

日米気象学会共催「福島第一原子力発電所からの 汚染物質の輸送と拡散に関する特別シンポジウム —現状と将来への課題—」報告*

近藤 裕 昭^{*1}・山田 哲 二^{*2}・茅野 政 道^{*3}・岩崎 俊 樹^{*4}
堅田 元 喜^{*5}・眞木 貴 史^{*6}・斉藤 和 雄^{*7}・寺田 宏 明^{*8}
鶴田 治 雄^{*9}

1. はじめに

第93回国気象学会年会は、2013年1月6日～1月10日に米国テキサス州オースチン市で開催された。この初日の1月6日曜日に日米気象学会の共催のシンポジウムとして「福島第一原子力発電所からの汚染物質の輸送と拡散に関する特別シンポジウム—現状と将来への課題— (Special Symposium on the Transport and Diffusion of Contaminants from the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant: Present Status and Future Directions)」が開催された。2011年3月11日の東日本大震災とその後襲った津波により全電源を喪失した東京電力福島第一原子力発電所からの放射性物質の拡散と沈着の問題について、気象学に関連する課題については、すでにいくつかの会議で議

論がなされてきた。日本気象学会では2011年度秋季大会でのスペシャルセッション(近藤ほか 2012)および2012年度春季大会のシンポジウム(日本気象学会 2013)、また米国気象学会関連では2011年7月にGeorge Mason University (GMU)でのシンポジウム(Pullen *et al.* 2013)、また、2012年2月にNCARで放出源推定に関する会議(Bieringer *et al.* 2013)があった。このほか日本原子力研究開発機構(JAEA)が2012年3月に公開ワークショップ「福島第一原子力発電所事故による環境放出と拡散プロセスのワークショップ」(日本原子力研究開発機構 2012)を開催している。

このうち、事故後早い段階に米国で開催されたGMUのシンポジウムでは、事故直後の情報不足と組織間協力の欠如、アンサンブル計算の有用性、不確かさを持つ情報とそれに対する公衆の反応への対処等の問題点が指摘された。今回のシンポジウムでは、その後の進展やそのほか新たに顕在してきた問題点等に関する日本側からの発表がなされた。また米国側からは事故直後には公開が難しかった米国内の対応に関する発表もなされた。

本シンポジウムへの参加者は40名程度で、折しも米国ではいわゆる「財政の崖」にみまわれている時期で、米国の政府機関からの参加があまり多くなかったのはやや残念であった。日本からは発表者を含めて約20名の参加者があり、発表はすべて主催者側の招待講演という形で実施した。発表件数は20件で詳細な内容は米国気象学会ホームページ (<https://ams.confex.com/ams/93Annual/webprogram/FUKUSHIMA>)

* Report of the Special Symposium on the Transport and Diffusion of Contaminants from the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant: Present Status and Future Directions.

*1 (連絡責任著者) Hiroaki KONDO, 産業技術総合研究所, kondo-hrk@aist.go.jp

*2 Tetsuji YAMADA, Yamada Science & Art.

*3 Masamichi CHINO, 日本原子力研究開発機構.

*4 Toshiki IWASAKI, 東北大学大学院理学研究科.

*5 Genki KATATA, 日本原子力研究開発機構.

*6 Takashi MAKI, 気象研究所.

*7 Kazuo SAITO, 気象研究所.

*8 Hiroaki TERADA, 日本原子力研究開発機構.

*9 Haruo TSURUTA, 東京大学大気海洋研究所.

© 2013 日本気象学会

第1表 セッション名.

