

2019年度 崇城大学教職員海外研修報告書

研修者：工学部機械工学科 内田 浩二 准教授

研修先：Imperial college LONDON

受入者：Professor Alex Taylor

<研究活動>

現在研修者はエネルギー・環境問題を背景に、資源の中で再生可能な植物バイオマスベースのアルコール（特にバイオエタノール）をはじめとした様々なバイオ燃料に適し、且つ高効率なディーゼル型バイオ燃料エンジンシステムの実現に向けた研究を行っている。特にそのキー技術である自着火・燃焼制御法を基礎現象の観点から確立しようとするのが本研究の目的である。

研修者はこれまで、噴霧混合気形成過程に対する理論検討、定容燃焼炉を用いた噴霧可視化実験（可視化方法：シャドウグラフ法）および実機関を用いた着火・燃焼特性試験を通し、アルコール燃料の自着火を支配する主要因の明確化を目指してきた。その結果、アルコール燃料の自着火支配要因には燃料物性・特性に関わる内部要因と周囲ガス条件（圧力・温度・酸素濃度）に関わる外部要因があることを明らかにするとともに、これら要因と着火遅れ（燃料噴射から自着火が起こるまでの時間）の定量評価によって様々な燃料の実用的な着火遅れを確保するために必要な周囲ガス条件を予測することが可能であることを示唆した。

一方、噴霧混合気形成過程に影響を及ぼす現象として、燃料噴射初期の生じる微粒化・蒸発過程が挙げられる。特に蒸発潜熱の大きなアルコール燃料では、この過程が後の噴霧温度上昇に大きく影響を及ぼす。そのため、アルコール燃料の自着火性改善に向けた燃料噴射方法を構築するには、燃料物性および周囲ガス条件が蒸発過程に及ぼす影響を詳細に調べる必要がある。

本研修の受け入れ先である Imperial College の professor Alex Taylor は過去の実験においてアセトン蒸気噴霧の混合気形成過程をレーザーによる PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence: 平面レーザー誘起発光法) によって可視化した実績がある。

以上を踏まえ、研修者は本研修を通し、レーザーを用いた可視化手法 PLIF を理解するとともに、アルコール噴霧の微粒化&蒸発過程を可視化する新たな可視化手法の構築を主な目標とした。

(1) PLIF 法を用いた噴霧混合気形成過程の可視化

平面レーザー誘起発光法 (PLIF) は高出力レーザーを可視化対象物に照射し、そのレーザー波長に則した化学種を励起状態にし、その発光をカメラにて捉えるものである。噴霧や火炎に照射したレーザーによって得られる特定化学種の発光強度を、特定化学種単体にレーザー照射することで得られる発光強度によって校正することにより、噴霧内や火炎内の特定化学種の濃度および発光スペクトルから温度を計測することができる。エンジン燃焼関連においては燃料の燃焼時に発生する OH ラジカル（これ自身をトレーサーにすることも可能）や煤前駆体として知られる PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon) を本方法によって捉え、ディーゼル燃焼時の煤発生メカニズムを解明しようとする研究などに応用されている。Imperial College では噴霧の混合気形成過程および乱流場における燃料の混合率とスカラー散逸速度の詳細把握を目的として、インジェクタから噴射されるアセトン蒸気（励起波長 266nm、発光寿命 4ns、蛍光の S/N 比が高く時間的空間的分解能に優れる特徴を有する）を PLIF 法にて可視化している。

スカラー散逸速度 χ は乱流拡散燃焼をシミュレーションする中で重要なファクタであり、これをモデル化できれば拡散燃焼における数値シミュレーションの精度向上へと繋がる。図 1 は一例として、アセトン蒸気噴射後の各時間における混合率（カラーバー：混合率 0=空気のみ、混合率 1=燃料のみ）を示したものである（引用文献：N. Soulopoulos, Y. Hardalupas, and A. M. K. P. Taylor, “Mixing and scalar dissipation rate statistics in a starting gas jet”, Physics of Fluids 27, 125103, 2015）。図中の噴霧画像は PLIF によって得られた結果を画像処理（Wiener filter）したものである。図より噴射の初期段階では噴霧の先端が“渦の輪”らしき形状を形成していることが明らかに確認される。これは噴霧先端側での大規模なエントレイン（周囲ガスを噴霧内へ誘引）によって形成されるものと考えられる。“渦の輪”は時間と共に小さくなり、噴霧の周囲で起こるエントレインによって噴霧周辺の混合率が低下していることが分かる。このように PLIF およびその画像処理によって噴霧内のガス流動を詳細に把握することができることが分かった。そのため、研修者は PLIF による可視化方法を理解するため、光学系レイアウトの構築に参加した。

