

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010年度

課題番号：20560158

研究課題名(和文) マイクロチャンネルにおける分子気体効果を用いた
温度差再利用法の開発研究課題名(英文) Study on the thermal energy conversion with the rarefied gas flows in
micro-channels

研究代表者

杉元 宏 (SUGIMOTO HIROSHI)

京都大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：50222055

研究成果の概要(和文)：

マイクロチャンネル内の分子気体に生じる熱駆動流を用いて、温度差を圧力・濃度差に変換する方法について、解析および実験的研究を行った。その結果、10—1万Paの広い圧力範囲で熱駆動流を誘起する多層網構造を開発した。また、混合気体において、熱先端ポンプが発生する濃度差の測定に初めて成功した。特に、この種の気体分離効果を応用した、連続運転が可能な、開いた系の気体分離装置を考案したことは重要な成果である。

研究成果の概要(英文)：

The methods of energy conversion, which make use of the rarefied gas flows in micro-channels, are investigated. Numerical and experimental studies are carried out on the pressure difference or the variation of the molar fraction of gas mixture induced by the temperature field. The main result of this research is the fundamental design of the gas separator of open fluid system, which makes use of the molecular exchange flows in micro-channels. Two experimental results of this research support it. (i) A multilayer mesh structure, which transforms a temperature difference into a gas flow through the mesh, is devised. A test system works at wide range of gaseous pressure, e.g., from 10000 Pa down to 10 Pa. (ii) The differences of molar fraction of the gas mixture between the two ends of the thermal edge pump are detected for various mixture of gases. This is the first evidence of the gas separation effect of the thermally driven pumps.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：分子気体、希薄気体、気体分離、熱遷移、マイクロ・ナノデバイス、MEMS

1. 研究開始当初の背景

私たちは、温度場と重力によって、空気の運動—自然対流—が生じることを知っている。重力、つまり上下の区別が無ければ、対流は消えてしまう。このような状態でも、低圧あるいはマイクロな系の気体のように、気体分子の自由行程が無視できない大きさになる状態—分子気体—の場合には、温度場によって、重力とは無関係な、様々な定常な気体の流れが生じることが知られている。古くから知られている現象は、温度が不均一な壁面で、壁に沿って気体が高温側に流れる「熱ほふく流(熱遷移流)」である。1910年、Knudsenは熱遷移流を生み出す流路を多数直列に接続し、その両端で圧力差が得られることを示した。Knudsenの装置は一種のポンプであるが、実用化はされなかった。当時は、モーターや高速蒸気を用いるポンプが大きく進歩した時代だったのである。

近年になって、このポンプ—熱駆動ポンプと呼ぼう—の特異な特徴、すなわち、運動する部品が不要で微細化可能、蒸気混入や振動が無い、熱で動作する等が注目を集め、研究が再び行われるようになった。本研究の開始段階で、実際に動作する熱駆動ポンプとして報告されていたのは、米国 Muntz らの開発した各種多孔質を利用したポンプ、申請者らの開発した熱尖端ポンプ等である。Muntz らの Knudsen ポンプは、多孔質の素材を変えることにより、多孔質の孔サイズに対応した圧力(大気圧~高真空領域)で、ポンプ前後の圧力差を得ることができる。熱尖端ポンプでは、Knudsen ポンプの高温部と低温部を切り離し、(平均自由行程のスケールで見れば)尖った形の、高温物体と低温物体を配置する。この場合、物体温度がそれぞれ一様でも、物体尖端で熱尖端流が生じ、ポンプの駆動力となる。高温部と低温部が断熱性の高い空気で切り離されているため、ポンプの高温部からの熱の漏れを防ぐことができる。

近年、これらの熱駆動型ポンプが、混合気体の成分を自然に分離する作用を持つことが、分子気体流の基礎方程式である Boltzmann 方程式に基づく解析・数値解析によって明らかになった。具体的には、ポンプの両端を塞ぎ、内部に混合気体を封入すると、ポンプによって、圧力差だけではなく、濃度差が生み出されるのである。熱駆動型ポンプを直列に接続すれば、この濃度差は、圧力差とともに、積算して大きな値を得ることができると予想される。

