

エンジン燃焼の大規模LES計算

本田技研工業（株）
高林 徹

自動車用エンジンに対する燃焼の計算は、一般的にRANSベースの数十並列の計算が行われており、弊社も同様である。

近年は、効率向上、排ガス低減などの観点で、燃焼などの非常に複雑な現象に対して「高い計算精度」が、また様々な運転条件に対応できるように「汎用的な手法」が求められるようになってきており、従来の手法では対応できなくなっている。

一方、コンピュータの性能や計算手法は継続的に進化している。

燃焼解析ソフトウェア-HINOCAのLESの計算を自動車用エンジンに適用したので、その内容の紹介をさせていただきます。

I. エンジン入門

II.AICEの紹介

III.HINOCAの紹介

IV.解析例

- ① ガソリンエンジンの噴霧
- ② 燃料分布のサイクル変動
- ③ ディーゼルエンジンの噴霧
- ④ ガソリンエンジンポートの定常流
- ⑤ 副燃焼室

I. エンジン入門

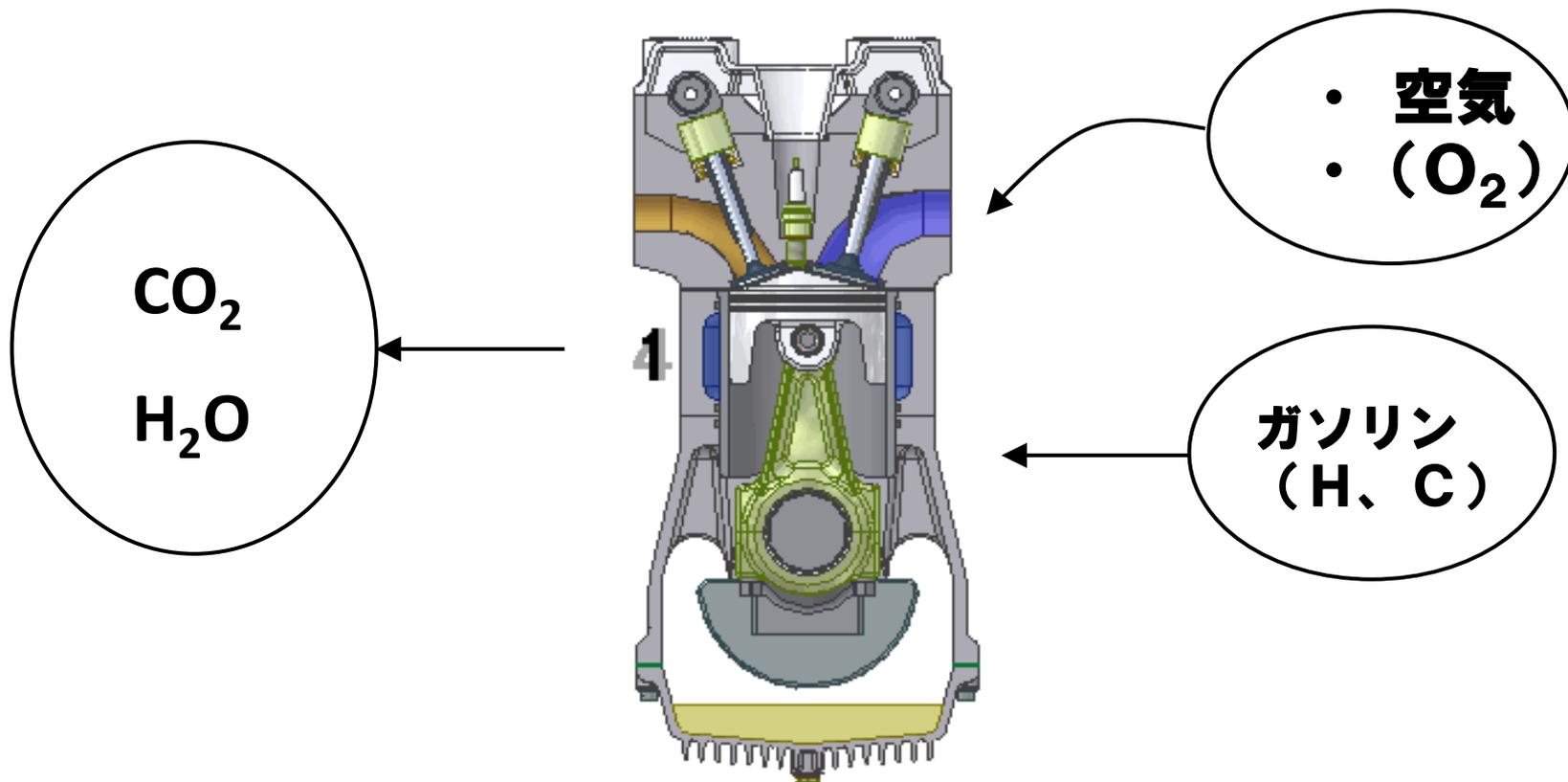
II.AICEの紹介

III.HINOCAの紹介

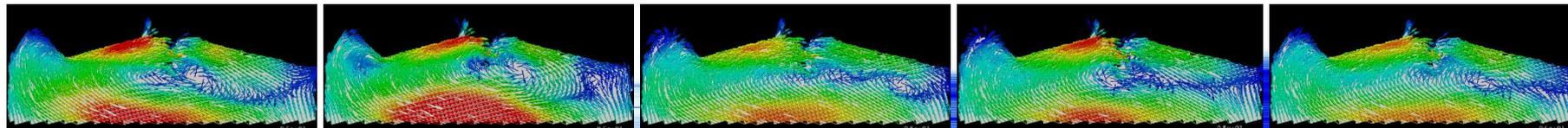
IV.解析例

- ① ガソリンエンジンの噴霧
- ② 燃料分布のサイクル変動
- ③ ディーゼルエンジンの噴霧
- ④ ガソリンエンジンポートの定常流
- ⑤ 副燃焼室

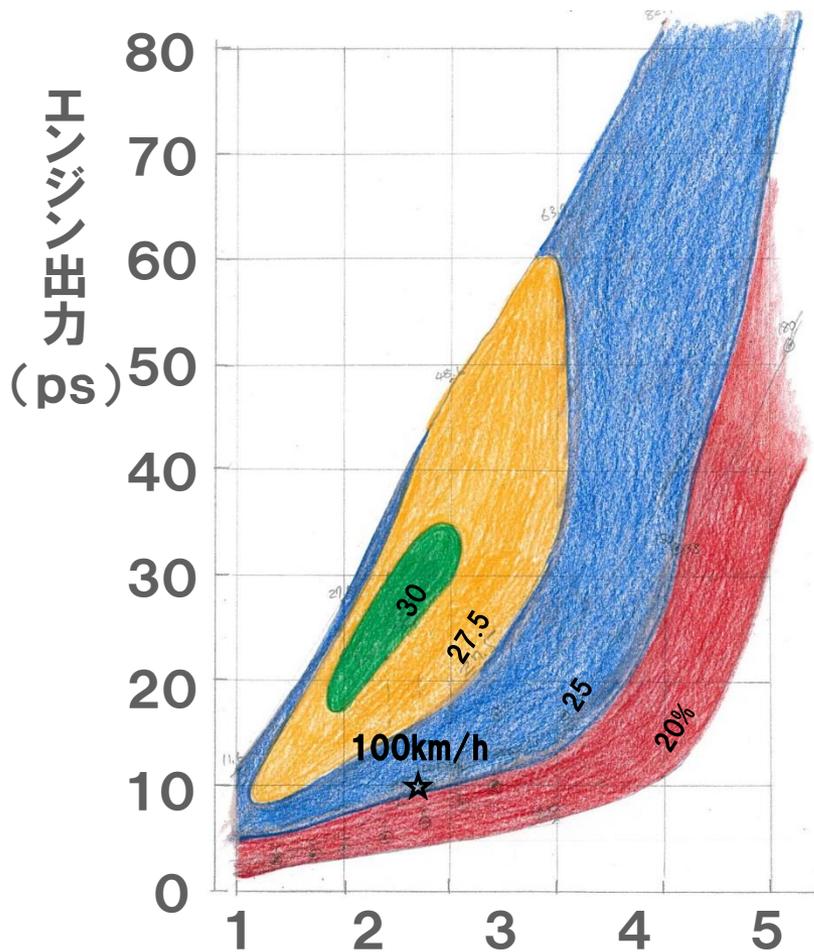
エンジンでは空気（酸素）と燃料（ガソリン）が燃焼する



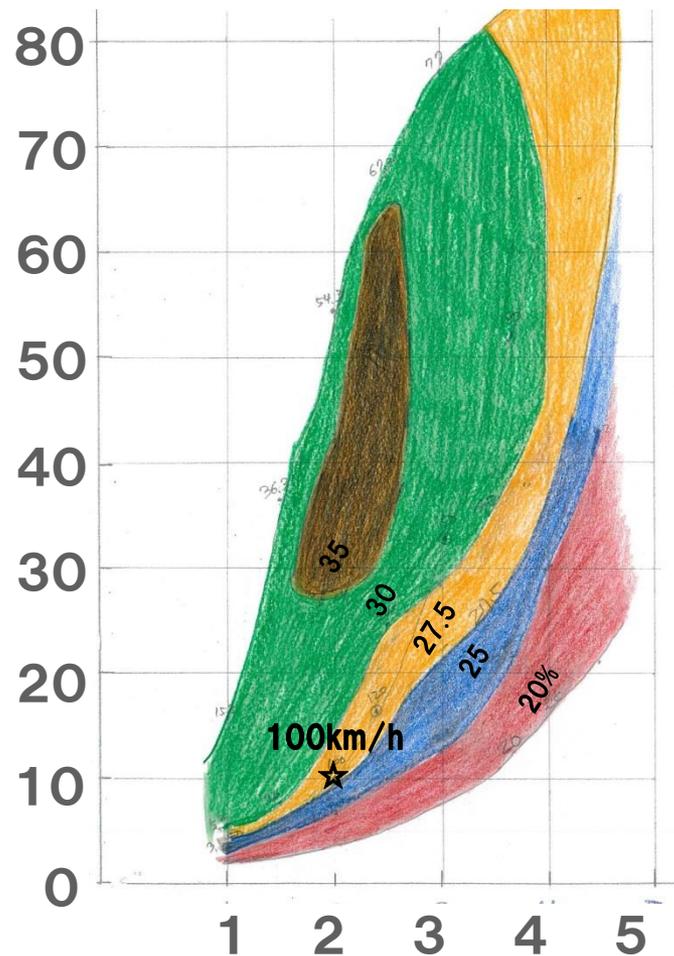
サイクル毎の流動サイクル毎の流動（流速ベクトル）の計算結果



ガソリンエンジン燃焼効率

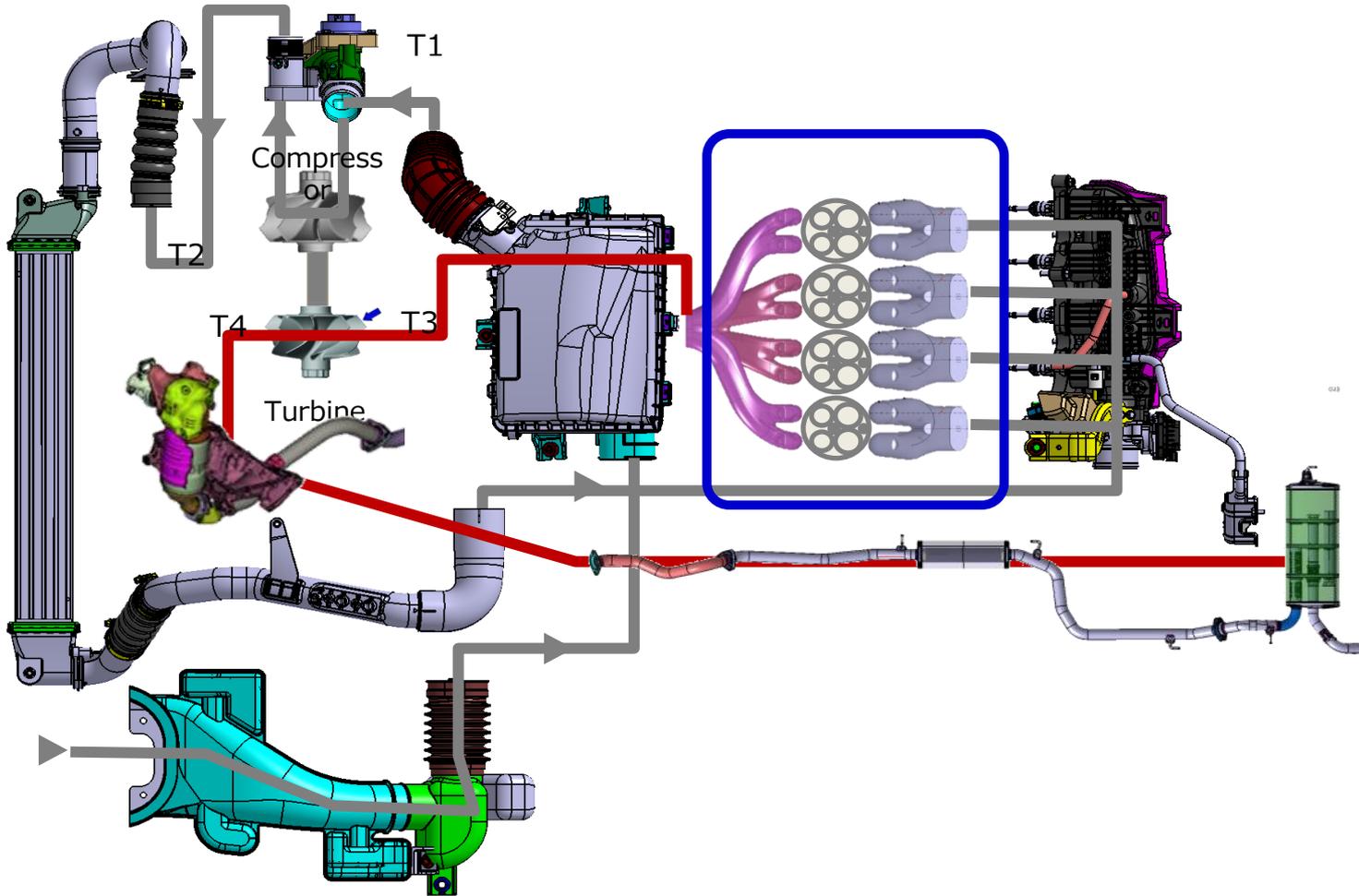


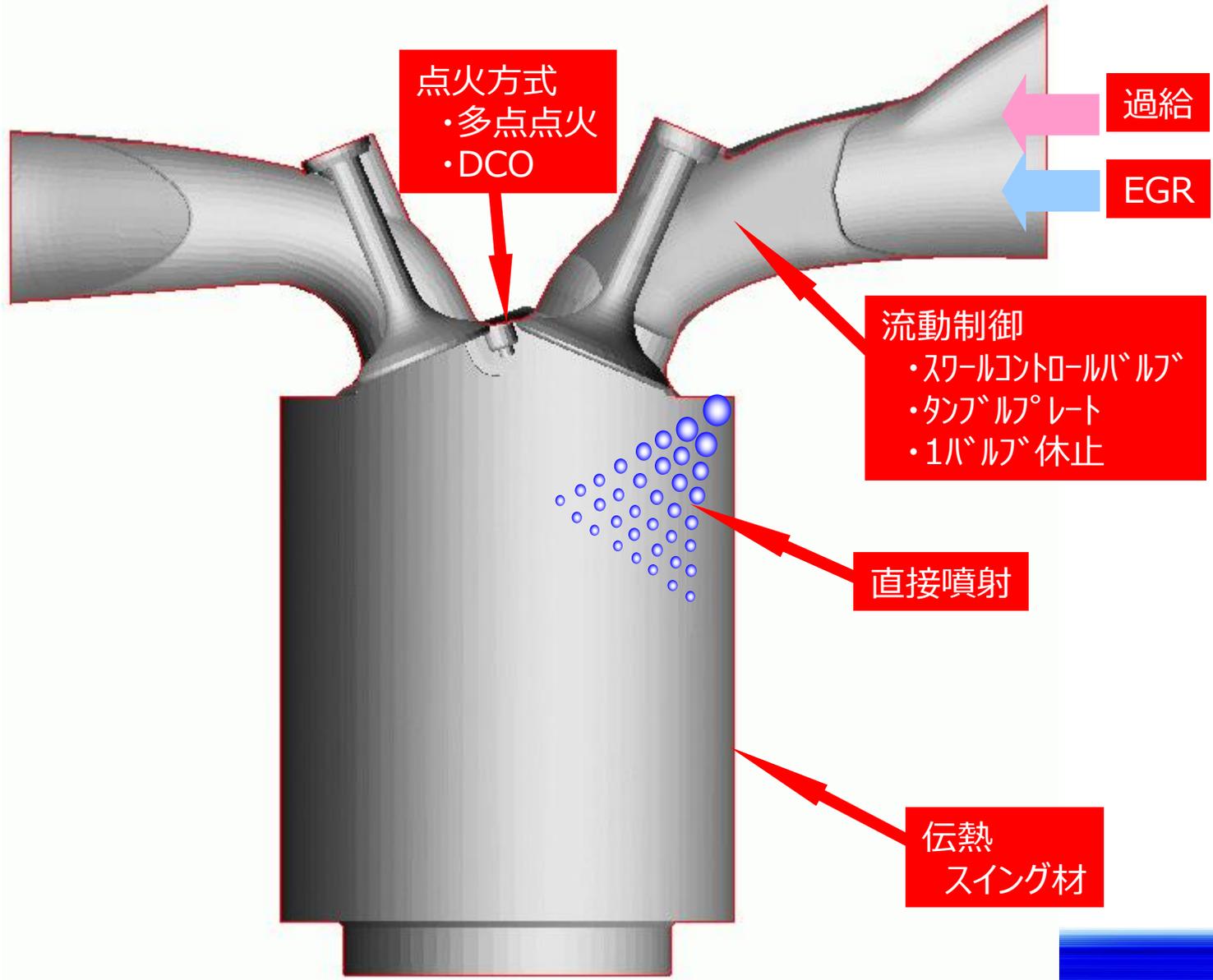
ディーゼルエンジン燃焼効率



エンジン回転数 (×1000) rpm

Ne (rpm) × 10³





I. エンジン入門

II. AICEの紹介

III. HINOCAの紹介

IV. 解析例

- ① ガソリンエンジンの噴霧
- ② 燃料分布のサイクル変動
- ③ ディーゼルエンジンの噴霧
- ④ ガソリンエンジンポートの定常流
- ⑤ 副燃焼室

エンジンの基盤技術を共同研究する組合（独占禁止法に気をつけながら・・・）



自動車用内燃機関技術研究組合（AICE:アイス）は、2014年に設立した自動車会社9社、研究機関2団体の組合員で構成する技術研究組合です。

CO2排出量削減やエミッション低減等が社会的に求められる状況の中で、自動車用エンジンの高効率化、低排ガス化の課題を共同で解決することを目的として、経済産業省等（官）からの支援をうけ、組合員・共同研究企業（産）、大学・研究機関（学）と共に研究を実施し、産学官で連携し事業を推進しております。

