

クリーンディーゼルエンジンの燃焼系開発と噴霧レーザー計測

大学院工学研究科 機械システム工学専攻
流体工学研究室 西田 恵哉

流体工学研究室では、マツダ株式会社パワートレイン技術開発部と共同研究を実施し、SKYACTIV エンジン(ディーゼルおよびガソリン)の燃焼系開発のための基礎研究を行ってきました。テーマは下記の3つです。

- 次世代直噴ガソリンエンジンのための燃料噴霧技術
- ガソリンエンジン噴霧燃焼の CFD シミュレーション検証のためのデータベース
- 直噴ディーゼルエンジンの噴霧/混合気形成と燃焼の機能開発

各テーマともエンジンの性能を動力計で測定するような会社で行う実験ではなく、燃料噴霧の基本的な特性を解明するリグ試験を行っています。高温高压容器中に燃料を噴射して噴霧中の燃料液滴と蒸気の濃度分布を、流体工学研究室で開発した世界でオンリーワンの計測法「2 波長レーザー吸収散乱(Laser Absorption Scattering: LAS)法」で計測し、CFD シミュレーションの計算結果の高精度化のための検証データを提供します。また高速度ビデオカメラを使った燃料噴霧や火炎の時系列観察、火炎画像の画像解析による火炎温度とすす濃度の計測を行います。これらの研究が SKYACTIV エンジンの開発、例えばガソリンエンジンの噴霧と点火プラグの位置関係、ディーゼルエンジンのピストンキャビティ燃焼室に対する噴霧軸角度の決定、などに役立てられました。様々なスペックの燃料噴射ノズルを高温高压容器に取り付けるため、ノズルアダプターや取り付け治具をフェニックスファクトリーで短期間に製作しています。

話は変わり、エンジンの発達の見ると、いくつかの素朴な疑問が湧いてきます。その一つは

- 「エンジンサイクルが吸入・燃焼行程と排気行程だけだったところに、Otto 博士は、なぜ圧縮行程を入れることを考えたのか?」。

この答えにはエンジンの研究者にも種々の意見があるようです。

またエンジン燃焼系技術開発の中で、常識を越えたところに解があった、という事例があります。

- 「実験範囲の設定、その範囲外に延長線上でない現象」:
液滴の壁面蒸発において、壁面温度が高い時ライデンフロスト現象が起こると、壁面温度が低い時より蒸発が遅くなる。
- 「常識の逆転」:
他段噴射において、高噴射圧の方が噴霧先端到達距離が抑制される。
- 「限界の峠を越えるとパラダイス」:
ディーゼルエンジンの超低 NOx・スモークの HCCI(予混合圧縮自着火)燃焼はノッキング限界の先にあった。また SKYACTIV ガソリンエンジンの高圧縮比化の出発点は、とにかく非常識をやってみようのチャレンジ精神だった。

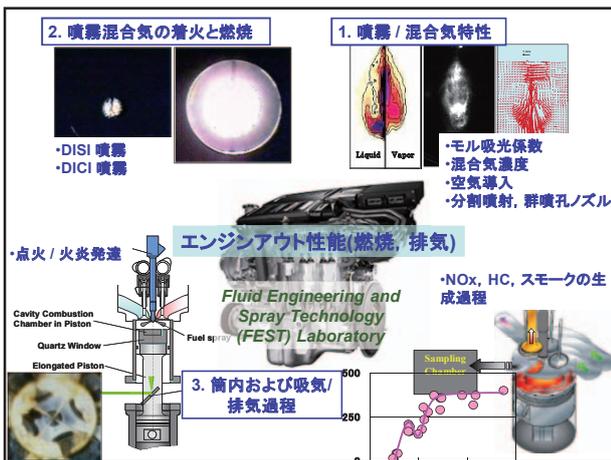
講演では上記のトピックスについて、参加者にも意見を出してもらいながら、話を進めました。

