

2011年度秋季大会スペシャルセッション 「放射性物質輸送モデルの現状と課題」報告*

世話人：近藤裕昭*1・里村雄彦*2・竹村俊彦*3・山澤弘実*4・渡邊 明*5

1. はじめに

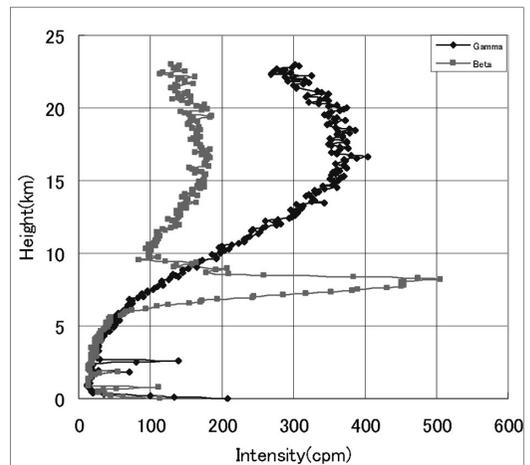
3月11日の東日本大震災とその後に起きた大津波により、東京電力福島第一原子力発電所は制御不能の事態に陥り、大量の放射性物質が大気中に放出された(経済産業省 2011)。また緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステムとして準備されていたはずのSPEEDIのデータが避難やその後の緊急対策に生かされず、今後大きな課題を残した。本スペシャルセッションはこれらの課題のうち、放射性物質の輸送モデルの現状と課題を中心に整理・集約し記録するとともに、今後に生かすため2011年度秋季大会2日目の11月17日午前に企画された。また、大会期間中の18日に開催された「日本気象学会原発事故に伴う放射性物質拡散に関するWG」においてセッション報告を「天気」に掲載することとなった。本セッションには13件の発表があり、全発表者より報告を得ることができた。以下発表順に概要を報告する。

2. 研究発表

2.1 放射能ゾンデ観測による放射能の鉛直分布

渡邊 明 (福島大学)

福島第一原子力発電所事故に伴う自由大気層への放射性物質の放出状況を理解するため VAISALA 社製のラジオゾンデ RS-92 に放射能ゾンデ NSS921 を装着し、2011年4月15日から29日まで1日1回、及びその後月1回の観測を実施した。連続観測した4月の β 線、 γ 線強度の平均鉛直分布を第1図に示す。 β 線、 γ 線とも高度3km以下にスパイク状に相対的に強いところが出現している。また、 β 線のみ高度8km付近に強い領域が出現している。なお、8月27日の観測



第1図 4月15日から29日までの平均した β 線、 γ 線の鉛直分布(高度は100m毎の平均を示す)。cpm (counts per minuteの略)は、放射線量を表現する単位で、放射線測定機に1分間に入ってきた放射線の数を示す。

* A report of the special topic session “Current status and issues of numerical models for the transport of radioactive substances” at the 2011 Autumn Meeting.

*1 Hiroaki KONDO, 産業技術総合研究所環境管理技術研究部門.

*2 Takehiko SATOMURA, 京都大学大学院理学研究科.

*3 Toshihiko TAKEMURA, 九州大学応用力学研究所.

*4 Hiromi YAMAZAWA, 名古屋大学大学院工学研究科.

*5 Akira WATANABE, 福島大学副学長.

© 2012 日本気象学会

ではこのβ線の相対的に強い領域が高度10km付近に上昇して出現している。いずれも相対的に放射線の強い領域は、特定日に出現しており、下層の相対的に強い放射線域の出現は、流跡線解析から、福島第一原子力発電所から直接輸送されて出現している可能性が強いことが分かった。

2.2 大気放射性物質の広域観測と土壌からの再飛散の影響

北 和之, 笠原理絵 (茨城大学)

渡邊 明 (福島大学)

鶴田治雄, 植松光夫, 桧垣正吾 (東京大学)

吉田尚弘, 豊田 栄, 山田桂大 (東京工業大学)

篠原 厚 (大阪大学)

三上正男, 五十嵐康人 (気象研究所)

恩田裕一, 末木啓介 (筑波大学)

滝川雅之 (JAMSTEC)

日本地球化学会=日本地球惑星科学連合=

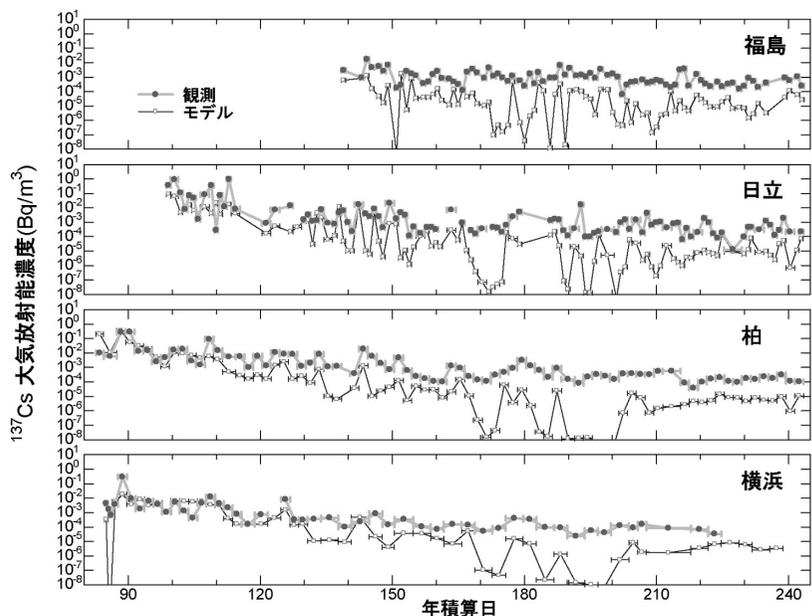
日本放射化学会連携緊急放射性物質

サンプリングチーム大気班および分析班

東京電力福島第一原子力発電所の事故によって、原子炉施設から放射性物質がその時の気象条件に応じて周辺地域に飛散・拡散した。その結果生じた放射性物質汚染は、付近の住民にとっての深刻な問題であるのみならず、国民にとって最大の関心事の一つである。事故発生直後から、科学者・研究者として専門的知識を活かし、国民の不安を少しでも解消し、また放射性物質による環境汚染の影響を客観的に予測するために必要な情報を取得する活動を開始すべきであるという議論が有志により行われた。特に地球惑星科学連合に所属する地球化学、大気科学、および放射化学の研究者が連携し、大気、降水、土壌、地下水のサンプリングを系統的かつ広範囲

