

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：73905

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21246125

研究課題名(和文) 新しい微粒化概念に基づく液体ロケットエンジン用微粒化シミュレータの開発

研究課題名(英文) Development of a new conceptual atomization simulator for liquid rocket engines

研究代表者

梅村 章 (Umemura, Akira)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：60134152

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,800,000円、(間接経費) 9,840,000円

研究成果の概要(和文)：噴霧燃焼は航空宇宙機エンジンに不可欠な技術である。近年、エンジン開発のために数値シミュレーションの導入が図られてきているが、最も重要な微粒化過程を予測する機能を欠いているために、現行の噴霧燃焼シミュレータの能力は大きく制限されている。本研究では、微小重力実験の観察から生まれた新しい微粒化概念を発展させ、これまで分からなかった高速噴射液の不安定化機構と乱流微粒化過程を支配する物理法則を解明した。それにより、現行の噴霧燃焼シミュレータに組み込み、噴射液の発展に伴って生じる局所的に異なった乱流微粒化による噴霧生成をシミュレートするサブグリッドモデルを構築することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Spray combustion is an indispensable technology for aero-space engines. The numerical simulation method is now being introduced for the development of advanced engines. The current spray combustion simulators, however, cannot describe the atomization of injected liquid fuel which is the most important process determining the subsequent combustion performance. In this study, the new atomization concept derived from microgravity experiment observations were extendedly developed to reveal the self-stabilizing mechanism of high-speed liquid jet and the underlying physics of turbulent atomization. Using the new findings, we for the first time succeeded in developing a turbulent atomization sub-grid model, which can be integrated into the current spray combustion simulators to describe the local turbulent atomization feature experienced by the injected liquid fuel.

研究分野：航空宇宙工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：乱流微粒化 噴霧燃焼 数値シミュレーション サブグリッドモデル 微小重力実験

### 1. 研究開始当初の背景

噴霧燃焼は航空宇宙機エンジンに不可欠な技術である。古くより研究されているが、気体燃料のように理解が進んでいない。理由は、現象が複雑過ぎるからである。特に、噴霧燃焼制御のキーテクノロジーである微粒化と噴霧保炎の機構が科学的に解明されていないのが問題である。

近年エンジン開発に数値シミュレーションが導入されている。現行の噴霧燃焼シミュレータは、KIVA をベースにして開発されたものであり、噴霧データを入力して、その後の現象の発展を計算する。入力噴霧を与える微粒化モデルとしては、自動車産業界で開発されたモデル(あるいはその派生形)を使っている例が多い。しかし、この微粒化モデルは、ノズル内径と同じ直径を持った親液滴を噴射し、それを子液滴に分割する操作を繰り返すアルゴリズムによって噴霧を作っているに過ぎないので、計算した噴霧の外形が、実験の噴霧に似た形になるか比較し、実験に合うように計算パラメータを調整する必要があり、実験の代わりに果たすシミュレータの使命を果たしていない。

### 2. 研究の目的

有力な微粒化モデルが作れないのは、乱流と同様、長い研究の歴史があるにもかかわらず、微粒化機構の本質が解明されていないからである。本研究は、この現状の打開を目指した科学的な基礎研究である。

噴霧燃焼では、生成噴霧によって基本的な燃焼特性が決まってしまうことより、噴霧燃焼シミュレータには、流れ場に応じた局所的な微粒化が自動的に計算できる能力が求められる。この要求は、航空宇宙機エンジンではより深刻である。自動車では、小さな燃焼室での短時間の間欠燃焼を対象にするので、実験との照合が比較的容易である。しかし、航空宇宙機では、大きな燃焼室で長時間の連続燃焼をさせるから、噴霧生成のムラが音響振動と連成し異常燃焼を起こさないようにすることが最も大切である。従って、シミュレータには下記の微粒化特性を予測する能力が備わっていないといけない。

微粒化の文献を見ると、微視的なケルビン-ヘルムホルツ(K-H)不安定性による微粒化を論じている研究が多いが、K-H 不安定性が噴霧燃焼の噴霧形成に有効な微粒化をもたらすとは考えにくい。K-H 不安定性はもっと大きなスケールの流れの不安定性に関連して大規模渦構造を作り、この流れの中で局所的に微粒化が別の機構によって起きると考えられる。ラージエディシミュレーション(LES)は、単相流での大規模乱流渦構造を効率的に数値計算できるように開発されたものであり、今日様々な分野で使用されるようになってきている。2相流に対しても、大規模渦構造で変形した液体表面で乱流渦と同程度のサイズの液系ができ、分断して噴霧が

