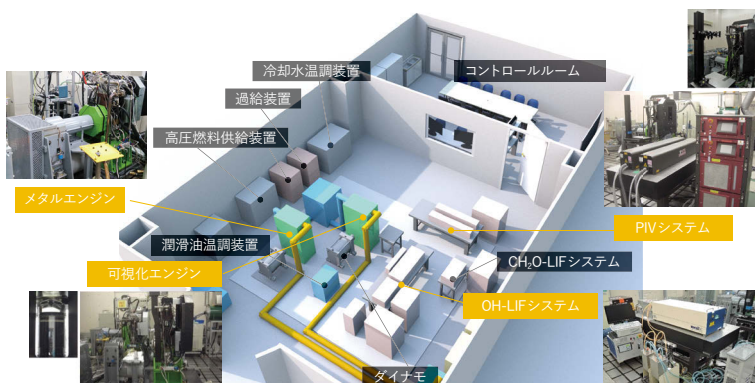


高効率ガソリンエンジンのための スーパーリーンバーン研究開発

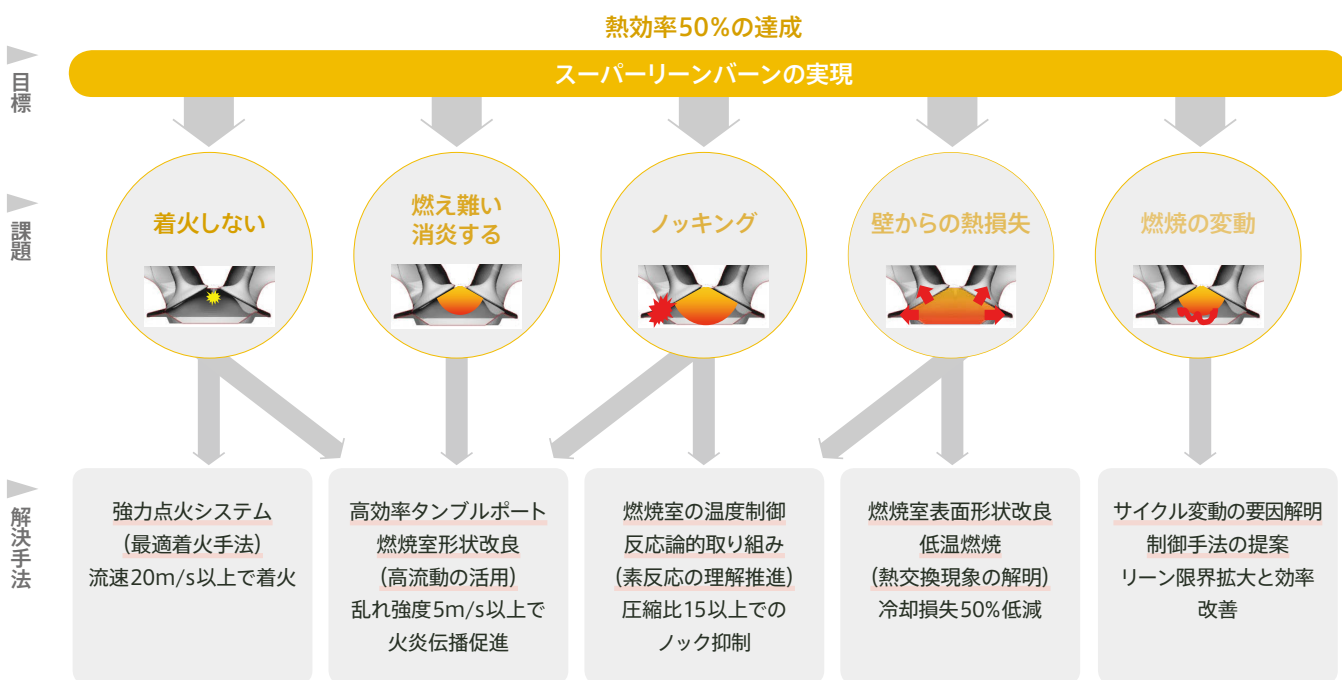


ガソリン燃焼チーム 研究責任者：慶應義塾大学 大学院理工学研究科 特任教授 飯田 訓正

スーパーリーンバーン技術の実現に向けた研究開発を行う。具体的には、①超希薄・高流動条件下で着火可能な点火システム、②タンブル流最適化による火炎伝播促進、③壁面熱伝達機構の解明に基づく冷却損失低減、④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の研究開発に取り組む。



