

圧電体薄膜を用いた圧力センサーの開発

— 量産車用燃焼圧センサーへの応用 —

秋山 守人*、田原 竜夫、岸 和司

この論文では、著者らが世界で初めて窒化アルミニウム (AlN) 系薄膜圧電体を用いて開発した、量産車用燃焼圧センサーの研究開発の経緯について述べる。この研究開発の構想当時 (2003年以前) は、単結晶を用いたセンサーが一般的であり、薄膜圧電体を用いた燃焼圧センサーは未開拓領域であり、その有用性は認識されていなかった。しかし、この研究開始以降、国内外の自動車部品会社や大学などが興味を示し、実用化に向けた共同研究を実施した。その結果、冷却を必要とせず、小型で高感度の燃焼圧センサーの開発に成功した。現在、著者らはセンサーの実用化を目指し、センサー信号の安定化、センサー構造の簡素化などの課題を解決するために研究を行っている。

キーワード: 燃焼圧センサー、量産車用、窒化アルミニウム薄膜、圧電型、積層構造

Development of a pressure sensor using a piezoelectric material thin film

– Application to a combustion pressure sensor for mass-produced cars –

Morito AKIYAMA*, Tatsuo TABARU and Kazushi KISHI

In this paper, we show the process of research and development of a combustion pressure sensor using an aluminum nitride (AlN) thin film, which we developed for the first time in the world. At the time we envisaged the R&D in 2003, most sensors used a piezoelectric single crystal. The research of a combustion pressure sensor using an AlN thin film was an unexplored field, and the usefulness of an AlN thin film was not yet well recognized. However, since we started the R&D, domestic and foreign auto parts companies and universities showed interest, and we carried out joint research with a domestic company and a university toward practical use of the sensor. Consequently, we have succeeded in developing a sensor of small size, high sensitivity, and without the need of cooling. We now conduct research to resolve the problems such as stabilization of sensor signals and simplification of the sensor structure for practical use.

Keywords: Combustion pressure sensors, mass-produced cars, aluminum nitride thin films, piezoelectric type, laminate structure

1 はじめに

1.1 量産車用燃焼圧センサーの必要性

二酸化炭素等による地球温暖化や、2008年頃から続いている原油価格の高騰等の影響によって、自動車エンジンの燃費向上と低公害化への対応が喫緊の課題となっている。また、日本では2015年から「重量車燃費基準」、欧州では2014年から「ユーロVI」、米国では「新排ガス規制の完全実施」等の内燃機関の排出物に関する法的規制が段階的に実施される。そこで、これらの規制への対応として、各自動車メーカーは直噴エンジン車、クリーンディーゼル車、バイオ燃料車、ハイブリッド車、電気自動車、水素自動車および燃料電池車等のさまざまな新しい自動車の研究開発を実施している。しかし、少なくとも今後10~20年間は、石油を使用する内燃機関をもつ自動車主流であることに変わりはないであろう。車体の軽量化やタイヤの性能アップ等と共に、燃焼効率の向上や排気ガスの浄化技術は現在もおもな重要な課題であり、燃焼状態を電子制御する

技術等が活発に研究されている。これらの技術には圧力や温度、流量、振動等のさまざまな計測技術が必要である。特に圧力計測には、センサー開発の必要性、装着性、精度、応答性、経済性から判断して、得られる情報の量と質の両面で期待が大きい。特に燃焼室の燃焼状態の高精度制御のためには、燃焼室の圧力を直接・高速で測定することができる、400℃以上の耐熱性を有する新たな筒内型燃焼圧センサーの開発が必要とされている^[1]。

1.2 燃焼圧センサーの現状

圧力センサーとして最も普及しているピエゾ抵抗式半導体圧力センサーは、小型で高感度であり、量産性が高く、市場の83.2% (数量ベース) を占めている^[2]。しかし、このセンサーの使用限界温度は120℃程度である。そこで耐熱性向上のために、ゲージ下部への断熱層 (アルミナ) の挿入や、サファイヤダイアフラム (隔膜) の使用、耐熱性に優れた酸化クロムや炭化ケイ素 (SiC) 薄膜をゲージ素材に使用する等の研究が行われているが、いまだ十分な耐熱

産業技術総合研究所 生産計測技術研究センター 〒841-0052 鳥栖市宿町 807-1
Measurement Solution Research Center, AIST 807-1 Shuku-machi, Tosu 841-0052, Japan * E-mail: m.akiyama@aist.go.jp

Original manuscript received January 27, 2012, Revisions received March 21, 2012, Accepted March 23, 2012

性は得られていない。

1992年にトヨタ自動車(株)は、センサー構造と設置方法を工夫することによってセンサー素子の最高温度を120℃以下におさえ、世界で初めて半導体圧力センサーを燃焼圧センサーとして量産車に搭載させたが、現在は使用されていない。また、2009年からドイツのBERUが、半導体圧力センサーを組み込んだ燃焼圧センサーの機能ももつ、グロープラグをアウディ社やフォルクスワーゲン社の一部のクリーンディーゼル車に搭載させているが、まだ広く普及していない。

これに対して、圧電体の電気分極による電荷を検出して利用する圧電型センサーは、大学や企業等の研究室で一般的に使用されている。圧電型センサーはダイアフラムで受圧したエンジン筒内圧力を圧電体が検知する仕組みになっており、小型で、応答速度が高く、耐熱性に優れている等の長所をもつ^[1]。

一般的な圧電型燃焼圧センサーの圧電体には、水晶(SiO₂)が用いられている。しかし、水晶の相転移点が573℃にあるため、使用限界温度は350℃程度であり、400℃以上の高温での計測には冷却を必要とする。そこで、耐熱性に優れた新しい圧電体の検討が行われている。図1に示すように、高い圧電性を示すものは使用限界温度が低い傾向があり、高い圧電性と耐熱性を併せもつ最適な圧電体を探し出すことは容易ではない。1997年頃には930℃の理論推定キュリー点をもつリン酸ガリウム(GaPO₄)単

