日本機械学会熱工学部門　　JSME Thermal Engineering Division

THERMAL ENGINEERING

TED Newsletter on the WEB

日本機械学会熱工学部門ニュースレター
TED Newsletter No.88 September 2019

目　　次

1. TED Plaza

- 低コスト化を目指した炭化水素燃料ロケットの研究開発
  金井　竜一朗（インターステラテクノロジズ株式会社）
- ドイツ・ハノーファー大学での研究活動
  川原田　光典（ハノーファー大学）

2. 行事案内

- 部門企画行事案内
- 部門関連行事案内
- 国際会議案内

3. 第 97 期部門組織

4. その他

- 編集後記

TED Plaza

低コスト化を目指した炭化水素燃料ロケットの研究開発

金井 竜一朗

インターステラテクノロジズ株式会社
軌道投入機「ZERO」 開発プロジェクトマネージャ
ryuichiro.kanai@istellartech.com

1．はじめに

インターステラテクノロジズ株式会社では, 2006年よりロケットエンジンの開発を行っている．「宇宙をもっと身近に，もっと気軽に．誰もが宇宙に手が届く未来を．」というコンセプトのもと，宇宙開発および宇宙利用のハードルを下げ，関われる人を増やしていこうというのが会社としてのミッションである．

2006 年の開発は，作家，宇宙ジャーナリスト，実業家，宇宙機エンジニアが手弁当で集まり結成した「なつのロケット団」により着手された．ロケット燃焼の専門家は 1 人もいないながら，関東某所において風呂場で水を流しての流量校正や，極低温ランタンクへの推進剤充填など，手探りで様々なノウハウを会得していった．この時に燃料として採用されたのが，取扱いが容易でなおかつ着火性も良好であるエタノールである．

2009 年には北海道赤平市の株式会社植松電機の設備を間借りする形で，エンジンの大型化を進めていった（図 1）．北海道大樹町で到達高度数 km 程度の小型ロケットを打ち上げ始めたのは 2011 年からである（この赤平での開発時代に，植松電機とハイブリッドロケットの共同研究をする北大工学部の宇宙環境システム工学研究室の学生として，筆者が同じ設備で実験をさせてもらっていたことを付記しておく）．

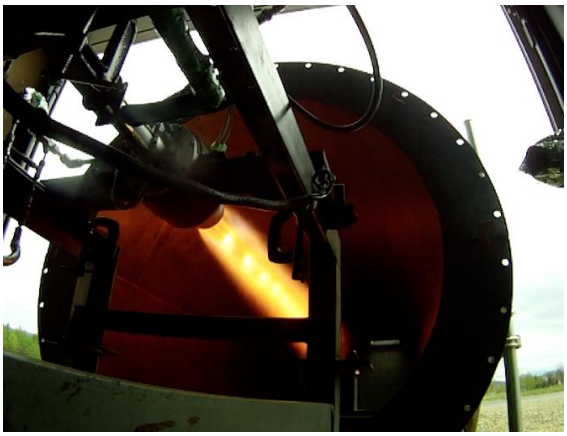


Fig. 1　Static firing test of 200 kgf thrust class engine

2013 年に北海道大樹町でインターステラテクノロジズ株式会社が設立され，観測ロケット事業の実現を目指して開発を加速していった．設立当初の時点で，エンジン推力は 500 kgf に達してい

た．開発のステップとして，新開発の推力 1.2 tonf 級エンジンを搭載し高度 100 km の宇宙空間に到達する観測ロケット「MOMO（名前の由来は色々とあるが，漢字の『百』の訓読みに因るものが大きい）」の成功に向けて，初号機の打上げが 2017 年 7 月に行われた．初号機は飛翔には成功したが途中で構造破壊が原因とみられる電源喪失に陥り宇宙空間到達は叶わなかった. 2 号機は離昇直後に高温ガス配管が溶損，空圧バルブの駆動ラインが焼き切られ推力停止し，射場に墜落，地球の裏側でも放映されるような大炎上（図 2）となった．

Fig. 2　A fall and a fireball of MOMO-F2

機体を拘束した状態でのステージ燃焼実験など，万全の準備の末に臨んだ 3 回目の打上げで，MOMO は宇宙空間に到達することができた（図 3）．2019 年 5 月 4 日のことである．

Fig. 3　Sight of the Earth and space from MOMO-F3

観測ロケット MOMO は，「国内で初の民間単独開発ロケット」と紹介されることが多いが，実は宇宙まで届いた国産開発の炭化水素系ブースターエンジンは民間かどうかに関わらず，MOMO のメインエンジンが初めてである（そうだと思っているが，もし事実誤認がある場合はご指摘いただきたい）．また MOMO のメインエンジンは噴射器に，国内では研究開発例の少ないピントル型インジェクタを用いている．2 号機では失敗の原因となってしまったが，3 号機では大活躍だったホットガススラスタのインジェクタは異種衝突式である．

このように，当社では（多くの国内外文献を参考としながらではあるが）これまでの基幹ロケットとは全く別の系譜と言える，独自の推進系で宇宙まで到達し，これからさらに軌道投入用ロケット ZERO の開発を本格化させようとしている．本稿では，参考にした文献を紹介しながらこれまでの開発の経緯を紹介する．

２．衝突型インジェクタの開発

開発初期に開発していたインジェクタは，図 4 に示すような衝突型インジェクタである．

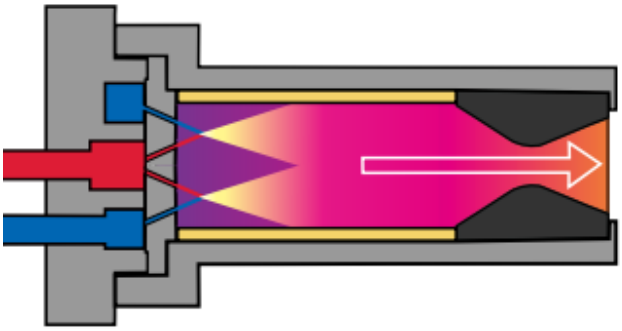


Fig. 4　A schematic of an impinging type injector

図に示すような単純な異種衝突タイプのものに加え，異種衝突する前に予め同種で衝突させておき，噴流ではなく，衝突した噴流が生成した異種ファン同士を衝突させる，というような方式も多く試された．衝突方式としては (徳留他，2008) の報告に比較的近いが，ファン同士の衝突角度などが異なっている．いずれの方式でも，中心の酸化剤マニホールドと，周辺の燃料マニホールドのみ 1 つずつのみで構成されていることが特徴である．一般的に衝突型インジェクタでは，平岩らのように異種衝突エレメントを多数配置する方式 (Hiraiwa et al., 2011) や，安富らのように同心円状に多数のマニホールドを持ち，半径方向に多数の衝突点を持つ方式 (安富他，2010) が多い．しかしいずれの方式においてもエレメント，またはマニホールドに多数の燃料/酸化剤隔壁が存在し，特に一体成型ではなく溶接によって複数パーツを組み合わせる場合は噴射まで燃料と酸化剤が絶対に混合しないよう入念な検査が必要である．

