



福島第一原子力発電所事故から放出される放射性セシウムの大気の流れのモデル図

中島輝幸^{1,2*}、三沢翔太¹、森野優³、鶴田春夫^{1,4}、後藤大介³、内田淳也¹、
竹村俊彦⁵、大原敏正³、大浦安治⁶、海老原満⁶、佐藤正樹¹

抽象的な

本研究では、福島第一原子力発電所事故により放出されたセシウム137の大気中輸送を描写するための新しい手法を提案する。この方法では、2つのエアロゾルモデルアンサンブルの結果と、浮遊粒子状物質監視ネットワークの90か所で2011年3月14日から23日の間に表面レベルで1時間ごとに観測された大気中の¹³⁷Cs濃度を組み合わせています。新しい方法は、以前に特定された8つのブルーム事象に関連する、正確な輸送経路と地表レベルの大気中のセシウム137の分布を解明する。モデルアンサンブルは、観測された表面レベルの大気¹³⁷Csの分布の主な特徴をシミュレートします。しかし、場合によっては大きな差異が見られ、阿武隈山地における放出シナリオ、ブルーム高さ、湿性堆積過程、ブルーム伝播のモデル化を改善する必要があることが示唆された。これらの誤差要因の寄与は、気象条件に応じて、各事象の初期段階と消滅段階で異なります。

キーワード: 福島原子力発電所事故、エアロゾル、放射性物質、¹³⁷Cs、化学輸送モデル、アンサンブルモデル

はじめに日本の東

北地方、東北地方、関東地方の広範囲は、東京電力株式会社（東京電力）の福島第一原子力発電所（FDNPS）の事故から放出された放射性物質によって、さまざまな症状で明らかになったように汚染された。環境調査（中島ら、2014）。この事故は、2011年3月11日の日本標準時（JST; 協定世界時、UTC+9時間）14時46分に発生した東日本大震災によって引き起こされました。

竹村ら。（2011）東経145度に沿ったオホーツク海域の高度500 hPaの負の異常により、西風ジェットが気候学的影響よりも強くなったことが示されました。

3月中旬を意味します。その結果、FDNPSからの放射性物質の70～80%が太平洋と地球の残りの部分に放出されました

(Takemura et al.

2011年; ストールら。2012年; メサロスら。2016)。残りの物質は日本の陸地に広がって堆積し、特徴的なホットスポットパターンを生成した(Yasunari et al. 2011; JAEA 2012; SCJ 2014)。4月末までの大気中へのセシウム137の総放出量は、 14.6 ± 3.5 PBqと推定されました(SCJ 2014)。

日本の文部科学省が実施した航空機モニタリングによると、大気への総排出量に対する日本の陸地全体の総沈着量の割合は $20 \pm 6\%$ と推定されています(MEXT 2011)。一方、日本学術会議による複数モデルの相互比較に基づいて、この比率は $27 \pm 10\%$ と計算されました(SCJ 2014)。現在まで、機器の損傷や停電による観測データが不足しているため、この矛盾は完全には理解されていません。

*連絡先: terry-nkj@nifty.com

¹ 東京大学大気海洋研究所 (AORI)

〒277-8568 千葉県柏市柏の葉5-1-5 2

宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター (EORC)

機関 (JAXA)、〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

著者情報の完全なリストは記事の最後にあります

不確実性のモデル化も可能です。さらに、の放出時系列には依然として大きな不確実性が存在する
図 1 に示す放射性物質。弓本らアル。(2016) を最適化するために逆分析を実施しました。の時系列を使用して排出率を推定します。堆積マップですが、結果は大きく異なります
堅田らのもの。(2015年)。

