

燃焼圧センサ

塚田厚志, 竹内正治, 徳光早苗, 大村義輝, 川口一義

Combustion Pressure Sensor

Kouji Tsukada, Masaharu Takeuchi, Sanae Tokumitsu,
Yoshiteru Ohmura, Kazuyoshi Kawaguchi

要 旨

近年, 自動車の燃費向上, エミッション低減の要求が強く求められている。この要求に答えるために, エンジンの燃焼室内の圧力を直接検知して空燃比を希薄燃焼限界近傍にフィードバック制御する希薄燃焼エンジン用燃焼圧センサを開発した。

燃焼圧センサは, 金属ダイアフラムで受けた燃焼圧力を, 内部の力検知素子に圧縮力として伝達し, シリコンのピエゾ抵抗効果を利用して燃焼圧力に対応した電圧信号を出力する。この力検知素子に利用したピエゾ抵抗効果は, π_{63} 型と呼ぶ新しいもので, 入力抵抗が低く, 電気ノイズに強いもので自動車用センサに適

している。また, この力検知素子は, 圧縮破壊荷重が1000N以上と非常に大きく, 動作範囲150~225Nに対して十分な安全係数を有している。

この力検知素子を用いた燃焼圧センサとしての出力特性は, 非直線性1% F.S以下の良好な結果が得られた。

燃焼圧センサを用いた新しい希薄燃焼システムは, リーンミクスチャセンサで検出して制御する方法に比べ, より希薄燃焼が可能になった。これにより, 従来より重量の重い車両やオートマチックトランスミッション車に採用可能となった。

Abstract

A new combustion pressure sensor capable of measuring the pressure in a cylinder of an automobile engine has been developed. Using the sensor output, the air-fuel ratio in the cylinder was successfully maintained in the vicinity of the lean combustion limit. The sensor has been used for controlling an advanced lean combustion engine for improvement of fuel consumption efficiency and reduction of emissions.

The combustion pressure sensor contains a metal diaphragm, a force transducer made from Si, and an amplifier. The combustion pressure is converted to the uniaxial stress through the diaphragm, and then the uniaxial stress is

transformed to the change in resistivity using the piezoresistive effect of Si. The force transducer is designed to utilize the piezoresistive coefficient, π_{63} , for sensing the stress.

The sensor exhibits excellent performance, including durability and reliability. Since the fracture load of the force transducer is 1000N, the whole strength of the sensor is considered to be sufficient for the actual load, 150 - 225 N. In addition, the sensor output linearly increases with increasing pressure; the non-linearity is estimated to be less than 1% of full scale. Consequently, the sensor is applicable to heavier vehicles and automatic transmission vehicles.

キーワード

エンジン, 希薄燃焼, 燃費改善, 排気対策, Si半導体, 燃焼圧力, センサ

1. はじめに

近年、自動車において、省資源ならびに地球温暖化抑制のための観点から、燃費改善が大きな社会的要請となっている。低燃費の実現には、軽量化や空気抵抗の低減が図られているが、燃焼の面からは希薄燃焼がガソリンエンジンにおける効果的な燃費改善の手段として注目されている。この希薄燃焼エンジンは燃費改善効果が大きいことが知られ、従来はリーンミクスチャセンサを用いた一定空燃比制御方式の希薄燃焼エンジンが実用化されていた。しかしNO_x排出量を規制値以下にする必要から、その採用は軽量のマニュアル車に限られていた。そこで、自動車用部品としての燃焼圧センサを開発することにより、この問題を大幅に改善した。

Fig. 1に希薄燃焼制御システムを示す。希薄燃焼エンジンでは燃料に対し空気量を過剰にしていくと燃費が向上し、NO_xガスの排出量も空燃比が16をピークにこれを越えて空気量を過剰にしていくと減少することが知られている。しかし、空気量を過剰にしすぎると燃焼が不安定になりトルク変動が顕著になりドライバビリティが損なわれる。そこで燃焼圧センサにより燃焼不安定によるトルク変動を圧力変動として検出し、希薄燃焼限界近傍に空燃比をフィードバックする制御方法を初めてトヨタ自動車において実現した。

