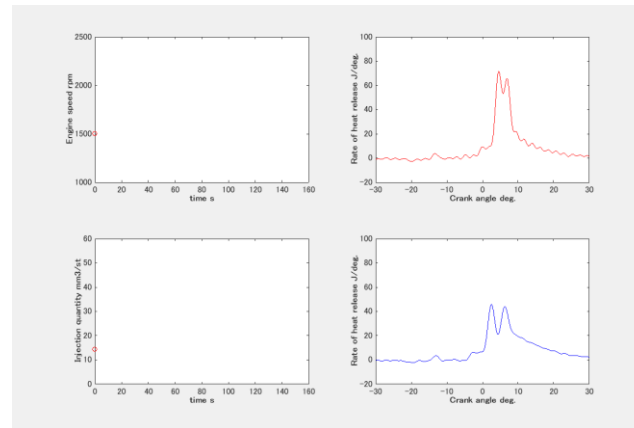
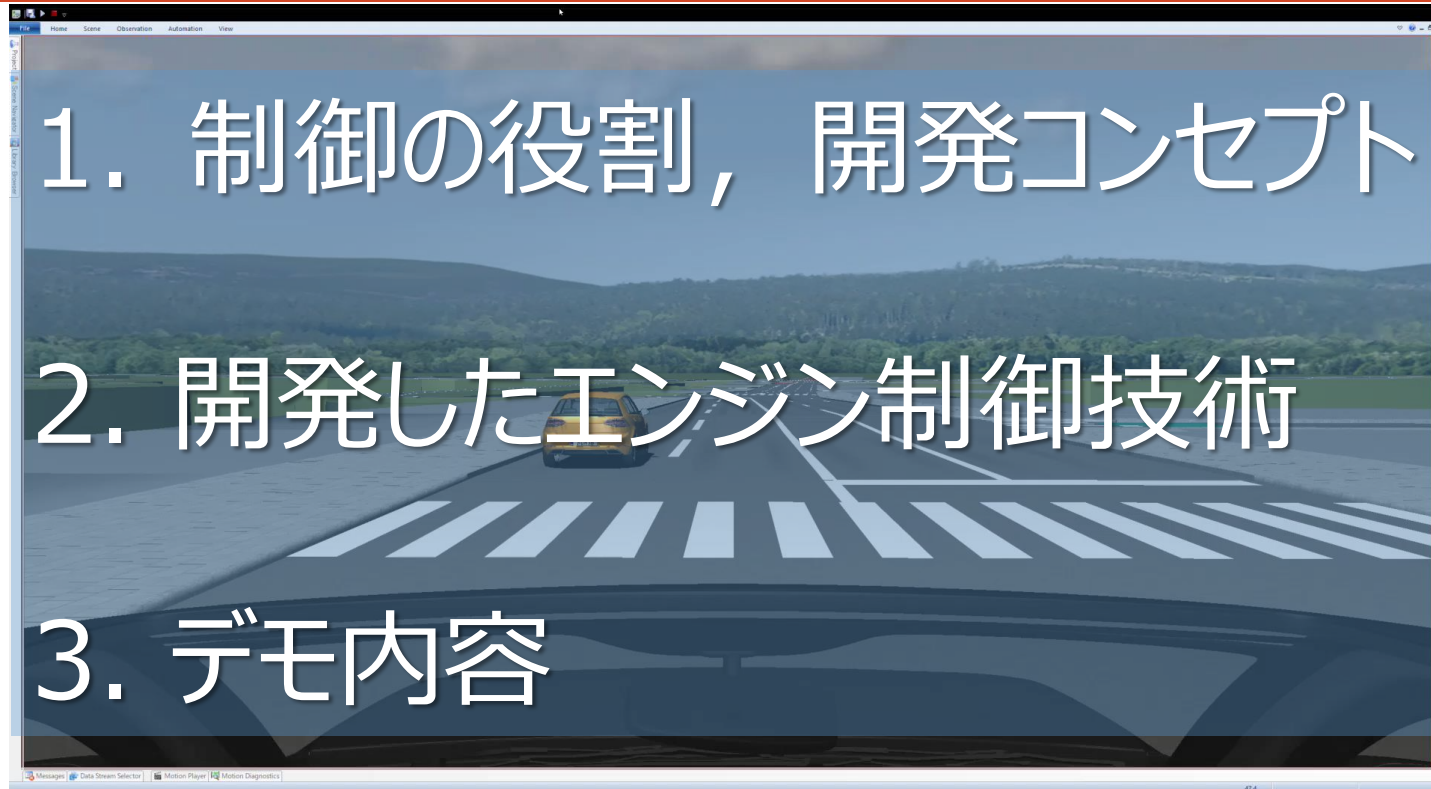


燃焼制御デモンストレーション SIP制御チーム制御グループ

国立大学法人 東京大学 大学院工学系研究科

山崎 由大

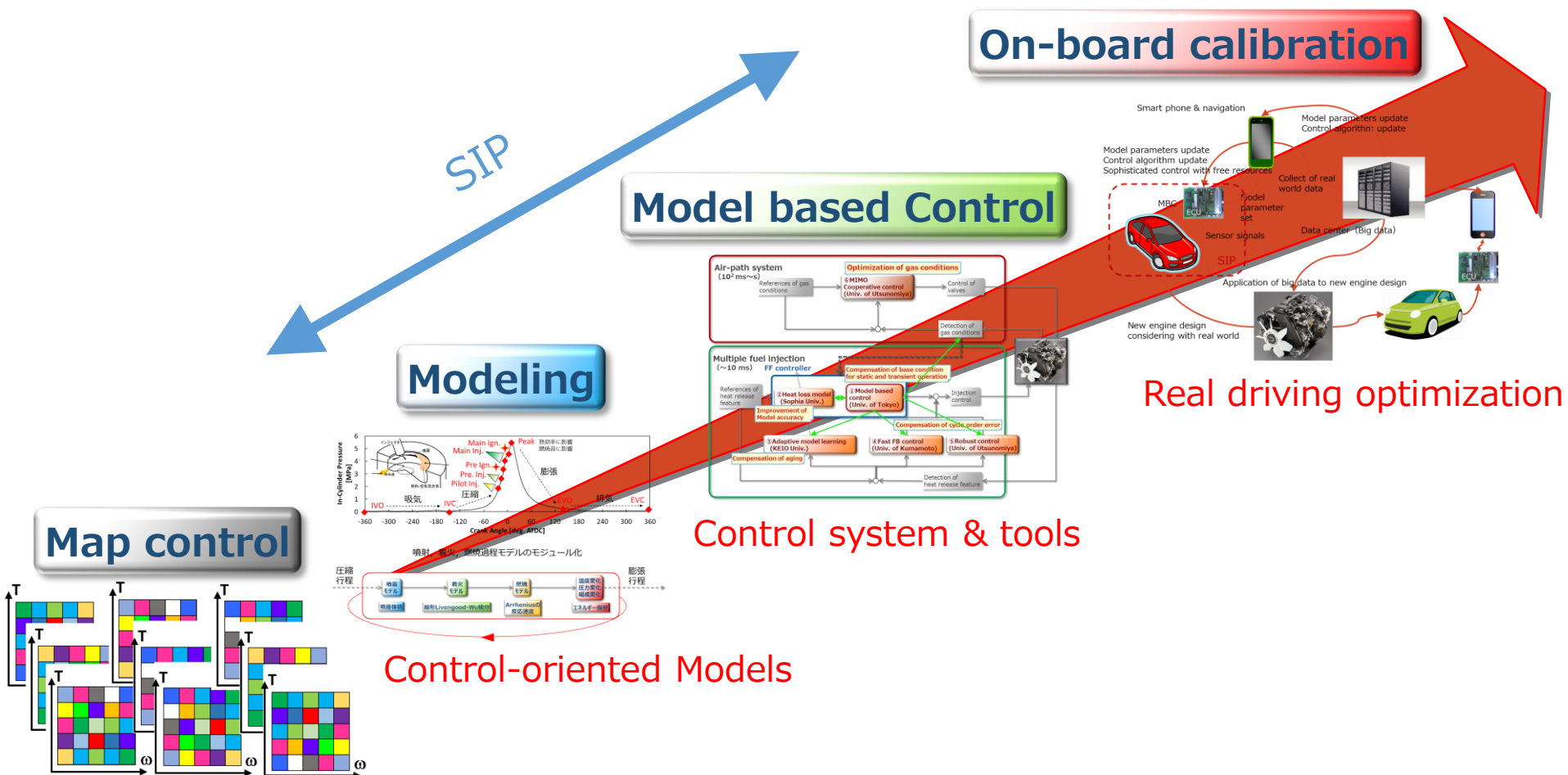


制御システムの比較

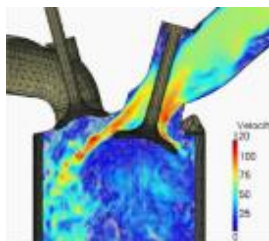
	エンジン制御 (モデルベースト)	自動運転	ドローン
制御対象	燃焼	車両	位置, 姿勢
モデルの記述	化学反応	運動方程式	運動方程式
アクチュエーター	燃料噴射 (回数, 量, 時期) EGRバルブ ターボ可変翼 スロットルバルブ (吸気バルブリフト, 位相) (排気バルブリフト, 位相)	ハンドル ブレーキ アクセル	アクセル
課題	制御に適したモデルの構築	ルート (目標値) 決定	ルート (目標値) 決定



