

論文・解説

28

無次元数による噴霧の分裂特性の統一的整理

Unified Expression of Spray Breakup Characteristics Using a Non-dimensional Quantity

倉持 晃^{*1} 原田 雄司^{*2} 永澤 健^{*3}
 Akira Kuramochi Yuji Harada Takeshi Nagasawa
 瀬戸 祐利^{*4} 山下 洋幸^{*5}
 Masatoshi Seto Hiroyuki Yamashita

要約

内燃機関の高熱効率化に加え、ゼロインパクトエミッション (ZIE) 化及びカーボンニュートラル (CN) 燃料への対応が急務となっている。多種多様な燃料において高い熱効率と ZIE 化を両立するためには、各種液体噴霧の分裂特性に基づいて、エンジン燃焼室内の混合気濃度分布・温度分布を精密に制御することが重要となる。本研究では、噴霧の分裂特性に深く関係する分裂長さに着目し、多種多様な液体噴霧の分裂長さを統一的に整理可能な指標構築に取組んだ。気液の相対速度を考慮した慣性力と表面張力の比を表すジェット数、噴霧先端速度と噴孔直径、雰囲気気体の動粘性に基づく気相レイノルズ数、及び液体の潜熱顕熱比を表す無次元量によって、液体種、噴孔諸元、雰囲気環境それぞれが異なる噴霧の分裂長さを統一的に整理できることを示した。

Abstract

In recent years, there has been a social demand for internal combustion engines with high thermal efficiency, zero impact emissions (ZIE), and carbon neutrality (CN). In order to satisfy the demands, it is important to control in-cylinder mixture concentration/temperature distributions, precisely, based on breakup characteristics of liquid sprays under various environments. In this study, we focused on non-dimensional quantities that represent the breakup lengths of various liquid sprays in a unified manner. The results showed that a breakup length was able to be uniformly expressed by non-dimensional quantities composed of Jet numbers, Reynolds numbers, and non-dimensional quantity representing the ratio of latent heat to sensible heat under various injector specifications, liquid types and ambient conditions.

Key words : Heat engine, Fuel, Fuel injection, Spray breakup, Breakup length, Water injection, Biofuel

1. はじめに

内燃機関の高熱効率化に加え、排気中の環境負荷物質含有率を大気同等とするゼロインパクトエミッション (ZIE) 化、排出 CO₂ 量を正味ゼロとするカーボンニュートラル (CN) 化への対応も急務の課題となる。ガソリンや CN 対応燃料を適用したエンジンにおいても、高い熱効率と ZIE を両立するためには、各種噴射液体の分裂速度、分裂後液滴の空間分布等に代表される分裂特性に基づいた筒内混合気濃度/温度分布の精密な制御が重要である。また筒内の混合気温度分布制御に関しては、水噴霧の活用も想定される⁽¹⁾⁽²⁾。よって、高熱効率化及び ZIE 化、更には CN 化へ迅速に対応するためには、多様な雰

囲気環境や噴孔諸元、水を含むさまざまな液体種において、噴霧の分裂特性を精度よく予測可能かつ重要な物理法則に則った簡易モデルの構築を進める事が重要となる。

分裂長さは、噴霧中に存在する液体の分裂状態、及び噴霧の巨視的な空間的発達挙動/空間分布特性を考察する上で重要な物理量であり、噴霧の分裂特性を代表するパラメーターの一つである。この分裂長さについては、Levich の分裂理論に基づいた簡便なモデルが提案されており、式(1)で表される⁽³⁾。

