

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE No.84

Design of the Japan Meteorological Agency Atmospheric Transport Model

BY

Toshiki Shimbori and Kensuke Ishii

(Department of Volcanology Research, Meteorological Research Institute)

気象研究所技術報告

第 84 号

気象庁移流拡散モデル設計書

新堀敏基・石井憲介

(気象研究所火山研究部)



気象研究所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

March 2021

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE

Established in 1946

Director-General: Keiji Doi
Senior Director for Research Affairs: Masao Ishii
Senior Director for Research Coordination: Hisaki Eito

Department of Atmosphere, Ocean, and Earth System Modeling Research	Director: Seiji Yukimoto
Department of Physical Meteorology Research	Director: Yuji Yamada
Department of Observation and Data Assimilation Research	Director: Hiromu Seko
Department of Typhoon and Severe Weather Research	Director: Naoko Seino
Department of Climate and Geochemistry Research	Director: Kazuto Suda
Department of Seismology and Tsunami Research	Director: Mitsuyuki Hoshiba
Department of Volcanology Research	Director: Makoto Saito
Department of Applied Meteorology Research	Director: Yasushi Takatsuki

1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052 Japan

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE

Editor-in-chief: Mitsuyuki Hoshiba

Editors:	Yosuke Fujii	Yoshinori Mizuno	Haruma Ishida
	Akihito Umehara	Izuru Takayabu	Hiroaki Tsushima
	Eiichi Sato	Hidetaka Sasaki	
Managing Editors:	Yasuyuki Kawazoe	Keiko Ono	

The *Technical Reports of the Meteorological Research Institute* has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute (MRI) since 1978 as a medium for the publication of technical report including methods, data and results of research, or comprehensive report compiled from published papers. The works described in the *Technical Reports of the MRI* have been performed as part of the research programs of MRI.

©2021 by the Meteorological Research Institute.

The copyright of reports in this journal belongs to the Meteorological Research Institute (MRI). Permission is granted to use figures, tables and short quotes from reports in this journal, provided that the source is acknowledged. Republication, reproduction, translation, and other uses of any extent of reports in this journal require written permission from the MRI.

In exception of this requirement, personal uses for research, study or educational purposes do not require permission from the MRI, provided that the source is acknowledged.

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE No.84

Design of the Japan Meteorological Agency Atmospheric Transport Model

BY

Toshiki Shimbori and Kensuke Ishii

(Department of Volcanology Research, Meteorological Research Institute)

気象研究所技術報告

第 84 号

気象庁移流拡散モデル設計書

新堀敏基・石井憲介

(気象研究所火山研究部)

気象研究所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

March 2021

序

気象庁は、大気中における火山灰の分布を含む、火山現象の予報を行う責務を負っている。大気中に浮遊する火山灰は、航空機にとってエンジン停止などの重大な事故を引き起こす。また地表面へ降下する火山灰や火山礫などは、交通障害、ライフライン障害、農作物や健康への被害など、広く社会に影響を及ぼす要因となる。防災面に加え生活情報としての観点からも、これらの予測に関する情報は非常に重要である。大気中の浮遊火山灰を対象とした航空路火山灰情報は、東京航空路火山灰情報センター設立後の平成 11 年 4 月から、地表面へ降下する火山灰・火山礫を対象とした降灰予報は、平成 20 年 3 月から発表されている。それらの高度化のための新たな技術基盤として開発したものが、本報告の主題である気象庁移流拡散モデル（JMA-ATM）である。

JMA-ATM は、これまで主として航空路火山灰情報で運用してきた気象庁全球移流拡散モデル（JMA-GATM）と降灰予報で運用してきた気象庁領域移流拡散モデル（JMA-RATM）を一つに統合した新しいモデルである。従来の二つのモデルは、力学・物理過程を含め共通部分が多いにも関わらず、入力する大気場の座標系の違いなどの理由から別々に開発されてきた歴史的経緯があり、モデル改良を進める上で双方のモデルを統一することは積年の課題であった。そこで、気象研究所では令和元年度から開始した 5 ヶ年計画の経常研究『火山活動の監視・予測に関する研究』の副課題「火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測」において、この課題に取り組むことにした。本報告は、新たに開発した JMA-ATM の設計内容をとりまとめたものである。

JMA-ATM は、気象庁の火山現業で利用するモデルとして、堅牢性・速報性・柔軟性および開発管理の観点で設計しており、その詳細は本報告で述べられる。本報告は 7 つの章と 9 つの付録から成り、第 1, 2, 4 章、第 5.2 節、第 6 章と付録 A～F は新堀、第 3 章、第 5.1 節と付録 G, H は石井、第 7 章および付録 I は両者が執筆した。モデルの詳細設計を詳らかにするために、付録も充実させている。

JMA-ATM の開発にあたっては、気象庁地震火山部火山監視課、地震火山技術・調査課、情報基盤部数値予報課、情報通信基盤課をはじめ、多くの方々のご協力をいただき、今年度中には、現業業務で運用開始の予定である。一方、JMA-ATM は、他の数値モデルと同様に、最終形として完成したというのではなく、当所においてもモデル改良を継続していく。本報告が、今後の気象庁内外の火山現象の予報業務の高度化に貢献するとともに、移流拡散モデルの研究・開発の推進に寄与することにも期待したい。

また、このモデルは、文部科学省次世代火山研究推進事業（平成 28 年度～令和 7 年度）のテーマの一つ「シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発」や内閣府戦略的イノベーション創造プログラム「国家レジリエンス（防災・減災）の強化（平成 30 年度～令和 4 年度）」の研究開発項目の一つ「衛星 SAR 解析および降灰シミュレーションによる広域降灰厚分布把握技術の開発」などでも活用される予定である。JMA-ATM の発展が火山防災の将来に資することを併せて強く希望する。

最後に、新型コロナウイルス対策に厳重警戒という状況の中、JMA-ATM の開発および本報告の作成にご尽力・ご協力いただいた多くの方々に深く感謝申し上げます。

令和 2 年 12 月

火山研究部長
齋藤 誠

Abstract

THE Japan Meteorological Agency (JMA) has operated global and regional atmospheric transport models (ATMs; JMA-GATM and JMA-RATM, respectively) to issue volcanic ash advisories (VAAs) and volcanic ash fall forecasts (VAFFs). The JMA-GATM is driven by the grid-point values of the global spectral model (GSM) and the JMA-RATM by those of the meso-scale model (MSM) or local forecast model (LFM) based on the nonhydrostatic model ASUCA. Under a research plan that began in April 2019, the Meteorological Research Institute (MRI) of the JMA is proceeding with a plan to unify the global and regional ATMs. In this Technical Report, we document the design and development of the new JMA-ATM.

The new JMA-ATM was designed from the point of view of robustness, promptness, flexibility and manageability. *Robustness*: To avoid any abnormal ends in operation, the JMA-ATM employs a Lagrangian description. *Promptness*: To issue VAAs and VAFFs immediately, the JMA-ATM is calculated offline. Moreover, the element conversion of grid-point values is executed during preprocessing, and the main ATM calculations are processed in parallel using a message-passing interface on supercomputers. *Flexibility*: ATM tracers are not limited to volcanic ash estimated from emission-source parameters as the initial condition, and the ATM coordinate system can accommodate beyond the input datasets of the GSM, MSM and LFM. *Manageability*: In order to review and share source code within the JMA, project management and version control systems have been implemented in the ATM development.

Considering these design principles, the offline Lagrangian model is the same as in the previous ATMs. Whereas the vertical coordinates of the JMA-GATM and JMA-RATM are the σ - p hybrid coordinate of the GSM and the hybrid terrain-following coordinate of the ASUCA, respectively, the JMA-ATM unifies the models by converting the grid-point values to identical z -coordinates. For readability, the JMA-ATM is written in Fortran in accordance with standard coding rules, and all subroutines are modularized. To ensure that dynamical and physical processes are commutative at each time step, the time tendency of tracer variables is calculated in each process and integrated at the last time step. A technical platform also provides visualization and verification tools. The JMA-ATM project is managed with Redmine and source code versions are controlled with Subversion.

As an operational model, a first objective of the new ATM, which is to maintain the accuracy of JMA-GATM and JMA-RATM predictions, has been achieved. To precisely predict atmospheric transport phenomena near ground surface, the next subject is a suitable treatment of the model terrain in the z -coordinate or transformation to a terrain-following coordinate. Furthermore, to improve the accuracy of JMA-ATM predictions, we are planning to implement aggregation and resuspension processes in addition to integrating a data assimilation system for volcanic ash.

目 次

第 1 章	序 論	1
1.1	はじめに	1
1.2	設計の方針	2
1.3	本書の構成	3
第 2 章	移流拡散モデル	5
2.1	定式化の準備	5
2.2	力学・物理過程の時間変化率	6
2.2.1	輸送過程	6
2.2.2	拡散過程	7
2.2.3	重力落下過程	10
2.2.4	乾性沈着過程	11
2.2.5	湿性沈着過程	12
2.2.6	崩壊過程	14
2.3	時間積分	14
2.3.1	時間積分法	14
2.3.2	積分後処理	17
2.4	空間内挿	18
2.4.1	入力値の空間内挿法	18
2.4.2	出力値の空間内挿法	19
2.5	出 力	20
2.5.1	粒子出力	20
2.5.2	格子出力	20
第 3 章	初期値	21
3.1	初期値の例：火砕物の供給源モデル	21
3.1.1	総噴出量	21
3.1.2	粒径分布（質量）	22
3.1.3	密 度	24
3.1.4	放出高度の分布	24
3.1.5	噴煙の形状	25
3.1.6	放出時刻	26
3.2	初期値の出力例：火砕物の供給源モデル	27
第 4 章	入力値	33
4.1	数値予報 GPV から変換	33

4.1.1	座 標	34
4.1.2	風	38
4.1.3	気 圧	38
4.1.4	気 温	38
4.1.5	空気密度	39
4.1.6	乱流拡散係数	40
4.1.7	地表面	42
4.1.8	雲	42
4.1.9	時間降水量	43
4.2	理想大気の作成	43
4.3	放出地点の大気プロファイル出力	43
4.4	定数データ	44
第 5 章	検 証	47
5.1	火山灰雲の予測に関する検証	47
5.1.1	対象とする事例	47
5.1.2	計算の設定	48
5.1.3	予測結果の比較	48
5.1.4	予報官解析に対する検証	57
5.2	降下火砕物の予測に関する検証	61
5.2.1	対象とする事例	61
5.2.2	計算の設定	61
5.2.3	予測結果の検証：初期値の比較	62
5.2.4	予測結果の検証：数値予報 GPV の比較	68
5.2.5	予測結果の検証：計算粒子数の比較	69
第 6 章	開発管理	73
6.1	開発管理	73
6.2	開発ツール	75
6.2.1	可視化ツール	75
6.2.2	検証ツール	76
第 7 章	結 び	81
付録 A	プログラムのディレクトリ構成	83
付録 B	計算の流れ	85
B.1	フローチャート	85
B.2	タイムコントロール	89
付録 C	変数一覧	91
C.1	主要変数一覧	91
C.2	主要パラメータ一覧	95
C.3	定数一覧	96
C.4	型一覧	97
C.5	構造型一覧	97

付録 D	ネームリスト・パラメーター一覧	99
D.1	GPV 前処理のネームリスト	99
D.2	ATM 計算のネームリスト	102
D.3	ESP リスト	106
D.4	conf ファイル	106
付録 E	入力データフォーマット	109
E.1	定数データフォーマット	109
E.1.1	植生パラメータ	109
E.1.2	植生分布	109
E.1.3	海面水温の気候値	110
E.2	NuSDaS による入力要素一覧	114
E.2.1	ATM 計算の入力 GPV	114
付録 F	出力データフォーマット	115
F.1	可変データフォーマット	115
F.1.1	大気プロファイル	115
F.1.2	粒子出力ファイル	116
F.1.3	タグ出力ファイル	117
F.2	NuSDaS による出力要素一覧	117
F.2.1	ATM 計算の格子出力データ	117
付録 G	乱数	119
G.1	一様乱数 (Xorshift)	119
付録 H	並列化	121
H.1	MPI	121
H.2	実行時間	122
H.3	ログ	123
付録 I	ローカル・コーディングルール	127
I.1	ソースコードのローカル・コーディングルール	127
I.2	シェルスクリプトの書き方	136
略語一覧		139
References		141

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（ σ - 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（SO₂）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

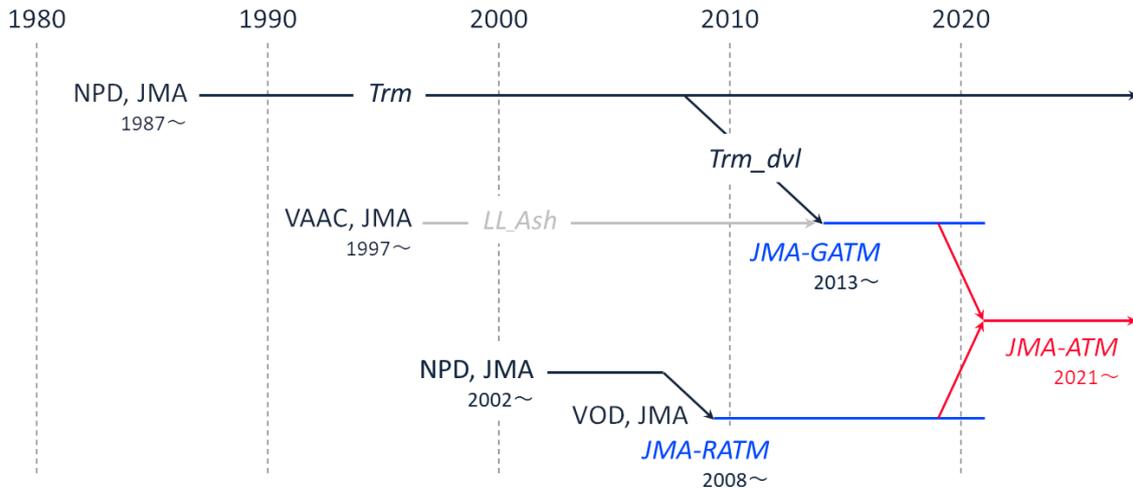


Figure 1.1 Brief history of JMA’s atmospheric transport models (code names are shown in italics)

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)。

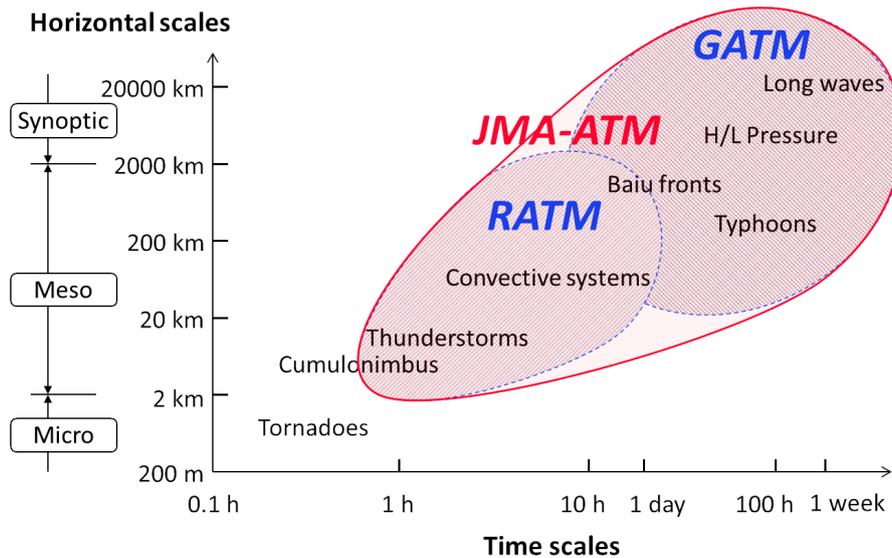


Figure 1.2 Horizontal and time scales of atmospheric phenomena covered by the JMA-ATM (after Shimbori, 2016)

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 SO₂ 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 σ - p ハイブリッド座標 (η 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。

第 2 章 移流拡散モデル

本章では、ラグランジュモデルである ATM の定式化として力学・物理過程の時間変化率と時間積分法、空間内挿法および出力について記述する。

2.1 定式化の準備

ラグランジュモデルである ATM の目的は、大気場に放出された N_t 個の計算粒子（トレーサー）の時刻 t における位置ベクトル

$$\mathbf{r}_n(t) = (\lambda_n(t), \varphi_n(t), z_n(t)) \quad (n = 1, 2, \dots, N_t) \quad (2.1)$$

の時間発展を求めることである。ただし $0^\circ \leq \lambda_n < 360^\circ$ は経度、 $-90^\circ \leq \varphi_n \leq 90^\circ$ は緯度、 z_n は鉛直上向きを正とする地球表面からの高度（海拔）である。水平方向は、 \mathbf{r}_n において東向きおよび北向きを正とする局所直交座標 (x_n, y_n) を取れば、

$$(dx_n, dy_n) = (R_E \cos \varphi_n d\lambda_n, R_E d\varphi_n) \quad (R_E : \text{地球半径}) \quad (2.2)$$

の関係が成り立つ¹。水平輸送されるトレーサーは受動的トレーサー（パッシブトレーサー）とし、トレーサー自体の運動は鉛直方向に働く重力と浮力、空気抵抗力のみを考慮して、以下の仮定を置く。

- (i) 大気場の風ベクトル $\mathbf{U}(\mathbf{r}_n) = (U_n, V_n, W_n)$ で輸送²
- (ii) 鉛直風速 W_n に対する相対的な終端速度 w_{tn} で落下³
- (iii) トレーサー間は相互作用しない⁴

すると、 n 番目のトレーサーについての運動論的方程式⁵は

$$\frac{D\mathbf{r}}{Dt} = \mathbf{U} - w_t \hat{\mathbf{z}} = (U, V, W - w_t) \quad (2.3)$$

となる。さらに風を平均 $\bar{\mathbf{U}} = (\bar{U}, \bar{V}, \bar{W})$ とゆらぎ $\mathbf{U}' = (U', V', W')$ の和 $\mathbf{U} = \bar{\mathbf{U}} + \mathbf{U}'$ にレイノルズ分解して、(2.3) 式を十分小さい積分時間間隔（タイムステップ） Δt でテイラー展開すると

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \bar{U}\Delta t + U'\Delta t + O((\Delta t)^2) \quad (2.4a)$$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \bar{V}\Delta t + V'\Delta t + O((\Delta t)^2) \quad (2.4b)$$

$$z(t + \Delta t) = z(t) + \bar{W}\Delta t + W'\Delta t - w_t\Delta t + O((\Delta t)^2) \quad (2.4c)$$

と書ける（例えば、Stohl, 1998; Lin, 2012）。(2.4) 式の右辺第 2 項は輸送項、第 3 項は拡散項、(2.4c) 式の右辺第 4 項は降下項である。

数値予報モデルによる時間発展の計算は、原 (2012) が述べているとおり、

¹本書では簡単のため、度数法から弧度法への変換因子 $\pi/180$ は省略する。

²トレーサーの初速度が大きい場合、例えば水平方向についてはトレーサーの速度 $(dx_n/dt, dy_n/dt)$ が (U_n, V_n) に漸近するまでの緩和時間が長くなるため、この仮定は成り立たない。

³鉛直流のトレーサーへの作用 dW_n/dt が重力や抵抗力に比べて小さいとみなせれば、この仮定が成り立つ。

⁴この仮定の下、トレーサーを識別する添字 n は以下省略する。

⁵運動方程式に基づく定式化は今後の課題（第 7 章）。

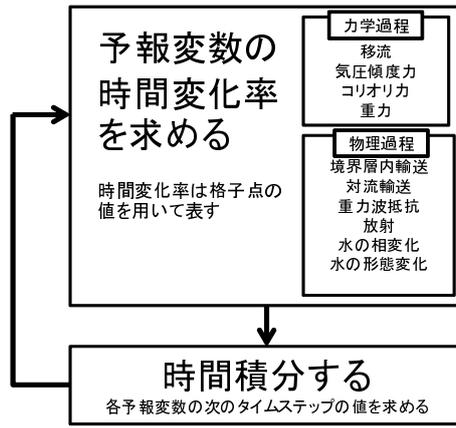


Figure 2.1 Basis of NWP model (from Figure 1.2.1 of Hara (2012))

1. 各予報変数 ϕ_i の過程 k による時間変化率 $f_i^k (\equiv \partial\phi_i(t)/\partial t|_k)$ を各過程ごとに独立に求めること
2. (全過程の時間変化率) $F_i = \sum_k f_i^k$ を用いて時間積分を行い、 Δt 後の各予報変数の値を求めること

が基本であり (Figure 2.1)、ラグランジュモデルの ATM も然りである。すなわち ATM の場合、予報変数 ϕ_i は (2.1) 式のトレーサーの位置 λ, φ, z であり、考慮する過程 k は (2.4) 式に対応した輸送、拡散、重力落下のほか、乾性および湿性沈着過程などがある。第 2.2 節の各項では ATM でこれらの時間変化率を求める方法について、(2.4) 式より高次の時間積分法については第 2.3 節で述べる。

2.2 力学・物理過程の時間変化率

本節では、大気輸送の素過程のうち ATM に実装している輸送⁶、拡散、重力落下⁷、乾性および湿性沈着過程の時間変化率を求める方法について述べる。これらは付録 A に示すディレクトリツリーの Process にある個々のモジュールで計算される。各過程の物理については、各項で引用する文献および新堀・他 (2010, 2014) を参照されたい。

2.2.1 輸送過程

局所直交座標

輸送過程の時間変化率は、第 2.1 節の仮定 (i) の下、(2.4) 式の右辺第 2 項に表されているとおり、大気場の平均風で与えられる。極座標表示の局所直交座標 (2.2) 式を (2.4) 式に代入して右辺第 2 項の時間変化率を取り出すと

$$f_{\lambda}^{\text{adv}} = \frac{\bar{U}}{R_E \cos \varphi} \quad (\varphi \neq \pm 90^\circ) \quad (2.5a)$$

$$f_{\varphi}^{\text{adv}} = \frac{\bar{V}}{R_E} \quad (2.5b)$$

$$f_z^{\text{adv}} = \bar{W} \quad (2.5c)$$

となる (例えば、Takasugi and Nakamura, 1988)。

球面三角形

水平輸送経路の地球の曲率を考慮する場合は、GATM (Iwasaki *et al.*, 1998) をはじめ実装されていた、球面三角法を用いる。すなわち Figure 2.2 において、水平風ベクトル $\bar{U}_h = (\bar{U}, \bar{V})$ がタイムステップ Δt になす大円弧を一边とする球面三角形 PSD に、球面三角法 (例えば、森口・他, 1957; 多田, 1997; 河瀬, 2019) を適用して、

⁶慣用では移流過程と呼ばれる。

⁷別名では降下過程と呼ばれる。

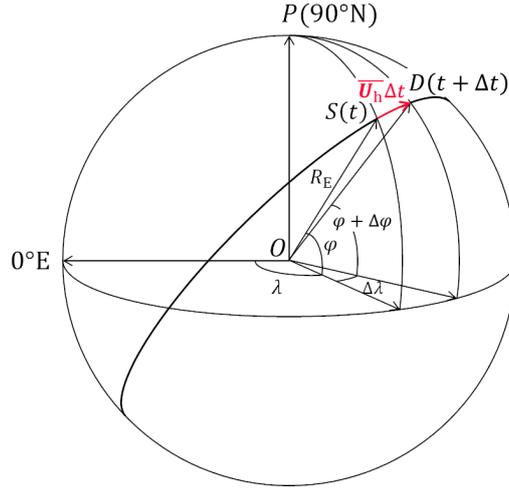


Figure 2.2 Advection sphere. $S(t, \lambda, \varphi)$, $D(t + \Delta t, \lambda + \Delta \lambda, \varphi + \Delta \varphi)$ are the tracer points before/after transport by horizontal wind \overline{U}_h within a time step Δt and R_E is the Earth radius.

$$f_{\lambda}^{\text{hadv}} = \frac{\angle DPS}{\Delta t} \quad (2.6a)$$

$$f_{\varphi}^{\text{hadv}} = \frac{(\angle R - \angle POD) - \varphi}{\Delta t} \quad (2.6b)$$

ただし $\angle R$ は直角を表し、 $\angle DPS$ と $\angle POD$ はそれぞれ正弦定理と余弦定理から

$$\begin{aligned} \sin \angle DPS &= \sin \angle SOD \frac{\sin \angle PSD}{\sin \angle POD} \\ &= \sin \left(\frac{|\overline{U}_h| \Delta t}{R_E} \right) \frac{\overline{U}}{|\overline{U}_h|} \sin \angle POD \end{aligned} \quad (2.7a)$$

$$\begin{aligned} \cos \angle POD &= \cos \angle POS \cos \angle SOD + \sin \angle POS \sin \angle SOD \cos \angle PSD \\ &= \cos (\angle R - \varphi) \cos \left(\frac{|\overline{U}_h| \Delta t}{R_E} \right) + \sin (\angle R - \varphi) \sin \left(\frac{|\overline{U}_h| \Delta t}{R_E} \right) \frac{\overline{V}}{|\overline{U}_h|} \\ &= \sin \varphi \cos \left(\frac{|\overline{U}_h| \Delta t}{R_E} \right) + \cos \varphi \sin \left(\frac{|\overline{U}_h| \Delta t}{R_E} \right) \frac{\overline{V}}{|\overline{U}_h|} \end{aligned} \quad (2.7b)$$

で求める⁸。

ATM の輸送過程の計算方法は Table D.11 で切り替える。輸送過程の単体試験の比較を Figure 2.3 に示す。タイムステップが短い極限では (2.5a), (2.5b) 式と (2.6a), (2.6b) 式は一致するが、タイムステップが長くなるとこれらの時間変化率の計算法よりも時間積分法 (第 2.3.1 項) の違いの方が予測精度に与える効果が大きくなると考えられる。

2.2.2 拡散過程

拡散過程は、ATM では水平拡散と鉛直拡散に分け、トレーサーの放出時間を考慮する水平拡散係数は ATM 本体で計算し、大気場から診断している鉛直拡散係数は前処理 GPV を使用する。

⁸ $|\overline{U}_h| \Delta t / R_E \ll 1$ ならば、 $\sin \angle DPS \approx \overline{U} \Delta t / R_E \sin \angle POD$, $\cos \angle POD \approx \sin \varphi + \overline{V} \Delta t \cos \varphi / R_E$.

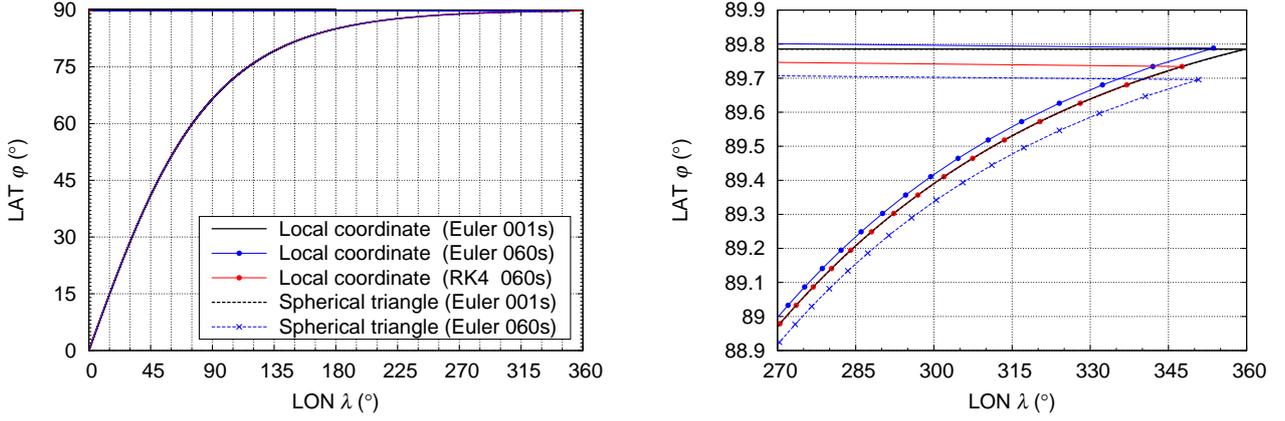


Figure 2.3 Comparison of horizontal advection. Single tracer trajectory by the ATM calculation with only horizontal advection process. Input GPV is ideal of $U = 100$ m/s and $V = 100$ m/s uniformly. Emission point is 0°N , 0°E . Solid and dotted trajectories are calculated by Equations (2.5) and (2.6), respectively. Right figure shows an enlarged near high latitude of the left one. Plots are at each time step of $\Delta t = 60$ s by Euler or Runge-Kutta (RK4) method ($\Delta t = 1$ s are as references).

(1) 水平拡散

拡散方程式

水平拡散の時間変化率 f_λ^{hdif} , f_ϕ^{hdif} は、(2.4a), (2.4b) 式の右辺第 3 項に表されているとおり、水平風速のゆらぎから与えられる。最も簡明なゆらぎの表現は、水平拡散係数を K_h とする拡散方程式との類比⁹から、

$$U' = \sqrt{\frac{2K_h}{\Delta t}}\Gamma, \quad V' = \sqrt{\frac{2K_h}{\Delta t}}\Gamma \quad (2.8)$$

で与えられる (例えば、Iwasaki *et al.*, 1998)。ここで Γ は平均 0、標準偏差 1 の正規乱数 (付録 G) である。しかし上式には、物質が放出されてからの経過時間 t に関する情報が含まれていない。

ランジュバン方程式

そこで (2.8) 式に代わり、RATM (Kawai, 2002) をはじめ実装されていたように、ランジュバン方程式 (Gifford, 1982, 1984) に基づき、風速ゆらぎは自己相関をもつ成分とランダムな成分の和

$$U'(t) = R_{U'}(\Delta t)U'(t - \Delta t) + \sqrt{1 - R_{U'}(\Delta t)^2} \sigma_{U'}\Gamma \quad (2.9a)$$

$$V'(t) = R_{V'}(\Delta t)V'(t - \Delta t) + \sqrt{1 - R_{V'}(\Delta t)^2} \sigma_{V'}\Gamma \quad (2.9b)$$

ただし

$$U'(0) = U'_0\Gamma, \quad V'(0) = V'_0\Gamma$$

で与える。ここで U'_0, V'_0 は放出時点の風速ゆらぎの大きさ、 U', V' の自己相関係数 $R_{U'}, R_{V'}$ は緩和時間 (ラグランジュの時間スケール) を t_{Lh} とし、

$$R_{U'}(\Delta t) = R_{V'}(\Delta t) = e^{-\Delta t/t_{Lh}} \quad (2.10)$$

それらの標準偏差は

$$\sigma_{U'} = \sigma_{V'} = \sqrt{\frac{K_h}{t_{Lh}}} \quad (2.11)$$

⁹フィック型拡散と呼ばれる。

である（例えば、Uliasz, 1990; Baumann and Schlager, 2012）。

$f_{\lambda}^{\text{hdif}}, f_{\varphi}^{\text{hdif}}$ は、(2.5a), (2.5b) 式または (2.6a), (2.6b) 式において、 \bar{U}, \bar{V} の代わりに (2.8) 式または (2.9) 式による \bar{U}', \bar{V}' を代入して求める。

ATM の水平拡散の計算方法は Table D.3 で設定する。水平拡散の単体試験の比較を Figures 2.4, 2.5 に示す¹⁰。 K_h の設定値によっては、(2.9) 式による水平拡散は、特に放出直後の広がりが抑えられる。

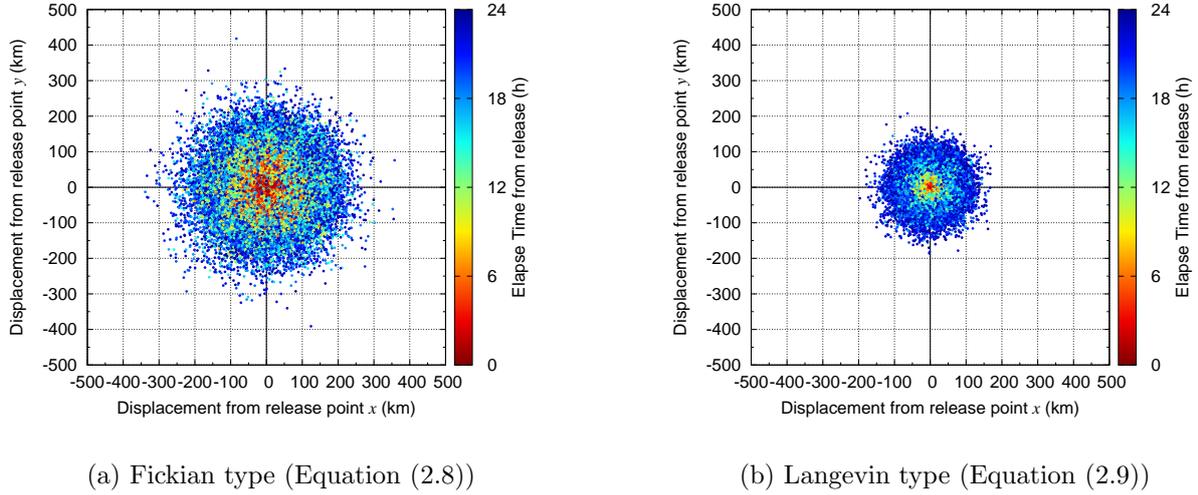


Figure 2.4 Comparison of horizontal diffusion (continuous emission). Tracer plots at FT = 24 h by the ATM calculation with only horizontal diffusion process of $\Delta t = 60$ s. Tracer positions are transformed from (λ, φ) to (x, y) on the plane rectangular coordinates (Kawase, 2011). All tracers are emitted continuously from the origin and emission rate is 1 tracer/s. Horizontal diffusion parameters are given $K_h = 5.0 \times 10^4$ m²/s, $t_{Lh} = 5.0 \times 10^4$ s and $U'_0 = V'_0 = 0$ m/s, as an example.

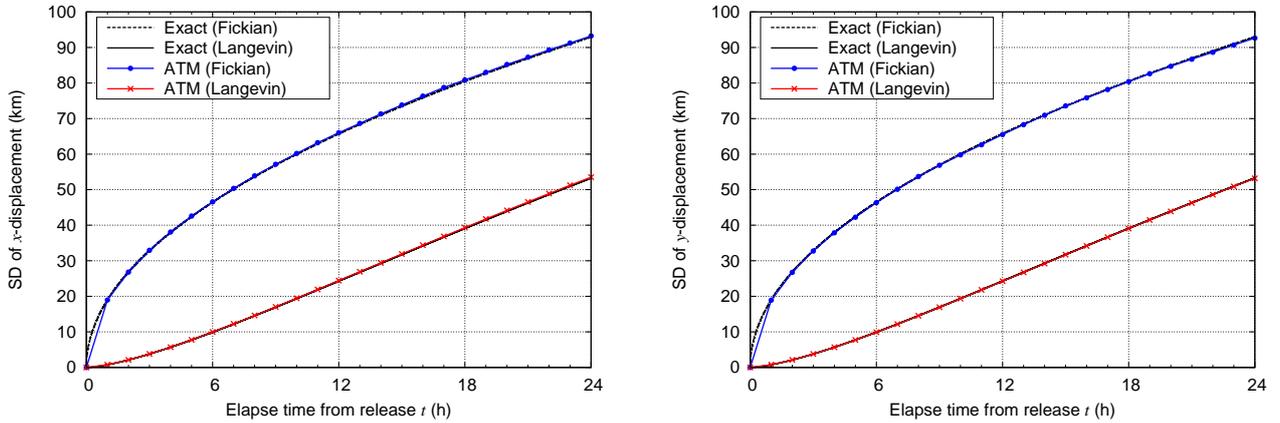


Figure 2.5 Comparison of horizontal diffusion (instantaneous emission). Standard deviation of tracer displacement of x - and y -direction by the ATM calculation with only horizontal diffusion process of $\Delta t = 60$ s. All tracers are emitted instantaneously at FT=0. Horizontal diffusion parameters are same as Figure 2.4. Black lines are exact solutions, blue and red lines are the ATM solutions by Equations (2.8) and (2.9), respectively.

¹⁰(2.8), (2.9) 式によるトレーサー変位の分散の厳密解はそれぞれ $\sigma_{x'}(t)^2 = 2K_h t$, $\sigma_{x'}(t)^2 = 2K_h t + (U'_0 t_{Lh})^2(1 - e^{-t/t_{Lh}})^2[1 - (K_h/U'_0{}^2 t_{Lh})(3 - e^{-t/t_{Lh}})/(1 - e^{-t/t_{Lh}})]$ ($\sigma_{y'}$ についても同様) で与えられる (Gifford, 1982)。

(2) 鉛直拡散

鉛直拡散の時間変化率 f_z^{vdif} は、(2.4c) 式の右辺第 3 項に表されているとおり、鉛直風速のゆらぎから与えられる。ゆらぎの表現は、前処理 GPV (第 4.1.6 項) の鉛直拡散係数 K_v を使用して、次式で与える。

$$f_z^{\text{vdif}} = W' = \frac{\sum' \sqrt{2K_v \Delta t' \Gamma'}}{\Delta t} \quad (\Delta t = \sum' \Delta t') \quad (2.12)$$

ただし $\Delta t' (\leq \Delta t)$ は、鉛直拡散による変位が過度に大きくならないようにするためのタイムステップの上限値であり (Iwasaki *et al.*, 1998)、Table D.3 で設定する。(2.12) 式の \sum' 内は (2.8) 式と同型である。

拡散過程の時間変化率 f_λ^{hdif} , f_φ^{hdif} , f_z^{vdif} はいずれの表式を用いてもタイムステップ依存性があることに注意する。

2.2.3 重力落下過程

重力落下過程の時間変化率は、第 2.1 節の仮定 (ii) の下、(2.4c) 式の右辺第 4 項に表されているとおり、トレーサーの終端速度から与えられる。

$$f_z^{\text{fall}} = -w_t \quad (2.13)$$

終端速度は、重力と浮力、空気抵抗のつり合いから

$$w_t(D, z) = \sqrt{\frac{4C_C (\rho_p - \rho_a) g D}{3C_a \rho_a}} \quad (g: \text{重力加速度}) \quad (2.14)$$

と書ける (例えば、Seinfeld and Pandis, 2016)。ここで D はトレーサーの粒径、 $\rho_p(D)$ はトレーサーのみかけ密度、 $\rho_a(z)$ は空気密度、 C_a は抵抗係数、 C_C はカニングガム補正係数である¹¹。 D と ρ_p の分布は初期値 (第 3 章) で与え、 ρ_a は前処理 GPV (第 4.1.5 項) を使用する。 C_a は、トレーサーに働く空気抵抗はトレーサーの物性に依拠して変化するため、ストークスと鈴木抵抗係数を導入している。

ストークスの抵抗係数

レイノルズ数 $\text{Re} \equiv wD/\nu_a$ ($\nu_a \equiv \eta_a/\rho_a$: 運動粘性率, η_a : 空気粘性率) が低い層流領域での球形トレーサーに対する空気抵抗は、ストークスの抵抗係数

$$C_a = \frac{24}{\text{Re}} \quad (2.15)$$

で与えられる。

鈴木抵抗係数

(2.15) 式を高レイノルズ数の乱流領域にある非球形トレーサーに拡張した空気抵抗として、火山灰を対象とした Suzuki (1983) の抵抗係数

$$C_a = \frac{24}{\text{Re}} F^{-0.32} + 2\sqrt{1.07 - F} \quad (2.16)$$

ただし F は Wilson and Huang (1979) の形状因子

$$F \equiv \frac{a_2 + a_3}{2a_1} \quad (a_1: \text{長軸}, a_2: \text{中軸}, a_3: \text{短軸の径}) \quad (2.17)$$

¹¹GATM, RATM では、(2.14) 式の分子において、重力と比べて浮力は無視できるとして $\rho_p - \rho_a \approx \rho_p$ と近似していた。また RATM では以前、 C_C は後出の C_a の表式において、その補正が有効となる (2.15) 式および (2.16) 式の右辺第 1 項のみに適用していた。

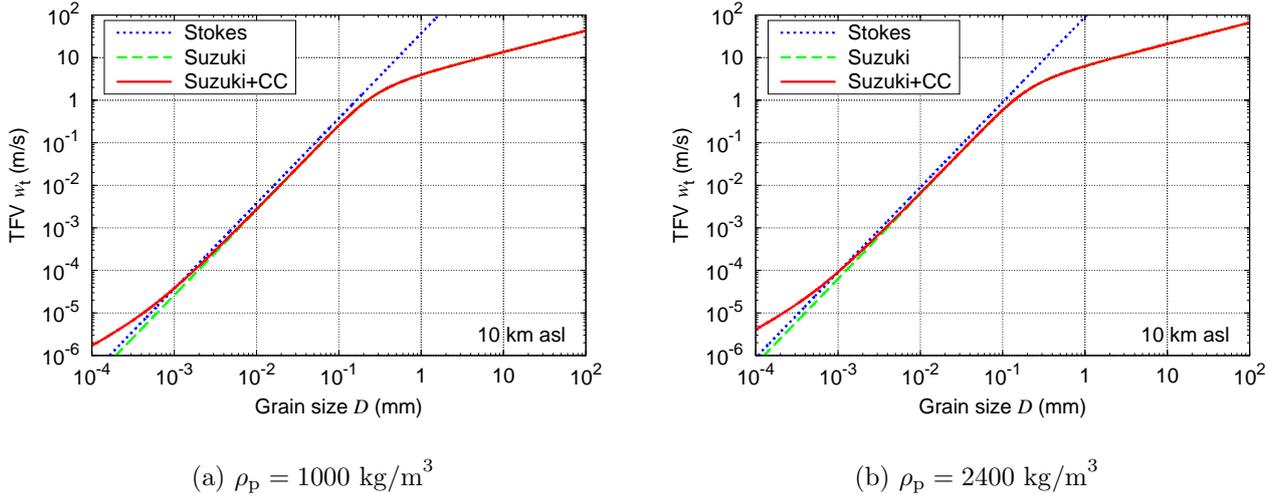


Figure 2.6 Comparison of terminal velocities in gravitational fallout process. All tracers are distributed at 10 km asl and input GPV is given by standard atmosphere (NOAA *et al.*, 1976). Blue dotted lines are Stokes' law, green dashed lines are Suzuki's law and red solid lines are Suzuki's law with Cunningham correction. Form factor of all tracers is set to $F = 1/3$ for Suzuki's law. (After Shimbori, 2016)

である（例えば、Folch, 2012; Bagheri and Bonadonna, 2016）。

また C_C は、クヌーセン数 $\text{Kn} \equiv 2\text{MFP}/D$ (MFP: 空気分子の平均自由行程) が $\gtrsim 1$ となる小さなトレーサーに対して必要なスリップ補正係数で

$$C_C = 1 + \text{Kn} \left[a + b \exp\left(-\frac{c}{\text{Kn}}\right) \right] \quad (a = 1.257, b = 0.400, c = 1.100) \quad (2.18)$$

で与えられる（例えば、水野, 2000; Seinfeld and Pandis, 2016）。

レイノルズ数を求めるのに必要な空気粘性率は、前処理 GPV（第 4.1.4 項）の気温 T を用いて

$$\eta_a(z) = \eta_0 \left[\frac{1 + C_S/T_0}{1 + C_S/T(z)} \right] \left[\frac{T(z)}{T_0} \right]^{1/2} \quad (C_S = 117 \text{ K: 空気に対するサザランド定数}) \quad (2.19)$$

クヌーセン数を求めるのに必要な MFP は、さらに前処理 GPV（第 4.1.3 項）の気圧 p を用いて

$$\text{MFP}(z) = \text{MFP}_0 \frac{\eta_a(z)}{\eta_0} \left[\frac{p(z)}{p_0} \right]^{-1} \left[\frac{T(z)}{T_0} \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

で算出する。ここで基準となる粘性率および MFP は標準空気 ($p_0 = 1013.25 \text{ hPa}$, $T_0 = 293.15 \text{ K}$) のときの値 $\eta_0 = 18.18 \text{ } \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\text{MFP}_0 = 0.0662 \text{ } \mu\text{m}$ を取っている（水野, 2000）。

ATM の重力落下過程における定数係数は Table C.3、計算方法は Table D.12 で設定する。重力落下の単体試験の比較を Figure 2.6 に示す。終端速度は、Figure 2.6 に図示したトレーサーの粒径や密度依存性のほか、トレーサーの形状や大気場の高度などに依存する。

2.2.4 乾性沈着過程

乾性沈着過程は、トレーサーの地表面からの高さを z' ($\equiv z - z_s$; z_s : トレーサー直下点のモデル標高)、接地層の厚さを L_r として、接地層内にあるトレーサーを対象とする。このうち、地表面へ付着するトレーサーを沈着確率

$$P_d = \begin{cases} \frac{V_d \Delta t}{L_r} & (z' \leq L_r) \\ 0 & (z' > L_r) \end{cases} \quad (2.21)$$

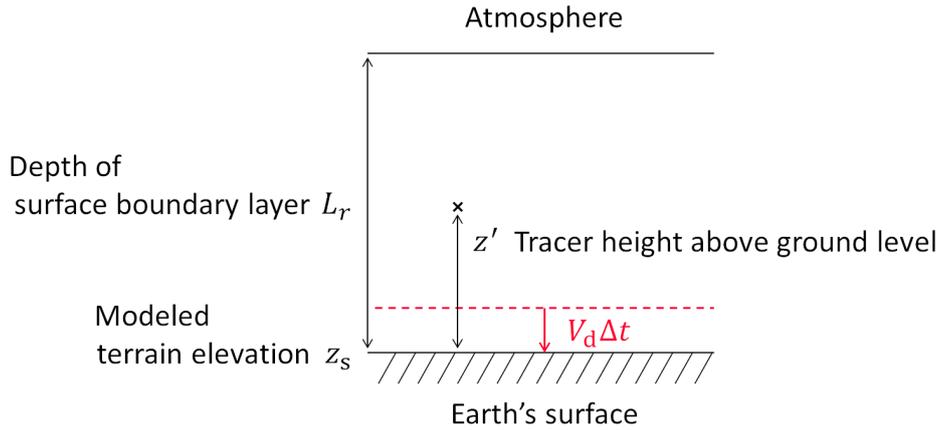


Figure 2.7 Dry deposition probability in a surface boundary layer (after Okita-Kitada, 1987)

により確率的に計算する（例えば、佐藤・他, 1995; Iwasaki *et al.*, 1998）。沈着速度 V_d は、空気力学的抵抗（第 4.1.7 項 (2)）のみを考慮する。

$$V_d = \frac{1}{r_a} \quad (2.22)$$

ATM の乾性沈着の計算方法は、 L_r は Table D.4 で設定し、 z_s は前処理 GPV（第 4.1.1 項 (2)）を空間内挿して z' を求める。そして $z' \leq L_r$ にあるトレーサーに対して $[0, 1]$ の一様乱数を付与し、(2.21) 式の確率未満のトレーサーが乾性沈着したとする（Figure 2.7）。

この定式化により乾性沈着するトレーサーの時間変化率は

$$f_z^{\text{ddep}} = -\frac{z'}{\Delta t} \quad (2.23)$$

で与えられる。

2.2.5 湿性沈着過程

湿性沈着過程は、雲底下洗浄（ウォッシュアウト）と雲内洗浄（レインアウト）に分けて計算する。

(1) 雲底下洗浄（ウォッシュアウト）

ウォッシュアウトは、雲がある場合に雲底の高さ L_b の下にあるトレーサーを対象とする。降水の形態（ $\alpha = r$ (雨), s (雪), g (霰)) ごとの沈着確率

$$P_{w(\alpha)} = \begin{cases} 1 - e^{-\Lambda_{w(\alpha)} \Delta t} & (z' < L_b) \\ 0 & (z' \geq L_b) \end{cases} \quad (2.24)$$

により確率的に計算し¹²、トレーサー直下地点へ沈着させる。(2.24) 式で沈着率を表す洗浄係数 $\Lambda_{w(\alpha)}$ は

$$\Lambda_{w(\alpha)} = A_\alpha R_\alpha^{B_\alpha} \quad (2.25)$$

の形で与える（北田, 1994）。ここで R_α [mm/h] は雨、雪、霰それぞれの降水強度であり、 A_α , B_α は各形態の降水粒子によるトレーサーの捕集効率に関する係数である（例えば、Sportisse, 2007）。ただし、その地点の降水強度がしきい値 $R_{\alpha t}$ 以上になった場合は強制的にウォッシュアウトする。

¹²トレーサーの大気中濃度 c の湿性沈着による時間変化 $\partial c / \partial t = -\Lambda_w c$ のラグランジュ表現（ α は省略）。GATM, RATM では以前、 $P_w \approx 1 - (1 - \Lambda_w) \Delta t \approx \Lambda_w \Delta t$ を用いていた。

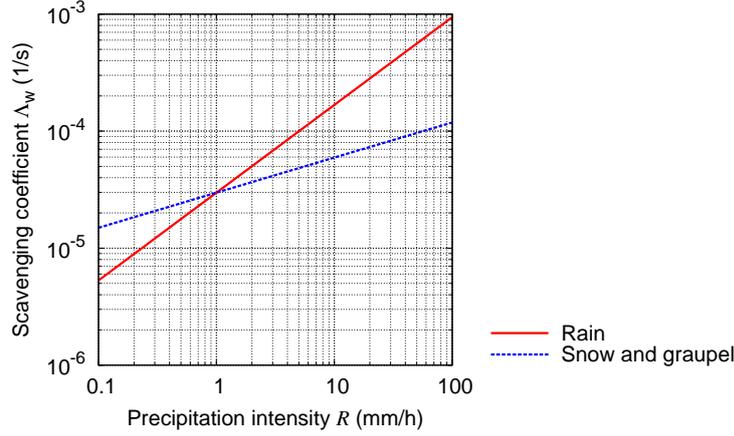


Figure 2.8 Below-cloud scavenging coefficients for rain (red solid line) and snow and graupel (blue dotted line). In this example, $A_r = A_s = A_g = 2.98 \times 10^{-5}$ (1/s), $B_r = 0.75$ and $B_s = B_g = 0.30$ in Equation (2.25). (After Saito *et al.*, 2015a)

ATM のウォッシュアウトの計算方法は、 L_b は第 4.1.8 項 (2)、 R_α は第 4.1.9 項の時間平均した前処理 GPV を使用し、 A_α , B_α 係数および $R_{\alpha t}$ は Table D.13 で設定する。洗浄係数と降水強度の関係を Figure 2.8 に示す。

この定式化によりウォッシュアウトするトレーサーの時間変化率は、(2.23) 式と同様に

$$f_z^{\text{wout}(\alpha)} = -\frac{z'}{\Delta t} \quad (2.26)$$

で与えられる。

(2) 雲内洗浄 (レインアウト)

レインアウトも、雲がある場合に雲頂の高さ L_t と L_b の内にあるトレーサーを対象とする。(2.24) 式と同様に

$$P_r = \begin{cases} 1 - e^{-\Lambda_r \Delta t} & (L_b \leq z' < L_t) \\ 0 & (z' < L_b, L_t \leq z') \end{cases} \quad (2.27)$$

により確率的に計算し、トレーサー直下地点へ沈着させている。洗浄係数 Λ_r は

$$\Lambda_r = S_r \frac{R}{Z} \quad (R \equiv R_r + R_s + R_g, Z \equiv L_t - L_b) \quad (2.28)$$

の形で与える (大喜多, 1987)。ここで R は全降水強度、 Z は雲の厚さ¹³であり、トレーサーの降水中濃度と大気中濃度の比を表す洗浄比 S_r はトレーサーの形態 (沈着性ガス、粒子) に応じて、Hertel *et al.* (1995) により以下のように与える。

沈着性ガスの洗浄比

沈着性ガスの洗浄比は、雲水量を CWC [m^3/m^3]、沈着性ガスのヘンリー定数を H として、次式で与える。

$$S_r = \frac{1}{(1 - CWC)/HR^*T + CWC} \quad (R^* = 8.31 \text{ J/mol.K}) \quad (2.29)$$

粒子の洗浄比

粒子の洗浄比は、トレーサーが雲粒子になる割合を表す活性度を f_{nuc} として、次式で与える。

$$S_r = \frac{f_{\text{nuc}}}{CWC} \quad (2.30)$$

¹³RATM では以前、雲の高さを使用していた。

ATM のレインアウトの計算方法は、 L_t や CWC は T , L_b , R_α などと同様に前処理 GPV (第 4.1.8 項) を使用し、トレーサーの形態の切替および H , f_{nuc} は Table D.13 で設定する。

この定式化によりレインアウトするトレーサーの時間変化率もまた、(2.26) 式と同様に

$$f_z^{rout} = -\frac{z'}{\Delta t} \quad (2.31)$$

で与えられる。

2.2.6 崩壊過程

GATM および RATM に導入されていた崩壊過程は、重力落下や乾性、湿性沈着などにより地表面に付着した分も含む全トレーサーを対象とし、1 タイムステップの間に崩壊してなくなる割合

$$\begin{aligned} P_n &= 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\Delta t/T_{1/2}} \\ &= 1 - e^{-\Lambda_n \Delta t} \quad \left(\Lambda_n \equiv \frac{\ln 2}{T_{1/2}}\right) \end{aligned} \quad (2.32)$$

により確率的に計算する。ただし $T_{1/2}$ はトレーサーの半減期であり、ATM では Table D.14 で設定する。湿性沈着の沈着確率 (2.24), (2.27) 式と (2.32) 式は同じ関数形である (Figure 2.9)。

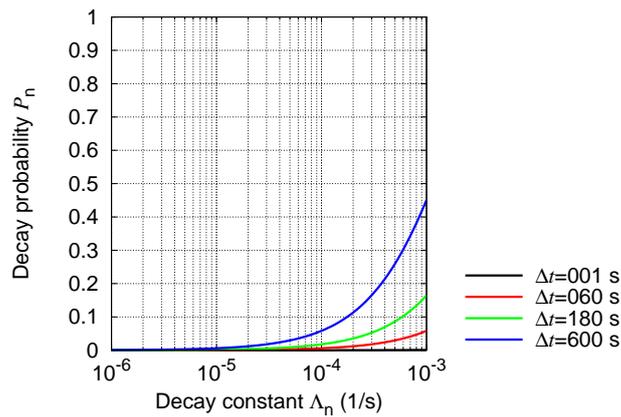


Figure 2.9 Decay probability (Δt is a time step). If a scavenging coefficient is given instead of Λ_n , P_n gives a deposition probability.

崩壊したトレーサーは計算対象から除外されるため、崩壊過程の時間変化率は考えない。

2.3 時間積分

本節では、前節で求めた時間変化率から時間積分する方法と、時間積分した後の処理について述べる。

2.3.1 時間積分法

ATM の時間積分法は、GATM や RATM など多くの移流拡散モデルで使われている前方差分 (オイラー法) とルンゲ・クッタ法を実装している。同じタイムステップで比較したとき、オイラー法は 1 次精度であるが高速なのに対し、ルンゲ・クッタ法は段階 (ステージ) 数は増えるが高精度であるため、予測する対象や予報の性質に応じて選択する。

(1) オイラー法

トレーサーの次のタイムステップの位置を、過程 k における i 成分の時間変化率 f_i^k から

$$\phi_i(t + \Delta t) = \phi_i(t) + \sum_k f_i^k(t, \phi_i(t)) \Delta t \quad (2.33)$$

により時間積分して求める。各成分をあらわに書くと、

$$\lambda(t + \Delta t) = \lambda(t) + \left(f_\lambda^{\text{hadv}} + f_\lambda^{\text{hdif}} \right) \Delta t \quad (2.34a)$$

$$\varphi(t + \Delta t) = \varphi(t) + \left(f_\varphi^{\text{hadv}} + f_\varphi^{\text{hdif}} \right) \Delta t \quad (2.34b)$$

$$z(t + \Delta t) = z(t) + \left(f_z^{\text{vadv}} + f_z^{\text{vdif}} + f_z^{\text{fall}} + f_z^{\text{depp}} + \sum_{\alpha=r,s,g} f_z^{\text{wout}(\alpha)} + f_z^{\text{rout}} \right) \Delta t \quad (2.34c)$$

である。最も基本的な時間積分法であり、(2.4) 式右辺の Δt の 1 次までに対応する。

(2) ルンゲ・クッタ法

一般的な 4 段階の場合、

$$\phi_i(t + \Delta t) = \phi_i(t) + \sum_k \sum_{s=1}^4 b_s d_i^{k(s)} \Delta t \quad (2.35)$$

で時間積分する。ただし補助増分 (s 回目の仮積分値) $d_i^{k(s)}$ は

$$d_i^{k(s)}(t) = f_i^k \left(t + c_s \Delta t, \phi_i(t) + \sum_{s'=1}^4 a_{ss'} d_i^{k(s')} \Delta t \right) \quad (2.36)$$

である。係数の取り方は任意性があるが、古典的なルンゲ・クッタ行列 $a_{ss'}$ 、重み b_s 、節 (ノード) c_s は

$$\begin{aligned} (b_1, b_2, b_3, b_4) &= \left(\frac{1}{6}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{6} \right), \\ (c_1, c_2, c_3, c_4) &= \left(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1 \right), \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$a_{21} = c_2, a_{32} = c_3, a_{43} = c_4, a_{ss'} = 0 \text{ (その他の場合)}$$

を取る。具体的に (2.37) 式を (2.35), (2.36) 式に代入すると

$$\phi_i(t + \Delta t) = \phi_i(t) + \frac{1}{6} \sum_k \left(d_i^{k(1)} + 2d_i^{k(2)} + 2d_i^{k(3)} + d_i^{k(4)} \right) \Delta t \quad (2.38)$$

ただし

$$d_i^{k(1)}(t) = f_i^k(t, \phi_i(t)) \quad (2.39a)$$

$$d_i^{k(2)}(t) = f_i^k \left(t + \frac{1}{2} \Delta t, \phi_i(t) + \frac{1}{2} d_i^{k(1)} \Delta t \right) \quad (2.39b)$$

$$d_i^{k(3)}(t) = f_i^k \left(t + \frac{1}{2} \Delta t, \phi_i(t) + \frac{1}{2} d_i^{k(2)} \Delta t \right) \quad (2.39c)$$

$$d_i^{k(4)}(t) = f_i^k \left(t + \Delta t, \phi_i(t) + d_i^{k(3)} \Delta t \right) \quad (2.39d)$$

となり、この時間積分法は Δt に関して 4 次精度がある (例えば、宮下, 2002)。この 1 回目の補助増分 $d_i^{k(1)}$ は、オイラー法 (2.33) 式の時間変化率と同じであることに注意する。

ATM の時間積分法の切替は Table D.11 で設定する。ルンゲ・クッタ法を選択した場合、輸送と重力落下過程を短いタイムステップによるルンゲ・クッタ法で時間積分する。時間変化率がタイムステップ依存性をもつ拡散過程と確

率的に計算する乾性、湿性沈着過程は常に長いタイムステップのオイラー法で時間積分する。演算順序は確率計算でトレーサーが ATM の計算対象外になる可能性がある過程を先に行う (付録 B.1)。またルンゲ・クッタ法による輸送、重力落下過程において、短いタイムステップの途中でトレーサーが ATM の計算領域外 (地表面降下も含む) に出た場合、(2.39a) 式のみを用いてオイラー法に切り替えて時間積分する。水平輸送と重力落下過程を結合してオイラー法とルンゲ・クッタ法を比較した結果を Figure 2.10 に示す。終端速度が数 10m/s 程度までのトレーサーを対象とする ATM 計算の場合、ルンゲ・クッタ法ではタイムステップを 180 秒程度に取ってもタイムステップ 1 秒のオイラー法と同じくらいの精度を保つことができる。

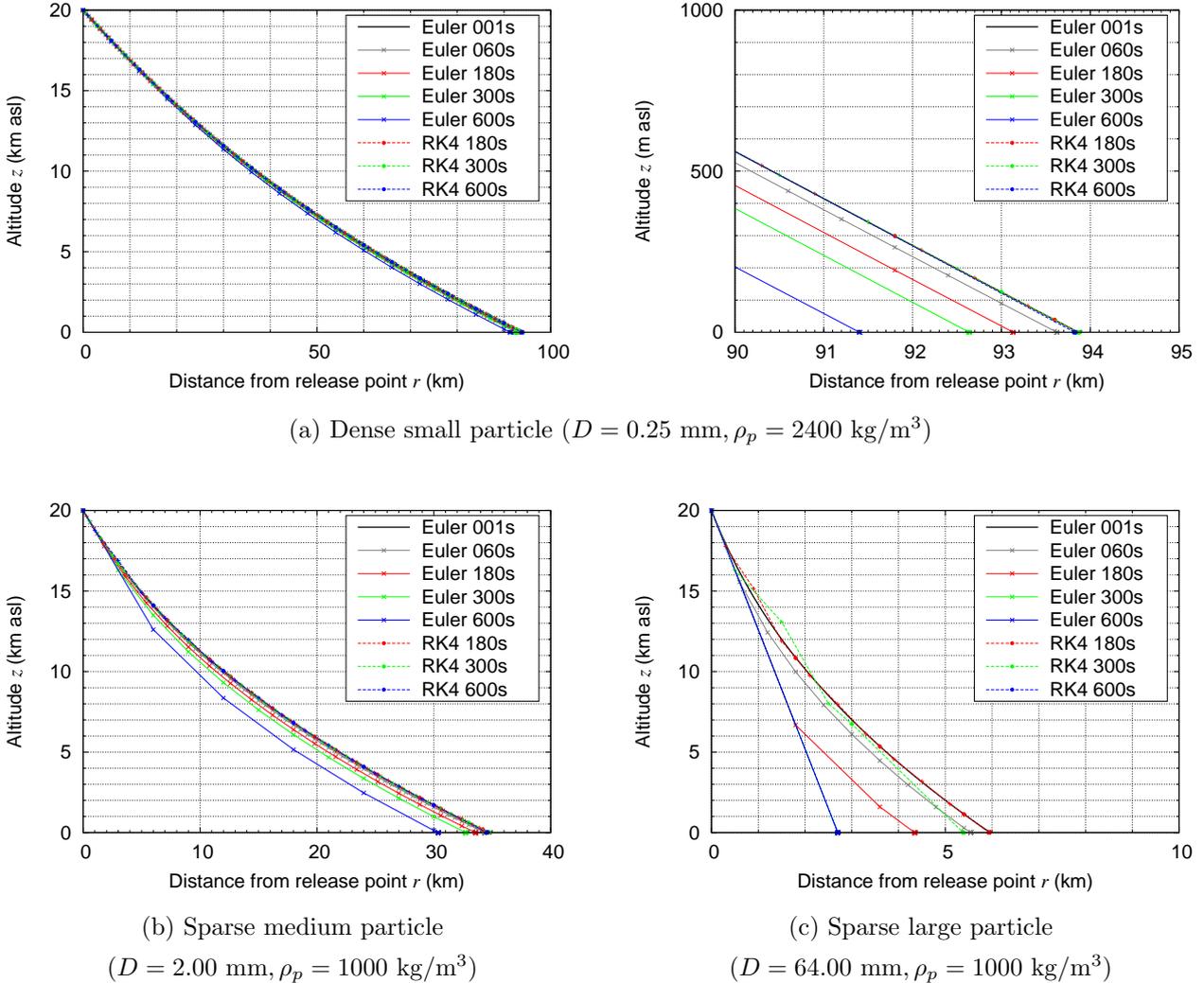


Figure 2.10 Comparison of time integral by Euler or Runge-Kutta (RK4) method with different time step Δt . Euler method with $\Delta t = 1 \text{ s}$ is as a reference. Single tracer trajectory by the ATM calculation with horizontal advection and gravitational fallout processes. Input GPV is given by standard atmosphere (NOAA *et al.*, 1976) combined with zonal wind $U = 10 \text{ m/s}$ uniformly. Single tracer is emitted from the altitude of 20 km asl. Terminal fall velocity of the tracer is according to Suzuki's law with fixed diameter D , density ρ_p and form factor $F = 1/3$ (Figure 2.6). The symbol \times or \bullet denote tracer point at each time step by Euler or RK4 method and $+$ denotes intermediate point of the temporal integral by RK4 method in Equation (2.38), i.e. horizontal distance from release point $r(t) + \sum_k d_r^{k(1)} \Delta t/6, r(t) + \sum_k (d_r^{k(1)} + 2d_r^{k(2)}) \Delta t/6, r(t) + \sum_k (d_r^{k(1)} + 2d_r^{k(2)} + 2d_r^{k(3)}) \Delta t/6$, where $k = \{\text{hadv, fall}\}$. Right figure of (a) shows enlarged near ground of the left one.

