

# Numerical reconstruction of high dose rate zones due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident

## 福島原発事故によって生じた高被曝線量率区域の数値再構成

Genki Katata\*, Hiroaki Terada, Haruyasu Nagai, Masamichi Chino

Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan

堅田元喜\*, 寺田宏明, 永井晴康, 茅野政道

### Abstract

To understand how the high dose rate zones were created during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant (FNPP1) accident on March 2011, the atmospheric dispersion of radionuclides during the period from 15 to 17 March was reproduced by using a computer-based nuclear emergency response system, WSPEEDI-II. With use of limited environmental monitoring data, prediction accuracy of meteorological and radiological fields by the system was improved to obtain best estimates of release rates, radiation dose maps, and plume movements. A large part of current high dose rate zones in Fukushima was explained by simulated surface deposition of radionuclides due to major releases of radionuclides on 15 March. In the simulation, the highest dose rate zones to the northwest of FNPP1 were created by a significant deposition of radionuclides discharged from FNPP1 during the afternoon. The results indicate that two environmental factors, i.e., rainfall and topography, strongly affected the spatial patterns of surface deposition of radionuclides. The wet deposition due to rainfall particularly played an important role in the formation of wide and heterogeneous distributions of high dose rate zones. The simulation also demonstrated that the radioactive plume flowed along the valleys to its leeward, which can expand the areas of a large amount of surface deposition in complex topography.

© 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

2011年3月11日の福島第一原発事故の間にどのようにして高被曝線量率区域が生成されたか理解するために、3月15日から17日の期間で放射性核種の空気散布は計算器ベースの原子核緊急応答システム WSPEEDI-II を用いて再現された。限られた監視データの使用で、このシステムによって計算学と放射線学の分野の正確な予知は提供する頻度のベストな推定と放射線被曝線量地図、そしてマントルブルーム\*の取得が向上された。福島の現在(2011年)の高線量率区域の大部分は3月15日の放出された主な放射性核種による核種表面沈殿のシミュレーション計算で解釈されている。このシミュレーションで、第一原発の北西の最も高い線量区域は午後の間に第一原発から排出された放射性核種の確かな沈殿によって生成された。結果は2つの環境要因(つまり、降水量と地形)を示し、放射性核種の表面沈殿の空間パターンに強く影響を与える。特に降水による湿った堆積は広く異質な高線量率区域の分布で重要な役割を担う。この計算は谷と風下に沿った核種の対流も実証し、複雑な地形で

の大きな表面堆積量の領域に拡大することができる。

© 2011 Elsevier B.V. 受理

\*マントルブルーム(plume): ブルームテクトニクス (plume tectonics) は、1990年代以降の地球物理学の新しい学説。マントル内の大規模な対流運動をブルーム (plume) と呼び、この変動を検討するため、ブルームテクトニクスと命名された。プレートテクトニクス理論が地球の表面に存在するプレート(厚さ約100km)の変動(テクトニクス)を扱うのに対し、この説では深さ2,900kmに達するマントル全体の動きを検討する。日本の深尾良夫(元東京大学地震研究所)や丸山茂徳(東京工業大学地球生命研究所)が提唱している。(wiki参照)

### 1. Introduction

In the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant (hereinafter referred to as FNPP1) accident, it was clarified by aerial and ground level radiation monitoring (MEXT and DOE, 2011) carried out after 16 March (Fig. 1a, reproduced by the authors) that the high dose rate zones had been formed to the northwest direction from FNPP1. It is important to understand how these zones were created for radiological dose assessment for the accident. The key of its formation is considered to be a significant release of radionuclides (such as  $^{131}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$ ) that can be deposited onto the ground surface on 15 March, 2011 estimated by Japan Atomic Energy Agency (JAEA). The preliminary estimation of the release rates of radionuclides indicates that the zones were formed due to a significant release on 15 March, 2011 (Chino et al., 2011). At 9 Japan Standard Time (JST . UTC . 9 h) on 15 March, air dose rate at the main gate of FNPP1 rapidly increased up to approximately  $12 \text{ mGy h}^{-1}$  after an explosive sound around the suppression chamber of unit 2 at 6:10 JST (TEPCO, 2011a). Then, air dose rates rose up at several off-site monitoring posts (Kawauchi, Koriyama, Iitate, and Fukushima) located at the southwest to north directions of FNPP1 in turn until the midnight (Fig.1b). The highest value of air dose rate of  $44.7 \text{ mGy h}^{-1}$  was observed at 18:20 JST at the monitoring post in Iitate (Fukushima Prefecture, 2011a) located 40 km northwest of FNPP1. These data imply that the radioactive plume changed its flow direction clockwise and passed through monitoring posts in various directions.

The formation process of high dose rate zones can be normally investigated by analyzing environmental observation data such as meteorological condition,

radiation dose, concentration and deposition of radionuclides. However, some important equipment (e.g., stack monitors, radiation and meteorological stations), which was deployed within 20 km from FNPP1 to measure air dose rates and meteorological conditions, did not work on 15 March, 2011 due to the severe earthquake and/or tsunami. Consequently, it was difficult to analyze in detail how the plume flowed from FNPP1 and formed the high dose rate zones. To reveal the formation mechanism further, numerical simulation of the event of atmospheric dispersion on 15 March, 2011 is required.

In the present paper, we tried to reconstruct the event on 15 March by coupling limited environmental data with numerical simulations of computer-based nuclear emergency response system, WSPEEDI-II (Terada et al., 2008). The reconstruction was carried out by two successive ways. The first is the estimation of temporal changes in release rates on 15 March by comparing air dose rates calculated under the assumption of unit release rate ( $1 \text{ Bq h}^{-1}$ ) with observed one. The second is the elucidation of formation process of high dose rate zones based on the transport, diffusion and deposition on the ground surface of plumes reproduced in the simulation.

## 1. はじめに

福島第一原発（ここでは FNPP1 と略す）の事故で、FNPP1 から北西方向に形成された高線量区域は 3 月 16 日後に実行した大気と地表水準の放射能監視 (MEXT and DOE, 2011) によって明らかにされた (図 1a に著者によって再現した)。これらの区域がどのように生成されたかを理解するために事故の放射線被曝線量評価は重要である。この構成の鍵は放射性核種 ( $^{131}\text{I}$  や  $^{137}\text{Cs}$  のような) の放出が重要であると考えられ、日本原子力研究開発機構 (JAEA) によって 2011 年 3 月 15 日に地表表面に堆積した可能性のある核種を評価した。放射性核種の放出頻度の最初の評価は 2011 年 3 月 15 日に重要な公開 (Chino et al., 2011) によって区域が形成されたことを示す。日本標準時間 (JST)\*\* の 9 時 FNPP1 のメインゲートの空間線量率は  $6:10 \text{ (JST)}$  で 2 ユニットの室内 (原子炉建屋) 抑制周りの爆発が聞こえた後、急速に約  $12 \text{ mGy h}^{-1}$  へ増加した (TEPCO, 2011a)。そして深夜の番の間に南西で FNPP1 の北方向にかけて、現場から離れた場所の監視ポスト (川口村、郡山市、飯館村、そして福島市) の幾つかで空間線量率が向上した (図 1b)。FNPP1 の北西に 40 km 離れた場所にある飯館村での監視ポストで 18:20 JST に最高空間線量率  $44.7 \text{ mSv h}^{-1}$  が観測された (Fukushima Prefecture, 2011a)。これらのデータは放射能の対流が時計回りの方向に変化し、それぞれの方で監視ポストを通過することを暗示している。

