

世界最先端 3Dエンジン燃焼シミュレーションコード 「HINOCA (火神)」を活用した研究・開発

§ 1 HINOCA (火神) の現状

草鹿 仁 (早稲田大学)

§ 2 乱流, 伝熱, 着火, そして伝播モデルの総合的な構築に向けて ~サイエンスからのチャレンジ~

店橋 護 (東京工業大学)

§ 3 産からの期待

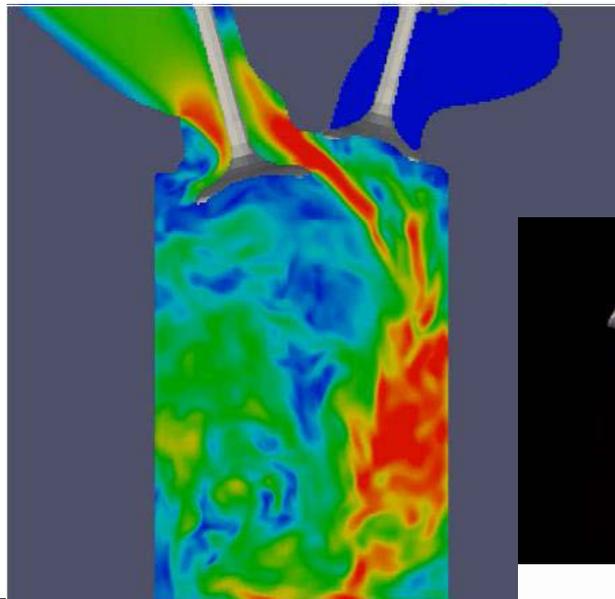
高林 徹 (AICE / 本田技術研究所)

HINOCA (火神) の現状

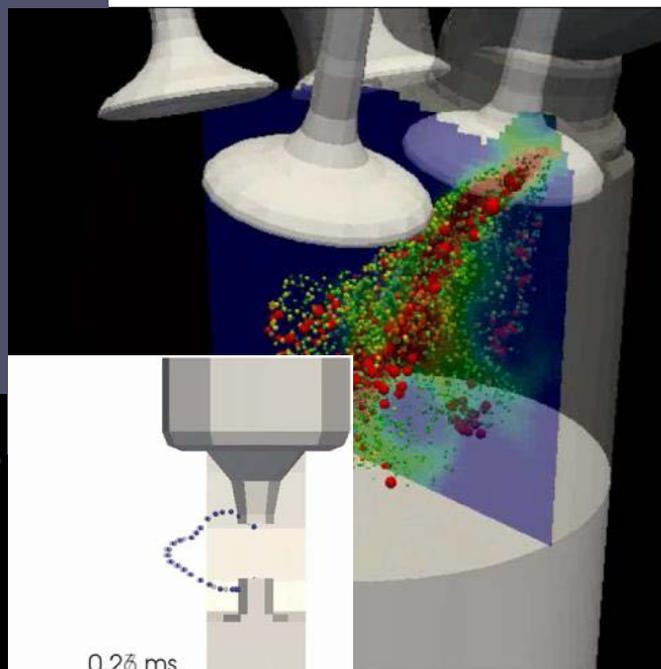
草鹿 仁 (早稲田大学)

現在の HINOCA (火神)

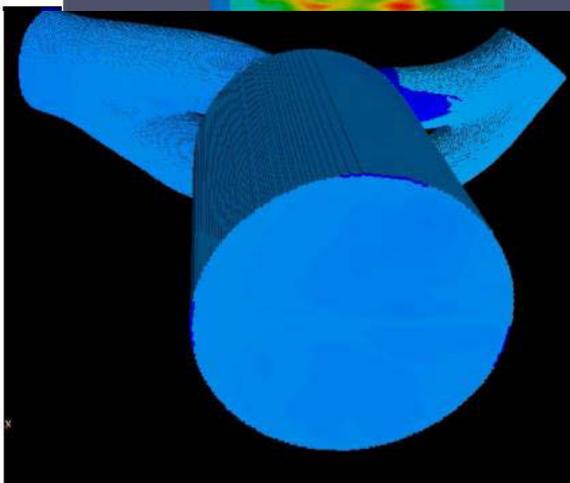
非定常流動



噴霧・混合気形成



火炎伝播

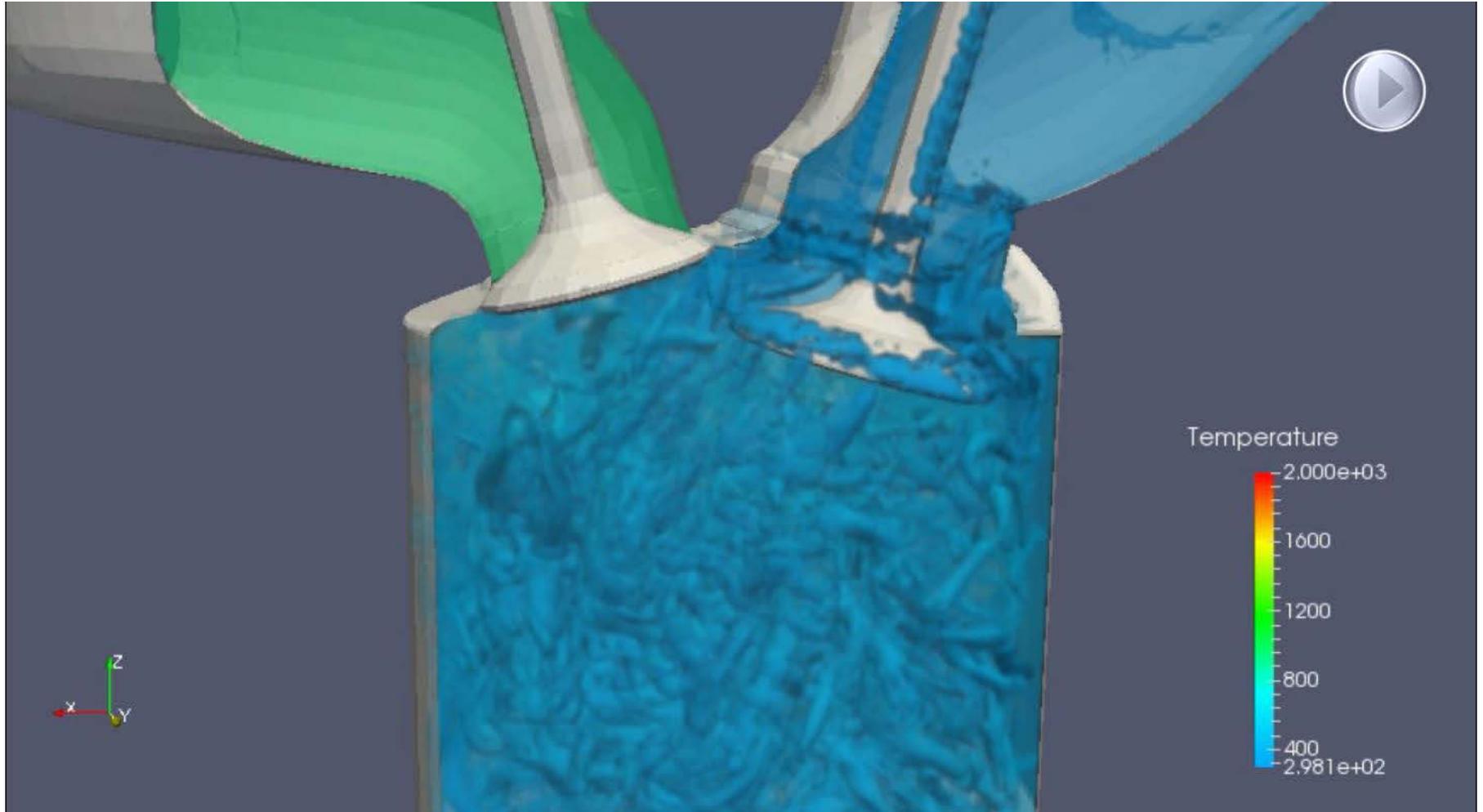


0.26 ms

火花点火

壁面熱損失

現在の HINOCA(火神)



搭載モデル

AICE CAE
代表 高林氏

制御CAE T
代表 溝淵氏

ガソリン T
代表 店橋氏

プラットフォーム

- IB法
- 圧縮性
- LES / RANS
LES : WALE モデル
RANS : 標準 k- ϵ
RNG k- ϵ
Realizable k- ϵ
Abe k- ϵ
Wilcox k- ω
Menter SST
- GPU
- 局所細分化

