

1/28 燃焼公開シンポジウム

産産学学連携で生まれた3次元燃焼解析 ソフトウェア『HINOCA(火神)』

平成31年1月28日(月) 14:50-15:20

東大安田講堂

草鹿 (早大) HINOCA WG 研究統括

溝渕 (JAXA) HINOCA WG 制御チーム代表

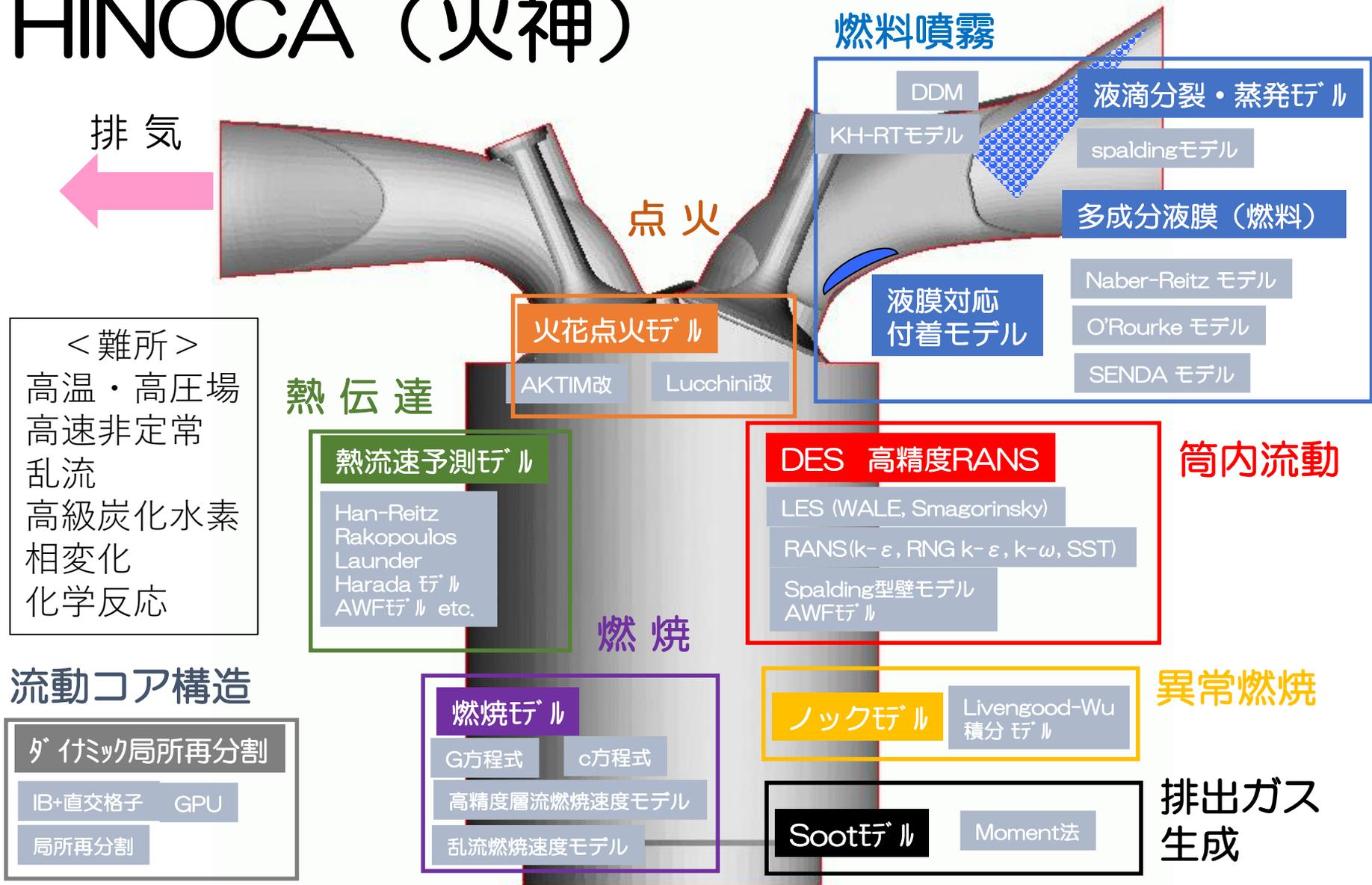
店橋 (東工大) HINOCA WGガソリンチーム代表

高林 (本田研) AICE 燃焼研究委員会 CAE・PM分科会長

本日の内容

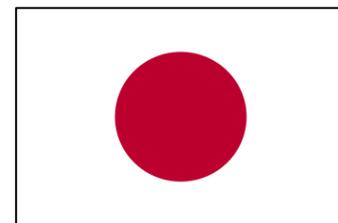
- (1) HINOCA 研究開発全体説明 (草鹿)
- (2) HINOCA プラットフォーム (溝渕)
- (3) 産産学学連携による先端モデル開発事例 (店橋)
- (4) HINOCAの将来 (高林)

HINOCA (火神)



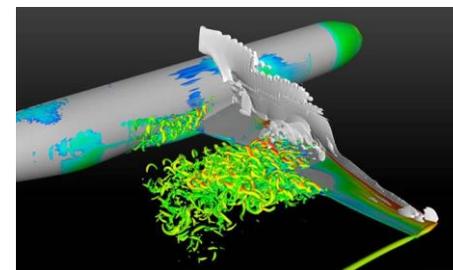
1機構, 1研究所, 22大学がプログラミング, モデル化, 定式化, 実験を実施

プログラムの構造



All Japan の
開発体制

航空宇宙分野で
培ってきた計算
科学技術を導入

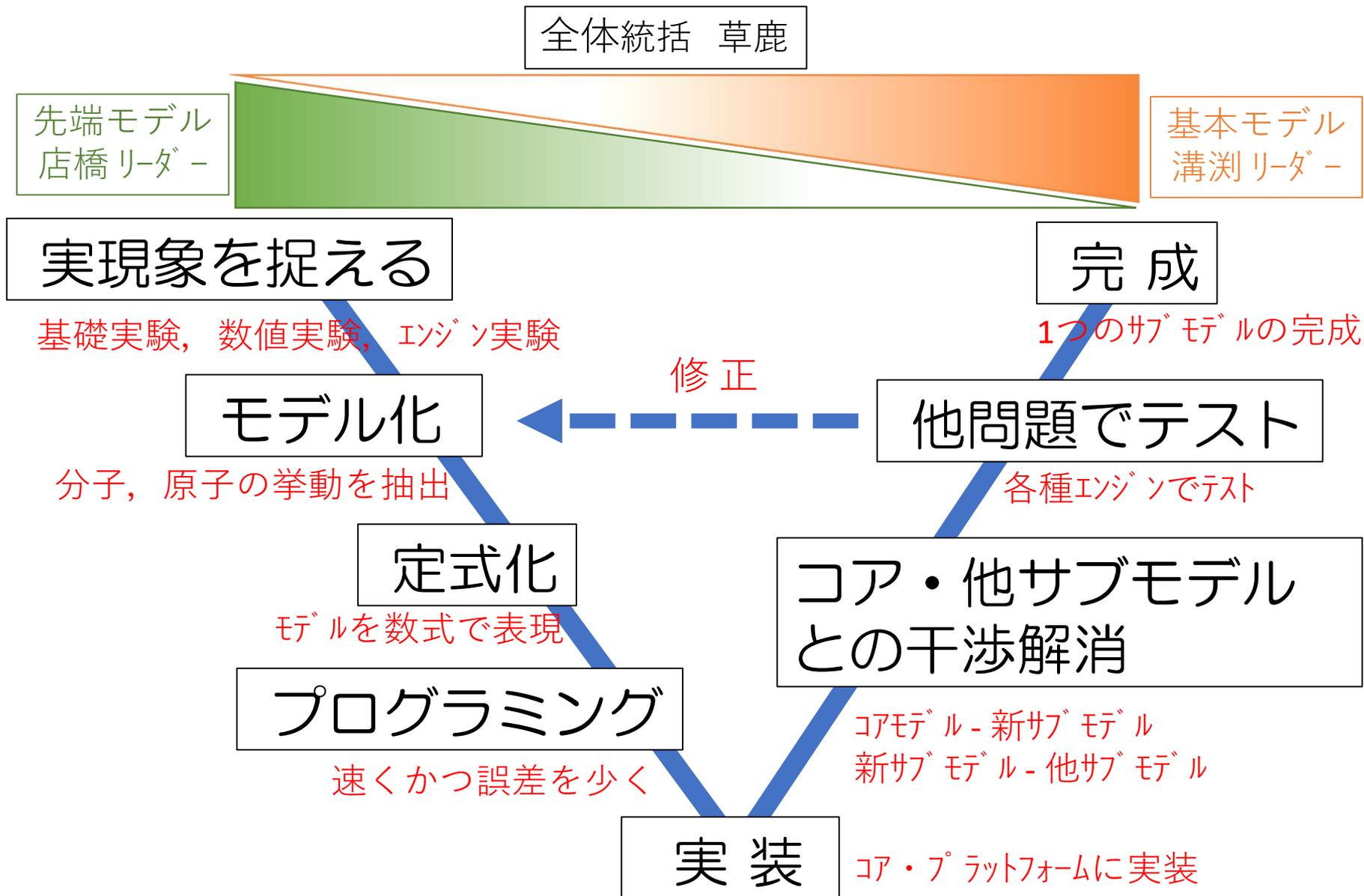


高速化

MPI, OpenMP, GPU, Know-How



プログラムの開発



HINOCA プラットフォーム

溝渕泰寛 HINOCA WG 制御チーム代表

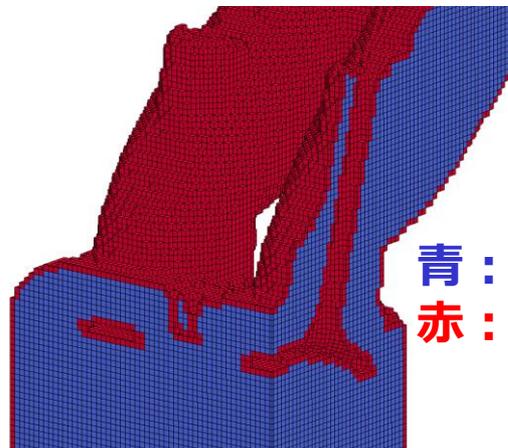
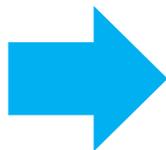
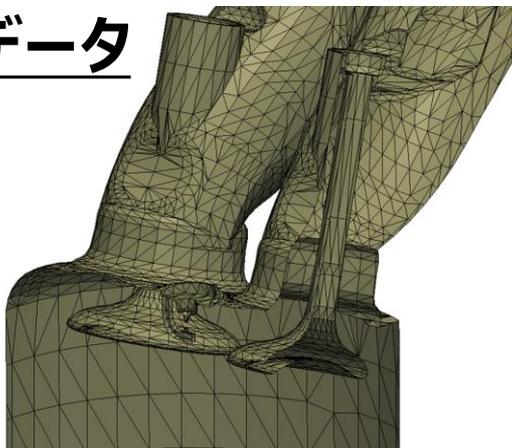
宇宙航空研究開発機構

- プラットフォーム開発方針・体制
- プラットフォームの仕様、基本機能
- 効率化・高速化・利便性向上
 - 並列計算効率化(ロードバランス平滑化)
 - 局所細分化(Adaptive Mesh Refinement)
 - ユーザーサポート GUI
- まとめ:HINOCA 現在の姿

エンジン燃焼解析ソフト HINOCA とは

- 等間隔直交格子法 + 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
- 各種乱流モデル (LES,RANS) 、壁関数、サブモデル搭載

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で解析開始

HINOCA 開発の狙い：期待される産学連携の成果

*2016/6/20 SIP革新的燃焼技術第2回公開シンポジウムより

課題(1)：エンジン熱効率向上

改善方向

- ・高圧縮比化
- ・希薄、希釈化
- ・熱伝達抑制
- ・摩擦低減

燃焼の課題

- ・ノック抑制
- ・点火着火安定化
- ・火炎伝播安定化
- ・熱伝達機構解明

シミュレーション要件

- ・**圧縮性を考慮**
- ・**サイクル変動予測**
- ・**高精度サブモデル**

課題(2)：開発効率向上、人材育成

- ・うまく作る：産学が連携し、日本の英知を結集して高精度なサブモデルを開発
- ・うまく使う：産産学学が共通のモノサシで議論
メッシュ作成作業からの解放
- ・しっかり育てる：ソフト開発/活用を通じ、筒内現象を広く深く理解したエンジン技術者を育成