このように、熱駆動ポンプは、ポンプとしてだけではなく、混合気体の分離・濃縮にも応用できる可能性がある。工学的な応用上の観点からは、最も興味があるのは大気圧程度の圧力で動作するポンプ・気体分離装置であろう。この時には、熱駆動ポンプの流路は非

常に微細なものが必要になる。大気圧における気体分子の平均自由行程は $0.1 \mu\text{m}$ 程度であり、熱駆動ポンプでは流路のスケールが気体分子の自由行程の程度であるためである。もちろん、その小さい領域に、効率よく温度差を与える必要仕組みも同時に必要となる。

代表者は、最近、温度が異なる2枚の多孔膜を僅かに離して重ねるだけで、膜を通り抜ける気体流が生じることを発見した。装置の構造は非常に簡単であり、高温・低温の二つの膜の間には、熱尖端ポンプ同様、空気の層で断熱性を持たせることが可能である。また、膜の孔径を適切に選ぶことにより、高圧下における動作が可能であると予想された。

2. 研究の目的

気体中で、温度が異なる2つの多孔膜を僅かに離して重ねたとする。多孔膜の孔のサイズが気体分子の自由行程に近い場合、膜の温度差によって、低温側から高温側へ膜を通り抜ける気体流が生じる。この現象を用いると、数十度程度の温度差を気体の圧力に変換するポンプや、混合気体を分子の重さによって分別する装置が実現できる。本研究では、中・低レベルの温度差を、再利用可能な大きさの圧力差・濃度差に変換する装置の実現を目指し、温度差を用いたポンプ効果を持つ膜状物体の試作・ポンプ効果・気体濃縮効果の実験的検証を進める。

3. 研究の方法

温度差を気体の圧力差に変換する手法については、Knudsen ポンプをはじめ、既に多くの提案が行われてきている。残る最大の課題は、装置を実現する上の問題、すなわち、大気圧における平均自由行程程度($0.1 \mu\text{m}$)の大きさの流路に、どのように熱を伝えるか、という点であろう。本研究では、代表者が前回の研究で考案した、図1に示す熱駆動流の発生装置を基に、熱駆動流をより高圧で誘起する実験的研究を行った。具体的には、装置構造・膜孔等のサイズ・素材特性も含めて検討・試作を繰り返し、動作圧力を、本研究グループで実績がある 10 Pa から徐々に高める方法を採用した。

一方、温度差を濃度差に変換する手法については、まだほとんど研究が行われていない。唯一の結果は、両端を封鎖した熱駆動ポンプ内部に濃度勾配が現れるという解析的研究だけである。まず、このような現

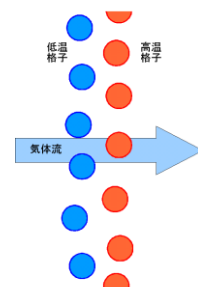


図 1 温度が異なる膜のペアを通り抜ける熱駆動流(杉元・山田, 第 54 回応用物理学関係連合講演会予稿集 2-734, 2007)。

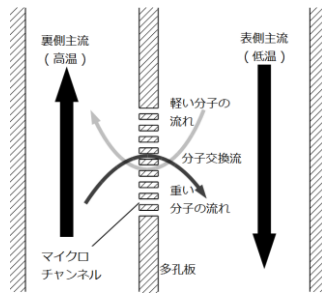


図 2 気体分離装置の概要。2つの主チャンネルを、気体分離デバイスで接続する。図では、気体分離デバイスとして多孔板を用い、主チャンネルの温度・圧力を調整して、気体分離デバイスで分子交換流を発生させる例を示している。

象が起こることを実験により示すことが必要不可欠である。研究期間を短縮するために、以前の研究で代表者らが試作した熱先端ポンプを用い、その両端を模擬的に封鎖した装置において、両端の濃度差を測定する実験を実施した。

温度差を濃度差に変換するという本研究の目標には、もちろん、濃度を変化させた気体を装置外部に取り出すことが含まれる。しかし、現在までの研究は、すべて「閉じた系」に対する結果であり、分離した気体を連続的に装置外部に取り出せるものではない。効率的に温度差を濃度差に変換するためには、連続的な気体分離動作を行う、開いた系の装置が必要である。本研究では、既存の研究結果が全くない、この課題に取り組み、数値シミュレーション等を援用して、開いた系で動作する気体分離装置を考案する研究を行った。

