

放射性物質の大気中における輸送・沈着のシミュレーション

独立行政法人国立環境研究所 大原利眞、森野悠、田中敦

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災によって発生した、東京電力福島第一原子力発電所（以下、福島原発）の事故によって大量の放射性物質が大気中に放出され、福島県だけでなく、宮城県、関東1都6県、静岡県などの広い範囲で、土壌、水道水、農産物、畜産物、上下水道汚泥など様々な環境汚染を引き起こしている。大気中に放出された放射性物質は、風によって風下に運ばれながら（移流）、風の乱れによって水平・鉛直方向に広がる（拡散）。大気中を輸送される過程において、放射性物質は放射性崩壊して徐々に減衰するとともに、大気中でガスと粒子の両方の状態で存在しうるヨウ素 131 のような物質の場合には、ガスになったり粒子になったりする。大気中の放射性物質は、最終的に、風の乱れ等による乾性沈着、もしくは、降水に取り込まれることによる湿性沈着によって大気中から除去され、地表面に負荷される。このようにして大気から地上に落ちた放射性物質のうち、半減期が長い放射性セシウム（セシウム 134 とセシウム 137）が私達の生活と周りの環境に大きな影響を及ぼしている。本講演では、福島原発から放出された放射性物質の大気中の挙動に関するシミュレーション結果について報告する。

2. 放射性物質の大気中の広がり と 筑波での測定結果

風が一定方向に吹いている場合には、放射性物質はブルーム（羽毛）状に大気中を輸送される。これが、いわゆる放射性ブルームである。しかし、風が時空間的に一定・一様に吹くことは少なく、地形や地表面状態、海陸風や山谷風などの局地風、高低気圧などの影響を受けて複雑に変化する。福島原発周辺でも、低気圧の通過、西側にある山岳や局地風の影響を受けて、放射性物質は大気中を複雑に移流・拡散したと考えられる。放射性物質は、大気中を運ばれる過程において、乾性・湿性沈着によって大気中から除去されるが、一般的に、大気中の粒子は乾性沈着しにくく、湿性沈着しやすい性質がある。このため、大気中で粒子として存在している放射性セシウムは、乾性沈着よりも湿性沈着によって大気中から除去されやすく、その大気濃度が高い所で雨・雪が降り始めた場合に、沈着量が多い地域（いわゆる「ホットスポット」）が出現する。一方、ヨウ素 131 は乾性沈着しやすいため、放射性セシウムに比べると降水による影響は少ない。

筑波の高エネルギー加速器研究開発機構と国立環境研究所は、事故直後から空間線量と大気中の放射性核種を測定し、分析結果をホームページで公開している^{1,2)}。図1は、3月14日から一ヶ月間の空間線量の時間変化（図1(a)）、ヨウ素 131 とセシウム 137 の大気濃度の時間変化（図1(b)）、及び大気中放射性核種の構成比（図1(c)）を示す。空間線量（図1(a)）^{3,4)}には、3月15日と16日の午前中の鋭いピーク、3月21～22日の上昇とその後の緩やかな減少が認められる。このような線量の上昇時には、ヨウ素 131 とセシウム 137 の大気濃度も上昇している（図1(b)）ことから、放射性ブルームが通

過したことによる影響が大きかったと考えられる。4月上旬までのヨウ素 131 とセシウム 137 の大気濃度の特徴は大きく異なり、ヨウ素 131 に比べてセシウム 137 の時間変動は大きく、また、濃度レベルは低い。しかし、4月中旬以降には、時間変動も濃度レベルもともに両核種間の違いが小さくなる。このような違いを生じる原因には、福島原発内の放出源の違いや、ヨウ素 131 とセシウム 137 の物性／沈着過程の違いを反映している可能性が考えられるが、今後解明すべき課題である。ヨウ素 131 とセシウム 137 の濃度比だけでなく、その他の放射性核種も含めて、構成比は時間的に大きく変化する（図 1(c)）。3月15日にヨウ素 131 とテルル 132 が多く、両者で8割程度を占めるが、放射性セシウムやテルル 129m の割合も比較的多い。それに対して、3月16日にはヨウ素 131 が多くて8~9割を占め、放射性セシウムは少ない。一方、3月20-22日には、ヨウ素 131 が半分、テルル 132 が1割程度であり、放射性セシウムが3割程度を占める。また、図には示さないが、線量の時間変化が少ない（即ち、放射性物質の大気濃度が低い）期間にはヨウ素 131 が9割以上を占め、その他の核種の存在量は非常に少ないことが特徴的である。

