

機関番号：13102

研究種目：基盤研究 (C) 一般

研究期間：2008 ~ 2010

課題番号：20560182

研究課題名 (和文) 高温勾配における微粒子状物質の熱泳動の高精度計測

研究課題名 (英文) Accurate measurement on thermophoresis of particulate matter under high temperature gradient

研究代表者

鈴木 正太郎 (SUZUKI MASATARO)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：10282576

研究成果の概要 (和文)：自由落下中の微小重力状態を利用して、高温勾配における熱泳動速度の計測を行う実験装置を開発し、繰り返し実験を行うことによって統計処理ができる程度に実験データを蓄積した。その結果、従来に比べて飛躍的に高精度な計測値を得ることに成功した。また、得られた結果と非常によく一致する理論モデルを開発することができた。

研究成果の概要 (英文)：Developed in this work is an experimental device for the measurement of the thermophoretic velocity under high temperature gradients by means of utilizing a micro-gravity environment during a free fall. Experiments are conducted repeatedly so that enough amounts of data are accumulated for statistical treatment, which is confirmed to enable notable improvement, in comparison with existing experiments, in the measurement accuracy. An improvement in the theory is also achieved; the prediction by the new theory coincides satisfactorily with experimental results.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	1,100,000	330,000	1,430,000
21年度	1,300,000	390,000	1,690,000
22年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：燃焼工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱泳動, 微小重力環境, 高温勾配

## 1. 研究開始当初の背景

本研究課題は「熱泳動」という現象を対象としている。熱泳動とは、温度勾配のある場に浮遊する微小な粒子が、高温側から低温側に向かう方向に力を受ける現象のことである。微粒子が低温壁にしばしば堆積するのはこの現象のためである。燃焼場から生じる微粒子状物質は、非常に高い温度勾配の中で生じ成長するので、その過程で熱泳動の影響を強く受ける。また、フィルタ等による捕集の際にも、低温の固体壁面と高温の排ガスとの間に高い温度勾配が存在することになるの

で、この熱泳動の影響が無視できない。

低品位な燃料資源の有効利用を進めていくうえで、燃焼により生じる微粒子状物質の抑制はますます重要になる。特に中国の発展地域における環境汚染は、偏西風の風下に位置する我が国にとって直接的な問題である。微粒子状物質の排出抑制技術を開発していくためには、微粒子の挙動を正確に予測できる技術が必要であり、それには熱泳動に関する基礎的理解が不可欠である。

しかし、燃焼場を前提とするような高い温度勾配(100 K/mm のオーダー)に対しては、信頼できるデータは、本研究の開始時点で、

ほとんど得られていなかった。その最大の理由は自然対流の存在にある。通常重力場では、温度勾配が自然対流を誘起する。実験装置の工夫による自然対流の抑制は、ある程度は可能であるが、温度勾配が 60 K/mm 程度にもなると非常に難しくなる。このため通常重力場では、高温勾配での高精度計測には限界があった。

この自然対流の問題を解決するための方法として、微小重力環境を利用する方法がある。過去、東京大学の土橋らのグループにより、JAMIC（地下無重力実験センター・現在閉鎖）の施設を利用して比較的高い温度勾配（数 10 K/mm 程度）で微小重力実験が行われている。この一連の実験により彼らは、微小重力環境が熱泳動計測に適していることを示すとともに、高温勾配において既存モデルの予測から熱泳動力が大きく外れる可能性を示した。しかしその一方で、実験回数が限られており、データの量及び信頼性が必ずしも十分とはいえない状況であった。

熱泳動の基礎データを収集する実験では、必ずしも大規模な設備は必要ではなく、むしろ小規模の方が望ましい。既存の無重力実験施設を利用する場合、無重力時間を数秒（JAMIC では 10 s）から数十秒以上と長く確保できる反面、高額のコストがかかり、また、装置が大規模であるため実験の回数が限られる。一方、熱泳動速度の測定に必要な時間の最低限度は 0.1 s 程度であり、必要となる微小重力の総時間も、装置を工夫すれば 0.3 s 程度、落下距離にして 0.5 m 程度にまで縮めることが可能である。実験を繰り返して大量にデータを収集するという点では、装置が小規模である方が、大規模施設の利用より、かえって都合がよいともいえる。