4. 研究成果

(1) 連続的に気体分離を行う装置の考案

分子気体の計算機シミュレーションを利用して検討を進め、簡単な構造で、連続的に気体分離を行う装置の基礎的なデザインを考案した。考案した装置の概念図を、図 2 に示す。材料気体が流れている 2 本の流路を、

気体分離デバイス[熱駆動ポンプあるいは多孔板]で連結したものである。2本の流路の温度比・圧力比・流速を適当に選んで材料気体を供給すると、気体分子の重さに応じて、一方の気体分子が気体分離デバイスを通り抜け、別の気体分子が逆向きに気体分離デバイスを通り抜ける「分子交換流」が発生する。その効果を、両側の大きなチャンネルを通る(分子交換流に比べて高速な)主流で装置外部に運び出す。装置構造はこのように簡単なものであるが、うまく動作させるには、多くの問題がある。最大の問題は、上の説明では、気体分離デバイス内の流路(簡単のため、マイクロチャンネルと呼ぶ)と、主流流路(主チャンネルと呼ぶ)で、混合気体の振舞に、異なったものを期待していることだろう。マイクロチャンネルにおいては、混合気体の分離を可能とするために、拡散的な、即ち Reynolds 数が小さい流れを期待している。その一方、主チャンネルでは、気体分離デバイスで生成した気体が、拡散せず下流に流れることを期待している。これは、対流的な、即ち、Reynolds 数が高い非線形流れの特徴である。このように2種の異なる Reynolds 数の流れを協調させて動作させるためには、流路幅の比、流速の比などを調整する必要がある。本研究では、代表的な気体分離装置内部の混合気体の振舞を、Boltzmann 方程式に基づく直接シミュレーション(DSMC)法によって解析した。これは、混合気体の特性に、粘性係数や各種の拡散係数の温度・濃度変動など、不確定な点が多く残されており、また、非線形性が重要な問題であることを考慮したためである。図 3 に、動作した気体分離装置内部の気体の振舞の例を示す。図 3(a)では、材料気体を左から入れ、生成気体を右から取り出す。生成気体の2つの出口で濃度差が得られている様子がわかる。図 3(b)は、主流の向きを対向方向に設定した場合の結果である。この場合には、適当な濃度の材料気体の供給により、主流に沿って、大きな濃度差を得ることができている。これらの結果から、本研

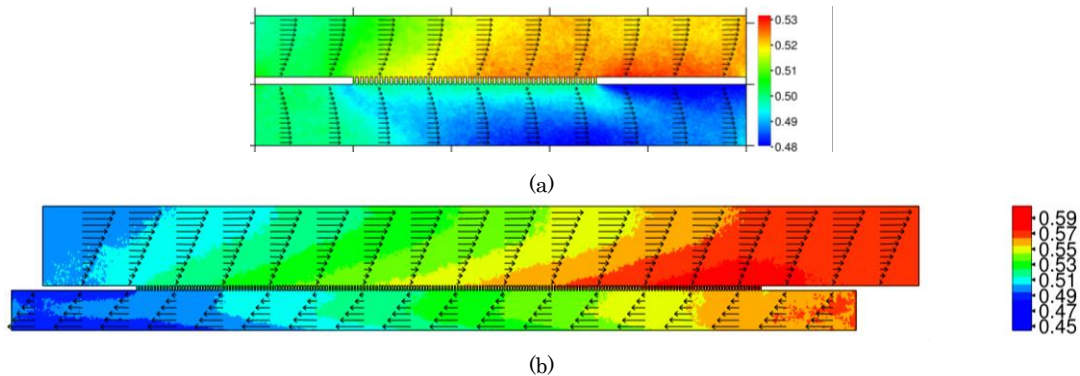


図 3 気体分離装置内部の混合分子気体の振舞の DSMC 解析結果。濃度分布を色分けで、流速分布を矢印で示している。どちらの例も、上のチャンネルが高温、下のチャンネルが低温となっており、その間に、気体分離デバイスとなるマイクロチャンネルの列が配置されている。(a) 同一方向の主流に対する結果; (b) 対向方向の主流に対する結果。

