関係

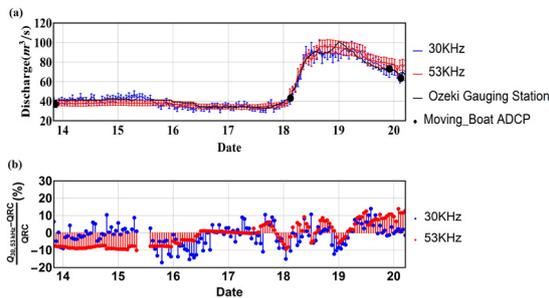


図5 クロス音線法による(a)FATS 流量と(b) 水位流量曲線法の FATS 流量との相対差の経日変化

(4) インバース解析による河川蛇行部の水深平均流速の水平分布の推定

江の川の支川である馬洗川の蛇行部の兩岸に4個ずつ、計8個のトランスデューサーを配置して、28本の音線網を形成した。観測地点とトランスデューサーの配置および、音線網を図6に示す。観測は2015年4月15日～22日に実施した。

FATSにより計測された多数の音線に沿った断面平均流速をインバース解析することにより、連続的に得られた流速ベクトル分布を図7に示す。水深平均流速ベクトルは河川の平面形と水深分布を反映しており、さらに、18日の降雨の影響を受けて変化している様子が見事に捉えられている。

図8と9は、図7の黄点(図6の赤点)の位置に固定した ADCP で計測された流速成分とインバース解析結果を比較したものである。両者の結果は良く一致しており、計測領域を取り囲むように、多数のトランスデューサーを配置した FATS により、水深平均流速場を連続的に可視化することが可能である。

(5) まとめ

FATS による高精度な流量観測を実現するためには、受信波に対する十分高い信号対雑音比(SNR)を確保することが重要である。本研究で行った改良により、SNRを5~10 dB

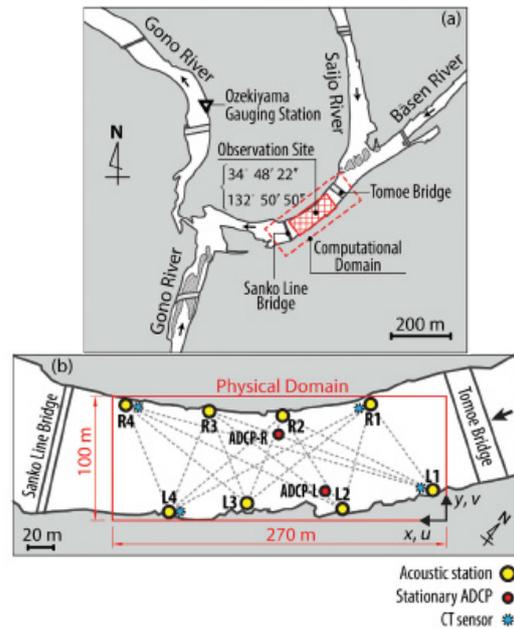


図6 (a) 観測地点；(b) インバース解析領域とトランスデューサーの配置、音線網

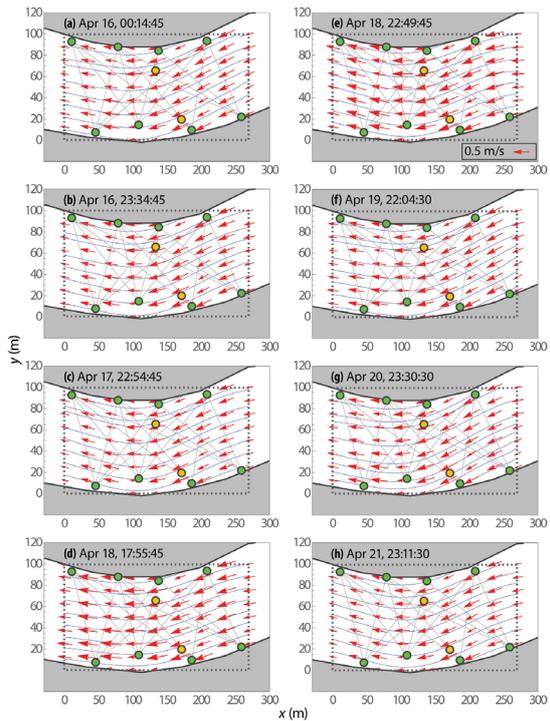


図7 インバース解析により得られた、水深平均流速ベクトル分布の経時変化

増加させることに成功した。広島県三次市を流れる江の川流量を258日間にわたり連続観測し、FATSの有効性を実証した。少子高齢化による労働力不足に直面している我が国では、河川流量の長期にわたる自動観測の実現が急務である。本研究により、この喫緊の課題を克服できる可能性が高まった。今後は、FATSによる流量観測技術を発展させ、リアルタイム河川流量の自動配信を実現する観測システムを開発する予定である。

