

様式 2

令和元年度 北海道大学大学院工学研究院若手教員在外研究助成報告書

令和 2 年 7 月 20 日

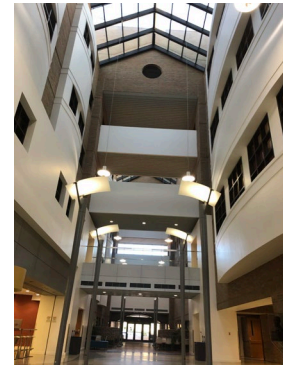
工学 研 究 院 長 殿

部門・職名 機械宇宙工学部門・助教
氏 名 藤井 宏之

(研究成果概要, 感想等)

令和元年度若手教員在外研究助成のご支援により在外研究を実施しました。以下に研究成果や感想について報告致します。

1. 渡航期間：2019 年 8 月 31 日 ~ 2019 年 12 月 26 日 (約 4 か月)
2. 渡航先：ミシガン大学 (University of Michigan, Ann Arbor, USA)



左図：電子工学・計算科学学科棟の外観、中央図：正面玄関前にある Shannon の銅像、右図：エントランスホール

3. 渡航 (研究) 目的

私は生体や農産物などの媒体における光散乱を輻射 (光のエネルギー) 輸送論の立場から研究している。光散乱を理解することは、散乱光を用いたイメージング技術の発展に必要不可欠である。支配方程式は輻射輸送方程式 (以降、輸送方程式) と呼ばれる、線形の Boltzmann 方程式である。輸送方程式はエネルギー保存より現象論的に導出することができるが、より微視的な時空間スケールの光輸送を記述する電磁波散乱理論からどのように導出されるのか、また、電磁波散乱理論と輻射輸送論との関係性はどのようになっているのか、理解する必要性を近年認識していた。輻射輸送論を電磁波の時空間スケールより理論及び数値的に解析している研究室に滞在して学びたいと考え、ミシガン大学の Leung Tsang 教授にお願いし、了解を頂いた。Tsang 教授はリモートセンシングに

おける分野での研究者である。リモートセンシングの分野でも輻射輸送論が使用されている。Tsang 教授は3部作で計1500ページとなる教科書「Scattering of Electromagnetic Waves」を執筆し、これまでに300編以上の論文を発表し、「von der Hulst 賞」を受賞されている、当分野で著名かつ精力的に研究を進めている研究者である。

4. 研究成果

生体や農産物の模擬試料として多分散の球状コロイド水溶液は当分野で広く使用されており、本研究のターゲットの媒体である。本研究ではコロイド水溶液に対する光散乱特性を電磁波散乱理論よりモデル化する。2%以下の体積分率の領域では、独立散乱理論が適用可能である。この理論では、各コロイド粒子によって独立に電磁波が散乱され、観測点に到達すると仮定する。しかし、本研究では20%程度の体積分率を考えており、独立散乱理論は適用できない。私が所属している熱工学の分野ではCartignyらによる干渉散乱理論が広く適用され、その妥当性は主に単分散のコロイド水溶液において示されている。しかし、この理論はCartignyによる直感的な考察によって導出されているため、多分散への拡張や、一般的な電磁波散乱理論(Foldy-Lax 方程式)との関係性は明らかではなかった。そのため、Tsang 教授や博士課程の学生に電磁波散乱理論を教えてもらい、一からモデルを構築することを滞在中の研究目的とした。

まず、孤立した粒子(誘電体)の散乱を考える。任意の入射波と粒子形状に対する散乱波はT-matrix理論によって定式化される。粒子の形状が球状であれば、T-matrix理論による結果はMie理論による結果と同じになる。次に多分散系のFoldy-Lax方程式を考える。この方程式は再帰型で、逐次的に解くことができ、全ての多重散乱が考慮されている厳密な式である(ベクトル波動方程式と等価)。この式の各項をベクトル球面調和関数で展開し、考えている粒子形状や入射波、境界条件によって展開係数を決定する。また、本研究ではFoldy-Lax方程式の1次の解と遠方場近似を考える。もしこの近似が妥当ではない場合、高次の近似に拡張することが理論上可能である。Foldy-Lax方程式から、系全体の散乱波と散乱振幅ベクトルを得る。この時、コロイド粒子の配置は系によって様々であるため、散乱振幅ベクトルを統計平均する(粒子の位置ベクトルが確率変数)。散乱振幅の二乗から、コヒーレントの要素を除き、それを系の体積で割ったものが輻射輸送論で考えている散乱位相関数 $P_{FL}(\theta, \phi)$ である(θ, ϕ はそれぞれ天頂角と方位角を表す)。具体的には以下の式で与えられる:

$$P_{FL}(\theta, \phi) = \frac{1}{k^2} \sum_{\alpha=1}^{N_s} n_{\alpha} |\bar{f}^{\alpha}(\theta, \phi)|^2 + \frac{1}{k^2} \sum_{\alpha=1}^{N_s} \sum_{\beta=1}^{N_s} \sqrt{n_{\alpha} n_{\beta}} \bar{f}^{\alpha}(\theta, \phi) \cdot \bar{f}^{\beta*}(\theta, \phi) H_{\alpha\beta}(\theta)$$

$$\bar{f}^{\alpha}(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^{\infty} i \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n^{\alpha} \{\hat{\theta} \tau_n(\cos \theta) \cos \phi - \hat{\phi} \pi_n(\cos \theta) \sin \phi\} + b_n^{\alpha} \{\hat{\theta} \pi_n(\cos \theta) \cos \phi - \hat{\phi} \tau_n(\cos \theta) \sin \phi\}]$$