産はAICEに、学はゼロエミッションモビリティパワーソース研究コンソーシアム（ZEMコンソ）に集まり、互いに連携することで、単独では達成し得ない大きな課題を解決するために、連携して活動しています。

共同研究企業

<https://www.aice.or.jp/column/?id=1583219355-361771&ca=8>



組合員・共同研究企業（産）は、各社共通の基礎・応用領域の課題をAICEに持ち寄り、研究テーマとして設定したうえで、大学・研究機関（学）で研究を実施、研究成果は、産の全員で共有しております。

これにより、産は学の深い科学力を享受でき、開発リソースを削減、自社コア技術や価値創出課題に資源集中が可能となります。

学側では、産と共同で研究課題に取り組むことで、研究力の強化や、研究ニーズの収集、人材育成の好機につながると考えています。

このように、産側だけでなく、学側も含めて日本全体で好循環していくことを目指しています。

I. エンジン入門

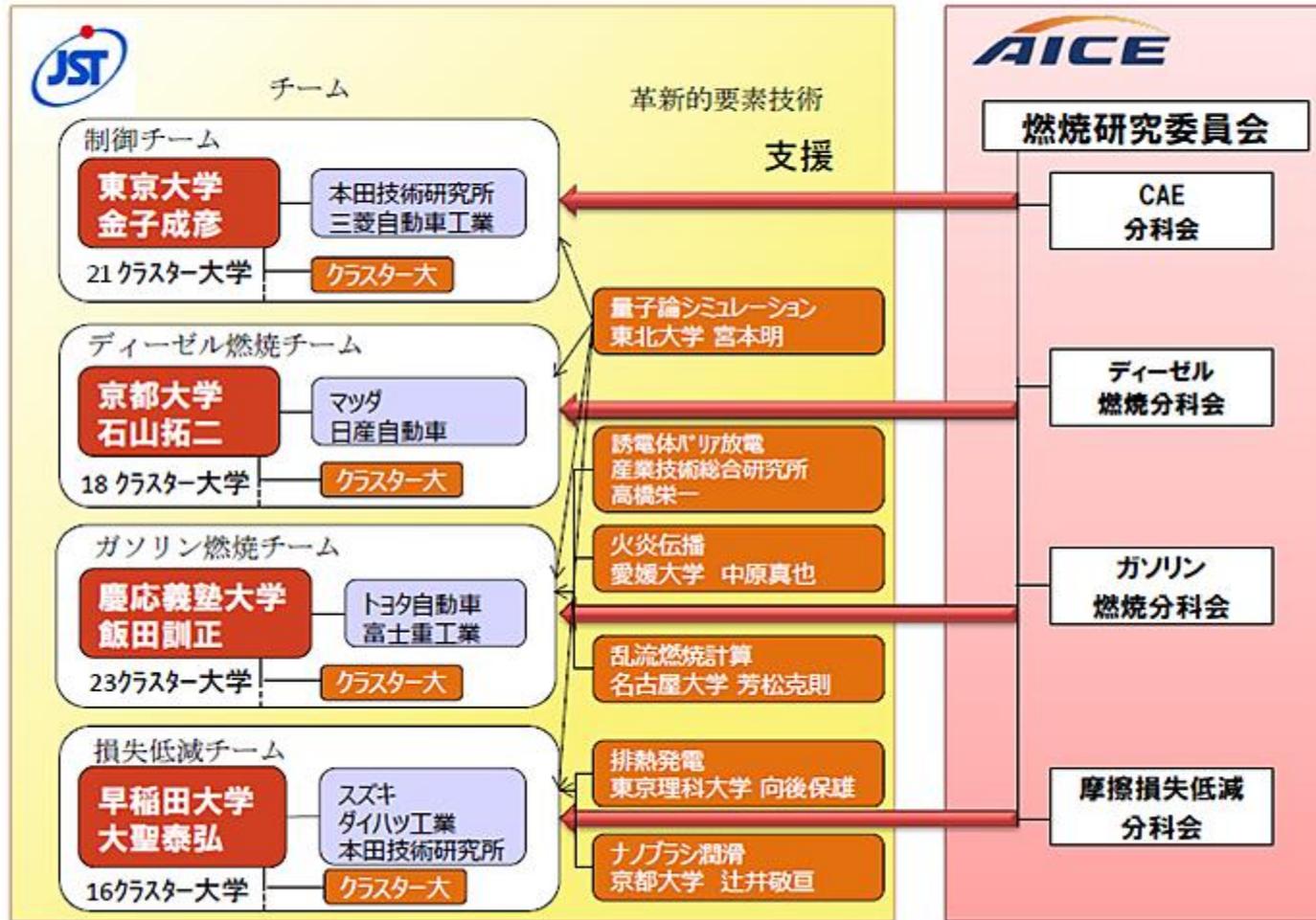
II. AICEの紹介

III. HINOCAの紹介

IV. 解析例

- ① ガソリンエンジンの噴霧
- ② 燃料分布のサイクル変動
- ③ ディーゼルエンジンの噴霧
- ④ ガソリンエンジンポートの定常流
- ⑤ 副燃焼室

SIP「革新的燃焼技術」研究実施体制



HINOCAは、SIP「革新的燃焼技術」の制御チーム（研究責任者：東京大学 金子 成彦）とガソリン燃焼チーム（研究責任者：慶應義塾大学 飯田 訓正）の連携で研究開発されている、自動車エンジンの3次元燃焼解析ソフトウェアです

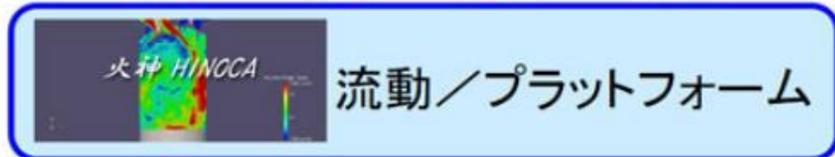


HINOCA(火神)開発

全体統括：早稲田大 草鹿

ソフトウェア構築

リーダー：JAXA 溝渕



成果の授受



先端モデル開発

リーダー：東工大 店橋

学の最先端の知見に基づいたモデル・実験式の構築、検証用データの取得

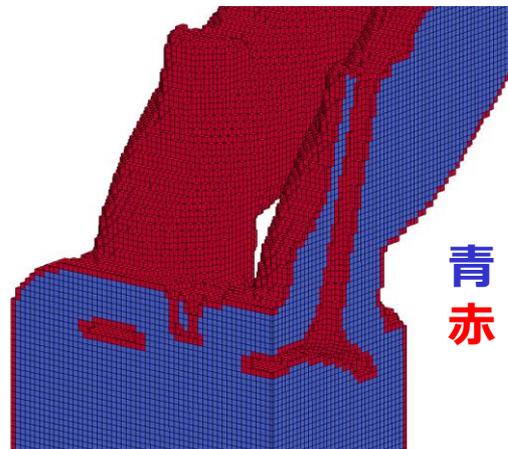
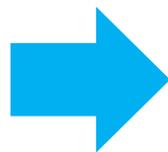
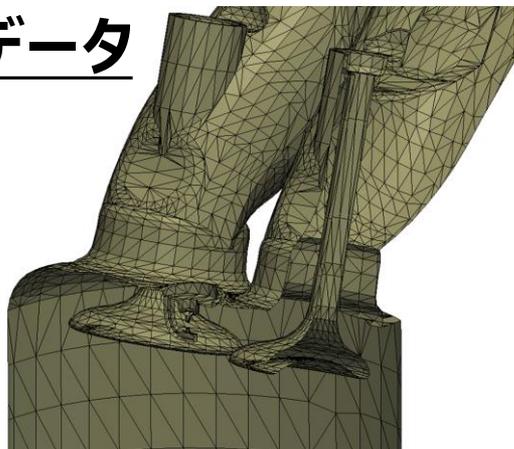
エンジン活用検証

リーダー：ホンダ 高林

AICE各社提供データを利用し、産の視点から課題提起、改善提案

直交格子法 + Immersed Boundary法の併用により形状データからメッシュ作成を経ずに直ちに燃焼計算が可能

形状データ



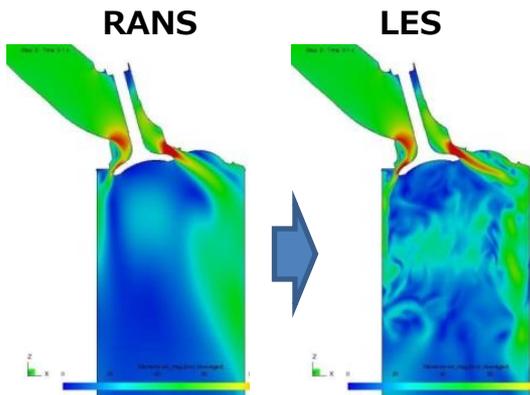
自動形状認識
自動条件設定

青 : 流体セル
赤 : IBセル



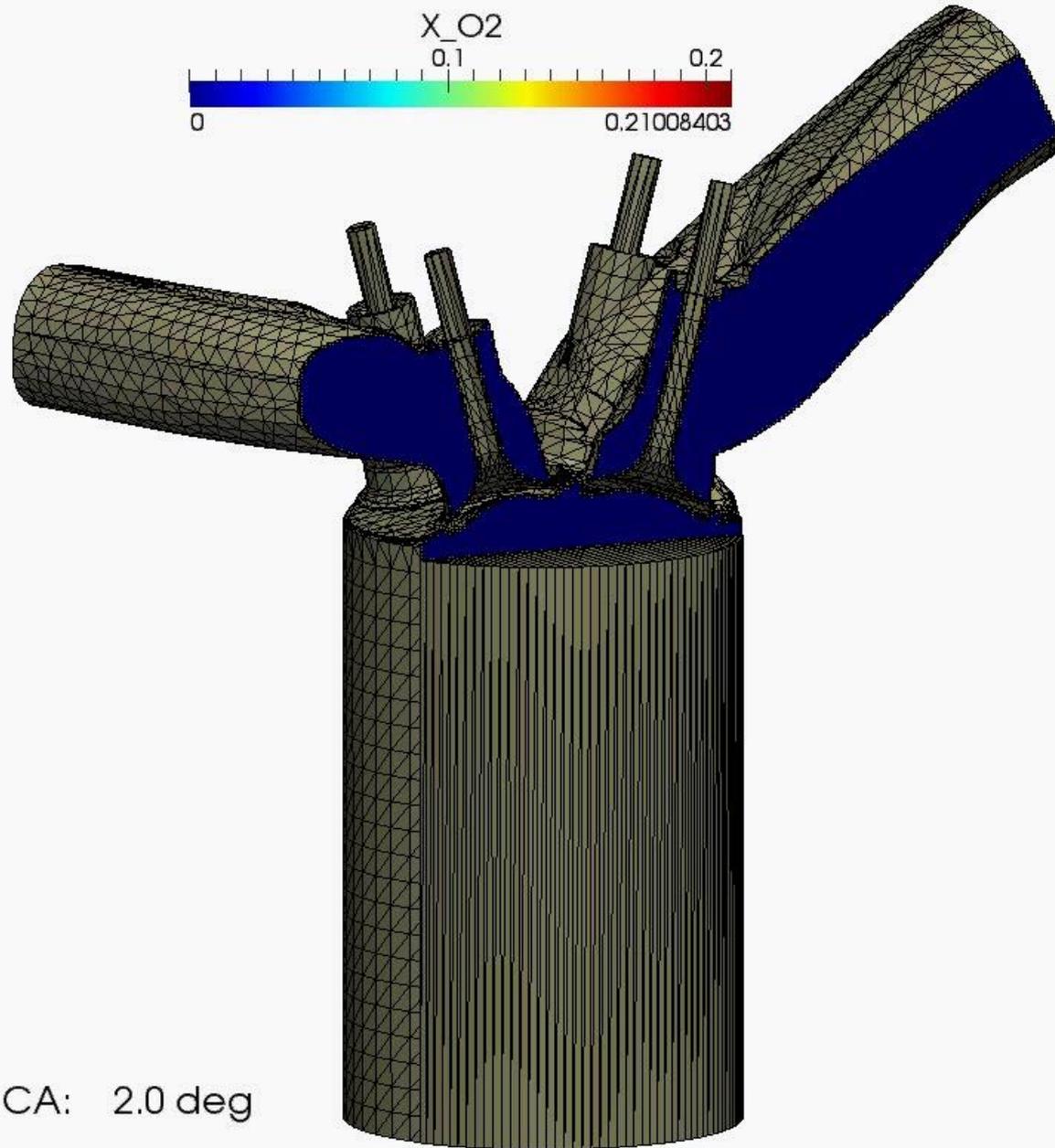
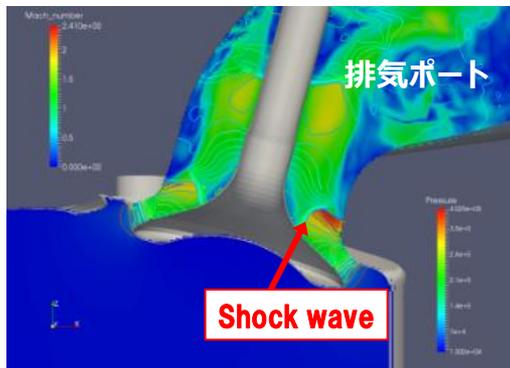
- メッシュ作成なし
- リードタイム 0 で計算開始
- MPIとOpenMPのハイブリッド並列