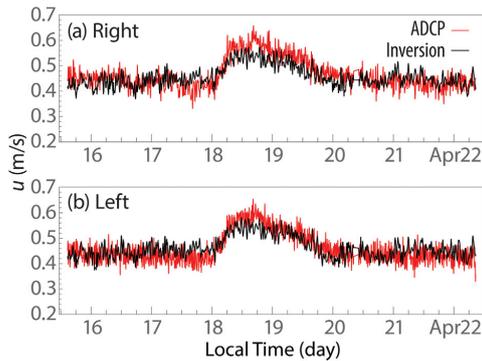


図 8 インバース解析により得られた、水深平均流速成分  $u$  と固定 ADCP の水深平均流速成分  $u$  の比較

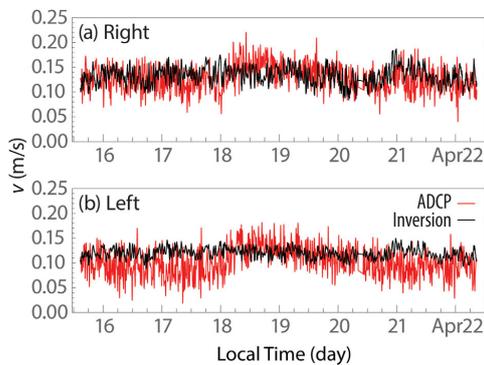


図 9 インバース解析により得られた、水深平均流速成分  $v$  と固定 ADCP の水深平均流速成分  $v$  の比較

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 9 件)

Al Sawaf MB, Kawanisi K, Kagami J, Bahreinimotlagh M, Danial MM, Scaling characteristics of mountainous river flow fluctuations determined using a shallow-water acoustic tomography system. Physica A, 査読有, 印刷中, 2017, 484, pp.11-20

DOI: 10.1016/j.physa.2017.04.168

Danial MM, Kawanisi K, Bahreinimotlagh M, Al Sawaf MB, Wakabayashi T, Investigation of flow velocity and salinity behaviour in Ota river estuary using acoustic tomography method and numerical modeling, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, 2017, 73(4), pp.1033-1038

[https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jjscejhe/73/4/\\_contents/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jjscejhe/73/4/_contents/-char/ja/)  
Al Sawaf MB, Kawanisi K, A mountainous river flow fluctuation analysis using shallow-water acoustic tomography system, 土木学会論文集 B1(水工学),

査読有, 2017, 73(4), pp.19-24  
[https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jjscejhe/73/4/\\_contents/-char/ja/Kawanisi K, Zhu X-H, Fan X, Nistor I, Monitoring tidal bores using acoustic tomography system](https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jjscejhe/73/4/_contents/-char/ja/Kawanisi%20K,%20Zhu%20X-H,%20Fan%20X,%20Nistor%20I,%20Monitoring%20tidal%20bores%20using%20acoustic%20tomography%20system), Journal of Coastal Research, 査読有, 2017, 33(1), pp.96-104

DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-15-00172.1  
Bahreinimotlagh M, Kawanisi K, Danial MM, Al Sawaf MB, Kagami J, Application of shallow-water acoustic tomography to measure flow direction and river discharge, Flow Measurement and Instrumentation, 査読有, 2016, 51, pp.30-39

DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2016.08.010

Kawanisi K, Bahreinimotlagh M, Al Sawaf MB, Razaz M, High-frequency streamflow acquisition and bed level/flow angle estimates in a mountainous river using shallow-water acoustic tomography, Hydrol. Process, 査読有, 2016, 30(13), pp.2247-54

DOI: 10.1002/hyp.10796

Razaz M, Kawanisi K, Kaneko A, Nistor I, Application of acoustic tomography to reconstruct the horizontal flow velocity field in a shallow river, Water Resour. Res., 査読有, 2015, 51(12), pp.9665-9678

DOI: 10.1002/2015WR017102

BahreiniMotlagh M, Kawanisi K, Zhu X-H, Acoustic investigations of tidal bores in Qiantang River, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, 2015, 71(4), pp.139-144

[https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jjscejhe/71/4/\\_contents/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jjscejhe/71/4/_contents/-char/ja/)

Razaz M, Kawanisi K, Nistor I, Tide-driven controls on maximum near-bed floc size in a tidal estuary, Journal of Hydro-environment Research, 査読有, 2015, 9(3), pp.465-471

DOI: 10.1016/j.jher.2014.04.001

[学会発表](計 7 件)

Danial MM (Kawanisi K), Investigation of flow velocity and salinity behaviour in Ota river estuary using acoustic tomography method and numerical modeling, 土木学会 第 61 回水工学講演会, 2017 年 3 月 15-17 日, 九州大学(福岡県・福岡市)  
Al Sawaf MB (Kawanisi K), A mountainous river flow fluctuation analysis using shallow-water acoustic tomography system, 土木学会 第 61 回水工学講演会, 2017 年 3 月 15-17 日, 九

州大学 (福岡県・福岡市)

Kawanisi K, A novel hydro-acoustic system for automated streamflow acquisition with high temporal resolution, IAHR, HydroSenSoft2017, 1-3 March 2017, Madrid (Spain)

Bahrainmotlagh M (Kawanisi K), Estimation of suspended sediment concentration by acoustic tomography system, IAHR-APD 2016, 28-31 Aug 2016, Colombo (Sri Lanka)

Al Sawaf MB (Kawanisi K), Gauging river discharge with acoustic tomography system, IAHR-APD 2016, 28-31 Aug 2016, Colombo (Sri Lanka)

Kawanisi K, Monitoring flow rate and salinity intrusion in a tidal floodway using fluvial acoustic tomography, The 36th IAHR World Congress, 28 June-3 July 2015, The Hague (the Netherlands)

Kawanisi K, Energy flux measurement of tidal stream in a strait using two crossing ultrasonic transmission lines, The 36th IAHR World Congress, 28 June-3 July 2015, The Hague (the Netherlands)

〔その他〕

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/kiyosi/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川西 澄 (KAWANISI KIYOSI)

広島大学・大学院工学研究科 (研究院)・  
准教授

研究者番号 : 40144878