

等価的な図示平均有効圧計測法の検証

Verification of Equivalent Indicated Mean Effective Pressure Measurement Method

長 島 慶 一*
Keiichi NAGASHIMA
花 田 尚 喜*
Naoki HANADA

三 浦 啓 二*
Keiji MIURA
塚 本 能 人*
Yoshito TSUKAMOTO

松 本 雅 彦*
Masahiko MATSUMOTO
土 屋 一 雄**
Kazuo TSUCHIYA

要 旨

内燃機関の燃焼状態を直接示すパラメータとして、一般に図示平均有効圧 (Indicated mean effective pressure: IMEP) が用いられる。指圧センサはデータ安定性やコスト、寿命などが課題となり実車制御用としての利用が難しかったが、指圧波形に起因するエンジン振動やボルト軸力の変化を計測し、IMEP と相関性の強い等価 IMEP をモニタする手法を使うことで、今後の発展性が見込める。

本研究では、指圧波形に起因する信号を圧電型点火プラグ座型力センサで検出し、等価 IMEP を検出する手法を検討した。実機計測をおこなうと、指圧波形から求めた IMEP と力センサから求めた等価 IMEP との相関係数は 0.799 となった。チャージアンプの設定変更と演算ゲートの設定によって相関係数は 0.990 に向上し、IMEP と等価 IMEP の相関性を向上させることができた。

ABSTRACT

Indicated mean effective pressure (IMEP) is generally used as a parameter directly expressing the status of combustion in an internal combustion engine. Issues of data stability, cost, and lifespan, among others, have made the use of pressure transducers in vehicle control applications challenging. The use of a method in which changes in engine vibration and bolt tightening force originating in the pressure diagram are measured and used to monitor equivalent IMEP, which has a strong correlation with IMEP, has potential for the future.

The research discussed in this paper studied a method in which signals originating in the pressure diagram were measured using a piezoelectric ignition plug washer-type force sensor and the results were used in the calculation of equivalent IMEP. When measurements were conducted in an actual engine, a correlation coefficient of 0.799 was obtained between IMEP, as determined from the pressure diagram, and equivalent IMEP, as determined using the force sensor. Alteration of the charge amplifier settings and the setting of a computation gate increased the correlation between equivalent IMEP and IMEP, raising the correlation coefficient to 0.990.

1. ま え が き

地球規模の大気汚染や温暖化に対して、自動車分野においても低公害、省燃費対策が急務となっている⁽¹⁾。これらの要求に対し、熱効率改善を目的としたガソリン筒内直接噴射エンジンの開発や HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) エンジンの研究がおこなわれている。また、最近の動弁系にみられる可変機構は、燃費や排気エミッションの改善に大きな役割を果たしている。その反面、制御パラメータは増大し、マップ状にした大量の制御データを必要としている。さらに、導入が検討されている過渡運転時の最適制御では従来のマップやテーブルの読み出し補間方式では対応が難しい状況にある⁽²⁾。

このようなエンジンの開発や制御には燃焼状態の把握が重要であり、確認手段として指圧波形の計測が従来から用いられてきた。指圧波形からは、最大筒内圧や発熱量、直接サイクルごとの仕事量を示す IMEP が算出でき重要なデータとなる。また、前述の制御データ用パラメータ設定や制御では、実車での過渡計測が重要となる。この場合、多少のひずみが指圧波形に生じて長時間計測時におけるデータの安定性が優先し、測定系の時定数設定が重要となる。

土屋らが提案する IMEP 演算手法⁽³⁾には、1 サイクルあたりのサンプリングデータ数を減少させても従来から用いられている数値積分法より演算誤差が少なく、演算速度が速く、かつ低周波数成分のみで算出できるという特徴がある。

これにより、測定系への制約がある場合でも有効な活用

* 四輪 R&D センター

** 明治大学

3.2. 点火プラグ座型力センサを用いた測定系

Fig. 3に供試センサとチャージアンプ、ケーブルからなる測定系を示す。この測定系では発生電荷 Q を出力電圧に変換するための帰還容量 C_f や出力電圧のドリフトを抑制するための帰還抵抗 R_f が接続されている。