当社では，加工や溶接，そして溶接部の検査を簡略化するために，溶接部を極力減らすように現在の方式を取っている．燃焼器や噴射器自体が小型であることも，加工性や溶接性を下げる要因となっている．近年急成長を遂げている積層造形についても検討中ではあるが，天井のあるドーム状構造の積層が難しいこと，また流体の通る場所，特にロケットエンジンのような流速が大きい流路では表面荒さの管理が非常に重要になることから，社内では未だ検討の域を出ていないのが実情である．

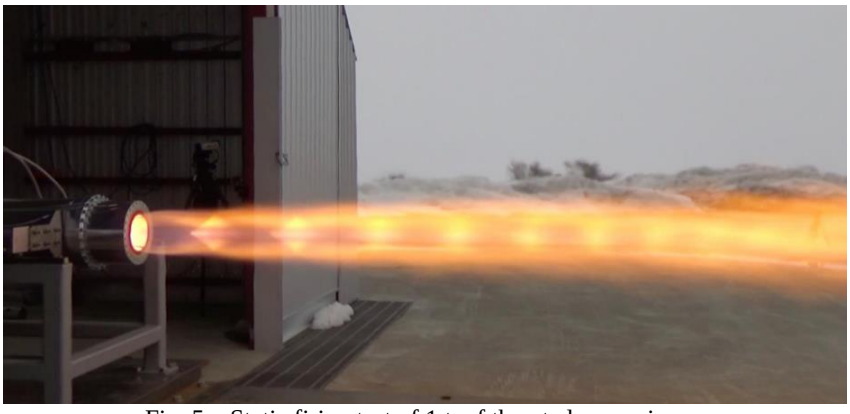


Fig. 5　Static firing test of 1 tonf thrust class engine

燃焼室圧力は，小型飛行実験機でジンバルとガスジェットによる姿勢制御を確認する LEAP シリーズ（推力 150 kgf 級，燃焼時間約 15 秒，到達高度約 180 m）までは 2.5 MPa 程度と，ガス押しサイクルのロケットにしては比較的高圧であった．MOMO の開発の初期段階において，ロケット全体のシステム計算を実施したところ，軌道投入に至らない観測ロケットクラスでも最適な燃焼室圧が約 1 MPa となった (金井，2015)．そこで，2015 年度には経済産業省からの研究開発委託を受け，低コストな燃焼器およびインジェクタの研究開発として燃焼室圧力 1 MPa，推力 1 トン級

のエンジンの研究開発を実施した．詳細は割愛するが，最終的な成果物として図 5 に示すような推力 1 tonf 級の衝突型エンジンで，100 秒間の燃焼を達成した．

1 tonf 級エンジンで実用的な効率が得られはしたが，150 kgf 級インジェクタの単一マニホールドを 7 つ並べるという構成上，溶接個所を最小限にしようとするとどうしても供給配管が膨大になり，ジンバルで推力ベクトル制御を行うエンジンと相性が悪かった．後述するピントル型インジェクタの高効率化開発の成功もあり，これ以降衝突型インジェクタは小型燃焼器に絞って適用されていく．

３．衝突型インジェクタを用いたガス発生器の開発

MOMO のメインエンジンは 2016 年度からピントル型で開発が進められたが，同じ 2016 年度に衝突型インジェクタを活用した燃焼器として，ターボポンプ用ガス発生器（GG: Gas Generator）の開発を行った．これも経済産業省からの研究開発委託を受けてのものである．

MOMO のようなガス押し式ロケットでは，加圧ガスボンベ→推進剤タンク→燃焼室という圧力勾配により推進剤を圧送するため，燃焼室圧力を上げて高比推力を得ようとすると，推進剤タンクの厚肉化，加圧ガスボンベの重量増を招いてしまう．つまり MOMO のようなガス押し式ロケットでは，高比推力と高構造効率を両立させるために，高度な圧力容器の開発技術が不可欠になってしまう．当社では観測ロケット MOMO の次世代機として，超小型衛星を軌道投入するためのロケット，開発コードネーム “ZERO” を開発しているが，軌道投入用ロケット ZERO のメインエンジンは高比推力と供給系の軽量化を実現するために，ターボポンプを採用している．高圧軽量容器の開発と，ターボポンプの開発，どちらも茨の道であることは間違いないが，後者の方がまだ国内外のロケットでの採用例が多く，JAXA や大学等研究機関との連携により先人の知恵を拝借できると期待してのものである．

Fig. 6　Roll angle control experiment of sounding rocket with hot gasjet thruster

GG サイクルのロケットエンジンは主燃焼器の開発とターボポンプの開発とをある程度切り分けることができるため，設備投資や開発の手戻りがあっても，主燃焼器とターボポンプが足を引っ張り合わない，という観点で採用している．軌道投入機 ZERO のメインエンジンは推力約 6 tonf を想定しているが，その GG はちょうど数 10～数 100 kgf 程度，小型実証実験機のメインエンジンとして社内で開発実績のあるサイズとなった．そのため，過去の社内開発の知見を参考にしながら GG の開発を徐々に進めていき，2017 年度にはまだまだ粗削りではあるものの，ターボポンプの体を成したプロトタイプの動作試験を実施することができた．この GG 開発には，航技研角田支所（現在の JAXA 角田宇宙センター）で行われたガス発生器の実験 (橋本他，1980) や NASA Fastrac の実験 (Dennis et al., 2000) といった文献をかなり参考にしている．

ターボポンプ用の GG 開発に並行する形で，観測ロケット MOMO に搭載する小型 GG の開発も進められていった．MOMO は 3 軸姿勢制御を行っており，進行方向を変えるヨー・ピッチ方向はエンジンを偏向させることで，進行方向周りのロール回転はガスジェットを使うことで制御している．初号機は窒素ボンベによるコールドガスジェットでロール制御をしていたが，外乱トルクが想定値を上回り，制御が発散してしまった．対策としてガスジェットの推力を増強することとしたが，コールドガスジェットの場合ガス重量がかさむため，ホットガスジェットを開発することと

した．1 液推進剤の間欠燃焼は，ヒドラジン以外では解がなく，開発費，管理コストの面から採用できなかった．既にターボポンプ用の GG 実験の実績があったため，最終的に「衝突型インジェクタでエタノール/液体酸素の 2 液式 GG を燃焼させ続け，ノズルを出たガスを偏向させる」という手法を採用した．図 6 に，自由回転できる架台で制御系と連成させた実験の様子を示す．

４．ピントル型インジェクタの開発

衝突型インジェクタは過去の文献が豊富であり，高い性能が比較的得やすいという利点が大きいが，インジェクタの構造が複雑で，部品点数や接合長さが嵩み，その分検査工数が増えたり性能のバラつきの管理が難しくなったりするという問題点は当初から指摘されていた．そこで着目されたのがピントル型インジェクタである（図 7）．