$$l_b = C_b D_n \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad (1)$$

l_b は分裂長さ、 ρ_l は液体密度、 ρ_g は雰囲気気体の密度、

*1 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

*2~5 技術研究所
Technical Research Center

D_n は噴孔直径, C_b はモデル定数である。しかし, 式(1)を多様な液体種や雰囲気環境に適用するためには, 液体種や雰囲気条件ごとにモデル定数 C_b について, 都度キャリブレーション試験を実施する必要がある。そのため, ガソリンや軽油のみならず, 多様な CN 燃料を内燃機関へ適用することが想定される環境において, 適切な筒内混合気制御を迅速に検討するためには, これまで以上に一般性を有する分裂長さモデル構築の必要性が増してくる。有次元の物理量を一般化する手法として, 無次元数及びそれを利用したダイアグラムがしばしば用いられている。そこで本研究では, さまざまな雰囲気場における各種液体噴霧の分裂長さについて, 無次元量を活用したその汎用モデルの構築を試みた。まず, 噴霧可視化試験結果に基づき水及びガソリン模擬燃料 (S5R⁽⁴⁾) 噴霧の分裂長さを分析した。そして, 種々の噴孔諸元, 噴射圧力, 液体種, 雰囲気環境における噴霧の分裂長さに関する既往研究結果を収集した。その上で, それらの結果を統一して整理可能な無次元量を, 分裂に寄与する物性・物理過程の考察に基づき導出した。

2. 実験装置, 実験条件及び解析手法

2.1 実験装置, 実験条件

定容容器内において, 単噴孔及び多噴孔ホールインジェクターを用いて液体噴射を行い, 容器内で形成される自由噴霧の発達過程を高速カメラにより可視化した。なお噴射液体とその分裂・蒸発の進展に伴う噴霧混合気形成挙動をとらえるため, 気相・液相両者の空間密度勾配と噴霧概形を時系列的かつ比較的簡便に観測可能なシュリーレン法を採用した。定容容器内に, Ar/N₂/O₂/C₃H₈ 予混合気をあらかじめ充填し, 火炎伝ば燃焼させることで, 容器内雰囲気をエンジン筒内環境相当の高温・高圧状態を実現した。なお上記予混合気の成分割合は, 容器充填時にねらいの密度となるよう調整した。そして, 充填予混合気の燃焼後に容器内部雰囲気がねらいの温度及び圧力条件に達した時刻に, 液体噴射を行った。実験方法及び装置の詳細については, 文献⁽¹⁾を参照されたい。得られた噴霧可視化映像から各時刻における噴霧先端到

達距離を求め, その値に基づき各種液体噴霧の分裂長さを解析した。

Table 1 に使用したインジェクター諸元を示す。供試インジェクターには, ソレノイド駆動式ホールインジェクターを用い, 各々の噴孔仕様を改造した。

Table 1 Specification of the Baseline Injectors

Injector type	Solenoid-Driven Injector		
Hole number	1	9	1
Hole diameter [mm]	0.08	0.08	0.10
Nomenclature	Inj. A	Inj. B	Inj. C

Table 2 は, 試験を行った際の容器内雰囲気条件である。噴霧の分裂過程においては, 噴射する雰囲気場の密度及び温度が大きな影響を及ぼす。そのため, 高温・高圧となるエンジン燃焼室内での噴霧分裂挙動を模擬するために, Case 1, 2 それぞれの密度及び温度条件は, 各々圧縮比 20 以上の自然吸気エンジンにおけるクランク角 20 [deg. bTDC], 5 [deg. bTDC] の筒内密度, 温度を模擬するように設定した。

Table 2 Ambient Conditions of the Experiment

	Case1	Case2	
Density [kg/m ³]	9.47	17.4	
Pressure [MPa]	2.02	4.40	
Temperature [K]	910	1070	
Gas component [mole fraction, %]	Ar	73.2	72.0
	N ₂	9.4	13.1
	H ₂ O	9.9	8.5
	CO ₂	7.5	6.4

Table 3 に, 噴霧可視化試験を実施した噴射条件と雰囲気条件を示す。噴射期間は, インジェクター及び噴射圧ごとに, 定常的に噴霧が形成される期間が観察できる時間幅に設定した。

Table 3 Summary of the Test Conditions

Test fluid	Water (293 [K])				S5R (293 [K]) (gasoline surrogate fuel)
	Inj. A	Inj. B	Inj. C		Inj. C
Injection pressure (rail pressure) [MPa]	130 200	60 130 200	20	100 200	100 200
Injection pulse width [ms]	0.5	0.5	3	0.5	0.5
Ambient condition	Case 1	Case 1	Case 1, 2	Case 1, 2	Case 1, 2