【サイクル変動】

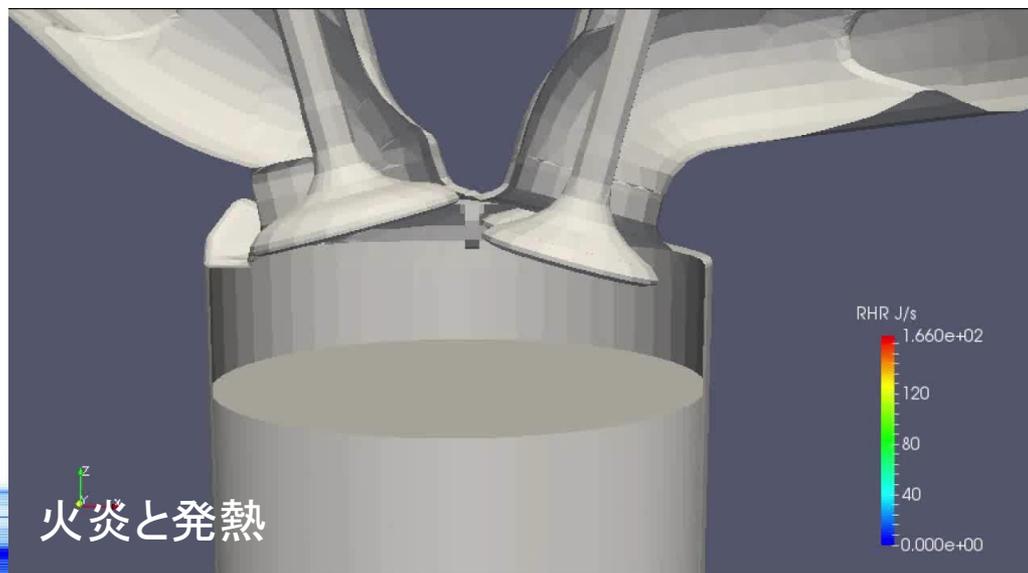
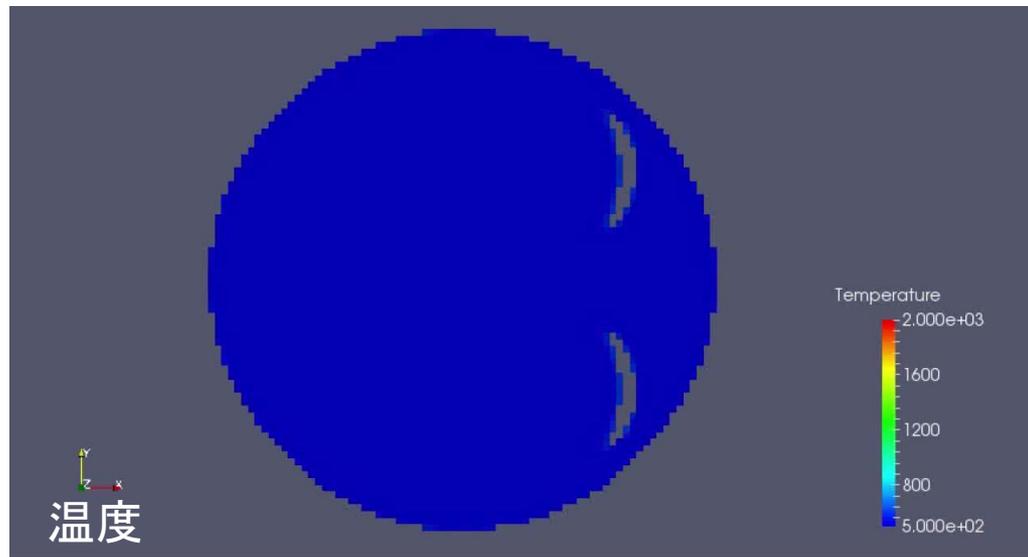
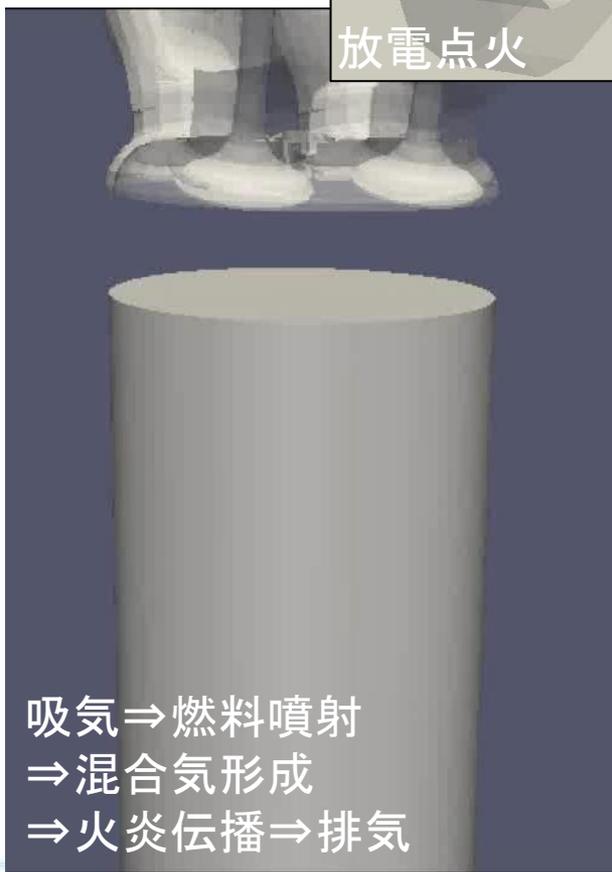
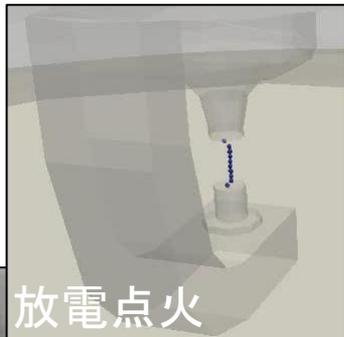


【排気高速流】

圧縮性解法



- 燃料 : $X_{iC_8H_{18}}=0.9$, $X_{nC_7H_{17}}=0.1$
- 混合気 : $\lambda \sim 1$
- インジェクタ : 6噴孔
- 過給なし

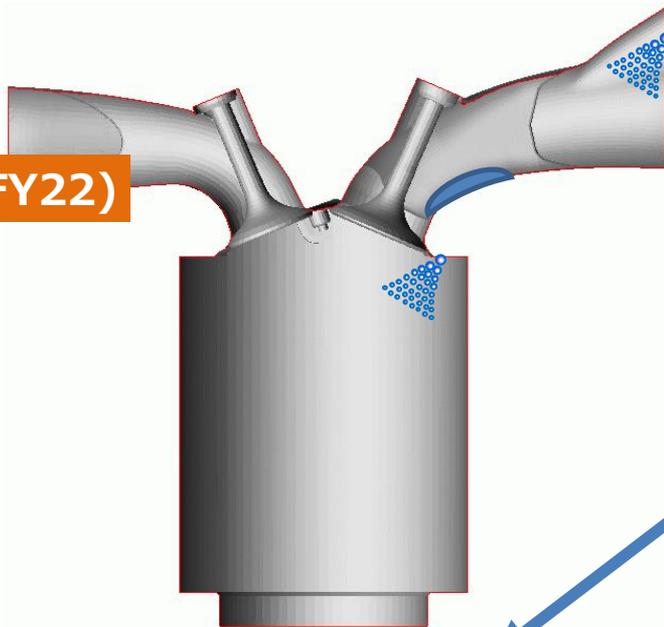


SIP終了時に実装

SIP後のAICE研究で実装

SIP後のAICE研究で実装 (FY22)

実装中 (FY23以降)



プラットフォーム機能

Immersed Boundary法

静的AMR

並列計算負荷分散

ピストン周り動的AMR

バルブ周り動的AMR

陰解法高速化

GUI

ポストファイル制御

実行中プログラム制御等

セルベースAMR

CutCell

計算からSTL排除

ケーキカット

熱伝達モデル

Han&Reitz熱伝達モデル

解析的壁関数モデル

Rakopoulosモデル

遷移状態表現モデル

MTS乱流熱伝達モデル

疑似3次元

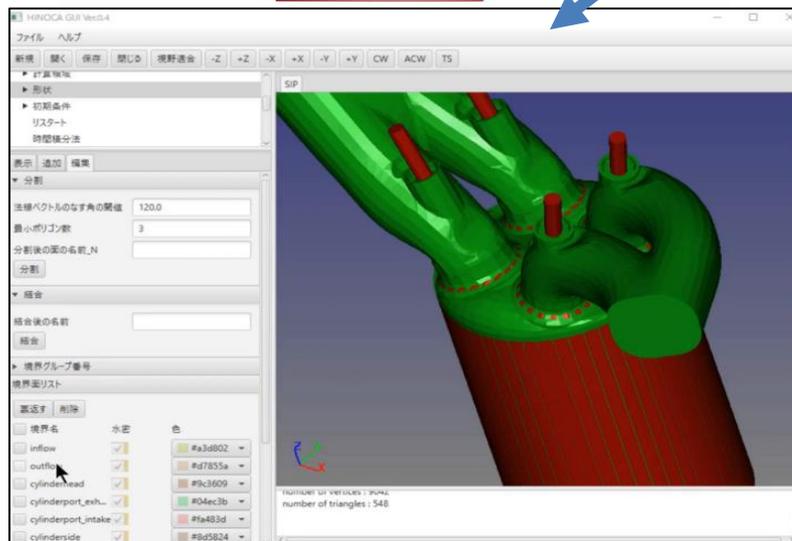
(1次元モデル適用)

疑似3次元詳細化

乱流モデル

RANS: RNGモデル etc.

LES: WALE モデル etc.



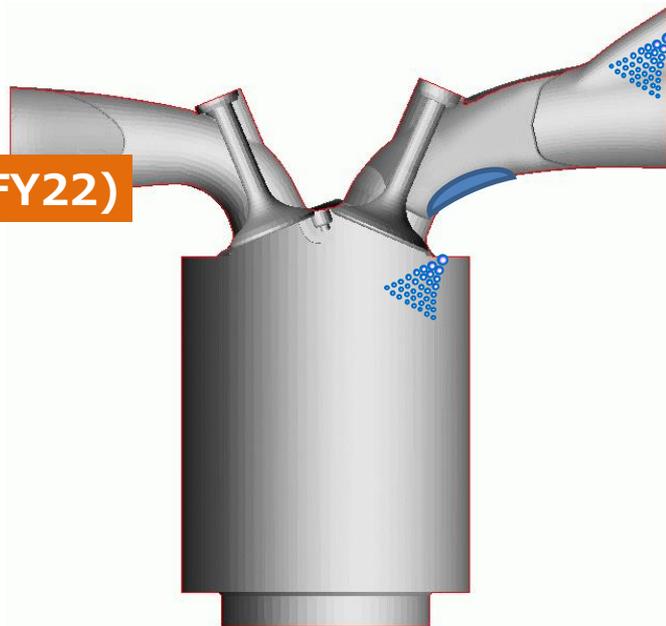
JAXAと共同で高速化や使い勝手の向上を実施

SIP終了時に実装

SIP後のAICE研究で実装

SIP後のAICE研究で実装 (FY22)

実装中 (FY23)



噴霧モデル

KH-RT噴霧分裂モデル

減圧沸騰モデル

噴霧変動モデル

ポート噴霧モデル

e-fuel噴霧 (噴霧ユーザ会)

液膜モデル

壁面衝突モデル

液膜蒸発モデル

液膜再飛散モデル (WG活動)

反応/ノックモデル

Livengood-Wuノックモデル

詳細化学反応高速化

類似反応まとめ計算

反応陽解法

反応スキームのリダクション

点火モデル

火炎核成長/放電パーセル点火モデル

最小点火エネルギー遷移点火モデル

燃焼モデル

G方程式火炎伝播モデル

Keck+Gulder層流燃焼速度モデル

S5R層流燃焼速度モデル

Pitsch乱流燃焼速度モデル

FDSGS乱流燃焼速度モデル

詳細化学反応

消炎モデル

Sootモデル

モーメント法PMモデル

セクショナル法PNモデル

AICE内の研究活動から産まれた最新のモデルを実装

$$\frac{1}{\tau} = A [Fuel]^{a_1} [O_2]^c \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

$$p = \rho R T \sum \frac{Y_i}{M_i}$$

基礎からわかる
自動車エンジンの
シミュレーション

Simulation for Automotive Engines

$$dN = f(t, X, v_p, r_i, T_i) dX dv_p dr_i dT_i$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + u_j \nabla_j U = S_L [PG]$$

金子 成彦 監修
 草鹿 仁 編著
 高林 徹・溝渕 泰寛・南部 太介
 尾形 陽一・高木 正英・川内 智詞
 小橋 好充・周 蓓霓・堀 司
 神長 隆史・森井 雄飛・橋本 淳 共著

コロナ社



➤ 目次

- エンジン計算
- 燃料噴霧計算
- 燃焼計算
- ガス流れ計算
- GIエンジン計算【実施中】

I. エンジン入門

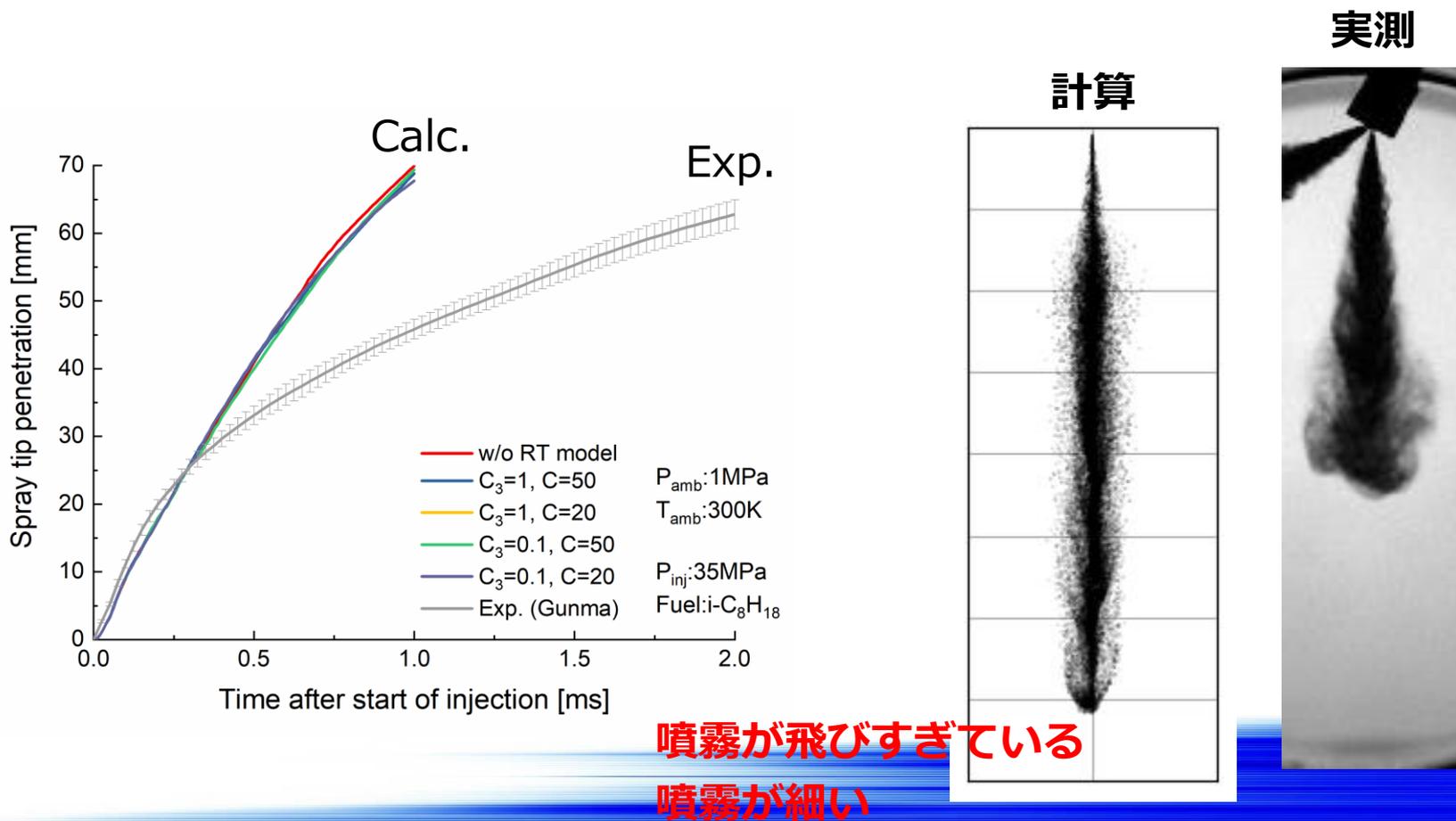
II. AICEの紹介

III. HINOCAの紹介

IV. 解析例

- ① **ガソリンエンジンの噴霧**
- ② 燃料分布のサイクル変動
- ③ ディーゼルエンジンの噴霧
- ④ ガソリンエンジンポートの定常流
- ⑤ 副燃焼室

