

自動車エンジン用磁歪式トルクセンサ

西部祐司，野々村裕，塚田厚志，竹内正治，奥村猛

Magnetostrictive Torque Sensor for Automobile Engine

Yuji Nishibe, Yutaka Nonomura, Koji Tsukada, Masaharu Takeuchi,
Takeshi Okumura

要 旨

近年，自動車のエンジン制御・診断においてトルク情報は非常に重要である。そこで，小型，非接触検出のメリットを有する磁歪式磁気ヘッド形トルクセンサを開発し，自動車用エンジン（型式：4A-FE，4気筒，排気量：1600cc）内に組み込んで，エンジントルクを直接検出することを試みた。

センサ装着位置は，エンジンクランクシャフトの第5ジャーナル部とした。クランクシャフトの軸振れによるセンサ出力への影響を低減するために，2つのヘッド形検出素子をクランクシャフトを介して180°対向配置させる構成とした。また，被測定軸の材質の検討を行い，クランクシャフト材とし

て高いセンサ感度が得られる球状黒鉛鋳鉄（JIS：FCD70）材を使用した。

本トルクセンサにより，クランクシャフト2回転に4つのピークを持つ4気筒エンジン特有の瞬時トルク波形が検出できた。さらに，実車走行状態においても，エンジンから出力される真のトルクが直接検出できた。これらの結果は，センサをエンジン内に組み込めるように小型化し，従来までのセンサでは不可能であったエンジントルクの直接検出を可能としたことにより得られた。将来的に，本センサは各種エンジン制御システムにおいて非常に有用となる。

Abstract

Recently, torque has become very important to various control systems and diagnoses of automobile engines. We have developed a miniature torque sensor based on the magnetostrictive effect, which is capable of accurately detecting the torque produced by an automobile engine. The sensor was installed in the last main bearing of the engine (TOYOTA 4A-FE; 1.6-liter 4-cylinder) crankshaft so as to directly pick up the torque generated in the crankshaft. This sensor was composed of two head-type detecting elements, which were placed opposite to each other through the crankshaft in order to eliminate the influence of the off-center motion of the shaft on the sensor output. In

addition, a commercial crankshaft made of nodular cast iron (JIS code: FCD70) was adopted, taking account of high sensor sensitivity and mechanical stiffness.

Tests using an engine dynamometer showed that this sensor could clearly detect peculiar instantaneous torque wave with four peaks during two crankshaft rotations, corresponding to four cylinder combustions. As a result of in-vehicle experiments, furthermore, this sensor was found to detect the true torque produced by an engine and to be available for on-board use. In the future, this sensor will be extremely promising for use in various engine control systems.

キーワード

磁歪効果，トルク，センサ，自動車，エンジン，燃焼，空燃比

1. はじめに

トルクは回転速度、パワー等と並んで回転駆動系における基本的な物理量である。したがって、工作機械、自動車、ロボット等において、トルクは重要な情報である。そこで、今までに各種トルクセンサの開発が実施されてきた¹⁻⁴⁾。この中で、非接触検出、高感度という特長を有する磁歪式トルクセンサが注目され、大学、及び各メーカーにおいて研究開発が精力的に実施されている。我々も磁歪式センサに着目し、磁気ヘッド形センサの研究開発を行っている⁵⁻⁸⁾。

最近の自動車用エンジンの開発動向に目を向けると、省エネルギーである低燃費化、及び環境破壊のない排気ガスのクリーン化等を目指し、各種エンジンの制御、診断が考えられている。これらの制御、診断において、エンジンから出力されるトルクが非常に重要な情報となる。現状、スロットル開度、エンジン回転速度等からトルク値を推定しているが、近年高精度なエンジンの制御、診断が要求されるに伴って、エンジンから出力される真のトルクを直接検出したいというニーズが高まっている。同時に、エンジンのより正確な評価・解析を実現するために、実車走行時にエンジンから出力されるトルクを直接把握するというニーズも高くなっている。

トルク検出の重要性を示す具体例として、トヨタ自動車にて開発されたエンジン希薄燃焼限界空燃比フィードバック制御を考える^{10, 11)}。Fig. 1に

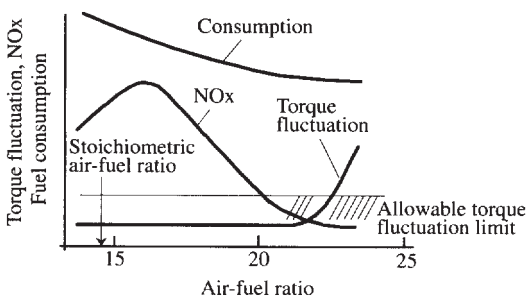


Fig. 1 Torque fluctuation, NOx and fuel consumption versus air-fuel ratio.

