

講演 3

ディーゼル自動車の排出ガス対策技術の最新動向

早稲田大学創造理工学部総合機械工学科 教授

大聖 泰弘



2013年5月31日

ディーゼル自動車の排出ガス対策技術の 最新動向

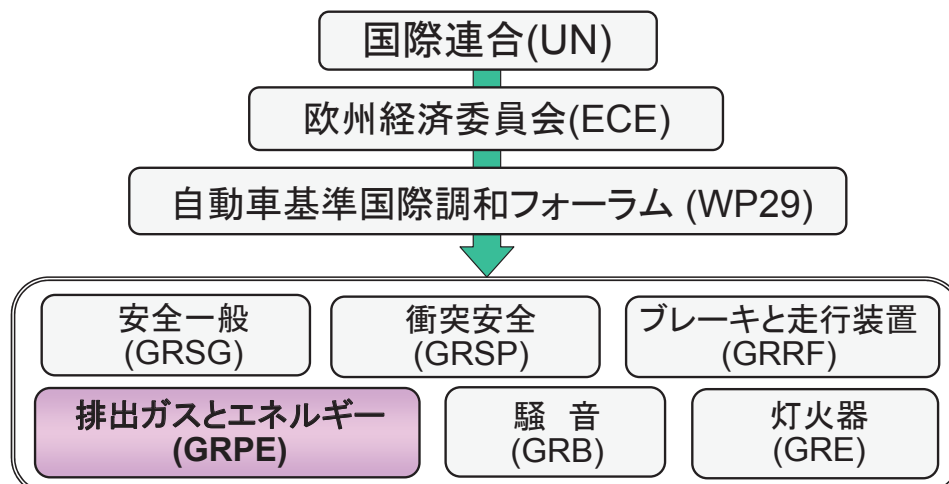
早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科

大聖 泰弘



2

自動車に関する国際基準調和活動の枠組み



■わが国としては、開発の合理化が図られる国際基準調和に積極的に参画し、推進すべき。そのような戦略の構築と国際舞台で活躍し得る人材の育成が重要な課題。
注) 各国の基準認証制度が国際貿易の不必要な障害を防ぐためのWTOの「貿易の技術的障害に関する協定」(1995年1月17日発効)に基づく。

国際基準調和のための排出ガス・エネルギーに関する専門家会議(GRPE)

■全世界規制(gtr)

- ・二輪車排出ガス試験法(WMTC) (決定)
- ・ノンロードエンジン試験法(NRMM) (決定)

- ・重量車排出ガス試験法(WHDC)
 - ・排出ガス故障診断(WWH-OBD)
 - ・オフサイクル試験法(WWH-OCE)
- 重量車排出ガス関係
(検討中)

- ・乗用車排出ガス試験法(WLTP) (決定へ)

■ECE規則改正

- ・粒子測定法(PMP) (決定)

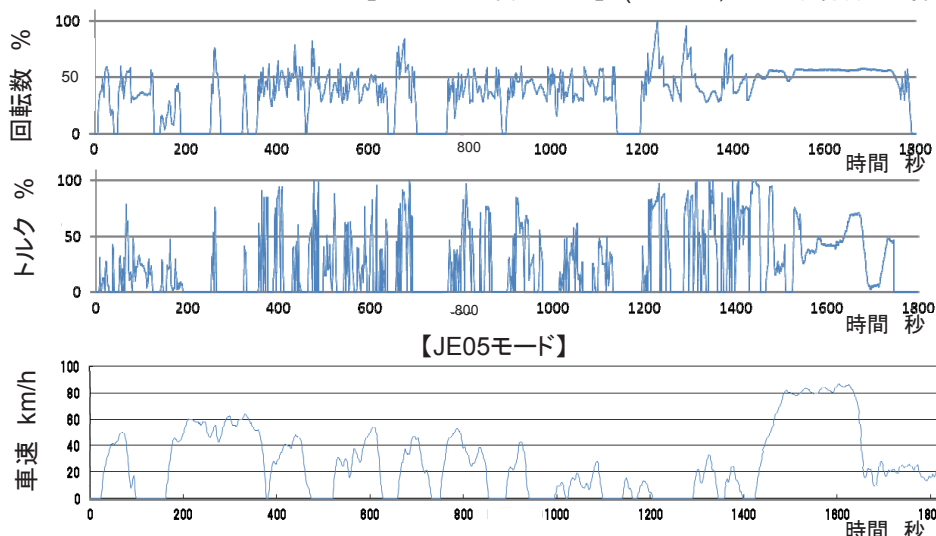
■その他

- ・環境に優しい自動車(EFV)

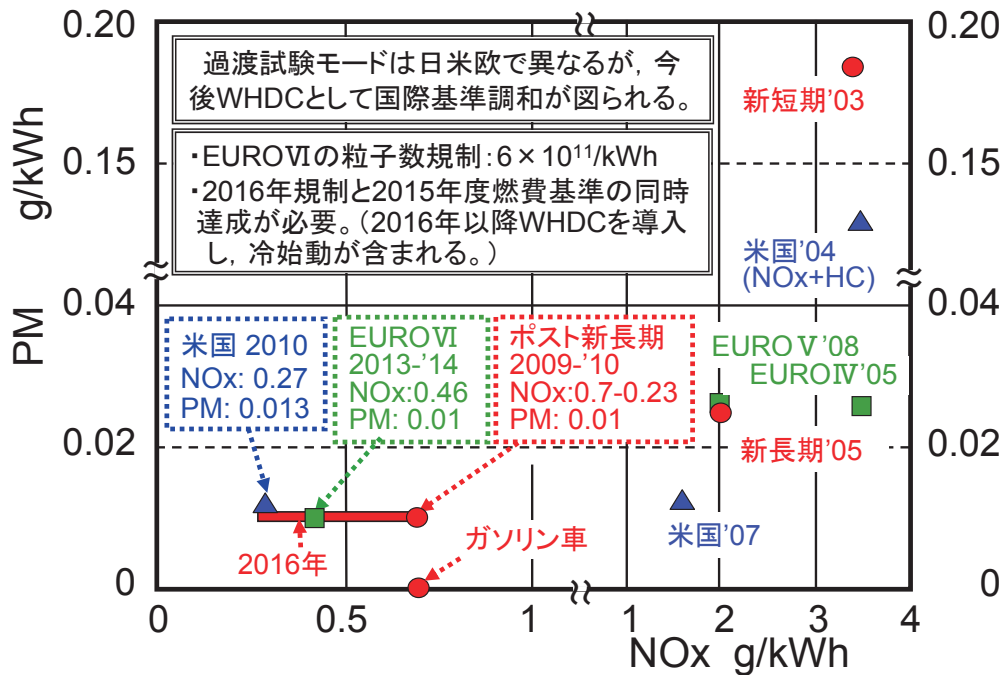
- ・燃料性状(FQ) (検討中)

次期重量車排出ガス規制における世界統一試験サイクル

国連欧州経済委員会自動車基準調和世界フォーラム (UN-ECE/WP29) において、我が国も参画し、平成18年に重量車世界統一試験サイクル (WHDC) が策定された。【WHTC(過度モード)】 (EURO6, 2016年規制から採用)



日米欧におけるディーゼル重量車のNOxとPMの規制



次期重量車排出ガス規制値（2016年以降）

- ・CO₂低減対策の重要性を考慮し、今後の燃費の改善代を確保すること。
- ・NO_x還元剤の噴射制御が不適切な場合等に温室効果ガスであるN₂Oや有害物質であるアンモニアの排出量が増加するおそれがあること。
- ・後処理装置等の耐久性を確保すること。

規制物質	NO _x	PM	CO	NMHC
規制値 *	0.4 g/kWh	0.01 g/kWh	2.22 g/kWh	0.17 g/kWh
ポスト新長期	0.7 g/kWh	0.01 g/kWh	2.22 g/kWh	0.17 g/kWh
低減率	43%	0%	0%	0%