筑波では、大気中の放射性核種の粒径分布も測定している。図 2 は、4月4~11日に、12段のインパクターと活性炭繊維フィルターのセットで測定された粒径分布を示す。この結果によれば、ヨウ素 131 のほとんどはガス状であるが一部は微小粒子として存在していること、放射性セシウムは数ミクロンの粒子として存在していることがわかる。

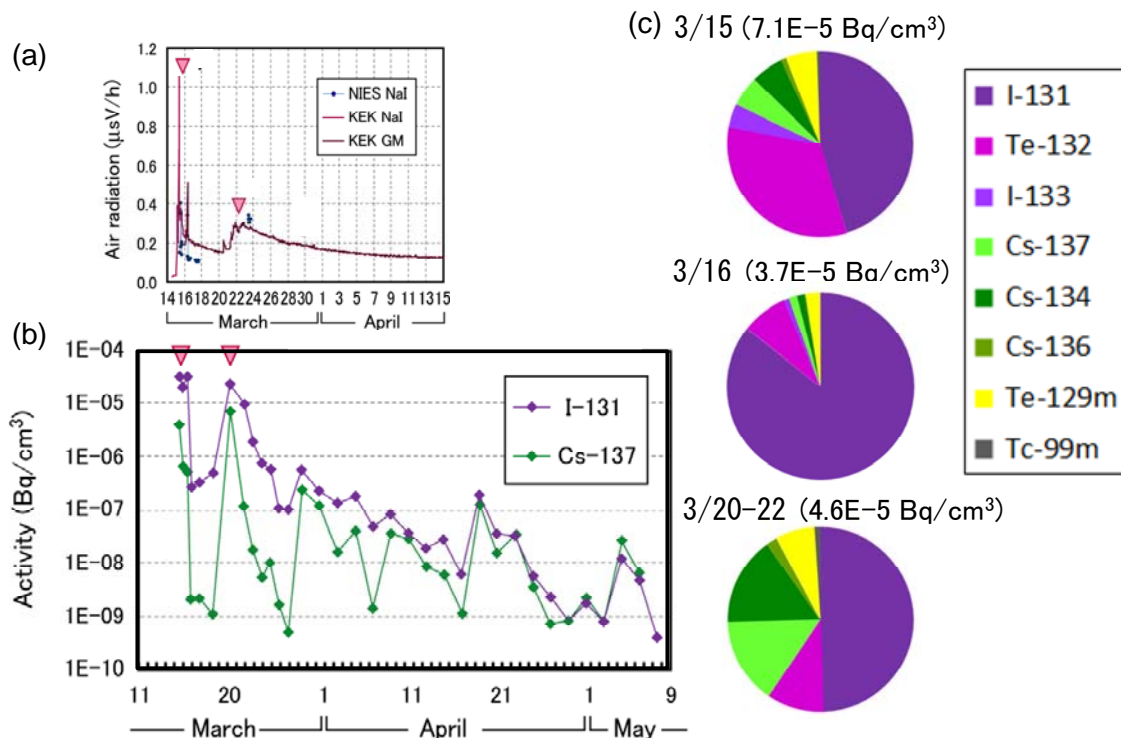


図 1 筑波で測定された空間線量の時間変化 (図 (a))、ヨウ素 131 とセシウム 137 の大気濃度の時間変化 (図 (b))、及び大気中放射性核種の構成比 (図 (c))。

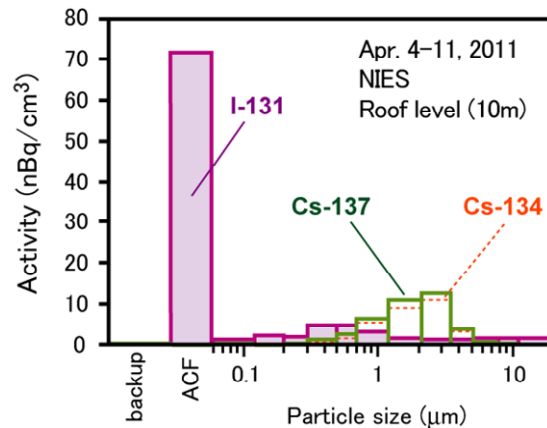


図2 筑波で測定された大気中放射性核種の粒径分布。

3. 放射性物質の広域シミュレーション

このような放射性物質の複雑な挙動を把握するためには、大気シミュレーションが有効である。本章では、化学輸送モデルを用いて放射性物質の広域的な挙動を解析した結果⁵⁾について紹介する。