示すように、希薄燃焼（ガソリンに対する空気の比率が大きい領域でのエンジンの燃焼）は、燃費の向上、低NOxというメリットがある反面、燃焼が不安定となりトルク変動が生じて、ドライバビリティを悪化させると言われている。そこで、この制御では、逐次トルク変動を検出し、この情報をもとにトルク変動を許容値内に抑えつつ希薄燃焼を実現するように空燃比（空気に対するガソリンの比率）をフィードバック制御することを行っている。現状ではエンジン筒内の圧力（燃焼圧）と回転速度を検出してトルクを推定しているが、この制御においても、精度の向上を考えた場合、直接エンジン出力トルクを検出することが重要となる。

ところで、世の中のエンジントルクの測定は、エンジン内に装着できる小型トルクセンサがないことより、エンジン外部に各種トルクメータを装着して行われているのがほとんどである。したがって、エンジン内にセンサを組み込みエンジントルクを直接検出した報告例はほとんどない。

本報告では、エンジン内に組み込みエンジントルクの直接検出を可能とする磁気ヘッド形センサの原理、構成、装着方法、基本特性について述べた後、本センサにより世の中で初めて得られたエンジントルクの各種測定結果（例えば、希薄燃焼でのトルク変動の測定、あるいは実車走行時でのエンジントルクの測定）について述べる。

2. トルクセンサ

2.1 検出素子の構造、動作原理

検出素子の構造は、Fig. 2(a)に示すようにコの字形の励磁コイルと検出コイルとを各々直交配置した磁気ヘッド形である⁹⁾。励磁コイルのコアはケイ素鋼板（厚み0.36mm）を8枚積層することにより形成されている。一方、検出コイルのコアはスーパーマロイ板（厚み0.2mm）を10枚積層することにより形成されている。薄板を積層することにより、渦電流発生を低減し磁化特性低下を防いでいる。コイルのターン数は、励磁コイル側で200巻、検出コイル側で400巻である。寸法の大きな励磁コイルを円周方向に配置した。一方、寸法の小さな検出コイルは軸方向に配置した。検出素子の外形寸法は12×8×16mmである。軸方向に8mmと少ないスベ

ースで検出素子の装着は可能となる。

本素子は、検出素子とトルク伝達軸との間にギャップを設け非接触でトルクを検出する。非接触検出は、高感度・高応答性の点でメリットを有する磁歪効果を利用したからこそ可能である。

励磁コイルには交流電流を通電し、交流磁界が発生させられ、トルク伝達軸表面を円周方向に交流磁化させる。検出コイルは、励磁コイルと直交する方向、つまりトルク伝達軸表面の軸方向の交流磁化成分を検出する。トルク検出は、強磁性体であるトルク伝達軸の磁歪効果を利用している。Fig. 2(b)に示すようにトルク伝達軸にトルク T が印加されると軸方向に対して 45° 方向に引張り応力 $+\sigma$ 、及び圧縮応力 $-\sigma$ が発生する。励磁コイルにより発生させられた円周方向の磁化ベクトルが、磁歪効果により応力発生方向である 45° 方向に回転させられ、磁化ベクトルの軸方向成分が生ずる。この磁化ベクトルの軸方向成分は印加トルクの増加に伴って大きくなる。したがって、磁化ベクトルの軸方向成分を検出する検出コイルからの誘起電圧が、軸に加わるトルクに対応することになる。

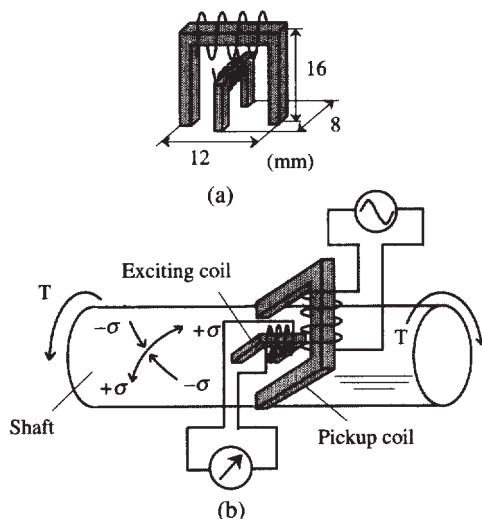


Fig. 2 Magnetic head type torque sensor based on magnetostrictive effect. (a) Schematic diagram of magnetic head type detecting element. (b) Principle of magnetostrictive torque sensor.

このような磁気ヘッド形検出素子は以下のような特長を有している。

- 1) 小型・軽量である。
- 2) 装着が容易である。
- 3) 非接触検出である。
- 4) 高感度・高応答性を有する。

世の中で主に実施されている磁歪式同軸コイル形センサ^{2,4)}は、高感度・高応答性、非接触検出というメリットを有するが、センサ寸法が大きくなる、装着性が悪い等のデメリットを有する。一方、ここで述べた磁気ヘッド形素子は上記4つの特長を有し、自動車応用において重要とされる低コスト、高信頼性の点でも有望であることより、現状では自動車エンジン用として最も実用性の高い素子であると考えられる。

