

着 火 時 期 セ ン サ

Combustion Timing Sensor

園 田 眞 夫⁽¹⁾ 寺 井 清 司⁽²⁾
Masao Sonoda Kiyoshi Terai

清 水 慎 二⁽³⁾ 高 橋 稔⁽⁴⁾
Shinji Shimizu Minoru Takahashi

要 旨

乗用車用ディーゼルエンジンの電子制御システムに用いられる着火時期センサを開発した。

このセンサはエンジンの副燃焼室に取付けられ、燃焼光を直接に検出するものである。苛酷な環境下で使用されるため、光学センサでありながら、その耐久性能については厳しいものが要求される。

当社と富士通株式会社は、共同してこの開発を行い、設計—評価—改良を重ねた。

本稿では、センサの構造と評価を中心として、開発の成果を紹介する。

Combustion Timing Sensor, that is used in electronic controlled system of diesel engines for passenger car, has been developed

This sensor is to be installed into the combustion chamber of engine, and directly detects the combustion fire. The sensor is obliged to be highly durable in the operation under severe conditions, though it is one of optical sensors.

A co-operative development between FUJITSU LIMITED and we, FUJITSU TEN LIMITED has been done, repeating design-evaluation-improvement in turn.

In this paper, we introduce our acquirements on development of the sensor, principally on its construction and evaluation.

(1), (2) 富士通株式会社

(3), (4) 富士通テン㈱モータロニクス本部技術部

1. はじめに

今回開発した着火時期センサは、ディーゼルエンジンの燃焼光を光学的に検出し、電気信号に変換する方式のセンサである。(図-1)

乗用車用ディーゼルエンジンでは、動力性能と燃費の向上および排ガスエミッションの低減のため、燃料噴射時期の電子制御化が進められており、燃料噴射ポンプのタイマ位置に基づく制御システムが実用化されている。

さらに最近開発された方式として部品のバラッキや経時劣化、燃料組成の違いについて、より精密な補正を行える、燃焼開始時期(着火時期)に基づいて燃料噴射時期をフィードバック制御するシステムがあり、このシステムの基本構成要素として必要となるのが、着火時期センサである。

富士通と当社は、光技術の自動車への応用として本センサの開発を試みた。

2. 原理と構造

2.1 ディーゼルエンジンの着火

ディーゼルエンジンの着火は、高温高压に圧縮されたシリンダ内の空気中へ、さらに高压の燃料を噴射し、燃料を自己発火させることにより起こる。自己発火という点が、点火装置を備え、電気

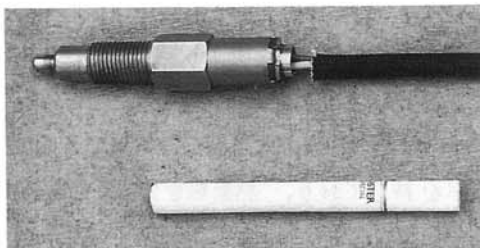


図-1 センサ外観

Fig. 1 Exterior view of the sensor.

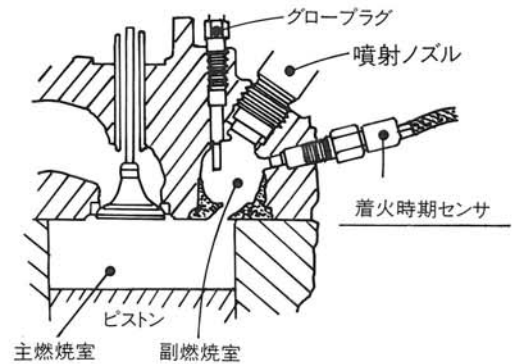


図-2 センサの取付け

Fig. 2 Installation of the sensor.

