

## Team MBC Model Based Calibrationにおけるエンジン実験モデルの精度向上に関する研究

担当者

秋久 和裕(M2) 知野見 哲司(B4) 川島 龍一郎(B4)

2013 年班紹介資料

## 1. 緒言

近年,ディーゼルエンジンは低公害化および高効率化のため,様々なデバイスが導入され, ECU の制御パラメータが増加している. そこで, エンジン適合の効率化を目指した MBC(Model Based Calibration)手法が注目されている. MBC では, 必要最小限の計測点から実機の実験モデルを作成し, 所望の制約条件下で最適化することにより, ECU 設定値を決定する手法である. しかし, MBC 手法で用いられている実験モデルは, 計測データの統計的な近似式であり, 計測点のない領域では予測精度が保証されていない.

そこで本研究では, 実験モデルに物理的概念を取り入れ, モデルの予測精度向上や適用範囲拡大が可能となるモデリング手法の構築を目指す. 本報においては, NOx およびすすの物理法則を適用したモデル(以下, 物理的モデル)を構築し, モデルの計測点数に対するロバスト性の評価を行った.

## 2. NOx モデルおよびすすモデル

NO の生成はサーマル NO のみを対象として, 拡大 Zeldovich 機構を用いて算出した.

$$NO = \alpha [O_2]^{1/2} \exp\left(-\frac{\beta}{T}\right) \quad (1)$$

ここで,  $\alpha$ ,  $\beta$  は実験定数,  $T$  は最大筒内平均温度 [K],  $[O_2]$  は筒内酸素濃度 [kmol/m<sup>3</sup>] である.

また, すすの質量  $m_s$  はすす生成反応速度と酸化反応速度の差として求められる Hiroyasu モデルを用いて算出した.

$$m_s = \frac{A_f p^{0.5} \exp\left(-\frac{E_f}{RT}\right) - C \exp\left\{-A_o X_{O_2} p^{1.8} \exp\left(-\frac{E_o}{RT}\right) t\right\}}{A_o X_{O_2} p^{1.8} \exp\left(-\frac{E_o}{RT}\right)} \quad (2)$$

ここで,  $p$ ,  $T$ ,  $X_{O_2}$  はそれぞれ最大筒内平均圧力 [MPa], 最大筒内平均温度 [K] および酸素分子のモル分率 [-] である. 活性化エネルギーは  $E_f = 8 \times 10^4$  [kJ/kmol],  $E_o = 12 \times 10^4$  [kJ/kmol] である.  $A_f$  および  $A_o$  はモデル定数であり,  $C$  は積分定数である. また, すすモデルは式(2)に加え, すす生成の影響因子として抽出した  $p$ ,

$T$  および  $X_{O_2}$  をパラメータとし, 指数関数表記による数式モデルを作成した.

$$m_s = a + b \cdot T^c \cdot X_{O_2}^d \cdot p^e \quad (3)$$

ここで,  $a-e$  は実験定数である. また, 式(2), (3)を用いてモデルの評価を行った結果, 式(3)の予測精度が優れていたため, 以下の考察では式(3)の結果を使用した.

## 3. 実験装置および実験条件

## 3. 1 供試燃料および供試機関

供試燃料は JIS1 号軽油(セタン価 52.0)を使用し, 供試機関は単気筒直噴ディーゼルエンジン(ボア×ストローク:  $\phi 85 \times 96.9$  mm, 排気量 550 cm<sup>3</sup>, 圧縮比 16.3)を用いた. また, エンジンシステムは, 燃料噴射系においてコモンレール式燃料噴射装置を使用し, 排気系では SCV, S/C および DPF を備えた低圧 EGR システムを採用している.

## 3. 2 計測機器

NOx は MEXA-1500D(堀場製作所)を用いて測定した. また, Smoke の測定はスモークメータ(451S, AVL)を使用した.

## 3. 3 実験条件および実験領域の設定

表 1 に実験条件を示す. 本実験は, 機関回転数 2000 rpm, 燃料噴射量を 29.4 mg/str. の定常条件において行った. この条件下で 5 つの実験パラメータを変化させ, トルクやエミッション等の計測を行った.

実験モデルは実験パラメータの 3 次多項式とした. また, エンジンが安定して運転できる領域で D 最適計画を適用し, 合計 124 点の計測データを実機試験により取得した. 本報では, これらのデータを使用し, 実験領域を図 1 のように設定した.