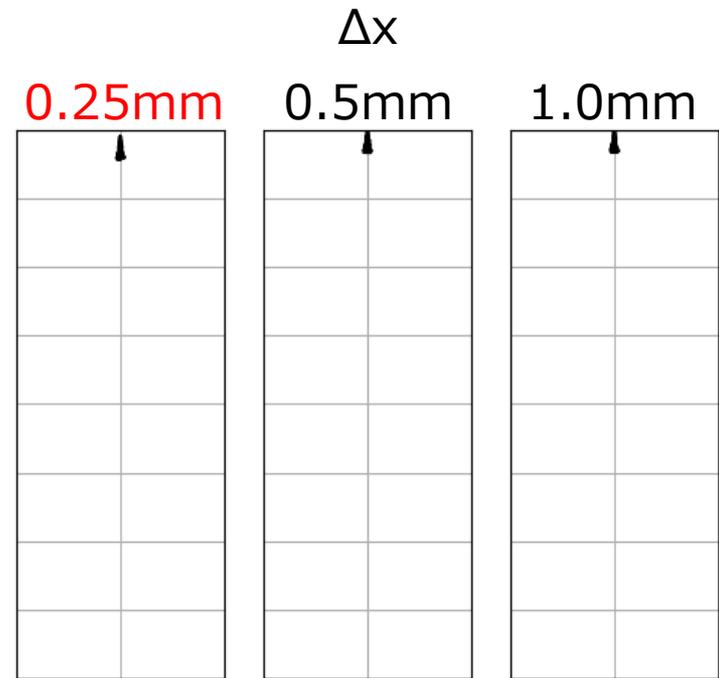
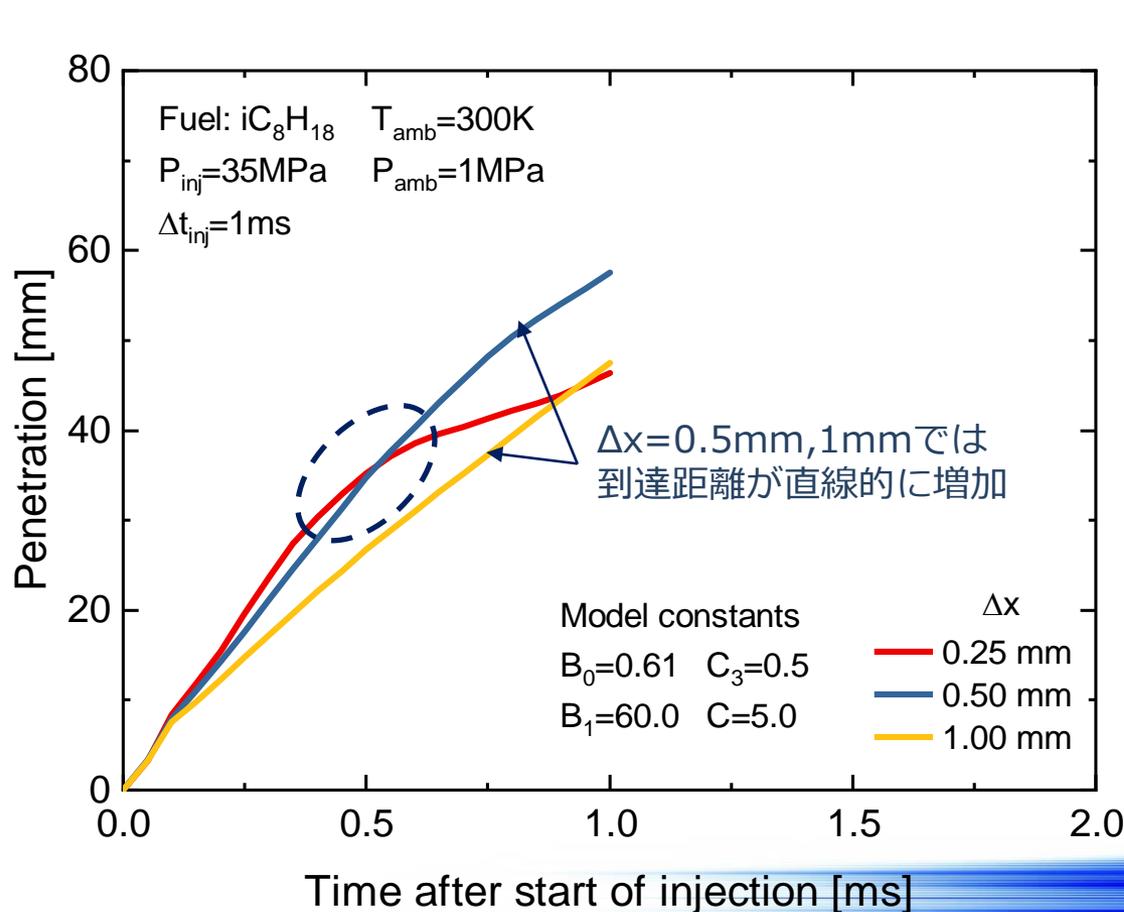
1. HINOCAで予測された噴霧の到達距離が、実測値よりも大きくなっており、実測値の再現ができていない。
2. モデル定数の変更に対して、噴霧形状の変化がみられない。



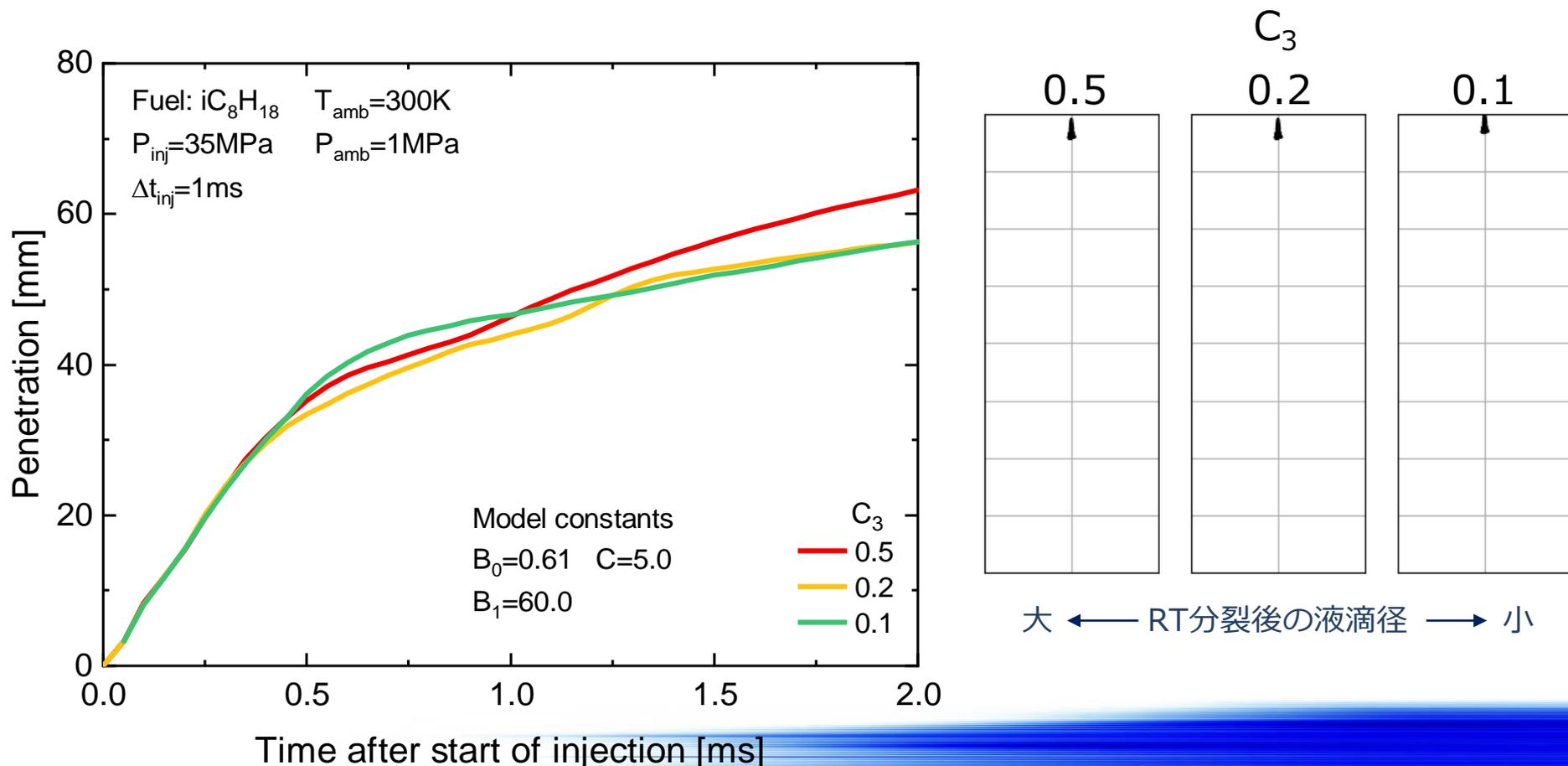
- ✓ 噴射終了後の挙動までが観察できている高圧霧困気場を対象とした。

Fuel injection	
Fuel	iC_8H_{18} : イソオクタン
Injected fuel mass, m_{inj}	2.52 mg
Injection duration, Δt_{inj}	1.04 ms
Injection pressure, P_{inj}	35 MPa
Ambient	
Ambient pressure, P_{amb}	1 Mpa
Ambient temperature, T_{amb}	300 K

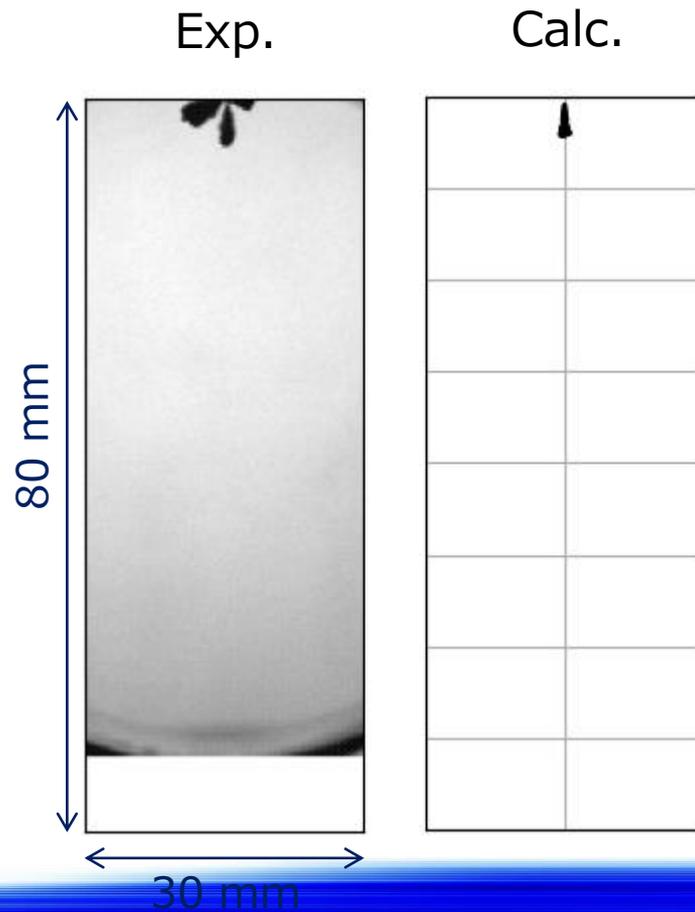
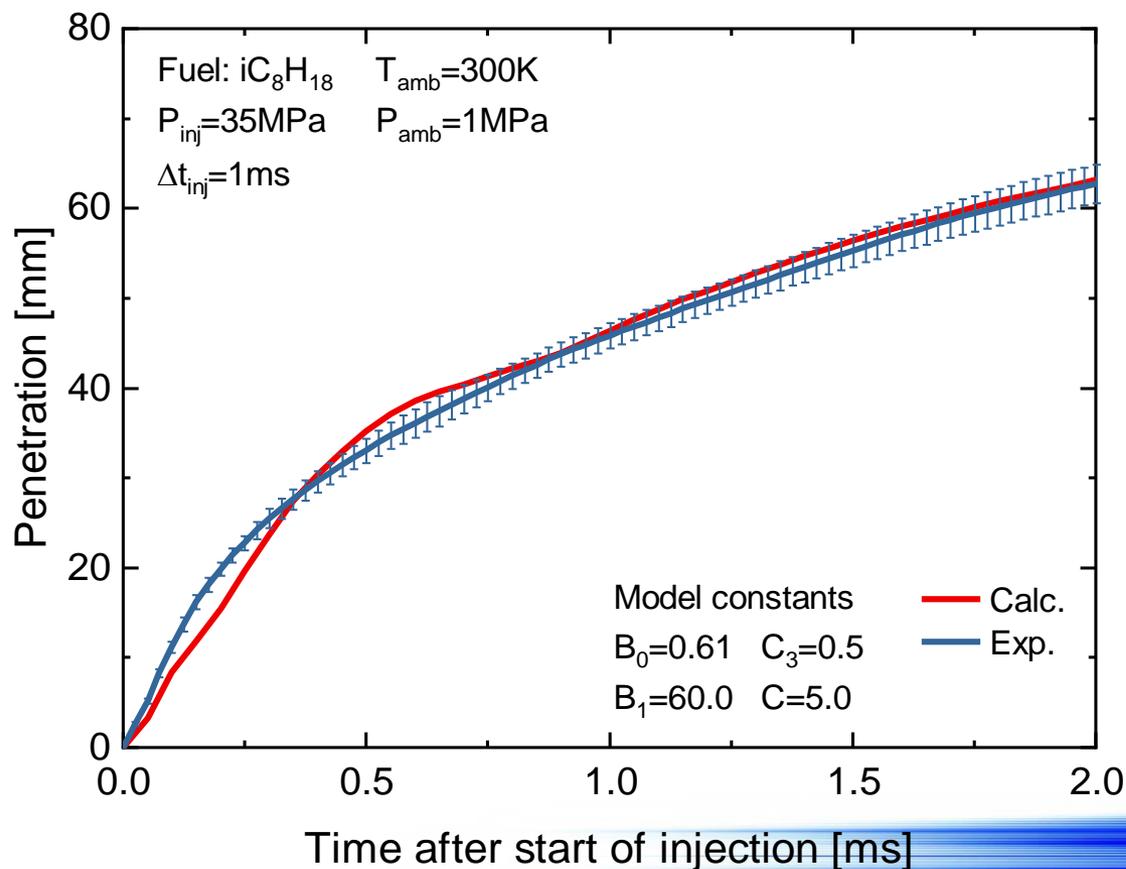
- ✓ Δx を0.25mm,0.5mm,1mmの3条件で解析を実施した。
- ✓ Δx を0.25mmとすることで、 $t_{\text{asoi}}=0.5\text{ms}$ 付近から到達距離の増加が抑制される。



- ✓ RT分裂の液滴径を調整する C_3 を変更して解析を実施した。
- ✓ $\Delta x=0.5\text{mm}$ では見られなかった到達距離に与えるモデル定数の効果が $\Delta x=0.25\text{mm}$ では確認される。



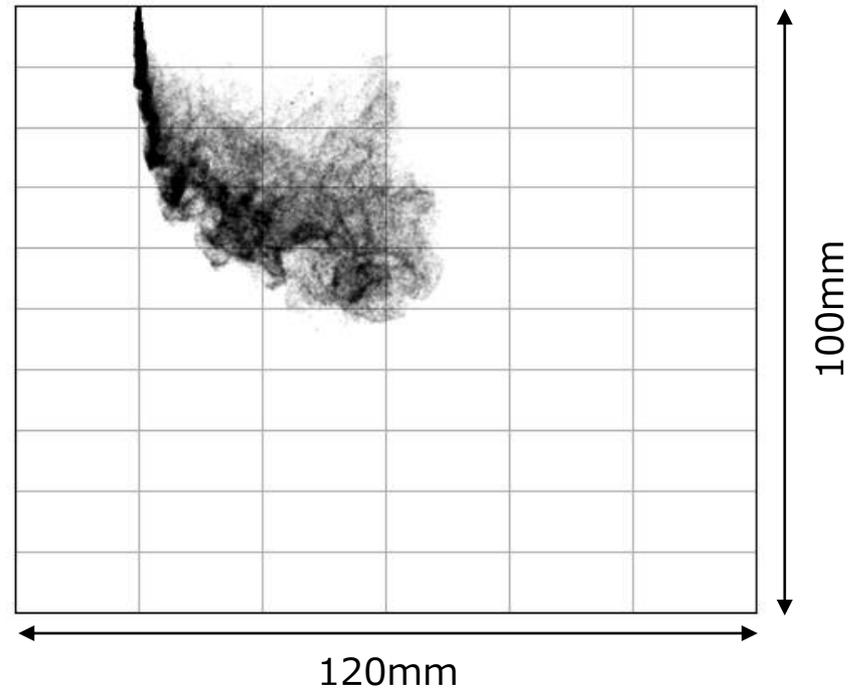
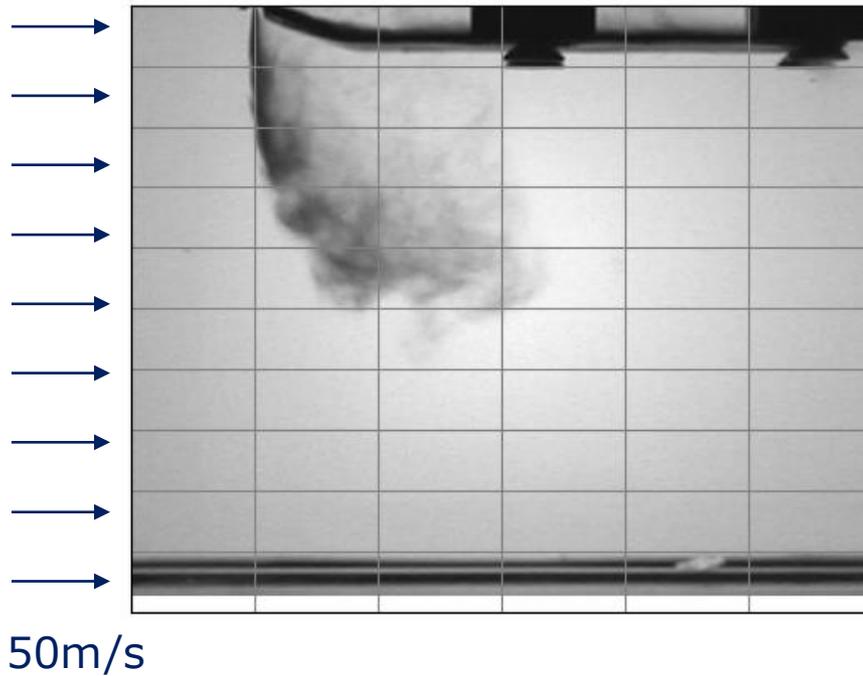
- ✓ $B_0=0.61$, $B_1=60$, $C_3=0.5$, $C=5$ として解析を実施した。
- ✓ 分裂モデル定数を調整することで、実測された噴霧の飛翔挙動が再現できた。



Pa=101.3kPa
Ta=300K

Exp.

Calc.