高線量率区域の構成過程は普通、計算条件と放射線被曝線量、汚染、そして放射性核種の堆積などの環境観測したデータを解析することによって調査されることが出来る。幾つかの重要な準備 (積算モニタ、放射能と計算センター) は空間線量率と計算条件と測定するために FNPP1 の 20 km 圏内に展開されたが、同年 3 月 15 日の厳しい地震かつまたは津波によって作動しなかった。その結果として、FNPP1 からの対流がどのように高線量区域を形成したかの詳細な分析が困難になった。構成原理をさらに明らかにするために同年 3 月 15 日の空气中堆積の事象

の数値再構築が要求される。

この論文提供では、計算機ベースの原子核緊急応答システム WSPEEDI-II (Terada et al., 2008) の数値シミュレーションと限られたデータを組みあわせて 3 月 15 日の事象の再現を試みた。再現は 2 通り方法で実行された。1 つ目は観測されたものの単位放出頻度 ( $\text{Bq h}^{-1}$ ) を下限値として仮定し計算した空間線量率を比較することによって 3 月 15 日の放出頻度の時間変化を評価すること。2 つ目はシミュレーションで地表表面における輸送と拡散、堆積の再現を基に高線量区域の構造過程を解明することだ。

\*\*JST: Japan Standard Time は日本標準時間を意味して、協定世界時である UTC: Universal Time Coordinated との関係は  $\text{JST} = \text{UTC} + 9\text{h}$  である。イギリスあたりが UTC の原点時間である。

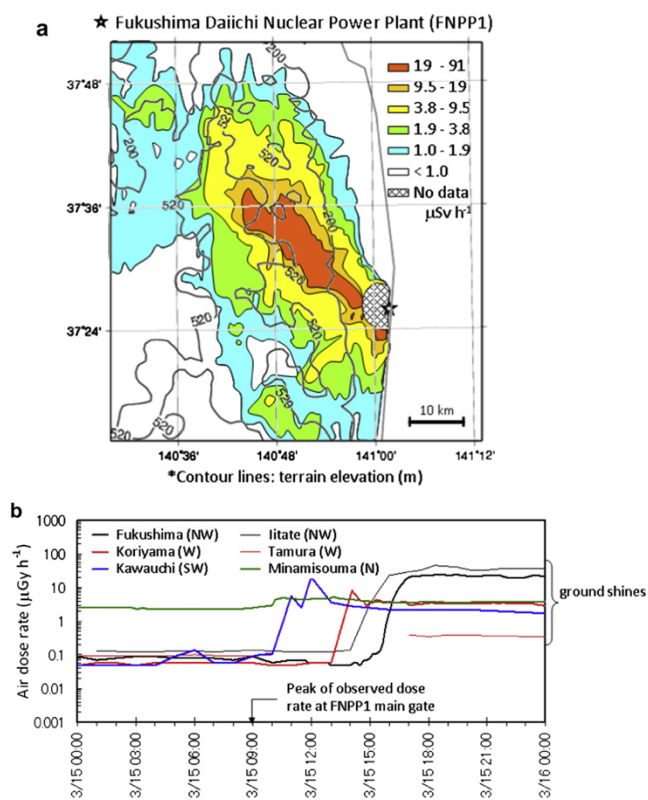


図 1. 福島県で観測された地表表面空間線量分布：(a) 大気観測 (MEXT and DOE, 2011 を著者が再現) と (b) 監視ポストにおいて (Fukushima Prefecture, 2011a and b)。 (b) の括弧内文字は FNPP1 からの場所の方角を示す。

## 2. Methodology

### 2.1. Study area and the environmental data

Three computational domains are set for meteorological prediction and inner two domains are used for atmospheric dispersion calculation (Fig. 2). The area for comparison

with the measurements is 190-km square area in Fukushima Prefecture, Japan. The site of FNPP1 is located near the Pacific coast and lies on the East side of Abukuma highland with an altitude up to 1000 m. Meteorological data of wind speed and direction observed at surface weather stations around FNPP1 (Figs. 3 and 4) were used for data assimilation of MM5. In addition, the data of wind speed and direction at the ground surface at FNPP1 and at the top of stack with 120 m height at Fukushima Daini nuclear plant (hereinafter referred to as FNPP2, METI, 2011; Fig. 5) were used to correct wind fields around the plant. To estimate the release rates and to validate the simulation results, we used the data of airborne (MEXT and DOE, 2011; DOE, 2011) and ground-level monitoring in Fukushima (Fukushima Prefecture, 2011a, b; TEPCO, 2011b), Ibaraki (Ibaraki Prefecture, 2011; Ibaraki Prefectural Environmental Radiation Monitoring Center, 2011; JAEA, 2011), and Tochigi Prefectures (Tochigi Prefecture, 2011).

2. 方法論

2.1. 領域と環境データの研究

3つの計算的な領土は計算学の予知のために設置され、そして内部2つの領土は空気中散布の計算のために使用される(図2)。測定と比較する面積は日本福島県の190 km<sup>2</sup>である。FNPP1の敷地は太平洋海岸の近く、そして高度1000 mの阿武隈高原の東側に位置する。FNPP1周辺の表面天候ステーションで観測された風速と風向き(図3と4)はMM5のデータ融合のために使用された。加えて、FNPP1の地表面と福島第二原発(FNPP2)の風速と風向きのデータ(METI, 2011; 図5)は原子炉周りの風の補正のために使用された。放出頻度の評価とシミュレーション結果を確認するために福島県(Fukushima Prefecture, 2011, b; TEPCO, 2011b)と茨城県(Ibaraki Prefecture, 2011; Ibaraki Prefectural Environmental Radiation Monitoring Center, 2011; JAEA, 2011)、栃木県(Tochigi Prefecture, 2011)の風媒(airborne)(MEXT and DOE, 2011; DOE, 2011)と地表水準のモニタを使用した。

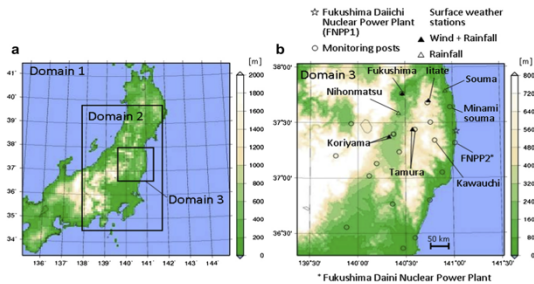


図2. MM5 と GEARN における(a)領土 1 と(b)領土 3 の地形とシミュレーション領土サイズ。(b)のラベルがついたプロットは WSPEEDI-II によって計算領域と放射線学事象の再現のために使用された環境データを示す。ラベルのないプロットは GEARN による計算と観測との間の空間線量の空間パターンを比較するために観測している監視ポストを示す。

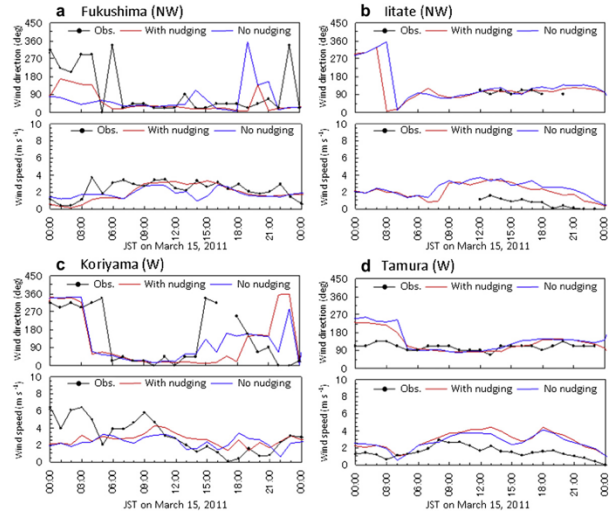


図3. FNPP1 から北西(NW)と西(W)の方角に位置する表面天候ステーションにおける風上と風速のための MM5 計算あり・なし間の比較(実線)と観測値(丸)。

