

エンジントルクの簡易計測法

A Substitution Method for Measuring Engine Output Torque

佐野 武俊*

Takatoshi Sano

要旨

エンジンの出力トルクを簡易的に計測する手法について研究を行った。テストコースでの走行試験、および動力計による単体試験を行った結果、特定のクランク角度における燃焼圧の増加量から出力トルクの大きさを算出可能であることが判明した。燃焼圧の増加量を計測するクランク角度はエンジン回転速度の変化に応じ、またエンジンの形式、種類により異なる。今回使用したエンジンでは1500rpmで上死点後約9～21度、5000rpmでは約5～16度の間における燃焼圧の増加量と出力トルクとの相関が高い。今後は理論的検証を行っていくとともに、エンジンの制御システムなどへの利用について検討していく予定である。

1 はじめに

シリンダ内圧力波形はエンジンの燃焼状態を表す最も直接的な情報であるが、センサのコストおよび耐久性などの問題のため、量産車の制御システムでの利用はなかなか実現しなかった。数年前から点火時期のノック制御およびMBT制御、また燃料噴射制御（希薄燃焼限界の向上）での使用を目的とした燃焼圧センサが開発され¹⁾²⁾、またこれらを量産車に組込んで得られた燃焼圧情報をもとに、従来より高精度な制御を実現し、エンジン性能を向上した例も報告されている³⁾⁴⁾。本研究では、圧力波形からエンジン制御に有用な情報を取り出すことを目的として出力トルクの推定について検討した結果、特定のクランク角度におけるシリンダ内圧の増加量のみから計算可能であることを実験により確認した。

2 実験装置および方法

本研究では、実際の運転状態により近い条件でのデータを収集するため、動力計によるエンジン単体での運転試験に加えて、車両にエンジンを搭載してテストコースでの走行試験を実施した。実験に使用したエンジンの諸元を表1に示す。

表1 供試エンジン諸元

| | |
|-------------------------|---------------|
| 型式 | 水冷4サイクル火花点火方式 |
| 気筒配列 | 直列3気筒 |
| 内径×行程 [mm] | 68.0×60.5 |
| 総排気量 [cm ³] | 659 |
| 圧縮比 | 9.5 |
| 燃料 | ガソリン |

単体試験（ベンチテスト）では動力計の速度制御によりエンジン回転速度を一定に保ち、スロットル開度で負荷を設定した。運転条件を表2に示す。

表2 単体試験の運転条件

| スロットル 開度 [%] | エンジン回転速度 [rpm] | | | | | | | |
|-----------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 |
| 10 | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | |
| 20 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| 30 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 40 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 50 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 60 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 70 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 80 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 90 | | | | | | ○ | ○ | ○ |
| 100 | | | | | | | ○ | ○ |

実験が行なわれた運転条件を記号「○」で示す。

また図1に単体試験での計測項目の概要を示す。計測した項目は、各気筒の燃焼圧（燃焼室内に穴を開け、キスラー社6001型圧力センサを組み込んで計測）、エンジン回転速度（爆発上死点タイミングパルス）、スロットル開度、ドライブシャフト駆動トルク（動力計）などである。

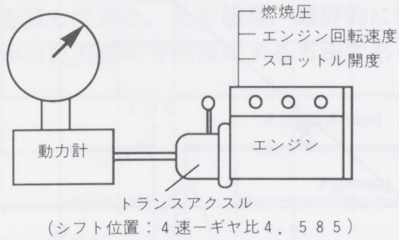


図1 単体試験計測項目概略

これに対し、走行試験では過渡時の反応を見るために、車速一定の条件で直線登坂路を走行し、各部のデータを収集した。図2に走行試験で設定した計測区間の概略を示す。

図中の数値は計測開始点からの距離 [m] を示す

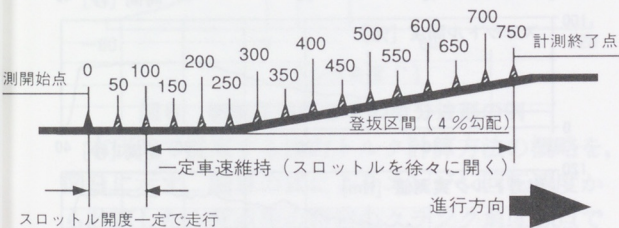


図2 走行試験計測区間概略

(チェックポイント数: 16,
チェックポイント間の距離: 50 m,
計測開始点から終了点までの距離: 750 m)

