

わたしたちの研究（16）動力・燃焼工学研究室



川那辺 洋
(H2/1990卒)



林 潤
(H15/2003卒)



堀部直人
(H14/2002卒)

1. 本研究室の概要と教員紹介（川那辺）

我々の研究室の沿革については第二世紀記念事業会の「第二世紀/100年の系図/講座・分野の歩み」をご参考いただくとよいかと思いますが、明治32（1899）年に機械工学第四講座として開設された後、大正6（1917）年に濱部源次郎教授が「内部燃焼機関」を開講して以来、長尾不二夫教授、池上詢教授と、工学部機械系工学において主に内燃機関の燃焼に関連する研究を進めてきました。平成6（1994）年には工学研究科エネルギー応用工学専攻エネルギーシステム工学講座動力工学分野となり、さらに平成8（1996）年5月にはエネルギー科学研究科の発足に伴って、エネルギー変換科学専攻エネルギー変換システム学講座に移行しました。このとき分野としては熱エネルギー変換分野の池上教授と変換システム学分野の塩路昌宏教授の2研究室体制となりましたが、実際の研究室の運用としては一体であり、それは現在も続いています。まず、熱エネルギー変換分野については平成11（1999）年に池上教授が定年により退官された後、平成13（2001）年には石山拓二教授が就任されました。令和3（2021）年に石山教授が定年により退職された後、令和4（2022）年には林潤が教授として就任しました。また、変換システム分野については塩路教授が平成29（2017）年に定年により退職された後、平成30（2018）年には私が教授に就任しています。

現在の研究室の体制を2分野でまとめると、熱エネルギー変換分野については林教授、堀部直人准教授、変換システム分野については私が教授でスタッフとしては3名、留学生を含めて博士課程が5名、修士2年生が8名、修士1年生が8名、学部学生が6名となっています（2022年4月1日現在）。また、教員の紹介を簡単に以下に記します。林教授は、2017年に京都大学大学院エネルギー科学研究科変換

システム分野に准教授として採用され、2022年に熱エネルギー変換分野教授に就任して現在に至ります。その間、混相燃焼場におけるすす生成特性に対するレーザー計測、および低温プラズマを用いた燃焼支援に対する研究などを進めてきました。堀部准教授は2010年に京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻後期課程を修了したのち、当時の石山研究室に助教として採用され、2021年より准教授として現在に至ります。特にディーゼル機関およびガス機関の性能向上（熱効率向上、排ガス低減、静粛性向上）のための燃焼改善に関する研究を進めております。私自身は、1995年に京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程を単位取得認定退学したのち、当時の池上研究室に助手として採用していただき、2002年に助教授（准教授）、2018年に教授に就任して現在に至ります。その間、乱流燃焼現象のレーザー計測、数値解析およびエンジン燃焼におけるモデリング等を主な対象として研究を進めてきました。

2. 研究紹介

・ 往復動内燃機関に関する研究（堀部）

本研究室では主として熱機関および燃焼機器における燃焼に関する物理・化学過程の解明とその制御に関する研究に実験的アプローチと数値解析的アプローチの両面から取り組んでいます。カーボンニュートラルを目指す時代に「燃焼？」と思われる方もいらっしゃるかもしれませんが、熱を利用するためには将来的にもカーボンニュートラル燃料を使った燃焼が重要な役割を果たすと考えられています。また、高出力かつ大容量のエネルギーが必要なモビリティの動力源としては電動化単体ではカバーしきれない領域があると考えられていて、カーボンニュートラルな合成燃料を熱機関で用いる方法が模索されており、これまで以上に熱効率向上の重要性が高まっています。

ここでは、特に往復動内燃機関の燃焼室内における現象解明に関する研究内容を紹介します。内燃機関の熱効率を高めるには有効仕事以外の「無駄」をできるだけ少なくすることが重要です。この「無駄」は燃焼室の壁から熱伝達によって熱が逃げる「冷却損失」と、仕事に変換しきれずに熱のまま排気として逃げる「排気損失」が大部分を占めます。たとえば、ディーゼル機関においては冷却損失の多くは図1のように高速の噴霧火炎が壁に衝突することに起因すると考えられています。エンジン内のような高温高圧場（たとえば1000K, 8MPa）で噴霧火炎

の断面速度分布と発熱領域の計測は難しく、これまで実験的に確認された例はほとんどありませんでした。本研究室ではこれに挑戦し、図2に示すように部分的にはありますが、光学計測によってディーゼル機関内の噴霧火炎内の高温領域分布と断面速度分布の計測に成功しました。また、排気損失を低減するには機関圧縮比を高めると同時に燃焼に要する時間（燃焼期間）を短くすることが求められます。ところが、そういう燃焼をさせると冷却損失が増えるため、排気損失と冷却損失を同時に低減することは非常に困難です。そこで、本研究室では図3に示すようにディーゼル噴霧の噴射量を小さくすることで燃焼期間を短くしながら噴霧火炎の壁面衝突による冷却損失を抑えつつ、さらに、流動が小さく、かつ、燃焼温度の低い希薄な混合気を燃焼室の周囲に配置し、同時に燃焼させることで冷却損失の低減と排気損失の低減の両立を実現しました（Z. Bao, et al., SAE 2019-01-2169, 2019）。

