Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program「革新的燃焼技術」（制御チーム）

革新的燃焼技術を具現化する モデリングと制御

国立大学法人　東京大学　大学院工学系研究科

金子　成彦

SIP革新的燃焼技術　2018（平成30）年度　最終シンポジウム
2019年1月28日@東京大学

制御チームの取り組み

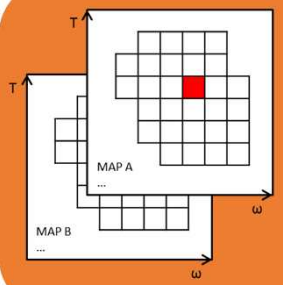
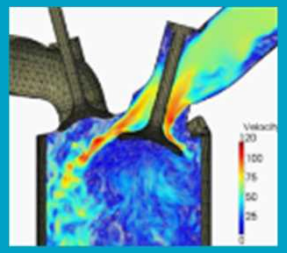
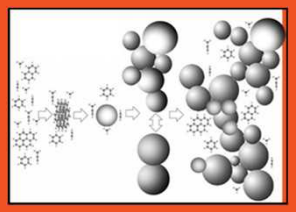
高度燃焼制御システムの構築を目指して、制御対象のモデリングと制御系設計開発支援ツールの開発を行う。具体的には、全体モデリングに必要な、①高速３Ｄ計算コアソフトの開発、②着火・燃焼・排気サブモデル群の開発、およびコントローラー設計に必要な、③高いロバスト性を有する制御方式の開発、④制御モデルの定数最適化を行うツールの開発を行う。

CAE グループ

PM グループ

制御 グループ

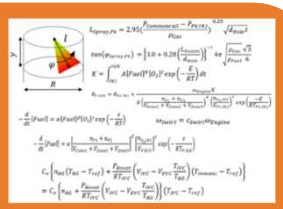
目標・課題と解決手法

目　標	課　題	解 決 手 法
熱効率50%に貢献する モデリングと制御技術		
新燃焼の実装	 性能が出し切れない	モデルベースト制御 **インテリジェント制御システム構築**
設計シナリオ検証	 多大な計算コスト	高速計算技術 **次世代 3D噴霧燃焼解析ソフト**
設計ツール	 ＰＭ発生	計測技術とメカニズム解明 **PMモデル開発**

制御チーム体制と成果

制御グループ

モデルベースの制御設計手法構築

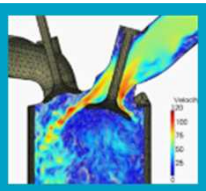


- 物理に基づいた制御モデルの構築
- 様々な最新の制御理論を応用したオンボード適合

RAICA（雷神）

CAEグループ

高速3次元CFDコアソフト開発および熱効率50%シナリオ検証ソフト開発



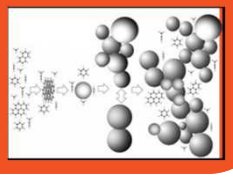
- メッシュ作成過程の排除
- 1Dｼﾐｭﾚｰｼｮﾝの精度向上へ貢献する3次元計算

HINOCA（火神）

PMグループ

CFD用ガソリンPMモデル構築

- モデル開発・最適化のための最先端計測技術の構築
- ｲﾝｼﾞｪｸﾀﾉｽﾞﾙ出口～ＰＭ生成までのﾓﾃﾞﾘﾝｸﾞ



RYUCA（粒神）

SIP革新的燃焼の構造が生み出した相乗効果（制御チームで感じたこと）

- 異なる分野の専門家との連携
  → モデルを共通言語にシステム構築

- 産学間での人，情報，物の交流
  → 従来踏み込めなかった興味，課題への挑戦

- 他大学学生間の交流
  → 各大学文化の融合

↓

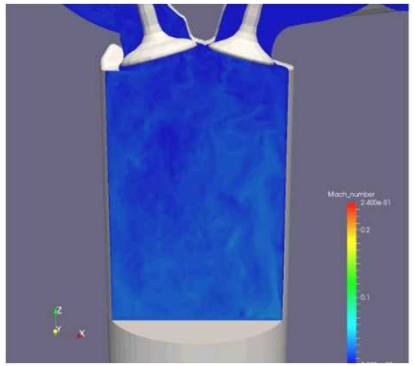
SIP後の研究テーマの発展性

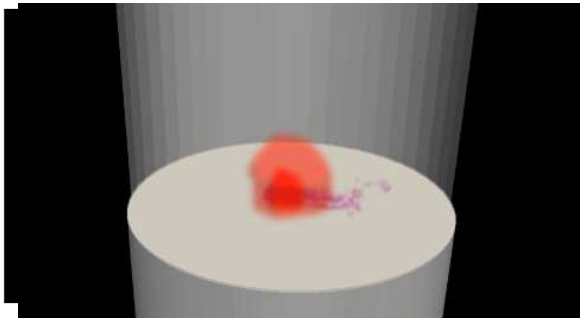
研究成果紹介

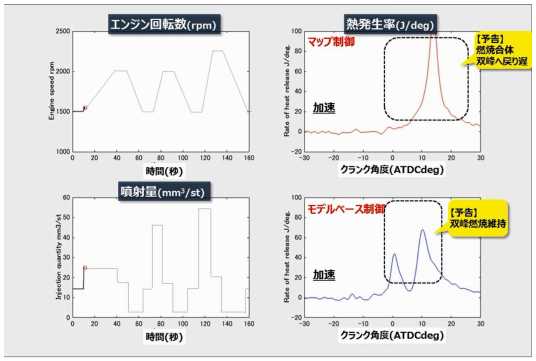
溝渕 泰寛
宇宙航空研究開発機構
主幹研究開発員
CAEグループ長

秋濱 一弘
日本大学
教授
PMグループ長

山崎 由大
東京大学
准教授
制御グループ長







研究成果紹介

Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program「革新的燃焼技術」　（制御チーム）

CAEグループ

エンジン燃焼ソフトHINOCAの開発

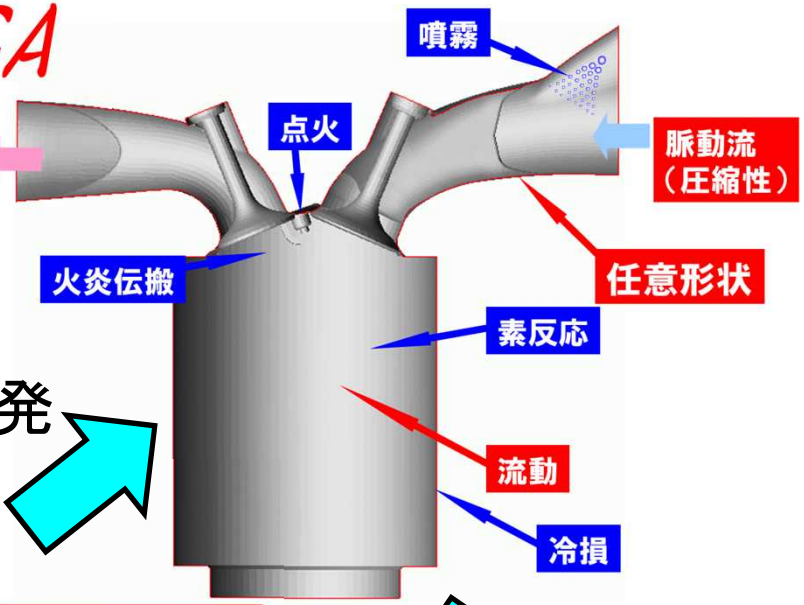
宇宙航空研究開発機構

溝渕 泰寛

高速3次元CFDコアソフト開発

火神 HINOCA

3D解析ソフト

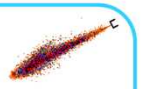


開発

モデル
リダクション

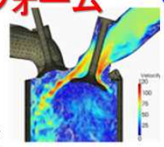
自動車業界で共有可能なプラットフォームへ

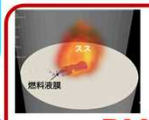
CAE
グループ

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

大阪大
点火モデル

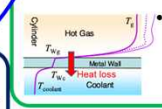
•放電経路を考慮した、超希薄、高流動、高EGR対応点火モデルの組込

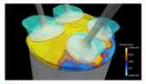
JAXA
プラットフォーム

•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を構築

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

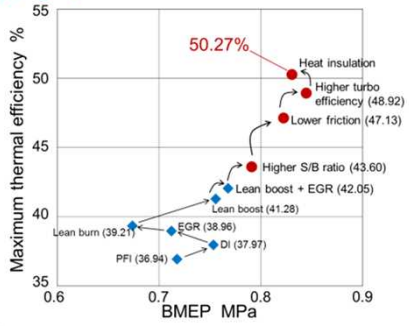
早稲田大
火炎伝播モデル

•超希薄燃焼対応火炎伝播モデルの組込

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

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

早稲田大
0-1D解析
熱効率50%シナリオ検証ソフト



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、人財育成

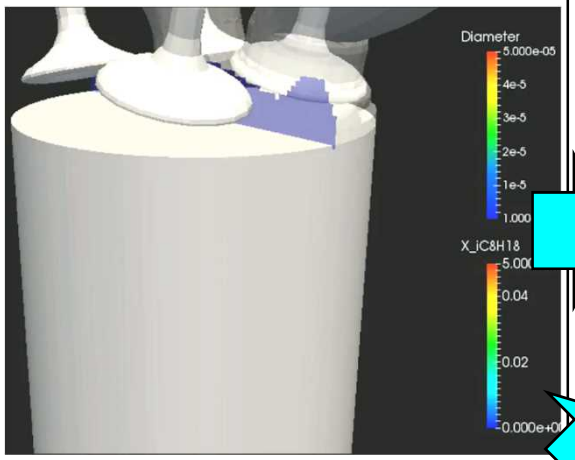
- うまく作る：産学が連携し、日本の英知を結集して高精度なサブモデルを開発
- うまく使う：産産学学が共通のモノサシで議論
  メッシュ作成作業からの解放
- しっかり育てる：ソフト開発/活用を通じ、筒内現象を広く深く理解したエンジン技術者を育成