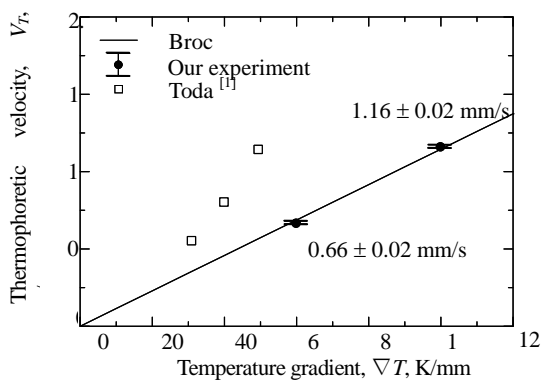


図 1. 温度勾配と熱泳動速度の関係

研究代表者は、科学研究費補助金（若手 B, H.17・H.18）を得て熱泳動に関する研究を進めていく中で、微小重力実験装置を自前で開発し製作していた。当時、その装置の改良を進め、高精度計測が実現しつつあった。

図 1 はその結果の一例で、図中のエラーバーが示すように非常に高い精度で、100 K/mm 程度の高温勾配の条件で計測結果を得ることに成功していた。土橋らのグループが過去に無重力環境で行った結果（図 1 中の Toda のデータ）と得られた結果とを比べると、顕著に乖離していることがわかる。

## 2. 研究の目的

高温勾配での正確なデータが不足していることから、本課題では、高温勾配における熱泳動の高精度計測を行って、燃焼場に適用しうる熱泳動の基礎データを蓄積することを目的として研究を開始した。また、微小粒子周りの流体挙動を数値シミュレーションにより解析し、数値解析と実験とで得られたそれぞれの結果を比較することによって、熱泳動のメカニズムに検討を加え、燃焼場に適用しうる熱泳動モデルを構築することを目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) 高精度計測装置の開発とデータの収集

まず、既存の実験装置の改良を行い、統計処理できる程度に十分な量の実験データを得られるようにした。本課題を開始した時点では、既存の装置には温度制御に関する問題があり、実験を繰り返すうえで問題があった。そのため、温度を高精度に制御するための制御系を新たに設計し製作することにより、高温勾配での実験を安定的に繰り返し行うための環境を構築した。

開発した装置では、計測ユニット（図 2）を搭載した落下ユニットを約 60 cm 自由落下させ、0.3 秒の微小重力時間を得るようになっている。計測ユニット内部の計測室は、密閉された高さ 1.5 mm の平たい空間である。その下面を加熱し、上面を冷却することによって、100 K/mm までの高い温度勾配を与える。落下開始前に粒子を計測チャンバ内に吹き込んでから吸気弁・排気弁を閉じて密閉し、その後落下させることにより、微小重力環境下での計測を行うことができる。図中右の排気管は照明用レーザーの導入口を兼ねている。レーザー光を当てることによって粒子を可視化し、落下ユニットに搭載した高速度カメラにより粒子の移動速度、すなわち熱泳動速度を計測する。

この装置を用いて実験データの蓄積を進めた。実験試料にはプラスチック、アルミナ、亜鉛の 3 種類の球状粒子を使用した。粒子径はいずれも数  $\mu\text{m}$  程度である。また、実験の精度を確認する作業の中で、予期していなかった湿度の影響を見いだしたので、これにつ

いても詳細に調べることにした。能動的に湿度を制御することも検討したが、そのためには新たに装置に変更を加え確認試験等を行う必要があるため、それよりも大気中の湿度の変化を利用した方がよいと判断した。そこで、ポンペからの乾燥空気と、実験室内の空気とで実験結果を比較することにより湿度の影響を調べる方法をとった。実験の時期(季節)を変えて異なる湿度のデータを得るとともに、時期が変わっても乾燥空気の結果が変わらないことを確認した。なお、この湿度の影響の調査は当初の計画で予定していなかったものである。これを優先して行ったため、当初予定していた減圧実験は、減圧チャンバの開発までとなった。減圧実験については、本課題終了後の研究の中で進めていく予定である。

