

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560160

研究課題名（和文） キャビテーション誘起乱れを伴う液体噴流の微粒化過程

研究課題名（英文） Atomization Process of Liquid Jet with Turbulence Induced by Cavitation

研究代表者 宋 明良 (SOU AKIRA)

神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授

研究者番号：20314502

研究成果の概要（和文）：内燃機関の熱効率向上や排ガス浄化等を目標とし、各種液体噴流微粒化装置内で生じるキャビテーションとそれに誘起される液体噴流の微粒化過程を解明予測するために、工夫を施した光学系や様々な形状のノズル内キャビテーションと噴流微粒化過程の高速撮影と詳細モデルによる数値計算を行なった。その結果、ノズル形状、長径比、非対称流入等がノズル内流動と噴流微粒化過程に及ぼす影響を解明し、その簡易予測が可能となるキャビテーション数を提案し、また新しい詳細モデルはノズル内非定常キャビテーションを良好に数値予測できることを検証した。

研究成果の概要（英文）：Improvement in thermal efficiency and reduction in emissions of internal combustion engines are expected. In order to clarify the cavitation taking place in a nozzle of a liquid injector and its effects on liquid jet atomization process, high-speed visualizations and numerical simulations of cavitation in nozzles are carried out. As a result, the effects of geometry, length-to-diameter ratio of nozzles and asymmetric inflow on cavitation and discharged liquid jets are clarified. It is clarified that cavitation in various nozzles with different geometries can be predicted by using a modified cavitation number. Numerical method based on LES, bubble tracking model and Rayleigh-Plesset equation enables us to simulate unsteady cavitation in a nozzle.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：微粒化

## 1. 研究開始当初の背景

環境に優しい工業技術確立を目的として、内燃機関の燃料噴射装置や塗料・潤滑油の霧化装置などの改良が期待されている。このような液体噴射・微粒化装置内ではキャビテーションが生じ、これが強い乱れを誘起して噴射される液体噴流の微粒化を著しく促進することが知られている。研究代表者らは、ディーゼル機関用燃料インジェクタの長径比の場合、これをモデル化した2次元的なノズ

ル内では、キャビテーション気泡群が誘起する組織的乱れが液体噴流界面に突起を引き起こすことを明らかにしてきた。しかし、3次元形状を有する実機ノズルから噴射される液体噴流の微粒化過程などは未解明であった。ノズル内キャビテーションの数値計算も多く試みられており、平均化乱流モデル、平均化気液二相流モデル、簡素化気泡力学モデルを組み合わせた手法が用いられてきたが予測性能は不十分であった。

まとめると次の期待と要望があった。

- (1)キャビテーションによって誘起される乱れとそれによって引き起こされる液体噴流の微粒化過程の解明
- (2)ノズル内キャビテーションの初生発達予測手法の構築とその性能検証
- (3)従来手法の枠を脱却した新しい数値予測手法による3次元非定常キャビテーション乱流の数値解析と定量的予測性能検証

## 2. 研究の目的

上述の背景を受けて、本研究では次の3つの目的を掲げた。

- (1)円筒形を含む様々な形状や径長比のノズル内で生じるキャビテーションとそれが誘起する乱れ、およびそれによって最終的に引き起こされる液体噴流の微粒化過程の解明
- (2)液体噴射装置のノズル内で生じるキャビテーション乱流の簡易予測指標の確立とその性能検証
- (3)LESモデル、ラグランジュ気泡追跡法、詳細気泡力学モデルに基づくノズル内キャビテーション乱流の3次元詳細数値計算の実施とその定量的予測性能検証

## 3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、大きく分類すると、主に次の方法で研究を行なった。

- (1)ノズル上流部の流路幅や長径比が異なる様々なノズル内キャビテーションと液体噴流微粒化過程の高速度撮影を行い、ノズル形状がノズル内キャビテーションと液体噴流の微粒化過程に及ぼす影響を明らかにする
- (2)実機を模擬した円筒形のノズル内キャビテーションとそこから噴射される液体噴流の微粒化過程の可視化装置を作成し、高速度撮影によって円柱状噴流の微粒化過程に関する知見を得る
- (3)最近のディーゼル機関で用いられているサック型やVCO型のインジェクタのように、ノズル上流から著しい非対称流入を伴うノズル内キャビテーションと液体噴流の可視化により、実機ノズル内キャビテーションと液体噴流微粒化過程に関する知見を得る
- (4)キャビテーション数やレイノルズ数などの無次元数を指標とするノズル内キャビテーションの簡易予測の可能性を調べるため、様々なノズル上流径、ノズル長径比、非対称性のノズル内キャビテーションのデータベースを獲得し、無次元数による予測を試みる
- (5)LES、ラグランジュ気泡追跡法、詳細気泡力学モデルに基づくノズル内非定常キャビテーション乱流の3次元詳細計算手法を構築して計算を行い、実験データを取得して、両者の比較により予測性能を検証する
- (6)キャビテーションの成長や崩壊を表す気泡力学モデルの基本特性を調べ、ノズル内キ