3.3. 感度算出法

チャージアンプ設定を $C_f = 1000$ pF, $R_f = 10^9$ Ω (時定数 $\tau = 1$ sec)とし、脈動圧校正器からの検定圧 400 kPa, 印加周期 10 Hz で検定をおこなった。その出力波形をクランク角度 0.5 deg ごとにサンプリングし、50 サイクルの平均化処理したものが Fig. 4 である。この図から出力波形にサグとよばれる電圧降下が生じ、出力電圧が時間経過とともに減少していることが確認された。

出力波形にサグが生じると、どのクランク角度の出力電圧が検定圧に対応するかが不明確となり、検定圧に対する

C_o : Capacitance of piezoelectric element C_c : Capacitance of cable
 R_{oc} : Sum of piezoelectric element insulation resistance and cable insulation resistance
 C_f : Feedback capacitance R_f : Feedback resistance
 E_i : Input voltage E_o : Output voltage
 Z_i : Input impedance of operational amplifier I_i : Total current
 I_o, I_1, I_2 : Branch current Q : Generated electric charge

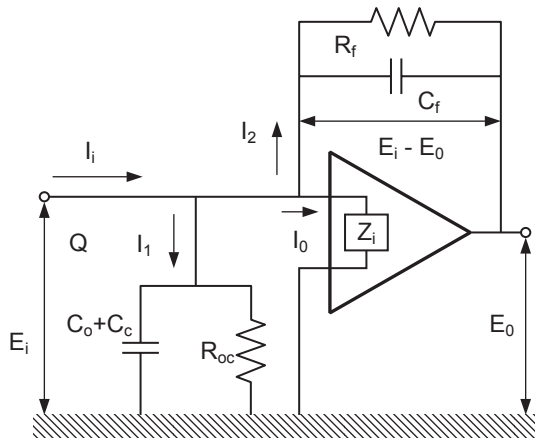


Fig. 3 Measurement system

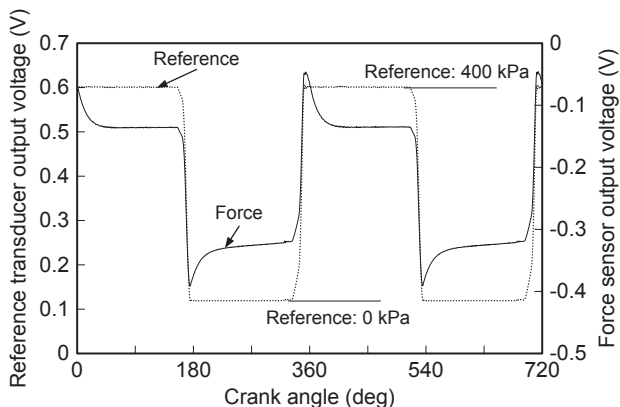


Fig. 4 Results of calibration

Table 1 Sensor sensitivity

Calibration pressure (kPa)	Sensitivity (kPa/V)
100	1721
200	1751
300	1864
400	1842
500	1849

出力波形の振幅から感度を求める従来手法を用いることが難しい。そこで、今回の検定では横軸に基準センサ、縦軸に供試センサの出力電圧をとった Fig. 5 から感度を求めることとした。このとき、傾きは供試センサの感度を示し、 y_1 がサグによる出力電圧低下分に相当する。以後、この手法をスロープ法と呼ぶ。

3.4. スロープ法による検定

チャージアンプの設定を $C_f = 1000$ pF, $R_f = 10^8$ Ω ($\tau = 100$ msec)として、圧力印加の周期を 10 Hz, 印加圧力を 100 kPa から 500 kPa まで 100 kPa ごとに与えると Fig. 6 の結果が得られる。印加圧力ごとに感度を読みとると Table 1 となり、それらを平均して感度は 1805 kPa/V となった。