* エンジンが冷機状態、暖機状態において、それぞれ排出ガス試験を実施する。
 排出ガス量 = 冷機時排出ガス量 × 0.14 + 暖機時排出ガス量 × 0.86

【平成28年までに見込んだエンジン技術の進展】

- ・二段過給，二段過給導入によるエンジンダウンサイジング
- ・EGR率の増大，EGR制御の高度化，一部車種へのLP-EGRの採用
- ・燃料噴射圧力の向上，PCI燃焼範囲拡大等の燃料噴射制御の高度化
- ・一部車種へのターボコンパウンドシステムの採用

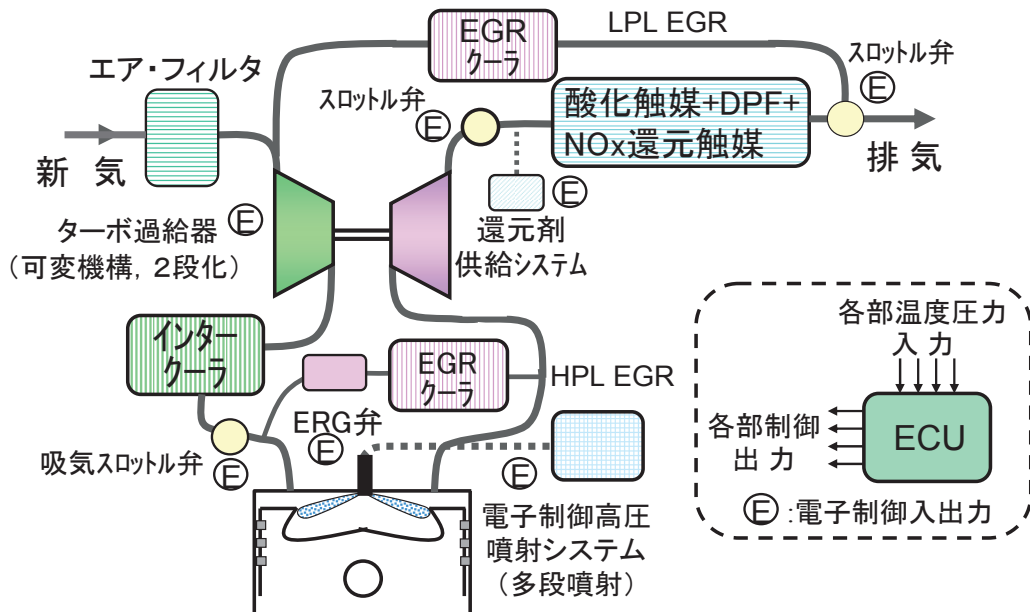
ディーゼル重量車のディフィートストラテジーの適用禁止（中環審第11次答申より、2012年8月）

- 法定試験モードに外の運転条件において、排出ガスを悪化させるディフィートストラテジーとみなされるエンジン関連の制御の適用を禁止する。ただし、そのような制御の中に、エンジン保護（排出ガス低減装置の故障防止）や車両の安全確保のために必要と考えられる制御については、それと見なさないこととする。
- 【保護制御の運転条件】
 - ・低回転連続運転時 ・高負荷・高回転時 ・エンジンオーバーヒート危険時
 - ・高地での運転時 ・低大気温度時 ・エンジン等異常検出時
- エンジン始動時や暖機過程時の低温のための触媒低活性等、意図的な制御以外の要因により排出ガス低減装置が有効に作動しない場合に配慮する。
- エンジンを保護する条件から外れた場合は速やかに保護制御を解除すべきである。また、保護制御が許容される条件は通常発現しない運転条件の範囲のみ認め、かつその中でも作動は最小限とすべきである。
- 今後の技術開発により、保護すべき条件は変化する可能性があり、保護機能の出現頻度や新たな排出ガス低減技術等の情報収集に努め、必要に応じて条件を見直すこととする。

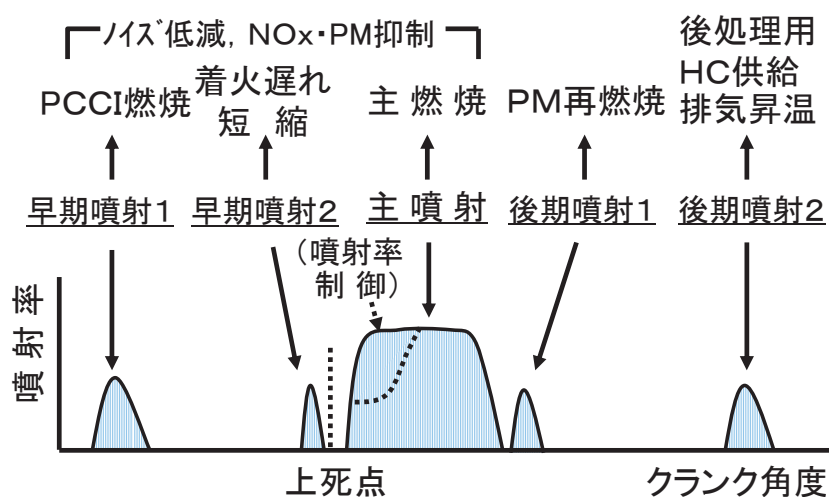
ディーゼル重量車のオフサイクルでの排出ガス低減対策に関する課題（中環審第11次答申より、2012年8月）

- エンジンベンチ認証試験条件の見直し
 - ・ 尿素SCRシステムは、触媒温度により活性状態が敏感に変化し、また、一定温度以下ではNOx浄化性能が低いこと及び尿素水結晶化による触媒損傷防止のため、尿素水の噴射を停止する制御が行われている。
 - ・ シャンダイナモでの排出ガス試験結果から、同一エンジンでも後処理装置のレイアウト位置により温度条件が変わり、排出ガス量が大きく異なることが確認されている。
 - ・ このため、エンジンベンチ認証試験条件については、使用実態を考慮して後処理装置にとってより厳しい条件に変更することが望ましい。
- 車載型排出ガス測定システムの導入
 - ・ 実走行で新車認証時の排出ガスレベルが維持されていることを確認する手法としてPEMS (Portable Emission Measurement System)が提案されており、欧州でも次期排出ガス規制EURO VIより導入される予定である。
 - ・ PEMSによる試験法や許容限度目標値の設定、システムの測定誤差や校正等の課題はあるものの、PEMS導入について検討することが望ましい。

今後のディーゼルエンジンの排出ガス対策例



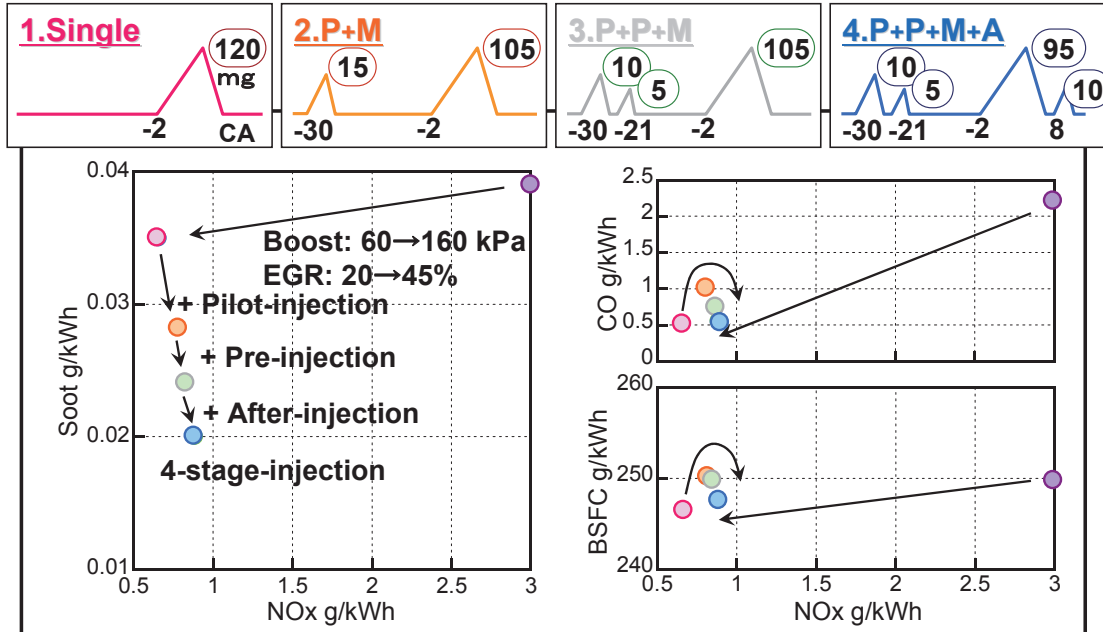
多段噴射によるディーゼル燃焼の制御



- ・ 電子制御式コモンレール高圧噴射システムの活用。
- ・ 噴射圧力: 180MPa~240MPa, 将来は300MPaへ?
- ・ 燃焼室形状との整合でさらに燃焼改善。

