

セッション1 大型車分野の先進技術

講演Ⅱ

大型車用エンジンの技術発展の動向

早稲田大学大学院
環境・エネルギー研究科
大聖 泰弘 教授



セッション1 大型車分野の先進技術

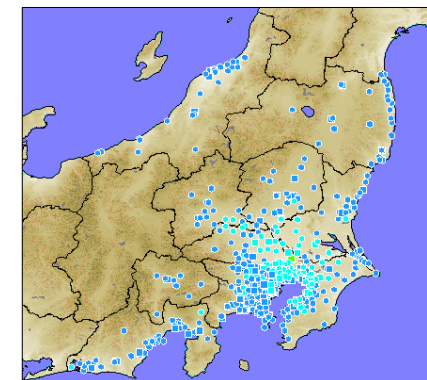
大型車用エンジンの技術発展の動向

早稲田大学大学院
環境・エネルギー研究科

大聖 泰弘



関東地方の浮遊粒子状物質濃度



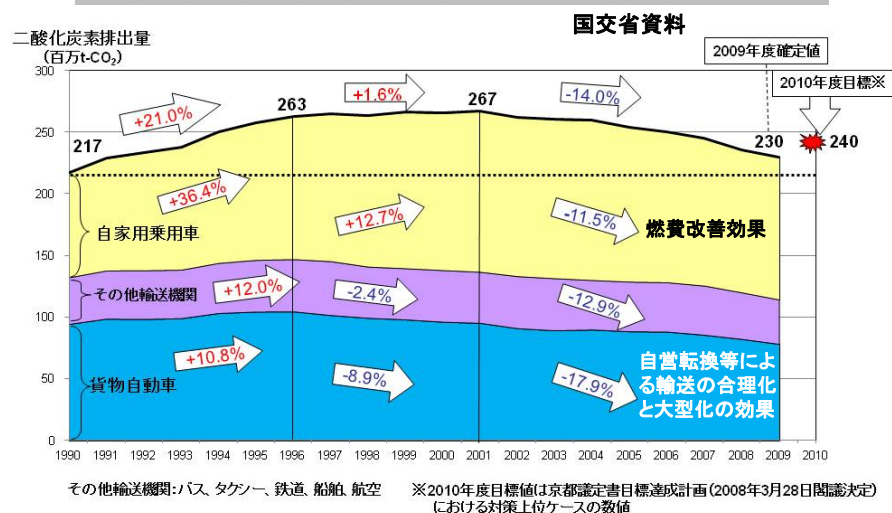
SPM濃度
○一般局 □自排局
■ 0～ 50 g/m³
■ 51～100
■ 101～200
■ 201～400
■ 401～600
■ 601～

2006年12月5日
19時現在
「そらまめ君」による

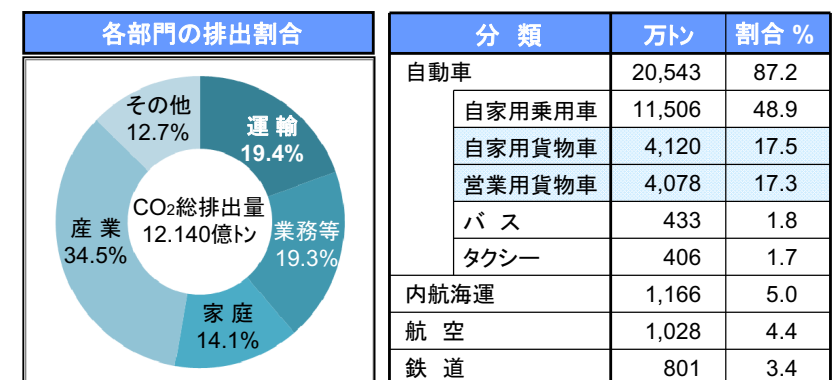
- 大気環境行政の最重要目標である2010年でのNO₂とSPMの大気環境基準の達成は、ディーゼル車排出ガス規制の強化と地域的な取組み(自動車NO_x・PM法等や首都圏ディーゼル車対策等)により概ね可能となった。
- 2009年9月、PM10に加えてPM2.5の環境基準が告示された。



