

「ACCORD SULEV」用極超低エミッションシステム

Super Ultra Low Emission System for ACCORD SULEV

北 川 浩*

Hiroshi KITAGAWA

岡 松 和 則*

Kazunori OKAMATSU

三 部 敏 宏*

Toshihiro MIBE

安 井 裕 司*

Yuji YASUI

要 旨

合衆国カリフォルニア州の LEV-II SULEV(Super Ultra Low Emission Vehicle)規制を満足する ACCORD SULEV を開発した。採用したエミッションシステムは、触媒を床下のみ配置し、制御技術によって極超低排ガスエミッションを実現している点に特徴がある。新開発の三元触媒は、貴金属の担持量をACCORD ULEV⁽¹⁾同等としながら、高浄化率と低排気抵抗を実現している。

床下のみ触媒構成で SULEV 規制を満足するために、触媒活性前については、始動時に吸入空気量と点火時期の制御によって排ガス温度上昇を図り、触媒の早期活性を更に促進させ、始動後の希薄燃焼を従来より早期に行う制御を開発した。

また触媒活性後についても、新しい Secondary O₂ Feedback Control Systemを開発した。このシステムは触媒の動的変化をリアルタイムに同定し、触媒後のセンサ出力変化を予測する機構を持ったスライディングモード制御による、非常に高精度な燃料制御である。

これらの技術により、ACCORD ULEVに比較してエンジン出力特性はほとんど差の無いものになりながら、現在最も厳しいとされる SULEV 規制を満たすことが可能になった。

ABSTRACT

Honda became the first company in the world to sell a gasoline-powered vehicle that satisfied California's (LEV-II) SULEV regulations. The engine system powering ACCORD SULEV is characterized by using only an under-floor catalyst due to the sophisticated control. The improved catalyst is realized to maximize the high conversion ratio and to minimize the increase in exhaust gas pressure.

To satisfy SULEV standards using the under floor only catalyst, we developed technologies to rapidly light-off the catalyst and to obtain stable combustion at even leaner Air/Fuel ratios when the engine is cold and the catalyst is inactive. Also, in order to further improve the conversion performance of the catalyst once it is active, we developed a New Secondary O₂ Feedback Control System. This is an extremely high precision system that utilizes an adaptive sliding mode controller to identify various catalyst models in real time and predict the post-catalyst HEGO sensor output. The implementation of these technologies makes it possible to achieve the most rigorous SULEV standards, with full load performance equivalent to our ULEV vehicle.

1. はじめに

大気汚染問題の深刻化から環境問題への取り組みが重要になってきている。自動車においても例外ではなく、排ガス規制強化は世界的に加速し、合衆国カリフォルニア州においては 2004 年から現行法規より厳しい LEV-II 法規の導入が決定されている。

Table 1 は、LEV-II 法規のカテゴリ別エミッション規制値を示す。耐久保証要件も見直されており、120kmile 耐久後エミッション保証が要求されることとなった。

*栃木研究所

Table 1 LEV-II emission standards

(g/mile)

Durability	Category	NMOG	CO	NOx	HCHO
50 kmile	LEV	0.075	3.4	0.05	0.015
	ULEV	0.040	1.7	0.05	0.008
120 kmile	LEV	0.090	4.2	0.07	0.018
	ULEV	0.055	2.1	0.07	0.011
	SULEV	0.010	1.0	0.02	0.004

Fig.1 に現行のLEV-I 規制とLEV-II 規制におけるNMOG (Non Methane Organic Gas)規制値を示す。LEV-II 規制には新たにSULEV カテゴリーが追加された。SULEV 規制値は、LEV-I ULEV(Ultra Low Emission Vehicle)規制値の1/5以下の値になっており、耐久保証要件も50kmile 走行後から120kmile 走行後の排ガスエミッション保証となり、非常に厳しい規制になっている。Fig.2 にLEV-I 規制とLEV-II 規制におけるNOxの規制値を示す。LEV-II では、NOxの規制強化がされており、SULEV 規制値は、LEV-I ULEVの1/10 以下の値になっている。

今回、ACCORD ULEV をベースにSULEV 規制を満足する世界で最もクリーンな極超低排ガスエミッション車を開発した。本稿では、ACCORD SULEV に採用した排ガスエミッションシステムについて解説する。