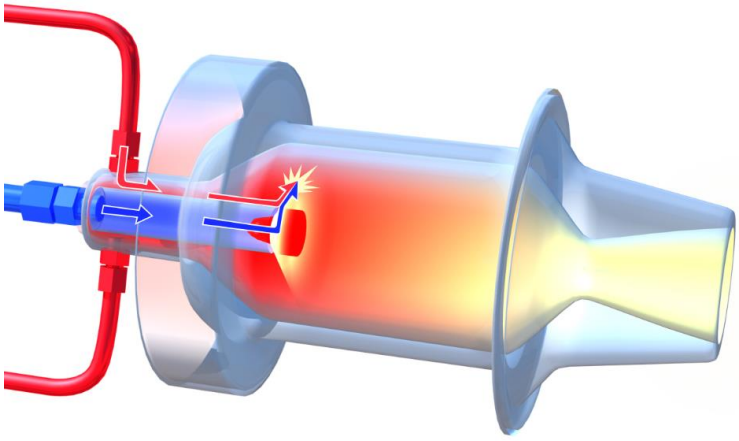


Fig. 7　A schematic of a pintle type injector

ピントル型インジェクタはアポロ計画で LMDE（Lunar Module Descent Engine，月着陸船用降下エンジン）に使われた実績があり，その後アメリカを中心に多数のロケットやミサイルで使用されている (Dressler and Bauer, 2000)．教科書等ではそのスロットリング性能が着目されることが多いが，特筆すべきはその部品点数の小ささであり，最近では米 SpaceX 社が大型ロケットのメインエンジンに適用している．ピントル型はロケットやミサイルの開発を行っている企業を中心に研究開発が行われてきたため，衝突型インジェクタや同軸型インジェクタに比べると，公開されている先行研究は少なかった．しかし近年では SpaceX の成功に伴って大学等でも広く研究が行われるようになってきた (Vasques and Haidn, 2017) (Cheng, et al., 2017).

インターステラテクノロジズ社の前身となる有志の団体である「なつのロケット団」として燃焼実験を行っていたころから，衝突型インジェクタと並行してピントル型インジェクタを用いたエンジンの開発が実施されてきた．2013 年に打ち上げられた，超音速実験機「すずかぜ」（図 8）のメインエンジンは推力 500 kgf 級で，ピントル型インジェクタを利用していた．

開発中期のピントル型インジェクタの課題は性能の向上と，そのための現象解明であり，2013 年から東大の津江・中谷研究室と，JAXA と共にピントル型インジェクタの共同研究を行っている．榊らと発表した論文 (榊他，2015) を皮切りに津江・中谷研究室から数件の論文投稿と学会発表が継続して行われている．これまでには，2 次元化したピントル型インジェクタや軸対称インジェクタによる噴霧構造の光学観察，各パラメータの性能への影響，燃焼振動の現象解明などが研究対象となっている．

この共同研究の成果や，TRW 社の文献（例えば，Carter and Bell, 1969 など）を活用しながら，2016 年 4 月にはピントル型インジェクタを用いた 1 tonf 級エンジンの燃焼実験に成功し，観測ロケットの成功に必要な性能と推力を得た．その後，燃焼の長秒時化開発や点火方式の変更による始動の安定化開発，ロケット全体の設計変更に伴う推力の増強開発（1 tonf → 1.2 tonf）を経て，現在の MOMO メインエンジンへと至っている．

さらにインターステラテクノロジズ社では，経済産業省からの研究開発委託を受け，2018 年度から常温炭化水素系燃料を用いた推力 6 tonf 級エンジンの開発に着手している（図 9）．これまで以上の共同研究の活用や，航空宇宙研究開発機構 JAXA の宇宙イノベーションパートナーシッ

プ（J-SPARC）の利活用をしながら，更なる性能向上や軌道投入機実機へ適用できるエンジンの完成を目指し，日夜研究開発を行っているところである．

Fig. 8　The prototype of 500 kgf-classhypersonic rocket “Suzukaze”, using pintle-type injector

Fig. 9　Ignition of 6 tonf class pintle type engine with hydrocarbon fuel

謝辞

本文中にも記載したが，弊社では推進系の研究開発の一部を経済産業省の宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業（SERVIS プロジェクト）として受託している．本事業の技術検討委員会だけでなく，普段から様々な相談に乗っていただいている JAXA の平岩徹夫先生，東京大学の津江光洋先生，中谷辰爾先生，北海道大学の永田晴紀先生，室蘭工業大学の内海政春先生，元名古屋大学の青木宏先生に改めて御礼申し上げる．

また，MOMO 2 号機の失敗に対する原因究明と対策立案をきっかけに様々な技術支援をいただいている日本宇宙フォーラムの淺田正一郎様，日本宇宙フォーラム S-Bridge 事業における JSF パートナーである中川稔彦様，坂爪則夫様，成尾芳博様に御礼申し上げる．

最後に，MOMO 初号機，2 号機，「宇宙品質にシフト MOMO 3 号機」の打上げを支えていただいた関係各所の皆様と，クラウドファンディングでご支援いただいた方々に深く感謝の意を示す．当社 HP http://www.istellartech.com/technology/momo に，ご支援いただいた方のうち一部の方のお名前を掲載する．

文献

徳留真一郎，八木下剛，羽生宏人，鈴木直洋，大毛康弘，嶋田徹，亜酸化窒素（N2O）／エタノール推進系の実験研究，宇宙航空研究開発機構研究開発報告, (2008), JAXA-RR-07-027.

Hiraiwa, T., Saito, T., Tomita, T., Azuma, N., Okita, K., Obase, K., Kaneko, T., Research works of ethanol propulsion system for the future rocket-plane experimental vehicle, Proceedings of 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, (2011), AIAA 2011-6114.
安富義展, 石井雅博, 鳥井義弘, LNG 推進系 LE-8 エンジンの開発, IHI 技報, Vol.50, No.3 (2010), pp.72-77.
Kanai, R., Inagawa, T., Noda, A., Development of the low-cost LOX/Ethanol sounding rocket system, Proceedings of 30th The International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), (2015), 2015-o-1-08.
橋本亮平, 渡辺義明, 長谷川敏, 液体ロケットエンジン用液酸･ケロシンガス発生器の実験, 航空宇宙技術研究所報告, (1980), TR-642.
Dennis, H. J. Jr., Sanders, T., NASA fastrac engine gas generator component test program and results, Proceedings of 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, (2000), AIAA 2000-3401.
Dressler, G., Bauer J., TRW pintle engine heritage and performance characteristics, Proceedings of 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, (2000), AIAA 2000-3871.
Vasques, B., Haidn, O., Effect of pintle injector element geometry on combustion in a liquid oxygen/liquid methane rocket engine, Proceedings of 7th European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences (EUCASS), doi:10.13009/EUCASS2017-88.
Cheng, P., Li Q., Xu S., Kang Z., On the prediction of spray angle of liquid-liquid pintle injectors, Acta Astronautica, Vol.138, (2017), pp.145-151.
榊和樹, 角銅洋実, 中谷辰爾, 津江光洋, 五十地輝, 鈴木恭兵, 牧野一憲, 平岩徹夫, エタノール/液体酸素ロケットエンジン燃焼室における平面ピントル型噴射器の噴霧燃焼構造の光学計測, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.63, No.6 (2015), pp.271-278.
Carter, W.A., Bell, G.S., Development and Demonstration of a N204/N2H14 Injector, Air Force Rocket Propulsion Laboratory Technical Report, (1969), AFRPL-TR-69-231.

