SIP革新的燃焼技術　　公開シンポジウム 平成31年 1月28日

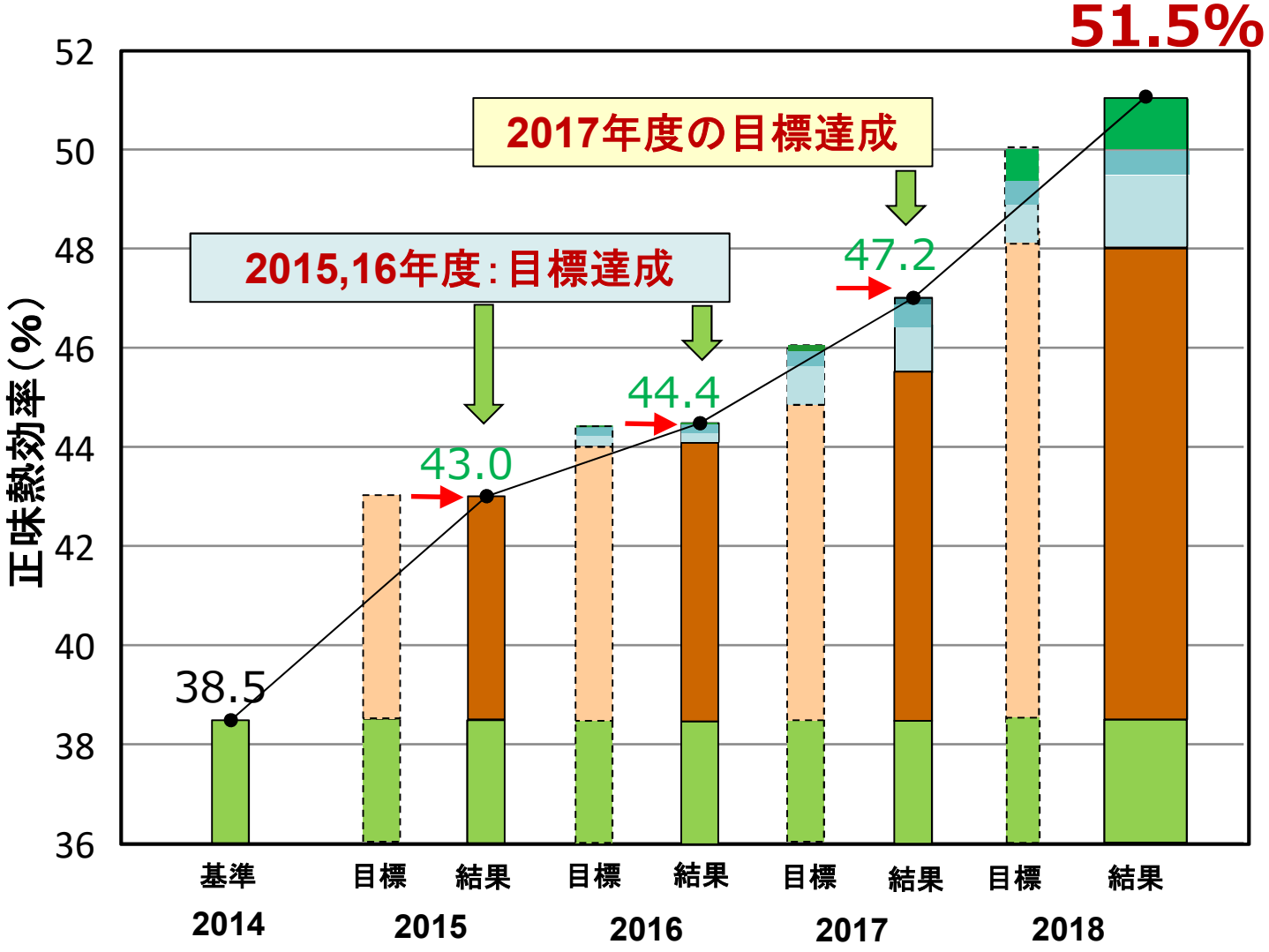
ガソリン燃焼チーム
高効率ガソリンエンジンのための スーパーリーンバーン研究開発

☆研究成果概要・・・	Tリーダ 飯田	15枚12分
1. 着火向上班・・・・・・・・・	津江	11枚 7分
2. 火炎伝播促進班・・・・・・	北川	14枚 7分
3. 冷却損失低減班・・・・・・	小酒	12枚 7分
4. 燃料･ノック抑制班 ・・・・	三好	12枚 7分
5. モデル/ばらつき班 ・・・・	森吉	5枚 3分
☆フラッシュプレゼン	Sリーダ 横森	11枚12分
6. 担当委員コメント ・・・	村中委員	0枚 5分
		(60分)

正味熱効率の達成状況

正味熱効率の最終目標50%を達成

スーパーリーンバーン＋水噴射



損失低減チーム3.48

- 熱電素子 1.25pt
- 過給機 0.65pt
- 摩擦損失 1.58pt

ガソリン燃焼チーム9.48

- スーパーリーンバーン（λ~2.0）
- Eng仕様と流動の最適化
  CR:14～17, S/B:1.7
  タンブル流動
- 点火系の最適化
  スーパー点火，
  放電ディレイ
- 燃料研究
  ノック抑制，燃焼促進、
  ポンピングロスス低減

ガソリン燃焼チーム Super Lean Burn

正味熱効率の達成状況

クラスターの燃焼サイエンス
に基づく新規アイデアで充足

1. スーパリーンバーンの進化（慶大）
スーパー点火装置+放電最適化+
傘型電極プラグ+タンブル流の変動削減
⇒ λ2.0～2.3に拡大 低温燃焼+高速燃焼

2. 水噴射（東工大）
超希薄燃焼＋水噴射＋鏡面化
⇒ 冷損低減・ノック抑制

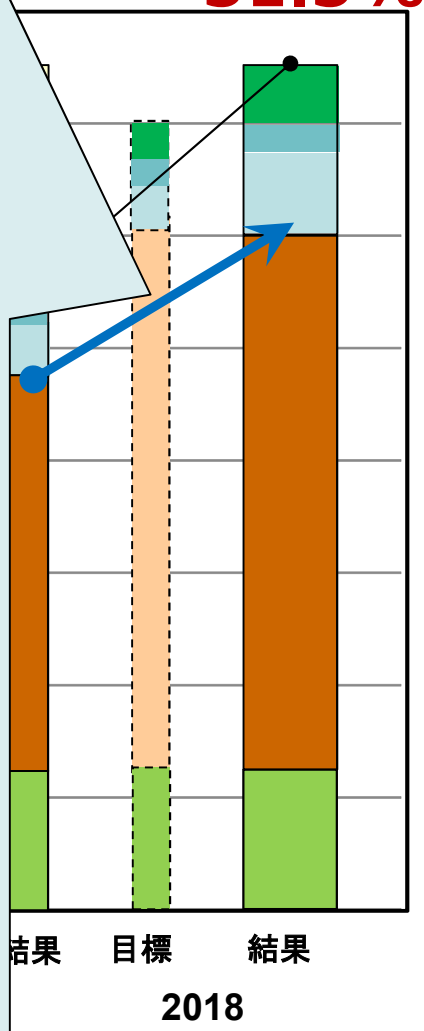
3. 次世代燃料研究（燃料ノック班）
⇒ ノック抑制・超希薄燃焼

4. 冷炎直前の摂動スパイク印加（広島大）
⇒ ノック抑制促進

5. ナノ秒パルス放電（東北大）

6. その他
⇒ ツインタンブル成層化（千葉大）
誘電体バリア放電（産総研）
超微細乱流促進体（農工大）

達成



スーパーリーン
バーン＋水噴射

損失低減チーム1.69

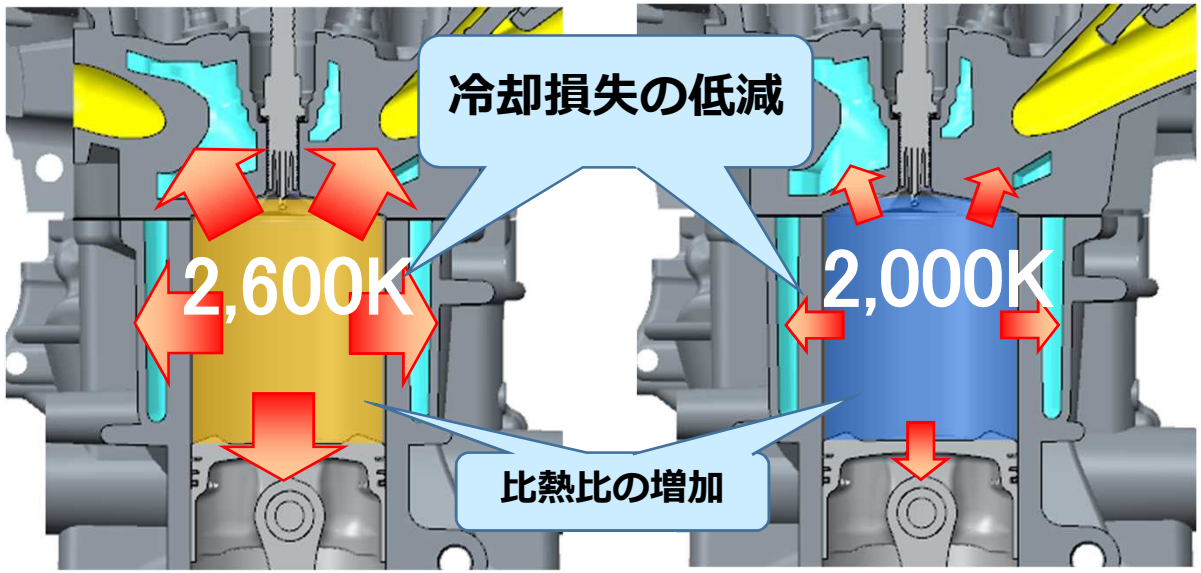
熱電素子	0.10pt
過給機	0.49pt
摩擦低減	1.10pt

ガソリン燃焼チーム9.48

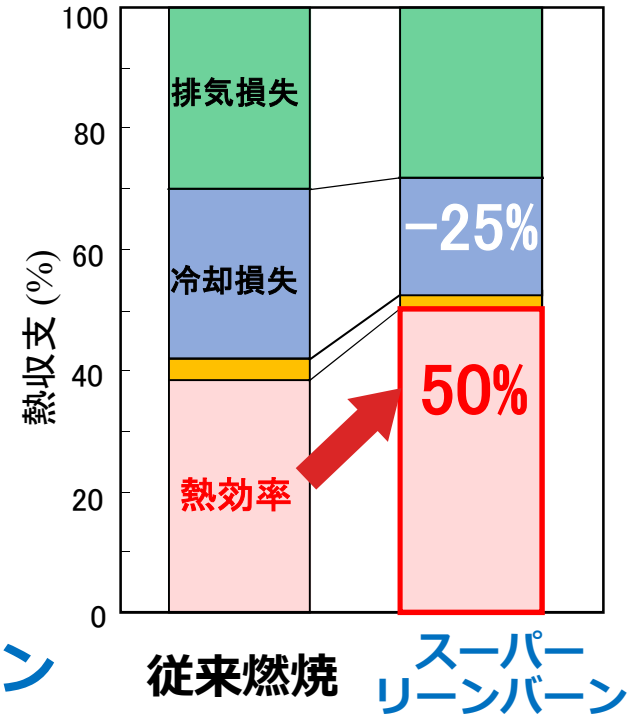
- スーパーリーンバーン（λ~2.0）
- Eng仕様と流動の最適化
  CR:14～17, S/B:1.7
  タンブル流動
- 点火系の最適化
  スーパー点火,
  放電ディレイ
- 燃料研究
  ノック抑制, 燃焼促進、
  ポンピングロスス低減

スーパーリーンバーンによる低温燃焼の実現

これまでにないスーパーリーンバーンによる低温燃焼の実現から，エネルギーロス（冷却損失）を低減し，熱効率を向上

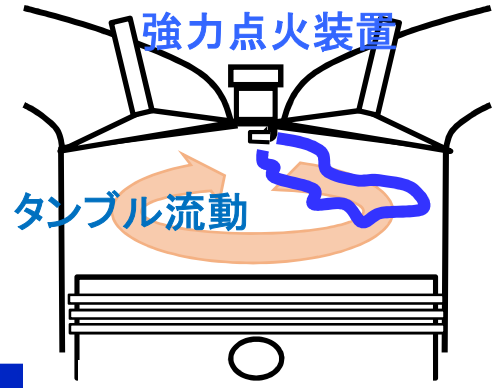


従来燃焼（ストイキ）　スーパーリーンバーン



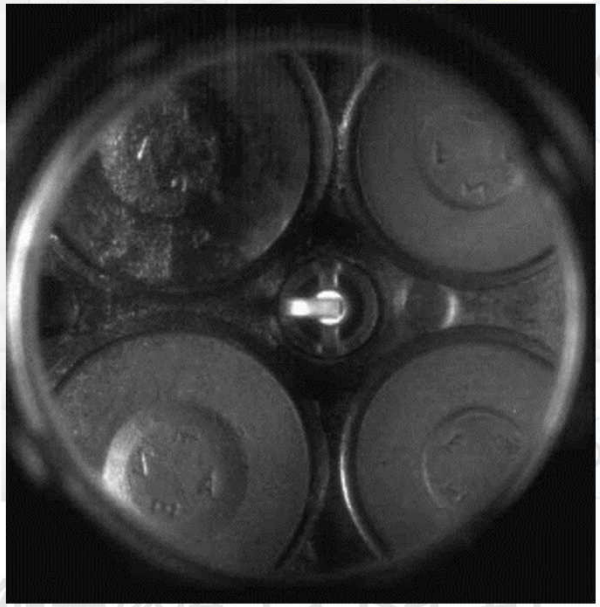
スーパーリーンバーンの燃焼条件

- 空気過剰率　$\lambda = 2.0$
- タンブル流動　$u = 20 \sim 50$ m/s，$u' = 5$ m/s



スーパーリーンバーンによる低温燃焼の実現

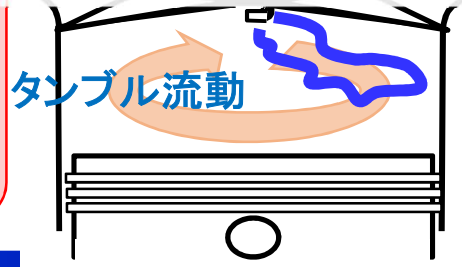
これまでにないスーパーリーンバーンによる低温燃焼の実現から，エネルギーロス（冷却損失）を低減し，熱効率を向上



従来燃焼（λ = 1.0）

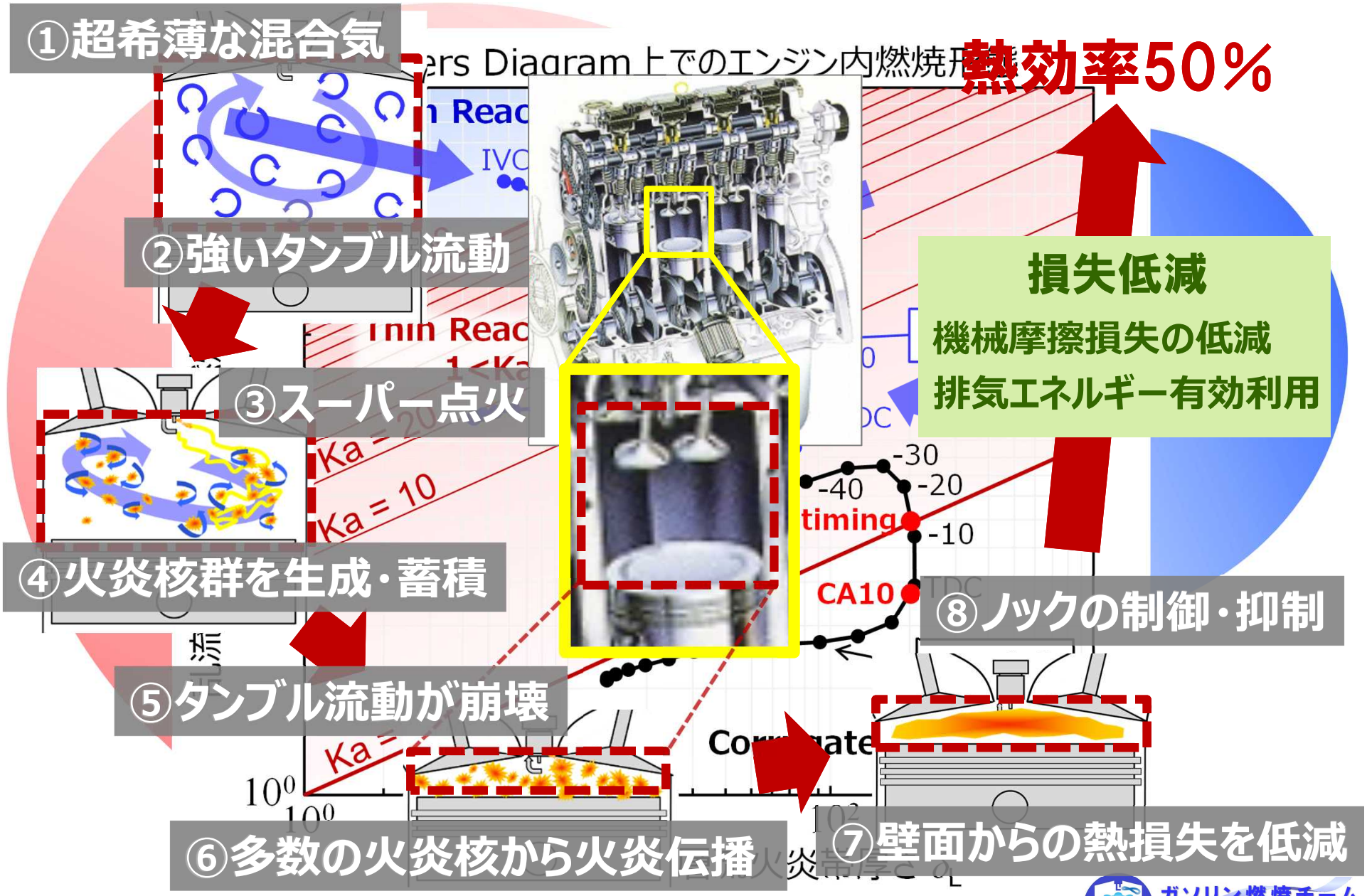
スーパーリーンバーン（λ = 1.89）
150mJ (100mA 単発放電)

- 空気過剰率　$\lambda = 2.0$
- タンブル流動　$\bar{u} = 20 \sim 50$ m/s，$u' = 5$ m/s



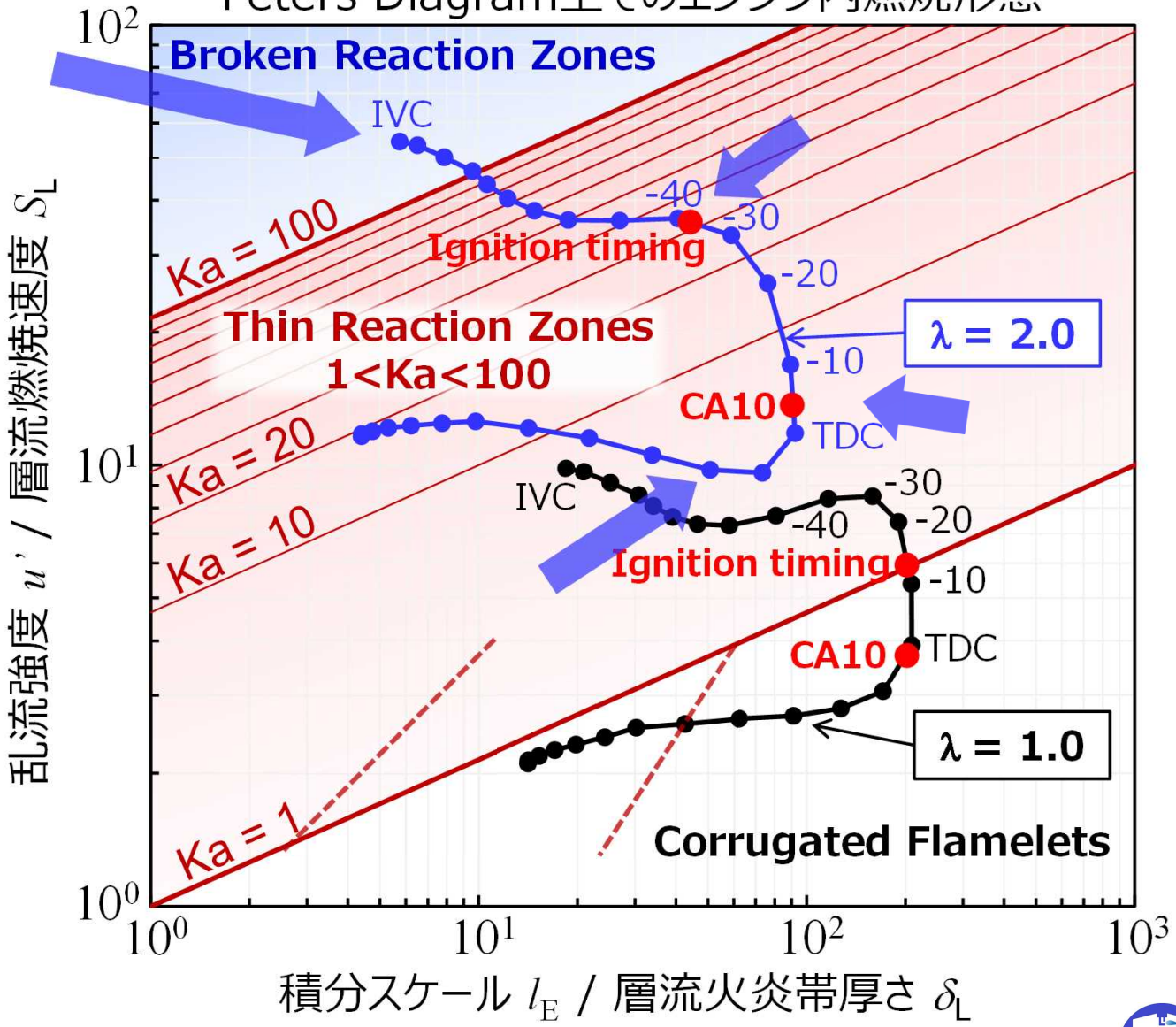
スーパーリーンバーンエンジンの構想

スーパーリーンバーン構想と燃焼のサイエンス 1/3

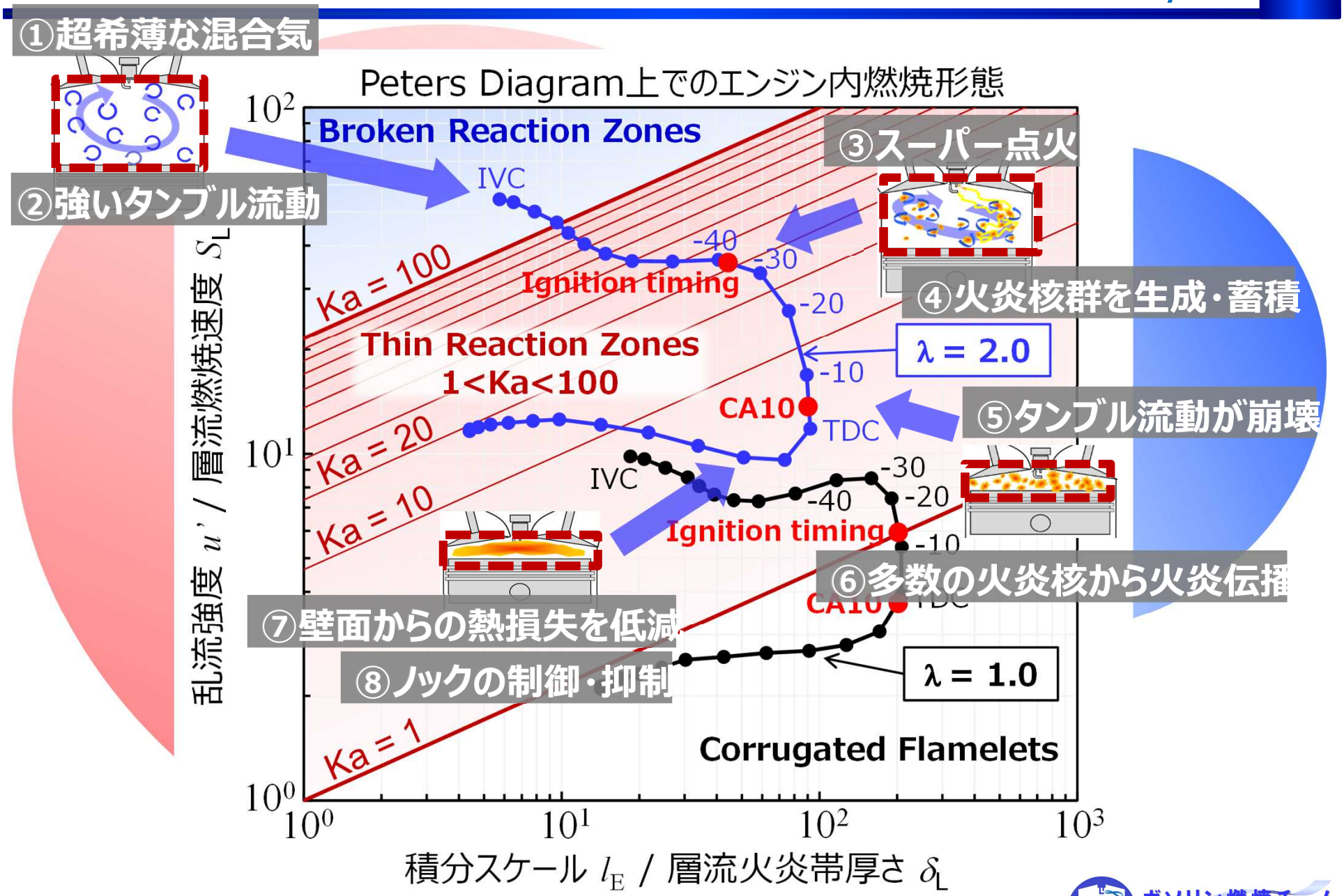


スーパーリーンバーン構想と燃焼のサイエンス 2/3

Peters Diagram上でのエンジン内燃焼形態



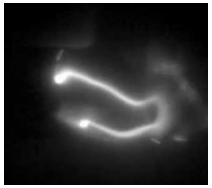
スーパーリーンバーン構想と燃焼のサイエンス 3/3

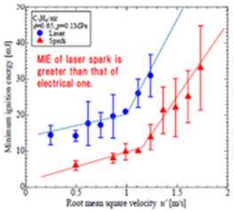


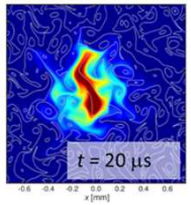
スーパーリーンバーンのサイエンスへの落とし込み

高温高圧でのガソリン空気混合気の層流燃焼速度，火炎帯厚みの把握
（サロゲート燃料，SIP共通ガソリン）

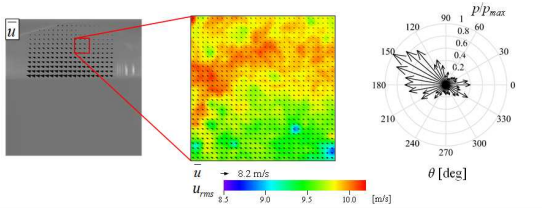
放電と火炎核形成のサイエンス



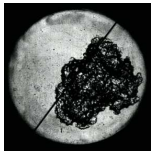


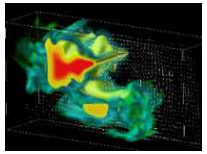


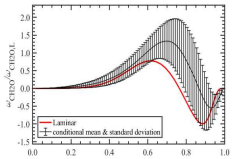
マイクロPIVによる流動変動/乱流スケール計測



超希薄予混合乱流燃のサイエンス，DNS計算



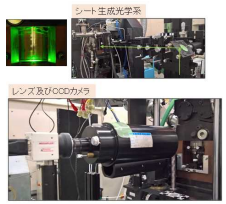


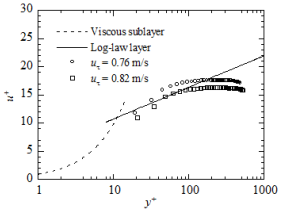


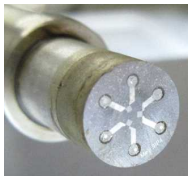
$$S_L = a\phi^b \exp\{-c(\phi-d)^2\}\left(\frac{p}{0.5}\right)^{e+f\phi+g\phi^2}\left(\frac{T}{450}\right)^{h+i\phi+j\phi^2}$$

$$\frac{S_T}{S_L} = \frac{A_T}{A_L} = \left(\frac{\alpha^4\nu^3}{2\sqrt{2}C_s^2\Delta^6}\right)^{\frac{2-D_3}{4}}\left(\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij} - \mathrm{div}(\tilde{\mathbf{u}})^2\right)^{\frac{-3(2-D_3)}{8}} + \frac{\delta_A}{\delta_L}\frac{\mathrm{div}(\tilde{\mathbf{u}})}{(\mathrm{div}(\mathbf{u})_L)|_{G=G_0}}$$