エンジン検証段階 サブモデル群

燃料噴霧

火花点火

火炎伝播

拡散燃焼

ノック

壁面熱伝達

平衡・
反応計算

PM生成

現象説明(竹WG) SIP-Suite

高精度化

希薄燃焼対応

- C 方程式
- LES用格子幅自己認識型FDSGS モデル

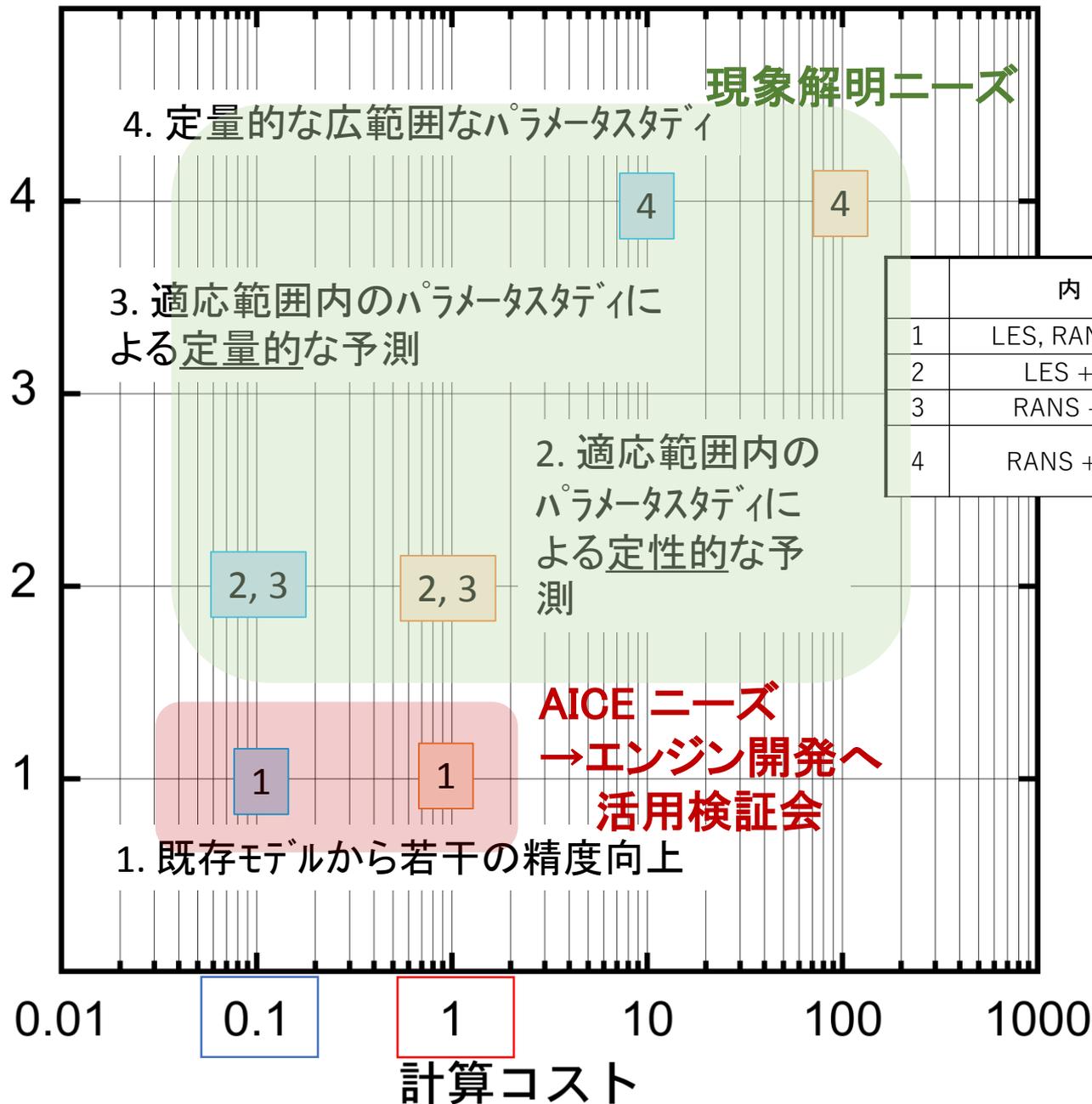
壁近傍熱流動の改善

- AWF

* 青字 H29年度内に実装

* 赤字 実施予定無

精度



4. 定量的な広範囲なパラメータスタディ

現象解明ニーズ

3. 適応範囲内のパラメータスタディによる定量的な予測

2. 適応範囲内のパラメータスタディによる定性的な予測

1. 既存モデルから若干の精度向上

AICE ニーズ
→ エンジン開発へ
活用検証会

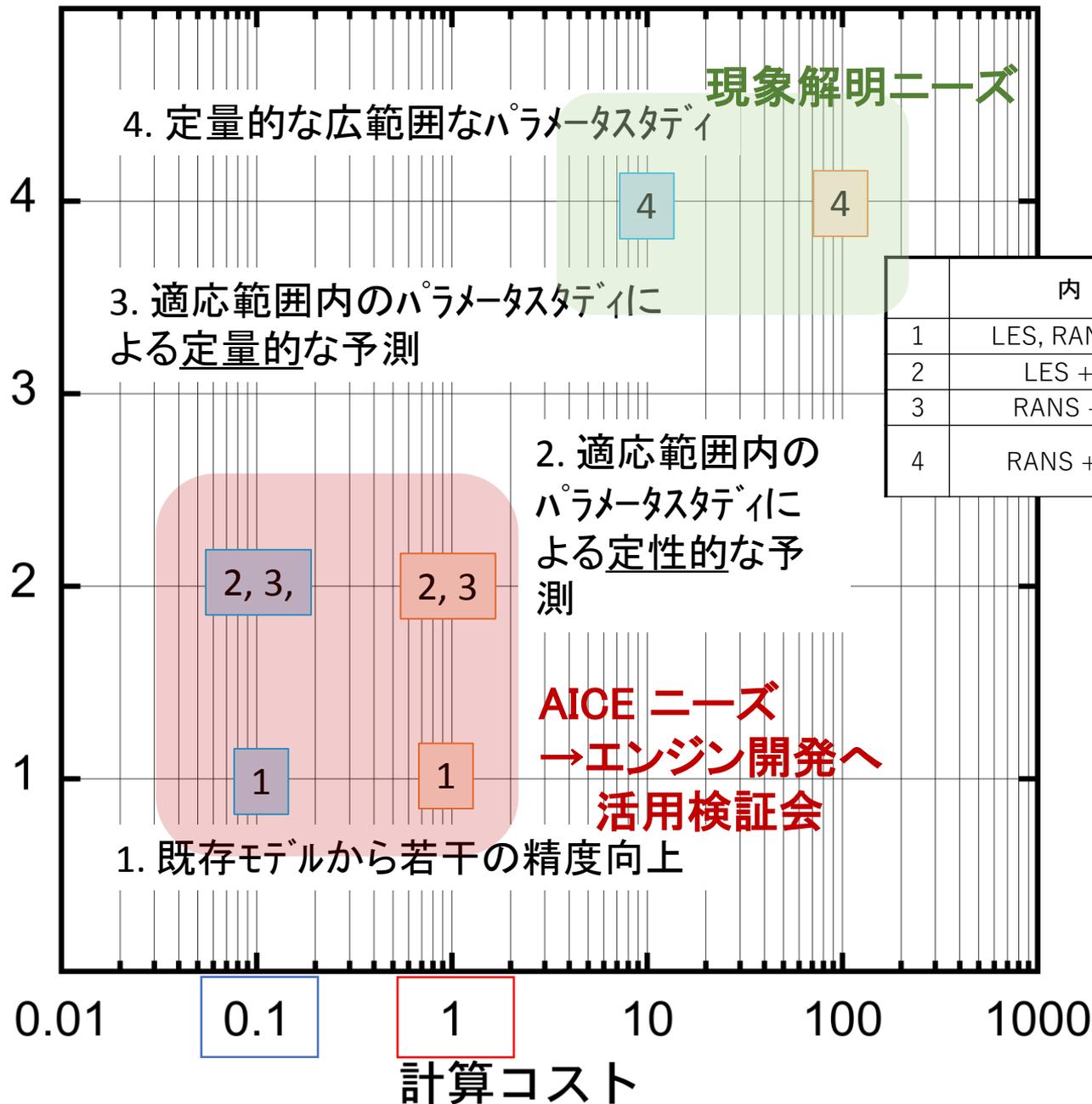
- i Combustion
- j Motoring

	内容	空間格子 解像度 mm	壁近傍 解像度 mm
1	LES, RANS + WF	0.5	0.5
2	LES + AWF	0.5	0.5
3	RANS + AWF	0.5	0.5
4	RANS + RANS	0.5	0.1

- 現象解明(基礎研究)から開発研究に活用可能
- GPUの利用による将来的には計算時間の短縮

計算コスト

精度



i Combustion
j Motoring

	内容	空間格子 解像度 mm	壁近傍 解像度 mm
1	LES, RANS + WF	0.5	0.5
2	LES + AWF	0.5	0.5
3	RANS + AWF	0.5	0.5
4	RANS + RANS	0.5	0.1

- 現象解明(基礎研究)から開発研究に活用可能
- GPUの利用による将来的には計算時間の短縮

HINOCA エンジン活用検証会

- 課題に対してJAXA が計算を実施
- AICE CAE分科会に加え、研究者も参加

月	内 容	対象エンジン, 燃料噴射ノズル
6	ポート定常流	SIP、ホンダ (Accord)、トヨタ
7	ポート定常流	スバル (TGV)、いすゞ
8	筒内流れ	SIP、ホンダ (Accord)
9	筒内流れ	スバル (TGV)、マツダ (SkyActiv)
10	噴霧単体	ホンダ (Fit用、Accord用)スバル(DI用)
11	噴霧単体	未 定
12	混合気分布	スバル(DI eng.)、ホンダ(Accord)
1	混合気分布	未 定
2	燃 焼	未 定
3	燃 焼	未 定

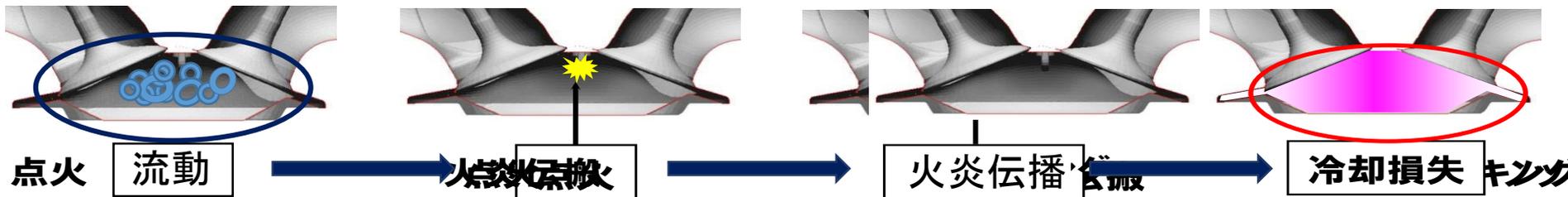
* 内容, 供試エンジンは現在の予定

乱流，伝熱，着火，そして伝播モデルの
総合的な構築に向けて
～サイエンスからのチャレンジ～

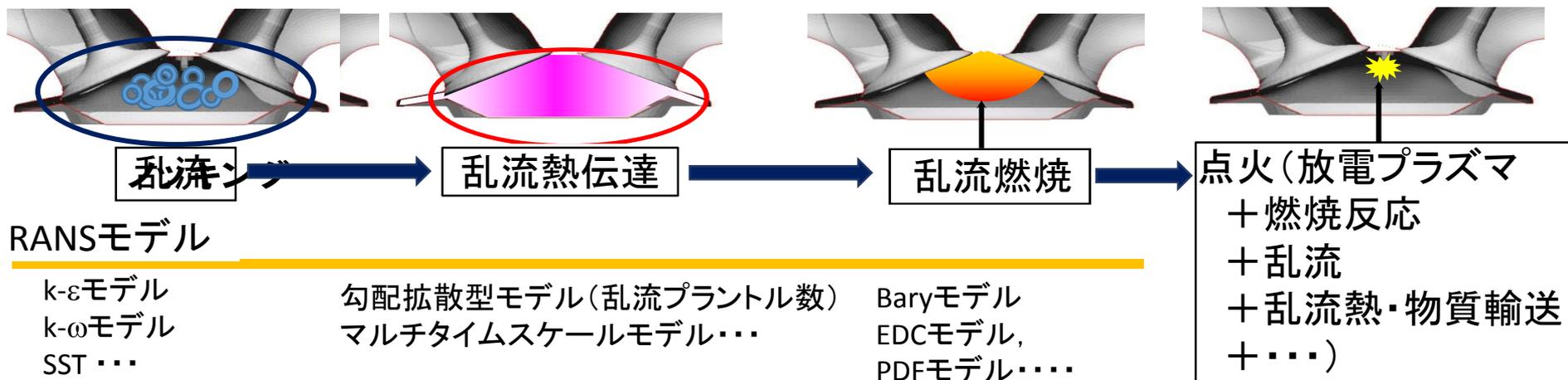
HINOCA竹WG ガソリンチーム代表
店橋 護（東京工業大学）

NINOCA開発への科学的アプローチ

エンジン素課程からのアプローチ



物理現象の複雑さからのアプローチ



RANSモデル

k-εモデル
k-ωモデル
SST ...

勾配拡散型モデル(乱流プラントル数)
マルチタイムスケールモデル...

Baryモデル
EDCモデル,
PDFモデル....

LESモデル

Smagorinskyモデル
Dynamic S モデル
WALEモデル ...

勾配拡散型モデル(乱流プラントル数)
逆勾配拡散考慮型
...

火炎面追跡型モデル
肥厚火炎型モデル,
PDFモデル....

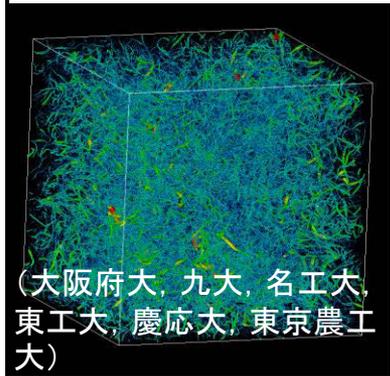
?



ガソリン燃焼チーム
Super Lean Burn

流動(乱流現象)のモデリング

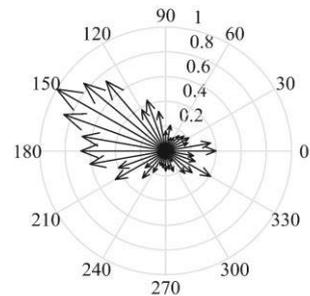
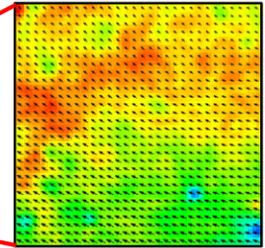
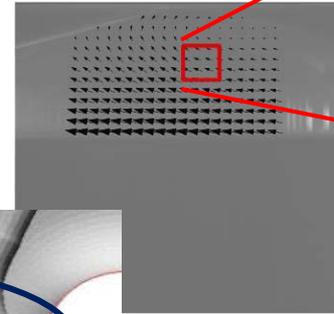
乱流現象に関する最先端の知見



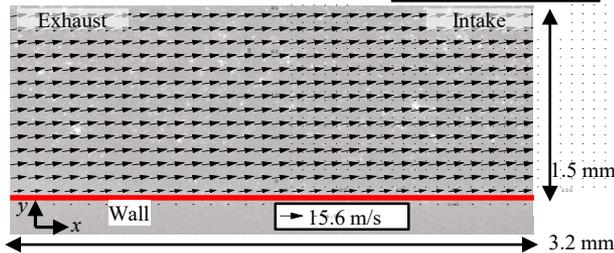
(大阪府大, 九大, 名工大, 東工大, 慶応大, 東京農工大)

- 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



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

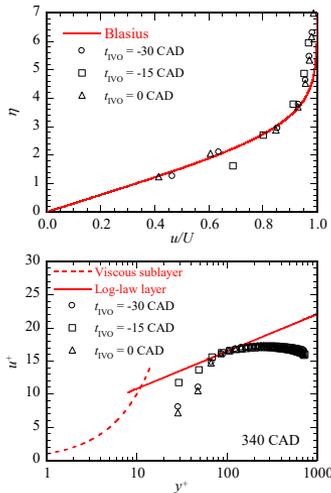
(東工大, 東京農工大, 慶応大)

- 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)

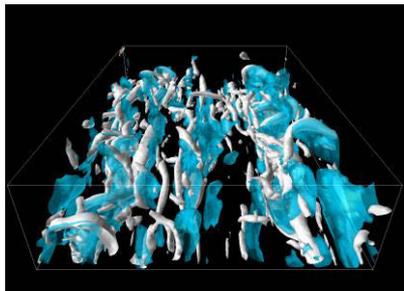
世界最高の μ PIV計測



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

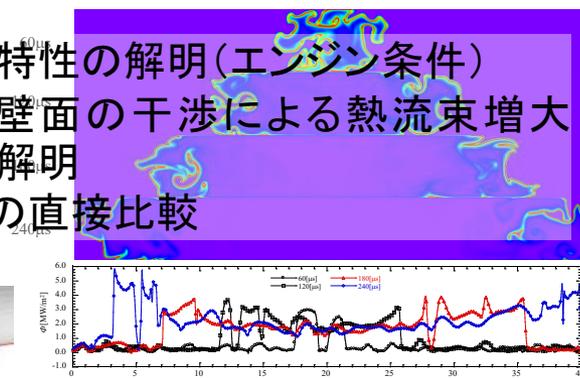


- 適切な乱流熱伝達モデルの提言・提案
- 適切な壁面近傍の取り扱い
- 乱流伝熱制御

(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)

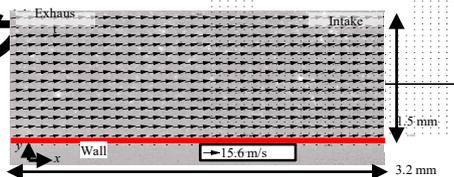
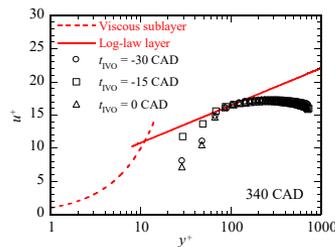
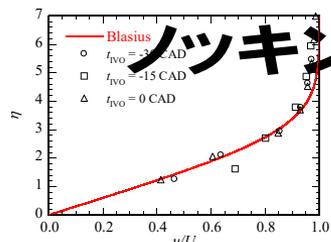
+