TED Plaza

ドイツ・ハノーファー大学での研究活動

川原田　光典

ハノーファー大学
燃焼技術研究所（ITV）　博士研究員
kawaharada@itv.uni-hannover.de

１．はじめに

ハノーファー大学，燃焼技術研究所にて博士研究員をしている川原田光典と申します．私が同研究所を初めて訪れたのは 2014 年 10 月から半年間の留学をした際でした．その後日本に戻って博士号を取り，2016 年 4 月から再び同研究所にて現在に至るまで博士研究員として研究に従事しています．この度はニュースレター執筆の機会をいただきましたので，私の所属する大学や研究所の成り立ち，研究プロジェクトの紹介や研究予算など，研究生活に関することを諸々紹介したいと思います．本稿が弊学を含めたドイツ留学，研究滞在，共同研究などに興味を持っていただくきっかけとなれば幸いです．

２．大学と研究所の紹介

ハノーファー大学は1831年創立であり，ハノーファー中心部から歩いていける距離にあります．大学本部は図 1 のヴェルフェン城であり，これはハノーファー選帝侯家の宮殿でした．本稿ではハノーファー大学と日本語で呼称していますが，ドイツ語での基本的な呼称は Leibniz Universität Hannover です．この Leibniz は微分積分学，二進法など数学分野のみならず，哲学や科学分野でも多大な功績を遺す Gottfried Wilhelm Leibniz のことです．Leibniz はハノーファー選帝侯に仕えて研究・政治・外交に携わっておりハノーファーと縁が深いということもあり，2006 年の大学創立 175 周年を機に彼の名前を冠しました．その際にロゴも刷新し，図 1 のように Leibniz の直筆の書類から二進法の部分を取り入れた図案となっています．なお日常的には使いませんが公式名称はフルネームを冠した Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover です．また，総合大学化して Universität Hannover となる前には Technische Universität（TU）Hannover すなわちハノーファー工科大学でした．そのため過去の文献などでは TU Hannover として記されており，そちらの呼称でご存じの方もいらっしゃるかもしれません．

Fig. 1　University logo and main building (Welfen Schloss)

TU であったことはハノーファー大学が名門工科大学連合 TU9 の一員であることにも表れています．TU9 はアーヘン，ベルリン，ブラウンシュヴァイク，ダルムシュタット，ドレスデン，カールスルーエ，ミュンヘンの各工科大学，シュツットガルト大学およびハノーファー大学からなる大学連携組織で，卒業資格の相互承認，共同でのプレスリリースなどを行っています．また，TU9 における活発な研究活動は，全ドイツの外部研究資金の 25%を獲得していること，ドイツにおける科研費のような DFG の工学分野における獲得資金ランキングの上位を占めること，ドイツの工学博士号の 57%を授与している (TU9 German Institutes of Technology, 参照日 2019 年 6 月 20 日) ことからもよくわかります．他の大学間連携としては，同じくハノーファーにある Medizinische Hochshule Hannover（MHH），ハノーファー医科大学との間で協定を結び，医療工学など学際的な分野での協力を進めています．

現在のハノーファー大学は学生数約 30,000 人，うち 17%が留学生で世界 114 カ国から学びに来ています．短期留学を除く日本からの留学生はほとんどおらず，残念ながら大学の統計資料に国名は現れません．以前は多くいたそうで，昔を知る OB の方からはすっかり見なくなったという話を聞きます．なお現在最も多い留学生の出身地は中国で，在籍者数は 1,000 人にせまります．

ハノーファー大学では 9 学部，180 を超える研究所の約 330 人の教授と 2,800 人の研究スタッフが学生の教育・研究指導にあたっています．私の所属する燃焼技術研究所（Institut für Technische Verbrennung，ITV）は機械工学部の 19 研究所の 1 つです．機械工学部は 1921 年の大学再編時にできた 3 学部の 1 つで，そろそろ 100 周年を迎えます．その時期に ITV の前身となる機械研究室 C に Prof. Dr.-Ing. habil. Kurt Gustav Neumann が着任し，その後内燃機関および熱力学研究所となるなど何度か改称があって今に至るものの，一貫して燃焼やエンジンを研究対象としています．現在の研究所のトップは Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker であり，15 名の研究スタッフ，6 名の技術支援スタッフがいます．近年では Junior-Professor（日本でいえば准教授）をおく大学も増えていますが，ITV では Professor とつくのは 1 人だけです．この 15 名の内訳は Oberingenieur という研究指導から技術支援スタッフとの折衝など研究所の運営全般に携わるポジションが 1 人，それに博士研究員の私以外は Doctor の課程の学生です．この Doctor の学生をスタッフに含むところが日本との大きな違いでしょうか．ドイツでは Diploma（ドイツ語圏では Diplom）または Master を終え，Research Assistant として大学で働きながら博士号の取得を目指します．このとき 1 つのプロジェクトを受け持つことが一般的で，必然的に博士論文の内容もそのプロジェクトで決まります．基本的に各研究所の持つプロジェクトに対する求人があり，それに応募して採用されることで Doctor の課程がスタートします．その他には奨学金などの外部資金を獲得してくるケースもあり，この場合には各研究所の関連分野であれば比較的自由に選択できるようです．ITV では毎年約 2 名が博士号を取ります．

Fig. 2　Institute building (ITV)

３． 研究内容

ITV には 6 台のエンジンテストベンチがあり，うち 4 台は単気筒ディーゼルエンジンで，1 台が学生実験に使用する乗用車用ディーゼルエンジン，さらにもう 1 台はターボチャージャ付きのデ

ィーゼルエンジンです．この他に，可視化用ガスエンジン，燃料噴射系のテストベンチ，ガスタービンエンジンの燃焼器を模したテストベンチ，排ガス後処理用 SCR システムのテストベンチがあります．また，これらの実験設備で得られたデータを用いたモデリングや数値解析も行っています．

図 3 に ITV の研究プロジェクトの俯瞰を示します．噴霧から燃焼，フリクションまで多岐にわたっています．このうち私の研究内容は主に噴霧，キャビテーション，レーザー計測などですが，それだけに限らず，いくつか結果を提示しながら研究紹介をしたいと思います．

