TED Plaza

ドイツ・ミュンヘン工科大学との共同研究

米谷 直樹

株式会社日立製作所 研究開発グループ
電動化イノベーションセンタ モビリティドライブ研究部
naoki.yoneya.qy@hitachi.com

１．はじめに

筆者は，日立ヨーロッパの Automotive and Industry Laboratory (A&IL)の駐在員として，2017 年 4 月から 2020 年 3 月の 3 年間，ドイツ・ミュンヘンに滞在した．現地業務として，ミュンヘン工科大学とのガソリン燃焼や燃料噴射に関する共同研究に従事した．本稿では，企業の立場として携わる海外共同研究について，プロジェクトの実例に説明する．またドイツ生活を通じて学んだこと等も紹介する．

２．共同研究先(LVK)の紹介

日立ヨーロッパは欧州各地に研究所を構えており，ミュンヘンラボ(図 1)の主なミッションは，自動車および産業分野の研究開発である．社外機関との連携により研究を加速するオープン・イノベーションの一環として，2009 年よりミュンヘン工科大学(Technische Universität München，略称 TUM)の内燃機関研究所(Lehrstuhl für Verbrennungskraft−maschinen，略称 LVK)との共同研究を行っている．ミュンヘン工科大学は 1868 年創立の歴史ある大学で，15 の学部およびミュンヘン市内外に複数のキャンパスを有している．またドイツの名門工科大学連合である TU9 にも属しており，研究の質も高い．その中の機械工学部(Fakultät für Maschinenwesen)に属し，エンジン研究の世界的第一人者である Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister(以降，Wachtmeister 教授と呼称)の率いる研究所が LVK である．

LVK は，ミュンヘン中心部から西に 10km 程のエリアに位置し，観光名所であるニンフェンブルク宮殿に近い．敷地内には 2 階建ての建屋が 2 棟で，周りは木々に囲まれており，一般的にイメージされる大学キャンパスよりもアットホームな雰囲気の研究所である(図 2).

Fig.1 Hitachi Europe in Munich

Fig.2 Institute entrance(LVK)

３．日々の研究生活

共同研究には様々な形態があるが，弊社で行っている共同研究では，大学がプロジェクト担当の学生を割り当て，その学生を窓口として研究が進められる．学生といっても，博士課程で在籍する学生は大学から雇用されているスタッフであり，プロジェクトをマネジメントする裁量と責任が与えられている．

実験は基本的に大学側の担当となるため，企業側のスタッフは大学に常駐はせず，研究計画や進捗の報告は主に週 1 回の電話会議で行われる．ただ現実的には，実験の感触や現場での困りごとなど，直接話すことでわかることも多かった．会社オフィスと大学の距離は，アウトバーン(高速道路)を車で走り 40 分程なので，筆者は出勤途中や帰り際等，かなり頻繁に足を運んでいた．

担当学生は，2，3 年の研究生活の後，博士論文を完成させ，大学を巣立っていく．共同研究の成果は, 企業側で活用されるだけでなく, 担当学生の博士論文テーマとしても一部が活用される．Wachtmester 教授を始めとする歴代 LVK スタッフの皆様の支えがあり，このような国を超えた Win-Win 関係の共同研究を 10 年以上も続けることができており，非常に感謝している．