燃焼圧センサによるトルク検出法をFig. 2に示す。

燃焼により発生した圧力でピストンが押され、ピストンの往復運動がクランクシャフトにより回転運動に変換される。この時発生した回転力がトルクである。従って、発生するトルクは燃焼圧力とクランク軸の角度により求められる。Fig. 2はこれを示したものである。燃焼圧をあらかじめ定められたクランク角でサンプリングし、数式によりエンジンコントロールユニットにてトルクが求められる燃焼圧センサを用いた新しい希薄燃焼システムは、従来の排気の酸素濃度をリーンミクスチャセンサ

で検出し、あらかじめ定められた空燃比に制御する方法に比べ、より希薄領域での燃焼が可能になった。これは、希薄燃焼限界を決めるエンジントルク変動量を燃焼圧センサで直接検知して、トルク変動限界近傍に制御する方式で、従来の空燃比に比べて、より燃料の少ない状態での運転が可能になり、NO_x排出量を同一運転条件で30%低減させることができた。そのためエンジン出力に余裕が生まれ、NO_x排出量が規制値を越えるため従来不可能であった車両、すなわち等価慣性質量1250kgの車両やオートマチックトランスミッション車に採用可能とした。この新型車において、車両性能を損なうことなく10%もの大幅な燃費改善が可能となった¹⁻⁴⁾。

本報では、燃焼圧センサに要求される性能、ピエゾ抵抗効果を利用した検出原理、センサ構造、特性について述べる。

2. 要求性能

燃焼圧センサは、#1気筒のファンベルト側からエンジンシリンダヘッドへM10のネジで取り付けられて、気筒内の燃焼圧を検出するもので、その取り付け状況をFig. 3, Fig. 4に示す¹⁻³⁾。

センサ先端部は直接燃焼火災にさらされる。そのため、本センサは特に耐熱性が必要である。また使用環境の過酷な自動車エンジン用センサとして高精度、高応答で燃焼圧検出が必要であり、耐電気ノイズ性、

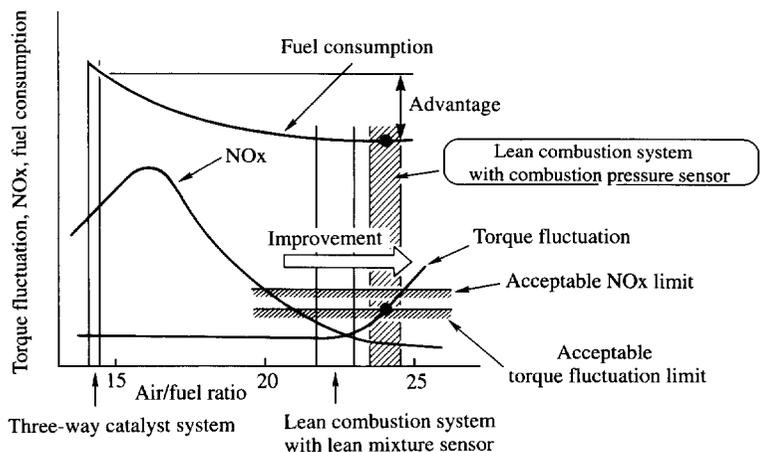


Fig. 1 Lean combustion control system.

耐圧性，長期信頼性が要求される。

Table 1に燃焼圧センサに要求される性能を示す。
使用圧力範囲は，0～10MPaで，耐圧はその2倍が

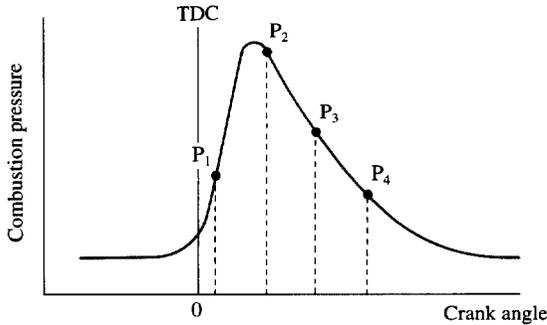


Fig. 2 Measured points of combustion pressure.

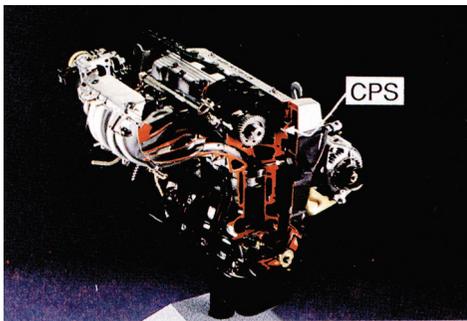


Fig. 3 Cut model of lean burn engine.

