

大気拡散影響予測システム Advance/Emerg の解析事例

山下 貴志* 高橋 邦生*

Analysis Cases of Prediction Software System for Atmospheric Dispersion Influence: Advance/Emerg

Takashi Yamashita* and Kunio Takahashi*

アドバンスソフト株式会社では、大気拡散物質の挙動予測と影響評価のためのソフトウェア・システム「Advance/Emerg」をリリースしている。本ソフトウェアは、迅速に気象を予測し、大気中に放出される化学物質等の挙動を地球規模も含めた広範な空間スケールで解析し、その影響を予測する機能を有する。本稿では、Advance/Emerg の解析事例として、① 放射性物質 (領域解析)、② 放射性物質 (全球解析)、および、③ スギ花粉 (領域解析) の 3 つの事例を紹介する。

Keywords: 気象モデル, 拡散モデル, 領域解析, 全球解析, 放射性物質, Cs-137, スギ花粉

1. はじめに

大気拡散影響予測システム Advance/Emerg は、大気中に放出された粒子状物質等の拡散・沈着過程を計算し、その影響を予測するためのシミュレーション・ソフトウェアである。本稿では、Advance/Emerg を用いた解析事例として、以下の 3 つの事例を取り上げる。

- 事例 1 : 放射性物質 (領域解析)
- 事例 2 : 放射性物質 (全球解析)
- 事例 3 : スギ花粉粒 (領域解析)

事例 1 と事例 2 では、福島第一原発事故によって放出されたセシウム 137 (Cs-137) の拡散・沈着を、それぞれ東日本領域と全球領域を対象として計算した。また、事例 3 では、東京周辺の 6 カ所の地域からのスギ花粉放出を仮定し、それぞれの放出源から放出されるスギ花粉の飛散量 (地表面沈着量) を計算した。本解析事例では、これらの解析方法とその結果について紹介する。

なお、Advance/Emerg の機能や計算モデル等

* 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

の詳細については、本稿では取り上げない。Advance/Emerg の気象モデルや拡散モデルなどの詳細については、別稿の解説記事を参照されたい。

2. 事例 1 : 放射性物質 (領域解析)

1 つ目の解析事例として、2011 年 03 月に発生した東日本大震災における福島第一原発からの放射性物質の放出・拡散に関する、東北地方から関東地方までを含む東日本地域を対象とした領域解析を紹介する。

2.1. 解析条件

図 1 に、本解析の解析領域を示す。気象モデルでは、日本全体をカバーする親領域と、東北地方から関東地方をカバーする子領域の 2 つの領域を設定し、1 段階のネスティング計算を行った。気象モデルの実行に必要な気象データには、米国国立環境予測センター (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) が公開している再解析データ (NCEP-FNL) を使用し、解析期間は 2011 年 03 月 10 日 00 時 (UTC) から 2011 年 04 月 01 日 00 時 (UTC) とした。気象モデルの実行後、計算した子領域の気象場を対象に拡散モデルを実行

して放射性物質の拡散・沈着過程を計算し、放射性物質の大気中濃度分布および地表面沈着量分布を求めた。

本解析では、放射性物質の放出源は福島第一原発発電所に設定した。また、放射性物質として粒子状の Cs-137 を仮定した。Cs-137 の放出期間や放出量については、文献[1]で報告されている値をもとに、1時間あたりの放出量 (Bq/h) に換算して設定した。

気象モデルおよび拡散モデルの実行には、弊社社内の計算機サーバ (Linux) を使用した。各モデルで使用した計算リソースおよび計算に掛かった時間は、表 1 および表 2 の通りである。

拡散モデルの実行後、NetCDF 形式で出力された解析データを米国 Unidata プロジェクトによって開発された気象・地球科学データの可視化ソフトウェア IDV (Integrated Data Viewer) を用いて Windows 端末上で可視化した。

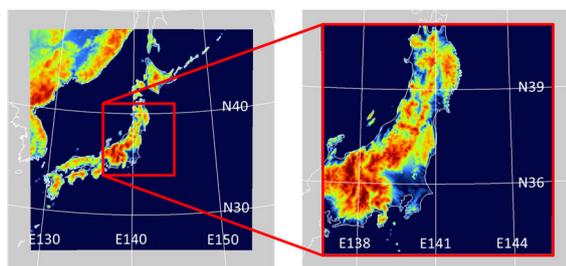


図 1 モデル

表 1 Cs-137 (領域解析) の計算条件 (気象モデル)