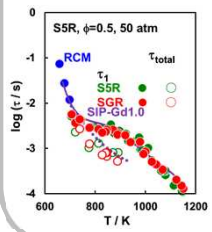
低温燃焼時の冷却損失境界層μPIV/熱流束計測

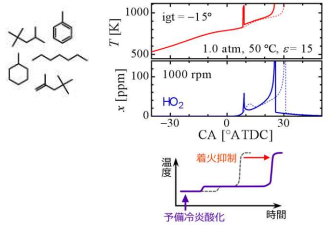


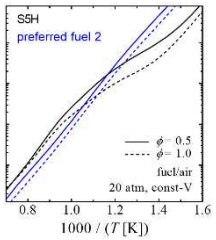




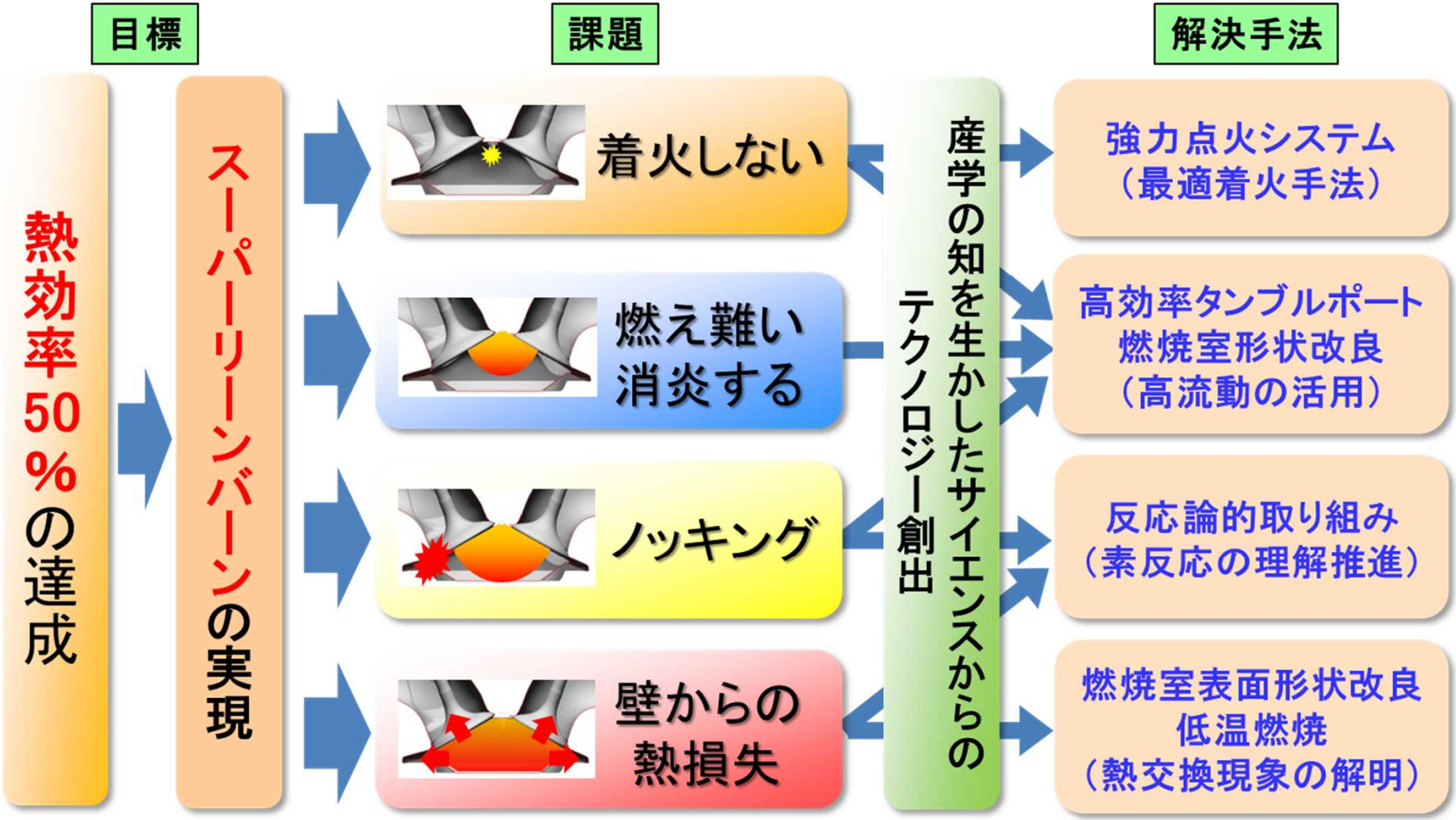
燃料とノックのサイエンス



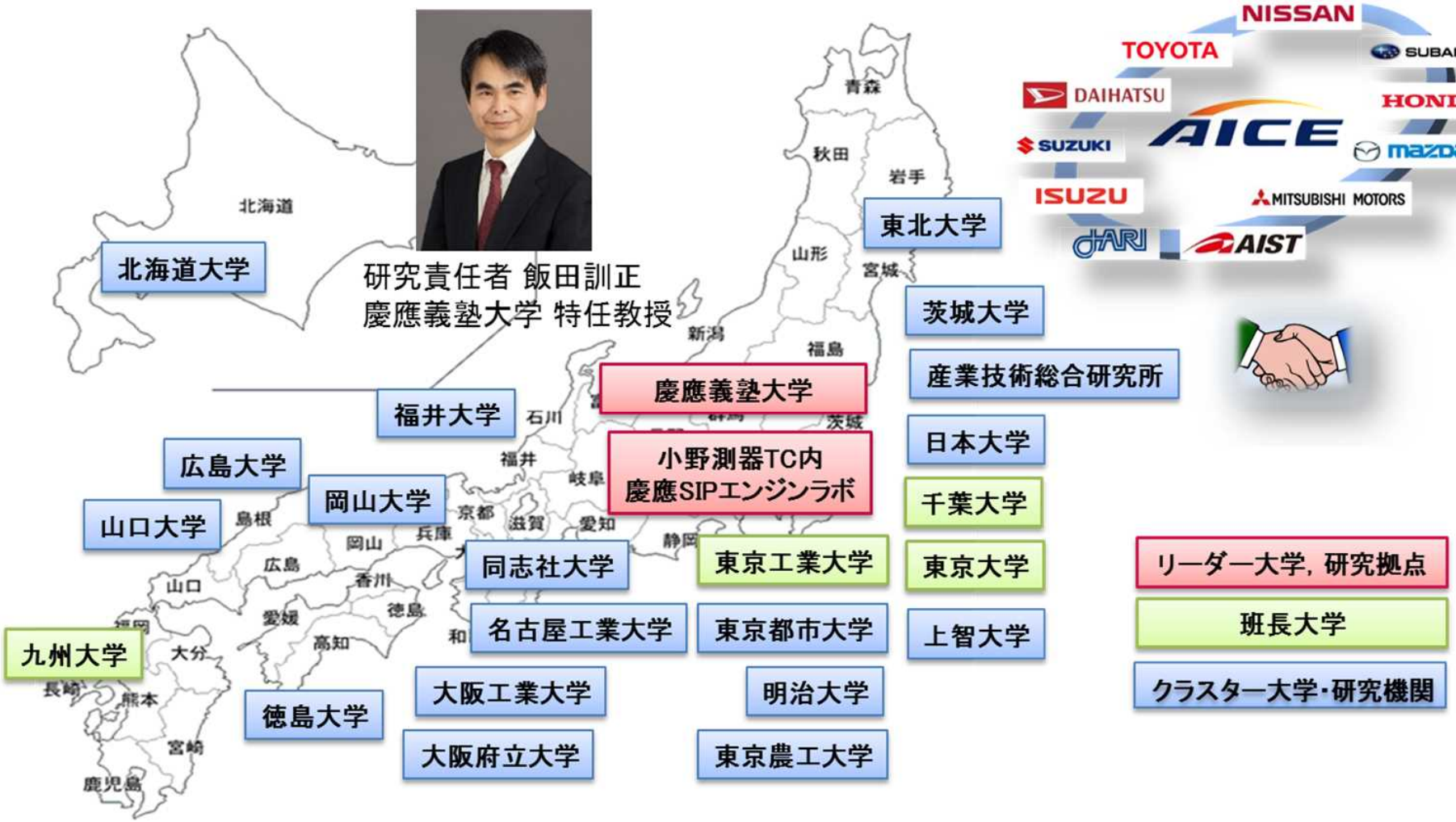




スーパーリーンバーン実現に向けた課題と解決手法



ガソリン燃焼チーム　22大学28クラスター



日本の知恵を結集し、世界を牽引する要素技術を創出

1) モデルの提供，2) 熱効率向上のアイデア，3) ＤＢの構築

⇒ 産業界の発展に貢献

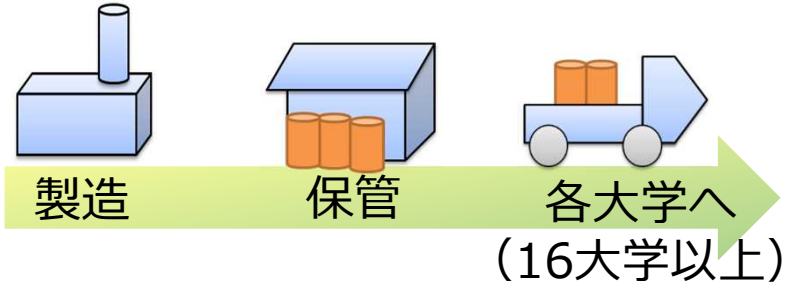
SIP共通燃料の使用 チームWEBサイトにてレシピ公開中

SIP共通ガソリン

燃料製造：ＪＸＴＧエネルギー殿

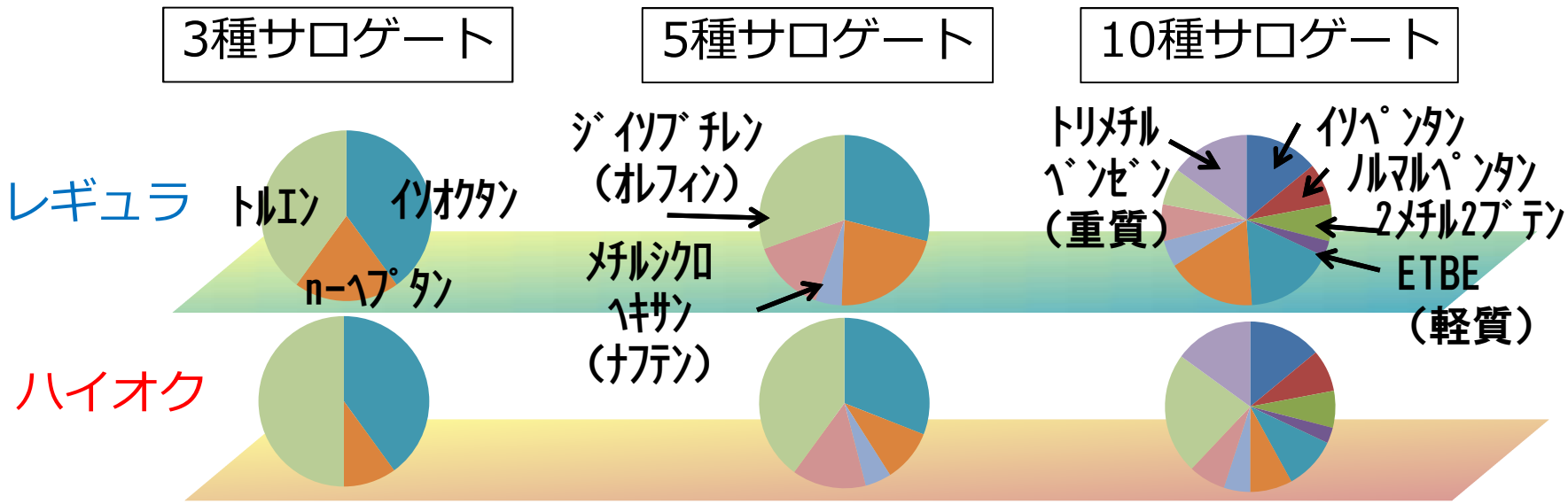
・SIP共用ガソリン(レギュラ)　4.8kL
・SIP共用ガソリン(ハイオク)　14.0kL

・5年間分を一括製造して使用する。



SIPサロゲート燃料

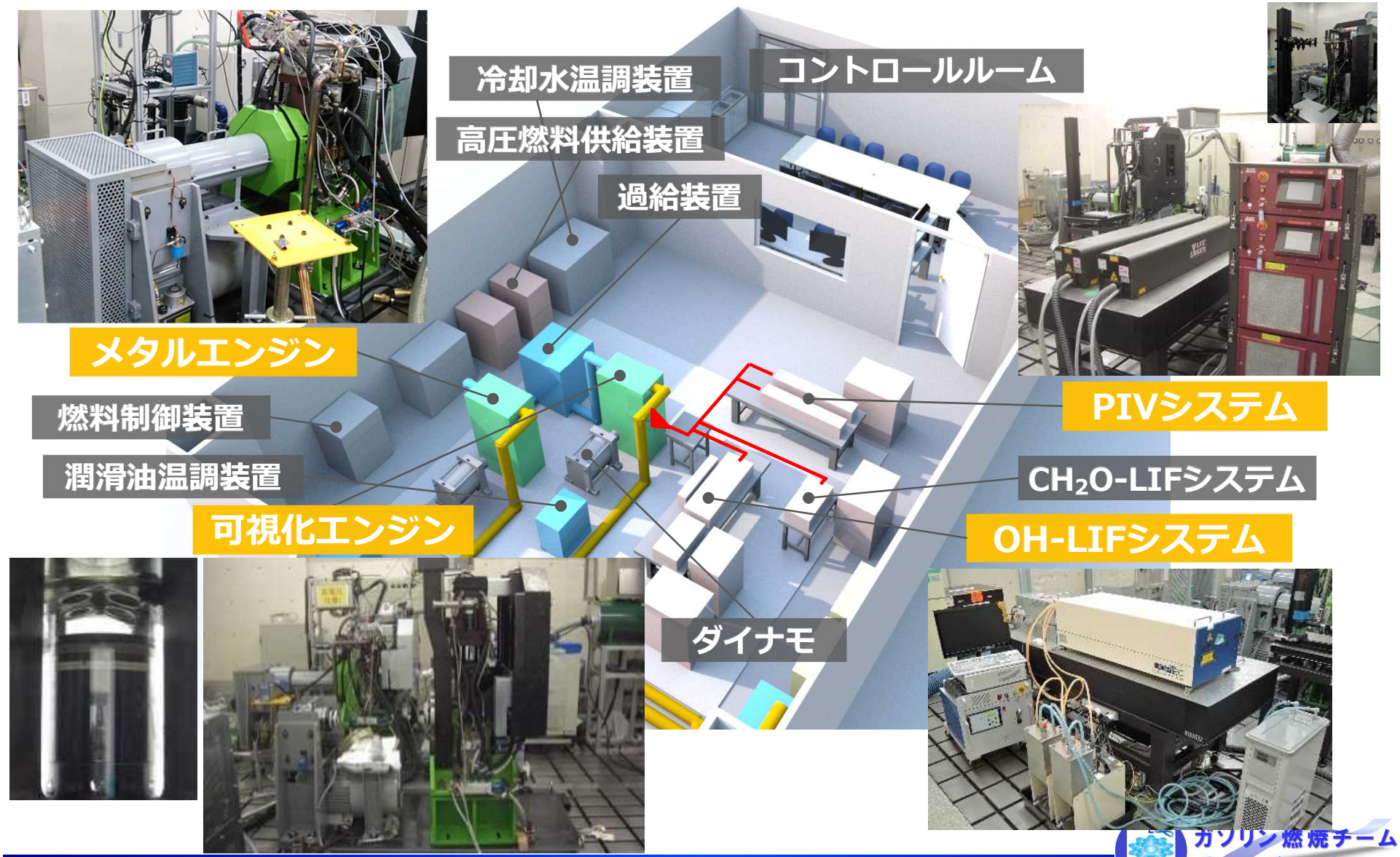
レシピ：広島大学 三好先生



市販燃料のRON, MONを加味　　成分割合を加味　　蒸留特性を加味

研究拠点の構築　2014年

㈱小野測器殿 横浜TC内 慶應義塾大学SIPエンジンラボラトリー



研究拠点の運営　2015～2018年

7クラスター大学とリーダー大学がSIPエンジンラボを利用

個人の識別がつく(学生の顔が映っている)ものは、媒体への掲載をご遠慮ください。

利用登録者数 延べ167名

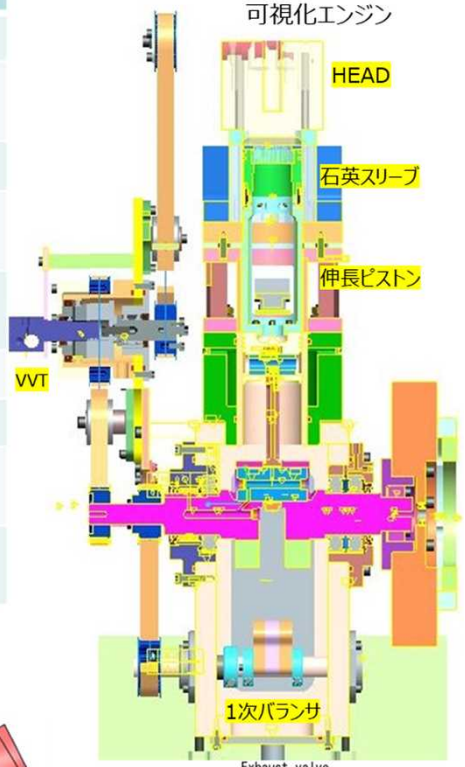
(2019.1.18現在)

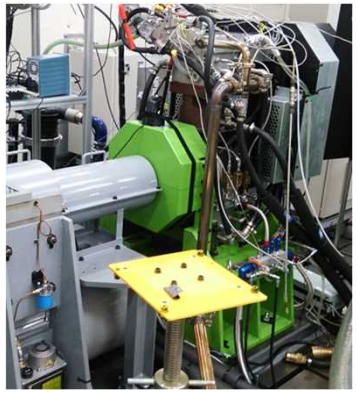
SIP共用エンジン（可視化エンジン・メタルエンジン）

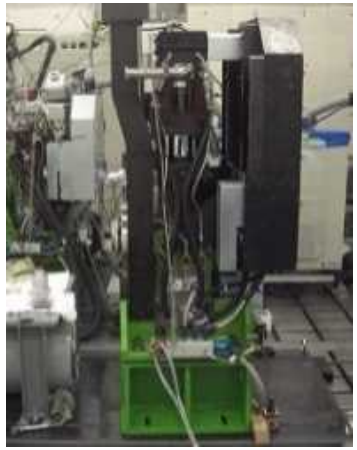
主要エンジン諸元

項目	諸元	備考
ボア	75mm	1.5L-DI FIT基準にボアφ73→75拡大
ストローク	90/112.5/127.5mm	Stroke/Bore比 1.2/1.5/1.7 （4気筒： 1590/1988/2253cc）
圧縮比	13/15/18	実効圧縮比12.3（遅閉じ）
ピストン	フラットトップ	初期はフラットピストン（別案タンブル保持） 圧縮比はピストン高さ変更により対応.
吸排気 VLV	IN 29mm*2 EX 25mm*2	1.5L DI FIT流用 吸排VVT 作動角40degCA（小山製）
直噴INJ	マルチホール（Pf20Mpa）	1.5L-DI FIT流用
ポートINJ	マルチホール（Pf0.3Mpa）	0.66L-TC N-BOX流用
吸気ポート	タンブル強化ポート	点火プラグ部流速 23.5m/s @BTDC60deg 2000rpmWOT
点火系	強力点火コイル＋PSPEプラグ	マルチコイル（並列結合）

