

SIP革新的燃焼技術

Research Report 2018.1



プログラムディレクター
杉山 雅則
(トヨタ自動車 未来創生センター)
(エグゼクティブアドバイザー)

SIP革新的燃焼技術も残り1年となりました。

SIP開始以降、「産産学学」の連携が強固なものに成長するに従い、研究成果も着実に積み上がってきました。最高正味熱効率50%というプロジェクトの最終目標の達成に向けた前進はもちろん、学会・論文発表等も700件に迫り(2017年11月時点)、エンジン技術・燃焼科学における知の蓄積にもSIPが貢献できつつあると考えております。

これらの成果は、SIP革新的燃焼技術の下に集った産学官のエネルギーによるものです。SIPが終了してもこれを継続・発展させ、さらに次世代に受け渡していけるような道筋をつけるのも、このプロジェクトに参画した私たちの役割であるとの想いを、SIP期間残りわずかな今、改めて強くしています。具体的には、SIPのチーム・大学横断で研究成果を集約するデータベースの導入や、内燃機関産学官連携コンソーシアムの発足などが、関係者のご尽力により進んでいるところです。

SIPで灯った連携と成果の「奇跡の火」を絶やさないためには、SIP終了後のSIP参画者の継続参画および新規参画の両方によって、これらのフレームワークに魂を吹き込むことが不可欠です。読者の皆様による各方面からご支援を、どうぞよろしくお願い申し上げます。



最新研究成果 Report1

慶應義塾大学大学院 菅田健志

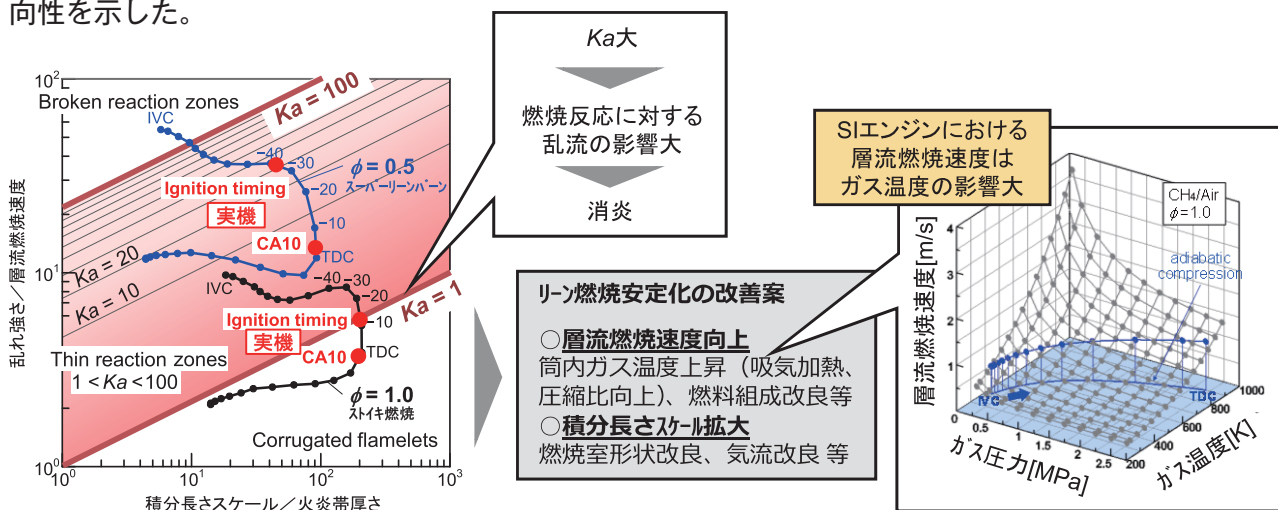
2017SIP 燃焼アワード

SI エンジンにおける スーパーリーンバーンの実現に向けた研究

ガソリン燃焼チームでは熱効率 50% 実現の基盤となる革新的燃焼技術（当量比 0.5 以下のスーパーリーンバーン）の確立に取り組んでいる。

現在、リーン燃焼限界拡大のための技術として高タンブル流による乱れ活用が進んでいるが、スーパーリーンバーンの実現には至っていない。

そこで、本研究では基礎現象に立ち返り、Peters の乱流燃焼ダイアグラムに着目してスーパーリーンバーンの燃焼形態を検討した。その燃焼形態が従来の火炎伝播と異なることを明確化し、リーン燃焼安定化に向けた改善方向性を示した。



