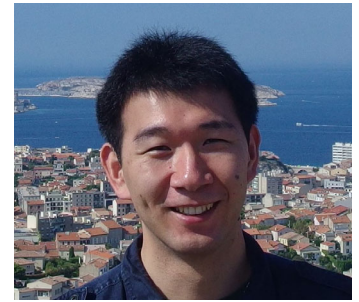


わたしの仕事 (34) 国立研究開発法人 海洋研究開発機構

松田景吾 (H19/2007卒)



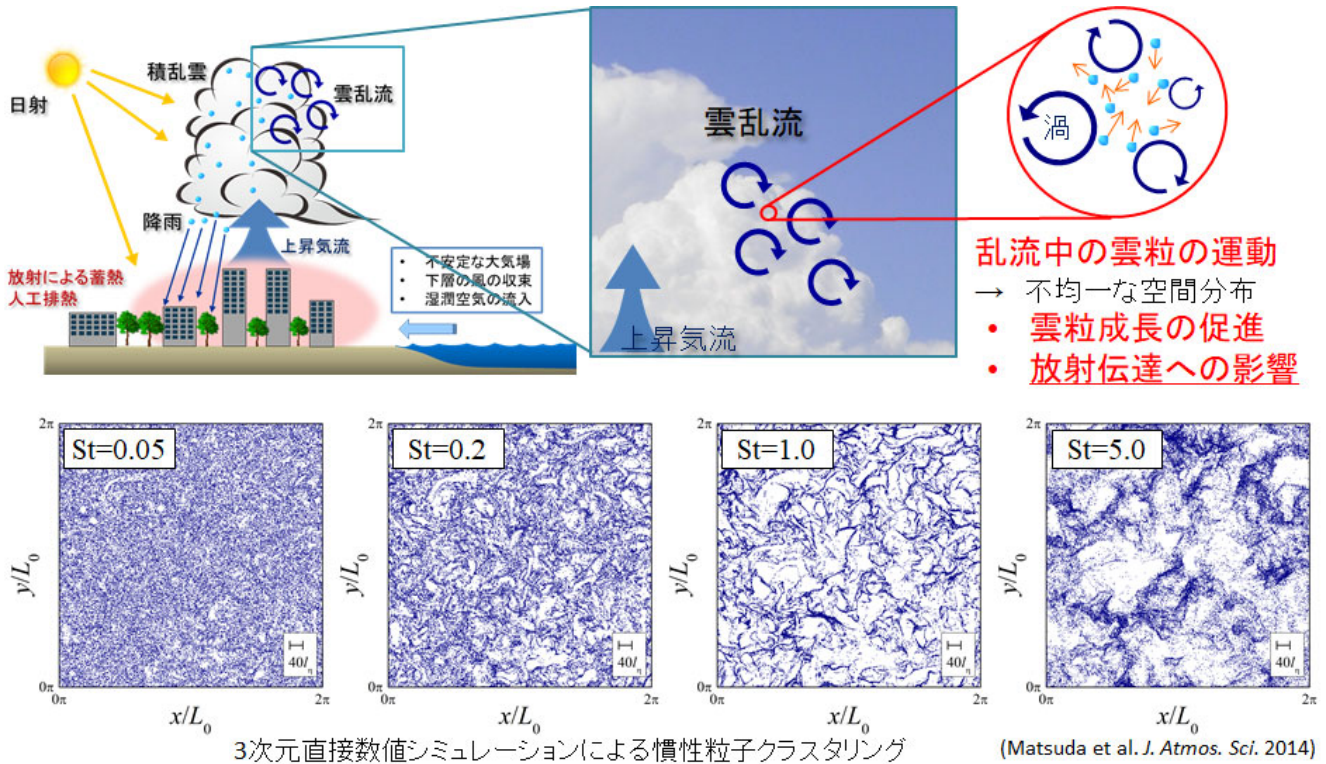
1. はじめに

私は環境熱流体工学研究室にて6年間、小森 悟 先生、黒瀬良一先生らのご指導を授かり、2012年3月に博士学位を取得した松田と申します。現在、国立研究開発法人 海洋研究開発機構の副主任研究員として大規模数値シミュレーションを用いた研究を行っています。今年8月のこと、黒瀬先生より京機短信に原稿を執筆してくれないかとのご連絡をいただきました。どうしようかと思いつつ京機短信の最新号を見てみたところ、なんと、同回生の浜地君が「わたしの仕事」に原稿を寄せているのではないですか。急に懐かしさが込みあげ、執筆を快諾することにしました。内容自由、長さ自由と、何とも寛大な制約条件のもと、これまでの私を振り返りながら、或る博士学生のその頃とその後をご紹介したいと思います。