Robust Artificial Intelligent Control Architecture



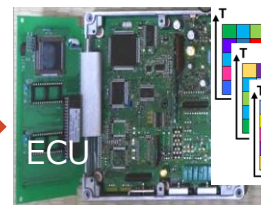
モデルがもたらすハードとソフトの対等な性能向上



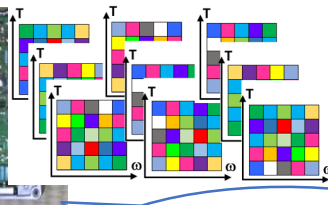
燃焼設計



ハードウェア



制御設計



無茶な仕様だ。。

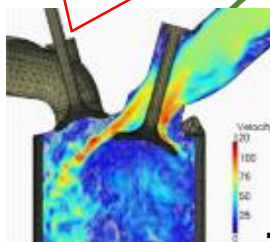
とりあえず動くようにはなったが。。

最高のハード完成！
あとは制御に任せた

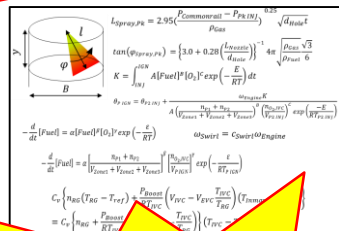
システムの更なる性能向上には・・・
ハードとソフトの対等な性能向上必要！

効率、排気とも良いが、安定性に欠ける。ソフト（制御）で対策できるかも？

そういうことが起きているなら。。



燃焼設計



コミュニケーション
を行えるモデルを構築

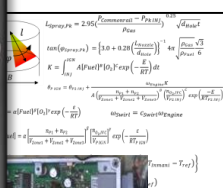


制御設計

こういう制御理論を使うと限界を広げられそう！



ECU



ハードとソフトが
マッチしたシステム

そういうことができるなら、ハードはもう少しこうしてみよう！

まとめ：RAICAとは

過渡状態や外乱のある環境でも、目指す理想的な燃焼を保持することができる、SIP燃焼発のエンジン燃焼の制御システム。

- 燃焼科学・工学と制御理論を融合させることで、**燃焼現象を物理から捉えて関数にしたもの（物理モデル）**と、**複数の高度制御理論（適応制御、ロバスト制御、学習制御・AI）**を組み合わせた、統合システムになっている。
- その精度と実用性は、**エンジン実験で実証済み**。このような物理モデルベースのエンジン制御システムは**世界初**であり、高速な複雑現象であるエンジン燃焼を、**ハードウェアとソフトウェアの両輪で発展させる新時代を切り拓く**ものとして、産学からの期待が高まっている。
- 燃焼工学出身で制御工学との融合に取り組んでいるグループリーダー（山崎）をコアに、燃焼と制御の産学が集結したことによって成し得た、SIP燃焼の産産学学連携による代表成果である。

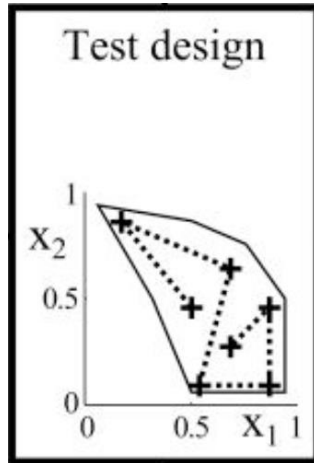
RAICA ～高度制御が拓く、複雑現象を制御できる新時代～

	現状と課題	RAICA
開発の形式	燃焼・ハード開発、次いでその不足部分を補うために制御・ソフト開発を行う、 リニア形式 。	燃焼現象解明・ハード開発と制御・ソフト開発を融合的に行う、 両輪・共進化形式 。
制御技術の開発方法	- 想定しうるアクセル操作と環境をカバーできるよう、あらゆる条件下でエンジンを作動させる大量の実験を実施。 - そこから得た数値を詰め込んだ膨大な表（マップ）を、車載用簡易コンピュータ（ECU）に記録。	- 燃焼による物理現象を解析。そこからエンジン制御に大きく効くエッセンスを抽出し、関数化（物理モデルの構築）。 - 物理モデルと各種制御アルゴリズムで構成されるシステム（RAICA）を構築し、ECUに記録。
路上でのエンジン制御	刻々と変わる走行条件、環境・経年変化に合致するよう、走行中に車載アクチュエータがECUから 最適な値を参照 し、エンジン動作を決定。	走行中に、 目標値の設定 のための計算、 大気圧・温度などの自然環境や経年変化 によるずれを補うための 計算 、 走行状態の変化 によるずれを補うための 計算 、 吸排気ガスの最適化 のための 計算 を行い、エンジン動作を決定。 いずれも ミリ秒～秒の高速計算 。
特徴	各社の経験と知見と実験の蓄積に基づいており、信頼性が高いが、今後、より高度な燃焼コンセプトを搭載するだけの精度が確保できない可能性が見えつつある。	最先端の現象解析による物理モデルに基づくので、走行条件、環境変化、経年変化に 普遍的に対応 できる エンジン制御 が可能。実現には、 基礎～実用工学～製品化の連携 が必須。

国際動向との比較

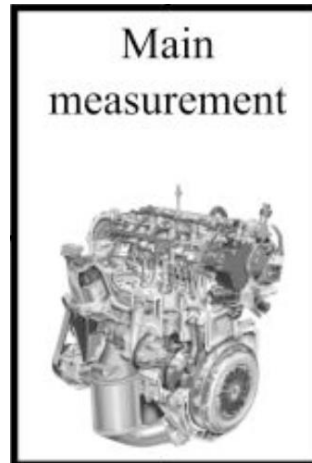
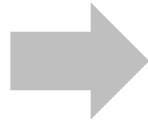


