

| | |
|------------|-----------------------------------------------------------|
| | かまたはるゆき |
| 氏名 | 鎌田美志 |
| 授与学位 | 博士(工学) |
| 学位授与年月日 | 平成23年3月25日 |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第4条第1項 |
| 研究科, 専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科(博士課程)化学工学専攻 |
| 学位論文題目 | 低品位液体燃料を対象とした噴霧燃焼シミュレーションに関する研究 |
| 指導教員 | 東北大学教授 三浦 隆利 |
| 論文審査委員 | 主査 東北大学教授 三浦 隆利 東北大学教授 猪股 宏 東北大学教授 塚田 隆夫 東北大学准教授 青木 秀之 |

論文内容要旨

第1章 緒論

近年、発熱量が小さい、または高粘度であるため微粒化性能が悪化するなどの性状を示す劣質な液体燃料を使用する頻度が増大している。とくに、廃食用油からバイオディーゼル燃料を製造する工程において副生される廃グリセリンは取扱いが最も困難な燃料のひとつである。本論文では、低品位液体燃料の使用促進に有用となる噴霧燃焼シミュレーションの開発を目的とし、液滴相の計算に広く用いられている Lagrange 法について新たな解析手法の導入を図った。従来の噴霧燃焼シミュレーションは灯油など一般的な燃料を対象とし、ガス燃焼に類似した均質燃焼を想定している。しかしながら、蒸発速度の小さい液体燃料の燃焼特性は不均質燃焼が支配的となるため、従来の手法では現象を再現することが困難である。本論文では、不均質燃焼を表現可能とする新たな解析手法を提案し、低品位液体燃料を対象とした噴霧燃焼シミュレーションへの適用を図った。

第2章 噴霧燃焼シミュレーションに用いる蒸発速度推算手法の検討

噴霧燃焼では液滴が燃料の供給源となるため、噴霧燃焼シミュレーションでは蒸発速度の推算手法が重要である。そこで、本章では蒸発速度の推算手法の精度を検討する。蒸発モデルとして広く用いられている Abramson and Sirignano のモデル(以下 A-S モデル)や Langmuir-Knudsen モデル(以下 L-K モデル)について、単一滴の蒸発実験および乱流非燃焼場における噴霧の蒸発実験を対象に解析を行った。その結果、A-S モデルでは液滴のふく射吸収が大きい場合実験値との差異が大きくなる場合があり、L-K モデルは A-S モデルよりも計算負荷が小さいため、噴霧燃焼シミュレーションにおいては L-K モデルを使用することが望ましいことを示した。

液滴のふく射吸収についての精度向上を目的に、ふく射伝熱モデルの検証を行った。対象としたふく射モデルには、燃焼シミュレーションに多用されなかつ光学厚さが薄い系においても十分な精度を有している Discrete

Ordinates Method(DOM)と Discrete Transfer Method(DTM)の2つを選択した。ふく射平衡の系を対象に解析を行った結果、壁面への入射熱流束に関しては、DTMはDOMよりもさらに高い精度を示す結果であった。しかしながら、液滴のふく射吸収を計算するために必要な各空間における入射熱流束の見積もりに関して、DTMはDOMよりも精度が劣る場合があった。したがって、噴霧

燃焼シミュレーションにはDOMを使用することが望ましいことを示した。
 噴霧燃焼シミュレーションにおける蒸発モデルおよび液滴のふく射吸収の効果を検討するために、重油の噴霧燃焼実験[1]を対象に解析を行った。Fig. 1 に軸方向に対する蒸発速度の推移を示す。

