Study on Predictive Precision Improvement of the Engine Experiment Numerical Model by the Physical Law Application

学 ○清水 勇貴 (同志社大院) 学 岡本 真弥 (同志社大院) 学 松本 雅 (同志社大院)
 学 田中 悠也 (同志社大) 正 千田 二郎 (同志社大理工) 正 北村 泰隆 (株式会社本田技術研究所)
 湯浅 弘之 (株式会社本田技術研究所) 加藤 彰 (株式会社本田技術研究所)

Yuki SHIMIZU, Doshisha University, 1-3, Tataramiyadani, Kyotanabe, Kyoto, Japan
 Shinya OKAMOTO, Masashi MATSUMOTO, Yuya TANAKA, Jiro SENDA, Doshisha University
 Yasutaka KITAMURA, Horoyuki YUASA, Akira KATO, HONDA R&D Co., Ltd.

1 緒言

燃費・排気規制に対する多くの技術の導入により、エンジンの制御パラメータは増加しており、開発期間が長期化している。本研究は、エンジン実験モデルの高精度化と適用条件範囲の拡大を目的に、実験モデルに物理法則を組み込む手法を提案する。本報では、単気筒ディーゼルエンジンを対象に、NO_x・Smokeに関する物理モデルを作成し、実験モデルと比較することによりその有効性を検証した。

2 エミッションモデル

2.1 NO_x モデル

NO の生成はサーマル NO のみを対象とし、拡大 Zeldovich 機構を用いて次のように定式化した。

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

ここで、 α 、 β 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/m³]である。

2.2 Smoke モデル

すすの生成量 m_s は Hiroyasu モデルを用いて、噴霧・燃焼の実験式から多く使用されている指数関数で表現した。

$$m_s = a + b \cdot T^c \cdot X_{O_2}^d \cdot p^e \quad (2)$$

ここで、 p 、 T 、 X_{O_2} はそれぞれ最大筒内平均圧力[MPa]、最大平均筒内温度[K]、酸素分子のモル分率[-]を表す。なお、定数 $a \sim e$ は実験定数である。

3 実験装置および実験条件

本研究で使用したエンジンは過給器付単気筒 4 サイクルの直噴ディーゼルエンジン(B×S: φ82×96.9mm, 縮比 16.3)である。本実験では機関回転数を 2000rpm とし、燃料(JIS1 号軽油)噴射量は 29.35mg/st.とした。この条件下で 5 つの実験パラメータ(パイロット噴射量、メイン噴射時期、燃料噴射圧力、新気量および過給圧)を変化させ、トルク、筒内圧力、燃料流量、エミッションの計測を行った。

4 実験結果および考察

4.1 実験結果およびモデルの評価方法

実験より得た NO_xおよび Smoke 排出量のうち、エミッション値の安定した領域(NO_x:最大 640[ppm], Smoke:最大 4.7[FSN])100 点をモデル作成用データとし、残りの 24 点は検証用データとした。NO_xおよび Smoke の実験モデルは 3 次多項式で、物理モデルは式(1)、(2)を用いて計算した。なお、モデルの予測精度は、式(3)、(4)で表される統計指標で評価した。RMSE はモデルとそのモデル作成に使用した計測データとの平均二乗誤差を、Validation RMSE はモデルと検証用データとの平均二乗誤差を示している。ここで、 $\hat{y}$ は実験モデル、 y はモデル作成用データ、 $\tilde{y}$ はモデル検証用データ、 n は計測点数、 p は実験パラメータ数を表す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n-p}} \quad (3)$$

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

4.2 物理モデルの評価

表 1 に RMSE、Validation RMSE および RMSE に対する Validation RMSE の比率を示す。この比率は物理(実験)モデルをモデル作成に使用した実験データ以外に適用した際のロバスト性を示す。表 1 より、RMSE および Validation RMSE とともに物理モデルは実験モデルと比較して大きく、精度が劣る。次に、RMSE に対する Validation RMSE の比率では、物理モデルは実験モデルと比較して改善する。よって、予測精度の絶対値は悪化するものの、物理モデルにより実験範囲外で精度悪化を抑制できることが明らかになった。

4.3 実験パラメータと物理モデルの関係

本節では影響度の低い実験パラメータを削除した場合の物理モデルの予測精度について考察する。表 2 に RMSE、Validation RMSE および RMSE に対する Validation RMSE の比率を示す。表中の物理モデル A は 5 パラメータで、物理モデル B はパラメータを削除して作成したモデルを表す。表 2 より、RMSE および Validation RMSE とともに、物理モデルは実験パラメータの削除を行っても同等の精度が得られる。また、RMSE と Validation RMSE の比率は 5 パラメータで構成された物理モデルと比較して、改善する。この結果より、物理モデルに使用する実験パラメータは、精度を保ったまま削除が可能であると考えられる。

5 結言

1. 物理モデルにより実験範囲外で精度悪化を抑制できる。
2. 物理モデルに使用する実験パラメータは、精度を保ったまま削除が可能である。

Table1 Evaluation for experimental model and physical model

	Experimental model			Physical model		
	RMSE	V.RMSE	Ratio	RMSE	V.RMSE	Ratio
NO _x [ppm]	58.17	250.41	4.30	122.69	458.14	3.73
Smoke [FSN]	0.652	2.285	3.50	0.957	2.663	2.78

Ratio=Validation RMSE/RMSE

Table2 Influence of experimental parameters on physical model

	Experimental model			Physical model A			Physical model B		
	RMSE	V.RMSE	Ratio	RMSE	V.RMSE	Ratio	RMSE	V.RMSE	Ratio
NO _x [ppm]	58.17	250.41	4.30	122.69	458.14	3.73	126.44	457.29	3.62
Smoke [FSN]	0.652	2.285	3.50	0.957	2.663	2.78	0.981	2.700	2.75

Ratio=Validation RMSE/RMSE