高過給, 高EGR, 多段噴射による直噴ディーゼル機関の 排気浄化 (早大, 自技会2008年)

Single cylinder: 2L, ε :17, Ne:1,200 rpm, Load: 60%, P_{inj} : 180 MPa



排出ガス低減と燃費改善のためのEGRの活用

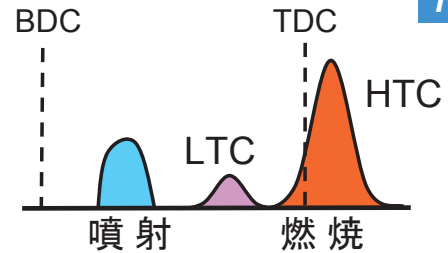
～燃焼温度を下げてNOx低減するのが本来の目的～

- 着火遅れの増加 → 噴射時期の進角
- 大量EGRによるPCCIの実現 → 不活性ガスによる燃焼温度の低下と混合時間の増加でそれぞれNOxとPMを同時低減。
等容度の増加で燃費悪化を抑制。
- 低温排気でのNOx後処理の浄化率低下を補完する。

【課題】

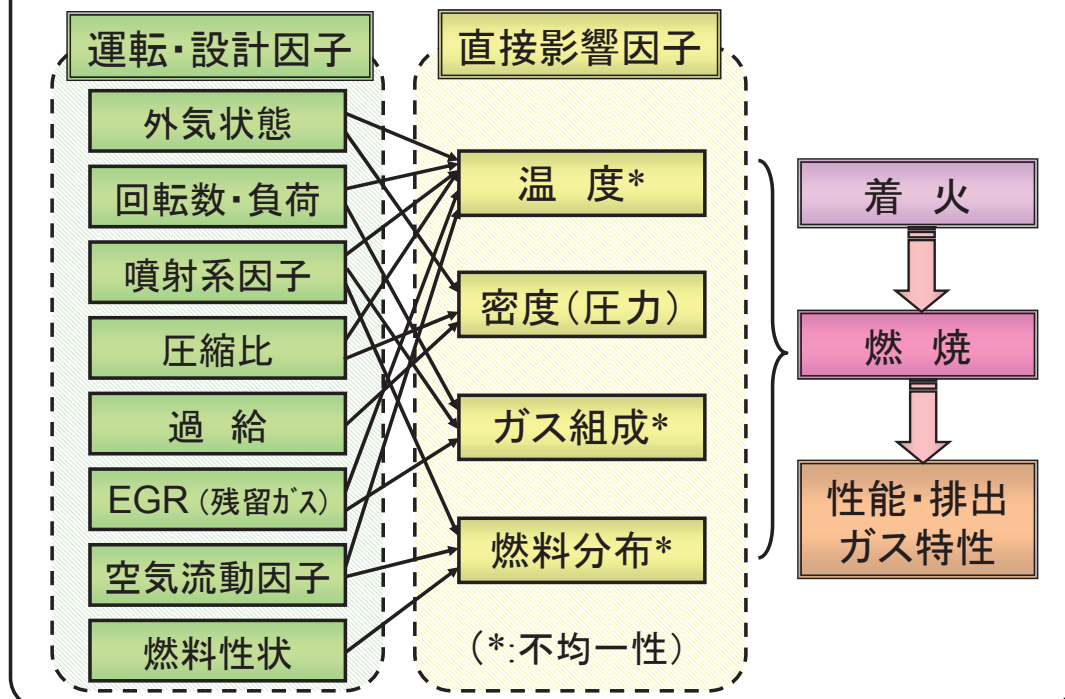
- EGRガスの温度と量の制御: HPL EGRとLPL EGRの制御ロジックとEGRクーラの利用の最適化
- 低温でのPMやHCによる吸気系の汚損やEGR弁の固着の対策
- 着火性, 燃焼速度の低下の回復(燃費改善)
 - ・ 噴射系と燃焼室形状と最適化
 - ・ 噴射圧の一層の高圧化(～300MPa?)
 - ・ 噴射の噴口数、噴射方向
 - ・ 段付き燃焼室

PCCI (予混合圧縮着火) 燃焼方式の実現可能性



- 低負荷における希薄燃焼によって超低NO_x, PMとディーゼル並みの高効率化を実現して、後処理の負担を大幅に低減することがねらい。
- ▲高負荷では爆発的な燃焼となるため適用が極めて困難。
- ▲未燃HCとCOの排出増加(燃料の壁面衝突とクエンチング)。
- セタン価、温度と混合気の不均一性に支配されるので、PCCI (Partially Premixed Charge Compression Ignition)と呼ぶべき。
- 冷始性確保、気筒間バラツキ抑制、通常燃焼との接続性等、制御が難しい。制御には、噴射制御、EGR、可変バルブ機構、圧力/火炎センサー類が必要。燃費は通常のディーゼル燃焼を超えられない。
- ガソリン車における低中負荷での燃費・排出ガス改善の可能性。
- 低温・高温における化学反応を含めた詳細な燃焼シミュレーションモデルと計測による現象解明、さらには予測手法の開発が必要。

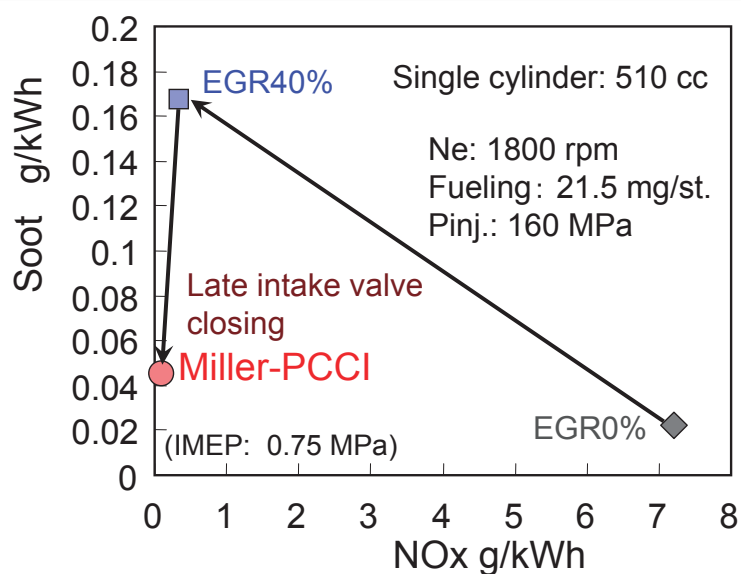
PCCI 燃焼の影響因子



PCCI 燃焼を実現する方法

方 法	特 徴
早期噴射	▲シリンダ壁への燃料付着 ▲制御が困難 ▲高負荷運転困難(主噴射との組合せ)
遅延噴射 (MK燃焼方式)	●圧力上昇率と最高圧力の抑制 ▲燃費悪化 (高スワール比で混合促進)
低圧縮比	●混合時間の確保 ▲燃費悪化(低セタン化高圧縮比の方がベター)
吸気弁遅閉 (Millerサイクル)	●制御性良好 ▲機構の複雑性 ●燃費の確保(低圧縮比化と膨張比の維持)
共通の方法	EGR, 残留ガス(内部EGR)の利用 噴射の多段化, 可変バルブ機構