利用要件

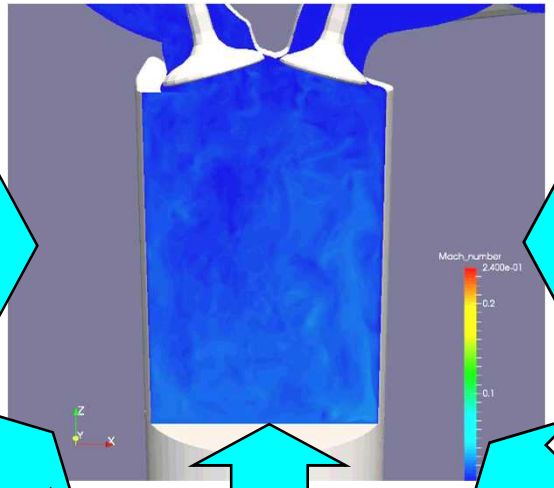
オープンソースの産学共通プラットフォーム

HINOCA：流動プラットフォーム＋サブモデル群

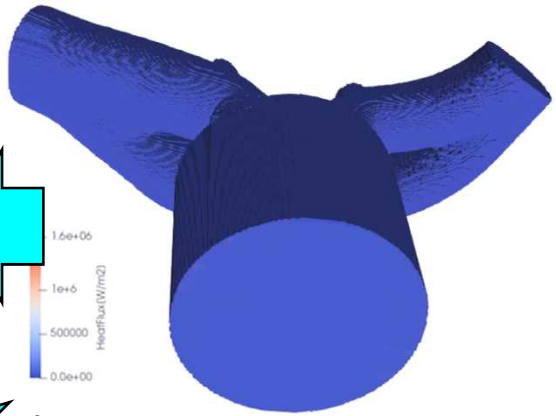
噴霧・混合気形成



流動プラットフォーム

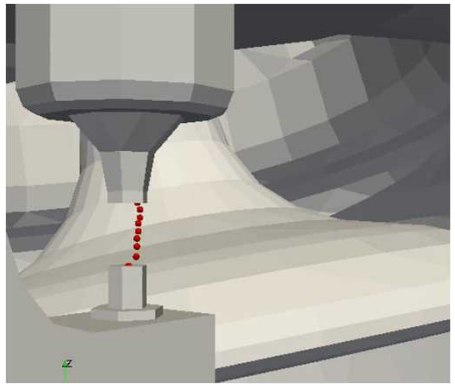


壁面熱損失



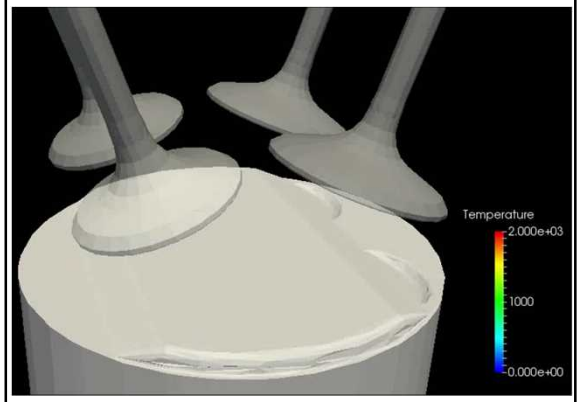
ピストン面熱流束

放電・火炎核成長



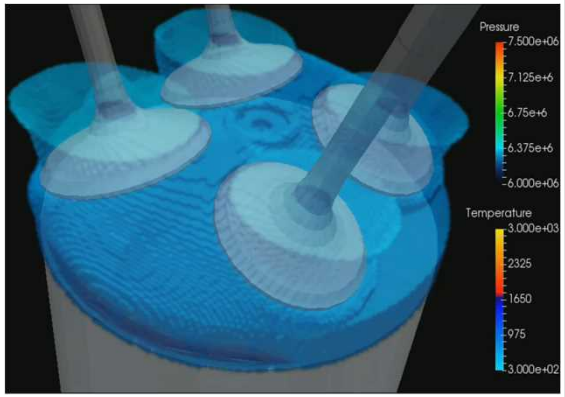
放電経路（再放電あり）

火炎伝播



伝播性火炎面

ノック

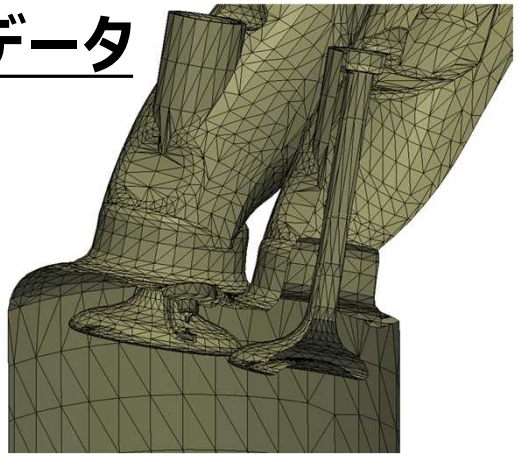


ノック発生時の圧力変動

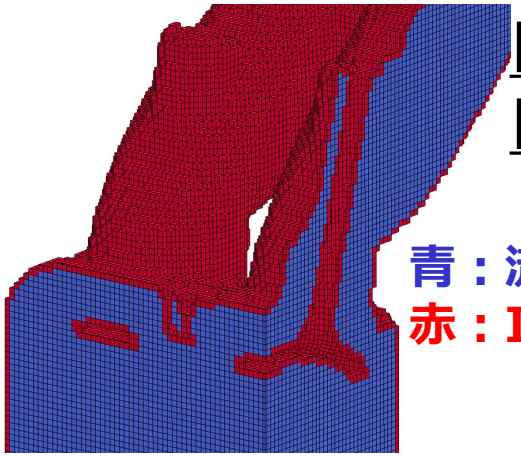
エンジン燃焼解析ソフト HINOCA

- 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

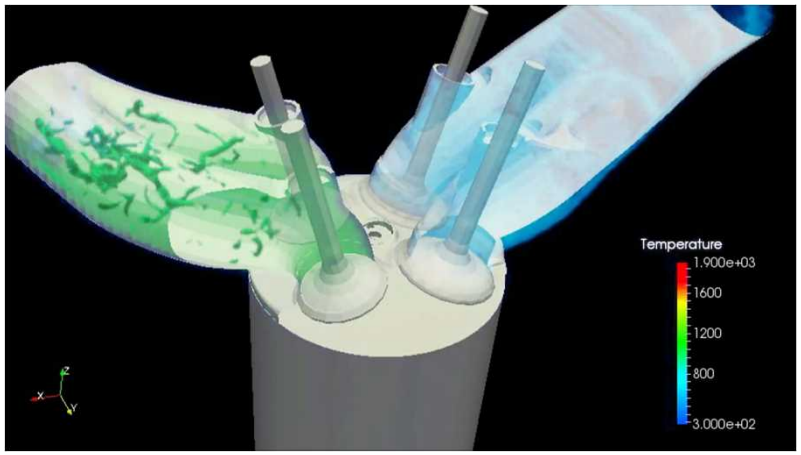
形状データ



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

エンジン燃焼解析ソフト HINOCA

より詳細は、

企画セッション
「産産学学連携で生まれた HINOCA」

で、ご紹介させていただきます。

Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program「革新的燃焼技術」　（制御チーム）

「PMグループ成果報告」

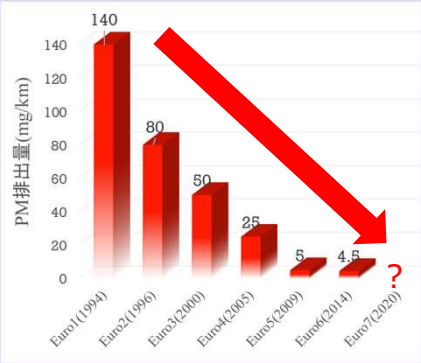
直噴ガソリンエンジン筒内のPM生成計算用モデル群（RYUCA）と HINOCA搭載

日本大学

秋濱　一弘

背景 と ねらい

PM規制強化と対策／燃費向上の障害

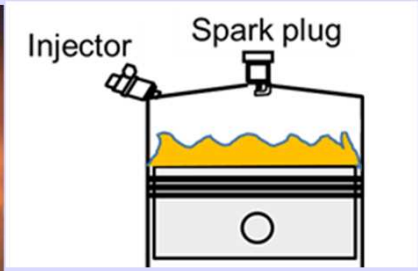


https://www.env.go.jp/council/07air-noise/y072-58/mat04.pdf

GPF(Gasoline Particulate Filter)
http://www.ngk.co.jp/news/2014/20140425.html

低PM排出エンジンの開発

課題
ー直噴ガソリンエンジンの冷間始動PM生成ー



燃料液膜燃焼（プール燃焼）からのPM生成

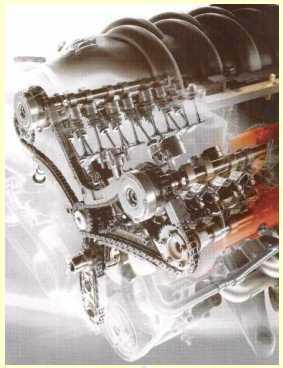
冷間始動時の再現計算

出来ない・無い

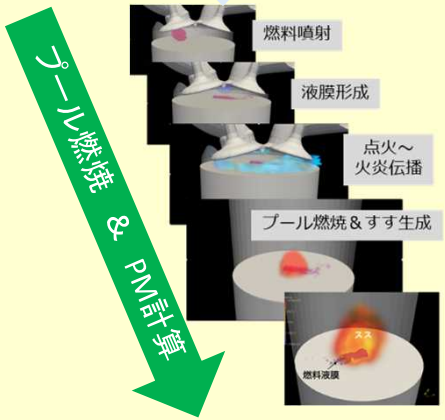
CFD計算用のモデル群

試作レス 開発

モーターファン・Vol.115「エンジン新次元」より



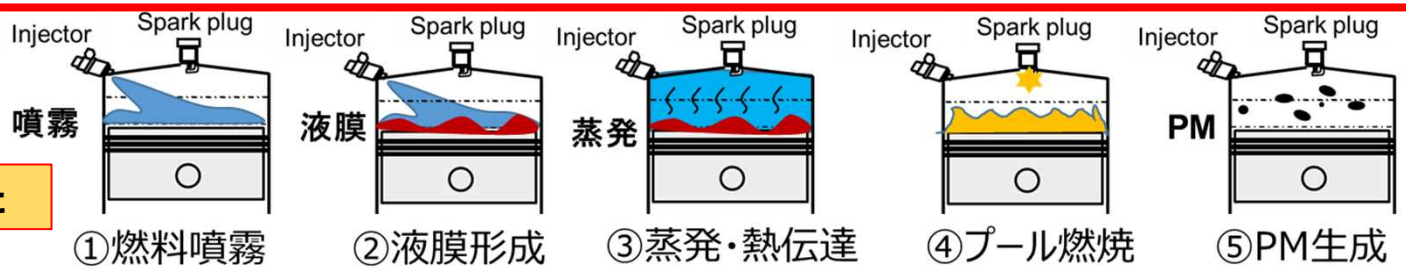
CFD計算による設計支援



冷間始動PMを計算できるモデル群　RYUCA（粒神）

プール燃焼も扱える
筒内PM計算

今まで出来なかった



成果：SIPで可能になった

モデル群　/　RYUCA（粒神）

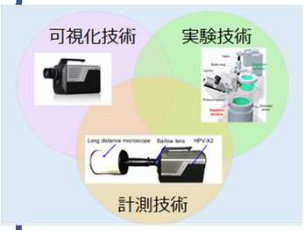
HINOCA搭載

噴霧流動モデル	壁面衝突モデル	噴霧分裂・蒸発モデル	液膜形成流動モデル	液膜熱伝達モデル	燃焼＆PMモデル
群馬大 座間	岡山大 河原	海技研 高木（CAEgr）	北大 小橋	北大・小橋 千葉大・窪山	大分大・橋本 日大・秋濱

共通燃料

TRF*ガソリン模擬燃料（3成分）
蒸留特性も再現（5成分）

*TRF：Toluene Reference Fuel



定常プール火炎 バーナの非接触 PM/PN計測法	衝撃波管 すす生成 データベース	RCEM筒内 すす生成挙動 可視化データベース	単筒エンジン 冷間～温間 PM排出特性データベース
群馬大 荒木	横浜国大 石井	明治大 相澤	千葉大・窪山 日大・秋濱