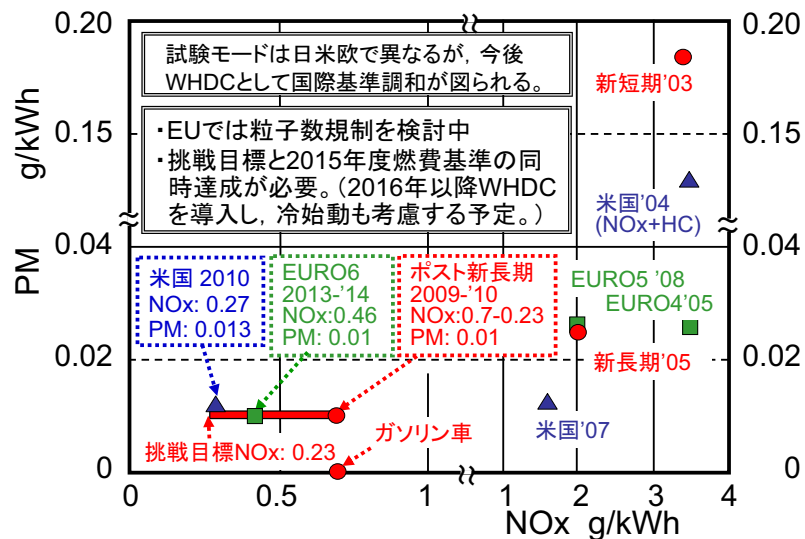
わが国の運輸部門におけるCO₂排出量の推移



2008年度におけるわが国の運輸部門のCO₂排出量



日米欧におけるディーゼル重量車のNOxとPMの規制



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) (検討中)

■ECE規則改正

- 粒子測定法 (PMP) (決定)

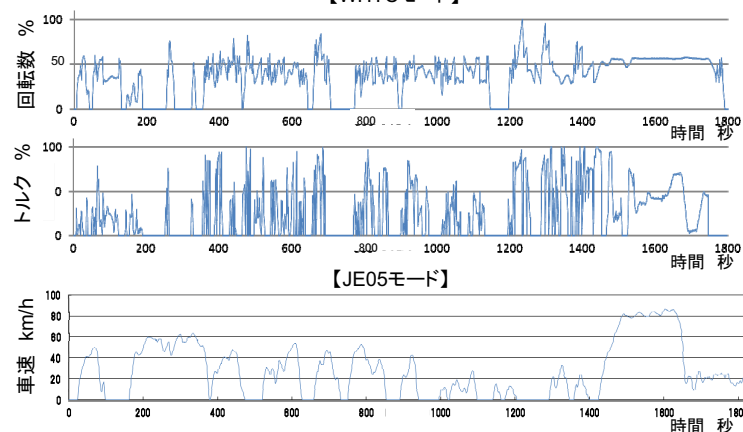
■その他

- 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 (WHTC) が策定された。【WHTCモード】



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。
- NOx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。

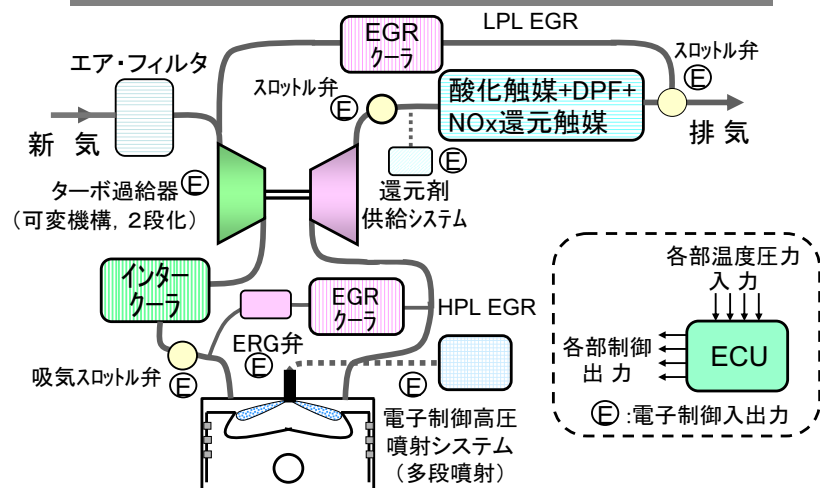
規制物質	NOx	PM	CO	NMHC
規制値 *	0.4g/kWh	0.01g/kWh	2.22g/kWh	0.17g/kWh
ポスト新長期	0.7g/kWh	0.01g/kWh	2.22g/kWh	0.17g/kWh
低減率	43%	0%	0%	0%

