

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 5 日現在

機関番号：84510

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420205

研究課題名(和文) 弾性表面波の波動特性を用いた粉体の精密輸送制御

研究課題名(英文) High Accuracy Powder Transport by Using Property of Surface Acoustic Wave

研究代表者

才木 常正 (Saiki, Tsunemasa)

兵庫県立工業技術センター・その他部局等・研究員

研究者番号：80470227

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：近年、創薬や電子分野において、マイクロ粉体の輸送等の高精度な物理的操作に期待が高まっているが、従来技術では不可能であった。そこで、弾性表面波(SAW)デバイスに注目し、SAWによる高精度な粉体輸送の可能性について調べた。その結果、SAWを発生させる楕円電極(IDT)への駆動周波数を変えることで、粉体の輸送方向を制御できることが明らかになった。また、大きなピッチサイズを有するIDTほど、粉体の輸送効率が高くなることがわかった。更に、SAW伝搬面に薄膜パターンを形成することで、粉体の輸送速度が制御できることもわかった。これらの知見を基に、世界に類を見ない高精度の粉体供給機を製作することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Recently in the electronics and drug industries, physical operations such as the transportation and separation of micro dry powders are required. However, it is impossible to operate the powders with accuracy by miniaturizing a general-purpose conveyor or blower. Therefore, we focused on a surface acoustic wave (SAW) device whose structure is simply, and investigated powder transport properties by the SAW device. As a result, it was shown that powder transport direction can be controlled by changing a drive frequency applied to an interdigital transducer (IDT) that generates the SAW, and its powder transport efficiency becomes higher as the IDT's pitch size increases. Moreover, it was also shown that the powder transport speed can be suppressed by thickness of a metal film formed on the SAW propagating area. On the base of the obtained knowledge, we succeeded in fabricating a high efficiency transport feeder for dry micro powder.

研究分野：電気・電子工学

キーワード：弾性表面波 アクチュエータ 粉体 圧電材料

1. 研究開始当初の背景

(1) 弾性体の表面に沿って伝わる波(弾性表面波: SAW)を利用したデバイスとして、携帯電話等に使う帯域通過フィルター等が実用化されていた。しかし、SAWを利用したアクチュエータやセンサについては研究開発段階であった。

(2) 粉体の科学的研究は古く、1831年のMichael Faradayに始まるが、現在においても、固体と液体が共存しているような粉体の流動性から、普遍的な物理メカニズムを導き出すまで至っていない。このような背景もあり、粉体の輸送方法としては圧力空気、ベルトコンベアによる方法しか存在しない。

(3) そこで、我々は液体駆動用のSAWアクチュエータを進展させ、SAWで粉体を輸送する研究に着手し始めた。粉体では直線性の強いSAWの伝播面のみの輸送となるため、ジグザクな経路の粉体輸送は不可能であった。そこで、SAWの伝播方向を変えるため、微細溝やグレーティングを利用してSAWを任意方向に反射させ、粉体輸送の方向制御に成功していた。しかしながら、以前、SAW上流側への粉体輸送しかできていなかった。

2. 研究の目的

(1) SAWを発生させる櫛歯電極(IDT)の反射損失の周波数特性を調べると、共振周波数以外にもピーク周波数が確認できる。そこで、これらピーク周波数を候補として、SAW下流方向への輸送が可能なIDTの駆動周波数について調査する。ちなみに、SAW下流方向への輸送が可能となれば、粉体を輸送し開口部から落とし込むような粉体供給機にもSAWが利用することができ、適応範囲が格段に広がる。

(2)そして、SAW下流方向への粉体輸送に適したIDT形状についても、輸送速度の面から検討する。

(3) 更に、粉体輸送を高精度に行うために、SAWの伝搬路に設置した金属膜上における粉体輸送の抑制効果について調べる。

(4) 上記の結果を基に、高効率のSAW粉体供給機を製作し、その性能を評価する。

3. 研究の方法

(1) 粉体輸送に適した駆動周波数

SAW下流方向へ粉体を輸送可能な駆動周波数を調べるため、櫛歯電極(IDT)の反射損失(RL:入射に対する反射電力の対数比)の周波数特性をアンテナアナライザ(RigExpert社製AA-230PRO)で調べた。IDT(ピッチサイズ $p=400\mu\text{m}$, 対数 $n=20$, 開口幅 $a=5\text{mm}$)の周波数特性の測定結果を図1に示す。このIDTは LiNbO_3 (128度回転YカットX方向伝搬)ウェハの上にCr/Al膜(10nm+1 μm 厚)をDCスパッターで成膜し、半導体リソグラフィ技術によってパターンニングすることで製作した。そして、このIDTの設置方向(SAWの伝搬方向)はウェハのオリエンテーションフラット(OF)の垂直方向と一致している。

