

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560989

研究課題名(和文) ラジオコントロール模型を用いた小型ボートの安全性評価法の開発

研究課題名(英文) Development of Safety Inspection System by using Radio Control

研究代表者

片山 徹 (Katayama, Toru)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20305650

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：高速航走時の急旋回に伴う転覆現象を含む急旋回時安全性能評価法を構築するためには、実現象を計測し、その発生条件および状態を把握する必要がある。しかし、実艇での試験は、操船者を危険にさらす可能性がある。模型船で実艇の運動を再現出来れば(一般には縮尺影響があり、現象の発生条件やその程度が異なる)、設計段階において模型試験による安全性の確認が可能となる。本研究では、模型船を用いた自由航走試験システムの開発を行い、危険な運動の計測と運動性能評価法の提案を試みた。

研究成果の概要(英文)：In this study, a free running scaled model test system for measuring unstable phenomena of planing craft, which include measurement devices, is developed (a radio control planing hull model: length: 1.0m, maximum forward speed: 12m/sec) to inspect safely and easily the occurrence of instabilities instead of a real-craft test. And, by using the system, the occurrence running condition, the characteristics of motion and the mechanism of occurrence of a spinout phenomenon* is investigated.

*A spinout is one of the more serious consequences of high speed maneuvering, in its moderate form, a spinout is the maneuvering motion that a hull suddenly begins spinning by small disturbance in high speed turning or straight running and rapidly stops without capsizing. In the serious cases, it may cause capsizing, hull damage and/or crew's injury.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：スピアウト 滑走艇 ラジオコントロール

1. 研究開始当初の背景

レジャーボート、レスキュー艇などに見られる滑走艇は、前進速度の増加に伴い船底に鉛直上向きの揚力が働き、最高速度域では船体のほとんどが水面上に浮上する。水面下の小さな部分に船体を支える力が集中するため、風や波などの外乱やわずかな操船ミスによって姿勢を崩し、場合によっては転覆などの事故につながる。

日本国内においてはこのような滑走艇の設計は、デザイナーの経験に基づいて行われ、プロライダーの実機試験による性能確認と修正によって製品化されており、性能開発手法や操船方法が理論的に説明されていないため、設計段階において不安定現象の発生を予測し回避することは簡単ではない。

このような背景のもと、申請者は誰もが安心して利用できる安全、快適、低環境負荷のバランスのとれた高性能小型高速艇の開発・設計技術を構築することを目標として、平成5年からその運動性能（直進性能、操縦性能など）を評価するための実験装置および解析方法を開発すると共に、各種現象を論理的に説明することに努めてきた。

平成5～10年) 超高速滑走艇の性能試験装置の開発：時速100kmに達する小型の滑走艇に働く平水中直進航走時の流体力特性および航走性能を把握するために、大阪府立大学に秒速15メートルで曳航試験を実施できる高速曳引システムを作成すると共に、この試験システムの実験結果を用いた航走性能評価法を構築した。

平成8～9年) 無人高速電車をを用いた小型高速滑走艇の不安定性試験法の開発：滑走艇の高速航走時に発生する不安定現象として、ポーポイジングおよびチェーンウォーキングを対象として、その発生メカニズムを明らかにするし、その実験評価手法並びに実験データを援用したコンピュータによる性能評価手法を構築した。

平成11年) 高速滑走艇の加速発進時性能試験法の開発：滑走艇の急加速時の推進性能（運動および抵抗）を水槽試験データを援用し推定する手法を構築した。

平成11～12年) 滑走艇の波浪中船体運動特性に関する実験的研究：超高速滑走域での波浪中の運動性能を評価するための、実験データを援用したコンピュータシミュレーション法を構築した。

平成13～14年) 浅海底の段差が高速航走する滑走艇の航走姿勢に及ぼす影響について：超高速で航走する滑走艇が、突然浅海域を航走構想する場合に発生する運動特性について実験的に評価した。

平成15年) 数値計算手法に基づく耐航性能評価手法に関する研究(英国ストラスカイド大学との共同研究)：理論計算と経験式等に基づき船体に働く流体力を推定し、波浪中での操縦運動を推定するモデルを