に行い、精密な放射化学分析を実施することが提案され、地震に続く混乱の中ではあったが、いち早く実行に移された。

その活動の一環として、大気中に放出・浮遊・輸送されていく放射性物質の濃度を調べるため、3月下旬より北海道から沖縄まで20地点を超える場所でエアロゾルサンプリングが実施された。3月以降は大規模な放射性物質放出が起こっていないため、福島第一原子力発電所を囲むように配置された11箇所に縮減しつつ、9月まで24-72時間間隔でのサンプリングを実施し、現在も4箇所で継続している。第2図は、その中で福島、日立、柏、横浜において測定されたセシウム137の大気放射能濃度の時間変化を示したものである。3月～5月には減少傾向が見られたが、それ以降は横ばいである。ただし、9月以降はさらに濃度は減少している。しばしば短期的に10倍以上の濃度増加が見られ、日立、柏、横浜でほぼ同時に発生する場合もある。これは、低濃度ながらも事故現場から漏出した放射性物質が大気中を輸送されていることを示唆し、JAMSTECにより開発された大気輸送モデルも多くの場合でその増加を再現している。しかし風向から見



第2図 2011年3月下旬～8月に、福島(福島県)、日立(茨城県)、柏(千葉県)、横浜(神奈川県)において、観測されたセシウム137の大気放射能濃度(太線, 単位はBqm⁻³。JAMSTECにより開発された大気輸送モデルによる推定値(細線)と比較している。

て事故現場からの輸送がないときにも、モデルでは極めて低濃度と推定されるが、観測ではある程度の濃度の放射性物質が検出されている。その濃度は、福島> 柏～日立> 横浜という順となっており、事故現場から拡散されたものだけではなく、観測地点周辺において土壌から再飛散された放射性物質が、バックグラウンド的に浮遊していることを示唆している。

Q：現在も福島第一原発事故による放射性物質が空気に含まれていますか？

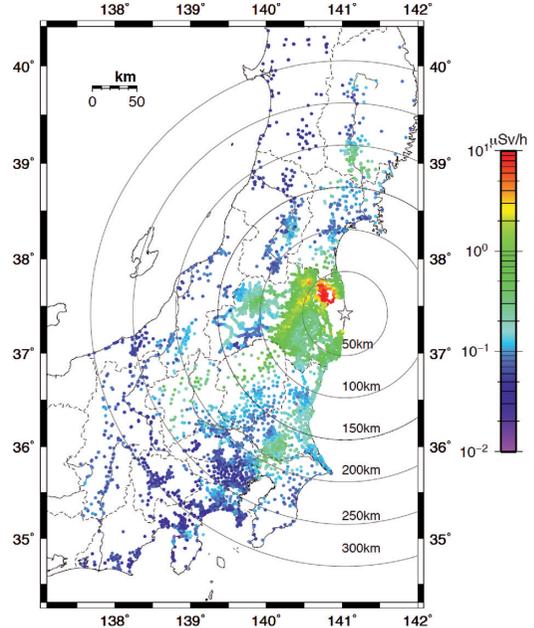
A：東北南部から関東北部では、日や場所で異なりますが、原発事故に起因する放射能は、今も1m³あたり1/10000ベクレル程度観測されています。しかし、これは自然に存在する大気放射能に比べ小さい値です。

2.3 原発事故による放射性物質の地表面沈着の広域分布とその要因

鶴田治雄, 司馬 薫, 佐藤陽祐,
橋本真喜子, 荒井俊昭, 山田裕子,
中島映至 (東京大学大気海洋研究所)

現段階で公表された多くの実測データをもとに、この事故により放射性物質が、いつ頃、どのくらいの量が、どの範囲まで、どのように運ばれ沈着したのか、を解析した(モデルとの比較検討でも必要である)。

広域に地表面に沈着した放射性物質による空間放射線量は、各自治体が密に測定をしてHPに公表しているので、比較的地域代表性のある小学校校庭の高さ1mでの空間放射線量データを集約して第3図に示した。この図から、高汚染地帯(福島県相双地域とその次に高い福島県中通り)と、遠方でも周囲より比較的高い汚染地域(栃木県北部から群馬県北部と西部、茨城県南部と千葉県東葛地域、山形県東部地域、岩手県南部から宮城県北部)が存在することが明らかになった。これらの結果は、その後に文科省が実施した福島県内での2kmメッシュによる土壌マップ調査、及び航空機調査による広域土壌沈着量推定結果(文部科学省:2011年10月26日,12月16日)とよく対応しており、貴重なデータベースである。次に、陸上で大気中の空間放射線量が急激に増加した時期は、次の4時期だった。(1)3月12-13日:南よりの風で、汚染気塊が原発から北方に輸送され、宮城県東部を南から北へ通過した(降水無し)。(2)3月14日午前中:原発を通過する北よりの風で、いわきと北茨城で大きなピークが見られた(降水無し)。さらに広域に汚染された時期



第3図 東日本の各県市町村の校庭などにおける高さ1mでの空間放射線量($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)の広域分布。(福島は校庭を含む種々の地表面で4月下旬,他の地域は小学校校庭で6月前後)

は、(3)3月15-16日(第1期)と(4)3月20-23日(第2期)だった。放射線量が第1期>第2期だった地域は、福島、関東北部、長野と新潟南部で、第2期>第1期だったのは、関東南部、山梨と静岡、山形、宮城北部から岩手南部だった。第3図にみられる放射性物質の不規則な広域沈着量分布の要因は、気象、特に局地風系、降水および逆転層の存在(館野の高層気象データによる)であり、また、地形の影響はこのような局地気象と深くかかわっていた。一方、発生源からの排出量は、まだ不確実性が大きいことがわかった。大気中の放射性物質の測定が実施された関東地域の約6地点のデータによれば、¹³¹I/¹³⁷Csの比は、地点による違いよりも日により大きく異なっており、公表された発生源からの排出量比とは、大きく異なっている場合もあった。この比は、発生源から測定地点までの輸送中の乾性沈着量と湿性沈着量の割合に左右されるので、これらの測定結果(及び降水量データ)を考慮した発生源推定を再構築する必要がある。

