

# 特集 A/F センサの開発\*

## Development of Air Fuel Ratio Sensor

坂輪年洋 堀 誠 中村靖紀  
Toshihiro SAKAWA Makoto HORI Yasuki NAKAMURA

The Air Fuel Ratio Sensor (A/F sensor), which is applied to a 1997 model year Low Emission Vehicle (LEV) was developed. This sensor enables the detection of the exhaust gas air fuel ratio, both lean and rich of stoichiometric. It has a effective air fuel ratio range from 12 to 18 as required for LEV regulation. It has a fast light off, - within 20 seconds - to minimize exhaust hydrocarbon content. Further, it has fast responses times, less than 200 msec, to improve air fuel ratio control-ability.

**Key words** : exhaust system, air fuel ratio

### 1. はじめに

自動車の排出ガスによる大気汚染は地球規模の環境問題となってきている。これに対応して様々な法規制による排出ガスの浄化が求められており、それらの規制値は年々厳しくなりつつあり、更に燃費規制も導入されようとしている。90年以降の法規制動向を Table 1 に示す。米国では96年にLEV規制が導入され、その後更に厳しいULEV規制も導入される。一方、欧州では2000年にSTEP IIIが、日本では2000年に新たな規制(ポスト78年規制)の導入が予定されている。ここで、一例として米国での排出ガス規制値を Fig. 1 に示す。LEV・ULEV規制は、従来の規制と比べ、HC・NOxともに厳しく、特にHCに対し非常に厳しい規制となっている。

これに対し自動車会社では、冷間始動時に早期に空燃比制御を開始しHCの排出量を減少させることや、精密な空燃比制御を行うことで規制をクリアしようとしている。この空燃比制御を行うためには排出ガス成分を検出するセンサが必要とされるが従来のO<sub>2</sub>センサだけではシステム側からの要求に対し不十分であり、精密空燃比制御用のA/Fセンサが必要となる。

これまで、センサではトヨタ自動車と協力し、排出ガス浄化システムに用いるための種々のセンサを適宜開発してきた。77年には国内で初めてO<sub>2</sub>センサを実用化し、84年には世界で初めてリーンセンサを製品化した。96年にはLEV規制に対応させた精密空燃比制御用として、世界で初めてA/Fセンサを開発・量産させ

た。

O<sub>2</sub>センサは、触媒の最も排出ガス浄化率の高い領域

Table. 1 Regulation trend

		90	95	00	05
Exhaust Emission Regulation	USA		Tier1, TLEV	LEV, ULEV	
	E C		STEP I	STEP II	STEP III
	JAPAN			POST78	
Fuel Consumption Regulation (CO <sub>2</sub> Regulation)					

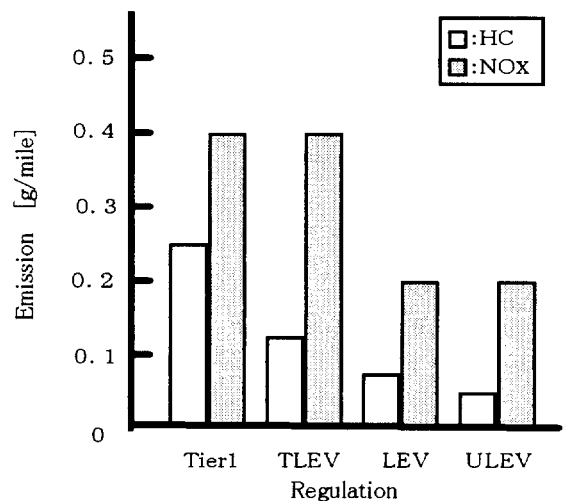


Fig. 1 Exhaust emission regulation limit in USA

\* 98年4月6日原稿受理

に空燃比を制御するものである。O<sub>2</sub>センサの出力（起電力） $E$ は、ネルンストの式(1)により導かれる。

$$E = \frac{RT}{4F} \ln \left[ \frac{P_0}{P_1} \right] \quad (1)$$

ここで、

- $R$  : 気体定数
- $T$  : 絶対温度
- $F$  : ファラデー定数
- $P_0$  : 大気酸素分圧
- $P_1$  : 排出ガスの酸素分圧

