Nakatani RIES 修了報告書

箕田有音　東北大学　4 年　工学部　化学・バイオ工学科
ホストラボ　ジョージア工科大学　Dr. Nian Liu（メンター Adam Hsieh）

1．ジョージア工科大学での研究活動

レドックスフロー電池は、発火危険性の低さ、システム寿命の長さ、エネルギー容量と出力を独立して設計できる柔軟さなどの点で、大規模蓄電システムとして注目を集めている。現在、広く普及しているリチウム電池などとの大きな違いは、活性種が電解液中に溶けて存在しており、外部タンクに貯蔵された電解液をポンプによって電池セルに循環させることで充放電を行う点である(Fig.1)。このような構造であるため、電池のセルの大きさや数によって出力を、外部電解液タンク体積によってエネルギー容量をそれぞれ独立して調整可能である。よって、設置規模に応じて容易なスケールアップが可能になるというメリットがある。

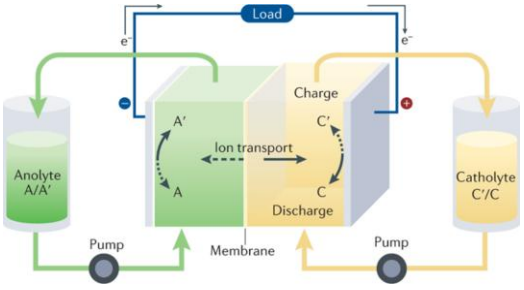

Fig.1 Redox Flow Battery [1]

具体的な用途としては、再生可能エネルギーの安定利用のための大規模蓄電池としての用途が挙げられる。太陽光や風力などの再生可能エネルギーは、その発電量が天候や時間帯によって変動するという課題を抱えている。そのため、発電量が多い時に余剰電力を蓄え、発電量が少ない時に放電することで電力供給を安定化させるシステムが重要となる。こうした用途に対して、長寿命かつ大容量化が容易なレドックスフロー電池は有望な技術の一つといえる。

レドックスフロー電池の中でも最も利用が進んでいるのが、バナジウムレドックスフロー電池(Vanadium Redox Flow Batteries: VRFBs)である(Fig.2)。VRFBs の大きな特徴は正極側と負極側の両方の活性種としてバナジウムイオンを利用する点である。他の異種金属を組み合わせたレドックスフロー電池では、イオン交換膜を介した活性種の不可逆的なクロスオーバーによって、電池性能が低下する可能性がある。一方で、VRFBs ではすべての活性種がバナジウムであり、クロスオーバーによって誘発された電解質の不均衡は、電解質の再混合によって打ち消されるため、不可逆的なクロスオーバーリスクを下げることができる。このような特徴から、長期的な運用に適した蓄電技術として期待されている。

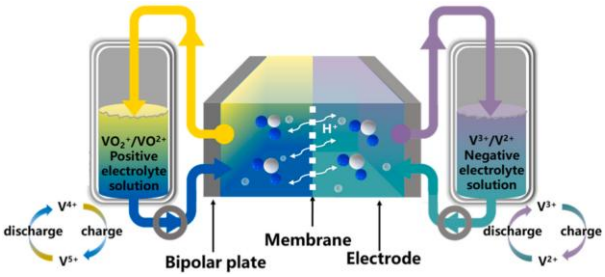

Fig.2 Vanadium Redox Flow Battery [2]

しかし、VRFBs にはエネルギー密度が低いという重大な課題がある。電池のエネルギー容量は電解液中に含まれる活性種の量に依存するため、電解液中のバナジウム濃度を高めることができれば同じタンクサイズでもより多くのエネルギーを貯蔵できることになる。一方で、VRFBs では硫酸水溶液中にバナ

