

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 31 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360214

研究課題名(和文)音響トモグラフィー法による新しい河川流量観測技術の検証と確立

研究課題名(英文)Validation and establishment of new technology for streamflow measurement using acoustic tomography

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) 13,800,000円、(間接経費) 4,140,000円

研究成果の概要(和文)：正確な河川流量の把握は、河川・水資源計画および水循環や河川環境を考える上で必須であり、安全・確実な河川流量観測法の確立は喫緊の課題である。

本研究では、音響トモグラフィー法を用いた河川音響トモグラフィーシステム(FATS)を開発した。FATSは、河川の両岸に設置したトランスデューサーから放射状に発射した超音波を用いて流量を自動連続観測するものである。感潮河川と山地河川における実証試験の結果は良好で、河川流量観測に対する本方法の信頼性・有用性が確認できた。

研究成果の概要(英文)：The acquisition of continuous measurements of river discharge is a high-priority issue for water resource management, and the real-time knowledge of river discharge is an environmental, social, and economic asset. Therefore, establishing a method and/or technology for quantifying discharge is of paramount importance.

Fluvial Acoustic Tomography System (FATS): a state-of-the-art acoustic system was developed. Continuous measurements of the flow rate were conducted in a tidal estuary and a gravel-bed river using FATS. FATS equipped with a couple of broadband transducers with horizontally omnidirectional and vertically hemispherical beam patterns can be used to estimate the flow rate from multiple ray paths that cover the cross-section of a stream.

The present study strongly suggest that FATS is a reliable and accurate technique for the long-term measurement of river discharge, even in shallow, wide rivers or tidal estuaries with salinity intrusions.

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：土木工学，水工学

キーワード：河川流量 洪水 水資源 水循環 音響トモグラフィー

1. 研究開始当初の背景

河川流量は河川・水資源計画や水循環を考える上で極めて重要な水文量であることから、安全かつ確実な河川流量観測法の確立は、世界的な喫緊の課題であり、流量観測の高度化が強く望まれている。

そこで本研究では、音響トモグラフィ法を用いて低水から洪水まで連続して流量を自動計測できる技術の確立を目指した。本方法では、音波が屈折したり、河床と水面で反射しながら伝搬することを前提としているため、従来の方法では連続計測が困難であった、塩分遡上のある感潮河川においても流量観測が可能である。

2. 研究の目的

従来の河川流量観測技術が抱えている様々な欠点や制約を打開するため、高度な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)を開発することに成功した。本研究では、この新しい流量観測技術を確立・普及させるため、洪水を含む様々な水理条件の下で、超音波の周波数やトランスデューサー(送受波器)の設置方法(堤防法尻に固定、水面下に係留)、河床材料(砂泥、礫)の違いが、FATSの適用性に与える影響を明らかにする。

3. 研究の方法

超音波の周波数が高いほどFATSの流速分解能は向上するが、音波の減衰は大きくなる。本研究では、10 kHzと30 kHzの2周波に対応したFATSを製作し、河床材料が砂である太田川(感潮域を含む)と、礫床河川である江の川(三次市尾関山水位・水質観測所)において、FATSの適用性に関する現地実験を実施した。10 kHzの場合、10次のM系列では500 m程度の音線長を必要とするため、2周波実験は音線長を長く取れる太田川高瀬堰貯水池で行った。

FATSに用いられる計測原理は古くから知られている伝搬時間差法であるが、無指向性のトランスデューサーから半球状に発射され、河川の横断面を覆うように伝搬する多重音線を利用する点に特徴がある。すなわち、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搬する時間を測定して河川の横断面を覆う多数の音線(図1)に沿った平均音速と平均流速を求めた。正確な伝搬時間を測定するため、GPSの原子時計を利用し、さらに、水中雑音の中から正確に送信波を検出するため、送信波をM系列で位相変調した。

礫床河川である江の川(三次市尾関山水位・水質観測所付近)の護岸法尻に1対のトランスデューサーを固定して流量の連続観測を行い、河床の礫の影響や水深の変化がFATSの適用性に与える影響を調べた。また、

