

# 特集 燃焼圧センサー一体型グロープラグ\*

## Glow Plug with Combustion Pressure Sensor

村井 博之

Hiroyuki MURAI

亀島 昭彦

Akihiko KAMESIMA

守谷 栄記

Hidenori MORIYA

宮本 裕

Yutaka MIYAMOTO

Combustion-pressure-data-based feedback control of fuel injection and EGR is the most promising diesel system, since it can reduce fuel consumption and emissions, as well as noise and vibration, and also improve the evaluation efficiency for adapting engine performance.

We developed a combustion pressure sensor installed inside the glow plug. This is superior in maintainability and ease of installation, and can detect the combustion pressure in each cylinder with a high accuracy and low cost, with no need for any engine modification

**Key words** : Diesel engine, Combustion, Glow plug / Combustion pressure sensor, Feedback control, Reducing emission, Noise, Vibration

### 1. まえがき

近年、地球温暖化防止の観点から、CO<sub>2</sub>排出量が少なく低燃費のディーゼルエンジンが着目されている。

しかしながら、ディーゼルエンジンは、ガソリンエンジンに比較してNO<sub>x</sub>、PM、黒鉛などの排出成分が環境問題として懸念され、メーカ各社は国内外での排出ガス規制強化をもにらみ、クリーンなディーゼルエンジンシステムの開発を推進している。

そのアイテムとして、燃料噴霧の微細化を狙いとした「噴射圧の高圧化」、「多段噴射・ピエゾインジェクタ」に代表される精密燃料噴射制御、あるいは後処理装置の「DPF」は既に実用化段階に達している。

その中で近年注目されているのが燃焼圧センサを用いて燃料噴射系やEGR等の制御を行う燃焼フィードバック制御法である。これは、エミッションの改善や燃費低減に限らず騒音、振動、適合工数の低減あるいは噴射系部品の経時劣化補正など、その波及効果は大きく、将来最も有望視されたシステムである。

そこで我々は、燃焼フィードバック制御に不可欠なディーゼルエンジン用燃焼圧センサの開発を手掛け、現在、実用化検討段階にまで達している。

### 2. 燃焼圧センサの要件

近年、ディーゼルエンジン仕様はその取り巻く環境から、「小型化」による燃費低減と、高出力・排出ガス低減の両立を狙いとした「吸排気弁の4弁化・センターインジェクション化」が主流となっている。

その結果、新たな燃焼圧センサ搭載には、「体格」「取付け性」「配置スペース」の制約が課せられる。

一方センサには、ヒステリシス・ノイズ比率・相関係数などの基本性能の確保はもちろんのこと、気筒ごとに燃焼フィードバック制御を実現させるための「全気筒搭載可能なセンサ」への期待は大きい。

しかしながら、全気筒に燃焼圧センサを新たに装着することは、現状ではエンジンの構造上、不可能である。そこで、現在エンジンに装着されている製品に圧力センサを組み込み、一体化した製品の創出を目指した。

燃焼圧センサ搭載可能な製品の要件としては、全気筒に装着され、かつ燃焼室に露出して直接燃焼圧にさらされていることであり、インジェクタと始動用点火栓グロープラグを検討対象とした。

### 3. 燃焼圧伝達媒体の選定

Fig. 1に、燃焼圧センサを搭載した製品の概要を示す。基本構成は、各製品の外周面に圧電素子を内蔵した簡素な座金構造からなる燃焼圧センサを配置させることとした。センサは、各製品に備えられた取付けねじを介してエンジンへ直接固定されている。

