

博士論文

粒子モデルによる福島第一原子力発電所の放射能汚染機構の推定

2018年3月

長崎大学大学院工学研究科

齋藤恵介

## ABSTRACT

### Estimates of Radioisotope Pollution Mechanism for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant by the particle model

On March 11, 2011, the Great East Japan Earthquake brought earthquakes and tsunami in East Japan, and Fukushima Daiichi nuclear power plant became out of control, finally, worldwide radioisotope pollution occurred. Atmospheric diffusion of radioisotopes was simulated by SPEEDI (System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information) and various methods so far as validations and reproduction.

Atmospheric diffusion model is often used to determine the transfer process of gaseous pollutants, and it is also adopted for SPEEDI. The atmospheric diffusion model has a puff model and a plume model depending on wind speeds.

The atmospheric diffusion model has the following problems.

- 1) The atmospheric diffusion model requires various parameters such as atmospheric stability, outlet heights, mixed layer heights and deposition rates. It is necessary to verify the validity of these values.
- 2) Since the surface shape of pollutions is continuous with a normal distribution or a log-normal distribution, detailed falling points of radioisotopes could not be specified. Therefore, local pollution shapes such as hot spots could not be reproduced.
- 3) Since temporal-spatial resolution is relatively rough, local data such as wind directions and speeds could not be handled in detail.

Therefore, based on the above problems, in this study, advection calculation was performed using a particle model. A particle model is a model of the fragment (a basic unit forming a part of fluid) constituting the fluid, which can express a dynamic free deformation of the fluid. In the particle model, the initial position and velocity of particles are determined, the velocity (unit time by acceleration vector) of particles are obtained from the wind velocity and direction, and particles are controlled with Stokes speeds vertically and constant air resistance horizontally. In this study, most radioisotopes were emitted from Fukushima Daiichi nuclear power plant by hydrogen explosions, the vent operations, and leaks with increasing pressure in the reactors, and radioisotopes are assumed to move with concrete debris in hydrogen explosions or aerosols in the air using a particle model.

Small particles have a tendency to fall far from the origin, while large particles to fall near, they are continuously reproduced. From this model result, it is also possible to

evaluate the effects of both westerly wind and surface wind. In addition, as a result of considering the topography effect using DEM, the tendency that radioactive substances transferred in the air deposits on slopes of mountainous areas with high altitudes in the case of dry deposition, not to deposit in the shade of mountains and valleys. This tendency is not noticeable because many particles dropped in the surround of Fukushima Daiichi nuclear power plant. However, the tendency becomes remarkable when 20 km or more away from the Fukushima Daiichi nuclear power plant. Radioactive substances deposited on the east slopes of the Abukuma Hills and plateaus near the Inawashiro Lake, but did not deposit on the shade of the flat areas.

In this study, the fractal dimension of the pollution horizontal shapes was calculated, and quantitative classification for pollution patterns was attempted. Fractal figures have generally complex shapes, but their complexity is quantified by non-integer dimensions.

The correlation between wind speed and fractal dimension had low correlation coefficients. However, if the wind velocity is 4.0 m/s or more or the wind velocity is less than 4.0 m/s, it is roughly classified into two types of flow: high speed and low speed flows. When the atmospheric diffusion equation is used, the atmospheric stability is taken into account. Even when a particle model is used, high speed and low speed flows are distinguished from wind speed 4.0 m/s, and the features of contamination shape are also distinguished. The spatial distribution type for each contamination pattern was organized. As a result, the distribution type was different in each of the four contamination patterns (high speed/low speed flow and wet/dry deposition). In the conventional atmospheric diffusion model, all pollutions are calculated by the puff model expressing the normal distribution and the plume model expressing the lognormal distribution. In the particle model, fractal and exponential distributions are newly added, and the appearance conditions were found out by flow forms and deposition types. As a result, the features of 2 peaks and hot spots have been evaluated. Since the correlation coefficients are as high as 0.8 or higher, conformity to each distribution type is very high. From the above, it was suggested that the mechanism of contamination would be estimated by the distribution type of contamination shapes.

## 目次

第1章 序論 .....	1
1.1 本研究の背景.....	2
1.2 本研究の目的および本論文の構成.....	3
1.3 福島第一原子力発電所事故の整理.....	4
1.3.1 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震.....	4
1.3.2 福島第一原子力発電所事故.....	12
1.4 研究の経緯.....	19
第2章 方法 .....	20
2.1 粒子モデルを利用した放射性物質の移流計算.....	21
2.1.1 大気拡散モデルの概要.....	21
2.1.2 粒子モデルの概要.....	24
2.1.3 既往モデルの概要.....	29
2.1.4 粒子モデルを利用した放射性物質の移流計算.....	34
2.1.5 風向風速データ.....	40
2.1.6 降水データ.....	42
2.1.7 地形データ.....	44
2.2 空間線量分布計算.....	45
2.2.1 空間線量分布計算.....	45
2.2.2 放射性物質放出データ.....	48
2.2.3 航空機モニタリングデータ.....	49
2.3 汚染形状の定量的評価.....	51
2.3.1 空間分布型の特定.....	51
2.3.2 フラクタルとは.....	52
2.3.3 フラクタル次元.....	55
2.3.4 フラクタルを用いた既往研究.....	57
2.3.5 距離の関係から求めるフラクタル次元.....	58
2.3.6 正方形による細分で測るフラクタル.....	60
2.3.7 フラクタル次元による空間分布解析.....	62
2.3.8 雲形状データ.....	63

第3章 結果 .....	65
3.1 粒子モデルによる移流計算.....	66
3.2 空間線量分布計算.....	87
3.3 汚染形状の定量的評価.....	88
第4章 考察 .....	100
4.1 粒子モデルによる移流計算.....	101
4.2 空間線量分布計算.....	108
4.3 汚染形状の定量的評価.....	110
第5章 結論 .....	112
謝辞 .....	114
参考文献 .....	115