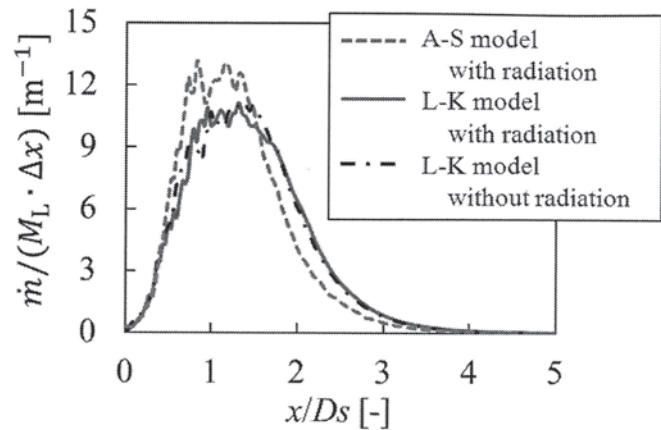


Fig. 1 Axial distributions of evaporation rate

A-S モデルはL-K モデルよりも蒸発速度を大きく予測し、液滴のふく射吸収の有無に関わらず同じ値を示している。液滴一個の経時変化についての計算結果を検討した結果、蒸発が物質拡散の律速となる系においては、液滴のふく射吸収が蒸発速度に与える影響は小さく、蒸発速度に対しては対流伝熱が支配的となることを示した。Fig. 2 に $x/D_s = 2.21$ での半径方向に対する気相のガス温度分布を示す。実験値と比較し、モデルによる有意な差異は確認されなかった。このため、計算負荷のより小さいL-Kモデルを噴霧燃焼シミュレーションに用いることが望ましいことを示した。

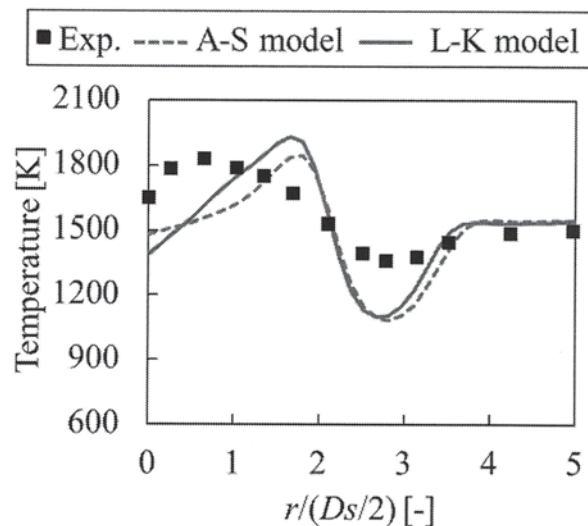


Fig. 2 Radial distributions of gas temperature at $x/D_s = 2.21$

第3章 単一滴蒸発および燃焼を考慮した新規モデルの噴霧燃焼シミュレーションへの適用

低揮発性燃料の噴霧燃焼では、噴霧直後に不均質燃焼である単一滴燃焼が発生し、単一滴燃焼の火炎が結合することにより均質燃焼である群火炎が出現すると報告されている[2]。しかしながら、従来の噴霧燃焼シミュレーションでは、不均質燃焼を表現することが難しい。そこで、液滴相の計算において、液滴の状態を単一滴燃焼の状態を示す燃焼モードと均質燃焼または蒸発の状態を示す蒸発モードに区分する新たな手法を提案した。蒸発モードである液滴の蒸発速度を計算する手法は従来の計算と同一であるが、燃焼モードでは単一滴燃焼の状態を考慮した蒸発速度を計算する。本研究では、計算負荷を低減するために単一滴燃焼を対象とした解析を行い、データベースを作成した。Fig. 3 にフローチャートを示す。破線はデータの流れを示す。

この新しいモデルを用いて、第2章において解析した重油の噴霧燃焼実験を対象に再度解析を行った。Fig. 4に $x/D_s = 2.21$ での半径方向に対する(a)燃料蒸気濃度と(b)ガス温度の分布を示す。Case1は今回考案したモデルによる結果であり、Case2は第2章でのL-Kモデルによる従来の手法である。Case1、Case2ともに、燃料蒸気の燃焼反応速度は、化学反応速度と渦消散モデルから評価した値のより小さいほうに依存するとした。Case3では液相の計算をCase2と同一としたが、燃焼反応速度を渦消散モデルのみで与えることにより、Case2よりも燃焼反応が促進される計算条件とした。燃料蒸気濃度では、Case1と3は実験値と概ね一致を示したが、Case2では燃焼反応速度を過小に評価した結果であった。Fig. 5(b)気相のガス温度分布を見ると、Case1と2は概ね実験の傾向を再現しているが、Case3では火炎が半径方向に拡大した結果である。以上のことから、新しいモデルを導入することにより解析精度の向上が示唆された。