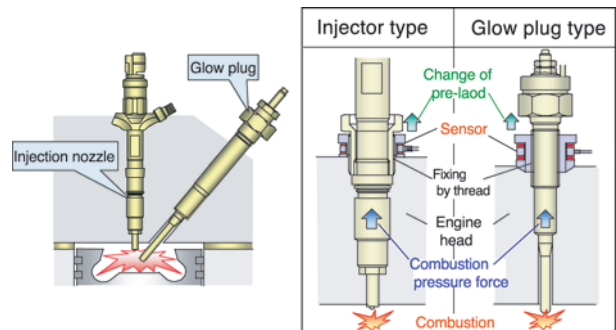


Fig. 1 Mounting position of sensor

\* (社)自動車技術会の了解を得て、2002年秋季大会学術講演会前刷集No. 87-02, 64より転載

ここで、燃焼圧検出の原理について説明する。まず、燃焼圧が発生すると、その圧力に応じて、エンジン取付け部品には歪みが発生する。続いてこの歪みは、部材を伝播してセンサ部に到達する。センサに内蔵した圧電素子の予荷重は、この歪みに応じて変動する。この予荷重変動によって発生する電荷を検出し、燃焼圧と相関付けている。

Fig. 2に今回設定したセンサについて、実機での連続燃焼及び単発燃焼時の出力波形を示す。計測は、それぞれのセンサ出力に周波数域が5kHz以下となるようフィルタを掛け、同一気筒内に取付けたキスラー社製筒内圧センサをリファレンスとして同時観察した。なお、ここで設定したフィルタリング周波数5kHzは、通常の運転条件内で燃焼による圧力を検出できることと、噴射ノズルの開閉に伴うノイズを排除できることを燃焼圧スペクトル解析で確認し設定した。

インジェクタタイプは、比較的低周波の揺らぎが発生し、燃焼間の波形にも大きく影響を与えている。一方、グロープラグタイプは、基本的に筒内圧に近似しているが、高周波の振動ノイズが重畳していることが分かった。

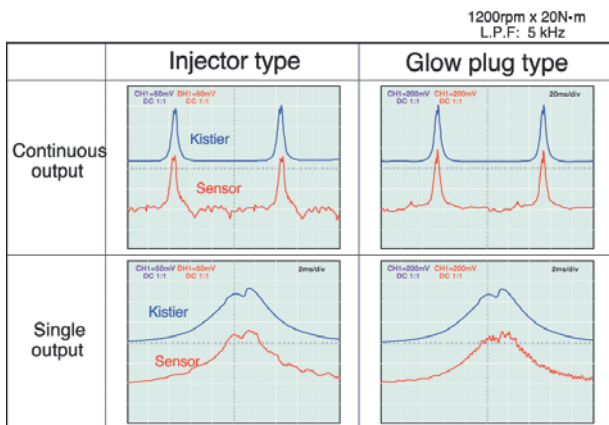


Fig. 2 Waveform

次に、先に得られたセンサ出力波形を基に、燃焼圧センサの基本性能である「ヒステリシス」「ノイズ比率」「相関係数」について定量化を行った。グロープラグタイプの方が基本性能すべてにおいて優位であることが分かる。(Fig. 3)

そこで、我々はグロープラグタイプをベースに、課題である振動ノイズ低減に取り組むこととした。

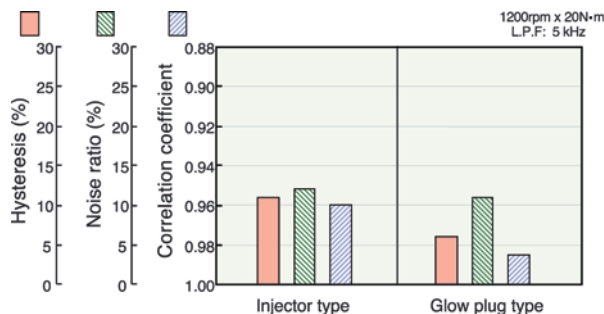


Fig. 3 Basic characteristics comparison

#### 4. センサ仕様の最適化

振動ノイズ低減に当っては、ノイズ源の解明が不可欠である。そこで、実機へ装着したグロープラグとセンサ周辺の振動解析を実施した。(Fig. 4) グロープラグの中軸とハウジング、センサ部、エンジンヘッドに縦振動用のGセンサを配置した。センサ出力については直接周波数解析を実施した。

