Nakatani RIES 2026 最終報告書

氏名：小川成就
所属学科：東北大学　工学部　機械知能・航空工学科　航空宇宙工学専攻
ホストラボ：Georgia Institue of Technology Cardiovascular Fluid Mechanics Lab
PI: Dr. Lakshmi Prasad Dasi　Mentor: Tanmay Khare

1．ジョージア工科大学での研究活動

(＊論文化される為, 具体的な患者データやモデルに関する詳細は伏せています.)

1. 研究背景と目的

私は、School of Biomedical EngineeringのCardiovascular Fluid Mechanics Labにて先天性心疾患に的わる心臓内の流体の流れの予想に関する研究を行いました。本研究では、小児の先天性心疾患の治療に用いられるBTTシャントを対象として、血流の特徴を迅速に評価する手法の開発に取り組見ました。BTTシャントは肺への血流を確保する役割を担うが、その内部の血流は、シャントの形状や接続部の構造、流動条件によって変化します。特に、局所的な逆流や再循環がどこで生じるかを把握することは、シャント内の血流環境を理解するうえで重要です。血流を詳細に調べる方法として、数値流体解析（Computational Fluid Dynamics：CFD）が用いられるが、患者ごとの形状について解析を行うには計算時間を要するため、多数の形状や条件を比較する際には負担が大きい。そこで本研究では、あらかじめ計算したCFDデータを機械学習に利用し、形状や流動条件から血流の特徴を短時間で推定することを目指しました。単に計算を高速化するだけでなく、逆流の程度や発生位置など、評価したい血流の特徴を適切に捉えられるかに重点を置き研究を進めました。

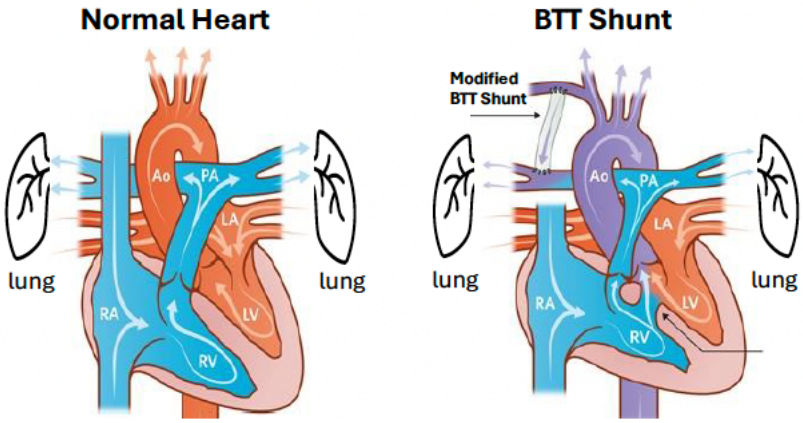

Fig.1 通常の心臓とBTT Shuntを持つ心臓の違い、BTT Shuntでは肺動脈へ一本多くバイパスが繋がれている

2. 研究方法

まず、シャントの直径や接続角度などを変化させた理想化形状を対象に、異なる流動条件で得られたCFDデータを整理し、モデルの学習と評価に用いました。理想化形状を用いることで、複雑な患者形状をそのまま扱う前に、形状の違いと血流の変化との関係を検討しました。予測対象としては、逆流の割合などを表す指標と、血管内の各位置における速度分布の両方を扱いました。指

標の予測では、形状や流動条件を入力とする回帰モデルを検討しました。一方、速度分布は情報量が大きいため、流れの主要な特徴を少数のパターンで表現する低次元モデルを利用しました。具体的には、固有直交分解（Proper Orthogonal Decomposition：POD）によってCFDの速度分布を代表的な空間パターンに分解し、それらの組み合わせとして流れを表現しました。そのうえで、形状や流動条件から各パターンの重みを推定するモデルを構築しました。これは、複雑な流れを直接すべて予測する代わりに、流れを構成する少数の情報を予測する方法です。評価では、「既知のCFD結果を少数のパターンでどの程度再現できるか」と、「CFD結果を与えずに、形状や条件だけからどの程度予測できるか」を分けて検討しました。また、学習に使用していない条件についても評価し、速度分布全体の誤差に加えて、逆流や血流の分配に関する指標を比較しました。さらに、実患者の形状とCFDデータを用いて、理想化形状での検討を実際の解剖学的構造へ展開しました。患者のシャントは曲がりや直径の変化を含むため、シャントの走行方向を基準として局所的な逆流を判定しました。これにより、逆流の割合だけでなく、シャント内のどの位置に逆流が集中するかを可視化し、形状の変化との関係を調べました。