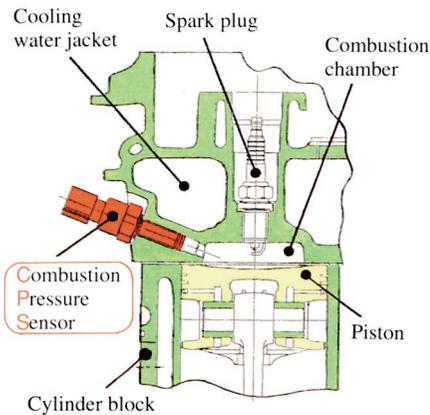


Fig. 4 Installation of combustion pressure sensor.

要求されている。

自動車のエンジンに直接取り付けられることから耐熱性は特に重要で，燃焼圧センサ先端の金属ダイヤフラム部で400℃，力検知素子部で150℃，信号増幅調整回路部で120℃の耐熱性が要求される。

3. 検出原理

3.1 各種検出原理の比較

エンジンの燃焼圧を検出するセンサとして従来から，試験計測用センサ，あるいは車載用として点火プラグ部に組み込まれ間接的に燃焼不良（ノッキング）を検出する圧電型センサが知られていた。圧電型センサの力検出部は水晶あるいはPZT（チタン酸ジルコン酸鉛）焼結体のもつ圧電効果を用いていた。水晶圧電型は水冷が必要で出力も小さいので高感度で特殊なチャージアンプが必要とされ，計測用としては適しているが，量産車両の制御用として用いることは价格的に不可能である。

今回開発した燃焼圧センサは半導体のピエゾ抵抗効果を検出原理として用いている。そこで燃焼圧センサとして用いた場合のピエゾ抵抗効果方式（Si）と圧電効果方式（PZT）の比較をTable 2に示す。最高動作温度はセンサ出力の温度依存性，安定性の点から高いほ

Table 1 Requirement specification of CPS.

Item	Rating	Unit
Working pressure range	0～10	MPa
Burst pressure	20	MPa
Temperature range	CPS diaphragm	-30～400
	Force detective device	-30～150
	Signal conditioner	-30～120
Sensitivity 80～120℃	0.3	V/MPa
Total allowable error	±6	%FS
Non-linearity	-1.5	%FS
Bandwidth	5	kHz
AC coupling frequency	0.2～0.75	Hz
Power supply voltage	5±0.25	V
Bias level	1±0.1	V
Vibrational resistance	30	G

うが望ましい。ピエゾ抵抗効果は、電気抵抗の変化として出力が得られるが、圧電型は電荷の変化として出力される。そのためピエゾ抵抗効果の方は回路が単純であり特殊な回路を必要としない。ピエゾ抵抗効果はシリコンの単結晶を用いる。一方、圧電効果は焼結体であるPZTを用いる。機能性材料としての強度、耐久性、安定性は単結晶の方が優れている。ピエゾ抵抗効果は抵抗変化型のため素子の入出力抵抗値が低く1kΩ程度でありノイズに強い。圧電効果は数MΩと入出力抵抗が非常に高くそのため外因性のノイズに弱い。シリコンは半導体プロセスが使えるのでウエハーサイズで量産できる。PZTはこのようなプロセスが使えない。シリコンのピエゾ抵抗効果の出力電圧はPZTの出力電圧より小さいが、しかし簡単なアンプにより増幅することができ、また温度補償回路も比較的簡単である。

以上のことよりシリコンのピエゾ抵抗効果方式を用いることにより、従来不十分であった耐熱性、強度、耐久性、耐ノイズ性、生産性、温度特性、装着性などの性能が向上し、希薄燃焼限界フィードバック制御用のセンサとして実用化された。

3.2 ピエゾ抵抗効果

ピエゾ抵抗効果とは、応力により電気伝導度に変化する効果である。シリコン単結晶はこの効果が顕著である。特に、本センサには電流・電圧・応力のベクトルが互いに直交した特殊なピエゾ抵抗効果を用いた新しいタイプの方式である。