セッション名	講演数
Overview (概要)	2
Source Term Estimation (放出源推定)	3
Observations (観測結果)	3
Limited Area Model Analyses (領域モデルによる解析)	6
Global and Ocean Model Analyses and Human Health Effects (全球, 海洋モデルによる解析と健康影響)	4
International Collaboration (国際協力)	2

SYMP.html, 2013.6.21閲覧)に掲載されている。これらが第1表に示す6つのセッションに分かれて発表された。以下日本側の発表を中心にセッション順に報告する。(近藤裕昭・山田哲二)

2. 概要

東北大学の岩崎俊樹は、福島第一原子力発電所事故の経緯について簡単に報告した。特に、移流拡散・数値モデルの予測の公表を巡り、科学と社会に巻き起こった様々な議論についても説明した。

福島事故では、SPEEDIの予測が公表されていれば、もっと適切な避難誘導が可能であったと指摘される一方で(東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会 2012)、数値モデルによる予測は誤差を含むので利用が困難であるという意見も根強い。改訂中の原子力災害対策指針でも、数値モデルの利用については、ほとんど言及されていない。最先端の数値モデルを被ばく被害の軽減に役立てる体制を早急に確立しなければならない。

数値モデルの活用が進まない最大の理由は、予測の不確実性にある。放射性物質の予測は、一般気象要素の予測誤差、発生源の誤差、乱流拡散の扱いなどの輸送モデルの誤差などに影響される。相当の誤差を伴う予測について、決定論的な唯一の解を提供しても、適切に利用することは難しい。提供側が、予測の不確実性に配慮した活用法とその手順を具体的によく検討し、説明する必要がある。

数値モデルの最大の利点は速報性にある。放射性物質の放出情報が提供されれば、危険度の時間・空間変動や最悪シナリオを事前に推定することができる。(1)数値モデルの予測は不確実性のため絶対値の利用は難しいが、相対値でも屋内退避のタイミングやより安全な地域への移動などの初動の退避措置に利用できる。(2)確実な第2次の退避行動のためには、モ

ニタリング(観測)で広い範囲の汚染実態を把握する必要がある。機動的な観測を効率的に実施するために、数値モデルの予測結果が第一推定値として有効である。(3)数値モデルの不確実性を低減し信頼度に応じて利用するためには、初期値アンサンブル、マルチモデル解析などが有効である。(4)緊急時にも予測情報の提供者による解説が不可欠である。とくに、大気中の放射性物質を吸引する内部被ばくと、上空の放射性物質が降水で地表面に沈着する外部被ばくでは、対策は大きく異なる。場合に応じた適切なガイダンスを提供する仕組みが必要である。

米国側からはGMUで開催されたシンポジウムの結果について、特に海岸に存在する原子力発電所からの放射性物質の海洋への拡散を含む研究の紹介がJulie Pullen (Stevens Institute of Technology, 米国)によりなされた。(岩崎俊樹)

3. 放出源推定

放出源推定では3名が発表を行った。NCARのPaul Bieringerは、放出源推定を行うための様々な手法を概観しその長所・短所を紹介すると共に、今後の方向性としてアジョイントモデルやアンサンブル手法の導入が重要ではないかという見解を示した。次にJAEAの茅野政道が東京電力福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大気放出率の時間変動を推定した発表を行った。推定法は、 1 Bq h^{-1} の単位放出率を仮定した大気拡散計算と、環境モニタリングデータの比較から行う逆推定である。放出率は、測定された ^{131}I と ^{137}Cs の大気中濃度を、単位放出率を仮定して計算された同地点の大気中濃度で割ることにより求めた。また、大気中濃度の観測データが無い場合でも、放射性核種の組成比率を仮定した単位放出率計算によって算出された空間線量率と、面的に密に観測されている空間線量率の測定値との比較を行うことに

よって放射性物質の大気放出率を推定することができた。

環境モニタリングデータには、主に ^{131}I と ^{137}Cs の大気中濃度の測定データを使用した。3月12日の水素爆発時と、プラント北西で降雨による大量の地表沈着をもたらした3月15日日中の大気放出に対応する大気中濃度データは無いため、この期間の ^{131}I と ^{137}Cs の放出率は、地表沈着した放射性核種からの空間線量率分布を比較して求めた。単位放出率を仮定した大気中濃度及び線量率計算には、文部科学省のSPEEDIネットワークシステム及びJAEAで開発した世界版SPEEDI第2版(WSPEEDI-II)を使用した。

