

欧州地球科学連合総会2023 (EGU General Assembly 2023)

参加報告

丹 治 星 河^{*1}・松 信

匠^{*2}・中 下 早 織^{*3}

1. はじめに

2023年4月23日～28日、欧州地球科学連合総会2023 (EGU General Assembly 2023, 以下、EGU2023) が現地とオンラインのハイブリッド形式によって開催された。本会は毎年行われる欧州最大の地球科学系学術会議であり、今年は100以上の国から合計18,831人の人々が参加した。このうち80%以上にあたる15,453人がオーストリア・ウィーンの Austria Center Vienna に集った(第1図)。現地参加者が15,000人を超えたのは COVID-19の流行以降初めてであった。合計938のセッションから16,357件の発表が行われ、連日盛り上がりを見せた。

本会が挙行された2023年4月は中欧でも例年になく天気の不安定な月で、我々も日本とは異なる気候を十分に体験することができた。隣国のドイツ気象庁のプレスリリース (Deutscher Wetterdienst 2023) によると、オーストリアに近いバイエルン州では気候値より10%以上も降水量が多く、特にアルプス地域では月の日照時間が計100時間ほどであった。我々の滞在したウィーンでも冷たい風雨と暖かい晴れ間が数十分おきに入れ替わるような毎日で、欧州における気象予報へのニーズの違いを体感させられる一週間であった。

本稿では、今回初めて国際会議に現地参加した中下、松信、丹治の3名(第2図)が、本会の様子や発表の感想を報告する。



第1図 会場の Austria Center Vienna の入り口(上図)と受付に続く道(下図)。参加証を取得するため、多くの研究者が列を成していた。



第2図 会場近くのドナウ川にて。左から中下、丹治、松信。

^{*1} (連絡責任著者) Seika TANJII, 京都大学防災研究所.
seika@storm.dpri.kyoto-u.ac.jp

^{*2} Takumi MATSUNOBU, ルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘン。

^{*3} Saori NAKASHITA, 京都大学防災研究所。

© 2023 日本気象学会

2. 数値予報とデータ同化 (中下)

本節では、数値予報とデータ同化に関するセッション (AS1.1 Numerical weather prediction, data assimilation and ensemble forecasting, AS1.12 Developments in convective-scale and satellite data assimilation and observations, NP5.2 Inverse problems, predictability and uncertainty quantification in the Earth system using data assimilation and its combination with machine learning) の内容を報告する。中下の研究テーマはアンサンブルデータ同化を用いた大気の誤差特性の解明である。国際会議への現地参加は初めてであり、やや偏った考えも含まれるかもしれないが、率直な感想を記す。

中下は NP5.2 のセッションにおいて、現在開発中の非線形観測の同化に適した解析システムに用いる最尤法アンサンブルフィルタの局所化手法についてのポスター発表を行った。想定していたよりも多くの研究者と議論することができた。データ同化を扱うセッションは複数あったが、同化手法についての発表は比較적少なかったため、他分野の研究者にも興味を持ってもらえたことが大きい。発表内容はまだ発展途上であり、実験結果に対する考察が少ないこと、手法の選択に至った理論的な裏付けが不足していることについての指摘を数多く受けた。言語の面では、研究内容の説明にはそれほど苦労しなかったが、より深い議論となると適切な表現が思いつかず、言葉に詰まる場面が多かった。反省点は多かったものの、多くの人に興味を持ってもらえたのも事実であり、今後の研究の発展に向けて大きな励みとなった。

次に中下が参加したセッションでの興味深かった発表をいくつか取り上げる。数値予報とデータ同化、アンサンブル予報のセッション (AS1.1) では、現業予報機関での開発状況、数値予報モデル改良に向けた研究、新たな観測の利用に関する研究の議論が行われた。NOAA ではコミュニティでの開発をベースとした包括的結合モデリングシステムを利用して、大気モデルと波浪及び海洋モデルを結合した現業予報システムの開発が進められていることが報告された。また、ECMWF では2023年6月に行われる更新(Cycle 48r1)で全球中期アンサンブル予報が決定論予報と同じ水平解像度9 kmに高解像度化されるとともに、延長アンサンブル予報が100メンバーに増強され、更新頻度も週2日から1日ごとに拡張されることが報告された。データ同化の話題では、新たなリモートセンシング観