利用要件

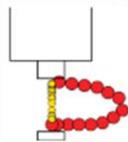
**オープンソースの
産学共通
プラットフォーム**

開発体制

制御チーム
CAE・PMグループ

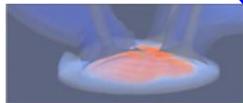
大阪大 点火モデル

- 放電経路を考慮した、超希薄、高流動、高EGR対応点火モデルの組込



早稲田大 火炎伝播モデル

- 超希薄燃焼対応火炎伝播モデルの組込



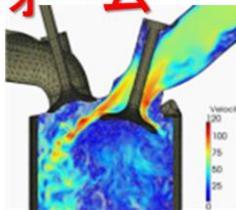
海技研 噴霧モデル

- 液滴の変形/分裂/合体、気相セル内速度分布を考慮した離散液滴モデルの組込



JAXA プラットフォーム

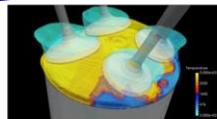
- 実形状対応
- 圧縮性流動
- 移動境界
- 反応高速計算



の機能を有したコア部分
部分を構築

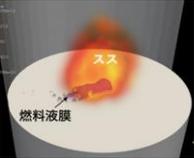
東北大 ノックモデル

- Livengood-Wu 積分を使った自着火予測モデル組込



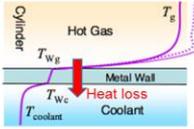
大分大・北大 PM生成モデル

- 液膜モデルおよび、モーメント法を用いたスス生成モデル組込



広島大 壁面冷損モデル

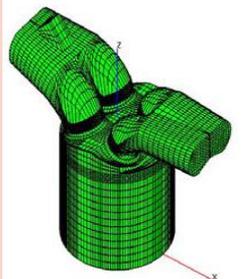
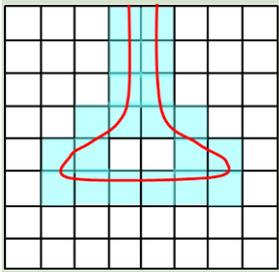
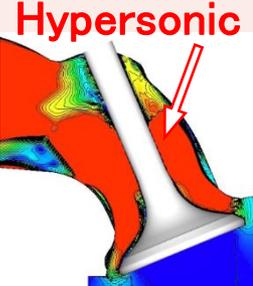
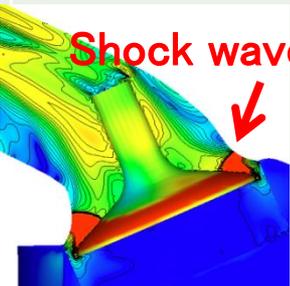
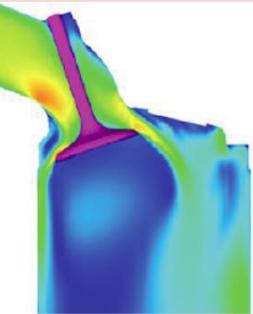
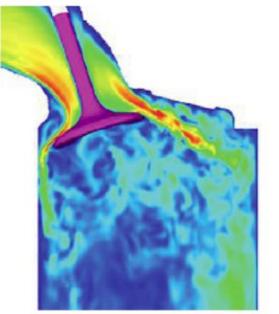
- 圧縮性、非定常性考慮モデルの組込



ガソリンチーム・サイエンス・先端モデル

AICE（自動車用内燃機関研究組合）：検証

従来の解析プラットフォームにおける課題と対策

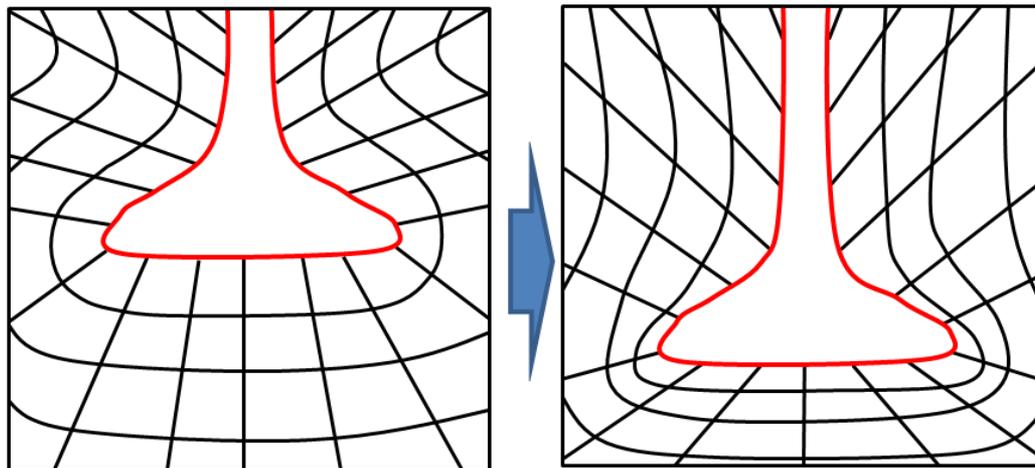
従来ソフトの課題	原因	対策
膨大なメッシュ 作成コスト		直交格子法 + IB (Immersed Boundary) 法 
チョーク現象、 衝撃波を捕えら れない		完全な圧縮 性流体方程 式 
サイクル間変動 を再現できない	 RANS	LES (Large Eddy Simulation) に も とづく空間 平均的解析  LES

メッシュ作成の煩わしさから解放します

等間隔直交格子法 + IB法

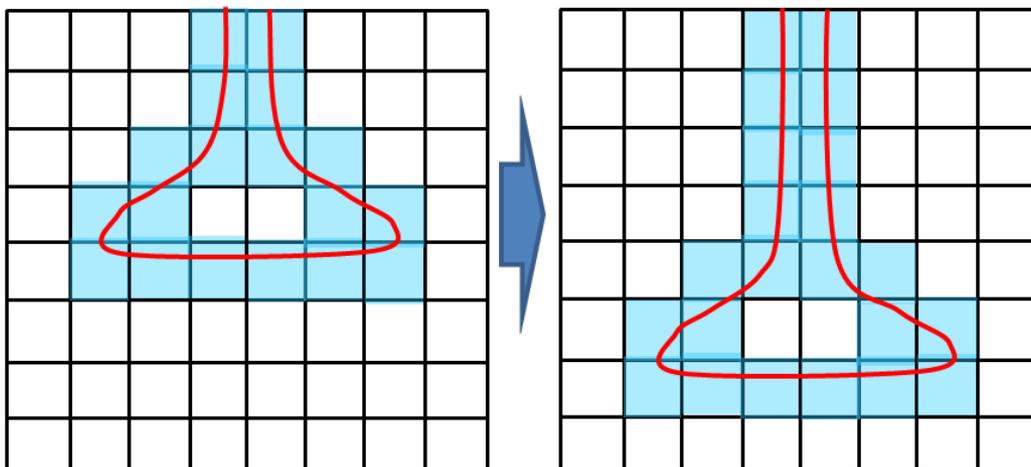
一般的なCFD

- メッシュは物体にはりついている
- 物体境界(赤線)が動くとメッシュ全体を作り直し

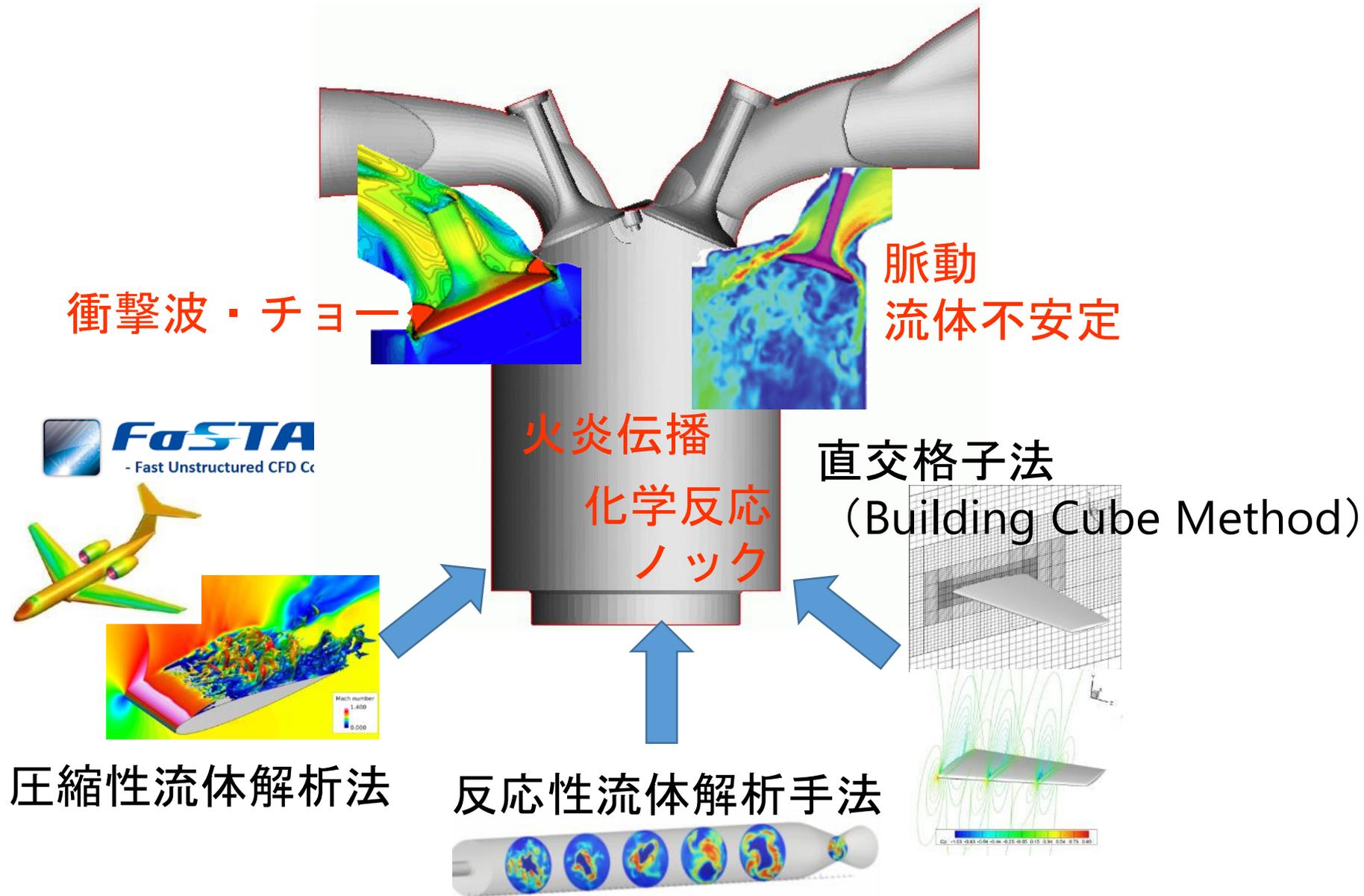


火神 HINOCA

- メッシュは動かない
- 物体境界(赤線)を含むメッシュ(水色)の物理量が適切に与えられる



航空宇宙分野で培ったシミュレーション技術を結集してプラットフォーム開発



プラットフォームの仕様、基本機能

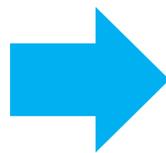
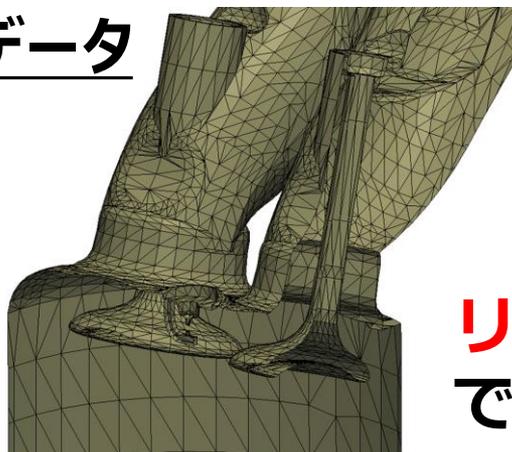
プログラムソース