Table 3に、各種タイプのピエゾ抵抗係数をシリコンの主な結晶面(100), (110), (111)について計算し

た結果を示す。

タイプAは、ひずみゲージや拡散ゲージによく用いられる電流・電圧・応力平行のもので、(110)面内および(211)面内の< 111 >方向で最大値を示す。タイプBは電流・電圧は平行であるが、応力が結晶面に垂直に作用するものであり、(110)面の< 110 >方向検出するものが最大値を示す。またタイプCは、電流・電圧・応力が全て直交するもので、ピエゾ抵抗係数 π_{63} は(110)面にのみ有効で、< 100 >または< 110 >から45度の方向に最大値を有する。

これらのタイプについてその優劣を考えると、タイプAとタイプBでは、温度変化に伴う抵抗値の変化が電圧出力として重畳されるため、2個あるいは4個の素子からなるブリッジ回路構成をとり、零点の温度変化を補償する必要がある。これに対し、タイプCは1個の素子で等価的にフルブリッジ回路を構成している。またシリコン単結晶の圧縮に対する破壊強度は約600MPaと高く、圧縮力のみで検出できるタイプCは、耐久性、信頼性が求められるセンサ用素子として大変有利な構造である。燃焼圧センサ用素子は、このタイプCとした。

Fig. 5にタイプCのP型(110)面のピエゾ抵抗係数 π_{63} の電圧出力の検出方向との関係を示す。抵抗率7.8Ω・cmの時、< 100 >軸より45度の方向で最大値(約 $35 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{dyne}$)を有する。

ピエゾ抵抗係数 π_{63} と電圧出力 V_o との関係は⁵⁾

$$V_o = k\pi_{63}\sigma V_i \quad (1)$$

と表される。ここで、kは電極形状により決まる形状

Table 2 Comparison of piezoresistive effect and piezoelectric effect.

Item \ Method	Piezoresistive effect		Piezoelectric effect	
	Method	Value	Method	Value
Maximum operation temperature	Excellent	300	Good	250
Circuit	Excellent	Conventional amplifier small size	Poor	Charge amplifier large size
Material	Excellent	Single crystal	Good	Sinter
Resistance of element	Excellent	Approximate 1 kilohm	Poor	Several megaohm
Production process	Excellent	Wafer size process	Good	Individual
Temperature compensation	Excellent	Simple by resistor	Good	Complex
Sensitivity	Good	Small	Excellent	Large
Total evaluation	Excellent		Poor	

係数で、 σ は圧縮応力、 V_i は入力電極間に印加する電圧である。

圧縮応力 σ が燃焼圧力と比例関係にあれば、燃焼圧力に比例した電圧信号が得られる。

4. センサ構造

4.1 検知部の構造

Fig. 6に検知部の構造を示す。力検知部は半球、力伝達ブロック、シリコン単結晶及び台座からなる。半球は鋼材からなり、力を安定に受けとめ、応力を分散させる。力伝達ブロックと台座は熱膨張係数がシリコンとほぼ等しく電気絶縁性があり耐圧、耐熱性の高い

結晶化ガラスでできていて、陽極接合技術によりシリコンと均一強固に接合している。この力検知素子はウエハ単位で一度に数百個接合作製できる⁵⁾。

Fig. 7に、3inchのシリコンウエハにアルミ電極を真空蒸着で形成し、上下に結晶化ガラスウエハを陽極接合したものの写真を示す。力検知素子は、このウエハよりダイヤモンドダイサで1.7mm角に切りだして用いる。ここで用いた陽極接合とは、静電引力を利用した固相接合技術であり、接着剤を使用しないことから以下の特徴を有している。

- ・温度特性に優れている。
- ・クリープ、ヒステリシス、出力の非直線性等の特

Table 3 Different types of piezoresistive devices.

