

TED Plaza

米国スタンフォード大学での在外共同研究



寺島 洋史

北海道大学 准教授
大学院工学研究院 機械・宇宙航空工学部門
htera@eng.hokudai.ac.jp

1. はじめに

筆者は、2023年4月から2024年3月までの約1年間、米国スタンフォード大学において在外共同研究を行う機会を得ました。本稿では、その紹介をさせていただきます。

今回の米国滞在は、科研費の国際共同研究強化(A)に採択されたことで実現しました。受け入れホスト先は、スタンフォード大学機械工学科のMatthias Ihme教授です。Ihme教授は、燃焼流れのシミュレーションを専門とし、機械学習をはじめとしたデータ科学技術をいち早く取り入れることで、世界の燃焼研究をリードしています。また、超臨界流体物性の研究にも力を入れており、分子動力学シミュレーションや日本のSpring 8でも実験をされています。近年、燃焼研究の主要学会での招待講演も多く、例えば本年7月の国際燃焼学会や5月に京都で開催された国際数値燃焼学会でも招待講演をされました。Ihme教授はドイツ生まれで、スタンフォード大学で博士号を取得し、ミシガン大学を経て、現在はスタンフォード大学で教授を努められています。

2. 在外研究に至るまで

Ihme教授と知り合うきっかけとなったのは、私が実行委員を努めた2019年の第33回数値流体力学シンポジウムで、Ihme教授を招待講演者として日本に招聘したことがきっかけでした。実行委員長の大島教授から招待講演者の選定を任せていただいた際、研究内容が近いだけでなく、年齢も近いIhme教授が頭に浮かび、招聘が実現しました。滞在中は、シンポジウム開催地の札幌だけでなく、仙台、東京、京都など日本各地でIhme教授に講演をしていただきました。その際、私が付き添いを務めたことで、研究だけでなく個人的にも私を知ってもらうことができました。

私も燃焼流れのシミュレーションを専門としており、Ihme教授が取り組まれている研究テーマと合致するテーマを複数持っていたことから、共同研究の機会を探っていました。2021年、科研費の国際共同研究強化(A)に応募し、幸運にも採択いただきました。科研費の国際共同研究は、長期の在外研究が可能であり、若い方は積極的に応募されるとよいと思います。また、枠を拡大し、希望する多くの研究者が在外研究できる状況になるといいなと感じます。

私の場合、Ihme教授と日本への招聘を通じて知り合うことができました。通常の学会参加だけでは、このような関係性(信頼関係)を築くのは難しいと思いますので、海外研究者の日本招聘は、特に若手研究者の皆さんが人脈を広げ、世界的ネットワークを構築する絶好の機会だと思います。

3. 日々の生活(研究)

私が過ごした機械工学科の建物(図1)は、スタンフォード大学キャンパスの心臓部となるMain quad(図2)の背後にあり、キャンパス内でも非常に良いロケーションでした。教員部屋が集まるフロアにブースを設けていただき、1年間で過ごしました。Ihme教授の研究室には約15名の学生

があり、そのほとんどが博士課程に所属します。その他 6-7 名の博士研究員（ポスドク）があり、研究集団という感じを強く受けました。学生およびポスドクは研究内容に応じて大きく 5 つのグループに分かれ、それぞれで週 1 回の頻度で、進捗ミーティングが行われていました。私は 3 つのグループ（数値手法：numerics、燃焼：combustion、機械学習：machine learning）のミーティングに参加しました。ミーティングは内容によって 1 時間から 2 時間で、それぞれがスライドを用意して、前回からの進捗と今後の方針を報告します。滞在を通じて感じたのは、研究に対する学生の責任感が非常に強いことでした。博士課程学生だから、と言われるとそうかもしれませんが、自分で研究をデザインし、すでに個々が独立した研究者という印象を受けました。全員がファーストネームで呼び合い、教員と学生の関係が良い意味で対等であることが根底にあるのかもしれません。また、学生それぞれが得意分野を持っており、お互いに教え合うといった横のつながり、つまり集団としての強さを感じました。ミーティング以外にも個別ミーティングを行っており、Ihme 教授はそこで細かい指示をしているようでした。教授部屋に学生は頻繁に来ていましたので、教員の時間管理は難しく、ハードワークだと感じました。滞在中、私もミーティングにて週 1 回進捗報告をするようにしました。報告を求められていたわけではありませんが、研究の推進には重要と考えていました。進捗が悪い時も多々あり、改めて学生の苦悩、気持ちが理解できました（笑）。研究内容については後述します。