高度計測法の開発・検証用データベース

SIP独自
希少データ

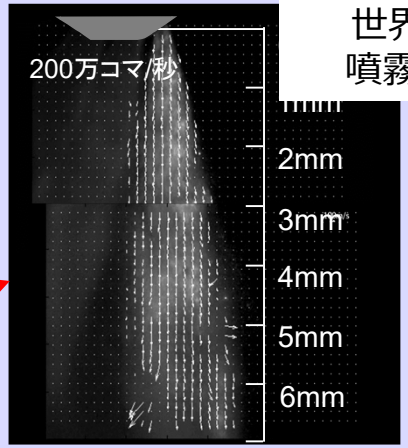
噴霧～液膜形成～蒸発モデル：世界トップの計測法による検証とモデル最適化！

不十分な既存モデル

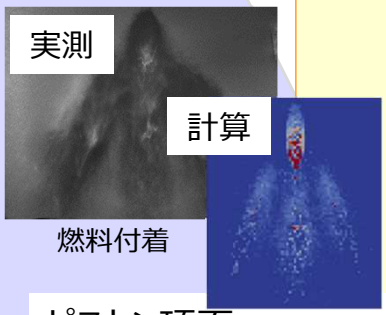
既存モデルの課題

- ガソリン模擬燃料未対応
- 現象の詳細データ不足
- 手探りモデル作り
- 検証データの欠如

トップレベル計測とモデル最適化・検証



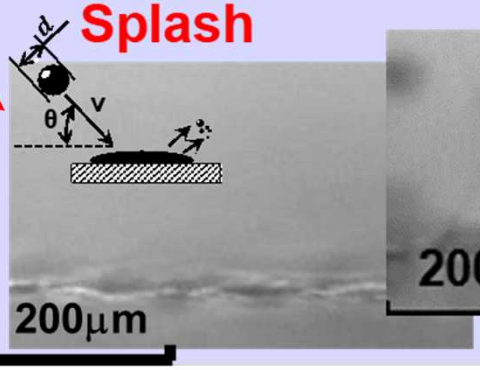
世界最速PIV
噴霧速度計測

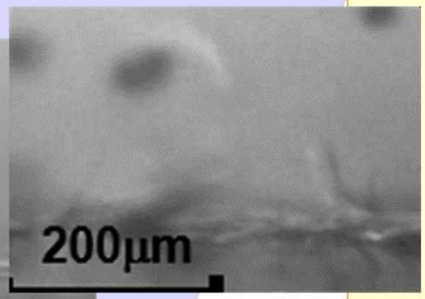


燃料付着

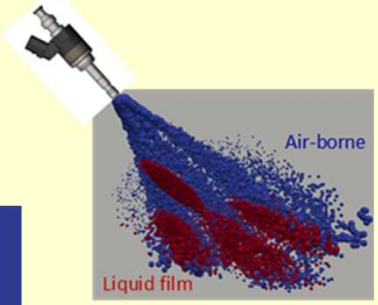
ピストン頂面
液膜パターン検証例

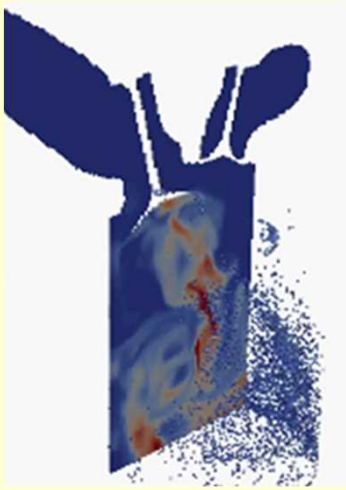
壁面衝突の
超高速・超拡大観察





ガソリン模擬燃料用モデル群をHINOCAへ搭載





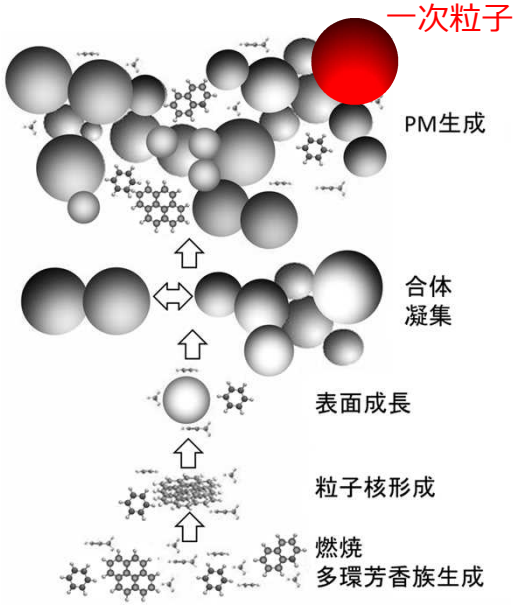
HINOCA計算例

PMモデル：ガソリン模擬燃料＆液膜（プール）燃焼への対応が可能に！

複雑なPM生成過程

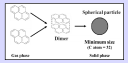
既存モデルの課題

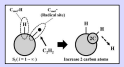
- “ガソリン模擬燃料”
- “無酸素下プール燃焼”でのモデル検討と検証



サイエンス＆現象理解 ＆ モデル検討・改善

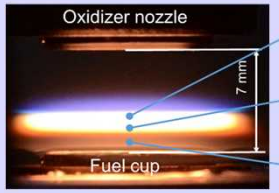
- 核生成速度の再検討
- アセチレン付加表面成長の再検討

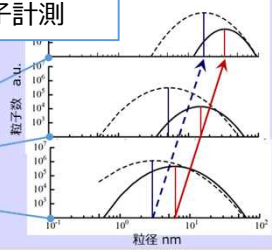


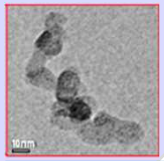


H + Csoot-H => Csoot・+ H2
Csoot・+ H2 => Csoot-H + H
Csoot・+ H => Csoot-H
Csoot-H + OH => H2O + Csoot・
H2O + Csoot・=> OH + Csoot-H
Csoot・+ C2H2 => Csoot-H + 2C(B) + H
CH3 + Csoot-H => Csoot・+ CH4
Csoot・ + CH4 => Csoot-H + CH3
C3H3 + Csoot-H => Csoot・ + AC3H4
Csoot・+ AC3H4=> Csoot-H + C3H3
C2H + Csoot-H => Csoot・+ C2H2

SIP独自プール燃焼バーナでの多環芳香族・ナノ粒子計測

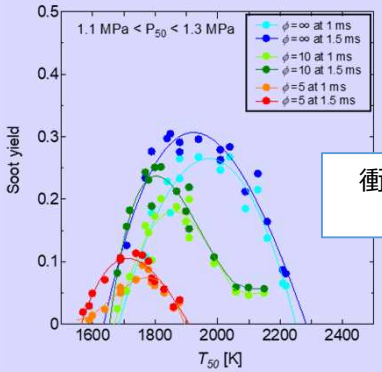






高倍率
TEM観察

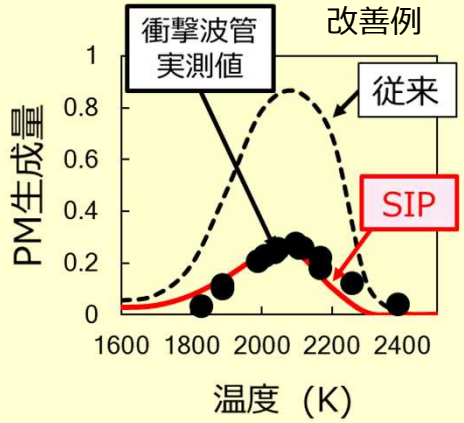
ガソリン模擬燃料のすす生成データ（SIP独自）



衝撃波管データ
（SIP独自）

徹底検証

ガソリン模擬燃料用PMモデル



SIPモデル

- 化学種233
- 反応数1375
- PM生成量や一次粒子平均粒径計算

今後の課題

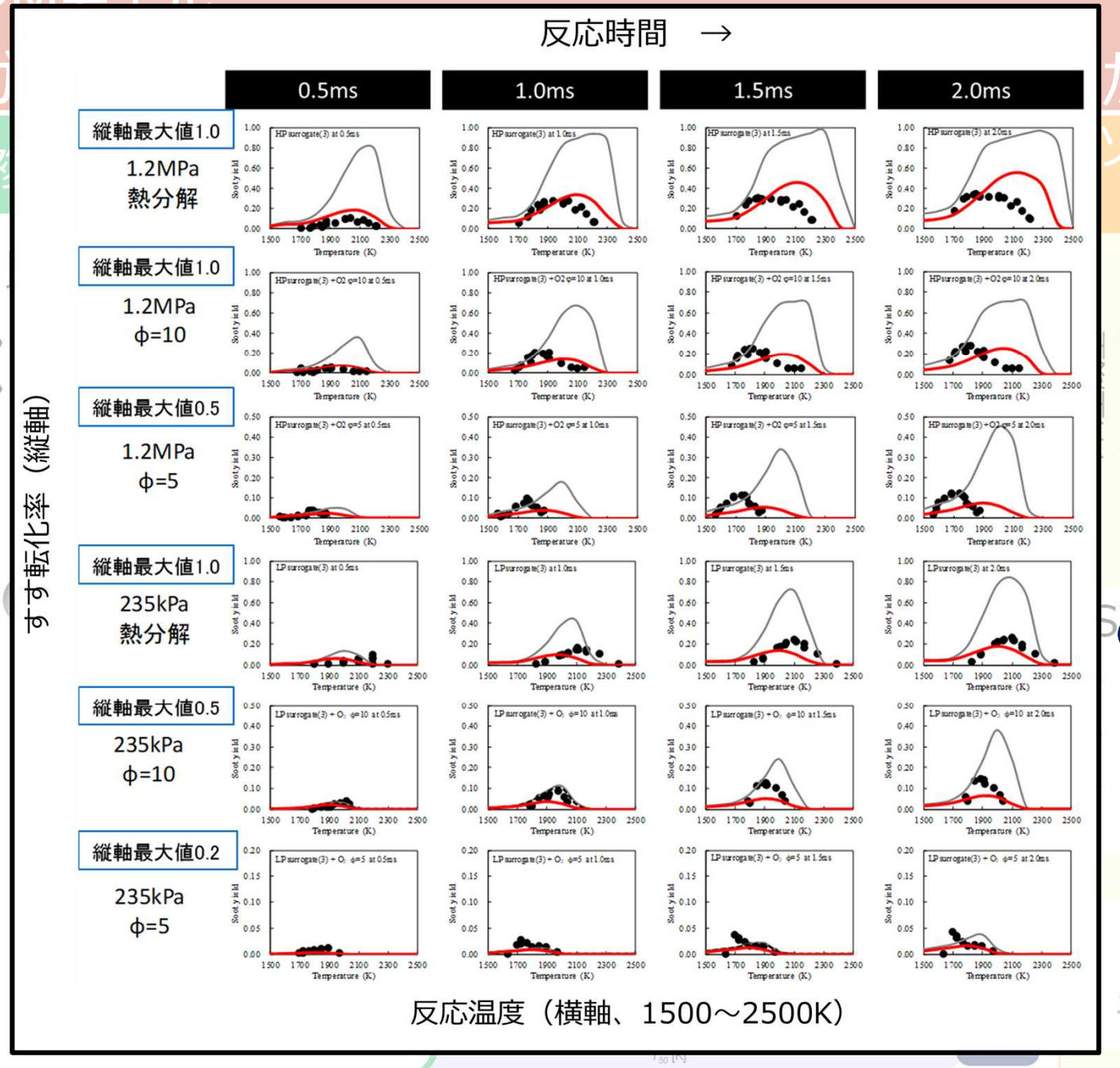
モデルの簡略化

PMモデル・

が可能に！

ソリン模擬燃料用

PMモデ



徹底検証

化学種233

反応数1375

PM生成量や一次粒子平均粒径計算

今後の課題

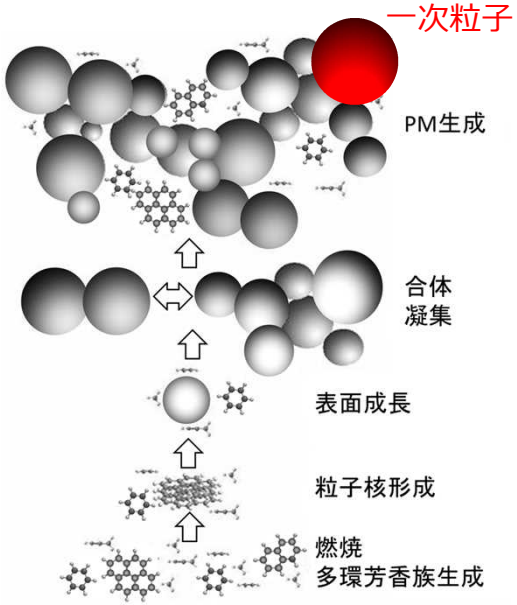
モデルの簡略化

PMモデル：ガソリン模擬燃料＆液膜（プール）燃焼への対応が可能に！

複雑なPM生成過程

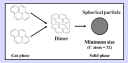
既存モデルの課題

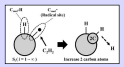
- “ガソリン模擬燃料”
- “無酸素下プール燃焼”でのモデル検討と検証



サイエンス＆現象理解＆ モデル検討・改善

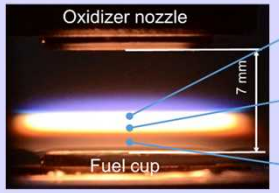
- 核生成速度の再検討
- アセチレン付加表面成長の再検討

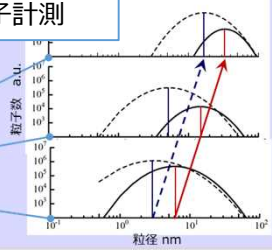


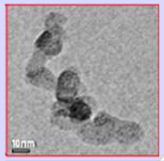


H + Csoot-H => Csoot・+ H_2
Csoot・+ H2 => Csoot-H + H
Csoot・+ H => Csoot-H
Csoot-H + OH => H2O + Csoot・
H2O + Csoot・=> OH + Csoot-H
Csoot・+ C2H2 => Csoot-H + 2C(B) + H
CH3 + Csoot-H => Csoot・+ CH4
Csoot・ + CH4 => Csoot-H + CH3
C3H3 + Csoot-H => Csoot・ + AC3H4
Csoot・+ AC3H4=> Csoot-H + C3H3
C2H + Csoot-H => Csoot・+ C2H2