火花で燃焼を開始させるガソリンエンジンと大きく異なる点である。(図-2)

着火が自己発火に基づくものであるため、燃料噴射開始から着火までには必然的に時間的な遅れ—着火遅れ—が生じ、エンジンの運転状況に影響をおよぼしている。着火遅れの大きさは、燃料の組成・霧化の程度や圧縮空気の状態により種々変化する。エンジンの良好な運転のためには、燃料噴射時期は、着火遅れを見込んで適切に決定される必要がある。本センサを用いたシステムは、自動的にこの着火遅れの補正が行えるシステムである。

2.2 センサの原理

ディーゼルエンジンの着火時期検出の方法として、シリンダ内の圧力変化やエンジン振動に基づく方式もあるが、本センサの方式は、前述のよう

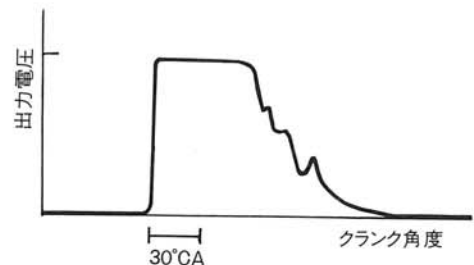


図-3 出力波形

Fig. 3 Output waveform.

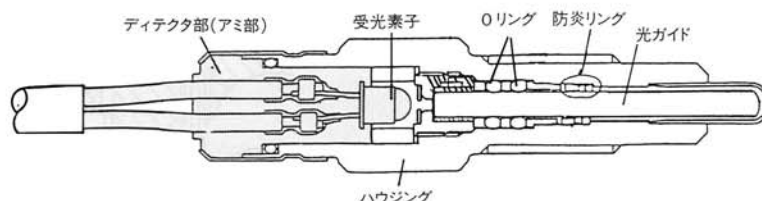


図-4 センサ断面

Fig. 4 Cross section of the sensor.

に受光素子を用いた燃焼光直接検出方式である。

測定結果によると、燃焼光のスペクトラム分布は近赤外域ではほぼ一様強度であり、特定の波長域への偏りはみられない。また燃焼光は、強くかつ急峻に立上るので、信号源としての S/N 比が非常に高い。この燃焼光特性により、Si ホトトランジスタと簡単な構成の信号処理回路の組合せで、良好な着火時期信号が得られる。(図-3)

今回の開発に用いたエンジンは副燃焼室式であり、センサも副燃焼室へ向けて取付けてある。燃焼室直結の光学センサで問題となるカーボンは、燃焼炎によって焼却されるので蓄積することはない。

2.3 センサ構造

センサの構造を図-4に示す。センサは大きく分けて「光ガイド部」と「ディテクタ部(図中のアミ部)」とで構成されている。

光ガイド部の基本機能は、燃焼光の検出と受光素子への伝達である。石英ガラスの光ガイド先端は広い指向性が得られる形状になっており、燃焼室内のさまざまな位置で発生する燃焼光を、確実に捕らえられる。捕えた燃焼光のうち、入射角の小さなものは光ガイド内を直線的に通過し、また入射角の大きなものは光ガイド側面で反射され、いずれも受光素子へ到達する。光ガイドを保持している部分の構造は重要であり、石英ガラスに衝撃を与えないとともに、十分な熱遮断・気密性能を持たせ、燃焼室の高温・高圧環境に耐えられる

ようになっている。この保持構造により、受光素子を保護し、センサの損傷を防止し、安定に光信号を伝達することが可能となっている。

ディテクタ部は、到達した燃焼光を電気信号に変換することが基本機能であり、受光素子として赤外ホトトランジスタを用いている。受光素子は電子部品であり、エンジンルーム環境からの保護が必要である。電気的な耐環境性を高めるため、素子の後部はプラスチックモールドで覆われている。またセンサ内部の光学的環境悪化の防止のため、ディテクタ部と光ガイド部の接合は、気密構造を用いている。

3. 光学設計

3.1 受光素子

エンジン燃焼光は、前述のように光学的に良好な信号源である。従ってこの検出に特殊な受光素子は不要であり、本センサでは高耐熱で赤外域に応答する Si ホトトランジスタを使用している。

