

---

# クレムソン大学 CU-ICAR (アメリカ) 研修報告書

## 数値計算を用いた軽油着火型天然ガスエンジンに関する研究

工学研究科 機械システム工学専攻 M140812 板持 仁之

### 1. はじめに

2014年9月1日から同年9月26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。そこで今年度は HIDECS を用いて軽油着火型天然ガスエンジンに関する共同研究を行う。

### 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ず、NO<sub>x</sub> 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、今年度はまず HIDECS の予測精度を確保すること、CU-ICAR で用いられているシミュレーション法などの習得

---

を目標とした。

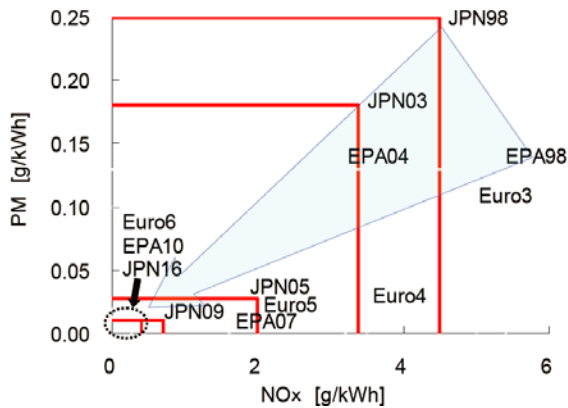


Fig 1 排気ガス規制

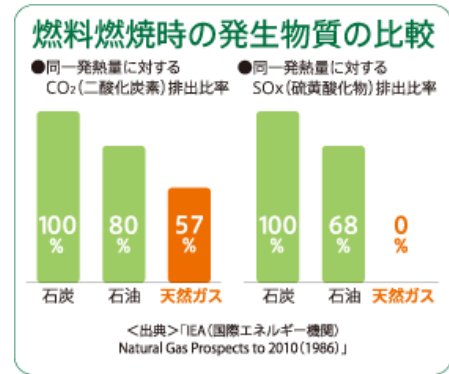


Fig 2 天然ガスのクリーン性

<http://www2.panasonic.biz/es/air/ghp/feature.html>

## 5. 2 軽油着火型天然ガスエンジン

CU-ICARでは 軽油を着火源とした天然ガスエンジンの研究を行っている。このエンジンは軽油と天然ガス二つの燃料を使用するエンジンである。天然ガスを吸気ポートに噴射し、天然ガスと空気が混合したものが筒内に吸入され、ピストンが圧縮され軽油を微量噴射し、その軽油を着火源として天然ガスに着火させ、動力を得る機構である。(Fig 3) 天然ガスは自着火温度が非常に高いため(537℃)、そのために自着火温度が低い軽油(250℃)を噴射し着火源としている。利点として余剰空気量で燃焼すること、天然ガスの特徴から、すす、NO<sub>x</sub>の排気量が極めて少ないという点である。しかし天然ガスの主成分はメタンでありこれは温暖効果がCO<sub>2</sub>の20倍であるため、従って未燃燃料の排気が大きな課題である。

