

直噴インジェクター一体型超小型筒内圧センサの開発

Development of Cylinder Pressure Sensor Integrated with Direct Injector

山 本 裕 司*
Yuji YAMAMOTO

佐 藤 岳**
Gaku SATO

林 貴 之***
Takayuki HAYASHI

要 旨

これまで開発してきた多結晶圧電素子型筒内圧センサは、焦電効果等による出力特性の補正が必要であり、プラグ挟み込み式を採用せざるをえないためエンジンレイアウトへ大きな影響を与えた。

今回こうした課題に対して、単結晶圧電素子の筒内圧センサを直噴インジェクターと一体とすることにより課題を解決したので、その効果と特徴を紹介する。センサをインジェクターとの一体構造とすることにより、既存の部品とコモンリティをもたせ、今後拡大する直噴過給エンジンへ容易に取り付けられるようにした。また、筒内圧検知性については、温度特性の優れた単結晶圧電素子を採用することにより、基準センサ〔Kistler 社製 (6052B)〕と比較して、 $\pm 3\%$ の検知精度が得られた。またノッキング波形も基準センサと同等の検知性が確認できた。

ABSTRACT

Polycrystalline piezo-electric element-type cylinder pressure sensors developed thus far require correction of the output characteristics due to pyroelectricity and other factors. This type of sensors also made it necessary to use plug clamp-type sensors, which had a large influence on engine layout.

This issue was addressed by integrating a single crystal piezo-electric element-type cylinder pressure sensor with a direct injector, and this paper introduces the effects and characteristics of this new sensor. Use of an integrated sensor and injector structure provided commonality with existing parts and enabled easy installation in turbocharged engines with direct injection that are expected to become widespread in the future. In addition, with regards to cylinder pressure detectability, the use of single crystal piezo-electric elements with good temperature characteristics achieved a detection accuracy of $\pm 3\%$ compared to the reference sensor (Kistler (6052B)). Furthermore, the knocking waveform detectability was also confirmed to be the same level as that of the reference sensor.

1. まえがき

近年、国内では電気自動車やハイブリッド車とは違う内燃機関の効率を高めたスモールカーや、アイドルストップ技術を搭載したコンパクトカーなどにみられるような燃費向上技術が量産化されている。また、欧州を中心にダウンサイジング過給エンジンの普及や Cooled-EGR, Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) 燃焼研究など、燃焼の高効率化を中心とした燃費向上技術が注目されている。

ガソリンエンジンにおいてもポート噴射式から、燃焼室内に直接燃料を噴射する直噴式へと進化し、それまで燃焼室形状や点火時期制御のみでは困難であった燃焼の制御も可能となり、より多くのパラメータを用い、さらに精密

に制御する要求が生まれた。これらの要求に応えるため、各社筒内圧センサの開発を進めているが、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンともに一部を除いて量産されていない^{(1) - (7)}。

こうした複雑で精密な制御要求に対応し、燃焼制御技術を量産適用するため、ガソリンエンジンの筒内圧をリアルタイムに計測し、熱計算や効率演算を高速で実行可能な CPU と組み合わせる手法を長年に渡り研究してきた。その中でプラグ挟み込みタイプの筒内圧センサを研究開発してきた^{(8), (9)}。このセンサの特徴は、センサの取り付けに関して、バルブ構造に影響を与えない構造であったが、組み付け上の制約からプラグホール、ヘッドカバーの変更が必要であった。

また、多結晶圧電素子を採用していたため、温度特性に

* 四輪 R&D センター

** 株式会社ケーヒン

*** シチズン ファインテック ミヨタ株式会社

よる出力感度の変化や、焦電効果による出力がドリフトするという課題があり、特別なソフトウェアが必要であった⁽⁸⁾。こうした課題を、新たなセンサを開発し解決した。その内容を以下に述べる。