項目	設定
解析期間 (UTC)	2011-03-10 00:00 - 2011-04-01 00:00
使用気象データ	NCEP-FNL (水平解像度: 1度×1度)
ネスティング	1段階
水平方向の解像度	親領域: 10.0 km × 10.0 km
	ネスト領域: 2.5 km × 2.5 km
水平方向の分割数	親領域: 240 × 240
	ネスト領域: 320 × 320
鉛直方向の分割数	41
計算リソース	Xeon E5-2650 v4 @ 2.20GHz, 12 並列
計算時間	約 91 時間

表 2 Cs-137 (領域解析) の計算条件 (拡散モデル)

項目	設定
解析期間 (UTC)	2011-03-11 18:00 - 2011-04-01 00:00
放出期間 (UTC)	2011-03-11 20:00 - 2011-04-01 00:00
水平方向の解像度	2.5 km × 2.5 km
水平方向の分割数	320 × 320
放出源	北緯 37.421 度, 東経 141.028 度, 高さ 20m
放出核種	Cs-137 (粒子状、粒径 0.4 μm)
放出量	1.4 × 10 ¹⁶ Bq
放出分布	Katata et al., 2015 [1]
計算粒子数	1 × 10 ⁸
計算リソース	Xeon E5-2650 v4 @ 2.20GHz, 12 並列
計算時間	約 19 時間

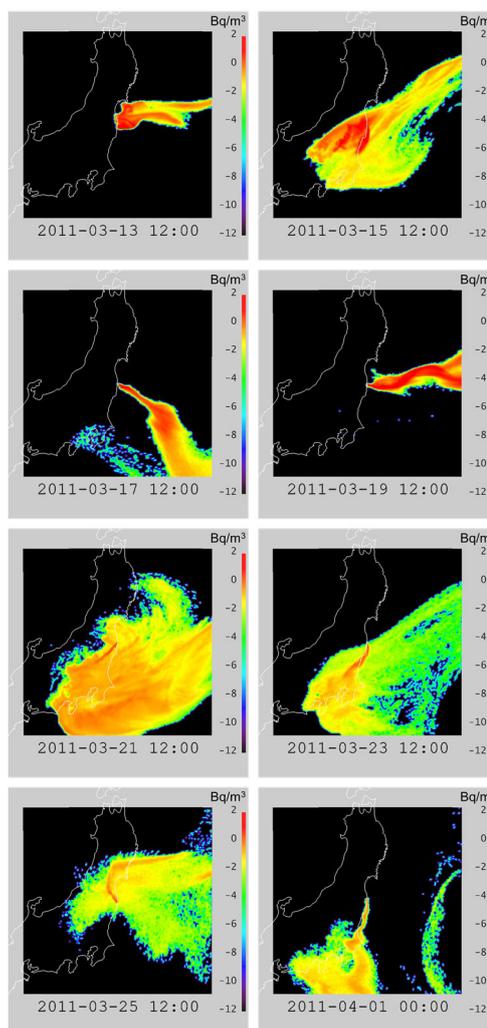


図 2 Cs-137 の大気中濃度分布 (領域解析)

2.2. 結果

Cs-137 の大気中濃度分布および地表面沈着量分布の解析結果を図 2 および図 3 に示す。計算の結果、放射性物質の放出初期は太平洋に向けて Cs-137 が拡散していたものの、2011 年 03 月 15 日頃や 21 日頃など、数度にわたって関東地方の方向に向かって Cs-137 が拡散していき、東京を含む首都圏においても Cs-137 が沈着していく結果となった。計算結果のうち、2019 年 04 月 01 日 00:00 時点における東京近辺の地表面沈着量計算結果に着目すると、航空機を用いた観測値として報告されている値よりも高い傾向となっている[2]。これは、ひとつには航空機による観測が雨によるクリアランスが行われた 04 月 01 時点での値であるのに対して、本解析では一度沈着した粒子が地表面から再飛散あるいは流出しないという過程で計算したものであるという違いによると考えられる。

3. 事例 2 : 放射性物質 (全球解析)

2 つ目の解析事例として、2011 年 03 月に発生した東日本大震災における福島第一原発からの放射性物質の放出・拡散に関する、地球全体を対象とした全球解析を紹介する。