排出ガスの酸素分圧はA/F=14.6の理論空燃比点を境に大きく変化するため、O<sub>2</sub>センサの出力電圧はFig. 2に示すようなリッチ/リーン信号を出力する。通常使われている制御は、出力電圧が0.45Vを下回れば燃料噴射量を増やし、0.45Vを超えると燃料噴射量を減らすというものである。

リーンセンサは燃費向上のためのリーンバーン（希薄燃焼）エンジン用として、トルク変動による失火及びNO<sub>x</sub>大量排出を共に防ぐことのできるA/F=23付近で精密に空燃比制御するために開発されたセンサである。リーンセンサの出力電流値 $I_L$ は式(2)で表わされ、空燃比に対して正の相関のある出力を持っている。この出力を利用することで、A/F=23に制御することができ、更にリーンセンサの検出範囲としてはA/F=14.6から大気まで可能である。

$$I_L = C \frac{D}{T} \cdot \frac{PS}{L} \ln \left[ \frac{1}{1 - P_0/P} \right] \quad (2)$$

ここで、

- $C$  : 定数
- $D$  : 拡散層での拡散係数
- $T$  : 絶対温度
- $S$  : 電極表面積
- $P$  : 排出ガスの全圧力
- $P_0$  : 排出ガスの酸素分圧
- $L$  : 拡散抵抗厚さ

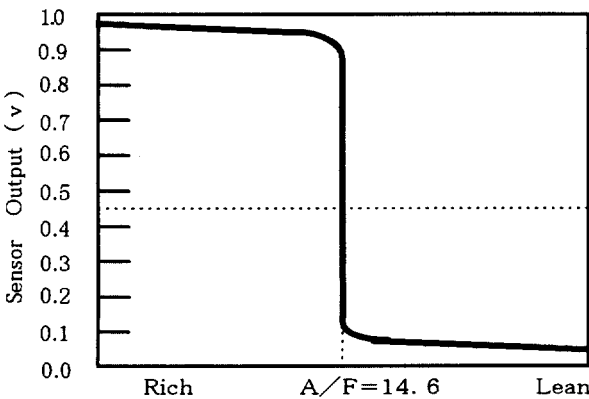


Fig. 2 Output characteristics of oxygen sensor

## 2. システム

1997 MY 対米加州向けLEV車両用に導入されたエンジンシステムの構成をFig. 3に示す。排気側に取り付けたA/FセンサとO<sub>2</sub>センサにより空燃比を検出し、この信号をECUに入力することで、排出ガスを理論空燃比に制御することが可能となる。排出ガスは小容量のスタート触媒と大容量のメイン触媒により浄化される。A/Fセンサは空燃比の最適値からのずれを速い応答性でかつ正確に検出するため、スタート触媒の上流に取り付けられ、O<sub>2</sub>センサは空燃比の検出精度を改善する役割でメイン触媒の下流に取り付けられている。ここで、A/Fセンサを用いる狙いとしては、①早期活性による冷間始動時の排出ガス低減、②A/F精密制御による過渡時の排出ガス低減（例えば、リーンガスが発生したとき、これにつりあうリッチ制御することにより、A/F積算値を常に理論空燃費 $\lambda=14.6$ に制御する）である。

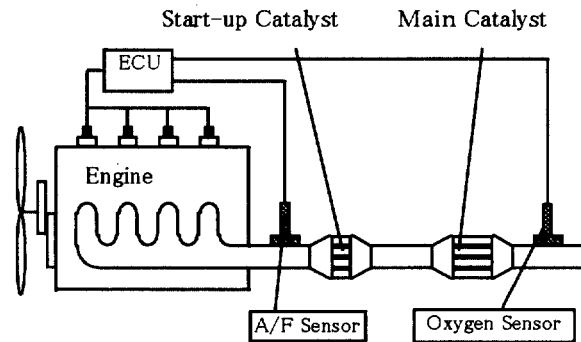


Fig. 3 Fuel control system and exhaust system for LEV

## 3. A/F センサの開発

A/Fセンサは、リーンセンサをベースに開発したものであり、A/Fセンサの構造をFig.4に示す。このA/Fセンサは広範囲の空燃比における酸素濃度を検出するもので、O<sub>2</sub>センサと類似構造だが、外側電極の外周に緻密なセラミックコーティングによる拡散律速層を設けたことが特徴である。