2. 筒内圧センサの開発

2.1. 新筒内圧センサの特徴

新たなセンサは、Fig. 1 に示す通り近年増加しているガソリンエンジンの直噴インジェクタの先端部の燃料噴射口周囲に超小型単結晶素子を配置した。

新筒内圧センサは、インジェクター一体式のため、特別なハードウェアやヘッドのレイアウト変更を伴わない。また、インジェクタから噴射される燃料の冷却効果により、素子部温度を 150 ℃ 以下に保つことができ、熱的課題が生じない特徴を有する。さらに、軸シール構造も変更が必要なく、汎用性の高いセンサとすることができた。一方、従来のプラグ挟み込みタイプでは、燃焼圧をヘッドのひずみとして検知する方法であったため、吸気バルブ、排気バルブの着座による影響があったが、新筒内圧センサでは直接筒内圧力を検知しているため、そのような影響を受けない。

センサ構造を、Fig. 2 に示す。基本構成は、圧電素子をインジェクタ先端に環状に組み込む構造とした。圧電素子の片方の電極は、圧力伝達部位に塗られた電極材を通じて、外部に結線される。

圧電素子は、温度特性に優れた単結晶圧電素子を採用した。この圧電素子は、温度特性変化による感度補正や、焦電効果によるドリフトの補正が必要なく、高精度に筒内圧力の検知が可能である。

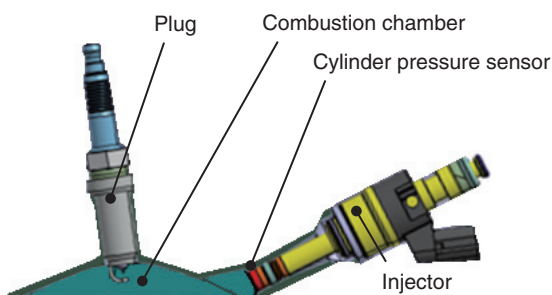


Fig. 1 Installation of injector with cylinder pressure sensor

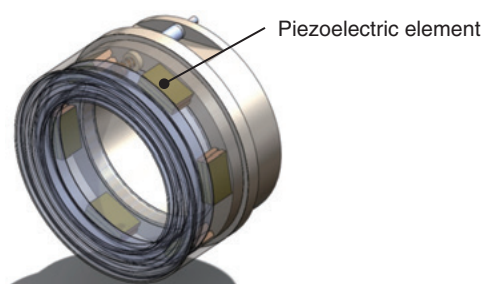


Fig. 2 Cylinder pressure sensor structure

2.2. 圧電素子特性

圧電素子は、単結晶のランガタイト系単結晶を採用した。ランガタイト系単結晶の結晶構造は Fig. 3 に示す通り、空間群 P321 に属する三方晶の結晶で、焦電性を持たず圧電性のみを有する単結晶である。A から D の四つの異なるカチオンサイトで構成されており、組成式は $A_3BC_3D_2O_{14}$ で表され、代表的なランガタイトは化学式 $La_3Ga_{5.5}Ta_{0.5}O_{14}$ で表される。

多結晶体の圧電素子は、粉末を成型、焼成した段階では分極が発生しない。外部よりキュリー点以上の高温下で高電圧をかけることで、分極方向が一方向を向き、打ち消しあっていた自発分極を強制的に統一することで、多結晶全体が分極方向を持つ圧電体となる。こうした製法による圧電素子は、圧力振幅の繰返し、特にキュリー点近傍や高温下での圧力振幅の繰返すことで、分極方向が元に戻っていき、圧電性を失ってしまう。

一方、ランガタイト系圧電単結晶は、育成し終えた段階より自発分極を一方向に持つため、分極処理の必要がなく、また融点までキュリー点が存在しないため、構造の変化もない。また、ランガタイト系圧電単結晶は、結晶育成において、融液組成と育成結晶組成に差を生じる disorder 型の結晶であるが、Cz 法などの溶融固化法での育成が可能で AlN や $GaPO_4$ と比較して大型化が容易である。また、キュリー点が融点まで存在しないことも育成しやすく安定している理由である。したがって、ランガタイト系単結晶は、低温から高温まで広い温度範囲において圧電定数の温度依存性が小さく、優れた安定性を有しているため、筒内圧センサ用圧電素子としてすぐれた特性を持つ (Table 1)。