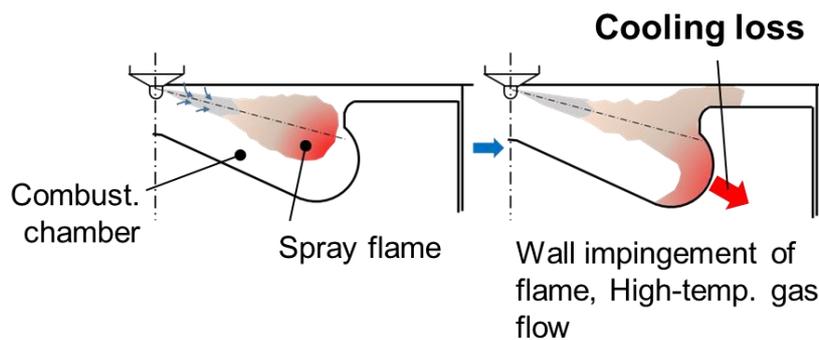


図1 ディーゼル噴霧火炎の壁面衝突による熱伝達（冷却損失）の概念図

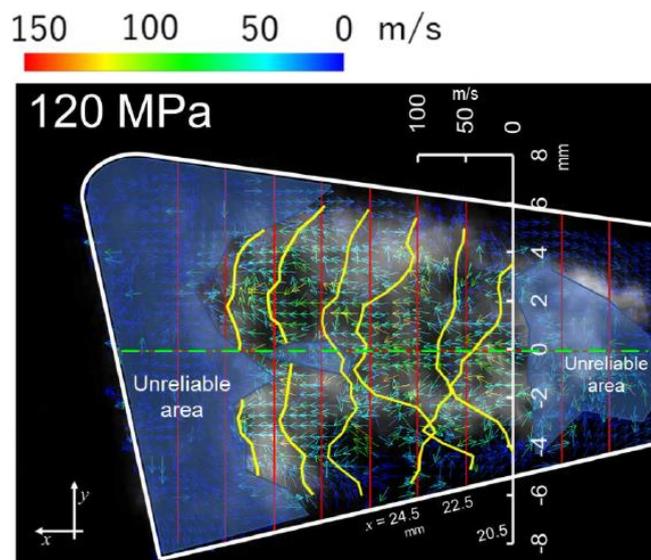


図2 ディーゼル噴霧火炎内の高温領域分布（背景の白い雲のような影）と断面速度分布（色付き矢印）の例（H. Jo, et al., SAE 2021-01-1167, 2021）

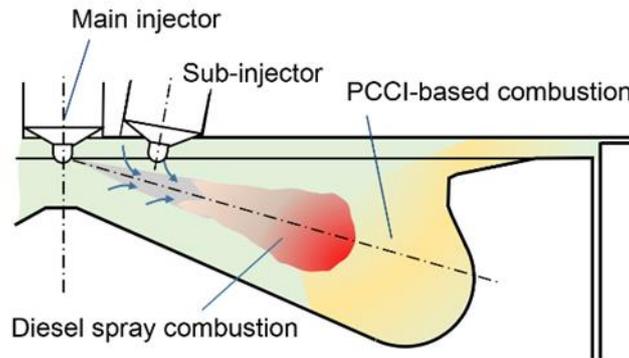


図3 PCCI燃焼とディーゼル噴霧燃焼を組み合わせた燃焼コンセプトの概略図

その他にも、バイオガスの有効利用方法の提案や、水素の直接利用（エンジンでの燃焼利用）等についての研究も進めています。

・プラズマを利用した燃焼反応の支援に関する研究（林）

燃料を無駄なく、有効に利用するための方策の一つとして、冷却損失の低減が見込める燃料希薄条件での燃焼が考えられます。このような条件で燃焼反応を起こす（点火する）ためには、点火のためのエネルギーを大きくする必要がありますが、点火のためのエネルギーを大きくすることで、点火装置には過度な損耗の可能性が生じます。そこで本研究室では、電子温度が高くガス温度の上昇を抑えた非平衡プラズマを用いた点火に関する研究を行っています。特に、放電の持続時間をナノ秒(10^{-9} 秒)まで短縮して繰り返し放電させる手法に注目しており、その放電周波数や放電エネルギーを操作した際の火炎核形成に関する研究に取り組んでいます。これまでに、ナノ秒の繰り返し放電において形成されるプラズマおよび活性化学種は、層流燃焼速度よりも速い速度で電極間から噴出される（Jetting Motion 図4 [S. Lovascio, J. Hayashi, et al., Proc. Combust. Inst., 37 (2019), 5553-5560])ことが明らかになりました。この噴出によって形成される

