

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05795

研究課題名(和文) 超高压ディーゼル噴霧現象の高精度数値研究

研究課題名(英文) Accurate Numerical Study on Ultra-high-pressure Diesel Spray Phenomena

研究代表者

住 隆博 (Sumi, Takahiro)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30358668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：将来における自動車用ディーゼルインジェクターの超高压燃料噴射現象に関する定性的な知見を得るために、熱力学的な相転移モデルを用いた圧縮性気液二相流解法を新たに開発し、二次元微細単噴孔ノズルからの液体燃料噴射の非定常数値シミュレーションを実施した。実運転に近い条件において、計算結果は、噴流の不安定性、燃料ジェット先端における離脱衝撃波の形成、および噴孔内部におけるキャビテーション気泡の発生による噴霧の促進を再現した。さらに、これらの現象に対する噴射圧力と背圧の影響を詳細に確認することができた。本研究成果は、将来の自動車用ディーゼルインジェクターの開発に有用であると期待される。

研究成果の概要(英文)：To obtain qualitative knowledge about ultra-high-pressure fuel injection phenomena in future automotive diesel injectors, a compressible gas-liquid two-phase flow solver with thermodynamic phase transition model was newly developed, and unsteady numerical simulations of the liquid fuel injection from a two-dimensional nozzle with single micro hole were performed. Under conditions close to real operation, numerical results reproduced promotion of atomization due to jet instability, formation of a detached shock wave at the tip of the fuel jet and generation of cavitation bubbles inside the hole. Moreover, effects of the injection pressure and the back pressure on these phenomena were confirmed in detail. The results of the present study are expected to be useful for the development of the future automotive diesel injectors.

研究分野：数値流体力学

キーワード：ディーゼル噴霧 気液二相流 圧縮性 数値流体力学 拡散界面モデル シャープ界面モデル

1. 研究開始当初の背景

熱効率 50%および二酸化炭素排出量 30%低減を目指す将来型自動車用ディーゼルエンジンの燃料噴射システムでは、燃料の噴射圧力が超高压 (300 MPa 以上)、かつノズル噴孔径が微細 (0.1 mm 以下) となることが想定されている。そのため、実機大の可視化モデルの製作、およびそれを用いたノズル噴孔内流動や噴霧微粒化過程の直接観察が非常に困難であり、現象についての学術的な考察や理解が進んでいない。

この測定困難な現象の詳細を把握するには数値シミュレーションを用いることが有効と考えられるが、本現象に関しては、①超高压化による気液相の圧縮性効果、②ノズル噴孔内でのキャビテーション気泡の形成、③微粒化された燃料噴霧の微細挙動、等に留意する必要がある。特に、これまで非圧縮性流体として取り扱われることの多かった燃料噴射現象に対して、①の効果がどの程度影響があるのかについては、ほとんど未解明と言ってよい。そもそも圧縮性を考慮した気液二相流の数値計算技術は世界的に見ても未だ発展途上にあり、殊に液体燃料の超高压噴射に焦点を当てたものは極めて稀である。

2. 研究の目的

本研究では、圧縮性効果、粘性効果、表面張力効果、キャビテーション効果を含んだ気液二相流の高精度数値解析技術を開発し、噴射システム全体 (蓄圧部、ノズル部、チャンバ部) を対象に、液体燃料の超高压噴射時におけるノズル噴孔内流動および噴霧微粒化過程の現象解明を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

圧縮性気液二相流の数値解法は、気液界面の取り扱いに関して、熱力学モデルの構築を必要とする「拡散界面モデル」と幾何学的な追跡を必要とする「シャープ界面モデル」に大別され、それぞれ界面捕捉性や質量保存性について一長一短があることが知られている。そこで、研究代表者 (住) が拡散界面モデルを、研究分担者 (黒滝) がシャープ界面モデルを担当して、液体燃料の超高压噴射を念頭に、二つのアプローチから計算技術の研究とコード開発を行った。