Fig. 1 滞在中過ごした建物と相棒の自転車



Fig. 2 Main quad からの眺め（いつも快晴）

4. 日々の生活（プライベート）

1891 年創立のスタンフォード大学は、西海岸サンフランシスコ市から南に約 50 キロの場所に位置し、広く美しいキャンパスを持ちます（図 3 と図 4）。世界有数のトップ研究大学であることは言うまでもないかと思えます。太平洋との間に丘陵があり、乾燥した空気が流れてくることから、いつも快晴温暖で非常に快適でした。春から秋にかけてはほぼ雨は降りません。私の滞在中は、4 月から 9 月まで雨が降ったのは数日だけだったと思います。一方、冬は雨が多くなりますので、スタンフォードを訪問するなら、春から秋がおすすめです。

私は、18 年ほど前に（2006 年後半から）2 年間強、米国東海岸ボストン近郊に滞在した経験があり、今回は西海岸、米国でも異なる地ということで滞在生活を楽しみにしていました。しかし、スタンフォード大学がある周辺はベイエリア、読者の方もニュース等を通して聞いていますが、想像以上の物価高でした。18 年前の滞在中に比べると、感覚として 1.5 倍、さらに円安の影響が重なり、日本の物価に対して 2 倍以上でした。例えば、家賃は、1 ベッドルームで 2500 から 3500 ドルが相場であり、滞在中は 1 ドル約 140 円でしたので、仮に 3000 ドルとして、家賃は約 42 万円です。豪華なアパートを想像されるかもしれませんが、シンプルな部屋でこの家賃です。伝え聞くとところによると、ベイエリアでは、年収 12 万ドル以下は貧困層、また月 8000 ドルの収入がないと普通の暮らしはできないと言われており、まさに異国の地です。18 年前に比べて、米国の物価と賃金が上昇しているのに対し、日本は全く変わっていないことを実感します。このような状況を踏まえると、海外研究枠においては、日本円ベースとなる研究滞在費の見直しが必要なのかもしれません。

スタンフォード大学は、帯同する家族にも優しい大学でした。配偶者プログラムは充実しており、ESL（英語学習）をはじめ国際交流プログラムが多々あり、ほぼ全て無料です。妻は毎日キャンパスまたは周辺に出かけていましたので、私よりも？充実した生活を送っていたようです。強い研究力だけでなく、こうした家族サポートが充実していることも世界から研究者を惹きつける大きな要因だと感じます。



Fig. 3 Hoover tower からの眺め



Fig. 4 キャンパスの風景

5. 研究について

滞在中に主に取り組んだ研究は、多成分流体の接触面に関する数値計算法です。例えば非予混合火炎の形成時に燃料と酸化剤が接触する問題を想像してもらえればと思います。一見、簡単にシミュレーションできると思われるかもしれませんが、保存型の圧縮性流体方程式を使用した場合、接触面から虚偽圧力振動が発生し、場合によっては計算が破綻することが知られています (Abgrall, 1996)。1990年代後半にこの問題が指摘されて以来、虚偽圧力振動を避けるための計算手法が提案されてきました。過去に私 (Terashima and Koshi, 2012) も Ihme 教授 (Ma et al., 2017) もそれぞれ計算法を提案しています。虚偽圧力振動を避ける鍵は、接触面を通して圧力が一定である状態が (擾乱がなければ) 次の時間ステップでも維持するように計算法を構築することです。これを圧力平衡条件と呼びます。圧力平衡条件を満たす簡単な方法は、エネルギー保存方程式の代わりに圧力発展方程式を解くことですが、これではエネルギー保存が満足されなくなります。そのため、エネルギー保存と圧力平衡条件を同時に満たすのは困難とされてきました。そのような中、滞在前の 2023 年に東北大学の河合教授のグループがエネルギー保存と圧力平衡条件を同時に満たす計算法を提案 (Fujiwara et al., 2023) されたことから、その内容を注視していました。提案された計算法は画期的なものでしたが、熱量的完全気体 (比熱一定で空力解析で適用される) に限定という課題もありました。私は燃焼流 (熱的完全気体) や超臨界圧流 (実在流体) を対象に研究を行っておりますので、状態方程式に依存しない形で計算法を導出できないかと考えていました。Ihme 教授もこの課題を把握しており、計算法の導出ができれば世界初であること、また燃焼流シミュレーション技術の土台にもなることから、一緒に取り組んでみようということになりました。

前置きが長くなりましたが、化学種質量保存式、運動量保存式、そしてエネルギー保存式で使用する数値流束を、圧力平衡条件を満たすように構築する、ということが鍵となります。2023年5月に本格的に考え始めてから、圧力平衡を満足する条件式には早くたどり着いたものの、状態方程式に依存しない場合の数値流束の導出が難しく、日々悩んでいました。読者の皆さんも経験があるかと思いますが、何がきっかけかわかりませんが、ある日、こうしたら求まるのではないのか、と試した所、数値流束の形がノートの上に現れました。一緒にやってくれた学生に実装してもらい、虚偽圧力振動が抑制された結果を見せてもらった時は興奮しました。在外研究という環境、そして自由な時間を与えていただいたことがこの導出につながったと信じています。図 5

