

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360081

研究課題名(和文) 浮遊液滴の非線形ダイナミクスを用いた高性能無容器プロセッシングに関する研究

研究課題名(英文) Study on high-performance non-container processing with non-linear dynamics of the floating droplets

研究代表者

阿部 豊 (ABE, YUTAKA)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：10241720

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円、(間接経費) 4,290,000円

研究成果の概要(和文)：従来の液滴浮遊技術を用いた材料創生や物性測定は、線形的な液滴挙動を前提としたものである。しかし、申請者のこれまでの研究により、浮遊液滴の界面挙動や内外部流動は非線形でダイナミクスなものとなることが示されている。浮遊液滴の非線形性でダイナミックな挙動を熱流体力学の視点から解明し、材料製造や物性測定だけでなく、生化学分析や高粘性流体やマイクロ流体の混合や凝固プロセスや微粒化などに対して、浮遊液滴の非線形特性を活用した従来にない新たな熱流体プロセス技術を確立する。

研究成果の概要(英文)：Measuring physical properties of materials and creation using a droplet suspension prior art, is obtained by assuming the droplet behavior linear. However, studies to date of the applicant, that it becomes a non-linear dynamics have been shown to internal and external flow and interfacial behavior of the floating droplets. Elucidated from the point of view of the thermal fluid dynamics behavior and dynamic nonlinearity of the floating droplets, as well as measurement of the physical properties of materials and manufacturing, such as for atomization and solidification process and mix of microfluidic and highly viscous fluid and biochemical analysis establishing a new thermal fluid process nonconventional technology that upgrade does not utilizing the non-linear characteristic of the suspension drops.

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：浮遊液滴 宇宙環境利用 非線形 ダイナミクス 無容器プロセッシング

1. 研究開始当初の背景

浮遊技術の利用により容器との接触による汚染で測定が困難とされていた融点が2000℃を超える高融点の液体金属の熱物性値測定が可能となっている。また、液滴を浮遊状態で凝固させた場合、容器壁に起因する不均質核生成を排除できることから過冷却凝固が発生し、均質で高品質な新材料を製造することができる。以上に述べたように、浮遊技術を用いることによって、従来に無い新たな物性測定や材料製造など、より高機能な流体プロセス技術への展開が期待されている。これらの浮遊技術の利用においては、浮遊状態にある液滴の挙動は全て定常かつ線形であることを前提としている。しかしながら、過去の研究において、静電場や超音波を利用する浮遊技術においては、液滴の界面変形や、液滴内外の流動など、非線形な流動挙動が発現することが観測されている。浮遊技術を用いた新たな高機能流体プロセス技術を実現するためには、このような非線形挙動を流体力学的知見から明らかにすることが必要不可欠となっている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、浮遊技術を用いた高機能流体プロセス技術の実現を目的とし、静電浮遊法および超音波浮遊法を用いた実験を行い、浮遊状態にある液滴に発生する非線形挙動についての実験的知見を取得する。また、非線形で非定常な変動界面を有する現象を予測評価するための非定常の数値解析法の構築を行う。

3. 研究の方法

(1) 静電浮遊液滴のダイナミクス

本研究は、クーロン力で液滴を浮遊させる静電浮遊装置を用いて実験を行い、振動および回転が浮遊液滴の界面変形挙動に及ぼす影響を調べる。

① 実験装置概要

本研究で使用した静電浮遊装置について、その概略を図1に示す。外乱の抑制などのため、装置中央部にアクリル製チャンバー(155 mm × 155 mm × 120 mm、厚さ15 mm)を設け、その中央に上下一対の電極を設置した。下部電極には中心に金属製のパイプと、上下に移動可能なシリンジ(穴直径1 mm)を設けた。チャンバー側面には浮遊液滴の位置制御に用いるHe-Neレーザー(出力5 mW)とポジションディテクターを設置した。また、2つのスピーカーは液滴へ回転を誘起する際に用い、ラインセンサー、CCDカメラおよびハイスピードビデオカメラは浮遊液滴の観測に用いる。

② 非線形挙動観測と表面張力測定実験

静電浮遊装置を用いて振動が浮遊液滴の共振周波数に及ぼす影響を調べるために、浮

遊させた液滴に振動を誘起させ、その際の変形挙動の観測を行う。浮遊させた液滴に非接触で振動を誘起する方法として、下部電極に電圧信号を印加し電極間電圧を変化させることで液滴を振動させ、計測を行う。