- 仕様言語：FORTRAN90
- 機能ごとにMODULE化
- サブモデルの組込みが容易

基本機能

- 形状データ（STL形式）から自動で計算条件設定
- Hybrid 並列計算（MPI + OpenMP）を自動設定

形状データ



**リードタイム0
で並列計算**



並列計算ロードインバランス解消が必要

計算領域を含まないブロックを削除

残ったブロック毎にCPUを割り当て並列計算

計算負荷大

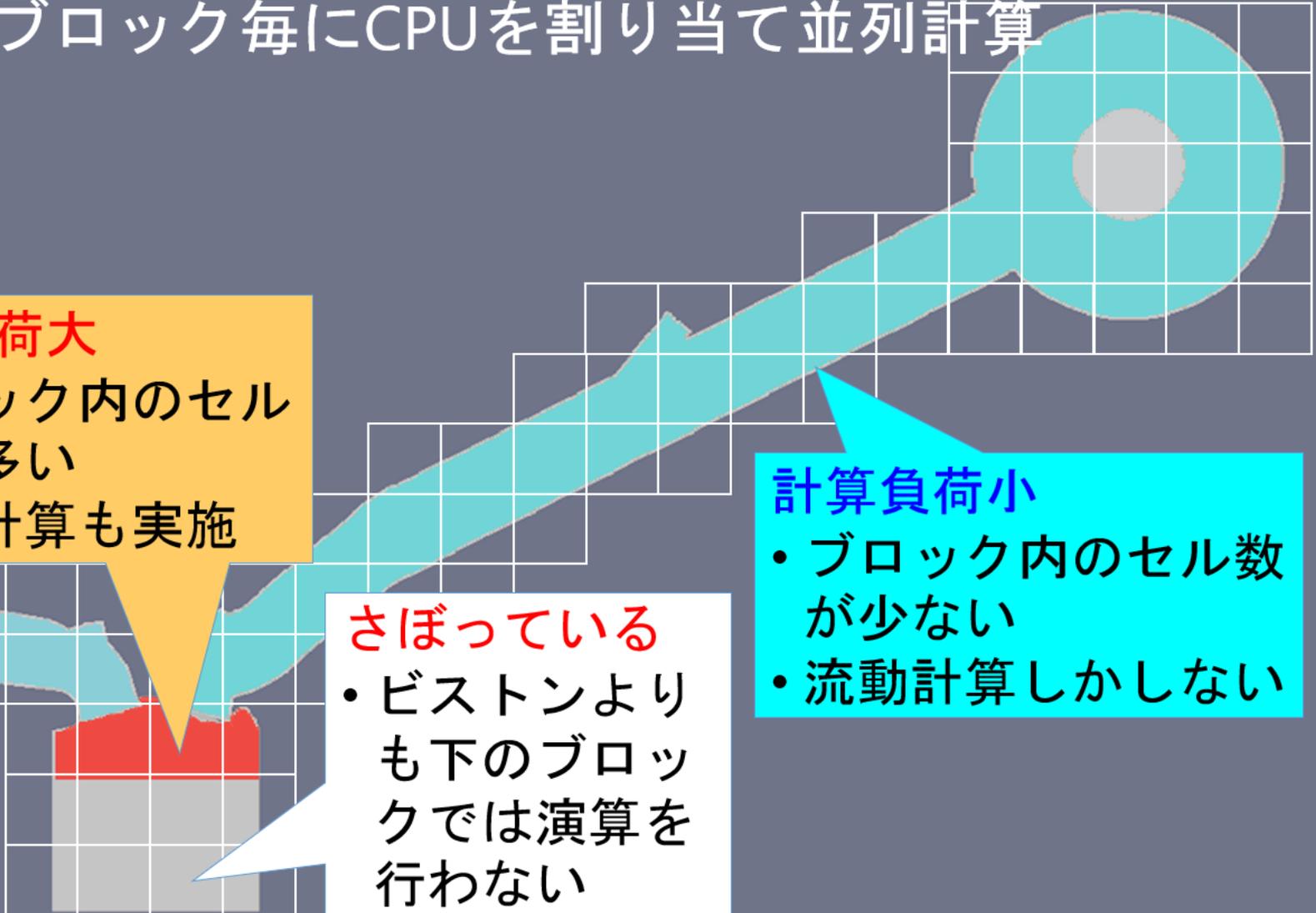
- ブロック内のセル数が多い
- 燃焼計算も実施

さぼっている

- ビストンよりも下のブロックでは演算を行わない

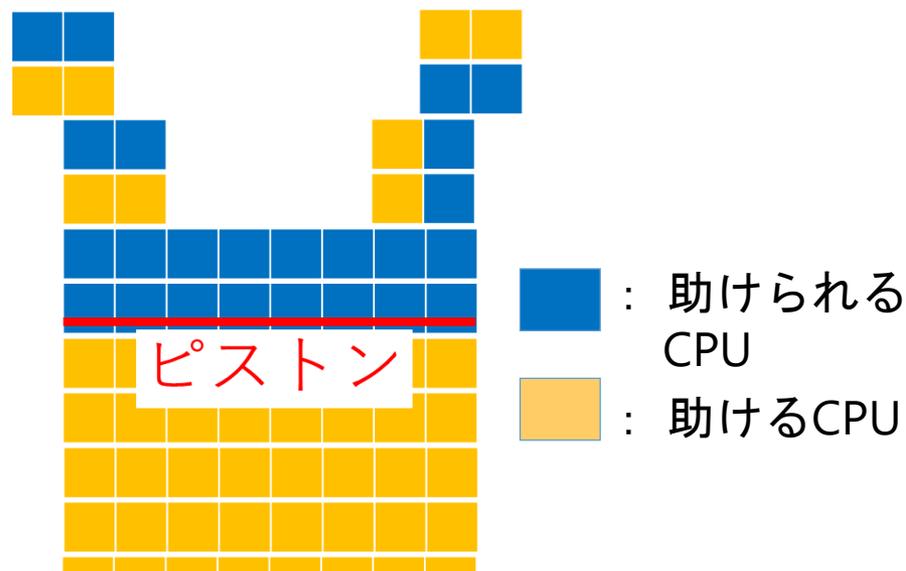
計算負荷小

- ブロック内のセル数が少ない
- 流動計算しかしない



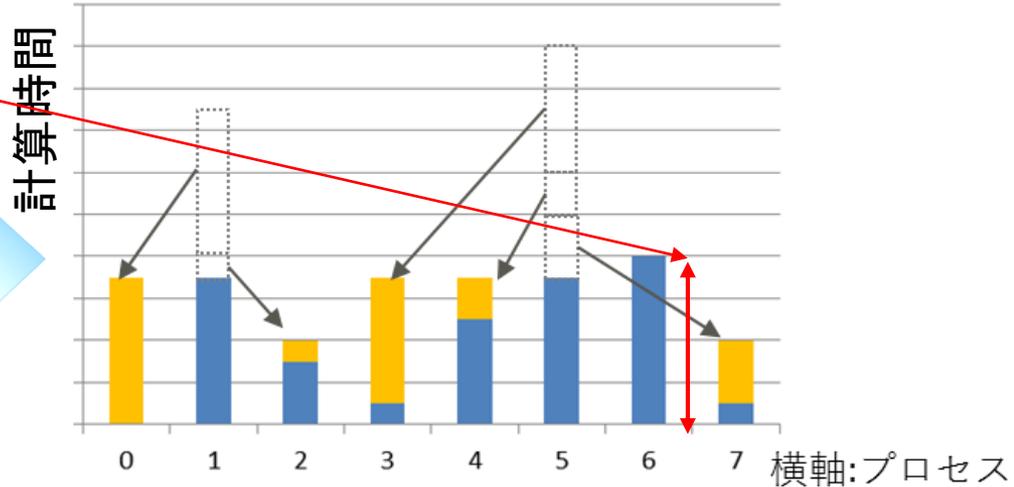
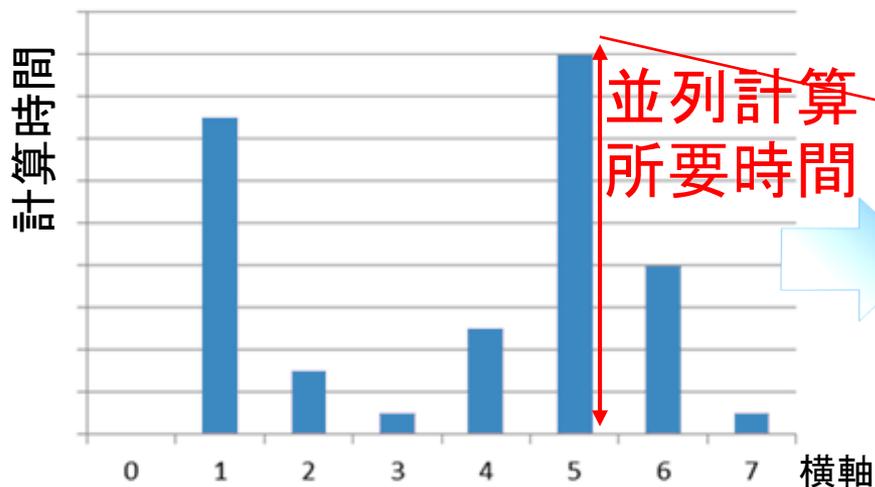
並列計算ロードバランス平滑化機能

負荷分散、収集の通信コストが発生するものの、**サイクル全体で数十%の速度向上**



インバランス解消前

インバランス解消後

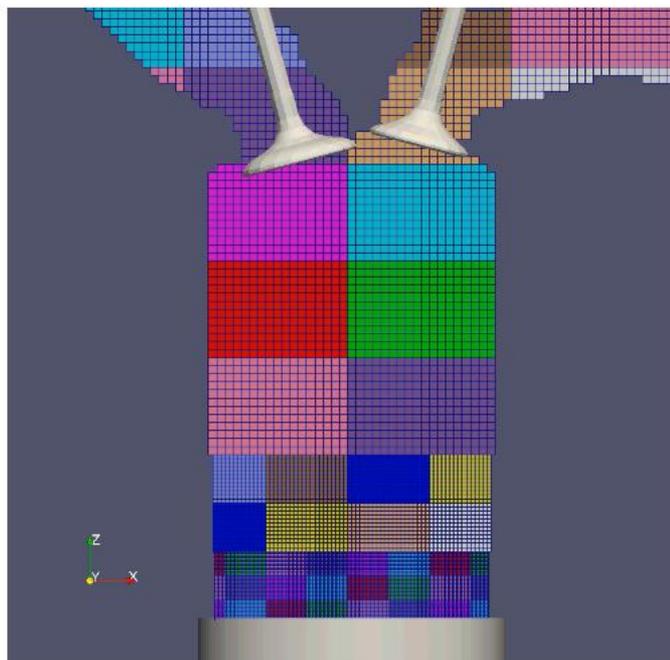


局所細分化機能

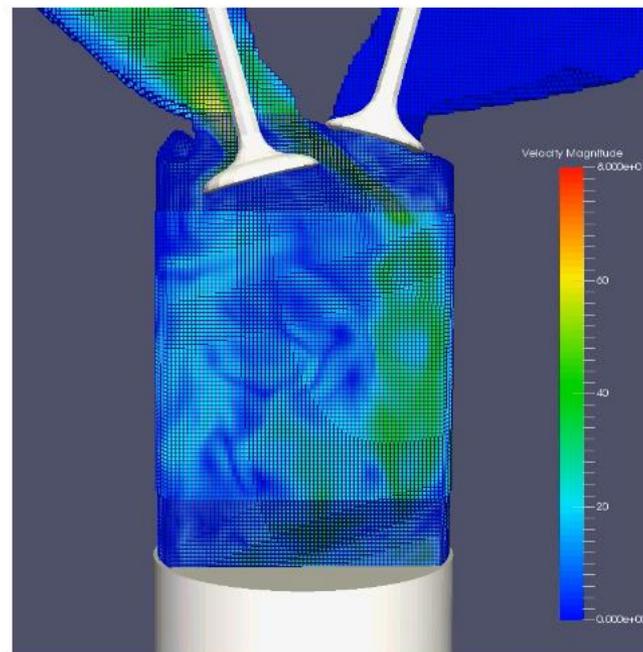
(BAMR: Block Adaptive Mesh Refinement)

バルブ付近、壁近傍で
局所的に高い空間解
像度が必要

並列計算のスケールビリ
ティが高い、BAMRを導入



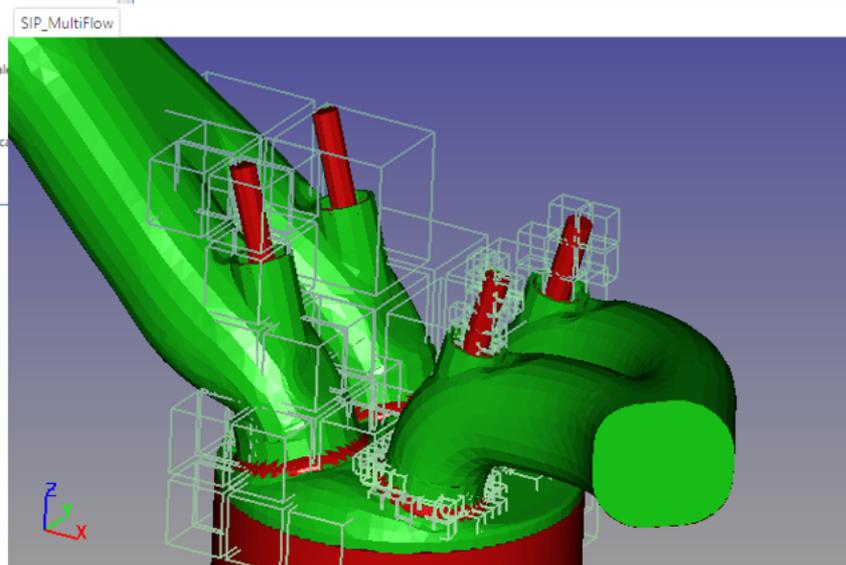
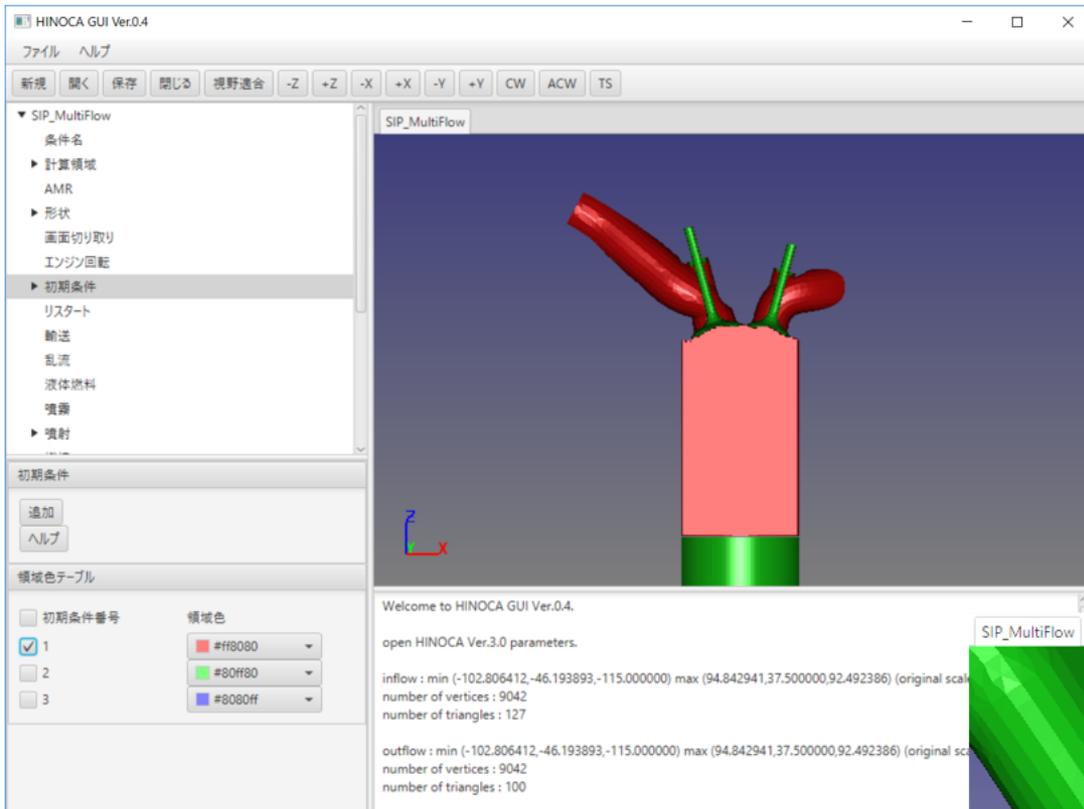
ピストン位置を自動追従



バルブ付近、ピストン近傍を
AMR化したモータリング計算

ユーザーサポートGUI

- 計算（運転）条件入力
- バルブ・ピストンを動かして設定確認
- 最高細分化レベルと、その位置をGUIで指定
=>自動的に、細分化レベルがスムーズに変化するようにその周りを細分化



まとめ：HINOCA 現在の姿

プラットフォーム+サブモデル

乱流(流動)モデル	壁モデル	壁面冷損モデル	噴霧モデル	壁面液膜モデル	点火モデル	火炎伝播モデル	ノックモデル	PMモデル	⋮
-----------	------	---------	-------	---------	-------	---------	--------	-------	---

プラットフォーム

等間隔直交格子法+IB(Immersed Boundary)法

- 格子生成作業なしで**圧縮性**流体計算実行
- 自動並列計算(MPI+OpenMP)
- 高速反応計算

ブロックAMR(Adaptive Mesh Refinement)