欧州の例



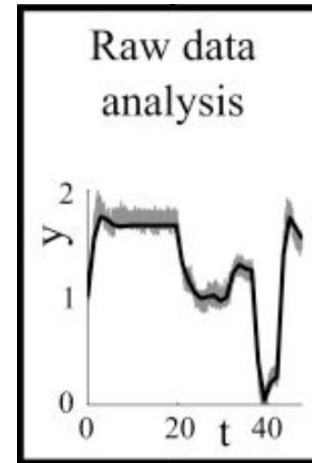
境界設定, 実験計画

効率的な実験パラメータの設定
探索手法の検討



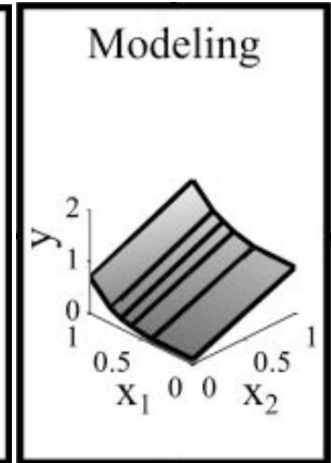
実験

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



S
I
P

ピストン
クランクモデル

気体の
状態方程式

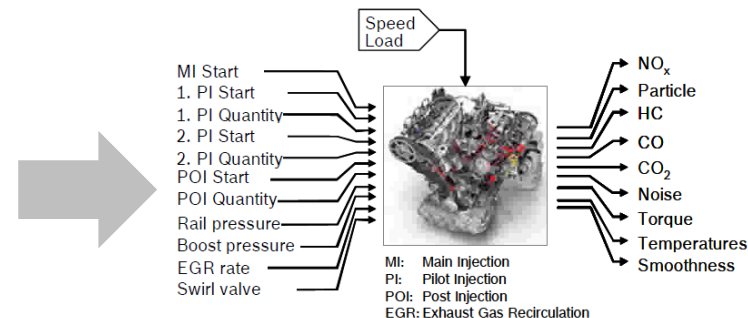
燃料噴射
モデル

着火モデル

燃焼モデル

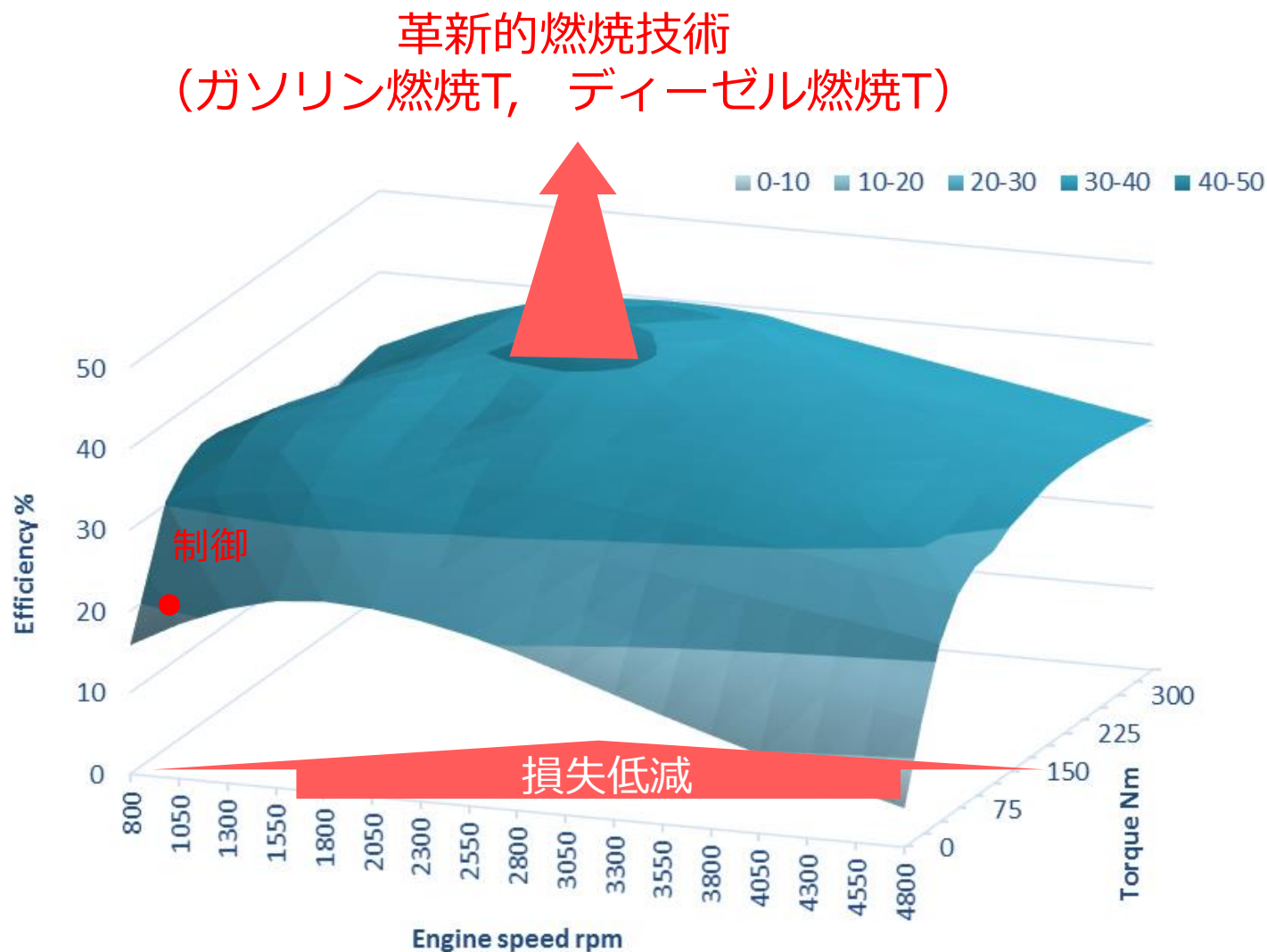
化学反応
モデル

物理からのモデリング



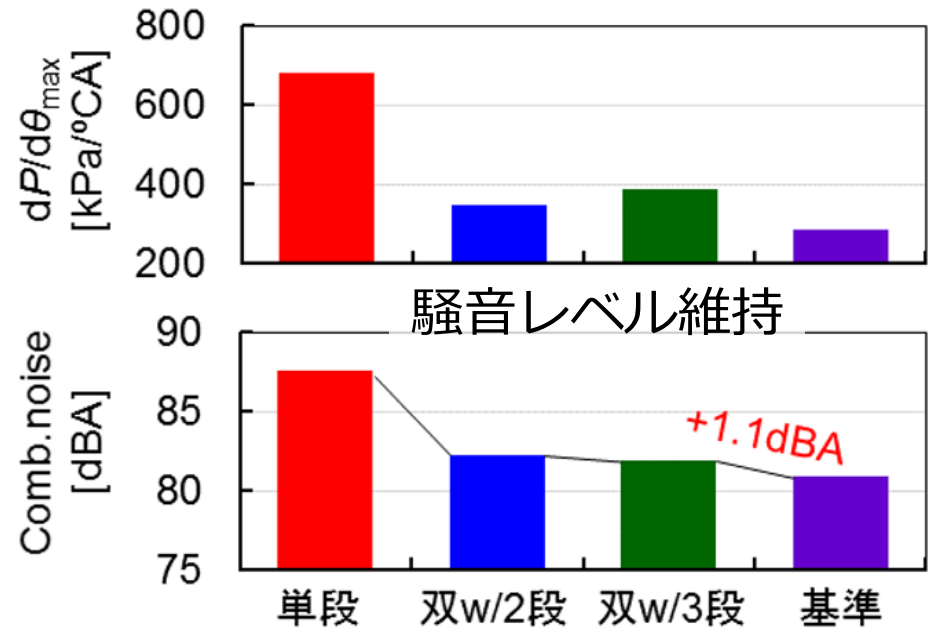
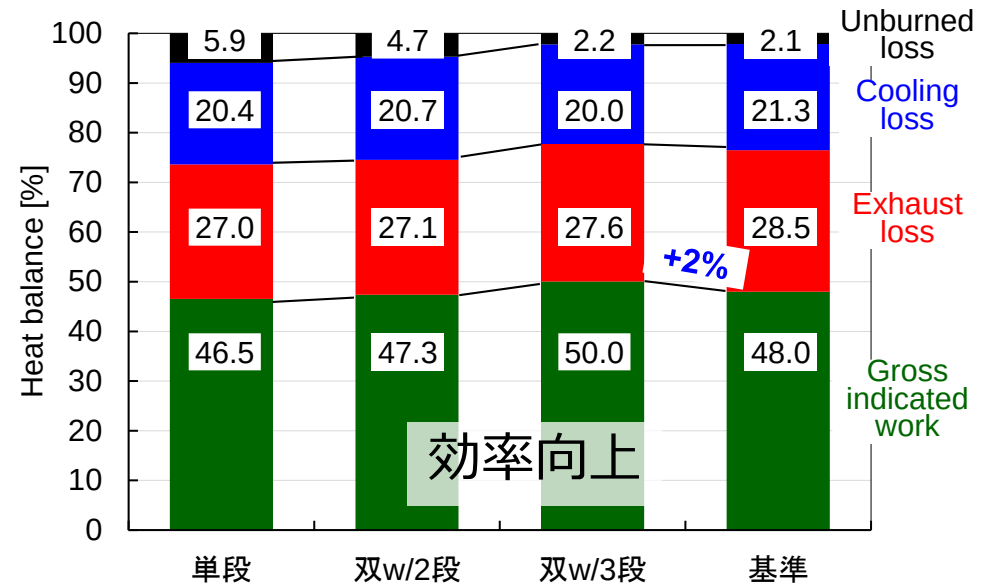
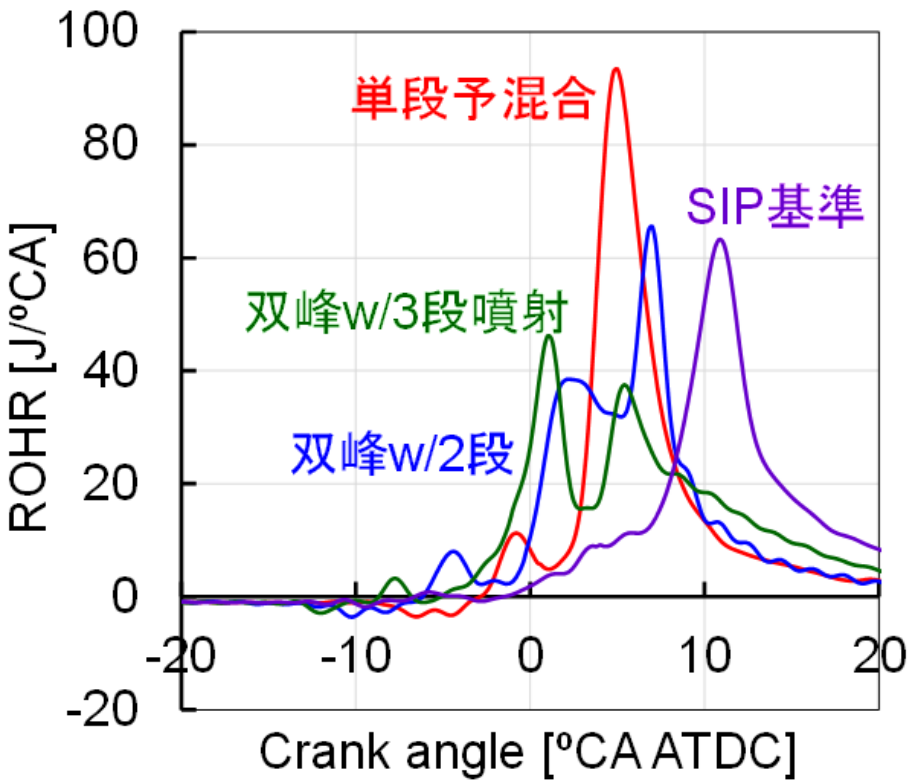
制御モデル

