

自動車用ディーゼルエンジンの高出力化と  
クリーン化および低燃費化に関する研究開発

2011 年

藤村 俊夫

## 目次

第1章 序論	1
第2章 コモンレール噴射式小型直噴ディーゼルエンジンの 研究開発	7
2.1 まえがき	7
2.2 コモンレールシステムの概要	8
2.2.1 直噴ディーゼルエンジン用高圧噴射システム	8
2.2.2 小型直噴ディーゼルエンジン用コモンレールシステム	8
2.3 コモンレール噴射式ディーゼルエンジンの特徴	10
2.3.1 エンジン性能と排気	10
2.3.2 燃焼改良	13
2.4 コモンレールシステムの研究開発	15
2.4.1 インジェクタ構造	15
2.4.2 高圧ポンプ構造	18
2.4.3 システムの耐久性能の向上	25
2.4.4 エンジン制御	29
2.4.5 パイロット噴射制御	30
2.4.6 燃料制御異常監視システム	34
2.4.7 降圧制御性の改良	39
2.5 まとめ	40
第3章 コモンレール噴射式小型直噴ディーゼルエンジンの 後処理システム (DPNR) の研究	41
3.1 まえがき	41
3.2 直噴ディーゼルエンジンの将来技術シナリオ	42
3.3 NO <sub>x</sub> 、PM 同時浄化コンセプト	42
3.3.1 NO <sub>x</sub> 、PM 同時低減メカニズムの発見	43
3.3.2 NO <sub>x</sub> 、PM 同時低減コンセプトの確立	45
3.4 ディーゼル NO <sub>x</sub> 、PM 同時低減システム DPNR の概要	48
3.4.1 システム構成	49
3.4.2 第2世代コモンレールシステム	50
3.4.3 排気燃料添加システム	51
3.4.4 新触媒コンバータ	51
3.4.5 DPNR 搭載 2L エンジンの排気性能	52

3.5	ディーゼル乗用車用 DPNR の研究開発	53
3.5.1	第2世代コモンレールでの性能改良	54
3.5.2	低温燃焼の導入	55
3.5.3	NO <sub>x</sub> 低減制御	57
3.5.4	DPNR 触媒の改良	59
3.5.5	DPNR の NO <sub>x</sub> , PM 低減効果	64
3.5.6	PM の連続再生特性	64
3.5.7	PM の強制酸化	65
3.5.8	硫黄被毒回復	67
3.6	まとめ	69

#### 第4章 DPNR 搭載コモンレール式ディーゼル乗用車の

	市場実験によるシステム解析	70
4.1	まえがき	70
4.2	大規模実験車	70
4.3	実験地域	71
4.4	モニタリングシステム	71
4.5	市場適合性の確認	72
4.5.1	排気テスト結果	72
4.5.2	PM 強制酸化	73
4.5.3	硫黄被毒回復制御	74
4.5.4	市場走行時の温度制御性	75
4.5.5	市場走行実験時の排気トレンド	77
4.5.6	アッシュ詰り	78
4.6	まとめ	79

#### 第5章 DPNR 搭載コモンレール式乗用車用

	ディーゼルエンジンの開発	80
5.1	まえがき	80
5.2	2L-D4D エンジン	80
5.3	量産化に向けた DPNR の改良	82
5.3.1	触媒改良	82
5.3.2	市場走行モードでの制御性確認	83
5.3.3	硫黄被毒回復制御の改良	84
5.3.4	燃費の改善	86
5.4	まとめ	88

第6章 高出力・クリーンを両立する乗用車用	
新型ディーゼルエンジンの研究開発	89
6.1 まえがき	89
6.2 ディーゼルエンジン開発における技術戦略	89
6.3 次世代DPNRの概要	90
6.4 新エンジンの概要	91
6.4.1 クリーン化と高出力化の両立	93
6.4.2 エンジン性能と排気	93
6.5 エンジンの燃焼改良	95
6.5.1 低圧縮比化に向けた研究開発	96
6.5.2 インジェクタ改良による燃焼研究	103
6.5.3 セラミックグロープラグによる始動性改良	109
6.5.4 燃焼改良のまとめ	110
6.6 触媒システムの改良	111
6.6.1 NOx改良効果	111
6.6.2 回収触媒での硫黄被毒解析	112
6.6.3 触媒サイズの変更	113
6.6.4 硫黄被毒回復制御の改良	114
6.6.5 排気添加インジェクタの噴霧改良	116
6.6.6 PM強制再生制御の改良	116
6.6.7 触媒低圧損化	118
6.6.8 触媒システム改良のまとめ	119
6.7 将来システム	120
6.8 まとめ	121
第7章 結論	122
参考文献	125
謝辞	130

## 第1章 序論

内燃機関を搭載した自動車がこの世に誕生し 125 年の歳月が流れたが、その間自動車の動力源である内燃機関は大きな変貌をとげ、石油系燃料の違いによりガソリンエンジン車とディーゼルエンジン車に分かれるものの、両エンジンともユーザの要望に応え又排気規制等に対応すべく出力、排気、燃費の大幅改良を図ってきた。

そのような中でガソリンエンジンは 3 元触媒という 1980 年代の画期的発明により、排気的大幅クリーン化を実現し、出力も高く、静粛であるというメリットを持ち合わす反面、燃費及び CO<sub>2</sub> の改善が重点課題であった。一方、ディーゼルエンジンは低燃費、低 CO<sub>2</sub> というメリットはあるものの、振動騒音の低減、高出力化、さらには排気ガス規制強化への対応も含め、クリーン化が重点課題であった。ガソリンエンジンにおいてはその後、噴射系の電子制御化、可変動弁系の採用等により、燃費改善、低 CO<sub>2</sub> 化にも力を注いできたが、燃焼方式の違いにより、ディーゼルエンジンのレベルまで到達するには至っていない。

ディーゼルエンジンの燃焼方式には大きく分けて二つの種類が有り、1 つは主燃焼室とは別に渦流室を持つ予燃焼室式 (IDI) であり、もう 1 つは主室のみで燃焼室が構成される直接噴射式 (DI) である。予燃焼室式は燃費性能、低 CO<sub>2</sub> 排出量という観点では直接噴射式に劣るものの、直接噴射式に比べ、低振動・騒音及び排ガスも比較的クリーンということから主に乗用車に使われ、直接噴射式はトラックを初めとする商用系に使われていた。1990 年代に入り、予燃焼室式において噴射システムを含め電子制御化を進め、排気ガス及び燃費等は改善できたものの、自動車を取り巻く環境も大きく変化し、エネルギーセキュリティ、地球温暖化、大気汚染という課題に対しディーゼルエンジン本来の低燃費・低 CO<sub>2</sub> というメリットをさらに向上させるのみならず、排気ガス及び煤に代表される PM (Particulate Matter) の大幅改善の必要性が出てきた。図 1.1 にここ数年の世界の排気ガス規制強化の状況を示す。国内・欧州・米国等の先進国において PM を含む排ガスの規制強化が進む中で、BRIC' s 等の新興国においても少し遅れてはいるものの先進国の規制を導入している。ただし、排ガス規制対応は燃料性状の改善と並行して進める必要があるため、新興国においては硫黄分の低減等に関して、先進国で進めているのと同様の涉外活動も必要である。図 1.2 は欧州、国内の排気ガス規制値の強化状況を示すが、10 年前に比べて NO<sub>x</sub> は 25~35%、PM は 10% のレベルまで規制強化されている。図 1.3 には CO<sub>2</sub> あるいは燃費規制の各国の導入状況を示している。こちらも排気ガス同様、年々強化され年率 2~3% の割合で強化が進み、今後は 4% 程度になると予想される。

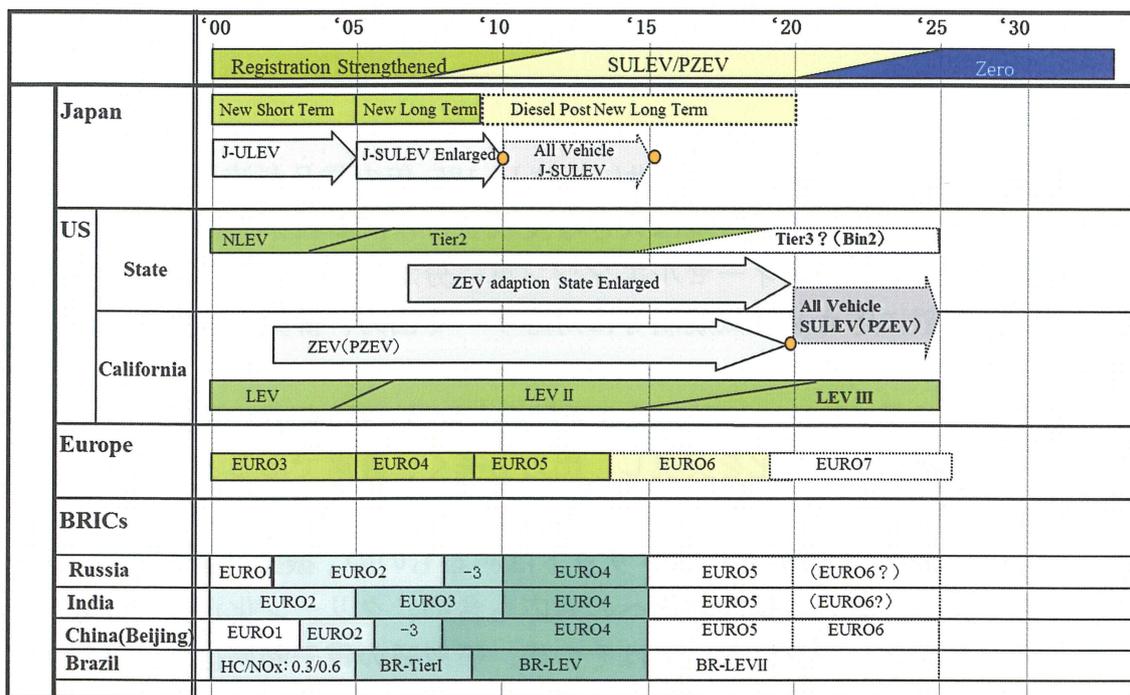


Fig.1.1 The Trend of Emission Registration

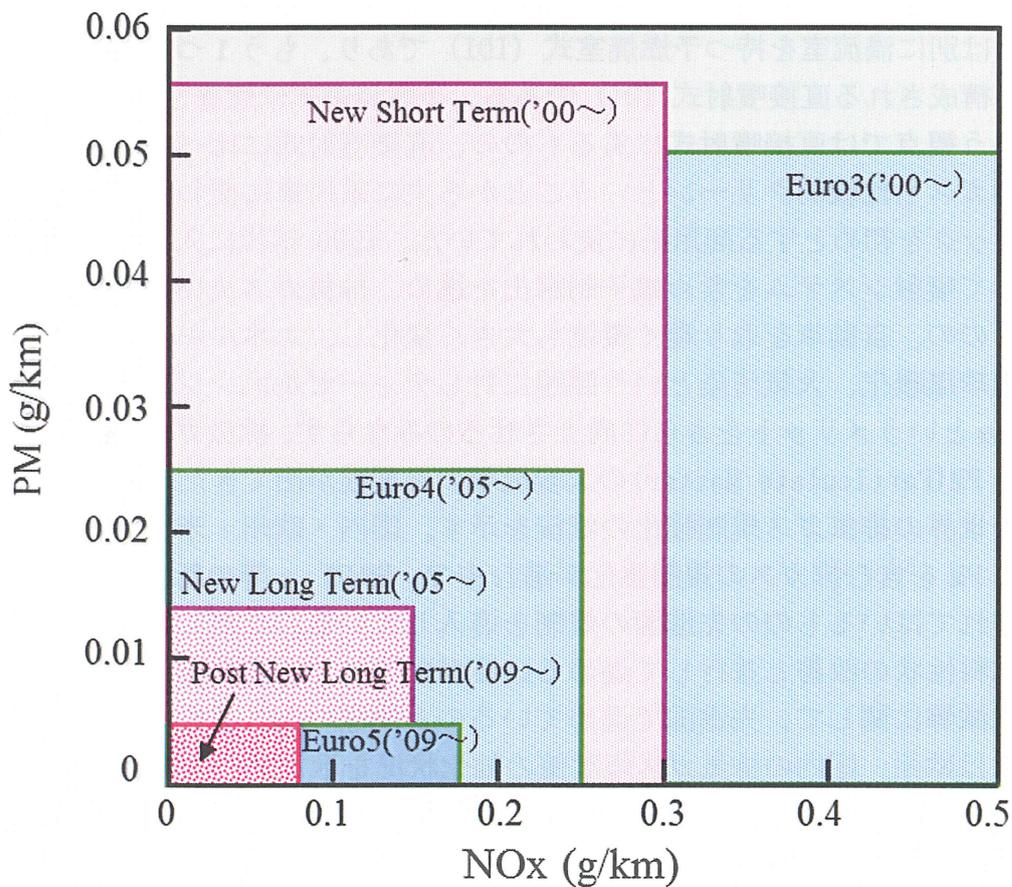


Fig.1.2 Emission Registration for NOx and PM

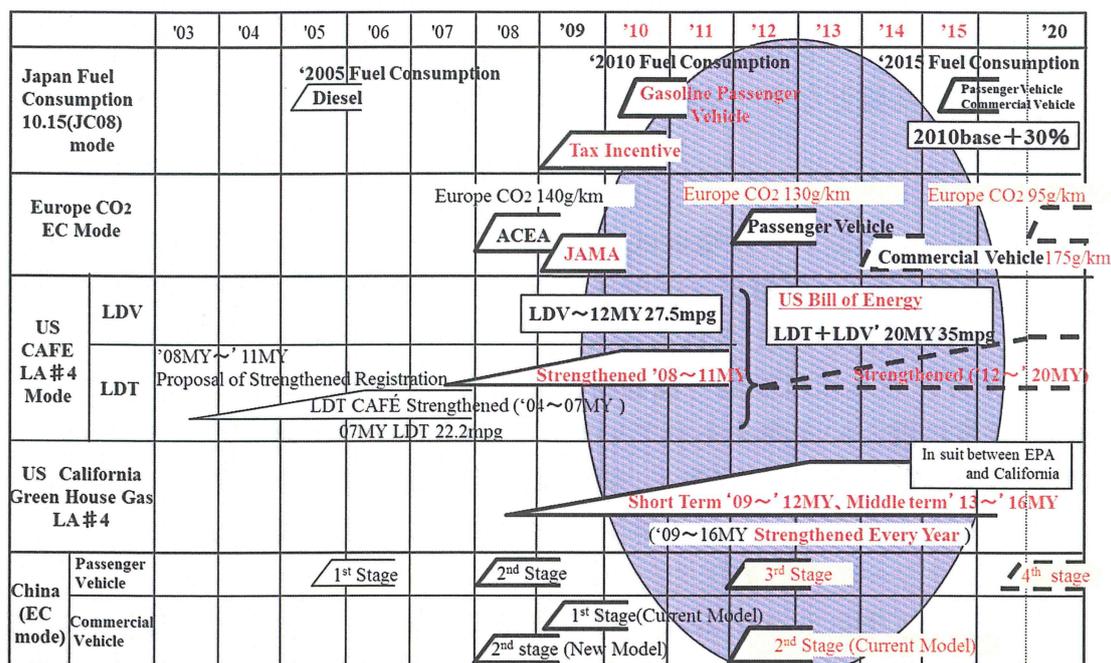


Fig.1.3 The Trend of CO2 and Fuel Consumption Registration

著者はこれまで長年にわたり、ディーゼルエンジンの燃焼あるいは高圧噴射システムの研究開発を進めてきたが、従来の予燃焼室式ディーゼルエンジンによって先に説明したような規制強化に対応し高出力化を図っていくには限界があると判断し、低燃費化（低 CO<sub>2</sub> 化）、高出力化においても将来性のある直接噴射式をベースに研究開発を進めることとした。

直接噴射式ディーゼルエンジンにおいて各種性能を向上させるためには、噴射システム、燃焼システム、後処理システムに関して従来とは異なる新しい発想での研究開発が必要である。

著者はシリンダ内に燃料を噴射する直接噴射システムにおいて、それまで開発を行っていたラジアルプランジャ方式の分配型高圧ポンプ<sup>(1)</sup>でなく、全く発想の異なる圧力・噴射の制御自由度が高いコモンレール噴射システムを開発し、それに合わせた燃焼システムの研究開発、さらにはガソリンエンジンに比較し排ガスの後処理が非常に難しいディーゼルエンジンにおいて、NO<sub>x</sub>、PM の低減が可能な新後処理システムの研究開発を推進した。近年のサブミクロンオーダーでの加工技術の進歩あるいは電子制御技術の進歩、および材料技術・触媒技術の進歩によりこれら次世代システムの実現が可能となった。

本論文は、自動車を取り巻く環境が大きく変化する中で、低燃費でクリーンかつ高出力化が可能なディーゼルエンジンの実現に向けて進めてきた先進技術に関する研究開発結果についてまとめたものである。燃焼システム、噴射システム、触媒システムそれぞれの性能向上にかかわる研究を進め、これら新技術

の融合を図ることにより、新世代ディーゼルエンジンとも言えるエンジンの基本を確立することができた。これらは今後のディーゼルエンジンの更なる進化においてもその基盤となるべく重要なものとする。次に 2 章以降の概要について述べる。

**第 2 章**では、コモンレール噴射式小型直噴ディーゼルエンジンの研究開発について述べる<sup>(2)(3)(4)</sup>。直噴ディーゼルエンジンが燃費性能に優れることは先にふれたが、排気規制が強化される中で、燃費改善とトレードオフ関係にある PM, NO<sub>x</sub> を下げ、さらには振動・騒音特性を改善し乗用車への適応を図ることは技術的に非常に難しいと考えられていた。そのような中、著者はコモンレール式噴射システムの研究開発を行い、乗用車にも適用可能な直噴ディーゼルエンジンを開発し、従来のディーゼルエンジンに対して、低燃費化はもちろんのこと、静粛性、クリーン化、高出力化を実現した。

コモンレール式噴射システムは、電子制御式であり、噴射圧力、噴射の制御性が非常に高い。従来の分配型噴射ポンプに比べ低速回転域でも高圧化が可能で低速トルク向上への効果も大きく、さらには小型・コンパクトであるということが最大の利点である。高機能とコンパクトを追及する中で、インジェクタ構成、ポンプの構成に関して様々なケーススタディーを行い、又 130MPa という超高压条件下の作動においても耐久、信頼性を確保するために多くの基礎的な研究にもとづく対応手法を検討し、最良結果をシステム設計に織り込んだ。

**第 3 章**ではディーゼルエンジンが最も苦手とする排気の画期的低減に向けた新触媒システムの研究開発結果について述べる<sup>(5)(6)(7)</sup>。ここで著者らはこの新触媒システムを DPNR (Diesel Particulate NO<sub>x</sub> Reduction System) と名付けた。ガソリンエンジンでは 1980 年代に開発された 3 元触媒により NO<sub>x</sub>、HC、CO を大幅に低減することに成功していたが、ディーゼルエンジンはリーン燃焼のため 3 元触媒での排ガス低減を望めず、さらには PM という厄介者も存在していた。各種触媒研究を進める中で、DPF (Diesel Particulate Filter) に触媒及び NO<sub>x</sub> 吸蔵材を追加することで PM のみならず NO<sub>x</sub> の同時かつ連続に低減することが可能であることを発見し、ディーゼルエンジンにおいても画期的な排気ガスの低減が可能となった。この新たな触媒システム DPNR は PM, NO<sub>x</sub> のみならず HC, CO の浄化も可能なため、ガソリンエンジン用の触媒が NO<sub>x</sub>、HC、CO が浄化できる 3 元触媒というものに対し、4 元触媒とも言える。又このシステムはコモンレール式直噴ディーゼルエンジンをベースとするもので、コモンレールという制御自由度の高い噴射システムの開発により、この新しい触媒システムも実現可能になったと言える。しかしながら、大半が過渡の状態で開催される乗用車におい

て、触媒の温度コントロールをうまく行うことは至難の技であった。燃費を犠牲にすること無く NOx、PM の低減を行うための技術開発に多くの時間を費やしたが、コモンレールシステムに関しては更なる高圧化等の機能向上を図り、又新しい燃焼法としての低温燃焼方式やリッチスパイク制御を行うための排気燃料添加システム等も新たに開発し、最終的に世界初の新触媒システム (DPNR) の技術確立を図ることが可能となった。

尚、本 DPNR の研究開発において 2003 年度の機械学会賞技術賞を受賞した。

**第 4 章**では、DPNR の量産化にむけ、開発速度の加速により早期に完成度をあげることを狙い、大規模な市場実験をヨーロッパ諸国、および国内で実施し、それによって得られた多くの知見及び解析結果について述べる<sup>(8)(9)</sup>。

欧州の様々な走行状態、条件にて、エンジン構成部品、触媒及び触媒制御に関する適合性の確認を行った。DPNR は燃料中の硫黄濃度 50ppm 以下で機能を発揮するシステムであるが、高硫黄燃料国での評価も実施し、触媒劣化、燃費への影響調査を行った。長距離にわたる走行評価を通して、細かなハード上の問題はあったものの、改良内容を適宜実験車に織り込み、市場での効果確認を行った。また、実験室の評価では実現できなかった様々な運転モードにおいても触媒をうまく機能させる制御方法を確立することが可能となり、1年にわたる大規模実験の実施により、新触媒システム DPNR の量産化に向けての技術確立を図ることができた。DPNR の機能を最大限に発揮するためにも、燃料中硫黄の低濃度化が必須であることも確認した。

**第 5 章**では噴射最高圧力 180MPa の第 2 世代コモンレールシステムおよび、世界初の PM、NOx 同時低減システム DPNR を装着した先進ディーゼルエンジンの量産開発について述べる<sup>(10)</sup>。第 4 章の実験車で得られた多くの知見を織り込むことで、システムの完成度をあげ世界初の技術をいよいよ世の中に投入することが可能となった。大規模実験車では当初、触媒コンバータは DPNR 触媒のみの構成であったが、NOx 低減効果の改良と、硫黄被毒回復制御性および PM 強制再生性の向上を狙って DPNR 触媒の前段に NOx 吸蔵還元触媒 (NSR) を追加する 2 段の構成に変更し、市場実験においても良い結果が得られたことから、量産車についてもサイズの見直しも含め 2 段式を採用した。

硫黄被毒回復制御、PM 強制再生制御については、市場で予想されるあらゆる運転条件に対して制御が終了するまでに時間がかかる場合があり、それが結果的に燃費悪化につながるということも判明した。これらについては、上述の触媒構成の見直しも含め、低温燃焼領域の拡大、硫黄被毒回復制御開始までの触媒内に吸蔵される硫黄被毒量を見直すことにより、燃費悪化分を 1/3 にまで改

善することができた。量産車の販売地域は、燃料中の硫黄濃度が 50ppm 以下でディーゼル乗用車比率の高い、ドイツとフランスに限定した。

第6章では、第5章まででディーゼルエンジン本来の燃費性能・低CO<sub>2</sub>という特色を生かしつつ、コモンレールシステムの技術確立、世界初のシステムであるDPNRの技術確立により、燃費、排ガス及び燃焼騒音の画期的な低減を実現してきたが、著者らは車本来の走りの楽しさをさらに追及する必要性を感じ、新たに高出力エンジンを開発することを決定した。ここではその研究開発結果について述べる<sup>(11)</sup>。

これまでのすべての研究成果を織り込むのみならず、コモンレール噴射系に関してはインジェクタ駆動方式において、高応答で高制御精度が実現できるピエゾ駆動方式を開発し、更なる高機能化を図った。又、技術的に非常に難易度が高いと考えていた低圧縮比化においても、ピエゾインジェクタという新しい技術との組み合わせにおいて圧縮比 16 を下回る 15.8 を実現し、低排気・低燃費（低CO<sub>2</sub>）・高出力化を実現する技術を確立することができた。触媒システムの改良については、市場実験車の知見の反映、回収触媒の詳細分析等の解析を通して、性能劣化に対する改良、制御方法の改良検討を進め最終諸元に反映させた。これらの研究・開発努力により、高出力、低燃費、低CO<sub>2</sub>、低騒音、低振動、クリーン化のすべてを高次元で達成する世界トップのディーゼルエンジンの量産化を実現した。

このエンジンの研究開発で、ディーゼルエンジン開発の 50 年の節目を迎え、ここで確立された技術をベースに、新たな次世代ディーゼルエンジンの開発に取り組む出発となると考える。

第7章では2章から6章で得られた成果をまとめ、今後の展望を述べる。

## 第2章 コモンレール噴射式小型直噴ディーゼルエンジンの研究開発

### 2.1 まえがき

この章ではコモンレール噴射システム搭載の直噴小型ディーゼルエンジンの研究開発について述べる。近年、低燃費、低CO<sub>2</sub>の直噴ディーゼルエンジンが地球温暖化防止の観点で注目されており、これらのメリットをさらに活かすためにも、ガソリンと同レベルの高出力、低騒音化への期待が高まっている。一方、ディーゼルエンジンにおけるNO<sub>x</sub>、PM、黒煙といった排出成分は大気汚染問題として取り上げられ、国内、海外において排気ガス規制がより強化されている。

著者はこれらの要求にこたえるために、これまで燃焼改善、エンジン本体改良、後処理システムの改良を積極的に推進してきた。直噴ディーゼルエンジン用の噴射システムについてもエンジン要求にこたえるべく改良を図り、電子制御式分配型噴射ポンプをベースに、圧送プランジャを駆動するカムをフェースカム方式からラジアルカム方式<sup>(1)(12)</sup>に変更することで、最高噴射圧力を大幅に増大させることを実現した。電磁弁制御による圧力のスピルコントロールによって、狭い領域ではあるがパイロット噴射も可能となった。

これらの研究努力により高出力、低燃費、低騒音化を実現し、年々強化される排気ガス規制強化に対応していく中、新小型直噴ディーゼルエンジンのプロジェクトを立ち上げることを決定し、噴射システムはラジアルカム方式の高圧分配型噴射ポンプで開発をスタートした。しかしながら、開発を進めて行く中で将来性すなわちパイロット噴射等の高い制御自由度、低速においても高圧化が可能、小型ディーゼルエンジンにも搭載が容易というようなことを考慮すると、高圧分配型噴射ポンプで様々な要求に対応するには限界があると判断し、開発途中ではあったが小型のコモンレールシステムを新たに開発することに方針を変更した。

当時、ECD(Electric Controlled Diesel)-U2<sup>(13)(14)(15)</sup>という呼称のデンソー製電子制御式コモンレールシステムが世界発の技術として95年にJ-1Aエンジンに搭載され、日野自動車のトラック用エンジンとして世に送り出された。このシステムにおいてインジェクタは3方弁方式の電磁制御弁、ポンプは列型2シリンダ方式を採用していたが、インジェクタ、ポンプ共にサイズが大きいため、小排気量エンジンに搭載することには課題があった。乗用車用ディーゼルエンジンにおいては、97年にフィアットがボッシュ製のコモンレールシステムを2.4LのTDIに搭載し販売を開始した<sup>(16)(17)</sup>。このシステムは2方弁方式のインジェクタと高圧ポンプからなり、高圧ポンプはエキセントリックカムにより駆動される3つのラジアルプランジャ方式をとっていた。小型ディーゼルエンジンへの搭載という課題は解決したが、ポンプの駆動損失及び燃料温度上昇については解決すべき課題として残存していた。

そんな中、著者とデンソーは乗用車用小型直噴ディーゼルエンジンにも適用可能なECD-U2Pという呼称のコモンレール噴射システムを新たに開発した。このシステムは高圧リーク量を抑制することが可能な2方弁方式の小型インジェクタと駆動ロスの減少及び燃料温度上昇の抑制が可能な吸入調量方式のタンデム圧送方式の高圧ポンプからなっている。

ECD-U2Pをはじめ直打方式のツインカム4弁システム、エアフローメータによるEGR(Exhaust Gas Recirculation)の精密制御、電子制御スロットル等の新規技術の採用によ

り、新開発の小型ディーゼルエンジンは環境に優しく、低騒音及び燃費、出力といった性能を最大限に高めることが可能となった。

## 2.2 コモンレールシステムの概要

### 2.2.1 直噴ディーゼルエンジン用高圧噴射システム

直接噴射システムの小型ディーゼルエンジンへの適用は、低CO<sub>2</sub>、低燃費という理由から乗用車においても一般的になってきたが、サイズが小型で搭載が容易ということだけではなく、クリーンな排気、低燃費、高出力化さらには低騒音を実現するためには噴射の高圧化が必要である。表 2.1 に電子制御式の高圧噴射システムを示すが、コモンレールシステムをはじめ、ラジアルカム方式の高圧分配型ポンプ、ユニットインジェクタ (EUI) といったものの開発が急速に進み、従来の機械式の分配型ポンプにとって代わろうとしていた。

これらの中でも、コモンレールシステムが電子制御の自由度においてもっとも優位性があり、また搭載性、コスト、各種性能面においてももっともバランスが取れている。このようなことから、コモンレールシステムの将来性に着目し、小型直噴ディーゼルエンジン用の噴射システムとして新たな開発を開始した。又このシステムを乗用車用コモンレールシステムということで ECD-U2P (U2 for Passenger Car) と名付けた。

Table.2.1 Comparison of Fuel Injection System

		Common Rail (CR)	Distributor Type Injection Pump (Radial)	Unit Injector (EUI)
Controllability (pilot injection etc.)		◎	△	○
Noize	Mechanical	◎	△	○
	Combustion	◎ Pilot	△	○ Pilot
Exhaust emission		◎	○	○
Drivability		◎ Low End Torque	△	○
Cost		○	△	△
Size		○	○	△
Drive Torque		○	△	△
Application to Small Direct Injection Diesel		◎	○	△ ~ ○

### 2.2.2 小形直噴ディーゼルエンジン用コモンレールシステム

電子制御式燃料噴射システムは 1982 年に予燃焼室式ディーゼルエンジン用に開発した。1CD-FTV ディーゼルエンジンに搭載した ECD-U2P システムはこの従来式の電子制御噴射システムとは全く異なる構造をとっており、高精度、高制御自由度を可能とする次世代の高圧電

子制御噴射システムである。燃料の高圧化が回転数、負荷に依存することなく可能である。そのため、低速トルクの改善、黒煙及びPMの著しい低減が可能となった。制御自由度の高さにより、パイロット噴射やポスト噴射のようなマルチ噴射を使い、燃焼騒音、排気ガスの低減も可能となった。

図2.1はECD-U2Pのシステムの概略を示したものである。従来の噴射システムは電子制御式噴射ポンプ、高圧パイプ及び自動弁式ノズルで構成されていた。しかしながら、ECD-U2Pの基本は図に示すように高圧発生源としての電子制御式高圧ポンプ、コモンレール、電子制御式インジェクタ及びこれらをつなぐ高圧パイプからなる。又、安全性確保のための圧力リリーフバルブ、システムにおける噴射量精度向上のための圧力制御バルブもシステムに追加した。高圧ポンプから圧送される高圧燃料はコモンレールに蓄圧され各気筒のインジェクタの制御バルブの開閉によってシリンダ内に燃料が噴射される。多くのセンサーにより運転条件を検知することで、さまざまな条件下においてコモンレール圧力、燃料噴射量、燃料噴射時期を高精度で制御し、最適なエンジン性能を実現することが可能となる。一方、その制御自由度の高さから、従来の電子制御噴射ポンプに比べると噴射圧力、パイロット噴射といったような制御パラメータが増加したため、排気ガス、出力、燃焼騒音の改良の過程で解析の効率化を進めた。システムの設計については以下の開発要件を考慮して行った。

- ◇4バルブシリンダヘッドにおいても設計自由度のある小型インジェクタ
- ◇従来の分配式噴射ポンプと同等の駆動トルクと搭載性を可能とする高圧ポンプ
- ◇高精度のポンプの燃料調量と圧力制御応答性の確保
- ◇パイロット噴射の高精度制御と高制御自由度の確保
- ◇高圧に対する安全設計

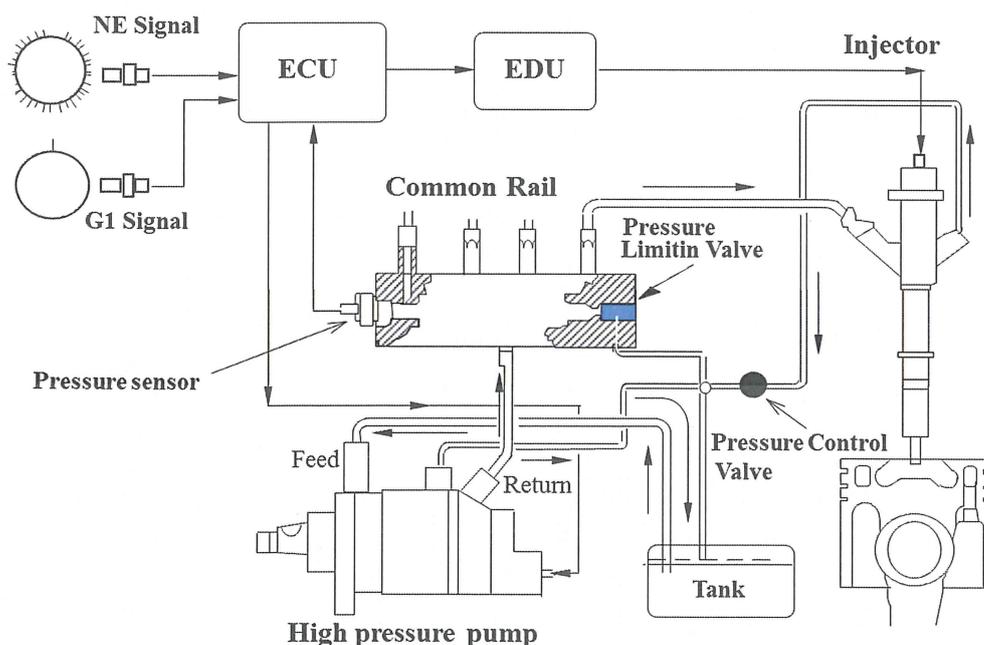


Fig.2.1 Schematic Diagram of ECD-U2P

## 2.3 コモンレール噴射式ディーゼルエンジンの特徴

コモンレール噴射式小型ディーゼルエンジンにおいて、以下に示す開発項目を掲げ、高ポテンシャルを有する次世代ディーゼルエンジンの実現を可能とした。

- (1) 欧州乗用車ディーゼルにおいて2リッタクラスでトップレベルの出力性能
- (2) ガソリン並みの振動・騒音レベル
- (3) 直噴ディーゼルエンジンのアドバンテージである、低燃費の更なる追求
- (4) 将来の欧州排気ガス規制及び黒煙規制を満足する低排気レベル
- (5) 軽量・コンパクト
- (6) 高信頼性・安全性

### 2.3.1 エンジン性能と排気

新開発のディーゼルエンジンはECD-U2P及び4バルブシリンダヘッド等の新技術を採用した直噴高過給ディーゼルエンジンである。エンジン諸元を表2.2に示す。このエンジンは従来の予燃焼室式ディーゼルエンジンである2C-TEに対しボア径は3.8mm短く、ストロークは9mm長いロングストロークとし、直噴化に伴い圧縮比は18.6まで下げた。直噴化による燃費メリットをさらに向上させるための変更である。

ECD-U2Pの諸元を表2.3に示す。詳細はのちに述べるがインジェクタについては、制御弁

Table.2.2 Engine Specification

Engine type	1CD-FTV	2C-TE
Displacement (L)	1.995	1.975
Cyl.No.-Bore × Stroke (mm)	L4- φ 82.2 × 94	L4- φ 86 × 85
Combustion System	Direct Injection	Indirect Injection
Compression Ratio	18.6 : 1	23.0 : 1
Intake System	Turbocharged with Intercooler	←
Valve Train	4-Valve DOHC	2-Valve OHC
Fuel Injection System	Common Rail System	Distributor Type Injection Pump
Max. Power (kW/rpm)	81/4000	66/4000
Max. Torque (Nm/rpm)	250/2000~2400	203/2200
EC Driving Cycle Fuel Consumption (L/100km)	5.7	6.4

Table.2.3 ECD-U2P Specification

Injector	Control Method	2-Way Valve W/Flat seat
	Nozzle Type	VCO
	Hole Number/size	6 *φ0.14
Pump	Type	Inner Radial Cam and Tandem
	Control Method	Suction Metering
	Delivery Capacity	1047mm <sup>3</sup> /rev.
	Max Pressure	135MPa

構造を2方弁方式のフラットシートとし、ノズルについてはHC低減に対して効果のあるニードル先端の油溜まり容積の少ないVCO(Valve Covered Orifice)方式を採用した。高圧ポンプについては、対抗するプランジャをタンデムに配置したタンデム方式とし、圧送燃料の調量については時間調量方式を採用した。

図2.2にエンジンの断面図を、図2.3に動弁系、燃焼室周りの拡大図を示す。ツインカム4バルブの動弁系とインジェクタ及び高圧ポンプをコンパクトな形で搭載できた。

4Valve System and Compact Injector

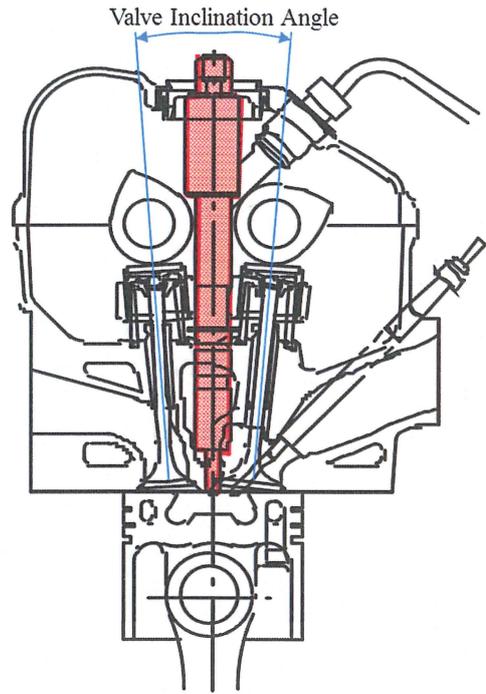
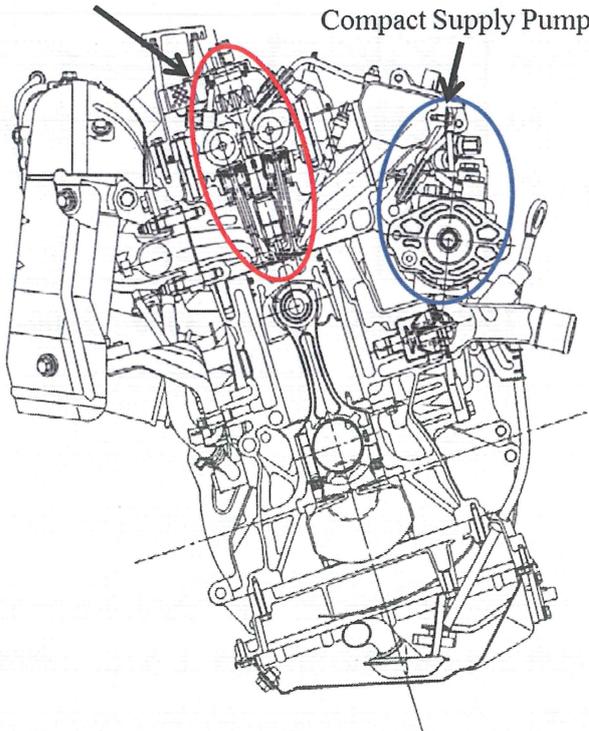


Fig.2.2 Section Drawing of 1CD-FTV Engine

Fig.2.3 Sectional View of Head and Piston

図2.4にエンジン性能曲線を示す。ECD-U2P及び4バルブシリンダヘッド等の新規技術の導入及び最高筒内圧、燃焼システム、吸排気システムの最適化により最高出力81kW、最大トルク250Nmを実現した。従来の2C-TEに比べ出力及びトルクは22~23%向上し、全負荷での燃料消費率も13%改善した。図2.5に他の直噴エンジンとの出力性能比較を示すが、VNT(Variable Nozzle Turbo)無のエンジンの中ではトップクラスの性能である。

このような大幅な性能向上が実現できたことは、以下にまとめる技術により良好な燃焼が可能となった結果である。

- ① ECD-U2Pにより低速域を含め高圧化が可能となり、噴霧の微粒化を促進した。
- ② 4弁化により吸排気それぞれ2つのバルブを有することで、吸排気のポンピングロスが低減し、吸・排気効率が大幅に改善できた。
- ③ ノズルのそれぞれの噴孔からピストン上部の燃焼室に噴射される燃料の噴霧性状はインジェクタをボア中心に搭載することで大幅な改善が可能となり、最適なスワールとのコンビネーションにより均一化された混合気分布を実現した。

- ④ 4バルブシステムにおいて、インジェクタの小型化によりバルブ挟角の縮小が可能となり、その結果ピストン頂部のバルブリセスを小さくしてデッドボリュームを最小化することができた。

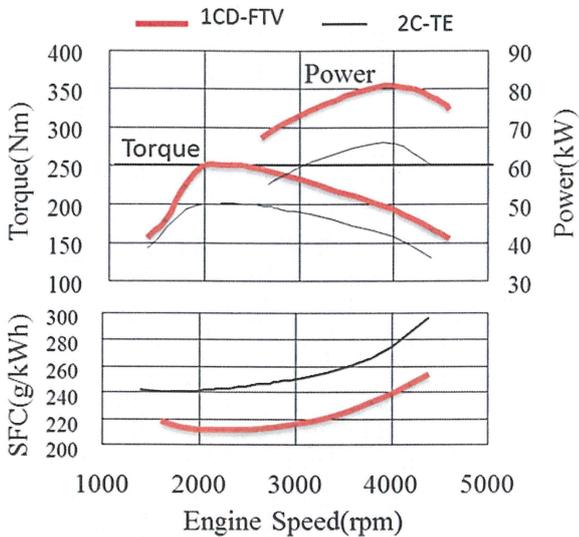


Fig.2.4 Engine Performance

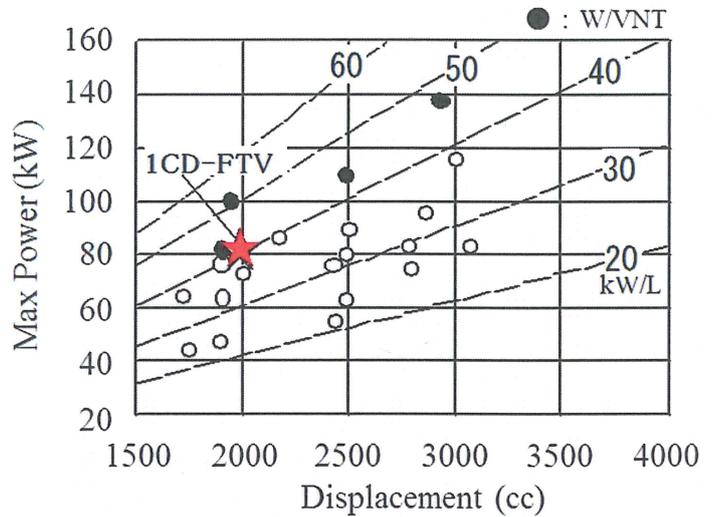


Fig.2.5 Specific Output Comparison

図 2.6 に欧州 EC モード（排気認証試験時のシャシダイナモ上での走行モード）における NO<sub>x</sub>、HC、PM を従来の 2C-TE との比較で示す。図に示すように NO<sub>x</sub>、HC、PM も大幅に低減することができた。EC 走行モードでの燃料消費は表 2.2 の燃費の項に示すように、13%改善され 5.7L/100km の結果を得た。排気及び燃費改善については噴霧微粒化改善の効果のみならず、コモンレールシステムにおける噴射圧／噴射時期／噴射量の精密制御及び EGR の精密制御により実現できた。

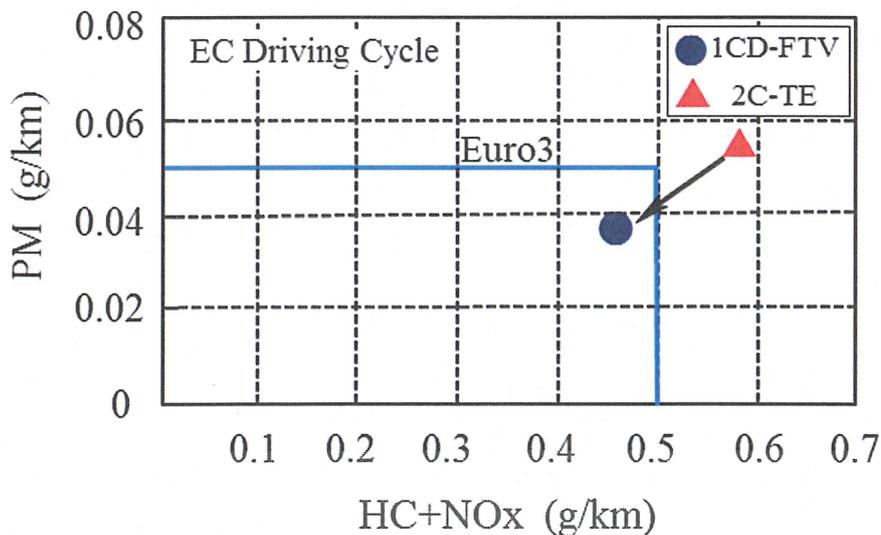


Fig.2.6 Exhaust Emission

### 2.3.2 燃焼改良

燃焼室については先に述べたように 1CD-FTV は 4 バルブの構成の中で、バルブ挟角の縮小によりピストン頂部クリアランスを 0.7mm まで減らし、圧縮比 18.6 で 70% 近くの主燃焼室容積比率を確保した。

吸気ポートについては図 2.7 に示すようにエンジン縦方向に平行に配置された二つのヘリカルポートを組み合わせ、吸気の干渉を抑えることで高い流量係数を確保している。

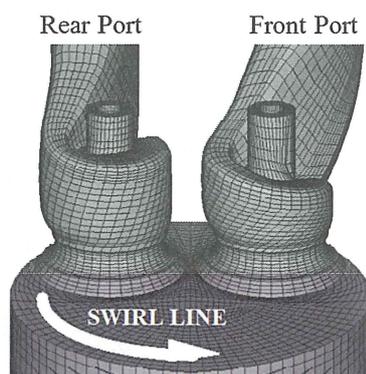


Fig.2.7 View of Intake Port CFD Model

コモンレールシステムの高圧噴射のメリットを活かすため、噴霧混合の促進による燃焼改善を狙い、ピストンキャビティの各部分の形状と噴霧角度及びスワールとの関係を検討し、最適化した結果について述べる。図 2.8 にピストンキャビティ形状の初期段階、検討段階、最終形状の 3 種類について示す。キャビティのリップ付近の形状は図 2.9 の L1, L2, L3 の寸法を変えて変更した。表 2.4 に評価した項目の一覧を示す。ピストンキャビティの変更に併せ、ノズルの形式は SMS (Super Mini Sac) から VCO (Valve Covered Orifice) タイプに変更し、噴孔径は縮小し、噴霧角度を最適化した。

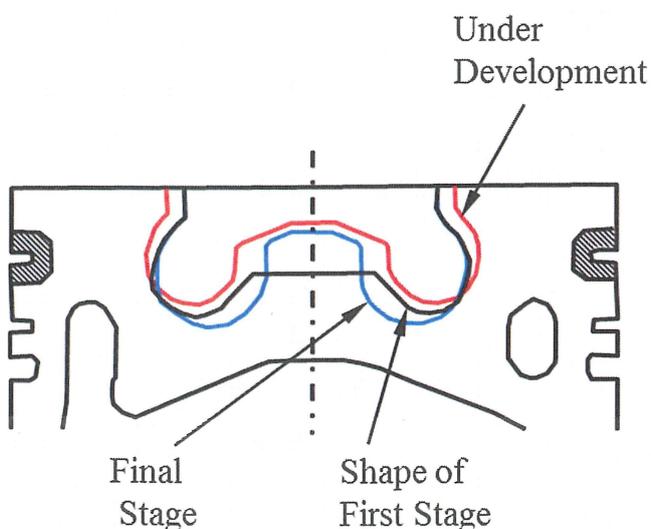


Fig. 2.8 Shape of the Piston Cavity

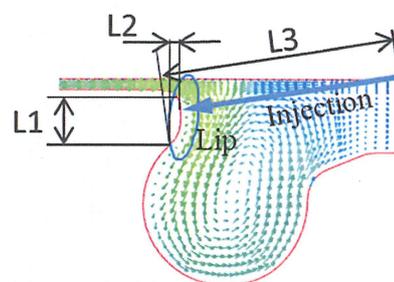


Fig.2.9 Detailed Shape of Lip

Table.2.4 Item of Investigation

Combustion Chamber	Nozzle Spec.
● The shape of First Stage	6×φ0.16*SMS
■ Under Development	6×0.16*VCO
▲ ↑	6×0.14*VCO
○ Final Stage	6×φ0.14*VCO + Changing of Spray Angle

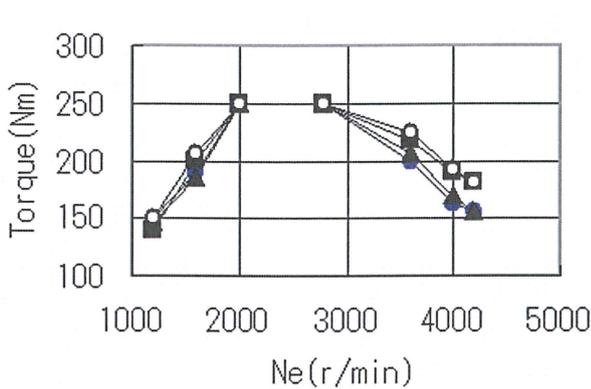


Fig.2.10 Effect on Engine Performance

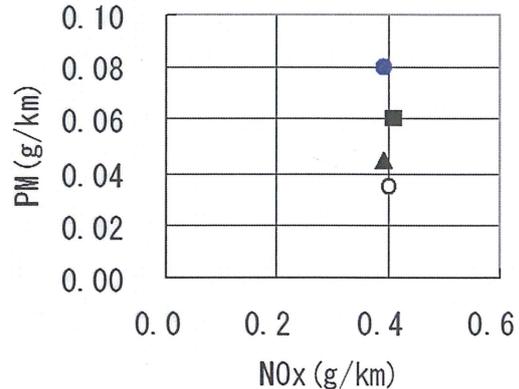


Fig.2.11 Effect on Exhaust Emission

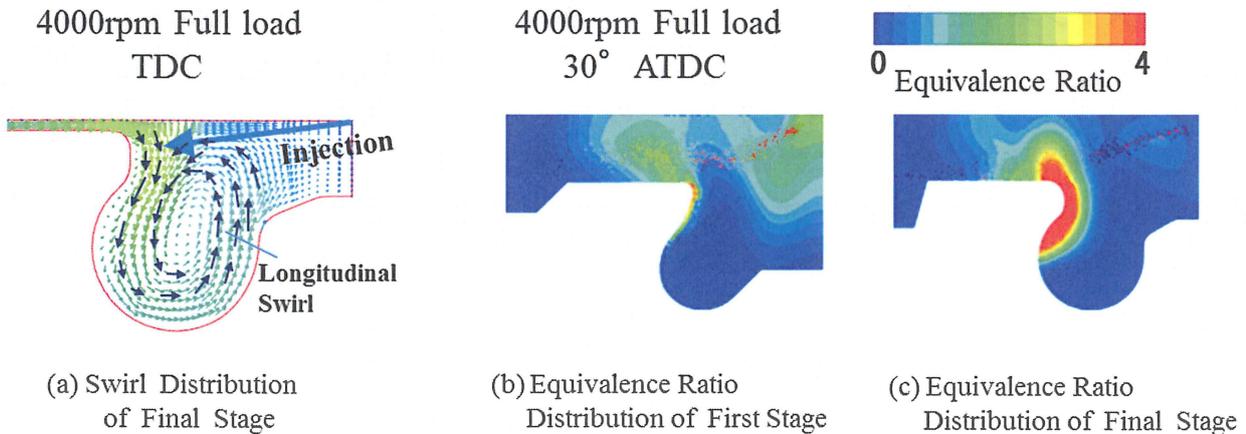


Fig.2.12 Simulation using AVL-FIRE

図 2.10 にトルク向上への効果、図 2.11 に PM 低減の効果を示す。トルク、PM 共に、キャビティを深くし、噴口径を縮小し、噴霧がリップ部にあたるように噴霧角を最適化することで大きく改善できた。PM に関してはノズルを SMS から VCO に変更したことで、ニードル先端のサック容積が低減し、PM の成分である未燃燃料が低減した効果も大きい。

図 2.12 に TDC における最終的なキャビティ形状でのスワール分布 (図 (a)) と、30° ATDC (After Top Dead Center 30° Crank Angle) における開発初期のキャビティ形状 (図 (b)) と最終的なキャビティ形状 (図 (c)) での当量比分布の比較を、AVL 社製の燃焼解析シミュレーションソフト AVL-FIRE を使って解析した結果を示す。図 (a) より最終的なキャビティ形状での縦方向のスワールは、圧縮行程が完了したあとにおいてもリップ付近に維持され

ていることがわかる。このリップ付近に噴射された噴霧が縦方向のスワールを増強している。その結果、図(b)に示す開発初期の形状での当量比分布に対し、図(c)に示す最終的なキャビティ形状では、燃焼過程の前半にリップ付近に均一な混合気が形成され良好な燃焼が行われる。このように図 2.10 のトルク向上効果と図 2.11 の PM 改善効果をシミュレーションでも裏付けることが出来た。図の最終形状は燃費、低温始動性等も十分配慮して決定した。

## 2.4 コモンレールシステムの研究開発

以上コモンレール搭載エンジンの設計諸元および性能改良結果について述べた。ここからは、コモンレールシステムにおけるインジェクタ、高圧ポンプをはじめとする各要素部品の研究開発結果及びフェールセーフを含む各種制御の検討結果について述べる。

### 2.4.1 インジェクタ構造

先に述べたように、今回の乗用車用コモンレールシステムの開発において、インジェクタについては3方弁のサイズが大きくクリアランスリークが多いという問題を解決するため、図 2.13 に示す、ソレノイドの小型化とリーク箇所を減らしクリアランスリーク量を低減することが可能な2方弁式のインジェクタを開発した。高圧燃料のリータンサイドへのリーク量の低減は、ポンプの圧送量、すなわちポンプの駆動損失を低減できることと、リターンサイドの燃料温度を低減し燃料系部品の信頼性を確保できるという点からも重要である。

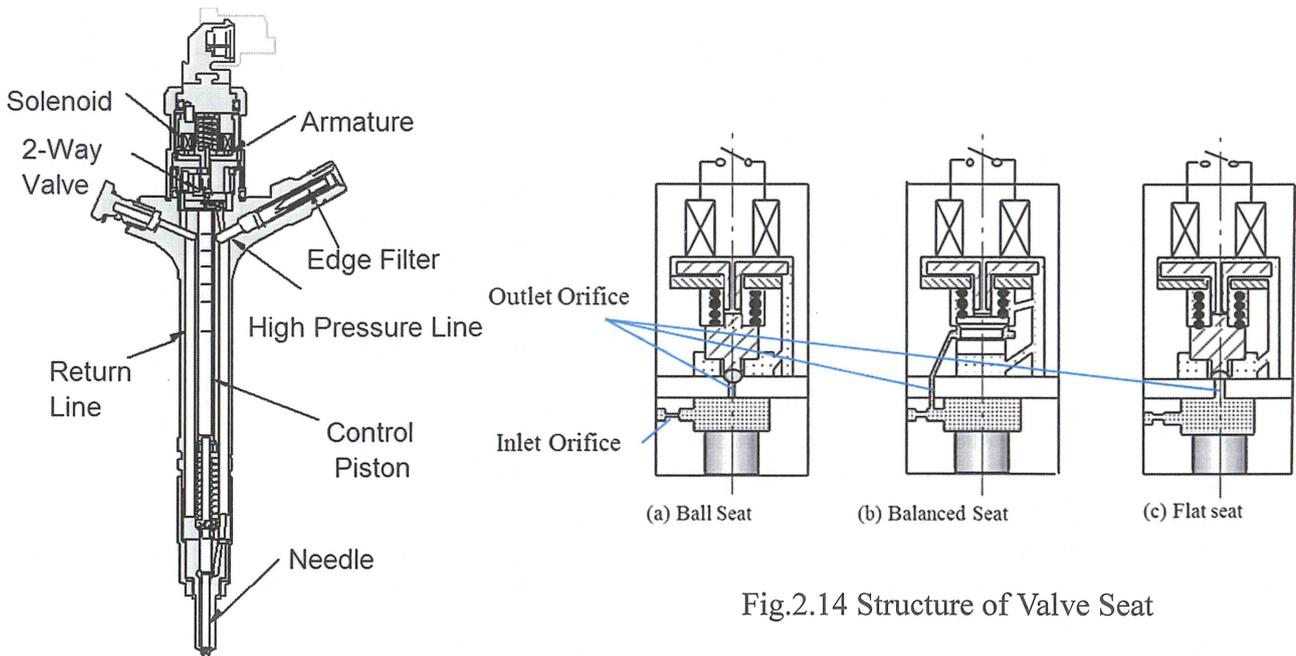


Fig.2.13 Sectional View of Injector

Fig.2.14 Structure of Valve Seat

#### 2.4.1.1 制御バルブのシート構造

図 2.14 に示すように、制御バルブのシール構造に関して(a)ボールシート方式、(b)バランスシート方式、(c)フラットシート方式の3つの方式を検討した。

(a)のボールシート方式は高面圧でシールできるため、シート部の燃料リーク量を減少する

ことが期待できる。この方式は Bosch が採用していたものである。(b)のバランスシート方式はシール性能は他の二つに比べあまりよくないが、以下の特徴を持つ。

バルブのステムにグループを設け、その部分に高圧燃料を導入することで、バルブが上下に動く際にバルブに加わる荷重がバランスしているため、シート部の高圧によってバルブに働く荷重が低減できる。その結果バルブ径を拡大しリフトを縮小することでニードルの応答性を改善することも可能となる。(c)のボールシートの下部を削ってフラット形状にしたフラットシートタイプは、軸ずれによるシール性能の悪化を抑えるために検討した。

図 2.15 は 3 方式のリーク特性を示したものであり、リターンサイドからの燃料流量を測定した。燃料流量は①制御バルブが閉じている際に、制御バルブのピストン・ボディー間のクリアランス部及びバルブのシート部からのリーク量と②噴射期間中 (1ms) に高圧燃料の一部がバルブ部を介してリターンサイドに排出される燃料の総量である。

低リーク量を期待したボールシートタイプは、予想に反しバランスシートタイプと同等のリーク量であった。理由は、ボールとシート間の軸ずれによりシール性能が悪化し、ボールシートのリーク量が期待値よりも多くなってしまったことによる。軸ずれの改善等によりリーク量を低減する対策法もあったが、シートが線接触であることによりボールとシートの摩耗を促進するといった信頼性の観点より、ボール方式は採用しなかった。

ボールシートをフラット形状にしたフラットシートタイプでは、ソレノイドバルブのシートにおけるリーク量を大幅に低減することができた。バランスシートについては、実測においてもリーク量が多いことを確認した。

これらの結果より、燃料リーク量の最も少ない、フラットシートタイプをシート形状の基本とした。フラットシート部の圧力分布を示したものが図 2.16 であるが、(a)の基本形状では、ソレノイドバルブ開の状態から完全閉の状態にいたる過程において、圧力が内側のエッジから外側のエッジに向けての広い範囲に作用する。そのためバルブをシートに押し付けるソレノイドのセットスプリング力は 78N という強いものが要求される。その結果、ソレノイドはスプリング力に打ち勝って吸引する必要があるため、より大きなサイズが必要となる。したがって、(b)に示すようにフラットシートタイプの構造を内エッジから外エッジ間の狭い範囲で急激に圧力が低下する環状の突起を持つ形状に成形した。計算により燃料圧力によるソレノイドバルブへの荷重は 1/4 以下に低減できることを確認した。

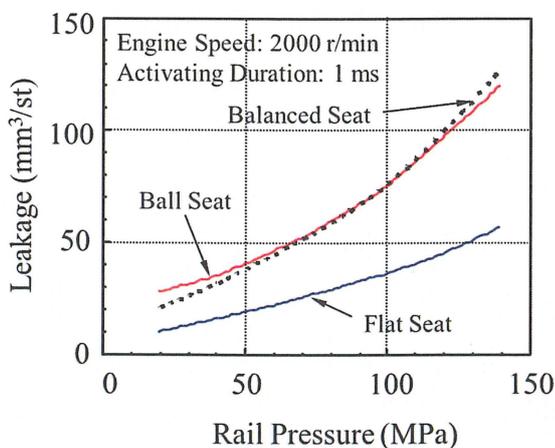


Fig.2.15 Seal Ability of Seat Structure

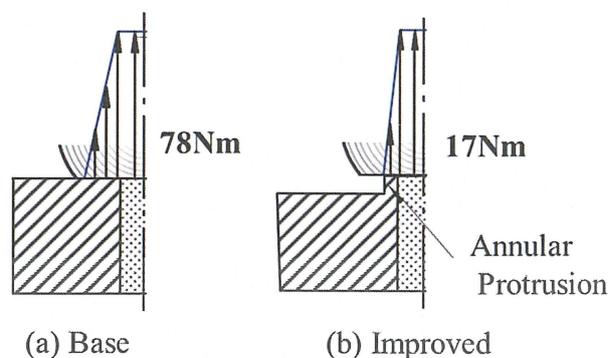


Fig.2.16 Pressure Distribution

ただし、その後の実験においてソレノイドバルブからの衝撃荷重により、突起部に荒れが生じシール性能が著しく低下した。そのため、最終的に図 2.17 に示すように、突起部の外周にかかる衝撃荷重の大半を吸収し、燃料を溝に逃がすことを目的として、シート部に燃料の逃がし溝を追加する構造とした。

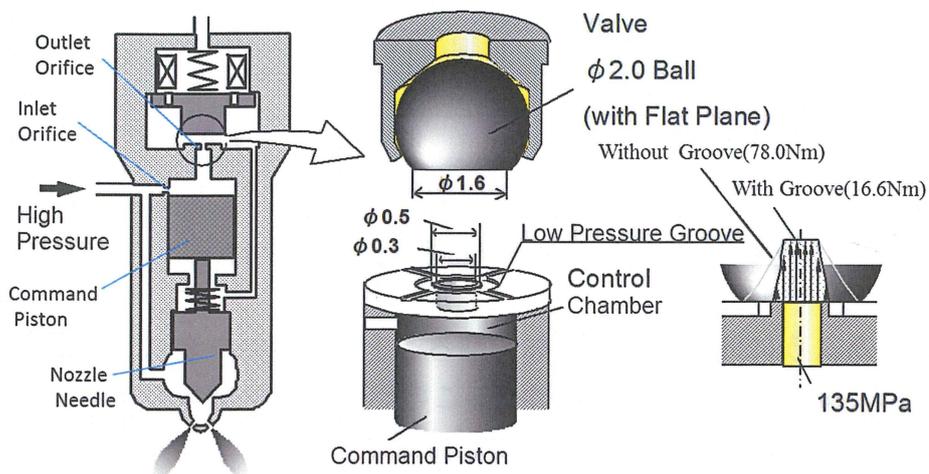


Fig.2.17 Configuration of Valve Seat

#### 2.4.1.2 シートオリフィス流量特性

次にバルブシートの信頼性と燃料噴射精度の向上を狙い、オリフィス上部の内径を削ることによる効果について説明する。バルブシートの出口オリフィスサイズが小さいと燃料噴射量のばらつきはバルブリフトに応じて増加する。同時にバルブリフトが大きいとバルブが閉じる際のシートへの衝撃荷重が増加する。そのため、バルブリフトは信頼性上及び噴射量精度確保の観点より小さくとる必要がある。これらを達成するために、図 2.18 に示すようにバルブが開いた瞬間での開口面積を拡大するよう、出口オリフィスの表面部の外形を一部削った。従来内径 0.297mm のオリフィス径を 0.26mm に若干縮小し、オリフィス上部を削って 0.4mm まで拡大した。バルブリフトに対する、出口オリフィスの静的な流量特性を図 2.19

