

第 7 章 結 び

おわりに、GATM, RATM と同等の予測精度を確保した、ATM に関する今後の課題を挙げる。

初期値の課題

検証を行った第 5 章でも確認したとおり、ATM のような予測モデルでは初期値が重要である。初期値に供給源モデルを用いる場合、ATM の予測精度は供給源モデルの ESP に大きく依存する。例えば火砕物の予測の初期値の場合、ESP の一つである総噴出量（第 3.1.1 項）は、Mastin (2014) でも指摘されているように、経験に基づくベキ乗則は最大 1 桁程度の誤差があることから、(3.3) 式も同程度の誤差があると考えられる。特に、風が支配的な弱い噴煙 (weak plume) の場合は過少推定になりやすいことに注意すべきである。強風時の弱い噴煙の場合は 2 桁過少になる可能性も Bursik (2001) により指摘されている。また Woods (1993) や Mastin (2007) によれば、風速だけでなく相対湿度の影響も受ける。風を考慮した総噴出量の推定（例えば、Degruyter and Bonadonna, 2012）は今後の課題である。

速報性を維持しつつ、データ同化による解析値を ATM の初期値に適用して、解析・予報サイクルの実行により精度向上を図ることも課題である。火砕物を対象にした観測データ（例えば、林・他, 2018b）を同化する火山灰データ同化（石井・他, 2017）については、ATM と結合した火山灰データ同化・予測システムの構築を進めることが肝要である。システム構築にあたっては、現在の ATM 計算の流れ（Figure B.1）から、初期値作成に関わるジョブ（IniEsp, IniComb）を独立の JG にすることも検討が必要である。

入力値の課題

ATM はオフラインモデルであるため、その予測精度は入力値である数値予報 GPV（第 4.1 節）にも大きく依存する。ATM に入力する GPV には、空間分解能とバランスした高い時間分解能が求められる。第 5 章では、時空間分解能の高い方から、LFM, MSM そして GSM の対流圏の気圧面 GPV を入力して検証した。しかし、予測対象が火砕物の場合、地球上で発生する火山噴煙は最高 50 km 程度まで到達する可能性があり、対流圏の気圧面 GPV のモデルトップを超える（Table 4.2）。大規模噴火を想定した ATM 予測では、GSM の成層圏の気圧面 GPV を入力した検証が課題である。

ATM に入力可能な GPV は、柔軟性をもたせるために、前処理で GSM も MSM, LFM も z 座標に変換して ATM へ入力する設計にした。しかし元々 GSM は σ - p ハイブリッド座標、MSM と LFM の asuca は鉛直ハイブリッド座標でいずれも地形に沿っている。モデル地形の表現をよくするために、ATM も地形に沿う鉛直座標（例えば、 z^* 座標、斉藤, 2003a）に変換して計算できないか、検討が必要である。

その他、乱流拡散係数（第 4.1.6 項）における乱流プラントル数の動的設定や TKE から推定する方法の調整、乾性沈着速度に関する空気力学的抵抗（第 4.1.7 項 (2)）の推定に必要な植生パラメータ、植生分布、SST の気候値（付録 E.1）の高分解能化、相対湿度から雲頂・雲底高度を推定する方法（第 4.1.8 項 (2)）の改良などの課題がある。

ATM の課題

予測精度の向上には、ATM 自体のモデリング（第 2.2 節）の不完全性、すなわち力学・物理過程の不十分性や各過程における不確実性を明らかにして改良することが必要であり、このためには理想大気（第 4.2 節）を用いた単体試験や結合試験に基づく点検を踏まえた上で、観測に基づく検証を行うことが不可欠である。

実装した力学・物理過程に関しては、まず水平輸送過程において、タイムステップに依存する球面三角法（第 2.2.1

項)による時間変化率とルンゲ・クッタ法(第 2.3.1 項 (2))による時間積分の共立が課題である。また重力落下過程では、高層の大気(例えば、木田, 1983)になるほど空気密度が小さくなり(Figure 4.5 (d))、トレーサーの終端速度が速くなるため、予測精度のタイムステップ依存性が大きくなる(Figure 2.10)。終端速度はまた、トレーサーの粒径が礫クラスになると、その密度や形状依存性などが大きくなる(Figure 2.6)。ゆえに、例えば高高度から放出される火山礫が予測対象の場合は降礫予測の定量的検証を行い、これらの不確かさを小さくしなければならない。さらに粒径が数 cm オーダーより大きい岩塊クラスになると、トレーサーに働く水平方向の空気抵抗は十分短い時間で無限大とみなせなくなり、トレーサーの速度の水平成分と大気場の水平風は一致しなくなることが予想される。したがって、大きな岩塊に対しては、パッシブトレーサー(第 2.1 節)の仮定を外した定式化を検討する必要があるだろう。ATM の予測可能性を粒径のより大きい方へ拡張するためには、(2.3)式に替わり運動方程式(例えば火山岩塊の場合、鈴木・他, 2008)に基づくトレーサーの速度変数の導入が今後の課題である。