3. 得られた結果と考察

理想化形状を用いた検討では、CFDによって得られた速度分布の主要な特徴を、低次元の表現によって再現できることを確認しました。一方、細かな流れの特徴を表現するためにパターン数を増やしても、機械学習による予測が必ずしも改善するわけではありませんでした。これは、流れを表現する能力と、その表現に必要な情報を未知の形状から推定する能力が、異なる課題であることを示しています。また、速度分布全体の誤差が小さい場合でも、シャント内の局所的な逆流や流量の分配を十分に捉えられるとは限りませんでした。そのため、モデルの評価には全体的な誤差だけでなく、研究目的に対応した局所的な指標も必要であると整理しました。実患者のCFDデータの解析では、逆流が生じる領域を可視化し、その位置や程度が患者形状によって異なることを確認しました。シャントに沿った直径の変化や曲がり方などを調べることで、単一の接続角度だけでは表現できない形状の特徴と、逆流位置との関係を検討しました。局所的な拡大などの形状変化は、逆流の発生位置を考えるうえで着目すべき特徴であることが示唆されました。ただし、限られた症例による観察であり、特定の形状要因が逆流を引き起こすと断定できる段階ではありません。一方、理想化形状で学習した予測モデルを実患者に適用した場合には、予測値と患者CFDの結果に差が残りました。このことから、理想化形状内で良好な性能を示すことだけでは、実患者への適用可能性を十分に保証できないことが分かりました。実際の解剖学的形状を適切に表現することに加え、学習データが対象とする形状や条件を十分に含んでいるかを検討する必要があります。なお、患者の逆流位置を可視化した結果は、患者CFDデータを解析して得られたものであり、機械学習によって患者の血流全体を正確に予測できたことを示すものではありません。本研究では、このような解析による位置の確認と、モデルによる未知条件の予測を区別して評価しました。

4. 研究の意義と今後の展望

本研究では、CFD、低次元モデル、機械学習を組み合わせた血流の高速評価に向けて、基礎的なモデル構築と実患者データによる検討を行いました。その成果は、予測モデルの性能評価にとどまらず、逆流の発生位置を調べるための解析手順を整理し、理想化形状から実患者へ展開する際の課題を具体化した点にあります。今後は、シャントの局所的な直径変化や曲がりなどを、モデルにどのように取り入れるかを検討します。また、逆流を評価する領域や流れの方向の定義を統一し、

より多くの患者データと心周期内の条件で検証を進める必要があります。モデルの複雑さを増すことだけを目指すのではなく、どの形状情報が予測に有効であり、どの条件で予測が難しくなるのかを明らかにすることが重要だと考えています。将来的には、異なるシャント形状や流動条件を短時間で比較できる評価手法へと発展させ、治療計画の検討を支援することを目指します。