最近、鶴田ら。(2014) する方法を開発しました。

大気の時ごとの時系列を直接測定する
全国浮遊粒子状物質のエアロゾルサンプリングテープからの地表レベルでのセシウム137濃度
(SPM) ネットワーク。SPM ネットワークは大気汚染を監視します
ベータ線減衰カウンターを使用することによって。首都大学東京の4
研究室
東京大学原子力専門学校、
日本原子力研究開発機構、日本化学工業
分析センター、大気負荷を取得
SPM テープ上の 1 時間ごとのエアロゾル スポット。この方法は、データは地表レベルからのものではあるが、大気中のセシウム 137 の輸送を研究する可能性を提供する。
事故後の全期間。SPM データセットには高度な時間的および空間的サンプリングがあり、1 時間ごとに観測が行われます。
400 サイト中 90 サイト (図 2)。図 2 では、次のことがわかります。
中通り地域は奥羽川と海峡の間の海峡流域です。
阿武隈山地や阿武隈山地、浜通り地域は
阿武隈山地東側の海岸地帯。の
FDNPSは浜通り地域の北部に位置しています。このレポートでは、アンサンブル結果を比較します。
SPM データを含む 2 つのエアロゾル輸送モデル。比較の重要な目的は、妥当性を調査することです。
SPMデータとマルチモデルシミュレーションの併用

大気中のセシウム137の輸送を示す図

日本の陸地上空。検証が完了したら、さらなる分析など、より大量の SPM データに対して実行できます。
99 の SPM サイトからの最新データ。最近一般公開されました (Oura et al. 2015)。

さらに、その結果は私たちの研究にとって有益なインプットとなる可能性があります。

2 番目のモデルの相互比較。これは、

最初の比較のフォローアップ。

SCJ (SCJ 2014)。これは、緊急プロトコルにおけるモデルの使用に関する将来の議論に貢献する可能性があります。

鶴田ら。(2014) リストされているように 9 つのブルームを特定しました。

図 3 では、粒子状物質を陸域に輸送しました。

大気中のセシウム137が最大値を示す日本濃度が10Bqm⁻³を超えた、概要に基づいて SPM データの時系列を使用した分析と風ベクトルフィールド。比較の目的で、2011 年 3 月 14 日から 24 日までの期間のブルーム P2 から P9 を選択しました。この期間、低気圧の移動が 2 回ありました。日本上のシステム。これらは3月15日と20日に発生しました。図4に示す天気図によると。

方法/実験

大気中のセシウム137濃度のモデルシミュレーション
表面レベルで

この研究では、2 つのエアロゾル輸送モデルが使用されました。セシウム 137 の大気輸送をシミュレートします。の最初のモデルは、非流体静力学的二十面体大気モデルのオンライン動的コアを使用します (NICAM; 富田) および佐藤 2004。佐藤ら。2008) スペクトルと組み合わせるエアロゾル種の放射線輸送モデル (SPRINTARS; 竹村ら。2000年;ダイラ。2014) ;これを参照します Nモデルとして。NICAMモデルが実装されています
高い空気質量流束タイプの動的スキームを備えた
大量保存、地球規模から地域までをカバーできる
3 つのグリッド システムを使用したシミュレーション。
準均一グローバル グリッド、ストレッチ グリッド、およびダイヤモンド地域グリッド (Uchida et al. 2015)。採用しました
地域シミュレーション用のダイヤモンド グリッド システム
次の設定: 10 秒の時間ステップ、5 km のグリッド解像度、
40層あり、最下層の厚さは20μmです。の
雲の微小物理スキームは、6 つの水カテゴリー (NSW6) を備えた
NICAM 単一瞬間スキームでした。
は、Lin のスキームの簡略化されたバージョンです (Lin et al. 1983)。の
乱流拡散の計算には、部分凝縮スキーム (Mellor and Yamaha 1982) とレベル 2.0 の乱流スケール調整を備えた渦拡散スキームが採用されました。
(中西と新野 2004)。数値領域は、北緯 26.5 度、東経 144.4 度
を持つ菱形の領域でした。

北緯35.8度、東経132.0度、北緯50.6度、東経133.4度、北緯39.9度、東経147.7度。それ

東北地方 (東北地方) をカバー

図2に示す福島県、宮城県を含む日本列島および関東平野地域

(東京、埼玉、千葉、神奈川を含む地域)

及び茨城県)。FDNPS から解放された後、

大気中のセシウム137は硫酸塩エアロゾル粒子として扱われた

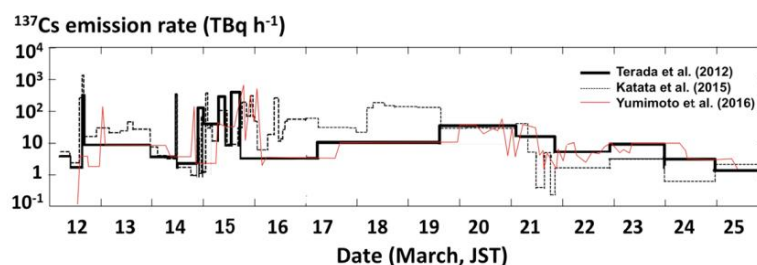


図 1 寺田らが推定した FDNPS からの¹³⁷Cs放出速度の時系列。(2012)、堅田ら。(2015)、弓本ら。(2016)