新たに実装が必要な物理過程としては、序論で述べたとおり、凝集(例えば火山灰の場合、Brown *et al.*, 2012)や再飛散(例えば、Leadbetter *et al.*, 2012; Folch *et al.*, 2014; Miwa *et al.*, 2018)がある。凝集は湿性沈着(第 2.2.5 項)による輸送過程と密接に関係する。また輸送過程だけでなく、予測対象によっては凝集、再飛散とも供給源周辺でも発生するので ATM の初期値の課題でもある。特に再飛散は、ATM の前回の予測値が次の初期値になることや場合によっては観測時に供給源が不明であることが想定されるので、サイクル化(相川, 2008)や後方追跡(バックトラジェクトリ)の機能追加も課題に含まれる。さらに ATM は現在、主に粒子を対象にした物理過程しか考慮していない。例えば、近年の西之島の活動(高木・他, 2017)に観られるようなガス(SO₂)やそれから化学変化したエアロゾル(硫酸エアロゾル粒子)を精確に予測するには、物理過程だけでなく、化学過程も考慮しなければならない。

ATM の検証については、予測対象によっては観測が不足していたり検証そのものが困難な場合がある。例えば火山灰雲の予測に関する検証については、多くの事例を用いた統計的な検証はほとんど行われておらず、一般的な検証方法は確立していない。そのため、第 5.1 節では火山灰雲の「位置」と「形」に注目し、その指標として「中心位置」と「面積」を用いて検証を試みた。「火山灰雲の面積」を「火山灰雲の形」の指標としたものの、面積が同じならばよい予測とは限らず、その形も考慮して検証を行うことが望ましい。また、予測された火山灰雲の面積を計算する際の格子にも任意性が含まれる。なぜなら、格子が小さいほど計算される面積は小さくなるため、予測された領域をほどよく表すような格子の大きさを決定する必要がある。この問題は、トレーサー数を増やすと自然と解決するものであるが、どの程度のトレーサー数にすれば十分なのか、(5.1)式のような対応は自明ではなく、今後さらなる調査が必要である。また第 5.2 節の定量的検証では、(6.9), (6.10)式で定義した平均誤差と RMSE を用いた。しかし、降灰量の空間分布のように、指数関数的に変化する現象に対して量の多少によらず統計的検証を行うには、第 6.2.2 項 (2)で述べたように適切に重み付けした指標の導入が必要である。

最後に、検証に資する可視化(第 6.2.1 項)の課題として、ATM の出力結果から予想衛星画像(林・他, 2018a)を作成することと PANDAH に代わる可視化ツール(原, 2017b)を利用することを挙げておく。

ATM は一つのモデルであり、ほかの数値予報モデルと同様、その完成はなく、冒頭に掲げた設計方針の下、予測精度を向上させるための開発・改良が継続されてゆく。ATM の設計の現在をまとめた本書もまたモデル改良とともに改訂されるものである。

謝 辞

JMA-ATM の降灰予報および VAA 業務における現業化に際しては、気象庁地震火山部火山監視課の中村政道課長補佐をはじめ、林 勇太調査官、大城久尚降灰予報係長、吉開裕亮技術主任、東京 VAAC の川口和哉調査官、丸本大介予報官、土山博昭航空路火山灰運用係長、山名泰隆技術専門官、菅野 洋技官、地震火山技術・調査課の五十嵐洋輔地震火山観測企画調整官、相澤幸治課長補佐、長谷川嘉臣技術専門官、甲斐玲子係長、内製化班、情報基盤部情報通信基盤課の林 洋介技術主任ほか皆様のお世話になっております。数値予報課の関係官、気象研究所の永戸久喜研究調整官および編集委員の佐藤英一氏からのご確認・ご指摘により、本稿は改善されました。ここに感謝いたします。