Case1において、燃焼モードによる蒸発量は燃料供給量に対して5%程度であったが、そのほとんどが $x/D_s \leq 0.27$ の領域におけるものであった。不均質燃焼と均質燃焼を区分したことにより、噴霧上流部における蒸発速度およびガス温度の予測に大きく影響を与えることが示された。

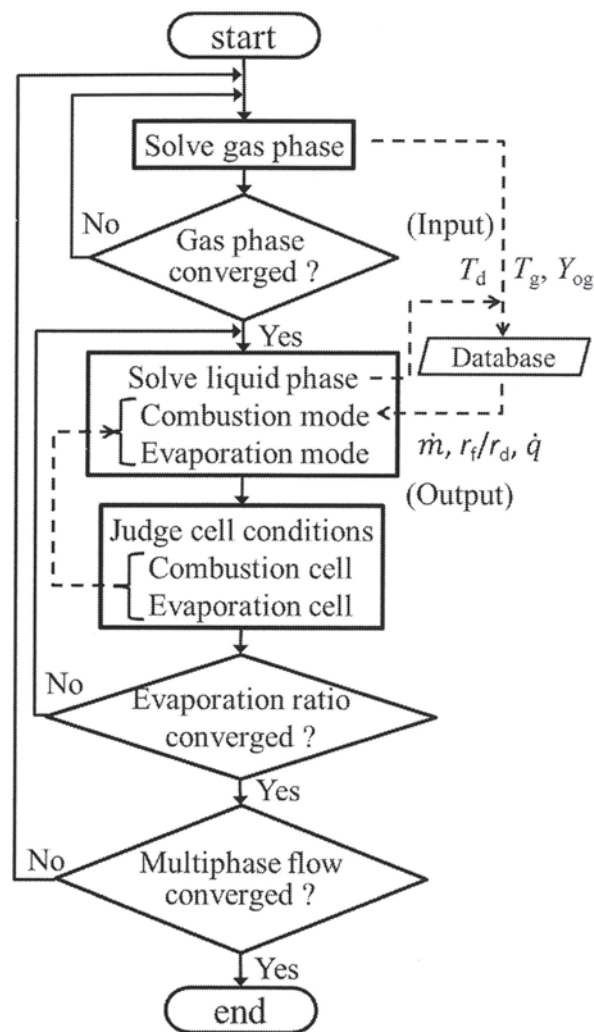


Fig. 3 Flow chart of new concept

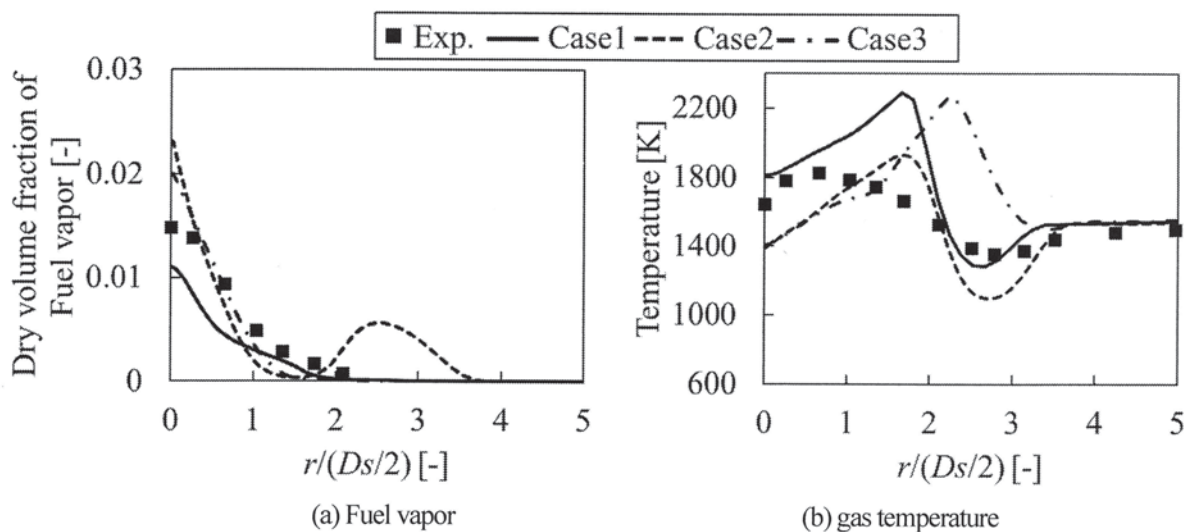


Fig. 4 Radial distributions of fuel vapor concentration and gas temperature at $x/D_s = 2.21$

第4章 グリセリン燃焼における実験および数値解析的検討

グリセリンを完全燃焼する適切な微粒化条件の把握を目的に、二流体噴射弁を用いて噴霧燃焼実験を行った。燃料の温度を制御することにより粘度を調整し、微粒化空気量を制御することにより噴霧の運動量と SMD(Sauter mean diameter)を調整し、SMD = 56, 65, 80 μm の3条件について実験した。燃焼状態が良好であると判断する指針として燃焼炉出口における排ガスの CO 濃度が 100ppm 以下とした場合、本実験条件においては、微粒化条件として SMD を 70 μm 以下にすることが必要であることを明らかにした。