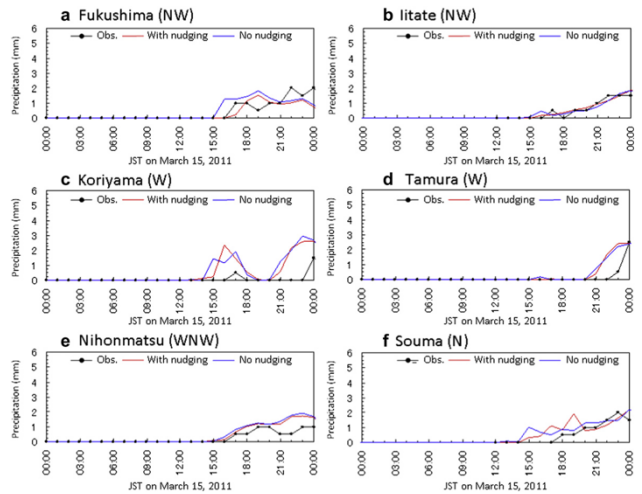


図4. FNPP1 から北西(NW)と西(W)、そして北(N)の方角に位置する表面天候ステーションにおける風上と風速のための MM5 計算あり・なし間の比較(実線)と観測値(丸+黒実線)。

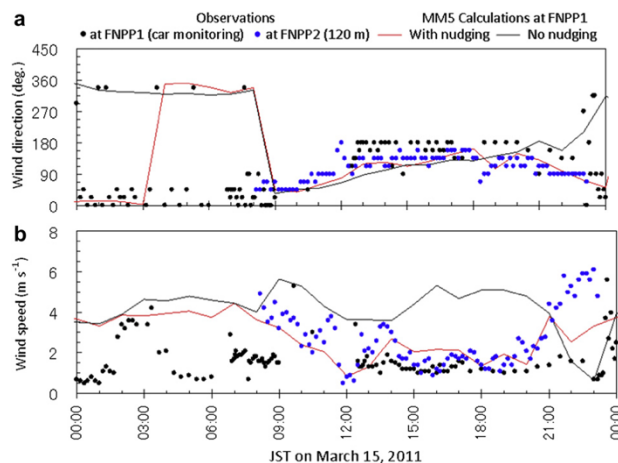


図 5. FNPP1 と FNPP2 における (a) 風向きと (b) 風速の時間変化。観測値(点と実線)、MM5 計算(実線)。

## 2.2. Radionuclides

In our calculations, the major radioactive species of  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ , and  $^{137}\text{Cs}$  were considered to be discharged from FNPP1. Iodine-132 is treated as  $^{132}\text{Te}$  progeny life = 3.2 d) and  $^{132}\text{I}$  (half-life = 2.3 h) is assumed. Thus, in our simulation,  $^{132}\text{I}$  and  $^{132}\text{Te}$  discharged into the atmosphere have the same radioactivity and half-life. The radioactivity ratio  $^{131}\text{I} : (^{132}\text{I} + ^{132}\text{Te}) : ^{134}\text{Cs} : ^{137}\text{Cs}$  was set to be 1:2:0.1:0.1 based on that the ratio of  $^{131}\text{I}$  to other nuclides derived from measured airborne concentrations at Tsukuba (KEK, 2011). Radioactive noble gas,  $^{133}\text{Xe}$  (half-life = 5.2 d), was not considered in this paper since the study mainly focuses on atmospheric movements of radionuclides that can be deposited onto the ground surface. Such approach may lead to a discrepancy of air dose rate between calculation and measurement for the period of the passage of plume. By considering this effect of  $^{133}\text{Xe}$ , the monitoring data during the plume passage were used to investigate the movements of plume. The simulated air dose rates were quantitatively compared with observed ones due to ground-shines of deposited radionuclides after the plume passed away (see Section 2.4).

## 2.2. 放射性核種

我々の計算でFNPP1から排出される主な放射性核種は  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ , and  $^{137}\text{Cs}$  であると考えられる。ヨウ素 132(半減期3.2h)<sup>(\*)</sup>は $^{132}\text{Te}$ (半減期3.2日)の子孫(娘核)で放射平衡であると前提して取り扱われた。したがって我々のシミュレーションでは、空气中に排出された $^{132}\text{I}$ と $^{132}\text{Te}$ は同じ放射能と半減期を持つ。つくば市の空気濃度測定(KEK, 2011)から他核種に提供された $^{131}\text{I}$ との比を基にして放射能比 $^{131}\text{I} : (^{132}\text{I} + ^{132}\text{Te}) : ^{134}\text{Cs} : ^{137}\text{Cs}$ は1:2:0.1:0.1に設定された。希ガスの放射能( $^{133}\text{Xe}$ : 半減期5.2日)はこの論文では考慮していなかった。それはこの研究が地表に堆積できる放射性核種の大気移動に主に集中しているからである。このような

アプローチは対流の道の期間のための測定と計算の間の空間線量率の不一致を導けるかもしれない。 $^{133}\text{Xe}$ の効果を考慮することによって、対流道間の監視データは対流移動を調査するために使用された。対流が道を通じた後に堆積した放射性核種の地面からの放射(ground-shines)によって空間線量率は計算値と観測値を定量的に比較された(2.4.を参照)。

(\*)文章先頭における核種は元素記号ではなく、名称を使用すること。(×:  $^{131}\text{I}$  was..., ○: Iodine-131 was...)

## 2.3. Models

The computer-based nuclear emergency response system, Worldwide Version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (WSPEEDI-II) was used to reproduce the event which had occurred in the atmospheric environment during the period from 15 to 17 March 2011 in Fukushima Prefecture, Japan (Fig. 2). WSPEEDI-II includes the combination of models, a non-hydrostatic atmospheric dynamic model (MM5, Grell et al., 1994) and Lagrangian particle dispersion model (GEARN, Terada and Chino, 2008). MM5 predicts three-dimensional fields on wind, precipitation, diffusion coefficients, etc. based on atmospheric dynamic equations with appropriate spatial and temporal resolution, by using domain nesting method. GEARN calculates the advection and diffusion of radioactive plumes, dry and wet deposition onto the ground surface, and air dose rate from radionuclides in the air by the submersion model and on the ground surface (ground-shine). GEARN can predict the atmospheric dispersion for two domain domains simultaneously based on the meteorological fields of each domain by MM5 by considering in- and outflow between the domains. The performance of this model system was evaluated by its application to the field tracer experiment over Europe, ETEX (Furuno et al., 2004) and Chernobyl nuclear accident (Terada et al., 2004; Terada and Chino, 2005, 2008). Further information of WSPEEDI-II is available in Terada et al. (2004) and Terada and Chino (2005). The simulation conditions of MM5 and GEARN are summarized in Tables 1 and 2, respectively.

Concerning deposition processes in GEARN, deposition velocity is set to typical value for short vegetation, such as grassland (Sehmel, 1980). However, it is known that dry deposition velocity is larger for forest than that for grass (Sportisse, 2007) because forests have tall canopy height and large leaf surface area that enable to capture a large amount of radionuclides in the atmosphere. To roughly simulate this effect, GEARN was modified to use five times larger deposition velocity at the grids with forest category in MM5 than that used at other categories.