## 表の一覧

表 1	福島第一原子力発電所・原子炉建屋基礎版上の最大加速度.....	12
表 2	福島第一原子力発電所事故時系列【1号機】.....	15
表 3	福島第一原子力発電所事故時系列【2号機】.....	16
表 4	福島第一原子力発電所事故時系列【3号機】.....	17
表 5	福島第一原子力発電所事故時系列【4号機】.....	18
表 6	大気安定度.....	23
表 7	乾性沈着の場合の沈着速度.....	29
表 8	ConvBLXY2000 アドイン機能表.....	36
表 9	毎時大気解析 GPV の概要.....	40
表 10	レーダアメダス解析雨量の概要.....	42
表 11	標高傾斜度 3 次メッシュの概要.....	44
表 12	換算係数.....	46
表 13	空間分布型とフラクタル次元計算結果.....	98
表 14	雲形状のフラクタル次元 (3/15).....	99
表 15	高濃度放射性物質が大気中に放出されたと考えられる時間帯.....	105
表 16	風速・沈着種類・フラクタル次元の関係.....	110
表 17	4 つの汚染パターンの空間分布特性.....	111

## 図の一覧

図 1	東北地方太平洋沖地震とその余震 .....	6
図 2	本震の地域ごとの震度分布.....	7
図 3	本震の市町村ごとの震度分布.....	8
図 4	本震の推計震度分布 .....	8
図 5	津波観測施設で観測された津波の高さ.....	9
図 6	石巻市鮎川の 2011 年 3 月 5 日～ 2011 年 3 月 15 日の潮位予測 .....	10
図 7	粒子法による時間と空間の離散化.....	25
図 8	粒子の表記.....	25
図 9	各モデルを用いて計算された $^{137}\text{Cs}$ 積算沈着量の緯度—経度分布図.....	33
図 10	計算領域.....	35
図 11	粒子モデルのイメージ.....	38
図 12	粒子と風向風速データの対応イメージ.....	38
図 13	地表面の風向風速可視化画像例 (3 月 15 日 9:00) .....	40
図 14	修整量の決め方の模式図 .....	41
図 15	レーダアメダス解析雨量可視化画像例 (3 月 15 日 22:00) .....	42
図 16	解析雨量データの作成イメージ.....	43
図 17	標高傾斜度 3 次メッシュ.....	44
図 18	粒子のカウント.....	45
図 19	平滑化フィルタ.....	47
図 20	平成 23 年 3 月 27 日時点のモニタリングポスト .....	48
図 21	モニタリングポストの観測結果.....	48
図 22	航空機モニタリング.....	50
図 23	分布型の決定.....	51
図 24	コッホ曲線.....	53
図 25	一部を拡大すると同じ図形が出てくる .....	54
図 26	ペアノ曲線.....	55
図 27	線分・正方形・立左体の単位長さを半分に分割する .....	56
図 28	ボックスの例.....	60
図 29	$d$ と $N(d)$ の関係 .....	61
図 30	気象レーダによる観測の概要.....	63
図 31	気象データ可視化画像例 (3 月 15 日 23 時) .....	64
図 32	移流計算結果 (3 月 12 日～3 月 31 日) .....	66
図 33	移流計算結果 (3 月 12 日) .....	67

図 34	移流計算結果 (3月13日)	68
図 35	移流計算結果 (3月14日)	69
図 36	移流計算結果 (3月15日)	70
図 37	移流計算結果 (3月16日)	71
図 38	移流計算結果 (3月17日)	72
図 39	移流計算結果 (3月18日)	73
図 40	移流計算結果 (3月19日)	74
図 41	移流計算結果 (3月20日)	75
図 42	移流計算結果 (3月21日)	76
図 43	移流計算結果 (3月22日)	77
図 44	移流計算結果 (3月23日)	78
図 45	移流計算結果 (3月24日)	79
図 46	移流計算結果 (3月25日)	80
図 47	移流計算結果 (3月26日)	81
図 48	移流計算結果 (3月27日)	82
図 49	移流計算結果 (3月28日)	83
図 50	移流計算結果 (3月29日)	84
図 51	移流計算結果 (3月30日)	85
図 52	移流計算結果 (3月31日)	86
図 53	空間線量分布図	87
図 54	3月12日の空間分布 (フラクタル型)	88
図 55	3月13日の空間分布 (指数分布型)	88
図 56	3月14日の空間分布 (フラクタル型)	89
図 57	3月15日の空間分布 (指数分布型)	89
図 58	3月16日の空間分布 (指数分布型)	90
図 59	3月17日の空間分布 (2ピーク正規分布型)	90
図 60	3月18日の空間分布 (指数分布型)	91
図 61	3月19日の空間分布 (指数分布型)	93
図 62	3月20日の空間分布 (正規分布型)	92
図 63	3月21日の空間分布 (フラクタル型)	92
図 64	3月22日の空間分布 (正規分布型)	93
図 65	3月23日の空間分布 (フラクタル型)	93
図 66	3月24日の空間分布 (フラクタル型)	94
図 67	3月25日の空間分布 (正規分布型)	94
図 68	3月26日の空間分布 (指数分布型)	95
図 69	3月27日の空間分布 (指数分布型)	95



図 70	3月28日の空間分布（フラクタル型） .....	96
図 71	3月29日の空間分布（正規分布型） .....	96
図 72	3月30日の空間分布（フラクタル分布型） .....	97
図 73	3月31日の空間分布（指数分布型） .....	97
図 74	ホットスポットの例 .....	101
図 75	粒子の落下位置と標高（3/15） .....	102
図 76	放射性物質放出の時系列.....	103
図 77	粒子の軌跡と落下した粒子が発射された時間の空間線量（3月18日） ....	104
図 78	放射性物質放出の時系列.....	106
図 79	空間線量分布図不整合箇所.....	108
図 80	風速とフラクタル次元の関係.....	110

## 第 1 章 序論

本研究は平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震及び、それによって引き起こされた津波が原因で発生した福島第一原子力発電所（以下、福島第一原発）の事故により大気中に放出された放射性物質の移流および分布形状について計算・評価するものである。

序論では本研究の背景及び目的について記載する。また、福島第一原発事故の整理として、東北地方太平洋沖地震、津波、福島第一原発事故の概要に触れる。更に著者がこれまで取り組んできた研究の経緯についてまとめる。