研究拠点 小野測器横浜テクニカルセンター内 慶應義塾大学SIPエンジンラボラトリー



研究項目とチーム体制	着火向上班	火炎伝播促進班	燃料・ノック抑制班	冷却損失低減班	モデル/ばらつき縮減班
	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	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	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	壁面熱伝達機構の詳細な解明に基づく冷却損失の低減	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
	- 着火メカニズムの詳細解析 - 対象条件下に対応する新規点火モデルの提案 - 強力点火システムの開発	- 火炎伝播メカニズムの詳細解析 - 対象条件下に対応する新規火炎伝播モデルの提案	- Livengood-wu 積分で対応が困難な条件・領域での解析 - 反応・圧力伝播等を踏まえた新規ノック発生モデルの提案	- 境界層の内部にまで踏み込んだ対流熱伝達解析 - エンジン壁面に適合する新規熱伝達モデルの提案	- 着火、火炎伝播、冷却損失、ノック、過給、機械損失の新規 1D モデルの提案 - 燃焼変動の要因解明、抑制する手法・制御法の提案と実証
	点火	火炎伝播	ノッキング	冷却損失	ばらつき

超希薄(スーパーリーン)条件下でも安定着火、高速燃焼、ノック抑制を可能とする 各種要素技術を構築し、正味熱効率50%を達成

サブリダー: 慶應義塾大学 理工学部 准教授 横森 剛



超希薄(スーパーリーン)条件では安定な着火・燃焼が困難。ノックの発生も熱効率向上を阻害。

- ▶ スーパーリーン条件での高速燃焼実現のために高タンブル流動技術を導入。PIV 計測によりタンブル流動の不安定性を解明、流動の最適化により燃焼促進を実現 (図 1)。
- ▶ スーパー点火装置の開発により、スーパーリーン・高流動条件下でも安定な着火・燃焼を実現 (図 2)。
- ▶ 筒内水噴射技術の導入によりノック抑制効果を確認。熱効率向上を実証 (図 3)。
- ▶ 燃料の改良設計によるノック抑制・燃焼促進技術の指針を提案 (図 4)。

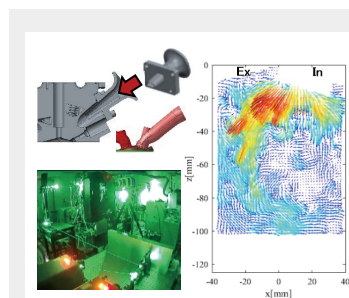


図1 高タンブル流動下におけるPIV計測

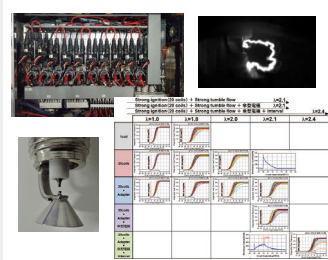


図2 スーパー点火装置・改良型電極による超希薄条件下での安定着火燃焼

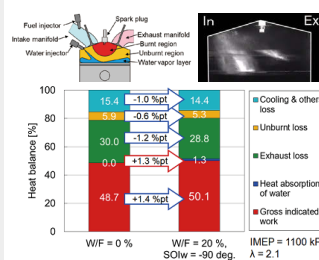


図3 筒内水噴射による熱効率向上

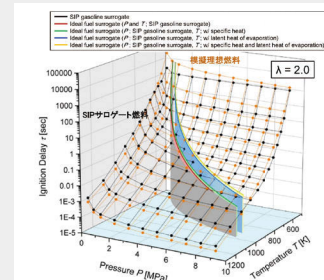


図4 燃料種の違いによる着火遅れ時間の変化

実証条件: SIP単気筒エンジン・可視化エンジン、2000rpm、 $\lambda=1.5\sim 2.2$ 、IMEP=0.8 $\sim$ 1.2MPa。

モデル/ソフトウェアへの繋がり: 得られた結果はHINOCAおよび1Dモデルに組み込み(点火モデル、火炎伝播モデル、壁面熱伝達モデル、ノックモデル)。

今後の課題: スーパーリーン条件下における着火～火炎伝播の遷移現象の解明と最適化。燃料改良設計の具現化。

主な 関連論文

- ①横森 剛, 松田昌祥, 飯田訓正, 浦田泰弘, 横尾 望, 中田浩一, 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, 自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会 (2016), ②菅田健志, 李世俊, 横森剛, 飯田訓正, 乱流燃焼ダイアグラムを用いたスーパーリーンバーン SI エンジンにおける燃焼形態の検討, 自動車技術会論文集, Vol.48, No.4, pp.801-806 (2017)

最先端の計測手法と数値計算により放電挙動および点火特性を明らかにし、 超希薄高流動混合気に適用可能な点火モデルを構築した。

班長: 東京大学 大学院工学系研究科 教授 津江 光洋



超希薄高流動場における火花点火挙動はほとんど解明されておらず、点火モデルも存在していなかった。

- ▶ 点火実験による最小点火エネルギー計測 (図1) および DNS 計算による火炎核成長挙動 (図2) から、乱流特性が点火過程に及ぼす影響を明らかにした。
- ▶ 放電挙動と火炎核の詳細な計測により、放電電圧、電流、放電路の関係について実験式の適用範囲を明確にするとともに (図3)、火花放電から初期火炎核の形成過程を可視化 (図4) することで、点火モデルの妥当性を確認し、その精度および汎用性向上に寄与した。