1. 制御の役割, 開発コンセプト
2. 開発したエンジン制御技術
3. デモ内容

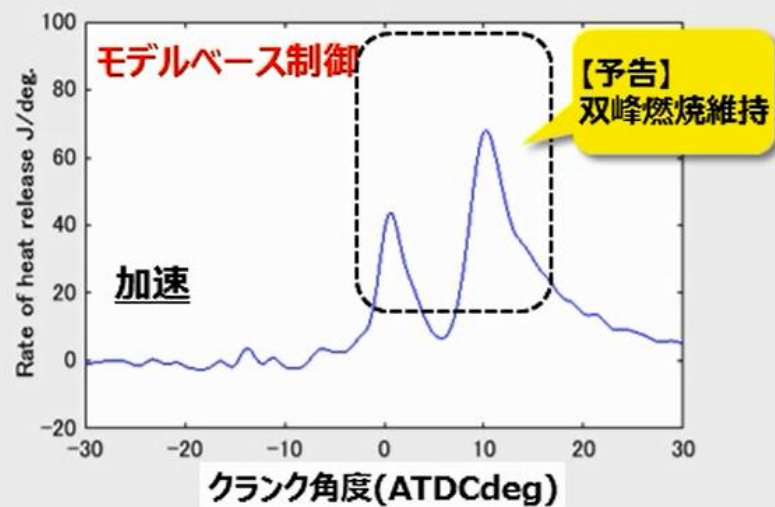
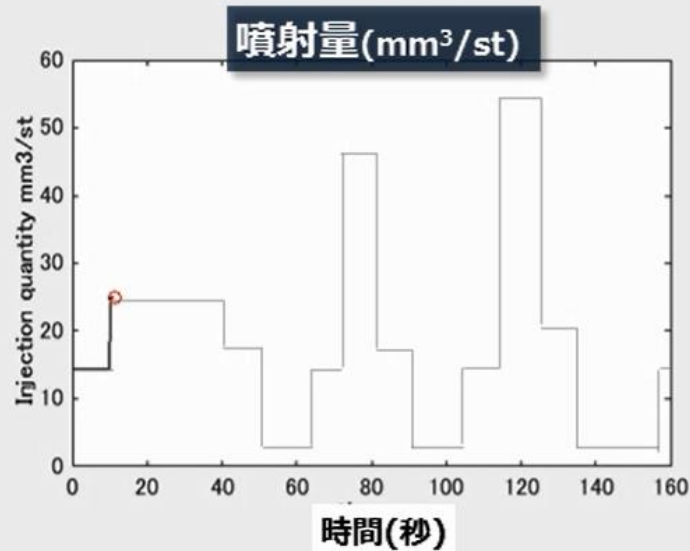
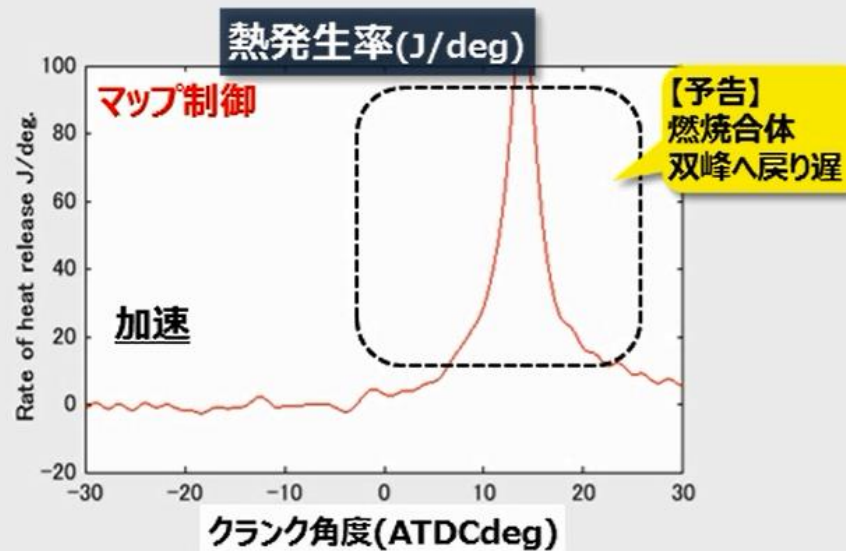
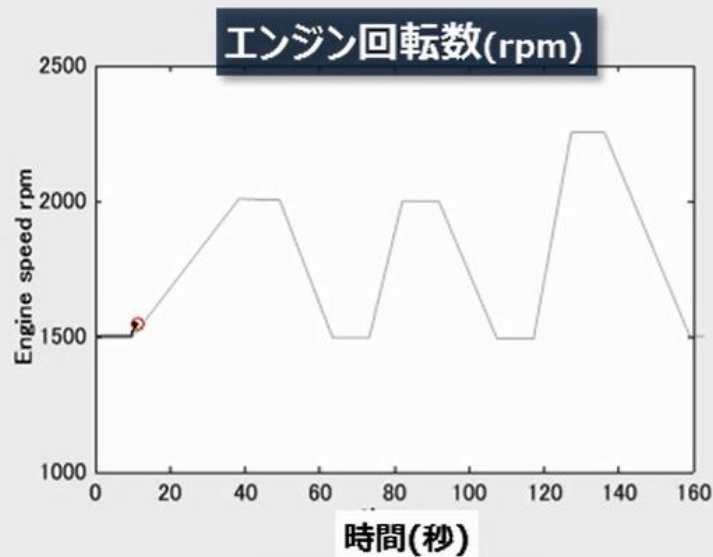


路上での過渡状態（回転数，トルク変化）でも燃焼を適切に維持する。

革新的燃焼技術（予混合的ディーゼル燃焼）



燃焼のロバスト性



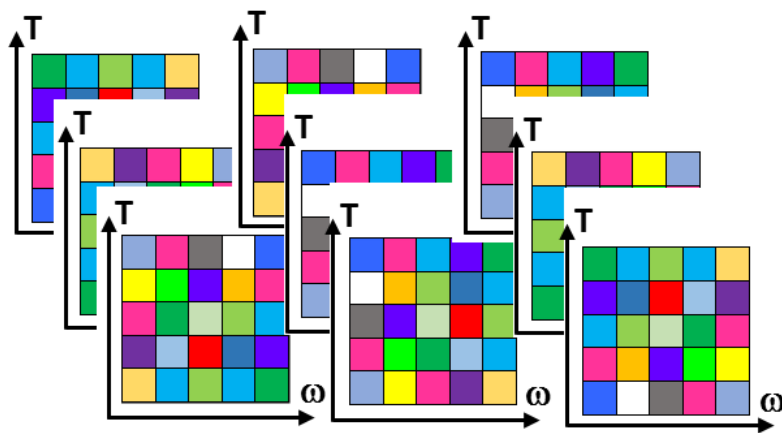
モデルを利用したエンジン制御

➤ 革新的燃焼技術の実現

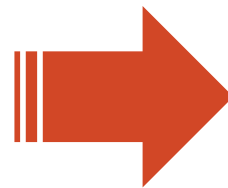
精密でロバスト性の高い制御手法の導入が必要

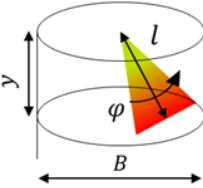
➤ 過渡性能の向上

ランダム加減速のある路上状態での性能向上



大量の実験をベースとした
制御マップ





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

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

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

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

$$-\frac{d}{dt} [Fuel] = \alpha [Fuel]^B [O_2]^C \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

