

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：17201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760137

研究課題名(和文) VCOノズルにおける噴霧微粒化過程の高精度数値研究

研究課題名(英文) Accurate Numerical Study on Spray Atomization Process of VCO Nozzle

研究代表者

住 隆博 (Sumi, Takahiro)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30358668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：直噴ディーゼル機関における未燃炭化水素の排出低減を目的として、VCO (Valve Covered Orifice) ノズルが知られている。本研究では、噴孔内部流動と噴孔出口下流チャンバ部の噴霧微粒化過程の相関について、数値流体力学を用いて考察を行った。噴孔出口背後の噴霧形態は、ニードルの偏心により生じる噴孔内旋回流に大きく影響を受け、噴孔内スワール数により定性的に整理できることが分かった。また、近年の直噴ディーゼルエンジンにおける超高压燃料噴霧現象の解析に向けて、高精度圧縮性気液二相流数値解析コードを開発し、今後の研究における課題と展望を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：The VCO (Valve Covered Orifice) nozzle is well known to reduce unburned hydrocarbon emission from direct-injection diesel engines. In the present study, we examine a relation between internal flow in the nozzle hole and spray atomization process in the nozzle chamber by using CFD (Computational Fluid Dynamics). Spray atomization characteristics behind the nozzle exit are greatly affected by swirling flow generated due to needle eccentricity, and is found to be organized by the swirl number calculated in the nozzle hole. Furthermore, toward the analysis of high-pressure fuel spray atomization phenomena in the recent direct-injection diesel engines, we have developed an accurate numerical simulation code for compressible two-phase flows, and obtained problems and prospects related to the future work.

研究分野：数値流体力学

キーワード：混相流 微粒化 数値流体力学

1. 研究開始当初の背景

直噴式ディーゼル機関の燃料噴射ノズルでは、複数の噴孔を持つノズルボディとその内部に組み込まれたニードルの干渉により、燃料噴射の実行と停止が行われる。そのようなノズルの代表的な形態として、図1のようなノズルボディの内側に燃料溜まり室（サック部）を設けて各噴孔への供給燃料の均圧化を図る Sac ノズル、およびノズルボディの内側にサック部を設けずニードルによる噴孔の直接的な開閉により噴射の実行と停止を行う VCO (Valve Covered Orifice) ノズルが知られている。

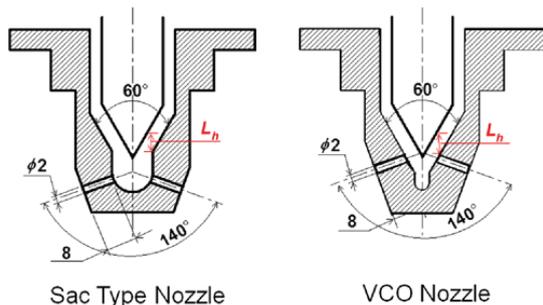


図1 代表的なディーゼル燃料噴射ノズル形態

Sac ノズルは、ニードルの開閉状態に関わらずサック部と噴孔が常時通じており、ニードルが離座するとサック部に溜まった燃料に均等な圧力が加わり、噴孔を通じて噴射されるため、安定した燃料の噴射が実行できる。しかしながら、閉弁時でも燃焼室内の圧力変化に起因して、サック部に溜まった燃料が噴孔から流出することがあり、このことは排気ガス中の未燃炭化水素濃度の増加要因となる。一方、VCO ノズルは、ニードル閉弁時に噴孔への燃料の流入を直接遮断するので、上記のような燃料の流出が生じず、排気の悪化が起こり難い。しかしながら、開弁時にニードルが基端側に移動した際、加工公差によりニードル中心がノズルボディ中心から僅かに偏心することがあり、これによりニードルとノズルボディの間に形成される燃料の通路幅が不均一になることで、結果的に複数噴孔から噴射される燃料量にばらつきが生じると考えられている。

以上のように、原理的に VCO ノズルの環境負荷に対する優位性は認識されつつも、上述したニードルの偏心問題を完全に克服できず未だ実用化に至っていない。

2. 研究の目的

VCO ノズルにおけるニードル偏心時の噴孔内部流動と噴孔出口下流チャンバ部における噴霧微粒化過程の関係は、拡大模型を用いた可視化実験等による定性的な理解に止まっているのが現状である。本研究では、数値流体力学的なアプローチにより上記相関について、考察および検討を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