推定された放出率の時間変動によれば、 ^{131}I について 10^{15} Bq h^{-1} を超える放出が3月15日に発生し、3月16日から24日にかけて 10^{14} Bq h^{-1} のレベルで推移した。その後、放出は日々の変動を伴いながら減少し、4月初めには 10^{11} から 10^{12} Bq h^{-1} のオーダーに減少した。推定した放出率は、この放出率を用いた大気拡散計算とモニタリング値を比較することで検証した。放射性物質が海側に流れた時の検証はできていないが、推定値が過小評価になっている可能性があり、今後、解明されるべき課題と考えている。

気象研究所の眞木貴史は、オンライン全球エロゾル輸送モデル(MASINGAR-mk2)と全球規模の約50観測地点(包括的核実験禁止条約機関(CTBTO)準備委員会など)に、二酸化炭素や黄砂のフラックス解析に利用してきたバイズ統合逆解析の手法を用いて、福島第一原子力発電所からの放出量時系列を解析した結果を報告した。3月11日から4月19日までの ^{137}Cs の放出量は $18.5 \pm 3.6\text{ PBq}$ (ベタベクレル= 10^{15} Bq)となり、Chino *et al.* (2011)の結果(9 PBq)とStohl *et al.* (2012)の結果(37 PBq)の間となるとともに、海洋沈着量などから推定したAoyama *et al.* (2013)の結果(14~17 PBq)ともほぼ一致する結果を得ることができた。この解析手法の大きな特徴は、単にモデルと観測値が合うように放出量を決めるのではなく、放出量時系列に関してあらかじめ分かっている情報(先験情報)を拘束条件として与え、観測とモデルの差を小さくしつつ先験情報との差も小さくすることにより自然な放出量を解析する点である。このため、解析の精度は輸送モデルや先験情報の精度に大きく依存する。本解析の先験情報としては先に発表した茅野の解析結果とStohlの先験情報を用い、先験情報の不確かさを変化させた感度実験を行った。Stohlの

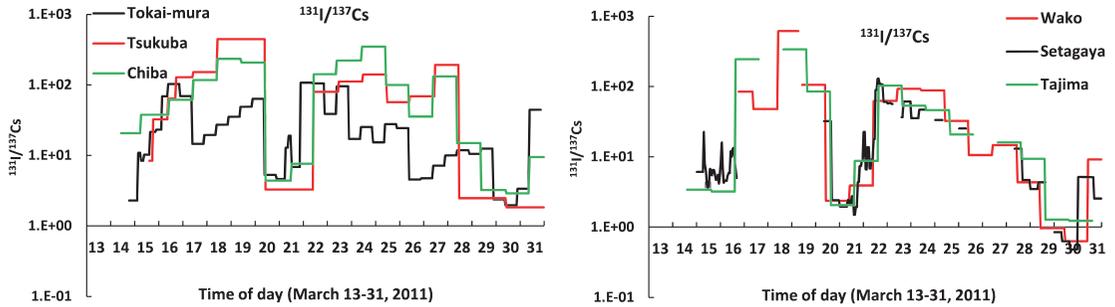
解析結果ではなく先験情報を用いた理由は、今回の解析とStohlの解析で用いられた観測ネットワークがほぼ同一でStohlの解析結果には当該観測ネットワークの観測データの情報が既に含まれていることから、観測データの二重利用を避けるためであり、感度実験の結果、茅野らの解析結果を先験情報として利用した。今後は、領域モデルとより詳細な観測データを用いた逆解析に取り組む予定である。

(茅野政道・眞木貴史)

4. 観測結果

観測結果のセッションでは、産業技術総合研究所の兼保直樹が福島第一原子力発電所から放射性セシウムを輸送したエアロゾルの粒径と担体に関する発表を、気象研究所の五十嵐康人が気象研究所における放射性セシウム、ストロンチウムに関する観測結果の発表を行った。

