

DME 火炎のすす生成特性と その輝炎化に関する実験的研究

学位論文内容の要旨

DME(ジメチルエーテル)は天然ガスや石炭等から合成される化学製品であり、燃焼時の排ガスがクリーンで取り扱いも容易なことから、次世代の燃料として注目されている。すでに中国では生産が本格化しつつあり、日本でも国内初の燃料用商業プラントが 08 年に稼働する予定である。

DME はボイラやガスタービン、ディーゼル機関、燃料電池など幅広い用途に適するが、専用機器の普及には時間がかかることから、当面はボイラや工業炉など、台数が多く、かつ 1 基当たりの燃料消費量が多い既存設備での利用が有力視されている。一方、これらの機器は伝熱に火炎からの輻射熱を利用するため、火炎の輝度が性能に大きく影響する。すなわち、従来の燃料に比べて極めて火炎輝度の低い DME に転換すると、当初の性能を維持できなくなる可能性が高い。従って、DME 火炎の輝炎化は、その普及を促す観点から、喫緊の課題であるといえる。

火炎の輝度向上には燃焼時にすすを生じさせる必要があるが、従来の DME 研究はすすの少なさを利点と捉えるものが大半で、DME 火炎で積極的にすすを発生させる研究はほとんど行われていない。あえて挙げれば、数値解析を通じてすす生成の可能性を示唆する報告は存在するものの、実際の DME 火炎において定量的にすすを捉え、その発生条件を明らかにした研究は見あたらない。

以上の状況を鑑み、本研究では、実験的な手法を通じて DME 火炎中にすすを生じさせるための基本条件を明らかにするとともに、その生成特性を調べ、実際のボイラ用バーナで輝炎化を実現するための工学的手法を見いだすことを目的とした。

検討の前提として、通常の条件では DME 火炎から十分なすすを生じさせること自体が難しいが、本研究では、高温雰囲気下で DME 火炎が輝炎化する現象に着目し、高温燃焼場でのすすの生成条件および生成特性の特定を行った。また、得られた生成条件に関する知見を基に、ボイラ用バーナにおける DME の輝炎化手法を検討し、バーナ先端の形状変更により周囲の流れに変化を与えることが、輝炎化および輻射伝熱量の向上に有効であることを示した。

本論文は全 5 章で構成されており、本研究の一連の成果をまとめたものである。

第 1 章では、DME の燃料としての特性およびこれまでの DME 製造および利用技術の進展を俯瞰するとともに、普及に向けての課題を考察した。さらに、現在のボイラにおける燃料の動向を踏まえて、本研究の目的、およびその意義について述べた。

第 2 章では、燃焼雰囲気を高温度化することにより、DME 火炎からのすす生成を試みた。通常の燃焼実験で雰囲気温度を変化させることは難しいが、高温空気実験装置を用いることで常温から 1000K レベルまで、任意の温度場を作り出すことができる。本章では、この装置を研究に導入することで、DME を高温雰囲気下で拡散燃焼させて、火炎輝度の変化を観察した。また、透過光減衰法によ

り、火炎中のすす濃度を測定し、雰囲気温度および酸素濃度がすす生成量に与える影響を調べた。その結果、高温雰囲気下では DME 火炎の輝度が高くなり、火炎中にすすを十分に生成しうることが示された。また、すす生成量は雰囲気温度が高いほど増加し、かつ特定の雰囲気酸素濃度で最大となることがわかった。比較として、同一条件におけるメタン噴流拡散火炎のすす生成量を調べたところ、そのすす生成量は DME 拡散火炎に比べ大きく、すす濃度がピークを取る雰囲気酸素条件は DME に比べ高酸素濃度側にシフトし、その生成特性は DME と異なることが示された。

第 3 章では、前章の結果を受けて、DME 火炎におけるすす生成量の少なさが、含酸素燃料ゆえに実質的な当量比が低いためのものか、あるいは酸素を含む分子構造自体に起因するものかという基本的な課題に対し、実験的なアプローチによる考察を行った。具体的には、高温空気燃焼場における DME 拡散火炎からのすす生成量と、燃料に酸素を部分予混合したメタン火炎のすす生成量を比較することによって、DME の分子中の酸素がすすの抑制にどのように関与しているかを検証した。その結果、DME 火炎のすす生成量は、当量比を DME と等価にしたメタン部分予混合火炎に比べて大幅に少なく、DME 火炎のすす抑制要因が、含まれる酸素による実質的な当量比の低下では説明できないことを明らかにした。さらに、DME の熱分解機構に関する過去の研究事例を参照しつつ、初期の熱分解経路に起因するすす抑制機構について考察した。

第 4 章では、これまでに得られた知見を基に、実際のボイラにおける DME の輝炎化を試みた。通常の工業用バーナで DME を輝炎化するのは極めて困難だが、DME を噴霧燃焼させた際に、気化潜熱でバーナ先端が冷却されると、ハイドレート状の物質が付着し、火炎が明るくなることがある。この現象に着想を得て、バーナ先端に円錐状の凹みを持つ部品を装着したところ、DME が輝炎化することが確認された。輝炎化の原因を明らかにするため、位相ドップラ式レーザ粒子分析計で噴霧挙動の変化を測定し、バーナ先端の形状変更が周辺の流れ場にどのような変化を与えているかを検証した。続いて、この流れ場の変化と前章までに得た DME 火炎のすす生成条件を考え合わせることで、輝炎化のメカニズムについて検討を加えた。さらに、この燃焼手法を実際のボイラに適用し、輝炎化による輻射伝熱量の向上を検証するとともに、より実用的な燃焼性が得られるよう構造に改良を加え、その効果を確認した。