噴孔出口下流チャンバ部での噴霧微粒化過程を正確に再現するには、それを可能とする高精度な数値解析コードが必要となる。しかしながら、シート部および噴孔部を含むノズル全体から噴孔出口下流のチャンバ部までの複雑形状を包括的に取り扱うには、技術的、時間的、計算資源的に困難が予想されるので、本問題を以下の二つに切り分けて研究を行う。

(1) 複雑形状となるノズルシート部から噴孔出口部までの内部流動予測には汎用熱流体解析ソフトウェアである CD-adapco 社の Star-CCM+ を用いる。これによりニードル偏心量と噴孔内部流動およびチャンバ部での噴霧角の関係を明らかにする。また、後述の高精度気液二相流数値解析コード開発の進捗を補うため、ノズル全体からチャンバ部にかけての一体計算を予備的に行う。

(2) 前述のような汎用熱流体解析ソフトウェアは一般に解法の精度が低く、燃料の噴霧微粒化過程を詳細に解像することは困難である。(低次精度解法に起因する大きな数値拡散のため気液界面の解像が不鮮明である) さらに、コモンレールによる蓄圧方式を導入した近年のディーゼルエンジンの燃料噴射システムでは、微細噴口から超高压で燃料を噴射し微粒化の促進を行うため、圧縮性を考慮した高次精度解法が望ましい。そこで、鮮明な気液界面捕獲が可能な高精度圧縮性気液二相流数値解析コードの開発を行う。

4. 研究成果

(1) 別途行った10倍拡大ノズル可視化実験条件に合わせ、ノズルシート部から噴孔出口部までの流路を対象に、Star-CCM+ を用いて解析した。計算条件の詳細は発表論文等に譲るが、図2右に示すように、ニードルが噴孔流路に対して垂直方向に偏心した際に、噴霧のばらつきが顕著に表れることが経験的に分かっていたので、ニードル偏心量をパラメータとして内部流動を詳細に調べた。(雑誌論文: ①, 学会発表: ⑥, ⑩, ⑬)

図3に噴孔出口方向速度分布と流線を示す。ニードル偏心量が増えるに従い、噴孔入口部の流路に偏りが生じることで旋回流が生じる。同偏心量が大きい場合、旋回中心付近の圧力が低下し逆流領域が形成され中実流れから中

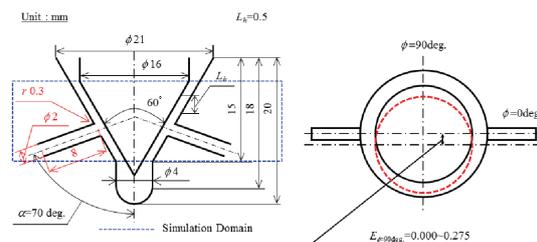


図2 計算モデル (10倍拡大模型)