2.4 逆解析を用いた初期放射線量推定システムの構築

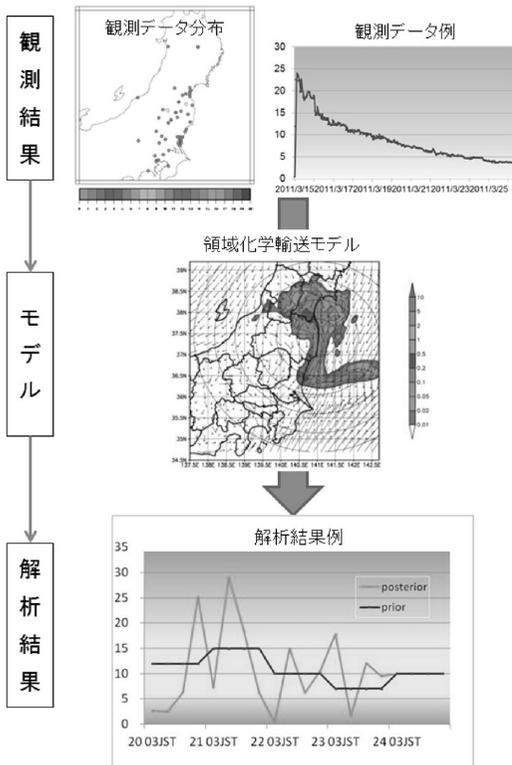
眞木貴史, 梶野瑞王, 田中泰宙,
関山 剛, 千葉 長, 五十嵐康人,
三上正男 (気象研究所)

本研究の目的は、福島第一原子力発電所から放出された放射線核種量を、観測データと化学輸送モデルを用いて統計数理的に逆解析することである。

逆解析はこれまで炭素循環解析や黄砂解析 (Maki *et al.* 2011) に用いられてきた。今回の場合は放出源が点源であることから、放出高度と時間のみに着目した解析を行うことによって、より高分解能かつ高精度の解析が可能になることが期待できる (第4図)。輸送モデルは領域化学輸送モデル (MRI-PM/r; 梶野ほか 2011) のタグ付きトレーサー実験の結果を用いた。水平解像度は 5 km (予測範囲は 500km×500 km)、6 時間毎、高度は 3 レベル (0-100m, 100-200m, 200-400m) の一定量放出のタグ付き輸送実験を行った。観測データは文科省等が実施している

環境放射能のモニタリング結果の49地点の特別値を用いた。観測データの取り扱いとしては、地表面に沈着した物質による放射線の影響を避けるために観測データに指数関数的に減少する曲線を近似し、これからの差を大気中の放射線量として利用した。

予備解析 (3月20-23日) の結果では、事前情報として与えた放出量 (Chino *et al.* 2011) よりも一時的に高い放出量を解析することができた。ただ、今回の解析は観測データが陸地に限定されているために、時間帯によっては放出された物質がほとんど海に流されてしまう場合などは十分な精度で解析できていない可能性がある。このため、今後はより広範囲の観測データの収集と全球化学輸送モデルを用いた解析を行う予定である。また、単一の化学輸送モデルを用いた解析では、モデルの輸送誤差等が解析結果に大きく影響することが考えられるため、マルチモデル解析あるいは輸送パラメータを変化させたモデル解析結果をアンサンブル的に用いることによって、解析値の信頼性などに関する情報を得ることも必要になると考えられる。



第4図 逆解析の模式図。

2.5 大型再処理施設から排出される放射性物質の拡散予測精度評価

阿部康一, 五代儀 貴, 赤田尚史
(財)環境科学技術研究所

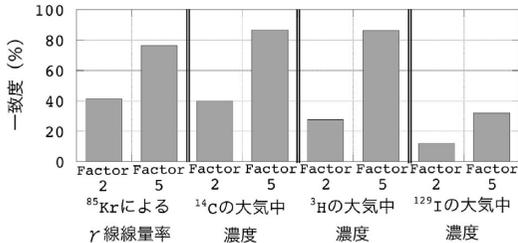
江 俊賢, 斯波宇司 (日本エヌ・ユー・エス株式会社)

久松俊一 (財)環境科学技術研究所

青森県六ヶ所村に建設中の大型再処理施設は、現在、使用済燃料を用いた試験運転中である。大型再処理施設の運転に伴い、微量の放射性物質が大気及び海洋中に計画排出される。排出される放射性物質の挙動や中・長期の被ばく線量の地域分布を予測するため、大気、陸域、大型再処理施設に隣接する尾駁沼とその集水域及び六ヶ所沿岸域における放射性物質の移行を解析する各サブモデルを統合し、総合的環境移行線量評価モデル1.0を開発した。

本モデルの大気拡散を扱うサブモデルでは、MM5 (水平解像度 9 km, 3 km, 1 km) により求めた風向・風速と降水強度を用い、ARAC2 をベースとした拡散モデル (水平解像度 500m) により、放射性物質の濃度を解析する。このサブモデルの解析精度を評価した。

大型再処理施設の試験運転により⁸⁵Kr, ¹⁴C, ³H 及び¹²⁹Iが大気中に排出された2006年4月から2009年2



第5図 ファクター2および5の一致度。ただし、2006年4月から2009年2月までに大型再処理施設から放射性核種が排出された月のうち、 $1/N \leq (\text{解析値}/\text{実測値}) \leq N$ となった月の割合をファクター N の一致度とした。

月の期間に、大型再処理施設の主排気筒から東側に2.6km離れた環境科学技術研究所敷地内において、 ^{85}Kr による γ 線線量率(10分間毎)、並びに ^3H (約2週間毎)、 ^{14}C (1ヶ月毎)及び ^{129}I (1ヶ月毎)の大気中濃度を測定した(Akata *et al.* 2011など)。同期間について、日本原燃株式会社から開示された10分毎の ^{85}Kr の放出量並びに約1週間毎の ^{14}C 、 ^3H 及び ^{129}I の放出量や、メソ客観解析データ、日本原燃及び環境科学技術研究所における気象観測値を用いて、1ヶ月毎の ^{85}Kr の線量率と ^{14}C 、 ^3H 及び ^{129}I の平均濃度を解析した。

第5図にファクター2および5の一致度を示す。 ^{85}Kr 、 ^{14}C 及び ^3H の一致度は同程度であるが、 ^{129}I だけが小さい。

^{129}I は大気中で気体及び粒子として存在し、それぞれ異なる乾性・湿性沈着速度で地表に降下すると考えられる。しかし、本モデルでは ^{129}I を存在形態別に扱っておらず、大気中における ^{129}I の挙動が十分再現できなかった可能性がある。