3.2 光ガイド材料

光ガイド材料の基本的な必要条件是透光性があることであり、工業的に利用できるものとして石英ガラスが最も適している。石英ガラスはその物性として高い軟化温度と低い熱膨張率を持っており、熱衝撃を含めた耐熱性が高い。化学的性質も安定しており、エンジン燃焼室内の高温酸化雰囲気中で使用しても、透過率の低下や変形などの劣化を起こしにくい。

表-1 光ガイド材料の比較

番号	材 料	光結合効率※	耐燃焼室環境
1	石英ガラス棒	1/5	良好
2	石英ファイバ 〔コア:P, Geドープ クラッド:純石英〕	1/25	ドープ部が劣化する
3	石英ファイバ 〔コア:純石英 クラッド:Bドープ〕	1/25	ドープ部が劣化する
4	サファイヤ球	1/5	非常に良好 球の保持に難がある

※注 光結合効率は、本センサに応用した場合の概略値

石英ガラスの形態として純石英棒と石英ファイバがあるが、光結合効率と耐燃焼室環境性能がより優れている点から、本センサでは純石英棒を使用している。しかし純石英棒は通常のガラスと同様、耐衝撃性に劣るため、保持方法には工夫が必要である。保持方法については後述する。

3.3 光ガイド端面

エンジンの着火開始は副燃焼室内のあらゆる位置で起こる可能性があり、これを遅れなく検出す

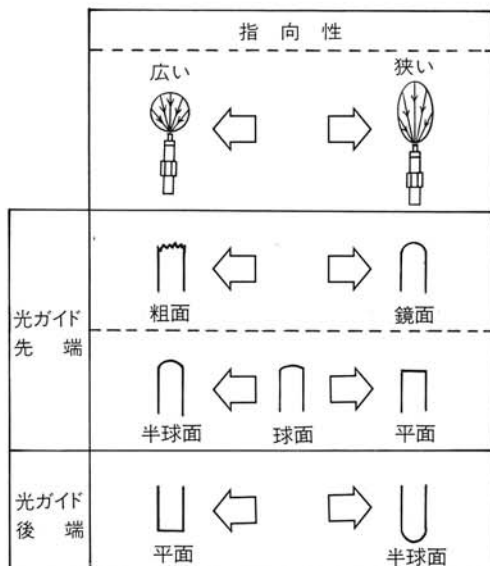


図-5 光ガイド形状と指向性

Fig. 5 Directivity by light guide's form.

るため、センサには広い指向性が求められる。広い指向性を得るため、丸棒形状の光ガイドは、先端側端面を粗い球面に、後端側を鏡面仕上げの平面にしてある。(図-5)

4. 構造設計

4.1 気密構造

燃焼室内の圧力サイクルは、燃焼行程においては最大10MPa(98気圧)以上、吸気行程においては負圧(大気圧以下)になっており、ここに直結して用いられるセンサには高度の気密性能が求められる。

気密を要する部分で最も重要なのは光ガイドハウジング間であり、気密と同時に、衝撃を与えないよう光ガイドを保持できる構造にする必要がある。本センサでは、この構造にOリングを用いている。

またこのOリングを熱的劣化から保護するため、Oリングのさらに先端側に金属性の防災リングを設け燃焼炎の内部侵入を防いでいる。

Oリング+防災リングの構造により、本センサは良好な気密性能と光ガイド保持機能を実現している。

4.2 光ガイドの移動防止

燃焼室の圧力サイクルのため、光ガイドの軸方向には往復運動力が繰返し加えられている。これによる光ガイドの移動と破損防止のため、光ガイド後端部分とハウジングとの間は耐熱性接着剤で接着してある。