## 2.3. 模型

計算器ベースの原子核緊急応答システム, World Version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (WSPEEDI-II)が日本福島県の2011年3月15-17日の期間の間の大気環境で発生した事象を再現するために使

用された(図2)。WSPEEDI-IIは模型の組合せを含んでいる：非静流体的な大気力学模型(MM5, Grell et al., 1994)とラグランジアン粒子拡散模型(GEARN, Terada and Chino, 2008)。MM5は3次元場の風と降水量、散布、計数などを、空間と時間分解能当たった大気力学の式を基に予知する、領域が入れ子にされている方法を使用することによって。GEARNは水没模型による空気と地表(ground-shines)における放射性核種対流の移流と沈殿、地表表面上の乾燥と湿気の堆積、そして核種からの空間線量率を計算する。GEARNは領域間の流入流出を考慮したMM5によるそれぞれの領域の計算上場に基づいて2つの領域の大気散布を同時に予知できる。この模型システムの性能はヨーロッパ、ETEX (Furuno et al., 2004)、そしてチェルノブイリ核事故(Terada et al., 2004; Terada and Chino, 2005, 2008)を超えるフィールドトレーサー実験のアプリケーションによって評価された。さらにWSPEEDI-IIの情報はTerada et al., 2004とTerada and Chino 2005が獲得されている。MM5とGEARNのシミュレーション条件は表1, 2にそれぞれまとめられている。

GEARNの堆積過程に関しては、堆積速度は牧場のような短い草木のための値(Sehmel, 1980)が設置されている。しかし、乾燥した堆積速度は牧草よりも森の方が大きい(Sportisse, 2007)ことが知られている。なぜなら、森は背の高い天蓋の高さと大きな葉の表面積を持ち、大気中の放射性核種の多くの量を捕獲できるからである。粗くこの効果を計算するために、GEARNはMM5の森カテゴリーでの堆積速度を他のカテゴリーよりも5倍大きく修正した。

**2.4. Reconstruction process of atmospheric dispersion**  
Reconstruction procedure in the present study is summarized in Fig. 6. Firstly, meteorological fields were reproduced by using a four dimensional data assimilation method to nudge prediction results by MM5 to observed meteorological data at FNPP1, FNPP2, and surface weather stations in Fukushima Prefecture. Then, based on the reproduced meteorological fields, GEARN was used to simulate atmospheric dispersion and radiological events during the period from 15 to 17 March by using

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Simulation period		15 JST March 14–0 JST March 17, 2011	
Horizontal grid cell	100 × 100	190 × 130	190 × 190
Spatial resolutions	9 km	3 km	1 km
Time steps	18 s	6 s	3 s
Vertical levels		31 sigma levels <sup>a</sup> from surface to 100 hPa	
Nesting option		Two-way nested	
Boundary and initial conditions		MSM <sup>b</sup> (0.1° × 0.125° for atmosphere, 0.05° × 0.0625° for the surface layer)	
3D/surface analysis nudging		Utilized with data at FNPP1 (surface), FNPP2 (120 m), and all available surface weather station	
Nudging coefficient (best estimate)		2.5 × 10 <sup>-4</sup> for wind and temperature and 1.0 × 10 <sup>-3</sup> for humidity	
Radius of influence (best estimate)		20 km for 3D and 40 km for surface	
Observation nudging		Utilized with data at FNPP1 (surface) and FNPP2 (120 m)	
Nudging coefficient (best estimate)		2.0 × 10 <sup>-3</sup> for horizontal wind speed	
Radius of influence (best estimate)		40 km	
Physical parameterizations			
Cumulus		Grell	
Cloud microphysics		Schultz microphysics	
Radiation		Cloud-radiation	
Planetary boundary layer		Eta PBL	
Land surface		Five-layer soil model	

<sup>a</sup> Terrain-following half-sigma levels as 1.0, 0.9974, 0.9945, 0.9917, 0.9863, 0.9727, 0.9592, 0.9459, 0.9327, 0.9003, 0.8687, 0.8380, 0.8080, 0.7504, 0.6957, 0.6190, 0.5482, 0.4822, 0.4215, 0.3658, 0.3148, 0.2682, 0.2256, 0.1868, 0.1515, 0.1194, 0.9035, 0.6409, 0.4041, 0.1910, and 0.0.

<sup>b</sup> Meso-scale Spectral Model.

表1. 大気力学模型のシミュレーション設定(MM5)。解析のパラメータと観測ナudgingはFNPP1 辺りの計算データで観測値を計算して適正化されている (図3を参照)。

	MM5 Domain 2	MM5 Domain 3
Simulation period	17 JST March 14–0 JST March 17, 2011	
Spatial resolutions	3 km	1 km
Time step	12 s	4 s
Vertical levels	29 levels from surface (with 20 m thickness layer) to 10 km	
Release height	20 m	
Nesting option	Two-way nested	
Radioactivity ratio	<sup>131</sup> I: ( <sup>132</sup> I+ <sup>132</sup> Te): <sup>134</sup> Cs : <sup>137</sup> Cs = 1:2:0.1:0.1	
Release rates (Bq h <sup>-1</sup> ) for <sup>131</sup> I on 15 March		
Preliminary estimation (Chino et al., 2011)	0–9 JST: 3.5 × 10 <sup>14</sup> , 9–15 JST: 1.0 × 10 <sup>16</sup> , 15–24 JST: 2.1 × 10 <sup>14</sup>	
Best estimate <sup>a</sup>	0–7 JST: 1.0 × 10 <sup>14</sup> , 7–10 JST: 3.0 × 10 <sup>15</sup> , 10–13 JST: 8.0 × 10 <sup>13</sup> , 13–17 JST: 4.0 × 10 <sup>15</sup> , 17–24 JST: 6.0 × 10 <sup>13</sup>	

<sup>a</sup> The estimated release rate from 17 to 24 JST on 15 March was extended until 0 JST on 17 March.

表2. 大気力学模型のシミュレーション設定(GEARN)。解析のパラメータと観測ナudgingはFNPP1 辺りの空間線量率で観測値を計算して適正化されている (図3を参照)。

preliminary estimated release rates by Chino et al. (2011). The detailed release rates were estimated by that calculated air dose rates along or not along the passage of plumes due to ground-shines (see Fig. 1b) were consistent with those from observations at monitoring posts. Prediction accuracy of GEARN was mainly evaluated by comparisons of air dose rate at Fukushima, Iitate, Koriyama, Tamura, Kawauchi, and Minamisoma in Fukushima Prefecture (Fukushima Prefecture, 2011a, b) between calculations and measurements (Fig. 7) using the statistical indicator of percentage of the calculated values within factors to the measurements. In addition, the spatial distributions of air dose rate calculated by GEARN were also compared with aerial measurements (Fig. 1a, MEXT and DOE, 2011). When **there their** discrepancies of the amount and temporal variation of air dose rates at monitoring points between simulations and measurements were significant, the release rates and durations were modified for recalculation by GEARN.

The revision was extended to the correction method of meteorological field in MM5simulation (Figs. 3e5), when the discrepancy of distribution patterns of air dose rates appeared. Figs. 3e5 show the comparisons between calculations and observations for wind and rainfall at FNPP1, FNPP2, and the surface weather stations in Fukushima Prefecture. At FNPP1 and FNPP2 (Fig. 5), for example, the changes from easterly to southeasterly wind delayed several hours in calculations compared with observations without the analysis and observational nudging functioned in MM5. Calculated wind speed was also clearly higher than the observed one from 9 to 21 JST on 15 March. After the four-dimensional data assimilation of analysis and observation nudging were made, model predictions of wind direction and speed clearly improved, particularly in the period from 9 to 21 JST on 15 March. Tuning parameters for four dimensional as **simulation simulation** in MM5 are given in Table 1. The above procedure for meteorological and atmospheric dispersion simulations was repeated until the simulation results of air dose rate became consistent with most of the measurements.