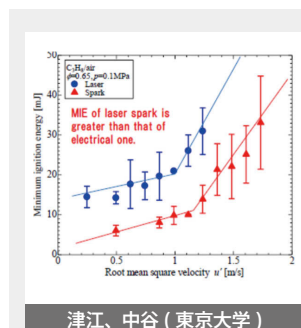


図1 最小点火エネルギーに及ぼす乱流の影響 (定容容器実験)

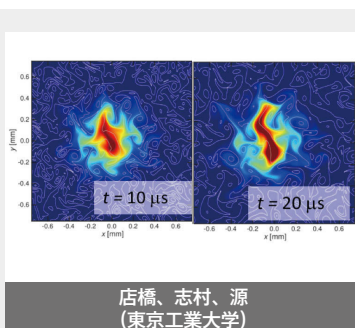


図2 乱流場における火炎核成長挙動 (DNS 計算)

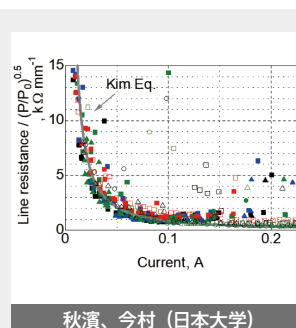


図3 様々な流速、当量比、圧力による線抵抗と電流の関係

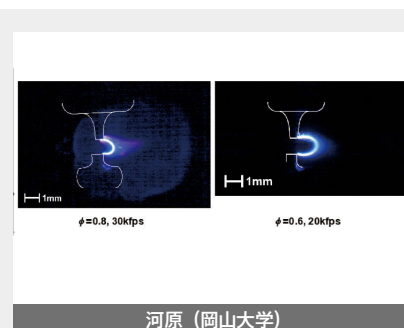


図4 初期火炎核形成過程 (RCFM実験)

メカニズム成立条件: 圧力0.1 $\sim$ 1MPa、当量比1.0 $\sim$ 希薄限界の範囲内で検証済。温度依存性は未解明。

モデル/ソフトウェアへの繋がり: 構築した点火モデルはGT-Power、HINOCAに組み込み。

今後の課題: 放電(プラズマ)特性と点火性能の関連性。LES点火モデル構築。

主な 関連論文

- ① N. Saito, 他, Effects of turbulence on ignition of methane-air and n-heptane-air fully premixed mixtures, Combustion Science and Technology, 190 (3) 451-469 (2018). ② N. Kawahara, 他, Ignition process of spark discharge in a spark-ignition engine using a time series of spectra measurements, Proceedings of the Combustion Institute, 36, pp.3451-3458 (2016).

HINOCA: 超希薄・高流動場における火花点火挙動の予測を可能とした。

班長: 東京大学 大学院工学系研究科 教授 津江 光洋



既存ソフトでは点火モデルが組み込まれておらず、点火挙動の予測が不可能であった。

- ▶ 電気回路モデル、放電パーセルモデル、火炎核成長モデルから構成 (図1)。
- ▶ 本点火モデルは GT-Power に組み込み可能 (図2)。
- ▶ 火炎核成長から伝播への遷移に基づき乱流場における点火挙動を定性的に予測 (図3)。

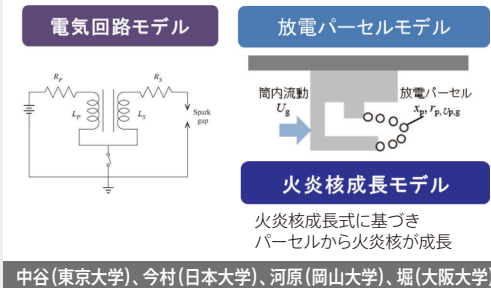


図1 点火モデル概要 (GT-Power用と共通)

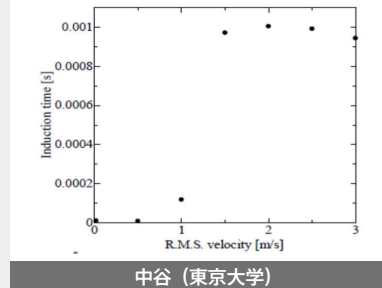


図2 GT-Power用点火モデル計算結果 (乱れ強さと点火遅れの関係)