２．研究活動における日米での違い

日本でのこれまでの研究経験と比較して、今回滞在した米国の研究室では、専門分野の境界を越えて知識や意見を共有し、研究室全体で互いの研究を前に進めようとする姿勢が特に印象に残りました。各自が独立した研究テーマを持ちながらも、自分の研究だけに閉じるのではなく、周囲の研究にも関心を持ち、積極的に協力する雰囲気がありました。例えば、自分の研究で専門外の知識が必要になった際には、その分野に詳しい別の研究室のポスドクを紹介していただくことがありました。研究室内だけで解決しようとするのではなく、必要に応じて外部の専門家につないでいただけることで、新しい視点から研究を見直す機会を得られました。この経験を通じて、研究を進めるうえでは、自分自身の知識を深めることに加え、適切な専門性を持つ人に相談し、その知見を取り入れることも重要だと実感しました。
また、PIとのミーティングでは、議論を通じて次の週に取り組むべき内容が明確になる点が印象的でした。現在の課題に対して何を優先し、次回までに何を確認するべきかを具体的に整理できたため、ミーティング後は目標を持って研究に取り組むことができました。限られたインターンシップ期間の中でも、方向性を確認しながら進められたことは、大きな支えとなりました。研究室内での意見交換にも、分野を越えた開放性を感じました。自分の専門と一部しか重ならない研究に対しても、それぞれの視点から率直に助言する姿が見られました。一方で、私が用いている手法に関心を持ち、詳しく質問してくださったり、関連する研究を行う別の方に紹介してくださったりすることもありました。助言を一方的に受けるだけでなく、自分の取り組みも他の人の研究につながる可能性があると感じられたことは、研究への意欲を高めるきっかけになりました。日常生活では、研究に集中する時間と、休憩や交流の時間とのメリハリがあると感じました。研究室のメンバーが一緒に昼食を取り、研究以外の話題も交えながら過ごすなど、ラボでの生活そのものを楽しんでいる様子が印象的でした。こうした日常的な交流が、研究上の疑問や困りごとを気軽に相談できる関係にもつながっているように感じました。

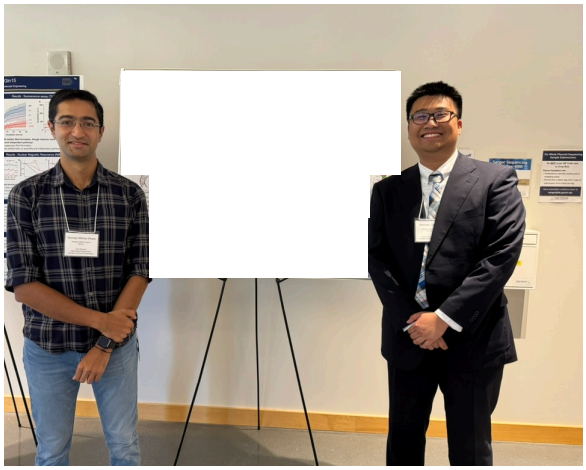

Fig.2. ポスター発表にて(メンターとの写真)



Fig.3. ラボ送別会にて(左からImran, Tanmay, 自分, Aniket, Courtney)

3．米国の文化・生活面での発見・苦労等

滞在中は、研究活動だけでなく、通学や食生活、旅行などを通じて、日本とは異なる生活環境を経験しました。慣れない土地での生活には苦労もありましたが、自分なりに工夫したり、大学の支援を活用したりすることで、徐々に生活を整えることができました。

生活面で特に苦労したのは、宿泊先から研究室までの移動です。研究室はキャンパス外に位置しており、宿泊先からも距離があったため、通学の負担が大きく感じられました。また、周辺では住まいを持たず路上で生活する方々を目にする機会が多く、米国の都市が抱える社会課題を身近に感じました。土地勘のない地域を移動する際には、安全な経路や移動手段にも気を配る必要がありました。

こうした中で助けとなったのが、大学によるUberの利用券（バウチャー）の提供です。大学が学内の研究・教育環境だけでなく、キャンパス外での移動についても支援していることが印象に残りました。この経験を通じて、大学での活動と周辺地域での生活は切り離せないものであり、地域の中で学生や研究者の活動を支える大学の役割を実感しました。

食生活については、滞在中は比較的よく自炊をしていました。日本から持参した食べ物も活用しながら、慣れない環境でも食べ慣れたものを取り入れていました。現地の食事を楽しむ一方で、日本の食べ物が手元にあることは、日々の生活の中で安心感にもつながりました。食事を含めた生活環境を自分で整えることは、研究に落ち着いて取り組むためにも大切だと感じました。

また、滞在中には米国内を旅行する機会もありました。移動で特に印象に残ったのは、国内線の機内の寒さです。冷房が強く、外の気温に合わせた服装では寒く感じることがあり、目的地の天候だけでなく、移動中の環境にも備える必要がありました。航空便の遅延によって予定どおりに移動できないこともあり、時間に余裕を持たせ、状況に応じて柔軟に対応する大切さも実感しました。