#### 2.4. 大気散布の再現過程

提供する研究の再現手順は図 6 にまとめられている。はじめに、計算場は 4 次元データを用いて再現された。このデータは福島県の表面天候ステーションと FNPP1, FNPP2 での計算データを観測する MM5 による散布結果を少しずつ動かす方法を融合している。そして計算場の再製造を基に GEARN は Chino et al., 2011 による最初に評価した放出頻度をもちいて 3 月 15-17 日の大気拡散と放射性核種の事象をシミュレーションするために使用された。詳細にされた放出頻度は監視ポストからの観測値からのそれらで構成されている地表放射 (図 1b 参照) によって起こる対流の道に沿ってまたは沿わない空間線量率を計算することによって評価された。GEARN の予知精度は主に福島県の福島市、飯館村、郡山市、田村市、川口村、そして南相馬市の空間線量率の計算値と測定値の間の比較によって評価されている。

この測定値は測定への因子をもつ計算した値の確率の統計的指針を使用している。加えて、GEARN によって計算された空間線量率の空間分布も大気測定(MEXT and DOE, 2011)と比較されている。空間線量率の量と時間の計算と測定の間これらの不一致が有意なとき、放出頻度と存続期間は GEARN による再計算で修正された。

この修正は MM5 シミュレーションの計算場 (図 3-5) の補正法に拡張された。そしてこのとき空間線量率のパターン分布の不一致が現れた。図 3-5 は福島県の表面天候センサーと FNPP1, FNPP2 での風と降水量の観測と計算の間の比較を示す。FNPP1 と FNPP2 で(図 5)、例えば、計算の上で数時間遅れた東から北東へ風向きの変化は解析を用いない観測値と MM5 での役割を担っていたと観測ナudging を比較した。計算した風速も 3 月 15 日の日本標準時間 9 時から 21 時の観測値より明らかに速かった。解析と観測ナudgingの融合した 4 次元データが作られた後、風速と風向きの模型予知は明らかに向上した、特に 3 月 15 日の 9 時から 21 時の間の期間においては。MM5 の融合した 4 次元データの調整パラメータを表 1 に与える。計算上の予知と大気散布のシミュレーションの上記の手順は空間線量率のシミュレーション結果が測定値の最も多く一致するようになるまで繰り返される。

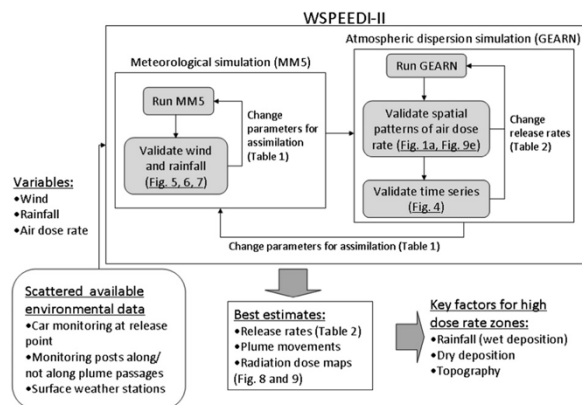


図 6. WSPEEDI-II を用いた福島第一原発事故の放射能核種の大気拡散の再現手順

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Reconstructed atmospheric dispersion on 15 March, 2011

The detailed release rates on 15 March (Table 2) were determined from the comparison of temporal variations of air dose rates between calculations and observations at three monitoring posts (see Section 2.4). The accuracy of estimated release rates is considered to be within the factor 2 based on the comparisons of air dose rates between calculations and observations for six monitoring posts at 18 JST on March 16 (Fig. 7). The estimation showed two major releases of radionuclides around 7 to 10 ( $3.0 \times 10^{15}$  Bq h<sup>-1</sup> for <sup>131</sup>I) and 13 to 17 JST ( $4.0 \times 10^{15}$  Bq h<sup>-1</sup> for <sup>131</sup>I) on 15 March. The former release was also detected as the increase of air dose rate during the same period by the monitoring car at the main gate of FNPP1, while the latter was not clearly detected because the plume flowed toward the different direction from the gate. However, the rapid decreases of reactor pressure of Unit 2 of

FNPP1 from 7:20 to 11:42 and from 13:00 to 16:10 JST (TEPCO, 2011c) indicate the both releases.

By using estimated release rates in the calculations, best estimates of radiation dose maps and plume movements during the period from 15 to 17 March (Figs. 8 and 9, Movie 1 and 2 available online) were obtained. In the simulation, the high dose rate zones **was were** found to spread mainly to the northwest direction from FNPP1 (Fig. 9e), while **the** some discrepancies between calculation and observation appeared in overestimations of air dose rates in the north and middle parts of Fukushima. This pattern corresponded to airborne observations carried out on 17e19 March, 2011 (DOE,

2011). Time series of calculated air dose rate also agreed well with measurements at six off-site monitoring posts that included three monitoring posts used for reconstruction (Fig. 7).

Supplementary data related to this article can be found online at doi:10.1016/j.jenvrad.2011.09.011.

Based on simulated vertically accumulated concentrations of  $^{131}\text{I}$ , precipitation and surface wind (Figs. 8 and 9), the formation process of the high dose rate zones (Fig. 9e) is explained as follows. Increases in air dose rates at the monitoring posts at the southwest and west directions (Kawauchi and Koriyama, respectively) of FNPP1 were caused by the high-concentration plume released in the morning (7e10 JST). As shown in Fig. 8b and d, the plume represented by concentration contours of radionuclides distributed in the southwest direction of FNPP1 around 11 JST. At 14 JST, the plume encountered the rainband that covered the west and central areas, and caused some amounts of wet deposition around Koriyama (Fig. 8e and f). In the afternoon, easterly and southeasterly winds (Fig. 8f) carried the plume discharged from 13 to 17 JST to the northwest of FNPP1 (Fig. 9b). The rainfall which widely covered in the north part of Fukushima scavenged this high-concentration plume, and produced a significant amount of surface deposition and high dose rate zones at the northwest region of FNPP1 in the evening (Fig. 9a, c, e).

The circles in right panels of Figs. 8 and 9 show air dose rates at the off-site monitoring posts. Air dose rates rose up when the plume covered the posts and, even after the passage of plume, higher levels of air dose rates continued than those before the passage of plume. This fact means that radionuclides depositing on the ground surface maintain the high dose rate zones due to ground-shines (Fig. 1b).