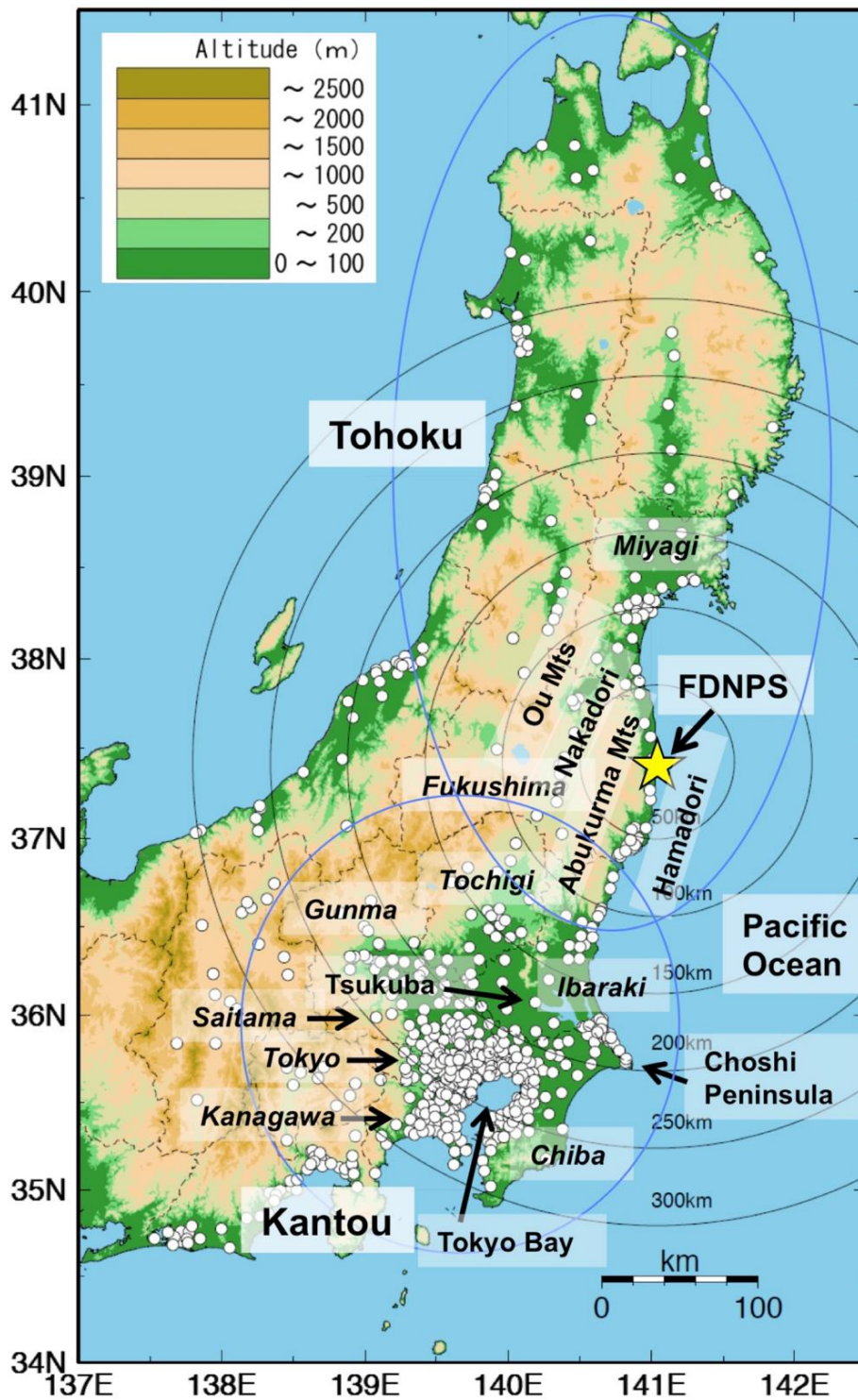
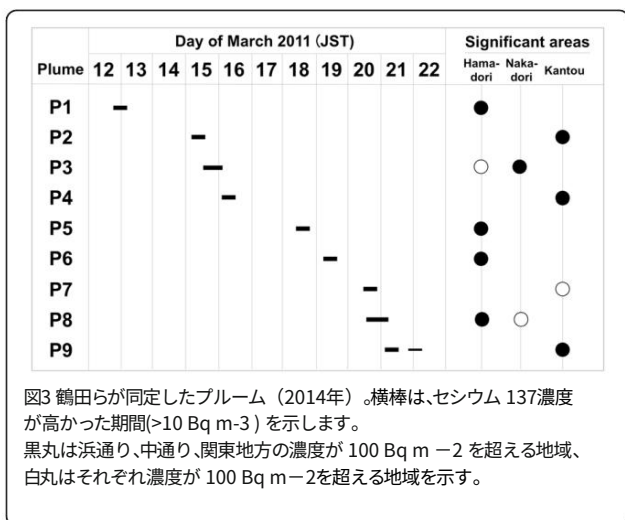