測を同化する研究がいくつか発表された。Ramon Padulles (ICE-CSIC) は、GNSS 掩蔽 (radio occultation) 観測に偏光 (polarimetric) の技術を組み合わせることで、水蒸気量の鉛直プロファイルに加えて水物質の相も観測できる GNSS-PRO に対する観測演算子の設計と複数センターの予報モデルを用いたテストについて報告した。また Rohith Muraleedharan Thundathil (GFZ 研究所/ベルリン工科大学) は、GNSS で観測される対流圏の水蒸気勾配を同化すると、天頂遅延量だけを同化する場合に生じる水蒸気勾配のバイアスを軽減できるという結果を示した。Javier Amezcua (モンテレイ工科大学/レディング大学) からは、気圧の微小変化として観測される超低周波の音波速度や経路から得られる情報をアンサンブル同化で利用する研究が示された。音波の経路に沿った予報変数を観測に変換する必要があるため、衛星観測の同化で利用される変調アンサンブルを利用したモデル空間での局所化を行った。その他の話題として、Sören Schmidt (ヨハネス・グーテンベルク大学マインツ) は確率的物理過程で混入する微小スケールの誤差が総観規模にまで拡大する過程を局所的に捉えるために、渦位の誤差発展の理論から分類してトラッキングする手法を提案した。平均的な誤差成長は、まず下層の水蒸気の誤差に伴う潜熱放出の違いから始まり、上層での発散を通じて対流圏界面に投影され、最終的に非線形ロスビー波により増幅される。一方で個々の誤差成長は平均的描像とは異なる場合が多く、大気に内在する誤差成長とモデル誤差などに伴う非線形誤差成長をどう分離するかが鍵になることを示した。

対流スケールと衛星のデータ同化に関するセッション (AS1.12) では、新たな衛星観測プロジェクトと衛星観測を同化利用するための課題に対する最新の研究が報告された。Lukas Kugler (ウィーン大学) は可視光と赤外輝度温度観測の同化の影響を OSSE で調べ、水平2次元の輝度温度観測の効果が3次元のレーダー観測を上回ることを報告した。南出将志 (東京大学) は、雲の影響を受けた放射も利用する全天同化での高解像度アンサンブル予測実験で、湿潤対流の予測可能性に複数の空間スケールの水蒸気場の不確実性が関与しているという結果を示した (Minamide and Posselt 2022)。Guannan Hu (レディング大学) からは、高密度観測を同化する際に重要となる観測誤差共分散行列の非対角成分 (相関) に関わる計算を高速に行うために、行列を正確に計算する部分と特異値分解を利用し

て近似的に計算する部分、寄与を無視する部分に分ける計算手法 (Hu and Dance 2021) が紹介された。また、Rakesh Teja Konduru (理化学研究所) は、高頻度の衛星観測を同化する OSSE では、高頻度にするほど力学的インバランスが生じ、これは観測誤差を膨張させることで緩和できることを示した。