ャビテーション解析への適用性を検証する

## 4. 研究成果

以上の研究を行った結果、主に次の研究成果を得た。

- (1)ノズルの上流にあるサックの径とノズル径の比が小さくなると剥離境界層厚さが薄くなり、縮流係数が増し、キャビテーションも薄くなる。縮流係数とノズル内圧損を考慮した修正キャビテーション数を用いると、図1に示すように様々な形状のノズル内キャビテーションの初生と発達を一意に簡易予測できる見通しを得た。

- 2D Nozzle
- $W_N=4.2\text{mm}$ ,  $C_u=7.6$ ,  $L/W_N=3.8$
  - ◇  $W_N=2.2\text{mm}$ ,  $C_u=7.2$ ,  $L/W_N=3.6$
  - △  $W_N=3.8\text{mm}$ ,  $C_u=2.9$ ,  $L/W_N=4.2$
  - ▽  $W_N=4.1\text{mm}$ ,  $C_u=1.5$ ,  $L/W_N=3.9$
- Cylindrical Nozzle
- $D_N=2.0\text{mm}$ ,  $C_u=64$ ,  $L/D_N=4$
  - $D_N=1.0\text{mm}$ ,  $C_u=100$ ,  $L/D_N=4$
  - ▲  $D_N=0.5\text{mm}$ ,  $C_u=100$ ,  $L/D_N=4$
  - ▼  $D_N=1.0\text{mm}$ ,  $C_u=4$ ,  $L/D_N=4$
  - ▽  $D_N=2.0\text{mm}$ ,  $C_u=64$ ,  $L/D_N=20$
  - ▲  $D_N=0.5\text{mm}$ ,  $C_u=100$ ,  $L/D_N=20$

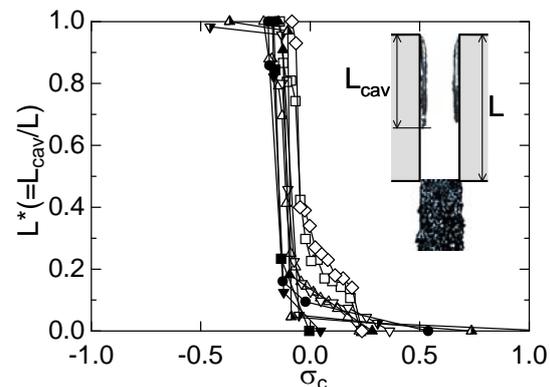


図1 修正キャビテーション

またノズル径長比が大きいと、圧損が増し、微粒化が阻害されるハイドロリックフリップが生じにくくなることと、修正キャビテーション数は様々な径長比のノズル内流動様式予測に適用できることを明らかにした。

- (2)光学系に工夫を凝らした円筒ノズルと噴流微粒化過程の同時高速度撮影により、図2に示すように、円筒ノズル内で生じる円環状ではないキャビテーション気泡群の崩壊跡に誘起される組織的な強い乱れがノズルから流出すると、円柱状に噴射された液体噴流の気液界面に大きな突出や変形を引き起こすことを見出した。

- (3)ディーゼル機関で用いられるサック型やVCO型のインジェクタではノズル上流から著しい非対称流入を伴う。図3に示す非対称流入を伴うノズルをモデル化したノズルの可視化により、非対称流入が非対称キャビテ