センサ構造は、燃焼室に面したセンサ先端部より圧力を素子に伝達し、センサに生じた応力を出力として取り出す構造としている。そこで、燃焼パラメータ演算に影響を与えない S/N 比より目標感度を 50 pC/Mpa とし、センサ配置と構造をシミュレーションを用いて最適化した。筒内圧センサの出力シミュレーション結果を Fig. 4 に示す。出力シミュレーションにおいて、15 MPa を印加させた場合、

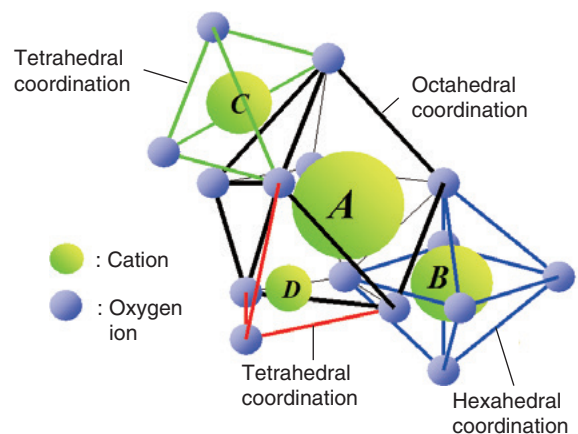


Fig. 3 Langatate crystallization structure

Table 1 Piezoelectric element comparison

		Single crystal		Polycrystalline	
		La ₃ Ga _{5.5} Ta _{0.5} O ₁₄ langatate	SiO ₂ quartz	PbTiO ₃ lead titanate	PbNb ₂ O ₆ lead niobate
Performance characteristic	Piezoelectric constant (pC/N)	7.5	2.5	60	80
	Pyroelectricity (pC/°C)	0	10	20000	15000
	Temperature characteristics (%/°C)	0.5<	0.1	0.4	0.3
Degradation characteristic	Curie temperature (°C)	—	570	490	570
	Piezoelectric property degradation temperature (°C)	—	350	300	350
	Breaking strength (MPa)	800	400	500	300
	Piezoelectric property degradation pressure (MPa)	800	300	400	200

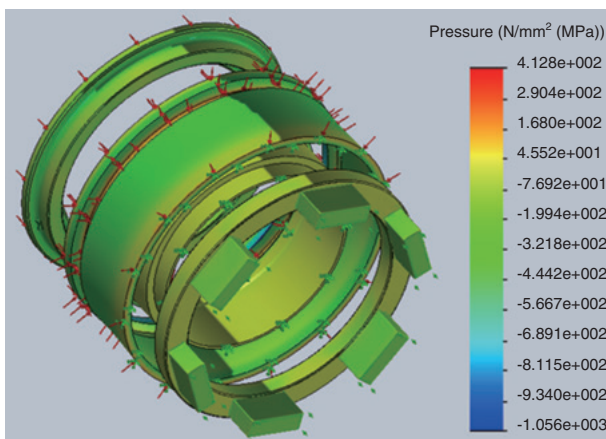


Fig. 4 Sensor stress simulation result

圧電素子に掛かる荷重は 103 N であった。ランガタイトの圧電縦効果 Q_x を使用して圧電素子を製作した場合、結晶単体の出力は約 7 pC/N である。この時の発生電荷量は 721 pC となり、センサの出力としては 48 pC/MPa が想定される。

筒内圧センサを実際に製作し、出力を確認したところ、50 pC/MPa と成り、シミュレーションとの差は 2 pC/MPa で、目標通りの性能が得られた。

3. 筒内圧センサー一体インジェクタの開発

3.1. インジェクタ構造

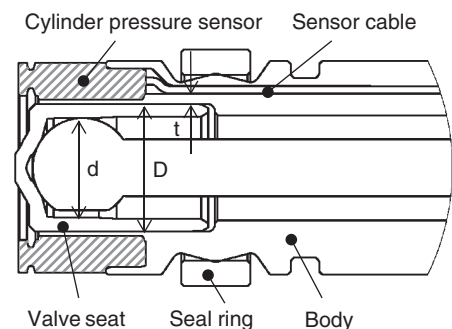
外径の変更なくインジェクタ先端へセンサを取り付けるには、リング状のセンサの内側にバルブシートを収める必要があるため、バルブシートやボデーを薄肉化することで対応した。構造解析シミュレーションを活用し、ベースのインジェクタと同等の強度が得られるようバルブシートやボデーの最適化を図った。