詳しくは：

菅田健志、李世竣、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 2016 年秋季大会 学術講演会 講演予稿集、No.1-177、2003-2007（2016）
菅田健志、李世竣、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、48（4）、801-806（2017）

コメント

SIP ガソリン燃焼で実現しようとしているスーパーリーンバーン（当量比 0.5）の燃焼形態が、古くから提唱されてきた Peters の乱流燃焼ダイアグラム上でどの領域に位置するかをクランク角毎に詳細に計算し明らかにしたことは大いに評価できるので、'17SIP 燃焼アワードに選出した。ただ、 Ka 数 = 100 越えの燃焼形態である Broken reaction zone には本計算でも燃焼期間は入っていない、今後、実際のスーパーリーンバーンエンジン内での燃焼形態の検証に是非期待したい。

SIP 燃焼 サブ・プログラムディレクター 古野 志健男（SOKEN 専務取締役）

最新研究成果 Report2

熊本大学大学院 藤井聖也

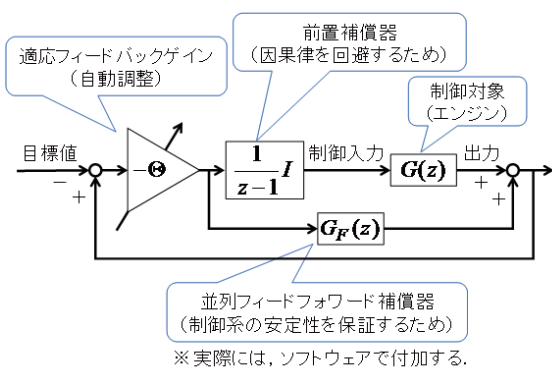
2017SIP 燃焼アワード



3 段噴射ディーゼルエンジンに対する 適応出力フィードバック制御に基づく燃焼制御

エンジン燃焼は非常に複雑で、また次世代の燃焼技術は環境に大きく影響され、制御用に構築したモデルとは必ず何らかの差が生ずる。従ってモデルベース制御における不確かさに対して、高速で補正し、ロバスト（頑健）に制御性能を保つ適応出力フィードバック制御アルゴリズムの開発を行った。

エンジン制御システム

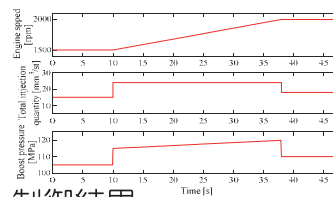


出力
筒内最大圧力時期
筒内最大圧力

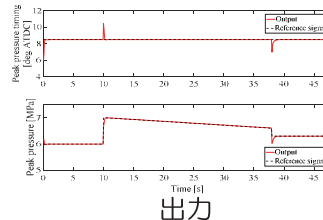
制御入力
メイン燃料噴射時期
パイロットとプレの燃料噴射量の和

数値シミュレーション

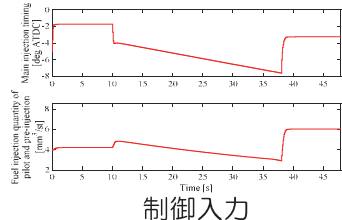
● 運転条件（走行モード）



● 制御結果



出力



制御入力

詳しくは：

Seiya Fujii and Ikuro Mizumoto : Adaptive Output Feedback Control System Design for Diesel Engine with Triple Fuel Injection, The Ninth International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA2017) , C109 (2017)

コメント

4 気筒ディーゼルエンジンの燃焼制御について、まず非線形モデルを線形近似化したモデルに対して、適応出力フィードバック制御系を実装するために、概強正実性を満たすように前置フィードフォワード補償器を設計した。さらに、拡張されたプラントに対して非連成化を行い、この系に対してフィードバックゲインを最適化するべく適応出力フィードバック制御系を実装した。シミュレーション結果から、目標値に誤差無く追従することが明らかとなった。本論文とは別に実験も行われており、この成果の有効性が実証されている。その意味で燃焼効率改善に寄与する可能性を有しており、今後の成果が期待される。