SIP独自プール燃焼バーナでの多環芳香族・ナノ粒子計測

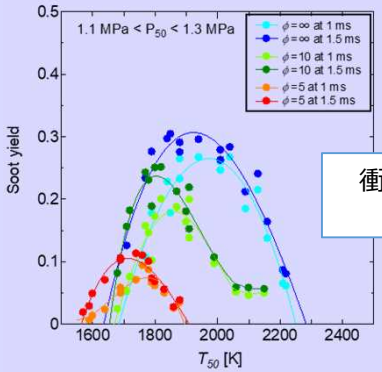






高倍率
TEM観察

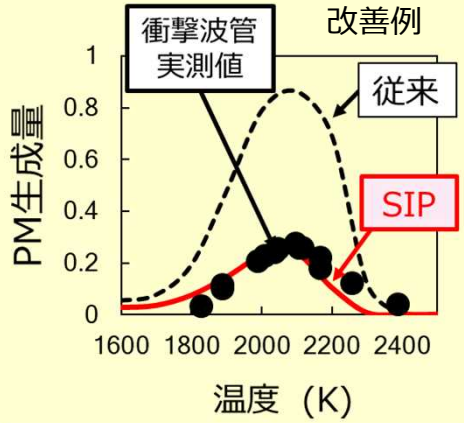
ガソリン模擬燃料のすす生成データ（SIP独自）



衝撃波管データ
（SIP独自）

徹底検証

ガソリン模擬燃料用PMモデル



SIPモデル

- 化学種233
- 反応数1375
- PM生成量や一次粒子平均粒径計算

今後の課題

モデルの簡略化

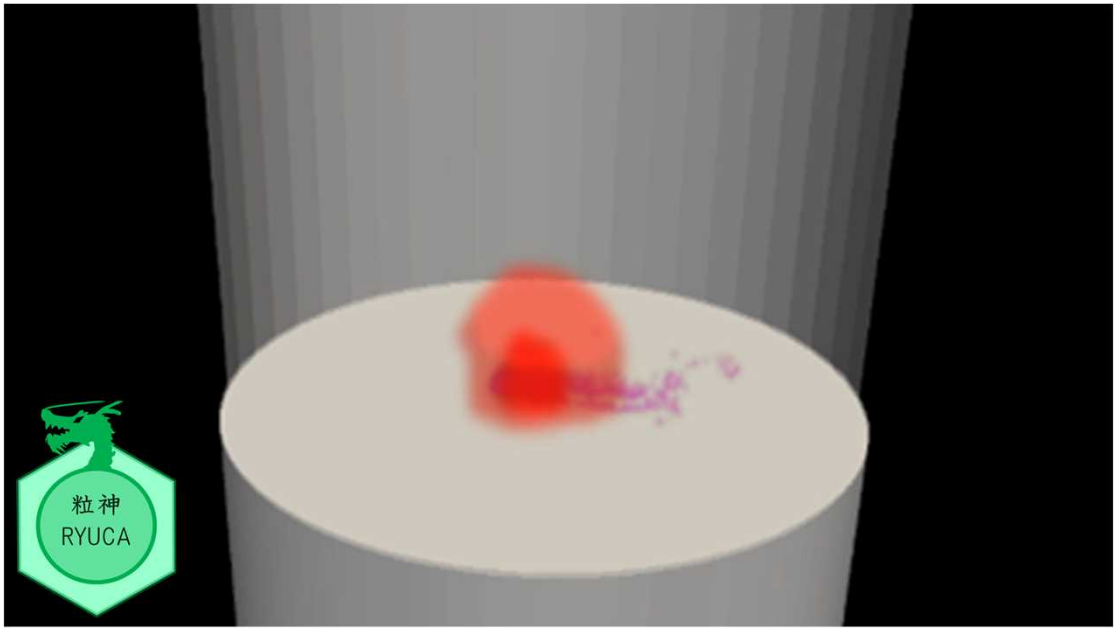
HINOCAでエンジン内PM計算に成功
～従来困難だったプール燃焼を伴うPM計算～

表1：エンジン諸元と運転条件（計算条件）

ボア(mm) ストローク(mm)	75 112.5
圧縮比	12.3
回転数(rpm)	2000
燃料噴射条件	①吸気行程メイン噴射 （噴射時期：-280deg.ATDC） ②液膜形成噴射 （噴射時期：-35 deg. ATDC）

表2：計算概要

コンピュータ	1080コア（JAXAスパコン）
格子サイズ	1～2mm
計算時間	約500時間



プール燃焼を伴うエンジン筒内PM生成の様子
（圧縮上死点手前～膨張行程にかけて）

【HINOCAのサブモデル群 RYUCA】

① **機能**：低温始動（プール燃焼有）～温間までのPM計算が可能

② **新規性・優位性**：従来難しかった筒内液膜プール燃焼を伴うPM生成も計算できる

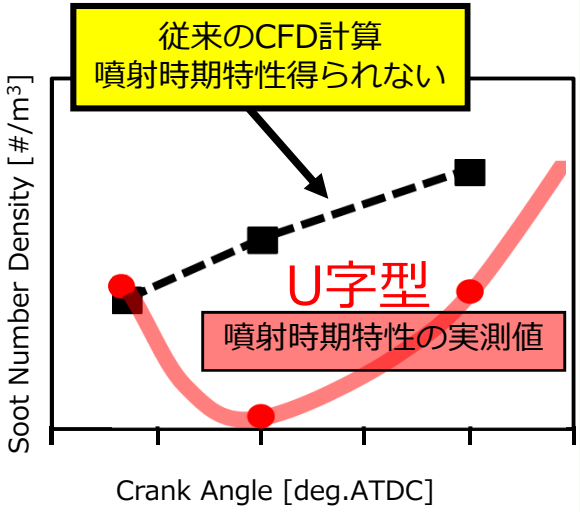
③ **産での活用**：低PM排出燃焼系開発における試作レス検討ツール

将来の設計支援ツールとしてのポテンシャル ～実機PM排出特性を再現～

既存モデルの課題

既存ソフトウェアでは、

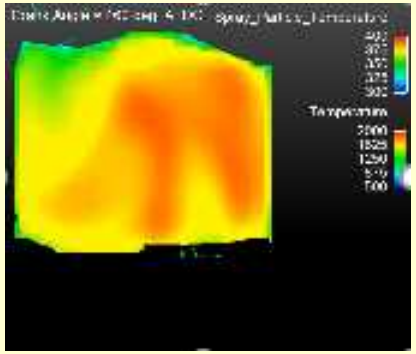
- プール燃焼に伴うPMの噴射時期特性が再現できない
- 設計ツールとして実質使用不可



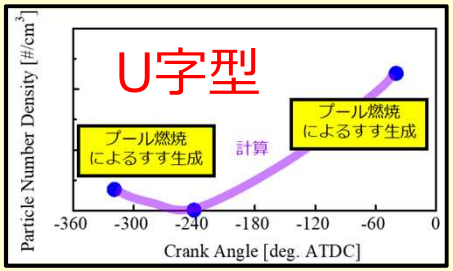
(J.Gao and T.-W.Kuo; COMODIA2017)

難しかった噴射時期特性の再現に成功

汎用ソフトで先行検討



試行計算
（実機データなし）



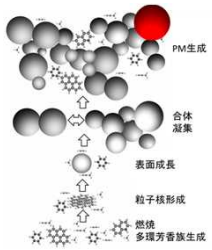
今後

実機実験を
HINOCAで計算
（SIP後）

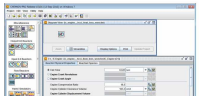
ガソリン模擬燃料のPMモデル＆CFD計算

計算

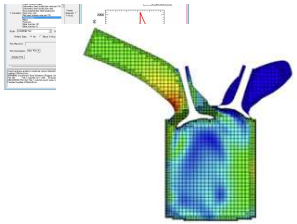
共通燃料で進行中



PMモデル

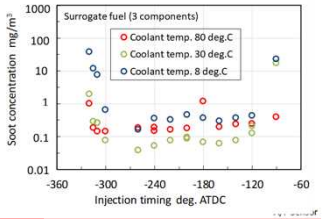


実機CFD計算

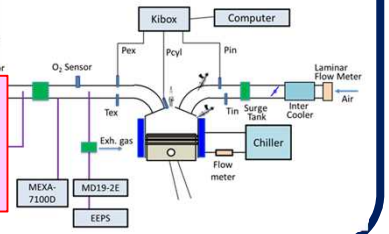


実験

ガソリン模擬燃料の実機PM排出データ（SIP独自）



千葉大
エンジンベンチ

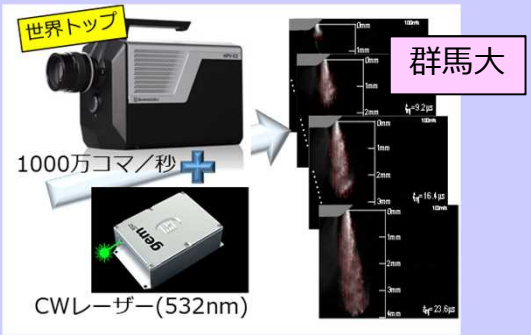


実機
データベース

RYUCA開発を支えた“トップレベル計測技術”

世界最高速PIV

最大1000万コマ/秒・超高速PIVシステム（世界最高速）



超高速・拡大観測

液膜衝突・飛散現象・燃料付着挙動を可視化（世界初）

岡山大

オリジナル プール燃焼バーナー

プール燃焼を定常・安定して再現できる（世界初）

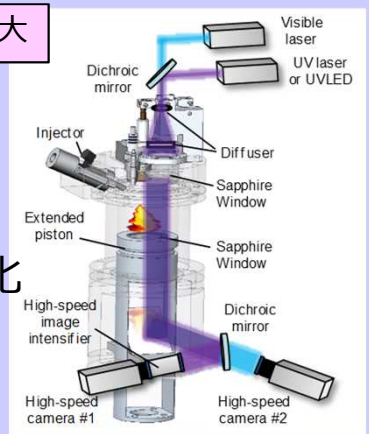
日本燃焼学会
炎の写真展
優秀作品賞受賞

大分大

最先端光学計測 ＆ 急速圧縮膨張装置への適用

明治大

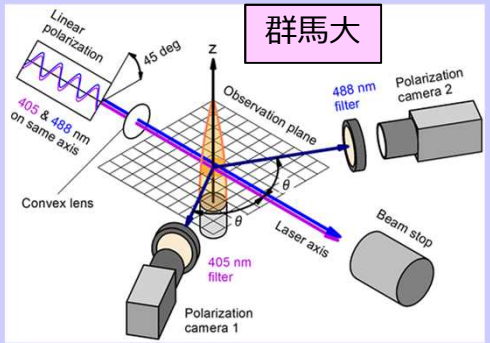
・液膜
・混合気
・燃焼
・すす生成
を一括可視化
(世界初)



