

大気拡散影響予測システム Advance/Emerg の機能

高橋 邦生* 山下 貴志* 長谷美 宏幸* 松澤 邦裕*

Prediction Software System for Atmospheric Dispersion Influence: Advance/Emerg

Kunio Takahashi*, Takashi Yamashita*, Hiroyuki Hasemi* and Kunihiro Matsuzawa*

アドバンスソフト株式会社は、大気拡散物質の挙動予測と影響評価を行うためのソフトウェア・システム「Advance/Emerg」をリリースしている。本稿では、その機能について概説する。

Keywords: 気象モデル, 拡散モデル, WRF, FLEPART, FLEXWRF, 線量評価モデル

1. はじめに

Advance/Emerg は大気中に放出された汚染物質などの挙動を地球規模で解析し、その影響を評価予測することを目的に開発されたソフトウェア・システムである。全球を含む地球規模で気象予測が可能な気象モデルとして、米国国立大気研究センター (The National Center for Atmospheric Research, NCAR) を中心に開発されている WRF (The Weather Research and Forecasting) を採用している。また、拡散・沈着・放射性崩壊を取り扱うことが可能な拡散モデルとして、ノルウェー大気研究所で開発された粒子拡散モデル FLEXPART (FLEXible PARTicle dispersion mode) をベースに WRF 用にカスタマイズされた FLEXWRF を採用している。

本ソフトウェア・システムは、簡易な操作で解析に必要な設定ファイルを作成する初期設定入力支援 GUI や、解析を実行する Linux 計算機におけるコマンド操作を容易にするための対話式コマンド群を備えている。さらに、放射性物質を対象とする場合には、拡張機能として被ばく線量評価モデルで被ばく線量を評価することができる。

2. 気象モデル WRF の概要

Advance/Emerg が採用する気象モデル WRF は、鉛直方向の運動方程式に静水圧近似を用い

ない非静力学モデルである。非静力学とは、重力と気圧傾度力が釣り合うと仮定しないことを意味する。気圧傾度力は、高気圧側から低気圧側に生じる圧力勾配により働く力を指す。非静力学モデルでは、静力学モデルとは異なり、水平方向の長さスケールが2~2000mのメソスケールの気象現象を扱うことが可能である。

本ソフトウェア・システムの気象モデルとして WRF を採用した理由としては、大気拡散において重要なメソスケールの気象現象を扱うことができること、また、気象現象のシミュレーションにおいて広く用いられており、研究開発が継続されていることなどが挙げられる。

WRF は、図 1 に示すように複数のコンポーネントから構成されており、前処理、データ同化、大気化学など広範な利用用途に対応しているだけでなく、領域計算だけでなく全球計算にも対応している。

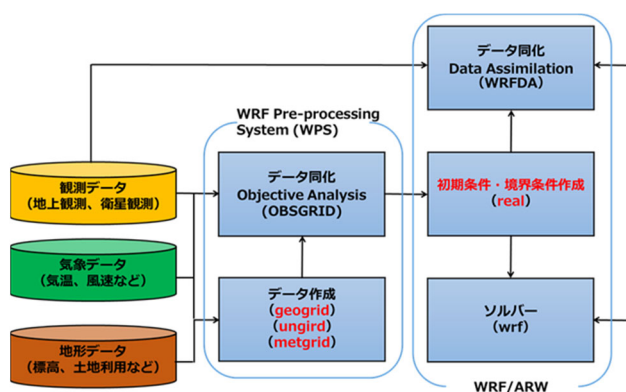


図 1 気象モデル WRF のコンポーネント

* アドバンスソフト株式会社 第3事業部
Computational Science and Engineering
Division III, AdvanceSoft Corporation

2.1. Advance/Emerg が利用するコンポーネント

Advance/Emerg では WPS (WRF Pre-processing System) と ARW (Advance Research WRF) を利用している。WPS は前処理用コンポーネントで、計算領域の設定 (格子点間隔・格子点数・地図投影座標系・地形データ・土地利用データなど) を行う geogird、気象データを読み込み解凍して中間処理データを作成する ungrid、geogird で作成した計算領域と ungrid で作成した中間処理データを組み合わせて解析で使用するためのデータセットを作成する metgrid、およびデータ同化で利用する OBSGRID から構成される。データ同化は長期の再解析などで観測データをモデルに同化させるために用いられるが、迅速な予測を目的とすることから Advance/Emerg では geogrid, ungrid, metgrid のみを使用する。前処理後は、前処理で作成したデータセットを AWR に含まれる real で処理して、解析に必要な初期条件と境界条件のためのデータセットを作成する。解析には ARW のソルバー (wrf) を使用する。また、データ同化は行わないので、OBSGRID と同様に WRFDA も使用しない。

2.2. データ形式

データ形式は、気象分野で標準的なデータ形式である GRIB (GRidded Information in Binary) 形式 (GRIB2 形式を含む) と NetCDF (Network Common Data Form) 形式を利用する。また、Advance/Emerg では、気象モデルの入力データとして、米国国立環境予測センター (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) が提供する気象データと、気象庁が提供する数値予報 GPV (全球数値予報モデル GSM・メソ数値予報モデル MSM・局地数値予報モデル LSM) の気象データに対応している。数値予報 GPV については、地上高度 2 m・10 m に加えて、新たに地上高度 1.5 m の地表面気温のデータ入力にも対応させている。

2.3. 基礎方程式

WRF で用いられる基礎方程式について簡単に

触れておく。基礎方程式は、複数の保存式と状態方程式および補助方程式で構成される。ここでは、表記を簡単にするために直交座標系で示すが、実際には地図投影を考慮した座標変換が行われる。また、基礎方程式における各変数の意味を表 1 に示す。

