

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656296

研究課題名(和文) 河川音響トモグラフィー法によるウォッシュロードの自動連続計測技術の開発

研究課題名(英文) Automated continuous measurement of wash load using fluvial acoustic tomography

研究代表者

川西 澄 (Kawanishi, Kiyoshi)

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ウォッシュロードを計測する新たな方法を提案した。複数の中心周波数を持つ河川音響トモグラフィーシステム(FATS)を使って、太田川と江の川および、钱塘江の断面平均流速と流量、信号対雑音比(SNR)を計測した。FATSで計測したSNRから浮遊土砂による音波減衰量を求め、断面平均の浮遊土砂濃度(SSC)を推定した。求められたSSCと同時にFATSで計測される河川流量を用いて、ウォッシュロードが連続観測した。断面平均SSCは、音波の周波数と粒径に関係する粘性吸収係数を使って求められる。太田川と江の川での粘性吸収係数は、音響理論値の約10倍の大きさとなったが、钱塘江では両者は同程度の値を示した。

研究成果の概要(英文)：New method for measuring wash load was proposed. Fluvial acoustic tomography system (FATS) with central frequencies (5, 10 and 30 kHz) was deployed in the Ota River, Gono River and Qiantang River. The FATS enabled us to measure cross sectional averaged flow velocity, streamflow and signal-to-noise ratio (SNR). The cross-sectional average suspended sediment concentration (SSC) was deduced from the SNR. Thus, continuous measurements of the wash load was conducted. Although the viscous absorption of sound due to SSC was around 10 times as large as that from an acoustic theory in shallow rivers (Ota and Gono River), the viscous absorption in Qiantang River was comparable with that from the acoustic theory.

研究分野：水工学

キーワード：浮遊土砂 ウォッシュロード 音響トモグラフィー 音響インテンシティ

### 1. 研究開始当初の背景

河川における栄養塩類の輸送と密接に関係しているウォッシュロードを計測することは、河川・沿岸域の環境を考える上で不可欠である。一般に、微細浮遊土砂濃度は採水や濁度計により観測されるが、横断面内の計測点は数点しかない。そのため、複断面のように浮遊土砂濃度が横断面内で大きく変化している場合、従来法ではウォッシュロードを正確に計測できない可能性が高い。また、浮遊土砂濃度計測に多用される濁度計は、浮遊土砂の粒径によりその感度が変化する問題もある。複数の周波数の超音波散乱強度から浮遊土砂の粒径と濃度を計測する方法も考案されているが、高周波の後方散乱を利用しているため音波の減衰が激しく、トランスデューサーの近傍しか計測できない。

海洋と沿岸域の水温・流速場を計測する方法として、伝播時間型の音響トモグラフィ法が発展してきた。申請者は流量観測にこの音響トモグラフィ法を導入し、浅い広幅河川や塩水遡上のある感潮域でも高精度に断面平均流速・流量を計測できる河川音響トモグラフィシステム(FATS)を、世界に先駆けて開発することに成功した。これ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するもので、流速分布に対する更正係数を必要としない画期的な計測法である。

本研究ではこの FATS を発展させ、浮遊土砂濃度の計測に必要となる音響インテンシティー型トモグラフィの機能を持たせる。さらに周波数の異なる 2 種類の超音波を同時に用いて微細浮遊土砂の平均粒径を推定した上で、浮遊土砂の横断面平均濃度を計測する。

### 2. 研究の目的

(1) 2つの周波数に対する浮遊土砂による音波の粘性吸収係数の比と浮遊土砂の粒径の関係から、ソースレベルや受信感度などに関係するシステム固有のパラメーターを決定する。

(2) FATS で計測される 2つの周波数の音響インテンシティーから、浮遊土砂の粒径を推定した後、粘性吸収係数と平均土砂濃度を求め、ウォッシュロードを算出する。FATS 連続計測から、増水・減水にともなう濃度、粒径、ウォッシュロードの変化を明らかにする。

### 3. 研究の方法

河川の両岸に超音波の送受波器を設置し、超音波が河川を横切って上下流方向に伝播する時間を測定して河川の横断面を覆う多数の音線(図 2)に沿った平均音速と平均流速を求める。正確な伝播時間を測定するため、GPS の原子時計を利用する。さらに、水中雑音の中から正確に送信波を検出するため、送信波は M 系列で位相変調する。

