

特集 気筒間の空燃比変動の検出性を向上させた積層A/Fセンサの開発*

Advanced Air-Fuel Ratio Sensor for improved detectability of Air-Fuel Ratio imbalance

菅沼孝敏 林下 剛 青木圭一郎 川井将司
Takatoshi SUGANUMA Go HAYASHITA Keiichiro AOKI Masashi KAWAI

野田浩史 中藤充伸
Hirofumi NODA Mitsunobu NAKATOU

Air-Fuel Ratio Sensor is requested high response. To improve the high frequency response of A/F Sensor, we clarified the necessity for the improvement of Diffusion layer and Catalyst layer in the sensing element by the sensor model simulator. As a result, the high frequency response was expanded twice by the sensor that optimized Diffusion layer and Catalyst layer.

Key words : Gasoline engine, Exhaust system, Sensor/Air-Fuel Ratio imbalance

1. はじめに

近年、各国で大気環境保全のためにエミッション規制強化、及びOBD (On Board Diagnostics) 規制の適用が進められている。このような環境問題に対応するため、ガソリンエンジンの排ガス浄化システム（以下、排気システム）では、複数の気筒の空燃比：Air-Fuel Ratio（以下、A/F）を気筒毎に推定して、各気筒の燃料噴射量を制御する気筒別空燃比制御技術が研究されている。

気筒毎の空燃比を検出する方法には、排気空燃比センサ（以下、A/Fセンサ）出力の単位時間当たりの変化量（傾き値）や、センサ出力の軌跡を利用したものが提案されており¹⁾、A/Fセンサに対して気筒毎の空燃比変動に追従できるレベルの応答性向上が求められている。

筆者らは2009年「新型積層A/Fセンサ開発」²⁾においてA/Fセンサの活性時間の短縮、およびA/F検出精度の向上について報告しているが、今回A/Fセンサの高応答化技術に関する解析を行い、その技術を応用したA/Fセンサを新たに開発したので紹介する。

2. 排気システムの概要と狙い

Fig. 1にガソリンエンジンにおける排気システム構成の一例を示す。三元触媒上流のA/Fセンサを用いて触媒に流入する排ガスのA/Fを制御し、触媒下流のO₂センサにて触媒状態を監視することで触媒の浄化効率を最大化している³⁾。

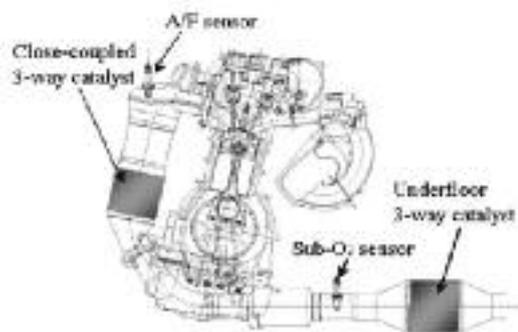


Fig. 1 Emission Control System of Gasoline Engine

3. A/Fセンサの構造と検出原理

Fig. 2に本開発で用いた限界電流式A/Fセンサの構造を示す。検知部はジルコニア固体電解質の両側に白

*自動車技術会の了解を得て、「2013年秋季大会学術講演会前刷集」No.156-13,280-20135855より一部加筆して転載

金電極を設け、排気側電極上に気体分子の拡散を制限する多孔質のセラミック（アルミナ）からなる拡散律速層を配置した構造になっている。

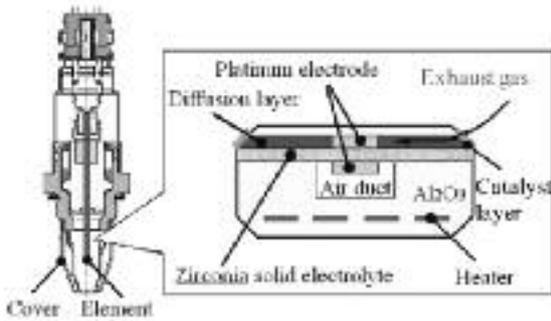


Fig. 2 Sectional view of planar A/F sensor

センサ出力電流はFig. 3に示すように、拡散律速層の働きによりセンサ電極間の印加電圧を増加させてもセンサ電流は増加せずに飽和する特性となる。空燃比の検出は、所定電圧（V₀）を印加したときに流れる電流が酸素濃度に比例することを利用して行っている。このときのセンサの出力（限界電流値：IL）は一般的に式（1）で表される。

$$I_L \approx D \frac{P \cdot S}{T \cdot l} \ln \left(\frac{1}{1 - P_{O_2}/P} \right) \dots (1)$$

