

平成22年 3月31日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760137  
 研究課題名（和文） 高圧下の燃料分散系における混合液体燃料の燃焼開始過程の解明  
 研究課題名（英文） Investigation on combustion-initiation process of dispersed blended liquid fuels at high pressures  
 研究代表者  
 森上 修 (MORIUE OSAMU)  
 九州大学・大学院工学研究院・准教授  
 研究者番号：70363124

研究成果の概要（和文）：高圧力下における混合燃料噴霧の蒸発・点火特性を燃料組成，雰囲気条件から予測するモデル構築に向けて，本研究の範囲ではその素過程として燃料液滴を対象とし，高温高圧空気中の正デカン／エタノール混合燃料液滴の自発点火実験を行った．燃料組成，空気温度，圧力を変じて，蒸発速度，点火遅れ，火炎温度，火炎径を取得し，データベースを作成した．概ね，揮発性が高く反応性の低いエタノール成分の増加に伴い，自発点火は抑制された．また，現象を数値計算により再現可能とした．

研究成果の概要（英文）：The final objective is to establish of the model to predict the vaporization and ignition characteristics of blended fuel spray at high pressure depending on fuel composition and ambient-gas conditions. In the present study, isolated droplets were studied as an elementary process. Spontaneous ignition of n-decane/ethanol blended fuel droplets in high-temperature and high-pressure air was experimentally observed. Fuel composition, air temperature and pressure were varied, and vaporization rate, ignition delay, flame temperature and flame diameter were obtained as database. Generally, spontaneous ignition was suppressed with increasing ethanol composition, which is more volatile and less reactive. Numerical calculation reproduced the phenomena successfully.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：噴霧燃焼，熱機関，新燃料，高圧力

## 1. 研究開始当初の背景

噴霧燃焼は多くの燃焼器で採用されてお

り，電力・動力の発生において主要な役割を担っている．近年，排気浄化，熱効率向上の

要求を受けて、燃焼器のさらなる最適化、新燃焼法の開発が求められている。また、環境への配慮およびエネルギー資源の多様性の維持のために、バイオ燃料に代表される燃料多様化が進んでおり、今後、新燃料に対応した燃焼法の開発、もしくは燃焼法に対応した燃料設計が重要となってくる。そのためには、噴霧特性、燃料性状、雰囲気条件から燃料噴霧の燃焼特性を予測可能としておくことが必要である。このために、いきなり実機を使用して特性を把握すると、各条件がどれだけの寄与で結果に影響を与えているかの評価が困難となり、未知の条件についての予測ができず、結果として **try and error** となってしまう。適切な手法は、上記諸条件が各々明確に規定された条件下での基礎的な燃焼特性の条件依存性を系統的に把握しておき、未知の条件についても予測可能とすることである。今日、予測のための最も有用なツールは数値シミュレーションであるが、その定量的信頼性の確保には実験との比較が必須である。しかしながら、実用燃焼器は高圧力下で行われるものの、明確に規定された諸条件下での基礎実験による系統的な実験データ取得は、これまで耐気圧近傍で行われてきた。液体燃料の蒸発特性、化学反応特性は圧力に大きく依存するため、高圧力下での実験が重要であるが、そのデータが不足している。

## 2. 研究の目的

燃料噴霧の燃焼特性に影響を与える噴霧特性、燃料性状、雰囲気条件のうち、噴霧特性については本研究の範囲では条件を固定する。すなわち、素過程として、噴霧を構成する個々の燃料液滴を研究対象とし、燃料分散系の燃焼を代表させる。また、点火時期の制御が燃焼器の効率向上の重要な因子であることから、高温空気に曝された液体燃料の燃焼開始過程を研究対象とする。すなわち、本研究では高圧力下における高温雰囲気中の混合燃料液滴の蒸発・点火特性を燃料性状、雰囲気条件から予測するためのモデル構築用データを取得し、現象のメカニズムを明らかにすることを目的とする。高温・高圧空気中の混合燃料液滴の自発点火・燃焼実験を雰囲気条件、燃料組成を変じて行い、液滴の蒸発速度、点火遅れ、火炎温度、火炎径に関するデータを収集する。