+

世界最高の流速・温度計測

乱流熱伝達 + α

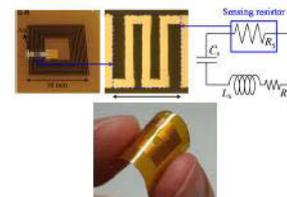
最先端熱流速センサー



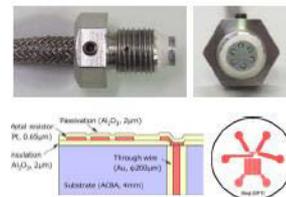
- 壁面近傍の流動特性 → 熱流速モデルの基礎
- 温度・濃度との同時計測
- 伝熱促進デバイス

(東工大, 東京農工大, 慶応大)

- 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

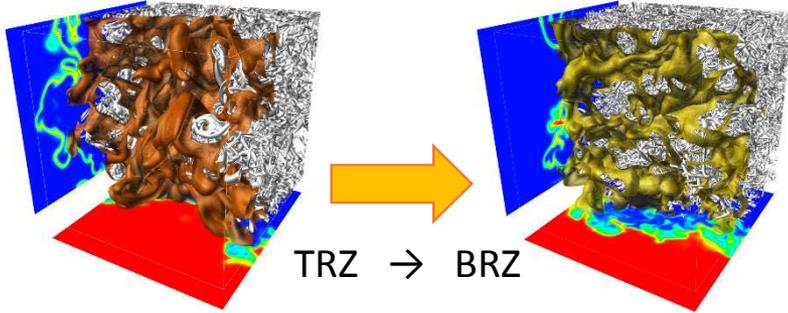


(都市大, 明治大, 東大, 東工大)

高精度熱伝達モデルと火炎-壁面干渉機構の解明

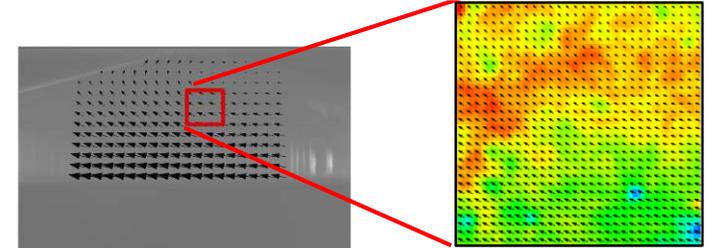
乱流火炎伝播のモデリング

最先端の乱流燃焼DNS

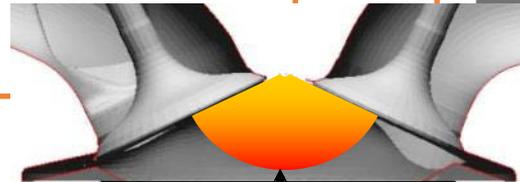


- SIP条件での乱流燃焼機構の解明
(東工大, 徳島大)

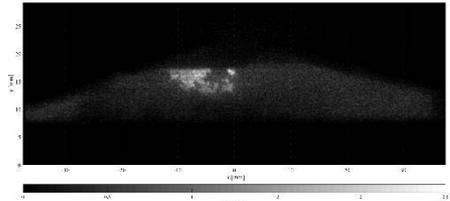
世界最高のレーザ計測



- 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)



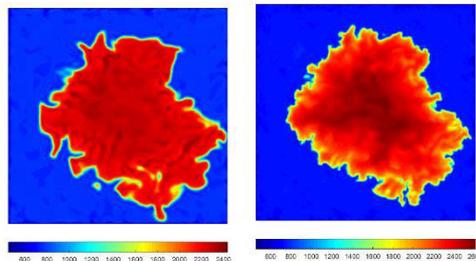
乱流火炎伝播



- 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



ガソリン燃焼チーム
Super Lean Burn

HINOCA WG

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



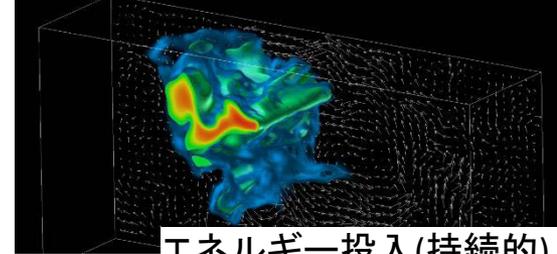
(東大)

- 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



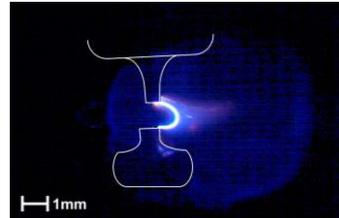
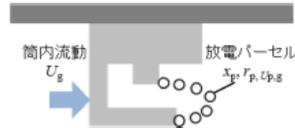
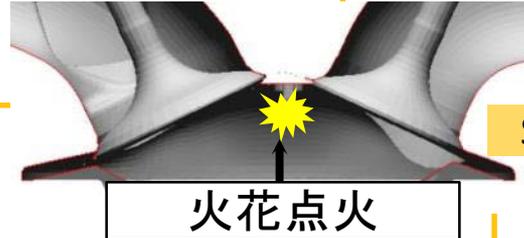
(東工大, 東大, 岡山大, 東北大)

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

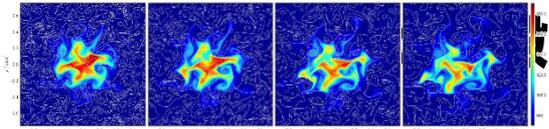
- 既存モデルはキャッチアップ済(RANSベースの概念) (神戸大, 岡山大)



- 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)

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)



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

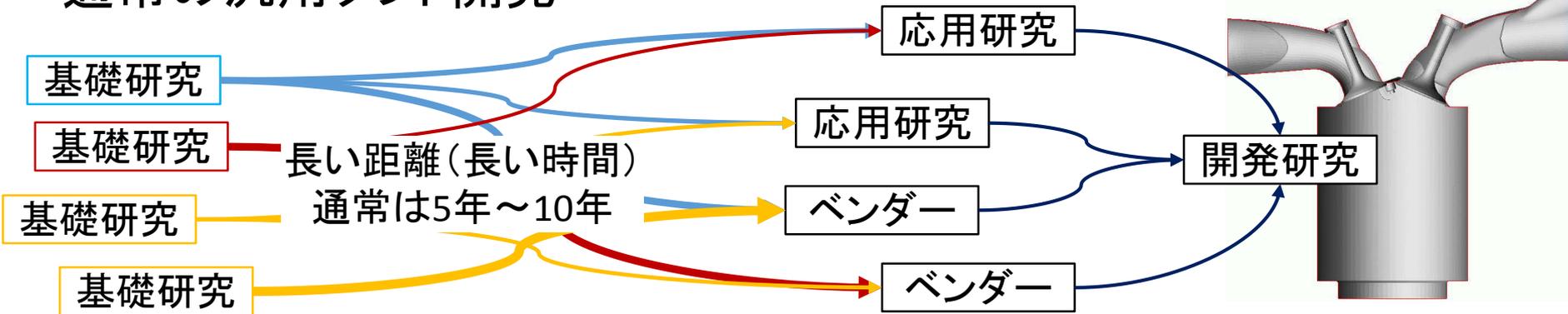


ガソリン燃焼チーム
Super Lean Burn

HINOCA WG

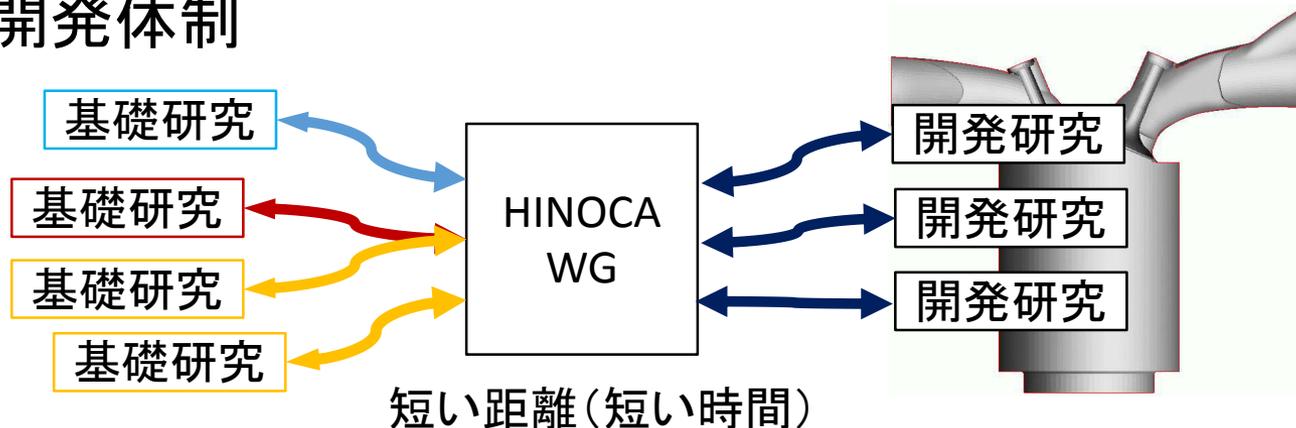
HINOCA開発体制～基礎・応用・開発研究の距離～

• 通常の汎用ソフト開発



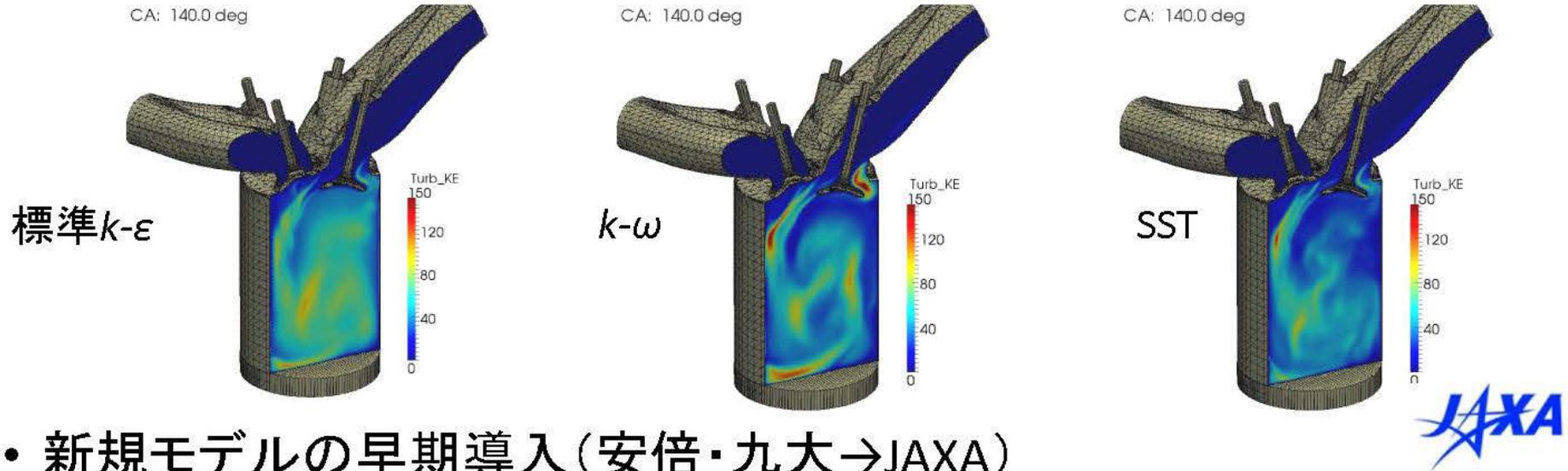
- Craft-Launder-Sugaモデル(1996)(須賀, 大阪府大)
- Abe-Kondoh-Naganoモデル(1994)(安倍, 九大)
- 普遍的微細構造(1997)(店橋, 東工大) → Coherent Structure SGSモデル(2005)(小林, 慶応大)
- FDSGSモデル(基本概念1994 → 定式化2006)(店橋, 東工大)

• HINOCAの開発体制

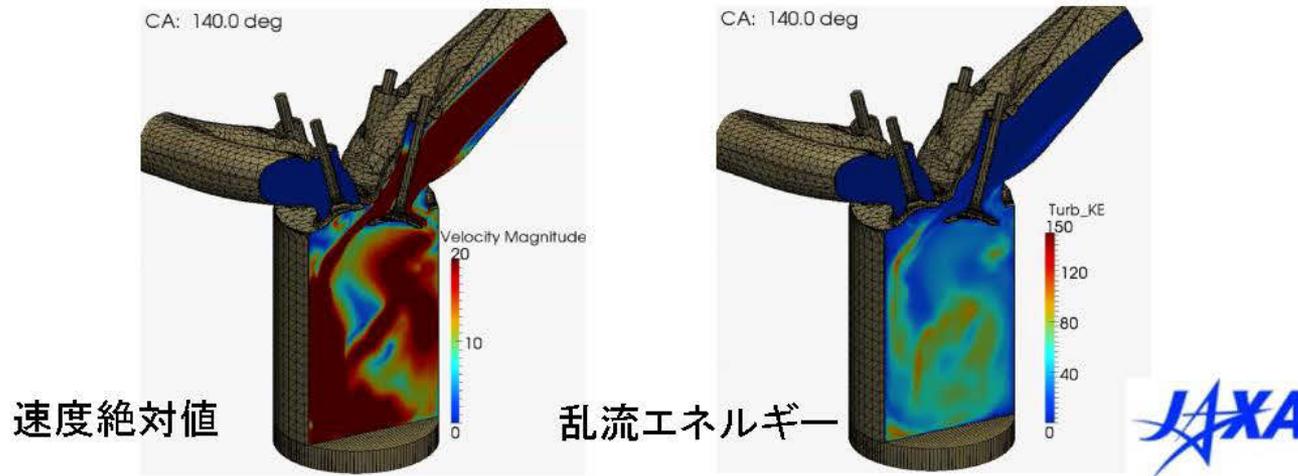


HINOCA-RANS構築の例

- 既存モデルの整備 (JAXA) (可視化: 乱流エネルギー)