D: diffusion coefficient S: electrode area P_{O₂}: partial pressure of oxygen
 P: total pressure T: temperature l: diffusion length

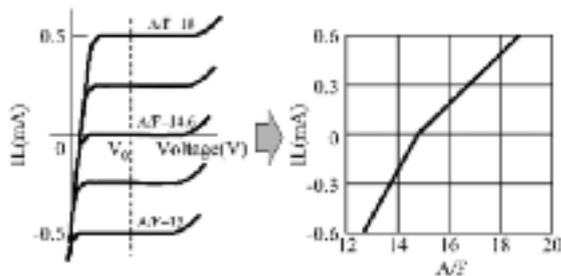


Fig. 3 Output characteristics of A/F sensor

また、このような限界電流式A/Fセンサでは排ガス中に存在する水素によりA/Fの検出誤差が生じる。Fig. 4に水素による検出誤差のメカニズムを示す。水素のように、酸素に比べて分子量の小さいガスは拡散速度が速く、拡散律速層を通過し電極に到達する量が多い。そのため電極近傍の水素濃度は実際の排ガス雰囲気よりも高くなり酸素分圧が低下し、センサ出力はリッチ（酸素不足状態）出力を示す。

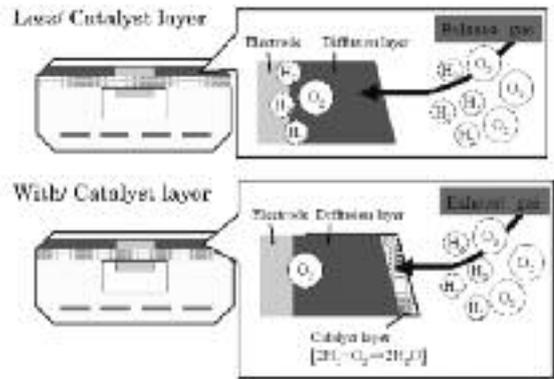


Fig. 4 Mechanism of Catalyst Layer function

水素による出力変動の低減のために、拡散律速層の表面に白金系の触媒層を設けており⁴⁾、拡散律速層の表面で水素の平衡化を促進することで水素の拡散速度差による出力変動の低減が可能となる。

4. 従来A/Fセンサの応答特性

直列4気筒2.5Lエンジンを用いて、各気筒のA/Fが均一となるように各気筒の噴射量を調整した場合と、特定の1気筒の噴射量を30%増量（リッチ）し、その他の気筒の噴射量をそれぞれ10%減量（リーン）したときのA/Fセンサ出力挙動をFig. 5に示す。各気筒のA/Fが均一な場合にはA/Fセンサの出力に変動は小さいが、A/F変化を与えた場合にはリッチ気筒のガスとリーン気筒のガスが順に混合されてA/Fセンサに到達するため、1サイクル間のA/Fセンサ出力は周期的に変動する。