## 1.1. 本研究の背景

平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分、三陸沖でマグニチュード (M) 9.0 の地震「東北地方太平洋沖地震」が発生し、宮城県栗原市で震度 7、宮城県、福島県、茨城県、栃木県の 4 県 34 市町で震度 6 強を観測したほか、東日本を中心に北海道から九州地方にかけての広い範囲で震度 6 弱～1 を観測した。また、この地震に伴い、福島県相馬で高さ 9.3m 以上、岩手県宮古で高さ 8.5m 以上の非常に高い津波を観測したほか、東北地方から関東地方北部の太平洋側を中心に、北海道から沖縄にかけての広い範囲で津波を観測した<sup>1)</sup>。この地震 (余震を含む) により、死者 19,533 人、行方不明 2,585 人、全壊家屋 121,768 棟など、各地で甚大な被害が生じた (2017 年 3 月 8 日時点)<sup>2)</sup>。

震源は岩手県沖から茨城県沖までの長さ約 450km、幅約 200km におよび、震源直上の海底の移動量は東南東に約 24m 移動、約 3 メートル隆起と推定されている。これにより広範囲に大規模な津波が引き起こされた。

本研究の対象である福島第一原発に津波の第一波が押し寄せたのは、地震発生から約 40 分後の 15 時 27 分頃で、その 8 分後の 15 時 35 分頃にはさらに極めて高い第二波が襲来した。その結果、相次いで 1～5 号機で全交流電源を喪失する事態に陥った。この影響で、原子炉の冷却が不可能となり、結果として 1 号炉・2 号炉・3 号炉で炉心溶融 (メルトダウン) が発生し、大量の放射性物質の漏洩を伴う重大な原子力事故に発展した。特に 3 月 12 日から 15 日までに発生した水素爆発及び、それを避けるために実施されたベント作業によって放出された放射性物質は近隣地域に多大な影響を及ぼすこととなった。

放射性物質の大気拡散については、SPEEDI (System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information : 緊急時迅速放射能影響予測)<sup>3)</sup>をはじめ、これまでに様々な手法で検証・再現が試みられてきた。しかし、地震による気象台や各観測施設の壊滅的な被害のため、事故当時のデータが少なく、また事象が複雑であることから、手法やパラメータによって、モニタリング結果や他の検証方法との整合性がとれていない<sup>4)</sup>。2012 年に東京電力から放出量等の解析結果<sup>5)</sup>が提出されたが、それ以降も当時の状況の推定や予測手法の検討が続けられている。

## 1.2. 本研究の目的及び本論文の構成

本研究では以下のことを目的とする．

- 粒子モデルと気象庁の高精度気象データアーカイブを組みあわせることにより、  
簡便かつ高精度な放射性物質の移流計算を行う．
- 乾性沈着と湿性沈着を同一のアルゴリズムで計算する．
- 汚染物質の沈着から空間線量を求める
- 汚染物質の空間分布から汚染の機構を明らかにする

本論文の構成は以下の通りである．

第1章では序論として、地震とその影響で引き起こされた津波、更に福島第一原発事故で発生した事象を時系列で取りまとめる．

第2章では方法として、本研究の方法を説明する．まず、本研究で粒子モデルを用いた放射性物質の移流計算を実施するにあたり、粒子モデルと、それ以前に多く利用されていた大気拡散モデルについて解説する．本研究で実施する粒子モデルを用いた計算方法は粒径と放出高さのみを初期パラメータとするため、計算が非常に簡便になる特徴がある．本手法では、放射性物質はエアロゾル（大気中の浮遊物）や水素爆発の際のコンクリート碎に付着して移動したと仮定し、その移流経路及び落下地点を高精度気象データ及び地形データから推定することで拡散の状況を計算する．本研究では更に換算係数を乗じることで汚染物質の空間分布図の作成を行う．また、フラクタルの概念を用いた定量的な汚染形状の空間分布特性の測定を行う．汚染形状の評価に利用するフラクタルの概念とよく用いられる計算手法について解説する．この中で既往研究についても触れる．

第3章では結果として、第2章で記述した方法で計算を実施した結果を記載する．

第4章では考察として、第3章で得た結果を踏まえ考察を行うことで、本研究で得た結果を評価し、有用性について検討する．

第5章では結論として、本論文のとりまとめを行う．

## 1.3 福島第一原子力発電所事故の整理

### 1.3.1 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震

#### (1) 概要<sup>6)</sup>

平成 23 年（2011 年）3 月 11 日 14 時 46 分、三陸沖（牡鹿半島の東南東約 130km 付近）の北緯 38 度 06.21 分、東経 142 度 51.66 分、深さ 24km を震源とする M 9.0（モーメントマグニチュード）の地震が発生した。気象庁はこの地震を「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」（The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake）と命名した。

この地震の発震機構（CMT 解）は西北西 - 東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した地震であった。この発震機構はプレートの沈み込み方向と調和的である。

この地震では宮城県栗原市で震度 7 を観測したほか、東北地方を中心に北海道から九州地方にかけて震度 6 強から 1 を観測した。また、北海道から沖縄の太平洋沿岸及び日本海沿岸、オホーツク海沿岸、東シナ海沿岸の一部で津波が観測され、国内の津波観測施設では高いところで 9.3m 以上となった。

この地震の揺れ及び津波により、宮城県を中心に岩手県・福島県等で死者 16,278 名、行方不明者 2,994 名、負傷者 6,179 名、住家全壊 129,198 棟、住家半壊 254,238 棟、一部損壊 715,192 棟などの被害を生じた<sup>7)</sup>。政府はこの地震による震災の名称を「東日本大震災」とした。

今回の地震の速度応答スペクトルは周期 0.1 秒程度から 10 秒程度まで幅広い周期帯にわたってフラットで大きなパワーを持っている。最大加速度の分布は東日本の海岸線付近に 500 ガル以上の領域が見られるが、他の地震（平成 7 年（1995 年）兵庫県南部地震など）と比べて総じて速度は大きくない。また、45cm を超える非常に大きな変位振幅が宮城県や千葉県などにみられる。

陸域観測技術衛星「だいち」の PALSAR によるデータを用いた SAR 干渉解析によると、下北半島を基準として牡鹿半島の先端付近では北行軌道で約 4m 衛星から遠ざかる方向の、南行軌道で約 3m の衛星に近づく方向の地殻変動量が推定されている。ただし衛星の撮像時期の関係により、この結果には余震活動や余効変動を含んでいる可能性がある。国土地理院の GEONET の連続観測によると解析結果<sup>8)</sup>で牡鹿半島で最大 540cm の水平変動が観測されるなど、広域で地殻変動が観測されている。