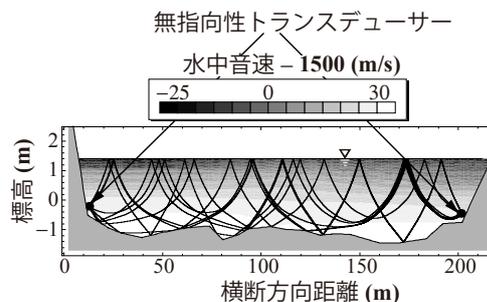


図1 河川断面内の音線分布。(塩分成層により音速が異なっているので、音線は屈折している。)

浮体に取り付けたトランスデューサーを水面付近に係留する、係留式計測法の試験を行った。

感潮河川である太田川放水路では、低水路護岸法尻に設置した一対のトランスデューサーを用いて流速・流量の長期連続観測を行うとともに、時間的に流向が変化する感潮域における流量の計測精度を向上させるため、両岸に2個ずつトランスデューサーを配置してクロス音線を作り、流速とともに流向を計測した。

4. 研究成果

(1) 河床材料が礫の方が砂より音波の反射が強いため、信号対雑音比(SN比)が高い傾向があったが、砂河床との差は大きくなかった。いずれの観測地点でも、水深が音波の波長の約10倍(30 kHzの場合0.5 m, 10 kHzの場合1.5 m)より小さくなると急激に音波の伝搬損失が大きくなることが明らかとなった。

(2) 太田川高瀬堰貯水池における2周波実験を2013年に行った。トランスデューサー間の直線距離は620 mであった。図2は30 kHzと10 kHzのトランスデューサーを同時に用いて計測した断面平均流速の経日変化を示したものである。いずれも送信波の位相変調には9次のM系列を用いている。10月24日から26日にかけて発生した出水前は水位が低く、10 kHzは欠測となっている。また、両周波数とも出水期間の一部で欠測が発生しているが、音波の伝搬損失がより少ない10 kHzでは出水のピーク時の計測に成功している。このように、十分な水深がある場合は、浮遊土砂による音波減衰が少ない低周波数の使用が有効であるが、周波数が低いほど流速の分解能が落ちるため、図2(b)に示した10 kHzによる短周期の流速変動(ノイズ成分)は、図2(a)に示す30 kHzによる流速変動よりやや大きくなっている。なお、出水期間の一部に見られる10 kHzの欠測は、出水時に全開となっている高瀬堰近くの水位が低いためである。

FATSの流速精度を検証するため、本計測終了直前にADCPをゴムボートで音線に沿って移動させ断面平均流速を計測した。ADCPによ

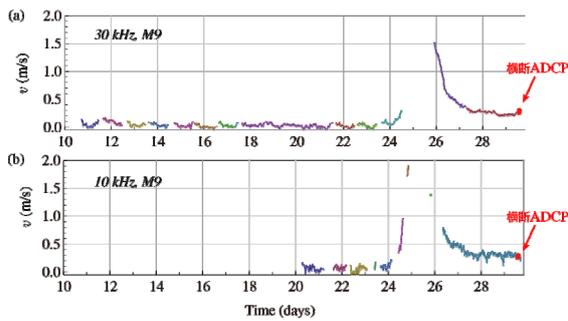


図 2 (a) 30 kHz_M9 と(b) 10 kHz_M9 の FATS による断面平均流速の経日変化；計測終了直前の赤点は横断移動 ADCP で計測した断面平均流速。

る断面平均流速を赤点で図 2 にプロットしている。FATS による断面平均流速は、ADCP による結果と良く一致しており、FATS の信頼性が確認できる（流速差は 1.5 cm/s）。

(3) 江の川（三次市尾関山水位観測所付近）で 30 kHz のトランスデューサーを用いて流量の長期連続観測を行った結果の一例を図 3 に示す。観測期間は 2012 年 3 月 22 日～6 月 14 日である。尾関山観測所における水位-流量(H-Q)曲線から求めた流量を緑の線で示している。FATS で計測した流量は H-Q 法による流量とほぼ一致している。図 3(a) に示した平均水深が 0.9 m（トランスデューサー付近の水深は 0.5 m）を下回った、6 月初旬の低水時には欠測期間が発生している。