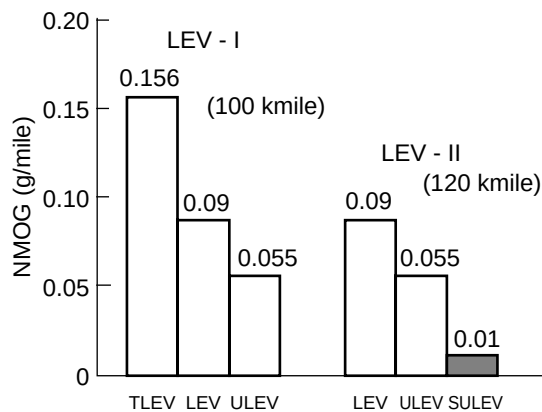


Fig.1 LEV-I and LEV-II NMOG regulations

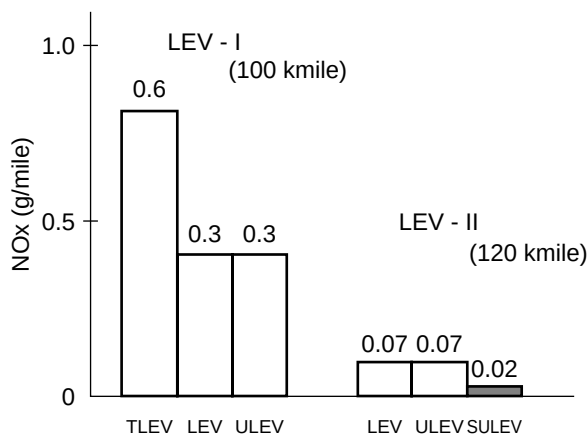


Fig.2 LEV-I and LEV-II NOx regulations

2. SULEV 達成の技術コンセプト

SULEV 技術開発にあたり、我々は現行量産されているACCORD ULEVの排ガスエミッション性能を再検証し、更なる低減化を図るターゲットを明らかにした。

Fig.3 にACCORD ULEVの排ガスエミッション測定を行

い、FTP(Federal Test Procedure)サイクルを3つに区分した時の、各区間の排出エミッション値を示す。区間Aはエンジン始動から最初の発進まで、区間Bはその後からLA-4ドライビングサイクルエンジン停止まで、区間Cは、ホットソーク後の再始動から終了までである。

区間Aの排出量は、NMHC(Non Methane Hydrocarbon)とNOx共にSULEVの規制値の2倍以上になってしまう。この区間は、冷機時の始動と触媒の暖機途中にある。従って、触媒が十分に機能しないこの間は、エンジンの排出するエミッション自体を低減する技術と、触媒の昇温を促し早期活性をさせる技術が必要となる。区間Bの排出量は、SULEV 規制値と比較すると、NMHCの排出量は下回っているものの、NOxの排出量はほぼ同じである。どちらの成分も、区間Aの低減だけではなく、この区間の排出量もまた更なる低減を図らなければ、SULEV規制値を満足することはできないことが明らかになった。この区間では、触媒はすでに十分に活性しているので、触媒の浄化率を更に高める新たな制御技術開発を課題とした。

区間Cは暖機された状態であるので、区間A、Bに対応

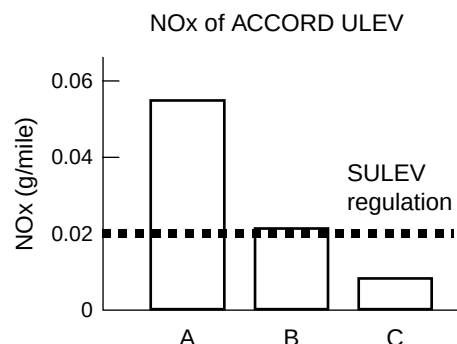
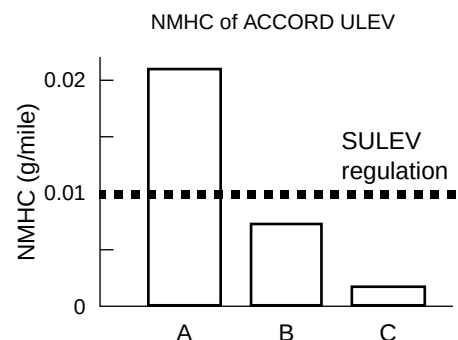
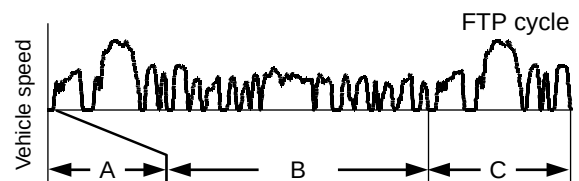


Fig.3 ACCORD ULEV Emissions at A-C period

した技術ができれば結果的に排出量は十分低減できると考えた。

上記の課題を解決するための手法には、さまざまなアプローチ⁽²⁾があるが、開発にあたって ACCORD SULEV の基本コンセプトを「Simple」と定めた。これは、1997年9月に米国カリフォルニア州の LEV-I ULEV 規制を満足するガソリン車として発売した ACCORD ULEV のシステムコンセプトを踏襲するものである。この ACCORD ULEV システムは、VTEC-Eと高精度空燃費制御システムをコアとし、三元触媒は床下配置のみという「Simple」なシステム構成であった。

SULEV の厳しいエミッション規制を満足するためには、直下触媒やハイドロカーボントラップなどを付加する手法も考えられたがコストアップとエンジン出力損失を招くことが懸念される。本システムは、触媒担体の高密度化、薄壁化によって早期活性、高浄化率を達成した三元触媒を床下のみに配置し、その触媒の性能を最大限に引き出す制御技術を開発することで、排気抵抗の低い安価なシステムとした。

Fig.4 に SULEV を達成したシステムの全体構成を示す。図中の(a)～(h)は、既に ACCORD ULEV に採用されているシステムである。

ACCORD SULEV システムとして新たに採用した技術を以下に示す。

- ・ 高密度・薄壁化された触媒担体(1200 セル・2.0 ミル)。(貴金属の担持量は ACCORD ULEV と同等。)
- ・ 触媒の早期活性化を図るための触媒急速暖機制御
- ・ アシスト・エア量を増加させた改良 AAI(Air Assisted

Injector)

- ・ ACCORD ULEV より更にリーン化を図った始動後希薄燃焼制御
- ・ 触媒の浄化性能を最大限に引き出す、新 Secondary O₂ フィードバック制御:PRISM(Prediction and Identification type Sliding Mode Control)