2.2 検出素子のエンジンへの装着

自動車エンジンにより発生するトルクを精度良く検出するために、エンジントルクを直接検出することが重要である。そこでエンジン内にセンサを組み込むことを検討した。

センサの組み込みに際しては以下の3つが重要な問題となる。

- 1) トルク検出位置の選定
- 2) クランクシャフトの軸心振れの克服
- 3) センサ装着に必要な加工を最小限とする

今回、測定対象としたエンジンはトヨタ車のカリーナ等に搭載されている4気筒エンジン（型名4A-FE）で、排気量は1600cc、最大出力トルクは約100Nmのものである。クランクシャフトに発生するエンジントルクを検出するために、Fig. 3に示す

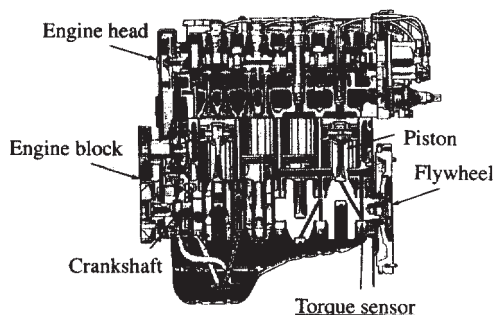


Fig. 3 Installation of sensor within engine.

ようにクランクシャフト第5ジャーナル部にセンサを装着することとした。装着位置をこのような最終検出部とすることにより、エンジン各気筒（全部で4気筒）の燃焼により発生するトルクが検出可能になると考えられる。例えば、世の中で実施されているように、センサ装着位置をエンジン外部、つまりフライホイールよりも変速機側（Fig. 3ではフライホイールより右側）とした場合には、慣性質量の大きなフライホイールを介してエンジントルクが伝達されることより、検出されるトルクは実際に発生しているエンジントルク波形よりもかなり鈍った波形になると考えられる。したがって、エンジントルクの挙動を正確に把握することができない。

センサ取り付け状況をFig. 4に示す。磁気ヘッド形検出素子を180°対向して上下に1個ずつ配置した2ヘッド構成としている。この理由としては、センサの被測定軸であるクランクシャフト軸の振れ回りによるクリアランス（検出素子と被測定軸とのギャップ）変動のセンサ特性への影響を低減するためである。検出素子の1つをエンジンブロック内にモールドし、もう1つを軸受けキャップ内にモールドした。センサ取り付けに必要な加工によるエンジン剛性低下の問題に関しては、検出素子の寸法が12×8×16mmと小さいことよりほとんど問題ないと考えられる。なお、各検出素子の励磁コイ

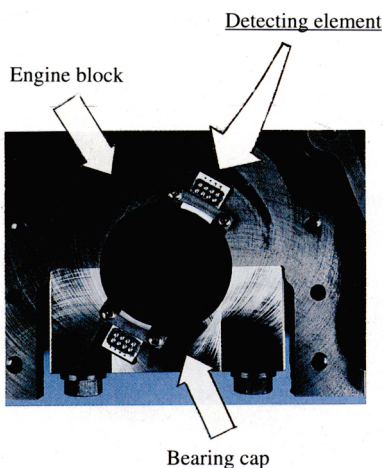


Fig. 4 Integrations of each head type detecting element into engine.

ルには、周波数20kHz、200mAの交流電流を通电した。この励磁条件は、消費電力を抑えつつ十分な感度が得られる最適条件である。また、検出素子とクランクシャフトとが接触しないように各検出素子とクランクシャフトとのクリアランスを0.2mmとした。

2.3 シャフトの材質とセンサ特性の関係

磁歪式センサの特性は被測定軸の材質に大きく依存することより、被測定軸であるクランクシャフト材質について検討を行った。クランクシャフト材として実用性のある、球状黒鉛鋳鉄（JIS：FCD70）品、鍛造（高周波焼入れ）品、ニッケルクロムモリブデン鋼（JIS：SNCM）品の3種類の材質についてセンサ感度を測定した。この結果をTable 1に示す。この結果を見ると、球状黒鉛鋳鉄品の場合、0.08mV/Nmと高い感度が得られることが分かった。一方、高周波焼入れ処理を施した鍛造品の場合、0.01mV/Nmと低い感度を示すことが分かった。センサ感度はシャフト材質の磁化特性（B-Hループ）に依存し、透磁率が大きいほどセンサ感度は大きくなると考えられる。3種類の材質のB-H特性を測定した結果、球状黒鉛鋳鉄品が大きな透磁率を有し、鍛造（高周波焼入れ）品が小さな透磁率を有することが分かり、センサ感度と透磁率とがよい対応を示すことが確認された。今回S/N比（センサ信号とノイズとの比率）の向上をねらい、高感度が得られる球状黒鉛鋳鉄をクランクシャフト材として採用した。

3. センサの特性

3.1 測定方法

測定はFig. 5に示すエンジンベンチ試験で行っ

Table 1 Comparison of sensor sensitivities for various crankshaft materials.