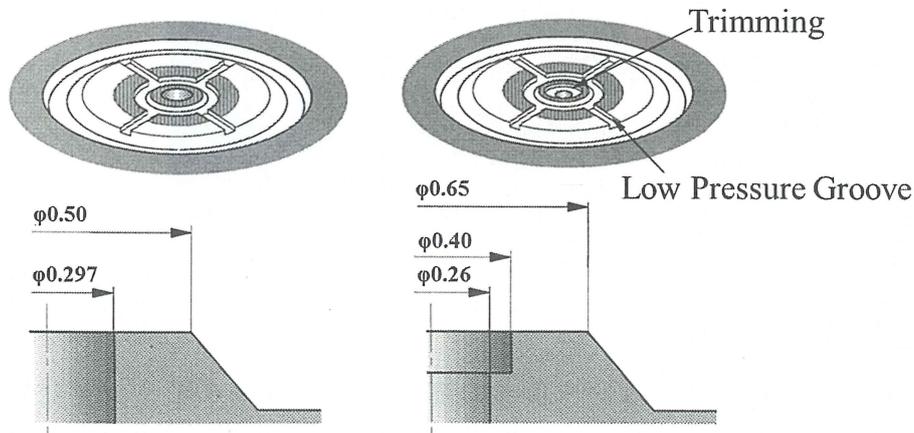


Fig.2.18 Trimmed Orifice Valve Configuration

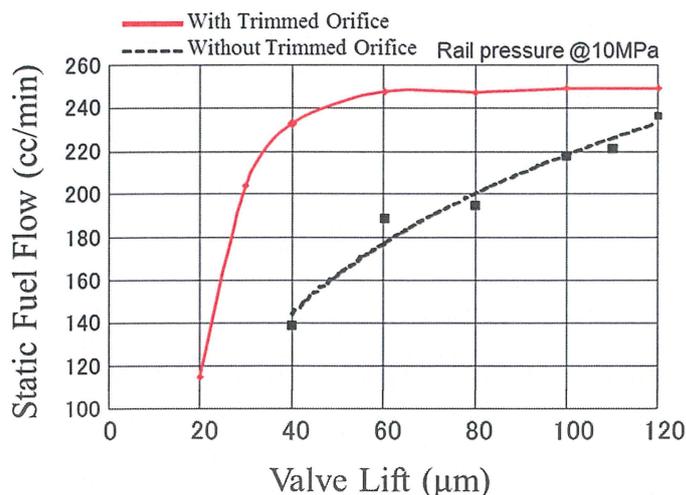


Fig.2.19 Valve Lift vs. Static Fuel Flow at Seat Valve

に示す。この図でわかるようにオリフィス上部を削ることで、従来のオリフィスと同等の流量を得るためのリフトを縮小できることがわかる。この出口オリフィスの採用によりリフトを縮小しシートの衝撃荷重低減と噴射量ばらつき精度を改善することが可能となった。

## 2.4.2 高圧ポンプ構造

図 2.20 に高圧ポンプのカットモデルの外観写真を示す。

駆動トルクの低減及びトルク変動の抑制、燃料温度の高温化の抑制を狙い、時間調量方式及び対抗するプランジャをタンデムに配置したタンデムポンプを開発した。

このタンデム方式に決定するまでの過程で次の検討を実施した。

以下①ポンプ圧送と噴射の同期 ②燃料調量方式 ③シングル圧送方式について述べる。

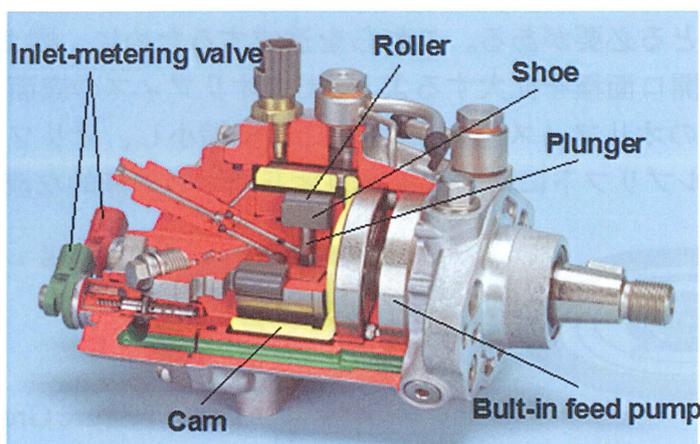


Fig.2.20 Configuration of High Pressure Pump

### 2.4.2.1 ポンプ圧送と噴射の同期

燃料噴射時期に対してポンプからレールへの高圧燃料の圧送タイミングに関しては二つの方式が考えられる。一つは噴射に対してポンプ圧送を同期させる方法、もうひとつは噴射

のタイミングとは非同期で圧送するものである。図 2.21 に 4 山カムと 3 山カムでの、噴射時期に対する圧送の状態を示す。上からインジェクタの作動信号、噴射率、4 山カムの圧送と吸入及びその時のレール圧変化、3 山カムでの圧送と吸入及びその時のレール圧変化を整理した。4 山カムでは各シリンダでの噴射の前に圧送を終え、各シリンダの噴射開始時のレール圧 a, b, c, d に差はないため、これを同期方式と呼ぶ。一方 3 山カムでは 4 山カムがエンジン 2 回転の間で 4 回の噴射に対し、3 回の圧送となり、噴射開始時のレール圧 a, b, c, d はシリンダ毎に異なるため、非同期方式と呼ぶ。3 山カムの場合、エンジンシリンダ数の制約がないため様々なエンジンに搭載できる自由度が高い。しかしながら噴射圧力がシリンダ毎に異なるため、噴霧形態も異なり、結果的にシリンダ間の燃焼のばらつきが増加する。噴射量は圧力センサーの信号を使って補正できるが、噴霧性状については補正は不可能である。そのため、著者は気筒間の噴霧性状を同じ条件とすることを最優先事項とし同期方式を選択した。加えて、同期制御は圧力予測精度が高く比較的容易にシステムでの燃料漏れを検出し、異常部品を特定することが可能である。

ここで 4 気筒エンジンの場合、2 回転で 4 噴射するが、ポンプ回転数はエンジン回転数に対し 1 / 2 に減速され、4 山カムの場合、ポンプ 1 回転で 4 圧送することになる。

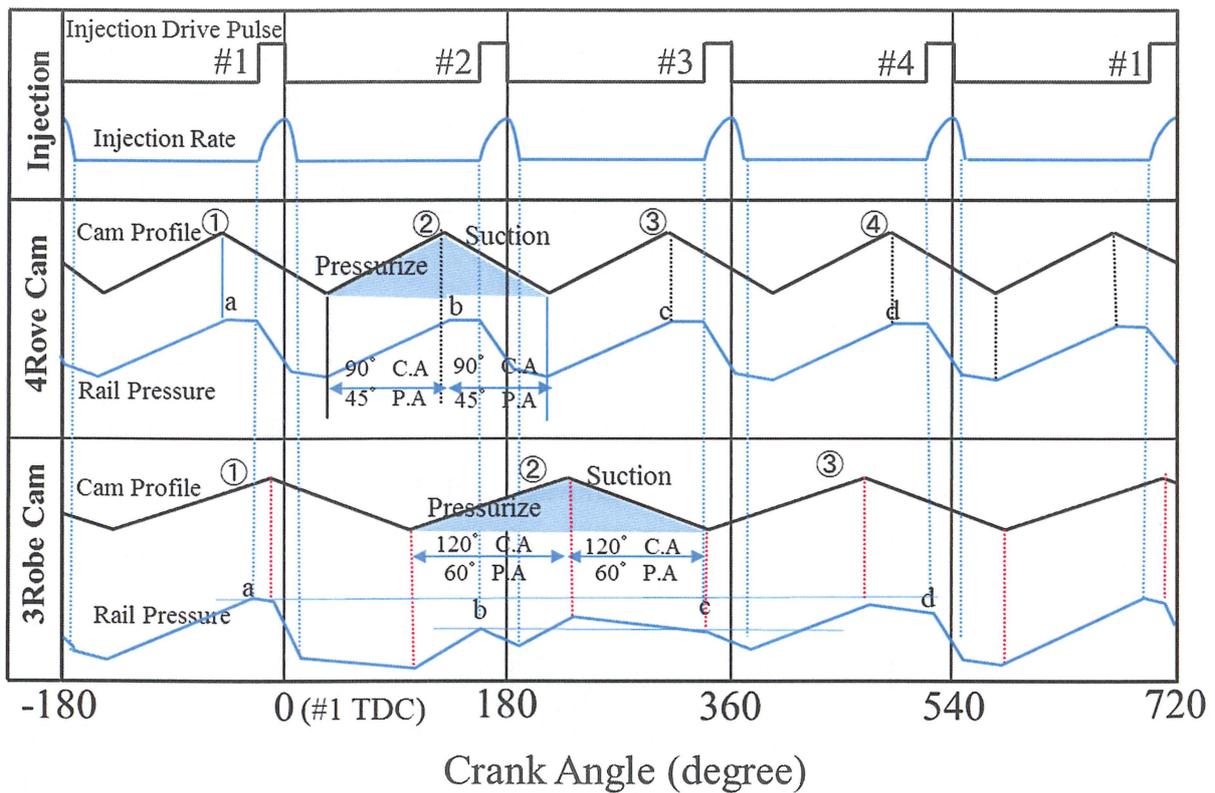


Fig.2.21 Type of Pressurize

#### 2.4.2.2 調量方式の検討

ここではポンプへの燃料供給方式について、全量圧送方式と燃料調量方式の 2 種類の検討結果について述べる。全量圧送方式の場合、燃料はプランジャのフルストローク分ポンプの圧送室に供給されたあと加圧されレールに供給される。レール圧力は圧力センサーの信号を

もとにレギュレートバルブにより高圧燃料の一部をリリースさせることで、所定の値に制御される。一方、燃料調量方式の場合、必要な量のみ加圧された高圧燃料がレールに供給される。この方式においては、ポンプの燃料調量制御で所定のレール圧とするため、レギュレートバルブは不要である。

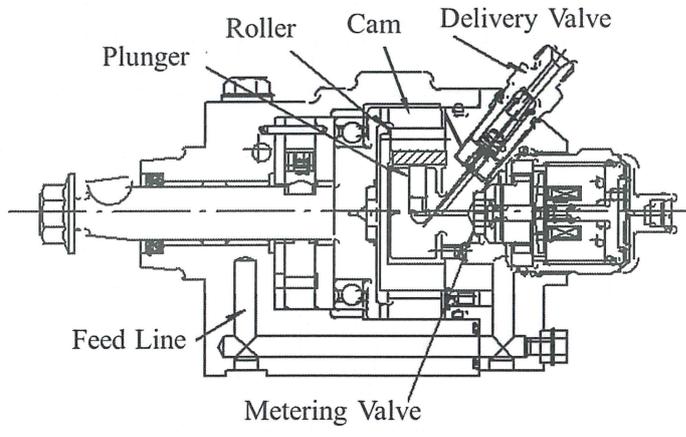


Fig.2.22 Single Pump with Metering Valve

図 2.22 は燃料調量制御式のシングルポンプと呼ばれる高圧ポンプの断面図を示したものである。燃料吸入量を調整するため外開方式のソレノイドバルブを設置した。このポンプはインナーカムと対向する 2 組のラジアルプランジャで構成される。圧送タイミングの始めと終わりを除き、等カム速度を維持する 4 山カムで構成される。図 2.23 にこのポンプにお

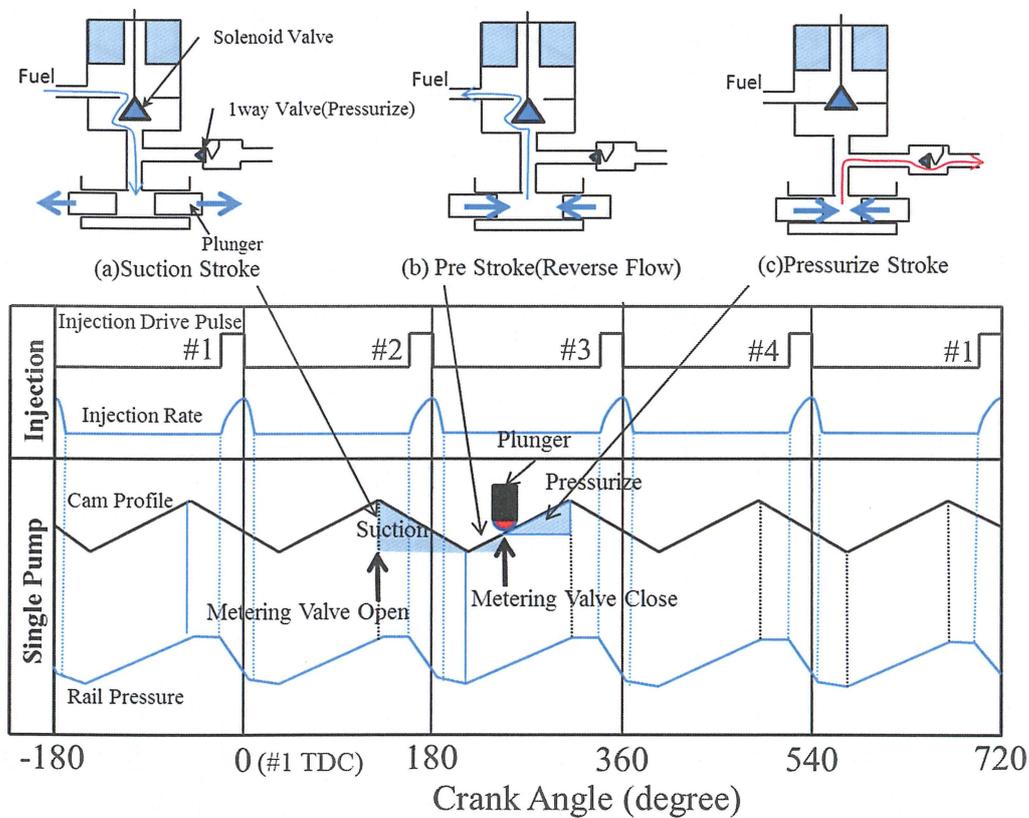


Fig.2.23 Pre Stroke Control

る燃料調量方式を示す。それぞれの吸入及び圧送工程はポンプカム角度  $45^\circ$  PA で設計した。これは図 2.21 に示したものと同一である。内臓タイプのベーンポンプで 1.5MPa に加圧された燃料は図 (a) に示すように外開方式のソレノイドバルブを介してポンプの圧送室に供給される。次に図 (b) に示すように圧送工程に入ったあと外開弁が閉じ、図 (c) で加圧を開始する。圧送燃料量はソレノイドバルブの閉弁時期の変更によって精度よく制御される。この制御のことをプレストローク制御と呼ぶ。この方式では燃料圧力が負圧とならないためキャビテーションの心配もない。

図 2.24 に全量圧送方式と燃料調量方式において、レール圧 135MPa の状態で燃料噴射量を変えた際の高压ポンプのピーク及び平均駆動トルクを示す。

ピーク駆動トルクはカムプロフィールが一定速度のため、燃料噴射量あるいはポンプ燃料供給方式を変えても変化しない。しかしながら燃料調量方式の平均駆動トルクは、噴射量の減少に伴い圧送量を減少することができるため低減が可能である。

2 リッターの乗用車用ディーゼルエンジンのレール圧マップより計算すると、全量圧送方式に対して燃料調量方式では欧州の燃費走行モードにおいて 2% の燃費改善効果を確認した。また、燃料調量方式ではレール圧制御において高压の燃料をリターン側に排出させないため、1CD ディーゼルエンジンの定格点での評価においてポンプ入口温度を  $45^\circ\text{C}$  低減できることも確認した。燃温の低減により、このシステムでは樹脂、ゴム製部品の保障或いは燃料粘度の低下に伴う供給燃料の低下防止の<sup>為</sup>に燃料クーラのような追加部品が不要となった。

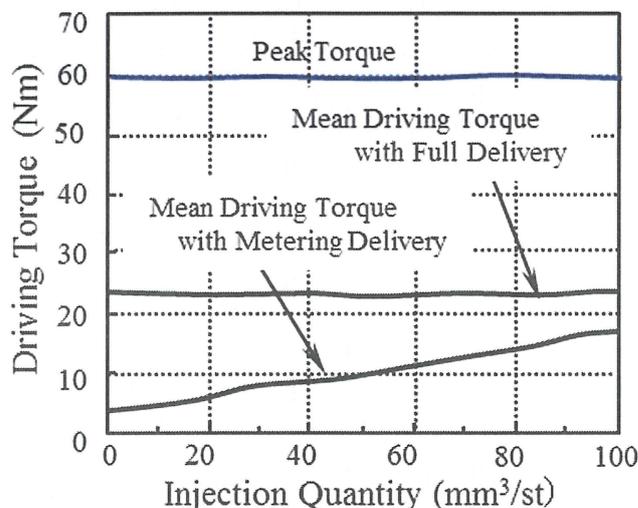


Fig.2.24 Effect of a Delivery System on Mean Driving Torque

### 2.4.2.3 ピーク駆動トルクの低減

先に説明したシングルポンプでは、ピーク駆動トルクが大きく、ベルト駆動での成立が難しいと判断し、変動を抑えてコグドベルトの使用を可能とするために、2組の対向プランジャをタンデムに配置したポンプ方式を開発した。

図 2.25 に示すこのタイプの高压ポンプは前述のシングルポンプで説明したのと同様に、インナーカムと対抗したプランジャ構成の設計となっている。但し、異なるのはこのポンプ

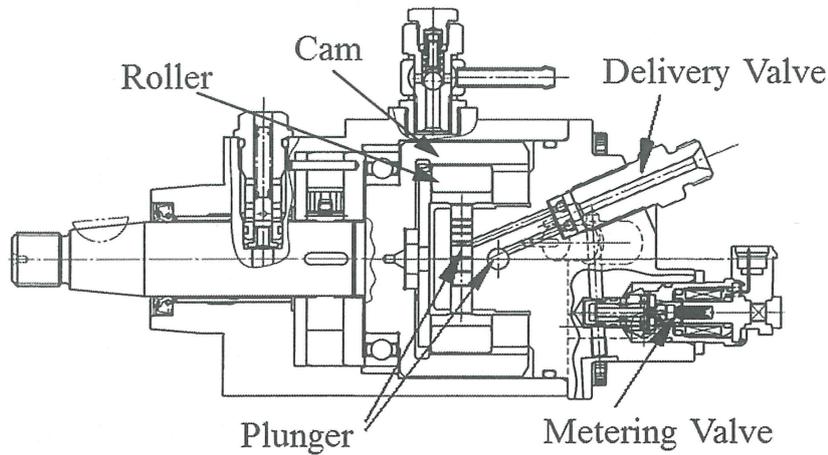


Fig.2.25 Cross section Picture of Pump

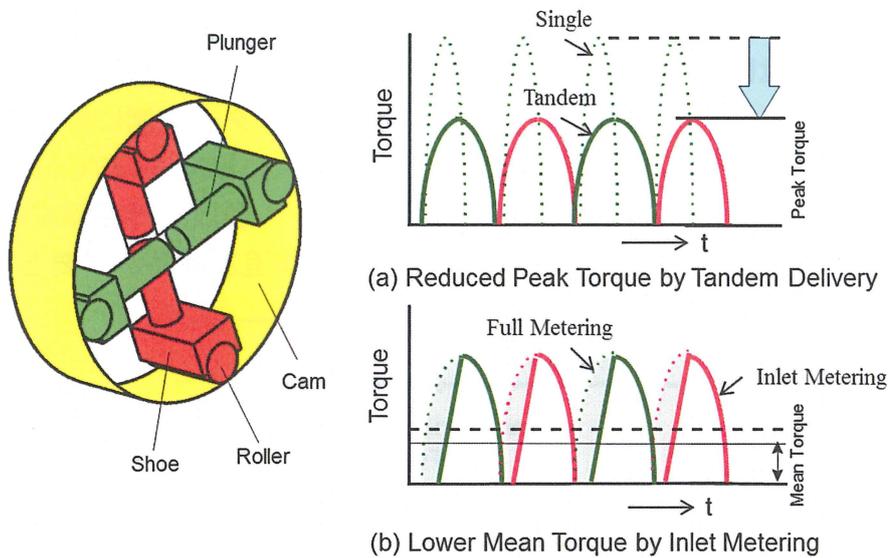


Fig.2.26 Scheme of Tandem Pumping Method

では2山カムを使い、吸入及び圧送工程はそれぞれシングルポンプの2倍の90° PA となっている。更に2組の対抗プランジャが独立した燃料供給ラインのもとで交互に燃料圧送できるように90度ずらした形でタンデムに配置されている。その結果、図2.26に示すようにポンプの駆動トルク変動のピーク値は、シングルポンプの半分に低減した。これはカムの作用角を2倍にしカム速度をシングルポンプの半分にした効果である。又、シングルポンプの場合と同様、全量圧送に対し燃料調量を行うことで平均駆動トルクも低減している。

図2.27にこのタンデム型ポンプでの二つの圧送系と燃料調量方式を示す。上から、インジェクタの作動信号、噴射率、#1カム、#2カムの圧送と吸入及びその時のレール圧変化を整理した。先のシングルポンプとは異なり、ポンプ1回転で2山のカム及び対抗するプランジャで①②③④と交互に圧送し、噴射に同期する形をとっている。

燃料調量方式に関しては、シングルポンプで検討したプレストローク制御方式の場合、高圧室に充填された燃料を外開弁を通して押し出す際の駆動損失、及び調量精度に関してさら

に改善の余地があったため、図に示すように外開弁を燃料が通過する開閉時間を変えてポンプ高圧室への燃料供給量の制御を行う時間制御方式に変更した。

図(a)に示すように、外開弁はプランジャの吸入ストローク開始時に開弁し、その後ポンプに内臓された小型のフィードポンプにより 1.5MPa の圧力で燃料はポンプの高圧室に外開弁、逆止弁を経由して供給される。時間制御バルブが閉じると対向する2つのプランジャはスプリングで押し付けられていないため、カム面から離れ、その後図(b)に示すようにプランジャが再度カムに接した後、圧送が開始される。

このようにして、燃料供給量は外開弁の開弁タイミングを変えることによって、精度よく調量できることが可能である。表 2.5 にシングルとタンデムの特性比較をまとめる。

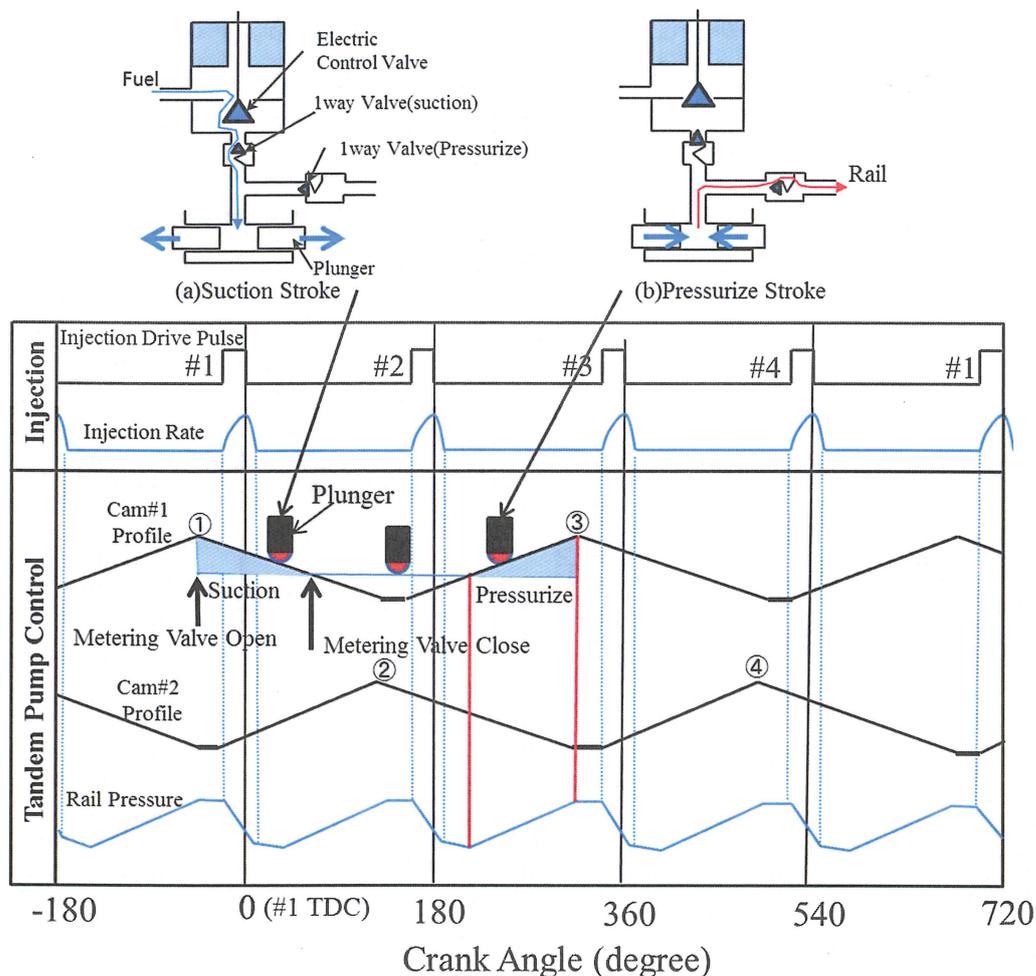


Fig.2.27 Tandem Pump Control

Table.2.5 Characteristics of Pump

	Single	Tandem
Fuel Metering	Pre Stroke	Inlet Metering
Maximum Driving Torque	60Nm	30Nm
Noise Level	Low	Lower

#### 2.4.2.4 タンデムポンプのベルト張力への低減効果

図 2.28(a)に 1CD のベルトレイアウトを示すが、この 7 自由度の条件 (Crank, Cam, Oil Pump, Water Pump, Stationary Tensioner, Idler, and Belt) をもとにベルト張力を計算した。図 2.28 (b)はエンジン回転数を変えた時のベルト張力の計算結果と実測結果を示したものである。シングルポンプではエンジン回転数 3000rpm において共振が発生しベルトの有効張力は著しく増加しているが、タンデムポンプにおいては半分以下のレベルである。このベルトレイアウトでは 100Hz に共振モードがあり、主にポンプ駆動トルクの 2 次及び 4 次成分が 3000rpm のエンジン運転領域でベルト有効張力の急激な増加を引き起こしていることが判明した。タンデムポンプにおいては、図 2.28(c)にあるように 2 次、4 次成分は大幅に低減している。ベルトレイアウトの変更や共振点を常用運転領域からずらすために各部品の剛性を変更するという対策もあるが、これらの対策には限界がある。タンデムポンプの採用により駆動トルクを低減することは非常に効果的であった。更にはこの利点以外にポンプから放射される音圧レベルもポンプの駆動トルク低減により改善することができた。

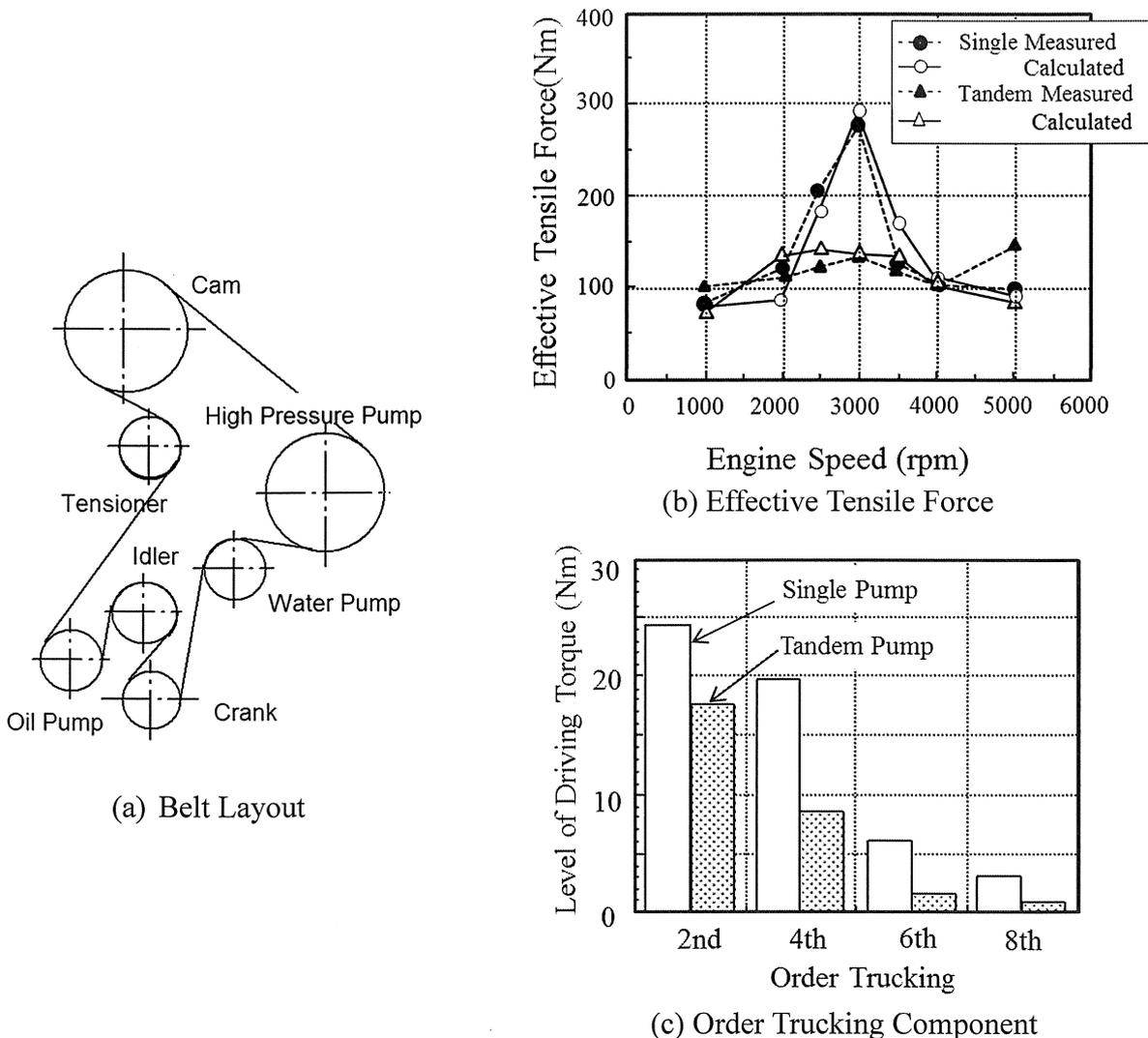


Fig.2.28 Effect of Tandem Pump on Effective Tensile Force

### 2.4.3 システムの耐久性能の向上

インジェクタ、ポンプの基本構成をほぼ固めた後でも、135MPa という超高压で運転されるシステムにおいては、各種耐久実験を進める中で更なる改善が必要となった。これ以降、インジェクタ、高圧ポンプにおいて、信頼性向上に向けた開発内容について述べる。

図 2.29 に示すように各種部品より構成されるインジェクタでは、ノズルニードルとボディ間の摺動性改善、ソレノイドバルブのシート部における信頼性向上が最重点課題となった。図 2.30 は 3 次元弾性解析によりノズル先端の変形を解析したものである。解析につい

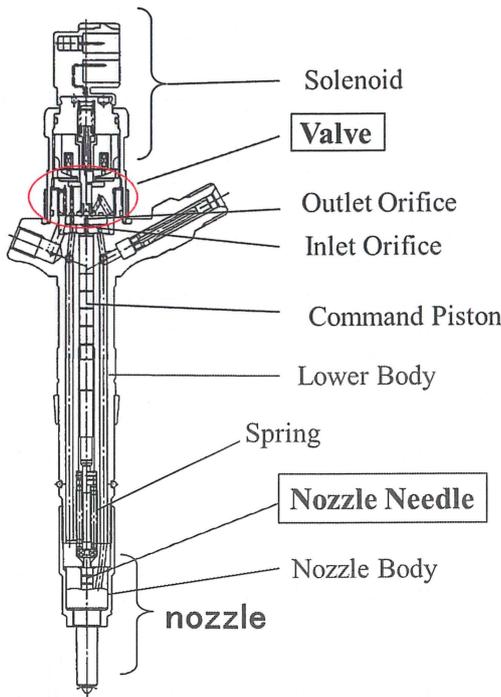


Fig.2.29 Injector Configuration

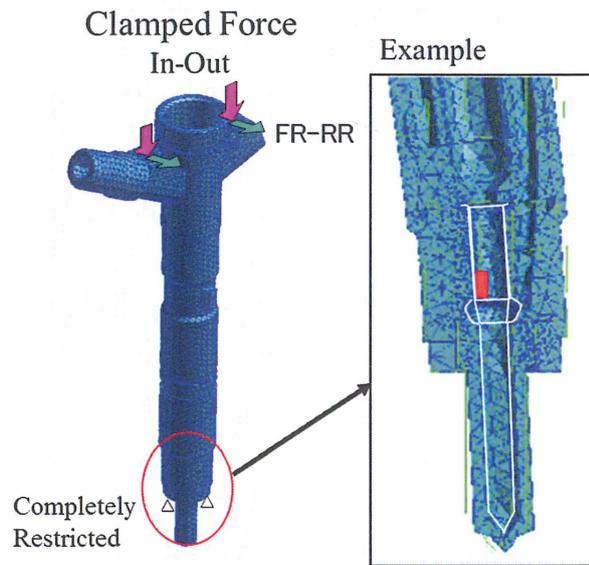


Fig.2.30 Analysis of Transformation

ては、10 節点 4 面体要素を用い、シミュレーション解析ソルバーは MARK K6、メッシュ作成は PATRAN を使用した。材料物性については、ヤング率 206GPa、ポアソン比 0.3 とした。インジェクタ上部のクランプにより発生する偏荷重により、ノズルボディが変形し、ニードルとの接触が起こることがわかる。この解析結果をもとに、図 2.31 にインジェクタを

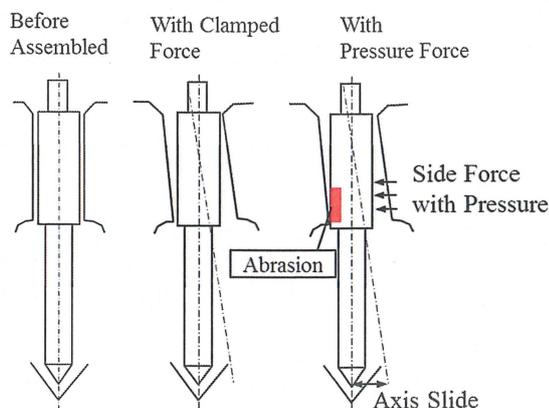


Fig.2.31 Mechanism of Side Force Occurring

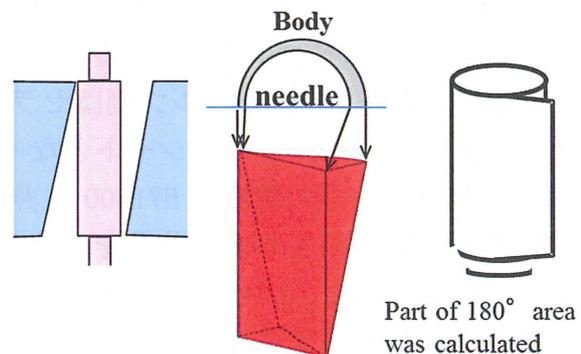


Fig.2.32 Analysis of Side Force Occurring

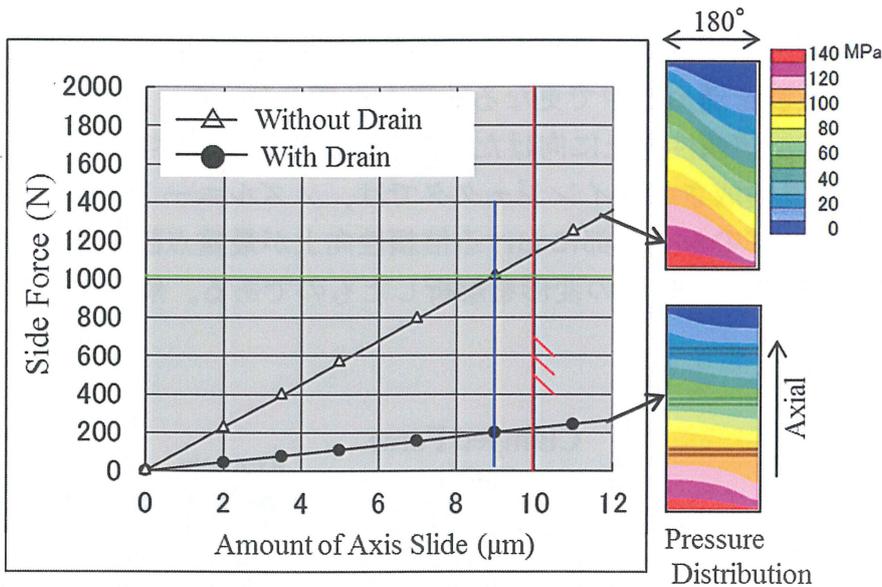


Fig.2.33 Effect of Annular Drain on Side Force

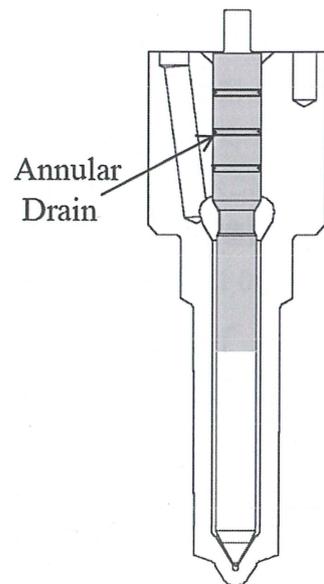


Fig.2.34 Annular Drain

エンジンに組付ける際の偏荷重により、ノズルニードル下部がボディに接触する状況をまとめた。ニードル先端はシート部で拘束されるため、ニードルの軸芯はボディの軸芯に対し傾きニードル下部が接触する。この状態でニードルが上下に作動すると接触部で摩耗が発生し、作動不良に至る。

次にニードルが傾いた状況でニードル周りの油圧分布の解析を行った。ソルバーはSTAR-CDによる非圧縮層流定常解析を用い、図 2.32 に示すように 180° 分を展開し、メッシュ作成は PATRAN を使用した。計算条件は、高压側圧力 135MPa、低压側圧力 0MPa、軽油密度 830kg/m<sup>3</sup>、粘性係数 8.38e-4PaS (軽油 120°C相当) とした。

油圧分布及びニードルとボディの軸ずれに対し、その油圧によってニードルにかかる側方荷重の影響を示したものが図 2.33 である。図 2.34 は油圧分布を改善するために、ニードルには環状溝を追加したものを示す。図 2.33 より、従来の油圧分布においては 180° 展開方向に圧力差が有り、この圧力差によってニードルを側方に押し付ける大きな荷重が発生していた。対策として、クランプによる偏荷重を低減することが重要であるが、それだけでは不十分なため図 2.34 に示す環状溝をニードルに追加した結果、圧力分布の均一化を実現することが可能となり、軸ずれに対する側方荷重も大幅に低減することができた。

図 2.35 はソレノイドバルブとそのシート部を示したものである。この構造については 2.4.1 で示したとおりである。バルブ側はセラミックボールの下部を研削してフラットにし、シート側はグループ付のフラットシートとなっている。

セラミックボールバルブの硬度は HV1300 と非常に高いため、バルブが閉じる際、フラットシートには高硬度材料からの衝撃荷重を受ける。又シート部への異物あるいは高压燃料リークによる浸食等考えると、シート側も硬度アップ等の対策が必要と判断した。ここで材料をより高強度なものに変更する案もあるが、グループ等の加工の難易度を考え、表面硬度アップの対策として実績のある PVD (Physical Vapor Deposition) を適用することとした。

PVD に求められる要件として、①高硬度の確保 (Hv1300 以上) ②被膜密着性の確保 ③膜圧最適化による耐摩耗性と耐衝撃性の両立を満足する必要がある。

表面処理として TiN、CrN、DLC 等を検討する中で、これらの要件及び相手材料への攻撃性を考慮し最終的に CrN の適用を決定した。図 2.36 に PVD 処理によるシート部の摩耗対策効果について示す。CrN の適用により摩耗発生はほとんど無く目標の  $1\mu\text{m}$  を満足しセラミック側も問題ないことが確認できた。

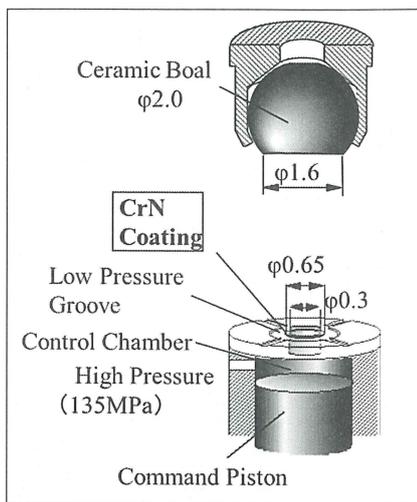


Fig.2.35 Configuration of Solenoid Valve Seat

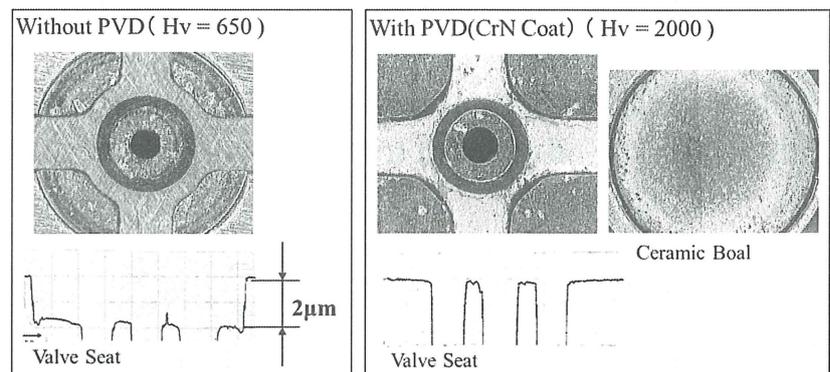


Fig.2.36 Effect of the PVD

次に高圧ポンプの改良について述べる。高圧ポンプは前述のように対向するプランジヤをタンデムに配置した構造をとる。図 2.37 に示すようにプランジヤの圧送はカムからローラ、シューを介して行われる。図中の高圧分配型噴射ポンプ V4 は商用車用の直噴ディーゼル用

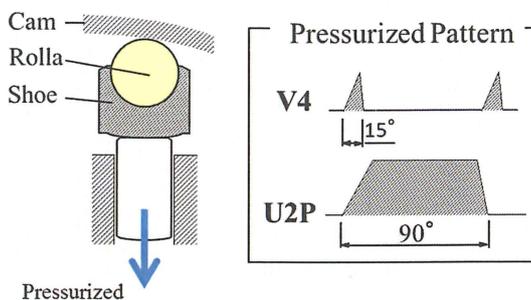


Fig.2.37 Pressurized Pattern

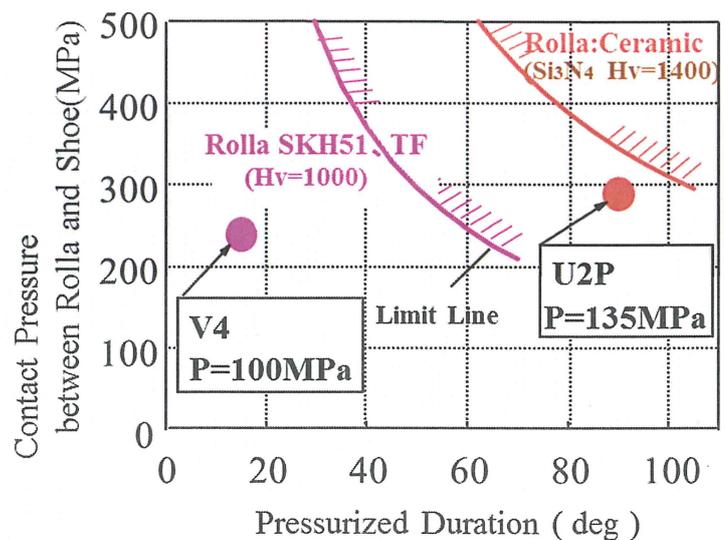


Fig.2.38 Stress on Rolla and Shoe

に開発したものである<sup>(1)</sup>。インナーカム、対抗プランジヤという構造は類似しているが、ジャーク式と呼ばれるこのポンプでは燃料圧送は噴射期間中の 15° PA と短い。

一方、U2P(コモンレール式) の場合圧送期間は 90° PA と長いため、ローラ・シュー間の高面圧に伴う油膜切れの時間も長く耐久性上は非常に厳しくなる。図 2.38 に圧送期間とローラ・シュー最大面圧に対し、ローラ材を SKH51 (工具鋼)、セラミック<sup>(18)</sup>としたときの強度限界線を示す。圧送期間が延びれば許容面圧は低下するため、コモンレールの高圧ポンプにおいてはローラ材料をセラミックにして余裕度を確保した。

耐久確認を進める中で、面圧余裕があるにも関わらずローラ・シュー間での焼き付きの問題が発生し、調査したところ、セラミックローラ表面のボイドからセラミック片が脱落しそれがシューに噛み込むことが原因と判明した。図 2.39 は耐久時間の経過に対し、ボイド部からセラミック片が脱落する様子を示したものである。この対策として、図 2.40 に示すように HIP 処理 (超高压でセラミックを焼き固めボイドを低減) を施すことでボイドを大幅に低減できることが判明し、最終的にはセラミックローラに HIP 処理を採用した。

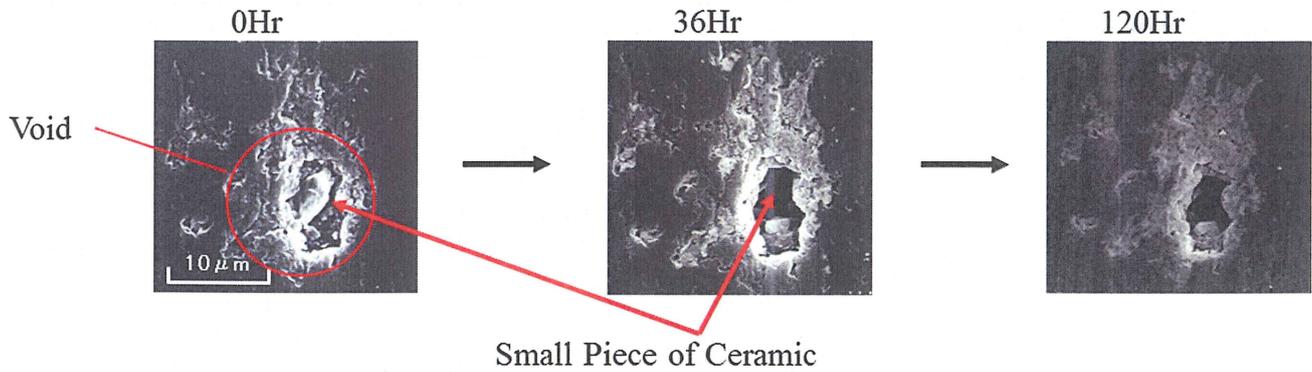


Fig.2.39 Observation Result of Void

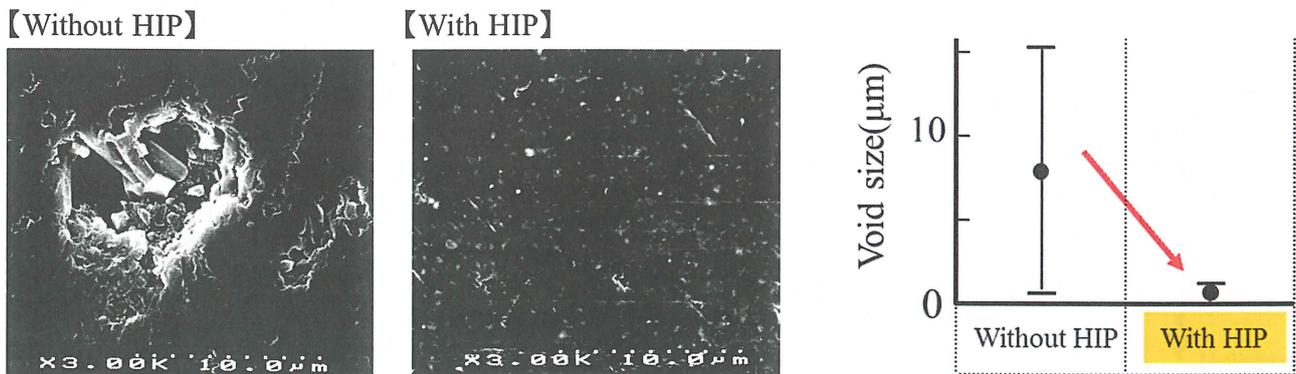


Fig.2.40 Effect of HIP on Reducing Void

### 2.4.4 エンジン制御

ここからは、システムの制御性とその改良内容について述べる。ECD-U2P 及び EGR のフィードバック制御システムは第 2 世代の ECD (Electric Controlled Diesel) システムとして 16bit マイクロコンピュータに組み込んだ。

図 2.41 は ECD システムの概要を示す。様々な運転条件下の中で、高応答・高精度な制御を行うことで、排気レベルを低く抑え黒煙を見えないレベルまで低減し、優れたドライバビリティと低騒音、低燃費を実現した。噴射量及び噴射時期はアクセルペダル開度、エンジン回転数、その他様々なセンサーにより検出された運転条件に従って決定される。しかしながら、従来の噴射制御に比較しパイロット噴射やレール圧制御を追加したことで、ECD-U2P の制御には多くの改良を加えた。噴射量及び噴射圧に関する演算スケジュールについては、異常検出性の改良及び、シリンダ間のレール圧の変化に伴う噴射バラツキの低減のため、ポンプによる燃料の加圧が完了後に噴射を開始するというコンセプトのもとに検討を進めた。

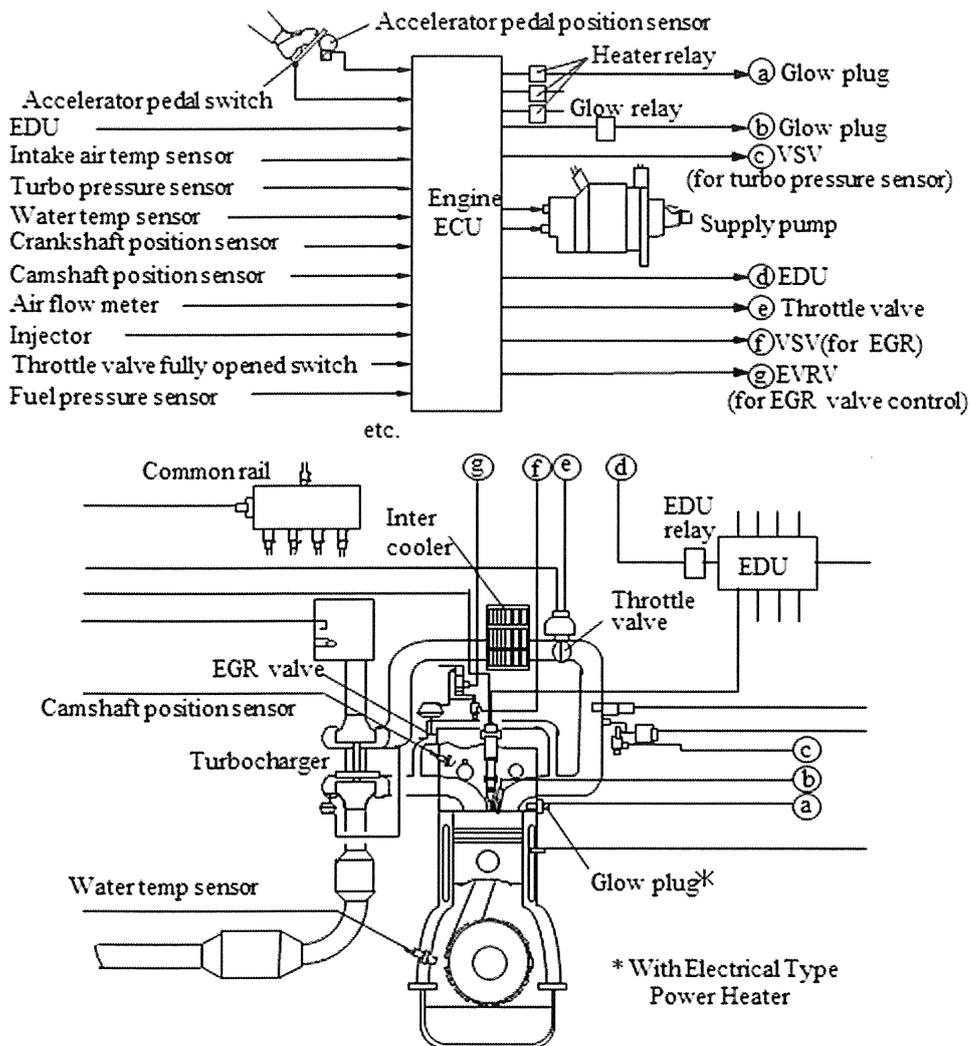


Fig.2.41 Schematic Diagram of Engine Management System

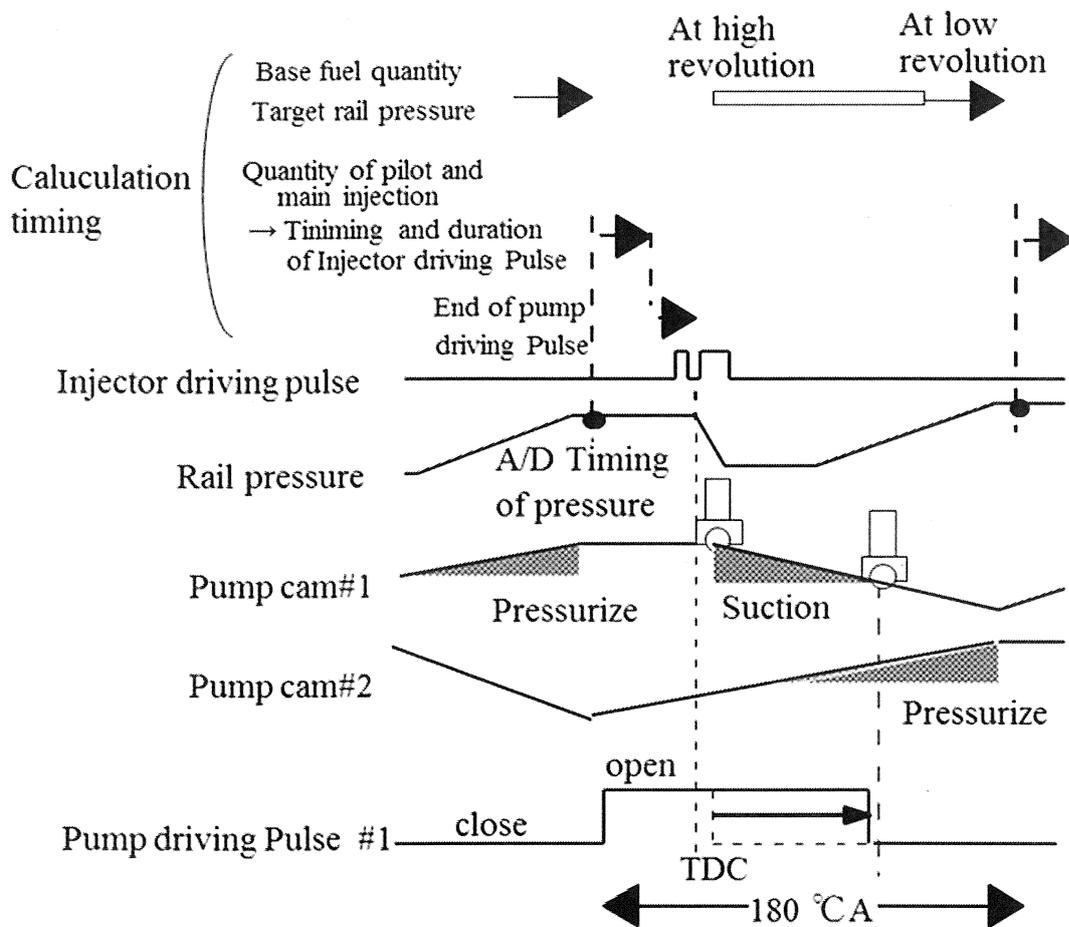


Fig.2.42 Calculation Schedule of Injection System

図 2.42 は噴射量、噴射時期及び噴射圧力制御における演算スケジュールをまとめたものである。レール圧力が検出される前に、エンジン回転数及び基本噴射量と次回圧送時の目標圧力が計算される。レール圧力を検出後、基本噴射量はパイロット噴射量とメイン噴射量に振り分けられる。それと同時にパイロット噴射時期とメイン噴射時期は基本噴射量とエンジン回転数より計算される。次に大気温度、水温等により補正が加えられ、パイロット及びメイン噴射の最終噴射量、最終噴射時期が決定される。その後インジェクタの駆動パルス時期及びインジェクタの駆動間隔が、パイロット及びメイン噴射に対してレール圧を考慮して計算され、噴射が行われる。上記のようにエンジン回転数の演算等につき、レール圧を検出した後の短い期間でこれらの演算を完了させておく必要がある。この間ポンプの調量バルブ制御の演算も実施されるため、演算スケジュールについてはそれぞれの制御に関する演算が干渉して遅れることがないように最適化した。

#### 2.4.5 パイロット噴射制御

図 2.43 はパイロット噴射制御におけるシーケンスを示したもので、上からソレノイド通電状態、ソレノイドバルブのリフトの動き、制御室圧変化、ニードルリフトの動き、噴射率

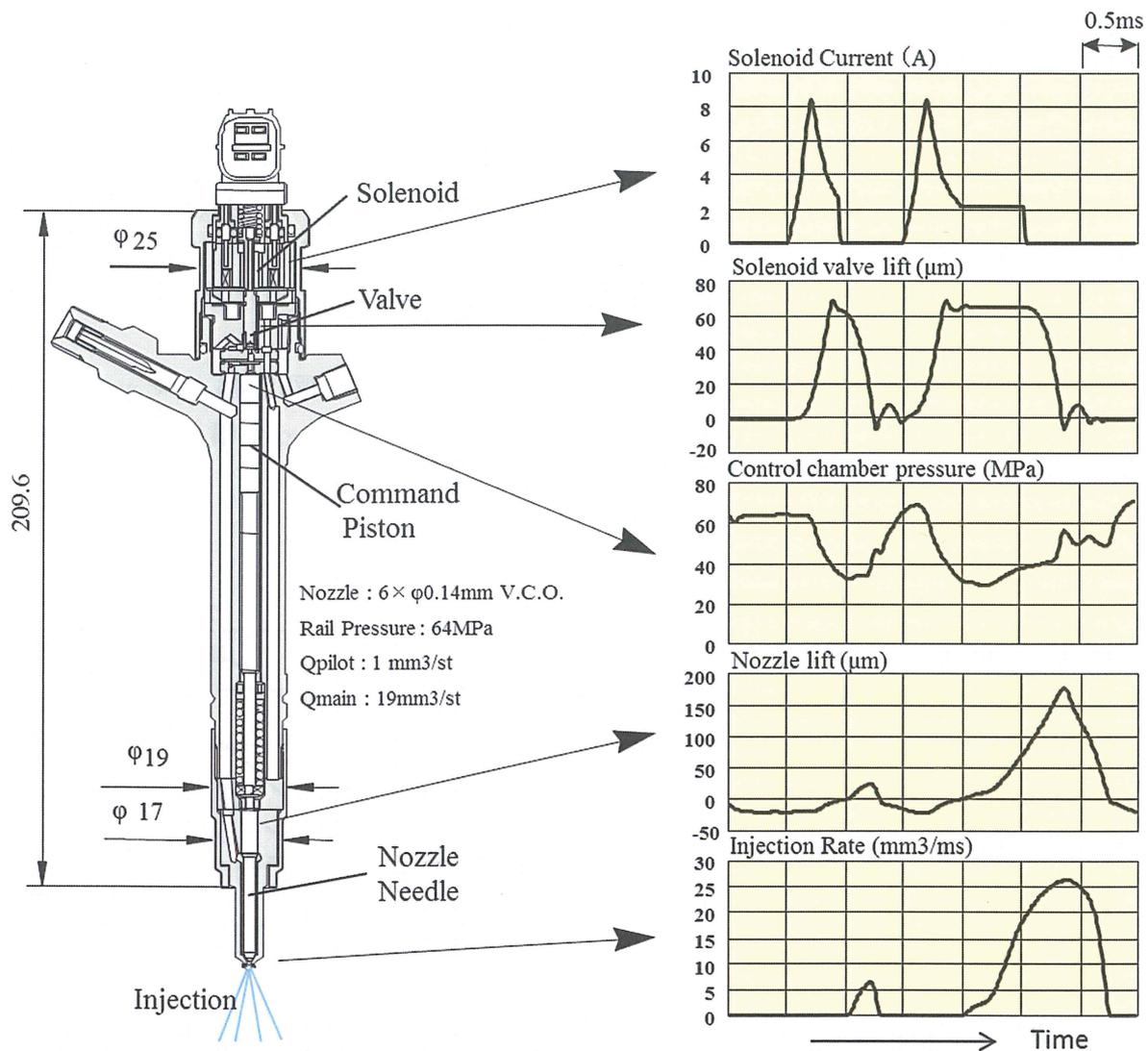


Fig.2.43 Pilot Injection - Sequence of Signals -

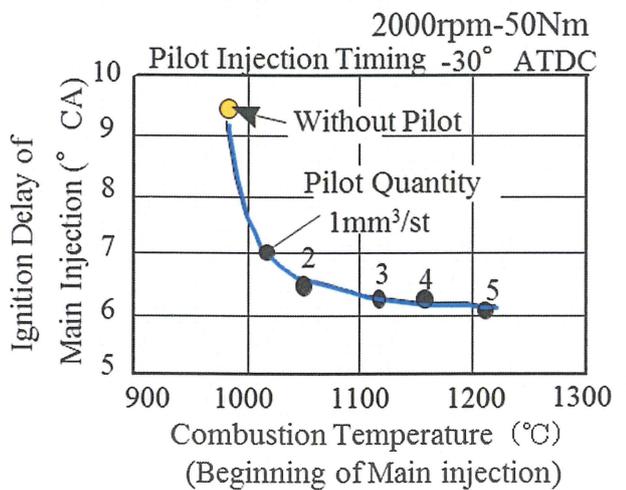
を示している。ソレノイドに通電されると、磁力が発生し、ソレノイドバルブが開く、コマンドピストン室の高圧燃料が出口オリフィスからリターン側に排出されるためコマンドピストンは上方に移動し、同時にニードルは開弁しパイロット噴射が行われる、その後ソレノイドの通電を遮断すると、ソレノイドバルブが閉じるため、コマンドピストン室の油圧は上昇し、コマンドピストン、ニードルは押し下げられ、パイロット噴射は完了する。この後同制御を続けることで図に示すような、パイロット、メイン噴射という2段階噴射が可能となる。

図 2.44 はパイロット噴射量とパイロット噴射時期を変更した際のメイン噴射の着火遅れへの影響を調べたものである。主噴射時期は TDC で固定している。図(a)ではパイロット噴射時期 $-30^{\circ}$  ATDC でパイロット噴射量を変えているが、 $1\text{mm}^3/\text{st}$  程度の少量のパイロットでもパイロット噴射が火種となることで、主噴射の着火遅れは改善できる。さらにパイロット量を増やしても着火遅れの縮小効果はそれほど期待できず主噴射の着火時の燃焼温度が上がるのみである。パイロット噴射時期と主噴射時期の差をパイロットインターバルというが、図(b)ではパイロット噴射量  $1\text{mm}^3/\text{st}$  の条件でパイロット噴射を遅くする、すなわちインタ