- 領域分割されたブロックごとに局所細分化

並列計算ロードバランス平滑化

SIP「革新的燃焼技術」公開シンポジウム
産産学学連携で生まれた
3次元燃焼解析ソフトウェア『HINOCA(火神)』

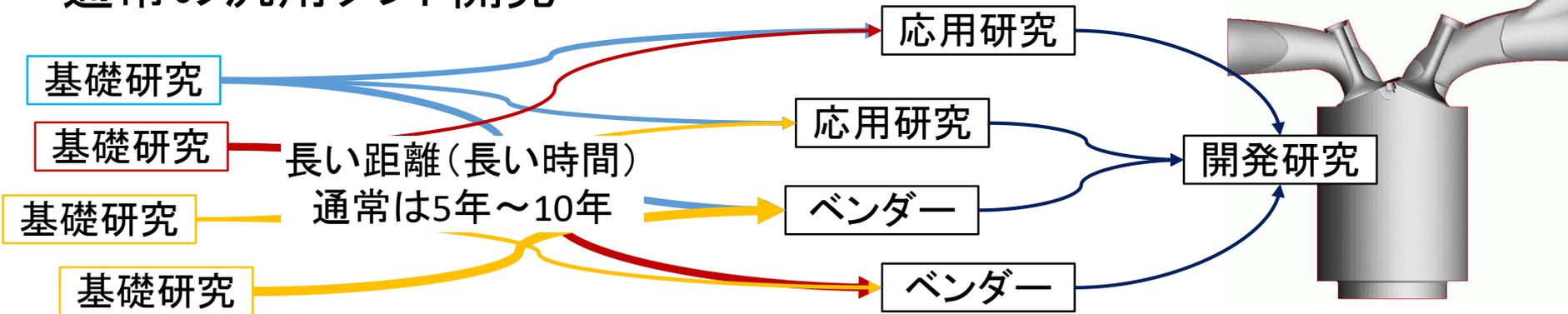
2019年1月28日

産産学学連携による先端モデル開発事例
～サイエンスからのチャレンジ～

HINOCA WG ガソリンチーム代表
店橋 護(東京工業大学工学院)

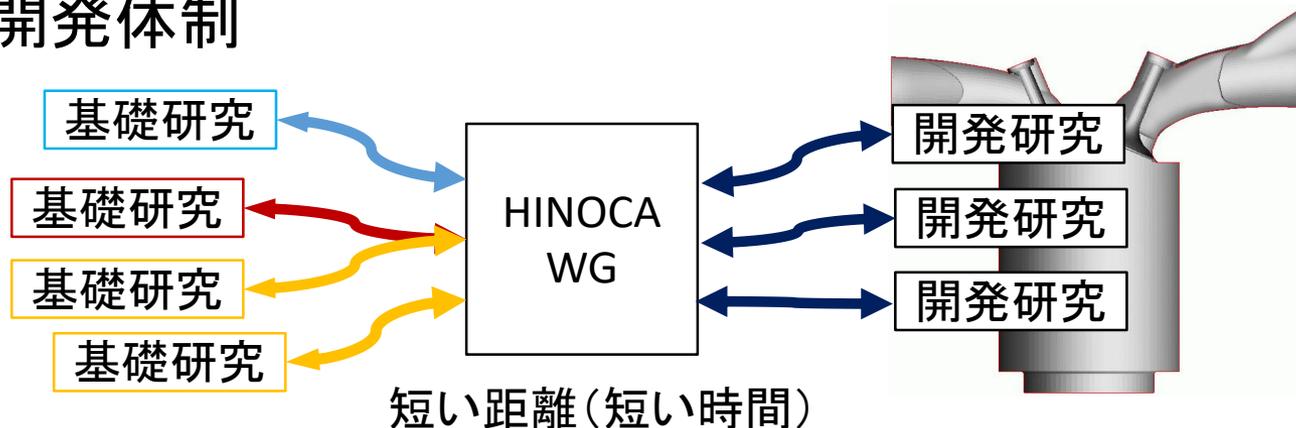
HINOCA開発体制～基礎・応用・開発研究の距離～

• 通常の汎用ソフト開発



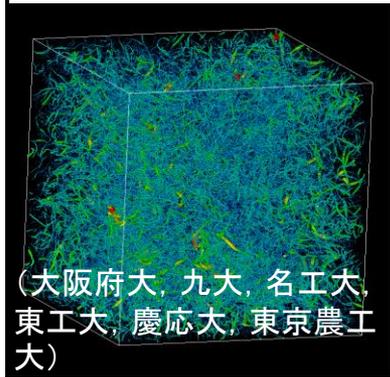
- Craft-Launder-Sugaモデル(1996)(須賀, 大阪府大)
- Abe-Kondoh-Naganoモデル(1994)(安倍, 九大)
- 普遍的微細構造(1997)(店橋, 東工大) → Coherent Structure SGSモデル(2005)(小林, 慶応大)
- FDSGSモデル(基本概念1994 → 定式化2006)(店橋, 東工大)

• HINOCAの開発体制



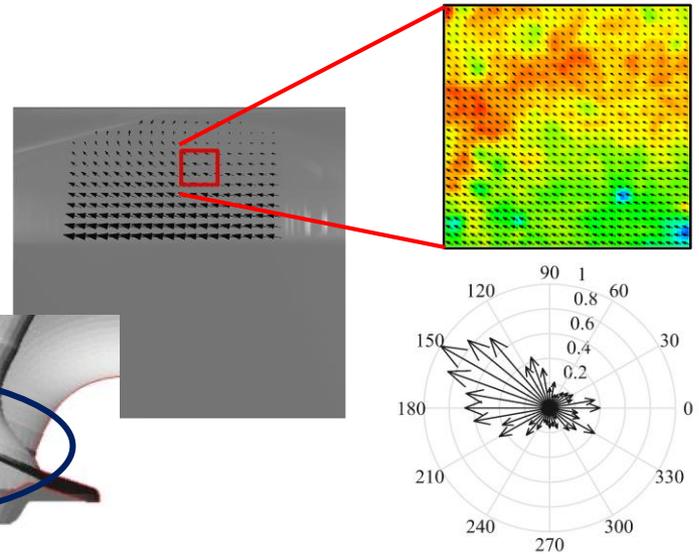
流動(乱流現象)のモデリング

乱流現象に関する最先端の知見

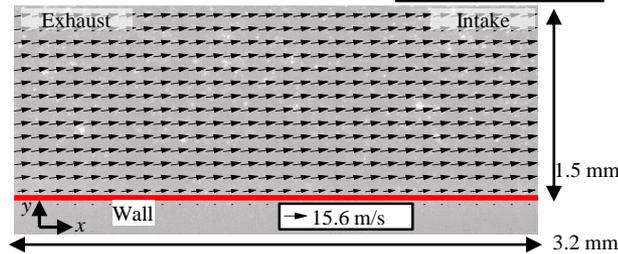
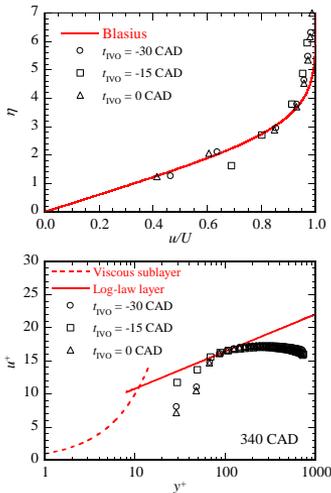


- エンジン筒内の流動(乱流)に関する新たな知見
- 適切な乱流モデルの提言・提案
- 適切な壁面近傍の取り扱い

世界最高の乱流計測



世界最高の μ PIV計測



流動予測

- エンジン筒内の壁面近傍は層流でも十分発達した乱流でもない

(東工大, 東京農工大, 慶応大)

- サイクル変動と乱流変動の分離
- タンブル強化と乱流変動強度
- 燃焼に寄与する乱流変動の抽出

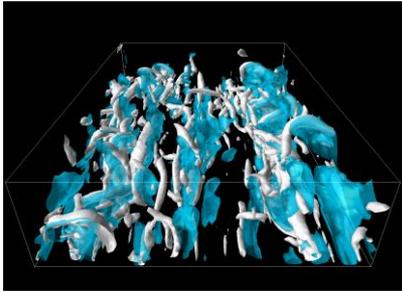
- 乱流モデル(LES, RANS)の検証
- 乱流燃焼機構の解明
- 乱流燃焼モデル(LES, RANS)の開発・検証

(東工大, 東京農工大, 山口大, 慶応大)

従来, 完全発達した乱流の仮定? → 脱却可能か

乱流熱伝達のモデリング

乱流熱伝達・制御に関する最先端の知見

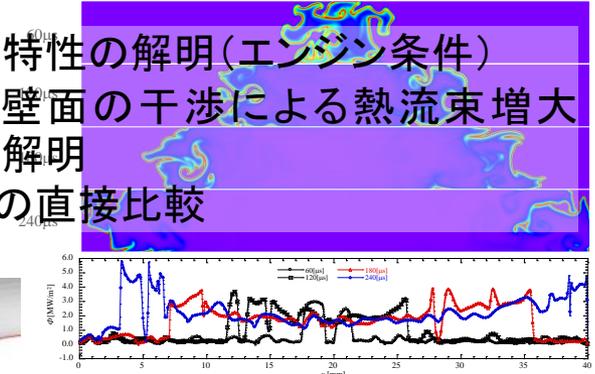


- 適切な乱流熱伝達モデルの提言・提案
- 適切な壁面近傍の取り扱い
- 乱流伝熱制御

(名工大, 九大, 大阪府大, 東工大, 慶応大, 東京農工大)

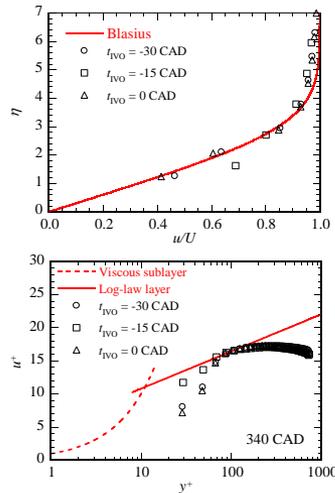
最先端乱流燃焼のDNS

- 熱損失特性の解明(エンジン条件)
- 火炎と壁面の干渉による熱流束増大機構の解明
- 計測との直接比較



(東工大)

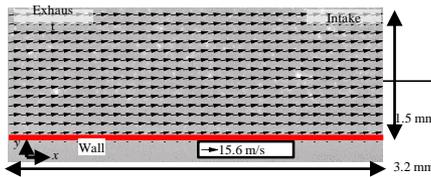
世界最高の流速・温度計測



- 壁面近傍の流動特性 → 熱流速モデルの基礎
- 温度・濃度との同時計測
- 伝熱促進デバイス

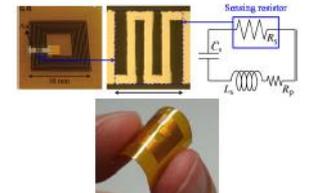
(東工大, 東京農工大, 慶応大)

乱流熱伝達 + α

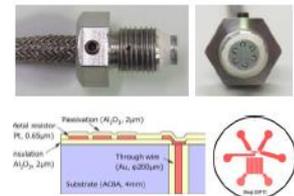


最先端熱流速センサー

- 瞬時熱流束センサー
- 無線熱流束センサー
- 多点熱流速センサー



- RCM や SIP 共用エンジンでの詳細計測
- PIV や PLIF 等との同時計測



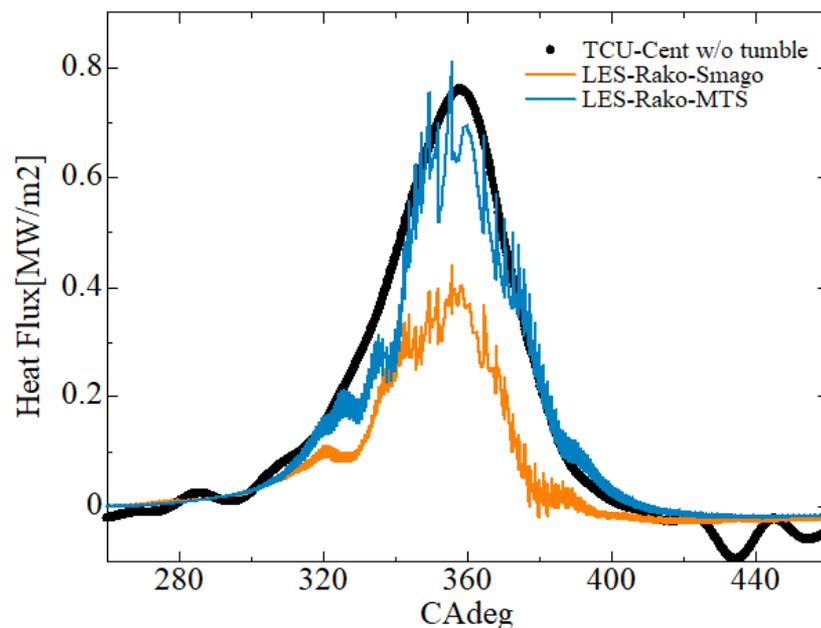
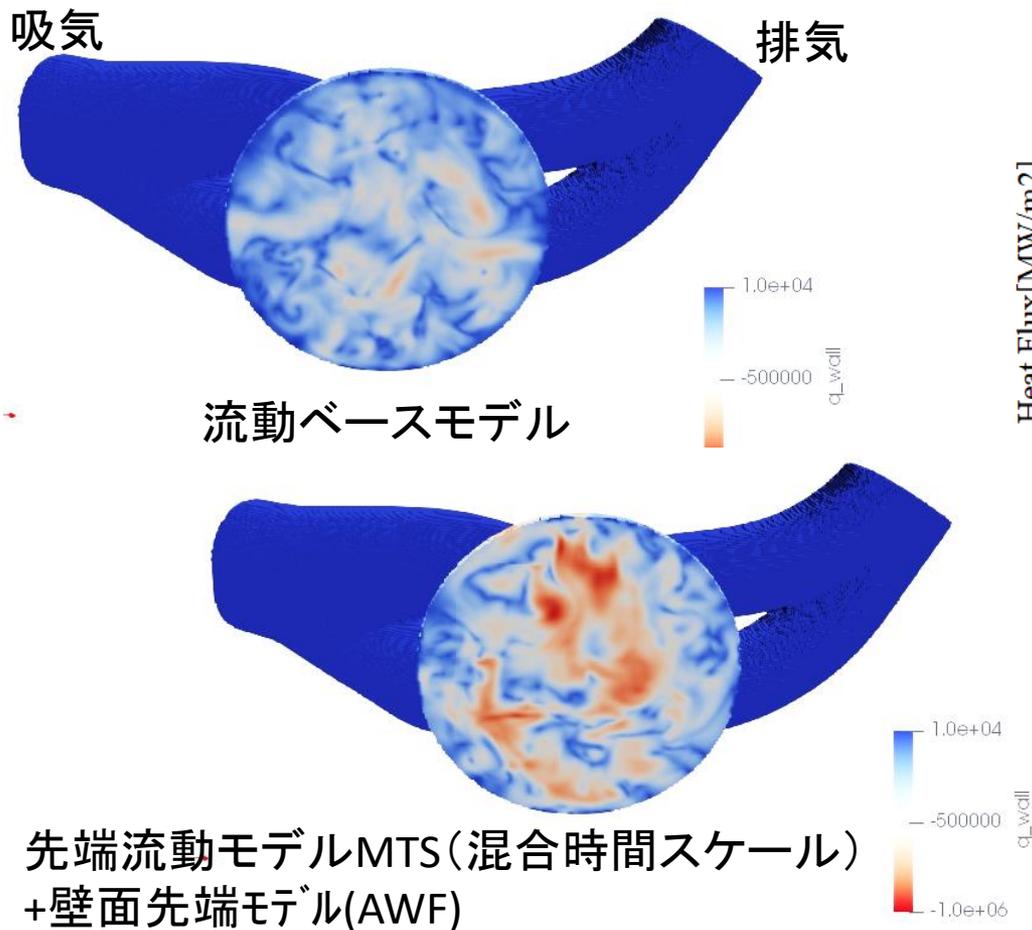
(都市大, 明治大, 東大, 東工大)