2.2 分裂長さの解析手法

噴霧先端到達距離は、噴射初期においては時間に比例し、噴射開始から時間が経過し準定常となった状態においては時間の0.5乗に比例することが知られている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本研究では、噴霧の発達状態が非定常状態から準定常とみなせる状態へと遷移する際の噴霧先端到達距離を分裂長さとして定義した。これに基づき本研究での噴霧可視化試験及び既往研究から得られた噴霧先端到達距離の経時発達特性から、分裂長さを解析した。Fig. 1に本研究における分裂長さの定義を図示する。以下に示す式(2-1)、(2-2)について、 α 、 β をフィッティングパラメータとして、噴霧先端到達距離 s の時系列データに対するフィッティングカーブを導出し、それらの交点における噴霧先端到達距離を分裂長さとした。

$$s = \alpha t \tag{2-1}$$

$$s = \beta \sqrt{t} \tag{2-2}$$

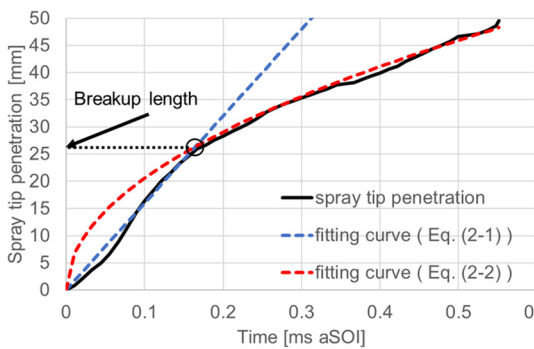


Fig. 1 Definition of the Breakup Length

3. 結果と考察

3.1 分裂過程に関連する無次元数

Fig. 2に、各条件下にて計測した噴霧の分裂長さ解析結果を示す。横軸は噴射圧力、縦軸は分裂長さである。Fig. 2中に記載のない計測条件については、可視化視野範囲内において、噴霧の発達挙動が準定常状態へ遷移せず、分裂長さの解析が不可能であった。

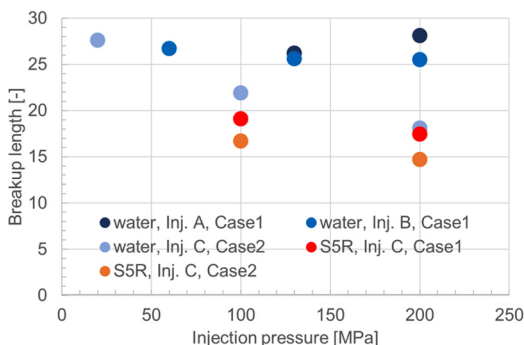


Fig. 2 Breakup Length Against the Injection Pressure

ここで、霧囲気場、及び液体種のそれぞれが分裂長さに及ぼす影響を独立して比較可能な Inj. C による噴霧の分裂長さを対象に、ジェット数による整理を試みた。ジェット数は、液体噴流の分裂特性を評価する量としてしばしば用いられており⁽⁷⁾、式(3)の形で表される、気液の相対速度を考慮した慣性力と表面張力の比を表す無次元数である。

$$Je = \left(\frac{\rho_l D_n V_{tip}^2}{\sigma_l} \right) \left(\frac{\rho_{amb}}{\rho_l} \right)^{0.55} \tag{3}$$

ρ_{amb} は霧囲気場の密度 [kg/m³]、 ρ_l は噴射液体の密度 [kg/m³]、 D_n はインジェクターの噴孔直径 [m]、 V_{tip} は噴霧先端速度 [m/s]、 σ_l は液体の表面張力 [N/m] である。 Inj. C における噴霧の分裂長さとの関係を、Fig. 3に示す。なお次元を一致させるため、縦軸には、分裂長さを噴孔直径で無次元化した、無次元分裂長さを記載している。液体種、及び霧囲気条件が同一であれば、無次元分裂長さはジェット数の対数に線形依存する傾向がある。この結果から、適用可能範囲は限定的であるものの、ジェット数は、液体の分裂過程に寄与する代表的な物理量の関数であることがわかる。一方で、同程度のジェット数であっても、Case 1及びCase 2環境下のS5R噴霧の無次元分裂長さを比較すると、Case 1よりも高温かつ高密度であるCase 2条件の方が短い。更には、水噴霧とS5R噴霧とでは、S5R噴霧の無次元分裂長さが短い傾向にある。この結果からは、噴霧の分裂長さには、ジェット数にて考慮している物理量以外に、依存性をもつ物理量が存在することを示唆している。以上のことから、ジェット数に加えて、液体の分裂過程に関与する主要な物理量を代表する無次元量を組み合わせることで、多様な噴霧の分裂長さを包括的に表現可能ではないかと考えた。