## 3. 研究の方法

### (1) 概要

高温高圧空気中の混合燃料液滴の自発点火実験を行う。燃料としては、石油系燃料の代表として正デカン、バイオ燃料の代表としてエタノールを選択し、両者の混合燃料とする。観測において時間・空間分解能を確保するため、直径 1 mm の粗大液滴を実験対象と

する。ただし、実用燃焼器中の噴霧を構成するような直径数 $\mu\text{m}$ ~数十 $\mu\text{m}$ の微小液滴は自然対流の影響をほとんど受けない。一方、直径 1 mm の粗大液滴は自然対流の影響を受けてしまう。この影響を排するために、実験は微小重力場にて行う。直接写真法による液滴の撮影により蒸発速度を、火炎の撮影により火炎温度を、熱電対による液滴近傍の気相の温度計測により、点火遅れ、火炎温度を取得する。燃料組成、空気温度、圧力を変じてデータベースを作成する。また、現象を物理的過程、化学的過程に分けて系統的に総括し、メカニズムを明らかにする。また、数値計算計算を利用して、混合燃料の蒸発を模擬する。

### (2) 実験手法

実験装置は高圧容器、高温電気炉、液滴保持・移動装置、液滴生成装置、熱電対およびデータ記録装置、光学的観測系、制御部からなる。高温電気炉、液滴保持・移動装置、液滴生成装置、熱電対は高圧容器内に収容される。制御部、熱電対用データ記録装置、光学的観測系は高圧容器外に設置される。電気炉は 900 K まで昇温可能である。液滴生成ならびに保持は、それぞれの液滴について直径 14  $\mu\text{m}$  の SiC ファイバを交差させ、その交点上に液滴を生成し、保持する。この液滴保持部を室温状態の場所から所定の温度に維持された高温電気炉内に瞬時に移動させることにより実験は行われる。液滴保持部には液滴近傍の温度の計測用の線径 25  $\mu\text{m}$  の K 型熱電対が 3 点設置されており、液滴と一緒に電気炉内に挿入される。熱電対の温接点は、液滴中心より上方 1 mm, 2 mm, 3 mm の位置に設置された。熱電対の出力は増幅された後 500 Hz で記録された。これらより液滴近傍の熱発生が検知される。また、液滴の蒸発速度の計測のため、液滴を背光で照らしてカメラにより撮影し 30 fps で PC 上にデジタル録画した。さらに、視認できる熱炎の挙動把握のため、さらに広い視野角をカメラにより撮影し 40 fps で PC 上にデジタル録画した。微小重力場を得る施設として、日本無重量総合研究所の無重量研究センターが利用された。

## 4. 研究成果

### (1) 現象

熱電対の出力の例を図 1 に示す。燃料は正デカン 100%, 雰囲気圧力は 0.3 MPa, 雰囲気温度は 620 K である。凡例は温接点の液滴中心からの距離を示す。時間 0 は液滴が電気炉内で停止した瞬間である。正デカンに代表される炭化水素系燃料は、比較的低温で活発で温度が 800~900 K 程度まで上昇すると抑制されてしまう低温酸化反応を有する。これにより比較的炎温度の低い(およそ 1000 K 以下)冷炎が発生する。冷炎は発光をほとんど

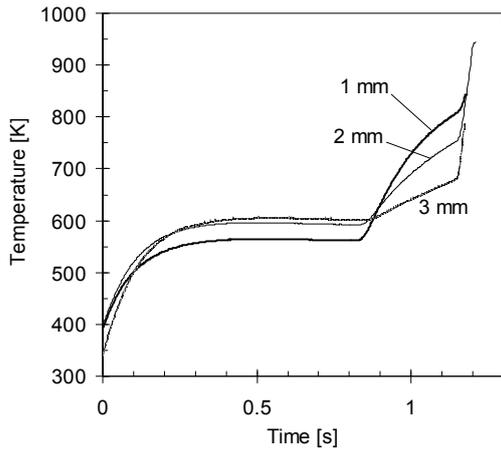


図1 液滴近傍の温度履歴  
(正デカン, 0.3 MPa, 620 K)