FATS の信頼性を確認するため、横断 ADCP による流量と比較した結果が図 4 である。3 年間の研究期間内に ADCP で取得できた 20～650 m³/s の流量範囲において FATS と ADCP で計測した流量は良く一致しており、流量計測における FATS の信頼性を確認できる（決定係数 R^2 は 0.99）。

図 3(b) の流量時系列の最初の部分に見られる鋭いピークはダムフラッシュ放流にともなうもので、この期間には一対のトランスデューサーを追加して、クロス音線法による流向流速計測を行い、FATS の詳細な精度検証を実施した。図 5 にフラッシュ放流時の流量と相対誤差の経時変化を示す。青点で示した RC(Rating Curve) は H-Q 式による結果を表している。相対誤差は ±10% 以内に収まっている。流向を固定した場合の相対誤差は ±15% であった。

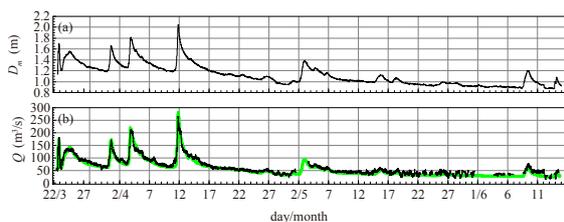


図 3 (a) 計測断面の平均水深と(b) 流量の経日変化；緑線は H-Q 曲線式で求めた流量。

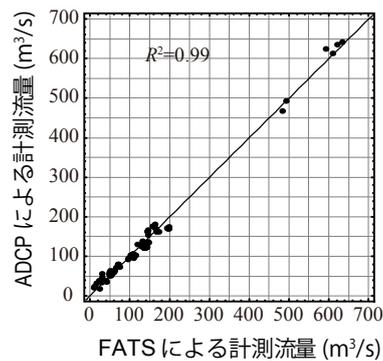


図 4 FATS と ADCP により計測された流量の比較（ R^2 は決定係数）。

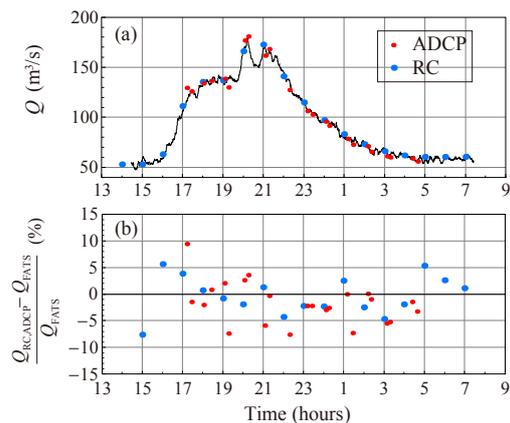


図 5 ダムフラッシュ放流時の流量(a)と相対誤差(b)の経時変化；クロス音線法を使用。

なお、クロス音線を形成するために追加した一対のトランスデューサーは浮体に取り付け、係留式計測法の試験を兼ねて行った。トランスデューサーを浮体に取り付けて浮かべた状態でも、トランスデューサーを護岸付近の河床に固定した場合と遜色ないデータが得られ、係留式計測法の有効性が確認できた。

(4) 太田川放水路で行った長期観測結果の内、2013 年の出水があった 8 月と 10 月における FATS の計測流量を図 6(c) に示す。図 6(a) は矢口水位観測所での流量、図 6(b) は FATS 観測地点の水位を示したもので、大潮期の水位変動振幅は約 3 m である。太田川放水路は上流端にある祇園水門により流入量が制御されており、平常時は 3 門のスルースゲートの内、右岸側のゲートだけがわずかに空いている（開度 0.3 m）状態に固定されている。矢口水位観測所で観測されている太田川流量が、400 m³/s 以上の出水時には 3 門全てが全開となる。