使用したモデルは、米国・環境保護局で開発された大気質モデル CMAQ (Community Multi-scale Air Quality model) である。グリッドは 3km、計算対象領域は関東・南東北地方を含む東西 700km×南北 700km、計算対象物質はヨウ素 131 とセシウム 137 であり、ヨウ素 131 はガス 80%と粒子 20%、セシウム 137 は全て粒子として大気中に存在すると仮定した。CMAQ で使用する気象データは、気象庁の数値気象データをもとに地域気象モデルを使用して計算した。また、放出量データには、日本原子力研究開発機構による推計結果^{6,7)}を使用した。モデルの結果を検証するために、文部科学省が実施した定時降下物モニタリングデータや航空機モニタリングデータなどと比較し、観測された降下量(沈着量)の時空間変化やレベルを、モデルがほぼ再現していることを確認した。しかし、放出条件、気象(風と降水など)、沈着モデルなどの不確実性が大きいことに注意する必要がある。

モデルによって計算されたセシウム 137 の 3 月 11 日～3 月 29 日における地上付近の大気濃度(期間平均値)と積算沈着量の地域分布を図 3 に示す。図 3 によると、放射性物質の影響は福島県以外に、宮城県や山形県、関東 1 都 6 県、静岡県、山梨県、長野県、新潟県など広域に及んでいることがわかる。前述したように、セシウム 137 は湿性沈着の影響が大きいため、その沈着量は大気濃度と降水量の両方に依存し、大気濃度が高い降水域で沈着量が増大する。このことを反映して、原発周辺だけでなく、風によって放射性物質が輸送され、且つ、降水があった福島県東部、宮城県南部、関東北部・西部などの地域で沈着量が多いホットスポットが計算されている。このような地域分布の特徴は、文部科学省が実施した航空機モニタリングの測定結果⁸⁾と良く一致している(図 4)。