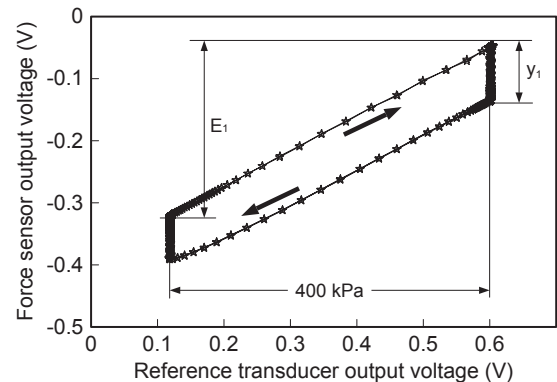


Fig. 5 Calculation of sensor sensitivity using slope method

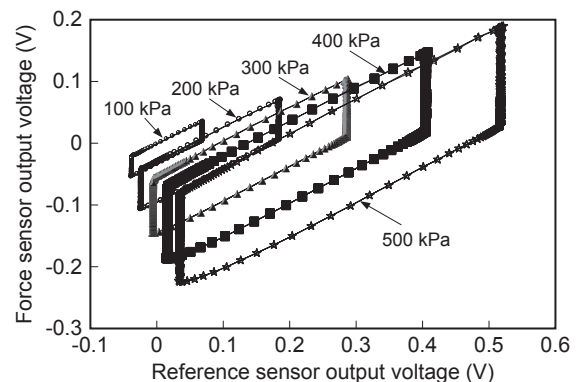


Fig. 6 Result of calibration using slope method

4. 点火プラグ座型力センサの固有振動数

等価 IMEP を精度良く求めるには、エンジン回転数の第 1 次、第 2 次周波数成分付近に固有振動がないことが重要である。エンジンの最高回転数は市販車で 8000 rpm 程度、レーシング用でも最高回転数は 20000 rpm 程度なので第 2 次周波数成分はそれぞれ 266.7 Hz、666.7 Hz である。よって、この周波数成分より低い帯域に固有振動が存在しなければよい。

供試センサを測定部位に取り付けた状態で固有振動数を調べるため、シリンダヘッドに供試センサと加速度センサを取り付け、鋼球落下試験をおこなった。実験装置を Fig. 7 に示す。直径 0.48 mm、重量 0.48 g の鋼球を脚立で固定されたガイドを通して、供試センサの付いた点火プラグの中心電極をねらって落下させる。このとき、生じる振動を供試センサと加速度センサで観測し、FFT アナライザで周波数解析をおこなう。なお、加速度センサは Fig. 8 の A に取り付けた。

Fig. 9、Fig. 10 にそれぞれ加速度センサの出力波形、パワースペクトラムを示す。この結果から、測定部位に取り付けられた供試センサは、IMEP 計測結果に影響を与える周波数帯域に固有振動数が存在しないことが確認できた。