- 新規モデルの早期導入 (安倍・九大→JAXA)



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

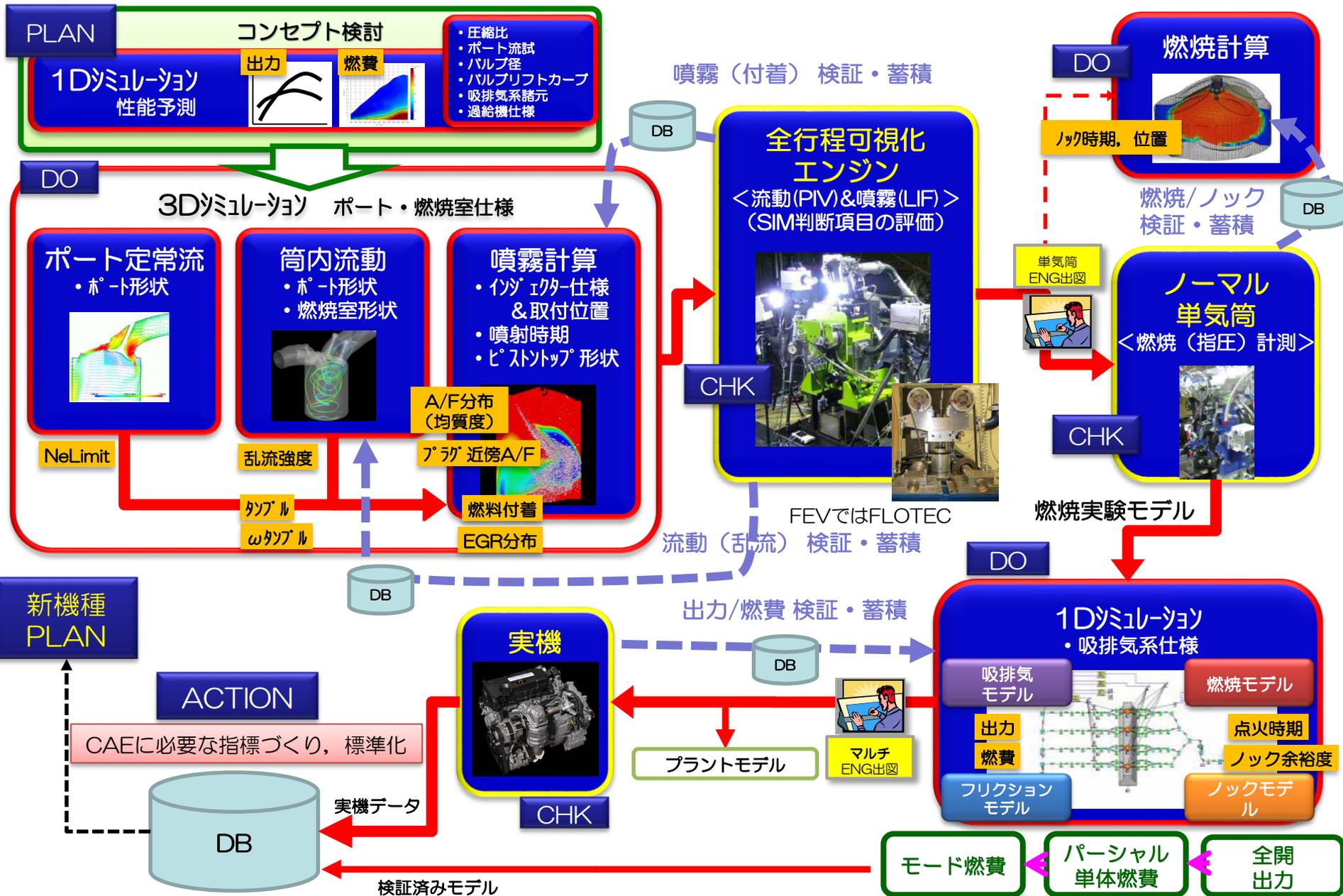


「産からの期待」

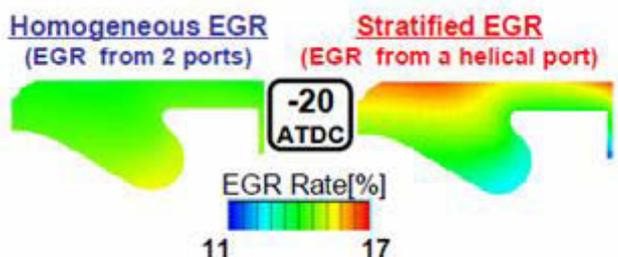
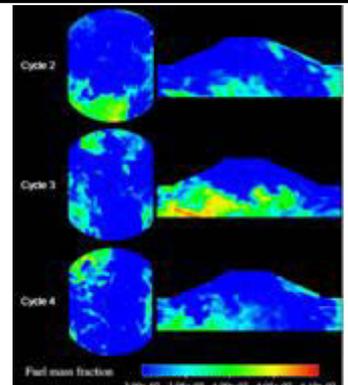
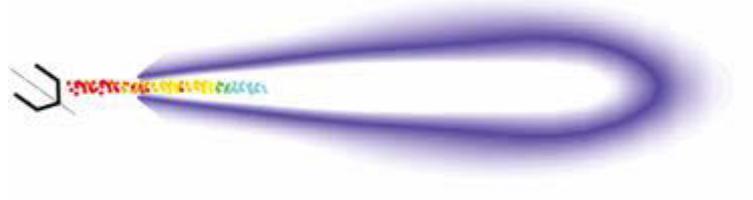
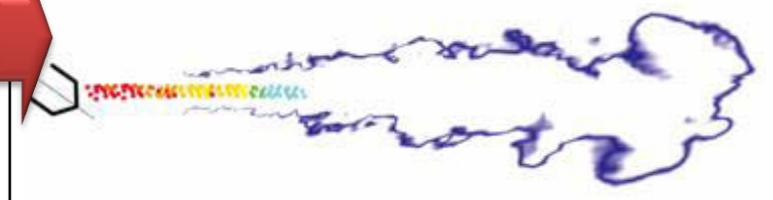
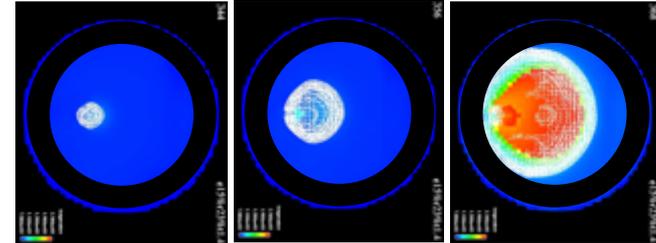
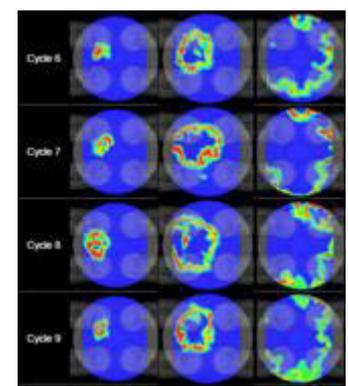
AICE CAE・PM分科会長
高林 徹

エンジン
燃焼シミュレーション
の活用方法

燃烧開発ワークフローの例



燃焼シミュレーションによる現象解明

観察項目	平均場→安定燃焼の予測	サイクル変動→不安定燃焼の解明
<p>EGR分布</p> <p>～因子～ 流動 乱流強度</p>	<p>EGRの分布が上にくるのか？下に来るのか？位置が分かる。</p> <p>Homogeneous EGR (EGR from 2 ports) Stratified EGR (EGR from a helical port)</p> 	<p>EGRの分布がサイクル毎にどのくらいばらつくのか？</p> 
<p>噴霧の蒸気特性</p> <p>～因子～ 液滴挙動 乱流強度</p>	<ul style="list-style-type: none"> 実機流動場を考慮した混合気の挙動 	<ul style="list-style-type: none"> SootとNoxの高精度予測、発生原因究明 燃焼変動や異常燃焼の発生原因究明 
<p>着火性 燃焼挙動</p> <p>～因子～ 反応 乱流強度</p>	<ul style="list-style-type: none"> 実機流動場を考慮した火炎挙動 	<p>燃焼がどのくらいばらつきその不安定要素は何か？</p> 

まとめ

- 今後のエンジン研究開発には、CAEを用いた開発プロセスの定義と、変動現象も再現できるシミュレーション技術が必要であると考ええる。

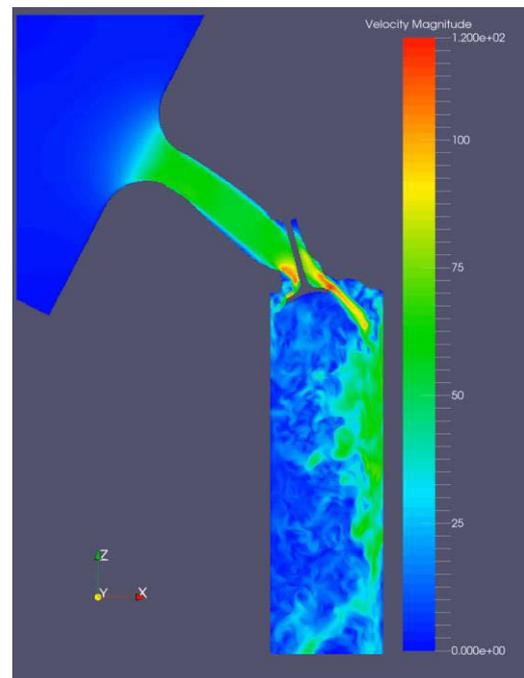
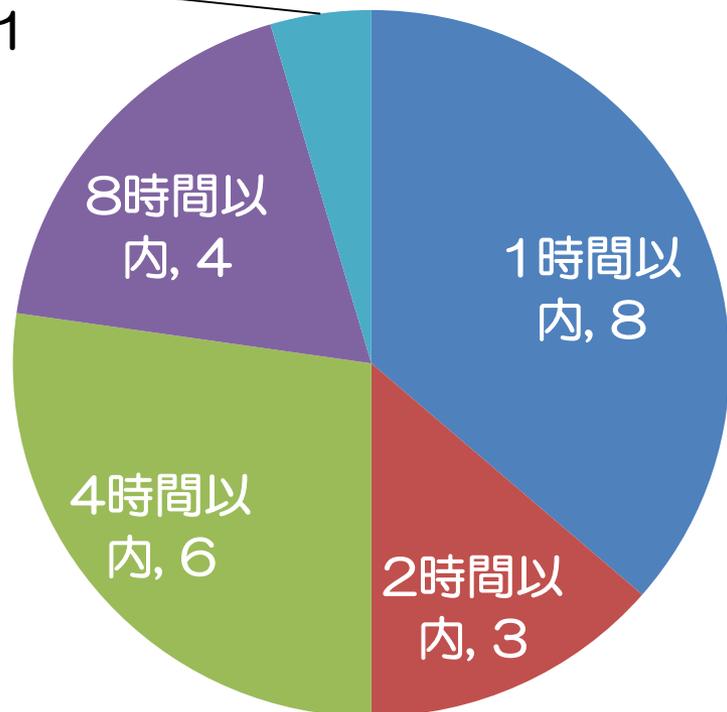
エンジン