その結果、センサ出力のスペクトルはグロープラグ各部やグローに装着のセンサ部よりも、エンジン振動スペクトルに酷似していることが分かった。また、新たな知見として、グロープラグの中軸が最も振動レベルの小さな部材であることが分かった。

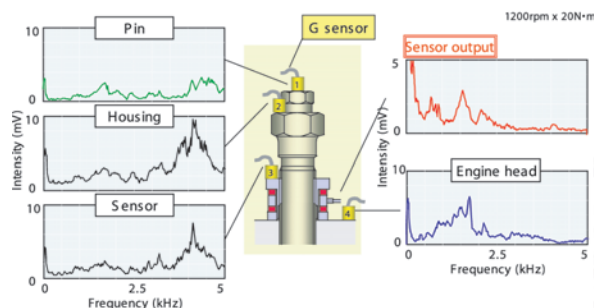


Fig. 4 Vibration analysis

次に、エンジンへ取付けた振動センサの出力波形についてセンサ出力波形と比較観察を行った。(Fig. 5) その結果、センサ出力波形に重畳した振動ノイズの周期は、Gセンサ出力波形の周期と数多くの同調が見られ、この現象はエンジン回転を増しても同様の結果であった。

一方、グロープラグはインジェクタの近傍に配置されているため、噴射ノズルの開閉振動の影響を確認しておく必要がある。そこで、インジェクタが駆動しないモータリング条件においても評価を行った。その結果、この場合もセンサ出力波形に重畳した振動ノイズ

とGセンサ出力波形には同調が見られた。

以上の点から、センサ出力波形に重畳した振動ノイズは、センサ本体をエンジンへ直接固定するため、センサにエンジン振動が伝達されると結論付けた。

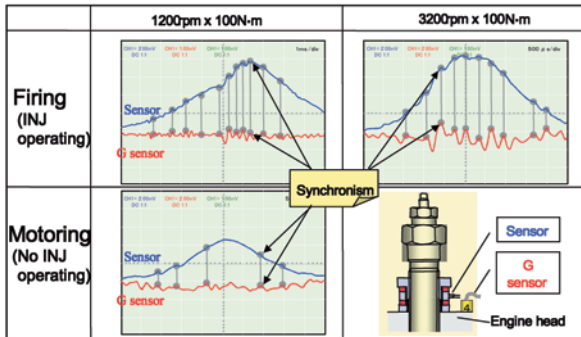


Fig. 5 Relationship between engine vibration and sensor output

そこで我々はセンサをエンジン振動から隔離する方法を検討するに当たり、先の振動解析から得られた新たな知見、すなわち、グロープラグの中軸が最も振動レベルが小さな部材である点に着目した。なぜ、グロープラグの中軸の振動レベルが小さいかについて以下説明する。

グロープラグの中軸はその先端にヒータ部を形成し、エンジン深部に位置するハウジング端部に固定されている。一方、他端は中軸とハウジングとの間に柔軟性に富んだシールゴムと絶縁樹脂が介在し、ナットで保持されている。(Fig. 6)

この構造から、中軸はハウジングに比べるとエンジンからの振動伝達経路が遥かに少なく、他端は、緩衝部材で保持されているため、中軸自体は構造的に免振効果が期待できるものと考えた。