構築した。

平成15～現在) 高速艇の操縦運動推定手法の開発：操縦運動時に航走姿勢が大きく変化する影響を考慮できる斜航試験法およびPMM試験法を構築し、実験データを用いた操縦運動シミュレーションを開発した。

平成16～現在) 滑走艇の高速航走時安全性向上に関する研究：高速航走する滑走艇の航走安全性を各種運動制御装置を積極的に使用して、危険な状態を能動的に回避するシステムの構築を目指す。

平成17～現在) 小型滑走艇の実海域燃費性能評価手法の構築：すでに申請者は平水中での燃費性能評価手法の構築を行ったが、その方法を実海域での性能評価手法に発展させる。

申請者は、前述の研究を実施するなかで、実艇試験、縮尺模型を用いた水槽試験、理論計算を実施してきた。特に、不安定現象に関する研究においては発生条件および運動の特徴を把握するためには、実艇試験が重要となるが、時速100kmを超える超高速域での転覆や船体損傷といった重大事故につながる現象を対象とする場合には、操船者の安全性の観点から実艇試験を実施することが困難であった。

このような状況のもと、申請者は、滑走艇の安全性に関する性能評価法の構築には、実艇ではなく人命に危険が無い縮尺模型を用いた自走試験を実施することが必要不可欠であるとの結論に至った。

海外における滑走艇の超高速域での安全性に関する研究は、主として軍事目的で実施されるため、実艇による実験が行われてきた。近年になり、イギリスのサザンプトン大学の研究グループが、ラジオコントロール自走試験システムの開発を試みているが、小型化に伴う軽量化とそれに反した大きな推進力の必要性の問題で、超高速域での実験を実施できるまでには至っておらず、その研究成果もほとんどないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、縮尺模型船を用いた自由航走試験システムの開発を行い、模型の縮尺の影響を補正した危険な運動の計測と運動性能評価法の提案することを目的とし、以下の内容を実施した。

- (1) ラジオコントロール模型船による6自由度運動解析システムの開発
- (2) 縮尺影響補正法の検討
- (3) 不安定現象(高速急旋回時のスピン現象)の計測
- (4) 水槽試験による不安定現象の発生原因の検討

超高速域で発生する不安定現象に関する研究は、その発生条件および運動の特徴の把握に実艇試験が重要であるが、操船者の安全

性の観点から実験を実施することができなかった。本研究で提案する実験システムを開発することで、この問題が解消され、小型滑走艇の飛躍的な安全性能向上を目指したい。

3. 研究の方法

(1) ラジオコントロール模型船による6自由度運動解析システムの開発

高速で航走する小型滑走艇を含む高速艇の自航模型実験を実施するためには、その前進速度の速さと高速艇特有の船体の軽さのため、超小型軽量化された実験システムが必要である。例えば、ここで対象とする滑走艇の場合、1.0mの縮尺模型では重量は6.0kg以下(すべての計測機器を含める)、船速12m/sec以上が求められる。以下に重量制限を達成し、目標速度を達成するための構成を示す。

船体はFRP用いて軽量化し3kg程度とする。本研究では、6自由度の運動計測装置を模型船に搭載可能とすることが不可欠であり、GPS搭載型ジャイロ(Xsens社製MTi-G、コードを含む重さ210g)をタブレットPC(Lenovo, MIIX2 8, コードを含む重さ380g)で制御する。推進、操舵装置は、京商製EPツイーンストーム800VEレディセットのものをサーボモータ、プロペラごと流用する(100g)。動力には、ブラシレスモータとスピードコントローラ(京商製、VORTEX MR8Lセンサー付ブラシレスモータORI28219, 重さ380g+京商製、VORTEX R8 PRO ブラシレスESC ORI65105, 105g)とし、7.4Vリポバッテリー(京商製、ORI14127 ロケットパック LiPo 5400 IBS, 1本あたり315g)2本で作動する。最大回転数は35520rpmであり、1.68:1の減速機によってプロペラの最大回転数は21143rpmとすることで、必要推力9kgを得る。プロペラ回転数は、電流の向きが変化する周期をHYPERION社製Emeter(重さ250g)で計測する。舵角は、回転式ポテンシオメータで小型アンプ(コードを含む重さ40g)により計測する。操船命令のレシーバーには双葉製R6106(10g)を用い、転覆発生時の浸水防止と自己復原性確保のため十分な浮力を持つ防水天板(300g)を取り付ける。