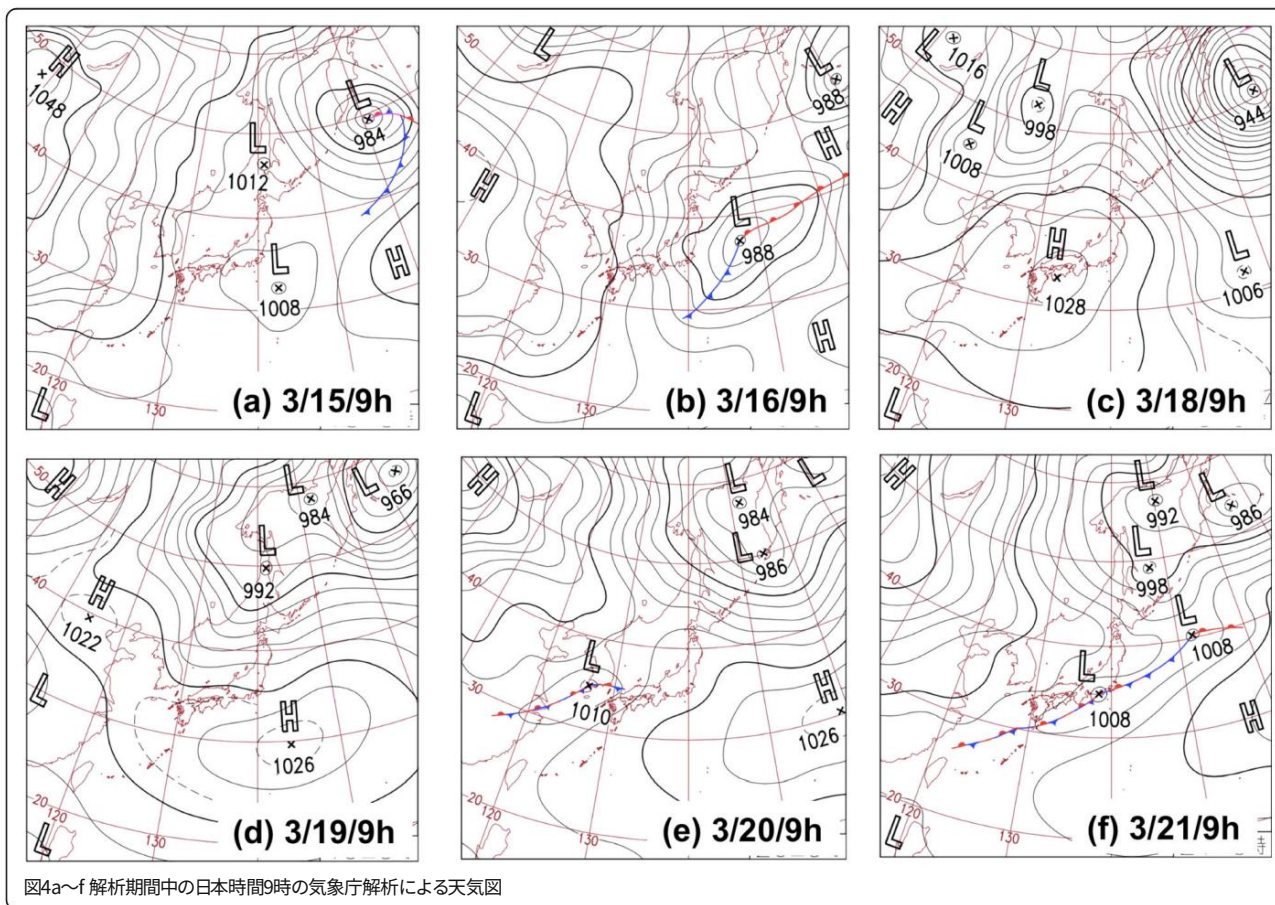
図2 本研究における事故時の主要な地域名と SPM サイトの位置。東北地方は日本列島の北東部であり、福島県と宮城県を含みます。関東地方とは、東京都、埼玉県、千葉県、神奈川県、茨城県を含む地域です。FDNPSは、阿武隈山地東側の海岸地域である浜通り地域の北部に位置しています。中通り地域は、奥羽山脈と阿武隈山地の間にある海峡流域です。白丸は事故前、東日本の自治体が管理・維持していたSPM監視サイト。ベースマップは、鶴田らの図1のオリジナルマップを使用して修正されました。(2014)