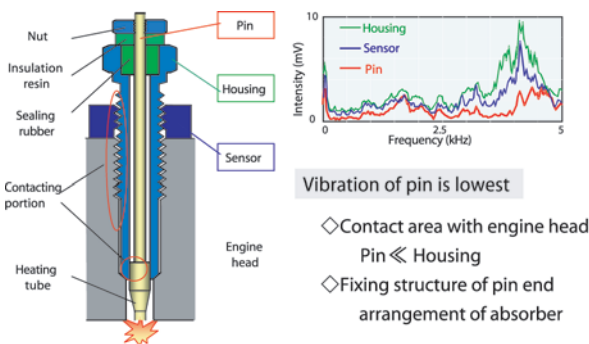


Fig. 6 Structure and vibration of each portion

しかしながら、中軸が燃焼圧の伝達媒体として成立するか否かが問題となるためFEM解析を用いて可能性を検討した。

具体的モデルは、伝達媒体がハウジングの場合、センサはエンジンで拘束され、燃焼圧のハウジングへの伝達力を、エンジンに対するセンサの引張力として解析した。また、伝達媒体が中軸の場合、中軸はハウジングで拘束され、燃焼圧の中軸への伝達力をハウジングに対する中軸の引張力として解析した。そしてこれを基に、各伝達媒体への燃焼圧の伝達率を算出した。

その結果、ハウジングへの伝達率は2.5%、中軸への伝達率は5%と、中軸はハウジングに比べ伝達率が倍増することが判明した。(Fig. 7)

以上の結果から、中軸が「エンジン振動からの絶縁性」と「燃焼圧の伝達率」に優位なことからハウジング歪検出から中軸歪検出へ方針を転換した。(Fig. 8)

ハウジング歪検出の場合、センサ部はグロープラグのハウジング外周とエンジン間に配置していたが、中軸歪検出では、グロープラグの中軸とハウジング間に配置した。すなわち、グロープラグにセンサを内蔵した一体構造とし、構造の簡素化、コスト並びにエンジン取付け性が飛躍的に改善できた。

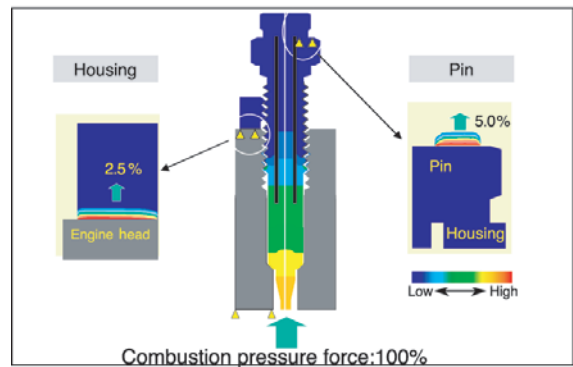


Fig. 7 Transmission of combustion pressure force

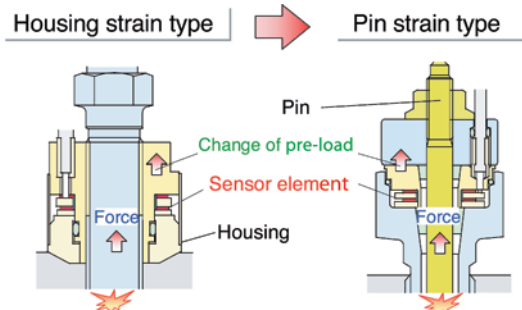


Fig. 8 Structure of sensor

以上の検証として、まず出力波形の改善効果を実機で確認した。Fig. 9に示す出力波形に於いて、各上段は5kHz以下のフィルタリング波形、下段は振動ノイズ成分を強調させた0.5~5kHzのフィルタリング波形である。中軸歪検出の出力波形はハウジング歪検出に比べ、燃焼間に発生していたバルブ開閉ノイズ並びに、センサ出力に重畳していた振動ノイズは、エンジンの高回転域まで大幅に低減できることを確認した。

次にFig. 10では、先の出力波形を基に、アイドリングからエンジン回転数3200rpm間に至る評価6条件について、振動ノイズを定量化した。なお、ここに示すノイズ比率とは、簡易的にセンサ出力に対するノイズ幅の割合を算出した値である。そのノイズ比率は、ハウジング歪検出では平均約13%で推移していたが、中軸歪検出ではハウジング歪検出の1/4に相当する約3%までに低減できたことを確認した。