まとめ：LESを使いメッシュを細かくすると、噴霧周りの細かい渦が解像でき、噴霧の広がりやペネトレーションが予測できるようになった。⇒ 見えないものが見えるようになった。

I. エンジン入門

II. AICEの紹介

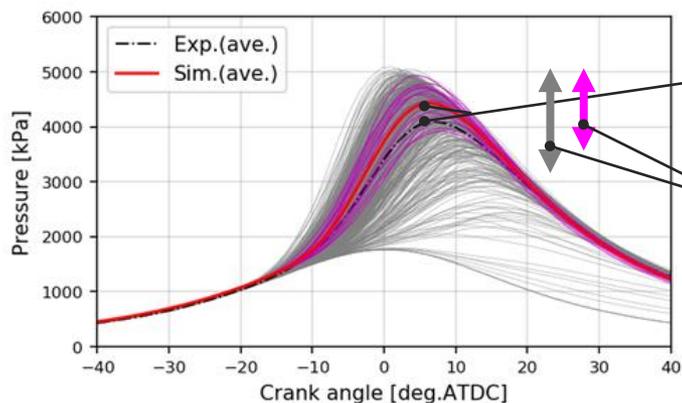
III. HINOCAの紹介

IV. 解析例

- ① ガソリンエンジンの噴霧
- ② **燃料分布のサイクル変動**
- ③ ディーゼルエンジンの噴霧
- ④ ガソリンエンジンポートの定常流
- ⑤ 副燃焼室

【狙い】

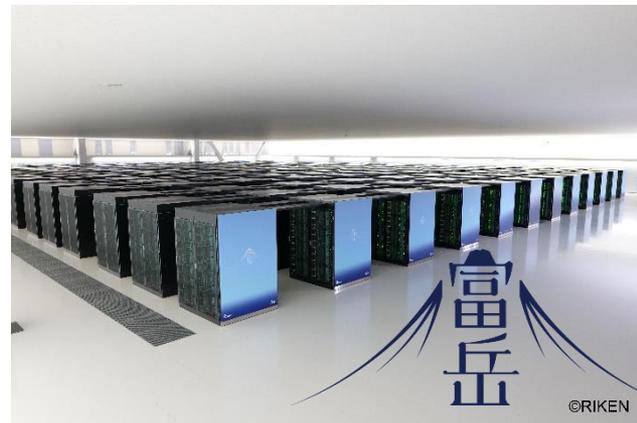
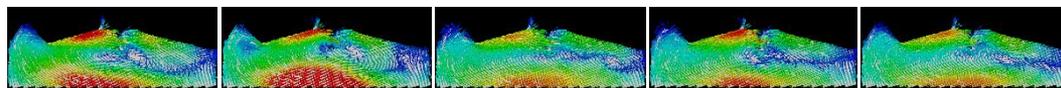
✓ HINOCAを用いたサイクル変動計算の可能性の検討と知見の蓄積



① 平均値の比較

② 変動幅の比較

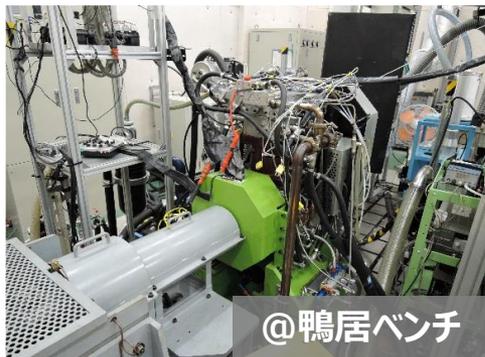
サイクル毎の流動（流速ベクトル）



【エンジン実験】

PFI/DIの切り替えが可能な単気筒エンジンを用いて、負荷・噴射量の異なる運転条件でプラグ近傍と筒内圧力を計測

※エンジン実験データは慶応大学横森先生よりご提供



@鴨居ベンチ

Displaced volume [cc]	563.3
Stroke [mm]	127.5
Bore [mm]	75.0
Compression ratio [-]	15.0
Number of valves [-]	4
Fuel Injection System	PFI / DI

#	IMEP	燃料噴射	燃料濃度
1	400 kPa	PFI	ストイキ
2		DI	ストイキ
3			リーン

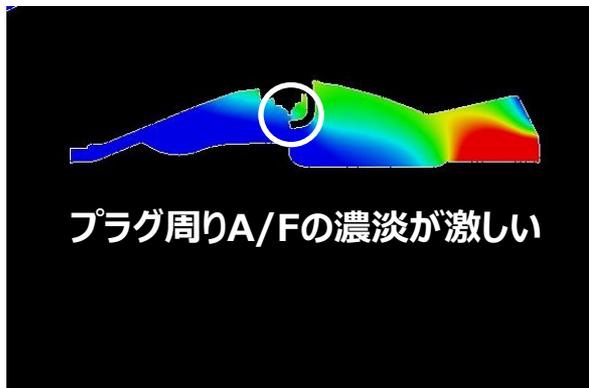
プラグ断面当量比



BASE,仕様(9MPa, SOI=-65deg.)

燃焼変動の主要因は、プラグ近傍の燃料濃度がリーンの為である

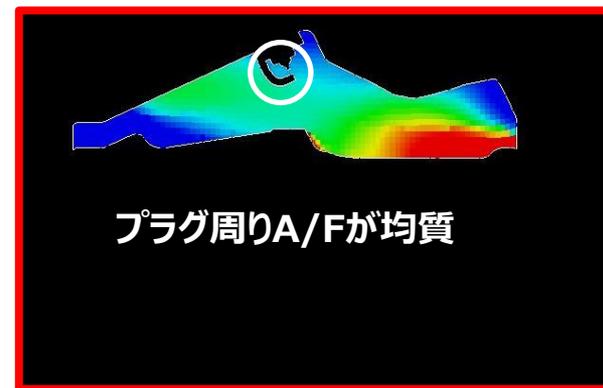
プラグ断面当量比@-350deg(θ_{IG})



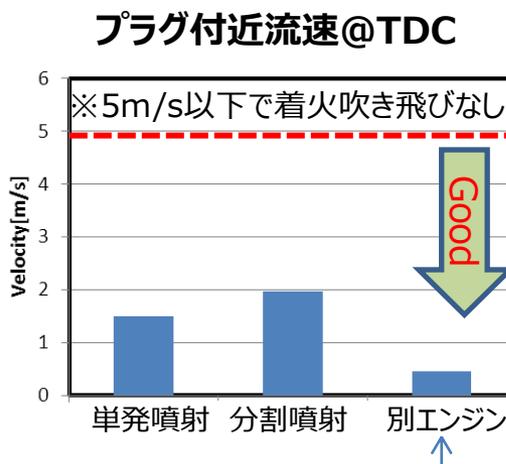
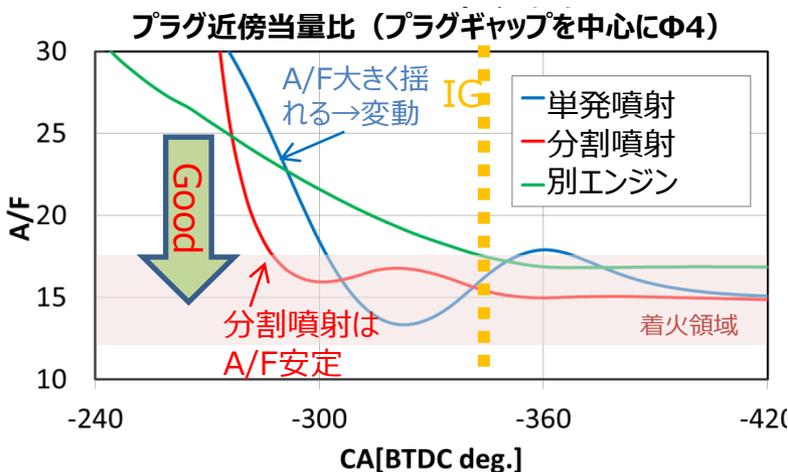
単発噴射



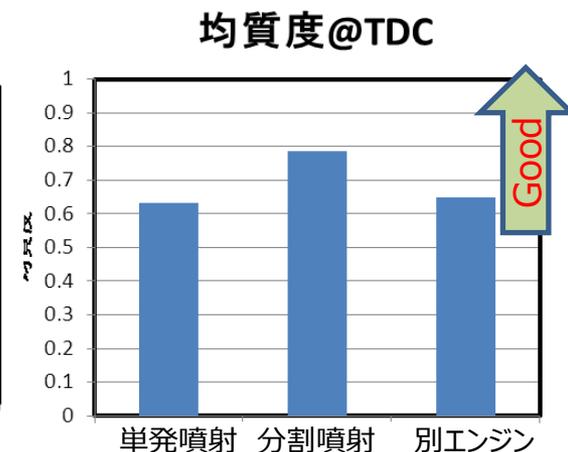
分割噴射



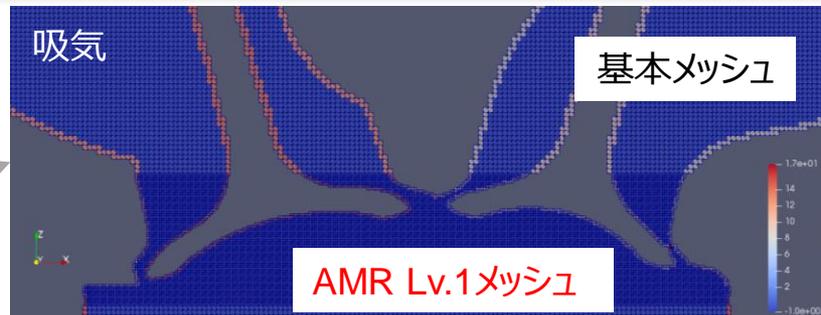
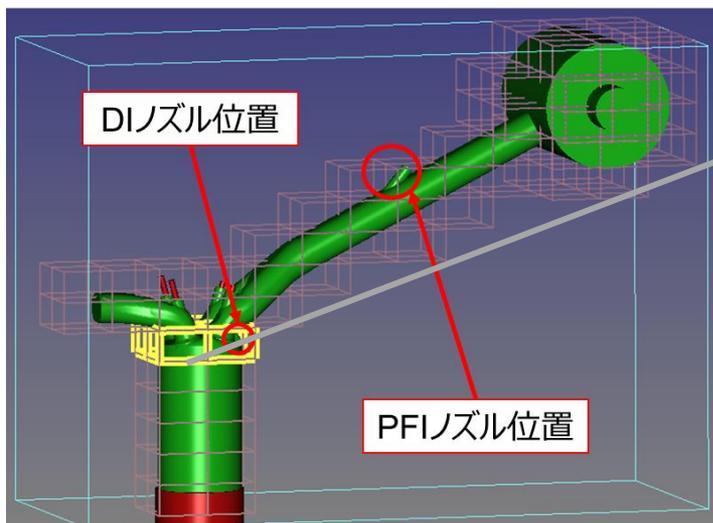
別エンジン



「別エンジン」は全体的に流速が遅いため、プラグ付近も流速が小さい



インジェクターからの燃料噴射を分割にすることで、プラグ近傍の当量比を均質にすることができ燃烧変動を低減できたが、当量比の変動幅が分かれば、もっと攻めることができた。

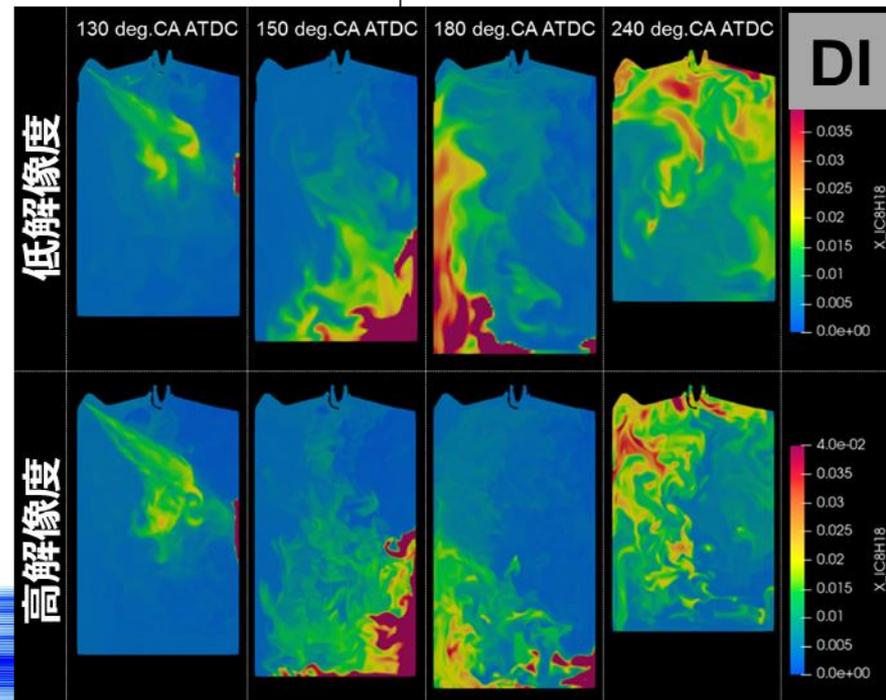
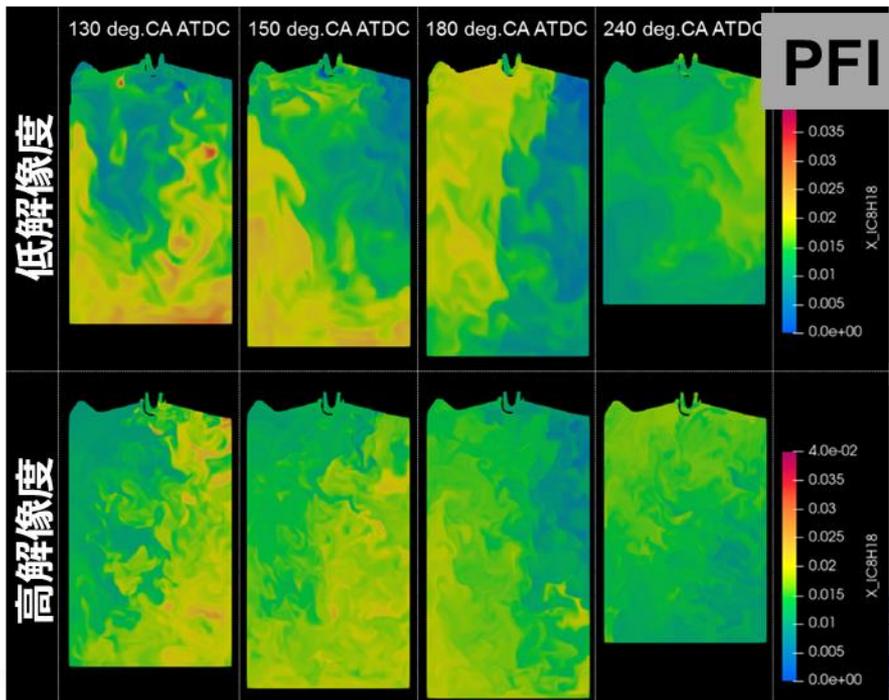


低解像度計算

- 基本メッシュ：1.0mm
- バルブ近傍AMR Lv.1
- 流体セル252万
- プロセス数：204, スレッド数：12 富岳
- 計算時間：1日/cycle

高解像度計算

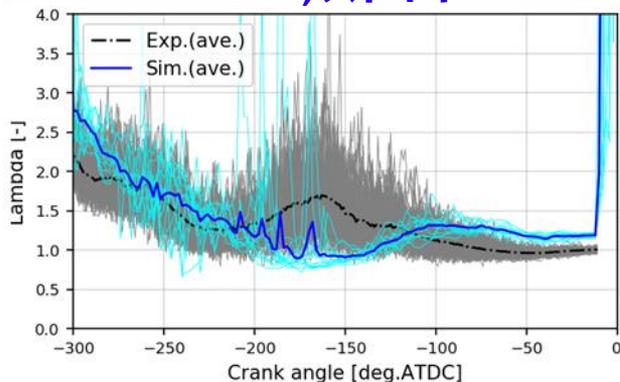
- 基本メッシュ：0.5mm
- バルブ近傍AMR Lv.1
- 流体セル2372万
- プロセス数：1858, スレッド数：6 富岳
- 計算時間：5日/cycle