* 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】

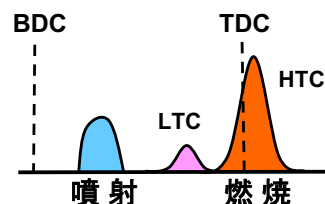
- 二段過給、二段過給導入によるエンジンダウンサイジング
- EGR率の増大、EGR制御の高度化、一部車種へのLP-EGRの採用
- 燃料噴射圧力の向上、PCI燃焼範囲拡大等の燃料噴射制御の高度化
- 一部車種へのターボコンパウンドシステムの採用

今後のディーゼルエンジンの排出ガス対策例



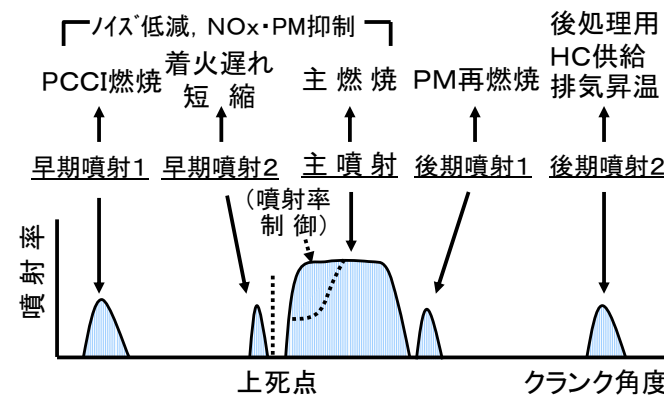
低硫黄軽油を利用して、燃料噴射系と排気後処理の最適な制御のシステム化、信頼耐久性の確保、コスト低減が重要。長期的に一層の高効率化を目指す必要がある。

HCCI (予混合圧縮着火) 燃焼方式の実現可能性



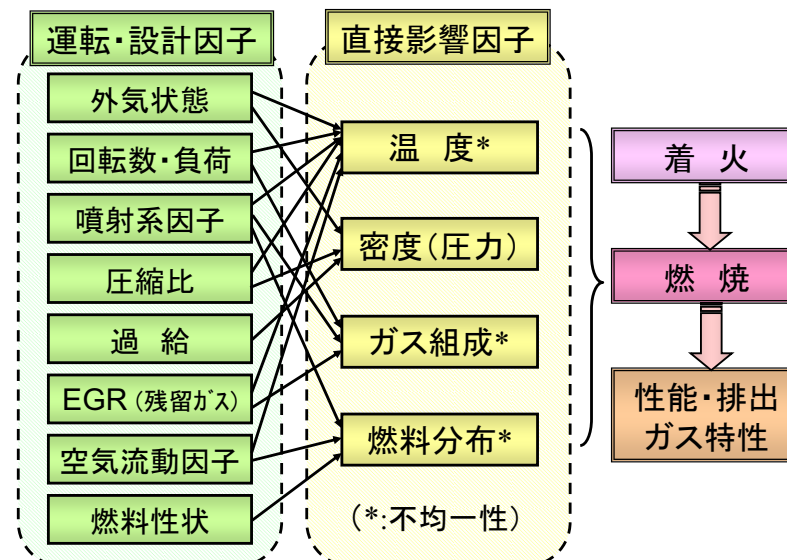
- 低負荷における希薄燃焼によって超低NOx, PMとディーゼル並みの高効率化を実現して、後処理の負担を大幅に低減することがねらい。
- ▲ 高負荷では爆発的な燃焼となるため適用が極めて困難。
- ▲ 未燃HCとCOの排出増加(燃料の壁面衝突とクエンチング)。
- セタン価、温度と混合気の不均一性に支配されるので、むしろPCCI (Partially Premixed Charge Compression Ignition)と呼ぶべき。
- 冷始性確保、気筒間バラツキ抑制、通常燃焼との接続性等、制御が難しい。制御には、噴射制御、EGR、可変バルブ機構、圧力/火炎センサー類が必要。燃費は通常のデ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。