続いて、検出方式による燃焼圧の伝達率を、センサ出力の感度から判断した。ハウジング歪検出の場合は感度、100mV/MPa、これに対し中軸歪検出の場合は190mV/MPaであり、先のFEM解析結果を略再現し、感度が倍増したことを確認できた。(Fig. 11)

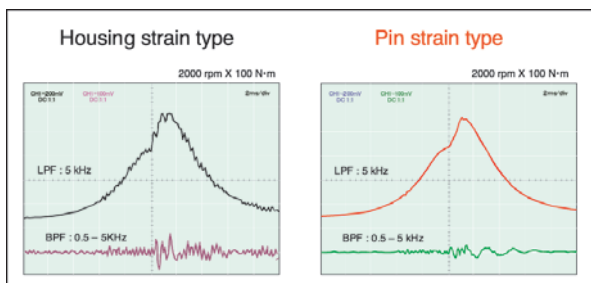


Fig. 9 Waveform comparison

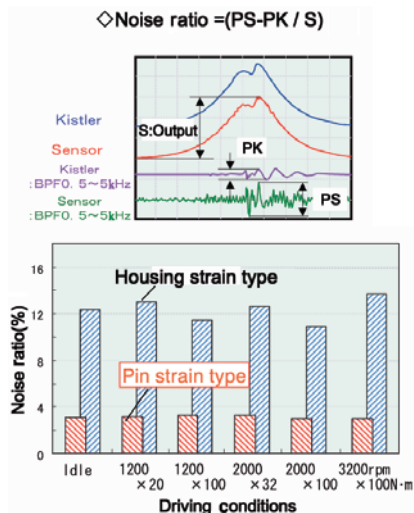


Fig. 10 Vibration noise

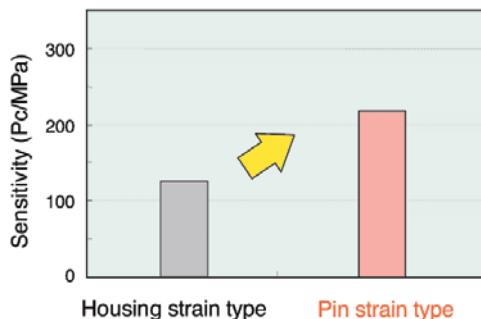


Fig. 11 Sensitivity

### 5. 実機による評価結果

2000cm<sup>3</sup> - 直噴エンジンで実施した開発品とキスラー製筒内圧センサとの基本性能の比較結果を示す。

Fig. 12に出力波形を示す。開発品は、燃焼間のバルブ開閉ノイズ及び振動ノイズは共に完全除去されないものの、エンジン高回転域まで、キスラーに接近させることができた。

Fig. 13に出力値の直線性を示す。ここではアイドリングからエンジン回転数3200rpmまでの7条件において、開発品とキスラー製センサを同時計測した出力波高値から相関係数を算出した。値は0.995と満足する結果が得られた。

Fig. 14に波形の相似性を示す。X軸にキスラー出力、Y軸には開発品出力を割りあてたりサーージュ波形を基に、一般算出法に沿ってヒステリシスを算出し、2%以下を推移することを確認した。

Fig. 15に出力値のパラツキ結果を示す。ここでは、同時計測したサンプル数200について、出力値の平均に対するパラツキ幅6 の割合を算出した。結果は、評価条件によってはエンジン側の燃焼変動に起因し、パラツキ自体は変動しているが、これはキスラーも全く同様であり、出力パラツキには差が無いことが確認できた。