この地震の震源域は長さ約 450km、幅約 200km と推測され、主な破壊継続時間は約 160 秒に及んだ。同日 15 時 08 分には震源域の北、岩手県沖で M7.4 の、15 時 15 分には南の茨城県沖で M7.6 の余震（最大余震）が発生した。余震活動は長さ約 500km に及ぶ範囲で発生し、非常に活発に推移した（図 1）。また、今までは地震の発生しなかった領域での地震発生や、これまで見られなかった正断層型の地震の発生も見られた。因果関係は明確ではないが、余震域近傍を中心に様々な地域で大きな地震や活発な地震活動が見られた。この地域では過去 M7.0 を超えるような地震が繰り返し起こってきた。地震調査委員会ではこれらの地震を最大の固有地震であるとして長期評価を行ってきた。今回の地震はこれらの領域が独立して起こったのではなく 1 つの地震としてまとめてすべることにより発生したものであり、地震の規模やすべり量などは複数の地震のそれを単純に足し合わせたものよりも大きい。史料に残されているこのタイプの地震としては 869 年の貞観地震がある。この地震は「日本三代実録」に記載があるのみでありその実在を疑問視する研究者もいた。しかし近年津波堆積物の調査によって貞観地震に伴う巨大津波の痕跡が確認され<sup>9)</sup>、地震調査研究推進本部でも「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価の一部改訂について」として貞観地震について記述した矢先であった。

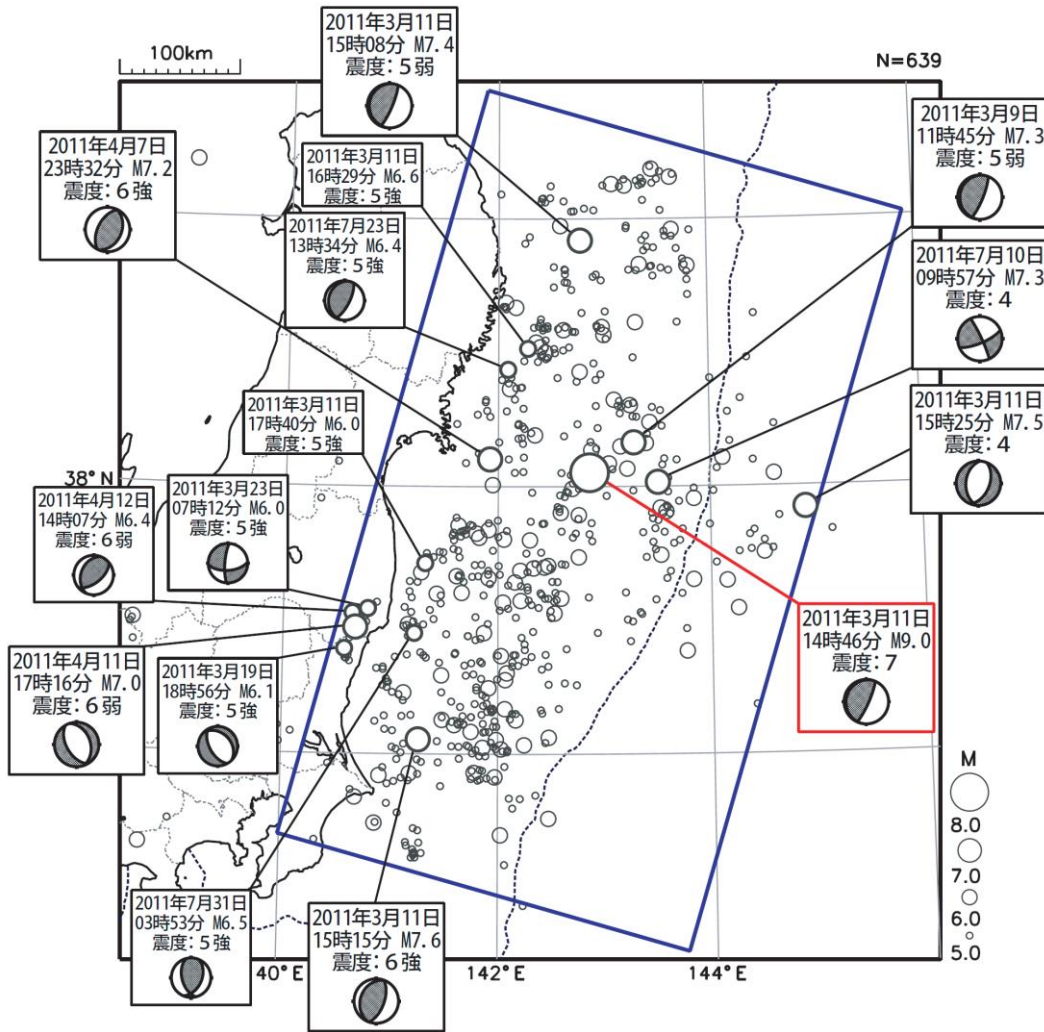


図1 東北地方太平洋沖地震とその余震<sup>6)</sup>

2011年3月1日～2012年2月29日，深さ0～90km， $M \geq 5.0$ 。図中の吹き出しは矩形領域内で発生した $M7.0$ 以上の地震と $M6.0$ 以上で震度5強以上を観測した地震

(2) 地震動<sup>7)</sup>

東北地方太平洋沖地震では、震央の西北西約174kmにある宮城県栗原市築館で最大震度7の揺れを観測したほか、宮城県仙台市、宮城県大崎市、福島県白河市、茨城県日立市、栃木県宇都宮市など宮城県、福島県、茨城県、栃木県で震度6強の揺れを観測し、岩手県、宮城県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県で震度6弱の揺れを観測した(図2, 3)。なお、17都県で震度5弱以上の揺れを観測しており、宮崎県、沖縄県以外の45都道府県で震度1以上を観測した。