４．プロジェクト紹介

ここでは，共同研究成果の一部を紹介する．

４・１　副室式ジェット点火システム

次期 CO_2 規制への対応およびライフサイクルでの CO_2 排出削減の観点から，2030 年以降も内燃エンジンを搭載したハイブリッド車が高い市場シェアを持つと考えられている．エンジンを発電用に特化したシリーズハイブリッド(SHEV)向けに，副室を用いた火炎ジェット点火システムの開発が活性化している．従来の火花点火システムでは，主燃焼室上部に固定された点火プラグから放電による火花を発生され，燃焼室内の混合気へ点火を行う．一方，ジェット点火システムでは，燃焼室上部に副室を有し，点火プラグは副室内に露出する形で固定される．燃焼開始時はまず，副室内部にて混合気への点火が行われ，副室内の燃焼発生後，噴孔を通じて連結された主燃焼室側に向けて高温かつ未燃混合気を含んだジェットを噴出し，主燃焼室側の混合気を多点同時着火させ，高速燃焼を実現する．ジェット点火システムは，アクティブ型とパッシブ型の 2 種類に分けられる．アクティブ型は，燃料供給系統を副室内に配置され，点火に必要な燃料の直接供給が可能である．パッシブ型は，副室内に燃料供給系統を持たず，燃料を含んだ混合気を主燃焼室側から噴孔を通じて副室内に供給する．

本研究では，アクティブ型の副室を試作し，ノズル形状や副室内燃料噴射割合が熱効率や排気に与える影響を，単気筒エンジンベンチを用いて評価した．そして，リーン限界の拡大による低 NOx 化，および高圧縮比との組み合わせによる図示熱効率向上のポテンシャルを明確化した（Stadler, et al., 2020）．

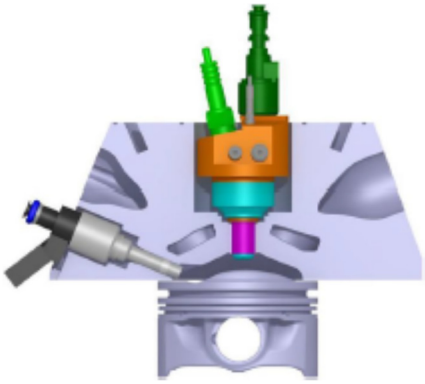

Fig.3 Active type Pre-chamber on the engine head

Fig.4 Single cylinder research engine bench

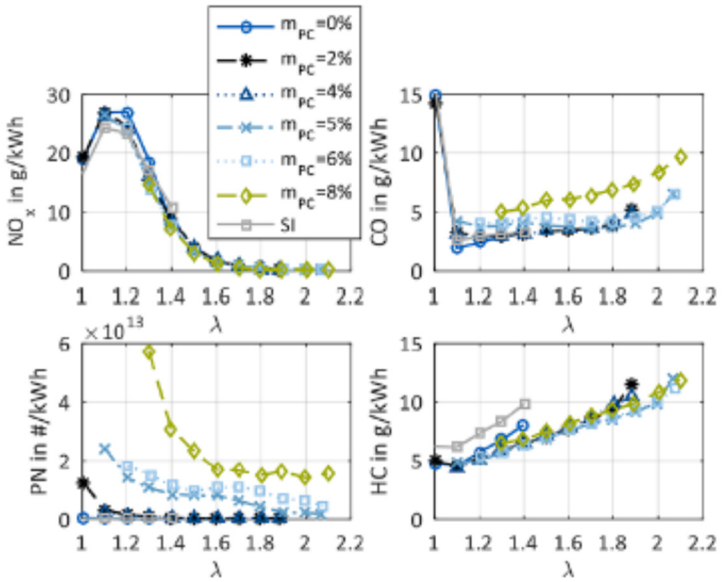

Fig.5 Emission measurement result (Active pre-chamber)

図 3 に試作した副室をエンジンヘッドにマウントしたイメージを示す．アクティブ型副室には，点火プラグと単孔インジェクタ，および副室内圧力センサが備わっている．主燃焼室側への燃料供給は，筒内直接噴射インジェクタを用いて行った．図 4 に，評価に用いた単気筒エンジンベンチ外観を示す．

図 5 に排気評価結果として，副室内への直接燃料供給割合mPC を変えた際の，NOx，CO，PN，および HC 排出を，横軸を空気過剰率λでまとめたものである．従来火花点火(SI)のケースや，副室内に燃料噴射を行わない(mPC ＝ 0)場合，リーン限界はλ1.4 程度であるのに対し，副室内に燃料噴射を行った場合は，最大 λ2.0 まで安定燃焼させることが可能となった．その結果，NOx は 0.2g/kWh 以下まで抑えることができた．一方で，mPC を増やしていくと CO と PN 排出量が増加する傾向も見られた．副室内に噴射した燃料が一部，リッチ状態で燃焼した，または未燃として燃え残ったことが要因と考えられる．