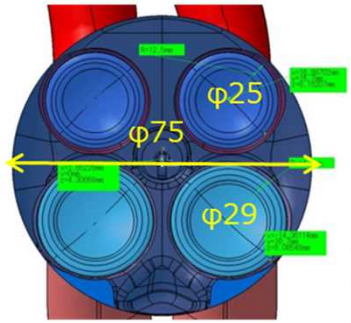
可視化エンジン





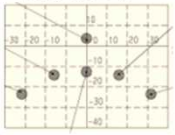


燃焼系主要構成

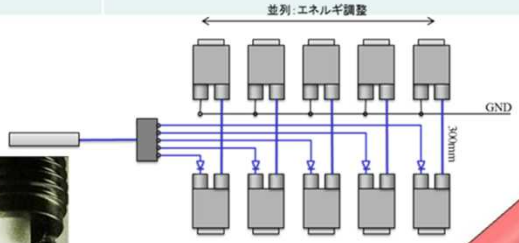


1.5L_DI FIT流用

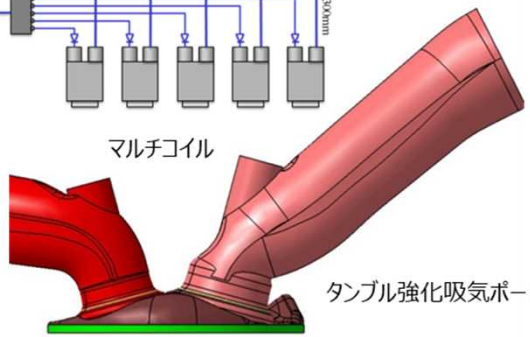
PSPEプラグ



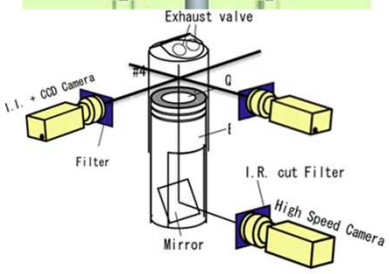
マルチホールDI-INJ



マルチコイル



タンブル強化吸気ポート



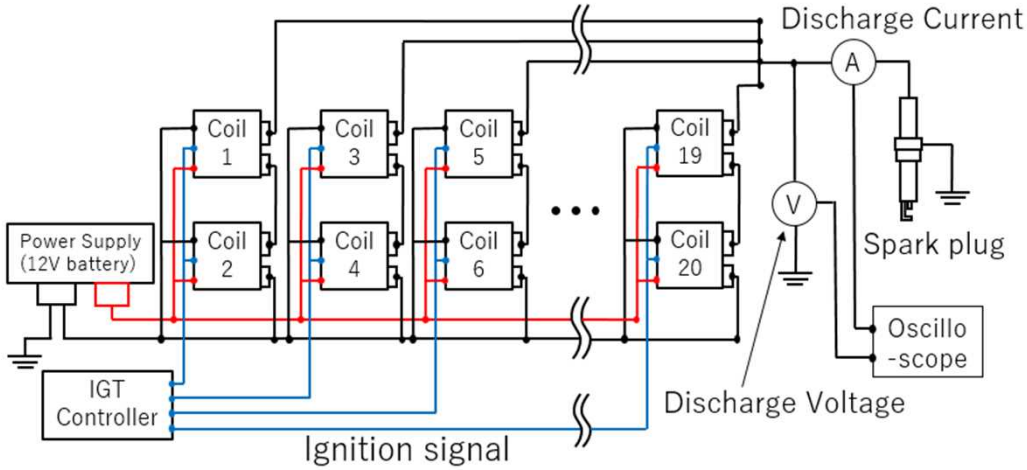
可視化観察エリア

2014年にAICEガソリン燃焼分科会の支援・協力により，仕様の決定・設計がなされました。
タンブル強化吸気ポート：ホンダ殿, SIP共通強力点火装置：トヨタ殿

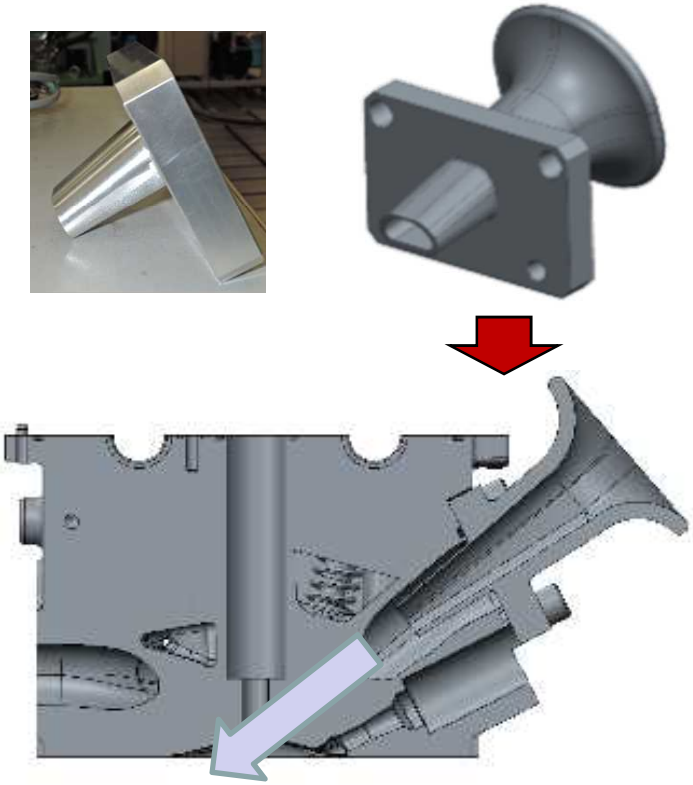
チームで提案された熱効率向上要素技術　その１

・点火装置の強化と制御

・タンブル流動の強化

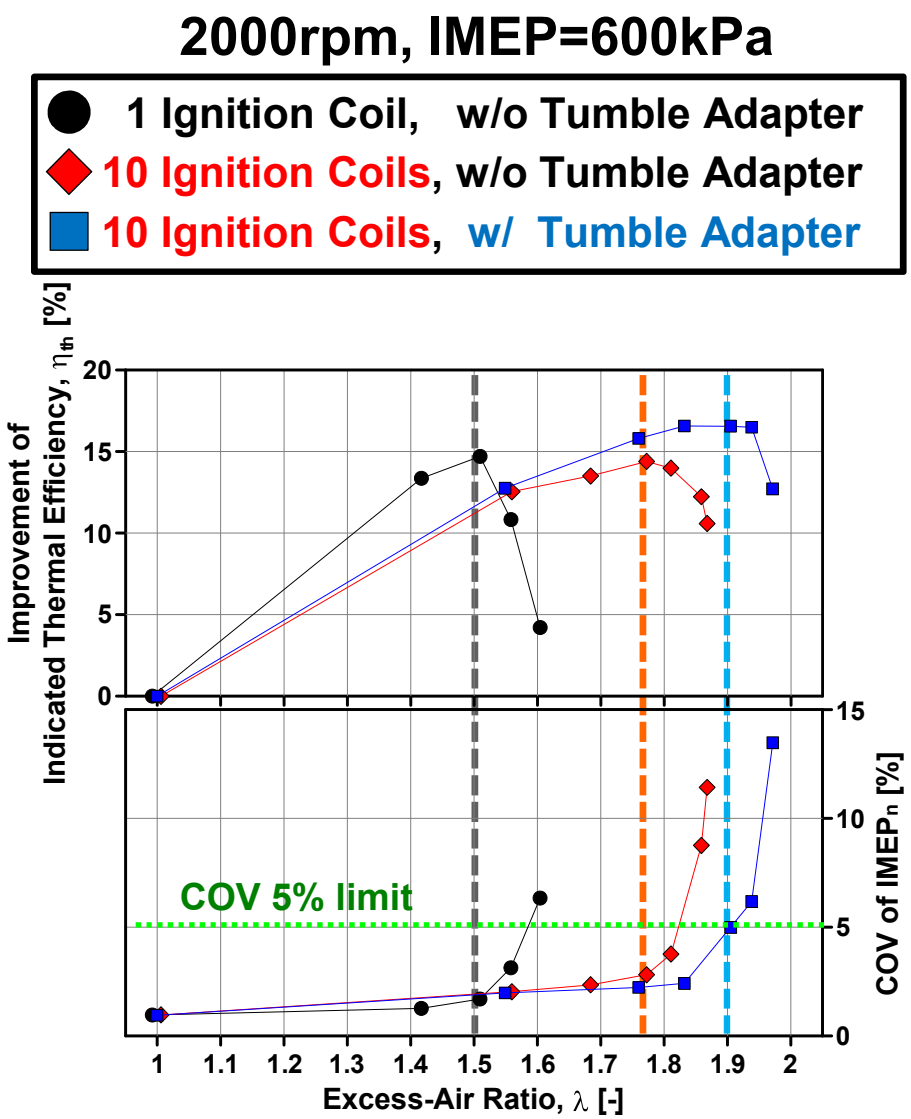


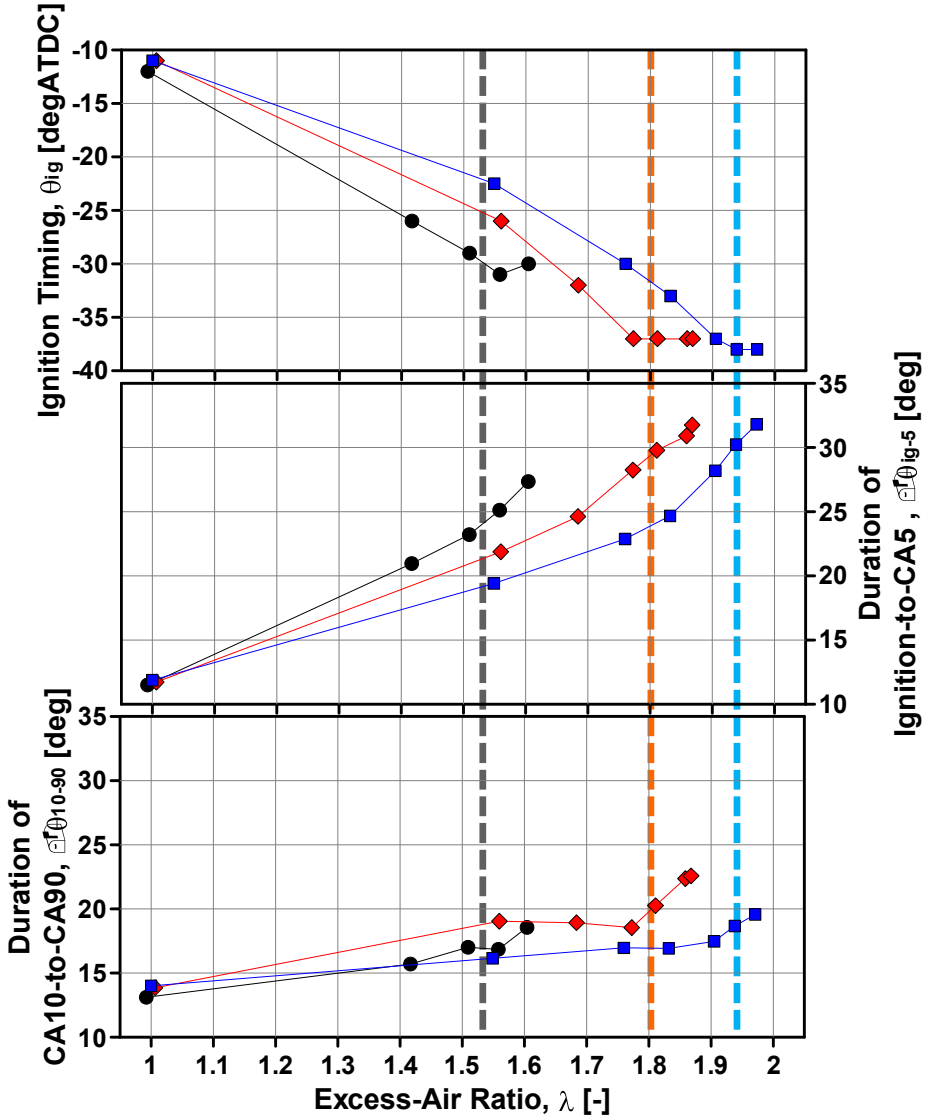
スーパー点火装置



タンブル強化アダプター

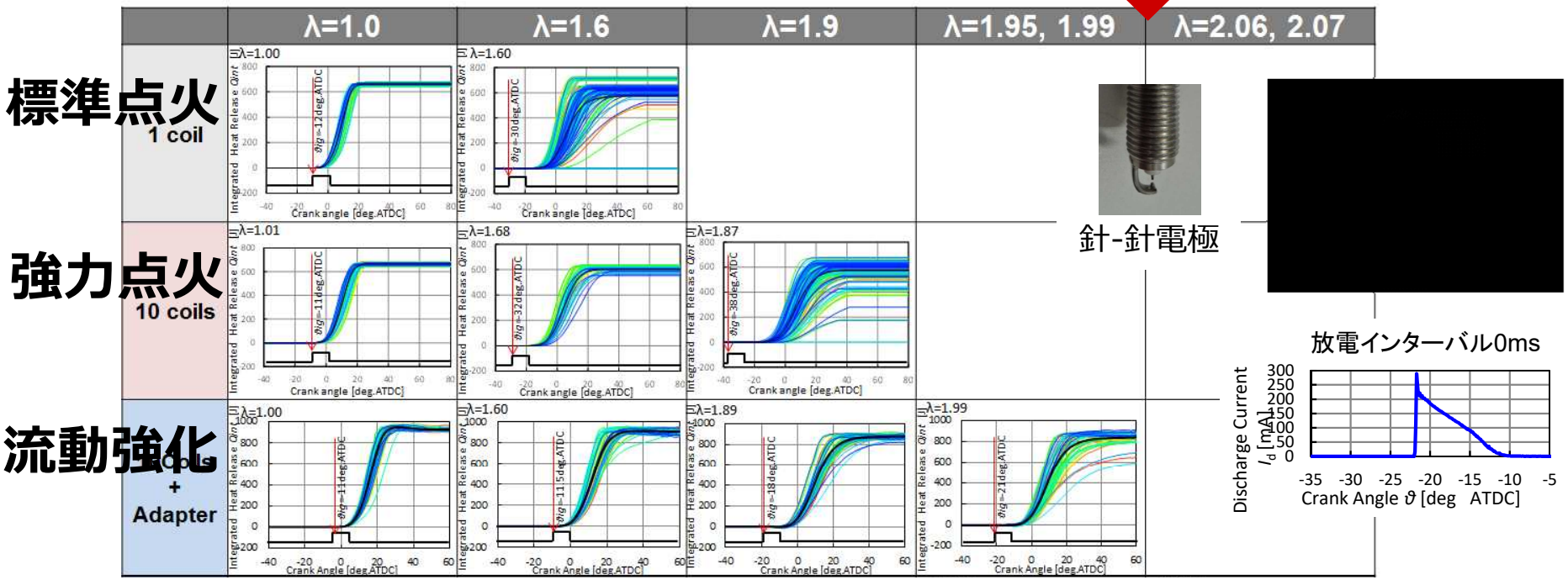
強力点火とタンブル流動の効果





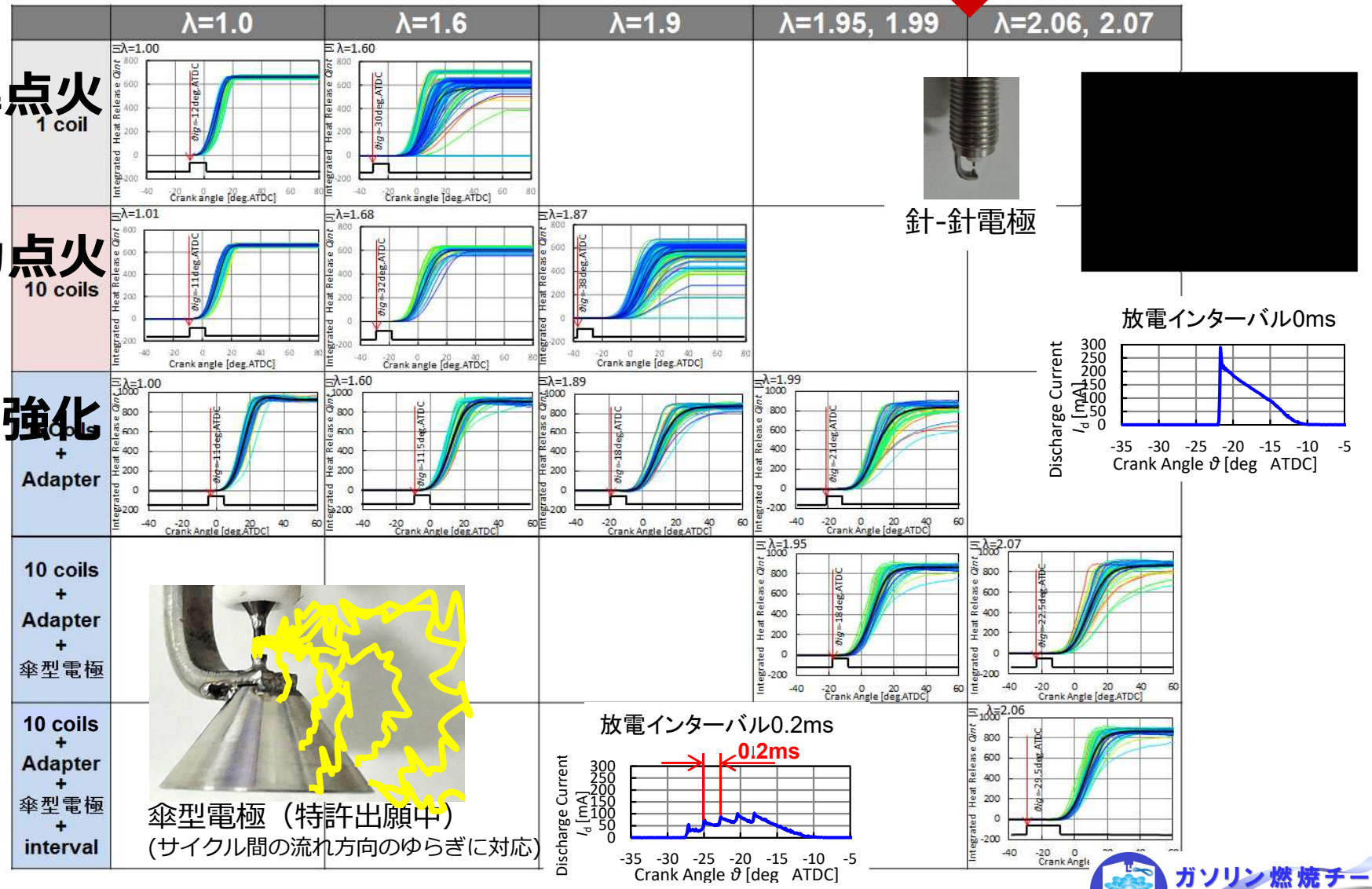
強力点火とタンブル流動では超えられない λ＝2.0の壁

Strong ignition（10 coils）＋Strong Tumble flow up to 30m/s　λ=2.0

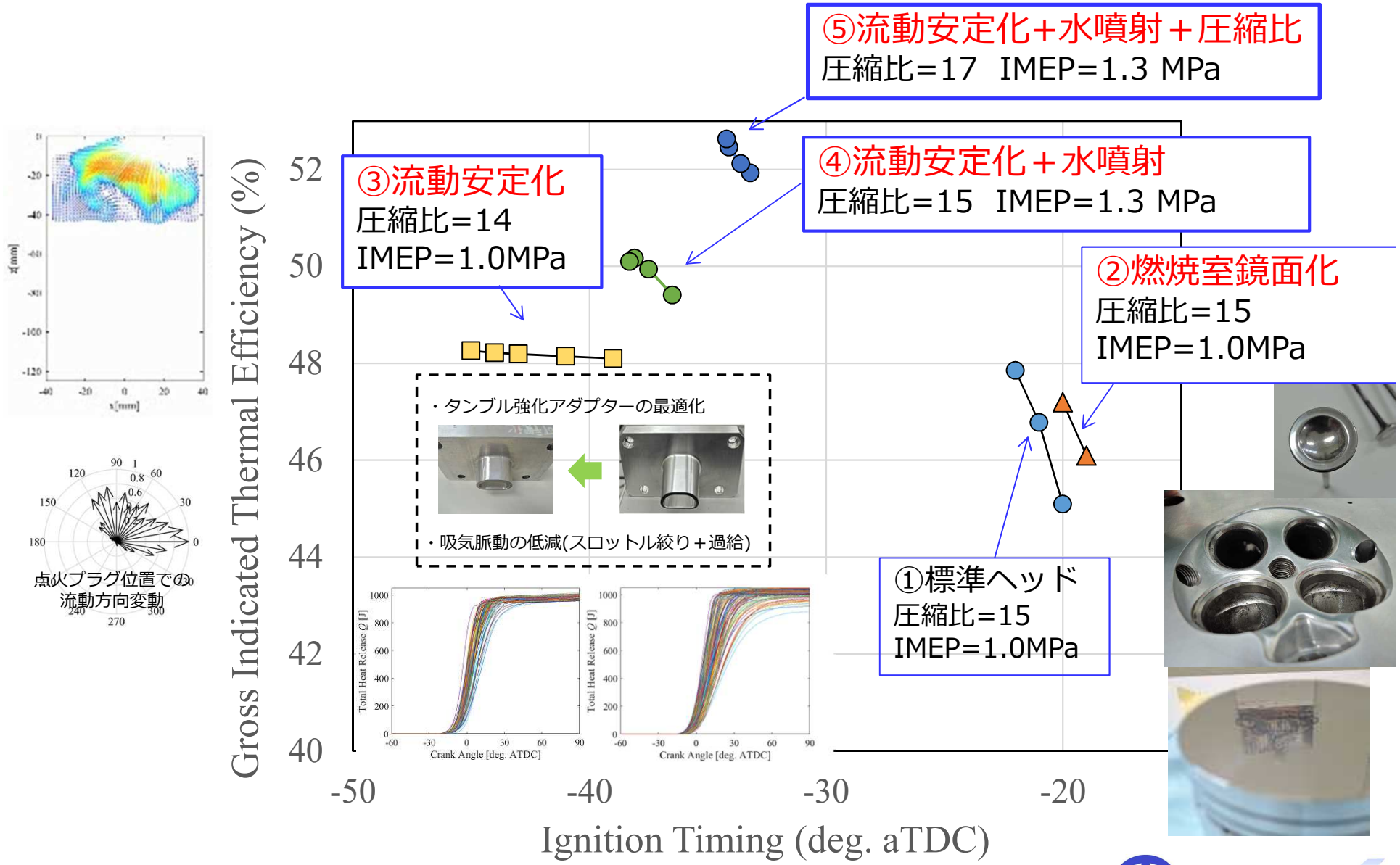


強力点火とタンブル流動では超えられない λ＝2.0の壁

Strong ignition（10 coils）＋Strong Tumble flow up to 30m/s　λ=2.0



チームで提案された熱効率向上要素技術　2018年度



ＳＩＰ革新的燃焼技術 最終公開シンポジウム
ガソリン燃焼チーム 研究成果報告

2019年1月28日
東京大学 安田講堂

着火向上班

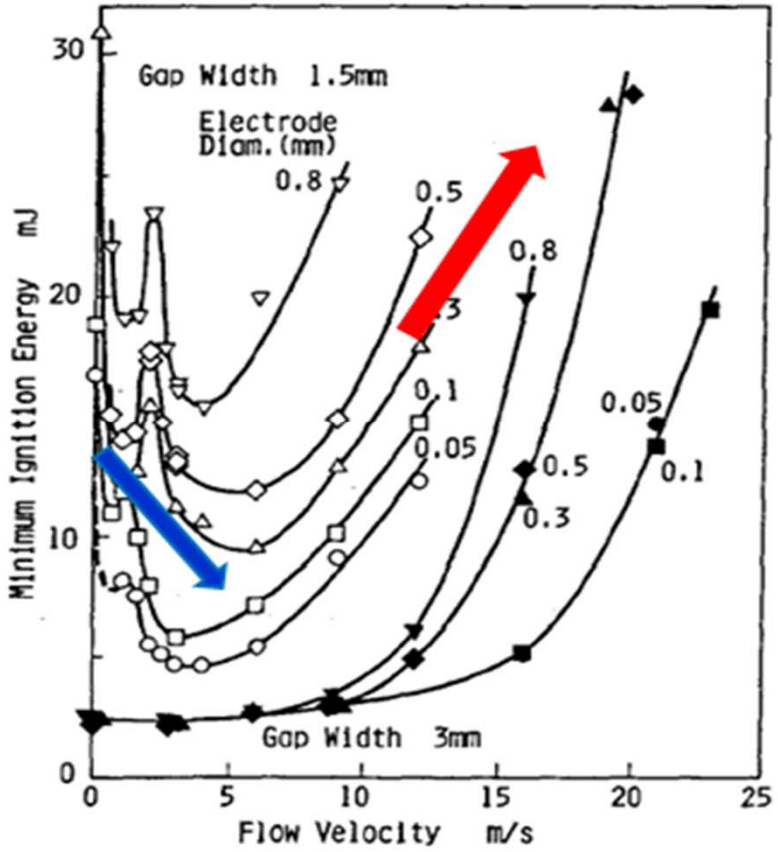
超希薄・高流動・高EGR条件下で着火可能な点火システムの開発と点火モデルの確立

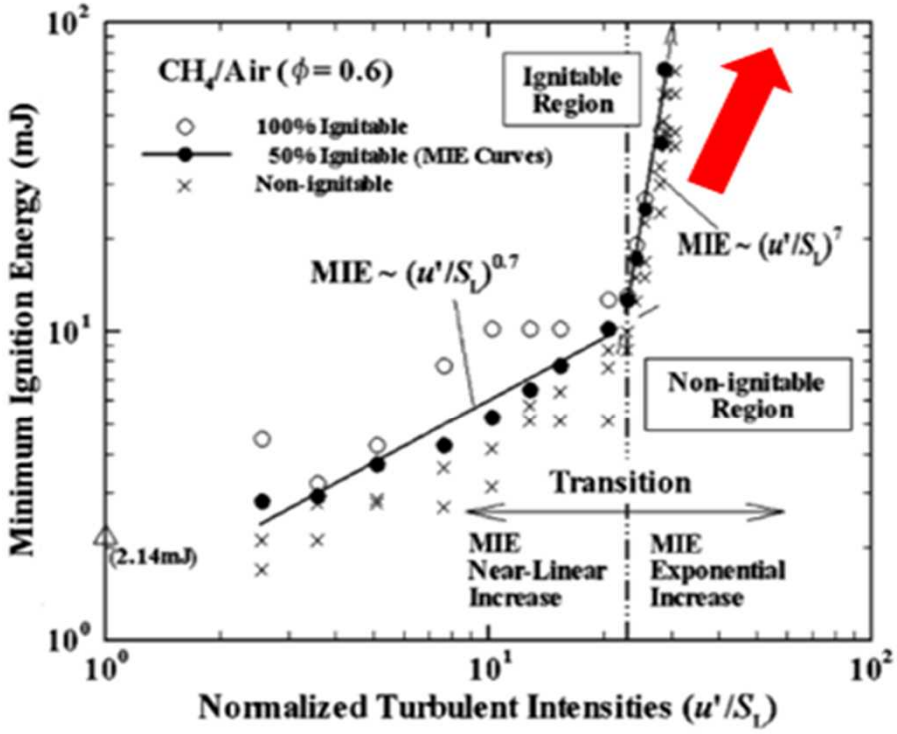
班長 東京大学　津江光洋

ガソリン燃焼チーム　着火向上班の研究目標

目標：超希薄，高EGR，高流動場，過給条件下において，
安定した点火が可能な点火コンセプトの構築

- 極限条件下における火花点火機構の詳細解明
- 計測結果および物理化学的解析に基づく点火モデルの構築





点火に必要なエネルギーは流速，
乱れ強さとともに増大

ガソリン燃焼チーム　着火向上班の研究体制

01 東京大
流動場における点火成否把握
各種点火系特性検討

03 岡山大
流動場および放電・火炎伝播挙動計測
プラズマ計測

02 日本大
流動場における放電路計測
電流電圧波形と放電路の関係

04 東工大
DNSによる着火解析
電極近傍の流動・火炎挙動計測

超希薄・高流動場・高EGR・高過給条件下における点火挙動解明

ガソリン燃焼チーム　着火向上班の研究連携

超希薄・高流動場・高EGR・高過給条件下における点火挙動解明

火炎伝播促進班
燃料・ノック班

点火モデル構築

ばらつき縮減/モデル班
09千葉大

CAEチーム
大阪大

GT-Power

HINOCA

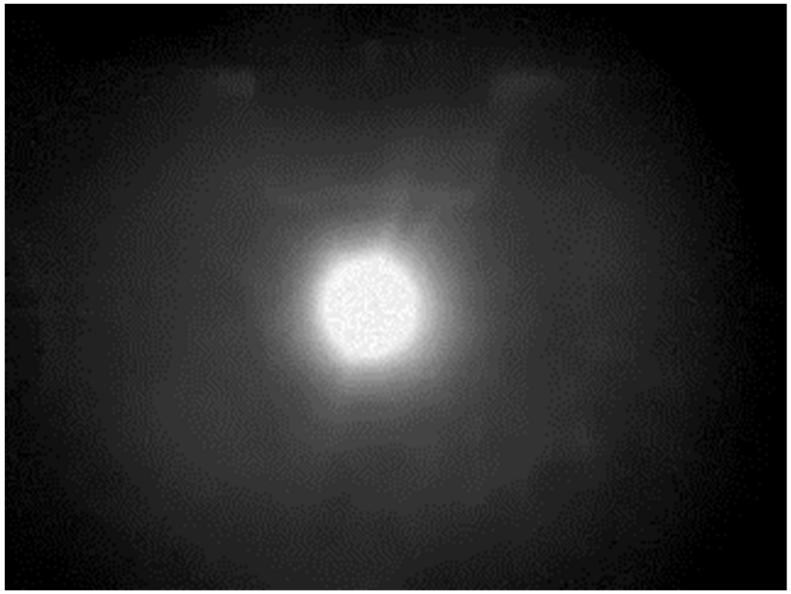
スーパー点火コンセプト
・放電経路の伸長
・放電時間の長期化
・放電経路の安定化

検証

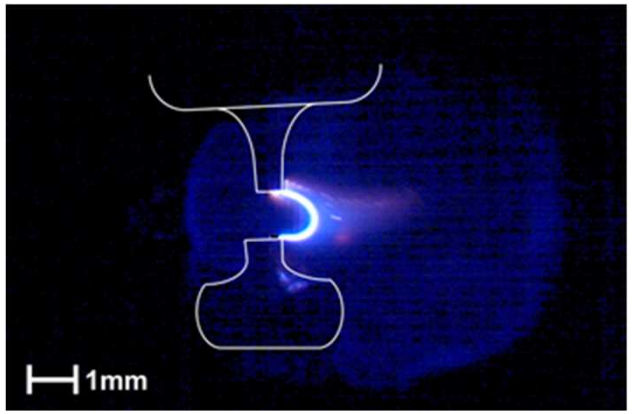
SIP単気筒エンジンによる実証
総括班　00慶応大

超希薄流動混合気における放電経路の挙動と点火特性

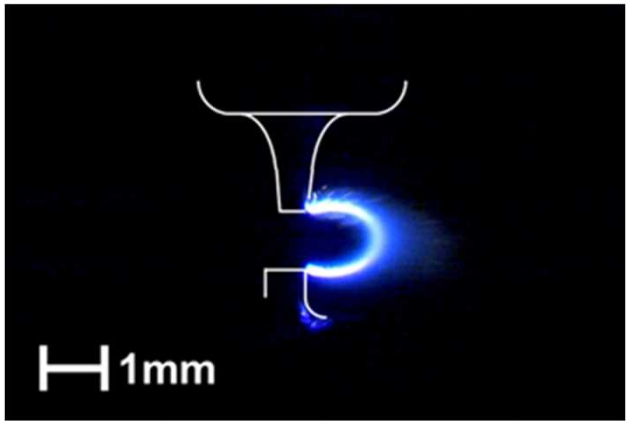
放電経路の伸長と短絡,
再放電挙動の発生



高流動場(18.5m/s)
における放電路挙動
02日大



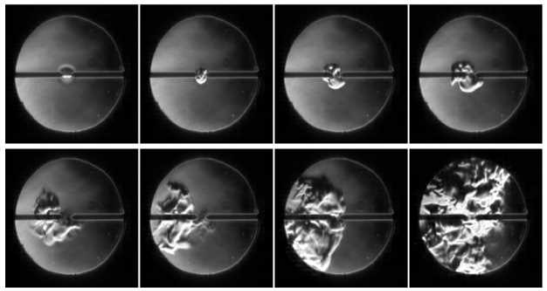
当量比0.8
放電直後に
火炎核発生

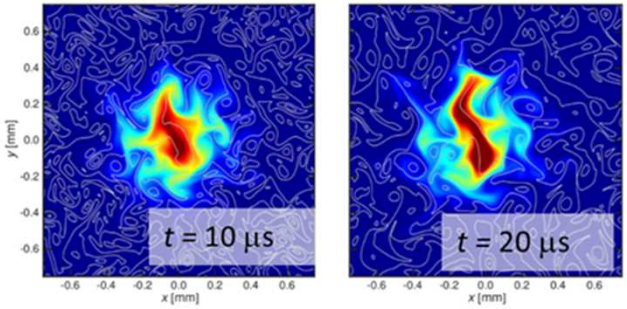


当量比0.6
放電経路の
周囲から
火炎核発生

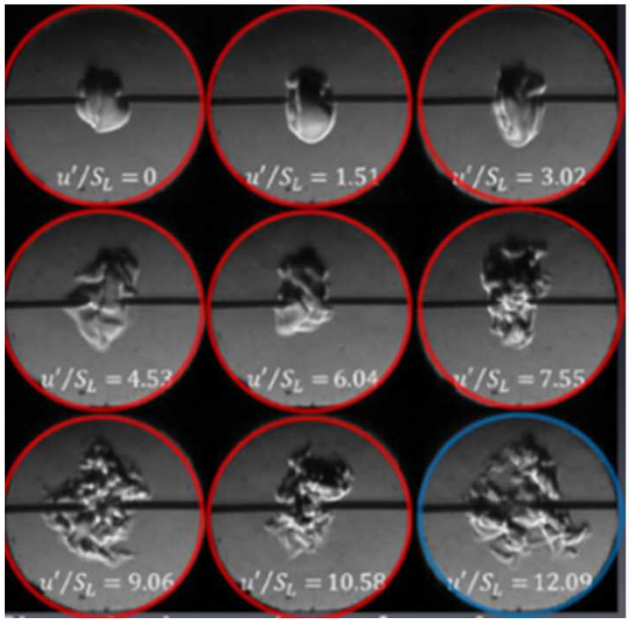
放電路・火炎核の
同時可視化 03岡山大

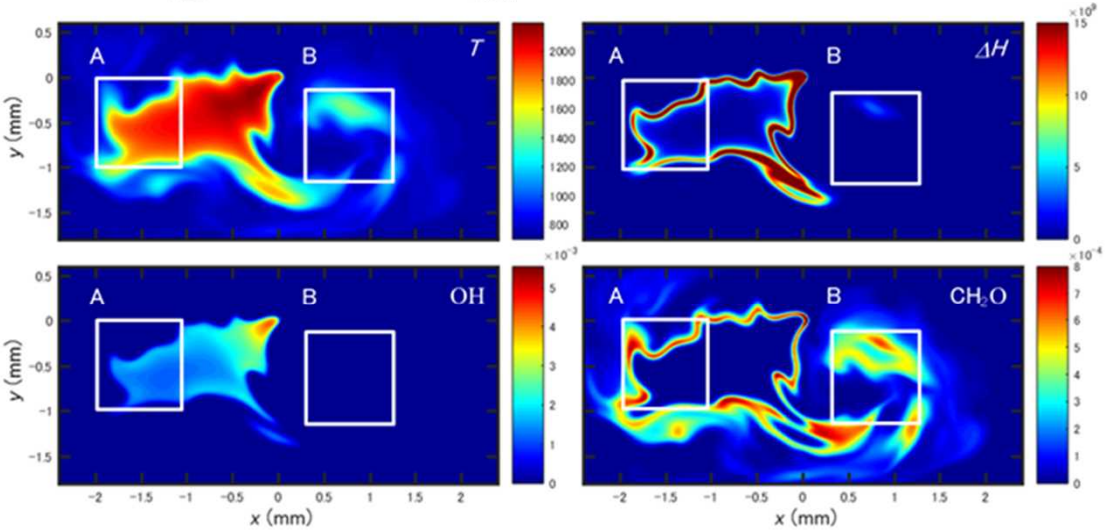
超希薄流動混合気中の火炎核成長と消炎挙動





乱流場における
火炎核成長挙動
（DNS計算）
04東工大



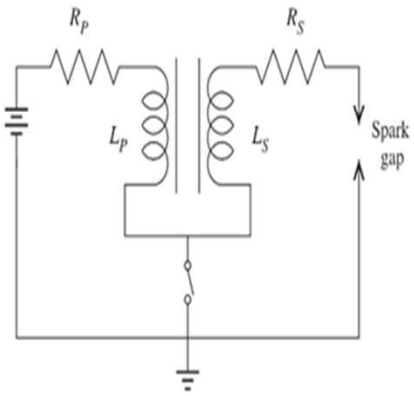


乱流場における火炎核
成長挙動観察 01東大

領域A：主要な反応領域.
一般的な層流伝播火炎と同様
領域B：分断された反応領域.
消炎過程にある可能性

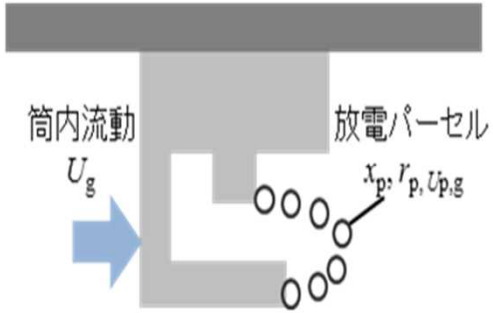
超希薄・高流動場における放電と火炎核成長モデル

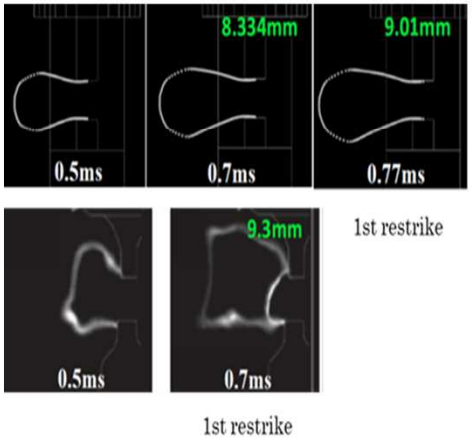
電気回路モデル



$$V_{gc} = 40460 l_{spk} i_s^{-0.32} (p/p_0)^{0.51}$$

放電パーセルモデル





火炎核成長モデル

$$\frac{dm_p}{dt} = 4\pi \cdot r_p^2 \cdot \rho_u \cdot \left(s_T + \frac{\rho_k}{\rho_u} s_{plasma} \right),$$