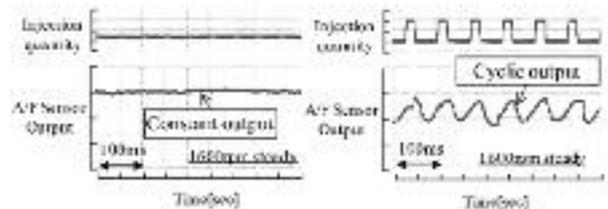


Fig. 5 Output waveform of A/F Sensor

これに対して、エンジン回転数を高にしたときのセンサ出力挙動をFig. 6に示す。高回転時にはセンサ応答遅れから、A/Fの変動を正確に出力できなくなる。

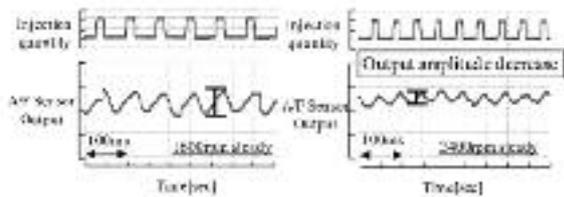


Fig. 6 Output waveform of A/F Sensor

Fig. 7に各気筒の噴射量変動の周波数とセンサ出力の振幅比（実際のA/F変化幅とA/Fセンサ出力変化の比）を示す。A/F変化の周波数が大きくなるにつれてA/Fセンサの振幅比が小さくなっている。本開発の応答特性の改善目標としては、実市場における車両使用域でのエンジン回転数を想定し、1000~5000rpmの領域（8~40Hz：以下，高周波域）で，種々のノイズや固体間ばらつきを考慮して0.4以上とする。

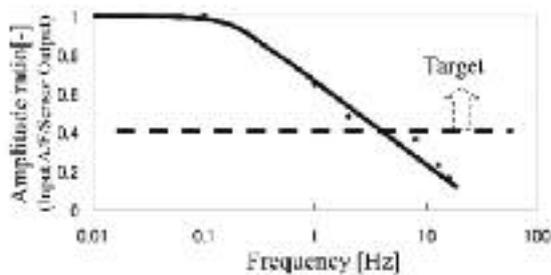


Fig. 7 Frequency response of A/F Sensor

5. シミュレーションを活用した⁵⁾ A/Fセンサ素子の応答解析

排ガスがA/Fセンサの電極表面に到達する経路はFig. 8に示すように，①排気管内を通り，②A/Fセンサの保護カバーを経てA/Fセンサ素子表面に到達し，さらにセンサ素子内では③センサを保護する役割を担うアルミナ多孔質層（トラップ層），④触媒層，⑤拡散律速層を通り，⑥電極の順となる。

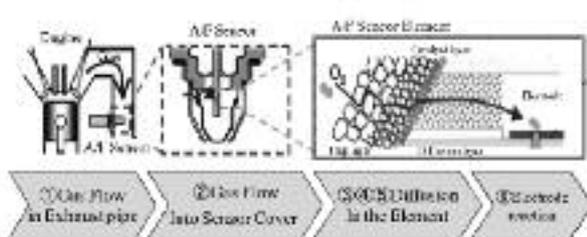


Fig. 8 Process of A/F Sensor Gas detection

この経路の中で①排気管内ガス流れ以外がセンサ設計によって改良可能な過程である。ただし②の保護カバーは素子を被水，被毒物質から保護する目的を主として最適形状を決定している。このため本開発の設計対象外とし，センサ素子部分に着目した改良を行った。A/Fセンサ素子改良のアプローチとして，センサの応答特性において律速となっている構成要素を解析し，改良指針を明らかにした。解析手法としては，A/Fセンサをモデル化しガスの拡散，吸脱着および反応を考慮したA/F応答シミュレータを構築し用いた。また，素子内部でのガス拡散速度については実際のセンサ構造を反映した3次元多孔質シミュレータによる計算結果を用いた。Fig. 9にモデル概要と計算の流れを示す。