【プラグ近傍 λ （空気過剰率）の予実検証：低解像度計算 vs. 高解像度計算】

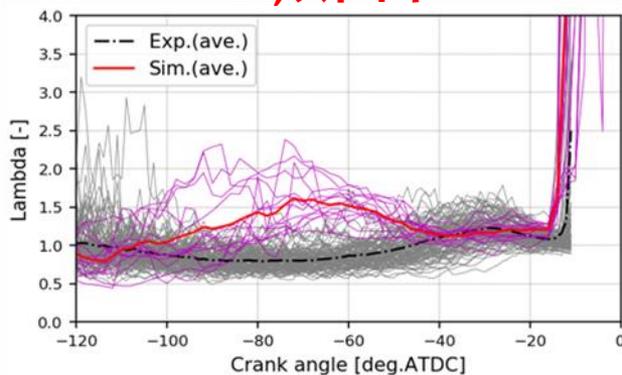
○低解像度計算

PFI, ストイキ



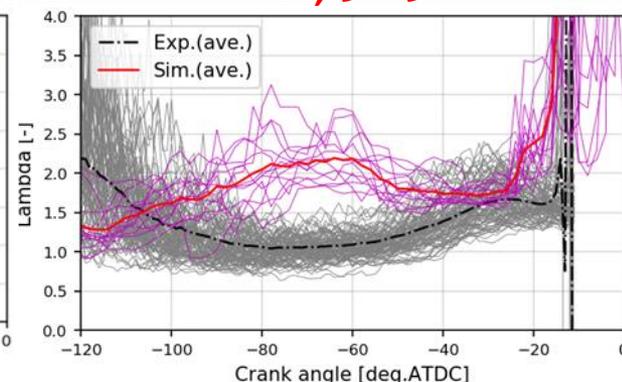
(a) Coarse mesh

DI, ストイキ



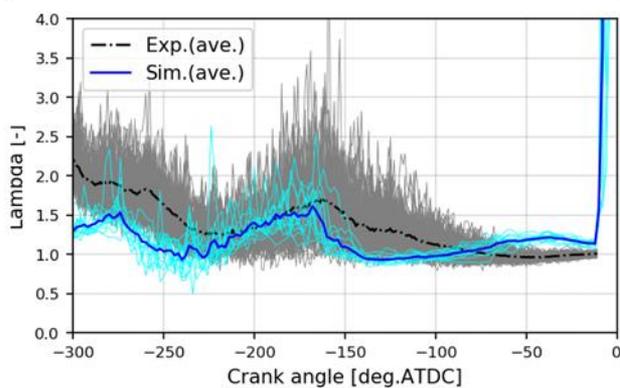
(a) Coarse mesh

DI, リーン

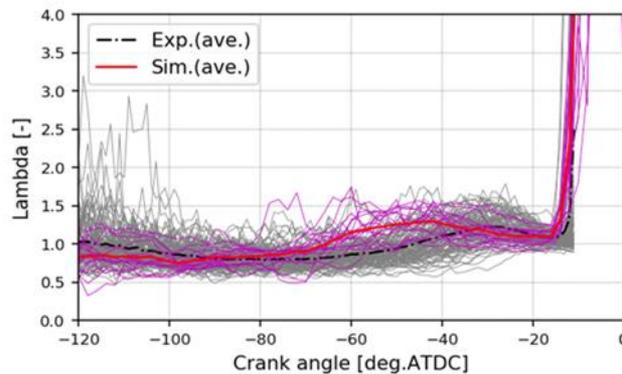


(a) Coarse mesh

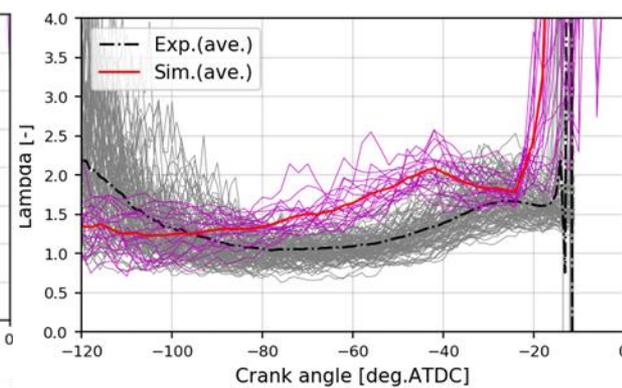
○高解像度計算



(b) Fine mesh



(b) Fine mesh

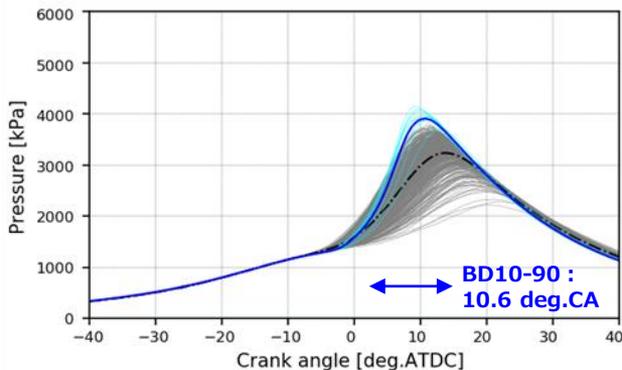


(b) Fine mesh

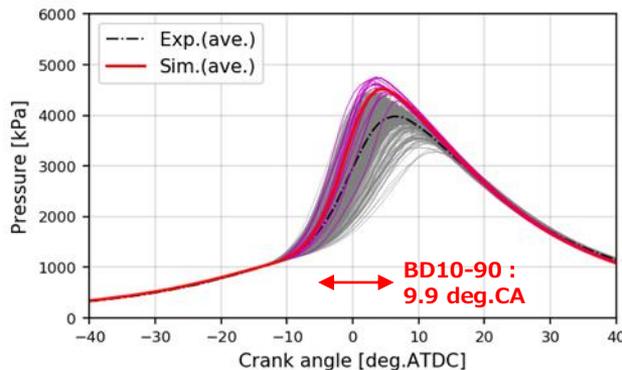
プラグ近傍 λ について、高解像度計算では実験の挙動の傾向を表現できる。

高解像度計算

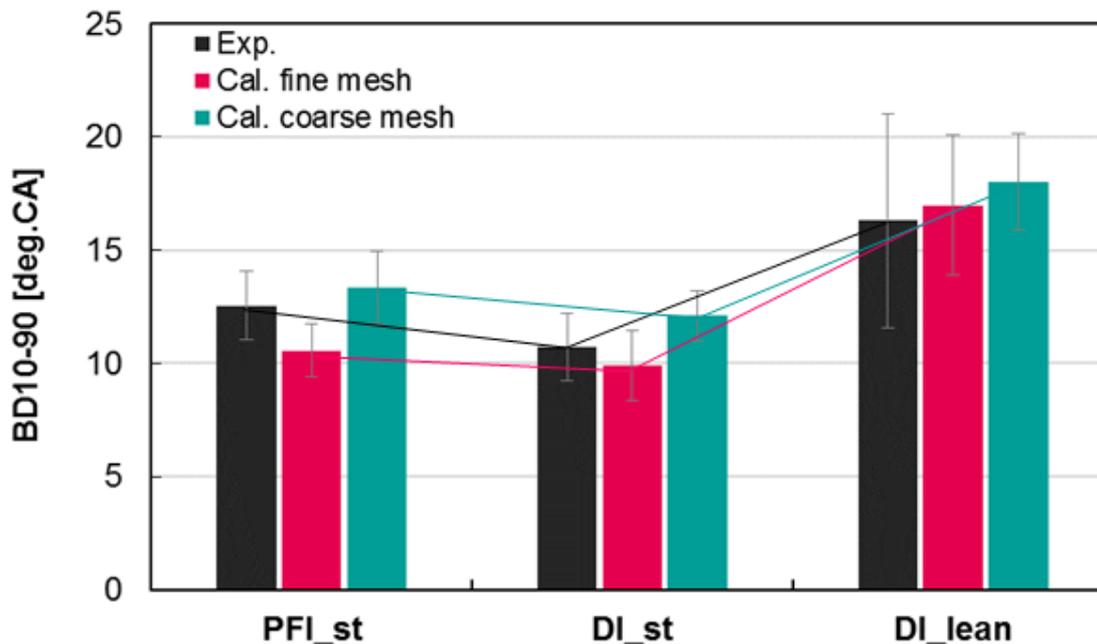
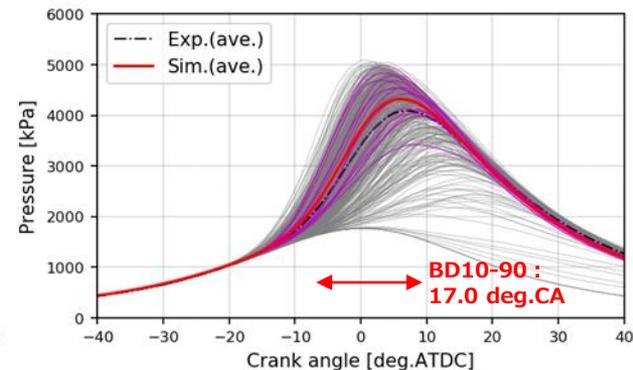
PFI、ストイキ



DI、ストイキ



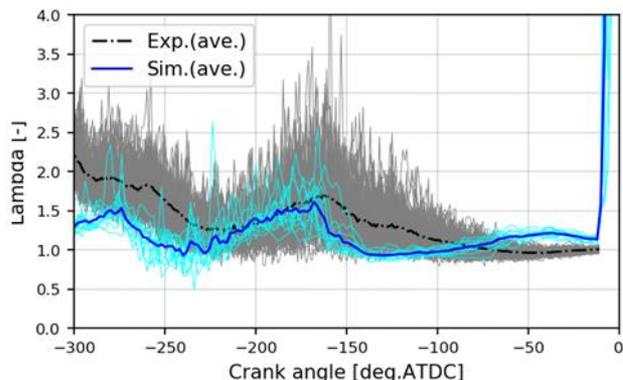
DI、リーン



主燃焼期間の予測精度は十分だが初期燃焼が課題

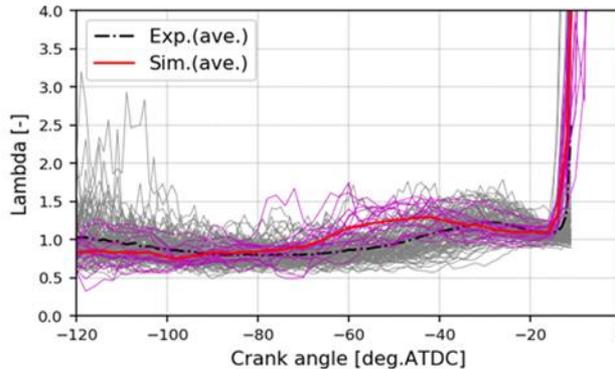
プラグ近傍入 : 高解像度計算

PFI、ストイキ



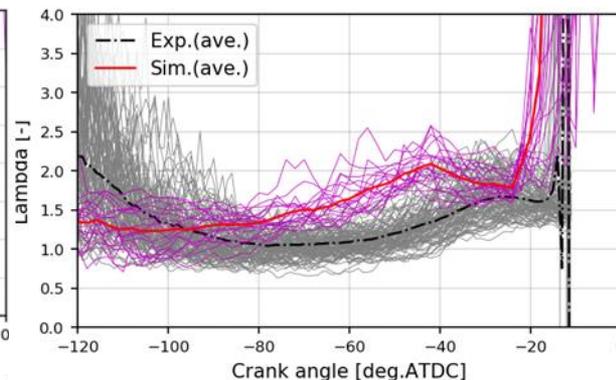
(b) Fine mesh

DI、ストイキ



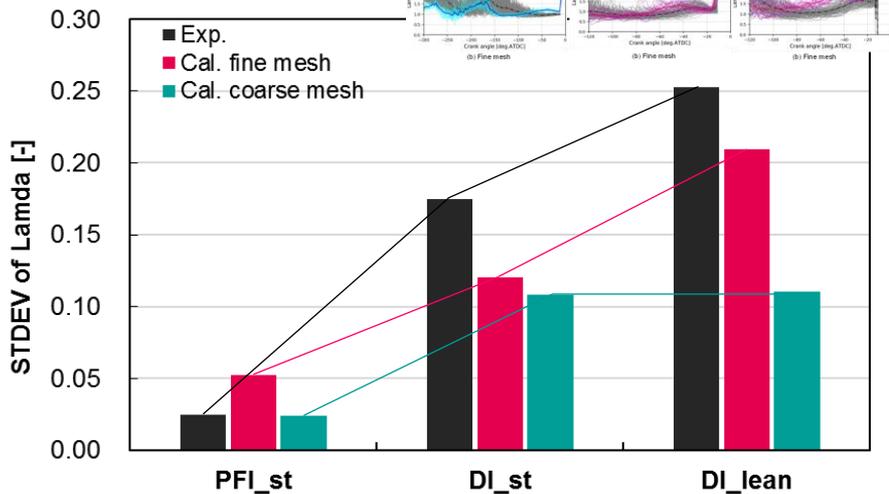
(b) Fine mesh

DI、リーン

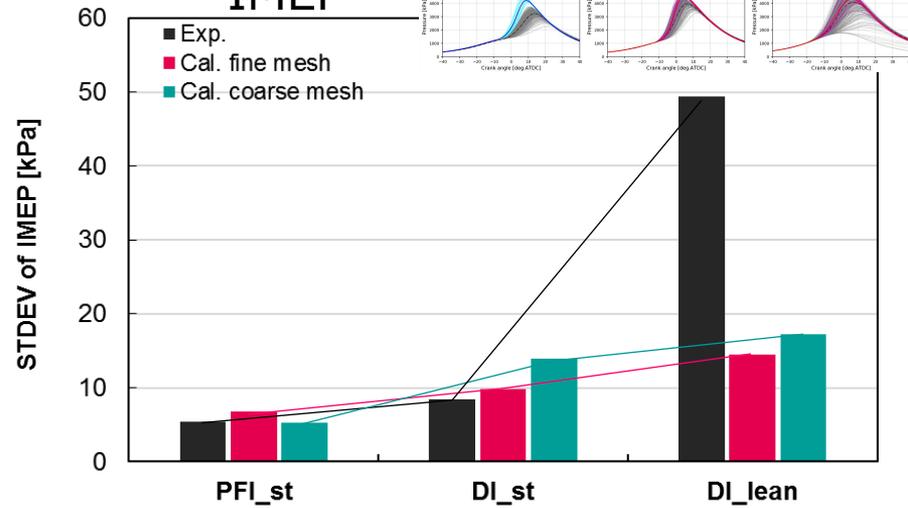


(b) Fine mesh

プラグ近傍入



IMEP



まとめ：LESを使いメッシュを細かくすると、流動や燃料分布の動きが正確になって、着火性の予測ができるようになった。⇒ばらつきの大小が分かるようになり、制御がやりやすくなった。

I. エンジン入門

II. AICEの紹介

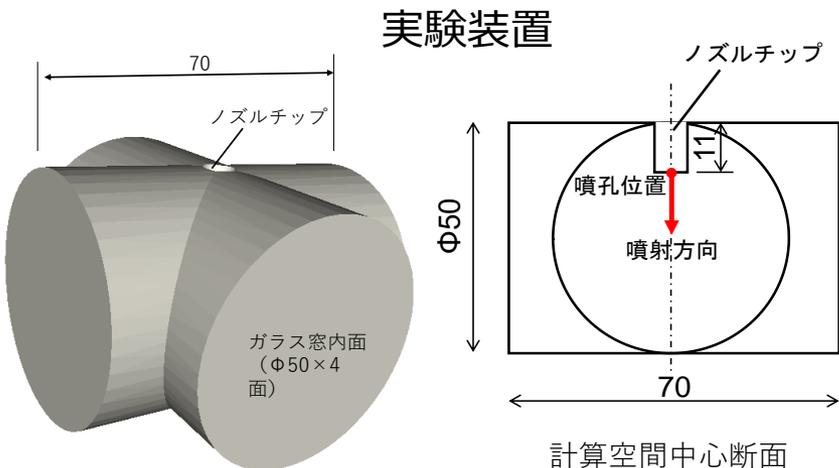
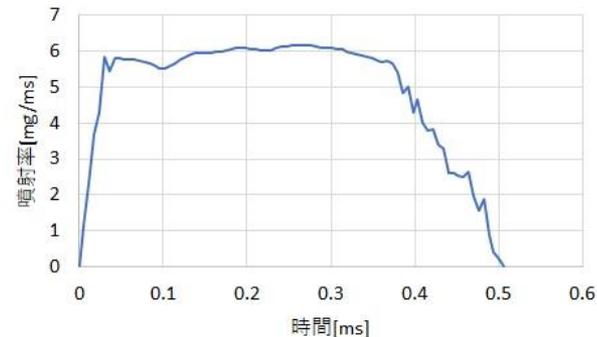
III. HINOCAの紹介

IV. 解析例

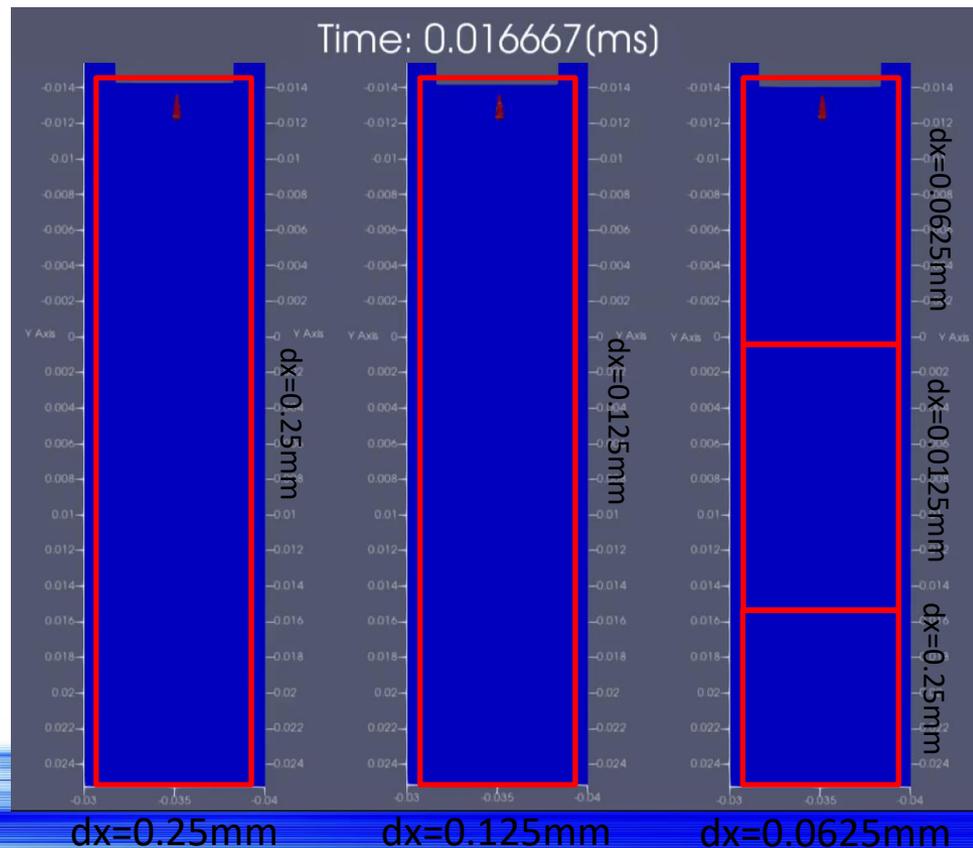
- ① ガソリンエンジンの噴霧
- ② 燃料分布のサイクル変動
- ③ **ディーゼルエンジンの噴霧**
- ④ ガソリンエンジンポートの定常流
- ⑤ 副燃焼室