③ 新たな粘性係数測定実験

本実験では粘性係数の測定を行う新たな測定方法を提案する。浮遊液滴に非接触で回転を誘起させるため、音波によってトルクを与える方法を利用した。2つのスピーカーを90度の角度で配置することで、発生する音響定在波により液滴に回転トルクを与える。本実験では、回転を誘起された浮遊液滴の界面について主に観測する。

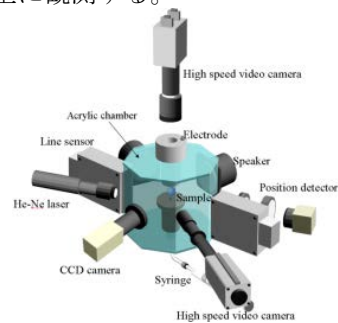


図1 静電浮遊装置

④ 内部流動と界面変形観測実験

静電浮遊液滴の回転分裂挙動を用いた粘性係数測定法を確立するためには、回転分裂挙動の支配因子を特定し、粘性応力が卓越する時間を特定する必要がある。さらに、浮遊液滴の回転分裂時における内部流動に関する知見も乏しく、粘性応力の挙動は解明されていない。そこで、蛍光染料を液滴に溶解し、シート状にしたYAGレーザーを用いて液滴の水平断面を蛍光発光させることによって、液滴の回転分裂時の界面変形の詳細可視化観測を行った。

(2) 超音波浮遊液滴のダイナミクス

本研究では、超音波浮遊液滴の内部・外部流動が界面での物質輸送に与える影響を調べる。

① 実験装置概要

図2に示すように、実験装置は液滴を浮遊させるテスト部、超音波発信部、音圧計測部、液滴観測部の計4つで構成されている。関数発信機から発信した正弦信号をアンプで増幅し、電力測定器を介して、超音波振動子へ入力する。これにより超音波振動子を駆動し、振動子に接続された固体スピーカーホーンを介してテスト部内の空間に音場を印加する。下部ホーンから印加され、上部のホーンの反射板にて反射された音波によりホーン間に音響定在波が形成される。この音響定在波から発生する放射圧力と液滴自身の自重との釣り合いによって試料は浮遊する。音響定在波により、テスト部内に5つの音圧の節

が形成され、その節に液滴が浮遊する。ここでホーン先端の直径 D は 36 mm、超音波振動子の共振周波数 f は 18.9 kHz となっている。音波の波長 λ は、25 °C において約 18 mm である。その後、音圧の節の位置付近にシリンジを用いたマニュアル操作にて試験流体を注入し、液滴を保持させる。

② 流動観測実験

超音波浮遊液滴に生じる内部・外部の流動状況を評価するために、流動の可視化観測を行う。図 3 に二次元内部・外部流動計測の概要図を示す。二次元の流動計測では液滴の鉛直断面 ($X-Z$ 平面) シートレーザとハイスピードカメラによって計測する。内部流動計測用のトレーサ粒子として、平均粒子径 10 μm のシルバーコート粒子を試験流体中に混入させた。また、液滴の周囲の流動場を可視化観測するために、ネブライザによって発生する径が平均で約 5 μm 微小液滴を気体用トレーサ粒子として混入する。そこへシートレーザを照射し、ハイスピードビデオカメラで撮影することで液滴外部の流動を観測する。二次元三成分の内部流動計測の観測系は図 4 に示すように、超音波浮遊装置の反射板上部に直角プリズムミラーと 2 枚の鏡を設置することによってステレオ画像を撮影する。ステレオ画像にそれぞれ 2D PIV 解析を行い、左右の画像の速度ベクトル差により液滴赤道面の z 軸方向流速を算出する。この二次元三成分速度ベクトルを用いて、浮遊液滴内部の三次元内部流動を評価する。撮影は内部流動の場合 1000 fps、外部流動の場合 2000 fps で 500-2000 枚の画像を撮影し、PIV によってその平均の速度ベクトル場を算出した。