(2) 縮尺影響補正法の検討

模型船と実艇とのレイノルズ数の違いにより船体に働く流体力には縮尺影響が生じ、模型船の抵抗係数は実船のものよりも大きくなる。したがって、フルード相似則に従って模型船を航走させるために、模型船の推力をスケールの3乗倍した場合、実船のそれよりも大きく、プロペラ後方に舵をもつ一般商船では、模型船の舵効きが実船に比べてよくなる傾向がある。

一般商船の場合、抵抗の縮尺影響(いわゆるSFC)は、等価平板の考えに基づき次式で求める。

$$SFC_{hull} = 0.5(C_{fM} - C_{fS})\rho_M S_{SM} V_M^2$$

$$C_{fM} = \frac{0.074}{Rn_{KLM}^{0.2}} - \frac{1700}{Rn_{KLM}} \quad (5.0 < Rn_{KLM} \times 10^{-5} < 100)$$

$$C_{fS} = \frac{0.4631}{(\log_{10} Rn_{KLS})^{2.6}} \quad (Rn_{KLS} \leq 1.0 \times 10^7)$$

ここで、添え字のM, Sはそれぞれ模型および実艇での値を示す。C_fは等価平板摩擦抵抗係数であり、C_{fM}にはPrandtlの遷移域の式、C_{fS}にはSchoenherrの式を用いる。ρは流体密度、S_Sは航走時浸水表面積、Vは前進速度、Rn_{KL}は浸水キール長を代表長さとするレイノルズ数である。図1に全抵抗とSFC(模型スケールでの力)を示す。フルード数4.0で全抵抗の7%程度である。

この7%分の推力を空中に設けたプロペラの推力で補うことを検討し、この縮尺影響の修正が操縦運動に与える影響も調査する。

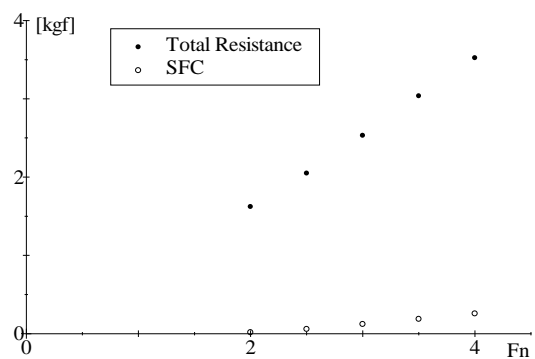


図1 模型の全抵抗と縮尺影響の割合

(3) 不安定現象(高速急旋回時のスピン現象)の計測

ここで開発するラジオコントロール模型船による6自由度運動解析システムを用いて、実在するオフショア・フィッシングボートの縮尺模型を作製し、平水中および波浪中での高速旋回時の運動計測を実施し、転覆に至るような不安定運動および発生条件の解明を行う。実験は、大阪府立大学内の府大池で実施する。屋外環境のため、風および波の影響があるが、可能な限り平穏な状態での計測を試みる。

ラジオコントロール模型を船速が定常に達するまで直進させた後、転舵を開始する。転舵速度は、最大舵角に達する時間を1秒とした。計測は停止状態からスピアウトが発生し停止するまでとした。また、右旋回、左旋回ともに実験を行う。なお、直進させるためには適切な当て舵が必要であり、本試験に先立って直進試験を実施し、目標速度と当て舵の関係を調査する。表1に示す状態を中心に実験する。

表 1 実験状態

模型船の重量 [kgf]	6.08
初期トリム角 [deg]	0
進入速度 [m/s]	7.0 ~ 11.0
最大舵角 δ_{max} [deg]	10.0 ~ 20.0
転舵時間 [sec]	1.0

(4)水槽試験による不安定現象の発生原因の検討

申請者がこれまでに開発した、水槽試験による船体に働く流体力計測法を用いた不安定現象発生予測法により、スピナウト発生時に船体に働く流体力を計測し、その発生原因について考察する。