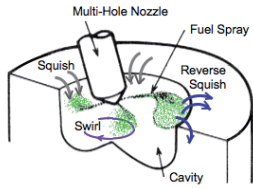
Miller PCCI燃焼コンセプトによる NOxとPMの同時低減



(早大:村田, 草鹿, 大聖, 交通研, SAE 2008)

燃焼室形状の最適化 (内燃機関シンポ2012, 早大 松崎・草鹿・大聖他)

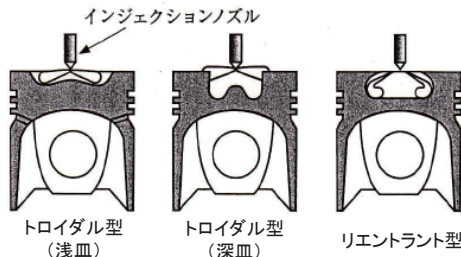
直噴型ディーゼルエンジンにおける流動



- ・スワール
- ・スキッシュ
- ・逆スキッシュ

出典: <http://www.geocities.jp/bequemereise/index.html>

代表的な燃焼室形状



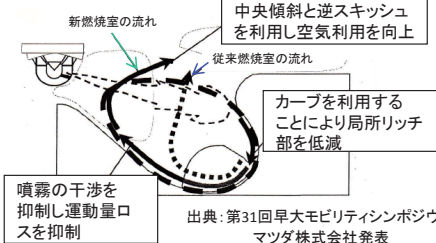
旋回流の利用

旋回流+縦渦流の利用

燃料噴射が高圧化されたことを受け、
噴射の流動によるタンブル流の利用に注目

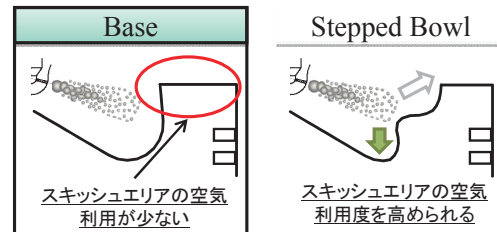
燃焼室形状変更の指針

高圧噴射を利用し、中心部の空気利用率を向上



出典: 第31回早大モビリティシンポジウム
マツダ株式会社発表

二段燃焼室形状を利用し、スキッシュエリアでの
空気利用率を向上

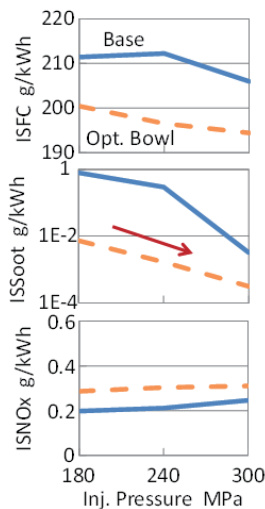


燃焼室形状の変更と、噴霧の衝突に関する
パラメータとして噴霧角の調整を行った

最適化した燃焼室形状と噴射圧力の影響

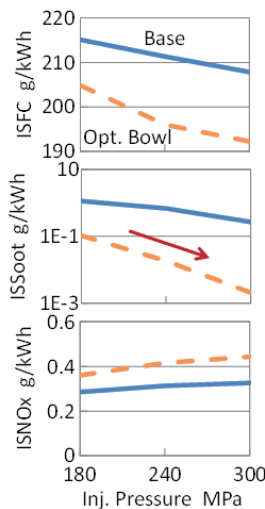
Med. Load

Fuel : 100mg/cyc.
EGR : 40% Boost : 60kPa



High Load

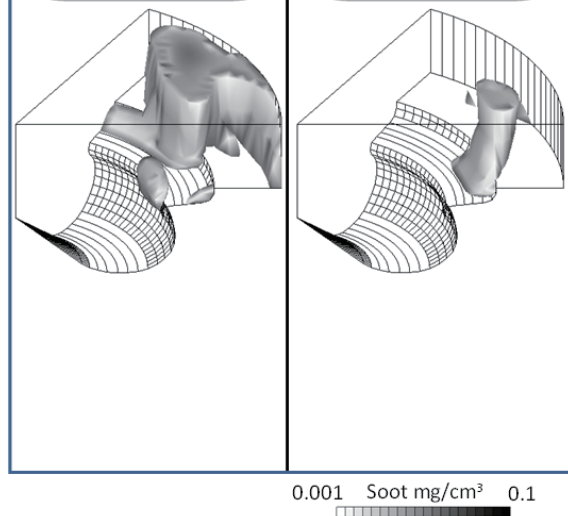
Fuel : 150mg/cyc.
EGR : 35% Boost : 120kPa



Medium Load

180MPa

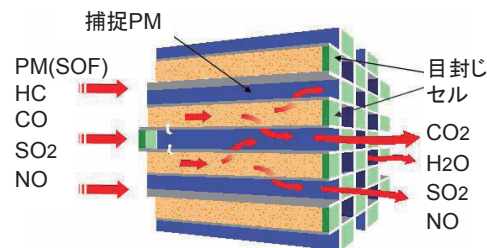
300MPa



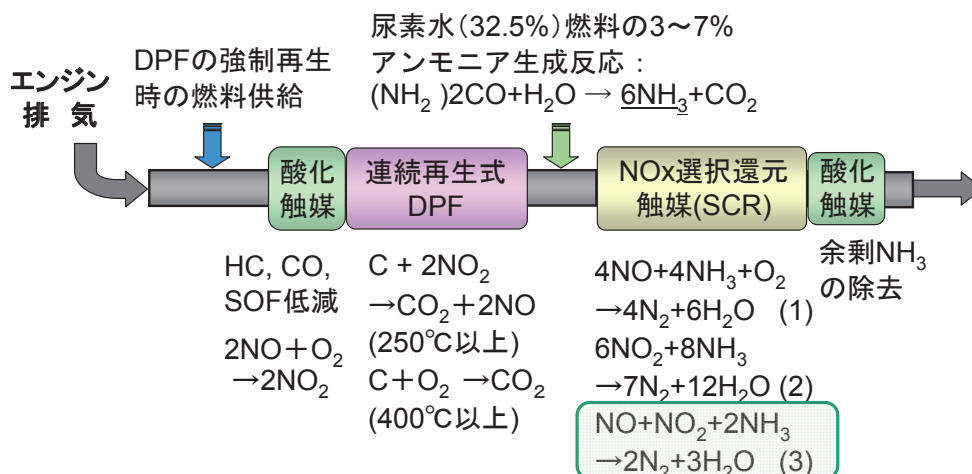
最適化形状と超高压噴射によるSootの大幅低減

壁流型ディーゼル微粒子フィルターの機能と課題

- 多孔質のセラミックフィルターでPMを捕捉し、それを再生(酸化)処理する方式。
 - ・耐久信頼性, ナノ粒子を含めた捕捉率の確保と圧力損失の抑制の両立が課題。
 - ・フィルター材料, 気孔径, 気孔径分布, 気孔率の適切な設計が必要。
 - ・連続再生: 250℃以上の高温で連続的に酸化除去する。
酸化触媒が, HCやS分で被毒する場合があります, 高温で除去する必要がある。
 - ・強制再生: 長い低負荷運転が蓄積したPMを排温を高めて酸化除去する。走行時と停車して行う場合がある。(いずれも排気温度を上げるため, 燃費が悪化する。停車時の再生は運行に不都合を招く場合がある。)
 - ・捕捉したPMを定量的に把握して再生を最適化することが課題。
 - ・NOx還元触媒との一体化の可能性
- アッシュ等による目詰まり防止のため, 10ppm以下の超低硫黄燃料, 低アッシュの潤滑油が必要。(定期的に堆積物の除去を行うことが必要な場合もある。)