2. 環境熱流体工学研究室

現在の私の仕事について書こうと思つくと、やはり学部4年から博士後期課程まで在籍した機械理工学専攻・環境熱流体工学研究室から話を始めなくてはなりません。

研究室配属前の学部3回生の頃の私は、本当に新しいものを創り出す仕事として研究開発の仕事を目指したいと考えており、研究開発の仕事を得るための手段として博士課程への進学は有力な選択肢でした。そのため、学部4回生での研究室選びの際には、博士課程まで視野に入れて面白い研究ができそうな研究室はどこかを考えていました。そんな最中、環境熱流体工学研究室では、機械理工学専攻でありながら風波や雲などの自然環境の中の流体現象を対象にした研究が行われていること、それだけでなく乱流を伴う燃焼流や混合反応流を対象とした研究も行われていることを知りました。特に私の目を引いたのは、燃焼の数値シミュレーションの可視化図に現れていた、見るからに“複雑そう”な乱流渦構造でした。



雲乱流と雲粒の慣性粒子クラスタリングに対する数値シミュレーション結果

「乱流とはこんなに“複雑そう”な構造なのか、こんなに“複雑そう”なら研究すべきことが沢山あるに違いない」という安直な考えと、もともと気象などに興味があったこともあって、環境熱流体工学研究室への配属を希望しました。

環境熱流体工学研究室では、雲を対象とした研究を進めることになりました。積雲や積乱雲などの対流雲の中では、多数の雲粒（水滴）が乱流中を運動しています。雲粒同士が衝突し合体すると大きくなり、それによって雨粒へと成長します。このような雲粒の衝突併合成長は雲の発達から降水に至るまでのプロセスを精度よく予測するうえで重要となるものです。卒論の研究テーマは、この雲粒の衝突併合成長が乱流によって促進される効果に関する研究でした。

この研究を通して、乱流中での粒子の運動について勉強するうちに、雲乱流というのが非常に興味深いものであることを知りました。乱流中を運動する雲粒は、空気に比べて質量が大きい重い慣性粒子であるために、慣性力によって乱流渦からはじき出されます。この効果によって、乱流中では雲粒の不均一な空間分布が形成されます。これを乱流による慣性粒子クラスタリング（または乱流クラスタリング）と呼びます。つまり、乱流がなければ雲粒が一様ランダムに分布するような条件であっても、乱流があると慣性粒子クラスタリングによって不均一に分布するようになるのです。そこで、修士課程以降では、このような乱流中での慣

性粒子クラスタリングに着目し、日射などに伴う熱輸送プロセスである放射伝達プロセスや、雲のレーダー観測において重要なマイクロ波散乱プロセスに及ぼす雲粒のクラスタリングの影響について調べる研究に取り組みました。例えば、ナビエ・ストークス方程式をそのまま解く直接数値シミュレーションによって一様等方性乱流場を形成し、その乱流中での多数の粒子の運動を追跡することで慣性粒子クラスタリングを再現します。さらに、得られた粒子分布に対して、乱数を用いて放射伝達を計算するモンテ・カルロ光線追跡シミュレーションを実施することで、世界で初めて乱流による粒子クラスタリングが放射伝達に及ぼす影響を定量的に明らかにしました。雲乱流中の放射伝達プロセスに着目するということは、環境流を研究対象としてきた小森先生と、噴霧燃焼の研究を行っている黒瀬先生のお二人がいたからこそ、いただくことのできた着眼点でした。雲乱流を模擬した風洞実験にも取り組みましたが困難を極め、最終的には数値シミュレーションの結果を中心として博士論文をまとめ、学位を取得するに至りました。

環境熱流体力学研究室に在籍して最も強く感じたことは、機械工学の知識は決して機械工学だけに使えるものではないということです。機械工学として学んできた物理・数学やシステム概念などは、様々な工業装置に共通しているだけでなく、工業装置の外の様々な自然現象にも共通しています。そのため、応用次第で様々な分野へ進出していけるのです。