究で提案する図2の装置が、実際に気体分離装置として動作することが予想される。マイクロチャンネル内で誘起される分子交換流を応用する試みは他に例が無い。図2のデザインは、その初めてのものであり、重要な成果である。

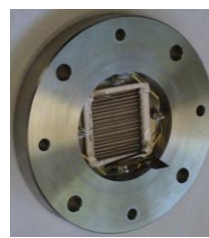
(2) 熱駆動ポンプの混合気体分離効果の実証実験

以前に代表者が試作した、10 Pa 程度の低圧で動作する熱尖端ポンプと2種混合気体を用いて、熱駆動ポンプが気体分離効果を持つことを実験的に示すことに成功した。装置の写真を図4に示す。測定結果では、事前の直接シミュレーションによる数値解析通り、ポンプの高圧端で重い気体の濃度が、低圧端で軽い気体の濃度が上昇した。熱駆動ポンプの混合気体分離効果を実験的に示したのは、1910年にKnudsenが熱駆動ポンプを考案して以来、初めての結果である。

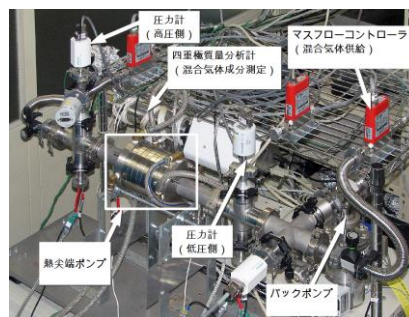
研究期間中に分離試験を行った混合気体は、He(ヘリウム)-Ar(アルゴン), He-Ne(ネオン), He-N₂(窒素), N₂-CO₂(二酸化炭素), N₂-CF₄(四フッ化炭素)である。結果の一部を、図5に示す。ここでは、装置両端で得られる濃度差と、混合気体の分子量比の関係をプロットしてある。分離効果は分子質量比とともに増大するが、多原子分子気体を含む混合気体(二酸化炭素-窒素、ヘリウム-窒素)では、単原子分子気体の結果から想定される量とは異なる分離効果が得られる。これは、熱駆動流による気体分離現象が、中間流(Knudsen数が1程度の流れ)領域で生じ、気体分子の内部構造の影響が現れうることを示唆している。

(3) 高圧で動作する熱駆動ポンプの開発

図1に示した熱駆動流を、大気圧程度の高圧化において誘起する研究を行った。このためには、気体の圧力に応じて網の目を微細化すればよい。ここで問題になるのは、構造の微細化に伴って、高温網から低温網に流れる熱流が増大する一方で、網の素線の熱流束が減少し、網の温度差を維持できなくなることである。この問題に対して、図6のように、目の粗い網・微細な網の多層網を用いる方法を考案した。各網の目のサイズ、素材などの検討・試作試験を繰り返し、最終的には0.1気圧において、熱駆動流の発生を確認することに成功した。この時の複合網の構成は、最も粗い網としてφ1 mmの孔を持つパンチングメタルを高温側と低温側に用い、その間に線径100 μmの銅網を2枚、銅網の間に線径1 μmの焼結ステンレス網を4枚挟んだものである。各網の写真および対応する試作装置を、図7に示す。10 Pa~10⁵ Pa(1気圧)の範囲で、装置を通る流れを流入口に取り付けた



(a)



(b)

図4 熱尖端ポンプの気体分離効果測定実験。(a) 実験で使用した熱尖端ポンプの1ユニット。実験では8ユニットの直列接続を使用した。(b) 気体分離効果の測定システム。

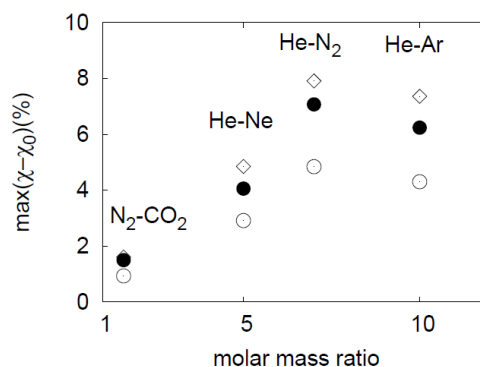


図5 熱尖端ポンプの気体分離効果測定実験の結果の一例。ポンプ両端の濃度差と、分子質量比の関係。◇: 熱尖端ポンプ内部の温度差150K, ●: 100K, ○: 50K。