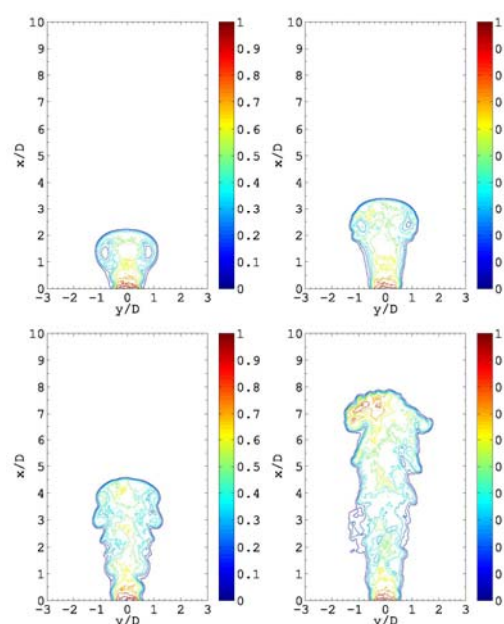


図 1. 噴射後の各時間における混合率

研修者はこれら実験装置を用いてアルコール燃料の噴霧可視化実験を行いたかったが、アルコールの物性上、PLIF 法のトレーサーとしては適さず、またレーザーの危険性およびセキュリティの関係から本実験に参加することはできなかった。しかしながら、本光学系レイアウトの構築に参加したことで、レーザー計測に必要な機器類および設置上の注意点に関する知識を得ることができ、レーザーによる可視化方法の可能性について新たな知識を得ることができた。

(2) シュリーレン&DBI 法を用いた噴霧液相気相同時計測による蒸発過程の可視化

噴霧液相の可視化は主に Mei 散乱光（レーザーを液体に照射することによって生じる散乱光）が用いられる。近年、可視化対象への入射光と対象通過後の光の減衰率から液相濃度を定量的に評価できる DBI(Diffused Back Illumination)法が開発され、それら結果が Mei 散乱光の可視化結果とほぼ同等であることが報告されている。特に DBI 法は高価なレーザーを必要とせず、特定の波長を有する安価な LED を光源として利用できるため、コストを大幅に削減できる。研修者は上記の知見と噴霧蒸気相の可視化に有効なシュリーレン法を組み合わせた噴霧の気液相同時計測法を提案した。これができるれば、Imperial College 現有設備である定容燃焼炉を用いた高压高温場、無反応条件（酸素 0%）における噴霧可視化実験によって、噴霧気液相の時間変化を詳細に把握することが可能となる。

以上の考えをベースに実験準備を進めてきたが、光源のタイミングを制御する回路の開発（Imperial College 内で自作）に時間が掛かり、実験を行うまでには至らなかった。しかしながら、本光学システムはアルコール噴霧の蒸発過程の可視化に対して極めて有効な手段であるため、留学終了後には得られた情報および知見を基に、本学にて本光学システムを構築する予定である（Prof. Alex 了承済み）。

(3) 欧州におけるディーゼルエンジンの排気 (NO_x, Soot) 低減に向けた燃焼制御技術に関する調査研究

欧州では自動車の約 50%がディーゼル車であり、大型トラックおよびバスなどもディーゼルエンジンが主力であるため、これらから排出される窒素酸化物(NO_x)および煤(Soot)を低減する技術が強く求められている。現在、上記への対応は DPF(Diesel Particulate Filter)の搭載による煤捕集、或いはエンジン排気管に尿素を噴射し、アンモニア(NH₃)と NO_xを反応させ、NO_xを窒素と水に還元する尿素 SCR(Selective Catalytic Reduction)の搭載など、いわゆる燃焼後処理技術が主流である。しかし、これらの技術は装置のコストが高価なため、欧州ではこのような触媒を搭載せず NO_x, Soot を同時低減する燃焼技術の研究が活発に行われている。NO_x 低減のための燃焼温度低下と燃焼効率向上を狙った HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition)や PCCI(Premixed Charge Compression Ignition)等が挙げられる。特に PCCI 燃焼ではその予混合気にアルコール燃料を使用する研究も行われている。調査の中、研修者が最も興味を