燃焼シミュレーションに対する
AICE(OEM)のアンケート

[質問] . 1つの検討がどの程度の計算時間内で終われば仕様検討に活用できますか？

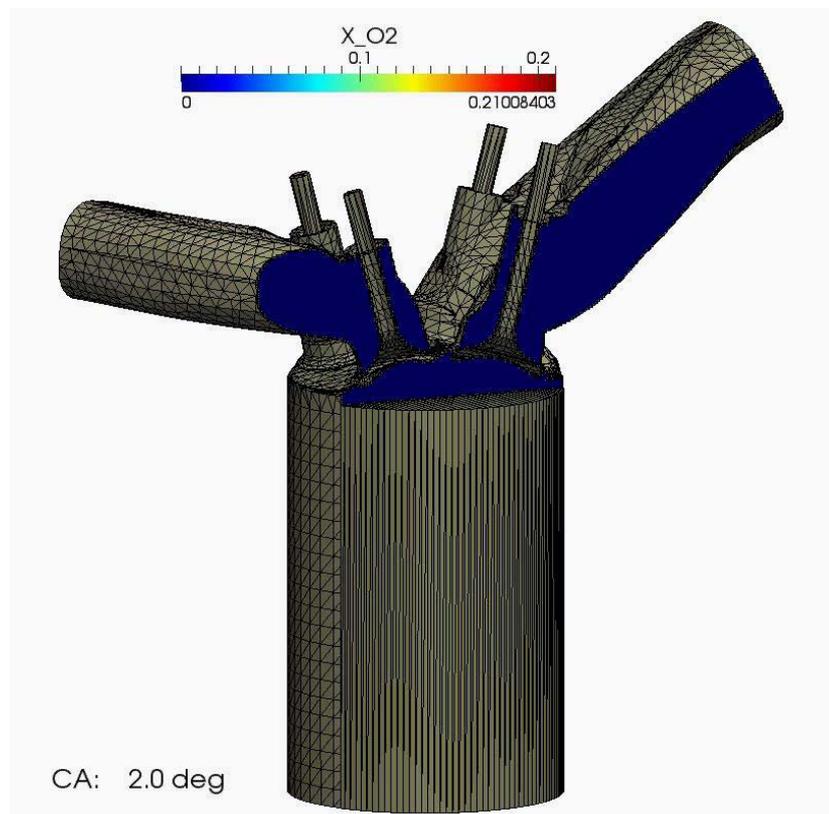
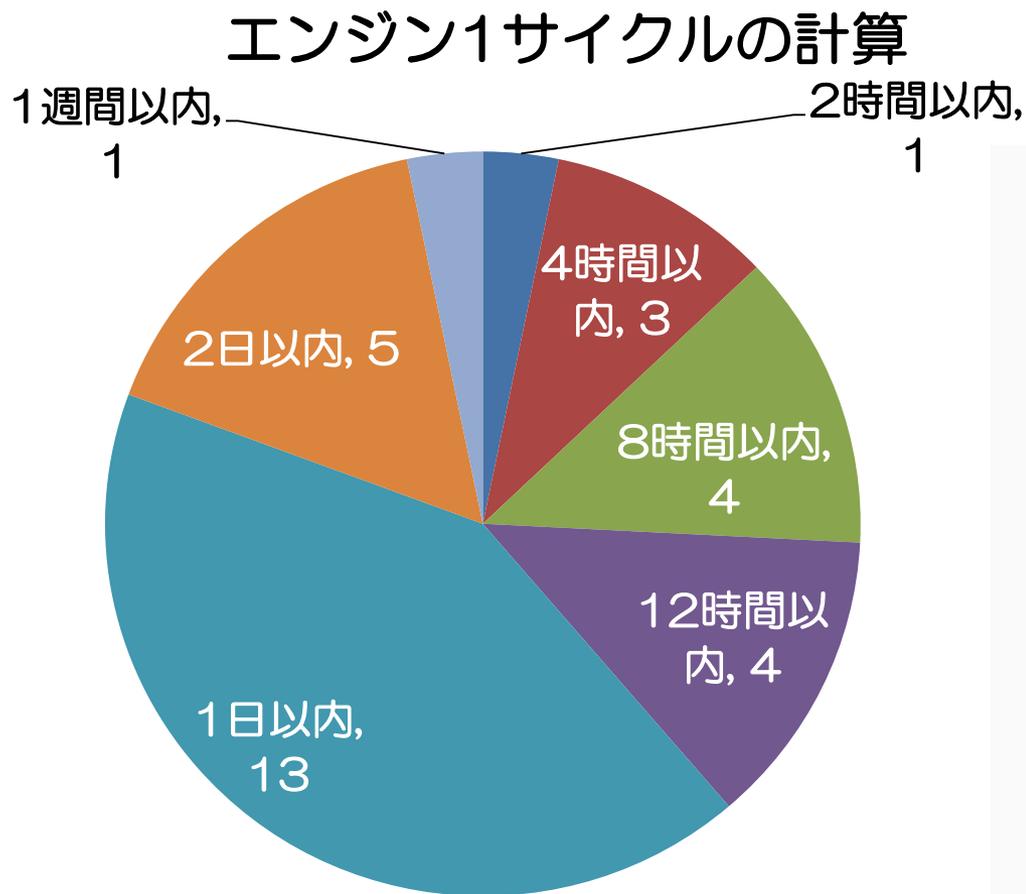
ポート定常流の計算