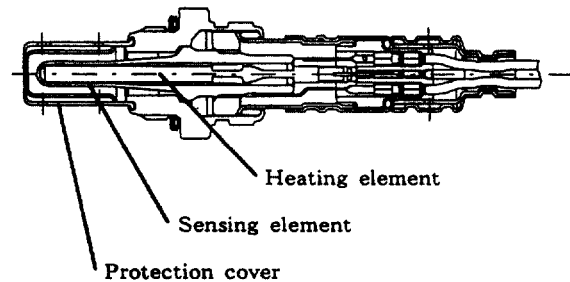


Fig. 4 Structure of A/F Sensor

### 3.1 原理

リーン領域では、素子に電圧を印加することにより酸素分子は排出ガスから大気へ、すなわち素子内側へポンピングされる。しかし、拡散律速層を設けたことにより移動する酸素分子の量が制限されるため、出力電流が一定の値で飽和する。リッチ領域では、酸素分子は大気から排出ガスへポンピングされ、排出ガス中の未燃ガスと反応するが、拡散律速層により移動する未燃ガスの量が制限され、出力電流は一定の値で飽和する。ここで飽和する出力電流は、Fig. 5のように空燃比に対し正の相関があり、これにより広範囲での検出が可能となる。

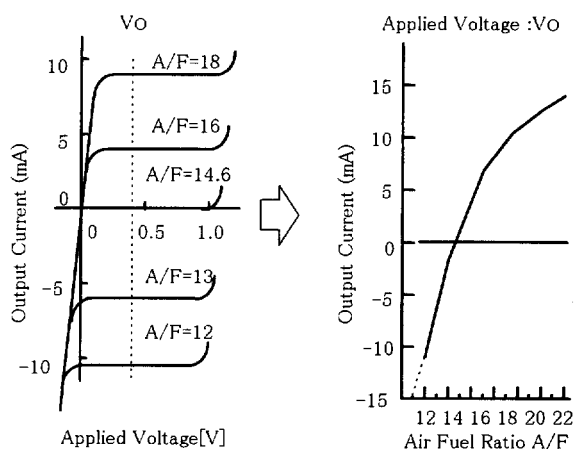


Fig. 5 Characteristics of air fuel ratio sensor

### 3.2 特徴

LEV規制を達成するためのA/Fセンサの目標値は、Table 2に示す値である。

今回のA/Fセンサでは、以下の方法により目標を達成した。

(1) 検出範囲

素子とヒータ間の通気構造の最適化によりリッチ領域 A/F=12 まで検出領域を拡大。

(2) 活性化時間

高耐熱性ヒータ(窒化珪素ヒータ)の開発により、LA #4 コールドスタート(米国などで採用されている排出ガス測定モード)での活性化時間20秒以内を達成。

(3) 応答性

ガス流れ解析を用いた保護カバーの穴の配列の最適設計によりリッチ→リーン、リーン→リッチの応答時間 200 ms 以内を達成。

(4) 耐久性

素子の電極、及び、被毒トラップ層の改良による大幅な耐久性向上。

Table 2 Specification

Item		Specification
Detection Range		A/F12~18
Detection Accuracy		≤ ±3%A/F
Activation Time		≤ 20 s
Response	Rich→Lean	≤ 200 ms
	Lean→Rich	≤ 200 ms