そして、竹村らのスキームによれば、輸送、吸湿性成長、乾燥および湿潤堆積、重力沈降を受けると想定されています。(2000年)。この数値実験では、半径がの単分散硫酸塩相当粒子を仮定しました。

兼安らによって観察されたサイズ分布を考慮すると、0.24 μm。(2012)と竹村らによって定義されたクラウド内掃気係数。(2000)を0.8として計算します(Goto et al. 2015a)。

もう1つのモデルは、気象調査および予測モデル(WRF)バージョン3.1(Skamarock et al. 2008)であり、3次元化学輸送モデルであるModels-3 Community Multi-scale Air Quality(CMAQ)と組み合わせたものです。バージョン4.6(ByunおよびSchere 2006)。これをWモデルと呼びます。CMAQは、FDNPSシミュレーション用に国立環境研究所によって放射性物質の輸送用に修正されていました(Morino et al. 2011; SCJ 2014)。我々は、6次の水平移流ノイズフィルターを使用しないスカラー正定値移流、完全拡散のWRFモジュール、およびMellor-yamada-Janjicスキームの惑星境界パラメータ化を採用しました(Wang et al. 2012)。今回のシミュレーションでは、すべての¹³⁷Csが粒子相にあると仮定され(Sportisse 2007)。詳細なプロセスが十分に報告されていないため、化学プロセスとエアロゾルプロセスは計算されませんでした。堆積スキームは、ByunおよびChing(1999)およびByunおよびSchere(2006)のものでした。平均粒子半径は次のように仮定されました。



を0.5 μm とし、幾何分散 σ_g を次のように仮定した。
 $\sigma_g = 1.1$ (Sparmacher et al. 1993; Sportisse 2007; Kanayas et al. 2012)。モデル領域は、東北地方と関東地方の大部分をカバーする700 × 700 km²のエリアで、格子状に配置されました。解像度は3 km、34層で、最下層の厚さは約60 mです。シミュレーション期間は14 ~ 24年でした
 3月と比較して分析を行った。

観測された大気中のセシウム137を用いたモデルアンサンブルの結果
 表面レベルでの濃度。合計堆積量
 日本の国土は、Nモデルでは2.12 PBq、Wモデルでは2.21 PBqとしてシミュレーションされました (Morino et al. 2013)。これらの値は小さな堆積物に属します
 SCJモデル比較 (SCJ 2014) のグループ。
 総沈着量の平均値は2.92 PBqでした。

どちらのモデルも3時間ごとに5 × 5 kmでナッジされました
 日本の中規模客観的分析データ (MANAL)
 気象庁 (JMA)。放出を選択しました
 寺田らのシナリオ (2012) で使用されています。
 多くの先行研究があるため、比較に適しています
 彼らと一緒に。図5は、シミュレートされた2つの例を示しています。
 特定のケースにおけるNモデルとWモデルの両方のパフォーマンスを研究するために使用された。観測された大気中の137Cs、
 図3 ~ 図6に示す詳細な時系列から抜粋したものである。6
 7は気象庁の解析による降水量マップと
 Nモデル。これら2つの例は、3月15日、日本時間12:00でした。
 (3/15/12時間)、3月21日9:00 JST (3/21/9時間)、関東地方で
 100 Bq m⁻³以上の高濃度ブルームが観測されました。図5では、
 観測された濃度が色分けされた円で示されており、データは