持った研究が図2に示す「ダクト燃料噴射」である。これは燃料噴射ノズル先端から少し離れた位置に小さなダクトを設置し、このダクト内を燃料噴霧が通過することによって生じるダクト出口のトンネル効果により、後の混合気形成を促進させることを狙ったものである。現象の詳細は不明な点が多いが、実験結果では明らかなSoot低減が示されている（引用文献：Charles J. Mueller, Christopher W. Nilsen, Daniel J. Ruth, Ryan K. Gehmlich, Lyle M. Pickett, Scott A. Skeen, “Ducted fuel injection: A new approach for lowering soot emissions from direct-injection engines”, Applied Energy 204 (2017), pp.206–220）。研修者はこの燃料噴射法をアルコール燃料の自着火性改善に応用できないか検討した。

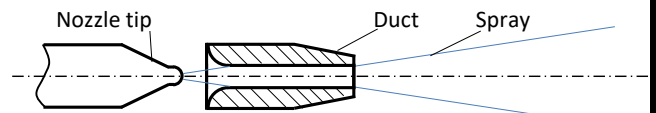


図 2.ダクト燃料噴射

これまでの研究結果より、アルコール燃料の自着火性改善には、噴霧濃度希薄遅延化と噴霧温度上昇早期化を同時に成立させる必要がある。これを満たすアイデアとして、図 2 に示すダクト燃料噴射のダクトにヒーターを組み込み、燃料噴霧への局所熱量供給（蒸発潜熱分を供給）を実現すれば、上記要件が実現可能である（ダクト内を流れる間は噴霧濃度希薄化を抑えることができる）。この効果については研修終了後、本学現有設備である定容燃焼炉を用いた噴霧可視化実験によって検証する予定である。

一方、CO₂ 低減の観点から代替燃料として、OME(オキシメチレンエーテル)の活用に対する研究が活発である。OME は天然ガスやバイオマスガスと CO₂ から生成できる合成燃料であるため、カーボンリサイクルとしての利用が可能であり、且つディーゼル燃焼による微粒子状物質の排出が少ない等の特徴を持つ。本燃料は我が国の経済産業省が示したカーボンリサイクル技術ロードマップにも記載されており、研修者は今後注目すべき重要な課題であると認識している。

(4) EGR および酸素富化燃焼が排気特性に及ぼす影響

主にディーゼルエンジンから排出される窒素酸化物 NO_x および煤の同時低減技術は、大気汚染問題の観点から全世界で求められている。しかし、NO_x と煤の生成にはトレードオフの関係があることが知られており、同時低減が困難である。NO_x 生成は燃焼温度に依存することが分かっており、その低減には一般的に EGR (Exhaust Gas Recirculation：排ガス再循環) が用いられる。これは排ガスに含まれる熱容量（比熱）の大きな CO₂ を再度吸気することにより、燃焼時の温度を低下させることで NO_x 生成を抑える方法である。しかし、EGR による吸気 CO₂ の増加は吸気酸素濃度の低下および圧縮温度の低下を招き、燃焼によって生成された煤の酸化速度を低下させるため、結果として煤の排出量を増加させる。一方で、吸気時に一定量の酸素を直接供給し、筒内全体酸素濃度を高めた状態で燃焼させる“酸素富化燃焼”では煤の酸化速度を促進させ、煤の排出を低減することはできるものの、増加した酸化速度によって燃焼温度が高まり、NO_x 生成が促進する。これらの関係から、現在のディーゼル機関では EGR によって NO_x 生成を抑え、煤は DPF (Diesel Particulate Filter) 等を用いて後処理する方法が取られている。