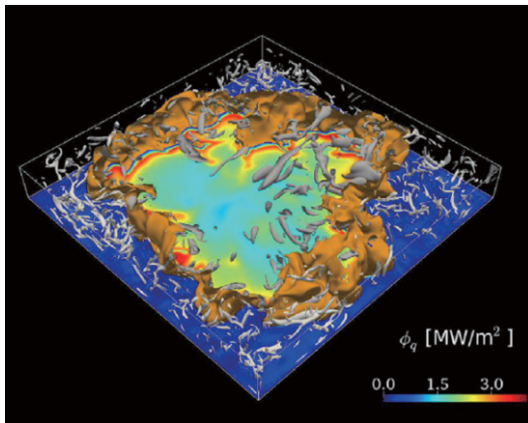
SIP 燃焼 プログラム会議委員 野波 健蔵（千葉大学 名誉教授）

最新研究成果 Report3

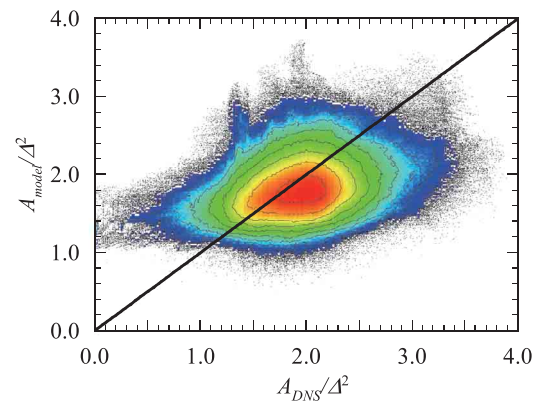
東京工業大学工学院 山田理恵

平均圧力が急激変化する燃焼場を対象とした 世界初の SGS 燃焼モデルの検証と開発

ガソリンエンジンを想定して、平均圧力が大きく変化する乱流燃焼場、定容容器内乱流予混合火炎の DNS 結果を用いて、Fractal Dynamic SGS 燃焼モデルの検証を行うとともに、その適用性拡大のための手法を提案した。



直数数値計算結果
(オレンジ: 火炎面, 白および灰色: 小スケール渦,
定容容器底面の色の变化: 熱流束)



平均圧力が変化する乱流予混合火炎
におけるモデル予測値と厳密値(DNS
結果)との結合確率密度関数

詳しくは：

山田 理恵、名田 譲、平岡 克大、Yenerdag Basimil、源 勇気、志村 祐康、店橋 護：定容容器内乱流予混合火炎のためのフラクタル・ダイナミック SGS 燃焼モデルの構築、第 30 回数値流体力学シンポジウム、第 30 回数値流体力学シンポジウム予稿集、1-4 (2016)

コメント

筆者らの研究グループ（東工大店橋研）で開発されたフラクタル・ダイナミック SGS (FDSGS) 燃焼モデルは、高乱流強度条件下の燃焼特性予測にも有効であることはすでに示されているが、本研究では更にエンジンのような圧力変動のある燃焼場においても有効であることを実証している。さらに、FDSGS を用いた LES 計算の負荷を軽減するため、圧力変動のある場の層流燃焼特性を簡便に推定する方法を提案しているが、この手法は SIP で開発している HINOCA の LES 計算負荷低減に大きく寄与すると期待される。