4.3 ディテクタ部の気密構造

受光素子保護のため、光ガイド部とディテクタ部の継ぎ目はOリングによる気密構造にしてある。

5. 評価とその結果

5.1 評価の方針

センサの評価は、実使用での熱、圧力、振動等

の複雑な環境条件に対して忠実に試験を行う目的で、エンジン耐久試験を中心としてすすめた。しかし同時に、試験数の増加、時間の短縮を目的とした代用評価の検討も行った。これらすべての評価結果を実車走行試験によって確認した結果、評価方法は一応十分であったと判断している。

すべての試験において、その判定は主として電気光学特性の測定により行っているが、エンジン状態に近い、かつ安定したものとなるよう、測定方法の検討も行っている。

5. 2 測定項目（電気光学特性）

電気光学特性の測定項目を紹介する。すべての試験の前後でこれらの測定を行い、評価の判定要素とする。

1) 出力電圧

一定光量下での出力電圧を測定するもので、最も基本的な測定項目である。測定光源は、スペクトラム分布がエンジン燃焼光と類似していることから、標準タングステン電球を用いている。出力電圧特性は、素子固有の光電変換効率と光ガイドの光学特性により、決定される。

2) 温度特性

出力電圧測定装置を恒温槽中に組込み、種々の温度での出力電圧を比較するもので、代表値とし

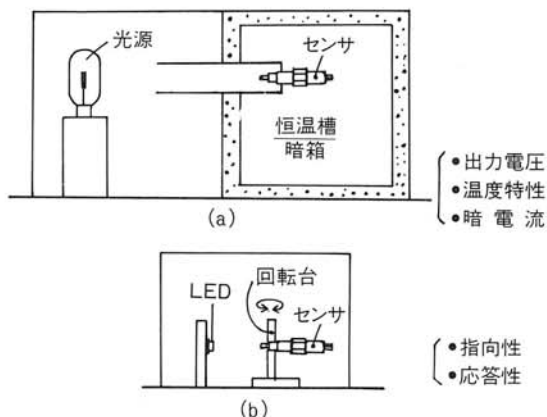


図-6 測定装置

Fig. 6 Measurement system.

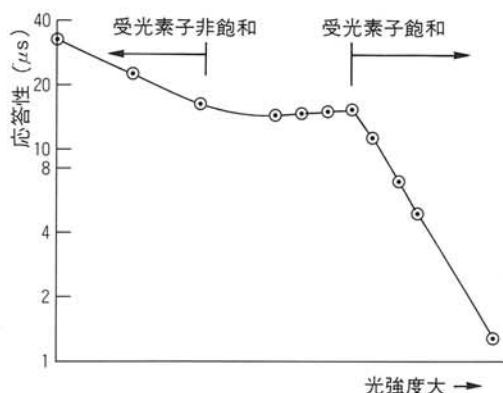


図-7 光強度と応答性

Fig. 7 Response time by strength of luminous source.

ては、実使用に則して、

$$V_{TMAX}/V_T$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{TMAX}: \text{使用最高温度での出力電圧} \\ V_T: \text{常温での出力電圧} \end{array} \right\}$$

を用いている。この特性は素子固有の光電変換特性によりほぼ決定され、センサ構造にはあまり影響されない。(図-6 a)

3) 指向性

光の入射角に対する出力電圧の変化を求めるもので、着火検出遅れを防ぐためには、広い指向性の確保が必要である。測定光源には点光源が適しており、無指向性の赤外LEDを用いている。この特性は、主として3.光学設計で述べたような光学特性により決定される。(図-6 b)

4) 応答性

ステップ状の光信号を与えた時の応答遅れを測定するもので、光源には指向性測定と同じLEDを用いている。この特性は測定回路や光源光量の設定値により種々変化し、一意的な表現が難しい。設定値によって受光素子が飽和($V_{CE}=0$)したり、非飽和であったりするためである。傾向としては、素子の受光量が多いほど応答遅れが短くなっている。従って、測定光はエンジン光より弱く設定してあり、実使用での応答性より遅く

