

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2006 年度 ～ 2008 年度

課題番号：18360106

研究課題名 (和文) マイクロマルチ噴流を利用したマイクロエネルギー機器の熱制御に関する研究

研究課題名 (英文) Thermal Control on Micro-Energy Devices by Using Micro-Multijets

研究代表者 中部 主敬 (NAKABE KAZUYOSHI)  
京都大学・工学研究科・教授  
研究者番号：80164268

研究成果の概要： ミリメートル級マイクロエネルギー機器の混合・伝熱制御に小寸法噴流 ( $\mu$ -J) を用いる場合、 $\mu$ -J の低レイノルズ数化・安定化によって乱流混合が十分に機能しない。そこで、 $\mu$ -J の混合・伝熱性能を回復・促進させることを目的に、 $\mu$ -J あるいはそれを多数に分割したマイクロマルチ噴流 ( $\mu$ -MJ) を対象に、自励共振、音響的加振、機械的強制加振による擾乱付与の効果、 $\mu$ -MJ の分割・配置の最適化等について、検討を行った。

交付額：

(金額単位：円)

|         | 直接経費      | 間接経費      | 合計         |
|---------|-----------|-----------|------------|
| 2006 年度 | 5,200,000 | 1,560,000 | 6,760,000  |
| 2007 年度 | 2,300,000 | 690,000   | 2,990,000  |
| 2008 年度 | 1,400,000 | 420,000   | 1,820,000  |
| 年度      |           |           |            |
| 年度      |           |           |            |
| 総計      | 8,900,000 | 2,670,000 | 11,570,000 |

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 機械工学・熱工学

キーワード： 熱・物質移動，噴流，熱制御，混合制御，マイクロ流路，エネルギー機器

### 1. 研究開始当初の背景

高密度化する CPU の冷却やマイクロマシン (MEMS)，マイクロ化学分析システム ( $\mu$ -TAS) 用の混合・放熱・加熱に要する超小型の伝熱機器，化学反応器には，微小領域における高度な混合・伝熱制御技術が必要である。しかし，ミリメートル・サブミリメートル程度以下の小寸法デバイス内では，冷却用流体流れのレイノルズ数 ( $Re$  数) が低下するとともに，相対的に体積力よりも表面力や壁面の影響が強くなるため，流れが安定化・層流化し，混合・伝熱に対して通常のスケールで起こる乱流輸送の効果が発揮されにく

くなることが予想される。また，パワー-MEMS のような超小型の機械的エネルギーや電気エネルギーへのマイクロエネルギー変換機器では，小寸法であるがための熱発生源とその周辺との急峻な温度勾配，あるいは，その逆に，表面積が相対的に大きくなるため，表面に沿う熱漏洩が周囲部材，流体に大きな影響を与えることが考えられる。

一方，噴流については工業的に，従来からセンチメートル程度以上のいわゆる通常のマクロ噴流 (M-J) が，その流量・噴出方向制御の容易さから，高温伝熱面の冷却や食品乾燥，製膜，炉内加熱など，混合・伝熱・燃

焼現象を伴うプロセスで幅広く利用されてきた。それゆえ、M-Jの流動・混合特性や衝突熱伝達特性は古くから研究され、流れの層流、乱流を問わず文献的蓄積もかなり多い。

したがって、 $\mu$ -Jや $\mu$ -MJをマイクロエネルギー機器の混合・伝熱制御に用いる場合には、その流れが連続体を逸脱するようなクヌッセン数 ( $Kn$  数) =  $O(10^{-2})$  以上の極端な流れには至らないまでも、個々の噴流の流れが機器の小寸法化に伴って  $Re$  数 =  $O(10^3)$  以下に低下し、乱れ強さが抑制される。このため、混合・熱伝達は主に、流体の拡散効果に頼らざるを得なかった。

## 2. 研究の目的

ミリメートル程度以下の小寸法デバイス内では、表面力の影響が体積力に比して相対的に大きくなり、流れが安定化・層流化する。それゆえ、これまで工業的に多用されてきたM-Jの持つ、乱流輸送の大きな混合・伝熱効果は期待できない。また、小寸法であるがための熱発生源とその周辺との急峻な温度勾配や、相対的に広い伝熱面積のための熱漏洩などが周囲部材、流体に与える影響は大きい。