ジウムイオンを溶解させて電解液を調整するため、バナジウムイオンの溶解度に制限を受けるのである。

溶解度の低さに由来するエネルギー密度の低さという課題に対して、これまでに様々な無機化合物や有機化合物の添加剤を用いてバナジウムイオンの溶媒和構造の安定性を向上させる研究が行われてきた。特に有機添加剤については、カルボキシ基(-COOH)、スルホ基(-SO_3H)、リン酸基(-H_2PO_3)、アミノ基(-NH_2)などの官能基を有する有機化合物を添加することで、バナジウムイオンとの相互作用を通じて溶液中の化学的安定性向上や析出の抑制をできることが報告されている。一方で、従来の添加剤導入研究では、主に析出の抑制や電解液の安定温度範囲の拡大に重点が置かれており、添加剤の導入による粘度やイオン伝導度の変化への影響も考慮する必要がある。

Unpublish の内容となるため、具体的な言及は避けるが、本研究では従来の添加剤とは異なる分子構造をもつ硫黄含有有機溶媒に着目して共溶媒候補を選定し、これらの分子構造の違いがバナジウム電解液の濃度や溶液特性に与える影響を検討した。これにより、従来の硫酸系電解液の濃度限界を改善し、高エネルギー密度化につながる電解液設計の可能性について探索した。また、濃度測定だけでなく電気化学特性の面から電解液の評価を行ったり、溶媒和構造の変化を理解するためにラマン分光法による計測を行ったりした。また、システム全体の評価を行うために、サイクリングテストの実施を試みた。以上の分析を通して、有望な有機共溶媒を示すことができた。

参考文献

[1] Zhang, L., Feng, R., Wang, W. et al. Emerging chemistries and molecular designs for flow batteries. *Nat Rev Chem* **6**, 524–543 (2022). https://doi.org/10.1038/s41570-022-00394-6

[2] Qiong W., Longhui R., Jiacheng S., Changwu H., Zhiyuan J., Zhiguo Q., Cheng Z., Juan W., From assessment to advancement: a deep dive into the performance evaluation and optimization methods of all-vanadium redox flow battery, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **226**,1364-0321(2026), https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116471.

2. 研究活動における日米の違い

研究の進め方については、研究活動そのものの流れに大きな違いがなかったものの、共通機器や研究支援施設が充実しており、多様な分析や実験を実施できる環境が整っていることと、研究に取り組む姿勢として Work Smart を重視していることが印象的であった。

まず、研究環境については、共通機器を利用できる体制が充実していた。例えば Raman 分光装置や SEM などの分析機器が設置されており、所定の登録を行えば自由に利用できる環境が整っていた(Fig.3A)。また、SD printer については、Georgia Tech の The Hive Makerspace には専門スタッフや学生のアルバイトが常駐しており、学生が CAD で設計したデータを持ち込めば、翌日にはプリントされたものが得られるようになっていた(Fig.3B)。また、School of Chemical and Biomolecular Engineering(ChBE) には Machine Research Services という加工支援施設があり、期間中には何度かメンターとともに訪問し、実験に使用する部品の加工を依頼した。このように、研究者自身がすべての装置や部品を準備・制作するのではなく、専門的なサポートを受けながら研究を進められる環境が整っていることは、大きな特徴であると感じた。

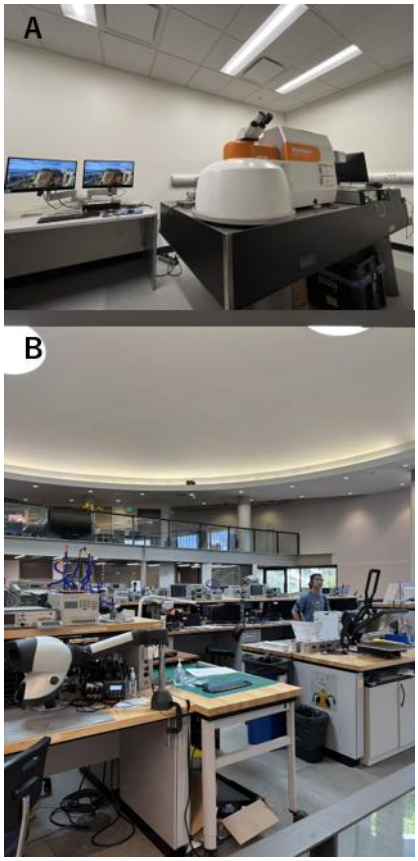

Fig.3 Georgia Tech の施設. A）研究に使用した Raman. B）The Hive の様子.

