

# 第 1 章 序 論

## 1.1 はじめに

気象庁の移流拡散モデルは、予め準備した大気場を入力して粒子（トレーサー）の運動を計算するオフラインかつラグランジュ記述のモデルである。移流拡散モデルは大気中の物質輸送の速やかな予測を可能とするため、例えば火山噴火に伴う火山灰輸送のように、現象発生時に迅速な予測が必要とされる場合に活用される。現在、世界に 9 つある航空路火山灰情報センター（VAAC）はすべてオフライン、うち 7 センターでラグランジュモデルが運用されている（例えば、Folch, 2012）。

気象庁における移流拡散モデルの開発は、1986 年チェルノブイリ原子力発電所事故を契機として予報部（現：情報基盤部）数値予報課で始まった（Figure 1.1）。当初は数値予報ルーチンの全球モデル（GSM）と結合したオンラインモデル（Takasugi and Nakamura, 1988）であったが、1990 年代に GSM の矩形ガウス格子・地形に沿う気圧座標（ $\sigma$ - $p$  ハイブリッド座標）の格子点値（GPV）を入力値とするオフラインモデル（Iwasaki *et al.*, 1998）になり環境緊急対応（EER）で運用されている（Aranami and Sakamoto, 2019）。また 1997 年に発足した東京 VAAC では、火山灰拡散予測図（VAG）を含む航空路火山灰情報（VAA）を発表するために、このモデルを原型とする全球移流拡散モデル（JMA-GATM、以下、GATM）が 2013 年以降運用されてきた（Ishii *et al.*, 2018; Hasegawa and Hayashi, 2019a）。他方、1990 年代半ばに領域モデル（RSM）の運用が始まり、2000 年三宅島噴火（気象庁, 2006）に伴う火山ガス（SO<sub>2</sub>）を予測するために、RSM の GPV を入力する領域版移流拡散モデル（Kawai, 2002）や非静力学モデル（NHM）に対応した長距離輸送モデル（佐藤・他, 1995）が使用され（例えば、Seino *et al.*, 2004）、後者は富士山の降灰ハザードマップ（富士山火山防災協議会, 2004）にも応用された（例えば、山本・他, 2003）。その後、メソモデル（MSM）として現業化された NHM（気象庁予報部, 2003, 2008; Saito *et al.*, 2006, 2007）のランベルト格子・地形に沿う高度座標（鉛直ハイブリッド座標）に対応したメソ版移流拡散モデル（後に JMA-RATM と改名、相川, 2008）が開発され、地震火山部火山課では同モデルを使用した降灰予報業務を 2008 年に開始した（Shimbori

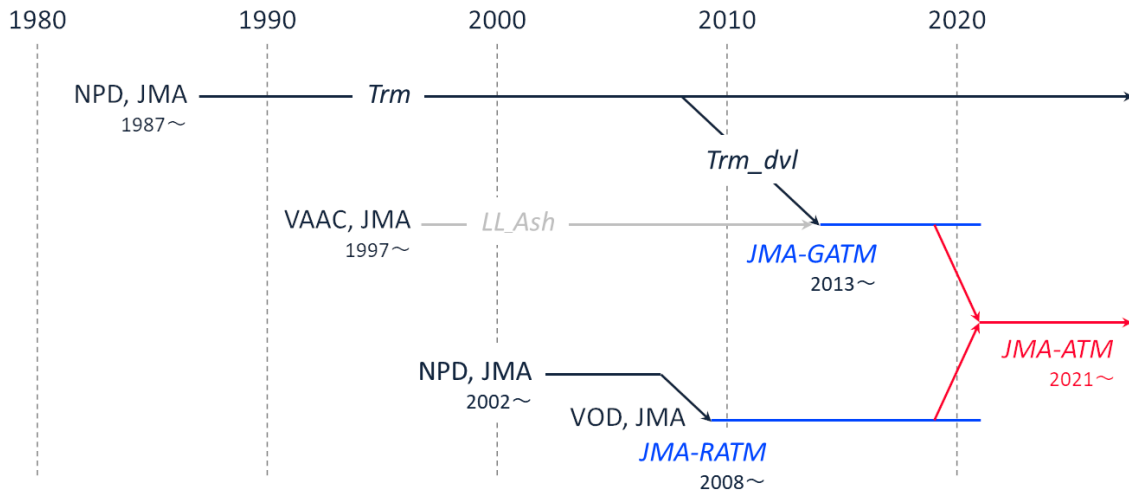


Figure 1.1 Brief history of JMA's atmospheric transport models (code names are shown in italics)