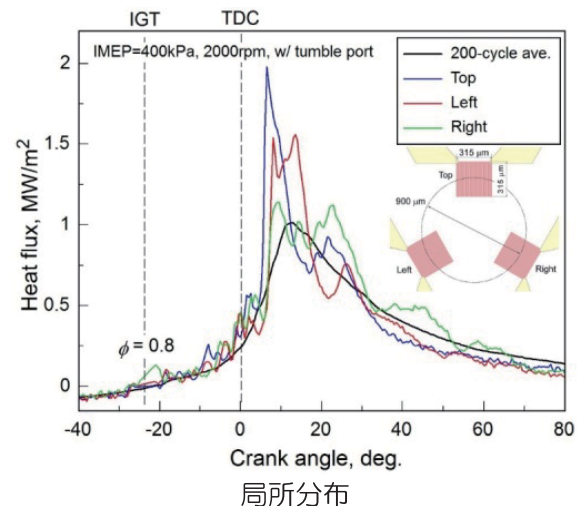
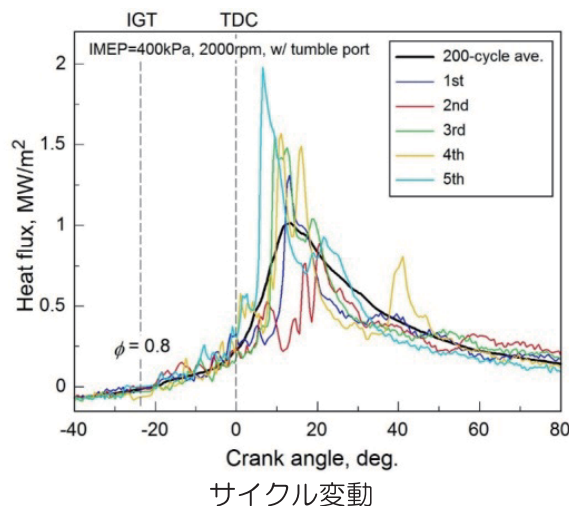
SIP 燃焼 プログラム会議委員 越 光男（大学改革支援・学位授与機構 特任教授）

最新研究成果 Report4

明治大学大学院 出島一仁

エンジン壁面の乱流熱伝達特性解明につながる 隣接 3 点 MEMS 熱流束センサの開発

エンジンの壁面熱伝達特性解明のため、MEMS 技術を用いて熱流束センサを開発した。本センサは cycle-by-cycle での熱流束評価が可能な高い S/N 比を持ち、乱流と同等の空間スケールで同時隣接 3 点測定が可能である。エンジンでの熱流束測定では乱流による変動が明確に捉えられており、今後、乱流特性の抽出と熱伝達特性の解明が期待される。



詳しくは：

K. Dejima, O. Nakabeppu, Y. Nakamura, T. Tsuchiya : Local three-point heat flux measurement on sub-millimeter scale in an internal combustion engine, ASPACC2017, 239 (2017) .

コメント

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術で製作された、高い時間・空間分解能を有する熱流束センサである。

左図では火炎面の到達時期近傍で大きなサイクル変動が捉えられており、直接撮影で火炎伝播のサイクル変動を見ているような印象を与える。右図では数百 μ 離れた 3 点の局所熱流束でピーク値と時期の違いも検出されている。

強力な計測ツールであり、ガソリン燃焼チームで検討されている、各種の冷却損失低減手法の解析にまず活用してもらいたい。

SIP 燃焼 プログラム会議委員 村中 重夫 (元 日産自動車)

最新研究成果 Report5

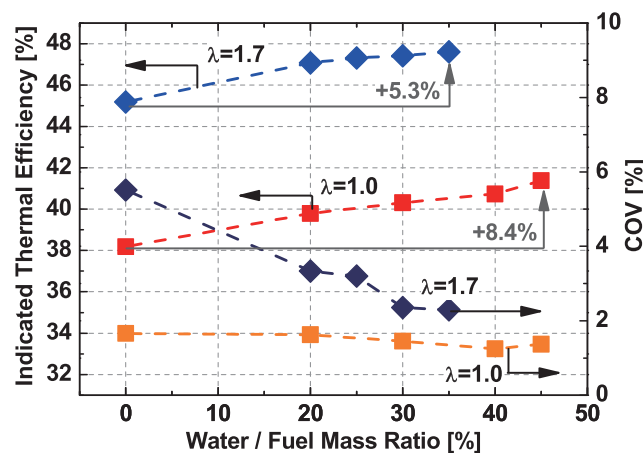
東京工業大学工学院 山田涼太

筒内水噴射による スーパーリーンバーンの熱効率向上

スーパーリーンバーンにおいても高負荷運転ではノックが発生し点火時期が制約され熱効率向上の妨げとなる。従来よりノック抑制のために SI 機関への水添加や噴射が行われているが、ほとんどが量論混合気燃焼に対する適用である。希薄燃焼では水添加による着火性低下や燃焼不安定化が課題である。

本研究では、水の筒内直接噴射により、燃焼室壁面近傍のみに水蒸気を成層分布させることで希薄燃焼の悪化を招くことなく、ノック抑制と冷却損失低減を実現する。これまでに急速圧縮膨張装置において水添加が壁面熱流束を低減することを明らか