ーションを誘起し、著しく非対称な噴流挙動を引き起こす可能性を見出した。

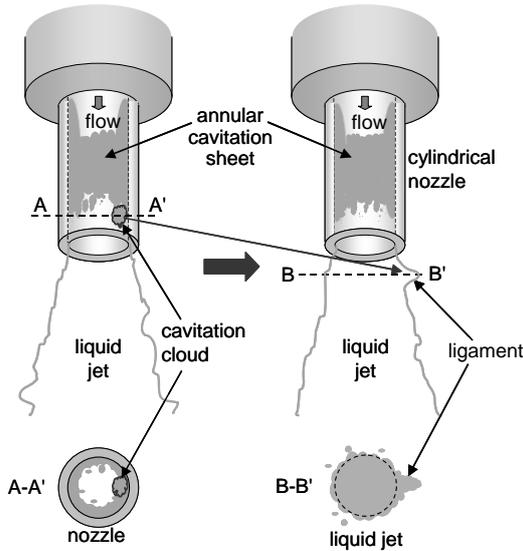


図2 円筒ノズルの噴流微粒化促進過程

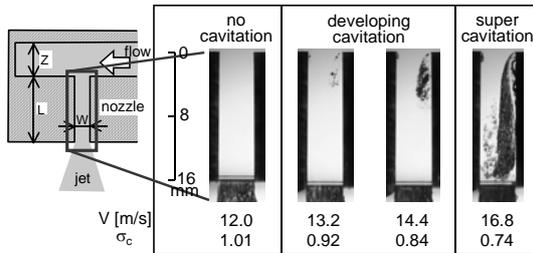


図3 非対称流入ノズル内非対称流動

またニードルリフトが小さいほど剥離境界層厚さが増し、キャビテーションの初生成長を促進することが分かった。

これら知見は今後の実機ノズル設計に貢献する実用的な知見である。

(4)レイノズル数や既存の様々なキャビテーション数では、円筒ノズルや二次元的ノズル、ノズル上流のサック径やノズル径長比が異なるノズル、ニードルリフトが異なる非対称流入ノズルなどの様々なノズル内キャビテーションの初生発達の予測を一意に整理できないが、縮流係数とノズル内圧損を考慮した修正キャビテーション数を用いると一意に簡易予測できることが分かった。

これは今後の様々なノズル設計やキャビテーション予測に有用である。

(5)本研究で提案した LES、ラグランジュ気泡追跡法、レイリー・プレセット方程式に基づく高精度キャビテーション乱流モデルを用いた3次元詳細数値計算の結果、図4に例示したように、剥離境界層内と再付着点から放出される渦内のキャビテーション気泡群の非定常挙動を良好に予測できることがわ

かった。

この新しい計算手法の成功によって、今後のノズル内キャビテーション解析は新しい手法に一新される。従って本研究はキャビテーションの非定常挙動を含めた定量的に妥当な数値解析の道を開拓したと言える。

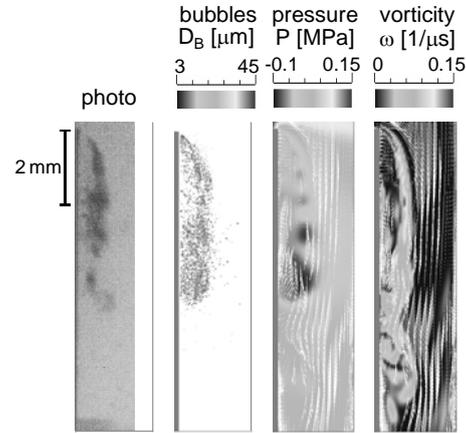


図4 高精度モデルによるキャビテーションの数値計算結果と実験結果

(6)レイリー・プレセット方程式やレイリー式などの各種気泡力学モデルの基本特性とノズル内キャビテーション解析への適用性を検証した結果、図5に示すように簡素化されたレイリー式は飽和蒸気圧と臨界圧の間になる場合に気泡成長を過大評価する問題点を明らかにした。

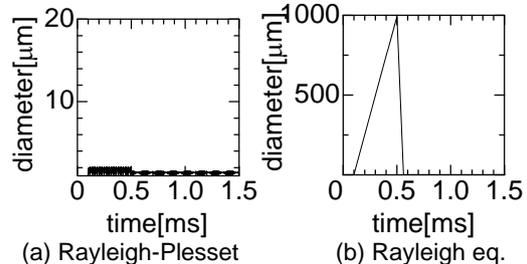


図5 各種気泡力学モデルの性能検証

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① Akira Sou, Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, "Cavitation in Nozzles of Plain Orifice Atomizers with Various Length-to-Diameter Ratios", Atomization and Sprays, 査読有, Vol. 20, Iss. 6, (2010) pp. 513-524.
- ② Akira Sou, "Liquid Jet Deformation Induced by Cavitation in Nozzles of Various Shapes", SAE Int. J. Engines, 査読有, Vol. 2, Num. 2, (2010), pp. 694-702.