図を見ると、まず9.6MHzにRLのピークが確認でき、20.5MHzから3.5MHz程度の間隔で複数のRLのピークが確認できる。この9.6MHzのピーク周波数はSAWの伝搬速度(3690m/s)をIDTピッチサイズで割った値(理論値)とほぼ同じであり、従来のSAWアクチュエータで使用する駆動周波数である。このようなピーク周波数が20.5MHz以上においても複数存在することから、他の周波数においてもSAWが発生し粉体が輸送される可能性があると考えられる。

そこで、得られたRLのピーク周波数でIDTを駆動し、粉体輸送の様子を観測した。SAWによる粉体輸送実験の概略を図2に示す。実験では、まずIDTの前方35mmの位置に粒径100 μm の銅粉30mgを設置する。そして、信号発生器(テクトロニクス社製AFG3252)で2000周期の駆動周波数 f_d の正弦波で構成される1kHzのバースト波形を発生させる。この f_d は周波数特性から得られたIDTのRLのピーク周波数である。そして、バースト高周波電圧を高周波増幅器(R&K社製ALM00110-2840FM)で増幅する。ここで、バースト波形を用いた理由は、デューティ比を下げて熱による圧電基板の損傷を防ぐためである。そして、この増幅された電圧をIDTに印加する。ここでは、IDTへの印加電圧を測定するのではなく、RFパワーメーター(ロード・シュワルツ社製NRP-2とNRP-Z91, AR社製DC3001M1)によって、入射電力 P_i と反射電力 P_r を測定している。そして、電力印加時の粉体の様子をハイビジョンカメラ(SONY製HDR-CX500V)により動画として記録し、これら動画像より粉体輸送の有無及びその方向を調べた。

典型的なSAWによる粉体輸送の様子を図4に示す。図(a)と(b)のIDTのピッチサイズは共に同じ400 μm であり、それぞれ9.6MHzと31.6MHzの周波数で駆動したときの写真である。ちなみに、これら図中の t は電力供給開始からの時間である。図(a)と(b)から、同じIDTであっても、粉体がIDT側(SAW上流側)へ又は逆側(下流側)へ輸送できていることがわかる。この事実は、従来不可能であったSAW下流方向への粉体輸送が可能となったことを示しており、異なった周波数でIDTを駆動することで粉体の輸送方向を制御できることをも示している。

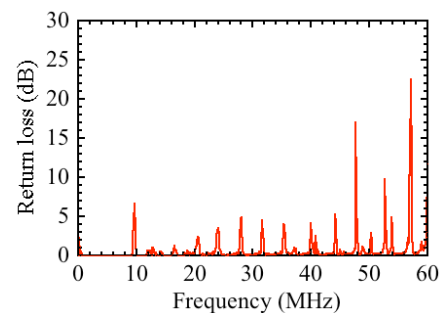


図1 櫛歯電極(IDT)の反射損失(RL)の周波数特性 ($p=400\mu\text{m}$)

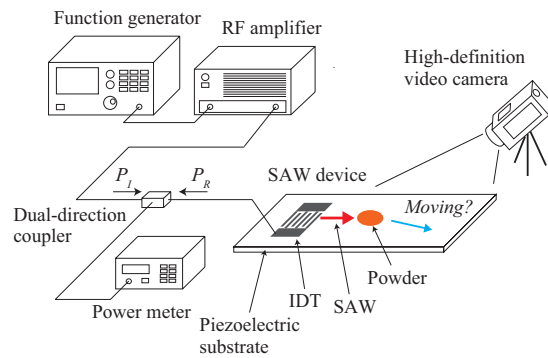


図2 弾性表面波(SAW)による粉体の輸送実験の概略

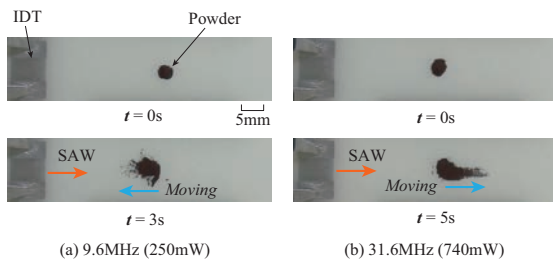


図3 典型的な SAW による粉体輸送の様子 ($p=400\mu\text{m}$)