3. 海洋研究開発機構（JAMSTEC）

学位取得後、2012年に、幸いにも海洋研究開発機構（JAMSTEC）の地球シミュレータセンターに研究員として着任することができました。

海洋研究開発機構は、文部科学省所管の独立行政法人（国立研究開発法人）のひとつで、海と地球に関する研究開発を行う研究機関です。海の中を深度6500mまで潜航することのできる有人潜水調査船「しんかい6500」や、海上からドリルパイプを7000m以上伸ばして深海底を掘削することのできる地球深部探査船「ちきゅう」などを保有していることで知られています。また、日本のスーパーコンピュータ開発史上の金字塔のひとつである「地球シミュレータ」を運用していることでも有名です。2002年に運用が開始された地球シミュレータ（初代）は、その圧倒的な性能で当時の世界最速のスーパーコンピュータとなりました。その後、地球シミュレータは世界ランキング上位を目指すマシンではなくなったものの、

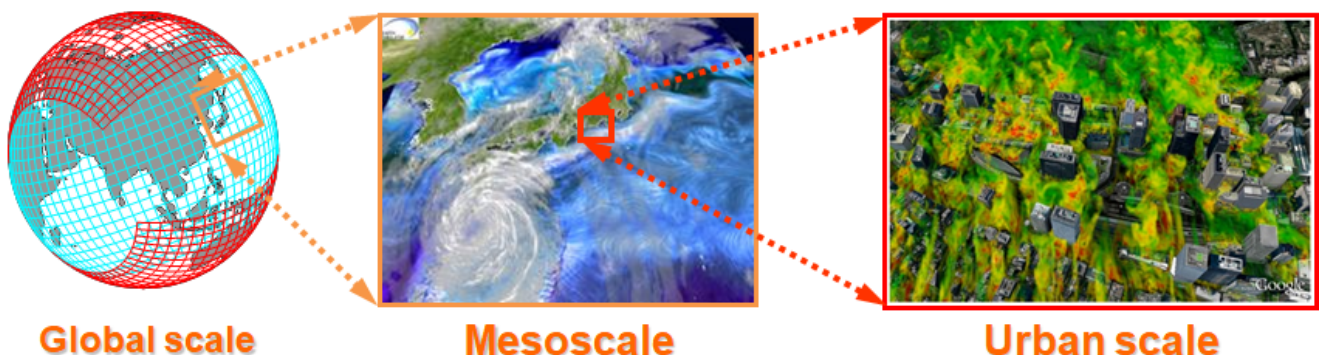
リプレースによって計算性能を向上させながら運用が続けられており、世界最先端の数値シミュレーション研究を支え続けています。今年3月には、4代目の地球シミュレータ（ES4）が稼働を開始しました。

私が着任した地球シミュレータセンター（現 地球情報基盤センター）では、この地球シミュレータを活用して、数値シミュレーションを用いた気象・海洋・宇宙などに関する研究や数値シミュレーション技術の研究開発が行われていました。私は、当時の高橋桂子グループリーダー（現 早稲田大学・教授）の下で、雲乱流に関する研究に継続して取り組み、数値シミュレーションを大規模化させながら発展させる機会をいただきました。また、雲乱流の研究と並行して、グループで開発されてきたマルチスケール大気海洋モデルMSSG（Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment）の研究開発にも携わることになったのです。

4. マルチスケール大気海洋モデルMSSGの高度化

マルチスケール大気海洋モデルMSSGは、大気と海洋の現象を対象とした高解像度シミュレーションを実施するために、海洋研究開発機構で開発された数値モデルです。MSSGと書いて「メッセージ」と呼んでいます。地球全体（全球）をカバーするスケールから、国・地域などを数kmから数百mのメッシュで解像したメソスケール、さらには建物の一つ一つを数mメッシュで解像した都市街区スケールまでも対象とすることができるマルチスケールのモデルです。対流活動による雲の形成を考慮できる高解像度の台風予測シミュレーションや、赤道付近のメソスケール対流活動を捉える大気海洋結合シミュレーションなどを実施することができます。