本稿ではスペースの都合上省略するが，本評価では高圧縮比化とλ2.0 リーン燃焼の組み合わせにより，図示熱効率 5.4pt の向上も確認でき(1500rpm, IMEP 9bar)，ガソリンエンジンにおけるジェット点火システムのポテンシャルを示した．

4・2　多段噴射による極低温環境での PN 低減

筒内直接噴射ガソリンエンジンの課題の 1 つとして，粒子状物質(Particle Number, PN)排出規制の強化が挙げられる．2017 年より Euro6d-Temp 規制の枠組みの中で，より実際の運転環境に近い RDE 走行モード試験が導入された．2020 年からは Extended 条件として下限温度が-7℃に引き下げられた．内燃機関の排気は冷間時に多く放出され，特に-7℃のような極低温時は，PN は著しく増加する傾向にある．規制適合車の多くは，排気管下流で PN を捕集するフィルタ(以下，GPF)を搭載するようになったが，GPF の再生制御には燃費悪化の跳ね返りがある．そのため，PN 低減と燃費低減の両立のためには，エンジンから排出される PN 自体も低減していく必要がある．

図 6 に燃料噴霧撮影の一例を示す．写真上部から下方に向けて噴霧が噴射され，その垂直方向

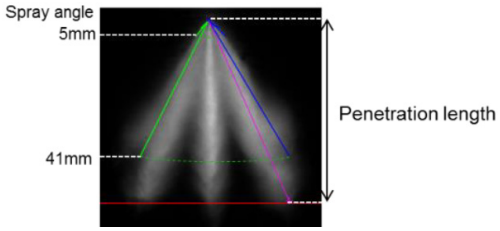

Fig.6 Spray measurement image

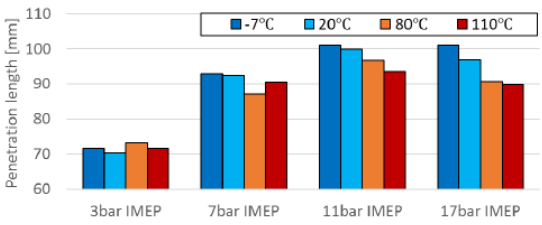

Fig.7 Penetration length with temperature variation

の到達距離をペネトレーションと定義した．図 7 に，燃料温度を-7，20，80，110℃と変化させた際のペネトレーション長さを示す．噴射圧力は 35MPa で，横軸のエンジン負荷に相当する燃料噴射量および背圧を試験条件として用いた．IMEP 3bar の低負荷条件では，温度ごとにペネトレーションに大きな違いが見られなかったが，中高負荷側では燃料温度が低くなるほど，ペネトレーションが増大する結果となった．エンジン負荷が高いときの方が，燃料噴射期間も長くなり，低温で燃料が蒸発しづらくなる影響を受けやすいためと考えられる．この結果から，極低温での中高負荷運転では特に，多段噴射によるペネトレーション短縮の重要性が高まることが読み取れる．多段噴射は，噴射回数や噴射時期などのストラテジ設計自由度が高く，やみくもに全適合を行うと，試験工数の増大を招く．そこで，多段噴射の最適ストラテジを効率的に抽出する手法として，実験計画法(Design of Experiment，略称 DoE)と応答曲面法を適用した（Yoneya, et al., 2020）．

図 8 に，3 回噴射の設計変数の設定を示す．各噴射の噴射パルス，噴射間隔を変数とし，初回の噴射時期については，ピストン付着との兼ね合いで決まるため，固定とした．各設計変数に適切な制約条件を課した後，Space-filling 法を用いてパラメータ空間内に均一にサンプル点を配置することで，エンジン試験計画が生成される．生成された試験計画に基づきエンジン試験を実施し PN を測定し，その結果を，応答曲面法を用いてマップ化する．図 4 の単気筒エンジンの冷却水を-3℃程度まで冷却し，PN を計測した．