中下がポスターで発表した逆問題と不確実性の定量化に関するセッション (NP5.2) の口頭発表では、さまざまな地球物理学の分野におけるデータ同化や機械学習の応用についての議論が行われた。Femke Vossepel (デルフト工科大学) はアンサンブル同化を活用した地震のパラメータ推定に関する研究を紹介した。断層の摩擦パラメータの確率分布がプレートの固着の影響でダブルピークを持つ非ガウス分布で特徴付けられるため、粒子フィルタなどの非線形データ同化手法の利用が有効であることを示した。Devon Francis (レディング大学) は、バイアスが小さい観測 (アンカー観測) を同化し、変分法バイアス補正による観測バイアス補正と弱拘束4次元変分法によるモデルバイアス補正を同時に行う手法を紹介した。補正の効果を最大にするためには、同化ウインドウの中でのアンカー観測のタイミングが重要であることを示した。Lili Lei (南京大学) は、雲域の放射輝度などの非ガウス分布に従う観測を同化する場合の観測演算子の線形化に関して、アンサンブル同化でよく用いられる非線形演算子の差で近似する手法と接線形演算子を利用する手法の比較を行った。晴天同化の場合は非線形性が弱くガウス分布に近いので接線形演算子を用いる方が有利だが、全天同化の場合は非線形の演算子の差で近似する方が有利であるという結果を示した。一方で、非線形演算子で近似する場合、観測統計にバイアスが生じる傾向があることにも言及した。セッションの後半には結合モデルでの同化に関する議論が行われ、Eric de Boissésion (ECMWF) からは単体の同化ではバイアスが大きく扱えなかった境界部 (海面、陸面など) での観測が扱えるようになる利点 (all-surface approach) があることが報告された。Svetlana N. Losa (アルフレッド・ウェゲナー研究所) からは海水と大気などの時間スケールの異なるモデルの結合では、観測の影響を徐々に反映させるナッジングが有効であることが示された。

全体として、データ同化関連のセッションからは、新たな観測の有効利用に向けて、現業設定での調査と理想化した設定での理論研究の両面から盛んに研究が

進められていることがわかった。

3. 対流と予測可能性 (松信)

松信はドイツ気象庁との協業で夏季降水の短期予測可能性について研究をしている。数値モデルとデータ同化一般についての最新の開発動向は前節を参照されたい。本節では対流と数値予報という視点で興味深かった発表を紹介する。本会では対流に関する多くのセッションで分野を横断したテーマが歓迎された結果か、関連する発表が多くのセッションに跨ることになった。そのため複数のセッションからサンプリングして最新の動向を紹介させていただく。

Irene Kruse (コペンハーゲン大学/ライプニッツ熱帯海洋研究センター) は CSA のモデル内における表現を、日内変動と海陸間の作用という視点で調べた。理想モデル実験から、CSA は陸地における地上気温の日内変動に強く依存し、まず陸上でのみ CSA が発生した後に海上に影響を与えることを示した。一方でこれらの現象は流れ依存であり、CSA が発生しやすい大気状態があることが示唆された。Susan van den Heever (コロラド州立大学) は NASA によって2026年から行われる INCUS mission の手法と展望について述べた。INCUS では Ka バンドレーダーを積んだ3つの衛星を数十秒の間隔を開けて周回させ時間差分を取ることにより、熱帯対流の成長 (質量フラックス) を全球規模・高頻度・高時空間解像度で系統的に観測する。データの有効性が期待できる一例として、対流のレーダー観測を同化することでモデルによる深い対流内での水分量と上昇流との相関がより精度よく再現できるという実験結果を示した。Lena Frey (カールスルーエ工科大学) はエアロゾルと微量ガスを陽に予測する数値予報モデル ICON-ART を用いた感度実験をもとに、パラメタリゼーションに含まれる不確実性が降電と降水に与える影響を分析した。領域平均した降電量には雲凝結核濃度が大きく影響する一方、全降水量は主としてシア強度の違いによるストームトラックの変化に依存することを示した。Lucile Ricard (スイス連邦工科大学ローザンヌ校) は DYAMOND プロジェクトに参加する全球ストーム解像モデルを使用し、スケールの異なる鉛直循環に対する降水の応答とモデル依存性を調べた。降水の応答はモデルを問わず大小スケールの上昇流と結合していたが、下降流が卓越する地域ではスケール間で結合の強さが異なり、その違いもモデル間でばらつきがみられた。Francine