- ③ Akira Sou, Tomoyuki Kinugasa, "Numerical Simulation of Developing Cavitation Flow in a Nozzle of Pressure Atomizer", Proc. Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines, 査読有, (2010), pp. 53-61.
- ④ Akira Sou, Daisuke Goshima, Tomoyuki Kinugasa, Kosuke Hayashi, Akio Tomiyama, "LES-Based Bubble Tracking Simulation of Turbulent Cavitation Flow in Injector Nozzle", Proc. 7th Int. Conf. Multiphase Flow, 査読有, (2010), No. 2-1-2.
- ⑤ Akira Sou, "Liquid Jet Deformation Induced by Cavitation in Nozzles of Various Shapes", Proc. 9th Int. Conf. Engines and Vehicles, 査読有, (2009), SAE2009-24- 0157.
- ⑥ Akira Sou, Shigeo Hosokawa, and Akio Tomiyama, "Dimensionless Numbers on Cavitation in a Nozzle of a Plain Orifice Atomizer", Proc. 11th Int. Conf. Liquid Atomization and Spray Systems, 査読有, (2009), ICLASS 2009-019.
- ⑦ Akira Sou, Muhammad Ilham Maulana, Kenji Iozaki, Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, "Effects of Nozzle Geometry on Cavitation in Nozzles of Pressure Atomizers", J. Fluid Sci. and Technol., 査読有, Vol. 3, No. 5, (2008) pp. 622-632, [http://www.lib.kobe-u.ac.jp/infolib/meta\\_pub/G0000003kerneldetail-jp](http://www.lib.kobe-u.ac.jp/infolib/meta_pub/G0000003kerneldetail-jp).
- ⑧ Akira Sou, Muhammad Ilham Maulana, Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, "Ligament Formation Induced by Cavitation in a Cylindrical Nozzle", J. Fluid Sci. and Technol., 査読有, Vol. 3, No. 5, (2008) pp. 633-644, [http://www.lib.kobe-u.ac.jp/infolib/meta\\_pub/G0000003kerneldetail-jp](http://www.lib.kobe-u.ac.jp/infolib/meta_pub/G0000003kerneldetail-jp).
- [学会発表] (計 1 1 件)
- ① 衣笠智行, 絹川悠介, 宋明良, "ディーゼル機関の燃料インジェクタにおける気泡力学モデル", 第 81 回マリンエンジニアリング学術講演会, 東京, (2011, 5).
- ② 宋明良, 杉村良平, 大橋亮太, "インジェクタ内キャビテーション挙動と液体噴流", 自動車技術会 2011 年の春季大会, 横浜, (2011, 5), No. 106-20115365.
- ③ 宋明良, 大橋亮太, 杉村良平, 下田壮一, 鷹野智, "非対称流入を伴うノズル内キャビテーションと液体噴流", 第 19 回微粒化シンポジウム, 東京, (2010, 12), B-4, pp. 1-4.
- ④ 下田壮一, 大橋亮太, 杉村良平, 鷹野 智, 宋明良, "インジェクタの噴孔内キャビテーションと液体噴流", 第 15 回キャビテーションに関するシンポジウム, 大阪, (2010, 11), No. B2-5.
- ⑤ Akira Sou, Ryohei Sugimura, Ryota Ohashi, Raditya Hendra Pratama, "Cavitation in Tilted Nozzles of Liquid Injectors", Proc. Techno-Ocean 2010, Kobe, (2010, 10), 16-1-009.
- ⑥ Ryohei Sugimura, Raditya Hendra Pratama, Ryota Ohashi, Akira Sou, "Cavitation in Fuel Injector and its Effects on Liquid Jet", Proc. East Asia Int. Student Symp., Kobe, (2010, 10), A2-1-3.
- ⑦ 宋明良, 杉村良平, 大橋亮太, Raditya Hendra Pratama, "非対称流入を伴うノズル内キャビテーション", 日本マリンエンジニアリング学会第 80 回ME学術講演会, 新潟, (2010, 8).
- ⑧ 大橋亮太, 杉村良平, 宋明良, "VCOノズル内キャビテーションと液体噴流の可視化", 日本機械学会関西支部 2009 年度関西学生会卒業研究発表講演会, 神戸, (2010,3), 1111.
- ⑨ 五島代介, 宋明良, 林公祐, 富山明男, "ノズル内キャビテーション乱流のLES", 第 18 回微粒化シンポジウム 2009, 九州, (2009, 12), pp. 113-117.
- ⑩ 五島代介, 宋明良, 細川茂雄, 富山明男, "圧力噴射弁のノズル内キャビテーション流れ", 日本混相流学会年会講演会 2009, 熊本, (2009, 8).
- ⑪ 磯崎健二, 宋明良, 細川茂雄, 富山明男, "ノズル内キャビテーションと液体噴流に及ぼすノズル長さの影響", 第 17 回微粒化シンポジウム, 横浜, (2008, 12), pp. 283-288.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宋 明良 (SOU AKIRA)

神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授  
研究者番号：20314502

### (2) 研究分担者

富山 明男 (TOMIYAMA AKIO)

神戸大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：30211402

細川 茂雄 (HOSOKAWA SHIGEO)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：10252793