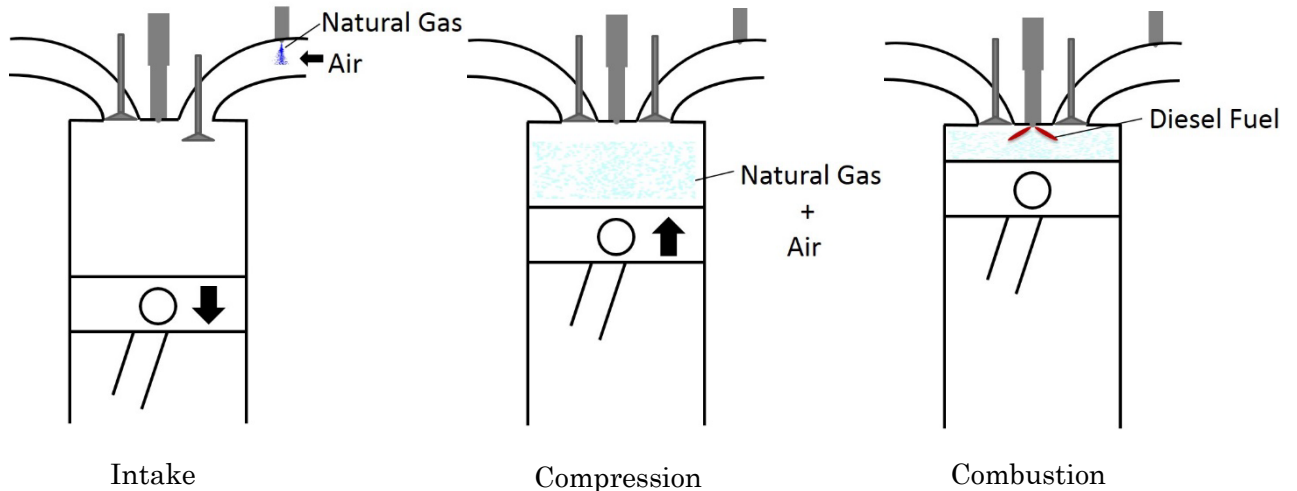


Fig 3 軽油着火型天然ガスエンジンの工程

### 5.3 エンジン性能予測計算（エンジン性能シミュレーション）

研究を進行するにあたりCU-ICARではエンジン性能を予測するシミュレーションを用いている。そのシミュレーション法としてCU-ICARでは商用ソフトウェアであるGT-POWERという吸排気工程など考慮できる1次元エンジントータルシミュレーションを使用している。GT-POWERはガソリン、ディーゼル、天然ガスなど多数のエンジンシステムシミュレーションが可能である。DI（Direct Injection）にはジェットモデル、SI（Spark Ignition）には乱流火炎モデルを使用し、Wiebe FunctionモデルはDIおよびSI両方に適用可能である。

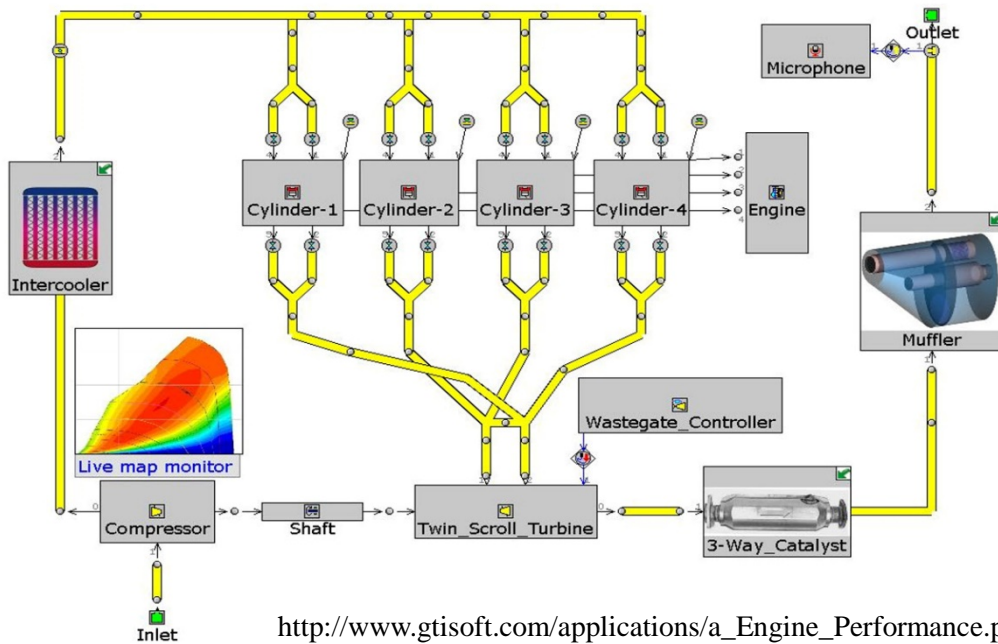


Fig 4 GT-POWER による 4 気筒エンジンモデル

また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はディーゼルエンジンの燃焼を計算する数値計算プログラムで広島大学の廣安名誉教授らによって開発された。GT-POWERが1次元エンジントータルシミュレーションなのに対し、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 5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。

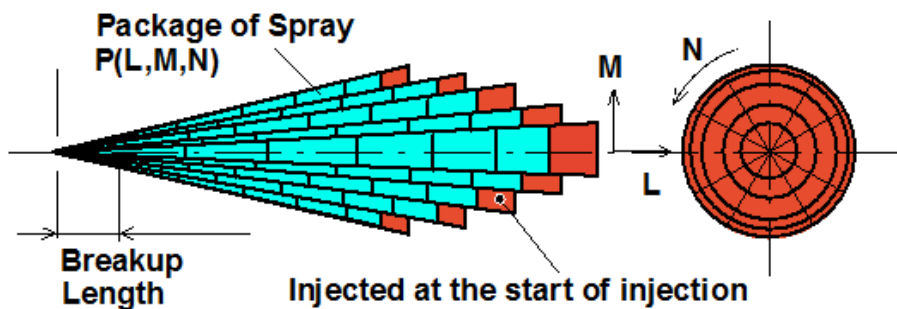


Fig 5 HIDECS の噴霧モデル

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, GT-POWER の予測精度を確保することを目的とする。