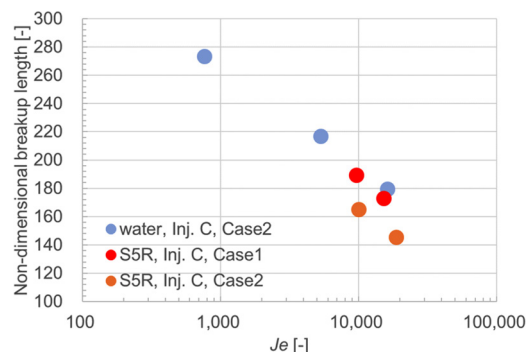


Fig. 3 Non-dimensional Breakup Length of the Inj. C Spray Against the Jet Number

ここで、Fig. 4に、噴霧の分裂特性に寄与する現象と関連する物理量の相関図を示す。インジェクターから噴射された液体は、主に霧囲気場との速度差、密度差による不安定性の励起により、その表面が変形する。そして、

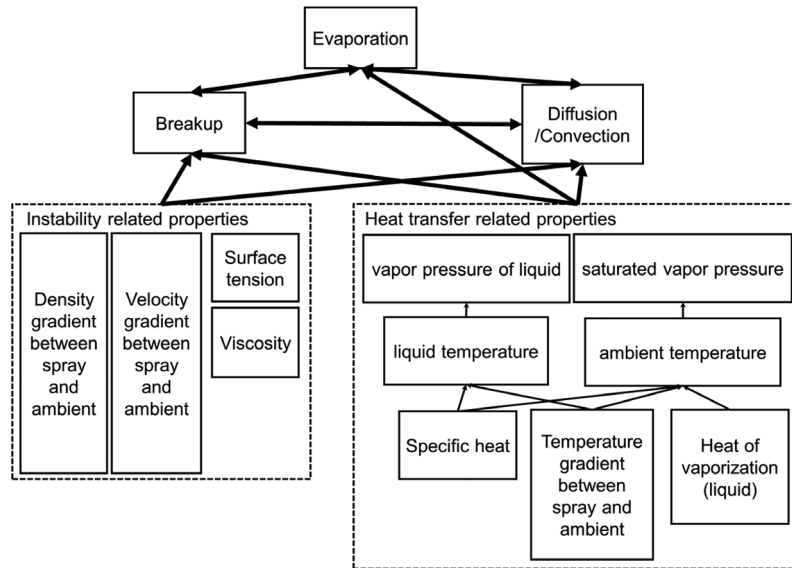


Fig. 4 Breakup and Evaporation Process of Liquid Spray

その変形を阻害する物理作用（液体の表面張力や粘性）の影響を受けつつ、最終的に分裂へと至る。一方で気液間の熱交換は、噴射直後から生じており、気液間熱交換により生じる液体の昇温及び気化は、液体周囲の気体の温度、ひいては密度や粘性の変化をもたらすために、液体の分裂過程にも影響を及ぼすことが予想される。ジェット数に加えて、上述の物理量各々が噴霧の分裂に及ぼす影響を評価する無次元数を組み合わせることで、多様な噴霧の分裂特性を評価可能であると考えられる。これ以降、ジェット数に加えて考慮する無次元数に関して、検討した内容を記述する。

新城らによる高速噴流の噴射初期段階における分裂機構解析⁽⁸⁾により、噴射初期の液柱表面では、壁乱流遷移に類似した気相境界層の不安定化が生じていること、また噴射初期の液柱コアに形成される表面パターンの位相速度が Tollmien-Schlichting 波の位相速度に一致することが確認されている。Tollmien-Schlichting 波の増幅/減衰傾向は、流体のレイノルズ数に相関をもつ⁽⁹⁾。したがって、噴流の噴射初期段階における不安定性の成長には、気相の物性に基づくレイノルズ数が重要な影響を及ぼすものと考えられる。すなわち、噴霧の初期分裂過程においては、式(4)で表現する気相の物性に基づくレイノルズ数が支配的となり現象が進行すると推測される。