試験時の走行パターンは、通常走行時の登坂走行を意図して、次のように設定した。計測区間進入前に指定回転速度 (3000rpm) で定速走行 (シフト位置 4速固定) し、計測開始位置から100mの地点まではスロットル開度一定でそのまま走行する。その後、坂を登りながら指定回転速度を維持できるようにスロットルを開けていく。ただし、スロットルを戻す必要のないよう徐々に開けていくことと、開け過ぎた場合でもスロットルを戻さないことがその際の条件である。

図3に走行試験での計測項目の概要を示す。計測項目は単体試験での計測項目（動力計を除く）の他、右側駆動軸トルク（歪ゲージ）、左右輪の回転速度、計測地点通過時の地上信号などである。

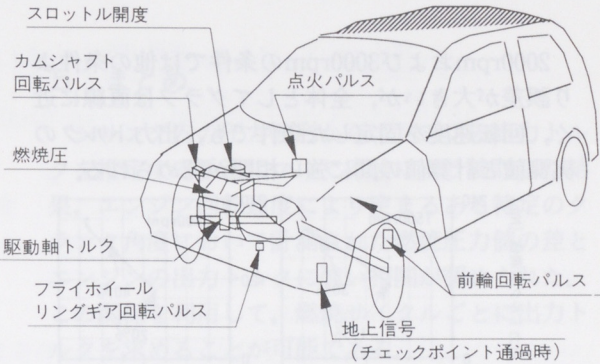


図3 走行試験計測項目概略

なお、単体試験／走行試験とも計測時にはセンサからの出力をすべてデータレコーダに記録し、分析時にはデータ処理用EWSを使用して、再生信号のA/D変換と信号処理を行った。

3 実験結果

3.1 単体試験

単体試験の結果をもとに得られた、動力計によるエンジン出力トルクの実測値と、本研究で提案する方法による計算値との関係を図4に示す。

実測値と計算値の間には強い相関が認められる。相関係数Rは0.959である。また実測値と計算値との差は最大で38 [Nm] であるが特に差の大きい3点を除いた残り60点についてはこの差が±15 [Nm] 以内であり、供試エンジンの最大トルク値（約200 [Nm]）に対し最大誤差で20%，データの95%（60/63×100）については±8%以内である。

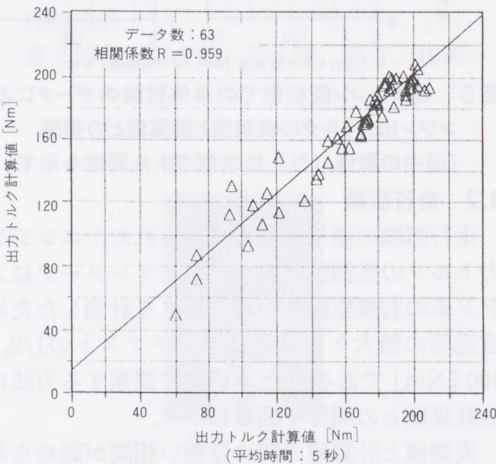


図4 単体試験のデータによるエンジン出力トルクの実測値と計算値との相関

図5にエンジン回転速度別に分けた出力トルクの実測値と計算値との関係を示す。%で示した数値は計測時のスロットル開度である。

2000rpmおよび3000rpmの条件では他の条件より誤差が大きい、全体としてグラフは直線に近く、回転速度を固定した条件でも、出力トルクの実測値と計算値の間に強い相関が認められる。