#### 5. 4 HIDECS と GT-POWER によるディーゼルエンジン性能予測精度の検証

HIDECS, GT-POWER の予測精度を検証するために実機ディーゼルエンジン結果との比較を行った。実機ディーゼルエンジンの諸元を表 1, 検証結果を図 6 に示す。上図は筒内圧力履歴, 下図は熱発生率履歴を示している。結果から HIDECS, GT-POWER は実機を概ね再現出来ていることが分かる。しかし HIDECS による熱発生率履歴を見てみると, 計算結果では実機より早く着火が発生していることが分かる。今回 HIDECS では着火判定を Lievengood-Wu モデルで定義しているが, 図 7 に示すように着火判定式はいくつかのパラメータが与えられているため, 実機に合うように更なるチューニングが必要である。

表 1 Engine Specification

Bore × Stroke[mm]	137 × 169
Length of Connecting Rod[mm]	220
Engine Speed[rpm]	1200
Mass of Fuel[mg/cycle]	150
EGR Rate[%]	25

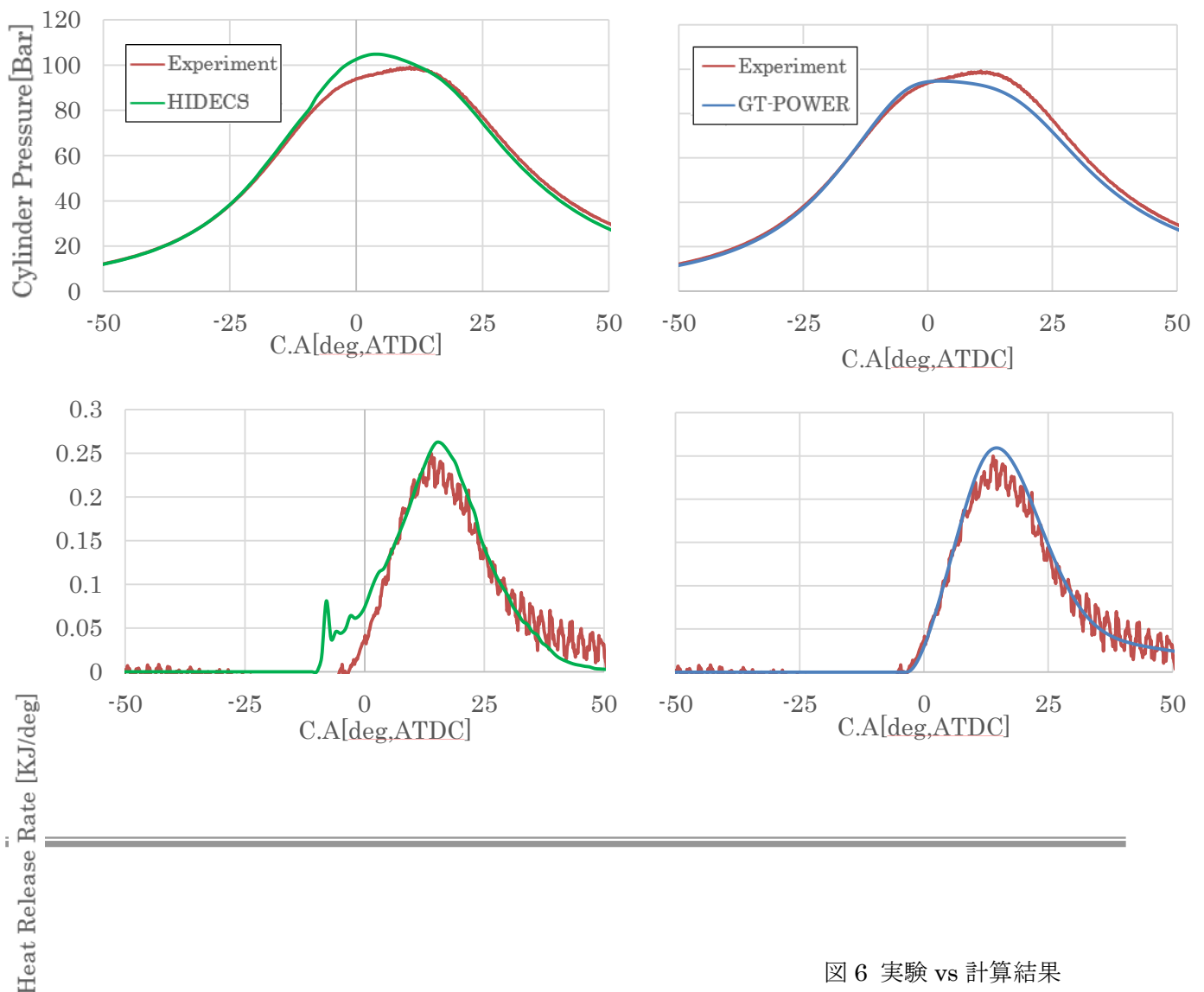


図 6 実験 vs 計算結果

$$\tau = AP^C \phi^D \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (1)$$

$$\int_0^{t_i} \frac{1}{\tau} dt = 1 \quad (2)$$

$t_i$ : 着火遅れ時間 [s]

P: 筒内圧力 [kg/cm<sup>2</sup>]

$\phi$ : セル内の当量比

T: セル内のガス温度

A, B, C, D: モデルパラメータ

図 7 着火判定式の Lievengood-Wu モデル