$$\omega_{\text{Swirl}} = c_{\text{Swirl}} \omega_{\text{Engine}}$$

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

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

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

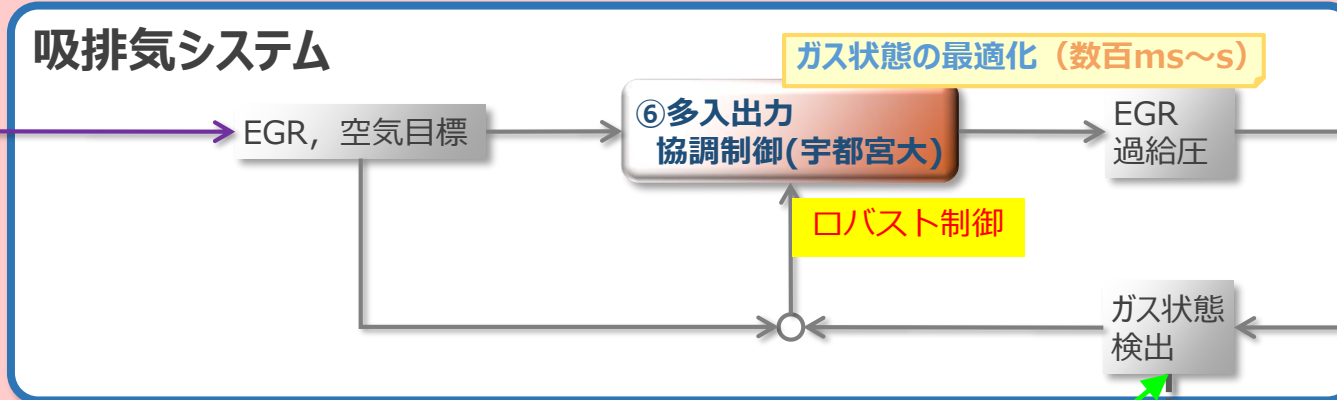
モデルを利用した
制御系設計と制御

構築する制御システム

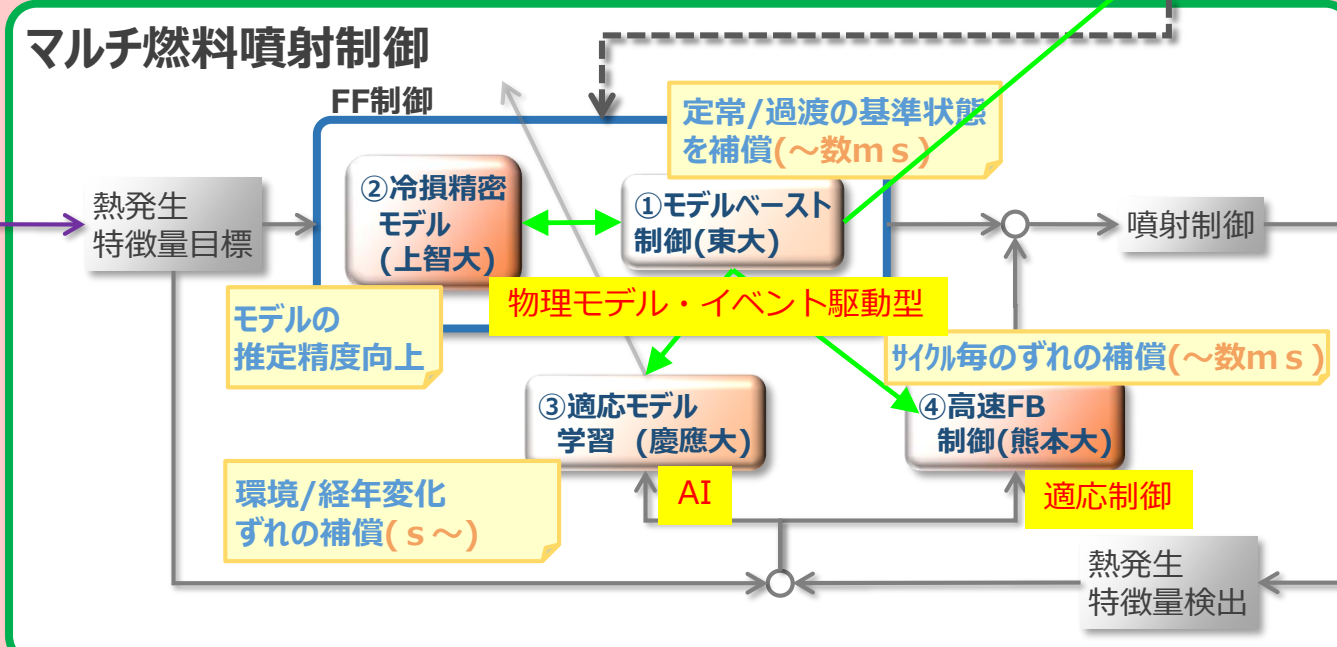
革新的燃焼（ディーゼル燃焼チーム）

エンジン制御システム（ディーゼルエンジンベース）

吸排気システム



マルチ燃料噴射制御



これまでにない制御システム（サイエンス視点）：物理モデル+適応制御+ロバスト制御+AI

基礎からわかる自動車エンジンのモデルベース制御

基礎からわかる
自動車エンジンのモデルベース制御

金子 成彦 監修
山崎 由大 編著



コロナ社

基礎からわかる

自動車エンジンの モデルベース制御

Model Based Control for Automotive Engines

$$G_{pfc}(z) = G_{aspr}(z) - G_r(z)$$

$$\|G_{zw}\|_{\infty} < \gamma$$

$$P_{Pilot\ inj.} = P_{IVC} \left(\frac{V_{IVC}}{V_{Pilot\ inj.}} \right)^{\gamma_{comp.}}$$

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

金子 成彦 監修
山崎 由大 編著
大森 浩充・平田 光男・水本 郁朗
一柳 満久・松永 彰生・神田 智博 共著

目次

2	まえがき (山崎@東大)	1
3	1. 序論 (山崎@東大)	1
4	1.1. 自動車のエンジンシステム	1
5	1.2. 従来エンジンの制御と適合	5
6	1.3. 走行モード、燃料、新燃焼と制御 MAP とその適合	7
7	1.4. モデルと制御系設計	12
8	コラム 1: 適合 (松永@トヨタ)	14
9	2. 燃焼のモデリング (山崎@東大)	18
10	2.1. 離散化モデル	18
11	2.2. 吸気行程	19
12	2.3. 圧縮行程	20
13	2.4. 燃料噴射	21
14	2.5. 着火・燃焼	22
15	2.6. 膨張行程	23
16	2.7. 排気行程	24
17	2.8. ポリトロップ変化	25
18	コラム 2-1: ディーゼル燃焼	26
19	コラム 2-2: 熱力学 (一柳@東大)	27
20	3. 吸排気システムのモデリング	28
21	3.1. 吸気スロットル (35%開度)	28
22	3.2. EGR バルブ	29
23	コラム 3: 吸排気システム	30
24	4. 制御器設計	31
25	4.1. 制御理論	31
26	4.1.1. 逆モデルによる	32
27	4.1.2. ロバスト制御	33
28	4.1.3. 適応制御 (水本@東大)	34

1 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 に米国にて発売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