今後、 ^{129}I の存在形態別に扱えるよう本モデルを改善し、 ^{129}I の大気中濃度の予測精度向上をめざす。

謝辞

本記事事項は青森県からの受託事業により得られた成果の一部である。

2.6 2011年3月の福島県東部地域における風速特性・拡散特性のモデル解析

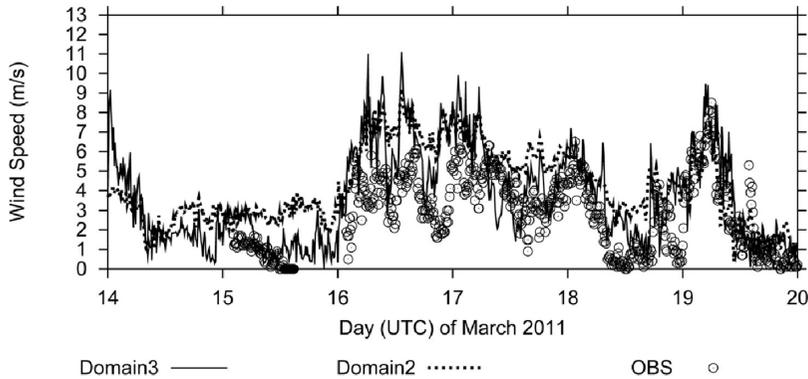
竹見哲也、石川裕彦(京都大学防災研究所)
放射性物質の放出は事故時の緊急対応のためのみならず

長期期間におよぶ環境汚染を引き起こす可能性があるため、放出源を中心とした地域規模で大気中をどのように輸送されるかという定量的な評価が重要である。そのため、周辺地域の局地的な風の情報が不可欠となる。日本の原子力発電所は急峻・複雑な地形に立地する機会が多いため、大気中の物質輸送を考える上では、複雑な小地形の影響を受けた気流の微細な時空間変動と微細規模での拡散特性の情報が重要である。本研究では、領域気象モデルを用いて高分解能数値シミュレーションを行い、小地形の影響を受けた気流の時空間変動の特性について調べた。

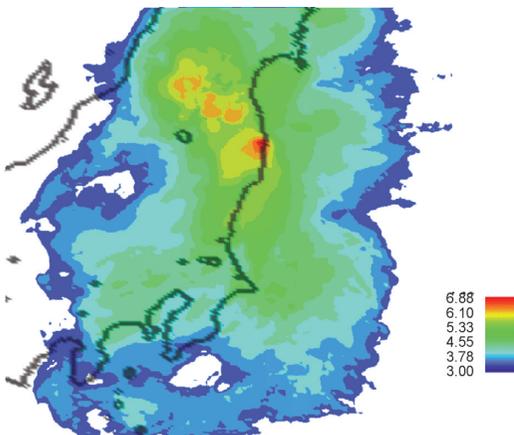
数値シミュレーションにはWRFモデルを用い、地形の詳細を精度よく表現するという観点から、ネスティング機能を用いて水平格子間隔を10km/2km/400mと細密化した計算領域を設定した。400m格子領域は100km×150kmの領域とし、福島県東部地域をカバーするようにした。ネスト領域間の接続は親領域から子領域への1方向とした。400m格子の領域については、国土地理院数値地図50mメッシュ値および国土交通省国土数値情報100mメッシュ値を用いて、地形および土地利用分布を作成した。一方、低解像度領域の地形はGTOPO30を用いている。気象庁メソ客観解析値を初期値・境界値に用い、2011年3月11日0000UTCを初期時刻として4月1日0000UTCまでの期間を通して計算を行った。

着目するのは主に地上近傍および大気境界層における風であるため、境界層乱流混合のパラメタリゼーションを数通りに変化させて数値シミュレーションを行った。ここでは乱流運動エネルギーの輸送方程式を用いるスキームによる計算結果を示す。第6図は、飯館アメガス地点における風速の観測値と400m格子および2km格子領域での計算値を比較している。観測された時間変動はモデルである程度再現されている。また、高解像度の場合に比べて低解像度の場合には風速変動がゆるやかで変動の幅も大きくないことが分かる。400mと2km格子領域の結果を福島県東部地域の領域で比較したところ、高解像度の場合には詳細な尾根や谷筋の分布に対応して地上近傍では風速の強弱のコントラストが明瞭になっていた。このような地形の影響は地上高200mまでの風に明確に現れることも分かった。以上のことから、複雑地形での風の数値モデルによる再現には、現実の地形を高分解能で正確に表現することが重要であると言える。

質問には、他のモデルではある地点の風速の低減が



第6図 飯館アメダス地点における3月14日0000UTCから20日0000UTCまでの風速時系列。丸印は観測値、実線および点線はそれぞれ400mおよび2km格子領域の計算値を示す。



第7図 計算されたセシウム137の沈着量。数値は10のべき乗 (Bqm^{-2}) を示す (2011年4月1日現在)。

再現されないという問題があるが本モデルではどうか、20日間のシミュレーションで初期値を更新する計算を行っているか、といったものがあつた。前者の質問については地形表現の違いが関係していると考えている。

2.7 福島第一原子力発電所から福島県内への3月15日の放射性物質の輸送と沈着

近藤裕昭 (産業技術総合研究所)

滝川雅之 (JAMSTEC)

渡邊 明 (福島大学)

中村 尚 (東京大学先端科学技術研究センター)

竹村俊彦 (九州大学
応用力学研究所)
里村雄彦 (京都大学)
吉田尚弘 (東京工業大学)
中島映至 (東京大学
大気海洋研究所)

3月15日におきた福島第一原子力発電所からのセシウム137の大量放出のその後の移流拡散と沈着についてAIST-MMを用いて解析を行った。AIST-MMはGPV (MSM) の各時刻の初期値を境界条件とし、ドライモデルであるため降水過程を含まない。このためレーダーアメダス解析雨量を用いて湿性沈着の計算を行った。乾性沈着は沈着速度、湿性沈着は洗浄係数を用いて計算した (Brandt *et al.* 2002)。発生源情報はChino *et al.* (2011) を使用した。福島第一原子力発電所を中心とした約600km四方の領域を約3km格子間隔で計算した結果では、4月1日現在のセシウム137の沈着量の分布は、宮城県から山形県南部と阿武隈山地南部で大きく (第7図)、実測とは異なる結果になっている。放射性物質のプルームは、15日朝には関東方面に流されるが、関東では地上付近に存在して厚さが薄いものに対し、発電所付近では日出後混合層が発達し上空に拡散したために計算では阿武隈山地を容易に越えることができている。また15日夕方には福島市方面から宮城県方面に輸送されているが、このときの放射性物質のプルームは上空に上昇しており、降水層よりもさらに上空にあつたために宮城県の実際の沈着量は小さかつたと思われる。