3.1. 解析条件

本解析の対象領域を図 4 に、気象モデルおよび拡散モデルの計算条件を表 3 および表 4 に示す。気象モデルの実行に使用する気象データや放出する Cs-137 の形態、各モデルの実行に使用した計算リソースなどについては、事例 1 の領域計算と同様である。事例 1 の領域計算と異なる点として、本解析では気象モデル・拡散モデルともにネスティングは行わず、全球を対象とした領域 1 つのみを設定して計算を行った。それぞれのモデルの解析期間は、気象モデルは 2011 年 03 月 10 日 00 時(UTC)から 2011 年 05 月 01 日 00 時(UTC)まで、拡散モデルは 2011 年 03 月 11 日 18 時(UTC)から 2011 年 05 月 01 日 00 時(UTC)までとした。Cs-137 の放出分布については、事例 1 と同様に、文献[1]の値を用いた。

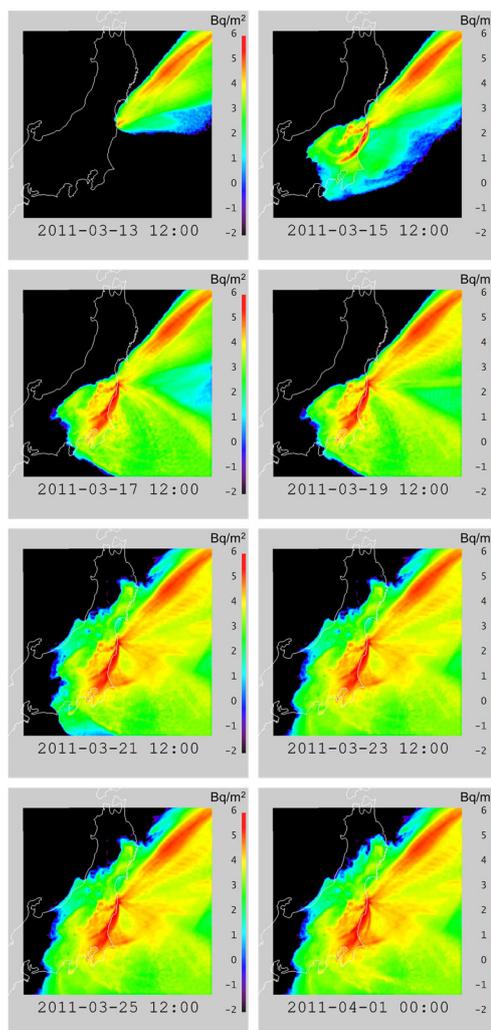


図 3 Cs-137 の沈着量分布 (領域解析)

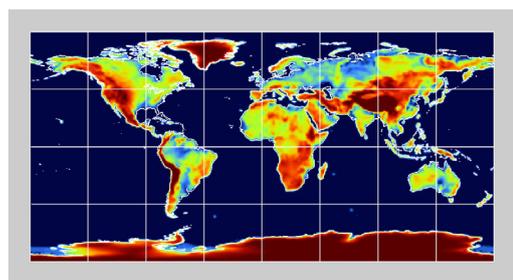


図 4 Cs-137 (全球解析) の計算領域

3.2. 結果

Cs-137 (全球解析) の大気中放射能濃度分布および地表面沈着量分布を図 5 および図 6 に示す。計算の結果、事例 1 の Cs-137 (領域解析) の解析終了時刻である 2011 年 04 月 01 日の段階で、地球を経度方向に循環した Cs-137 が日本に戻ってきていることが分かる。ただし、その大気中放射

能濃度および地表面沈着量の値は小さく、福島第一原発を中心とする東日本領域における Cs-137 沈着量への寄与のほとんどは福島第一原発から直接飛散してきたものによると考えられる。本解析の結果については、報告されている Cs-137 の大気中放射能濃度分布および地表面沈着量分布のシミュレーション結果と定性的に一致している[3]。

表 3 Cs-137 (全球解析) の計算条件 (気象モデル)

項目	設定
解析期間 (UTC)	2011-03-10 00:00
	2011-05-01 00:00
使用気象データ	NCEP-FNL (水平解像度: 1 度 × 1 度)
ネスティング	なし
水平方向の解像度	1 度 × 1 度 (111 km × 111 km)
水平方向の分割数	360 × 180
鉛直方向の分割数	41
計算リソース	Xeon E5-2650 v4 @ 2.20GHz, 12 並列
計算時間	約 41 時間

表 4 Cs-137 (全球解析) の計算条件 (拡散モデル)