次に、研究に取り組む姿勢として印象的だったのは、Work Smart という考え方である。日本では、特に博士課程への進学を目指す学生や博士課程の学生が、朝早くから研究室に行き、夜遅くまで研究に取り組む姿を目にすることも多い。一方で、アメリカでは確かにそのような生活を送っている Ph.D.学生もいるが、昼頃大学にきて、自分の予定した仕事が終わると帰宅する学生もいた。ここで大切なのはなぜ、彼らはそのような生活を送れているかということである。背景の一つには、The Hive Makerspace や Machine Research Services のような施設の存在があると考えられる。研究に必要な作業をすべて自分で行うのではなく、専門的なサポートを受けるべき部分は外部の支援を活用することで、学生自身が本来取り組むべき研究に集中できているのであろうと想像する。また、研究室によってはラボオートメーション化が進んでおり、実験作業の効率化が図られていることも関係していると考えられる。しかし、最も大きな違いは、研究に対する意識にあると感じた。私の滞在した Dr. Liu の研究室では日本で大切にされがちな Work Hard だけでなく Work Smart が重視されていた。やみくもに実験を繰り返すのではなく、事前に十分な情報収集や検討を行い、何をすべきかを明確にしたうえで研究に取り組むという考え方である。この方法は、研究時間効率化だけでなく、試薬や材料の無駄を減らすことにもつながる。実際に、そのような考え方の下で研究が進められている様子を見て、限られた時間で資源を有効に活用することの重要性を学んだ。

渡米して最初の 1 週間は、同期のラボの建物が近いメンバーと 9:00 頃にホテルロビーに集合して大学へ向かい研究して、17:00 頃にホテルに帰ってみんなで食事をとるような生活を送った。しかし、慣れない分野や文化、言語の中で、自分が納得できる研究活動を行うためには、私自身はある程度の時間をかけて取り組む必要があった。同期の中にも、同じように朝から研究に取り組む生活スタイルの同期がいたので、一緒に研究室へ通い自分に合ったペースで研究を進めるようになった。このようにすることでようやく、落ち着いて研究に取り組めるようになったと感じた。この経験を通じて、私が感じたことは働き方を考える上で、研究室にいる時間の長さだけを指標にすべきではないということである。研究に必要な時間や、充実感を得られる研究の進め方は人それぞれ異なる。重要なことは、自分にとって最適な研究への取り組み方を見つけることである。アメリカでの 2 か月間での研究生活を通じて、研究者には様々な働き方や価値観があるということを知り、その多様性を実感しつつ自分に合ったペースというのを考え調整できたという経験は大きな収穫であった(Fig. 4)。



Fig.4 研究室が入っていた建物の様子.

また、研究室での指導体制にも違いを感じた。これは研究室によって異なると考えるが、Dr. Liu の研究室では、一週間に一度 Principal Investigator (PI)との individual meeting が設定されていた。この meeting では自身の研究の進捗を報告することにより、研究の方向性が適切であるか、研究を進める上で必要な部品や装置を購入すべきなのかなどについて相談することができた。また、PI から研究に関する具体的な助言や指摘を受けることもでき、研究を進める上で非常に有意義な時間となっていた。さらに、研究内容だけでなく、将来のキャリアや日々の生活について相談する機会ともなっていた。日本でも研究室全体、研究室内のグループ単位での進捗報告会が行われている。これは、他の学生の研究内容や進捗を把握する上で重要な役割を果たしている。一方で指導教員と学生が一対一で確実に話せる時間を定期的に確保することは、自身の研究について深く相談するだけでなく、研究室生活やその後のキャリアを豊かにするうえで有意義な取り組みであると感じた。