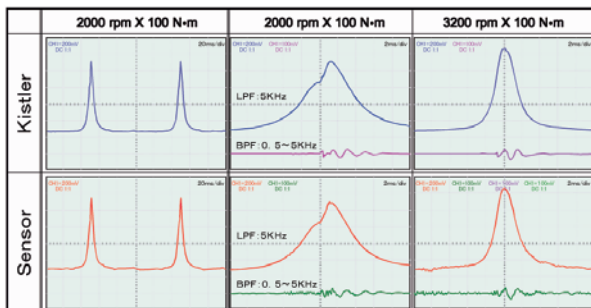


Fig. 12 Result of engine test - waveform

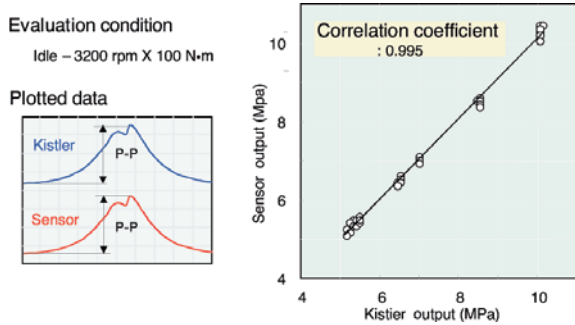


Fig. 13 Output relationship with Kistler

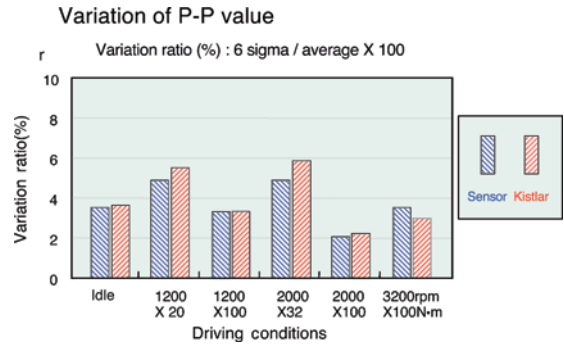


Fig. 15 Output variation

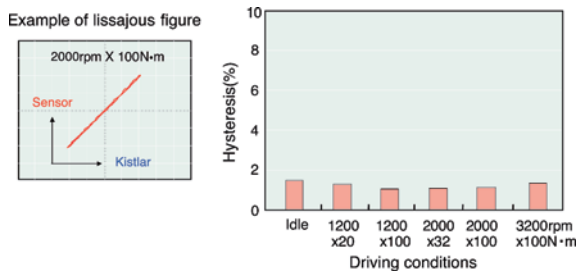


Fig. 14 Hysteresis relationship with Kistler

## 6. まとめ

燃焼のフィードバック制御に適用可能なディーゼルエンジン用の燃焼圧センサの開発に取り組み、以下の結果を得た。

- (1) ヒータ機能とセンサ機能を複合させた燃焼圧センサー一体型グロープラグを開発した。
- (2) グロープラグに圧力センサを一体化させたことにより、新たなエンジン加工なしに全気筒への搭載を可能とした。
- (3) センサ部の最適構造を見出し、キスラー製センサとほぼ同等の燃焼圧検出性能を確保した。

以上、開発品は、燃焼圧に直接さらされるグロープラグをベースに、低振動部材である中軸を燃焼圧の伝達媒体とした歪み検出方式の採用により、燃焼圧検出のSNを向上させることに成功した。これにより、ディーゼルエンジン用燃焼圧センサの実用化へ近づけることができた。

## < 著 者 >



村井 博之  
(むらい ひろゆき)  
セラミック技術部  
燃焼圧センサー一体型グロープラグの  
開発に従事



亀島 昭彦  
(かめしま あきひこ)  
機能品技術 2 部  
燃焼圧センサー一体型グロープラグの  
開発に従事



守谷 栄記  
(もりや ひでのり)  
トヨタ自動車(株)  
東富士研究所 パワートレーン制御  
開発部  
パワートレーン系センサ、制御デバ  
イスの次世代制御系開発に従事



宮本 裕  
(みやもと ゆたか)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
第 1 研究室  
センサ及び噴射系部品の開発に従事