本研究では伝播時間に加えて受信される音響インテンシティーを記録・解析する。2種類の周波数(10 kHz と 30 kHz)対応に拡

張した新 FATS を 2 組用いて、太田川高瀬堰貯水池と江の川(三次市尾関山水位・水質観測所)において現地実験を実施する。

本計測法は大きく分けて 2つのステップからなる。

#### (1) システム固有パラメーターの決定

粒径と粘性吸収係数の比の関係式を用いて、採水試料から得られた粒径から粘性吸収係数の比を求める。これと、FATS で計測される音響インテンシティー、水温(水による吸収係数の算定に使用)、伝播距離を用いてシステムパラメーターを決定する。

#### (2) ウォッシュロードの算出

ステップ(1)でシステムパラメーターが求まると、FATS で計測される音響インテンシティー、水温、伝播距離、流量を使ってウォッシュロードを算出することが可能になる。まず、計測された粘性吸収係数の比から粒径を求める。粒径と周波数から音響理論にしたがって浮遊土砂による粘性吸収係数を求め、河川を横断する音波の音響インテンシティーの変化から断面平均濃度を算出する。FATS で同時計測される河川流量とこの濃度の積をとれば、ウォッシュロードを連続的に計測できることになる。

### 4. 研究成果

当初の計画にはなかったが、太田川高瀬堰貯水池と江の川実験に加えて、高濃度の浮遊土砂が存在する中国の銭塘江での実験を行った。得た主な成果は以下のものである。なお、江の川ではトランスデューサーの設置の問題があり、30 kHz の周波数のみを用いて実験を行った。

#### (1) 太田川高瀬堰貯水池における結果

図-1 に 2013 年度から行った本実験の観測地点と 10 kHz と 30 kHz のトランスデューサーの設置状況を示す。下流側のトランスデューサーは、捨て石の影響で送受信状態が悪かったため、20 m 程、上流に移動した。トランスデューサー間の距離は約 629 m である。

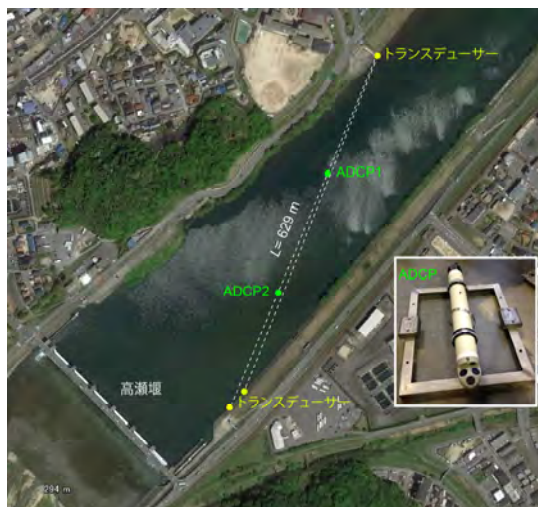


図-1 太田川高瀬堰貯水池の実験状況

FATS で計測した断面平均流速は、河床上に固定した 2 台の ADCP と音線に沿って移動さ

せた ADCP の平均流速と比較した結果、妥当なものであった。

図-2(b), (c)に 9 次の M 系列を使った SN 比の経日変化を示す。計測期間は 2013 年 10 月 10 日～29 日である。赤線が上流、黒線が下流部で受信された SN 比である。河床形状の影響で上流右岸側の SN 比の方が下流左岸側の SN 比より小さくなっている。図-2(a)に示すように、24 日までの低水時は高瀬堰の操作により 1 日周期で水位が変動しており、水位が低いときは SN 比が大きく低下している。

図-2(d)は玖村観測所の濁度と上流側のトランスデューサー設置の水面付近で採水して求めた浮遊土砂濃度の時系列を示したものである。10 月 24 日から 26 日にかけて発生した出水にともない、濁度が上昇し最大  $102 \text{ g/m}^3$  の値を示している。図-2(b), (c)に見られるように、出水にともなって FATS の SN 比は大きく低下している。