Material	Treatment	Sensitivity
Casting nodular iron (JIS code : FCD70)		0.08 (mV/Nm)
Nickel-chromium-molybdenum steel (JIS code : SNCM)	Nitriding	0.07
Forging	Induction hardening	0.01

た。エンジンの出力側には、変速機、プロペラシャフトを經由してダイナモメータが接続されている。このダイナモメータで、エンジンから出力されるトルクを吸収している。ダイナモメータにより、クランクシャフトの回転速度、及びトルクを所望の値に設定することができる。

ダイナモメータとプロペラシャフトとの間に市販のトルクメータを装着し、そこからの信号を基準トルクとした。センサの検出信号とこの基準トルク信号とを比較することにより特性評価を行った。この評価を行うに当たって重要なことは、比較する2つの信号の応答性を等しくすることである。

測定して確認した訳ではないが、市販のトルクメータから得られる基準トルク信号と本トルクセンサの検出信号について以下のことが言える。基準トルク信号については、エンジンから出力されるトルクを慣性質量の大きなフライホイール、変速機等を經由した下流の位置で検出した信号であることより、実際のエンジントルクと比較して平均的なトルク信号と考えられる。一方、センサ検出信号については、センサ信号処理回路の応答性が1kHzと高いことと本センサがクランクシャフトに発生するトルクを直接検出していることより、エンジンからの瞬時トルク情報を正確に反映した信号と考えられる。このように基準信号とセンサ検出信号との間には応答性の点で大きな違いがあると考えられる。そこで、トルクメータ、及び本センサからの各信号にカットオフ周波数3Hzのローパスフィルタを挿入して2つの信号の応答性を同じにして、平均トルク特性評価という形でセンサ評価を実施した。

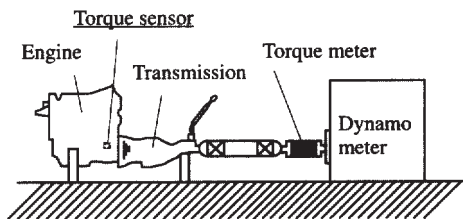


Fig. 5 Engine-dynamometer test arrangement.

一方、瞬時トルク特性評価においては、基準とすべき瞬時トルクを検出できる有効な手段が現状において全くないことより、トルクメータから得られる各信号(平均トルク値)に対して、本センサから得られるトルク波形をフィルタを介さず直接測定することとした。

3.2 平均トルク検出特性

Fig. 6にセンサ出力vs基準トルクを示す。基準トルクの増加とともにセンサ出力は直線的に大きくなる。また、センサ出力は、基準トルクの増減に対して同一直線上を通りヒステリシスを示さない。エンジンオイル温度を90°C一定として、回転速度を1000rpmから5000rpmまで変化させたが、センサ出力の変化は全く見られなかった。この結果では、見易くするために各特性のゼロ点をシフトさせて描いているが、実際には回転速度を変えてもすべて同一直線上に重なる。

一方、回転速度を2000rpm一定として、オイル温度を70°Cから100°Cまで変化させた場合、オフセット出力(トルクゼロ時のセンサ出力)は2%FS(FS:100Nm)変動し、感度(トルク1Nm当たりのセンサ出力の変化分)は4%変動することが分かった。

以上より、本センサは回転速度依存性をほとんど示さないが、温度依存性を有することが分かった。回転速度1000rpmから5000rpm、オイル温度70°Cから100°Cの範囲において、センサ精度は

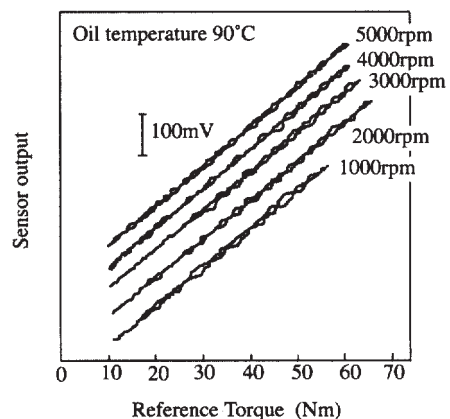


Fig. 6 Relations between sensor outputs and reference torque signal.

5%FSである。センサ精度を決めている要因としては、温度依存性が支配的である。さらにセンサ精度を向上させるためには、いかに温度依存性を低減させるかがポイントである。

3.3 瞬時トルク検出特性

Fig. 7(a)には、センサが検出したエンジントルクの瞬時波形を示している。エンジン燃焼の1サイクルに相当するクランクシャフト2回転に4つのピークを持つ4気筒エンジン特有のトルク波形が得られた。各ピークは各気筒の燃焼に対応する。エンジンから出力されるトルクの平均値を増加させるにつれて、各ピークは競り上がっていき、ピークトルク値はエンジン出力トルクの平均値の4倍程度の