項目	設定
解析期間 (UTC)	2011-03-11 18:00
	2011-05-01 00:00
放出期間 (UTC)	2011-03-11 20:00
	2011-05-01 00:00
水平方向の解像度	1 度 × 1 度 (111 km × 111 km)
水平方向の分割数	360 × 180
放出源	北緯 37.421 度, 東経 141.028 度, 高さ 20m
放出核種	Cs-137 (粒子状、粒径 0.4 μm)
放出量	1.5×10^{16} Bq
放出分布	Katata et al., 2015 [1]
計算粒子数	1×10^8
計算リソース	Xeon E5-2650 v4 @ 2.20GHz, 12 並列
計算時間	約 24 時間

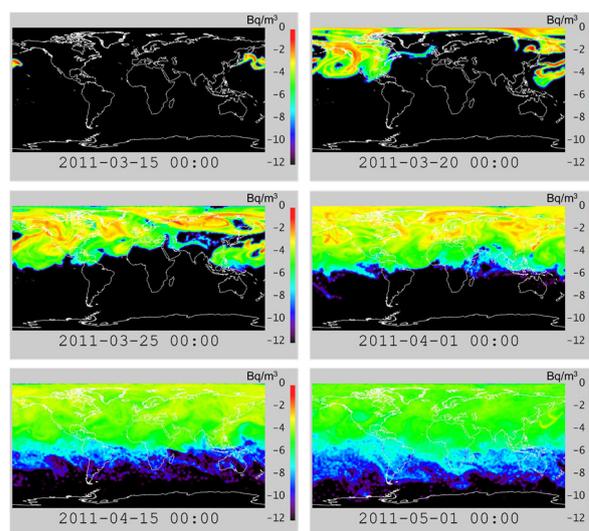


図 5 Cs-137 の大気中濃度分布 (全球解析)

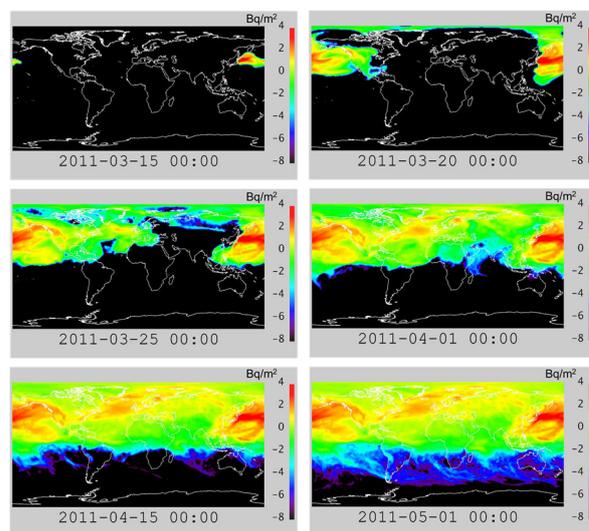


図 6 Cs-137 の沈着量分布 (全球解析)

4. 事例 3 : スギ花粉 (領域解析)

3 つ目の解析事例として、スギ花粉の飛散量(地表面沈着量)解析を紹介する。本解析では、東京周辺の 6 か所にスギ花粉の放出源を設定し、それぞれの放出源からのスギ花粉の拡散と沈着過程を計算することで、2019 年春の東京都千代田区におけるスギ花粉飛散量に対する放出源ごとの寄与の大きさを比較した。

4.1. 解析条件

本解析における解析領域を図 7 に、気象モデル

および拡散モデルの計算条件を表 5 および表 6 に示す。気象モデルでは、東京を中心とした東日本領域を対象とした親領域と、同じく東京を中心とした関東地方を対象とした子領域の 2 つの領域を設定し、1 段階のネスティング計算を行った。各モデルの解析期間は、気象モデルは 2019 年 02 月 13 日 00 時 (UTC) から 2019 年 05 月 15 日 00 時 (UTC) まで、拡散モデルは 2019 年 03 月 14 日 00 時 (UTC) から 2019 年 05 月 15 日 00 時 (UTC) までとした。