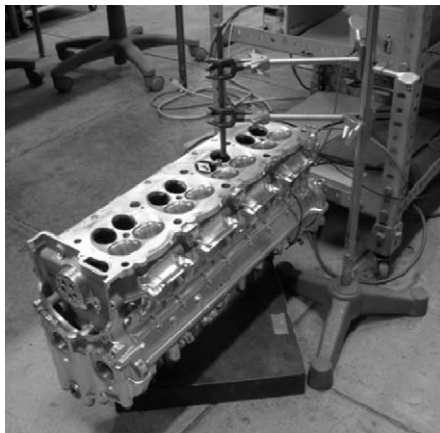


Fig. 7 Steel ball impact test

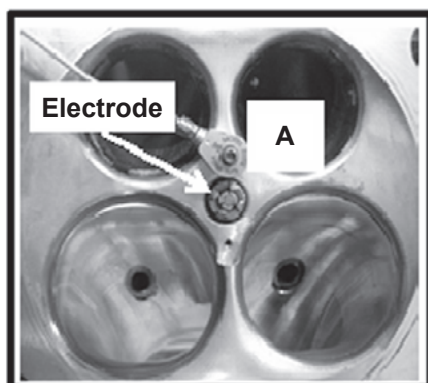


Fig. 8 Location of sensors

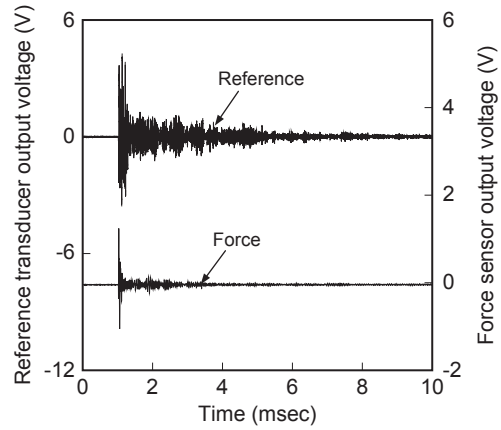


Fig. 9 Sensor output voltage

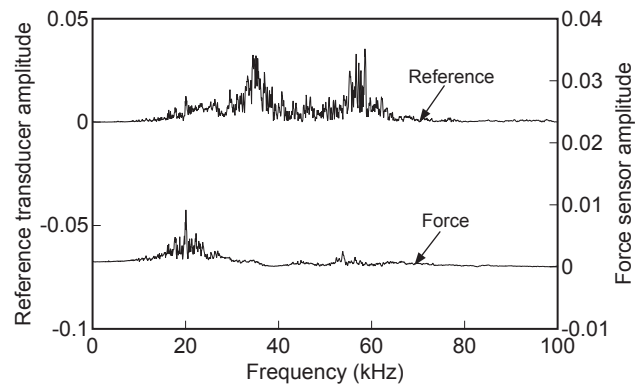


Fig. 10 Power spectrum

5. 実機での等価 IMEP 計測

5.1. 実験装置と供試機関

実機計測をおこなう装置を Fig. 11 に示す。供試センサと比較データ計測用の指圧センサを図のように取り付け、出力波形をフーリエ級数型燃焼解析装置⁽⁷⁾に取り込み、同一サイクルにおけるセンサ出力を比較した。ここで、指圧センサはキスラー社製 7061B センサを使用し、5011B チャージアンプを接続し、時定数は MEDIUM とした (以

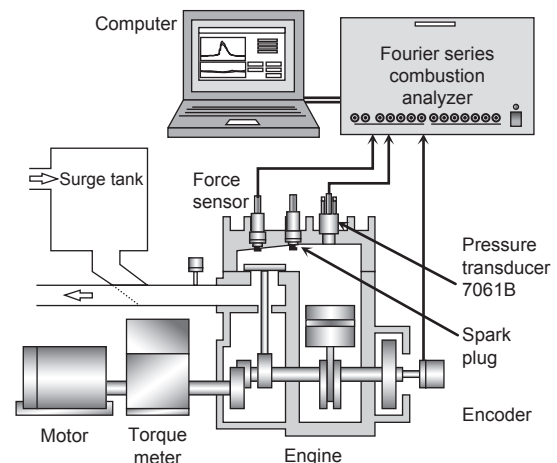


Fig. 11 Test equipments

Table 2 Engine specifications and test conditions

Engine type	Shibaura GEF30RE
Bore × Stroke	78 × 62 (mm)
Displacement	296 (cm ³)
Compression ratio	7.4
Engine speed	1,800 (rpm)
Throttle	1/4 - 3/4
Ignition timing	BTDC 22 (deg)
A/F	12.7, 15.3

下, 基準センサ). なお, エンジンへの点火はプラグ座型力センサではおこなわず, 供試エンジンの点火プラグを使用した. 実験に用いたエンジンの諸元とテスト条件を Table 2 に示す.

5.2. 等価 IMEP 計測結果

本実験で使用する供試センサを含む測定系は Fig. 3 に示したとおりである. ここでは, C_f を 1000 pF, R_f を指圧波形計測の SHORT モードに相当する $10^9 \Omega$ とした. このとき, 時定数 $\tau = 1$ sec, 低域遮断周波数 $f_c = 0.159$ Hz となる.

Table 2, A/F 12.7 の条件で供試センサと基準センサの出力波形をそれぞれ 300 サイクル収録し, 平均化すると Fig. 12 となった. この結果から, 供試センサ出力波形は高調波のノイズ成分を除けば, 指圧波形に近い形態となっていることがわかる. Fig. 13 は, 連続した 300 サイクルの IMEP と等価 IMEP の推移を示したもので, 等価 IMEP は IMEP に対してほぼ追従している. また, Fig. 14 は IMEP に対する等価 IMEP の相関性を示しており, 相関係数は 0.799 となった.

以上より, 今回のテスト条件, 計測条件であれば, おおよその IMEP モニタが可能と思われる. しかし, より高精度な等価 IMEP の計測やエンジン制御への適用を考えると, 追従性や相関性の向上が必要である.