Schevenhoven (ベルゲン大学) は Supermodelling という新たなフレームワークとその効果を示した。Supermodelling は従来のモデルアンサンプルのアイデアを発展させた手法で、それぞれのモデルが独立に行った予測を集めてアンサンプル予測を得るかわりに、オンラインで予報変数を交換する。本手法によってモデル固有のバイアスが大きく軽減され、従来のアンサンプル平均や重み付き平均より良い予測精度が示された。Mark Muetzelfeldt (レディング大学) は対流をコア部分とそれを取り巻く対流内環境場とに分けた上で全球トラッキングし、それら内部における物理量の MCS 全体の成長や維持への関わりを調べた。単独の深い対流と比較して、MCS 内ではコアと環境場で CAPE の確率密度分布が特に大きく異なることが示されたとともに、これらの関係を用いた MCS パラメタリゼーションスキームへの将来的な希望が述べられた。

ポスターセッションからもいくつかの興味深い発表を紹介する。Beata Czajka と Christian Barthlott (ともにカールスルーエ工科大学) はドイツ気象庁の現業モデル ICON を使用し、サンダーストームの予測可能性における Swabian MOSES キャンペーンによる集中観測の成果を示した。ストーム時には雲凝結核濃度が非常に小さくなるとともに、モデル内の凝結核濃度パラメータを観測値に近づけることでモデルによる予測精度が大きく向上した。また凝結核濃度が与える影響はモデル解像度に依存することが示された。固定されがちなパラメータの極端現象予測への効果、およびさらなる観測の重要性が議論された。Derek Posselt (カルフォルニア工科大学 JPL) は微物理過程のパラメータにモンテ・カルロ法でランダムに摂動を加えた大アンサンプルを作成し、対流への影響を調べた。微物理過程のパラメータ摂動は微物理過程と熱力学過程の両者に対して初期値摂動と同じオーダーの影響を持ち得、コールドプールには初期値摂動よりも大きな影響を与えることを示した。また、微物理過程のパラメータのうちいくつかは相対的に大きな影響を持っており、パラメータの最適サブセットで微物理過程の不確実性を効果的にサンプリングできることを示唆した。

また、ポスターセッションにおいて筆者は夏季欧州の対流性降水におけるモデル不確実性の影響について、空間分布のアンサンプル信頼度の観点から評価した結果を報告した。Stochastic スキームによるモデル不確実性の表現が、対流場を支配する総観規模の流れに依存して異なる影響を持ち、特に総観規模の強制が

弱い状況では系統的にモデル誤差を減少させつつスプレッドを増加しアンサンプル信頼度を向上させるといった応用的側面が強い内容であったが、現業予報センターだけではなく大学や研究所からも多くの研究者がディスカッションに参加してくれた。特に、このようなローカルな対流現象に注目する場合は対流を測るインデックスや考え方がそれぞれの地域や立場で重要なファクターを反映するようにデザインされているため、お互いの「対流観」がどのような力学的特徴を重視しているかを意見交換するだけで多くの学びがあった。これは地域と所属を超えて数千の専門家が一堂に会する EGU ならではの収穫だったと思う。

4. 雪氷学と都市気象 (丹治)

丹治は学生時代、雪氷学を専門として、吹雪や吹きだまりに関する研究を行ってきた。今回の EGU2023 では、博士論文の内容の中心である自作した吹きだまりモデルについて発表することとした (Tanji *et al.* 2021)。欧州、特にスイスやフランスはアルプスの積雪分布への関心が強く、雪に関する研究機関が多い。これらの研究機関に所属する世界の研究者と議論をしたいと考え、EGU 2023 における雪氷圏 (Cryosphere) のセッションでの発表を決断した。本節では、CR6.2 Modelling and measuring snow processes across scale における発表と、雪氷学や都市気象などのセッションで聴講した内容について報告する。