東京大学大気海洋研究所の鶴田治雄は、“Summary of atmospheric measurements of radioactive materials released after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident and their transport pathways (福島第一原子力発電所事故後に放出された放射性物質の大気中での測定結果の総まとめとそれらの輸送経路)”というタイトルで発表した。内容は、福島第一原子力発電所事故直後に関東地方の6地点で独自に連続測定されて公表された、大気中の ^{137}Cs と ^{131}I の濃度を取りまとめて解析し、 $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ や粒子状 ^{131}I が気体状と粒子状の ^{131}I の総和に占める割合などの特徴を明らかにした(Tsuruta *et al.* 2012)。関東地方での大気中 ^{131}I と ^{137}Cs 濃度の経時変化によれば、すべての地点で、3月15日と16日および21日の午前中に高くなったが、3月22日は ^{131}I だけが高かった。なお関東南部では、 ^{131}I 濃度は3月21日より22日のほうが高く、茨城県東海村とは異なっていた。一方、大気中の $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ の比は、 ^{131}I 濃度の高かった時間帯(22日を除く)では10前後と小さく、濃度の低かった時間帯では、100前後と大きかった(第1図)。原発停止時の原子炉容器内の放射性物質インベントリ(西原ほか2012)によれば、この比は7-10だったので、ドライな状態で放出されたと推定される。なお、3月22日だけは、 ^{131}I 濃度が高かったにもかかわらず ^{137}Cs 濃度が低かったため、その比は100前後と大きかった。また、大気中の ^{131}I は気体状(^{131}Ig)と粒子状(^{131}Ia)とが混在し、茨城県東海村のJAEA核燃料サイクル工学



第1図 関東地方の6つの採取/分析機関 (Tokai-mura: JAEA 核燃料サイクル工学研究所, Tsukuba: 国立環境研究所/KEK, Chiba: 日本分析センター, Wako: 理化学研究所, Setagaya: 東京都立産業技術研究センター, Tajima: 川崎市公害研究所・東大気海洋研究所/大阪大学) における $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ の経時変化 (2011年3月14-31日)。

研究所, およびつくばの国立環境研究所と千葉県の日本分析センターでは, これらを分離して採取した (千葉は一括測定). 粒子状の存在比 $^{131}\text{I}/(^{131}\text{I}_g + ^{131}\text{I}_a)$ は, 地点および測定時による変動は大きかったが, 放射性物質の大量放出時 (3月15日, 3月20-21日) は 0.4-0.8で, その他の期間の0.1-0.4に比べて大きかった. この違いは, チェルノブイリ原発事故後直後にも見られており, 放出後の大気中での変質によって $^{131}\text{I}_a$ が相対的に増加した可能性があり, 今後の検討課題である. 今回の大気関係を中心とした特集は内容が豊富でコンビーナに感謝するとともに, 総合討論ができればもっと議論が深まったと思われる. (鶴田治雄)

5. 領域モデルによる解析

このセッションでは6件の発表があった. JAEAの寺田宏明は“Regional-scale atmospheric dispersion of radionuclides discharged during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident (福島第一原子力発電所事故において放出された放射性核種の領域スケール大気拡散)”と題した発表を行った. 発表内容は以下に要約される.

福島第一原子力発電所事故により放出された放射性核種の大気拡散及び沈着過程を再構築して解析するため, WSPEEDI-II を用いて3月12日から4月30日までの ^{131}I と ^{137}Cs の東日本域大気拡散シミュレーションを実施した. 計算には, 単位放出率 (1 Bq h^{-1}) による大気拡散シミュレーションと大気中核種濃度及び空間線量率の測定値を基に推定された放出率を用いた (Katata *et al.* 2012; Terada *et al.* 2012). シミュレーションは, 東日本の陸上で観測された日降下量及び月