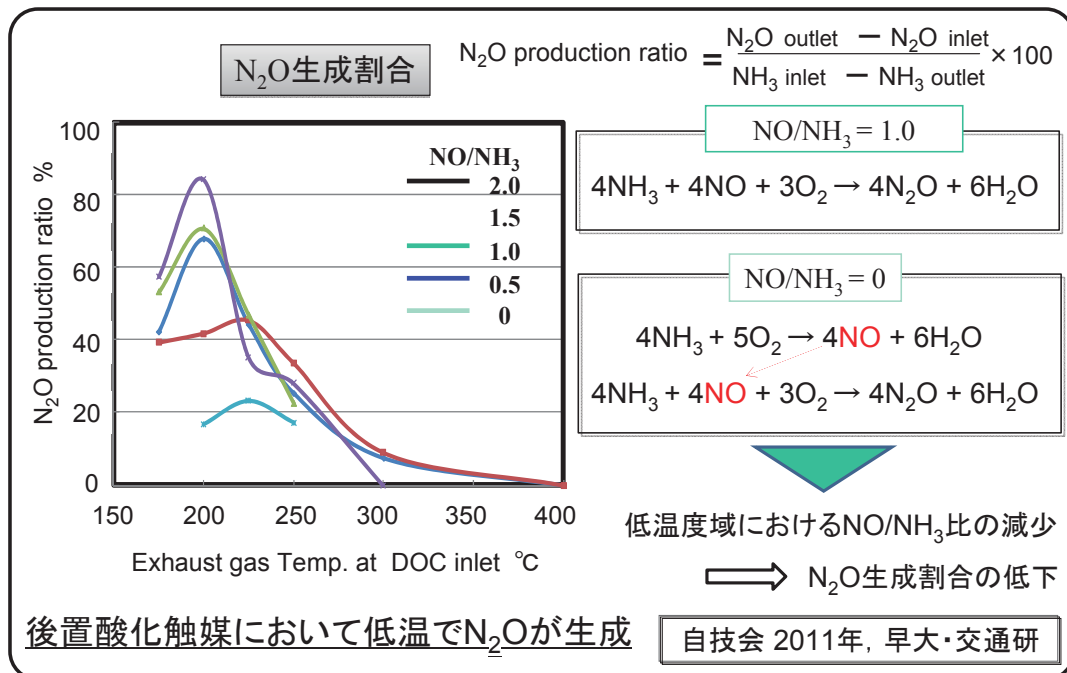


酸化触媒, DPF, 尿素SCRシステム

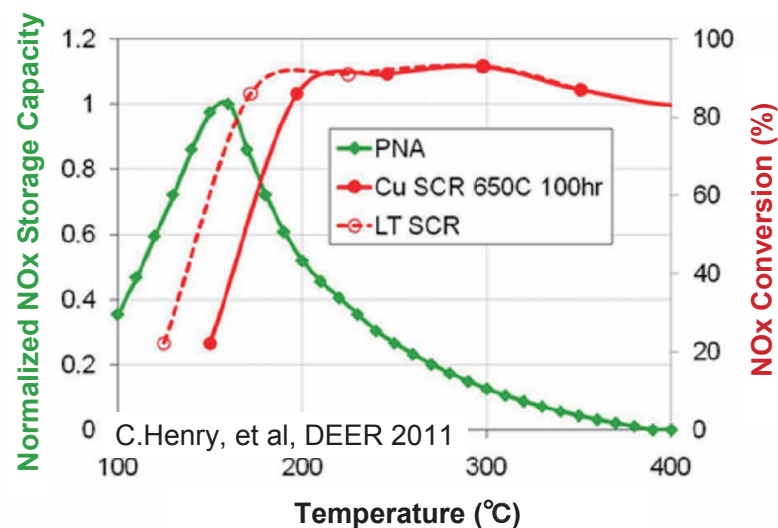


- <課題> ■ 燃焼によるNOxとPM低減, 燃費改善と後処理をどう分担するか?
 ■ DPFの強制再生での燃料消費抑制 ■ 低温でのSCR浄化率の向上
 ■ 尿素水供給量制御の最適化 ■ HCやS被毒の抑制と触媒種の選択
 ■ アンモニアとN₂Oの排出抑制 ■ コンパクト化 ■ 信頼耐久性の確保

尿素SCRにおけるN₂O生成メカニズム(定常試験結果)



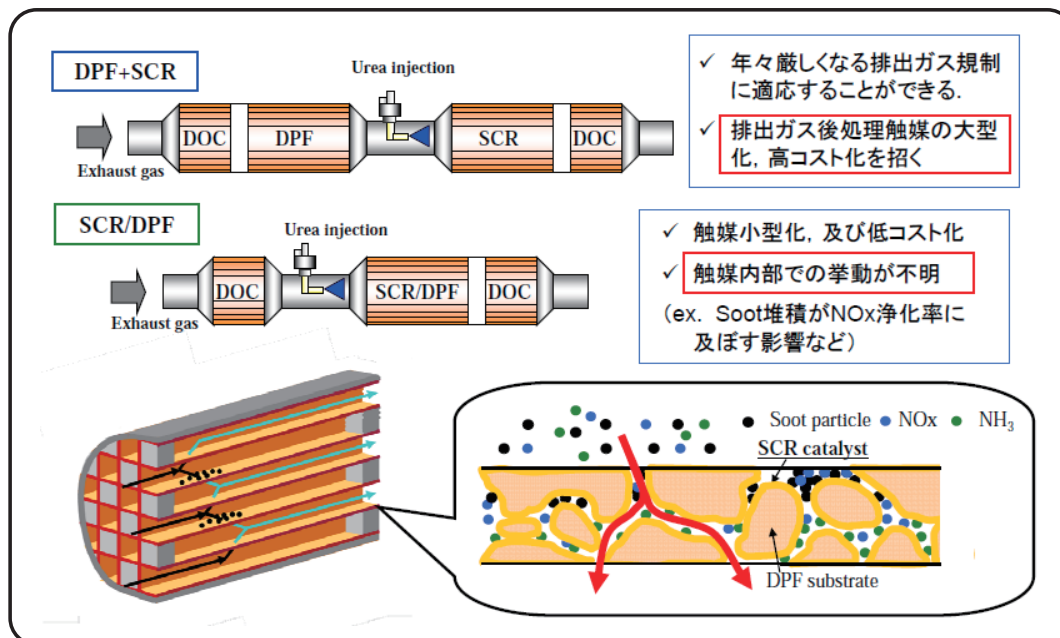
Passive NOx adsorber (PNA) と尿素SCRの組合せ



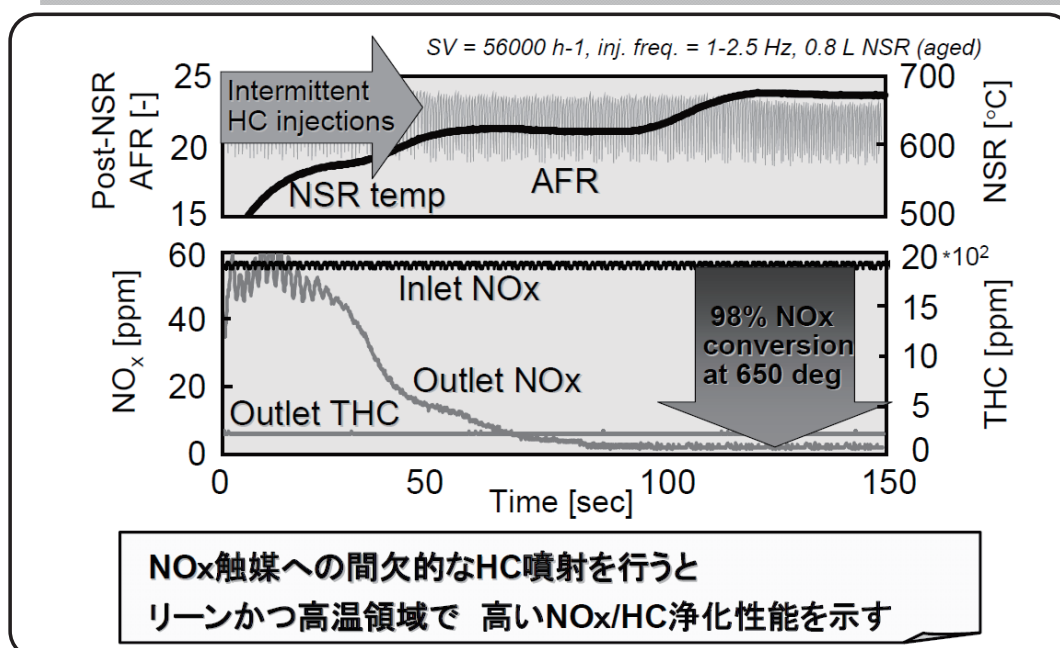
■ PNAを上流に配置し温度150℃以下で NOxを吸蔵し, 150℃以上で脱離し尿素SCRで還元する。