学生の研究に対する自律性についても印象的な違いがあった。Ph.D.学生は給与を受け取りながら研究に取り組んでいることもあり、それぞれが自身の研究プロジェクトにより責任を持ち、主体的に進めているように見えた。また、研究室には学部生や修士課程の学生が比較的少なく、学部生が研究に参加する場合は、Ph.D.学生が自身のプロジェクトとして行っていることの一部を指導しながら学部生に担当させるような体制になっていた。

キャリア形成についても、日本との違いを感じる機会が多かった。Georgia Tech には、母国を離れてアメリカにわたり Ph.D.取得を目指して研究に取り組んでいる学生が数多く在籍していた。また、学生の経歴や進学までの道のりも多様であった。例えば、母国での兵役や新型コロナウイルスの蔓延といった、

それぞれの国の事情や社会情勢が、進学やキャリア選択に影響している学生もいた。日本では、学部卒業後に同研究室で修士課程、博士課程へと進学するという進路を選ぶ人も多いが、アメリカで出会った学生のほとんどは、学部や修士課程とは異なる大学で Ph.D.を取得している人や、様々な経験を経て博士課程に進学している人が多いというのが印象的であった。年齢や経歴がさまざまな様子を見て、キャリアを形成するうえで必ずしも決まった進路や年齢の基準があるわけでないことを肌で感じた。また、学部生と話すと学部生の段階から企業で長期インターンシップに参加している人が複数いたのも興味深かった。大学での研究だけでなく、企業で実際に研究開発に携わりながら技術や経験を身に着けている姿を見て、学生のうちから多様なキャリアを経験できる意義を感じた。

Georgia Tech での研究経験を経て、アメリカには世界各国から多様な背景や目標を持った人々が集まるのもうなずけるほどの、研究に取り組むための充実した設備や、専門的な支援体制、金銭的な豊かさがあるということを知った。日本とアメリカにはそれぞれの良さがあると考える。今回の滞在を通して、日本とは異なる研究環境や価値観に触れられたこと、そして研究に対する強い思いを持ちながら研究者を目指して世界に出て日々生き生きと研究をしている人々に出会えたことは、今後の人生やキャリアを考える上で非常に大きな経験となった。特に、研究者になるための道筋は一つではなく多様な選択肢があることを知れたことは、今回の渡米で得られた重要な気付きの一つである。

3. 米国の文化・生活面での発見・苦労等

海外経験の少ない私にとっては、アトランタで生活することは楽しみである一方、食生活、治安、習慣やコミュニケーションなどの面で様々な不安があった。しかし、約 2 か月間のアメリカでの滞在を終えて今感じていることは、意外と日本の外でも生活していけるということである。

例えば、渡米前は、現地での食生活を心配し、日本から乾麺やインスタントの飲み物などをたくさん持って行った。実際、一度体調を崩した際には、持参した食べ物に救われたこともあったが、帰国時には意外と多くのものが残っていた。現地では、同期と近くのスーパーに行き、野菜やお肉、パスタなどを購入し、一緒に自炊をすることで食事を確保することができた(Fig.5A)。(小さいサイズのにんじんとアボカドが特に美味しかった。) 今回の滞在ではホテルで朝食が提供され(Fig.5B)、昼食や帰りが遅くなった際の夕食には大学の学食を利用できるという恵まれた環境であったものの、海外で生活することへの心理的なハードルが下がり、自分の行動範囲や可能性が広がったように感じた。



Fig.5 アトランタでの食生活. A)スーパーでの買い物. B)ホテルの朝食(好きだったベーグルコーナー).