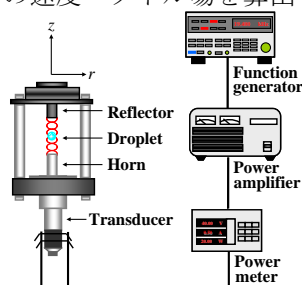


図 2 超音波浮遊装置

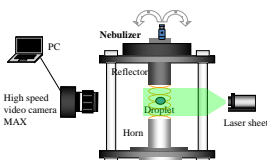


図 3 二次元内外流動観測実験方法

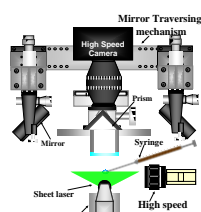


図 4 二次元三成分内部流動観測方法

③ 伝熱特性計測実験

浮遊液滴の外部流動が液滴の伝熱に影響を与えていることが考えられるため、液滴が蒸発していく過程における熱伝達率を調べることにした。ここでは、液滴界面近傍における熱の授受について調べるために、液滴界面近傍の温度分布を調べる。実験方法として、先端素線径 25mm の熱電対を用いることで液滴近傍の温度場を計測した。算出した温度分布から、熱伝達率を算出し、液滴周りの流動を考慮して整理を行う。

④ ホログラフィー干渉計

熱電対では液滴界面近傍の一点の温度分布のみしか調べることができない。そこで、浮遊液滴界面近傍における温度分布を非接触かつ二次元的に理解するための手段としてホログラフィー干渉計を用いることとした。図 5 に今回使用したホログラフィー干渉計の概要図を示す。本実験ではマッハツェンダー干渉計を使用しており、出力パワー 1 mW、波長 632.8 nm の He-Ne レーザーを光源として用いる。レーザーはスペイシャルフィルターに通すことで光強度分布が一定となる。さらに、スペイシャルフィルターはビームエキスパンダーとしての役割も持っており、ビーム径が約 30 mm になるまで広げる。そして、コリメートレンズによって再び平行光に戻す。その後、二つのミラーとハーフミラーによって二つの光路を作る。この二つの光路の差によって干渉縞ができ、その途中に液滴を浮遊させることでその部分の干渉縞が変位する。本実験では、干渉縞をハイスピードカメラによって撮影する。

図 5 ホログラフィー干渉計

(3) 液滴を含んだ振動流場の数値計算

液滴を浮遊させる際に超音波や音場振動子を利用した場合、浮遊液滴は振動する圧力場に影響を受ける。しかし、液滴の内部外部における定常状態の流動については研究がなされているものの、瞬時の流動については十分に議論されていない。そこで本研究では、液滴を含んだ振動流場について数値的にシミュレーションを行う。

① シミュレーション概要

本解析では、浮遊液滴表面の薄い層における振動流場の特性について議論を行う。

②計算条件

振動流場を、振動する境界条件によってモデル化する。流動場は、計算グリッド点が振動する境界速度によって移動する ALE 法 (Arbitrarily Lagrangian-Eulerian method) によって計算を行う。流動場を得るために非圧縮性ナビエ・ストークス方程式は解かれ、圧縮性の影響は密度摂動として考慮する。シミュレーションプログラムは、MPI (Message Passing Interface) ライブラリを用いた領域分割法によって並列化を行っている。シミュレーション領域は図 6 に示す二次元の矩形領域である。

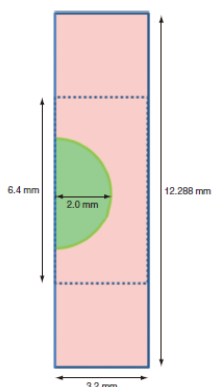


図 6 液滴シミュレーション領域

4. 研究成果

(1) 静電浮遊液滴

①非線形挙動と表面張力測定

浮遊させたプロピレンカーボネート液滴の振動による共振周波数の変化の関係から、共振周波数変化を 0 とする振動振幅と回転速度の関係に着目した結果を図 7 に示す。これより、共振周波数変化が 0 になる時の振動と回転は線形関係にあることが観測された。したがって、表面張力測定時に浮遊液滴に与える振動と回転を、このような線形関係が成り立つように制御することができれば、共振周波数の変化による測定誤差を抑制できることが示された。