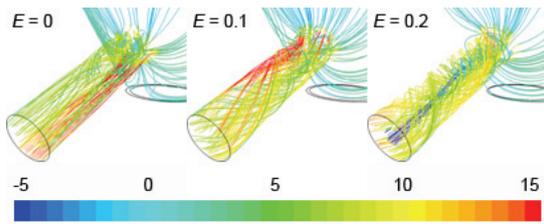


図3 噴孔出口方向速度分布 (m/s) と流線

空流れへと変化する。まず、噴孔出口において算出できるスワール数から噴孔出口下流チャンバ部（ここでは計算領域外）における噴霧角を計算する次の推算式を提案した。

$$\theta = 2 \tan^{-1} S_w$$

図4にニードル偏心量と噴霧角の関係を示す。実験と計算では逆流が発生するニードル偏心量（噴霧角のピーク付近）が異なるものの、定性的には同様の傾向が得られた。

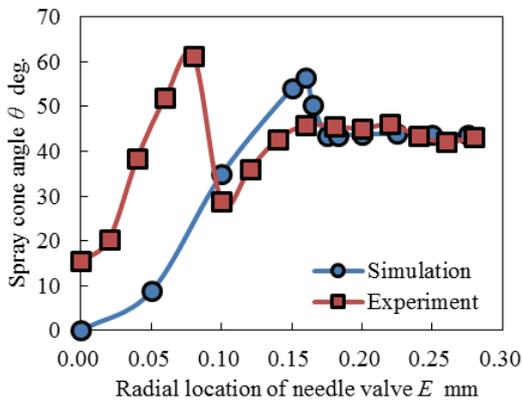


図4 ニードル偏心量と噴霧角の関係

また、上記推算式がどの程度妥当であるかを調べるために、図5のように噴孔出口下流にチャンバを取り付け、（低次精度ながら）噴霧微粒化過程を再現することで、画像処理により噴霧角を直接算出して比較した。図6に示すように、チャンバ無しの場合において推算式より求めた噴霧角は、ほぼ正確にチャンバ有りの場合の噴霧角を予測できることを示した。

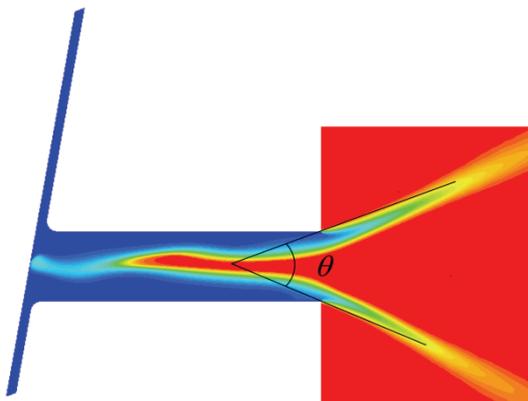


図5 チャンバを含む計算モデルと噴霧角

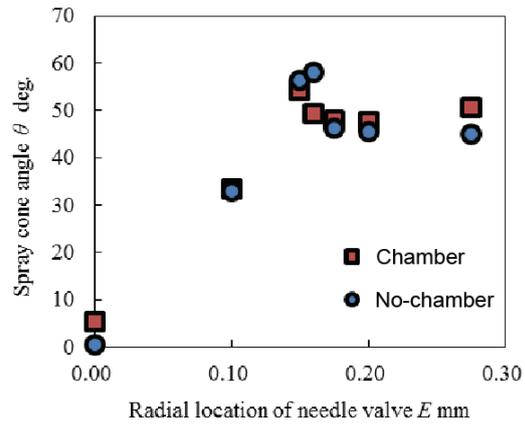


図6 チャンバの有無における噴霧角の比較

次に、噴孔入口部のエッジ曲率半径が噴孔内流れに及ぼす影響を調べた。図7に示すように、エッジ曲率半径が増すと噴霧角がピークを取るニードル偏心量は小さくなる。したがって、図4において実験と計算の間で定量的な一致が得られない原因の一つは、可視化ノズルの加工精度にあると考えられる。

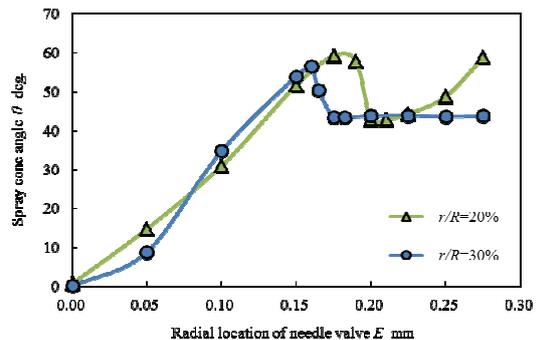


図7 ニードル偏心量と噴霧角の関係
(噴孔流入部エッジ曲率半径の影響)

図8はニードル偏心量に対する噴孔入口部のスワール数である。図7より逆流が発生し中空噴霧となるニードル偏心量は形状条件によって異なるものの、その時のスワール数は $S_w = 0.56$ 付近でほぼ共通しており、噴孔内流れがスワール数で整理できることが分かった。