治安の面では、確かにアトランタの街を歩いていると、日本と同じ感覚で行動することは危険であると感じる場面があった。また、アトランタの生活に慣れてきた頃、大学から行方不明者の捜索や、近隣での強盗事件を知らせるメールが届き、日本のように安全な場所ではないのだと時折思い出させられた。しかし、登下校の際には同期と一緒に行動していたこともあり、私自身は大きなトラブルに遭うことなく生活することができた。また、旅行で訪れたニューヨークでは地下鉄を利用する必要があり、最初は不安を感じていたが、実際に利用してみると抱いていたイメージほど治安が悪いわけではないと感じたこともあった。このように、場所や時間帯によっては注意が必要であるということに変わりはないが、実際に現地を訪れて生活することで、周囲の状況に十分気を配って行動すれば、過度に恐れることなく生活できるということを学んだ。

習慣やコミュニケーションの面でも、日本との違いを新鮮に感じることは多々あった。チップの制度や、お店での注文の仕方に戸惑うなど、毎日のように慣れないことに直面していた。しかし、困っていることを伝えると、周囲の人が親身になって対応してくれた。例えば、最終プレゼンが近づき夜遅くまでポスター製作をし、部屋に帰ってみたもののカードキーが反応せず部屋から閉め出されたときは、フロントの人が心配してあらゆる手を尽くしてくれたこともあった。また、アメリカでは、初対面の人同士でも挨拶を交わし、ホテルや大学のエレベーターの中で気軽に話しかけてくれることが印象的だった。最初は話しかけられるたびに緊張していたが、拙い英語であっても、相手はにこやかに反応してくれた。慣れない環境で戸惑うことも多かったが、私が出会った人たちは、困っている人に自然と手を差し伸べてくれる、心に余裕のある優しい人たちが多かったように思う。こうした人々との交流を通じて、アメリカでの生活に安心感を持つことができた。

最後に、私がアメリカ中に楽しんだアメリカのスポーツ文化を紹介したい。滞在中には、サッカーや野球、大学のフットボールの試合を観戦する機会があった(Fig.6)。どの試合もファンの熱気が非常に強く、会場全体が一体となって応援している雰囲気が非常に好きだった。特に、フットボールの試合は大学の施設とは思えないほど立派なスタジアムに多くの学生が集い、熱心に応援していた。また、会場の周辺でも試合に向けてパーティなどをして盛り上がっている様子が見られ、スポーツが大学や地域の人びとに深く根付いている素敵な文化だと感じた。

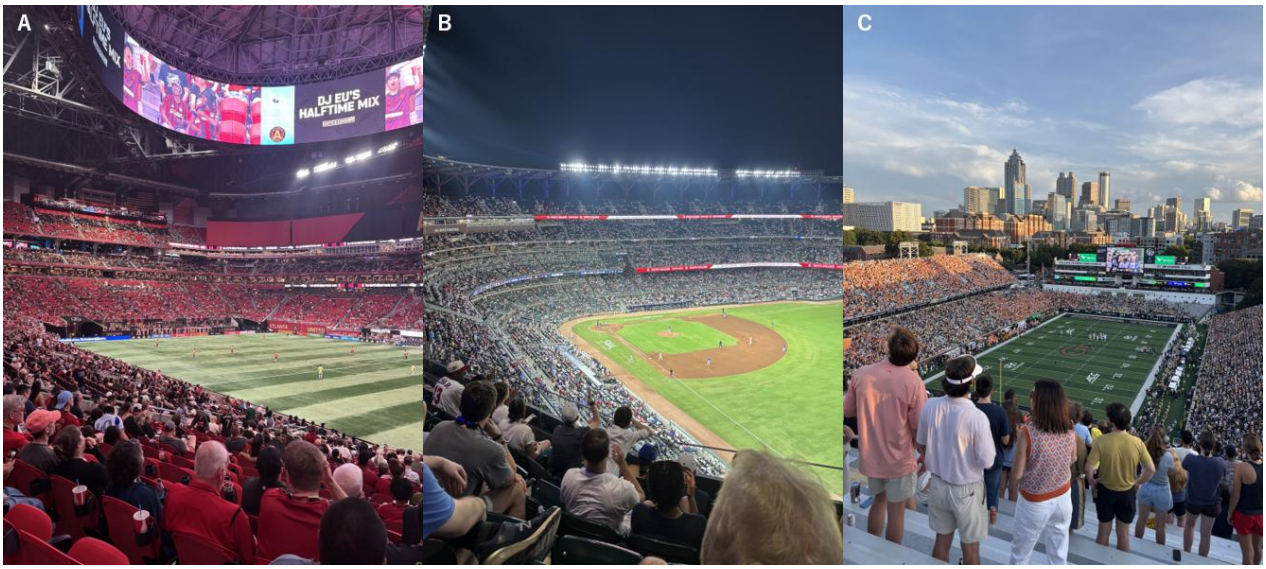

Fig.6 アトランタでのスポーツ観戦. A) W 杯の試合も行われたスタジアムでのサッカー観戦. B) ドジャース対アトランタ・ブレーブスの試合観戦. C)Georgia Tech の施設でのフットボール観戦.