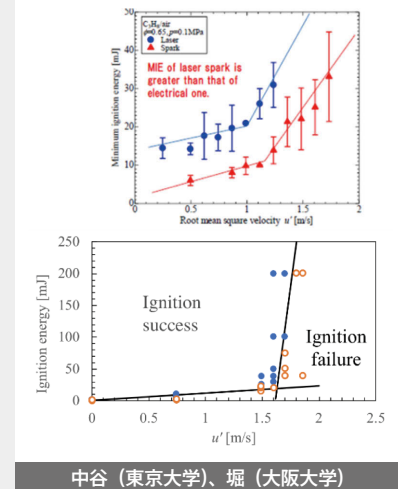


図3 最小点火エネルギーと乱れ強さの関係 (上: 実験 下: 計算 当量比0.68)

実施内容: 流動場における点火・放電挙動計測、放電路と火炎核の同時計測、HINOCAへの点火モデル組み込み。

搭載した新知見: 点火成否境界の燃焼速度特性、最小点火エネルギーの乱れ強さに対する遷移挙動。

今後の課題: LES計算に適する点火モデルおよび化学反応を考慮した点火モデル構築。

主な
関連論文

①堀、火炎核から火炎伝播に至る成長過程のモデリング、第56回 燃焼シンポジウム講演論文集、大阪府堺市、2018。

火炎伝播促進班

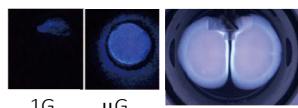
スーパーリーンバーンの火炎伝播メカニズム解明と流動最適化による燃焼促進により、新たな燃焼モデルの構築とエンジン熱効率向上を実現

班長: 九州大学 大学院工学研究院 教授 北川 敏明



リーンバーン条件では燃焼速度が低下し、安定した燃焼が不可能。

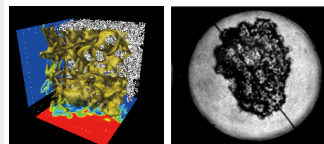
- ▶ スーパーリーンバーン時の燃焼速度を微小重力実験やダブルカーネル法により把握、高精度実験式を構築 (図1)。
- ▶ 定容燃焼実験、スーパーコンピュータによる数値シミュレーション、エンジン内可視化によるスーパーリーンバーン条件での火炎伝播の解析から、スーパーリーンバーンの火炎伝播メカニズムを解明 (図2)。新たな燃焼モデルを構築 (図3)。
- ▶ これらの知見に基づきエンジン内流動を最適化し、燃焼促進を図りエンジン熱効率向上を実現。あわせて、誘電体バリア放電という流動によらない燃焼促進手法も開発 (図4)。



1G μG
微小重力実験 ダブルカーネル
$$S_L = a \phi^b \exp[-c(\phi - d)^2] \left(\frac{P}{P_0} \right)^e \left(\frac{T}{T_0} \right)^f \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right)^g$$

瀬川、片岡 (大阪府立大学)
三上、瀬尾 (山口大学)

図1 層流燃焼速度計測 (微小重力法、ダブルカーネル法)

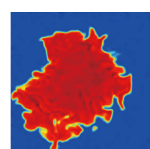


店橋、志村、源 (東京工業大学)、
名田 (徳島大学)
北川、渡邊、永野 (九州大学)

図2 スーパーリーンバーン条件の数値計算と実験による伝播火炎

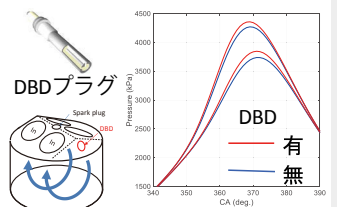
FDSGS model

DNS



店橋、志村、源 (東京工業大学)、
名田 (徳島大学)

図3 燃焼モデルによる予測結果のモデル無し計算との比較・検証



高橋 (産業技術総合研究所)

図4 誘電体バリア放電プラグと燃焼圧力増大効果

メカニズム成立条件: Corrugated flamelet領域条件で燃焼モデルを定容容器実験結果により検証済。

モデル/ソフトウェアへの繋がり: 得られたフラクタルダイナミックSGS燃焼モデルはHINOCAに組み込み。

今後の課題: さらなる燃焼促進技術の開発、熱効率向上。

主な
関連論文

①山田 理恵 (東工大), 名田 謙 (徳島大), Yenerdag Basimil (東工大), 源 勇気 (東工大), 志村 祐康 (東工大), 店橋 護 (東工大): A FRACTAL DYNAMIC SGS COMBUSTION MODEL FOR LES OF TURBULENT PREMIXED FLAMES UNDER A PRESSURE RISING CONDITION, 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9) (2017).