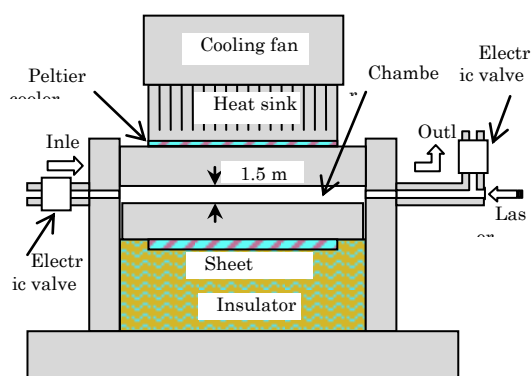


図 2. 計測ユニット

## (2) 理論モデルの開発

熱泳動速度は、温度勾配に起因して粒子に働く熱泳動力と、空気抵抗により周囲から受ける抗力との釣り合いで決まるとされる。熱泳動力の予測には Brock が導出した式が、また熱泳動の速度の予測には Talbot が導出した式が、それぞれ、従来よく用いられてきた。これを改良するのがこの開発の内容である。

まず、Brock の予測式の導出過程を検証した。解析に用いられた境界条件を検討したところ、境界条件に「熱応力すべり流」および「高次の等温すべり流」の効果が含まれていないことがわかったので、それらを考慮に入れた数値計算プログラムを開発して計算を行い、Brock の予測との違いを確認した。また、数値解析を試みて、数値計算に寄らず熱泳動力を算出できる予測式の導出を試みた。

解析の対象は、粒子内部の温度場と、粒子周囲の温度場・流れ場・圧力場である。粒子の中心を原点とした極座標をとり、温度勾配の方向を軸に軸対称として 2 次元・定常の計算を行う。粒子内部については固体の熱伝導方程式を解く。粒子周囲(気相)については、

非圧縮性・定常の流れを、流れ関数・渦度方程式により解く。

計算領域の境界は、図 3 の太線部分のように、粒子表面・中心軸・遠方境界の三つからなる。粒子表面に与える境界条件がこの熱泳動の現象を決定づける要因であり、この境界条件の改良が最も重要な点である。この表面に沿って生じるすべり流れについて、Brock が考慮に入れていない「熱応力すべり流」「高次の等温すべり流」を境界条件に組み込んで計算・解析を行う。

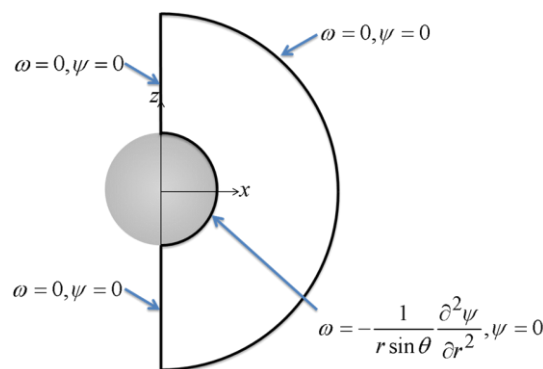


図 3. 流れ場の境界条件

中心軸は、いわゆる通常の軸対称境界条件である。遠方境界は、粒子の遠方で一定の温度勾配となるように温度を与え、圧力は一定、速度はゼロとする。

## (3) 実験データと理論予測との比較

前項目で開発した理論モデルによる予測と実験データとの比較を行うことにより、モデルの精度を検討した。まず、従来、問題であった、理論予測と実験結果との不一致がどの程度、改善されるかを確認した。さらに、統計処理により生じるずれについても検討を行った。