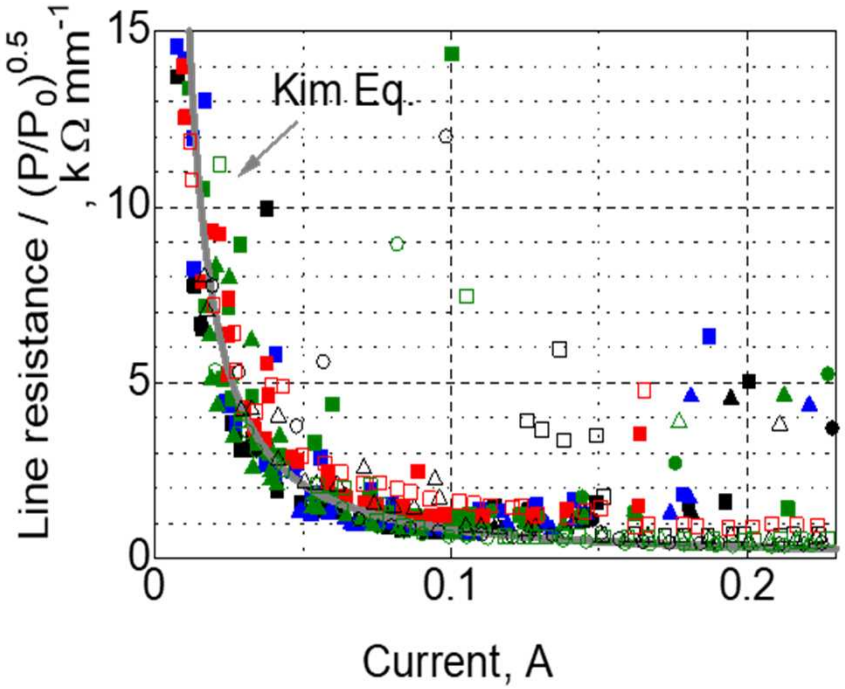
$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{\rho_u}{\rho_b} s_T + s_{plasma},$$

$$S_L = a\phi^b exp^{-c(\phi-d)^2} \left(\frac{p}{0.5}\right)^{e+f\phi+g\phi^2} \left(\frac{T}{450}\right)^{h+i\phi+j\phi^2}$$

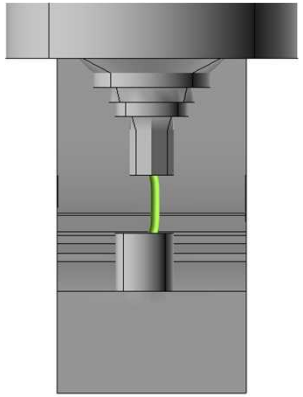
点火モデルの概要（HINOCA, GT-Power 共通）

01東大 02日大 03岡山大 CAEチーム大阪大

超希薄・高流動場における火花点火挙動のモデル HINOCA

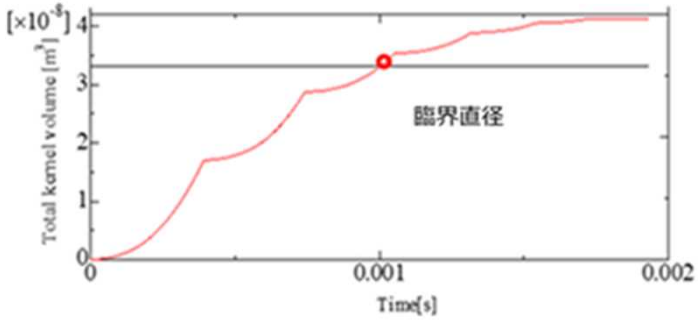


$$V_{gc} = 40460 l_{spk} i_s^{-0.32} (p/p_0)^{0.51}$$

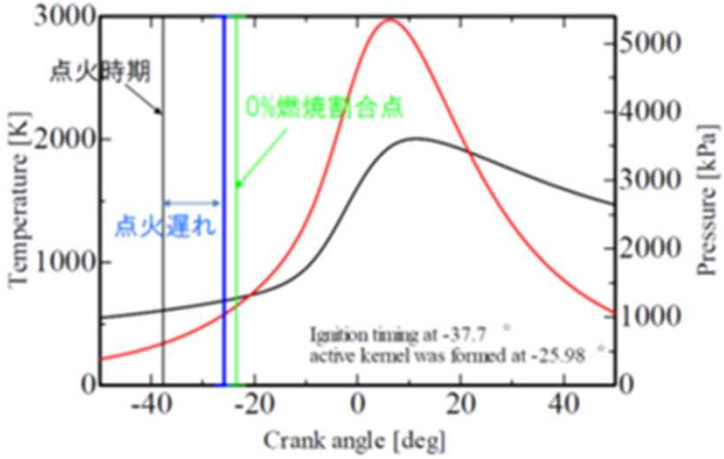


Kimの式妥当性検証 02日大　　放電路挙動 実験と計算 03岡山大

超希薄・高流動場における火花点火挙動のモデル GT-Power

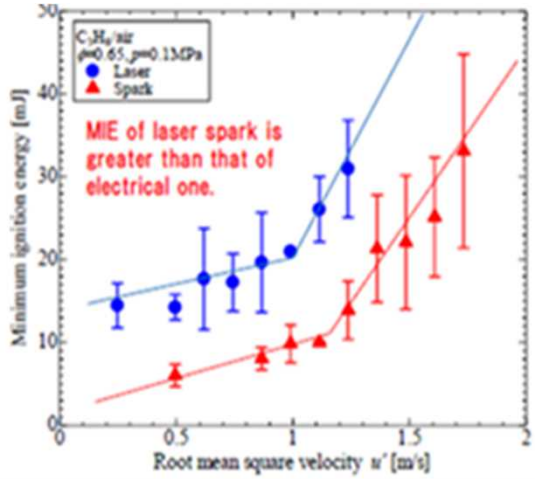


火炎核成長過程

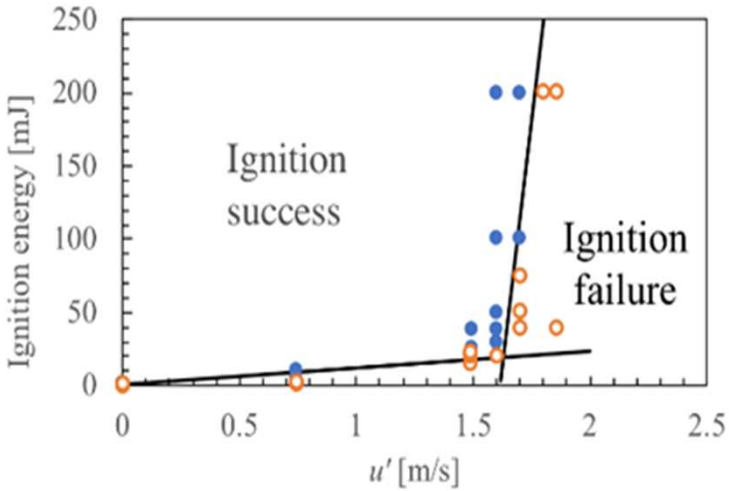


実験結果との比較

GT-Power用点火モデル
計算結果 01東大



実験
01東大

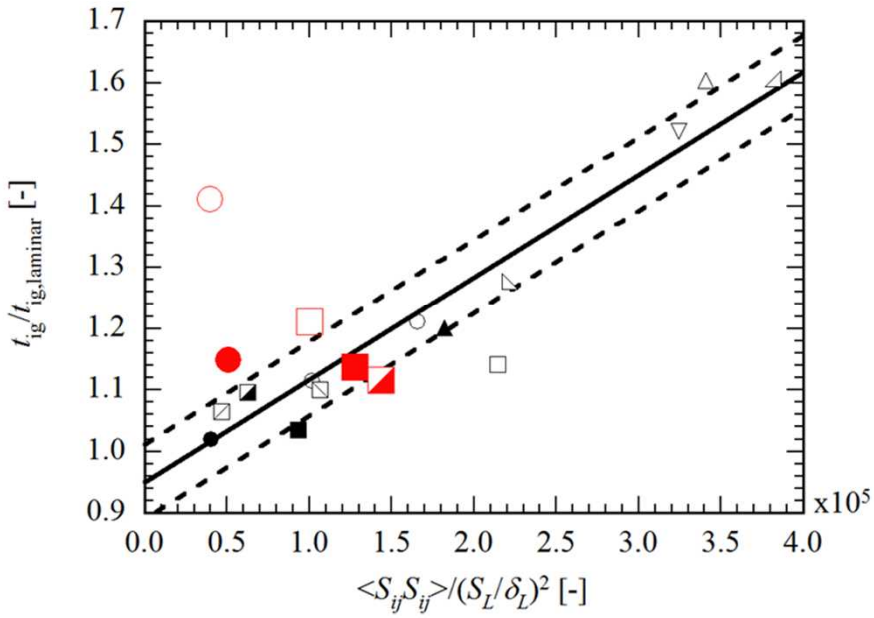


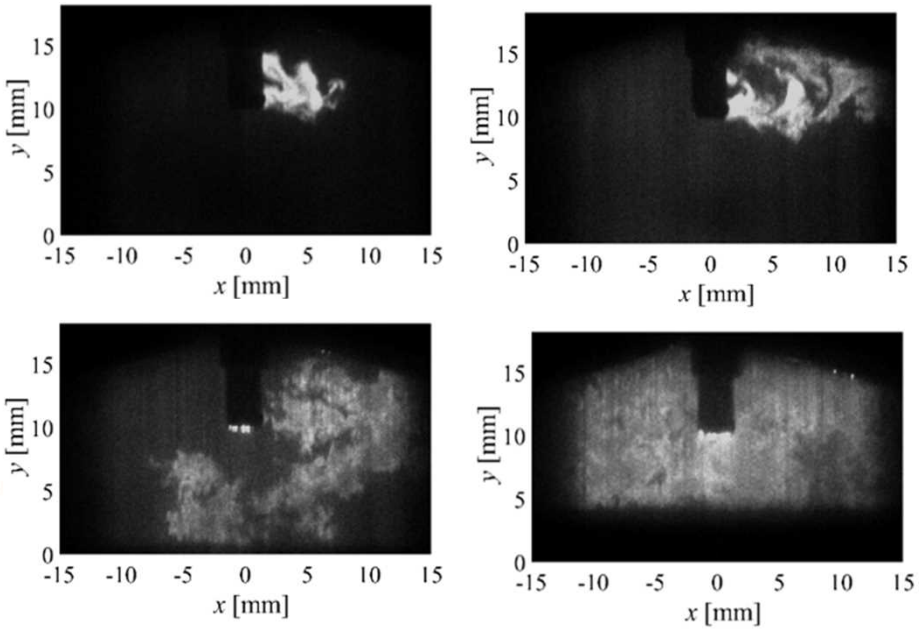
計算
CAEチーム
大阪大_堀

当量比0.68
最小点火エネルギー
と乱れ強さの関係

着火向上班 今後の研究展望

高度数値計算と最先端計測手法による点火機構の詳細解明
放電特性と点火性能の関連性解明と高性能点火コンセプト創出



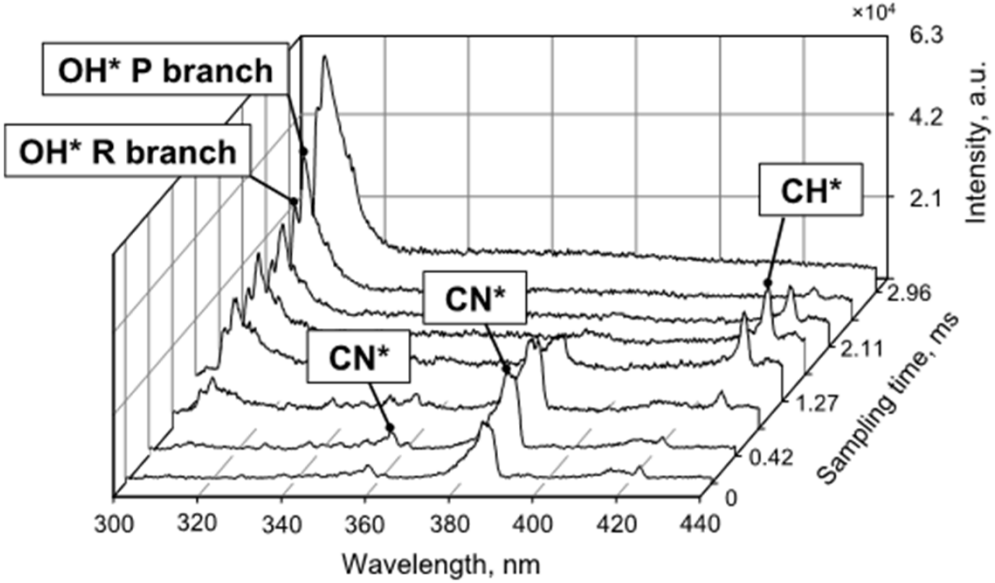


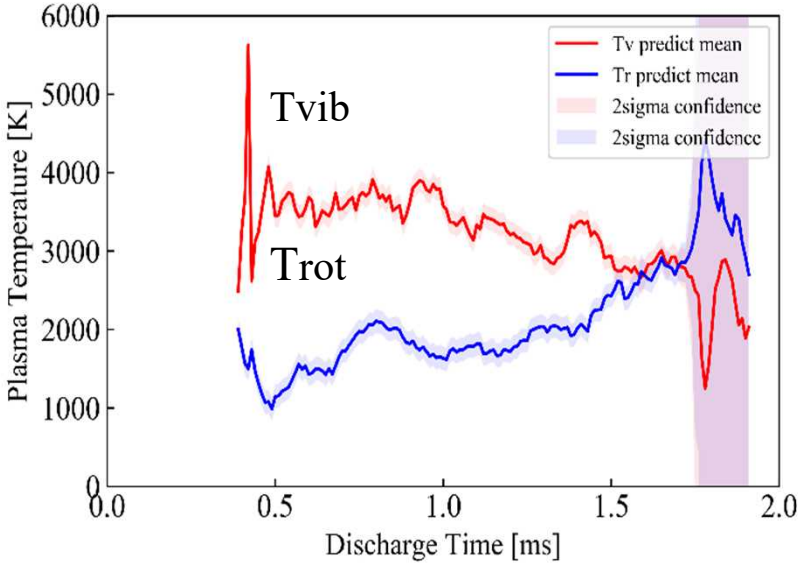
歪み速度と点火遅れ時間の関係
（DNS計算）04東工大

筒内火炎核成長挙動計測
（OH-PLIF) 04東工大

ガソリン燃焼チーム　着火向上班 今後の展望

高度数値計算と最先端計測手法による点火機構の詳細解明
放電特性と点火性能の関連性解明と高性能点火コンセプト創出





時系列分光スペクトル計測（火花放電／初期火炎核）03岡山大

プラズマ温度計測（バリア放電） 01東大

ＳＩＰ革新的燃焼技術 最終公開シンポジウム
ガソリン燃焼チーム 研究成果報告

2019年1月28日
東京大学 安田講堂

火炎伝播促進班

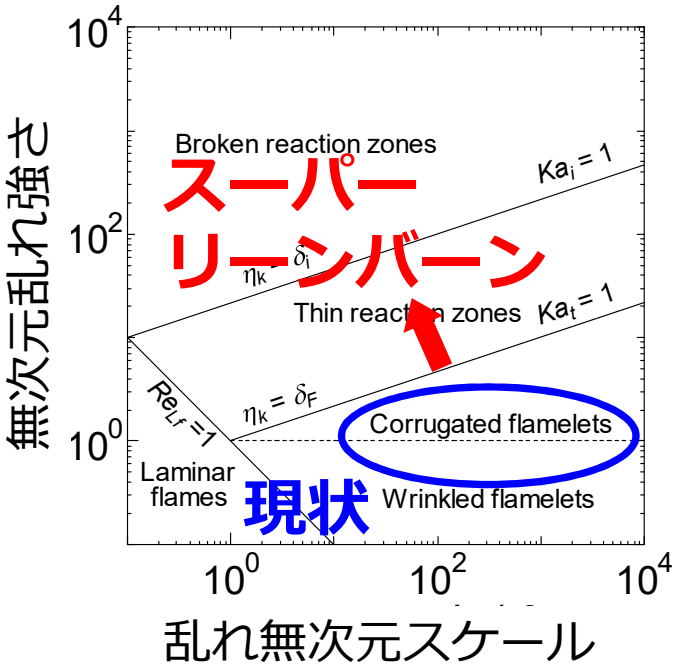
タンブル流の最適化・高強度乱流下での燃焼現象解明に基づく火炎伝播の促進と新モデル提案

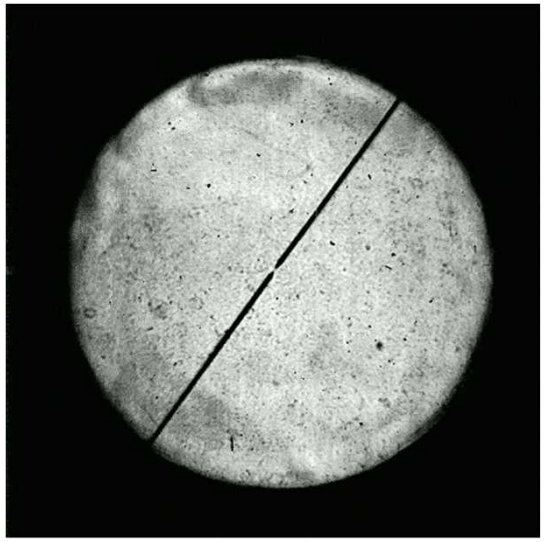
班長 九州大学　北川敏明

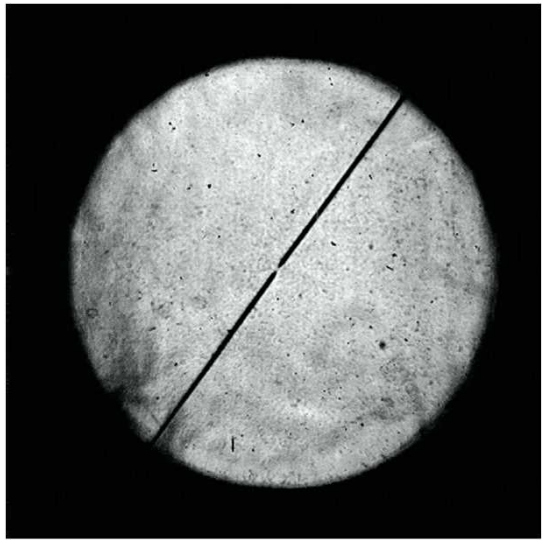
スーパーリーンバーン技術

➢燃焼速度低下を克服する高強度流動・乱流による燃焼促進

高強度乱流下での予混合火炎構造の大幅な変化







乱流燃焼ダイアグラム

超希薄燃焼促進技術の創出と燃焼モデルの確立

ガソリン燃焼チーム　火炎伝播促進班の目標

➢ スーパーリーンバーン時の火炎伝播特性の解明

・乱流火炎解析の基礎となる層流火炎の詳細解明

・高流動場での乱流火炎の詳細解明

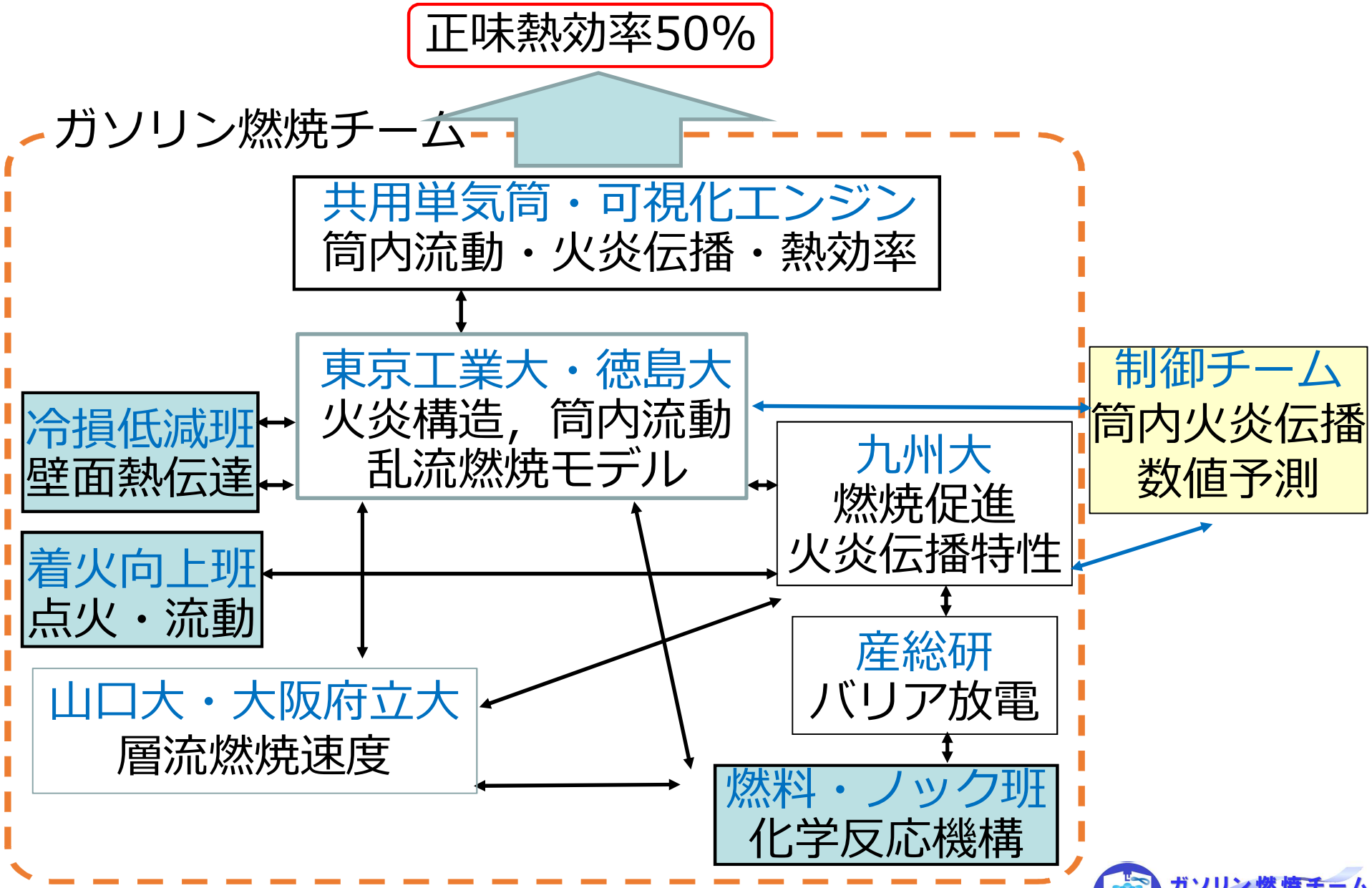
➢ 燃焼促進技術・燃焼モデルの構築

・流動強化による燃焼促進

・超希薄・高EGR下での層流燃焼速度式の提案

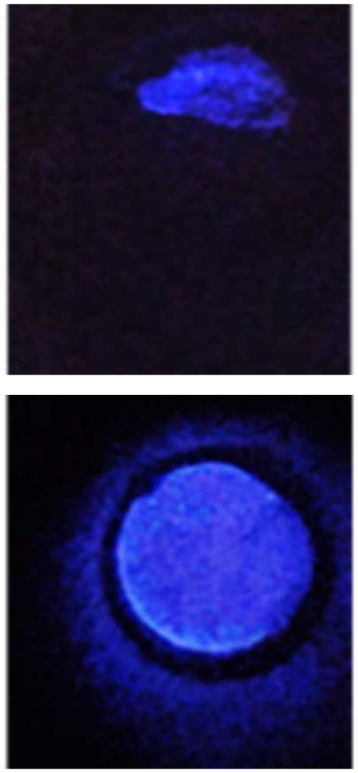
・現象理解に基づく乱流燃焼モデルの構築

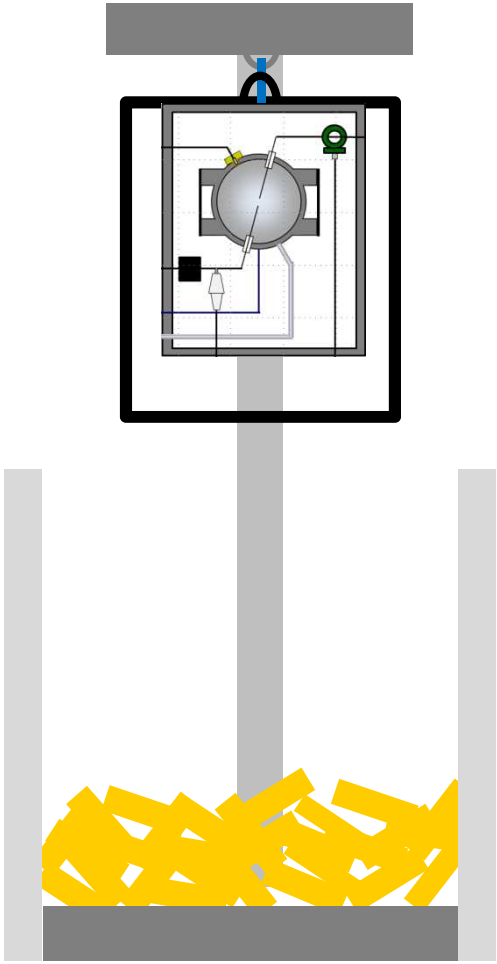
火炎伝播促進班のチーム内外との研究連携



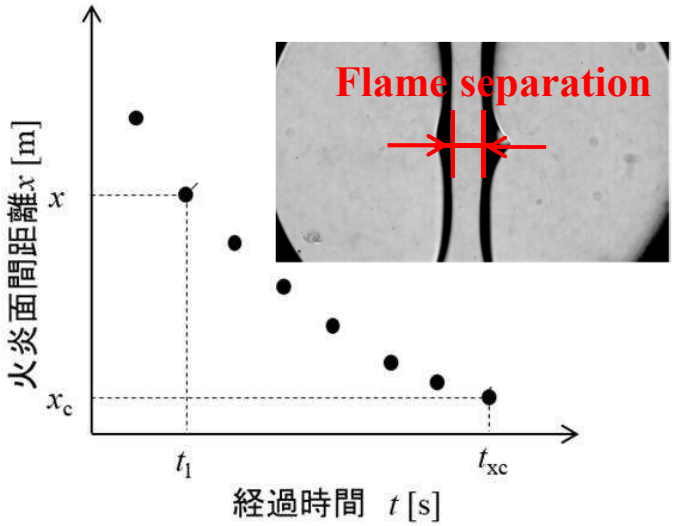
スーパーリーン条件でのSIPサロゲートガソリンの層流燃焼速度を微小重力下、 ダブルカーネル法により計測