に結果の例を示します。従来法では圧力や速度に大きな虚偽振動が見られますが、開発した手法（APEC: approximately pressure equilibrium under conservation と名付けました）では振動が抑制されていることがわかると思います。得られた成果は、滞在中 11 月の米国物理学会流体力学部門 APS-DFD で発表（Terashima et al., 2023）し、査読論文に投稿中です。もしご興味があれば、詳細については少々お待ちいただければと思います（この原稿中で十分に説明できず申し訳ありません）。これで全て解決となればいいのですが、APEC は近似的に圧力平衡条件が満たされる計算手法になっており、虚偽圧力振動を完全には排除できず、まだ課題が残っています。より高精度に圧力平衡条件が満たされる数値流束の導出を目指して研究を進めたいと思っています。

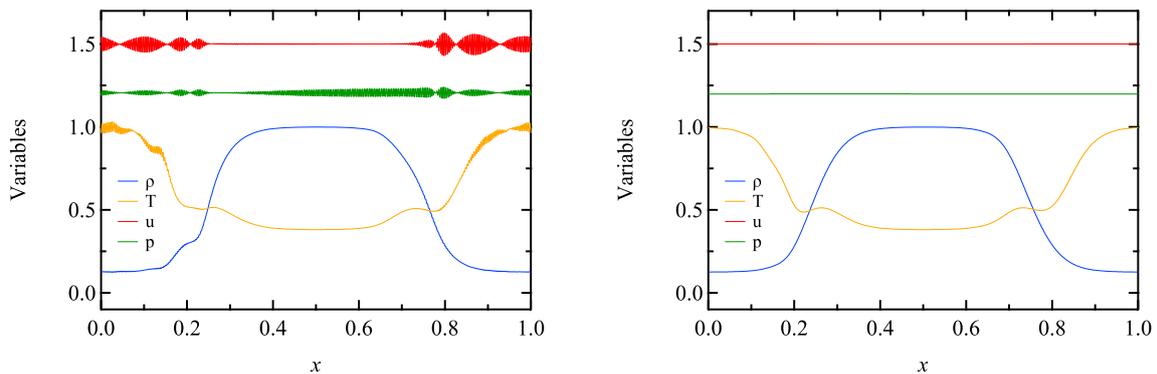


Fig. 5 超臨界圧 CH₄/N₂ 接触面移流問題の結果（密度，温度，速度，圧力分布）．左が従来法，右が提案した APEC による結果．

6. おわりに

滞在の最終週には、研究室の皆さんに送別会を開いてもらいました（図 6）．グループ集合写真を入れた写真立てを含め、沢山の贈り物をいただき、温かく送り出してもらいました．Ihme 教授をはじめ、研究室の皆さんに心から感謝の意を表したいと思います．また、在外研究をサポートしてくださった大島教授、不在中お世話になった北大研究室の皆さんにも感謝致します．最後に、今回の滞在はとても有意義なものになりましたが、30 代前半で経験した米国滞在からも強い刺激を受け、今回の滞在に大いに活かされました．何事も若い時に、海外優位とは思いませんが、少しでも海外で研究したいという考えがあれば、できるだけ若い時にその一歩を踏み出されることをお勧めします．



Fig. 6 Farewell party 時の研究室集合写真．前列右から 3 番目が筆者．その左に同じく在学研究で滞在されていた北大の橋本准教授，短期滞在されていた北大の博士課程学生 Cho さん，京大の Abhishek 助教，そしてその左隣が Ihme 教授．

謝 辞

本研究は、科研費国際共同研究強化（A）21KK0250 の支援を受けた。

文献

- Abgrall, R., How to prevent pressure oscillations in multicomponent flow calculations: a quasi-conservative approach, *Journal of Computational Physics*, Vol.125 (1996), pp.150-160.
- Fujiwara, Y., Tamaki, Y., Kawai, S., Fully conservative and pressure-equilibrium-preserving schemes for compressible multi-component flows, *Journal of Computational Physics*, Vol.478 (2023), 111973.
- Ma, P.C., Lv, Y., Ihme, M., An entropy-stable hybrid scheme for simulations of transcritical real-fluid flows, *Journal of Computational Physics*, Vol.340 (2017), pp.330-357.
- Terashima, H., Koshi, M., Approach for simulating gas-liquid-like flows under supercritical pressures using a high-order central differencing scheme, *Journal of Computational Physics*, Vol.231 (2012), pp.6907-6923.
- Terashima, H., Ly, N., Ihme, M., On the analysis of conservation- and pressure-equilibrium-preserving schemes for compressible real-fluid simulations, 76th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, November 19-21, 2023, Washington, DC, USA.