4. 研究成果

4. 1 拡散界面モデルによる研究成果

圧縮性の気液二相流を記述するために、拡散界面モデルのひとつである 6 方程式モデルを採用した。本モデルは、二相間の熱力学的緩和過程 (力学的緩和、熱的緩和、化学的緩和) を導入できる拡張性に優れており、キャビテーションに代表される熱と質量移動を伴う相転移問題に有効であることが知られている。本研究課題で取り扱う空気中への超高压燃料噴射の計算モデルでは、燃料中のキャビテーション気泡の生成を想定しており、燃料

(液相) とその蒸気相、および不溶性空気の二相三成分について上記すべての緩和過程を考慮する必要があるため、従来提案されている二相二成分系の 6 方程式モデルを二相三成分系へ拡張した。

移流項の離散化には、数値的に堅牢な差分法ベースの 5 次精度非線形コンパクトスキームを用いた。数値流束は、界面や接触不連続面の解像に優れる HLLC スキームにより評価した。拡散項の離散化には 6 次精度中心差分スキームを用いた。さらに、時間項の離散化は 3 次精度 TVD-RK 法により陽的に行った。

図 1 に計算モデルを示す。本計算モデルは二次元であり、高压チャンバと低压チャンバを単噴孔ノズルで連結した単純形状とした。ノズルは噴孔幅 0.1 mm、噴孔長 0.8 mm の矩形であり、高压チャンバ側の噴孔入口に仮想的に開放弁を設けた。計算領域については、圧力波の遠方境界面での反射を抑えるために十分に広く設定し、噴孔径を基準として、高压チャンバについては x 方向に約 50 倍および y 方向に約 175 倍とし、低压チャンバについては同じく約 150 倍および約 175 倍とした。また、計算格子については、噴孔内に格子幅 2.5×10^{-3} mm の等間隔格子を配置し、各チャンバ内については、これを最小格子幅として遠方境界方向に向かって滑らかに広げ、領域内の総格子点数を約 65 万点とした。

表 1 に計算条件を示す。ここでは噴孔内におけるキャビテーション気泡の生成や燃料ジェット先端における離脱衝撃波の形成に関して検討を行うために、高压チャンバ内における液体燃料の圧力と密度を変更し計 3 ケースの計算を行った。なお、低压チャンバ内における空気の圧力と密度は一定としており、それぞれ 4.0 MPa および 30.4 kg/m^3 とした。なお、噴射時のノズル噴孔出口中心部におけるレイノルズ数は噴射条件により若干異なるが、ノズル噴孔径を代表長とした場合、およそ 10^5 のオーダーである。