### 3.3 検出範囲

A/Fセンサでは、LEV車両として検出範囲 A/F=12~18が要求されるが、現状のリーンセンサではリッチ領域での要求値を満足できない。リッチ領域では、酸素は、大気からセンシング素子部分とヒータ間の通路を通り、排出ガスに供給される。モデルをFig. 6に示す。リッチ限界出力は、式(3)で表わされ、O<sub>2</sub>導入断面積及びO<sub>2</sub>導入路長さにより決定される。

$$I_L = C \cdot \frac{S}{L} \cdot D \cdot \ln \frac{1}{1 - P_0} \quad (3)$$

ここで、

- C : 定数
- S : O<sub>2</sub>導入路断面積
- D : 拡散定数
- L : O<sub>2</sub>導入路長さ
- P<sub>0</sub> : 酸素分圧

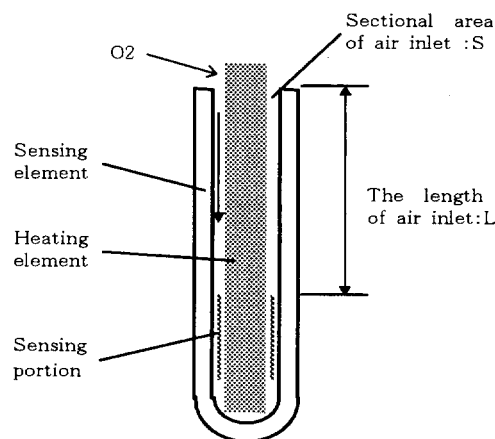


Fig. 6 Oxygen path between sensing element and heating element (1)

そこで今回開発したA/Fセンサでは、センシング素子部分とヒータ間の形状最適化によりO<sub>2</sub>供給量を確保

し、A/F=12 までの検出を可能にした。

リッチ限界を向上させるためには、センシング素子とヒータ間のクリアランスを拡大させれば良いが、単純に拡大させると、ヒータの伝熱効率が低下し、始動時の素子活性温度までの到達時間やヒータの使用最高温度などに対し目標を満足できない。そこで、今回、伝熱効率にかかわるセンシング素子の電極部分付近のクリアランスは現状のままとし、それ以外の部分を拡大することを考えた。

モデルを Fig. 7 に示す。A/F=12 の検出を確保するためには、S と L の比率を式(4)とする必要がある。

$$\frac{S}{L} = \frac{L}{\frac{L_1}{S_1} + \frac{L-L_1}{S_2}} \geq 0.104 \quad (4)$$

S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、L<sub>1</sub>の各寸法を最適設定することで、伝熱効率を低下させることなく、リッチ出力 A/F=12 の検出に必要な O<sub>2</sub>供給量の確保を達成した。

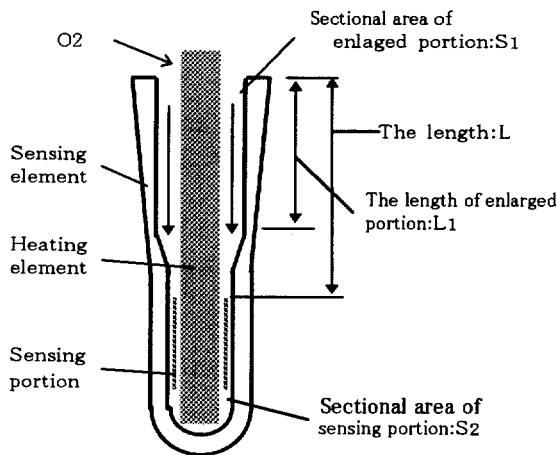


Fig. 7 Oxygen path between sensing element and heating element (2)

### 3. 4 早期活性

LEV 規制に対しては、冷間始動時の HC 排出量を減少させることが必要であり、A/F センサには冷間始動時 20 秒以下で活性温度まで到達することが要求される。A/F センサを 20 秒で活性させるためには、素子活性に必要な熱量を短時間に供給させなければならず、Fig. 8 のようにヒータ急速昇温及びヒータ高温使用が必要となる。このため、高温強度、高温絶縁性に優れ、かつ、熱膨張率の小さな基材が必要であり、また、高温強度に優れ比抵抗が小さく、かつ、基材と同レベルの熱膨張率をもつ発熱体で構成された高性能ヒータの開発が必要となる。