高精度熱伝達モデルと火炎-壁面干渉機構の解明

ガソリンチームと連携した開発・検証①

流動モデルと冷却損失モデルの高精度化 (LES解析例)

(大阪府大, 九大, 名工大, 東工大, 農工大, 慶應大, 広大, JAXA)



壁面熱流束計測
慶應大, 都市大, 明大の連携

冷却損失: ベースモデル

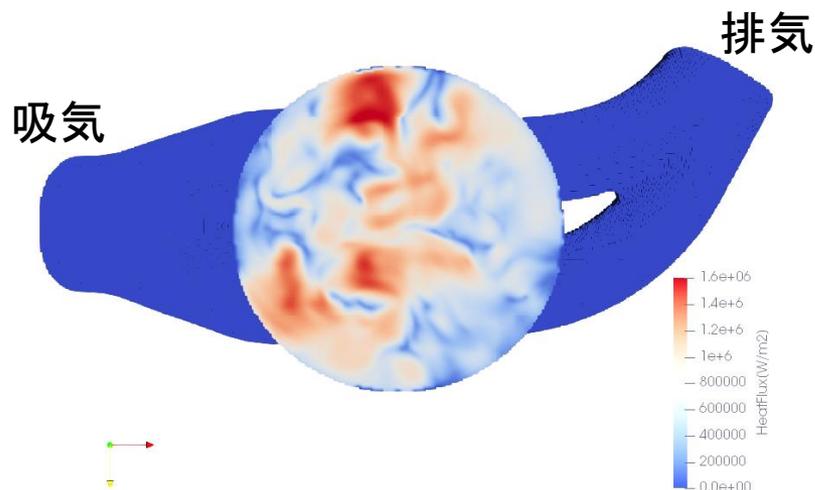
※レンジの数字が逆

ガソリンチームと連携した開発・検証②

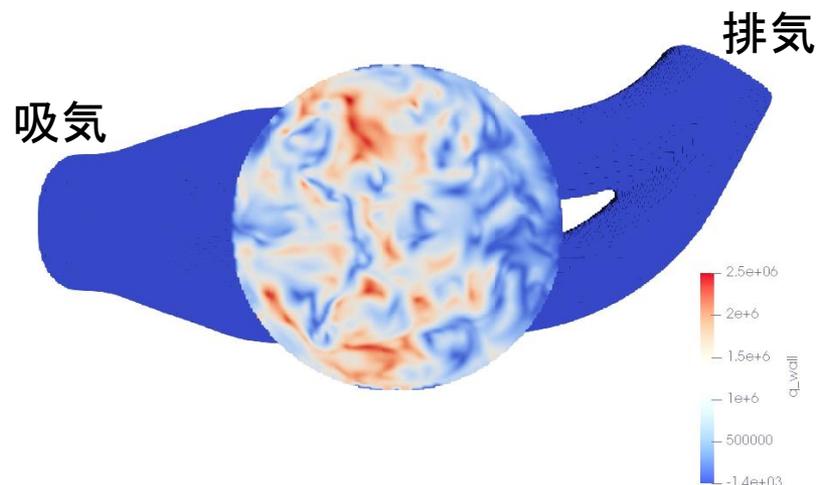
冷却損失モデルの高精度化

(大阪府大, 九大, 名工大, 東工大, 農工大, 慶應大, 広大, JAXA)

LES解析の例



流動: ベースモデル
冷損: ベースモデル



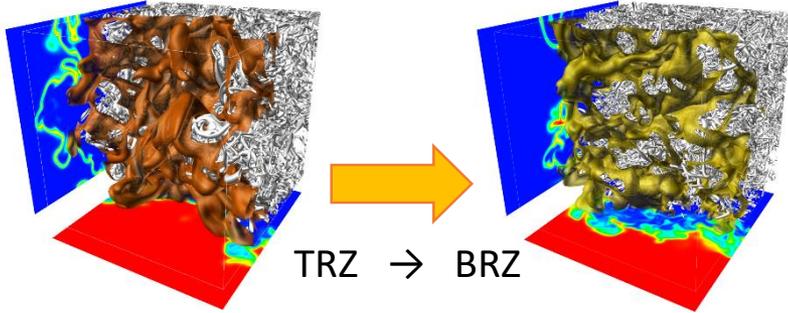
流動: ベースモデル+壁面先端モデル
冷損: 先端モデル



乱流運動等による壁面熱流束の詳細な
変動を再現可能

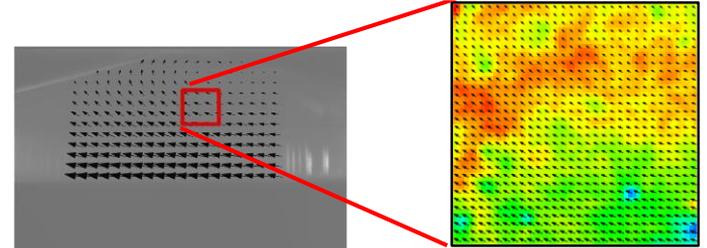
乱流火炎伝播のモデリング

最先端の乱流燃焼DNS

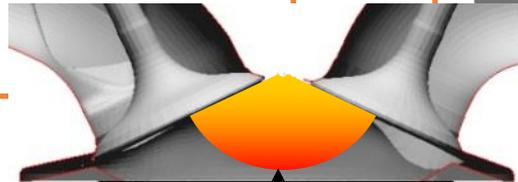


- SIP条件での乱流燃焼機構の解明 (東工大, 徳島大)

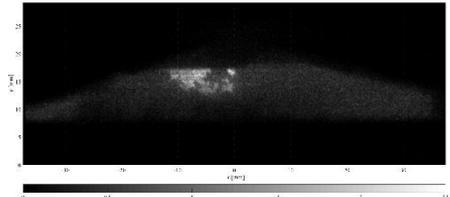
世界最高のレーザ計測



- 燃焼に寄与する乱流変動の抽出 (東工大, 東京農工大, 山口大, 慶応大)



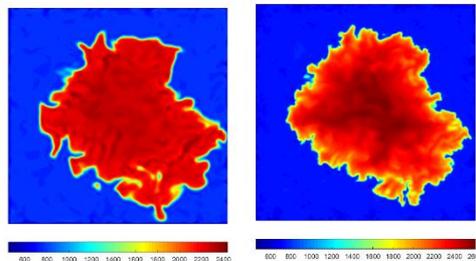
乱流火炎伝播



- 世界最高圧でのOH PLIF (東工大, 慶応大)

国産乱流燃焼モデル

- LES用フラクタルダイナミックSGS燃焼モデル
- LES用格子幅自己認識型フラクタルダイナミックSGS燃焼モデル
- 層流火炎サブモデル
- RANS用ハイブリッド燃焼モデル



LES

DNS

(東工大, 徳島大)

基礎燃焼特性の最先端

- 詳細化学反応機構の構築 (広大)
- 層流燃焼速度 (大阪府大, 山口大, 九大)
- バルク乱流燃焼速度 (九大)

- HINOCA火炎片モデルの基礎
- HINOCA着火モデルの基礎
- HINOCA伝播モデルの検証

乱流燃焼の物理に基づいたモデル構築へ

着火・火炎伝播遷移のモデリング

火花点火の物理

- 放電現象の解明と放電経路モデリング



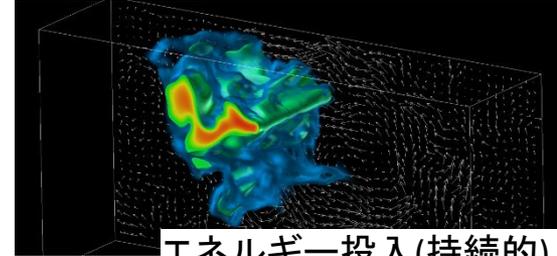
(東大)

- 流動が大きく影響を与えない条件での現象解明

STEP 4

SIP条件での着火機構

- TRZ~BRZにおける着火・火炎伝播



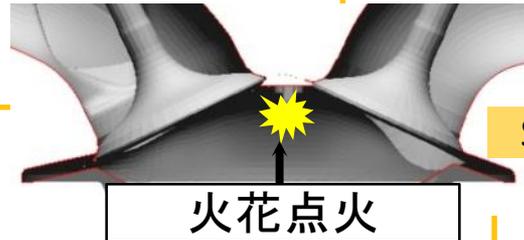
(東工大, 東大, 岡山大, 東北大)

エネルギー投入(持続的) → 乱流混合 → 着火 → 一部伝播か自着火? (未解明)

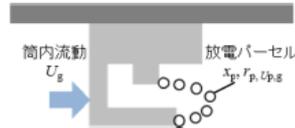
HINOCA点火モデル

STEP 1

- 既存モデルはキャッチアップ済(RANSベースの概念) (大阪大, 岡山大)



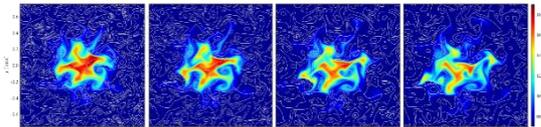
火花点火



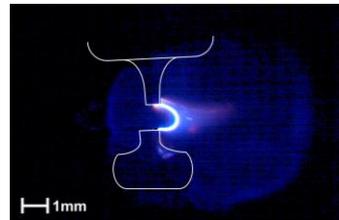
STEP 3

強乱流中での着火機構

- 着火核形成から火炎伝播まで遷移過程 (東大, 日大, 東工大, 東北大)



- 層流燃焼速度に関する経験式 (大阪府大, 山口大, 九大)
- バルク乱流燃焼速度に関する経験式 (九大)



LESモデルへの拡張

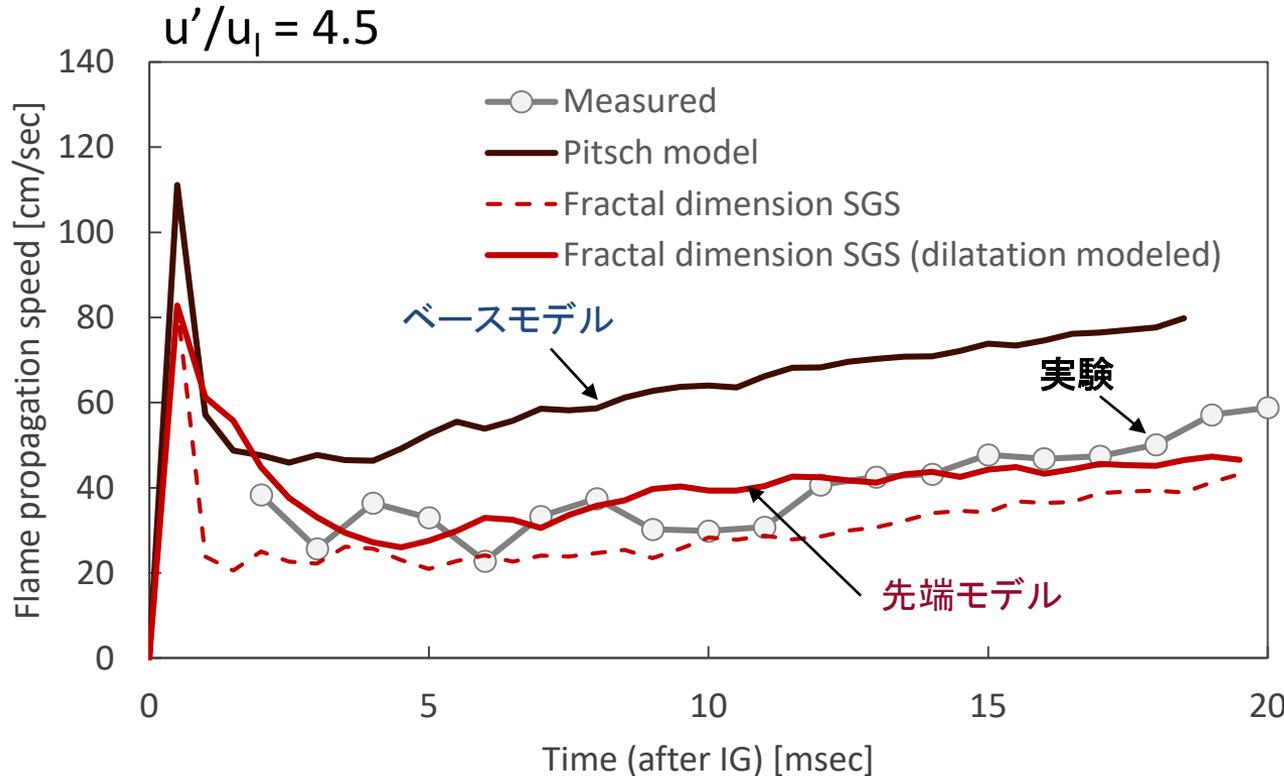
STEP 2

- 放電~着火核形成までの過程での乱流効果 (東大, 日大, 岡山大)
- 着火に影響を与える流動特性の解明 (先端計測) (東工大, 山口大, 慶応大)