間降下量の分布を良好に再現し, 推定放出率の妥当性を示した. シミュレーション結果の解析から, 航空機モニタリングによる現在の東日本における ^{137}Cs の高濃度沈着分布は, 主に, (1) 3月12日の福島県北東部及び宮城県北東沿岸部における乾性沈着, (2) 3月15日の福島県南東部及び茨城県北部における湿性及び乾性沈着, (3) 3月15~16日の福島第一原子力発電所北西域における湿性及び乾性沈着と, 福島県中部 (中通り), 栃木県, 群馬県における湿性沈着, (4) 3月20日の宮城県北部及び岩手県南部における湿性沈着, (5) 3月21日の茨城県南部及び千葉県北西部における湿性沈着, により形成されたことが示唆された. シミュレーションと航空機モニタリングによる ^{137}Cs 沈着量分布においていくつかの相違が見られたため, 拡散モデルの沈着過程に着目したパラメータ解析を行った結果, レインアウト/ウォッシュアウト及び氷相/液相の区別や霧沈着を考慮した適切な沈着スキームを用いることで, 計算モデルは放射性核種の時空間分布をより高精度に再現できることが示唆された.

JAEAの堅田元喜は“Local-scale atmospheric dispersion of radionuclides discharged during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident (福島第一原子力発電所事故において放出された放射性核種の局地スケール大気拡散)”と題した発表を行った.

2011年3月の福島第一原子力発電所事故の間に高線量地帯が形成されたメカニズムを明らかにするために, WSPEEDI-II を用いて, 3月12日から17日までの放射性核種の大気拡散状況を再現した. シミュレー

ションには、環境モニタリングデータと単位放出率（ 1 Bq h^{-1} ）の大気拡散計算を組み合わせ推定した放出率を用いた、WSPEEDI-IIによって、 ^{137}Cs の沈着量とモニタリングされた空間線量率の上昇の全体的な傾向が再現された。シミュレーション結果では、3月12日の午後に起きた1号機の水素爆発の後と3月14日の夜間に放出された高濃度の放射性プルームが、原子力発電所からそれぞれ北西および南南西の方向に流れ、その経路上に大量の乾性沈着をもたらした。福島県に見られる高線量地帯の大部分は、3月15日に放出された放射性物質の湿性および乾性沈着によって形成されたことが示唆された。最も線量が高い福島第一原子力発電所北西地域は、3月15日から16日の大量の沈着によって形成されたと考えられる。

このほか日本側からは国立環境研の大原利真、海洋研究開発機構の滝川雅之、気象研究所の関山 剛らの発表があり、米国側からはローレンス・リバモア国立研究所 NARAC の Gayle Sugiyama より福島第一原子力発電所事故の際に NARAC がとったオペレーションについての発表があった。

(寺田宏明・堅田元喜)

6. 全球、海洋モデルによる解析と健康影響

このセッションでは、気象研究所の田中泰宙が放射性物質の全球拡散、東京大学大気海洋研究所の植松光夫が ^{134}Cs と ^{137}Cs の北大西洋への拡散、NOAAの Glen Watabayashi が GNOME を用いた海洋漂流物の移動のモデル計算結果を発表した。また鳥取大学の栗政明弘は、原子力発電所事故の際の避難における健康リスクについて、放射線のリスクに加えて高齢者を避難・移動する際のリスクも考慮すべき点として指摘した。

(近藤裕昭・山田哲二)

7. 国際協力

国際協力のセッションでは、「福島第一原子力発電所事故に関する気象解析についての技術タスクチーム」に関する2件の講演が行われた。このタスクチームは、原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR) の求めに応じて2011年に世界気象機関 (WMO) に設置されたもので、5ヶ国 (日本、英国、カナダ、オーストリア、米国) のメンバーで構成されている。

Roland Draxler (NOAA) ほかは、“World meteorological organization’s evaluation of the radionu-

