

補助事業番号 2017M-147

補助事業名 平成29年度 分子選択的拡散特性の活用による水素爆発防止技術に関する研究 補助事業

補助事業者名 愛媛大学 工学部 機械工学科 熱工学研究室 中原 真也

1 研究の概要

本研究では、凹凸の生じた火炎面の燃烧特性の重要な因子となるルイス数と分子拡散特性を能動的に利用し、水素伝ば火炎を消炎させる技術の構築を目指す。具体的には、希釈ガスには未燃混合気側に凸または凹な各火炎部分に燃烧抑制効果が期待できる分子拡散速度が大きなヘリウムと小さな二酸化炭素を、さらに拡散速度の小さな燃料であるプロパンを対象とし、次のことを明らかにした。①これら混合気の消炎限界などの基礎燃烧特性の把握、②2次元火炎の凹凸スケール及び2成分希釈ガスや燃料の混合条件が与える火炎伝ば速度低減・消炎効果、③消炎に至らしめる2成分希釈ガスや燃料の添加や混合条件をルイス数を用いて整理できることを明らかにした。

2 研究の目的と背景

水素は、二酸化炭素を排出しないクリーンエネルギーとして燃料電池に用いられる他、直接燃烧も検討されている。また石油精製や化学合成等からも取り出すことができるため、産業にとって安定的なエネルギーや資源の供給体制が構築される。さらに、水素は電池に代わるエネルギーキャリアとしても注目されている。この水素利用社会へ向けた取り組みが産官学で進められている。

一方で、2011年の東日本大震災で福島第一原子力発電所において発生した水素爆発は、大きな社会問題を生じ、水素爆発の恐ろしさが広く認識された。この様に水素爆発の影響の大きさから、古くは水素-空気に希釈ガスを添加した混合気の静止場での爆発限界が米国鉱山局等により詳細に調査されてきた。しかしながら、実際の水素漏洩場では、ガス流動等の影響により火炎面には凹凸が生じ乱流火炎面化していることが容易に想像でき、これらの静止場でのデータが実際の事故で有用か不透明である。また従来の炭化水素燃料に比べて、火炎伝ば速度が速い水素では、従来型の初期消火設備であるスプリンクラーによる水噴霧が有効でない可能性も指摘されている。

従って、安全・安心な水素利用社会の構築には、水素の製造・貯蔵輸送・利用の各段階に潜在化する水素火災等事故に対応した、新たな水素爆発防止技術の開発が必要不可欠である。

一方、申請者はこれまでの研究で火炎面が凹凸を有する場ではルイス数効果および分子拡散特性に起因した選択拡散効果が重要であること初めて明らかにしてきた。

そこで、本事業では、この水素火災・爆発事故さらには甚大な被害をもたらす爆ごうへの遷移の防止技術を開発するために、従来型の水噴霧等ではなく、申請者のこれまでの成果を基に次の2点に着目した新しい概念の消火・爆発防止技術を構築することを目的とする。

① ルイス数効果にも着目した、分子拡散特性が大きく異なる2種類の希釈ガスまたは炭化水素燃料の利用による消炎

② 消炎に最適な火炎の凹凸スケールに制御する格子の利用

すなわち、熱と物質の移動のバランスを表すルイス数効果に着目し、例えば分子拡散特性が大きく異なるヘリウムと二酸化炭素が、火炎面に凹凸がある場合に、その未燃混合気側に凸および凹な各火炎部分に選択的に拡散する効果を能動的に活用し、両火炎部分の燃焼反応を効率よく低下・停止させ、水素伝ば火炎全体を消炎に至らしめる新しい消火・爆発防止技術の開発を目標とする。

3 研究内容

(1) 分子選択的拡散特性の活用による水素爆発防止技術に関する研究

(<https://www.me.ehime-u.ac.jp/labo/kikaiene/netu/JKAh2930.html>)