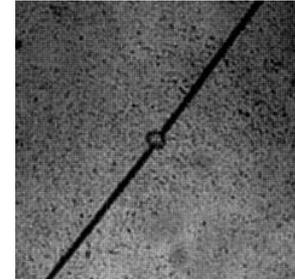
物理に基づいた点火モデル構築 SIPのその先へ

ガソリンチームと連携した開発・検証③

国産新モデル(FDSGS+膨張項モデル)を導入
(東工大, 徳島大, 九大, 早大, JAXA)



実験



80mm

ベースモデル



Time: 0.00 msec

先端モデル



Time: 0.00 msec

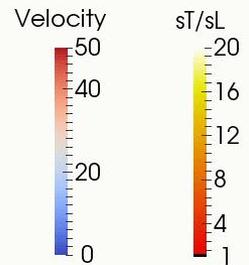
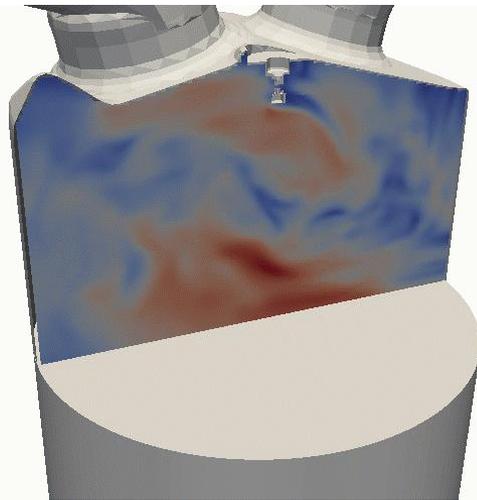


モデル定数の調整無く, 実験の乱流
燃焼速度をほぼ定量的に再現

ガソリンチームと連携した開発・検証④

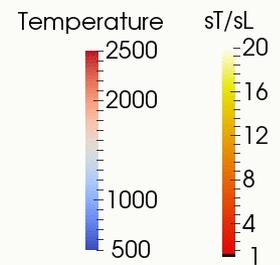
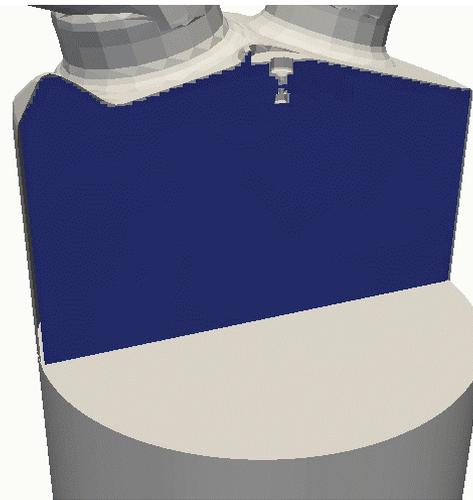
SIPエンジン($\lambda=1.7$)での検証 (慶應大, 東工大, 徳島大, 早大, 阪大, JAXA)

筒内流動 [m/s]



CA: -60 deg.aTDC

筒内温度 [K]



CA: -60 deg.aTDC

2000 rpm, $\lambda=1.7$



ガソリンチーム開発の先端燃焼モデルを用いて、
SIPエンジンのリーン($\lambda=1.7$)条件を正常に計算

まとめ

- HINOCA開発に重要となる基礎物理過程，特に乱流，乱流伝熱，着火，火炎伝播現象の明確化とそれらの解明
- HINOCA開発に対する基礎研究からのアプローチとして，現象解明，モデル構築，そしてHINOCA実装の一連のプロセスに対する共通認識の醸成
- 基礎・応用・開発研究の距離を短縮したHINOCA開発体制の先進性



世界最先端3Dエンジン燃焼
シミュレーションコード





HINOCAの将来

自動車用内燃機関技術研究組合 (AICE)

燃焼研究委員会 CAE・PM分科会長

(本田技術研究所 四輪R&Dセンター 第3技術開発室)

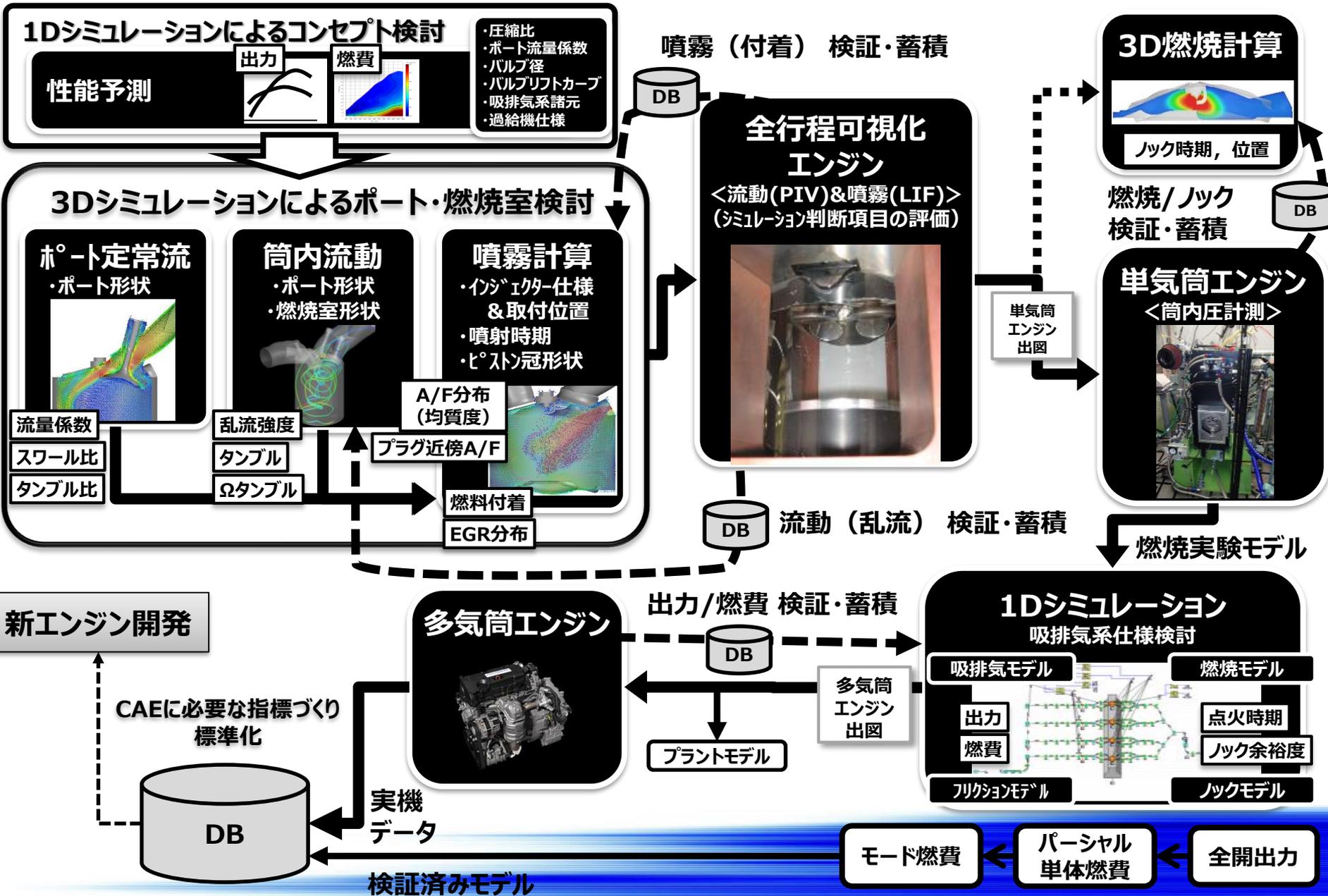
高林 徹

1.HINOCAの活用と発展

2.HINOCA精度検証会

1.HINOCAの活用と発展

2.HINOCA精度検証会

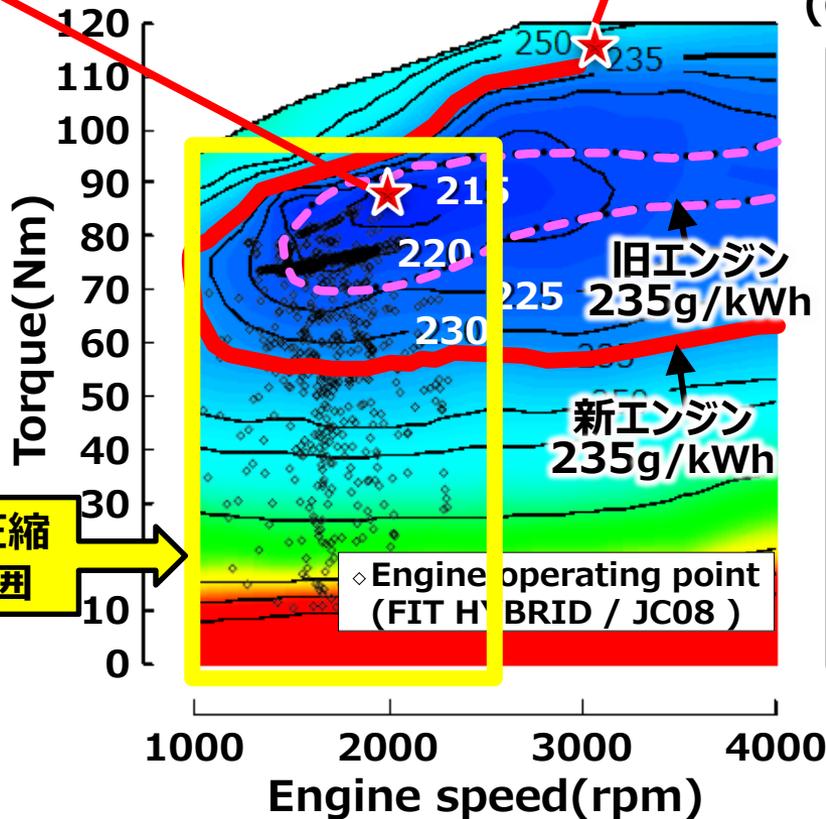


最小BSFC : 214g/kWh
(熱効率 : 39%)

筒内流速最大値
約50m/s

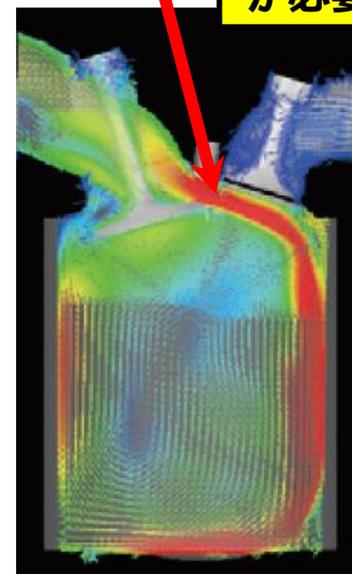
高回転、高負荷領域 :
従来 : エンリッチメント → 今後 : ストイキ ($\lambda=1$)

↑
燃焼変動が抑制でき
れば、燃費向上に
繋がる



筒内流速最大値
100m/s以上

↑
圧縮性
が必要!