8 月 25 日の出水時、太田川ピーク流量 600 m³/s 超に対し、FATS で計測された放水路の分派流量は 400 m³/s を示している。ゲートがほぼ閉じており塩分遡上のある平常時から出水時まで欠測無く連続計測できている。本観測地点のように塩分遡上があり、非定常性の

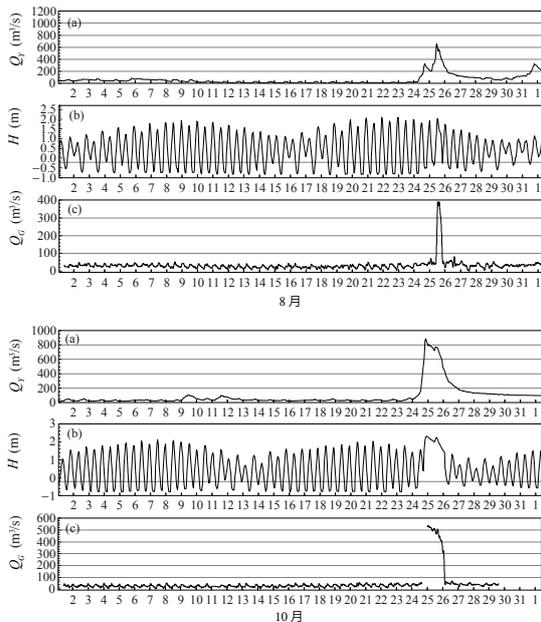


図6 2013年8月と10月における矢口流量(a)と観測地点の水位(b), 流量(c)の経日変化.



写真1 土砂に埋もれたトランスデューサー

著しいところで流量を自動連続計測できるのはFATSしかない。

一方, 8月よりも大きな出水が発生した10月25日では, ゲート全開直後, 一時的にFATSは欠測となった。これは洪水とともに流入した大量の浮遊砂による音波の減衰や低水路護岸法尻に設置したトランスデューサーが土砂に埋もれたためであると考えられる。写真1は洪水後のトランスデューサーハウジングの写真であるが, 先端に取り付けられていたトランスデューサーは土砂に埋もれて見えない。

図7は8月と10月の出水時の断面平均流速と流量の経時変化を示したものである。FATSで計測された低水路内の断面平均流速の最大値は約1.5 m/sで, ゲートが全開となっている期間における放水路の分派流量は, 矢口で観測された太田川流量の約70%の大きさである。

本観測地点は, ゲートの開度が小さい平常時, 潮汐により著しい非定常性を示し, 流向も時間的に不規則に変化している。従って,

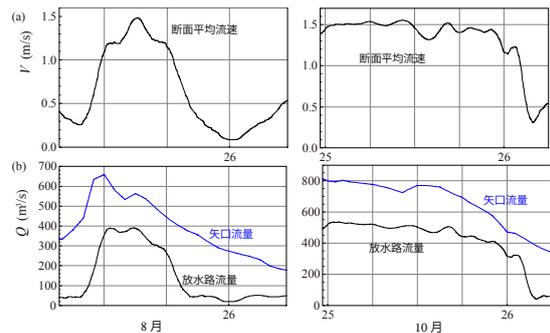


図7 出水時の断面平均流速と流量の経時変化.

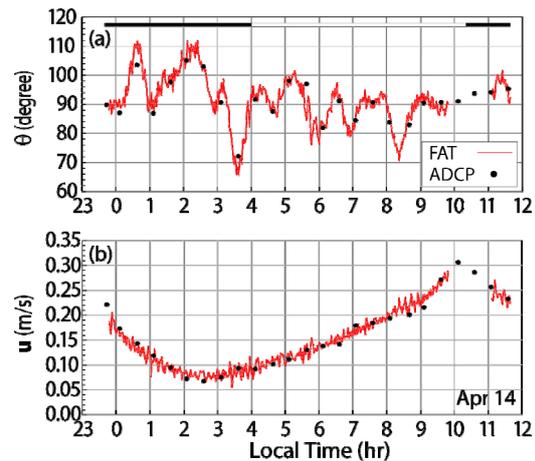


図8 クロス音線法によって計測された流向, 流速の経時変化

平常時の流量精度を維持するためには流速と同時に流向も計測することが望ましい。そこで, 両岸に2個ずつのトランスデューサーを設置してクロス音線を形成して断面平均の流速と流向を計測し, ADCPとの比較により精度検証を行った。