質量保存の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

運動量保存の式

$$\frac{\partial U}{\partial t} + C_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} = -\frac{\partial Uu}{\partial x} - \frac{\partial Vu}{\partial y} - \frac{\partial Wu}{\partial z} + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + C_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial y} = -\frac{\partial Uv}{\partial x} - \frac{\partial Vv}{\partial y} - \frac{\partial Wv}{\partial z} + F_y \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} + C_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial z} + g\rho \\ = -\frac{\partial Uw}{\partial x} - \frac{\partial Vw}{\partial y} - \frac{\partial Ww}{\partial z} + F_z \end{aligned} \quad (4)$$

エネルギー保存の式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial U\theta}{\partial x} + \frac{\partial V\theta}{\partial y} + \frac{\partial W\theta}{\partial z} = \rho Q \quad (5)$$

状態方程式

$$p = \rho R_d T \quad (6)$$

補助方程式

$$U = \rho u, V = \rho v, W = \rho w, \theta = \rho \theta \quad (7)$$

$$\Pi = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{R_d}{C_p}} = \frac{T}{\theta} \quad (8)$$

2.4. 鉛直座標系

気象モデル WRF の鉛直座標は、図 2 のように

地形に沿った乾燥大気の静水圧座標系を使用する。これを質量座標系と呼ぶことがある。また、実際に使用する際には、さらに地図投影法に従った座標系へと変換される。ここで、図 2 の p_h, p_{hs}, p_{ht} はそれぞれ、圧力の静水圧成分・地表面の圧力・大気上端の圧力を示す。このとき、以下の関係が成り立つ。

表 1 基礎方程式における変数とその意味

変数	意味
ρ	密度
u	速度（東西成分）
v	速度（南北成分）
w	速度（鉛直成分）
p	圧力
p_0	標準圧力 (=1,000 hPa)
θ	温位
C_p	乾燥気体の定圧比熱 (=1004.5 J・K ⁻¹ ・kg ⁻¹)
R_d	乾燥気体の気体定数 (=2/7C _p)
Π	無次元化された気圧のパラメータ (エクスター関数)
T	温度
g	重力加速度
F_x, F_y, F_z	重力を除く外力項 (粘性力、コリオリ力など)
Q	熱フラックス

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{p_{hs} - p_{ht}} \quad (9)$$

鉛直座標が式 (9) の η の値により 0 ~ 1 の値で規格化されるため、これを η (エータ) 座標系と呼んでいる。また、高度については、標高の代わりに単位質量当たりの重力による位置エネルギー (ジオポテンシャル) に対応した高度を示すジオポテンシャル高度を用いることが普通である。これらは、

$$z = \frac{\phi}{g} \quad (10)$$

の関係にあり、 z, ϕ はそれぞれジオポテンシャル高度とジオポテンシャルを示している。

2.5. 格子系

気象モデル WRF の計算格子は、図 3 に示すような Arakawa-C グリッドと呼ばれるスタッガード格子を使用する。スタッガード格子とは、ベクトル量とスカラー量を半格子ずらした位置に定義することで計算安定性を考慮した格子配置である。また、Arakawa とは大気の大循環モデルの開発とモデルの数値計算手法の発展に貢献した荒川昭夫氏のことで、彼により開発されたグリッド配置は荒川グリッドと呼ばれており、その配置の仕方により A ~ E まである。

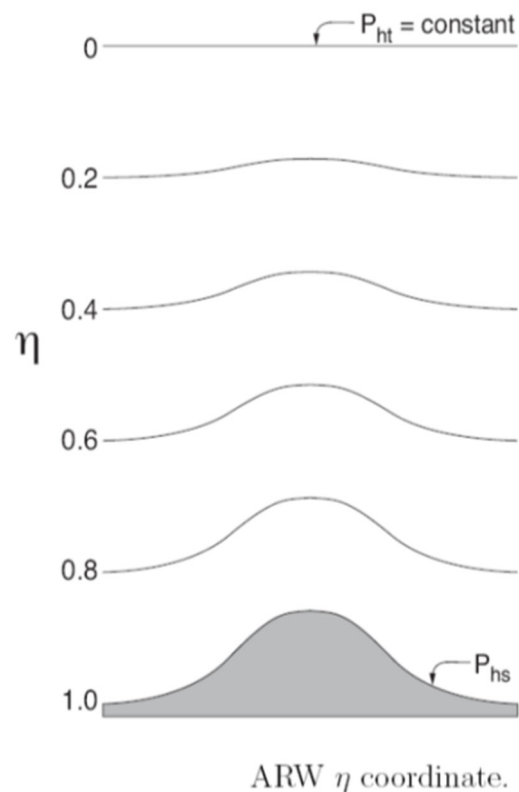


図 2 気象モデル WRF の鉛直座標系[1]

2.6. 数値解法

Advance/Emerg で使用している気象モデル WRF の数値解法について簡単に触れておく。まず、時間積分法には RK3 スキームと呼ばれる 3 次の Runge-Kutta 法を使用している。移流項の数値解法は、水平方向の移流項に対しては 5th-

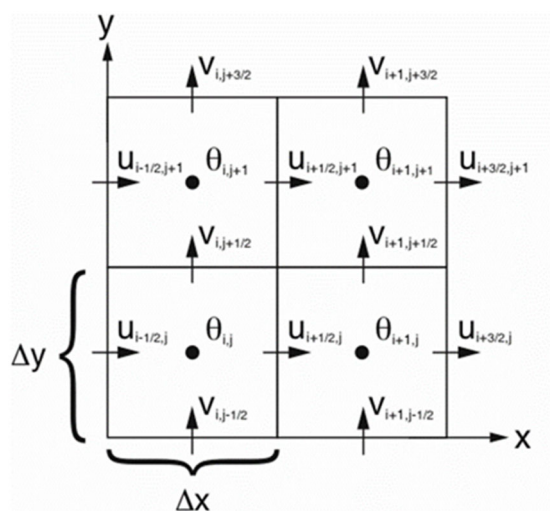


図 3 気象モデル WRF の格子配置[2]

order WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) scheme を採用している。これは、重み平均により 5 次精度化された風上差分スキームでありながら、温位など本来負の値を取ってはならない物理量に対しては負にならず高精度で安定な非負スキームである。また、鉛直方向の移流項に対しては 3 次精度の風上差分スキームを用いている。