そこで、小寸法チャンネル内流れにおける組成や温度の異なる2流体混合ならびに温度制御を行うため、 $\mu$ -Jあるいは $\mu$ -MJを有効に利用することを提案する。また、 $\mu$ -MJの更なる

混合・伝熱促進効果を望むべく自励共振、音響的加振、機械的強制加振を行って、M-Jと比較しつつ、 $\mu$ -MJの層流～乱流遷移現象、混合・伝熱特性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

図1に示す研究実施のフローチャートに沿って、研究を遂行する。一方の研究グループは、 $\mu$ -MJの分割・配置の最適化のために、噴流相互の干渉について、またもう一方の研究グループは、更なる混合・伝熱制御のための擾乱付与のために、噴流振動の効果について、それぞれ検討を行う。

前者の研究グループは図1の左半分に示すように、まず、基準となる噴流系（噴流A）について、これまで既に多く公表されている高  $Re$  数条件に関する研究結果を検討した上で、流れ系を $\mu$ -MJ系（噴流B）の場合と比較、吟味する。

両噴流系の装置は可視化実験用に新規設計、製作する必要がある。流動パターンの可視化には既存のアルゴンイオンレーザーを光源とし、高速度デジタルビデオカメラを用いる。撮影した画像から流動様式、とくに、比較的大規模な渦の寸法と構造に関する解析を行って、噴流AとBとの相違点、小寸法化が流動様式に及ぼす効果、 $\mu$ -MJの場合の噴流相互間の干渉などを実験的に調べる。

