九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

# エンジン内燃料ガス噴流の空気導入と拡散燃焼の可視化計測及び数値予測に関する研究

石橋，亮佑

https://hdl.handle.net/2324/1959156

出版情報：Kyushu University, 2018, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

（様式３）Form 3

氏　　名　：　石橋　亮佑

論 文 名　：　エンジン内燃料ガス噴流の空気導入と拡散燃焼の可視化計測及び数値予測に関する研究

区　　分　：　甲

# 論 文 内 容 の 要 旨

船舶の主推進機関として，舶用残さ油を燃料とする低速ディーゼル機関が長らく独占的な地位を占めてきたが，燃料の残さ分に由来する硫黄酸化物の排出や，高い燃焼温度に由来する窒素酸化物の排出は克服が困難であり，近年では水素含有率が最大で，硫黄分を含有しない清浄燃料である液化天然ガスで舶用残さ油を代替する試みが本格化している．その内，高圧燃料ガスを筒内に直接噴射するガス直噴機関は，ガス噴流の拡散燃焼を利用する点で，従来の低速ディーゼル機関と互換性が高く，希薄予混合燃焼で問題となる未燃メタンの排出が微少であることから，代替策として有望である．しかしながら，熱量基準の噴射率を揃えて，ディーゼル噴霧をガス噴流に置換しただけでは，後燃えの増大や熱効率の低下を招くことが報告されており，燃焼促進手法の開発が望まれている．本論文は，ガス噴流の空気導入過程が明らかになっておらず，ガス噴流の数値予測手法が確立していないことが問題の本質であるとの観点から，シャドウグラフ撮影による噴流の先端到達距離の測定，時系列 PIV を用いた空気導入量の定量計測，それらの知見を反映したガス噴流モデルの構築を行い，最終的にガス直噴機関の燃焼の数値予測手法を確立することを目的としたものである．

第１章は，舶用ディーゼル機関における技術開発や近年の排出物規制の進展と動向から起稿し，液化天然ガスを燃料とする大型低速エンジンの開発が急務であること，燃料液滴の分裂を通じた気液２相流での空気導入が生じるディーゼル噴霧と異なり，ガス単相での空気導入過程に関する計測法および数値予測法が未確立であることがガス直噴エンジンの低公害化と高効率化を阻害していることを詳らかにして，本研究の位置付けと目的，および社会的，学術的な意義を明らかにしている．

第 2 章では，ガス直噴機関の筒内条件を再現可能で，燃焼室全体を可視化範囲とする急速圧縮膨張装置(RCEM)の構成や特徴を紹介し，噴流の形状や先端到達距離を取得するためのシャドウグラフ撮影装置と高圧ガス噴流の空気導入量の定量測定するための時系列 PIV 装置の構成，および両者の同時適用を実現するために構築した，大型ハーフミラーを有する光学系について詳述している．さらに，次章で詳述しているが，ディーゼル噴霧の液滴分列モデルの妥当性を真に検証するには，通常行われるような噴射圧の変更ではなく，噴霧周囲の空気流速によって噴霧のウェーバー数を変更する方策が有効であり，その実現手段として世界的にも類例のない高圧回流風洞の利用を提案し，そのために必要となる詳細設計をついて説明している．

第３章では，噴流モデルを展開する CFD の基盤となる KIVA 3V の計算モジュールの構成や数値解法の概略に言及し，特に既往のディーゼル噴霧に関わるサブモデル群の枠組みを踏襲しつつ，到達距離と空気導入量を独立して制御でき，高圧ガス噴流への適用が容易なガスパーセルモデルの有用性を明らかにするとともに，その噴流への適用にはディーゼル噴霧における液滴分裂モデルに遡って妥当性を検証することが不可欠であるこ