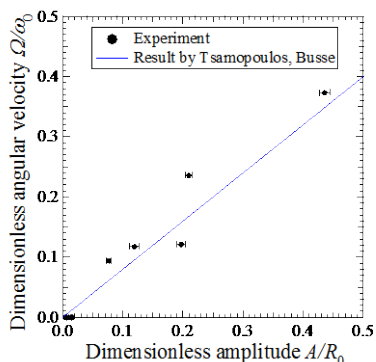


図 7 共振周波数変化を抑制する振動振幅と回転速度の関係

②新たな粘性係数測定

浮遊したプロピレンカーボネート液滴の回転による変形挙動を観測し、粘性係数測定を行う既存の機器である「液体フィラメント

レオメーター (LFR)」の原理を、本実験体系に適用することで、浮遊液滴の粘性係数測定を行い、図 8 の結果を得た。このように、浮遊液滴の回転分裂挙動を用いることで、粘性係数を測定する新たな手法を提案した。

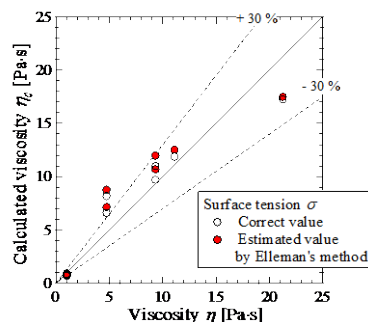
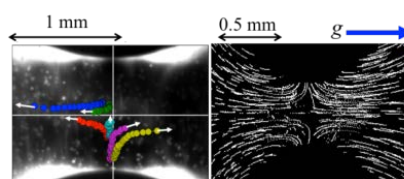


図 8 浮遊液滴の回転分裂を用いた粘性係数測定結果

③内部流動と界面変形の観測

分裂直前における粘性応力の挙動を調べるため、内部流動の観測を行った。液滴中央部付近の粒子の軌跡を図 9(a) に示す。結果、液滴内の位置により粒子の移動方向と速度が異なることから、分裂の直前において液滴中央部に多次元的な速度勾配が存在することが確認された。次に、LFR を模擬した液柱破断実験により、液柱が破断する際の内部流動と界面変形挙動の比較を行った。分裂直前における液柱破断時の蛍光粒子の軌跡を図 9(b) に、中央部直径の時間変化を図 10 に示す。青いプロットは液柱、赤いプロットは浮遊液滴を表す。結果、内部流動の構造および中央部収縮の挙動は、分裂直前において定性的に一致した。上記の様に、本研究では、これまで困難だった浮遊液滴の界面変形挙動および内部流動の観測を可能にし、浮遊液滴と液柱の破断挙動の類似性を明らかにした。



(a) 液滴の分裂 (b) 液柱破断

図 9 液滴の分裂と液柱破断時におけるトレーサ粒子の軌跡

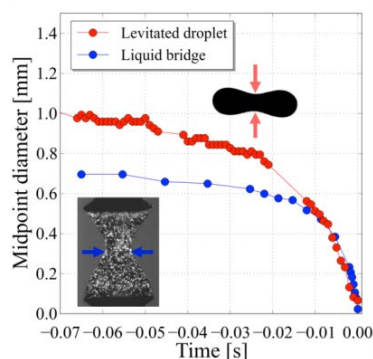


図 10 液滴の分裂時と液柱破断時における中央部直径の時間変化の比較

(2) 超音波浮遊液滴

①浮遊液滴の内部・外部流動場の観測

浮遊させた水液滴およびエタノール液滴の流動を2次元2成分PIVで計測した結果を図11、2次元3成分PIVで計測した結果を図12に示す。水の場合、内部に1つの循環渦、外部においては液滴下部に1つのトロイダル渦の発生が観測された。また、エタノールの場合、液滴内部に2つのトロイダル渦、液滴外部にも2つのトロイダル渦が発生している。さらに、界面近傍の流動をより詳細に把握するため、2倍の顕微鏡レンズを用いて液滴界面近傍の拡大撮影を行った。水液滴、水との質量割合が50%濃度のエタノール液滴の液滴界面近傍の外部流動を多重露光で撮影した画像を図13に示す。図13の左に示す水液滴では、図12に示した流動と同様の流動が観測された。一方、図13の右に示す水との質量割合が50%濃度のエタノール液滴では、図11で示した上下から流入する流れと液滴界面との間に循環渦が観測され、液滴界面を通して内部と循環渦の流動方向の逆転が観測された。この現象は、振動流に対するSchlichtingの理論に示されるストークス層内での循環によってもたらされたものと推定される。よって、超音波浮遊液滴の内部・外部に発生する流動について、詳細に観測を行い、浮遊技術を用いた高機能流体プロセス技術実現へ向けて、有用な実験的な知見を得た。