### 3. 結果と議論

#### 3.1. 2011年3月15日の大気拡散の再現

3月15日の詳細な放出頻度は3つの監視ポストでの観測と計算との間の空間線量率の時間変化の比較から決定された(セクション2.4参照)。評価した放出頻度の精度は3月16日18時JSTの6つの監視ポストの観測値と計算値の間の空間線量率を基にした要因2の内であると考慮した(図7)。この評価は3月15日の7-10時JST( $3.0 \times 10^{15} \text{ Bq h}^{-1}$ )と13-17時JST( $4.0 \times 10^{15} \text{ Bq h}^{-1}$ )の放射性核種( $^{131}\text{I}$ )の2つの主な放出を示す。前者の放出はFNPP1のメインゲートで観測車によって同じ期間の間の空間線量率の増加としても観測された。後者は明らかには観測されなかったが、それは対流がゲートからの方向とは異なる方向に流れたからである。しかしFNPP1の7:20-11:42と13:00-16:10の2ユニットの原子炉圧力が急速に下がったことが2つの放出を示す(TEPCO, 2011c)。

計算によって推定した放出頻度を使用したことによって、ベストな放射線被曝線量マップの推定と3月15-17日の期間の間の対流移動(図8, 9, そして映像1, 2がオンラインで得ら

れる)が得られた。シミュレーションで、高線量区域がFNPP1の北西方向に主に広がっていることがわかった。福島の中中部と北部における空間線量率の観測で、計算値と観測値の間の幾つかの矛盾が現れた。空気微子(airborn)に一致するパターン観測は2011年3月17-19日に実施された。計算した空間線量率の時系列は再現のために使用された3つの監視ポストを含んだ6つの現場から離れた監視ポストで観測にもよく一致する(図7)。

この論文に関係する補足するデータはオンライン DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.09.011.で見つけることができる。

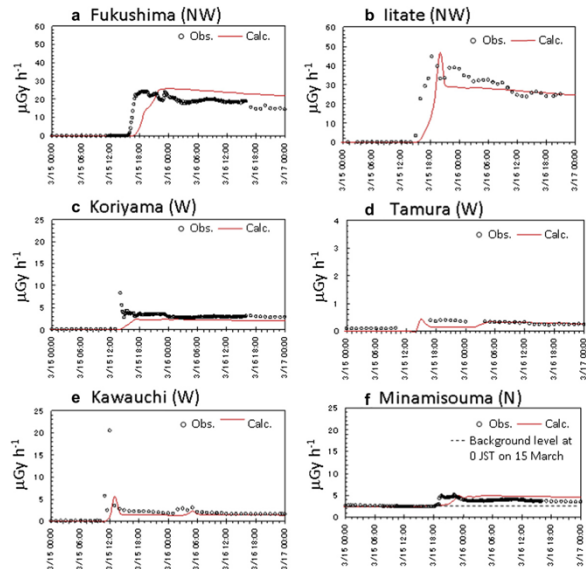


図7. FNPP1 から北西(NW)、西(W)、西北西(WNW)、そして北(N)での観測ポストにおける空間線量率の観測値と計算値の時間変化。

シミュレーションで鉛直方向に $^{131}\text{I}$ の蓄積濃度と、降水量と風向き(図8, 9)を基にして、高線量率区の域変化過程は以下として説明される(図9e)。FNPP1の南西と西方向(それぞれ川口村、郡山市)の観測ポストにおける空間線量率の増加は朝(7-10時JST)に高濃度の対流放出によって引き起こされた。図8b, 8dに示すように、放射性核種の等高線に沿った濃度によって示された対流は11時JSTあたりのFNPP1の南西方向に分布する。14時JSTに、対流は西と中央をカバーする降雨帯に出くわし、郡山市あたりに湿った堆積の幾つかの量を引き起こす(図8e, 8f)。午後には、東と南東方向の風が13-17時JSTにFNPP1の北西へ対流変化を運んだ(図9b)。福島北部を広く覆った降水はこの高濃度対流を洗浄し、そして夕方にFNPP1の北西部で高線量率と表面堆積の有意な量を生産した(図9a, c, e)。

図8と9の右パネルにある丸は現場から離れた観測ポストの空間線量率を示す。対流が観測ポストを覆いた(たとえ対流の通過の後でも)そして対流が通過する前よりも空間線量率の高い水準が継続した時、空間線量りつが增加する。この

事実は以下を意味する：地表表面での放射性核種の堆積が地表放射(ground-shines)によって高線量区域を持続する(図1b)。

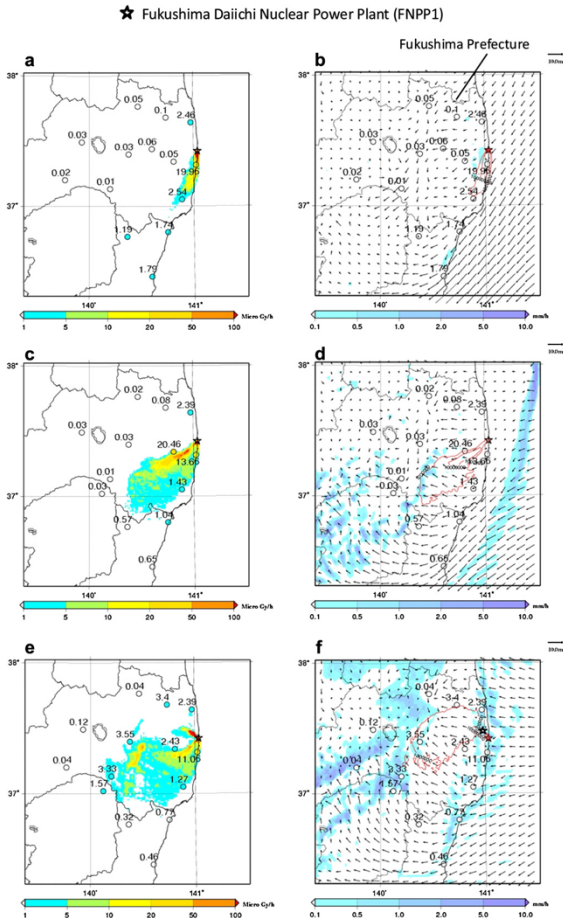


図 8.  $^{131}\text{I}$  の濃度による空間線量率の空間分布(左パネル)と降水量と風向きの空間分布(右パネル)の時間変化。(a)と(b)は3月15日の9時、(c)と(d)は12時、(e)と(f)は15時を示す。右パネルの丸の隣の数値は観測ポストで観測した線量率を示す。

### 3.2. Influences of deposition processes

To quantify the contribution of dry and wet deposition processes on air dose rates, the spatial distributions of them accumulated in the simulation period were compared (Fig. 10). Dry deposition (Fig. 10a) was clearly dominant in the southwest region of FNPP1 where no rainfall area appeared during the passage of plume. It gradually decreased with distance from FNPP1, i.e., with the decrease of ground-level concentration due to atmospheric dispersion. In contrast, wet deposition dominated the high dose rate zones in the northwest region of FNPP1 and the middle area of Fukushima Prefecture (Fig. 10b). The characteristics of wet deposition were firstly the distribution pattern was heterogeneous reflecting overlap zones of rainfall and plume and, secondary, a large amount of deposition appeared in far regions,

★ Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FNPP1)

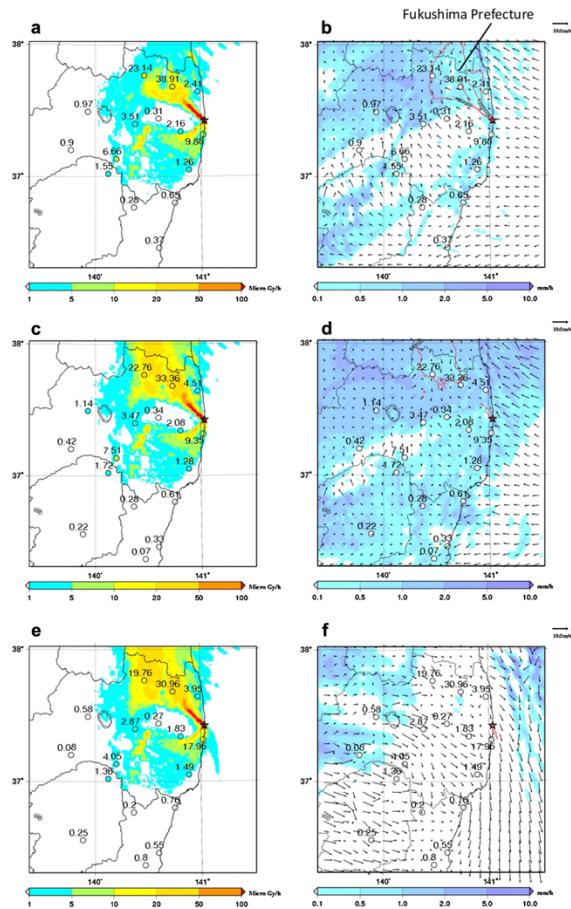


図 9.  $^{131}\text{I}$  の濃度による空間線量率の空間分布(左パネル)と降水量と風向きの空間分布(右パネル)の時間変化。(a)と(b)は3月15日の18時、(c)と(d)は21時、(e)と(f)は翌日の9時を示す。右パネルの丸の隣の数値は観測ポストで観測した線量率を示す。