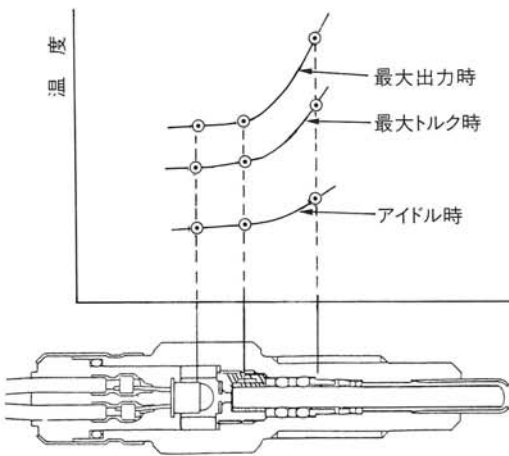


図-8 測温センサによる測定（エンジン条件による各部温度）

Fig. 8 Measurement by thermo-measuring sensor.

なる応答特性で評価している。（図-7）

5) 暗電流

光のない時の通電電流であり、暗箱中で測定する。この特性は素子固有の特性であり、センサ構造には無関係である。通常極めて値は小さく、常温で数 nA 程度であるが、温度特性が大きく、25℃上昇につき約10倍となる。評価基準値は実使用に対し十分な余裕を見込んだ値に設定してある。

5.3 測温センサによる測定

センサ構造の評価法、基準を定めるために、測温センサを用いてセンサ内部温度の測定をしている。この測定は実際のエンジンに取りつけて行うもので、特に断熱性能、気密性能の確保を目的としたものである。測温センサは、実際のセンサに熱電対を埋め込んだもので、構造変更のたびに新たに作り直す必要はあるが、性能や取扱いが通常のセンサと同一であり、測定結果の信頼性は高い。（図-8）

測温センサを用いた測定結果によれば、センサ内部温度が最高となるエンジン運転条件は最大出力時であり、5.5 エンジン耐久試験においてもこの条件を用いている。

表-2 環境試験項目

	項 目
温度・湿度	高温放置、高温作動 高温高湿放置、高温高湿作動 低温放置、低温作動 冷熱サイクル、熱衝撃
外部環境	耐水、耐湿、散水作動 塩水、耐薬品、耐泥水 耐候性
その他	締付け、落下

5.4 環境試験

環境試験項目を表-2に示す。

5.5 エンジン耐久試験

エンジン耐久試験は、エンジンダイナモメータを用い、センサをエンジン実機に取付けて行う耐久試験である。センサを総合的に評価する能力はこの試験が最も優れており、実施には大きな工数を要するが、その必要性は高い。

耐久試験であるためエンジン運転条件は最大出力状態とし、試験時間も車両耐用年数を基準に算出してある。実車でエンジンがこの状態になるのはほとんどが高加速時であり、連続してこの状態になることは普通ない。従って、センサにとっては相当過酷な試験である。

このような条件のため、試験後のセンサの出力電圧は初期に比べかなり低下する。しかし、この

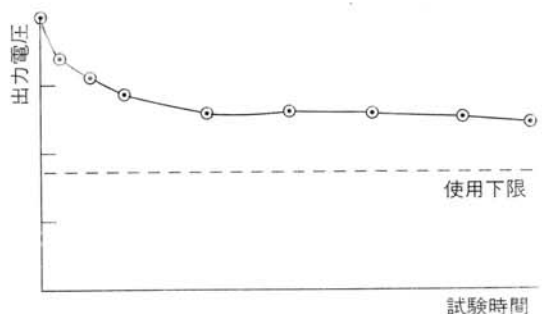


図-9 エンジン耐久試験結果

Fig. 9 Result of durability test by engine.