ど伴わず、通常視認されない。図1の約0.85 sにおいて、低温酸化反応による熱発生である冷炎の発生が検知されている。次に約1.15 sにおいてより急激な温度上昇が検知されている。これは通常の視認できる火炎である熱炎の発生であり、実際、直接写真法による火炎の検知の瞬間と一致している。熱炎は高温酸化反応により生じ、高温酸化反応は冷炎の発生により温度が上昇することで誘起されていると考えられる。このように、正デカンの自発点火は二段点火となっている。冷炎の温度は液滴に近いほど高い。冷炎の発生前は液滴による雰囲気冷却により液滴に近いほど温度が低いが、燃料に近いほど燃料の蒸気濃度が高く低温酸化反応による熱発生が大きい影響の方が勝るためである。なお、熱炎の温度はK型熱電対の融点を超えるため、熱炎発生直後に熱電対は融解してしまう。よって、約1.15 s以降の出力は示されない。

## (2) 正デカン液滴の自発点火

図1のような温度履歴より、冷炎の点火遅れ、熱炎の点火遅れを求めた。雰囲気圧力0.3 MPaにおける両者の雰囲気温度との関係を図2に示す。微小重力時間の制限(4.5 s)より、熱炎発生の下限温度は特定されていない。雰囲気温度の上昇とともに概して点火遅れは減少する。これは物理的な遅れ(蒸発に要する時間)と化学的な遅れ(反応に要する時間)両者の温度依存性による。但し、後者の温度依存性は必ずしも単調ではなく、正デカンの場合、低温酸化反応のために温度依存性が逆転する温度範囲があることが化学反応に関する研究から一般に知られている。これが図2において640~670 Kあたりに表れていると考えられる。冷炎が発生してから熱炎が発生するまでの期間が短い場合には、冷炎の点火遅れと熱炎の点火遅れが一致する。590 Kがこれに該当する。一方、700 Kにお

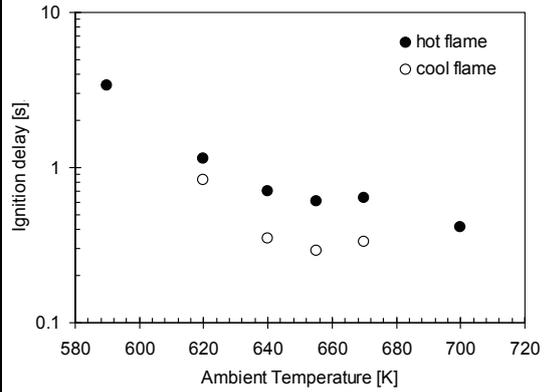


図2 点火遅れの雰囲気温度依存性  
(正デカン, 0.3 MPa)

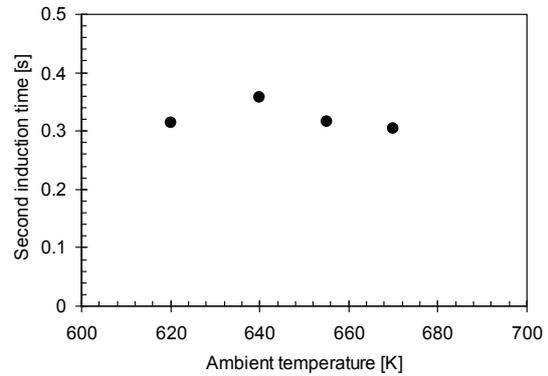


図3 冷炎発生から熱炎発生までの期間の  
雰囲気温度依存性 (正デカン, 0.3 MPa)

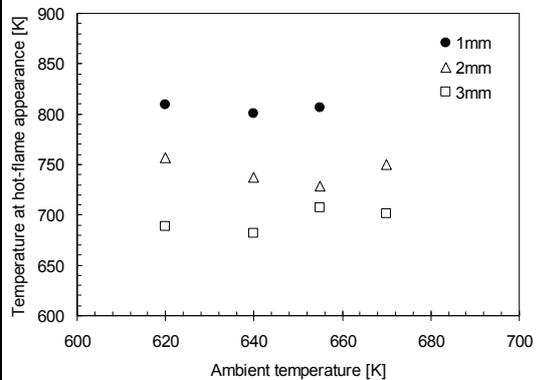


図4 熱炎発生時の計測温度の雰囲気温度依存性  
(正デカン, 0.3 MPa)