(2) 楕歯電極形状と粉体輸送速度

我々の過去の研究から IDT 形状の中でもピッチサイズが最も SAW の送液と関係するパラメーターであるとわかっている。このため、粉体においても IDT のピッチサイズが輸送に及ぼす影響は大きいと考えられる。そこで、まず、ピッチサイズを変えた4つの IDT ($p=100, 200, 400, 800\mu\text{m}$) を用意し、それらの SAW 下流側への駆動周波数を調べる。次に、それら周波数で IDT を駆動し粉体 (Cu, 粒径 $100\mu\text{m}$) を輸送させ、各 IDT への供給電力と輸送速度の関係を調べ、粉体輸送に適した IDT のピッチサイズについて検討する。

SAW 下流側への輸送の駆動周波数と IDT ピッチサイズとの関係を図4に示す。ここでは、用いた全ての IDT の対数と開口幅は 20 と 5mm である。また、参考のため、粉体供給機等で必要となる SAW 下流側 (IDT の逆側) への駆動周波数のみならずその逆方向のそれらについても、図中にプロットした。

図4を見ると、SAW 下流側への粉体輸送において、IDT ピッチサイズが大きくなるに伴い、駆動周波数が低くなっていることが確認できる。この傾向が理論的にも推測可能な逆方向への粉体輸送と同じになっていることから、SAW 下流側への粉体輸送の駆動周波数と IDT のピッチサイズにおいて規則性があると考えられる。ちなみに、ピッチサイズ $100\mu\text{m}$ の IDT においては、50MHz 以上に SAW 下流側への駆動周波数があるのではなく、2W 程度の供給電力を加えても駆動周波数が確認できなかった。

次に、粉体供給機等に適した IDT ピッチサイズを検討するため、SAW 下流側への粉体輸

送が可能であった3つの IDT ピッチサイズについて、IDT への供給電力とそのときの粉体の輸送速度を調べた。その結果をまとめて図5に示す。ここでは、粉体輸送速度を粉体群の先端が約 10mm 移動するまでの時間から計算している。

この図5を見ると、全ての IDT ピッチサイズで供給電力の増加に伴い、粉体の輸送速度がほぼ直線的に増加していることがわかる。そして、ピッチサイズが大きな IDT ほどその直線の傾きが大きくなり、粉体の輸送効率が高くなることがわかった。このことから、実験で用いた IDT の中ではピッチサイズが $800\mu\text{m}$ の IDT が輸送に最も適していることが明らかになった。しかしながら、大きなピッチサイズの IDT を採用することは粉体供給機等のデバイス自身の大型化に繋がり問題が生じる。そこで、 $200\mu\text{m}$ に比べ $400\mu\text{m}$ ピッチサイズの IDT の輸送速度が $800\mu\text{m}$ のそれと比較的近い値をとるため、本研究では IDT の外形サイズを考慮し、粉体供給機に適した IDT のピッチサイズを $400\mu\text{m}$ とした。