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。

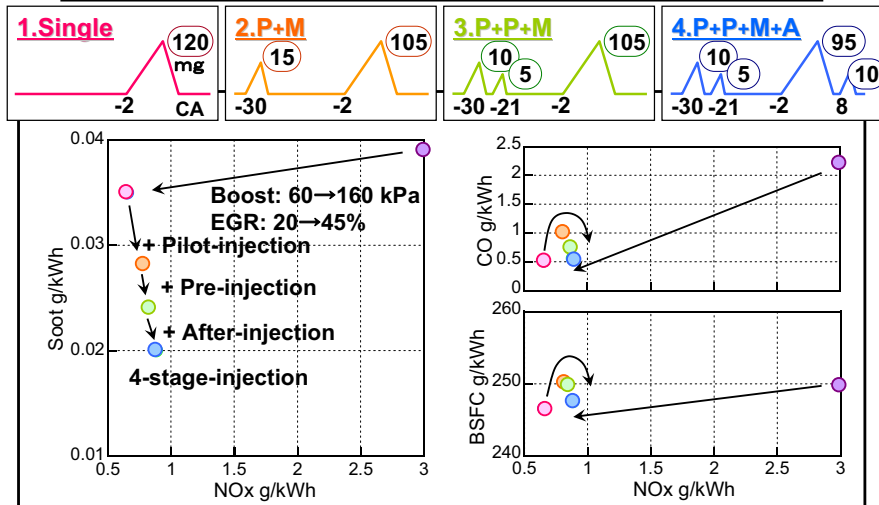
PCCI 燃焼の影響因子



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

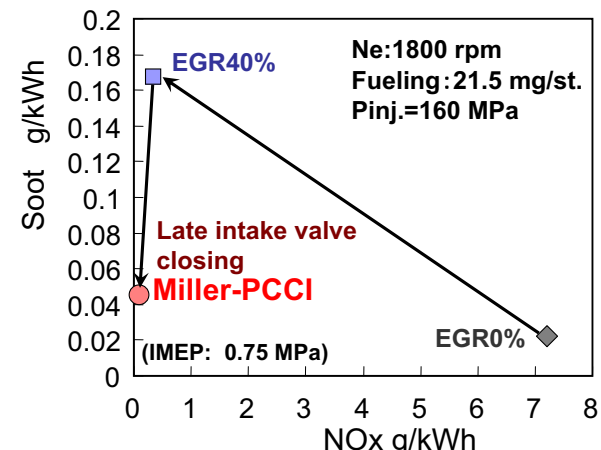
13

Single cylinder: 2L, ϵ :17, Ne:1,200 rpm, Load: 60%, Pinj: 180 MPa



Miller PCCI燃焼コンセプトによる NOxとPMの同時低減

14

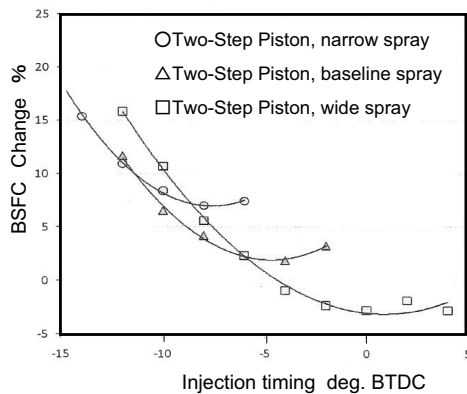
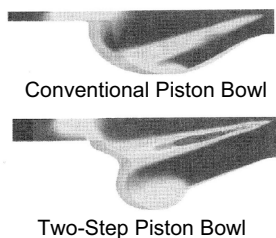


(早大:村田, 草鹿, 大聖, 交通研, SAE 2008)

高圧噴射, EGR, 段付き燃焼室の効果

15

Injection pressure: 270 MPa



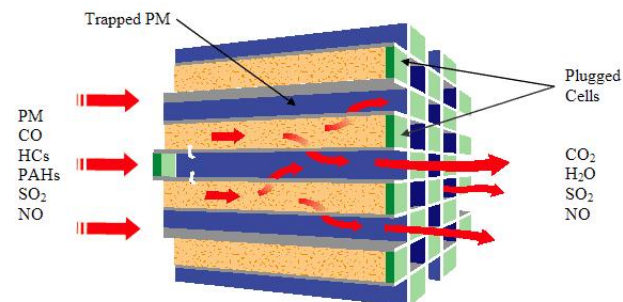
Engine Operating Point

Engine Variable	Value	Comment
RPM	1500 rpm	Mid-speed
BMEP	15 bar	High Load
EGR rate	~38%	Constant NO _x = 0.27 g/kwh
Air-Fuel Ratio	~18/1	