これらの経験から、海外生活では自分で準備や工夫をすることに加え、利用できる支援を知り、必要に応じて活用することも重要だと学びました。研究以外の場面でも、異なる環境や社会のあり方に触れ、自分の生活を見直す貴重な機会となりました。







左から Fig.4, 5, 6: US Fellow Danielとのマイアミ旅行、JP Fellowの高木さん、河原さんとのオーランド旅行、JP Fellowの佐藤さん、水上さん、箕田さんとのボストン旅行



左上からFig.7, 8: 大空へ羽ばたくFalcon Heavy Rocket

Fig.9: ヒューストン宇宙センター

Fig.10: Duke 大学

Fig.11: ヒューストン宇宙センター宇宙飛行士訓練施設

Fig.12, 13: JP Fellowの箕田さんと水上さん、US FellowのAlexとJoonghoのニューヨーク旅行

４．本プログラムに参加した成果・意義

本プログラムへの参加を通じて、専門的な研究経験を得るとともに、異なる分野や文化的背景を持つ人々と協力しながら研究を進める姿勢を学びました。約２か月間のジョージア工科大学での研究生活は、自分の専門性や今後の進路を考えるうえでも、大きな意味を持つ経験となりました。

研究面では、BTTシャント内の血流を対象に、CFD、機械学習、低次元モデルを組み合わせた解析に取り組みました。理想化形状におけるモデルの構築・評価から実患者データの解析までを経験し、血流の高速予測に向けた可能性と、実際の患者形状に適用する際の課題を整理することができました。特に、モデルが学習した条件では良好な結果が得られても、複雑な患者形状にそのまま適用できるとは限らないことを実感しました。予測が難しい事例を通じて、どのような情報や検証が不足しているのかを考えられたことも、重要な成果です。今回得られた知見と課題を、今後の研究の発展や論文化につなげていきたいと考えています。

また、研究結果を批判的に捉え、根拠に基づいて説明することの重要性を学びました。モデルの性能を一つの数値だけで判断するのではなく、何を予測できているのか、どの条件で誤差が大きくなるのかを確認する必要がありました。さらに、CFDデータの解析によって確認した結果と、機械学習によって予測した結果を区別するなど、成果を正確に伝える姿勢を身につける機会となりました。

コミュニケーション面では、英語でのミーティングや発表を通じて、自分の考えを整理し、相手に伝える経験を重ねました。特に、専門分野が異なる相手に研究を説明する際には、専門用語を並べるだけでは伝わらず、研究の目的や意義から説明する必要がありました。ポスター発表の準備でも、限られた時間の中で何を伝えるべきかを考え、図や表現を工夫しました。こうした経験は、自分自身の研究への理解を深めることにもつながりました。
研究室での交流を通じて、周囲の専門性を頼ることと、自分の知識を周囲に還元することの両方が大切だと学びました。専門外の課題について他の研究者を紹介していただいたり、自分の用いる手法に関心を持っていただいたりする中で、研究は一人で完結するものではないと実感しました。帰国後も、自分の研究に集中するだけでなく、他の人の研究にも関心を持ち、互いに協力できる関係を築いていきたいと考えています。
本プログラムの意義は、海外で研究を行うことを、将来の漠然とした選択肢から、具体的に考えられる選択肢へと変えられた点にもあります。研究と生活の両面で、自分が対応できることと、今後さらに伸ばすべきことを知ることができました。今回の経験を一度の海外滞在で終わらせず、研究の継続、英語での発信、分野を越えた交流に生かし、今後の成長につなげていきたいと考えています。

５．その他

RIES2026の夏は、研究スキル・人脈の広さ・将来観など、様々な意味で人生を変える２ヶ月になりました。このような貴重な機会をくださった中谷財団様に心より感謝申し上げます。また、私を受け入れてくださった Dr. Dasi やTanmay、Imran、Courtney、Aniketをはじめとする CFM Labの皆様、現地で手厚いサポートをくださった Dr. Takayama および Dr. Soojung、出発前から帰国後のイベントまでサポートをいただいた小川様と藤川様、ともに素晴らしいときを過ごした JP Fellows、US Fellows、Alumni の方々、および関わってくださった全ての皆さまに、心から感謝を申し上げます。