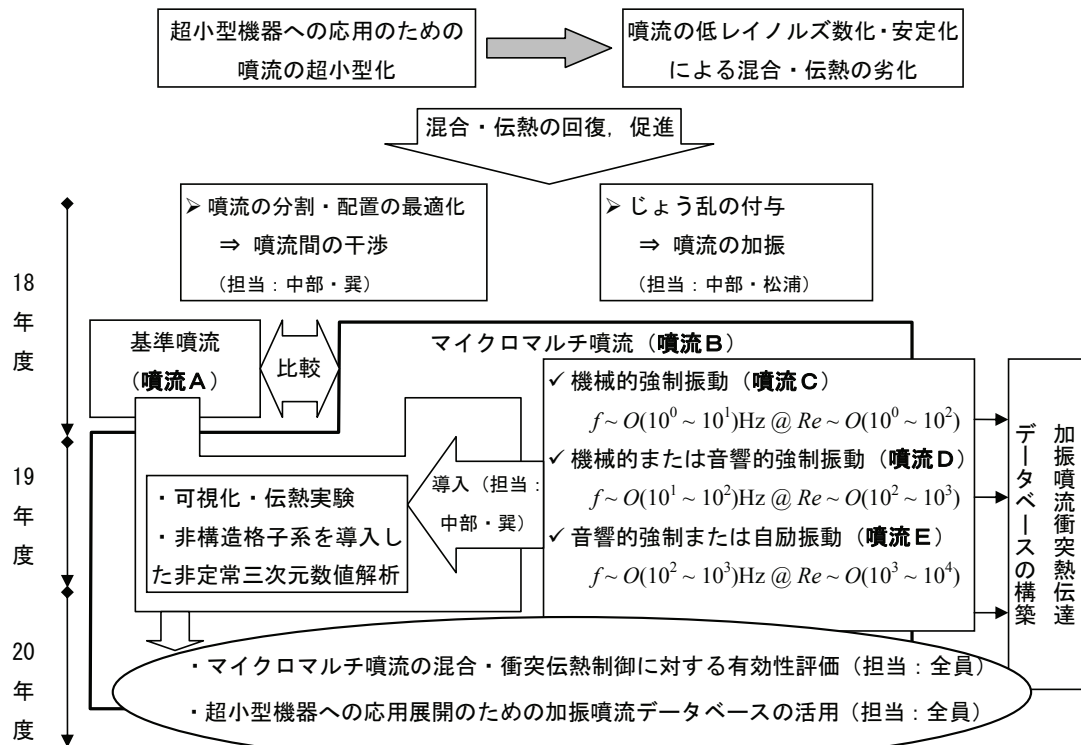


図1 研究実施のフローチャート。

噴流画像の処理結果と対比できるように、可視化実験と並行して、噴流 A および噴流 B に関する数値シミュレーションも立ち上げる。そのために、これまでに当研究室で開発してきた数値計算コードを改変し、両噴流系に対応できるように準備を進める。噴流 A の層流流れの場合については比較的容易に計算を実行することができると思われるが、噴流 B についてはマルチ噴流用の複数のノズル孔があるため、複雑な境界設定を要する。それゆえ、その境界形状を滑らかに模擬できる計算格子が配置できるように、非構造格子の採用を検討、準備する。

もう一方の研究グループは図 1 の右半分に示すように、 $\mu\text{-J}$  の更なる混合・伝熱促進のために付与する擾乱として、噴流の加振を検討する。また、これまでに公表されている噴流に及ぼす加振効果について、噴流のスケール、 $Re$  数、および加振方法と周波数の影響を調べる。噴流 E についてはこれまで、通常のスケールの乱流噴流として、自励共振の衝突熱伝達に及ぼす影響を検討してきた。その際、内径の異なるカラーを数種類用意し、それを噴流ノズル先端部でスライドさせることによってカラー部の押し出し長さを調整し、自由噴流の自励共振と乱れ強さの関係、とくに、流動および熱伝達特性の  $Re$  数および  $St$  数依存性を調べる。

音響的に噴流を振動させる別の方法として、スピーカなどを使った外部からの強制的音響加振も行う (噴流 D)。これについてもある程度、研究を先行させており、得られた結果を  $\mu\text{-MJ}$  の場合に反映させる。

機械的な強制振動を付与する場合 (噴流 C) については、流れを  $Re \sim O(10^0 \sim 10^2)$  とし、 $f \sim O(10^0 \sim 10^1)\text{Hz}$  の振動周波数で加振することを試みる。なお、機械的強制加振装置については、その振動周波数範囲を  $f \sim O(10^2)\text{Hz}$  程度まで拡張することは出来なかった。

前出の研究グループは適切な  $Re-f$  の関係を検討し、得られた知見を噴流 B に導入する準備を行う。噴流 B に関する速度、濃度、伝熱面温度等、詳細なデータについては、既存の熱線風速計、レーザードップラー流速計 (LDV)、粒子画像流速計 (PIV) やガス分析装置、温度・圧力測定装置などを活用して取得する。また、噴流ノズル前後の圧力分布や閉塞状態、作動流体の種類、マイクロメートル以下のスケール流れでしばしば議論される壁面での速度のすべり、温度のジャンプなどの影響についても検討する。噴流 B のノズル噴孔径、噴孔数、噴孔位置および噴出方向については、数値シミュレーションの結果を噴流ノズル設計に反映させて決定する。

以上のことを纏めて、 $\mu\text{-MJ}$  の混合・伝熱制御に対する有効性を総合的に評価し、それと

併せて、超小型エネルギー機器における混合・伝熱制御に応用展開するための超小型噴流加振効果について、最終報告書に纏める。

#### 4. 研究成果

(1)  $Re \sim O(10^3 \sim 10^4)$  程度の噴流 E については、噴流ノズルのカラー部が段階的に特定の長さを取る場合に、周波数  $f \sim O(10^3)\text{Hz}$  で自励共振することが分かった。また、自励共振する場合には、振動しない通常の噴流の場合と比較して、半分程度の短い距離で同程度の混合状態が達成できる。また、それと連動して衝突熱伝達特性も同様の傾向を示す。従って、自励共振によってコンパクトで高い混合・伝熱性能が得られることが分かった。

(2)  $Re \sim O(10^2 \sim 10^3)$  程度の噴流 D については、スケールが小さくなると、わずかな外部音波に対しても噴流が大きく乱される。その場合の振動周波数は  $f \sim O(10^2)\text{Hz}$  であった。また、平行して設置された 3 本の自由噴流がお互いに干渉し合う結果を得た。