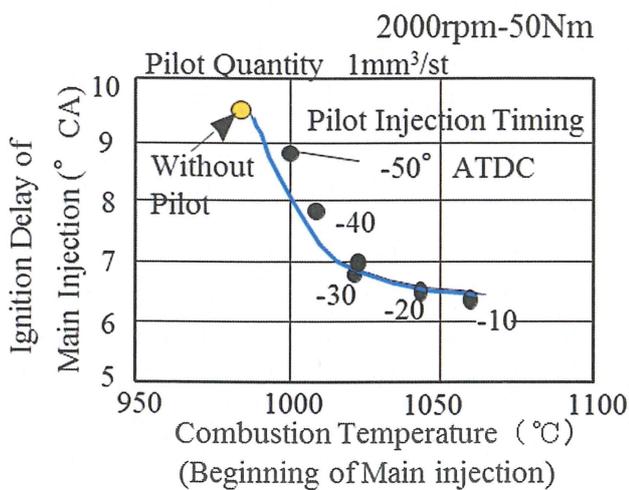
ーバルを短くすることで着火遅れを改善できることがわかる。このように主噴射の着火遅れ改善に対しては、少量のパイロットを主噴射に近接して噴射するのが良いと言える<sup>(19)</sup>。

図 2.45 はパイロット噴射時期、噴射量の排気ガス成分および騒音への影響を調べたものである。PM、NO<sub>x</sub> 及び燃焼騒音を低減するには比較的少量のパイロットをメイン噴射の 10～30° C.A 前に噴射することが有効であることがこのエンジンにおいて実験的に確認できた。パイロット噴射量を増やすことで、主噴射の着火遅れは改善できるが、10～30° C.A 前に噴射する場合、熱発生量の増加に伴い燃焼温度、圧力上昇率もあがるため、NO<sub>x</sub>、PM、燃焼騒音は悪化するものとする。

これらのデータ解析を、そのほかの運転領域でも実施することで、図 2.46 のマップデータに示すように(a)レール圧、(b)パイロットインターバル、(c)パイロット噴射量の回転数・負荷領域における最適値を決定した。



(a) Influence of Pilot Quantity



(b) Influence of Pilot Injection Timing

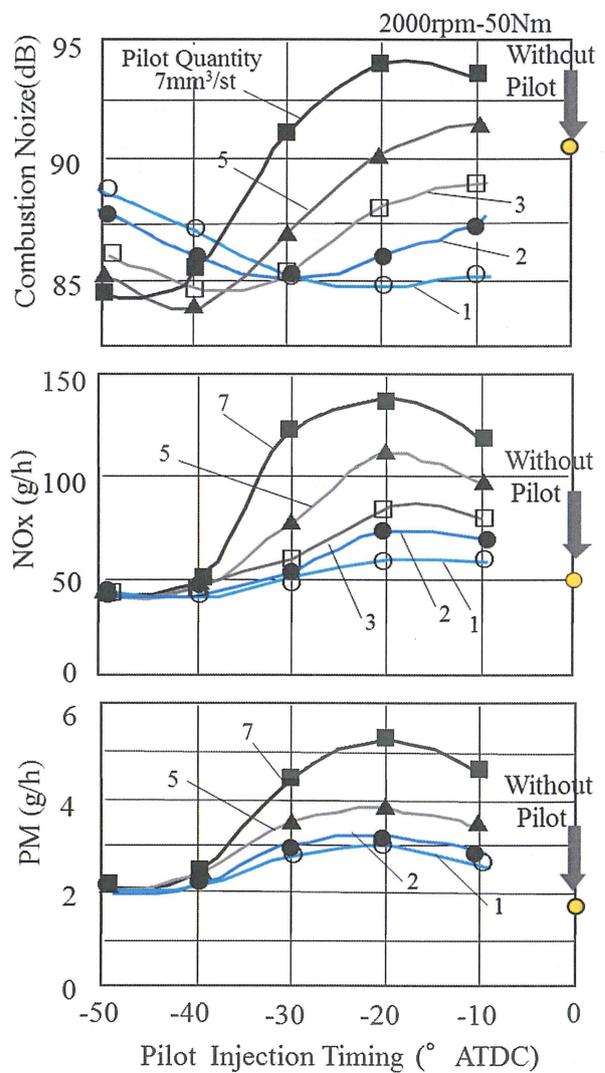
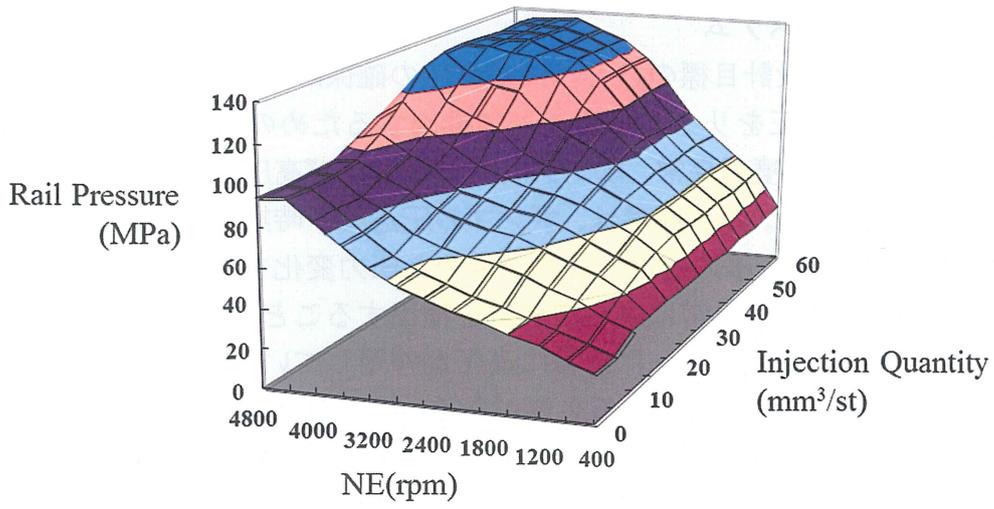
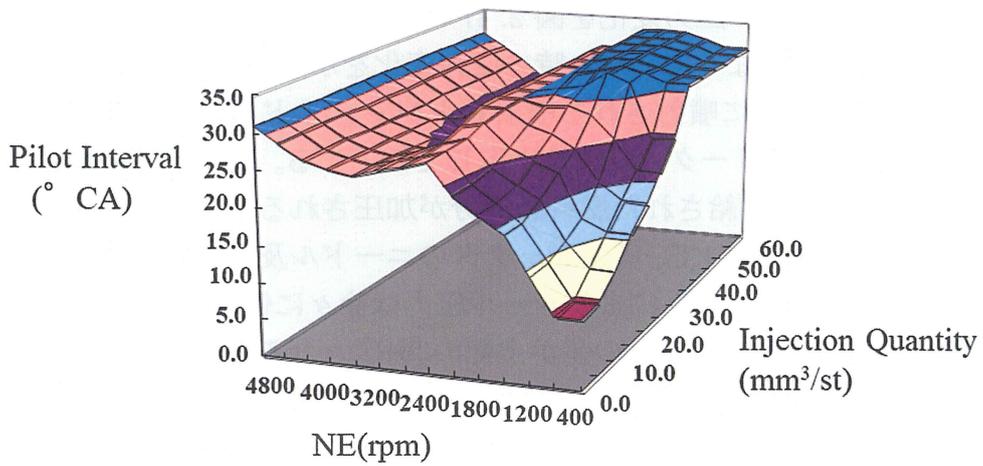


Fig.2.45 Exhaust Emission and Pilot Control

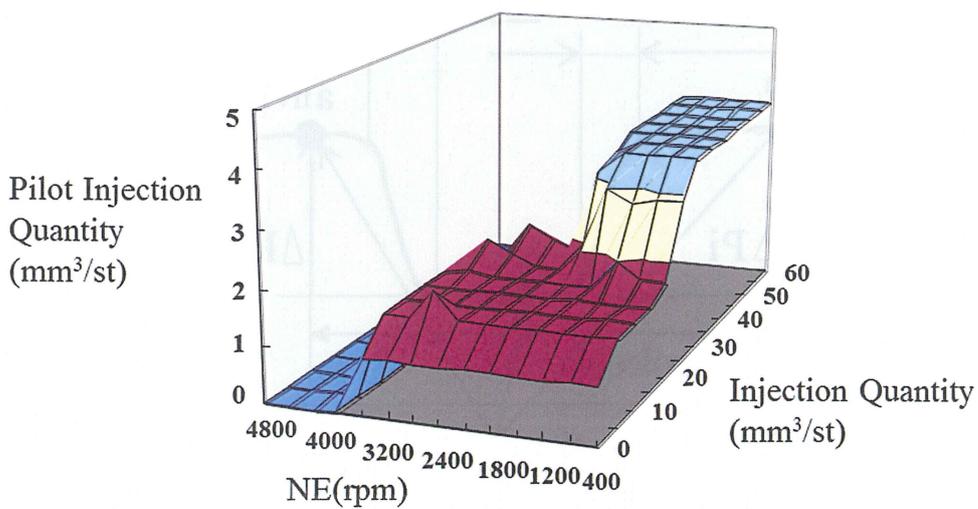
Fig.2.44 Ignition Delay



(a) Rail Pressure Map



(b) Pilot Interval Map



(c) Pilot Quantity Map

Fig.2.46 Control Map of Pilot Injection

## 2.4.6 燃料制御異常監視システム

コモンレールシステムの設計目標のひとつに安全性の確保がある。圧力制限バルブはレール圧が異常になった時に高圧をリターンサイドに排出するための機械的フェールセーフ機能を持つが、これとは別に、噴射異常、ポンプ制御異常および高圧システムにおける燃料漏れを検出する手法を検討した。基本原理は、ポンプの圧送終了時期からインジェクタの噴射終了時期の間で、実際のレール圧力変化と計算で求めた圧力変化を比較することで異常を検出する。その結果、様々な部品異常に対して異常を検出することが可能となった。

コモンレールシステムの圧力ラインには常に高圧が作用しているため、わずかな時間であったとしても、漏れ量をしっかり検出する必要がある。特に燃焼室への燃料漏れはシリンダ内が高圧になりエンジンに大きなダメージを与える。そのため、精度良く連続的に検知が可能で故障部品の特定ができる燃料制御異常監視システムは重要である。

### 2.4.6.1 燃料制御異常検出方法

燃料噴射、燃料圧送行程での圧力変化を図 2.47 に示す。これはインジェクタからの噴射とポンプからの燃料圧送が重なっていない時の圧力変化を示したものであるが、①噴射期間中にレール圧力はシリンダ内に噴射される噴射量とソレノイドバルブ開期間にリターンパイプ側に流れる噴射量（動的リーク）の総量に応じて低下する。②ポンプの燃料圧送行程においては、ポンプの高圧室に供給された燃料調量分が加圧されることでレール圧は増加する。③これらに加え、全行程中において、インジェクタのニードル及び制御ピストンの摺動部等からの燃料のリーク（静的リーク）によりレール圧力は徐々に低下する。図中の  $a_n$  と  $b_n$  の差が上記の①+③となり、 $b_n$  と  $a_{n+1}$  の差が上記の②+③となる。これらの燃料流量を使ってレールの圧力変化は計算できるので、レール圧センサーにより検出される圧力とこれら計算で求められる圧力を比較することで異常を検出することが可能となる。

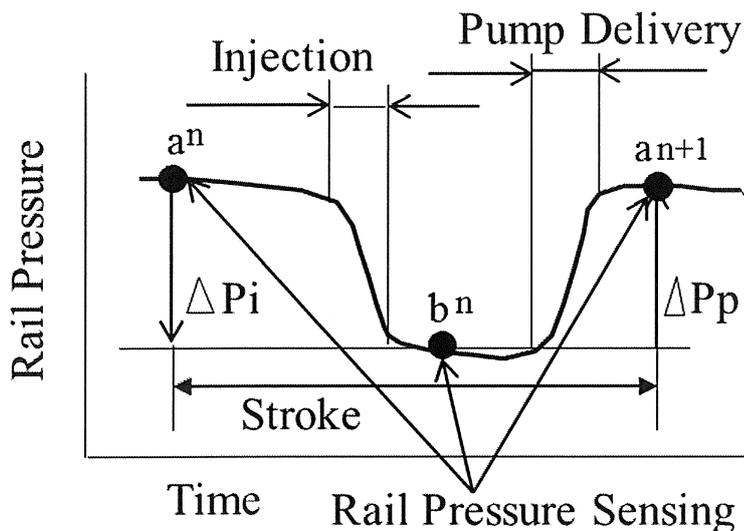


Fig.2.47 Fluctuation of Rail Pressure

ここで計算式について少し説明を加える。

容積内の圧力と体積の関係は体積弾性係数の定義から  $\Delta P/K = -\Delta V/V$  であらわされる。

( $\Delta P$  : 圧力変化、 $\Delta V$  : 容積変化、 $V$  : 容積、 $K$  : 体積弾性係数)

ここで体積弾性係数  $K$  は  $K=AP+B-C(T_f-40)$  で表される。(P: 圧力 A, B, C: 定数、 $T_f$ : 燃料温度)

体積弾性係数  $K$  は、図 2.48 に示す閉じた容器中の燃料体積と圧力の実験値と式  $\Delta P/K = -\Delta V/V$  より近似した。この弾性係数を使い図 2.49 に示すようにレール容積  $V_0$  : 32000mm<sup>3</sup>、レール圧力  $P_0$  : 100MPa のもとで燃料圧送量  $v$  (mm<sup>3</sup>) と昇圧量  $p$  (MPa) の関係を検証し、近似式  $p=K \times v/V_0$  でレール内の圧力変化を計算できることを確認した。

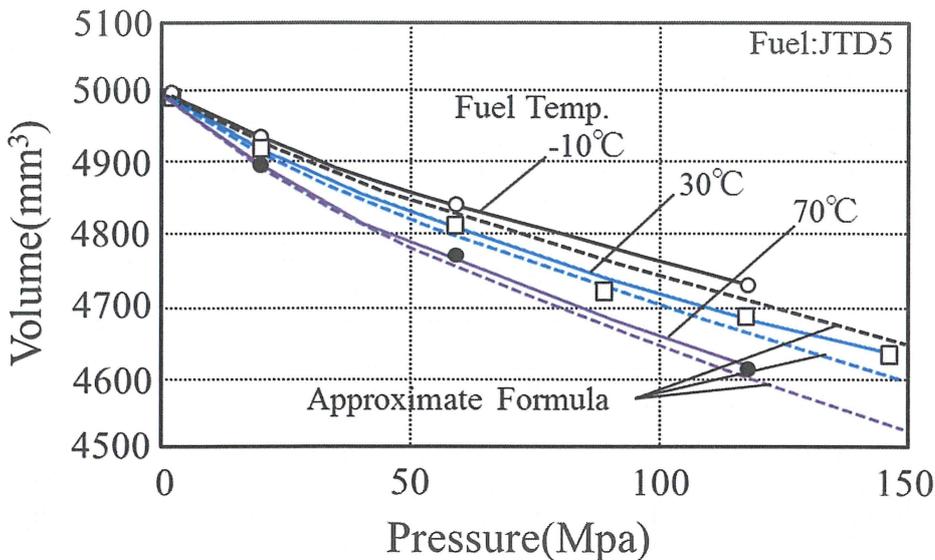


Fig.2.48 Correlation between Pressure and Volume

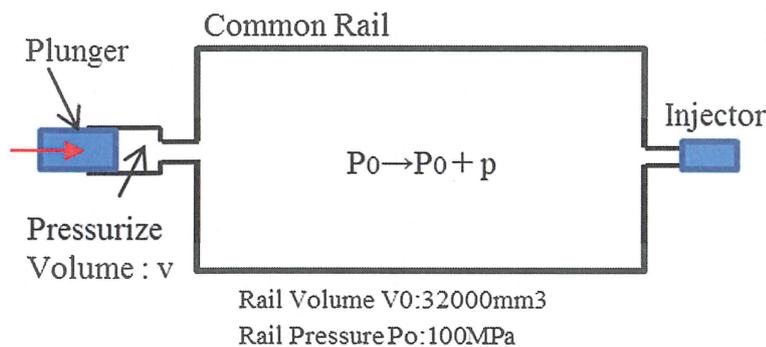


Fig.2.49 Calculation Model

異常の検出については、レール圧の変動あるいはそれ以外の誤差による検出エラーを防ぐために、過去7回分も含めて8回分の平均をとり、毎回その値が基準値を超えるかどうかで判断する。異常を検出すると、次に不具合部品の特定を行うことになる。

高レール圧で噴射量が多い場合は図 2.47 の噴射終わりが遅く、逆にポンプ圧送開始が早まるため、噴射期間と燃料圧送期間がラップすることもある。そのため、異常を検出すると噴射期間と燃料圧送期間がラップしている場合はレール圧を強制的に下げて燃料供給を減

らし、それぞれを分離したうえで図 2.47 に示す  $a_n$  と  $b_n$ ,  $b_n$  と  $a_{n+1}$  の行程でレール圧力をチェックする。表 2.5 にモードと故障部品を示すが、異常は計算で求められる値と実測値を比較し、図中に示す噴射工程の圧力差 ( $\Delta P_i$ )、圧送工程の圧力差 ( $\Delta P_p$ ) より全行程のどの行程に問題があるか判定し、故障部品を特定することができる。

Table.2.5 Trouble Component

		Value of $\Delta P_i$	
		Normal	Abnormal
Value of $\Delta P_p$	Normal	Normal	Injector
	Abnormal	Pump	High Pressure Line

ここで先ほどの式  $p=K \times v / V_0$  を使い、 $\Delta P_i$ 、 $\Delta P_p$  は次式で算出できる。

$$\Delta P_i = - (\text{燃料噴射量} + \text{噴射中の動的燃料リーク} + \text{静的燃料リーク}) \times K / V_0$$

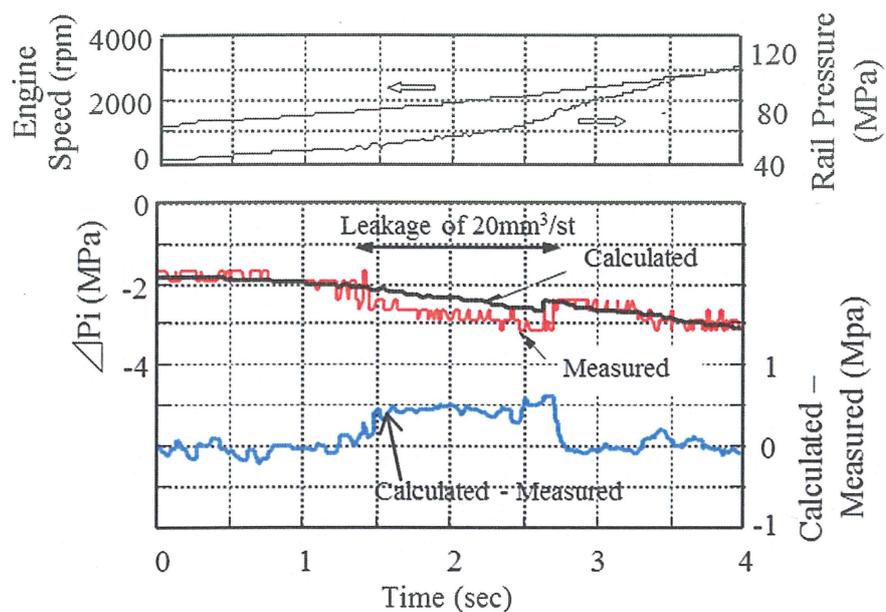
$$\Delta P_p = (\text{ポンプ圧送量} - \text{静的燃料リーク量}) \times K / V_0$$

このように、異常検出システムを開発することで、異常が発生してもすみやかに不具合部品を特定し、多くの場合はエンジンを止めることなく退避走行を可能とした。表 2.5 の内容を部品の不具合にまで整理すると以下のようにまとめることができる。

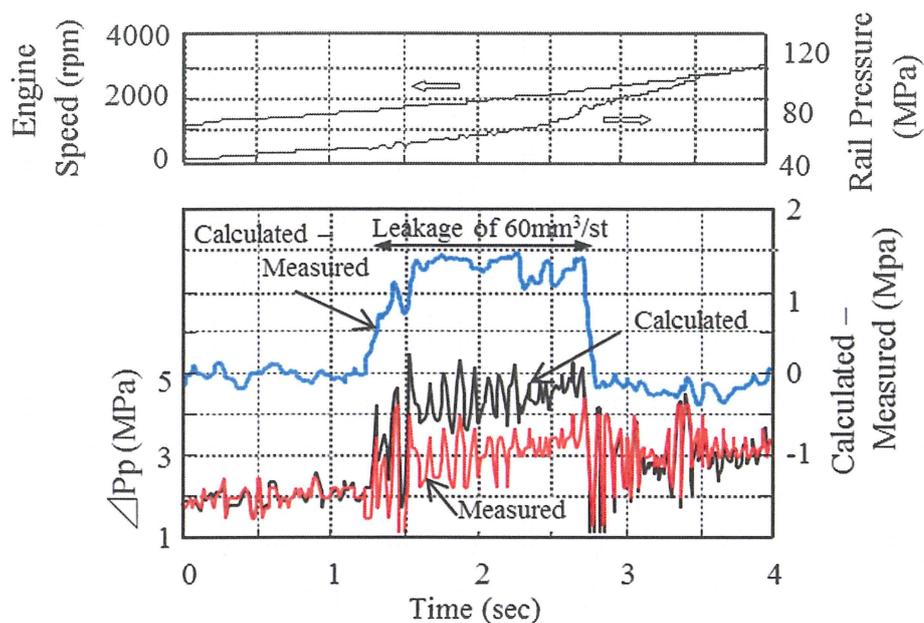
- (1) 特定のシリンダにおける噴射行程の圧力差 ( $\Delta P_i$ ) 異常  
特定の気筒のインジェクタに於いてソレノイドバルブ、コントロールピストン、ニードルの作動不良、あるいはソレノイドの断線不具合
- (2) ポンプ圧送行程の圧力差 ( $\Delta P_p$ ) 異常  
ポンプにおける故障で、実際の圧力変化が計算より小さい場合はプランジャでの漏れ、フィルターつまりによる燃料吸入不良、ガス欠。  
過剰な圧力上昇の場合はポンプ調量バルブの異常。
- (3) 噴射行程の圧力差 ( $\Delta P_i$ ) ポンプ圧送工程の圧力差 ( $\Delta P_p$ ) とともに異常  
インジェクタからシリンダ内あるいはシリンダ外への燃料漏れ、あるいはレールを含む高圧ラインからの漏れ。

図 2.50 に異常監視システムの検出性能を評価した結果を示す。噴射行程での圧力低下分  $\Delta P_i$ 、圧送行程での圧力上昇分  $\Delta P_p$  の実測と計算での圧力を示すが、ここではレールに装着されたリリーフバルブを使い強制的に燃料をリークさせることでシステムの異常検出性を確認した。

漏れない場合、計算と実測のレール圧差は 0.3MPa 以下と小さいことを確認した。



(a)Injector



(b)Pump

Fig.2.50 Detection Ability of Leakage Monitoring System

図 (a)はリリーフバルブにより 180° クランクアングル間あたりの漏れ量を 20mm<sup>3</sup>とした時の噴射行程の圧力差 ( $\Delta P_i$ ) の実測と計算結果を示す。この時の実測と計算での差は 0.5MPa となり、漏れを検出できることがわかる。

図(b)はリリーフバルブにより 180° クランクアングル間あたりの漏れ量 60mm<sup>3</sup>とした時のポンプ圧送工程の圧力差( $\Delta P_p$ )の実測と計算結果を示す。漏れが発生することによる圧力低下を補うため $\Delta P_p$ は増加するが、60mm<sup>3</sup>漏れた時の実測と計算での差は 1.5MPa となり、図(a)

の結果と併せて、テストを行った過渡状態においても高い漏れ検出性能を示している。漏れの誤検出を防ぐために判定基準値はポンプ圧送量、ニードル、制御ピストンからの静的リーク量、制御バルブ開時の流量バラつきを考慮し、慎重に決定した。

### 2.4.6.2 燃焼室への燃料漏れ評価

シリンダ内の異常燃焼は燃焼室への燃料漏れ、たとえばインジェクタの制御ピストンの固着等によって吹きっぱなしが起きた場合に発生する。このような漏れが検出できれば、ポンプ作動を停止して数回にわたる異常燃焼の発生を大幅に低減でき、結果的にエンジン破損を回避することができる。1CD エンジンを使って、最大燃焼圧力、異常燃焼の発生回数、異常検出システムによる検出タイミング及びエンジンへのダメージを解析するために、連続噴射による実験を実施した。結果を図 2.51 に示す。エンジン回転数は最大の燃焼圧力が発生するように吸入空気量が最大となる最大トルク点を選んだ。

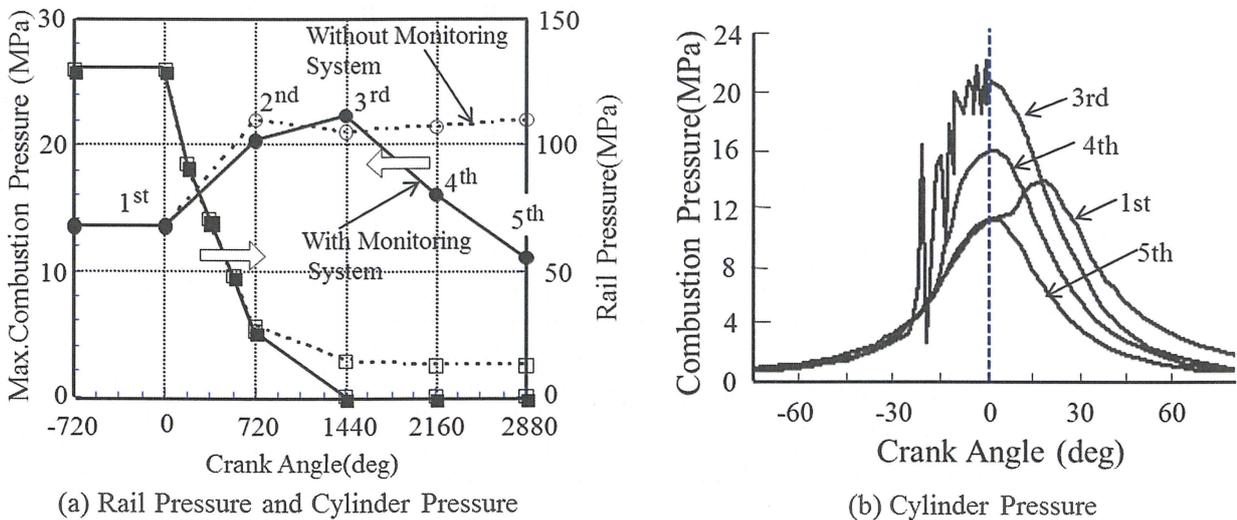


Fig.2.51 Effect of Leakage Monitoring System on Continuous Leakage Detection

実験は正常な噴射のもとで開始した。図(a)に示すように漏れが発生するとレール圧力は大幅に低下するが、異常検出システムを使わない時は、ECUがレール圧力低下に伴う目標圧力とのギャップを埋めるようにポンプ圧送量の増加を要求するため、レール圧はゼロとはならない。そのため、異常燃焼は2回目の燃焼タイミングで最大22MPaに達しその後も連続する。ただしこの時吸入空気量に対し、理論混合比相当の燃料が毎回すべて予混合燃焼しておりこれ以上圧力が上がることは無い。

一方、システムを作動させると、レール圧力の異常な低下(漏れ)を検出し、ポンプの圧送を停止するためレール圧はゼロとなる。その結果、20MPaを超える異常燃焼は2度で収まり、その後は通常の燃焼圧レベルにまで低下することが確認できた。図(b)にシステムを作動した場合の燃焼波形を示す、正常な一回目の燃焼に対し、異常燃焼発生時はTDCよりも30°前付近から急激な圧量上昇(100%予混合燃焼)が起こるがその後は低下し、5回目では燃焼していないことがわかる。

様々な実験によりこのエンジンでの最大燃焼圧力は22MPaであり、異常な燃焼圧力の発生

回数は2回で、漏れ発生から720° CAの間で漏れを検出し、ポンプの圧送を停止できることを確認した。加えて、エンジン破損も、コネクティングロッドの捩じり強度を22Mpa以上とする設計により防げることが確認できた。

#### 2.4.7 降圧制御性の改良

レール圧力の降圧速度が低いと目標圧力に対して実際の噴射圧が高くなるため燃焼音の悪化が引き起こされる。そこでレール圧を下げることで燃焼音悪化を防止するために、高压燃料を低压側に排出することを検討した。図2.52(a)は制御バルブの作動時間Tと噴射量の関係を示したものである。図2.52(b)は加速から減速に移った際のレール圧力の挙動を調査したものである。図(b)の①に示すように、減速時は無噴射となるため通常は降圧速度が遅く目標圧力とのギャップが大きい。③に示すようにリリーフバルブを使えば、レール圧力が目標圧力よりも高い時でも高压を強制的に排出できるため、レール圧を下げるができる。但しこのバルブの追加によりコストアップと搭載上の問題が発生する。

減速状態においては、目標圧よりも実際のレール圧は高いのでポンプは圧送していない。この様な時、レール圧力はシリンダへの燃料噴射、ニードル、制御ピストンクリアランス部からの静的な漏れ、及び噴射中のソレノイドバルブからリターンサイドへの制御燃料の排出により低下する。これらの排出量を増やす手段として、噴射燃料は運転条件等で決まっているので増やすことはできない。クリアランス漏れはニードル或いは制御ピストンのクリアランスを大きく取ること容易に増やすことはできる。しかしこれは高压ポンプに余分な仕事を要求することになり燃料消費を悪化させることに繋がる。

図(a)をみると、レール圧に関係なく500μs以下では噴射しないことがわかる。500μs以下のソレノイドの作動であれば、燃料噴射させない範囲で制御バルブを開き、制御室の高压燃料を出口オリフィスからリターン側に排出させレール圧を下げる事が可能となる。図(b)の②にはこの手法を使った場合の降圧特性を示しているが、レール圧力の降圧速度はリリーフバルブを使う場合ほど早くはないが、燃焼音についてはリリーフバルブの作動と同等レベルに改良することができた。この手法の開発により、余分な部品を加えることなく減速時(降圧時)の燃焼音改良を行うことが可能となった。

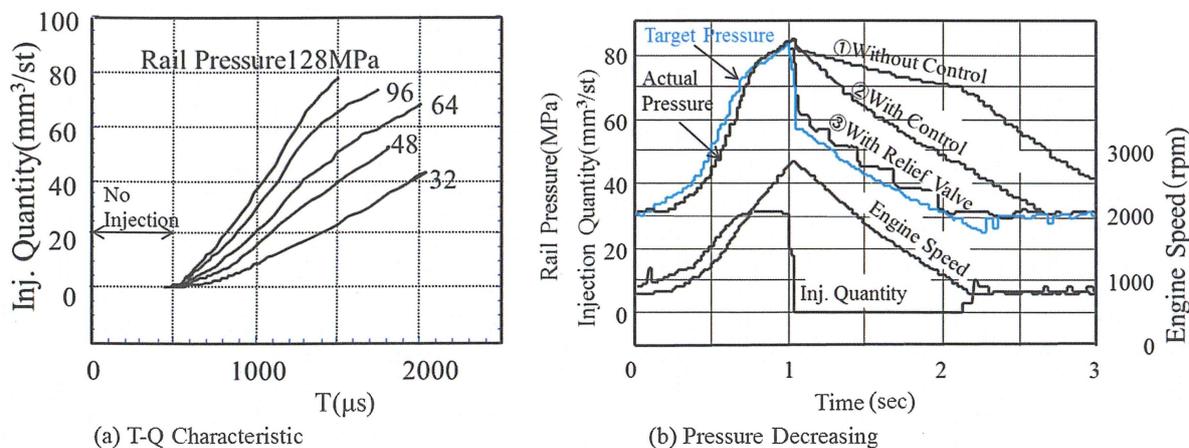


Fig.2.52 Improvement of Decreasing Speed of Pressure

## 2.5 まとめ

本章の結果についてまとめる。

新開発のディーゼルエンジンにおいて、コモンレールシステムをはじめ、4バルブレイアウトによるセンターインジェクションの実現、それと併せた燃焼室の改良等により、燃費性能、出力性能の大幅改善、排気のクリーン化が可能となった。コモンレールシステムについては、インジェクタ、高圧ポンプ共に小型排気量エンジンでも搭載可能なことを重視したシステム諸元の検討を進め、21世紀につながる小型直噴ディーゼルエンジンのベースとしてそのコンセプトを確立することができた。ここで、コモンレールシステム ECD-U2P の研究開発結果についてまとめると以下のようなになる。

### (1) インジェクタ

- ・ソレノイドバルブシート部の静的漏れは2方弁に平面シートを採用すること、加えて幅の小さい環状溝構造を取ることによって高圧燃料から受ける油圧作動力を1/4に低減することができ、その結果インジェクタサイズの小型化が可能となる。
- ・シート上の環状溝の外側に衝撃荷重の大半を受けるドレイン溝の追加及びPVD処理を行うことで、バルブシートの信頼性を大幅に改善できる。

### (2) 高圧ポンプ

- ・2組の対抗ピストンをタンデムに配置することで、シングルポンプに対しポンプ駆動トルク変動を半減し、ベルトレイアウトでのエンジン搭載が可能となる。
- ・全量圧送方式に対し、必要な量のみ吸入する時間調量方式を取ることによってポンプの平均駆動トルクの低減が可能となり、その結果、欧州のECモードサイクルにおける燃費率を2%改善し、高圧燃料を大気解放した時の燃料温度の上昇も45°Cに抑制できる。
- ・ローラ材をセラミックとしHIP処理を加えることで、300MPaを超える高面圧においても信頼性を十分に確保することが可能となる。

### (3) 異常検出システム

噴射に圧送をうまく同期させることで、故障部品を特定できる正確かつ簡単な異常検出システムを開発することができる。

### (4) 異常燃焼

シリンダへの燃料漏れを検出により、異常燃焼に伴う燃焼室内の高圧の発生は2回に抑えることが可能となり、最大圧力は22MPaとなる。コネクティングロッドの捩じり強度を25MPaを超えるように設計することでエンジン破損に対する安全率を確保できる。

### (5) 降圧制御性の改良

インジェクタのソレノイドバルブをニードルが開くまでの500 $\mu$ secの期間作動させることで、減速時の圧力降下性能を改良し、その結果、目標圧力より高い噴射圧によって発生する燃焼音を追加部品なしで許容レベルに改善することができる。

## 第3章 コモンレール噴射式小型直噴ディーゼルエンジンの

### 後処理システム (DPNR) の研究

#### 3.1 まえがき

この章では NO<sub>x</sub> と PM を同時かつ連続的に低減可能な触媒システムを装着したコンパクトなディーゼルエンジンの研究開発について述べる。著者らはこの世界初の新触媒システムを DPNR (Diesel Particulate NO<sub>x</sub> Reduction System) と名付けた。

地球温暖化防止策についての論議が世界中で交わされる中で、自動車業界においても CO<sub>2</sub> 低減に対する多くの努力がなされている。このような環境下で、ディーゼルエンジンの市場比率は 45% を超えるレベルにまで到達した。一方、ディーゼルエンジンにおいて NO<sub>x</sub>、PM の大幅な低減は、今後更なるディーゼル乗用車比率の拡大を考える際に避けては通れない重要な課題である。どの自動車製造メーカーもエンジン改良、高圧噴射による燃焼改良、コモンレールシステムの更なる洗練化のみならず、様々な方式の NO<sub>x</sub> 低減触媒<sup>(20) (21)</sup>、ディーゼルパーティキュレートフィルター<sup>(22) (23) (24)</sup> の研究開発を進めていた。

このような中、著者らは DPF (Diesel Particulate Filter) に触媒及び NO<sub>x</sub> 吸蔵材を追加することで PM のみならず NO<sub>x</sub> の同時かつ連続的に低減することが可能であることを発見し、ディーゼルエンジンにおいても画期的な排気ガスの低減が可能となった。ガソリン触媒が NO<sub>x</sub>、HC、CO が浄化できる 3 元触媒と呼ばれることに対し、ディーゼルエンジンにおけるこの新触媒は 4 元触媒とも言える。この触媒を最大限に活用するシステムが DPNR であり、このシステムはコモンレール式直噴ディーゼルエンジンをベースとするもので、前章で述べた制御自由度の高い噴射システムの開発により、この新しい触媒システムも実現可能になったと言える。著者が研究開発を進めた DPNR の特徴は NO<sub>x</sub> と PM を同時にかつ連続的に低減できるだけでなく、コンパクトであるということである。その結果、小型乗用車用ディーゼルエンジンにも適用することが可能となった。

新しい触媒コンバータは NO<sub>x</sub> 吸蔵触媒がコーティングされたセラミック製のモノリス基材からなる。新システムとなる DPNR は、第 2 章で述べたコモンレールシステムに対し更に改良を加えた第 2 世代コモンレールシステムを基本に、高精度・大容量 EGR システム、排気燃料添加システムおよび新触媒システムで構成した。新たな燃焼法としてエンジンから排出される NO<sub>x</sub>、PM の低減が可能な低温燃焼システムを開発した。これは、高精度・大容量 EGR システムの採用により実現可能となった。リーン状態で触媒に吸蔵された NO<sub>x</sub> を N<sub>2</sub> に還元するためには、リッチスパイクによりストイキ条件を作ることが必要となるが、様々な方式を研究し最終的には NO<sub>x</sub> 低減効率が高いこととエンジントルク変動への影響が小さいことを考慮し、上述の排気燃料添加システムを採用した。又、排気燃料添加システムでリッチリーンをうまく制御するための新たな制御方法も確立した。これらにより、いかなる運転環境下においても触媒をうまく活性化し、NO<sub>x</sub>、PM の同時低減を実現することが可能となり、欧州の Euro4 排気ガス規制値を大きく下回る低排出ガスレベルも達成できた。

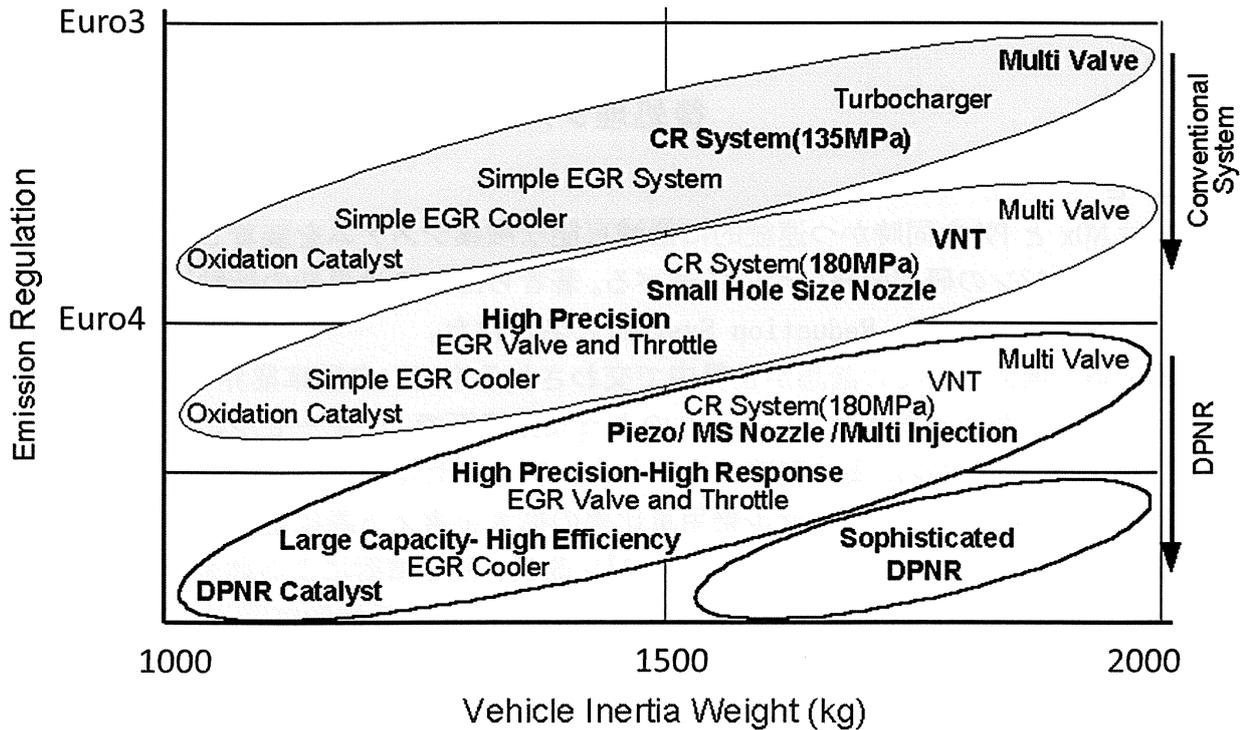


Fig.3.1 A Scenario for Direct Injection Diesel Technology

### 3.2 直噴ディーゼルエンジンの将来技術シナリオ

図 3.1 は著者のまとめた、欧州における将来の排ガス規制強化に対応するための直噴技術シナリオである。4バルブシリンダヘッド、コモンレールシステム、EGRシステムというような技術は既に採用しているが、図に示すようにそれぞれの技術のさらなる改良、新燃焼方式の開発、新触媒技術の研究開発を進め、ディーゼルエンジン本来の良好な燃費性能を維持したうえでNO<sub>x</sub>、PMを低減することが必要となる。コンパクトでNO<sub>x</sub>、PMの浄化性能が高く、コスト効果も高いという特徴を持つ新触媒技術は、近い将来のディーゼルエンジンにおける鍵となり、又ベースの排気レベルを改善し、触媒の性能ポテンシャルを最大限に引き出すためのエンジン改良が新触媒システムDPNR (Diesel Particulate-NO<sub>x</sub> Reduction System) において重要となる。

### 3.3 NO<sub>x</sub>、PM 同時浄化コンセプト

ここではNO<sub>x</sub>とPMを同時に低減できるメカニズムの発見に至る過程について説明する。図 3.2 に示すように、NO<sub>x</sub>浄化技術としては、吸蔵還元型と選択還元型を検討していたが、2000年時点でディーゼル車用として実用化には至っていない。

NO<sub>x</sub>吸蔵還元型触媒(NSR)は、リーンな空燃比のもとでNO<sub>x</sub>を一旦触媒に吸蔵し、瞬間的に空燃比をリッチにすることにより吸蔵されたNO<sub>x</sub>をN<sub>2</sub>に還元浄化する技術であり、ガソリンリーンバーンエンジン用に実用化してきた。ディーゼルエンジンで用いる場合には、空燃比リッチ条件を作る技術が課題となっていた。

一方、尿素化合物を排気系に添加し、尿素から生成するアンモニアを用いて酸素過剰雰囲気

	System Schematic	Issues
NOx Storage Reduction (NSR)	Momentary rich condition Reductant : HC,CO 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Smokeless rich combustion</li> </ul>
Selective Catalytic Reduction	Urea solution Reductant : NH <sub>3</sub> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Installing urea injection system</li> <li>● Infrastructure</li> </ul>
	HC (Fuel) Reductant : HC 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Increase NOx conversion efficiency</li> </ul>

Fig.3.2 Examples of NOx Reduction System

気下で NO<sub>x</sub> を選択的に還元する選択還元型(SCR)は、尿素水のインフラ整備およびアンモニア排出抑制が課題である。また、どちらのシステムも PM を処理することができないという問題があった。

### 3.3.1 NO<sub>x</sub>、PM 同時低減メカニズムの発見

1990 年頃から、PM をフィルターに捕集し、それを定期的に焼却再生するという DPF の技術開発が世界的に行われてきた。しかし、この DPF システムは、PM を溜めてから強制的に

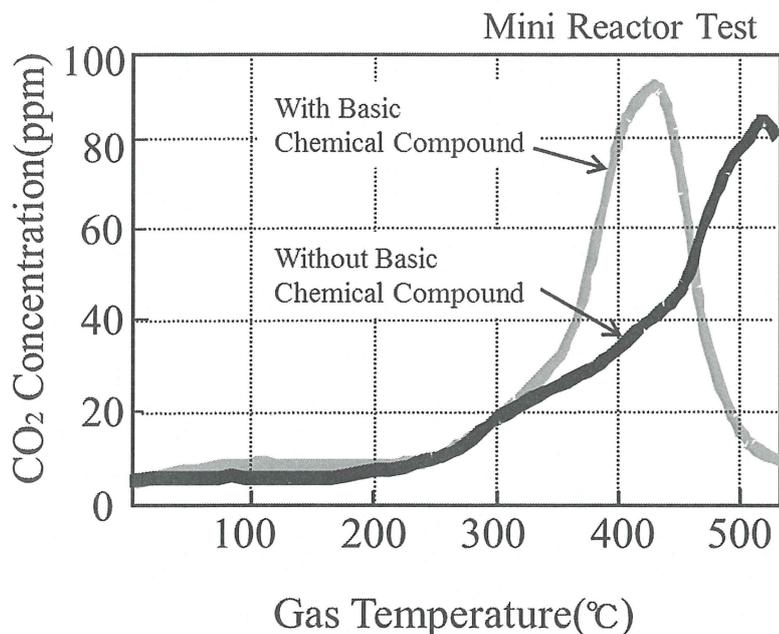


Fig.3.3 PM Oxidation Ability on the Ceramic Material with Catalyst

酸化するために、再生時の熱のコントロールが難しく、時としてDPF 基材の溶損、あるいはクラック等の問題が発生するという問題を抱えてきた。そのような状況下において、著者らはPMを溜めないで浄化するという新しい浄化方法の開発を1997年から開始していたが、十分な結果を得ることができなかった。

しかし、これらの検討の中で、触媒付きセラミック基材の上にPMを付加した場合には、DPFで溜めたPMが500℃以上に温度を上げないと酸化しないのに対し、低い温度からPM酸化能が得られるという現象を確認した。図3.3に塩基性の化合物を担持した場合とそうでない場合のPMの酸化への影響を示すが、塩基性の化合物の担持により、100℃低いガス温でもPMの酸化が促進されることがわかる。

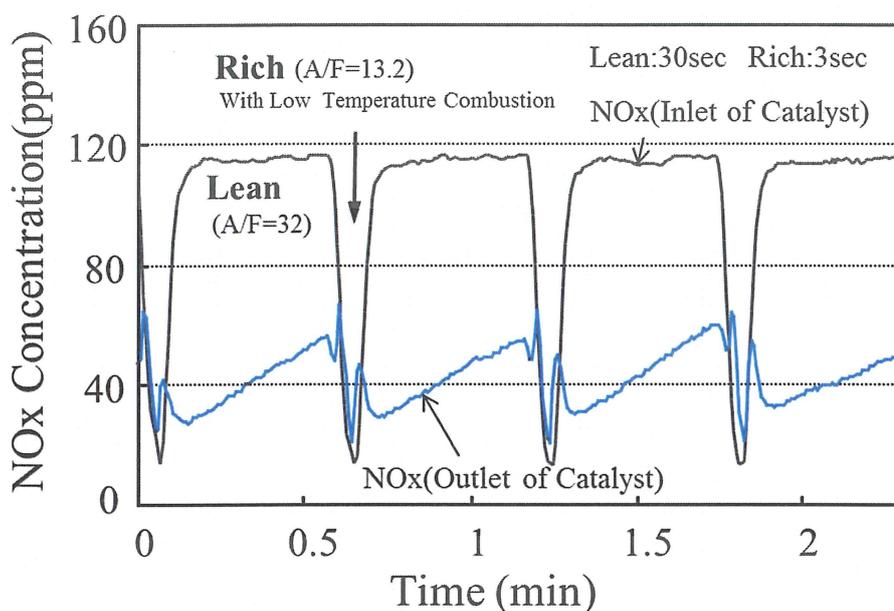


Fig.3.4 Effect of Rich Spike on NOx Regeneration Behavior in DPNR

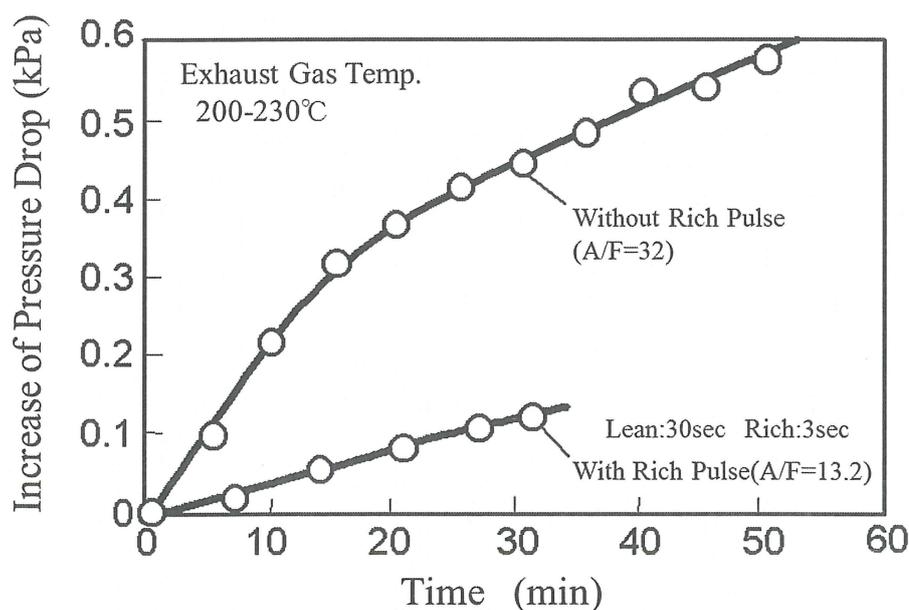


Fig.3.5 Effect of the Rich Pulse on the Transition of Pressure Drop

次に、この塩基性の化合物を NO<sub>x</sub> 吸蔵材とし、図 3.4 に示すように空燃比リーンとリッチを繰り返すことによって NO<sub>x</sub> を浄化しながら、PM のフィルター詰りによる圧力損失の昇がどのように変化するかを調査した。その結果、図 3.5 に示すように空燃比を変動させたほうが圧力損失の上昇が少なく、PM の酸化が促進されていることが判明した。これらの結果から、PM の酸化は触媒担持されたフィルタ上で比較的低い温度から生じ、さらに NO<sub>x</sub> 浄化のための空燃比リーンリッチを組み合わせることによって、それが連続的に促進されるという、これまでにない新しいメカニズムの存在を推定するに至った。

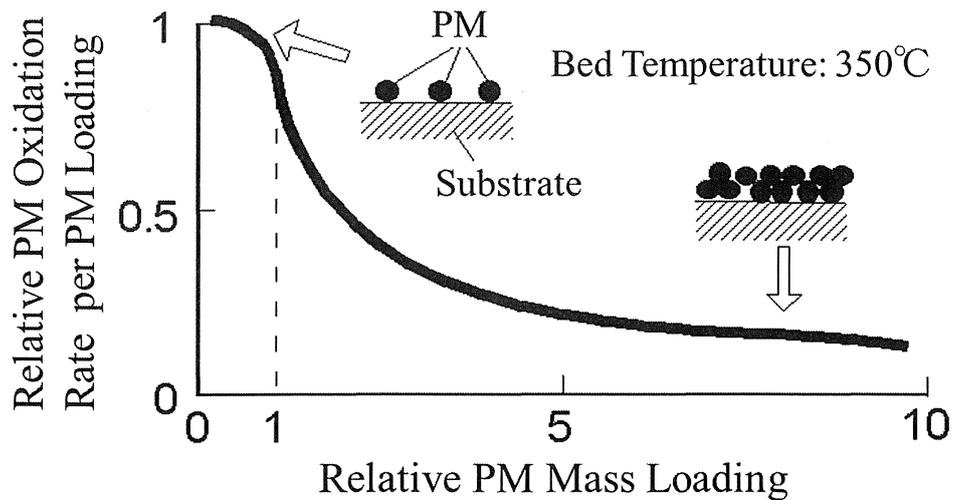


Fig.3.6 Relationship between the PM Mass Loading and the PM Oxidation Rate

### 3.3.2 NO<sub>x</sub>、PM 同時低減コンセプトの確立

#### 3.3.2.1 PM の連続酸化

まず PM の連続酸化現象を明確にするために、図 3.6 に示すように触媒上に捕捉された PM 量と酸化速度の関係を、実際のエンジンを用いて 350°C という触媒床温下で調査した。その結果、PM 捕捉量が少ないと PM 酸化速度は速いが、捕捉量が多くなると急激にその酸化性能が低下することが明らかとなった。

次に触媒上での PM の接触性と酸化性能について調査した結果を図 3.7 に示す。調査は、PM と DPNR 触媒を基材とともに粉碎した粉末を、接触度合いを変えて混合し、PM の酸化による CO<sub>2</sub> 濃度を比較する方法で行った。その結果、図からわかるように触媒と接触度の高い PM の方がより低温で酸化され、PM 酸化においては触媒との接触性の確保が重要であることが確認できた。

以上より PM の連続酸化を低温から確保するためには、触媒上で PM が密に接触する状況を作ること、すなわち触媒表面積を確保しなるべく PM を溜めない状態にして、連続酸化させることが重要である。また PM 酸化は、ガス反応のように分子レベルで高速に進むのではなく、触媒表面上に捕捉された状態で徐々に酸化していくことも透過型電子顕微鏡を用いた観察結果から推察できた<sup>(25)</sup>。

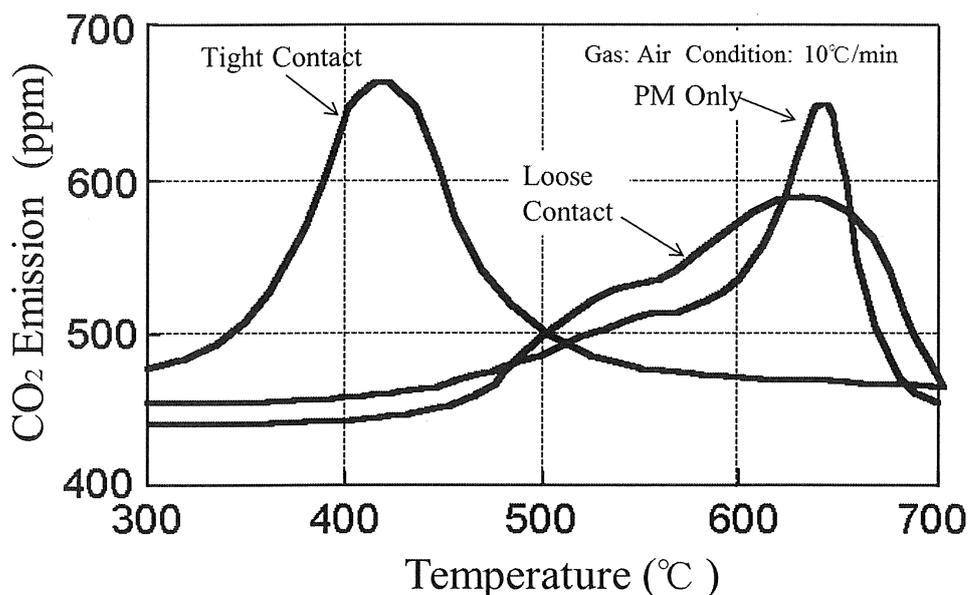


Fig.3.7 Effect of Contact between PM and Catalyst on the Oxidation of PM

### 3.3.2.2 空燃比変化によるPM酸化促進

空燃比の変動に伴って、PM酸化が促進された理由としては、空燃比リッチとリーンを繰り返すことによる局所的な温度上昇、貴金属の活性向上、活性酸素種の生成などが考えられる。そこで、局所的な温度上昇の影響を極力排除するために、DPNR触媒を電気炉内に設置するとともに、リッチスパイク前後にN<sub>2</sub>パージを行い、スパイク時の酸素を排除した条件下でのPM酸化速度を調査した。図3.8にリーン状態を1とした時の、リッチ状態を追加した場合のPM酸化速度を示す。PM酸化速度は、空燃比リッチの導入によって80%程度向上し、触媒内部における局所的な温度上昇以外のPM酸化促進要因が存在することが推定できた。このような空燃比変化を与えることによりPM酸化促進の効果が発現するメカニズムを解析

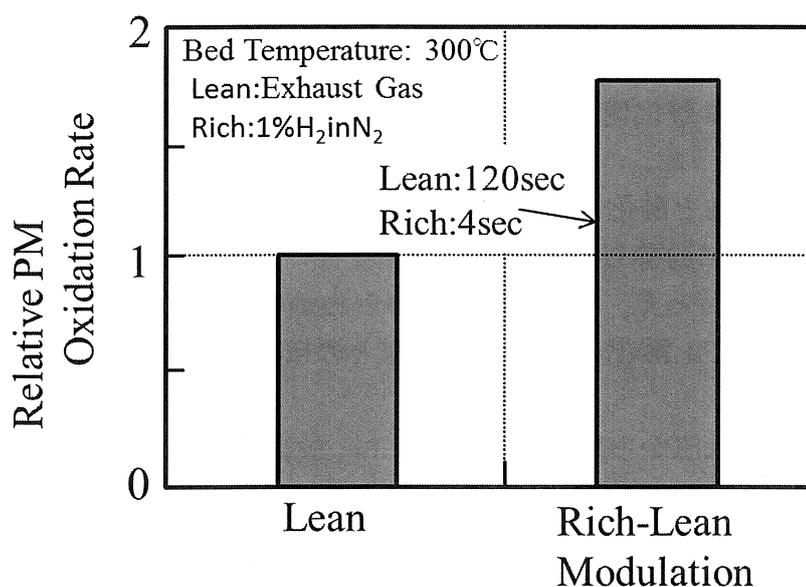


Fig.3.8 Effect of Rich Pulse on PM Oxidation Rate

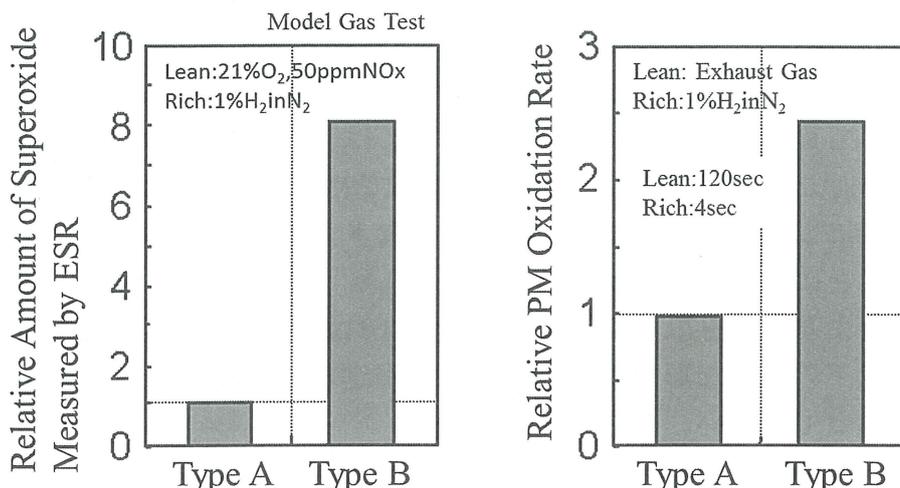


Fig.3.9 Effect of Contact between PM and Catalyst on the Oxidation of PM

するために、ESR (Electron Spin Resonance) を用いて触媒表面上の活性酸素種を測定した。その結果、空燃比変化を与えた場合のみ触媒表面上に活性酸素種（スーパーオキシドアニオン）の存在が確認された。図 3.9 は活性酸素種の生成量が少ない触媒 A と活性酸素種の生成量が多い触媒 B で、触媒から生成される活性酸素種（左図）とそれによる PM の酸化速度（右図）を比較したものである。図 3.9 からわかるように活性酸素種を多く生成する触媒 B では PM 酸化が速いことが確認できた。このことから、空燃比変化による PM 酸化促進に、活性酸素種が強く関与していることが確認できた。

以上の知見に基づき、比較的触媒温度の低い軽負荷領域においても、NO<sub>x</sub> と PM を同時に、かつ連続的に浄化する DPNR のコンセプトを確立することができた。

図 3.10 はこれまでの研究結果より、NO<sub>x</sub> と PM の浄化メカニズムをまとめたものである。

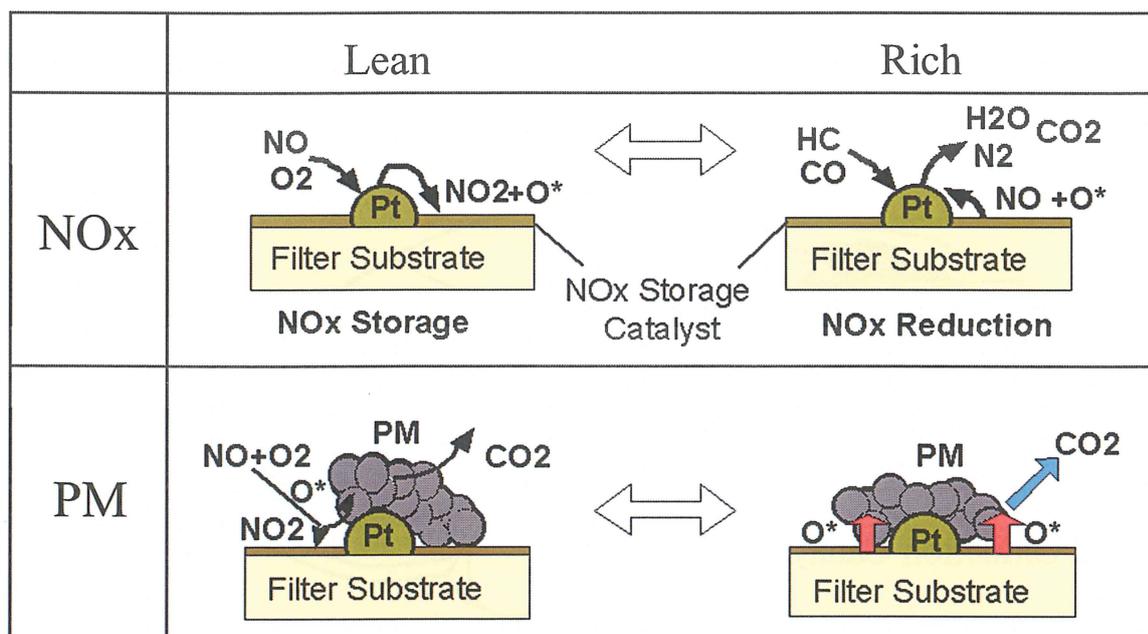
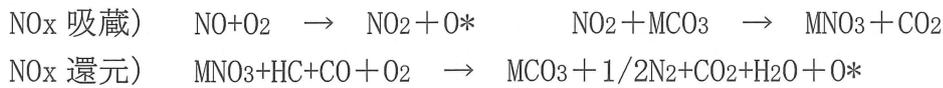


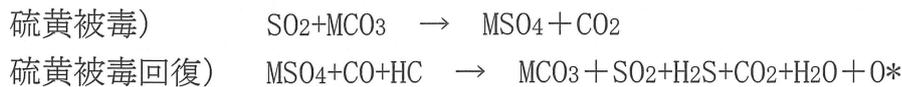
Fig.3.10 Purification Mechanism of DPNR Catalyst

ディーゼルエンジンは通常は空気が過剰なリーン条件のもとで運転される。このような条件下で NOx は硝酸塩の形として NOx 吸蔵触媒に溜められる。NOx 吸蔵の過程で放出された活性酸素により PM は酸化を開始し、同時に PM は周辺の過剰な酸素によって急速に酸化される。システム制御によって実現されるリッチ条件においては、NO と大量の活性酸素が NOx 吸蔵触媒から放出される。この NO は HC および CO によって N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> に形を変え、PM については大量の活性酸素によって酸化される。このようなメカニズムで NOx と PM は同時かつ連続的に酸化されることになる。

触媒上での反応をまとめると以下のようなになる。(O\*は活性酸素、M は塩基性金属とする) NOx については以下のような形で吸蔵・還元反応が進む。実際の反応は更に複雑なため、式中の原子数はあっていないことを注釈しておく。



又、後述するが、燃料中に含まれる硫黄については以下に示すように SO<sub>x</sub> という形で触媒の被毒(吸蔵)と回復(放出)の反応が進む。



触媒が硫黄で被毒するため硫黄被毒回復制御を行うことになるが、その際 H<sub>2</sub>S の排出をおさえるためのリーンリッチ制御も必要となる。これに関しては 3.5.8 項で詳細を述べる。