12時間以内,
1



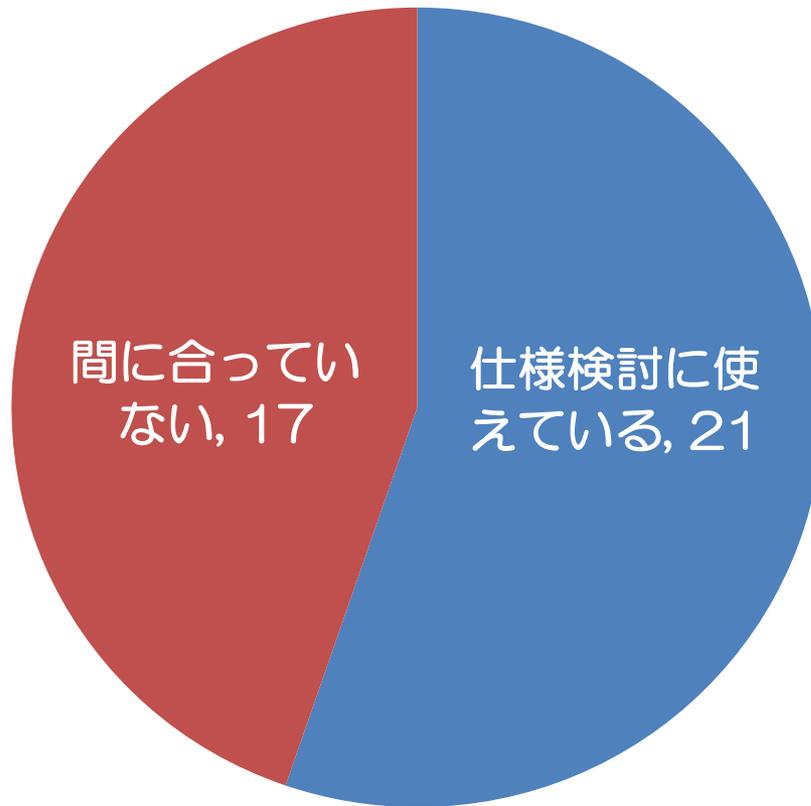
1リフトの計算が、概ね1~2時間

[質問] . 1つの検討がどの程度の計算時間内で終われば仕様検討に活用できますか？

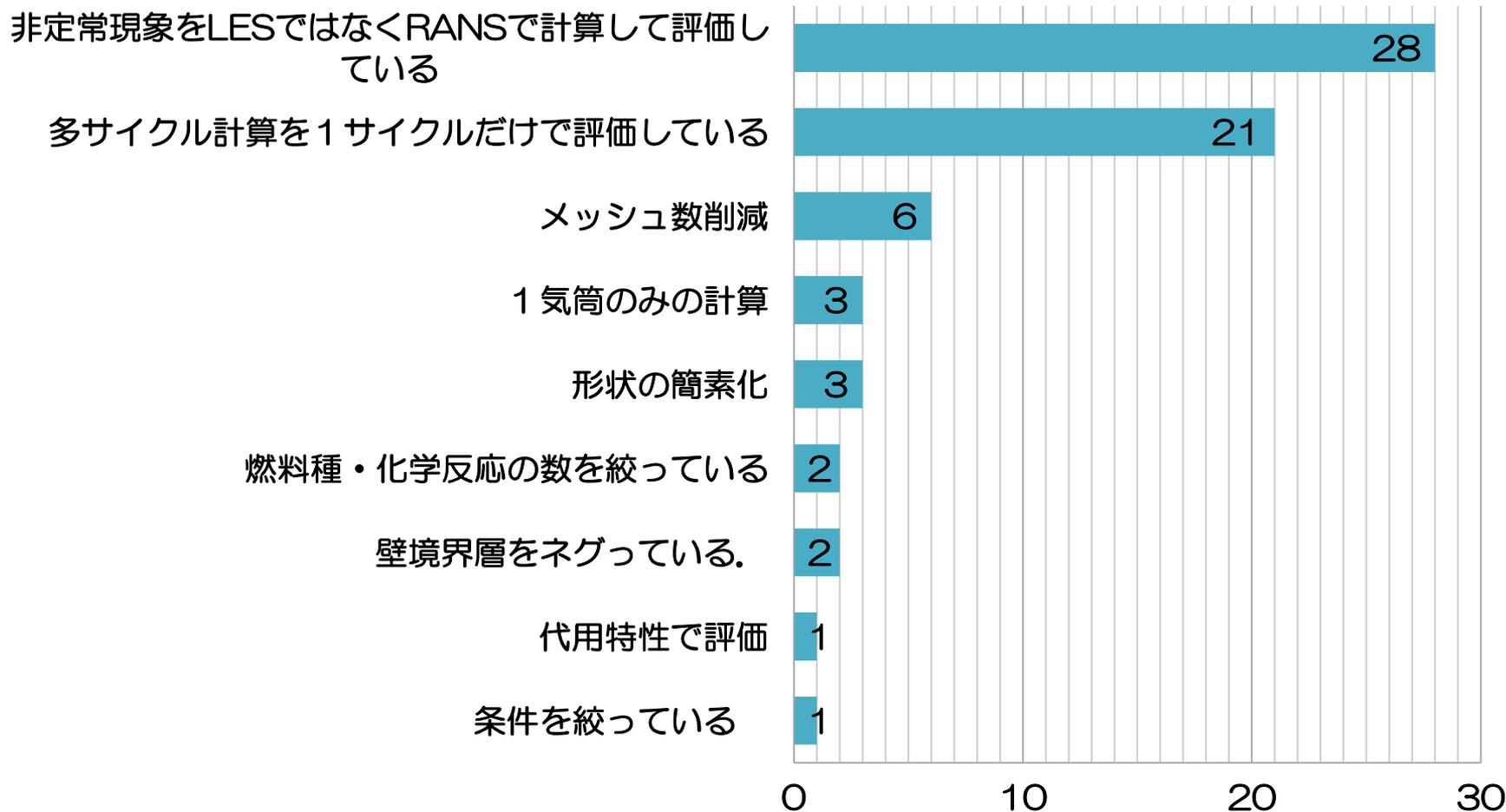


1 サイクル計算がおおよそ1日

[質問] . 現在の計算時間は十分に速いですか？

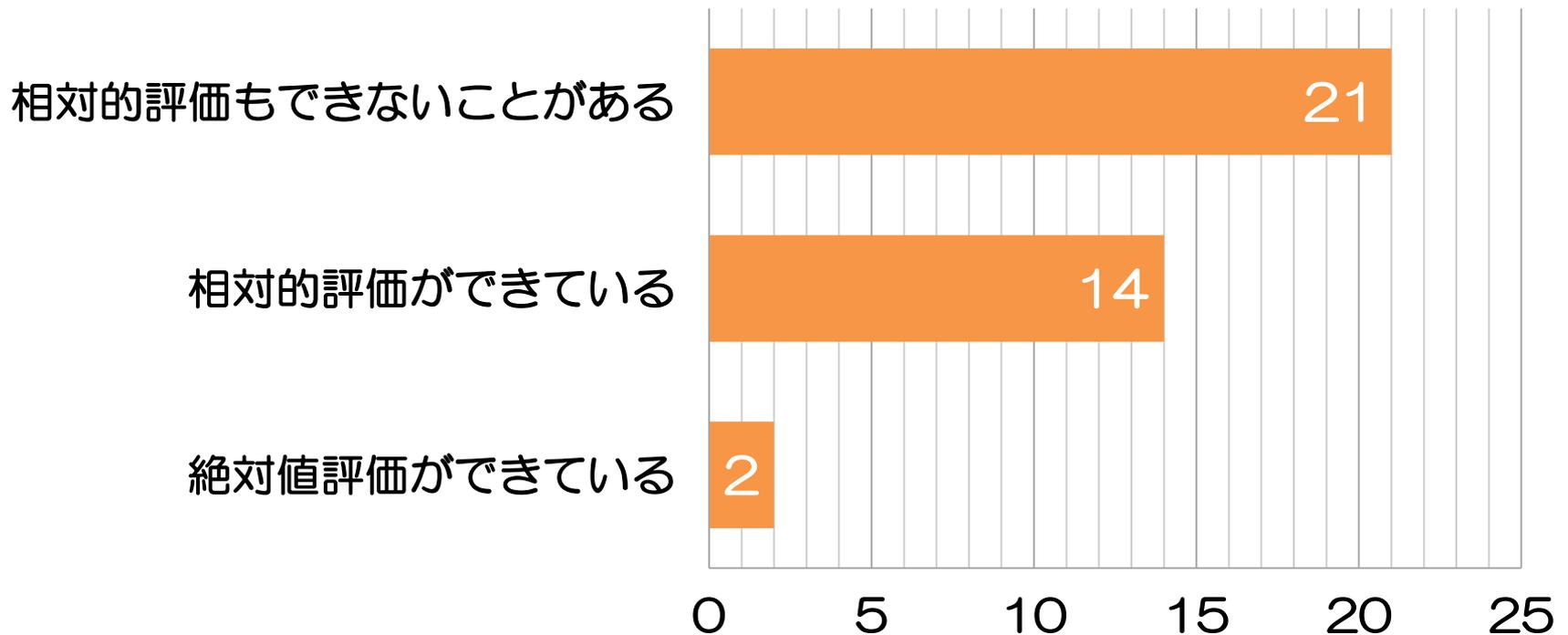


[質問] . 計算時間短縮のために妥協している点はありますか？（精度、機能、等）



LES計算や多サイクル計算などは計算時間が長く開発スピードに対応できないため、計算を簡略化している。

[質問] . 計算予測精度は十分ですか？

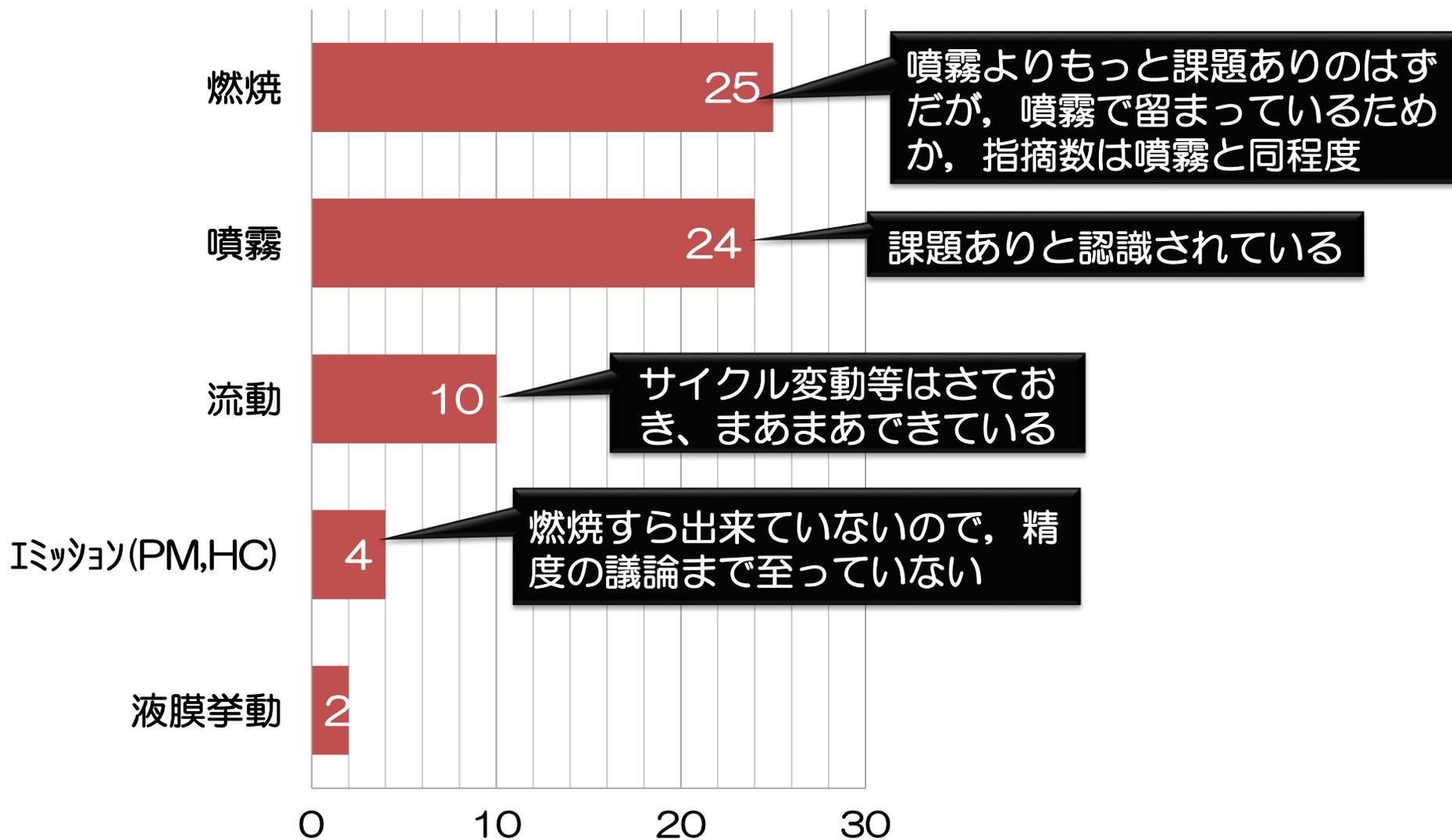


その他の意見

- 条件、形状違いによって予測精度がまちまち
- 設計項目によっては絶対値評価が難しい項目がある

「相対評価ができない」という意見から「絶対値評価ができる」という意見まで様々な回答である。信頼性が不安定と考えられる。

[質問] . 予測精度が不十分ならば、どの現象ですか？



[質問] . その他、実際の計算で困っている点がありましたら教えてください。

- 計算の安定性

例) 計算が発散した時、何が何処が原因で発散したのか分からない点 (メッセージもない)

- 計算精度

例) 条件違いに対する精度の追従性が取れない

- メッシュの依存性

例) 形状変更前後のメッシュの品質レベルが同等かどうか不確実である

- 計算速度

例) 並列度が低く高速化の阻害要因になっている

- 噴霧計算の問題

例) 噴霧解析における境界条件の取得

- 計算手法・ノウハウ

例) 燃焼室内の壁温分布の設定方法等

- その他

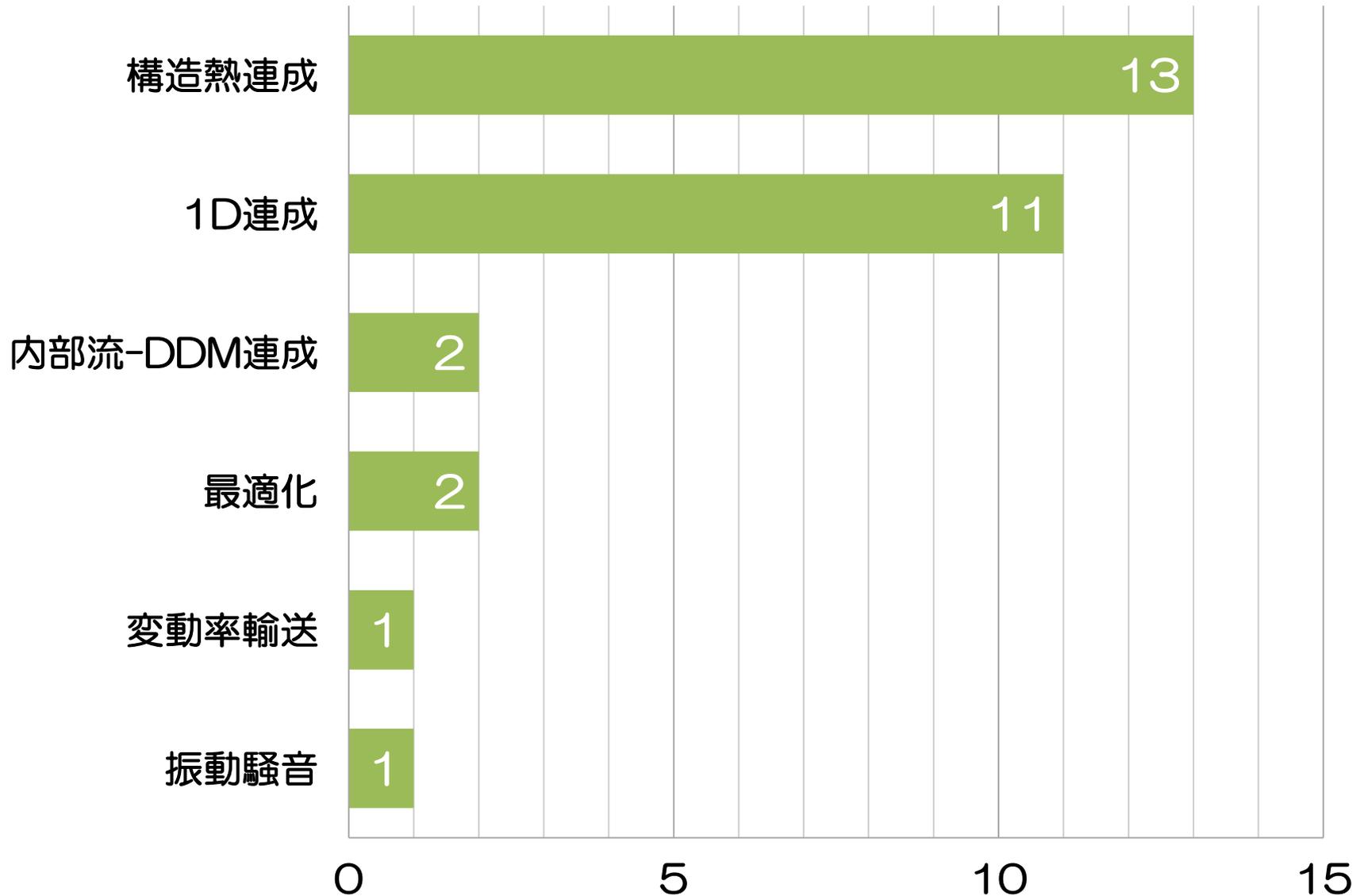
例) ベンチマークに使える共通の検証データが少ない

[質問] . 考慮に入りたい物理現象はありますか？

火花点火	火花放電（ブレイクダウン）から火炎伝播まで
	強流動によるアークの断線
	プラズマ、レーザー点火
	点火プラグの電極摩耗
火炎伝播	素反応計算に基づく火炎伝播
	消炎
噴霧	噴霧フラッシュボイリング現象
	液体圧縮性，キャビテーション
	ノズル内流れ，二相流
	噴霧の分裂、多成分燃料の蒸発
自着火	ノッキング
	プレイグニッション
熱	輻射
	固体熱連成
	熱伝達の高精度化
その他	気流音
	オイル希釈
	素反応を組み合わせたSOOT生成モデル

現在のエンジン開発の技術課題である、直噴化や強流動およびリーン時の火花点火に関する要求が多い。

[質問] . 組み込みたい機能はありますか？

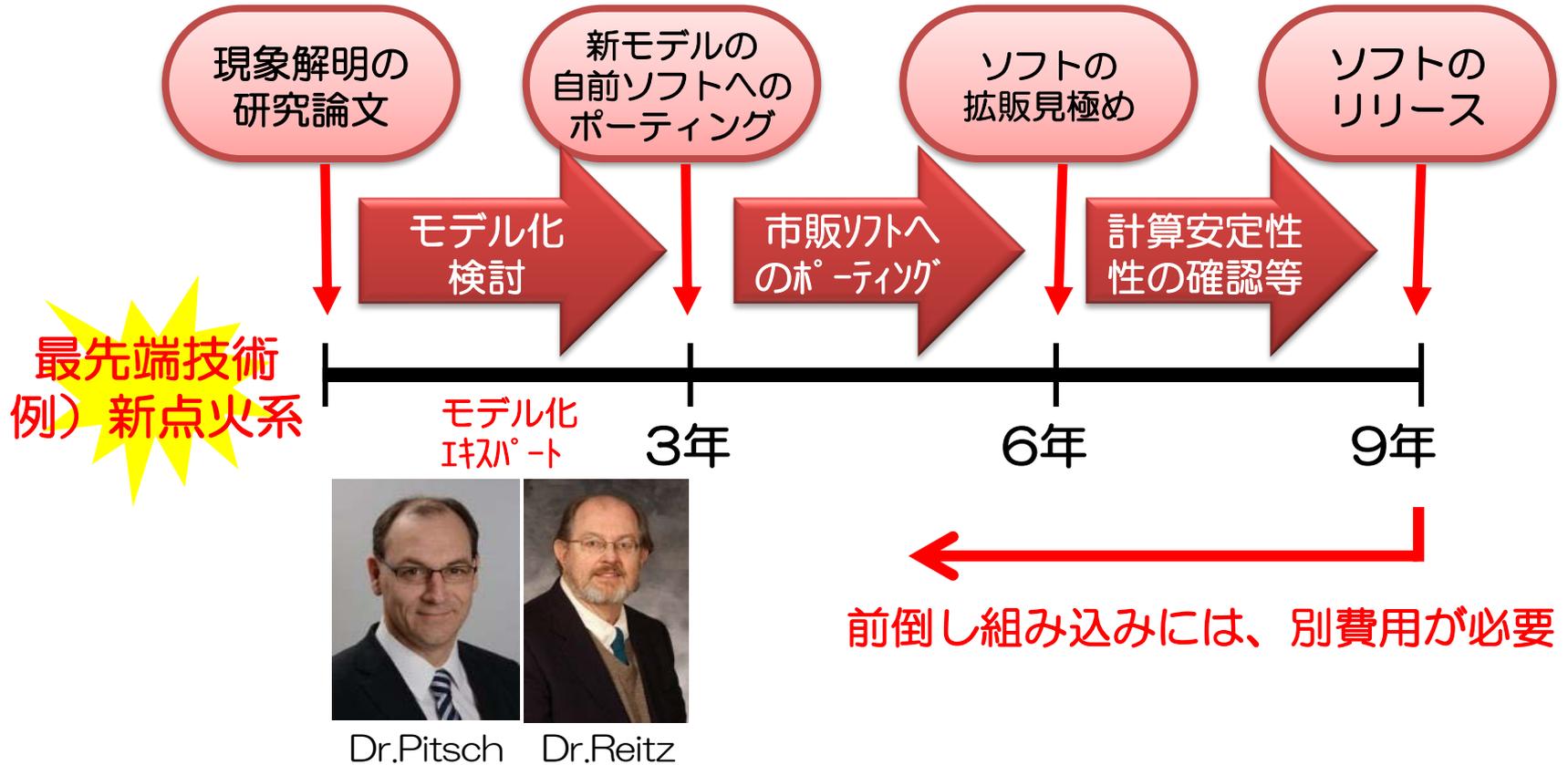


まとめ

- 新モデルや新機能に関する要望も多いが、現状の使い方でも、計算精度、計算速度、計算の安定性に課題があり、市販ソフトの改良が必要である。

モデル開発の課題

市販ソフトにおける最新モデルの研究から市販化まで

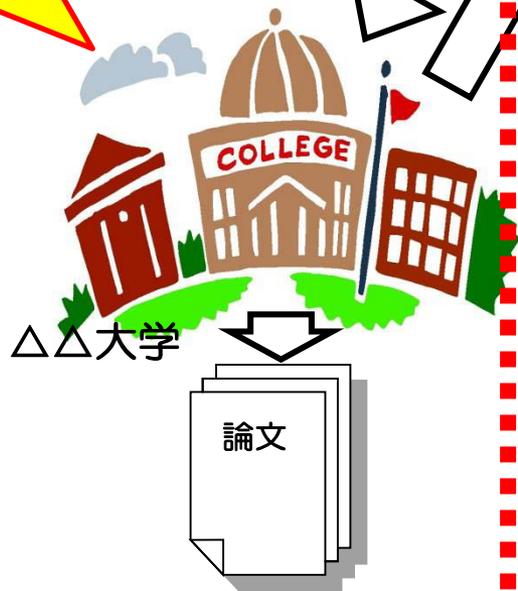


市販ソフトでは、最先端燃焼技術の新モデル導入に時間がかかる。従って、いち早く最先端燃焼技術をシミュレーション上で検討するためには、サブモデルを自前開発し、ソフトに組み込んでいくことが有効である。