(3) 項目 (2) と同様の噴流系について、時間平均的な噴流  $Re$  数を 1,500、噴流加振周波数  $f$  を 1Hz とした場合 (噴流 C) の可視化画像を図 2 に示す。なお、画像の各コマの時間間隔は 0.1s である。

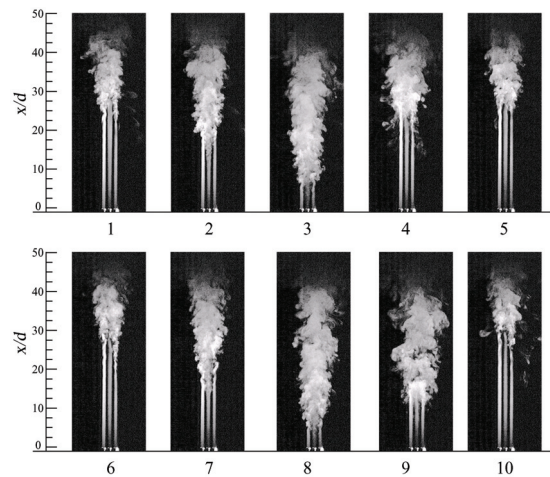


図 2 中心噴流の脈動による混合効果 (時間平均  $Re = 1,500, f = 1\text{Hz}$ ).

LDV による詳細な速度分布測定を行い、定常噴流の場合と比較したところ、噴流ノズル近傍では中心噴流を加振させた方が、噴流同士の混合状態を時間平均的に良くする。しかし、その一方、下流領域においては逆に、定常噴流の方が良い混合状態を示すことが分かった。また、中心噴流が加速する場合および減速する場合における瞬間の  $Re$  数が等しくなる位相においては、層流～乱流の遷移位置に相違が見られた。すなわち、加速する位相での乱流遷移位置の方が、減速する位相で

のそれに比べて下流側に位置することが分かった。これは加速状態の噴流を伴う噴流列の方が乱流遷移しにくいことを意味する。なお、乱流遷移後に3本の噴流が一体化する断面位置での主流方向速度分布は、両者ほぼ同じ形状を取る。

また、中心噴流を空気からヘリウムガスに変更して、隣接配置した空気噴流との非等密度噴流列を形成した場合についても実験を行い、等密度噴流列の場合と比較した。その結果、ヘリウム-空気噴流列では、ノズル出口近傍で中央のヘリウム噴流の半径方向流速が比較的大きいため、隣接空気噴流はその影響を強く受ける。一方、下流領域ではその影響が小さくなることが分かった。中央のヘリウム噴流を脈動させた場合には、加速する位相と減速する位相とで速度分布に相違が見られるものの、空気噴流列のように乱流遷移の位置に明確な相違は見られなかった。

中心噴流をメタンに変更して、拡散火炎を形成した場合についても、シュリーレン光学系で撮影を行うことによってメタン噴流が加速（流量増大）する位相および減速（流量減少）する位相の火炎形状を観察した。その結果、隣接する空気噴流との干渉によって、加速する位相における火炎面の方が、減速する位相におけるそれよりも、比較的滑らかであることが分かった。この新しい知見は今後の詳細な研究でその原因を明らかにしたい。

(4) 基準となる噴流 A および混合・伝熱促進のための擾乱付与の効果（噴流 C ~ E）の上記結果に基づき、 $\mu$ -MJ（噴流 B）について、詳細な検討を行った。その結果、 $\mu$ -MJ は全般的に、従来の管内同軸噴流に比して混合性能が高い。しかし、噴流出口直後において、管内同軸噴流よりも混合状態の悪くなる小領域が存在することが分かった。また、旋回成分の付与、浮力の作用が混合特性に及ぼす影響についても、以下のような結果を得た：

① 旋回（スワール数,  $Sw$ ）を伴う場合は、旋回を伴わない場合に比べて混合が抑制される。例えば、図 3 の流跡線を比較すると、 $Sw = 0.40$  の場合の方が、噴流同士の干渉し始める距離が比較的長くなっている。