2.3.2 積分後処理

1 タイムステップの時間積分が終わった後、鉛直輸送・拡散または重力落下により、トレーサーの高度がモデル標高より低くなった場合は、Figure 2.11 に示すように、地表面へ降下または大気中へ反射のいずれかの調節を行う。

(1) 地表面降下に伴う引戻し

地表面へ降下させる場合は、1 タイムステップ Δt の間に進み過ぎたトレーサーの位置 (λ, φ, z) を地表面まで引き戻す調節を行う。時間積分前後のトレーサーの地表面からの高さ（深さ）をそれぞれ $z'(t), z''(t+\Delta t) \equiv -z'(t+\Delta t) > 0$ とし、この間のモデル標高は平坦と仮定して、

$$\lambda(t+\Delta t) \rightarrow \lambda(t+\Delta t) - \frac{z''(t+\Delta t)}{\Delta z} \Delta \lambda \quad (\Delta \lambda \equiv \lambda(t+\Delta t) - \lambda(t)) \quad (2.40a)$$

$$\varphi(t+\Delta t) \rightarrow \varphi(t+\Delta t) - \frac{z''(t+\Delta t)}{\Delta z} \Delta \varphi \quad (\Delta \varphi \equiv \varphi(t+\Delta t) - \varphi(t)) \quad (2.40b)$$

$$z(t+\Delta t) \rightarrow z_s \quad (\Delta z \equiv z'(t) + z''(t+\Delta t)) \quad (2.40c)$$

だけ引き戻して、計算を終了する。

(2) 地表面反射に伴う跳返り

地表面で反射させる場合は、RATM と同様に鏡面反射 (Iwasaki *et al.*, 1998) により、トレーサーを地表面で跳ね返らせる調節を行う。時間積分後のトレーサーの反射点の高度は

$$z(t+\Delta t) \rightarrow z(t+\Delta t) + 2z''(t+\Delta t) \quad (2.41)$$

として、計算を継続する。

ATM の地表面における降下または反射の調節は Table D.11 で設定する。

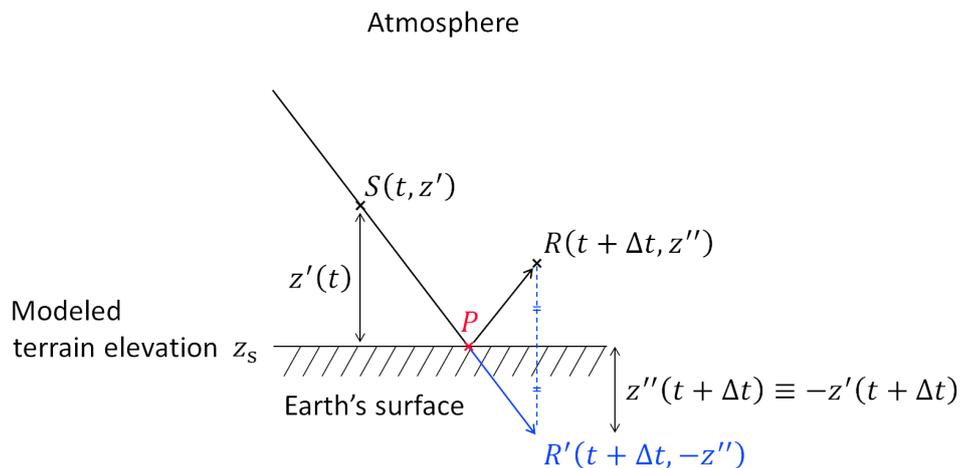


Figure 2.11 Fallout or reflection of tracer on a surface. $S(t, z')$, $R'(t+\Delta t, -z'')$ are the tracer points before/after time integration, $R(t+\Delta t, z'')$ is the mirror symmetric point of R' and $P(t+\Delta t, 0)$ is the pullback point on the surface.

2.4 空間内挿

本節では、ATM に入力する前処理 GPV をトレーサーの位置へ内挿する方法と、ATM 計算したトレーサーの物理量を出力格子へ内挿する方法、すなわち粒子・格子変換について述べる。

2.4.1 入力値の空間内挿法

第 2.2 節で述べた各過程の時間変化率を求めるには、第 4 章で述べる入力値の前処理 GPV をトレーサーの位置に内挿する必要がある。時間変化率を求める前後二時刻の GPV について時間内挿と空間内挿を行うが、前処理 GPV の格子点の位置は時間変化する場合がありますので（第 4.1.1 項 (2)）、先に前時刻と後時刻において、それぞれの予報時刻の GPV をトレーサーの位置に空間内挿する。その後、時間変化率を求める時刻への時間内挿を線形内挿¹⁴で行う。

空間内挿は、一般に数値予報 GPV の鉛直層厚に対する水平格子間隔の縦横比が大きいため、特に鉛直方向の内挿値の空間連続性を保つために、水平方向と鉛直方向を分けて内挿している。そこでまず、Figure 2.12 に示すように、トレーサーを囲む 8 格子点のうち、下面 4 点と上面 4 点の GPV（例えば、 $U_{k_{ij}}$ ）をトレーサーの水平位置に逆距離

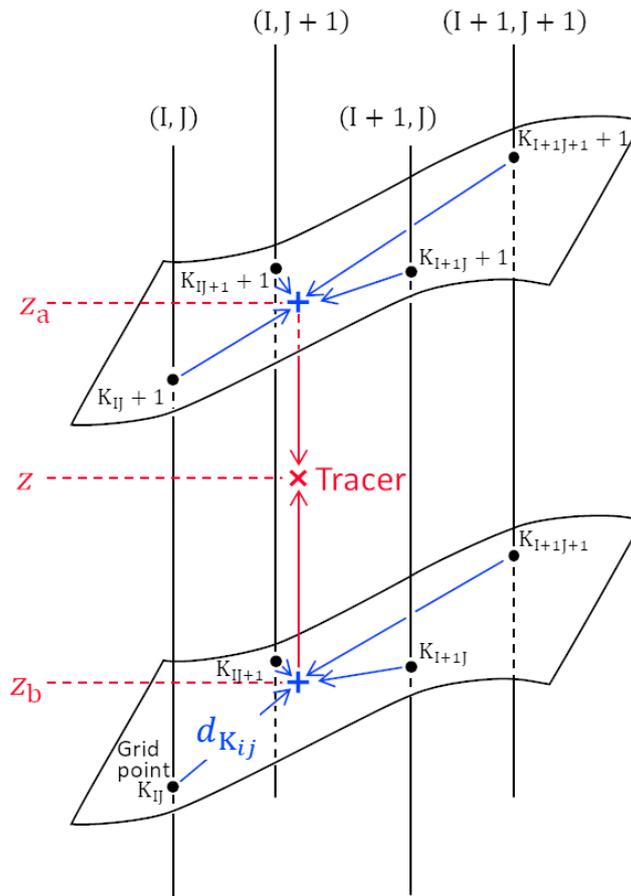


Figure 2.12 Space interpolation (GPV input). The symbol \times denotes tracer position, \bullet denote grid points surrounding the tracer, (I, J) , $(I, J+1)$, $(I+1, J)$, $(I+1, J+1)$ are horizontal grid numbers and K_{ij}, K_{ij+1} , ($i = I, I+1, j = J, J+1$) are vertical plane numbers of their points. z is tracer altitude, z_a and z_b are interpolation altitude above and below the tracer (the symbol $+$), respectively.

¹⁴(2.43) 式と同形で、 $z \rightarrow t$ (時間変化率を求めるトレーサーの時刻)、 $z_b, z_a \rightarrow t_b, t_a$ (t の前後の GPV の予報時刻)、 $\Delta Z \rightarrow t_a - t_b \equiv \Delta T_{\text{GPV}}$ (付録 B.2) と置換した式による内挿。

加重法

$$U_b = \frac{\sum_{i=I}^{I+1} \sum_{j=J}^{J+1} d_{K_{ij}}^{-p} U_{K_{ij}}}{\sum_{i=I}^{I+1} \sum_{j=J}^{J+1} d_{K_{ij}}^{-p}} \quad (2.42a)$$

$$U_a = \frac{\sum_{i=I}^{I+1} \sum_{j=J}^{J+1} d_{K_{ij+1}}^{-p} U_{K_{ij+1}}}{\sum_{i=I}^{I+1} \sum_{j=J}^{J+1} d_{K_{ij+1}}^{-p}} \quad (2.42b)$$

により 2 次元内挿する¹⁵。ここで $d_{k_{ij}}$ ($k_{ij} = K_{ij}, K_{ij} + 1$) は各格子点からトレーサーの水平位置までの距離であり、重み付ける指数は ATM では $p = 1$ を取っている¹⁶。また下面については、その格子点直下のモデル標高がトレーサーの高度 z より高い場合は内挿対象から除外する¹⁷。次いで、GPV の高度も同様に (2.42a), (2.42b) 式で内挿して下面・上面の高度 z_b, z_a を求め、トレーサーの高度へ線形内挿する：

$$u = \frac{z_a - z}{\Delta Z} U_b + \frac{z - z_b}{\Delta Z} U_a \quad (\Delta Z \equiv z_a - z_b) \quad (2.43)$$

2.4.2 出力値の空間内挿法

ATM はラグランジュモデルであるため、その計算結果を格子出力する場合は各トレーサーの物理量を粒子・格子変換する必要がある。これは、不規則に配置された多数のトレーサーから定点である格子点への内挿と見ることができ、ATM では以下に述べる方法で個々のトレーサーの物理量を格子点へ分配する。

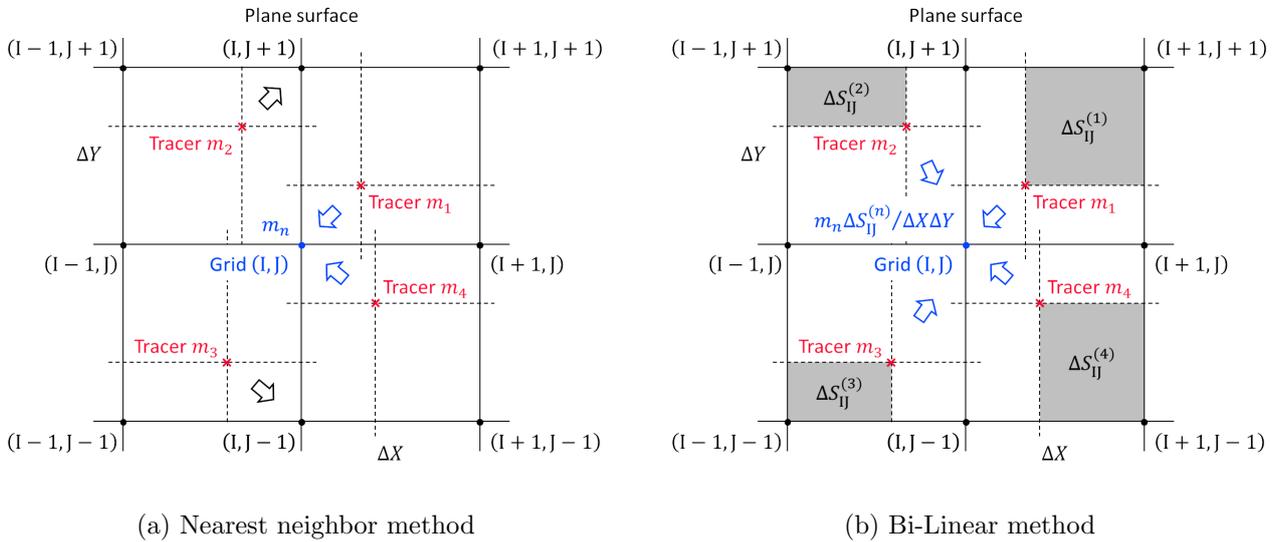


Figure 2.13 Space interpolation (ATM output). The symbol \times denote tracer positions, \bullet denote surface grid points including the tracers and (I, J) and $(I \pm 1, J \pm 1)$ are horizontal grid numbers. m_n is physical quantity of the tracer (number n), $\Delta S_{IJ}^{(n)}$ is partial grid area divided by the n -th tracer and $\Delta X, \Delta Y$ are horizontal grid spacing.

¹⁵ゼロ割回避として、 $d_{k_{ij}}$ が Table C.2 で設定するパラメータ `space_epsilon` より小さい場合は、トレーサー近傍の GPV のみ使用する（最近接内挿）。

¹⁶Table C.2 にあるパラメータ `idw` で固定している。

¹⁷4 格子点すべてのモデル標高がトレーサーの高度より高い場合は、トレーサーが地表面に付着したとして ATM の計算対象から除外されている。

(1) 最近接内挿

最近接内挿に相当する分配方法の場合、Figure 2.13 (a) に示すように、出力格子点 (I, J) の隣接 4 格子内に入ったトレーサーについて、各格子内の最近接格子点のみにトレーサーの物理量（例えば、 m_n ）を配分して、格子点出力値

$$M_{IJ} = \sum'_n m_n \tag{2.44}$$

を求める。ただし \sum' は (I, J) に最近接するトレーサーについてのみ和を取る。

(2) 共一次内挿

共一次内挿に相当する分配方法の場合、Figure 2.13 (b) に示すように、出力格子点の隣接 4 格子内に入ったトレーサーの物理量を面積比を重みとして分配して、

$$M_{IJ} = \sum_n \frac{\Delta S_{IJ}^{(n)}}{\Delta X \Delta Y} m_n \tag{2.45}$$

で求める。ここで、 $\Delta S_{IJ}^{(n)}$ は n 番目のトレーサーが (I, J) を頂点にもつ格子を分割する面積、 $\Delta X, \Delta Y$ は出力格子の水平格子間隔である。

ATM の格子出力の方法は Table D.15 で切り替える。3次元出力（例えば、濃度）の場合も、予め Table D.16 で指定した層厚に入ったトレーサーについて、その物理量を上述の方法で 2次元内挿して出力する。また、トレーサーのもつ物性（例えば、粒径）の最大値・最小値を出力する場合は、最近接内挿で出力する。

2.5 出力

ATM の計算結果は、粒子と格子で出力する。格子出力は粒子出力が元データになるが、ATM の出力時間間隔は通常、タイムステップより長く取るので、後処理では算出できない時間平均値などがあるため格子出力もしている。

ATM の出力時間間隔は Table D.15 で設定する。

2.5.1 粒子出力

粒子出力は、トレーサーの基本情報と放出源の基本情報をヘッダ出力した後、ATM 計算によるトレーサーの時間発展した状態を瞬時値としてバイナリ出力する。

ATM の計算可能時間・領域は、入力する GPV の有効な時間・領域と同じである。計算可能な時間・領域を超えたトレーサーは停止するが、粒子出力にはそのことを示すフラグとともに常時、全トレーサーの状態を出力する。

粒子出力の内容については、付録 F.1.2 を参照されたい。

2.5.2 格子出力

格子出力は、第 2.4.2 項の方法でトレーサー算出した格子点上の物理量を NuSDaS¹⁸出力する。出力格子の座標は NuSDaS 定義ファイル¹⁹および層厚は Table D.15 で設定する。また、出力値の瞬時値、平均値、積算値の切替は Table D.15 で指定する。

格子出力の要素については、付録 F.2.1 を参照されたい。

¹⁸NuSDaS については例えば、原 (2017a) およびマニュアル (豊田・他, 2019) を参照されたい。

¹⁹付録 A の `Atm/Const/Atm/Nusdef` に格納されている。

第 3 章 初期値

本章では、ATM の初期値について説明する。前述したとおり、移流拡散モデルでは、ある時刻 t の n 番目のトレーサーの位置 $\mathbf{r}_n(t)$ から、トレーサーの属性（粒径や密度など）とトレーサーの輸送に関する物理（移流や落下など）を用いて、時刻 $t + \Delta t$ の位置 $\mathbf{r}_n(t + \Delta t)$ を計算する。そのため、どのような属性のトレーサーが、どの位置から、いつ放出されるかといった初期値が必要となる。ATM の主な計算対象は火砕物の予測であることから、本章では、本供給源モデルの初期値の例として火山噴火時を想定した初期値の作成方法の詳細について説明する。火砕物以外の物質の輸送に関しては、対象の物質の性質や発生源の状況・特徴に応じて適切な初期値を用意する必要がある。

3.1 初期値の例：火砕物の供給源モデル

火山噴火時の噴煙柱から大気に供給される火砕物のプロファイルを計算するモデルをここでは「供給源（ESP）モデル」と呼ぶ¹。本供給源モデルでは、火山噴火時に発生する火砕物の予測を行う際には、主に Suzuki (1983)、鈴木 (1985) に基づいた供給源モデルを用いている。本節では、その供給源モデルについて説明を行う。ただし、本供給源モデルにはいくつかのオプションが用意されており²、オプションの選び方によっては、Suzuki (1983) や鈴木 (1985) とは異なる設定の初期値を作成することもできる³。

本供給源モデルでは、放出される粒径 $D \sim D + dD$ 、高度 $z \sim z + dz$ 、噴煙の中心軸からの水平距離 $r \sim r + dr$ と偏角 $\theta \sim \theta + d\theta$ 、放出される時間 $t \sim t + dt$ から、放出される質量 dM は確率密度 P を用いて次のように記述する。

$$dM(D, z, r, \theta, t) = MP(D, z, r, \theta, t)dDdzrdrd\theta dt \quad (3.1)$$

dM を各トレーサーで表現することで、ATM の初期値として利用することができる。ただし、噴煙柱から離脱する火砕物の質量の合計（総放出量）を M とした。全粒径、全高度、全水平位置（噴煙の中心軸からの半径方向の距離と偏角）、全時刻において、積分を実行すると

$$1 = \int P(D, z, r, \theta, t)dDdzrdrd\theta dt \quad (3.2)$$

となる。つまり、供給源モデルは、総噴出量 M を推定し、その M を各粒径、各高度、各水平位置、各時刻へどのように分配するかを表現するモデルである。

3.1.1 総噴出量

火山灰の定量的な予測のための初期値において、総噴出量は最も基本的なパラメータの一つである。総噴出量を直接測定することは困難であるため、得られた観測値から総噴出量を推定する式について説明する。

推定式については、現在の実装では下記のオプション（ベキ乗則）のみ選択可能である。

¹ 「噴煙柱モデル」または「噴煙モデル」などとも呼ばれる。しかし、Woods (1988) 以降、噴煙の力学（各種保存則など）の理解や周囲の大気場との相互作用を考慮した力学モデルの研究が進むにつれて、それらを「噴煙柱モデル」と呼びここで説明する「供給源モデル」と区別する傾向があるようである。なお、Folch (2012) では、移流拡散モデルの初期値を作成するモデルを“source term model”と表現している。

² オプションを表すスイッチ名とその値については、Table D.7 を参照。

³ 例えば、鈴木 (1985) では粒径は対数正規分布であるが、本供給源モデルでは一様な粒径分布も選択可能である。

(1) ベキ乗則 ($n_switch_calc_mass = 1$)

小屋口 (2008) のプリニー式噴火に対する次元解析によると、総噴出量は噴煙の到達高度の 4 乗と噴火継続時間に比例する。総噴出量 M は、噴煙柱の火口上の到達高度 H と噴火継続時間 T_M を用いて、次のように記述される。

$$M = K_M H^\gamma T_M \tag{3.3}$$

ただし、本供給源モデルでは、新堀・他 (2010) より $K_M = 193 \text{ kg/km}^4/\text{s}$, $\gamma = 4.0$ を標準の値としている⁴。

上記の関係式 (ベキ乗則と呼ばれる) は次元解析などの簡単な考察から導かれるものの、Sparks *et al.* (1997) や Mastin *et al.* (2009) で示される過去の噴火を集約した結果とよく一致する。Table 3.1 に他の文献も含めて係数をまとめておく。

Table 3.1 Coefficients in the power law for total mass estimation

References	K_M	γ
Sparks <i>et al.</i> (1997)	345	3.86
Mastin <i>et al.</i> (2009)	140	4.15
Shimbori <i>et al.</i> (2010)	193	4.00

3.1.2 粒径分布 (質量)

ここでいう粒径分布とは、粒径 $D \sim D + dD$ のトレーサーに総噴出量 M がどのように割り振られるか、を意味する⁵。すなわち、粒径分布を $M_D(D)$ と書くと、

$$M = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} M_D(D) dD \tag{3.4}$$

ただし、 D_{\min} と D_{\max} は粒径のカットオフである⁶。

火砕物の粒径分布については、多くの先行研究があるが、本供給源モデルでは次の 3 つのオプションが用意されている。

- (1) 単一粒径
- (2) 一様分布
- (3) 対数正規分布

それぞれのオプションについて以下で説明する。

なお、研究の分野では対数正規分布よりもベキ乗則を用いた粒径分布の方が一般的なようである⁷。理由は、ベキ乗則は火砕物の破碎のメカニズムに基づき導出されるからであろう (例えば、Turcotte, 1986)。しかし、Girault *et al.* (2014) にもあるように、適切にパラメータを選べばベキ分布か対数正規分布かの違いは小さくなく、むしろ、どのようなパラメータを使うかが重要である。パラメータとは対数正規分布では中央粒径と幾何標準偏差、カットオフ (最大粒径と最小粒径) であり、ベキ乗則では指数の係数とカットオフである。

ここで「火山灰粒子」と「トレーサー」は明確に区別していることに注意する。例えば、 10^8 kg の質量を粒径 1 mm の火山灰粒子で換算すると、火山灰粒子は $\approx 10^{14}$ 個のオーダーである (火山灰粒子を球形、密度 1000 kg/m^3 と仮定して概算した場合)。このような粒子数を直接計算することができないため、計算上の粒子 (トレーサー) に仮想的に質量を割り当てて計算する。つまり、多数の火山灰粒子を 1 個のトレーサーが代表している。

⁴この値は、新堀・他 (2010) より $K_M = 6.95 \times 10^5 \text{ kg/km}^4/\text{h}$ の単位を換算して少数第 1 位を四捨五入したもの。

⁵「粒径分布」というと、粒径 $D \sim D + dD$ の粒子の個数 $N(D)dD$ を指す場合もある。ここでは、 $D \sim D + dD$ の質量であることに注意する。

⁶VAA では $0.01 \text{ mm} \sim 0.1 \text{ mm}$ 、降灰予報では $0.65 \mu\text{m} \sim 96 \text{ mm}$ を用いている。

⁷例えば、Girault *et al.* (2014) の Table 1 には、過去の噴火事例について、ベキ乗則へあてはめた結果がまとめてある。

(1) 単一粒径 (n.switch.size.distribution = 0)

このオプションでは、ネームリストで与えた中央粒径の値が、全トレーサーの粒径に割り振られる。

(2) 一様分布 (n.switch.size.distribution = 1)

このオプションでは、粒径の対象区間 $D_{\min} \sim D_{\max}$ (D_{\max}, D_{\min} : 粒径のカットオフの上限と下限) において質量は ϕ スケールで等分配して割り振られる (なお、粒径 D を ϕ スケールで表すと、 $\phi = -\log_2 D/D_0$ である。ただし、 $D_0 = 1 \text{ mm}$ である。)。すなわち、 $D \sim D + dD$ に割り振られるの質量 $M_D(D)dD$ は、

$$M_D(D)dD = \frac{M}{(\ln D_{\max} - \ln D_{\min})} \frac{dD}{D} \quad (3.5)$$

これは、次のベキ乗則で $c = 3.0$ とした場合に等しい。

$$N(D \geq x) \propto x^{-c} \quad (3.6)$$

ここでは、 $N(D \geq x)$ は、粒径が x より大きい粒子数の合計である。なお、ベキ乗則の指数 c は噴火の事例によって異なるが、おおよそ $c=2.9 \sim 3.9$ 程度である (Kaminski and Jaupart, 1998)。

(3) 対数正規分布 (n.switch.size.distribution = 2)

本オプションでは、Suzuki (1983) が定式化で用いている対数正規分布を用いる。

粒径 $D \sim D + dD$ の火山灰粒子のもつ質量の合計 $M_D(D)dD$ は対数正規分布を仮定して、

$$M_D(D)dD = C \exp \left[-\frac{(\log_a D - \log_a D_m)^2}{2\sigma^2} \right] \frac{dD}{D \ln a} \quad (3.7)$$

ここで、 C は規格化定数、 D_m は中央粒径、 σ は幾何標準偏差⁸、 a は底を表す。なお、積分範囲が $-\infty \sim +\infty$ ならば、 $C = 1/\sqrt{2\pi\sigma^2}$ である。しかし、本供給源モデルでは、積分範囲はカットオフ (D_{\min} および D_{\max}) に依存する。

粒径 D のトレーサー 1 個の質量を $m(D)$ とすると、粒径 $D \sim D + dD$ のトレーサー数 $N(D)dD$ は

$$N(D)dD = \frac{C}{m(D)} \exp \left[-\frac{(\log_a D - \log_a D_m)^2}{2\sigma^2} \right] \frac{dD}{D \ln a} \quad (3.8)$$

本供給源モデルでは、各トレーサーが担う質量 (仮想質量⁹) $m(D)$ は、総噴出量 M を全トレーサーに等分配した量で定義する。すなわち、

$$m(D) = \frac{M}{N_t} \quad (3.9)$$

ただし、 N_t はトレーサー数である。したがって、本供給源モデルでは、粒径 $D \sim D + dD$ のトレーサー数 $N(D)dD$ は

$$N(D)dD = \frac{CN_t}{M} \exp \left[-\frac{(\log_a D - \log_a D_m)^2}{2\sigma^2} \right] \frac{dD}{D \ln a} \quad (3.10)$$

トレーサー数 N_t 、総噴出量 M は係数としてかかるだけなので、粒径分布に関するパラメータは、中央粒径 D_m と幾何分散 σ とカットオフ (D_{\max} および D_{\min}) である。

実装においては、中央粒径 D_m [m] に対して、 $\phi_m = \log_{10} D_m$ を中心とした標準偏差 σ の正規乱数 $N(\phi_m, \sigma)$ を用いて、 n 番目のトレーサーの粒径 D_n [m] は

$$D_n = 10^{N(\phi_m, \sigma)} \quad (3.11)$$

と計算される。ただし、粒径が対象区間内ならば採用し、区間外ならば不採用として計算を繰り返す (n ループ)¹⁰。

⁸ $\sigma \ll 1$ のときは、 σ の高次の項を無視すると、対数正規分布は正規分布に近似できる。

⁹粒径 $D \sim D + dD$ のトレーサーが $N(D)dD$ 個あるとすると、トレーサー 1 個は $3m(D)/4\pi D^3 \rho(D)N(D)$ 個の火砕物粒子を代表していると考えられる。

¹⁰そのためトレーサー数 N_t よりも十分に大きな繰返し回数を設定している。ある確率分布に従うサンプリングを作成する手法は、MCMC

3.1.3 密度

各トレーサーの密度 [kg/m³] は終端速度に大きく影響するため重要である。一般に、火砕物においては、粒径が小さいほど密度が大きくなる¹¹。本供給源モデルでは、次の 2 つのオプションが用意されている。

- (1) 一定値
- (2) 粒径に依存する場合

(1) 一定値 (n.switch_particle_density = 1)

本オプションでは、全粒径において設定ファイル (Table D.12) から与えた値を用いる。

(2) 粒径に依存する場合 (n.switch_particle_density = 2)

本オプションでは、新堀・他 (2010) に基づいて、粒径 D のトレーサーの密度 $\rho_p(D)$ を次のとおり定義する。

$$\rho_p(D) = \frac{\rho_{\min} + a\rho_{\max}D}{1 + aD} \quad (3.12)$$

ただし、 $a = 5000 / \text{m}$ 、小粒径極限の密度 $\rho_{\min} = 2400 \text{ kg/m}^3$ 、大粒径極限の密度 $\rho_{\max} = 1000 \text{ kg/m}^3$ である。なお、 ρ_{\min} および ρ_{\max} の値はデフォルト値であり、Table D.12 で設定する。

3.1.4 放出高度の分布

次にトレーサーの放出高度の分布を考える。放出高度の分布とは、どの粒径の粒子が、どの高度から放出されるか、を意味するものである。すなわち、粒径 $D \sim D + dD$ の粒子が、高度 $z \sim z + dz$ から放出される質量 $M_z(D, z)dDdz$ のことである。粒径 $D \sim D + dD$ の質量を $dM_D(D)$ と書いて、

$$M_z(D, z)dDdz = dM_D(D)P(D, z)dDdz \quad (3.13)$$

としたときの、確率分布 $P(D, z)$ を拡散比率と呼ぶ。 $M_D(D)$ の分布は前述したので、 $P(D, z)$ を決めることで、トレーサーの放出高度の分布が決まる。本供給源モデルでは、拡散比率 $P(D, z)$ の計算方法として、次の 2 つのオプションが用意されている。

- (1) 一様分布
- (2) Suzuki (1983) に基づく拡散比率

(1) 一様分布 (n.switch_shape_vertical = 1)

本オプションでは、どの粒径に対しても質量は火口から噴煙の到達高度 H にかけて、一様に分布する。実装では、0~1 の一様乱数 Γ を用いて、各トレーサーの高度 z_n は、

$$z_n = \Gamma H \quad (3.14)$$

と表される。

(Markov Chain Monte Carlo) 法が有名である (例えば、Aster *et al.*, 2013)。しかし、粒子数が少ない場合は、均等にばらつかない可能性もあり、動的に設定が変わる現業利用においては、実装にはそれなりの対処が必要と思われる。MCMC 法は、複雑な確率分布に対して汎用的で強力なツールだが、本供給源モデルのような単純な確率分布の場合は、本文にあるような方法で十分有効と考えられる。

¹¹例えば、Klawonn *et al.* (2014) では、 $\phi \leq -1$ では 1650 kg/m^3 、 $\phi \geq +2$ では 2600 kg/m^3 、 $-1 \leq \phi \leq +2$ は $\phi = -1$ と $\phi = +2$ の値を線形に内挿している。

(2) Suzuki (1983) に基づく拡散比率 (n_switch_shape_vertical = 2)

本オプションでは、Suzuki (1983) に基づき拡散比率を計算する。Suzuki (1983) は、拡散比率を粒径 D の粒子の終端速度を用いてパラメータ化した。ここでは、その実装について下記で説明する。

まず、高度 z における噴煙柱内部のガス流の上昇速度 $W(z)$ を次のように記述する。

$$W(z) = W(0) \left(1 - \frac{z}{H}\right)^\lambda \quad (3.15)$$

H は火口上からの噴煙の到達高度であり、 λ は 1 または 1/2 をとるとしているが運用では $\lambda = 1$ としている (新堀・他, 2010)。ただし、 $W(0)$ は火口における初速度で、次のように与える (勝井・村瀬, 1960)。

$$W(0) = W_0 \sqrt{\frac{H}{H_0}} \quad (3.16)$$

ここで、 H は火口上からの噴煙の到達高度、 $H_0 = 0.22$ m、 $W_0 = 1$ m/s である。

次に、高度 z における粒径 D の無次元化した上昇速度 $Y(D, z)$ を火口での終端速度 $w_t(D, 0)$ ¹² を基準に次のように定義する。

$$Y(D, z) = \beta \frac{W(z) - w_t(D, 0)}{w_t(D, 0)} \quad (3.17)$$

ここで、 β は離脱係数と呼ばれているパラメータで、予測に大きく影響する重要なパラメータである¹³。この $Y(D, z)$ を用いて、拡散比率 $P(D, z)$ を次のように定義する。

$$P(D, z) = AY(D, z) \exp[-Y(D, z)] \quad (3.18)$$

定数 A は規格化定数で、下記を満たすように決める¹⁴。

$$\int_0^H P(D, z) dz = 1 \quad (3.19)$$

放出量が最大となる高度 $Z_{\max}(D)$ は、 $dP(D, z)/dz = 0$ を解けばよい。

$$Z_{\max} = H \left[1 - (1 + \beta) \frac{w_t(D, 0)}{\beta W(0)} \right] \quad (3.20)$$

粒径が小さいほど噴煙柱の上部 (傘型部) からの放出が多くなる傾向がある。一方で、粒径が大きいほど、中部 (対流部) から下部 (スラスト部) にかけての放出が多くなる傾向がある。なお、Suzuki (1983) は $\beta \ll 1$ として、次のように近似した。

$$Z_{\max} = H \left[1 - \frac{w_t(D, 0)}{\beta W(0)} \right] \quad (3.21)$$

3.1.5 噴煙の形状

本項では、噴煙の形状について説明する。本供給源モデルでは、噴煙の形状として次の 2 つのオプションが用意されている。

- (1) 線 源
- (2) 逆円錐形

それぞれのオプションについて以下で説明する。

¹²火口での大気条件を用いて、第 2.2.3 項の計算方法で計算する

¹³以前は $\beta = 0.069$ が用いられていたが、現在、 $\beta = 0.017$ が使われている (鬼澤・他, 2013)。

¹⁴厳密には、粒径によって積分範囲が異なる。なぜなら、大きな粒径に対しては、 $Y(D, z) < 0$ の領域が無視できないためである。その結果、 $P(D, z) < 0$ となる高度が現れる。それを回避するために、 $P(D, z) \geq 0$ の範囲で粒子を分布させている

なお、このオプションは予測結果には大きく影響しない。(2) 逆円錐形を選んだとしても、最高高度付近の水平方向の広がりが高々数 km 程度である¹⁵。すなわち、両者のオプションの違いは、初期値としてのトレーサーの位置が最大でも数 km ずれている程度である。この数 km のずれが予測に影響するのは、主に火口のごく近傍に落下する粒子である。

(1) 線源 (`n.switch_shape_horizontal = 1`)

このオプションでは、噴煙の形状は線源が仮定される。すなわち、すべての粒子は火口直上から放出される。一見すると不自然ではあるが、前述したとおり、火山灰雲やある程度遠方の降灰の予測をする上では、大きな問題はない。実際、多くの研究では線源が仮定されている¹⁶。

(2) 逆円錐形 (`n.switch_shape_horizontal = 2`)

このオプションでは、噴煙の形状は逆円錐形が仮定される。小屋口 (2008) の次元解析によると、プリニー式・ブルカノ式のいずれの場合も高度 z における噴煙の水平方向の広がり $R(z)$ は、

$$R(z) = K_r z \tag{3.22}$$

と記述される。係数 K_r は次元解析からは決まらない無次元量であるが、Turner (1962) から $K_r = 0.198$ を用いている。

高度 z から放出される粒子の噴煙の中心軸から動径 $r(z)$ と偏角 $\theta(z)$ は、 Γ_1 および Γ_2 を $0 \sim 1$ の間の一様乱数として次のように表される。

$$r(z) = \Gamma_1 R(z) \tag{3.23}$$

$$\theta(z) = 2\pi\Gamma_2 \tag{3.24}$$

3.1.6 放出時刻

噴火発生時、火口から放出された火砕物は、周囲の大気を取り込みながら上昇していく。最高高度に達するまでの時間は、噴火の規模にもよるが数分から数 10 分程度である。したがって、噴火直後には、高高度に火山灰粒子は存在せず、噴煙柱から離脱し、周囲の風によって輸送される火山灰は低高度からの放出のみであろう。このような噴煙の形成時間を考慮して個々の粒子の放出時刻を粒子ごとに設定する。本供給源モデルでは、形成時間の計算方法は次の 2 つのオプションが用意されている。

(1) 一様

(2) 高度に依存した放出時刻

それぞれのオプションについて以下で説明する。

(1) 一様 (`n.switch_emission_rate = 1`)

このオプションでは、噴煙の形成時間は考慮されず、噴火発生時にただちに最高高度まで噴煙が達したとする。すなわち、高度 z から放出されるトレーサーの放出時刻 $t(z)$ は

$$t(z) = \Gamma T_M \tag{3.25}$$

と計算される。ただし、 Γ は $0 \sim 1$ の一様乱数とする。

¹⁵ 高度 10 km で半径 2 km 程度の広がり。

¹⁶ 例えば、Macedonio *et al.* (1988); Pfeiffer *et al.* (2005); Costa *et al.* (2009); Bonasia *et al.* (2010, 2011, 2012)。

(2) 高度に依存した放出時刻 (`n_switch_emission_rate = 2`)

このオプションでは、新堀・他 (2010) に従って、噴煙の形成時間 $t_s(z)$ を高度 z の関数として次のように表す。

$$t_s(z) = \left(\frac{5K_\Gamma^2}{72C_K} z^2 \right)^{2/5} \tag{3.26}$$

噴火継続時間を T_M とすると、この噴煙の形成時間 $t_s(z)$ を用いて、高度 z から離脱する粒子は、 $t_s(z) \sim t_s(z) + T_M$ の間に噴煙柱から放出する。ただし、渦拡散係数（噴煙柱内部の水平方向の乱流拡散係数） $C_K = 0.04 \text{ m}^2/\text{s}^{5/2}$ とする。実装では、 Γ を 0~1 の一様乱数とすると高度 z から放出されるトレーサーの放出時刻 $t(z)$ は

$$t(z) = t_s(z) + \Gamma T_M \tag{3.27}$$

で計算する。

3.2 初期値の出力例：火砕物の供給源モデル

本節では、初期値の出力の例として第 3.1 節で紹介した火砕物の供給源モデルの出力結果を示す。ここで示すのは、Table 3.2 および Table 3.3 に示した設定である。なお、例として示した図に利用したスイッチの設定は降灰予報のデフォルトの設定である。前節までで説明したように実装では各所に乱数を用いているので、モデルの出力は滑らかではないことに注意する (Figures 3.2, 3.4 など)。

Table 3.2 Switch for ESP model (see Table D.7 of `namelist.txt`)

Switch name in <code>namelist.txt</code>	Value	Remarks	Sections	Figures
<code>n_switch_calc_mass</code>	1	Power law	3.1.1 (1)	3.1
<code>n_switch_size_distribution</code>	0	Median	3.1.2 (1)	3.2
	1	Uniform	3.1.2 (2)	
	2	Log-normal	3.1.2 (3)	
<code>n_switch_particle_density</code>	1	Uniform	3.1.3 (1)	3.3
	2	Specific	3.1.3 (2)	
<code>n_switch_shape_vertical</code>	1	Uniform	3.1.4 (1)	3.4
	2	Suzuki (1983)	3.1.4 (2)	
<code>n_switch_shape_horizontal</code>	1	Line source	3.1.5 (1)	3.5
	2	Inverted cone	3.1.5 (2)	
<code>n_switch_emission_rate</code>	1	Uniform	3.1.6 (1)	3.6
	2	Diffusion time	3.1.6 (2)	

Table 3.3 Settings for ESP model

Latitude of vent [°]	32.0
Longitude of vent [°]	131.0
Altitude of vent [m asl]	0.0
Duration [s]	600.0
Date [UTC]	00:00 on 01 April 2020
Top height [m]	10000.0
Number of tracer	10000
D_{\min} [μm]/ D_{\max} [mm]	0.65/96.0
Median [mm]	0.25
SD	1.0
β	0.017
Ambient pressure around the vent [hPa]	1013.0
Ambient temperature around the vent [K]	300.0
Ambient air density around the vent [kg/m^3]	1.293

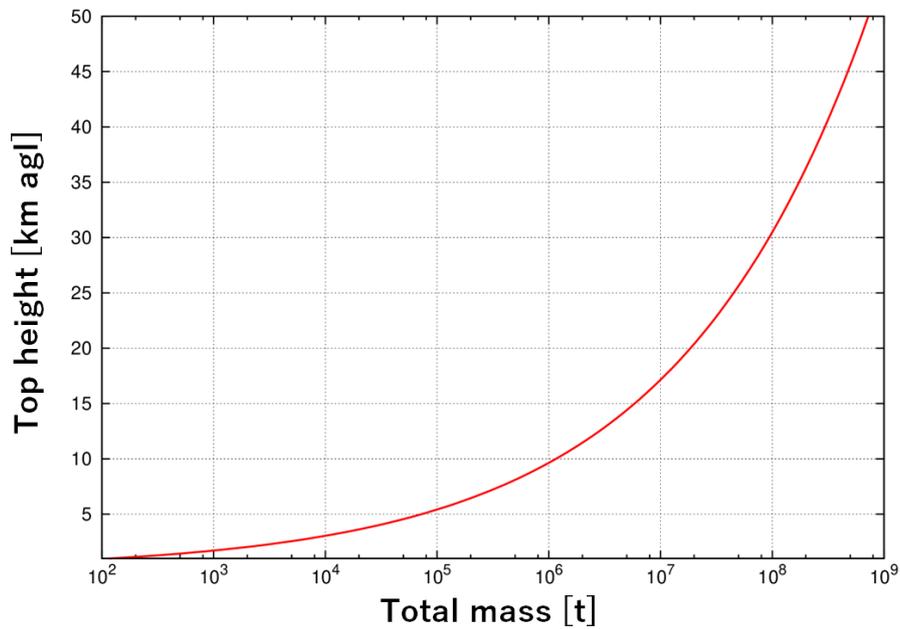


Figure 3.1 Power law for total eruption mass

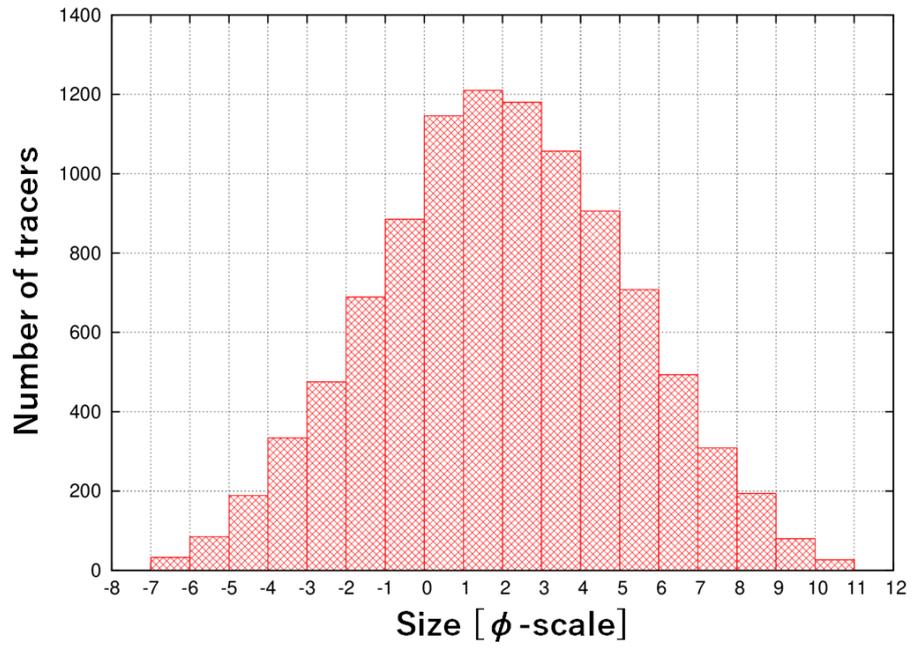


Figure 3.2 Size distribution

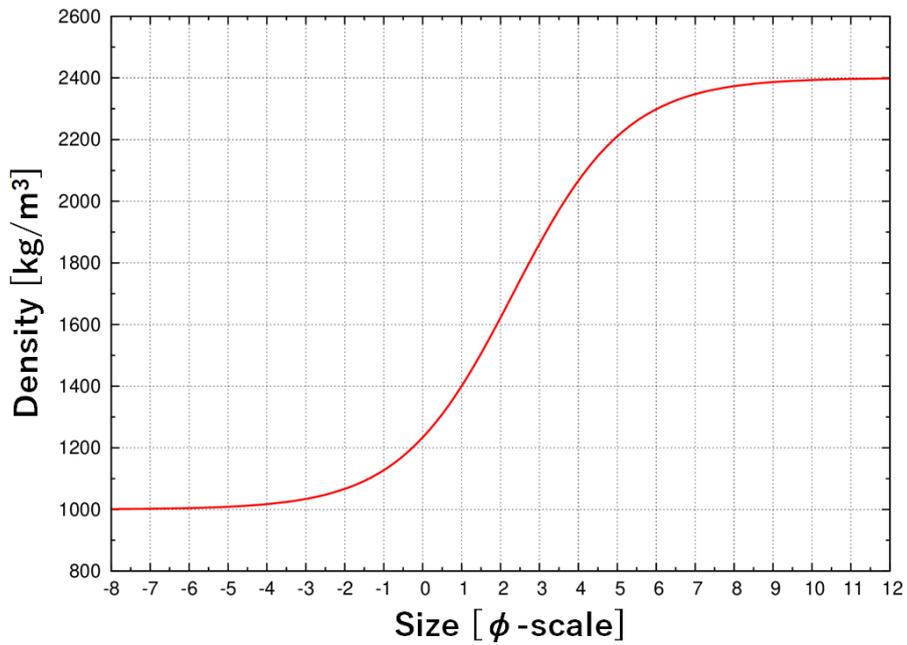


Figure 3.3 Relationship between density and size of tracers

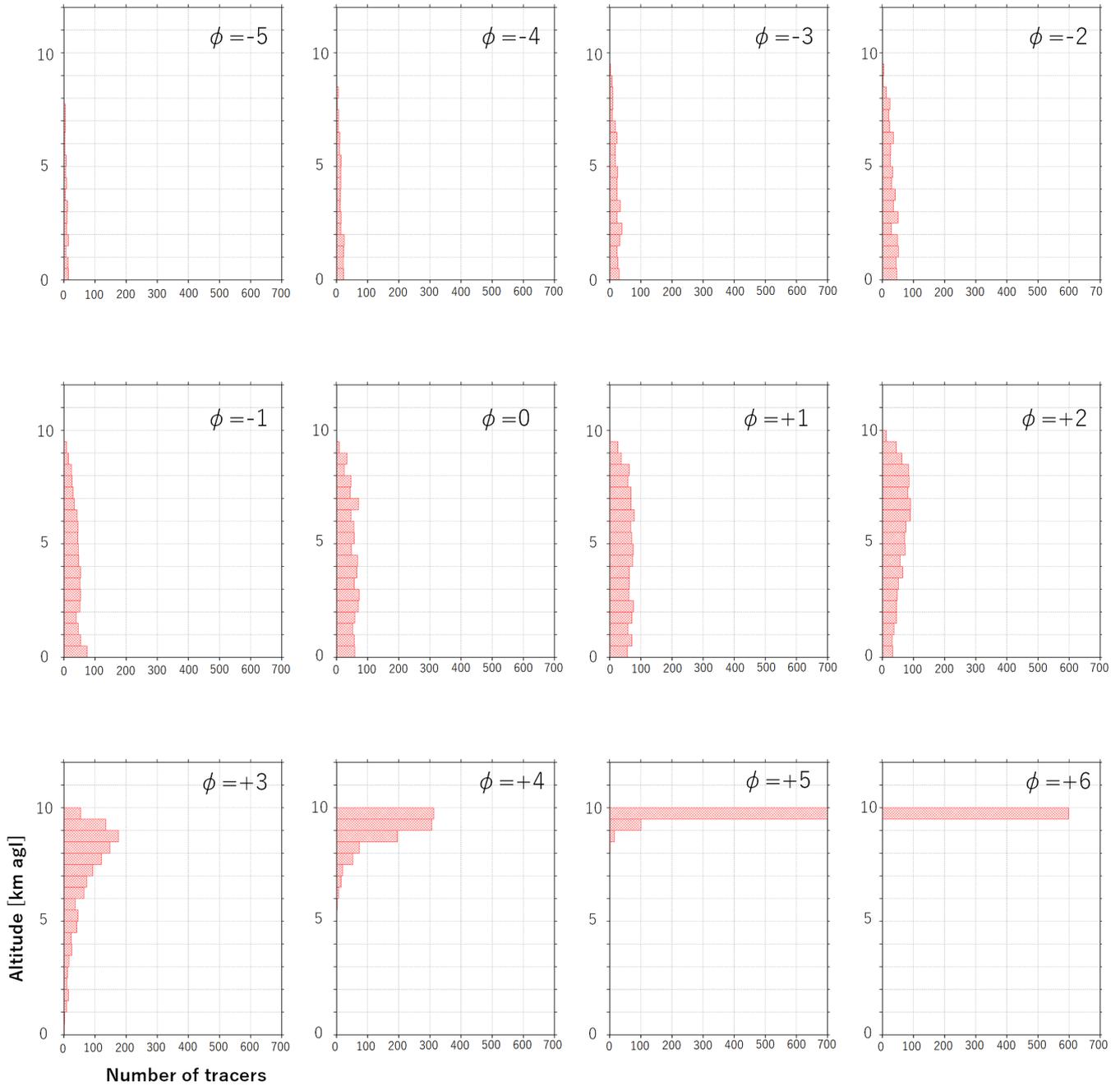


Figure 3.4 Vertical distribution of tracers

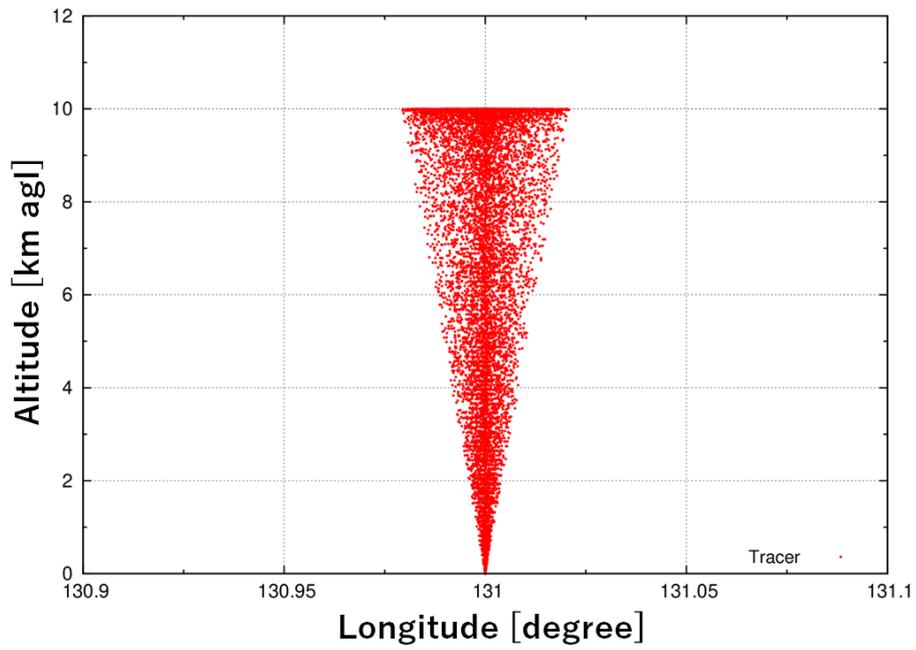


Figure 3.5 Shape of eruption plume

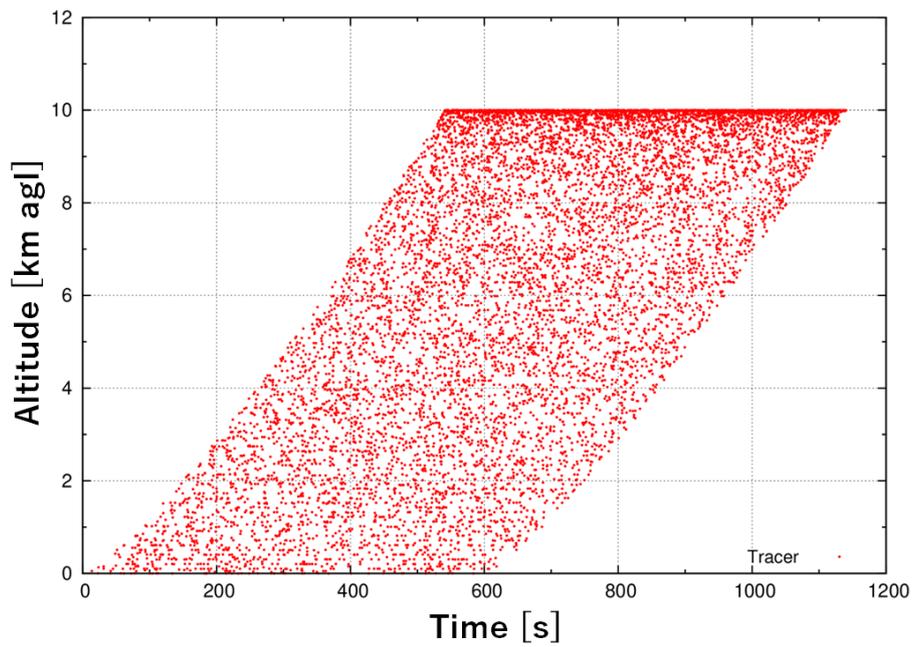


Figure 3.6 Time of emission

第 4 章 入力値

オフラインモデルである ATM に入力する大気場は、気象庁の GPV フォーマットである NuSDaS で Table E.4 に示す要素が必要である。ここでは、数値予報 GPV から変換する方法と理想大気を作成する方法を記述する。いずれも ATM 計算を行う前に GPV 前処理で作成する (Figure B.1)。

4.1 数値予報 GPV から変換

気象庁数値予報ルーチンで現在出力されている、GSM の対流圏と成層圏の気圧面 GPV (以下、全球気圧面 GPV) と MSM と LFM の鉛直高解像度 GPV (以下、メソ/局地鉛直高解像度 GPV) の場合を例に、ATM 計算に必要な各要素へ変換する方法を述べる。元の GPV の諸元を Table 4.1 に示す。これらは、付録 A に示すディレクトリツ

Table 4.1 Specifications of JMA-NWP GPVs used in the ATM calculations (as of October 2020)

NWP-GPV	GSM (upper)	GSM (lower)	MSM	LFM
Vertical plane	<i>p</i> -level		Vertical high resolution <i>z</i>-level	
Forecast time	132 h (00, 06, 18 UTC) 264 h (12 UTC)		51 h (03, 06, 09, 15, 18, 21 UTC) 39 h (00, 12 UTC)	10 h (hourly)
Temporal resolution	6 h	3 h (FT= 0-132) 6 h (FT=138-264)	1 h	
Forecast domain	Global		Japan and its surroundings	
Output resolution	2.50°	0.50°	5 km	2 km
Output levels*	28 + 1	21 + 1	76 + 1	58 + 1
Input elements†	U, V, OMG, Z, T, RH, CWC‡, PHI§, P¶		U, V, W, P, T, Dens, QV, QC, QI, SMQR,¶ SMQS,¶, SMQG,¶, ZS§, SL§, FLAT§, FLON§	
Vertical plane	Surface			
Forecast time	Same as above			
Temporal resolution	3 h (FT= 0-132) 6 h (FT=138-264)			
Forecast domain	Global			
Output resolution	0.25°			
Output levels	1			
Input elements†	U, V, T, RH, RAIN			

* Each level is shown in Table 4.2.

† CWC: Cloud water content (including ice), Dens: Air density, FLAT: Latitude of grid, FLON: Longitude of grid, OMG: Vertical *p*-velocity, P: Air pressure, PHI: Geopotential, QC: Mixing ratio (cloud water), QI: Mixing ratio (cloud ice), QV: Specific humidity, RAIN: Accumulated precipitation (total), RH: Relative humidity, SL: Land coverage rate, SMQG: Accumulated precipitation (graupel), SMQR: Accumulated precipitation (rain), SMQS: Accumulated precipitation (snow), T: Air temperature, U: *x*-wind speed, V: *y*-wind speed, W: Vertical wind speed, Z: Geopotential height, ZS: Terrain height of the model.

‡ Only lower GPV (≥ 100 hPa).

§ Without atmospheric levels (only initial time).

¶ Without atmospheric levels.