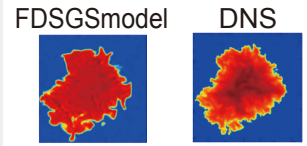
HINOCA:サブグリッドスケール (SGS) 燃焼モデルを構築し、ガソリンエンジンでの計算を可能とした。

班長:九州大学 大学院工学研究院 教授 北川 敏明



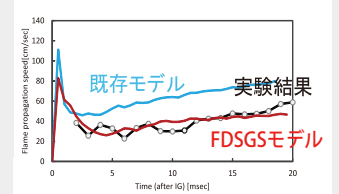
3D エンジンシミュレーションにおいて、精度の高い燃焼モデルが存在しなかった。

- ▶ フラクタル・ダイナミック SGS (FDSGS) 燃焼モデルを開発 (図 1)。大規模スケールの歪み速度が大きな領域で、局所火炎面積が増大する現象を再現。
- ▶ 層流燃焼速度のモデル化 (図 2)。
- ▶ 膨張の効果に基づく補正項を、データベース不要とするモデル化 (図 3)。
- ▶ DNS (図 4)、実験結果 (図 5) との比較検証から精度を実証。



店橋、志村、源 (東京工業大学)、名田 (徳島大学)

図4 燃焼モデルによる予測結果DNSとの比較・検証



草鹿、伸長 (早稲田大学)、北川、渡邊、永野 (九州大学)

図5 燃焼モデルによる予測結果の実験結果との比較・検証

$$\frac{S_T}{S_L} = \frac{A_T}{A_L} = \left(\frac{\alpha^4 v^3}{2\sqrt{2} C_s^2 \Delta^6} \right)^{\frac{2-D_3}{4}} (\tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij} - \text{div}(\tilde{\mathbf{u}})^2)^{\frac{-3(2-D_3)}{8}} + \frac{\delta_\Delta}{\delta_L} \frac{\text{div}(\tilde{\mathbf{u}})}{(\text{div}(\mathbf{u})_L)|_{G=G0}}$$

乱流運動の効果 膨張の効果

店橋、志村、源 (東京工業大学)、名田 (徳島大学)

図1 フラクタル・ダイナミック SGS (FDSGS) 燃焼モデル

$$S_L = \alpha \phi^b \exp\{-c(\phi - d)^2\} \left(\frac{p}{0.5}\right)^{f(\phi)} \left(\frac{T}{450}\right)^{g(\phi)}$$

$$C_1 \frac{(1+\phi)(\beta-\alpha)(\gamma+\phi)^2}{(\alpha+\phi)(\beta+\phi)} \left(\frac{d\rho^*}{dx^*}\right)^{-1} \frac{C_{FT} \alpha}{S_L^2} \text{div}(\tilde{\mathbf{u}})$$

瀬川、片岡 (大阪府立大学)

図2 層流燃焼速度のモデル化

名田 (徳島大学)

図3 膨張の効果の項のモデル化

実施内容: 乱流火炎のフラクタル特性に基づくSGS燃焼モデルの開発。多種燃料対応のためのモデル化。

搭載した新知見: 乱流火炎のフラクタル次元、インナーカットオフスケールなどの特性。層流火炎に起因する項のモデル化。

今後の課題: さらなる適用可能範囲の拡大。

主な関連論文

①山田 理恵 (東工大), 名田 謙 (徳島大), Yenerdag Basimil (東工大), 源 勇気 (東工大), 志村 祐康 (東工大), 店橋 護 (東工大): A FRACTAL DYNAMIC SGS COMBUSTION MODEL FOR LES OF TURBULENT PREMIXED FLAMES UNDER A PRESSURE RISING CONDITION, 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9) (2017).

冷却損失低減班

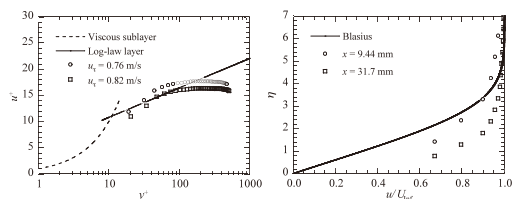
エンジン内壁面速度境界層構造を明らかにするとともに、冷却損失低減・ノック抑制技術を開発し、共用エンジンに適用することでグロス図示熱効率50.1%を達成した。

班長:東京工業大学 工学院 教授 小酒 英範



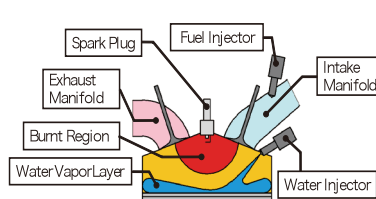
従来のエンジン壁面熱伝達モデルは、発達した乱流境界層を前提に構築されており、冷却損失の高精度予測は困難である。スーパーリーンバーンにおいても高負荷ではノックが発生し熱効率の向上を阻害していた。

- ▶ SIP 共用可視化エンジンにおいてμ PIV を用いて、ピストン頂面上の境界層内速度分布を計測し、速度境界層が発達した乱流境界層ではないことを世界で初めて明らかにした (図 1)。
- ▶ 冷却損失低減技術の効果を評価するために、新たに3種類の熱流束センサを開発した。
- ▶ 冷却損失低減とノック抑制技術として筒内水噴射を開発し (図 2)、SIP 共用エンジンへ適用することで上記の開発センサにより冷却損失低減効果を実証し、グロス図示熱効率 50.1%を達成した (図 3)。