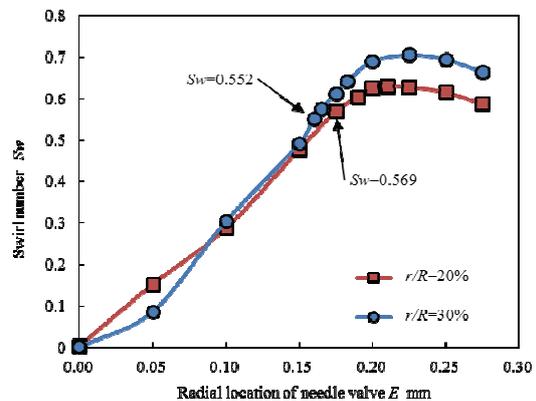


図8 ニードル偏心量とスワール数の関係

(2) 高精度圧縮性気液二相流数値解析コードの開発を行う前提として、圧縮性単相流に対する高次精度解法の調査および研究が必要となった。

圧縮性流れの高次精度差分法にWCNS (Weighted Compact Nonlinear Scheme) がある。同様の差分法として広く知られるWENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) スキームに比べ、数値流束の選択自由度や曲線座標系での一様流保存に関する優位性など様々な長所がある一方で、強力な衝撃波等が存在する厳しい不連続問題に対しては比較的脆弱で、しばしば計算が破綻することが知られている。先行研究により、この問題はWCNSで行ういくつかの操作のうち、変数の非線形補間もしくは線形差分後の更新過程において、圧力および密度に対して正值性が保てないことが原因であることが分かっていた。

本研究において、5次精度WCNSの線形差分操作にフリーパラメータを持つ6次精度三重対角中心コンパクト差分スキームを用いることで、上記問題を実質的に解決できることが分かった。具体的には次の線形差分式において係数を $-0.5 < \alpha < 0$ とした際に精度を損なうことなく計算の堅牢化が十分に達成されることを見出した。

$$\alpha f'_{j-1} + f'_j + \alpha f'_{j+1}$$

$$= \frac{1}{h} \sum_k \left[a_{2k-1} (\bar{f}_{j+k-1/2} - \bar{f}_{j-k+1/2}) + a_{2k} (f_{j+k} - f_{j-k}) \right]$$

$$(a_1, a_2, a_3) = \left(\frac{9-20\alpha}{6}, \frac{-9+62\alpha}{30}, \frac{1+12\alpha}{30} \right)$$

さらに、波数解析や安定性解析により本スキームの持つ基本特性を明らかにし、図9に示すような極めて厳しい圧縮性単相流のベンチマーク問題において安定かつ良好な結果を得ることができた。(学会発表：⑦, ⑧)

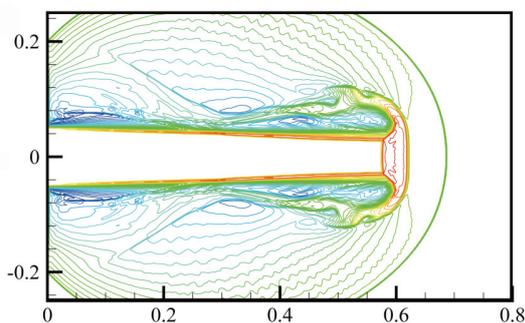


図9 M2000 ジェット検証問題 (密度)

(3) 現在の圧縮性混相流研究の数値モデルは、物質界面の取り扱いに関して、拡散界面モデルとシャープ界面モデルの二つに大別される。このうち前者は界面位置の明確な捕捉ができない代わりに、拡散界面における合理的な熱力学モデルを構築することで、圧縮

性単相流解法の拡張として考えることができるため、これを採用して高精度圧縮性気液二相流数値解析コードの開発を始めた。

しかしながら、先述した高次精度差分法の拡散界面モデルによる圧縮性混相流解析への応用は、一見するところ直接的に思えるものの、積極的に行われていないのが現状である。これは高次精度スキームが一般に単調性を持たないために、界面の捕獲に関してしばしば数値不安定を誘発することが原因と考えられる。この数値不安定は、界面を急峻に(すなわち拡散領域を狭く)捕えようとすればするほど顕在化する傾向がある。