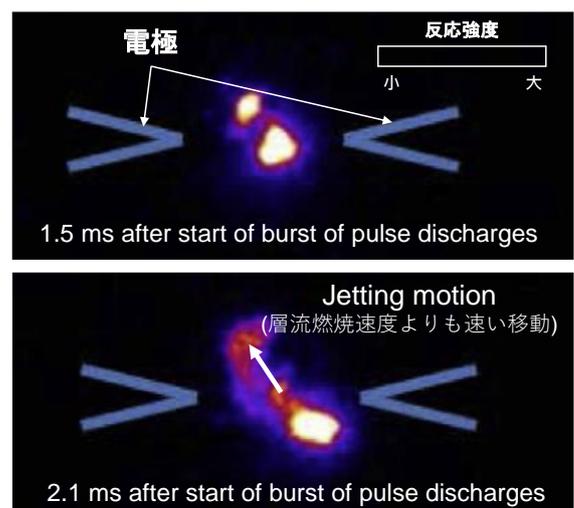


図4 Jetting motion による火炎成長

火炎核の形状が複雑になり火炎が燃え広がるまでの時間が短くなることが示され

ています。

・ 小型宇宙機の推進機器内部における壁面冷却機構に関する研究（林）

小型宇宙機の推進方法の一つに、液体の燃料と液体の酸化剤を衝突させて反応させる二液式スラスタがあります。この二液式スラスタでは、燃焼室を保護する目的から燃料の一部を壁面に衝突させて形成する液膜による冷却を行っています。二液式スラスタでは状況によって、連続噴射あるいは繰り返し噴射による出力制御が行われます（図5 [N. Sako, K. Noda, J. Hayashi, Y. Daimon, H. Kawanabe, Int. J. Heat Mass Trans., 192(2022), 122925]）。その際には、燃焼室の出口のスロートに高温領域が生じ、高温領域から燃料噴射孔側に温度の勾配が生じます。この温度勾配のある壁面に液体が衝突した際には液膜が形成されその先端では、沸騰現象による液滴の飛散が起こります（図6 [N. Sako, K. Noda, J. Hayashi, Y. Daimon, H. Kawanabe, Int. J. Heat Mass Trans., 192(2022), 122925]）。本研究室では、沸騰現象をともなう液膜と壁面間の伝熱機構を明らかにすることで、スラスタ設計に資する知見を獲得することを目的とした研究に取り組んでいます。

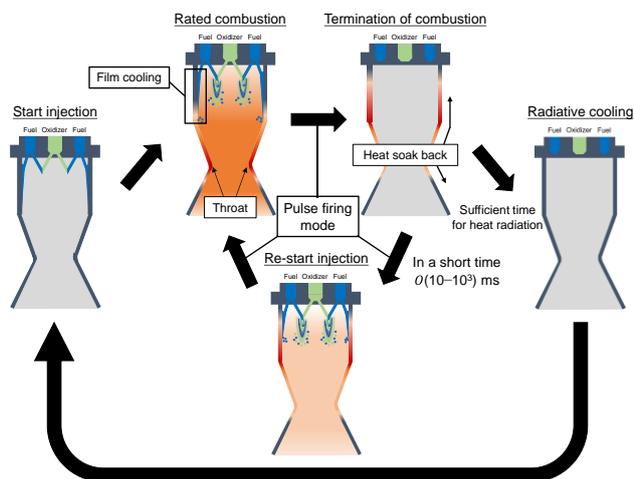


図5 二液式スラスタの運用方法の概念図

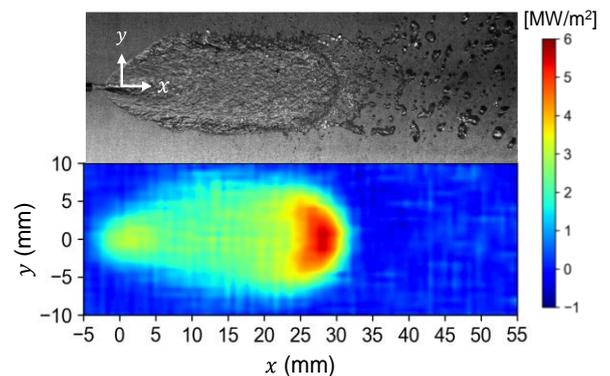


図6 温度勾配のある壁面に噴射された液膜と壁面間の熱流束分布

3. おわりに

以上、我々の研究室で現在実施されている研究の一部を紹介しました。本文中にも書きましたが、カーボンニュートラルの時代に「燃焼」というと、潮流に逆

行しているかのように思われるかもしれませんが、社会的な需要は上昇していると感じられます。むしろそんな中であっても、要望に対応する研究だけではなく、エネルギー変換過程あるいは反応を伴った熱流体の基礎学理に切り込めるような研究を取り組めるようにしていきたいと考えています。このたびはこのような機会をいただきありがとうございました。研究室の紹介は以下のHPでもご覧になれます。ご興味をお持ちいただきましたら是非ご連絡をお願いします。

○燃焼・動力工学研究室HP <https://cphe1.energy.kyoto-u.ac.jp>