クリーンディーゼルエンジンの燃焼系開発 と噴霧レーザー計測

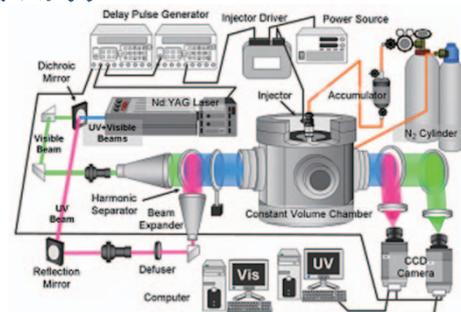
西田 恵哉
工学研究科機械システム工学専攻
流体工学研究室
(Fluid Engineering and Spray/Simulation
Technology: FEST Lab)

- ✓ マツダとの共同研究(SKYACTIV-G)
- ✓ SKYACTIV-Dエンジン燃焼系開発
- ✓ エンジン燃焼系開発こぼれ話

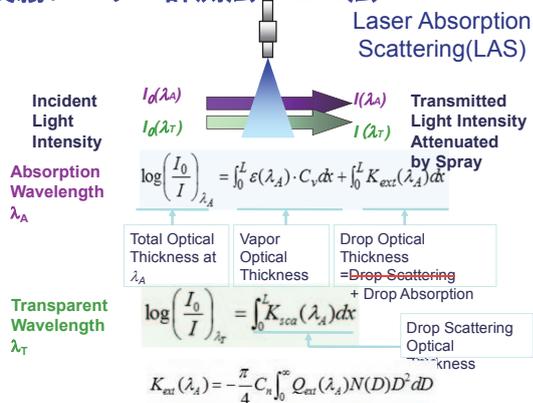
- ✓ マツダとの共同研究(SKYACTIV-G)
- ✓ SKYACTIV-Dエンジン燃焼系開発
- ✓ エンジン燃焼系開発こぼれ話



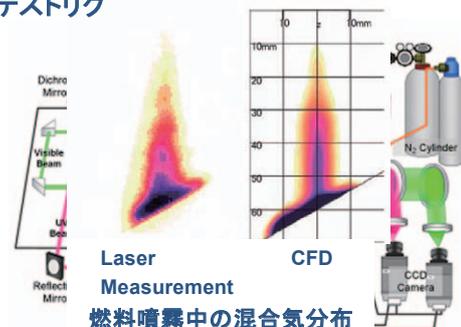
流体工学研究室 (Fluid Engineering and Spray/Simulation Technology: FEST) の噴霧燃焼テストリグ



噴霧レーザー計測法: LAS法



流体工学研究室 (Fluid Engineering and Spray/Simulation Technology: FEST) の噴霧燃焼テストリグ



広島大学 FEST – マツダ 共同研究

2000 - 2003, マツダ技術研究所
高効率・低エミッション直噴燃焼システムの開発研究

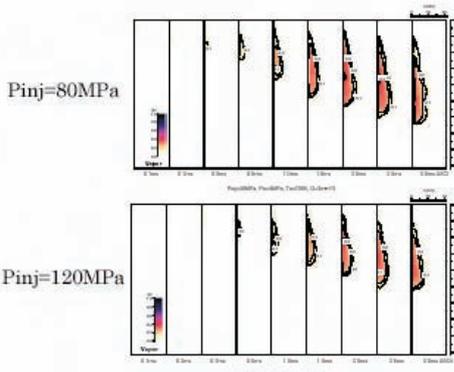
2004 - 2008, マツダ技術研究所, 2009 -, パワートレイン
開発本部
次世代直噴エンジンのための燃焼システムの開発研究

広島大学 FEST – マツダ 共同研究 (2013)

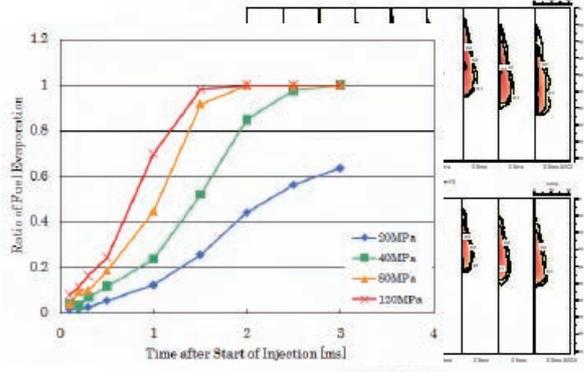
次世代直噴エンジンのための燃焼システムの開発

1. 次世代直噴ガソリンエンジンのための燃料噴霧技術
2. ガソリンエンジン噴霧燃焼のCFDシミュレーション検証のためのデータベース
3. 直噴ディーゼルエンジンの噴霧/混合気形成と燃焼の機能開発