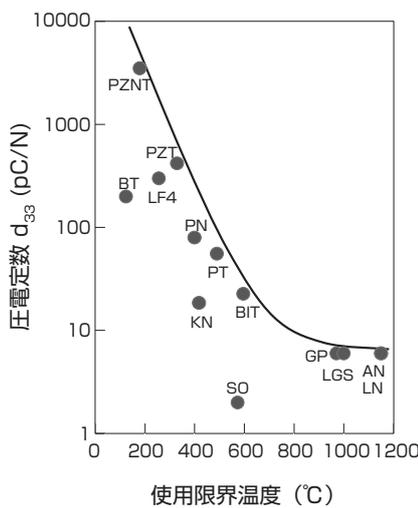


図1 圧電定数 d_{33} と使用限界温度との関係
 AN: AlN, BT: BaTiO₃, BIT: Bi₄Ti₃O₁₂, GP: GaPO₄, KN: KNbO₃, LF4: (K_{0.44}Na_{0.52}Li_{0.04})(Nb_{0.86}Ta_{0.10}Sb_{0.04})₃, LGS: La₃Ga₅SiO₁₄, LN: LiNbO₃, PN: PbNb₂O₆, PT: PbTiO₃, PZNT: 0.92Pb(Zn_{1/3}Nd_{2/3})O₃-0.08PbTiO₃, PZT: Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃, SO: SiO₂

結晶を使用したものが^[1]、2003年頃には1470℃までキュリー点(相転移温度)をもたないランガサイト(La₃Ga₅SiO₁₄)単結晶を使用したものが製品化されている^[3]。最近では、酸化亜鉛(ZnO)単結晶を使用したものも提案されている。しかし、これらの単結晶を用いた燃焼圧センサーは、耐熱性には優れているものの一般的に高価であり、機械的な衝撃に対する耐久性が乏しく、センサー出力が低い等の問題点もあり、量産車には搭載されていない。

以上のように、400℃以上の耐熱性と優れた耐久性(最低でも10年間以上)を示し、高出力で低価格な燃焼圧力センサーを実現するためには、圧電体材料および素子構造、センサー形状等あらゆる面で、これまでとは全く異なる新たな技術開発が必要とされている。

このような状況において筆者らは、燃焼圧センサーの耐熱性と耐久性、高出力化、低価格化という困難な課題に同時に取り組み、量産車用燃焼圧センサーを開発することを目標として、2003年に産総研のハイテクものづくりプロジェクトの支援を受け本格的に研究に着手した。この研究は既存の燃焼圧センサーの改良・改善ではなく、耐久性と低価格化を実現するために、これまでの単結晶を用いたセンサーではなく薄膜を検知材料に応用し、高出力化のためにセンサー素子を積層させた構造を採用したという点において、世界初の燃焼圧センサーの研究開発である。

2 量産車用燃焼圧センサーを開発するためのシナリオ

この研究開発において、最終目標に設定した量産車用燃焼圧センサーの開発とそのための要素技術との統合のシナリオを図2に模式的に示す。

既存の燃焼圧センサーが抱える課題(耐熱性、耐久性、高出力化、低価格化)を踏まえ、この研究開発の第1段階で重点的に取り組む課題として、以下の5項目を設定した。

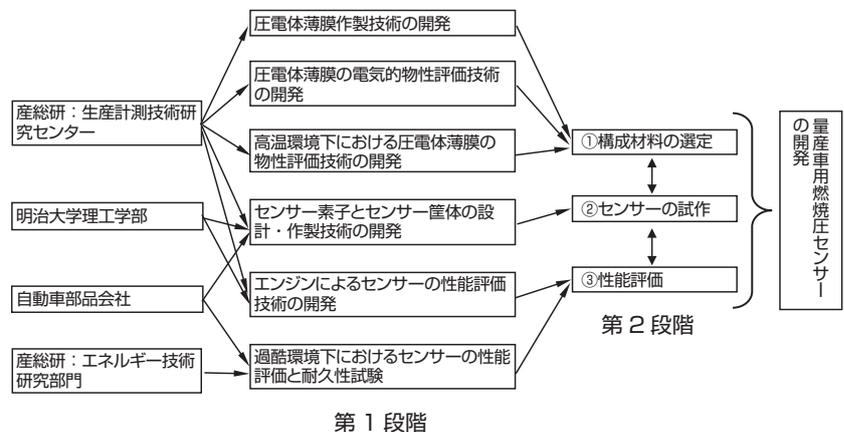


図2 量産車用燃焼圧センサーの開発のための要素技術と統合のシナリオ

- ・圧電体薄膜の作製技術の開発
- ・圧電体薄膜の電気的物性評価技術の開発
- ・高温環境下における圧電体薄膜の物性評価技術の開発
- ・センサー素子とセンサー筐体の設計・作製技術の開発
- ・エンジンによるセンサーの性能評価技術の開発

現在も進行中の第2段階では、これらの要素技術の統合による量産車用燃焼圧センサーの構成材料の選定、センサーの試作、性能評価試験を継続して実施している。以上のシナリオのもと、次世代の高性能エンジン制御技術の開発に貢献することを目指している。

研究開発の開始当初は、AlN 薄膜の圧電特性を明らかにすることができれば、市販燃焼圧センサーの検知材料である圧電体部分の代替によって、量産車用燃焼圧センサーの開発は大きく前進するものと想定していた。しかし、実際に共同研究に取り組んでみると、自動車部品会社も圧電型燃焼圧センサーを研究した経験があまりなかった。そのため、圧電体薄膜の作製技術の開発から、圧電体薄膜の電気的物性評価技術の開発へと研究が進むにつれて、自動車部品会社や大学等との協力体制の下で、高温環境下における圧電体薄膜の物性評価技術の開発、センサー素子とセンサー筐体の設計・作製技術の開発、エンジンによるセンサーの性能評価技術の開発までを平行して実施することとなってしまった。

性能評価試験においては、市販の圧電型燃焼圧センサーを評価の基準に設定した。圧電型燃焼圧センサーの出力（感度）はセンサーの形状に大きく左右されるため、センサー出力値を直接比較するのではなく、市販センサーの応答波形にどれだけ近づいたかという点で評価した。