コロナ社

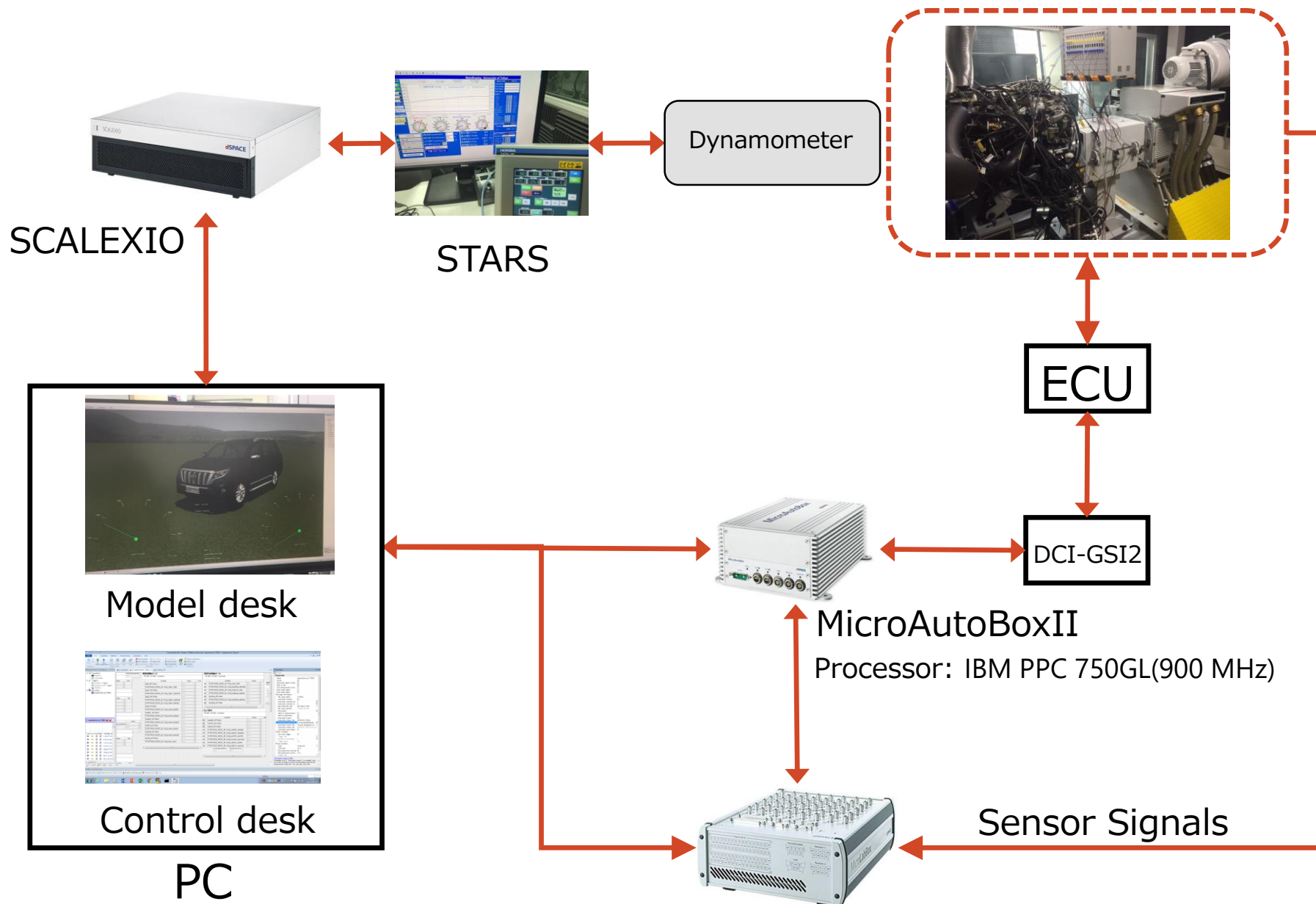
1. 制御の役割, 開発コンセプト

2. 開発したエンジン制御技術

3. デモ内容

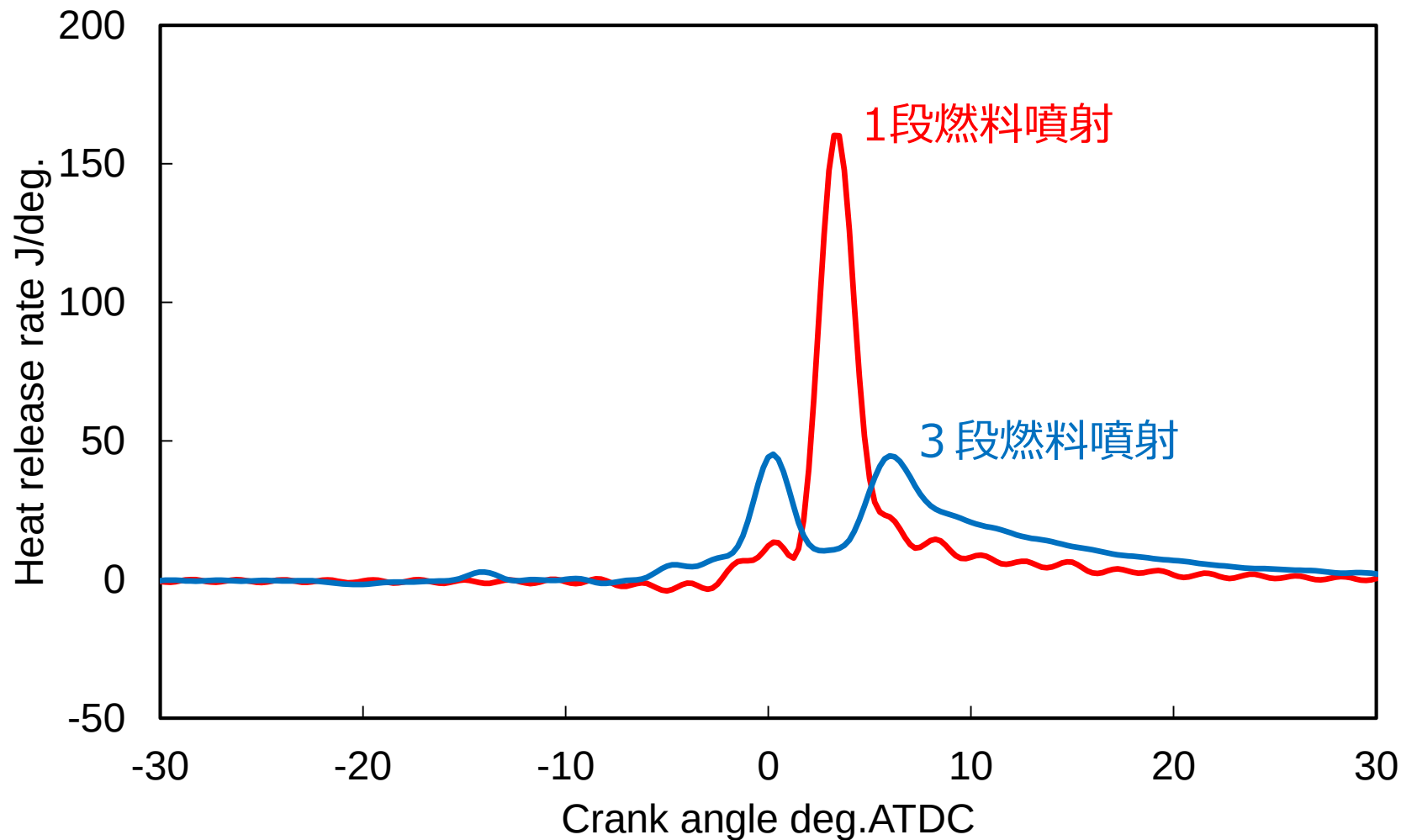
- ・ 新燃焼の燃焼騒音体験
- ・ 従来（マップ）制御 vs SIP（モデルベースト）制御