図 9 に結果の一例として，横軸を 2 回目噴射時期，縦軸を 3 回目噴射時期とした際の，50 点の測定結果に基づく PN 感度マップを示す．PN が低い青領域の多段噴射が有望であることを示しており，この結果に基づいて，詳細なエンジン適合を行うことで，全パターンを網羅的に試験実施する場合に比べて，より効率的に多段噴射の最適ストラテジを得ることが可能となる．図 9 のマップ上に示される点 A,B 周囲にて，最適点を探索した結果を，図 10 に示す．Single は 1 回噴射時の結果，Multi A は吸気行程 3 回噴射で，ペネトレーション短縮によるピストン付着最小化効果を狙うコンセプトに相当すると考えられる．Multi B は 3 回噴射の最終噴射を圧縮行程に行う．これは，圧縮行程で筒内温度が上昇した場に燃料を噴射することで，迅速な蒸発を狙ったコンセプトに相当すると考えられる．Multi A にて PN54%低減，Multi B にて 68%低減を確認した．また，エンドスコープを用いて PN 発生源である筒内の輝炎を高速度カメラで撮影した結果を図 11 に示す．クランク角度 40deg.ATDC 以降に見られる，輝炎を表す赤い領域が，多段噴射の実施により減少していることが確認できる．

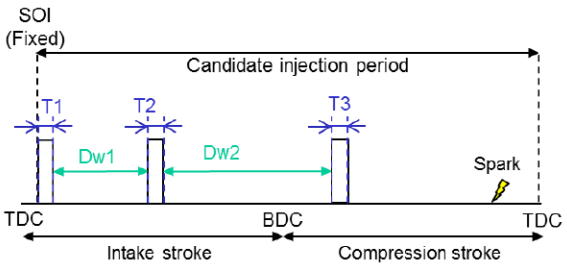

Fig.8 Design parameters of multiple injection

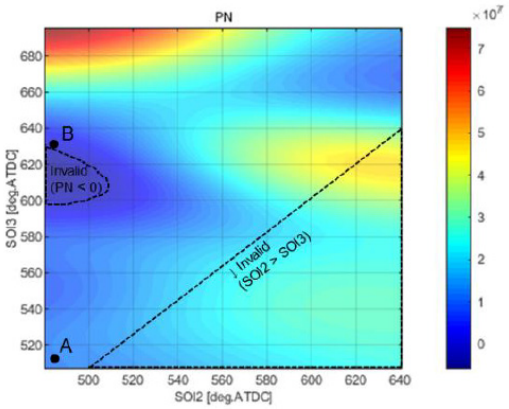

Fig.9 PN sensitivity map on injection timings

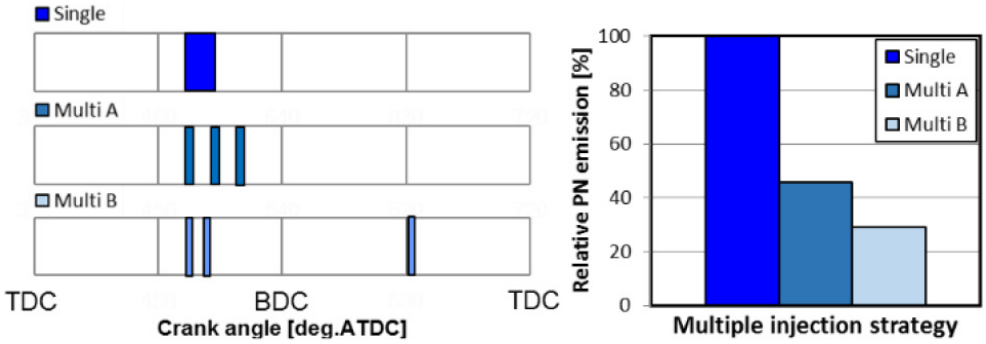

Fig.10 Optimum multiple injection result for 3 times injection (35MPa)