compared with dry deposition. In fact, air dose rate from the ground-shine at Koriyama located 58 km west from FNPP1 was affected by wet deposition and became larger than that at Kawauchi, positioned 22 km west-southwest of FNPP1 (Fig. 9e). These results indicate that the dry deposition contributes to the formation of high dose rate zones close to the release point along the passage of plume and the wet deposition due to rainfall plays an important role in the formation of wide and heterogeneous high dose rate zones. It corresponds to the prior observational study on the Chernobyl nuclear accident addressing that the geographic pattern of deposited  $^{137}\text{Cs}$  was closely related to that of rainfall (Clark and Smith, 1988).

### 3.2. 堆積の拡散過程

空間線量率の乾燥と湿った堆積過程の寄与を定量化するために、シミュレーションした期間のそれらの蓄積した空間分布を比較した(図10)。乾燥した堆積(図10a)は対流が通過する間に現れた降水がない場所のFNPP1の南西部領域



で明らかに支配的になった。これはFNPP1からの距離で次第に減少された。つまり、大気散布によって地表水準の濃度に減少になった。対照的に湿った堆積はFNPP1の北西部と福島中部で高線量率区域が支配的だ(図10b)。湿った堆積の特徴ははじめに堆積パターンが降水と対流の区域が覆い異成分な反射であることと、2つ目に堆積の大きな量が乾燥と比較して遠くの領域に現れている。実際に、FNPP1から西方向に58 kmに位置している郡山市で地表放射から空間線量率は湿った堆積の影響を受け、そしてFNPP1の西南西方向に22 kmに位置する川口村よりも大きくなった(図9e)。これら結果は以下を示す：乾燥した堆積は対流の通過に沿った放出点に近く高線量率区域の形成を寄与し、そして降水による湿った堆積は高線量率区域の広く異なる形成に重要な役割を担う。地理学的な $^{137}\text{Cs}$ の堆積パターンが降水に関係していたことが先のチェルノブイリ核事故の観測研究に一致する(Clark and Smith, 1988)。

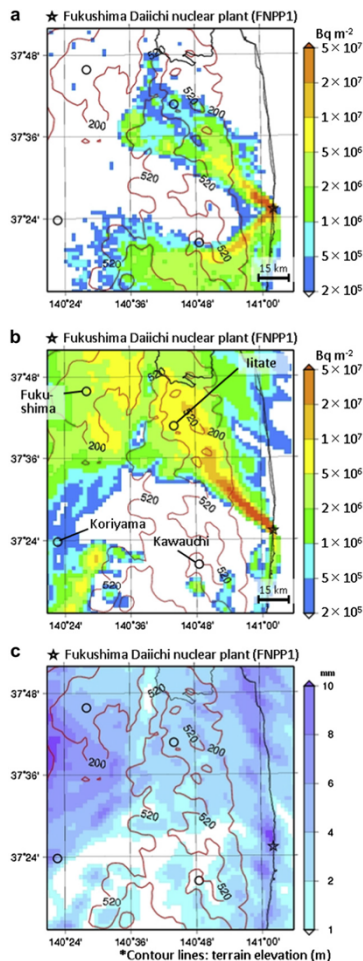


図 10. 2011 年 3 月 15 日 21 時 JST からの乾燥の堆積(a)と湿った堆積(b)、そして降水量の空間分布。

### 3.3. Roles of rainfall and topography in spatial distributions in dose rate

Although simulated and measured air dose rates are, in general, high in the northwest region of FNPP1 (Fig. 9e), the low dose rate area mainly spreads by mountain ridge lying from the south to the north between Iitate and Fukushima. This pattern is similar to the airborne observations (Fig.1a). Since the spatial distribution of dose rate reflects that of wet deposition (Fig. 10b), the precipitation and air concentration of radionuclides are considered to be important in the formation of such a heterogeneous pattern in air dose rate. In our simulation, rainfall covered over the north part of Fukushima Prefecture when the high-concentration plume flowed on the southeasterly wind (Fig. 9b). The rainband spread over a whole area of northwest Fukushima Prefecture in the midnight on March 15 (Fig. 9d). However, while the high-concentration plume flowed to the northwest direction from FNPP1, accumulated precipitation was relatively small around the mountain ridges above the height of 520m between Fukushima and Iitate (Fig.10c). This implies that one of possible formation mechanisms of the heterogeneous pattern in air dose rate was the areal difference of rainfall occurrence. To understand the condition of the plume when the rainfall occurred in the evening and nighttime on March 15, the relationship between topography and dry deposition (Fig. 10a) which reflects the passage of the plume at the ground-level was investigated. The areas of a large amount of dry deposition, to a large extent, distributed to the northwest direction from FNPP1. However, around the location of 37\_36°N and 140\_48°E, the plume was divided into two branches to the west-northwest and northwest directions (Fig. 10a). The branches were located along the valleys below the altitude of 520 m. Dry deposition was relatively high at the places, compared with that in the west region from the bifurcation point of the plume. Therefore, it is likely that the high-concentration plume which mainly spread along the valleys caused the heterogeneous patterns of wet deposition and air dose rate (Fig. 10a, Movies 1 and 2). The results also indicate that, when a valley leads to the leeward of the plume, it can flow along the valley and disperse to different directions from wind. This can expand the areas of a significant amount of surface deposition of radionuclides in complex topography. The role of topography in atmospheric dispersion is supported by airborne measurements that the highest dose rate zone mainly distributes over lowland areas below a height of 520 m, which included two valleys toward the Fukushima and Iitate (Fig. 1a; MEXT and DOE, 2011).

### 3.3. 降水量の役割と線量率の空間分布の地形学

計算そして測定した空間線量率は普通FNPP1の北西方向で高いが(図9e)、低線量率は福島市と飯舘村の間の南部から北部にかけて山の背を横渡って拡散される。このパターンは空気微粒子観測と同様である(図1b)。線量率の空間分布は湿った堆積の線量率に反射しているので、降水量と放射線核種濃度は空間線量率の異なるパターンのような形式情報は重要であると考えられる。我々のシミュレーションでは、降水量は北東方向の風に高濃度の対流の福島北部を覆った(図9b)。降水帯は3月15日の真夜中の福島県北部の全領域にわたって拡散した(図9d)。しかし、高濃度の対流はFNPP1から北西部に流れいる間に、蓄積する降水は福島市と飯舘村の間の高度520 m以上の山の背の周りの小さい関係であった(図10c)。空間線量率の異なるパターンの可能な形成原理の一つは降水が起こった大気の違いである事を暗示する。