### 3.4 ディーゼル NOx、PM 同時低減システム DPNR の概要

以上、NOx と PM を同時に低減できる触媒コンセプトを確立した。エンジンシステムによってこの触媒をうまく機能させることが重要であり、以下本システムの研究開発結果について述べる。

図 3.11 に DPNR を搭載した直噴 D4D (Direct Four Stroke Diesel) エンジンが車両に搭

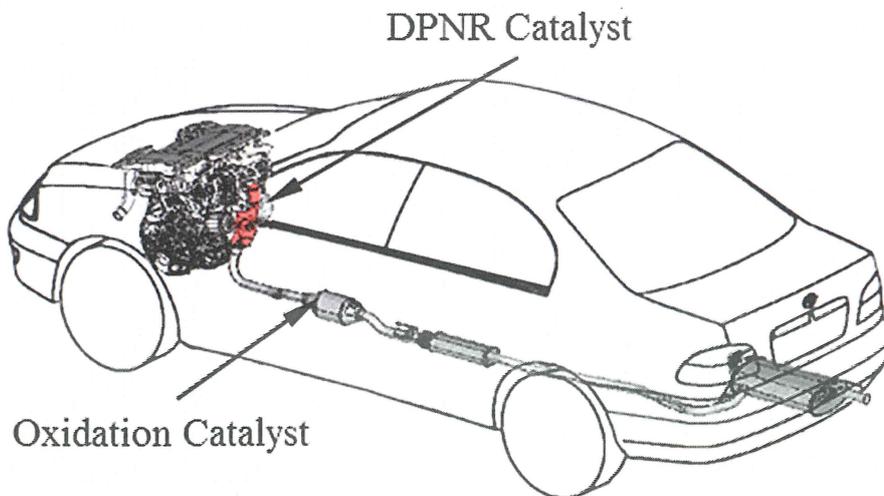


Fig.3.11 Diesel Passenger Car with DPNR

Table.3.1 Engine Specification

	2.0L D4D with DPNR	2.0L D4D(1CD-FTV)
Displacement (litter)	1.995	1.995
Cyl. No.-Bore × Stroke	L4- $\phi$ 82.2 × 94	L4- $\phi$ 82.2 × 94
Combustion System	Direct Injection	Direct Injection
Compression Ratio	18.2	18.6
Combusion Chamber	Shallow Bowl	Deep Bowl
Intake System	Turbocharge with Intercooler	Turbocharge with Intercooler
Valve Train	4-Valve DOHC	4-Valve DOHC
Fuel Injection System	Common Rail (180MPa)	Common Rail (135MPa)
Nozzle Hole	$\phi$ 0.115 × 7	$\phi$ 0.136 × 6
Max. Output	81kW@4000rpm	81kW@4000rpm
Max. Torque	180Nm@1400rpm 250Nm@2000~2400rpm	160Nm@1400rpm 250Nm@2000~2400rpm
Combustion Noise	68.0dB@750rpm idle	73.0dB@750rpm idle

載されている状況を示す。図からわかるように、DPNR 触媒コンバータはコンパクトであり容易に搭載可能である。表 3.1 にエンジン諸元を示す。コモンレールシステムは 135MPa から 180MPa への高圧化を図った。ノズルは小径・多孔とし、燃焼室も深皿方式から浅皿方式に変更した。これらの変更により低速トルクの改善、燃焼音の低減、エンジンから排出される排気ガス及び PM の改善が可能となった。

### 3.4.1 システム構成

図 3.12 に DPNR のシステム構成を示す。このシステムは量産されている 2L の直噴ディーゼルエンジンをベースとしており、新開発の触媒のみならず触媒の性能を最大限に引き出すための様々な改良と新技術を適用した。

DPNR はディーゼル直噴とコモンレールシステムをベースとしている。このコモンレールシステムを第 2 世代コモンレールシステムと呼び、高圧化と制御に関する様々な改良を実施し、パイロット噴射のみならず、ポスト噴射等を含めた多段噴射も実現した。EGR 制御システムに関しては大容量・高効率 EGR クーラ、高応答高精度 EGR バルブ及びモータ駆動のスロットルの適用により、後述する低温燃焼 (LTC: Low Temperature Combustion) を実現し、エンジンから排出されるベースの排気レベルを大幅に低減した。後処理システムについては、リッチ条件を作るための排気添加インジェクタ (EPI: Exhaust Port Injection) を排気ポートに追加した。マニホールドコンバータは NO<sub>x</sub> と PM を同時に低減できる 4-way 触媒を適用できるように構造変更し、床下には従来と同様の酸化触媒 (CCo) を搭載した。A/F センサー (Air Fuel Ratio Sensor)、エアフローメータ、排ガス温度センサー、触媒前後の差圧を検出する圧力センサー等の新装置も触媒制御のために新しく装備した。

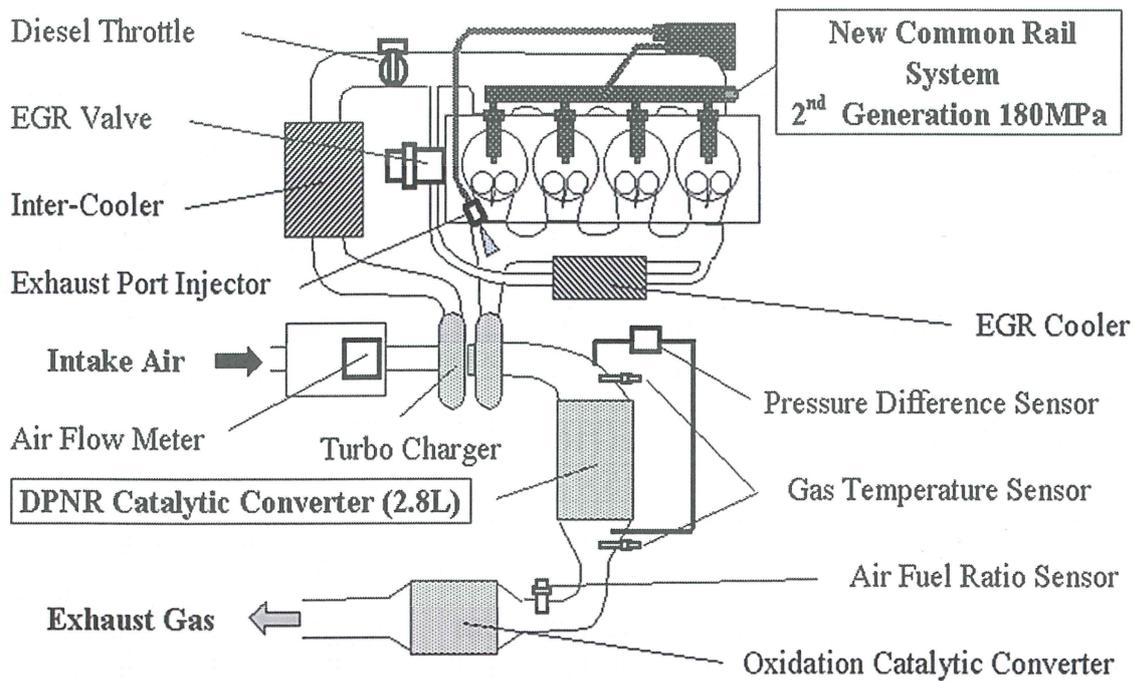


Fig.3.12 Configuration of DPNR

### 3.4.2 第2世代コモンレールシステム

前述のように新触媒システム DPNR は直噴コモンレールシステムをベースとしている。前章で説明した第1世代コモンレールシステムは、1999年に小型ディーゼル乗用車用に開発したが、出力の更なる向上、エンジンから排出される NO<sub>x</sub>、PM 等の低減、および触媒システムを最大限に機能させるための制御精度の改善を狙って第2世代コモンレールシステムの研究開発を進めた。図 3.13 に第1世代から第2世代での変更点を示す。

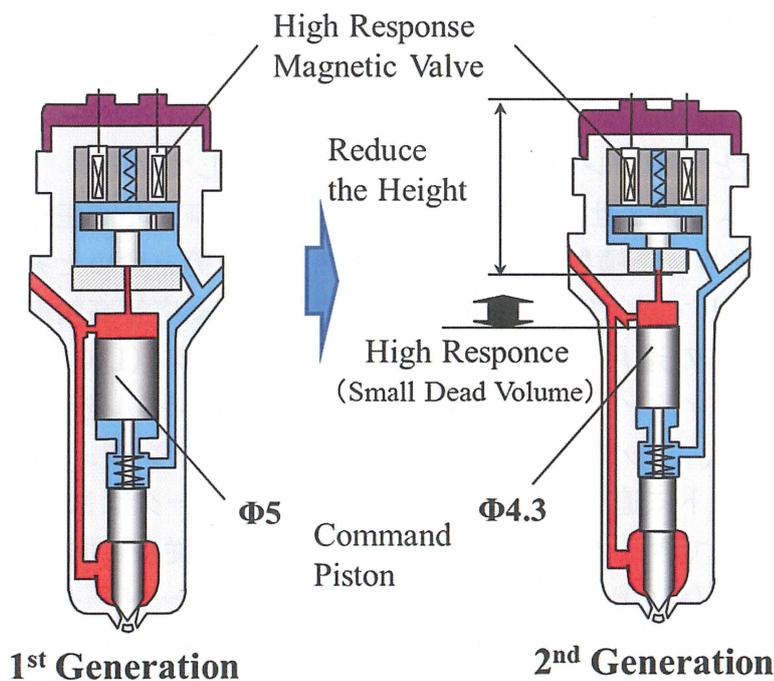


Fig.3.13 Improvement of 2nd Generation Common Rail System

大きな変更点はインジェクタの応答性向上に伴う改良と高圧化対応である。

以下に各機能向上に向けた改良内容を示す。

(1) 噴射圧化(180MPa)

- ・シール性向上
- ・耐圧強度向上
- ・摺動部耐摩耗性向上
- ・ノズルポート部耐摩耗性向上  
(コマンドピストン径の縮小  $\phi 5 \rightarrow \phi 4.3$  に対応)

(2) 射量バラツキ低減

- ・電磁弁応答性改善
- ・QR(Quick Response)コード補正(多点補正)

(3) 多段噴射化

- ・電磁弁の応答性改善

(4) インターバル縮小

- ・電磁弁の応答性改善
- ・制御室排除容積の低減 (0.4ms $\rightarrow$ 0.2ms)

### 3.4.3 排気燃料添加システム

DPNRにおいては、触媒内でストイキ条件を作り出し、NO<sub>x</sub>、PMを低減するための排気燃料添加システム(EPI: Exhaust Port injector)を新たに開発し、排気ポートにインジェクタを追加した。図3.14にエンジンの概略図と排気添加インジェクタの拡大図を示す。

コモンレールのサプライポンプから排気添加インジェクタに供給された燃料は、エキゾーストマニホールドの下流に向かって噴射され、簡単にストイキ条件を作り出すことができる。噴射圧力は1.5MPaである。

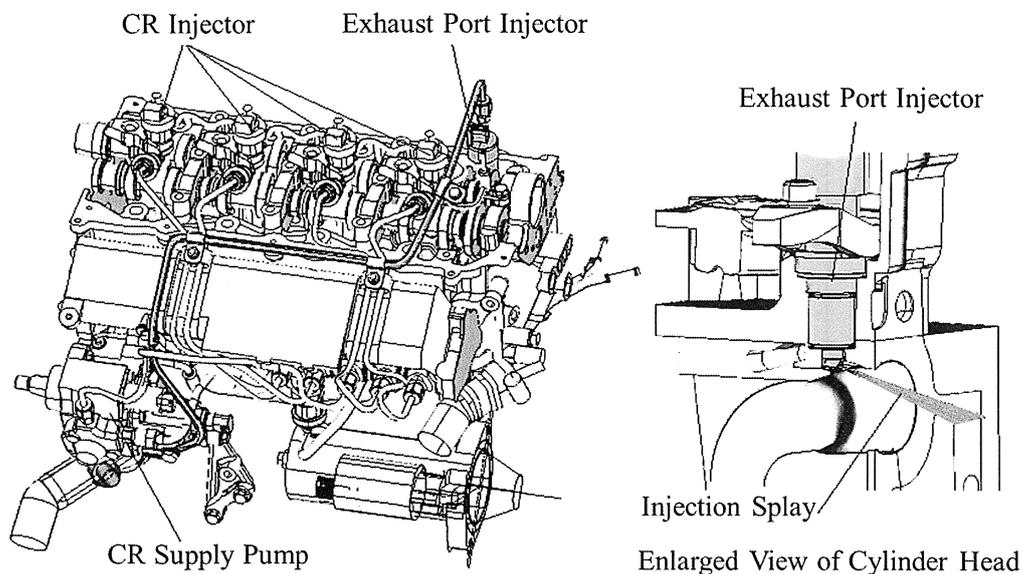


Fig.3.14 General View of Engine and Exhaust Port Injection System

### 3.4.4 新触媒コンバータ

図3.15に新触媒の構造を示す。基材はモノリス構造のセラミックスからなり、通路の壁にはたくさんの細孔がある。入口側、出口側で交互に栓詰めされ、表面にNO<sub>x</sub>吸蔵触媒をコートしている。この構造は、排気ガスが通路の壁を流るのでWall Flow Filterと

も呼んでいる。前述のように触媒システムに関しては、マニホールドコンバータを NOx と PM を同時低減できる新 4 元触媒に適用できるよう構造変更した。A/F センサー (Air Fuel Ratio Sensor)、排気ガス温度センサー、触媒の前後差圧を検出する圧力センサー等、新たなセンサーを触媒制御のために採用した。

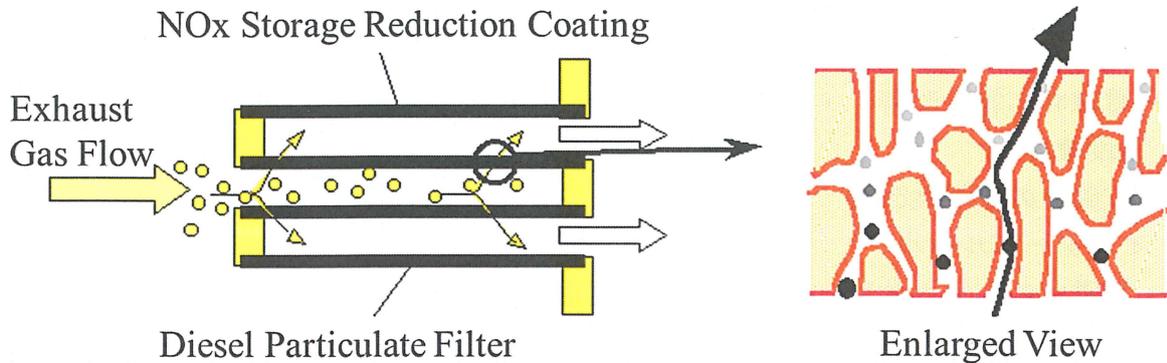


Fig.3.15 Cross-Section of New Catalytic Converter

### 3.4.5 DPNR 搭載 2L エンジンの排気性能

図 3.16 は欧州の EC ドライブモードにおける DPNR の排気ガス低減効果を示す。新品触媒と 10 万 km 相当の劣化触媒での結果をベースの 1CD エンジンに対して比較している。NOx、PM 低減への大幅な効果が DPNR によって可能となり、燃料消費率に関しては燃焼システム、噴射システム、EGR システムの改良、及び排気添加システム的最適化によりベースの 1CD と同等のレベルを実現した。触媒劣化を抑制するための更なる改良を加えることで、このシステムは低 CO<sub>2</sub> と低 NOx、PM を同時に低減するという相反する問題を解決できる。

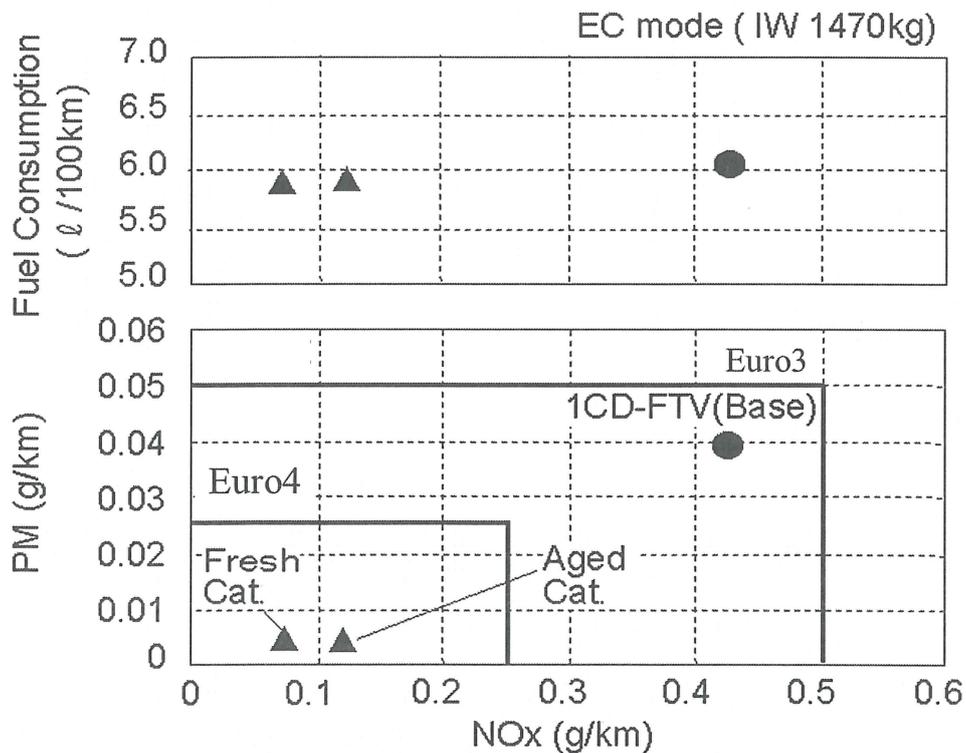


Fig.3.16 Emission Test Results of a 2.0L D4D with DPNR

### 3.5 ディーゼル乗用車用 DPNR の研究開発

これまで、システム構成及び EC ドライブモードでの排出成分について説明した。この触媒システムをディーゼル乗用車に適用するには、低温燃焼 (LTC) のような大量 EGR を用いた高精度な燃焼制御、コモンレールによるポスト噴射制御及び排気添加制御 (EPI) が、様々な運転条件下及び環境下で触媒の活性を維持するために必要となる。

図 3.17 はシステム制御の概要である。DPNR を効果的に機能させるために、詳細は後述するが、ここに示す異なる制御モードがそれぞれの運転条件及びシステムの状態に対して必要となる。低温始動後のエンジンが冷えている状態 (図中 (a)) では、通常の燃焼に EPI を加え、NO<sub>x</sub> と PM の低減を行う。暖気された状態 (図中 (b)) においては、通常燃焼に EPI と LTC を加え NO<sub>x</sub> と PM の低減を行う。厳しい走行が連続し、PM が触媒内に溜まった場合 (図中 (c)) は、ポスト噴射も加える形で、触媒の床温を 600℃ 以上に保ち PM の強制酸化を行う。車両が一定距離を走り、触媒が硫黄による被毒を受けた場合 (図中 (d)) は、狭い領域であるが LTC と EPI の組み合わせにより触媒雰囲気をストック条件としかつ触媒床温を 600~700℃ に保ち硫黄の被毒回復制御を行う。

それぞれのモードが切り替わる際に発生する、トルク変動及び燃焼音変化を抑制するために、燃料の噴射時期・噴射量、EGR 量を細かく制御している。このあと、様々なシステム改良について、実際のエンジンおよび車両実験から得られた解析結果をもとに説明する。

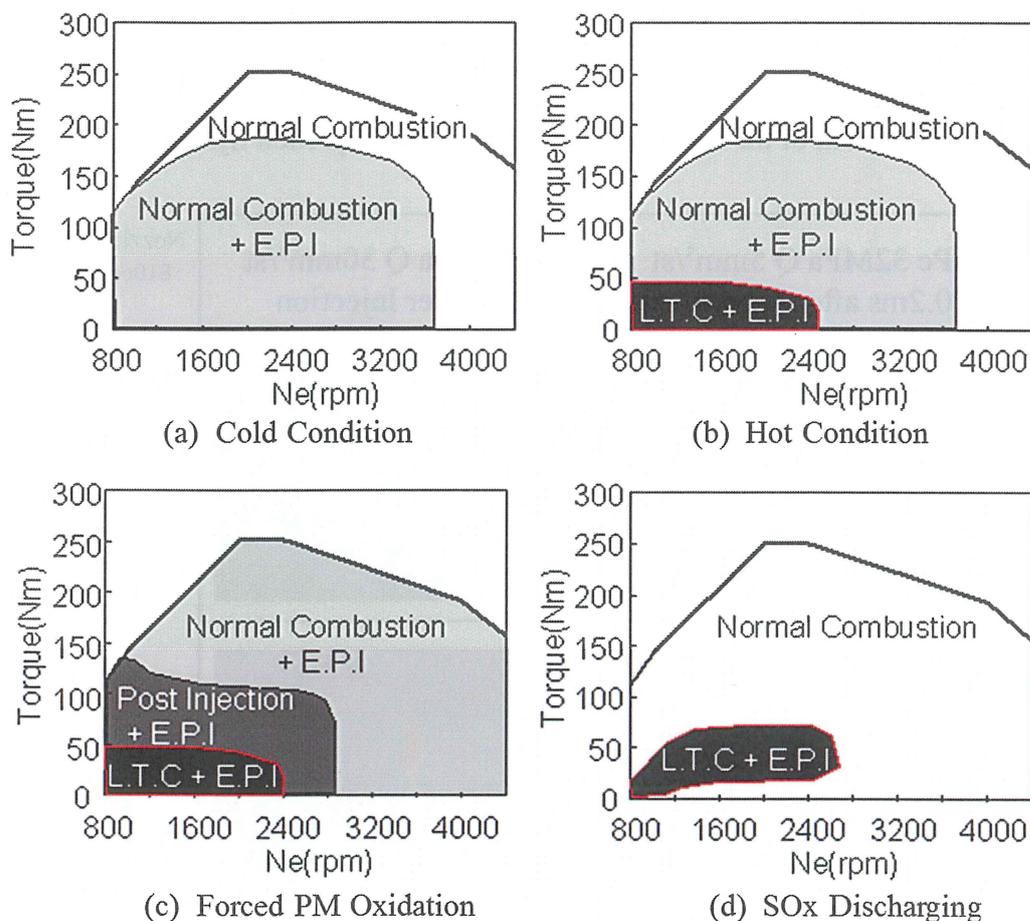


Fig.3.17 System Control under Different Operating Conditions

### 3.5.1 第2世代コモンレールでの性能改良

図 3.18 は第一世代コモンレールと第2世代コモンレールシステムで、インジェクタの駆動信号に対する、噴射率波形を比較したものである。

前述したように第1世代から第2世代に向けて、ソレノイドの電磁力増加と制御室の無駄容積の低減によりニードルの応答性を改善し、パイロット噴射とメイン噴射の間隔を 0.4msec から 0.2msec に短縮することができた。これにより、主噴射に近接して多段噴射することが可能となり、パイロット噴射による燃焼騒音の低減効果の拡大、さらにはポスト噴射による排気温度の上昇により触媒機能の活性化も可能となった。

図 3.19 は雰囲気温度 600°C、雰囲気気圧 5MPa において第1世代、第2世代の噴霧観察結果

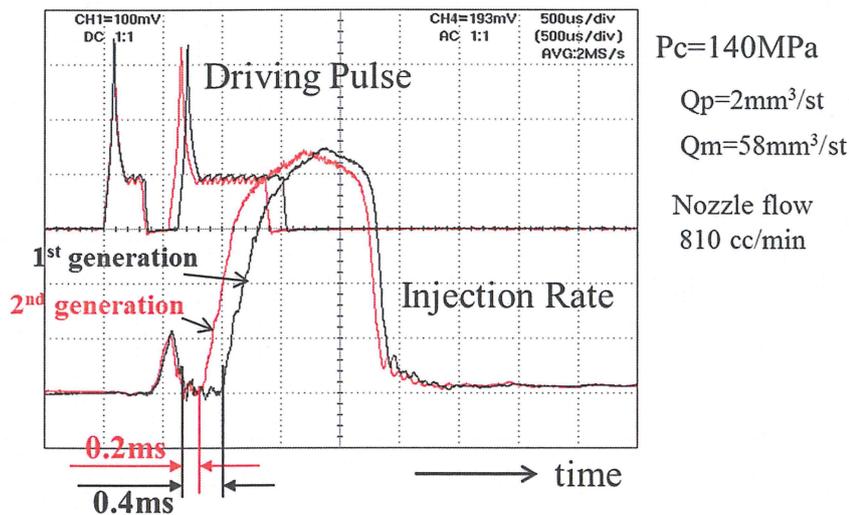


Fig.3.18 Improvement of the Response of Common Rail Injection System

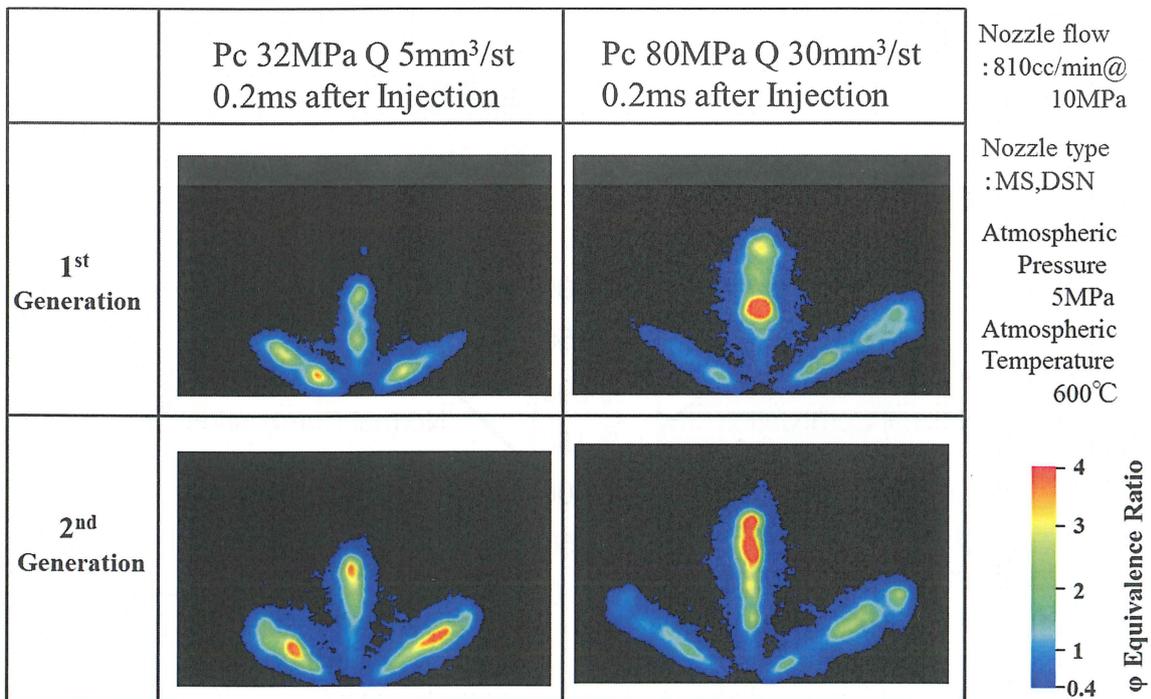


Fig.3.19 Observation Results of Mixture Formation by LIEF for Each Type

果を比較したものである。条件はアイドル相当のレール圧 32MPa/噴射量 5mm<sup>3</sup>/st と中速・中負荷相当の 80MPa/噴射量 30mm<sup>3</sup>/st で、噴霧後 0.2msec 経過時の混合気の当量比分布を示している。図からわかるように、噴射開始直後に第 2 世代の方が蒸発噴霧が広がり、赤く示す当量比が濃い領域も噴霧先端近くに分布し、微粒化が進んでいることが観察できる。これは前述のインジェクタの改良により、ニードル速度が上昇したことにより、低リフト時のシートチョーク現象が改善された効果と考える。これにより、大量の EGR を使った低温燃焼の制御性が改善でき、エンジンから排出される排気の低減も可能となった。

### 3.5.2 低温燃焼の導入

低温燃焼 (LTC: Low Temperature Combustion) の原理を図 3.20 に示す<sup>(26)</sup>。一般的に EGR 量を増加させると酸素濃度が減少するため、黒煙 (煤) は増加する (図中(a))。しかしながら EGR クーラを使ってさらに EGR 量を増加させ混合比を濃くすると、黒煙の排出は減少傾向となり (図中(b)) ストイキ条件近くでは黒煙レベルはほぼゼロとなる。この現象は、大量 EGR と EGR 冷却により燃焼温度を煤生成温度より低い状態に制御することで可能となるものである。更にこの時、NO<sub>x</sub> 及び燃焼音も大幅に低減できる上、大量の HC がこのようなリッチ条件下で発生し、軽負荷運転下においても触媒の床温を上昇させることが可能となる。

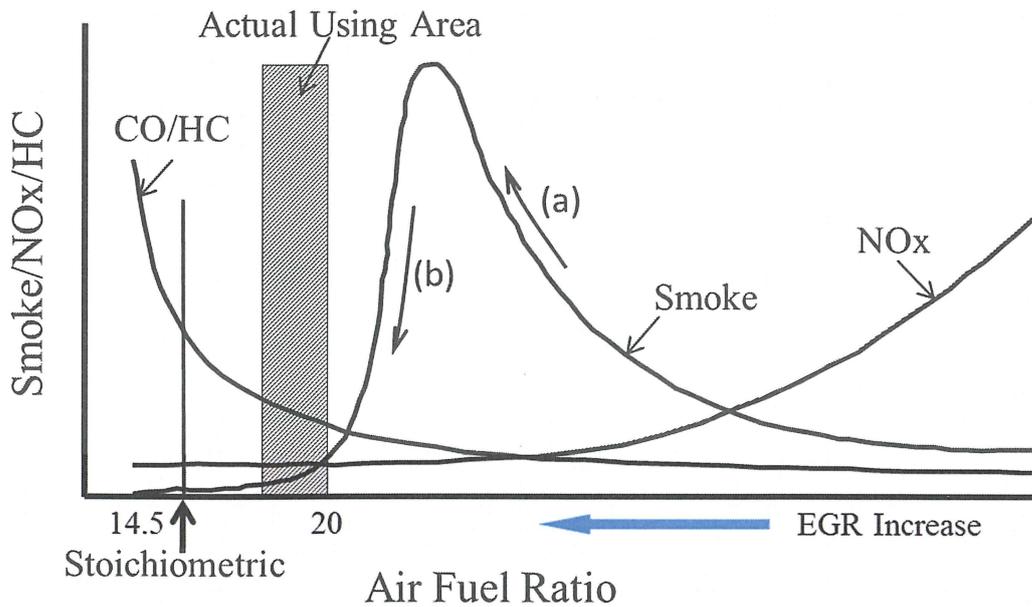


Fig.3.20 Principle of Low Temperature Combustion

図 3.21 は過渡運転条件下において低温燃焼の触媒温度上昇への効果を示したものである。上段が A/F (Air Fuel Ratio) を示し、下段が触媒の床温と車速を示す。通常の燃焼では A/F は 30 以上で非常にリーンな状態であるが、低温燃焼を行うことで A/F は 20 を下回るまでリッチになり、触媒床温を約 50°C 上昇させることが可能となった。触媒を活性化させるためには 200°C 以上の床温が必要となるが、低温燃焼の導入はこれを可能とした。

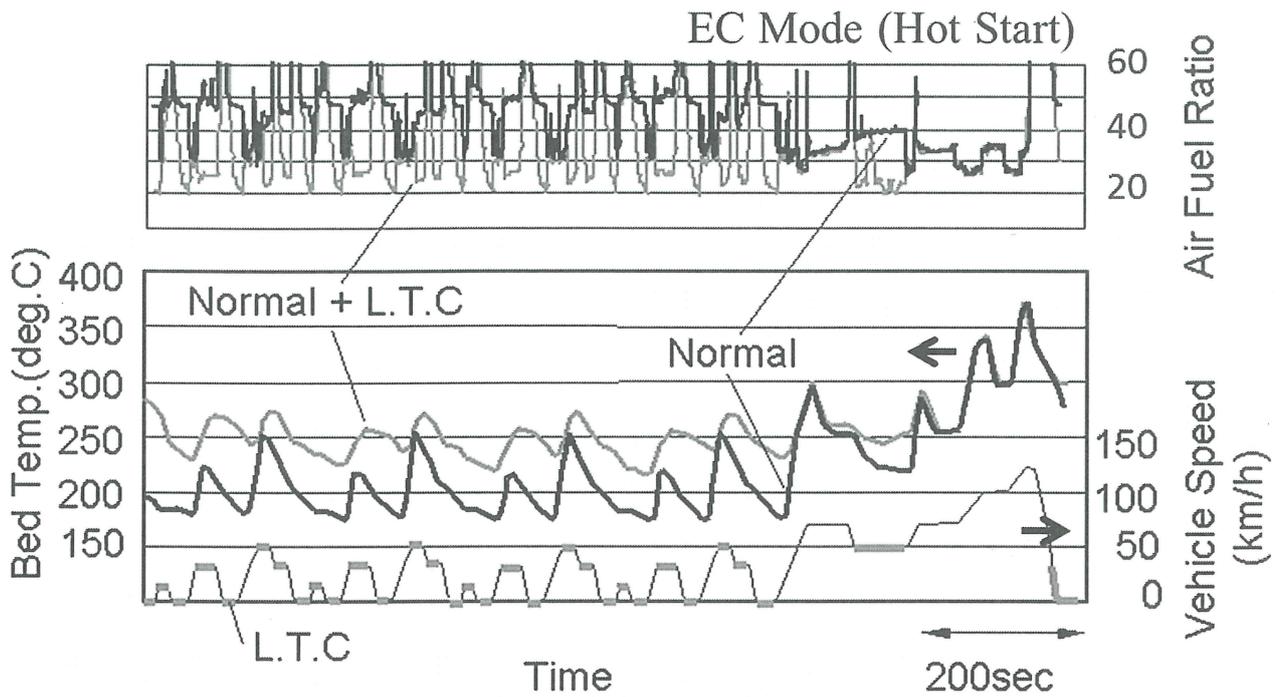


Fig.3.21 Effect on Catalyst Temperature under Transient Conditions

低温燃焼での運転領域と A/F の目標値はエンジンのトルク変動、黒煙レベル、燃焼騒音および触媒床温を考慮して決定した。図 3.22 に通常燃焼から低温燃焼への切替り時の様子を示すが、各制御モードの切替りに対しては、トルク変動によるショック、燃焼騒音の大きな変化が無いよう制御が行なえていることがわかる。

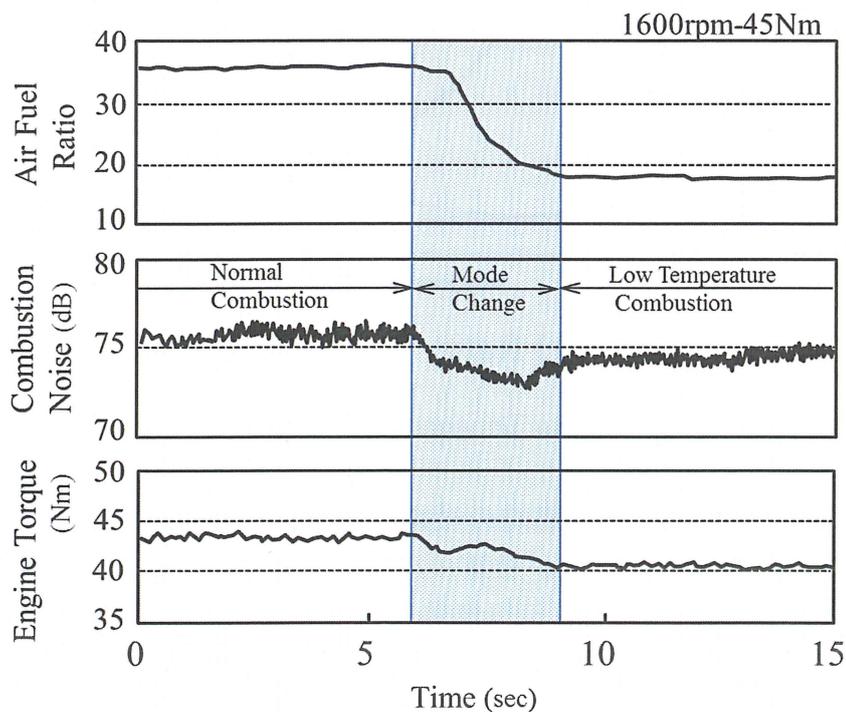


Fig.3.22 Torque and Noise Fluctuation

### 3.5.3 NOx 低減制御

#### 3.5.3.1 排気添加方式の採用

触媒内に吸蔵された NOx を N<sub>2</sub> に還元するためには、触媒内にリッチ雰囲気を作り出すことが必要となる。図 3.23 はリッチスパイクを排気燃料添加 (EPI) あるいはポスト噴射で発生させた時の解析結果を示す。ポスト噴射を使ったリッチスパイク制御の研究は広く報告されている<sup>(27)(28)</sup>。しかし、ポスト噴射でリッチスパイクを作る場合、膨張行程で比較的多くの燃料を噴射するため、右図に示す様なトルク変動あるいはシリンダ壁への燃料付着により発生するオイルへの燃料希釈という問題が伴い、広い運転範囲でシャープで深いリッチスパイクを実現することが難しく十分な NOx 還元性能を得ることができない。一方、排気燃料添加は左図に示すようにトルク変動への影響がなく、広い運転範囲でシャープで深いリッチ制御が可能であり NOx 還元性能も高い。低温燃焼モード中のように、エンジン排気の A/F がリッチ側に適合されていれば、燃料を添加することに伴う燃費性能の悪化も限られる。

図 3.24 に排気添加インジェクタのノズルの流量特性と噴口諸元及び噴霧形状の観察結果を示す。排気添加インジェクタは直噴ガソリンエンジンのインジェクタをベースとし、ノズル噴口諸元を排気添加用に最適化した。すなわち 0.7mm×0.19mm のスリット噴孔を二つあけることで、噴射燃料の微粒化を促進し、触媒での NOx 浄化反応を改善している。

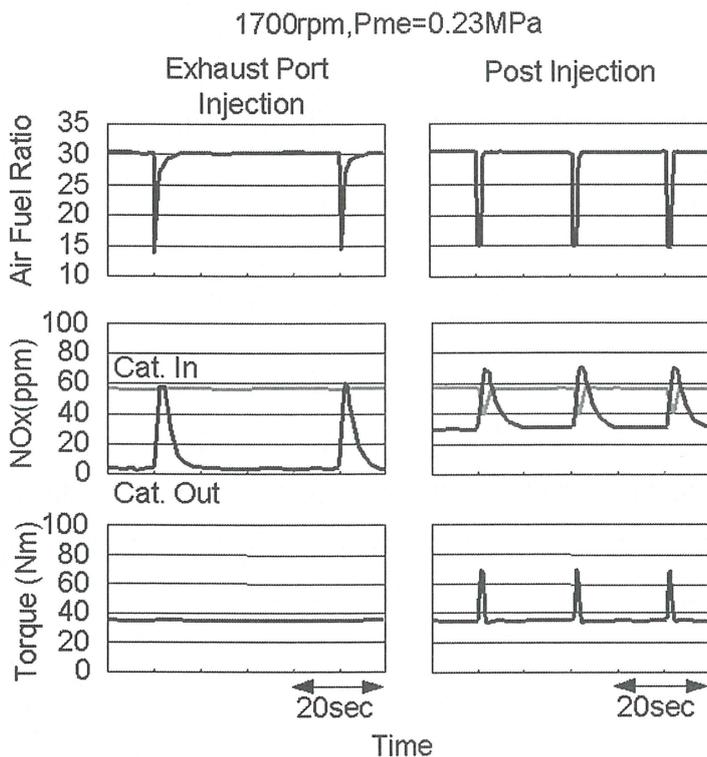


Fig.3.23 Rich Spike Control to Reduce NOx

Static Flow		430(cc/min)
Slit	Width	0.70mm
	Thickness	0.19mm

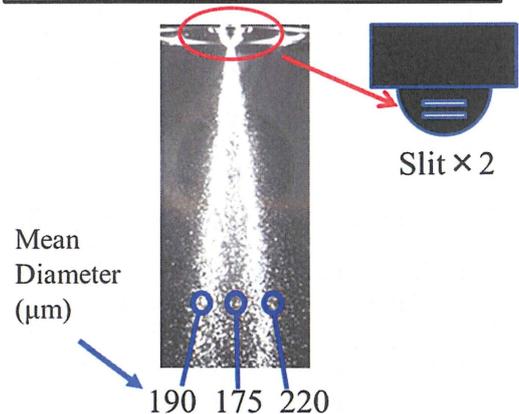


Fig.3.24 Observation Results of Injection Spray

#### 3.5.3.2 NOx 吸蔵・還元特性

NOx 吸蔵還元触媒の吸蔵特性と NOx 低減率を図 3.25 に示す。図 (a) は 10sec おきに 100msec のリッチスパイク制御を実施した場合、図 (b) は 20sec おきに 100msec のリッチスパイク制

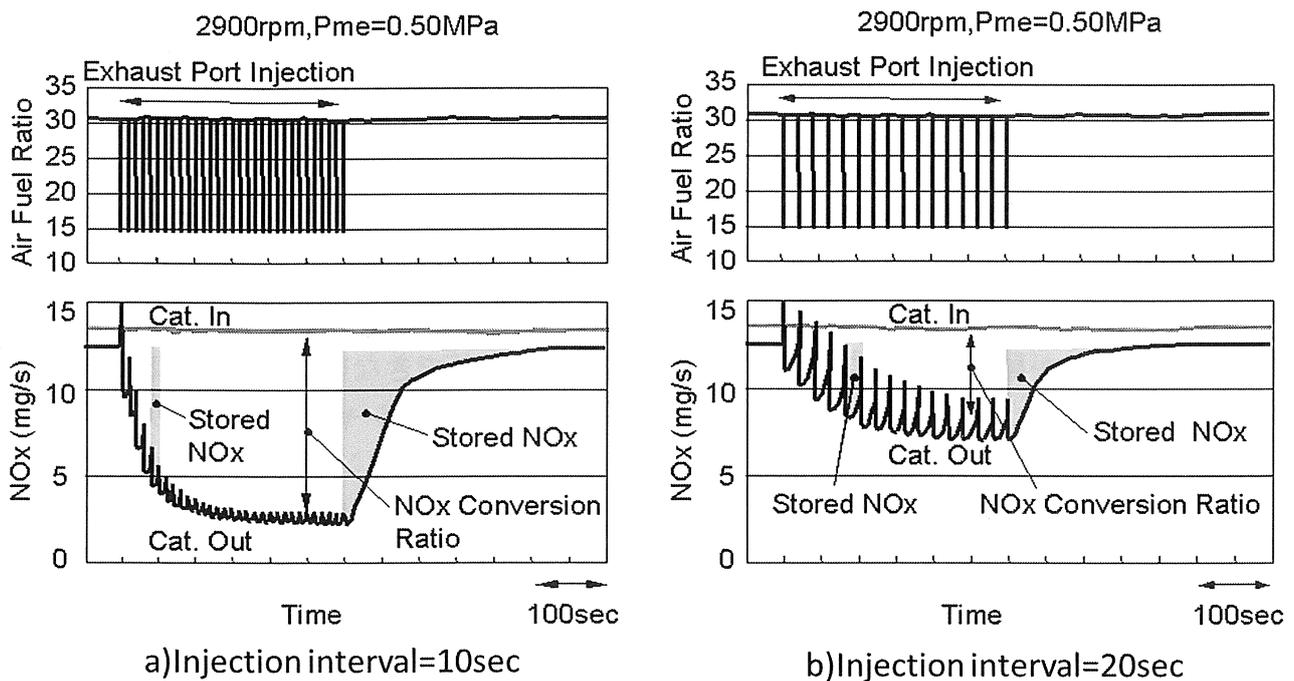


Fig.3.25 Characteristic of NOx Storage Reduction

御を行ったものである。図(a)において詳細に説明すると、触媒がNOxを100%吸蔵した条件で、リッチスパイク制御をスタートさせているが、リッチスパイク制御中の100msecの間、吸蔵NOxの一部は触媒から放出されN<sub>2</sub>に還元される。このときNOxのスパイクが見られるがこれは一部が還元されずにNOxとしてしみ出したものである。そしてリッチスパイク間のリーン条件において、図のハッチングで示すようにエンジンから排出されたNOxの一部は吸蔵されるため、触媒入口のNOxレベルに対し触媒出口のNOxレベルは低減する。この比率のことをNOx低減率(NOx還元率)というが、制御開始直後は、触媒に吸蔵されているNOx量が多いため、リーン時のNOx吸蔵速度は低いが、リッチでのNOx還元を繰り返すことで、触媒内に吸蔵されているNOxの総量は減少していくため吸蔵速度は増加する。その結果、触媒下流のNOxレベルは次第に低下していき吸蔵速度と還元速度が一致するところでNOx低減率は一定値となる。吸蔵されたNOxの還元速度はリッチスパイクの条件により変わり、図(b)で示すように、噴射間隔を20secにのばすと還元速度が遅くなるため、触媒内に吸蔵されたNOxも十分に還元されずに残る量が増えるため、図(a)に比べ吸蔵速度も遅く、結果的に低減率は低くなる。リッチスパイク制御を停止した後、図のハッチングで示す部分が制御中の吸蔵余裕量となり、図(a)に比べ図(b)が少ないこともわかる。この特性はガソリンエンジンで使われている触媒と同じである<sup>(29)(30)(31)(32)</sup>。

このように、噴射間隔が短いとNOx低減率は増加する。この値はリッチスパイク制御の噴射間隔のみならず、トータルの触媒のNOx吸蔵能力、触媒入口のNOxレベル、噴射期間といった制御パラメータにより決定することができる。リッチスパイクの制御条件は、最終的にはNOx低減率と燃費、HCを考慮して決めることになる。

### 3.5.3.3 排気添加の最適化

図 3.26 は排気添加により実現したリッチスパイク制御において、噴射期間  $\tau$  とインターバルを変えた場合の NOx 低減効果への影響を示したものである。

これらの実験結果は一定の運転条件のもとで、排気添加による燃料消費は一定になるよう実施した。噴射期間の縮小に伴い排気添加間隔も縮小することで燃料消費を一定にした。噴射間隔も噴射期間も短い場合、リッチスパイクの深さが不十分で NOx 還元性能は低下する。一方、噴射間隔および期間が長い場合、深くて期間の長いスパイクにより HC が増加する。そのため、NOx 同様 HC も排気添加制御パラメータを決定するうえで重要な要素となる。

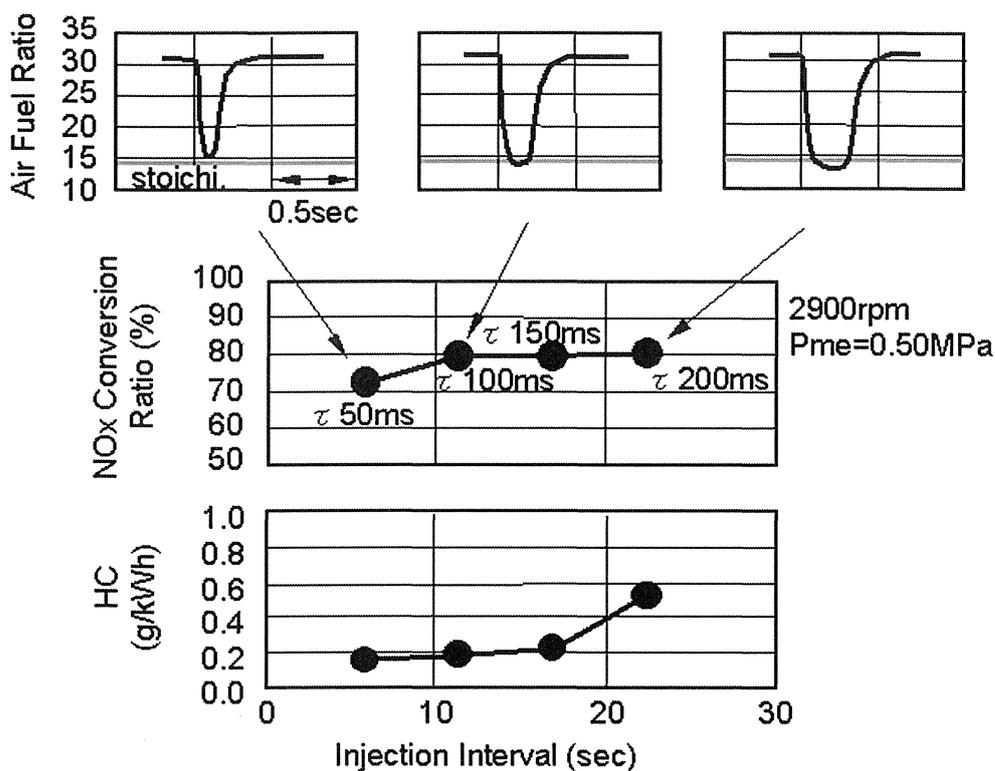


Fig.3.26 Optimization of Exhaust Port Injection

### 3.5.4 DPNR 触媒の改良

図 3.27 に DPNR 触媒における通路間の壁の内部の詳細な構造を示す。排気中の NOx と PM はフィルター基材内の細孔の間をすり抜ける時に、基材上の NOx 吸蔵還元型触媒と反応して浄化される。

フィルター基材内にディーゼルエンジンに適した NOx 吸蔵還元型触媒を担持し、十分な PM, NOx 浄化特性を得るため、今回、以下のような技術開発を実施した。

- (1) 低い圧力損失と高い PM 捕捉効率を両立させるセラミック構造体の開発
- (2) ディーゼルエンジン用に適合した NOx 吸蔵還元型触媒の開発
- (3) 基材壁内部への触媒担体のコート法、触媒の担持法の開発

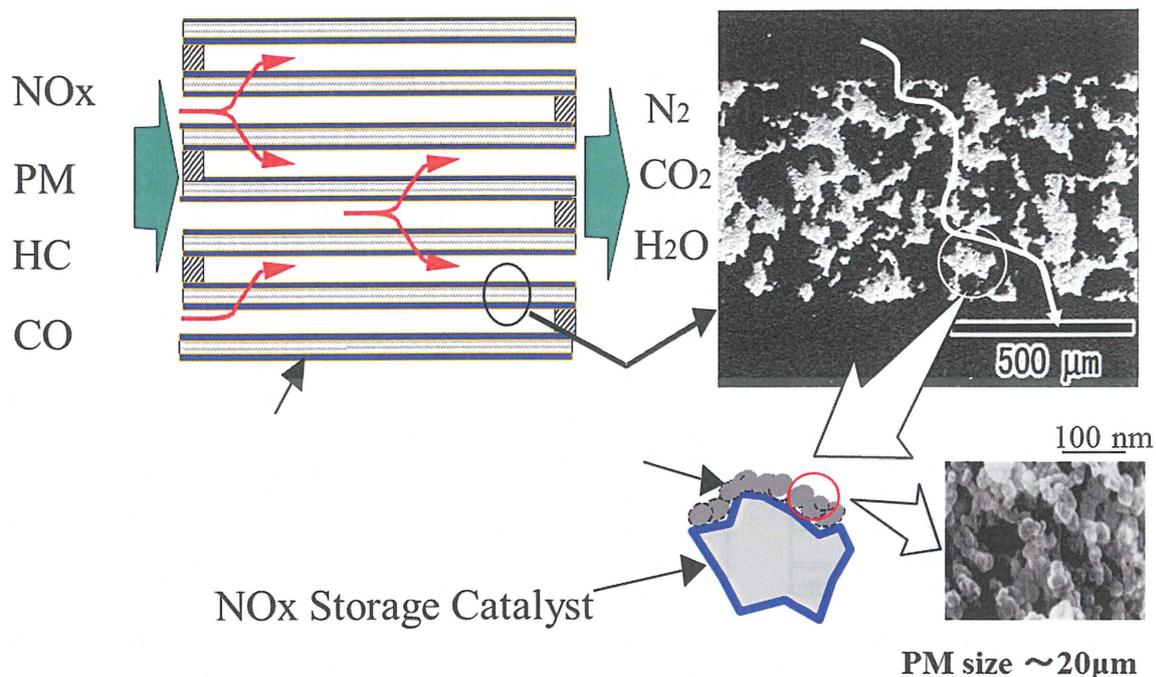


Fig.3.27 Structure of DPNR Catalyst

### 3.5.4.1 フィルター基材の気孔率の改良

従来の DPF 基材においては、PM 捕捉率を向上させると圧力損失が上昇するという関係が常識であった(図 3.28)。これに対し両者の要求を満たす方向性を見出すために、細孔構造の異なる約 20 種のコーゼライト製のセラミックフィルター基材を作製し、PM 捕捉率と圧力損失に寄与する要因を多変量解析により定量化した。

表 3.2 にその要因を洗い出した結果を示す。表 3.2 の結果より、PM 捕捉率向上と圧力損失低減の両立には、表面と内部の細孔を 20~40 μm に分布させ、PM のすり抜けが生じず、またアルミナなどを触媒担体にコートする時に閉塞されないようにし、この分布内の細孔容積を増加させることがポイントであることが判明した。

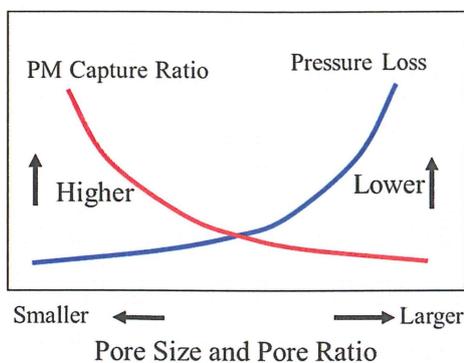


Fig.3.28 PM Captured Ratio and Pressure Loss

Table.3.2 Regression Analysis

		Increasing PM captured Ratio		Decreasing Pressure Loss	
Effective Factor	Internal Pore	Pore Size	20~40μm → Much	20~40μm → Much	
		Pore Ratio	Small	Large	
	Surface Pore	Pore Size	50μm ≥ → Much	100μm ≤ → Much	
Correlation coefficient			0.83 ~ 0.95	0.98 ~ 0.99	

以上の知見に基づき新開発したフィルター基材の細孔分布を図 3.29 に示す。この図は横軸に細孔のサイズをとり縦軸にそれぞれの細孔サイズでの容積比率を整理したものである。改良前に比べ細孔分布のピーク値を 20~40  $\mu\text{m}$  の狙い値とし、分布の裾野を狭めることができた。

図 3.30 に、後述する触媒コートをした開発初期の基材と新開発基材における捕捉率と圧力損失の比較結果を示す。捕捉率、圧力損失とも向上効果を確認でき、PM 高捕捉と低圧力損失の両立が可能となった。

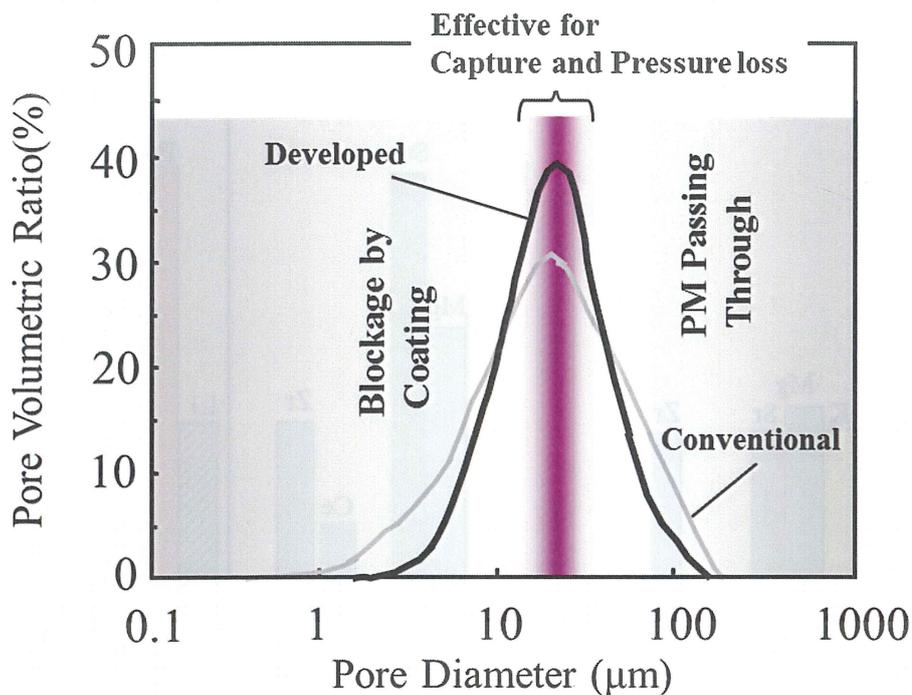


Fig.3.29 Pore Distribution and it's Roll

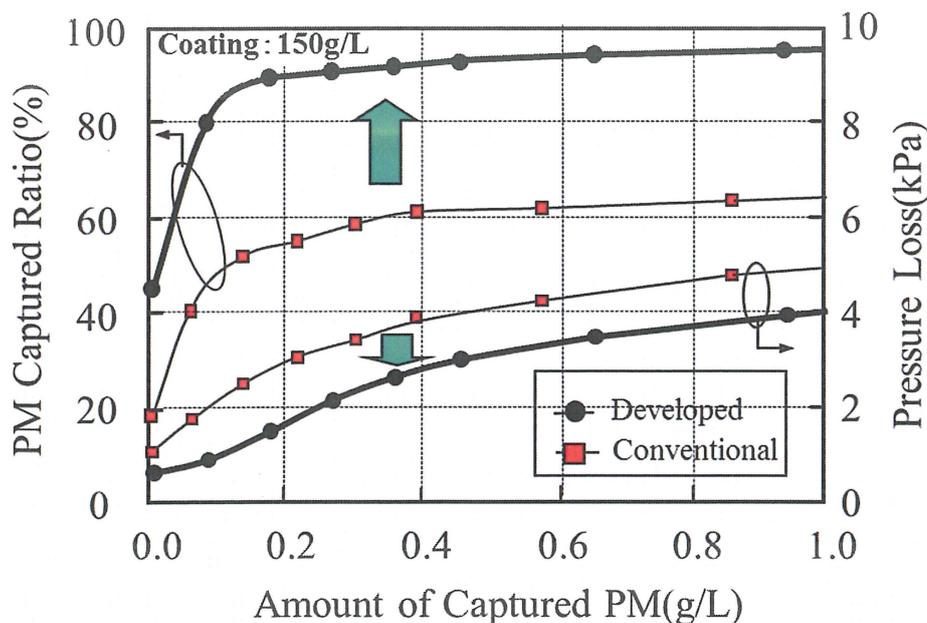


Fig.3.30 Improvement of PM Capture Ratio and Pressure Loss

### 3.5.4.2 NO<sub>x</sub> 触媒の改良

DPNR 触媒に担持される NO<sub>x</sub> 吸蔵還元型触媒に要求される機能は、①ディーゼルエンジン特有の低排気温度に合わせた NO<sub>x</sub> 浄化性能、②PM 酸化のための活性酸素種の生成、③耐硫黄被毒性、④HC、CO の酸化性である。

ディーゼルエンジンの通常走行時の排気温度は 150℃～400℃であり、ガソリンエンジンよりも低い。①の機能に対しては NO<sub>x</sub> 吸蔵材の選定がポイントであるので、まず低温型の吸蔵材の探索を行い、図 3.31 に示すように低排気温度領域での吸蔵性能の高いリチウム (Li) を選定し、Li を主体として Ba, K 等の吸蔵材との複合効果により目標の温度領域に適応できるだけでなく、②の目標機能を満足できる NO<sub>x</sub> 吸蔵材の組成を見出した。

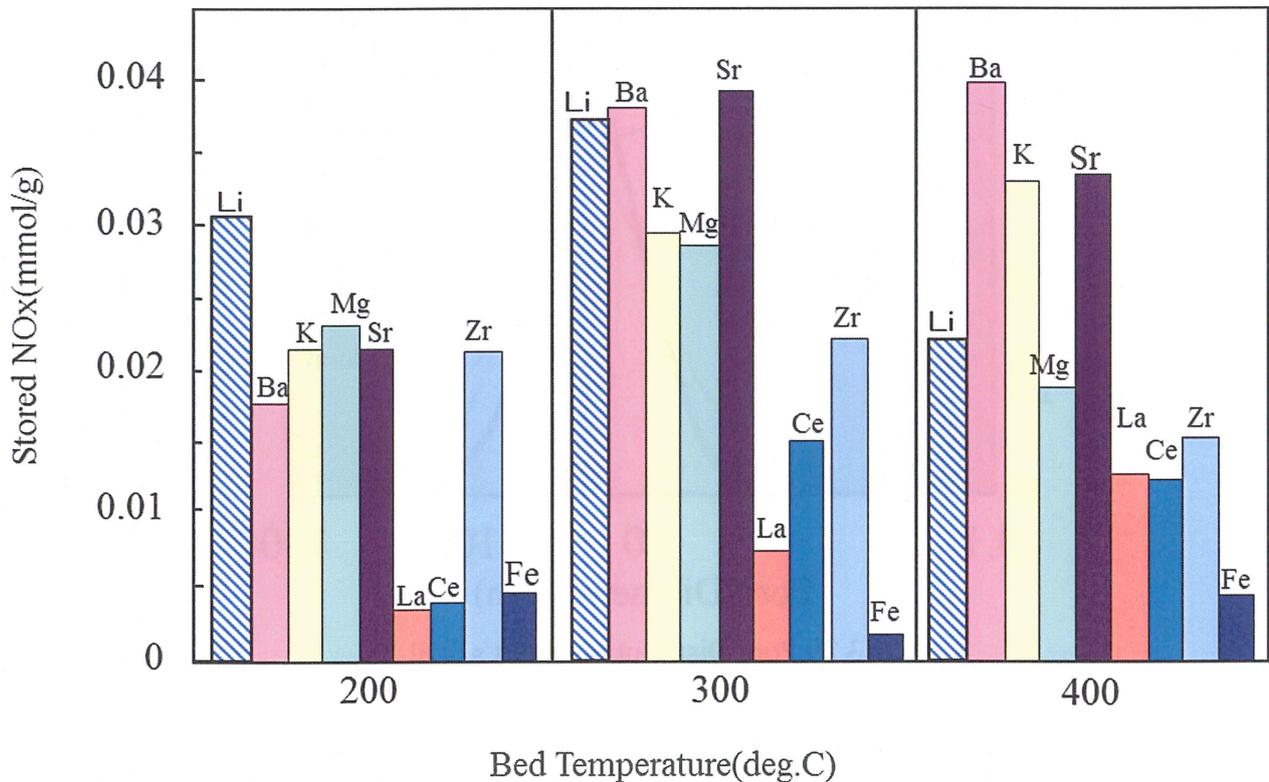


Fig.3.31 NO<sub>x</sub> Storage Ability and Storage Material

一方、塩基性の NO<sub>x</sub> 吸蔵材では燃料中の硫黄に起因する被毒劣化の抑制が課題である。筒内の燃焼により生成した SO<sub>2</sub> が触媒上で NO<sub>x</sub> 吸蔵材と反応して硫酸塩を生成し、NO<sub>x</sub> 吸蔵性能を低下させる。この被毒は空燃比リッチ条件で回復できるが、排気温度の低いディーゼルへの適用を考えると、ガソリンリーンバーン用よりも低温で硫黄が脱離する特性が必要となる。そのため NO<sub>x</sub> 吸蔵材 (Li) による効果と、ガソリンエンジン用の NO<sub>x</sub> 吸蔵還元型触媒の開発で培われた硫酸塩が吸着しにくくかつ低温で分解しやすい触媒担体成分との相乗効果によって、図 3.32 の触媒床温と SO<sub>x</sub> 放出特性で示すように③の硫黄被毒がより低温で回復する性能を確保した。上記の NO<sub>x</sub> 吸蔵還元型触媒を新開発基材の表面および壁内部に均一にコーティングする技術を開発することにより、低圧力損失かつ高性能な DPNR 触媒の諸元を決定することができた。