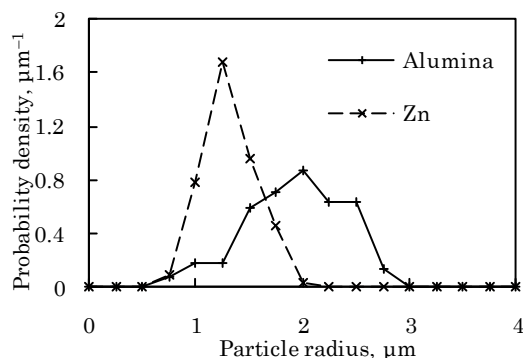


図 4. 粒子試料の粒径分布

実験で用いる粒子試料には粒径のばらつきがある(図 4)ため、計測される熱泳動速度のデータにはその分の誤差が含まれるこ

とになる。もし、粒径と熱泳動速度とが線形の関係にあれば、統計処理を行い平均値で議論する限り、その誤差は問題とならない。しかし、理論予測は非線形の関係を示している。すなわち、同じ母集団の粒子群を対象としたとしても、平均粒径に対する熱泳動速度と、熱泳動速度の平均値とは一致しないことになる。非線形性に起因するこのずれがどの程度なのかを調べるためには、一つ一つの粒径に対する熱泳動速度の予測値を計算し、その予測値群を実験データと比較する必要がある。幸い、前項目の理論モデルの開発において熱泳動速度の予測式の導出に成功したので、個々の粒径それぞれに対して、時間にかかる数値計算を行う必要はなく、数式を用いてすぐに予測値を得られるようになった。そこで、実験で用いた粒子試料の粒径分布を元に熱泳動速度の統計データを予測し、これを実験結果と比較して、非線形性によるずれがどの程度であるか、また、理論モデルがどの程度、実験と一致するかを調べた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 実験データ

開発した装置を用いて行った計測の結果を表 1 に示す。データ点数は、粒子の種類によって、38 から 69 までと多少、異なっているが、いずれの種類についても、統計処理を行うに十分なデータ量である。統計処理により得られた 95%信頼区間は熱泳動速度の 15%程度以下であり、もともと粒径が揃っている PMMA (プラスチック) では 3%程度と非常に高い精度が得られた。

表 1. 熱泳動速度の計測値

Particle	PMMA	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Zn
Sampling number	69	38	57
Average thermophoretic velocity (mm/s)	0.64	0.31	0.37
Standard deviation of velocity (mm/s)	0.08	0.14	0.12
Thermophoretic force (×10 <sup>-13</sup> N)	6.12	1.75	2.32
95% confidence interval (×10 <sup>-13</sup> N)	±0.18	±0.26	±0.20

この計測値と、既存の理論モデルによる予測値とを比較した結果を図 5 に示す。図中の黒点が実験データで、エラーバーは 95%信頼区間を示す。また、図中の曲線は従来の理論モデルによる予測値を示し、予測式に含まれるパラメータ (理論のみでは確定せず、実験値と合うように値が決める項) を幾つかの推奨値に変えて示したものである。曲線のうち実線は、用いられることの多いパラメ

ータのものである。この予測曲線と比べると、熱伝導率の低い PMMA の実験結果が割とよく一致する半面、熱伝導率の高い粒子では予測値よりも低くなっていることがわかる。

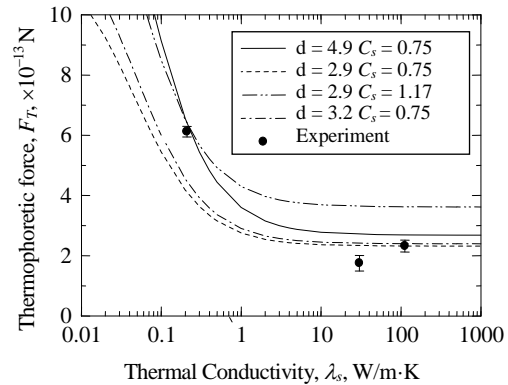


図 5. 熱泳動速度への熱伝導率の影響

熱伝導率の高い粒子の場合に理論予測からずれるという結果が得られたため、実験結果に誤差が含まれないか詳細に調べたところ、湿度の影響が無視できないことを発見した。その影響を調べた結果を図 6 に示す。図よりわかるように、湿度による速度の変化の程度は、絶対量としては、いずれの粒子でも同程度であった。しかし、熱伝導率の高いアルミナ・亜鉛の粒子の場合、乾燥空気中での熱泳動速度が PMMA と比べて顕著に小さい。そのため、乾燥時の速度を基準にして速度の変化量をみたととき、湿度の影響が相対的に顕著となることがわかった。この相対値で変化をみると、アルミナ粒子の場合、空气中にわずか 3%の水蒸気が加わっただけで、熱泳動速度は 1.8 倍程度にも増加することがわかる。一方の PMMA 粒子では 1.1 倍程度である。このような湿度の影響を示した研究例は、研究代表者が調べた限り過去がなく、この現象のメカニズムも今のところ不明である。