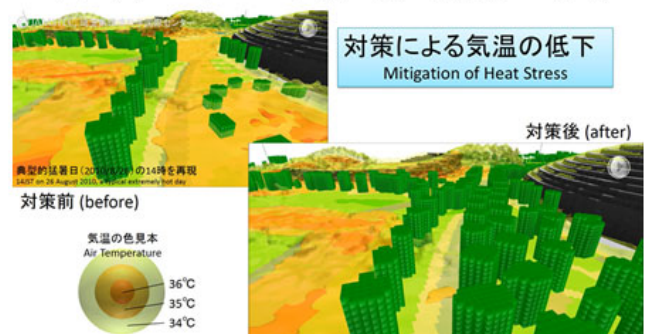
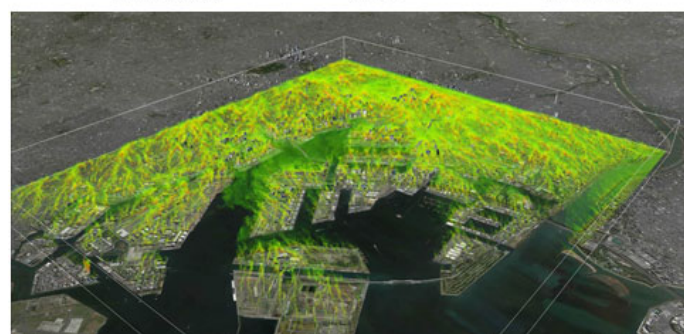
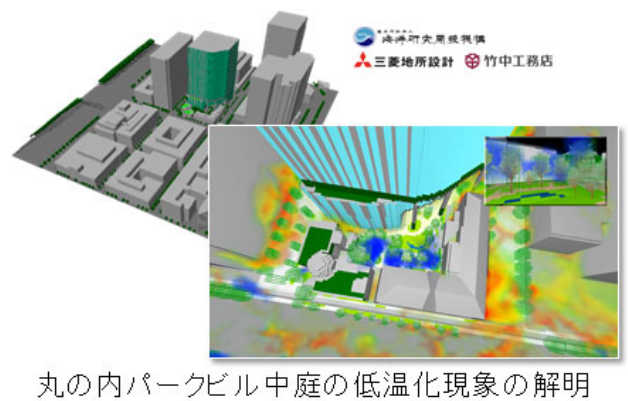
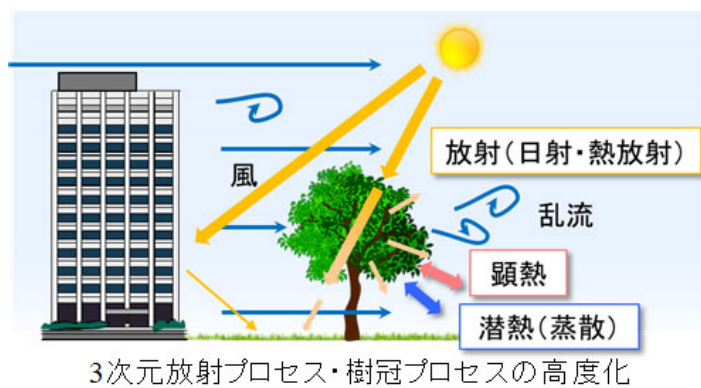
MSSGの大気コンポーネントでは、大気の密度、運動量、圧力の輸送方程式と水蒸気・雲水・雨水などの水物質の輸送方程式の計算をコアとして、雲粒の発生



マルチスケール大気海洋モデル MSSG

や雨粒への成長を取り扱う雲微物理プロセスや、日射や熱放射による熱輸送を取り扱う放射伝達プロセスなど、様々な要素物理プロセスの計算が行われます。都市街区スケールシミュレーションでは、その放射伝達プロセスをより精緻に計算する必要があります。そのため、大学で放射伝達シミュレーションを行った経験を活かして、都市街区スケールシミュレーションの高度化のためのモデル開発を私が担当することになりました。放射伝達プロセスについては、全球スケールやメソスケールの大気シミュレーションでは、鉛直方向の1次元の放射熱輸送を考慮するだけで十分なのですが、都市街区スケールの大気シミュレーションでは、建物の壁面や樹木の樹冠（葉の茂っている部分）での放射熱収支やそれらによる日陰の影響も考慮しなければなりませんので、3次元の放射伝達計算が必要となります。私は、都市街区スケールの3次元放射伝達プロセス部分を改良して計算コストの低下と計算精度の向上を図り、さらに街区内の樹木の樹冠熱収支計算部分についても放射熱収支や蒸散量の計算の精緻化を進めました。これらの改良を進めることで、MSSGを使って実在街区を対象とした暑熱環境シミュレーションを実行できるようにしました。

改良後のMSSGによる最初の街区暑熱環境シミュレーションは、株式会社三菱地所設計と株式会社竹中工務店との共同研究のもとで「丸の内パークビル」（東京・丸の内）の中庭緑地を対象に1m解像度で実施したものでした（2014年）。建