通常、河川の浮遊土砂の粒径は FATS で使用する音波の波長より小さいので、散乱損失は無視でき、浮遊土砂による音波の伝搬損失は粘性吸収係数のみを用いて評価できる。

採水サンプルをレーザー粒度分布計で分析して求めた 50%粒径を図-3 に示す。この粒径を用いて音響理論から求めた浮遊土砂の粘性吸収による音波強度の減衰率  $\xi L$  は、629 m の音線長 に対し、10 kHz と 30 kHz の場合、それぞれ、7.7 dB/( $\text{kg/m}^3$ )と 14.9 dB/( $\text{kg/m}^3$ )となる。

図-2(b), (c)の結果をみると、出水時における SN 比の減少量は 15～20 dB であり、図-2(d)に示した上流トランスデューサー付近の浮遊土砂濃度のピーク値  $102 \text{ g/m}^3$  から予想される減衰量 (0.79 dB と 1.52 dB) より、10 倍以上大きい。ただし、10 kHz と 30 kHz に対する計測した粘性吸収係数の比は理論値と良く一致しており、浮遊土砂の推定粒径は  $30 \mu\text{m}$  であった。

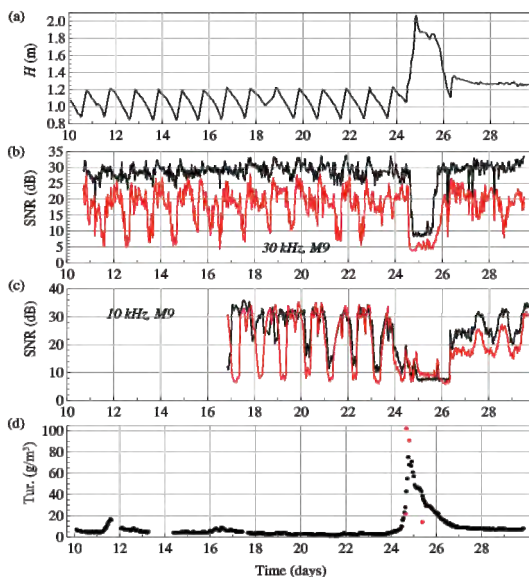


図-2 (a) 玖村観測所の水位, (b) 30 kHz の SN 比, (c) 10 kHz の SN 比, (d) 濁度・浮

## 遊土砂濃度の経日変化

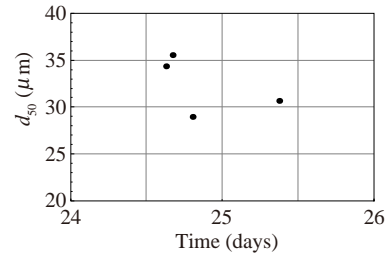


図-3 出水時における浮遊土砂の 50%粒径

## (2) 江の川における結果

観測地点の河床は礫で覆われており、シルトや砂の堆積がない、礫床河川である。図-4 に、観測地点と兩岸のトランスデューサー T1, T2 間の河床横断形状を示す。兩岸のトランスデューサー間の直線距離は 296 m である。

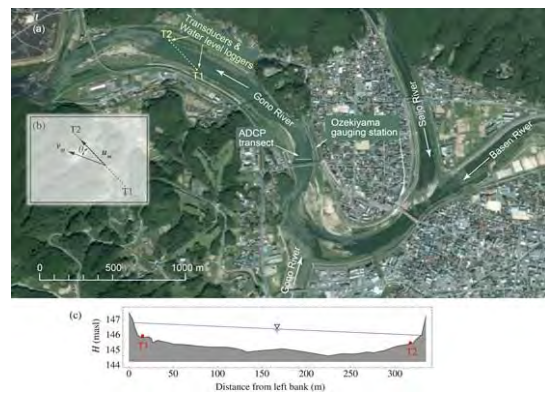


図-4 江の川の観測地点と音線に沿った河床横断形状

図-5～9 に、土師、灰塚ダムのフラッシュ放流があった 2015 年 3 月の計測結果を示す。図-5(a)は上下流のトランスデューサー付近に設置した水位ロガーで計測した、平均水位の経日変化を示したものである。27 日に見られる 2 つのスパイク状の水位上昇が、両ダムのフラッシュ放流によるものである。

