

氏名	NYENYEP SRIWARDANI
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博甲第645号
学位授与年月日	平成26年11月12日
学位授与の要件	学位規則第4条1項
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程) システム設計工学系専攻
学位論文題目	SPRAY COMBUSTION WITH SMALL AMOUNT OF HYDROGEN
論文審査委員	主査 山口大学 教授 三上 真人 山口大学 教授 加藤 泰生 山口大学 教授 望月 信介 山口大学 准教授 田之上 健一郎 山口大学 准教授 瀬尾 健彦

## 【学位論文内容の要旨】

Spray combustion has been used very widely as engine energy, especially in the worldwide development of transportation, providing high performance of aircrafts and diesel engines. Oil-fired furnaces also employ spray combustion. In the hydrocarbon spray combustion, there is a problem on exhaust emission: large amount of NO<sub>x</sub> is exhausted if the combustion is enhanced, but CO and THC emissions are increased if NO<sub>x</sub> emission is reduced by some method. Hydrogen is one of the promising alternative fuels. Hydrogen has no carbon content, faster flame speed and smaller quenching distance, thus incorporating hydrogen should improve the combustion performance without deterioration of the exhaust emission characteristics. Since the heating value of hydrogen is about three times as large as that of diesel fuel, the addition of small amount of hydrogen also has a possibility to improve hydrocarbon fuel spray combustion.

In the present research, the experiments were carried out in three steps. The first step is to investigate basic characteristics of combustion and exhaust emission from spray combustion, the second step is to understand the influence of hydrogen addition method on the spray combustion, and the third step is to confirm the effect of hydrogen addition in the emulsion fuel.

The experimental apparatus employed a rich-premixed spray burner similar to the Bunsen burner used for gaseous fuels. The liquid fuel was atomized by the atomizing air through a twin-fluid atomizer which was placed below the exit of the burner. The fuel spray, atomizing air and supplementary air were mixed to generate a rich-premixed spray jet where was issued from the burner exit. The atomization condition was varied by an atomizing air flow rate. Supplementary air was supplied to keep the equivalence ratio of the spray jet constant at different atomization conditions. The equivalence ratio of spray jet was varied by the fuel flow rate. The ambient air was supplied to the outside of the flame to complete diffusion combustion. The spray flame was observed using a video camera. Exhaust gas components, CO, THC, NO and CO<sub>2</sub> were measured using a motor exhaust gas analyzer.

In the first experiment, basic characteristics of spray combustion and exhaust emission were investigated by n-decane as fuel. Data of the flame height, and exhaust gas emission were taken for different equivalence ratios of the spray jet and different atomization conditions. The result shows that the spray flame consist of the internal flame and the external flame. The height of internal flame increase with decreasing spray jet equivalence ratio, while the height of external flame decreases. When the portion of internal flame in the external flame is higher, i.e., at smaller spray-jet equivalence ratio, CO emission is higher at the same atomizing air flow rate if the combustion efficiency is high enough. Since the internal flame is a rich premixed flame,

much CO is produced at the internal flame. CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O are also produced at the internal flame. CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O act as dilution gases and slow CO oxidation reaction at the external flame, resulting in much CO emission. This is more significant when the portion of the internal flame in the external flame is greater. CO oxidation and NO production at the external flame are enhanced by the combustion enhancement at higher atomizing air flow rate and/or higher spray-jet equivalence ratio.

The second experiment was conducted with n-decane as a pure fuel and diesel fuel as a practical fuel to investigate the effect of hydrogen addition. As a preliminary test for hydrogen addition to rich-premixed spray-jet combustion, two hydrogen addition methods were compared using n-decane as a fuel; hydrogen addition to the spray jet and near the flame base. The method of hydrogen addition to the spray jet has a limitation in the amount of hydrogen. Beyond the threshold, the fire back occurs. The method of hydrogen addition near flame base allowed more hydrogen addition than to the spray jet method. Thus, the effect of hydrogen on rich-premixed spray-jet combustion was investigated with hydrogen addition near flame base. The internal flame disappears by H<sub>2</sub> addition in most cases. The heat generated by H<sub>2</sub> combustion also enhances vaporization of droplets passing through the external flame and leads to lower THC. The trends of emission index with diesel fuel as a practical fuel is similar to those with n-decane.

The third experiment was done to investigate combustion and emission characteristics with hydrogen added to emulsion fuel spray combustion. The water percentage of 5 vol% in W/O emulsion fuel was used. The content of water in the emulsion fuel leads to the lower combustion temperature, resulting in low NO emission but high CO and THC emissions decrease significantly, while NO emission is still less than that with diesel fuel. The dependencies of emission index with the emulsion fuel on hydrogen fraction are also similar to those with n-decane. By adding a small amount hydrogen, CO and THC emission decrease significantly, while NO emission is still less than that with diesel fuel.