できる状況が計算できるようにすれば、航空宇宙機エンジンで起きる微粒化が記述できるようになる。そのためには、微細乱流と同様、液体表面で起きる微細な局所の変形および微粒化を表現するモデルを組み込む必要がある。そこで、本研究の工学的果実として、2相流LES用乱流微粒化サブグリッドモデルを構築することを最終的な目標とした。その実現には、乱流微粒化の原理と共に方程式系に対する深い数理的洞察が必要である。

### 3. 研究の方法

図1は液体の微粒化の様子を示す写真である。この図からわかる重要な事柄は、噴射方式によって噴射液の変形の履歴は異なるが、いずれの場合にも、液体表面から細い液体の糸ができ、それが切れて液滴が作られるという事実である。そこで、科学的基礎研究としては、まず液系の分断機構を明らかにする。その後、液系の生成機構、そして乱流微粒化機構を調べることにした。これらの研究により、微粒化を支配する根源的な法則性が明らかにできれば、噴霧燃焼シミュレータに搭載できる乱流微粒化モデルが構築できるはずである。

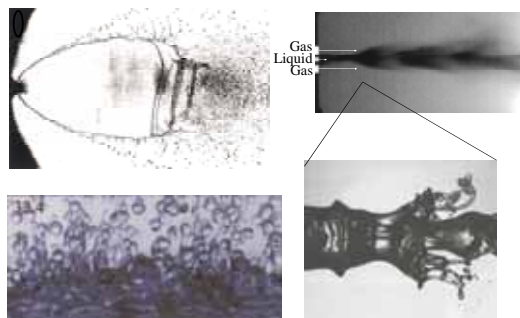


図1 液体の微粒化像

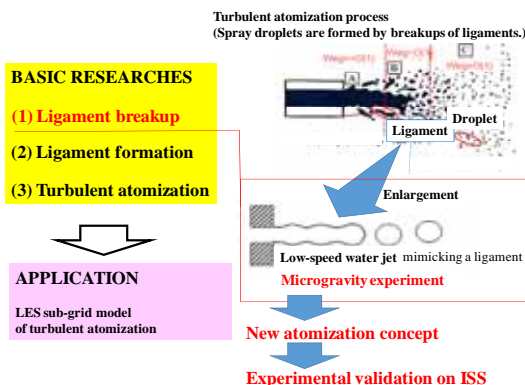


図2 研究戦略

### 4. 研究成果

(1) 微小重力実験から生まれた新しい微粒化概念の詳細化

以前より の研究を微小重力環境を利用して行ってきた。乱流微粒化状態のできる一つの液系を追跡し、変化を見るのは困難で

ある。液系を模擬する円柱状の液体は、噴射器から水を低速噴射すればできる。しかし、実験室で鉛直下方向に噴射して作った真直ぐな液柱では、重力加速の影響を受け乱流微粒化でできる液糸と異なった挙動が現れる可能性がある。微小重力環境を利用した。

従来の実験室実験の結果は、レーリーの理論に基づき、噴射器から噴射される液体にはかならずランダムな擾乱波が含まれており、その中から最も不安定な波が卓越的に成長して噴射液が分断されると解釈されている。確かに、レーリーの理論に依れば、分断距離は噴射速度に比例し、実験結果と一致しているように見える。しかし、レーリーの理論で分断距離を求めるには、最大増幅不安定波の初期振幅を与えなければいけないが、これは未知の乱れによって決まる量であるためわからない。逆に、実験室実験で測定された分断距離より初期振幅値を逆算すると、水を構成する分子のサイズより小さくなり奇妙である。これまで認識されてこなかったが、同様の矛盾は、移流不安定性に関連した全ての線形安定性理論に現れることが判明した。