量産車に搭載するためにはある定められた範囲のセンサー出力が必要であることから、性能評価後にはセンサー出力を調整できる構造も意識しながら研究開発を進めた。また同時に、初期段階の性能試験では問題とならなかった試作センサーの実用上の問題点を精査し、改良改善を行うことによって、より完成度の高い燃焼圧センサーの実用化を図っている。

以上の研究開発は独立行政法人産業技術総合研究所と自動車部品会社、学校法人明治大学が主に共同で実施し、薄膜作製技術や高温環境下における物性・現象、力学的解析技術、センサー設計技術等に関して、個々の専門知識と経験を集結させた。産総研生産計測技術研究センターチームは、圧電体薄膜作製技術の開発や圧電体薄膜の電気的物性評価技術の開発、高温環境下における圧電体薄膜の物性評価技術の開発、センサー素子とセンサー筐体の設計・作製技術の開発、エンジンによるセンサーの性能評価技術の開発を担当した。明治大学チームはセンサー素

表1 代表的な圧電体の特徴比較

	AlN	SiO ₂	Pb(Zr,Ti)O ₃	GaPO ₄	LiNbO ₃	La ₃ Ga ₃ SiO ₁₄
圧電定数 d ₃₃ (pC/N)	6	2	250	6	35	6
使用限界温度 (°C)	1200	350	250	920	1200	1000
薄膜の作製しやすさ	優	不可	可	不可	良	不可

子とセンサー筐体の設計・作製技術の開発とエンジンによるセンサーの性能評価技術の開発を担当した。自動車部品会社チームは、自動車部品会社の立場から、センサー素子とセンサー筐体の設計・作製技術の開発と過酷環境下におけるセンサーの性能評価と耐久性試験を担当した。産総研エネルギー技術研究部門チームは過酷環境下におけるセンサーの性能評価と耐久性試験を担当した。

なおこの研究開発を通じて、チーム間、メンバー間の情報共有と意見交換の場を設け、また性能試験や応用実験には積極的に相互に立ち会う等、共同プロジェクトのメリットを最大限に活用するよう務めた。

以下、この論文では燃焼圧センサーの研究開発のなかで、特に中核をなす要素技術開発および試作品の性能評価の概要を示す。

3 圧電体薄膜の作製および評価

3.1 圧電体の選択および薄膜作製

筆者らの研究チームでは、表1に示すような理由、1) 圧電体の中で1200 °Cと最も高い使用限界温度を示す。2) 重金属等の有害元素を含まない。3) 水晶の3倍の圧電性を示す。4) 弾性率が高く(ヤング率:314 GPa) 高压に対しても圧電性の線形性を保持する等から、窒化アルミニウム (AlN) を検知材料として選択した^[4]。AlN を検知材料に選択することによって、耐熱性という課題は容易にクリアできた。

また、圧電体の発生電荷をセンサーの出力信号にすれば、センサー出力が圧電体の厚さに全く依存しないことから、検知材料の形態を単結晶ではなく、薄膜にすることを考えついた。薄膜化することによって、単結晶の脆さという短所を克服できるという大きなメリットが得られ、機械的な衝撃に対する高い耐久性が期待できる。さらに、量産性に優れている半導体プロセスを使用することが可能となり、低価格化にも有効である。他の有望な圧電体と比較して、AlN は元素の数が少なく、薄膜化しやすいという長所もあることがわかった。したがって、筆者らの研究チームでは、当時としては世界に先駆けて AlN 薄膜を燃焼圧センサーの検知材料に採用し、AlN 薄膜の作製技術の開発に着手した。

まず、AlN 薄膜が報告されているような圧電応答性を示

すかどうかを調べるために、反応性スパッタリング法を用いて、AlN 薄膜をシリコン単結晶基板上に作製し、AlN 薄膜の圧電応答性を調べた。その結果、作製した AlN 薄膜の圧電応答性は、0.1～1.6 MPa の圧力範囲で良好な直線性を示し、0.1～100 Hz の領域で良好な周波数特性も示したことから、センサー材料として十分に可能性があることを確認した（2005 年）^[6]。また、AlN 薄膜の電気モデルによる基本特性の解析を行い、エンジンの燃焼圧と同程度の 0.4～8.0 MPa の範囲で良好な直線性が得られ、測定値と電気モデルが一致することから、AlN 薄膜が燃焼圧センサー用検知材料として、使用可能であることを示した（2005 年）^[6]。さらに、AlN 薄膜の電気抵抗は、温度が上昇するとアレニウス式にしたがって著しく低下していく。電気抵抗が低下すると、圧電体に生じた電荷は計測システムで検出する前に減衰してしまい、測定できなくなる。そこで、AlN 薄膜の体積抵抗率と比誘電率の温度依存性を調べた。図 3 にその結果を示す。AlN 薄膜の体積抵抗率は、851 °C においても $10^6 \Omega \text{ cm}$ 以上を示し、誘電率はわずかに増加しただけであり、AlN 薄膜は 800 °C 以上でも計測が十分に可能であることがわかった（2006 年）^[7]。

しかし、単結晶のシリコン基板を使用したため、センサー素子は機械的な衝撃に弱く、耐久性に優れたセンサー素子の開発が必要となった。そこで、筆者らは金属基板上に AlN 薄膜を作製し、機械的な衝撃に対する耐久性の向上を図った。金属基板材料には、耐熱性に優れている超合金の一つであるニッケル系のインコネルを選択した。スパッタリング法によって、多結晶であるインコネル基板上に AlN 薄膜を作製したところ、結晶配向した薄膜を作製することに成功した（2006 年）^[8]。図 4 (a) にインコネル基板上に作製した AlN 薄膜の断面の SEM 写真を示す。その薄膜の XRD パターンを図 4 (b) に示す。AlN 薄膜の断面部分からは、薄膜が基板表面に対して垂直に成長した、繊維構造の微細な結晶粒子から構成されていることが観察