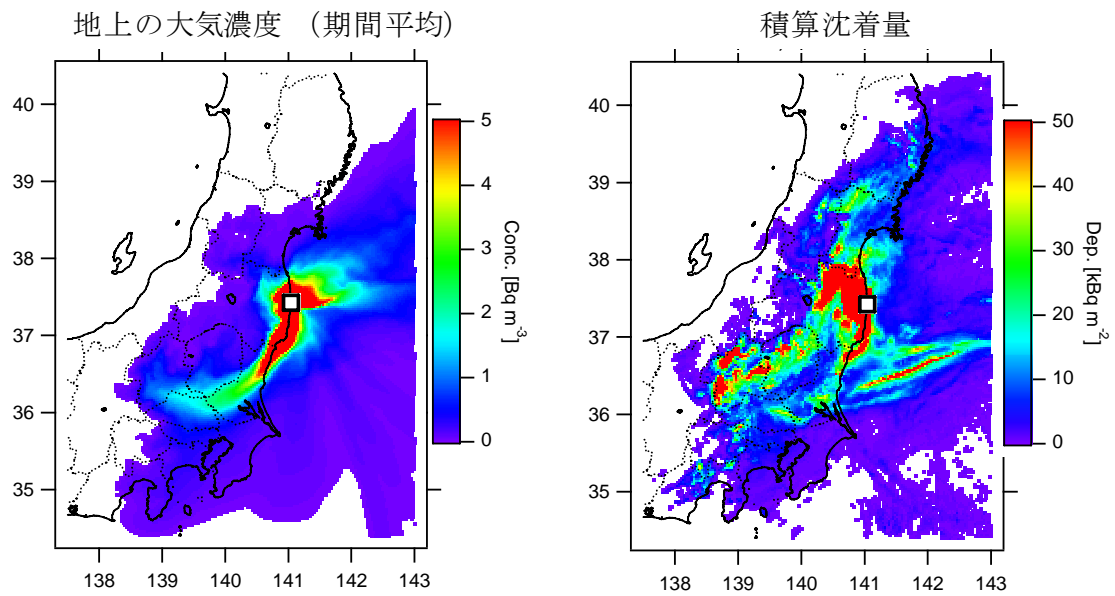


図3 3月11-29日におけるセシウム137の大気濃度（地上近くの平均濃度）と積算沈着量の地域分布。

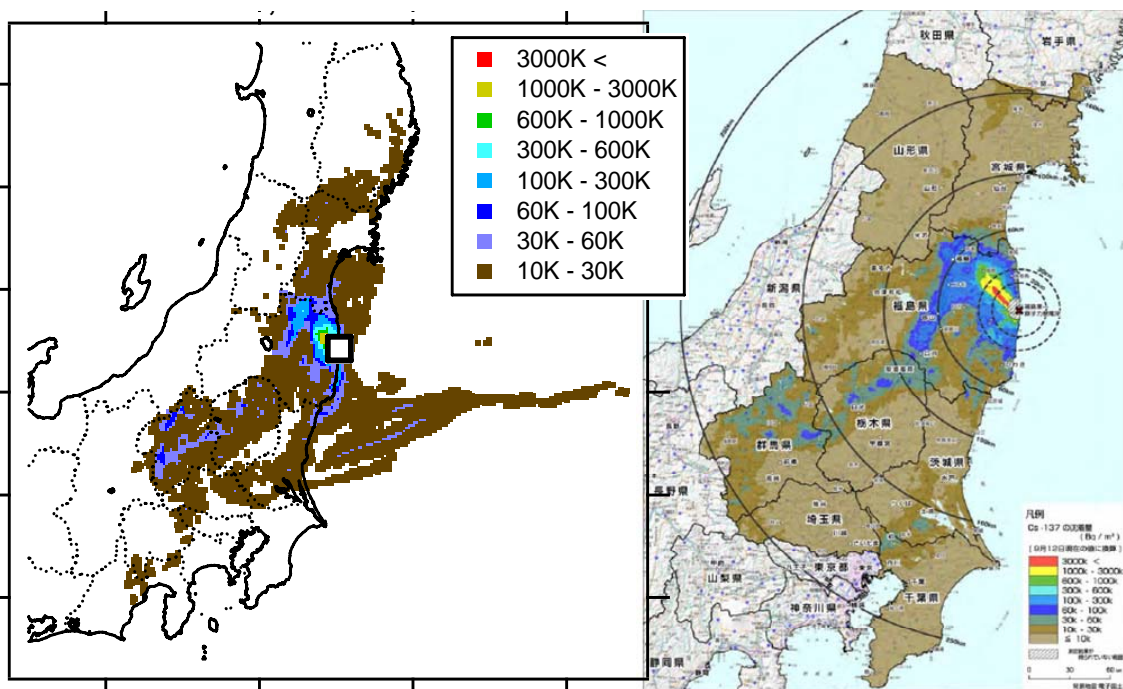


図4 セシウム137積算沈着量のモデル計算結果（左）と文部科学省の航空機モニタリング結果（右）。単位は Bq/m^2 で、カラースケールは両図で同じである。

それでは、放射性物質は、いつ東日本に沈着したのか？図5はセシウム137の都県別の沈着量と大気濃度の時間変化を示す。モデル結果によると、沈着したのは3月15日～16日と3月21日以降の数日の2期間で集中している。即ち、福島原発周辺において、高濃度の放射性プルームが通過し、更に、その通過と降水帯のタイミングが合った2期間に、大量の放射性物質が沈着したと考えられる。また、大気中に放出されたセシウム137のうち、28%がモデル領域内の陸上に沈着したこと、それ以外は海上に沈着したかモデル領域外（ほとんどが太平洋上）に流出したこと、湿性沈着が支配的で乾性沈着は少なかったことなどが明らかとなった。