実際には、噴射液自体の中に決定論的に噴射液を分断する仕組み（自己不安定化機構）があっても、それに気付かなければ、上流の乱れの性だと錯覚する可能性がある。微小重力実験の観察結果は、正にこの推測の正しさを示唆するものであり、その意義は非常に大きい。自己不安定化機構を解明すれば、微粒化特性が予測可能になるからである。様々な低速噴射液の自己不安定化機構を同定し、液糸の分断機構を解明した。

図3に国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」を利用した宇宙実験での詳細検証を予定している低速噴射液の自己不安定化機構を示す。噴射液の先端には上流に向かった表面張力が作用するので、先端が収縮し先端液塊ができると共に、上流に表面張力波が形成されていく。液体が溜まって先端液塊が大きくなり、圧力が上流の液柱より低くなると、上流から先端液塊に流れ込むジェットができ、ベルヌーイの定理に従ってくびれ部が絞られて分断する。この局所的な不安定性は、分断が起きるくびれ部に上流伝播性がある条件でのみ発現するので「短波長分断」と称し、レーリーの理論に則って起きる長い波長での分断「長波長分断」と区別した。短波長分断で残った液柱は、前に作られた表面張力波の存在を除けば、最初の状態と同じになるから、同じ過程を繰り返して次々に液滴

が作られていく。これより、端のある液柱（液糸）は自然に分断し続ける、先端収縮によって解放された表面エネルギーの一部が表面張力波となって上流に伝わっていくことがわかった。

先端収縮は非線形な過程であり、従来の線形安定性解析では、その効果が全く看過されている。上流伝播表面張力波は、噴射器出口に到達すると反射する。その際、噴射速度によって波長が伸びるので、反射波は不安定波に転化することができる。これは、レーリー不安定波の生成機構を説明するものである。重要な点は、先端収縮でできた表面張力波からできる不安定波であるから、不安定波の初期振幅は、決定論的に決まるという点である。これにより噴射条件に対して決定論的に分断距離が予測できる理論の原型ができた。

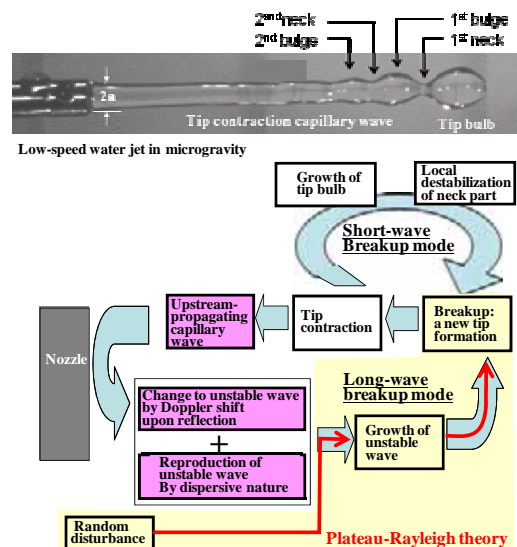


図3 自己不安定化機構（プロトタイプ）

このようにしてレーリーの不安定波が作られ、噴射液の分断が起きると、レーリー不安定波の発達は表面エネルギーを開放して運動エネルギーに転化させる過程であるから、先端収縮と同様、一部のエネルギーを分散表面張力波として上流に伝え、不安定波を複製する。さらに、増幅率の大きな波長の不安定波は短い距離で噴射液を分断し、それより下流でしか噴射液を分断できない波の効果を死滅させる。これが定常的な噴射液の分断で、最大増幅率不安定波だけが出現する理由である。

噴射器出口と同等の効果を生む流れ条件が成立すれば、どこでも上流伝播表面張力波から不安定波への転化が可能である。重力加速噴射液や、噴射液に速度分布があると、



上流伝播表面張力波が伝播中に伝播速度を変化させて波長が伸び不安定波に転化できる。この知見を得ることにより、微小重力実験と実験室実験、また、ノズルジェットとオリフィスジェットとの分断特性の違いが説明できるようになった。

## (2) 実験室実験による自己不安定化ループの検出

実験室実験では、重力の作用によってレーリーの不安定波が作られることを理論的に予測し、実験的に検証した。ノズルから噴射する水の速度を段階的に下げていくと、ある噴射速度でジェット状態から滴下状態へ遷移する。図4に遷移時の噴射液先端距離の履歴を示す。細かいギザギザは分断毎に起きる先端位置の移動を表す。先端距離はジェット状態の大きな値から、三角波状に振動しながら短縮し、滴下状態に落ちついている。この間の三角波状の振動の各周期が、自己不安定化ループを忠実に表していることを、先端収縮表面張力波の挙動を可視化して示すことができた。