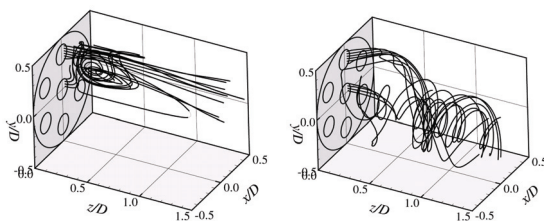
② 管内同軸噴流に比して混合状態の悪い  $\mu$ -MJ の小領域は、 $Sw$  数が大きくなるほど下流方向に伸張する。

③  $\mu$ -MJ に及ぼす浮力の影響として、浮力の作用方向が主流に平行な場合、その影響はほとんど顕れない。その一方で、浮力の作用方向が主流と平行でない場合には、速度ならびに質量分率の分布ともに非軸対称となり、著しく混合が劣化する。

④ 旋回の伴う  $\mu$ -MJ に浮力が作用する場合、浮力の作用方向に依らず、流れ場や混合状態に及ぼす浮力の影響が顕著になる。

$\mu$ -MJ の中心噴流に脈動を付加して、エネルギー機器のスタートアップ時や負荷変動に対する応答時を想定するような場合についても、LDV, PIV による流速測定を行ったが、今後、更に詳細な検討を行う予定である。また、小型エネルギー機器の一つとして、水素への燃料改質器を採り上げ、それに、 $\mu$ -MJ を適用した。これにより、霧化した液体燃料の空気との十分な混合や、改質器内での部分酸化反応時の火炎の逆火防止等に、 $\mu$ -MJ の噴流ノズル形状が極めて有効に機能することが分かった。

ギー機器のスタートアップ時や負荷変動に対する応答時を想定するような場合についても、LDV, PIV による流速測定を行ったが、今後、更に詳細な検討を行う予定である。また、小型エネルギー機器の一つとして、水素への燃料改質器を採り上げ、それに、 $\mu$ -MJ を適用した。これにより、霧化した液体燃料の空気との十分な混合や、改質器内での部分酸化反応時の火炎の逆火防止等に、 $\mu$ -MJ の噴流ノズル形状が極めて有効に機能することが分かった。



(a)  $Sw = 0$  (b)  $Sw = 0.40$

図 3 管内マルチ噴流の流跡線の様子。

## 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 9 件）

- ① Y. Rai, K. Tatsumi, K. Kuwabara and K. Nakabe, Heat and Reaction Characteristics of Multistage Alcoholic-Fuel Reformer (2nd Report: Velocity and Radical Chemiluminescence Measurements), International Conference on Power Engineering 2009 (ICOPE-09), (in printing), 2009, 査読有。
- ② M. Mizuno, K. Tatsumi and K. Nakabe, Phase-Averaged Mixing Characteristics of Homogeneous/Heterogeneous Multiple-Jets Perturbed by Cyclic Oscillation, Proceedings of the 3rd International Symposia on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, Vol. 1, 2008, CD-ROM No. E3\_5\_10 (6 pages), 査読有。
- ③ K. Tatsumi, E. Shinohara, M. Mizuno and K. Nakabe, Phase-Averaged Mixing Characteristics of Multi-Jets Modified by Cyclic Perturbation, Journal of Japanese Society for Experimental Mechanics, Vol. 7, pp. 6 – 11, 2007, 査読有。
- ④ K. Tatsumi, K. Kuwabara, Y. Rai and K. Nakabe, Heat and Reaction Characteristics of Multi-Stage Alcoholic-Fuel Reformer, Proceedings of the 6th Kyoto - Seoul National - Tsinghua University Thermal Engineering Conference, pp. 97 – 104, 2007,