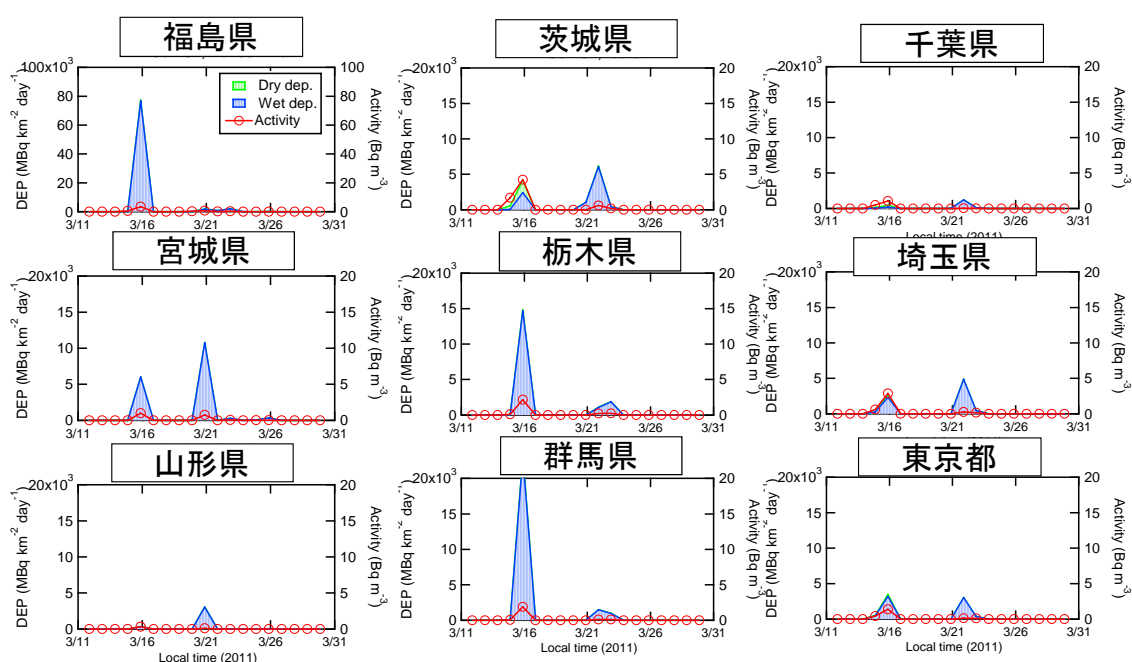


図5 セシウム137の都県別の沈着量と大気濃度の時間変化。緑色：乾性沈着量、青色：湿性沈着量、赤色：地上の大気濃度。

4. おわりに

現在、文部科学省や学術研究機関などによって放射性物質の測定が進められ、放射能汚染の実態が把握されつつある。また、シミュレーションによって、放射性物質の大気中での挙動や地表面に沈着したメカニズムが明らかになってきた。しかし、様々なデータを統合して、広域的な汚染マップを作成すること、土壌・水・生物・生態系といった様々な環境媒体での放射性物質の蓄積量・移行経路・移行量（即ち、ストック・ルート・フロー）を把握・予測すること、その前提となる放出量の不確かさを小さくすること、といった汚染の全容を把握するための取組みがまだまだ不足している。放射能汚染が非常に深刻な環境問題・社会問題になっていることを踏まえると、測定とモデルによる調査・研究を更に強力に推進し、また、原子力分野、環境分野、影響分野などの研究者間の連携

を強め、更には、関係する研究機関や行政機関、事業者、一般市民の協働によって、放射能汚染の全容解明と汚染低減に向けた取組みを加速する必要がある。

参考文献

- 1) 高エネルギー加速器研究機構. つくば (KEK) の放射性線量.
http://rcwww.kek.jp/norm/official_data/all_60min.dat
- 2) 高エネルギー加速器研究機構. 環境放射線の測定結果 (1)つくば市で観測された空气中の放射性物質の種類と濃度の測定結果
<http://www.kek.jp/quake/radmonitor/>
- 3) 佐波俊哉, 佐々木慎一, 飯島和彦, 岸本祐二, 齋藤究. 茨城県つくば市における福島第一原子力発電所の事故由来の線量率とガンマ線スペクトルの経時変化. KEK Preprint 2011-4. May 2011. <http://ccdb4fs.kek.jp/tiff/2011/1127/1127004.pdf>
- 4) 土井妙子, 田中敦, 柴田康行, 榎本和義. 福島第一原子力発電所事故後の茨城県つくば市における環境大気中の放射性核種測定. 国立環境研究所公開シンポジウム 2011.
- 5) Morino, Y., T. Ohara, and M. Nishizawa. Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G11, doi:10.1029/2011GL048689, 2011.
- 6) (独)日本原子力研究開発機構. 福島第1原子力発電所事故に伴う¹³¹Iと¹³⁷Csの 대기放出量に関する試算(Ⅱ) — 3月12日から15日までの放出率の再推定 — 第63回原子力安全委員会資料第5号. 平成23年8月22日.
<http://www.nsc.go.jp/anzen/shidai/genan2011/genan063/siry05.pdf>
- 7) (独)日本原子力研究開発機構. 私信.
- 8) 文部科学省. 文部科学省による埼玉県及び千葉県 of 航空機モニタリングの測定結果について. 平成23年9月29日.
http://radioactivity.mext.go.jp/ja/1910/2011/09/1910_092917_1.pdf