$$Re_{amb} = \frac{V_{tip} D_n}{\nu_{amb}} \quad (4)$$

ここで、 ν_{amb} は雰囲気の動粘性係数 [m²/s] である。気液間の熱交換による、液体の温度上昇、液体の蒸発、及びそれらに起因する周囲気体の温度低下は、分裂機構に関与する気液双方の粘性や、液体の表面張力、気液間の密度勾配に変動をもたらす。そして気液間を移動する熱量は、気液の温度差、比熱及び蒸発潜熱に依存する。ヤコブ数を参考にして、上記の熱交換による熱移動量及

びそれに伴う物性変動量を代表させる無次元量を、以下式(5)のように定義した。

$$Ja_{sp} = \frac{C_{pl} |T_{amb} - T_l|}{h_{lg}} \quad (5)$$

C_{pl} は噴射液体の比熱 [J/(kg・K)]、 T_{amb} は雰囲気の温度 [K]、 T_l は噴射液体の温度 [K]、 h_{lg} は噴射液体の蒸発潜熱 [J/kg] である。式(5)中の分子は、雰囲気から噴射液体へと供給される熱量により生じる液体のエンタルピー変化に対応し、分母は噴射液体が気化する際に周囲気体から奪う熱量に対応する。無次元量 Ja_{sp} を、液体の分裂過程における気液間熱交換の影響に関係する無次元数として用いる。

ジェット数に加えて、式(4)、(5)にて示した無次元数を組み合わせることで、Fig. 4 に示した気液の速度差、密度差、表面張力、粘性、気液間の熱交換といった各種物性及び現象が、噴霧の分裂長さへ及ぼす影響を考慮できると推測される。また Fig. 4 に示した物理現象は相互に影響を及ぼしつつ進行する。そのため、ジェット数 Je 、気相レイノルズ数 Re_{amb} 、無次元量 Ja_{sp} のそれぞれを個々に評価するのではなく、それらの積を、分裂過程に関わる一連の物理過程とその相互作用を包括する無次元数と考え、無次元分裂長さの予測式を構築した (式(6))。

$$\frac{L_b}{D_n} = a_0 (Je \times Re_{amb} \times Ja_{sp})^{a_1} = a_0 \left(\left(\frac{\rho_l D_n V_{tip}^2}{\sigma_l} \right) \left(\frac{\rho_{amb}}{\rho_l} \right)^{0.55} \times \frac{D_n V_{tip}}{\nu_{amb}} \times \frac{C_{pl} |T_{amb} - T_l|}{h_{lg}} \right)^{a_1} \quad (6)$$