C. E. Roberts et al,
JSAE 20105166,
May, 2010

壁流タイプの触媒付きディーゼル微粒子 フィルター (MECA, 2007)

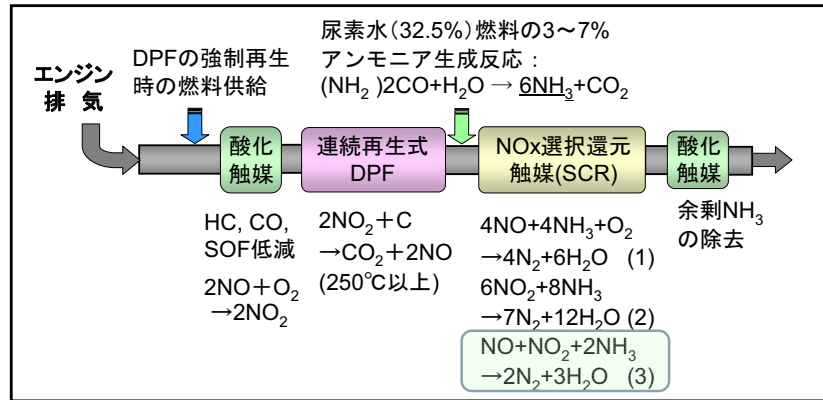
16



★フィルターで捕捉したPMの処理

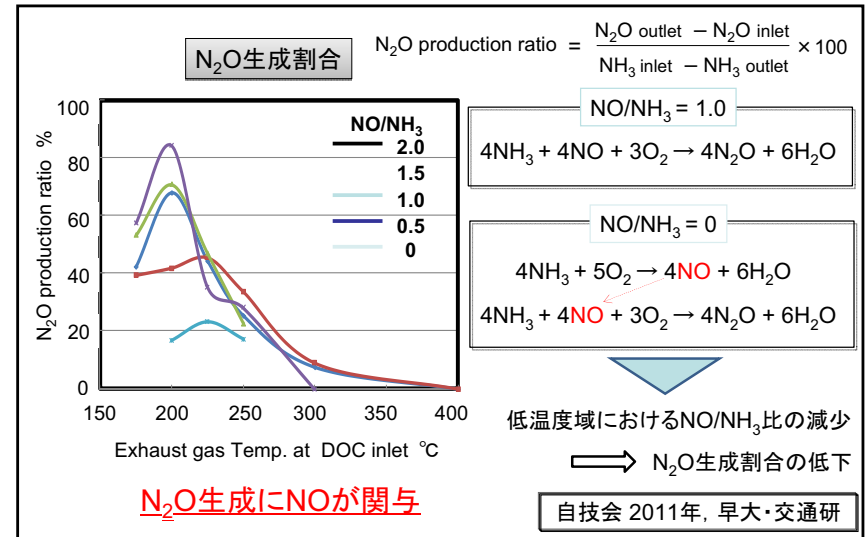
- ・連続再生: 高温では連続的に酸化除去する。
 - ・強制再生: 低負荷での運転が長く続く場合, 排気温度を高めて酸化除去する。
- ★CaSO₄等による目詰まり防止のため, 10ppm以下の超低硫黄燃料, 低アッシュの潤滑油が必要。