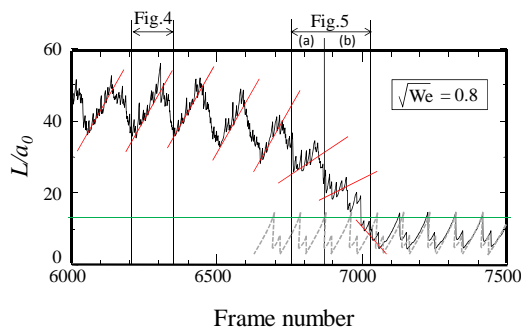


図4 遷移ジェットの先端位置履歴

振動が起きるのは、一連の短波長分断と長波長分断とが分かれて起きるからである。上流伝播表面張力波の振幅はノズル半径の1/100より小さいのに対して、高速度撮影画像の1ピクセルはノズル半径の1/10程度であるから、画像から抽出する噴射液の輪郭では分散波を解析できない。しかし、画像では背景光の屈折で表面の凸凹が明暗になって見える。この光学的特性をうまく利用して微細な振幅の波の移動と変化を図5に示す縞模様として表現することができた。図で赤色は噴射液の括れ部、青色は膨らみ部を表す。図は短波長分断ごとに放射される表面張力波がブランコと同じように共鳴的に強められた波を作り、それが重力加速流の中で伸長されてレーリーの不安定波に転化して

いく様子を明瞭に表している。

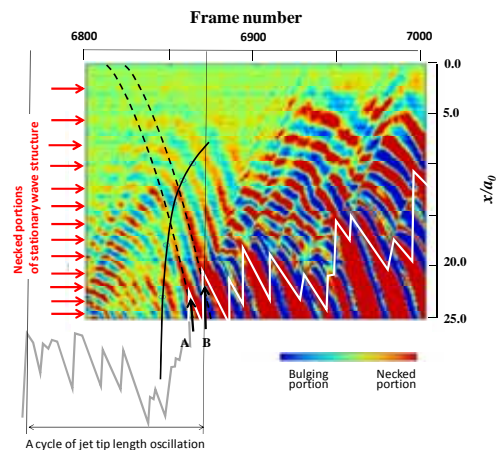


図5 自己不安定化ループパターン

## (3) 高速噴射液への新概念の適用

自己不安定化機構の考えは、低速噴射液に対してのみ当てはまるものではない。移流不安定性が関係した全ての不安定現象に当てはまる。このことを実証するための研究を乱流微粒化に関連付けて行った。

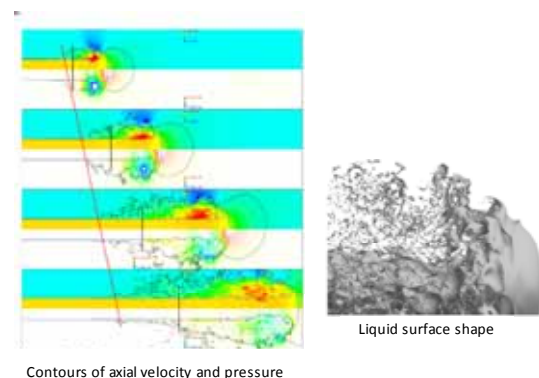


図6 初期ディーゼル噴霧形成過程DNS

図6は、JAXA大型計算機を用いて行われた初期ディーゼル噴霧形成過程の直接数値シミュレーションの結果である。高圧静止空气中に水を高速噴射した。噴射液は常に一樣速度で噴射し、噴射液が乱れを持つことはない。はじめに噴射液に乱れが生じるのは、空気と衝突する先頭部であり、そこから図に見る乱流微粒化が生起しており、乱流微粒化でも自己不安定化機構が働くことを示している。この計算に現れた液系の分断の様子を調べると、分断は前述の予測に完全に従っていることも確認された。また、計算結果の解析から噴霧燃焼のモデル化に有用な様々な情報を取得した。