気象モデル WRF では、ネスティングと呼ばれる入れ子格子を用いて解像度の異なる複数のドメインを同時に解析することができる。Advance/Emerg では、図 4 に示すように最大で 3 つのドメインに対応している。このとき、ネストされた領域は領域の大きなドメインから小さなドメインへの一方向の参照のみ行う。

計算領域における境界は、全部で 3 つあり、それぞれ大気上端の境界・地表面の境界・側面境界となっている。大気上端の境界は、浮力を復元力とする波である重力波に対して無反射となる吸収境界を用いる。圧力については一定値を与える。地表面の境界は、地形や地表面の状態に応じた物理境界が設定される。側面境界は、計算条件により異なる。領域計算の場合は、境界でのフラックス（流束）の流入・流出を考慮する必要があり、境界は 1 点ではなく、袖領域と呼ばれる複数の計算点を必要とする。Advance/Emerg では袖領域として 5 点を使用する。全球計算の場合は、経度方向に周期境界を緯度方向に減衰境界が適用される。

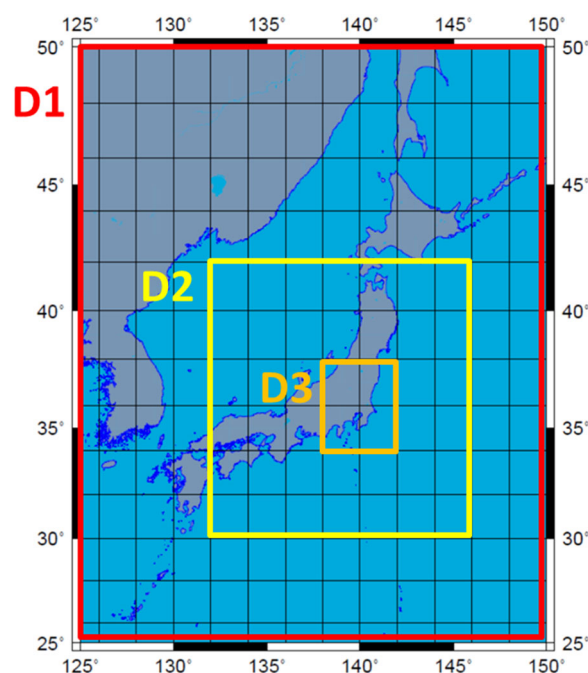


図 4 ネスティングの例

2.7. 物理モデル

気象現象を扱うためには、基礎方程式を計算格子の空間スケールであるグリッドスケールで計算（主に力学過程）するだけでは不十分であり、計算格子よりも小さな空間スケールであるサブグリッドスケールについても計算する必要がある。そこで、サブグリッドスケールの計算ではパラメータ化を行う。パラメータ化は力学以外の物理過程に対して用いられるが、パラメータ化するには物理モデルが必要である。Advance/Emerg では、元々、放射エネルギーから大気中に放出される放射性物質の挙動を地球規模で解析し、緊急時対策支援に資する放射能影響予測のために必要な被ばく線量評価を行うという目的で開発されたソフトウェア・システムであることから、計算速度と精度のバランスを考慮した物理モデルを予め選択している。よって、気象モデル WRF には様々な物理モデルが含まれているが、Advance/Emerg のユーザーは、これら全てを理解してその使い分けを行う必要はない。

物理モデルを必要とする主な物理過程は、境界層過程（乱流モデル）・雲微物理過程・積雲対流過程・地表面過程および大気放射過程（放射モデル）である。このとき、○○過程を○○モデルや○○

スキーム（法）と呼ぶことがあるが、これらは同じものを指している。

2.7.1. 境界層過程

境界層では、風による運動量輸送により乱流が活発で成層が不安定ではない状態でも鉛直混合が生じる（境界層過程）ことがある。この現象の空間スケールは、気象モデルに対してサブグリッドスケールとなるため、パラメータ化（乱流モデル）が必要である。Advance/Emerg では、乱流モデルに MYNN（Mellor-Yamada Nakanishi-Niino） Level 2.5 を採用している。Mellor-Yamada モデルでは、乱流を渦粘性近似で扱う。このとき、渦粘性を記述する方程式（補助方程式）の物理変数として、乱流エネルギーと乱流統計量を用いる。Yamada とは、乱流クロージャーモデルの開発に重要な貢献をした山田哲二氏のことで、このモデルは多くの大気および海洋モデルで採用されている。Nakanishi-Niino は、Mellor-Yamada のような渦粘性近似のモデルにおける乱流の長さスケールの改良を提案した。改良には、グリッドスケールの乱流をモデル化せずに直接計算する LES（Large Eddy Simulation）の結果が使用されている。また、レベルは乱流の等方性の程度に応じた分類のことを指しており、数値は時間変化項や拡散項の異方性を表すパラメータで評価したときのオーダー（次数）に対応する。レベル 1, 2, 3, 4 とあり、レベル 2.5 は 2 と 3 を混ぜたもので計算負荷と精度のバランスが適度なために用いている。Nakanishi-Niino とは、中西幹郎氏と新野宏氏のことで、境界層過程の物理モデルにおける日本人研究者の活躍は広く知られている。