微小重力実験





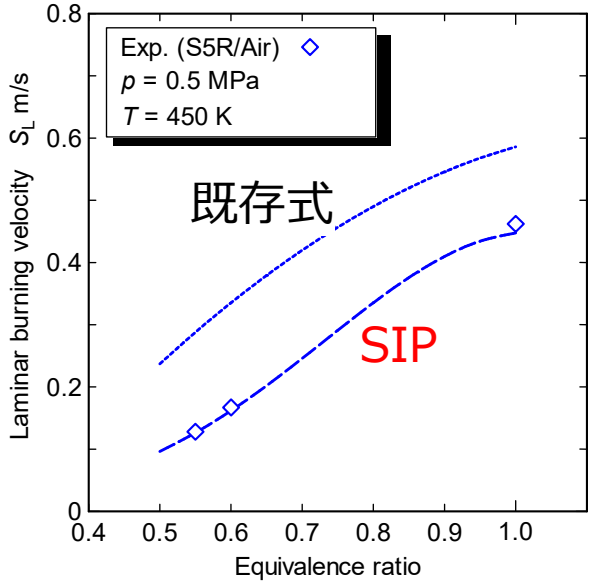
ダブルカーネル法

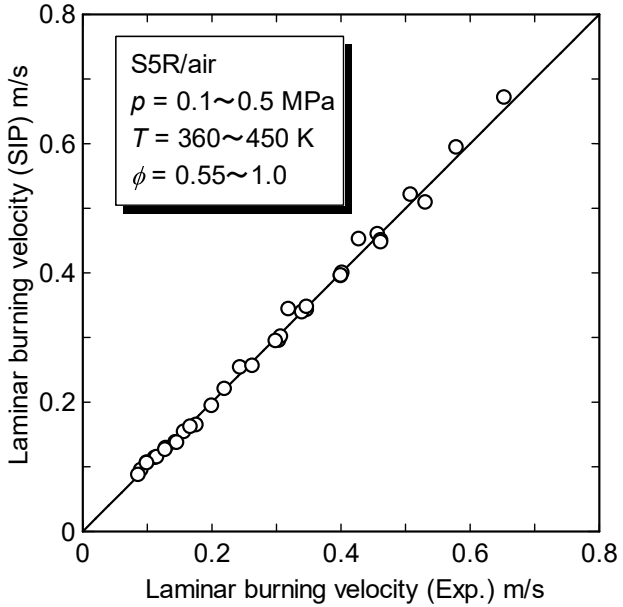


超希薄域での燃焼速度実験式の構築 07阪府大 05山口大

従来にないスーパーリーン条件での計測に成功，実験式の高精度化により、1D解析やHINOCAの予測精度向上

$$S_L = a\phi^b \exp\{-c(\phi - d)^2\}\left(\frac{p}{0.5}\right)^{e+f\phi+g\phi^2}\left(\frac{T}{450}\right)^{h+i\phi+j\phi^2}$$



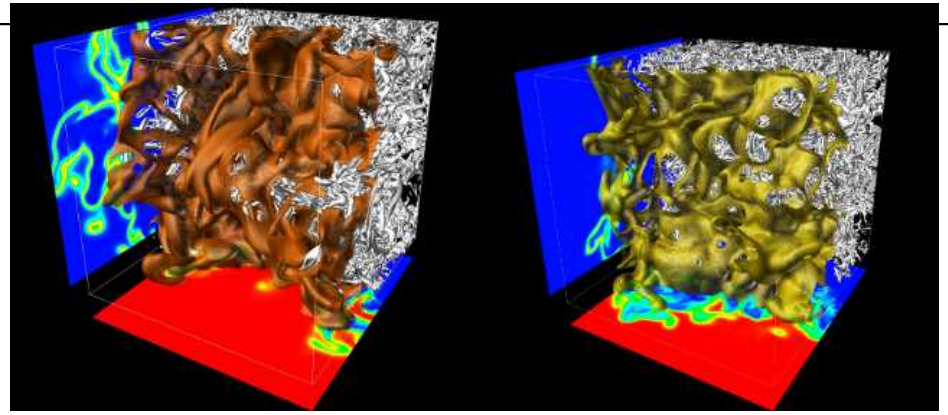


既存の層流燃焼速度算出値より高精度

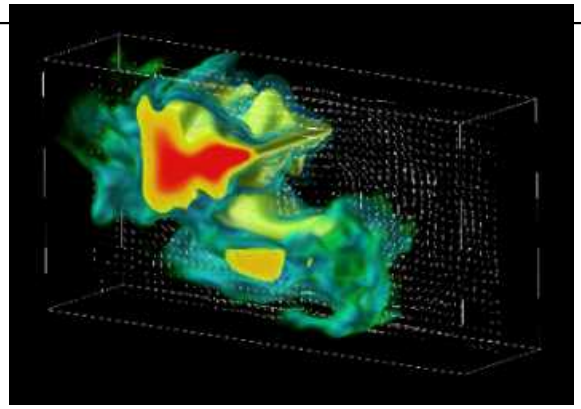
層流燃焼速度式実験値との差は10%未満

乱流火炎面特性の解明

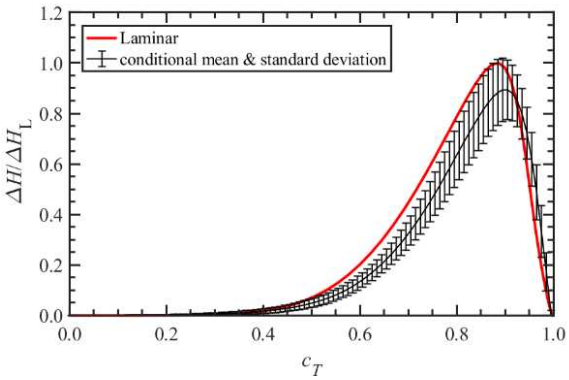
希薄・高EGR率、閉空間内の着火・火炎伝播混合現象をDNSにより明らかにし、乱流燃焼モデルの検証、新規モデル開発を可能とした。

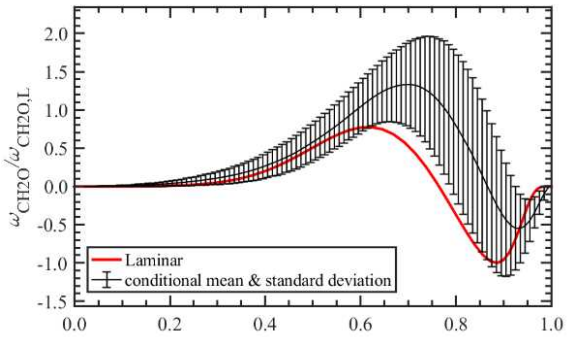


Thin reaction zones　Broken reaction zones

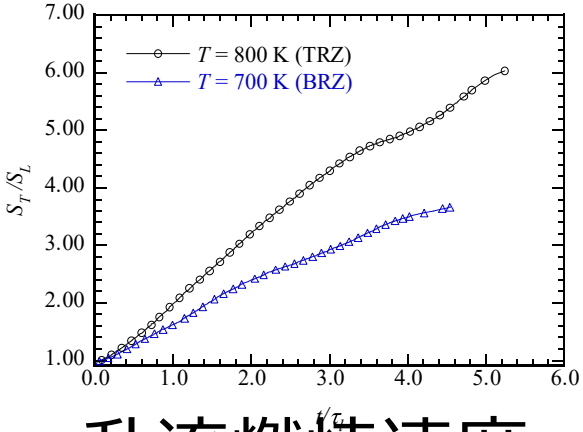


密閉空間でのDNS





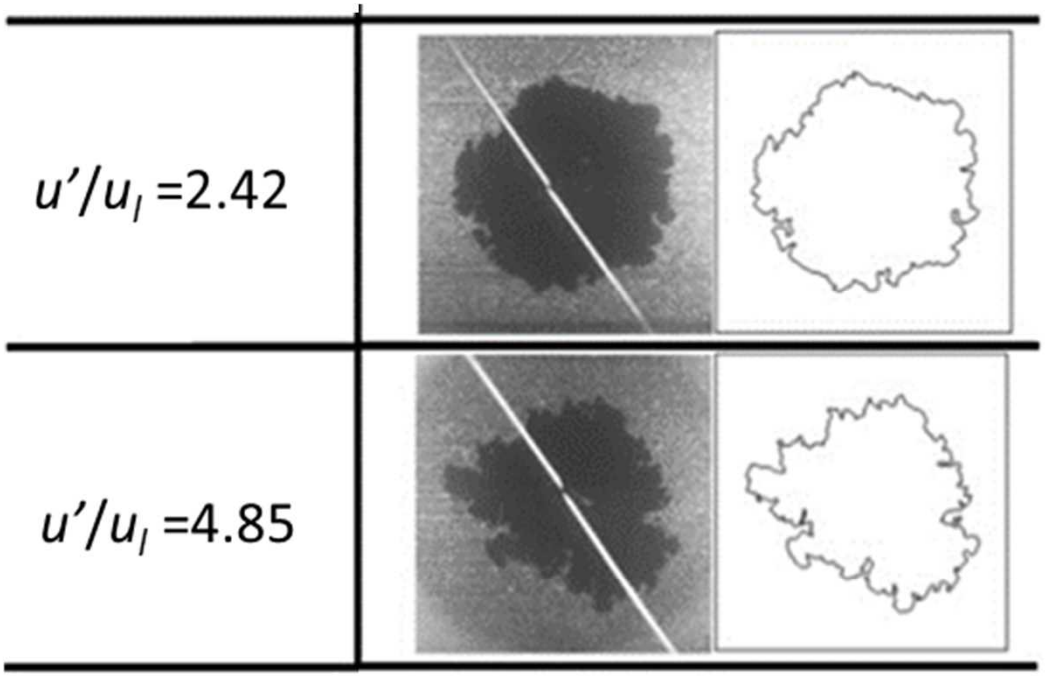
層流火炎と異なる火炎構造

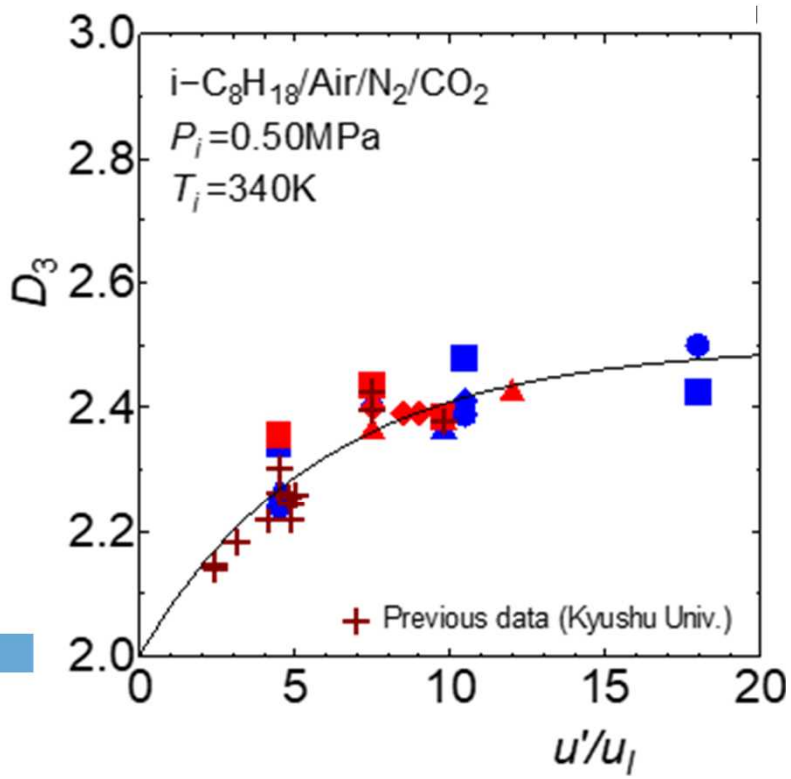


乱流燃焼速度

乱流火炎面フラクタル特性

定容容器を用いた実験から、乱れ強さ、乱れのスケール等広範な条件から火炎面形状のフラクタル特性を得た。





$$\frac{A_T}{A_L} = (\epsilon_o/\epsilon_i)^{(D_3-2)}$$

実験式

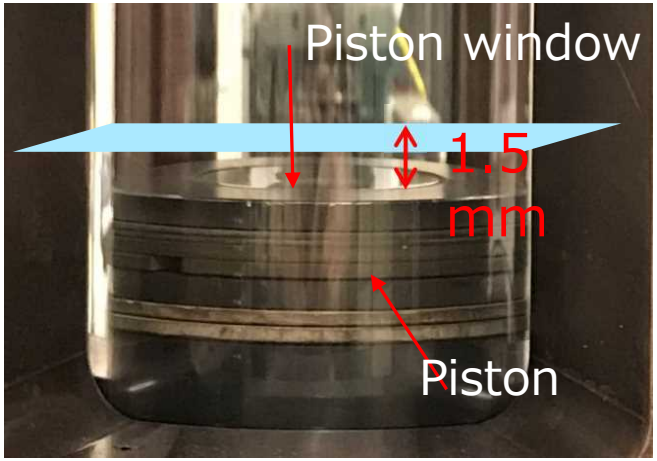
$$D_3 = 2.5\left(1 - exp\left(-0.17(u'/u_l + 9.5)\right)\right)$$

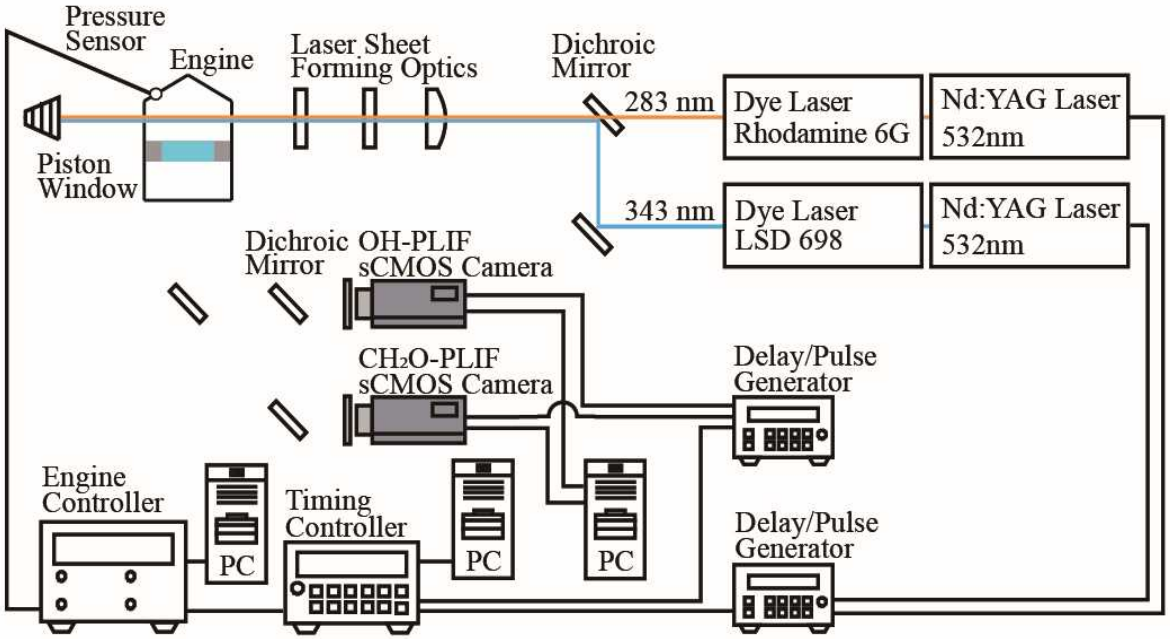
SIP可視化エンジン希薄火炎のLIF計測　04東工大

自動車用エンジンを対象としては世界最高圧力環境にて，CH_2O-OHラジカルの平面レーザ誘起蛍光法計測を、SIP可視化エンジンにて行った。

燃料: イソオクタン

当量比: 1.0, 0.8, 0.6





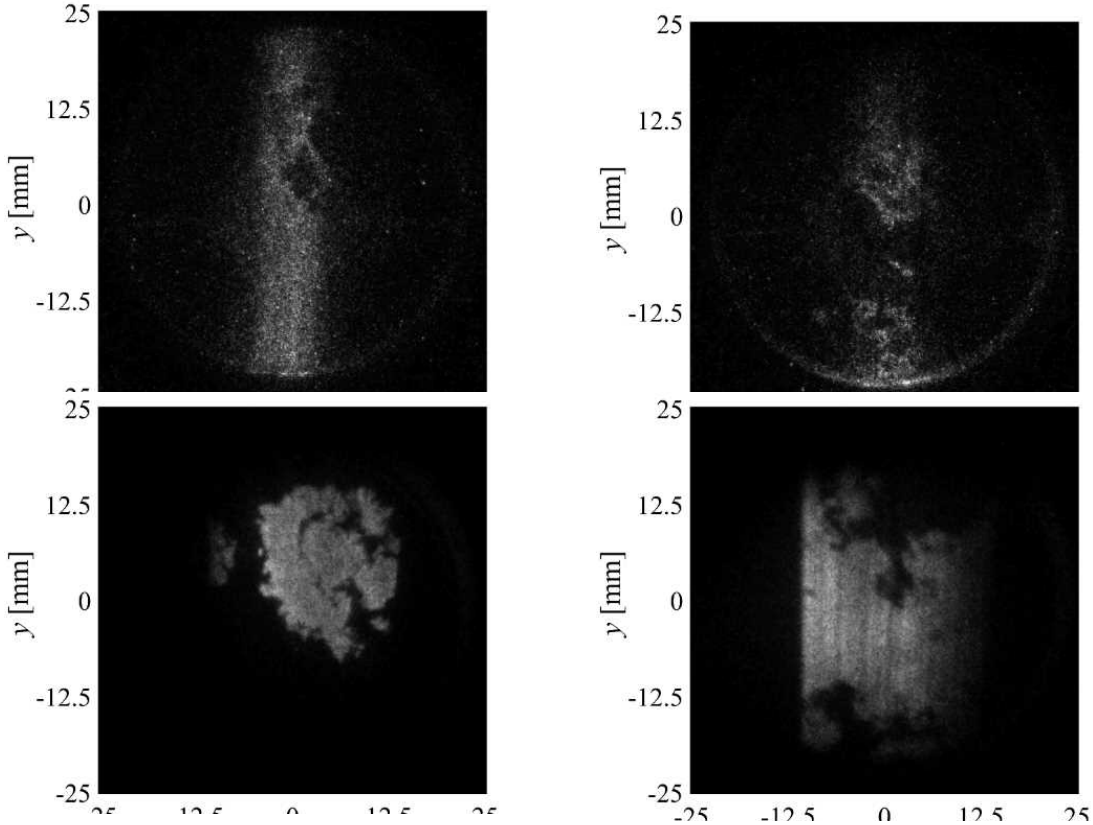
SIP可視化エンジン

SIP可視化エンジン希薄火炎のLIF計測　04東工大

可視化エンジンにて，CH_2OおよびOHラジカルの平面レーザ誘起蛍光法計測にチャレンジ、着火・火炎伝播特性に対するタンブル流動および当量比の影響を解明

CH_2O

OH



当量比1.0，CAD0°　当量比0.6，CAD0°

超希薄域まで適用可能な燃焼モデル構築

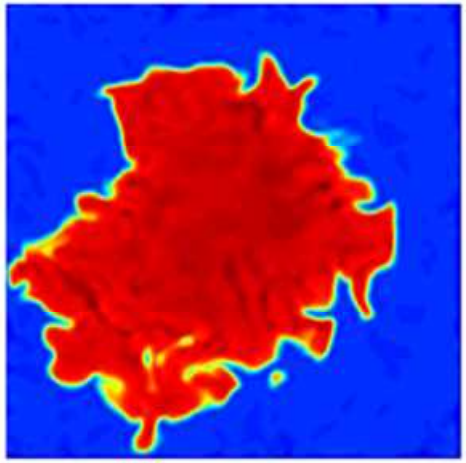
国産モデルとして唯一の高精度な格子幅自己認識型フラクタルダイナミックSGS燃焼モデルを開発し検証。

乱流運動の効果

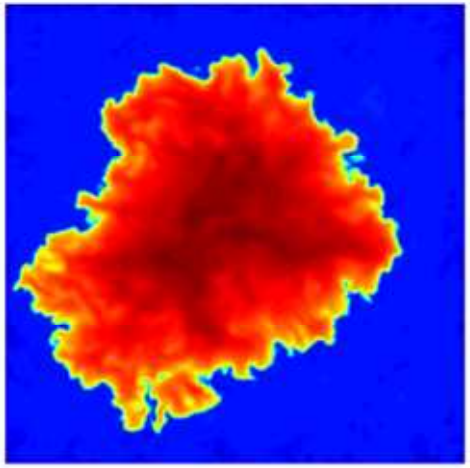
流体の膨張の効果

$$\frac{S_T}{S_L}=\frac{A_T}{A_L}=\left(\frac{\alpha^4\nu^3}{2\sqrt{2}C_s^2\Delta^6}\right)^{\frac{2-D_3}{4}}\left(\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij}-\mathrm{div}(\tilde{\mathbf{u}})^2\right)^{\frac{-3(2-D_3)}{8}}+\frac{\delta_\Delta}{\delta_L}\frac{\mathrm{div}(\tilde{\mathbf{u}})}{\left(\mathrm{div}(\mathbf{u})_L\right)\big|_{G=G_0}}$$

検証



モデル



DNS

04東工大
08徳島大

フラクタルダイナミックSGS燃焼モデルの簡易版はHINOCAに実装。補正項のモデル化で、ガソリン燃焼に適用可能とした。

乱流運動の効果

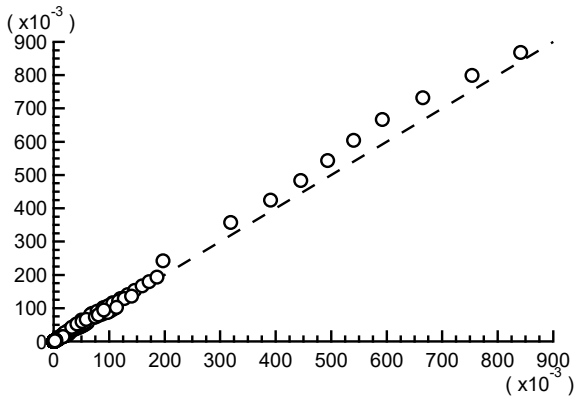
流体の膨張の効果

$$\frac{S_T}{S_L}=\frac{A_T}{A_L}=\left(\frac{\alpha^4\nu^3}{2\sqrt{2}C_s^2\Delta^6}\right)^{\frac{2-D_3}{4}}\left(\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij}-\mathrm{div}(\tilde{\mathbf{u}})^2\right)^{\frac{-3(2-D_3)}{8}}+\frac{\delta_\Delta}{\delta_L}\frac{\mathrm{div}(\tilde{\mathbf{u}})}{\left(\mathrm{div}(\mathbf{u})_L\right)\big|_{G=G_0}}$$

補正項のモデル化

$$\left\{C_1\frac{(\beta-\alpha)(\gamma+\varphi)^2(1+\varphi)}{(\alpha+\varphi)(\beta+\varphi)}\left(\frac{d\bar{\rho}^*}{dx^*}\bigg|_{x^*=x_f^*}\right)^{-1}\frac{C_{FT}a}{S_L^{\,2}}\right\}\mathrm{div}(\tilde{\mathbf{u}})$$

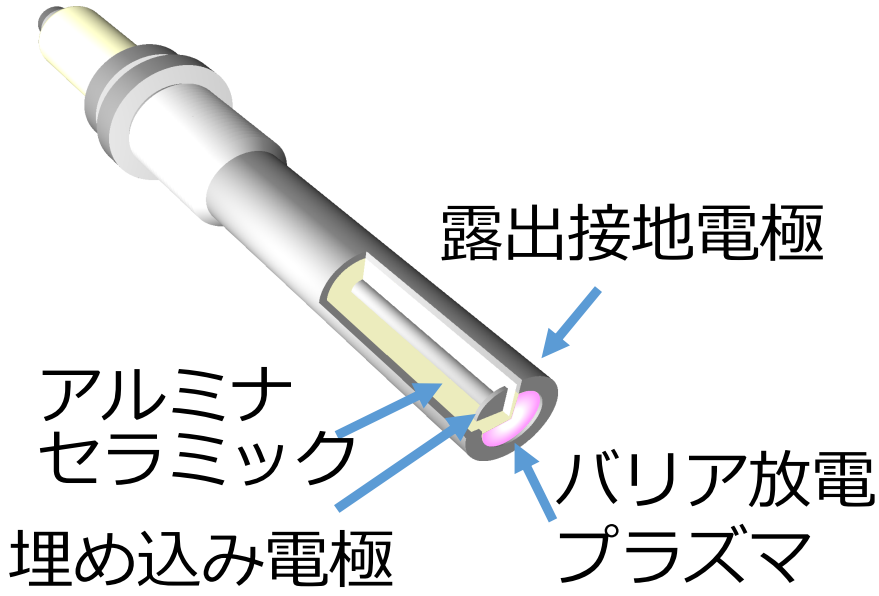
CHEMKINの結果

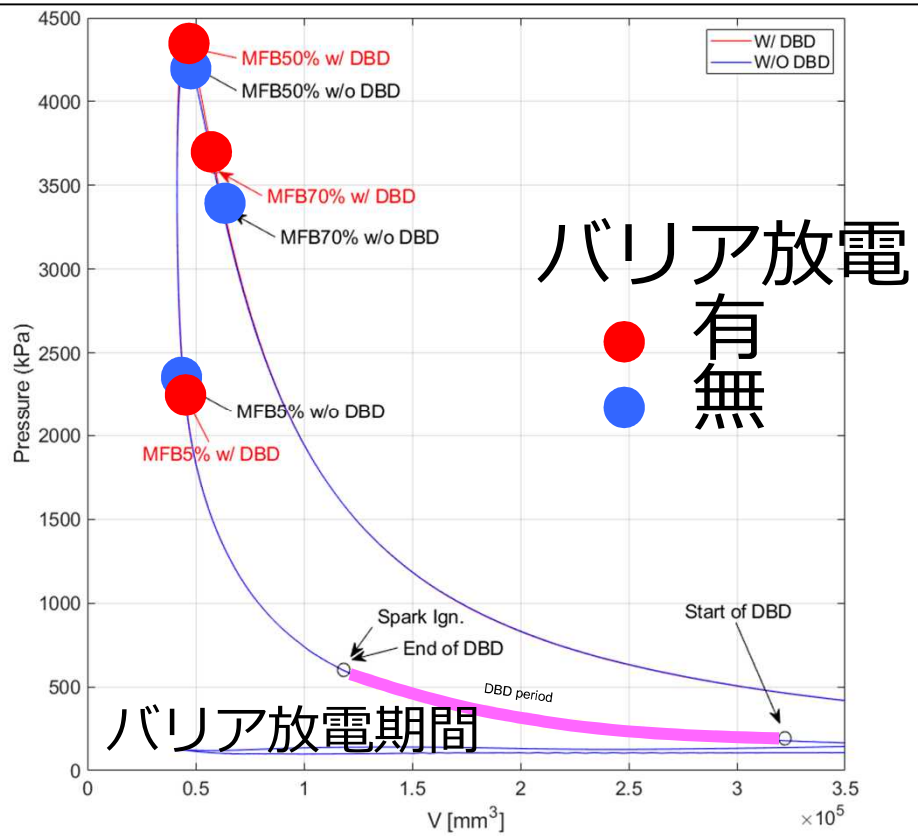


モデルによる予測結果

誘電体バリア放電による燃焼促進

希薄燃焼ガソリンエンジンの筒内で誘電体バリア放電を形成することでエンジン燃焼を促進できることを世界で初めて示した。





バリア放電（DBD）プラグ

火炎伝播促進班の主な成果と今後の展望

層流火炎	07阪府大	従来にない超希薄域までの高精度実験式 EGRの影響予測の精度向上 層流火炎データベース構築
乱流火炎モデル	05山口大	ダブルカーネル法確立 S5R 3.5MPaデータ取得
	06九州大	乱流燃焼速度への乱れのスケールの影響解析 乱流火炎面フラクタル特性実験式
	04東工大	筒内希薄火炎のPLIFによる把握 超希薄火炎の火炎構造解析 FDSGS燃焼モデル高精度化・格子幅自己認識型開発
	08徳島大	FDSGS燃焼モデル膨張の効果のモデル化 ガソリンでの精度向上
燃焼促進	25産総研	誘電体バリア放電による筒内燃焼の促進を確認