非接触＆局所 すす粒径分布計測

わずか3ミリの空間中での粒径変化をとらえる（世界トップ）

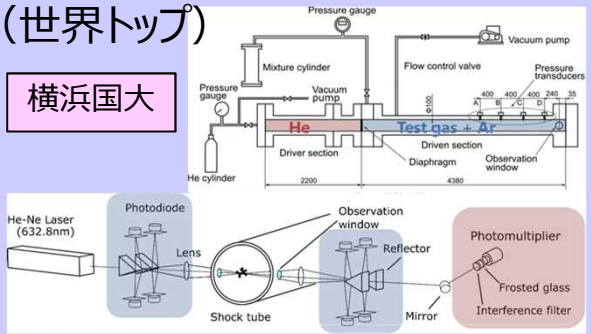
群馬大



すす光学計測強化 衝撃波管

すす量・粒径・温度の同時光学計測＆ガソリン模擬燃料データ（世界トップ）

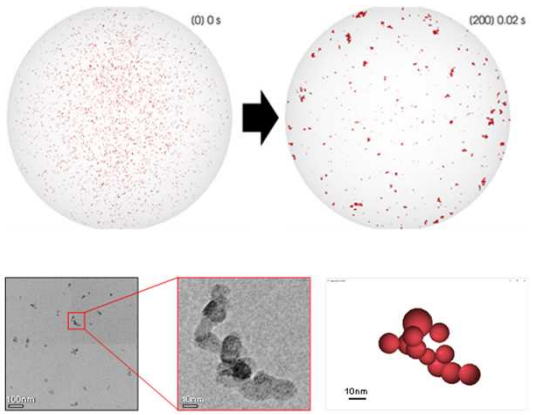
横浜国大



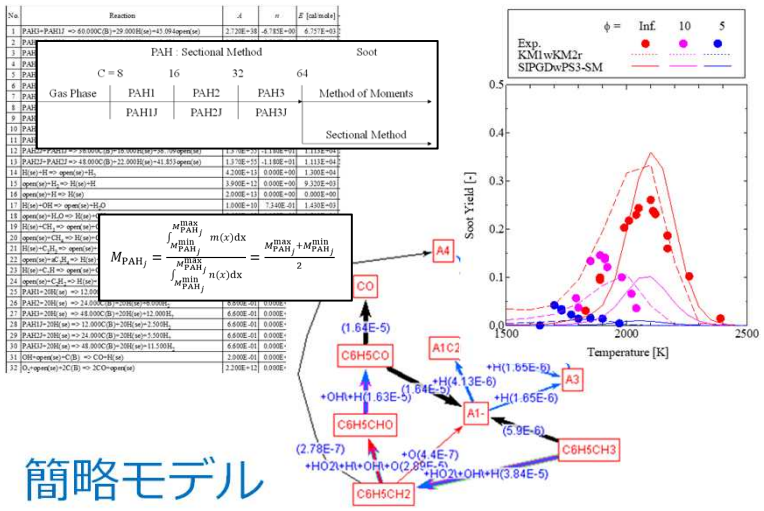
今　後

- PMモデルの簡略化
- 粒径分布計算の検討
- 凝集体計算法とモデル検討
- 実機データベース充実
- 実機のHINOCA計算

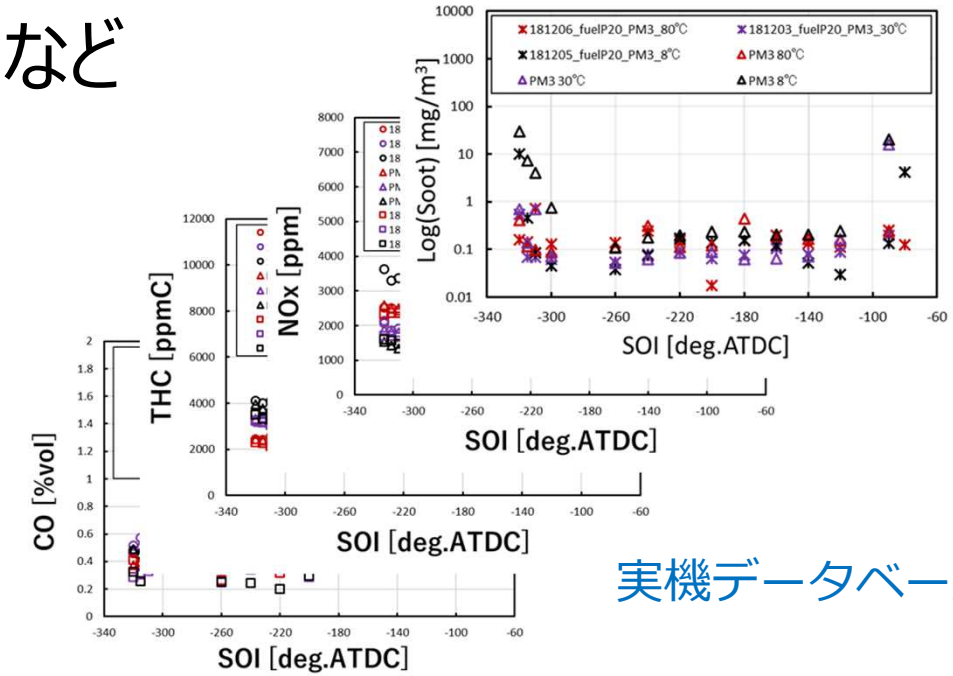
など



エンジン筒内粒子凝集



簡略モデル



実機データベース

PMグループメンバー：SIP終了後もよろしくお願いします

火神 HINOCA

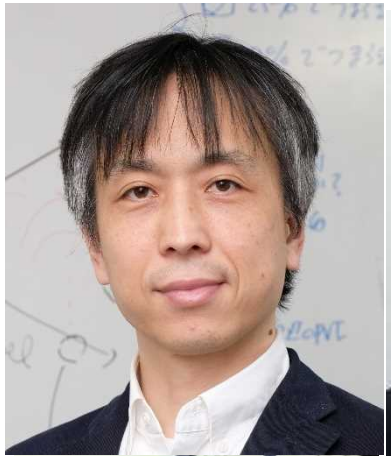
粒神 RYUCA

秋濱一弘
（日本大学）

河原伸幸
（岡山大学）

小橋好充
（北海道大学）

相澤哲哉
（明治大学）



橋本 淳
（大分大学）

窪山達也
（千葉大学）

荒木幹也
（群馬大学）

座間淑夫
（群馬大学）

石井一洋
（横浜国立大学）

「PMグループ成果報告」

終わり

粒神
RYUCA

制御グループ

モデルベースの制御システムの構築

国立大学法人　東京大学　大学院工学系研究科

山崎　由大

制御システムの比較

	エンジン制御 （モデルベースト） 	自動運転 	ドローン
制御対象	燃焼	車両	位置，姿勢
モデルの記述	化学反応	運動方程式	運動方程式
アクチュエーター	燃料噴射（回数，量，時期） EGRバルブ ターボ可変翼 スロットルバルブ (吸気バルブリフト，位相) (排気バルブリフト，位相)	ハンドル ブレーキ アクセル	アクセル
課題	制御に適したモデルの構築	ルート （目標値） 決定	ルート （目標値） 決定

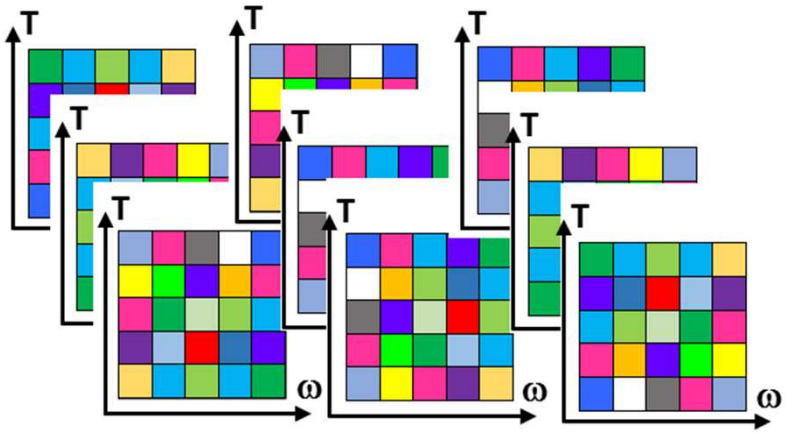
モデルを利用したエンジン制御

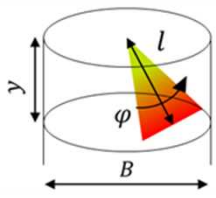
➢革新的燃焼技術の実現

精密でロバスト性の高い制御手法の導入が必要

➢過渡性能の向上

ランダム加減速のある路上状態での性能向上





$$L_{Spray,Pk} = 2.95\left(\frac{P_{Commonrail} - P_{Pk\,INJ}}{\rho_{Gas}}\right)^{0.25}\sqrt{d_{Hole}t}$$

$$\tan(\varphi_{Spray,Pk}) = \left\{3.0 + 0.28\left(\frac{L_{Nozzle}}{d_{Hole}}\right)\right\}^{-1} 4\pi\sqrt{\frac{\rho_{Gas}}{\rho_{Fuel}}}\frac{\sqrt{3}}{6}$$

$$K = \int_{INJ}^{IGN} A[Fuel]^{B}[O_2]^{C}\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)dt$$

$$\theta_{P\,IGN} = \theta_{P2\,INJ} + \frac{\omega_{Engine}K}{A\left(\frac{n_{P1}+n_{P2}}{V_{Zone1}+V_{Zone2}+V_{Zone3}}\right)^{B}\left(\frac{n_{O_2,IVC}}{V_{P2\,INJ}}\right)^{C}\exp\left(\frac{-E}{RT_{P2\,INJ}}\right)}$$

$$-\frac{d}{dt}[Fuel] = \alpha[Fuel]^{\beta}[O_2]^{\gamma}\exp\left(-\frac{\varepsilon}{RT}\right) \qquad \omega_{Swirl} = c_{Swirl}\omega_{Engine}$$

$$-\frac{d}{dt}[Fuel] = \alpha\left[\frac{n_{P1}+n_{P2}}{V_{Zone1}+V_{Zone2}+V_{Zone3}}\right]^{\beta}\left[\frac{n_{O_2,IVC}}{V_{P\,IGN}}\right]^{\gamma}\exp\left(-\frac{\varepsilon}{RT_{P\,IGN}}\right)$$

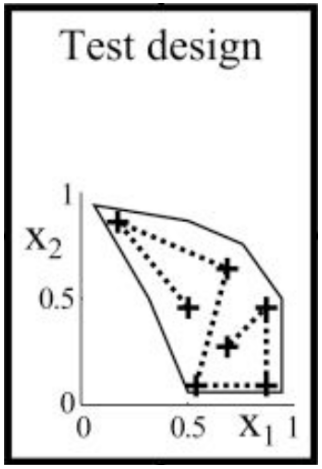
$$C_v\left\{n_{RG}(T_{RG}-T_{ref}) + \frac{P_{Boost}}{RT_{IVC}}\left(V_{IVC} - V_{EVC}\frac{T_{IVC}}{T_{RG}}\right)(T_{Inmani}-T_{ref})\right\}$$
$$= C_v\left\{n_{RG} + \frac{P_{Boost}}{RT_{IVC}}\left(V_{IVC} - V_{EVC}\frac{T_{IVC}}{T_{RG}}\right)\right\}(T_{IVC}-T_{ref})$$