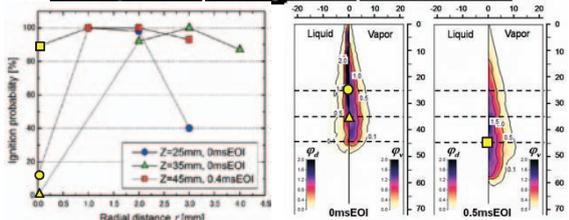
1. 次世代直噴ガソリンエンジンための燃料噴霧技術



1. 次世代直噴ガソリンエンジンための燃料噴霧技術

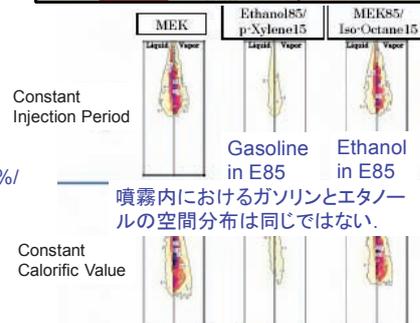


2. ガソリンエンジン噴霧燃焼のCFDシミュレーション検証のためのデータベース

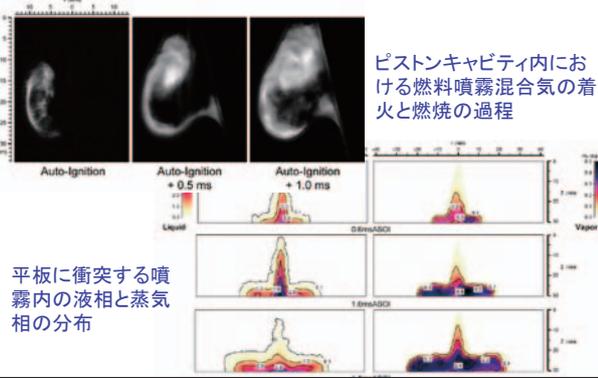


2. ガソリンエンジン噴霧燃焼のCFDシミュレーション検証のためのデータベース

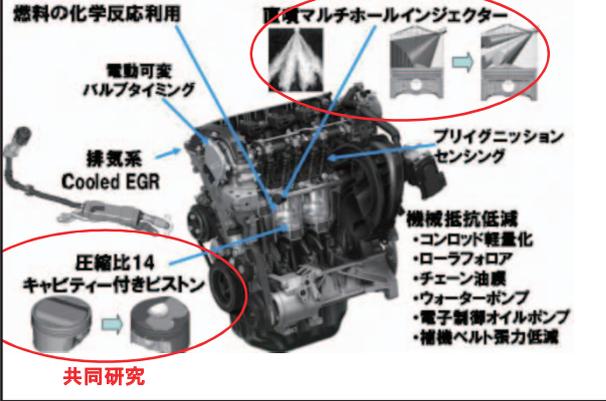
Actual Fuel	E85	
	Ethanol85%	Gasoline15%
Fuel for Measurement	Ethanol85%	p-Xylene15%
LAS Test Fuel	Ethanol	Methylstylyketone (MEK)85%
		Iso-Octane15%



