

平成21年6月4日現在

研究種目：特定領域研究・特別研究促進費（2008）

研究期間：2004 ～ 2008

課題番号：20900133

研究課題名（和文）パノスコピック形態制御高性能希土類磁石を用いた
磁気マイクロマシンの設計と試作研究課題名（英文）Design of magnetic micro-machine by use of
panoscopic-assembled rare earth magnets

研究代表者

山崎 二郎（YAMASAKI JIRO）

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40108668

研究成果の概要：

本研究課題ではパノスコピック形態制御により高エネルギー積が誘起された高性能希土類磁石を使用した磁気マイクロマシンを設計・試作し、電磁アクチュエータの特徴をいかした新規なマイクロデバイスの開発を目的としている。具体的には、外部磁界で経皮的駆動の可能な体内埋込用マイクロポンプの高吐出圧力化と小型化、及び、デバイス設計に摩擦駆動や生物模倣といった新規な概念を導入したインテリジェント磁気マイクロマシンの研究開発を実施した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	9,500,000	0	9,500,000
2005年度	9,400,000	0	9,400,000
2006年度	9,300,000	0	9,300,000
2007年度	9,900,000	0	9,900,000
2008年度	8,000,000	0	8,000,000
総計	46,100,000	0	46,100,000

研究分野：磁性材料、磁気応用

科研費の分科・細目：工学・電気電子材料

キーワード：パノスコピック、希土類、永久磁石、電磁力、磁気マイクロマシン、マイクロポンプ、魚型マイクロロボット

1. 研究開始当初の背景

マイクロ構造体の駆動には圧電力をはじめ種々の駆動力が利用される。申請者らは当初から電磁力に着目してオリジナルな磁気アクチュエータを考案作製し、その特長を明らかにしてきた。電磁駆動の最大の利点は、静磁エネルギーを蓄える永久磁石の存在と外部磁界による永久磁石のケーブルレス機械駆動が可能である点にある。ケーブルレス駆動法はマシン可動部近傍の励磁コイルを不要とするため、磁気マイクロマシンの

著しい小型化を可能にする。一方、生体の透磁率はほぼ真空に等しく常伝導で生成される強磁界には殆ど反応しない。磁性体を生体内に挿入することは電磁気的には限りなく低侵襲の行為と考えることができる。従って、磁性材料を使用した磁気デバイスを生体内に設置し、これを経皮的に外部磁界で駆動する全く新しい医療デバイスの実現が期待できる。

2. 研究の目的

本研究はパノスコピック形態制御により高エネルギー積が誘起された希土類永久磁石を用いて、(1)外部磁界で経皮的駆動の可能な体内埋込用高吐出圧力化マイクロポンプ。(2)デバイス設計に摩擦駆動や生物模倣といった新規な概念を導入したインテリジェント磁気マイクロマシン、の研究開発を目的とする。

3. 研究の方法

- (1)拡大モデルによる高圧力マイクロポンプ
バルク永久磁石を用いて数 cm サイズの拡大モデルを作製し、高吐出圧力電磁ポンプの構造と励磁方法に関する基礎的検討を行う。
- (2)生物模倣磁気マイクロマシン
滑らかな生物の動きや移動原理を解析、模倣して新規な磁気マイクロマシンを開発。
- (3)磁性体の微細加工法とマイクロ化
フォトリソグラフ技術に依る磁性体の微細加工法の開発し、これを利用してマイクロマシンの微小化をすすめる。

4. 研究成果

体内埋込用マイクロポンプの開発
本マイクロポンプは胎児水頭症の体内治療への適用を目指したもので、胎児頭部に取り付け外部磁界で母体経皮的駆動することによって過剰髄液を羊水腔へ排出しようとするものである。当初、図1に示すような弾性板の揺動を利用したポンプを開発し検討を行った。本ポンプは磁気トルクによるNdFeB 磁石の回転振動によって弾性板 (PET) を揺動させ送液する新規な原理のものである。弾性板の形状を最適化した結果、切開手術が不要な外径 4mm まで細径化を行った後においても、逆止弁装着時の流量が治療に要求される 5ml/min を満足することができた¹⁾。しかし、吐出圧力が最大でも 600Pa 程度と一般のマイクロポンプに比べ低く、生体応用には適さないことが共同研究者の医師より指摘された。