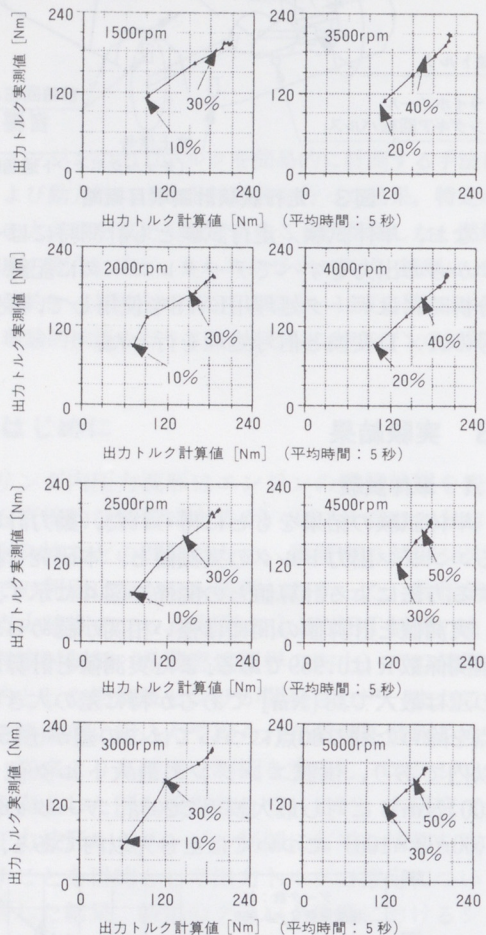


図5 各エンジン回転数での単体試験のデータによるエンジン出力トルクの実測値と計算値との相関
(図中の数値(%)はスロットル開度を示す)

3.2 走行試験

走行試験の結果をもとに得られた、エンジン出力トルクの実測値(歪ゲージとテレメータによりFF車の右側駆動軸からトルクを計測したため、直進時の最大トルク値はベンチテストの1/2、約100 [Nm]である。)と本研究で提案する方法による計算値との関係を図6に示す。

実測値と計算値の間には強い相関が認められる。相関係数Rは0.978である。また実測値と計算値との差は最大で20 [Nm]であり、供試エンジンの最大トルク値(約100 [Nm])に対し20%以内である。

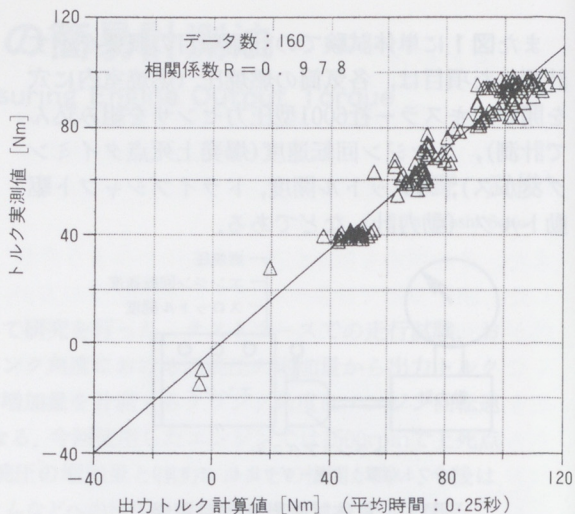


図6 走行試験のデータによるエンジン出力トルクの実測値と計算値との相関

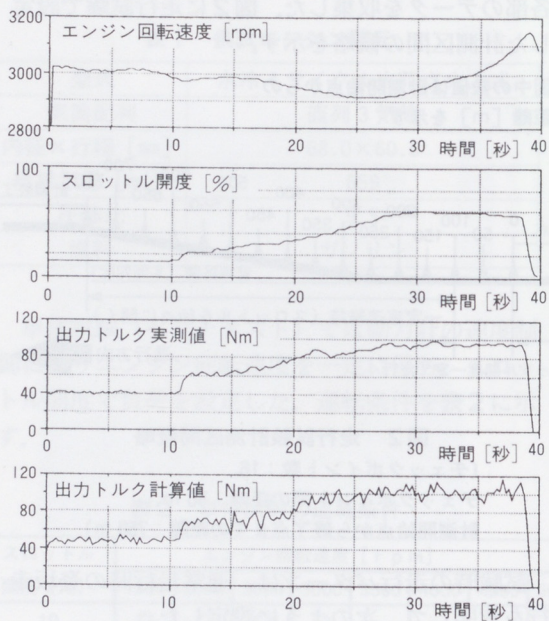


図7 走行試験データの時間変化
(平均時間: 0.25秒)