Type	※ π	Structure	Crystal		Max π X ※ π_{44}	Graphs of π in $\langle 100 \rangle$	Output
			Plane	Axis			
A	π_{11}		(100)	$\langle 110 \rangle$	1/2		$\Delta R/R = \pi_{11} \sigma_1$
			(110)	$\langle 111 \rangle$	2/3		
			(111)	all	1/2		
			(211)	$\langle 111 \rangle$	2/3		
B	π_{13}		(100)	-	0		$\Delta R/R = \pi_{13} \sigma_3$
			(110)	$\langle 110 \rangle$	-1/2		
			(111)	all	-1/3		
			(211)	$\langle 111 \rangle$	-1/3		
C	π_{63}		(100)	-	0		$V_2 = k \rho I_1 \pi_{63} \sigma_3$
			(110)	※45°	$\pm 1/4$		
			(111)	-	0		
			(211)	-	0		

- ※ π : Piezo resistance coefficient of element
- ※ π_{44} : $138.1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dyn}$ (P type silicon $7.8 \Omega/\text{cm}$)
- ※45° : 45° Oblique from $\langle 100 \rangle$ axis
- k : Structure coefficient
- ρ : Resistivity
- V : Voltage
- I : Current
- σ : Stress

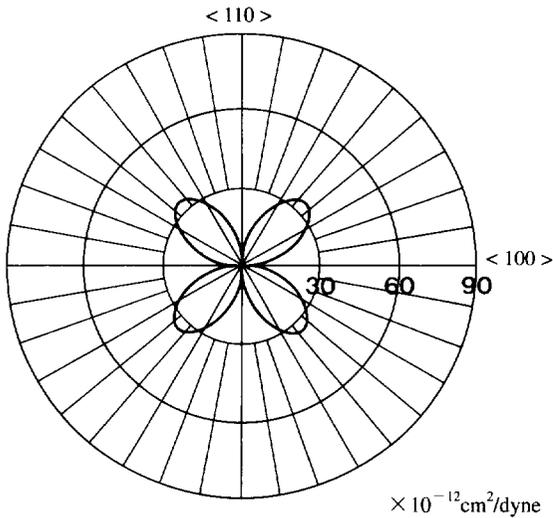


Fig. 5 Piezo resistance coefficient of π_{63} .
 • Resistivity $\rho = 7.8\Omega\cdot\text{cm}$
 • P type
 • (110) Plane

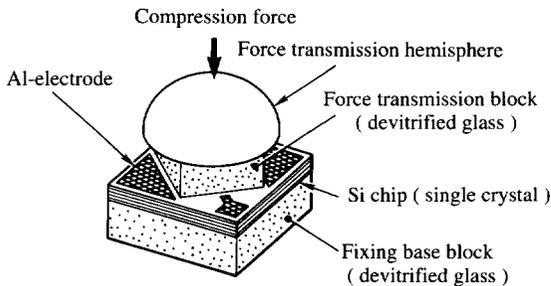


Fig. 6 Structure of piezoresistive device.

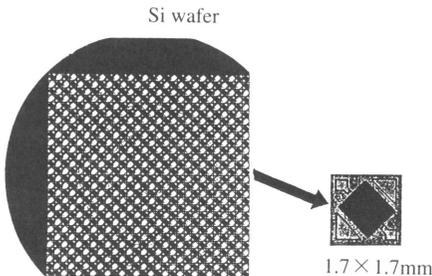


Fig. 7 Micrograph of bonded Si wafer.

性への影響が少ない。
 ・接合強度が大きく、信頼性が高い。
 ・接合工程、装置構成が簡単である。
 また、接合可能な条件として以下の項目が挙げられる。

- ・接合するガラス中に Li^+ , Na^+ などの可動イオンを含む。
 - ・接合面が共に鏡面仕上げされている。
 - ・熱膨張係数が近接している。
- 上記条件を満足するものとして、パイレックスガラス、デビトロンガラスがある。今回使用したものは、圧縮破壊強度が大きいデビトロンガラスを採用した。

4.2 センサ全体の構造

センサ外観写真を Fig. 8 に、センサ構造を Fig. 9 に示す。燃焼圧センサは、受圧部、力検知部および内蔵アンプ部の3つの主要部分からできている。

受圧部は金属ダイアフラム、熱絶縁力伝達ロッドからなる。気筒内の燃焼圧力はダイアフラムにより力に変換され、力伝達ロッドを介して力検知部に伝達される。燃焼による火炎、すすを遮断し圧力を受けるダイアフラムは、耐熱性、耐圧を考慮して耐熱ステンレス製とし応力が集中しないように等応力型ダイアフラム構造とした。このダイアフラム形状は有限要素法により決定した。力伝達ロッドは熱絶縁性があり強度の高いセラミック材を用いている。

力検知部は力伝達ブロックと台座の間にあるシリコン単結晶で力を電気信号に変換する作用を持つ。この力検知法は原理の項で述べたようにシリコン単結晶のピエゾ抵抗効果を利用し、半球頂部に作用した力に比



Fig. 8 General photograph of combustion pressure sensor.