いては低温酸化反応による熱発生が少なく冷炎が検知されていないと思われる。冷炎発生から熱炎発生までの期間を図3に示す。雰囲気温度依存性が非常に小さいのが特徴的である。この遅れを支配するのは冷炎の温度であると思われるため、冷炎が発生した後、熱炎が発生した時点での各計測位置における温度を図4に示す。冷炎の温度があまり雰囲気温度に依存しないことが傾向として把握できる。これが図3の要因となっていると思われる。

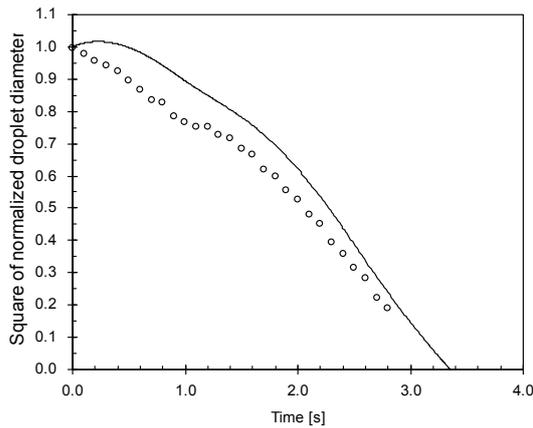


図5 正規化された液滴径の二乗の履歴  
(1.5 MPa, 600 K, 正デカン 25%(モル分率),  
液滴径 0.7 mm, 窒素中) 実線は数値計算。

### (3) 混合燃料液滴の自発点火

混合燃料液滴においては、二成分の揮発性の違いから、液滴表面より蒸発する各成分の流束は時間とともに変化する。二成分の反応特性は基本的に異なるので、この蒸発特性が自発点火挙動を支配する要因のひとつである。よって、雰囲気窒素とした蒸発実験を行った。結果を図5に示す。同条件での数値計算結果を実線で共に示してある。数値計算は、液滴中心に対する球対称の現象を扱い、質量保存、化学種保存、エネルギー保存に基づき、液相および気相における速度、各成分の質量分率、温度の半径方向分布、ならびに気液界面位置を時間の関数として求める。各種物性値の温度・圧力依存性が考慮され、液滴表面には気液平衡が成り立つとされている。正デカンとエタノールの標準沸点はそれぞれ 447 K と 351 K であり、後者の揮発性が高い。蒸発初期ではエタノールが主に蒸発し、後期では正デカンが主に蒸発されると思われる。数値計算ではそれが確認されている。実験結果では、約 0.8 s までの蒸発速度に比べ、約 1.5 s 以降の蒸発速度が大きい。蒸発速度は蒸発潜熱に依存し、潜熱が大きいほど小さくなるが、正デカン、エタノールの潜熱の大小と一致している。二つの蒸発速度の間には遷移期間がみられ、蒸発の主成分がエタノールから正デカンに交代する期間に相当する。数値計算と比較すると、時間 0 近傍の挙動が特に異なっている。実験において液滴が約 150 ms 要する移動を終了した時点零点と定義しているが、実際には移動の最中に液滴が加熱されていることの影響が考えられる。なお、揮発性の大きく異なる二成分からなる混合燃料液滴の蒸発においては、液滴が蒸発完了して消失する前に、液滴内から小液滴が飛び出すパフィンングや、液滴がはじけて消失する微小爆発が起こり得る。これは、液滴表

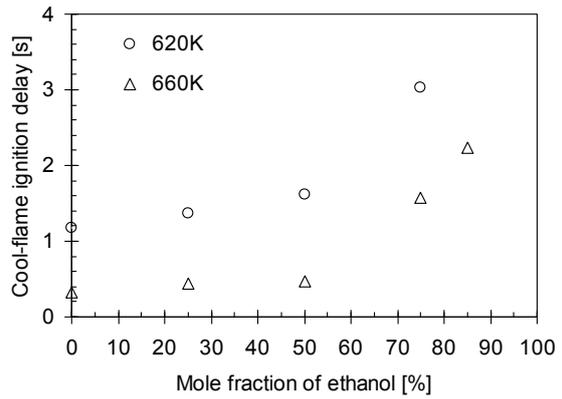


図6 冷炎の点火遅れの燃料組成依存性  
(大気圧, 正デカン/エタノール混合燃料)