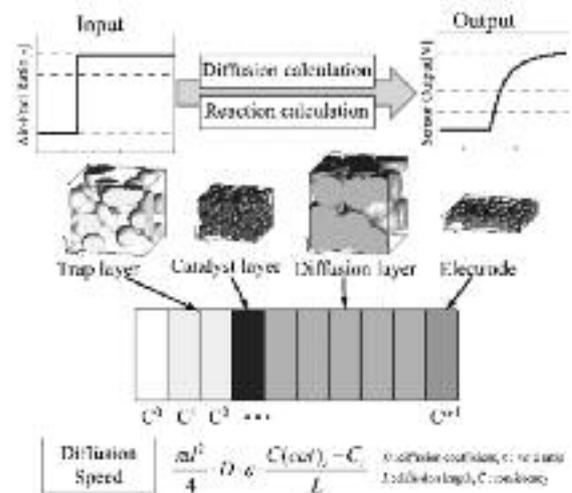


Fig. 9 Outline drawing of A/F Sensor Simulator

Fig. 10にシミュレーションにより求められた，A/Fセンサの総応答時間に占める構成要素毎の応答遅れ時間の割合を示す。A/Fセンサの応答時間のうち拡散律速層と触媒層での応答遅れ時間が全体の80%を占める結果となった。

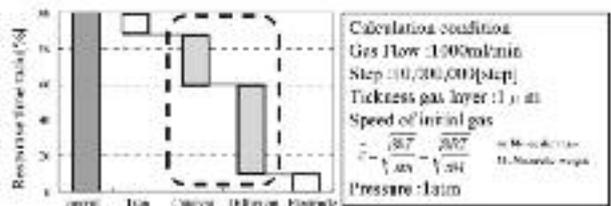


Fig. 10 Broken-down response lag

また，Fig. 11に3次元多孔質シミュレータによる各構成要素中のガス拡散速度の計算結果を示す。この結果から，A/Fセンサの応答特性の改善に対しては，拡散律速層におけるガス拡散速度の向上，および触媒層

排 ク
リ ー
ン 気 ン

の排ガスの吸脱着反応性の抑制が必要である。

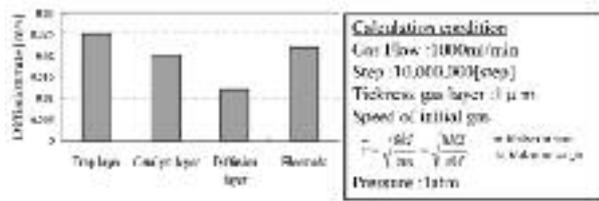


Fig. 11 Comparing of diffusion rate

6. センサ最適設計

A/Fセンサの応答特性の改善のため、拡散律速層と触媒層の最適設計を行った。

6.1 拡散律速層の設計

拡散律速層におけるガス拡散速度の向上には、拡散律速層におけるガスの拡散距離を短くすることが有効である。その手法としては拡散律速層自体の長さの縮小と拡散律速層の気孔率の拡大（以下、ポーラス化）が考えられるが、素子構造の大幅な変更を伴わない拡散律速層のポーラス化を選択した。前述したA/F応答シミュレータによる拡散律速層の気孔率を拡大した際の高周波入力に対するA/Fセンサ出力振幅比の計算結果をFig. 12に示す。拡散律速層の気孔率とA/Fセンサ出力振幅には良い比例関係があることがわかる。

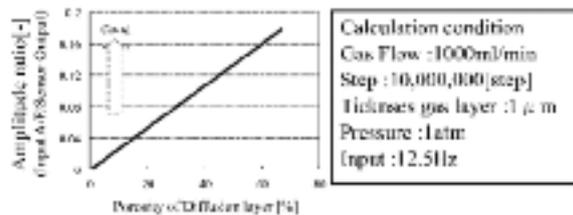


Fig. 12 Correlation of amplitude and porosity

また、拡散律速層は限界電流式A/Fセンサ出力特性を決定する重要な構成要素であるため、拡散律速層の設計に関しては、センサの出力特性への影響を考慮する必要がある。以下にその詳細を述べる。

前述の式(1)に示すように、限界電流式A/Fセンサの出力(IL)は拡散係数により変化する。ここで拡散係数(D)は分子拡散(D₀)とKnudsen拡散(D_k)の複合したものであり、それぞれ次式で表される。

$$D = \frac{D_0 + D_k}{D_0 \cdot D_k} \dots (2)$$

$$D_0 \propto \frac{T^{1.75}}{P} \rightarrow IL \propto T^{0.75} \dots (3)$$

$$D_k \propto T^{-0.5} \rightarrow IL \propto \frac{P}{T^{0.5}} \dots (4)$$

気孔率を大きくすると、分子拡散が支配的となり、式(1)と(3)からセンサ出力は圧力依存性が減少し、温度依存性が増加する。

Fig. 13に実際のA/Fセンサでの気孔率変化に伴う圧力依存性と温度依存性の変化率を示す。気孔率拡大に伴う温度依存性の悪化については、10%以内であればセンサの素子温度制御手法の改善により従来センサ同等の温度依存性を達成できると判断し、気孔率の設計狙い値を60%とした。