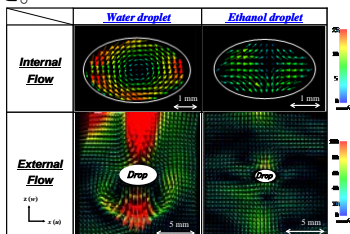


図11 二次元内外流動観測結果

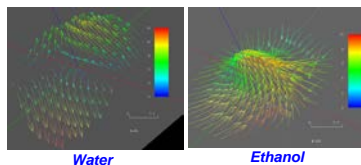


図12 二次元三成分内部流動観測結果

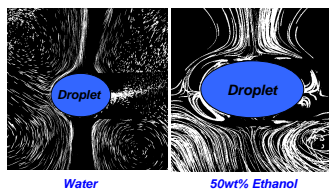


図13 外部流動の詳細可視化観測結果

②超音波浮遊液滴の流動発生機構と物質輸送機構

図14に水とエタノールの混合流体の蒸発過程における内部流動と外部流動の変化を示す。この結果から先に内部流動が変化し、

その後外部流動が変化している様子が分かる。これは、内部で先にエタノール成分が失われているものの、界面付近にわずかに残留しており、界面近傍はエタノール成分となるからであると考えられる。

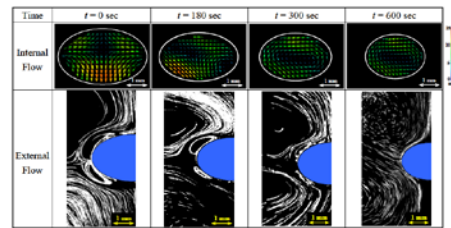


図14 混合流体の内部・外部流動の変化

③液滴の飽和蒸気圧と循環渦の構造

図15にエタノールと水を質量パーセント濃度で25, 50, 75 wt%の割合で予混合した希釈エタノールを用いて、界面近傍に生じる流動場の流跡線を算出した結果を示す。揮発成分の濃度を薄くすることで、定性的に循環渦が存在しなくなる様子が実験的に確認された。これにより、蒸発した液滴成分の濃度勾配が周囲で生じており、外部流動場に影響を与えている可能性が示唆された。

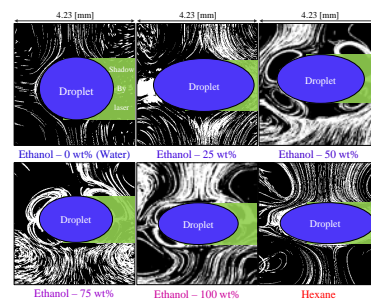


図15 飽和蒸気圧と界面近傍の流動構造

④超音波浮遊液滴の伝熱特性

温度計測において、液滴界面から徐々に計測点を離していき、空気相の温度分布を計測した。この結果から、界面近傍の温度勾配と液滴の体積変化を用いることで熱伝達率を算出し、浮遊液滴周りの流動を考慮して整理した。その結果を図16に示す。この結果から、超音波浮遊液滴は高い伝熱特性を有していることが分かった。

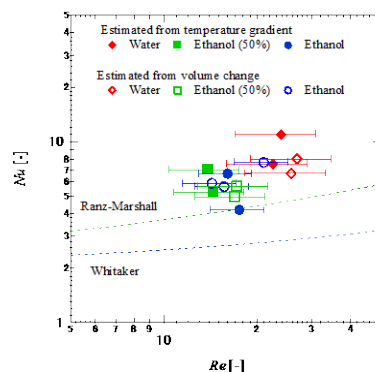


図16 浮遊液滴の伝熱流動特性

⑤ホログラフィーによる温度計測

図 17 に浮遊させた液滴の表面温度変化および干渉縞の可視化画像と赤外線カメラの可視化画像を示す。液滴は浮遊させる前にヒーターで 100 °C まで加熱してあり、その後シリンジ針で水を吸い取りテスト部内に注入した。本実験体系での実験結果では干渉縞から大きく変化している様子が確認できなかった。浮遊液滴周囲の温度場を見積もるためには実験装置の改良が必要であることが明らかになった。