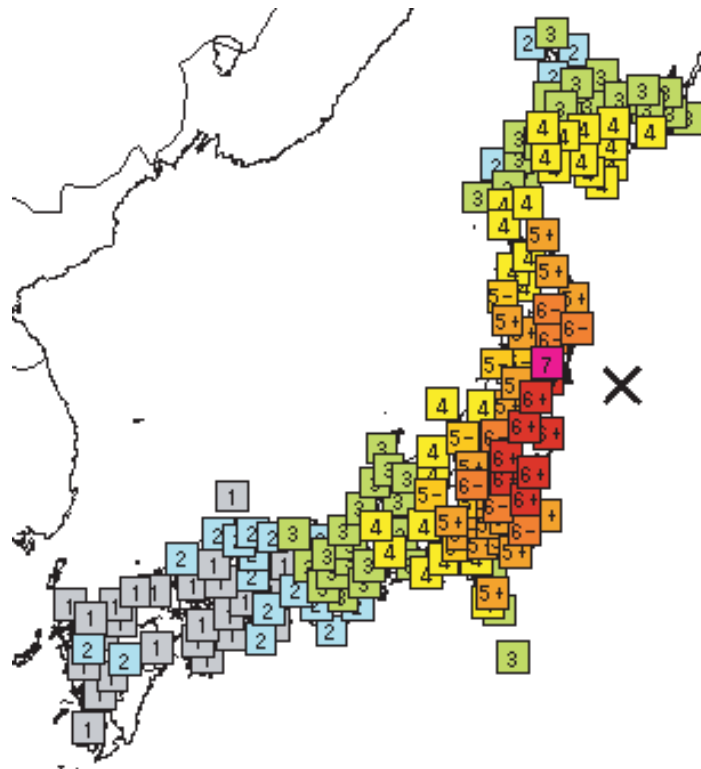


図2 本震の地域ごとの震度分布<sup>7)</sup>



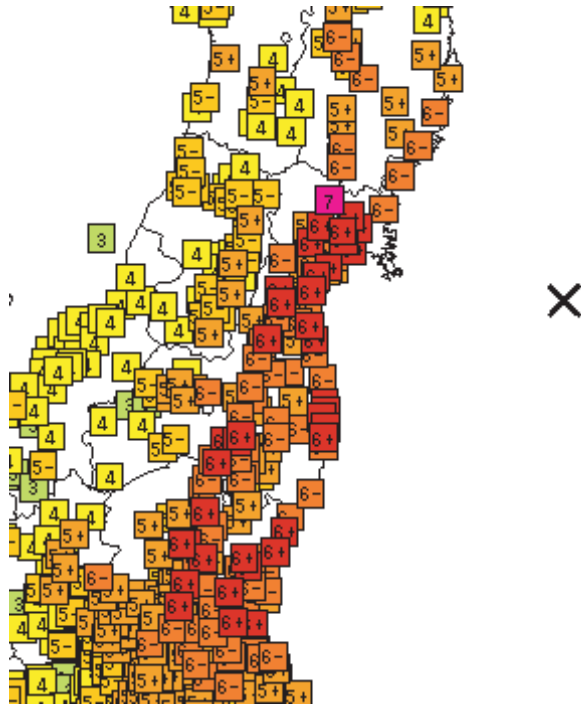


図3 本震の市町村ごとの震度分布<sup>7)</sup>

本震の推計震度分布（図4）では、宮城県栗原市付近と福島県いわき市付近に震度7の広がりが見え、東北地方から関東地方にかけての広い範囲で震度6弱以上の揺れが推定される。また、北海道から中部地方にかけて震度4以上の揺れが推定される。

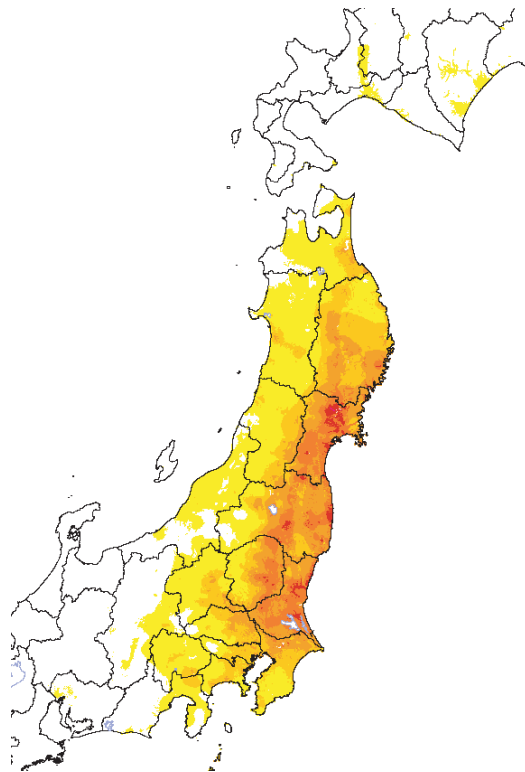


図4 本震の推計震度分布<sup>7)</sup>

### (3) 津波<sup>7)</sup>

東北地方太平洋沖地震により、東北地方太平洋沿岸をはじめとして全国の沿岸で津波が観測された。各地の津波観測施設では、福島県相馬で 9.3m 以上、宮城県石巻市鮎川で 8.6m 以上など、東日本の太平洋沿岸を中心に非常に高い津波を観測したほか、北海道から鹿児島県にかけての太平洋沿岸や小笠原諸島で 1m 以上の津波を観測した。

気象庁では「平成 5 年（1993 年）北海道南西沖地震」の際に、データが振り切れた地点があったことを教訓に、大きな津波でも観測可能なように巨大津波観測計を設置してきた。大きな被害が出た地点では観測施設の流失もあったが、この巨大津波観測計により、10m 程度の津波を初めて観測する事が出来た。

また、津波観測施設及びその周辺地域において現地調査を実施し、津波の痕跡の位置等をもとに津波の高さの推定を行った結果、地点によっては 10m を越える津波の痕跡を確認した。この津波により東日本の太平洋沿岸各地で甚大な被害が発生した。