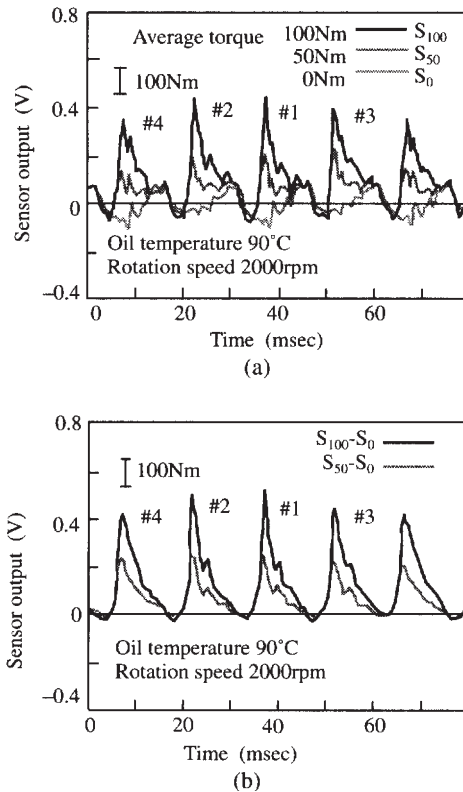


Fig. 7 Instantaneous torque waveforms generated by engine. (a)Raw waveforms detected by sensor at each applying torque of 0Nm, 50Nm, 100Nm. (b)Differences between waveforms at 0Nm and waveforms at 50Nm, 100Nm.

大きさとなっていることが分かる。例えば、エンジントルクの平均値が50Nmであるならば、ピークトルク値は約200Nmとなる。各気筒の燃焼による正味のトルク波形を得るために、エンジントルクの平均値が0Nm時のトルク瞬時波形とエンジントルクの平均値が50Nm、及び100Nm時のトルク瞬時波形との差分を求めた。この結果をFig. 7(b)に示す。4つのピークを持つ波形がより明確になり、この差分処理によりエンジン各気筒の燃焼による正味のトルク波形が十分検出できることが分かった。

4. エンジントルクの各種計測例

4.1 失火時のエンジントルク

エンジン1気筒だけ失火させた場合のトルク瞬時波形を測定した。この結果をFig. 8に示す。失火により、エンジンから出力されるトルクの平均値が40%程度低減し、失火した気筒に対応するピークが消失した波形となることが分かった。これにより、本センサがエンジン失火検出、あるいは失火

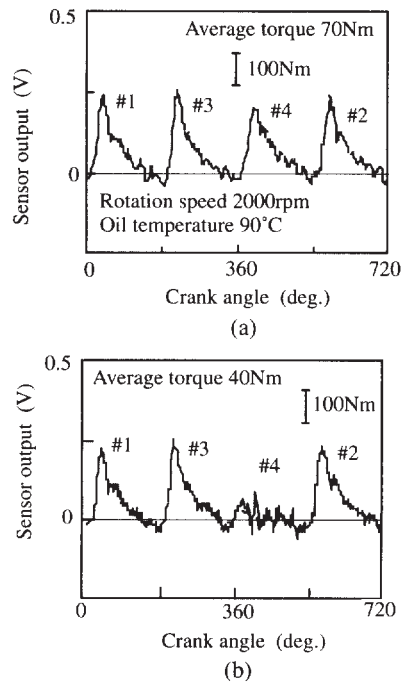


Fig. 8 Instantaneous engine torque waveforms. (a)Normal firing. (b)Misfiring.

している気筒の同定において有用であることが分かった。

4.2 希薄燃焼でのエンジントルク変動

第1章「はじめに」のFig. 1に示したように、エンジンにおいて希薄燃焼となるにつれて、エンジン気筒内での燃焼が不安定となりエンジントルクの変動が生ずる。このトルク変動の挙動の把握、及び定量的評価は、エンジンの制御、診断において重要である。

現状での評価は、エンジン外部にトルクメータを装着して実施されている。この評価の問題点は、正確なトルク変動を把握できないこと、特に気筒別にトルク変動評価できないことである。そこで、本センサにより、従来の評価法と比較して、より正確なトルク変動の把握が期待される。

空燃比 (Air/Fuel) を14.5 (理論燃焼状態)、及び24 (希薄燃焼状態)とした場合におけるエンジントルクの瞬時波形を測定した。その結果、Fig. 9(a)に示す。空燃比14.5の場合には、燃焼が安定していることより燃焼サイクルごとの波形はほぼ同じであり、良好な再現性を示すことが分かった。一方、空燃比24の場合には、数サイクルに約1回の割合でランダムにトルク波形の振幅の低下が見られた。

この低下は、希薄状態での燃焼が不安定になりランダムに発生した失火に起因していると考えられる。

さらにこの挙動を正確に把握するために、各気筒の燃焼に対応するトルクピーク値、及び積分値 (Fig. 9(a)参照)の100燃焼サイクルにわたっての推移を評価した。この1例として、Fig. 9(b)には、第1気筒のトルクピーク値の空燃比14.5と24の各場合の結果を示す。空燃比14.5の場合、サイクルごとのエンジン燃焼は安定しているので燃焼サイクル間推移は平坦な特性を示す。一方、空燃比24の場合、ランダムに出力の低下が見られる。これは、希薄状態での燃焼不安定による失火発生に起因していると考えられる。ここでは、第1気筒に着目したが、他の気筒でも同様な結果が得られた。また、トルク積分値のサイクル間推移についても、同様な傾向が得られた。

センサ出力の燃焼サイクル間推移を定量的に評価するために100サイクル間での式(1)に示すような標準偏差 σ を導入する。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{100} (X_i - \bar{X})^2}{100}} \quad (1)$$