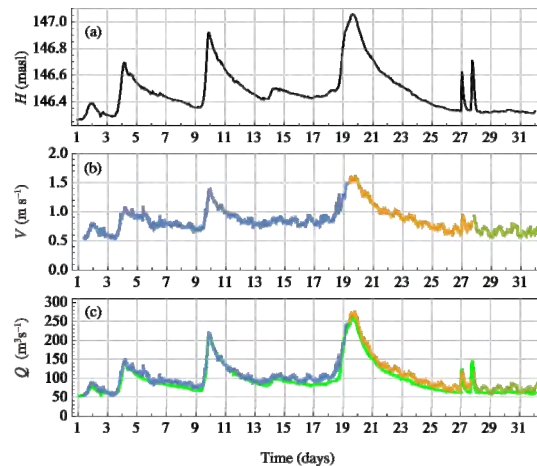


図-5 (a) 水位、(b) 断面平均流速、(c) 流量の経日変化 (2015.3)

FATS で計測された 3 月の断面平均流速は、0.5~1.6 m/s の範囲で変動している(図-5b)。河川流量の経日変化を示したのが図-5(c)である。緑線で示したのは、国土交通省が作成している尾関山観測所における水位-流量(H-Q)曲線の結果である。H-Q 曲線の流量は、FATS の流量とほぼ一致している。河川流量は 50~290 m<sup>3</sup>/s の間にあり、土師、灰塚ダムのフラッシュ放流時のピーク流量はそれぞれ、140 と 150 m<sup>3</sup>/s で、灰塚ダムフラッシュ放流によるピークの方がやや大きい値を示している。

SN 比(SNR)の経日変化を図-6 に示す。図-5の結果と比べてみると、出水時とダムフラッシュ放流に対応して SN 比が低下していることがわかる。

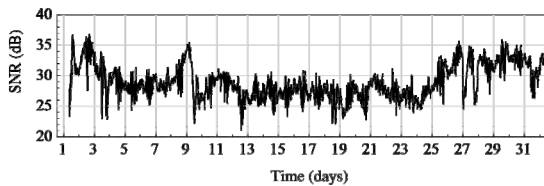


図-6 SN 比の経日変化 (2015.3)

粒径や水温の変化が大きくなかったことから、当初計画していた方法より簡便な式(1)をソナー方程式から導き、これを使って、FATS の SN 比(SNR)から断面平均の浮遊土砂濃度(SSC)を求めた。

$$SSC = -\frac{1}{\ell \xi_v} (SNR - SNR_0) + SSC_0 \quad (1)$$

ここで、 $\ell$  は音線長で、水温と音波の伝播時間から求められる。 $SNR_0$  と  $SSC_0$  はそれぞれ、基準となる SN 比と浮遊土砂濃度である。本観測地点では平常時の濁りがほとんどないため、本研究では最大 SNR を  $SNR_0$ 、 $SSC_0$  を 0 とした。

図-7 は、土師ダムフラッシュ放流に対する SN 比の低下量  $\Delta SNR = (SNR_0 - SNR)$  と尾関山水位観測所で自動採水器を使って得られた採水サンプルから求めた SSC との関係を示したものである。図中の直線は最小 2 乗直線である。式(1)から予想されるように、浮遊土砂濃度と SN 比の低下量の間には線形関係が認められる。採水サンプルから得られた

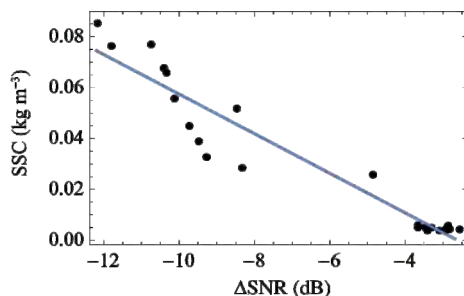


図-7 SN 比の低下量と浮遊土砂濃度の関係

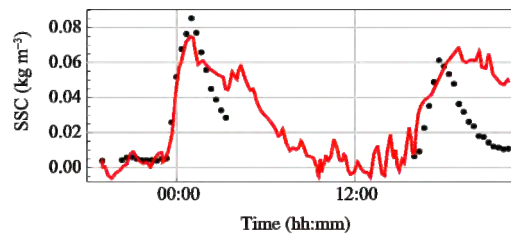


図-8 ダムフラッシュ放流時における浮遊土砂濃度の経時変化 (2015.3)