め降水過程を含まない。このためレーダーアメダス解析雨量を用いて湿性沈着の計算を行った。乾性沈着は沈着速度、湿性沈着は洗浄係数を用いて計算した (Brandt *et al.* 2002)。発生源情報はChino *et al.* (2011) を使用した。福島第一原子力発電所を中心とした約600km四方の領域を約3km格子間隔で計算した結果では、4月1日現在のセシウム137の沈着量の分布は、宮城県から山形県南部と阿武隈山地南部で大きく (第7図)、実測とは異なる結果になっている。

放射性物質のプルームは、15日朝には関東方面に流されるが、関東では地上付近に存在して厚さが薄いものに対し、発電所付近では日出後混合層が発達し上空に拡散したために計算では阿武隈山地を容易に越えることができている。また15日夕方には福島市方面から宮城県方面に輸送されているが、このときの放射性物質のプルームは上空に上昇しており、降水層よりもさらに上空にあつたために宮城県の実際の沈着量は小さかつたと思われる。

C: 発生源の時間変化により沈着場所は大きく変わるので他の発生源情報も検討すべきである。

Q: 宮城県での降水層が低かつたというが、少なくとも3000-4000mくらいはあつたのではないか。

A: 実際はさだかでないが、その高度から落とすと宮城県の沈着量は非常に多くなる。

2.8 領域化学輸送モデルを用いた放射性物質沈着量の推定

滝川雅之 (JAMSTEC)

福島第一原子力発電所事故により3月15日に大規模

な放射性物質の放出があったと推定されているが、この際には日本海側から低気圧が接近しつつあったこともあり、北関東から東北地方にかけての広い範囲で放射線量の増加が観測されている。またこの際に生じた放射性物質の地表への沈着には湿性沈着が大きな影響を与えたと推定されている (Morino *et al.* 2011; 日本原子力研究開発機構 2011など)。

このため本研究では、オンラインモデルである領域気象・化学輸送モデル WRF/Chem にセシウム137やヨウ素131などの放射性物質とその乾性・湿性沈着過程を新たに導入し、放射性物質の沈着量分布推定を行った。水平解像度は東日本域を含む 3 km (およそ 750km 四方) である。気象場の初期値および側面境界は気象庁メソ解析を使用し、境界層内部の水平輸送および大気安定性の再現性向上のため、気象庁地上観測およびアメダスによる風向、風速、気温、比湿および地上気圧 (気象庁地上観測のみ) の10分観測値をナッジングにより同化した。

タグトレーサを用いた放出期間ごとの沈着量分布推定を行ったところ、2号機の原子炉圧力変動などから3月15日早朝に発生したと推察される大規模放出による放射性物質はおもに北関東から福島県中通りにかけての範囲に輸送され、14JST ごろから中通りで見られた弱い霧雨などによって主に湿性沈着によって沈着していたと推定された。また低気圧の接近に伴う風系の変化から13JST から再び発生した大規模放出による放射性物質はおもに北西方向に輸送され、前線通過に由来する降雨・降雪によって高い沈着量を周辺地域

にもたらしていた (第8図)。また全てのタグトレーサを合計した積算沈着量分布は航空機モニタリング (文部科学省 2011) とも整合的であった。今後はさらにレーダーアメダス等を用いた実際の降雨域との比較や、湿性沈着過程に重要と思われる降雨・降雪時の状態 (霧雨、みぞれなど) などを観測と比較するなどさらに詳細な解析を進めていく予定である。

2.9 気象研領域モデルによる福島第一原発事故に伴う放射性物質の輸送・沈着実験

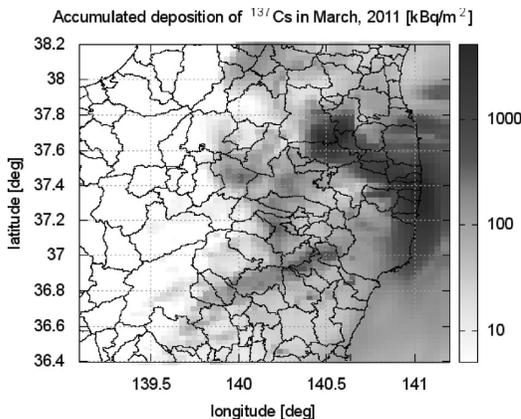
梶野瑞王, 五十嵐康人, 田中泰宙, 眞木貴史, 関山 剛, 千葉 長, 青柳暁典, 出牛 真, 大島 長, 三上正男 (気象研究所)

本研究では放射性核種の大気中の挙動を詳細に定式化し、核種の化学組成や粒径分布、地表面状態などが乾性・湿性沈着量に及ぼす影響を評価することが目的である。

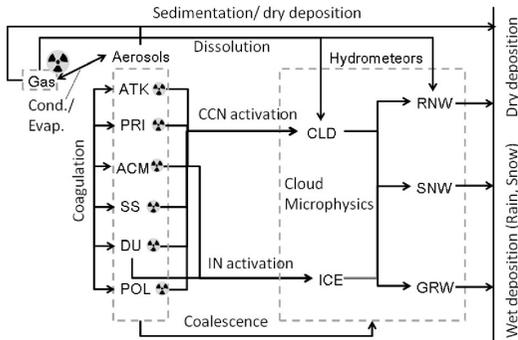
事故後つくば市で観測された Cs-137 は最大で 10^2 Bq/m³ のオーダーであり、数百 nm に粒径のピークが見られる (兼保ほか 2011)。重量濃度にするると 1 pg/m³ 程度であり、放射性蒸気が核形成を起こして数百 nm まで成長できるとは考えにくく、硫酸塩など環境の低揮発性物質と内部混合していると考えるのが自然である。その場合、粒子態核種の挙動は、核種そのものの物性ではなく、内部混合粒子としての挙動に従う。

そこで本研究では、放射性核種と環境中物質の相互作用を考慮した拡散モデル MRI-PM/r を開発した。モデルのフレームワークは Kajino and Kondo (2011) と同様だが、気象場は気象庁メソ解析を用いて非静力学モデル NHM により $\Delta x = 4$ km で作成した。エアロゾルはカテゴリ法によりプライマリ放射性核種 (PRI)、エイトケン粒子 (ATK)、累積モード粒子 (ACM)、海塩粒子 (SS)、土壌粒子 (DU)、花粉 (POL) に分類し、凝縮、蒸発、凝集、雲核活性、氷晶核活性、溶解、衝突併合 (washout)、雲微物理過程 (rainout; 雲水 CLD, 雲氷 ICE, 雨滴 RNW, 雪 SNW, 霰 GRW カテゴリ間の変換過程)、乾性沈着などの素過程を考慮している (第9図)。