リーの Ef_lwr1 と Mf_vhrc にあるモジュールにより各々前処理変換される。

4.1.1 座 標

(1) 緯度・経度

格子点の緯度 (NuSDaS 要素名: FLAT) および経度 (FLON) は、単位を度 (°) として、地表面 (SURF) の格子点のみに格納する。時間変化しないので、格納するのは初期時刻のみである。

全球気圧面 GPV の場合、経緯度座標 (NuSDaS 種別 1 の 2 次元座標名: LL) であるので、水平格子点 (i, j) における経度 $0^\circ \leq \lambda \leq 360^\circ$ 、緯度 $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ は、 x, y 方向の格子間隔 D_x, D_y [°] > 0、基準点の xy -座標 (格子番号) (i_0, j_0) およびその経度・緯度 λ_0, φ_0 [°] の格子情報から、

$$\lambda = \lambda_0 + (i - i_0)D_x \quad (4.1)$$

$$\varphi = \varphi_0 - (j - j_0)D_y \quad (4.2)$$

で求めて格納する¹。さらに本初子午線をまたぐ ATM 計算に対応するため、東西格子数は元の GPV より一つ増やして 360° を設け、経度 0° の各要素と同じ値を格納している。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、ランベルト正角円錐図法 (LM) であり、各格子点の緯度・経度は元の GPV にあるので、そのまま格納する。

(2) 高 度

高度 (NuSDaS 要素名: Z) は、SURF にモデル標高を格納し、大気層²に各格子点の値を海拔 (単位: m asl) で格納する。元の GPV の鉛直座標が気圧座標の場合は格子点の高度は時間変化するので毎時刻格納するのに対し、元々高度座標の場合は時間変化しないので初期時刻のみ格納する。

全球気圧面 GPV の場合、気圧座標 (NuSDaS 種別 1 の 3 次元座標名: PP) であり、各格子点の (ジオポテンシャル) 高度が元の GPV にあるので、その値を海拔高度として格納する。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、鉛直ハイブリッド座標 (ZS) であるので、鉛直格子点³ k における高度 z [m asl] への変換は次式を用いる (石田, 2008)。

$$z = \zeta_k + z_s f(\zeta_k) \quad (4.3)$$

ここで ζ_k はモデルの鉛直座標値面、 $f(\zeta_k)$ は座標変換関数でいずれも元の GPV の補助管理情報にあり、 z_s は以下で述べるモデル標高である。

モデル標高

全球気圧面 GPV の場合、地表面におけるジオポテンシャル Φ を g で割ったジオポテンシャル高度

$$z_s = \frac{\Phi}{g} \quad (4.4)$$

をモデル標高として格納する。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、元の GPV にある標高をそのまま格納する。

各モデルの水平格子点の分布とモデル標高を Figure 4.1 に、各鉛直面の高度を Table 4.2 に示す。ただし Figure 4.1 (c), (d) のメソ/局地鉛直高解像度 GPV の水平格子点は 10 点ずつ間引いて図示しており、Table 4.2 の全球気圧面 GPV の高度は標準大気を仮定した参考値である。

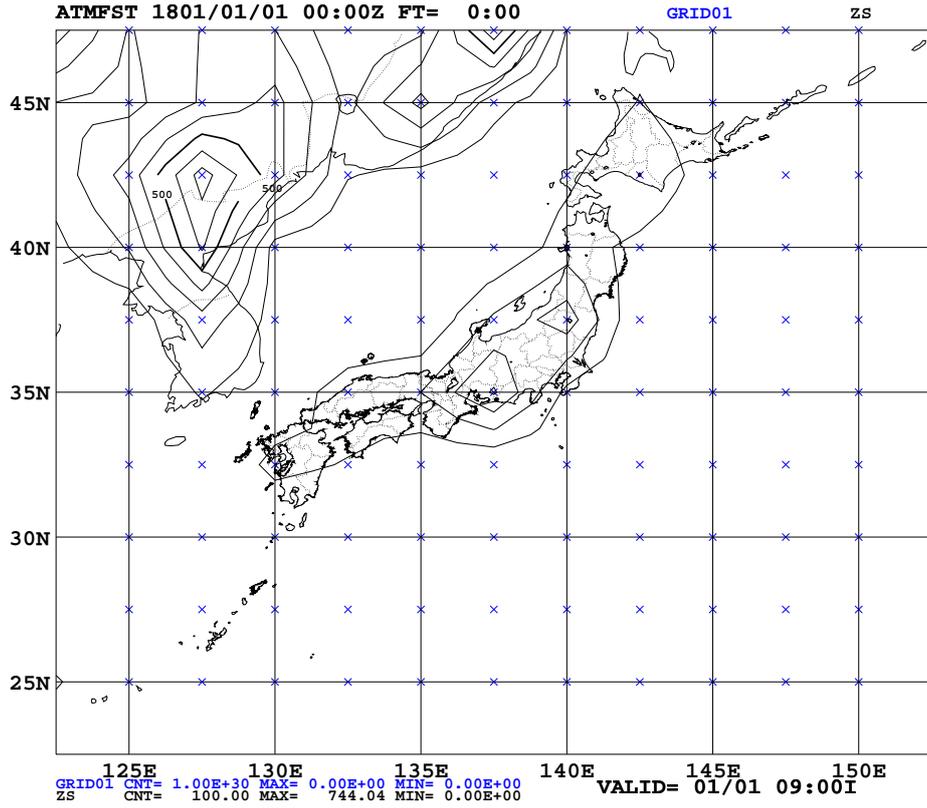
¹(4.2) 式に負号が付いているのは、NuSDaS は y 軸を北から南向きにとって格納するためである。ATM 計算では、緯度・経度も含め、NuSDaS から読んだ GPV はまず y 軸を南から北向きに入替え ($j \rightarrow j_{\max} - j + 1$, j_{\max} は南北格子数) してから使用している。

²Table 4.2 に示す面の名前が、1 (大気最下層), 2, 3, ..., NZ_GPV の層のこと。NZ_GPV は地表面 (SURF) を除く GPV の層数で現在、全球気圧面 (成層圏) GPV が 28、全球気圧面 (対流圏) GPV が 21、メソ鉛直高解像度 GPV が 76、局地鉛直高解像度 GPV が 58。なお鉛直層数を表す ATM の変数 `nz_gpv` は、SURF を 1 から数えるため、面の名前とは `nz_gpv = NZ_GPV + 1` の関係にあることに注意。

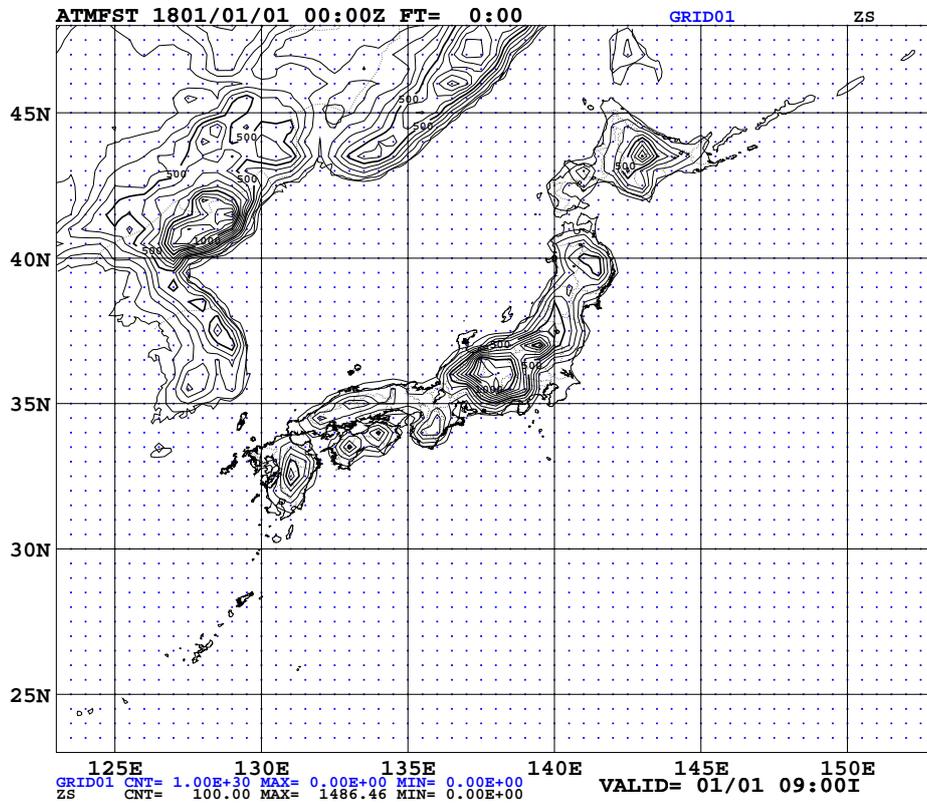
³フルレベル (例えば、原, 2008)。

Table 4.2 Standard altitude of vertical planes. Altitudes of GSM is geopotential heights (NOAA *et al.*, 1976) and those of MSM and LFM are full-level heights above sea. (as of October 2020)

Plane name	GSM (upper)		GSM (lower)		MSM	LFM
	Pressure [hPa]	Altitude [gpm]	Pressure [hPa]	Altitude [gpm]	Altitude [m asl]	Altitude [m asl]
76					21475.92	
75					20831.88	
74					20200.05	
73					19580.33	
72					18972.61	
71					18376.78	
70					17792.74	
69					17220.39	
68					16659.62	
67					16110.34	
66					15572.42	
65					15045.78	
64					14530.30	
63					14025.88	
62					13532.42	
61					13049.81	
60					12577.95	
59					12116.73	
58					11666.05	19858.75
57					11225.81	19202.75
56					10795.90	18557.75
55					10376.22	17923.75
54					9966.66	17300.75
53					9567.12	16688.75
52					9177.49	16087.75
51					8797.68	15497.75
50					8427.57	14918.75
49					8067.06	14350.75
48					7716.04	13793.75
47					7374.42	13247.75
46					7042.09	12712.75
45					6718.95	12188.75
44					6404.88	11675.75
43					6099.79	11173.75
42					5803.57	10682.75
41					5516.11	10202.75
40					5237.32	9733.75
39					4967.09	9275.75
38					4705.32	8828.75
37					4451.89	8392.75
36					4206.71	7967.75
35					3969.67	7553.75
34					3740.67	7150.75
33					3519.60	6758.75
32					3306.36	6377.75
31					3100.84	6007.75
30					2902.94	5648.75
29					2712.56	5300.75
28	0.01	79302.63			2529.60	4963.75
27	0.03	72724.69			2353.93	4637.75
26	0.05	69514.94			2185.48	4322.75
25	0.07	67329.92			2024.12	4018.75
24	0.10	64946.95			1869.75	3725.75
23	0.20	60111.94			1722.28	3443.75
22	0.30	57153.66			1581.59	3172.75
21	0.50	53283.96	10.00	31054.64	1447.58	2912.75
20	0.70	50645.75	20.00	26481.22	1320.15	2663.75
19	1.00	47820.08	30.00	23848.65	1199.19	2425.75
18	2.00	42439.85	50.00	20576.17	1084.61	2198.75
17	3.00	39429.49	70.00	18441.62	976.28	1982.75
16	5.00	35776.55	100.00	16179.72	874.12	1777.75
15	7.00	33444.40	150.00	13608.42	778.01	1583.75
14	10.00	31054.64	200.00	11784.05	687.86	1400.75
13	20.00	26481.22	250.00	10362.95	603.55	1228.75
12	30.00	23848.65	300.00	9163.96	524.99	1067.75
11	50.00	20576.17	400.00	7185.44	452.06	917.75
10	70.00	18441.62	500.00	5574.44	384.67	778.75
9	100.00	16179.72	600.00	4206.43	322.71	650.75
8	150.00	13608.42	700.00	3012.18	266.07	533.75
7	200.00	11784.05	800.00	1948.99	214.66	427.75
6	250.00	10362.95	850.00	1457.30	168.36	332.75
5	300.00	9163.96	900.00	988.50	127.08	248.75
4	500.00	5574.44	925.00	761.97	90.71	175.75
3	700.00	3012.18	950.00	540.34	59.14	113.75
2	850.00	1457.30	975.00	323.38	32.27	62.75
1	1000.00	110.88	1000.00	110.88	10.00	20.00
SURF	P(SURF)	PHI/G	P(SURF)	PHI/G	ZS	ZS

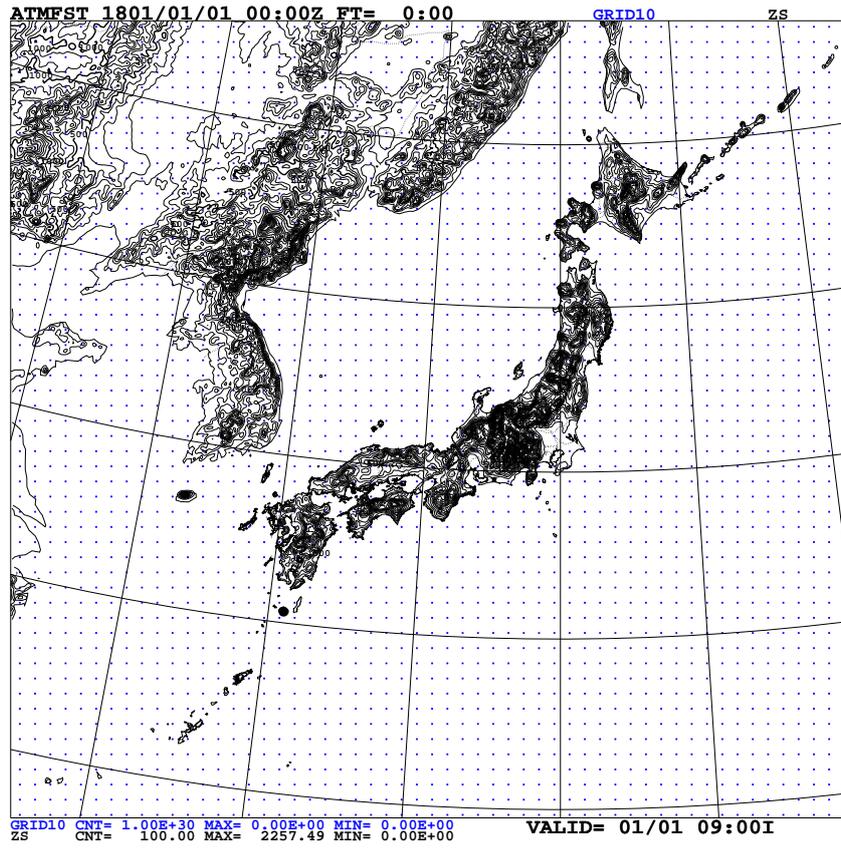


(a) GSM (upper: Ef_UPR1)

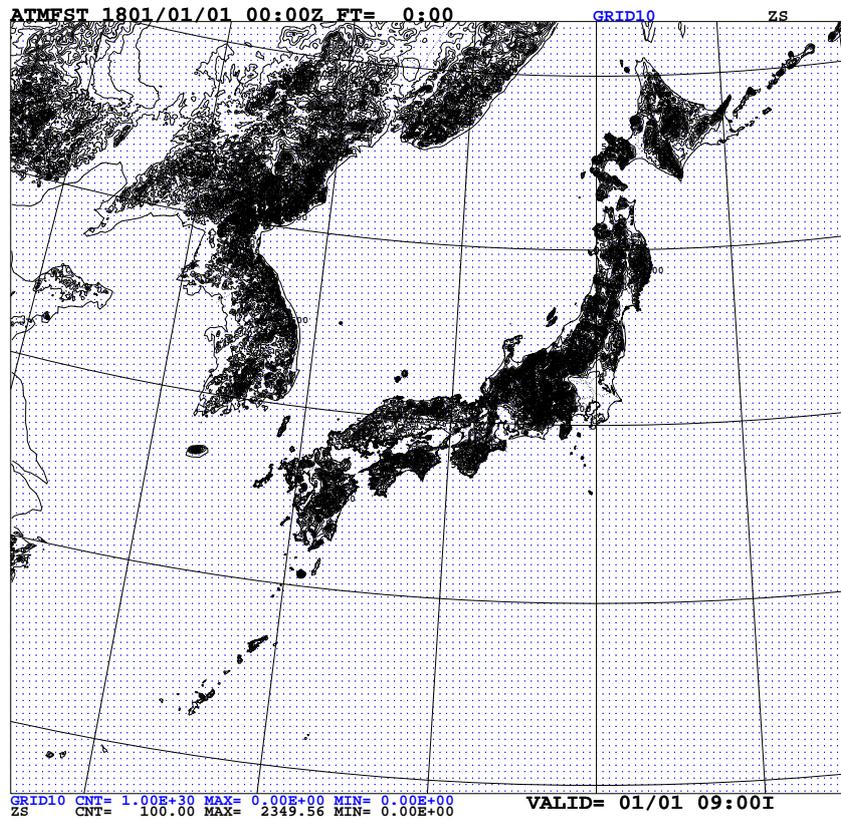


(b) GSM (lower: Ef_LWR1)

Figure 4.1 Horizontal grid points and modeled terrain (Japan and its surrounding area)



(c) MSM (Mf_VHRC)



(d) LFM (Lf_VHRB)

Figure 4.1 (Continued) The grid points of Figures (c) and (d) are thinning out one-tenth.

4.1.2 風

(1) 水平風

水平風は、東西風 (NuSDaS 要素名 : UU) と南北風 (VV) の 2 成分を [m/s] 単位で格納する。

変換前の元の数値予報 GPV の水平風は、各数値予報モデルで定義されている水平座標系の x, y 成分である。全球気圧面 GPV の場合は LL 座標系であり x 成分と東西成分、 y 成分と南北成分は一致しているので、東西・南北風をそのまま Table 4.2 の大気層に格納する⁴。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、標準経度 $\lambda_0 = 140^\circ\text{E}$ 、標準緯度 $\varphi_1 = 30^\circ\text{N}$, $\varphi_2 = 60^\circ\text{N}$ の LM 座標系であるので、その風ベクトル (U_x, V_y) を次式で時計回りに回転させた東西・南北風 (U, V) に戻して格納する⁵。

$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_x \\ V_y \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

ただし経度 λ [$^\circ\text{E}$] における回転角は、

$$\theta = \alpha(\lambda - \lambda_0), \quad \alpha = \frac{\ln \cos \varphi_1 - \ln \cos \varphi_2}{\ln \tan(45^\circ - \varphi_1/2) - \ln \tan(45^\circ - \varphi_2/2)} \approx 0.716 \quad (4.6)$$

である。

(2) 鉛直風

鉛直風 (NuSDaS 要素名 : W) は [m/s] 単位で大気層に格納する (SURF はゼロ)。

全球気圧面 GPV の場合、元の GPV にある上昇流 (鉛直 p 速度) ω から静力学平衡を仮定して求めた鉛直風

$$W = -\frac{\omega}{\rho_a g} \quad (4.7)$$

を格納する。ただし ρ_a は第 4.1.5 項の空気密度である。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、元の GPV にある鉛直速度をそのまま格納する。

なお、元の GPV の鉛直速度はいずれも瞬時値であり、特に ATM 計算における地表面付近の瞬間的に強い上昇流を緩和するために、前処理変換では水平 9 格子平均や大気最下層は地表に沿う調節機能を設けている (Table D.2)。鉛直調節しない場合と水平 9 格子平均した場合の例を Figure 4.2 に示す。鉛直調節した場合、この事例では極値で約 20 % 平滑化されている。

4.1.3 気圧

気圧 (NuSDaS 要素名 : P) は [hPa] 単位で SURF を含む全層に格納する。ただし元の GPV が気圧座標の場合は、SURF を除く格子点の気圧は時間変化しないので大気層は初期時刻のみ格納する。

全球気圧面 GPV の場合、SURF を除く大気層は等圧面なので、上述のとおり、初期時刻のみ大気各層の水平格子点すべてに同値を格納する (SURF の地上気圧は予報時刻ごとに格納する)。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、元の GPV にある気圧をそのまま格納する。

4.1.4 気温

気温 (NuSDaS 要素名 : T) は [K] 単位で SURF を含む全層に格納する。

全球気圧面 GPV、メソ/局地鉛直高解像度 GPV のいずれも元の GPV にある気温をそのまま格納する。

⁴地表面 (SURF) については、Table 4.1 の地上 GPV の水平風を気圧面 GPV と同じ水平格子に間引いて格納する。気温、空気密度の計算に必要な相対湿度および時間降水量についても同様。

⁵本章の大気場の各要素は、第 2.1 節の平均場であるが、本章では特に強調しない限り平均を表す \bar{U}, \bar{V} などの記号は省略する。

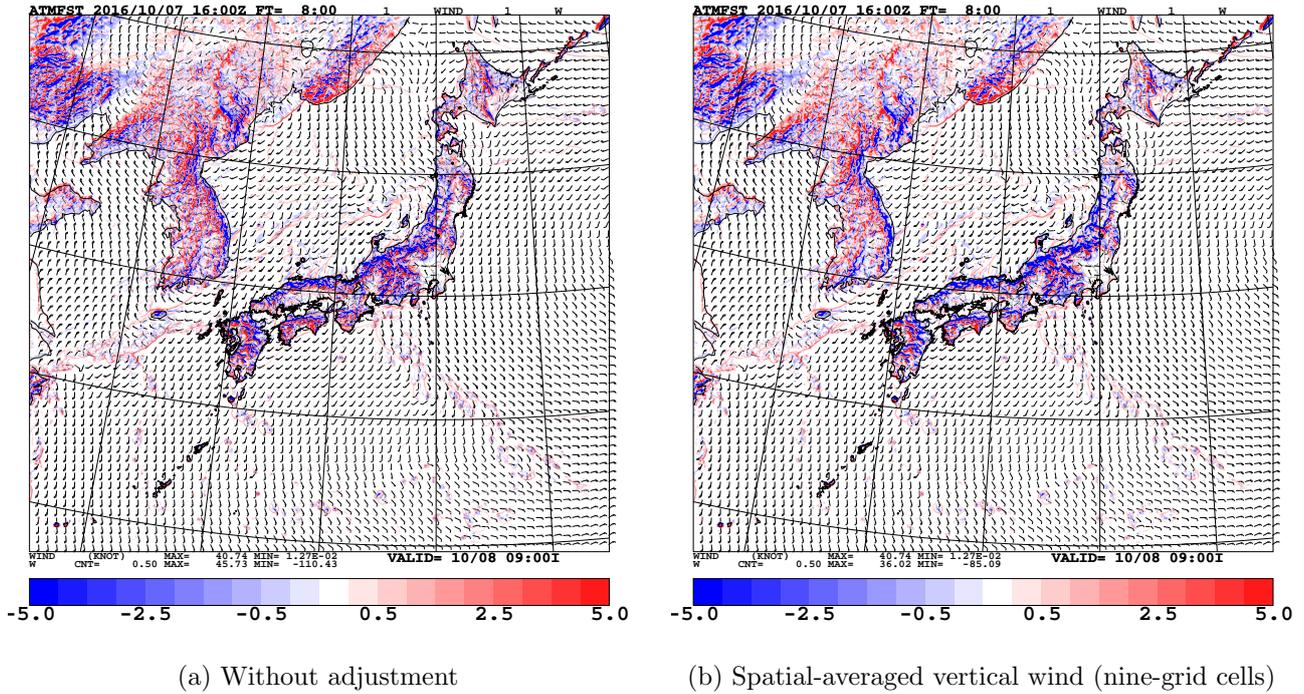


Figure 4.2 Examples of horizontal and vertical wind [cm/s] by LFM-GPV (The lowest atmospheric level at 00 UTC on 08 from initial time of 16 UTC on 07 October 2016).

4.1.5 空気密度

空気密度 (NuSDaS 要素名 : Dens) は [kg/m³] 単位で SURF を含む全層に格納する。
 全球気圧面 GPV の場合、各格子点の相対湿度 r があるので、まず同格子の水蒸気圧

$$e = re_s \quad (4.8)$$

を求める。ここで e_s [hPa] は、各格子点の気温 T' [°C] $\equiv T$ [K] - 273.15 から、テテンの式⁶

$$e_s = \begin{cases} 6.11 \times 10^{7.5T'/(T'+237.3)} & (T' \geq 0.0 \text{ }^\circ\text{C}) \\ 6.11 \times \left[10^{7.5T'/(T'+237.3)} \times \frac{15.0 + T'}{15.0} - 10^{9.5T'/(T'+265.5)} \times \frac{T'}{15.0} \right] & (-15.0 < T' < 0.0 \text{ }^\circ\text{C}) \\ 6.11 \times 10^{9.5T'/(T'+265.5)} & (T' \leq -15 \text{ }^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (4.9)$$

により求めた飽和水蒸気圧である (式中の定数係数の設定は Table C.3)。次に各格子点の気圧 p と (4.8) 式の e から比湿

$$q_v = \frac{\varepsilon e}{p - (1 - \varepsilon)e} \quad \left(\varepsilon \equiv \frac{R_d}{R_v} \approx 0.622, R_d = 287.05 \text{ J/kg.K}, R_v = 461.5 \text{ J/kg.K} \right) \quad (4.10)$$

を求める。さらに気温 T を (4.10) 式の q_v を用いて仮温度

$$T_v = T \left(1 + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} q_v \right) \approx T (1 + 0.608 q_v) \quad (4.11)$$

に変換し、空気密度 ρ_a を状態方程式

$$\rho_a = \frac{p}{R_d T_v} \quad (4.12)$$

から求めて格納する。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、大気層の空気密度は元の GPV にあるのでそのまま格納する。SURF については、大気最下層と同じ値を仮定して格納する。

⁶数値予報標準ライブラリ libnwp (例えば、原 (2017b), 豊田・他 (2019) で使用) と同様に、液相と固相を按分している。

4.1.6 乱流拡散係数

物質（トレーサー）の乱流拡散係数は、同じスカラー量である熱の乱流拡散係数（NuSDaS 要素名：EDDYKH）と同等と仮定⁷し、鉛直拡散係数（単位：m²/s）を大気層に格納⁸する（SURF はゼロ）。鉛直拡散係数は、全格子点を定数に設定しない場合、まず地表面からの高さ z' ($\equiv z - z_s$) における混合距離を

$$l = \frac{\kappa z'}{1 + \kappa z'/l_0} \quad (\kappa : \text{カルマン定数}) \quad (4.13)$$

で内挿する（Blackadar, 1962）。ただし上空で漸近する混合距離は、さらに自由大気中、大気境界層内の最大混合距離をそれぞれ l_{FA} , l_{PBL} 、大気境界層の高さを h_{PBL} とし、

$$l_0 = \begin{cases} l_{FA} + (l_{PBL} - l_{FA}) \exp\left(1 - \frac{z'}{h_{PBL}}\right) & (z' > h_{PBL}) \\ l_{PBL} & (z' \leq h_{PBL}) \end{cases} \quad (4.14)$$

で求める（Holtslag and Boville, 1993）。最大混合距離および大気境界層の高さは、RATM で使用されていた $l_{FA} = 30$ m, $l_{PBL} = 100$ m, $h_{PBL} = 1000$ m に設定している（Table D.3）。そして水平風、気圧、気温、比湿⁹または乱流エネルギー（TKE）から下記の乱流モデル（例えば、平岡・田中, 1994）で推定する。

0-方程式モデルから推定する方法

乱流を特徴付ける速度を (4.13) 式の混合距離と水平風（平均風） $\overline{U}_h = (\overline{U}, \overline{V})$ の鉛直シアーから推定し、鉛直拡散係数を次式で求める（例えば、Louis, 1979; Louis *et al.*, 1982）。

$$K_v = l^2 \left| \frac{\partial \overline{U}_h}{\partial z} \right| F_v (R_f) \quad (4.15)$$

ここで F_v は大気安定度を表すリチャードソン数¹⁰

$$R_f = \frac{Ri}{Pr} \quad (Pr : \text{乱流プラントル数}) \quad (4.16)$$

$$Ri \equiv \frac{N^2}{|\partial \overline{U}_h / \partial z|^2} \quad \left(N \equiv \sqrt{\frac{\partial \ln \overline{\theta}_v}{\partial z} g} \right) \quad (4.17)$$

の関数であり、Mellor and Yamada (1974, 1982) のレベル 2 モデルにより与える（例えば、原・永戸, 2008; 相川, 2008）。

1-方程式モデルから推定する方法

1-方程式モデルで予報された TKE がある場合は、鉛直拡散係数を次式で求める。

$$K_v = C_h l \sqrt{\text{TKE}} \quad (4.18)$$

ここでバルク係数は、

$$C_h = \frac{C_m}{Pr} \quad (4.19)$$

$$C_m = \begin{cases} 0.1 & (z' > h_{PBL}) \\ 0.2 & (z' \leq h_{PBL}) \end{cases} \quad (4.20)$$

⁷乱流レイス数が 1 に等しいとすることに相当する。

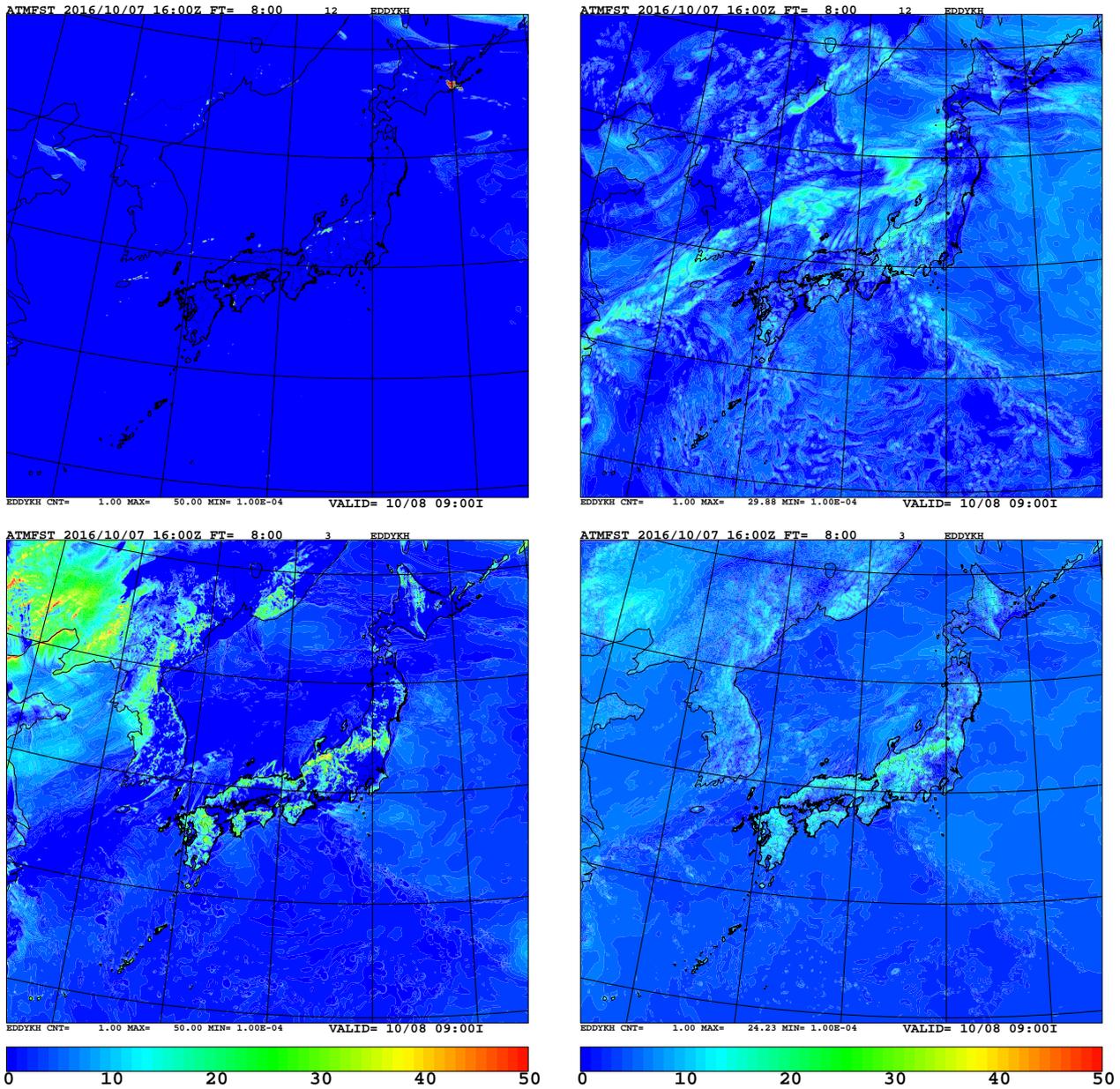
⁸水平拡散係数は GPV 前処理では求めず、ATM 本体で計算する（第 2.2.2 項 (1)）。

⁹比湿 q_v から仮温位 θ_v は、(4.11) 式の仮温度 T_v を用いて、 $\theta_v = T_v / \Pi$ ($\Pi \equiv (p/p_{00})^{R_d/C_p}$, $R_d/C_p = 2/7$) で求める。ただし p_{00} (= 1000 hPa) は基準気圧。

¹⁰水蒸気を考慮するため、温位の代わりに仮温位 θ_v を用いている。また、水平風の鉛直シアに $\min |\partial \overline{U}_h / \partial z| = 1 \times 10^{-2}$ /s を設けている。なお、乱流プラントル数は熱に対する運動量の乱流拡散係数の比を決める（(4.19) 式参照）。

を用いる (原・永戸, 2008)。

(4.15) 式または (4.18) 式のいずれかで推定する場合の乱流プラントル数は、GATM で使用されていた $Pr = 1.00$ に設定している¹¹。また鉛直拡散係数は、RATM (Kawai, 2002) と同様に $K_v \leq 50 \text{ m}^2/\text{s}$ の上限値を設けている (Table D.3)。各方法で推定した鉛直拡散係数の例を Figure 4.3 に示す。



(a) Zero-eq. model (Mellor-Yamada Level 2)

(b) One-eq. model (TKE)

Figure 4.3 Examples of vertical diffusion coefficient [m^2/s] by LFM-GPV (The 12th (upper) and 3rd (lower) atmospheric levels at 00 UTC on 08 from initial time of 16 UTC on 07 October 2016).

¹¹メラウ・山田のクロージャー定数を $(A_1, A_2, B_1, B_2, C_1) = (0.92, 0.74, 16.6, 10.1, 0.08) \rightarrow (0.92, 0.59, 16.6, 10.1, 0.08)$ に変更することに対応する。また NHM では、Deardorff (1980) により $Pr^{-1} = 1 + 2l / \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}$ ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$: x, y, z 方向の格子間隔) が用いられている (斉藤, 2003b; 原・永戸, 2008)。

4.1.7 地表面

(1) 海陸比

海陸比 (NuSDaS 要素名: SL) は、地表面格子において、完全に海面の状態をゼロとして陸地が占める割合を SURF に格納する。

全球気圧面 GPV の場合、元の GPV に海陸比がないので、(4.4) 式が正の場合を 1、それ以外は 0 の二値を格納する。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、元の GPV に海陸比があるのでそのまま格納する。

(2) 空気力学的抵抗

地表面に近い接地層における空気力学的抵抗 (NuSDaS 要素名: ra) は [s/m] 単位で SURF に格納する。空気力学的抵抗は、全地点を定数に設定しない場合、大気境界層の水平風速 $U_h (\equiv |\overline{U}_h|)$ から接地層の安定度は中立と仮定して

$$r_a = \frac{1}{\kappa u_*} \ln \frac{z' - d}{z_0} \quad (4.21)$$

$$u_* = \kappa U_h \left/ \ln \frac{z' - d}{z_0} \right. \quad (4.22)$$

で求める (Kitada *et al.*, 1986)。ただし各地点の粗度長 z_0 とゼロ面変位 d は、海陸比が 0.5 以上の陸上は植生に応じて Table E.1.1 を参照し、海上では海面水温 (SST) から海水と海氷で粗度長¹²を変えゼロ面変位はなしに設定している。植生と SST の分布は Tables E.1.2, E.1.3 を参照するが、全球気圧面 GPV、メソ/局地鉛直高解像度 GPV とは座標系が異なるため、数値予報 GPV の初期時刻と同じ月の気候値について、各地点の最近接の値を取る¹³。また空気力学的抵抗の逆数は、RATM で設定されていた乾性沈着速度 $r_a^{-1} \leq 0.3$ m/s の上限を設けている (Table D.4)。

4.1.8 雲

(1) 雲水量

雲水量 (NuSDaS 要素名: CWC) は、単位体積あたりの氷相も含む水物質質量 (単位: kg/m³) を大気層に格納する。

全球気圧面 GPV の場合、氷相も含む水物質質量 q_c [kg/kg] があれば、(4.12) 式で求めた空気密度 ρ_a [kg/m³] を掛けた

$$CWC = \rho_a q_c \quad (4.23)$$

を、雲水量 CWC [kg/m³] として格納する。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、湿潤空気 (乾燥空気と水蒸気) の密度 $\rho_d + \rho_v (= \rho_a)$ に対する雲水、雲氷の密度 LWC, IWC の比¹⁴ $q_w \equiv LWC / (\rho_d + \rho_v)$, $q_i \equiv IWC / (\rho_d + \rho_v)$ があるので、雲水量は (4.23) 式と同様に両形態の和として、

$$\begin{aligned} CWC &= LWC + IWC \\ &= (\rho_d + \rho_v) (q_w + q_i) \\ &= \frac{p}{R_d T_v} (q_w + q_i) \end{aligned} \quad (4.24)$$

を格納する。ただし (4.24) 式の右辺第 2 式から第 3 式へは湿潤空気の状態方程式 (4.12) 式を用いた。

¹²海上の場合、 $z_0 = 1.52 \times 10^{-4}$ m (海水: SST > SST_i = 271.35 K), 1.00×10^{-3} m (海氷: SST ≤ SST_i) に設定している。

¹³気候値は、GPV の予報時刻に時間内挿していないことに注意。

¹⁴水蒸気の場合、比湿 $q_v \equiv \rho_v / (\rho_d + \rho_v)$ が定義される。

(2) 雲頂・雲底高度

雲頂 (NuSDaS 要素名: CTOP) および雲底高度 (CBASE) は各地点上空にある最も下層の雲について、海拔 (単位: m asl) でいずれも SURF に格納する¹⁵。雲頂・雲底高度は、気圧、相対湿度または雲水量から下記のいずれかの方法で推定する。

気圧から推定する方法

雲頂および雲底高度に対応する気圧 p_t, p_b を設定して、各地点上空の気圧が初めて p_b より低くなった格子点の高度を雲底高度、さらに上空で初めて p_t より低くなった高度を雲頂高度と推定する¹⁶。

相対湿度から推定する方法

雲頂および雲底高度に対応する相対湿度 RH_t, RH_b を設定して、各地点上空の相対湿度が初めて RH_b に達した格子点の高度を雲底高度、さらに上空で初めて RH_t より下がった高度を雲頂高度と推定する¹⁷。

雲水量から推定する方法

雲水量のしきい値 CWC_t を設定して、各地点上空の雲水量が初めて CWC_t を超えた格子点の高度を雲底高度、さらに上空で再び CWC_t 以下になった高度を雲頂高度と推定する。

全球気圧面 GPV、メソ/局地鉛直高解像度 GPV ともに気圧から推定する方法をデフォルトとしている。 p_t, p_b などのしきい値は全領域で固定しており、Table D.5 で設定する。相対湿度または雲水量から推定した雲頂・雲底高度の例を Figure 4.4 に示す。

4.1.9 時間降水量

時間降水量 (降水強度) は、雨 (NuSDaS 要素名: SMQR1H)・雪 (SMQS1H)・霰 (SMQG1H) の形態に分けて、 $[\text{kg}/\text{m}^2]$ 単位で格納する。

全球気圧面 GPV の場合、地上 GPV に初期時刻からの積算降水量 (単位: kg/m^2) があるので、前回予報時刻との差分を取り 1 時間あたりに平均した値¹⁸を、雪・霰とは区別せず、雨として格納する (SMQS1H と SMQG1H は格納されない)。

メソ/局地鉛直高解像度 GPV の場合、雨・雪・霰の形態別に積算降水量 (単位: kg/m^2) があるので、前回予報時刻との差分を取った値を格納する。

4.2 理想大気の実験

ATM の理想実験を行う場合は、数値予報 GPV は使わずに、仮想的な鉛直 1 次元 (水平一様) の理想大気を作成する。この理想大気は、Table 4.3 に例示する設定ファイルから、付録 A に示すディレクトリツリーの Ideal にあるモジュールで ATM に入力するための NuSDaS を作成する。Table 4.3 の各面の高度や要素の値は、実験の目的に応じて任意に設定することができる。

4.3 放出地点の大気プロファイル出力

第 4.1 節や第 4.2 節で変換・作成した大気場の GPV から、ATM で計算するトレーサーの放出地点における上空の

¹⁵雲がない場合、ヌル値として Table C.2 で設定する `large_null` を用いて、雲頂高度に小さな負値 (`- large_null`)、雲底高度に大きな正値 (`large_null`) を格納している。

¹⁶気圧からの推定方法では、層状性対流性の雲の違いなどは考慮できず、雲頂・雲底高度はほぼ水平一様になる。

¹⁷各地点下層から上層への探索方法では、大気中層の雲に対応する相対湿度の極大域を見逃す場合がある。

¹⁸全球地上 GPV の時間間隔は 3 または 6 時間ごと (Table 4.1)。

風、気圧、気温および空気密度を、GPV の鉛直層ごとに時空間内挿して出力する。各層の時空間内挿の方法は、第 2.4.1 項と同様に、放出地点上空で 2 次元空間内挿してから放出時刻に時間内挿する。この大気プロファイルは、付録 A に示すディレクトリツリーの Point にあるモジュールにより付録 F.1.1 に示すフォーマットでテキスト出力される。MSM の初期値を与えるメソ解析 (MA) の GPV から出力した大気プロファイルの例を Figure 4.5 に示す。

大気プロファイルは、初期値 (第 3 章) を作成するための入力値であるが、ATM 本体には直接入力しない。

4.4 定数データ

第 4.1.7 項 (2) で述べたように、GPV 前処理で空気力学的抵抗を求めるときに植生パラメータ (付録 E.1.1)、植生分布 (付録 E.1.2) および SST の気候値 (付録 E.1.3) の各定数バイナリデータを入力する。

ATM 本体に直接入力するバイナリデータは、可変データのみで NuSDaS に含まれる定数要素以外の定数データはない。

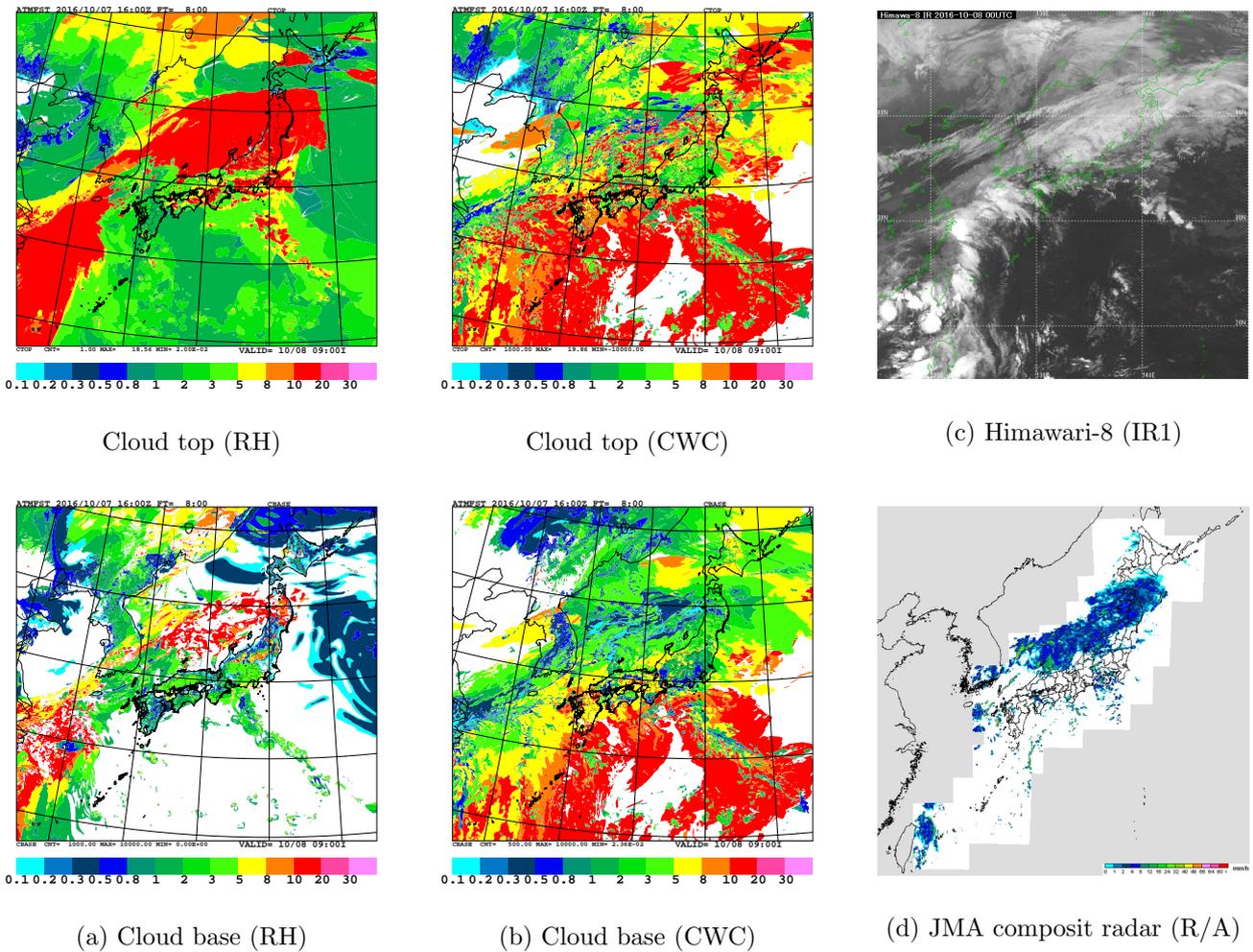
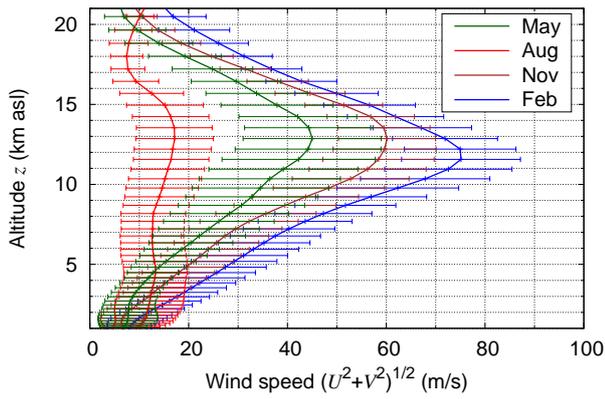


Figure 4.4 Examples of cloud top and base [km asl] by LFM-GPV (00 UTC on 08 from initial time of 16 UTC on 07 October 2016). Thresholds of (a) relative humidity $RH_t = 60\%$, $RH_b = 80\%$ and (b) cloud water content CWC_t is zero, respectively. In the case of estimation by atmospheric pressure ($p_t = 100$ hPa, $p_b = 700$ hPa), the cloud top is 16.14–17.31 km asl and the cloud base is 2.79–3.48 km asl. Observation times of (c) meteorological satellites image and (d) weather radar analysis, shown as a reference, are the same valid time of GPV.

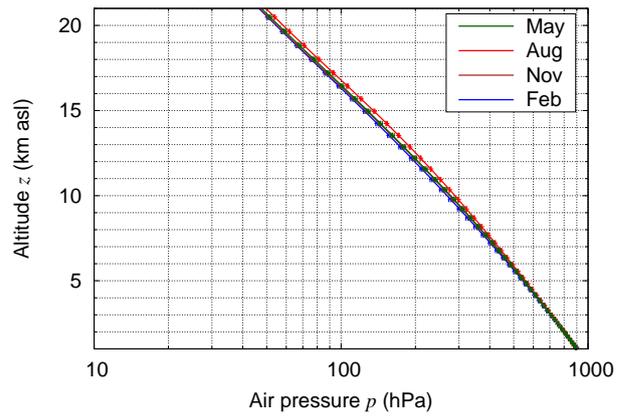
Table 4.3 Setting example of ideal GPV

alt	temp	pres	dens	u	v	w	vdf	cwc	ctop	cbase	rain	snow	grpl
0.0	288.150	1013.25	1.2250	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3	1.0d+4	1.0d+3	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0
50.0	287.825	1007.2	1.2191	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
500.0	284.900	954.61	1.1673	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
1000.0	281.651	898.76	1.1117	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
1500.0	278.402	845.59	1.0581	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
2000.0	275.154	795.01	1.0066	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
2500.0	271.906	746.91	9.5695d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
3000.0	268.659	701.21	9.0925d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
3500.0	265.413	657.80	8.6340d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
4000.0	262.166	616.60	8.1935d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
4500.0	258.921	577.52	7.7704d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
5000.0	255.676	540.48	7.3643d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
5500.0	252.431	505.39	6.9747d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
6000.0	249.187	472.17	6.6011d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
6500.0	245.943	440.75	6.2431d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
7000.0	242.700	411.05	5.9002d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
7500.0	239.457	382.99	5.5719d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
8000.0	236.215	356.51	5.2579d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
8500.0	232.974	331.54	4.9576d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
9000.0	229.733	308.00	4.6706d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
9500.0	226.492	285.84	4.3966d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
10000.0	223.252	264.99	4.1351d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
10500.0	220.013	245.40	3.8857d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
11000.0	216.774	226.99	3.6480d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
12000.0	216.650	193.99	3.1194d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
13000.0	216.650	165.79	2.6660d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
14000.0	216.650	141.70	2.2786d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
15000.0	216.650	121.11	1.9476d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
16000.0	216.650	103.52	1.6647d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
17000.0	216.650	88.497	1.4230d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
18000.0	216.650	75.652	1.2165d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
19000.0	216.650	64.674	1.0400d-1	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
20000.0	216.650	55.293	8.8910d-2	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
21000.0	217.581	47.289	7.5715d-2	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
22000.0	218.574	40.475	6.4510d-2	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
23000.0	219.597	34.668	5.5006d-2	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
24000.0	220.560	29.717	4.6938d-2	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
25000.0	221.552	25.492	4.0084d-2	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
26000.0	222.544	21.883	3.4257d-2	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
27000.0	223.536	18.799	2.9298d-2	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
28000.0	224.527	16.161	2.5076d-2	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
29000.0	225.518	13.904	2.1478d-2	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
30000.0	226.509	11.970	1.8410d-2	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
31000.0	227.500	10.312	1.5792d-2	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
32000.0	228.490	8.8906	1.3555d-2	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
34000.0	233.743	6.6341	9.8874d-3	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
36000.0	239.282	4.9852	7.2579d-3	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
38000.0	244.818	3.7713	5.3666d-3	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
40000.0	250.350	2.8714	3.9957d-3	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
42000.0	255.878	2.1996	2.9948d-3	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
44000.0	261.403	1.6949	2.2589d-3	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
46000.0	266.925	1.3134	1.7142d-3	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
48000.0	270.650	1.0229	1.3167d-3	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
50000.0	270.650	7.9779d-1	1.0269d-3	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
55000.0	260.771	4.2525d-1	5.6810d-4	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
60000.0	247.021	2.1958d-1	3.0968d-4	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
65000.0	233.292	1.0929d-1	1.6321d-4	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
70000.0	219.585	5.2209d-2	8.2829d-5	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
75000.0	208.399	2.3881d-2	3.9921d-5	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
80000.0	198.639	1.0524d-2	1.8458d-5	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					
85000.0	188.893	4.4568d-3	8.2196d-6	1.0d+1	0.0d+0	0.0d+0	0.0d+0	1.0d-3					

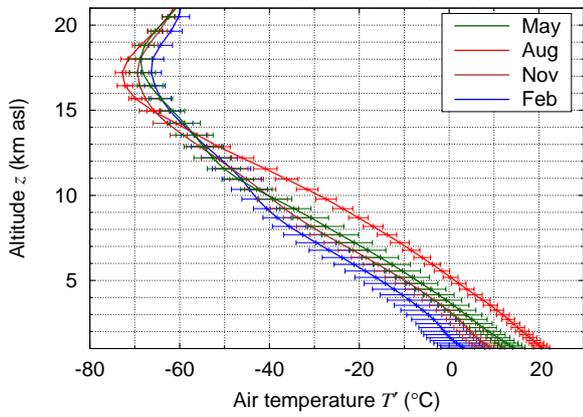
alt: Plane altitude [m asl], temp: Air temperature [K], pres: Air pressure [hPa], dens: Air density [kg/m³], u: Eastward wind speed [m/s], v: Northward wind speed [m/s], w: Vertical wind speed [m/s], vdf: Vertical diffusion coefficient [m²/s], cwc: Cloud water content [kg/m³], ctop: Cloud top [m asl], cbase: Cloud base [m asl], rain: Precipitation intensity (rain) [mm/h], snow: Precipitation intensity (snow) [mm/h], grpl: Precipitation intensity (graupel) [mm/h]. In this example, temp, pres and dens are given by standard atmosphere (NOAA *et al.*, 1976).



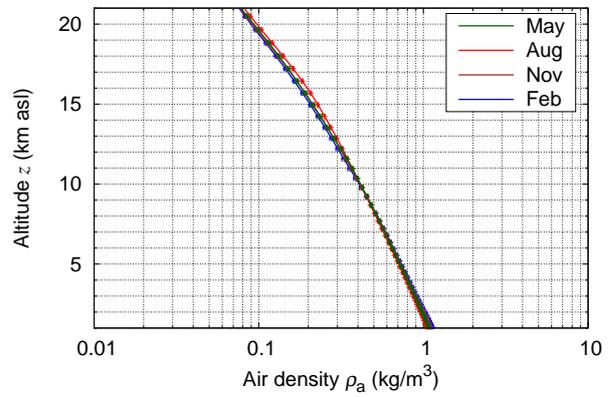
(a) Wind speed



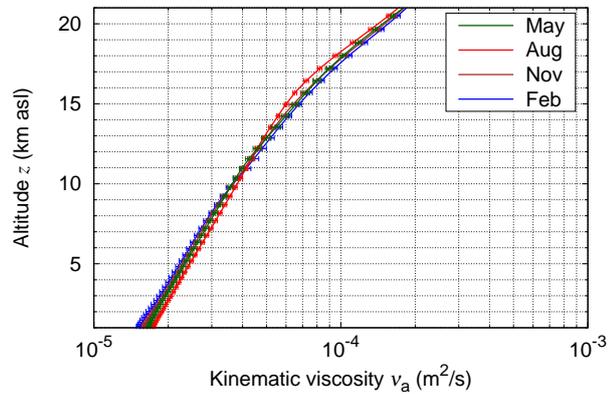
(b) Air pressure



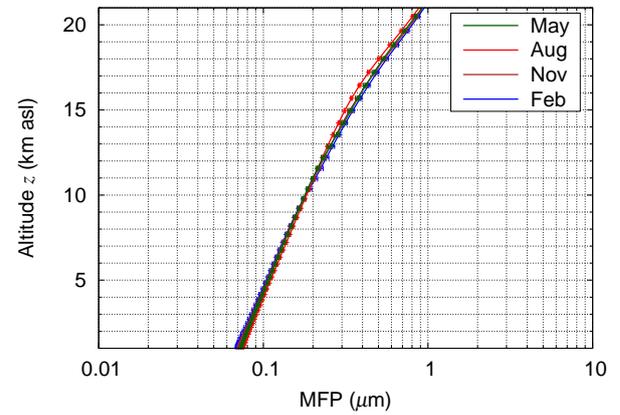
(c) Air temperature



(d) Air density



(e) Kinematic viscosity of air



(f) Mean free path of air

Figure 4.5 Example of vertical profiles of atmosphere above emission point (mean profiles with 1σ form 1 km to 21 km asl). Input GPVs are three-hourly MA (initial of MSM) during May, August, November 2019 and February 2020. Emission point is set at Asosan (Table 5.3) as an example. (a) Wind speed, (b) air pressure, (c) temperature and (d) density are derived by Sections 4.1.2–4.1.5. (e) Kinematic viscosity and (f) mean free path of air are calculated by Equation (2.19) divided by air density and Equation (2.20), respectively.

第 5 章 検 証

本章では、ATM による予測について検証する。例として、第 5.1 節で VAA の情報内容にある火山灰雲の予測に関して、第 5.2 節で降灰予報の情報内容にある降下火砕物すなわち降灰・降礫の予測に関して検証する。

5.1 火山灰雲の予測に関する検証

ATM の業務利用の具体例の一つは VAA 業務における火山灰雲の予測計算である。VAA の発表を行っている東京 VAAC では、2020 年度末を目途に現行のモデルである GATM から、ATM に更新を予定している。そこで本節では、モデル更新に伴う予測特性の変化を把握するためにモデル間の比較と検証を行う。ただし、VAA では大気中の火山灰（浮遊火山灰）が航空機の運航に与える影響を主な対象としていることから、比較・検証は火山灰雲に対して行う¹。

ATM と GATM で考慮している物理過程は同じであり、実装や定数も結果に大きく影響するような違いはなく、利用する大気場も同じものを使用したため、ATM と GATM の予測には大きな違いはないことが期待される。実際に大きな違いはみられなかったが、予報後半でわずかな違いが確認された（第 5.1.3, 5.1.4 項）。この違いは、ATM と GATM では大気場の内挿方法が異なることに起因すると考えられる。すなわち、ATM の場合、各トレーサーの位置の大気場は気象モデルの格子点の値をトレーサーの位置に内挿した値が用いられる一方で、GATM では、モデルの前処理で大気場を GATM 用の格子点に内挿²し、その内挿された格子点の値をトレーサーの位置にさらに内挿する。つまり、大気場をトレーサーの位置に空間内挿する回数は、ATM は 1 回、GATM は 2 回、という違いがある。内挿は平滑化の作用があり、つまり空間的な極値を丸める作用があるため、GATM に比べて内挿の回数が少ない ATM は、空間的な極大値や極小値が予測に取り込まれやすいという特徴がある。

本節で示すように、両モデルの予測は、大気場の取り扱いによると思われる若干の違いが予報後半にみられたものの、その違いは小さく、火山灰雲の予測図（Figures 5.1~5.8）では、ほとんど認識できない程度であった。このことから、GATM から ATM へのモデル更新に伴う予測特性の変化はほとんどないと判断した。以下では、検証の方法と結果について説明する。

5.1.1 対象とする事例

ATM と GATM の比較と検証にあたり、近年の噴火事例として以下の事例を抽出した（Table 5.1）。なお、検証では、モデルの結果と 3 時間ごとの予報官による衛星解析（SA）³の比較することとした。ただし、Table 5.1 のとおり、予報期間のうち予報官解析があるのは一部（表の ○ 印）であるため、検証も予報官解析のある時刻に対してのみ行った。

¹VAA 業務では、噴火の可能性が高い国内の火山について、単発的な噴火を想定した降灰の予測なども行っている。降灰予測の検証については次節を参照。

²鉛直座標系は η 座標で内挿される。

³東京 VAAC では、責任領域内の火山灰雲を監視しており、気象衛星画像などを用いて火山灰雲の領域や高度を解析して発表している。以下では、その解析結果を予報官解析と呼ぶ。

Table 5.1 List of case for the verification

Case No.	Volcano	Advisory No.	Initial time of forecasting [UTC]	SA (FT=03)	SA (FT=06)	SA (FT=09)	SA (FT=12)	SA (FT=15)	SA (FT=18)
1	Karymsky	2020/042	17:20 on 02 June 2020		○				
2	Sheveluch	2019/672	23:20 on 11 November 2019	○	○				
3	Sakurajima	2019/437	11:20 on 08 November 2019		○				
4	Sheveluch	2019/654	08:20 on 03 November 2019	○	○	○	○	○	
5	Sheveluch	2019/656	14:20 on 03 November 2019	○	○	○			
6	Sheveluch	2019/658	20:20 on 03 November 2019	○					
7	Sakurajima	2019/347	11:20 on 29 October 2019	○	○				
8	Sakurajima	2019/348	14:20 on 29 October 2019	○					

5.1.2 計算の設定

初期値の精度はモデルの予測精度に大きく影響する。したがって、複数のモデル間の予測を比較するためには、できる限り同じ初期値（初期の火山灰粒子の分布）を使うことが望ましい。モデルの比較の際に、異なる初期値を利用すると、モデルの違いなのか初期値の違いなのか判断が難しい。そこで、ATM と GATM で用いる初期値は、ともに東京 VAAC が現業で利用しているシステムで作成されたものを用いることとした⁴。一方、モデルの設定については、GATM に合わせて ATM の各種スイッチなどを設定した。GATM に合わせるための設定のうち、主な変数やスイッチなどを Table 5.2 に示す。

Table 5.2 Settings of the JMA-ATM experiments

	Value or description	Remarks (variable, switch etc.)
Number of tracers	40,000	n_tracer=40000
Time integral method	Euler scheme	n_switch_integral_method=1
Time step	600 s	dt_atm=600.d0
Horizontal diffusion	No diffusion	n_switch_diffusion_horizontal=0
Vertical diffusion	No diffusion	n_switch_diffusion_vertical=0
Meteorological field (GPV)	GSM (Early forecast (Ef))	Resolution: 0.5° × 0.5°

5.1.3 予測結果の比較

ATM と GATM の予測を Figures 5.1~5.8 に示す。参考として予報官解析（SA）も図に含めている。

各図から明らかなように、いずれの事例においても 2 つのモデル間で目立った違いはみられず、この図からは特性の変化はほとんど確認できない。ただし、細かく見るとわずかな違いがみられる。例えば、Case1 においては、北への輸送の傾向が ATM の方がわずかに強く 18 時間後の予測（FT=18）では、ごくわずかではあるが GATM に比べると ATM の予測する火山灰雲はより広域である。このような ATM の予測する火山灰雲の方が GATM に比べて広範囲である傾向は、この事例に限らず他の事例でもみられたが、それは図ではほとんど確認できない程度である。

⁴東京 VAAC では予報官解析に含まれる雲頂高度と領域から初期値を作成している。

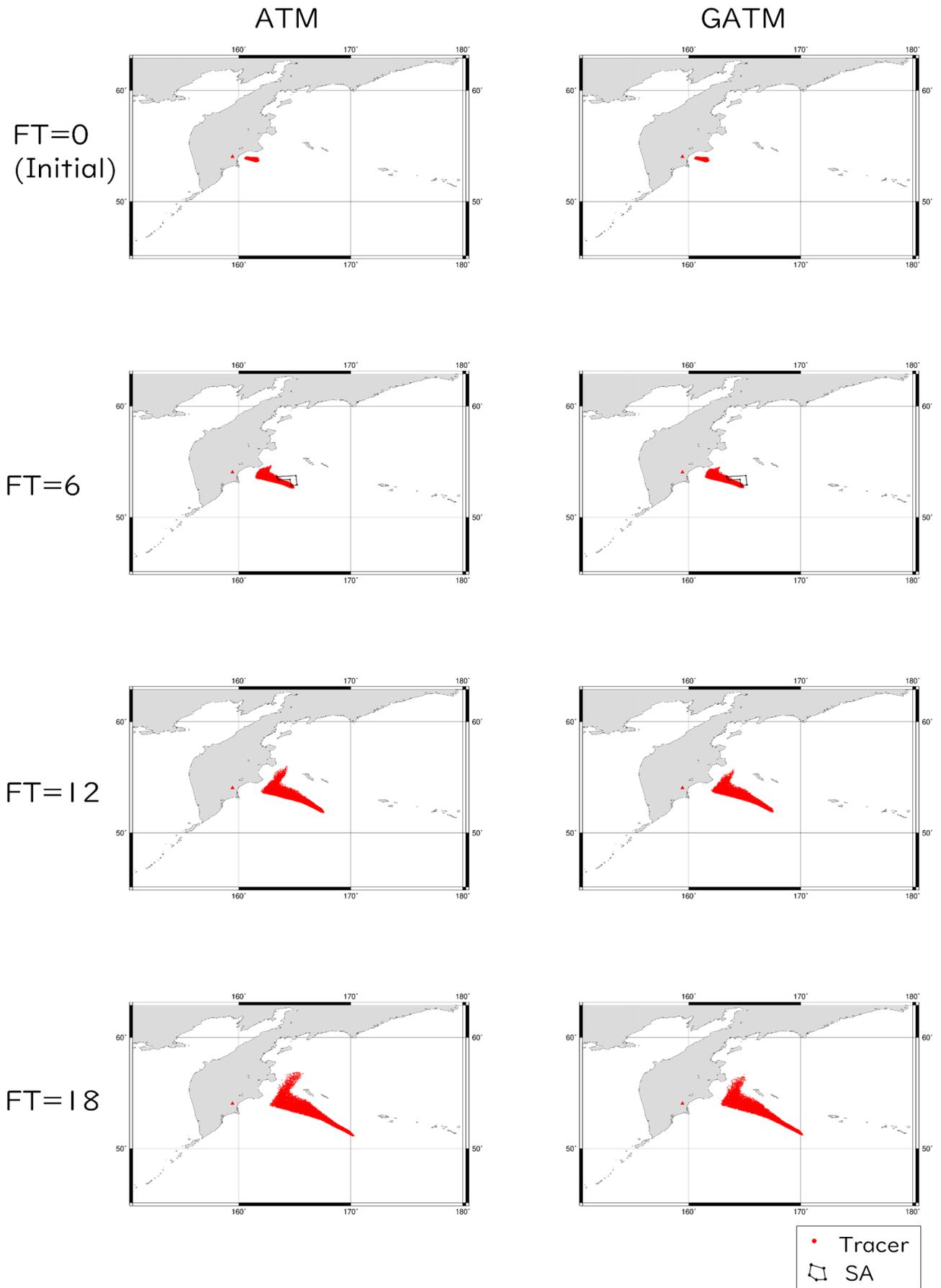


Figure 5.1 Forecast and SA (Case 1)

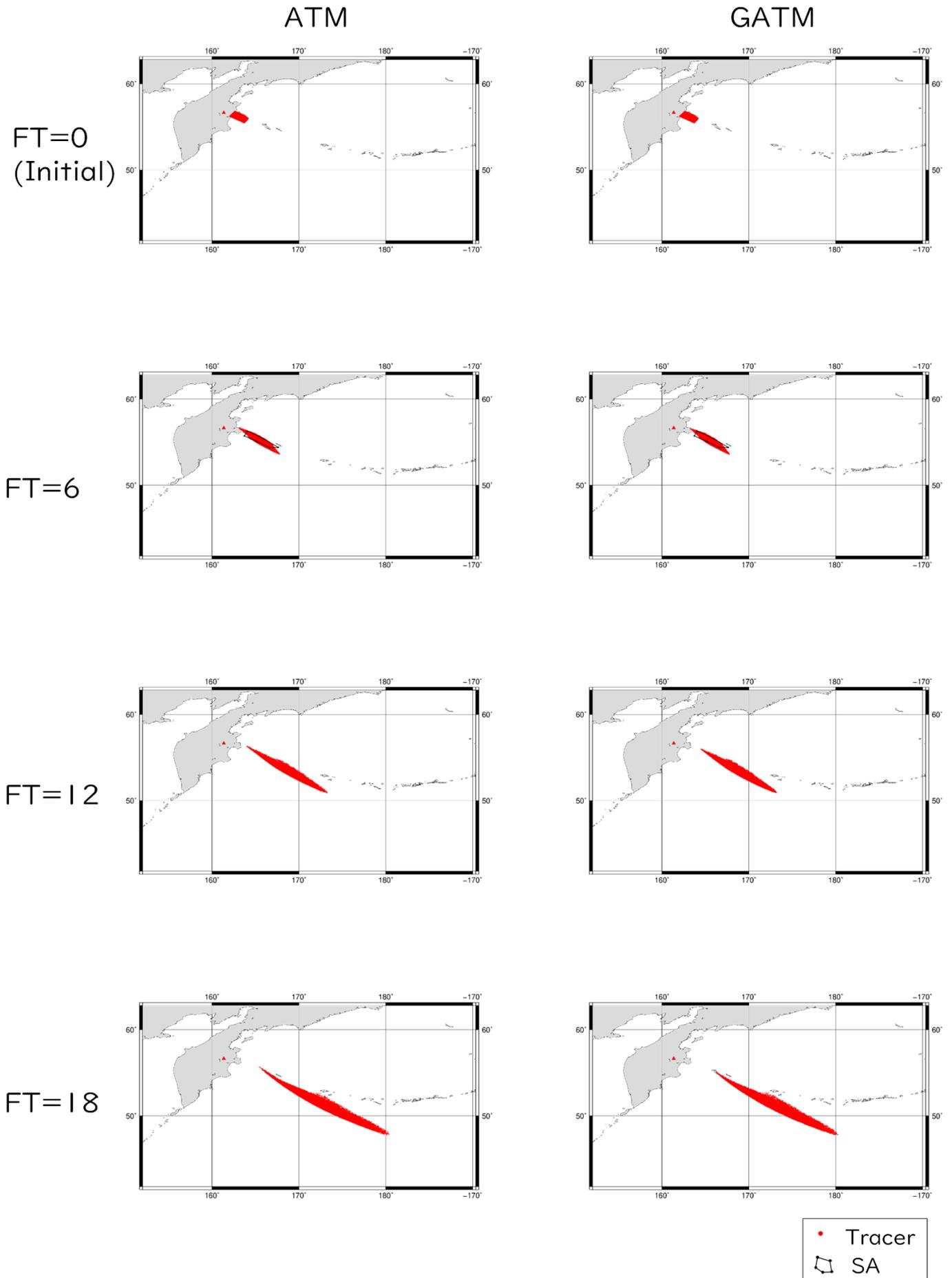


Figure 5.2 Forecast and SA (Case 2)