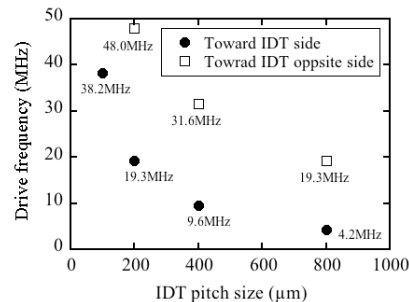


図4 粉体輸送可能な駆動周波数と IDT ピッチサイズの関係

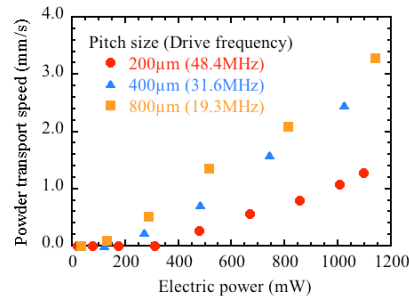


図5 IDT への供給電力と輸送速度の関係

(3) 金属膜による粉体輸送の抑制効果

誘導壁を設けていない SAW による粉体輸送においては、図3に示したように粉体が空間的に抑制されることなく輸送される。このため、粉体供給機として利用した場合には、基板端の一点に集中せず粉体は落下するため、落下領域が拡がり精度の面で問題が生じることが想定される。そこで、IDT と同じ製造プロセスで製作することが可能な金属膜パターンを誘導壁の代わりに利用できるかを検討する。

実験では、前節と同じ実験装置群 (図2参照) を用いて、IDT への供給電力と2種の金属膜 (10nm 厚 Cr 膜, 10nm 厚 Cr + $1\mu\text{m}$ 厚 Al

膜) 上での SAW による粉体 (Cu) の輸送速度を測定した。この実験で用いた IDT のピッチサイズは前節の結果より $400\mu\text{m}$ を採用し、その対数と開口幅も前節と同じ 20 と 5mm である。また、金属膜は長方形 ($15\times 30\text{mm}$) のパターン形状であり、IDT の前方 10mm の位置に SAW の伝搬路を覆うように設けている。

実験より得られた金属膜上での粉体の輸送速度をまとめて、図 6 に示す。この図では金属膜と比較するために金属膜無しの輸送速度もプロットしている。また、Cr/Al 膜では 2W 以上の供給電力であっても粉体が輸送されなかったため、図中にはプロットしていない。

図 6 から、粉体が輸送されれば金属膜の有無に関係なく、IDT への供給電力の増加に伴い粉体の輸送速度が増加することがわかる。更に、同じ供給電力であれば、金属膜無しの粉体の輸送速度は Cr 膜上でのそれより一桁程度小さいこともわかる。以上のことより、数十 nm 程度の薄い金属膜パターンであっても SAW は金属膜上に現われず、粉体の輸送をかなり妨げることが明らかになった。この抑制効果を利用すれば、 LiNbO_3 基板上の任意の領域のみを意図的に粉体輸送がすることでき、誘導壁を金属膜パターンで代用できる可能性があることがわかった。

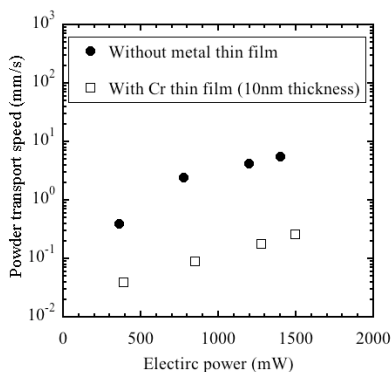


図 6 IDT への供給電力と金属膜上での粉体輸送速度

(4) SAW 粉体供給機の製作と輸送特性

前節の結果を基に、金属膜パターンを有する SAW 粉体供給機を設計・製作した。製作した SAW 粉体供給機の写真を図 7 に示す。この SAW 粉体供給機は 1 つ楕歯電極 IDT ($p = 400\mu\text{m}$, $n = 20$, $a = 5\text{mm}$) と 2 つの三角形の金属膜パターン (傾斜角 5° , 長さ 35mm , 端部の壁間距離 $300\mu\text{m}$) で構成されている。これら金属膜パターンの材料は IDT のそれと同じ Cr/Al 膜 ($10\text{nm}+1\mu\text{m}$ 厚) である。

この SAW 粉体供給機の評価実験の概略を図 8 に示す。この実験装置群は前節と前々節の粉体輸送実験で用いたそれらに電子天秤を追加して構成されている。増幅した高周波電圧を IDT に印加することで発生した SAW は圧電基板を伝搬し、IDT 前方 10mm に置かれた粉体 (Cu : 30mg) に到達する。そして、粉体は

或る幅を持って SAW によって輸送路端部方向 (SAW 下流側) に輸送されていくが、誘導壁代わりに金属膜パターンに当たるとそれらによって狭められ、基板の端点に集められる。これら集められた粉体は端点から 7mm 下方に設置された電子天秤に逐次落下する。このときの様子をハイビジョンカメラで記録し、落下した粉体重量を電子天秤で計測した。