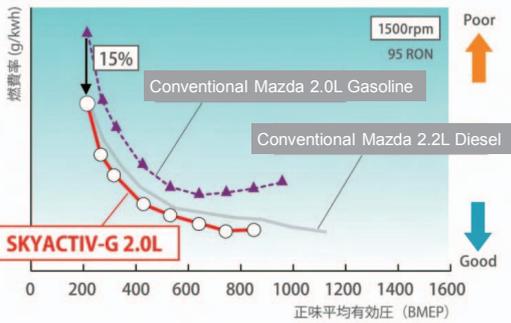
3.直噴ディーゼルエンジンの噴霧/混合気形成と燃焼の機能開発



SKYACTIV-G エンジン: 先進技術 共同研究



SKYACTIV-G エンジン: 燃料消費率



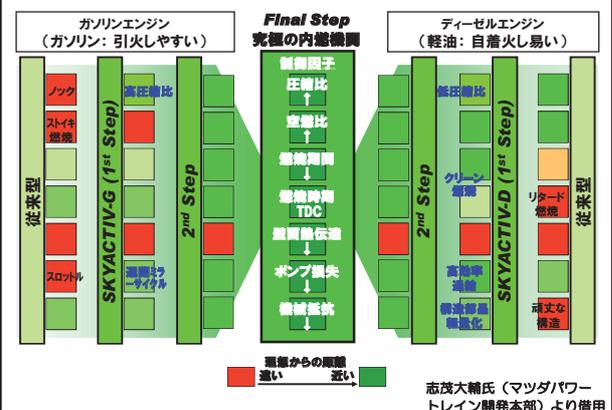
SKYACTIV-G の燃焼系技術はガソリンエンジンの燃料消費率を劇的に改善。

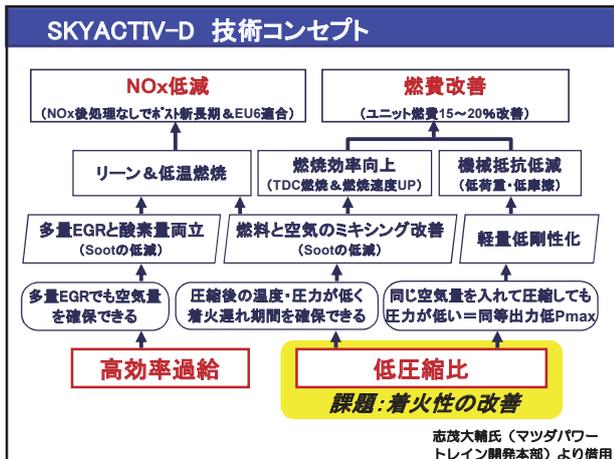
広島大学FEST – マツダ共同研究

- ▶ 広島大学 FEST 研究室は、噴霧燃焼テストリグを燃料噴霧と燃焼過程の定量的解析に使用することで、マツダのエンジン燃焼系研究開発に参加している。FEST 研究室は「マツダサテライトラボラトリー」。
- ▶ 広島大学の教員と学生がマツダ技術者と共に共同研究を推進する。
- ▶ 共同研究を通して
 - ✓ マツダはエンジン燃焼系の研究開発を加速する。
 - ✓ 広島大学学生は共同研究の一部を修士/博士課程研究として取り組む。
 - ✓ 広島大学 FEST 研究室は研究活動を活発化し論文発表を行う。
- ▶ 三方一両得。