ここで、 X_i は各サイクルでのセンサ出力のピー

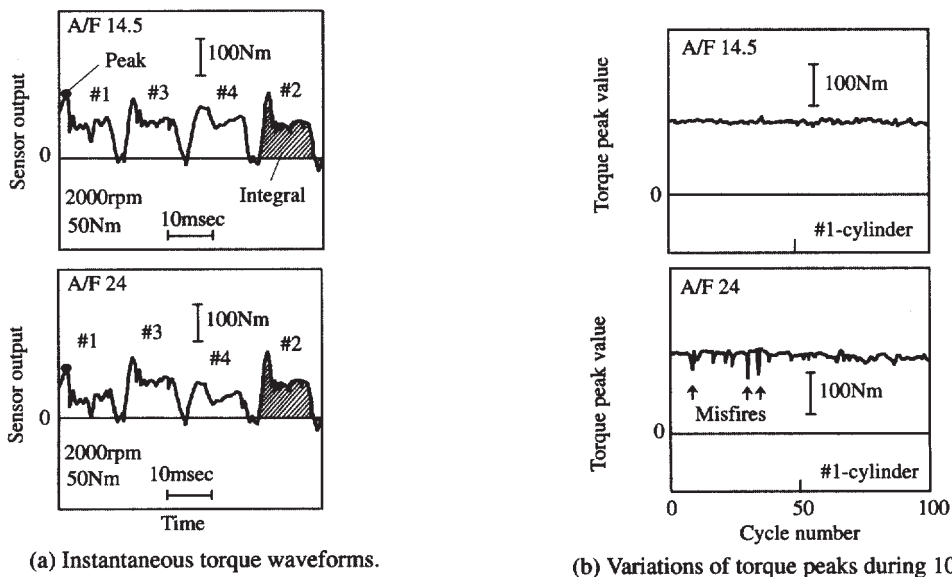


Fig. 9 Behaviors of sensor outputs in cases of air-fuel ratio 14.5 and 24.

ク値, 又は積分値, \bar{x} はそれらの100サイクルでの平均値とする。各空燃比でこの標準偏差を各気筒別に算出した。トルクピーク値の標準偏差vs空燃比をFig. 10に, トルク積分値の標準偏差vs空燃比をFig. 11に各々示す。これらの結果を見ると, 空燃比が大きくなるにつれて燃焼が徐々に不安定となることより, トルクピーク値, 及び積分値どちらの標準偏差も大きくなるのが分かる。この傾向は4気筒すべてにおいて見られる。各気筒に対応したセンサ出力の燃焼サイクル間での標準偏差算出という統計処理は, 希薄燃焼の気筒別トルク変動の評価に有効であることが分かる。

センサ出力ピーク値の場合, Fig. 10に示すよう

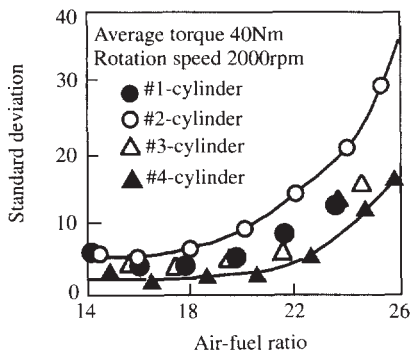


Fig. 10 Standard deviations of each peak for sensor outputs versus air-fuel ratio.

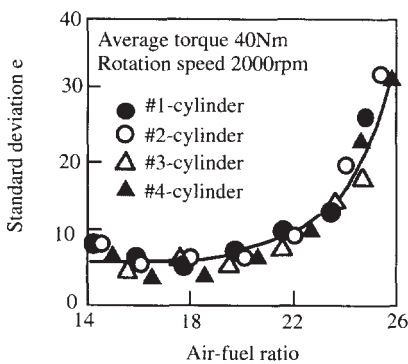


Fig. 11 Standard deviations of each integral for sensor outputs versus air-fuel ratio.

に各気筒で空燃比に対する標準偏差の特性が異なっている。一方, センサ出力積分値の場合, Fig. 11に示すように各気筒で標準偏差の特性は揃う。このようにピーク値と積分値で異なる特性を示す理由として, ピーク値は燃焼の瞬時情報であるため燃焼状態の少しの違いに対しても鋭敏に反応し各気筒別に異なる特性を示し, 積分値は燃焼の平均的情報であるため燃焼状態の違いに対して感度が鈍く各気筒で揃った特性を示したと考えられる。

以上述べたように, 本センサをエンジン内に組み込み, 希薄燃焼でのエンジントルクを評価した。その結果, 各気筒に対応したセンサ出力についてサイクル間での推移をモニターすることにより, 各気筒別に希薄燃焼でのトルク挙動を把握できることが分かった。さらに, 各気筒の燃焼に対応したセンサ出力の100サイクル間での標準偏差を算出することにより, 希薄燃焼でのトルク変動が気筒別に定量的評価できることが分かった。この評価方法は, 従来までの評価では全く不可能であった気筒別のトルク変動を把握できる点で非常に有益である。