乾性沈着速度についてはヨウ素の物理・化学形態による違いが大きく、粒子態に比べて、元素状ヨウ素 (I₂)、有機ヨウ素 (CH₃I) はそれぞれ 2 桁、7 桁小さい。粒径分布による違いは 1 桁程度 (花粉粒子 > 粗



第8図 モデル計算により推定された2011年3月におけるセシウム137の積算沈着量。単位は kBq/m²。



第9図 MRI-PM/rで考慮される素過程の模式図。

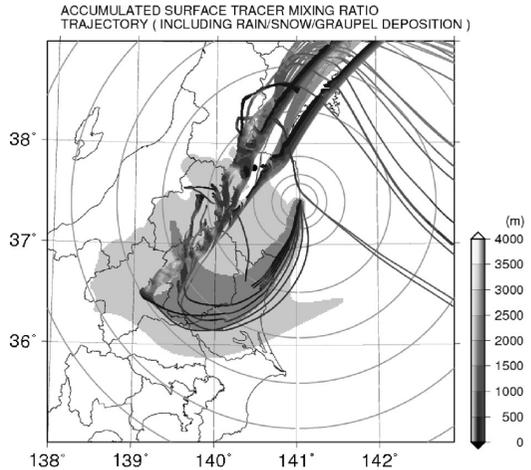
大粒子>微小粒子)で、地表面状態による違いも1桁程度(水面~混合林>裸地)であった。湿性沈着は素過程を複雑化することで不確定要因が増え、シンプルなものより結果が悪くなった。湿性沈着過程は、定式化自体から大きく異なり、モデル間のばらつきが大きい。このような場合はマルチモデルアンサンブルが有効である。実際、酸性雨に関しては有効性が確認されている(Wang *et al.* 2008)。

2.10 CReSSを用いた移流拡散シミュレーション

加藤雅也, 篠田太郎, 坪木和久
(名古屋大学地球水循環研究センター)
相木秀則 (JAMSTEC)

福島第一原子力発電所の事故翌日より5月まで雲解像モデルCReSSを用いて、水平格子解像度2.5kmと1.5kmという非常に高解像度で移流拡散シミュレーションを行った。その際、福島第一原子力発電所上空100mに点放出源を与え、混合比1のトレーサ物質を連続的に放出するという条件で計算を行った。計算には重力による落下、降水による沈着や、地表面や海面への沈着は考慮されていない。また、3月15日午前に発生した爆発事象を対象としたハインドキャストシミュレーションを水平格子解像度1.5km、放出源を爆発事象発生時刻に瞬間的に与えるという条件で実行した。この結果を中心に、放射性物質を想定した移流拡散シミュレーションにおける水平格子解像度依存性、初期値依存性、そして降水による沈着過程の重要性を示した。

3月15日は低気圧の通過に伴い、福島県周辺の風向は時間と共に北東、南東、北西へと変化していた。こ



第10図 CReSS最下層(約50m)での、トレーサ物質の期間積算混合比を陰影で、降水による沈着を考慮した流跡線を線で表す。濃い陰影、薄い陰影はそれぞれトレーサ混合比の放出量の千分の1、1万分の1を表し、流跡線の濃淡は粒子の高度を表す。

のため、爆発事象が3時間、6時間遅れたと仮定してシミュレーションを行った結果、地表面付近の混合比の分布が大きく異なった。水平解像度を5kmとして計算を行った結果と比較をしたところ、水平解像度1.5kmで見られた栃木県西部から福島県南西部に延びる混合比の大きな領域で代表される局地的な分布(第10図陰影)が水平解像度5kmでは再現されなかった。

3月15日午前の爆発事象に伴い、福島市では16時半過ぎより放射線量の急激な増加が観測された。福島市付近のCReSS格子点における地表付近の混合比の値は数時間遅れて増加した。これに対して気柱積算した混合比の値は観測された放射線量が増加する時刻とほぼ同じ時刻より値が増加した。15時より観測、シミュレーションともに降水があったため、この降水による沈着に伴い、福島市では放射線量が急激に増加したことが示唆された。このことを考察するため、降水による沈着を考慮した流跡線解析をオフラインで行った(第10図)。爆発事象発生時に福島第一原発上空の粒子は茨城県、栃木県、福島県中通り、宮城県へと移動していた。粒子が栃木県北部から福島県南部を通過時に降雨が、福島県北部を通過時に降雪が見られ、それらに沈着した粒子が地表にまで達していた。よって、福

島県中通りにおける放射線量の増加は降水に伴う沈着過程が重要であったと考えられる。

2.11 気象研究所全球モデルによる放射性物質輸送シミュレーションの現状と課題

田中泰宙 (気象研究所)

猪股弥生 (アジア大気汚染研究センター)

五十嵐康人, 梶野瑞王, 眞木貴史, 関山 剛,

三上正男, 千葉 長 (気象研究所)

大気中の微量物質を扱う化学輸送モデルは、開発当初から大気中の放射性物質と深く関わってきた。気象研究所では、チェルノブイリ原発事故による大気拡散実験や、全球モデルによる ^{222}Rn やその壊変核種、核燃料再処理施設から放出される ^{85}Kr の評価実験等を行ってきた。現在、我々は福島第一原発事故によって大気中に放出された放射性物質の広域への拡散の影響評価のため全球モデルを用いたシミュレーションを行っている。この全球モデルには、大気大循環モデルGSMUVと結合された、水平格子間隔を約60kmとした高解像度版のエロゾルモデルMASINGAR mk-2を用いている。放射性物質としては ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{133}Xe 、 ^{131}I 、 ^{132}Te 、 ^{132}I を扱い、放出量の推定値は原子力研究開発機構による推定値(茅野, 私信)によるものと、Stohl *et al.* (2011)が逆解析によって求めた ^{133}Xe および ^{137}Cs の値を用いている。

シミュレーションの結果は、北米や太平洋、北欧などで観測された到達時期を良好に再現している。特に、北米に到達する ^{133}Xe の濃度はほぼよく一致する。 ^{137}Cs は我々のモデルでは北欧に到達する濃度を過小評価する傾向にあり、降水による除去過程に不確