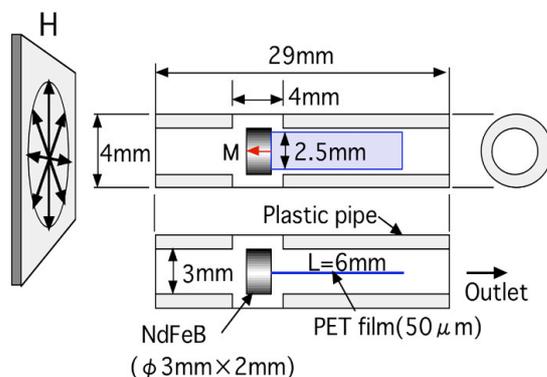


図1 弾性板の揺動を利用したマイクロポンプ

ポンプの原理を高圧力が見込めるねじ型 (スクリーポンプ) に変更し、高圧力化を図った。図2にポンプの構造を示す。ポンプ可動子は NdFeB 磁石にラテックスゴム棒を介してねじ (ポリカーボネート製、M3) を取り付けたもので、それをガラス管の内部に設置している。交流磁界の印加によって生じる磁石の回転振動を、磁石に取り付けた「脚」と

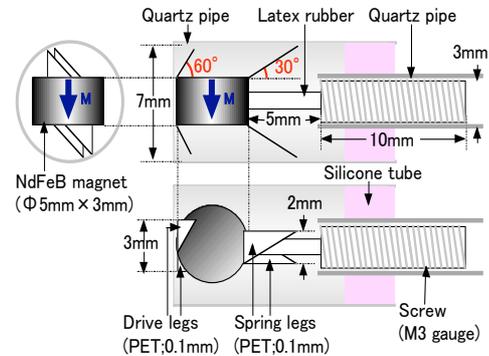


図2 ねじの回転を利用したマイクロポンプ

ガラス管壁との摩擦力によって回転運動に変換するもので、回転磁界ではなく交流磁界で駆動できるのが特徴である。評価の結果、図1の弾性板の揺動を利用したタイプに比べ高圧力が得られたが、ねじの回転が圧力の発生にほとんど寄与していないことが判明した。この原因を解明するために可動子の詳細な振動解析を行ったところ、管軸方向のねじの非対称な振動が圧力の発生に関与していることを明らかにした。具体的には圧力はねじが遅く動く方向に発生し、そのときの速度差が大きいほど高い圧力が発生した。また、ねじ溝の存在は圧力発生にほとんど関係なく、ねじ外径と管内径の間のギャップが小さいほど圧力が上昇することを明らかにした。これらの知見を基に作製したのが図3に示す新形状のポンプである。磁石の脚は回転しないよう左右対象に取り付け吐出口側の脚を省いている。ねじの部分には2枚の薄いM3規格のねじを細いねじで結合したものである。本ポンプの最大吐出圧力は600Pa印加時に約3kPaであり、従来型に対して5倍の高圧力化を達成することができた。

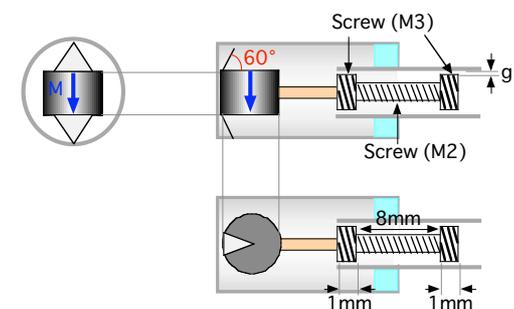


図3 微小振動を利用したマイクロポンプ

また、ポンプのさらなる小型化を図るために、ポンプ可動子の微細加工に半導体マイクロマシニング技術を導入し、Si 基板に対する KOH 水溶液による異方性エッチングや高アスペクト比の微細加工が可能な反応性イオンエッチングの微細加工装置を自作した。図 4 に Si 基板の両面を KOH 水溶液で異方性エッチングを施しポンプ可動子の SEM 写真を示す。