et al., 2009; 新堀・他, 2010)。そして、2011 年東北地方太平洋沖地震によって発生した福島第一原子力発電所事故に関して設置された世界気象機関 (WMO) の気象解析についての技術タスクチーム活動 (齊藤・他, 2014; Saito et al., 2015b) に応じて、MSM の解析値 (MA) やレーダー・アメダス解析雨量 (R/A) も入力可能な領域移流拡散モデル (JMA-RATM、以下、RATM) に改修された (Saito et al., 2015a)。RATM は局地モデル (LFM) や NHM の後継モデルである asuca (気象庁予報部, 2014) のモデル面 GPV の入力にも対応しており、2015 年に高度化された降灰予報で運用されてきた (新堀・他, 2014; Hasegawa et al., 2015; Hasegawa and Hayashi, 2019b)。

火山業務では上述のとおり、GATM と RATM の二つの移流拡散モデルが運用されてきたが、比較的新しい後者でも降灰予報の業務開始後、十年が経過した。この間も広域に火山灰被害をもたらす噴火が、2010 年アイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山や 2011 年霧島山 (新燃岳) を始めとして国内外で発生し、初期値に気象レーダーで観測された噴煙エコーの解析値を利用することの有効性 (例えば、Hashimoto et al., 2012) や従来の移流拡散モデルに組み込まれていない火山灰の凝集や再飛散などの新たな過程の必要性 (例えば、Brown et al., 2012; Leadbetter et al., 2012) が指摘されている。物質輸送の予測可能性に関わるこれらの物理過程は本来、モデルの予測領域の広狭によらないものである。移流拡散モデルの予測可能性は、オフラインの観点では入力する数値予報 GPV の予測可能性に準じるもののラグランジュモデルの場合は、オイラーモデルの格子間隔のようなモデル固有のスケールがなく、移流拡散モデルそのものは予測領域との関係が小さいと考えられる。このため、移流拡散モデルは予測領域によらず、一つのモデルとすることが運用上も研究上も有効である。そこで気象研究所火山研究部では、GATM と RATM を統一した新たな気象庁移流拡散モデル (JMA-ATM、以下、ATM: Atmospheric Transport Model) を設計・開発した (Figure 1.2)。

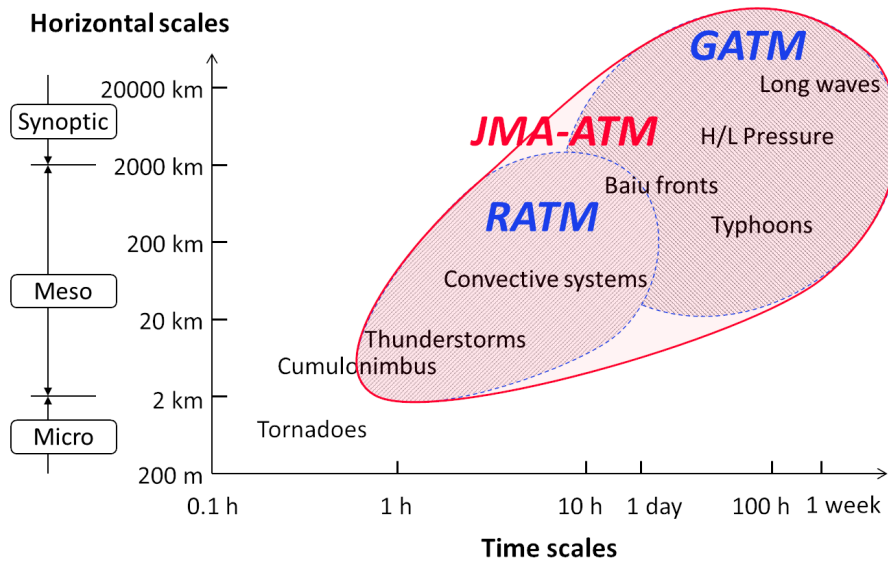


Figure 1.2 Horizontal and time scales of atmospheric phenomena covered by the JMA-ATM (after Shimbori, 2016)

本書では、次世代に繋がる移流拡散モデル開発の技術基盤の整備も視野に、ATM の設計内容について報告する。

## 1.2 設計の方針

ATM は、現業運用を念頭に、堅牢性・速報性・柔軟性および開発管理の観点から設計している。これらの観点は独立ではなく、以下に述べるように互いに関連している。

## 堅牢性

現業運用において有事の情報発表を支援するためには、予測精度とともに、予測モデルの計算が異常終了しないことが最も重要である。ATM は、GATM, RATM と同様に、質量保存を満たしつつ、計算不安定が発生しにくいラグランジュ記述を踏襲する。また業務継続計画 (BCP) に対応するため、入力できる GPV に柔軟性をもたせるとともに、気象庁スーパーコンピュータシステム (NAPS) 以外の計算機環境でも実行可能な設計にする。