目的：ディーゼル用インジェクターの計算に必要なメッシュ数を検証し、ノウハウ化する。

噴射率



噴射圧: 200 [MPa]



<計算条件>

噴射圧 : 200 [MPa]
 燃料 : 軽油
 雰囲気圧力 : 4.0MPa
 雰囲気温度 : 900K

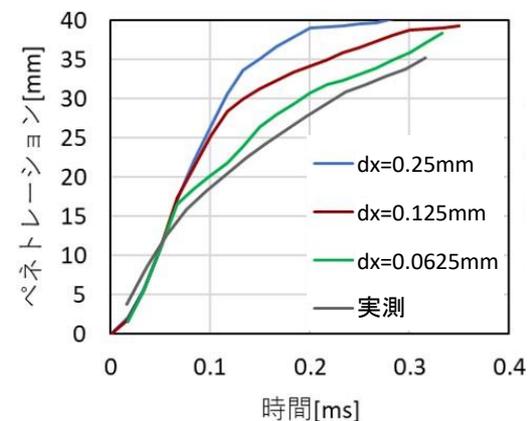
dx : 最小メッシュサイズ

<計算手法>

乱流モデル : LES
 時間発展 : 陽解法

	実測	dx=0.25mm	dx=0.125mm	dx=0.0625mm
0.12ms				
0.28ms				
		メッシュ数 : 380万 プロセス数 : 116 スレッド数 : 1 計算時間 : 2.2h	メッシュ数 : 1874万 プロセス数 : 572 スレッド数 : 1 計算時間 : 7.7h	メッシュ数 : 4678万 プロセス数 : 564 スレッド数 : 1 計算時間 : 38h

dx : 最小メッシュサイズ



結論 : ノズル近傍だけでも詳細メッシュにすることで、非常に精度の高い結果が得られることが分かった。ディーゼル計算の場合は、基本的にこの設定で計算を行う。

まとめ : LESを使いメッシュを細かくすると、噴霧周りの細かい渦が解けて、噴霧の広がりやペネトレーションが予測できるようになり、燃焼室の様子が検討できるようになった。

I. エンジン入門

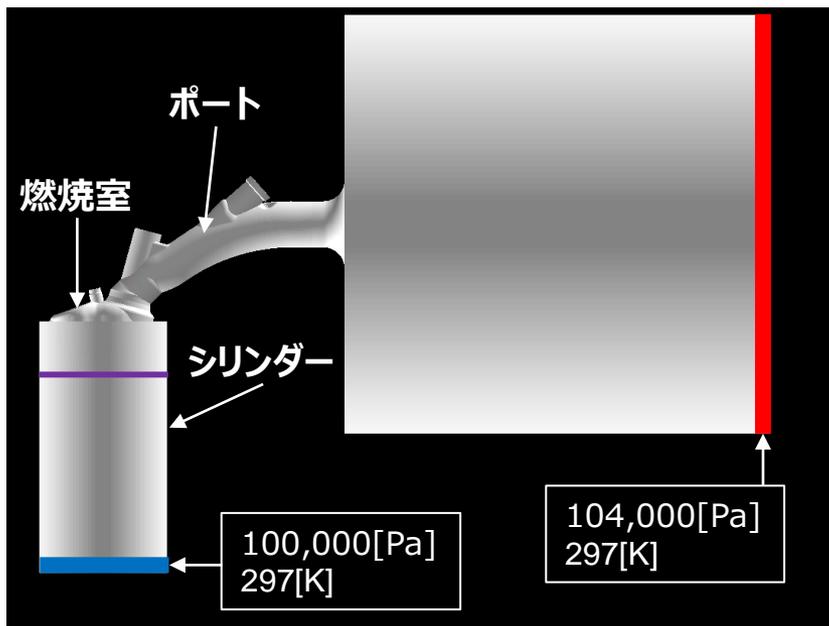
II. AICEの紹介

III. HINOCAの紹介

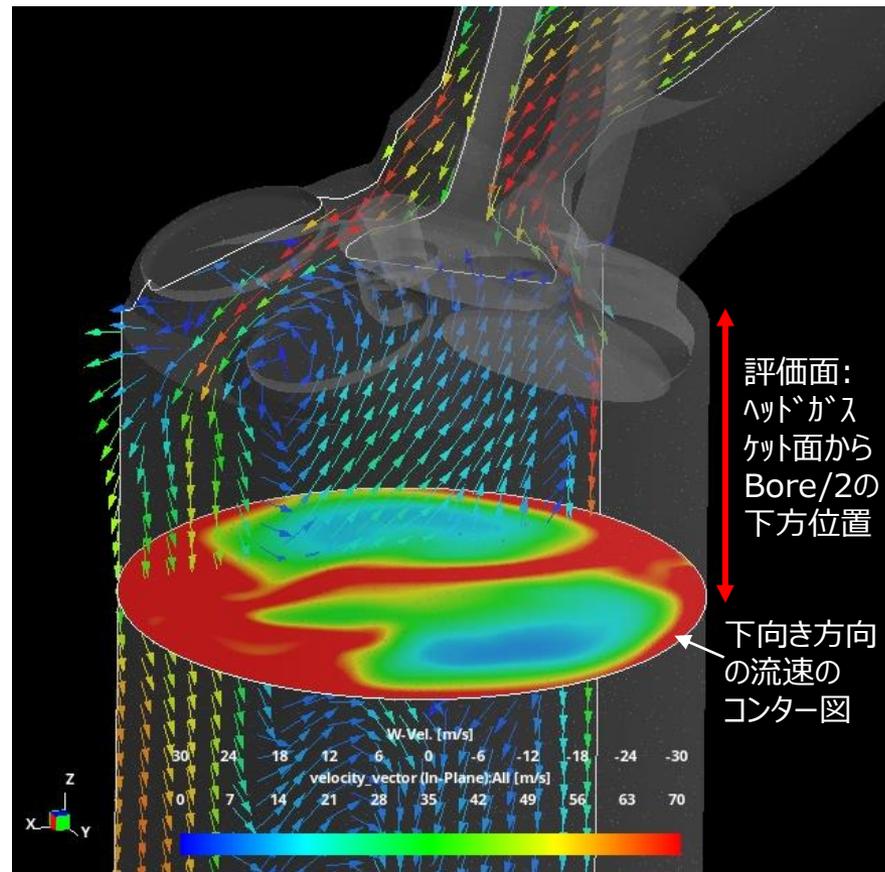
IV. 解析例

- ① ガソリンエンジンの噴霧
- ② 燃料分布のサイクル変動
- ③ ディーゼルエンジンの噴霧
- ④ **ガソリンエンジンポートの定常流**
- ⑤ 副燃焼室

目的：最近のタンブル強化ポートに対する定常流計算に必要なメッシュサイズを検証し、ノウハウ化する。



エンジンポートの定常流計算の境界条件



タンブル流動の評価

		バルブリット 3mm	バルブリット 6mm	バルブリット 9mm
実測	PIV計測			
AMRレベル1 LES	最小メッシュサイズ：0.5mm メッシュ数：715万 プロセス数：201 スレッド数：1 計算時間：29時間			
AMRレベル2 LES	最小メッシュサイズ：0.25mm メッシュ数：904万 プロセス数：297 スレッド数：1 計算時間：50時間			
AMRレベル3 LES	最小メッシュサイズ：0.125mm メッシュ数：2910万 プロセス数：538 スレッド数：1 計算時間：106時間			
AMRレベル3 RANS (RNG)	最小メッシュサイズ：0.125mm メッシュ数：2910万 プロセス数：538 スレッド数：1 計算時間：105時間			

まとめ：LESを使いメッシュを細かくすると、剥離や再付着が正しく計算できて、流動が正確に計算できるようになり、タンブル強化ポートのような新たなコンセプトのポートの仕様検討ができるようになった。計算時間は課題なので、短縮化の検討を行っている。

I. エンジン入門

II. AICEの紹介

III. HINOCAの紹介

IV. 解析例

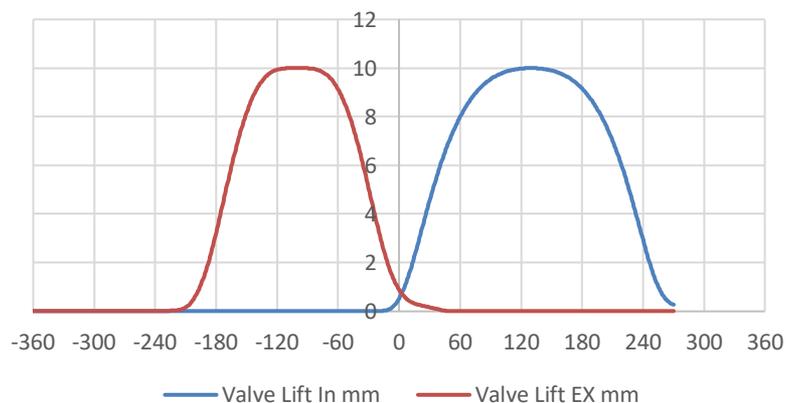
- ① ガソリンエンジンの噴霧
- ② 燃料分布のサイクル変動
- ③ ディーゼルエンジンの噴霧
- ④ ガソリンエンジンポートの定常流
- ⑤ **副燃焼室**

エンジン試験の前にHINOCAで予備検討を実施

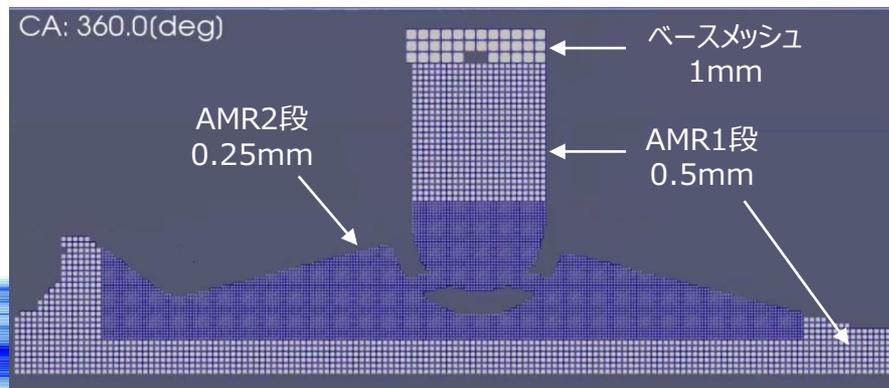
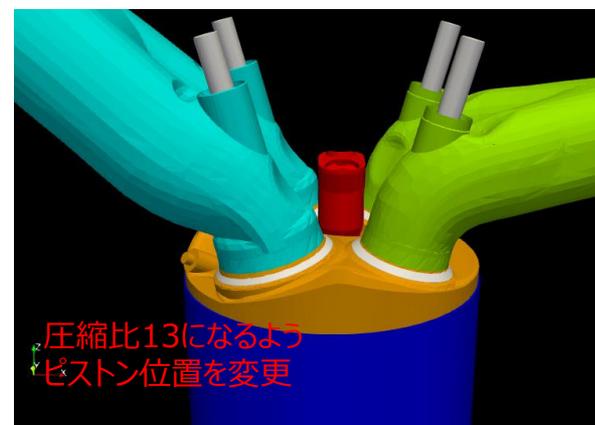
エンジン条件

- ✓ 圧縮比 : 13, 20
- ✓ 燃料 : イソオクタン
- ✓ 主室A/F : A/F = 35 ($\lambda \approx 2.4$) の予混合吸気
- ✓ 副室A/F : A/F = 20狙いで燃料噴射 (-90deg.ATDCで、0.9mgを副室内に噴射)
- ✓ 点火時期 : -20deg.ATDC (MBTではない)
- ✓ NMEP : 10bar狙い (吸排気境界条件で調整)

バルブリフト

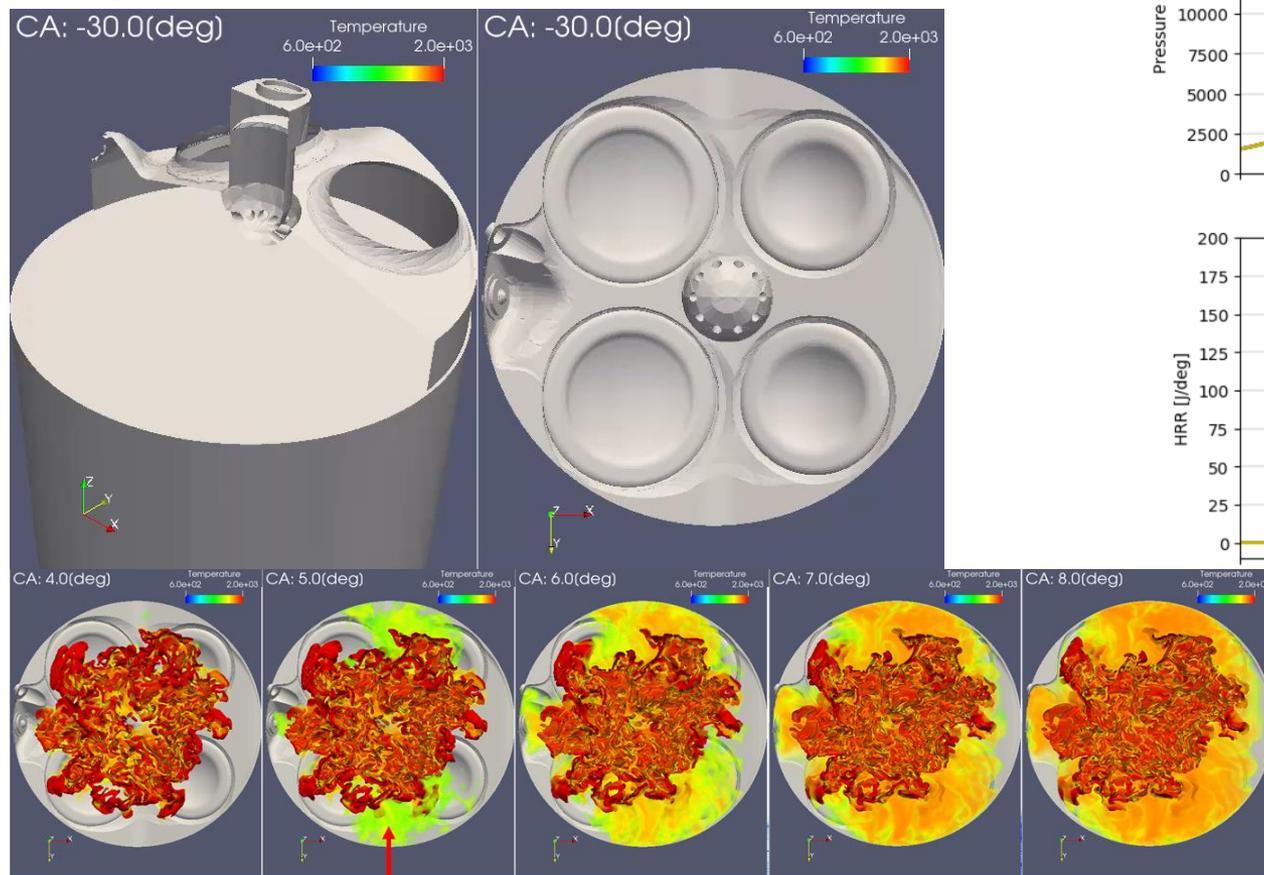


吸気リフト : -24~301deg
 排気リフト : -233~52deg

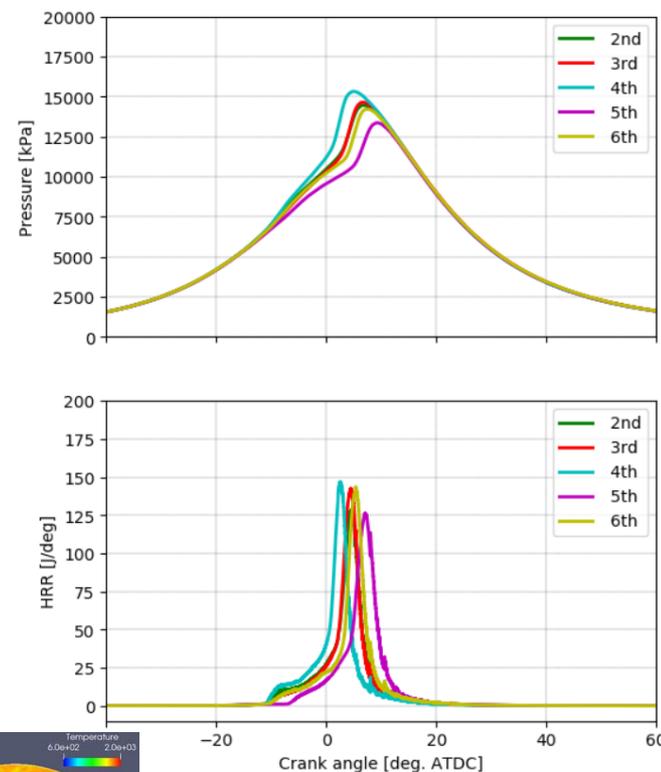


設定モデル

- ✓ 乱流モデル : LES (WALE)
- ✓ 火炎伝播モデル : G方程式モデル (S_L : Gulder, S_T : Pitsch)
- ✓ 壁面熱損失モデル : Han-Reitz
- ✓ 点火モデル : Lucchini
- ✓ 噴霧モデル : KH-RT