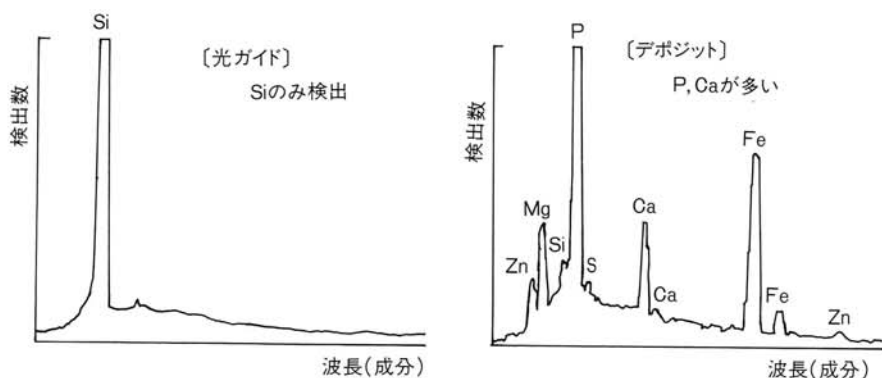


図-10 デポジットの成分分析
(X線マイクロアナライザによる)

Fig. 10 Component analysis of deposits.

状態においても機能的には十分使用可能なレベルを維持している。(図-9)

5. 6 デポジット

エンジン耐久試験において出力低下の原因となったデポジット(堆積物)について、分析結果を紹介する。(図-10)

デポジットは、エンジンを高負荷で運転した時に燃焼室内で生成される黄白色～茶色の化合物であり、燃焼室壁に付着、堆積する。元素分析によるとP、Caが多く検出され、それらから主成分はリン酸カルシウムであると考えられる。原因物質は主としてエンジンオイルの添加剤中に含まれている。リン酸カルシウム生成には高温、高圧環境が必要であり、従ってデポジットはエンジン負荷

が大きいほど多く生成される。実際、中負荷以下ではほとんどその発生は見られない。

センサに与える影響としては、光ガイド透過率の低下と指向性の広がりが見られる。後者はセンサにとっては、むしろ好ましい状況である。

5. 7 実車走行試験

評価の総合結果の確認のため、実車走行試験を行った。走行距離は、高速道路状態と一般道路状態を組合せた計6000kmである。実車走行において、高加速時以外のエンジン使用条件は穏やかであり、燃焼室の温度、圧力も、エンジン耐久試験に比べ低くなっている従って試験後の出力電圧もほとんど初期と同等のレベルを示している。

走行距離がセンサ評価として十分ではないが、データの推移からいって、この先も同様の性能を維持していくものと考えられる。(図-11)

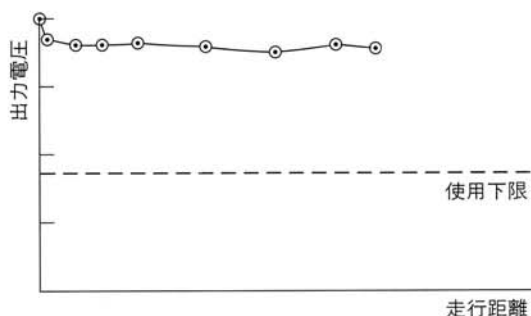


図-11 実車走行試験結果

Fig. 11 Result of durability test by actual vehicle.

6. おわりに

以上のように、実車走行やエンジン耐久において使用可能な着火センサを開発することができた。一般に耐環境性に劣ると考えられた光学センサも、構造設計や材料選択において、使用環境に対する適合化を行えば、自動車用センサに応用す

ることが十分に可能である。今回、このことの確認と評価技術を得られたことは大きな成果である。

今後、光技術が自動車へ数多く応用されるであろうが、これらの開発に際しては、今回得られた成果を十分に生かしていきたい。また、多様化する自動車システムにおいては、さらに新たな技術に基づくセンサが求められるであろうが、より総合的な評価技術を用い、その開発に取り組んでいきたい。

最後に本開発に関し絶大な御協力と御指示を賜った関係者各位に、紙面を借り厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 池田、青木、小林、小橋：『乗用車用ディーゼルエンジンにおける噴射時期制御』、自動車技術、Vol. 40, No. 2, pp. 162-167 (1986).
- 2) 古濱：内燃機関工学、産業図書