試験ベンチ

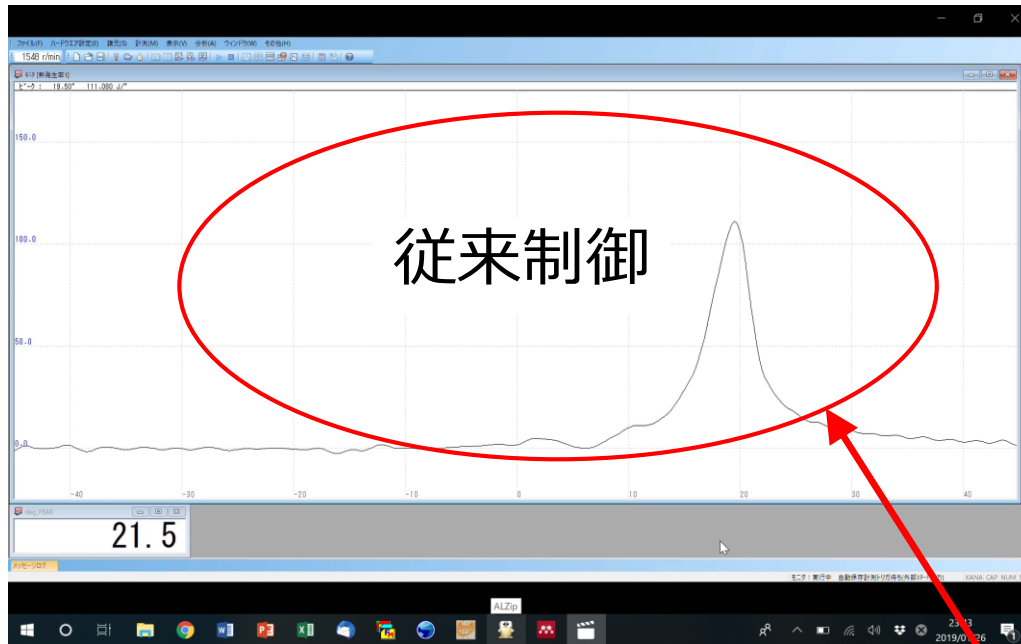




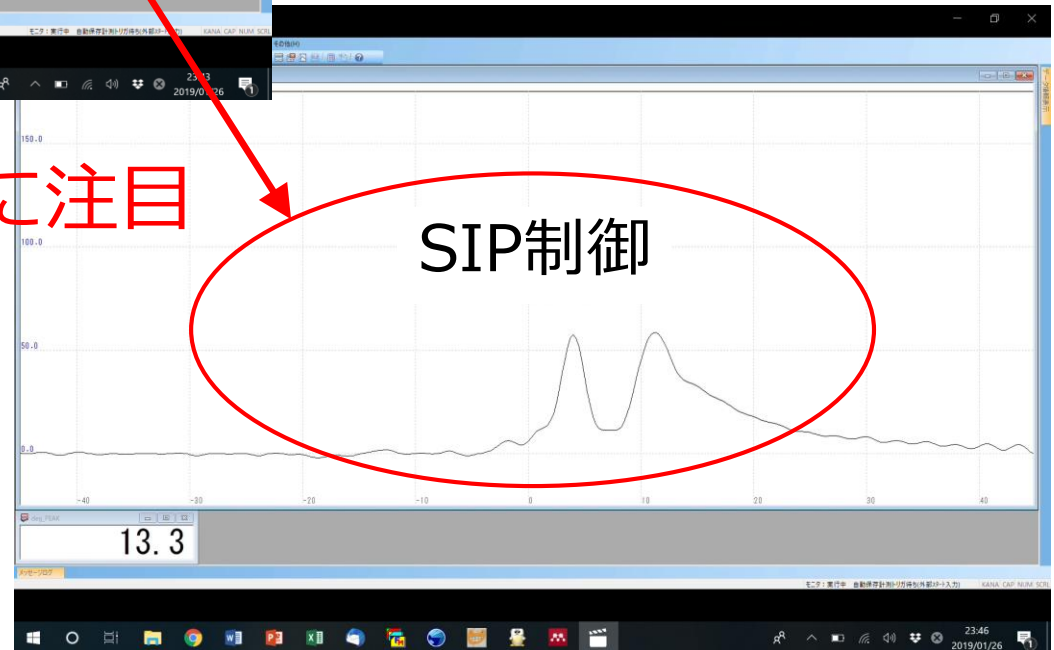
熱発生形状で音が異なります。



従来（マップ）制御 vs SIP（モデルベースト）制御



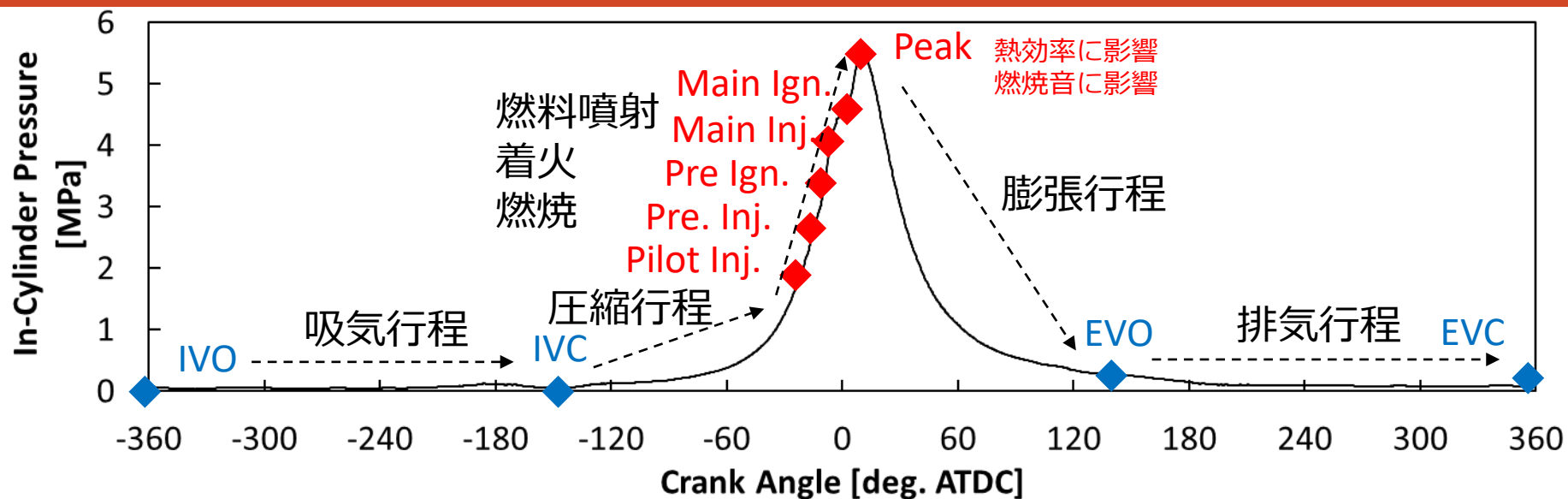
この挙動の違いに注目



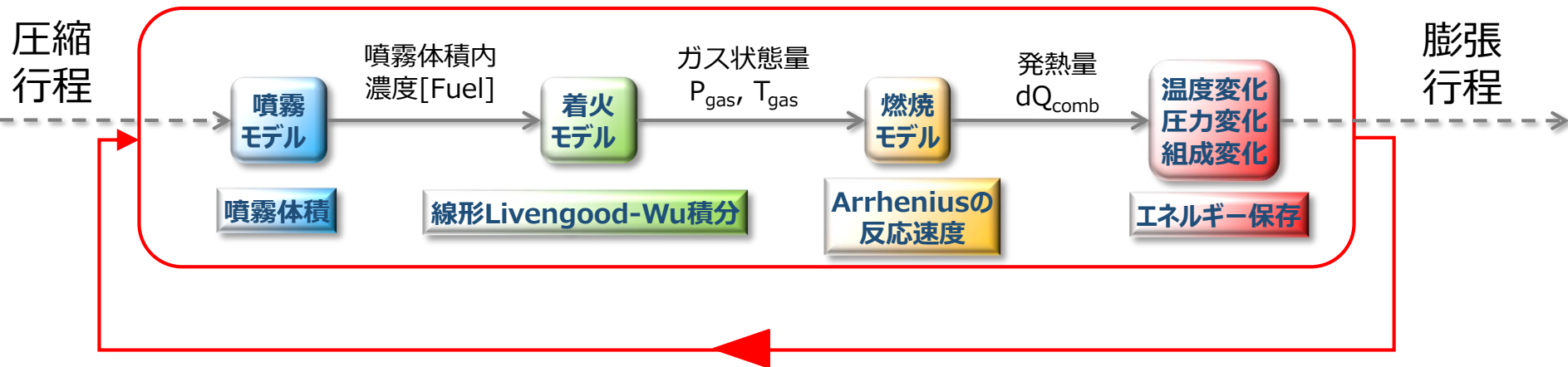


技術詳細

燃焼制御モデルとFF制御器（東大）

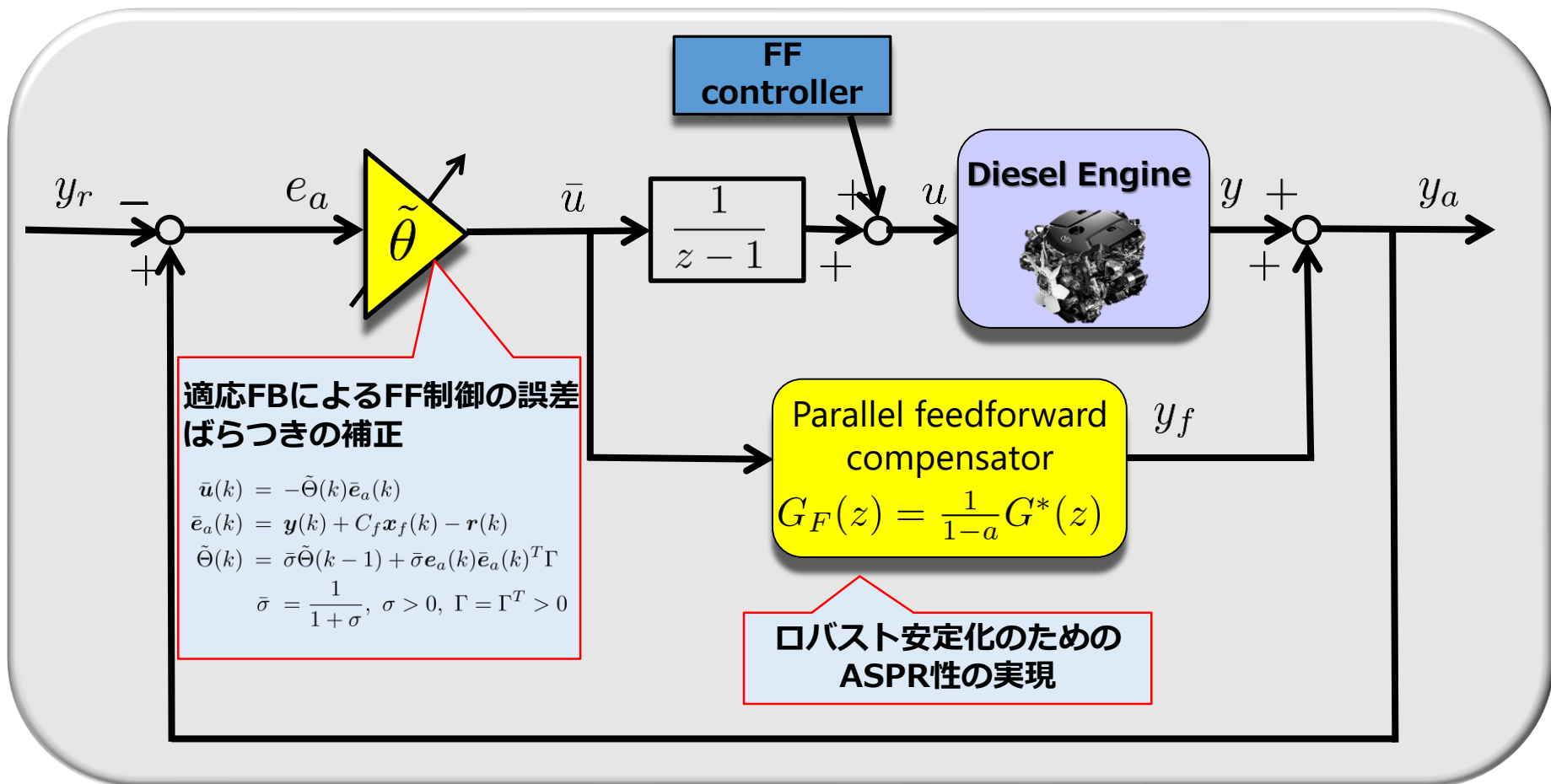


サイクルを離散化した予測モデルを構築，計算の高速化，制御理論適用を可能とする。