2.7.2. 雲微物理過程

Advance/Emerg においては、WDM6（WRF Double-Moment Class 6）と呼ばれるモデルを採用している。WDM6 は、WSM6（WRF Single-Moment Class 6）を改良したモデルのことで、風速・温位・気圧と水物質の混合比を用いて、水物質の生成・消滅や熱の発生を計算する。風速・温

位・気圧・混合比を入力値、温位と混合比を出力値として扱う。ここで、Class 6 とは、水物質の数を指している。このモデルでは、水蒸気・雲水・雲氷・雨・雪・霰（雹よりも小さいもの）の混合比が考慮される。WDM6 モデルにおける水物質の生成・消滅の経路図を図 5 に示す。全部で 22 経路あり、双方向の経路が 2 つある。雲微物理過程におけるモーメントとは、モーメントバルク法のモーメントを指す。バルク法では、まず飽和水蒸気量より多い水は、雲水（雲の中の水滴）になると仮定する。また、ある程度の雲水の量になると雨水として落下する雨になると考える。このとき、雲水から雨水への変換率を表す関数があるとして、それを評価することを考える。モーメントとは、バルク法における雲水雨水変換率をどのように評価するかの違いのことを言っており、1 次モーメントバルク法では、観測で得られた雲の中の水滴の粒径分布と雨水量の関係から雲水雨水変換率を評価する方法のことで、2 次モーメントバルク法は、雲の中の水滴の粒径分布だけでなく、雨水の水滴の粒径分布も考慮して雲水雨水変換率を評価する方法となる。

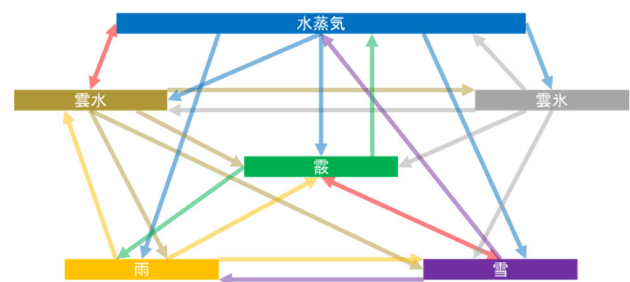


図 5 水物質の生成・消滅の経路図（WDM6）

2.7.3. 積雲対流過程

積雲対流過程を扱うことを対流パラメタリゼーションと呼ぶ。対流パラメタリゼーションの役割は、サブグリッドスケールの鉛直輸送による運動量・熱（温位）・水の時間変化を予測することと、凝結による熱の放出や凝結が降水となる量を予測することである。よって、積雲対流過程は雲微物理過程と密接に関係する。Advance/Emerg では、対流パラメタリゼーションに KF（Kain-

Fritsch : ケイン - フリッチ) スキームを採用している。KF スキームは、サブグリッドスケールの鉛直輸送の過程を考慮して、対流が終わった後の最終状態を予測するというものである。また、KF スキームは気象庁の予報モデルでも使用されている。KF スキームの模式図を図 6 に示す。このスキームで考慮される鉛直輸送過程は、積雲対流が生じたときに起こる水平方向の輸送（エントレインメントとデトレインメント）と上昇流および下降流による質量フラックスとそれらの差で生じる補償下降流となる。なお、点線で囲まれた領域は境界層過程による鉛直混合を示している。

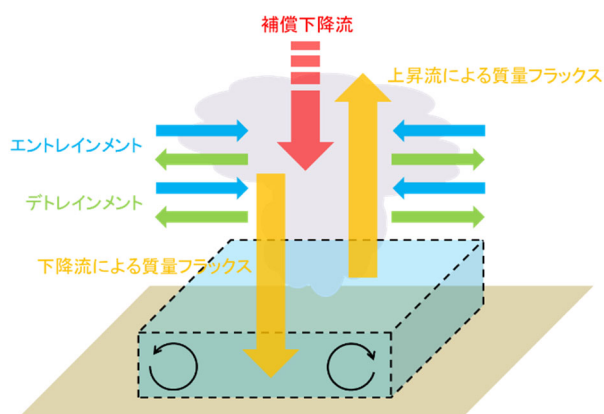


図 6 積雲対流過程の模式図 (KF スキーム)

2.7.4. 地表面過程と大気放射過程

地表面過程として地表面とその下の土壌の 5 層に分けて、熱のやり取りを計算している。最下層は温度一定を仮定する。図 7 は、地表面過程の模式図（ただし、太陽放射は入力）である。大気放射過程では、短波放射のモデルに Dudhia (ダットヒア) スキームを採用している。このスキームは、地表に到達する正味の日射量のみを診断的に求めるものである。そのため、放射輸送における複雑な物理過程は省略されている。また、晴天時における散乱、水蒸気による吸収、雲による反射・吸収のみを扱う。長波放射のモデルには、RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) スキームを使用している。このスキームは、モンテカルロ法によるランダムな放射輸送を直接計算するが、計算負荷が大きいので、大気を 3 次元的に分割して、それぞれの気柱に対して 1 次元の放射

輸送のみを考慮する。この近似を独立気柱近似または ICA (Independent Column Approximation) 近似と呼ぶ。また、グリッドスケールで確率論的に水平不均質な雲の配置を考慮している。