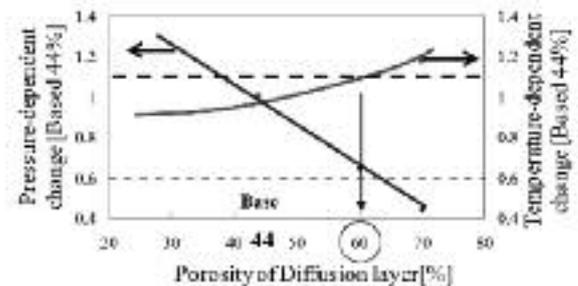


Fig. 13 Sensor Output change rate by Pressure and Temperature

次に拡散律速層の気孔率を大幅に拡大するための製造法について述べる。拡散律速層の気孔率向上を図る手法として一般的には多孔体を構成する材料（ここではアルミナ）の粒子径を変更することが挙げられる。しかし、A/Fセンサは拡散律速層と基材（ジルコニア）を1400℃以上の高温で一体焼成により形成するため、構成材料の粒子径を変更すると焼結挙動が変化し、安定的な拡散律速層を形成できないといった製造上の懸念がある。この課題を解決するため、多孔体を構成する材料（アルミナ）は従来センサで使用しているものから変更せず、その材料内に高温で焼失する、粒径分布が小さい樹脂球を均一に混ぜ合わせ、焼成後に樹脂球存在部分が気孔となる手段を利用し気孔率の拡大を図った。結果として、Fig. 14に示すように拡散律速層を構成する粒子を変更することなく、気孔率を目標である60%まで向上させた構造体を製造できた。

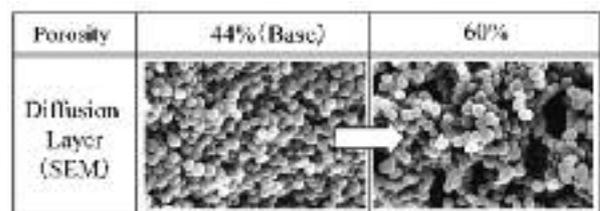


Fig. 14 Picture of Diffusion layer Structures

この拡散律速層を用いた実際のA/Fセンサの高周波入力に対する出力振幅比の評価結果をFig. 15に示す。

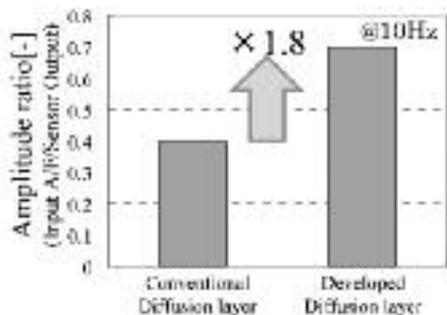


Fig. 15 Effect of Diffusion layer improvement

エンジンでの実験結果においてもシミュレーション計算結果と同等の従来センサ比1.8倍の出力振幅を確認した。

6.2 触媒層の設計

触媒層における高周波応答性を向上するため、触媒層のガス吸脱着反応性の低減を検討した。ただし、触媒層の機能として水素の平衡化（燃焼）能力を維持する必要がある、これら双方の特性を両立する触媒層の設計を行った。水素の平衡化能力については、A/Fセンサ評価装置にて水素濃度0.5%混合し理論空燃比とした基準ガスに対するA/F変動量（以下、ストイキ精度）を指標とした。