なお a_0 、 a_1 は、実験定数であり、非線形回帰により決定する。

3.2 分裂長さ予測式の精度検証

本研究において分析した水及び S5R 噴霧の分裂長さ

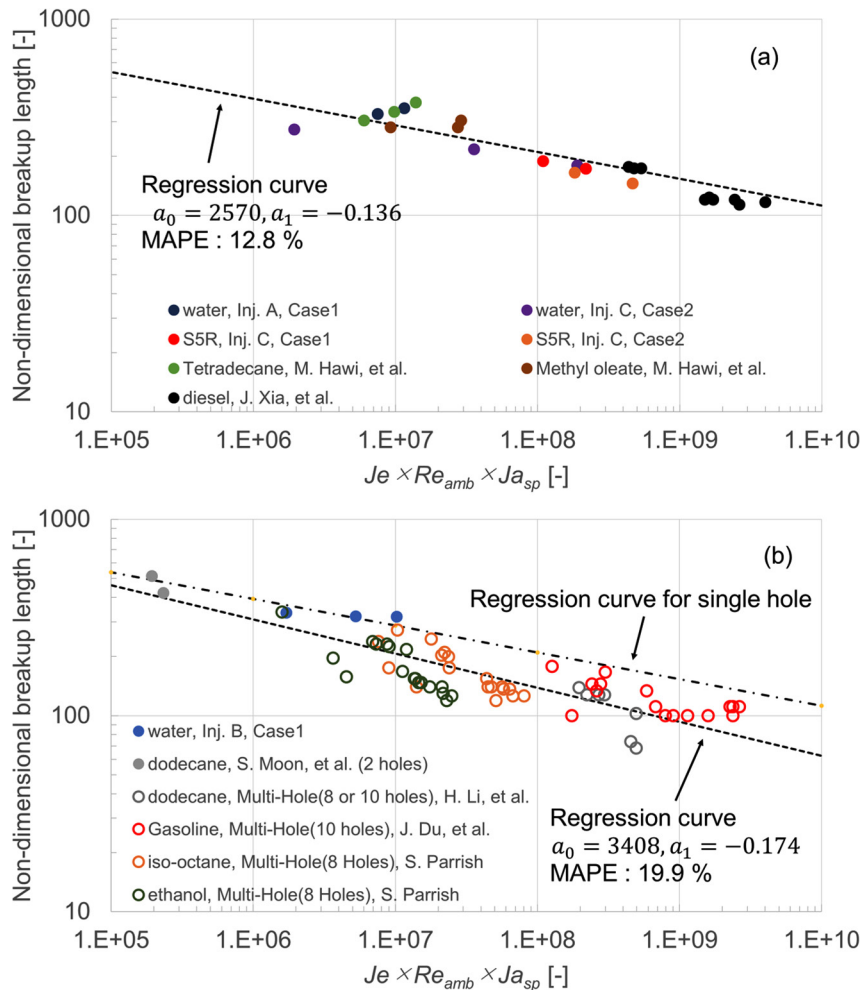


Fig. 5 Dependence of the Non-dimensional Breakup Length on the $Je \times Re_{amb} \times Ja_{sp}$
 (a) Single Hole Injector Spray (b) Multi Hole Injector Spray

加え、種々の噴孔諸元、噴射圧、液体種、霧囲気環境における噴霧分裂長さを既往研究報告^{(10)–(15)}から分析し、多様な環境下での噴霧分裂長さを対象に、式(6)の予測精度を検証した。なお式(6)の諸量の計算に際して、液体の物性値について文献中に記載がない場合はBronkhorst社が公開している液体物性データベース⁽¹⁶⁾を参照した。霧囲気の動粘性係数については、予燃焼霧囲気場での計測データでは主要な希釈気体を、窒素充填霧囲気場では窒素を、それぞれ霧囲気の代表成分として、サザーランド式により算出した。

単噴孔及び多噴孔の分裂長さを対象に、式(6)を用いて回帰分析を行った結果をFig. 5に示す。Fig. 5(a)が単噴孔噴霧を対象とした回帰結果、Fig. 5(b)が多噴孔噴霧を対象とした回帰結果である。単噴孔噴霧の無次元分裂長さを予測対象としたとき、式(6)による予測値の平均絶対誤差率 (MAPE) は12.8%とよい精度が得られた。多噴孔を対象とした時、MAPEは19.9%と単噴孔対象時と比較して精度が悪化している。そして、多噴孔噴霧の無次元分裂長さは、単噴孔噴霧の値と比べ短い。多噴孔化に伴う予測精度の悪化及び無次元分裂長さ短縮の要因

としては、噴霧間干渉、すなわちコアンダ効果に起因する噴霧先端速度の減少が考えられる。コアンダ効果による噴霧先端速度低下作用を受ける場合、噴霧が準定常的運動に遷移する時期が見かけ上早期化し、結果的に噴霧先端到達距離から算出される無次元分裂長さが短くなると思われるためである。更に、コアンダ効果による噴霧間干渉効果は、噴孔数や噴孔配置、及びコーン角等に依存性をもつために、多様な噴孔諸元を扱った際、モデル予測精度の悪化につながったと推測される。そのほか、噴霧の一次分裂特性に寄与するニードル及びキャビテーション挙動も、噴孔仕様により変動するため、多噴孔噴霧の分裂長さ予測精度悪化の要因として考えられる。今後は、更なる分裂長さ予測精度の向上のため、噴霧間干渉効果や、インジェクター内部流動特性を表現する特徴量の抽出を試みる。