大学とのモデル開発の問題点

各大学や自動車メーカーは一部共同研究を行っているが・・・

モデルの改良のためには、ユーザファンクションではできず、ソースコードまで触らなければならない場合もある



「A」ソフトの上で作成したサブモデル

〇〇自動車

「B」ソフトの上で作成したサブモデル

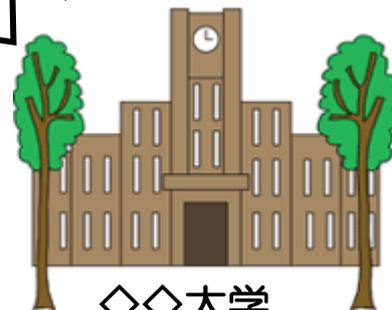
「C」ソフトの上で作成したサブモデル

大学のサブルーチンを社内で使っているソフトに載せるためにはかなりの工数が必要になる

費用



費用

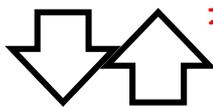


サブモデルをばらばらのソフトで開発してしまうため、最終的に合体できない。使えるソフトを開発するには、「プラットフォームの共通化」が必要！

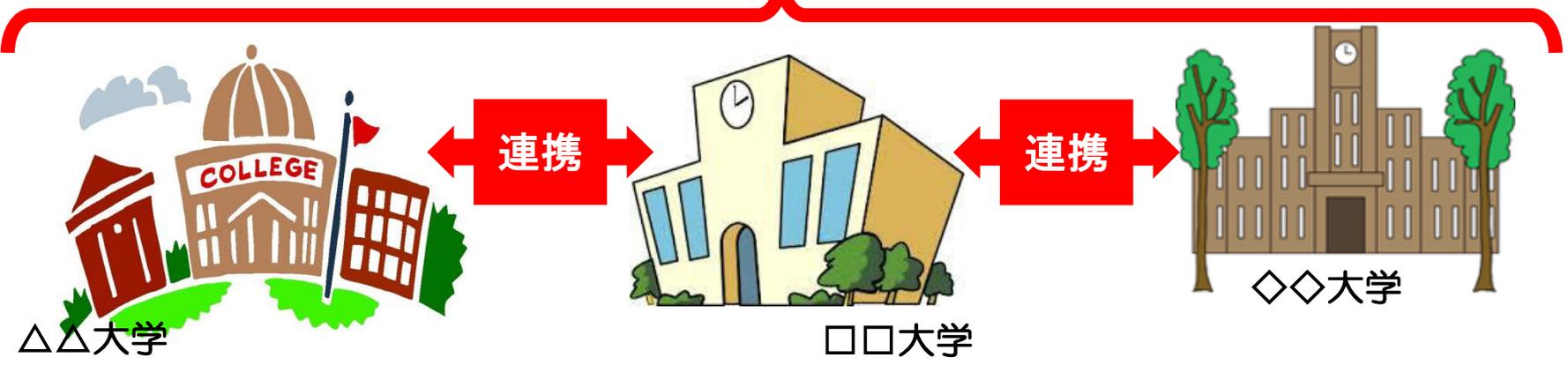
ありたい姿



費用



共通プラットフォームの上で
作成したモデル



今後は、大学間は「学連合」で繋がり、産学連携が加速していくことを期待したい

まとめ

- 新しいシミュレーション技術を短期間で構築するためには、産学連携の自前開発が有効である。
- シミュレーションを産学で進化させて行くためには、「共通のプラットフォーム」と「モデル開発ができる人材」が必要と考えている。

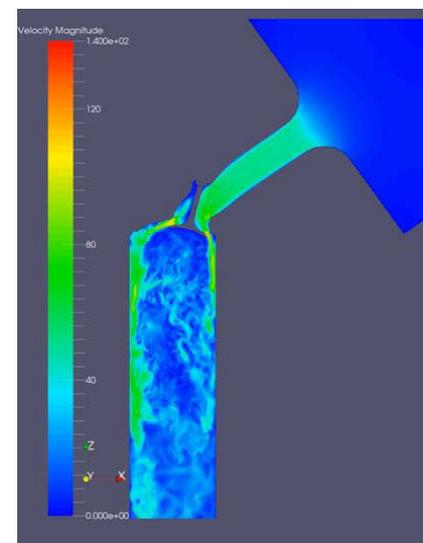
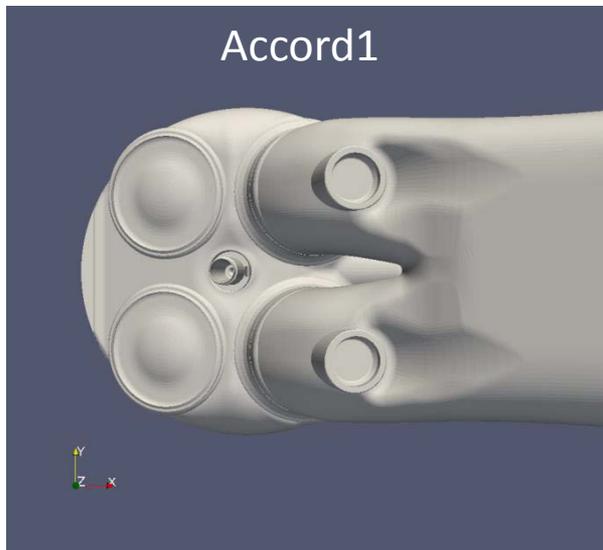
HINOCAの検証

精度検証内容（詳細）

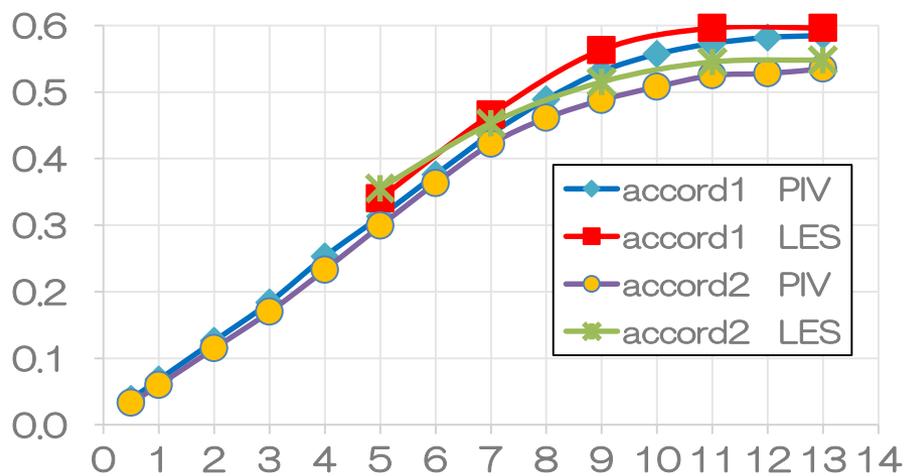
	項目	現象	検証の指標	精度要求
流動	定常流	ポート流動	ポートCv	±1%くらい
			ポートTr	定性比較 できていること
	非定常流	筒内流動	Tr	±3%くらい
			タンブル中心	±ポア直径3%くらい
		乱流強度	u'	±1%くらい
噴霧	微粒化	代表平均粒径	SMD	±3%くらい
	運動量	粒径分布	-	定性比較 できていること
		粒流速	-	±3%くらい
	燃料分布 乱流混合 付着 液膜分布	ペネトレーション	先端到達距離	±3%くらい
		液滴衝突	-	定性比較 できていること
		液滴蒸発	-	±3%くらい
		乱流との相互作用	筒内混合気分布	
		壁面衝突	衝突後反射挙動	
		液膜移動	液膜挙動	
	液膜蒸発	液膜厚さ、		
液膜再飛散	飛散後の挙動			
着火	着火	放電波形		定性比較 できていること
		放電	アーク波形	
	燃焼	点火	エネルギー量, 期間	
		火炎伝播	乱流火炎伝播速度	
		拡散燃焼	拡散燃焼速度	
	熱伝達		熱流束	
			冷却損失	
		Knock時期	着火遅れ トレースノック時期	
		消炎	-	
		後燃え	-	
燃焼生成物	HC		バルブアウトHC エンジンアウトHC	
	NO _x		NO _x	
	PM		Engine-out PM	