$d_{50}$  は時間的にほぼ一定で、約 35  $\mu\text{m}$  であった。最小 2 乗直線の傾きから求められた粘性吸収係数  $\xi_v$  は、この粒径から予測される  $\xi_v$  の 10 倍程度であり、高瀬堰の結果と同様、浅い河川では、浮遊土砂による音波強度の大きな減衰が起こることを示唆している。

ダムフラッシュ放流時に、式(1)を使って SN 比から推定した浮遊土砂濃度(SSC)の経時変化を示したのが図-8 である。黒点が採水サンプルから求めた SSC、赤線が FATS の SN 比から推定した SSC である。自動採水器による採水は、FATS の観測地点から約 1 km 上流に位置する祝い橋から行った。

FATS の観測地点と採水地点が離れているため、両者の浮遊土砂濃度(SSC)の値にはややずれが見られるものの、式(1)を使って SN 比から推定した SSC は妥当なものと判断される。

図-9 は、FATS によって計測された 3 月の断面平均浮遊土砂濃度(SSC)とウォッシュロード(SSF)の経日変化を示したものである。ウォッシュロードは FATS の SN 比から推定した断面平均 SSC に、図-5(c)に示した FATS で計測した流量を乗じて求めている。今後、十分な実地検証が必要であるが、当初目的としていたウォッシュロードの連続観測を実現できた可能性は高いと考える。

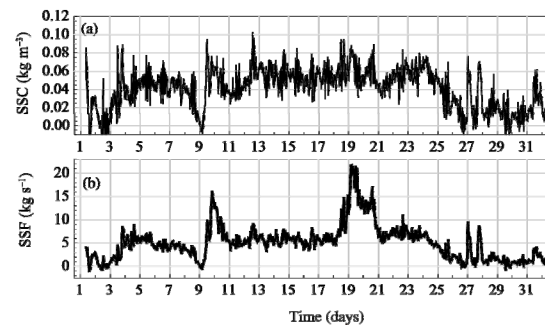


図-9 (a) FATS の SN 比から推定した断面平均 SSC、(b) ウォッシュロードの平日変化 (2015.3)

### (3) 中国銭塘江における結果

中国浙江省杭州市を流れている銭塘江は、大きなタイダルボアが発生することで有名である。日本の河川とくらべて、銭塘江の中下流域は非常に濁度が高く、本研究手法の有

用性を確認するには都合がよい。河口から約 90 km 上流の杭州市で流速と濁度の連続観測を行った。

钱塘江と観測地点を図-10 に示す。観測地点の川幅は約 1.2 km、平均水深は約 5 m である。トランスデューサーを固定することは困難だったので、西側の W-station (Zakou 水文観測所)、東側の E-station (復興大橋) から、20 kg の錘を取り付けたトランスデューサーをつり下げて観測を実施した。W、E-station 間の直線距離は 3050 m であった。

両地点での水深変化は、W、E-station の河床上に設置した水位ロガーにより、10 秒間隔で計測した。音線長が長く、濁度も高いことから、太田川や江の川実験より周波数の低い、5 kHz のトランスデューサーを使用した。



図-10 (a) 钱塘江、(b) 観測地点とトランスデューサーの配置

2013 年 9 月 5~6 日の大潮期の観測結果を図-11 に示す。観測結果には 2 回のタイダルボアの通過が含まれている。図-11 (b) に黒点で示した FATS の計測流速は、最初の大きなボアの通過時に一時的に欠測となっている。なお、赤と青で示してあるのはそれぞれ、E と W-station の河床に設置した ADCP (超音波ドップラー流速分布計) で計測した水深平均流速である。FATS の欠測の原因は、後述するように、高濃度の浮遊土砂による大きな音波伝播損失である。