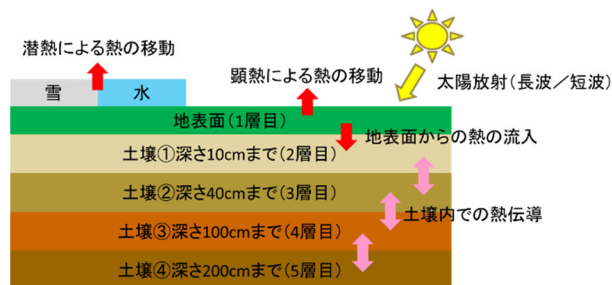


図 7 地表面過程の模式図

3. 拡散モデル FLEXPART の概要

Advance/Emerg では、拡散モデルとして、ノルウェー大気研究所で開発された粒子拡散モデル FLEXPART をベースに気象モデル WRF 用にカスタマイズされた FLEXWRF を採用している。FLEXWRF は、WRF の出力結果を駆動場として、ラグランジュ法により粒子の拡散シミュレーションをすることができる。また、米国立環境予測センター (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) やヨーロッパ中期予報センター (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 等の再解析データを駆動場とすることも可能である。FLEXPART は、放射性物質の拡散においても豊富な実績を有する。代表的な例としては、欧州の原発事故を想定したプロジェクトである flexRISK[3]での利用や CTBTO (包括的核実験禁止条約機構) において利用されており、また、2011 年 3 月の福島第一原発事故における放射性物質の拡散シミュレーション[4]においても利用されている。

3.1. 計算手法

粒子の運動の記述には以下の式を用いる。

$$\frac{dX}{dt} = v\{X(t)\} \quad (11)$$

$$X(t + \Delta t) = X(t) + v(X, t)\Delta t \quad (12)$$

ここで、 $\mathbf{X}$ は粒子の位置で $\mathbf{v}$ が速度、 t は時間を表している。また、粒子の速度を表す運動方程式には、ブラウン運動を記述する Langevin (ランジュバン) 方程式が用いられる。

$$d\mathbf{v}_t = \mathbf{a}(\mathbf{X}, \mathbf{v}_t, t)dt + \mathbf{b}(\mathbf{X}, \mathbf{v}_t, t)dW \quad (13)$$

右辺の関数 $\mathbf{a}$ は移流に関する項、 $\mathbf{b}$ は拡散に関する項で dW は粒子が受けるランダム力を表している。FLEXWRF では、粒子位置の時間積分法 (粒子の移動計算) に Pettersen 法を使用する。Pettersen 法は Runge-Kutta 法と比べると精度は劣るが、高速に計算できるというメリットがある。精度については、時間刻みを小さくすることで確保する。Pettersen 法における粒子位置の離散式は以下の通りである。

$$\mathbf{x}_{n+1,0} = \mathbf{x}_n + \Delta t \mathbf{v}(\mathbf{x}_n, t_n) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{n+1,m} = \mathbf{x}_n + \frac{\Delta t}{2} \{ & \mathbf{v}(\mathbf{x}_n, t_n) \\ & + \mathbf{v}(\mathbf{x}_{n+1,m-1}, t_{n+1}) \} \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 n, m は繰り返し計算の反復回数でそれぞれ内部反復と外部反復の回数となる。

さて、粒子の移動を計算する際には、乱流の効果を考慮する必要がある。大気における境界層では、流れは地表面の影響を受ける。境界層の厚さは 500~1000 m 程度で、それより上空の流れは地表面の影響をほとんど受けることはない。この上空の層を自由大気と呼ぶ。Advance/Emerg では、乱流の効果の取り扱いについて 2 つのオプションを用意している。初期設定では、FLEXPART の乱流モデルを利用する。一方、気象モデル WRF のデータ (摩擦速度と顕熱フラックス) を利用する方法もある。FLEXPART の乱流モデルは、乱流の一般的な速度分布が対数分布を示すことを利用した対数則モデルで、大気の密度成層を考慮した修正がなされたものを使用している。

3.2. 座標系

FLEXWRF は、図 8 のような気象モデル WRF の座標系とは別に独自の座標系を持っている。

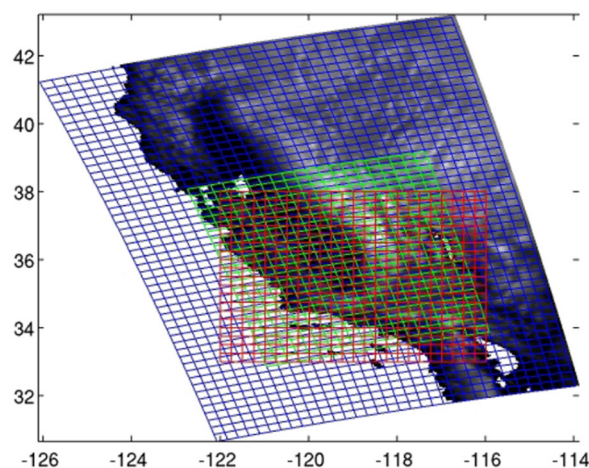


図 8 座標系の設定例[5]

この座標系は、WRF の計算範囲内で任意の位置と分割数で指定することが可能である。座標の基準位置の指定には、緯度経度で指定する場合と実際の距離で指定する場合があるが、Advance/Emerg では解析条件により内部で自動的に使い分けるため、ユーザーがこれを意識する必要はない。

3.3. 取り扱える粒子

Advance/Emerg が取り扱う粒子の形態と性状について、放射性物質を例に説明する。

3.3.1. 形態と性状

Advance/Emerg では、放射性物質を放射性希ガス・放射性ヨウ素・放射性粒子状物質の 3 形態に分けて取り扱う。このとき、形態に応じて考慮される性状が異なる。放射性希ガスは、放射性崩壊のみを考慮し、放射性ヨウ素と放射性粒子状物質は、放射性崩壊と沈着を考慮する。放射性崩壊は、核種ごと与えられる崩壊定数に従う。沈着は、湿性沈着と乾性沈着についてそれぞれ考慮する。ここで、湿性沈着とは雲や降雨などによる沈着過程を表し、乾性沈着とは粒子運動そのものによる沈着過程と重力沈降が考慮される。これらをまとめると表 2 のようになる。

Advance/Emerg においては、3 形態合わせて初期設定で合計 30 核種を扱うことができる。放射性崩壊は、e-folding time (初期の 1/e 倍になる時間) で崩壊定数を考慮するモデルを用いている。