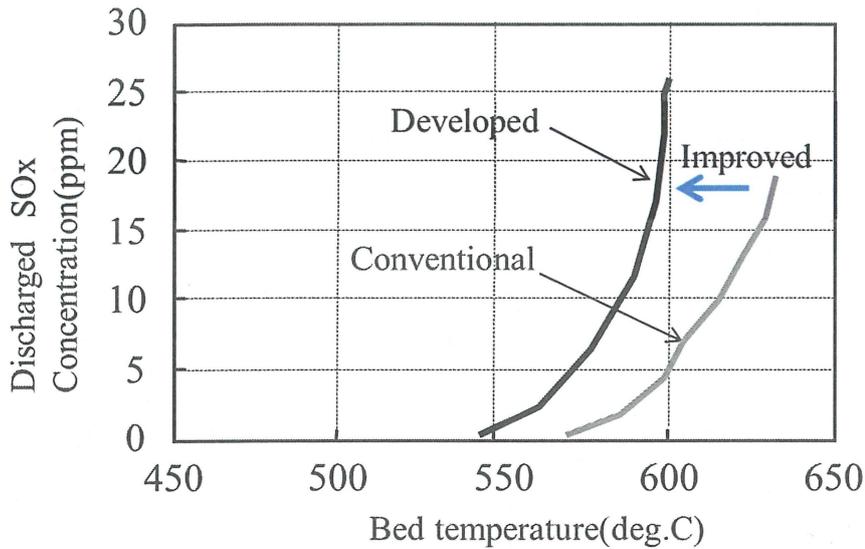


Fig.3.32 SOx Discharging Performance

### 3.5.4.3 触媒性能向上の効果

図 3.33 はエンジン速度 2900rpm のもとで、エンジン負荷を変更した時の触媒床温に対する、NOx 吸蔵性能を整理したものである。ここでは新品時の触媒の特性について述べている。NOx 吸蔵性能は基材の構造、コーティングの方法、吸蔵材等を変更することで吸蔵性能を大幅に改善した。触媒床温が低いと、触媒の活性が低下するため、吸蔵性能は悪化する。一方、高温側では、吸蔵 NOx の還元反応がうまく進まず、NOx の脱離量が増えるため吸蔵性能は悪化する。このようなデータより、排気添加を使った NOx 還元制御は触媒床温が 200℃から 450℃の領域で実施することにした。低温側の値は 200℃以上が DPNR 触媒前端の PM つまりを避けるために必要ということより決定し、高温側の値については、NOx 還元効率と燃料消費率の関係を考慮し 450℃に決定した。

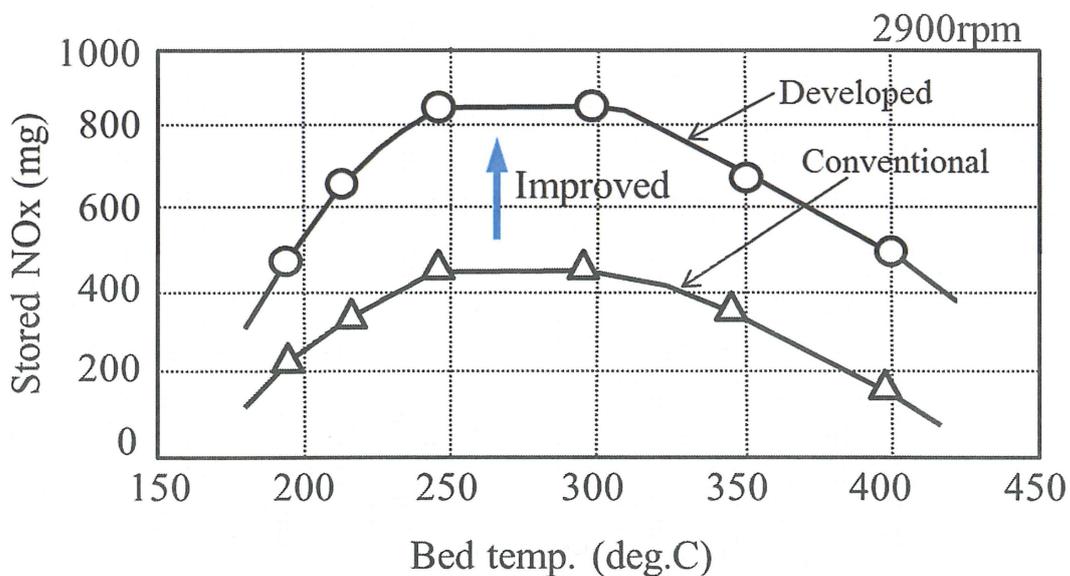


Fig.3.33 NOx Purification Performance

### 3.5.5 DPNR の NO<sub>x</sub>、PM 低減効果

これまでの、触媒を含む改良をすべて織り込み、欧州 EC モード走行における DPNR の排気低減効果を確認した。図 3.34 にコールドスタートからの触媒入口、出口の PM、NO<sub>x</sub> 及び触媒床温を示す。低温燃焼 (LTC) によって触媒床温を 200°C 以上に上げることで触媒を早期にライトオフ(触媒の活性化)させ、排気添加制御(EPI)により NO<sub>x</sub> を著しく低減することが可能となった。触媒床温を高く保てることで、PM の連続再生も促進することができた。

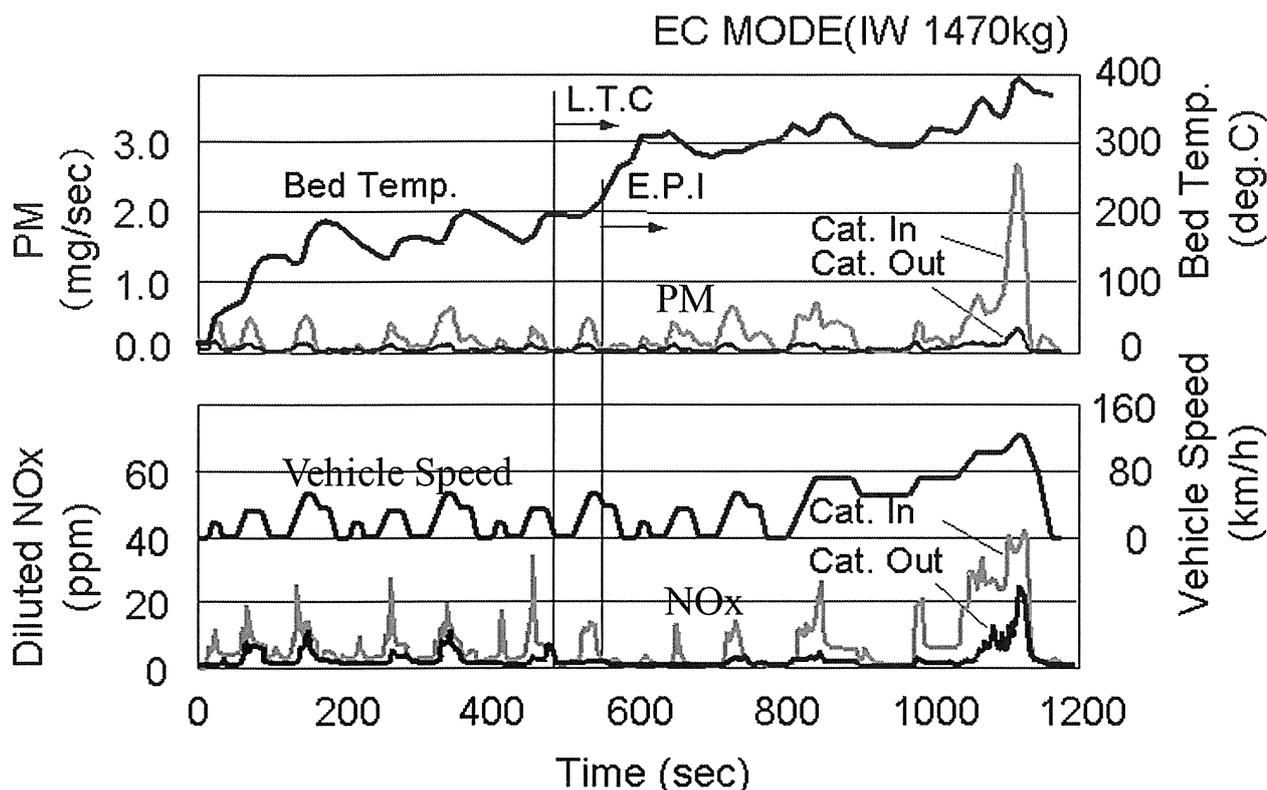


Fig.3.34 Effect of LTC and DPNR on Emission

### 3.5.6 PM の連続再生特性

図 3.35 の上段に触媒床温に対する PM の連続酸化特性を実線で示す。図中にエンジンの全運転領域における排出 PM の分布と、高速走行モード、市街走行モード、山岳走行モードでの PM 排出値を示す。縦軸に単位を入れていないが、ここではエンジンから排出された PM と触媒の連続酸化性能を相対的に比較している。下段に示す図は高速走行モード、市街走行モード、山岳走行モードにおける車速と触媒床温および触媒圧損を示したものである。ハイウェイモードのような高速条件において、エンジンから排出された PM 量は触媒の連続酸化性能を上回る。(上図) そのため、触媒入口・出口の圧力差は徐々に増加する。(下図) 市内走行のような低速条件下では PM 排出量は触媒の連続酸化性能と同等である。そのため PM がさらに触媒に溜まることはないため、圧力差は変化しない。登坂のように低速・高温条件においては PM の排出量は触媒の連続酸化性能を下回るため、連続的に排出される PM と共にそれ以前に触媒に溜まった PM も酸化され結果として、差圧は低減する。しかしながら、たとえば、床温が 300°C を下回り、PM の連続酸化にとっては厳し

い条件が続く場合、触媒にたまる PM の総量は増加する一方となる。このような場合、システムとして触媒 OT (Over Temperature) を避けるため、PM の総量を検出後、強制酸化を実施する必要がある。

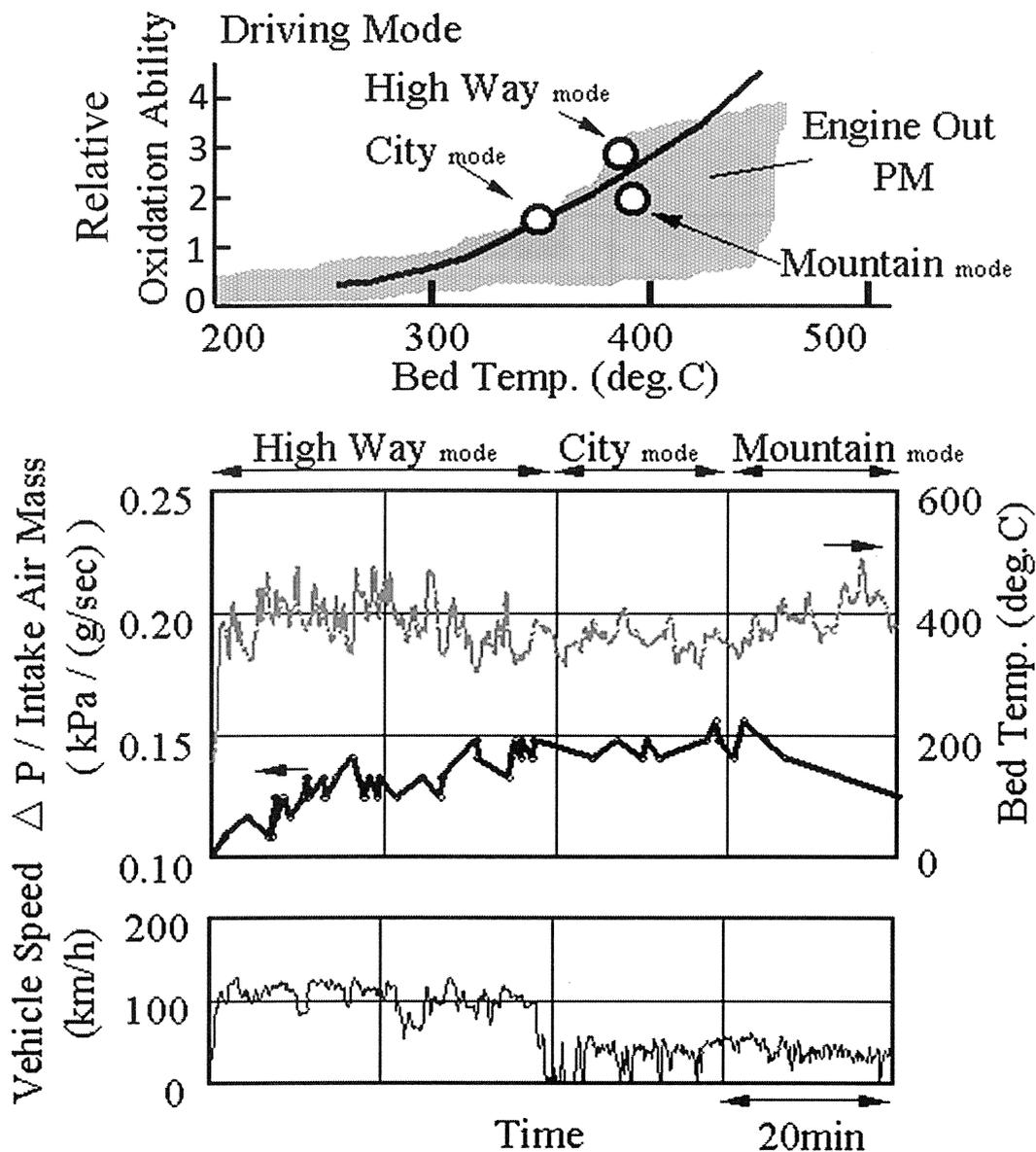


Fig.3.35 Characteristic of Continuous PM Oxidation

### 3.5.7 PM の強制酸化

図 3.36 に触媒床温度と触媒に溜まった PM を酸化するのに必要な強制酸化時間の関係を示す。触媒に溜まってしばらくたった PM も触媒床温が 600°C を超えると比較的短い時間で酸化することができる。先に説明したように PM の触媒内での状況には完全な連続再生、不十分な連続再生、PM がたまる一方の条件と様々なケースがある。そのため、触媒に溜まった総量がある値を超えるとシステムがそれを検出し強制的に PM を酸化する必要がある。

図 3.37 は排気添加による PM の強制酸化の状況を示す。触媒に PM が 4 g 溜まった状態から、強制酸化制御を始めるわけであるが、比較的短い時間で床温を上昇させるために、まず最初にポスト噴射により排気ガス温度を上昇させ、その後排気添加制御により床温を強制酸化に必要な 600℃以上に上昇させる。図に示すような過渡運転状態においても、排気ガスセンサーを使った排気添加のフィードバック制御により、触媒床温は 600℃から 660℃の間に制御可能なことが確認できる。この時、4g の PM は約 4 分で強制酸化することができた。

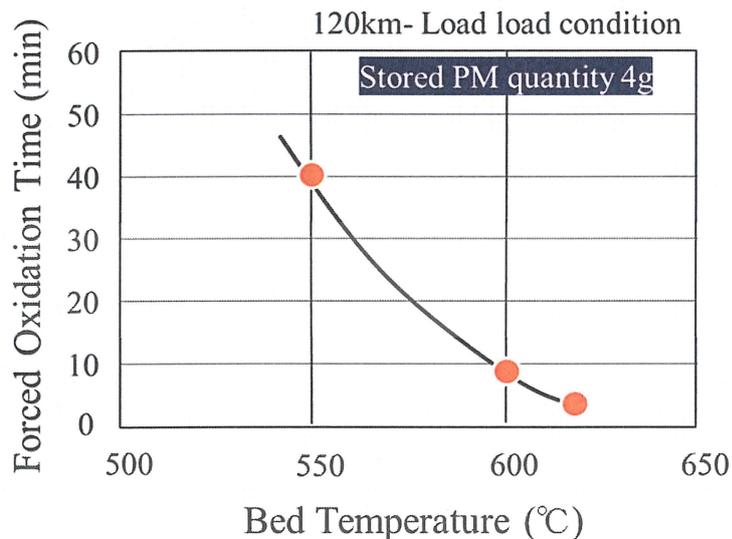


Fig.3.36 Forced Oxidation Time and Bed Temperature

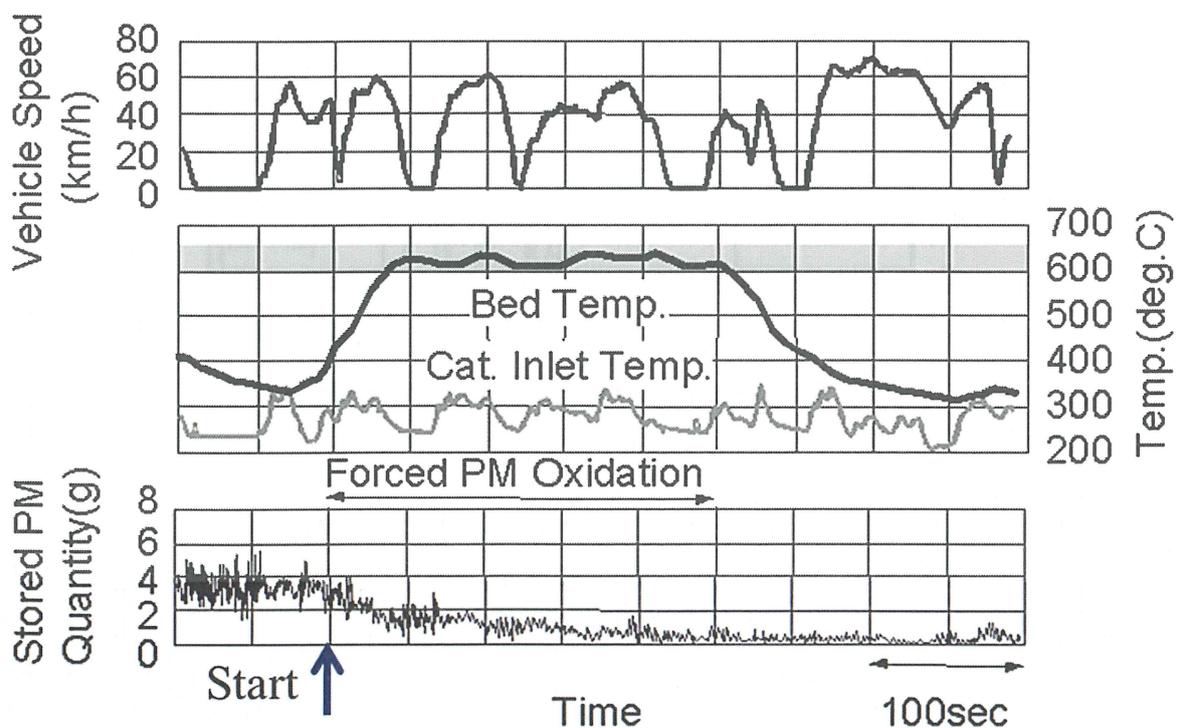


Fig.3.37 Forced PM Oxidation

単に PM トータルの重量を低減するだけでなく、あらゆる粒径の PM 粒子数を低減することも DPNR の狙いの一つであるため、SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) 試験を実施し、PM 強制再生時の影響を調査した。図 3.38 に PM 粒径と PM 粒子数の関係を示す。粒子数、粒径共に対数表示である。図より通常走行中においては DPNR 触媒によりあらゆる粒径の PM 粒子数が 1/100 レベルにまで低減できることがわかる。PM 強制酸化時には、排出 PM 粒子数が若干増加するものの、PM 強制酸化制御の頻度が比較的低いことを考慮すれば、平均的な PM 粒子数は DPNR 触媒によって劇的に低減できると言える。

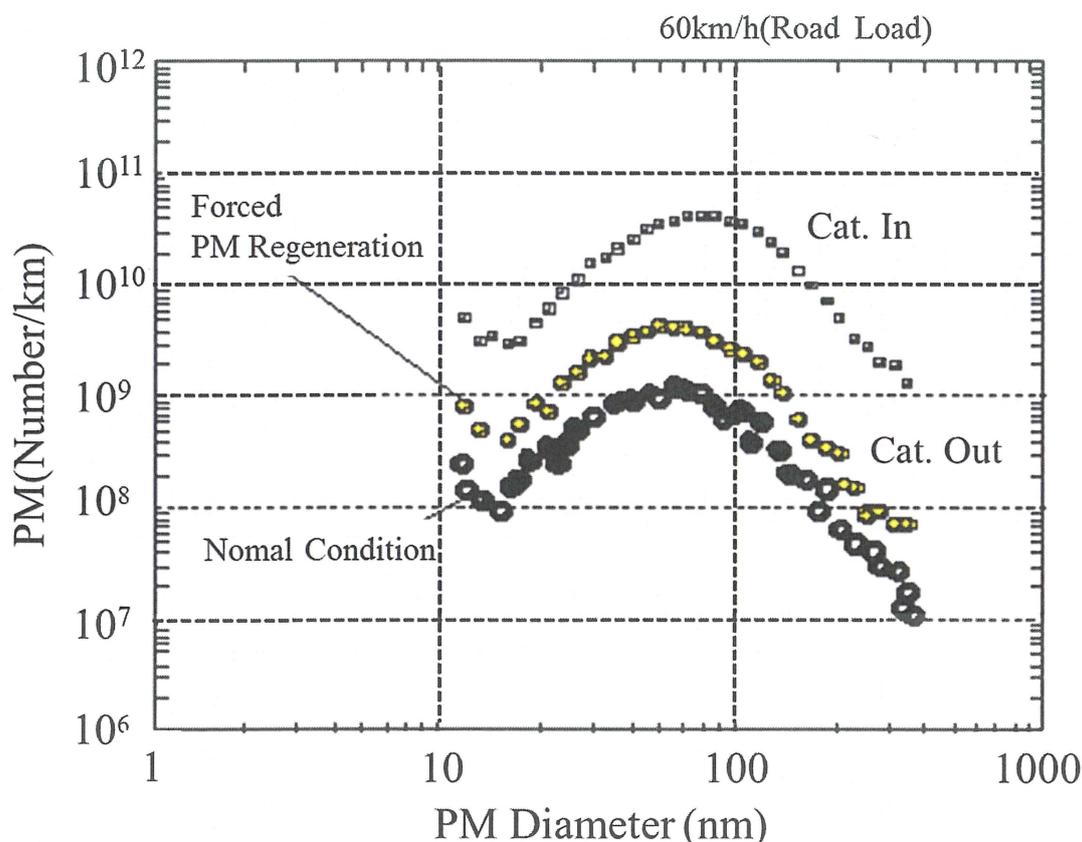


Fig.3.38 PM Size Distribution

### 3.5.8 硫黄被毒回復

図 3.39 は触媒上に吸蔵された  $\text{SO}_x$  の放出特性を示す。 $\text{SO}_x$  はストイキかつ触媒床温  $600^\circ\text{C}$  以上の条件で放出することが可能で、 $\text{SO}_x$  放出条件は排気添加と低温燃焼により実現することができる。最初にポスト噴射と排気添加により床温を  $600^\circ\text{C}$  まで上昇させ PM の強制酸化を実施する。その後、低温燃焼 (A/F 17 相当) と排気添加によってストイキ条件が実現できる。このような条件で  $\text{SO}_x$  の放出を開始できるが、 $\text{H}_2\text{S}$  もまた酸素不足により放出される。長くて連続的なリッチ制御の場合、大量の  $\text{SO}_x$  が放出されるのと同時に多くの  $\text{H}_2\text{S}$  が放出されてしまう。これを避けるため図の上部に示すように、ストイキ条件近くで細かなリッチ

リーン制御を行うことでH<sub>2</sub>Sを放出することなく大量のSO<sub>x</sub>を放出させることが可能となる。

触媒の硫黄被毒の総量は燃料中のサルファー濃度と走行距離（燃料消費量）によってほぼ決定され、硫黄濃度が高いと触媒の頻繁な硫黄被毒回復制御の実施に繋がる。これは触媒の熱劣化と燃料消費の悪化のみならずNO<sub>x</sub>低減効果を低下させることになる。それゆえ硫黄フリー燃料がDPNRの機能を効果的にするためにも必要となる。

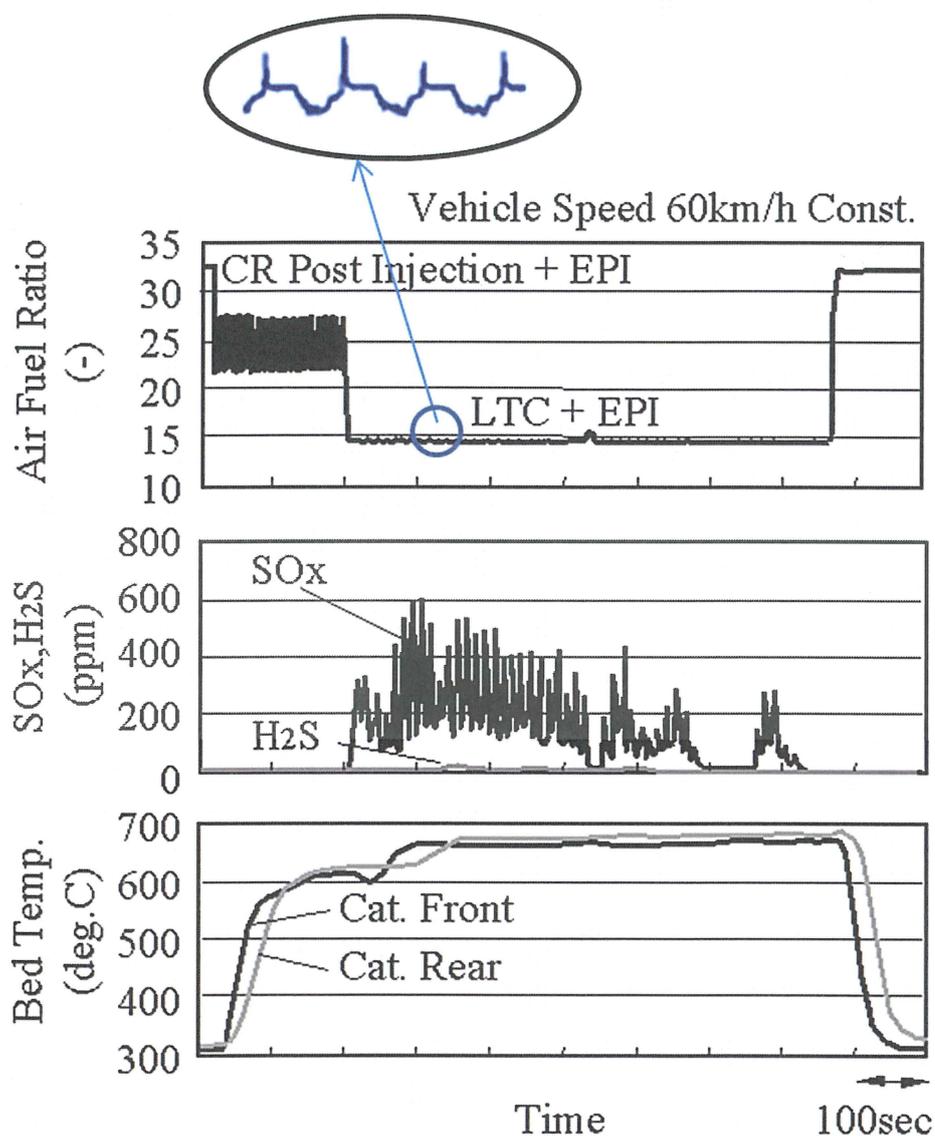


Fig.3.39 Characteristic of SO<sub>x</sub> Discharging

### 3.6 まとめ

この章ではディーゼル乗用車向けの DPNR の構成、NO<sub>x</sub>、PM の同時低減効果、システムの機能改善結果について述べた。これをまとめると以下のようになる。

- (1) DPNR 触媒は NO<sub>x</sub> 吸蔵触媒をディーゼルパーティキュレートフィルターにコーティングしたポーラスセラミック構造からなる。
- (2) NO<sub>x</sub> 吸蔵触媒上で、A/F のリッチリーンの条件を作り出すことで、PM の酸化を促進する事を発見した。これは NO<sub>x</sub> の吸蔵と還元時に放出される活性酸素の効果によるものと考えられる。
- (3) DPNR を構成するコモンレール噴射システムの高精度制御と大量 EGR を活用した低温燃焼、およびリッチリーンを作るための排気燃料添加システムにより、広い運転範囲で DPNR 触媒をうまく機能させ、NO<sub>x</sub>、PM の同時かつ連続的な低減が可能となる。
- (4) 新触媒システム DPNR においては、NO<sub>x</sub>、PM 共に欧州 Euro4 規制を大幅に下回ることができる。
- (5) PM の酸化速度は DPNR 触媒にたまっている PM が少ないほど高くなる。すなわち、触媒に溜める PM は少なくし、触媒床温を 300℃以上に制御することが PM の連続酸化性能を高く保つために必要である。
- (6) 触媒中に SO<sub>x</sub> という形で吸蔵された硫黄はストイキ条件のもとで触媒床温 600℃以上の条件で放出することが可能で、硫黄被毒回復制御は、低温燃焼と排気燃料添加により実現することができる。又、ストイキ付近でのリッチリーン制御の繰り返しにより、H<sub>2</sub>S の放出を抑えた SO<sub>x</sub> の放出が可能となる。
- (7) 硫黄フリー燃料が触媒劣化と燃料消費の増加を防ぐ意味で必要である。

## 第4章 DPNR 搭載コモンレール式ディーゼル乗用車の

### 市場実験によるシステム解析

#### 4.1 まえがき

前章では DPNR の技術確立について述べたが、本章では DPNR を構成するシステム部品及び制御の完成度を検証することを目的として、欧州、国内で大規模な実験を実施した結果について述べる。

著者らは、これからのクリーンディーゼルのコンセプトを D-CAT (Diesel Clean Advanced Technology) と名付け、そのコンセプトのもとに DPNR という新触媒システムを位置付け、量産を前提とした開発を進めることとした。前章でも述べたように DPNR は新触媒、低温燃焼コンセプト等の新技术を統合したシステムである。DPNR を乗用車用 2L ディーゼルエンジンに適用し、量産化に向けてシステムの信頼性を保証するために、欧州において 60 台、国内において 2 台の大規模市場実験を実施し、実験室及びテストコースの評価ではなかなかつかめない、各種制御の課題および実走行条件下での燃費への影響について市場での解析を進めた。実験を開始する前に全車両で DPNR による排ガス成分の低減性能を確認した。市街走行、郊外走行、高速走行という走行条件の違いのみならず、高地、極寒地といった環境面の違いによる実験も行った。実験を通して、触媒上に溜まった PM の強制酸化、硫黄被毒回復等の様々な触媒制御が実際の運転条件 (モード)、環境下においてうまく機能していることを確認し、併せてシステムの信頼性及び触媒の熱劣化の影響と硫黄被毒の影響、すなわち初期の NOx 吸蔵、還元性能に対する劣化傾向も把握することができた。これら市場での評価結果より、量産展開に向け DPNR の完成度が十分であると判断した。

#### 4.2 大規模実験車

市場実験に使われた試験車両は 2L 直噴ディーゼル車アベンシスに改良を加えたものである。ベースの 2L 直噴 (1CD-FTV) を第 2 世代コモンレールシステム、排気添加インジェクタ、大量 EGR システムに対応できるように改良した。DPNR 触媒の搭載状態を図 4.1 に、エンジンの主要諸元表 4.1 にを示すが、これらは前章で述べたものと同一である。

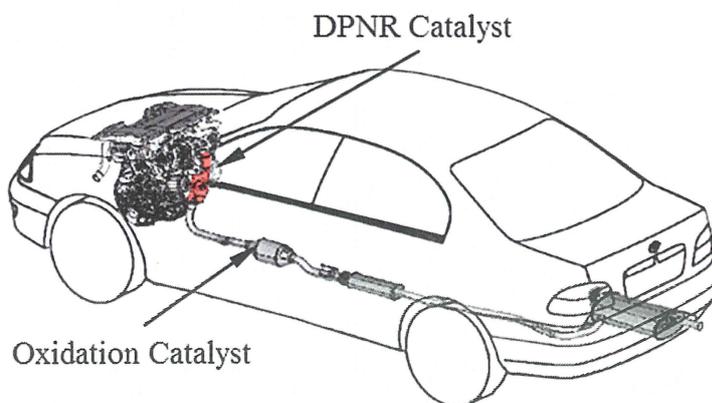


Fig.4.1 Diesel Passenger Car with DPNR

Table.4.1 Engine Specification

Modified Avenis 2.0L D4D Technical Specifications		
Power	kW	81 at 4000 rpm
Torque	Nm	180 at 1400rpm (250 from 2000 ~ 2400 rpm)
Combustion Noise	dB	68.0 at 750 rpm idle
Displacement	cm <sup>3</sup>	1995
Bore x Stroke	mm	82.2 x 94
Compression Ratio		18.2
Valve Train		4Valve DOHC
Injection System		CR (Max180 MPa)

### 4.3 実験地域

市場実験は図 4.2 に示すように欧州 7 か国のユーザの運転環境下に近い状態での情報を得るために実施し、低温地域に加え高地での実験も含めた。運転条件は主に高速走行パターン、市街走行パターン、市街・高速・郊外複合走行パターンの 3 つのパターンに区別した。大半の車はドイツとイギリスで評価し、一部はタクシーユースも含まれる。尚、これらの国では 50ppm 以下の低硫黄燃料が市場で給油可能であった。

Conditions	Country	Driving pattern	Nr. Of cars	Fuel S content
Normal	Germany	Highway	27	50 ppm
		City		
		Standard		
Normal	UK	City	19	10 ~ 50 ppm
		Standard		
High altitude	Austria	Standard	7	350 ppm
Cold area	Norway	City ~ Standard	3	10 ~ 50 ppm
Normal	Italy	Highway	2	350 ppm
		City		
Cold area	Finland	Standard	1	10 ~ 50 ppm
Normal	Belgium	Standard	1	50 ppm

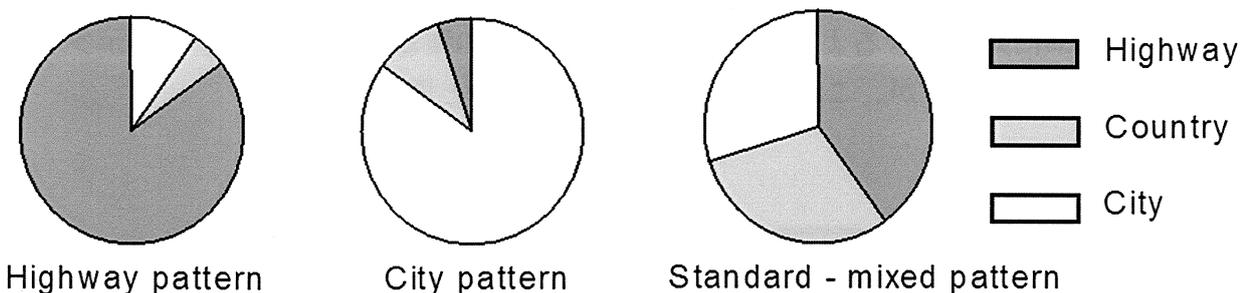


Fig.4.2 Field Trial Overview

### 4.4 モニタリングシステム

図 4.3 に示すように、すべての試験車にはデータを蓄積可能な ECU を搭載し、週間単位でエンジンの運転状態、コモンレール噴射システム、DPNR 触媒等の主要部品に関連するデータをダウンロードし、R and D センターに転送したあと詳細な解析を実施した。

シャシダイナモ設備での定期的な排気テスト、PM のサイズ分布評価もすべての車両において実施し、触媒性能の劣化等についても詳細にモニター評価を行った。

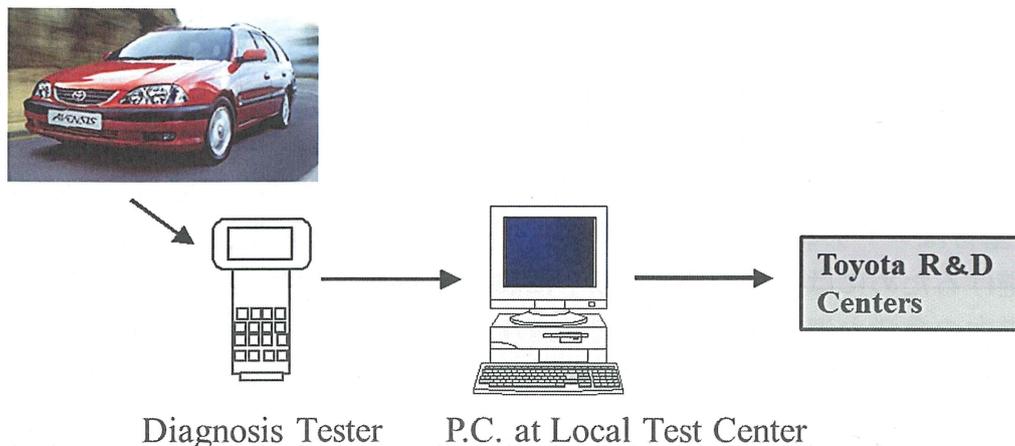


Fig.4.3 Weekly Download of ECU with Data Acquisition Ability

## 4.5 市場適合性の確認

### 4.5.1 排気テスト結果

図 4.4 に示すように市場実験開始前に、試験車両の初期の排気実力を欧州走行モードで測定し、DPNR が Euro4 排気規制を大幅に下回る能力があることを確認した。DPNR 触媒については、個々の車両において PM 及び NOx 低減性能に影響する要素について少し諸元を変えて供試した。シャシダイナモでの車両排気耐久 100000km 及び市場実験での 5000~20000km のデータを整理した結果、耐久走行に伴い NOx 低減性能が劣化し、シャシダイナモでの車両排気耐久よりも少ない走行距離でもそれ以上に劣化している車両があることがわかる。このよ

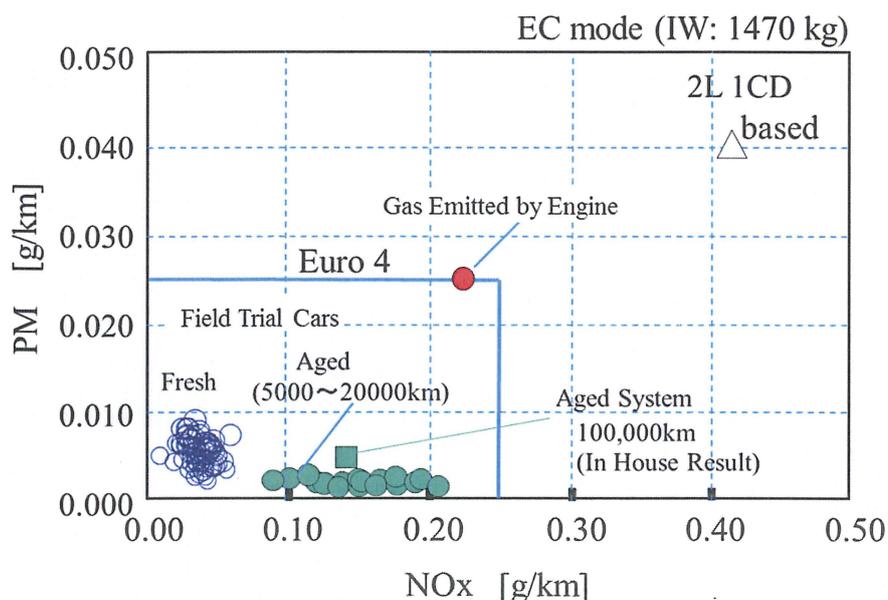
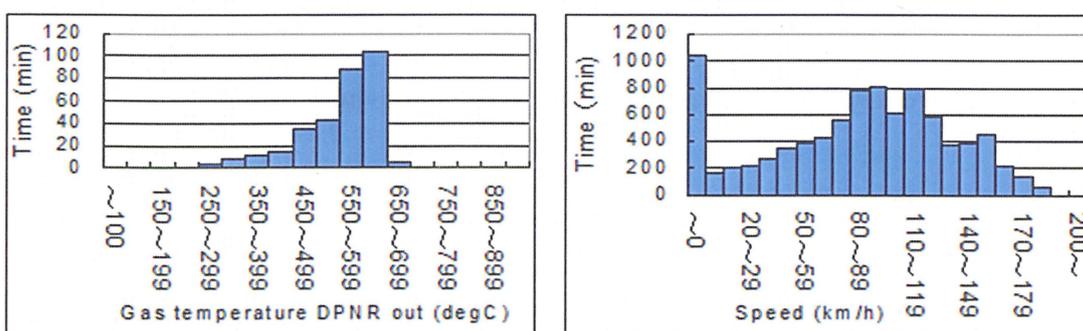


Fig.4.4 Emission Potential of Field Trial Vehicles

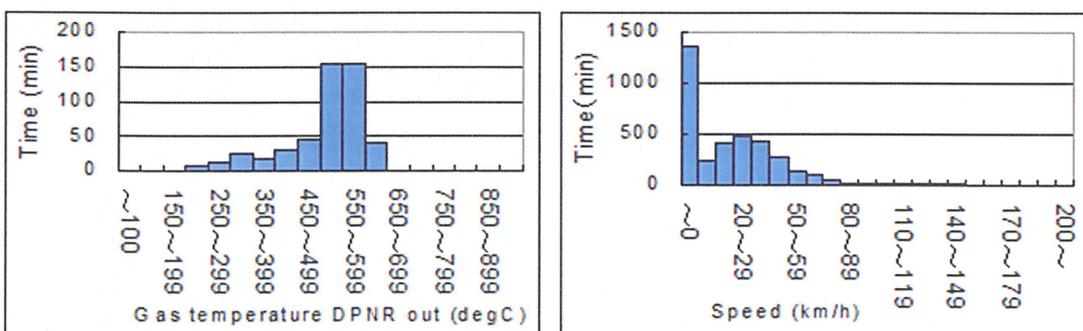
うなことから、市場実験において DPNR 触媒の劣化に関係するデータをモニターしその要因を解析することが重要である。

#### 4.5.2 PM 強制酸化

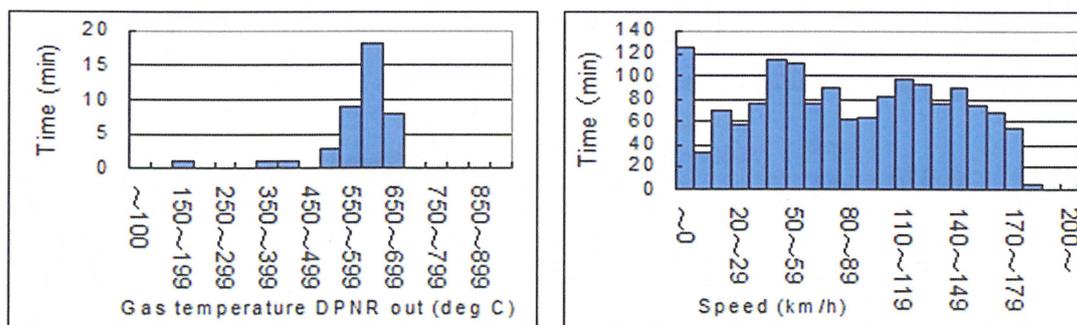
前章でも述べたが、特定の運転条件で触媒床温が低い場合には DPNR 触媒の連続的な PM 酸化量よりもエンジンから排出される PM の量が多くなることもある。この様な場合、大量の PM が触媒内に溜まることを防止し、溜まった PM を強制的に酸化することが必要となる。DPNR 触媒の基材はコーデュライトというセラミックでできており、基材の亀裂防止、触媒の熱劣化を避けるためには床温を 700℃以下におさえる必要がある。いかなる運転条件下においても触媒内の急激な温度上昇を避けるために、高精度な排気添加制御が不可欠である。図 4.5 は様々な運転条件下で、PM を強制再生しているときの触媒床温と車速の分布を示し



(a) High speed Highway Pattern (Germany)



(b) City (London)



(c) City, Country and Highway (Köln area)

Fig.4.5 Temperature during Particulate Matter Regeneration and Speed Frequency

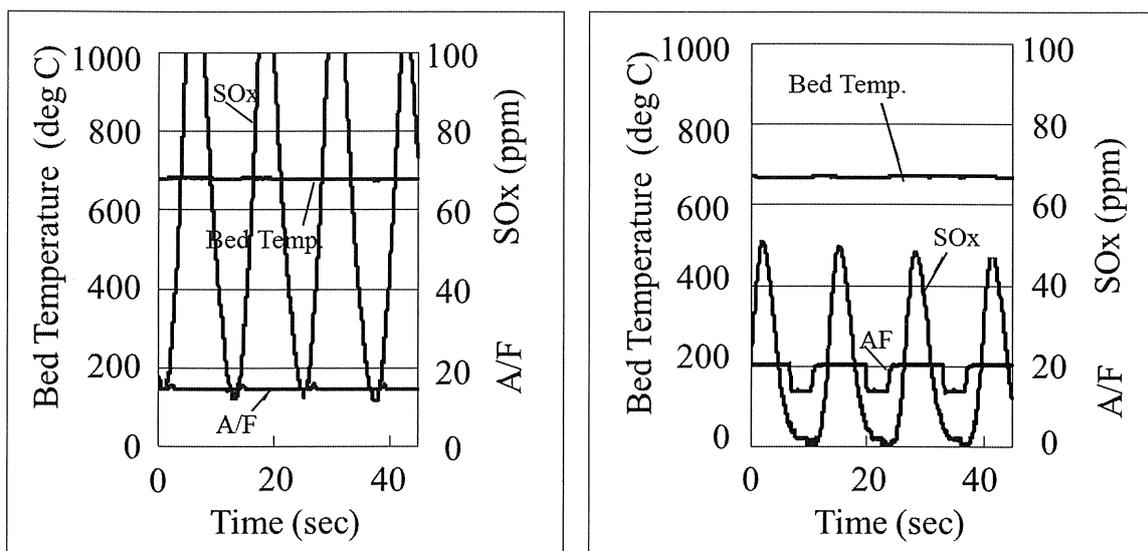
たものであり、(a) 高速走行、(b) 市街走行、(c) 市街・郊外・高速複合走行のいずれにおいてもシステムは要求温度の 600~700°C の間でうまく昇温制御ができており、700°C を超える OT (Over temperature) は検出されなかった。

### 4.5.3 硫黄被毒回復制御

NO<sub>x</sub> 還元効率は排ガス中の硫黄濃度の影響を受ける。燃料中の硫黄は燃焼室の中で酸化され SO<sub>2</sub> となり、さらに触媒の貴金属上で酸化され硫酸塩の形で触媒に吸蔵される。硫酸塩は安定した状態で触媒に吸蔵されているため、NO<sub>x</sub> は吸蔵材との反応が難しくなり吸蔵性能は低下する。(これを硫黄被毒と呼ぶ)

前章でも述べたが、SO<sub>x</sub> は床温 600°C 以上でかつストイキよりも少しリッチ側の条件で DPNR 触媒から放出することができる。触媒でのストイキ条件は、排気添加と低温燃焼の組み合わせにより実現可能であり、ベースの A/F は低温燃焼 (LTC) により約 17 程度までリッチにできるので、ストイキにするための排気添加量は少なく済む。

図 4.6 は (a) 車速 60km/h と (b) 100km/h における硫黄被毒回復制御性を示したものである。車速 60km/h での走行においては、ほぼストイキ条件近くでのリッチ-リーン制御の連続で SO<sub>x</sub> は 600~650°C で放出される。一方、車速 100km/h での走行においては触媒を通過する酸素量が多く、ストイキ条件を連続すると触媒床温を 650°C 以下に制御することが難しくなるため、図に示すようにリーン条件 (A/F20) とストイキ条件 (A/F14.5) を交互に繰り返す必要がある。このようにリッチかつ高床温が SO<sub>x</sub> 放出には要求されるが、このような放出雰囲気化においては H<sub>2</sub>S も容易に形成される。そのため、高速ではリーン+ストイキ条件近くでのリッチ-リーン制御の切り替えにより過剰 HC の総量を抑えることで H<sub>2</sub>S の発生を抑制しつつ大量の SO<sub>x</sub> 放出が可能となる。



(a) 60km/h-4<sup>th</sup> gear

(b) 100km/h-5<sup>th</sup> gear

Fig.4.6 Temperature Control during Sulfur Discharging

図 4.7 に欧州 EC モードにおける硫黄被毒回復制御の様子を示す。リッチ運転条件下での酸素不足による H<sub>2</sub>S の発生を抑制するため、ストイキとリーンの緻密な切替制御を実施し SO<sub>x</sub> 放出性との両立を図っている。

DPNR 触媒の硫黄被毒量は、燃料中の硫黄含有量と燃料消費量（≒走行距離）によって決まる。硫黄被毒回復制御が実走行モードでもうまく機能していることは上述した通りであるが、燃料中の硫黄含有量が多いと硫黄被毒回復を行う頻度が増加するため、DPNR 触媒の熱劣化が進むことによる NO<sub>x</sub> 浄化性能の低下のみならず燃料消費率の悪化にも繋がる。DPNR を有効に機能させるためにも、硫黄フリー燃料の早期展開は必須である。

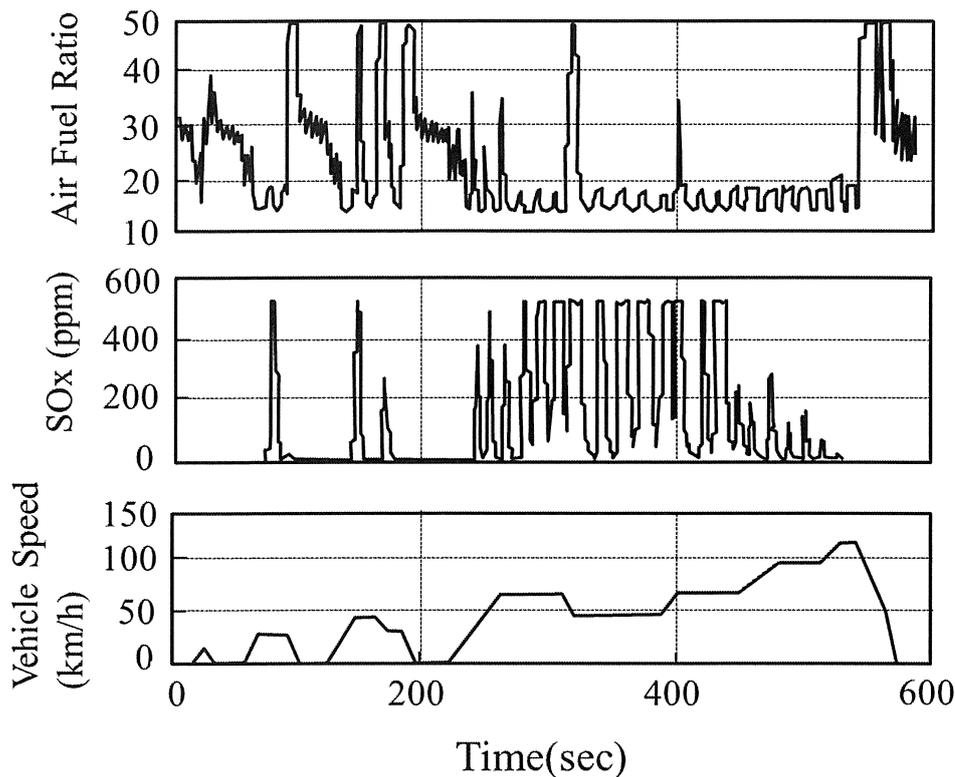


Fig.4.7 Sulfur Discharging in EUDC Mode (0.4g S stored, max H<sub>2</sub>S: 2.5ppm)

#### 4.5.4 市場走行時の温度制御性

図 4.8 に、実際の市場での運転モードにおいて、PM の強制酸化および硫黄被毒回復制御中の触媒床温を示す。床温はまずコモンレールのポスト噴射で上昇し、引き続き排気添加によりさらに上昇し目標温度に到達後、PM の強制酸化が行われる。PM の強制再生が終了し、その後の PM の酸化がない状態で燃焼モードは低温燃焼モードに変更され、同時に、排気添加量は増加し、硫黄被毒回復制御に入る。図からわかるように、PM の強制酸化制御中は低速を除き、目標の 600~650°C に入っている。PM の強制酸化が終了後引き続きストイキ条件のもとで硫黄被毒回復制御を実施しているが、この時も触媒床温は目標の 600~650°C に入っている。図では、硫黄被毒回復制御は市街走行モードで開始されている。PM の強制酸化はこの時点で完了し、硫黄被毒回復制御は郊外走行、高速走行で継続される。

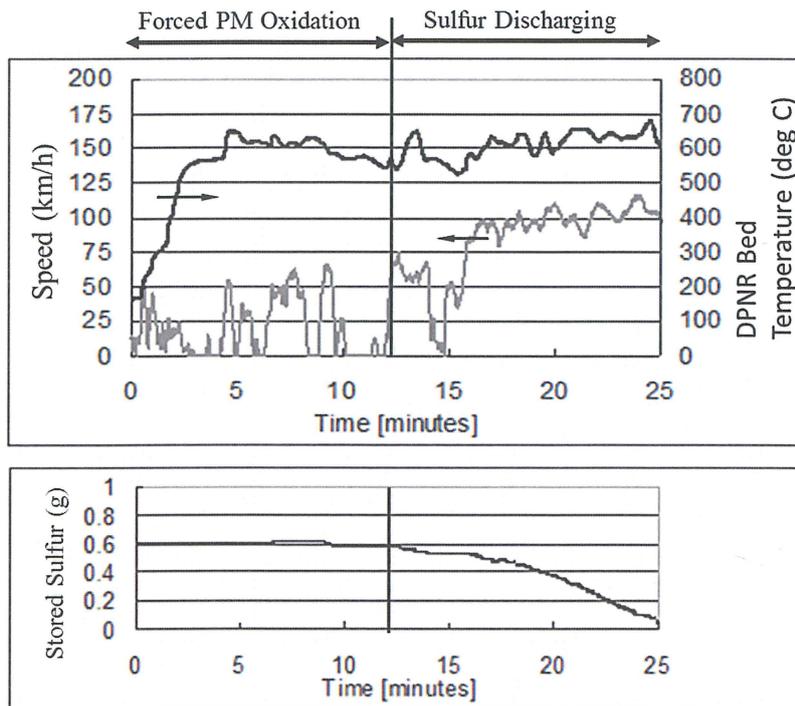


Fig.4.8 Sulfur Discharging and Forced PM Oxidation, during On-Road Driving

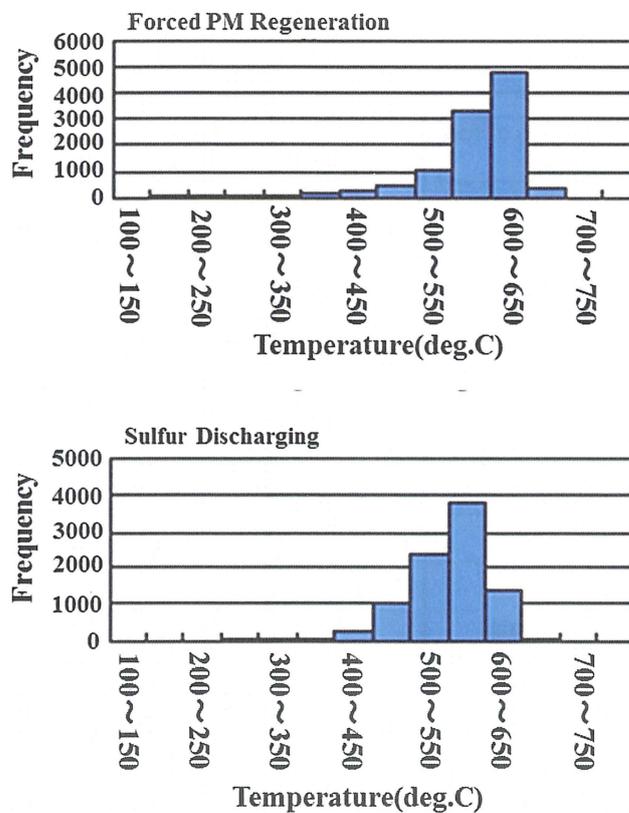


Fig.4.9 Temperature Distribution under Actual Driving Condition

図 4.9 は市場実験走行中に PM 強制酸化制御と硫黄被毒回復制御が連続して実施された時の温度分布を示したものであり、縦軸はそれぞれの温度範囲での走行頻度のカウント量を示す。PM 強制酸化および硫黄被毒回復といった異なる要求に対して、いずれも 700°C を超えることなくほぼ 600°C 域で制御されており、実走行においても高い制御能力があることを示している。

#### 4.5.5 市場走行実験時の排気トレンド

図 4.10 に市場実験車の欧州 EC モードでの排出ガス結果の推移を示す。社内 100000km 耐久走行車および市場実験車のいずれも、その走行条件に関わらず EURO4 規制値を大幅に下回る結果となっている。先にも述べたように、耐久後の DPNR 触媒の NO<sub>x</sub> 浄化性能は触媒の熱劣化の影響等により走行距離の増加に伴い低下する。この傾向は、市街、郊外、高速走行という条件にかかわらず同一傾向である。また、図 (a) に示すように燃料中の硫黄分が高い (300ppm) 地域を走行している車両の NO<sub>x</sub> レベルは低硫黄 (50ppm 以下) 地域の結果に対して悪化している。これは NO<sub>x</sub> 浄化性能に関して、熱劣化よりも硫黄被毒の影響が大きい可能性を示している。又、図 (b) に示すように市街走行においては 2 万から 3 万 km で一部の車両の NO<sub>x</sub> レベルが高くなっている。これは DPNR 触媒の入口の一部が PM によって詰まったため、触媒性能が低下したことによる。頻繁に停止・走行を繰り返すタクシースタイルでは触媒の床温度が上がりにくいいため、触媒前端が詰まりやすくなる。この問題については、低温燃焼等の見直しによって軽負荷域での触媒床温を上昇させることと、軽負荷走行が続く場合、コモンレールのポスト噴射により強制的に排気温度を上昇させることで触媒

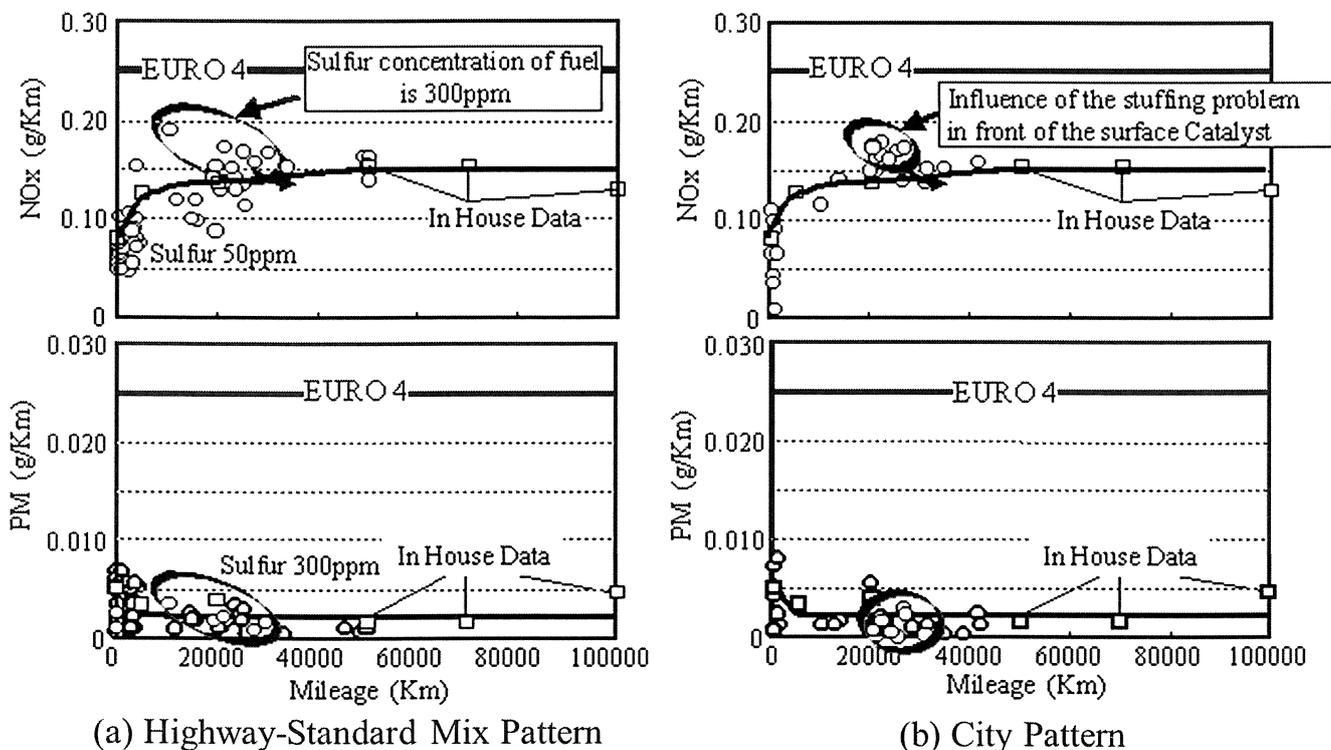


Fig.4.10 Emission History of Field Monitor Cars

前端のPM詰りを改善した。その結果、他の運転モードと同様のNO<sub>x</sub>トレンドをとることが可能となった。PMに関しては、運転モードの違い、燃料中の硫黄濃度、上述の前端詰りによる影響はほとんどなく初期の高い浄化性能を維持している。

#### 4.5.6 アッシュ詰り

DPNR 触媒の劣化性能に関しては、排気の結果に加えて、触媒内のアッシュによる詰りの影響を詳細にモニターすることが必要となった。アッシュが触媒内に詰まると、背圧の増加による出力の低下、燃料消費率の悪化、触媒性能の悪化を引き起こす。

図 4.11 に 200000km 耐久走行時の DPNR 触媒での圧力損失変化を示す。新品時の圧損を基準として、悪化率で示している。圧力損失に対するアッシュ詰まりの影響は、走行条件による差は小さく、200000km 時点での圧力損失も初期に対して約 30%増加しているものの、ほぼ安定し許容値以下であり問題ない。ここでの許容値は出力、燃費、触媒性能への影響を考慮し決めている。高速走行モードにおいてはオイル消費増大に伴いアッシュ詰りによる背圧の増加を心配したが、他モードとの差異はなかった。

アッシュは、DPNR 触媒内の PM 上に堆積され成長して行く。しかしながら、DPNR 触媒の最大の特徴の一つである PM 連続酸化性能により PM の堆積そのものが抑制されており、また厳しい運転条件下において溜まった PM も比較的少量(4g)のうちに強制的に酸化している。結果としてアッシュの堆積、成長も抑制することが可能となる。

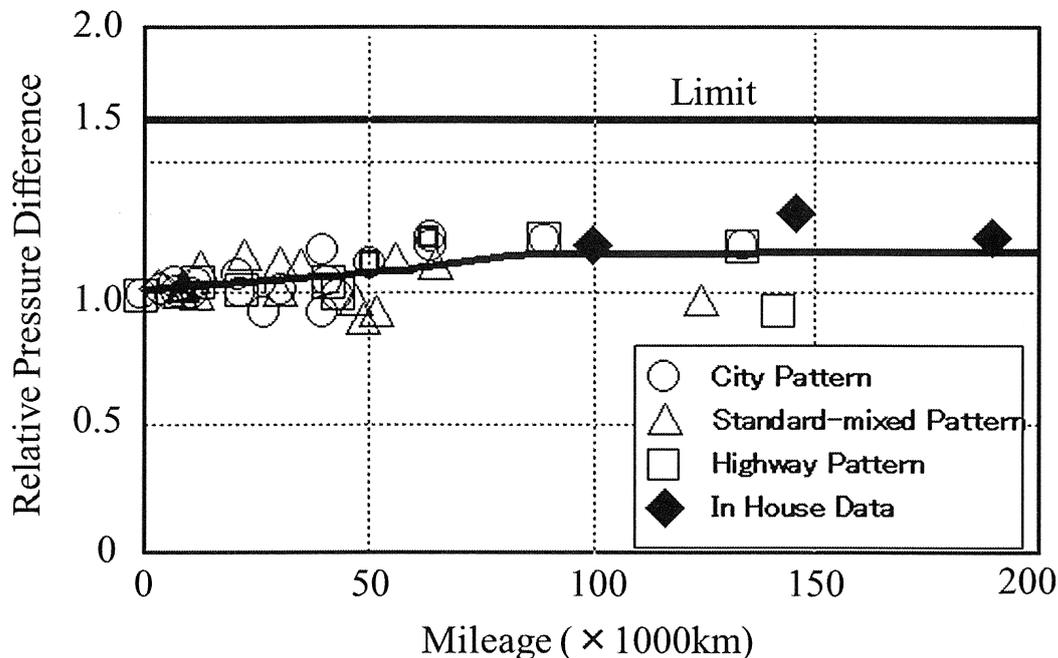


Fig.4.11 Effect of Ash on Pressure Difference of DPNR

## 4.6 まとめ

量産化に向けたシステム耐久性と各種制御性を確認するため、DPNR を搭載した 2L 直噴ディーゼル乗用車 62 台を欧州 7 ヶ国と日本国内で走行させる大規模な市場実験を実施した。この実験により、DPNR の完成度を確認することができた。