図-11 (c) に示す、光学式濁度計による濁度は、強い光減衰のため信頼性が低いと考えられる。図-11 (d) は ADCP の後方散乱強度から推定した、河床から 1.9 m の高さにおける浮遊土砂濃度 (SSC) である (赤線が E、青線が W-station における値)。最初の大きなボアの通過時には最大  $4 \text{ kg/m}^3$  の高い濃度値を示している。

FATS の SN 比から式(1)を用いて推定した断面平均 SSC の経時変化を図-11 (e) に示す。粘性吸収係数  $\xi_v$  は、採水サンプルから得られた粒径 ( $10 \mu\text{m}$ ) を用いて音響理論から求めた値 ( $6.68 \times 10^{-3} \text{ dB m}^2 \text{ kg}^{-1}$ ) を使用した。

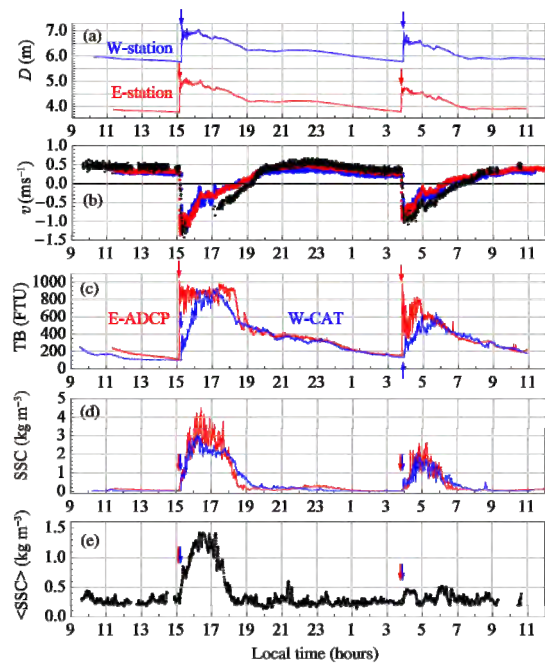


図-11 (a) 水深、(b) 流速、(c) 濁度、(d) ADCP の後方散乱強度から推定した低層の浮遊土砂濃度、(e) FATS の SN 比から推定した断面平均の浮遊土砂濃度。矢印はボアの到達時間を示す。

最初の大きなボア通過時の SSC は、ADCP の後方散乱強度から推定した値と比較すると妥当なものと思われ、音波の周波数が低く、水深の大きな場合は、音響理論にしたがって求めた粘性吸収係数の値を使っても問題ないと考えられる。

2 回目の小さなボア通過時には、SN 比の低下はほとんど見られず、SSC の推定値にはボアの通過に対応するピークは見られない。これは、小さなボアでは高濃度の浮遊土砂が河床付近に限られていたため、河床付近以外を通過する多くの音線を伝播する音の減衰量が小さいためだと推定される。

なお、図-11 の連続観測結果から、予想に反して、浮遊土砂濃度のピークは、タイダルボアの到達時間より、約 1 時間遅れていることがわかる。

## 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 3 件)

1. BahreiniMotlagh, M., Kawanisi, K. and Zhu, X.-H., 2015. Acoustic investigations of tidal bores in Qiantang River. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering), 71(4), pp.139-144、査読あり
2. 川西, Zhu, 久徳, 石川, 池田, 宮本, 2014. 河川音響トモグラフィーによる钱塘江のタイダルボア観測. 土木学会論文集 B1 (水工

学), 70, pp.601-606、査読あり  
3. Kawanisi, K., Razaz, M., Yano, J. and Ishikawa, K., 2013. Continuous monitoring of a dam flush in a shallow river using two crossing ultrasonic transmission lines. Meas. Sci. Technol., 24(5), doi: 10.1088/0957-0233/24/5/055303. 査読あり

〔学会発表〕(計 2件)

1. BahreiniMotlagh, M., Acoustic investigations of tidal bores in Qiantang River, 2015.3.10-12, 土木学会, 早稲田大学西早稲田キャンパス(東京都).
2. 川西 澄, 河川音響トモグラフィーによる銭塘江のタイダルボア観測, 2014.3.4-6, 土木学会, 神戸大学工学研究科(兵庫県・神戸市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川西 澄 (KAWANISHI KIYOSHI)  
広島大学・工学研究院・准教授  
研究者番号: 40144878