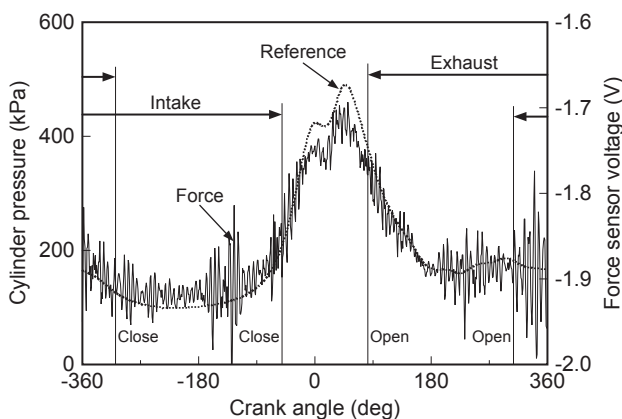


Fig. 12 Cylinder pressure and force sensor output voltage waveforms

5.3. 等価 IMEP の計測精度向上

圧電型センサとチャージアンプを組み合わせる場合, Fig. 3 の絶縁抵抗 R_{oc} が低下すると, 出力波形のベースラインにドリフトが生じる. このドリフトを長時間放置すると, やがて測定レンジを超え測定不能になる. 絶縁抵抗の低下はコネクタ部への液滴浸入や素子の温度上昇によって生じ, 抑制するには帰還抵抗 R_f を小さく設定する必要がある. そこで, R_f が前章の設定である $10^9 \Omega$ の場合におけるベースライン安定性を確認した. 供試機関は Table 2 のエンジンで, 運転条件はスロットル開度 2/4, A/F 12.7 とした. 比較用として基準センサで指圧波形の計測をおこなった. その結果は Fig. 15 に示すとおりで, エンジン

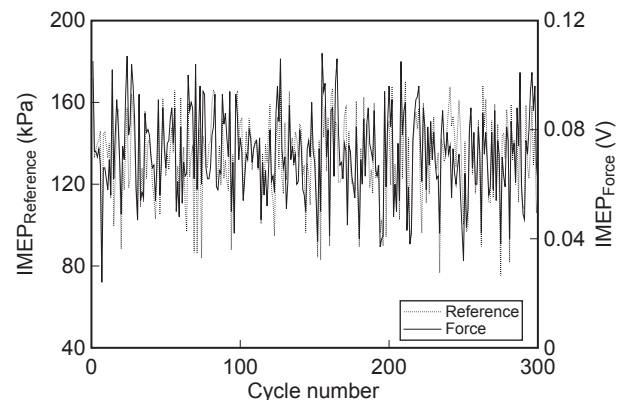


Fig. 13 IMEP and equivalent IMEP in continuous cycles

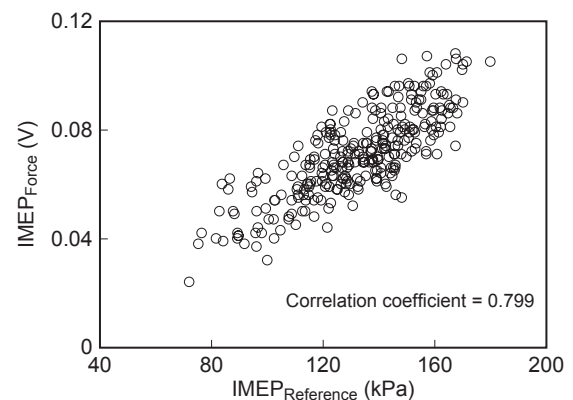


Fig. 14 Relation between IMEP and equivalent IMEP

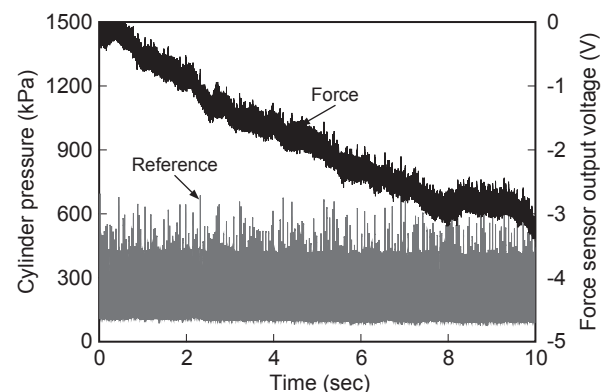


Fig. 15 Baseline drift of sensors

運転中に供試センサ出力のベースラインがドリフトを起し、測定レンジを超える傾向にある。よって、 R_f をより小さく設定する必要がある。一方、 R_f を小さく設定することで低域周波数成分の検知性が低下し、等価 IMEP の計測結果に影響することが考えられる。これに対しては、測定系の周波数特性を事前に調べておくことで補正が可能⁽⁴⁾であり、 R_f を小さく設定し安定性を優先することが実用的である。

