

## 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 Hochschule 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) をおろ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

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えます。

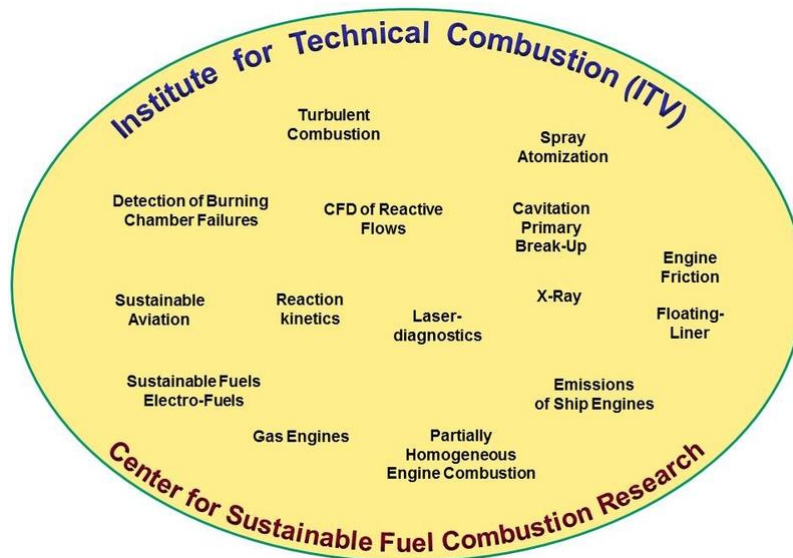
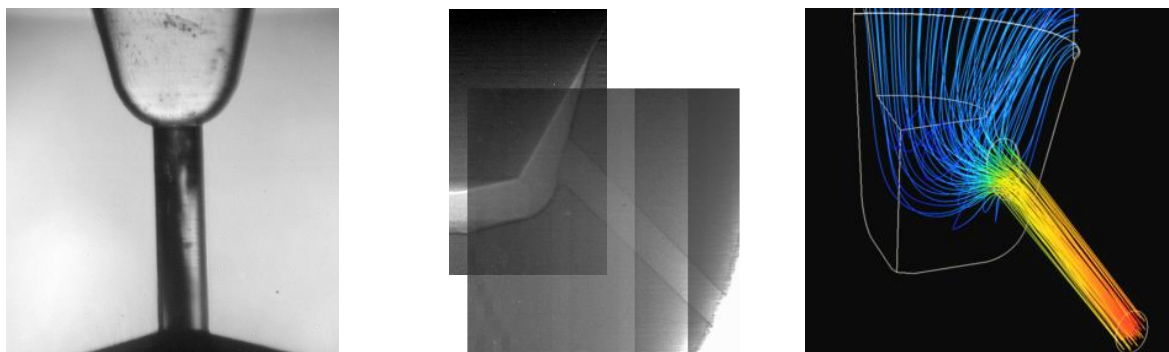


Fig. 3 Overview of research fields at ITV

### 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。そ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で、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)。

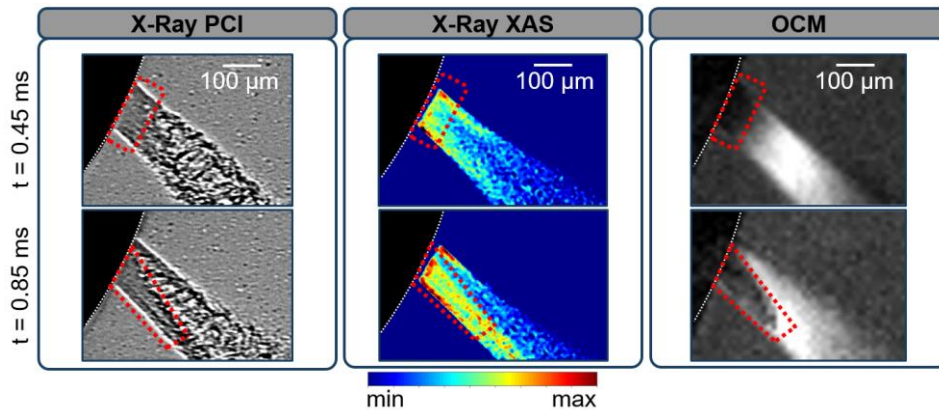


Fig. 5 Flow outside the nozzle

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  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  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。