MSSG による都市街区スケール暑熱環境シミュレーション

物に囲まれた中庭緑地の夜間の低温化現象に対する樹木の効果を明らかにしました（動画：<https://youtu.be/AI0O-Y3fdPI>）。

その後、今度は中央大学との共同研究のもとで、当時建て替えが計画中であった新国立競技場（ザハ・ハディド氏の提案に基づく旧計画案）の周辺を対象に暑熱環境シミュレーションを実施しました（2014年）。3次元放射伝達を考慮して暑さ指数（Wet-Bulb Globe Temperature, WBGT）を算出することにより熱中症リスクの評価も行い、日本学術会議の提言の作成に貢献しました。このシミュレーション結果について、2015年に国際会議で発表するためにフランスへ渡航する直前、計画案そのものが白紙撤回されたことは今でも忘れられません。「ここまで説明してきたこの競技場の建設計画は実は数々の批判を受けていました。そして、3日前に、3日前に、安倍首相により白紙撤回されてしまいました！ だからこの競技場を実際に目にすることはありません！ とにかく、2020年の東京オリンピックをどうぞお楽しみに！」と最後に話したその発表は、これまでの国際会議発表の中で最も聴衆に受けた発表となりました。

さて、その次には、環境省と文部科学省の協力要請に応じて、2020年東京オリンピック・パラリンピック大会を契機とした環境対策の検討に貢献するため、主要な競技会場が置かれる東京湾臨海部を対象としたシミュレーションに取り組みました（2015年）。計算効率を向上させることで、12.5km×14.0kmを5mで解像した大規模暑熱環境シミュレーション（動画：<https://youtu.be/9x9jCmkhTf0>）を実現し、来場者の想定ルートを対象に緑地による暑熱環境改善効果を明らかにしました。ご存じのように、大会は1年延期になった末、無観客での開催となりました。暑熱環境の評価を行った身として、残念でなりません。

とはいえ、このように実績を積みながらモデルの性能や機能も拡充させてきたことで、ついには社会実装可能なレベルまでMSSGを成長させることができました。文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）の一環で、熊谷スポーツ文化公園（埼玉県・熊谷市）を対象とした事例では、埼玉県と協力し、現地観測に基づいてシミュレーションの信頼性を検証したうえで、埼玉県が検討中だった暑熱環境改善策を事前評価しました（2016～2018年）。埼玉県では暑熱環境シミュレーションの結果を踏まえて暑熱対策工事計画を決定し、実際に対策工事が行われるに至りました。

このように実施してきたMSSGによる都市街区スケールの暑熱環境シミュレー

シヨン結果のアニメーションは、ヒートアイランド現象について説明する日本科学未来館の展示動画 (<https://www.youtube.com/watch?v=EMm9La3riNA>) にも用いられています。

MSSGによる都市街区スケールシミュレーションについては、現在も高度化技術開発を進めており、将来的には暑熱環境以外の様々な微気象現象に対して高速かつ高精度に解析できるモデルへと成長させていきたいと思えます。

5. エクス=マルセイユ大学長期滞在

MSSGのモデル開発と暑熱環境シミュレーションを進める一方で、雲乱流に関する研究も継続して進めてきました。それまでに、雲粒の乱流中でのクラスタリングが雲のレーダー反射強度に及ぼす影響を定量的に評価し、その影響を推定するための数式モデルの構築も行っていました。雲のレーダー観測では、アンテナから雲に向かってマイクロ波を送信し、雲粒によって散乱されて返ってくるマイクロ波をアンテナで受信しています。この反射強度が、雲粒のクラスタリングが生じている場合には、散乱されたマイクロ波同士の干渉によって増加する可能性があり、その定量評価を行ったのです。その際に重要となったのが、雲粒の数密度変動スペクトル（数密度の空間変動強度に関する波数スペクトル）でした。乱流に関しては乱流エネルギースペクトルがどのような形状となるのかがよく知られているのですが、乱流中の慣性粒子クラスタリングが生じている場合の数密度変動スペクトルについては全く知られていなかったのです。私の研究ではこれを数値シミュレーション結果に基づいて半経験的な数式モデルに落とし込んだのですが、その適用範囲を明らかにするためには、そもそも高レイノルズ数乱流中の慣性粒子クラスタリングがどのようなマルチスケール構造を持つのかを明らかにする必要がありました。そんな時期に運よく、ウェーブレット法を使った乱流のマルチスケール解析で有名なKai Schneider先生（エクス=マルセイユ大学・教授）に出会うことができたのです。ハワイ島での国際会議でのことで、素晴らしい自然環境に囲まれて楽しく意見交換ができたことも幸いでした。共同研究の話も進んだので、せっかくの機会だと考え、海洋研究開発機構の在外研究員等派遣制度に申請することにしました。