3. 高密度・薄壁化三元触媒

触媒の浄化性能を向上させるためには、担体の高セル化と薄壁化が効果的であることはすでに知られている。

今回開発した1200セル、2.0ミル担体のセル密度と表面積及び嵩密度の関係を Fig.5 に示す。ULEVで採用した600セル、4.3ミル担体に対し表面積は、50%増加し、これにより浄化性能が向上した。

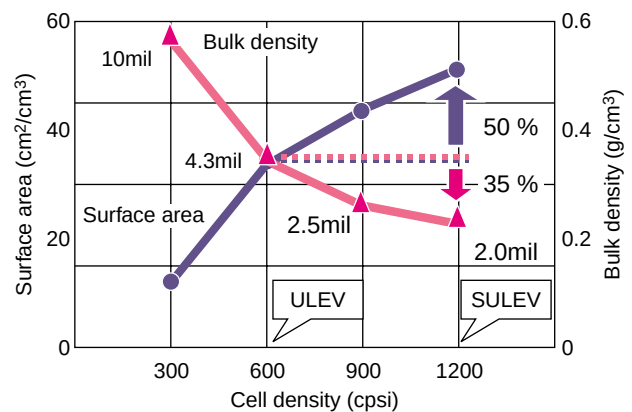


Fig.5 Cell density, bulk density and surface area

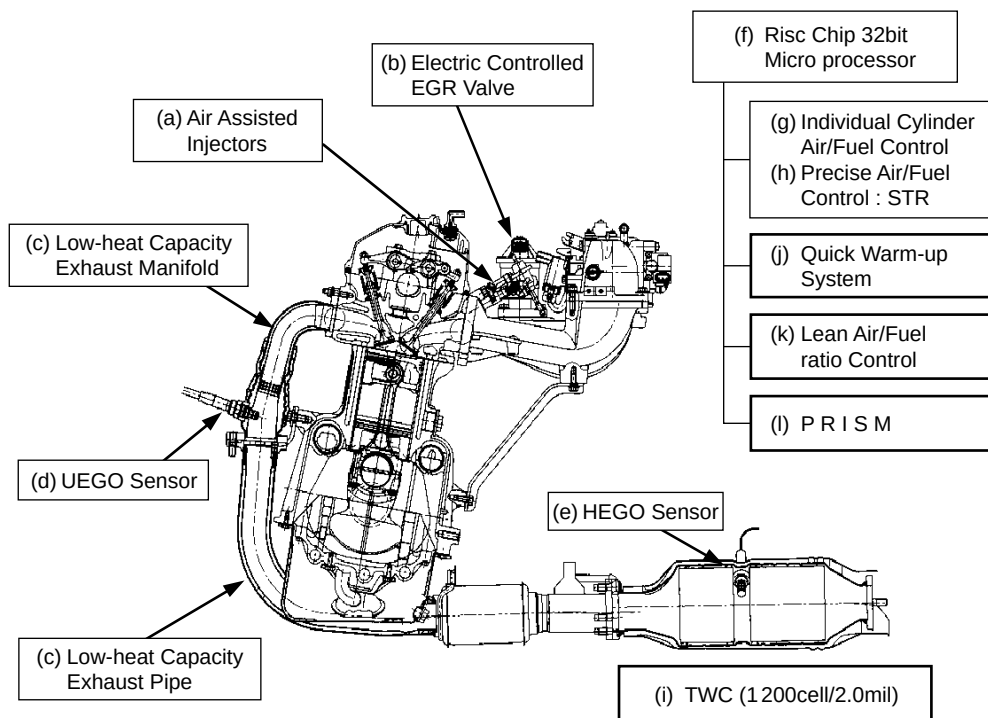


Fig.4 Overview of SULEV System

また、かさ密度では35%低減し、これによって触媒のライトオフ性能の向上が図れた。

Fig.6にキャニング構造を示す。従来手法では上下に分割したケースで担体と保持材を包み込み固定するクラムシェルタイプであった。しかし、この構造ではケースの内径が一定で担体や保持材の径方向のバラツキによってキャニング時に発生する面圧分布が不均一になるため、15 kgm/cm²以上のアイソスタティック強度の担体を採用していた。

今回、ケースを円筒状に巻いて担体と保持材を固定するローリングタイプを新たに採用した。この方法では、キャニング時に発生する面圧を円周方向に均一化することができ、担体径バラツキに合わせてケース内径を設定することが可能である。合わせて、保持材の選定および製造方法の改良を行い、キャニング時の面圧を5kgm/cm²以下にすることができ、アイソスタティック強度の低い1200セル、2.0ミル担体でもキャニングを可能にした。

また、セル数増加によって排気圧力損失増大によりエンジン出力低下が懸念されるが、薄壁化によって軽減することができた。

Fig.7にACCORD ULEVとACCORD SULEVのエンジンの出力特性を示す。4000rpm以下においては馬力・トルク共にULEVと同等であり、1200セル触媒の影響は無い。