また、グリセリンの噴霧燃焼実験を対象に、第3章で提案した新しい手法によるシミュレーションを行った。Fig. 5 にガス温度分布の計算結果を示す。Conventional concept は従来の手法による解析であり、New concept は本研究で提案した新しい手法を用いた解析である。燃焼炉上流部における蒸発速度の推算が温度分布の結果に支配的であった。これは、グリセリンの蒸発潜熱と液滴の初期運動量が大きかったためである。Fig. 6 に軸方向に対する蒸発速度の推移を示す。不均質燃焼と均質燃焼を区分したことにより噴霧上流部における液滴の蒸発速度が増大し、実験結果との比較から提案した新規モデルの有用性が確認された。また、グリセリン燃焼の挙動を定量的に把握するためには、従来の反応速度に関する取扱いでは不十分であることが示された。

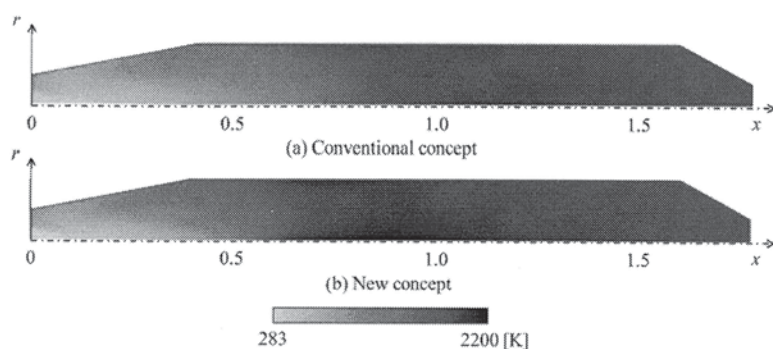


Fig. 5 Predicted distributions of gas temperature

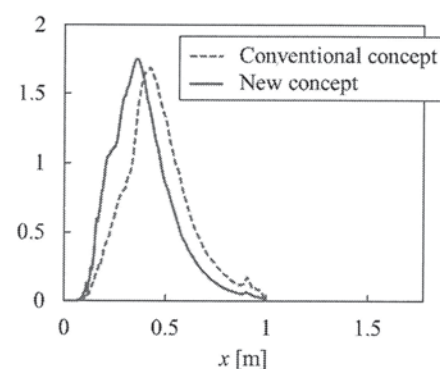


Fig. 6 Axial distributions of evaporation rate

第5章 結論

噴霧燃焼シミュレーションにおいて、不均質燃焼と均質燃焼を区分する新たな手法を提案した。本解析手法を適用することにより結果が大きく変化し、精度の向上が示唆された。また、本研究により低品位液体燃料の利用を促進するための知見を得た。