図 2 および図 3 に流れ場全体の密度と数値シュリーレン画像を示す。詳細は省略するが、開放弁から射出された燃料は液柱となって噴

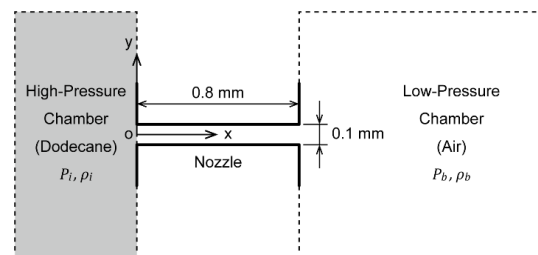


図 1 単噴孔噴射モデル

表 1 計算条件

Case	P_i [MPa]	ρ_i [kg/m ³]
H1	100	8.12×10^2
H2	200	9.75×10^2
H3	300	1.14×10^3

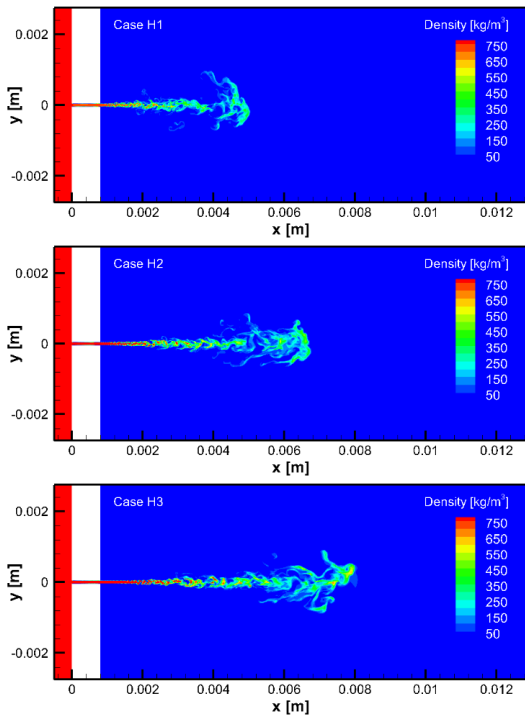


図2 密度分布

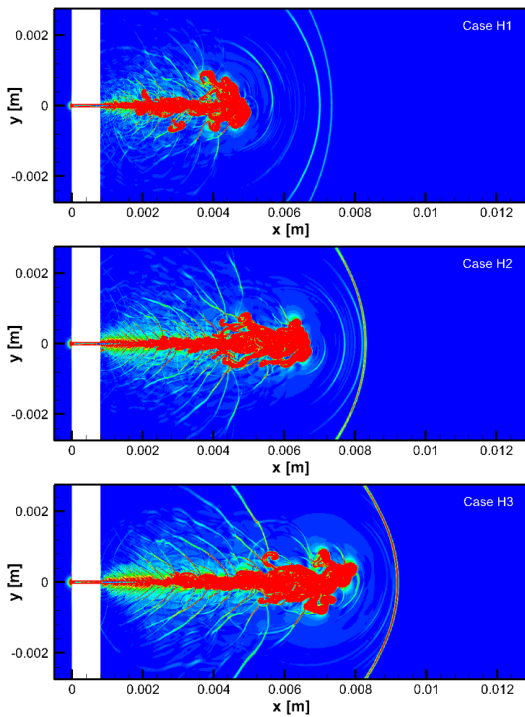


図3 数値シュリーレン画像

孔内を進み、噴孔出口直後において先端が傘状に巻き上がる。その直後に液柱は不安定となって乱れ始め微粒化に至る。噴射圧の上昇に応じてジェットの出射速度は大きくなり、同時刻における噴霧到達距離は長くなる。また、界面の時間的な形状変化に伴って周囲に圧力波が絶えず放出され、噴射圧 200 MPa 時においてジェット先端に明確な離脱衝撃波の形成が確認できる。