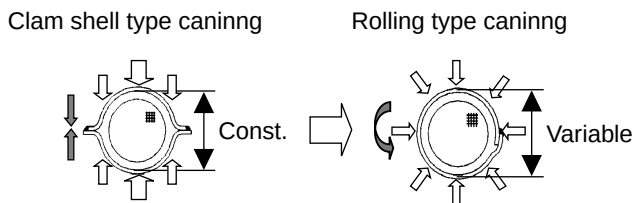


Fig.6 Canning type

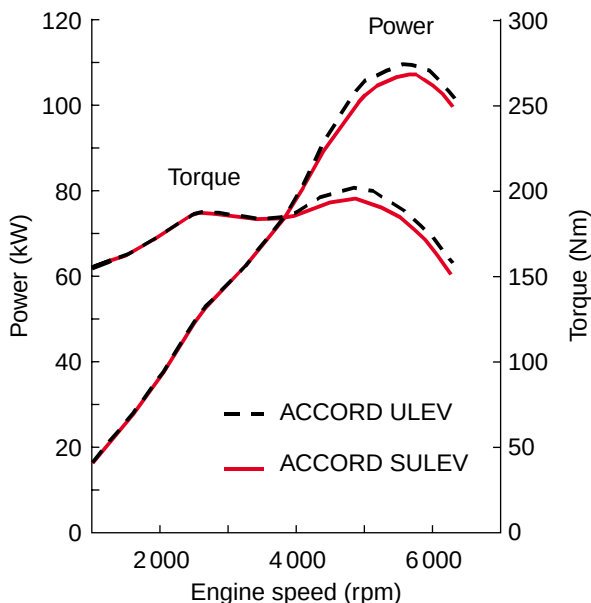


Fig.7 Characteristics of power and torque

最大出力における低下は、馬力で2kW、トルクで5Nmと極わずかである。

Fig.8はLA-4モードにおける排気エミッション測定結果である。同じ車両に600セル、4.3ミル(100kmile 耐久走行)と1200セル、2.0ミル(120kmile 耐久走行)を装着し測定を行った。高セル化、薄壁化による効果によりNMOGでは31%の低減、NOxでは48%の低減となった。ULEVの量産品はパラジウム触媒(Pd, 330 g/ft³)であるが、SULEV車に採用した物はトリメタル触媒(Pt/Pd/Rh=1:15:1 330g/ft³)である。これはNOx規制強化に対応するためである。

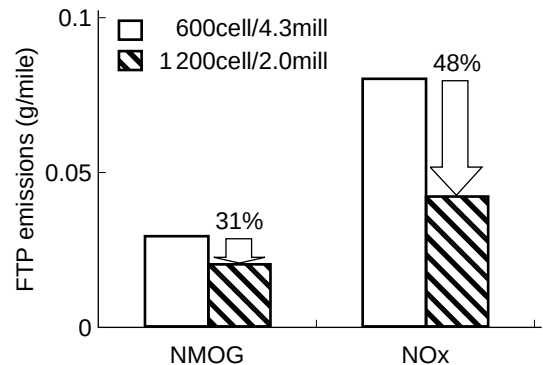


Fig.8 Comparison of emissions between 600 cell and 1200 cell catalysts (FTP cycle)

4. 始動時、始動直後エミッション低減技術

触媒担体の高密度化、薄壁化によって大幅な排気エミッション低減が可能になったが、SULEV規制値を満足することはできなかったため、エンジン制御による低減を行った。始動時においては、触媒の早期活性化と、始動後希薄燃焼技術の改良を行った。

4.1. 触媒急速暖機システム

排ガス温度は、エンジンが始動した直後から上昇し始める、三元触媒はこの排気エネルギーを受けて温度が上昇し、活性度合いを高めていく。その際点火時期を遅角させることが、触媒の昇温に有効であることは一般的に知られている。エンジンの冷機始動時(三元触媒の未活性状態)にRACV(Rotary Air Control Valve)を利用して吸入空気量を制御し、同時に点火時期を制御するシステム(以下 Quick Warm-up System⁽³⁾と呼ぶ)を構成した。

Fig.9に制御概要を示す。図の横軸はそれぞれ時間を表す。縦軸は上段からRACVの開度、エンジン回転数、点火時期を表す。Quick Warm-up Systemは、エンジン始動後のアイドル中にRACVを使い(フィードフォワード制御で)多量の吸入空気を供給する。エンジン回転が所定値を上回ると点火時期のPI(Proportional+Integral)フィードバック制御を開始する。この制御は、目標エンジン回転を維持する様に

