
クレムソン大学 CU-ICAR (アメリカ) 研修報告書 次世代ディーゼルエンジンの噴霧先端到達距離予測モデルの改善

工学研究科 機械システム工学専攻 山川 裕貴

1. はじめに

2015年8月31日から同年9月28日の間、アメリカのクレムソン大学 CU-ICAR において研究を行った。以下にその報告内容を示す。

2. 共同研究テーマ

クレムソン大学 CU-ICAR(国際自動車研究所)では天然ガスエンジンの研究に取り組んでおり、そこでは実機を用いた実験や数値シミュレーションを用いている。また広島大学は昨年度から廣安名誉教授が開発したディーゼルエンジン燃焼の数値シミュレーションプログラム HIDECS (Hiroshima University Diesel Engine Combustion Simulation) の技術を新たに導入した。しかし、近年ディーゼル技術の進歩と共に HIDECS の予測結果と実機結果に違いが生じてきている。そこで、今年度は HIDECS の予測精度向上のために、エンジン性能予測結果に影響を与える噴霧先端到達距離式の予測精度向上を共同研究として行う。

3. 共同研究スケジュール

8月30日 出国
9月1日～9月26日 研究、プレゼンテーション
10月29日 帰国

4. 共同研究派遣先の概要

大学名: Clemson University Design Department of Automotive Engineering
所在地: アメリカ サウスカロライナ州 クレムソン
指導教員: Dr. Zoran FILIPI

5. 共同研究内容

5.1 背景・目的

アメリカでは採掘技術の発展によりシェールガスの採掘技術が確立し、天然ガス産出が急激に増加し、豊富な天然ガスの供給量が予想される(シェール革命)。その一方で、アメリカでは新たな排気ガス規制案を発表された。これは従来よりもすす、NOx などの有害物質の排出を40～80%削減することも義務付けるものであり、排気ガスのクリーン化が必要である。そのためには、DPF (Diesel Particulate Filter)や尿素 SCR(Selective Catalytic Reduction)システムなどの後処理が一般的だが、これらの装置は高コストであるため、エンジン本体の噴射、燃焼技術によって更なる排気ガス低減が必要である。そのため、アメリカではシェール革命による天然ガスの豊富な供給量、クリーンな特徴を持った天然ガスを主な燃料とした天然ガスエンジンの研究が急激に進んでいる。クレムソン大学 CU-ICAR ではこの天然ガスエンジンの研究が行われている。天然ガスエンジンは軽油を着火源として微量噴射し、主燃料として天然ガスを使用する。そこでは実機エンジンを用いた実験や数値シミュレーションを用いて研究が行われている。また広島大学は今年度から廣安名誉教授が開発したディーゼルエンジン燃焼の数値シミュレーションプログラム HIDECS (Hiroshima University Diesel Engine Combustion Simulation) の技術を新たに導入した。そこで HIDECS で天然ガスエンジン用の性能を予測計算できること最終目標にし、今年度は HIDECS の予測精度を向上させる事を目標とした。

5.2 エンジン性能予測計算 (エンジン性能シミュレーション)

広島大学では上述のとおりディーゼル燃焼シミュレーションの HIDECS をあらたに導入した。HIDECS は広島大学の廣安名誉教授らによって開発されたディーゼルエンジン燃焼室の噴霧・燃焼を計算するシミュレーションコードであり、現象論モデルに基づいて計算される。HIDECS は空間的概念を持たない 0 次元燃焼シミュレーションであり、擬似的に 3 次元として計算できる。噴霧 (インジェクタから噴射された燃料は霧状になることから噴霧と呼ぶ) を Fig. 1 に示すように時間的、空間的にセルと呼ばれる要素に分割することで、疑似的に 3 次元的不均質性を考慮することが可能である。また HIDECS での計算は全て実験式でモデル化されており、そのため 1 サイクルおよそ数秒で計算が行われるので、非常に計算時間が早いことが大きな利点である。