と，そのためには基本に立ち返り，液滴噴霧の KH-RT 分裂モデルのスイッチング時期などを適正化することが必要であることを詳細かつ客観的に説明している．

第 4 章の前半では，ピストンと燃焼室を切り離すことで RCEM を定容容器に転用し，高圧雰囲気中にメタンガスを高圧噴射して，その噴流の発達過程をシャドウグラフ撮影した結果から，燃焼室中の燃料配置と空気利用に直接的に影響する重要な因子である，噴流の先端到達距離の時間的変化を計測した結果を紹介している．通常，ガス噴流の計測ではチョーキングによる噴出速度の飽和とノズル孔直後の不足膨張流の挙動が主たる興味の対象となるため，噴射圧と雰囲気圧の比を 10 倍程度に取ることが多いが，直噴ガス機関では 3 倍程度に留まることから，本論文では圧力比はあえて現実的な値に留め，同じ圧力比で圧力の絶対値が異なる組み合わせなどの工学的により価値の高いと思われる実験条件での計測を行っている．計測の結果，噴射率が等しい場合，ガス噴流の先端到達距離は液滴噴霧とほぼ同等であること，液滴噴霧と同様にガス噴流の到達距離も，噴射直後からの時間比例区間(所謂，ブレークアップ距離)と噴流発達後の時間平方根に比例区間に大別されること，その理由として噴流の空気導入が活性化するまではショックトレインのような不足膨張流の存在が考えられることなど，多くの貴重な知見を示すとともに，ガスパーセルモデルが高圧ガス噴流の数値予測に有効である確証を得ている．後半では，噴霧モデルが与えるブレークアップ距離の妥当性を検証するため，高圧回流風洞を用いて雰囲気の主流速に基づいて噴霧ウェーバー数を変更するという世界初の計測を試み，経験的な定数として与えられていたブレークアップ距離が噴霧ウェーバー数の関数である確証を得ることに成功している．

第 5 章では，高周波数の繰返し発振が可能な大出力パルスレーザーを中核とする時系列 PIV システムとシャドウグラフ光学系を組み合わせて，噴流の境界線と噴流周囲の 2 次元速度場の同時計測を実現し，噴流と雰囲気との境界線と，PIV で取得された境界線上下の速度場に基づいて，高圧ガス噴流の空気導入過程に関して詳細な検討を行っている．本章での計測を通じ，噴流と雰囲気の境界面に生起したせん断渦が噴流の進行とともに成長して噴流下流に向かうこと，渦尺度の拡大に従って噴流中心部に達するような大規模で強い空気導入が生じていることなど，ディーゼル噴霧との定性的相違はあるものの，円錐近似の噴流体積から推測した空気導入量はほぼ同等と考えられることなどを指摘している．

第 6 章では，前章までに得られた知見を反映したガスパーセルモデルを組み込んだ KIVA 3V による直噴ガスエンジン内に燃焼現象の数値予測の有効性について検証している．先ず，直噴ガスエンジンで常用されるパイロット噴霧による高圧ガス噴流の強制着火に関して，その着火及び火炎成長過程を RCEM により詳細に観察し，グロープラグのような熱面着火との比較等を通じて，気液二種の燃料が混在する複雑な着火・燃焼現象の本質を明らかにしている．その上で，可視化計測を優先したために間隙容積が直方体状になるなど燃焼室形状に妥協が生じていた RCEM の欠点を改善すること目的に，新たに単純円筒状の間隙容積とシャドウグラフ撮影を両立するシリンダヘッドを製作し，より実機に近い環境での燃焼再現を実現している．最後に，ディーゼル噴霧と高圧ガス噴流の双方の観察結果に立脚した修正を加えたガスパーセルモデルを導入した KIVA 3V による数値予測の結果を紹介し，直噴ガスエンジン内の燃焼現象が良好な精度で再現できる予測手法が確立できたことに言及している．

第 7 章では，本論文で得られた多岐に渡る計測と数値予測の結果を総括し，それらの学術的・工学的な貢献に言及している．