また、供試センサの出力波形は Fig. 12 のように電氣的ノイズや振動が重畳している。この場合、吸気行程や排気行程のような筒内圧が小さい領域では SN 比が低下し、圧縮上死点付近の筒内圧が大きい領域では比較的 SN 比が良好になる。そこで、SN 比が良好な圧縮上死点付近に演算ゲートを設け、演算ゲート内のデータのみで等価 IMEP の算出をおこなう。

R_f を $10^8 \Omega$ に変更し、圧縮上死点 ± 120 deg で演算ゲート設定をおこない、等価 IMEP の計測精度を確認すると Fig. 16, Fig. 17 となる。Fig. 16 から等価 IMEP は IMEP の変化に追従していることが確認でき、Fig. 14 の相関係数 0.799 に対し Fig. 17 は 0.990 に向上していることが確認できる。

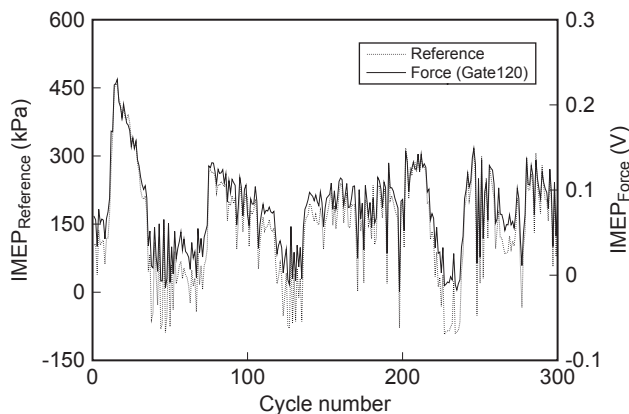


Fig. 16 IMEP and equivalent IMEP in continuous cycles (R_f modified)

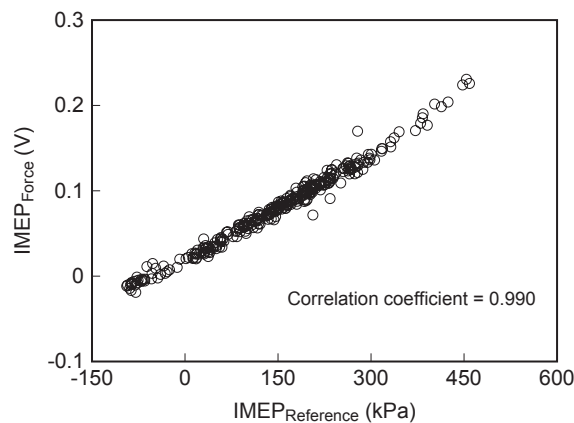


Fig. 17 Relation between IMEP and equivalent IMEP (R_f modified)

5.4. 高速エンジンへの応用

前節までの結果を利用して、高速回転エンジンへ適用した事例を示す。使用したエンジンは V 型 8 気筒、ボア 97 mm、ストローク 40.25 mm、圧縮比 13.0 のレーシングエンジンである。運転条件はスロットル開度全開、A/F 13.1、点火時期は MBT 相当とし、エンジン回転数は 14000 rpm とした。等価 IMEP 検出の測定系は、7 番気筒に供試センサを取付け、チャージアンプの帰還抵抗は $R_f = 10^8 \Omega$ とした。比較用としてキスラー社製 6081AQ05 型センサと 5011 型チャージアンプ (時定数は MEDIUM モード) で指圧波形を同時計測した。なお、データ処理ではゲート設定していない。

Fig. 18 は 100 サイクルの IMEP と等価 IMEP の推移を示したもので、レーシングエンジンでも等価 IMEP は IMEP の変化に追従できていることがわかる。Fig. 19 は IMEP に対する等価 IMEP の相関性を示したもので、相関係数は 0.981 となっており、高い相関性が得られた。