ヒータの開発にあたり、まずは目標仕様を設定する

ため FEM 解析を実施した。今回実施したのは、素子・ヒータをモデル化し、このモデルのヒータ発熱部に熱量を与えることにより、ヒータ最高温度及びヒータ昇温速度と、活性時間及び素子発生熱応力との関係を推定する方法とした。結果を Fig. 9 に示す。活性時間及び、素子強度限界を考慮し、目標値としてヒータ抵抗を 1 Ω、さらに耐熱温度を 1200°C 以上と設定した。次に、耐熱温度 1200°C 以上を確保するための材料の選定をヒータ基材、発熱体の順に実施した。

基材としては、種々の高温高強度材料の中で低熱膨張及び高温絶縁性に着目し検討をした結果、各項目とも優れた特性をもつ窒化珪素を選定した。高温絶縁材料の強度及び、熱膨張係数を Fig. 10 及び 11 に示す。

一方、発熱体としては、種々の高温電気伝導性材料の中で熱膨張係数に着目し検討した結果、基材の窒化珪素に近い熱膨張係数を持つ WC(炭化タングステン)を選定した。電気伝導性材料の熱膨張係数を Fig. 12 に

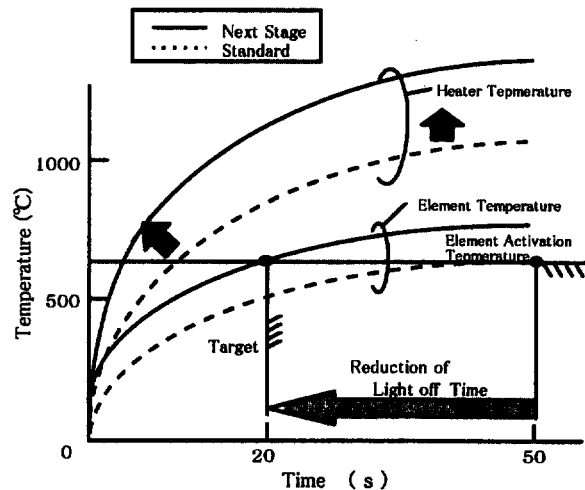


Fig. 8 Reduction of light off time

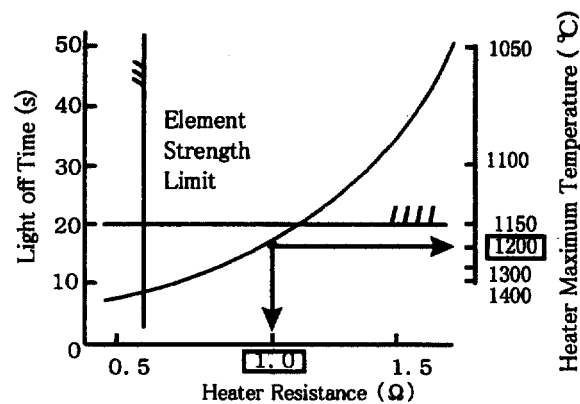


Fig. 9 FEM analysis result

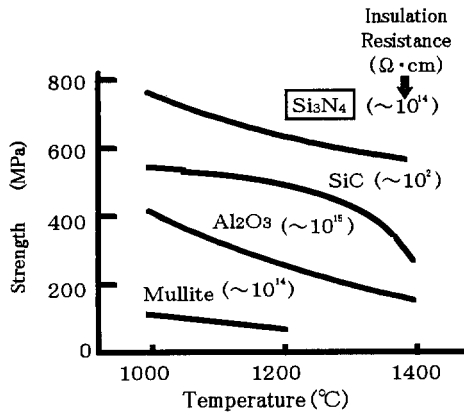