4. 研究成果

(1)ラジオコントロール模型船による6自由度運動解析システムの開発

平成 24 年度に、運動計測システム搭載自由航走模型船（自由航走試験システム）を設計し製作した。全長は 1m, FRP 製模型船のみの重量は 2800g となり、総重量は 5200g となった。また、直進時最高速度は 12m/sec を達成した。



図 2 6 自由度運動解析システムを搭載したラジオコントロール模型船

(2)縮尺影響補正法の検討

縮尺影響を補正するために空中プロペラを用いて SFC 分の曳航力を加えることを考えた。空中プロペラの推力は航走姿勢を変化させる可能性があるため、推力軸の延長線上になければならないが、今回はそれができなかったため、できるだけ推力軸に近い位置に設置した。空中プロペラの直径は 0.18m, ピッチは 0.15m であり、モーターには 70W のブラシレスモーターを用いた。自由航走試験に先立ち、図 3 のように検力計を介して高速曳引台車に取り付けて、曳航時の推力を計測した。図 4 に計測結果を示す。速度ごとに推力が異なり、空中プロペラの回転数を調節することで SFC 分の推力が得られることがわかる。

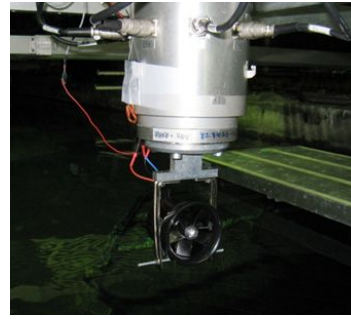


図 3 走行時空中プロペラが発生する推力の計測実験の様子

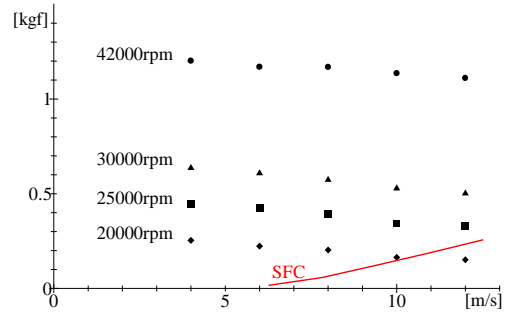


図 4 前進速度を有するときの空中プロペラの回転数と推力

曳航力を付加した影響をみるために、旋回試験を行った。舵角は 11 度に固定し、(水中の)プロペラ回転数を系統的に変化させて、空中プロペラの作動の有無について実験を行った。計測した定常回転半径を図 5 に示す。なお、横軸は旋回中の平均速度である。同図から、同速度で旋回しているときでも空中プロペラ作動の有無により旋回径が異なることが確認できる。実験で計測された旋回中の水中プロペラの回転数と POT 試験結果から、水中プロペラの推力を推定した結果を図 6 に示す。両者の差は、フルード数 1.5 のとき、およそ 0.7kgf となった。図 7 に旋回中の平均トリム角を示す。空中プロペラ作動によるトリム角の変化はほとんどなく、空中プロペラ作動による姿勢変化に伴う旋回径への影響はほとんどないものと考えられる。以上より、船外機タイプの推進器においても縮尺の影響により操縦運動が幾何学的に相似では無い可能性があることがわかった。