### 5. 5 軽油着火型天然ガスエンジンとディーゼルエンジンの NO<sub>x</sub> 排気量比較

軽油着火型天然ガスエンジン、ディーゼルエンジンの NO<sub>x</sub> の排気量の比較を GT-POWER を用いて行った。図 7 にその結果を示す。結果から軽油着火型天然ガスエンジン(NG)はディーゼルエンジンに比べ NO<sub>x</sub> の排気量が約 75%低減していることが分かる。NO<sub>x</sub> はエンジン筒内の燃焼が最も激しい時期、つまり燃焼温度が高いほど多く発生する。軽油着火型天然ガスエンジンは希薄燃焼であるために燃焼温度が低くなるため、結果 NO<sub>x</sub> 排気量が低減したと考えられる。

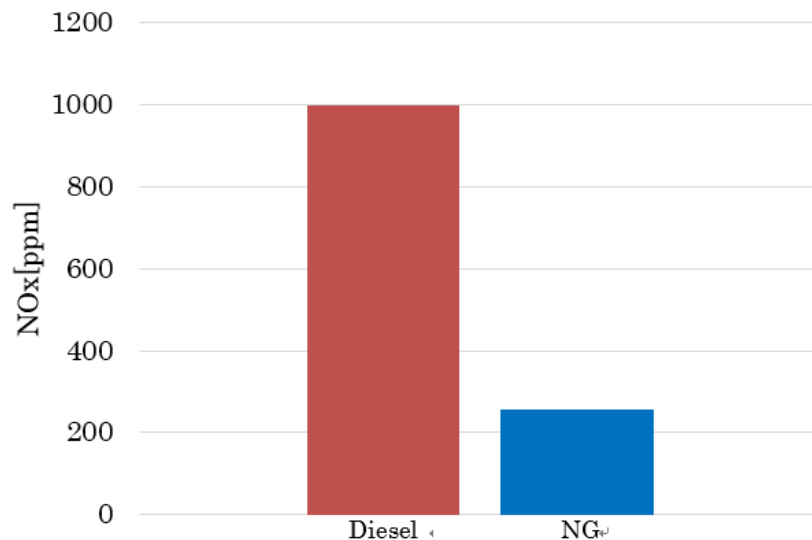


図 7 ディーゼルエンジン vs 軽油着火型天然ガスエンジンの NO<sub>x</sub> 排気量比較

---

## 6. まとめ

HIDECS, GT-POWER を用いて実機ディーゼルエンジンの性能予測の精度検証を行った。概ねの傾向は再現出来たが HIDECS による熱発生率履歴計算では実機の着火遅れを適切に再現出来ていない。今後も改良の必要がある。その後 HIDECS でのディーゼルエンジン性能予測精度が確保出来たら、HIDECS を軽油着火型天然ガスエンジンに対応出来るようにモデルを変更していく。

## 7. 謝辞

海外共同研究を通し、初めて海外へ行き、普段経験できないような貴重な体験ができました。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くだ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、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。最後に全面的に応援、サポートしてくれた家族にも感謝の意を表します。

---