Fig. 10 Strength of insulation material at high temperature

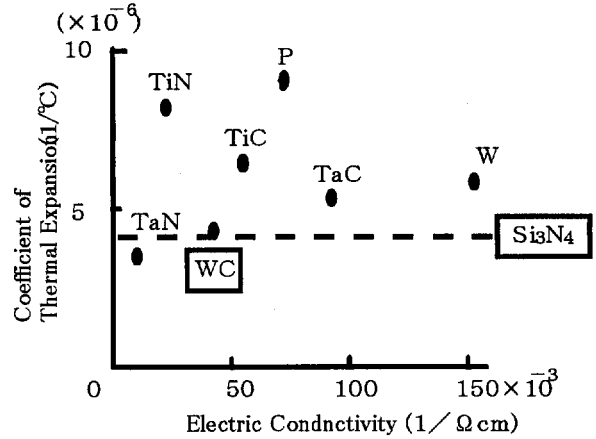


Fig. 12 Coefficient of thermal expansion of high electric conductivity material

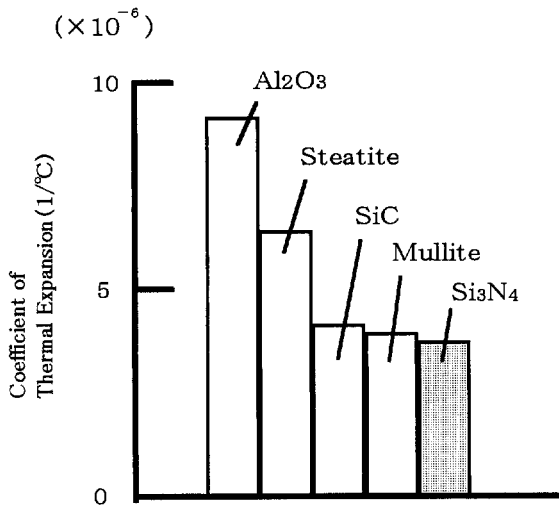


Fig. 11 Coefficient of thermal expansion of high strength material

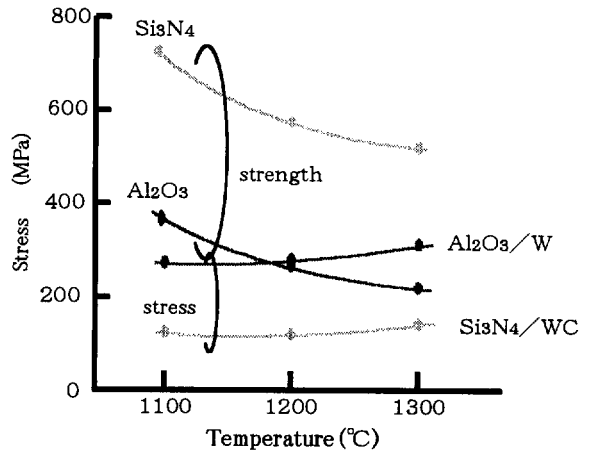


Fig. 13 Stress of heating element

示す。

今回選定した材料を用い FEM 解析で高温強度を確認した結果、従来のアルミナの基材とタングステンの発熱体のヒーターでは、1200°Cでの発生応力が許容応力を越え耐熱性 1200°Cを満足できなかったが、今回開発したヒーターでは 1200°Cでも十分余裕があると確認できた。解析結果を Fig. 13 に示す。

更に、目標とするヒーター抵抗値が低い値であるため発熱体パターンの 2 本の並列化を考慮し、これよりヒータ抵抗 1 Ω を確保した。今回開発した高性能ヒーターの発熱体パターンの配置、及び寸法を Fig. 14 及び 15 に示す。