図 4 Si 基板の異方性エッチングによって作製したポンプ可動子

3) インテリジェント磁気マイクロマシン

高性能希土類磁石を用いた電磁アクチュエータの設計に摩擦駆動や生物模倣といった新規な概念を導入することで、磁石の性能を効率よく引き出すとともに新機能を創成できることが期待される。本研究課題では、摩擦駆動型マイクロモータ、マイクロ把持デバイス、細管内自走マイクロロボット、魚型マイクロロボット、歩行マイクロロボット、飛翔マイクロロボットなどのインテリジェント磁気マイクロマシンの開発を行った。ここではその中から摩擦駆動型マイクロモータと魚型マイクロロボットに関する研究成果について述べる。

3-1 摩擦駆動型電磁マイクロモータの扁平化²⁾

近年、電子機器やモバイル機器の小型化・低背化が急速に進み、搭載されるモータにもマイクロ化・扁平化が強く求められている。しかし、従来までの電磁モータでは小型化に伴い急速にトルクが減少し減速機が必要となるため扁平化には限界がある。これに対し我々が開発した摩擦駆動型電磁マイクロモータは低回転・高トルク特性を有し、扁平化しても直接駆動が期待される。そこで本モータを扁平化し、その基礎特性を調査した。はじめに従来の素子構造のまま 3mm 厚の扁平化を行ったところ、0.1mNm を越える始動トルクが得られ、扁平化しても高トルク特性を有することがわかった。しかし、さらに扁平化するためには後述する「脚」の長さが短くなりすぎて、作製が困難になることがわかった。そこで、脚の長さを確保するために 2 種類の構造を新たに考案し 2mm 厚の扁平化を実施した。

図 5 に 2mm 厚までの扁平化に成功したモータの構成を示す。回転子は NdFeB 焼結磁石 (表面改質処理済み、 $\phi 5.7\text{mm} \times 0.35\text{mm}$) と磁石を接着した BeCu 板から構成される。BeCu 板の外周には 3 本の脚を励磁部周囲の円周方向に水平面から 85° の角度で立ててある。励磁部は厚さ方向に着磁された SmFeN ボンド磁石 ($\phi 5.7\text{mm} \times 0.35\text{mm}$) の上部に、MnZn フェライト ($\phi 3.0\text{mm} \times 0.8\text{mm}$) を内蔵した平角銅線コイルをアルミナ板上に載せて構成される。コイルに交流電流を通電すると、回転子は吸引力の変化を受け上下に振動する。振動がある条件を満たすと回転子は脚から跳躍を起こし、離脱と着地を繰り返しながら一方向へと回転する。実験では BeCu 板の厚さを 0.1mm と 0.05mm とし、回転子磁石と励磁コイルの距離 d を近づけながら無負荷回転数と始動トルクの評価を行った。始動トルクは回転面にアルミナを用い d が 0.1mm の時に増大し、 $68.2 \mu\text{Nm}$ の最大始動トルクを得ることができた。この値は同体積の扁平形状アキシアルギャップ型 DC モータが示す平均値に比べ一桁大きな値であり、2mm 厚まで扁平化しても高いトルクを示すことが明らかになった。