clide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident (世界気象機関の福島第一原子力発電所事故からの放射性物質の拡散と沈着推定)”の標題で、WMO タスクチームの放射性物質拡散予測の概要と検証について報告した。タスクチームによる大気輸送・拡散・沈着モデル (ATDM もしくは ATM, 本稿では以下 ATM とする) 実験は、メンバー国の領域 ATM を用いて、水平解像度 0.05° もしくは 5 km で3月11–31日の21日間を対象に3時間おきの初期値168ケースについて、単位放出量に対する72時間予報を行い、地表沈着と最下層 100 m での濃度の時系列を計算するというものである (http://ready.arl.noaa.gov/READY_fdnpwpmo.php, 2013.06.13閲覧)。単位放出量に対する上記の計算は、放出シナリオに応じた重みを加えた線形和をとることにより、沈着と濃度時系列の観測と比較することができる (Draxler and Rolph 2012)。放出シナリオとしては、タスクチーム最終報告書の ANNEX III (http://www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/WMO_fnpp_final_AnnexIII_10June2013.pdf, 2013.6.13閲覧) ではその殆どの計算において、UNSCEAR の推定を用いたが、この講演では、JAEA のシナリオ (Chino *et al.* (2011) に基づくもの、上記報告書の Fig. 1 参照) を用いた結果を報告した。講演では、気象庁メソ解析を用いたカナダ、英国、日本、米国の領域 ATM の結果例と全球解析を含む様々な解析値との組み合わせによる領域 ATM 計算の検証結果が示された。結論として、特に濃度時系列についてメソ解析の利用は全球解析よりも良い結果が得られたこと、解析雨量の利用は必ずしも結果の改善に繋がらなかったこと、アンサンブル予報はアンサンブル平均をとるサブセットを選ぶことによって ATM の結果を大きく改善するが、どのモデルを用いるかをあらかじめ決めることは難しいこと、などを挙げた。

気象研究所の齊藤和雄と新堀敏基は、“JMA’s regional ATM calculations for the WMO technical task team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident (WMO「福島第一原子力発電所事故に関する気象解析についての技術タスクチーム」での気象庁領域大気輸送拡散沈着モデル計算)”の標題で、気象庁の WMO タスクチーム活動への貢献、気象庁メソ解析と解析雨量、気象庁領域 ATM とその改良などにつ

いて述べた。気象庁は、タスクチーム会合での決定に従い、気象庁メソ解析と解析雨量をWMOの標準フォーマットであるGRIB2形式に変換し、UNSCEARで放射性物質の放出と拡散の評価を担当しているグループBに提供している。気象庁とWMOはこれらのデータの利用を希望する研究コミュニティに条件付きで公開することに合意しており、データは、WMOのFTPサイト (<http://www.wmo.int/metdata/>, 2013.6.13閲覧) にアップされている(パスワードについては、WMO <dpfsmail@wmo.int> にメールでコンタクトすることにより与えられることが、前述の最終報告書 ANNEX III に記載されている)。気象庁の領域 ATM は、気象庁大気汚染気象センターの光化学予測や地震火山部の降灰予報に用いられているラグランジュ型の領域移流拡散モデル(新堀ほか 2010) をベースに放射性物質の取り扱いを追加したもので、湿性沈着の取り扱いや軽量粒子の重力落下の取り扱いなどが導入されている。湿性沈着の計算において、メソ解析の降水量を用いる場合と、解析雨量を用いる場合の2種類を計算した。また解析値の内挿に不適切な誤りを修正した。修正版においては、これに加えて鉛直流の内挿に際して周囲8格子を含む9格子平均を用い、モデル最下層では、流れは地形に沿うと仮定している。これらの改修により福島第一原子力発電所から北西に伸びる高濃度の沈着域の表現や関東西部や南部の過剰な沈着が改善し、NOAAのツールを用いた観測値に対する検証スコアも大きく向上した。ただし、解析雨量の利用は、タスクチームの他の領域 ATM 同様、濃度の時系列予報を改善しなかった。今後の課題として、雪の扱いの導入や、レインアウト/ウォッシュアウトにおける解析値の3次元的な情報の利用などを挙げた。(斉藤和雄)

8. おわりに

本シンポジウムは発表数が多く、1発表に20分とつたため、朝8:30-17:30までの長時間になり、総合討論は行わなかった。研究者の個人的かつ献身的な努力を始め機関を越えた協力によりデータの集積が始まっていること、放出源解析とシミュレーション結果の相互のフィードバックや、国際協力が徐々にではあるが進展しつつあることが発表された。これらの問題については、長期にわたる異なる分野間での地道な取り組みが必要であり、今後も定期的に情報公開を兼ねた会議の開催が望まれる。(近藤裕昭・山田哲二)