【記号】 D_s : diameter of secondary air tube (= 0.056) [m], \dot{m} : evaporation rate [kg s^{-1}], M : mass flow rate [kg s^{-1}], \dot{q} : heat transferred into the droplet [W], r : radius [m], T : temperature [K], x, r : cylindrical coordinate, Δx : cell width [m], Y_{O} : mass fraction of oxygen [-], Subscript d: droplet, f: flame, g: gas, L: liquid

【参考文献】 [1] M. Costa, *et al.*, *Comb. Sci. Tech.*, **75**, 129-154 (1991) [2] 三上ら, 日本燃焼学会誌, **50**, 242-247 (2008)

論文審査結果の要旨

最近、発熱量が低いあるいは高粘度で微粒化性能が悪いなどの劣質な液体燃料が使用される頻度が增大している。特に BDF 製造時に副生するグリセリンなどはその典型的な例である。本論文では特殊な液体燃料の噴霧燃焼では、灯油など従来から燃焼特性や物性が既知の燃料と異なり、微粒化特性や蒸発速度などが灯油や重油と大きく異なることからシミュレーションも従来通りに行うことは困難であるため、単一滴での蒸発・燃焼特性に関する実験が必要であり、それらを基に、噴霧燃焼シミュレーションを迅速に行える手法を検討した。

本論文では、低品位液体燃料に適用可能な噴霧燃焼シミュレーションの開発を目的とし、灯油など蒸発速度が大きくガス燃料の燃焼に近いいわゆる均質相として扱える燃焼と、蒸発速度や液滴数密度が小さく不均質相の燃焼の二つに区分し、液滴の蒸発速度や火炎半径などをデータベース化し、このデータベースと均質・不均質燃焼の区分を噴霧燃焼シミュレーションへの適用を図った。

第 2 章では、燃料液滴の蒸発速度を推算する精度が重要であるため、噴霧燃焼シミュレーションに多用されている蒸発モデルとして、Abramzon and Sirignano のモデルと Langmuir-Knudsen モデルについて比較・検討した。重油の噴霧燃焼を対象としたシミュレーションを行い、両モデルによるガス温度の解析結果に有意な差異はないが、計算負荷の小さい点で Langmuir-Knudsen モデルに優位性があることを示した。また、シミュレーションにおける液滴のふく射吸収の効果について検討した結果、蒸発が物質拡散の律速となる系においては、液滴のふく射吸収が蒸発速度に与える影響は小さく、蒸発速度に対しては対流伝熱が支配的となることを明らかにした。

第 3 章では、不均質燃焼を呈する噴霧燃焼に適用するために、均質相と不均質相とに区分し、さらに蒸発速度などをデータベース化し、シミュレーションするという新しい手法を提案した。これにより噴霧燃焼シミュレーションでの計算負荷を低減し、Lagrange 法において燃焼モードと呼ぶ液滴の状態を設定することにより液滴数密度の小さい燃焼と群燃焼とを区分した。数密度の少ない領域を形成する燃焼場において不均一相を考慮する手法は世界初である。またこれらの手法を重油の噴霧燃焼を対象としたシミュレーションに適用し、従来の計算による結果と比較した。新しい解析手法による結果は、従来の均質相のみとした計算結果よりも実験の傾向に近い結果を再現したため、新しい解析手法の有用性が明らかとなった。また液滴数密度の小さい領域と均質相の燃焼とを区分することで、液滴が存在する領域においてはガス温度の解析結果が大きく変化することが示された。

第 4 章では、グリセリンの噴霧燃焼実験とシミュレーションを試みた。二流体式アトマイザーを用いた実験により、この実験条件における完全燃焼に必要な微粒化条件は、 $70\mu\text{m}$ 以下であったことを明らかにした。グリセリンの噴霧燃焼シミュレーションを行い、第 3 章で提案したデータベースと不均質相と均質相の区分等の新しい解析手法が有用であるなど噴霧燃焼シミュレーション手法に新たな知見を与えたものであり、化学工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。