Fig. 5 に開発したインジェクタの構造を示す。外径寸法は、ベースのインジェクタと同一であり、先端に取り付けられたセンサよりシールリング内側を圧力信号線が通りコネクタ側へ配線される。圧力信号線は、電気的ノイズを考

慮し同軸構造の細線を採用した。

バルブシート内径は、インジェクタの流量特性に大きく影響を与える。そこで、シミュレーションをおこない、バルブシートの変形が、ベースのインジェクタと同等以下になるように設定した。バルブシート外径 D を変数とし、圧入後のバルブシート内径 d の変形量 Δd を Fig. 6 に示す通り、ベースのインジェクタと同等以下の変形量に抑えられるような外径を設定した。

圧力信号線を通すためのボデー溝部は、燃料圧力による応力集中が発生する箇所である。この溝部の肉厚 t と応力の関係を Fig. 7 に示す。本開発では、この結果に基づいて溝部の肉厚を設定し、燃料圧力により発生する応力に対しボデー強度を確保できた。



D: Valve seat outside diameter
d: Valve seat inside diameter
t: Body thickness under groove

Fig. 5 Injector structure

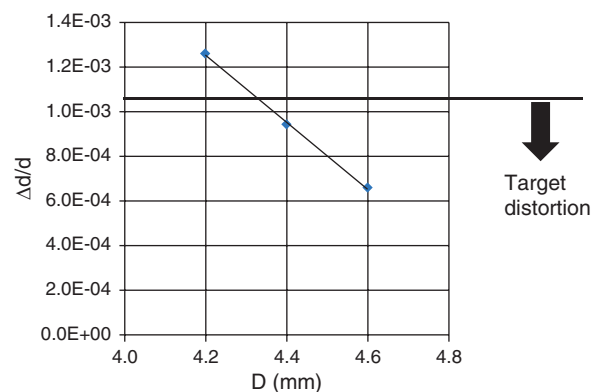


Fig. 6 Valve seat diameter simulation result

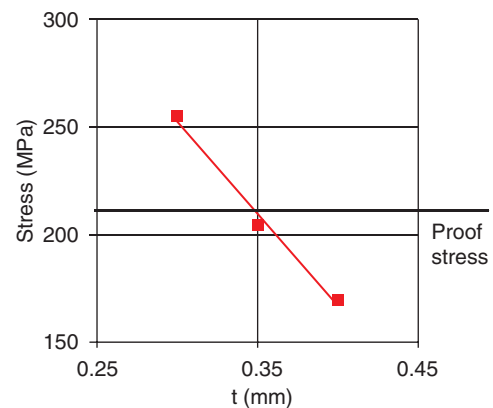


Fig. 7 Body stress simulation result

次に、組立性向上と断線防止の方法について述べる。
Fig. 8に示すように、圧力信号線をカプラより引き出す構造とするため、コネクタを3ピンタイプとした。センサ信号は中央のターミナルより取り出す構造とした。

インジェクタの駆動ノイズの対応手法を以下に述べる。
磁場解析シミュレーションをおこない磁界の強さが最小となるように磁路構造を決定した。磁場解析シミュレーションの結果を Fig. 9 に示す。この図よりインジェクタ駆動による磁場の影響を少なくするには、ハウジングの外径を大きくすれば良いことがわかった。本開発では、本シミュレーションにより、ハウジングの最大外径 D_h を設定した。

3.2. インジェクタ単体性能評価

センサ取り付けの影響を確認するため、インジェクタの流量特性の検証をおこなった。流量特性は Fig. 10 に示す通り、従来のインジェクタと同等であることが証明できた。