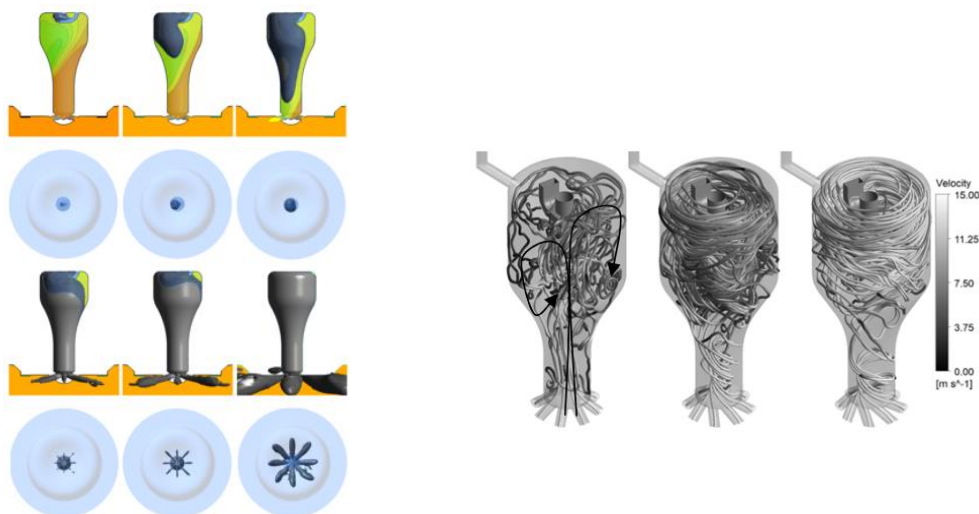


Fig. 6 Numerical simulations of flame propagation and flow inside prechamber

### 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。

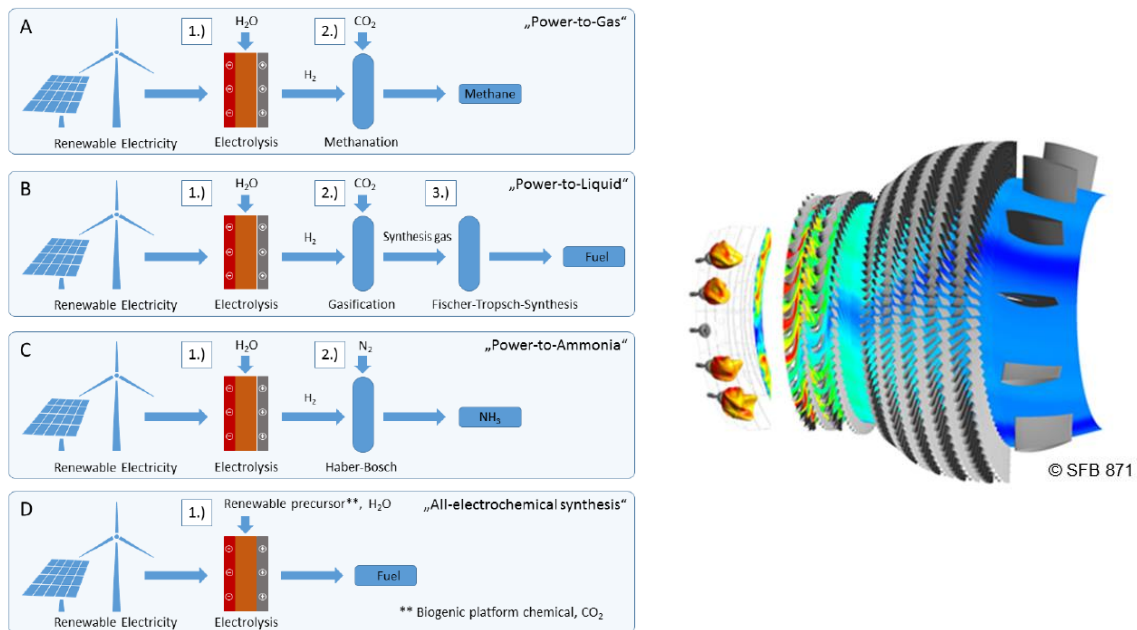


Fig. 7 Fuel synthetic processes (left) and numerical simulation for failure detection of a combustor (right)

### 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 Forschungsgemeinschaft, ドイツ研究振興協会のことです。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

ながら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まれます。

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、こちらもお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.