- ✓ マツダとの共同研究(SKYACTIV-G)
- ✓ SKYACTIV-Dエンジン燃焼系開発
- ✓ エンジン燃焼系開発こぼれ話

究極の内燃機関





SKYACTIV-D 燃費低減技術

機械抵抗の低減

- 最高燃焼圧低下による回転系部品の軽量化

低圧縮比化のための着火性改善

- 着火遅れ短縮のための機能開発
- アイドルストップ迅速再始動

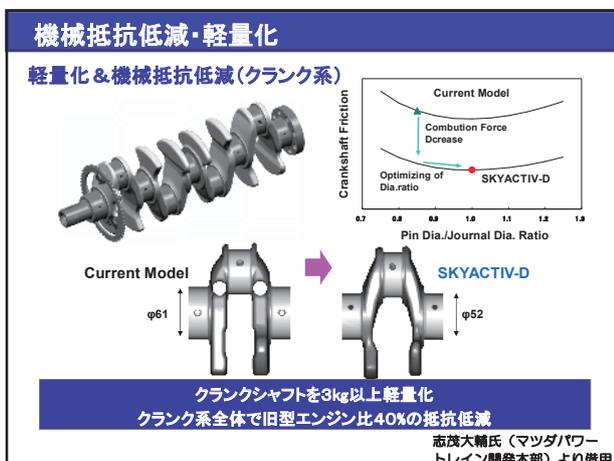
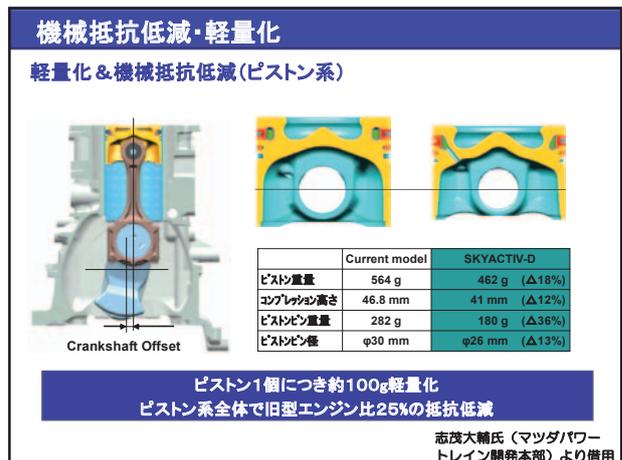
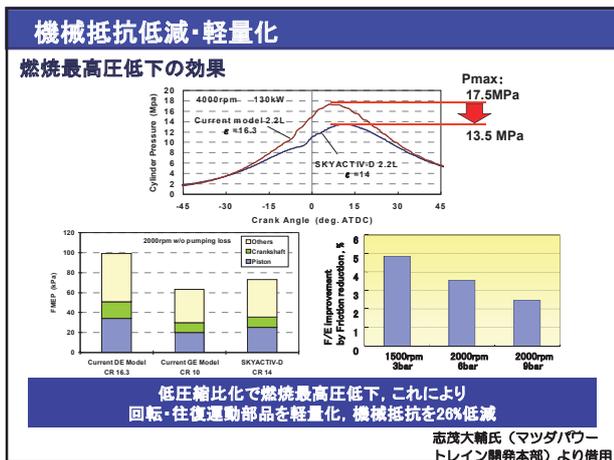
クリーン燃焼による燃費と排気の低減