酸化触媒, DPF, 尿素SCRシステム

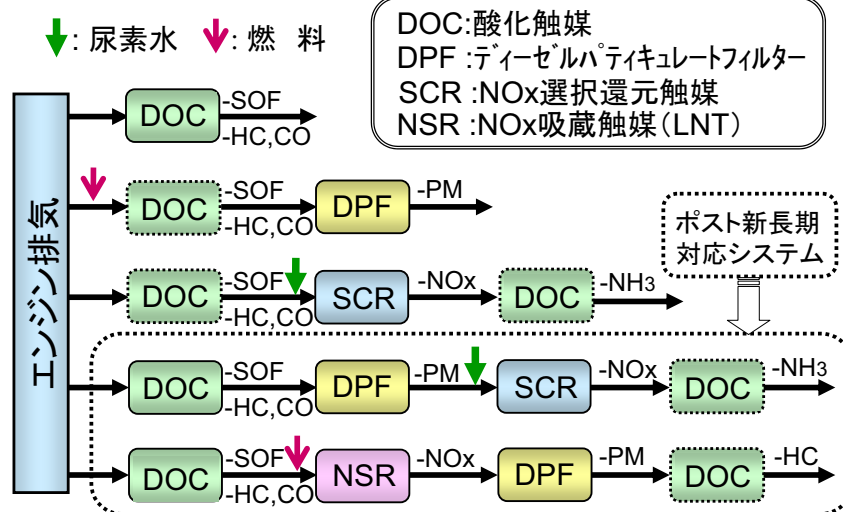


- <課題> ■ 燃焼によるNOxとPM低減, 燃費改善と後処理をどう分担するか?
■ DPFの強制再生での燃料消費抑制 ■ 低温でのSCR浄化率の向上
■ 尿素水供給量制御の最適化 ■ 触媒種の選択 ■ 触媒種の選択
■ アンモニアとN₂Oの排出抑制 ■ コンパクト化 ■ 信頼耐久性の確保

N₂O生成メカニズム(定常試験結果)



ディーゼル車の後処理システムの組み合わせ



エンジン制御の方法論の新たな展開

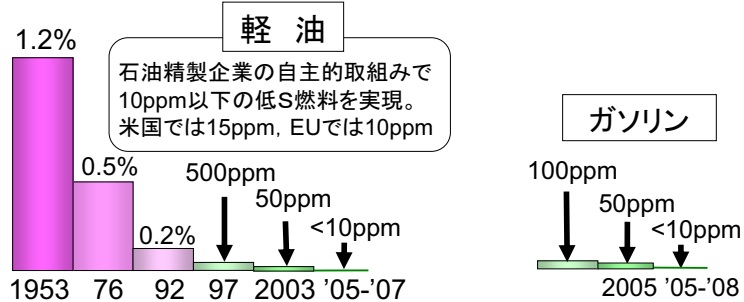
“Map-Based Control”の限界

- ・ 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, アクチュエータの併用
- ・ 多車種に対する開発工数/コストの低減

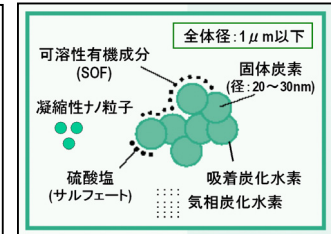
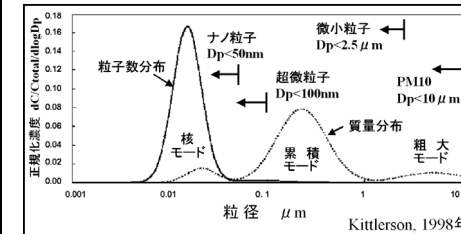
わが国における燃料中の硫黄低減



- 新長期規制, ポスト新長期規制に対応してNOx吸蔵還元触媒を用いるリーンバーン直噴ガソリン車とディーゼル車における利点
 - ・硫黄による被毒劣化の抑制(耐久性の向上)
 - ・被毒回復制御に必要な燃料消費量の抑制
- 精製過程での超深度脱硫によるCO2増加
 - ・NOx吸蔵還元触媒装着車の普及促進で克服
- 課題: 2009年以降, NOx吸蔵触媒では、ゼロS燃料が必要?