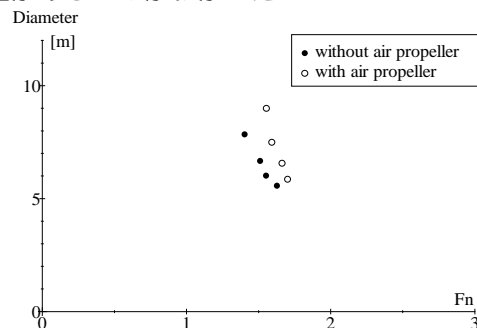


図 5 空中プロペラ作動有無時の旋回時平均速度と旋回半径

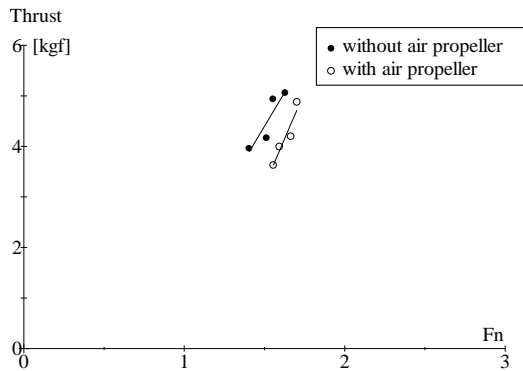


図 6 空中プロペラ作動有無時の旋回時平均速度と水中プロペラの推力

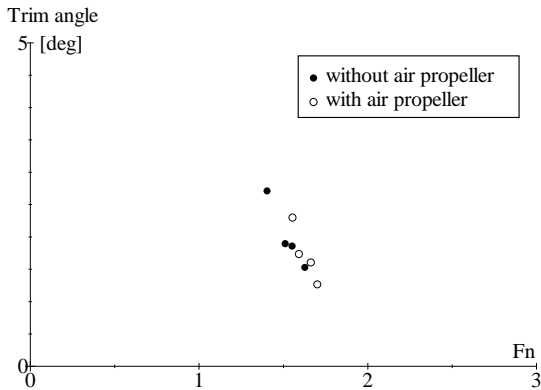


図 7 空中プロペラ作動有無時の旋回時平均速度と平均航走トリム角

(3)不安定現象（高速急旋回時のスピン現象）の計測

平成 25 年度に、高速旋回時の動的不安定現象の一つであるスピナウトについて、自由航走試験システムで再現し、その運動の特徴を整理した。

図 8 に、スピナウトが発生した時（図中赤線）としなかった時（図中青線）のモーター回転数と舵角の時系列データを示し、図 9 に同試験での回頭角速度と斜航角の時系列データを示す。なお、これらは右旋回時の結果である。スピナウトが発生しなかった時、回頭角速度は転舵開始と同時に増加して転舵終了後わずかに減少し一定値となるのに対し、スピナウト発生時の回頭角速度は転舵終了後も増加し続けて突然減少する。一方、スピナウト発生時の斜航角は回頭角速度が増加すると同時に増加し 90 度以上となり、回頭角速度が減少し始める頃にはコントロールを失い 180 度（進行方向逆向）となっている。図 10 に、前述と同じ試験での航走トリム角、横傾斜角、船速の時系列データを示す。スピナウト発生時の船速は、発生しなかった場合に比べて転舵開始後しばらくして大きく減少し、航走トリム角も船首下げへと大きく減少している。この船首下げは、転舵による推力方向の変化のために急減速し、慣性力により船首下げ方向のモーメントが発生したと考えられる。