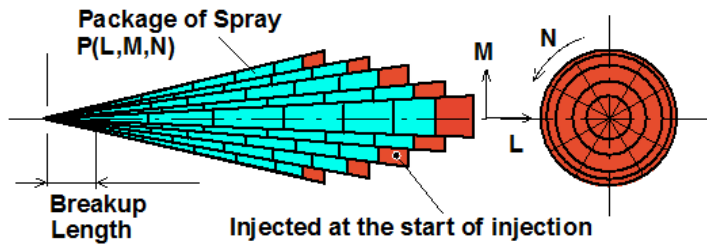


Fig 1 HIDECS の噴霧モデル

本研究では HIDECS を軽油着火型天然ガスエンジンに適用することが最終目標であるが、本年度は HIDECS の噴霧先端到達距離の予測精度を確保することを目的とする。

5.3 HIDECS による噴霧先端到達距離の予測精度の検証

HIDECS の噴霧先端到達距離の予測精度を検証するために定容器での噴霧計測結果と HIDECS に用いられている噴霧先端到達距離予測式での予測結果との比較を行った。HIDECS には噴霧先端到達距離の予測には廣安一新井の式が用いられている。廣安一新井の式を以下に示す。

$$0 < t \leq t_b$$

$$S = 0.39 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_l}} \cdot t$$

$$t > t_b$$

$$S = 2.95 \left(\frac{\Delta P}{\rho_a} \right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{d_0 \cdot t}$$

t : 時間 [s]

t_b : 分裂時間 [s]

S : 噴霧先端到達距離 [m]

ΔP : 噴射差圧 [Pa]

ρ_l : 燃料密度 [kg/m³]

ρ_a : 雰囲気気密度 [kg/m³]

d_0 : ノズル径 [m]

噴霧の到達距離は、噴霧が微粒化されるまでは等速で発達し、それ以降は時間の 1/2 乗に比例して発達する事を表している。実験条件を表 1-1、噴霧先端到達距離の計測結果と計算結果との比較を図 2-2 に示す。図 2-2 より、噴霧先端到達距離の計算結果は計測結果に比べ小さい値であることが分かる。また、噴射開始直後の噴霧先端到達距離を図 3-3 に示す。図 3 より、計算結果では分裂時間が短くなっている。よって分裂時間の違いから噴霧先端到達距離に違いが生じているのではないかと考えられる。

- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: Times New Roman
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: Times New Roman
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: Times New Roman
- 書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝
- 書式変更: フォント: Times New Roman
- 書式変更

Table 1 噴霧計測条件

Fuel	JIS#2 Diesel Fuel	
Nozzle hole diameter : d_o	$\phi 0.111\text{mm}$	
Nozzle hole number	1	
Injection quantity : Q_{inj} [mm ³]	5	
Injection duration [ms]	1.6	
Injection pressure : P_{inj} [MPa]	100	160
Ambient temperature [K]	300	
Ambient pressure [MPa]	1.5	
Ambient gas component	N ₂	
Ambient density [kg/m ³]	≈ 18	