★その他, 異なる複数のSCR触媒の組合せや多層化のアイディアもある。

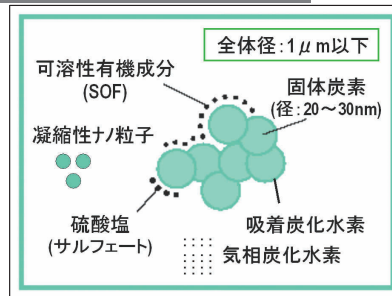
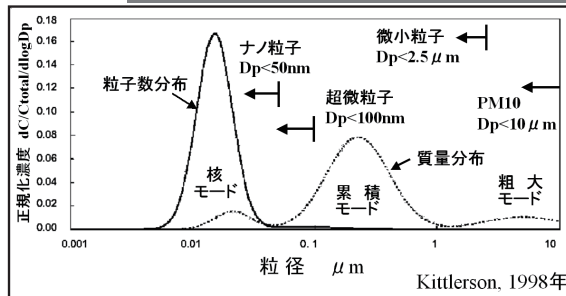
尿素SCRとDPFの一体化 (早大・中野, 草鹿他, 自技会2012年)



トヨタのディーゼル乗用車用・新NOx吸蔵還元触媒 “Di-Air” (福間, トヨタ, 自技会春季大会フォーラム2012)



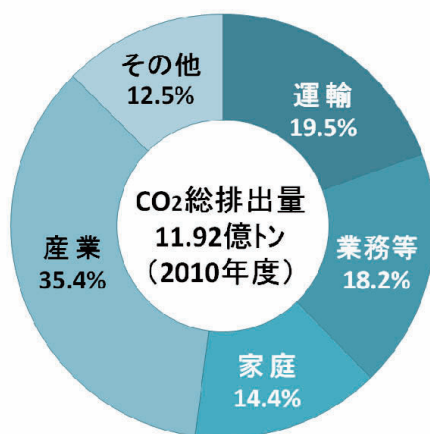
ディーゼルナノ粒子の生成と対策



影響因子	・排気温度 ・大気との希釈率 ・保持時間 ・湿度
成分	・軽油の硫黄分 ・潤滑油と添加剤 ・燃料と燃焼起源 (T90, 芳香族)
生成要因	・低温でDPF内に捕捉された成分の温度上昇時の蒸発と希釈による凝縮 ・DPF再生時, NOx吸蔵触媒でのリッチスパイク時
規制動向	・EUでのPN規制: 乗用車 6×10^{11} 個/km, 重量車 6×10^{11} 個/kWh ★直噴ガソリン車にも適用 (冷始動, 壁面衝突等で排出, GPFが必要か?) ・わが国でも“PM2.5”の環境基準が設定された。(2009年9月)
対策	・大部分はDPFで捕捉可能。酸化触媒でも除去 ・軽油低硫黄化 ・潤滑油消費量の低減, 添加剤の改善 ・DPF再生時とリッチスパイク時対策
課題	・PM2.5への影響の解明 ・測定法の確立 ・粒子数規制の可否の検討

2010年度におけるわが国の運輸部門のCO₂排出量

各部門の排出割合



分類	万トン	割合 %
自動車	20,427	88.1
自家用乗用車	11,680	50.4
自家用貨物車	3,909	16.9
営業用貨物車	4,023	17.3
バス	434	1.8
タクシー	381	1.6
内航海運	1,089	4.7
航空	919	4.0
鉄道	757	3.3
合計	23,192	100.0

★ わが国の自動車から排出される CO₂ は全体の排出量の17.1%を占めている。

ディーゼル重量車と乗用車等の2015年度燃費基準

☆トップランナー方式により、車両区別に燃費基準が設定されている。

ディーゼル重量車（車両重量3.5t超）

- 世界初の燃費基準。2002年度比で2015年度までに平均で12.2%の改善。
- 2009年からのポスト新長期排出ガス規制による燃費悪化の克服が必要。
- 車体の種類や形状が多いことを考慮し、定常運転でのエンジン燃費特性をもとに数値シミュレーションによる評価を行う。

乗用車等

- 現 状：1995年度比で22.8%改善する2010年度の乗用車燃費基準はすでに達成されている。（2004年度に約22%改善）
- 車両の重量区分を一層細分化。
- エンジンと動力伝達技術の改善効果で2010年度基準値に対して平均で29.2数%の改善が可能な見通し。2004年度比で23.5%改善，2015年度基準が達成されれば，1995年度に対して約40～50%の改善
- ガソリン車とディーゼル車の区別廃止でディーゼルには有利。
- 2020年度燃費基準が2011年に提示された。

2015年度重量車の燃費基準（車両総重量>3.5トン）

<トラック> (L/km)

車 種	基準2002年度	2015年度	改善率
トラクター以外	6.56	7.38	12.2%
トラクター	2.67	2.93	9.7%
全 体	6.32	7.09	12.2%

<バ ス> (L/km)

車 種	基準2002年度	2015年度	改善率
路線バス	4.51	5.01	11.1%
一般バス	6.19	6.98	12.8%
全 体	5.62	6.30	12.1%

自動車の燃費改善技術

燃費改善率 ◎: 10%以上 ○: 5~10% □: 5%以下

対 象		技 術 (G:ガソリン車, D:ディーゼル車)	
エンジン	新方式	◎直噴ガソリン(G) ◎ハイブリッド化 ◎ミラーサイクル ○リーンバーン, HCCI(G)	
	制 御	○アイドルストップ □減速時燃料カット □空燃比, 点火時期制御の高精度化(G)	
	機 構	□4弁化 ○可変ターボ過給 ○可変弁機構(VVT等による可変圧縮比) ◎可変気筒機構 ◎エンジンダウンサイジング	
	摩擦低減	□潤滑特性の改善 □運動部の軽量化	
駆 動・ 伝達系	ATの改善	○無段変速機(CVT) ○自動化MT(DCT) □ATの電子制御化 □ATの多段化	
車 体		◎軽量化(樹脂, 軽金属, 超高張力鋼の利用) ◎空気抵抗低減(高速時) □低転がり抵抗タイヤ	
その他		□補機類の高効率化(電動化) □廃熱利用	

ディーゼル商用車の高効率化

■物流と公共交通を担うディーゼル車の一層の高効率化は、スーパークリーン化との両立共通の課題。

- ①エンジンシステムの高効率化
- ②高過給ダウンサイジング化(低速・高トルク化(高BMEP化))
- ③ターボコンパウンド(メカニカル／エレクトリック)
- ④ハイブリッド化 ⑤排気熱の利用(ランキンサイクル等)
- ⑥軽量化(超高張力鋼等の利用)
- ⑦空力特性の改善 ⑧低転がり抵抗タイヤの利用