4. 本プログラムに参加の成果・意義

4.1　人との出会い

今回の滞在を振り返って、特に楽しかった時間の一つは、研究室での活動を終えた後、その日の研究について帰り道や夕食の時間に同期と話すことであった(Fig.7)。

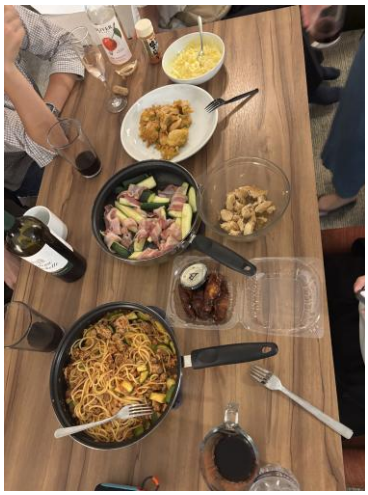

Fig.7 同期との夕食の様子.

正直なところ、初めて同期と顔を合わせ、自己紹介をしたときには、これまで出会ったことがないほど素晴らしい経歴や経験を持つ人たちばかりで、少し気後れしてしまった。しかし、一緒に過ごす時間が増え、美味しいごはんやお酒を囲いながらいろいろな話をし、お互いを励ましあって生活するうちに、自分と同じように将来のキャリアについて悩みながらも、日々のイベントを楽しんでいる同世代の学生なのだと感じるようになった。研究に対して真剣に向き合う姿だけでなく、そのような人間らしい一面を知ることで、同期は自分にとってかけがえのない仲間になっていった。一方、研究については当初のイメージ通り、幅広い知識を持ち、鋭い指摘や意見を与えてくれる頼もしい存在であった。ポスター作成の際にも、お互いの発表内容を確認し、意見を出し合いながら完成度を高めていった。このように、研究について真剣に議論できると同時に、将来についての悩みも共有できる仲間に出会えたことは、今回のプログラムに参加して得られた大きな財産である。

また、今回の留学をこのように充実したものにするには、素晴らしいメンターとの出会いが欠かせなかったと考える。私のメンターを務めてくれた Adam は、研究に限らず多くの話を聞いてくれた。さらに彼自身の豊かな人生経験を話しつつ、多くの人との出会いや挑戦を後押ししてくれた。例えば、キャリアやその時々で感じていた不安を打ち明けた際には、いつも自身の経験を交えながら暖かいアドバイスや励ましの言葉をくれたことが印象に残っている。台湾出身の彼自身も、アメリカに初めて来たときは同じような悩みを抱えたことがあるようで、そのときどのように向き合ったのかなど、具体的な経験談を聞かせてくれた。彼の話は、研究面だけでなく慣れない環境で生活する私にとって大きな支えとなった。

さらに、Adam は自分の交友関係にも私を積極的に招き入れてくれた。例えば、アジアにルーツを持つ友人たちの集まりにも連れて行ってくれた。彼らと食事をしながら日常の話をすることで、アメリカで留学生として Ph.D.を取得し、生活することのリアルな姿を知ることができた。また、研究プロジェクトが引き続き行われるということになったため、現地の学部 4 年生に研究の引継ぎ、原理や実験方法を教えるという機会も作ってくれた。Adam は、将来 Ph.D.に進めば、後輩を指導しながら研究を進める機会が増えるということで、この経験をさせてくれた。実際に、人に教えることで自身の研究内容への理解も深まり、人に教える際にどのように教えればいいのかというヒントも得ることができた。さらに、そこで出会った同世代の学部生と話すことで、Georgia Tech の学部生の生活や進路選択についても聞くことができてとても良い機会であった。