一方で、低次精度 TVD (Total Variation Diminishing) スキームに様々な界面急峻化法を組み込み界面の鈍化を防ぐことで、解像度の高い解を得る試みが成されている。そこで、拡散界面において安定に計算が行えるように、5次精度WCNSにおける非線形補間操作に単調性維持の制限関数 (MP-limiter) を局所的に作用させ、さらに拡散界面の急峻化法として圧縮性 Anti-diffusion 法もしくは圧縮性 THINC (Tangent of Hyperbola for INterface Capturing) 法を組み合わせることで、数値解の大局的な高次精度化と高解像度化を試みた。

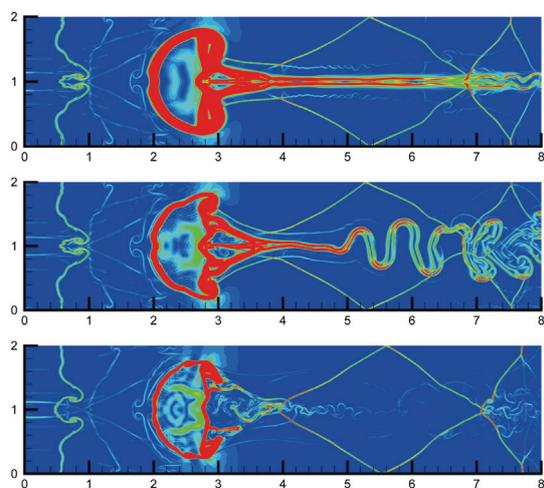


図10 水柱/M6 衝撃波干渉検証問題(数値シュリーレン), No-sharpening (上), Anti-diffusion (中), THINC (下)

図10に水柱/M6 衝撃波干渉問題について、拡散界面にMP-limiterの適用のみを行った場合 (No-sharpening), 拡散界面の急峻化法として Anti-diffusion 法を適用した場合、および THINC 法を適用した場合の3ケースについて、それぞれの数値シュリーレン画像を示す。拡散界面急峻化法の適用により、拡散界面を非常に薄く捕えることができる一方で、さらに高次精度スキームの適用により、衝撃波等の不連続面とともに下流域の流れの渦構造をも詳細に解像することに成功した。(学会発表：①, ④)

(4) 拡散界面モデルは体積分率に関する輸送方程式を解くため、質量保存性については厳密であるが、物質界面位置の明確な捕捉ができない。一方でシャープ界面モデルは質量保存性が厳密ではないものの、物質界面位置を適切に追うことができる。そこで、Level Set 法をベースとしたシャープ界面モデルによる圧縮性混相流の高精度数値解析コードの整備を追加して行った。共通のベンチマーク問題を用いて上記二つの方法論を比較し、各数値解法の検証や補強ならびに課題の抽出を行った。(学会発表: ②, ⑤)

高精度圧縮性気液二相流数値解析コードの研究開発は、当初の想定よりも技術的なハードルが非常に高く、研究計画に対して進捗が遅れたため、これを用いた噴霧微粒化過程の実用計算には至らなかった。しかしながら、本研究課題を通して VCO ノズルにおける現象論への理解が深まり、圧縮性混相流の高精度数値解法についての数多くの有用な知見を得ることができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 山根禎史, 住隆博, 大澤克幸, 小田哲也, 拡大 VCO ディーゼルノズルにおけるニードルの偏心が噴孔内流れに及ぼす影響の数値解析, 査読有, 日本機械学会論文集, Vol. 80, 2014, pp. 1-14
DOI: 10.1299/transjsme.2014tep0094

[学会発表] (計 13 件)