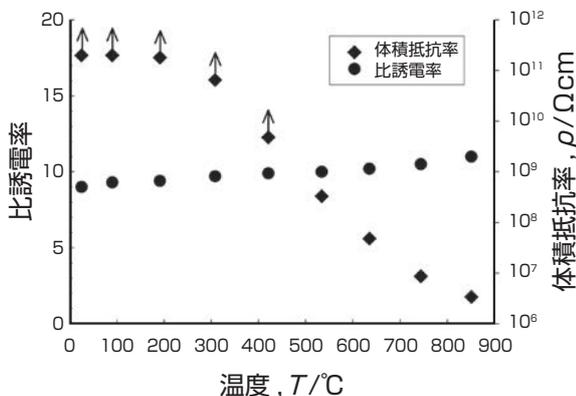


図 3 AlN 薄膜の比誘電率と体積抵抗率の温度依存性

された。インコネル基板が多結晶体にもかかわらず、得られた AlN 薄膜はウルツ鉱型の AlN の 0002 面の回折ピークのみを示し、c 軸配向性を示していた。ピエゾメーターを用いて測定した圧電定数 (d_{33}) は 2.4 pC/N であり、単結晶の AlN の半分程度の値であったが、圧電性を示す AlN 薄膜をインコネル基板上に作製することができた。

図 5 に、フェライト系ステンレスとインコネル基板上に作製した AlN 薄膜に生じる面内応力の温度依存性と AlN の曲げ強度 σ_b (AlN) を示す。いずれの基板を用いた場合にも、応力分布範囲が広く、両試料には明確な差が生じることがわかった。ともに 400 °C で作製しているが、作製後にはステンレスと比較して約 2 倍の圧縮応力がインコネル試料には作用している。また、AlN の熱膨張係数は両合

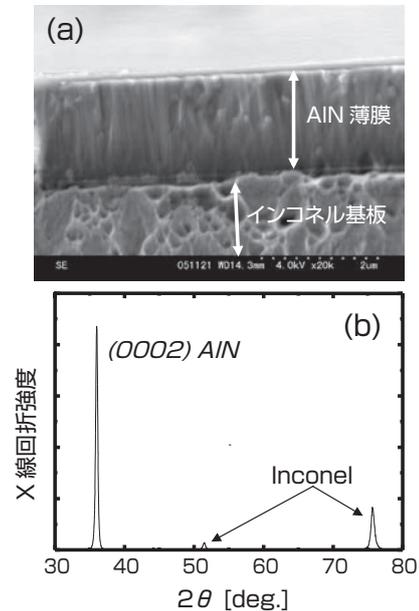


図 4 インコネル基板上に作製した AlN 薄膜の断面 SEM 写真 (a) と XRD パターン (b)

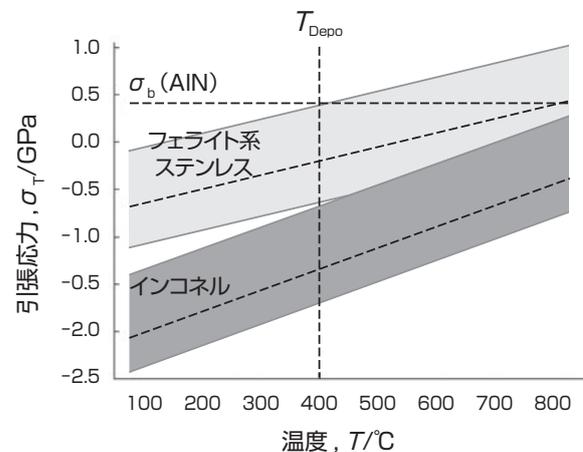


図 5 各基板材料上に成膜した AlN 薄膜の面内応力の温度依存性

金基板よりも小さいため、加熱によって引張応力が増加する。その結果、ステンレス試料では 400 °C を超えると AlN 薄膜の破断強度を超える応力が局所的に発生する可能性がある。これに対して、インコネル試料の場合には、800 °C においても AlN の破断強度を超えることはない。これらの結果により、AlN 薄膜の破断を防ぐためには、金属基板の材質を選択することが重要であることがわかった。

3.2 高温環境下における電気的物性の評価

インコネル基板上に作製した AlN 薄膜の高温環境下での圧電性を調べた。一定周波数で印加圧力の振動振幅を変えたときの AlN 薄膜の発生電荷の振幅変化を図 6 (a) に示す。AlN 薄膜は 10 ~ 300 MPa の高圧領域で直線性を示した。普通車の燃焼室内の最高圧力が数十 MPa であるため、AlN 薄膜は燃焼圧センサーとして十分な耐圧性をもっていることがわかった。

また、印加圧力の正弦振動振幅 300 MPa における AlN 薄膜の周波数応答を図 6 (b) に示す。ここでは、AlN 薄膜のゲインは 1 Hz での出力値で規格化している。高い周波数域 (3 ~ 30 Hz) ではゲインはおおよそフラットであり、位相のずれも小さかった。自動車のエンジンの回転数が数千 rpm (数十 Hz) であることから、AlN 薄膜は十分な周波数応答性を示すことがわかった。さらに、高温環境下での測定を行った結果、AlN 薄膜の圧電応答性が 450 °C で 54 時間全く変化しないことも確かめた (2006 年)^[9]。

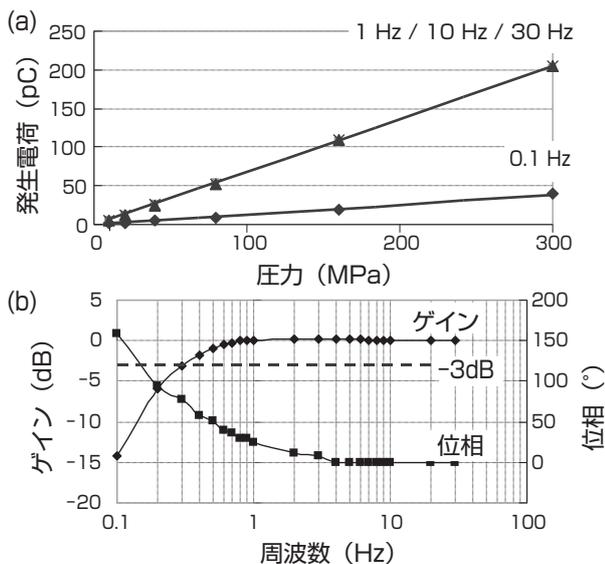


図 6 (a) 周波数 0.1 ~ 30 Hz 間における AlN 素子の発生電荷の圧力依存性、(b) 150 MPa の加圧変化に対する AlN 素子のゲインと位相の周波数応答性