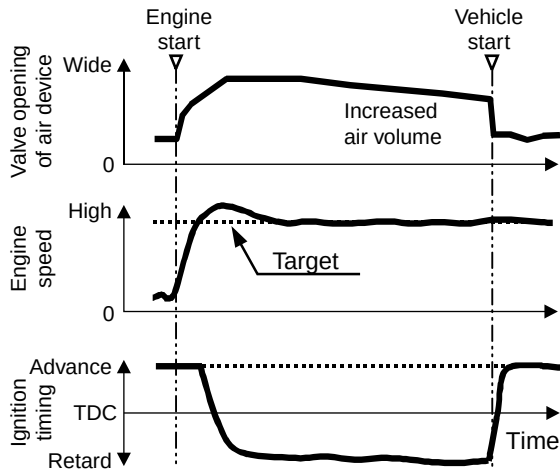


Fig.9 Ignition feedback control for Quick Warm-up System

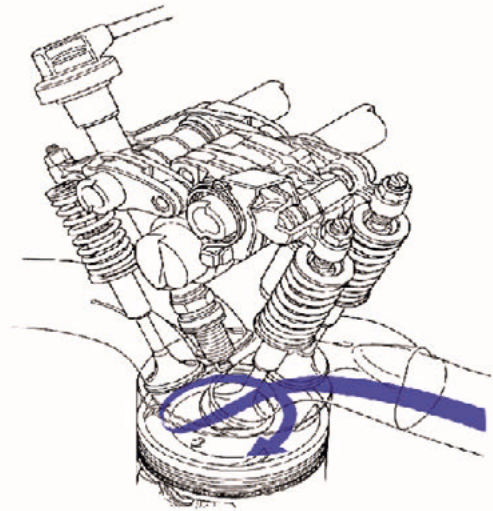


Fig.11 VTEC-E system

点火時期制御され、図のように吸入空気を増大させると点火時期は、遅角側に制御され、目標エンジン回転を維持する点火時期に収束する。Fig.10 に従来の ULEV システムと SULEV に採用した Quick Warm-up System の点火時期制御と排気温度の差異を示す。始動後の20秒間で従来の制御に対し 240℃の排気温度昇温効果を得ている。この結果、触媒を急速活性化させることが可能になった。

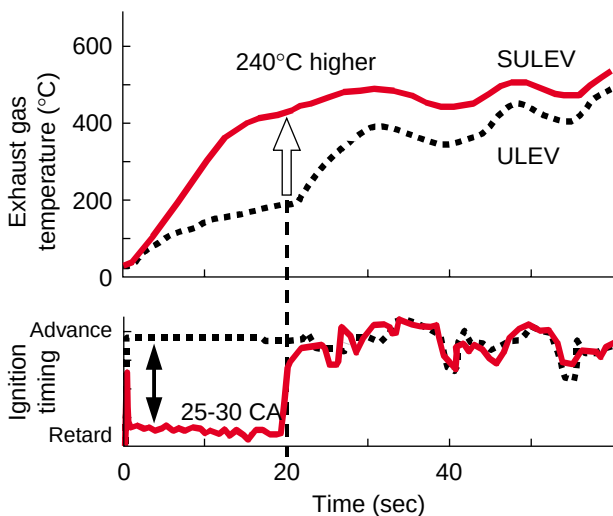


Fig.10 Effect of Quick Warm-up System at start-up period of FTP cycle

4.2. 始動後希薄燃焼制御の改良

Fig.11 に、本エンジン(VTEC-E システム)の吸気の流れを示す。吸気弁を片側のみ開くことによりスワールを発生させ、始動後から、空燃比をリーン制御することが可能となっている。今回、噴射燃料の微粒化の促進と Quick Warm-up System によって、始動後希薄燃焼制御をさらに早期から安定して行うことが可能になった。

Fig.12 にエアアシストインジェクタにより噴射された燃

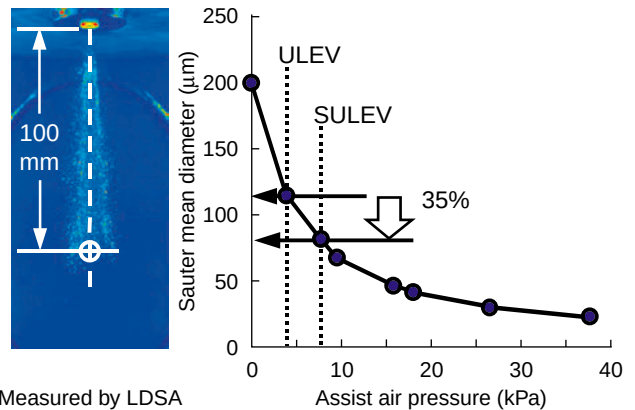


Fig.12 Air Assisted injection Spray Characteristics

料のザウタ平均粒径(LDSA 計測法)を示す。測定点はインジェクタの鉛直方向に 100mm の点である。

ULEV で採用していたインジェクタに対しアシストエア通路の改良により圧力損失を低減し 35%の微粒化を図っている。

Quick Warm-up Systemは触媒早期活性化効果以外にも有用である。Fig.13 に FTP サイクルの始動時における ULEV システムと Quick Warm-up System の吸気管内圧力とその時の始動後希薄燃焼のようすを示す。このシステムは始動と共に大量の空気を送り込むため、従来よりも高負荷域でエンジンが運転され、燃焼が安定する。この結果、Fig.13 下図のように始動後の希薄燃焼領域が拡大し燃焼改善も図られている。

Fig.14 に FTP サイクルにおける始動後 60 秒間の SULEV システムと ULEV システムのエミッション比較を示す。図の上段はトータル hidrocarbon, 中段は NOx の排出量である。前述の Quick Warm-up System と希薄燃焼領域の拡大により、各成分共、劇的に排出量が低くなっている。これは、冷機時のエンジンが排出するエミッションを低く