羽根車の回転で観察したところ、10² Pa以下で700rpm以上、10³ Paで約220 rpm、10⁴ Paで10 rpmの回転が観測できた。その他の検証と合わせて、この装置が10 Pa以下から0.1気圧に至るまでの3桁以上の広い圧力範囲で、温度場による流れを誘起することが確認できた。本装置が、このように広い圧力範囲で動作する原因は、その多層網構造に求められるだろう。つまり、最も低圧ではパンチメタルが流れを誘起し、より高圧になるにつれ、より細かい網が流れを誘起するようになると考えられる。これは、既存の熱駆動流の発生装置には見られない、興味深い特性である。

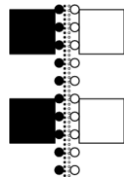


図 7 多層構造の網を用いた、熱駆動流発生装置の概略図。□部分を加熱、■部分を冷却することで、中央部の最も細かい網で熱駆動流を誘起し、網を左から右に通り返ける気体流を誘起する。

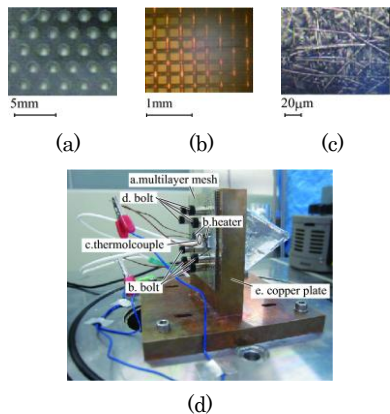


図 8 多層構造の網を用いた、熱駆動流発生装置。(a)~(c): 多層網を構成する各網。(d) 試験装置全体図。

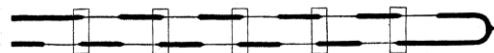


図 6 Knudsen の熱駆動ポンプ。1910 年に考案されたもので、10 本のマイクロチャンネルと太い管を、直列に接続したものである。四角枠部分を加熱すると、管の両端に圧力差が生じる。

(4) 今後の展望

本研究では、 10 Pa から 10^4 Pa に至る広い圧力範囲で熱駆動流を誘起する、多層網構造の試作に成功した。また、熱駆動ポンプが混合気体の分離効果を持つことを実験的に示した。さらに、熱駆動流が持つ気体分離効果を、連続的に動作する気体分離装置に応用するための基本的な装置デザインを考案した。

最大の成果は、気体分離装置のデザインであろう。これは、従来の熱駆動ポンプの構造とは大きく異なる。すなわち、従来のすべての熱駆動ポンプは、Knudsen のポンプ(図 8)と同様に、マイクロチャンネルを直列に接続して、熱駆動流の小さな効果を増大させることを考えている。これに対し、本研究で提案する気体分離装置では、図 3(b)に示すようにマイクロチャンネルを並列に並べ、熱駆動流の小さな効果を増大させることができる。気体の主たる流れは、マイクロチャンネルを通り抜ける必要が無く、太い単純な流路を高速に流れるだけで、その組成が変化する。また、図 3 と図 8 を比べる限り、並列接続の方が、莫大な接続数を容易に実現できると思われる。

る。これらの点に注目して開発を進めれば、流量が大きく、効率の良い、革新的な気体分離装置が実現できると考えられる。

この気体分離装置を大気圧下で実現するには、大気圧下において、効率的に熱遷移流を誘起させる必要がある。本研究で開発した多層板構造は、その候補の一つである。一方、2010 年冬から 2011 年春にかけて、米国ミシガン大学のジャンチャンダニ教授らの研究グループが、大気圧下で動作する、実用的耐久性を持つ Knudsen ポンプの開発に成功したことが相次いで報告されている。そこでは、本研究で採用した多層網構造の代わりに、粗く加工した金属面とメンブレン濾紙を利用して簡単な構造が実現されている。この装置も、上記の気体分離装置の駆動源として有望である。

本研究で提案した多層網構造においても、メンブレンフィルターを最も細かい網として用いれば、大気圧動作は可能だろう。ただし、多層化によって米国グループの Knudsen ポンプよりも部品点数が多くなることは避けられない。広い圧力範囲で動作するという特性を、より積極的に利用する必要があるだろう。