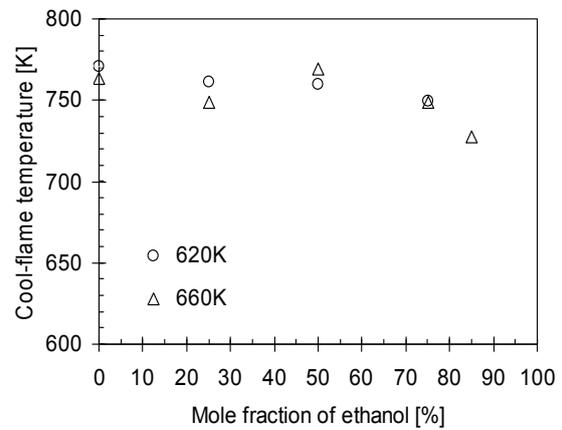


図7 冷炎温度の燃料組成依存性  
(大気圧, 正デカン/エタノール混合燃料)

面から液滴内部への熱伝導に比べて、液滴内の拡散が遅すぎる場合、液滴内の局所温度が局所沸点に達してしまうことに起因するが、図5の条件ではパフィンング、微小爆発ともに観測されなかった。

次に正デカン/エタノール混合燃料液滴の自発点火実験を行った。ここで、熱炎の発生を左右するのは冷炎発生の挙動であると考えられるので、特に冷炎に注目するために大気圧下で実験を行った。大気圧下では熱炎の発生下限温度が 1000 K 程度であるので、その下の雰囲気温度においては冷炎のみが発生する。雰囲気温度を固定して、燃料組成が冷炎の発生に与える影響を調査した。図6に冷炎の点火遅れの燃料組成依存性を示す。エタノールの割合が増えると冷炎の点火遅れが長くなることが端的に分かる。エタノールは低温酸化反応を有さず、またこの雰囲気温度では熱炎を発生しない。よって、化学反応面での寄与が小さいと思われる。このエタノール成分が先に主に蒸発し、冷炎を発生する正デカン成分の蒸発が遅れることにより、冷炎の点火遅れが長くなっていると思われる。

る。図7に冷炎温度の燃料組成依存性を示す。なお、冷炎発生後の温度は計測位置ならびに時間によって異なる。まず各温度計測位置について冷炎発生後の最高温度を求め、この値の全計測位置の中での最大値をその雰囲気温度での冷炎温度と定義した。冷炎温度を与える温度計測位置は全ての条件において2 mm上であった。冷炎温度の燃料組成への依存性はあまり大きくない。エタノールによる正デカンの希釈は正デカン蒸気層の形成を遅らせはするが、冷炎を誘起する正デカンの低温酸化反応はいずれ十分な蒸気層が形成されてから活発になっているためだと思われる。なお、大気圧下ではパフリングが観測された。二段点火の生じる0.3 MPaで自発点火実験を行ったところ、エタノール成分の増加とともに冷炎の点火遅れが長くなる大気圧下と同様の傾向がみられた。冷炎発生から熱炎発生までの期間については、燃料組成への依存性は大きくはなく、これは図7でみられる傾向に基づくとと思われる。

#### (4) まとめ

燃料液滴が高温空気に曝されて燃焼を開始する過程について、正デカン/エタノール混合燃料を用い大気圧下ならびに高圧下で実験を行った。圧力、空気温度、燃料組成を広く変じ、蒸発速度、熱発生履歴、火炎径が収集され、複雑な噴霧燃焼の素過程としての系統的なデータベースを作成することに成功した。空気温度800K程度まで実験を行ったところ、大気圧下では燃料は完全燃焼せずに部分的な酸化で留まる（すなわち、冷炎のみが発生）が、高圧下では燃焼開始後まずは第一段階の酸化（冷炎の発生）を経て完全燃焼（熱炎の発生）した。燃料組成を変じたところ、エタノール成分の増加とともに冷炎の点火遅れは長くなった。これは、エタノール成分の高揮発性ならびに冷炎を発生しない特性に由来すると思われる。一方、冷炎発生から熱炎発生までの期間については、燃料組成への依存性は大きくなかった。また、液相の熱・物質輸送を考慮する数値計算と実験を比較し、内部沸騰特性によい一致がみられた。