にし、さらに共用エンジンに筒内水噴射を適用することで、空気過剰率 $\lambda = 1.7$ という希薄燃焼において、図示熱効率を 5.3% 向上させることに成功した。



水噴射による熱効率向上効果
(SIP共用単気筒エンジン)

詳しくは：

Ryota Yamada, Susumu Sato and Hidenori Kosaka. "A Study on Reduction of Cooling Loss by Water Addition in SI engine by using Rapid Compression and Expansion Machine", COMODIA2017

コメント

高負荷のノック抑制手段としての（予混合的）水噴射は古くから例はあるが、本研究は上死点近傍でピストン冠面に水を噴射して成層化を図り冷却損失低減を狙ったところが新しい。

一般に G/F の増大と共に燃焼変動（COV）は増大する。図 1 の結果はこれと逆で、水噴射量の増加と共に燃焼安定性がよくなり熱効率も向上している。このことは上死点近傍の水噴射に燃焼改善効果があることを示している。噴射時期、方向、量の最適化で効果の最大化を図ってもらいたい。

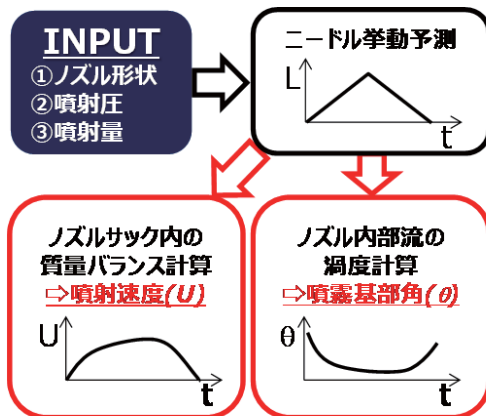
SIP 燃焼 プログラム会議委員 村中 重夫（元 日産自動車）

最新研究成果 Report6

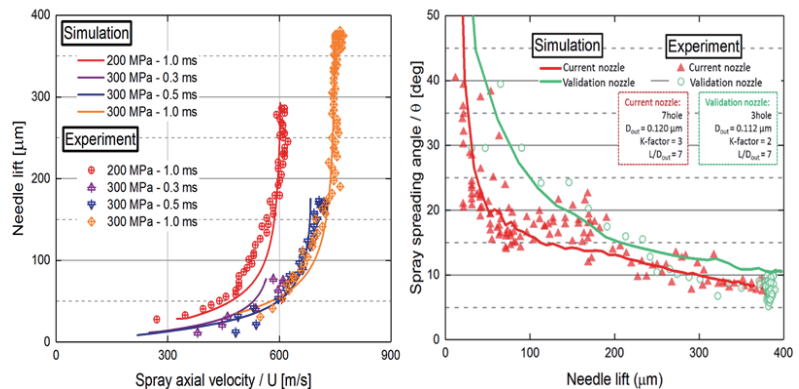
産業技術総合研究所 主任研究員 文石 洸

エンジン多段噴射の 境界条件予測モデル構築

「先進 X 線噴霧計測技法」を用い、エンジン多段噴射における過渡的なニードル挙動が噴射速度（噴射率）および噴霧基部角などの初期流動条件に及ぼす影響を解明しモデル化した。



【モデルの概要】



【モデルの予測精度検証】

詳しくは：

W. Huang, S. Moon*, J. Jeon, Y. Gao, Z. Li, J. Wang, A Model for Predicting the Transient Spray Dynamics of Engine Multiple Injections, ILASS-Asia 2017, Korea, Oct 2017.

W. Huang, S. Moon*, K. Ohsawa, Near-nozzle dynamics of diesel spray under varied needle lifts and its prediction using analytical model, Fuel, vol. 180, pp. 292-300, 2016.