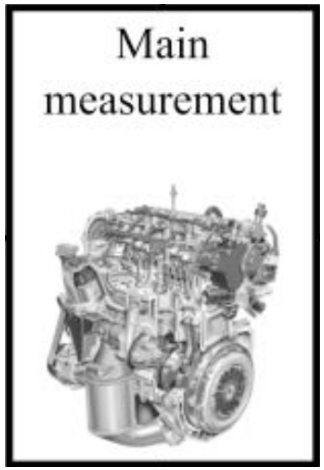
大量の実験をベースとした
制御マップ

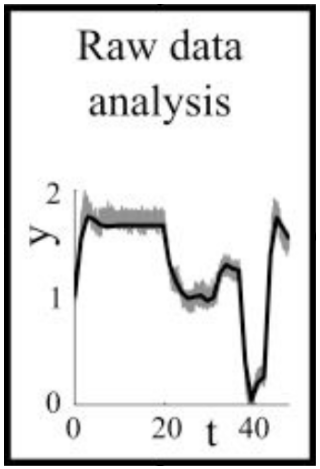
モデルを利用した
制御系設計と制御

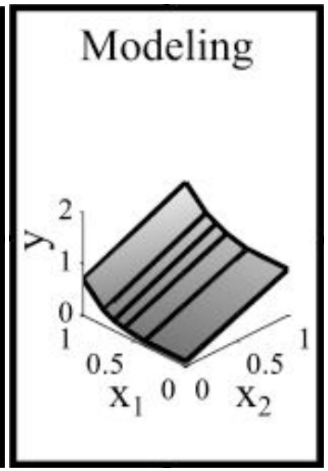
国際動向との比較

欧州の例









境界設定，実験計画

効率的な実験パラメータの設定
探査手法の検討

実験

自動運転ベンチによる高効率化

実験データからのモデリング

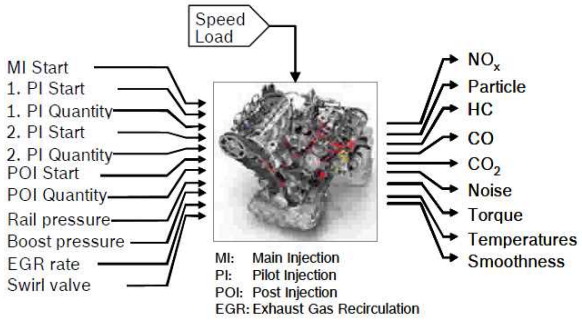
精度のよい近似手法の検討

Rolf Isermann, Heiko Sequenz, IFAC-PapersOnLine 49-11 (2016) 633–640

SIP

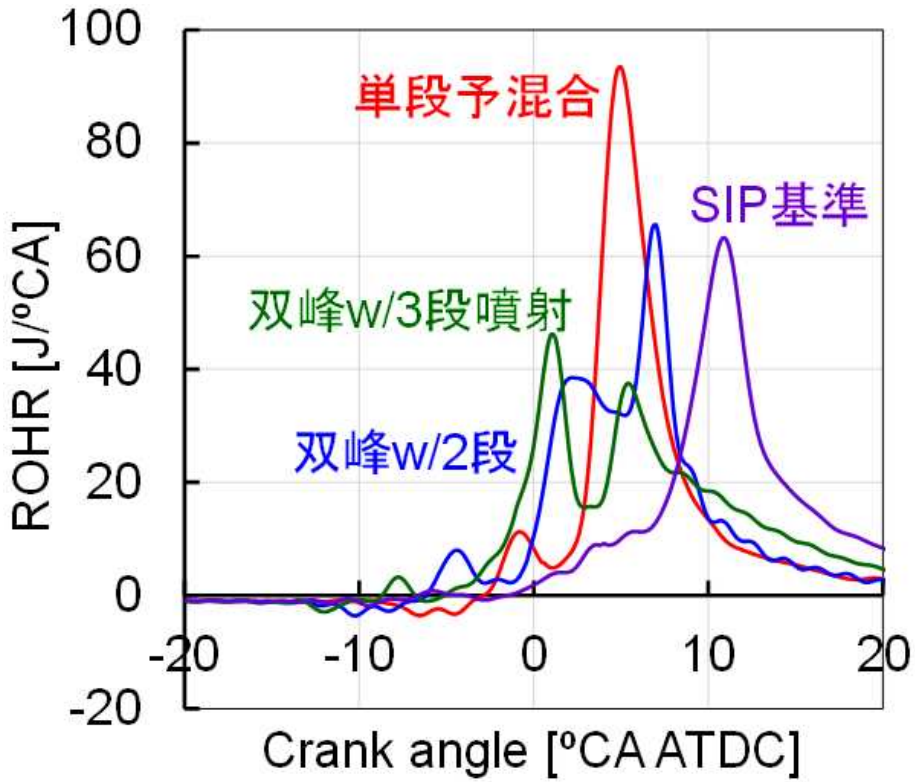
- ピストンクランクモデル
- 気体の状態方程式
- 燃料噴射モデル
- 着火モデル
- 燃焼モデル
- 化学反応モデル