■信頼耐久性, 保守の容易性の確保, 低コスト化が重要

★小型車・中量車(域内輸送用), 路線バス

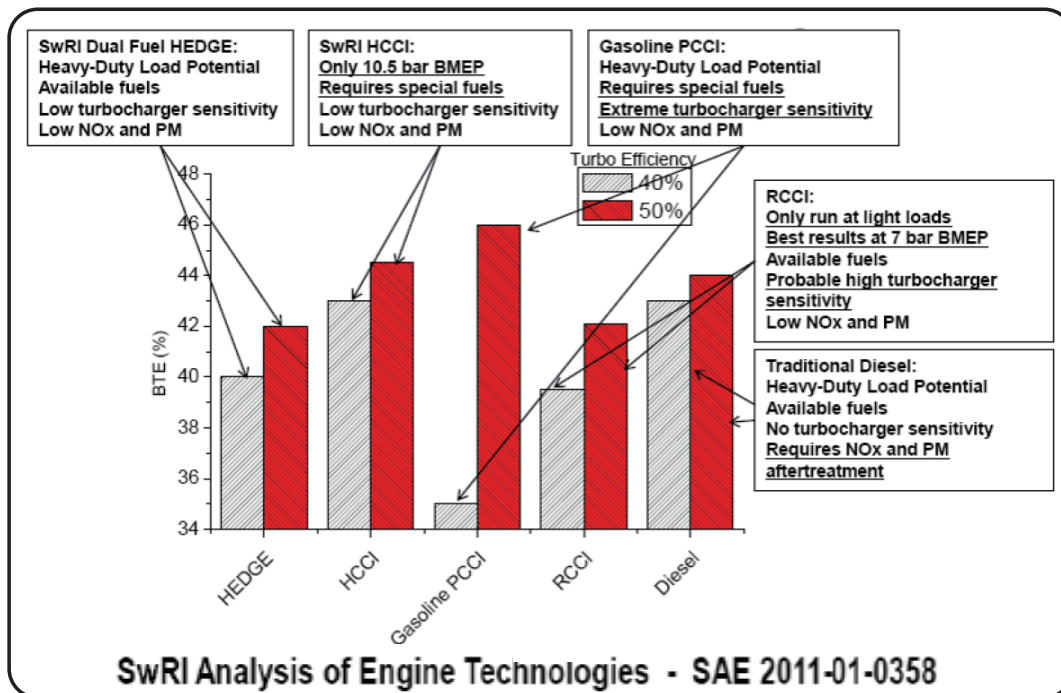
④ハイブリッド化

★長距離高速輸送用の重量車

エンジンシステムの高効率化が最重要

③, ④(シリーズハイブリッド?), ⑤, ⑦, ⑧

各種エンジン燃焼方式の熱効率比較



米国NHTSAとEPAによる大型ピックアップトラックを含む商用車の燃費基準(2014~18年)

- 2014~18年モデルの5年間を対象期間とし、2010年比で6~23%の燃費改善を求めるもので、米国初の商用車の燃費基準の実施となる。
- 対象車両は大きく3カテゴリーに分けられ、2010年実績比で、燃費と二酸化炭素(CO₂)排出量の削減が求められる。(N₂OとCH₄:0.1g/bhph以下)
 - (1) トレーラーヘッドなどを含むコンビネーション・トラクター: 最大20%
 - (2) ピックアップトラックやバン等の一般商用車
 - ・ガソリン車: 10%改善
 - ・ディーゼル車: 15%
 - (3) スクールバス、ゴミ収集車等の特殊車両を含む商用重量車: 10%

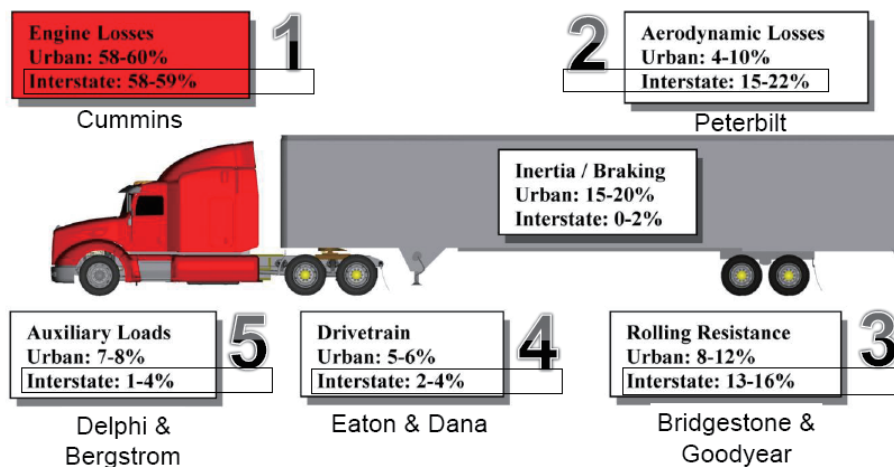
ただし、屋根の高さや重量などによって規制値が異なる場合がある。
- 詳細情報: NHTSAのウェブサイト, <http://www.nhtsa.gov/fuel-economy>
- なお、2010年4月には、乗用車と小型トラックを対象に企業平均の新規制を決定。2012年から16年までにCO₂の排出量を段階的に42%削減し、燃費を現行の27.5MPGから35.5 MPG(約15km/L)に引き上げる。
- 一層の改善を求める次期基準(2020~25年)の検討が開始されている。

米国エネルギー省 “SuperTruck Program” の概要

- ”21st Century Truck Partnership”の一環
- 予算と期間
 - ・DOEの助成(50%補助)約100億円／4社
 - Cummins, Navistar, Daimler (DDC), Volvo
 - ・5年間:2010年～2014年
- 目 標:
 - ・輸送効率全体を50%改善する。
 - トラクター／トレーラーの車両技術で30%達成
 - エンジン技術で20%達成
 - 正味熱効率(BTE)50%達成(42%→50%)
 - さらに, 正味熱効率55% の見通しを付ける。
- 課 題
 - ・費用対効果 ・ロバスト性 ・軽量化
 - ・低燃費と低排出ガスの両立
 - (NOx後処理システムの簡素化)
 - ・そのための燃料性状の決定(デュアル燃料の利用?)

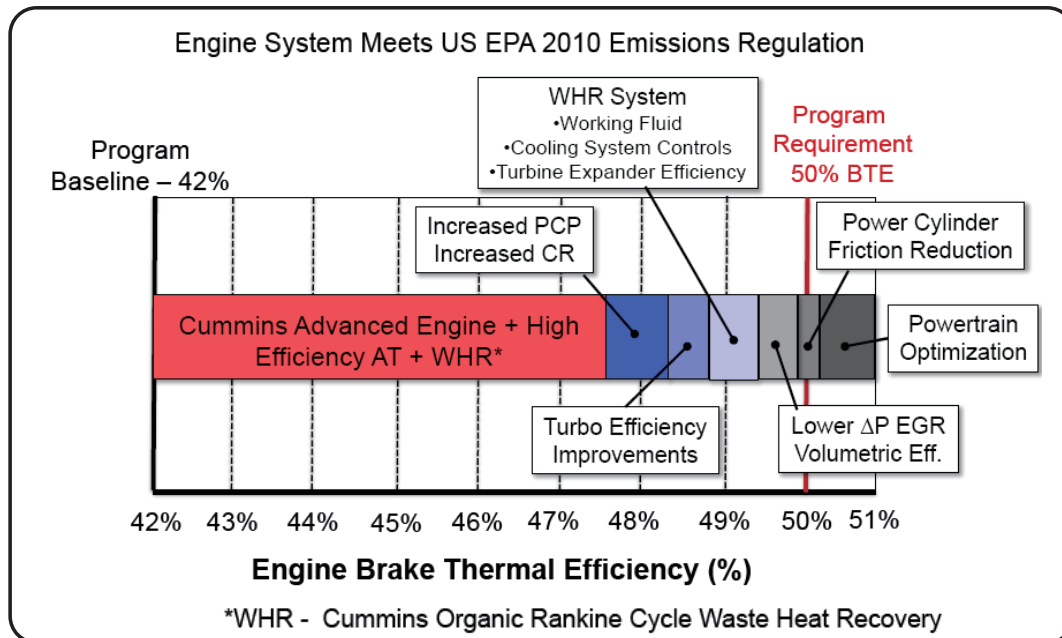
Cummins社の総合的燃費改善手段 米国DOEのSuperTruck プログラム(2010~2014年)

Analysis of 27 Drive Cycles for Class 8 Vehicles
with a Variety of Seasons (Summer, Winter, etc.)