例した信号電圧を出力電極間で取り出すものである。

内蔵アンプ部はこの信号電圧を調整増幅して、防水コネクタにより外部へ送り出す。

5. 特性

5.1 検知部単体の特性

検知部単体の圧縮破壊に至るまでの出力特性をFig. 10に示す。0から1000Nまでの非常に大きな荷重範囲までも動作する。圧縮破壊は圧縮断面積最小の力伝達ブロック（1mm角、厚さ0.5mm 結晶化ガラス）で発生し、結晶化ガラスの理論強度近傍の結果が得られた。この結果は圧縮荷重に強いシリコン単結晶の特徴を生かした構造、片当たり防止と圧縮応力の均一化および均一強固な陽極接合技術により達成できたものである。

燃焼圧センサとしては150Nのプリロードを金属ダイアフラムの弾性変形で印加して用い、150～225Nを動作範囲としている。そのため力検知部の安全係数は

約4となり、自動車用として十分な耐久性が確保されている。

5.2 センサ全体の特性

燃焼圧センサとしての出力特性をFig. 11に示す。0から10MPaの圧力に対し1～4Vの電圧が出力される。

図からわかるように出力の直線性は良好で1%以下である。またヒステリシスも見られない。

0あるいは5V付近は自己診断用の電圧領域である。センサに異常が生じた場合は0あるいは5Vの電圧が出力され誤動作を未然に防ぐフェールセーフの設計となっている。特殊な方式の内蔵アンプ部を設計開発し温度補償効果、ノイズキャンセリング、耐電磁干渉、耐静電特性を向上した。

本センサは圧縮力で動作するため破壊強度が著しく向上しており、実際には70MPa以上の耐圧が得られた（最大使用圧力 10MPa）。センサの許容温度範囲は、150 で自動車用エンジンに組み込んで動作するに十分な値である。またセンサ自身の応答性も14kHzと高

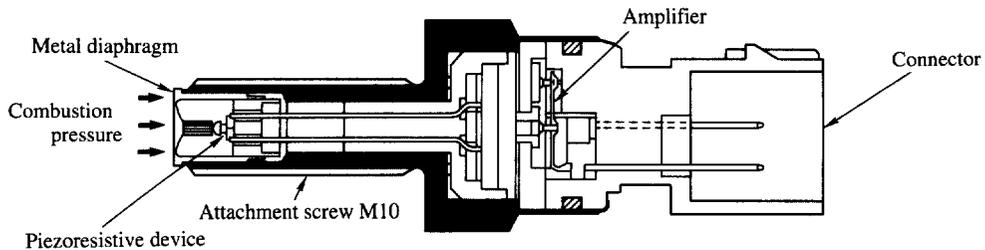


Fig. 9 Structure of combustion pressure sensor.

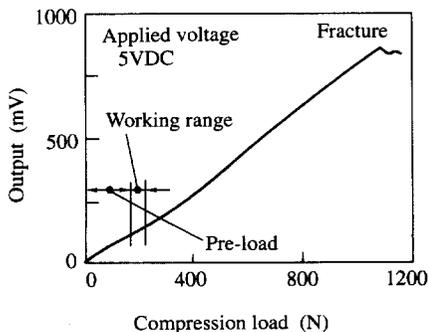


Fig. 10 Output of piezoresistive device.

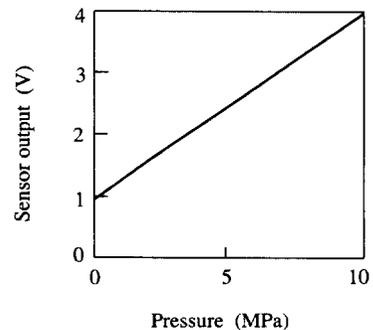


Fig. 11 Output of combustion pressure sensor.