以上のように高性能ヒーターを開発したことにより A/F センサーの 20 秒以内での活性化が可能となった。

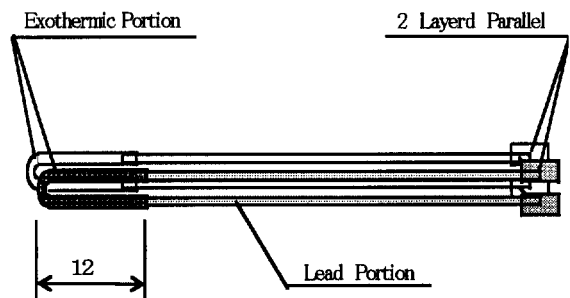


Fig. 14 Heater coil arrangement for silicon nitride heating element

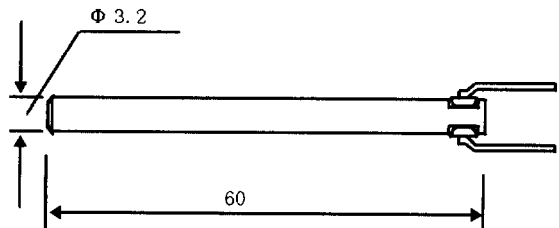


Fig. 15 Dimension of silicon nitride heater

### 3. 5 応答性

A/F センサの保護カバーは、ガソリンやオイル成分が素子に付着することに起因する素子の目詰まり防止（被毒防止）や、素子の保温性確保のため、側面の穴数を絞った二重カバーが必要とされる。一方、LEV 車両としてのエミッション目標を満足させるため、速い応答性が不可欠である。従って、耐被毒性・保温性と応答性の両立を図るために保護カバーの検討をガス流れ解析を用いて行った。その結果、センサの軸方向の流れを促進させることが効果的であることを解明し、Fig. 16 に示すような、側面に  $\Phi 1.5$  の 2 段 4 列の穴を設けたカバーの底部に  $\Phi 2$  の穴を追加した構造の保護カバーを用いることとした。

これにより、応答性は 100 ms を達成でき、LEV 規制を満足する制御性を得ることが可能となった。

ここで、応答性の定義は Fig. 17 に示すようにセンサの出力が 63% 変化するまでの時間とする。

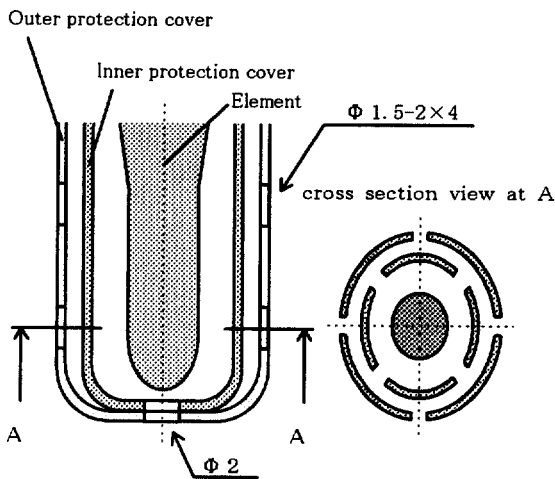


Fig. 16 Aperture arrangement of the protection cover for air fuel ratio sensor

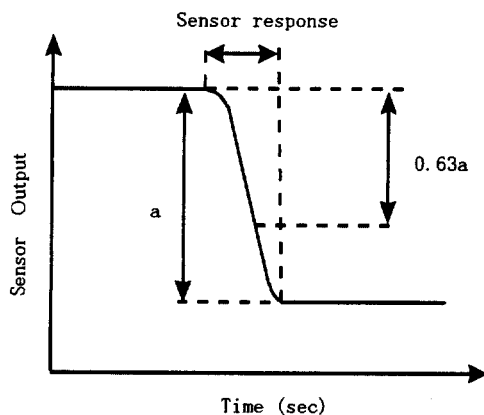


Fig. 17 Response definition of air fuel ratio sensor

### 3. 6 耐久性

A/F センサの耐久劣化としては、①高温による素子の電極劣化、②被毒によるコーティング層の目詰まりの二つが大きな要因として考えられる。(素子のモデルを Fig. 18 に示す。)