観測された津波について、最大の高さの分布を図 5 に示す。

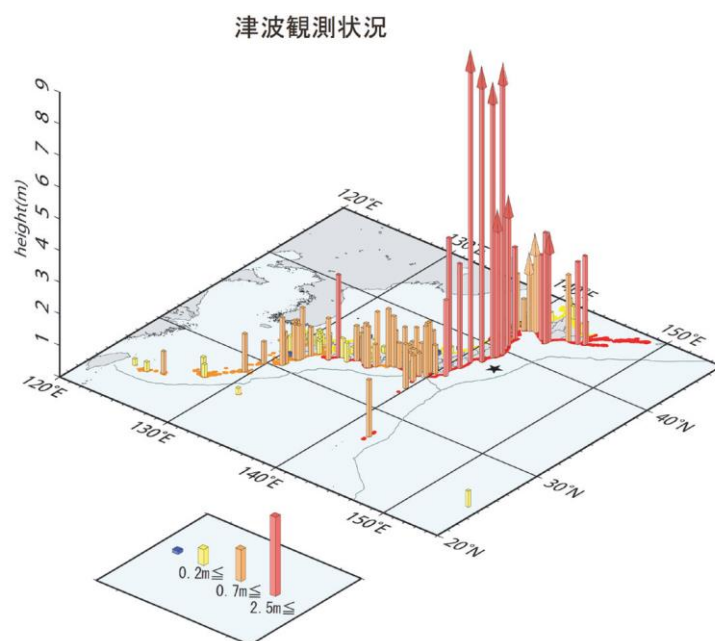


図5 津波観測施設で観測された津波の高さ<sup>7)</sup>

矢印は、津波観測施設が津波により被害を受けたためデータを入手できない期間があり、後続の波でさらに高くなった可能性があることを示す。観測施設には、内閣府、国土交通省港湾局、海上保安庁、国土地理院、愛知県、四日市港管理組合、兵庫県、宮崎県、日本コークス工業株式会社の検潮所を含む。

この図から、東北地方太平洋側で非常に高い津波を観測したほか、日本の広い地域で津波が観測されたことが分かる。3月11日は、東北地方太平洋側では13時頃に干潮であり、地震発生後に東北地方沿岸に巨大な津波の到達した15時～16時頃は潮位がこれから高くなり始める時間帯であり、特段、潮位が高いレベルであったということとはなかった。参考図として、石巻市鮎川の地点の3月11日前の潮汐の予測（推算潮位）を図6に示す。

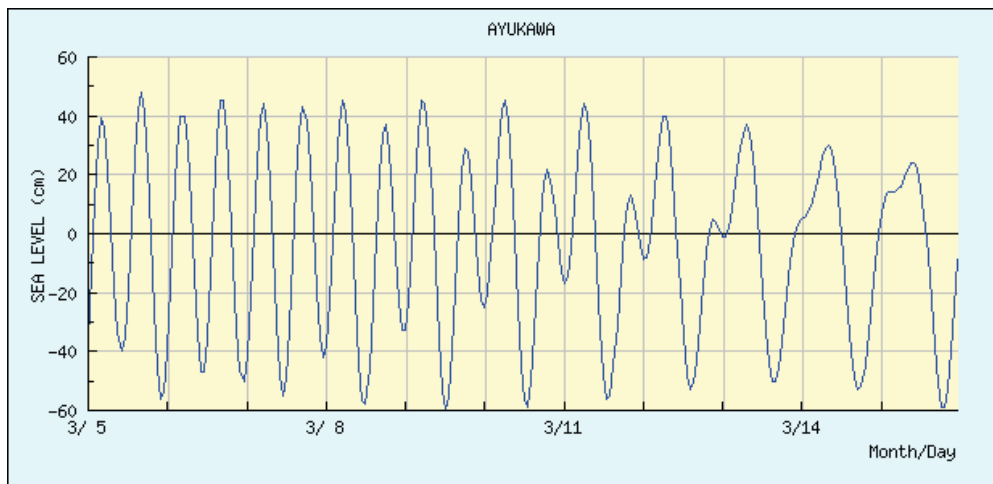


図6 石巻市鮎川の2011年3月5日～2011年3月15日の潮位予測<sup>7)</sup>  
(潮位は標高で表示)

東北地方太平洋沿岸の多くの観測点では、地震発生直後から緩やかな引き波が観測されたが、地震発生後の約15分後（15時過ぎ）には押し波に転じて高い津波が押し寄せ、そのさらに10分前後経ったのち、場所によっては非常に急激に巨大な津波となったことが分かる。多くの地点でデータが途絶えたが、これは、地震発生直後の非常に大きな地震動による揺れやその後の巨大な津波により、津波観測施設の損傷・流出、停電及び伝送網の不通といった被害が発生したためである。地震後の数日間の津波の観測記録が得られた福島県のいわき市小名浜の観測記録の波形を見ると、東北地方太平洋側では第一波がおおむね最大の波であり、その後も大きな津波が半日程度繰り返し押し寄せていたことが分かる。地震動に起因すると推定される振動を地震発生直後に記録した観測地点が多くあり、日本海側など震源域から遠く離れた場所でも、地震の震源過程解析から導き出された海底面の優位な変動から直接伝播する津波では説明できないような記録が見られた。また、国土地

理院の報告によると、岩手県～千葉県のパシフィック沿岸では 1.2m ～ 0.1m 程度の地盤沈下があつたとされ、多くの観測点で地盤沈下の影響を受けたとされる。茨城県の大洗や千葉県の銚子、館山市布良では、押し波の第一波と同程度の高さの波が 17 時頃にあり、最大の高さを記録している。また、四国の太平洋沿岸の観測点では、須崎港（高知県）のように第一波を観測してから約 4 時間後の、第七波で最大の津波の高さ 278cm を観測するなど、津波の第一波が過ぎても安心できない事を裏付けるデータが得られている。このように、後続波で最大の津波を観測する地点も多く見受けられた。有明海の津波観測施設である太良町大浦野崎（佐賀県）など、記録を取り始めてから日本周辺で発生した津波を初めて観測した所も少なくなかつた。沿岸から 10 ～ 20km 沖合に設置されている GPS 波浪計（国土交通省港湾局整備、平成 20 年から津波警報等の切替や津波の観測に活用）でも、岩手県釜石沖の GPS 波浪計で最大の高さ 6.7m の津波を観測する等、巨大な津波を観測した。これらの GPS 波浪計では第一波で最大の津波を観測している。これは、沿岸の観測施設に比べ海岸からの津波の反射波の影響等が小さいことなどによると考えられる。