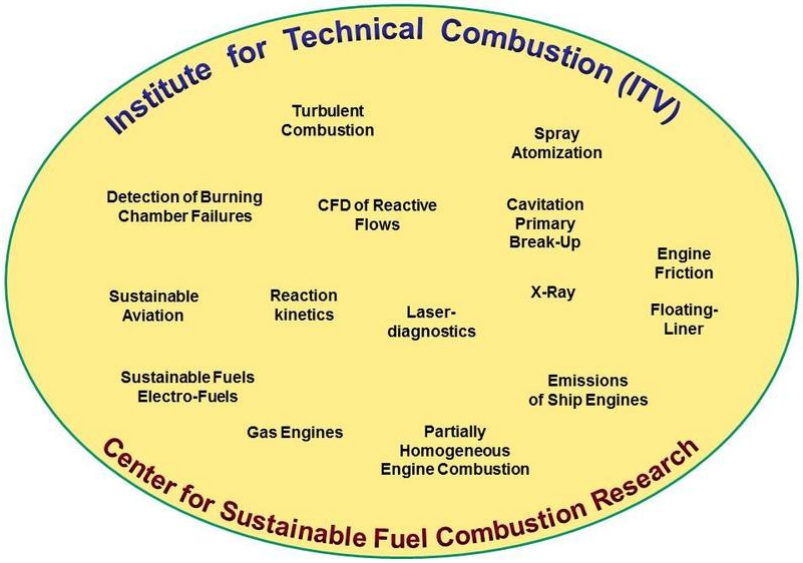
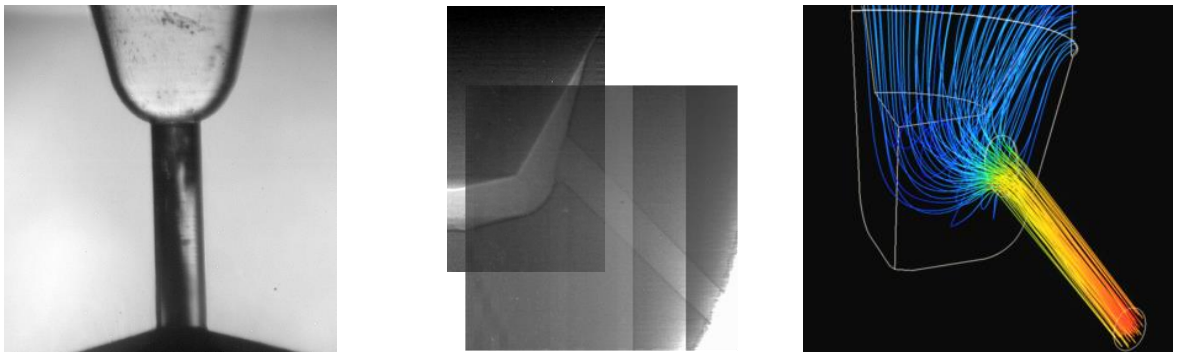


Fig. 3　Overview of research fields at ITV

3・1　ガソリン・ディーゼルエンジン

乗用車用エンジンに一般的に用いられている高圧燃料噴射装置においては，燃焼の適切なコントロールの一助とすべく高圧化，細孔化，多段噴射化が進んでいます．この結果として燃料流路においては非定常性の強いキャビテーションが生じています．特にインジェクタの噴孔付近に生じるものは短時間で発生，消失を繰り返し，燃料の流れに乱れを与えます．噴孔から噴射された燃料はインジェクタ内部で与えられた乱れや周囲空気との速度差などにより微粒化し，噴霧を形成します．この後噴霧内に取り込んだ空気との混合や蒸発を経て燃焼に至るわけですが，そもそも噴霧形成過程の始まりである噴孔出口部での状態が十分に理解されていません．これは先述の強い非定常性，周囲条件が噴孔前後でガラッと変わること，対象とする領域が小さいうえにその中に微小液滴が密に存在して一般的な装置では計測が難しいことなどが理由としてあげられます．そこで噴孔の中と外の両面からこの領域の理解を進めるべく，実験や数値解析を行っています (Kawaharada, et al., 2017).



(a) Transparent nozzle　(b) X-ray　(c) Simulation

Fig. 4　Flow inside the nozzle

図 4 では噴孔内部の結果を例示しています．（a）に示す可視化ノズルの噴孔径は実機と同等，また噴射圧も実機に近い 160MPa の条件で計測可能です．また（b）の X 線計測の画像をもとに形状を作成し（c）のように内部流れ，キャビテーションの数値解析を行っています．図 5 では噴孔外部での各計測結果を比較しています (Durst, et al., 2019).

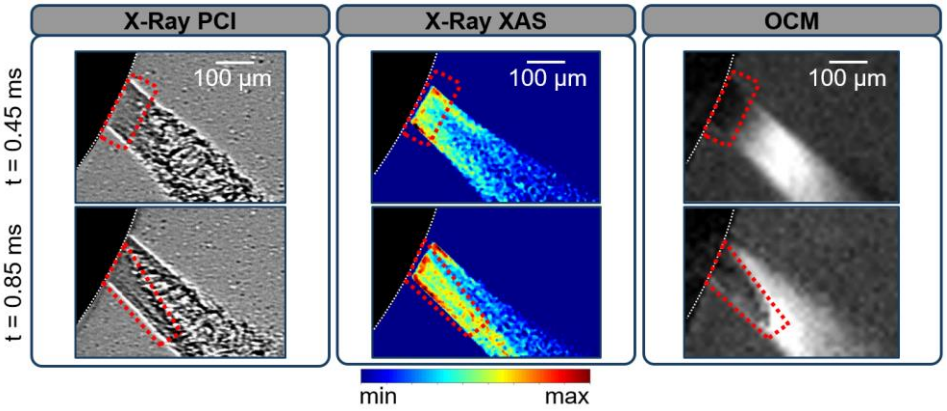


Fig. 5　Flow outside the nozzle

図 5 において PCI は Phase Contrast Imaging，XAS は Absorption Imaging の結果であり，研究プロジェクトの一環としてアメリカの Argonne National Laboratory で計測したものです. OCM は Optical Connectivity Method (Gröger, et al., 2018) であり，これはインジェクタに接続したファイバによって噴孔内部から液相が途切れる部分を照らし出す計測技術です．各時刻は噴射の初期と中期を表しており，それぞれの時刻において結果に関連性が見られます.

この他さらに噴孔から離れた位置での計測も行っており (Kawaharada, et al., 2018)，噴孔内部から噴霧形成まで一貫して理解することを目標にしています．また噴霧形成の過程で粘度などの温度依存の物性が影響するため，局所的な温度の時間変化を見る方法についても将来的に実現したいと考えています.

3・2　ガスエンジン

天然ガスなどを燃焼させるガスエンジンは NO_x，CO_2 排出量が比較的少なく，石炭や石油系の燃料を用いるエンジンや発電設備などの 1 つの代替案として有望です．さらなる性能向上を実現するための 1 コンセプトとして，副室式の希薄燃焼エンジンがあります．このエンジンにおける課題は希薄混合気の安定した着火であり，副室内での着火の数値解析が行われています (Nguyen, et al., 2019). また，予混合燃焼と部分予混合燃焼の同時モデリングが可能な燃焼モデルの開発が進められており，可視化ガスエンジンで副室内の着火条件や流れ場のデータを取得し，モデルの検証を行っています.