① 定容燃焼器を用いた基礎燃焼特性の検討に関する研究

水素-炭化水素-2成分希釈ガス[H₂-AIR-CO₂-He]混合気および水素-プロパン [(1-δ_P)H₂-δ_PC₃H₈-Air-N₂/O₂]混合気の基礎燃焼・消炎特性を把握するために、定容燃焼器【図1(a)参照】を用いて最小着火エネルギー*E_{i,min}*や火炎核形成特性【図1(b)参照】、乱流燃焼速度*S_T*や消炎限界特性【図1(c)参照】を把握・評価した。その結果、同一層流燃焼速度の下では、希薄水素伝ば火炎へ、燃料には分子拡散が遅いプロパンの混合が、また希釈ガスには分子拡散の速いヘリウムの添加が、*E_{i,min}*を大きく及び*S_T*を小さくする傾向にあることなどを明らかにした。

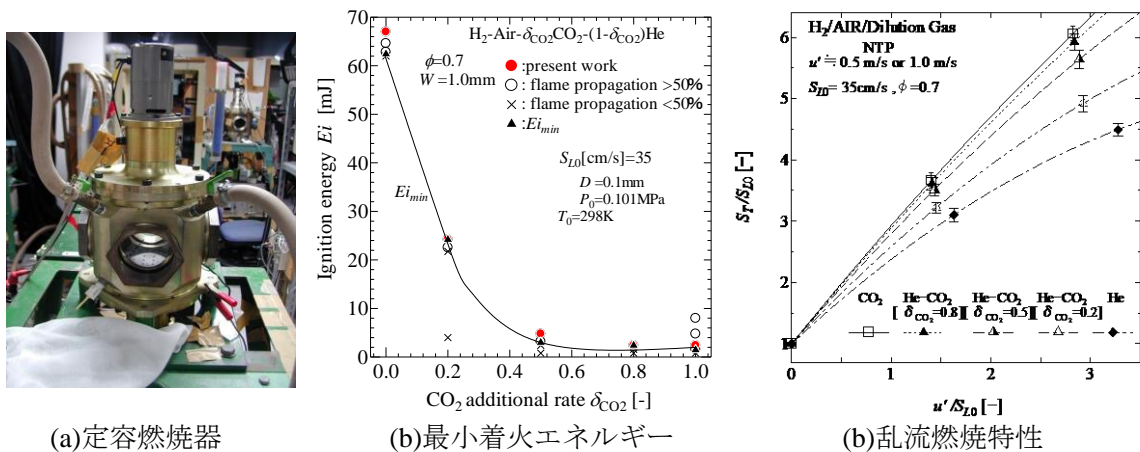
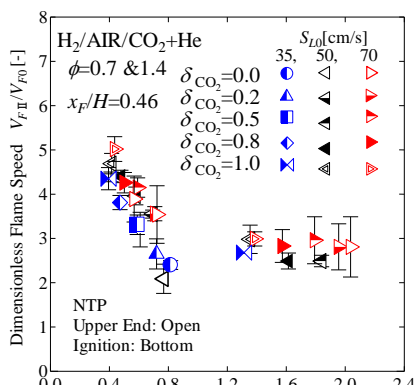
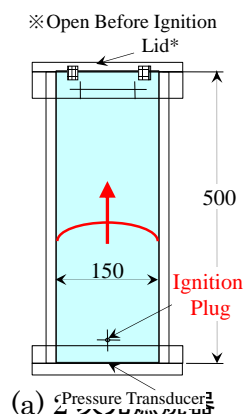


図1 基礎燃焼特性の把握 [H₂-AIR-CO₂-He, *S_{L0}*=35cm/s]

② 2次元燃焼器を用いた水素火炎伝ば特性の検討に関する研究

水素設備のロッカー等を模擬した格子により任意スケールの火炎凹凸形状を発生できる2次元燃焼器を製作【図2(a)参照】し、2つの希釈ガス(或いは燃料)の混合比および濃度が火炎伝ば・消炎特性に与える影響の把握・評価した。その結果、2成分希釈ガスの影響を検討した

H₂-AIR-CO₂-He混合気の火炎伝ば特性を整理した結果を図2(b)に示すように、火炎伝ばの加速特性をレイス数 Le を用いると整理できる可能性があることを明らかにした。