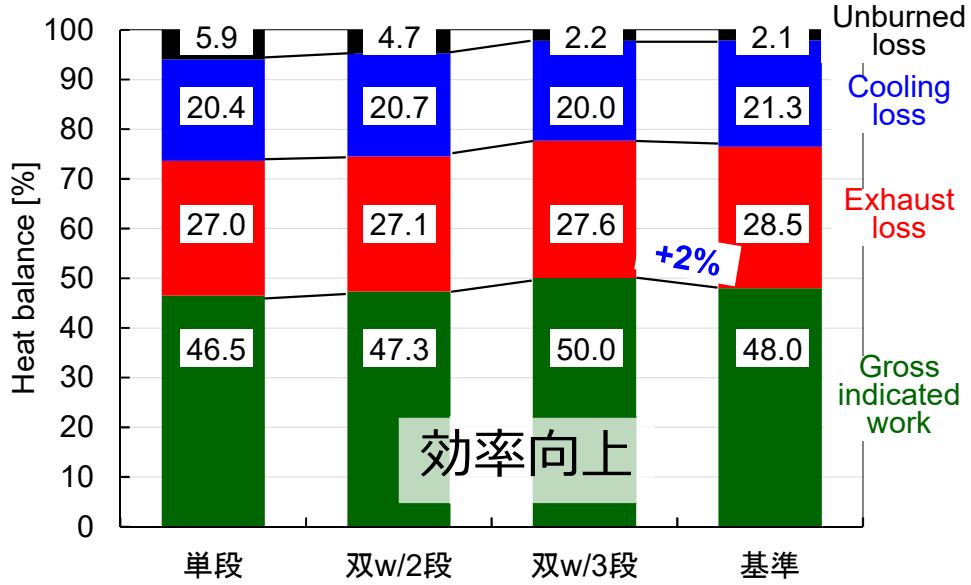
物理からのモデリング

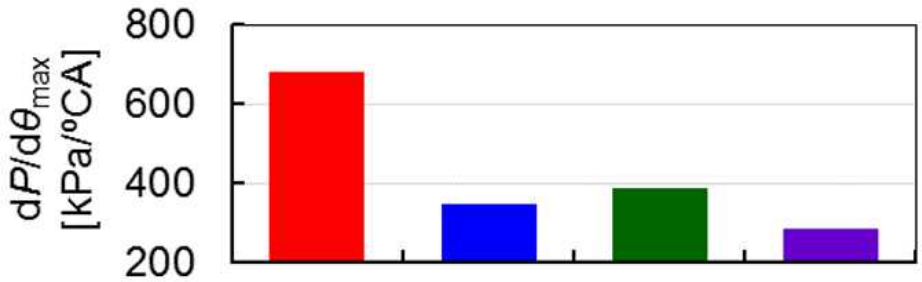


制御モデル+制御理論

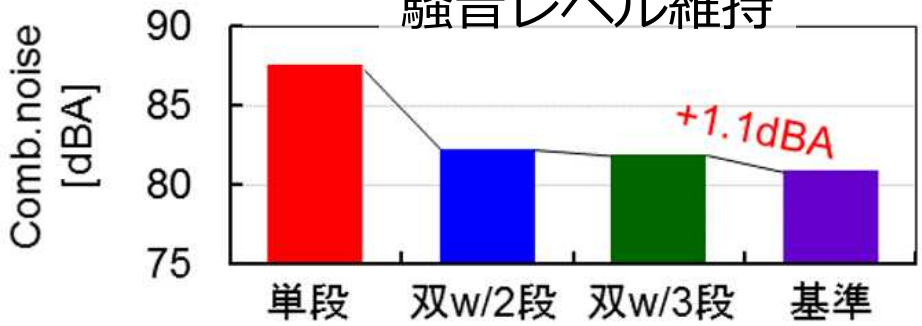
革新的燃焼技術（予混合的ディーゼル燃焼）





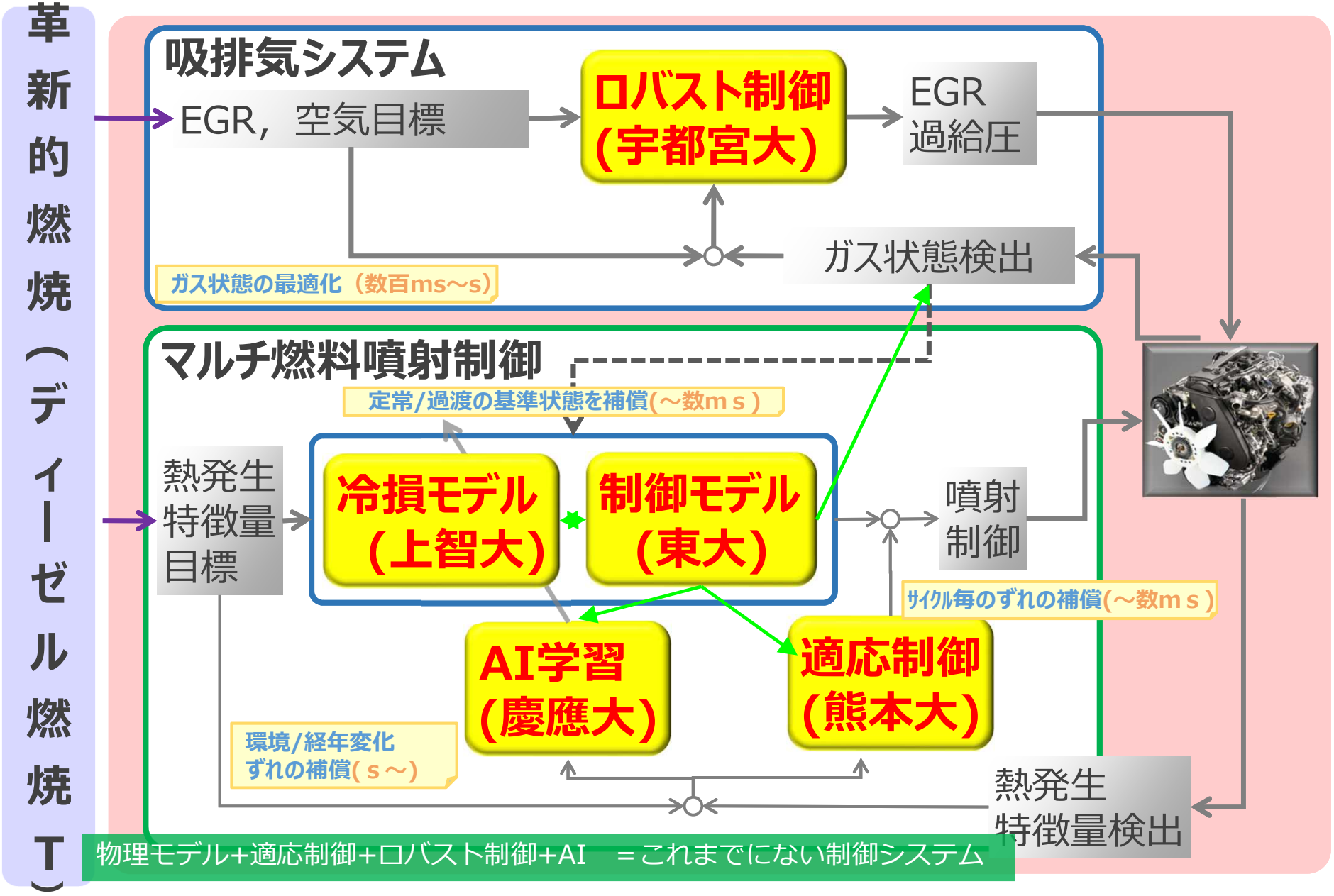


騒音レベル維持

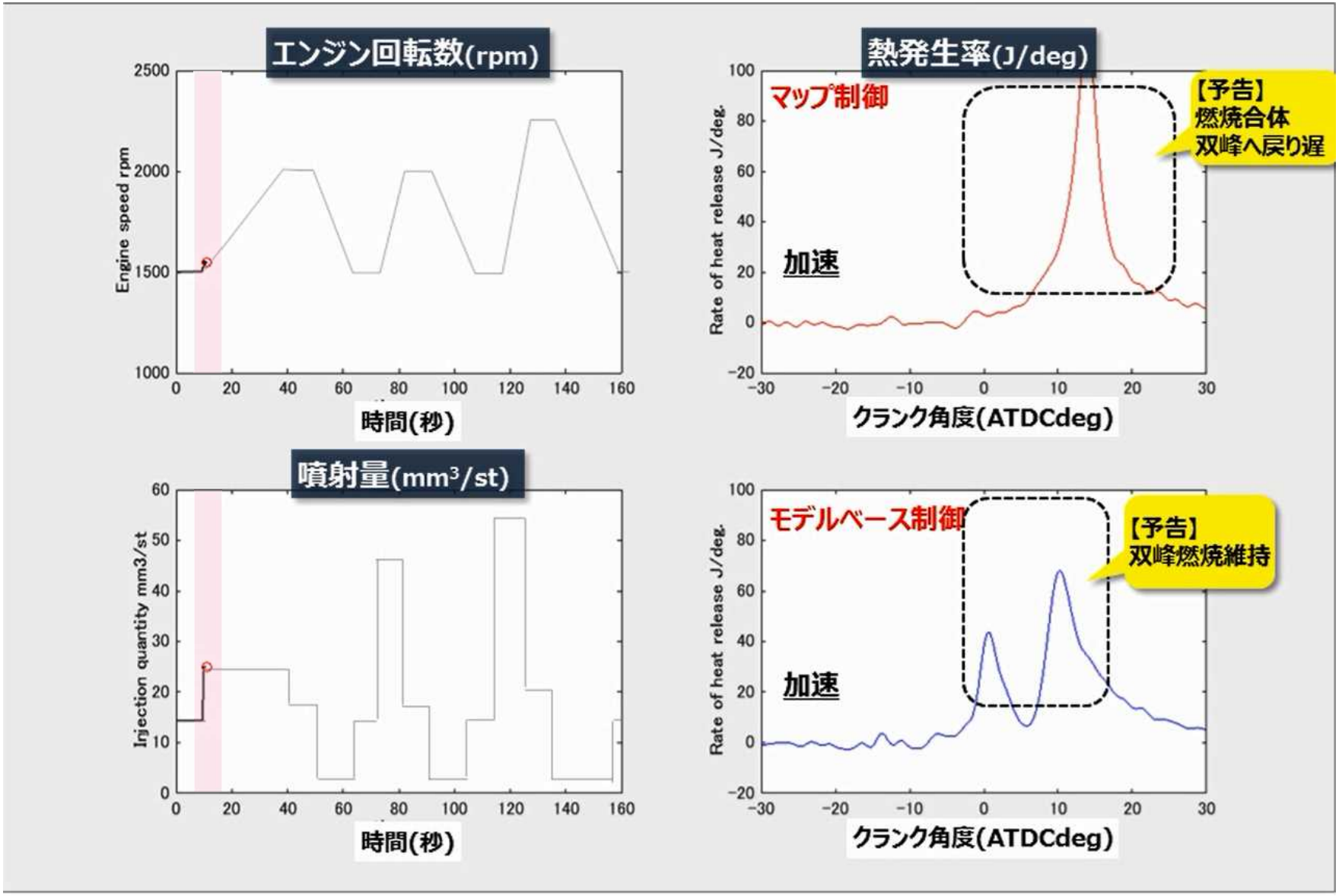


ディーゼル燃焼チーム（北大）より提供

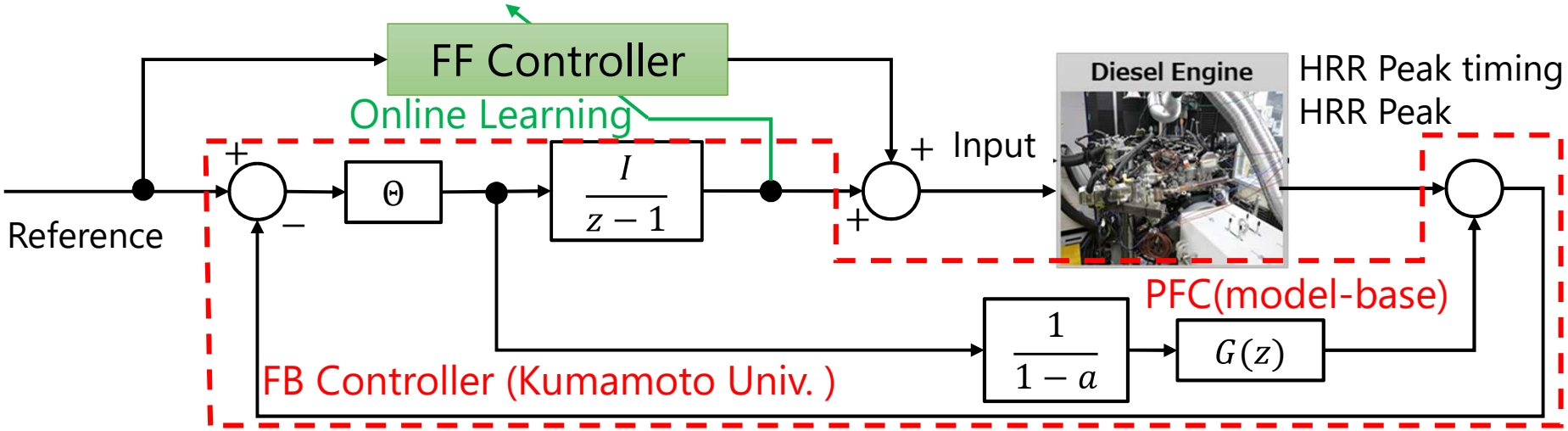
モデルを基盤とした制御システム



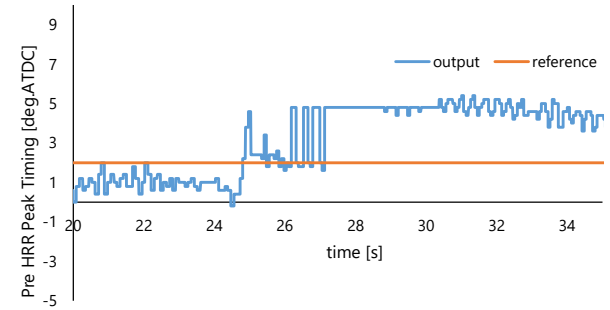
従来（マップ）制御 vs SIP（モデルベースト）制御

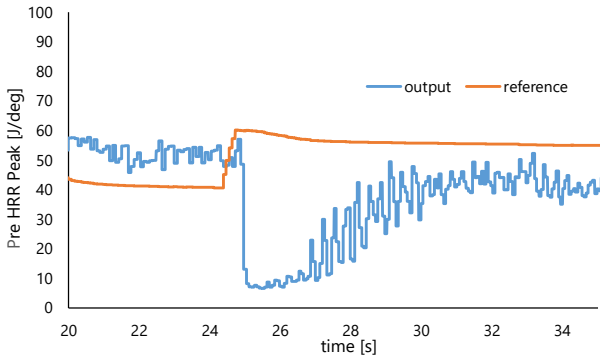


学習制御でFF制御器を運転しながら補正（オンボードキャリブレーション）

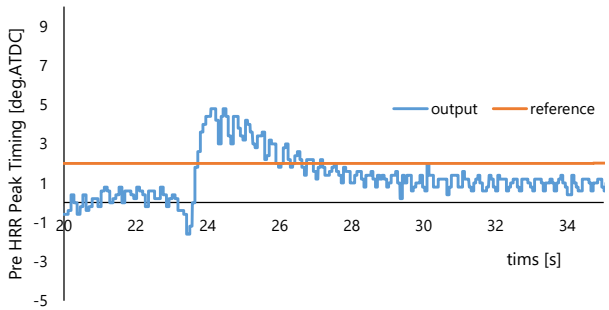


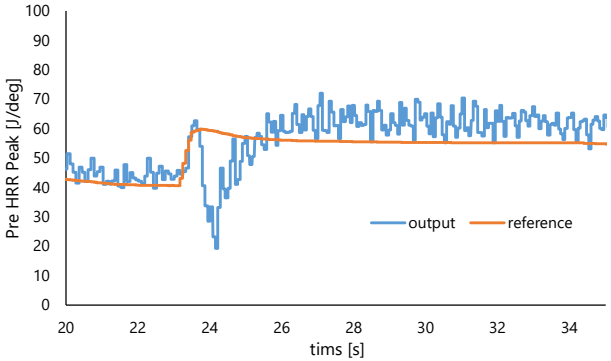
学習前





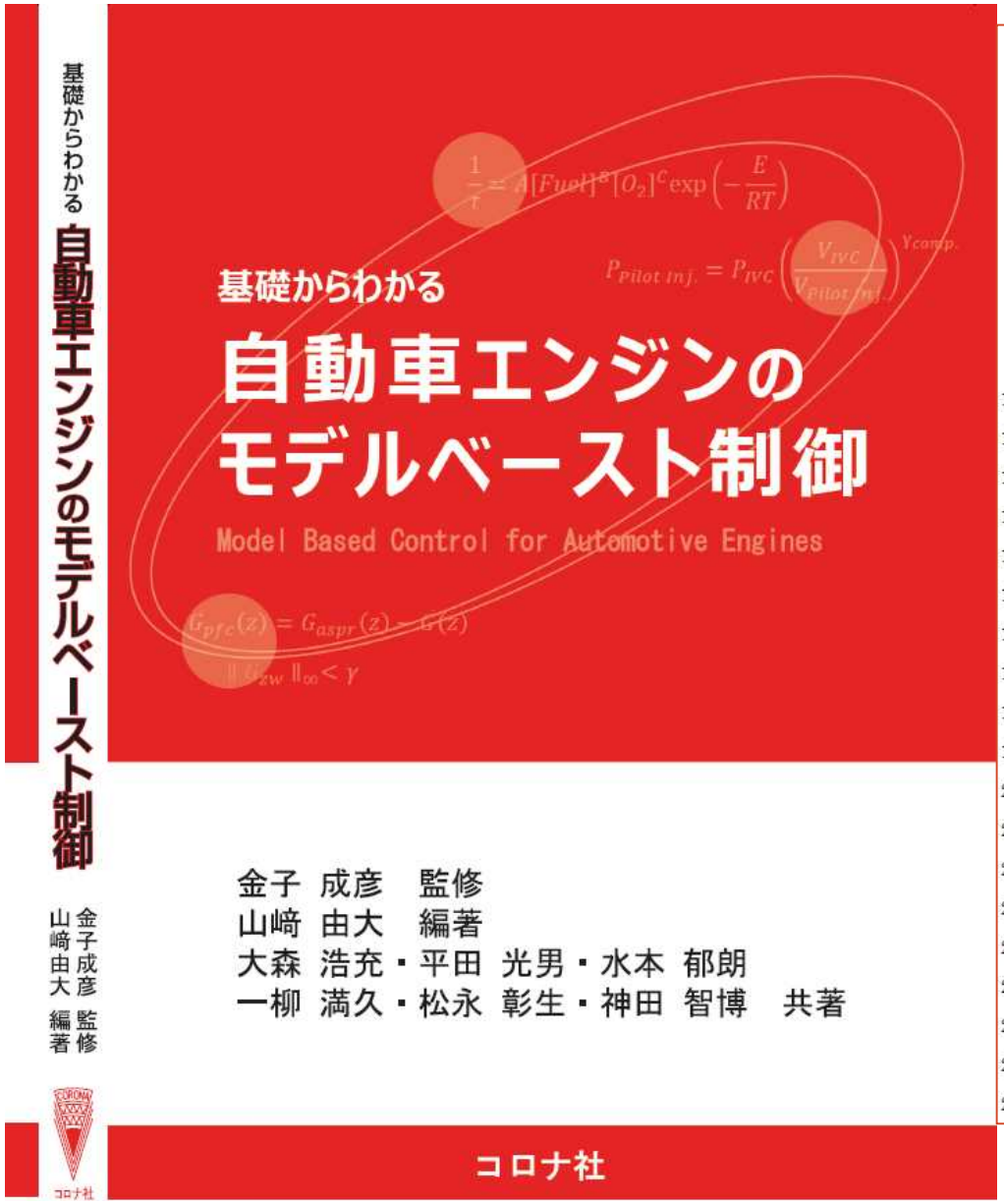
走行後

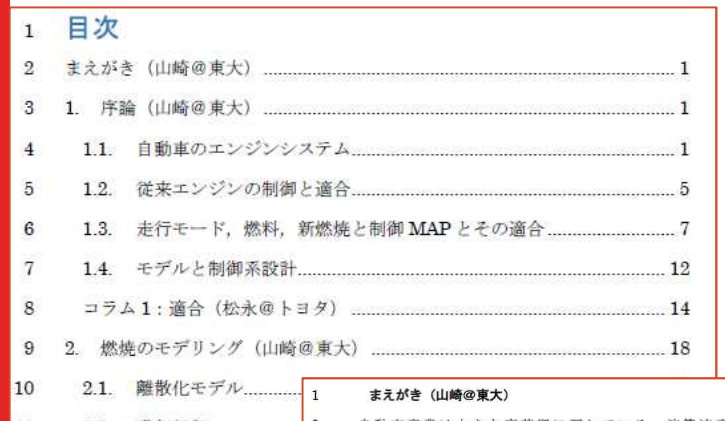




学習後

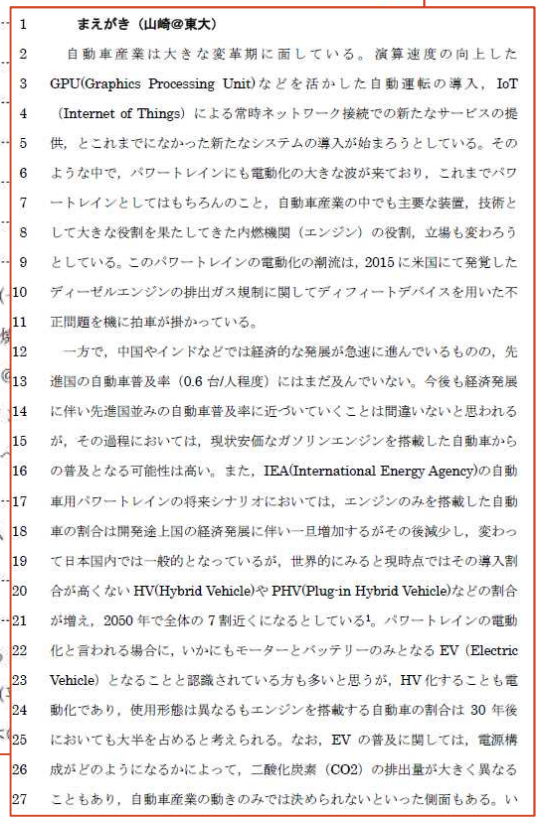
モデルベース制御システムの設計プロセス





目次

まえがき（山崎@東大） 1
1. 序論（山崎@東大） 1
1.1. 自動車のエンジンシステム 1
1.2. 従来エンジンの制御と適合 5
1.3. 走行モード，燃料，新燃焼と制御 MAP とその適合 7
1.4. モデルと制御系設計 12
コラム 1：適合（松永@トヨタ） 14
2. 燃焼のモデリング（山崎@東大） 18
2.1. 離散化モデル
2.2. 吸気行程
2.3. 圧縮行程
2.4. 燃料噴射
2.5. 着火・燃焼
2.6. 膨張行程
2.7. 排気行程
2.8. ポリトロープ変化（
コラム 2-1：ディーゼル燃
コラム 2-2：熱力学（一柳@
3. 吸排気システムのモデリ
3.1. 吸気スロットル(35
3.2. EGR バルブ
コラム 3：吸排気システム
4. 制御器設計
4.1. 制御理論
4.1.1. 逆モデルによる
4.1.2. ロバスト制御（
4.1.3. 適応制御（水本



まえがき（山崎@東大）