- ① 住隆博, 黒滝卓司, 拡散界面モデルによる圧縮性混相流解法の高次精度化および高解像度化について, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 2014 年 12 月 9-11 日, タワーホール船堀 (東京都・江戸川区)
- ② 黒滝卓司, 住隆博, Sharp interface model を用いた高速流圧縮性混相流解析の WCNS による高精度化について, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 2014 年 12 月 9-11 日, タワーホール船堀 (東京都・江戸川区)
- ③ 高橋直人, 岩谷隆志, 塔本昭平, 小田哲也, 住隆博, 大澤克幸, 拡大 VCO ディーゼルノズルのニードルの偏心が及ぼす噴射特性の影響, 第 25 回内燃機関シンポジウム, 2014 年 11 月 26-28 日, 産業総合技術研究所つくば共用第 1 講堂 (茨城県・つくば市)
- ④ 住隆博, 黒滝卓司, 拡散界面モデルによる圧縮性混相流の高次精度解法, 混相流シンポジウム 2014, 2014 年 7 月 28-30 日, 道民センター「かでの 2・7」(北海道・札幌市)
- ⑤ 黒滝卓司, 住隆博, 固気相連成問題におけるインターフェースモデルの構築と高速流解析への応用, 第 46 回流体力学講演会/第 32 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2014 年 7 月 3-4

- 日, 弘前文化センター (青森県・弘前市)
- ⑥ 山根禎史, 住隆博, 大澤克幸, 小田哲也, 拡大 VCO ディーゼルノズルにおけるニードルの偏心と噴孔内流れの相関性の解析, 日本機械学会中国四国支部第 52 期総会・講演会, 2014 年 3 月 7 日, 鳥取大学鳥取キャンパス (鳥取県・鳥取市)
- ⑦ 住隆博, 黒滝卓司, 重み付きコンパクトスキームの堅牢性および解像度向上への試み, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 2013 年 12 月 17-19 日, 名古屋大学東山キャンパス (愛知県・名古屋市)
- ⑧ 黒滝卓司, 住隆博, Anti-diffusion interface sharpening technique を応用した重み付きコンパクトスキームにおける理想気体不連続接触面の解像度向上について, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 2013 年 12 月 17-19 日, 名古屋大学東山キャンパス (愛知県・名古屋市)
- ⑨ 岩谷隆志, 大西謙斗, 横部澄人, 住隆博, 小田哲也, 大澤克幸, 拡大 VCO ディーゼルノズルにおけるニードルの偏心が一次微粒化と噴霧特性に及ぼす影響, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013 年 9 月 8-11 日, 岡山大学津島キャンパス (岡山県・岡山市)
- ⑩ 山根禎史, 北村和夫, 住隆博, 大澤克幸, 小田哲也, 拡大 VCO ディーゼルノズルにおけるニードルの偏心が噴孔内流れに及ぼす影響の数値解析, 日本機械学会中国四国支部第 51 期総会・講演会, 2013 年 3 月 8 日, 高知工科大学 (高知県・高知市)
- ⑪ 大西謙斗, 合田幸弘, 岩谷隆志, 住隆博, 小田哲也, 大澤克幸, 可視化用拡大 VCO ディーゼルノズルにおけるニードルの偏心が内部流動に及ぼす影響, 日本機械学会中国四国支部第 51 期総会・講演会, 2013 年 3 月 8 日, 高知工科大学 (高知県・高知市)
- ⑫ T. Oda, K. Ohnishi, Y. Goda, T. Sumi, K. Ohsawa, Internal Flow Visualization of a Large-Scaled VCO Diesel Nozzle with Eccentric Needle, 12th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2-6 Sep. 2012, Heidelberg (Germany)
- ⑬ K. Ohsawa, K. Kitamura, M. Hiratsuka, T. Oda, T. Sumi, Analysis of Needle Eccentricity Effects on Internal Flow and Spray Characteristics of Enlarged VCO Diesel Injector, 8th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems, 23-26 Jul. 2012, Fukuoka (Japan)

[その他]

- ① 山根禎史, 拡大 VCO ディーゼルノズルにおけるニードルの偏心が噴孔内流れに及ぼす影響の数値解析, 平成 25 年度鳥取大学工学研究科修士論文, 2014 年 3 月 (指

導教員（実質）：住隆博

6. 研究組織

(1) 研究代表者

住 隆博 (SUMI Takahiro)

佐賀大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：30358668

(2) 研究協力者

山根 禎史 (YAMANE Tomofumi)

三菱日立パワーシステムズ株式会社 (鳥取
大学・大学院工学研究科・博士前期課程

2013 年度修了)

黒滝 卓司 (KUROTAKI Takuji)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機
構・航空技術部門・上席研究員

研究者番号：20358659