表 2 放射性物質とその性状の扱い

放射性物質	放射性崩壊	湿性沈着	乾性沈着
希ガス	核種による	しない	しない
ヨウ素	核種による	する	する
粒子状物質	核種による	する	する

ここで e は自然対数の底であり、粒子質量の時間変化は以下のように書くことができる。

$$m(t + \Delta t) = m(t)e^{-\Delta t/\beta} \quad (16)$$

$$\beta = \frac{T_{0.5}}{\ln(2)} \quad (17)$$

ここで、 m は粒子質量、 $T_{0.5}$ は半減期である。

3.3.2. 沈着過程

FLEXWRF の沈着過程は、単純化された湿性沈着と乾性沈着を考慮している。模式図で示すと図 9 のようになる。

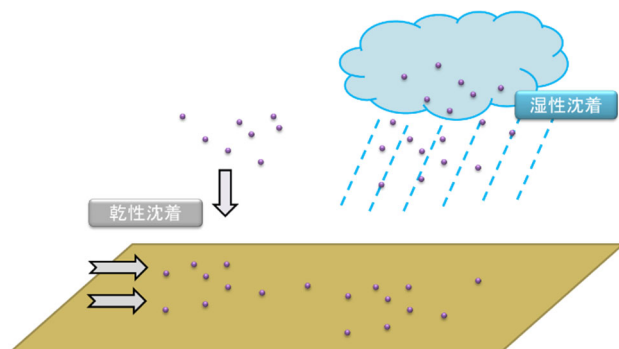


図 9 沈着過程の模式図

まず、乾性沈着の効果は沈降速度として与える。このとき、沈降速度は以下の式となる。

$$v_a(z) = \frac{1}{r_a(z) + r_b + r_a(z)r_b v_g} + v_g \quad (18)$$

$$v_g = \frac{g\rho_p d_p^2 C_{cun}}{18\mu} \quad (19)$$

ここで、それぞれの変数の意味を表 3 に示す。

表 3 沈降速度を与える変数

変数	意味
$v_d(z)$	沈降速度
$r_a(z)$	空気抵抗の効果
r_b	層流底層の効果
v_g	重力沈降の速度
g	重力加速度
ρ_p	粒子密度
d_p	粒径
C_{cun}	Cunningham 補正係数
μ	粘性率 (空気)

重力沈降の速度を与える式 (19) は、ストークスの式と呼ばれる。また、層流底層の効果は、層流境界層の下部で水平方向の流れが卓越するため沈降速度が小さくなることを反映している。さらに Cunningham 補正係数(カニングム補正係数)は、粒子表面での流れの速度はゼロにはならないので、ストークスの式を補正する必要がある(重力沈降の速度は小さくなる)ために付け加えられた係数である。なお、表 3 における粒子密度・粒径・粘性率は FLEXWRF の初期設定を採用しており、核種に依らず一定の値を用いる。このとき、粒子密度は $2.5 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、平均の粒径を $0.6 \text{ } \mu\text{m}$ 、粘性率を $1.8 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ とする。

湿性沈着は、大気中から粒子が取り除かれる割合を与える洗浄率モデル (wet scavenging model) を使用している。モデル式は、放射性崩壊の式 (16) と同様に

$$m(t + \Delta t) = m(t)e^{-\Lambda \Delta t} \quad (20)$$

$$\Lambda = A \times I^B \quad (21)$$

となる。ここで、 m は粒子質量、 Λ は洗浄率、 I は降水強度、 A, B はモデル係数を表す。モデル係数は FLEXWRF の初期設定を採用しており、核種に依らず一定の値を用いる。モデル係数は、それぞれ 1×10^{-4} と 0.8 である。降水強度(雨量)は、気象モデル WRF の出力より与えられる。

3.4. 出力

放射性物質の質量の単位はキログラム (kg) ではなく、ベクレル (Bq) として扱う。このとき、時間ごとに放出される粒子数と各核種の放出量から、粒子 1 個がどの核種で何ベクレルに相当するのかが決定される。一方、設定した FLEXWRF の座標系の各グリッド点から座標空間の体積と底面 (地表面) の面積を求めることができるので、この体積と面積の中に何個の粒子があるかで濃度と沈着量が決定される。よって、出力は濃度または沈着量となる (図 10)。

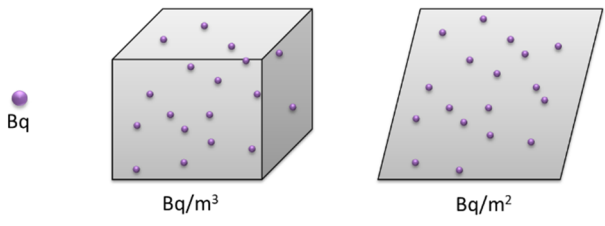


図 10 粒子質量・濃度・沈着量の関係 (放射性物質の場合)

4. 被ばく線量評価モデルの概要

Advance/Emerg では、拡張機能として被ばく線量評価モデルとして、アドバンスソフト株式会社 で 独 自 に 開 発 し た AE-RADOM (Advance/Emerg RAdiation DOse Model) を有している。本モデルでは、放射性物質の大気中における 3 次元濃度分布および地表面の 2 次元濃度分布から、地表面における外部被ばく量と内部被ばく量を求める。

外部被ばく量については、大気中および地表面から照射される γ 線による空気吸収線量率 (Gy・h⁻¹) を評価する。空気吸収線量率は電離放射線によって空気に与えられた単位時間あたりのエネルギー量に相当し、モニタリングポストなどによる環境放射線の実測値等と比較することができる。内部被ばく量については、放射性ヨウ素の吸入による甲状腺の預託等価線量を、大人・小児・乳児に対して評価する。預託等価線量は、放射性物質を体内に取り込んでから一定期間 (預託年数、