以上の内容を踏まえ、Imperial College では高価な後処理装置を使用せず、EGR や酸素富化燃焼による NO_x および煤の同時低減策を提案している。既に実機関を用いた性能試験が実施されており、Euro V 排ガス規制の領域を満足する結果が得られている。この結果に対し、熱力学的解析から燃焼特性が評価されているが、この段階では排気低減策と NO_x および煤の同時低減との因果関係が明確化されていない。また、この技術によって得られる NO_x、煤の同時低減効果を最大限に引き出すため、各運転条件に対する各パラメータを最適化する必要がある。そこで本研究は、実機による性能試験で得られた結果をベースとし、市販計算ソフトを用いて数値シミュレーションを行い、Imperial College にて提案された排気低減策が NO_x および煤を同時低減するメカニズムを明らかにすると共に、排ガス特性改善に最も効果的な各パラメータ値を定量的に予測することを目的とした。

研修中は実験結果の妥当性を検証するとともに数値計算を主に実施した。その結果、実験結果とシミュレーション結果が概ね一致する結果が得られ、シミュレーションによって排気低減策の燃焼特性を予測することが可能であることが分かった。また、この結果を基に、各種パラメータを変更して数値計算を行った結果、それぞれのパラメータと NO_x および煤の関係をある程度把握することができた（これについては現在検証中である）。本研究は Imperial College と企業との共同研究であるため、今回の報告においてこれ以上の詳細説明は控えさせていただきたい。尚、本研究は現在も Prof. Alex と共に継続中であり、新たな知見が得られ次第、雑誌への投稿を予定している。

<教育活動>

今回研修先として受け入れて頂いた Imperial College LONDON は QS World University Rankings 2019 で世界 8 位に位置付けられ、教育的視点からも学ぶべき点が非常に多いと思われる。研修者は自らの今後の教育活動改善を目的に、Imperial College の学生達の学習姿勢、講義雰囲気および教員の雰囲気づくり等を感じるべく、積極的に講義へ参加&見学した。

(1) 語学教育

学部生約 9000 人、大学院生約 5300 人、この内約 43%が留学生（中国籍 13%）を抱える Imperial College では、留学生に対する英語教育が活発に行われている（但し、強制ではない）。Grammar for speaking, Lecture listening, Pronunciation, Speaking interactions 等が週 1 回、1~2 時間程度実施される。どのコースも概ね 4 週で完結し、各シーズンで 2 回程度実施されている。講義内容についてはレベルが非常に高く、常に Small group discussion で実践的に行われた。学生達からの意見や質問が多く、教員との意見交換が常に成立している感があった。これは“学生の質の高さ”が大きく影響しているように思われるが、教員の誘導も確実に影響している。日本では“これは英語でこのように表現する”“英語の文法はこうです”と言うような“教える”指導方法が主であるように思われる。英国では先に学生に対し、“この場合あなたはどのように表現しますか？”と言う問いがあり、学生からの回答に対して全員で“議論する”と言うスタイルが多い。テキストや練習問題では“答え”を先に示し、“この答えを導くにはどのように問うべきか”を問う（考えさせる）。すなわちこの問いに対する答えは複数存在する（決まった答えは特にない）。この方法であれば、学生は常に自分の意見（考え）を求められることになり、自分の発言に責任が伴うこと（自己責任）を認識させることができる。これは研修者が崇城大学での講義において実践している方法に非常に近く、その重要性について再認識することができた。

(2) ものづくり教育関連

Imperial College では 1 年生への導入教育として、自動制御ロボットの製作を題材としたものづくり教育が行われていた。この講義は通年科目であり、1 チーム当たり 4~5 名でチームを組み、1 年を掛けてプレゼンテーションおよび試走を繰り返し、ロボットを完成させる。図 3 は最終評価として実施されたコンテストの様子を示したものである。ルールは図中の円の外側からロボットを自動制御で走らせ、中央にある支柱を検知し、元の位置（走行開始位置）に戻らせるというものである。この時、走行開始位置と走行終了位置の誤差を測定し、その誤差を競い合う。つまり、如何に目的を果たし、正確に元の位置に戻ることができるかが問われ、その制御方法の提案が評価される。この講義は、ルールは異なるものの、現在崇城大学機械工学科で導入教育として実施している“ロボット製作”とほぼ同じである。本学ではロボットの走行性能（走る、曲がる）および操縦性を重視し、主に機械的機構を工夫させている。これに対し、Imperial College では制御方法そのものを提案させている。何より異なるのはプレゼンテーションの機会の数である。半期でプレゼン 2 回、試走 1 回のペースである。プレゼンでは各チームが自分達の制御方法を説明し、他のチームおよび教員と議論する。その結果を基に制御方法を考え直し、新たな制御方法を構築する。これによりブラッシュアップされた方法で試走を行い、その性能を自ら評価する。教員は具体的な方法は言わず、自らの考えを示し、それについてどう考えるかを問う。研修者が日本と欧州との教育方針の違いを感じたのは正にこの部分である。日本では“1+1”が“2”であることを教え、その解を導く方法を教えることが主であるように感じる。しかし、欧州では解である“2”を先に示し、この解を得るためにはどうすればよいかを問う。つまり、学生のアイデアによってその答えはいくつも存在する。教員は自分の考えを示し、学生のアイデアを聞くことで“議論”が生まれる。その議論の繰り返しによって、教員&学生間の“信頼関係”が構築される。“学生の面倒を見る”という視点ではなく、学生と議論することによってお互いを尊敬し合う関係を生む教育こそが Imperial College の本質であると研修者は痛感した。このように鍛えられた学生は常に自分の考えを持ち、胸を張ってそれを主張できる。教員として、企業人として見た時、Imperial College の学生