PI である Dr. Liu にも感謝をしている。前章で述べたように、毎週の面談を通して研究の進捗だけでなく、キャリアについても話す機会を設けてくれた。また、海外で Ph.D. を取得することを後押しするような言葉をいただいたことも印象に残っている。メンターや PI、研究室のメンバーとの交流を通じて、アメリカでの研究環境に対して良いイメージを持てたことと、PI から励ましの言葉をいただいたことで、これまで具体的には考えられていなかった海外 Ph.D.への進学を、自分の将来の選択肢の一つとして考えられるようになった(Fig.8)。

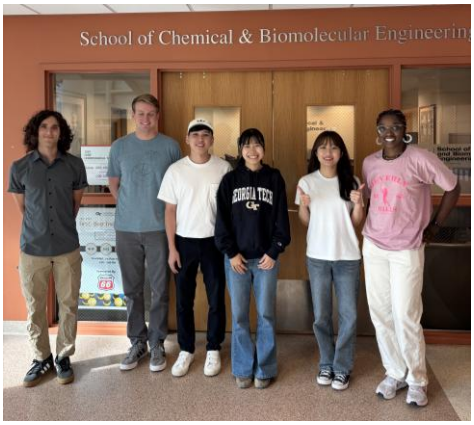

Fig.8 Dr. Liu 研究室のメンバー.

アメリカでの滞在をより豊かなものにしてくれた US Fellow にも感謝を述べたい。豊富な経験を持つ彼らは、アメリカでの生活をより楽しめるよう、さまざまな場所に案内してくれた。Georgia Tech の産学連携が行われている施設を訪れたり(Fig.9A)、近くのビーチまで車で連れて行ってもらったりした(Fig.9B)。また、友人に声をかけてくれてフットボールのチケットを JP Fellow 分確保してくれたり、ニューヨークを訪れた際にも街を案内してくれたり(Fig.9C, D)と、思い出の裏側には彼らのサポートがたくさんあったと考える。

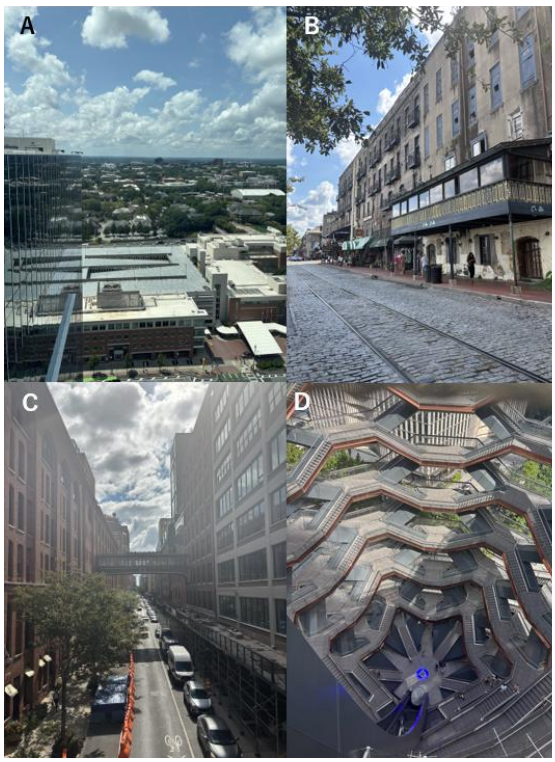

Fig.9 US Fellow に案内してもらった場所.
A) Coda. B) Savannah. C, D) New York.