Table 1 Experimental conditions

Engine speed	[rpm]	2000
Total injection quantity	[mg/str.]	29.4
Pilot injection quantity	[mg/str.]	1.0~4.0
Pilot injection interval	[edeg]	15.0
Main injection timing	[edeg, BTDC]	-3.0~9.0
Rail pressure	[MPa]	80~180
EGR ratio	[%]	0.0~39.0
Intake manifold pressure	[kPa]	120~150

### 3. 4 モデルの評価指標

本報では式(4), (5)で表される統計指標を用いて、実験モデルおよび物理的モデルの評価を行った。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n-p}} \quad (4)$$

$$\text{Validation RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \tilde{y}_i)^2}{n-p}} \quad (5)$$

ここで、 $y$  はモデリングデータ  $\hat{y}$  はモデル予測値、 $\tilde{y}$  はモデル検証用データ、 $n$  はモデル作成用データ数、 $p$  は実験パラメータ数である。なお、RMSE はモデルとモデリングデータとの二乗平均平方根誤差であり、モデルのフィッティング精度を意味する。また、Validation RMSE(以下、V.RMSE)は、モデルと検証用データとの二乗平均平方根誤差であり、モデルの予測精度を示している。

### 4. 結果および考察

本章では、実験モデルと物理的モデルの予測精度の比較を行う。図1の実験領域において、領域内の計測点から無作為に選択した75点、50点および30点をモデル作成用データとし、各モデル作成用データ数に対してNOx、すすの実験モデルおよび物理的モデルを各々10個作成した。また、10個ずつ作成したモデルに対してRMSEおよびV.RMSEの平均値および標準偏差を算出した。これらの計算結果を図2、3に示す。

図2から、実験モデルでは、計測点数の減少に伴いRMSEが低下する一方で、V.RMSEは大幅に増加している。この原因は、計測点数が減少すると計測点への

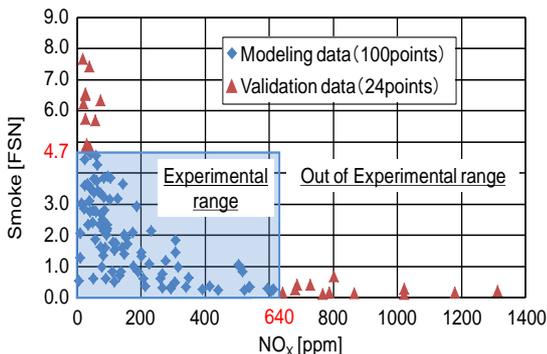


Fig. 1 Scatter diagram of measurement data

依存度が大きくなり、オーバーフィットが生じたため、予測精度が大幅に悪化したと考えられる。また、物理的モデルの各モデル精度はほぼ一定の値となっている。これは、物理法則を適用することでオーバーフィットが抑えられたためと考えられる。

次に、図3において、実験モデルは図2の結果と同様の傾向がみられる。一方、物理的モデルでは、NOxモデルに着目すると、計測点数の減少と共にV.RMSEの標準偏差は若干の増加傾向が見られるが、RMSEの標準偏差は大きな変化が見られない。また、すすモデルは、各モデル精度の標準偏差が小さい値でほぼ一定となっている。以上より、物理的モデルは実験モデルと比較して、計測点数および計測点の選び方に対し、高いロバスト性を有するといえる。

### 5. 結言

単気筒ディーゼルを対象にNOx、すすの物理法則適用モデルを構築し、計測点数に対するロバスト性を検証した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 実験モデルは測定点数の減少に伴い、計測データに対してオーバーフィットするため、予測精度が大幅に悪化する。
- (2) 物理的モデルは実験モデルと比較して、計測点数および計測点の選び方に対する予測精度のロバスト性が高い。

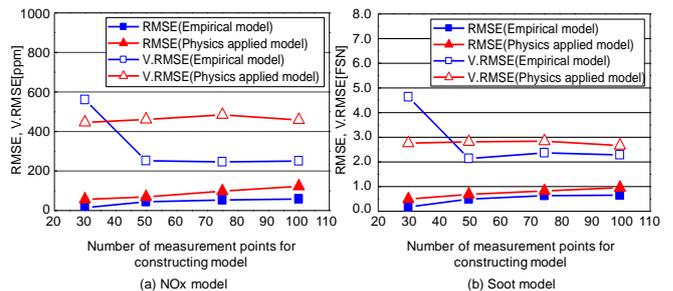


Fig. 2 Influence of the number of measurement points to model accuracy

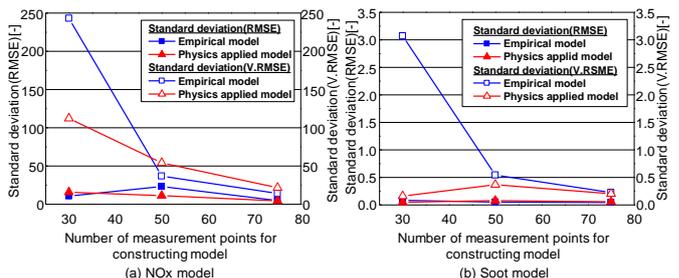


Fig. 3 Influence of the number of measurement points to stability of model accuracy