- ITIC-PCI 予混合型燃焼
- エッグシェイプ 燃焼室



SKYACTIV-D

志茂大輔氏 (マツダパワー
トレイン開発本部) より借用



SKYACTIV-D 燃費低減技術

機械抵抗の低減

- 最高燃焼圧低下による回転系部品の軽量化

低圧縮比化のための着火性改善

- 着火遅れ短縮のための機能開発
- アイドルストップ迅速再始動

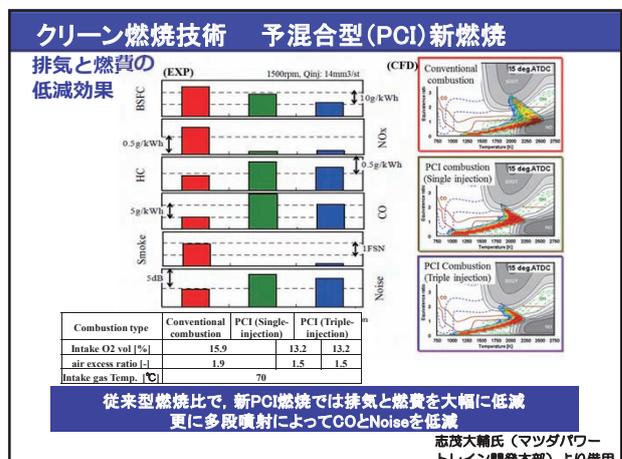
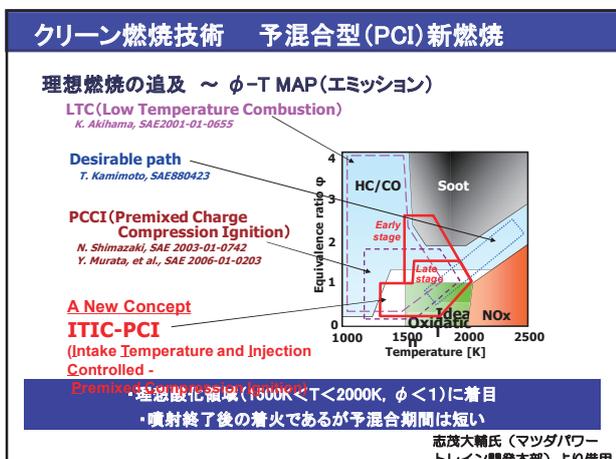
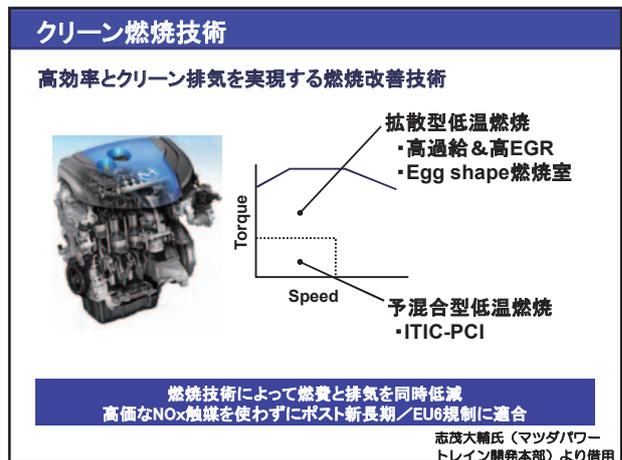
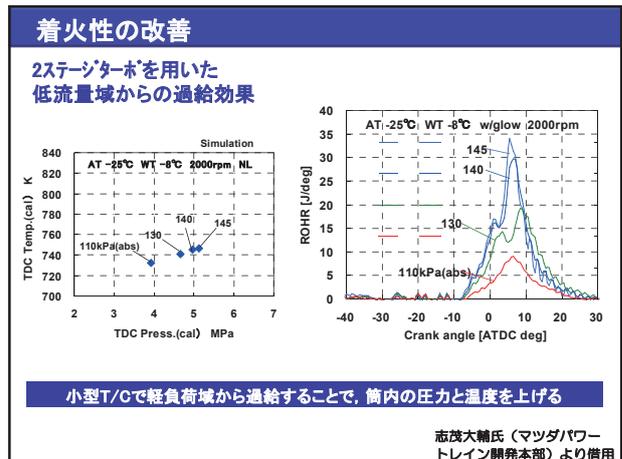
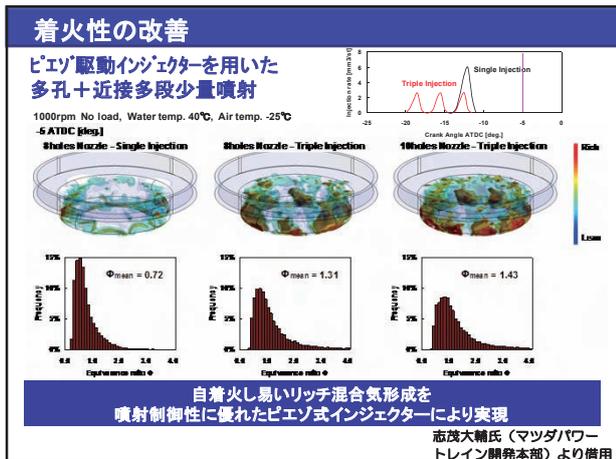
クリーン燃焼による燃費と排気の低減

- ITIC-PCI 予混合型燃焼
- エッグシェイプ 燃焼室



SKYACTIV-D

志茂大輔氏 (マツダパワー
トレイン開発本部) より借用



クリーン燃焼技術 エッグシェイプ燃焼室

Egg shape 燃焼室コンセプト

③ Improving the use of air in squish region

Unburned gas

Fuel spray

① Suppressing the stagnation of rich mixture

② Mixing of burned gas with unburned gas

Fuel-rich mixture

卵型の曲線によって運動エネルギーのロスを最小限に抑え、強い縦渦流れを形成し、燃料の混合を促進

志茂大輔氏（マツダパワーtrain開発本部）より借用

クリーン燃焼技術 エッグシェイプ燃焼室

CAEによる検証結果

Velocity 0 25 m/s

Equivalence ratio Low Rich

強い縦渦流れが燃料の混合を促進することでリッチ領域を低減

志茂大輔氏（マツダパワーtrain開発本部）より借用

SKYACTIV-D 燃費性能

燃費性能

2000rpm

20g/kWh

Current Model 2.2L

SKYACTIV-D 2.2L

BMEP (kPa)