さらに、プログラムを通じた出会いは、同期や研究室のメンバーにとどまらない。RIES の Alumni の方々や、小川さん、高山先生、Soojung をはじめとする中谷 family の皆さんにも大変お世話になった。Nakatani Ries のプログラムの Alumni の中には Georgia Tech や Emory University などで Ph.D.コースに進んでいる方がいる。それらの先輩が Emory を案内してくださったり、アトランタで行われている日本祭りや日本人研究者の集まりに連れて行ってくれたりした。このような Nakatani RIES の Alumni の方との交流もプログラムでの学びにつながった。

このように、今回のアメリカでの滞在を充実したものにできたのは、出会った多くの方々の支えがあったからこそだと感じている。それぞれ異なる立場や経験を持つ方々との交流を通じて、研究について学ぶだけでなく、将来のキャリアや海外で生活することについても多くのことを考えることができた。そして何より、研究について刺激を与え合い、悩みや喜びを共有できる仲間や、困ったときに支えてくれる人たちに出会えたことが、今回のプログラムに参加して得られた最も大きな成果であると思う。

4.2　キャリアの考え方

この 2 か月間のジョージアでの生活は、人生で最も自分のキャリアについて考えた時間であったと感じる。私の将来の夢は研究者になることであり、高校生の頃から博士課程まで進学し、おそらくアカデミアで研究を続けるのだろうと漠然と考えていた。このプログラムに参加する前は、周囲にあまりいない博士課程への進学を目指す同世代の友人と出会い、互いに刺激を受けながら、自分の進路に対するモチベーションを高めたいと考えていた。しかし、実際にプログラムに参加してみると、さらに多くのものを得ることができたように思う。世界に飛び出し、さまざまな苦労を経験しながらも、充実感を持って楽しそうに研究に取り組んでいる人々が想像以上にたくさんいることを知った。そして、自分がこれまで知らなかった世界や、多様な生き方、キャリアの選択肢があることにも気づかされた。自分自身がそのような思いを抱くようになるとは参加前には想像していなかったが、将来はできれば海外で研究する機会を得たいと、心から感じるようになった 2 か月間であった。

このプログラムを通して感じた、将来に対するワクワク感と不安は、帰国した今も続いている。アメリカから帰ってきてからも、自分の進路をどうするべきか毎日のように考えており、話す相手やその日の気持ちによって、考えや結論が変わることも多い。しかし、確かなことは、このプログラムを通じて、これまで自分には無理だと勝手に決めつけていたことや、そもそも知らなかった進路が少しずつ見えるようになったことである。そして、以前よりも多くの選択肢を知ったうえで、自分の将来について真剣に悩めるようになったこと自体が、大きな変化であり、重要な成果であると感じている。まだ自分の進路について明確な結論は出ていない。しかし、これからも自分自身と向き合い、このプログラムで出会った仲間とも話しながら、自分が納得できる進路を選んでいきたいと考えている。

５．終わりに

この素晴らしいプログラムは、企画・運営を担い、さまざまな面からサポートしてくださった小川さん、藤川さんをはじめとする中谷財団の皆様、訪問先の大学で受け入れてくださったメンターや PI、研究室の皆様、そして Alumni の方々を含む、多くの方々の支えによって成り立っている。また、報告会においては先生方から多くの貴重なご意見やフィードバックをいただいた。さらに、日本の所属研究室の先生方をはじめ、多くの方々のご理解とご配慮があったからこそ、今回このプログラムに参加することができた。この場を借りて、関わってくださったすべての方々に心より感謝申し上げたい。

中谷 RIES というプログラムは、私にとって非常に大きな衝撃と変化をもたらしてくれた。今回のプログラムを通じて特に強く感じたことは、多くの人に対する感謝とリスペクトである。自分の挑戦したいという思いを、これほど多くの人が支え、応援してくれているのだということを実感した 2 か月間であった。そのことを決して忘れず、これからも日々の研究活動をはじめ、さまざまなことに精進していきたい。そして、これからも周囲の人に応援してもらえる人間でありたいと思うと同時に、今回得られた機会を研究や今後の人生の歩みで返していきたいと考えている。最後にその決意と、このような素晴らしいプログラムが今後も継続され、未来の参加者のみなさんにも多くの出会いや学び、かけがえのない経験をもたらしてくれることを願っていることを述べて報告書を締めくくりたい。