- 今後の展望
  - さらなる燃焼促進
  - 乱流燃焼モデルのさらなる領域拡大

ＳＩＰ革新的燃焼技術 最終公開シンポジウム
ガソリン燃焼チーム 研究成果報告

2019年1月28日
東京大学 安田講堂

冷却損失低減班

壁面熱伝達機構の詳細な解明に基づく冷却損失の低減と新モデル提案

班長 東京工業大学 小酒英範

ガソリン燃焼チーム　冷却損失低減班

目標

冷却損失低減による熱効率50%達成

SG1：スパーリーンバーンエンジンにおける壁面熱伝達機構の解明

- 壁面境界層内の速度と温度分布の計測
  慶應大(0)、東工大(4)(10)、農工大(11)
- 閉空間内燃焼場の壁面境界層DNS
  東工大(4)、徳島大(8)

HINOCA-WG：熱伝達モデル検討

- HINOCA用の新たな熱伝達モデルの構築
  大府大(26)、九州大(27)、名工大(28)、慶應大(29)、農工大(11)

SG3：冷却損失評価のための壁面熱流束センサーの開発

都市大(12)、東大(13)、明大(14)

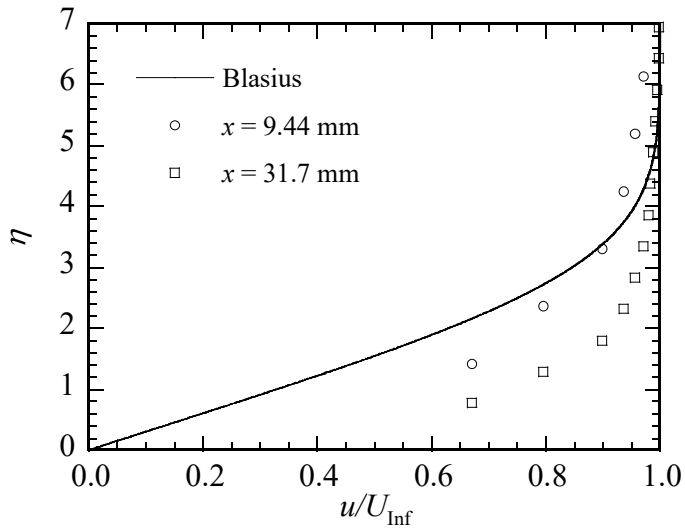
SG2：冷却損失低減技術の開発

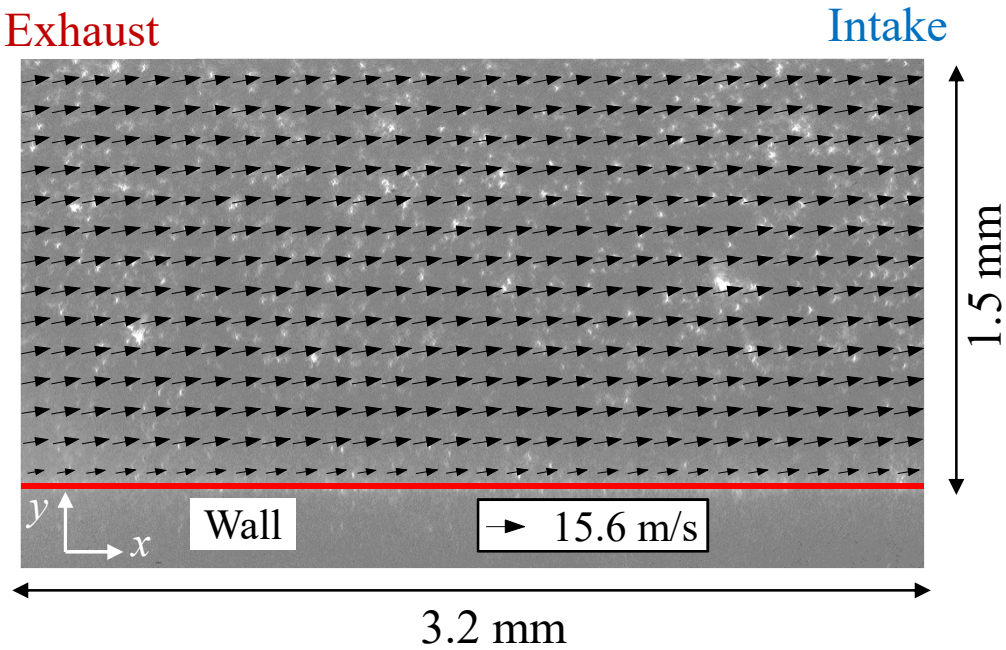
- 超希薄燃焼と水噴射による冷却損失低減
  東工大(10)
- 壁面微細構造を用いた熱伝達制御
  農工大(11)

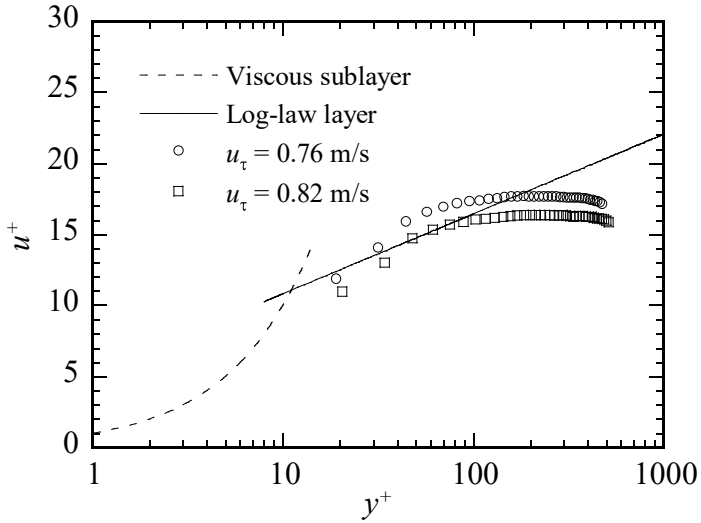
SG1: エンジン内壁面熱伝達の解明　04東工大

SIP可視化エンジンのピストン頂面上の境界層を世界最高レベルのマイクロPIV計測技術にて計測，速度境界層が発達した乱流境界層でも，層流境界層でもないことを世界で初めて明らかにした

公表文献：志村祐康, 吉田真悟, 大沢耕介, 源勇気, 横森剛, 岩本薫, 店橋護, 小酒英範, Micro PIV Investigation of Near Wall Behaviors of Tumble Enhanced Flow in an IC Engine, International Journal of Engine Research (2018)



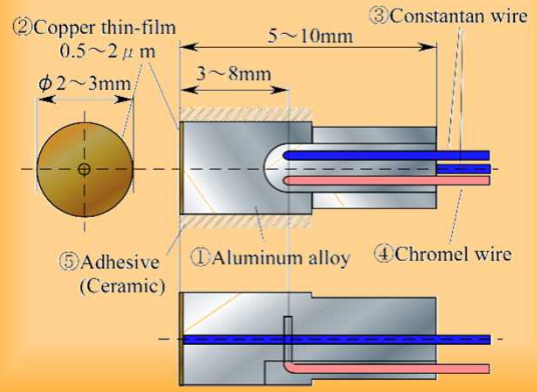




SG3: 壁面熱流束センサーの開発

使用目的・タイプの異なる3種類の熱流束センサを開発

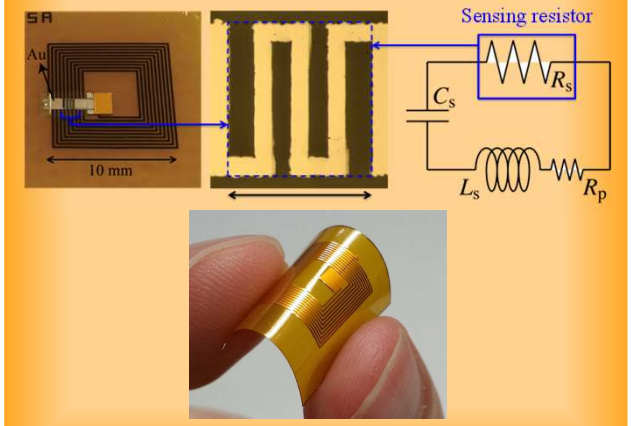
センサ材質をエンジン材に合わせた高精度同軸型瞬時熱流束センサー



12都市大

冷却損失高精度評価技術の確立

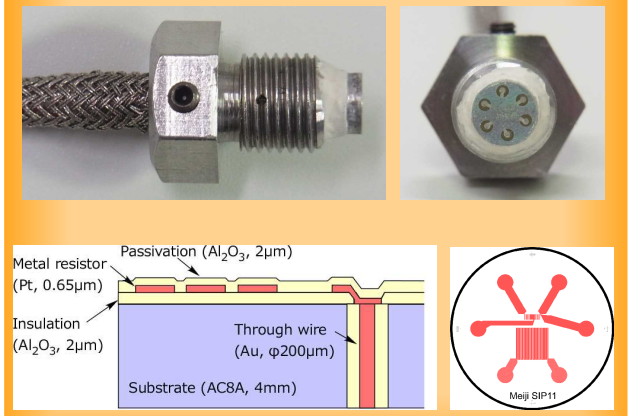
MEMS技術による柔軟な無線熱流束センサー



13東大

計測適用場所の拡大

MEMS技術による微小間隔多点熱流束センサー

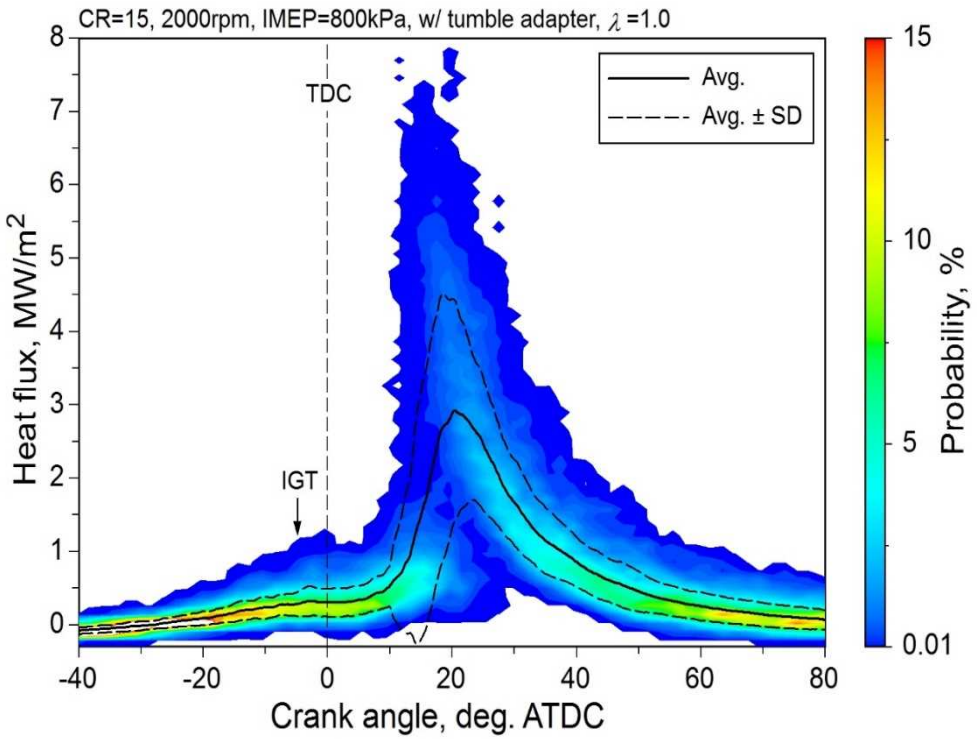


14明大

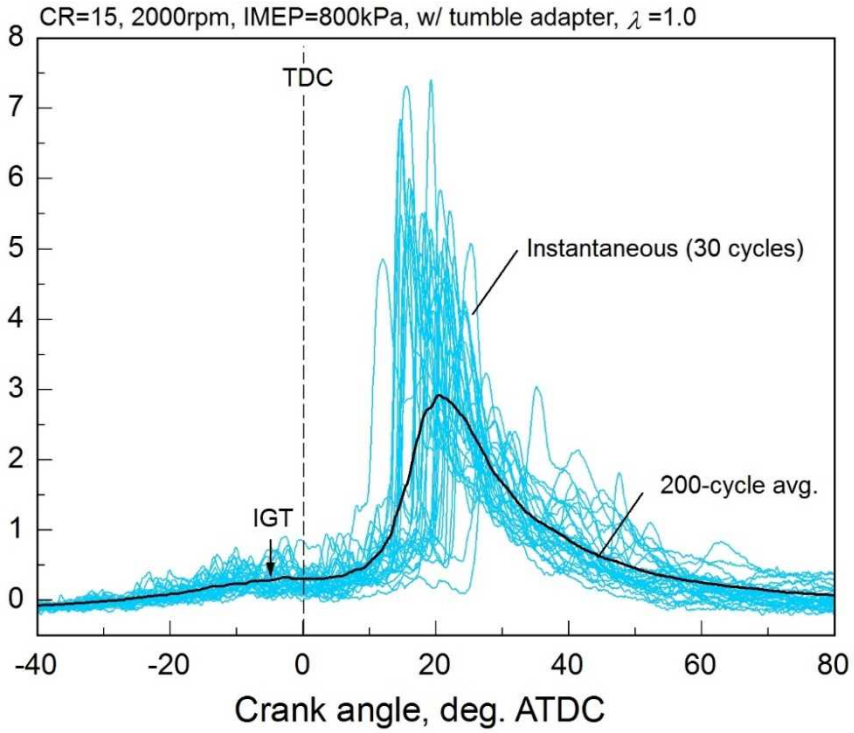
流動と同スケールの計測を実現

SG3:多点熱流束センサの開発　14明治大

瞬時熱流束履歴のPDF



連続30サイクルの瞬時熱流束



- 熱流束のピーク値および位相がサイクル毎に大きく変動
- 位相変動によりアンサンブル平均波形が鈍化すること
- アンサンブル平均にて3MW/m2がピーク値と判定される条件にて、瞬時熱流束のピーク値は7MW/m2 に及ぶことが判明

SG3:多点熱流束センサの開発　14明治大

隣接3点熱流束センサの信号から，壁面近傍の流動特性の抽出が可能なことを示した。非光学手法による筒内流動情報の検出は，実機エンジンの診断・制御へ新たな可能性を提供するものである。

公表文献：中別府修，乱流特性の導出方法および導出装置，特願2018-070922，2018年4月

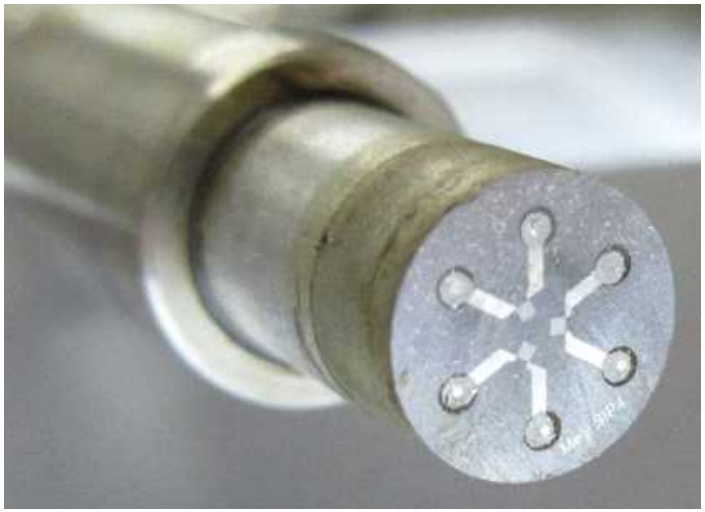


図1　隣接3点熱流束センサ．Φ900μmの円周上に300μm角の3個のRTDを配置

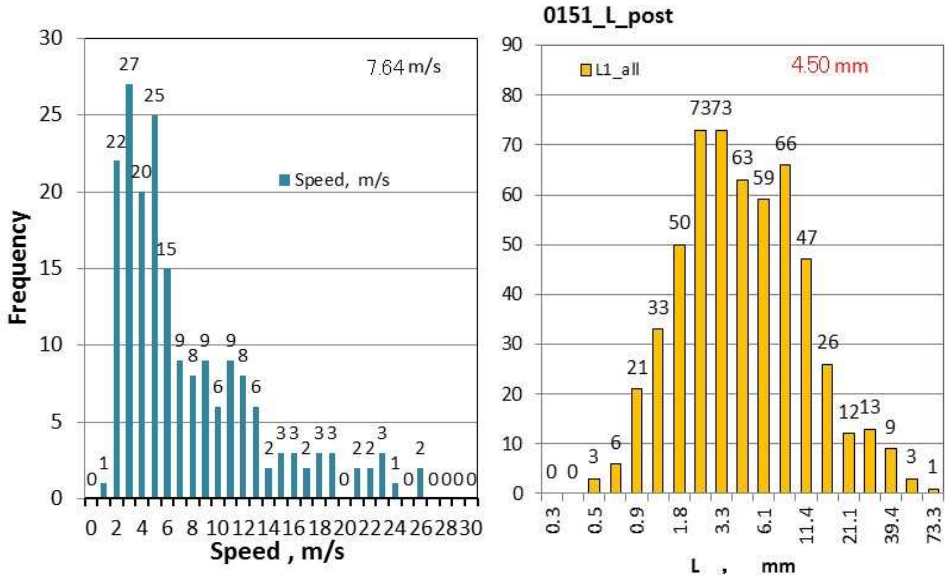
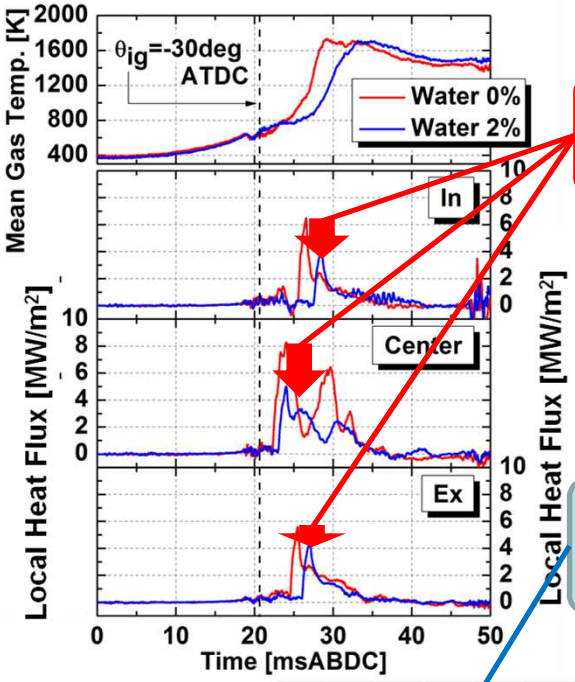


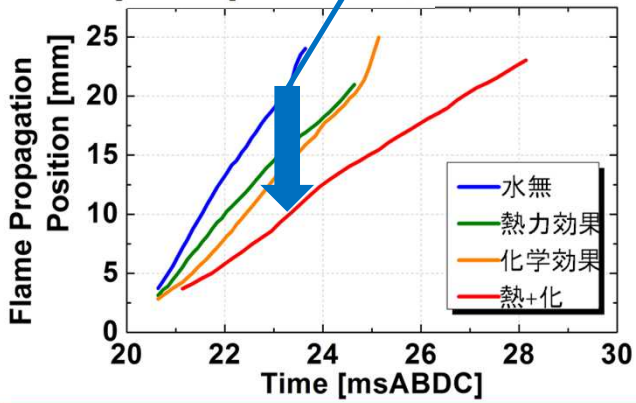
図2　壁面近傍速度と熱伝達スケールのヒストグラム（燃焼後）

SG2: 水噴射による冷損低減とノック抑制

【従来の水噴射コンセプト】

RCEM, λ＝1.0





壁面熱伝達抑制

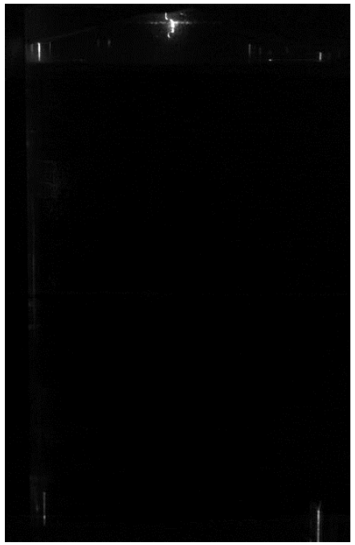
背反

燃焼抑制
超希薄燃焼では
失火の可能性

水蒸気を壁面近傍に成層分布させることで解決

【新しい水噴射コンセプト】

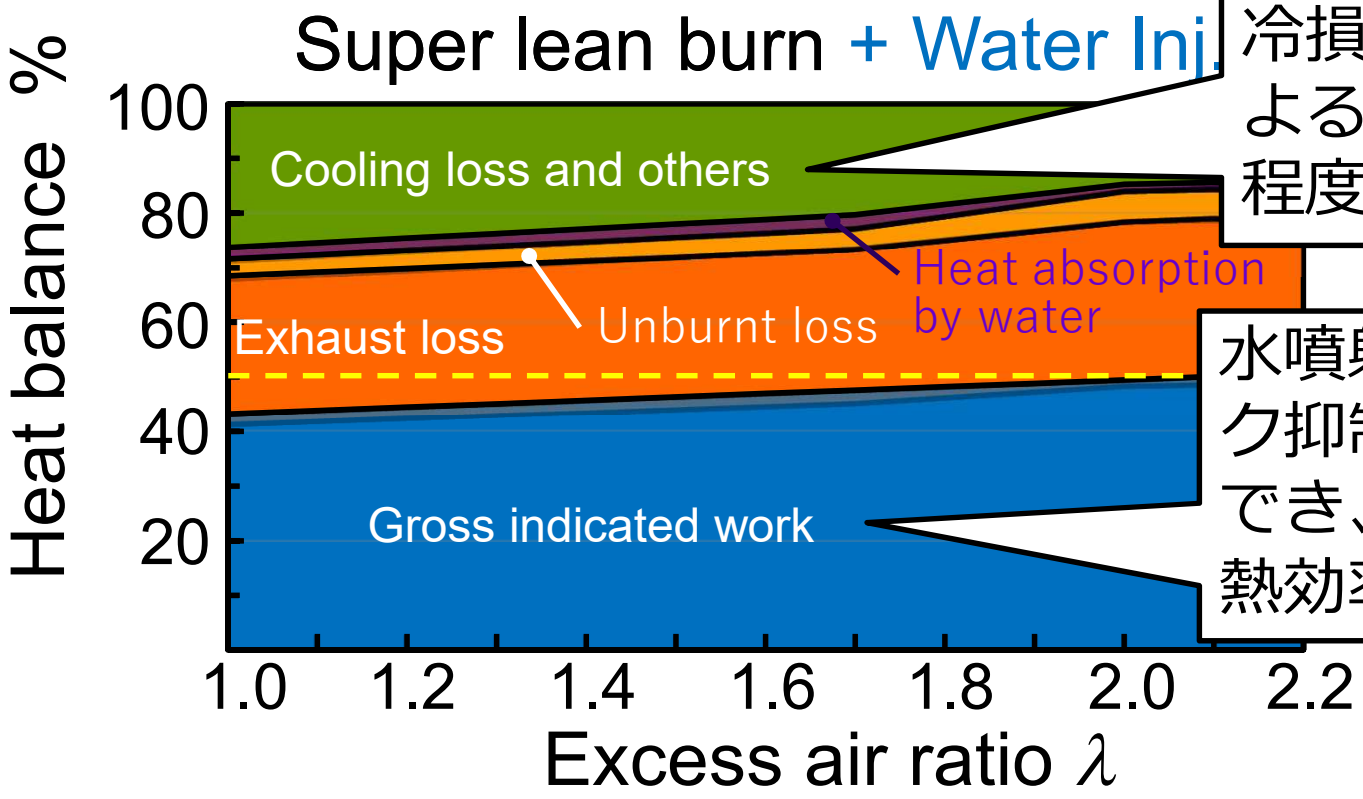
- **超希薄燃焼＋水噴射**
  → 冷却損失低減とノック抑制
- **水噴射＋超希薄燃焼＋高圧縮比**
  → 局所冷却により燃焼を悪化させずに熱効率向上



- **燃焼を阻害せずに冷却損失とノックを抑制**

水噴射時の超希薄燃焼の高速度散乱光画像
（共用可視化エンジン）

スーパーリーンバーンと水噴射による熱効率向上

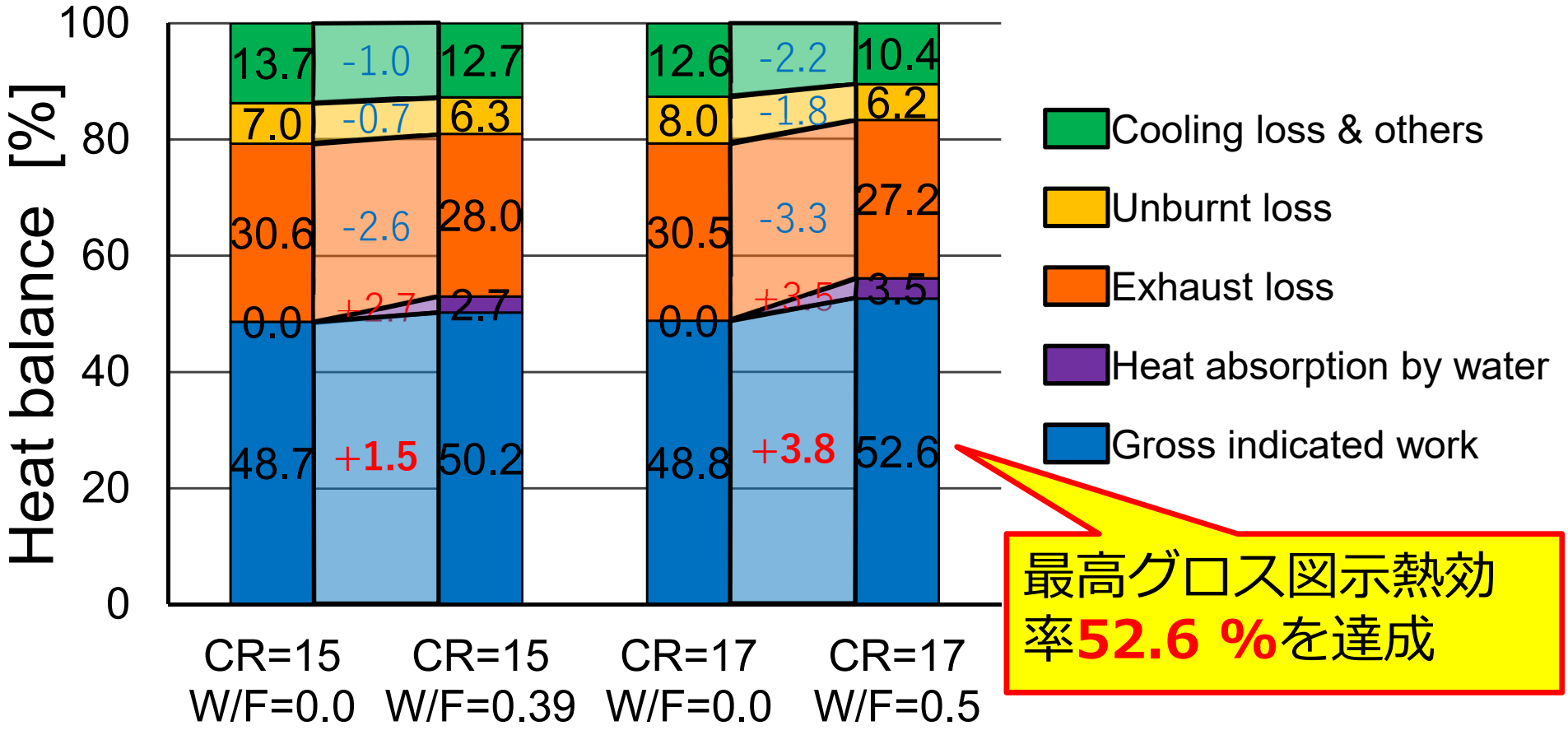


水噴射により冷却損失は低減する。冷損低減量は水による熱吸収分と同程度である

水噴射によるノック抑制で点火進角でき、グロス図示熱効率が向上する

Ne=1800~2000 rpm, CR=15.0, IMEP=0.8~1.1 MPa

スーパーリーンバーン＋水噴射+圧縮比17



最高グロス図示熱効率**52.6 %**を達成

Knock rate[%]	6.5	4.5	10.0	4.0
COV[%]	4.9	2.2	8.5	3.4

Ne = 2,000rpm

λ = 1.9

IMEP=1.2 to 1.3 MPa

冷却損失低減班の主な成果と今後の展望

1. 強タンブル流動SIエンジン内のマイクロPIV計測を行い、燃焼室の壁面流れ場は発達した乱流境界層ではないことを明らかにした。
   ⇒　今後，さらに壁面境界層の詳細な計測と解析により，エンジン内高精度熱伝達モデルの開発および新たな冷損低減技術の開発につなげる.