略語一覧

ATM: Atmospheric Transport, dispersion and deposition Model 大気輸送・拡散・沈着モデル
 CTBTO: Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization 包括的核実験禁止条約機関
 FTP: File Transfer Protocol ファイル・トランスファー・プロトコル
 GNOME: General NOAA Operational Modeling Environment 汎用緊急時海洋漏洩事故拡散モデル
 GRIB2: GRIB2 Binary edition 2
 JAEA: Japan Atomic Energy Agency 日本原子力研究開発機構
 MASINGAR-mk2: Model of Aerosol Species in the Global Atmosphere 気象研究所全球エアロゾルモデル
 NARAC: National Atmospheric Release Advisory Center 米国大気放出勧告センター
 NCAR: National Center for Atmospheric Research 米国大気科学研究センター
 NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration 米国海洋大気庁
 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
 UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 原子放射線の影響に関する国連科学委員会
 WMO: World Meteorological Organization 世界気象機関
 WSPEEDI: Worldwide version of SPEEDI 世界版 SPEEDI

参考文献

Aoyama, M., M. Kajino, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, D. Tsumune, T. Tsubono, Y. Hamajima, T. Gamo, M. Uematsu, T. Kawano, A. Murata, Y. Kumamoto, M. Fukasawa and M. Chino, 2013: One year tracking of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs in the North Pacific Ocean released from Fukushima Dai-ichi NPP accident. <https://ams.confex.com/ams/93Annual/webprogram/Paper222652.html> (2013.6.21閲覧).
 Bieringer, P. E., S. Hanna, G. Young, B. Kosovic, J. Hannan and R. Ohba, 2013: Methods for estimating the atmospheric radiation release from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. Bull. Amer. Meteor. Soc., **94**, ES1-ES4.
 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.
- Draxler, R.R. and G.D. Rolph, 2012: Evaluation of the Transfer Coefficient Matrix (TCM) approach to model the atmospheric radionuclide air concentrations from Fukushima. *J. Geophys. Res.*, **117**, D05107, doi: 10.1029/2011JD017205.
- Katata, G., M. Ota, H. Terada, M. Chino and H. Nagai, 2012: Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part I: Source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident. *J. Environ. Radioact.*, **109**, 103-113.
- 近藤裕昭ほか, 2012: 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. *天気*, **59**, 239-250.
- 日本原子力研究開発機構, 2012: 公開ワークショップ「福島第一原子力発電所事故による環境放出と拡散プロセスの再構築」. <http://nsed.jaea.go.jp/ers/environment/envs/FukushimaWS/> (2013.6.21閲覧).
- 日本気象学会, 2013: 東日本大震災への対応. <http://www.metsoc.or.jp/others/shinsai/shinsai.html> (2013.6.21閲覧).
- 西原健司, 山岸 功, 安田健一郎, 石森健一郎, 田中 究, 久野剛彦, 稲田 聡, 後藤雄一, 2012: 福島第一原子力発電所の滞留水への放射性核種放出. *日本原子力学会和文論文誌*, **11**, 13-19.
- Pullen, J., J. Chang and S. Hanna, 2013: Air-sea transport, dispersion, and fate modeling in the vicinity of the Fukushima nuclear power plant. A special conference session summary, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 31-39.
- 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.
- Stohl A. *et al.*, 2012: 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.*, **12**, 2313-2343.
- Terada, H., G. Katata, M. Chino and H. Nagai, 2012: Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part II: Verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion. *J. Environ. Radioact.*, **112**, 141-154.
- 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会, 2012: 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会政府事故調中間・最終報告書. <http://www.kantei.go.jp/saigai/syusoku.html> #事故の調査・検証 (2013.6.21閲覧).
- Tsuruta, H., M. Takigawa and T. Nakajima, 2012: Summary of atmospheric measurements and transport pathways of radioactive materials released by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident*, 101-111.