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
 - ・潤滑油とその添加剤
 - ・燃料とその燃焼起源(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, NSRでのリッチスパイク時
- 規制動向
 - ・EUでは, 乗用車: 6×10^{11} 個/kmの規制 ($D_p > 23\text{nm}$)
 - ・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
- 課題
 - ・PM2.5を含む健康影響の解明
 - ・測定法の確立
 - ・規制の可否



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年ポスト新長期排出ガス規制, さらに2016年以降の次期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年度燃費基準が検討開始。2012年に基準値が決定される予定。

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)	
エンジン	新方式	◎直噴ガソリン(G) ◎ミラーサイクル	◎ハイブリッド化 ○リーンバーン, HCCI
	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 ○可変弁機構(VVT等による可変圧縮比) ◎可変気筒機構 ○可変・多段ターボ過給 ◎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) □ATの電子制御化	○自動化MT(DCT) □ATの多段化
車 体		◎軽量化(樹脂,軽金属,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極めて重要な共通課題。スーパークリーン化が前提

- ①エンジンシステムの高効率化
- ②高過給システム
- ③ターボコンパウンド
- ④ハイブリッド化
- ⑤軽量化(超高張力鋼等の利用)
- ⑥空力特性の改善
- ⑦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

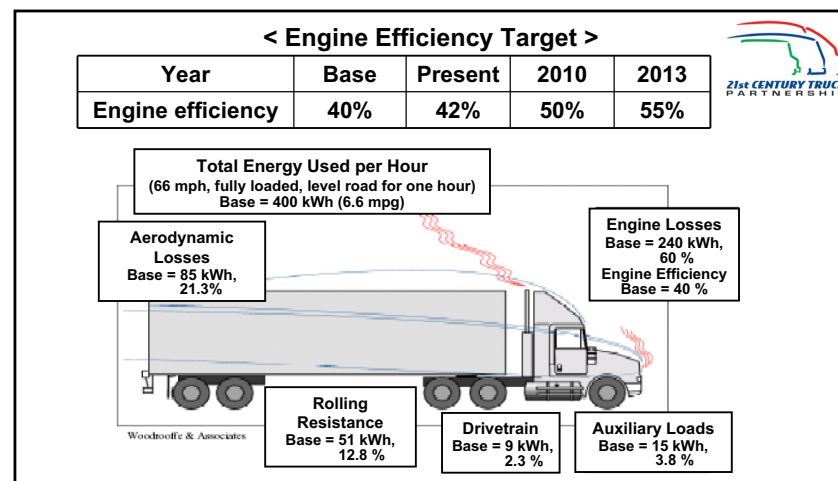
③, ④(シリーズハイブリッド?), ⑥, ⑦

米国における商用車の燃費基準の提示 (NHTSAとEPA発表, 2011年11月)

- 2014~18年モデルの5年間を対象期間とし, 最大20%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(gal/ton-mile)と二酸化炭素(g/1,000 ton-mile)排出量の削減が求められる。
 - (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。
- N₂OとCH₄も規制対象とする。いずれも, 0.10g/bhph
- 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の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)に引き上げるとしている。

Heavy Vehicles U.S. Climate Change Technology Program – Technology Options for the Near and Long Term, The 21st Century Truck Partnership (U.S. DOE) –



ディーゼルエンジンのダウンサイジング ～利点と課題・対策～

<●:利点, ■:課題>

● 相対的な負荷率の向上による正味熱効率の向上

- ・ 高い機械効率条件での運転
- ・ 過給による排気エネルギーのコンプレッサでの回収
- ・ 相対的な熱損失の抑制

● エンジンシステムの小型軽量化と搭載性の向上

■ 過給システムの変可変, 多段化と燃焼の高圧化

- ・ エンジン構造と関連部品の強化
- ・ 機械損失の増大抑制

■ 燃焼室の容積の縮小化と形状の最適化

■ ヒートマネジメントの最適化

- ・ インタークーリング
- ・ エンジン冷却
- ・ EGRクーリング

- ・ V型から, 直列型
エンジンへの回帰
- ・ 気筒数の低減

排気エネルギーの回収・利用技術

～エンジンの膨張終了時状態 (T₄, P₄) におけるエネルギーの有効利用～

$$W_{ex} = m_{ex} \{ h_4 - h_0 - T_0 (s_4 - s_0) \}$$

$$= m_{ex} [C_p (T_4 - T_0) - T_0 \{ C_p \ln(T_4/T_0) - R \ln(P_4/P_0) \}]$$

ここに, W_{ex}: 定常流れ系での最大仕事, 周囲の大気状態: T₀, P₀

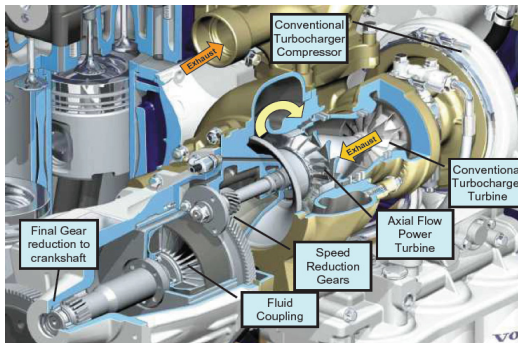
- メカニカル・ターボコンパウンド
- エレクトリック・ターボコンパウンド
- ランキンサイクル
- 熱電素子 (ゼーベック素子)