これらの技術により、厳しい排気ガス規制に対応させながら、従来モデル比で15~20%燃費を改善した。特に軽~中負荷の実用燃費改善に努めた。

志茂大輔氏（マツダパワーtrain開発本部）より借用

まとめ

- 「低圧縮比」と「高効率過給」を用いたSKYACTIV-D技術コンセプトを開発した。
- 最高燃焼圧低下により回転系部品の軽量化と大幅な機械抵抗低減を実現した。
- 冷間着火性は、「多孔ノズルでの少量多段近接噴射」による「リッチ混合気形成」、および低流量域からの過給などによる「筒内温度上昇」「筒内圧力上昇」によって確保した。
- 新しい「予混合型 (ITIC-PCI) 燃焼」および「エッグシェイプ燃焼室」により、燃費を改善しつつ、高価なNOx触媒を使わずにポスト新長期/EU6排気規制に適合させた。
- これらの技術によって従来型エンジンから燃費を15~20%低減した。

志茂大輔氏（マツダパワーtrain開発本部）より借用

- ✓ マツダとの共同研究 (SKYACTIV-G)
- ✓ SKYACTIV-Dエンジン燃焼系開発
- ✓ エンジン燃焼系開発こぼれ話

Otto博士は、なぜ圧縮行程を取り入れることを考えたのか？

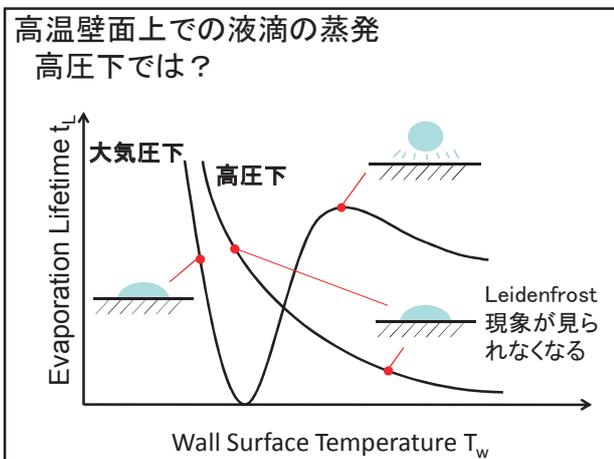
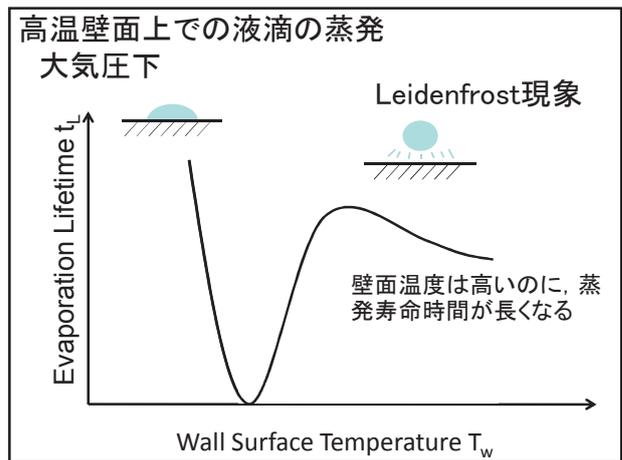
Lenoir (仏), 1860
 吸入・燃焼・膨張→
 排気の2ストローク
 サイクル

電圧縮 電気点火
 ガス機関
 0.5~3 PS, $\eta=4\%$

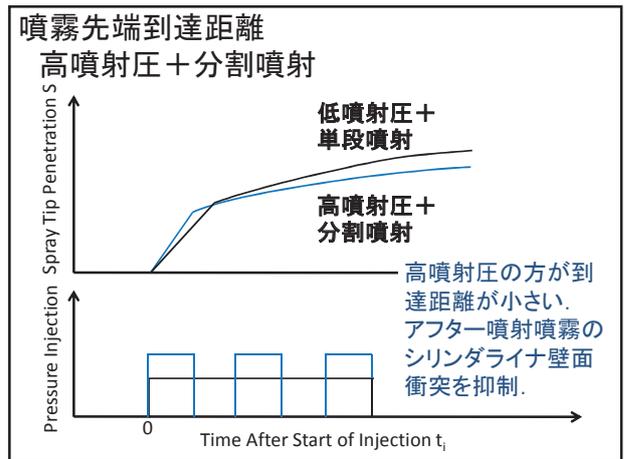
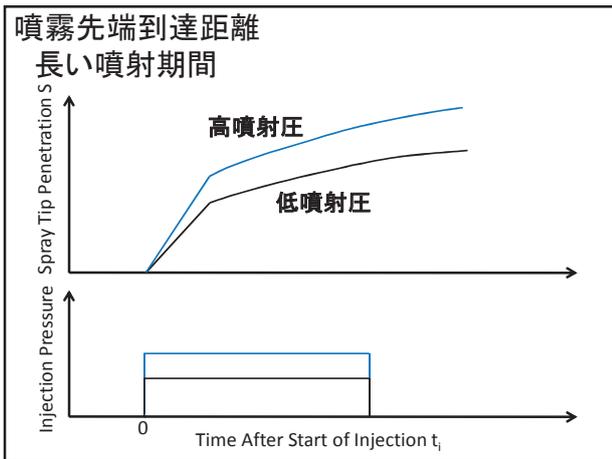
エンジン小型化したい。
 ならばピストン位置をTDCに
 戻してから燃焼・膨張行程を
 させよう。
 フライホイールに蓄積した回
 転エネルギーを利用する。