2. 熱効率向上要素技術として水噴射を提案し、高圧縮比(ε =17)スーパーリーンバーンとの組み合わせにてグロス図示熱効率**52.6%**を**達成**。
   ⇒　今後，燃焼室壁面と作動ガスとの境界層に形成された水蒸気層が燃焼と熱伝達に与える影響を解明し，水噴射の最適制御技術を開発することで熱効率をさらに向上させる.

3. 異なる機能を有する3種類の熱流束センサを開発し、共用エンジン等に適用することで、開発センサの有効性を実証。
   ⇒　今後，開発センサの高精度化と実機適用を推進し，エンジン内熱伝達機構の解明に貢献する.

ＳＩＰ革新的燃焼技術 最終公開シンポジウム
ガソリン燃焼チーム 研究成果報告

2019年1月28日
東京大学 安田講堂

燃料・ノック抑制班

化学反応論的アプローチによる
ノッキング制御コンセプト創出

班長 広島大学 三好 明

燃料とノック

- ノックは燃料に強く依存
- ノックはエンジン開発の長期課題

しかし 実燃料は>100種の混合物
　・再現は困難・長期保存も困難

SIP 共通ガソリンサロゲート

- 数種類の化合物で実ガソリン燃焼特性を模擬
- 再現性を担保できる試験研究用ガソリン
- 反応機構が構築可能

➔ 反応機構に基づく燃焼現象解明が可能に！

➔ 燃料と反応に目を向けた技術開発を可能に!!

SIP共通ガソリンサロゲート

— 初の日本市場ガソリンサロゲート
S5R(レギュラー) S5H(ハイオク)

Table 1 Composition and properties of the SIP common gasoline surrogate mixtures

				S5R [a]		S5H [a]	
Constituent	bp [°C]	RON	MON	vol%	mol%	vol%	mol%
isooctane (C_8H_{18}) [b]	98	100	100	29.0	23.825	31.0	24.704
n-heptane (C_7H_{16})	98	0	0	21.5	19.903	10.0	8.980
methylcyclohexane (C_7H_{14})	101	75	74	5.0	5.317	5.0	5.158
diisobutylene (C_8H_{16}) [c]	101	96	82	14.0	12.125	14.0	11.761
toluene (C_7H_8)	110	120	109	30.5	38.830	40.0	49.397
RON / MON				90.8 / 82.9		100.2 / 88.8	
HHV / LHV [MJ/kg]				45.41 / 42.49		45.14 / 42.43	

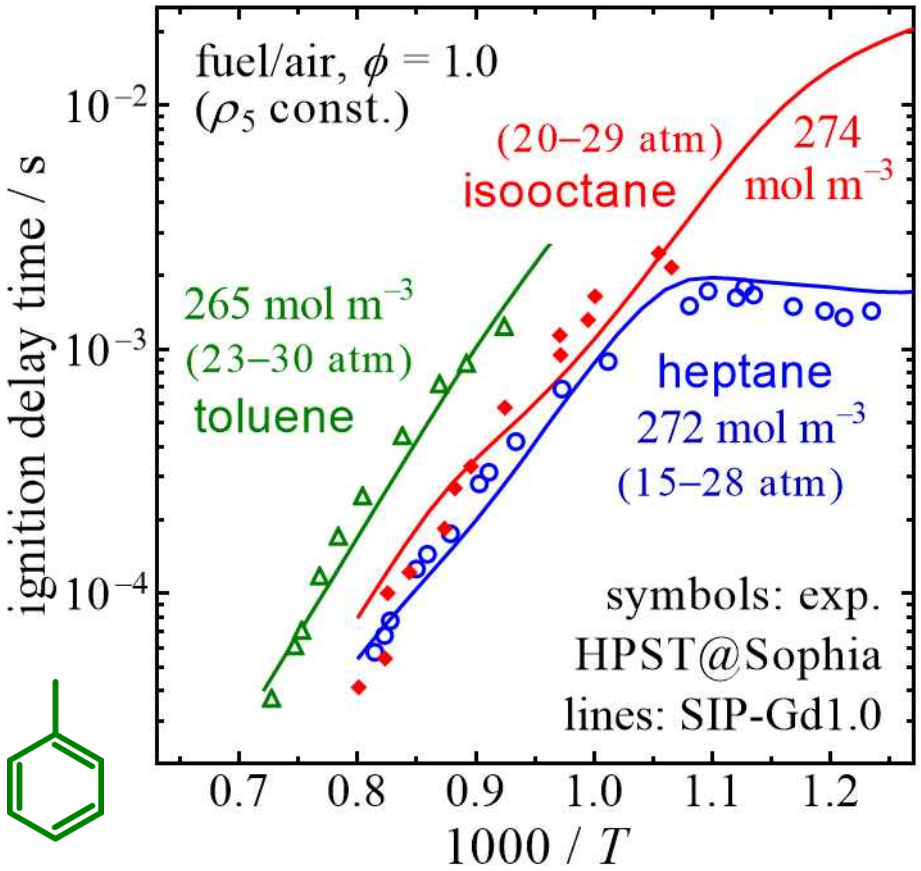
[a] "S5R" and "S5H" stand for the SIP five-component surrogate for "regular" (JIS number 2) and "high-octane" (JIS number 1) gasolines. [b] 2,2,4-trimethylpentane.
[c] Approximately 4:1 mixture of 2,4,4-trimethyl-1-pentene and 2,4,4-trimethyl-2-pentene.

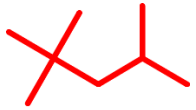
＊ JXTG エネルギーの協力による

反応機構：サロゲート成分着火遅れ検証

ー 成分炭化水素の着火遅れ

- 実験値をよく再現





イソオクタン

n-ヘプタン

トルエン

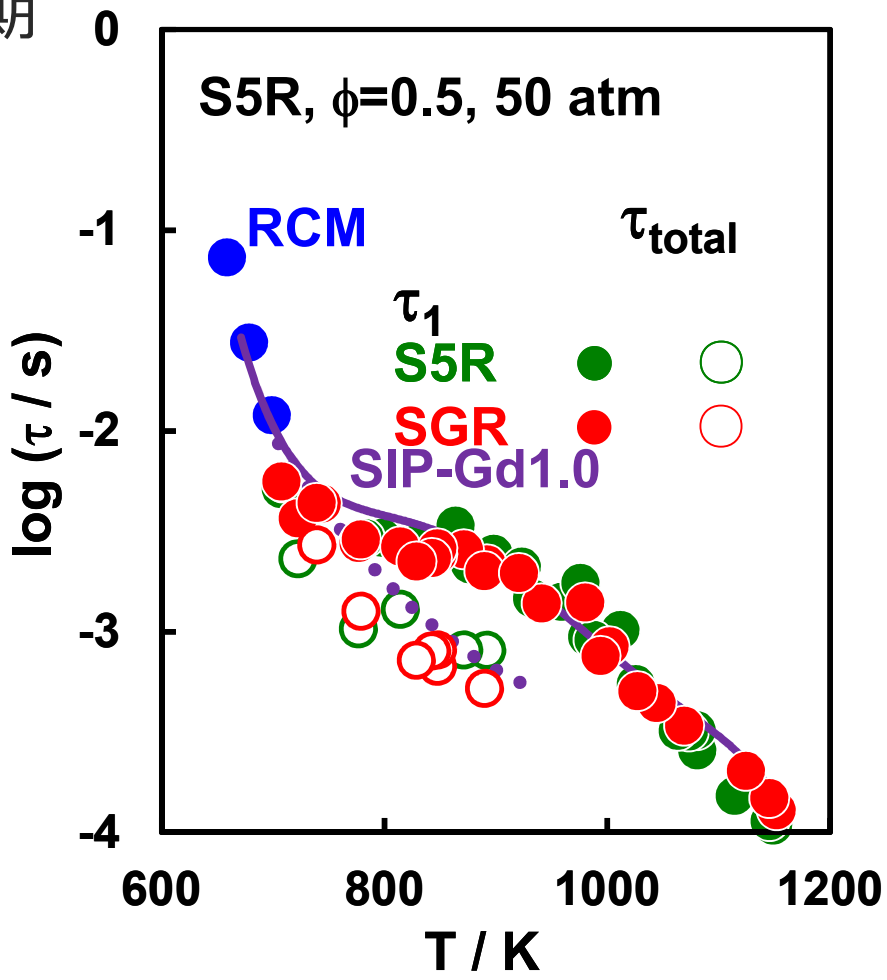
実験: 上智大学

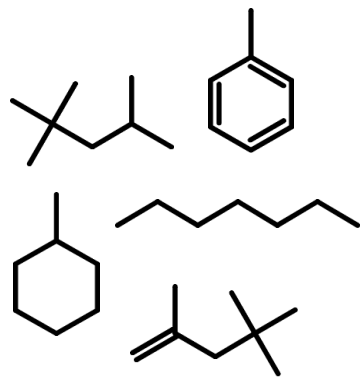
点(○△..):実験
線(——):計算

反応機構：混合燃料の着火遅れ

― サロゲート混合燃料の着火遅れ

- 冷炎発生時期を含めて実験値をよく再現





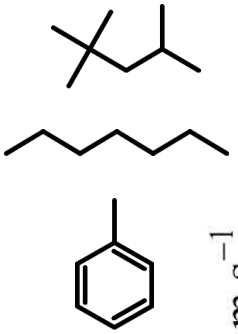
上智大学

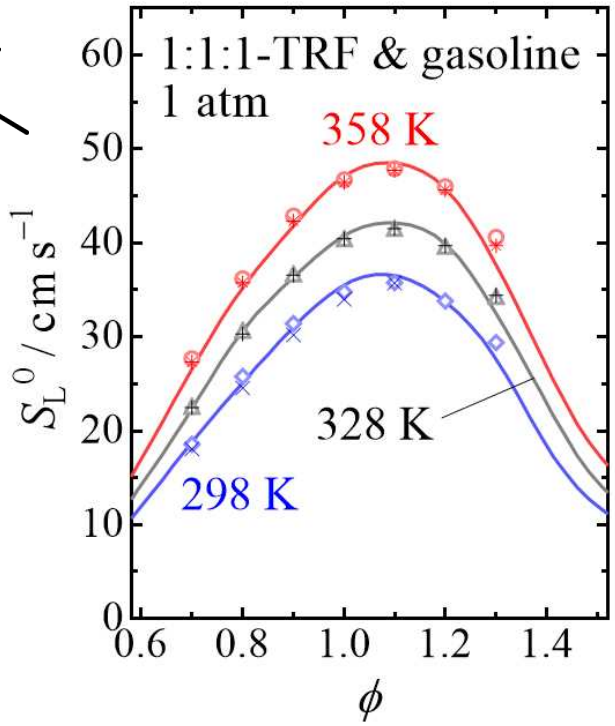
点(○●..):実験
線(――):計算

反応機構：層流火炎伝播速度

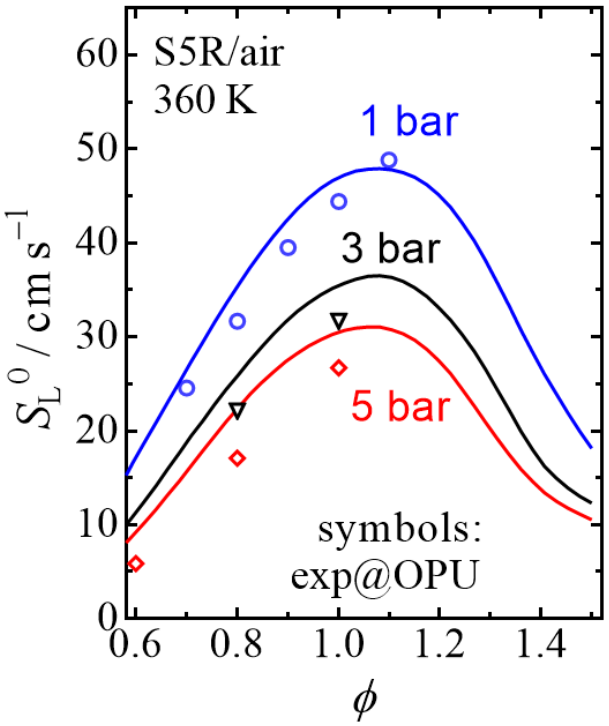
― 混合燃料の火炎伝播速度

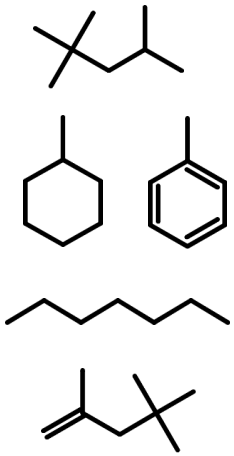
TRF(1:1:1)





S5R



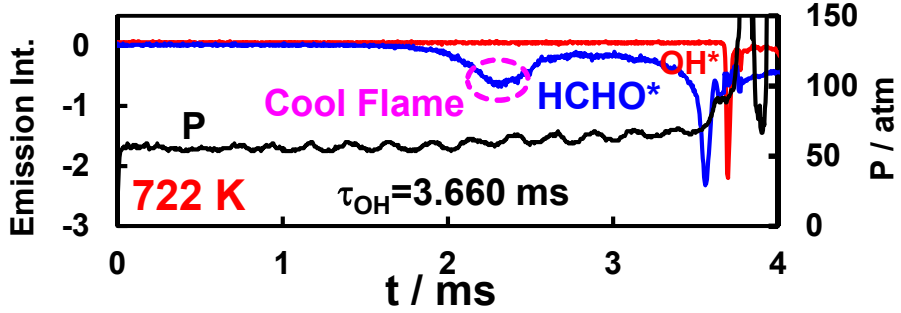


点(○□…):実験
線(――):計算

実験:
大阪府立大学

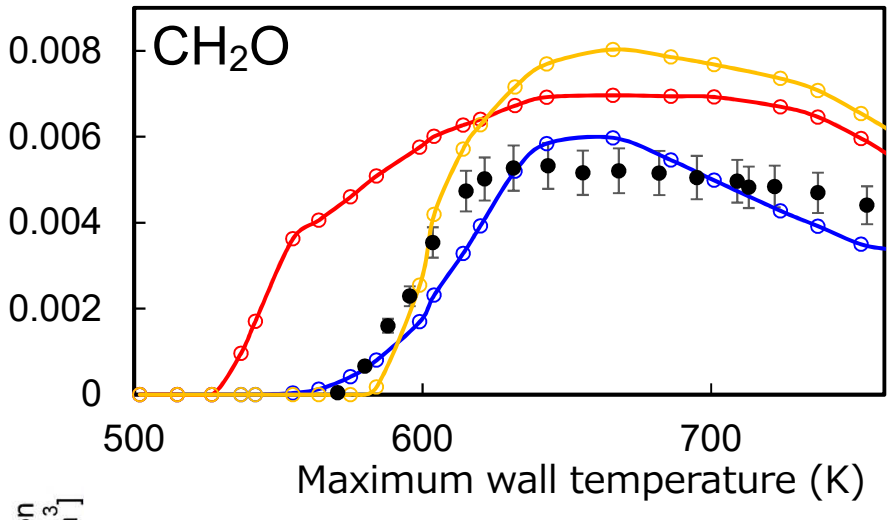
「冷炎」の詳細観測

ホルムアルデヒド紫外発光 (衝撃波管)



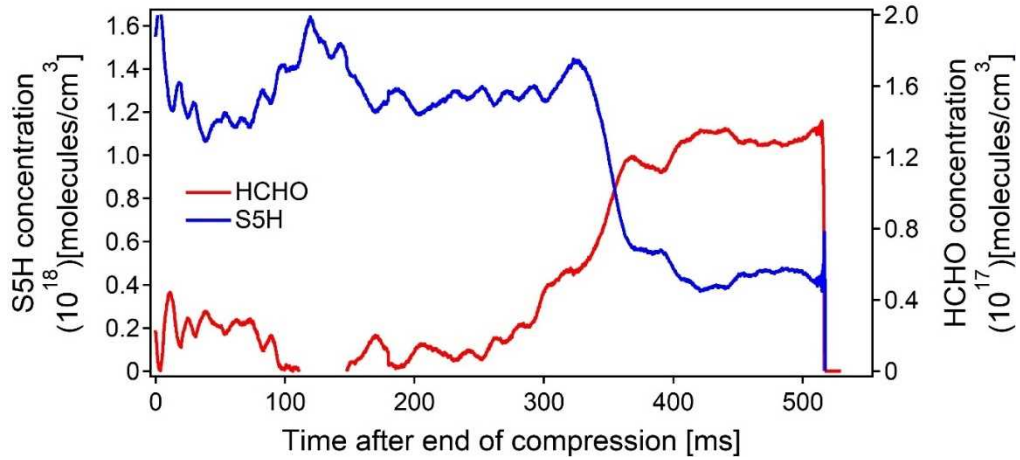
上智大学

定在冷炎TOF-MS (MFR)



東北大学

赤外レーザ吸収分光 (RCM)



茨城大学

冷炎の反応機構とノック抑制法の提案

冷炎を再現する簡略化反応機構

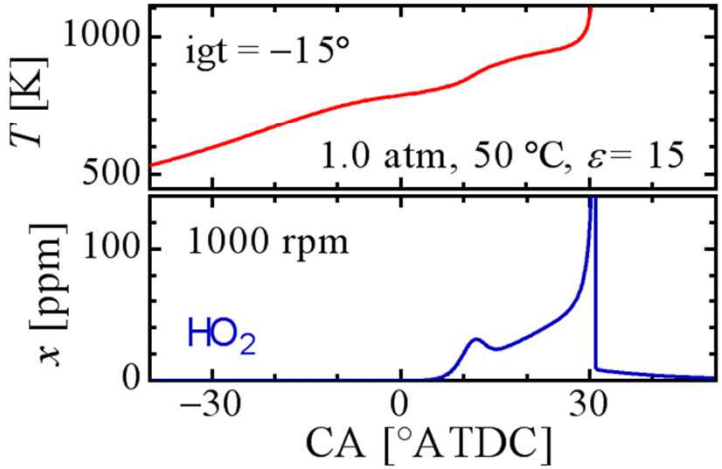
冷炎前後統合L-Wノックモデル

福井大学

大阪工業大学

広島大学

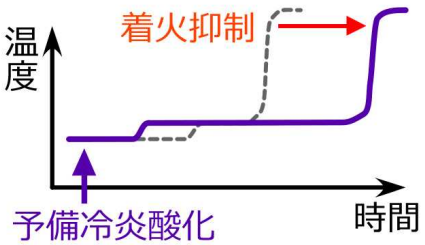
反応機構による
ノック抑制法
の提案



- パルス圧縮

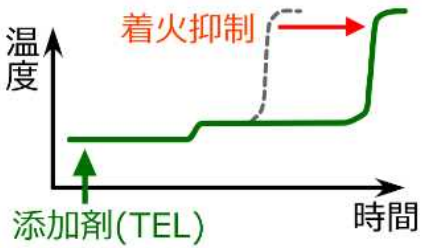
パルス圧縮で
着火が遅延

- 常圧部分酸化



吸気冷炎酸化
着火が遅延

(cf.)



四エチル鉛
着火を遅延

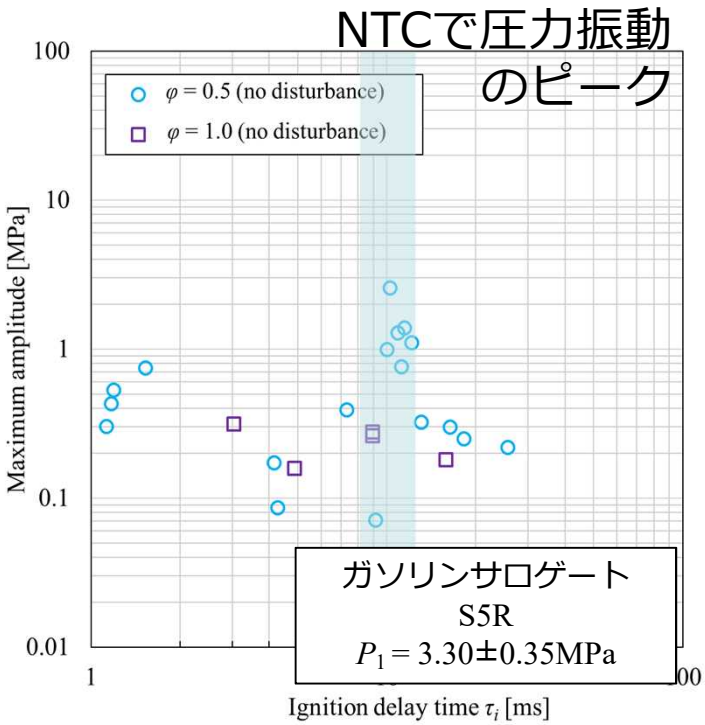
いずれも冷炎後熱着火が遅延

ガソリン燃焼チーム Super Lean Burn

ノック強度

― 着火遅れ時間の温度依存性 (dτ/dT)・負温度係数 (NTC) 領域とノック強度

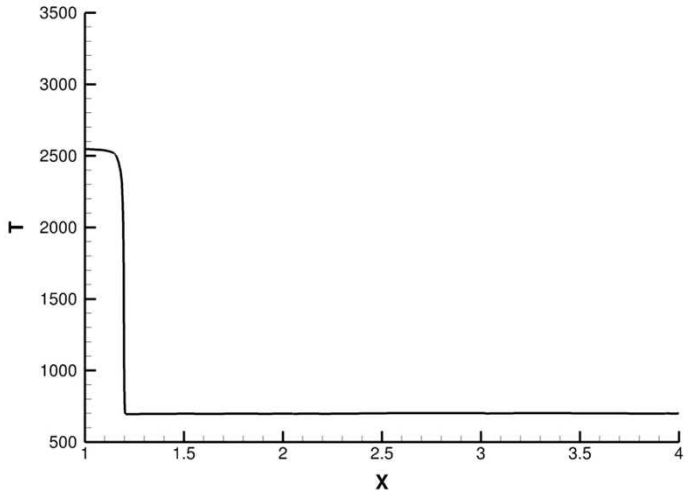
- 温度領域とノック強度(SRCM)



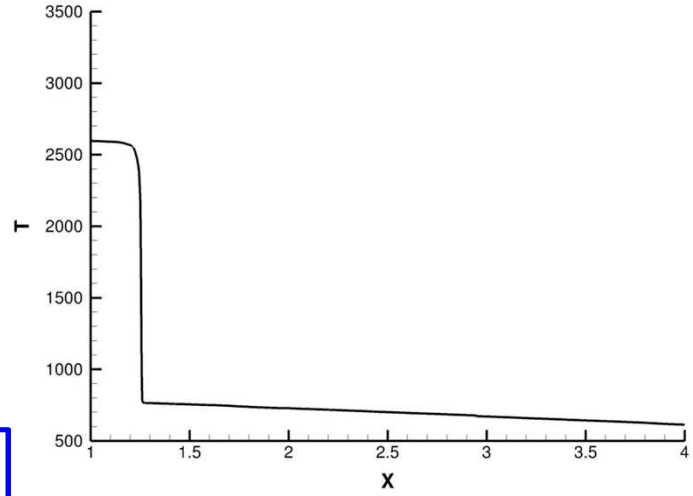
日本大学

- 温度勾配によるノック強度低減(DNS)