図 3.ロボットコンテスト

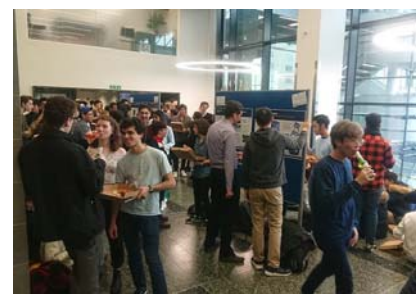


図 4.プレゼンテーション風景

は実に魅力的であった。前述したが、研修者はこれまで学生に考えさせる（解が1つではない課題）教育を常に意識し、実施してきた。しかしながら、未だ学生と議論するまでには至っていないのが現状であると認識している。勿論、このような教育は学生の基礎学力なしには成立しない。現在、本学の教育改革（SEIP II）では全学数理 W.Gが組織され、学生達の基礎力向上に対する議論がなされ、その施策が実行されている。これにより、学生達の基礎学力が向上すれば、今回の経験を踏まえ、教員と学生が議論し合える環境を実現できると研修者は確信している。一方、コンテストで自作のロボットが目的通りに動いた時の学生達の表情は自信に満ちており、大いにはしゃいでいた。ものづくりの苦勞を乗り越え、達成感を得て喜び合う学生達の姿は世界共通であった。

(3) 学生の夢について

上記(1),(2)では教育の考え方の違いについて述べた。もう一つの重要項目は Imperial College の講義レベルの高さである。研修者は指導教員から講義ノートを頂くことができたため、その内容を確認した。講義方法そのものは特に新規性があるものではないが、専門的内容は実にレベルが高い。当然ながら学生達は相当の学習を要求されることになる。では何故学生達はやる気を維持できるのか。一つはイギリスの教育が“自己責任”を前提として成立していることが挙げられる。もう一つは学生達の“将来像”が非常に明確である点である。研修者は偶然、Horse Guards（近衛騎兵隊）のパレードや海軍学校の卒業式を見ることができた。そこでは自分の仕事に胸を張る息子と家族が泣きながら喜び合い、互いを尊敬の眼差しで見つめる光景があった。イギリスには少々特殊な職業であっても、それを目指したいと思える（尊敬される）仕事が多くあり、若者はそれらを自分の将来像として明確に目指すことができる。

研修者は本学の学生に対し、夢を持つことの大切さと技術者がどれだけ夢のある職業であるかを感じさせられるよう心掛けている。しかし、日本では現実問題として、技術者が魅力ある職業であり、尊敬される職業である事実は若者に伝わっておらず、目指したい職業と言われてもそのイメージすら持てていないのが現状であるように思える。今の企業で働く人々を見て、学生達が“あのようになりたい”と思うだろうか？答えはNOであると思う。研修者は何もイギリスの方法が正しいと言っている訳ではなく、国として根本的な教育方針（早い時期に自分の将来像と職業を合致させられるような）を見直さなければならぬ時期であることを訴えたい。未だ高校までの教育は有名大学へ合格することが目標であるように研修者は思えてならない。このような問題に対し、研修者は現時点において具体的な案がある訳ではないが、この教育の延長線上には日本産業界の衰退しかない。