Nikolaus A. Otto (独), 1876
 ガス機関, $\eta=14\%$
 圧縮行程を取り入れた吸入
 →圧縮→燃焼・膨張→排気
 の4ストロークサイクル

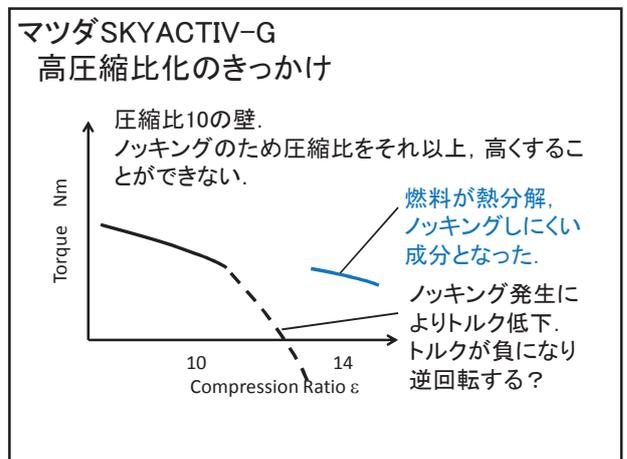
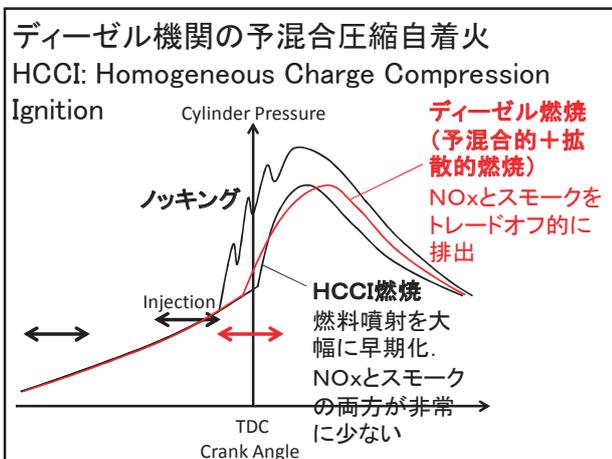
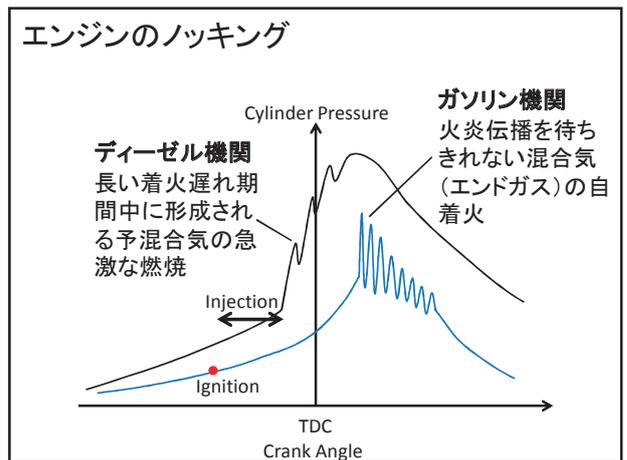
実験範囲の設定
 その範囲外に, 延長線上
 でない現象



常識の逆転



限界の峠を越えると
パラダイス



おしまい