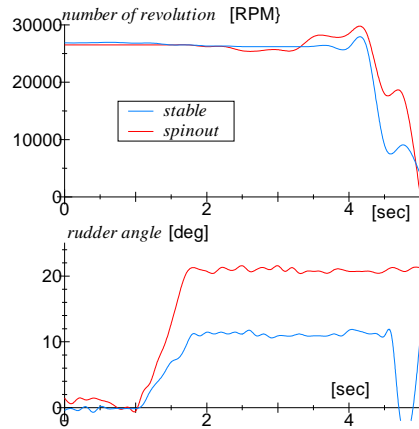


図 8 スピナウト発生有無時のモーター回転数と舵角

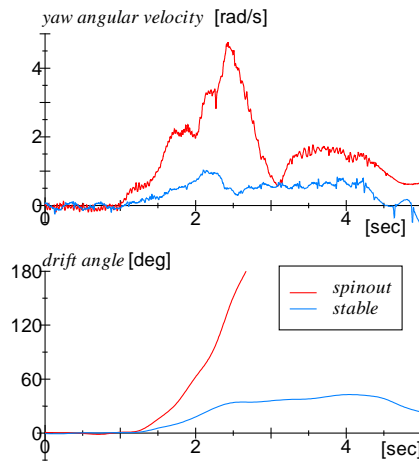


図 9 スピナウト発生有無時の回頭角速度と斜航角

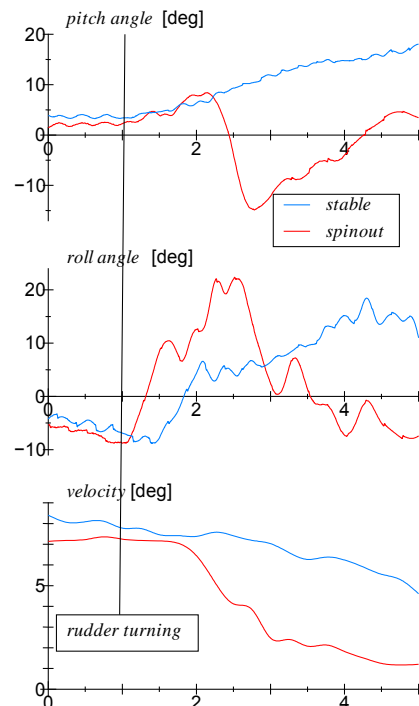


図 10 スピナウト発生有無時の航走トリム角、横傾斜角、船速

(4)水槽試験による不安定現象の発生原因の検討

前年度に引き続き平成 26 年度は、試験精度を向上させるとともに、申請者がこれまでに開発した完全拘束流体力計測法によりスピナウト発生時の操縦流体力を調査し、その発生メカニズムを考察した。

定常旋回状態では、推力は重心前後位置回りに斜航角を増加させる方向の回頭モーメントを発生させ、一方船体に働く流体力は斜航角を減少させる方向の回頭モーメントを生じ、これらが釣り合っている。それに対して、スピナウト発生時は、図 11 に示すように、旋回開始後の急減速や横傾斜に伴い船首を下げた結果、船体に働く横力の作用点が重心前後位置を超えて船首側に移動し、斜航角を増加させる向きの回頭モーメントへと作用する向きを変え、推力が発生する回頭モーメントと釣り合うことなく、スピナウトが発生することが明らかとなった。

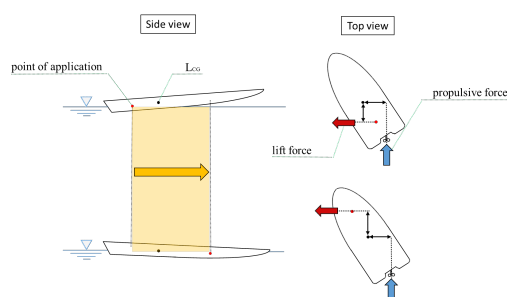


図 11 スピナウトの発生機構

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Toru Katayama, Shun Ohashi, A Study on Spinout Phenomena of Planing Craft in High Speed Turning with Radio Control Small Model, Proceedings of 14th International Ship Stability Workshop, pp.249-253, Kuala Lumpur, Malaysia, (2014) (査読無)

片山徹, 大橋隼, ラジオコントロール模型を用いた小型ボートの高速旋回時スピナウト現象に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 18 号, pp.339-342 (2014) (査読無)

片山徹, 井上智裕, 高速滑走艇の波浪中運動特性に関する基礎的研究 - 自由航走模型試験 -, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 17 号, pp.265-268 (2013) (査読無)

片山徹, 橋本翼, 小型模型を用いた高速滑走艇の自由航走試験システムの開発, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 15 号, pp.187-190 (2012) (査読無)

〔学会発表〕(計 4 件)

Toru Katayama, A Study on Spinout Phenomena of Planing Craft in High Speed Turning with Radio Control Small Model, 14th International Ship Stability Workshop, 1st October 2014, Kuala Lumpur (Malaysia)

片山徹, ラジオコントロール模型を用いた小型ボートの高速旋回時スピナウト現象に関する研究, 日本船舶海洋工学会平成 26 年春季講演会, 2014 年 5 月 27 日, 仙台国際センター (宮城県, 仙台市)

片山徹, 高速滑走艇の波浪中運動特性に関する基礎的研究 - 自由航走模型試験 -, 日本船舶海洋工学会平成 25 年秋季講演会, 2013 年 11 月 22 日, i-site なんば (大阪府, 大阪市)

片山徹, 小型模型を用いた高速滑走艇の自由航走試験システムの開発, 日本船舶海洋工学会平成 24 年秋季講演会, 2012 年 11 月 26 日, 東京大学柏キャンパス (千葉県, 柏市)

6. 研究組織

研究代表者

片山 徹 (KATAYAMA, Toru)

大阪府立大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 20305650