実性が残される。日本でのセシウム沈着量を観測値と比較すると、細かな構造は再現できないが、影響の範囲や値のオーダーは妥当な範囲にある。地球全体で見ると、放射性物質はそのほとんどが東に流され、70~80%は太平洋上に沈着している(第11図)。

今後の課題として、逆解析手法などによる放出量のより正確な推定と、モデル内での各種放射性物質のより物理的な扱いによる高精度化と、それらに基づいたデータ同化が必要となるだろう。放出量の推定にはStohl *et al.* (2011)による逆解析手法による試みが既に報告されているが、逆解析は輸送モデルへの依存性も大きい。大気輸送モデルは、モデルごとに不確実性が異なるため、異なるモデルによる相互比較を行い、モデル間の不確実性の評価を行うべきであろう。さらに、この事故を教訓として生かし、シミュレーションモデルを原発事故のみでなく、火山噴火や森林火災などの災害に対して、ハザードマップの作成などに利用できる方法を改めて確立していく必要があるだろう。

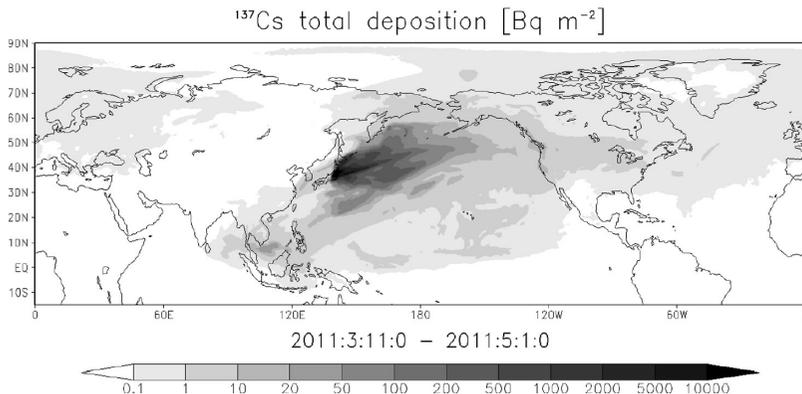
2.12 核災害を含む緊急時対応システム—欧州の先事例から

五十嵐康人, 三上正男, 青山道夫 (気象研究所)

気象研究所では、2011年3月の福島第一原子力発電所事故への対応として、大気エロゾル中に含まれる放射性核種の観測を行うとともに、先端的な知見を導入した新しい放射性物質の移流・拡散モデルの開発を進めている(2.4, 2.9, 2.11節)。こうしたモデル開発は、原子力災害への対応にとどまらず、化学コンビナート火災に伴う有害物質や火山灰の移流・拡散など

の予測と被害防止に活用が可能と考えられる。しかし、如何に高度なモデルが存在したとしても有効な活用策がなければ、社会的な価値は半減する。

欧州においてはチェルノブイリ事故による放射能汚染を教訓として、移流・拡散モデルをコアとした緊急時対応システムが実用化されている。我が国でもこうした取り組みは行われてきたが、社会的認知度は低い



第11図 全球モデルによる ^{137}Cs の2011年3月・4月の総沈着量。

と考えられるし、気象学会も例外ではないであろう。そこで、本発表では、欧州における取り組みを紹介し、我が国における有害物質の移流・拡散モデルの活用策の検討や議論の材料提供を行った。

緊急時危機管理システムの実例としてドイツ等中欧が中心の Realtime Online Decision Support System for nuclear emergency management (RODOS), および北欧中心の the Accident Reporting and Guidance Operational System (ARGOS) につき紹介した(第12図)。後者は、化学・生物・核・放射線災害に対し、

- ・被災状況の認識・把握, 状況展開の診断予測
 - ・被害結果の計算予測
 - ・対策の政策支援, 一般公衆への情報周知
 - ・演習・訓練
- 等を与えることとなっている。計算結果や情報は GIS により利用者に分かりやすく提供される。

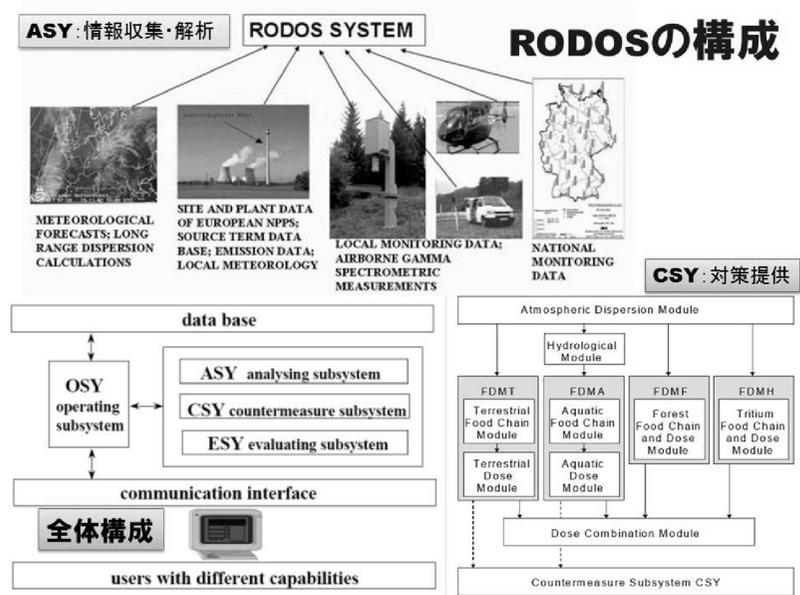
こうしたシステムの活用については、下記のような観点からの議論が可能であろう。

- ・情報一元化, 中央集権的なシステム vs 多元的なシステム, バックアップ, セカンドオピニオン
- ・政策決定者の恣意的判断の排除可能性
- ・低レベル放射線の慢性被ばくなど, 安全性についての基準が明確でない場合の判断基準
- ・予防原則(被害の未然防止)の如何
- ・国民的な合意, 科学的リテラシー
- ・国民性, 文化性に適したシステム

2.13 大気拡散予測情報に関する震災前後の意識変化

鈴木 靖 (京都大学防災研究所)