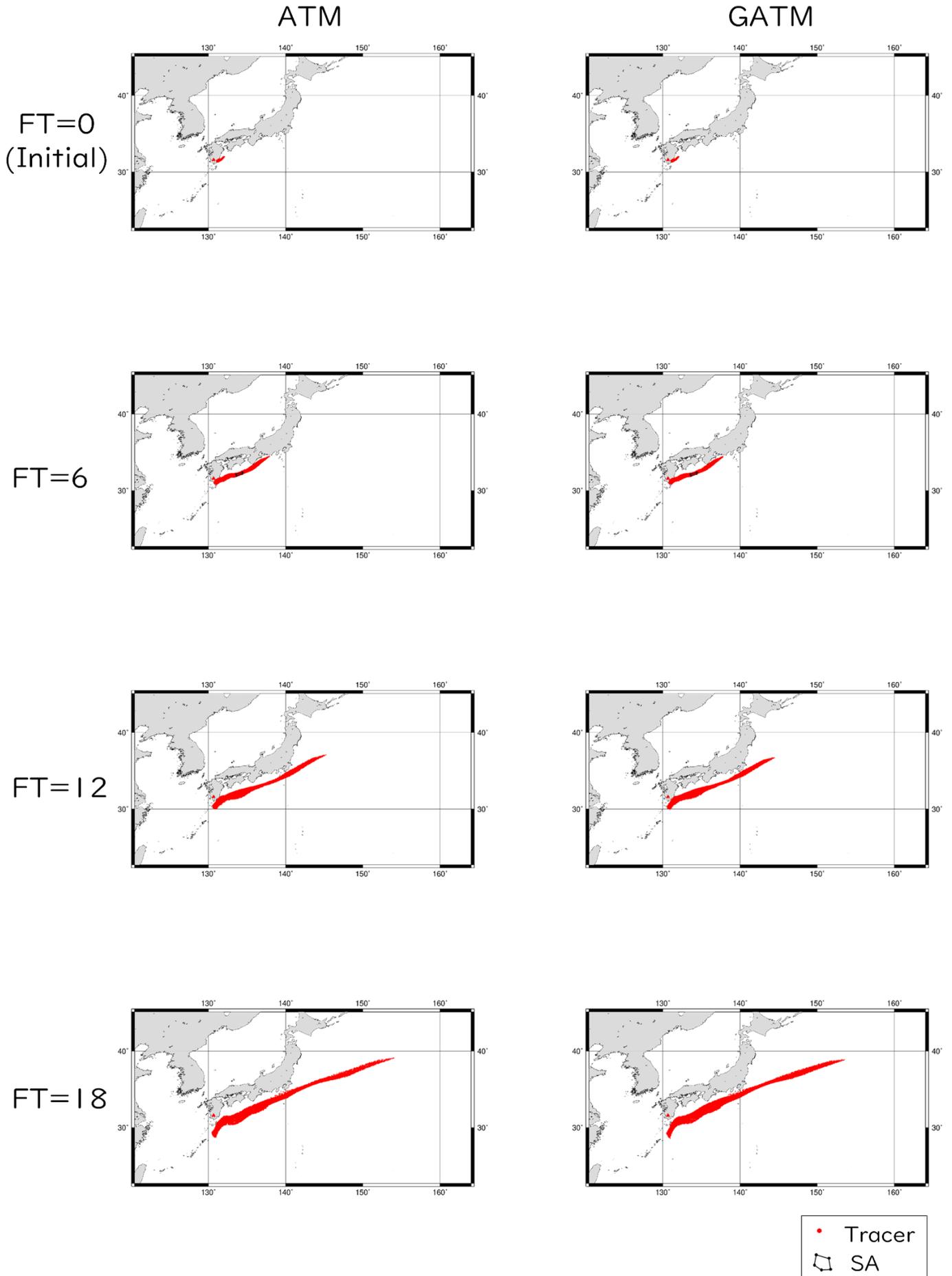


Figure 5.3 Forecast and SA (Case 3)

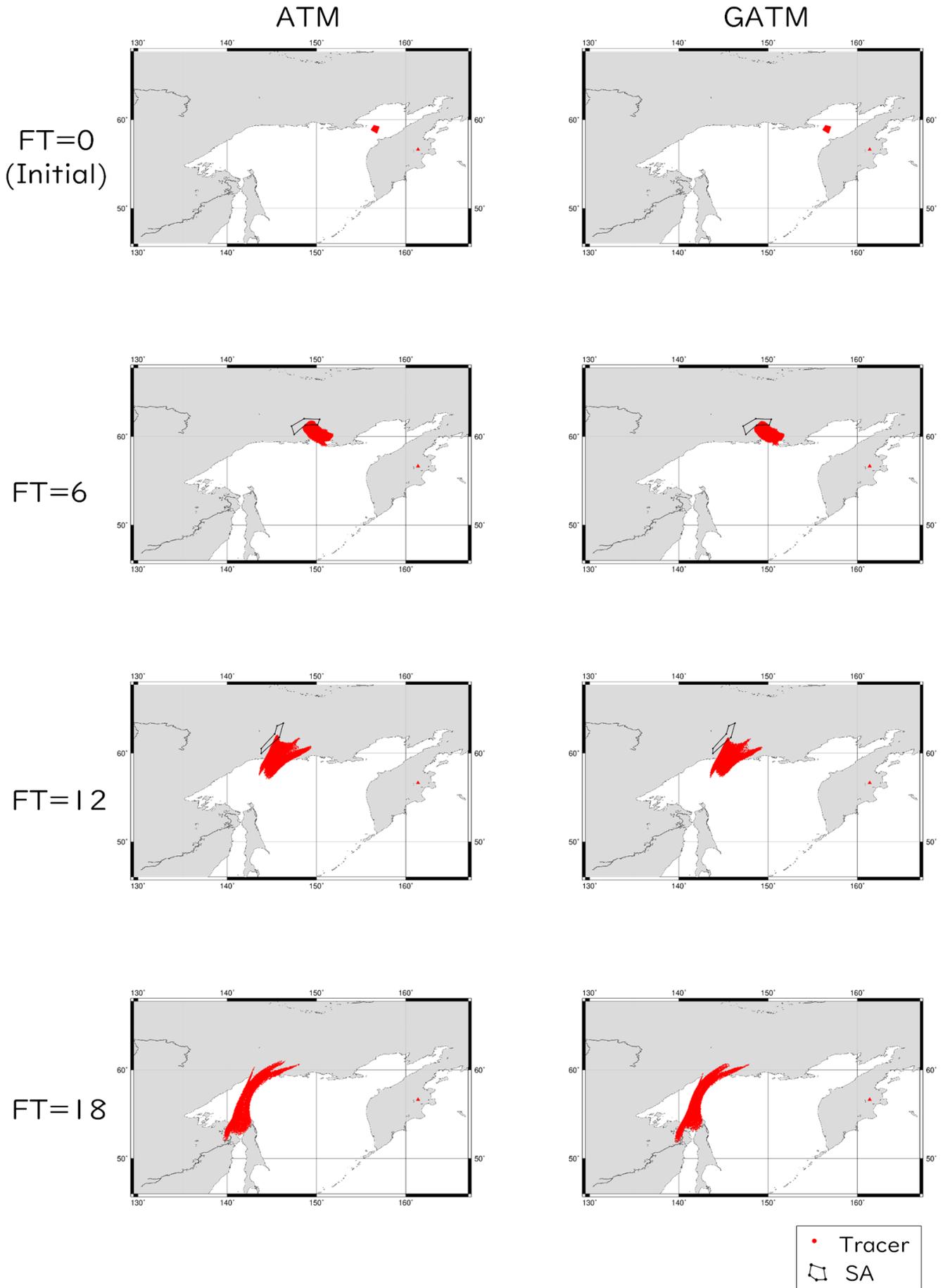


Figure 5.4 Forecast and SA (Case 4)

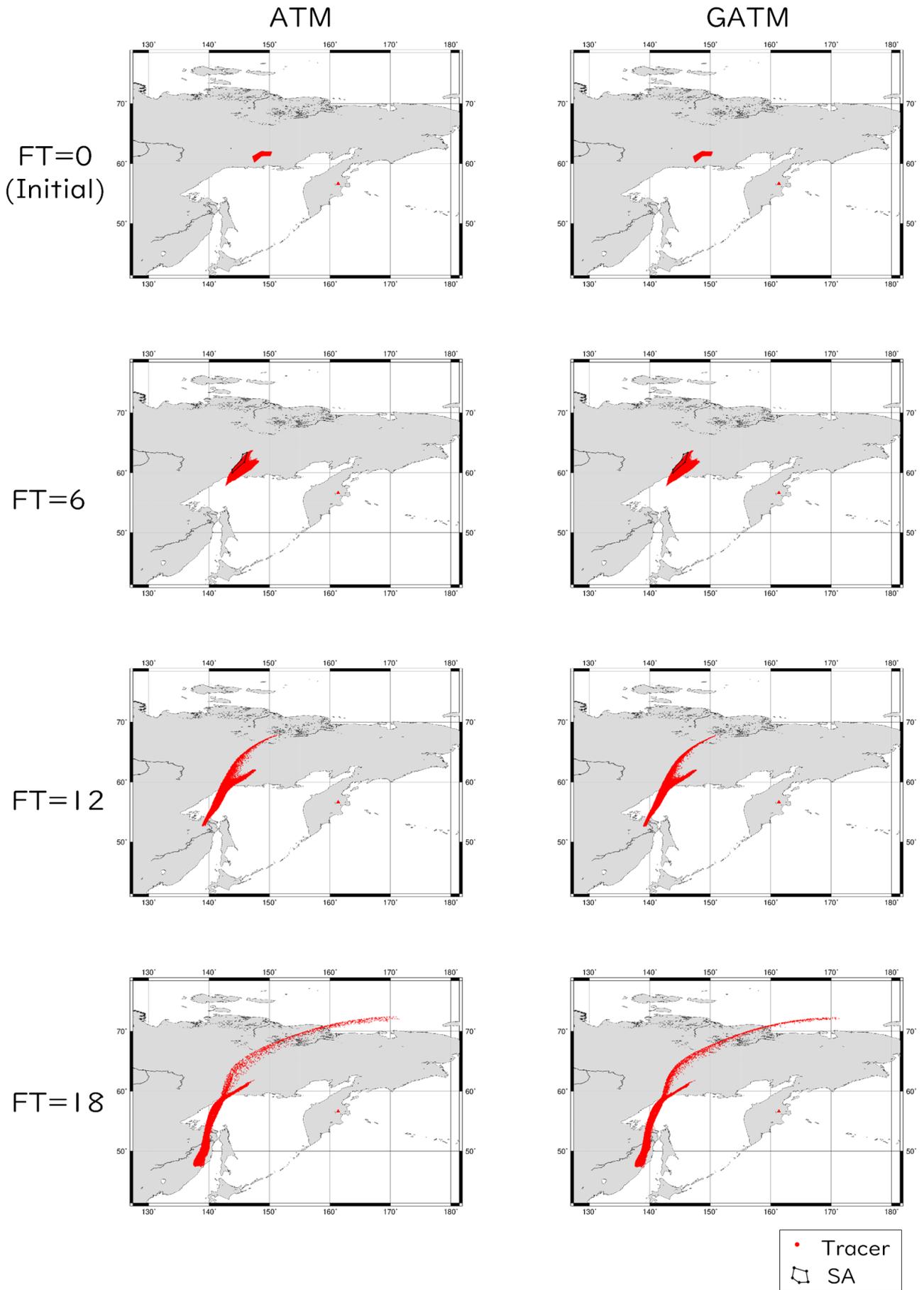


Figure 5.5 Forecast and SA (Case 5)

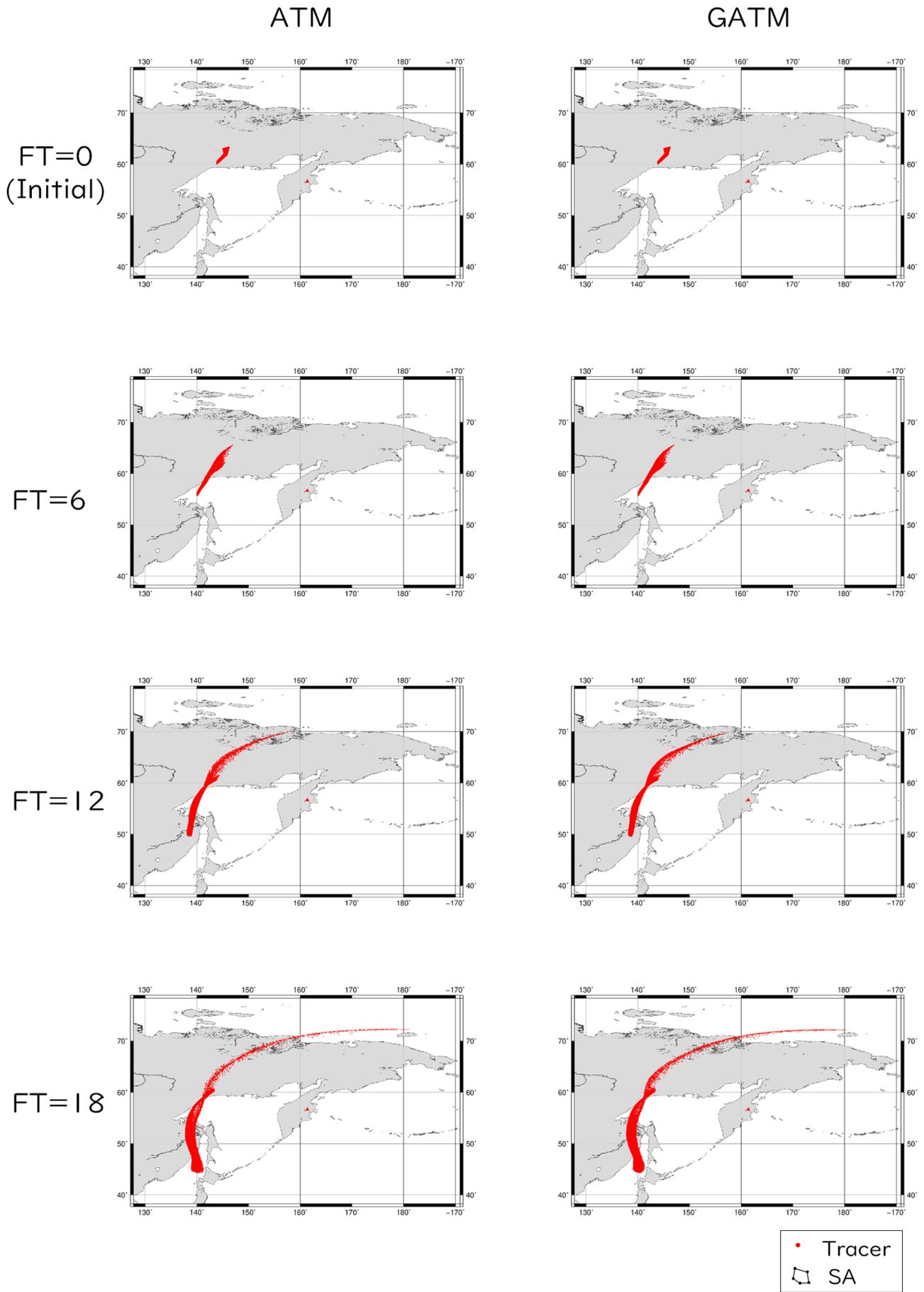


Figure 5.6 Forecast and SA (Case 6)

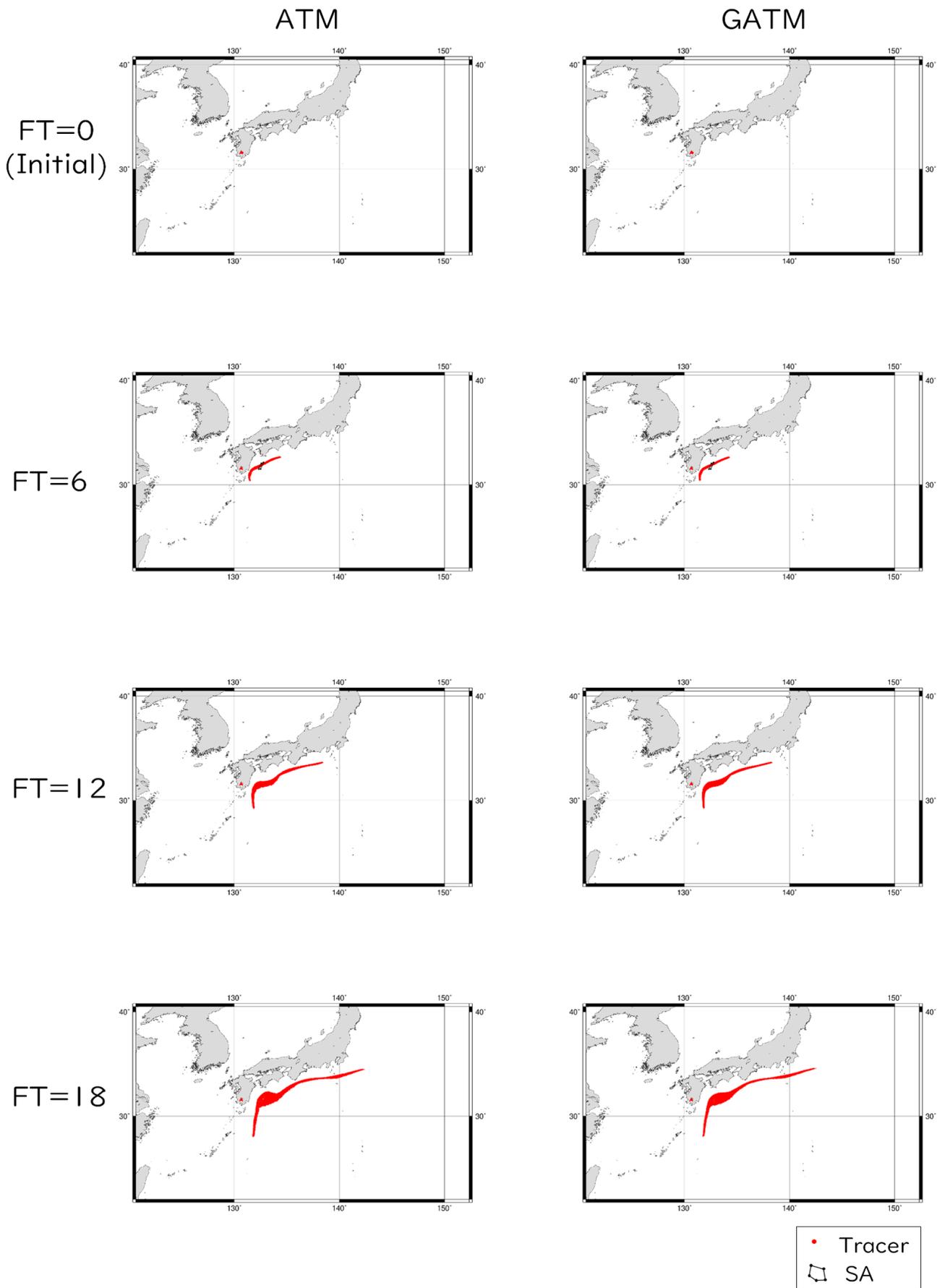


Figure 5.7 Forecast and SA (Case 7)

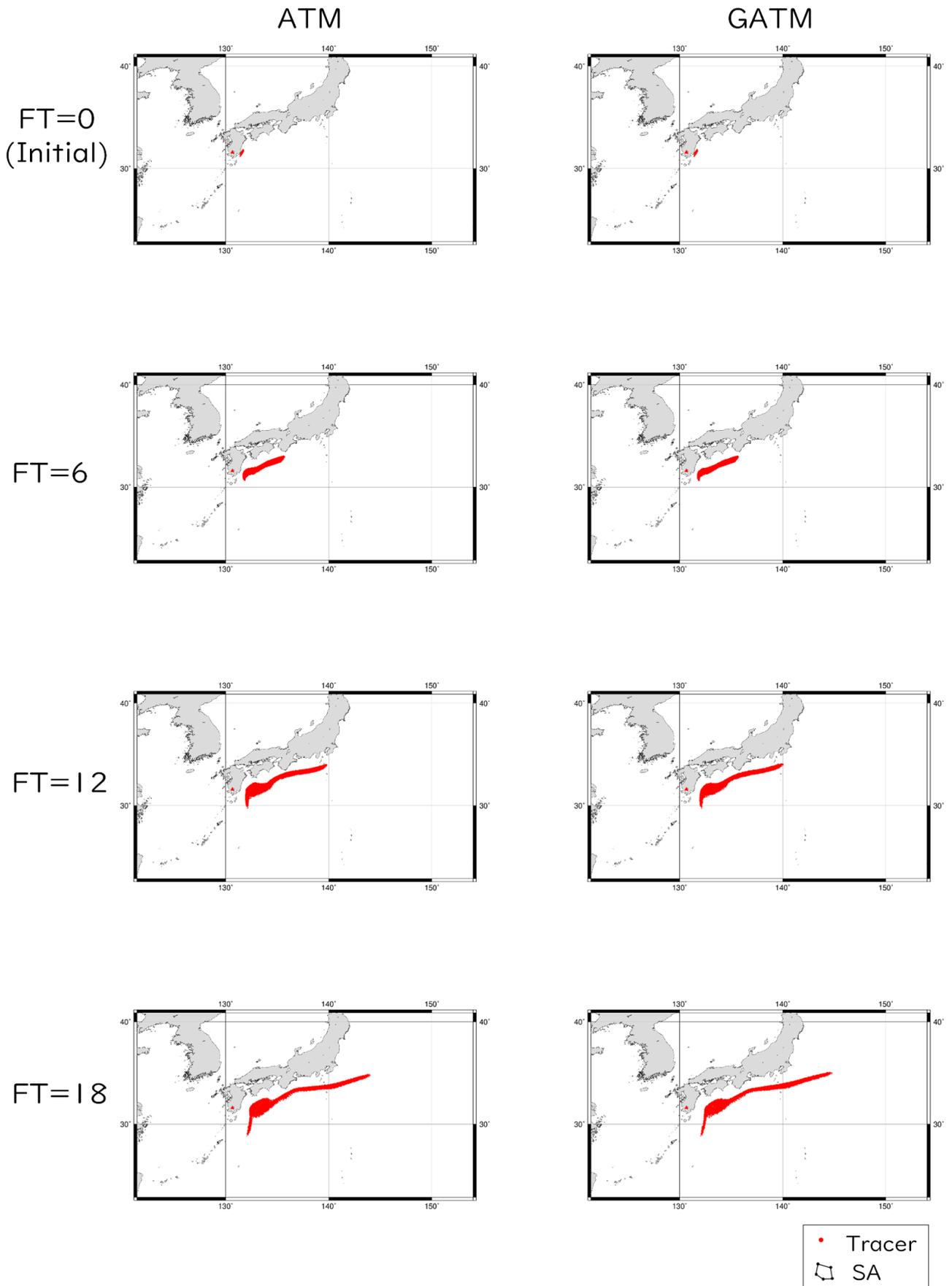


Figure 5.8 Forecast and SA (Case 8)

5.1.4 予報官解析に対する検証

ATM と GATM の両モデルが予測する火山灰雲について予報官解析に対する検証を行い、モデルの特性の違いを調べる。VAA では現在、火山灰雲の予測は領域の予測のみであり火山灰の濃度の予測は行っていない。そこで、本項では火山灰雲に対して「位置」と「形」に注目して検証を行う。具体的には、予測精度を定量化するための指標として「火山灰雲の中心位置（重心）」と「火山灰雲の面積」について検証を行うこととした。

(1) 火山灰雲の中心位置の検証

予測に用いる火山灰雲の初期値については、火山灰雲の濃度に関する観測などがいないため、各トレーサーについては同じ質量を与えており、予測においても各トレーサーは同じ質量をもっている。そこで、火山灰雲の中心位置を評価するにあたり、予測結果の中心位置は全トレーサーが同じ質量をもっていると仮定して計算した重心を「予測の中心」とした。予報官解析は領域内の質量分布の情報をもっていないので、領域内で均等に質量が分布するとして重心を求めた。任意の多角形の質量重心を求める方法にはいくつかあるが、ここでは、モンテカルロ法を用いて計算した。すなわち、予報官解析の火山灰雲の領域付近に無数の点（計算では 100 万点）を不規則に生成し、各点に対して内外判定を行い、領域内部の点と判断された点に対して質量重心を求め、それを火山灰雲の中心と定義した。

上述した方法で求めたモデルの予測と予報官解析の火山灰雲について中心位置の軌跡を Figure 5.9 に示す。事例によっては、ATM と GATM で若干の違いがみられるが、おおむね同様の軌跡となっており、顕著な特性の違いはみられない。しかし、上述したように、大気場の内挿方法の違いがあるため、予報期間が後半になるにつれてわずかな違いがみられる。この違いはわずかであり、Figure 5.9 からは ATM と GATM のどちらがよい予測であるかの判断が困難である。そこで、予報官解析の火山灰雲の中心位置とモデルの予測の火山灰雲の中心位置の距離を予報期間ごとにプロットした (Figure 5.10)。この図を見ると、いずれの事例においても、予報期間前半 (FT=09 程度まで) は ATM と GATM でほとんど違いはみられない一方で、Case 4 では、予報期間後半 (FT=12, 15) で ATM が GATM よりもよい予測であることがわかる。予報期間後半の検証事例は 1 事例 (Case 4) であり、より適切な検証結果を得るためには、さらに多くの事例で検証を行う必要があるだろう。

(2) 火山灰雲の面積の検証

次に、火山灰雲の面積の検証を行う。火山灰雲の面積を評価するにあたり、トレーサー情報を面積の情報に変換する必要がある。そこで、モデルで予測された火山灰雲の東西・南北の端を求め、東西・南北をそれぞれ 100 等分した格子 (合計 10,000 格子) を考え、その格子内にトレーサーがあった場合には、その格子内の面積をモデルが予測したと解釈した。一方、予報官解析の火山灰雲の面積は、前述の中心位置と同様にモンテカルロ法を用いて計算した⁵。

上述した方法で求めた両モデルの予測と予報官解析の火山灰雲の面積を 3 時間ごとにプロットしたものを Figure 5.11 に示す。事例によって程度は異なるものの、予報後半において GATM に比べて ATM の方が広い範囲に火山灰雲を予測する傾向がみられる。両モデルの面積比 (GATM に対する ATM の増減率) (Figure 5.12) から予報後半では 5~7% 程度、GATM に比べて ATM の方が火山灰雲の面積を広い範囲に予測する傾向がある。

実際に発表されている VAA は予報期間が進むにつれて、実況に比べて広い範囲に火山灰雲を予測する傾向があり、その傾向は ATM でも同様である。したがって、ATM は火山灰雲の広がりについては、過大傾向がより強まったという点で若干の改悪の傾向がみられたこととなる。ただし、火山灰雲の面積の過大傾向の問題は主に初期値の精度に起因しているため、その判断は、初期値の精度とともに議論すべきあり、むしろ実際の予測図 (Figures 5.1~5.8) から、大きな変化ではないと考えている。

⁵低次元空間における閉じた領域の体積を求める常套手段である。

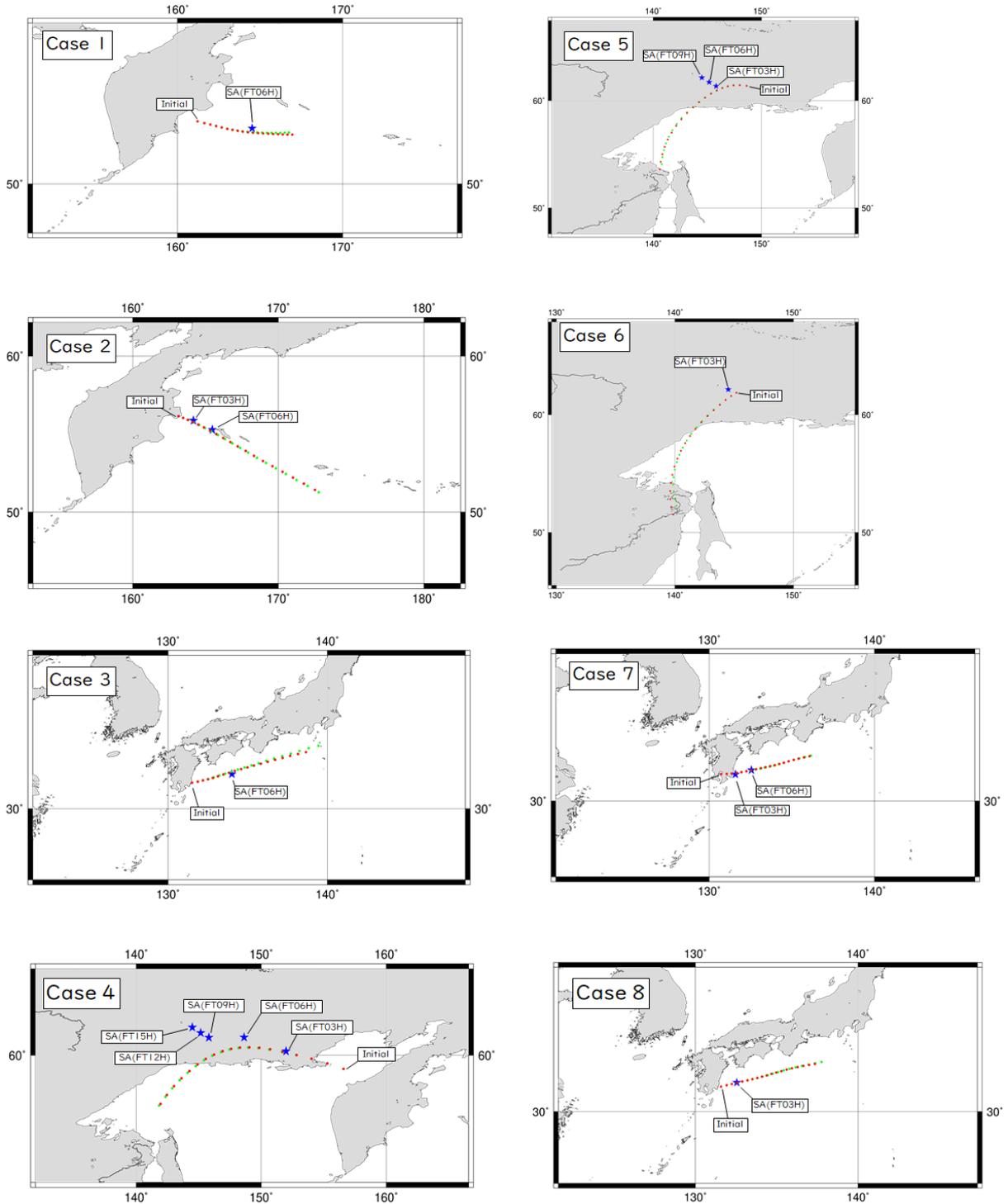


Figure 5.9 Trajectory of forecast (ATM: red dot, GATM: green dot, every hour) and SA (blue star)

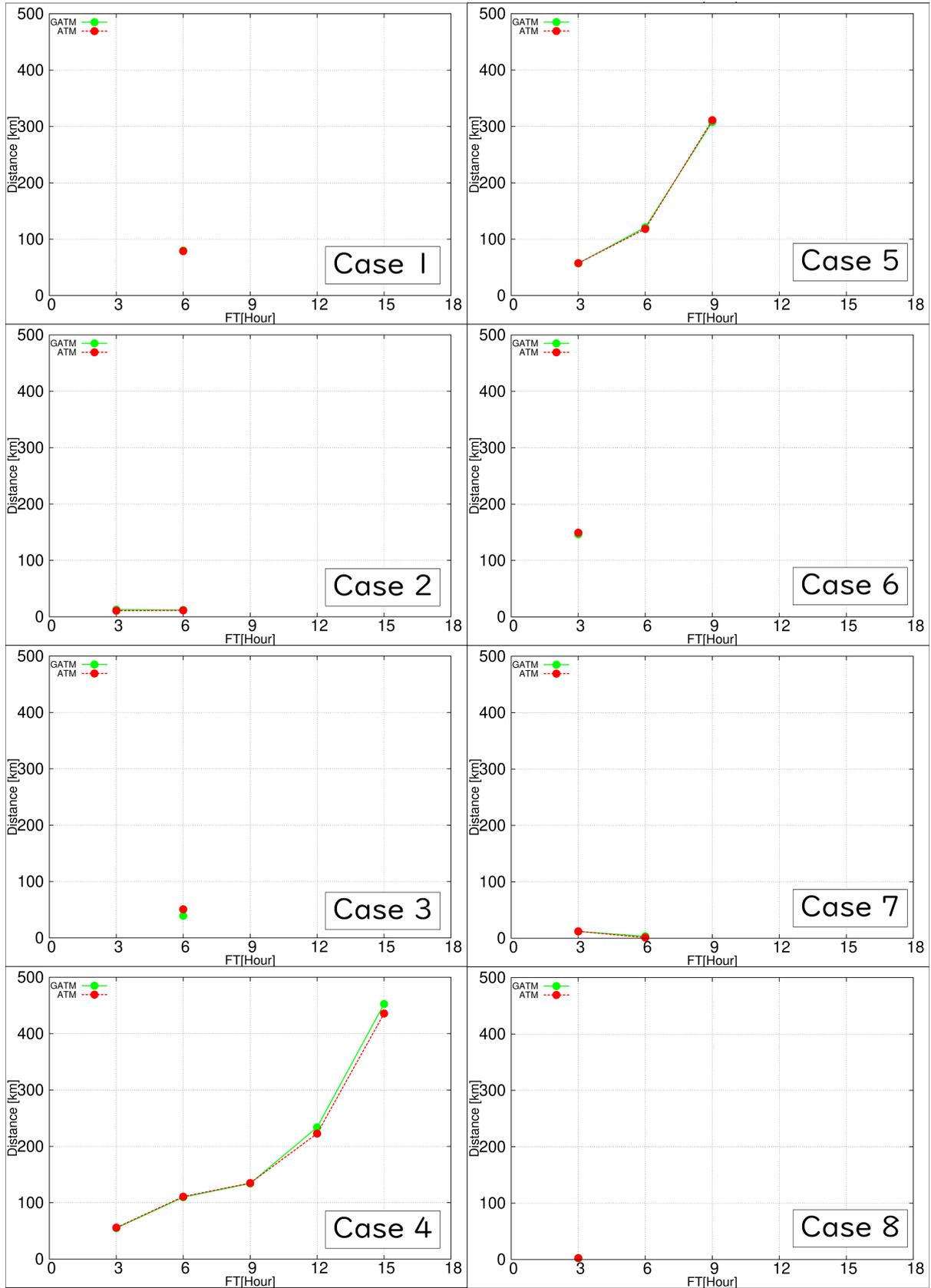


Figure 5.10 Distance from center of SA (ATM: red, GATM: green)

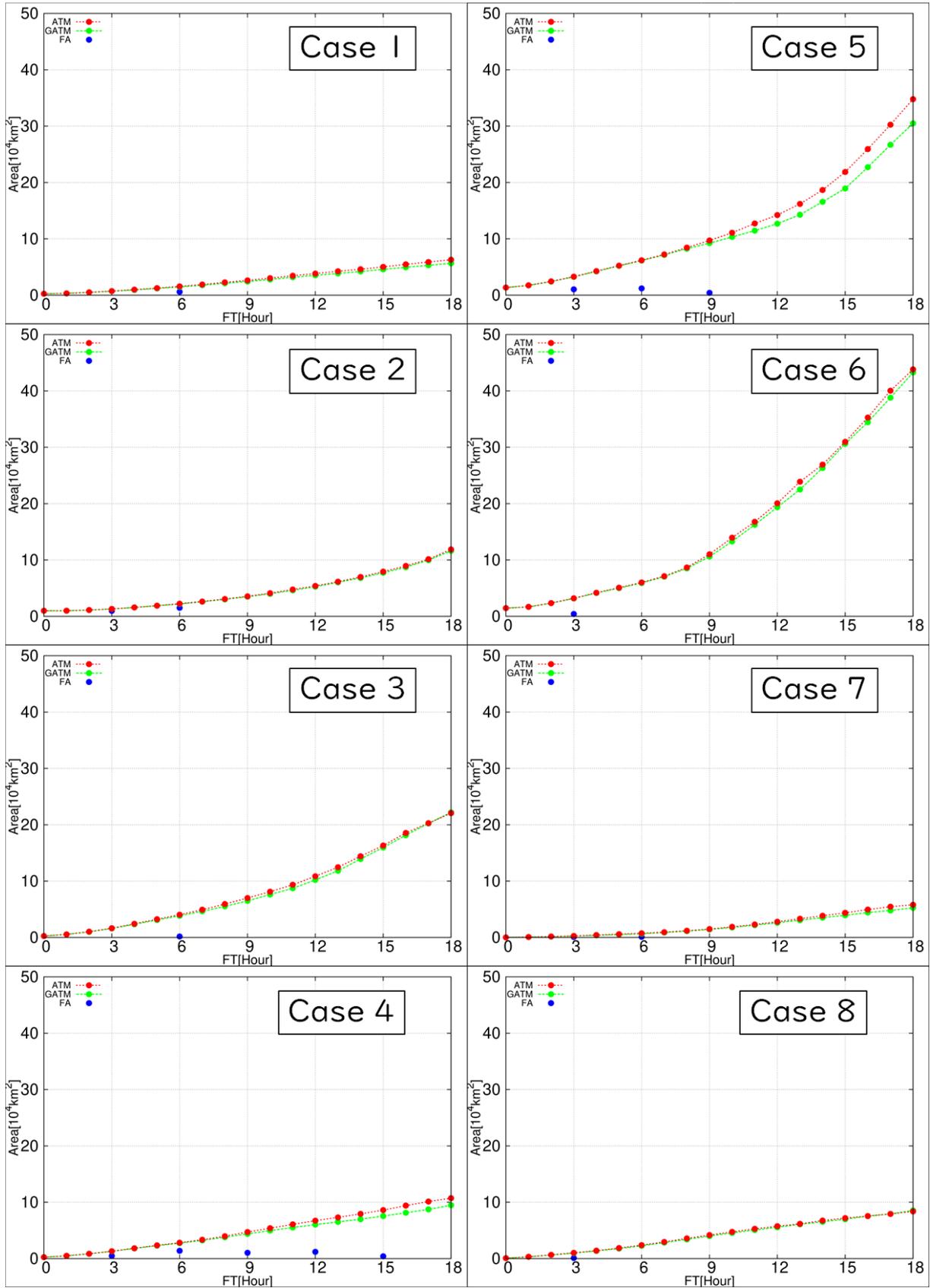


Figure 5.11 Area of ash cloud (ATM: red, GATM: green and SA: blue)

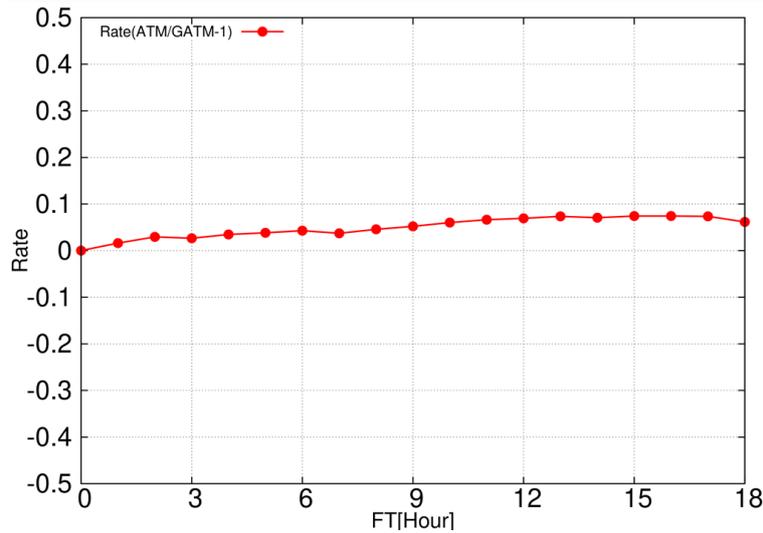


Figure 5.12 Rate of area of ash cloud (ATM/GATM)

5.2 降下火砕物の予測に関する検証

気象庁における移流拡散モデルの業務利用のもう一つに、第 1.1 節で述べた降灰予報における降下火砕物、すなわち降下火山灰（降灰）と風の影響を受け流されて降る小さな噴石⁶（降礫）の予測がある。本節では、ATM 計算による積算降灰量と最大長径分布の予測について、初期値、入力値および ATM 計算の設定の違いによる検証を行う。

ATM は、第 2.2 節で述べたように、GATM とともに RATM で考慮していた物理過程も実装している。これまで GATM で実行してきた火山灰雲の予測に関して、新旧モデルの予測特性に大きな違いがないことは前節で検証した。RATM で実行してきた降灰・降礫の予測に関しては、第 5.2.1 項に挙げる一事例について、第 5.2.3 項で比較検証する。

5.2.1 対象とする事例

降灰・降礫予測の検証は、2015 年の新しい降灰予報の運用開始後、最も広域に降灰が観測された 2016 年 10 月 8 日阿蘇山爆発的噴火の事例（宮縁・他, 2017; Ishii *et al.*, 2018; Sato *et al.*, 2018）を対象とする。検証に用いた降灰・降礫の観測は、気象庁の地上気象観測、機動調査班（JMA-MOT）による現地調査および聞取調査の結果（降灰あり：73 地点（内、降灰量の観測：20 地点、降礫の観測：9 地点）、降灰なし：52 地点）を使用した。

5.2.2 計算の設定

以下の項では、初期値の ESP の違いによる RATM との比較、入力値の数値予報 GPV および ATM の計算粒子数の違いについて検証する。検証にあたり行った数値計算の設定について、Suzuki (1983) に基づく初期値の設定を Table 5.3 に、ATM 計算の共通設定を Table 5.4 (p. 72) にまとめる。

第 5.2.3 項 (2) を除く検証において初期値に用いる Table 5.3 の噴煙高度は、気象レーダー（Sato *et al.*, 2018）および気象衛星（Ishii *et al.*, 2018）による解析値を参考に、噴煙高度を変化させた RATM 予測の降灰観測のあり／なしに対する予備検証から最もよいスコア（第 6.2.2 項 (1)）を取った高度を設定した。噴火継続時間は、観測された震動継続時間を参考に、(3.3) 式で推定する総噴出量が現地調査（宮縁・他, 2017）による解析値と整合するように設定

⁶降灰予報（速報）には、最大長径 a_1 ではなく、最大粒径 $D \geq 10$ mm の降下火山礫の分布が図示されている（気象庁, 2014）。

した。

降灰・降礫予測をする場合の ATM のタイムステップ Δt は、ルンゲ・クッタ法で降灰予報（運用開始当初⁷はオイラー法の 60 秒（降礫）ないし 180 秒（降灰））より長くかつベースタイム起算で最短 10 分ごとの出力を考える場合（Figure B.2）、選択肢として、 $\Delta t = 200, 300, 600$ 秒が挙げられるが、降礫も想定した理想実験（Figure 2.10 (c)）からルンゲ・クッタ法の $\Delta t = 300$ 秒以上はオイラー法の 60 秒より精度が低下することから、 $\Delta t = 200$ 秒に設定した。

積算降灰量および最大長径分布の検証対象時刻は、初期時刻：7 日 16 UTC（8 日 01 時）の LFM の 9 時間予報値⁸を用いた RATM の計算に基づき、当日 03 時 15 分に発表された降灰予報（詳細）の予報終了時刻と同じ 8 日 08 時までとした。

Table 5.3 Settings of the eruption source parameter based on Suzuki (1983)

	Value or description	Remarks
Volcano	Asosan (the Nakadake first crater)	
Position	32°53'05"N, 131°05'06"E	
Summit elevation	1300 m asl	
Eruption time	01:46 JST on 08 October 2016	
Eruption duration	168 s	
Plume height	13100 m asl	
Total mass	6.3×10^8 kg	Equation (3.3)
Grain-size distribution	Log-normal with $D_m = 0.25$ mm, $\sigma_D = 1.0$	Equation (3.7)
Cutoff size	$D_{max} = 96$ mm, $D_{min} = 0.65$ μ m	
Particle density	$\rho_{max} = 1000$ kg/m ³ , $\rho_{min} = 2400$ kg/m ³	Equation (3.12)
Release constant	$\beta = 0.017$	Equation (3.17)

5.2.3 予測結果の検証：初期値の比較

初期値として、第 3.1 節で述べた Suzuki (1983) の ESP と、降灰の観測値を逆解析した Ishii (2018) の解析値を用いた場合について、RATM と ATM の予測結果を比較・検証する。

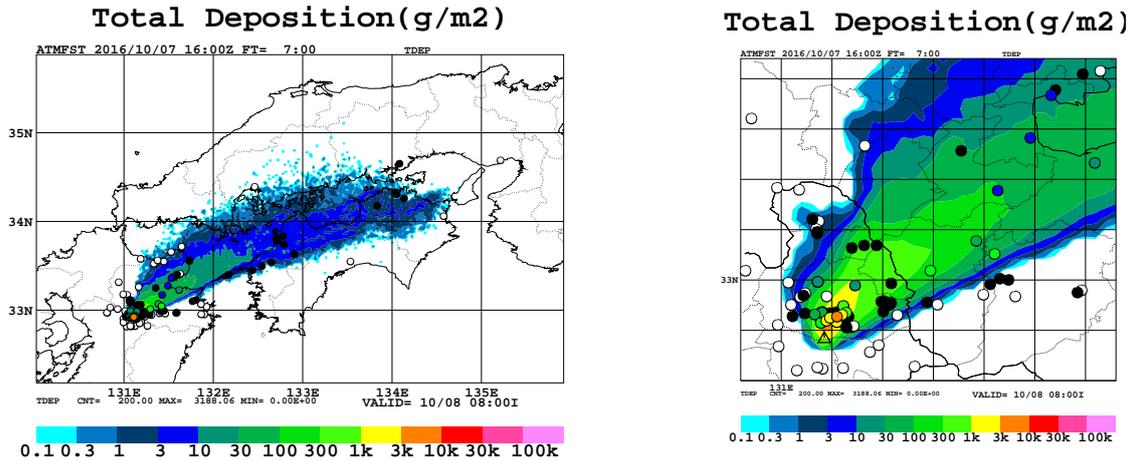
(1) Suzuki (1983) の初期値

積算降灰量

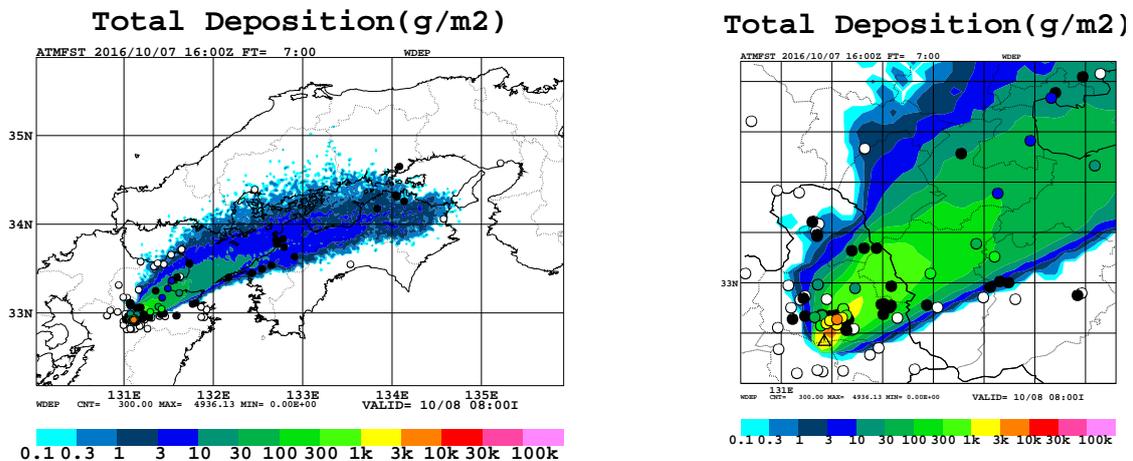
初期値に Suzuki (1983) の ESP を用いた場合の ATM と RATM による積算降灰量の予測およびその差分を Figure 5.13 に示す。図中に示した降灰のあり（●）／なし（○）の観測点に対して、ATM の定性的な予報特性は RATM とおおむね同じ（(6.5) 式の見逃し率は同じ、適中率・空振り率・バイアスコア・スレトスコア（第 6.2.2 項 (1) 参照）はわずかに改善）であることは、Figure 5.14 (a) に示した POD-SR ダイアグラム（Roebber, 2009）からも確認できる。定量的には、平均誤差・RMSE とともに改悪しているが（Figure 5.14 (b)）、これは ATM 本体ではなく初期値の不確実性に起因することを (2) で確認する。なお、Figure 5.13 (c) にみられる分布主軸に顕著な差異の成因については、次の最大長径分布の検証で述べる。

⁷2020 年 10 月現在、定時、速報、詳細の RATM はいずれもオイラー法の 180 秒で運用されている。

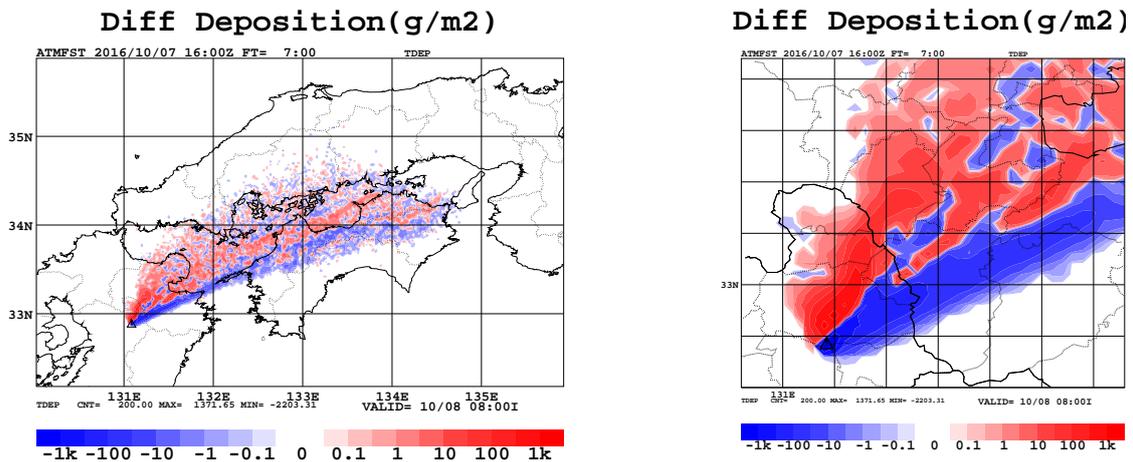
⁸本検証の LFM は、当時の気象庁スーパーコンピュータシステム（NAPS9）の数値予報ルーチンで出力された asuca のモデル面 GPV を使用した。現在は NAPS10 において、鉛直高解像度 GPV の 10 時間予報値が出力されている（Table 4.1）。



(a) JMA-ATM (Runge-Kutta 200 s)

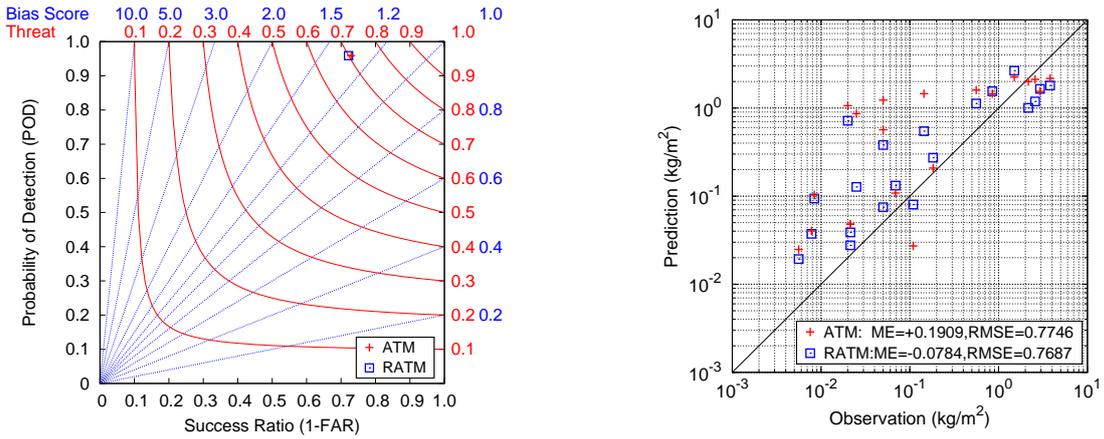


(b) JMA-RATM (Euler 180 s)



(c) (a) JMA-ATM - (b) JMA-RATM

Figure 5.13 Comparison of accumulated ash-fall predictions for the eruption at Aso volcano from eruption start time 01:46 JST to valid time 08:00 JST on 08 October 2016. Initial ESP is based on Suzuki (1983), input GPV is LFM with initial time 16 UTC on 07 (01 JST on 08) and number of tracer 250,000. Triangle denotes the volcano, filled circles denote the ash-fall observation points, colored circles indicate their observation values and open circles denote the unobserved points surveyed by Local Meteorological Offices and JMA-MOT. Right figures show enlarged near volcano of the left ones.



(a) POD-SR diagram (ash-fall)

(b) Accumulated ash-fall values

Figure 5.14 Verification diagrams of Figure 5.13

最大長径分布

同計算における最大長径分布⁹の予測およびその差分を Figure 5.15 に示す。RATM, ATM とともに観測された降塵については完全に捕捉しており見逃しはないが、積算降灰量の予測 (Figure 5.13) と同様に、分布主軸には差異がみられる。これは第 5.1 節で述べた大気場の内挿回数の違いに加え、タイムステップごとの計算方法を、RATM では各過程ごとに時間積分していたが¹⁰、ATM では全過程の時間変化率を求めてから時間積分 (Figure 2.1) に改良したこととともに地表面へ降下したときは引戻し (Figure 2.11) するようにしたことにより、特にトレーサーがモデル地表面以下に達したときの水平変位が補正されるため、地表面付近の計算結果に効いていると考えられる。

降灰時刻

本噴火時に各気象台では、大分 (火口の北東約 63 km) で 8 日 02 時 30 分前~04 時に少量、松山 (火口の北東約 190 km) で 05 時~06 時 20 分にうっすら、高松 (火口の東北東約 318 km) で 08 時前~18 時 30 分の間、降灰現象が観測された。これに対して予測は Figure 5.16 に示すように、大分は 03 時まで、松山は 06 時まで、高松は 07 時までに降灰開始を予想しており、RATM と ATM の降灰時刻の予想に大きな違いはない。

(2) Ishii (2018) の初期値

積算降灰量

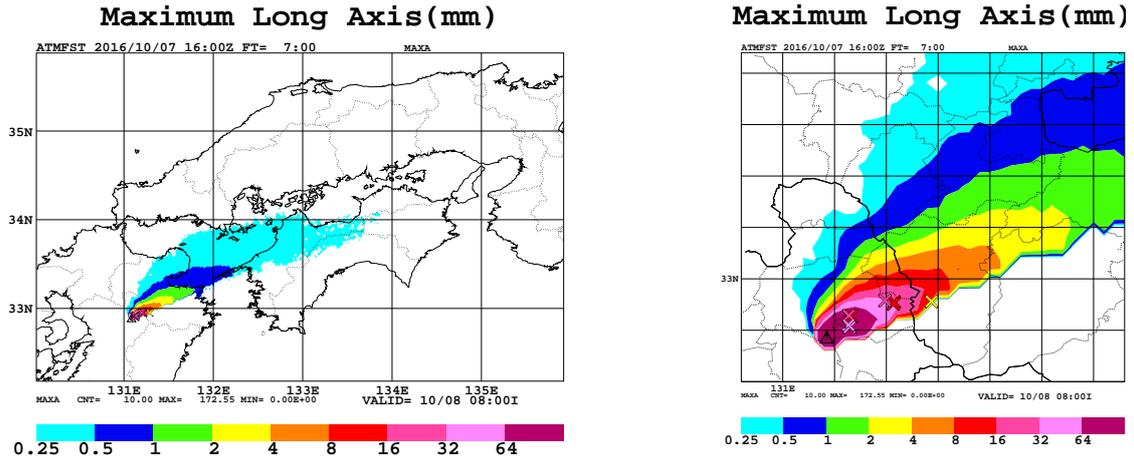
第 5.1 節で述べたとおり、初期値の精度はモデルの予測精度に大きく影響する。そこで、RATM, ATM とは独立なオイラーモデルを用いて降灰量の観測値¹¹を 4 次元変分法によりデータ同化して逆解析した Ishii (2018) の ESP¹²を初期値にして、積算降灰量を再予測した結果を Figure 5.17 に示す。より確からしい初期値で再検証した結果、ATM は RATM と比べて、検証スコアは全てで明らかに改善また平均誤差・RMSE も改善しており (Figure 5.18)、予測精度が高いといえる。ただし、絶対的な予測精度は Suzuki (1983) (Figure 5.14) の方がよい部分があり、モデルの不完全性も踏まえた改良は今後の課題である。

⁹長径と粒径の関係は後出の (6.2) 式を参照。

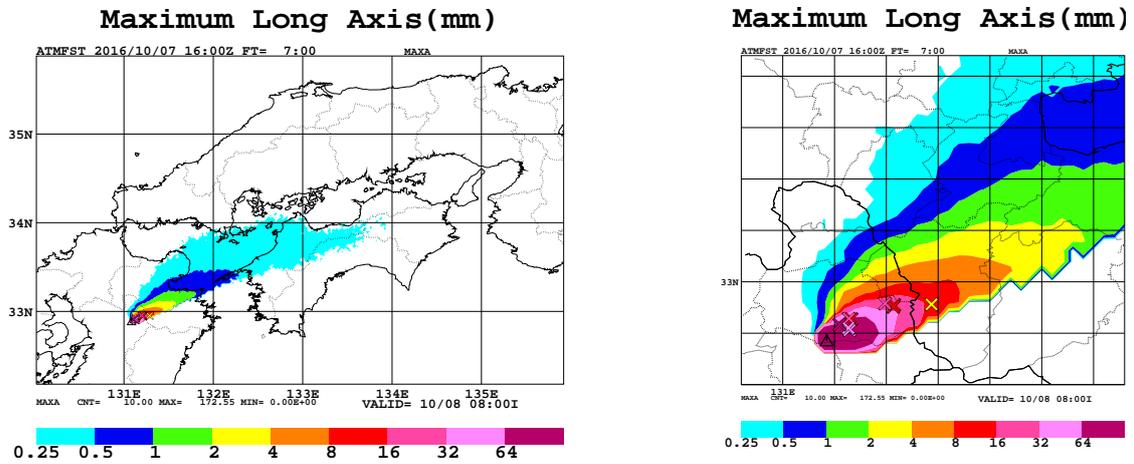
¹⁰RATM では、重力落下を時間積分してから水平輸送を時間積分しており、両過程の計算順序を換えると、特に終端速度の速いトレーサーの計算結果が大きく変わる。

¹¹Ishii (2018) では、粒径の観測値はデータ同化されておらず、また逆解析している粒径の範囲は $-4 \leq \phi \leq 4$ ($62.5 \mu\text{m} \leq D \leq 16 \text{mm}$) に限られている。

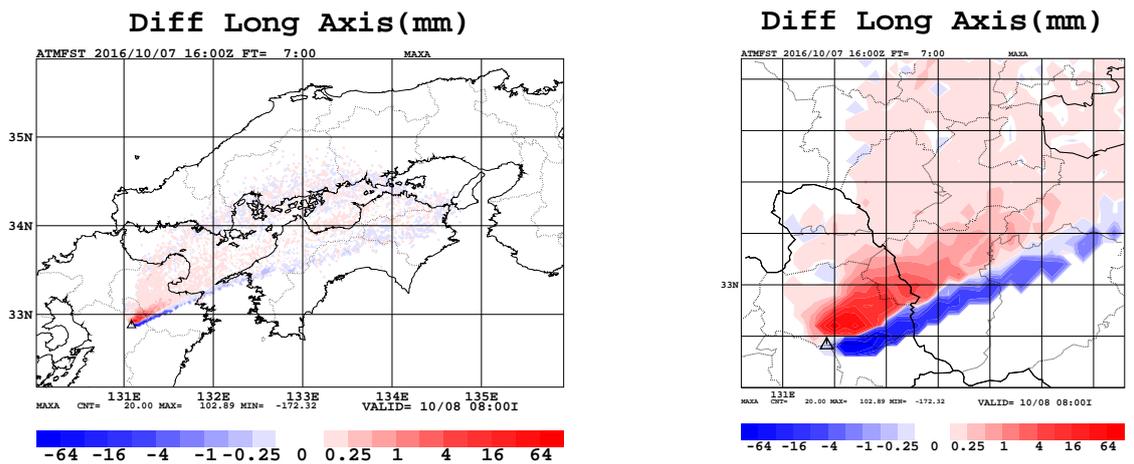
¹²噴煙高度は 16.5 km asl、噴火継続時間は 180 秒で逆解析されている。



(a) JMA-ATM (Runge-Kutta 200 s)



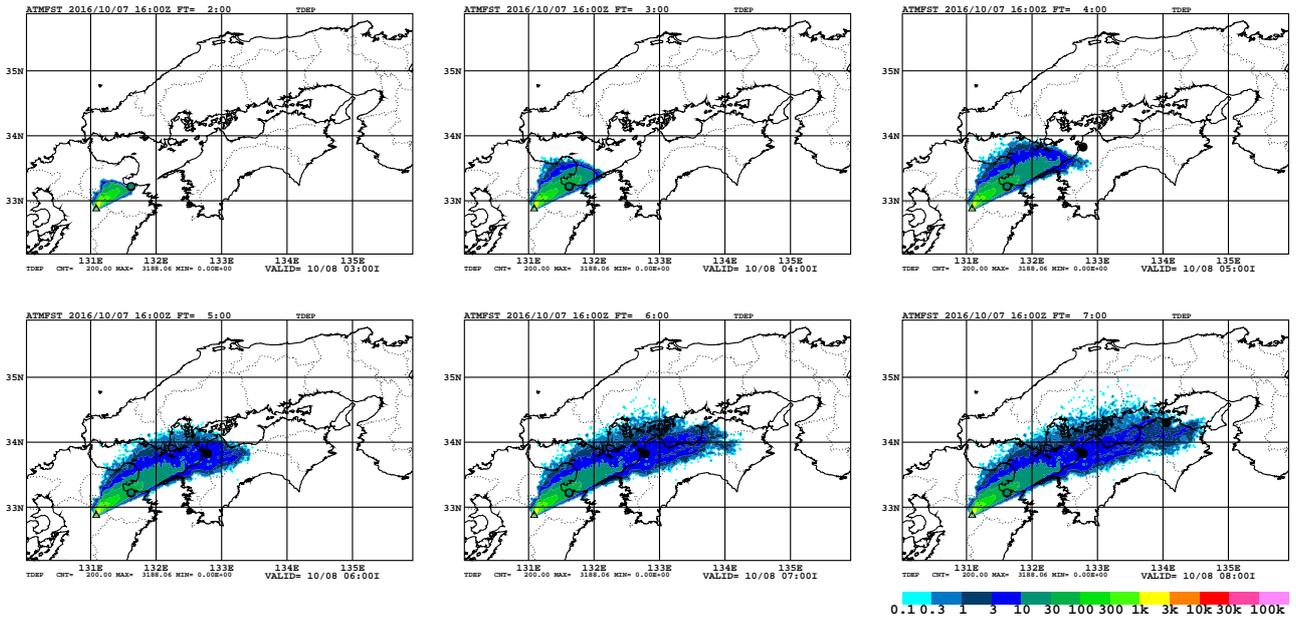
(b) JMA-RATM (Euler 180 s)



(c) (a) JMA-ATM – (b) JMA-RATM

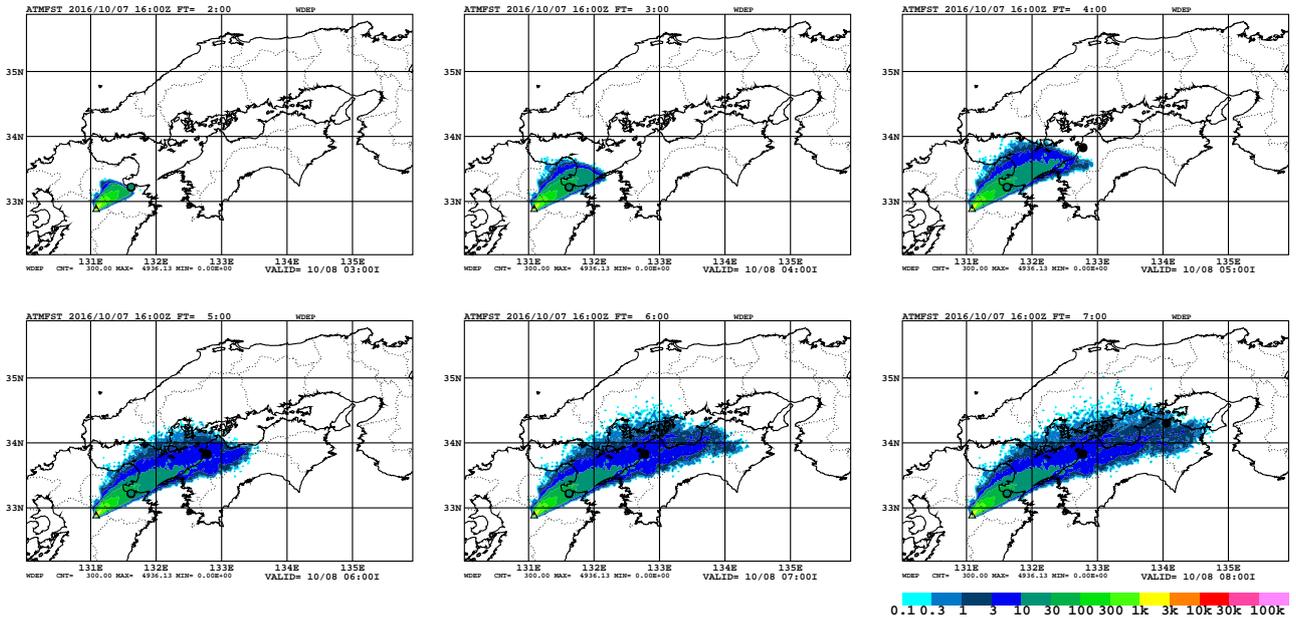
Figure 5.15 Same calculations as in Figure 5.13, but comparison of maximum grain size (long axis) predictions. Triangle denotes the volcano and colored crosses indicate the lapilli fall observation values surveyed by JMA-MOT.