広島湾・太田川河口域ではM2潮が卓越していることから, 半日間連続して断面平均の流速と流向を計測した。図8(a)と(b)はそれぞれ, 流向と流速の経時変化を示したものである(上部に示した黒バーは上げ潮, 白抜きバーは下げ潮期を示している)。黒点は横断移動ADCPにより計測された断面平均の流向と流速である。クロス音線法によるFATSの流向, 流速はADCPの結果と良く一致しており, 流向流速が複雑に変化する河口域でさえ, FATSで正確な流量観測が行えることを示している。

(5) まとめ

革新的な音響トモグラフィー技術を用いた次世代超音波流速計(河川音響トモグラフィーシステム:FATS)を開発し, これまで流量観測が困難であった, 塩分遡上のある水深変化の大きな感潮域や浅い礫床河川でもFATSを用いて流量の自動連続観測が可能であることを実証した。さらに, 両岸に2個ずつ

つトランスデューサーを配置してクロス音線を作り、流速とともに流向を計測することによって、流量の計測精度を向上できることを確認できた。これらの成果は、複数の高インパクトファクターの世界トップジャーナルに発表した。

确实で高精度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 (SN 比) を確保することが重要である。今後は、計測システム (FATS) と河川の物理環境に起因する SN 比の低下機構の解明と FATS の改良を進め、洪水などの厳しい条件下における FATS の適用性の向上を図る。さらに、時間的に流向が変化する感潮域や蛇行部など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パース解析による流速ベクトル分布の推定を行い、本流量観測技術を発展させる。

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 19 件)

1. 川西澄, Xiao-Hua Zhu, 河川音響トモグラフィによる銭塘江のタイダルポア観測, 土木学会論文集 B1 (水工学), 査読有, 58 巻, 2014, pp.601-606
2. 川西澄, 音響トモグラフィ法による河川モニタリング, 騒音制御, 査読無, 38 巻, 2014, pp. 34-37
3. Kawanisi, K., Ishikawa, K. and Razaz, M., Acoustic measurements of streamflow and water temperature in a mountain river, Proc. of 7th International Symposium on Environmental Hydraulics, 査読有, 巻無し, 2014, pp.29-32
4. 川西澄, 革新的な水中音響技術を用いた河川モニタリングシステム, 検査技術, 査読無, 18 巻, 2013, pp. 10-13
5. Soltaniasl, M., Kawanisi, K. et al., Investigation of salt intrusion variability using acoustic tomography system, J. JSCE, Ser.B1 (Hydraulic Engineering), 査読有, 69 巻, 2013, pp.91-96
6. Razaz, M., Kawanisi, K., Nistor, I. and Sharifi, S., An acoustic travel time method for continuous velocity monitoring in shallow tidal streams, Water Resour. Res., 査読有 49 巻 2013, pp.4885-4899, DOI: 10.1002/wrcr.20375
7. Kawanisi, K., Razaz, M., Continuous monitoring of a dam flush in a shallow river using two crossing ultrasonic transmission lines, Meas. Sci. Technol., 査読有, 24 巻, 2013, DOI: 10.1088/0957-0233/24/5/055303
8. Kawanisi, K., Ishikawa, K., Razaz, M., An application of a shallow acoustic tomography: Continuous monitoring of streamflow and water temperature in a mountain river, Proc of UA2013, 査読有, 巻無し, 2013, pp. 539-546
9. Razaz, M., Kawanisi, K., Continuous velocity measurement with travel-time method in stratified shallow flows, Proc of UA2013, 査読有, 巻無し, 2013, pp. 555-562
10. Kawanisi, K., Razaz, M., Continuous measurements of flow rate in a shallow gravel-bed river by a new acoustic system, Water Resour. Res., 査読有, 48 巻, 2012, DOI: 10.1029/2012WR012064
11. 石川和彦, 川西澄, FATS による浅い礫床河川の流量と断面平均水温の連続モニタリング, 土木学会論文集 B1 (水工学), 査読有, 56 巻, 2012, pp.1333-1338
12. Yano, J., Kawanisi, K., New acoustic system for continuous streamflow measurement in tidal estuaries with saltwater intrusion, Proc. of IAHR-APD 2012, 査読有, 2012, CD-ROM
13. Ishikawa, K., Kawanisi, K., Investigation of river discharge fluctuations in a shallow gravel-bed river, Proc. of IAHR-APD 2012, 査読有, 2012, CD-ROM
14. Kawanisi, K., et al., Investigation of streamflow fluctuations by fluvial acoustic tomography, Proc. ICEC 2012, 査読有, 2012, pp.209-216
15. Ikeda, M., Kawanisi, K., Continuous measurement of flushing discharge from reservoirs, Proc. ICEC 2012, 査読有, 2012, pp.325-331
16. Yano, J., Kawanisi, K., Measuring streamflow and salinity in a tidal estuary with saltwater intrusions, Proc. ICEC 2012, 査読有, 2012, pp. 217-222
17. Kawanisi, K., Razaz, M., Long-term salinity measurement in a tidal estuary by the use of acoustic tomography, Proc. of UAM2011, 査読有, 2011, pp. 401-408
18. 川西澄, 感潮河川流量の自動連続計測を可能にする河川音響トモグラフィシステム, 水工学シリーズ. 2011, 土木学会, 査読無, 2011, 16pp.
19. Soltaniasl, M., Kawanisi, K., Estimates of flushing time in a tidal river using fluvial acoustic tomography, ICCEE-2011, 査読無, 巻無し, 2011, pp. 1-7