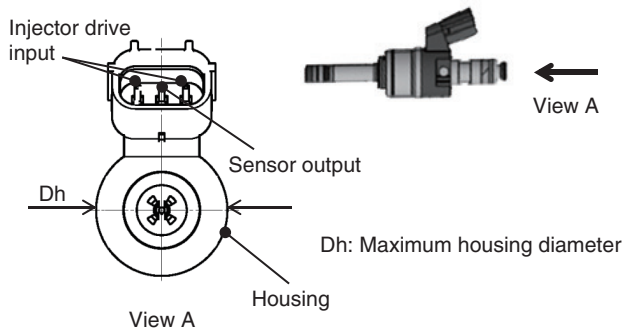


Fig. 8 Signal connector layout

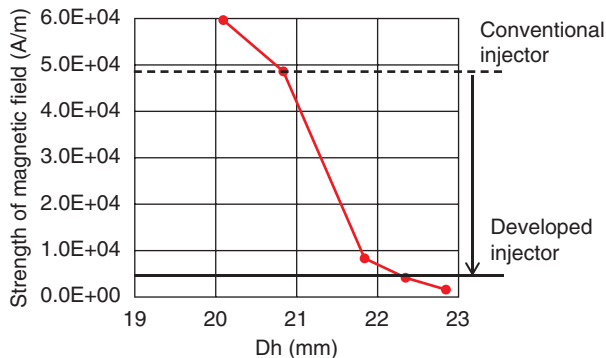


Fig. 9 Magnetic field simulation result

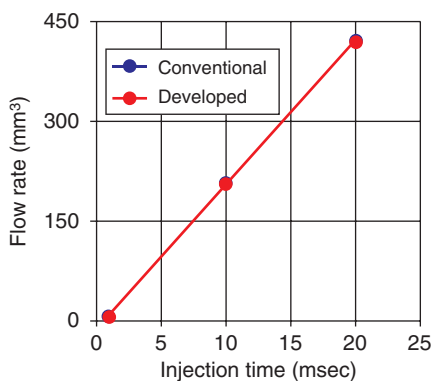


Fig. 10 Flow rate characteristics

4. 実機検証結果

テストベンチにて筒内圧の検知性能を基準センサ [Kistler 社製 (6052B)] と比較評価をおこなった。直列4気筒 2000 cm^3 エンジンを用い、2000 rpm, 180 Nm の条件で比較した。

Fig. 11 に基準センサと新筒内圧センサの筒内圧波形の比較を、Fig. 12 に基準センサとの相関を示す。基準センサに対し $\pm 3\%$ 以内の出力結果が得られた。

また、筒内圧センサとしては、10 kHz 近傍のノック波形が検知できるかどうかが重要な要素である。そこで 1500 rpm, 中負荷時のノック波形を基準センサと比較した。Fig. 13 に示す通り、基準センサと同等の圧力が得られた。