本解析では、スギ花粉の放出源として、東京周辺の 6 か所に 30km × 30km の正方形の放出源を設定した。放出されるスギ花粉は、直径 33μm、質量 12ng の粒子として扱った。また、各放出源からのスギ花粉放出量 (総生産量) は、以下のように求めた。まず、単位面積当たりのスギ林で 1 年 (1 季節) あたりに生産される雄花数を文献[4]の値 (平均値) から、

$$N_{F.F.} = 8,000 \text{ [個/m}^2\text{]},$$

雄花 1 個あたりに含まれる花粉粒の数を文献[5]から、

$$N_G = 396,000 \text{ [個]},$$

とした。ここで、些か大雑把ではあるが、各放出源におけるスギ林の割合を 0.5 であるとする、各放出源から放出されるスギ花粉の総量は、

$$\begin{aligned} N_{\text{Total}} &= N_{F.F.} \times N_G \times \text{面積} \times \text{スギ比率} \\ &= 8,000 \times 396,000 \times 30,000^2 \times 0.5 \\ &= 1.4 \times 10^{18} \text{ [個]} \end{aligned}$$

となる。上式で求めたスギ花粉総放出量をもとに、放出量の経時変化がガウス分布に従うと仮定してスギ花粉の放出量を設定し、拡散・沈着を計算した。

上記の仮定は、実際の関東地方におけるスギ林の分布を正確に再現するものではないが、ここでは各放出源からの放出量を同量として計算することで、特定の地点における飛散量 (単位面積当たりの沈着量) に対する放出源ごとの寄与を評価することに主眼を置いた。

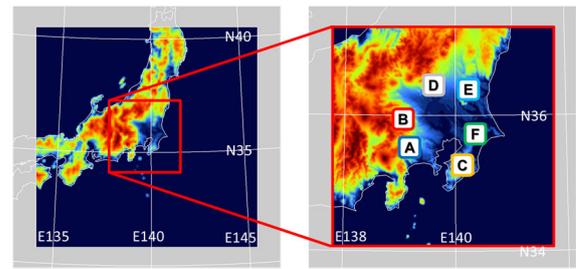


図 7 モデル

表 5 スギ花粉の計算条件 (気象モデル)

項目	設定
解析期間 (UTC)	2019-02-13 00:00 - 2019-05-15 00:00
使用気象データ	NCEP-FNL (水平解像度: 1 度 × 1 度)
ネスティング	1 段階
水平方向の解像度	親領域: 6.0 km × 6.0 km
	ネスト領域: 1.5 km × 1.5 km
水平方向の分割数	親領域: 180 × 180
	ネスト領域: 240 × 240
鉛直方向の分割数	41
計算リソース	Xeon E5-2650 v4 @ 2.20GHz, 12 並列
計算時間	約 198 時間

表 6 スギ花粉の計算条件 (拡散モデル)

項目	設定
解析期間 (UTC)	2019-02-14 00:00 - 2019-05-15 00:00
放出期間 (UTC)	2019-02-14 00:00 - 2019-05-15 00:00
水平方向の解像度	1.5 km × 1.5 km
水平方向の分割数	240 × 240
放出源	東京周辺 6 か所 (30km × 30km の平面)
放出物質	スギ花粉 (粒径 32 μm、質量 12ng)
放出量	(1.4 × 10 ¹⁸ 個) × 6
計算粒子数	(1 × 10 ⁷) × 6
計算リソース	Xeon E5-2650 v4 @ 2.20GHz, 12 並列
計算時間	約 21 時間

4.2. 結果

図 8 に、スギ花粉飛散量 (地表面沈着量) の計算結果を示す。また、図 9 および図 10 に、千代田

区における1日当たりのスギ花粉飛散量およびその積算値を示す。

本解析では、一度沈着したスギ花粉の再飛散やクリアランス（降雨などによる地表面からの除去）は考慮していない。したがって、図8の結果は、解析開始から終了までの間に各点に沈着したスギ花粉の総量を表している。

計算の結果、各放出源から放出されたスギ花粉によって、千代田区周辺の東京都心部における沈着量は日を追うごとに増加した。しかし、各放出源から放出されたスギ花粉の多くは、放出源内あるいはその周辺で沈着しており、放出源から離れた地域へ拡散する割合が少ない。これは、スギ花粉の質量が約12ngと比較的重いため、重力沈降による沈着の寄与が大きく、比較的遠くまで飛散しないためであると考えられる。

図11に放出源ごとのスギ花粉飛散量の解析結果、図12に放出源ごとの東京都千代田区における飛散量への寄与の計算結果を示す。放出源ごとのスギ花粉飛散量に対する寄与の大きさを東京