SAW 粉体供給機の輸送時の写真を図 9 に示す。図 (a) 金属膜パターン有りの写真であり、図 (b) は比較のための金属膜パターン無しのそれである。ここでは、SAW 粉体供給機の駆動開始からの時間を t で表す。図 (a) を見ると、粉体が IDT 側と反対側に輸送され、薄膜パターンの存在によって粉体が徐々に集められていることが観測できる。そして、基板端部に到着した粉体は金属膜パターン間の隙間から落下していることもわかる。一方、図 (b) を見ると、同様に粉体は IDT の反対側に輸送されているが、IDT 幅と同程度の端部から落下していることが観測できる。これらより、SAW 粉体供給機に金属膜パターンを設けることで、狙い通りの位置に粉体を精度良く的確に落下させることができることが明らかになった。

次に、図 10 に SAW 粉体供給機から落下した粉体重量の時間変化を示す。この図より、金属膜パターン有りの SAW 粉体供給機では徐々に重量が増しており、一方、金属膜無しの場合は 25 秒付近で急激に重量が増加していることがわかる。このことから、SAW 粉体供給機に金属膜パターンを設けることで、落とし込み位置の精度のみならず微細粉体の供給精度をも向上することが明らかになった。

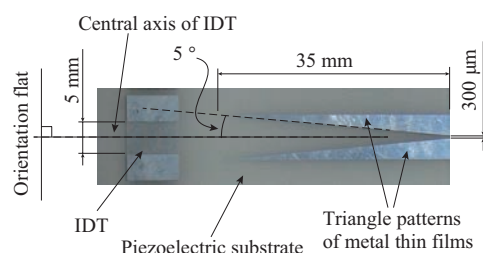


図 7 製作した SAW 粉体供給機の写真

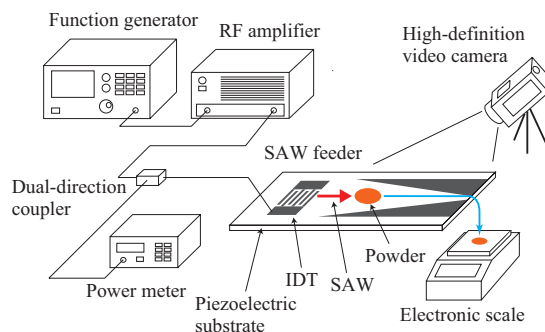


図 8 SAW 粉体供給機の特性格評価実験の概略

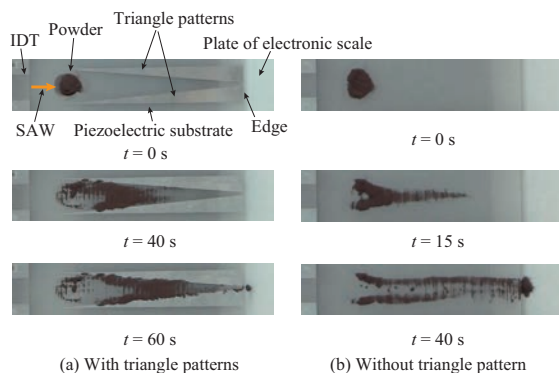


図9 SAW粉体供給機の粉体輸送の様子

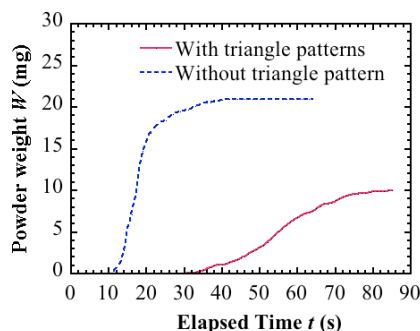


図10 SAW粉体供給機の供給重量の時間変化

4. 研究成果

従来のIDTの共振周波数でSAWアクチュエータを駆動する方式では粉体がSAW上流側へ輸送される。このため、開口部から粉体を落とすような供給機においてはSAWが粉体に届かず、原理的に製作することができなかった。

そこで本研究で、共振周波数以外の周波数でSAWアクチュエータを駆動する新規の方式を提案し、SAW下流方向への粉体輸送に世界で初めて成功した。そして、本駆動方式を用いた粉体輸送においては、ピッチサイズが大きなIDTほど粉体の輸送効率が高くなることがわかった。更に、SAWの伝搬路に金属パターンを設けることで、パターン上では粉体輸送の抑制効果があることもわかった。