Total Deposition(g/m2)



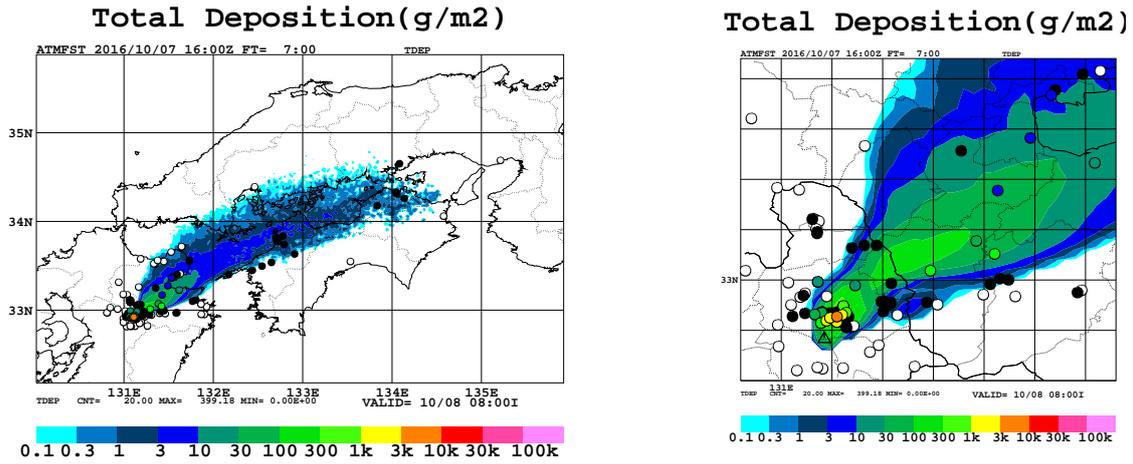
(a) JMA-ATM (Runge-Kutta 200 s)

Total Deposition(g/m2)

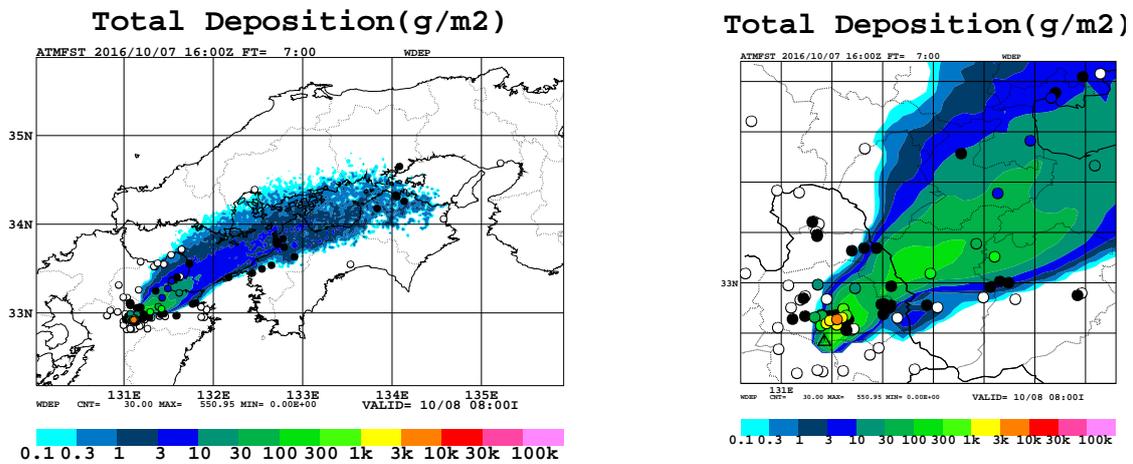


(b) JMA-RATM (Euler 180 s)

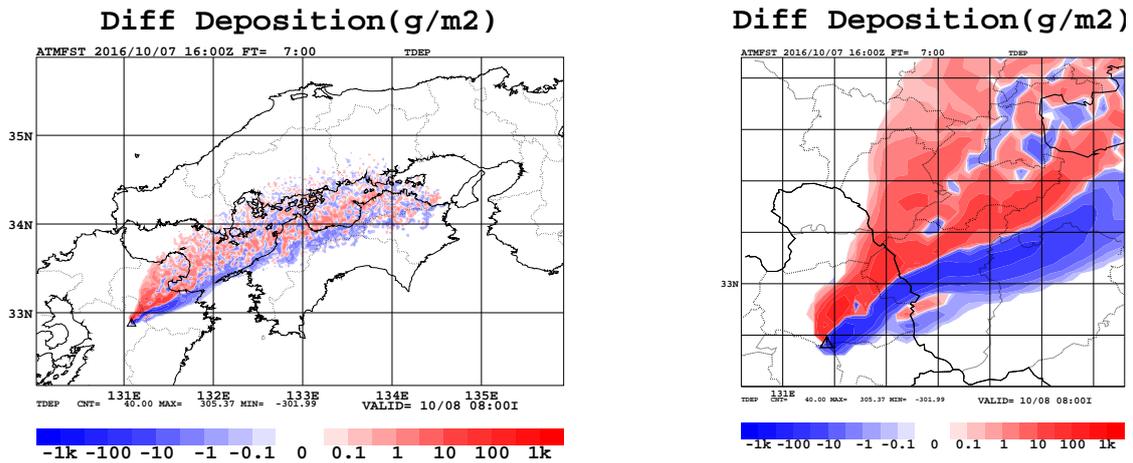
Figure 5.16 Same calculations as in Figure 5.13, but depicted each forecast time from 03:00 to 08:00 JST on 08 October 2016. Triangle denotes the volcano, colored and filled circles from West to East denote the ash fall observation points at Oita (observation time: before 02:30 to 04:00 JST), Matsuyama (from 05:00 to 06:20 JST) and Takamatsu (before 08:00 to 18:30 JST) Meteorological Offices, respectively.



(a) JMA-ATM (Runge-Kutta 200 s)

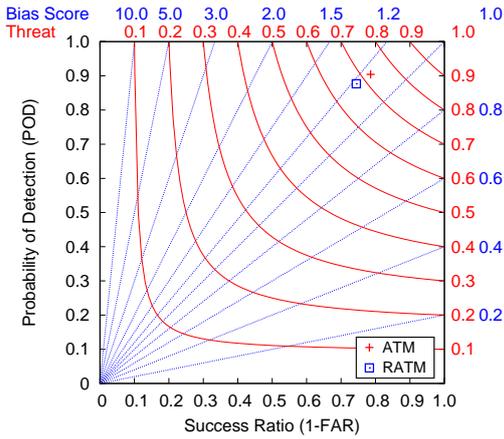


(b) JMA-RATM (Euler 180 s)

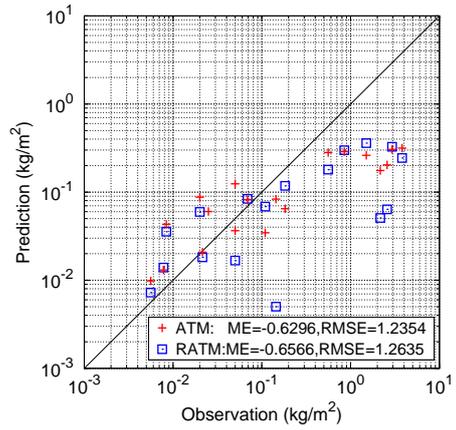


(c) (a) JMA-ATM – (b) JMA-RATM

Figure 5.17 Comparison of accumulated ash-fall predictions for the eruption at Aso volcano from eruption start time 01:46 JST to valid time 08:00 JST on 08 October 2016. Initial ESP is based on Ishii (2018), input GPV is LFM with initial time 16 UTC on 07 (01 JST on 08) and number of tracer 263,000. The symbols are the same as in Figure 5.13. Right figures show enlarged near volcano of the left ones.



(a) POD-SR diagram (ash-fall)

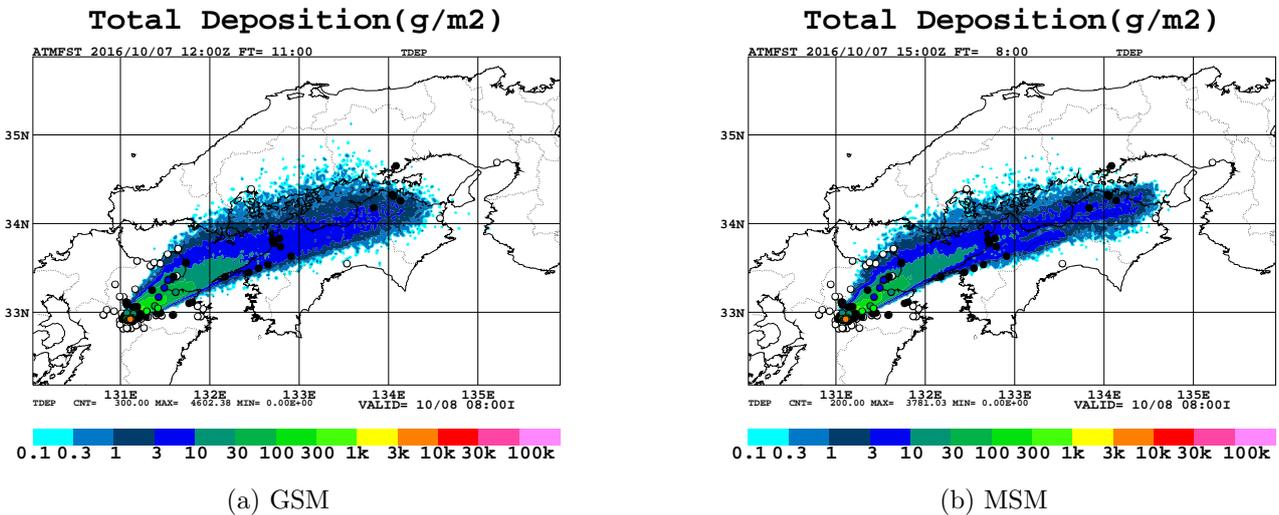


(b) Accumulated ash-fall values

Figure 5.18 Verification diagrams of Figure 5.17

5.2.4 予測結果の検証：数値予報 GPV の比較

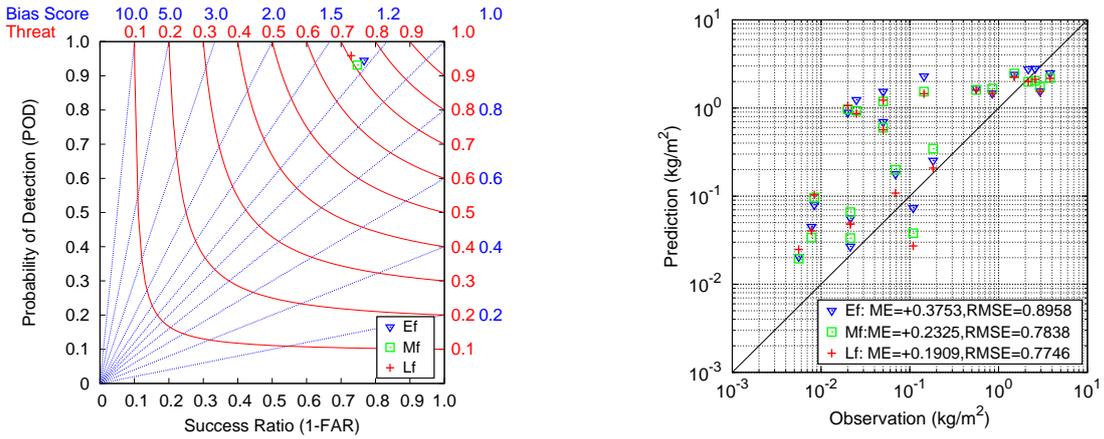
入力値として、LFM に換えて GSM と MSM の数値予報 GPV を用いた場合について、ATM による積算降灰量の予測結果を Figure 5.19 に示す。同じ初期値で LFM を入力した Figure 5.13 (a) と比較して、GSM を入力した場合は水平格子間隔が粗くなり、予報時間間隔が長くなるため、一般に ATM は直線的な予測傾向になる。降灰のあり／なしの定性的予測については、見逃し率が高いことを除けば (Figure 5.20 (a))、GSM を入力した降灰予測も可能であると考えられる。降灰量の定量的予測については、LFM の方が平均誤差・RMSE とともに小さいが (Figure 5.20 (b))、この検証結果は第 5.2.3 項 (2) のとおり初期値に依存することに留意が必要である。



(a) GSM

(b) MSM

Figure 5.19 Comparison of accumulated ash-fall predictions for the eruption at Aso volcano from eruption start time 01:46 JST to valid time 08:00 JST on 08 October 2016. Initial ESP is based on Suzuki (1983), input GPVs are (a) GSM with initial time 12 UTC on 07 (21 JST on 07) or (b) MSM with initial time 15 UTC on 07 (00 JST on 08) and number of tracer 250,000. The symbols are the same as in Figure 5.13.



(a) POD-SR diagram (ash-fall)

(b) Accumulated ash-fall values

Figure 5.20 Verification diagrams of Figure 5.19 (Lf is the same as ATM of Figure 5.14)

5.2.5 予測結果の検証：計算粒子数の比較

ラグランジュモデルである ATM において、予測可能性を決める要素（永田, 1994）の一つである分解能¹³はトレーサー数 N_t に依存する。ATM の設定のうち、 N_t を変えた場合の積算降灰量の予測結果を Figure 5.21 に示す。予測対象が降灰量のように 2 次元物理量でその広がり（面積）が S の現象に対して、ATM の計算結果を水平格子間隔 Δx , Δy の水平格子で表現する場合、面積比から

$$\min N_t \sim O\left(\frac{S}{\Delta x \Delta y}\right) \tag{5.1}$$

が必要最小限なトレーサー数のオーダーを与える。本検証では $\Delta x = \Delta y = 2$ km に取っているので（Table 5.4）、Figure 5.21 の降灰分布の広がりから (5.1) 式は 10,000 程度になり、これ以下のトレーサーでは不十分である（Figures 5.21 (a), (b)）。また総噴出量 M に対して、水平格子上で表現可能な単位面積あたりの質量（面密度 χ_{\square} ）の最小値のオーダーは

$$\min \chi_{\square} \sim O\left(\frac{M}{N_t \Delta x \Delta y}\right) \tag{5.2}$$

で与えられる（新堀・他, 2010）¹⁴。本検証の Table 5.3 で設定した総噴出量に対して、 0.1 g/m^2 の予想降灰量¹⁵を表現するのに必要なトレーサーは (5.2) 式から 1,000,000 程度になる（Figures 5.21 (d)–(f)）。以上の考察は、定性的および定量的な検証結果（Figure 5.22）がトレーサー数 100,000 程度を境に変化している（1,000,000 以上ではおおむね同じ結果になっているが、10,000 以下ではそれから外れている）ことにも表れている。

¹³ オイラーモデルの場合は格子間隔に依存。

¹⁴ 濃度のように 3 次元物理量の場合は、予測現象の大きさ（体積） V 、出力格子の厚さ Δz として、(5.1), (5.2) 式はそれぞれ $O(V/\Delta x \Delta y \Delta z)$, $O(M/N_t \Delta x \Delta y \Delta z)$ になる。

¹⁵ 0.1 g/m^2 は、現在の降灰予報の表示しきい値。

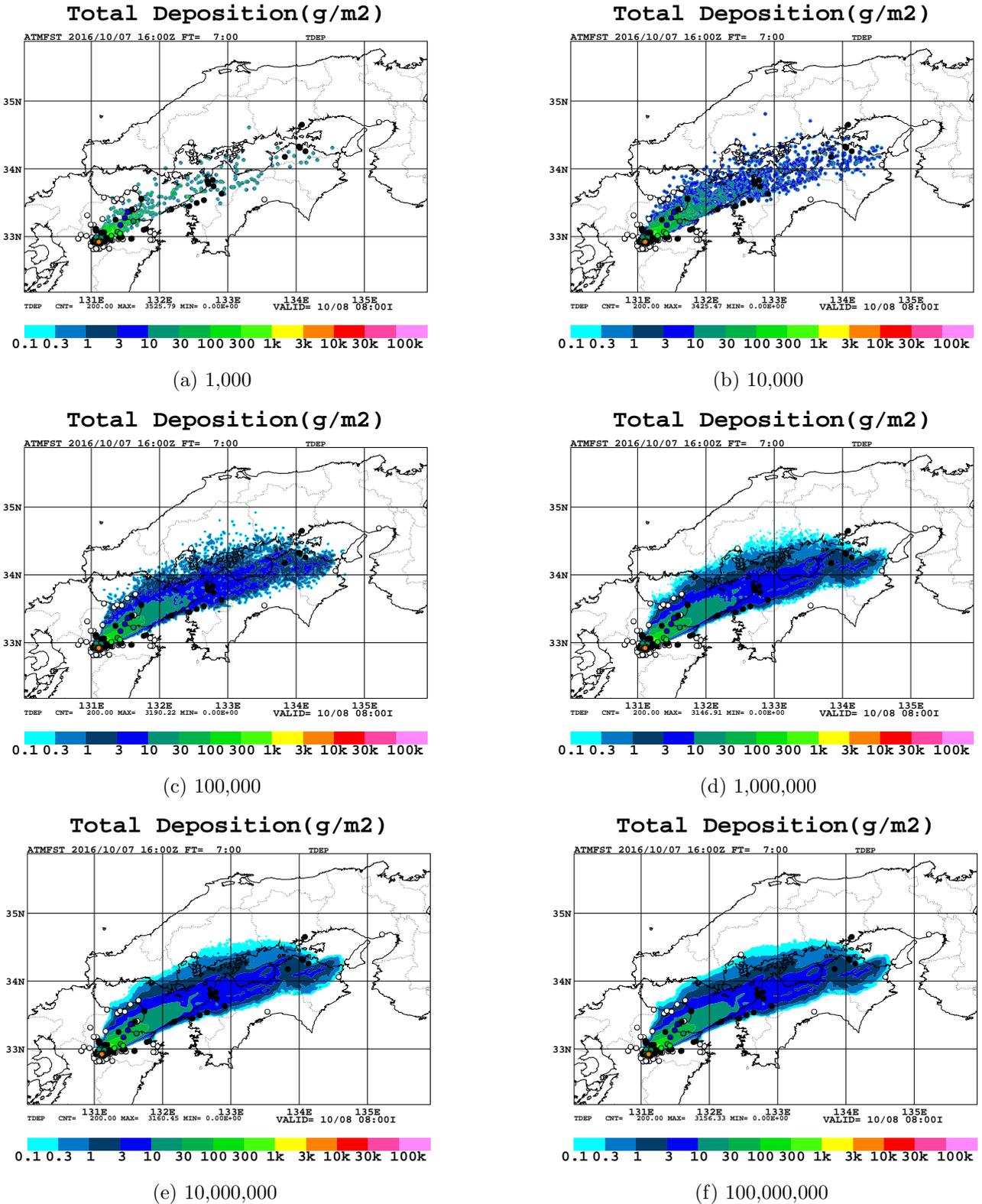
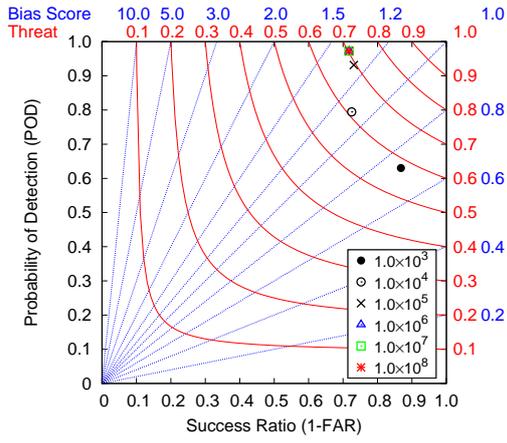
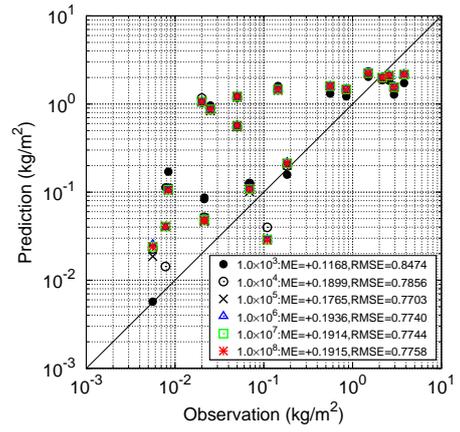


Figure 5.21 Comparison of accumulated ash-fall predictions for the eruption at Aso volcano from eruption start time 01:46 JST to valid time 08:00 JST on 08 October 2016. Initial ESP is based on Suzuki (1983), input GPV is LFM with initial time 16 UTC on 07 (01 JST on 08) and number of tracer from (a) one-thousand to (f) one-hundred million. The symbols are the same as in Figure 5.13.



(a) POD-SR diagram (ash-fall)



(b) Accumulated ash-fall values

Figure 5.22 Verification diagrams of Figure 5.21

Table 5.4 Settings of the JMA-RATM and ATM experiments

		RATM		ATM											
Description		Lagrangian													
Coverage		Global/Regional/Local													
Vertical coordinate		z													
Initials (ESPs)		Suzuki (1983)													
Meteorological field (GPVs) and its initial time		Suzuki (1983)	Ishii (2018)	MSM (Mf-MLVA)		LFM (Lf-MLVB)									
Forecast time		16 UTC	12 UTC	15 UTC	16 UTC	16 UTC									
Number of tracers		7 h	11 h	8 h	7 h	7 h									
Time integral methods		250,000	263,000	250,000	1,000	10,000	100,000	250,000	1,000,000	10,000,000	100,000,000	1,000,000,000	100,000,000,000		
Time step		Runge-Kutta													
Advection		200 s													
Diffusion		Forward difference with local coordinate													
Gravitational fallout		Spatially-average and terrain-following only surface													
Dry deposition		Langevin equation (Gifford, 1982, 1984)													
Wet scavenging		Zero-equation model (Louis <i>et al.</i> , 1982)													
MPI		Suzuki (1983) with Cunningham correction													
Output grid spacing		$F = 1/3$ of Equation (2.17)													
Figures		Diagnose from aerodynamic resistance													
Washout (below-cloud)		Fixed deposition vel. (Shao, 2000)													
Rainout (in-cloud)		$V_d = 0.3$ m/s													
Scavenging coefficients (Kitada, 1994)		$A_r = A_s = A_g = 2.98 \times 10^{-5} (1/s)$, $B_r = 0.75$ and $B_s = B_g = 0.30$ in Equation (2.25)													
Off		Off													
MPI		N/A													
Output grid spacing		40													
Figures		2 km													
5.13 (b)		5.17 (b)	5.17 (a)	5.19 (a)	5.19 (b)	5.21 (a)	5.21 (b)	5.21 (c)	5.21 (d)	5.21 (e)	5.21 (f)	5.13 (a)	5.15 (a)	5.16 (a)	
5.15 (b)															
5.16 (b)															

第 6 章 開発管理

6.1 開発管理

気象庁におけるモデル開発では近年、プロジェクト管理およびバージョン管理システムの利用が進んでいる（例えば、気象庁予報部, 2017; 坂本・他, 2018）。ATM についても 2019 年 3 月、第 1.2 節で触れた開発管理サーバ¹（雁津, 2017a）で提供されているプロジェクト管理システム Redmine に、プロジェクト「気象庁移流拡散モデル (JMA-ATM)」を立ち上げた (Figure 6.1)。

ATM の開発は、開発課題ごとに Redmine にチケットを切って進めている (Figure 6.2)。またバージョン管理システムとして、開発管理サーバには SVN と Git が提供されているが、前身の RATM は CVS から移行した SVN を利用してきた経緯があり、ATM も SVN でソースコード類²を管理している (Figure 6.3)。

Redmine と SVN は連携しているため、チケット駆動開発により、ソースコードのバージョン（リビジョン）は

Home | My Page | Projects | Help | ログイン中: shimbori | 個人設定 | ログアウト

移流拡散モデル - 気象庁移流拡散モデル (JMA-ATM) | 検索: | 気象庁移流拡散モデル(JMA-A... ▼

+ 概要 | 活動 | チケット | ガントチャート | Wiki | リポソトリ | 設定

概要 👤 新しいサブプロジェクト | 🏠 終了

気象庁移流拡散モデル(JMA-ATM, 略称: ATM)のサブプロジェクト管理を行います。
ATMはGATMとRATMを統一した後継モデルです。

📌 チケットラッキング			
	未完了	完了	合計
バグ	0	5	5
機能	9	19	28
サポート	4	6	10
ルーチン	0	0	0
イベント	0	0	0
開発・調査	15	12	27
文書作成	1	0	1

すべてのチケットを表示 | ガントチャート

👤 メンバー

管理者: 土山 博昭, 大城 久尚, 新堀 敏基

開発者: ishii kensuke, 土山 博昭, 大城 久尚, 山名 泰隆, 新堀 敏基, 林 勇太, 林 洋介, 長谷川 嘉臣

報告者: ishii kensuke, 土山 博昭, 大城 久尚, 山名 泰隆, 新堀 敏基, 林 勇太, 林 洋介, 長谷川 嘉臣

Figure 6.1 Homepage of Redmine: JMA-ATM (as of October 2020)

¹2020 年 6 月 8 日からは開発管理 VPS に移行。

²付録 A にディレクトリツリーを示すように、ソースコードのほかに定数関連ファイルやジョブ投入スクリプトなども SVN で管理しており、本書の L^AT_EX 原稿も Tec_rep_mri の下に保管されている。



Figure 6.2 Ticket list of Redmine: JMA-ATM (as of October 2020)

ATMの開発課題を記したチケットと関連付けられている。具体的には、まず開発課題の担当者がRedmineにチケット (Figure 6.2) を切り、それからSVNディレクトリ (リポジトリ) の各開発者の作業場所であるブランチ (Figure 6.3の branches) の下に開発版のソースコード類を登録 (コミット) する。開発版のソースコード類は、相互点検 (レビュー) を経て、正式な安定版の置き場所であるトランク (Figure 6.3の trunk) へ格納 (マージ) する。また Figure 6.3の tags には、気象業務における運用版のバージョン管理のために、トランクからタグ打ちしたものが置かれる。

開発管理サーバは、開発元の気象研究所スーパーコンピュータシステムと運用先のNAPSの双方からアクセス可能であり、開発プログラムの中継サーバとしても機能している。

実行シェルスクリプト

ATMを実行するためのシェルスクリプト (*.sh)³は、数値予報ルーチンで使用されているJCL (雁津, 2017b) から生成することを標準にしている。生成元のJCLファイル (*.jcl) は、実行するジョブのステップごとに実行プログラム (ロードモジュール) とその入出力ファイルなどの情報を記述したテキストファイルであり、付録Aに示すディレクトリツリーのJcl_scriptの下に置いてある。

ただし、BCP対応など、JCLがないことが想定される環境でも実行できるように、Shの下にはシェルスクリプト

³ただし数値予報ルーチンでは、JCLから生成するジョブスクリプトには一般に拡張子.shは付けない。



Figure 6.3 SVN’s repository of Redmine: JMA-ATM (as of October 2020)

のひな型 (*.sh.in) を configure スクリプトとともに用意してある。

メイクファイル

ソースコードをコンパイルするためのメイクファイル (*.mk) は、JCL と同様に数値予報ルーチンで使用されている PBF (雁津, 2017b) から生成することを標準にしている。生成元の PBF ファイル (*.pbf) は、ロードモジュール、インクルードファイル、ライブラリ、コンパイルオプションなどとともにソースコードとその参照ファイルの情報を記述したテキストファイルであり、付録 A に示すディレクトリツリーの Pbf の下に置いてある。

ただし PBF がないことが想定される環境でも実行できるように、Mk の下にはひな型の親メイク (Makefile.in) および子メイク (*.mk.in) を configure スクリプトとともに用意してある。

またコンパイル元のソースコードのプログラミングにあたっては、ローカルにコーディングルールを定め、Redmine の Wiki で共有している。同内容は付録 I に転載したので参照されたい。

6.2 開発ツール

ATM の開発ツールとして、可視化と検証指標を出力するツールを用意している。これらのモジュールは付録 A に示すディレクトリツリーの Tools 以下にあり、Figure B.1 のジョブ FcAtm の後処理 Monit, Verif で実行される。

6.2.1 可視化ツール

ATM の計算結果は、粒子データ fcst_particle.dat (第 2.5.1 項) からトレーサーの各種空間分布を、格子データ fcst_atm.nus (第 2.5.2 項) から各出力要素を予測時間ごとに可視化している。一例として、fcst_particle.dat

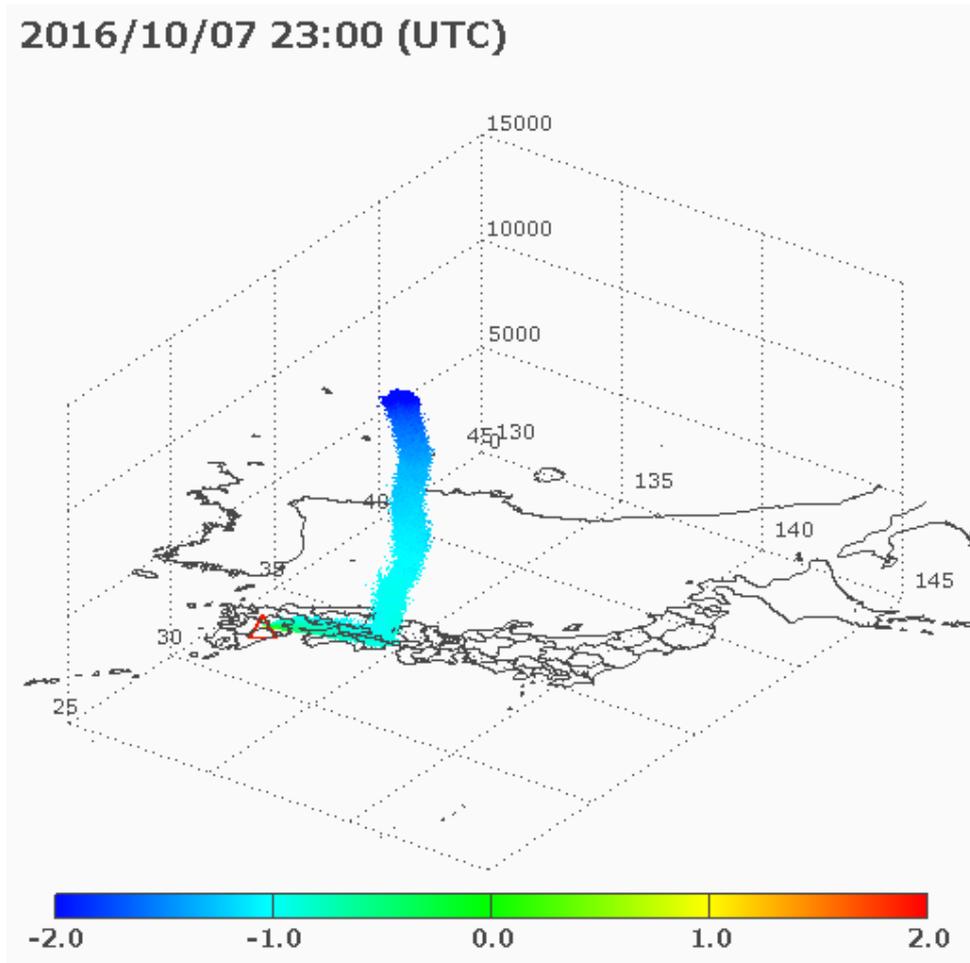


Figure 6.4 Example of particle data plotted by AVS/Express. Same case of volcanic ash fall prediction shown in Figure 5.13 (a). Color shade indicates common logarithmic grain size $\log D$ [mm].

から可視化ソフトウェア AVS/Express⁴により描画したトレーサの 3 次元空間分布を Figure 6.4 に示す。また、`fcst_atm.nus` から可視化ツール PANDAH (例えば、原, 2017b) により描画した Table F.4 の要素を Figure 6.5 に示す。ただし格子出力していない最大長径 (MAXA) については、粒径 D を幾何学的な 3 軸平均径 (例えば、高橋, 2003)

$$D \equiv \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3} \quad (6.1)$$

で定義して、ここでは上式と (2.17) 式から求めた長径 a_1 との関係式

$$a_1 = \frac{3D}{1 + 2F} \quad (6.2)$$

に、Table D.12 の `form` で設定した形状因子 F と最大粒径 (MAXD) の予測値を代入して描画している。

6.2.2 検証ツール

検証ツールは、予め用意した観測点のデータ (観測のあり/なし、および観測値) に対して、ATM の格子出力 (第 2.5.2 項) を各観測点に空間内挿した予測値から、以下に示す検証指標 (例えば、Ima-izumi, 2019) を出力する。検証時刻は ATM の予測時刻ごと、空間内挿法は Figure 2.12 と同様である。

⁴気象研究所スーパーコンピュータシステムに導入されている可視化ソフトウェアの一つ。

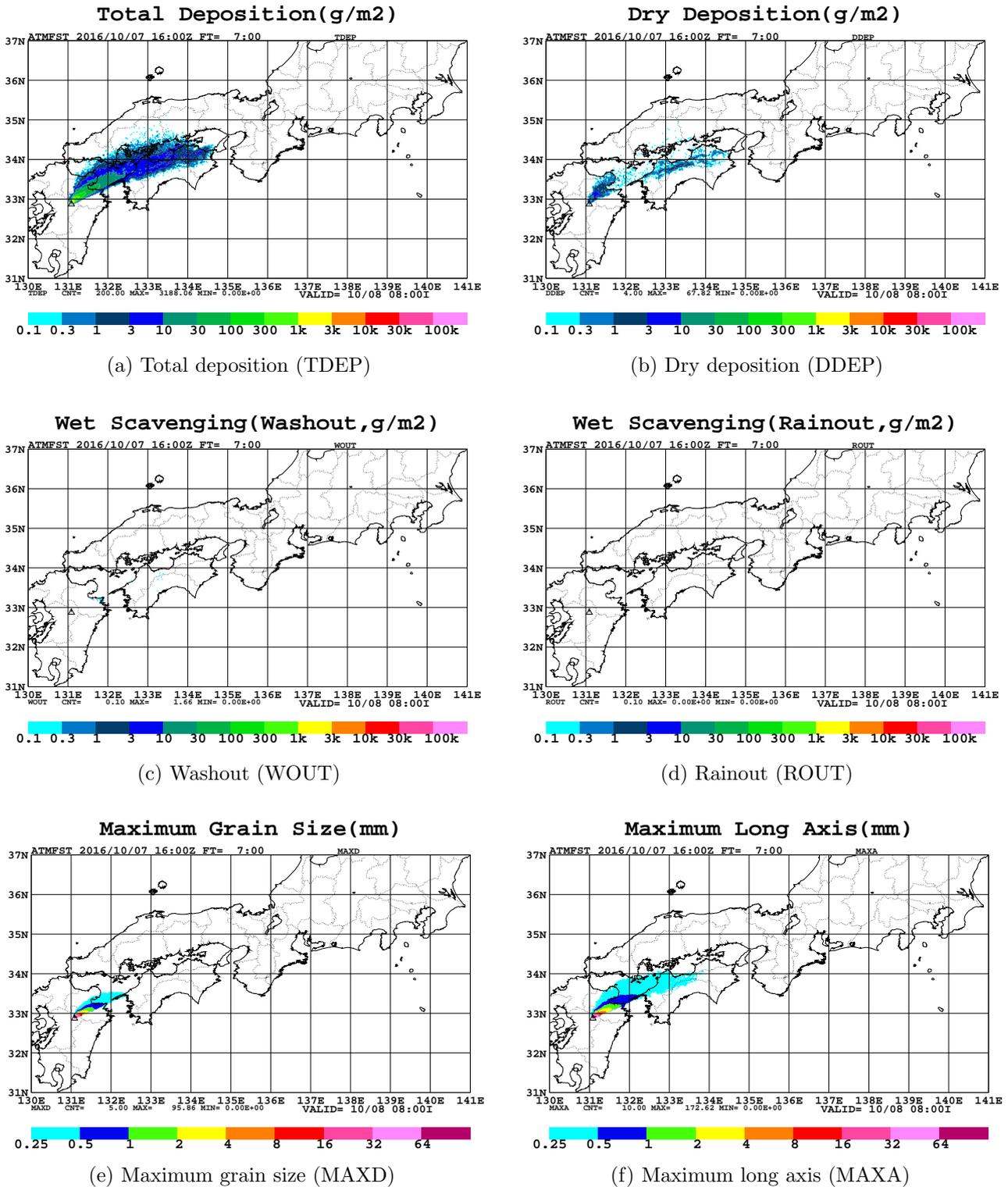
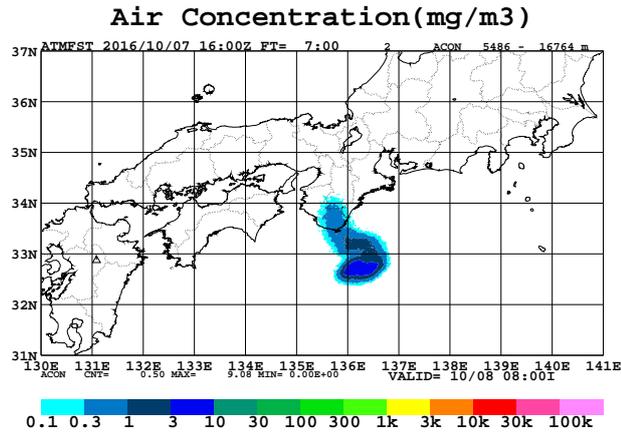
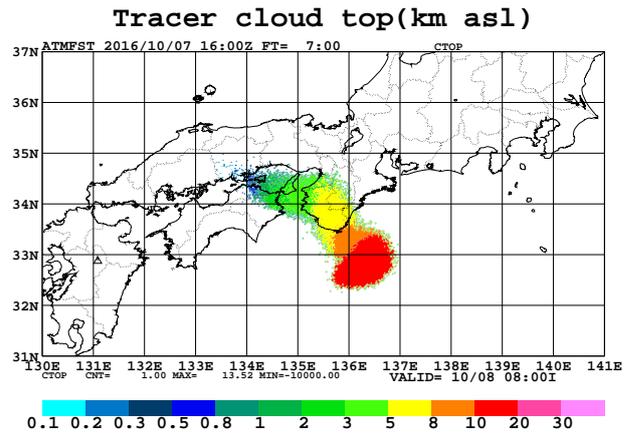


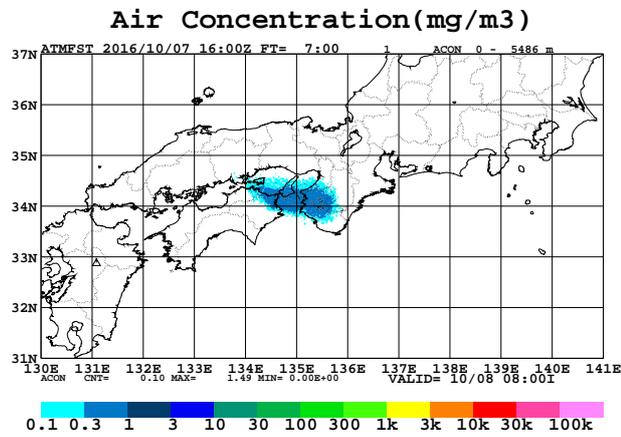
Figure 6.5 Example of PANDAH plot. Same case as in Figure 6.4, i.e. Figures (a) and (f) are same as in Figures 5.13 (a) and 5.15 (a), respectively, but plot area is widened.



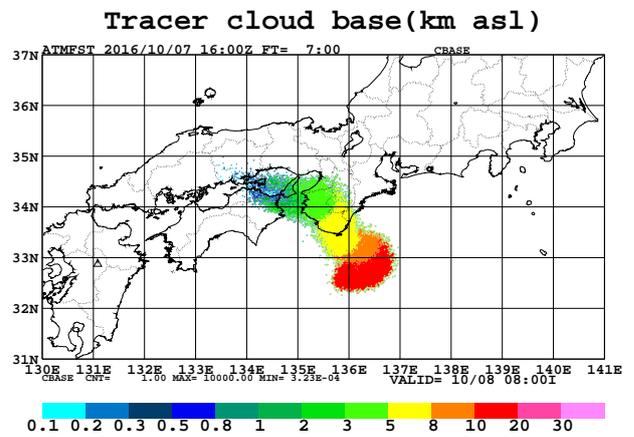
(g) Atmospheric concentration (ACON, upper layer)



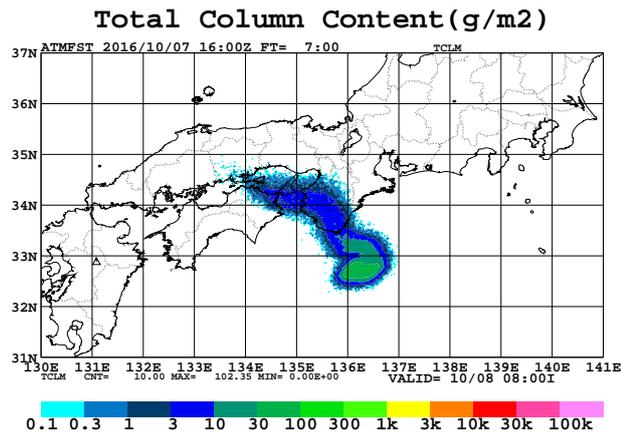
(j) Tracer cloud top (CTOP)



(h) Atmospheric concentration (ACON, lower layer)



(k) Tracer cloud base (CBASE)



(i) Total column content (TCLM)

Figure 6.5 (Continued)

Table 6.1 2×2 contingency table. FO, FX, XO and XX indicate the number of occurrences in each category, respectively, and $N \equiv FO + FX + XO + XX$ is the total number of events.

Predictions	Observations		Total
	Yes	No	
Yes	FO (Hit)	FX (False alarm)	FO + FX
No	XO (Miss)	XX (Correct rejection)	XO + XX
Total	FO + XO	FX + XX	N

(1) スコア

各観測点において、観測のあり／なしに対する予測のあり／なしの 4 分割表 (Table 6.1) から出力する。

適中率

$$HR \equiv \frac{FO + XX}{N} \quad (0 \leq HR \leq 1) \tag{6.3}$$

HR は 1 に近いほど適中している。

空振り率

$$FAR \equiv \frac{FX}{FO + FX} \quad (0 \leq FAR \leq 1) \tag{6.4}$$

FAR はゼロに近いほど空振りが少ない。

見逃し率

$$MR \equiv \frac{XO}{FO + XO} \quad (0 \leq MR \leq 1) \tag{6.5}$$

MR はゼロに近いほど見逃しが少ない。

バイアスコア

$$BI \equiv \frac{FO + FX}{FO + XO} \quad (BI \geq 0) \tag{6.6}$$

BI は 1 に近いほどバイアスが小さい。

スレットスコア

$$TS \equiv \frac{FO}{FO + FX + XO} \quad (0 \leq TS \leq 1) \tag{6.7}$$

TS は 1 に近いほど精度がよい。

捕捉率

$$POD \equiv \frac{FO}{FO + XO} = 1 - MR \quad (0 \leq POD \leq 1) \tag{6.8}$$

捕捉率 POD と空振り率 FAR は、POD-SR ダイアグラム⁵ (Roebber, 2009) の描画に使用する。

⁵横軸を $x \equiv 1 - FAR \in [0, 1]$ 、縦軸を $y \equiv POD \in [0, 1]$ に取ったグラフ。このとき、 $BI = y/x$ 、 $TS = (1/x + 1/y - 1)^{-1}$ となるため、このグラフ上でバイアスコアの等値線は直線 ($BI = 1$ は傾き 1 の対角線)、スレットスコアの等値線は直角双曲線 ($TS = 1$ は座標 (1, 1) に対応) で表される。POD, FAR, BI, TS の 4 スコアをまとめて確認することができ、各スコアがよいほどグラフの (1, 1) に近づく。具体例は、Figures 5.14 (a), 5.18 (a), 5.20 (a) and 5.22 (a) を参照。

(2) 平均誤差・平方根平均二乗誤差 (RMSE)

N_o 点の観測点において観測値 o_n がある場合、同点における予測値 f_n から、平均誤差 ME および RMSE を出力する：

$$\text{ME} \equiv \frac{1}{N_o} \sum_{n=1}^{N_o} (f_n - o_n) \quad (6.9)$$

$$\text{RMSE} \equiv \sqrt{\frac{1}{N_o} \sum_{n=1}^{N_o} (f_n - o_n)^2} \quad (6.10)$$

ME は 1 に近いほどバイアスが小さく、RMSE (≥ 0) はゼロに近いほど精度がよい。

ジョブ Verif では現在、上式で定義した平均誤差と RMSE を出力している。検証対象の観測値が数値変わるような場合の予報誤差をまとめて評価するためには、より適切な重み付き平均誤差、RMSE (例えば、梅津・他 (2013) とその付録) などを見出して指標を改良する必要がある。

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。

付録 A プログラムのディレクトリ構成

ATM プログラムのディレクトリ構成（ディレクトリツリー）について、GPV 変換前処理ならびに ESP および ATM 計算本体に関連する部分を次頁に示す。Atm は SVN (Figure 6.3) の trunk の下に置かれている。各ディレクトリ名は Table A.1 の分類指針に従っている。

ディレクトリ名の分類

Table A.1 Classification of directory of the JMA-ATM

Class	Character limit	Example	Remarks
Shell script: Sh/ <i>Primary/Secondary/Name</i>			
<i>Primary</i>	8	Tf, Tp, etc.	Job group name
<i>Secondary</i>	8	Comm, Post	
<i>Name</i>	8	FcAtm.sh, PreGpvMf_vhrc.sh, etc.	
Source code: Module/ <i>Primary/Src/Secondary/Tertiary/Quaternary/Name</i>			
<i>Primary</i>	16	Atm	
<i>Secondary</i>	16	Atm, Products, Tools, etc.	
<i>Tertiary</i>	16	Comm, Fcst, Ini, Misc, Pre, etc.	(Optional)
<i>Quaternary</i>	32	Esp, Gpv, Point, etc.	(Optional)
<i>Name</i>	64	variable.f90, main_atm.f90, etc.	
Load module: Module/ <i>Primary/[Exe Mk]/Secondary/Tertiary/Name</i>			
<i>Primary</i>	16	Atm	
<i>Secondary</i>	16	Atm, Products, Tools, etc.	
<i>Tertiary</i>	16	Comm, Post	(Optional)
<i>Name</i>	64	atm.imxx, atm.imxx.mk, etc.	
Constant: Const/ <i>Primary/Secondary/Tertiary/Name</i>			
<i>Primary</i>	16	Atm	
<i>Secondary</i>	16	Atm, Nusdef, Tools, etc.	
<i>Tertiary</i>	16	Comm, Tf, Tp, etc.	(Optional)
<i>Name</i>	128	setting_template.conf, sst.dat, typ.dat, veg.dat, fcst_atm.def, etc.	
Variable data: Data/ <i>Primary/YYYYmmddHHMM/Secondary/Tertiary/Name</i>			
<i>Primary</i>	16	Tf, Tp, etc.	Job group name
<i>Secondary</i>	16	Fcst, Ini, Monit, Parm, Post, Pre, Succ, etc.	(Optional)
<i>Tertiary</i>	16	Mf.Latest, Tp.Latest, Mpilog.txd, etc.	(Optional)
<i>Name</i>	99	ini_particle.dat, fcst_particle.dat	

YYYYmmddHHMM is base time (Tp) or start time (Tf).

ディレクトリツリー

```

Atm/
|-- Const/ 定数関連ファイル
|   |-- Atm/ ATM 定数ファイル群
|       |-- Atm/ GPV 前処理、ATM 計算のネームリスト (ひな型)、理想大気、定数データ
|       |-- Nusdef/ ATM 入力用 GPV、ATM 出力の NuSDaS 定義ファイル
|       |-- Tdvar/ (同化関連)
|       |-- Tools/ 可視化・検証の設定ファイル
|       |-- Vafs/ VAFS 関連の設定ファイル
|-- Doc/ ドキュメント
|   |-- README
|   |-- Tec_rep_mri/ (本書)
|-- Jcl_script/ JCL ファイル (実行シェルスクリプトの生成元)
|   |-- Jcl_auto/ ルーチン実行用
|   |-- Jcl_class/ 対話型実行用
|-- Jobs/ ジョブ投入スクリプト
|   |-- Pbs/ PBS ファイル (NAPS 用)
|   |-- Pjm/ PJM ファイル (気象研究所スーパーコンピュータ用)
|-- Module/ ソースコード関連ファイル
|   |-- Atm/ ATM プログラム群
|       |-- Exe/ ロードモジュール
|       |-- Mk/ メイクファイル
|       |-- Pbf/ PBF ファイル (メイクファイルの生成元)
|       |-- Src/ ソースコード
|           |-- Atm/ 移流拡散モデルのメインおよびサブ
|               |-- Comm/ 共通モジュール (定数、変数、パラメータスイッチ、I/O 関係など)
|               |-- Fcst/ モデル本体
|               |-- Ini/ 初期値
|               |-- Comb/ (同化結合用)
|               |-- Esp/ 供給源モデル
|               |-- Misc/ その他 (物理量変換、座標変換、時空間内挿、乱数など)
|               |-- Mpi/ 並列計算環境
|               |-- Pre/ 前処理
|               |-- Gpv/ 数値予報 GPV 変換
|                   |-- Ef_lwr1/ 全球予報 (気圧面 (成層圏/対流圏)) GPV 変換
|                   |-- Ideal/ 理想実験用 GPV 生成
|                   |-- Lf_mlvb/ 局地予報 (asuca モデル面) GPV 変換
|                   |-- Ma_mlva/ メソ解析 (NHM モデル面) GPV 変換
|                   |-- Ma_mlvb/ メソ解析 (asuca デル面) GPV 変換
|                   |-- Mf_mlva/ メソ/局地予報 (NHM モデル面) GPV 変換
|                   |-- Mf_vhrc/ メソ/局地予報 (鉛直高解像度) GPV 変換
|               |-- Point/ 放出地点の大気プロファイル出力
|               |-- Process/ 力学・物理過程
|-- Products/ ルーチン・プロダクト用
|   |-- Comm/ 共通モジュール (定数)
|   |-- Vaa/ VAA 関連
|   |-- Vaff/ 降灰予報関連
|-- Tdvar/ (同化関連)
|-- Tools/ ツール類
|   |-- Comm/ 共通モジュール (定数)
|   |-- Monit/ 可視化
|   |-- Verif/ 検証
|-- Setup/ 実行環境 (ネームリスト設定、シェル生成、コンパイルなど)
|   |-- MRI/ 気象研究所スーパーコンピュータ用
|   |-- NAPS10/ NAPS 用
|   |-- PC/ 非並列計算機用 (BCP 対応)
|-- Sh/ 実行シェルスクリプト
    
```

付録 B 計算の流れ

GPV 前処理と ATM 計算のフローチャートとタイムコントロールについて記述する。

B.1 フローチャート

Figure B.1 に GPV 前処理と ATM 計算の各ジョブグループ (JG) のジョブフローを示す。ここで Tp は GPV 前処理、Tf は ATM 計算の JG 名を表す¹。

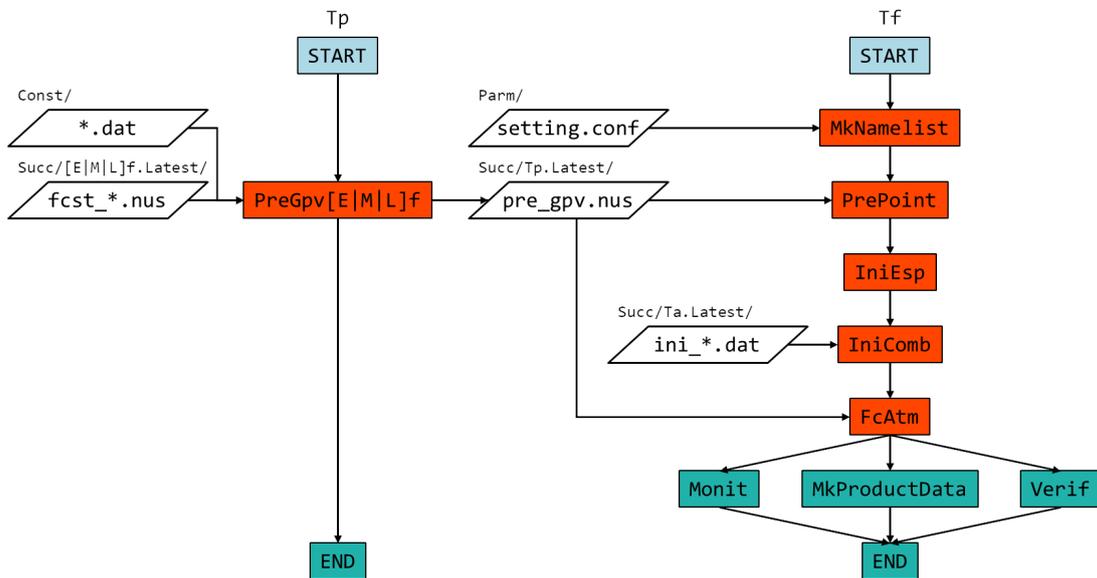


Figure B.1 Job flows of the Transport pre (Tp) and forecast (Tf). Each square box shows a job. `setting.conf` is configuration file of NAMELIST, `*.dat` are constant data, `fcst_*.nus` are original GPVs and `pre_gpv.nus` is transformed GPV for ATM. `IniComb` is an optional job when using an analysis by the data assimilation (Ta).