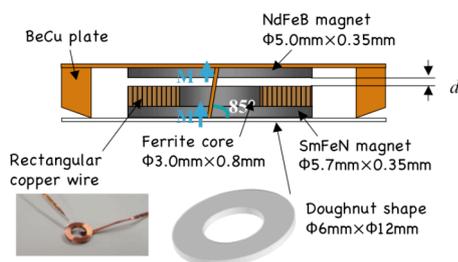


図 5 厚み 2mm の摩擦駆動型電磁マイクロモータ

3-2 科学教育用魚型マイクロロボット

デバイス設計に生物模倣技術を取り入れた結果、本研究で開発されたマイクロロボッ

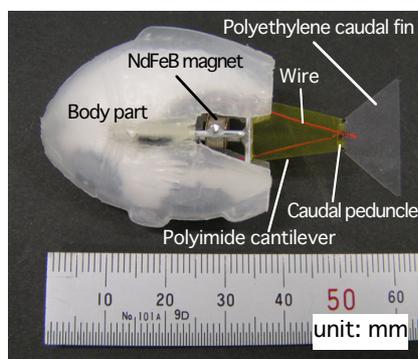


図 6 魚型マイクロロボット

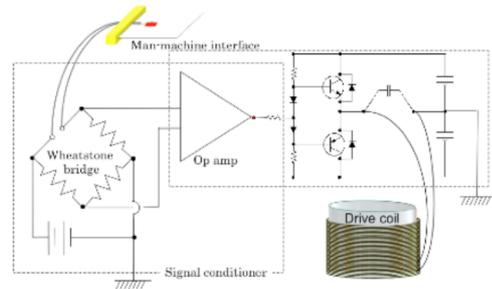


図7 マンマシンインターフェース

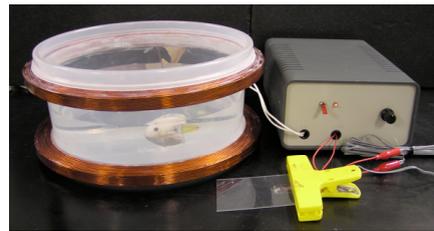
トの多くは生物のような滑らかな動きを特徴とし、展示会等でとくに子供たちの興味を惹きつけることがわかった。一方、日本における青少年の科学離れは OECD が実施した国際的な調査 (PISA) でも明らかになり、その対策が急務となっている。このような背景から、本研究で開発した魚型マイクロロボット³⁾を科学教材として利用するための駆動システムを構築した。

図6に魚型マイクロロボットの写真を示す。重りと浮きでバランスをとった胴体部に、磁石を内蔵した推進機構を取り付け構成され、全長6cm程度である。水面に垂直方向の交流磁界を印加すると磁石が磁気トルクを受け回転振動し、磁石に取り付けた糸が尾びれを左右に振らせて推進する。直流バイアス磁界により尾びれの揺動を左右に偏らせると旋回が可能である。この駆動磁界を図7のようなマンマシンインターフェース (以後、インターフェースと呼ぶ) によって制御するシステムを構築した⁴⁾。インターフェースは PET 製の薄板にひずみゲージを貼り付けたもので、両手で屈曲させて使用する。図8に駆動システムの構成を示す。ひずみゲージはブリッジ回路を介してオペアンプ、トランジスタ回路に接続されており、コイルにはインターフェースのひずみに応じた電流が通電され磁界が発生する。すなわちインターフェースを尾びれのように左右に屈曲させるとその動きと同期してロボットの尾びれが左右に振れることになり、ロボットを直感的に操作することが可能である。

本教材の有効性を確認するために本システムを6セット作製し、小学生を対象とした出前講義や科学展等において本ロボットの操作を実際に行ってもらった結果、科学技術への興味を高める科学教材として極めて有効であることがわかった。



(a) 駆動回路



(b) 作製した科学教材

図8 魚型マイクロロボット駆動システム

まとめ

高性能希土類磁石を使用することで電磁アクチュエータの特徴をいかした新規なマイクロデバイスの開発を行った。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 体内埋込用マイクロポンプでは弾性板の揺動を利用する方式から、管軸方向の微小振動を利用した方式に変更したことによって3kPaの高い吐出圧力を得ることができた。

(2) 扁平形状に適した2種類の摩擦駆動型電磁マイクロモータを考案した。表面改質処理を施したNdFeB磁石を回転子に用いることで2mm厚まで扁平化しても低回転・高トルク特性を示すことがわかった。

(3) 外部磁界で駆動可能な魚型マイクロロボットをマンマシンインターフェースで直感的に操作する新規な科学教材を提案し、出前講義等でその有効性を実証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計13件)

(1) T. Honda, K. Ono, J. Yamasaki, Science Education Tool Using Magnetically Driven Fish-type Microrobot, Proc. 12th Workshop on Rare Earth Permanent Magnets and Application, (2008) 374-377, 査読有

(2) T. Honda, S. Hatanaka, A. Hatano, J. Yamasaki, and K. I. Machida, "Fabrication of Thin-Profile Electromagnetic Micromotor Utilizing Friction Drive," Sensor Letters, **5(1)** (2007) 234-236, 査

読有.