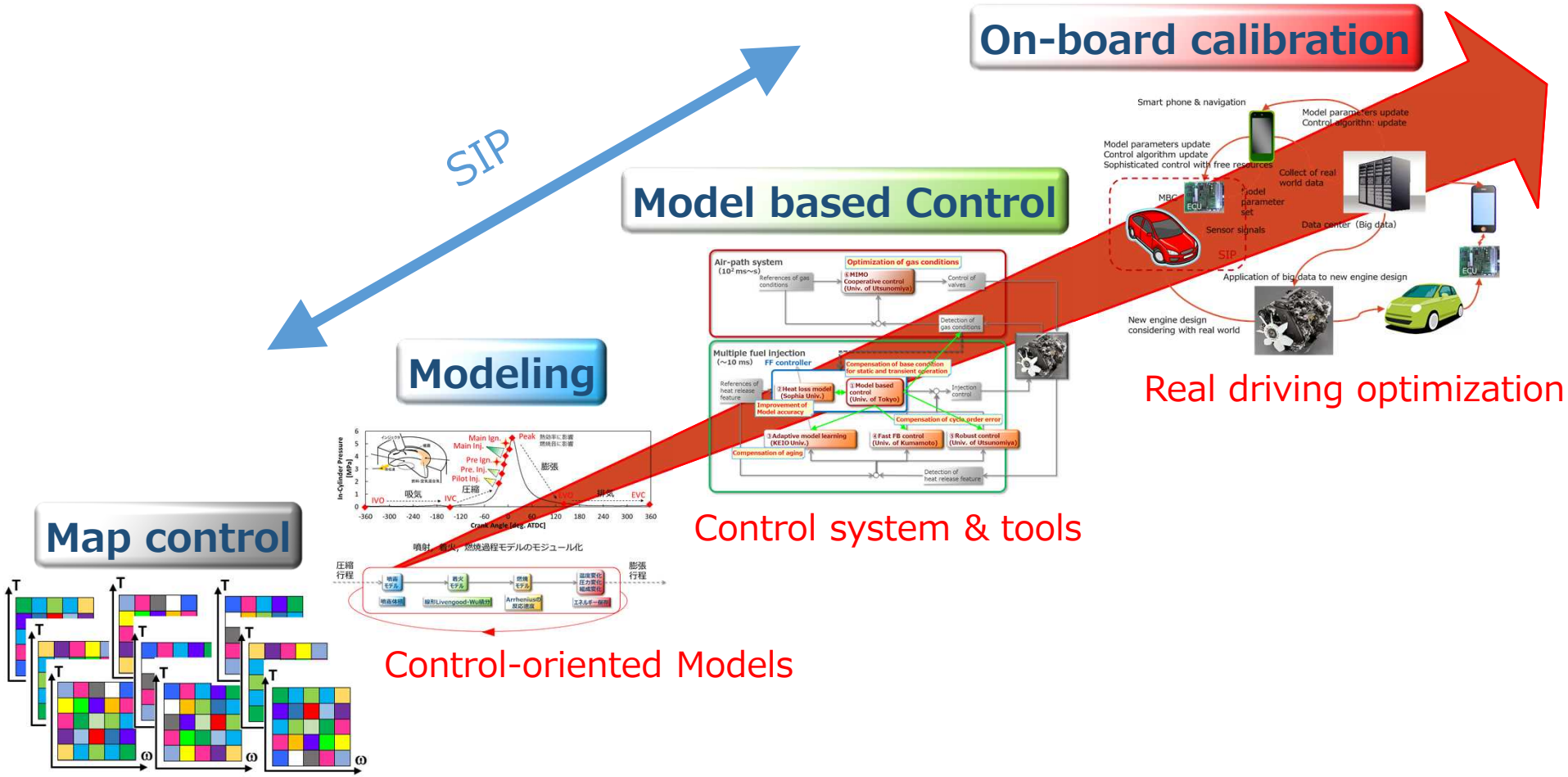
自動車産業は大きな変革期に面している。演算速度の向上したGPU(Graphics Processing Unit)などを活かした自動運転の導入，IoT（Internet of Things）による常時ネットワーク接続での新たなサービスの提供，とこれまでになかった新たなシステムの導入が始まろうとしている。そのような中で，パワートレインにも電動化の大きな波が来ており，これまでパワートレインとしてはもちろんのこと，自動車産業の中でも主要な装置，技術として大きな役割を果たしてきた内燃機関（エンジン）の役割，立場も変わろうとしている。このパワートレインの電動化の潮流は，2015 に米国にて発覚したディーゼルエンジンの排出ガス規制に関してディフィートデバイスを用いた不正問題を機に拍車が掛かっている。

一方で，中国やインドなどでは経済的な発展が急速に進んでいるものの，先進国の自動車普及率（0.6 台/人程度）にはまだ及んでいない。今後も経済発展に伴い先進国並みの自動車普及率に近づいていくことは間違いないと思われるが，その過程においては，現状安価なガソリンエンジンを搭載した自動車からの普及となる可能性は高い。また，IEA(International Energy Agency)の自動車用パワートレインの将来シナリオにおいては，エンジンのみを搭載した自動車の割合は開発途上国の経済発展に伴い一旦増加するがその後減少し，変わって日本国内では一般的となっているが，世界的にみると現時点ではその導入割合が高くない HV(Hybrid Vehicle)や PHV(Plug-in Hybrid Vehicle)などの割合が増え，2050 年で全体の 7 割近くになるとしている[1]。パワートレインの電動化と言われる場合に，いかにもモーターとバッテリーのみとなる EV（Electric Vehicle）となることと認識されている方も多いと思うが，HV 化することも電動化であり，使用形態は異なるもエンジンを搭載する自動車の割合は 30 年後においても大半を占めると考えられる。なお，EV の普及に関しては，電源構成がどのようになるかによって，二酸化炭素（CO2）の排出量が大きく異なることもあり，自動車産業の動きのみでは決められないといった側面もある。い

次世代のパワートレイン制御アーキテクチャー

RAICA（雷神）

Robust Artificial Intelligent Control Architecture



制御グループ　デモンストレーション

- 新燃焼の燃焼騒音体験
- 従来（マップ）制御 vs SIP（モデルベースト）制御

ご清聴ありがとうございました。