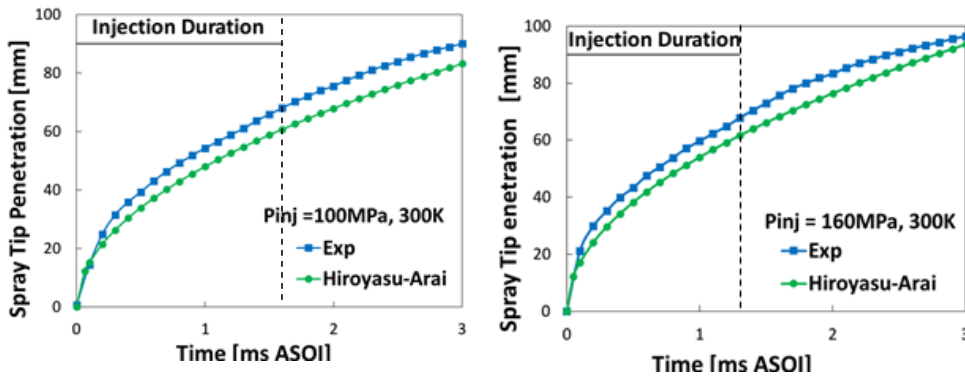


Fig 2 噴霧計測結果 vs. 計算結果

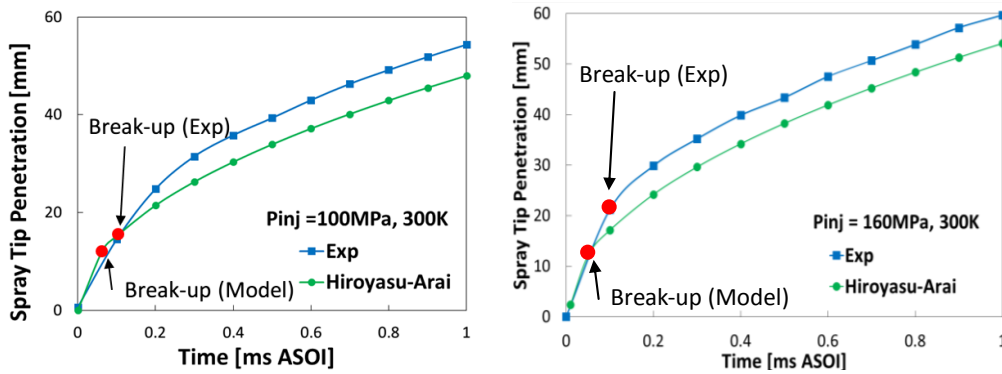


Fig 3 分裂時間 噴霧計測結果 vs. 計算結果

5. 4 分裂時間および噴霧先端到達距離予測モデルの精度向上

従来の分裂時間を求める式を以下に示す.

$$t_B = \alpha \frac{d_0}{v_0} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_a}}$$

$$\left(\begin{array}{l} v_0 = \alpha_v \sqrt{2\Delta P / \rho_l} \\ L_b = \alpha \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_a}} d_0 \end{array} \right)$$

t_B : 分裂時間 [s]
V_0 : 噴射初速度 [m/s]
α_v : 速度計数 [-]
ρ_l : 燃料密度 [kg/m ³]
ρ_a : 雰囲気密度 [kg/m ³]
d_0 : 噴孔径 [m]
α : 実験係数 [-]
L_b : 分裂長さ [m]

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

廣安一新井の式では, 実験係数および速度計数はそれぞれ 15.8, 0.39 と一定として計算を行っている. しかし, これらの係数は雰囲気密度によって変化する事が近年の研究により明らかになっている. よってこれらの係数に無次元化した雰囲気密度をかける事で係数が雰囲気密度によって変化する事を表している. ($C_v = \alpha_v$)

$$\alpha = 27.0 \left(\frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^{-0.1} \quad C_v = 0.70 \left(\frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^{-0.25}$$

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

書式変更: フォント: Times New Roman

書式変更: フォント: Times New Roman

書式変更: フォント: Times New Roman

これらの係数を用いた新たな式 (Clemson-Hiroshima Model) を以下に示す.

$$0 < t \leq t_B$$

$$S_{inj} = 0.70 \left(\frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^{-0.25} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_f}} \cdot t_{inj}$$

$$t > t_B$$

$$S_{inj} = 4.347 \left(\frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^{-0.175} \left(\frac{2\Delta P}{\rho_a} \right)^{0.25} \sqrt{d_0 \cdot t_{inj}}$$

t : 時間 [s]
t_B : 分裂時間 [s]
S : 噴霧先端到達距離 [m]
ΔP : 噴射差圧 [Pa]
ρ_f : 燃料密度 [kg/m ³]
ρ_a : 雰囲気密度 [kg/m ³]
d_0 : ノズル径 [m]

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

書式変更: フォント: Times New Roman

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

次に上記の式を用いた計算結果と廣安一新井の式の計算結果, 噴霧計測結果の比較を図4.4, 分裂時間の比較を図5.5 に示す. 図4.4より, 新たに用いた式から算出された結果は, 噴射開始初期では計測結果より小さな値を取っているが, 計測結果と非常に近い値を得ることが出来た. また図5.4からも分かるように, 分裂時間も廣安一新井の式と比較すると計測結果に近い値を得ることが出来た. 今回はノズル条件・雰囲気条件などを変化させていないため今後は違うノズル諸元での検証や蒸発条件などの様々な雰囲気条件での検証が必要である.