4.3 実車走行時のエンジントルク

実車走行時にエンジンから出力されるトルクは, 正味の自動車の駆動力であることより, エンジンの解析・評価において重要な情報である。そこで, センサを組み込んだエンジンを自動車に搭載して, 実車走行状態でエンジンから出力されるトルクを測定した。

測定は, センサ出力にカットオフ周波数5Hzのローパスフィルタを挿入して行った。Fig. 12は, 自動車が坂を登り, その後平坦路を走り, 最終的に坂を下るといった走行パターンでの本センサの測定結果を示している。登り坂ではアクセルを大きく踏み込みスロットル全開に近い状態であることより90Nmから100Nmのトルクが出力され, 平坦路ではアクセルをあまり踏み込まずスロットル開度は中程度であることより30Nmから40Nmのトルクが出力される。下り坂では, アクセルを全く踏み込んでおらずスロットル全開であることより, エンジンブレーキが生じていると考えられる。したがって, 負のトルクが検出された。このような実車走行時でのエンジントルクのデータは, 世の中に

において初めて得られたものであり、本センサによるフィールドでのエンジン性能評価の可能性を示している。

4.4 未舗装路走行時のエンジントルク

未舗装路走行時に路面の凹凸により車輪に反力トルクが発生する。この反力トルクが駆動系を介してエンジントルクに影響を及ぼすのかどうか？を把握することは、高性能なエンジンの実現において重要課題とされている。したがって、未舗装路走行時のエンジントルク測定には興味を持たれている。

ところで、もし未舗装路面から発生する反力トルクがエンジントルクに影響するならば、路面の凹凸の周期性からFig. 13に示すように5Hz程度の変動トルクとしてエンジントルク波形に重畳される形で現れると予想され、このようなトルク出力が本センサにより検出されることになる。

測定は、舗装路走行時のセンサ出力と未舗装路走行時でのセンサ出力との比較という形で行った。アクセルの踏み込み量の違いにより発生するトルク変動の影響を受けないように、アクセルを全く踏まない状態、つまり惰性で自動車を走行させた。さらに、エンジン燃焼によるトルク変動の周波数は数十Hzであり、路面反力によるトルク変動の周波数は5Hzであると考えられることより、カットオフ周波数7Hzのローパスフィルタを介してエンジン燃焼によるトルク変動を取り除いたセンサ出力をもって評価を行った。

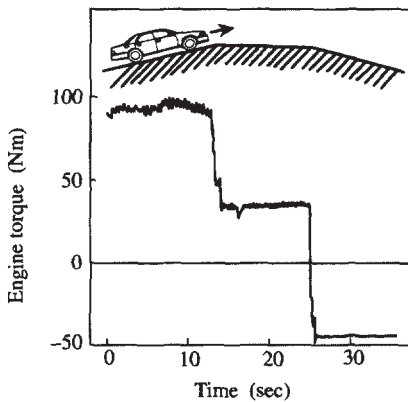


Fig. 12 Engine torque in in-vehicle experiment.

Fig. 14には舗装路と未舗装路でのセンサ出力を示す。惰性で走行していることよりエンジンブレーキが生じ、負のトルクが検出される。舗装路走行時と未舗装路走行時でセンサ出力はほとんど同じであることが分かった。この結果は、予想に反して、路面凹凸のエンジントルク波形への影響は

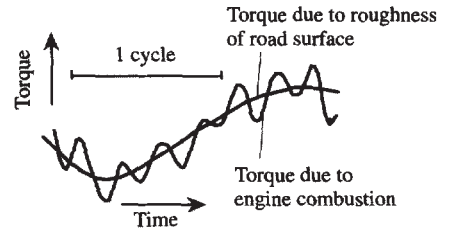


Fig. 13 Influence of torque variation produced by rough road surfaces on engine torque waveform.

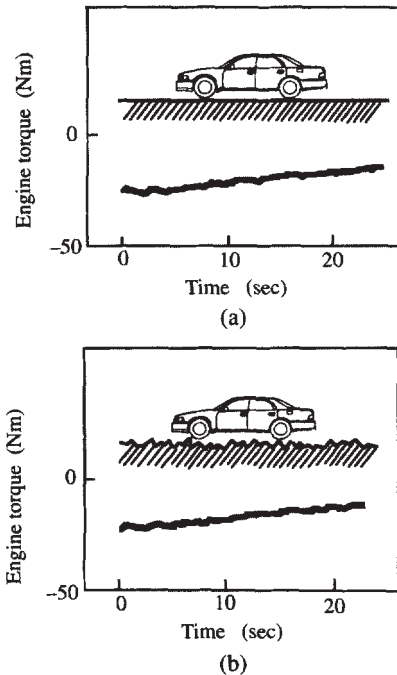


Fig. 14 Engine torque in in-vehicle experiments. (a) Engine torque on flat road. (b) Engine torque on rough road.