ジョブ/シェルスクリプト名の意味

Ef	全球速報解析からの予報
Fc	予測する
Ini	初期値
Lf	局地予報
Mf	メソ予報
Mk	プロダクトを作成する
Monit	モニタ図を作成する
Pre	前処理
Verif	検証する

¹それぞれ Transport pre, Transport forecast の略称。ただし数値予報ルーチンに登録された名称ではない。

メインプログラムの計算の流れ

ジョブ FcATM で実行される ATM の主プログラム（メインプログラム）の計算のおおよその流れを、ソースコードの主なサブルーチンの呼出しに沿って示す。時間積分を開始する前の初期時刻の状態を出力するため、ATM の粒子出力 `write_tracer` と格子出力 `write_atm_grid` は時間積分ループ `timeloop` の中間で行っている。

```

program main_atm
  call mpi_ini !! MPI 初期化

  call read_namelist_pre !! ネームリスト (GPV 前処理 : NAMELIST_PRE) 読み込み
  call read_namelist_anl !! ネームリスト (同化結合用 : NAMELIST_ANL) 読み込み
  call read_namelist      !! ネームリスト (ATM 計算 : NAMELIST) 読み込み
  call check_namelist    !! ネームリスト確認

  call set_tracer_ini      !! 総トレーサー数設定
  call mpi_particle_num_set !! MPI 設定
  call timeset_gpv_ini    !! 時刻カード (基準時刻 : TIMECARD) 読み込み
  call set_stage_ini      !! 総ステージ数設定
  call emission_stage_allocate !! 放出源配列の動的割付け
  call read_gpv_ini       !! NuSDaS (GPV 入力) 格子情報の読み込み
  call timeset_atm_ini    !! 時刻カード (計算開始時刻 : TIMECARD_RUN) 読み込み
  call read_atm_grid_def  !! NuSDaS (ATM 出力) 格子情報の読み込み
  call atm_grid_allocate  !! ATM 出力 (格子) 配列の動的割付け
  call read_namelist_atm_layer !! ネームリスト (ATM 計算 (出力高度) : NAMELIST) 読み込み
  call set_atm_grid_ini   !! ATM 出力 (格子) の座標設定
  call gpv_allocate       !! GPV 入力配列の動的割付け
  call tracer_allocate    !! トレーサー配列の動的割付け
  call random_ini        !! 乱数初期化

  call read_gpv_const !! GPV (定数) 入力

  call read_initial_tracer !! トレーサー初期値読み込み

  call write_tracer_ini    !! ATM 出力 (粒子 (ヘッダ))

  call wrk_tracer_allocate !! トレーサー (作業変数) 配列の動的割付け
  call index_tracer_allocate !! トレーサー (格子情報) 配列の動的割付け
  call gpv_tracer_allocate !! トレーサー (GPV 内挿) 配列の動的割付け
  call diffusion_allocate  !! 拡散過程初期化
  call set_local_timestep_ini !! 時間積分 (段階数) 設定
  call increment_allocate  !! 時間積分配列の動的割付け
  call set_local_timestep_coef !! 時間積分 (補助増分) 設定

timeloop: do
  call monit_timestep !! タイムステップのモニタ
  call drive_atm      !! ATM 時間積分
  call set_exit_flag ( n_flag_timing_finish ) !! 積分終了の判断
  call set_input_flag ( n_flag_timing_input ) !! GPV 入力の判断
  call set_output_flag( n_flag_timing_output ) !! ATM 出力の判断

  call drive_atm_prepost !! ATM 前後処理
  call set_timestep      !! タイムステップ設定
  call activate_tracer   !! トレーサーのフラグ設定 (計算開始)
  call find_tracer_gpv_ij !! トレーサー位置の GPV の水平格子番号探索
  call intp_zs_tracer    !! トレーサー地点のモデル標高内挿
  call judge_fallout    !! 地表面への降下判定
  call adjust_position_tracer !! トレーサー位置の調整 (引戻し・跳返り)
  call find_tracer_atm_ij !! トレーサー位置の ATM 出力 (格子) の水平格子番号探索

```

```

call tracer2grid          !! ATM 出力 (格子) 値の計算
call set_final_flag      !! トレーサーのフラグ設定 (計算終了)

if ( n_flag_timing_output == m_flag_is_timing ) then
  call write_tracer      !! ATM 出力 (粒子)
  call write_atm_grid    !! ATM 出力 (格子)
end if

if ( n_flag_timing_finish == m_flag_is_timing ) exit timeloop !! 積分終了

if ( n_flag_timing_input == m_flag_is_timing ) then
  call read_gpv         !! GPV 入力
end if

call drive_atm_pre !! ATM 前処理
  call find_tracer_gpv_k    !! トレーサー位置の GPV の鉛直格子番号探索
  call set_interpolation_time !! GPV の内挿時間設定
  call intp_gpv_tracer     !! GPV のトレーサー位置への時空間内挿

call drive_atm_run !! ATM 計算本体
  call calc_tendency_long !! 物理過程：時間変化率の計算 (長いタイムステップ)
  call proc_decay          !! 崩壊
  call proc_washout        !! 湿性沈着 (雲底下洗浄)
  call proc_rainout        !! 湿性沈着 (雲内洗浄)
  call proc_deposition_dry !! 乾性沈着
  call proc_diffusion_horizontal !! 水平拡散
  call proc_diffusion_vertical !! 鉛直拡散
  call sum_tendency_long   !! 時間変化率の足上げ (長いタイムステップ)

local_timeloop: do n_timeloop_stage = 1, n_timeloop_stage_max
  if ( n_timeloop_stage >= 2 ) then
    call drive_atm_pre_local !! ATM 前処理 (短いタイムステップ)
    call time_integral       !! 仮積分
    call find_tracer_gpv_ij  !! トレーサー位置の GPV の水平格子番号探索
    call find_tracer_gpv_k   !! トレーサー位置の GPV の鉛直格子番号探索
    call intp_gpv_tracer_part !! GPV のトレーサー位置への時空間内挿 (一部)
  end if

  call calc_tendency !! 力学過程：時間変化率の計算 (短いタイムステップ)
  call proc_advection_horizontal !! 水平移流
  call proc_advection_vertical  !! 鉛直移流
  call proc_fallout_gravity     !! 重力落下
  call sum_tendency_part       !! 時間変化率の足上げ (短いタイムステップ)
end do local_timeloop

call sum_tendency !! 時間変化率の足上げ (全部)

call drive_atm_post !! ATM 後処理
  call time_integral !! 時間積分

  call timeset_next    !! 経過時間の更新
  call timestamp_tracer !! トレーサーの時刻更新

end do timeloop

call increment_deallocate    !! 時間積分配列の割付け解除
call diffusion_deallocate    !! 拡散過程配列の割付け解除
call gpv_tracer_deallocate   !! トレーサー (GPV 内挿) 配列の割付け解除

```

```
call index_tracer_deallocate  !! トレーサー（格子情報）配列の割付け解除
call wrk_tracer_deallocate    !! トレーサー（作業変数）配列の割付け解除
call tracer_deallocate       !! トレーサー配列の割付け解除
call gpv_deallocate          !! GPV 入力配列の割付け解除
call atm_grid_deallocate     !! ATM 出力（格子）配列の割付け解除
call emission_stage_deallocate !! 放出源配列の割付け解除

call mpi_final !! MPI 後処理

stop
end program main_atm
```

B.2 タイムコントロール

年月日時分 [UTC] がスペース区切で 1 行に書かれた ATM 計算の時刻カードは、GPV 前処理の Succ/Tp.Latest/timecard.txt と作業ディレクトリ直下の timecard.txt の 2 枚あり、それぞれプログラムからはファイル名 TIMECARD, TIMECARD_RUN で開いて読む。TIMECARD は GPV の基準時刻（ベースタイム：GPV が予報値の場合は通常、初期時刻）であり、ATM 計算上の時刻もこのベースタイムからの経過時間によって制御する。すなわち ATM の積分時間間隔（タイムステップ） Δt とすると、経過時間 t はベースタイムを $t = 0$ として Δt ずつ刻まれる： $t = n\Delta t$ ($n \in \mathbb{N}$)。ただし個々のトレーサーの放出時刻はこの時間刻みとは独立なので、放出開始直後の最初の時間積分だけはより短い時間ステップ Δt_0 ($< \Delta t$) で計算する (Figure B.2)。

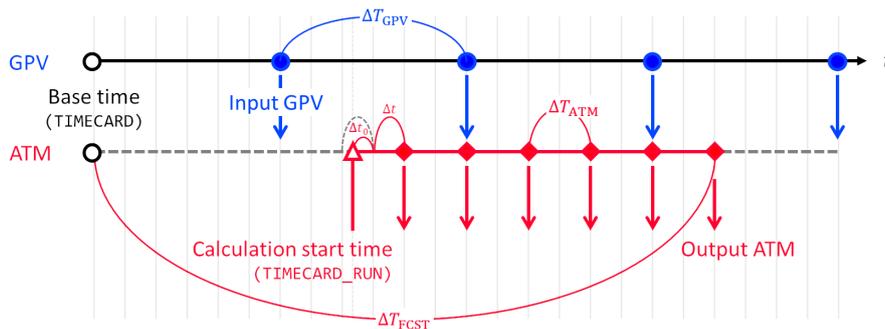


Figure B.2 Time control of the JMA-ATM. Δt is the time step of ATM and Δt_0 is first time step right after emission. ΔT_{GPV} , ΔT_{ATM} and ΔT_{FCST} are the intervals of input GPV, output ATM and forecast time of ATM, respectively.

時間積分ループにおいて、GPV 入力、ATM 出力および積分終了はそれらの時間間隔を ΔT として、次式で判断する。

$$\text{mod}(t, \Delta T) \equiv t - \left\lfloor \frac{t}{\Delta T} \right\rfloor < \varepsilon \quad \text{または} \quad \text{mod}(t, \Delta T) > \Delta T - \varepsilon \quad (\text{B.1})$$

ただし ε は十分小さい数である。

ATM の出力時刻については、Figure B.2 に示したベースタイムを起点としてタイムステップで刻まれた時刻での出力を基本とする。この他にネームリスト・パラメータ `n_switch_atm_output` (Table D.15) により、計算開始時刻から起算した相対時刻での出力が可能である。後者の場合、タイムステップの取り方によって、時刻刻みと出力時刻が合わないときは出力時刻のステップを二分割して計算する (Figure B.3)。

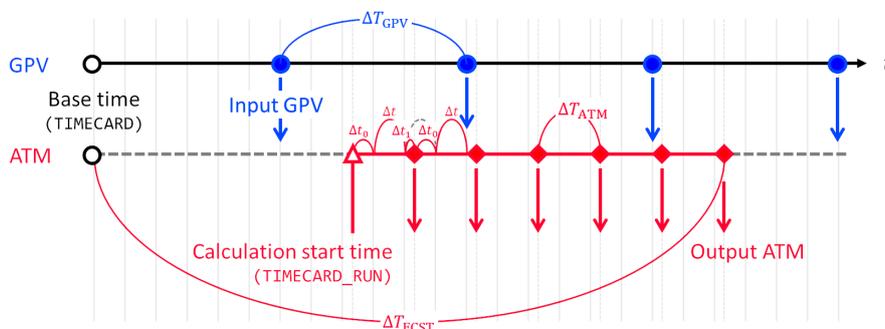


Figure B.3 Time control of the JMA-ATM (Output from calculation start time case). $\Delta t_1 (= \Delta t - \Delta t_0)$ is last time step just before the output, and the other variables are the same as Figure B.2.

付録 C 変数一覧

ATM 本体（第 2 章）で使用する主要な変数とパラメータ、定数および型定義をまとめる。ESP 作成（第 3 章）と GPV 前処理（第 4 章）で共用するものも含む。ソースコードではそれぞれ、変数モジュール (`variable.f90`)、パラメータモジュール (`parm.f90`)、定数モジュール (`const.f90`)、Numerical Recipes (`nrtype.f90`, Press *et al.*, 1996) および構造型 (`mytype.f90`) の型定義モジュールにまとめ、`public` 属性と `variable.f90` には `save` 属性もつけてグローバル変数として共有する。各モジュール・サブルーチンからは、必要なものだけを `use` 宣言文で `only` をつけて使用する。変数名は、可読性を高めるために、単独でも意味が通じるように長い名前も許容している。

C.1 主要変数一覧

主な変数を Table C.1 にまとめる。付録 D のネームリストにあるスイッチ、パラメータ、作業変数は除く。

Table C.1 Main variables (`variable.f90`)

Variable name	Description	Remarks
Basic variable		
<code>n_tracer</code>	Number of tracer	
<code>n_stage</code>	Number of emission stages	
Breakdown variable		
<code>n_tracer_esp</code>	Number of tracer (ESP)	
<code>n_tracer_anl</code>	Number of tracer (ANL)	
<code>n_stage_esp</code>	Number of emission stages (ESP)	
<code>n_stage_anl</code>	Number of emission stages (ANL)	
Setting of MPI		
<code>n_tracer_mpi</code>	Total number of tracer (each MPI)	
<code>n_tracer_mpi_start</code>	Number of tracer (start of each MPI)	
<code>n_tracer_mpi_end</code>	Number of tracer (end of each MPI)	
<code>mpi_myrank</code>	Rank (each MPI)	
<code>mpi_rank_num</code>	Sum of rank	
<code>io_mpi_log</code>	Unit number of MPI log	
<code>log_mpi</code>	file name of MPI log	
Source variable		
<code>emission_start_time(5)</code>	Start time of release 1st [UTC]	
<code>starttime_seq_min</code>	Start time [sequential min]	
<code>elapse_starttime</code>	Initial elapse time [sec]	
<code>emission_duration</code>	Total duration of emission [sec]	
<code>emission_mass</code>	Total mass of emission [kg]	
Source variable at each stage		
<code>n_tracer_stage(n_stage)</code>	Number of tracer at each stage	
<code>source_name_stage(n_stage)</code>	Name of source	e.g. "Fujisan"
<code>source_lat_stage(n_stage)</code>	Latitude of source [deg]	
<code>source_lon_stage(n_stage)</code>	Longitude of source [deg]	
<code>source_btm_asl_stage(n_stage)</code>	Bottom altitude of source [m asl]	
<code>source_top_asl_stage(n_stage)</code>	Top altitude of source [m asl]	
<code>emission_start_time_stage(n_stage, 5)</code>	Emission start time at each stage [UTC]	
<code>emission_duration_stage(n_stage)</code>	Emission duration at each stage [sec]	
<code>emission_mass_stage(n_stage)</code>	Emission mass at each stage [kg]	
<code>cutoff_min_stage(n_stage)</code>	Cutoff grain size (Min) [m]	
<code>cutoff_max_stage(n_stage)</code>	Cutoff grain size (Max) [m]	
<code>median_diameter_stage(n_stage)</code>	Median diameter of size distribution [m]	
<code>sig_stage(n_stage)</code>	Standard deviation of size distribution	
<code>emission_point_id_stage(n_stage)</code>	Emission point ID	8-Byte Integer

Table C.1 (Continued)

Variable name	Description	Remarks
Tracer variable		
tracer_tag(n.tracer)	Tags of tracer	Table C.5
tracer_lat(n.tracer)	Latitude of tracer [deg]	
tracer_lon(n.tracer)	Longitude of tracer [deg]	
tracer_alt(n.tracer)	Altitude of tracer [m asl]	
tracer_size(n.tracer)	Diameter of tracer [m]	
tracer_dens(n.tracer)	Density of tracer [kg/m ³]	
tracer_mass(n.tracer)	Mass of tracer [kg]	
tracer_release_time(n.tracer)	Release time of tracer [sec]	
tracer_current_time(n.tracer)	Current/stop time of tracer [sec]	
n.flag.tracer(n.tracer)	Action flag of tracer	Table C.5
Atmospheric GPV parameter		
basetime_gpv(5)	Base time [UTC]	
basetime_seq_min	Base time [sequential min]	
fcst_time_gpv	Forecast time of input GPV [sec]	
interval_gpv	Time interval of input GPV [sec]	
Atmospheric GPV parameter (Space)		
plane_name_gpv(ne_gpv)	Plane namelist for NWP-GPV	Allocate after
element_gpv(ne_gpv)	Element namelist for NWP-GPV	NUSDAS_INQ_CNTL
nz_gpv	Vertical plane number	
nx_gpv	Grid number of EW direction	
ny_gpv	Grid number of NS direction	
ne_gpv	Element number	
GPV cut area parameter		
cut_startpoint_ix	Startpoint of EW direction (cut)	
cut_startpoint_jy	Startpoint of NS direction (cut)	
cut_endpoint_ix	Endpoint of EW direction (cut)	
cut_endpoint_jy	Endpoint of NS direction (cut)	
Original atmospheric GPV parameter (NuSDaS type1-3)		
type1_air	NuSDaS Type1 (atmosphere)	
type2_air	NuSDaS Type2 (atmosphere)	
type3_air	NuSDaS Type3 (atmosphere)	
member_air	NuSDaS member (atmosphere)	
air_basepoint_ix	Basepoint of EW direction	
air_basepoint_jy	Basepoint of NS direction	
air_basepoint_lat	Basepoint latitude [deg]	
air_basepoint_lon	Basepoint longitude [deg]	
air_distance_x	Grid distance of EW direction [deg or m]	
air_distance_y	Grid distance of NS direction [deg or m]	
air_standard_lat1	Standard latitude1 [deg]	
air_standard_lat2	Standard latitude2 [deg]	
air_standard_lon1	Standard longitude [deg]	
nx_air	Grid number of EW direction (air)	
ny_air	Grid number of NS direction (air)	
Original surface GPV parameter (NuSDaS type1-3)		
type1_surf	NuSDaS Type1 (surface land)	
type2_surf	NuSDaS Type2 (surface land)	
type3_surf	NuSDaS Type3 (surface land)	
member_surf	NuSDaS member (surface land)	
surf_basepoint_ix	Basepoint of EW direction	
surf_basepoint_jy	Basepoint of NS direction	
surf_basepoint_lat	Basepoint latitude [deg]	
surf_basepoint_lon	Basepoint longitude [deg]	
surf_distance_x	Grid distance of EW direction [deg or m]	
surf_distance_y	Grid distance of NS direction [deg or m]	
surf_standard_lat1	Standard latitude1 [deg]	
surf_standard_lat2	Standard latitude2 [deg]	
surf_standard_lon1	Standard longitude [deg]	
nx_surf	Grid number of EW direction (surface)	
ny_surf	Grid number of NS direction (surface)	
Input atmospheric GPV parameter for ATM (NuSDaS type1-3)		
type1_gpv	NuSDaS Type1 (input ATM)	
type2_gpv	NuSDaS Type2 (input ATM)	
type3_gpv	NuSDaS Type3 (input ATM)	
member_gpv	NuSDaS member (input ATM)	

Table C.1 (Continued)

Variable name	Description	Remarks
Input atmospheric GPV for ATM (Constant)		
lat_gpv(nx_gpv, ny_gpv)	Latitude of grid [deg]	
lon_gpv(nx_gpv, ny_gpv)	Longitude of grid [deg]	
zs_gpv(nx_gpv, ny_gpv)	Modeled terrain elevation [m asl]	
sl_gpv(nx_gpv, ny_gpv)	Land coverage rate	
Input atmospheric GPV for ATM (Before)		
alt_gpv1(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Altitude of grid [m asl]	
u_gpv1(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Horizontal wind (EW) [m/s]	
v_gpv1(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Horizontal wind (NS) [m/s]	
w_gpv1(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Vertical wind [m/s]	
vdens_gpv1(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Air density [kg/m ³]	
temp_gpv1(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Air temperature [K]	
pres_gpv1(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Air pressure [hPa]	
vdf_gpv1(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Vertical diffusion coefficient [m ² /s]	
resist_air_gpv1(nx_gpv, ny_gpv)	Aerodynamic resistance [s/m]	
cwc_gpv1(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Cloud water content [kg/m ³]	
cloud_top_gpv1(nx_gpv, ny_gpv)	Cloud top [m asl]	
cloud_base_gpv1(nx_gpv, ny_gpv)	Cloud base [m asl]	
rain_gpv1(nx_gpv, ny_gpv)	Precipitation intensity (rain) [mm/h]	
snow_gpv1(nx_gpv, ny_gpv)	Precipitation intensity (snow) [mm/h]	
grpl_gpv1(nx_gpv, ny_gpv)	Precipitation intensity (graupel) [mm/h]	
Input atmospheric GPV for ATM (After)		
alt_gpv2(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Altitude of grid [m asl]	
u_gpv2(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Horizontal wind (EW) [m/s]	
v_gpv2(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Horizontal wind (NS) [m/s]	
w_gpv2(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Vertical wind [m/s]	
dens_gpv2(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Air density [kg/m ³]	
temp_gpv2(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Air temperature [K]	
pres_gpv2(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Air pressure [hPa]	
vdf_gpv2(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Vertical diffusion coefficient [m ² /s]	
resist_air_gpv2(nx_gpv, ny_gpv)	Aerodynamic resistance [s/m]	
cwc_gpv2(nx_gpv, ny_gpv, nz_gpv)	Cloud water content [kg/m ³]	
cloud_top_gpv2(nx_gpv, ny_gpv)	Cloud top [m asl]	
cloud_base_gpv2(nx_gpv, ny_gpv)	Cloud base [m asl]	
rain_gpv2(nx_gpv, ny_gpv)	Precipitation intensity (rain) [mm/h]	
snow_gpv2(nx_gpv, ny_gpv)	Precipitation intensity (snow) [mm/h]	
grpl_gpv2(nx_gpv, ny_gpv)	Precipitation intensity (graupel) [mm/h]	
Input GPV grid index & interpolation time at tracer		
tracer_gpv_ii(n_tracer_mpi)	Grid index (EW) at tracer point	
tracer_gpv_jj(n_tracer_mpi)	Grid index (NS) at tracer point	
tracer_gpv_k1(2, 2, n_tracer_mpi)	Grid index (before Z) neighbor tracer point	
tracer_gpv_k2(2, 2, n_tracer_mpi)	Grid index (after Z) neighbor tracer point	
tracer_gpv_time(n_tracer_mpi)	Interpolation time from nearest GPV	
Interpolate atmospheric GPV to tracer point		
u_at_tracer(n_tracer_mpi)	Horizontal wind (EW) [m/s]	
v_at_tracer(n_tracer_mpi)	Horizontal wind (NS) [m/s]	
w_at_tracer(n_tracer_mpi)	Vertical wind [m/s]	
dens_at_tracer(n_tracer_mpi)	Air density at tracer level [kg/m ³]	
temp_at_tracer(n_tracer_mpi)	Air temperature at tracer level [K]	
pres_at_tracer(n_tracer_mpi)	Air Pressure at tracer level [hPa]	
vdf_at_tracer(n_tracer_mpi)	Vertical diffusion coef. at tracer level [m ² /s]	
resist_air_at_tracer(n_tracer_mpi)	Aerodynamic resistance at tracer point [s/m]	
cwc_at_tracer(n_tracer_mpi)	Cloud water content at tracer level [kg/m ³]	
cloud_top_at_tracer(n_tracer_mpi)	Cloud top at tracer point [m asl]	
cloud_base_at_tracer(n_tracer_mpi)	Cloud base at tracer point [m asl]	
rain_under_tracer(n_tracer_mpi)	Rain under tracer point [mm]	
snow_under_tracer(n_tracer_mpi)	Snow under tracer point [mm]	
grpl_under_tracer(n_tracer_mpi)	Graupel under tracer point [mm]	
Diagnostic variable at tracer point		
yuragi_u(n_tracer_mpi)	Fluctuation of horizontal wind (EW) [m/s]	
yuragi_v(n_tracer_mpi)	Fluctuation of horizontal wind (NS) [m/s]	
Input data variable		
roughness_length(m_parm.vegetation_type2)	Roughness length [m]	m_parm.vegetation_type2 = 25
displacement_height(m_parm.vegetation_type2)	Zero-plane displacement [m]	
vegetation_mask(nx_surf.t1319, ny_surf.t1319)	Vegetation distribution	nx_surf.t1319 = 640
sst.climate(nx_surf.t1319, ny_surf.t1319)	Sea surface temperature [K]	ny_surf.t1319 = 320

Table C.1 (Continued)

Variable name	Description	Remarks
ATM calculation variable		
atm_end_time(5)	End of ATM forecast time [UTC]	
fcst_time_atm	Forecast time of ATM from basetime [sec]	
dt_atm	Global time step [sec]	
dt_atm_mod	Time step (modified) [sec]	
rk_weight(n_timeloop_stage_max)	Runge-Kutta weights (b-coefficients)	
rk_node(n_timeloop_stage_max)	Runge-Kutta nodes (c-coefficients)	
interval_atm	Time interval of output ATM [sec]	
Tendency variable		
dt(n_tracer_mpi)	Time step [sec]	
dlatdt(n_tracer_mpi)	Sum of latitude increment (total step) [deg]	
dlonddt(n_tracer_mpi)	Sum of longitude increment (total step) [deg]	
daltddt(n_tracer_mpi)	Sum of altitude increment (total step) [m]	
Output ATM parameter (Space)		
plane_name_atm(nz_atm)	Plane namelist for output ATM	
plane_alt_atm(nz_atm)	Plane altitude [m asl]	
plane_thickness_atm(nz_atm)	Thickness of ATM layer [m]	
nz_atm	Vertical plane number	
nx_atm	Grid number of EW direction	
ny_atm	Grid number of NS direction	
atm_basepoint_ix	Basepoint of EW direction	
atm_basepoint_jy	Basepoint of NS direction	
atm_basepoint_lat	Basepoint latitude [deg]	
atm_basepoint_lon	Basepoint longitude [deg]	
atm_distance_x	Grid distance of EW direction [deg]	
atm_distance_y	Grid distance of NS direction [deg]	
lat_atm(nx_atm, ny_atm)	Latitude of grid [deg]	
lon_atm(nx_atm, ny_atm)	Longitude of grid [deg]	
Output ATM parameter (NuSDaS type1-3)		
type1_atm	NuSDaS Type1 (output ATM)	
type2_atm	NuSDaS Type2 (output ATM)	
type3_atm	NuSDaS Type3 (output ATM)	
member_atm	NuSDaS member (output ATM)	
Output ATM grid index at tracer		
tracer_atm_ii(n_tracer_mpi)	Grid index (EW) at tracer point	
tracer_atm_jj(n_tracer_mpi)	Grid index (NS) at tracer point	
Output ATM variable (Eulerian grid)		
grid_atm_dep_total(nx_atm, ny_atm)	Total deposition (TDEP) [kg/m ²]	
grid_atm_dep_gravity(nx_atm, ny_atm)	Gravitational fallout (FOUT) [kg/m ²]	
grid_atm_dep_dry_dep(nx_atm, ny_atm)	Dry deposition (DDEP) [kg/m ²]	
grid_atm_dep_washout(nx_atm, ny_atm)	Wet scavenging (washout) (WOUT) [kg/m ²]	
grid_atm_dep_rainout(nx_atm, ny_atm)	Wet scavenging (rainout) (ROUT) [kg/m ²]	
grid_atm_max_size(nx_atm, ny_atm)	Maximum grain size (MAXD) [m]	
grid_atm_max_alt(nx_atm, ny_atm)	Tracer cloud top (CTOP) [m asl]	
grid_atm_min_alt(nx_atm, ny_atm)	Tracer cloud base (CBASE) [m asl]	
grid_atm_clm_content(nx_atm, ny_atm)	Total column content (TCLM) [kg/m ²]	
grid_atm_air_concent(nx_atm, ny_atm, nz_atm)	Atmospheric concentration (ACON) [kg/m ³]	
Time control		
n_timeloop_stage	Local timeloop stage counter	
n_timeloop_stage_max	Local timeloop stage number	
validtime_seq_min	Valid time [sequential min]	
n_total_step	Total time step (for monitor)	
n_current_step	Current time step (for monitor)	
n_flag_timing_finish	Exiting flag in timeloop	
n_flag_timing_input	Input flag in timeloop	
n_flag_timing_output	Output flag in timeloop	
elapse_time	Elapse time from basetime [sec]	
Other variable		
seed	Random seed (Xorshift)	Appendix G

C.2 主要パラメーター一覧

主なパラメータを Table C.2 にまとめる。付録 D のネームリストにあるスイッチは除く。

Table C.2 Main parameters (parm.f90)

Parameter name	Description	Value	Remarks
ATM control (Tracer)			
Status flag			
m_flag_tracer_status_before_active	Not active tracer (before calculate)	-1	
m_flag_tracer_status_active	Active tracer	1	
m_flag_tracer_status_suspended	Suspended tracer	2	
m_flag_tracer_status_out	Not active tracer (after calculate)	0	
Result flag			
m_flag_tracer_result_air	In air	1	
m_flag_tracer_result_reflection	Surface reflection	2	
m_flag_tracer_result_fallout	Fallout	11	
m_flag_tracer_result_deposition_dry	Dry deposition	21	
m_flag_tracer_result_washout_rain	Washout by rain	31	
m_flag_tracer_result_washout_snow	Washout by snow	32	
m_flag_tracer_result_washout_grpl	Washout by graupel	33	
m_flag_tracer_result_rainout	Rainout	41	
m_flag_tracer_result_top_out	Over model top	0	
m_flag_tracer_result_bottom_out	Under model surface	10	
m_flag_tracer_result_domain_out	Out of domain	90	
m_flag_tracer_result_decay_out	Decayed tracer	99	
ATM control (Process)			
m_switch_process_off	Process OFF	0	
m_switch_process_on	Process ON	1	
Time control			
m_flag_is_not_timing	Elapse time check (not action)	0	
m_flag_is_timing	Elapse time check (action)	1	
Misc			
m_flag_misc_off	System OFF	0	
m_flag_misc_on	System ON	1	
Space interpolation: GPV lattice to Tracer point			
idw	Inverse distance weight	1	≥ 1
Epsila			
time_epsilon	Small number for time interpolation	epsilon5	= 1.e-5_rp
space_epsilon	Small number for space interpolation	epsilon6	= 1.e-6_rp
Null			
large_null	Large number for null value	1._rp/epsilon7	= 1.e+7_rp
I/O			
io_rank	Rank number for I/O	0	MPI output for RANK0

C.3 定数一覧

ATM で使用する定数を Table C.3 にまとめる。

Table C.3 Constants (const.f90)

Constant name	Description	Value	Remarks
Universal constants			
pi	π	3.14159265358979323846_rp	
rad_unit	[rad/°]	pi / 180._rp	
deg_unit	[°/rad]	180._rp / pi	
Constants for Earth			
earth_radius	Earth radius R_E [m]	6.371e+6_rp	
inv_earth_radius	Inverse Earth radius $1/R_E$ [1/m]	1._rp / earth_radius	
earth_circumference	Earth circumference $2\pi R_E$ [m]	2._rp * pi * earth_radius	
earth_semi_major_axis	Semi-major axis [m]	6.378137e+6_rp	GRS80
inv_earth_flattening	Inverse Earth flattening	298.257222101_rp	GRS80
grav	Gravitational constant g [m/s ²]	9.80665_rp	
Constants for Air			
gas_ideal	Ideal-gas constant R^* [J/mol/K]	8.31_rp	
gas_dry	Gas constant R_d [J/kg/K] for dry air	287.05_rp	
gas_vapor	Gas constant R_v [J/kg/K] for water vapor	461.5_rp	
dens_water	Water density under standard state [kg/m ³]	1000._rp	
inv_gas_kappa	C_p/R_d	7._rp / 2._rp	For diatomic molecule
gas_kappa	R_d/C_p	1._rp / inv_gas_kappa	= 0.286
cp_dry	Specific heat C_p [J/kg/K] at constant pressure	inv_gas_kappa * gas_dry	= 1004.675
gas_epsilon	ϵ	gas_dry / gas_vapor	= 0.622
standard_temp	Standard temperature [K]	273.15_rp	
standard_pres	Standard pressure p_0 [hPa]	1013.25_rp	
reference_pres	p_{00} [hPa]	1000._rp	For potential temperature
sound_velocity	Sound velocity for dry air [m/s]	331.45_rp	
karman	Karman constant κ	0.4_rp	
Tetens' parameters for saturation vapor pressure			
standard_vapor_pres	Standard saturation vapor pressure [hPa]	6.11_rp	
tetens_factor_water	Tetens' factor for water	7.5_rp * log(10._rp)	= 17.27
tetens_temp_water	Tetens' temperature for water [K]	237.3_rp	
tetens_factor_ice	Tetens' factor for ice	9.5_rp * log(10._rp)	= 21.875
tetens_temp_ice	Tetens' temperature for ice [K]	265.5_rp	
Sutherland's parameters for viscosity and MFP			
sutherland_temp	Sutherland constant C_S [K]	117._rp	
base_temp	Reference temperature T_0 [K]	293.15_rp	
base_viscos	Viscosity η_0 [Pa.s] at T_0	18.18e-6_rp	
base_freepath	Mean free path MFP_0 [m] at p_0 and T_0	6.62e-8_rp	
Cunningham's parameters for slip correction			
cc_factor_a	a -factor of Cunningham correction	1.257_rp	
cc_factor_b	b -factor of Cunningham correction	0.400_rp	
cc_factor_c	c -factor of Cunningham correction	1.100_rp	
Epsilon			
epsilon2		1.e-2_rp	
epsilon3		1.e-3_rp	
epsilon4		1.e-4_rp	
epsilon5		1.e-5_rp	
epsilon6		1.e-6_rp	
epsilon7		1.e-7_rp	
epsilon8		1.e-8_rp	
epsilon9		1.e-9_rp	
epsilon10		1.e-10_rp	
epsilon11		1.e-11_rp	
epsilon12		1.e-12_rp	
epsilon13		1.e-13_rp	
epsilon14		1.e-14_rp	
epsilon15		1.e-15_rp	

C.4 型一覧

ATM で使用する型定義を Table C.4 にまとめる。実数変数の型（精度）は `rp` で指定する。また NuSDaS を読み書きする配列データの精度は `rktype` で指定する。

Table C.4 Kind types (`nrtypes.f90`)

Symbolic name	Description	Value	Remarks
Numerical Recipes types (Press <i>et al.</i> , 1996)			
<code>sp</code>	Single precision	<code>kind(1.0e0)</code>	= 4
<code>dp</code>	Double precision	<code>kind(1.0d0)</code>	= 8
Select precision			
<code>rp</code>	Precision for real variables	<code>sp</code>	
		<code>dp</code>	Default
NuSDaS read/write data array types			
<code>r4type</code>	Single precision	<code>'R4'</code>	
<code>r8type</code>	Double precision	<code>'R8'</code>	
Select precision			
<code>rktype</code>	Precision for user data array type	<code>r4type</code>	
		<code>r8type</code>	Default

C.5 構造型一覧

ATM で使用する構造型を Table C.5 にまとめる。

Table C.5 Derived types (`mytypes.f90`)

Component name	Component type	Description	Remarks
TYPE tag			
<code>tracer_id</code>	<code>integer(4)</code>	ID of tracer	1, 2, ..., <code>n.tracer</code>
<code>emission_stage_id</code>	<code>integer(4)</code>	ID of emission stage	1, 2, ..., <code>n.stage</code>
<code>emission_point_id</code>	<code>integer(8)</code>	ID of emission point	8-Byte Integer
TYPE flag			
<code>status</code>	<code>integer(4)</code>	Status flag of tracer	
<code>result</code>	<code>integer(4)</code>	Result flag of tracer	

付録 D ネームリスト・パラメーター一覧

入力パラメータをまとめたネームリスト (`namelist.txt`) は、GPV 前処理 (第 4 章) と ATM 計算 (第 2 章) のジョブグループ (JG) ごとに用意する。各 JG のネームリストに重複はなく、共通のパラメータについては後続ジョブの ATM 計算で GPV 前処理のネームリストも参照する。また ATM 計算の初期値作成 (第 3 章) には、放出源ごとの計算設定をまとめたリスト (ESP リスト: `emission_time_series.txt`) も用意する。GPV 前処理 (`Tp`) のネームリストはジョブ実行時に定数ディレクトリ `Const` から作業ディレクトリの `Parm` にコピーするのに対し、ATM 計算 (`Tf`) のネームリストと ESP リストは、`Parm` にあるユーザーが編集する元ファイル (conf ファイル: `setting.conf`) から `MkNamelist.sh` の実行により生成される (Figure B.1)。これは ATM を現業で運用する場合、`Tp` のネームリストは静的であるのに対し、`Tf` のネームリストは情報の種類に応じて動的に変化することに対応するためである。

ここでは、GPV 前処理と ATM 計算のネームリストおよび ESP リストにあるネームリスト・パラメータ¹と conf ファイルとの対応について説明する。

D.1 GPV 前処理のネームリスト

GPV 前処理のネームリストは、`namgpv`, `namwadj`, `namdiff`, `namra`, `namcloud` である。GPV の種類ごとに `Const` に用意して作業ディレクトリの `Parm` に `namelist.txt` としてコピーし、ソースコードからはファイル名 `NAMELIST_PRE` で開いて入力する。なお、入力する GPV (NuSDaS) の格子数や格子間隔などの基本情報は、ネームリストでは与えず、`Const/Atm/Nusdef` にある各 GPV の NuSDaS 定義ファイルに書かれた格子情報から読み取る。

以下、各ネームリストのパラメータを表にまとめる。

¹ネームリスト・パラメータには、例えば Table D.7 の `n_switch_calc.mass` のように、1 つしか選択可能でないにも関わらず用意されているスイッチがある。これは将来的に他の方法が追加される可能性を考えてのことである。

Table D.1 namgvp: Setting parameters of GPV

Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks	
fcst_time_gpv	real	Forecast time of input GPV [s]	475200.0 (GSM)	From TIMECARD (base time)	
			140400.0 (MSM)		
			36000.0 (LFM)		
interval_gpv	real	Time interval of input GPV [s]	10800.0 (GSM(lower))		
			21600.0 (GSM(upper))		
			3600.0 (MSM, LFM)		
Switch name	Switch kind	Option	Value	Remarks	
n_switch_coordinate_vertical	Vertical coordinates	<i>p</i> -coordinate	1	GSM	
		<i>z</i> -coordinate	2	MSM, LFM	
n_switch_terrain	Model terrain	OFF	0	Flat	
		ON	1		
n_switch_surf_gpv	Surface GPV	OFF	0		
		ON	1		
Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks	
Original GPV: NuSDaS (atmosphere)					
type1_air	character(8)	Type1	.GSMLLPP (GSM)	Lat/Lon coordinate, <i>p</i> -plane	
			.MSMLMZS (MSM)		Lambert coordinate, modelled plane
			.LFMLMZS (LFM)		
type2_air	character(4)	Type2	FCSV	Forecast value (instantaneous)	
type3_air	character(4)	Type3	LWR1 (GSM(lower))	Very high resolution GPV	
			UPR1 (GSM(upper))		
			VHRC (MSM)		
			VHRB (LFM)		
member_air	character(4)	Member			
Original GPV: NuSDaS (surface)					
type1_surf	character(8)	Type1	.GSMLLLY (GSM)	Lat/Lon coordinate	
			.MSMLMLY (MSM)	Lambert coordinate	
			.LFMLMLY (LFM)		
type2_surf	character(4)	Type2	FCSV	Forecast value (instantaneous)	
type3_surf	character(4)	Type3	STD1 (GSM)		
			SFC2 (MSM, LFM)		
member_surf	character(4)	Member			
Transformed GPV: NuSDaS (for ATM input)					
type1_gpv	character(8)	Type1	.ATMFGZZ	Free grid, <i>z</i> -coordinate	
type2_gpv	character(4)	Type2	FCSV	Forecast value (instantaneous)	
type3_gpv	character(4)	Type3	GPV1		
member_gpv	character(4)	Member			

Table D.2 namwadj: Adjust parameters of vertical wind

Switch name	Switch kind	Option	Value	Remarks
n_switch_wind_vertical_average	Spatial average of vertical wind	OFF	0	
		ON	9	
n_switch_wind_terrain_following	Terrain following wind	Only surface	1	
		Under lowest level	2	

Table D.3 namdiff: Setting parameters of diffusion

Switch name	Switch kind	Option	Value	Remarks
n_switch_diffusion_type_horizontal	Horizontal fluctuation	Fickian diffusion eq.	1	
		Langevin eq. (1st order)	2	
n_switch_diffusion_type_vertical	Vertical diffusion	Const.	1	
		Zero-eq. model (MY2)	2	
		One-eq. model (TKE)	3	
Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks
diffusion_coef_horizontal_limit	real	Horizontal diffusion coefficient (Max) [m ² /s]	5.684×10^4	
diffusion_coef_vertical_limit	real	Vertical diffusion coefficient (Max) [m ² /s]	5.000×10^1	
diffusion_timescale_horizontal	real	Lagrangian time scale (horizontal) [s]	5.0×10^4	
turbulent_u_ini	real	Initial turbulent velocity (E-W) [m/s]	0.253	
turbulent_v_ini	real	Initial turbulent velocity (N-S) [m/s]	0.253	
dt_max_diffusion_vertical	real	Max time step of vertical diffusion [s]	200.0	
boundary_layer_depth	real	Boundary layer depth [m agl]	1000.0	
asym_length_scale_boundary_layer	real	Asymptotic length scale (in boundary layer) [m]	100.0	
asym_length_scale_free_air	real	Asymptotic length scale (in free air) [m]	30.0	

Table D.4 namra: Setting parameters of dry deposition

Switch name	Switch kind	Option	Value	Remarks
n_switch_resistance_aerodynamic	Aerodynamic resistance	Uniform	1	
		Diagnosis	2	
Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks
deposition_velocity_limit	real	Deposition velocity (up-pre limit) [m/s]	0.3	
surface_layer_depth	real	Surface boundary layer depth [m agl]	100.0	

Table D.5 namcloud: Setting parameters of cloud top/base height

Switch name	Switch kind	Option	Value	Remarks
n_switch_cloud_height	Diagnosis of cloud height	Air pressure (P)	1	
		Relative humidity (RH)	2	
		Cloud water content (CWC)	3	
Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks
threshold_pres_cloud_top	real	Threshold of P (cloud top) [hPa]	100.0	Only n_switch_cloud_height = 1
threshold_pres_cloud_base	real	Threshold of P (cloud base) [hPa]	700.0	
threshold_rh_cloud_top	real	Threshold of RH (cloud top) [%]	60.0	Only n_switch_cloud_height = 2
threshold_rh_cloud_base	real	Threshold of RH (cloud base) [%]	80.0	
threshold_cwc_cloud	real	Threshold of CWC [kg/m ³]	0.0	Only n_switch_cloud_height = 3

D.2 ATM 計算のネームリスト

ATM 計算のネームリストは、`namsrcinfo`, `namsrcopt`, `namsrcparm`, `nampoint`, `namgpvcut`, `namatmcal`, `namfall`, `namwdep`, `namdecay`, `namatmout`, `namatmalt` である。`Parm/setting.conf` (付録 D.4) から `MkNamelist.sh` を実行して同ディレクトリに生成される `namelist.txt` を、ソースコードからはファイル名 `NAMELIST` で開いて入力する。なお、ATM の格子出力 (NuSDaS) の格子数や格子間隔などの基本情報は、Table D.16 で設定する高度面を除きネームリストでは与えず、NuSDaS 定義ファイル `fcst_atm.def` の格子情報で設定する。

以下、各ネームリストのパラメータを表にまとめる。

Table D.6 `namsrcinfo`: Basic parameter of ESP

Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks
<code>n.tracer_esp</code>	integer	Tracer number of ESP	250,000	Sum of each emission tracer (12th field of Table D.17)
<code>n.stage_esp</code>	integer	Emission source (stage) number of ESP	1	

Table D.7 `namsrcopt`: Option parameters of ESP

Switch name	Switch kind	Option	Value	Remarks
<code>n.switch_shape.horizontal</code>	Shape of emission source	Line	1	
		Inverted cone	2	
<code>n.switch_shape.vertical</code>	Vertical distribution of emission source	Uniform	1	
		Suzuki function	2	Suzuki (1983)
<code>n.switch_emission.rate</code>	Formation time of emission source	Uniform	1	
		Diffusion time	2	
<code>n.switch_size.distribution</code>	Grain-size distribution of tracer	Single	0	Fixed median
		Uniform	1	Min-Max sizes
		Log-normal	2	
<code>n.switch_particle.density</code>	Density distribution of tracer	Uniform	1	
		Specific	2	Size dependent
<code>n.switch_mass.distribution</code>	Mass distribution of tracer	Uniform	1	
<code>n.switch_calc.mass</code>	Total mass of emission	Power law	1	

Table D.8 `namsrcparm`: Setting parameters of ESP (Suzuki, 1983)

Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks
<code>entrainment_eruption.column</code>	real	Entrainment coefficient of eruption column	0.198	
<code>lambda</code>	real	Power of plume rising velocity	1.0	
<code>eddy.diffusion</code>	real	Parameter of eddy diffusivity inside plume [$\text{m}^2/\text{s}^{5/2}$]	400.0×10^{-4}	(Diffusion coef.) $\propto t^{3/2}$
<code>emission_ratio</code>	real	Adjust ratio of emission mass	1.0	
<code>km.mass</code>	real	Coefficient for total mass [$\text{kg}/\text{km}^4/\text{s}$]	193.0	$\approx 6.95 \times 10^5 \text{kg}/\text{km}^4/\text{h}$
<code>power.mass</code>	real	Power exponent of plume height for total mass	4.0	

Table D.9 nampoint: Setting parameter of Point

Switch name	Switch kind	Option	Value	Remarks
n.switch.point.vertical.profile	Output of point value	For ESP	1	
		Vertical profile	2	

Table D.10 namgpvcut: Setting parameters of GPV (CUT)

Switch name	Switch kind	Option	Value	Remarks
n.switch.cut.gpv	Cut region	OFF	0	
		ON	1	NUSDAS_CUT
Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks
cut.startpoint.ix	integer	Lower limit index of x -direction		Valid for n.switch.cut.gpv=1
cut.endpoint.ix	integer	Upper limit index of x -direction		
cut.startpoint.jy	integer	Lower limit index of y -direction		
cut.endpoint.jy	integer	Upper limit index of y -direction		

Table D.11 namatmcal: Basic parameters of ATM

Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks
dt.atm	real	Time step [s]	200.0	Case of n.switch.integral_method= 4
atm_end.time(1)	integer	End time of ATM forecast (Year) [UTC]		
atm_end.time(2)	integer	End time of ATM forecast (Month) [UTC]		
atm_end.time(3)	integer	End time of ATM forecast (Day) [UTC]		
atm_end.time(4)	integer	End time of ATM forecast (Hour) [UTC]		
atm_end.time(5)	integer	End time of ATM forecast (Minutes) [UTC]		
Switch name	Switch kind	Option	Value	Remarks
n.switch.advection.horizontal	Horizontal advection	OFF	0	
		ON	1	
n.switch.advection.vertical	Vertical advection	OFF	0	
		ON	1	
n.switch.diffusion.horizontal	Horizontal diffusion	OFF	0	
		ON	1	
n.switch.diffusion.vertical	Vertical diffusion	OFF	0	
		ON	1	
n.switch.fallout.gravity	Gravitational fallout	OFF	0	
		ON	1	
n.switch.deposition.dry	Dry deposition	OFF	0	
		ON	1	
n.switch.scavenging.below.cloud	Wet scavenging (Below cloud)	OFF	0	Washout
		ON	1	
n.switch.scavenging.in.cloud	Wet scavenging (In cloud)	OFF	0	Rainout
		ON	1	
n.switch.reflection.surface	Reflection (On surface)	OFF	0	
		ON	1	
n.switch.decay	Decay	OFF	0	
		ON	1	
n.switch.cycle.calc	Cycle calculation	OFF	0	
		Add previous forecast (same basetime)	1	TBD
		Continue previous forecast (different basetime)	2	TBD
n.switch.time.integral	Time reversal flag	Forward	1	
		Backward	-1	TBD
n.switch.integral.method	Time integral method	Euler	1	1st order w/ one stage
		Runge-Kutta	4	4th order w/ four stages
n.switch.tendency.horizontal	Space integral method	Local coordinate	1	Horizontal advection and diffusion
		Spherical triangle	2	

Table D.12 namfall: Setting parameters of gravitational fallout

Switch name	Switch kind	Option	Value	Remarks
n.switch_terminal.velocity	Terminal fall velocity	Stokes' law	1	
		Suzuki's law	2	Suzuki (1983)
n.switch_slip_correction	Slip correction	OFF	0	
		Cunningham correction	1	
Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks
form	real	Shape factor of tracer	1/3	Wilson and Huang (1979)
maxd.dens	real	Density of Max grain size [kg/m ³]	1000.0	
mind.dens	real	Density of Min grain size [kg/m ³]	2400.0	

Table D.13 namwdep: Setting parameters of wet scavenging

Switch name	Switch kind	Option	Value	Remarks
n.switch_scavenging_tracer_type	Tracer species	Noble gas	0	
		Depositing gas	1	
		Particle	2	
Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks
scavenging_coef_rain	real	Scavenging A-coefficient (rain) [1/s]	2.98×10^{-5}	
scavenging_power_rain	real	Scavenging B-coefficient (rain)	0.75	
threshold_intensity_rain	real	Precipitation threshold (rain) [mm/h]	999.9	
scavenging_coef_snow	real	Scavenging A-coefficient (snow) [1/s]	2.98×10^{-5}	
scavenging_power_snow	real	Scavenging B-coefficient (snow)	0.30	
threshold_intensity_snow	real	Precipitation threshold (snow) [mm/h]	999.9	
scavenging_coef_grpl	real	Scavenging A-coefficient (graupel) [1/s]	2.98×10^{-5}	
scavenging_power_grpl	real	Scavenging B-coefficient (graupel)	0.30	
threshold_intensity_grpl	real	Precipitation threshold (graupel) [mm/h]	999.9	
henry_const	real	Henry constant [M/atm]*	8.0×10^{-2}	Only n.switch_scavenging_tracer_type= 1
fraction_nuclei	real	Fraction of particles that is activated	0.9	Only n.switch_scavenging_tracer_type= 2

* M ≡ mol/L

Table D.14 namdecay: Setting parameters of decay

Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks
half_life	real	Half-lifetime [d]	1.10×10^4	Only n.switch_decay= 1

Table D.15 namatmout: Output parameters of ATM

Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks
interval_atm	real	Time interval of output ATM [s]	3600.0	
Switch name	Switch kind	Option	Value	Remarks
n_switch_atm_output	Output timing	From TIMECARD (base time)	1	VAFF
		From TIMECARD_RUN (calculation start time)	2	VAA
n_switch_atm_value_deposit	Value attribute (deposition)	Snap	1	
		Mean	2	
		Accumulated	3	VAFF
n_switch_atm_value_concent	Value attribute (concentration)	Snap	1	VAA
		Mean	2	
n_switch_atm_interp	Space interpolation	Nearest neighbor	1	
		Bi-Linear	2	
Output ATM: NuSDaS				
type1_atm	character(8)	Type1	_ATMLLY	Lat/Lon coordinate
type2_atm	character(4)	Type2	FCAV	Forecast value (accumulated)
type3_atm	character(4)	Type3	STD1	
member_atm	character(4)	Member		

Table D.16 namatmalt: z-plane parameters of ATM

Variable name	Variable type	Description	Default	Remarks
plane_alt_atm	real	Plane altitude [m asl]	0.0, 5486.4, 16764.0	≈ 0, 18000, 55000 ft. Number of planes is arbitrarily

D.3 ESP リスト

放出源に固有の ESP は 1 行 (1 レコード) にまとめて `emission_time_series.txt` に記入し、放出源が複数ある場合 (個々の放出源をステージと呼ぶ) は第 2 レコード以降に追記する。そのフォーマットを下表に示す。

Table D.17 Format of ESP list (`emission_time_series.txt`)

Column index	Variable type	Description	Default	Remarks
Record #1				
1	character(24)	Name of source		
2	real	Latitude of source [°]		
3	real	Longitude of source [°]		
4	integer	Start time of emission (year) [UTC]		TIMECARD.RUN
5	integer	Start time of emission (month) [UTC]		
6	integer	Start time of emission (day) [UTC]		
7	integer	Start time of emission (hour) [UTC]		
8	integer	Start time of emission (minutes) [UTC]		
9	real	Duration of emission [s]	600.0	
10	real	Bottom altitude of source [m asl]		
11	real	Top altitude of source [m asl]		
12	integer	Number of tracer in this stage	40,000 250,000	VAA VAFF
13	real	Cutoff grain size (Min) [m]	0.65×10^{-6}	
14	real	Cutoff grain size (Max) [m]	9.60×10^{-2}	
15	real	Median diameter of grain-size distribution [m]	2.50×10^{-4}	
16	real	Standard deviation of grain-size distribution	1.0	
17	real	Release constant in Suzuki function	0.017	β of Suzuki (1983)
18	integer(8)	ID of emission point		
Record #2- (Same format as Record #1)				

D.4 conf ファイル

ユーザーが編集する conf ファイルと ATM 計算のネームリスト (付録 D.2) および ESP リスト (付録 D.3) の対応を下表にまとめる。

Table D.18 Correspondence of NAMELIST (ATM), ESP list and configuration file (`setting.conf`)

Environment variable of configuration file	ESP list	Remarks
STAGE_01	Record #1	Table D.17
STAGE_02	Record #2	
...		
STAGE_50	Record #50	
...		
Environment variable of configuration file	NAMELIST of ATM	Remarks
Option of ESP		
N_SWITCH_SHAPE_HORIZONTAL	n_switch_shape_horizontal	Table D.7
N_SWITCH_SHAPE_VERTICAL	n_switch_shape_vertical	
N_SWITCH_EMISSION_RATE	n_switch_emission_rate	
N_SWITCH_SIZE_DISTRIBUTION	n_switch_size_distribution	
N_SWITCH_PARTICLE_DENSITY	n_switch_particle_density	
N_SWITCH_MASS_DISTRIBUTION	n_switch_mass_distribution	
N_SWITCH_CALC_MASS	n_switch_calc_mass	
Parameter of ESP		
ENTRAINMENT_ERUPTION_COLUMN	entrainment_eruption_column	Table D.8
LAMBDA	lambda	
EDDY_DIFFUSION	eddy_diffusion	
EMISSION_RATIO	emission_ratio	
KM_MASS	km_mass	
POWER_MASS	power_mass	
Point setting		
N_SWITCH_POINT_VERTICAL_PROFILE	n_switch_point_vertical_profile	Table D.9

Table D.18 (Continued)

Enviroment variable of configuration file	NAMELIST of ATM	Remarks
GPV (CUT) settings		
N_SWITCH_CUT_GPV	n_switch_cut_gpv	Table D.10
CUT_STARTPOINT_IX	cut_startpoint_ix	
CUT_ENDPOINT_IX	cut_endpoint_ix	
CUT_STARTPOINT_JY	cut_startpoint_jy	
CUT_ENDPOINT_JY	cut_endpoint_jy	
ATM settings		
DT_ATM	dt_atm	Table D.11
ATM_END_TIME_YYYY	atm_end_time(1)	
ATM_END_TIME_MM	atm_end_time(2)	
ATM_END_TIME_DD	atm_end_time(3)	
ATM_END_TIME_HH	atm_end_time(4)	
ATM_END_TIME_MIN	atm_end_time(5)	
N_SWITCH_ADVECTION_HORIZONTAL	n_switch_advection_horizontal	
N_SWITCH_ADVECTION_VERTICAL	n_switch_advection_vertical	
N_SWITCH_DIFFUSION_HORIZONTAL	n_switch_diffusion_horizontal	
N_SWITCH_DIFFUSION_VERTICAL	n_switch_diffusion_vertical	
N_SWITCH_FALLOUT_GRAVITY	n_switch_fallout_gravity	
N_SWITCH_DEPOSITION_DRY	n_switch_deposition_dry	
N_SWITCH_SCAVENGING_BELOW_CLOUD	n_switch_scavenging_below_cloud	
N_SWITCH_SCAVENGING_IN_CLOUD	n_switch_scavenging_in_cloud	
N_SWITCH_REFLECTION_SURFACE	n_switch_reflection_surface	
N_SWITCH_DECAY	n_switch_decay	
N_SWITCH_CYCLE_CALC	n_switch_cycle_calc	
N_SWITCH_TIME_INTEGRAL	n_switch_time_integral	
N_SWITCH_INTEGRAL_METHOD	n_switch_integral_method	
N_SWITCH_TENDENCY_HORIZONTAL	n_switch_tendency_horizontal	
Settings of gravitational fallout		
N_SWITCH_TERMINAL_VELOCITY	n_switch_terminal_velocity	Table D.12
N_SWITCH_SLIP_CORRECTION	n_switch_slip_correction	
FORM	form	
MAXD_DENS	maxd_dens	
MIND_DENS	mind_dens	
Settings of wet scavenging		
N_SWITCH_SCAVENGING_TRACER_TYPE	n_switch_scavenging_tracer_type	Table D.13
SCAVENGING_COEF_RAIN	scavenging_coef_rain	
SCAVENGING_POWER_RAIN	scavenging_power_rain	
THRESHOLD_INTENSITY_RAIN	threshold_intensity_rain	
SCAVENGING_COEF_SNOW	scavenging_coef_snow	
SCAVENGING_POWER_SNOW	scavenging_power_snow	
THRESHOLD_INTENSITY_SNOW	threshold_intensity_snow	
SCAVENGING_COEF_GRPL	scavenging_coef_grpl	
SCAVENGING_POWER_GRPL	scavenging_power_grpl	
THRESHOLD_INTENSITY_GRPL	threshold_intensity_grpl	
HENRY_CONST	henry_const	
FRACTION_NUCLEI	fraction_nuclei	
Parameter of decay		
HALF_LIFE	half_life	Table D.14
I/O settings		
INTERVAL_ATM	interval_atm	Table D.15
N_SWITCH_ATM_OUTPUT	n_switch_atm_output	
N_SWITCH_ATM_VALUE_DEPOSIT	n_switch_atm_value_deposit	
N_SWITCH_ATM_VALUE_CONCENT	n_switch_atm_value_concent	
N_SWITCH_ATM_INTERP	n_switch_atm_interp	
TYPE1_ATM	type1_atm	
TYPE2_ATM	type2_atm	
TYPE3_ATM	type3_atm	
MEMBER_ATM	member_atm	
PLANE_ALT_ATM	plane_alt_atm	Table D.16

付録 E 入力データフォーマット

GPV 前処理 (Figure B.1 の PreGpv[E|M|L]f) に入力する定数データと ATM 計算 (PrePoint および FcATM) に入力する前処理した GPV の要素一覧を記す。

E.1 定数データフォーマット

いずれも乾性沈着過程で用いる空気力学的抵抗を求めるための定数データである植生パラメータ、植生分布、海面水温 (SST) の気候値のフォーマットをそれぞれ付録 E.1.1, E.1.2, E.1.3 に示す。植生分布と SST の水平分解能は 640×320 の標準的な矩形ガウス格子である。

E.1.1 植生パラメータ

Table E.1 Data format of vegetation parameter (veg.dat). The extents of vegetation type ityp = 25 (1–12: Northern Hemisphere, 13–24: Southern Hemisphere, 25: Ice sheet), months imon = 12 and icg = 2.

Variable name	Variable type	Description	Unit	Remarks
Record #1 (Omitted)				
Record #2				
xgreen(ityp*imon*icg)	real(8)	(Omitted)		Not used in ATM
xcover(ityp*imon*icg)	real(8)	(Omitted)		Ditto
xzlt(ityp*imon*icg)	real(8)	(Omitted)		Ditto
x0x(ityp*imon)	real(8)	Roughness length	m	
xd(ityp*imon)	real(8)	Zero-plane displacement	m	

E.1.2 植生分布

Table E.2 Data format of vegetation type (typ.dat). Grid numbers nx_surf = 640 in the West–East direction and ny_surf = 320 in the South–North direction.

Variable name	Variable type	Description	Unit	Remarks
imask(nx_surf*ny_surf)	integer(4)	Vegetation type	-	0 (Water) – 13 (Ice sheet)

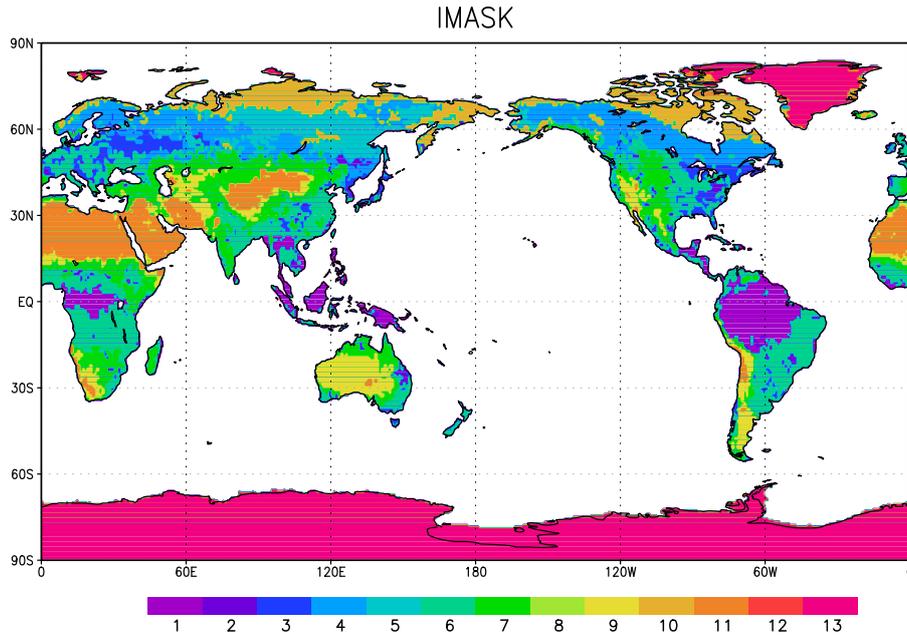


Figure E.1 Distribution of vegetation type (*typ.dat*). 1: Broadleaf evergreen, 2: Broadleaf deciduous, 3: Mixed broadleaf deciduous and needleleaf evergreen, 4: Needleleaf evergreen, 5: Needleleaf deciduous, 6: Grass and broadleaf deciduous shrubs, 7: Grass, 8: Broadleaf deciduous shrubs, 9: Semi-desert, 10: Tundra, 11: Desert, 12: Cultivated land and 13: Ice sheet (Sato *et al.*, 1989).

E.1.3 海面水温の気候値

Table E.3 Data format of climate values of SST (*sst.dat*). Grid numbers *nx_surf* = 640 in the West–East direction and *ny_surf* = 320 in the South–North direction.