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

書式変更: フォント: Times New Roman

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

書式変更: フォント: Times New Roman

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

書式変更: フォント: Times New Roman

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

書式変更: フォント: Times New Roman

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

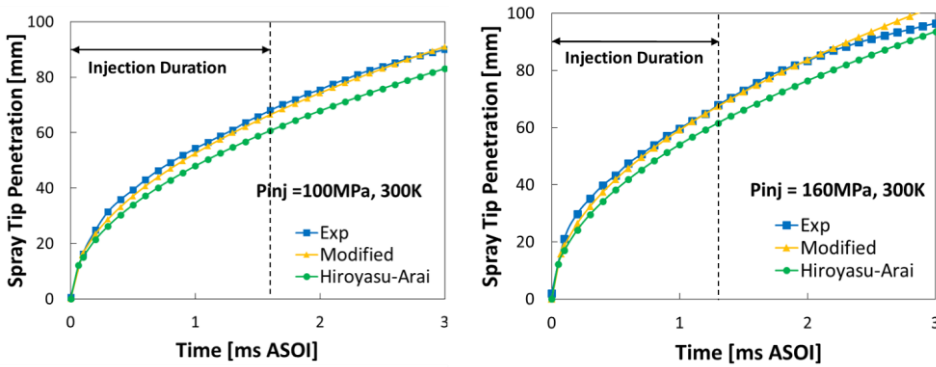


Fig 4 噴霧計測結果 vs. 計算結果(Clemson-Hiroshimaモデル, 廣安一新井の式)

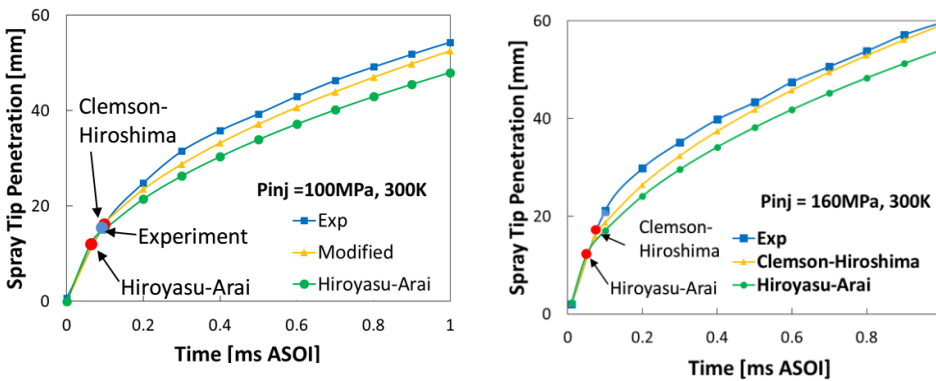


Fig 5 分裂時間 噴霧計測結果 vs. 計算結果(Clemson-Hiroshimaモデル, 廣安一新井の式)

6. まとめ

HIDECS[▲]で用いられている噴霧先端到達距離の精度検証および精度向上を行った。噴霧先端到達距離の予測には廣安一新井の式が用いられている。廣安一新井の式で用いられている実験係数および速度計数は雰囲気密度によって変化する事が近年の研究により明らかになっている。よってこれらの係数に無次元化した雰囲気密度をかけ実験式の修正を行った。その結果従来の式に比べ計測結果に近い値を得ることが出来た。今回は非蒸発条件での比較であるため、今後は蒸発条件などの様々な条件から検証する必要がある。

書式変更: フォント: MS 明朝

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

7. 謝辞

本派遣において非常に多くの方々にご支援を頂きました。このような機会を与えてくださった先生方、並びにサポートして下さった皆様に感謝の意を表します。特に研究を行うにあたり、様々な指導、ご鞭撻を頂いた西田先生、尾形先生並びに現地で指導および世話して下さった Zoran FILIPI 先生、また週末の観光や食事など研究のみならず日常生活で様々なサポートをして下さった博士研究員の Shuonan XU[▲]に深く感謝します。皆様のおかげで1ヶ月充実した日々を過ごすことができました。本当にありがとうございました。最後に海外共同研究という素晴らしい場を提供して下さった山本元道准教授をはじめとする実行委員会の諸先生方、学生支援国際事業担当の皆様にも深く御礼申し上げます。

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝

書式変更: フォント: (英) MS 明朝, (日) MS 明朝