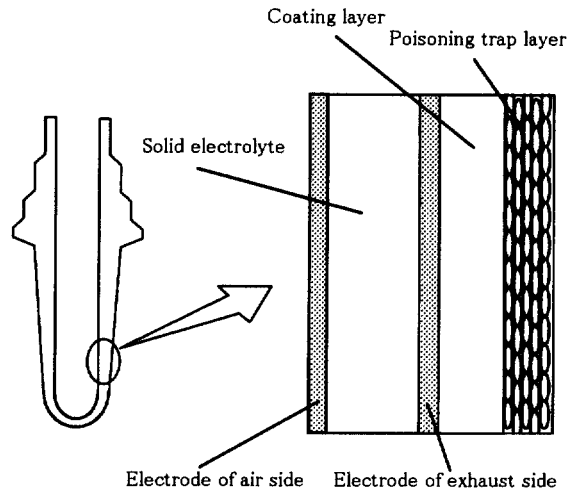


Fig. 18 Cross section of air fuel ratio sensor

理論空燃比制御領域拡大や排出ガステストモードの改訂などによる排出ガス温度の上昇や、清浄剤の添加等、ガソリンやオイルの多様化による緻密な被毒物（ガラス状被毒物）の発生など、A/F センサの使用環境は今後更に厳しくなる傾向にある。

電極劣化に対しては電極である白金の厚化により電極凝集を防止することを考案した。しかし、単純に厚化すると応答性が悪化してしまうので、電極を骨格電極と反応電極の複合電極とし、この問題を解決した。複合電極は、厚く形成した骨格電極により耐熱性を向上させ、従来レベルの厚さとした反応電極により応答性を確保させることで、耐熱性と応答性の両立を可能とした。

さらに、固体電解質表面に凹凸層を設けた。この凹凸層は粒度の粗い層であるため電極と固体電解質の密着性が向上し、これより、電極凝集を抑制することができた。

被毒に対しては、従来の多孔質のトラップ層ではガラス状の物質が付着した場合、目詰まりを生じ特性劣化を起こしてしまう。そこで、トラップ層の細孔径、気孔率を改良し、かつ、厚化することにより、非常に緻密なガラス状被毒物でもトラップすることができ、これにより、目詰まりの防止を可能とした。

これらにより、A/F センサの耐久性を大幅に向上させ、劣化防止を図ることができた。

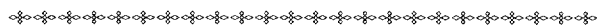
#### 4. ま と め

今回、LEV 規制に対応させた精密空燃比制御用として A/F センサを開発した。この A/F センサと O<sub>2</sub> センサを組み合わせて用いる精密空燃比制御システムは、より厳しくなる規制に十分対応可能であると考えられる。今後は、CO<sub>2</sub> 規制(燃費規制)等の強化により排出ガス規制と燃費を両立させることが課題であり、A/F センサへの期待はますます高まりつつある。自動車会社と共同で、この A/F センサを用いた精密空燃比制御システム及び、排出ガス浄化関連製品を開発・展開することで、地球環境保護に貢献したい。

最後に、本 A/F センサの開発に多大なる御協力を頂いたトヨタ自動車、日本自動車部品総合研究所及び、エンジン制御技術部、電子技術部、材料技術部、生産技術部、生産技術開発部等の関係各位に謝意を表してこの稿を終える。

#### ＜参 考 文 献＞

- 1) 水澤和哉：1997 ML LEV 車両用 A/F センサの開発 SAE(1997)
- 2) 青木圭一郎：LEV 車両用 A/F センサの開発 EAEC(1997)
- 3) 鈴木雅寿：自動車用 O<sub>2</sub> センサの最新技術 セラミックス 31 (1996) No. 4



#### ＜著 書＞



坂輪 年洋 (さかわ としひろ)  
セラミック技術部  
O<sub>2</sub> センサ、A/F センサの開発・設計業務に従事。



堀 誠 (ほり まこと)  
セラミック技術部  
排気センサ (O<sub>2</sub> センサ・A/F センサ等) の開発・設計に従事。



中村 靖紀 (なかむら やすき)  
トヨタ自動車株式会社  
第2電子技術部第21電子室  
酸素センサの技術開発、及び、エンジン・トランスミッション制御のシステム開発に従事。