ほとんどないことを示唆するものである。なお、今回の測定で使用した自動車は、自動変速機 (Automatic Transmission) を装着していることから、トルクコンバータ等により路面反力の影響が減衰されたのではないかと考えられる。このデータは本センサにより初めて得られたものであり、エンジンから出力されるトルクに関して新たな知見を与えるものである。

5. まとめ

(1) 高感度、非接触検出、小型・軽量という利点を有する磁歪式の磁気ヘッド形トルクセンサを開発し、エンジクラクシャフト第5ジャーナル部軸受け内に装着して、エンジンから出力されるトルクを直接検出した。

(2) センサの装着に関して次の2点を検討した。

・2ヘッド方式によるクラクシャフト軸振れのセンサ特性への影響低減

・FCD70 (球状黒鉛鋳鉄) をクラクシャフト材として選定したことによるセンサ高感度化

(3) 回転速度1000rpmから5000rpm、温度70°Cから110°Cの範囲で、5%FS (FS: 100Nm) のセンサ精度が得られた。

(4) 本センサにより、クラクシャフト2回転に4つの山を持つという4気筒エンジン特有の瞬時トルク波形が測定できた。

(5) 本センサにより、エンジントルクの各種測定を行った。その結果、以下に述べる世の中においてまだ得られていない有益なデータ、及び知見を得た。

・エンジン失火時には、失火気筒に対応したトルクピークが消失する波形となること

・各気筒に対応したセンサ出力のサイクル間変動を統計処理の1つである標準偏差を用いて評価することにより、希薄燃焼において発生するトルク変動について気筒別に評価できること

・加速時にエンジン最大トルクが出力される状況、あるいはエンジンブレーキにより負のトルクが生じる状況等、実車走行時のエンジントルク挙動を把握できること

・未舗装路面の凹凸によるエンジントルク波形への影響は、予想に反してほとんどないこと

最後に、当所開発部の宮下政則技師には回路設計・製作、及び計測において多大なるご協力をいただきました。

参考文献

- 1) Dahle, D. : ASEA J., 33-3(1960)
- 2) Sasada, I., Hiroike, H. and Harada, K. : IEEE Trans. Mag., 20, (1984), 951
- 3) Sahashi, M., Kobayashi, T. and Inomata, K. : Proc. of the 6th Sensor Symp., (1986), 83
- 4) 長谷裕之, 若宮正行 : "アモルファス磁性合金薄帯の応力-磁気特性", 日本応用磁気学会誌, 13-2(1989), 427
- 5) Nonomura, Y., Sugiyama, J., Tsukada, K. and Takeuchi, M. : "Measurements of Engine Torque with the Intra-Bearing Torque Sensor", SAE Tech. Pap. Ser., No.870472, (1987), 11p.
- 6) Nishibe, Y., Nonomura, Y., Tsukada, K. and Takeuchi, M. : "Real Time Measurement of Instantaneous Torque by Magnetostrictive Sensor", Tech. Dig. TRANSDUCERS'91, (1991), 412
- 7) 野々村裕, 西部祐司, 竹内正治, 五十嵐伊勢美 : "磁歪式トルクセンサにおける励磁場の効果", 日本応用磁気学会誌, 13-2(1989), 431
- 8) 西部祐司, 野々村裕, 塚田厚志, 竹内正治 : "磁歪効果による磁気ヘッド型トルクセンサ", 電気学会論文誌A, 115-10(1995), 1013
- 9) 山田一, 山田芳生, 脇若弘之 : "磁気異方性センサとその動作解析", 電気学会論文誌B, 100-4(1980), 197
- 10) 岡野博志 : "燃焼圧センサを用いた新世代希薄燃焼エンジン", 日本機械学会誌, 96-890(1993), 86
- 11) 上田政博, 杉谷伸芳, 小杉正秀, 中條芳樹, 塚田厚志 : "希薄燃焼エンジン用燃焼圧センサの開発", 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, 924-3(1992), 53

著者紹介



西部祐司 Yuji Nishibe

生年 : 1959年。

所属 : センサ研究室。

分野 : 磁気現象を利用したセンサの研究開発。

学会等 : 電気学会会員。



野々村裕 Yutaka Nonomura

生年 : 1954年。

所属 : センサ研究室。

分野 : センサデバイスに関する研究開発。

学会等 : IEEE, 応用物理学会, 日本応用磁気学会会員。

1993年R&D100受賞。

工学博士。



塚田厚司 Koji Tsukada
生年：1944年。
所属：センサ研究室。
分野：各種センサ開発。
学会等：日本機械学会会員。
科学技術庁長官賞。
1992年日本機械学会賞技術賞受賞。
1993年R&D100受賞。



奥村猛 Takeshi Okumura
生年：1951年。
所属：トヨタ自動車第4開発センター第3
エンジン技術部担当員。
分野：ガソリンの燃焼技術に関する研究
開発。
学会等：自動車技術会会員。
1987年恩賜発明賞受賞。



竹内正治 Masaharu Takeuchi
生年：1943年。
所属：センサ研究室。
分野：自動車用センサデバイスに関する
研究開発。
学会等：日本応用磁気学会，計測自動制
御学会会員。
1993年R&D100受賞。
工学博士。