[学会発表](計 11 件)

1. 川西澄, 河川音響トモグラフィによる

- 钱塘江のタイダルポア観測，土木学会水工学講演会，2014.3.4，神戸大学工学部
2. Kiyosi Kawanisi, Acoustic measurements of streamflow and water temperature in a mountain river, 7th International Symposium on Environmental Hydraulics, 7 January 2014, Singapore
 3. Kiyosi Kawanisi, An application of a shallow acoustic tomography: Continuous monitoring of streamflow and water temperature in a mountain river, 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, 26 June 2013, Corfu, Greece, Invited
 4. Mahdi Razaz, Continuous velocity measurement with travel-time method in stratified shallow flows, 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, 26 June 2013, Corfu, Greece, Invited
 5. Jyunki Yano, New acoustic system for continuous streamflow measurement in tidal estuaries with saltwater intrusion, 18th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association of Hydro-Environment Engineering and Research, 21 August 2012, Jeju Island, Korea
 6. Kazuhiko Ishikawa, Investigation of river discharge fluctuations in a shallow gravel-bed river, 18th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association of Hydro-Environment Engineering and Research, 21 August 2012, Jeju Island, Korea
 7. Jyunki Yano, Measuring streamflow and salinity in a tidal estuary with saltwater intrusions, 9 October 2012, 4th International Conference on Estuaries and Coasts, Hanoi, Vietnam
 8. Kazuhiko Ishikawa, Investigation of streamflow fluctuations by fluvial acoustic tomography, 9 October 2012, 4th International Conference on Estuaries and Coasts, Hanoi, Vietnam
 9. Kazuhiko Ishikawa, Verification of New method for River Discharge measurement, 11th International Conference on Civil and Environmental Engineering, 18 August 2012, 広島大学工学部
 10. Junki Yano, Variations in Salinity/Streamflow and Water Exchange at a Tidal River Branch, 11th International Conference on Civil and Environmental Engineering, 18 August 2012, 広島大学工学部
 11. Kiyosi Kawanisi, Long-term salinity

measurement in a tidal estuary by the use of acoustic tomography, 4th International Conference & Exhibition on "Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results", 22 June 2011, Kos, Greece, Invited

〔その他〕

ホームページ等

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

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・准教授
研究者番号：40144878

(2) 研究分担者

金子 新 (KANEKO ARATA)

広島大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：10038101