これらをまとめると、以下のようなになる。

- (1) DPNR を搭載したディーゼル乗用車は 100000km 走行後においても欧州 Euro4 規制値を大幅に下回る性能を有する。大規模市場実験を通して長距離耐久データを蓄積し、その細部解析結果を量産エンジン開発に展開することができた。
- (2) PM 強制酸化や硫黄被毒回復制御が、市場の実走行を通じて目標の触媒温度内の 600～650°C の範囲内で制御できることを確認した。しかしながら、将来に向けて更に NO<sub>x</sub> を低減するためには、DPNR 触媒の劣化について改良を進める必要がある。又、硫黄被毒による劣化、被毒回復制御に伴う熱劣化および燃料消費率の点からも硫黄フリー燃料の早期展開は必須であることも確認できた。
- (3) 20 万 km 時点での DPNR 触媒での圧力損失は初期に対して約 30% 増加しているものの、既に飽和しており又その値は許容値以下であることが確認できた。これは、DPNR 触媒の最大の特徴の一つである PM 連続酸化性能により PM 堆積そのものが抑制されていることによる。したがって車両の通常寿命期間においては DPNR はメンテナンスフリーと言える。

## 第5章 DPNR 搭載コモンレール式乗用車用ディーゼルエンジンの開発

### 5.1 まえがき

本章では、2003年より市場に導入した、DPNRを装着した新型2L直噴ディーゼルエンジンの開発結果について述べる。

地球温暖化防止のためにCO<sub>2</sub>削減が強力に要求される中で、直噴ディーゼルエンジンの優れた燃費性能と走行性能に注目が集まり、欧州市場におけるディーゼルシェアは50%に近づく勢いである。将来更なるディーゼルシェアの拡大を図るためには、更なるNO<sub>x</sub>、PMの低減が必要となり、欧州の自動車メーカー及び研究機関においても、コモンレールシステムの高圧化・高機能化及びエンジンの燃焼改良と併せて、NO<sub>x</sub>還元触媒、ディーゼルパーティキュレートフィルタの研究を強力に推進している。

このような状況の中で、ディーゼルエンジンからの排気成分の更なる低減のために、著者らが開発を進めてきたPM、NO<sub>x</sub>を同時に低減できる新触媒システムDPNRを世界初の技術として市場に導入することを決定した。

DPNRを搭載する排気量2Lの新型ディーゼルエンジンは、市場実験を実施したエンジンに更なる改良を加えたものである。第4章で述べたように2002年の4月よりDPNRを搭載した試験車による市場実験を欧州、日本で実施し、システムの信頼性と制御性、NO<sub>x</sub>還元性能の耐劣化性、燃料中の硫黄による被毒影響等を調査し、欧州市場におけるシステムの適用性を確認した。最終的な評価結果をこのDPNRを装着した新型ディーゼルエンジンに展開し、PM、NO<sub>x</sub>を同時低減できるエンジンとして世界初の量産化を実現した。

### 5.2 2L-D4D エンジン

新エンジンの諸元と性能及び排気エミッションレベルについて以下説明を加える。表5.1にアベンシスに搭載された新型ディーゼルエンジンの諸元を示す。市場実験に使われたエンジンと比較し、排気量は同一の2Lであるが、燃焼室の改良、低圧縮比化及びVNT(Variable

Table.5.1 Specifications of the Production Model

	D4D in field monitor	D4D in new AVENSIS
Displacement [cm <sup>3</sup> ]	1995	1995
Bore x stroke [mm]	82.2 x 94	82.2 x 94
Combustion system	Direct Injection	Direct Injection
Compression ratio	18.2	17.8
Intake System	Turbocharge with Intercooler	VNT Turbocharge with Intercooler
Valve train	4v DOHC	4v DOHC
Fuel Injection system	2 <sup>nd</sup> generation Common rail	2 <sup>nd</sup> generation Common rail
Nozzle Hole	0.115 x 7	0.119 x 6
Power[kW]	81 at 4000rpm	85 at 3600rpm
Torque[Nm]	180 at 1400rpm 250 at 2000 ~ 2400rpm	190 at 1400rpm 280 at 2000 ~ 2200rpm
Combustion noise [dB]	68.0 at 750rpm idle	64.5 at 800rpm idle
Displacement Of DPNR[L]	2.8	2.0

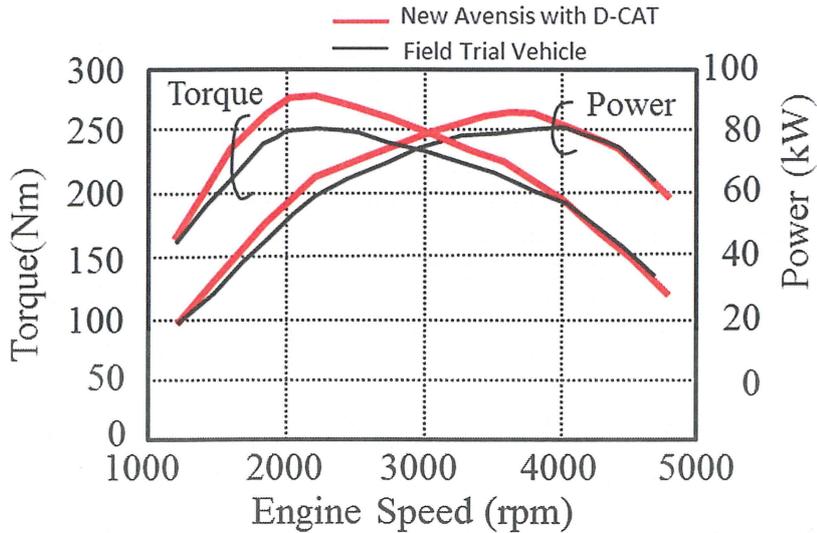


Fig.5.1 The Output Performance of the Production Engine

Nozzle Turbo)の採用等により、図 5.1 に示すように新エンジンでは最高出力で 4kW、最大トルクで 30Nm、低速トルクで 10Nm の改善を図った。低温燃焼の最適化によりアイドルでの燃焼騒音は 3.5dB 改善し、ガソリン並みのレベルとすることができた。

図 5.2 に排気レベルを示す。排気レベルは様々な改良を織り込んだ市場実験車と同等であり、欧州 Euro4 の規制に対し NOx については 60%、PM については 90%以上の低減が可能となった。触媒及び制御の改良により、排気レベルは実験車と同レベルであるが、表 5.1 に示すように触媒容量を 2.8 から 2L に縮小することで背圧を低減し出力性能を向上させることができた。

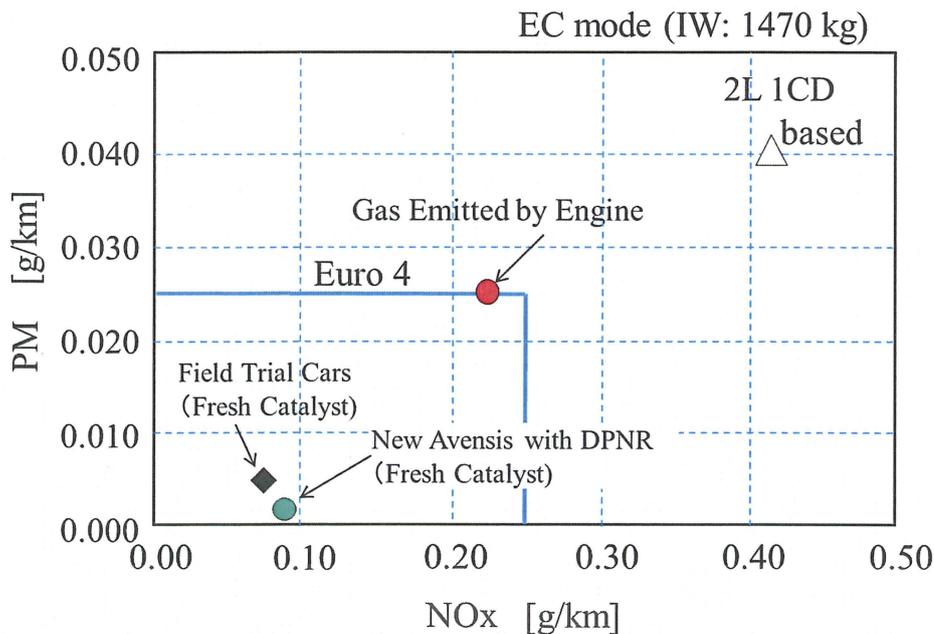


Fig.5.2 The Emission Level of the Production Engine

### 5.3 量産化に向けた DPNR の改良

#### 5.3.1 触媒改良

低速走行が連続する渋滞走行のようなモードにおいては触媒床温を増加させることが難しく、ベルリン市街のタクシーでの市場実験において触媒前面の端部で PM による詰りが発生した。実験車では温度制御の見直しを実施したが、新エンジンでの改良策として DPNR 触媒入口のガス温度を高めるため、図 5.3 に示すように新たな触媒を DPNR 触媒の前に設置することにした。触媒選定にあたっては、栓詰めのない NO<sub>x</sub> 吸蔵還元触媒 (NSR) を採用し、触媒容量はトータルで 2.8 から 2L に縮小している。触媒を 2 段化したが、容量縮小と併せて、写真に示すようにコンパクトにまとめることができた。

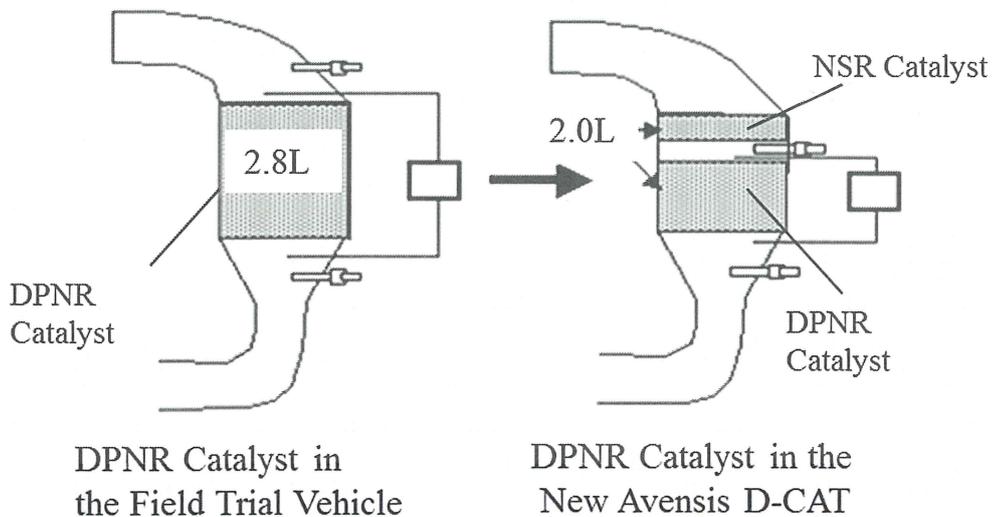


Fig.5.3 Comparison of Displacement between Field Trial Vehicle and New AVENSIS

NO<sub>x</sub> 吸蔵還元タイプの触媒は触媒に流入するガスの温度を上げることに對しても有効であるが、活性酸素量を増加させる意味でも有効であることが判明している。第 3 章で述べたように、DPNR 触媒では NO<sub>x</sub> 吸蔵・還元のプロセスにおいて発生する活性酸素により PM の酸化を加速することができる。DPNR 触媒の前段に設けた NO<sub>x</sub> 吸蔵還元触媒から放出された活性酸素は DPNR 触媒内部で放出される活性酸素に追加される。結果として、図 5.4 に示すように PM 酸化性能は、DPNR 触媒の前に吸蔵還元触媒のない実験車仕様に対し 20% 改良することができた。この図の PM 酸化性能は、前段の吸蔵触媒がない場合との相対値で示している。

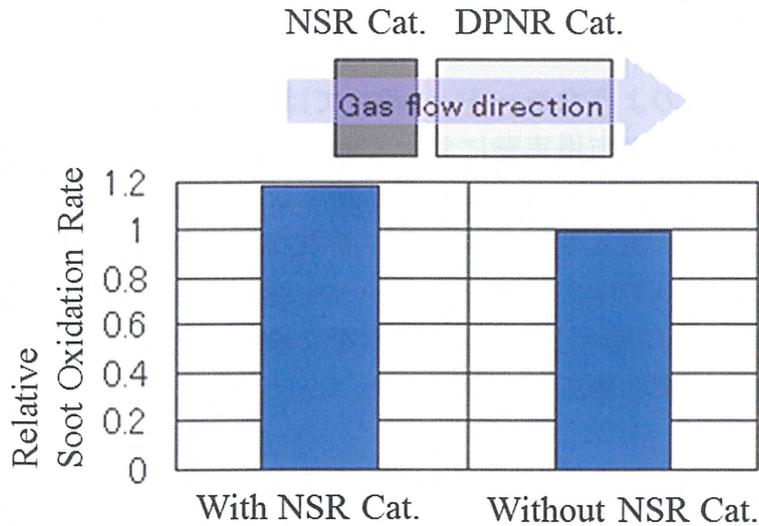


Fig.5.4 The Effect of the NSR Catalyst on the PM Oxidation Performance

### 5.3.2 市場走行モードでの制御性確認

図 5.5 に欧州実験車の市場走行を代表するモードをシャシダイナモ上で再現した時の、PM 強制酸化と硫黄被毒回復制御の状況を示す。モード走行中、触媒に溜まった PM は DPNR 触媒

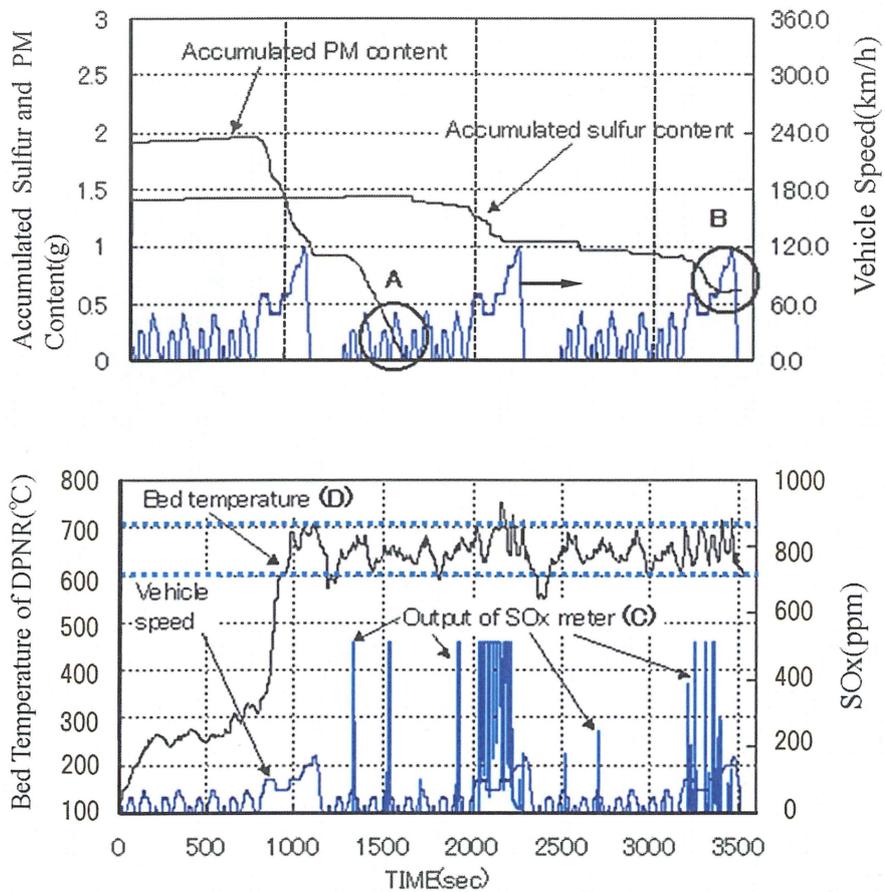


Fig.5.5 The PM Regeneration and Sulfur Discharging Control during Mode Driving

の床温を上げることで十分に酸化される（図中 A）。これに引き続き触媒に吸蔵された  $\text{SO}_x$  は放出される（図中 B）が、この際  $\text{SO}_x$  センサーにより確実な  $\text{SO}_x$  放出を確認できた（図中 C）。触媒の温度制御に関しては、床温は 600 から 680°C の目標温度の間でほぼ制御できている（図中 D）。

### 5.3.3 硫黄被毒回復制御の改良

DPNR の機能を活かすためには燃料中の硫黄濃度は 50ppm 以下にすべきであるという想定のもとに市場実験を開始した。既に述べているように、 $\text{SO}_x$  は 600°C 以上の触媒床温でストイキより若干リッチな条件で放出することができる。これをシステムで実現するため、低温燃焼、排気燃料添加システムを開発し、適応性を市場実験で調査した。硫黄被毒回復の制御運転領域が狭いこともあり、市場走行中においては制御を完了するまでに比較的長い時間がかかることが判明した。その結果、燃料消費への悪化影響は無視できないレベルであり、次に示す改良を実施した。

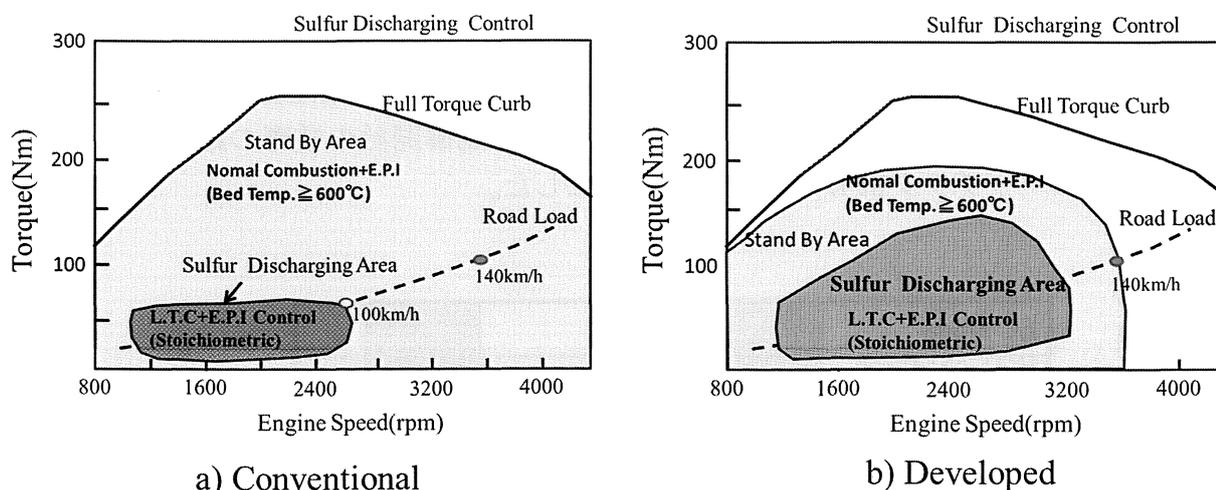


Fig.5.6 Enlargement of the Sulfur Discharging Control Range

#### 5.3.3.1 硫黄被毒回復制御領域の拡大

図 5.6 に被毒回復制御領域の拡大を検討した結果を示す。図(a) は改良前の制御領域を示す。様々な市場走行モードから得られたデータを解析することによって、低温燃焼は車速で 20 km/h から 140km/h で制御されることが必要と判明したが、改良前は 100 km/h 程度であった。硫黄があるレベルまで触媒中に溜まると硫黄被毒回復制御を開始するが、図(a) に示すように、研究の初期段階ではエンジン使用領域が硫黄被毒回復が可能な領域の外であっても、まずは触媒温度を 600°C とするスタンバイ制御（図中の薄いハッチング領域）を行い、硫黄被毒回復領域（図中の濃いハッチング領域）に入ったと同時にリーン-リッチ制御が実施できるようにしていた。市場での実走行においてはスタンバイ状態が連続し、低温燃焼領域になかなか入らないため、硫黄被毒回復制御が短時間で完了せず、燃料消費率が大幅に悪化するケースもあることが判明した。そのため、図(b) に示すように低温燃焼および排気燃

料添加の改良による硫黄被毒回復制御域の拡大に併せて、600℃以上で制御していたスタンバイ領域を縮小することで、硫黄被毒回復制御の時間を短縮することができた。

低温燃焼領域の拡大で問題となるのは、黒煙と燃焼騒音であるが、これらについてはEGRクーラ効率の向上と、EGR系の圧損低減によりシリンダ内への充てんガス量の増加とガス温の低減を図ることで対策が可能となった。排気添加については、低温燃焼域の拡大に併せリーン-リッチの間隔、リッチ時間の最適化を行い温度条件とストイキ条件の両立を図った。

### 5.3.3.2 硫黄被毒の影響

図5.7は触媒の硫黄被毒量に対する、硫黄被毒回復速度とNOx吸蔵量及び燃費悪化への影響を示したものである。横軸の硫黄被毒の総量は永久被毒分を差し引いたもので整理している。本来の触媒の総被毒量は永久被毒量（制御では回復できない）にこれらの被毒量をたしたものとなる。

従来の制御は、触媒への硫黄被毒量が0.5g以下の比較的少ない値に達したところで実施していた（図中左側のハッチング部分）。しかしながら図をみてわかるように、被毒量が少ない場合、NOx吸蔵性能はあるレベルを確保できるが、硫黄の被毒回復速度は遅く燃料消費を増大させてしまう。燃料消費への影響を最小化するために、NOx吸蔵性能は低下するが硫黄被毒回復速度が比較的早く制御時間も短くできるよう、制御開始の被毒の総量を1.5~2g程度（図中右側のハッチング部分）に増やすことにした。

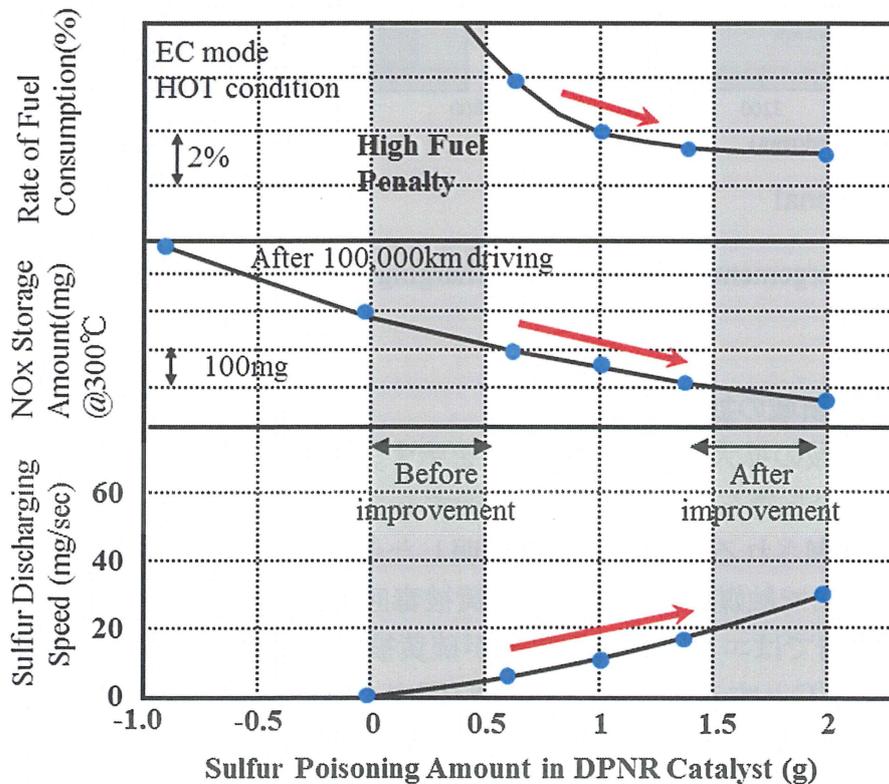


Fig.5.7 Influence of Sulfur Poisoning on Discharging Speed , NOx Emissions and Fuel Consumption

図 5.8 は硫黄被毒回復制御改良後の排気レベルを整理したもので、2台の結果を示す。市場走行状態において自動的に制御が働き硫黄が放出された後のNO<sub>x</sub>と、その後さらに実験的に時間をかけて硫黄をしっかりと放出したあとのNO<sub>x</sub>を比較しても差が小さいことから、実走行時の硫黄被毒回復制御性は非常に高いことが確認できた。

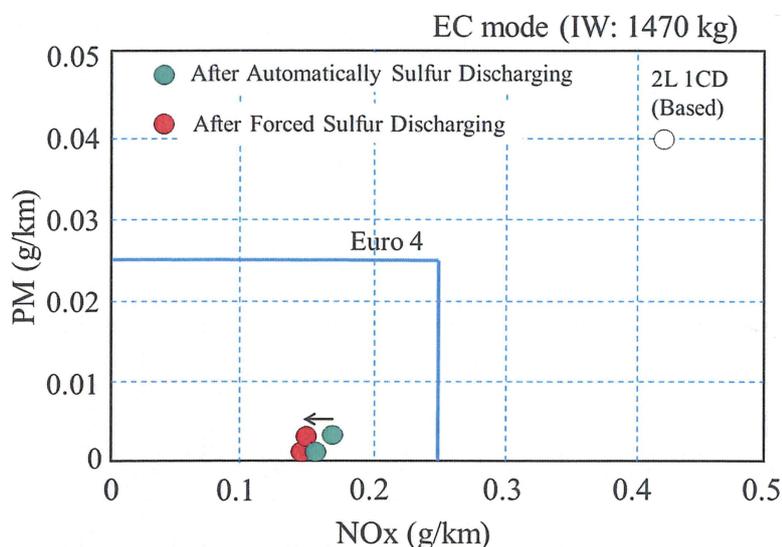


Fig.5.8 Comparison between Automatically Discharging and Forced Discharging

### 5.3.4 燃費の改善

図 5.9 は硫黄被毒回復制御が燃費に及ぼす影響を示したものであり、目標値を1とした時との比較で示す。図中①に示されるように改良前の硫黄被毒回復制御は明らかに燃費を悪化させてしまう。先に説明した硫黄被毒回復制御領域の拡大、制御開始被毒量の見直し等による

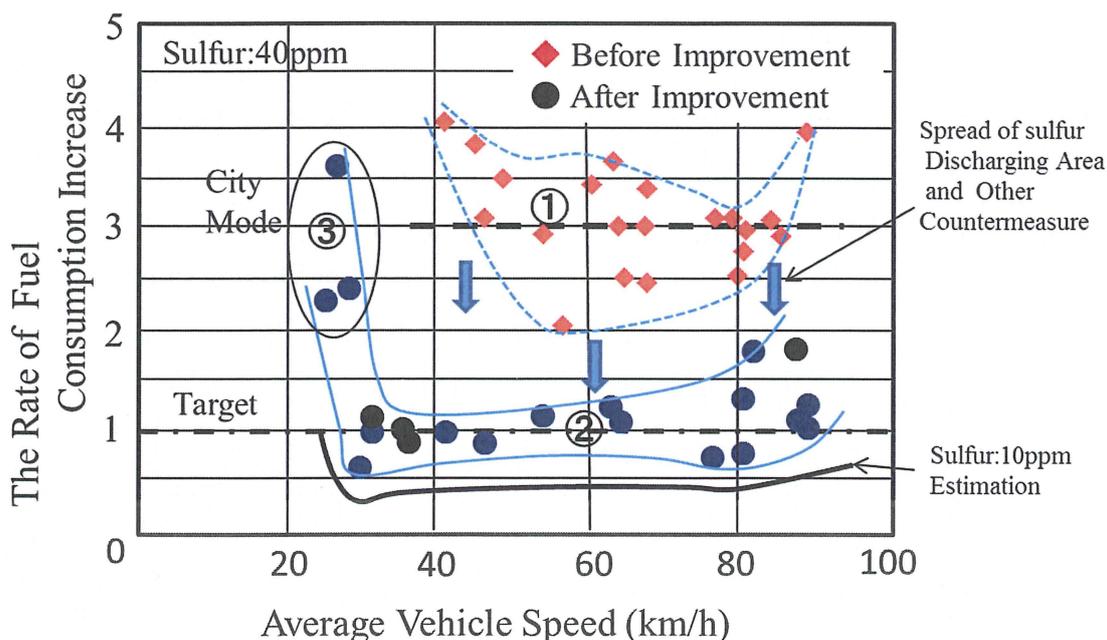
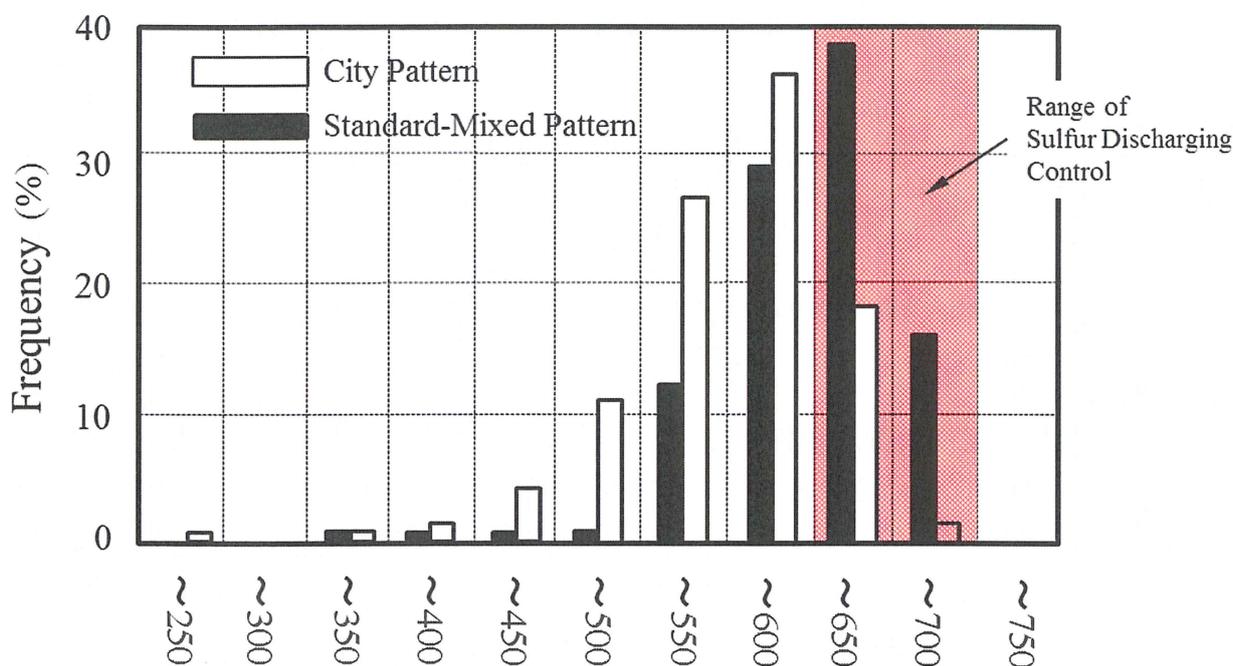


Fig.5.9 The Influence of Sulfur Discharging Control on Fuel Economy

り燃費への悪化影響を 1/3 に低減することはできたが（図中②）、市街走行（図中③）のように平均 30km 以下の低車速走行モードにおいては、依然燃費悪化への影響は大きい。

図 5.10 は市街走行と中速・高速複合走行における触媒床温の分布を比較解析したものである。市街走行のような低車速走行においては、硫黄被毒回復制御中の触媒床温は図に示すように 600℃を上回る頻度が中速・高速走行モードに比べて少ないことが燃費悪化に繋がっている。システムとして触媒床温を高く保つための制御改良をさらに進める必要がある。

図 5.9 には燃料中の硫黄濃度を 10ppm とした時の燃費悪化率の推定値も併記したが、これとの比較から燃料中の硫黄濃度 50ppm は DPNR の機能を活かすためには不十分であり、将来 NOx と CO<sub>2</sub> 共に低減するためには硫黄フリー燃料の導入は必須であることがわかる。



The Bed Temperature of DPNR in Sulfur Discharging Control (deg.C)

Fig.5.10 The Frequency Difference of the Bed Temperature in some Driving Conditions

## 5.4 まとめ

新触媒システム DPNR を量産エンジンに適用するため、DPNR を搭載した 62 台の 2L ディーゼル乗用車の欧州 7 か国及び日本での実証実験を実施した。その結果、システムの信頼性および制御性に関する課題が抽出され、その対策効果を確認した上で、量産エンジンに反映した。市場実験から得られた知見も含めまとめると以下のようになる。

- (1) PM、NO<sub>x</sub> が同時低減できる世界初のディーゼルエンジンの量産化に対して、システムの信頼性と様々な制御性を確認するための市場実験を実施し、実験から得られた知見を量産エンジンの完成度アップにつなげることができた。
- (2) DPNR 触媒の前段に NO<sub>x</sub> 吸蔵触媒を追加することで、触媒総量を 2.8L から 2L に縮小し、触媒床温の上昇とあわせ PM 連続酸化性能を 20%改善することができた。
- (3) 市場での実際の使われ方を解析した結果、車速 140km/h まで硫黄被毒回復制御域を拡大することが不可欠であることを確認した。これに対応するため低温燃焼の改良及び排気添加制御方法の見直しにより、制御領域を市場の走行モードに適用できるよう拡大した。又、硫黄による被毒量と放出速度との関係を明確にし、被毒回復制御に伴う燃費悪化を最小限とするよう制御開始時の硫黄被毒量を 1.5 g に定めた。
- (4) 硫黄被毒回復制御に先立ち、床温を 600°C 以上に保つスタンバイ制御領域を硫黄被毒回復制御の拡大に併せて縮小し、制御開始時の硫黄被毒量を見直すことで、硫黄被毒回復制御に関わる燃費悪化は 1/3 に低減できた。但し、触媒床温の上がりにくい低速域での硫黄被毒回復制御中の燃料消費については更なる改良が必要である。

## 第6章 超高出力・クリーンを両立する乗用車用

### 新型ディーゼルエンジンの研究開発

#### 6.1 まえがき

前章では、DPNR を搭載した 2L ディーゼルエンジンの開発結果について述べた。本章では低燃費（低 CO<sub>2</sub>）、クリーン化とあわせ、更なる高出力化を実現した新開発の 2.2L エンジン（2AD）の研究開発について述べる。

著者らの数年に渡る研究開発により、DPNR という世界初の触媒システム技術を確立することができた。ディーゼル本来の低燃費（低 CO<sub>2</sub>）という特色を活かすためには、排気のクリーン化が課題であったが、DPNR 技術の確立によりそれを実現することが可能となった。地球温暖化防止のための CO<sub>2</sub> 削減、エネルギーセキュリティーのための燃費改善、大気環境保護のためのクリーン化については今後も継続的な努力が必要であるが、車本来の魅力の一つとして、スムーズな加速、レスポンスの良い走りを追及することも顧客の要求を満たす上で非常に重要である。そのためにも、これまで研究開発を進めてきた低燃費（低 CO<sub>2</sub>）、クリーン化のみならず、ディーゼルエンジンの更なる高出力化も併せた検討が必要とは判断した<sup>(33) (34)</sup>。

新 2.2L 直噴ディーゼルエンジン（2AD）においては、高出力・低燃費・クリーン化のすべてを同時に実現するために、これまで難易度が高いと考えていた圧縮比 16 を下回る低圧縮比化を研究開発の基盤とした。低圧縮比を実現するために、インジェクタのピエゾ駆動化をはじめ、高レール圧力（180MPa）、高過給圧、セラミックグローシステム等、多くの新技術の研究・開発を進め、これらをすべて織り込んだシステムとして次世代 DPNR という形にまとめた。当然のことながら、次世代 DPNR には市場実験を通して得られた触媒及び触媒制御における各種改良策も導入し、更なる洗練化を図った。

このように多くの実現可能な技術を採用することで、従来エンジンでは達成できなかった出力・燃費効率の向上、NO<sub>x</sub>・PM・CO<sub>2</sub> の低減を高いレベルで実現することが可能となった。

#### 6.2 ディーゼルエンジン開発における技術戦略

図 6.1 にこれまでのディーゼルエンジンの研究開発の変遷を示す。コンベンショナルなシステムからさらに、高出力、クリーン、良好な燃費性能を実現するシステムに進むために 2 種類の後処理システム（DPR, DPNR）を D-CAT コンセプトのもとで開発した。DPR は更なる低排気要求への対応に適用し、DPNR は更なる高出力要求、低燃費要求および低排気要求への対応のために適用しこれをベースに次世代 DPNR でさらなる洗練化をはかった。

図 6.2 は DPR と DPNR の量産化に向けた研究開発の歴史を示したものである。1990 年頃から開発していた DPR は 2003 年から国内で商用のディーゼル車に搭載した。DPR 触媒（触媒 DPF）とガソリンエンジンで開発された NO<sub>x</sub> 吸蔵還元触媒の技術を融合した DPNR 触媒は 2002 年からの国内欧州における大規模実験に続き少量であるが、2003 年に欧州での量産乗用車と国内での量産商用車に採用した。これらの経験をもとに新規に開発した 2.2L 直噴ディーゼル

エンジンは様々な改良を通して洗練された DPNR に加えて、多くの新技術を採用している。

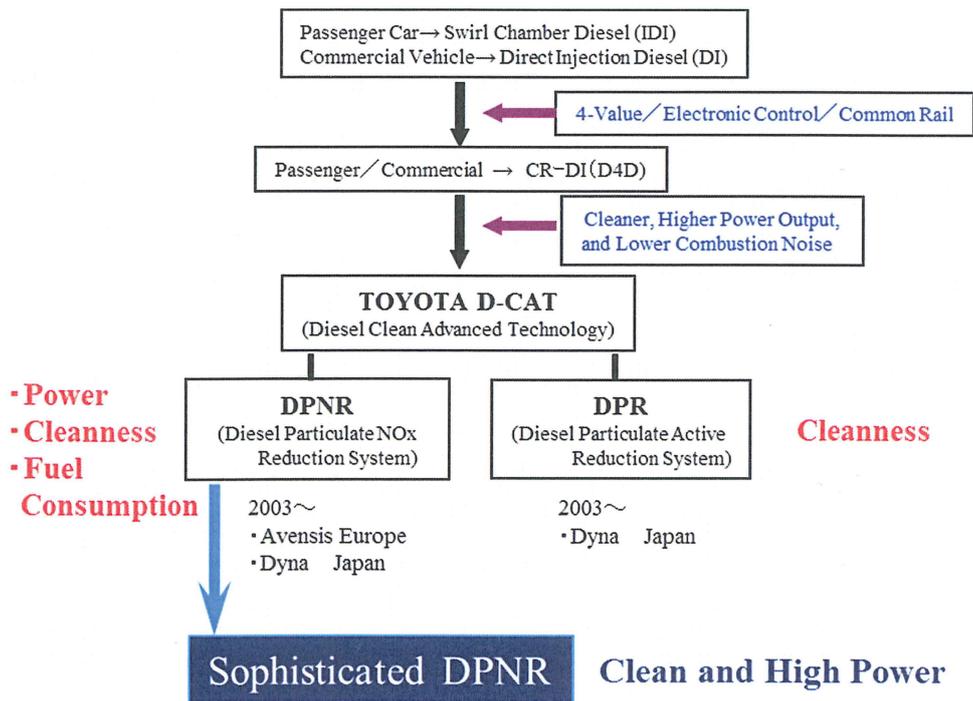


Fig.6.1 Development of Diesel Engine

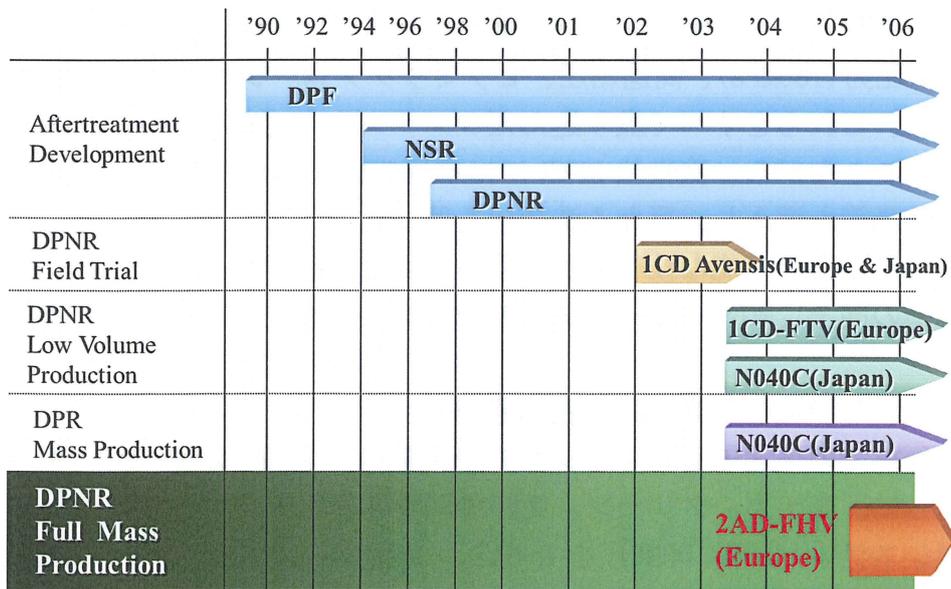


Fig.6.2 D-CAT Development History

### 6.3 次世代 DPNR の概要

図 6.3 に次世代 DPNR の構成を示す。ここでは新しく開発したピエゾコモンレール式直噴ディーゼルエンジンをベースに 180Mpa の高圧化を実現し、多くのシステム改良を行った。

噴射システムは第 2 世代コモンレールシステムをベースに、インジェクタの駆動方式をソレノイド式からピエゾ式に変更することで、従来以上の高応答化と噴霧の微粒化を実現した。

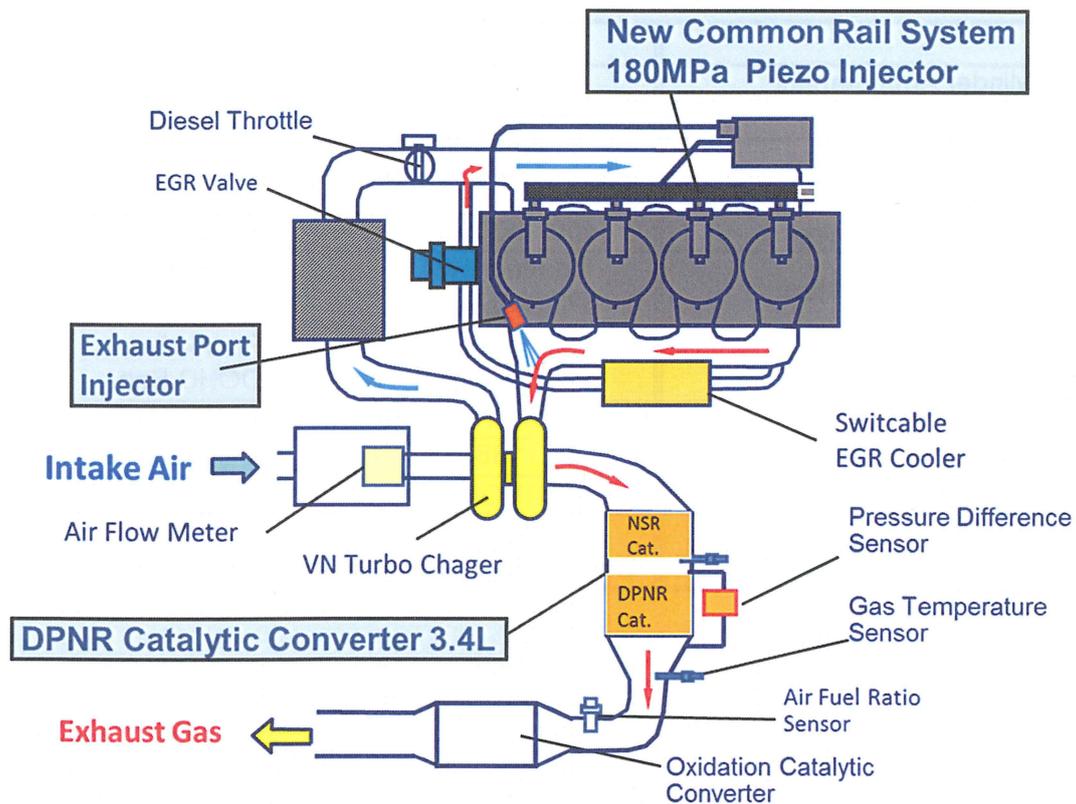


Fig.6.3 Configuration of New Generation DPNR

排気燃料添加システムはノズルの噴口の設計を見直し、噴霧の更なる改善が可能となった。EGR システム (EGR Valve、ディーゼルスロットル、EGR クーラ) の構成は従来と同じであるが、ディーゼルスロットルについては駆動方式をロータリーソレノイドから DC モータに変更するとともに、EGR クーラについては容量をアップしクーラをバイパスする機能を追加した。これらの改良により、大量かつ高応答な EGR 制御システムを実現した。

触媒システム (DPNR 触媒、酸化触媒、各種センサー) については、触媒のコート法の見直しを行い、浄化能力の向上と高出力化に対応するための圧損低減等を行った。各種制御の改良とも併せ、これによりあらゆる条件下において DPNR 触媒の機能を最大限に活かすことが可能となった。

#### 6.4 新エンジンの概要

高出力、クリーン、良好な燃費性能 (低 CO<sub>2</sub>) を達成するために触媒の改良とエンジンの改良を進めた。エンジン本体の改良により、エンジンから排出される NO<sub>x</sub>、PM を低減することで触媒への負荷を低減し、コストパフォーマンスの高いシステムを確立することが出来た。表 6.1 に 2.2L 新ディーゼルエンジン (2AD) の基本諸元を、従来の 2L (1CD) エンジンとの比較で示す。排気量の 10%アップと併せ、出力、トルク共に大幅な増加を達成するとともに (詳細は後述する)、重量については 21 kg の軽量化が実現できた。

Table.6.1 Main Specification

	2AD-FHV	1CD-FTV
Cylinder Arrangement	In-line 4-cylinder	
Displacement (cm <sup>3</sup> )	2231	1995
Bore × Stroke (mm)	86 × 96	82. 2 × 94
Max. Power (kW/rpm)	130/3600	85/3600
Max. Torque (Nm/rpm)	400/2000-2600	280/2000-2200
Fuel Injection System	Common Rail, Piezo Injector	Common Rail, Solenoid Injector
Valve Mechanism	Four valve, DOHC, Chain	Four valve, DOHC, Belt
Induction System	VN-Turbocharger with Intercooler	
Engine Weight (Dry kg)	168	189
Emission Compliance	EURO 4	EURO 4
Emission Reduction System	DPNR + Switchable EGR Cooler	CCo+ EGR Cooler

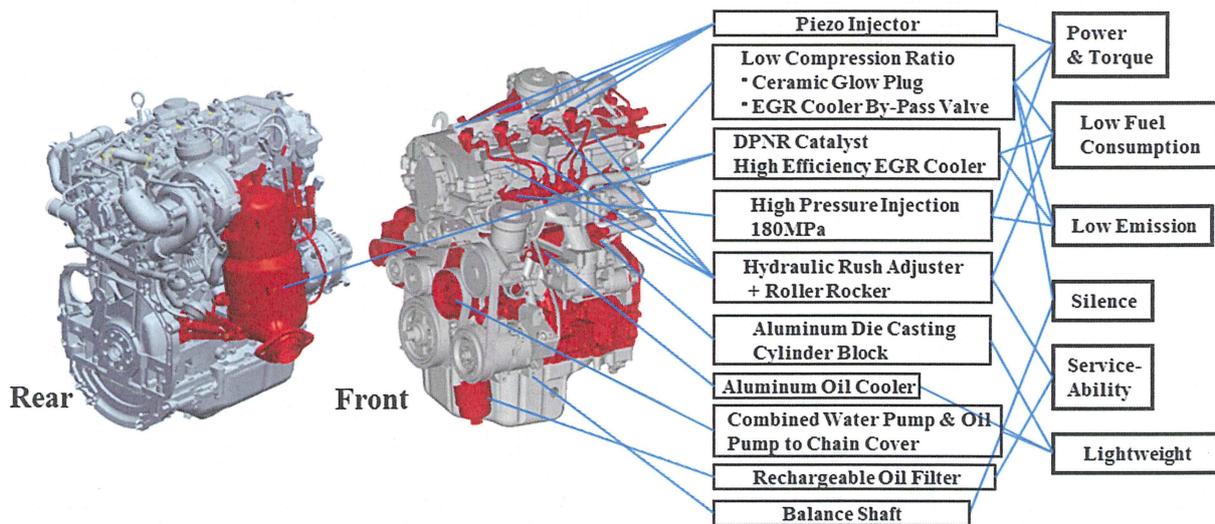


Fig.6.4 Technologies Adopted in New System

図 6. 4 に新規採用技術を示すが、主なものは次の 4 点である。

- ピエゾインジェクタシステム及び次世代 DPNR の様々な新規技術による超クリーン化
- 低圧縮比コンセプトとピエゾ駆動インジェクタ及び高圧化 180MPa による高出力化
- 多段噴射、高剛性、コンパクトなバランスシャフト、効果的な防音カバーによるガソリンエンジン並みの低燃焼騒音化
- アルミダイカストブロック採用による超軽量化

### 6.4.1 クリーン化と高出力化の両立

図 6.5 は新技術を新エンジンに適用することによりいかに高出力化及びクリーン化が実現されたかを示したものであり、横軸に NOx、縦軸に排気量あたりの出力（比出力）を取って整理した。厳しい NOx 規制に DPR あるいは酸化触媒 (CCo) を使って対応する場合には、エンジンそのものの改良によってエンジンから直接排出される NOx を低減する必要がある。しかしながらこの場合には、NOx の低減と出力（及び燃費性能）は図中①に示すようにトレードオフの関係となるため、クリーン化と高出力化の実現は難しい。図中②に示すように、インジェクタのピエゾ化+低圧縮比化 ( $\epsilon$  16.8→15.8) により NOx、出力共に改善できるため、仮に同一の NOx レベルで比較すると比出力は 9kW/L 改善できる。ここで③のようにトレードオフラインにそって比出力を上げると NOx も増加するが、この状態で DPNR を追加すると、④のように比出力は変わらず NOx が低減し、結果的に同一の NOx レベルであれば、DPNR 追加で比出力を更に 6kW/L 増加させることが可能となる。高出力化を狙いかつ厳しい排気規制に対応する場合、ピエゾコモンレール、低圧縮比といったエンジン改良も重要であるが、NOx 触媒 (DPNR 触媒) が将来の重要技術となり得ることがわかる。

尚、図中には車両重量 (IW: Inertia Weight) を軽量化した場合の NOx 低減効果を併せて示したが、エンジンの改良と併せ軽量化が今後非常に重要であることがわかる。

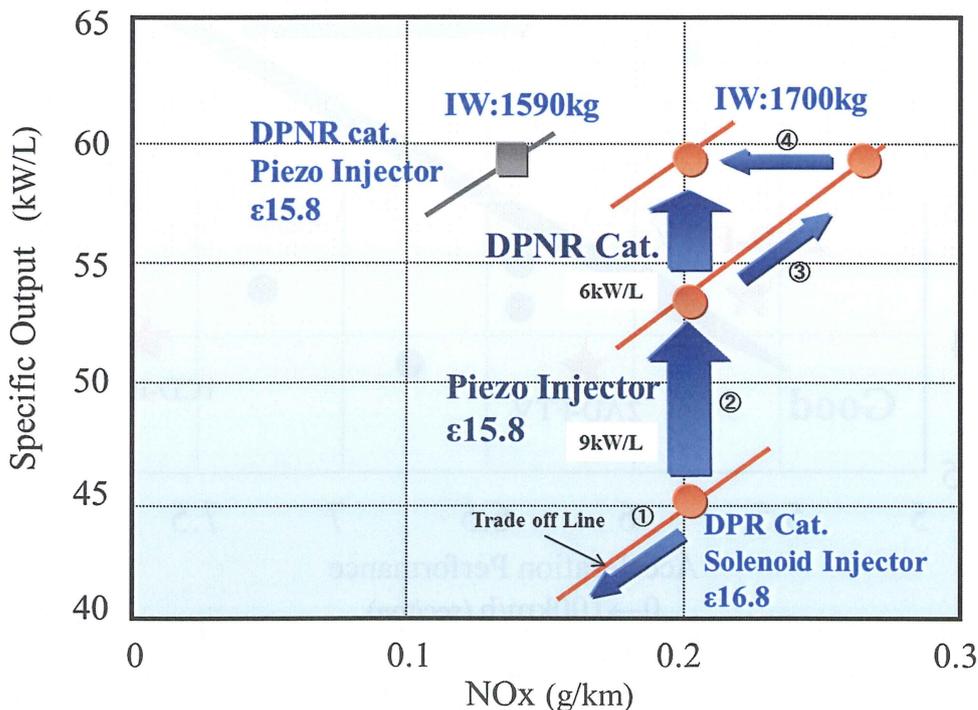


Fig.6.5 Relationship between Low Emissions and High Power Output

### 6.4.2 エンジン性能と排気

図 6.6 にエンジン出力性能を示す。左図からわかるように 2AD エンジンの比出力・比トルク（排気量 1L 当たり）は欧州乗用車市場の同セグメントにおいてトップレベルにある。右図はトルク、出力性能を 1CD エンジンと比較したものであるが、2AD エンジンは従来の 1CD

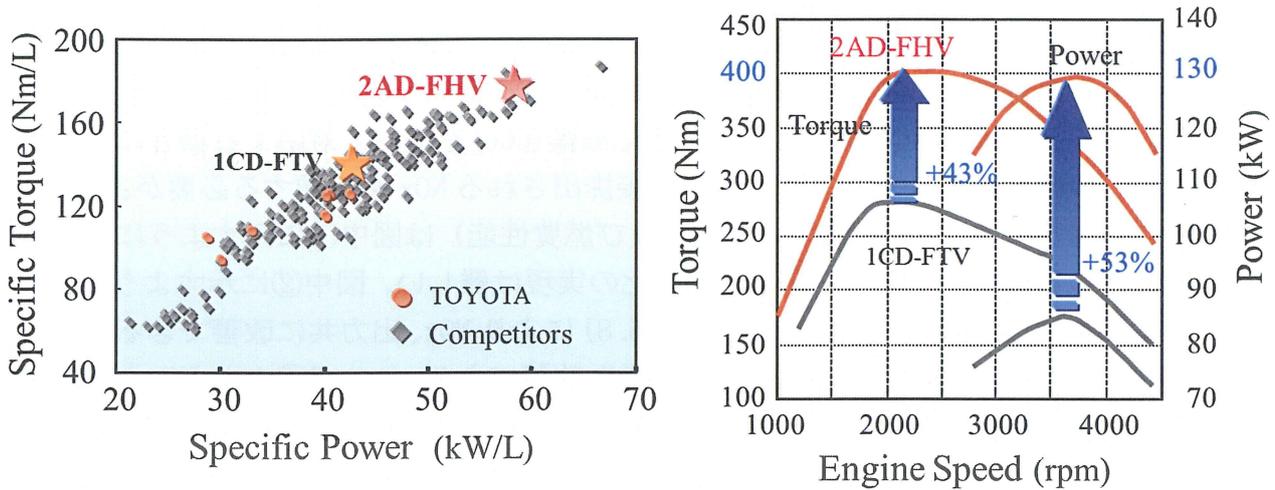


Fig.6.6 Power and Torque Performance

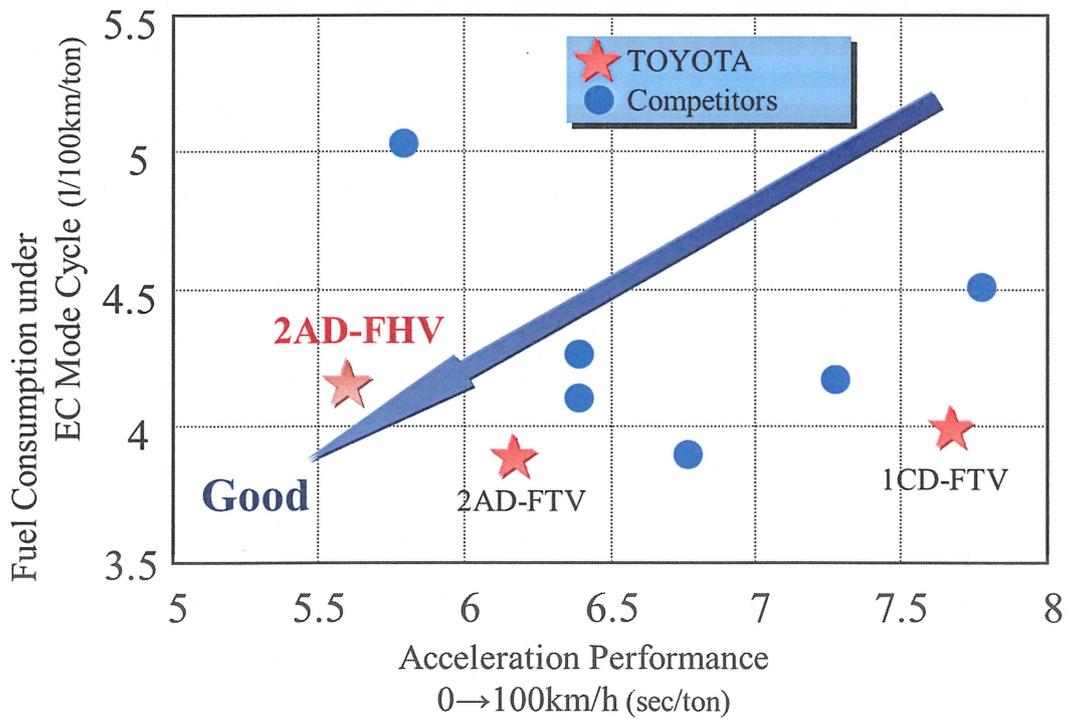


Fig.6.7 Acceleration Performance and Fuel Consumption

に比べてはるかに優れており、広い範囲での最大トルク化を実現した。図 6.7 は車両の加速性能と燃費性能の関係を示すが、両者がトレードオフの関係にある中で、1CD エンジン及び他メーカーの車両の性能と比較し最高のレベルを達成していることがわかる。

図 6.8 は新エンジンを搭載したアベンシスの 100000km 走行後の排ガスデータである。2AD エンジンでは Euro4 を大幅に下回る NOx 及び PM の低減を実現した。

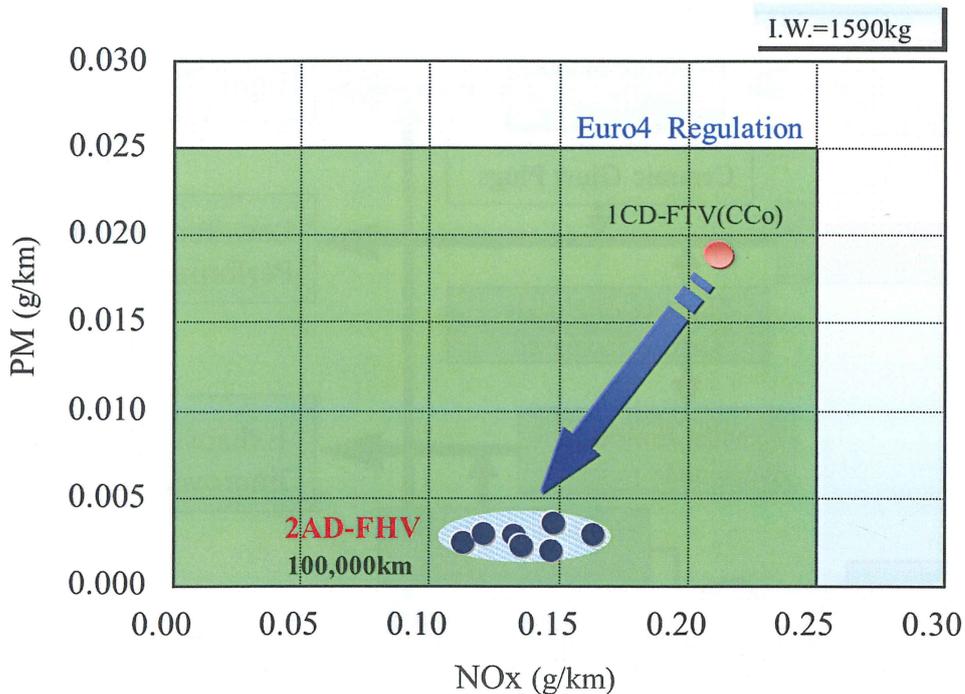


Fig.6.8 Emission Results in EC Mode

### 6.5 エンジンの燃焼改良

図 6.9 はエンジンのベース改良においてピエゾインジェクタと低圧縮比化、高圧噴射化（180MPa）の3つの技術が、高出力化、低燃費化及びクリーン化というエンジンの基本性能を向上させるための鍵となることを示している。

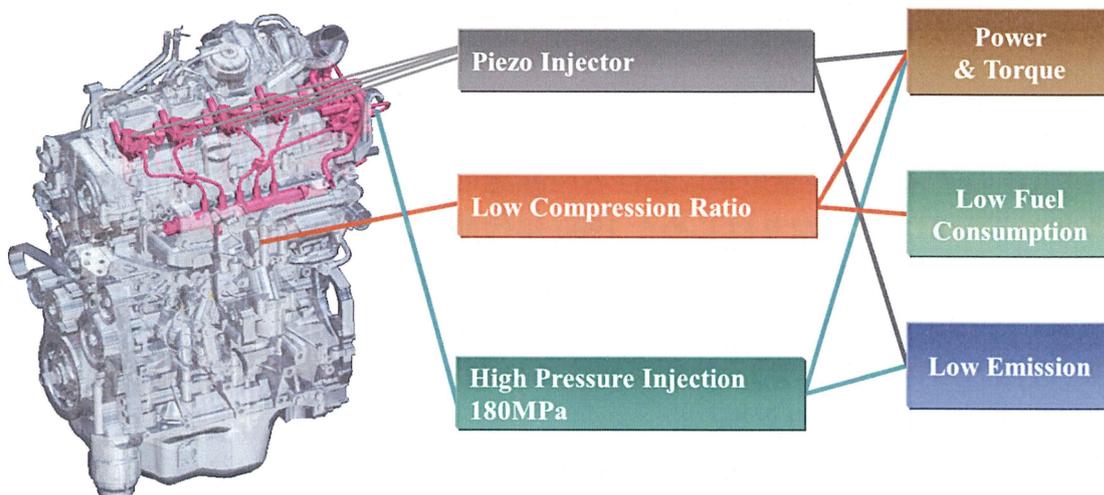


Fig.6.9 Key Technology to Improve the Base Engine Performance

図 6.10 に低圧縮比化と高圧ピエゾインジェクタ技術の融合により、高出力化とクリーン化を達成したプロセスを示す。低圧縮比化と高過給化、高噴射圧化及びピエゾインジェクタによる高噴射率化により高出力が達成できる。低圧縮比化による低温性能の悪化はノズル噴孔の増加とセラミックグロープラグの採用により改善できる。一方、ノズル噴孔数増加に伴