東日本大震災後に発生した福島第一原発からの放射性物質の拡散について、事故発生時には自治体や住民が十分な情報を得ることができなかった。もし予測情



第12図 RODOS の構成概要 (RODOS (GEN)-TN (99)02, Raskob et al. (2006) を元に編集)。

Q 大気拡散という研究分野があることを知っていますか

13.2	22.0	64.8
------	------	------

Q ちりなどは風に流されることを知っていますか

76.2	18.2	5.6
------	------	-----

Q ちりなどは雨とともに落ちてくることを知っていますか

75.6	19.4	5.0
------	------	-----

0% 20% 40% 60% 80% 100%
 ■震災前から知っている ■震災後に知った □今はじめて聞いた

第13図 大気拡散についての認知度の調査結果。

報が十分に活用されていれば、的確な避難や退避により被ばく量を最小限に抑えることができた可能性がある。今後の予測情報のありかたを検討することを目的として、ネットによるアンケート調査を行った。調査は震災前後の意識の変化を問う形で7月初めに実施した。全国から500サンプルを集計した。回答者の属性は、東北・関東が225、それ以外の地域が275サンプル、年齢は10代から70代まで多い順に40代40%、30代27%、50代18%である。

SPEEDIの公開が遅れたことが報道で盛んに取り上げられていたにもかかわらず、約半数の人が名前を聞いたことすらないという回答は意外であった。第13図に示すように、大気拡散という研究分野があること

を約65%の人が知らないこととあわせ、大気拡散に関する基本的な知識が不足していると言える。ただし、身近な黄砂や花粉の情報に接する機会が多いことから、ちりなどが風に流され、雨とともに降下してくることをほとんどの人が経験的に知っている。また、1960年代の大気核実験を知っている50代以上の世代の大気拡散に関する知識が高い。その世代は当時、風向や雨に気をつけるように学校などで教えられたことが経験となっているものと考えられる。

質疑では、大気拡散という言葉ではなく、大気汚染と言い換えてアンケートをとれば一般の方の関心がより高かったのではないかと、との指摘があった。日頃から拡散予測情報を何らかの形で発表し、専門家がその不確実性を解説するなどの機会を増やすことによって、このような事故の際の拡散予測情報の利用の仕方がもっと有意義なものとなるのではないかと思われる。

略語一覧

AIST-MM : National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Mesoscale Model 産総研メソスケールモデル

ARAC2 : 2nd-Generation Atmospheric Release Advisory Capability 米国エネルギー省で開発された緊急時環境放射能予測システム

CRSS : Cloud Resolving Storm Simulator

GIS : Geographic Information System 地理情報システム

GPV (MSM) : Grid Point Value (MesoScale Model) メソ数値予報モデル格子点値

GSMUV : 気象庁気象研究所統一大気モデル

GTOPO30 : Global 30 Arc Second Elevation Data Set

MASINGAR mk-2 : Model of Aerosol Species in the Global Atmosphere 気象研究所全球エアロゾルモデル

MM5 : 5th-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model

MRI-PM/r : Meteorological Research Institute - Passive-tracers Model for radionuclides 気象研パッシブトレーサーモデル

NHM : Non-Hydrostatic Model 気象庁非静力学モデル

SPEEDI : System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information 緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム

WRF : Weather Research and Forecasting model

WRF/Chem : Weather Research and Forecasting model/Chemistry

参考文献

- Akata, N., H. Kakiuchi, N. Shima, T. Iyogi, N. Momoshima and S. Hisamatsu, 2011: Tritium concentrations in the atmospheric environment at Rokkasho, Japan before the final testing of the spent nuclear fuel reprocessing plant. *J. Environ. Radioact.*, **102**, 837-842.
- Brandt, J., J. H. Christensen and L. M. Frohn, 2002: Modelling transport and deposition of caesium and iodine from the Chernobyl accident using the DREAM model. *Atmos. Chem. Phys.*, **2**, 397-417.
- Chino, M., H. Nakayama, H. Nagai, H. Terada, G. Katata and H. Yamazawa, 2011: Preliminary estimation of release amounts of ¹³¹I and ¹³⁷Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48**, 1129-1134.
- Kajino, M. and Y. Kondo, 2011: EMTACS: Development and regional-scale simulation of a size, chemical, mixing type, and soot shape resolved atmospheric particle model. *J. Geophys. Res.*, **116**, D02303, doi:10.1029/2010JD015030.
- 梶野瑞王, 五十嵐康人, 田中泰宙, 眞木貴史, 関山 剛, 千葉 長, 青柳曉典, 出牛 真, 大島 長, 三上正男, 2011: 気象研領域モデルによる福島第一原発事故に伴う放射性物質の輸送・沈着実験. 日本気象学会2011年度秋季大会予稿集, A209.
- 兼保直樹, 大橋英雄, 村上利幸, 鈴木芙美恵, 2011: つくばにおける福島第一原子力発電所事故後の大気中放射性核種の粒径分布. 日本気象学会2011年度秋季大会講演予稿集, D158.
- 経済産業省, 2011: 原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書について. <http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/backdrop/20110607001.html> (2012. 1. 11閲覧).
- Maki, T., T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama and M. Mikami, 2011: The impact of ground-based observations on the inverse technique of Aeolian dust aerosol. *SOLA*, **7A**, 21-24.
- 文部科学省, 2011: モニタリング情報. http://radioactivity.mext.go.jp/ja/monitoring_around_FukushimaNPP_MEXT_DOE_airborne_monitoring/ (2012. 1. 11閲覧).
- Morino, Y., T. Ohara and M. Nishizawa, 2011: 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.
- 日本原子力研究開発機構, 2011: 福島第一原子力発電所事故に伴うCs137の大気降下状況の試算. <http://nsed>.

- jaea.go.jp/fukushima/data/20110906.pdf (2012. 1 .11 閲覧).
- Raskob, W., J. Ehrhardt, C. Landman and J. Pasler-Sauer, 2006: Status of the RODOS system for off-site emergency management after nuclear and radiological accidents. Apikyan, S. and D. Diamond ed. *Countering Nuclear and Radiological Terrorism*, Springer, 151-166.
- Stohl, A., P. Seibert, G. Wotawa, D. Arnold, J. F. Burkhardt, S. Eckhardt, C. Tapia, A. Vargas and T. J. Yasunari, 2011: Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **11**, 28319-28394.
- Wang, Z.F., F.Y. Xie, T. Sakurai, H. Ueda, Z.W. Han, G. R. Carmichael, D. Streets, M. Engardt, T. Holloway, H. Hayami, M. Kajino, N. Thongboonchoo, C. Bennet, S.U. Park, C. Fung, A. Chang, K. Sartelet and M. Amann, 2008: MICS-Asia II: Model inter-comparison and evaluation of acid deposition. *Atmos. Environ.*, **42**, 3528-3542.
-