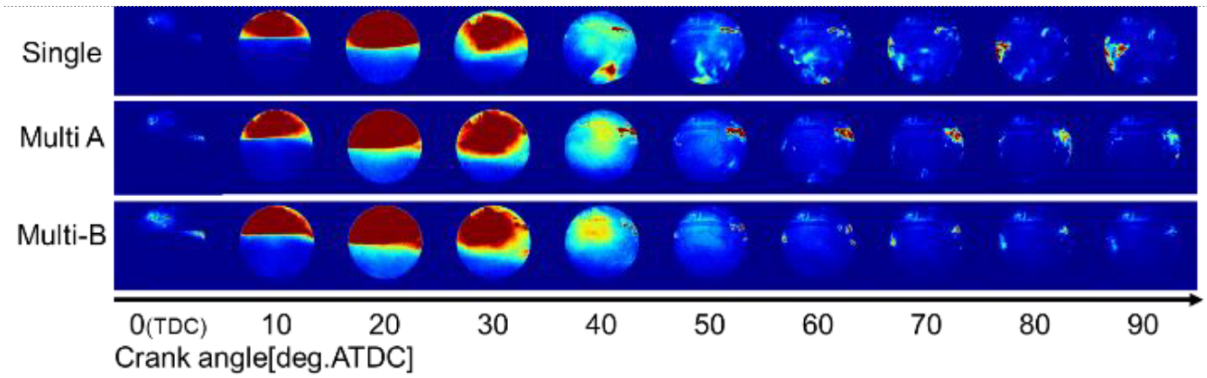

Fig.11 Endoscope measurement results for each injection strategies(35MPa)

５．ドイツ生活について

ミュンヘンはドイツ南部に位置し，バイエルン州の州都である．市街地中心部のマリエンプラッツ (図 12), 自動車メーカ BMW の本社(図 13)等, 観光や産業の要衝であり, 人口はドイツで 3 番目に多い約 147 万人(2019 年)を誇る．観光客が訪れる店舗やレストランは英語が通じ，日本人向けの食材店もあるため，海外生活としては比較的恵まれている地域であると思うが，スーパーマーケットやガソリンスタンド等，ドイツ語しか使えない場面も多く，渡独後に初めてドイツ語の勉強を始めた筆者には，苦労も多かった．

9 月になると，世界最大のビールの祭典，オクトーバーフェストが開催される(2020, 2021 年は中止)．老若男女問わず，伝統衣装を身にまとい，ビールや楽器演奏を楽しむドイツ文化を体感できたことは，良い経験であった．欧州は日本に比べ，人々の屋外での活動率が高い．レストランも屋外席の方が多く，住宅でも休日には公園やベランダで談笑する人々の姿が多くみられる．筆者の自宅周辺にも，散歩道の整備された大きな公園がいくつも存在し，緑の中の散歩は非常に気持ちの良いものであった．お気に入りは，市街地に隣接する英国庭園でのランニングであった．公園全体を回ると 1 周 20km を超え，なかなかの運動である．

Fig.12 Munich city center (Marienplatz)

Fig.13 BMW headquarter & museum

６．まとめ

駐在員として海外大学との共同研究に携わる機会を頂き，その研究生活と成果，およびドイツ生活の一部を紹介した．Wachtmeister 教授を始めとする大学スタッフの皆様，苦楽を共にした担当学生には，心から感謝の意を表したい．本稿が，グローバルに働くことへ興味を持つきっかけとなれば幸いである．

文献

Stadler, A., Sauerland, H., Härtl, M., and Wachtmeister, G., The Potential of Gasoline Fueled Pre Chamber Ignition Combined with Elevated Compression Ratio. SAE Technical Paper, 2020-01-0279, (2020)

Yoneya, N., Blochum, S., Wachtmeister, G., Yasukawa, Y., Sugiyama, Y., High fuel pressure and multiple injection of gasoline for the particle emission reduction under cold conditions, FISITA Web Congress 2020,　F2020-EPV-028, (2020)