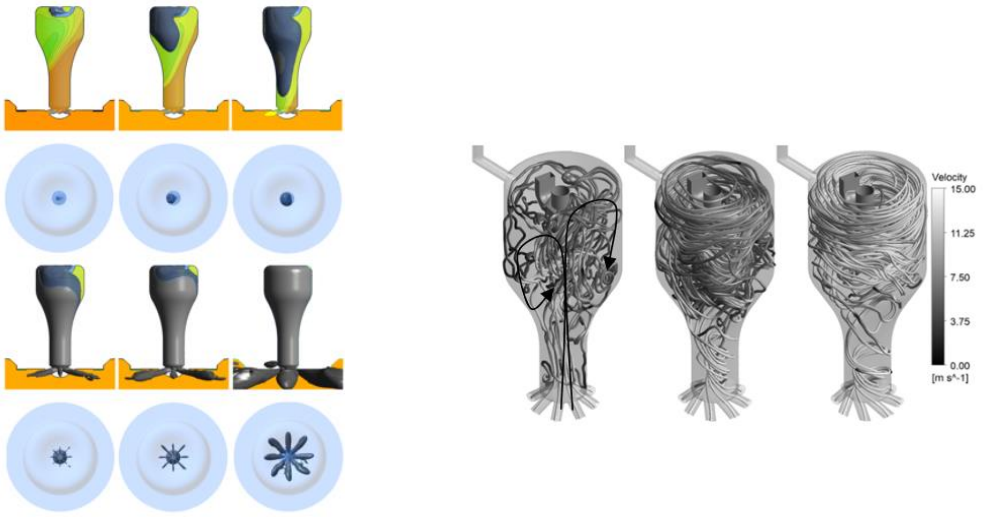


Fig. 6　Numerical simulations of flame propagation and flow inside prechamber

3・3　ガスタービンエンジン

航空機用エンジンや定置発電用設備として用いられているガスタービンエンジンの主要な燃料であるケロシンの比エネルギーは 12 kWh/kg であり，リチウムイオン電池のおよそ 80 倍です．このことから将来の航空機においても依然として液体燃料が重要であるものと考えられます．将来的にも持続可能な液体燃料の供給源として風力発電などの再生可能エネルギーを用いた燃料合成が研究されています (Goldmann, et al., 2019)．合成燃料は可能な限り用途に特化したデザインが可能です．そのため現行の航空機用燃料では実現できないような希薄予混合燃焼であっても，合成燃料であれば運転できる可能性があります．そこで詳細な反応速度論を用いた各種燃料の燃焼特性の数値解析が行われています．

また，同じく航空機用ガスタービンエンジンの研究プロジェクトとして非接触での故障診断法の開発が進められています (Hennecke, et al., 2019)，(von der Haar, et al., 2019)．これはエンジン後方での排出ガスの計測によって燃焼室内で発生した損傷を検出するもので，燃焼器からエンジン後方までの間の複雑な混合プロセスの数値解析が行われています．また環状燃焼器のモデルを使用した実験において，故障発生時の温度分布の変化など計測を行っています．

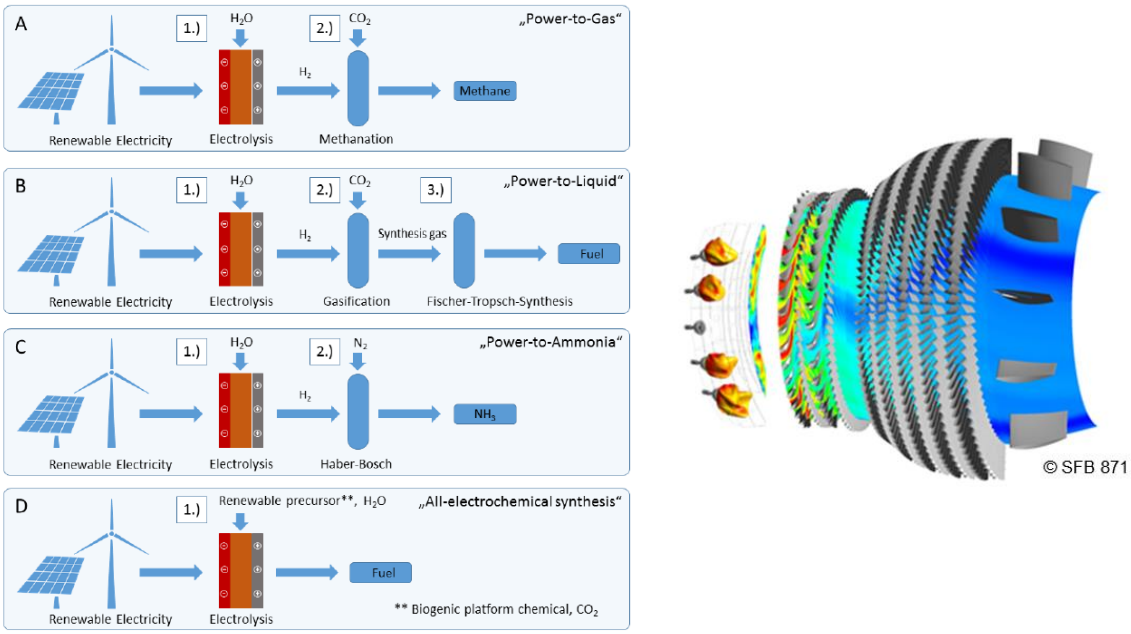


Fig. 7　Fuel synthetic processes (left) and numerical simulation for failure ditection of a combustor (right)

4．研究資金

上記の研究を含めた各種プロジェクトに対して様々な研究費を獲得しており，トータルでは数億円規模になります．まずはドイツの科研費ともいえる DFG の研究助成について説明したいと思います．DFG は Deutsche Forshungsgemainshaft，ドイツ研究振興協会のことで，年間予算は 20 億ユーロに上ります．通常のプログラムでは，連邦政府と州政府がおおむね 50%ずつ負担し，大学での研究を支援しています．DFG の助成が科研費と大きく異なるのは，基本的に書類の提出締め切りがない点で，提出した書類はすぐに審査の第一段階である複数のレビュアーによる書類評価に回されます．第二段階ではドイツ全土の研究者の中から投票で選ばれた審査員が第一段階の評価を精査し，必要であればさらに修正意見などを出します．第三段階はその審査員による報告書をもとに助成承認委員会が最終判断を行います．第一，第二段階ではプロポーザルを提出した研究者はなにも全てレビュアーの修正要求に従う必要はなく，場合によってはレビュアーの差し替えを要求することも可能です．最終的に受理されるまで約半年から 1 年程度かかるといわれています．延長要求は可能ですが通常 2〜3 年程度の実施期間であるため，書類審査からプロジェクトの終了まで 4 年程度です．

産学連携による研究助成もあり，私の関わっているプロジェクトの 1 つは Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen（FVV），内燃機関研究協会による研究支援を受けています．この協会は内燃機関に関連する企業を会員としています．FVV は内燃機関の環境性能向上や高効率化につ

ながる研究を分野ごとに募集し，大学側が提出した研究案を精査して採択します．プロジェクトがスタートすると年間複数回のプロジェクトミーティングでの結果報告と会員企業によるプロジェクト進行度の評価，大学側から年次報告書の FVV への提出が行われます．こうして大学での基礎研究の成果が短期間でスムーズに会員企業に共有され，企業の競争力強化につながります．そのため, プロジェクトの資金源は企業の会費だけでなく, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 連邦経済エネルギー省からの出資も含みます.