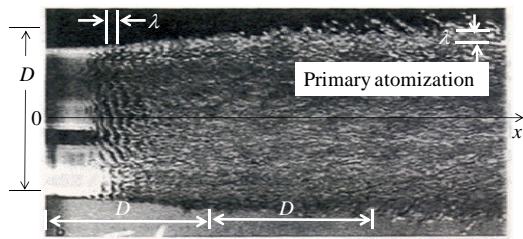


図7 高速噴射水ジェットの流れの乱流化。

上述の計算では、意図的に噴射器の影響を排除している。ノズルが噴射液の乱流微粒化においてどのような役割を果たしているか調べた。図7はせん断不安定性を可視化した著名な実験の写真であるが、この流れ構造を解き明かした研究はない。短いノズルではノズル内壁に沿って発達するせん断層の厚みは薄く、噴射速度が大きいときは、強い渦層を表面近くに持った噴射液が噴射され、ジェット部で速度分布緩和を起す。ノズル流れに乱れはなく、且つ、周囲ガスからの作用も無視できる条件で、せん断不安定波がノズル出口で継続的に作られる仕組みを明らかにした。ノズル近くでの急速な不安定波の発達による非線形性により上流伝播表面張力波が作られ、それがノズル出口で反射して写真の不安定波を複製する数理の定式化に成功した。強いせん断層でのレイノルズ応力によって支えられた乱流微粒化開始位置の噴射速度依存性を予測した結果は、実験と一致し、写真に見える乱流微粒化は、基本的に周囲ガスの影響を受けず、ノズル内で作られた液体せん断層の不安定性によって引き起こされていることを理論的に示すことができた。

以上、新しい微粒化概念は液系の分断のみならず、2相流の乱流生起に係る不安定波の記述に対しても、決定論的（シミュレータの構築にはそうでなければいけない）な理論枠を与えることができることがわかった。それで、最後に、噴射液の乱流と微粒化を繋ぐ液系の生成機構について研究した。これにより、乱流微粒化サブグリッドモデルの構築に必要な基礎知識が揃う。

#### (4) 液系の形成機構

液系の形成は、表面近くの液体が如何に運動するかの問題であり、液体の揺動によって決まると考えられ、ガス流に吸引されて液系ができるとする従来の考え方では、乱流微粒化機構としては無理がある。それで、超音波

微粒化を取り上げて液系の形成機構を考えたい。超音波微粒化はファラデーの不安定性を利用したものである。ファラデー波の研究も古くから多数あるが、噴霧形成と関連つけて論じることができない。液系形成の物理がよく理解されていなかったからである。

この研究でもたらされた新たな知見は、表面変形が大きくなった非線形現象の理解にある。凸凹した表面を持つ液体が表面に垂直な方向に揺さぶられると、表面近くに凸凹間を往復する液体の流れが生じ、表面張力波と共鳴する条件で表面変形が増幅する。ここで大事な点は、表面変形に関連する流れは表面近くの薄い層内に限られるという事実である。この表面層流がその下の液体の揺動運動から力学的に自由になることができ、初めて微粒化するリガメントができる(図8)。この条件は、凸表面部に流れ込む液体の速度が大きくなり、慣性によってそのまま流れ続けようとする状態に対応し、普遍的な特性を持つことがわかった。また、面白いことに、液系は重力下でオリフィスから噴射した液体ジェットと類似の挙動を示すことが分かった。液体ジェットの分断機構は、既に解明しているので、生成液系がどのように分断し、どのような液滴が作られるか予測できるようになった。

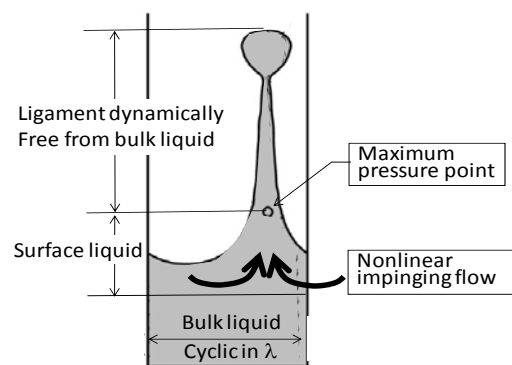


図8 液体リガメントの形成機構

#### (5) 乱流微粒化サブグリッドモデル

これまで述べてきた微粒化の本質にかかわる理論・数値・実験的研究から得られた新しい知識を乱流理論の枠組の中で捉え直し、乱流微粒化サブグリッドモデルを構築した。このサブグリッドモデルは、現行の噴霧燃焼シミュレータで計算される平均流、噴霧、およびk-εデータに基づき、局所的な液体表面状態が微粒化を起こす状態になるかどうか判定する。微粒化が起きる場合には、発生