### 1.3.2 福島第一原子力発電所事故

#### (1) 福島第一原子力発電所における地震動<sup>10)</sup>

福島第一原発には、地震計が 53 箇所設置されている。地震動はこれらのうち 29 箇所記録された。しかし、東京電力の調査によれば、7 箇所の地震計の加速度時刻歴波形の記録が、130～150 秒程度で中断していた。東京電力の調査で、原因は、記録装置のソフトウェアの不具合であることがわかった。

原子炉建屋基礎版上の水平方向(東西・南北)及び上下方向の計 3 成分の観測地震動の最大加速度の一覧を表 1 に示す。水平方向での最大加速度は、2 号機の 550Gal(東西方向)、上下方向は 2 号機の 302Gal であった。

表 1 福島第一原子力発電所・原子炉建屋基礎版上の最大加速度<sup>10)</sup>

観測点 (原子炉建屋最地下階)		観測記録(暫定値 <sup>※1)</sup> 最大加速度値(ガル)			基準地震動 Ss に対する 最大応答加速度値(ガル)		
		南北方向	東西方向	上下方向	南北方向	東西方向	上下方向
福島第一	1号機	460 <sup>※2</sup>	447 <sup>※2</sup>	258 <sup>※2</sup>	487	489	412
	2号機	348 <sup>※2</sup>	550 <sup>※2</sup>	302 <sup>※2</sup>	441	438	420
	3号機	322 <sup>※2</sup>	507 <sup>※2</sup>	231 <sup>※2</sup>	449	441	429
	4号機	281 <sup>※2</sup>	319 <sup>※2</sup>	200 <sup>※2</sup>	447	445	422
	5号機	311 <sup>※2</sup>	548 <sup>※2</sup>	256 <sup>※2</sup>	452	452	427
	6号機	298 <sup>※2</sup>	444 <sup>※2</sup>	244	445	448	415

※1：これらの記録については暫定値であるため、今後の検討により変更となる可能性がある。

※2：記録開始から約 130～150 秒程度で記録が終了

#### (2) 福島第一原子力発電所における津波<sup>10)</sup>

福島第一原発の潮位観測システムは、潮位計及び観測記録装置からなる。潮位計は港内静穏域、潮位観測記録装置はデータ中継装置建屋に設置されている。東京電力の記者会見(4月9日)によると、津波の最初の大きな波は、15時27分頃(地震発生41分後)に到達し、水位は約4mであった。次に大きな波は、15時35分に到達した波であり、潮位計が損傷したため水位は不明である。潮位計の測定範囲は7.5mである。

福島第一原発の敷地高さは1～4号機が10m、5号機及び6号機は13mである。これらの敷地には、津波が敷地前面海域から襲来し、主要建屋設置敷地のほぼ全域が冠水した。東京電力は、浸水時の痕跡調査結果に基づき、1～4号機の原子炉建屋、タービン建屋等の海側の敷地の浸水高はO.P.約+14～15m(O.P.:小名浜港工事基準面)であったと報告してい

る。今回の地震による津波水位について、専門家は、東京電力より公開された津波の防波堤(10m)の越流状況の写真に基づき、10m 以上と推定している。

しかし、その想定を今回の巨大津波は大きく上回り、福島第一原発を襲った津波の高さは想定の 5.4~9.4m も高い 11.5~15.5m に達した<sup>11)</sup>。

### (3) 事故の直接的原因<sup>12)</sup>

事故の直接的原因は、今後の対策の策定にも大きな影響を持つ。被災設備の詳しい現地調査は現状においては不可能であるため、地震動の影響を含めた事故の直接的原因の究明が重要な課題として残されていることは、東京電力福島原子力発電所事故調査委員会（以下、国会事故調）、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（以下、政府事故調）、一般財団法人・日本再建イニシアティブが設立した福島原発事故独立検証委員会（以下、民間事故調）、福島原子力事故調査委員会（以下、東電事故調）全ての事故調報告に共通の認識である。

その中でも、政府事故調、民間事故調、東電事故調は、津波によって全交流電源と直流電源を喪失し、原子炉を安定的に冷却する機能が失われたことを、今回の大事故（炉心溶融、水素爆発、放射性物質の大量拡散）の直接的原因としている。一方、国会事故調は、事故の直接的原因を津波のみに限定することには疑念を呈し、「安全上重要な機器の地震による損傷はないとは確定的には言えない」としている<sup>13)</sup>。

国会事故調が、地震による損傷の可能性を排除しない主な理由は以下の 6 点である。

- ① 平成 18(2006)年の耐震設計審査指針に照らした耐震バックチェックと耐震補強が未了であったことから、発電所設備が今般の地震動に耐え得ない可能性があること
- ② 地震直後に大規模な「冷却材喪失事故」(LOCA) は確認されていないが、小さな配管破断とそれによる炉心損傷や炉心溶融の可能性があること（独立行政法人原子力安全基盤機構の解析結果）
- ③ 1 号機 A 系の非常用交流電源喪失が津波到着前に生じていること
- ④ 地震発生当時、1 号機の建屋 4 階の作業員数人が原因は特定できないものの出水を目撃していること
- ⑤ 1 号機の運転員は、地震直後の非常用復水器 (IC) 操作にあたって、配管からの冷却材の漏れを気にしていたこと

- ⑥ 主蒸気逃がし安全弁 (SR 弁) が, 2 号機・3 号機には開閉記録があるものの, 1 号機にはないため, 作動しなかった可能性を否定できないこと

一方, 政府事故調は, 津波の襲来する前に, 地震動による損傷を断定する事実は確認できていない<sup>14)</sup>とし, 民間事故調も, プラントパラメータ (原子炉の圧力や水位) から推察して地震による破損は考えにくいとして, 津波による全交流電源や直流電源, 海水ポンプ系の機能喪失によって, 異常の拡大を食い止めることができなかったことに着目している。<sup>15)</sup>なお, 東電事故調は, 安全上重要な機能を有する主要な設備は, 地震時及び地震直後において安全機能を保持できる状態にあったとし, その根拠として, 最終報告書作成時点までに確認できた以下の事実が提示されている<sup>16)</sup>。