図4および図5に噴孔付近での燃料蒸気と

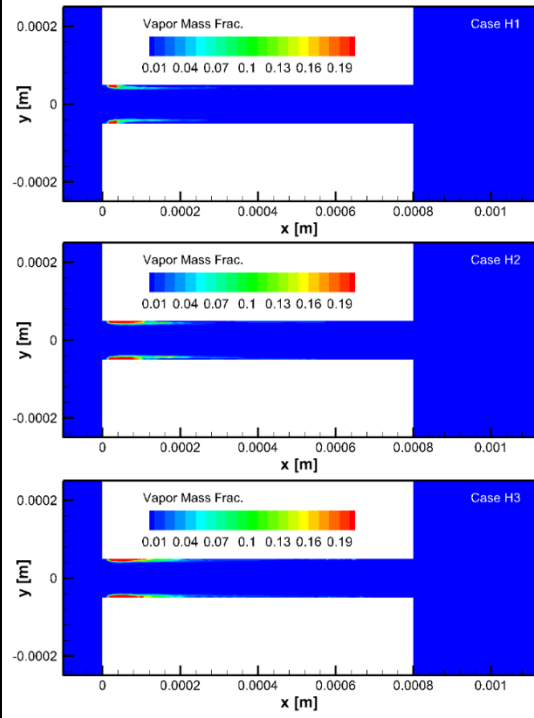


図4 燃料蒸気質量分率

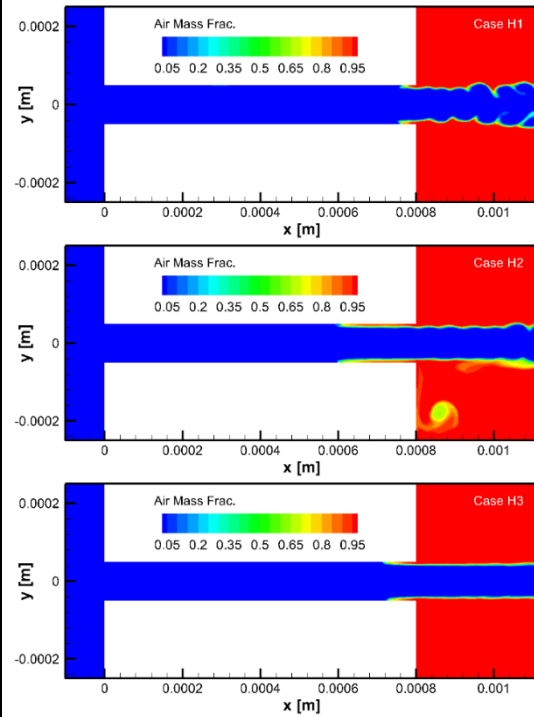


図5 空気体積分率

空気の質量分率を示す。キャビテーション気泡は噴孔入口直後の縮流部で生成され、下流に移流されているものと考えられ、気泡の大きさは噴射圧に応じて大きくなる。一方、空気はどのケースにおいても噴孔出口から噴孔内に流入していることがわかる。

以上より、高噴射圧条件下において、ジェットの不安定化による噴霧微粒化の促進、ジェット先端における強い離脱衝撃波の形成、ならびにノズル噴孔縮流部における活発なキャビテーション気泡の生成が確認された。

4. 2 シャープ界面モデルによる研究成果
 本研究では、気液界面における蒸発及び凝縮を考慮したモデルを構築し、1 次元球対称を仮定したキャビテーション気泡の崩壊現象を検証解析として実施した。

Akhatov らによる実験結果では、無限に広がる水中にレーザー照射によって生じた気泡が周囲の液体圧力と気泡内蒸気の圧力差により収縮・膨張を繰り返す現象が観察される。この現象を再現するために、球対称オイラー方程式を基礎方程式として、液相の水に対して stiffened gas 状態方程式、および気泡内の蒸気相に対して van der Waals 状態方程式を用いて計算を行った。相変化の無い通常の気液二相流では界面を介して質量の出入りは無いが、キャビテーション等の相変化を考慮する場合には質量流束を考慮する必要がある。質量流束を記述するモデルは一般に分子気体力学から与えられ、ここでは Hertz-Knudsen-Langmuir モデルを用いた。

シャープ界面モデルでは、界面に相当する格子に適切な境界条件を与え、それぞれの相について単相の基礎方程式を解き、界面の移動をレベルセット法により計算するのが一般的である。ここでは、界面に相当する中間点 2 格子分に対して境界条件を与える代わりに、HLLC スキームから得られる質量・運動量・エネルギーに関する流束を直接与えることを試みた。HLLC スキームは数ある数値流束の中でも接触不連続面の存在を考慮しており、表面張力の効果も含めて比較的簡明に界面の移動速度等の物理的諸量を与えることができることに利点がある。

図 6 に検証解析の問題設定を示す。初期状態において、水の圧力を 10^5 Pa, 気泡半径を 1 mm, 系の温度を 296 K, 気泡内圧力をその温度における飽和蒸気圧に設定する。格子間隔については、初期気泡半径内の格子点数を 96 点から 1000 点の範囲で変更し、格子収束性について調べ、結果的に 750 点程度で妥当な結果が得られることを確認した。