Variable name	Variable type	Description	Unit	Remarks
Record #1–6 (Omitted)				
Record #7 (January, header)				
Record #8 (January)				
level	character(4)	(Omitted)		Not used in ATM
nlem	character(4)	(Omitted)		Ditto
title	character(32)	(Omitted)		Ditto
unit	character(16)	(Omitted)		Ditto
ktsd	integer(4)	(Omitted)		Ditto
ktsa	integer(4)	(Omitted)		Ditto
base	real(4)	Base	K	
amp	real(4)	Amplitude	-	
idata(<i>nx_surf</i> * <i>ny_surf</i>)	integer(2)	SST	(K)	Decode by $\text{base} + \text{amp} * \text{idata}$
Record #9 (February, header)				
Record #10 (February, same format as Record #8)				
...				
Record #29 (December, header)				
Record #30 (December, same format as Record #8)				

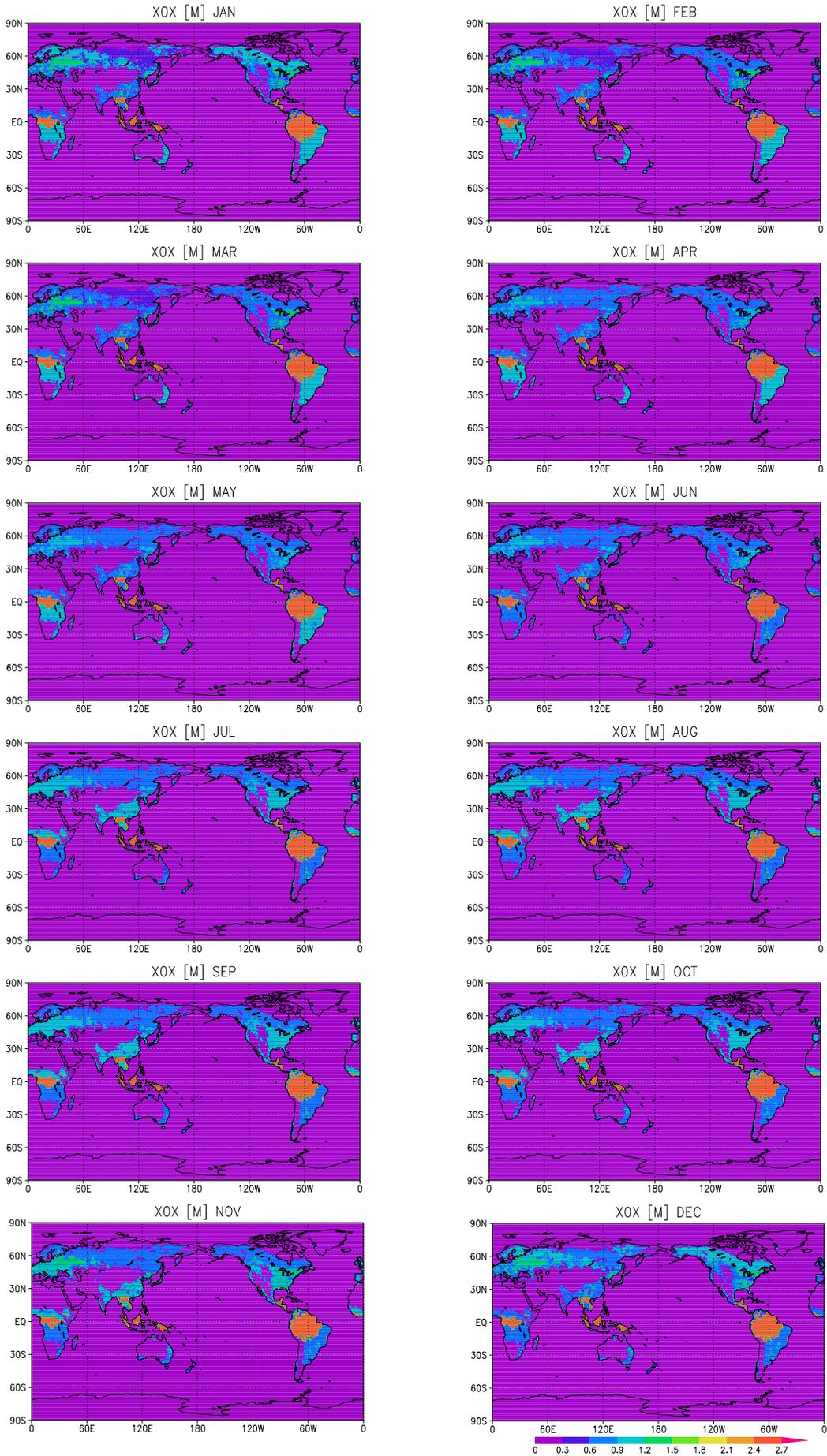


Figure E.2 Monthly distribution of roughness length with vegetation parameter (veg.dat)

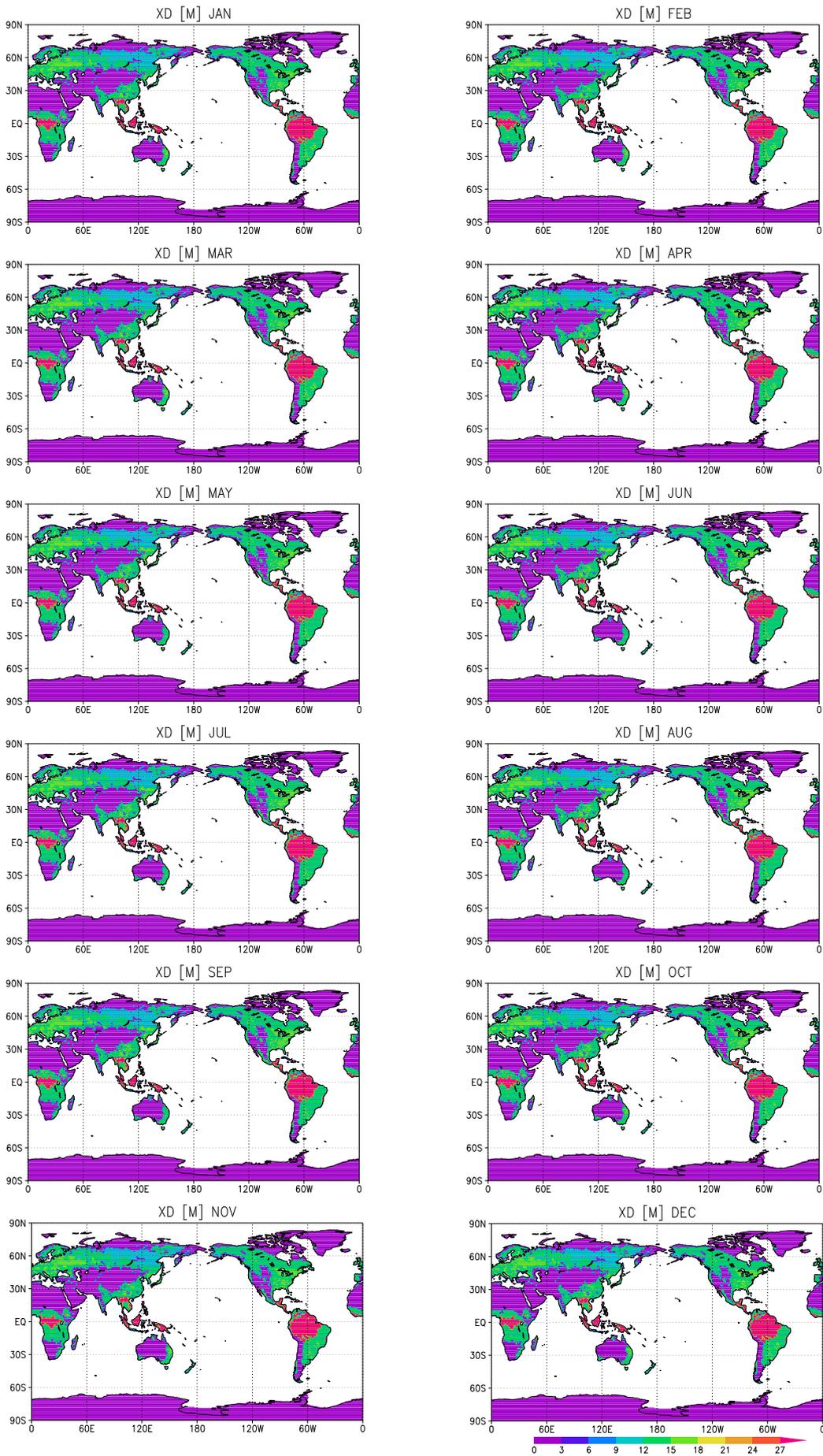


Figure E.3 Monthly distribution of zero-plane displacement with vegetation parameter (veg.dat)

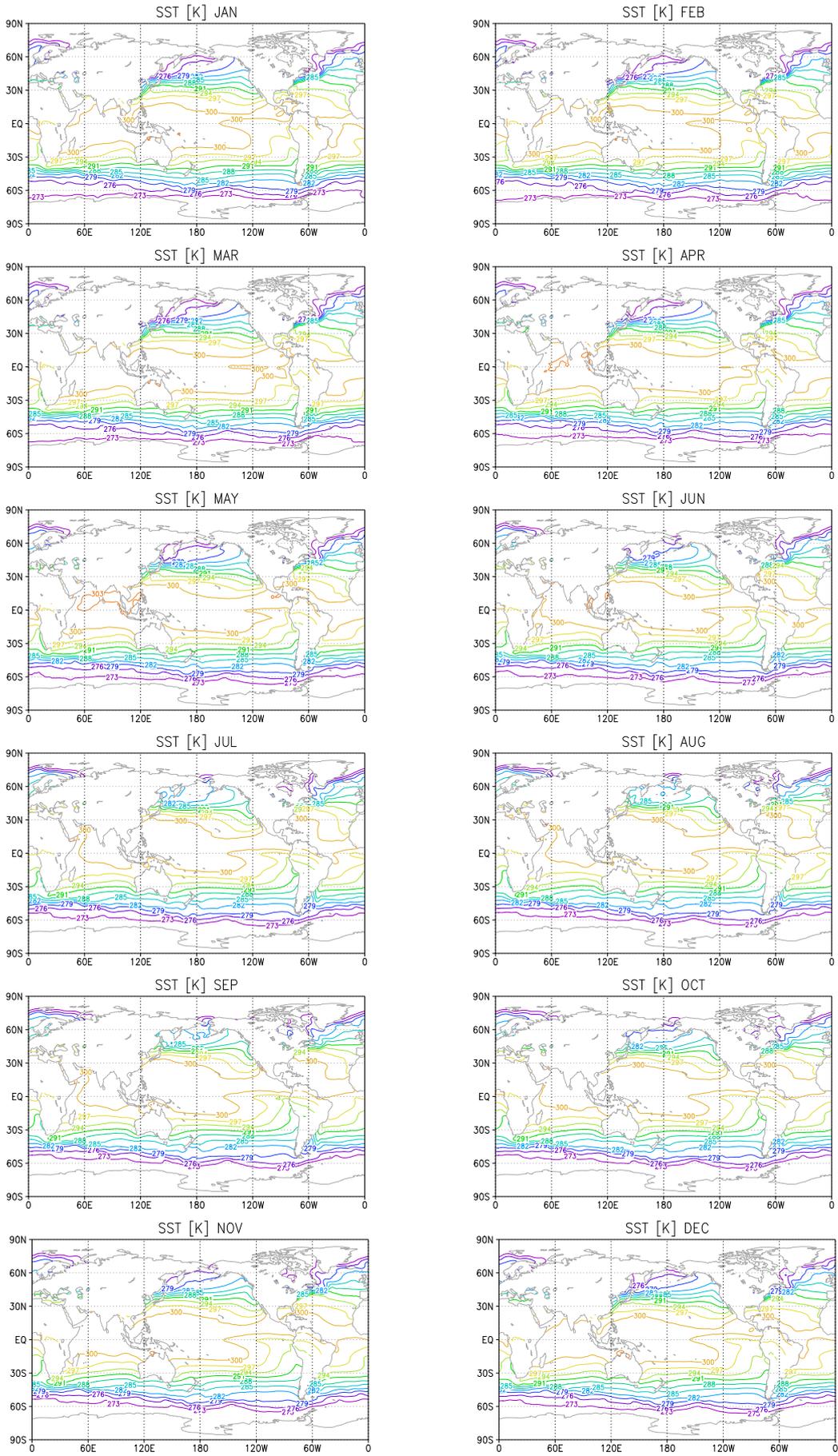


Figure E.4 Monthly distribution of SST (sst.dat)

E.2 NuSDaS による入力要素一覧

ATMに入力する GPV は、気象庁数値予報システムの格子点値フォーマットである NuSDaS のデータセットで格納している。前処理後の ATM 計算へ入力する GPV の要素を付録 E.2.1 に示す。前処理前の元の数値予報 GPV の入力要素については Table 4.1 および GSM, MSM, LFM の各マニュアル（例えば、JMA, 2019）を参照されたい。

E.2.1 ATM 計算の入力 GPV

Table E.4 Elements of input GPV (`pre.gpv.nus`) to the JMA-ATM. The data type names of `type1 = _ATMFGZZ`, `type2 = FCSV` and `type3 = GPV1`. SURF and NZ_GPV mean surface and the number of atmospheric planes (footnote 2 of § 4.1), respectively.

Element	Meaning	Unit	Plane	Remarks
Z	Altitude	m asl	SURF, 1, 2, ..., NZ_GPV	Only initial time in cases of MSM and LFM Modeled terrain elevation is stored in SURF
SL	Land coverage rate	0.01%	SURF	Only initial time 0 (Sea) – 1 (Land)
FLAT	Latitude	°	SURF	Only initial time
FLON	Longitude	°	SURF	Only initial time
UU	Horizontal wind speed in the West–East direction	m/s	SURF, 1, 2, ..., NZ_GPV	
VV	Horizontal wind speed in the South–North direction	m/s	SURF, 1, 2, ..., NZ_GPV	
W	Vertical wind speed	m/s	1, 2, ..., NZ_GPV	
Dens	Air density	kg/m ³	SURF, 1, 2, ..., NZ_GPV	
T	Air temperature	K	SURF, 1, 2, ..., NZ_GPV	
P	Air pressure	hPa	SURF, 1, 2, ..., NZ_GPV	Only initial time in case of GSM (except SURF)
EDDYKH	Turbulent diffusion coefficient	m ² /s	1, 2, ..., NZ_GPV	Vertical component
ra	Aerodynamic resistance	s/m	SURF	
CWC	Cloud water content	kg/m ³	1, 2, ..., NZ_GPV	
CTOP	Cloud top	m asl	SURF	<i>cf.</i> Table D.5
CBASE	Cloud base	m asl	SURF	
SMQR1H	Precipitation intensity (Rain)	mm/h	SURF	
SMQS1H	Precipitation intensity (Snow)	mm/h	SURF	
SMQG1H	Precipitation intensity (Graupel)	mm/h	SURF	

付録 F 出力データフォーマット

ESP 関連 (Figure B.1 の PrePoint, IniESP および IniComb) と ATM 計算本体 (FcATM) から出力する可変データと NuSDaS で出力する格子データの要素一覧を記す。

F.1 可変データフォーマット

放出地点の大気プロファイルを付録 F.1.1、ATM の粒子出力のフォーマットを付録 F.1.2 に、タグ出力のフォーマットを付録 F.1.3 に示す。粒子出力のフォーマットは ESP と ATM 本体で共通である。ESP の出力データはまた ATM 本体の入力データとなり初期値を与える。

F.1.1 大気プロファイル

Table F.1 Text format of atmospheric profiles above emission points (`point_stagenn.txt`, $nn = 1, 2, \dots, n_stage$). $nz_gpv = NZ_GPV + 1$ (NZ_GPV is the number of atmospheric planes of Table E.4).

Column index	Variable type	Description	Unit	Remarks
Row #1 (Header caption)				
Row #2 (Surface)				
1	integer	Start time of emission (year)	UTC	
2	integer	Start time of emission (month)		
3	integer	Start time of emission (day)		
4	integer	Start time of emission (hour)		
5	integer	Start time of emission (minutes)		
6	real	Altitude above emission point	m asl	Modeled terrain elevation at surface
7	real	Eastward wind speed	m/s	
8	real	Northward wind speed	m/s	
9	real	Vertical wind speed	m/s	Null value at surface
10	real	Air density	kg/m ³	
11	real	Air temperature	K	
12	real	Air pressure	hPa	
Row #3 (The first atmospheric plane, same format as Row #2)				
...				
Row #nz_gpv+1 (The NZ_GPV-th atmospheric plane, same format as Row #2)				
Row #nz_gpv+2 (Partition line)				

F.1.2 粒子出力ファイル

Table F.2 Data format of tracer particles (`ini_particle.dat` and `fcst_particle.dat`). Variable type of integer means integer(4), real are selectable from real(4) or real(8).

Variable name	Variable type	Description	Unit	Remarks
Record #1				
<code>n_tracer</code>	integer	Total number of tracer	-	Sum of <code>n_tracer_stage</code>
<code>n_stage</code>	integer	Total number of emission source (stage)	-	
<code>basetime_gpv(5)</code>	integer	Base time of GPV	UTC	TIMECARD
Record #2				
<code>source_name_stage(n_stage)</code>	character(24)	Name of source	-	
<code>source_lat_stage(n_stage)</code>	real	Latitude of source	°	
<code>source_lon_stage(n_stage)</code>	real	Longitude of source	°	
<code>emission_start_time_stage(n_stage,5)</code>	integer	Start time of emission	UTC	TIMECARD_RUN
<code>emission_duration_stage(n_stage)</code>	real	Duration of emission	s	
<code>emission_mass_stage(n_stage)</code>	real	Mass of emission	kg	
<code>source_btm_asl_stage(n_stage)</code>	real	Bottom altitude	m asl	
<code>source_top_asl_stage(n_stage)</code>	real	Top altitude of source	m asl	
<code>n_tracer_stage(n_stage)</code>	integer	Number of tracer in this stage	-	
Record #3- (Repetition until the end of forecast time)				
<code>tracer_id(n_tracer)</code>	integer	ID of tracer	-	Same as 1st field of Table F.3
<code>elapsed_time</code>	real	Elapse time	s	From base time
<code>tracer_release_time(n_tracer)</code>	real	Release time of tracer	s	Ditto
<code>tracer_current_time(n_tracer)</code>	real	Current/Stop time of tracer	s	Ditto
<code>tracer_lat(n_tracer)</code>	real	Latitude of tracer	°	
<code>tracer_lon(n_tracer)</code>	real	Longitude of tracer	°	
<code>tracer_alt(n_tracer)</code>	real	Altitude of tracer	m asl	
<code>tracer_size(n_tracer)</code>	real	Diameter of tracer	m	
<code>tracer_dens(n_tracer)</code>	real	Density of tracer	kg/m ³	
<code>tracer_mass(n_tracer)</code>	real	Mass of tracer	kg	
<code>n_falg_status(n_tracer)</code>	integer	Status flag of tracer	-	
<code>n_falg_result(n_tracer)</code>	integer	Result flag of tracer	-	

F.1.3 タグ出力ファイル

Table F.3 Data format of tracer tags (`ini_tag.dat`). `n_tracer` and `n_stage` are given by Table F.2. Variable type of integer means integer(4).

Variable name	Variable type	Description	Unit	Remarks
<code>tracer_id(n_tracer)</code>	integer	ID of tracer	-	1, 2, ..., <code>n_tracer</code>
<code>emission_stage_id(n_tracer)</code>	integer	ID of emission stage	-	1, 2, ..., <code>n_stage</code>
<code>emission_point_id(n_tracer)</code>	integer(8)	ID of emission point	-	18th field of Table D.17

F.2 NuSDaS による出力要素一覧

ATM から出力する格子データは NuSDaS のデータセットで格納している。出力要素を付録 F.2.1 に示す。

F.2.1 ATM 計算の格子出力データ

Table F.4 Elements of output (`fcst_atm.nus`) from the JMA-ATM. The data type names of `type1 = _ATMLLLY`, `type2 = FCAV` and `type3 = STD1`. SURF and NZ_ATM mean surface and the number of atmospheric planes set by Table D.16, respectively. Time attribute of TDEP, FOUT, DDEP, WOUT and ROUT is defined by `n_switch_atm_value_deposit` and that of TCLM and ACON is defined by `n_switch_atm_value_concent` of Table D.15.

Element	Meaning	Unit	Plane	Remarks
TDEP	Total deposition	kg/m ²	SURF	= FOUT + DDEP + WOUT + ROUT
FOUT	Gravitational fallout	kg/m ²	SURF	N/A
DDEP	Dry deposition	kg/m ²	SURF	
WOUT	Wet scavenging (Washout)	kg/m ²	SURF	
ROUT	Wet scavenging (Rainout)	kg/m ²	SURF	
MAXD	Maximum grain size	m	SURF	From start to valid time
CTOP	Tracer cloud top	m asl	SURF	Snap value at valid time
CBASE	Tracer cloud base	m asl	SURF	Ditto
TCLM	Total column content	kg/m ²	SURF	
ACON	Atmospheric concentration	kg/m ³	1, 2, ..., NZ_ATM	

付録 G 乱数

ATM では、いくつかの箇所では擬似乱数を扱っている。例えば、ATM 本体に含まれる拡散過程（第 2 章）や、ESP を用いて初期値（第 3 章）を作成する際のトレーサーの配置や粒径分布などである。Fortran には擬似乱数を生成する組み込みサブルーチンとして `random_number` が用意されているものの高速で高品質な擬似乱数を生成し、また、MPI 並列化（付録 H.1）における各プロセスごとに異なる擬似乱数を扱うためには、組み込みサブルーチンとは別の擬似乱数生成器が必要である¹。そこで ATM では、一様乱数は現在 `xorshift` (Press *et al.*, 1996; Marsaglia, 2003) と呼ばれる擬似乱数生成器で作成し、正規乱数は `xorshift` で作成された一様乱数を使って、Box-Muller 法 (Box and Muller, 1958) を用いて作成している。正規乱数については、以前のモデル (GATM, RATM) で使われていた方法であるが、`xorshift` は今回のモデル更新の際に新たに採用した擬似乱数生成器であり、比較的最近の手法であるため、ここで簡単に特徴を述べる。

G.1 一様乱数 (Xorshift)

Marsaglia (2003) によって開発された擬似乱数生成器である `xorshift` のアルゴリズムは、排他的論理和とビットシフトのみから構成され処理速度が速く²、高速な計算が求められる ATM に適していると考え採用した。また、`xorshift` で作られる擬似乱数は乱数としての精度（規則性のなさなど真の乱数が満たすべき性質の再現性）も高く、擬似乱数を多用する ATM には適している。Marsaglia (2003) によると `xorshift` は、周期に関して 3 つのオプションが存在し、それぞれの周期は、 $2^{32} - 1$ 、 $2^{64} - 1$ 、 $2^{128} - 1$ である。ATM では、最も周期の短い $2^{32} - 1$ を採用しているが、それでも 43 億程度である。この周期は、数 10 万から数 100 万程度の粒子数を計算するには十分な長さであるが、将来的により周期の長いオプションに変更する可能性はある³。

`Xorshift` は、乱数シード ($s = s_0$) を入力値として与え、そのシードに対応した乱数 x_0 を出力し、同時にシードが $s = s_1$ に更新される仕様になっている。新たに乱数を取得したいときは、更新されたシード $s = s_1$ を `xorshift` に入力すると、新たな乱数 x_1 が出力され、同時にシードが $s = s_2$ に更新される。更新されたシード $s = s_2$ は次の擬似乱数 x_2 を取得するために使われる。このように、`xorshift` では、初期のシード (0 以外の整数) を決定し、そのシード s を更新しながら対応する新たな乱数を取得する仕組みとなっている⁴。

Figure G.1 に実際に ATM のコード (抜粋) を示す⁵。ATM で行う計算では、トレーサーの数だけの乱数が必要となる状況が多いため、`n_max` 個の 1 次元配列の擬似乱数 (0 以上 1 以下) を返り値とするサブルーチンを実装している⁶。また、`seed` (乱数シード) が入力値であり、作成された擬似乱数の数だけ更新されるので、`n_max` 回更新された `seed` が返り値になる。なお、Figure G.1 の 29 から 33 行目までは本来ならば不要である処理であるが、どのような状況になっても異常終了させないための例外処理であり、0 未満または 1 より大きい擬似乱数が生成されてしまった場合は 0.5 を返すようにしている (実際には、この `if` 文は通過しない)。

¹ プロセスごとに異なる擬似乱数を使うためには、`seed` を陽に管理する必要があり `random_number` は使えない。

² 気象研究所の現有サーバ「リモートセンシングによる噴煙状態解析装置」(Intel® Xeon® Gold 6138 (3.7 GHz) 搭載) で実行したところ、1 億個の乱数を 10 回作成するのにかかる時間は 4 秒程度であった。

³ 一回の計算の中で同じ乱数が使われても直ちに問題になるわけではない。例えば、初期値の粒径分布に使われる乱数と、予報の途中で拡散計算に使われる乱数に一部重複があっても問題にはならないだろう。

⁴ プロセスごとに初期の乱数シードを異なる値にする必要があることに注意。

⁵ コード内の整数・実数の精度については、`sp=4`、`rp=8` である (Table C.4)。また装置番号は、非 MPI 環境では、`io_mpi_log=6` である。

⁶ つまり、このサブルーチンは `n_max` はトレーサー数 (`n_tracer`) で呼ばれることがほとんどである。

```

1  ! =====
2  !   Based on Marsaglia (2003) "Xorshift RNGs"
3  ! =====
4  subroutine xorshift32_rng( harvest, n_max, seed )
5
6     real  (rp), intent(out)  :: harvest(1:n_max)
7     integer(sp), intent(in)  ::          n_max
8     integer(sp), intent(inout):: seed
9
10    integer(sp)          :: nn
11    integer(sp)          :: y          !! 32bit Integer
12    integer(sp), parameter:: n_32bit = 2147483647 !! 2**32/2-1
13    real  (rp), parameter:: inv      = 1._rp / ( 2._rp * real(n_32bit, rp) )
14
15    ! -----
16    !   Initialize
17    ! -----
18    y = seed
19    ! -----
20    !   Xorshift algorithm for seed y
21    ! -----
22    do nn = 1, n_max
23        y = ieor(y, ishft(y, +13))
24        y = ieor(y, ishft(y, -17))
25        y = ieor(y, ishft(y, + 5))
26
27        harvest(nn) = inv * real(y, rp) + 0.5_rp
28
29        if ( harvest(nn) < 0._rp .or. 1._rp < harvest(nn) ) then
30            write(io_mpi_log, *) "WARNING: RANDOM NUMBER GENERATION"
31            write(io_mpi_log, *) "SEED, N, Y, HARVEST = ", seed, nn, y, harvest(nn)
32            harvest(nn) = 0.5_rp
33        end if
34    end do
35    ! -----
36    !   Update seed for next call
37    ! -----
38    seed = y
39
40    return
41 end subroutine xorshift32_rng

```

Figure G.1 Xorshift RNGs implemented in the JMA-ATM

付録 H 並列化

H.1 MPI

第 2 章で仮定したとおり、ATM で扱うトレーサーは現在、相互作用を考えていない。そのため、ATM はトレーサーの初期分布に対して重ね合わせの原理が成り立つ方程式系に基づいているという意味で線形モデルであるといえる。すなわち、2つの初期値から別々に計算した予測結果を合わせたものと、それら2つの初期値を合わせた1つの初期値から計算した予測結果は一致する¹。

このような線形モデルは、並列化されたプロセス間のデータの受け渡し（通信）が基本的には不要であるため並列化の実装が容易である上に計算効率が上がりやすい²。ATM を利用した予報業務においては、現象発生時の迅速な情報発表のために予測計算を高速に行うことは、速報性（第 1.2 節）の観点から重要である。そこで、供給源モデルと ATM 本体にはメモリを共有しない複数プロセスによる並列化である MPI を用いて並列計算を実装³し予測計算の高速化を図っている。ここでは ATM における並列化について説明する。

Figure H.1 に ATM の並列計算の概念図を示す。この例では、分割数は 5 である。各プロセスが扱うトレーサー数は全トレーサー数を均等に配分するため、トレーサー数が 100,000 とすると 1 プロセスあたり 20,000 のトレーサーの計算を行うことになる。この場合、各プロセスは 20,000 のトレーサーの予報結果しかもっていないため全トレーサーの結果を出力するために特定のプロセスに各プロセスからデータをまとめて出力する必要があり、Figure H.1 の例だとプロセス 0 にデータをまとめている（図中の黄色と緑色の領域に対応）。したがって、プロセス 0 とプロセス 0 以外は出力の有無という点で異なる処理をしており、出力を担当するプロセス 0 は他のプロセスに比べて負荷が高い。一方で、GPV や初期値の読み込みについては全プロセスで読み込み、「読み込み専用プロセス」などは用意しておらず負荷は均等である。また、GPV の読み込むタイミングは、利用する GPV によって異なり、例えば、LFM の場合は 1 時間ごとである（Table 4.1 参照）。

ATM で MPI 並列計算を行う際の注意点を最後に述べておく。上述したように、トレーサーに対して ATM はトレーサーに対する線形モデルであるから、並列化によって予測値は変化しないはずであるが実際には、並列数を変えると擬似乱数（付録 G）の順番が異なるため計算結果が完全には一致しない。その差は物理的に意味のない差であるものの、開発の際にはこの差には注意が必要である。すなわち、開発中には「予測結果を変えない些細な変更」を行うことは頻繁にあり、そのような場合は変更前の結果との一致を確認し想定外の修正をしていないことを確認する。その際、万が一、異なる並列数で実行した結果を比較すると結果は一致しない。したがって、一致を確認する必要がある場合は、必ず並列数を合わせて計算を行う必要がある。

¹ 方程式系としては一致するべきであるが、実際の数値計算上では計算の順序による違いや乱数シードの設定によって擬似乱数の順番が異なるため計算結果が完全に一致することはない。しかし、その違いは物理的に意味のない差である。

² 出力やモニタのために最低限の通信は必要となる。

³ ATM は非 MPI 環境でも実行可能である。その場合、付録 A の Mpi にある MPI ライブラリの呼び出しをまとめた `mpi_control.f90` に換えて、空の MPI ライラリ `mpi_fake.f90` でコンパイル実行する。後述するログは、ジョブ全体のログに集約して 1 つだけ出力される（MPI 計算の場合はプロセス内とジョブ全体のログが各 1 出力）。

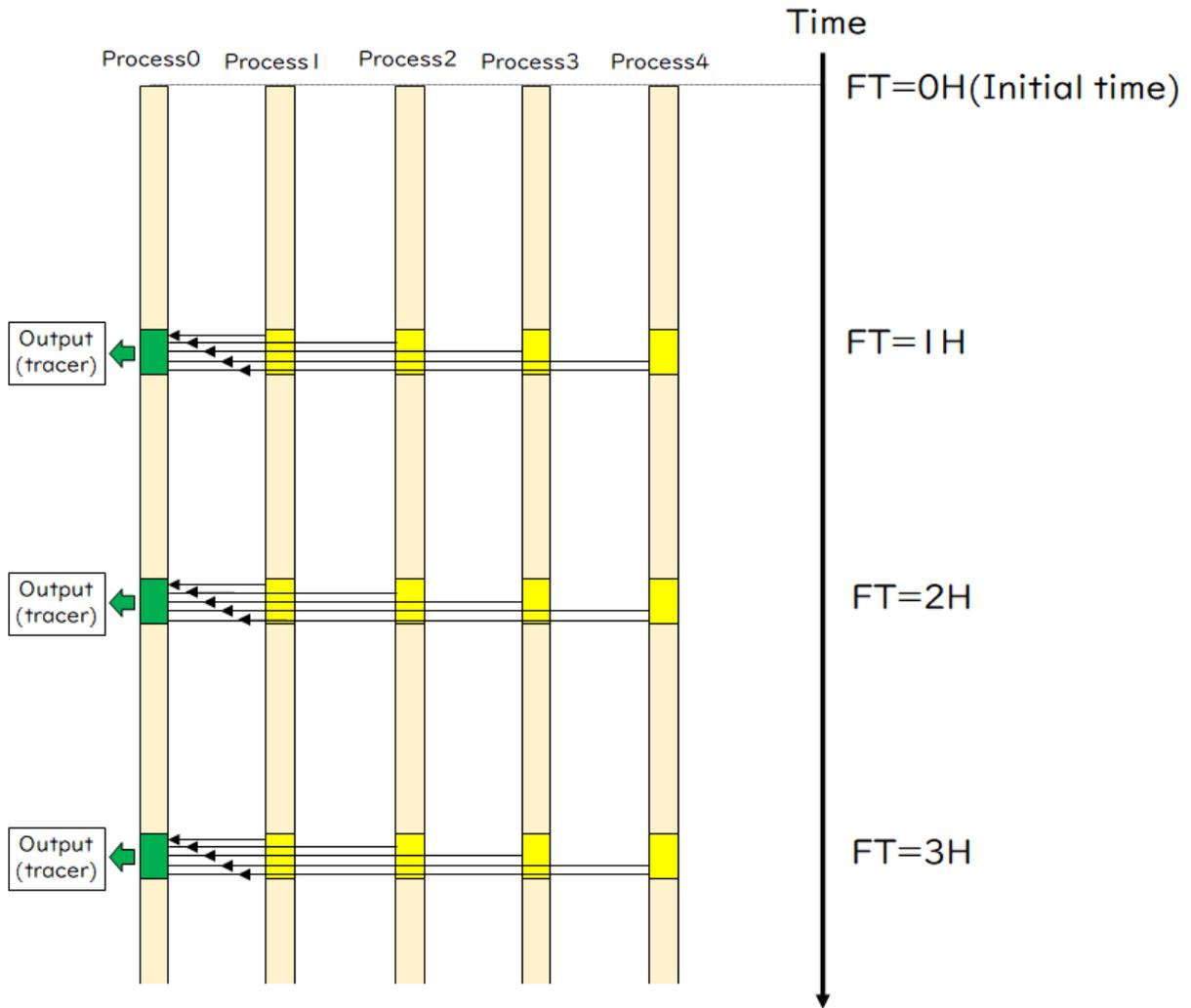


Figure H.1 Image of MPI parallel computing in the JMA-ATM

H.2 実行時間

MPI 並列化におけるプロセス数とトレーサー数の違いによる ATM の実行時間について、気象研究所スーパーコンピュータシステムで調査した結果⁴を Figure H.2 に示す。プロセス数を増やしても実行時間は頭打ちし、トレーサー数に応じて最適なプロセス数が変わること留意する。MPI 並列化は粒子数を並列化処理しており、粒子数によらない処理（GPV の読み込みなど）に費やす時間は MPI 並列化によって変わらない。そのため、並列化数を大きくしていくと、粒子数によらない処理に費やす時間が支配的になり、ある値に漸近していくと考えられる⁵。したがって、どの箇所が計算時間に対して支配的かは粒子数に依存し、また同じ粒子数であってもタイムステップなどの計算の設定や入力する GPV の格子数にも計算時間は依存する。運用で利用する際は、実際に ATM を実行する環境で運用を想定した設定やデータを使用して確認しておく必要がある。その際は、付録 H.3 の MPI ログに出力される計算時間が参考になるだろう。

⁴2020 年 3 月 2 日更新前の FX100 による。実行時間は、使用する計算機の演算性能やノード数・コア数などの設定により変化する。

⁵逐次実行時間に対して並列化できる割合と MPI プロセス数の関係については「アムダールの法則」が有名である。

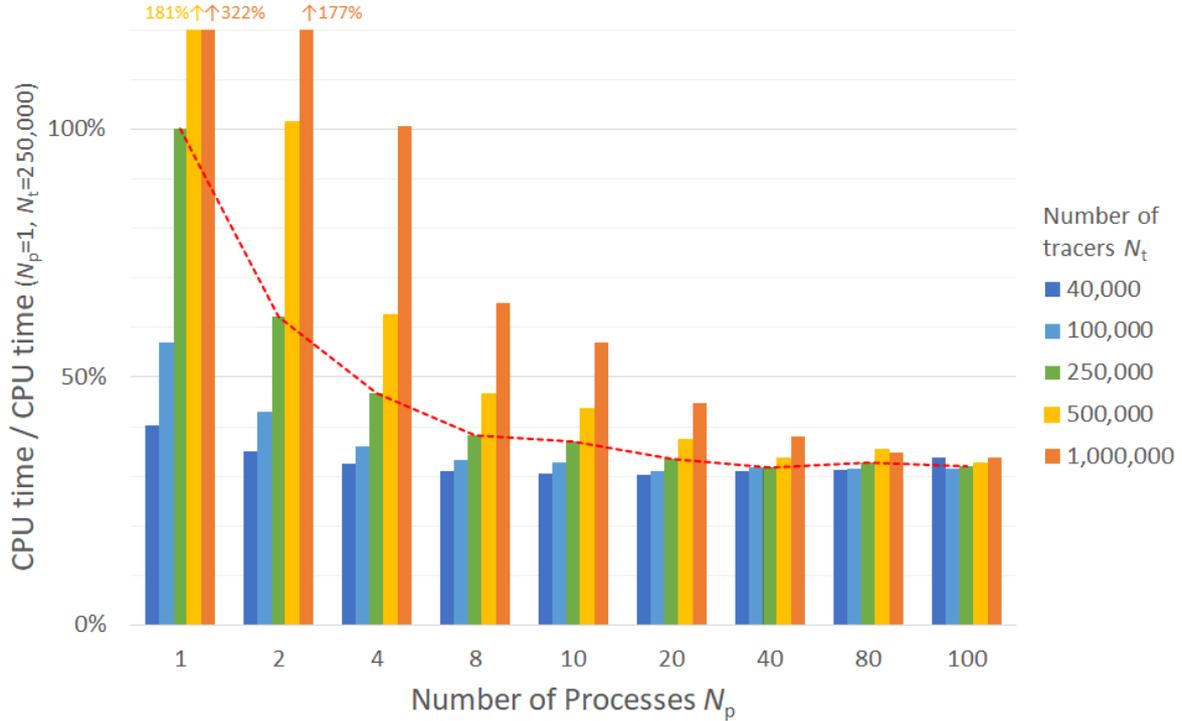


Figure H.2 Relation between CPU time and MPI processor number. An example of ATM 6-hour prediction with input GPV of LFM. The numerical calculation was executed by the MRI supercomputer.

H.3 ログ

ATM 本体ではプロセスごとのログとジョブ全体に対するログの 2 種類のログが出力される。Figure H.1 の例だと並列数は 5 なので、合計 6 つ（プロセスごとのログが 5 つ、ジョブ全体に対するログが 1 つ）のログが出力される⁶。

プロセスごとのログの一例として一部を抜粋したものを Figure H.3 に示す。プロセスごとのログでは、各タイムステップにおける終端速度に関連した情報（30～35 行目）、地面に落下したトレーサーの情報（5 行目）などが記載される。また、このログには各ステップの値以外にもネームリストで指定した各種設定値や粒子の並列化の情報（各プロセスが何番目のトレーサーを計算しているかなど）、GPV の基本情報（水平格子数や格子間隔）、初期値の情報（放出場所や放出時刻）など様々な情報が記載されている。そのため、異常終了の原因調査などの際はこのログを優先的に確認する。また、このログの最後には計算時間の内訳が出力される（Figure H.4）。この計算時間の内訳は高速化を行う際の目安になり、また、粒子数など計算時間に影響する設定を変えたときや計算機資源を変えたときに、どの処理の時間が変化しているかなどが確認できる。なお、計算時間（Figure H.4 の `cpu(time)`）の単位は、システム（コンパイラ）に依存することに注意する⁷。

ジョブ全体に対するログの一例を Figure H.5 に示す。このログには、いくつかのトレーサーの各ステップの値（位置や終端速度、12～23 行目）と対象領域内の最高雲頂高度（34 行目）や最大濃度（37 行目）などの全トレーサーから計算される量が出力される。

⁶供給源モデルも同様である。

⁷気象研究所スーパーコンピュータシステム（CX2550 M5）で利用している Intel® Fortran コンパイラでは、0.1 ミリ秒単位で表示される。したがって、Figure H.4 の例の合計計算時間は、246.8363 秒である。なお、NAPS10 でも同コンパイラを利用する場合は同じ単位である。

```

1 *****
2 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      19 /      120 (      3420.0000 )
3 *****
4 SET_HORIZONTAL_FLAG: #OUT OF DOMAIN (HORIZONTAL) =          0 /          60493
5 JUDGE_FALLOUT: #UNDERGROUND TRACER =          1147 /          60493
6 TRACER2GRID: WEIGHT_DEPOSIT =      1.000000000000000
7 TRACER2GRID: WEIGHT_CONCENT =      1.000000000000000
8 TRACER2GRID: #FALLOUT          =          1168
9 TRACER2GRID: #DEPOSITED        =           9
10 TRACER2GRID: #WASHOUT(RAIN)   =           0
11 TRACER2GRID: #WASHOUT(SNOW)   =           0
12 TRACER2GRID: #WASHOUT(GRAUPEL) =           0
13 TRACER2GRID: #RAINOUT         =           0
14 TRACER2GRID: #STILL_ACTIVE    =          59346
15 SET_VERTICAL_FLAG  : #OUT OF DOMAIN (TOP)      =          0 /          59346
16 SET_VERTICAL_FLAG  : #OUT OF DOMAIN (BOTTOM)   =          32 /          59346
17 BELOW_CLOUD_SCAVENGING (RAIN)
18 #WASHOUT TRACER          =           0 /          59314
19 #WASHOUT TRACER (FORCED) =           0 /          59314
20 BELOW_CLOUD_SCAVENGING (SNOW)
21 #WASHOUT TRACER          =           0 /          59314
22 #WASHOUT TRACER (FORCED) =           0 /          59314
23 BELOW_CLOUD_SCAVENGING (GRAUPEL)
24 #WASHOUT TRACER          =           0 /          59314
25 #WASHOUT TRACER (FORCED) =           0 /          59314
26 DRY_DEPOSITION
27 #DEPOSITED TRACER =           9 /          59314
28 --- TFV MONITOR -----
29 -----
30      ID(N)          ALT[m]          PRES[hPa]          TEMP[K]          DENS[kg/m3]  VISCOS[muPa.s]
31      SIZE[mm]      TFV[m/s]      REYNOLDS_NUM  CUNNINGHAM_COR
32      30000         6924.100386         437.495426         262.270196         0.581076         16.637055
33      0.234732         1.343789         11.016914         1.001421
34      50000         10896.999265         253.520124         234.680512         0.376245         15.186895
35      0.049048         0.129211         0.157007         1.010136
36      60000         11815.128632         221.331332         227.337247         0.339120         14.788483
37      0.027668         0.045032         0.028571         1.019726
38      70000         11993.942197         215.506361         226.063309         0.332018         14.718806
39      0.006088         0.002483         0.000341         1.091388
40      100000        11931.432786         217.547177         226.505665         0.334512         14.743020
41      0.012097         0.009225         0.002532         1.045678
42 --- TFV MONITOR (END) -----
43 -----

```

Figure H.3 Example of a part of a process log (time step)

```

1          ===== cpu time =====
2          sububroutine                cpu(time)   cpu rate(%)   number
3          1  START                      1.00000      0.000         1
4          2  READ_NAMELIST              440.00000     0.018         1
5          3  INITIALIZATION            15584.00000    0.631         1
6          4  INPUT_CONST_GPV           2876.00000     0.117         1
7          5  READ_INITIAL_TRACER       32.00000      0.001         1
8          6  WRITE_TRACER_HEADER       13.00000      0.001         1
9          7  PREPARE_WORK_VARIABLE     118.00000     0.005         1
10         8  MAIN_LOOP_START            3.00000       0.000         1
11        11  PREPOST: SET_TIMESTEP      583.00000     0.024        121
12        12  PREPOST: ACTIVATE_TRACER   60.00000     0.002        121
13        21  PREPOST: FIND_GPV_IJ      252707.00000  10.238        121
14        22  PREPOST: INTP_ZS_TRACER   32635.00000    1.322        121
15        31  PREPOST: FALLOUT_JUDGEMENT 167.00000     0.007        121
16        32  PREPOST: POSITION_ADJUSTMENT 512.00000     0.021        121
17        33  PREPOST: FIND_ATM_IJ     88694.00000    3.593        121
18        40  PREPOST: TRACER2GRID      9575.00000     0.388        121
19        50  OUTPUT_ATM                6023.00000     0.244        121
20        60  INPUT_GPV                 108552.00000   4.398        120
21        71  PRE: FIND_GPV_K           19072.00000    0.773        120
22        72  PRE: SET_INTP_TIME        879.00000     0.036        120
23        73  PRE: INTP_GPV            1899049.00000  76.936        120
24        99  RUN_LONG: DECAY            173.00000     0.007        120
25       110  RUN_LONG: WASHOUT          5622.00000     0.228        120
26       120  RUN_LONG: RAINOUT          53.00000      0.002        120
27       130  RUN_LONG: DRY_DEPOSITION   968.00000     0.039        120
28       140  RUN_LONG: HORIZONTAL_DIFFUSION 8153.00000    0.330        120
29       150  RUN_LONG: VERTICAL_DIFFUSION 2000.00000    0.081        120
30       200  RUN_LONG: SUM_TENDENCY_LONG 828.00000     0.034        120
31       510  RUN: HORIZONTAL_ADVECTION  3784.00000    0.153        120
32       520  RUN: VERTICAL_ADVECTION   135.00000     0.005        120
33       530  RUN: GRAVITATIONAL_FALLOUT 4524.00000    0.183        120
34       600  RUN: SUM_TENDENCY_PART     652.00000     0.026        120
35       700  RUN: SUM_TENDENCY         1213.00000    0.049        120
36       810  POST: TIME_INTEGRAL       1525.00000    0.062        120
37       900  DEALLOCATION                1158.00000    0.047         1
38  -----
39          -- total cpu time -- 2468363.00000    100.0000

```

Figure H.4 Example of a part of a process log (cpu time)

```

1 *****
2 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      18 /      120 (      3240.0000 )
3 *****
4 *****
5 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      19 /      120 (      3420.0000 )
6 *****
7 *****
8 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      20 /      120 (      3600.0000 )
9 *****
10 --- TRACER MONITOR -----
11 -----
12      ID(N)          TIME[sec]      LAT[deg]      LON[deg]      ALT[m]          SIZE[m]
13 SIZE[phi] DENS[kg/m3]      MASS[kg]  S_FLAG  R_FLAG
14      10000      2520.000000      32.951792      131.144074      691.092713      0.001097111
15 -0.133709862  1215.864286      15179.017796      0      11
16      20000      1080.000000      32.902729      131.098373      725.019541      0.006541098
17 -2.709532730  1041.536263      15179.017796      0      11
18      30000      3600.000000      32.884009      131.238591      6681.383993      0.000234732
19 2.090913132  1644.074866      15179.017796      1      1
20      40000      1080.000000      32.910958      131.105635      739.546145      0.003146646
21 -1.653814857  1083.665857      15179.017796      0      11
22      50000      3600.000000      32.880509      131.264081      10879.602368      0.000049048
23 4.349667633  2124.282146      15179.017796      1      1
24      60000      3600.000000      32.897585      131.252258      11809.397188      0.000027668
25 5.175658149  2229.863131      15179.017796      1      1
26      70000      3600.000000      32.913659      131.247070      11995.448547      0.000006088
27 7.359928359  2358.646038      15179.017796      1      1
28      80000      1980.000000      32.933710      131.109987      683.217676      0.000771565
29 0.374139986  1288.194755      15179.017796      0      11
30      90000      720.000000      32.892450      131.084545      732.602274      0.001110142
31 -0.150744525  1213.717254      15179.017796      0      11
32      100000      3600.000000      32.896682      131.248772      11931.815756      0.000012097
33 6.369247333  2320.152797      15179.017796      1      1
34      ID(N)          TIME[sec]      LAT[deg]      LON[deg]      ALT[m]          SIZE[m]
35 SIZE[phi] DENS[kg/m3]      MASS[kg]  S_FLAG  R_FLAG
36 --- TRACER MONITOR (END) -----
37 -----
38 --- ATM GRID MONITOR -----
39 -----
40
41 MAX: TDEP [kg/m2], GRID(SURF) =      0.156751821858989      263      247
42 MAX: FOUT [kg/m2], GRID(SURF) =      0.155755171629878      263      247
43 MAX: DDEP [kg/m2], GRID(SURF) =      9.966502291108054E-004      263      247
44 MAX: WOUT [kg/m2], GRID(SURF) =      0.000000000000000E+000      1      1
45 MAX: ROUT [kg/m2], GRID(SURF) =      0.000000000000000E+000      1      1
46 MAX: MAXD [ m ], GRID(SURF) =      9.591168592214949E-002      263      247
47 MAX: CTOP [m asl], GRID(SURF) =      12016.6716584730      264      247
48 MIN: CBASE[m asl], GRID(SURF) =      659.510310104424      263      247
49 MAX: TCLM [kg/m2], GRID(SURF) =      0.138224548475345      263      247
50 MAX: ACON [kg/m3], GRID( 2) =      6.923316699368353E-006      263      247
51 MAX: ACON [kg/m3], GRID(KMAX) =      9.102324543651221E-006      264      247
52 --- ATM GRID MONITOR (END) -----
53 -----
54 *****
55 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      21 /      120 (      3780.0000 )
56 *****
57 *****
58 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      22 /      120 (      3960.0000 )
59 *****
60 *****
61 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      23 /      120 (      4140.0000 )
62 *****

```

Figure H.5 Example of a part of an ATM log

付録 I ローカル・コーディングルール

ATM のソースコードは Fortran で書いている。またバッチ処理はシェルスクリプトで書いている。ここでは、ローカルで定めている Fortran のコーディングルールと、シェルスクリプトを書くときに気をつけていることを記述する。

I.1 ソースコードのローカル・コーディングルール

ソースコードをコーディングルールに則って記述することは、可読性を高める意味がある。ATM 固有のコーディングルールは、Fortran 標準コーディングルール（室井・他, 2002）¹、NHM（藤田, 2003）および asuca（石田・他, 2014）のコーディングの規則を規範として定めている。

スタイルルール

全般的なルール

- プログラムは原則小文字で書く。ただし組み込み関数を除く外部ライブラリ（NuSDaS, NWP など）およびライブラリで宣言されている変数名や、`open`, `close`, `read`, `write` 文の制御項目などは大文字で書く。
- 1 行は 132 文字以内とする。
- 継続行は「&」を行末と継続行の始めに入れ、桁位置は前行に揃える。行末で「,」を伴う場合は「, &」をセットとして前行に揃える。
- 引数内などの文字変数は「'」、`write` 文などの文字出力は「"」で囲む。

(例)

```
call NUSDAS_INQ_DEF( type1_atm, type2_atm, type3_atm, & !! IN
                   & N_PLANE_NUM           , & !! IN
                   & nz_atm                , & !! OUT
                   & 1                      , & !! IN
                   & irtn                   ) !! OUT

open(n_io, FILE='NAMELIST', STATUS='OLD', ACTION='READ')

write(6, '(a, i4, a26)') "RANK, LOG_FILE = ", mpi_myrank, log_mpi
```

宣言文

use 宣言文

- 原則として `use` 文はサブルーチンの中で利用する。モジュール全体での `use` 文は次項の例外を参照。
- `use` 文のうち、`contains` 文の前で宣言するのは基本的に各サブルーチンで共用されるもの：

¹<https://www.mri-jma.go.jp/Project/mrinpd/coderule.html>

```

use nrtype      , only: sp, dp, rp, rrtype
use mpi_type    , only: mpi_i4type, mpi_rktype
use mytype      , only: tag, flag
use variable    , only: mpi_myrank, mpi_rank_num, io_mpi_log, log_mpi
use const       , only: pi, rad_unit, deg_unit
use parm        , only: time_epsilon, space_epsilon           , &
                  & large_null                               , &
                  & io_rank
use func        , only: tracer_size_phi, exponential_decay
use filetool    , only: filetool_searchfile, filetool_searchft
use timetool    , only: ctime_run
use mpi_control, only: mpi_ini, mpi_final, mpi_particle_num_set , &
                  & tracer_allgather_const, tracer_allgather_variable, &
                  & atm_grid_reduce

implicit none

include "nusdas_fort.h"

contains
    
```

の類とする。include 文についても同様とする。

基本的な方針としては、

- あるモジュール内の多数のサブルーチンのうち、大半で呼ばれる一般的な変数は、モジュール全体で use してもよい。
- モジュール内の特定のサブルーチンでのみ呼ぶ場合は、サブルーチン内で use する。
- 変数によっては、引用が多くてもサブルーチンごとに use する方が見易い場合もあるので、その都度検討する。

参照許可宣言文

- モジュールでは private 文を書く（サブルーチンや変数を無条件に公開しない）。
- モジュール間で公開するサブルーチンや変数のみ、public 文で公開する。

（例）サブルーチン make_random_uniform のみ公開

```

module random

  implicit none

  private
  public :: make_random_uniform

contains
! #####
  subroutine make_random_uniform

    call xorshift32_rng
    ...
    return
  end subroutine make_random_uniform
! #####
  subroutine xorshift32_rng
    ...
    return
  end subroutine xorshift32_rng
! #####
end module random
    
```

ただし型定義 (nrtype.f90, mytype.f90)、変数 (variable.f90)、定数 (const.f90)、パラメータ (parm.f90) のモジュールについては、全体で public 宣言してよい。

save 宣言文

- 静的変数 (グローバル変数) をまとめた variable.f90 については、全体で save 宣言してよい:

```

module variable

  use nrtype, only: sp, dp, rp
  use mytype, only: tag, flag

  implicit none

  save

  public
  ...
end module variable
    
```

配列の宣言文

- 配列データで引数を明示する場合は 1 行に 1 変数とする。継続行「&」の使用は、同じ型であっても引数のありなしで分ける。

(例)

```

real    (sp):: r2_wrk(1:4), &
          & r4_wrk(1:4)
integer(sp):: n2_wrk(1:2)
integer(sp):: irtn
    
```

配列の割付

- 配列の大きさが予め決まらない場合を含め、allocatable 属性による動的割付を基本とする。ただしサブルーチン内で、始めから終わりまで作業配列を確保するときは自動割付を基本とする。
- 配列の代入は下記のとおりとする:

(よい例)

```

do jj = 1, ny_gpv
  do ii = 1, nx_gpv
    rain_gpv2(ii, jj) = rain_gpv1(ii, jj)
  end do
end do
    
```

または

```

rain_gpv2(1:nx_gpv, 1:ny_gpv) = rain_gpv1(1:nx_gpv, 1:ny_gpv)
    
```

(よくない例)

```

rain_gpv2(:, :) = rain_gpv1(:, :)
    
```

ネームリスト

- 1 変数 1 行ずつ書き、行末にカンマはつけない (原則、小文字で書く)。

- 終わりは「&end」ではなく「/」を用いる。

(例)

```
&namsrcinfo
  n_tracer_esp=250000
  n_stage_esp=1
/
```

サブルーチン

- できるだけ、一つの処理を行う。開発を進めるうちに、一つのサブルーチンに複数の処理が入った場合、サブルーチンの分割を検討する。
- 名前は省略せずに、意味がはっきりと分かるようにつける。

(よい例)

```
subroutine calc_tracer_size_distribution
```

(よくない例) 頭文字だけで表現

```
subroutine ctsd
```

- サブルーチンコール
 - 呼出し側の配列の引数は明示し、行末に「!! IN」、「!! OUT」などの入出力特性を示すことを基本とする。ただし自明なものは省略してもよい。
 - 一まとまりで意味がある引数 (nx, ny や type1, type2, type3 など) については、属性が同じであれば 1 行に書いてよい。
 - 配列の場合は、引数の範囲を明記する。

(例)

```
call swap_j( rr (1:nx, 1:ny), & !! IN
             & data(1:nx, 1:ny), & !! OUT
             &      nx,   ny   ) !! IN

call ctime_run( 50, "OUTPUT_ATM           " )

call NUSDAS_ALLFILE_CLOSE( N_FOPEN_ALL, irtn )
```

- 終了前に return 文を書く。
- end 文にはモジュール名、サブルーチン名を書く：

(よい例)

```
end subroutine drive_atm
end module sub_atm
```

(よくない例)

```
end subroutine
end
```

演算

- 整数化・実数化は型を明示する。


```
! *****
!   Level 0 comment (2-character indent)
! *****
```

- レベル 1：サブルーチン内の構造を見易くするために利用（目安：サブルーチン内で数ヶ所）。レベル 1 の中にレベル 1 は入れず、並列に利用する（「入れ子」にしない）。

```
! =====
!   Level 1 comment (2-character indent)
! =====
```

- レベル 2：レベル 1 中の各処理の説明に利用（目安：多数）。

```
! -----
!   Level 2 comment (2-character indent)
! -----
```

レベル 0, 1, 2 それぞれの仕切の長さは、見易さを考慮して例外あり。

- 行末にコメントを入れる場合は「!!」で始める。
- 文字化けを防ぐため、日本語（2 バイト言語）は使わない。

字下げ（インデント）

- 2 文字分の字下げ（「2 文字下げ」）する。
- `contains` 文以降は 2 文字下げする（仕切は除く）。
- `if` 文、`do` 文などの内部も 2 文字下げを基本とする。
- 条件判断が複数のとき、短い場合は複数行に分けなくてもよいが、分けるときの字下げは下記を参考にする：

（例）

```
if (      center_lat(nn) == 0._rp .and. center_lon(nn) == 0._rp &
    & .and. target_lat(nn) == 0._rp .and. target_lon(nn) == 0._rp ) then
```

- コメントの字下げ（各行の開始位置）は、コード本文の各行に合わせる。すなわちインデントを揃えることを原則とするが、見易さを考慮して例外あり。

（よい例）

```
! =====
!   Output
! =====
do nn = 1, n_stage

! -----
!   Write: data
! -----
do kk = 1, nz_gpv
  ...
end do

end do
```

(よくない例) レベル 1 が入れ子、コメント開始位置がコード本文に合っていない

```
! =====
!   Output
! =====
do nn = 1, n_stage

! =====
!   Write: data
! =====
do kk = 1, nz_gpv
    ...
end do

end do
```

空白 (スペース)

- 「,」, 「:」, 「::」の前にはスペースを入れず、後にスペースを入れる (英文タイプの句読法)。ただし配列の範囲を「:」で指定するときは後にもスペースを入れない。
- 「(」, 「)」の前後には原則スペースを入れない。ただし、if 文や do while 文など、次に条件文が入る「(」, 「)」の前後はスペースを入れる。またサブルーチン名や関数名と「(」の間はスペースを入れず、「(」の後は前行と桁位置を揃えるためにスペースを入れてもよい。
- 二項演算子の両脇はスペースを開ける。ただし、ループ変数の上下限值や配列の引数など、一まとまりにした方が可読性が上がる場合は省略できる。

(例)

```
allocate(grid_atm_air_concent(1:nx_atm, 1:ny_atm, 1:nz_atm))

open(11, FILE='NAMELIST_ELEM', STATUS='OLD', ACTION='READ')

read(11, NML=namverif)
write(6, NML=namverif)

close(11)

deallocate(grid_atm_air_concent)

do jj = 1, ny
do ii = 1, nx
    data_out(ii, jj) = data_in(ii, ny-jj+1)
end do
end do
```

変数の命名ルール

- 暗黙の型宣言は無効にする : `implicit none`
- 変数の型宣言は、付録 C で述べたように、Numerical Recipes (`nrtype.f90`, Press *et al.*, 1996) または独自 (`mytype.f90`) の型定義 (Tables C.4, C.5) から `use` して使用する。実数型・整数型の種別 `kind` は省略してよいが、文字型の長さ `len` は明示することを推奨する。

(よい例)

```
use nrtype, only: sp, dp, rp

real    (rp)    :: dx, dy
real    (dp)    :: bz
integer (sp)    :: nn, irtn
character(len=4):: element
```

(よくない例)

```
real    :: dx, dy
real    (8):: bz
integer (4):: nn, irtn
character*4 :: element
```

- トレーサーに関する変数は「tracer_」で始める。

(例)

```
real(rp), allocatable:: tracer_size(:) !! Diameter of tracer [m]
real(rp), allocatable:: tracer_mass(:) !! Mass      of tracer [kg]
```

- 整数の変数は原則、「i_」、「j_」、「k_」や「n_」で始める。

(例)

```
integer(sp):: n_tracer !! Number of tracer
```

- 検索し易くするため、1 文字変数は避ける。

(よい例)

```
do nn = 1, n_max
  ...
end do
```

(よくない例)

```
do n = 1, n_max
  ...
end do
```

- 一時的な作業変数に「wrk」や「work」はできるだけ使わず、「work_名前」として意味の分かる変数名にする。

(例)

```
work, work1, work2

ではなく

work_angle, work_random1, work_random2
```

また気温と混同し易いため、「temp_名前」は使わない。

パラメータスイッチ・フラグのルール

スイッチ

- ネームリストなどで外から与える変数「n_switch_名前」に対し、ソースコード内で定める対応する固定パラメータは「m_switch_名前」とする。

(例)

```
integer(sp):: n_switch_coordinate_vertical !! Vertical coordinate 1:P, 2:Z

integer(sp), parameter:: m_switch_coordinate_vertical_p = 1 !! p-coordinate
integer(sp), parameter:: m_switch_coordinate_vertical_z = 2 !! z-coordinate
```

- スイッチ変数に関する if 文は、パラメータの値ではなく名前 (Table C.2) を書く。

(よい例)

```
if ( n_switch_coordinate_vertical == m_switch_coordinate_vertical_p ) then
...
else if ( n_switch_coordinate_vertical == m_switch_coordinate_vertical_z ) then
...
end if
```

(よくない例)

```
if ( n_switch_coordinate_vertical == 1 ) then
...
else if ( n_switch_coordinate_vertical == 2 ) then
...
end if
```

フラグ

- スイッチと同様に、「n_flag_名前」(変数)、「m_flag_名前」(対応する固定パラメータ)で始める。
- フラグ変数に関する if 文の書き方は、スイッチの場合と同様にする。

その他

- 不要なゼロクリアは避ける。
- 出力については、装置番号をサブルーチン filetool_searchft で空き番号を探して与え、open 文で明示的に記述する。
- 行内の「,」、「:」や「::」などについても、できるだけ複数行に渡って揃えて書く：

(よい例)

```
integer(sp), intent(in) ::          n_max
real  (rp), intent(in) :: dx        (1:n_max), &
                                & dx12  (1:n_max), &
                                & in_data1(1:n_max), &
                                & in_data2(1:n_max)
real  (rp), intent(out):: out_data(1:n_max)
```

(よくない例)

```
integer(sp), intent(in):: n_max
real(rp), intent(in):: dx(1:n_max)
real(rp), intent(in):: dx12(1:n_max)
real(rp), intent(in):: in_data1(1:n_max)
real(rp), intent(in):: in_data2(1:n_max)
real(rp), intent(out):: out_data(1:n_max)
```

- 外部ソースの利用などで、上記ルールに適合しないコードはディレクトリを分けておく (例えば、Lib/)。
- 上記ルール化できない部分は、各ソースコードの担当者の書き方に準じる。

1.2 シェルスクリプトの書き方

シェルスクリプトについては、書き方に自由度をもたせるため、ライティングルールを特に定めていない。しかし、ソースコードのコンパイルのような確認機能がなく、一定の可読性は維持したいことから、書き方の指針を設けている。

最初

- 先頭行は、

```
#!/bin/sh
```

で始める。

- 必要に応じて、シェルの終了・出力オプションと出力ファイルのモードを設定する：

```
set -evx
umask 022
```

シェル変数

- 原則、すべて大文字とする。
- シェル変数による代入は中括弧でくる。ただし組込み変数にはつけない。

(例)

```
OLD_PATH=${PATH}
echo $1
```

コマンド

- シェルに組み込まれているコマンドを使用し、派生言語（Perl や Ruby など）の使用は必要最小限にする。

(例) 整数の計算

```
N_TRACER_ESP=`expr ${N_TRACER_ESP} + ${N_TRACER_STAGE}`
```

(例) 浮動小数点を含む計算

```
TOP=`echo "scale=4; ${TOP} * 0.3048 " | bc`
```

または

```
TOP=`echo ${TOP} | awk '{printf "%.4f", ($1 * 0.3048)}'`
```

test コマンド

- [] を使い、if 文との組合せは次のように書く：

(例)

```
if [ "${YYYY}" = "" ]; then
    continue
fi
```

- 文字列に関する test は=を用い、シェル変数が空か否かに関わらず、常にダブルクォートでくくる。
([X\${YYYY} = X] としない)

字下げ (インデント)

- ローカル・コーディングルールと同様、「2 字下げ」を基本とする。
- 改行が複数の場合は\の位置を揃え、継続行はさらに 2 字以上字下げする。

(例)

```
if [    "${ELEM}" = "TDEP" \
    -o "${ELEM}" = "FOUT" \
    -o "${ELEM}" = "DDEP" \
    -o "${ELEM}" = "WDEP" \
    -o "${ELEM}" = "WOUT" \
    -o "${ELEM}" = "ROUT" \
    -o "${ELEM}" = "TCLM" ]; then
```

空白 (スペース)

- 不要な空白文字は入れない。
- 改行\の前、test コマンド [] やパイプ|の前後は 1 字だけ入れる。
- クォート内の先頭と末尾には必要のない限り入れない。

(例)

```
HHMM_LIST="0000 0600 1200 1800"
```

ヒアドキュメント

- 閉じる文字列には EOF を使う。

(例)

```
cat << EOF > NAMELIST
&namsrcinfo
  n_tracer_esp=${N_TRACER_ESP}
  n_stage_esp=${N_STAGE_ESP}
/
EOF
```

その他

conf ファイルなどで置換する変数は、前後を@一文字以上で囲むことを原則とする：@変数名@

最後

- 最終行は、

```
exit
```

で終わり、必要に応じて終了コードを引数にして返す。

略語一覽

agl	Above Ground Level
asl	Above Sea Level
asuca	Asuca is a System based on a Unified Concept for Atmosphere
ATM	Atmospheric Transport Model
BCP	Business Continuity Plan
BI	Bias Score
CVS	Concurrent Versions System
CWC	Cloud Water Content
EER	Environmental Emergency Response
EOF	End of File
ESP	Emission Source Parameter
FA	Free Atmosphere
FAR	False Alarm Ratio
GATM	Global Atmospheric Transport Model
gpm	Geopotential Meter
GPV	Grid Point Value
GRS	Geodetic Reference System
GSM	Global Spectral Model
HR	Hit Rate
IR	Infrared
IWC	ICW Water Content
JCL	Job Control Language
JG	Job Group
JMA	Japan Meteorological Agency
JST	Japan Standard Time
LFM	Local Forecast Model
LWC	Liquid Water Content
MA	Mesoscale Analysis
ME	Mean Error
MFP	Mean Free Path
MOT	Mobile Observation Team
MPI	Message-Passing Interface
MR	Miss Rate
MRI	Meteorological Research Institute
MSM	Mesoscale Model
NAPS	Numerical Analysis and Prediction System

NASA	National Aeronautics and Space Administration
NHM	Nonhydrostatic Model
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPD	Numerical Prediction Division
NuSDaS	NWP Standard Dataset System
NWP	Numerical Weather Prediction
PBF	Program Build File-format
PBL	Planetary Boundary Layer
PBS	Portable Batch System
PJM	Parallel Job Manager
POD	Probability of Detection
R/A	Radar/Rain gauge-Analyzed Precipitation
RATM	Regional Atmospheric Transport Model
RMSE	Root Mean Square Error
RSM	Regional Spectral Model
SR	Success Ratio
SST	Sea Surface Temperature
SVN	Subversion
TFV	Terminal Fall Velocity
TKE	Turbulent Kinetic Energy
TS	Threat Score
US	United States
UTC	Universal Time Coordinated
VAA	Volcanic Ash Advisory
VAAC	Volcanic Ash Advisory Center
VAFF	Volcanic Ash Fall Forecast
VAFS	Volcanic Ash Advisory and Ash Fall Forecast Distribution System
VAG	Volcanic Ash Graphic
VOD	Volcanic Observation Division
VPS	Virtual Private Server
WMO	World Meteorological Organization

References

- 相川百合, 2008: メソ版移流拡散モデルの概要. *数値予報課報告・別冊*, **54**, 気象庁予報部, 223–228.
- Aranami, K. and M. Sakamoto, 2019: Atmospheric transport and dispersion model: Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. JMA, Tokyo, pp. 118–121.
- Aster, R. C., B. Borchers and C. H. Thurber, 2013: Parameter Estimation and Inverse Problems, 2nd ed. Academic Press, Boston, 376 p.
- Bagheri, G. and C. Bonadonna, 2016: Aerodynamics of volcanic particles: Characterization of size, shape, and settling velocity: Volcanic Ash: Hazard Observation, S. Mackie *et al.*, editors, Elsevier, Amsterdam, pp. 39–52.
- Baumann, R. and H. Schlager, 2012: Lagrangian modeling of transport and dispersion of air constituents: Atmospheric Physics: Background-Methods-Trends, U. Schumann, editor, Springer, Heidelberg, pp. 381–399.
- Blackadar, A. K., 1962: The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **67**, 3095–3102.
- Bonasia, R., L. Capra, A. Costa, G. Macedonio and R. Saucedo, 2011: Tephra fallout hazard assessment for a Plinian eruption scenario at Volcán de Colima (Mexico). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **203**, 12–22.
- Bonasia, R., A. Costa, A. Folch, G. Macedonio and L. Capra, 2012: Numerical simulation of tephra transport and deposition of the 1982 El Chichón eruption and implications for hazard assessment. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **231–232**, 39–49.
- Bonasia, R., G. Macedonio, A. Costa, D. Mele and R. Sulpizio, 2010: Numerical inversion and analysis of tephra fallout deposits from the 472 AD sub-Plinian eruption at Vesuvius (Italy) through a new best-fit procedure. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **189**, 238–246.
- Box, G. E. P. and M. E. Muller, 1958: A Note on the generation of random normal deviates. *Ann. Math. Stat.*, **29**, 610–611.
- Brown, R. J., C. Bonadonna and A. J. Durant, 2012: A review of volcanic ash aggregation. *Phys. Chem. Earth*, **45–46**, 65–78.
- Bursik, M., 2001: Effect of wind on the rise height of volcanic plumes. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3621–3624.
- Costa, A., F. Dell’Erba, M. A. Di Vito, R. Isaia, G. Macedonio, G. Orsi and T. Pfeiffer, 2009: Tephra fallout hazard assessment at the Campi Flegrei caldera (Italy). *Bull. Volcanol.*, **71**, 259–273.
- Deardorff, J. W., 1980: Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. *Bound.-Layer Meteor.*, **18**, 495–527.
- Degruyter, W. and C. Bonadonna, 2012: Improving on mass flow rate estimates of volcanic eruptions. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L16308.
- Folch, A., 2012: A review of tephra transport and dispersal models: Evolution, current status, and future perspectives. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **235–236**, 96–115.
- Folch, A., L. Mingari, M. S. Osorio and E. Collini, 2014: Modeling volcanic ash resuspension—Application to the 14–18 October 2011 outbreak episode in central Patagonia, Argentina. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **14**, 119–133.