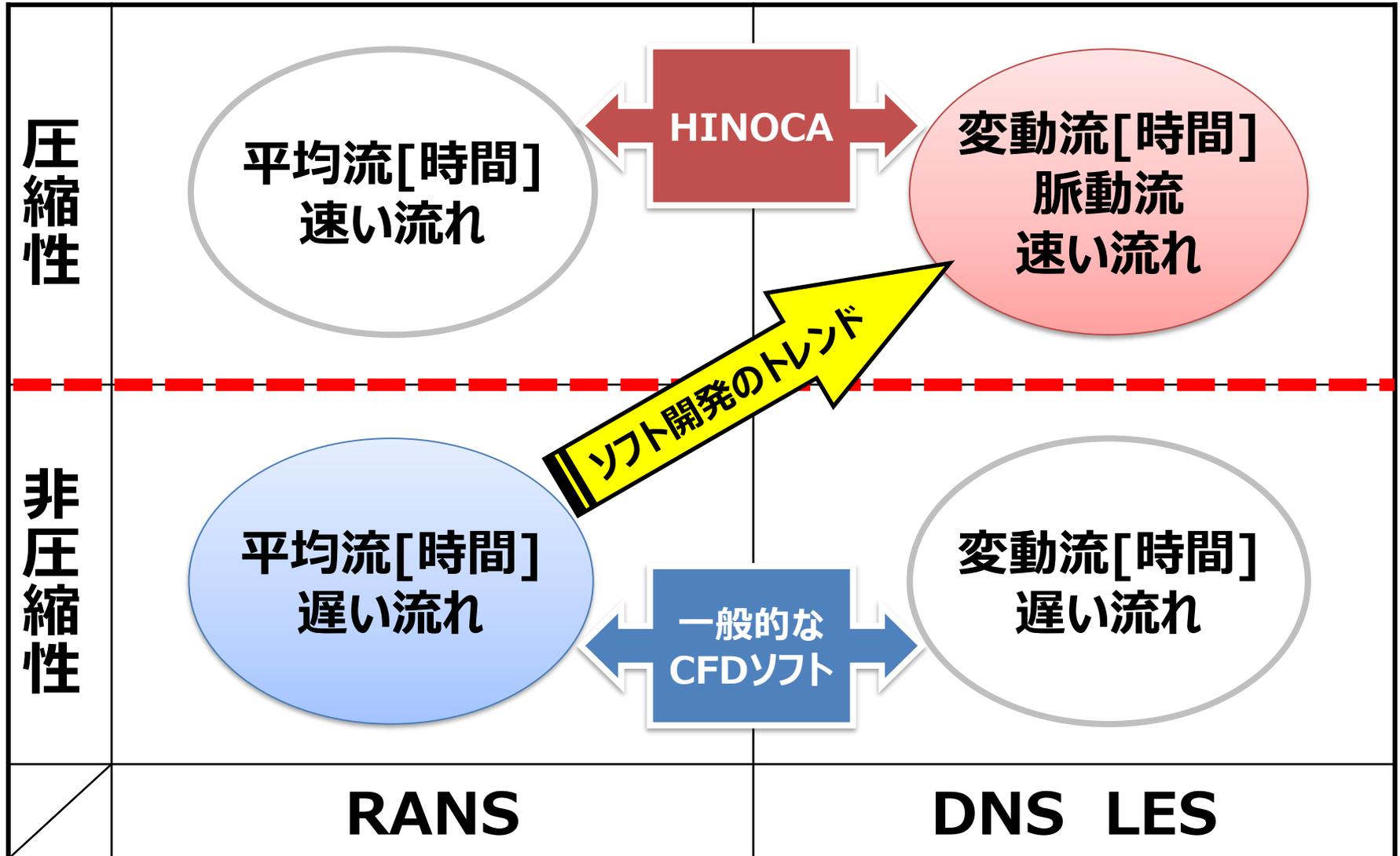


↓
一般的なソフト (非圧縮
性) で計算できる範囲

燃焼の評価が必要な運転
領域が広がっている



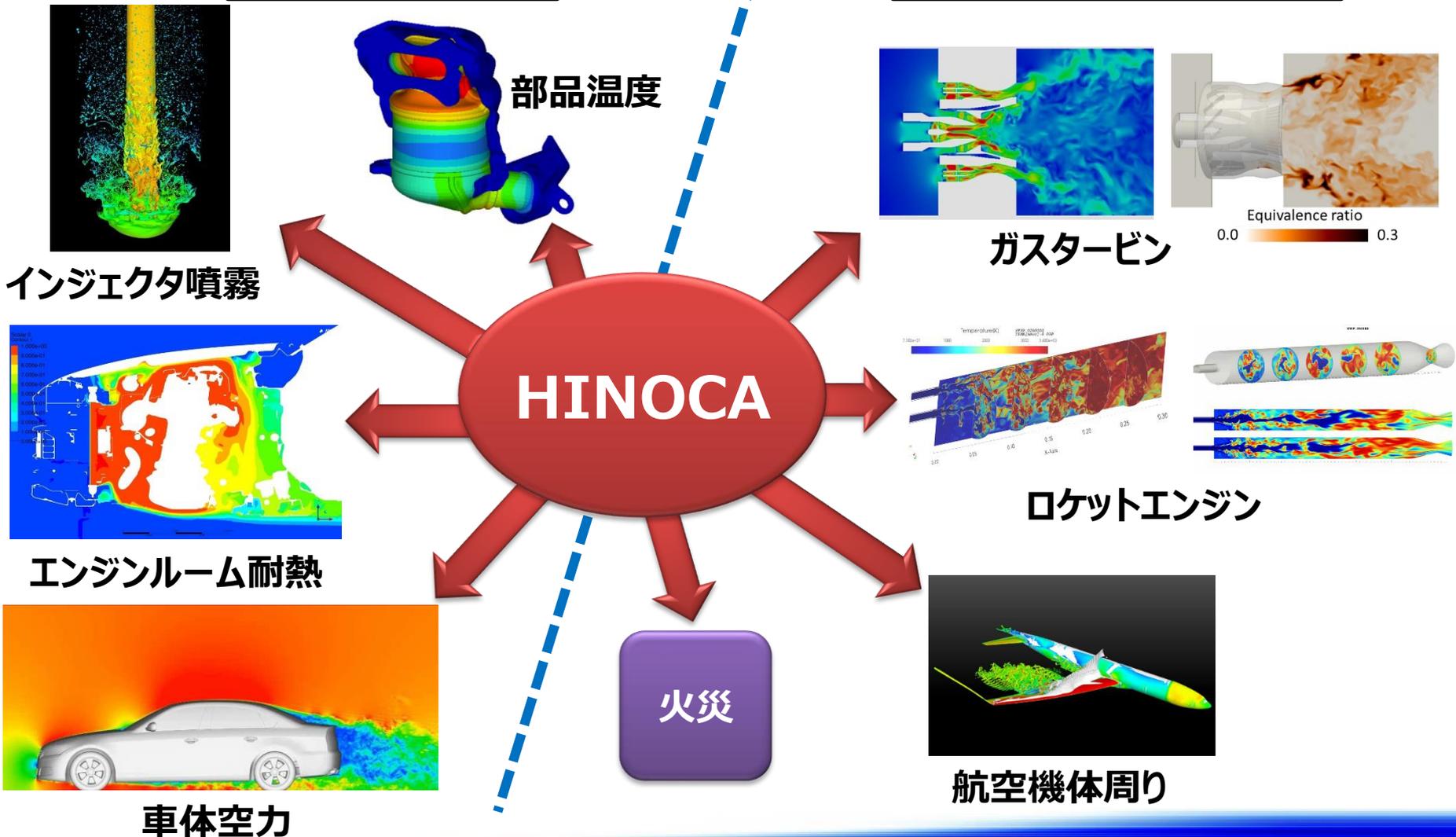
「速い流れ」が扱える計算が必要!
「変動」が扱える計算が必要!



HINOCAは汎用性のある手法なので、より広範囲の運転条件に適用でき、工学分野だけでなく科学分野にも適用可能！

自動車分野

自動車分野以外



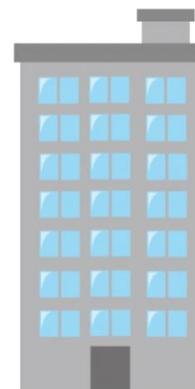
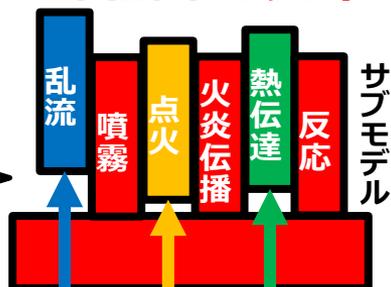
汎用性の高い手法を採用したHINOCAを改良することで、多分野への応用が可能

自動車メーカーは大学との共同研究を行っているが・・・

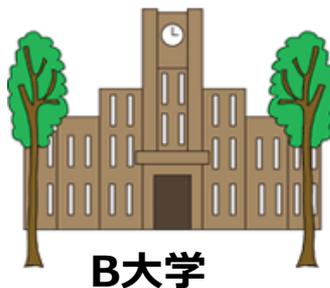
①インターフェースが異なる
②メッシュタイプが異なる
こと等から、プラットフォーム
[A][B][C]上で作成した
サブモデルはD自動車会社
のソフトに載らない。