コメント

分割パイロット噴射や多段噴射の実現のためには、微量燃料の精密な噴射制御が要求される。しかし、この領域における噴霧の挙動は、計測および解析の困難さから従来あまり行われてこなかった。この研究は特に低噴射量領域におけるノズルリフト量と噴霧（噴霧速度および噴霧拡がり角）の関係を X-ray Phase Contrast Imaging 法と解析モデルを用いて明らかにしたもので、今後のディーゼル燃焼の改善および PCCI などの新しい燃焼法の開発に大きく貢献することが期待される。

SIP 燃焼 プログラム会議委員 工藤 俊治（元 トヨタ自動車／科学技術振興機構 戦略ディレクター）

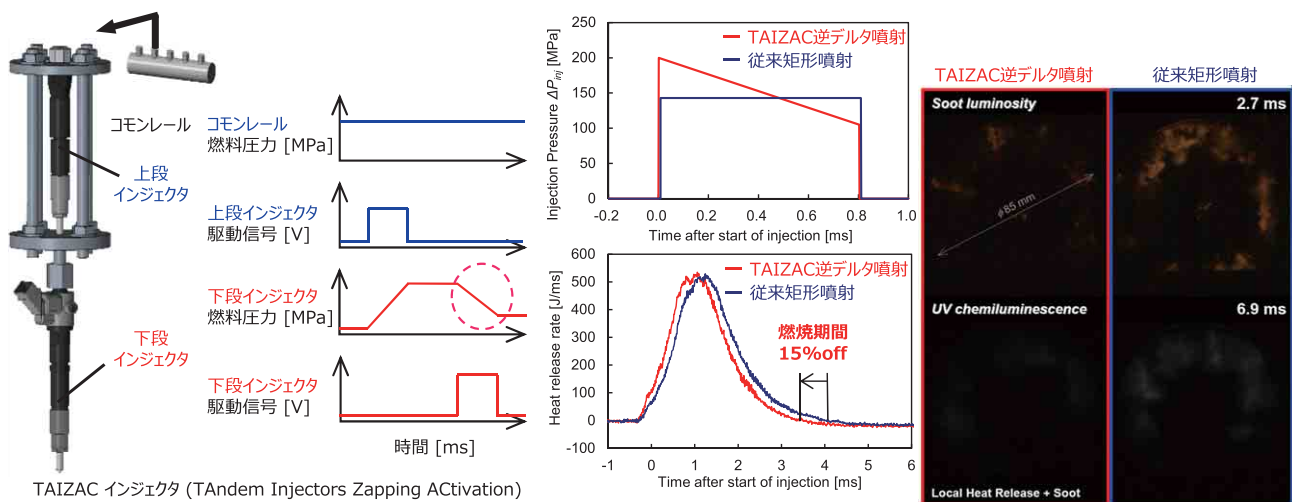
最新研究成果 Report7

明治大学大学院 遠山義明



TAIZAC インジェクタを開発 ～簡便な機構で逆デルタ噴射が可能に～

燃焼期間短縮を狙い、逆デルタ噴射を実現。TAIZAC による逆デルタ噴射の容器実験で、燃焼期間の 15% 短縮を実証。更に急峻な逆デルタ噴射を実現する改良型 TAIZAC を製作し実機に搭載完了、性能評価実施中。



詳しくは：

猿渡蒼周、遠山義明、嶋田泰三、相澤哲哉：ディーゼル噴霧火炎の後燃え低減のための噴射率可変インジェクタの設計及び開発、JSAE 関東支部講演会（2017 年 3 月 8 日@日本大学）

コメント

ディーゼル噴霧火炎の後燃え低減を狙いとした逆デルタ噴射コンセプトを実証するため実機搭載可能な TAIZAC（噴射率可変インジェクタ）を新規設計、試作した。その TAIZAC は市販インジェクタの改修活用によるシリーズ配列ツインアクチュエータ機構や新動作反転機構などアイデアを駆使したものから構成され、この一貫した行動はものづくりの原点と思える。今後、更なる改良や進化に期待したい。