発表した CR6.2 のセッションは、PICO という発表形式であった。はじめにセッションの発表者全員が大きなスクリーンで 2 分間の研究紹介を順番に行ったあと、それぞれ与えられたタッチモニターの前に移動し、訪れた人に対してスライドで詳しい内容を説明するという、口頭発表とポスター発表を組み合わせたような形式である (第 3 図)。筆者は初めての国際会議の参加であったことに加え、元々海外の研究者とのコネクションはほとんどなかった。事前に複数の関連研究者にご挨拶のメールを送ったが、ほとんどリアクションはなかったので、自身の発表に聴講者は来るのか、海外の研究者にアピールはできるのか非常に不安であった。しかし、結果として非常に多くの研究者と議論することができた。私のブースを訪れた研究者のほとんどは吹雪や雪崩を専門とした欧州の研究機関に所属する人々であり、世界には吹雪や雪崩に関心のある研究者がここまで多いということを再認識した。特に、スイスの吹雪・雪崩研究の主力研究機関である

WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF に所属する多くの研究者が興味を持ってくれたのは非常に光栄であった。彼らと、開発したモデルに関する議論や、吹きだまりの形状に関する細かな話までできたため、欧州の研究者と議論したいという投稿当初の目標は達成できたと言える。また、雪氷の専門家だけでなく、流体力学の専門家とも話をすることができた。そこでは、筆者の吹きだまりモデルで使用している数値流体計算法の格子ボルツマン法 (McNamara and Zanetti 1988) について深い議論をした。

PICO の最大の特長は、2分トークで自分の研究を不特定多数の研究者にアピールできる点にある。2分間は非常に短いものの、どのような目的の研究か、自分自身の研究と関係する点はどこかが即座に分かる。また、議論したい点や疑問点について2分トークの時点で目星をつけることができるので、各モニターでは非常にスムーズに議論が行われていた。自身の発表でも、トークを聞いて興味を持ったから来たと言い、詳しい説明を求めて筆者のブースに来た研究者が多かった。しかし、PICO に適したスライド構成ではなかった点など反省点も多いので、ぜひまたこの発表形式に挑戦したい。

続いて、聴講した研究について報告する。丹治は、専門である吹雪関連の研究に加え、現在行っている都市気象に関する研究を中心に聴講した。加えて、同じ気象モデルや数値流体計算手法を使っている研究を探して訪問した。吹雪研究については、各々がそれぞれのモチベーションに合わせた吹雪研究を行っていると感じた。丹治が行っている吹雪研究は道路周辺の雪氷災害に着目したもので、研究対象とする現象のスケールは数10m ほどであることに對し、ほかの研究は、アルプスの積雪分布の変化や北極域の水資源分布を知ることがを目的とし、数 km スケール、あるいはそれ以上

の大きなスケールにおける吹雪や吹きだまりを研究対象としていた。特に興味深かったのは、アルプスの積雪分布をシミュレーションするために領域気象モデルに吹雪モデルを組み込んだ研究や、北極の海氷上で発生する吹雪による海塩エアロゾルの供給についての研究である。どちらの研究でも、吹雪と気象の関わりとその重要性について示されていた。都市気象に関する研究では、都市気象モデルを用いて、ベルリンやパリの都市化が街そのものの気温や降水へ与える影響を評価した研究が発表されていた。都市気象モデルを使用した研究は都市を研究対象としたものだけではなく、道路横に設置された柵まわりの風分布と PM2.5 の飛散を対象としたものもあった。この研究は、雪と PM2.5 という違いはあるが、シミュレーション対象やその計算対象スケールが筆者の研究と非常に近かった。格子ボルツマン法を用いた研究も、少数ながら発表されていた。地球力学の分野では、新たな数値流体計算法として格子ボルツマン法が紹介され、ブルームの上昇や下降といった地球内部の流体運動がシミュレーション可能であることが示された。水文学の分野では、格子ボルツマン法を用い、土壌間の水の流れを数 mm 以下の格子間隔でシミュレーションした研究が発表された。格子ボルツマン法は工学分野を中心に発展した数値流体計算法であるが、今後地球科学分野でも使用されることが増えるかもしれない。