くつつかない！

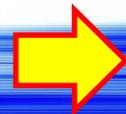
D自動車のソフト



D自動車

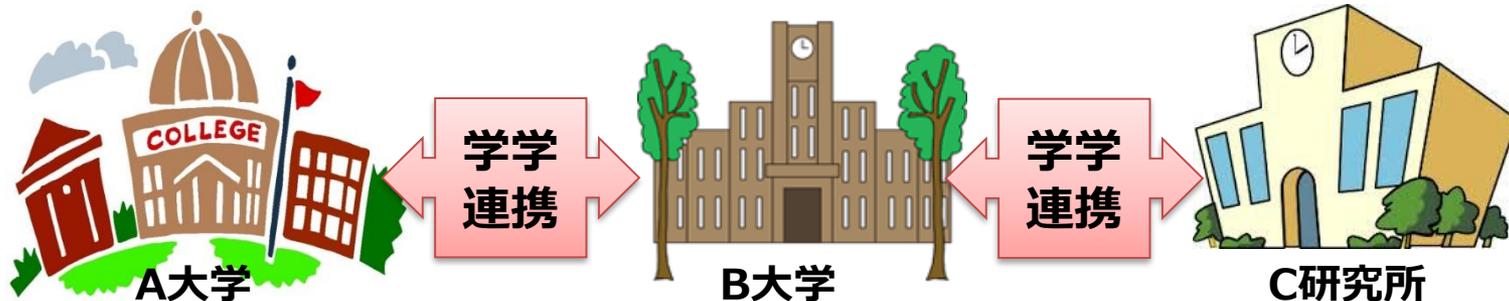


サブモデルをばらばらのプラットフォームで開発してしまうと、最終的に合体できない



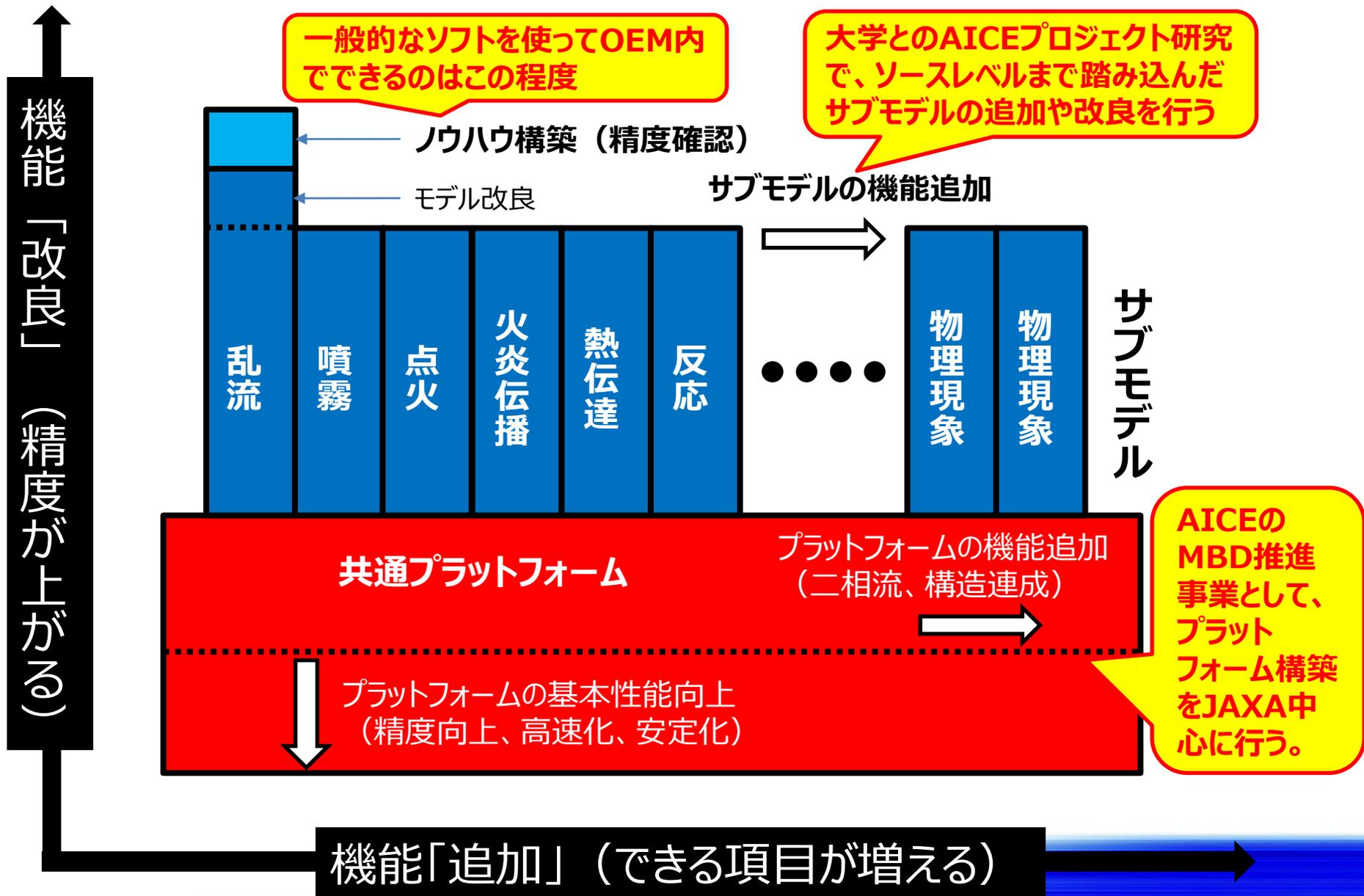
使えるソフトを開発するには、「プラットフォームの共通化」が必要！

今後シミュレーションを発展
 させていくためには・・・



学学連携と産学連携の研究が加速し、ソフトの進化や人材育成が進む





1.HINOCAの活用と発展

2.HINOCA精度検証会



AICE会議室



計算結果の提示



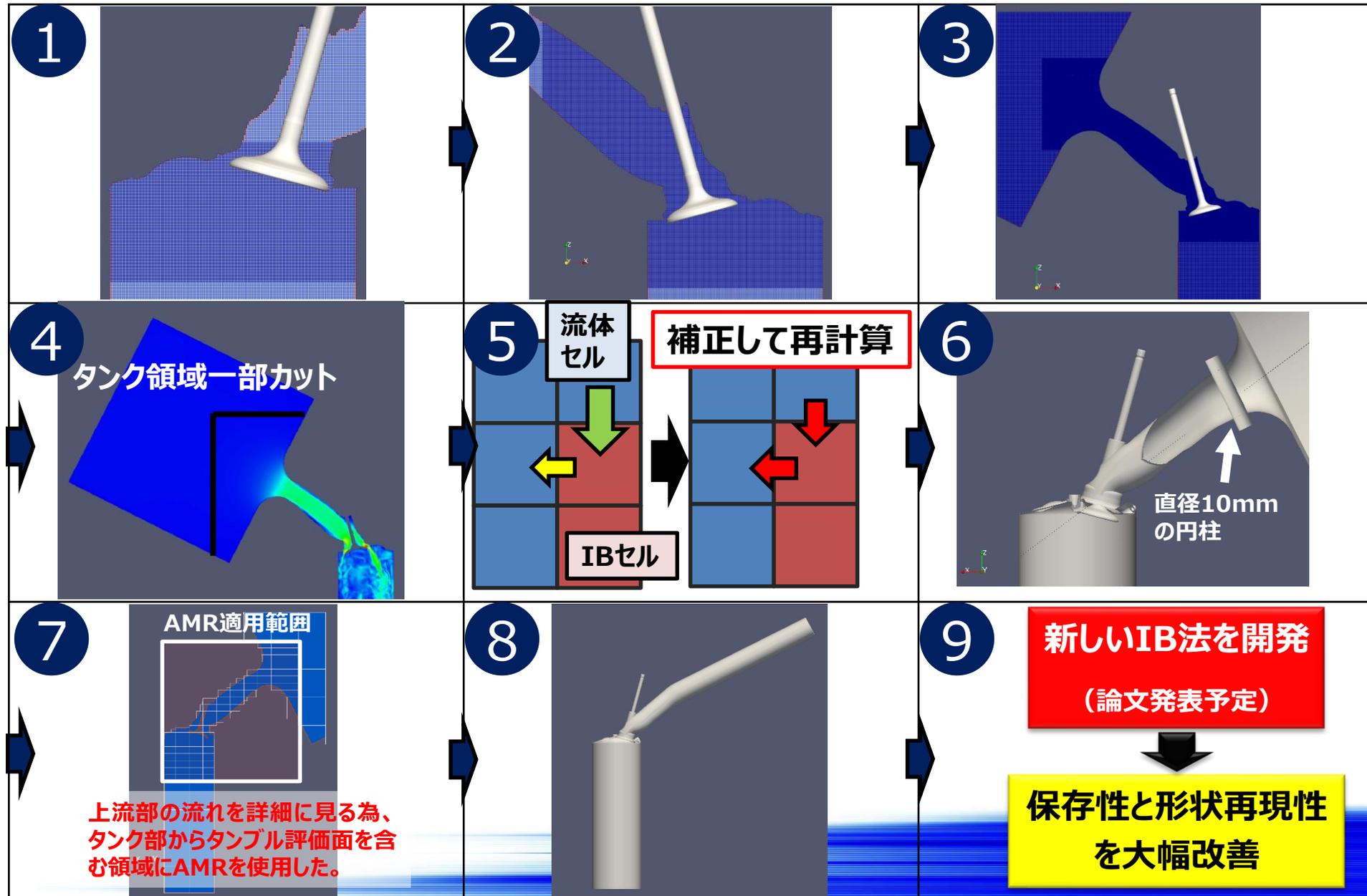
HINOCAをエンジン開発に活用可能なレベルとするための、

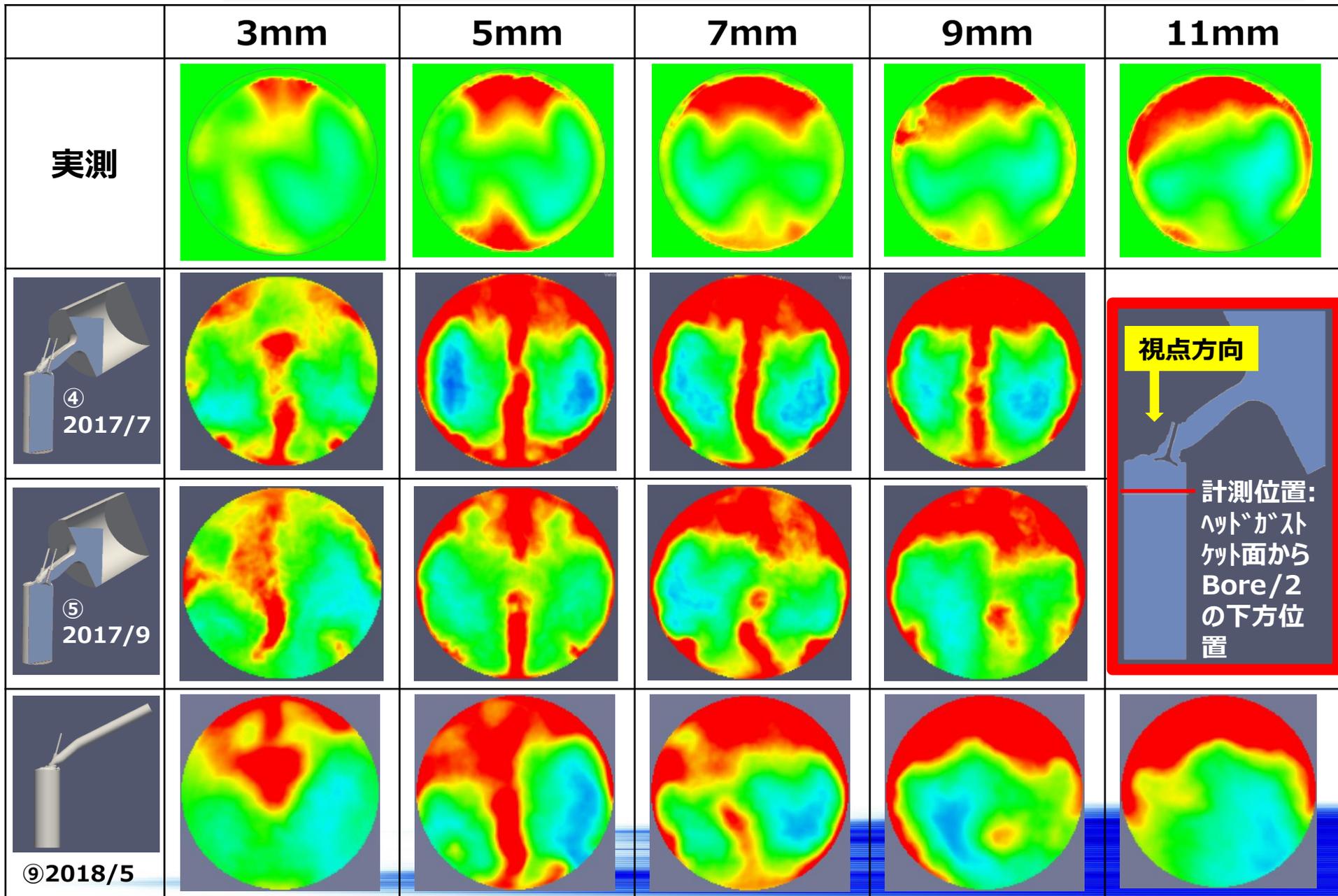
- ・計算と計測の結果比較（精度検証）
- ・計算時間の確認

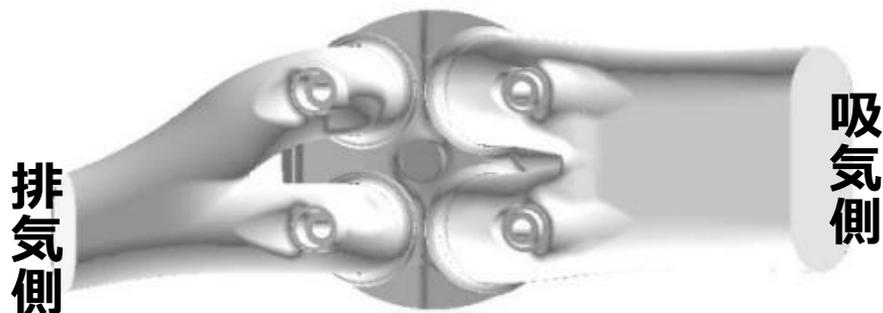


実エンジンの計測データや形状データの提供

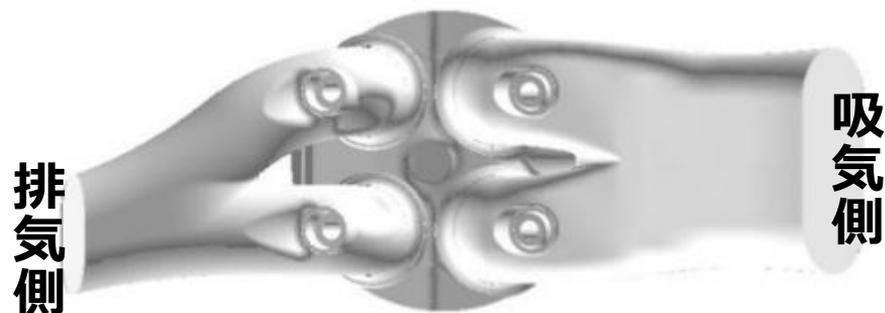




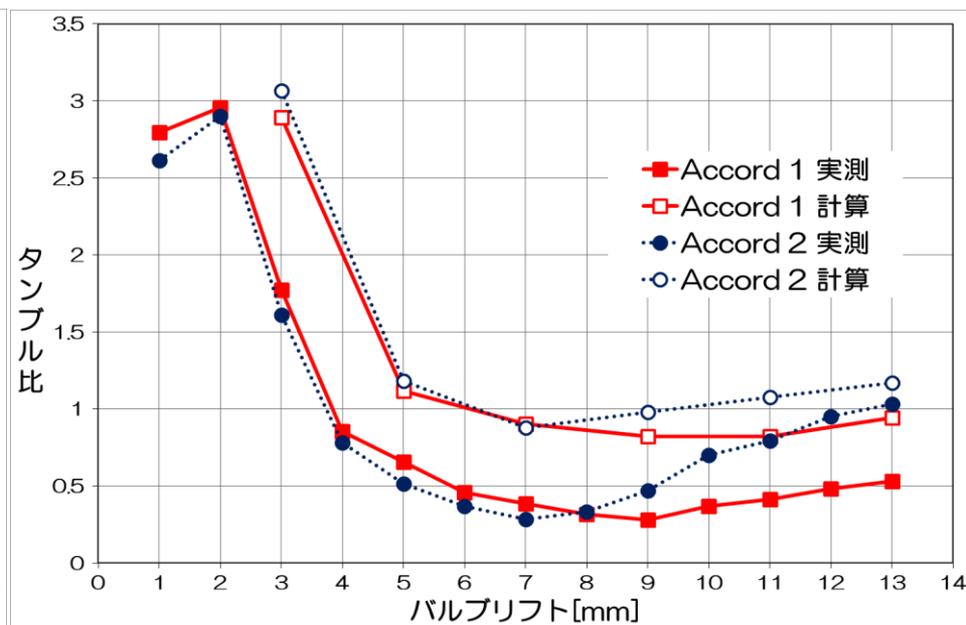
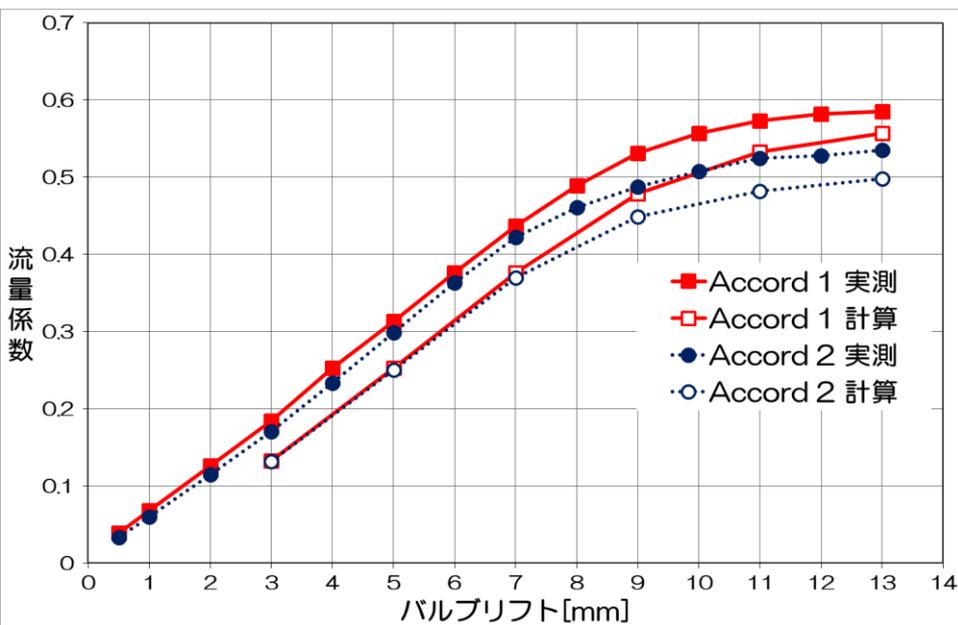




Accord1



Accord2

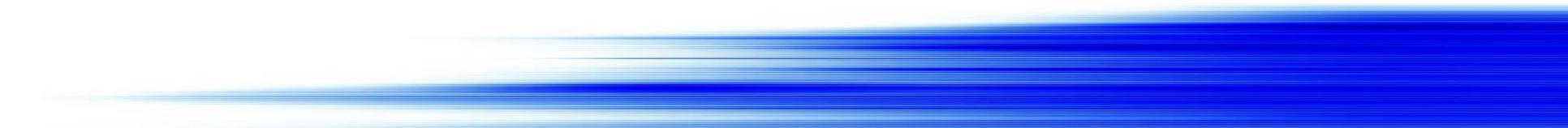


計測と計算で絶対値の乖離はまだあるが、各リスト毎の優劣比較は可能である

	Accord1		Accord2	
バルブリット	計算	PIV計測	計算	PIV計測
5 mm				
7 mm				
9 mm				
11 mm				
13 mm				

**SIP後のHINOCAの利用に関しては、
皆さんが使いやすい状態で見えるよう
に、現在JAXAおよび大学とAICEの
間で交渉中です。**

以上

A decorative horizontal bar at the bottom of the slide, consisting of a gradient of blue colors, transitioning from a lighter blue on the left to a darker blue on the right.