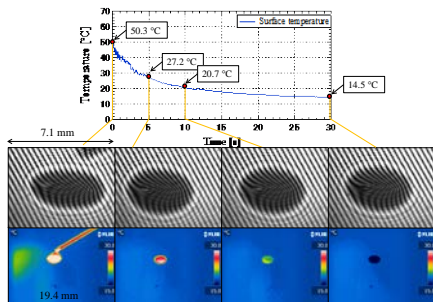


図 17 浮遊させた液滴の干渉縞画像と赤外線カメラ画像

(3) 浮遊液滴の数値計算

図 18 に計算によって得られた流動場の平均を示してあり、一振動周期の平均をとってある。平均流速は一振動周期ではほぼ 0 であり、上方向と下方向の流速の大きさが上と下の境界で全く同じためである。しかし、平均流動場に示すように定常的な渦流れが現れた。

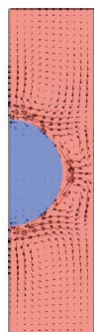


図 18 音響流の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

- ① 阿部豊, 長谷川浩司, “浮遊液滴の非線形ダイナミクスを用いた新たな熱流体プロセス制御”, 混相流, 査読有, Vol. 27, No. 4, pp. 434-443, (2013), https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjmf/27/5/27_563/_article/-char/ja/
- ② 阿部豊, 長谷川浩司, “超音波による浮遊液滴の制御”, 日本音響学会誌, 査読有, Vol. 69, No. 11, pp. 591-596, (2013), <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009661820>
- ③ 阿部豊, 松本聡, 渡辺正, 西成活裕, 北畑裕之, 金子暁子, 長谷川浩司, 田中類, 下西国治, 佐々木聡, “浮遊液滴の非線形

ダイナミクス”, Int. J. Microgravity Sci. Appl., 査読有, Vol. 30, No. 1, pp. 42-49, (2013), <http://www.jasma.info/journal/?journal=vol-30-no-1-2013&lang=ja>

- ④ Tadashi Watanabe, “Numerical simulation of oscillating flow field including a droplet”, the International Journal of Multiphysics, 査読有, Vol. 27, No. 1, (2013), <http://multi-science.metapress.com/content/2031w3j740550348/>

〔学会発表〕(計 23 件)

- ① 北畑裕之, 田中類, 松本聡, 西成活裕, 渡辺正, 長谷川浩司, 金子暁子, 阿部豊, “回転する浮遊液滴のダイナミクス: 単純な力学モデルを用いた解析”, 日本物理学会 2014 年年次大会, (2014. 3), 神奈川県
- ② 下西国治, 長谷川浩司, 金子暁子, 阿部豊, “超音波浮遊法を用いた無容器プロセスに関する研究”, JSMAC-27 予稿集 (CD-ROM), pp. 87, (2013. 11), 東京
- ③ Koji Hasegawa, Kuniharu Shitanishi, Akiko Kaneko, Yutaka Abe, “Effect of acoustic streaming flow on evaporation of an acoustically levitated droplet”, Eighth International Symposium on TWO-PHASE SYSTEMS FOR GROUND AND SPACE APPLICATIONS, pp. 15-16, (2013. 9), Bremen, Germany
- ④ Kuniharu shitanishi, Koji Hasegawa, Akiko Kaneko, Yutaka Abe, “Study on Heat Transfer and Flow Characteristics under Phase-Change Process of an Acoustically Levitated Droplet”, Eighth International Symposium on TWO-PHASE SYSTEMS FOR GROUND AND SPACE APPLICATIONS, pp. 13-14, (2013. 9), Bremen, Germany

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 豊 (ABE YUTAKA)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号: 10241720

(2) 研究分担者

松本 聡 (MATSUMOTO SATOSHI)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・

主任研究員

研究者番号: 90360718

渡辺 正 (WATANABE TADASHI)

福井大学・附属国際原子力工学研究所・特命教授

研究者番号: 50391355