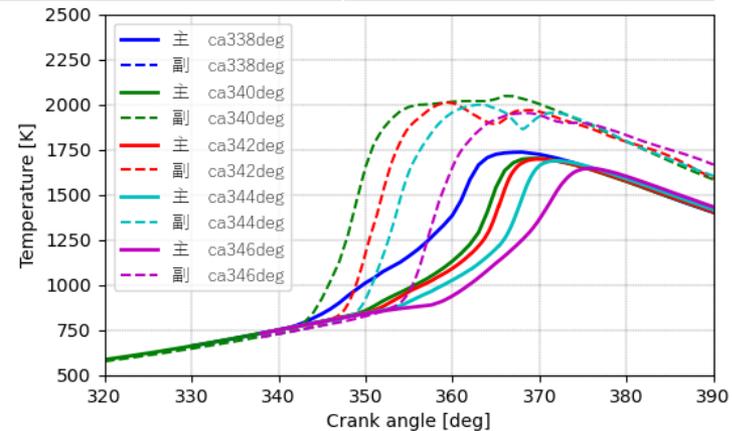
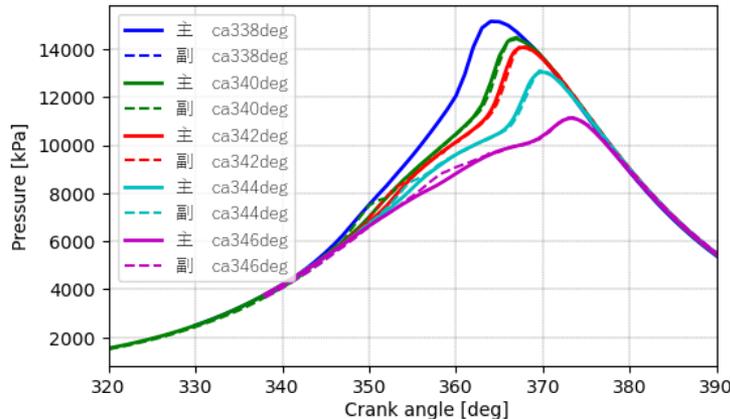
spontaneous ignition



点火時期の影響調査

- ✓ 2サイクル目のリスタートファイルを用いて点火時期パラスタを実施
- ✓ 点火時期： 338(-22)、340(-20)、342(-18)、344(-16)、346(-14) deg.CA

点火時期	BD10-90 [deg]	MFB50 [deg.ATDC]	燃焼効率 [%]
338deg.CA	17.6	0.9	97.7
340deg.CA	12.4	4.2	97.0
342deg.CA	11.7	5.3	96.7
344deg.CA	11.2	7.5	96.6
346deg.CA	12.7	10.6	95.8

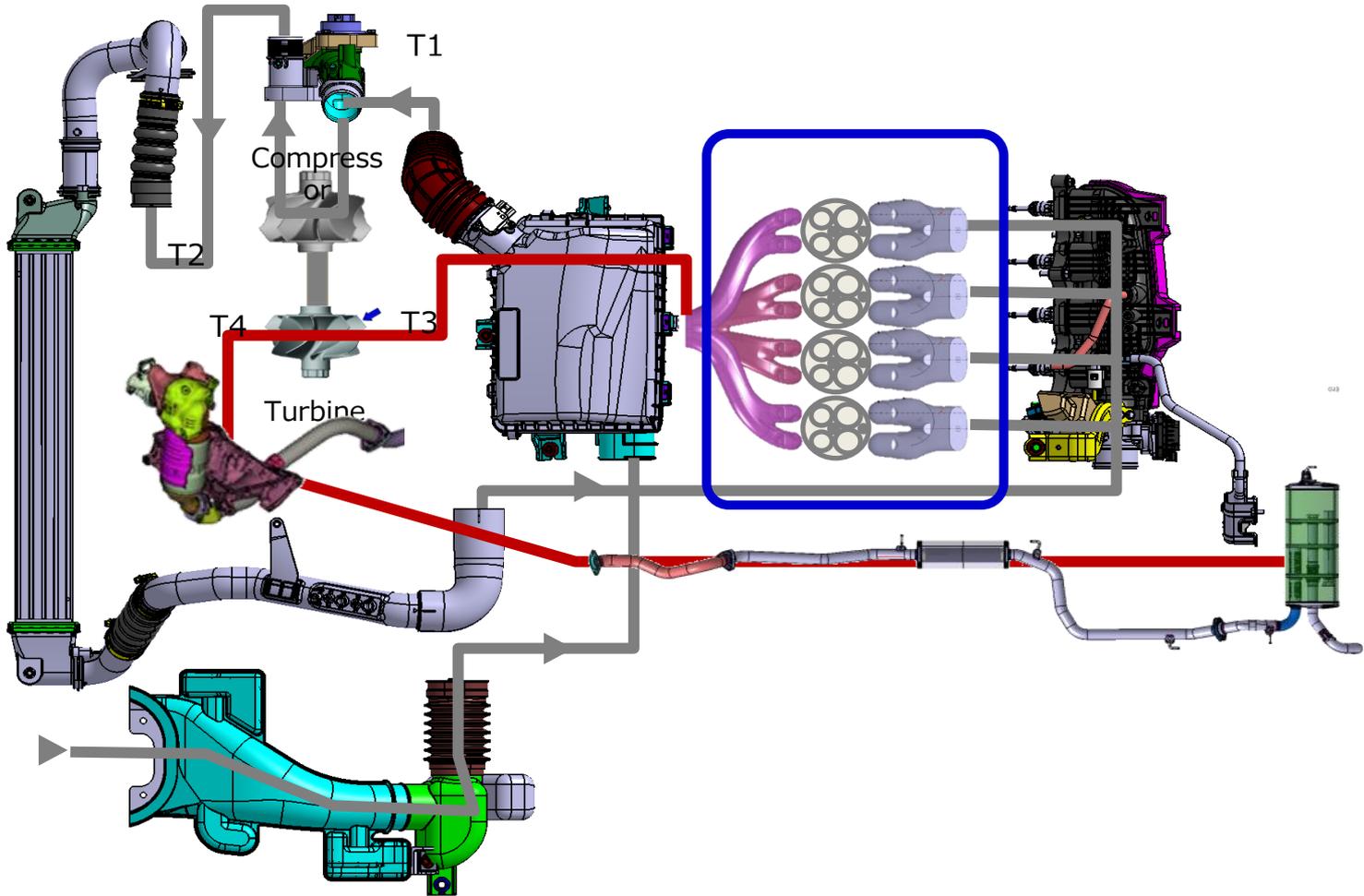


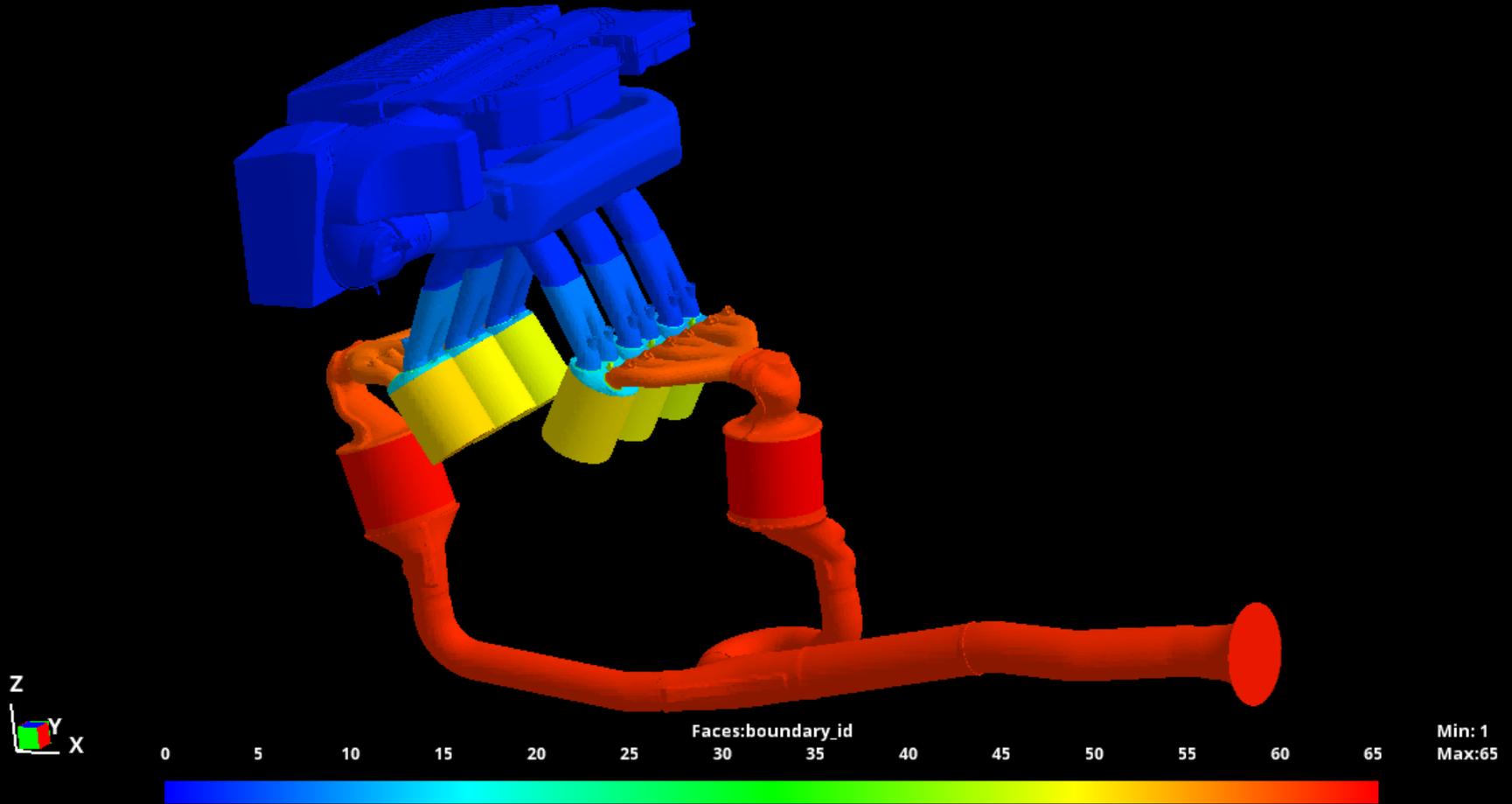
まとめ：詳細な反応計算を実施することにより、副室燃焼の自着火プロセスを計算することができ、副室の仕様検討に使っている。

今回、富岳のような並列数の大きな計算機を使い、変動を再現できるLESを使うことによって、今まで計算ができていなかった現象を再現できるようになった。

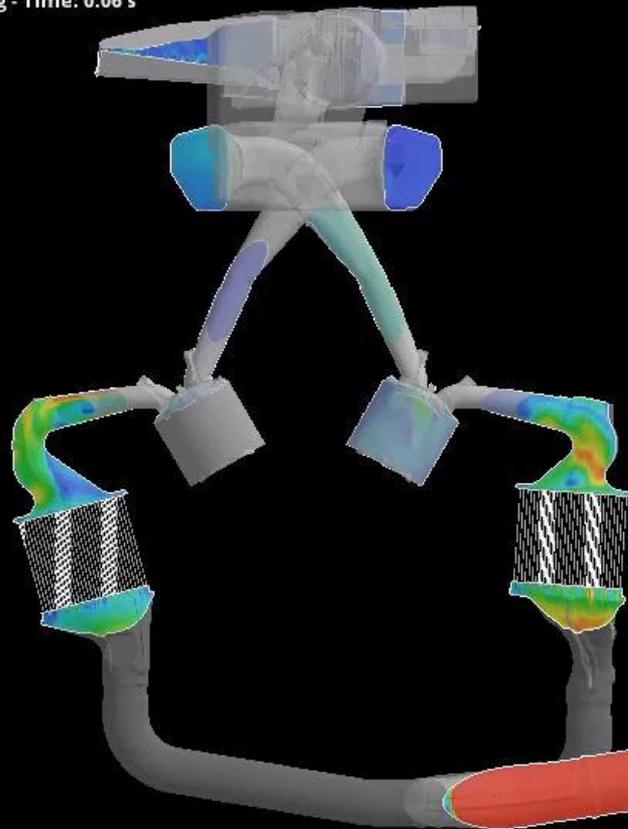
最先端のコンピュータの能力をエンジンの研究開発に活用することにより、更なる効率向上、排ガス低減が期待できる。

将来的には、計算手法にLESや圧縮性を採用し、モデル規模を拡大し、メッシュを詳細化して、リアルワールドに近づけていく。

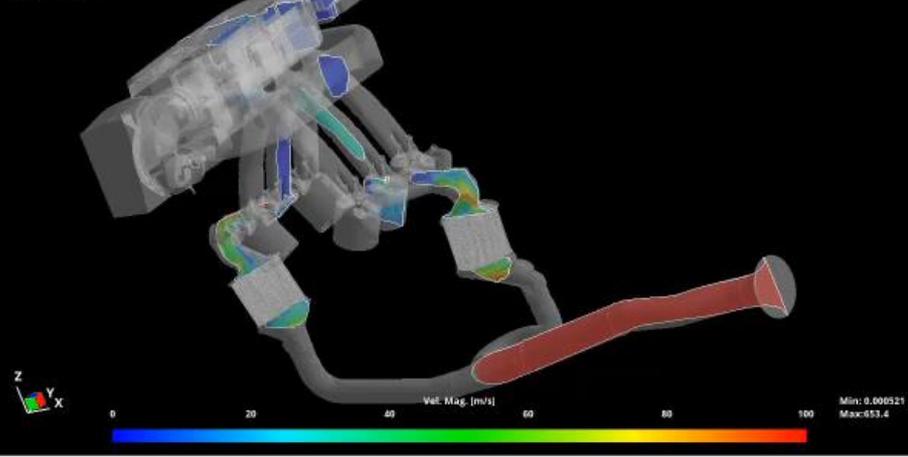




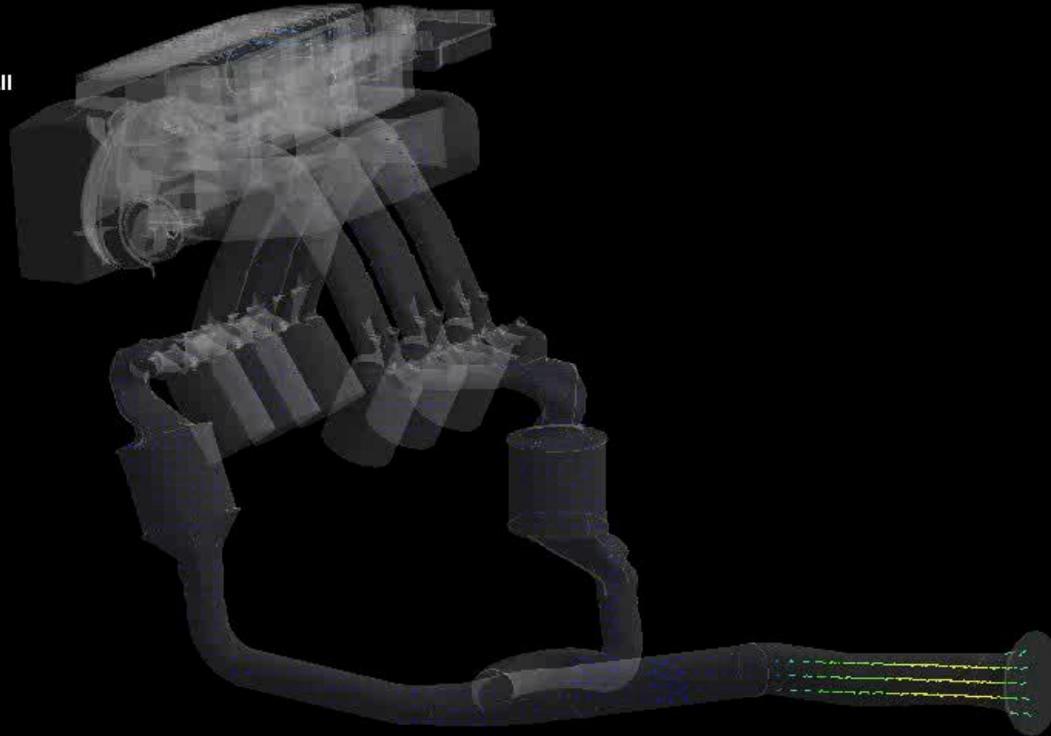
Step: 144 - Crank Angle: 720 deg - Time: 0.06 s
Data: s1 - Elements



Step: 144 - Crank Angle: 720 deg - Time: 0.06 s
Data: s1 - Elements



Contour = Step: 2 - Time: 0.001 s
 Data: g2, g3, g4 - Elements
 Vector = Step: 2 - Time: 0.001 s
 Data: g2, g3, g4 - Elements, Component: All



			Vel. Mag. [m/s]						
0	10	20	30	40	50	Min: 6.649e-05			
			Vel. Vec.:All [m/s]						
0	10	20	30	40	50	Max:49.94			
						Min: 0.04467			
						Max:45.29			