4 センサーの試作および評価

4.1 エンジンによる性能評価

AlN 薄膜素子を使用できる見込みが立ったため、燃焼圧センサーの試作を行った (2007 年)^[10]。図 7 に作製した AlN 薄膜燃焼圧センサーの外観写真とセンサー構造の模式図を示す。このセンサーの受圧部は、AlN 薄膜素子を円板状の内部電極で押さえ、信号線で電荷を取り出す簡単な構造で、筐体と絶縁をとるためにアルミナ板とアルミナ管を用いている。AlN センサーの燃焼圧応答特性を調べるために、単気筒の 2 サイクルエンジン (HONDA LEAD 90, HF05) を使用し、図 8 に示すようにセンサーをシリンダーヘッドの頂部近くに設置し、燃焼室の圧力を測定した。性能比較を行うために、エンジンの研究用に最も普及している Kistler 社製燃焼圧センサー (型番 6001) を用いた。無負荷でエンジン回転数を約 4000 rpm にしたときの AlN センサーの出力を、市販センサーと比較して図 9 に示した。市販センサーの発生電荷量が 140 ~ 160 pC であることから、燃焼室内の圧力は 1.1 ~ 1.2 MPa である。AlN センサーの出力波形には外部ノイズがほとんどなく、また市販センサーとおよそ同じ波形が得られた。

さらに、AlN センサーの耐久性を評価するために、約 2000 rpm で 20 分間運転し、冷却後再度 20 分間運転することを繰り返したときのセンサー出力の変化を図 10 に示

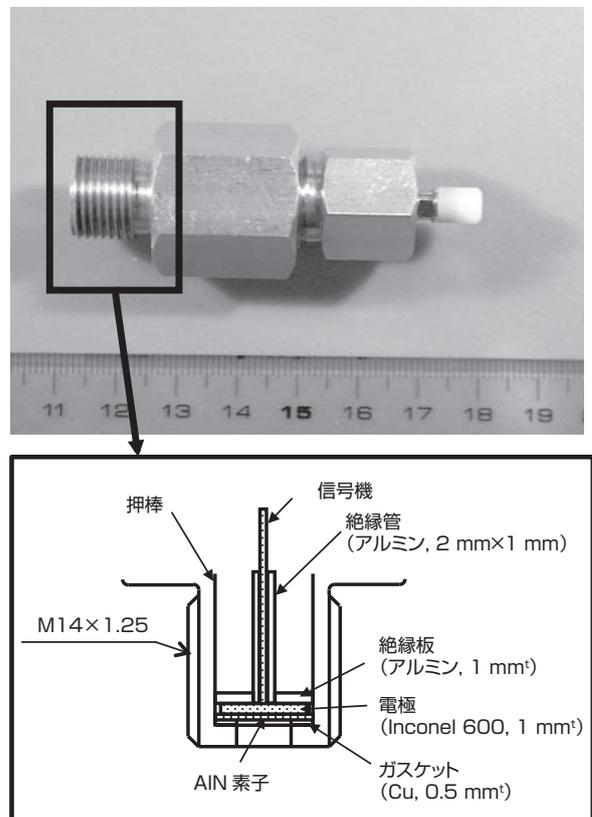


図 7 AlN センサーの外観と内部の模式図

す。エンジンの回転数を正確に一定とすることができないため、測定回ごとに出力値ばらつきはあるが、およそ一定の出力を示し、計40時間後でも出力の低下はほとんどなく、安定して動作した。

当初の目標は、実機エンジンで燃焼圧の測定が可能であることを確認することと、市販センサー並みの出力波形を得ることであったが、市販センサーとおよそ同様な応答波形を得ることができ、当初の目標は達成できた。

市販センサーは、脆い水晶の単結晶を細かく加工し、複数の単結晶片を組み合わせているが、結晶軸を揃えて切り出した小さい水晶の板を組み合わせる複雑な構造のため、素子の作製にはかなりの費用と技術が必要である。事実として、比較に使用した市販センサーは数十万円ととても高価なものである。一方、筆者らが研究開発を行っている AlN センサーは、金属板上に作製した AlN 薄膜を電極で押さえつけただけのとても簡単な構造であり、量産車用のセンサーとして1万円以下を目指している。