定常流の検証（形状差）

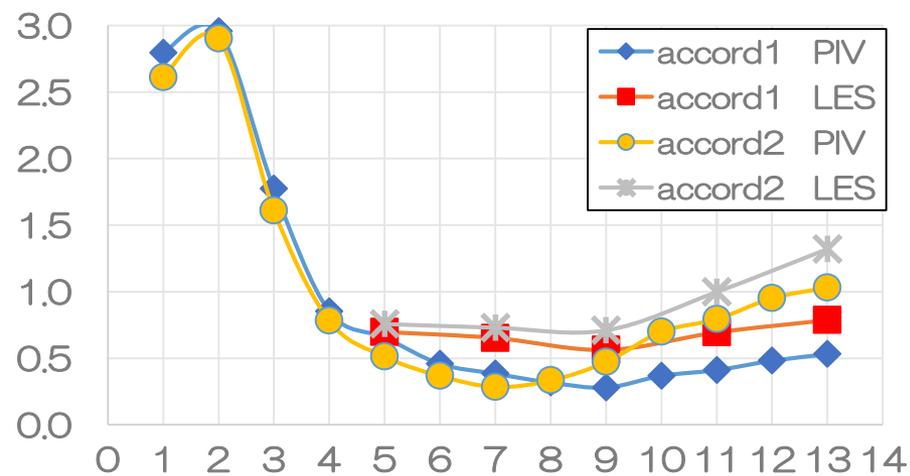
ポート形状



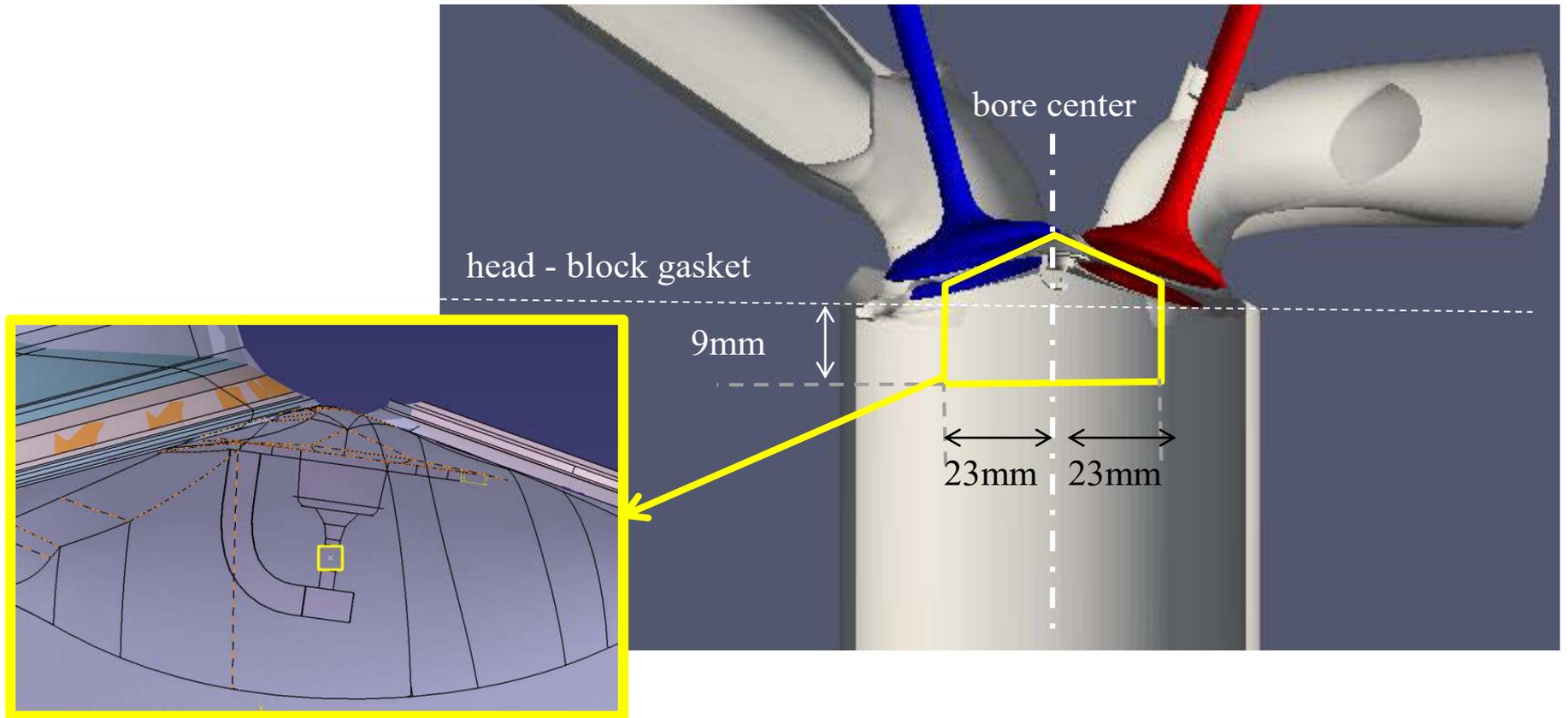
流量係数



タンブル比



可視化範囲

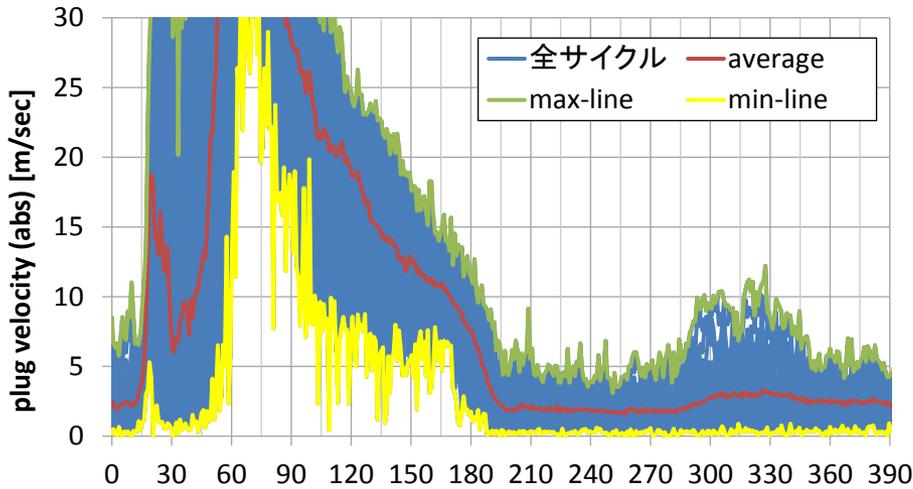


比較サイクル数

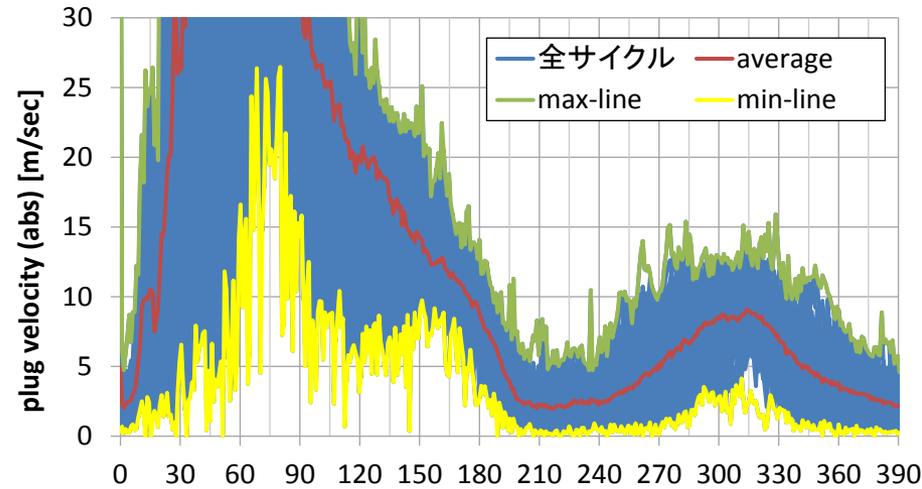
可視化計測 : 52サイクル
HINOCA : 16サイクル

プラグ流速（絶対値）の時間変化比較

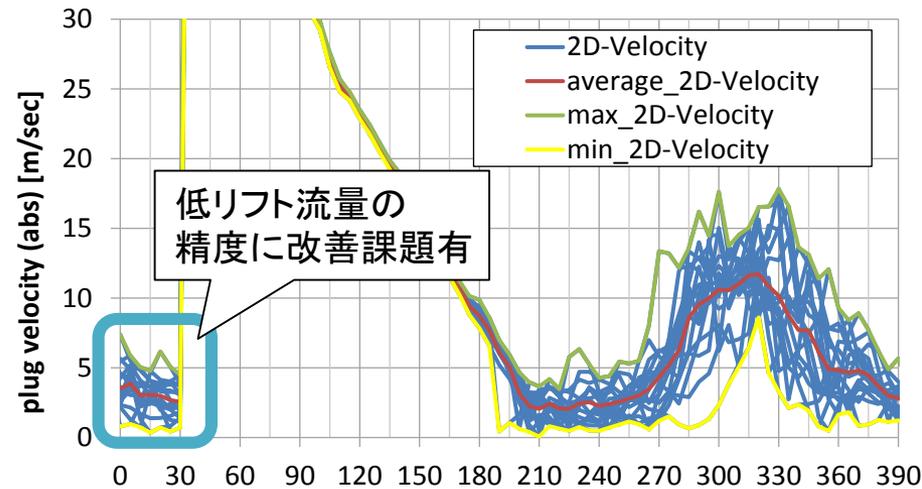
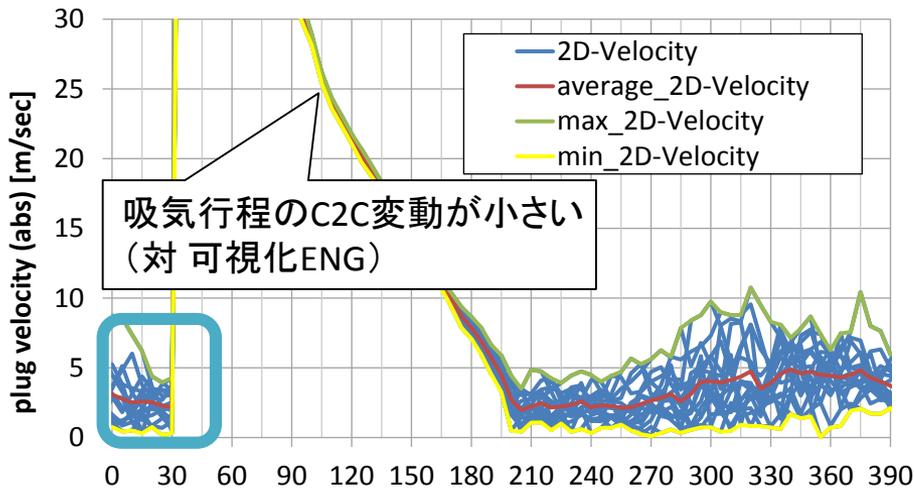
Accord1



Accord2



HINOCA result



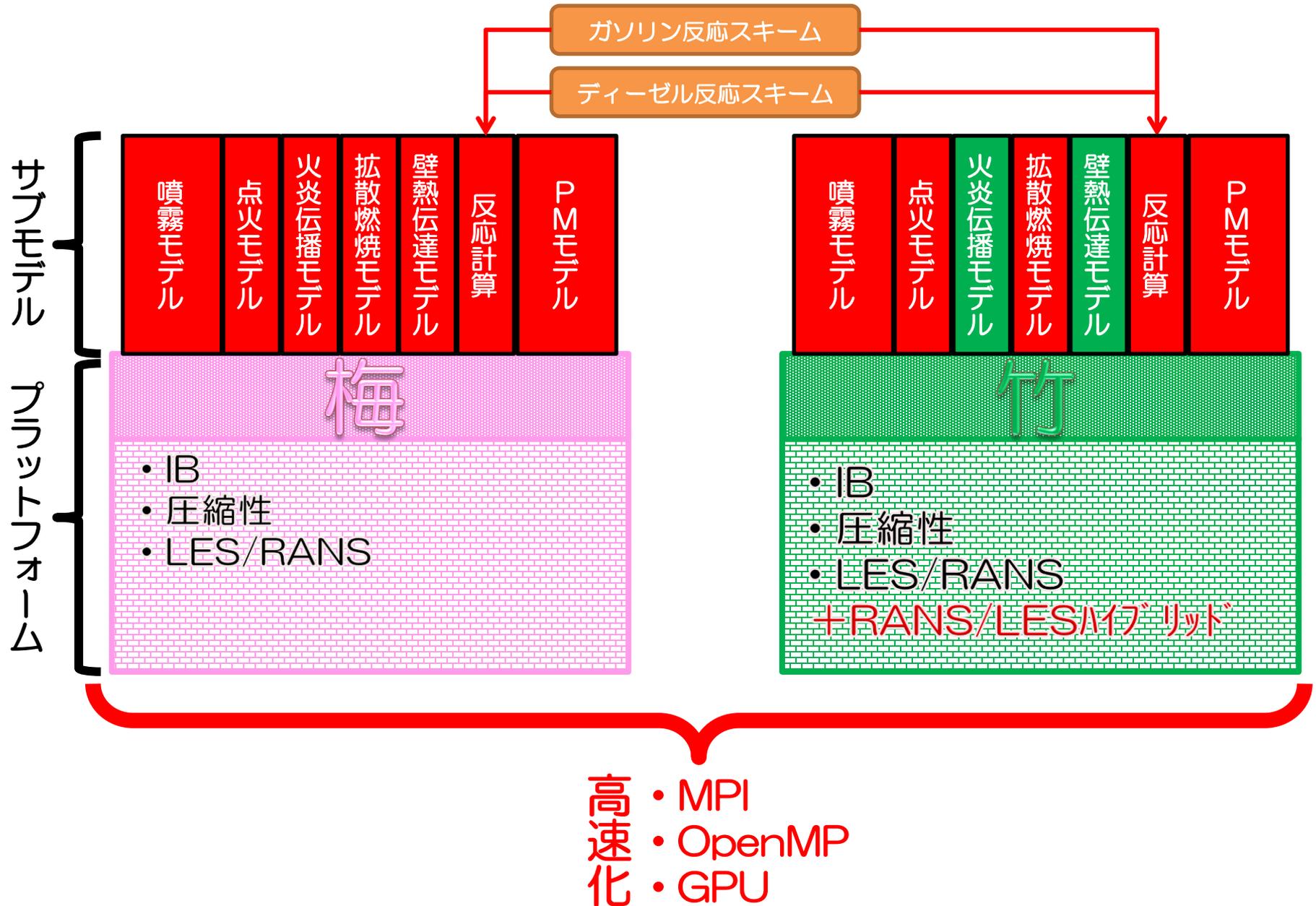
サイクル平均プラグ流速はtest-HINOCAで良い一致を示し、評価したい圧縮行程後半（点火タイミング付近）ではばらつき幅も良い一致を示している。結果engine.1 / 2 の違いもSIMできている。

まとめ

- HINOCAに対して、各社が進めて行こうという気運が高まってきた。
 - 検証会にサンプルデータを出す
 - 自分たちで検証を始めた
 - LESの活用方法の検討を始めた

HINOCAの発展

現状のHINOCAのバージョン



SIP後のHINOCA発展の方向性

- ① 先端的な手法を組み込んでいく（大学ニーズ）
 - DNSに向かい、サイエンス方向に思いっきり振る
 - 燃焼機能のバリエーションを増やす



技術の流れ

- ② 精度と速度に磨きをかける（自動車会社ニーズ）
 - 同一機能のまま、精度や速度の向上を行っていく



技術の流れ

- ③ 適用の幅を広げる（部品メーカーニーズ）
 - 吸排気系も含めて、システム全体や各部品に対応する
 - 水流れなども含めて、汎用化する

HINOCA発展 ①イメージ

2021年度末

2019年度末 (暫定)

機能拡張に加え
各サブモデルのさらなる高精度化を図る
⇒ダントツの性能

流出条件

噴霧

インジェクター
内部流れ (VOF)

VOF→DDM

DDM

KH-RTモデル

高精度液滴分裂モデル

多成分液膜 (燃料)

Naber-Reitz モデル

spaldingモデル

O'Rourke モデル

千田モデル

油膜対応
付着モデル

アーク放電

AKTIM改 Lucchini改

熱伝達

壁温予測モデル
(固体熱連成)

Han-Reitz
Rakopoulos

筒内流動

DES 高精度RANS

LES RANS

Spalding型壁モデル

ソフト構造

ダイナミック局所再分割

IB+直交格子 GPU

局所再分割

燃焼

汎用的燃焼モデル
(w/詳細化学反応)

G方程式 c方程式

乱流燃焼速度モデル

燃焼生成物

Soot前駆体 (w/詳細化学反応)

NOx (w/詳細化学反応)

HC (消炎モデル)

Moment法

まとめ

- SIP後を見据え、HINOCAをより良いものにしていくための議論がAICE内でも始まっている。

全体まとめ「産からの期待」

- 競争力の高い製品を開発するには、産官学が連携して、技術レベルが高く競争力が高いシミュレーションを開発し利用しなければならない。
- そのために、HINOCAが産学連携のプラットフォームとなり、その上でモデルを開発できる人材が育っていくことを期待する。