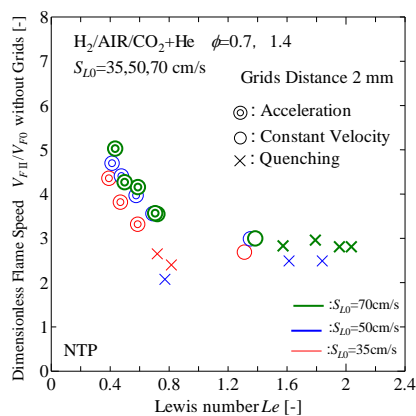
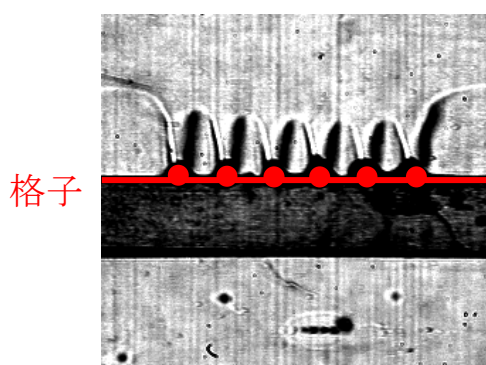


(a) 実験装置 (b) 火炎伝ば速度 V_F/V_0 特性値とレイス数 Le との関係
[H₂-AIR-CO₂-He, $\phi=0.7&1.4$, $S_{L0}=35, 50 \text{ \& } 70\text{cm/s}$]
図2 水素火炎の伝ば特性に与える2成分希釈ガスの影響

③ 水素伝ば火炎を消炎する新爆発防止技術の検討に関する研究

二成分希釈ガスや炭化水素の混合が水素伝ば火炎に、すなわちH₂-AIR-CO₂-He混合気や(1- δ_p)H₂- δ_p C₃H₈-Air-N₂/O₂混合気を対象に、格子を用いて曲率を与え各希釈ガスの分子拡散特性またはレイス数効果を能動的に作用させ【図3(a)参照】、その効果が火炎伝ば加速の抑制や消炎へ与える影響について検討した。その結果、例えば、図2(a)に対する格子通過後の火炎の加速特性を示すように、レイス数 Le を概ね1より小さくすると、消炎させることができること等を明らかにした。

これらの成果を基に、消炎に至らしめる希釈ガスや燃料の混合条件や火炎形状を制御する格子条件を明らかにでき、そして水素爆発防止技術を資となるデータを提供できた。



(a) 格子通過後の火炎

(b) 伝ば火炎の消炎特性値とレイス数 Le との関係
[H₂-AIR-CO₂-He, $\phi=0.7&1.4$, $S_{L0}=35, 50 \text{ \& } 70\text{cm/s}$]

図3 水素伝ば火炎の消炎特性に与える2成分希釈ガスの影響

4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

本事業により得られた成果は、既存の防火防災設備企業、水素や副生水素ならびにアンモニアを製造・貯蔵輸送・利用する化学プラントや石油精製等企業または水素ステーション、さらには原子力発電所を取り扱う電力・重工企業へ学会活動等をとおして周知することにより、提案する水素爆発防止技術の実用化が期待できる。また、本成果は、水素爆燃シミュレーションの精度向上に資するものであり、本成果を発展させ水素爆燃シミュレーションへの燃焼モデルの提供も期待できる。

さらに、本成果は水素利用社会および原子力発電利用への国民の安心・安全を担保することに貢献できるものと考ええる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

21世紀のエネルギーおよび地球・地域環境問題を考える時、エネルギー源として水素が最適であることは言うまでもない。そこで、熱工学、特に燃焼工学の観点から、水素エネルギーの高度有効利用燃焼機器および水素利用社会に潜在化する災害防止のために安全利用に必要な基礎学理および技術の確立を目的とし研究を行っている。