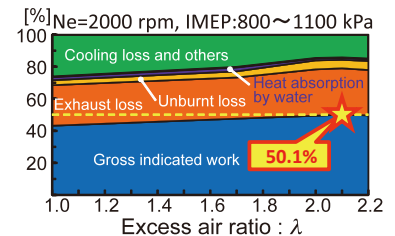
店橋、志村、源 (東京工業大学)、岩本 (東京農工大学)、飯田、横森 (慶應義塾大学)

図1 ピストン頂面上の速度分布 (μPIV計測)



小酒、佐藤、長澤 (東京工業大学)

図2 スーパーリーンバーンへの筒内水噴射技術の提案



小酒、佐藤、長澤 (東京工業大学)、飯田、横森 (慶應義塾大学)、三原、石井 (東京都市大学)、中別府、出島 (明治大学)、鈴木、李 (東京大学)

図3 スーパーリーンバーンと筒内水噴射による熱効率の向上 (共用エンジン実証)

実証条件: SIP単気筒エンジン、機関回転数:2000rpm、λ=2.1、IMEP=1.1MPa、水噴射質量は供給燃料質量の20%

モデル/ソフトウェアへの繋がり: 得られた計測データはHINOCAおよび1Dモデルの検証用に提供。

今後の課題: 水噴射条件の最適化。水噴射による燃焼阻害の最小化(最小水噴射量の低減)。水噴射時期の自動制御。

主な関連論文

① Shimura, M., Yoshida, S., Minamoto, Y., Yokomori, T., Iwamoto, K., Tanahashi, M. and Kosaka, H. : Micro PIV Investigation of Near Wall Behaviors of Tumble Enhanced Flow in an IC Engine, International Journal of Engine Research, (2018), doi: 10.1177/1468087418774710, ②大倉優一, 長澤剛, 山田涼太, 佐藤進, 小酒英範: スーパーリーンバーン SI エンジンにおける筒内水噴射による熱効率向上に関する研究、第 29 回内燃機関シンポジウム、京都 (2018.11.26 発表予定)

HINOCAにおける熱伝達解析を高精度化した。

班長: 東京工業大学 工学院 教授 小酒 英範



LES において格子サイズが壁面境界層を解析するに十分でない場合に壁面熱伝達の解析精度が低い。

- ▶ LES 用解析的壁関数 (AWF) を開発し HINOCA へ組み込み、壁面熱流束の解析精度を向上させた (図 1)。
- ▶ LES 用マルチタイムスケール (MTS) を開発し HINOCA へ組み込み、壁面熱流束の解析精度を向上させた (図 1)。
- ▶ エンジン内流動の特徴を有した流動場としてキャビティ内流れを選定し DNS 解析を行い、エンジン内流動場と似た構造を有していることを明らかにし、解析解の格子依存性等を調べるアプリオリツールを開発した (図 2)。

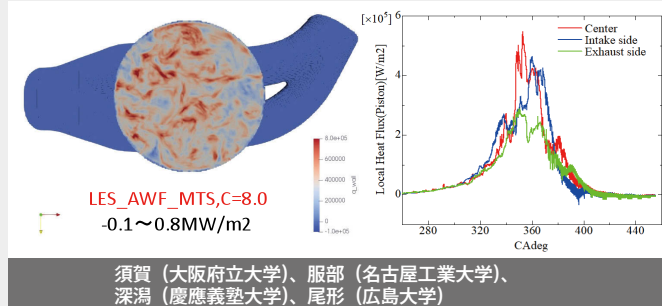


図1 HINOCAによるピストン表面局所熱流束の解析結果 (熱流束分布の詳細な情報を得ることが可能となった)

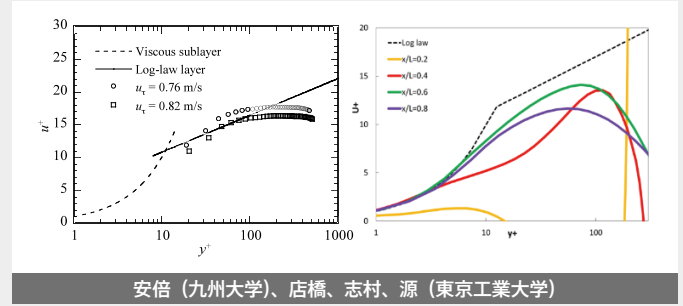


図2 ピストン表面中央の壁面速度境界層とキャビティ内流速度境界層の比較 (キャビティ内流の壁面速度境界層の構造はエンジン壁面速度境界層の構造と類似している)