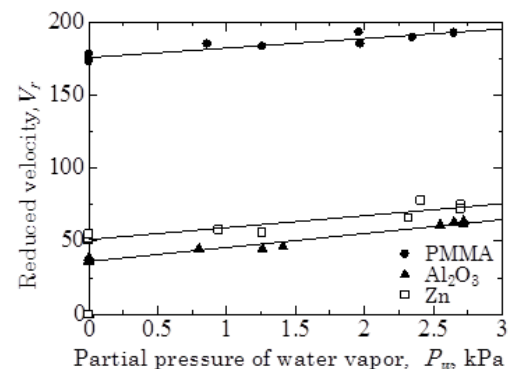


図 6. 換算熱泳動速度への湿度の影響

## (2) 理論モデル

高精度の実験結果が得られたことから、理論モデルの検討を進め、改良を加えて数値計算を行った。図にその計算結果の例を示す。粒子周りの温度場・速度場について、従来の理論モデルと同等となるように行った計算の結果を左に、改良した理論モデルの計算結果を右に示す。粒子はアルミナである。両者を比べると、温度場があまり変わらない一方、粒子表面の速度場は明確に違っており、ベクトルの矢印をみると右の改良モデルの方がはっきりと小さい。すなわち、改良した理論モデルを用いると、熱泳動速度が小さくなる。

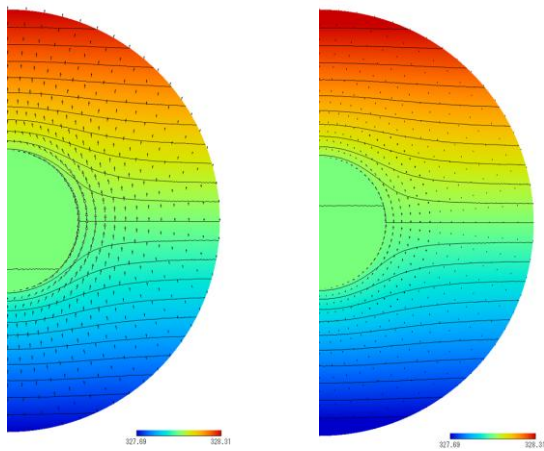


図 7. 数値計算の結果 (右が改良モデル)

図 7 の両者を比べたとき温度分布に違いがないことから、流れ場の違いが温度場にほとんど影響を及ぼしていないことがわかった。このことは、温度場を計算する支配方程式から対流項を省略できることを示唆しており、これにより計算が大幅に単純化される。そこで、この単純化を適用して支配方程式の検討を進め、その結果、熱泳動力を算出する予測式を導出することに成功した。得られた式により計算される熱泳動力は、数値計算の結果得られた熱泳動力と全て一致することを確認した。この式により、これ以降は、計算コストの必要となる数値計算を行うことなく理論予測値を算出することが可能となった。

## (3) 実験・理論の比較

図 8 は、数値計算の結果を実験結果と比較したものである。報告書の構成上、話が前後するが、これは、予測式の導出に成功する前に行った数値計算の結果である。PMMA、アルミナ、亜鉛の 3 種類のそれぞれについて、左から、数値計算 1、数値計算 2、数値計算

3、Brock の式による予測値、実験値の 5 つを並べて示している。数値計算の 3 種類は、左の数値計算 1 が Brock と同等となる条件で行った計算で、それに熱応力すべり流の項を加え改良したものが数値計算 2、さらにそれに高次の等温すべり流の項を加えて改良したものが数値計算 3 となっている。まず、数値計算 1 と Brock の予測値とは一致しており、確かに同等となっていることが確認できる。これらに比べると、数値計算 2、数値計算 3 では数値が明らかに低くなっており、熱伝導率の高いアルミナ粒子および亜鉛粒子でその違いが顕著である。数値計算 2 と 3 との間には目立った差はなく、高次の等温すべり流の効果はほとんど確認できない。

さて、これらの予測値を実験値と比べると、改良モデルにより得られた結果がよく一致しており、従来モデルが実験より大きな予測値を示していることがわかる。改良モデルの予測値は、3 種類の粒子のいずれについても、実験値の 95%信頼区間の中に入っており、極めてよい一致を示しているといえる。一方、従来モデルの予測値 (数値計算 1 および Brock) では、特に熱伝導率の高い 2 種類の粒子に対して、目立って大きく異なる結果となっている。