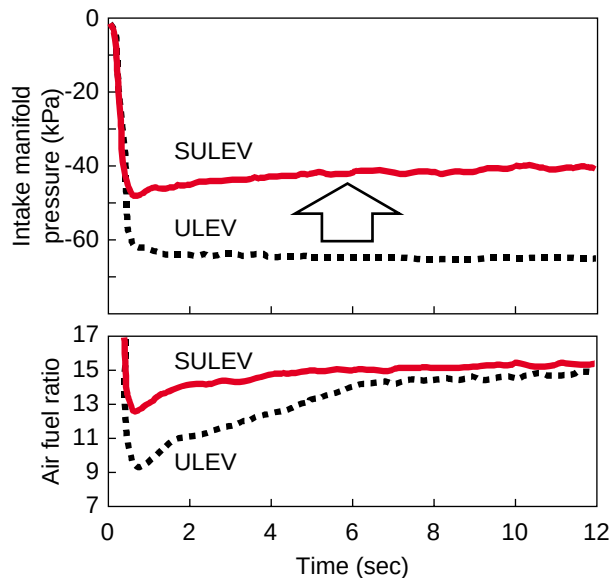


Fig.13 Lean air fuel control at start-up period of FTP cycle

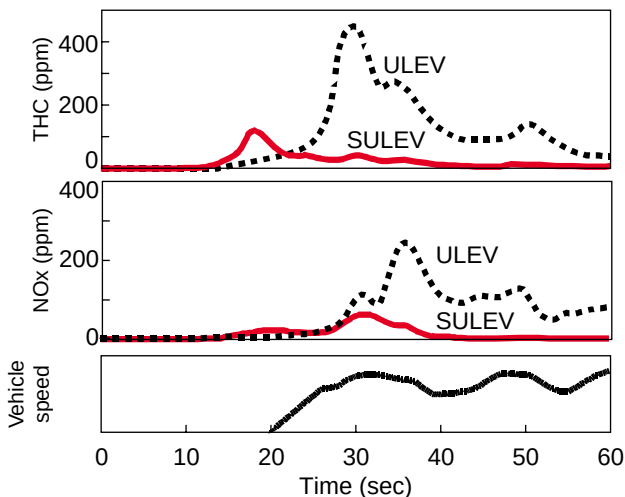


Fig.14 Emissions reduction effects of SULEV system at start-up of FTP cycle

押さえていることと、触媒の活性が著しく速いためである。また、ULEV システムに比べ排出量のピークがより早く現れるのは、Quick Warm-up Systemに依って始動後から大量の空気が送り込まれるためである。

4.3. 実車テスト結果

Fig.15 に FTP サイクルの CT フェーズのエミッション排出量を示す。CTフェーズにおけるエミッションは始動後の 20 秒間の排出量でほとんどを占める。

Fig.14 に見られる大幅な排出量低減によって、ULEV システムに対し SULEV システムでは、NMOG で 70%、NOx で 35% の低減を達成している。SULEV の制御システムは VTEC-E と三元触媒の持つポテンシャルを最大限に引き出しているといえる。

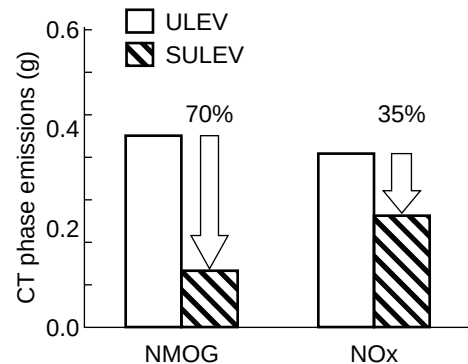


Fig.15 Emissions reduction effects of SULEV system

5. 三元触媒活性後エミッション低減技術

1200 セル、2.0 ミル(高密度、薄壁化)触媒を採用することで高浄化率を得ることができたが、SULEV規制を満足するためには、触媒活性後も更に低減を図らなければならない。従来より、三元触媒の浄化性能を引き出すために、触媒前後に配置した空燃比センサによる制御システムが用いられてきた。ACCORD ULEVも同様にUEGOセンサ(Universal Exhaust Gas Oxygen Sensor)を使いフィードバック制御を行い、触媒後のHEGOセンサ(Heated Exhaust Gas Oxygen Sensor)出力に応じて空燃比制御を修正する(この様なシステムを一般的に Secondary O₂ Feedback Control System と呼ぶ)手法を取っている。これは三元触媒の浄化性能を引き出すためである。

今回、ACCORD ULEVシステムよりも触媒の浄化性能をさらに引き上げる制御技術を開発した。その高精度制御の目的は、エンジン排気を触媒に最適な空燃比に制御することであるが、空燃比制御をするインジェクタが燃料を噴射した量が触媒後のHEGOセンサで検出されるまでには、非常に大きな無駄時間が存在しており、これを考慮して制御する必要があった。また触媒は自動車の走行距離によって変化していく特性変化も常に把握する必要があった。Fig.16 に新しいフィードバックシステムの概要図を示す。本システムは、ACCORD ULEV で採用された STR(Self-Tuning Regulator)^{(4)~(6)}に対して空燃比制御の目標値演算部分を新たにしている。この演算部は、リアルタイム同定器(Identifier)、状態予測器(Predictor)、制御器(Sliding Mode Controller)の3つのモジュールから成っている。システム名は“Prediction and Identification type Sliding Mode Control”の頭文字を取って PRISM⁽⁷⁾⁽⁸⁾と呼ぶこととした。

リアルタイム同定器:その内部に触媒モデル(無駄時間とローパスフィルタから成る数値モデル)を有しており、触媒の前後のセンサ出力から触媒モデルの動特性をリアルタイムで同定を行う。これによって触媒の特性変化をエンジンの運転中にリアルタイムでとりこむことが可能になる。