これらの結果を基に、誘導壁の代用とした金属膜パターンを有するSAW供給機を設計・製作を行った。そして、実験より、製作したSAW粉体供給機を用いることで、粉体を精度良く任意の位置に落下させることが可能となった。以上のことより、本研究の本来の目標であった粉体輸送の高精度化については十分な成果を得ることができた。

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2件)

① Tsunemasa Saiki, Yuichi Utsumi, High Efficiency Mixing Chip with Liquid Flow Actuators Operated by Surface Acoustic

Waves, Electronics and Communications in Japan, 97, 1, 54-61, 2014, 査読有

② 才木常正, 松井優耶, 有末康人, 内海裕一, 山口明啓, ブラック反射を用いた弾性表面波アクチュエータによる粉体輸送, 電気学会論文誌C, 134, 12, 1934-1935, 2014, 査読有

[学会発表] (計7件)

① Yasuto Arisue, Yuya Matsui, Tsunemasa Saiki, Kazusuke Maenaka, Akinobu Yamaguchi, Yuichi Utsumi, Powder Transport Direction Control Method by Using Drive Frequency of Surface Acoustic Wave, 10th International Workshop on High Aspect Ratio Micro Structure Technology, 2013年4月21日, SEMINARIS CAMPUSHOTEL, Berlin, Germany

② Tsunemasa Saiki, Yasuto Arisue, Yuya Matsui, Kazuo Kasai, Akinobu Yamaguchi, Masahiro Takeo, Kazusuke Maenaka, Yuichi Utsumi, Design of Surface Acoustic Wave Actuator using Bragg Reflection for Powder Transport, P39th International Conference on Micro and Nano Engineering, 2013年9月16日, Imperial College London, London, UK

③ Yasuto Arisue, Tsunemasa Saiki, Akinobu Yamaguchi, Yuichi Utsumi, Study on Reflected Surface Acoustic Wave Actuator for Powders using a Grating Reflector, 2013 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 2013年11月5日, ロイトン札幌

④ Koichi Okuda, Masaki Harada, Hiroo Shizuka, Tsunemasa Saiki, Kazuya Hamaguchi, Yuichi Utsumi, Machining of Micro Groove of Lithium Niobate by Planer-type Cutting with Diamond Tool for Fabrication of SAW device, 14th euspen International Conference, 2014年6月2日, Valamar Hotel Lacroma, Dubrovnik, Croatia

⑤ Akinobu Yamaguchi, Yasuto Arisue, Yuya Matsui, Tsunemasa Saiki, Kei Kuramoto, Ikuo Okada, Yuichi Utsumi, Micron-Powder Blending, Transportation and Separation using Surface Acoustic Waves, 58th International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication, 2014年5月27日, Omni Shoreham hotel, Washington DC, USA

⑥ Tsunemasa Saiki, Yuya Matsui, Akinobu Yamaguchi, Masahiro Takeo, Kazusuke Maenaka, Yuichi Utsumi, High-Performance Feeder Driven by Surface Acoustic Wave for Micro Powders, 40th International Conference on Micro and Nano Engineering, 2014年9月22日, Swiss Tech Convention Center, Lausanne, Switzerland

⑦ 松井優耶, 原田昌樹, 山口明啓, 奥田孝一, 内海裕一, 笠井一夫, 浜口和也, 才木常正, 弾性表面波を用いた粉体フィーダーの提案

日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014 年 9 月 7 日, 東京電機大学

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

才木 常正 (SAIKI TSUNEMASA)

兵庫県立工業技術センター生産技術部

主任研究員

研究者番号 : 8 0 4 7 0 2 2 7

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

内海 裕一 (UTSUMI YUICHI)

兵庫県立大学高度産業科学技術研究所

教授

MEMS 技術に関する情報交換,

実験装置の借用

研究者番号 : 8 0 3 2 6 2 9 8

山口明啓 (YAMAGUCHI AKINOBU)

兵庫県立大学高度産業科学技術研究所

準教授

設計に伴うシミュレーション解析に

関する情報交換

研究者番号 : 7 0 4 2 3 0 3 5