## 速報性

現象発生時に迅速な情報発表を実現するためには、予測モデルの計算が高速かつ正常終了することが必要である。ATM は、速報性に関しても GATM, RATM と同様に、数値予報ルーチンで作成された GPV を元にオフライン計算で実行する。ただし、ATM に入力する GPV については、RATM のように MSM や LFM (asuca) のモデル面 GPV を直接入力するのではなく、前処理で ATM 計算に必要な物理量 (気象要素) に予め変換した GPV を入力する。運用では、この GPV 前処理は数値予報ルーチンのプロダクト作成時刻に合わせてルーチン化しておくことができ速報性に影響しないため、ATM 本体実行時の計算量を軽減することができる。さらに今後の新規情報に伴う計算量の増加を見込んで、NAPS 上では MPI によりトレーサー数を分割した並列計算も実行可能とする。

## 柔軟性

供給源パラメータ (ESP、第 3 章) に基づく初期値は、火山灰のような粒子に限定せず、パラメータ設定の切替えにより SO<sub>2</sub> のようなガスにも対応できるトレーサーで構成する。また、入力値の大気場は、元の数値予報モデルに特化しない座標系を設定する。特に鉛直座標系 (萬納寺, 1994) について、GATM は GSM と同じ  $\sigma$ - $p$  ハイブリッド座標 ( $\eta$  座標)、RATM は asuca と同じ地形に沿う鉛直ハイブリッド座標で計算していた。これに対し ATM では、前述のとおり、前処理で異なる種類の GPV を共通の気象要素に変換して、元の格子配置は維持したまま  $z$  座標で計算する。この方針により、二つに分かれていた GATM と RATM を、一つの ATM に統一する。

## 開発管理

ATM のプログラム (ソースコード) は、可読性を高めるために、コーディングルール (室井・他, 2002) などを規範として定めたローカル・コーディングルールに基づき Fortran で書き、すべてのサブルーチンをモジュール化している。力学・物理過程は、各過程を一つひとつのモジュールにすることにより、基本的に可換にして独立性を保つようにする。また ATM に対応した可視化や検証などの開発ツールも用意する。ATM のソースコードを含む開発環境は、気象庁内におけるモデル開発の相互点検・共有のため、技術開発推進本部 (現: 技術開発推進委員会) 開発管理調整グループの下で導入された数値予報モデル開発管理情報共有装置 (通称: 「開発管理サーバ」、雁津, 2017a) を活用して、Subversion (SVN) により変更履歴 (バージョン) を管理するとともに、SVN と連携した Redmine により作業工程 (プロジェクト) を記録する。

なお ATM の設計・開発にあたっては、NHM (気象庁予報部, 2003, 2008) および asuca (気象庁予報部, 2014) を参考にさせて戴いた。

## 1.3 本書の構成

### 本論の構成

本論は、第 2 章から第 6 章で構成される。

第 2 章では、ATM の本体である移流拡散モデルについて、その定式化を記述する。

第 3 章では、ATM の初期値の例として、火山灰・火山礫などの火砕物の ESP を記述する。

第 4 章では、ATM に入力する GPV について、要素変換の方法を記述する。

第 5 章では、ATM の検証について、火山灰雲および降下火砕物予測を例に記述する。

第 6 章では、ATM の可視化や検証のツールも含む開発管理について記述する。

最後にまとめとして第 7 章で、初期値、入力値そして移流拡散モデルの今後の課題を挙げる。

## 付録について

付録 A にプログラム全体のディレクトリ構成を示す。

付録 B に主プログラムの計算の流れ（フローチャート）と時間制御（タイムコントロール）を示す。

付録 C に ATM で使用する主要な変数、パラメータ、定数および型一覧を示す。

付録 D に ATM で使用する計算設定ファイル（ネームリスト）のパラメーター一覧を示す。

付録 E に ATM に入力するデータ形式（フォーマット）と要素を示す。

付録 F に ATM が出力するデータフォーマットと要素を示す。

付録 G に ATM で使用する乱数について記す。

付録 H に ATM の MPI による並列化について記す。

付録 I に ATM のローカル・コーディングルールを示す。