実施内容: HINOCA用の解析的壁関数モデルとマルチタイムスケールモデルの開発。

搭載した新知見: HINOCAの熱伝達解析の精度向上。エンジン内流動とキャビティ内流れの類似性を明らかにした。

今後の課題: HINOCA-RANSの熱伝達モデルの精度向上 AWFモデルの粗面対応。

主な関連論文

- ① Sakamoto, T., Kuwata, Y. and Suga, K.: A study on wall-modeled large eddy simulations by the analytical wall function, Proc. The 29th International Symposium on Transport Phenomena, Honolulu, USA, (2018.10.30-11.2)8p. ② Hattori, H. and Tsutsui, K.: Multi-time-scale turbulent heat transfer model for predictions of various turbulent heat transfer phenomena, Int. J. Adv. Eng. Sci. Appl. Math., Vol. 11, pp. 1-11, (2019)

燃料・ノック抑制班

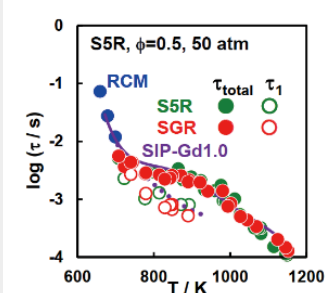
ノッキングと(1)燃料/燃焼特性/化学反応との関係・(2)圧縮性流体力学との関係を解明することによりノッキング抑制手法を提案

班長: 広島大学 大学院工学研究科 教授 三好 明



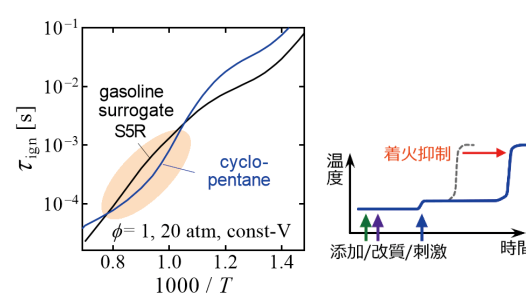
燃料のオクタン価 (RON および MON)・燃焼速度以外の指標がなく説明と制御は困難。

- ▶ ガソリンサロゲートの反応機構を、衝撃波管・RCM・MFR 着火性試験と火炎伝播速度に対して検証することで構築した。
- ▶ さらに冷炎の直接観測を行うことで、ノッキング抑制の鍵となる反応機構を明らかにした (図 1)。
- ▶ 構築した反応機構を用いた計算によりノック抑制手法を提案した (図 2)。
- ▶ 一次元直接 NS 流体計算と SRCM および可視化エンジンを用いて圧縮性流体とノック振動の関係を解明した (図 3)。



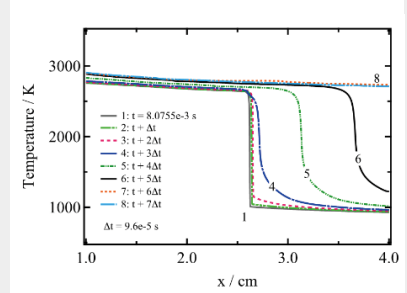
高橋 (上智大学)

図1 衝撃波管による冷炎観測



三好 (広島大学)

図2 燃料設計の提案(左) ノック抑制手法の提案(右)



寺島 (北海道大学)

図3 詳細反応1D-DNS

適応条件: 筒内条件のストイキ燃焼～超希薄燃焼。

モデル/ソフトウェアへの繋がり: 詳細反応機構・簡略化反応機構の構築と 1D 用ノックモデルの構築。

今後の課題: 具体的な燃料設計とノック抑制への展開。

主な関連論文

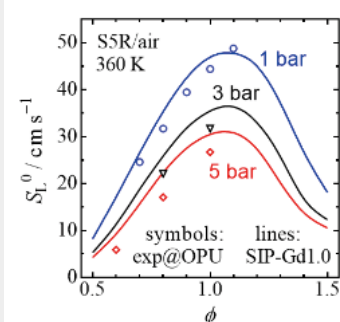
- ① A. Miyoshi, Int. J. Automotive Eng., 8, 130-136 (2017) ② H. Terashima et al., Origin and reactivity of hot-spots in end-gas autoignition with effects of negative temperature coefficients, Comb.Flame, 184, 324-334 (2017)

ガソリンサロゲート反応機構：将来の再現性を担保した試験研究用ガソリンの提案と半定量的予測性を有する反応機構の構築

班長：広島大学 大学院工学研究科 教授 三好 明

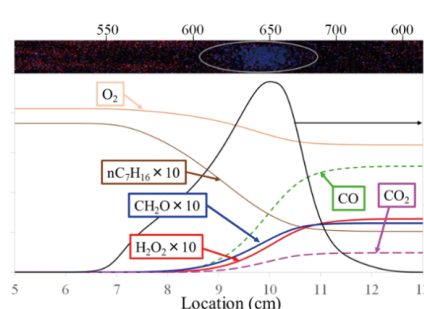


実燃料は再現性が保証されず、反応機構による検討は定性的。
国内市場のレギュラーおよびプレミアムガソリンの基礎燃焼特性を模擬するサロゲート混合物を提案した。
ガソリンサロゲートの詳細 / 簡略化反応機構を、火炎伝播速度と衝撃波管・MFR 着火試験に対して検証することで構築 (図 1 ~ 3)。半定量的な予測を可能にした。