0 K/cm



40 K/cm

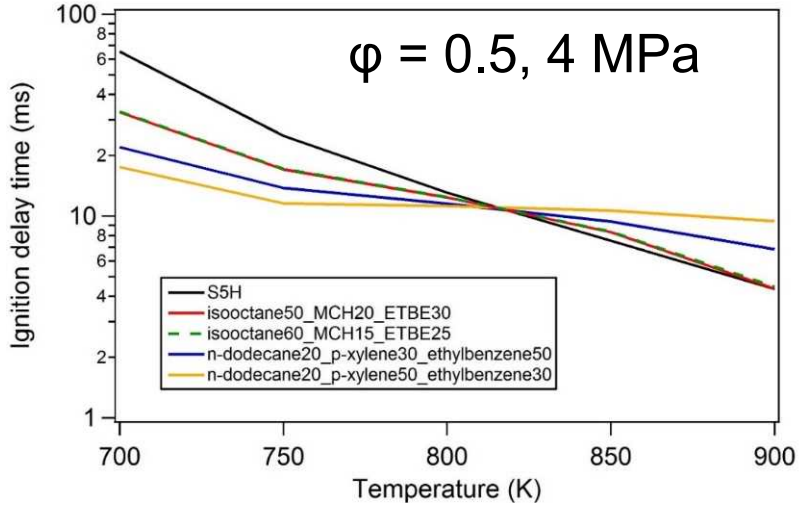


北海道大学

燃料からの実験的知見

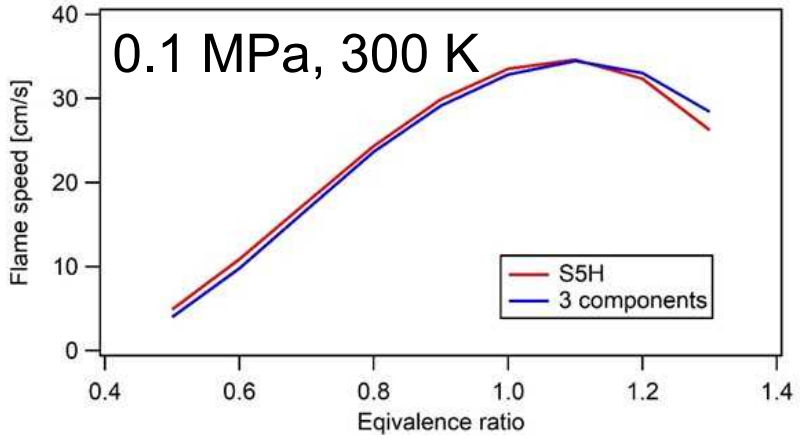
― dτ/dTの小さい燃料はノック抑制？

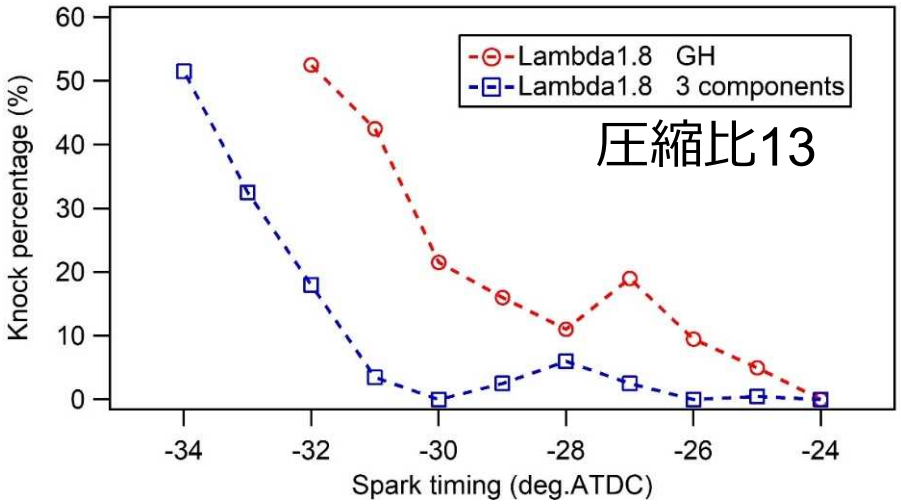
茨城大学



isooctane	MCH	ETBE
50vol%	20vol%	30vol%

3種混合	GH	GR
43.05 MJ/kg	42.28 MJ/kg	42.63 MJ/kg





ノック頻度は低下・熱効率向上にはいたらず

⇨ 圧縮比15では？

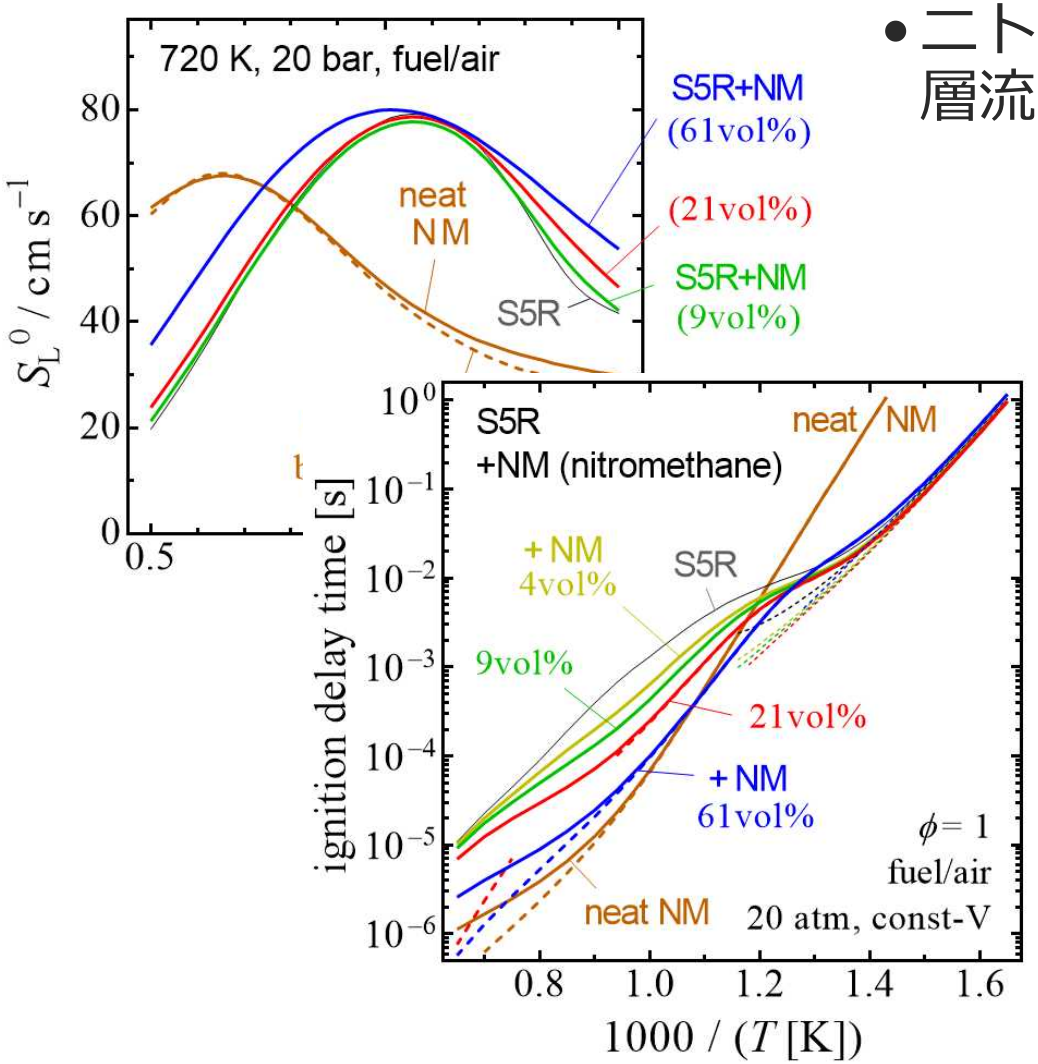
燃料とオクタン感度

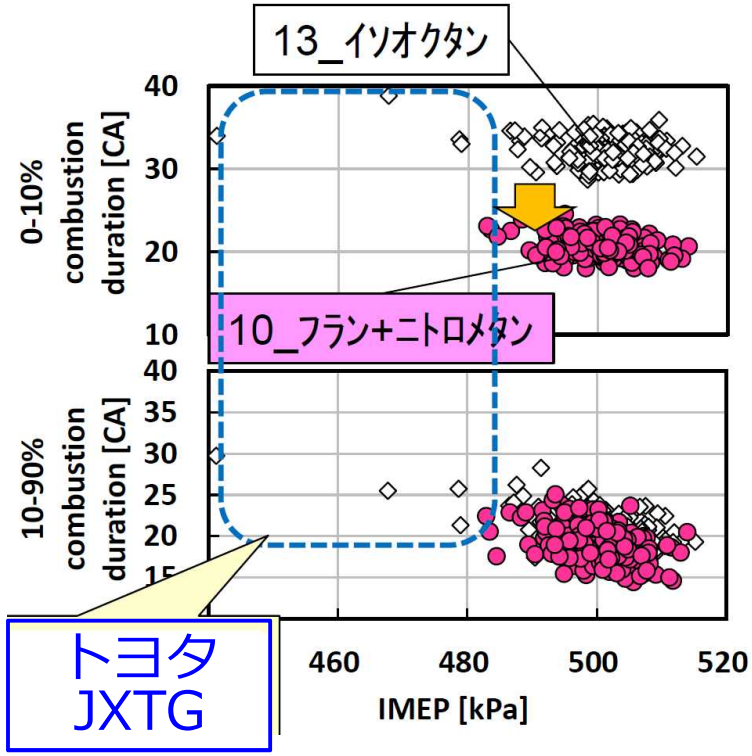
ー 高オクタン感度燃料は SI 燃焼期間を短縮？

オクタン感度: S=RON−MON

広島大学

- ニトロメタンは燃焼期間を短縮
  層流燃焼速度は変わらない

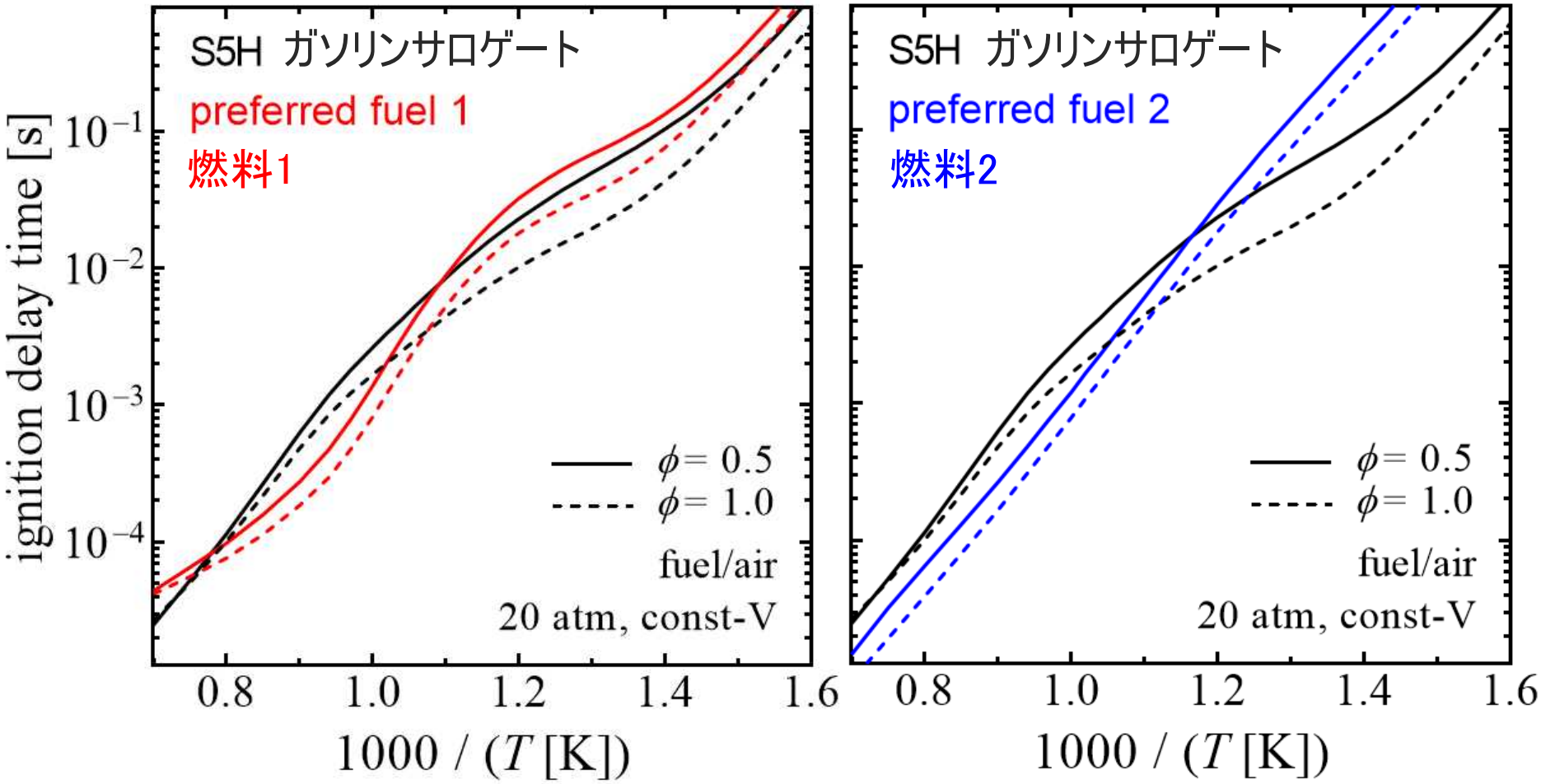




宮元他, 第28回内燃機関シンポ, 60, 2017年11月6-8日

リーンSI燃焼に好ましい燃料

ー 高オクタン感度 ➔ 燃料のもつ可能性
低温で着火し難く/高温で着火し易い→燃焼期間短縮(?)



ＳＩＰ革新的燃焼技術 最終公開シンポジウム
ガソリン燃焼チーム 研究成果報告

2019年1月28日
東京大学 安田講堂

モデル/ばらつき縮減班

１Ｄシミュレーションモデルの開発
燃焼のサイクル変動抑制

班長 千葉大学 森吉泰生

モデル班/ばらつき縮減班

目　標：各要素技術の実機への展開に必要な技術の提案

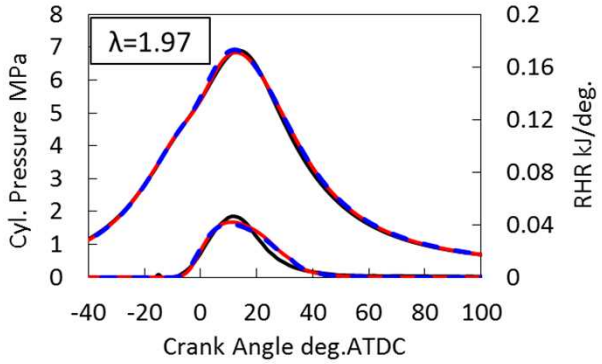
モデル班：要素毎に実験的に検証された１Ｄモデルの開発
正味熱効率50%の検証．エンジン研究ツールとしての提供

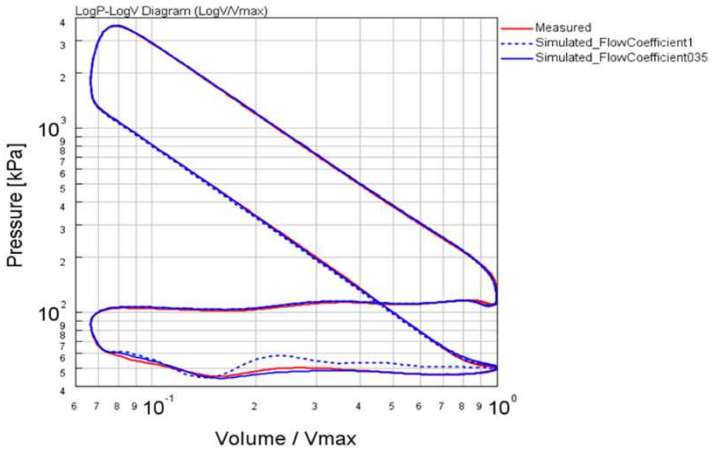
ばらつき班：リーンバーンの実用化を阻む燃焼ばらつき要因の現象
解明と特定．オンボード制御の体系化による対策

クラスター	SIP目標	特筆すべき成果
千葉大（モデル）	1D ガソリンエンジンシミュレータの構築と検証	GT-POWERベースで検証された1Dモデル構築
千葉大（ばらつき）	リーンバーンにおけるサイクル変動要因の明確化	リーンバーンサイクル変動の現象解明と対策実施
上智大（ばらつき）	燃焼境界判定指標の抽出とリーンバーン制御モデルの提案	境界領域最尤推定を伴う極値探索学習制御法構築

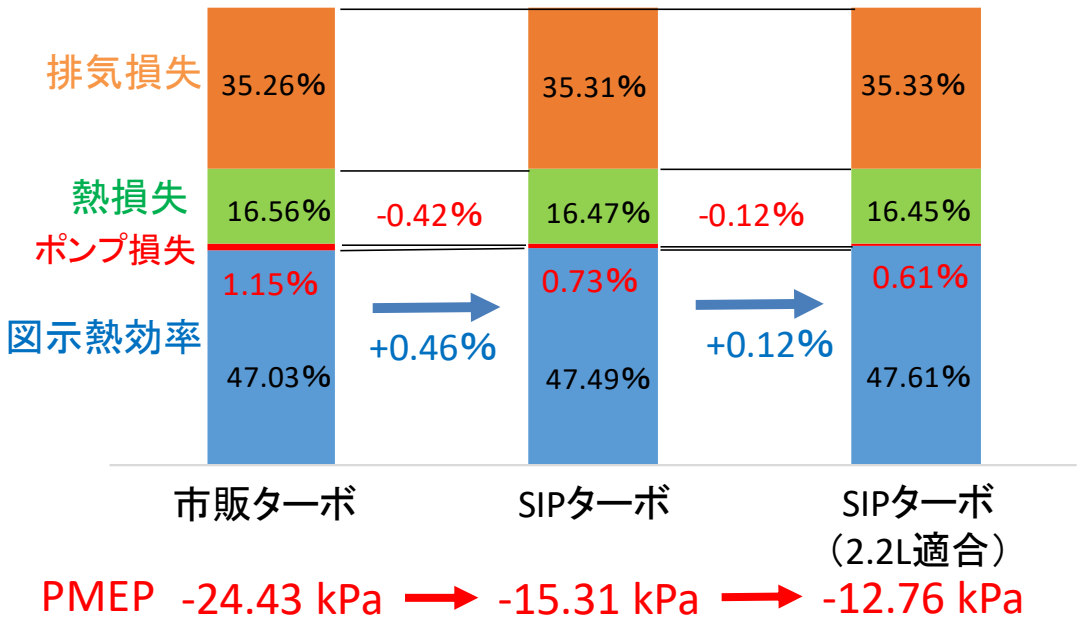
1Dモデル開発と高効率燃焼コンセプト検証

新開発の1Dサブモデル（着火01東大，火炎伝播早大，冷却損失06千葉大，ノック22阪工大，ターボ・熱電・摩擦損失低減T）を組込．4気筒エンジンを想定し，正味熱効率を高精度に予測できる1Dモデルを開発．





IMEP = 1.0 MPa, Ne = 2000 rpm, λ = 2.0



PMEP -24.43 kPa → -15.31 kPa → -12.76 kPa

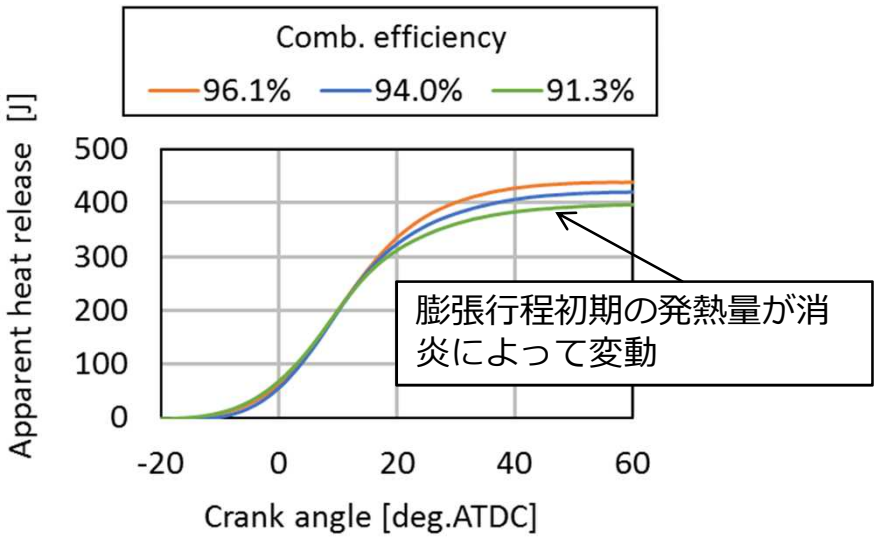
適合パラメータの削減＆希薄燃焼サイクルの予測精度向上

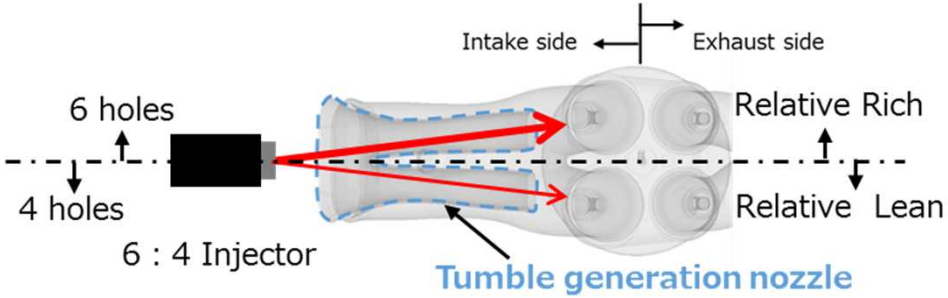
統合モデルによる損失低減効果の数値予測

リーン燃焼でのばらつき要因の解明と対策　10千葉大

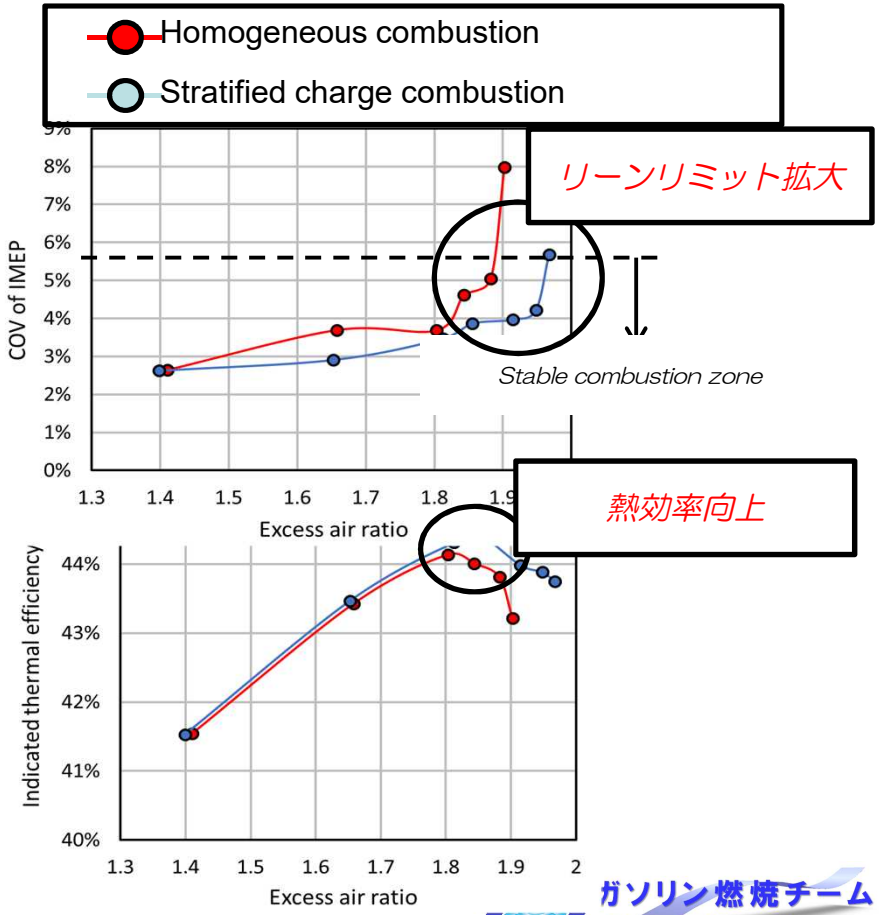
膨張行程初期に消炎が生じるサイクルではトルクが低下することを発見.
これを抑制するために2つの吸入タンブルを利用して縦方向に弱成層化.

1600rpm, λ=1.85, CA50=7deg.ATDC, COV of IMEP=5.2%



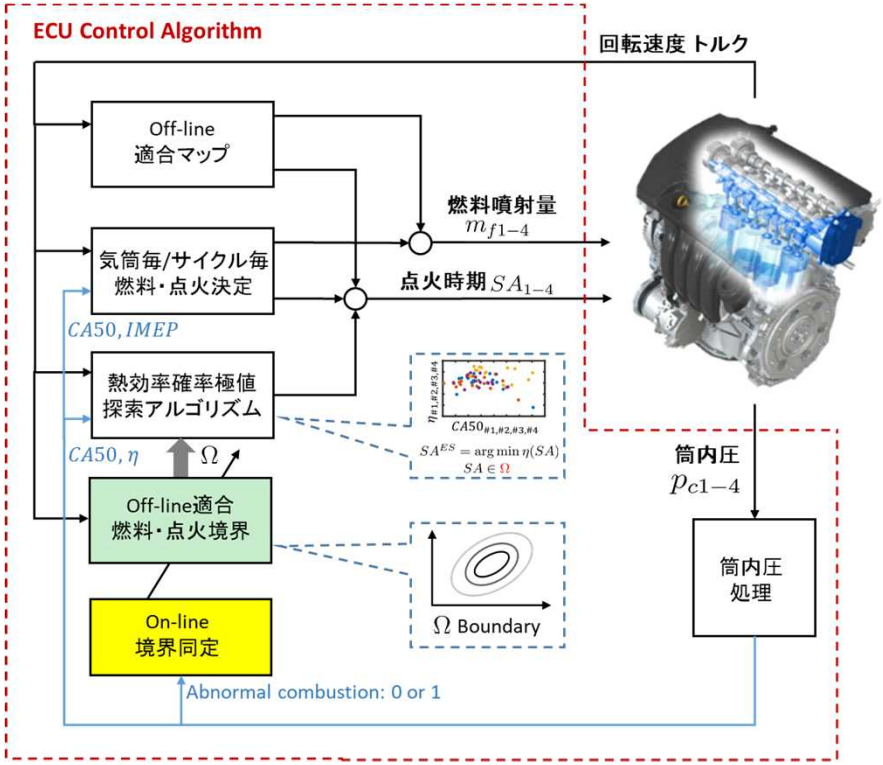


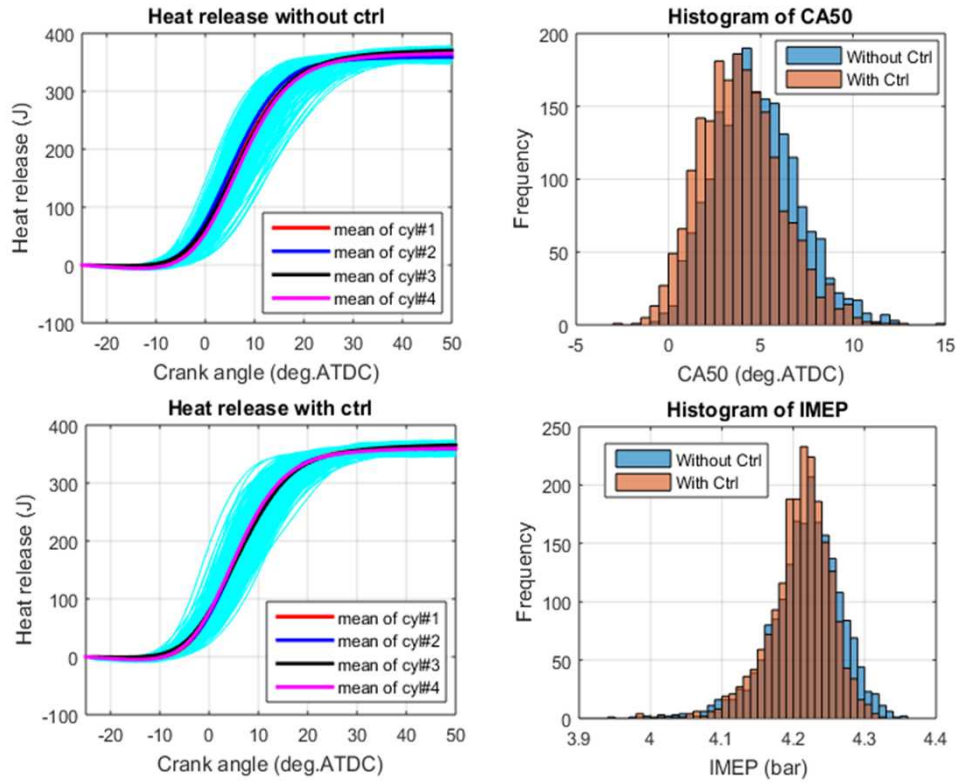
2000rpm，IMEP:800kPa（@λ=1.4，Knock limit）



ばらつき縮減と効率向上を考慮した制御アルゴリズム開発

ノック拘束の下でオンボード学習により最大効率を実現する最適化制御手法開発．四気筒エンジンでばらつき変動係数25%減　24上智大

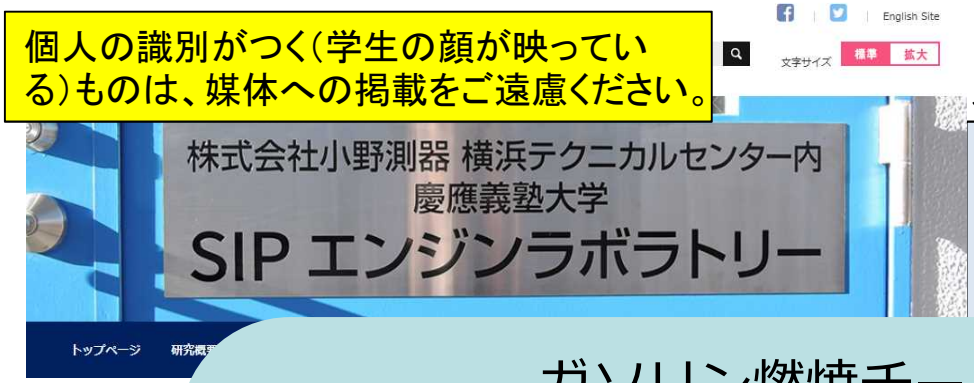




成果を実機に適用してゆく！

Mean r_{COV} of 9 points: $\bar{r}_{COV} = 0.725$; Efficiency improvement: Max0.5%
Speed: 1600-2400rpm, torque: 40-60Nm,
InVVT: 10-40deg.

個人の識別がつく(学生の顔が映っている)ものは、媒体への掲載をご遠慮ください。



ガソリン燃焼チーム

日英WEBサイトの紹介

http://sip.st.keio.ac.jp/

ガソリン燃焼チームのWEBサイト

総アクセス数：**計61,600件** (2016/10/06-2019/01/22現在)

・SIP共通ガソリン・SIPサロゲート燃料の組成と性状

計 978件 （邦文サイト873・英訳サイト105）

・ガソリンサロゲート詳細反応機構Ver.1.02 (SIP-Gd1.02)

簡略化反応機構Ver.1.02 (SIP-Gr1.02)

計1,389件（邦文サイト1,037・英訳サイト352）

本日，最新版Ver.2.0をリリースいたしました！！

A 成果公表の件数 493件（内44件はクラスタ間の共同執筆)

B 特許出願 6件 (内１件はクラスタ間の共同出願)