最終章(第 5 章)は結論であり、本研究で得られた知見の総括を行うとともに、今後の DME 利用に向けた本研究の役割について述べた。

本研究では、スートフリー燃料と考えられてきた DME からすす生成が可能であることを実験的に確認するとともに、含酸素燃料である DME のすす生成特性を明らかにした。さらに、これらの知見をボイラ用バーナに適用することによって、DME の輝炎燃焼が実現し、輻射伝熱の改善を図ることができた。

これらの研究成果は、DME の燃焼利用に対して一定の知見を与えるものであり、学術的のみならず工業的にも、一つの指針となると考えられる。

以上

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 田 修
副 査 教 授 小 川 英 之
副 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 教 授 近 久 武 美

学 位 論 文 題 名

DME 火炎のすす生成特性と その輝炎化に関する実験的研究

DME(ジメチルエーテル)はボイラやガスタービン、ディーゼル機関、燃料電池など幅広い用途に適するが、専用機器の普及には時間がかかることから、当面はボイラや工業炉など、台数が多く、かつ1基当たりの燃料消費量が多い既存設備での利用が有力視されている。一方、これらの機器は伝熱に火炎からの輻射熱を利用するため、火炎の輝度が性能に大きく影響する。すなわち、従来の燃料に比べて極めて火炎輝度の低いDMEに転換すると、当初の性能を維持できなくなる可能性が高い。従って、DME火炎の輝炎化は、その普及を促す観点から、喫緊の課題である。

火炎の輝度向上には燃焼時にすすを生じさせる必要があるが、従来のDME研究はすすの少なさを利点と捉えるものが大半で、DME火炎で積極的にすすを発生させる研究はほとんど行われていない。そこで本研究では、実験的な手法を通じてDME火炎中にすすを生じさせるための基本条件を明らかにするとともに、その生成特性を調べ、実際のボイラ用バーナで輝炎化を実現するための工学的手法を見いだすことを目的としている。

本論文は全5章で構成されており、本研究の一連の成果をまとめたものである。

第1章では、DMEの燃料としての特性およびこれまでのDME製造および利用技術の進展を俯瞰するとともに、普及に向けての課題を考察した。さらに、現在のボイラにおける燃料の動向を踏まえて、本研究の目的、およびその意義について述べている。

第2章では、燃焼雰囲気を高温度化することにより、DME火炎からのすす生成を試みた。通常の燃焼実験で雰囲気温度を変化させることは難しいが、高温空気実験装置を用いることで常温から1000Kレベルまで、任意の温度場を作り出すことができる。本章では、この装置を研究に導入することで、DMEを高温雰囲気下で拡散燃焼させて、火炎輝度の変化を観察した。また、透過光減衰法により、火炎中のすす濃度を測定し、雰囲気温度および酸素濃度がすす生成量に与える影響を調べた。その結果、高温雰囲気下ではDME火炎の輝度が高くなり、火炎中にすすを十分に生成しうることが示された。また、すす生成量は雰囲気温度が高いほど増加し、かつ特定の雰囲気酸素濃度で最大となることを実験的に初めて示した。

第3章では、前章の結果を受けて、DME火炎におけるすす生成量の少なさが、含酸素燃料ゆえに実質

的な当量比が低いためのものか、あるいは酸素を含む分子構造自体に起因するののかという基本的な課題に取り組んでいる。具体的には、高温空気燃焼場における DME 拡散火炎からのすす生成量と、燃料に酸素を部分予混合したメタン火炎のすす生成量を比較することによって、DME の分子中の酸素がすすの抑制にどのように関与しているかを検証した。その結果、DME 火炎のすす生成量は、当量比を DME と等価にしたメタン部分予混合火炎に比べて大幅に少なく、DME 火炎のすす抑制要因が、含まれる酸素による実質的な当量比の低下では説明できないことを明らかにした。さらに、DME の熱分解機構に関する過去の研究事例を参照しつつ、初期の熱分解経路に起因するすす抑制機構について述べている。

第 4 章では、これまでに得られた知見を基に、実際のボイラにおける DME の輝炎化を試みた。通常の工業用バーナで DME を輝炎化するのは極めて困難だが、DME を噴霧燃焼させた際に、気化潜熱でバーナ先端が冷却されると、ハイドレート状の物質が付着し、火炎が明るくなることがある。この現象に着想を得て、バーナ先端に円錐状の凹みを持つ部品を装着したところ、DME が輝炎化することが確認された。輝炎化の原因を明らかにするため、位相ドップラ式レーザ粒子分析計で噴霧挙動の変化を測定し、バーナ先端の形状変更が周辺の流れ場にどのような変化を与えているかを検証した。続いて、この流れ場の変化と前章までに得た DME 火炎のすす生成条件を考え合わせることで、輝炎化のメカニズムについて検討を加えた。さらに、この燃焼手法を実際のボイラに適用し、輝炎化による輻射伝熱量の向上を検証するとともに、より実用的な燃焼性が得られるよう構造に改良を加え、その効果を確認した。

最終章(第 5 章)は結論であり、本研究で得られた知見の総括を行うとともに、今後の DME 利用に向けた本研究の役割について述べた。

これを要するに、著者は、スートフリー燃料と考えられてきた DME からすす生成が可能であることおよびその生成条件を実験的に初めて示すとともに、この知見をボイラ用バーナに適用することによって DME の輝炎燃焼を実機において実現させ輻射伝熱の改善に成功しており、その成果は、エネルギー工学、燃焼工学の発展に貢献すること大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。