検出限界0.1 Bq m⁻³未満は三角形で示されます。3月15日、
 交通機関は乾式雨に支配され、遅くまで大きな降水はありませんでした。

に示された気象庁の分析が示すように、その日の夕方。
 図6. 大気中のセシウム137の分布は良好であった
 0.1 ~ 100 Bq m⁻³の広範囲の濃度について2つのモデルでシミュレーション。注意すべきことは、

観測された高濃度領域は狭い範囲に限定されていた
 この領域は、シミュレーションされたブルームと一致していました。
 関東地域向けはFDNPSから配信開始。
 Nモデルでシミュレートされたブルームはあまり拡散していませんでした
 Wモデルでシミュレートされたものより (狭い)。審査する
 観測値とシミュレーション値の相関係数による
 分布では、現実はこちら2つの結果の間にあると想定されます。
 これについては、次の段落でさらに説明します。

3月21日のイベントでは、図5c、d、

それぞれ。朝方に雨が降った
 図7bに示すように、3月21日の関東地方。
 ただし、シミュレートされた大気中濃度は、
 セシウム137は全体的に観測値よりも小さかったが、
 シミュレートされた湿式堆積が多すぎることを示唆しています
 Wモデルに強い。トータル中のウェット成膜
 日本の陸上の周期は1.68としてシミュレーションされ、
 NモデルとWモデルではそれぞれ2.12 PBq。

図5に示すように、シミュレーションされた精度は
 2つのモデルのブルームパターンはイベントごとに異なりました。
 イベント。これらの違いはSCJ (2014) によっても報告されています。
 差異を調整し、統計的に最適な分布を構築する1つの方法は、マルチモデルアンサンブル法を使用して加重平均濃度を計算すること
 です。

j回目のNモデルのk番目の格子点のC_k
 で与えられるステップ

$$\frac{1}{C_{k,j}^{1/4}} \frac{CN_{k,j}}{\sigma_N^2} = \frac{1}{C_{k,j}^{1/4}} \frac{1}{\sigma_W^2} \quad \delta P$$

ここで、CN_{k,j}とCW_{k,j}は、それぞれNモデルとWモデルの値です。
 Wモデルのグリッド値は次のとおりです。
 Nモデルグリッド上に線形補間されます。量 σ_N と σ_W は、観測値からのそれぞれのモデル値の毎日の二乗平均平方根偏差です。

価値観。図8は、観察された値の比較を示しています。

Nモデルのみで得られた値との値

そして、次のように構築された2つのモデルアンサンブル手法を使用します。

提案された方法。日次相関係数

特定の日 (3月15日、20日、21日) については、次のとおりです。

表1. 計算された相関係数

観察およびシミュレーションされた毎日の手段を使用する

表面レベルで線形補間された値

サイトの場所。アンサンブルメソッドは、

大気中のセシウム137の分布は、いずれかのモデル単独の相関係数よりも優れた相関係数を持っていました。しかし、

3月20日は例外だった。相関係数

2モデルアンサンブル法の効果はそれほど良くありませんでした

Nモデルよりも優れていましたが、

Wモデル。相関係数の3日平均は、Nモデルとモデルで得られた

0.48から2モデルアンサンブル法により0.51に改善されました。

Wモデルでは0.46。

結果と考察

大気中のセシウム137ブルームの構造

このセクションでは、ブルームの形成と

3つの期間のそれぞれで散逸: 3月15 ~ 16日

2011年3月18 ~ 19日と3月20 ~ 21日。

3月15日~16日

関東・東北地方での噴煙現象

3月15日の朝から3月15日の正午まで続いた

翌日。セシウム137濃度の時系列

2つのモデルと観察結果を以下に示します。

図6a、bと気象庁の降水量マップ

解析とNモデルの解析。気象庁解析の2モデルアンサンブル平均と
 風ベクトルは次のようになります。

いくつかの特徴的な時間について図9に示します。その間

3月15日の朝、低気圧が発達し、

弱いトラフ構造は太平洋地域に位置していた

関東地方沖 (図4a)。北東の風