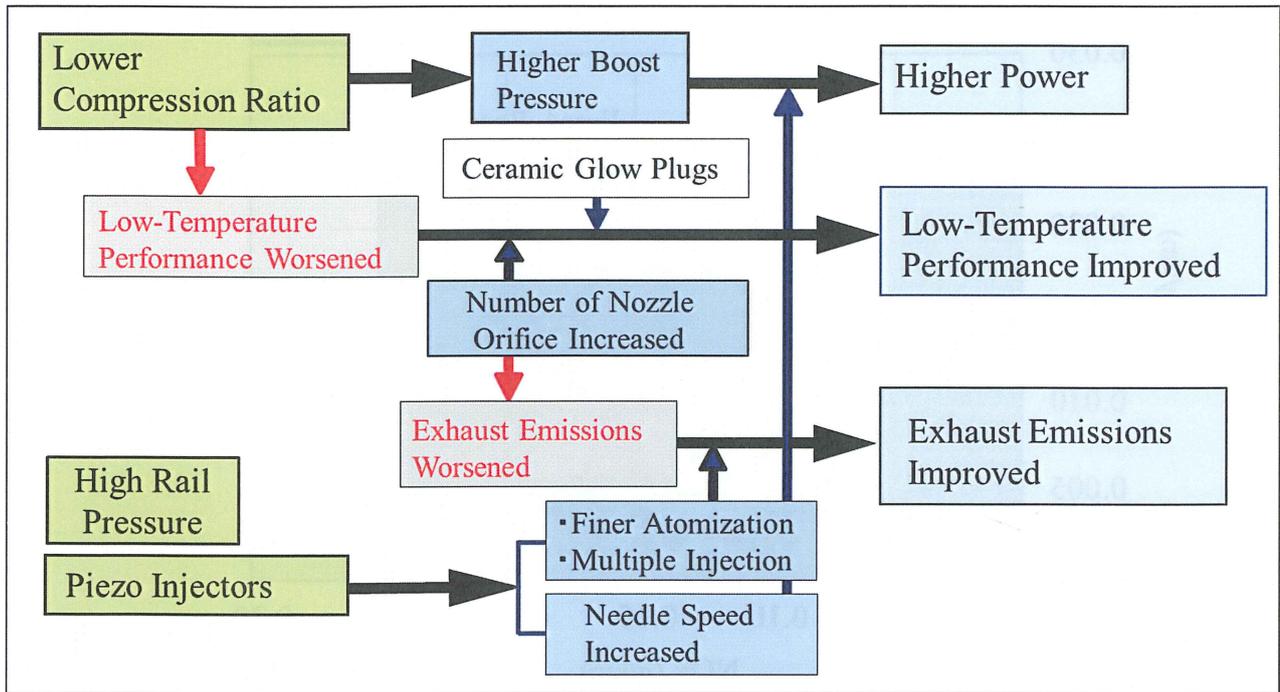


Fig.6.10 Effects of Piezo Injector System and Lower Compression Ratio

う排気HCの悪化はピエゾインジェクタによる噴霧改良と多段噴射で対策が可能となる。このように、これらの技術を組み合わせることで、高出力とクリーン化を高いレベルで達成することが可能となり、圧縮比をさげることで高出力化を狙うコンセプトにおいて、多段噴射の制御性が高く、良好な噴霧の微粒化性能を持つピエゾインジェクタとの組み合わせが極めて重要となる。

### 6.5.1 低圧縮比化に向けた研究開発

図6.11は近年のディーゼル乗用車における圧縮比のトレンドを示したものである。直噴ディーゼルエンジンが主流になりはじめた1990年代前半以降、圧縮比は低下傾向となり、90年代後半のCRシステムの登場によりさらに圧縮比が低下してきたことは明白であり、2ADエンジンにおいては16を下回る15.8を実現している。

これ以降、今回の新エンジンで15.8を実現するに至った研究過程について図6.10で説明したプロセスに沿って説明を加える。

図6.12に比出力とシリンダの最高圧力の相関を示す。(多くのエンジンデータを含むためゾーンで示す。)ディーゼルエンジンはガソリンエンジンと異なり、燃焼はノッキングによって制限されないため、高過給によって高出力化が可能である。しかしながら、この場合最高燃焼圧力も増加し構造の強化が必要となる。その結果エンジンの重量は増加し燃料消費の悪化をもたらす要素が増加する。これに対し低圧縮比化が可能となれば、図に示すように比出力とシリンダ最高圧力の相関は高出力側にシフトするため、最高燃焼圧は同等で重量を増加させずに高過給のままで高比出力を得ることができる<sup>(35)</sup>。

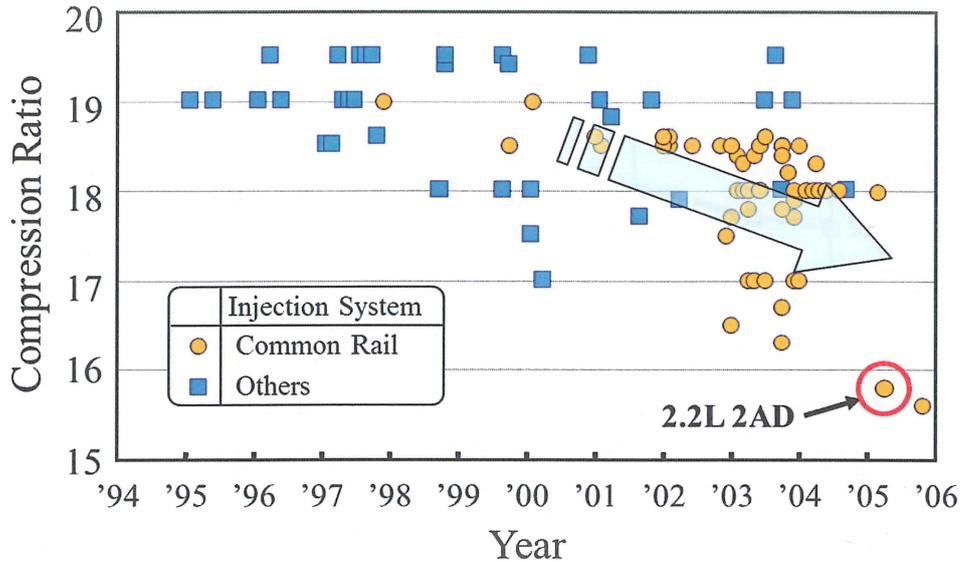


Fig.6.11 Trend of the Diesel Compression Ratio Decreasing

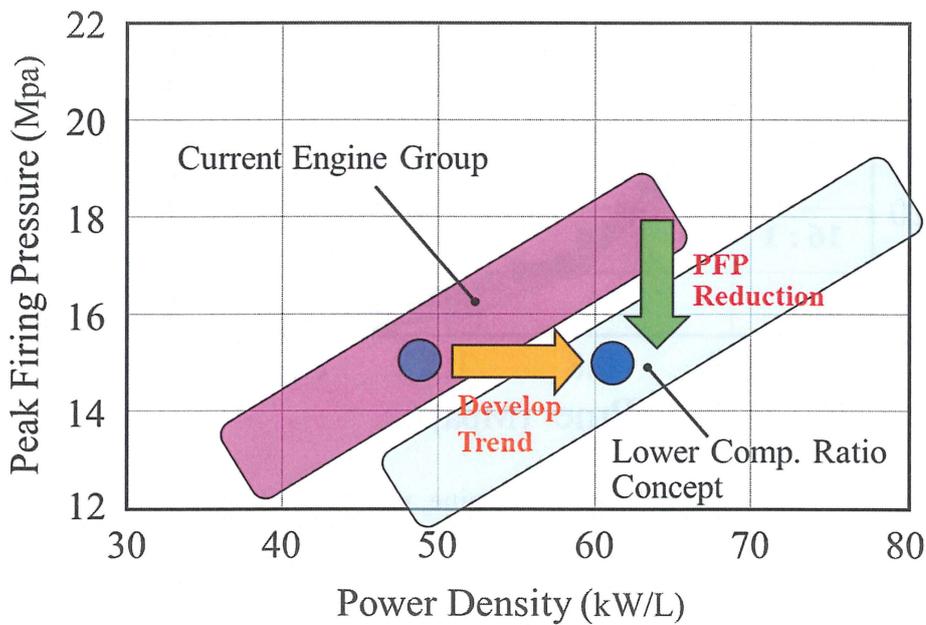


Fig.6.12 Peak Firing Pressure to Achieve a Target Power Density

### 6.5.1.1 フリクション・燃費への効果

図6.13は排気量2Lのディーゼルエンジンを使った、代表的な摩擦損失の試験結果を示す。試験はモータリングで実施し、摩擦損失は平均有効圧で表した。低圧縮比化により摩擦損失を低減できることは明白であり、燃費改善が期待できる。

図6.14に低圧縮比化による燃料消費の改善効果を示す。横軸は正味平均有効圧である。軽負荷域で低圧縮比化が燃費改善につながることを立証しており、これは先の図の低フリクションの効果である。高負荷に於いても低圧縮比化により燃費は改善しているが、これはシリンダ最高圧力に余裕があり噴射時期を遅角しなくてもよいことによる。

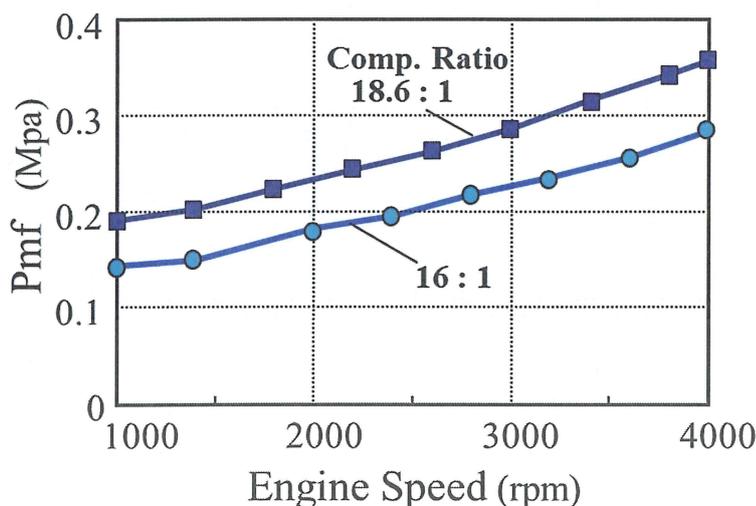


Fig.6.13 Motoring Friction (2L Engine )

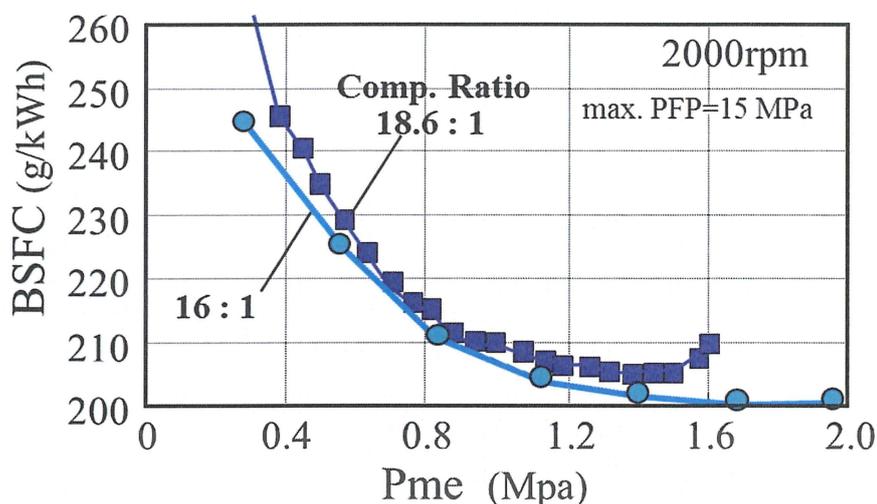


Fig.6.14 Fuel Consumption 2L Engine, max. PFP=15 MPa)

### 6.5.1.2 $\phi$ -T ダイアグラムからの考察

図 6.15 は排気量 2L のエンジンで、圧縮比 18.6 および 16 において A/F をリッチにした時の NO<sub>x</sub>、黒煙 (煤) への影響を示す。圧縮比 18.6 の場合 EGR の増加により A/F をリッチ側に変化させた時に NO<sub>x</sub> は低減し、黒煙は一旦増加するがその後低減しストイキ付近でゼロになることがわかる。これが 3 章で述べた低温燃焼のメカニズムである。一方、圧縮比 16.1 においては A/F をリッチ側に変化させても黒煙は低いレベルを維持している。

図 6.16 は圧縮比が異なる場合の燃焼の違いを理解する目的で、燃焼室内の代表的な温度 T と当量比  $\phi$  (理論 A/F / 実 A/F) の関係を  $\phi$ -T ダイアグラムを使って示したもので、AVL-FIRE を使ったシミュレーション結果である。ここでは 2000rpm, Pme0.86MPa の運転条件のもとで 15° ATDC の状態を示す。NO<sub>x</sub> 及び煤生成領域は色が濃い程濃度が高いが、圧縮比を 17 から 15 に下げることによって運転領域は低温側にシフトし、NO<sub>x</sub>、煤の高濃度領域から離れることがわ

かる。A/F をリッチ側に変化させた場合、 $\phi$ -T ダイアグラム上では運転領域が右下から矢印で示す方向にシフトする変化に相当する。圧縮比 17 において、煤は  $\phi$ -T ダイアグラム上でみると一旦高濃度領域に近づきその後離れるため、図 6.15 に示すように黒煙は一旦増加するもののストイキ近くではゼロになるものと考えられる。図 6.16 の圧縮比 15 では 17 の場合よりも運転領域が低温側にシフトしているため、煤の高濃度領域からは離れており、図 6.15 に示すように A/F をリッチ側に変化させても黒煙 (煤) は低いレベルを維持している。

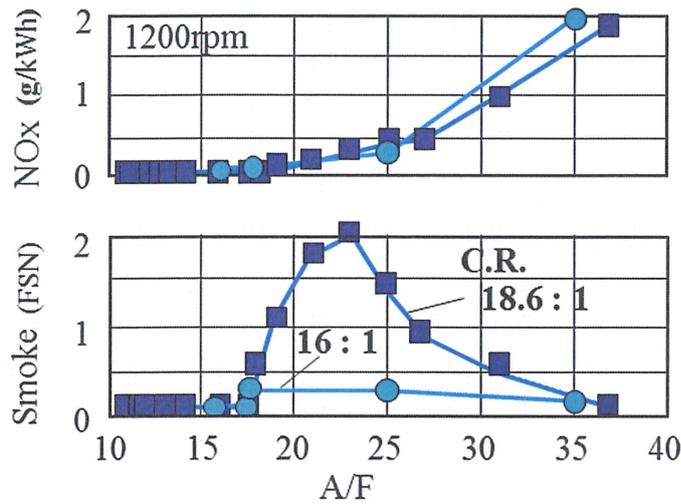


Fig.6.15 Low Smoke Rich Combustion  
(Engine Displacement: 2L, 1200 rpm)

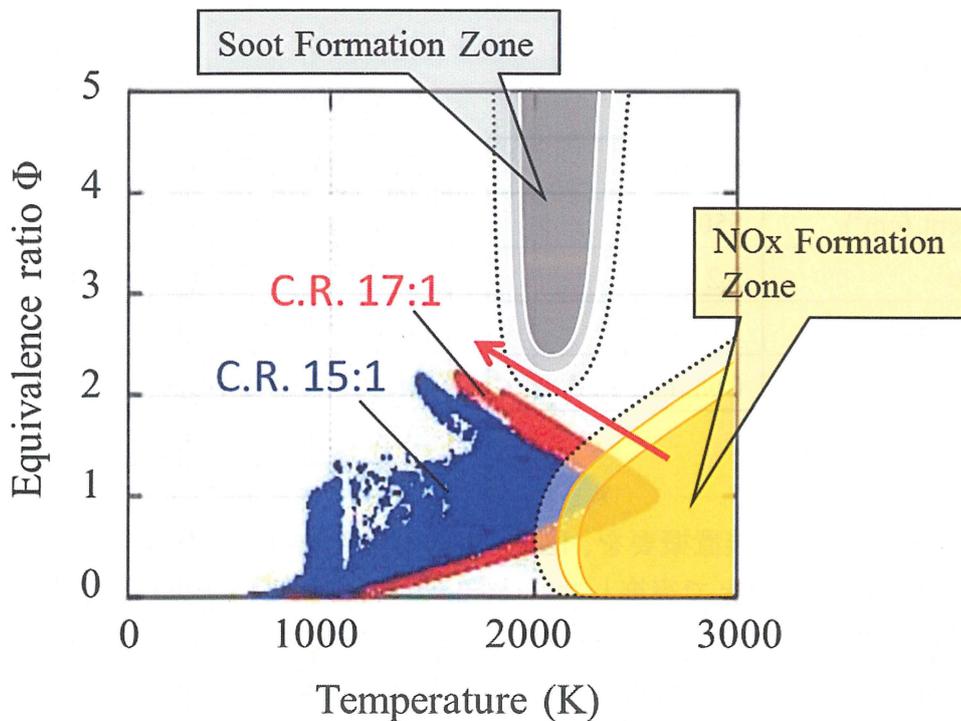


Fig.6.16  $\Phi$ -T Diagram given by CFD Simulation  
(Engine: 2.2 L, 2000rpm, Pme=0.86MPa, 15ATDC, IT=TDC)

### 6.5.1.3 燃焼可視化による燃焼室形状の検討

低圧縮比化により圧縮後のガスの密度と温度は低下するため、圧縮上死点付近で噴射された噴霧の貫徹力と蒸発特性は異なり、燃焼室内の混合気形成と着火条件に違いが出てくる。そこで単気筒の燃焼可視化エンジンを実験に使い、燃焼室内の噴霧と燃焼挙動を観察した。図 6.17 に燃焼可視化実験に使った浅皿方式の燃焼室の形状を示す。

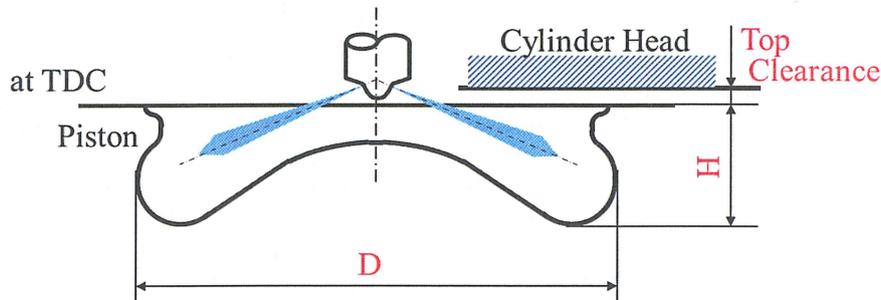


Fig.6.17 Basic Combustion Chamber Design

圧縮比を変える実験の際は通常は燃焼室のキャビティー形状も変更するが、この場合圧縮行程後のキャビティー内のスワール速度が変わってしまい、噴霧貫徹力に影響が現れる。したがって、圧縮比を 15 と 17 で実験する際には、目標の圧縮比を得るために、キャビティーの形状すなわち、キャビティーの径  $D$  と深さ  $H$  はそのまま、ピストン上面とヘッド下面の間 (Top Clearance) をヘッドガスケット厚さで調整することとした。厳密に言えばピストントップクリアランスが変わることで、ピストントップでのスキッシュ速度も変わりキャビティー内の流れに影響する可能性もある。しかしながら、圧縮比 15 と 17 の頂面隙間の差は 0.8mm でありこの差は無視できると判断した。表 6.2 に単気筒エンジンの主な諸元、表 6.3 に実験条件を示す。

Table.6.2 Engine Specifications

Bore – Stroke (mm)	86 - 96
Displacement (cm <sup>3</sup> )	550
Swirl Ratio	2.2
Compression Ratio	15 , 17 : 1
Injection System	Common Rail

Table.6.3 Experimental Conditions

Engine Speed (rpm)	1250
Inj. Pressure (Mpa)	50
Inj. Timing (deg. ATDC)	-8 (C.R15), -5(17)
Inj. Quantity (mm <sup>3</sup> /st)	11.6
Intake Air Temp (degC )	80
EGR	0

図 6.18 に燃焼可視化の装置概要を、図 6.19 に可視化結果の一例を示す。実験は圧縮比を変更し、同一着火時期のもとで実施した。図 6.20 は圧縮比 15 と 17 におけるシリンダ内圧力と熱発生率 (ROHR) を示したものであり、図中および表 6.3 に示すように圧縮比 15 では着火が遅いため、圧縮比 17 の場合の -5° ATDC の噴射時期に対し、圧縮比 15 では噴射時期の設定を -8° ATDC とし 3° C.A ほど進角した。

図 6.19 において、それぞれの噴射直後の噴霧形状を比較すると、低圧縮比における噴霧の

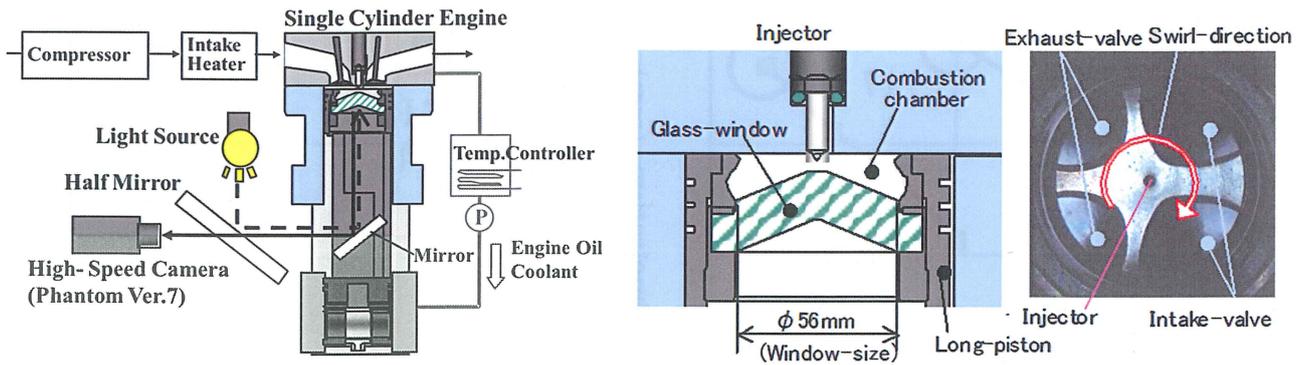


Fig.6.18 Single Cylinder Engine for Combustion Visualization

Comp. Ratio	Crank Angle (deg. ATDC)					
	-6	-4	-2	0	5	7
15 : 1						
17 : 1						

Fig.6.19 Combustion Photographs

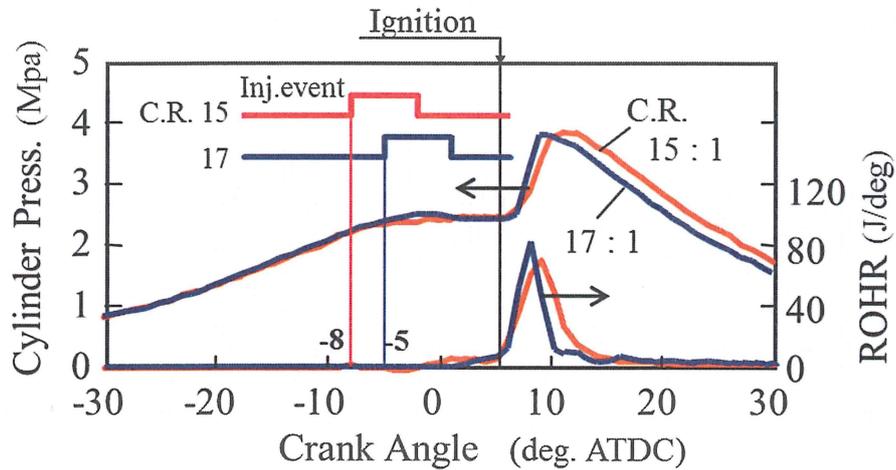


Fig.6.20 Cylinder Pressure Diagram

貫徹力は圧縮比が高い場合に比べ少し高く噴霧角度は小さい。これは低圧縮比であることと早期の噴射によりその時のガス密度が低く抵抗が少ないことによる。図 6.21 ではクランク角度毎の貫徹力を図 6.19 から読み取り整理したものを左図に、クランク角度の代わりにシリンダ内のガス密度で貫徹力を整理したものを右図に示す。

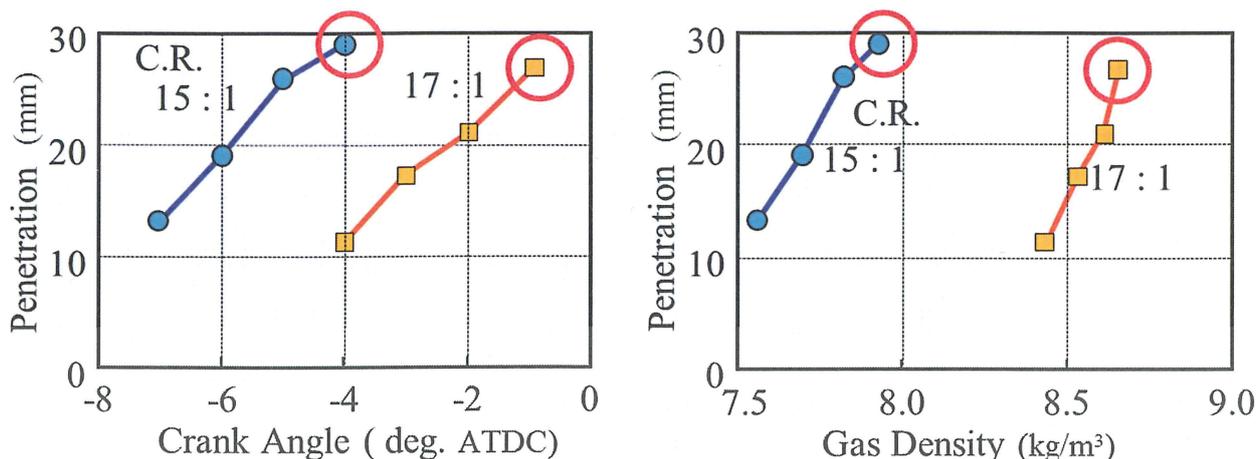


Fig.6.21 Spray Penetration

貫徹力が圧縮比 17 の 27mm に対し、圧縮比 15 では 29mm となっているのがわかる。

着火位置に関しては図 6.19 に示すように圧縮比の違いに起因する明確な違いのないことが分かる。クランク角度  $5^{\circ}$  ATDC、 $7^{\circ}$  ATDC での結果は光源のない状態での撮影結果であるが、両圧縮比において、着火は燃焼室の外側のエッジ付近で起こっていると思われる。しかしながら、低圧縮比の場合、高圧縮比で観察される輝炎はほとんど観察されないことから、熱発生率が低いことにより煤の発生が抑制されていると考えられる。

図 6.22 は図 6.19 の可視化実験と同じ条件でのシミュレーション結果である。計算には AVL-FIRE を使った。図に示すように  $5^{\circ}$  ATDC において圧縮比 15 の噴霧はピストンのリップ付近まで達し、着火位置を示す高温領域 (1100K の等温線) は燃焼室の外側のエッジ付近に存在しており、可視化結果と一致する。加えて低圧縮比に於いては高温領域がわずかではあるがより外側のエッジ近くにあり、これは高貫徹力の結果と考えられる。

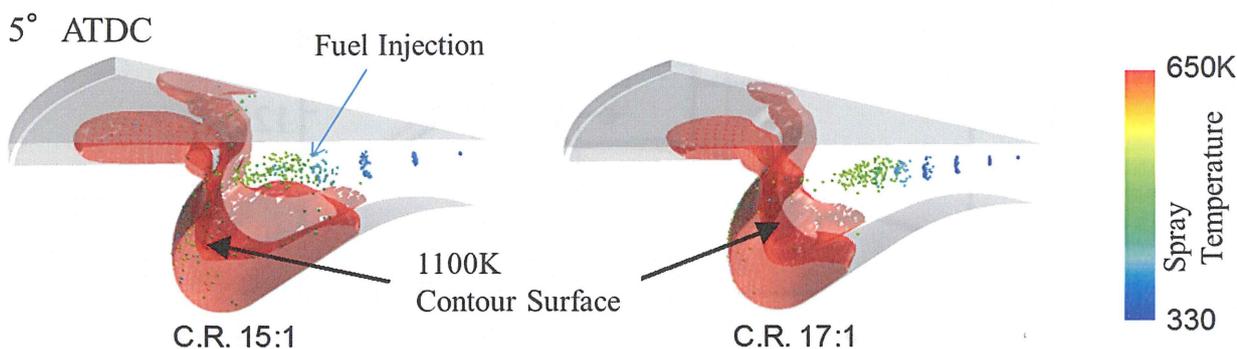


Fig.6.22 CFD Results Corresponding to the Experiment

このように低圧縮比化により噴霧の貫徹力は増えるため、燃焼室壁周りでの積極的な空気の活用と燃焼室壁に付着した燃料により起こる HC の増加の抑制を考慮すると、キャビティ一径の大きい浅皿タイプの燃焼室は低圧縮比に向いており、さらにはコモンレールシステムによる高圧噴射が良好な混合気を形成するうえで重要であると考えられる。

### 6.5.2 インジェクタ改良による燃焼研究

図 6.23 に示すピエゾインジェクタは、高応答で作動するピエゾスタックを内部に備え、ソレノイドインジェクタに比べニードル制御速度を大きく改善することができる。ピエゾインジェクタのノズル諸元は高出力化を狙うため、噴孔流量を 2L エンジンの 800cc/min に対し、1000cc/min と増やし、この流量を確保するため、噴孔については 2L エンジンの孔径 0.119 × 6 孔に対し、孔径 0.129 × 10 孔とした。10 孔化は低圧縮比化に伴う低温始動性改善も狙っている。このあと比較するソレノイドインジェクタのノズル諸元は、流量は同じ 1000cc/min で噴口は孔径 0.131 × 10 孔である。

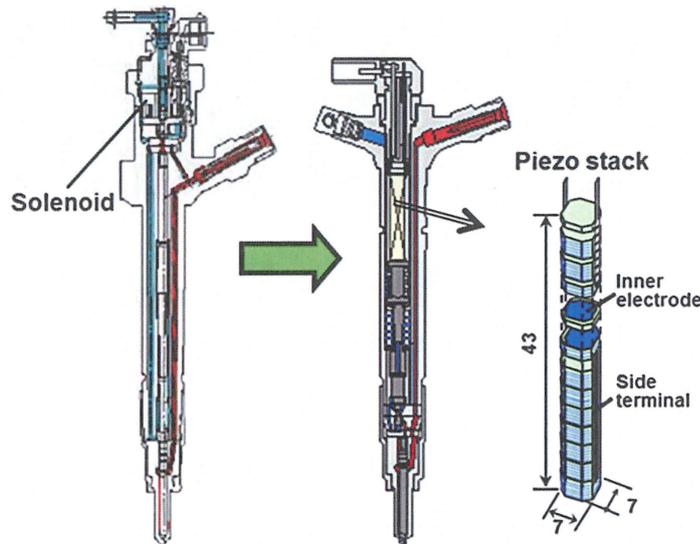


Fig.6.23 Piezo Injector

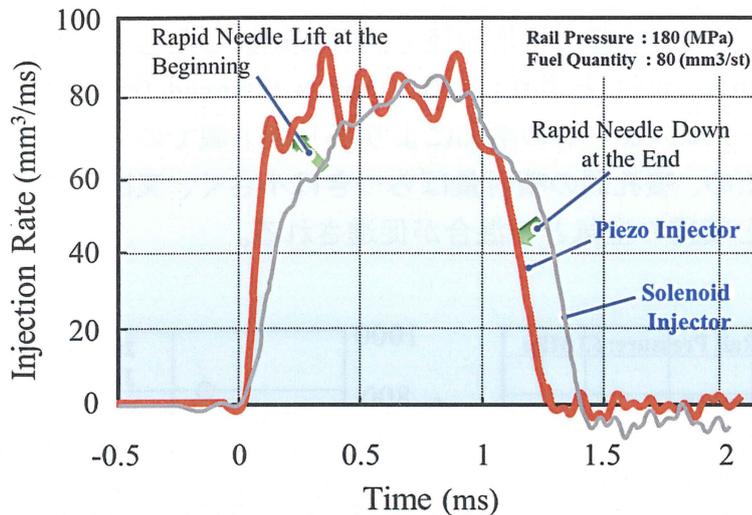


Fig.6.24 Comparison of Injection Rate

図 6.24 は最高出力点の条件で噴射率を比較したものであり、ピエゾインジェクタでは噴射率が高く、噴射期間は縮小できる。また初期の噴射率も高いため、噴霧の初期段階で十分な貫徹力が得られることにより良好な微粒化が可能となる。燃料の微粒化は圧縮比の設定値にかかわらず、ディーゼルエンジンにおいては重要な要素である。

Rail Pressure : 63MPa Fuel Quantity : 2.0mm<sup>3</sup>/st

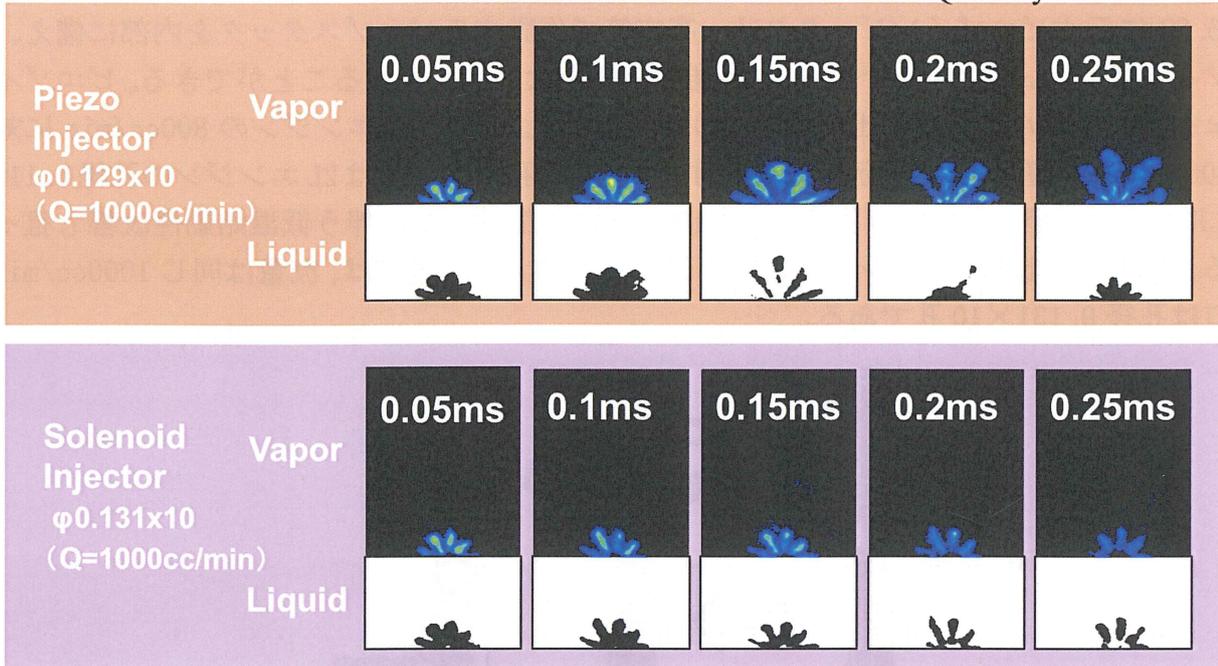


Fig.6.25 Observation Results of Air Fuel Mixture

図 6.25 はパイロット噴射における噴霧微粒化への影響をソレノイドインジェクタとピエゾインジェクタで比較したもので、画像解析装置 (LIEF) により噴霧の液状及び気化状態を観察している。図中の下段は噴霧の液状部分を、上段は噴霧の気化部分を示す。図より従来のソレノイドインジェクタに比べ、ピエゾインジェクタでは貫徹力が高く、優れた微粒化特性を持つため、蒸気化が進み広い範囲で拡散が起こっていることがわかる。

図 6.26 はパイロット噴射時の噴霧の平均粒径を両者で比較したものである。ノズルについてはデッドボリュームが少ないことより、VCO (Valve Covered Office) タイプを採用しているが、ピエゾではニードルスピードの増加により小リフト域でのシートチョークの影響が大幅に減少する。そのため、噴孔間の噴射量ばらつきは小さく、又図に示すように噴霧の微粒化も改善され蒸気化と噴霧の空気との混合が促進される。

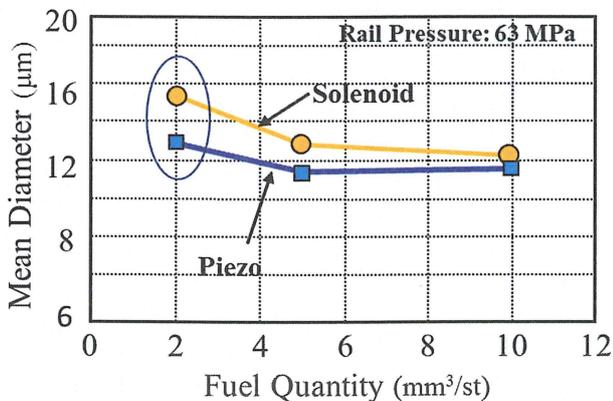


Fig.6.26 Fuel Droplet Size by Piezo Injector

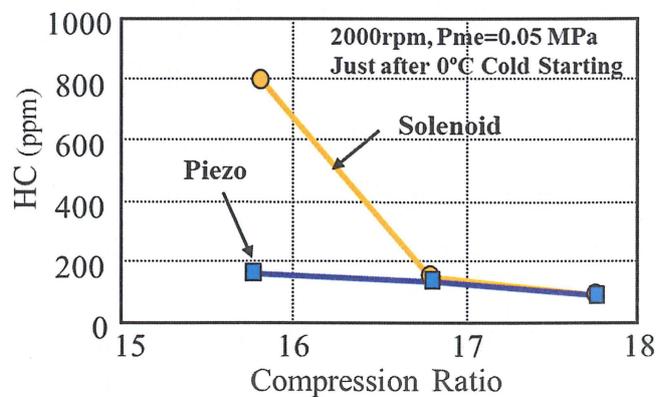


Fig.6.27 Advantage of Piezo in HC

図 6.27 は圧縮比を変更した際に、外気温 0°C における始動直後のアイドル HC を両者で比較したものである。ピエゾインジェクタを使うことで圧縮比 16 以下でも HC の顕著な悪化を避けることができる。これらは暖気後の運転下における HC 低減にも有効であり、低温燃焼の改良におけるピエゾインジェクタの効果についても同様なことが言える。

### 6.5.2.1 噴孔諸元変更による噴霧影響解析

ノズルの噴孔諸元は燃焼室内のガス流動を考慮して決定する必要がある、低圧縮比の燃焼において低温時あるいは低負荷時の HC の低減は重要な課題である。低圧縮比化においては貫徹力が上がるため、キャビティー内の空気利用率を改善できることと併せ、燃焼室壁に付着した燃料により起こる HC の増加を抑制する観点から、浅皿が好ましいことを示した。このあと低圧縮比での燃焼室形状は浅皿を前提とし、ソレノイドインジェクタを使って噴射ノズル諸元の噴霧への影響について調査した結果を示す。

図 6.28 は冷却水温、油温、外気温すべて 0°C という条件のもとで始動直後のアイドル運転時の HC の値を調査した結果である。レール圧力及び噴射時期が始動に最適な状態にある事を考慮し、エンジンは既に量産化されている乗用車用の CR 式直噴 2L を選択した。ここではパイロット噴射は行なわず、低圧縮比の効果を明確に評価するために、圧縮比は 2AD エンジン (15.8) よりもさらに低い 13.8 とした。ノズルの噴孔流量は同一になるようにそれぞれの孔径を変更し、噴孔数を 6 から 18 孔までふって影響を評価できるようにした。図から噴孔径を縮小し、孔数を増やすことで HC 濃度は明らかに低下することがわかる。代表的な例として図中に 9 孔と 18 孔のノズルの観察結果を示すが、小噴孔で噴孔数の多いノズルは貫徹力が弱まることが確認でき、この事実が小径のマルチホールノズルで HC が少ない理由であると想定される。

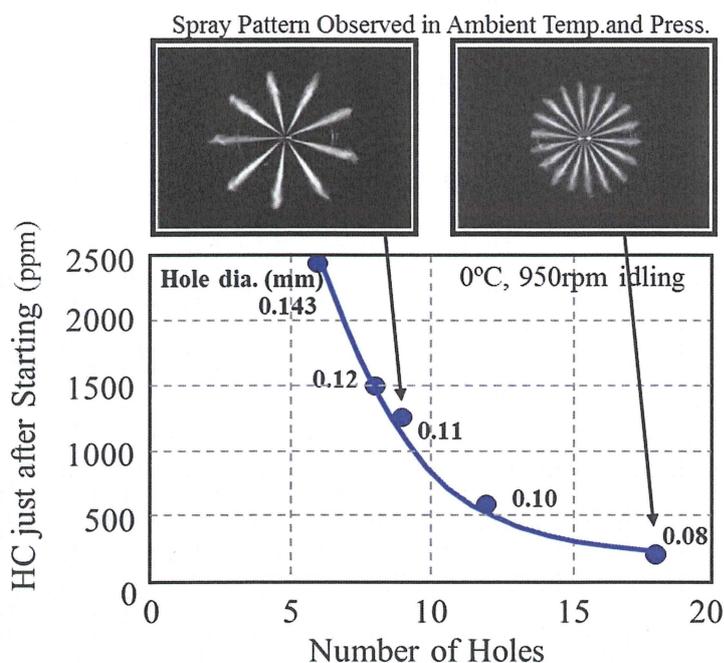


Fig.6.28 HC Reduction with a Large Number of Holes at Idling just after Cold Starting (2L Engine: 4 cylinder, C.R.13.8:1)

### 6.5.2.2 パイロット噴射に着目した噴霧解析

小噴孔で噴孔数の多いノズルは貫徹力が弱まることがわかったが、ここではコモンレール噴射における利点であるパイロット噴射に特に着目し、更なる調査解析を進めた。

図 6.29 は圧力容器に噴射された噴霧写真である。噴霧の観察は Stroboscopic Radiation (exposure time: 2  $\mu$ s) によって行なった。表 6.4 はこの実験で使った 2 種類のノズル諸元であり、スペック 1, 2 共に VCO タイプを使い、噴孔数は同一とし、孔径のみ変更した。図より、注目すべきはパイロット噴射のように噴射量が少ない時の噴霧の挙動であり、小径ノズルで小量噴射の場合は貫徹力が高くなり、2mm<sup>3</sup>/st 程度の小量において特に顕著となる。

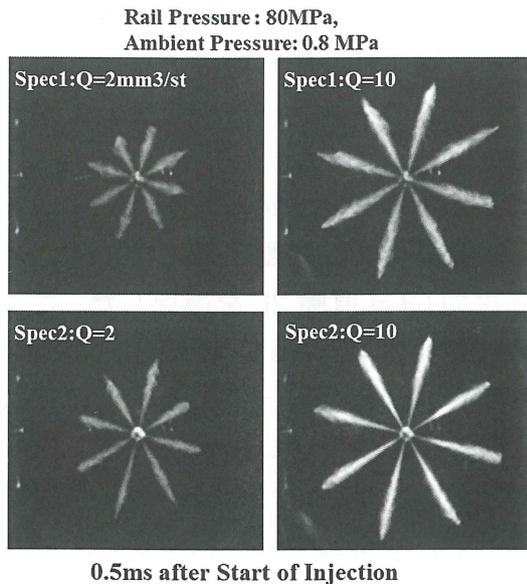


Table.6.4 Nozzle Specifications

	Spec 1	Spec 2
Nozzle Type	VCO	VCO
Hole Dia. (mm)	0.164	0.1
Hole Number	8	8
L/D of Holes	6.3	10.4
Needle Seat Dia.(mm)	2.25	2.25
Spray Cone Angle (deg)	155	155

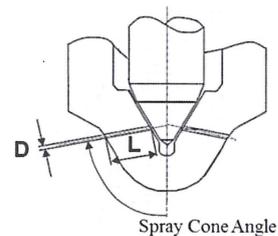


Fig.6.29 Spray Pattern with a Small Shot Volume  
(Rail Pressure : 80MPa, Ambient pressure: 0.8 MPa)

図 6.30 は写真から読み取った両ノズルの噴霧貫徹力(噴霧到達距離)と噴霧角度を示す。これらの結果より、スペック 1 に比べ、スペック 2 は特に噴射量 2mm<sup>3</sup>/st において貫徹力が高く噴霧長は長いことがわかる。これは噴霧角度の縮小と噴孔からの噴射速度が高いことに起因し、噴霧角の縮小はスペック 2 において L/D が大きいことにも関係する。

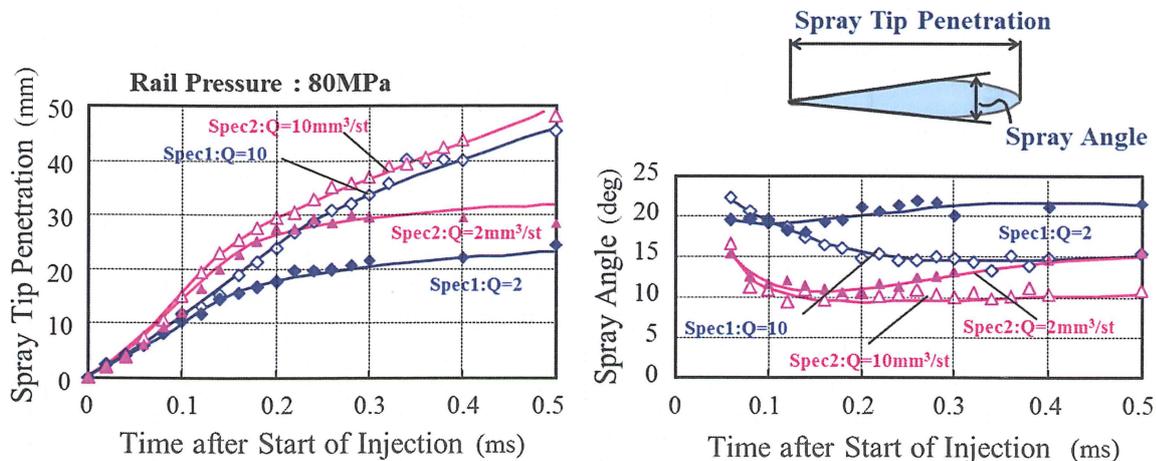


Fig.6.30 Spray Penetration and Angle (Rail pressure : 80MPa)

図 6.31 にノズル先端の流路部を示すが、噴射量が少なくニードルリフトが小さい場合、スペック 1 では噴孔の上流側の流路部分が総噴孔面積より小さいため、ここで流速は決定される。一方、噴孔径の小さい SPEC2 では噴口部が最小流路面積となるため、これが噴射速度が高くなり貫徹力もあがる理由と考える。

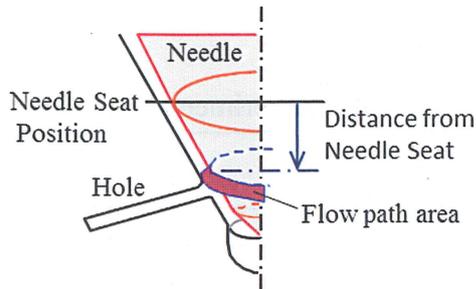


Fig.6.31 Nozzle Flow Area

Table.6.5 Experimental Conditions

Compression Ratio	15.8 : 1
Engine Speed	1600rpm
Injection Pressure	80MPa
Pilot/Main Inj. Timing	-6° /1° ATDC
Pilot/Main Inj. Quantity	11.6mm <sup>3</sup> /st
Intake Air Temperature	42°C
EGR	0%

### 6.5.2.3 パイロット噴霧に着目した燃焼解析

図 6.32 は低負荷条件におけるスペック 1 と 2 のノズルの燃焼挙動をピストン下部から可視化したものであり、試験条件を表 6.5 に示す。装置及び可視化エンジンは図 6.18 と同じである。高圧容器の噴霧解析でもわかったように小径ノズルは、パイロット噴射あるいは主噴射の早い段階において、高貫徹力であることが明白である。図より、小径ノズルでは主噴射からの輝炎の発生時期は遅れ、火炎は燃焼室の外側のエッジ部から出てくる。この理由として、小径ノズルによりパイロット噴霧が広範囲に広がるため、局所的な高温領域は外側のエッジ部に点在し、パイロット火炎による主噴射への着火が遅れるものと考えられる。

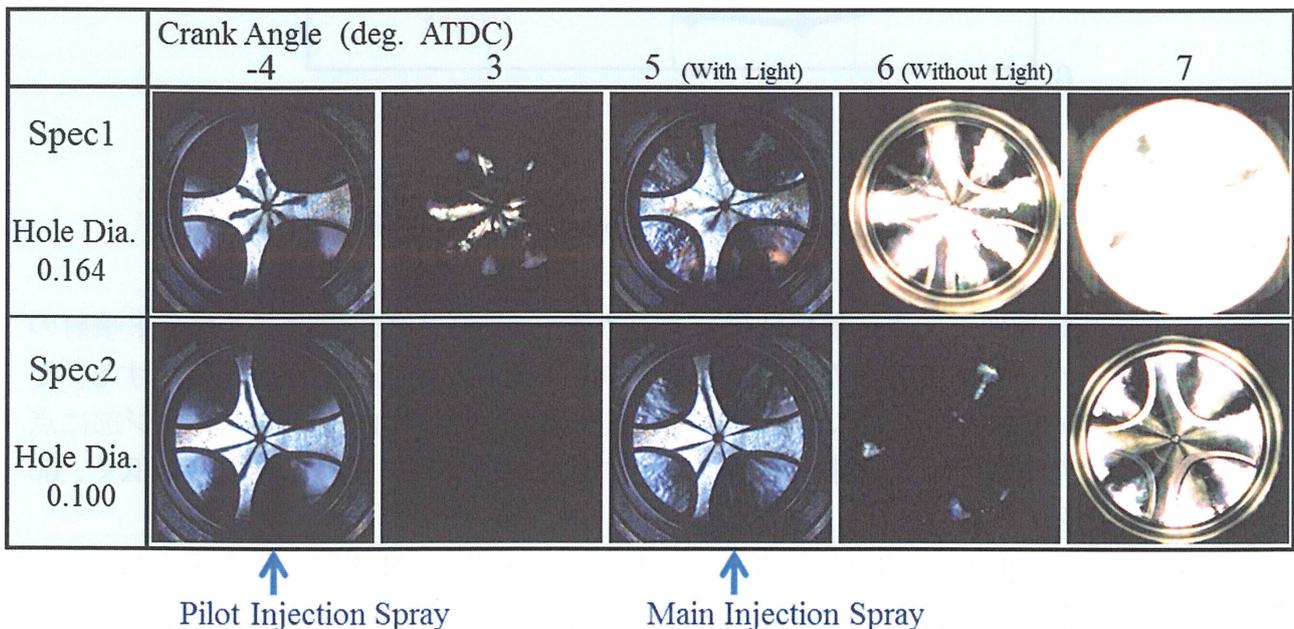


Fig.6.32 Combustion with a Small-Hole Nozzle

図 6.33 は図 6.32 の写真が撮られた時のシリンダ圧のダイアグラムと熱発生率を示すが、両ノズルにおいて顕著な差はみとめられない。熱発生率は同等であるが、燃焼室内での着火

位置と局所的な燃焼室温度分布には違いが観察されているので、これは非常に興味深い。

図 6.34 は 2L の 4 シリンダエンジンを使って、両ノズルで得られた HC の挙動であり、試験条件を表 6.6 に示す。図よりパイロット噴射を行う場合、小径ノズルにおける HC レベルは悪化するが、多段噴射(2パイロット)を行うことで改善できることがわかる。

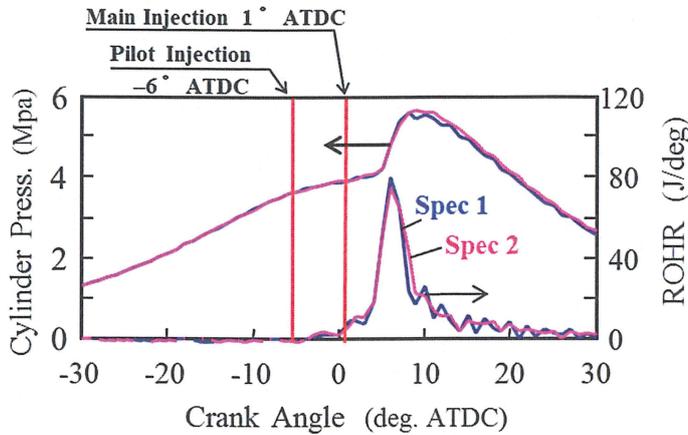


Fig.6.33 Cylinder Pressure Diagram and ROHR

Table .6.6 Experimental Conditions

Compression Ratio	15 : 1
Engine Speed	1600rpm
Pme	0.25MPa
Injection Pressure	75MPa
Pilo Inj. Timing	-31 ~ -5° ATDC
Pilot Inj. Quantity (Single)	1.5mm <sup>3</sup> /st
Pilot Inj. Quantity (Multiple)	2, 1 mm <sup>3</sup> /st
NOx	0.5g/kWh

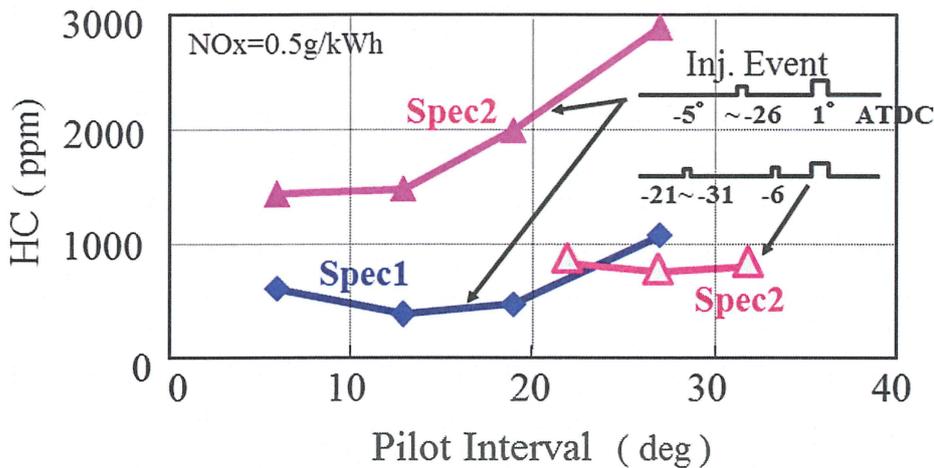


Fig.6.34 Influence of Small Hole Nozzle on HC Emission

ここまでの噴孔諸元変更による解析結果をまとめると、小径ノズルではパイロット噴射の貫徹力が高いためパイロット噴霧の拡散が加速され、希釈された混合気領域が拡大する。そのため、パイロット噴霧の熱発生による局所的な高温領域は燃焼室内の外側のエッジ部に点在し、主噴射はその高温領域に到達する前に拡散するため、着火が遅れ燃焼温度が低く、HCが悪化すると考えられる。

このように、コモンレールシステムにおいてパイロット噴射を積極的に使う場合は、意図とは反対に小径ノズルで低負荷域の HC が悪化する場合もあることを考慮する必要がある。高貫徹力、高噴霧拡散は黒煙と NOx を低減するために必要であるが、低負荷域での HC への対策としてはパイロット噴射の貫徹力を落とし微粒化を促進することが不可欠となる。このような観点から、噴霧微粒化に対してのポテンシャルが高く、多段噴射の制御性も高いピエゾインジェクタが非常に有効である。

### 6.5.3 セラミックグロープラグによる始動性改良

低圧縮比での低温始動においては、圧縮行程後の圧縮端温度が低いため着火性が悪い。そのため、始動時間は長く、不安定な燃焼により HC が悪化する。ピエゾインジェクタを使った混合気形成の改善および多孔化はこの問題を解決する一手段となるが、更に効果的なのは吸気温度の上昇である。グロープラグは低温始動時の吸気温上昇のために使うものであるが、従来の金属グロープラグで更なる高温化を進めるのは信頼性上難しいことから、セラミックグロープラグでの改良検討を進めてきた<sup>(36)</sup>。低圧縮比のもとで低温始動性の問題を解決するために、表面温度の高いセラミックグロープラグを使うことは効果的である。

図 6.35 は $-25^{\circ}\text{C}$ での始動試験の 1 例を示す。ここでは圧縮比 15 の 2L エンジンを用いたが、 $1400^{\circ}\text{C}$ の表面温度となるセラミックグロープラグを開発することで、従来の金属グロープラグの  $950^{\circ}\text{C}$ に対して始動性の画期的な改良が可能となる。

図 6.36 は  $0^{\circ}\text{C}$ での始動直後の HC レベルとグロー表面温度の影響を示したもので、グロー表面温度の上昇により HC レベルはほぼ直線的に減少する。このように、グロー表面温度を上げることで 15 程度の低圧縮比エンジンにおいても良好な低温始動性と低温環境下での低 HC レベルを満足することができる。

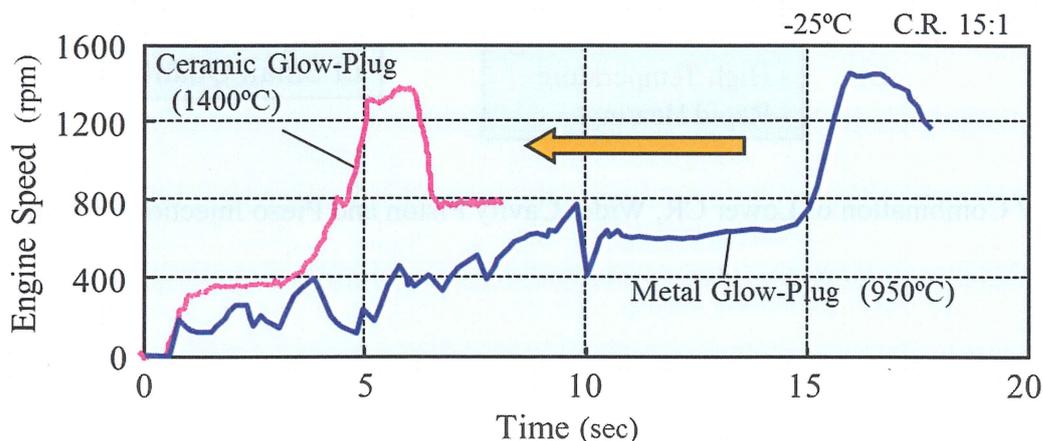


Fig.6.35 Improvement of Cold Startability with a Ceramic Glow Plug

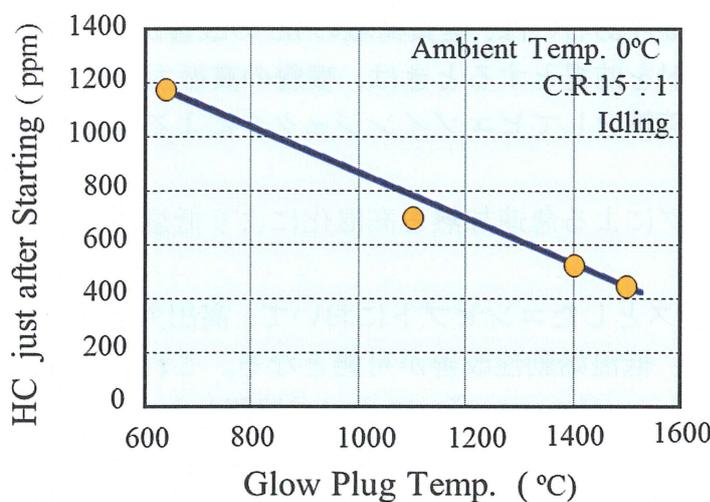


Fig.6.36 Effect of Glow Plug Surface Temperature on HC Reduction

#### 6.5.4 燃焼改良のまとめ

これまでの燃焼改良の結果をまとめると図 6.37 に示すようになる。

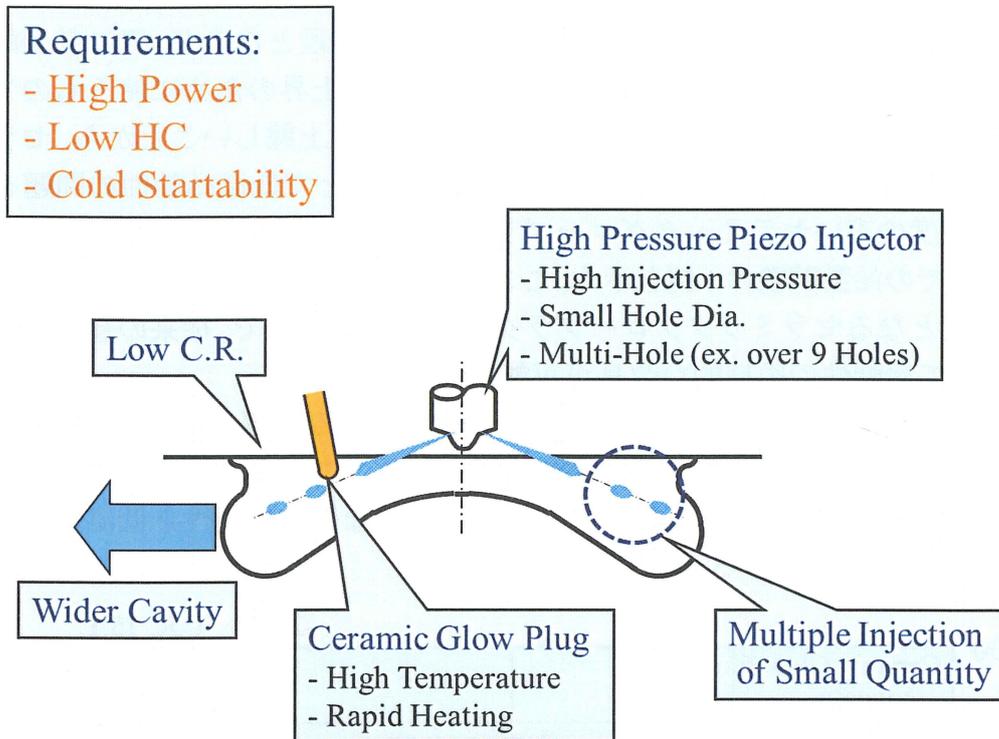


Fig.6.37 Combination of Lower CR, Wider Cavity Piston and Piezo Injection System

- ・ 低圧縮比に伴う噴霧貫徹力の増加に対し、ピストンキャビティを広げ空気利用率を上げることが必要である。
- ・ 高圧ピエゾインジェクタにより、高噴射率化（噴射期間の短縮）と低リフト域での噴霧の微粒化が可能となる。
- ・ ノズル多孔化は低温始動性あるいは、軽負荷域の HC の改善が可能であるが、小径化と組み合わせパイロット噴射を前提とするときは、噴霧の貫徹力が増すため、HC の悪化に注意する必要がある。改善策としてピエゾインジェクタによる噴霧の微粒化と多段噴射が有効である。
- ・ セラミックグロープラグによる急速加熱と高温化により低温時の噴霧改良が可能となる。

以上より、低圧縮比をベースとしたコンセプトにおいて、高出力を実現し、課題となる低温或いは軽負荷時の HC 低減、低温始動性改善が可能となる。これらのコンセプトにもとづく改良内容は新開発の 2AD ディーゼルエンジンにすべて展開した。

## 6.6 触媒システムの改良

ここでは後処理システムの開発結果について述べる。

表 6.7 は市場実験から得られた触媒システムの改良ポイントについてまとめたものであり、図 6.38 は後処理システムの主要部品を示す。表 6.7 に示すポイントをもとに改良を進め、燃費・排気の改善を検討した。

Table.6.7 Knowledge Gained through the Field Trials

Item	Improvement Point
①NO <sub>x</sub> Reduction	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducing the Amount of Sulfur Poisoning at the Front End of the NSR</li> <li>Finer Atomization of Fuel through Exhaust Port Injector</li> </ul>
②PM Regeneration	<ul style="list-style-type: none"> <li>Continuous Regeneration for Better Fuel Economy.</li> <li>Optimization of Forced Regeneration Timing</li> </ul>
③Sulfur Discharging	Expansion of Control Range to Accommodate High Performance Engines
④Actual Fuel Economy	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increasing the Engine Exhaust Gas Temperature</li> <li>Improvements ①,② and ③ Shown Above.</li> </ul>