A/Fセンサの触媒層のガス吸脱着反応性低減の手段としてリッチガス（水素）の吸着エネルギーが高いPdとリーンガス（酸素）の吸着エネルギーが高いRhの比率を低減することが有効と考えた。しかしPdとRhはストイキ精度の劣化を抑制するため添加しており⁴⁾、経時劣化後もストイキ精度を担保することを考慮した比率の低減が必要である。また、ストイキ精度は触媒層の貴金属組成と総表面積が重要な設計要素となる。総表面積は貴金属の粒子径と添加量から決まるので、触媒層設計には貴金属組成、貴金属粒子径、添加量を最適化する必要がある。このうち貴金属粒子径は、使用環境における熱ストレスにより貴金属が凝集し変動することがわかっているため、実験により凝集を抑制できる粒子径を決定した。Fig. 16に熱ストレス試験での初期貴金属粒子径と耐久後の粒子径変化割合を示す。粒子径が0.5 μ m以上であれば凝集が抑制出来ることから初期粒子径として0.5 μ mを中心粒子径とした。

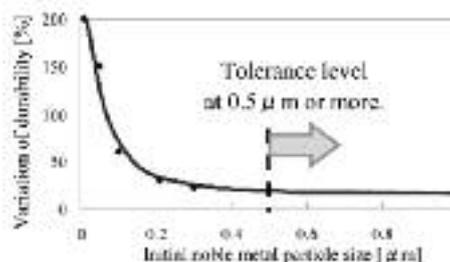


Fig. 16 Sensor output variation change by noble metals particle size

次に貴金属の添加量については、熱ストレスによる蒸散量の変動を考慮する必要があり、蒸散量に寄与する貴金属組成も同時に設計を行った。設計手法として貴金属の経時劣化予測シミュレータを用いた。このシミュレータは、貴金属組成による蒸気圧、粒子径、添加量、熱負荷（温度、排ガスA/F、時間）を入力することで、出力として経時劣化後の粒子径、添加量を求めることができる。シミュレーション結果より、ストイキ精度を確保可能で、かつPd及びRhの比率を最低限まで低減可能な貴金属組成としてはPdを10wt.%以上、Rhを2wt.%以上と設定し、製造上の公差を考慮して中心組成を決定した。

改良した触媒層を用いたA/Fセンサの高周波応答性をFig. 17に示す。

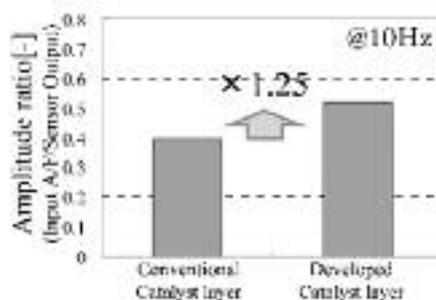


Fig. 17 Effect of Catalyst layer development

実機評価において従来触媒層比1.25倍の出力振幅が得られた。またFig. 18に改良前後での熱ストレス耐久におけるストイキ精度の評価結果を示す。改良した触媒層においても従来同等のストイキ精度が耐久後も維持されていることを検証できた。

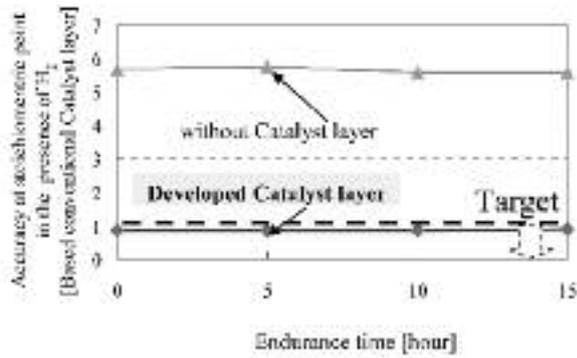


Fig. 18 Result of improved Catalyst layer in the Engine endurance

7. センサ改良による効果

Fig. 19に改良したA/Fセンサを用いた噴射量変動時のセンサ出力波形と高周波応答性を示す。拡散律速層ポーラス化、触媒層改良により出力振幅比が従来に比べ2倍向上した。