- 査読有。
- ⑤ M. Mizuno, K. Tatsumi, S. Okano and K. Nakabe, Phase-Averaged Mixing and Combustion Characteristics of Multiple Jets Perturbed by Cyclic Oscillation, Proceedings of the 2nd International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics (ISEM 2), CD-ROM No. 39 (6 pages), 2007, 査読有。
- ⑥ K. Tatsumi, K. Kuwabara, Y. Rai and K. Nakabe, Heat and Reaction Characteristics of Multi-Stage Alcoholic-Fuel Reformer, Proceedings of the 8th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-18), CD-ROM No. 130 (8 pages), 2007, 査読有。
- ⑦ K. Tatsumi, E. Shinohara, F. Okamoto, Y. Kitaoka, and K. Nakabe, Mixing characteristics of multi-jets modified by cyclic perturbation, JSME International Journal (Series B), Vol. 49, No. 4, 2006, pp. 959 – 965, 査読有。
- ⑧ 田中美也子, 巽和也, ウッドフィールド・ピーター, 中部主敬, 管内マルチ噴流の混合性能に及ぼす旋回と浮力の効果, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 72, No. 722, 2006, pp. 2554 – 2561, 査読有。
- ⑨ D. Cvetinovic, M. Ukai, K. Nakabe and K. Suzuki, Velocity Measurements and Flow Structure Visualizations of a Self-Sustained Oscillating Jet, Thermal Science, Vol. 10, No. 2, 2006, pp. 113 – 125, 査読有。
- [学会発表] (計 9 件)
- ① M. Mizuno, K. Tatsumi and K. Nakabe, Phase-Averaged Mixing Characteristics of Homogeneous/Heterogeneous Multiple-Jets Perturbed by Cyclic Oscillation, The 3rd International Symposia on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, 2008.12.07, Tainan, TAIWAN.
- ② 頼泰弘, 栗原啓介, 巽和也, 中部主敬, 多段式メタノール燃料改質器の熱および反応特性(第2報 火炎発光と流速測定), 第46回燃焼シンポジウム, 2008.12.03, 京都。
- ③ 栗原啓介, 頼泰弘, 巽和也, 中部主敬, 多段式メタノール燃料改質器の熱および反応特性, 第45回燃焼シンポジウム, 2007.12.05, 仙台。
- ④ K. Tatsumi, K. Kuwabara, Y. Rai and K. Nakabe, Heat and Reaction Characteristics of Multi-Stage Alcoholic-Fuel Reformer, The 6th Kyoto - Seoul National - Tsinghua University Thermal Engineering Conference, 2007.10.16, Beijing, CHINA.
- ⑤ K. Tatsumi, E. Shinohara, M. Tanaka, P. L. Woodfield, T. Kitaoka and K. Nakabe, Flow and Mixing Characteristics of Free and Confined Multi-Jet, International Workshop on Multiphase Flow & Mixing Phenomena, 2007.10.04, Krakow, POLAND.
- ⑥ M. Mizuno, K. Tatsumi, S. Okano and K. Nakabe, Phase-Averaged Mixing and Combustion Characteristics of Multiple Jets Perturbed by Cyclic Oscillation, The 2nd International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics (ISEM 2), 2007.09.23, Osaka.
- ⑦ 水野将明, 岡野真弥, 巽和也, 中部主敬, 燃焼/非燃焼時の噴流と隣接脈動噴流の干渉効果, 機械学会年次大会 2007, 2007.09.10, 吹田市。
- ⑧ K. Tatsumi, K. Kuwabara, Y. Rai and K. Nakabe, Heat and Reaction Characteristics of Multi-Stage Alcoholic-Fuel Reformer, The 18th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-18), 2007.08.29, Daejeon, KOREA.
- ⑨ E. Shinohara, K. Tatsumi, M. Mizuno and K. Nakabe, Phase-averaged Mixing Characteristics of Multi-Jets Modified by Cyclic Perturbation, The 1st International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics (ISEM 1), 2006.09.13, Sapporo.
- [図書] (計 1 件)
- ① 中部主敬, 乱流工学 (分担執筆, 19.2.3 節 噴流の受動制御), 朝倉出版, 2009 (印刷中), 査読有。

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
 中部主敬 (NAKABE, KAZUYOSHI)  
 京都大学・工学研究科・教授  
 研究者番号: 80164268
- (2) 研究分担者  
 巽和也 (TATSUMI, KAZUYA)  
 京都大学・工学研究科・助教  
 研究者番号: 90372854  
 松浦寛人 (MATSUURA, HIROTO)  
 (H18~H19)  
 大阪府立大学・工学研究科・助教  
 研究者番号: 70219385
- (3) 連携研究者  
 松浦寛人 (MATSUURA, HIROTO)  
 (H20)  
 大阪府立大学・工学研究科・助教  
 研究者番号: 70219385