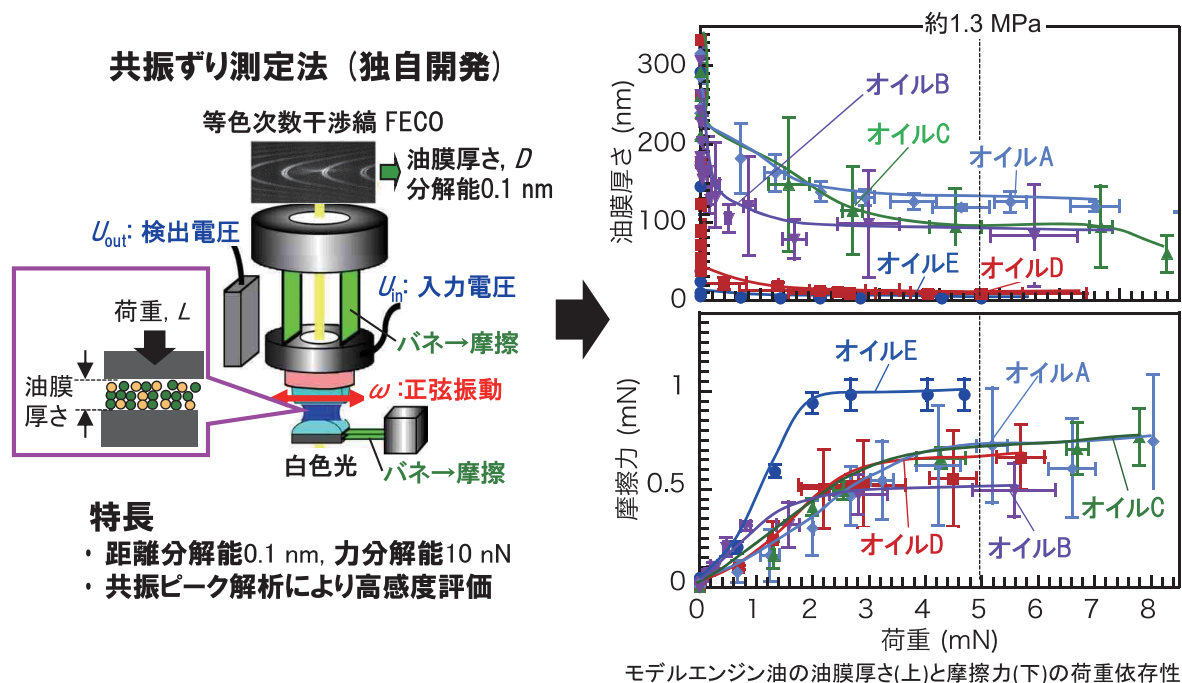
SIP 燃焼 プログラム会議委員 長弘 憲一（元 本田技術研究所）

最新研究成果 Report8

東北大学大学院 柴崎翔伍

潤滑油のナノレベル評価

共振ずり測定法を用いて、添加剤成分の異なる7種類のモデルエンジン油を評価し、油膜厚さと摩擦力の面圧依存性をナノレベルで明らかにした。金属系清浄剤に含まれる粒子により約100 nmの油膜が保持される（オイルA,B,Cデータ参照）、基油（オイルE）に粘度指数向上剤のみを添加（オイルD）で境界摩擦が半減するなど、従来知られていない添加剤の機能を明らかにした。



詳しくは：

柴崎翔伍, 水上雅史, 吉田沙恵, 柳町拓哉, 田邊匡生, 栗原和枝, 「共振ずり測定法によるエンジンオイルの潤滑特性評価：添加剤の効果の検討」, トライボロジスト, vol.63, no.4 (2018) 掲載予定

コメント

東北大学栗原グループが開発してきた共振ずり測定法（RSM）を、潤滑油の油膜およびせん断特性の解析に適用した。特に SIP モデル潤滑油の油膜特性を解析し、金属系清浄剤や粘度指数向上剤の添加油において油膜形成およびせん断特性をナノスケールで明らかにしたことは興味深い。今後は、潤滑条件に近いせん断速度、面圧および温度の影響を明らかにするとともに界面の化学構造を明らかにすることで、エンジン潤滑に一層貢献すると期待される。

SIP 燃焼 プログラム会議委員 森 誠之（岩手大学 名誉教授）

最新研究成果 Report9

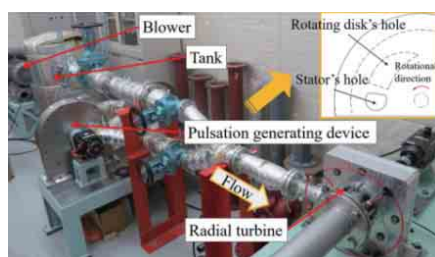
早稲田大学理工学術院 中村揚平

脈動流下における タービン内部流れの可視化

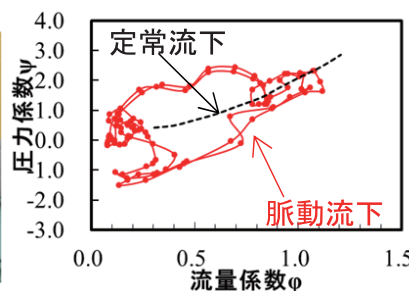
自動車用過給機は脈動流下で運転するために定常流下とは異なった性能、挙動を示す。本研究では PIV を用いて、脈動流下におけるタービン内部流れを詳細に計測し、脈動流がタービンの効率に与える影響を明らかにした。