4.2 車載に向けた小型化

開発が進むにつれて、量産車では電源の違い、使用条

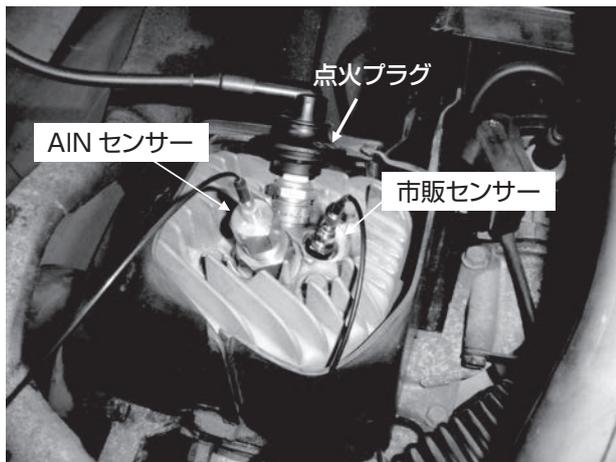


図8 センサーを2サイクルエンジンに取付けた様子

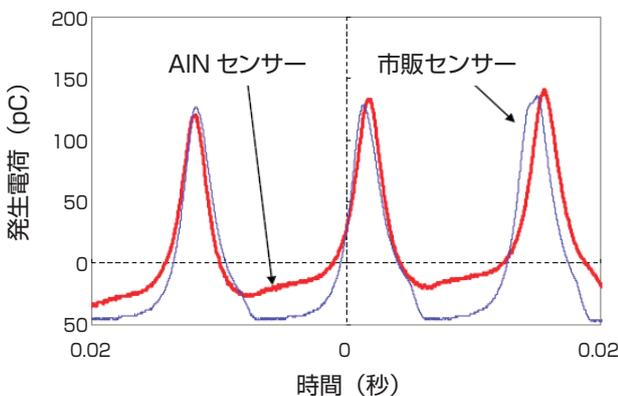


図9 2ストロークエンジン運転中のセンサーの出力波形
エンジン回転数：約4000 rpm

件の過酷さ、価格等から、実験室で使用しているようなチャージアンプを搭載することができないという問題に直面した。そこで、すでに別の目的で車に搭載されているアンプを使用することになったが、そのアンプを使用するためには、数倍のセンサー出力が必要であった。また、近年の高性能なエンジンでは、高圧燃料噴射システムの採用やバルブ数の増加等によって、その構造がますます複雑化しているため、上記の実験で使用したような大きな筐体をもつ燃焼圧センサーを量産車のエンジンに取り付けるスペースがなく、筐体を小さくすることが求められた。圧電体の場合、発生電荷量は受圧面積に比例するため、センサー出力を増加させるためには受圧面積を増加させなければならない。しかし、受圧面積を広げると、センサー素子のサイズが大きくなり、エンジンに設置できなくなるという問題が発生する。

著者らはセンサー出力を高めつつ、体積を小さくする方法の検討を行った結果、センサー素子を縦に積み重ねることによって、センサー素子の表面積を増加させ、体積を小さくする方法を考え出した。しかし、この積層構造を実現するためには、薄膜表面または基板を筐体に接触させることなく積層させなければならないという問題が発生した。そこで、筆者らは図11に示す素子構造を考案した^[11]。円形の金属基板の中心に孔を開け、その周辺を残して全面に AlN を成膜し、AlN 表面を銅箔で覆った素子を、中心の孔に信号線を通して積層する構造である。AlN は絶縁体であるため、信号線を筐体から絶縁すれば AlN 薄膜の基板側と表面が接触しなくなる。市販センサーと AlN センサーを比較して図12に示す。AlN センサーの外径は4.6 mm、センサー素子の厚さは0.2 mmの金属基板の両面に約3 μmの厚さで AlN を製膜した後、厚さ10 μmの銅箔電極で包んで図11に示した素子を作製し、図12のように組み立てた。AlN センサーの筐体外径は10 mm、ピッチ1 mmのネジになっており、これでエンジンに装着する。市販センサー(Kistler 6001)のエンジン取り付け用アダプターを装着した場合の外観とおよそ同じである。

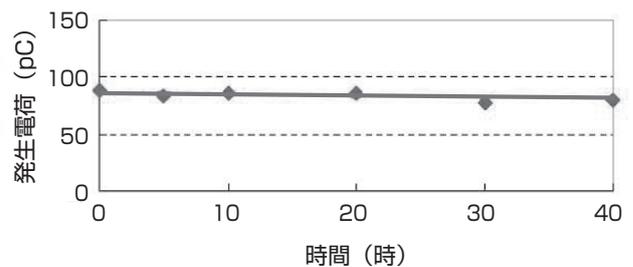


図10 AlN センサーの出力のエンジン運転時間依存性
エンジン回転数：2000 rpm × 20 min の断続運転

AlN センサーと市販センサーをエンジンに取り付け、燃焼圧を測定した。AlN 素子を1枚、3枚および5枚積層したセンサーの出力波形を調べた。5枚積層したセンサーの出力波形を図13(a)に示す。市販センサーと同様な波形が得られ、発生電荷量は上回った。図13(b)に発生電荷量の枚数依存性を示す。素子1枚の場合の出力で40 pC、3枚では140 pC、5枚では210 pCで、枚数を増やすにつれて発生電荷量は直線的に増加し、3枚積層することで市販センサーとおおよそ同等の出力が得られ、発生電荷量が市販センサーと同等レベルならば車載用の実用的なセンサーとしての最低感度は満足していると判断している。さらに、この筐体では厚さ0.2mmの素子で最大15枚まで装着することができ、15枚使用した場合には市販センサーの4.5倍の出力を得ることが可能である。

2サイクルエンジンは、燃費や排気ガスに問題があるため、バイクやスクーター等で使用されている。量産車には

4サイクルエンジンが使用されているため、市販の4サイクルエンジン（富士重工業製ロビンエンジン（EY28DS））での評価も実施した。図14に示すように、エンジンのシリンダーヘッドバルブ側にAlNセンサーをアダプターを介して取り付け、右側に市販センサーを直接取り付け測定した。今回のAlNセンサーには、Scを加えて高感度化したAlN薄膜を3枚積層して用いた^[12]。図15にAlNセンサーと市販センサーの出力波形を示す。市販センサーの出力は52 pCであり、AlNセンサーの出力は151 pCであり、市販センサーの3倍の出力が得られた。もし、最高の15枚の素子を使用した場合は、市販センサーの15倍もの出力が期待できる。また、市販センサーではブロードなピークに見える排気時のわずかな圧力変化も、AlNセンサーでは明確なピークとして観察された。これらの結果より、AlNセンサーは市販センサーの性能を大きく超えることができ、実用的な燃焼圧センサーと期待できる。