- 富士山火山防災協議会, 2004: 富士山ハザードマップ検討委員会報告書. 240 p.
- 藤田 司, 2003: コーディングの規則とモジュール化. *数値予報課報告・別冊*, **49**, 気象庁予報部, 112–113.
- 雁津克彦, 2017a: 数値予報モデル開発管理情報共有装置（開発管理サーバ）. *数値予報課報告・別冊*, **63**, 気象庁予報部, 24–28.
- 雁津克彦, 2017b: 現在の NAPEX の設計思想と実装. *数値予報課報告・別冊*, **63**, 気象庁予報部, 64–68.
- Gifford, F. A., 1982: Horizontal diffusion in the atmosphere: A Lagrangian-dynamical theory. *Atmos. Environ.*, **16**, 505–512.
- Gifford, F. A., 1984: The random force theory: Application to meso- and large-scale atmospheric diffusion. *Bound.-Layer Meteor.*, **30**, 159–175.
- Girault, F., G. Carazzo, S. Tait, F. Ferrucci and É. Kaminski, 2014: The effect of total grain-size distribution on the dynamics of turbulent volcanic plumes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **394**, 124–134.
- 原 旅人, 2008: 鉛直層の配置. *数値予報課報告・別冊*, **54**, 気象庁予報部, 25–26.
- 原 旅人, 2012: 数値予報モデルにおける物理過程の役割. *数値予報課報告・別冊*, **58**, 気象庁予報部, 2–7.
- 原 旅人, 2017a: 格子点値データフォーマット. *数値予報課報告・別冊*, **63**, 気象庁予報部, 82–86.
- 原 旅人, 2017b: 数値予報課で利用されているその他の可視化ツール. *数値予報課報告・別冊*, **63**, 気象庁予報部, 101–106.
- 原 旅人・永戸久喜, 2008: 乱流過程. *数値予報課報告・別冊*, **54**, 気象庁予報部, 117–148.
- Hasegawa, Y., A. Sugai, Yo. Hayashi, Yu. Hayashi, S. Saito and T. Shimbori, 2015: Improvements of volcanic ash fall forecasts issued by the Japan Meteorological Agency. *J. Appl. Volcanol.*, **4**: 2.
- Hasegawa, Y. and Y. Hayashi, 2019a: Global atmospheric transport model for volcanic ash: Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. JMA, Tokyo, pp. 132–135.
- Hasegawa, Y. and Y. Hayashi, 2019b: Regional atmospheric transport model for volcanic ash: Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. JMA, Tokyo, pp 135–138.
- Hashimoto, A., T. Shimbori and K. Fukui, 2012: Tephra fall simulation for the eruptions at Mt. Shinmoe-dake during 26–27 January 2011 with JMANHM. *SOLA*, **8**, 37–40.
- 林 洋介・土山博昭・新堀敏基, 2018a: 火山灰移流拡散モデルの予測結果を用いた擬似衛星画像作成の試み. *日本火山学会講演予稿集*, P059.
- 林 勇太・石元裕史・稲澤智之, 2018b: 火山灰. *気象研究ノート*, **238**, 99–113.
- Hertel, O., J. Christensen, E. H. Runge, W. A. H. Asman, R. Berkowicz, M. F. Hovmand and Ø. Hov, 1995: Development and testing of a new variable scale air pollution model—ACDEP. *Atmos. Environ.*, **29**, 1267–1290.
- 平岡正勝・田中幹也, 1994: 移動現象論, 新版. 朝倉書店, pp. 74–75.
- Holtstag, A. A. M. and B. A. Boville, 1993: Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model. *J. Climate*, **6**, 1825–2842.
- Ima-izumi, T., 2019: Verification Indices: Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. JMA, Tokyo, pp. 205–213.
- 石田純一, 2008: 気象庁非静力学モデルの支配方程式系と地形に沿う鉛直ハイブリッド座標の導入. *数値予報課報告・別冊*, **54**, 気象庁予報部, 27–43.
- 石田純一・河野耕平・荒波恒平, 2014: システムデザイン. *数値予報課報告・別冊*, **60**, 気象庁予報部, 141–149.
- 石井憲介・新堀敏基・佐藤英一・林 勇太・徳本哲男・福井敬一・橋本明弘, 2017: 火山灰拡散予測のための火山灰データ同化システムの開発. *Abstract, JpGU-AGU Joint Meeting*, MIS02–P02.
- Ishii, K., 2018: Estimation of emission mass from an eruption plume for the Aso volcano eruption, on October 8, 2016, using a four-dimensional variational method. *Earth Planets Space*, **70**: 202.
- Ishii, K., Y. Hayashi and T. Shimbori, 2018: Using Himawari-8, estimation of SO₂ cloud altitude at Aso volcano

- eruption, on October 8, 2016. *Earth Planets Space*, **70**: 19.
- Iwasaki, T., T. Maki and K. Katayama, 1998: Tracer transport model at Japan Meteorological Agency and its application to the ETEX data. *Atmos. Environ.*, **32**, 4285–4295.
- JMA, 2019: Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency: Appendix to WMO Technical Progress Report on the GDPFS and NWP Research. JMA, Tokyo, 229 p.
- Kaminski, E. and C. Jaupart, 1998: The size distribution of pyroclasts and the fragmentation sequence in explosive volcanic eruptions. *J. Geophys. Res.*, **103**, 29 759–29 779.
- 勝井義雄・村瀬 勉, 1960: 支笏火山の活動にかんする 2・3 の考察. *地質学雑誌*, **66**, 631–638.
- Kawai, H., 2002: Forecast of sulfur dioxide flow from Miyake volcano with a high resolution regional transport model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **32**, 0524–0525.
- 河瀬和重, 2011: Gauss–Krüger 投影における経緯度座標及び平面直角座標相互間の座標換算についてのより簡明な計算方法. *国土地理院時報*, **121**, 109–124.
- 河瀬和重, 2019: 球面三角法の簡潔かつ体系的な理解への試み. *国土地理院時報*, **132**, 115–118.
- 木田秀次, 1983: 高層の大気—運動と組成の立体構造をみる—. 東京堂出版, 211 p.
- 気象庁, 2006: 平成 12 年 (2000 年) 三宅島噴火及び新島・神津島近海の地震活動調査報告. *気象庁技術報告*, **128**, 295 p.
- 気象庁, 2014: 火山噴火予知連絡会火山活動評価検討会報告書—噴火現象の即時的な把握手法について—. 気象庁, p. 37.
- 気象庁予報部, 2003: 気象庁非静力学モデル. *数値予報課報告・別冊*, **49**, 194 p.
- 気象庁予報部, 2008: 気象庁非静力学モデル II—現業利用の開始とその後の発展—. *数値予報課報告・別冊*, **54**, 265 p.
- 気象庁予報部, 2014: 次世代非静力学モデル asuca. *数値予報課報告・別冊*, **60**, 151 p.
- 気象庁予報部, 2017: 数値予報モデル開発のための基盤整備および開発管理. *数値予報課報告・別冊*, **63**, 108 p.
- 北田敏廣, 1994: 酸性降水の輸送・反応・沈着モデル. *気象研究ノート*, **182**, 95–117.
- Kitada, T., G. R. Carmichael and L. K. Peters, 1986: Effects of dry deposition on the concentration-distributions of atmospheric pollutants within land- and sea-breeze circulations. *Atmos. Environ.*, **20**, 1999–2010.
- Klawonn, M., L. N. Frazer, C. J. Wolfe, B. F. Houghton and M. D. Rosenberg, 2014: Constraining particle size-dependent plume sedimentation from the 17 June 1996 eruption of Ruapehu Volcano, New Zealand, using geophysical inversions. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **119**, 1749–1763.
- 小屋口剛博, 2008: 火山現象のモデリング. 東京大学出版会, 637 p.
- Leadbetter, S. J., M. C. Hort, S. von Löwis, K. Weber and C. S. Witham, 2012: Modeling the resuspension of ash deposited during the eruption of Eyjafjallajökull in spring 2010. *J. Geophys. Res.*, **117**, D00U10.
- Lin, J. C., 2012: Lagrangian modeling of the atmosphere: An introduction. *Geophys. Monograph*, **200**, 1–11.
- Louis, J.-F., 1979: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Bound.-Layer Meteor.*, **17**, 187–202.
- Louis, J.-F., M. Tiedtke and J.-F. Geleyn, 1982: A short history of the operational PBL-parameterization at ECMWF. Workshop on planetary boundary layer parameterization. ECMWF, pp. 59–79.
- Macedonio, G., M. T. Pareschi and R. Santacroce, 1988: A numerical simulation of the Plinian fall phase of 79 A.D. eruption of Vesuvius. *J. Geophys. Res.*, **93**, 14 817–14 827.
- 萬納寺信崇, 1994: 鉛直座標系. *数値予報課報告・別冊*, **41**, 気象庁予報部, 62–64.
- Marsaglia, G., 2003: Xorshift RNGs. *J. Stat. Softw.*, **8**: 14.
- Mastin, L. G., 2007: A user-friendly one-dimensional model for wet volcanic plumes. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **8**, Q03 014.
- Mastin, L. G., 2014: Testing the accuracy of a 1-D volcanic plume model in estimating mass eruption rate. *J.*

- Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 2474–2495.
- Mastin, L. G., M. Guffanti, R. Servranckx, P. Webley, S. Barsotti, K. Dean, A. Durant, J. W. Ewert, A. Neri, W. I. Rose, D. Schneider, L. Siebert, B. Stunder, G. Swanson, A. Tupper, A. Volentik and C. F. Waythomas, 2009: A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **186**, 10–21.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791–1806.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851–875.
- Miwa, T., M. Nagai and R. Kawaguchi, 2018: Resuspension of ash after the 2014 phreatic eruption at Ontake volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **351**, 105–114.
- 宮縁育夫・前野 深・中田節也・長井雅史・飯塚義之・星住英夫・田中明子・伊藤順一・川辺禎久・大石雅之・横尾亮彦・大倉敬宏, 2017: 阿蘇火山中岳における 2016 年 10 月 7 日～8 日噴火とその噴出物. *Abstract, JpGU-AGU Joint Meeting*, SVC47–11.
- 宮下精二, 2002: 数値計算. 朝倉書店, pp. 80-81.
- 水野 量, 2000: 雲と雨の気象学. 朝倉書店, pp. 60-61.
- 森口繁一・宇田川銚久・一松 信, 1957: 岩波 数学公式 II. 岩波書店, pp. 200-202.
- 室井ちあし・豊田英司・吉村裕正・保坂征宏・杉 正人, 2002: 標準コーディングルール. *天気*, **49**, 91–95.
- 永田 雅, 1994: 数値予報モデルでの予測可能性を決める要素. *数値予報課報告・別冊*, **41**, 気象庁予報部, 130–134.
- NOAA, NASA and US Air Force, 1976: U.S. Standard Atmosphere, 1976. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 227 p.
- 大喜多敏一, 1987: 湿性沈着：雲物理過程と降水への物質の取り込み機構. *気象研究ノート*, **158**, 107–118.
- 大喜多敏一・北田敏廣, 1987: 乾性沈着. *気象研究ノート*, **158**, 119–138.
- 鬼澤真也・新堀敏基・福井敬一・安藤 忍・弘瀬冬樹・木村一洋・吉田康宏・岩切一宏・吉田知央・山本哲也・吉川澄夫, 2013: 2011 年霧島山新燃岳噴火における降灰観測と予測. *験震時報*, **77**, 215–222.
- Pfeiffer, T., A. Costa and G. Macedonio, 2005: A model for the numerical simulation of tephra fall deposits. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **140**, 273–294.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery, 1996: Numerical Recipes in Fortran 90: The Art of *Parallel* Scientific Computing, 2nd ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 1141-1166, 1361-1363.
- Roebber, P. J., 2009: Visualizing multiple measures of forecast quality. *Wea. Forecasting*, **24**, 601–608.
- 齊藤和雄, 2003a: 支配方程式. *数値予報課報告・別冊*, **49**, 気象庁予報部, 16–25.
- 齊藤和雄, 2003b: 乱流過程と拡散過程. *数値予報課報告・別冊*, **49**, 気象庁予報部, 90–92.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006: The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266–1298.
- Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita and Y. Honda, 2007: Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 271–304.
- Saito, K., T. Shimbori and R. Draxler, 2015a: JMA’s regional atmospheric transport model calculations for the WMO technical task team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*, **139**, 185–199.
- Saito, K., T. Shimbori, R. Draxler, T. Hara, E. Toyoda, Y. Honda, K. Nagata, T. Fujita, M. Sakamoto, T. Kato, M. Kajino, T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, T. Maki, H. Terada, M. Chino, T. Iwasaki, M. C. Hort, S. J. Leadbetter, G. Wotawa, D. Arnold, C. Maurer, A. Malo, R. Servranckx and P. Chen, 2015b: Contribution of JMA to the WMO Technical Task Team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power

- Plant accident and relevant atmospheric transport modeling at MRI. *Tech. Rep. MRI*, **76**, 225 p.
- 齊藤和雄・新堀敏基・原 旅人・豊田英司・加藤輝之・藤田 司・永田和彦・本田有機, 2014: WMO「福島第一原発事故に関する気象解析についての技術タスクチーム」活動. *測候時報*, **81**, 1-30.
- 坂本 圭・辻野博之・中野英之・浦川昇吾・山中吾郎, 2018: Git と Redmine を用いた気象研究所共用海洋モデル「MRI.COM」の開発管理. *海の研究*, **27**, 175-188.
- Sato, E., K. Fukui and T. Shimbori, 2018: Aso volcano eruption on October 8, 2016, observed by weather radars. *Earth Planets Space*, **70**: 105.
- 佐藤純次・里村雄彦・佐々木秀孝・村治能孝, 1995: 硫黄酸化物の長距離輸送モデルと東アジア地域への適用. *気象研究所技術報告*, **34**, 106 p.
- Sato, N., P. J. Sellers, D. A. Randall, E. K. Schneider, J. Shukla, J. L. Kinter III, Y-T. Hou and E. Albertazzi, 1989: Effects of implementing the simple biosphere model in a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 2757-2782.
- Seinfeld, J. H. and S. N. Pandis, 2016: *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 3rd ed. Wiley, New Jersey, 1120 p.
- Seino, N., H. Sasaki, J. Sato and M. Chiba, 2004: High-resolution simulation of volcanic sulfur dioxide dispersion over the Miyake Island. *Atmos. Environ.*, **38**, 7073-7081.
- Shao, Y., 2000: *Physics and Modelling of Wind Erosion*, 1st ed. Kluwer Academic Pub., Dordrecht, pp. 268-270.
- 新堀敏基, 2016: 火山灰輸送: モデルと予測. *火山*, **61**, 399-427.
- 新堀敏基・相川百合・福井敬一・橋本明弘・清野直子・山里 平, 2010: 火山灰移流拡散モデルによる量的降灰予測—2009年浅間山噴火の事例—. *気象研究所研究報告*, **61**, 13-29.
- Shimbori, T., Y. Aikawa and N. Seino, 2009: Operational implementation of the tephra fall forecast with the JMA mesoscale tracer transport model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **39**, 0529-0530.
- 新堀敏基・甲斐玲子・林 洋介・林 勇太・菅井 明・長谷川嘉彦・橋本明弘・高木朗充・山本哲也・福井敬一, 2014: 領域移流拡散モデルによる降下火砕物予測—2011年霧島山(新燃岳)噴火の事例—. *気象研究所研究報告*, **65**, 75-107.
- Sparks, R. S. J., M. I. Bursik, S. N. Carey, J. S. Gilbert, L. S. Glaze, H. Sigurdsson and A. W. Woods, 1997: *Volcanic Plumes*. Wiley, Chichester, 574 p.
- Sportisse, B., 2007: A review of parameterizations for modelling dry deposition and scavenging of radionuclides. *Atmos. Environ.*, **41**, 2683-2698.
- Stohl, A., 1998: Computation, accuracy and applications of trajectories—A review and bibliography. *Atmos. Environ.*, **32**, 947-966.
- 鈴木建夫, 1985: 有珠山 1977 年降下火砕堆積物の渦動拡散モデルによる解析. *火山*, **30**, 231-251.
- 鈴木建夫・新井田清信・西田泰典・大島弘光・室伏 誠, 2008: 火山岩塊の運動再考(3)—放出火山岩塊に対する風の効果と岩塊の初速度についてのモデル計算—. *北海道大学地球物理学研究報告*, **71**, 1-18.
- Suzuki, T., 1983: A theoretical model for dispersion of tephra: Arc Volcanism: Physics and Tectonics, D. Shimozuru and I. Yokoyama, editors, TERRAPUB, Tokyo, pp. 95-113.
- 多田英夫, 1997: 大気客観解析. *数値予報課報告・別冊*, **43**, 気象庁予報部, 62-86.
- 高木朗充・長岡 優・福井敬一・安藤 忍・木村一洋・土山博昭, 2017: 2013-2015 年西之島噴火のモニタリングに関する研究. *気象研究所技術報告*, **78**, 72 p.
- 高橋幹二, 2003: エアロゾルの基礎(日本エアロゾル学会編). 森北出版, p. 117.
- Takasugi, T. and H. Nakamura, 1988: A tracer diffusion model coupled with the JMA global spectral model. *JMA/NPD Tech. Rep.*, **24**, 48 p.
- 豊田英司・原 旅人・横井信太郎・田浦俊太郎・長谷川昌樹・雁津克彦, 2019: NuSDaS(数値予報標準データセットシステム). バージョン 1.4-1, 221 p.

- Turcotte, D. L., 1986: Fractals and Fragmentation. *J. Geophys. Res.*, **91**, 1921–1926.
- Turner, J. S., 1962: The ‘starting plume’ in neutral surroundings. *J. Fluid Mech.*, **13**, 356–368.
- Uliasz, M., 1990: Development of the mesoscale dispersion modeling system using personal computers. Part I: Models and computer implementation. *Z. Meteorol.*, **40**, 110–120.
- 梅津浩典・室井ちあし・原 旅人, 2013: 検証指標. 数値予報課報告・別冊, **59**, 気象庁予報部, 6–15.
- Wilson, L. and T. C. Huang, 1979: The influence of shape on the atmospheric settling velocity of volcanic ash particles. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **44**, 311–324.
- Woods, A. W., 1988: The fluid dynamics and thermodynamics of eruption columns. *Bull. Volcanol.*, **50**, 169–193.
- Woods, A. W., 1993: Moist convection and the injection of volcanic ash into the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **98**, 17 627–17 636.
- 山本 哲・佐々木秀孝・清野直子・千葉 長, 2003: 1977 年有珠山噴火および 1707 年富士山噴火の降下火砕物の数値シミュレーション. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, V055–020.

気象研究所技術報告一覧表

- 第 1 号 バックグラウンド大気汚染の測定法の開発 (地球規模大気汚染特別研究班, 1978)
Development of Monitoring Techniques for Global Background Air Pollution. (MRI Special Research Group on Global Atmospheric Pollution, 1978)
- 第 2 号 主要活火山の地殻変動並びに地熱状態の調査研究 (地震火山研究部, 1979)
Investigation of Ground Movement and Geothermal State of Main Active Volcanoes in Japan. (Seismology and Volcanology Research Division, 1979)
- 第 3 号 筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設 (花房龍男, 藤谷徳之助, 伴野登, 魚津博, 1979)
On the Meteorological Tower and Its Observational System at Tsukuba Science City. (T. Hanafusa, T. Fujitani, N. Banno, and H. Uozu, 1979)
- 第 4 号 海底地震常時観測システムの開発 (地震火山研究部, 1980)
Permanent Ocean-Bottom Seismograph Observation System. (Seismology and Volcanology Research Division, 1980)
- 第 5 号 本州南方海域水温図-400m (又は 500m) 深と 1,000m 深- (1934-1943 年及び 1954-1980 年) (海洋研究部, 1981)
Horizontal Distribution of Temperature in 400m (or 500m) and 1,000m Depth in Sea South of Honshu, Japan and Western-North Pacific Ocean from 1934 to 1943 and from 1954 to 1980. (Oceanographical Research Division, 1981)
- 第 6 号 成層圏オゾンの破壊につながる大気成分及び紫外日射の観測 (高層物理研究部, 1982)
Observations of the Atmospheric Constituents Related to the Stratospheric ozone Depletion and the Ultraviolet Radiation. (Upper Atmosphere Physics Research Division, 1982)
- 第 7 号 83 型強震計の開発 (地震火山研究部, 1983)
Strong-Motion Seismograph Model 83 for the Japan Meteorological Agency Network. (Seismology and Volcanology Research Division, 1983)
- 第 8 号 大気中における雪片の融解現象に関する研究 (物理気象研究部, 1984)
The Study of Melting of Snowflakes in the Atmosphere. (Physical Meteorology Research Division, 1984)
- 第 9 号 御前崎南方沖における海底水圧観測 (地震火山研究部・海洋研究部, 1984)
Bottom Pressure Observation South off Omaezaki, Central Honshu. (Seismology and Volcanology Research Division and Oceanographical Research Division, 1984)
- 第 10 号 日本付近の低気圧の統計 (予報研究部, 1984)
Statistics on Cyclones around Japan. (Forecast Research Division, 1984)
- 第 11 号 局地風と大気汚染質の輸送に関する研究 (応用気象研究部, 1984)
Observations and Numerical Experiments on Local Circulation and Medium-Range Transport of Air Pollutions. (Applied Meteorology Research Division, 1984)
- 第 12 号 火山活動監視手法に関する研究 (地震火山研究部, 1984)
Investigation on the Techniques for Volcanic Activity Surveillance. (Seismology and Volcanology Research Division, 1984)
- 第 13 号 気象研究所大気大循環モデル I (MRI・GCM-I) (予報研究部, 1984)
A Description of the MRI Atmospheric General Circulation Model (The MRI・GCM-I). (Forecast Research Division, 1984)
- 第 14 号 台風の構造の変化と移動に関する研究-台風 7916 の一生- (台風研究部, 1985)
A Study on the Changes of the Three-Dimensional Structure and the Movement Speed of the Typhoon through its Life Time. (Typhoon Research Division, 1985)
- 第 15 号 波浪推算モデル MRI と MRI-II の相互比較研究-計算結果図集- (海洋気象研究部, 1985)
An Intercomparison Study between the Wave Models MRI and MRI-II - A Compilation of Results - (Oceanographical Research Division, 1985)
- 第 16 号 地震予知に関する実験的及び理論的研究 (地震火山研究部, 1985)
Study on Earthquake Prediction by Geophysical Method. (Seismology and Volcanology Research Division, 1985)
- 第 17 号 北半球地上月平均気温偏差図 (予報研究部, 1986)
Maps of Monthly Mean Surface Temperature Anomalies over the Northern Hemisphere for 1891-1981. (Forecast Research Division, 1986)
- 第 18 号 中層大気の研究 (高層物理研究部, 気象衛星研究部, 予報研究部, 地磁気観測所, 1986)
Studies of the Middle Atmosphere. (Upper Atmosphere Physics Research Division, Meteorological Satellite Research Division, Forecast Research Division, MRI and the Magnetic Observatory, 1986)
- 第 19 号 ドップラーレーダによる気象・海象の研究 (気象衛星研究部・台風研究部・予報研究部・応用気象研究部・海洋研究部, 1986)
Studies on Meteorological and Sea Surface Phenomena by Doppler Radar. (Meteorological Satellite Research Division, Typhoon Research Division, Forecast Research Division, Applied Meteorology Research Division, and Oceanographical Research Division, 1986)
- 第 20 号 気象研究所対流圏大気大循環モデル (MRI・GCM-I) による 12 年間分の積分 (予報研究部, 1986)
Mean Statistics of the Tropospheric MRI・GCM-I based on 12-year Integration. (Forecast Research Division, 1986)
- 第 21 号 宇宙線中間子強度 1983-1986 (高層物理研究部, 1987)
Multi-Directional Cosmic Ray Meson Intensity 1983-1986. (Upper Atmosphere Physics Research Division, 1987)

- 第 22 号 静止気象衛星「ひまわり」画像の噴火噴煙データに基づく噴火活動の解析に関する研究 (地震火山研究部, 1987)
Study on Analysis of Volcanic Eruptions based on Eruption Cloud Image Data obtained by the Geostationary Meteorological satellite (GMS). (Seismology and Volcanology Research Division, 1987)
- 第 23 号 オホーツク海海洋気候図 (篠原吉雄, 四竈信行, 1988)
Marine Climatological Atlas of the sea of Okhotsk. (Y. Shinohara and N. Shikama, 1988)
- 第 24 号 海洋大循環モデルを用いた風の応力異常に対する太平洋の応答実験 (海洋研究部, 1989)
Response Experiment of Pacific Ocean to Anomalous Wind Stress with Ocean General Circulation Model. (Oceanographical Research Division, 1989)
- 第 25 号 太平洋における海洋諸要素の季節平均分布 (海洋研究部, 1989)
Seasonal Mean Distribution of Sea Properties in the Pacific. (Oceanographical Research Division, 1989)
- 第 26 号 地震前兆現象のデータベース (地震火山研究部, 1990)
Database of Earthquake Precursors. (Seismology and Volcanology Research Division, 1990)
- 第 27 号 沖縄地方における梅雨期の降水システムの特性 (台風研究部, 1991)
Characteristics of Precipitation Systems During the Baiu Season in the Okinawa Area. (Typhoon Research Division, 1991)
- 第 28 号 気象研究所・予報研究部で開発された非静水圧モデル (猪川元興・斉藤和雄, 1991)
Description of a Nonhydrostatic Model Developed at the Forecast Research Department of the MRI. (M. Ikawa and K. Saito, 1991)
- 第 29 号 雲の放射過程に関する総合的研究 (気候研究部・物理気象研究部・応用気象研究部・気象衛星・観測システム研究部・台風研究部, 1992)
A Synthetic Study on Cloud-Radiation Processes. (Climate Research Department, Physical Meteorology Research Department, Applied Meteorology Research Department, Meteorological Satellite and Observation System Research Department, and Typhoon Research Department, 1992)
- 第 30 号 大気と海洋・地表とのエネルギー交換過程に関する研究 (三上正男・遠藤昌宏・新野 宏・山崎孝治, 1992)
Studies of Energy Exchange Processes between the Ocean-Ground Surface and Atmosphere. (M. Mikami, M. Endoh, H. Niino, and K. Yamazaki, 1992)
- 第 31 号 降水日の出現頻度からみた日本の季節推移-30 年間の日降水量資料に基づく統計- (秋山孝子, 1993)
Seasonal Transition in Japan, as Revealed by Appearance Frequency of Precipitating-Days. -Statistics of Daily Precipitation Data During 30 Years- (T. Akiyama, 1993)
- 第 32 号 直下型地震予知に関する観測的研究 (地震火山研究部, 1994)
Observational Study on the Prediction of Disastrous Intraplate Earthquakes. (Seismology and Volcanology Research Department, 1994)
- 第 33 号 各種気象観測機器による比較観測 (気象衛星・観測システム研究部, 1994)
Intercomparisons of Meteorological Observation Instruments. (Meteorological Satellite and Observation System Research Department, 1994)
- 第 34 号 硫黄酸化物の長距離輸送モデルと東アジア地域への適用 (応用気象研究部, 1995)
The Long-Range Transport Model of Sulfur Oxides and Its Application to the East Asian Region. (Applied Meteorology Research Department, 1995)
- 第 35 号 ウインドプロファイラーによる気象の観測法の研究 (気象衛星・観測システム研究部, 1995)
Studies on Wind Profiler Techniques for the Measurements of Winds. (Meteorological Satellite and Observation System Research Department, 1995)
- 第 36 号 降水・落下塵中の人工放射性核種の分析法及びその地球化学的研究 (地球化学研究部, 1996)
Geochemical Studies and Analytical Methods of Anthropogenic Radionuclides in Fallout Samples. (Geochemical Research Department, 1996)
- 第 37 号 大気と海洋の地球化学的研究 (1995 年及び 1996 年) (地球化学研究部, 1998)
Geochemical Study of the Atmosphere and Ocean in 1995 and 1996. (Geochemical Research Department, 1998)
- 第 38 号 鉛直 2 次元非線形問題 (金久博忠, 1999)
Vertically 2-dimensional Nonlinear Problem (H. Kanehisa, 1999)
- 第 39 号 客観的予報技術の研究 (予報研究部, 2000)
Study on the Objective Forecasting Techniques (Forecast Research Department, 2000)
- 第 40 号 南関東地域における応力場と地震活動予測に関する研究 (地震火山研究部, 2000)
Study on Stress Field and Forecast of Seismic Activity in the Kanto Region (Seismology and Volcanology Research Department, 2000)
- 第 41 号 電量滴定法による海水中の全炭酸濃度の高精度分析および大気中の二酸化炭素と海水中の全炭酸の放射性炭素同位体比の測定 (石井雅男・吉川久幸・松枝秀和, 2000)
Coulometric Precise Analysis of Total Inorganic Carbon in Seawater and Measurements of Radiocarbon for the Carbon Dioxide in the Atmosphere and for the Total Inorganic Carbon in Seawater (I.Masao, H.Y.Inoue and H.Matsueda, 2000)
- 第 42 号 気象研究所/数値予報課統一非静力学モデル (斉藤和雄・加藤輝之・永戸久喜・室井ちあし, 2001)
Documentation of the Meteorological Research Institute / Numerical Prediction Division Unified Nonhydrostatic Model (Kazuo Saito, Teruyuki Kato, Hisaki Eito and Chiashi Muroi, 2001)
- 第 43 号 大気および海水中のクロロフルオロカーボン類の精密測定と気象研究所クロロフルオロカーボン類標準ガスの確立 (時枝隆之・井上(吉川)久幸, 2004)
Precise measurements of atmospheric and oceanic chlorofluorocarbons and MRI chlorofluorocarbons calibration scale

- (Takayuki Tokieda and Hisayuki Y. Inoue, 2004)
- 第 44 号 PostScript コードを生成する描画ツール"PLOTPTS"マニュアル (加藤輝之, 2004)
Documentation of "PLOTPTS": Outputting Tools for PostScript Code (Teruyuki Kato, 2004)
- 第 45 号 気象庁及び気象研究所における二酸化炭素の長期観測に使用された標準ガスのスケールとその安定性の再評価に関する調査・研究 (松枝秀和・須田一人・西岡佐喜子・平野礼朗・澤 庸介・坪井一寛・堤 之智・神谷ひとみ・根本和宏・長井秀樹・吉田雅司・岩野園城・山本 治・森下秀昭・鎌田匡俊・和田 晃, 2004)
Re-evaluation for scale and stability of CO₂ standard gases used as long-term observations at the Japan Meteorological Agency and the Meteorological Research Institute (Hidekazu Matsueda, Kazuto Suda, Sakiko Nishioka, Toshirou Hirano, Yousuke, Sawa, Kazuhiro Tuboi, Tsutumi, Hitomi Kamiya, Kazuhiro Nemoto, Hideki Nagai, Masashi Yoshida, Sonoki Iwano, Osamu Yamamoto, Hideaki Morishita, Kamata, Akira Wada, 2004)
- 第 46 号 地震発生過程の詳細なモデリングによる東海地震発生の推定精度向上に関する研究 (地震火山研究部, 2005)
A Study to Improve Accuracy of Forecasting the Tokai Earthquake by Modeling the Generation Processes (Seismology and Volcanology Research Department, 2005)
- 第 47 号 気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM) 解説 (海洋研究部, 2005)
Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) Manual (Oceanographical Research Department, 2005)
- 第 48 号 日本海降雪雲の降水機構と人工調節の可能性に関する研究 (物理気象研究部・予報研究部, 2005)
Study of Precipitation Mechanisms in Snow Clouds over the Sea of Japan and Feasibility of Their Modification by Seeding (Physical Meteorology Research Department, Forecast Research Department, 2005)
- 第 49 号 2004 年日本上陸台風の概要と環境場 (台風研究部, 2006)
Summary of Landfalling Typhoons in Japan, 2004 (Typhoon Research Department, 2006)
- 第 50 号 栄養塩測定用海水組成標準の 2003 年国際共同実験報告 (青山道夫, 2006)
2003 Intercomparison Exercise for Reference Material for Nutrients in Seawater in a Seawater Matrix (Michio Aoyama, 2006)
- 第 51 号 大気および海水中の超微量六フッ化硫黄(SF₆)の測定手法の高度化と SF₆ 標準ガスの長期安定性の評価 (時枝隆之、石井雅男、斉藤 秀、緑川 貴, 2007)
Highly developed precise analysis of atmospheric and oceanic sulfur hexafluoride (SF₆) and evaluation of SF₆ standard gas stability (Takayuki Tokieda, Masao Ishii, Shu Saito and Takashi Midorikawa, 2007)
- 第 52 号 地球温暖化による東北地方の気候変化に関する研究 (仙台管区気象台, 環境・応用気象研究部, 2008)
Study of Climate Change over Tohoku District due to Global Warming (Sendai District Meteorological Observatory, Atmospheric Environment and Applied Meteorology Research Department, 2008)
- 第 53 号 火山活動評価手法の開発研究 (地震火山研究部, 2008)
Studies on Evaluation Method of Volcanic Activity (Seismology and Volcanology Research Department, 2008)
- 第 54 号 日本における活性炭冷却捕集およびガスクロ分離による気体計数システムによる ⁸⁵Kr の測定システムの構築および 1995 年から 2006 年の測定結果 (青山道夫, 藤井憲治, 廣瀬勝己, 五十嵐康人, 磯貝啓介, 新田 済, Hartmut Sartorius, Clemens Schlosser, Wolfgang Weiss, 2008)
Establishment of a cold charcoal trap-gas chromatography-gas counting system for ⁸⁵Kr measurements in Japan and results from 1995 to 2006 (Michio Aoyama, Kenji Fujii, Katsumi Hirose, Yasuhito Igarashi, Keisuke Isogai, Wataru Nitta, Hartmut Sartorius, Clemens Schlosser, Wolfgang Weiss, 2008)
- 第 55 号 長期係留による 4 種類の流速計観測結果の比較 (中野俊也, 石崎 廣, 四竈信行, 2008)
Comparison of Data from Four Current Meters Obtained by Long-Term Deep-Sea Moorings (Toshiya Nakano, Hiroshi Ishizaki and Nobuyuki Shikama, 2008)
- 第 56 号 CMIP3 マルチモデルアンサンブル平均を利用した将来の海面水温・海氷分布の推定 (水田 亮, 足立恭将, 行本誠史, 楠 昌司, 2008)
Estimation of the Future Distribution of Sea Surface Temperature and Sea Ice Using the CMIP3 Multi-model Ensemble Mean (Ryo Mizuta, Yukimasa Adachi, Seiji Yukimoto and Shoji Kusunoki, 2008)
- 第 57 号 閉流路中のフローセルを用いた分光光度法自動分析装置による海水の高精度 pH_T 測定 (斉藤 秀, 石井雅男, 緑川 貴, 井上 (吉川) 久幸, 2008)
Precise Spectrophotometric Measurement of Seawater pH_T with an Automated Apparatus using a Flow Cell in a Closed Circuit (Shu Saito, Masao Ishii, Takashi Midorikawa and Hisayuki Y. Inoue, 2008)
- 第 58 号 栄養塩測定用海水組成標準の 2006 年国際共同実験報告 (青山道夫, J. Barwell-Clarke, S. Becker, M. Blum, Braga E.S., S. C. Coverly, E. Czobik, I. Dahllöf, M. Dai, G. O. Donnell, C. Engelke, Gwo-Ching Gong, Gi-Hoon Hong, D. J. Hydes, Ming-Ming Jin, 葛西広海, R. Kerouel, 清本容子, M. Knockaert, N. Kress, K. A. Kroglund, 熊谷正光, S. Leterme, Yarong Li, 増田真次, 宮尾 孝, T. Moutin, 村田昌彦, 永井直樹, G. Nausch, A. Nybakk, M. K. Ngirchchol, 小川浩史, J. van Ooijen, 太田秀和, J. Pan, C. Payne, O. Pierre-Duplessix, M. Pujo-Pay, T. Raabe, 齊藤一浩, 佐藤憲一郎, C. Schmidt, M. Schuett, T. M. Shammon, J. Sun, T. Tanhua, L. White, E.M.S. Woodward, P. Worsfold, P. Yeats, 芳村 毅, A. Youéno, Jia-Zhong Zhang, 2008)
2006 Inter-laboratory Comparison Study for Reference Material for Nutrients in Seawater (M. Aoyama, J. Barwell-Clarke, S. Becker, M. Blum, Braga E. S., S. C. Coverly, E. Czobik, I. Dahllöf, M. H. Dai, G. O. Donnell, C. Engelke, G. C. Gong, Gi-Hoon Hong, D. J. Hydes, M. M. Jin, H. Kasai, R. Kerouel, Y. Kiyomono, M. Knockaert, N. Kress, K. A. Kroglund, M. Kumagai, S. Leterme, Yarong Li, S. Masuda, T. Miyao, T. Moutin, A. Murata, N. Nagai, G. Nausch, M. K. Ngirchchol, A. Nybakk, H. Ogawa, J. van Ooijen, H. Ota, J. M. Pan, C. Payne, O. Pierre-Duplessix, M. Pujo-Pay, T. Raabe, K. Saito, K. Sato, C. Schmidt, M. Schuett, T. M. Shammon, J. Sun, T. Tanhua, L. White, E.M.S. Woodward, P. Worsfold, P. Yeats, T.

- Yoshimura, A. Youéno, J. Z. Zhang, 2008)
- 第 59 号 気象研究所共用海洋モデル(MRI.COM)第 3 版解説(辻野博之, 本井達夫, 石川一郎, 平原幹俊, 中野英之, 山中吾郎, 安田珠幾, 石崎廣(気象研究所海洋研究部), 2010)
Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) Version 3 (Hiroyuki Tsujino, Tatsuo Motoi, Ichiro Ishikawa, Mikitoshi Hirabara, Hideyuki Nakano, Goro Yamanaka, Tamaki Yasuda, and Hiroshi Ishizaki (Oceanographic Research Department), 2010)
- 第 60 号 栄養塩測定用海水組成標準の 2008 年国際共同実験報告(青山道夫, Carol Anstey, Janet Barwell-Clarke, François Baurand, Susan Becker, Marguerite Blum, Stephen C. Coverly, Edward Czobik, Florence D' amico, Ingela Dahllöf, Minhan Dai, Judy Dobson, Magali Duval, Clemens Engelke, Gwo-Ching Gong, Olivier Grosso, 平山篤史, 井上博敬, 石田雄三, David J. Hydes, 葛西広海, Roger Kerouel, Marc Knockaert, Nurit Kress, Katherine A. Kroglund, 熊谷正光, Sophie C. Leterme, Claire Mahaffey, 光田均, Pascal Morin, Thierry Moutin, Dominique Munaron, 村田昌彦, Günther Nausch, 小川浩史, Jan van Ooijen, Jianming Pan, Georges Paradis, Chris Payne, Olivier Pierre-Duplessix, Gary Prove, Patrick Raimbault, Malcolm Rose, 齊藤一浩, 齊藤宏明, 佐藤憲一郎, Cristopher Schmidt, Monika Schütt, Theresa M. Shammon, Solveig Olafsdottir, Jun Sun, Toste Tanhua, Sieglinde Weigelt-Krenz, Linda White, E. Malcolm. S. Woodward, Paul Worsfold, 芳村毅, Agnès Youéno, Jia-Zhong Zhang, 2010)
2008 Inter-laboratory Comparison Study of a Reference Material for Nutrients in Seawater(青山道夫, Carol Anstey, Janet Barwell-Clarke, François Baurand, Susan Becker, Marguerite Blum, Stephen C. Coverly, Edward Czobik, Florence D' amico, Ingela Dahllöf, Minhan Dai, Judy Dobson, Magali Duval, Clemens Engelke, Gwo-Ching Gong, Olivier Grosso, 平山篤史, 井上博敬, 石田雄三, David J. Hydes, 葛西広海, Roger Kerouel, Marc Knockaert, Nurit Kress, Katherine A. Kroglund, 熊谷正光, Sophie C. Leterme, Claire Mahaffey, 光田均, Pascal Morin, Thierry Moutin, Dominique Munaron, 村田昌彦, Günther Nausch, 小川浩史, Jan van Ooijen, Jianming Pan, Georges Paradis, Chris Payne, Olivier Pierre-Duplessix, Gary Prove, Patrick Raimbault, Malcolm Rose, 齊藤一浩, 齊藤宏明, 佐藤憲一郎, Cristopher Schmidt, Monika Schütt, Theresa M. Shammon, Solveig Olafsdottir, Jun Sun, Toste Tanhua, Sieglinde Weigelt-Krenz, Linda White, E. Malcolm. S. Woodward, Paul Worsfold, 芳村毅, Agnès Youéno, Jia-Zhong Zhang, 2010)
- 第 61 号 強雨をもたらす線状降水帯の形成機構等の解明及び降水強度・移動速度の予測に関する研究(大阪管区気象台・彦根地方気象台・京都地方気象台・奈良地方気象台・和歌山地方気象台・神戸海洋気象台・松江地方気象台・鳥取地方気象台・舞鶴海洋気象台・広島地方気象台・徳島地方気象台・予報研究部, 2010)
Studies on formation process of line-shaped rainfall systems and predictability of rainfall intensity and moving speed (Osaka District Meteorological Observatory, Hikone Local Meteorological Observatory, Kyoto Local Meteorological Observatory, Nara Local Meteorological Observatory, Wakayama Local Meteorological Observatory, Kobe Marine Observatory, Matsue Local Meteorological Observatory, Tottori Local Meteorological Observatory, Maizuru Marine Observatory, Hiroshima Local Meteorological Observatory, Tokushima Local Meteorological Observatory AND Forecast Research Department, 2010)
- 第 62 号 WWRP 北京オリンピック 2008 予報実証/研究開発プロジェクト(齊藤和雄, 國井勝, 原昌弘, 瀬古弘, 原旅人, 山口宗彦, 三好建正, 黄偉健, 2010)
WWRP Beijing Olympics 2008 Forecast Demonstration/Research and Development Project (B08FDP/RDP) (Kazuo Saito, Masaru Kunii, Masahiro Hara, Hiromu Seko, Tabito Hara, Munchiko Yamaguchi, Takemasa Miyoshi and Wai-kin Wong, 2010)
- 第 63 号 東海地震の予測精度向上及び東南海・南海地震の発生準備過程の研究(地震火山研究部, 2011)
Improvement in prediction accuracy for the Tokai earthquake and research of the preparation process of the Tonankai and the Nankai earthquakes (Seismology and Volcanology Research Department, 2011)
- 第 64 号 気象研究所地球システムモデル第 1 版(MRI-ESM1) —モデルの記述—(行本誠史, 吉村裕正, 保坂征宏, 坂見智法, 辻野博之, 平原幹俊, 田中泰宙, 出牛真, 小畑淳, 中野英之, 足立恭将, 新藤永樹, 藪将吉, 尾瀬智昭, 鬼頭昭雄, 2011)
Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) — Model Description — (Seiji Yukimoto, Hiromasa Yoshimura, Masahiro Hosaka, Tomonori Sakami, Hiroyuki Tsujino, Mikitoshi Hirabara, Taichu Y. Tanaka, Makoto Deushi, Atsushi Obata, Hideyuki Nakano, Yukimasa Adachi, Eiki Shindo, Shoukichi Yabu, Tomoaki Ose and Akio Kitoh, 2011)
- 第 65 号 東南アジア地域の気象災害軽減国際共同研究(齊藤和雄, 黒田徹, 林修吾, 瀬古弘, 國井勝, 小司禎教, 上野充, 川畑拓矢, 余田成男, 大塚成徳, Nurjanna Joko Trilaksono, 許智揚, 古関俊也, Le Duc, Kieu Thi Xin, 黄偉健, Krushna Chandra Gouda, 2011)
International Research for Prevention and Mitigation of Meteorological Disasters in Southeast Asia (Kazuo Saito, Tohru Kuroda, Syugo Hayashi, Hiromu Seko, Masaru Kunii, Yoshinori Shoji, Mitsuru Ueno, Takuya Kawabata, Shigeo Yoden, Shigenori Otsuka, Nurjanna Joko Trilaksono, Tieh-Yong Koh, Syunya Koseki, Le Duc, Kieu Thi Xin, Wai-Kin Wong and Krushna Chandra Gouda, 2011)
- 第 66 号 太平洋における大気-海洋間二酸化炭素フラックス推定手法(杉本裕之, 平石直孝, 石井雅男, 緑川貴, 2012)
A method for estimating the sea-air CO₂ flux in the Pacific Ocean (Hiroyuki Sugimoto, Naotaka Hiraishi, Masao Ishii and Takashi Midorikawa, 2012)
- 第 67 号 太平洋における大気-海洋間二酸化炭素フラックス推定手法(坪井一寛, 松枝秀和, 澤庸介, 丹羽洋介, 中村雅道, 久保池大輔, 岩坪昇平, 齊藤和幸, 花宮義和, 辻健太郎, 大森英裕, 西秀紘, 2012)
Development of a flask sampling and its high-precision measuring system for greenhouse gases observations using a cargo aircraft C-130H (Kazuhiro Tsuboi, Hidekazu Matsueda, Yousuke Sawa, Yosuke Niwa Masamichi Nakamura, Daisuke

- 第 68 号 Kuboike, Shohei Iwatsubo, Kazuyuki Saito Yoshikazu Hanamiya, Kentaro Tsuji, Hidehiro Ohmori, Hidehiro Nishi, 2012)
国際シンポジウム 電子顕微鏡を用いたエアロゾル研究 (五十嵐康人, Weijun Li, Peter.R.Buseck, 岡田菊雄, 張代洲, 足立光司, 藤谷雄二, 嶋寺光, 五藤大輔, 三井千珠, 野島雅, 大島長, 松井仁志, 石元裕史, 松木篤, Pradeep Khatri, 中山智喜, 向井将平, 大石乾詞, 間山憲仁, 坂本哲夫, 直江寛明, 財前祐二, 塩流水洋樹, 田中泰宙, 梶野瑞王, 2013)
International Symposium on Aerosol Studies Explored by Electron Microscopy (Yasuhito Igarashi, Weijun Li, Peter. R. Buseck, Kikuo Okada, Daizhou Zhang, Kouji Adachi, Yuji Fujitani, Hikari Shimadera, Daisuke Goto, Chizu Mitsui, Masashi Nojima, Naga Oshima, Hitoshi Matsui, Hiroshi Ishimoto, Atsushi Matsuki, Pradeep Khatri, Tomoki Nakayama, Shohei Mukai, Kenji Ohishi, Norihito Mayama, Tetsuo Sakamoto, Hiroaki Naoe, Yuji Zaizen, Hiroki Shiozuru, Taichu Y. Tanaka and Mizuo Kajino, 2013)
- 第 69 号 マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究 (地震火山研究部, 2013)
Development of Quantitative Detection Techniques of Magma Activity and Improvement of Evaluation of Volcanic Activity Level (Seismology and Volcanology Research Department, MRI, 2013)
- 第 70 号 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による津波高の現地調査報告 (林豊, 前田憲二, 対馬弘晃, 岡田正實, 木村一洋, 岩切一宏, 2013)
Reports on Field Surveys of Tsunami Heights from the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Yutaka Hayashi, Kenji Maeda, Hiroaki Tsushima, Masami Okada, Kazuhiro Kimura and Kazuhiro Iwakiri, 2013)
- 第 71 号 気候研究のための気象研究所アンサンブル予測システムの概要とその応用 (藪将吉, 水田亮, 吉村裕正, 黒田友二, 向川均, 2014)
Meteorological Research Institute Ensemble Prediction System (MRI-EPS) for climate research - Outline and its applications - (Shoukichi Yabu, Ryo Mizuta, Hiromasa Yoshimura, Yuhji Kuroda, and Hitoshi Mukougawa, 2014)
- 第 72 号 日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究 (地震火山研究部, 地震火山部, 気象大学校, 札幌管区気象台, 仙台管区気象台, 大阪管区気象台, 福岡管区気象台, 沖縄気象台, 2014)
Survey of moderate repeating earthquakes in Japan (Seismology and Volcanology Research Department of MRI, Seismology and Volcanology Department, Meteorological College, Sapporo Regional Headquarters, Sendai Regional Headquarters, Osaka Regional Headquarters, Fukuoka Regional Headquarters, and Okinawa Regional Headquarters, 2014)
- 第 73 号 気象研究所非静力学地域気候モデルによる日本付近の将来気候変化予測について (佐々木秀孝, 村田昭彦, 川瀬宏明, 花房瑞樹, 野坂真也, 大泉三津夫, 水田亮, 青柳曉典, 志藤文武, 石原幸司, 2015)
Projection of Future Climate Change around Japan by using MRI Non-hydrostatic Regional Climate Model (Hidetaka Sasaki, Akihiko Murata, Hiroaki Kawase, Mizuki Hanafusa, Masaya Nosaka, Mitsuo Oh'izumi, Ryou Mizuta, Toshinori Aoyagi, Fumitake Shido, and Koji Ishihara, 2015)
- 第 74 号 新型自己浮上式海底水圧計の開発 (平田賢治, 山崎明, 対馬弘晃, 2015)
Development of a new pop-up ocean-bottom pressure gauge (Kenji Hirata, Akira Yamazaki, and Hiroaki Tsushima, 2015)
- 第 75 号 2012 年・2013 年に日本に接近・上陸した台風の概要と特性 (北畠尚子, 小山亮, 嶋田宇大, 櫻木智明, 沢田雅洋, 2015)
Summary and Characteristics of Approaching and Landfalling Tropical Cyclones in Japan in 2012 and 2013 (Naoko Kitabatake, Ryo Oyama, Udai Shimada, Tomoaki Sakuragi and Masahiro Sawada, 2015)
- 第 76 号 WMO福島第一原発事故に関する気象解析技術タスクチーム活動と気象研究所の大気拡散モデリング (斉藤和雄, 新堀敏基, R. Draxler, 原旅人, 豊田英司, 本田有機, 永田和彦, 藤田司, 坂本雅巳, 加藤輝之, 梶野瑞王, 関山剛, 田中泰宙, 眞木貴史, 寺田宏明, 茅野政道, 岩崎俊樹, M.C. Hort, S.J. Leadbetter, G. Wotawa, D. Arnold, C. Maurer, A. Malo, R. Servranckx, P. Chen, 2015)
Contribution of JMA to the WMO Technical Task Team on Meteorological Analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident and Relevant Atmospheric Transport Modelling at MRI (K. Saito, T. Shimbori, R. Draxler, T. Hara, E. Toyoda, Y. Honda, K. Nagata, T. Fujita, M. Sakamoto, T. Kato, M. Kajino, T.T. Sekiyama, T.Y. Tanaka, T. Maki, H. Terada, M. Chino, T. Iwasaki, M.C. Hort, S.J. Leadbetter, G. Wotawa, D. Arnold, C. Maurer, A. Malo, R. Servranckx and P. Chen, 2015)
- 第 77 号 海溝沿い巨大地震の地震像の即時的把握に関する研究 (地震津波研究部, 2017)
Research on rapid estimation of the parameters for large earthquakes along trenches (Seismology and Tsunami Research Department, 2017)
- 第 78 号 2013-2015 年西之島噴火のモニタリングに関する研究 (高木朗充, 長岡優, 福井敬一, 安藤忍, 木村一洋, 土山博昭, 2017)
Studies on Monitoring of the 2013 - 2015 Nishinoshima Eruption (Akimichi Takagi, Yutaka Nagaoka, Keiichi Fukui, Shinobu Ando, Kazuhiro Kimura, and Hiroaki Tsuchiyama, 2017)
- 第 79 号 2012 年から 2016 年に実施された温室効果ガス観測に関する相互比較実験 (iceGGO) (坪井一寛, 中澤高貴, 松枝秀和, 町田敏暢, 青木周司, 森本真司, 後藤大輔, 下坂琢哉, 加藤健次, 青木伸行, 渡邊卓朗, 向井人史, 遠嶋康徳, 勝又啓一, 村山昌平, 石戸谷重之, 藤谷徳之助, 小出寛, 高橋正臣, 川崎照夫, 滝沢厚詩, 澤庸介, 2017)
InterComparison Experiments for Greenhouse Gases Observation (iceGGO) in 2012-2016 (A. K. Tsuboi, T. Nakazawa, H. Matsueda, T. Machida, S. Aoki, S. Morimoto, D. Goto, T. Shimosaka, K. Kato, N. Aoki, T. Watanabe, H. Mukai, Y. Tohjima, K. Katsumata, S. Murayama, S. Ishidoya, T. Fujitani, H. Koide, M. Takahashi, T. Kawasaki, A. Takizawa and Y. Sawa, 2017)
- 第 80 号 気象研究所共用海洋モデル第 4 版(MRI.COMv4)解説 (辻野博之, 中野英之, 坂本圭, 浦川昇吾, 平原幹俊, 石崎廣, 山中吾郎 (気象研究所海洋・地球化学研究部), 2017)

- Reference Manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 4 (MRI.COMv4) (Hiroyuki Tsujino, Hideyuki Nakano, Kei Sakamoto, Shogo Urakawa, Mikitoshi Hirabara, Hiroshi Ishizaki, and Goro Yamanaka, (Oceanography and Geochemistry Research Department), 2017)
- 第 81 号 集中豪雨・大雨発生の必要条件の抽出・妥当性の確認と十分条件の抽出 (津口裕茂 (予報研究部)・大阪管区気象台・彦根地方気象台・京都地方気象台・神戸地方気象台・奈良地方気象台・和歌山地方気象台・広島地方気象台・岡山地方気象台・松江地方気象台・鳥取地方気象台・高松地方気象台・徳島地方気象台・松山地方気象台・高知地方気象台, 2018)
- Extraction and Validation of Necessary Conditions and Analysis of Sufficient Conditions for Causing Heavy Rainfall (Hiroshige TSUGUTI (Forecast Research Department), Osaka District Meteorological Observatory, Hikone Local Meteorological Observatory, Kyoto Local Meteorological Observatory, Kobe Local Meteorological Observatory, Nara Local Meteorological Observatory, Wakayama Local Meteorological Observatory, Hiroshima Local Meteorological Observatory, Okayama Local Meteorological Observatory, Matsue Local Meteorological Observatory, Tottori Local Meteorological Observatory, Takamatsu Local Meteorological Observatory, Tokushima Local Meteorological Observatory, Matsuyama Local Meteorological Observatory and Kochi Local Meteorological Observatory), 2018)
- 第 82 号 台風予報・解析技術高度化プロジェクトチームによる 5 日先台風強度予報ガイダンスの開発 (山口宗彦、嶋田宇大、沢田雅洋、入口武史(台風研究部)、大和田浩美 (気象庁)) , 2019)
- Development of 5-day Typhoon Intensity Forecast Guidance by the Project Team for Improvement in Operational Typhoon Forecasts and Analysis (Munehiko Yamaguchi, Udai Shimada, Masahiro Sawada, Takeshi Iriguchi(Typhoon Research Department, Meteorological Research Institute), and Hiromi Owada(Japan Meteorological Agency), 2019)
- 第 83 号 日本沿岸海況監視予測システム 10 年再解析値 (JPN Atlas 2020) (広瀬成章、坂本圭、碓氷典久、山中吾郎、高野洋雄(全球大気海洋研究部)) , 2020)
- The 10-year reanalysis dataset of an operational system for monitoring and forecasting coastal and open-ocean status around Japan (JPN Atlas 2020) (Nariaki Hirose, Kei Sakamoto, Norihisa Usui, Goro Yamanaka, and Nadao Kohno (Department of Atmosphere, Ocean and Earth System Modeling Research, Meteorological Research Institute), 2020)

気 象 研 究 所

1946 (昭和21) 年 設 立

所 長 : 土 井 恵 治

研究総務官 : 石 井 雅 男

研究調整官 : 永 戸 久 喜

全 球 大 気 海 洋 研 究 部

気 象 予 報 研 究 部

気 象 観 測 研 究 部

台 風 ・ 災 害 気 象 研 究 部

気 候 ・ 環 境 研 究 部

地 震 津 波 研 究 部

火 山 研 究 部

応 用 気 象 研 究 部

部 長 : 行 本 誠 史

部 長 : 山 田 雄 二

部 長 : 瀬 古 弘 子

部 長 : 清 野 直 子

部 長 : 須 田 一 人

部 長 : 干 場 充 之

部 長 : 齋 藤 誠 靖

部 長 : 高 槻 靖

気 象 研 究 所 技 術 報 告

編 集 委 員 長 : 干 場 充 之

編 集 委 員 : 藤 井 陽 介 水 野 吉 規 石 田 春 磨

梅 原 章 仁 高 薺 出 対 馬 弘 晃

佐 藤 英 一 佐々木 秀 孝

事 務 局 : 川 添 安 之 小 野 景 子

気象研究所技術報告は、1978 (昭和53) 年の初刊以来、気象研究所が必要の都度発行する刊行物であり、気象研究所の研究計画に基づき実施した研究に関する手法、データ、結果等についてのまとめ、または、すでに公表した研究論文類をとりまとめ総合的報告としたものを掲載する。

本紙に掲載された報告の著作権は気象研究所に帰属する。本紙に掲載された報告を引用する場合は、出所を明示すれば気象研究所の許諾を必要としない。本紙に掲載された報告の全部又は一部を複製、転載、翻訳、あるいはその他に利用する場合は気象研究所の許諾を得なければならない。個人が研究、学習、教育に使用する場合は、出所を明示すれば気象研究所の許諾を必要としない。

気 象 研 究 所 技 術 報 告	ISSN 2189-8871
第 84 号	
令和3年3月 発行	
編 集 兼 発 行 者	気 象 研 究 所
	〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1
	TEL(029)853-8535