以上から、レーシングエンジンのような高速回転型エンジンでもチャージアンプの設定を適切におこなえば、等価 IMEP を精度良く検出できることが確認できた。

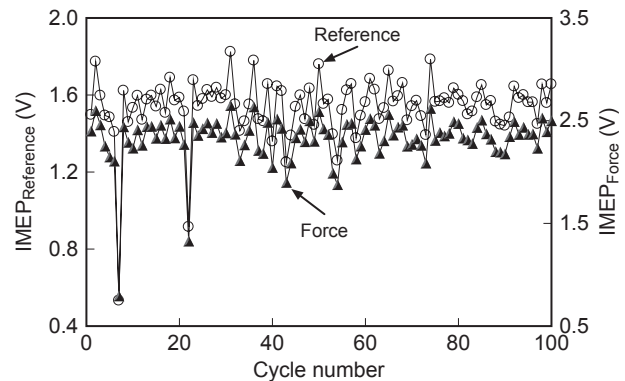


Fig. 18 IMEP and equivalent IMEP in continuous cycles (in high-speed engine)

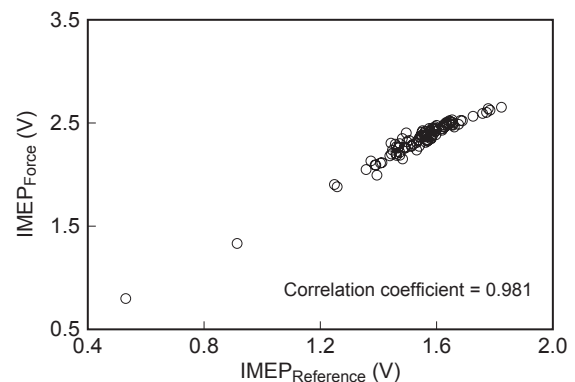


Fig. 19 Relation between IMEP and equivalent IMEP (in high-speed engine)

6. まとめ

実機改修不要で取付けが可能な点火プラグ座型力センサで、IMEP と相関性が強い等価 IMEP を計測可能することが可能となった。得られた結果を以下に述べる。

- (1) 点火プラグ座型力センサによる等価 IMEP 計測を、指圧波形計測の時定数 SHORT モード相当の設定 ($R_f = 10^9 \Omega$) でおこなうと、IMEP に対する等価 IMEP の相関係数は 0.799 となり、おおまかなモニタリングには適用できるが、エンジン制御などに用いるには IMEP に対する追従性や相関性の向上が必要である。
- (2) 等価 IMEP の計測において、チャージアンプの帰還抵抗 $R_f = 10^8 \Omega$ とし、あわせて圧縮上死点付近のデータのみで算出するように演算ゲートを $\pm 120 \text{ deg}$ に設定すると、IMEP に対する等価 IMEP の追従性が向上し、相関性も 0.990 となった。
- (3) 高速回転で運転されるレーシングエンジンでも、チャージアンプの設定を適切にすることで、IMEP に対する等価 IMEP の相関性向上が可能である。

参考文献

- (1) 大聖泰弘: 21 世紀のくるま社会—環境—エネルギー問題の克服に向けて—, 自動車技術, Vol.56, No.1, p.18-24(2002)
- (2) 土屋一雄: 図示平均有効圧のエンジン制御への応用, 自動車技術, Vol.58, No.4, p.25-30(2004)
- (3) Tsuchiya, K., Nagashima, K.: A Calculation Method for Indicated Mean Effective Pressure Based on Harmonic Analysis of Pressure Waveform, International Journal of Engine Research (JER03702), Vol.4, No.2, June (2003)
- (4) 土屋一雄, 河内康朗, 宮本貴司: 加速度, 力, すきまセンサを用いた図示平均有効圧のモニタ法, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.28-06 (20065298), p.5-8(2006)
- (5) 西尾澄人, 塚原茂司, 土屋一雄, 堺正博: 船用ディーゼル機関マネージメントシステムの開発 (第 2 報), 第 76 回春季マリンエンジニアリング学術講演会 (A109) (2007)
- (6) 賀羽常道, 三浦啓二, 秦野芳明, 皆川友宏, 賀羽宏之, 柳原茂: 筒内圧センサ用脈動圧力校正装置の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.14-07 (20075022), p.1-4(2007)
- (7) 長島慶一, 土屋一雄, 神本武征: フーリエ級数型燃焼解析装置の開発, 自動車技術会論文集, Vol.33, No.2, p.31-36(2002)

■ 著 者 ■



長島 慶一



三浦 啓二



松本 雅彦



花田 尚喜



塚本 能人



土屋 一雄