ここで、 k は波数、 $\hat{\theta}$ と $\hat{\phi}$ は各方向の単位ベクトル、 n_{α} は粒径 d_{α} の数密度、 N_s は粒径の種類の数、 $\tau_n(\cos \theta)$ と $\pi_n(\cos \theta)$ はそれぞれ1次のLegendre倍関数から成る関数である(入射方向をz軸方向に揃えているため、1次のみ)。 $H_{\alpha\beta}(\theta)$ は粒子の局所密度分布を表す動径分

布関数のフーリエ変換である。 $P_{FL}(\theta, \phi)$ の式右辺の第1項は独立散乱による寄与、第2項は干渉効果による寄与である。この式が、単分散の場合において、Cartignyらの干渉散乱理論による形式と理論的に一致することを示すことができた。得られた位相関数 $P_{FL}(\theta, \phi)$ より、散乱係数や異方性因子などの散乱特性を計算することができる。散乱係数の体積分率依存性を計算すると、独立散乱理論では線形に変化するが、干渉効果を考慮すると独立散乱理論の結果よりも小さくなり、線形ではなくなる。

結果は載せないが、Foldy-Lax方程式に基づいて得られた散乱特性を用いて非定常の輸送方程式を数値計算した。位相関数 $P_{FL}(\theta, \phi)$ は散乱角に対して対数的に変化しており、単純な数値計算では誤差が非常に大きくなる。私は、散乱角依存の強い位相関数を高精度に数値計算する手法をこれまでに開発しており(e.g., Fujii et al., J. Comput. Phys., 2018)、開発手法を適用した。また、生体光学の分野において、Heney-Greenstein(HG)の位相関数が広く使用されている。しかし、この関数は数理モデルであり、電磁波散乱理論から導出されているわけではない。そのため、今回 Foldy-Lax 方程式より得られた位相関数と HG 関数は形状が大きく異なっている。HG 関数を用いた従来の輸送方程式の結果と Foldy-Lax 方程式より得られた位相関数を用いた輸送方程式の結果を比較した。体積分率が低い場合に、両結果に相違があった。滞在中の研究成果は、国際共著論文として米国光学会の学術雑誌 Optics Express に掲載された(Fujii, H.; Tsang, L.; Zhu, J.; Nomura, K.; Kobayashi, K.; Watanabe, M.: Photon transport model for dense polydisperse colloidal suspensions using the radiative transfer equation combined with the dependent scattering theory. *Opt. Express* 2020, 28, 22962)。

5. 研究議論について

研究議論については、Tsang 教授が多忙にもかかわらず、週に1度必ず議論させて頂いた(最初の一か月は週に2度)。何とか応えたいとの気持ちで、緊張感をもって研究に取り組むことができた。Tsang 教授から電磁波散乱理論の基礎知識や研究の考え方など多くのことを教えて頂いた。一番驚いたことは、Tsang 教授は、電磁波散乱理論と輻射輸送論の関係に取り組んだ先駆者であり、その研究成果に対して受賞もされているが、その研究内容に固執していなかったことであった。現段階では輸送方程式を解いておらず、Foldy-Lax 方程式を直接解いていた。そして、更に今後を見据えていて、量子光学やトポロジーを勉強しているとのことだった。自身で構築した理論に縛られず、新しい概念を学び、取り入れていく研究姿勢に感銘を受けた。

滞在中に研究室から2人の博士学生が学位を取得し、発表会に参加することができた。発表会では軽食が出て、日本の大学とは異なり、リラックスしている雰囲気だった。発表時間に制限はあまりないようで、最初の学生は質問も含めて1時間程度、2人目は3時間程度だった。特に2人目が印象的で、スライドはシンプルで、式が少なめに記載されており、その式を丁寧に説明するスタイルだった。式を十分に理解して具体的なイメージを持っていることが伝わってきて、感動した。

研究議論を通じて、自分の研究スタイルが少し見えてきた(恥ずかしながら、まだ確立していない)。流行をあまり気にせずに、読み手の心が動くような質の高い論文を発表していきたいと決めた。