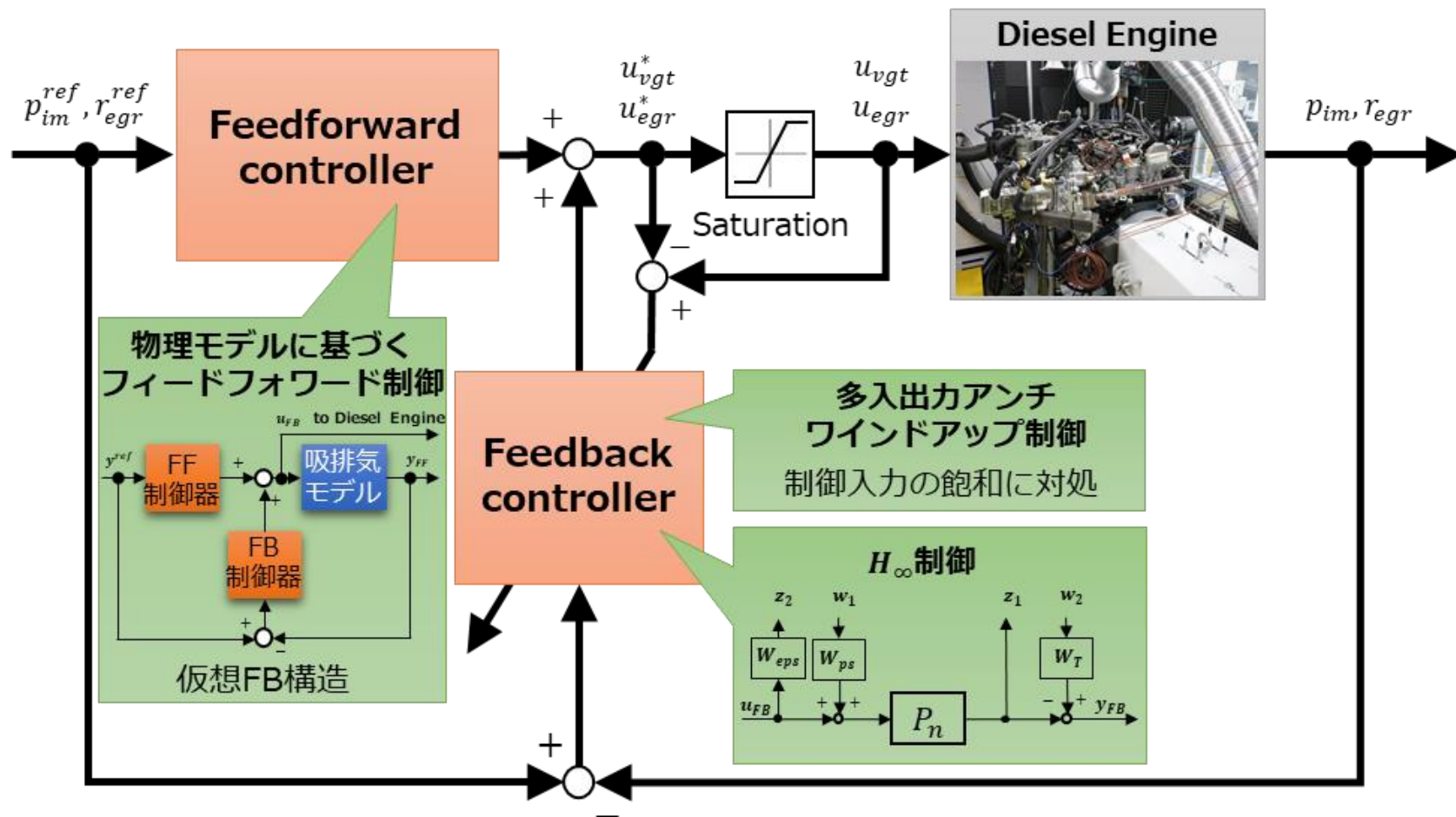
モジュール化した噴射，着火，燃焼過程モデルを噴射回数分繰り返す。

適応FB制御（熊本大）



- ◆ 単純構造かつロバストな適応フィードバック制御による安定なエンジン燃焼制御を実現
- ◆ フォワード制御と融合させることで高精度なエンジン燃焼制御を実現

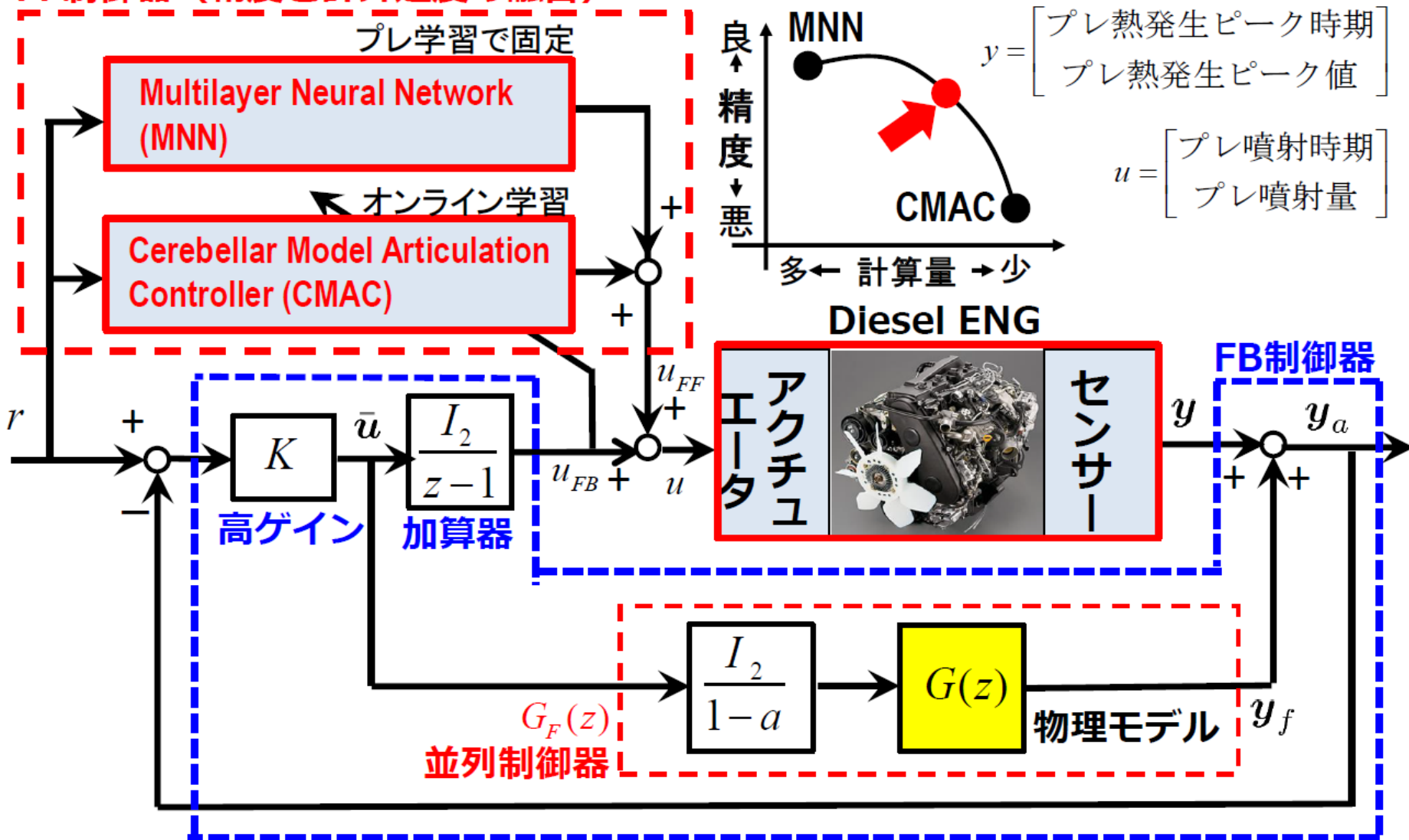
吸排気制御（宇都宮大）



特徴

- ・ 物理モデルと仮想FB構造を有するFF制御器による過渡応答の向上
- ・ 多入出力AWC構造を有するH ∞ FB制御器による高いロバスト性の実現

FF制御器 (精度と計算速度の融合)



フィードバック誤差学習制御系