その他の研究費としてはドイツ国内大学のトップレベルの研究を助成するエクセレンスクラスター制度，European Research Council によるプロジェクト助成などがあります．また，企業からの短期的な計測依頼や研究依頼なども受けており，企業との打合せや契約などの準備期間を合わせて数か月程度で終了するものもあります.

５． おわりに

大学や研究所の紹介，研究内容や資金について書かせていただきました．なお ITV の現行のプロジェクトのうち完全に単独で行っているものは少なく, パートナーとなる大学（例えばエアランゲン・ニュルンベルク大学，ミュンヘン工科大学，ブラウンシュヴァイク工科大学など）や企業と連携を取りながら協力して研究を進めています．国内外問わず連携先を求めていますので，もしご興味を持っていただけましたらご連絡いただけますと幸いです. また, 1 か月から半年程度の滞在期間の修士課程の留学生の受け入れも積極的に行っておりますので，こちらもご連絡いただけますと幸いです. ぜひ私共とともに研究プロジェクトを共同で進めて成果をあげ，ドイツビールとソーセージで祝杯をあげましょう！その実現を切に願っております.

謝　辞

本稿に記載の研究プロジェクトの一部は DFG，FVV，SFB の助成を受けたものであり，感謝いたします．また貴重な執筆の機会をいただいた電力中央研究所の西美奈先生，および弘前大学の岡部孝裕先生に感謝申し上げます. また岡部先生には本稿の質を上げるうえで貴重なご意見を多々いただきました．重ねてお礼申し上げます.

文献

Durst, A., Gröger, K., Dinkelacker, F. and Wensing, M., Spray Diagnostics of Future Gasoline and Diesel Fuels under Engine Relevant Conditions, Proceedings of FVV Frühjahrstagung 2019 (2019), p.1.

Gröger, K., Kaiser, M., Wang, J. and Dinkelacker, F., Comparison of the Optical Connectivity Method to X-Ray Spray Measurements in the Near Field of a Diesel Injector, Proceedings of Combustion Institute Vol.37, No. 3 (2018), pp. 3271-3278.

Goldmann, A., Sauter, W., Oettinger, M., Kluge, T., Schröder, U., Seume, J.R., Friedrichs, J. and Dinkelacker, F., A Study on Electrofuels in Aviation, Energies (2018), Vol.11, No.392, pp. 1-23.

Hennecke, C., von der Haar, H. and Dinkelacker, F., Numerical Simulation of Gas Turbine Burning Chamber Combustion with Defined Burner Defects, Proceedings of the Global Power & Propulsion Forum 2019 (2019), GPPS-TC-2019-0088, pp.1-8.

Kawaharada, N., Gröger, K., Kaiser, M., Thimm, L., Hansen, H., and Dinkelacker, F., Investigation of Detailed Injection Processes Inside the Injector and in the Spray Near Field, VII International Congress on Combustion Engines 2017 (PTNSS) (2017), pp.1-8.

Kawaharada, N., Gröger, K., Ueki, H., Wang, J., and Dinkelacker, F., Fluctuations of Droplet Characteristics in Diesel Fuel Atomization, 14th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS) (2018), pp.1-8.

Nguyen, H.D., Neuenschwander, M., and Dinkelacker, F., Numerical Simulation of the Prechamber Processes in a Lean-Burn Gas Engine, Proceedings of 9th European Combustion Meeting (2019), pp.1-6.

TU9 German Institutes of Technology, Excellence in Engineering and Science Made in Germany, < https://www.tu9.de>, (参照日 2019 年 6 月 20 日).

von der Haar, H., and Dinkelacker, F., Automatic Defect Detection in a Model Combustion Chamber Using Support Vector Machine, Proceedings of 9th European Combustion Meeting (2019) , pp.1-6.

行事案内

部門企画行事案内

－2019 年度－

●The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC2019)
開催日：2019 年 12 月 13 日(金)～17 日(火)
場　所：Hawaii, USA

●熱工学コンファレンス 2019
開催日: 2019 年 10 月 12 日（土）～13 日（日）
場　所: 名古屋工業大学　御器所地区，愛知県名古屋市

●第 6 回相変化界面研究会
開催日：2019 年 10 月 11 日（金）
場 所：名古屋工業大学　御器所地区，愛知県名古屋市

●『伝熱工学資料(改訂第 5 版)』の内容を教材にした熱設計の基礎と応用(No.19-23)
開催日: 2019 年 9 月 24 日(火)～25 日(水)
場　所: 日本機械学会 会議室，東京都新宿区

部門関連行事案内

－2019 年度－

●第 30 回内燃機関シンポジウム
開催日：2019 年 12 月 10 日(火)～12 日(木)
場 所：広島国際会議場，広島県広島市
主 催：自動車技術会，日本機械学会エンジンシステム部門

●第 22 回スターリングサイクルシンポジウム
開催日：2019 年 11 月 30 日（土）
場 所：早稲田大学　西早稲田キャンパス，東京都新宿区
主 催：日本機械学会エンジンシステム部門

●第 33 回数値流体力学シンポジウム
開催日： 2019 年 11 月 27 日（水）～29 日（金）
場 所：北海道大学フロンティア応用科学研究棟，北海道札幌市
主 催： 日本流体力学会

●第 57 回燃焼シンポジウム
開催日：2019 年 11 月 20 日(水)～22 日(金)
場 所：札幌コンベンションセンター，北海道札幌市
主 催：日本燃焼学会

●NEE 研究会第 23 回講演討論会
開催日：2019 年 11 月 8 日(金)
場 所：大阪大学 中之島センター，大阪府大阪市
主 催：日本機械学会環境工学部門 NEE 研究会

●日本機械学会 第 97 期流体工学部門講演会
開催日：2019 年 11 月 7 日(木)～8 日(金)
場 所：豊橋技術科学大学，愛知県豊橋市
主 催：日本機械学会

●第 40 回日本熱物性シンポジウム
開催日：2019 年 10 月 28 日(月)～30 日(水)
場 所：長崎ブリックホール，長崎県長崎市
主 催：日本熱物性学会

●第 67 回レオロジー討論会
開催日：2019 年 10 月 16 日(水)～18 日(金)
場 所：滋賀県立大学，滋賀県彦根市
主 催：日本レオロジー学会，日本バイオレオロジー学会