(3) M. Takezawa, T. Imagawa, J. Yamasaki and M. Yagi, "Effect of applied magnetic field on anodic oxidation of aluminum for high-aspect ratio microfabrication," *Sensor Letters*, **5(1)** (2007) 293-295、査読有.

(4) S. Sudo, K. Tsuyuki, T. Matsumoto, M. Yoshikawa, M. Watanabe, and T. Honda, "Biomimetic study of diving beetle robot propelled by alternating magnetic field," *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, **25**, No. 1-4 (2007) 601-606、査読有.

(5) T. Honda, A. Yoshida, and J. Yamasaki, "Cylindrical micropump driven by external magnetic fields," *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, **25**, No. 1-4 (2007) 511-516、査読有.

(6) S. Sudo, S. Segawa and T. Honda, "Magnetic swimming mechanism in a viscous liquid," *J. Intelligent Material Systems and Structures*, **17(8/9)** (2006) 729-736、査読有.

(7) 須藤誠一, 露木浩二, 本間義則, 前田建伍, 本田崇, "若虫の遊泳解析とマイクロ泳動メカニズムの開発," *バイオメカニズム*, **18** (2006) 129-140、査読有.

(8) 本田崇, 畠中聡一, 山崎二郎, "高性能希土類磁石を利用し扁平化した摩擦駆動型電磁マイクロモータの基礎特性," *粉体および粉末冶金*, **53** (2006) 625-629、査読有.

(9) 柴木天, 本田崇, 山崎二郎, "外部磁界で駆動する科学教育用水中マイクロロボットの開発", *電気学会論文誌*, Vol. A, No. 5 (2005) 477-481、査読有

(10) M. Tomie, A. Takiguchi, T. Honda, and J. Yamasaki, "Turning performance of fish-type microrobot driven by external magnetic field," *IEEE Trans. Magn.*, **41**, No. 10 (2005) 4015-4017、査読有.

(11) T. Honda, A. Yoshida, and J. Yamasaki, "Cylindrical micropump driven by external magnetic fields," *Proc. of 12th Int'l Symposium on Interdisciplinary Electromagnetic, Mechanic & Biomedical Problems ISEM2005*, (2005) 374-375、査読有

(12) S. Sudo, K. Tsuyuki, T. Matsumoto, M. Yoshikawa, M. Watanabe, and T. Honda, "Biomimetic study of diving beetle robot propelled by alternating magnetic field," *Proc. of 12th Int'l Symposium on Interdisciplinary Electromagnetic, Mechanic & Biomedical Problems ISEM2005*, (2005) 394-395、査読有

(13) M. Takezawa, T. Wada, Y. Morimoto, and J. Yamasaki: "Domain Observation of

Amorphous Wire with Large Diameter for Micro-Sensor and Micro-Motor Application," *12th Int'l Symposium on Interdisciplinary Electromagnetic, Mechanic & Biomedical Problems*, (2005) 84-85、査読有.

[学会発表] (計 22 件)

(1) 濱本章裕, 本田崇, 山崎二郎, 「摩擦駆動型電磁マイクロモータの動作解析」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-08-159, (2008)12月、北九州市国際会議場.

(2) 江熊修志, 本田崇, 山崎二郎, 「外部磁界で駆動するマイクロ飛翔ロボットの羽ばたき角と推力の関係」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-08-160, (2008)12月、北九州市国際会議場.

(3) 弘嶋駿一, 本田崇, 山崎二郎, 「マイクロ4足ロボットの外部磁界によるワイヤレス駆動」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-08-161, (2008)12月、北九州市国際会議場.

(4) 小野蔵人, 本田崇, 山崎二郎, 「外部磁界で駆動する魚型マイクロロボットを使った科学教育用コンテンツ」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-08-163, (2008)12月、北九州市国際会議場.