4. おわりに

噴霧の分裂・発達特性に深く関係する物理量である分裂長さに着目し、多種多様な液体噴霧の分裂長さを統一的に整理可能な指標の構築に取組んだ。その結果、表面

張力と慣性力の比を表すジェット数、気相における粘性応力と慣性力の比を表す気相レイノルズ数、気液の熱交換過程を代表する無次元量を組み合わせた無次元量のべき乗関数モデルとして、液体種、噴孔諸元、雰囲気環境それぞれが異なる噴霧の分裂長さを統一して記述可能なことを明らかにした。今回構築したモデルによる分裂長さ予測精度は、単噴口噴霧を対象とした場合 12.8% (MAPE)、多噴孔噴霧を対象とした場合 19.9% (MAPE) であった。今回構築した無次元量を活用した分裂長さ予測モデルを用いることで、将来的に従来燃料や CN 対応燃料等幅広い燃料種においてもその分裂特性を定量的に予測し、高熱効率と ZIE を両立可能な液体噴射システムの迅速な検討／開発が可能となると期待される。

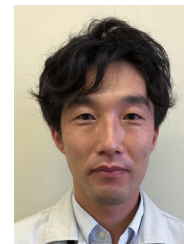
参考文献

- (1) 倉持ほか：噴霧の分裂・蒸発特性に及ぼす液体種の影響，微粒化シンポジウム講演論文集，Vol.29, B122 (2020)
- (2) 葛ほか：高温高圧雰囲気場における水添加が着火・燃焼反応に及ぼす影響，内燃機関シンポジウム講演論文集，Vol.28, 20178073 (2017)
- (3) V. G. Levich et al. : Physicochemical Hydrodynamics, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, pp.639-646 (1962)
- (4) 三好ほか：ガソリンサロゲート詳細反応機構の構築，自動車技術会論文集，Vol.48, No.5, pp.1021-1026 (2017)
- (5) 廣安ほか：ディーゼル噴霧の到達距離と噴霧角，自動車技術会論文集，Vol.21, pp.5-11 (1980)
- (6) 和栗ほか：ディーゼル機関燃料噴霧の到達距離に関する研究，日本機械学会論文集，Vol.25, No.156, pp.820-826 (1959)
- (7) S. Tanno et al. : Investigation of a novel leaner fuel spray formation for reducing soot in diffusive diesel combustion—Homogenizing equivalence ratio distribution in the lift-off region—, SAE technical paper, 2019-01-2273 (2019)
- (8) J. Shinjo et al. : Surface instability and primary atomization characteristics of straight liquid jet sprays, International Journal of Multiphase Flow, Vol.37, pp.1294-1304 (2011)
- (9) N. Itoh : The origin and subsequent development in space of Tollmien-Schlichting waves in a boundary layer, Fluid Dynamics Research, Vol.1, No.2, pp.119-130 (1986)
- (10) S. Moon et al. : Ultrafast X-ray Study of Multi-hole GDI Injector Sprays : Effects of Nozzle Hole Length and Number on Initial Spray Formation, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.68, pp.68-81 (2015)
- (11) M. Hawi et al. : Effect of injection pressure and ambient density on spray characteristics of diesel and biodiesel surrogate fuels, Fuel, Vol.254, 115674 (2019)
- (12) J. Xia et al. : Experimental study on spray and atomization characteristics under subcritical, transcritical and supercritical conditions of marine diesel engine, Energy Conversion and Management, Vol.195, pp.958-971 (2019)
- (13) H. Li et al. : Investigation of evaporating sprays in a medium speed marine engine, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.121, 110278 (2021)
- (14) J. Du et al. : Macroscopic non-reacting spray characterization of gasoline compression ignition fuels in a constant volume chamber, Fuel, Vol.255, 115818 (2019)
- (15) S. Parrish et al. : Evaluation of Liquid and Vapor Penetration of Sprays from a Multi-Hole Gasoline Fuel Injector Operating Under Engine-Like Conditions, SAE Int. J. Engines Vol.7, No.2, 2014-01-1409 (2014)
- (16) Bronkhorst : FLUIDAT on the Net, <https://www.fluidat.com> (accessed on 2021)

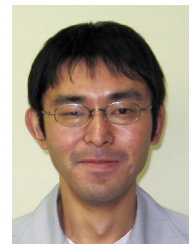
■著者■



倉持 晃



原田 雄司



永澤 健



瀬戸 祐利



山下 洋幸