アルカン/アルコール混合燃料の自発点火実験を行った Wang らの研究においては、本研究とは異なり、アルコール成分の増加とともに熱炎の点火遅れが短くなる傾向がみられている。これは、Wang らの研究では雰囲気温度が1300 Kという高温であったことによる。この温度では正デカンの低温酸化反応は活発ではなく、また Wang らの用いたメタノールも熱炎を発生し得る。よって、メタノールの高い揮発性のためにメタノールの割合が増えるほど液滴の加熱時間が短くなり点火遅れが短くなっていると考えられる。しかしながら、燃料を自発点火させる実用燃

焼器では雰囲気温度は本研究のそれに近く、実機の傾向は本研究でみられる傾向に近いと思われる。

数値計算において計算領域を開空間から閉空間に変更し、単分散噴霧を模擬したところ、液滴の数密度の増加に伴い、冷炎の点火遅れは増加するが、冷炎発生から熱炎発生までの期間は減少するという逆の影響がみられた。二液滴を用いた実験でも同様の傾向が確認され、単一液滴と液滴群の自発点火挙動の違いが示された。なお、冷炎の点火遅れは液滴の加熱期間を含むため、液滴径への依存度が大きい。冷炎発生から熱炎発生までの期間のそれは小さい。燃焼器の設計、もしくは燃焼器に合わせた燃料設計において、点火遅れは重要な指標であるが、粗大液滴を用いた本実験の知見を微小液滴によって構成される実用噴霧に適用する際には、数値計算を利用してスケールを適宜調整することになる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Osamu Moriue, et al., Cool-Flame Behaviors of an n-Decane/Ethanol Binary-Fuel Droplet in Microgravity, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan, Vol. 7, No. ists26, pp. Ph\_7-Ph\_10, 2009. (査読有)

[学会発表] (計11件)

- ① 西山 洋平, 他6名 (研究代表者5番目), 正デカン二液滴の冷炎発生特性, 第18回微粒化シンポジウム, 2009年12月18日, 福岡
- ② 山口 洋介, 他5名 (研究代表者5番目), 高圧力下における正デカン液滴の自発点火の実験的観測, 第47回燃焼シンポジウム, 2009年12月3日, 札幌
- ③ 森上 修, 他9名, 共通微小重力実験装置を用いる高圧環境下における点火・燃焼研究チームの落下実験成果報告, 第53回宇宙科学技術連合講演会, 2009年9月9日, 京都
- ④ Osamu Moriue, et al., Numerical Simulations of Spontaneous Ignition of Mono-disperse Fuel Spray in Lean Premixed Gas, The 11th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, July 27, 2009, Vail, USA
- ⑤ Osamu Moriue, et al., Spontaneous Ignition of a Droplet Pair in

Microgravity, The 27th International Symposium on Space Technology and Science, July 9, 2009, Tsukuba, Japan

- ⑥ 山口洋介, 他 5 名 (研究代表者 5 番目), 正デカン/エタノール混合燃料液滴の自発点火の実験的観測および蒸発挙動の数値計算, 第 17 回微粒化シンポジウム, 2008 年 12 月 19 日, 横浜
- ⑦ 川井田 佳陽, 他 3 名 (研究代表者 3 番目), 希薄予混合気中に燃料噴霧が存在する系の自発点火に関する数値計算, 第 46 回燃焼シンポジウム, 2008 年 12 月 5 日, 京都
- ⑧ Osamu Moriue, et al., Cool-Flame Characteristics of n-Decane and n-Decane/Ethanol Droplets in a Hot Air, The 32nd Internal Symposium on Combustion, 7 Aug., 2008, Montreal, Canada
- ⑨ Osamu Moriue, et al., Cool-Flame Behaviors of an n-Decane/Ethanol Binary-Fuel Droplet in Microgravity, The 26th International Symposium on Space Technology and Science, 4 June, 2008, Hamamatsu, Japan

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

森上 修 (MORIUE OSAMU)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：7 0 3 6 3 1 2 4

### (2)研究分担者

### (3)連携研究者