最後に、研修者は同室の中国人留学生に「何故 Ph.D.を取得したいか」尋ねた。その学生は「中国では車の排ガス問題で死者が多数出ている現状がある。私はこの現状を自分で解決したい。そのための知識が欲しい」と回答してくれた。素晴らしい回答であった。このような自らの目的を語る学生の育成が研修者の新たな目標である。

(4) セミナー関連

本学機械工学科では年に1~2回の機械工学セミナーが実施されている。これは教員の研究活動に対する刺激や異分野融合の機会および大学院生（学部生含む）の研究に対する意欲向上を目的として、外部より講師を招き、講演会を実施しているものである。Imperial College においてもこのようなセミナーが頻繁に実施されている。研修者が滞在した期間では、熱流体分野においておおよそ20回予定され、各国（欧州やアジア圏）の大学から招かれたその分野の専門家による講演が実施された。講演はエンジン燃焼に関連する数値シミュレーションや実験のみならず、流れ場解析（乱流に対する数値計算および実験）やライデンフロスト現象等、広範囲に渡って行われた。中には「バイオ燃料の将来」に関する講演や「内燃機関は今後絶滅するのか？」等の問題提起、「日本のハイブリッド自動車に関する技術紹介」等の講演もあり、研修者にとって貴重な情報収集の場となった。講演中は学生からの質疑が非常に多く、学生達の研究に対する意識の高さが伺えた。

一方で、セミナーの数のみならず、各教授の知り合いの多さに驚愕した。研究活動においても研修者の質問に対し、Prof. Alex はその内容に関わる様々な方に呼びかけ、意見集約する形で答えてくれた。このような人間関係が言わば研究遂行に対する原動力であり、新たな研究テーマ創出のキーであろうと思われる。研修者は改めて研究活動における人脈構築の重要性を痛感した次第である。



図 5.セミナー実施風景

<社会貢献>

英国の教会では他国籍の方々（英語を喋れない人々）を対象に英語を教える教室が多く開かれている。研修者は取得した VISA の関係上、英国での英語学習時間（語学学校での受講時間）が制限されていたため、上記サービスを活用させて頂いた。その中、研修者は JA(Japan association in the UK)英国日本人会、二水会部理事の飯塚忠治氏と知り合った。二水会は英国在中の日本人の会であり、月に 1 度講演会を実施している。飯塚氏は講演会を取り纏められており、少々突然ではあったが研修者に講演を依頼された。

講演は 2 月 12 日に実施され、研修者は本学の紹介を含め、「車社会とエネルギー・環境問題」と題して発表した。参加者は 20 名と少数ではあったが、自動車業界関係者の方々および材料関連企業の方などにご参加頂いた。講演は 60 分程度であったが、発表後の質疑が非常に多く、特にイギリスのエネルギー政策に関する問題や車の排ガス問題に関する議論が活発に行われた。これらの質問内容から研修者はイギリス在中の方々が環境問題に対して非常に意識が高いことを実感した次第である。講演後の懇親会においても質問を多数頂き、本学の教育内容を含め、大いに議論することが来た。尚、上記の内容は英国日本人会ホームページの会報にて少しだけ掲載されている。

以上、海外研修における研究・教育活動に関してご報告申し上げます。今回の海外研修はその 1 日 1 日が本当に貴重な経験であり、研修者の人生において最も濃厚な 1 年間でした。研究活動に関しましては、今後も Prof. Alex と連絡を取り合い、その関係を大切に継続していきたいと思えます。また、教育面に関しましては、本研修で得た経験をベースに、研修者の本学における教育姿勢・活動を見直し、学生達と「議論し合える」、学生達にもっと「考える」機会を与えられる教育方法を構築したいと考えております。一方では、留学の楽しみ（異文化に触れ、人々と触れ合うこと）や海外に出ていくことの重要性を少しでも学生達に伝えられるよう努力します。このような研究・教育活動を通し、自らの考えを持って行動できる（自分の意見を発言できる）真の意味でのエンジニアの育成に尽力することが、今回研修者に与えて頂いた海外研修という機会ならびにそれを支えてくださった全ての方々のご協力・ご尽力に報いることと認識しております。研究活動や語学能力に関しましては、1 年間の実績として決して満足できるものではなく、悔いの残るものばかりですが、その思いを含め、今後の研究・教育活動に邁進する所存です。