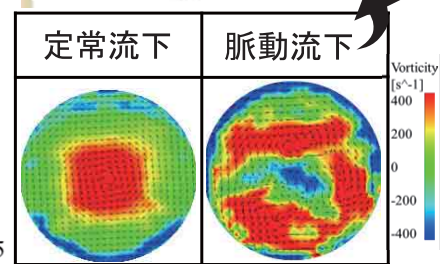
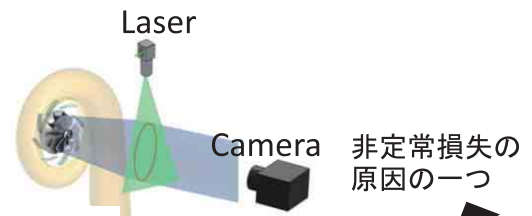
- 脈動流下の圧力、流量特性のヒステリシスを確認
- 脈動流下の流れを可視化し、性能を定量化
- 低周波数ほど非定常損失が増大



脈動流下タービン試験結装置



脈動流下特性曲線



タービン出口旋回可視化(PIV)

詳しくは：

M. Chinen, Y. Nakamura, S. Shiratori, S. Yamada, K. Yasui and K. Miyagawa : INVESTIGATION OF TURBOCHARGER CHARACTERISTICS BY FLOW VISUALIZATION USING PIV AND CFD ANALYSIS UNDER STEADY AND PULSATING FLOW, The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, 1-5 (2017)

コメント

ディーゼルエンジンはもとより、近年、直噴のガソリンエンジンにおいても、ダウンサイジングの要請から過給器を用いることが一般化しつつある。それゆえ、エンジンの全体効率改善のためには過給器の効率を上げることが求められている。一方、過給器の設計は定常流をもとに行われることがほとんどであった。本研究は脈動下において、PIV を用いてタービン内の流れを精密に測定し、脈動が効率に与える影響を明らかにした。この成果は過給器の設計および効率改善に大きく貢献するものとして期待される。

SIP 燃焼 プログラム会議委員 工藤 俊治 (元 トヨタ自動車/科学技術振興機構 戦略ディレクター)

What's New?

～燃焼研究 世界の最前線～

エンジンの熱効率向上において熱損失の低減が欠かせない。今回はエンジンの3Dモデリングにおいて長年決着のつかない壁面熱損失に関するスタンフォード大学とミシガン大学の共同研究を紹介する。Maが提案した非平衡壁モデル(非定常壁モデル)では、非定常、対流、圧力勾配、圧力仕事、熱発生などの項をモメンタムとエネルギー方程式に導入し、さらに壁面に垂直な速度成分の項を連続の式に追加して非平衡境界層方程式を解いている。境界条件として、マッチング点(バルクフローと境界層流れの接続点)における流速値と乱流特性値をPIV測定値で与えている。

火花点火式光学エンジンで測定したPIV計測と熱流束測定の結果を計算値と比較し、着火運転時の熱流束について、平衡モデル(従来の対数壁法則)の計算値は実測値のほぼ1/4であるのに対して、非平衡モデルの計算値は実測値とよく一致することを示した。SIPの熱損失研究に関して、今後の方向を示唆した研究といえよう。

書誌情報

- Peter C Ma, Mark Green, Volker Sick and Matthias Ihme, Non-equilibrium wall-modeling for internal combustion engine simulations with wall heat transfer, Int. Jour. of Engine Research. 2017, vol.18 (1-2) pp.15-25



神本 武征

東京工業大学 名誉教授

SIP 革新的燃烧技術 **Research Report 2018.1**

発 行 日：2018年1月25日

編集発行：科学技術振興機構（JST）環境エネルギー研究開発推進部 SIP革新的燃烧技術 担当
〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's五番町

E-mail ▶ sip_combustion@jst.go.jp HP ▶ <http://www.jst.go.jp/sip/k01.html>