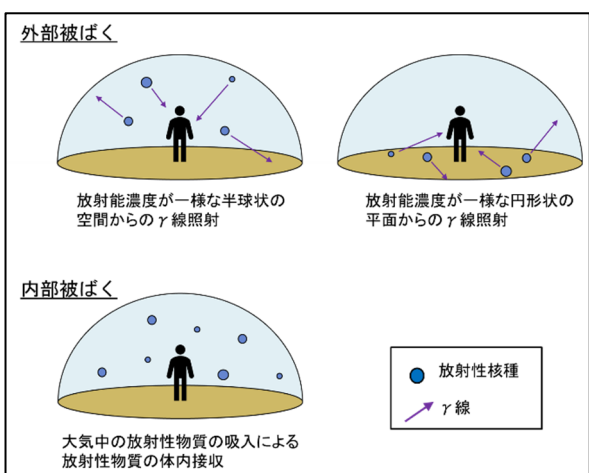


図 11 外部被ばく・内部被ばくのイメージ図

通常は大人に対して 50 年、小児や乳児に対しては 70 年を用いる) が経過するまでに対象 (臓器) が受ける被ばくの総量として定義される。被ばく線量計算に必要な核種データについても、標準で用意されている。

4.1. 外部被ばく線量

AE-RADOM では、評価点の周囲の大気中および地表面の放射性物質の濃度 (放射能濃度) から、γ 線照射による空気吸収線量率の値を各計算セル内の地表から高さ 1m の点に対して評価する。各評価点における空気吸収線量率 D_{Ext} は、大気中の放射能濃度 ($Bq \cdot m^{-3}$) および地表面の放射能濃度 ($Bq \cdot m^{-2}$) から空気吸収線量率 ($\mu Gy \cdot h^{-1}$) への換算係数を用いて、以下の式で求めることができる。また、各変数の意味を表 4 に示す。

$$\begin{aligned} D_{Ext} &= D_{air} + D_{gnd} \\ &= \sum_{i=1}^N \{ df_{air,i} \cdot C_{air,i} \} \\ &\quad + \sum_{i=1}^N \{ df_{gnd,i} \cdot C_{gnd,i} \} \end{aligned} \tag{22}$$

表 4 各評価点における空気吸収線量率の計算に用いる変数とその意味

変数	意味
D_{air}	大気中の放射能による空気吸収線量率
D_{gnd}	地表面の放射能による空気吸収線量率

N	大気中および地表面にある核種の数
$df_{air,i}$	空気吸収線量率への換算係数（大気中）
$df_{gnd,i}$	空気吸収線量率への換算係数（地表面）
$C_{air,i}$	大気中の各核種の放射能濃度
$C_{gnd,i}$	地表面の各核種の放射能濃度

ここで、核種の崩壊による減衰補正は放射性物質の拡散モデルに組み込まれており、その寄与を考慮した値が放射性物質の大気中濃度分布・地表面沈着量分布のデータとして得られているので、被ばく線量評価モデルでは、拡散モデルで計算した個々の核種の大気中濃度分布（最下層）・地表面沈着量分布をもとに核種ごとの空気吸収線量率分布を計算して空気吸収線量率の合計値とその積分値を求めている。

4.2. 内部被ばく線量

体内に摂取された放射性物質が体内で崩壊し、その際に放出された放射線によって引き起こされる被ばくを内部被ばくと呼ぶ。また、放射性物質の摂取後、体内で放出される放射線による線量率や等価線量率を積算（時間積分）した値はそれぞれ預託線量・預託等価線量と呼ばれる。AE-RADOM では、内部被ばく線量評価として、拡散モデルで得られた放射性物質の大気中濃度分布から、放射性ヨウ素の吸入による甲状腺への預託等価線量を大人・小児・乳児に対して求める。甲状腺に対する預託等価線量は、呼吸によって体内に吸入した放射能 (Bq) から預託等価線量率 (Sv) への換算係数を用いて、以下の式で求めることができる。

$$D_{int} = \sum_i^N \{C_{air,i} \cdot K_{air,i} \cdot L \cdot \Delta T\} \quad (23)$$

$K_{air,i}$ は放射エネルギーから預託等価線への換算係数、 L は評価対象の単位時間当たりの呼吸量、 ΔT は呼吸時間である。大気中の各核種の放射能濃度は、拡散モデルで計算した各セルの鉛直方向最下層の濃度を使用する。また、評価対象の単位時間当たりの呼吸量（一日当たりの活動状況を考量した平均値）として表 5 の値[6]を用いる。

表 5 単位時間当たりの呼吸量 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

大人（18 歳以上）	0.925
小児（5 歳）	0.345
乳児（3 ヶ月）	0.119

5. 初期設定入力支援 GUI と対話式コマンド群

Advance/Emerg には、初期設定入力支援 GUI が用意されており、気象モデルと拡散モデルで解析条件などを設定するために必要な入力ファイルの作成を簡単に行うことができる。この GUI は Windows 環境にて動作する。また、解析用途に応じたカスタマイズも行っており、設定項目の追加や必要な項目のみ設定できるようにするなど、ユーザーの目的に応じた使い方が可能となるようにしている。図 12 に気象モデルの入力ファイル作成時のメイン画面の一例を示す。また、図 13 に拡散モデルの入力ファイル作成時のメイン画面の一例を示す。設定項目については、表 6, 7 に記した。