海洋研究開発機構の在外研究員等派遣制度では、希望者が申請し審査で認められれば、1年間を上限として海外の研究機関に長期滞在することができます。研究



在外研究員等派遣制度によるマルセイユ滞在（2018年9月～2019年8月）

職の職員に限らず毎年数名がこの制度で海外へ派遣されています。私の申請は無事に認められ、2018年9月から2019年8月までの1年間、エクス=マルセイユ大学のマルセイユ数学研究所に長期滞在し、共同研究を進めることになったのです。

マルセイユ数学研究所は、名前の通りフランス南部の主要都市マルセイユにあります。地中海に面した港湾都市で、旧港の周辺は南フランスらしいベージュ色の外観の建物が並ぶ美しい街並みである一方、少し路地を入ると落書きアートが

あふれる、様々な側面を持つ街です。ギリシャ人が入植して以降およそ2600年の歴史を通して、地中海文化圏の国々との往来も多いことから、多様な背景の人々が暮らす街でもあります。

マルセイユでの共同研究では、当初考えていた手法ではうまく結果が出なかったものの、少しアプローチを変えて慣性粒子クラスタリングのマルチスケール構造の一端を明らかにする研究を進めることができました。しかし、それだけでなく、マルセイユを起点にパリやイギリスなどに足を運んで様々な研究者と出会う機会を得られましたし、マルセイユで混相乱流に関するワークショップを開催することもできました。また、マルセイユで出会った学生や他大の先生らとのさらなる共同研究にも着手することができ、研究者として活動の範囲を拡げることもできました。

私の滞在期間中には、マクロン大統領の政策を批判するデモ「黄色いベスト運動 (les gilets jaunes)」が活発化し、一部暴徒化したこともあって、土曜の外出時に出くわしてヒヤヒヤする場面も何度かありました。それでも、研究に、観光に、趣味にと様々な目的で、美しい景色と多くの人に出会うことのできた有意義な滞在でした。今思えば、非常に幸運なタイミングで1年間を過ごせたと思います。私が長期滞在を終えて日本に帰国した半年後、新型コロナウイルスの感染がヨーロッパにも拡大し、マルセイユでは厳しい外出制限を伴うロックダウンが実施されました。それ以降、マルセイユで知り合った人たちとの再会はまだ叶っていません。その反面、急速なオンラインツールの普及によって、国際共同研究は以前より進めやすくなったように感じています（日仏米を繋いだ深夜のオンライン会議には辛いものがありますが）。この国際共同研究を今後も継続し、そのうちまた現地で顔を合わせられればと願う日々です。

6. おわりに

ここまで、私が携わってきた仕事についてつらつらと振り返ってきました。気が付けば、私が海洋研究開発機構に来てもうすぐ10年が経ちます。これまで、雲乱流や都市街区スケール暑熱環境シミュレーションに関する研究に取り組んできましたが、このような様々な物理を含むマルチフィジックス現象を相手にするうえでは、学生時代に様々な科目を愚直に勉強していたことが生きてきていると感じます。流体力学や輸送論、熱力学はもちろんのこと、電磁気学、制御工学、固

体物理学、物理化学、工業数学などなど。当時の試験勉強の最中、友人らと黒板を使って議論したことも確実に功を奏していると思います。

また、研究室配属のころを振り返れば、「こんなに“複雑そう”な乱流には研究すべきことが沢山あるに違いない」という安直な考えは、強ち間違いではなかったと思います。実際、乱流は複雑でした。雲乱流も、都市街区スケールの微気象も、どちらも乱流を無視することはできず、また研究するほどに底が深いと感じてしまいます。最近では、雲乱流中のクラスタリングについて、教科書には書かれていない新しい現象を見つけて論文を準備中です。

最後になりますが、大変ありがたいことに、2020年度には、雲乱流に関するこれまでの研究業績を認められ、日本流体力学会の若手研究者賞である竜門賞を受賞するという榮譽にあずかることができました。研究室の諸先輩方が過去に受賞しており、私もいつか受賞できればと思っていた賞を受賞できたことは、大変光栄であるとともに、身の引き締まる思いです。今後は、研究者として中堅と呼ばれるところに入っていくことになるかと思いますが、より一層、大きく活躍していければと思います。

小森先生、黒瀬先生を始め、これまでに様々なご指導をくださり、研究活動を支えてくださった皆様に感謝申し上げます。