最後に、熱駆動流を用いた混合気体分離の、もう一つの可能性について述べておく。図 5 の実験結果から分かるように、熱駆動流を用いた混合気体分離の特性は、単に分子質量比だけで定まるのではなく、分子の内部構造が影響する可能性がある。これは、分子量が同一の気体でも分離が生じる可能性を示している。この点に注目し、本研究では、最新の 2CLJ(二中心レナードジョーンズ)分子ポテンシャルを用いた多原子分子混合希薄気体の DSMC シミュレーション・ソフトウェアも完成させた。残念ながら、研究期間内に解析結果と実験結果のずれを説明できず、明確な結果とはなっていない。この点についても研究を進め、多原子分子混合希薄気体の挙動解析を可能にしたいと考えている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① H. Sugimoto, S. Shinotou, Gas Separator with the Thermal Transpiration in a Rarefied Gas, in *Rarefied Gas Dynamics*, (印刷中)査読有。
- ② 門脇 征四郎, 杉元 宏, 多層構造の網の温度場によって誘起される希薄気体の流れ, *ながれ* **29**, 2010, p. 455-459 査読有。
- ③ 杉元 宏, 篠遠 晃, 温度場によって誘起される希薄気体の流れを用いた気体分離装置, *真空* **53**, 2010, p. 347-350 査読有。
- ④ H. Sugimoto, Experiment on the Gas Separation Effect of the Pump Driven by the Thermal Edge Flow, in *Rarefied Gas*

Dynamics, ed. by T. Abe (AIP, NY, 2008), p. 1123-1128 査読有.

- ⑤ H. Sugimoto, S. Kawakami and K. Moriuchi, Rarefied gas flows induced through a pair of parallel meshes with different temperatures, in *Rarefied Gas Dynamics*, ed. by T. Abe (AIP, NY, 2008), p. 1021-1026 査読有.

[学会発表] (計 9 件)

- ① H. Sugimoto, Gas Separator with the Thermal Transpiration in Micro Channels, 7th Micro Alliance Symposium, Kyoto University(Japan), Nov. 22, 2010.
- ② H. Sugimoto, Numerical Simulation on the Gas Separator with the Thermal Transpiration of a Rarefied Gas, Kyoto-Seul National-Tsinghua University, 10th Thermal Engineering Conference, Tsinghua University (China), Oct. 23, 2010.
- ③ 門脇 征四郎, 杉元 宏, 多層構造の網の温度場によって誘起される希薄気体の流れ, 日本流体力学会 年会 2010, 北海道大学, 2010 年 9 月 9 日.
- ④ H. Sugimoto, S. Shinotou, Gas Separator with the Thermal Transpiration in a Rarefied Gas, 27th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Asilomar, California(USA), Jul. 13, 2010.
- ⑤ 篠遠 晃, 杉元 宏, 温度場によって誘起される希薄気体の流れを用いた気体分離装置, 第 50 回真空に関する連合講演会, 学習院大学, 2009 年 11 月 4 日.
- ⑥ 高橋 秀, 杉元 宏, 熱先端ポンプの気体分離効果に関する実験的研究: 分子質量比の効果, 日本流体力学会年会 2009, 東洋大学, 2009 年 9 月 2 日.
- ⑦ H. Sugimoto, Experiment on the Gas Separation Effect of the Pump Driven by the Thermal Edge Flow, 8th Kyoto-Seul National-Tsinghua Univ. Thermal Engineering Conference, Seoul National University (Korea), Aug. 27, 2008.
- ⑧ H. Sugimoto, Experiment on the Gas Separation Effect of the Pump Driven by the Thermal Edge Flow, 26th International Symposium on rarefied gas dynamics, Kyoto University (Japan), Jul. 22, 2008.
- ⑨ H. Sugimoto, S. Kawakami and K. Moriuchi, Rarefied gas flows induced through a pair of parallel meshes with different temperatures, 26th International Symposium on rarefied gas dynamics, Kyoto University (Japan), Jul. 22, 2008.

[その他]

<http://fd.kuaero.kyoto-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉元 宏 (SUGIMOTO HIROSHI)
京都大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号 : 50222055

(2) 研究分担者

なし

研究者番号 :

(3) 連携研究者

なし

研究者番号 :