今回の事業は、軽視されがちな安全に関する研究に支援を頂いたもので、水素利用社会が第二の安全神話や村社会の原発に陥らない礎になるもので意義は大きいと考えます。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- (1) 吉田 毅, 堂尾 孝文, 中原 真也, 二成分希釈ガス添加水素予混合火炎の狭隘空間での伝ば特性に関する実験的研究, 2017 年度 日本機械学会 西日本エンジンシステム研究会 夏季セミナー, pp.P15-1~P15-4, 2017.
- (2) 堂尾 孝文, 中原 真也, 吉田 毅, 阿部 文明, 狭隘空間内での二成分希釈ガス水素火炎の伝ば特性に関する基礎研究, 第 55 回燃焼シンポジウム, pp.1-2, 2017.
- (3) 中原 真也, 植田 啓司, 黒川 恭丞, 工藤 寿悦, 阿部 文明, スワール流場での希薄水素-プロパン混合気の着火特性に関する基礎研究, 第 55 回日本伝熱シンポジウム, pp.1-5, 2018.
- (4) 尾熊 純一, 吉田 毅, 岩本 直起, 中原 真也, 狭隘空間における水素-プロパン予混合火炎の伝ば特性に関する実験的研究, 2018 年度 日本機械学会 西日本エンジンシステム研究会 夏季セミナー, pp.P6-1~P6-4, 2018.
- (5) 中原 真也, 工藤 寿悦, 木原 孝昌, 阿部文明, 超希薄水素-プロパン混合気の微小球状層流火炎の燃焼特性に与える希釈ガスの影響に関する研究, 熱工学コンファレンス, pp.1-5, 2018.
- (6) 吉田毅, 中原真也, 尾熊純一, 阿部文明, 狭隘空間における水素火炎伝ば特性に与えるプロパンの影響に関する実験的研究, 第 56 回燃焼シンポジウム, pp.1-2, 2018.
- (7) 黒川恭丞, 中原真也, 前田春樹, 阿部文明, スワール流中でのプロパン混合気の着火特性に及ぼす水素添加の影響に関する実験的研究, 第 56 回燃焼シンポジウム, pp.1-2, 2018.
- (8) Junichi Oguma, Tsuyoshi Yoshida, Masaya Nakahara, Fumiaki Abe and Kenichi

Tokunaga, “A Fundamental Study on Propagating Characteristics of Two-component Dilution Gas added Hydrogen Flames in a Narrow Space”, The 7th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology (JCREN 2018), pp.1-6, 2018.

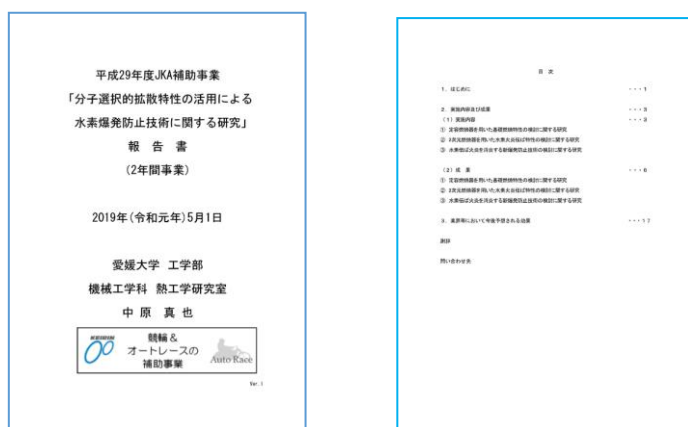
(9) Takamasa Kihara, Hisanobu Kudo, Masaya Nakahara, Fumiaki Abe and Kenichi Tokunaga, “Experimental Study on Burning Velocity Characteristics of Meso-scale Spherical Laminar Flames for Hydrogen-Propane Mixtures”, JCREN2018, pp.1-6, 2018.

(10) Haruki Maeda, Kyosuke Kurokawa, Masaya Nakahara, Fumiaki Abe, and Kenichi Tokunaga, “Experimental Study on Local Flame Displacement Velocity on Turbulent Burning Velocity for H₂-C₃H₈ Mixtures”, JCREN2018, pp.1-6, 2018.

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

平成29年度JKA補助事業「分子選択的拡散特性の活用による水素爆発防止技術に関する研究」報告書（2年間事業） (<https://www.me.ehime-u.ac.jp/labo/kikaiene/netu/JKAh2930.pdf>)



(2) (1) 以外で当事業において作成したもの
該当なし。

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 愛媛大学 工学部(エヒメダイガク コウガクブ)

住 所： 〒790-8577

愛媛県松山市文京町3番

担 当 者： 教授 中原 真也(ナカハラ マサヤ)

担 当 部 署： 機械工学コース 熱工学研究室

(キカイコウガクコース ネットコウガクケンキュウシツ)

E - m a i l : nakahara.masaya.mf@ehime-u.ac.jp

U R L : https://www.me.ehime-u.ac.jp/labo/kikaiene/netu/top_j.htm