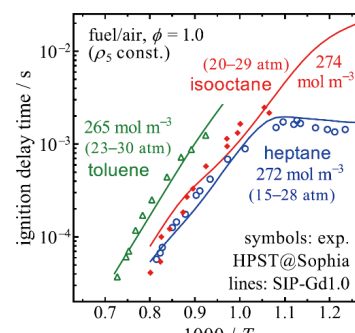
瀬川 (大阪立大学)

図1 火炎伝播速度の検証



丸田 (東北大学)

図2 MFRによる着火性検証



高橋 (上智大学)

図3 衝撃波管による着火遅れ検証

実施内容: 実ガソリンの基礎燃焼特性の再現を主眼においたサロゲート混合物を提案し、反応機構を構築。

搭載した新知見: 実測により検証された構成成分および混合物の着火遅れ時間と火炎伝播速度。

今後の課題: 燃料と燃焼の技術開発への活用。

主な関連論文

①三好・酒井, ガソリンサロゲート詳細反応機構の構築, 自動車技術会論文集, 48, 5, 1021-1026 (2017) ②酒井・三好, ガソリンサロゲート燃料簡略反応機構の構築, 第 28 回内燃機関シンポジウム, 2017 年 12 月 6 日 ~ 8 日, 福岡。

リーンバーン時の燃焼変動低減と熱効率最適化制御

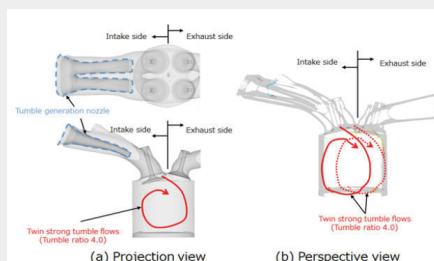
班長：千葉大学 大学院工学研究科 教授 森吉 泰生



超希薄高流動場に適用できる 1D モデルはなかった。そのような場でサイクル毎の燃焼変動を低減するための現象解明や対策は存在しなかった。

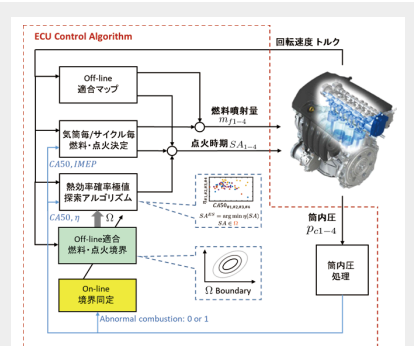
- ▶ (モデル) 各担当大学で新たに開発・検証された 1D のサブモデルを組み合わせ、SIP 単気筒エンジンをベースに仮想的に 4 気筒ターボエンジンを想定し、その正味効率を高精度に予測できる 1D モデルを開発した。
- ▶ (ばらつき) スーパーリーン燃焼において出力のサイクル変動が生じるのは、膨張行程初期に生じるバルククエンチであることを見だし、その解決方法を示した (図 1)。
- ▶ エンジン出力のばらつき縮減と効率向上を統括的に考慮した ECU 制御アルゴリズムを開発し、4 気筒エンジンで実証した。

ノック確率を閾値とした境界識別とその拘束の下でオンボード学習によって最大効率を実現する最適化制御手法は世界初 (図 2)。



森吉、窪山 (千葉大学)

図1 サイクル変動抑制法



申 (上智大学)

図2 ECU制御アルゴリズム

メカニズム成立条件: 殆どのモデルは空気過剰率 1~2 の範囲内で検証済。実験は $\lambda = 1.0 \sim 1.8$ の範囲内で検証済。

モデル/ソフトウェアへの繋がり: 1D モデルとして GT-Power に組み込み済。

今後の課題: ノックモデルのリーン限界付近での検証。制御モデルのリーン限界付近での検証。

主な関連論文

① Y. Moriyoshi, T. Kuboyama, M. Kaneko, T. Yamada and H. Sato, Fuel Stratification Using Twin-Tumble Intake Flows to Extend Lean Limit in Super-Lean Gasoline Combustion, SAE 2018-01-1664, 2018 ② Xun Shen, Yahui Zhang, Tielong Shen, and Chanyut Khajontrairatdet. Spark Advance Self Optimization with Knock Probability Threshold for Lean-Burn Operation Mode of SI engine. Energy, Vol. 122, pp 1-10, 2017.