6. 渡航の準備

Tsang 教授の研究室に滞在することが決まると直ぐに、ミシガン大学の先行秘書の方や国際交流センターの方などとやり取りを行い、J1-ビザを取得するための準備を行った。今回、妻や子供は一緒にアメリカに来てくれなかったため、1人分のビザを取得することになった。この点、寂しくもあったが、時間に余裕をもって取得することができた。ビザを取得するには、大使館に行って面談する必要がある。札幌でも面接できるが、指定できる日時がかなり限られており、東京の大使館で面接を受けた。ミシガン大学では J1 訪問研究員の受け入れ体制が非常に整っていて、出発前と出発後の手続きに関する e-learning などもあった。居住先は大学に頼らずに自分で探すことになっていたが、滞在開始の9月は新学期の始まりでもあって、多くのアパートでは受け入れを終了しており、とても焦った。出発の直前に、親切なインド人の学生に契約を譲ってもらう形で何とか決まった。今回の滞在先はミシガン大学の日本人会（ミシガン金曜会）の方々には色々教えて頂いた。普段日本にいると感じることのない、日本人同士の繋がりを強く感じた。

7. 滞在先の大学や研究環境について

ミシガン大学はデトロイト近くのアナーバーにある州立大学である。大学と市内を結ぶ、大学運営の循環バスが走っている。多い時には15分置きであり、利便性が高かった。

電子工学・計算科学科は北キャンパスにあり、情報エントロピーで有名な Shannon も卒業し、入り口に銅像がある。北キャンパスは市内から離れていて、自然が非常に豊かだった。通学路では、リスや鹿をあちこちで見かけた。10月頃は紅葉がとても綺麗だった。この点、北海道大学と近いものを感じた。

電子工学・計算科学科の学生や研究員のためのラウンジがあり、また、与えられた研究室は2人部屋であり、とても快適に研究することができた。大学の図書館では、書籍、特にオンラインで閲覧できる図書が充実しており、文献検索も非常に快適だった。Mdem という大学グッズを販売しているお店があり、子供服や大人の服、アクセサリ、おもちゃ、文房具など、かなり充実していた。ただ、お菓子類は殆どなかった。

Tsang 教授は食事会や打ち上げなどのイベントよりも研究を優先する考えであった。また、研究室全体のゼミはなく、個別のプロジェクトで進める体制だった。この体制は、他の研究室とは大きく異なっていた。色々な意見があると思うが、私もどちらかと言えば、食事会よりも研究を進めたい考えなので（ただでさえ、人よりも研究の進みが遅い）、Tsang 教授の研究室の体制は非常に心地よかった。

研究室の学生や訪問研究員は主に中国人で、電磁波散乱理論について教えてもらったり、研究以外のことも色々話したりと、親切な方たちだった。一方で、研究への姿勢は厳しくて、中国での激しい競争で勝ち上がってきて、ここに来ていることを強く感じた。

今回滞在先の研究室にかかわらず、全体的に中国人の学生が非常におおかった。また、上海交通大学とミシガン大学が共同学院を立ち上げており、中国の勢いを非常に強く感じた。一方で、日本人を北キャンパスでは殆ど見かけなかった。よく日本人は海外に行かなくなったということを知ることが、実感したように思った。

8. 滞在先での生活について

私の英語力は非常に拙いが、滞在先のアナバーの方々は、丁寧に私の意図をくみ取ってくれて、社交性に乏しい私にとって非常に話しやすく、嬉しく思った。居住先は生協が運営しているもので、部屋は個室だが、キッチンやシャワールームは共同であった。掃除やメール仕分けなどの仕事を住民が分担した。とても親切かつ、プライベートな時間を尊重する環境であり、とても過ごしやすかった。毎週土曜日に大学が運営する英会話サークルに参加した。このサークルでは、英語を母国語としない人たちが英語での会話を色々な場所に行き実践する場で、英語を母国語とする学生が主催する。大学の博物館や美術館、タピオカ店など、色々な場所に皆で行ったり、カードゲームをしたり、学生に戻った気分で、充実した休日を過ごした。大学の博物館や美術館が市内にあり、無料であった。日本の市の博物館ほどの規模であり、何度か足を運んだ。また、居住先の近くに大学が運営するスポーツジムがあった。トレーニングマシンは最新で、プールもあり、バスケットコートも2面あるなど充実していた。定期的に行き、体を動かし、リフレッシュすることができた。滞在によって、研究に取り組む時間を確保することができたので、休日や午後5時以降は、共同研究以外の研究を進め、学生の研究内容に関する論文を発表することもできた(Fujii, H.; Ueno, M.; Kobayashi, K.; Watanabe, M.:Characteristic Length and Time Scales of the Highly Forward Scattering of Photons in Random Media. *Appl. Sci.* 2020, **10**, 93)。



左図：Tsang 教授研究室メンバー(右から2人目が Tsang 教授、左から2人目が私(体重増))中央図：英会話サークルメンバー(大学博物館でのサイエンスカフェに参加した際の様子)右図：英会話サークルメンバー(タピオカティーのお店でお茶会した時の様子、一番右の女性がサークル主催者)

9. 謝辞

このような機会を与えていただいた工学系事務部職員の皆様(小島様、佐々木様)、および関係の先生方に感謝致します。特に、応用数学演習Ⅱの代講を快く引き受けて頂いた信太祐二先生、私が不在になり、大きな負担がかかることになるにもかかわらず、在外研究について了解して頂いた、所属研究室の渡部正夫先生と小林一道先生に深謝致します。滞在中、2歳になる娘の子育てをしてくれた妻や家族に感謝します。