5. おわりに

最後に、EGU2023に参加した感想を各々述べて本報告の結びとする。

全体の所感としては、大規模な会議であることもあり、未発表の研究について議論するというよりも、出版された論文をアピールする場という印象が強く、論文を執筆・投稿することの重要性を改めて認識した。また、筆者と同じ大学院生にとっては卒業後のポスト獲得に向けて自らをアピールする場であり、自分の業績をアピールするサイトを作ってポスターに QR コードを貼っている学生も多く、この積極性は見習うべきだと感じた。(中下)

ワークショップや気象学会の大会などとは全く違う経験のできた学術会議であった。なかでも強く感じたことは、予報という文脈において、伝統的なアンサンブルとガウス分布を前提にした研究がもはや主役ではないかもしれないということだ。例えば Forecasting the weather セッションで発表された18の研究のう



第3図 PICO の会場。

ち、アンサンブルやパラメトリックなモデリング手法のみを用いた発表はわずか2件であり、残りの16件はすべて経験的な機械学習に基づいていた。もちろんこれは欧州の典型的な国際会議の風景ではなく（力学や物理プロセスの研究はまだ多くが数値モデルに基づいている）、57%の発表が若手研究者によってなされたという本年のEGUの特殊性にも依るであろう。しかし、研究者として機械学習を自身のツールボックスに入れることがもはやオプションではなくなった、ということは本会の参加者の間で広く共有された認識だと思う。（松信）

国際会議が初めてであることに加え、英語を使用した発表の経験が非常に少なかったため、出発前は研究の議論ができるか非常に不安であった。しかし、図と専門用語がわかれば発表内容は理解できた。質問や議論の際は、お互い興味のある方向が共通しているためか、はっきりと重要単語を意識して話せば、言いたいことを伝えることができた。今回初めて国際会議に参加して、「発表資料の図は大きく」「大きな声で話す」といった、発表する際に当たり前に必要なことが非常に重要であると再認識した。個人的には日常会話のほうが難関で、レストランやカフェでは2回に1回は希望のものを注文できなかったのも、今後国際会議に参加するまでにこの点を改善したい。（丹治）

謝 辞

中下はJSPS 科研費22KJ1966の支援を受けた。松信はドイツ研究振興協会（DFG）のSFB/TRR 165 “Waves to Weather” の支援を受けた。丹治はJST ムーンショット型研究開発事業JPMJMS2283および環境研究総合推進費JPMEERF20232003の支援を受けた。

略語一覧

CSA : Convective Self-aggregation

ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather

Forecasts 欧州中期予報センター

DYAMOND : DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains

ICON-ART : ICOSahedral Nonhydrostatic model with Aerosols and Reactive Trace gases

INCUS : Investigation of Convective Updrafts

MCS : Mesoscale Convective System メソ対流システム

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration 米国海洋大気庁

Swabian MOSES : Swabian Modular Observation Solutions for Earth Systems

OSSE : Observing System Simulation Experiment 観測システムシミュレーション実験

PICO : Presenting Interactive Content

参 考 文 献

Deutscher Wetterdienst, 2023: Deutschlandwetter im April 2023.

https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2023/20230428_deutschlandwetter_april2023_news.html (2023.5.31閲覧).

Hu, G. and S. L. Dance, 2021: Efficient computation of matrix-vector products with full observation weighting matrices in data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **147**, 4101–4121, doi:10.1002/qj.4170.

McNamara, G. R. and G. Zanetti, 1988: Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata. *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2332–2335, doi:10.1103/PhysRevLett.61.2332.

Minamide, M. and D. J. Posselt, 2022: Using ensemble data assimilation to explore the environmental controls on the initiation and predictability of moist convection. *J. Atmos. Sci.*, **79**, 1151–1169, doi:10.1175/JAS-D-21-0140.1.

Tanji, S., M. Inatsu and T. Okaze, 2021: Development of a snowdrift model with the lattice Boltzmann method. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **8**, 57, doi:10.1186/s40645-021-00449-0.