い。Fig. 12にエンジンの燃焼圧力を測定した結果を示す。#1気筒の燃焼圧波形が720°ごとに出力されている。エンジンのシリンダヘッドに取り付けた状態での応答性でも5kHz以上あり、燃焼圧力検知用として十分な性能が得られた。

6. おわりに

自動車用エンジンの燃焼圧力を検出するために、自動車用部品として量産されるセンサとして世界初の燃焼圧センサを開発した。

本センサには電流・電圧・応力のベクトルが互いに直交したシリコン単結晶の特殊なピエゾ抵抗効果を用いた新しいタイプの力検知方式である。これは、シリコン単結晶の圧縮に強い特徴を生かし耐久性・信頼性に優れたセンサを構成でき、自動車用センサに適したタイプの方式である。この力検知素子の性能のまともをTable 4に示す。

エンジンの燃焼圧力を検出してエンジンを制御するというセンシング技術は、新しい制御技術分野を切り開き、今後の自動車用エンジンの計測制御の一つの方向を示すものである。また高温で高い圧力を検出する本センサは広く応用展開でき自動車以外の産業界に与える効果も、多大なものがあると考えられる。

最後に本燃焼圧センサの開発研究にあたり、トヨタ自動車開発企画部、11研究部、13研究部、第1電子技術部、第2電子技術部、電子生技部、ME開発部の御協力に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 上田政博, ほか3名: 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, 924-3(1992), 53
- 2) Takeuchi, M., et al.: "A Combustion Pressure Sensor Utilizing Silicon Piezoresistive Effect", SAE Tech. pap. Ser., No.930351, (1993), 8p.
- 3) Sugitani, N., et al.: "Combustion Pressure Sensor for Toyota Lean Burn Engine Control", SAE Tech. pap. Ser., No.930882, (1993), 8p.
- 4) 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
- 5) 大村義輝, ほか5名: "シリコン力変換素子を利用した燃焼圧センサ", 電子情報通信学会技術研究報告, EG93-20, CPM93-11, (1993), 67

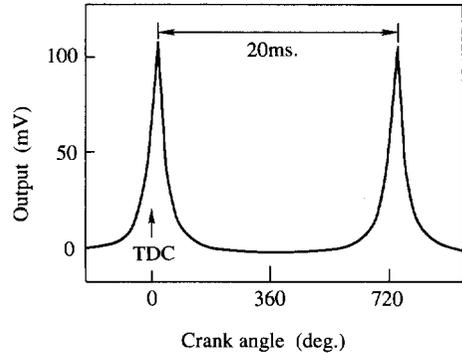


Fig. 12 Waveform of combustion pressure.

Table 4 Characteristics of combustion pressure sensor.

1. Piezoresistive device	
Si single crystal	1.7 × 1.7 × 0.22 mm
Fixing base block	1.7 × 1.7 × 0.50 mm
Force transmission block	1.7 × 1.7 × 0.50 mm
Force transmission hemisphere	1.5 mm diameter
2. Temperature range	
Operation temperature	80 to 150
Conservation temperature	- 40 to 200
3. Load range	
Working range	0 to 75N
Pre-load	150N
Load limit	1000N
4. Sensitivity	
	0.48 mV/N
5. Non-linearity	
	Less than 1% full scale
6. Creep, hysteresis	
	Less than 1% full scale
7. Operating current	
	3mA
8. Dissipation power	
	9mW

著 者 紹 介



塚田厚志 Kouji Tsukada

生年: 1944年。

所属: 物理センサ研究室。

分野: センサに関する研究。

学会等: 日本機械学会会員。

1992年日本機械学会賞・技術賞受賞。
1993年R&D100受賞。



竹内正治 Masaharu Takeuchi
生年：1943年。
所属：物理センサ研究室。
分野：センサに関する研究。
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。



徳光早苗 Sanae Tokumitsu
生年：1958年。
所属：物理センサ研究室。
分野：センサに関する研究。
学会等：1993年R&D100受賞。



大村義輝 Yoshiteru Ohmura
生年：1954年。
所属：デバイス開発室。
分野：デバイスに関する開発。
学会等：応用物理学会会員。
1993年R&D100受賞。



川口一義 Kazuyoshi Kawaguchi
生年：1950年。
所属：デバイス開発室。
分野：デバイスに関する開発。