3月15日の夕方から深夜にかけて起こった降水で対流の条件を理解するために、地表水準の対流の通過が反射する地形学と乾燥の堆積の間の関係は調査された。大きな乾燥した堆積量のある領域(大きく拡張している)はFNPP1から北西方向に分布した。しかし北緯37.36°東経140.48°の位置のあたりで、対流は北西方向と西北西へ2つの枝に分岐される(図10a)。こん分岐は高度520 mより下の溪谷に沿って位置される。乾いた堆積はこの場所と対流のこの分岐点から西の領域と比較して関係がある。したがって、溪谷に沿って主に拡散した高濃度の対流が湿った堆積と空気線量率の異なるパターンを引き起こす(図10a、映像1,2)。溪谷が対流の風下に導いた時、風からの異なった拡散と溪谷に沿った流れることも結果として示す。これは複雑な地形での放射性核種の表面堆積の有意な量の領域に拡張することができる。大気拡散の地形学の役割は高度520 m以下・低地領域以上に高線量率区域が主に分布する空気微粒子の測定値によって保証されている。これは福島市と飯館村への2つの谷を含んでいる(図1a: MEXT and DOE, 2011)。

#### 4. Conclusions

The atmospheric dispersion of radionuclides during the period from 15 to 17 March in the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident was reconstructed by coupling environmental data with numerical simulations of computer-based nuclear emergency response system, WSPEEDI-II. Temporal changes in release rates on 15 March was estimated by comparing air dose rates calculated under the assumption of unit release rate (1 Bq h<sup>-1</sup>) with observed one. By using estimated release rates, the spatial distributions and time series of observed air dose rate were overall reproduced by WSPEEDI-II. Two major releases of radionuclides in the morning and afternoon on 15 March were indicated by the numerical simulation.

A large part of current high dose rate zones in Fukushima was explained based on interactions between the deposition processes and geographical factors. The simulation results indicate that a

significant amount of surface deposition was produced at the northwest region of FNPP1 in the evening when the high-concentration plume discharged in the afternoon was scavenged by rainfall. The wet deposition due to rainfall played an important role in the formation of wide and heterogeneous high dose rate zones, while the dry deposition contributed to the formation of the zones close to the release point along the passage of plume. The simulation also suggested that the plume flowed and widely dispersed along the valley that leads to its leeward and expanded the areas of a large amount of surface deposition.

#### 4. まとめ

福島第一原発事故で3月15-17日の期間の間の放射性核種の大気拡散は計算器ベースの原子核緊急応答システムWSPEEDI-IIによる数値再構築を持った環境データの組み合わせによって再現した。3月15日の放出頻度の時間変化は観測したそれを持つ単位放出頻度(Bq/h)の家庭のもと計算した空間線量率を比較することによって推定した。放出頻度の計算を使用することで、観測した空間線量率の空間分布と時系列はWSPEEDI-IIによって全体的に再現された。3月15日の午前と午後に放射性核種の2つの主な放出が数値シミュレーションによって示された。

福島の現在の高線量率区域の大きな部分は地理的要因と堆積過程の間の相互作用に基づいて説明された。シミュレーション結果は、午後に排泄された高濃度な対流が降水帯によって除去された夕方にFNPP1の北西部で表面堆積の有意な量が生成されたことを示す。降水帯による湿った堆積は広くそして異なる高線量率区域の形成にとって重要な役割を担う。それは乾燥した堆積が対流の通過に沿った放出点に近い区域の形成に寄与する。このシミュレーションも対流の移動と溪谷に沿った広い拡散を示唆し、この溪谷にはこの風下に導かれそして、表面堆積の大きな量の領域が拡張される。

--- 予備知識 ---

国立研究開発法人日本原子力開発機構では27年度科学技術分野の文部科学大臣表彰開発部門において『緊急時環境線量情報予測システム WSPEEDI の開発』として本著者全員(4名)が受賞。茅野は企画調整室長、永井は原子力基礎工学研究センター研究主席、寺田は同センター環境・放射線科学ディヴィジョン環境動態研究グループ研究副主幹、堅田は同グループに所属している。

著者情報 (<http://researchmap.jp/katatagenki/>)

経歴

2015年2月現在 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 環境動態研究グループ 研究員  
2013年3月-2015年2月 日本学術振興会 海外特別研究員  
2005年10月-2013年3月 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 環境動態研究グループ 研究員  
2004年4月-2005年9月 日本原子力研究所 環境科学研究部 研究員

受賞暦2回

[2] 2015年4月 文部科学省 平成27年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞 緊急時環境線量情報予測システム WSPEEDI の開発

[1] 2012年3月 日本原子力学会 第44回日本原子力学会論文賞 Preliminary Estimation of Release Amounts of I-131 and Cs-137 Accidentally Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

主要論文18編

[1] G. 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年1月.

[2] G. Katata, Fogwater deposition modeling for terrestrial ecosystems: A review of developments and measurements, Journal of Geophysical Research 119 8137-8159 2014年7月.

[3] G. Katata et al., A numerical study of the effects of aerosol hygroscopic properties to dry deposition on a broad-leaved forest, Atmospheric Environment 97 501-510 2014年7月.

[4] 堅田元喜, エアロゾルによる植物影響評価のための精緻な陸面モデルの領域スケール解析への応用, エアロゾル研究 29(S1) S168-S175 2014年2月.

[5] G. Katata et al., Coupling atmospheric ammonia exchange process over a rice paddy field with a multi-layer atmosphere-soil-vegetation model, Agricultural and Forest Meteorology 180 1-21 2013年10月.

[6] 堅田元喜, 大気・陸域・海洋での包括的放射性物質動態予測モデル・システム, 放射線 39(1) 3-6 2013年9月.

[7] G. Katata et al., Aerosol deposition and behavior on leaves in cool-temperate deciduous forests. Part 3: Estimation of fog deposition onto cool-temperate deciduous forest by the inferential method, Asian Journal of Atmospheric Environment 7 17-24 2013年1月.

[8] G. Katata et al., Numerical reconstruction of high dose rate zones due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Journal of Environmental Radioactivity 111 2-12 2012年9月.

[9] G. Katata et al., 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, Journal of Environmental Radioactivity 109 103-113 2012年7月.

[10] 堅田元喜, 原子力事故時の放射性物質の大気中での挙動, 大気環境学会誌 46(6) A91-A94 2011年11月.

[11] G. Katata et al., Development of an Atmosphere-Soil-Vegetation Model for Investigation of Radioactive Materials Transport in the Terrestrial Biosphere, Progress in Nuclear Science and Technology 2 530-537 2011年10月.

[12] G. Katata et al., A method for simple and accurate estimation of fog deposition in a mountain forest using a meteorological model, Journal of Geophysical Research Atmospheres 116 2011年1月.

[13] G. Katata et al., Numerical study of fog deposition on vegetation for atmosphere-land interactions in semi-arid and arid regions, Agricultural and Forest Meteorology 150 340-353 2010年3月.

[14] G. Katata et al., Application of a land surface model that includes fog deposition over a tree heath-laurel forest in Garajonay national park (La Gomera, Spain), Estudios de la zona no saturada del Suelo (Studies of the Vadose Zone), ZNS'09. IX 393-400 2010年.

[15] 堅田元喜 et al., 植生への粒子沈着モデルの研究動向とその課題, エアロゾル研究 25(4) 323-330 (J-STAGE) 2010年.

[16] G. Katata, Improvement of a Land Surface Model for Accurate Prediction of Surface Energy and Water Balances, JAEA-Data/Code, Japan Atomic Energy Agency 69pp. 2009年2月.

[17] G. Katata et al., Development of a land surface model including cloud water deposition on vegetation, Journal of Applied Meteorology and Climatology 47 2129-2146 2008年12月.

[18] G. Katata et al., Development of a land surface model including evaporation and adsorption processes in the soil for the land-air exchange in arid regions, Journal of Hydrometeorology 8 1307-1324 2007年12月.