比較的大排気量で定常運転頻度の高いエンジンに適性がある。

★ 共通課題 ・ 5%～10%程度の燃費向上が目標

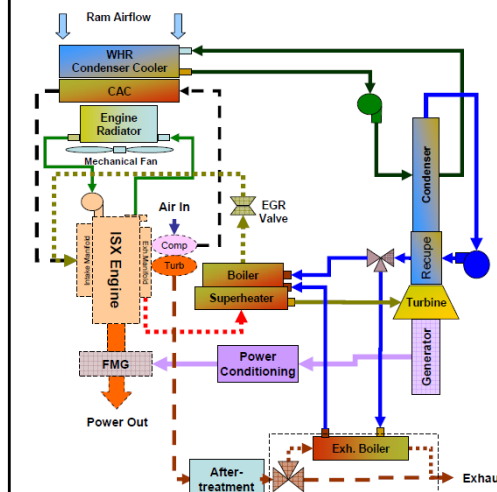
- ・ ジェネレーター補機類駆動・バッテリーのシステム構成
- ・ 排気圧力・温度の変化に対する制御
- ・ システムのコンパクト化と車両への搭載性
- ・ 耐久・信頼性の確保, メンテナンスの容易性
- ・ 費用対効果の確保

メカニカル・ターボコンパウンドシステム Volvo D12 500TC (ICCT, 2008年)



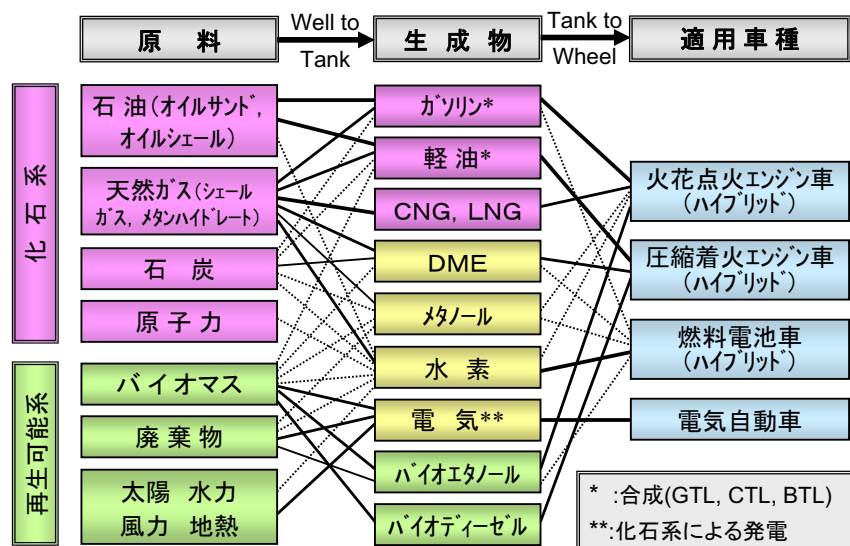
- 低圧タービン出力をクランクシャフトに伝達する複雑な高減速比機構が必要。
- 大排気量エンジンで一定の高負荷条件で運転する用途に適性がある。

米国Cummins社のWHRシステム ～クラス8トラクターの10%燃費改善～ (2008年)



- ・ Extracts Waste EGR Heat primarily -
- ・ Takes in Waste Exhaust Heat when off-peak
- ・ WHR Loop kept at peak power as much as possible
- ・ ~8% efficiency benefit across the drive cycle.
- ・ >8% improvement at cruise
- ・ 'More Electric' Accessories will add 2% benefit

将来の自動車用燃料・エネルギーの生成ルート



エンジンに関わる3つの技術