(5) 瀬戸 洋, 橋本俊輔, 本田崇, 山崎二郎, 「微小振動を利用した磁気駆動マイクロポンプの基礎特性」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-08-164, (2008)12月、北九州市国際会議場

(6) 上ノ段 暁, 竹澤 昌晃, 森本 祐治, 本田崇, 山崎二郎, 「DRIE装置と磁性体の微細加工」、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-07-145 (2007) 12月、つくば市産業技術総合研究所.

(7) 初木史敏, 本田崇, 山崎二郎, 「魚型マイクロロボットの外部磁界を利用した三次元運動」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-07-148, (2007) 12月、つくば市産業技術総合研究所.

(8) 井上和幸, 本田崇, 山崎二郎, 「カタツムリの腹足を模倣したマイクロ磁気アクチュエータの基礎特性」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-07-149, (2007) 12月、つくば市産業技術総合研究所.

(9) 本田崇, 富江真弘, 初木史敏, 小野蔵人, 山崎二郎, 「外部磁界による魚型マイクロロボットの運動制御」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-07-39, (2007) 3月. 熊本市ホテルニューオオタニ

(10) 初木史敏, 本田崇, 山崎二郎, 「魚型マ

イクロボットの磁界による上下運動の制御」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-06-181、(2006) 12 月、多賀城市東北学院大学

(11) 鶴羽恭輔、本田崇、山崎二郎、「軸方向に微小振動を伴うマイクロスクリューポンプの基礎特性」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-06-96、(2006) 8 月、奈良市奈良県新公会堂。

(12) 本田崇、「磁気マイクロマシンの新しいデザインコンセプト」、東北大学電気通信研究所工学研究会、第 91 回スピニクス研究会、東北大学電気通信研究所

(13) 大山 賢司、竹澤 昌晃、本田 崇、森本祐治、山崎 二郎、「低温 ECR による Si マイクロマシニングと磁性体の微細構造加工」、電気学会マグネティックス研究会資料、.MAG-05-190 (2005) 12 月、宮城郡松島町松島海岸ホテル壮観

(14) 福田隆志、本田崇、山崎二郎、「永久磁石を使った科学教材用水中マイクロロボット」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-05-193、(2005) 12 月、宮城郡松島町松島海岸ホテル壮観。

(15) 富江真弘、本田崇、山崎二郎、「外部磁界で駆動する魚型マイクロロボットの旋回モード」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-05-194、(2005) 12 月、宮城郡松島町松島海岸ホテル壮観。

(16) 島中聡一、本田崇、山崎二郎、「扁平化した摩擦駆動型電磁マイクロモータの基礎特性」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-05-70、(2005) 8 月、千葉市千葉大学。

(17) 神頃一寛、本田崇、山崎二郎、「外部磁界で動作する細管内微小泳動機構」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-05-71、(2005) 8 月、千葉市千葉大学。

(18) 本田崇、「電磁力を利用したマイクロマシン」、日本応用磁気学会第 142 回研究会、142-1 (2005) 5 月、pp. 1-6. 東京都中央大学

(19) 河崎 誠、山中 高司、竹澤 昌晃、山崎二郎、「Si マイクロマシニングによる磁性体の微細加工」、電気学会マグネティックス研究会資料、.MAG-04-170 (2004) 10 月、pp. 43-47. 長野市信州大学工学部

(20) 永野傑、本田崇、山崎二郎、「摩擦駆動型電磁マイクロモータの回転子形状と回転特性」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-04-163、(2004) 10 月、長野市信州大学工学部。

(21) 佐野友彦、本田崇、山崎二郎、「外部磁

界で駆動する二足歩行型マイクロロボット」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-04-164、(2004) 10 月、長野市信州大学工学部。

(22) 中森大輔、片木山直幹、本田崇、山崎二郎、「外部磁界で動作する小型羽ばたき機構の開発」、電気学会マグネティックス研究会、MAG-04-165、(2004) 10 月、長野市信州大学工学部。

[その他]

<http://www.climb.ele.kyutech.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 二郎 (YAMASAKI JIRO)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40108668

(2) 研究分担者

本田 崇 (HONDA TAKASHI)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70295004

竹澤 昌晃 (TAKEZAWA MASA AKI)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20312671