## 【論文審査結果の要旨】

噴霧燃焼は自動車・航空機用エンジン、また、油焚き炉など液体燃料を用いる多くの燃焼器で用いられている。噴霧燃焼は燃焼状態によっては窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)、一酸化炭素(CO)、未燃炭化水素(THC)、スモークなどを排出するため、その有害排気物質の低減が求められている。本研究では噴霧燃焼のクリーン化を目指し、発熱量ベースで全燃料に対して少量の水素を噴霧流燃焼に添加した場合の影響について実験的に調べた。水素非添加時の噴霧火炎の内部火炎に伴うCO増大と外部火炎の希釈が水素添加により解消されること、また、水素添加による発熱により燃焼効率が向上することを明らかにした。本手法をCO、THC排出の多い乳化燃料噴霧流燃焼にも適用し、その効果の確認も行っている。

まず第1章において、噴霧燃焼は多くの燃焼器に広く用いられてきているが、有害排気物質の低減において課題があること、また、研究室レベルの噴霧流燃焼に関する基礎研究が少ないことを述べている。次に、燃料として炭素分を含まない水素を燃料として用いる利点を欠点を述べ、炭化水素燃料を用いた噴霧流燃焼への少量水素添加により、噴霧燃焼自体の欠点および水素利用時の欠点を改善できる可能性について、これまでの研究成果をもとに示している。ただし、炭化水素燃料を用いた噴霧流燃焼に対する水素添加効果を調べた基礎研究が行われていないと問題点を指摘し、本研究の意義について述べている。

第2章においては実験装置と実験方法について述べている。実験装置として、気体燃料を用いる際に用いられるブンゼンバーナを噴霧流燃焼に適用した過濃予混合噴霧流バーナを採用している。液体燃料はバーナ下部に設置された2流体噴射弁から微粒化用空気によって微粒化し、その燃料噴霧と微粒化用空気・補助空気を混合することで過濃予混合噴霧流を形成した。噴霧流の微粒化状態の制御は微粒化用空気流量の変更によって行った。噴霧流当量比は燃料流量の変更によって制御した。噴霧火炎はビデオカメラを用いて観察し、排気ガス成分であるCO、THC、NO、CO<sub>2</sub>は自動車排気ガス分析装置を用いて計測した。

第3章では、正デカン燃料として噴霧流燃焼およびその排気ガス成分について基本特性の調査を行い実験結果から噴霧流燃焼の火炎構造と排ガス特性について考察を行っている。実験の結果、噴霧火炎は内

部火炎と外部火炎とから成る二重火炎構造であり、噴霧流当量比が減少するにしたがって内部火炎の火炎長が徐々に増加すると同時に外部火炎長が大きく減少することを示した。また、排気ガス中の CO, THC, NO, CO<sub>2</sub> の各濃度の噴霧流当量比および微粒化空気流量への依存性を示している。CO の依存性について、内部火炎における CO 生成および希釈ガス生成、さらに希釈ガスによる外部火炎での CO 酸化抑制の観点から考察を行っている。THC の依存性については粗大液滴の火炎貫通の観点から、NO については火炎温度の観点、CO<sub>2</sub> については CO および THC の生成と酸化の観点から考察を行っている。

第4章においては、正デカンを純粋燃料、軽油を実用燃料として、それら噴霧流火炎への水素添加効果の調査を行っている。過濃予混合噴霧流燃焼への水素添加の予備実験として、正デカンを燃料として、噴霧流に直接水素を添加する方法と噴霧火炎基部に水素を添加する方法の2つの水素添加方法の比較を行っている。本予備実験により、噴霧流への直接の水素添加方法は逆火が生じる危険があるために、水素添加量の制限が存在することが分かった。噴霧火炎基部に水素を添加する方法では、前者の方法よりも多くの水素を添加できることが明らかになったため、以降の実験では後者の水素添加方法を用いて実験を行っている。まず、噴霧火炎に水素を添加したほとんどの条件において内部火炎が消失することを示した。そして、排気ガス成分濃度に及ぼす水素添加効果について、内部火炎の消失の観点と発熱量増大による火炎温度増大の観点とから考察を行っている。

第5章では、エマルジョン燃料を用いた噴霧流火炎に水素を添加した場合の燃焼・排気特性を調査し、水素添加効果の確認を行っている。まず、水素添加を行わない場合において、エマルジョン燃料内の水分により燃焼温度が低下し、結果として軽油と比較して NO 排出量が抑えられるが、CO および THC 排出量が著しく増加することを確認している。次に、水素添加効果を確認し、正デカン、軽油を用いた場合と基本的に同様であることを示した。少量の水素を添加することにより、CO および THC 排出量は著しく減少した。その一方、NO 排出量は軽油を用いた場合よりも少なくなってきたことを確認している。

第6章においては以上により得られた知見をまとめている。

審査会および公聴会では活発な質疑・応答がなされた。主な質問内容は、本研究成果の応用に関するもの、最適水素割合に関するもの、内部火炎と外部火炎の違いに関するもの、今後の研究の方向性に関するもの、などであった。いずれの質問に対しても発表者から丁寧で的確な回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。