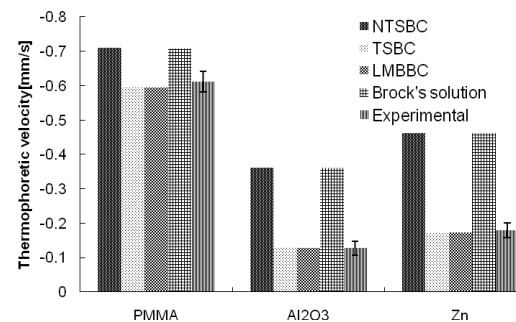


図 8. 実験データと理論計算との比較

ここまでのところで、すでに、非常によい理論と実験との一致をみることができたが、粒径分布のばらつきが誤差をもたらすことが理論より予想されたので、その影響を評価した。実験に用いた粒子試料の粒径分布から、熱泳動速度の統計分布を予測して、「平均粒径の熱泳動速度」と「熱泳動速度の平均」との違いを調べた。その結果が図 9 である。

図 9 の棒グラフは、左から、理論により予測される統計分布、単なる平均粒径に対する予測値、実際の実験結果の統計分布を示している。棒グラフの高さが平均値で、そのうえにあるエラーバーが 95%信頼区間を示す。左と中央との比較から、「平均粒径の熱泳動速度」と「熱泳動速度の平均」とが僅かながら違うことがわかる。この違いは、理論予測の 95%信頼区間と比べればそれにぎりぎり入る程度、また、実験値の 95%信頼区間と比べ

ば無視してもよい程度であることがわかる。一方、左の理論予測と右の実験値とで平均値同士を比べてみると、ほとんど、驚異的なほどに一致しているようにみえる。このことから、本課題で得た改良モデルが極めてよく実験結果と一致していることがわかる。

以上のように、本課題では、実験データの蓄積と統計処理による高精度計測を行い、また、これと比較することにより理論モデルを改良することができた。これらの成果が得られたことから、本課題は、おおむね当初の目的を達成できたと考えられる。むしろ、実験データと予測値との非常によい一致が得られたことは、当初の目標を超えた成果であるといえる。一方、当初の計画で予定していた減圧実験については、期間内には達成することができなかった。これは、予想していなかった湿度の影響を発見し、その確認作業に時間をとられたためである。この湿度の影響については、調べた限り他に報告例はなく、本課題で初めて発見したものであると思われる。本課題で研究の背景としている燃焼場を考えると、炭化水素系燃料の燃焼は水蒸気の影響を必ず伴っているため、この湿度の影響が重要な着目点に発展する可能性は十分にある。したがって、減圧実験はできなかったが、それに代わる発見があったと報告しておきたい。

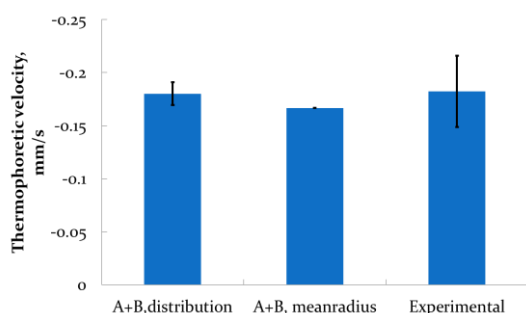


図 9. 統計分布の理論予測と実験値との比較

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

- ① 浜本尚晃, 鈴木正太郎, 増田渉, “熱泳動現象の熱伝導率による影響” 第 46 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.90-91 (2008)
- ② Masataro Suzuki, Kenichi Maruko, Kenta Iwahara, and Wataru Masuda, “Accurate Measurement of Thermophoretic Velocity under High Temperature Gradient”, 6th Int. Symp. Scale Modeling (ISSM6), pp.1.12.1 - 1.12.8 (2009)
- ③ 鈴木智之, 鈴木正太郎, 増田渉, “熱泳動

現象に水蒸気が及ぼす影響” 第 47 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.448-449 (2009)

- ④ Akira Hoshino, Masataro Suzuki, and Wataru Masuda, “Numerical Analysis on Thermophoretic Phenomenon in Slip Flow Regime Considering Thermal Stress Effect” 21st International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-21), ID180 (2010)
- ⑤ 星野信, 鈴木正太郎, 増田渉, “熱泳動速度の実験値に含まれる粒径分布の影響の評価” 第 48 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.464-465 (2010)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 正太郎 (SUZUKI MASATARO)  
長岡技術科学大学・工学部・准教授  
研究者番号：10282576

### (3) 連携研究者

増田 渉 (MASUDA WATARU)  
長岡技術科学大学・工学部・教授  
研究者番号：80143816