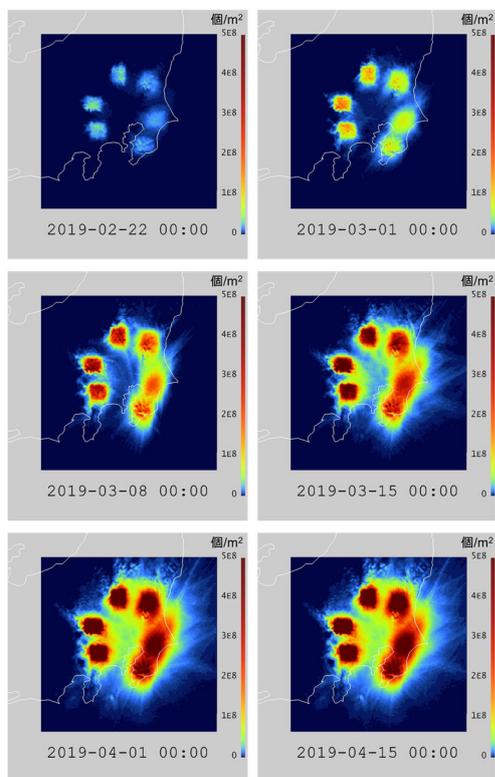


図8 スギ花粉飛散量（地表面沈着量）の計算結果

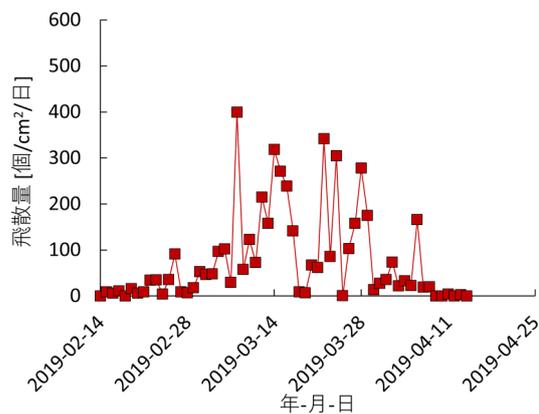


図9 千代田区におけるスギ花粉飛散量（1日当たり）の計算結果

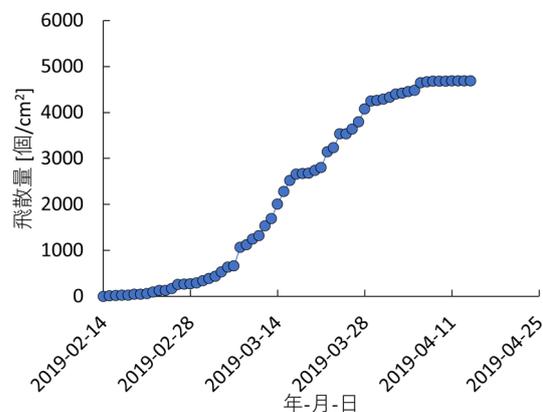


図10 千代田区におけるスギ花粉飛散量（積算値）の計算結果（積算値）

都千代田区の地点で比較すると、F部、すなわち千葉県北部付近からの寄与が最も大きいという結果となった。本解析事例では、スギ花粉の放出については簡単な仮定を行い、実際のスギ林分布に関わらず各放出源から放出されるスギ花粉の分量は同量であるという大雑把な仮定を課した。また、F部における実際のスギ林の面積比率は、その他のA・E部と比較して低いと考えられる。そのため、本解析における各放出源からのスギ花粉飛散量の絶対値に大きな意味はない。しかしながら、各放出源から同量のスギ花粉を放出させた場合にF部からの寄与が最も大きいという結果は、千葉県北部付近から放出されるスギ花粉の影響が都心部に対して無視しえない影響を及ぼしていることを示唆している。