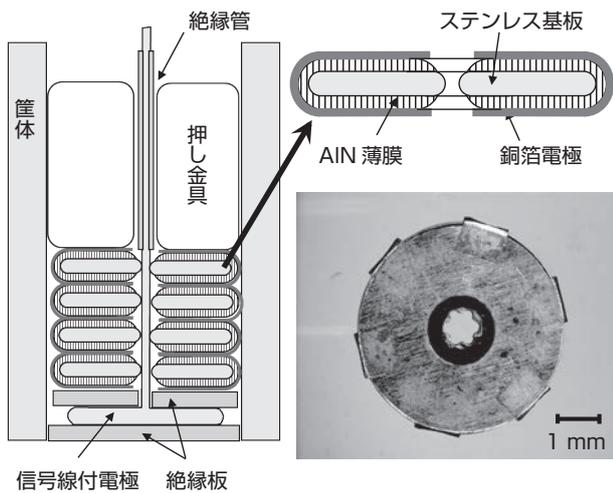


図11 AlN 薄膜センサーの素子の積層構造図と写真

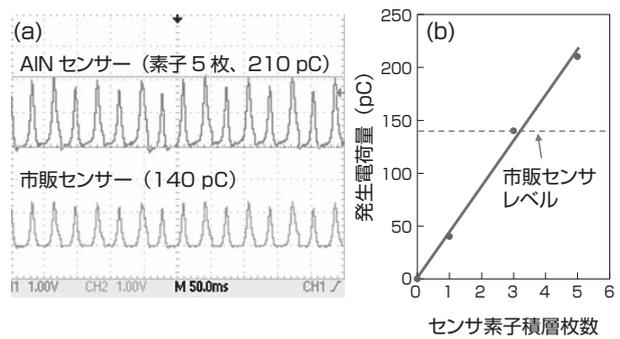


図13 (a) AlNセンサーの応答波形と(b) 発生電荷量のセンサー素子枚数依存性



図12 試作したAlNセンサーの外観

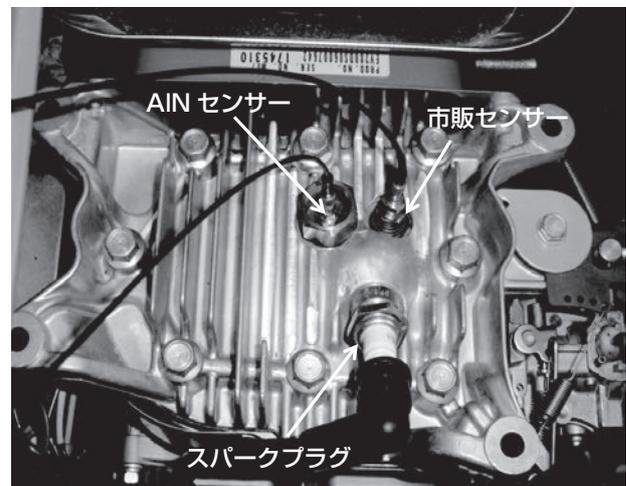


図14 センサーを取付けた4サイクルエンジンの外観

5 おわりに

この論文では、筆者らが世界で初めて薄膜圧電体を用いた、燃焼圧センサーの研究開発の経緯について述べた。この研究開発の構想当時(2003年以前)の燃焼圧センサー分野において、薄膜圧電体は未開拓領域であり、その有用性は認識されていなかった。しかし、この研究の開始以降、国内外の自動車部品会社や大学等が興味を示し、国内の自動車部品会社および明治大学と共同研究を行うこととなった。この薄膜燃焼圧センサーが量産車に搭載されるまでには、耐環境性や耐久性の実証試験や、センサー信号の安定化、高出力化、センサー構造の簡素化等まだ数多くの改善すべき課題が残されており、いまだ死の谷から抜け出してはいない状況ではある。しかし、これまでにさまざまな人たちの協力によって、一つずつ課題を克服し、一步一步前に進むことができてきている。この薄膜センサーの実用化と普及が進むことで、世界中で走り回っている多くの自動車からの排出ガス量が飛躍的に減少し、環境・エネルギー分野に大きく貢献することが期待される。また、船舶や特殊車両、発電機等の内燃機関への応用展開も可能であり、その波及効果は計り知れない。

謝辞

この研究開発を大きく促進させていただいた産業技術総合研究所の筒井康賢氏、立山博氏、エンジンによる評価方法やセンサー設計を指導していただいた明治大学の土屋一雄教授、共同研究を行っていただいた自動車部品会社の関係者の方々、産業技術総合研究所の野間弘昭氏、菖蒲一久氏、大石康宣氏、高橋三餘氏、古谷博秀氏およびその他の関係者の皆さまに深く感謝の意を表します。