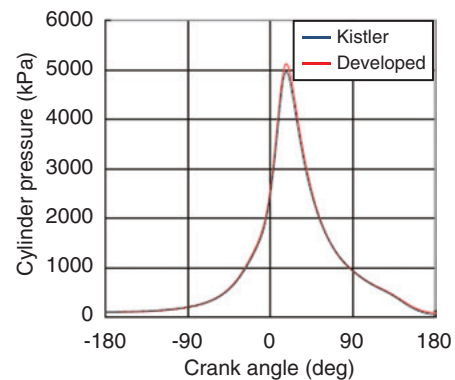


Fig. 11 Cylinder pressure measurement result

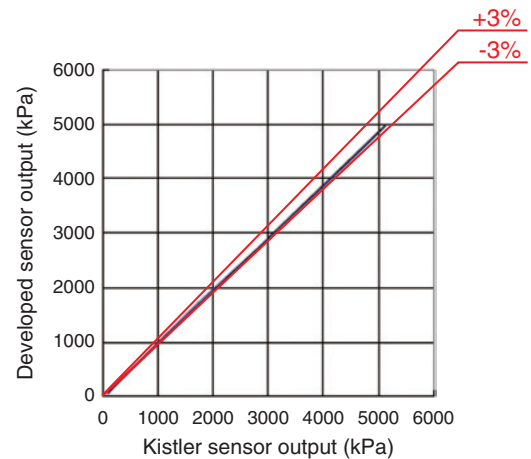


Fig. 12 Cylinder pressure correlation result

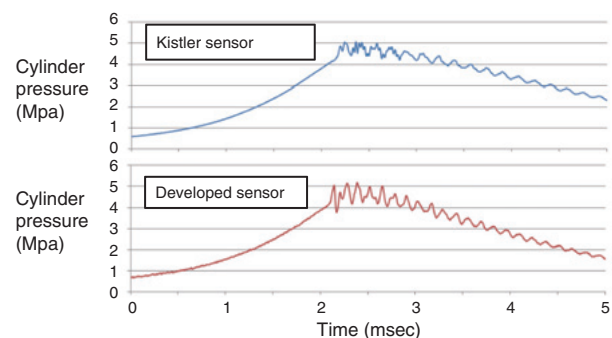


Fig. 13 Cylinder pressures with knocking

5. まとめ

超小型の単結晶圧電素子を直噴インジェクタの燃料噴射口の周囲にレイアウトすることで、燃料による積極的な冷却効果で素子部温度を 150℃以下にでき、従来よりも低温な環境を実現し、燃焼室にきわめて近い位置にセンサを配置することで、ノックも検知可能とした。同時にインジェクタのハード構成を変更することなく筒内圧センサを直噴インジェクタに一体化することができた。

- (1) 従来のインジェクタと同じ寸法内に収めることができ、エンジンハードの変更なく取り付けることが可能となった。
- (2) 従来の直噴インジェクタと筒内圧センサー一体式の流量特性への影響が無いことが確認できた。
- (3) 筒内圧力検知精度は、基準センサに対し±3%以内であり、ノッキング圧力も基準センサと同等に検知できることが確認できた。

参考文献

- (1) Kondo, K., Niimi, A., Nakamura, T.: Indiscope-A New Combustion Pressure Indicator with Washer Transducers, SAE Paper, 750883(1975)
- (2) Sawamoto, K., Kawamura, Y., Kita, T.: Individual Cylinder Knock Control by Detecting Cylinder Pressure, SAE Paper, 871911(1987)
- (3) Kusakabe, H., Okauchi, T., Takirawa, M.: A Cylinder Pressure Sensor for Internal Combustion Engine, SAE Paper, 920701(1992)
- (4) Wlodarczyk, M, T.: High Accuracy Glow Plug-integrated Cylinder Pressure Sensor for Closed Loop Engine Control, SAE Paper, 2006-01-0184
- (5) Hasegawa, M., Shimasaki, Y., Yamaguchi, S., Kobayashi, M., Sakamoto, H., Kitayama, N., Kanda, T.: Study on ignition Timing Control for Diesel Engines Using In-Cylinder Pressure Sensor, SAE Paper, 2006-01-0180
- (6) Shimasaki, Y., Kobayashi, M., Sakamoto, H., Ueno, M., Hasegawa, M., Yamaguchi, S., Suzuki, T.: Study on Engine Management System Using In-cylinder Pressure Sensor Integrated with Spark Plug, SAE Paper, 2004-01-0519
- (7) 村井博之, 亀島昭彦, 守屋栄記, 宮本裕: 燃焼圧センサー一体グロープラグ, Denso Technical Review, Vol.8 No.2, p.74-78(2003)
- (8) Yamamoto, Y., Akazaki, S., Ohara, M., Mizuno, H.: Development of Cylinder Pressure Measurement System Using Adaptive Calculation, SAE Paper,

2008-01-1009

- (9) 奥山高弘, 福澤毅, 橋本朗: V10 500 馬力エンジンの開発—高出力と環境性能の両立技術—, Honda R&D Technical Review, Vol.22, No.2, p.41-48

■ 著 者 ■



山本 裕 司



佐 藤 岳



林 貴 之