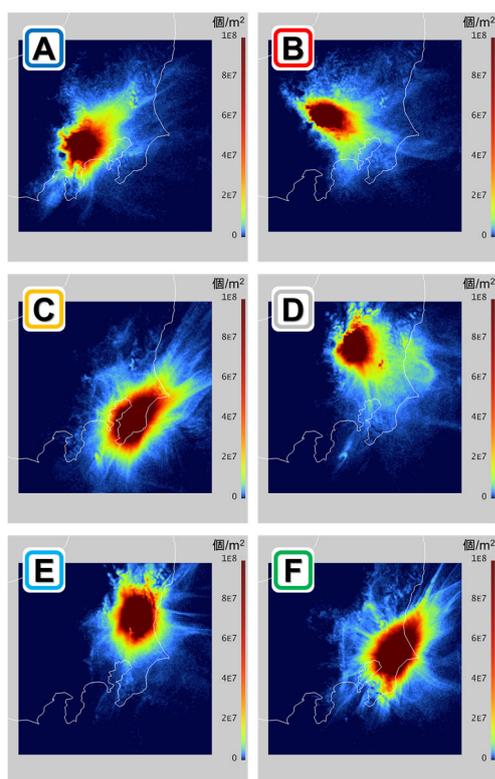


図 11 放出源ごとのスギ花粉飛散量の計算結果
(2019-04-15 00:00 時点)

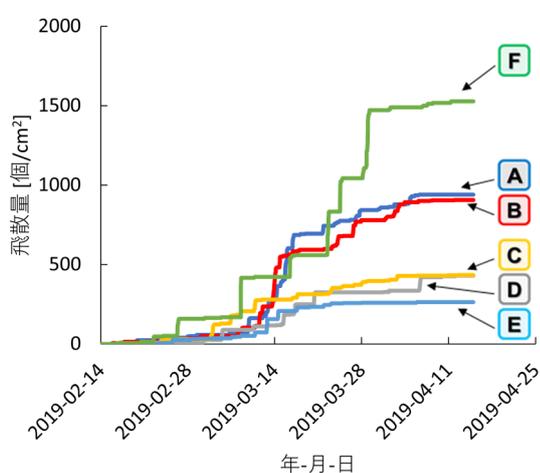


図 12 千代田区におけるスギ花粉飛散量に
対する放出源ごとの寄与の計算結果

本解析事例では、スギ花粉の放出源や放出量に簡単な仮定を課して計算しており、現実におけるスギ花粉の飛散量を詳細にシミュレーションすることを目的とはしていない。しかし、千代田区におけるスギ花粉飛散量の解析結果は、実は実際の観測結果とよく一致する傾向が得られている。

興味のある方は、自治体などが公表しているスギ花粉沈着量の観測結果と本解析結果を見比べてみていただきたい。

5. まとめ

大気拡散影響予測システム Advance/Emerg を用いた解析事例として、Cs-137 とスギ花粉を対象とした事例を紹介した。本解析事例では、簡易な解析を行うことを目的として、気象モデルの実行には NCEP が公開している水平方向解像度 1 度 × 1 度 (約 100km × 100km) の再解析データを使用した。気象場を予測する場合、気象現象が有するカオス的な振る舞いに起因する不確実性とその影響について十分に考慮する必要があり、また、気象データの解像度以下のスケールの局所的な気象については風速や風向などの舞いを正確に再現できない可能性があることにご留意いただきたい。

本ソフトウェアの拡張機能のひとつに、アドバンスソフト株式会社が独自に開発した被ばく線量評価モデル AE-RADOM (Advance/Emerg RAdiation DOse Model) がある。このモデルでは、拡散モデルで求めた放射性物質の大気中濃度分布および地表面沈着量分布から、地表面における被ばく線量を評価する機能を備えている。この機能を用いることで、放出源から飛散した放射性物質が一般公衆に与える被ばく線量の影響評価などが可能である。しかしながら、本解析事例は、福島第一原発事故に伴う被ばく線量に関する情報を提供することを目的としてはいないため、被ばく線量の解析結果についてはここでは取り上げなかった。被ばく線量評価にご興味ある方は、当社までお問い合わせいただきたい。

参考文献

- [1] Katata et al., “Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic

- dispersion model”, Atmospheric Chemistry and Physics, 15, 1029-1070, 2015.
- [2] Yumimoto et al., “Inverse modeling of the ^{137}Cs source term of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident constrained by a deposition map monitored by aircraft”, Journal of Environmental Radioactivity, 164, 1-12, 2016.
- [3] Marzo et al., “Atmospheric transport and deposition of radionuclides released after the Fukushima Dai-chi accident and resulting effective dose”, Atmospheric Environment 94, 709-722, 2014.
- [4] 齊藤秀樹、「林学からみたスギ花粉症：森林の花粉生産を中心に」、耳鼻咽喉科臨床、捕冊 76, 6-19, 1995.
- [5] 幾瀬マサ、「葯中の花粉粒並びに大きさについて」、第四紀研究、1965年4巻3-4号, 144-149, 1965.

※ 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。）