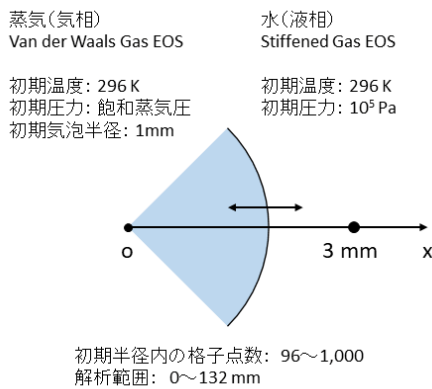


図 6 検証解析問題設定

初期気泡半径内の格子点数が 750 点のケースについて、凝縮係数 α を変化させた場合の気泡半径の時間履歴の解析結果を図 7 に示す。

$\alpha = 0$ は相変化の無いケース、 $\alpha = 1$ は蒸気相から液相界面に衝突する分子がすべて凝縮するケースに相当する。気泡が最小半径に達する時刻は、凝縮係数が大きくなるにつれて僅かながら早くなるが、気泡半径の時間履歴はほぼ同じ傾向を示す。ただし、その後の膨張の様子は大きく異なる。実験では、膨張後の最大半径 R_{\max} が初期半径の約 30% 程度となることが報告されているが、本解析では $\alpha = 0.15$ 程度がこれに相当する。また、この収縮・膨張過程は気泡が存在する限り繰り返されることがわかる。

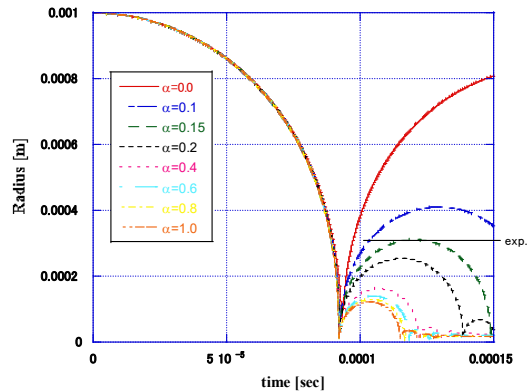


図 7 気泡半径変化

続いて、初期半径 R_0 を変化させた場合の結果について述べる。図 8 は最大半径 R_{\max} を、図 9 は気泡崩壊時の最小半径 R_{\min} を、図 10 は気泡の中心から 3 mm の位置での圧力の最大値 p_{\max} を示している。ここでは凝縮係数を $\alpha = 0.15$ とした。なお、図中には Akhatov らによる数値解析結果 ($\alpha = 0.075$) も併記した。凝縮係数は調整パラメータとして選択しているため、実験値との厳密な比較はあまり意味をなさないが、本解析結果の初期半径の変化に対する傾向は、少なくとも最大半径 R_{\max} 及び R_{\min} の実験値に対しては良く一致することが確認できる。一方、圧力の最大値 p_{\max} に対しては若干高めの結果が出ているが、定性的な傾向は一致していると言える。