状態予測器:リアルタイム同定器によって算出された触

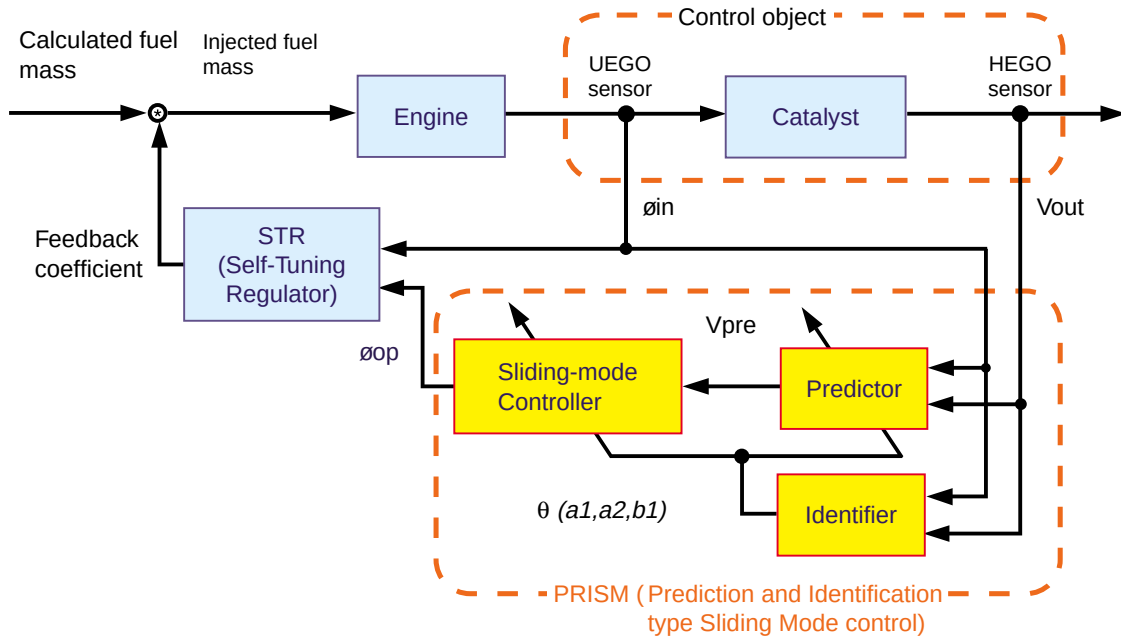


Fig.16 Overview of SULEV Feedback-System

媒モデルのパラメータ $\theta (a1, a2, b1)$ と触媒前後のセンサ出力から、触媒後HEGOセンサ出力の未来値を予測演算する。これによってアクチュエータから触媒後のセンサまでの長い無駄時間を補償することになり制御性能を向上させることができる。

制御器：適応スライディングモード制御⁽⁹⁾を採用しており高いロバスト性を有している。

Fig.17 にスライディングモードの動作原理を示す。PRISMにおけるスライディングモード制御器は、HEGOセンサ出力の目標値からの偏差を軸とする位相平面においてセンサ出力 VO_2 を切換線に拘束し、原点に向かって滑り落ちていく状態(スライディング状態)を作り出す制御である。 VO_2 を目標値に制定する様に、制御器が、触媒前空燃比フィードバックを行っているSTR(Self Tuning Regulator)の目標空燃比を算出する。

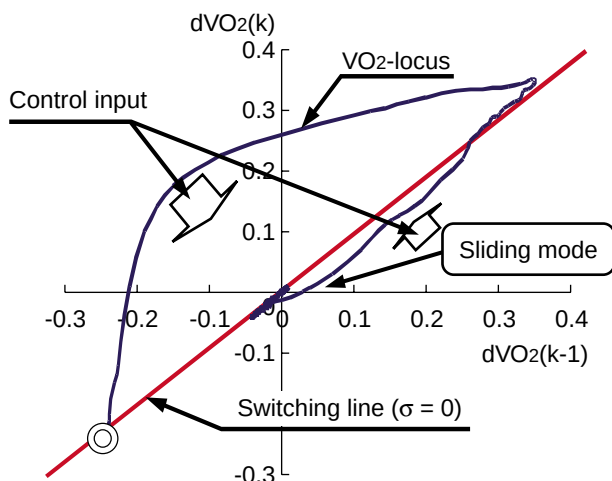


Fig.17 VO_2 -locus in Phase plane

Fig.18 に FTP サイクル中の PRISM の制御状態を示す。触媒後のHEGOセンサ出力は0 V(リーン雰囲気)または1 V(リッチ雰囲気)に張り付くことなく目標値に良く制御されている。これは、三元触媒内の雰囲気常在に理論空燃比近傍にあることを示しており、PRISMが三元触媒にとって最適な空燃比を高精度に制御していることがわかる。

この時のスライディングモードの制御状態をFig.19に示す。HEGO センサ出力 VO_2 が dVO_2 の位相平面にある切り替え関数上に良く拘束されているのが分かる。

Fig.20 に1200セル、2.0ミル触媒を使った場合のULEVシステムとPRISMによるエミッション結果の比較を示す。NMOGについては20%の低減、 NO_x については48%の低減効果があり、特に空燃比制御のパラ付きに敏感な NO_x に対し効果的であると言える。PRISMによって触媒暖機後においても更に浄化率を高めることが可能になった。