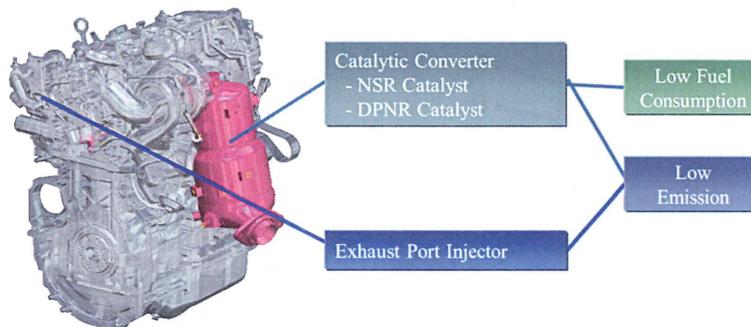


Fig.6.38 Key Technology to Improve the Catalyst System

### 6.6.1 NO<sub>x</sub> 改良効果

図 6.39 は 2AD エンジンを搭載したアベンシスの欧州 EC モード走行に於ける NO<sub>x</sub> を、市場実験車との比較で示す。走行距離の増加とともに触媒性能の初期劣化が見られるが、その後

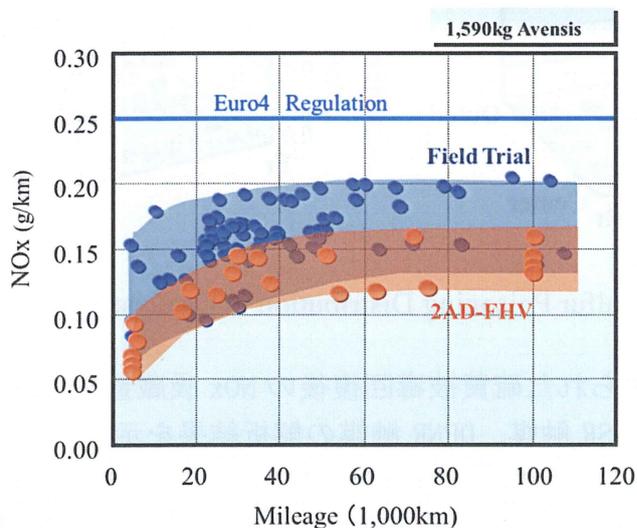


Fig.6.39 Emission Data of 2AD Engine on 1,590kg Avensis

の性能が安定した時点での NOx レベルは市場実験車に対し改善され、欧州 Euro4 排ガス基準を余裕をもって達成できるレベルにある。将来的に燃料あるいはオイル中の硫黄量が低減できれば、触媒性能が改善しさらに低い値が達成できると予想できる。

### 6.6.2 回収触媒での硫黄被毒解析

ここでは欧州での市場実験から得られた情報の解析結果について述べる。これらの結果は 2AD エンジンの触媒改良に反映している。

図 6.40 は市場実験車から回収した触媒において、NSR 触媒、DPNR 触媒それぞれの硫黄による永久被毒分布を調べたものである。図より NSR 触媒の前段部分の被毒量が多いことがわかるが、これは他の部分に比べ硫黄被毒回復制御中の触媒床温が低いことと A/F 分布が一様でないことによる。DPNR 触媒においては後部外側が比較的多いが、全体的には NSR 触媒に比べ被毒量は少なく、これは床温及び A/F 分布が NSR 触媒に比べより均一であることによる。これらは NOx 浄化性能についても同様なことが言える。

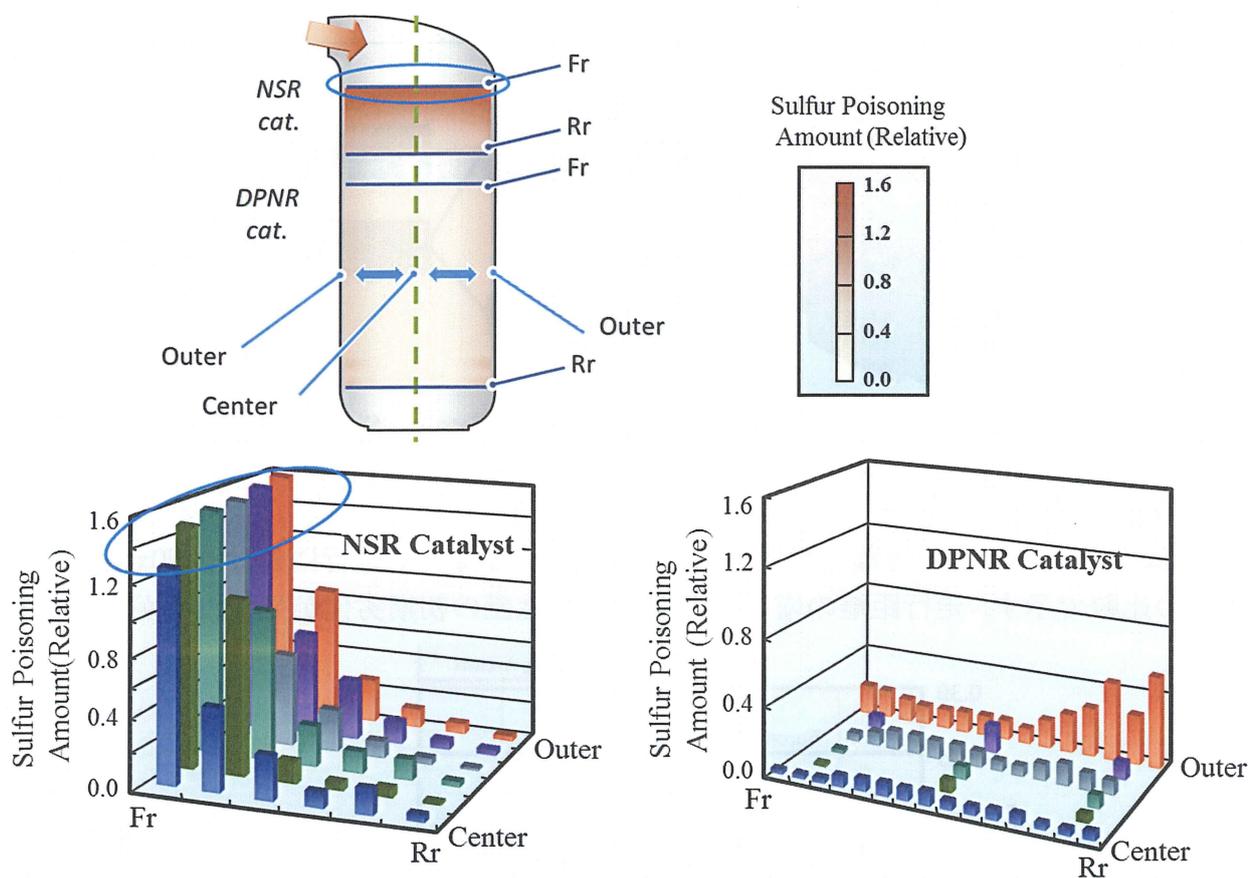


Fig.6.40 Sulfur Poisoning Distribution in Catalyst

図 6.41 は市場実験車から得られた硫黄被毒回復後の NOx 吸蔵量を、走行距離ごとに整理したもので、NSR+DPNR 触媒、NSR 触媒、DPNR 触媒の解析結果を示す。市場実験は当初 DPNR 触媒のみでスタートしたが、途中で前段 NSR 触媒、後段 DPNR 触媒に切り替えた。ここでは後者のデータを整理している。なおこの触媒構成は前章の 1CD の量産仕様でも採用した。

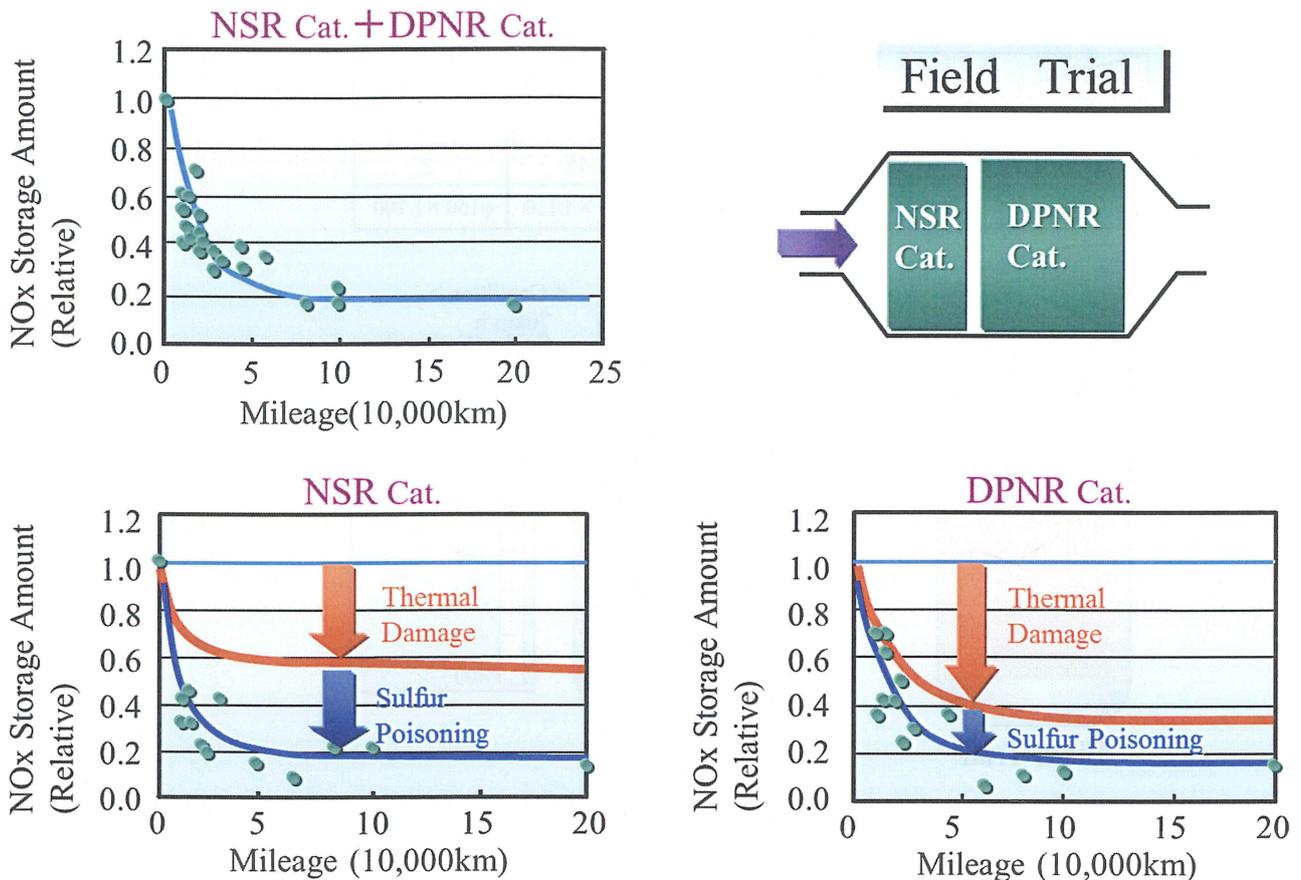


Fig.6.41 Degradation of NOx Storage Performance

図より触媒の NOx 吸蔵量は熱劣化及び硫黄による永久被毒の影響を受け総量が低下することがわかる。図では NSR+DPNR および、それぞれの触媒において劣化のない評価開始時の値をベースに比率で整理し、硫黄による永久被毒分と熱劣化の影響によるものに分離した。分離に関しては、回収触媒の熱による貴金属のシンタリング(凝集)調査および前述の硫黄による永久被毒分布の解析結果を用いて行った。30000km までは、NSR 触媒は主に硫黄被毒の影響を受け、また DPNR 触媒は主に熱劣化の影響を受けて劣化は増加するが、その後は安定する傾向にある。これは、貴金属の熱によるシンタリングが安定し又、温度が上がりにくく硫黄の被毒回復が難しい箇所がすべて被毒した結果と考える。

### 6.6.3 触媒サイズの変更

表 6.8 は触媒の諸元について、図 6.42 は硫黄被毒回復制御中の触媒床温の温度分布について市場実験車のデータと比較したものである。温度分布については、実測結果をもとに整理した。2AD において NSR 触媒の長さや総量を増やしたことで、破線で示す NSR 触媒前端的温度分布はより均一になり、硫黄被毒回復制御性は改善できた。温度分布が均一化したということは触媒上での HC、A/F も均一化されていることを示しており、これらは NSR 触媒の容量の増加とあわせ、トータルの NOx 吸蔵性能向上にも貢献している。

Table.6.8 DPNR Catalyst Specification

	Field Trial		2AD	
	NSR	DPNR	NSR	DPNR
Catalyst				
Capacity(L)	0.8	2	1.45	2
Size	φ129×L60	φ129×L150	φ129×L110	φ160×L100

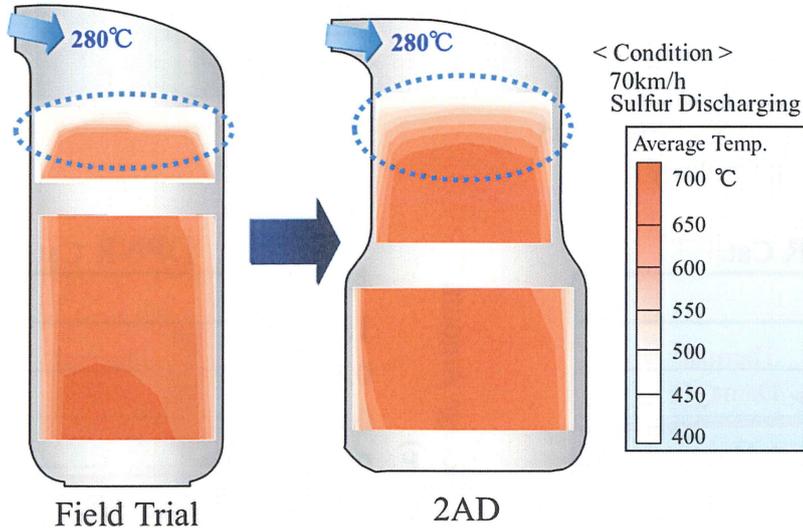


Fig.6.42 Comparison of Bed Temperature

#### 6.6.4 硫黄被毒回復制御の改良

図 6.43 は触媒の硫黄被毒量に対する硫黄放出速度と NO<sub>x</sub> 吸蔵性能及び燃費性能との関係を示したものである。硫黄放出時の床温が 650°C の特性をみると、硫黄被毒量が少ない場合、NO<sub>x</sub> の吸蔵量は増加する一方、硫黄放出速度は低下する。そのため、硫黄被毒量が多い場合

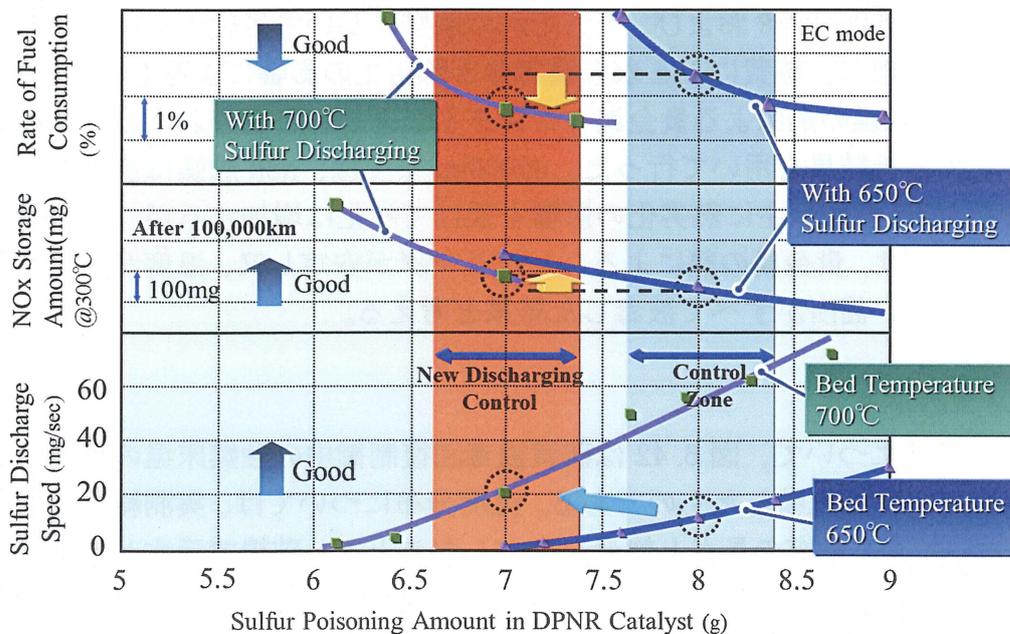


Fig.6.43 Influences of Sulfur Poisoning on Discharge Speed , NO<sub>x</sub> Emissions and Fuel Consumption

に比べ放出に要する時間が長くなるため、燃料消費は大幅に悪化する。そこで 2AD の新触媒システムに於いては硫黄放出速度を増加させるため、図に示すように硫黄放出時の床温制御を 650℃から 700℃に高めることにした。図の横軸は触媒の総被毒量を示しており、650℃における永久被毒量（硫黄放出速度 0 の点）は 7g でこれは回復することは出来ない。開発当初の被毒回復制御は、8g まで溜めて 7g まで回復するという制御を検討していたが、制御温度を 700℃にあげることで、永久被毒量は 6g となりそれを基準に 7g まで溜めて 6g まで回復するという制御に変更した。

その結果、以前に比べ被毒量が少なくてもより短時間で硫黄放出することが可能となった。これにより燃料消費への影響も低減が可能となり、NOx 吸蔵性能もわずかではあるが増加させることができた。これは 700℃以内での温度上昇であれば放出時間を短縮するほうが触媒の熱劣化についても有利であるという結果である。

図 6.44 は硫黄被毒回復制御中の、NSR 触媒、DPNR 触媒の各位置での温度挙動を示したものである。NSR 触媒中央及び DPNR 触媒に於いては触媒床温の変動は小さく目標範囲に入っているが、NSR 前端においては平均値は低いにも関わらず、破線で示すように変動値が制御目標を上回っている。これは、前端部分が他の位置に比べ硫黄放出性が劣るだけでなく熱劣化も厳しいことを意味している。これについては排気燃料添加によるリッチリーン制御のインターバル及びリッチ期間をそれぞれ 2/3 に短縮することで、右図のように NSR 入口の温度変動幅を縮小し、600~700℃以内に制御することが可能となり熱劣化抑制にもつながった。

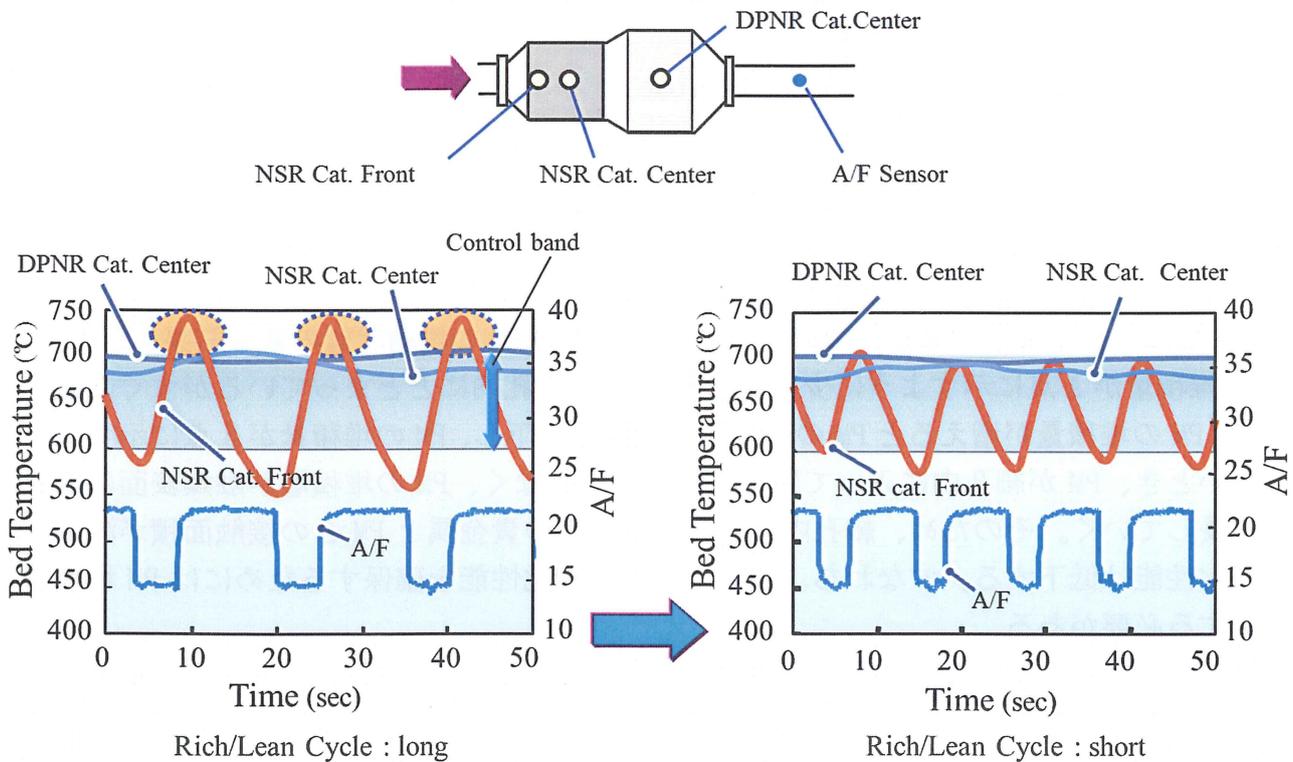


Fig.6.44 Temperature Control during Sulfur Poisoning Recovery

### 6.6.5 排気添加インジェクタの噴霧改良

図 6.45 は排気添加インジェクタの改良による燃料微粒化への効果を、図 6.46 は微粒化による NOx 浄化性能の改善効果を示す。図 6.45 において、排気添加インジェクタのノズルの流量特性を絞ることにより噴射燃料の微粒化を促進することが可能となり、図 6.46 に示すように触媒での NOx 浄化反応をさらに改善することができた。噴孔諸元については様々な仕様を検討する中で、貫徹力を維持し微粒化を改善することを狙い、噴孔厚さを薄くした。噴孔幅については上下それぞれの噴孔で異なる寸法とした。これは上下噴孔から排気ポート内に噴射された噴霧が、壁面に付着しないような噴霧分布を形成することを狙ったものである。

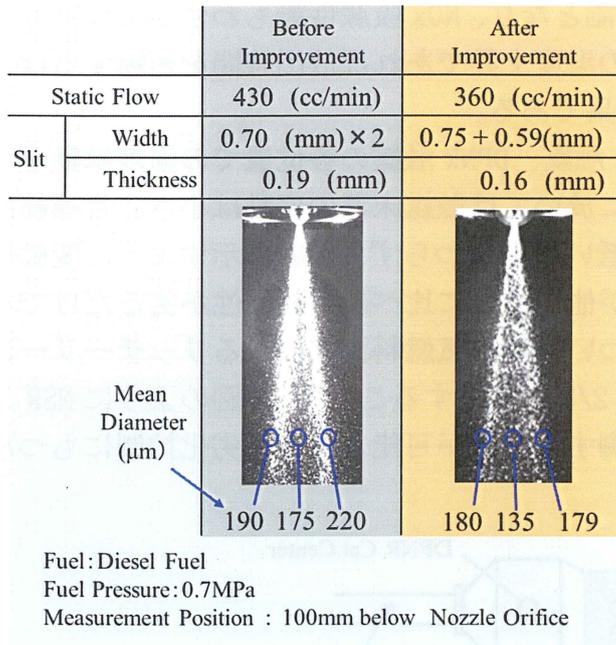


Fig.6.45 Finer Atomization of Fuel

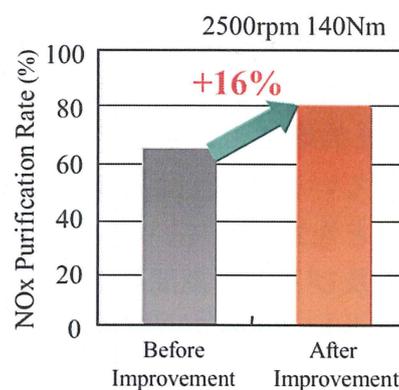


Fig.6.46 Effect of Finer Atomization

### 6.6.6 PM 強制再生制御の改良

図 6.47 は DPNR 触媒における PM 堆積量と連続酸化性能の関係を示したものである。ガス温度 330℃における A 点と B 点については、それぞれの PM の堆積状態の観察結果を示す。

PM の堆積量が A 点に示すように少ない場合、PM は細孔内にとどまっているがすぐに酸化される。PM の堆積量が増えると PM の連続酸化性能は低下し、PM の堆積量が B 点に示すように大きいとき、PM が細孔内に入って酸化されることはなく、PM の堆積層が触媒表面に形成され成長していく。そのため、細孔内を含め触媒表面の貴金属と PM との接触面積が減少し連続酸化性能は低下する。すなわち、触媒での連続酸化性能を確保するためには PM 堆積量を低減する必要がある。

図 6.48 は DPNR 触媒の床温に対する PM 酸化性能とエンジンから排出される PM を示したものであり、車両が排気ガス温度が低い状態で運転されているか、あるいは触媒の PM 連続再生性能を上回る量をエンジンが排出している場合、PM は触媒内に堆積していくため、強制再生が必要となり燃費は大きく悪化する。そこで 2AD エンジンでは PM の堆積量を 2g/L 以下とし、連続再生性能を有効に活用している。触媒に堆積した PM の総量は ECU 内で、エンジンから排出された PM 量から触媒内で酸化された PM 量を減算しカウントしている。

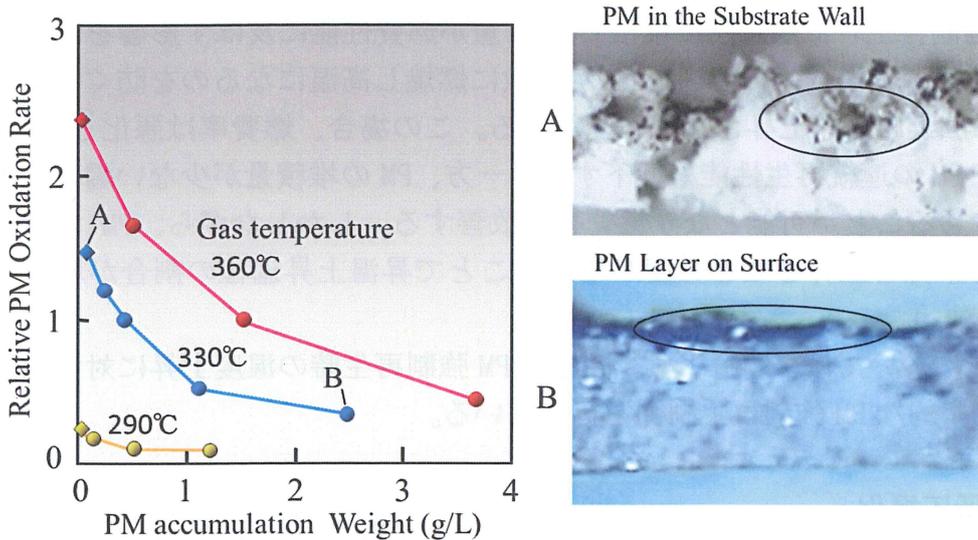


Fig.6.47 PM Oxidation Ability

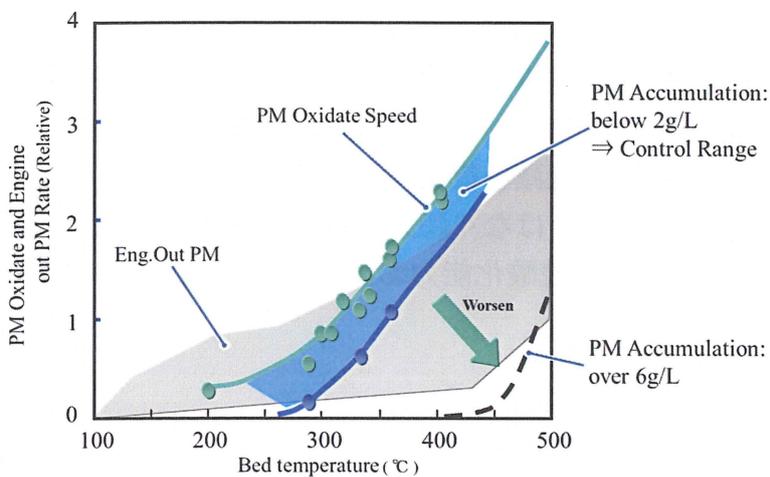


Fig.6.48 Continuous PM Oxidation Range

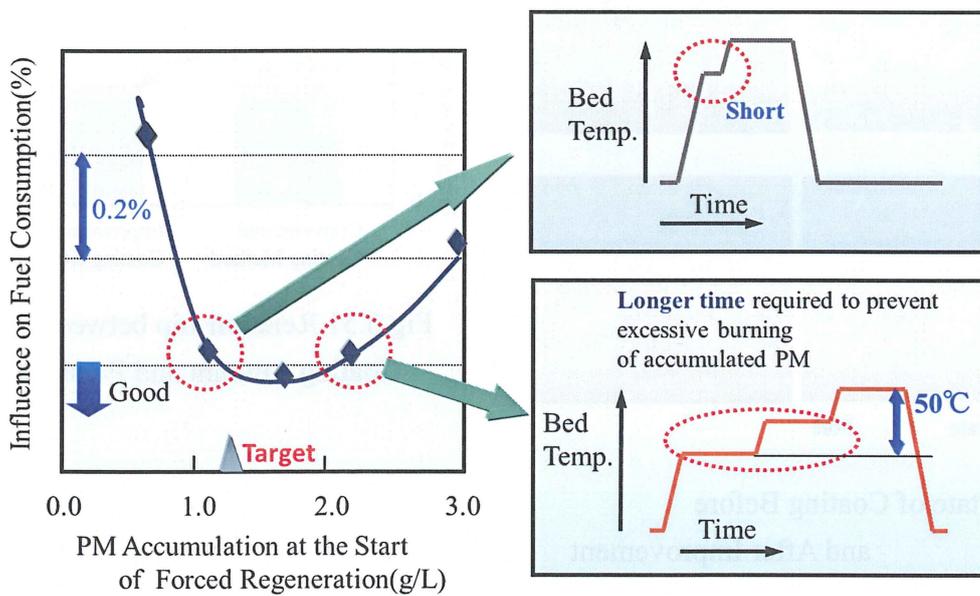


Fig.6.49 Influence of the Amount of PM Accumulation on Fuel Economy

図 6. 49 は強制再生時に触媒内に堆積した PM 量が燃費性能に及ぼす影響を示したものである。PM 堆積量が多い場合、堆積した PM が急激に燃焼し高温になるのを防ぐため、時間をかけて段階的に触媒床温を上昇させる必要がある。この場合、燃費率は悪化し、PM の堆積量が多いことで PM の連続再生性能も低下する。一方、PM の堆積量が少ない場合、急激に触媒床温を上昇させることが可能となり燃費率は改善する。しかしながら、PM 堆積量があまりにも少ないと床温を上昇させる頻度が増えることで昇温上昇過程の割合が増えるため燃費は悪化してしまう。

2AD エンジンに於いては、最適な燃費性能と PM 強制再生時の温度上昇に対する熱劣化余裕を考慮し、効率的な PM 強制再生制御を行っている。

### 6. 6. 7 触媒低圧損化

高出力化、低燃費化に対応するため、DPNR 触媒の基材・コートについて改良を行い低圧損化を実現した。図 6. 50 はコート状態を改良前後で比較したものであり、図 6. 51 はコート材改良による圧損への効果を示している。

改良前はコート材および吸蔵材が凝集しており、これが圧損上昇の原因であることが分かった。そこで、コート材の粒子径を小さくすることによるコート改良、吸蔵材の乾燥方法を改良することによる吸蔵材の偏析低減を行なった結果、写真でわかるように、細孔がコート材あるいは吸蔵材でふさがれることはなく圧力損失を低減できた。この改良は触媒との接触面積を増やすことになり、PM の連続酸化能力および NO<sub>x</sub> 浄化性能の改善にもつながる。

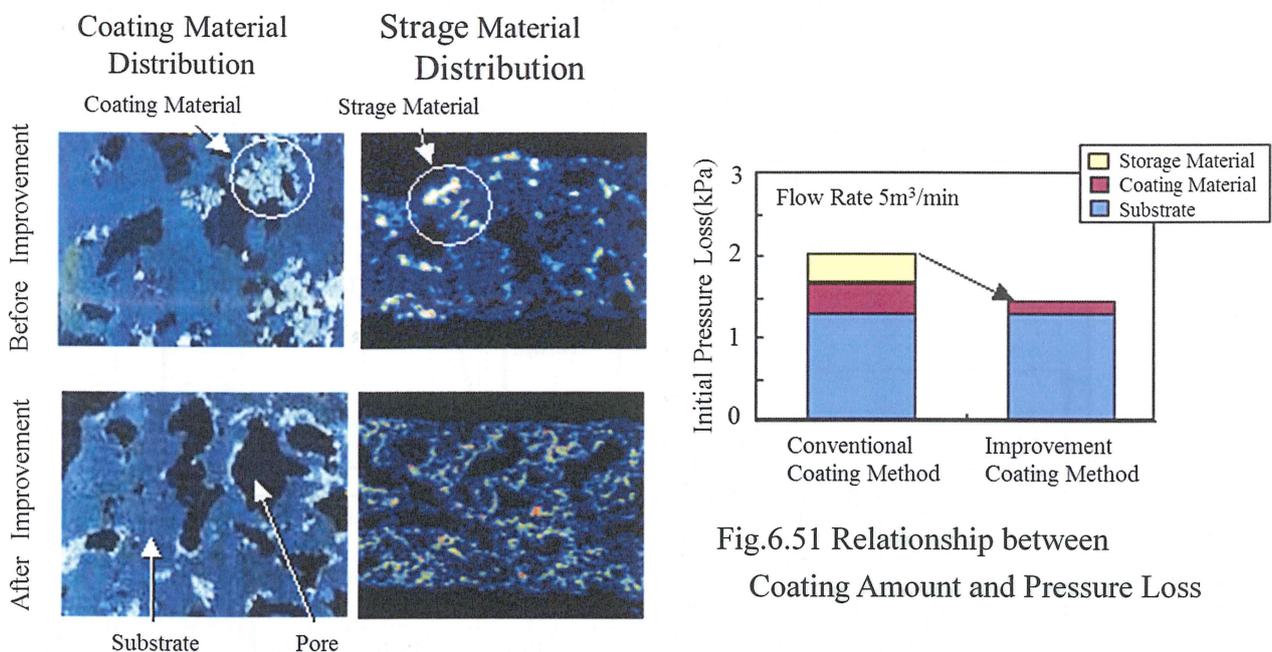


Fig.6.50 State of Coating Before and After Improvement

Fig.6.51 Relationship between Coating Amount and Pressure Loss

図 6.52 は大規模実験車から回収した触媒内のアッシュ詰まりの分布を調べた物である。前段は NSR 触媒、後段は DPNR 触媒であるが、DPNR 触媒は通路が入口出口で交互に栓詰めされており下流になるほど堆積量は増加し、最下流の栓詰めされた箇所にも最も堆積していることがわかる。このように、回収触媒においてアッシュの堆積はあったが基準以内であり 300000km を保障できるレベルであることを確認している。

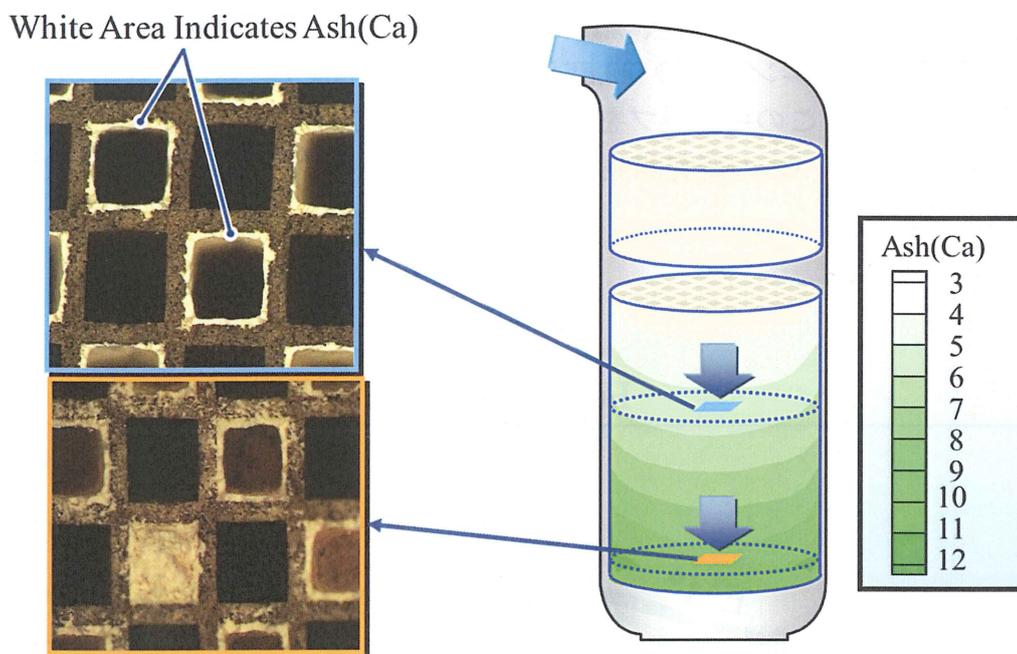


Fig.6.52 System Durability: Ash

#### 6.6.8 触媒システム改良のまとめ

これまでの触媒システムの改良結果についてまとめると、表 6.9 のようになる。市場実験車から回収した触媒の詳細分析も含め、各種改良技術を新開発の 2AD ディーゼルエンジンに投入し、排気のクリーン化と低燃費化を実現した。

Table.6.9 Summary of Catalyst System Improvement

Item	Description
NOx Reduction Improvement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increased NSR Capacity</li> <li>• Reduced Sulfur Poisoning Amount</li> <li>• Finer Atomization of Added Fuel</li> </ul>
PM Regeneration Improvement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimized Amount of PM Accumulation for Forced PM Regeneration</li> </ul>
Reduced Pressure Loss to Support High Power	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improved Catalyst Substrate and Coating</li> </ul>

## 6.7 将来システム

以上、DPNR の改良と新たな技術の導入により高出力化、低燃費化、クリーン化の同時達成を実現した。将来に向け、これらの更なる改良に向けた継続的な研究開発が必要である。

図 6.53 に示すように現在ディーゼルエンジンの排気低減手法には 3 つのパスがある。一つはエンジン改良と DPR(パーティキュレートフィルター)の組み合わせ。もう一つは HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition)と DPR の組み合わせ。3 つ目が DPNR である。これらは要求される出力レベル、燃費性能 (CO<sub>2</sub>)、システムコストにより選択する必要がある。図よりガソリンエンジンの SULEV(Super Ultra Low Emission Vehicle) 対応車との間にはギャップがあり、このギャップを埋めるために、これらのパスを集約した形の次世代 D-CAT と呼ばれる第 4 のパスの研究開発を触媒システムとエンジンシステムの改良を通して推進する必要がある。

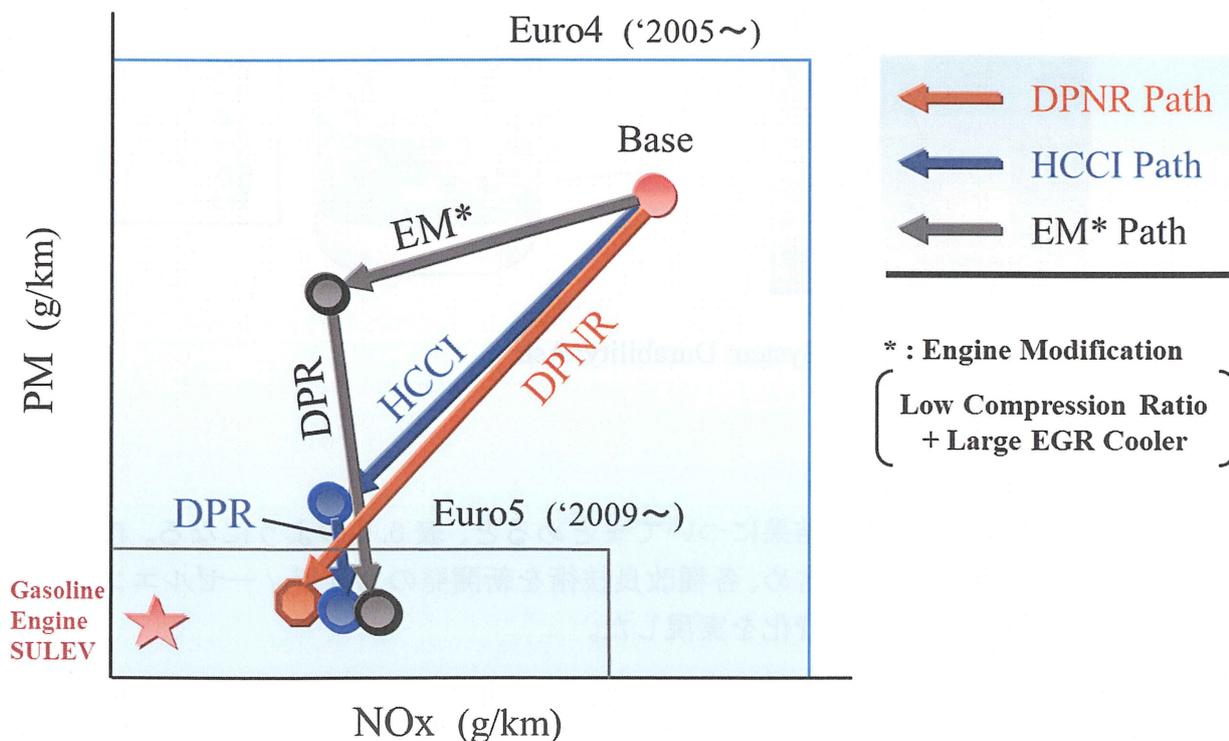


Fig.6.53 Paths for Lower Emissions

## 6.8 まとめ

ディーゼルエンジンにおける高出力、低排気、良好な燃費性能に対する強い要望に応えるために多くの新規技術の研究開発を進め、次世代 DPNR のシステム技術を確立し、新型 2.2L ディーゼルエンジンに適用した。このエンジンでは低圧縮比化を基本コンセプトとして、噴射システム、燃焼システム、触媒システムとの最適化検討を行うことで、高出力化、クリーン化、低燃費・CO<sub>2</sub>化を高次元で実現することができた。

以下に結果をまとめる。

- (1) 低圧縮比化とピエゾインジェクタの組み合わせは、高出力化とクリーン化を同時に達成するうえで極めて効果的な技術であり、ディーゼルエンジンの今後の研究開発の基本となり得る。
- (2) ピエゾインジェクタとの組み合わせにより、従来技術では達成不可能な圧縮比 15.8 を実現することができた。低圧縮比の場合、噴霧貫徹力が高くなるため燃焼室形状については浅皿タイプが有効である。
- (3) 低圧縮比化において問題となる HC 及び低温性能に関しては、高応答で作動するピエゾインジェクタによる噴霧の微粒化及び多段噴射が効果的である。
- (4) ノズルの多孔化は低温性能改善に有効であるが、小径化と組み合わせる場合はパイロット噴射時の HC の悪化に注意する必要がある。
- (5) セラミックグロープラグによる低温性能の改善効果は大きい。
- (6) 大規模実験から得られた知見をもとに、NSR 触媒の容量アップによる NO<sub>x</sub> 低減性能の改良及び PM 再生制御／硫黄被毒回復制御の最適化による燃費改良が可能となる。
- (7) コート材の粒子径を小さくすることによるコート改良と吸蔵材の乾燥方法を改良することによる吸蔵材の偏析低減をはかることで、圧力損失 25%の低減による高出力化、低燃費化のみならず、PM の連続酸化能力および NO<sub>x</sub> 浄化性能の改善も可能となる。

## 第7章 結論

本論文は、自動車用ディーゼルエンジンの高出力化とクリーン化および低燃費化に向けた研究開発の結果についてまとめたものである。

以下に各章のまとめを行う。

**第1章**は序論であり、ガソリンに比べ燃費的に有利なディーゼルエンジンにおいて、最大の課題である排気のクリーン化の実現のみならず高出力化に向けて進めてきた多くの新技術の研究開発について概要を述べた。

**第2章**ではコモンレール噴射式小型直噴ディーゼルエンジンの研究開発について述べた。新開発のディーゼルエンジンにおいて、コモンレールシステムの新規開発および燃焼系の改良等により、エンジン出力性能・排気・燃費について、従来の予燃焼室ディーゼルの性能を大幅に上回ることが可能となった。以下概要をまとめる。

- (1) 小排気量エンジンでも搭載可能なコモンレールシステムの開発に着目し、システム諸元の検討を進め、小型直噴ディーゼルエンジンのベースとしてのコンセプトを確立した。
- (2) インジェクタについては、2方弁式平面バルブシートの採用により油圧作動力を1/4以下に低減し、インジェクタサイズの小型化を実現した。
- (3) ポンプについては、対向するピストンをタンデムに配置し、時間調量方式を採用することで、従来と同じくベルト駆動での対応が可能となった。
- (4) 制御に関しては、シリンダ内への燃料漏れ検出によるシリンダ内の高圧の発生を抑制する手法や、レール圧の降圧特性改善による燃焼音の低減手法を確立した。

**第3章**ではコモンレール噴射式小型直噴ディーゼルエンジンの後処理システム(DPNR)の研究について述べた。NO<sub>x</sub>吸蔵触媒上で、A/Fのリッチリーンを作り出すことでPMの酸化が促進できることを発見し、PMとNO<sub>x</sub>を同時かつ連続的に低減できる世界初の新触媒システムDPNRの技術を確立した。以下概要をまとめる。

- (1) 触媒は、NO<sub>x</sub>吸蔵材をディーゼルパーティキュレートフィルターにコーティングしたポーラスセラミック構造とした。
- (2) DPNRを構成するコモンレール噴射システムの高精度制御と大量クールドEGRを活用した低温燃焼、およびリッチリーンを作るための排気燃料添加システムにより、広い運転範囲でDPNR触媒をうまく機能させNO<sub>x</sub>、PMの大幅な低

減が可能となった。

- (3) PM の酸化速度は DPNR 触媒にたまっている PM が少ないほど高くなることから、触媒に溜める PM を少なくし、触媒床温を 300℃以上に制御することが PM の連続酸化性能を高く保つために必要である。
- (4) 触媒中に SO<sub>x</sub> という形で吸蔵された硫黄は、ストイキ条件のもとで触媒床温 600℃以上の条件で放出することが可能で、この硫黄被毒回復制御は、低温燃焼と排気添加により実現することができる。又、ストイキ付近でのリッチリーン制御の繰り返しにより、H<sub>2</sub>S の放出を抑えた SO<sub>x</sub> 放出が可能となる。

第 4 章では DPNR 搭載コモンレール式ディーゼル乗用車用の市場実験によるシステム解析について述べた。以下概要をまとめる。

- (1) DPNR を搭載した 2L クラスの乗用車 62 台の欧州 7 ヶ国と日本国内の実走行試験より、DPNR を搭載したディーゼル乗用車の排ガス値は 10 万 km 走行後においても欧州 Euro4 規制値を大幅に下回り、又 PM 強制酸化や硫黄被毒回復制御が市場の実走行を通じて目標の触媒温度内の 600～700℃の範囲内で制御できることを確認した。
- (2) しかしながら、将来に向けて更に NO<sub>x</sub> を低減するためには、DPNR 触媒の劣化について改良を進める必要があることも判明し、硫黄被毒、被毒回復制御に伴う熱劣化、燃料消費率の点からも硫黄フリー燃料の早期展開は必須であることも確認できた。
- (3) 20 万 km での DPNR 触媒での圧力損失は初期に対して約 30%増加しているものの、既に飽和レベルも許容値以下であり問題ないことが確認できた。

第 5 章では DPNR 搭載コモンレール式乗用車用ディーゼルエンジンの量産開発について述べた。DPNR を量産エンジンに適用するため、第 4 章で述べた 62 台の実証実験の中で摘出された、システムの信頼性および制御性に関する課題について、その対策内容を量産エンジンに反映した。以下概要をまとめる。

- (1) 市場での実際の使われ方を解析後、硫黄被毒制御域を拡大することが不可欠であることが判明した。低温燃焼領域の拡大及び排気添加制御方法の見直しにより、制御領域を市場の走行モードに適用できるよう拡大した。
- (2) 硫黄の被毒量と放出速度との関係を明確にし、被毒回復制御に伴う燃費悪化を最小限とするための硫黄被毒量を決定した。
- (3) 硫黄被毒回復制御に先立ち、床温を 600℃に保つスタンバイ制御領域は硫黄被毒回復制御の拡大に併せ縮小し、硫黄被毒回復制御に関わる燃費悪化は 1/3 に低減可能となった。但し、触媒床温の上がりにくい低速域での硫黄被毒回復制御中の燃料消費については、更なる改良が必要であることも明確にな

った。

第 6 章では超高出力・クリーンを両立する乗用車用新型ディーゼルエンジンの研究開発について述べた。このエンジンは次世代 DPNR を装着した新型 2.2L 直噴ディーゼルエンジンで、低圧縮比化を基本コンセプトとし噴射システム、燃焼システム、触媒システムとの融合を図ることで、高出力化、クリーン化、低燃費・CO<sub>2</sub>化を高次元で実現した。以下概要をまとめる。

- (1) ピエゾインジェクタとの組み合わせにより、従来技術では難しいと考えていた低圧縮 15.8 を実現し、高出力化とクリーン化を同時に達成する技術を確立した。低圧縮比の場合、噴霧貫徹力が高くなるため燃焼室形状については浅皿タイプが有効である。
- (2) 低圧縮比化において最も問題となる HC 及び低温性能に関しては、高応答で作動するピエゾインジェクタによる噴霧の微粒化及び多段噴射の活用が効果的であり、セラミックグロープラグによる低温性能の改善効果も確認した。
- (3) コート材の粒子径を小さくすることによるコートの改良、吸蔵材の乾燥方法を改良することによる吸蔵材の偏析低減により圧力損失の低減が可能となり、高出力化、低燃費化に貢献した。又この改良は触媒との接触面積を増やすことになり、PM の連続酸化能力および NO<sub>x</sub> 浄化性能の改善にもつながった。
- (4) 大規模実験及び少量生産車を含む開発から得られた知見をベースに、NO<sub>x</sub> 低減、PM 再生制御の技術改良をすすめ、DPNR のさらなる完成度アップを実現した。

以上、本論文はここ 10 年余りでのディーゼルエンジンの改良技術をまとめたものでもある。この間、燃焼システム、噴射システム、触媒システムにおける新技術の研究開発及びその量産化によりディーゼルエンジンは大きな発展を遂げたと言える。今後はこれらの研究成果をもとに更なるディーゼルエンジンの発展に貢献したい。

## 参考文献

- (1) 藤村 俊夫、都築 雅人、高橋 岳志、安西 俊介、菱沼 修、永谷 康一., “小型直噴ディーゼルエンジン用電子制御式高圧噴射ポンプの開発” 社団法人自動車技術会(JSAE) 技術会誌, 自動車技術 Vol.52.No.4, pp.68-P73, April 1998
- (2) Masato.Nakagawa, Yukinori.Miyata, Masatoshi.Kuroyanagi, Toshiaki.Konomi, Toshio.Fujimura. , “Common Rail Injection System Development For HSDI Diesel Engines” EAEC 7<sup>th</sup> International Congress, STA99C410, pp.88-97, July 1999
- (3) Toshio.Fujimura, Toshiaki.Konomi , Teruhiko. Aiba, Naoyuki.Tsuzuki., “Development of the Toyota 1CD-FTV Type Diesel Engine with Common rail system” I-MECH-E SEMINAR PUBLICATION Fuel-Injection System , S492/S12/99, pp.121-134, December 1999
- (4) Yuichi.Hokazono, Toshiaki.Konomi, Toshio.Fujimura, Yukinori.Miyata., “Development of a Common rail system for a HSDI Diesel Engine” I-MECH-E SEMINAR PUBLICATION Fuel-Injection System, S492/S5/99, pp.71-81 , December 1999
- (5) Toshio.Fujimura, Souichi.Matushita, Toshiaki.Tanaka , Koichi Kojima., “Development towards serial production of Diesel passenger car with Simultaneous reduction system of NOx and PM for the European market” 23<sup>rd</sup>.International Vienna Motor Symposium, Reihe12-Nr.490, pp.156-174, April 2002
- (6) Jun.Tahara, Yasuhiko.Ohtsubo , Taro.Aoyama, Takekazu. Ito, Toshio Fujimura., “Development of an Exhaust Aftertreatment System for Diesel Passenger Cars” 2002 JSAE Spring Convention, No.23-02-106, pp.9-12, July 2002
- (7) Toshio.Fujimura, Toshiaki.Tanaka, Masato.Tsuzuki, Tatsumasa.Sugiyama., “Development of an Exhaust Aftertreatment System for Diesel Passenger Cars” 社団法人自動車技術会論文集, Vol.35 NO.2, pp.65-71, April 2004
- (8) Thiebault.Paquet, Jun.Tahara, Tatsumasa.Sugiyama, Hiroki.Matsuoka, Toshio.Fujimura., “1st Results of a Field trial with Diesel Passenger Cars, equipped with the DPNR Exhaust After treatment System” 11<sup>th</sup>.AACHEN COLLOQUIUM Automobile and Engine Technology, October 2002
- (9) Masato.Tsuzuki, Jun.Tahara, Tatsumasa.Sugiyama, Toshio.Fujimura, Shinya.Hirota., “Field trial for Diesel Passenger Cars with DPNR” Auto.Technology (International Magazine for Engineering, Production and Management - Official publication of FISITA ), Volume.4, pp.70-74 , August 2003

- (10) Takekazu.Ito, Hiroki.Matsuoka, Tatumasa.Sugiyama, Toshio.Fujimura.,  
 “The new Toyota 2.0L Direct injection Diesel Engine with D-CAT Concept”  
 12<sup>th</sup>. AACHEN COLLOQUIUM Automobile and Engine Technology,  
 pp.1115-1135, October 2003
- (11) Tatumasa.Sugiyama, Toshio.Fujimura, Shinya.Hirota, Juji Suzuki., “The new  
 Toyota 2.2L Direct injection Diesel Engine- Toyota D-CAT- Clean Power Concept”  
 14<sup>th</sup>. AACHEN COLLOQUIUM Automobile and Engine Technology,  
 pp.1045-1066, October 2005
- (12) Walter Egler et all., “Die Simulationsgestutzte Entwicklung von  
 Hochdruckeinspritzsystemen fur Dieselmotoren” MTZ 58, 1997
- (13) Masahiko Miyaki et all., “Development of New Electronically Controlled Fuel  
 Injection System ECD-U2 for Diesel Engine” SAE Paper 910252, 1991
- (14) Isao Osika et all., “Benefits of New Fuel Injection System Technology on Cold  
 Stability of Diesel Engine” SAE Paper 940586, 1994
- (15) Tetsuro Kato et all., “Common Rail Fuel Injection System for Improvement of  
 Engine Performance on Heavy Duty Diesel Engine” SAE Paper 980806, 1998
- (16) Gerhard Stumpp et all., “Common rail - An Attractive Fuel Injection System for  
 Passenger Car DI Diesel Engines” SAE Paper 960870, 1996
- (17) Karl-Heinz Hoffmann et all., “Das Common-Rail-Einspritzsystem-ein neues  
 Kapitel der Dieseleinspritztechnik” MTZ58 ,1997
- (18) K.Noda et all., “Development of ceramic roller-bushings for diesel distributor-type  
 fuel injection pump” JSAE Paper, No.9930649, 1999
- (19) Arndt Peters et all., “Der neue Vierzylinder-Dieselmotor OM611 mit  
 Vommon-Rail-Einspritzung” MTZ58 , 1997
- (20) Dahle. U, Beutel.T and Punke. A., “ Euro 4 - Exhaust After-treatment for Lean  
 Burn Engines(Gasoline/Diesel) ” VDA Technical Congress, pp.63-74 , 1999
- (21) Pischinger.S, Schnitzler. J, Hermann, O, Scholz, V.,  
 “ Investigations of the application of a NOx adsorber catalyst for a passenger car  
 diesel engine” 10<sup>th</sup> Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2001
- (22) Salvat. O, Marez. P and Belot.G., “ Passenger Car Serial Application of a  
 Particulate Filter System on a Common Rail Direct Injection Diesel Engine”  
 SAE Paper No.2000-01-0473, 2000
- (23) Hawker.P and Myers. N., “ Experience with a New Particulate Trap Technology in  
 Europe ” SAE Paper No. 970182 , 1997
- (24) Deckers. R, Follain. L, Herrmann. H.O, Lichtenberg.T, Pungs. A., “ Serial  
 Application of an Active Particulate Filter System for Passenger Cars ” 10<sup>th</sup> Aachen

Colloquium Automobile and Engine Technology , 2001

- (25) Tanaka. Toshiaki., “ Simultaneous Reduction of PM and NOx – A New After - Treatment System –” 22<sup>nd</sup> International Vienna Motor Symposium , 2001
- (26) Sasaki. S, Ito.T and Iguti. S., “ Smoke-less Rich Combustion by Low Temperature Oxidation in Diesel Engines ” 9<sup>th</sup> Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology , 2000
- (27) Itoh.S and Nakamura.K., “ Reduction of Diesel Exhaust Gas Emission with Common Rail System” Journal of Society of Automotive Engineers of Japan , 2001vol55, 2001
- (28) Tow. T.C, Pierpont. D. A and Reitz.R.D., “ Reducing Particulate and NOx Emissions by Using Multiple Injections in a Heavy Duty D.I. Diesel Engine ” SAE Paper No.940897, 1994
- (29) N.Miyoshi et all., “Development of NOx Storage-Reduction 3-Way Catalyst 2<sup>nd</sup> Report ” SAE Paper 050809, 2005
- (30) T.Tanaka et all., “Development of new Concept Three-Way Catalyst for Automotive Lean-Burn Engines” JSAE Paper 9540958, 1995
- (31) Asanuma. T., Takeshima, S., Yamashita, T., Tanaka, T., Murai, T. and Iguchi, S., “Influence of Sulfur Concentration in Gasoline on NOx Storage- Reduction Catalyst” SAE Paper No. 1999-01-3501, 1999
- (32) Hachisuka. I, Hirata. H, Ikeda. Y and Matsumoto. S., “ Deactivation Mechanism of NOx Storage-Reduction Catalyst and Improvement of Its Performance ” SAE Paper No.2000-01-1196, 2000
- (33) B. Cooper, I. Penny, M. Beasley, A. Greaney, J. Crump., “Advanced Diesel Technology to Achieve Tier 2 Bin 5 Emissions Compliance in US Light-Duty Diesel Applications” SAE Paper No. 2006-01-1145, 2006
- (34) P. Adomeit, M. Becker, H. Rohs, S. Pischinger, A. E. Greis, G. Grunefeld., “Potential Soot and CO Reduction for HSDI Diesel Combustion Systems” SAE Paper No. 2006-01-1417, 2006
- (35) P. Brunet, D. Ellul, J.Huet, S. Malcuy, C. Monereau, J. Piana., “The New Renault 2.0 Litre Diesel Engine” 27<sup>th</sup> International Vienna Motor Symposium , 2006
- (36) C. Kern, W. Dressler, V. Rothacker., “An Innovative Glow System for Modern Diesel Engines” SAE Paper No. 1999-01-1240, 1999

## 本論文に関する著者の論文

- (1) 藤村 俊夫、都築 雅人、高橋 岳志、安西 俊介、菱沼 修、永谷 康一., “小型直噴ディーゼルエンジン用電子制御式高圧噴射ポンプの開発” 社団法人自動車技術会(JSAE) 技術会誌, 自動車技術 Vol.52.No.4, pp.68-P73, April 1998
- (2) Masato.Nakagawa, Yukinori.Miyata, Masatoshi.Kuroyanagi, Toshiaki.Konomi, Toshio.Fujimura., “Common Rail Injection System Development For HSDI Diesel Engines” EAEC 7<sup>th</sup> International Congress, STA99C410, pp.88-97, July 1999
- (3) Toshio.Fujimur, Toshiaki.Konomi, Teruhiko.Aiba, Naoyuki.Tsuzuki., “Development of the Toyota 1CD-FTV Type Diesel Engine with Common rail system” I-MECH-E SEMINAR PUBLICATION Fuel-Injection System , S492/S12/99, pp.121-134, December 1999
- (4) Yuichi.Hokazono, Toshiaki.Konomi, Toshio.Fujimura, Yukinori.Miyata., “Development of a Common rail system for a HSDI Diesel Engine” I-MECH-E SEMINAR PUBLICATION Fuel-Injection System, S492/S5/99 pp.71-81 , December 1999
- (5) Toshio.Fujimura, Souichi.Matushita, Toshiaki.Tanaka, Koichi.Kojima., “Development towards serial production of Diesel passenger car with Simultaneous reduction system of NOx and PM for the European market” 23<sup>rd</sup>.International Vienna Motor Symposium, Reihe12-Nr.490, pp.156-174, April 2002
- (6) Jun.Tahara, Yasuhiko.Ohtsubo, Taro.Aoyama, Takekazu.Ito, Toshio.Fujimura., “Development of an Exhaust Aftertreatment System for Diesel Passenger Cars” 2002 JSAE Spring Convention, No.23-02-106, pp.9-12, July 2002
- (7) Toshio.Fujimura, Toshiaki.Tanaka, Masato.Tsuzuki, Tatsumasa.Sugiyama., “Development of an Exhaust Aftertreatment System for Diesel Passenger Cars” 社団法人自動車技術会論文集, Vol.35 NO.2, pp.65-71, April 2004
- (8) Thiebault.Paquet, Jun.Tahara, Tatsumasa.Sugiyama, Hiroki Matsuoka, Toshio.Fujimura., “1st Results of a Field trial with Diesel Passenger Cars, equipped with the DPNR Exhaust After treatment System” 11<sup>th</sup>.AACHEN COLLOQUIUM Automobile and Engine Technology, October 2002
- (9) Masato.Tsuzuki, Jun.Tahara, Tatsumasa.Sugiyama, Toshio.Fujimura, Shinya.Hirota., “Field trial for Diesel Passenger Cars with DPNR” Auto.Technology (International Magazine for Engineering, Production and Management - Official publication of FISITA) Volume.4, pp.70-74 August 2003

- (10) Takekazu.Ito, Hiroki.Matsuoka, Tatumasa.Sugiyama, Toshio.Fujimura., “The new Toyota 2.0L Direct injection Diesel Engine with D-CAT Concept”  
12<sup>th</sup>. AACHEN COLLOQUIUM Automobile and Engine Technology,  
pp.1115-1135, October 2003
- (11) Tatumasa.Sugiyama, Toshio.Fujimura, Shinya.Hirota, Juji.Suzuki., “The new Toyota 2.2L Direct injection Diesel Engine- Toyota D-CAT- Clean Power Concept”  
14<sup>th</sup>. AACHEN COLLOQUIUM Automobile and Engine  
Technology, pp.1045-1066, October 2005

## 謝辞

本研究をまとめるにあたり、終始懇切丁寧なご指導を賜った愛知工業大学工学部 機械学科 渡辺修教授、安田仁彦教授に深甚なる謝意を捧げます。

トヨタ自動車(株)の松田喜彦常務役員、田中俊明常務理事、吉田俊朗理事、杉山辰優主幹、外薮雄一主幹、Toyota Motor Europe NV/SAの阪田一郎博士(主査)、日本ガスケット株式会社の河瀬徹社長、デンソー(株)の徳田寛副社長、宮木正彦専務取締役、篠原幸弘常務役員、豊田中央研究所の中北清己博士(フェロー)、日本自動車部品総合研究所の工藤俊二専務取締役、調尚孝博士(取締役)、鳥谷尾哲也部長をはじめ多くの関係者の皆様には本研究を遂行するにあたり、多大なご協力を賜り、感謝いたします。

愛知工業大学の機械学科 内田誠之教授、応用化学科 小林雄一教授には有益な御助言を賜り感謝の意を表します。