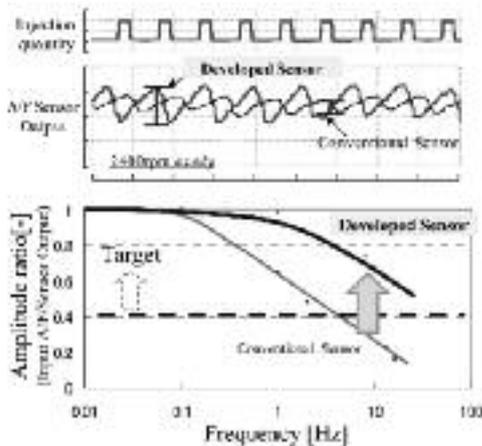


Fig. 19 Effect of Sensor improvement

またFig. 20に示すように、改良したA/Fセンサは拡散律速層をポーラス化したことによってセンサ出力の圧力依存性が従来比で約40%低減した。これにより高地などの低気圧地域や、今後の過給ダウンサイジングによる高圧環境下においてA/F検出ばらつきが抑制でき、より高精度な空燃比制御が可能となると考えられる。

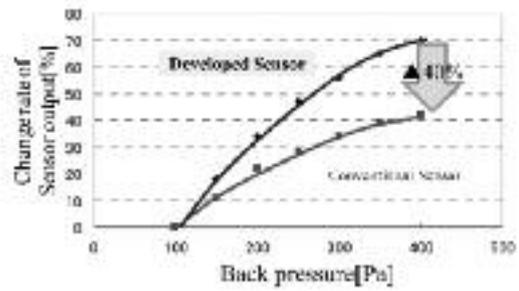


Fig. 20 Pressure dependence of A/F Sensor

8. まとめ

1. A/Fセンサのガス拡散、吸着、反応をモデル化したシミュレータによる解析を行い、A/Fセンサ素子の応答性向上に対し、拡散律速層と触媒層の寄与が高いことを明らかにした。
2. 拡散律速層についてはポーラス化（気孔率60%）することで応答特性を改善し、この製造手法として樹脂玉による気孔率制御を達成した。
3. 触媒層については、ガス吸脱着エネルギーの低減と耐久変動抑制の両立を検討し、最適貴金属組成と最適表面積を明確にした。
4. 上記技術を応用した積層A/Fセンサにて高周波応答性が従来センサ比で2倍向上した。

本センサは2012年12月から製品化し量産車に順次搭載している。

9. 謝辞

A/Fセンサのモデル解析を進めるにあたり、多大なご協力をいただいた東北大学 宮本研究室の関係者各位に深く感謝いたします。

<参考文献>

- 1) Igor Anilovich et al, Air/fuel imbalance detection system and method, United States Patent, US7152594, GM Global Technology Operations, Inc.
- 2) 佐々木敬規ほか：新型積層A/Fセンサ開発，09年自動車技術会秋季大会 学術講演会，123-20095724
- 3) 藤原孝彦ほか：触媒貴金属低減時のNOx排出抑制技術開発，自動車技術会論文集 Vol.40, No.2,

20094181

- 4) 山本真宏ほか：触媒付き積層A/Fセンサの開発，
10年自動車技術会秋季大会 学術講演会，177-
20105542
- 5) 伊藤みほ，宮本明ほか：自動車用酸素センサ電極
表面反応に関する量子化学的研究，06年，東北大
学大学院工学研究科応用化学専攻博士論文

<著 者>



菅沼 孝敏
(すがぬま たかとし)
セラミック技術部
排気センサの設計開発に
従事



林下 剛
(はやした ごう)
トヨタ自動車(株)
排気システムの設計に従事



青木 圭一郎
(あおき けいいちろう)
トヨタ自動車(株)
排気システムの設計に従事



川井 将司
(かわい まさし)
トヨタ自動車(株)
排気システムの設計に従事



野田 浩史
(のだ ひろふみ)
セラミック技術部
排気センサの設計開発に
従事



中藤 充伸
(なかとう みつのぶ)
(株)日本自動車部品総合
研究所 博士(工学)
排気センサの設計開発に
従事