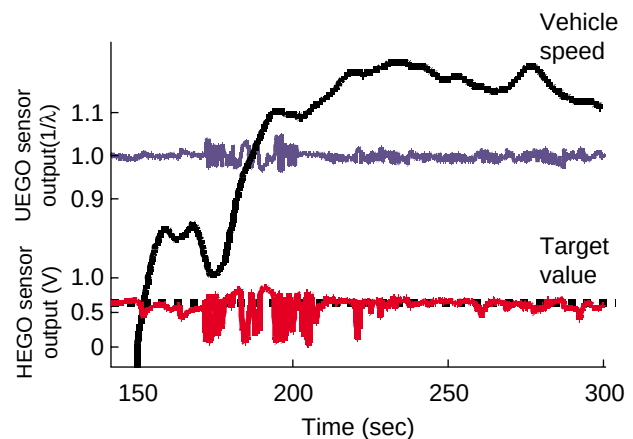


Fig.18 Improved controllability of secondary HEGO sensor output

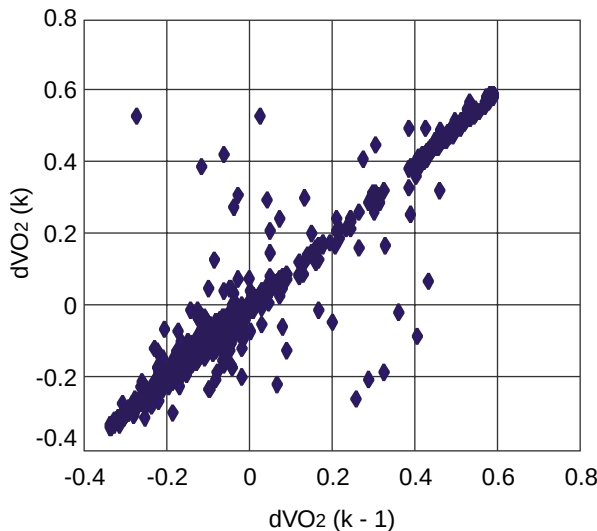


Fig.19 Secondary HEGO sensor output in phase plane (LA-4 2ND hill)

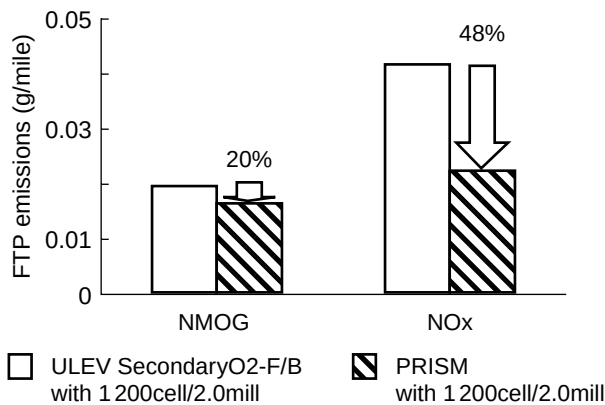


Fig.20 Comparison of ULEV's Secondary O2 Feedback and PRISM

6. まとめ

各技術について説明してきたが、これらを組み合わせることによって LEV-II SULEV 規制に適合した ACCORD SULEVを開発することができた。Table 2に達成したエミッション値を示す。

本システムは当初設定したコンセプト通り 特別なハードウェアを付加すること無く、非常に「Simple」な構成とすることができた。本システムを搭載することにより ACCORD

Table 2 ACCORD SULEV emissions
In-house data

	NMOG	CO	NOx
STD Values	0.010	1.00	0.020
Achieved Values	0.0084	0.16	0.016

(g/mile)

ULEV と同等のエンジン性能を持ちながら、SULEV 規制を満足する極超低エミッションを実現した自動車を発売することができた。

7. 参考文献

- (1) Kishi,N., Kikuchi,S., Seki,Y., Kato,A., and Fujimori,K. : Development of High Performance L4 Engine ULEV System, SAE Paper 980415
- (2) Shimasaki, Y., et al.: Study on Conformity Technology with ULEV Using EHC System, SAE Paper 960342
- (3) Ueno,M., Akazaki,S., Yasui,Y. and Iwaki,Y.: A Quick Warm-up System during Engine Start-up Period Using Adaptive Control of Intake Air and Ignition Timing, Honda R&D Technical Review, Vol.11, No.1, p.73-78 (1999)
- (4) Maki, H., Hasegawa, Y., Akazaki, S., Komoriya, I., Nishimura, Y. and Hirota, T.: Real Time Control Using STR in Feedback System, SAE Paper 950007
- (5) Fujii, S.: Digital Adaptive Control, Computrol, No.27, p28-, Corona, July 1989
- (6) Suzuki, T.: Basic of Adaptive Control, Computrol, No.32, p7-, Corona, July 1990
- (7) Yasui,Y., Akazaki,S., Ueno,M., and Iwaki,Y.: Adaptive Sliding Mode Control for Secondary O2 Feedback, Honda R&D Technical Review, Vol.11, No.1, p.65-71 (1999)
- (8) Yasui,Y., Akazaki,S., Ueno,M., and Iwaki,Y.: Adaptive Sliding Mode Control for Secondary O2 Feedback, A Second Report, Honda R&D Technical Review, Vol.11 No.2, p.65-71 (1999)
- (9) Nonami,K., Den,H.: Sliding Mode Control, Tokyo, Coronasha, 1994, p263

■ 著 者 ■



北川 浩



三部 敏宏



岡松 和則



安井 裕司