図 12 気象モデルの入力作成時のメイン画面

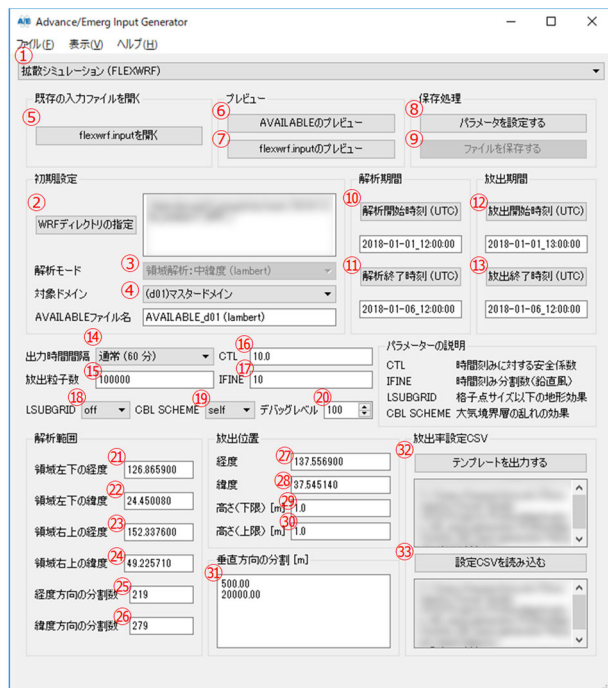


図 13 拡散モデルの入力作成時のメイン画面

表 6 メイン画面の設定項目（気象モデル）

番号	説明
①	メイン画面を切り替える
②	以前に作成した入力ファイルを開く
③	入力ファイルのプレビュー（WPS）
④	入力ファイルのプレビュー（ARW）
⑤	設定を入力ファイルに反映する
⑥	入力ファイルを保存する
⑦	解析モード（全球・領域）を選択する
⑧	使用する気象データを選択する
⑨	ネスティングの数を設定する
⑩	気象データの開始時刻を設定する
⑪	気象データの終了時刻を設定する
⑫	解析の開始時刻を設定する
⑬	解析の終了時刻を設定する
⑭	緯度・経度から 2 地点間の距離を計算する（解析領域の設定や解像度を決めるときに利用できる）
⑮	
⑯	
⑰	
⑱	ネスティングの確認画面を表示する
⑳	パラメータの設定を行うテーブル

表 7 メイン画面の設定項目（拡散モデル）

番号	説明
①	メイン画面を切り替える
②	気象モデルの出力ファイルの読み込み
③	気象モデルの解析モードが表示される
④	使用するドメインを選択する
⑤	以前に作成した入力ファイルを開く
⑥	気象モデルの出力ファイルを確認する
⑦	入力ファイルのプレビューを表示する
⑧	設定を入力ファイルに反映する
⑨	入力ファイルを保存する
⑩	解析の開始時刻を設定する
⑪	解析の終了時刻を設定する
⑫	粒子の放出開始時刻を設定する
⑬	粒子の放出終了時刻を設定する
⑭	計算の出力時間間隔を設定する
⑮	放出する粒子数を設定する
⑯	時間刻みに対する安全係数を設定する
⑰	時間刻みの分割数を設定する
⑱	格子点サイズ以下の地形効果の設定
⑲	大気境界層の乱れの効果を設定する
⑳	デバックレベルを設定する
㉑	解析領域の緯度・経度を設定する
㉒	
㉓	
㉔	
㉕	解析領域の経度方向分割数を設定する
㉖	解析領域の緯度方向分割数を設定する
㉗	粒子の放出点の緯度・経度を設定する
㉘	
㉙	粒子の放出点の高さの設定（上限値）
㉚	粒子の放出点の高さの設定（下限値）
㉛	垂直（鉛直）方向の分割数を設定する
㉜	放出率の設定テンプレートを出力する
㉝	テンプレートの CSV ファイルを読む

また、Linux 環境のコマンド操作に不慣れなユーザーでも容易に解析を実行できるように対話式のコマンド群が用意されている。対話式のコマンド群を順次実行することで、前処理から解析の

実行と後処理を step by step (ユーザーは主に yes/no を選択するだけで良い)にできる仕組みとなっている。さらにジョブスケジューラに対応したバッチ処理スクリプトを自動生成する機能、計算のログを表示する機能やデータ確認用の簡易ビューアなども備えている。

6. 可視化

Advance/Emerg は後処理として、気象モデルのシミュレーション結果と拡散モデルのシミュレーション結果から可視化用のデータを出力する機能を有している。出力データは NetCDF 形式であるため、NetCDF 形式に対応した可視化ソフトウェアを利用することができる。例えば、米国 Unidata プロジェクトにより開発された IDV (Integrated Data Viewer) などがある。

7. 利用上の注意点

本ソフトウェア・システムは、当社が権利を保有もしくは権利許諾を受けているソフトウェアに加えて、GNU General Public License (GPL) および GNU LESSER General Public License (LGPL) を含むライセンス条件の下で提供されているオープンソースソフトウェアを含んでいる。オープンソースソフトウェアに関しては、オープンソースソフトウェアのライセンスを遵守することが求められる。

また、気象予報の業務を行うことを目的に本ソフトウェア・システムを使用することは想定されておらず、気象庁以外の事業者が天気や波浪等の予報業務を行う場合は、気象業務法第 17 条の規定により、気象庁長官の許可を受けなければならない。

参考文献

- [1] Laura Bianco “The Weather Research & Forecasting Model”
<http://cires1.colorado.edu/science/groups/pi>

elke/classes/at7500/Bianco_PresentationWRF.pdf

- [2] https://www.openwfm.org/wiki/How_to_interpret_WRF_variables
 [3] <http://flexrisk.boku.ac.at>
 [4] Yasunari et al. “Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident”, PNAS, 108, no.49, 19531, 2011
 [5] Brioude et al. “The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART-WRF version 3.1”, Geosci. Model Dev., 6, 1889-1904, 2013
 [6] ICRP, “ICRP Publication 71”, ICRP, 1995

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)