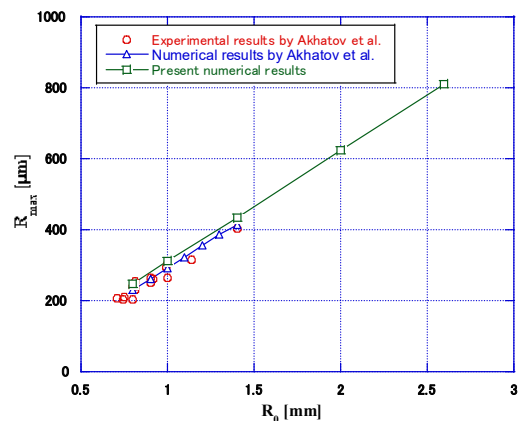


図 8 気泡最大半径

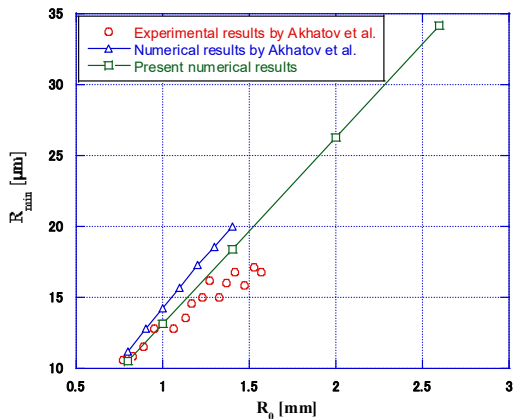


図9 気泡最小半径

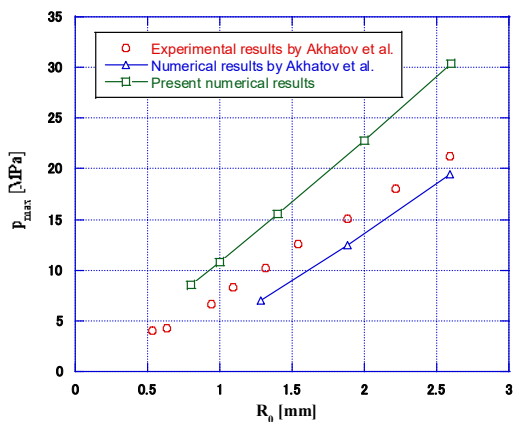


図10 最大圧力 (気泡中心から 3 mm)

本研究では, Akhatov らによる実験と同様に気泡内を純粋な蒸気とみなし, 凝縮係数を調整パラメータとして扱ったが, 分子動力学理論を基にした様々な純粋蒸気に対する凝縮係数がいくつか提案されている. これを本ケースに当てはめると, 初期状態 $\alpha \sim 0.95$ 程度の高い値を与え, 実験結果を適切に再現できなかった. この理由として, 実験時に相変化に与らない気体が僅かながら混入しており, 界面付近にこれらの気体による層が形成されることで, 実効的に相変化の進行を妨げていることが可能性の一つとして考えられる.

以上のように, シャープ界面モデルに基づく相変化を伴う圧縮性気液二相流に関する解析手法について検討し, 蒸発・凝縮を伴うキャビテーション気泡の崩壊現象に関して検証解析を試み, 妥当な結果を得ることができた.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

- ① 横部澄人, 大澤克幸, 小田哲也, 住隆博, 藪田圭一郎, 菅田秀平, 船用ディーゼルノズルの噴霧特性と内部流れに関する研究, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 51, No. 1, 2016, pp. 1-7.
- ② T. Sumi, T. Kurotaki, A New Central Compact Finite Difference Formula for Improving

Robustness in Weighted Compact Nonlinear Schemes, Computers & Fluids, Vol. 123, 2015, pp. 162-182.

〔学会発表〕 (計 6 件)

- ① 住隆博, 黒滝卓司, 大澤克幸, 小田哲也, 超高压燃料噴射に対する圧縮性気液二相流の非定常数値シミュレーション, 第 28 回内燃機関シンポジウム, 2017 年 12 月 6-8 日, 福岡リーセントホテル (福岡県・福岡市)
- ② 住隆博, 黒滝卓司, 拡散界面モデルによる超高压噴射・噴霧現象の数値シミュレーション, 平成 28 年度衝撃波シンポジウム, 2017 年 3 月 8-10 日, ヴェルクよこすか (神奈川県・横須賀市)
- ③ 黒滝卓司, 住隆博, Sharp interface model を用いた相変化を伴う流れのモデル化及びキャビテーションバブル崩壊に関する数値解析, 平成 28 年度衝撃波シンポジウム, 2017 年 3 月 8-10 日, ヴェルクよこすか (神奈川県・横須賀市)
- ④ 住隆博, 黒滝卓司, 圧縮性混相流に対する拡散界面モデルの比較検討, 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 2015 年 12 月 15-17 日, 九州大学筑紫キャンパス (福岡県・春日市)
- ⑤ 黒滝卓司, 住隆博, Sharp interface model を用いた高速流圧縮性混相流解析の質量保存性の向上について, 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 2015 年 12 月 15-17 日, 九州大学筑紫キャンパス (福岡県・春日市)
- ⑥ S. Yokobe, T. Oda, K. Ohsawa, T. Sumi, S. Sugata, K. Yabuta, Spray Characteristics and Inside Flow of a Marine Diesel Injector, JSAE/SAE 2015 International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting, SAE 2015-01-1838, Sep. 1-4, 2015, Kyoto TERRSA (Kyoto, JAPAN)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

住 隆博 (SUMI Takahiro)

佐賀大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号: 30358668

(2) 研究分担者

黒滝 卓司 (KUROTAKE Takuji)

宇宙航空研究開発機構・航空技術本部・上

席研究開発員

研究者番号: 20358659