●日本機械学会 第 32 回計算力学講演会（CMD2019）
開催日：2019 年 9 月 16 日（月・祝）～18 日（水）
場 所：東洋大学　川越キャンパス，埼玉県川越市
主 催：日本機械学会

●日本流体力学会 年会 2019
開催日 ：2019 年 9 月 13 日(金)～9 月 15 日(日)
場 所： 電気通信大学，東京都調布市
主 催：日本流体力学会

●2019 年度日本冷凍空調学会 年次大会
開催日 ：2019 年 9 月 11 日(水)～13 日(金)
場 所：東京海洋大学海洋工学部，東京都江東区
主 催：日本冷凍空調学会

●日本機械学会 2019 年度年次大会
開催日 ：2019 年 9 月 8 日(日)～11 日(水)
場 所：秋田大学，秋田県秋田市
主 催：日本機械学会

●No.19-55 講習会「実験流体力学　流体計測の基礎」
開催日 ：2019 年 9 月 5 日（木）
場 所：日本大学理工学部　駿河台キャンパス，東京都千代田区
主 催：日本機械学会 流体工学部門

●学生対象企業見学会「JEF スチール(株)」
開催日 ：2019 年 9 月 3 日(火)
場 所：JFE スチール株式会社 東日本製鉄所，神奈川県川崎市
主 催：日本機械学会 産業・化学機械と安全部門

国際会議案内

－2019 年－

●30th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-30)
開催日：2019 年 11 月 1 日(金)～11 月 3 日(日)
開催地：Vinpearl, Halong Bay, Vietnam

●第 14 回動力エネルギー国際会議(ICOPE-2019)
開催日：2019 年 10 月 21 日(月)～10 月 25 日(金)
開催地：昆明，中国

●The 7th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow-2019開催日：2019 年 9 月 3 日(火)～9 月 7 日(土)
開催地：東京理科大学葛飾キャンパス, JAPAN

第 97 期部門組織

熱工学部門運営委員会

●部門長
丸田　薫　　東北大学

●副部門長
鈴木　雄二　　東京大学

●幹事
下栗　大右　　広島大学

●部門運営委員
宗像　鉄雄　　（国研）産業技術総合研究所
麓　耕二　　青山学院大学
須藤　仁　　（一財）電力中央研究所
今村　宰　　日本大学
高橋　和義　　（国研）産業技術総合研究所
傳田　知広　　JFE エンジニアリング（株）
元祐　昌廣　　東京理科大学
志村　祐康　　東京工業大学
原村　嘉彦　　神奈川大学
石川　温士　　（株）IHI
安田　陽介　　（株）日立製作所
菊川　豪太　　東北大学
高奈　秀匡　　東北大学
廣田　光智　　室蘭工業大学
長野　方星　　名古屋大学
中山　浩　　中部電力（株）
保浦　知也　　名古屋工業大学
村松　憲志郎　　（株）デンソー
伊與田　浩志　　大阪市立大学
小田　豊　　関西大学
野口　佳樹　　龍谷大学
福谷　和久　　（株）神戸製鋼所
横峯　健彦　　京都大学
川原村　敏幸　　高知工科大学
堀部　明彦　　岡山大学
浅岡　龍徳　　信州大学
大高　武士　　鹿児島大学
迫田　直也　　九州大学
水口　尚　　琉球大学

熱工学部門各種委員会

●総務委員会
委員長　丸田　薫　　東北大学
幹事　林　潤　　京都大学
委員　岡崎　輝幸　　三菱重工業（株）
金子　暁子　　筑波大学
菊池　政雄　　JAXA
下栗　大右　　広島大学
鈴木　雄二　　東京大学
芹澤　良洋　　新日鐵住金（株）
西　美奈　　（一財）電力中央研究所
宗像　鉄雄　　（国研）産業技術総合研究所

●広報委員会
委員長　西 美奈　　（一財）電力中央研究所
幹事　大徳 忠史　　秋田県立大学
委員　岸本　将史　　京都大学
松岡　常吉　　豊橋技術科学大学
李　艶栄　　茨城大学
岡部　孝裕　　弘前大学
徳永　敦士　　宇部工業高等専門学校
馬渕　拓哉　　東北大学

●年次大会委員会
委員長　長野　方星　　名古屋大学
幹事　上野　藍　　名古屋大学

●熱工学コンファレンス委員会
委員長　田部　豊　　北海道大学
幹事　橋本　望　　北海道大学

●学会賞委員会
委員長　中別府　修　明治大学
幹事　鎌田　慎　　明治大学

●講習会委員会
委員長　戸谷　剛　　北海道大学

●日韓合同会議委員会
委員長　鈴木　雄二　東京大学
幹事　森本　賢一　東京大学

●部門賞委員会
委員長　鈴木　雄二　東京大学
幹事　下栗　大右　広島大学

●年鑑委員会
委員長　芝原　正彦　大阪大学
幹事　瀬尾　健彦　山口大学

●出版委員会
委員長　藏田　耕作　九州大学
幹事　仮屋 圭史　佐賀大学

●環太平洋熱工学会議委員会
委員長　店橋　護　　東京工業大学
幹事　深潟　康二　慶應義塾大学

●JTST 委員会
委員長　山田 昇　　長岡技術科学大学
幹事　櫻井 篤　　新潟大学

その他

編集後記

本号では，熱流体工学分野における実機開発の事例について紹介したいと思い，企業と研究所からそれぞれご寄稿いただきました．インターステラテクノロジズ株式会社の金井様からは，我が国初の民間企業により開発されたロケットである MOMO の開発史を，特に MOMO のメインエンジンに搭載されたインジェクタ関連の話題を中心にご解説いただきました．ハノーファー大学燃焼技術研究所（ドイツ）の川原田博士には，エンジンやガスタ ービンなど多岐にわたる研究事例について俯瞰的にご紹介いただきました．また，ハノーファー大学の成り立ちやドイツにおける外部資金獲得プロセスなどについてもご紹介いただいておりますので，ドイツ留学に興味がある若手研究者にもぜひご一読いただければと思います．

ところでこれを書いている数日前には MOMO4 号機の打ち上げがありました．残念ながらエンジンが停止し目標高度 100km には到達できなかったそうです．実機開発の難しさをあらためて感じました．今回の特集記事を通じて，実機開発の難しさとそれをブレークスルーする楽しさを感じていただければ幸いです．

最後になりますが，お忙しい中，特集記事をご執筆いただきました金井様と川原田博士に深く感謝を申し上げます．

（編集担当委員：岡部・松岡）

第 97 期広報委員会

委員長：	西 美奈	電力中央研究所
幹 事：	大徳 忠史	秋田県立大学
委 員：	岸本 将史	京都大学
	松岡 常吉	豊橋技術科学大学
	李 艶栄	茨城大学
	岡部 孝裕	弘前大学
	徳永 敦士	宇部工業高等専門学校
	馬渕 拓哉	東北大学

©著作権：2019　一般社団法人　日本機械学会　熱工学部門