する噴霧のデータを噴霧追跡ラグランジェ計算に入力し、微粒化量に対応したジェット表面の後退を平均流の計算にもたす。そのため、乱流微粒化によりコア流が削られていく様子も記述できる。局所的な液体表面の乱流状態と表面不安定性に準拠して微粒化量が決定されるので、このサブリッドモデルは、平均流と乱流微粒化との間で起きる相互干渉も自然に記述できる初めてのモデルになっている。すなわち、微粒化によって噴霧流を含めた平均流が力学的に変化し、乱流状態が変化する。その結果、微粒化状態に変化が起きる。平均流の状態によって微粒化が抑制される状態も正しく捉えて計算するので、噴射液の発展に応じて現れる微粒化状態の変化を捉え、大規模渦構造で顕在化する噴霧生成のムラも表現し、当初に期待した機能を果たす。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 22 件)

- A.Umemura and J.Osaka, Self-destabilizing loop observed in a jetting-to-dripping transition, J. Fluid Mech. (to appear).
- Y.Li and A.Umemura, Two-dimensional numerical investigation on the dynamics of ligament formation from vertically vibrating liquid layer, Int. J. Multiphase Flow, Vol.60, 2014, 64-75
- J.Shinjo and A.Umemura, Droplet/turbulence interaction and early flame kernel development in an autoigniting realistic dense spray, Proc. Combust. Inst., Vol.34, 2013, 1553-1560
- J.Osaka, S.Suzuki, Y.Suzuki and A.Umemura, Microgravity experiments on ISS in order to examine a new atomization theory discovered through normalgravity and microgravity experiments, J. Physics: Conf. Series, Vol.327, 2011, 012042(14 pages)
- J.Shinjo and A.Umemura, Surface instability and primary atomization characteristics of straight liquid jet sprays, Int. J. Multiphase Flow, Vol.37, 2011, 1294-1304
- J.Shinjo and A.Umemura, Detailed simulation of primary atomization mechanism in Diesel jet spray (Isolated identification of liquid jet tip effects), Proc. Combust. Inst., Vol.33, 2011, 2089-2097
- A.Umemura, S.Kawanabe, S.Suzuki and

J.Osaka, Two-valued breakup length of a laminar water jet issuing from a finite-length nozzle under normal gravity, Phys. Rev. E, Vol.84, 2011, 036309 (21 pages)

A.Umemura, Self-destabilizing mechanism of a laminar inviscid liquid jet issuing from a circular nozzle, Phys. Rev. E, Vol.83, 2011, 046307 (19 pages)

J.Shinjo and A.Umemura, Simulation of liquid jet primary breakup: dynamics of ligament and droplet formation, Int.J. Multiphase Flow, Vol.36, 2010, 513-532

### 〔学会発表〕(計 27 件)

A.Umemura, Toward a new paradigm of spray combustion research, 9th Asia-Pacific Conference on Combustion, 2013

### 〔図書〕(計 1 件)

A.Umemura(分担執筆), Springer-Verlag, Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications (Nasser Ashgriz Ed.), 2011, 951

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

梅村 章 (UMEMURA, Akira)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：60134152

### (2)研究分担者(平成 25 年度)

姫野 武洋 (HIMENO, Takehiro)

東京大学大学院・工学系研究科・准教授

研究者番号：60376506

新城 淳史 (SHINJO, Junji)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・その他部局等・研究員

研究者番号：10358476

### (3)連携研究者(平成 21 ~ 24 年度)

姫野 武洋 (HIMENO, Takehiro)

東京大学大学院・工学系研究科・准教授

研究者番号：60376506

新城 淳史 (SHINJO, Junji)

独立行政法人・宇宙航空研究開発機構・その他部局等・研究員

研究者番号：10358476