図7に走行試験時の各データの時間に対する変化を示す。図は上から順にエンジン回転速度[rpm]、スロットル開度[%]、エンジン出力トルクの実測値および計算値[Nm]である。トルクの実測値と計算値の変化はほぼ同様な傾向を示している。

4 計算方法について

図8に燃焼圧波形およびそのクランク角度による微分波形の1例を示す。 θ_{pmax} は燃焼圧最大と

なるクランク角度であり、 θ ($dp/d\theta_{max}$) は燃焼圧のクランク角度による微分が最大となるクランク角度である。

最初は、 θ ($dp/d\theta_{max}$) から θ (p_{max}) までの間の燃焼圧力の増加量と出力トルクとに相関がありそうだと、ということからスタートして、各種の方法を試してみた。その結果、最終的に最も相関の高かった方法が今回提案する方法である。

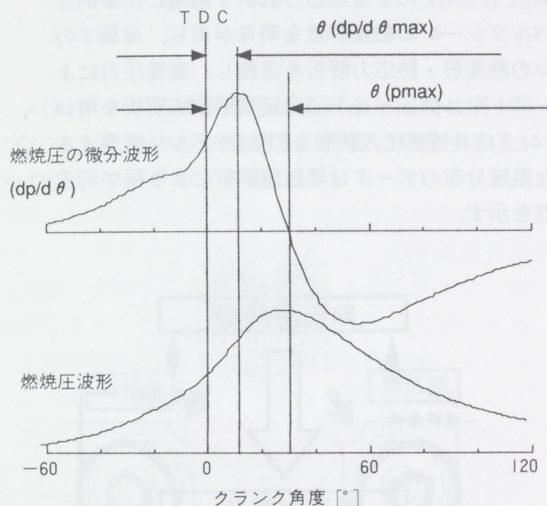
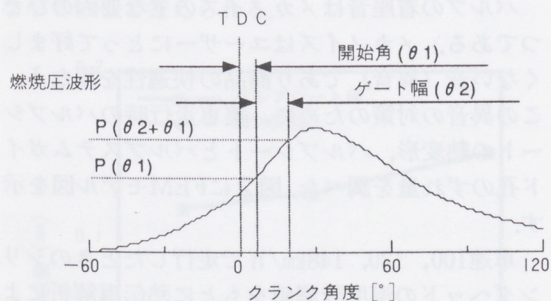


図8 燃焼圧波形とその微分波形の例

本研究で提案する出力トルク計算方法の概略を、図9に示す。図9の式によりエンジン回転速度から計算した上死点後の特定のクランク角度2点で燃焼圧力を計測し、その差（圧力増加量）に一定の係数を乗じることにより出力トルクが推定できる。



$$\text{トルク計算値 } T^* = CT \times \{P(\theta_2 + \theta_1) - P(\theta_1)\}$$

$$\theta_1 = C_1 + CR / (\sqrt{R} + CS)$$

$$\theta_2 = C_2$$

CT, C1, CR, CS, C2: 定数

R: エンジン回転速度 [rpm]

図9 出力トルク計算方法概略

5 まとめ

シリンダ内の圧力波形からエンジンの出力トルクを推定する手法について実験により検討した結果、エンジン回転速度により定まるある特定のクランク角度において計測された燃焼圧力値の差とエンジンの出力トルクに強い相関が認められた。この関係を利用して、燃焼サイクルごとに出力トルクを求めることが可能である。

6 おわりに

本研究に必要な計測器の借用を快諾くださった社内関係部署の方々にこの場を借りてお礼申し上げます。また、実験でのデータ収集に中心となって活躍してくれたプロジェクトメンバー、研究を進めるにあたって適切な指導をして頂いた上司、およびさまざまな形で協力してくださった方々に謝意を表したい。

本研究の成果を商品に結び付け、有効に活用していくためには、関係各部署との共同開発が欠かせない。今後とも御支援、御協力を願う次第である。

参考文献

- 1) 上田他4名：自動車技術会講演前刷集 924, 1992-10
- 2) 竹内：自動車技術会講演前刷集 892, 1989
- 3) 原田他4名：自動車技術会講演前刷集 924, 1992-10
- 4) 秦：精密工学会誌, Vol.56, No.4, 1990

著者



佐野 武俊