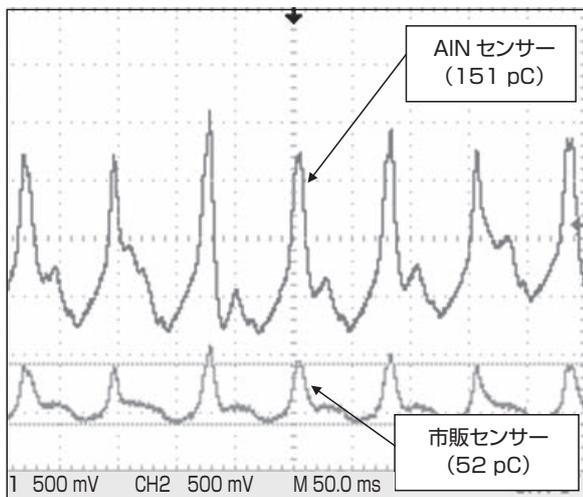


図 15 4 サイクルエンジンでの AIN センサーの応答波形

参考文献

- [1] 賀羽常道, 青柳友三, 皆川友宏, 柳原茂: 内燃機関の新しい圧力センサー技術, *自動車技術*, 58, 31-36 (2004).
- [2] 杉本武巳: 2002年セラミックス産業界の動き, *セラミックス*, 38, 686-693 (2003).
- [3] S. Uda, S. Q. Wang, N. Konishi, H. Inaba and J. Harada: Growth technology of piezoelectric langasite single crystal, *J. Crystal Growth*, 275, 251-258 (2005).
- [4] R. C. Turner, P. A. Fuierer, R. E. Newnham and T. R. Shrout: Materials for high temperature acoustic and vibration sensors: A review, *Appl. Acoustics*, 41, 299-324 (1994).
- [5] Y. Ooishi, H. Noma, K. Kishi, N. Ueno, M. Akiyama and T. Kamohara: Pressure response of aluminum nitride thin films prepared on silicon substrates, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 113, 700-702 (2005).
- [6] Y. Ooishi, K. Kishi, M. Akiyama, H. Noma and T. Tabaru: Analysis of the basic characteristic by electrical model of aluminum nitride thin film pressure sensors, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 113, 816-818 (2005).
- [7] 田原竜夫, 野間弘昭, 秋山守人: 800℃で動作可能な耐熱AEセンサーの開発, *エレクトロヒート*, 30, 7-13 (2009).
- [8] I. Ohshima, M. Akiyama, A. Kakami, T. Tabaru, T. Kamohara, Y. Ooishi and H. Noma: Piezoelectric response to pressure of aluminum nitride thin films prepared on nickel-based superalloy diaphragms, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 45, 5169-5173 (2006).
- [9] Y. Ooishi, K. Kishi, M. Akiyama, H. Noma, T. Tabaru and D. Nishijima: High pressure and high temperature durability of aluminum nitride thin films prepared on Inconel substrates, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 114, 657-659 (2006).
- [10] Y. Ooishi, K. Kishi, M. Akiyama, H. Noma, Y. Morofuji and S. Kawai: Combustion pressure sensors using c-axis-oriented aluminum nitride thin films prepared on Inconel substrates, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 115, 344-347 (2007).
- [11] 岸和司, 秋山守人, 大石康宣, 稲垣正祥: 圧電素子, 圧電センサー, 圧電素子の製造方法, 金属箔電極部材, 特願2008-142490.
- [12] M. Akiyama, T. Kamohara, K. Kano, A. Teshigahara, Y. Takeuchi and N. Kawahara: Enhancement of piezoelectric response in scandium aluminum nitride alloy thin films prepared by dual reactive cosputtering, *Adv. Mater.*, 21, 593-596 (2009).

執筆者略歴

秋山 守人 (あきやま もりと)

1993年九州大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年工業技術院九州工業技術試験所(現産業技術総合研究所九州センター)入所。1997年英国リバプール大学客員研究員。2001-2003年高感度薄膜圧力センサー連携体長。2003-2006年佐賀大学大学院助教授。2011年九州大学非常勤講師。2007年より生産計測技術研究センター研究チーム長。圧電体薄膜、圧力センサー、振動センサー、生体情報計測センサー等の研究に従事。この論文では、主として圧電体薄膜の作製および評価および全体のとりまとめを担当した。



田原 竜夫 (たばる たつお)

1997年東北大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年東北大学金属材料研究所中核的研究機関研究員。1999年科学技術振興事業団科学技術特別研究員。1999年工業技術院九州工業技術研究所(現産業技術総合研究所九州センター)入所。2006年よ

り佐賀大学大学院客員准教授。2007年より生産計測技術研究センター主任研究員。耐熱合金、耐酸化コーティング、耐熱 AE センサー、異常放電検知、摩擦摩耗等の研究に従事。この論文では、主として圧電素子の高温特性評価を担当した。



岸 和司（きし かずし）

1979年愛媛大学工学部工業化学科卒業。同年農林水産省肥飼料検査所入所、翌年工業技術院九州工業技術試験所入所。現在（独）産業技術総合研究所 生産計測技術研究センタープロセス計測チーム主任研究員。工学博士。この論文ではセンサーの試作、積層構造の開発およびエンジンによる評価を担当した。



査読者との議論

議論1 市販車への燃焼圧センサーの搭載

質問（岡路 正博：（株）チノー、阿部 修治：産業技術総合研究所）

（1.2節）自動車エンジンの燃焼圧センサーが量産車に搭載された例として、トヨタ自動車のピエゾ抵抗式センサーが挙げられています。現在は既に使用されていないと書かれています。使用が中止された理由は何だったのでしょうか？ また、これが唯一の過去の事例であって、現在は（海外の自動車メーカーも含めて）どの量産車にも搭載されている例は無いと理解して良いのでしょうか？

回答（秋山 守人）

トヨタ自動車のピエゾ抵抗式センサーの使用が中止された詳細な理由はわかりません。また、詳細に調べた結果、ドイツのプラグメーカーである BERU が米国のテキサスインスツルメンツ社と共同開発したピエゾ抵抗式グロープラグ型燃焼圧センサーが、2009年からアウディ社やフォルクスワーゲン社のクリーンディーゼル車の一部に搭載され、欧州や北米で発売されています。この内容を本文中に反映させるために、一部修正を行いました。

議論2 圧電型センサーの短所

質問（岡路 正博、阿部 修治）

（1.2節）圧電型センサーは「絶対圧力計測ができない等の短所もある」と書かれています。これは実用上問題ではないのかどうか、お伺いしたい。

回答（秋山 守人）

自動車エンジンの燃焼圧は急激に変化しているために、圧電型センサーでも測定することは可能です。しかし、誤解を生じては困りますので、必要ない部分の「絶対圧力計測ができない等の短所もある」を削除しました。

議論3 産総研において研究を継続する理由

質問（岡路 正博、阿部 修治）

（5章）「数多くの課題がまだ残されており、いまだ死の谷から抜け出せていない状況」ということですが、耐久性実証試験等は、民間企業が開発すべきフェーズに入ったとも受け取れます。それとも、まだ産総研や大学での研究開発が必要であるという状況でしょうか？ もう産総研が行うべきステージが過ぎたのではないかという印象をもたれますので、産総研が引き続き研究を続けるべき理由を明確にする方が良いと思います。

回答（秋山 守人）

耐久性実証試験等は、民間企業が開発すべきフェーズに入っています。しかし、よりセンサーの完成度を高めるためには、センサー信号の安定化や高出力化、センサー構造の簡素化等まだ改善すべき点が残されています。そこで、産総研が行うべきこととして、5章の終わりにこの内容を追記しました。

議論4 当該センサーと市販センサーとの比較

質問（岡路 正博）

（4.2節）図13に示されているように、当該センサーと市販センサーとの比較で論理を展開されていますが、発生電荷量が市販センサーと同等レベルならば車載用センサーとしての条件を満足するのでしょうか？

回答（秋山 守人）

4.2節に「発生電荷量が市販センサーと同等レベルならば車載用の実用的なセンサーとしての最低感度は満足していると判断している。」という文章を追記しました。