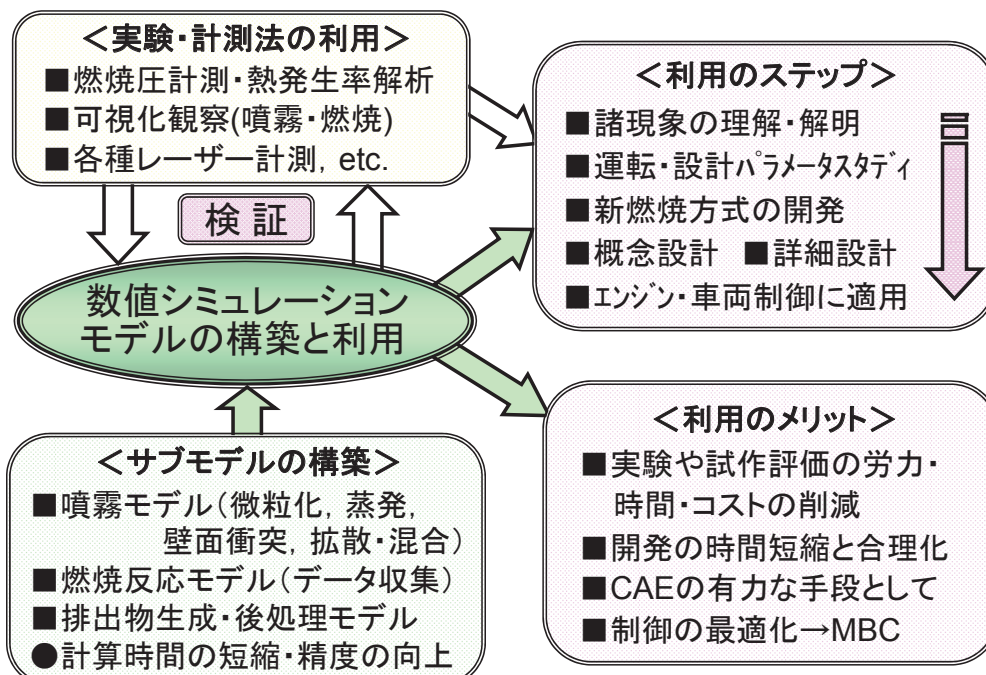


Analyze: Where is the energy going? Identify priority.

Cummins社による熱効率達成目標達の予測 —解析とコンポーネント評価による—(2012年)



エンジン燃焼システムの研究開発・設計に 関わる数値シミュレーションの役割



エンジン制御の方法論の新たな展開

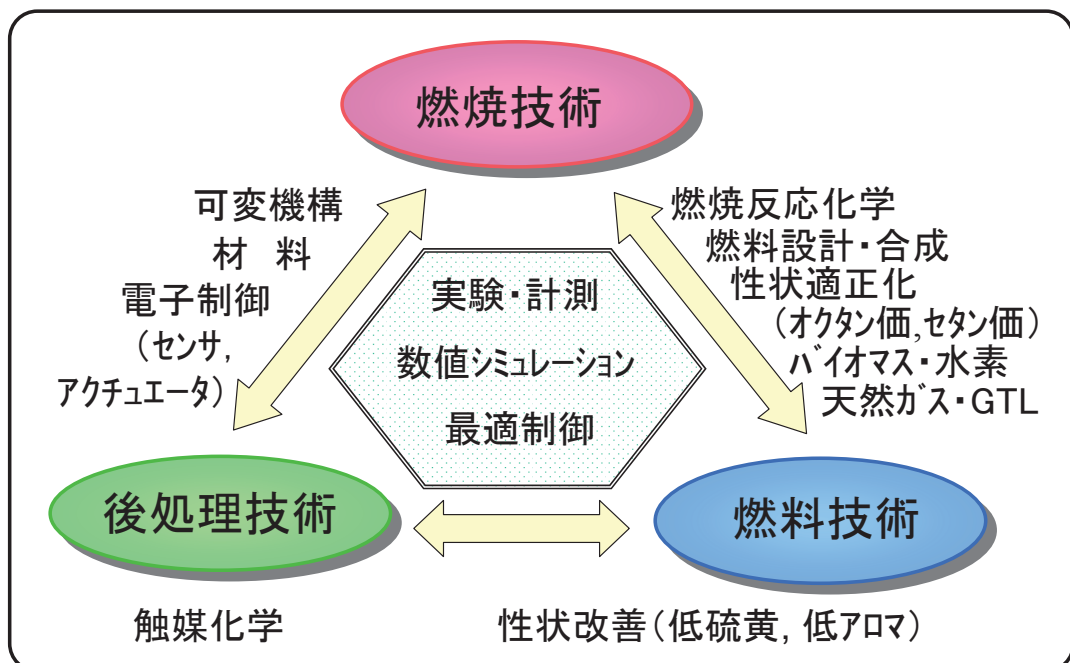
■ “Map-Based Control”の限界

- ・今後の排出ガス規制と燃費基準の強化により、対策技術が高度化し、エンジン制御用のデータとパラメータの増大
- ・エンジンMapの複数・大容量化と適合・チューニングの限界
- ・各車に対応したMap作成の工数拡大
- ・定常データを使った過渡特性への対応の限界

■ “Model-Based Control”へ

- ・新たな制御ロジックに基づくMath ModelやPhysical Model による制御の迅速化と他機種への柔軟な適用性
- ・センサー、アクチュエータの利用の最小限化
- ・多車種に対する開発工数／コストの低減

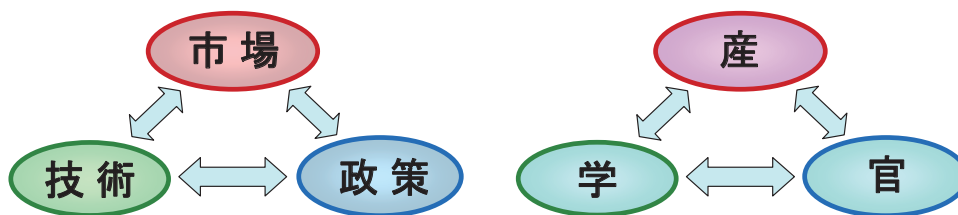
エンジンに関わる3つの技術



重量車の排出ガス対策技術の開発に関わる今後の課題

- 排気浄化と燃費改善の両立が今後の大きな課題
(2015年度燃費基準と2016年規制の達成)
- 排出ガスと燃費の試験法の整合性
- 後処理システムの一層の高性能化, 耐久試験法の確立と信頼耐久性の確保
- 実走行時の排出ガス特性の把握とその対策
(Real driving emissions, Off-cycle emissions の対策)
- ナノ粒子の排出特性とPM2.5への影響の明確化
- 後処理システムへの負担を大幅に軽減する革新的な燃焼技術の開発が不可欠
- 最新技術の提供を通じた新興国への支援も必要

持続可能なモビリティを支えるエンジン技術の研究開発に関わる課題



- 環境・エネルギー, 経済性, 利便性, 快適性, 安全性, 災害対応に配慮した持続可能な移動と輸送の手段を提供するモビリティ社会の構築を目指す。
- 革新的な動力システムの開発に関わる継続的な国の支援と産学官の連携による取組みの推進。
- 国際的な技術競争力の維持・強化。そのための人材の確保と育成。
- 人, クルマ, 物, 道路, 燃料インフラを結び, 高効率の移動と輸送を可能にする ITS, IT, ICTの開発と普及促進。
- 新興国への技術と政策に関わる適切な支援を通じた国際貢献。