- ① 地震によってすべての外部電源 (送電線等からの電力供給) が失われたが, 非常用ディーゼル発電機が起動し, 原子炉の安全維持に必要な電源が確保されたこと
- ② プラントパラメータによれば, 地震直後には高圧注水設備 (非常用復水器, 原子炉隔離時冷却系) が, 問題なく動作していると判断され, 主蒸気流量, 格納容器圧力・温度, 格納容器床サンプル (廃液を貯める貯水槽) 水位のチャートから, 配管の健全性についても, 異常はないこと
- ③ 観測記録を用いた地震応答解析によれば, 安全上重要な機能を有する主要な設備の耐震性評価の計算値は, すべて評価基準値以下であること (地震の影響はないと考えられること)
- ④ 発電所設備の損傷状況に関する, 可能な範囲の目視確認結果

(4) 主な事象の時系列 <sup>11) 17) 18) 19) 20) 21) 22)</sup>

主な報告書等を参考に福島第一原発にて発生していた事象を以下の通り時系列にまとめる。

表 2 福島第一原子力発電所事故時系列【1号機】

月日	時刻 (JST)	発生した事象
3/11	14:46	地震発生（震度 6 強） 原子炉自動停止→14:52 非常用復水器(IC)自動起動 全外部電源の喪失→14:47 非常用ディーゼル発電機（D/G）の自動起動
	15:35	津波襲来 全電源，「冷やす」機能，「圧力制御」機能の同時喪失+暗闇・劣悪環境 ■D/G，電源盤の水没→全交流電源の喪失→電動機使用不能へ ■直流電源（バッテリー喪失）→電源盤，計測・制御設備が使用不能へ→冷却機能の喪失（IC など），圧力制御機能の喪失 ■冷却用の海水系ポンプの損傷→冷温停止機能の喪失（最終ヒートシンク喪失）  津波直後：非常用復水器（IC）による原子炉の冷却機能喪失→やがて原子炉水位の低下へ 18:46 頃 燃料損傷の開始（推定）
	17:50	原子炉建屋二重扉付近で，高い放射線量を観測 核燃料が水から露出した可能性
	21:19	原子炉水位が判明（燃料頭頂部+200mm）
	22:00 頃	原子炉でメルトダウン（炉心融解）が始まった可能性
	23:00	タービン建屋内での放射線量の上昇を確認 この頃電源車が到着
	3/12	00:06
01:30 頃		ベントの実施を申し入れ，国了承
02:30		核の容器の圧力上昇を確認，その後，圧力容器の圧力の低下を確認
05:46		消防車により淡水注入開始
07:20		圧力容器の破損（解析）
10:17		格納容器ベント開始
14:30		格納容器ベント成功
14:53		淡水注入完了（累計 8 万 ℓ）
14:54		所長，海水注入を指示
15:36		建屋爆発（5 階部分）
19:04		海水注入の開始
20:45	ホウ酸を海水に混ぜ，原子炉へ注入開始	



表 3 福島第一原子力発電所事故時系列【2号機】

月日	時刻 (JST)	発生した事象
3/11	14:46	地震の発生（震度 6 強）
	14:47	原子炉の自動停止 全外部電源の喪失→非常用ディーゼル発電機（D/G）自動起動
	14:50	原子炉隔離時冷却系（RCIC）手動起動→RCIC 自動停止
	15:01	原子炉未臨界確認
	15:02	RCIC 手動起動→RCIC 自動停止
	15:35	津波の襲来
	15:39	RCIC 手動起動
	15:41	全交流電源喪失（D/G，電源盤水没）+劣悪環境・暗闇 ■海水系水没により最終ヒートシンク喪失→冷温停止機能喪失
	17:12	所長，消防車などによる注水の検討指示
21:50	原子炉水位が判明（燃料頂部+3400mm）	
3/12	02:55	RCIC 運転中であることを確認 （RCIC による原子炉注水が確認できたことから，1号機ベントを優先）
	17:30	所長，格納容器ベント操作準備開始を指示
3/13	11:00	圧力抑制室（S/C）ベント弁（大弁）開，ベントライン構成完了
	11:01	3号機爆発により，S/C ベント弁が弁閉となり，開不能となる また，消防車および仮設ホースの破損により，原子炉注水ラインも使用不能に
	13:25	原子炉水位の低下傾向を確認→RCIC 機能喪失判断
	17:17～	水位が燃料頂部に到達，燃料損傷の開始（推定）
	18:02	原子炉減圧開始
	19:54	消防車による海水注入開始
	21:00 頃	S/C ベント弁（小弁）微開，ベントライン再構成完了
23:35 頃	ドライウェル（D/W）ベント弁（小弁）によるベント実施を決定	
3/15	00:01	D/W ベント弁（小弁）開，ベントライン構成完了（数分後，弁閉確認） （D/W 圧力低下せず）
	06:14	S/C 圧が 0kPa を指示 （東京電力が 2012 年 6 月 20 日に発表した事故調査報告書では「ダウンスケール」という表現に修正されている）

表 4 福島第一原子力発電所事故時系列【3号機】

月日	時刻 (JST)	発生した事象	
3/11	14:46	地震の発生（震度 6 強）	
	14:47	原子炉の自動停止→15:05 原子炉隔離時冷却系（RCIC）手動起動→自動停止 全外部電源の喪失→14:48 頃 非常用ディーゼル発電機（D/G）自動起動	
	15:35	津波の襲来	
	15:38	全交流電源喪失+劣悪環境・暗闇 ■冷却用の海水系ポンプの損傷→冷温停止機能の喪失（最終ヒートシンク喪失） ■直流母線への被水は免れる．直流電源（バッテリー）からの供給継続→RCIC，記録計などへの供給継続	
	16:03	原子炉隔離時冷却系（RCIC）手動起動による冷却	
3/12	11:36	RCIC 自動停止	
	12:35	高圧注水系（HPCI）自動起動	
	17:30	所長，ベントの準備を指示	
3/13	02:42	HPCI 手動停止（バッテリー枯渇直前に停止）→原子炉圧力減圧失敗→圧力上昇→原子炉圧力低下へ	
	04:15	水位が燃料頂部に達したと判断	
	05:10	RCIC による注水を試みるも失敗と判断	
	08:00～ 09:00	燃料損傷の開始（推定）	
	09:08 頃	逃がし安全弁による減圧実施（社員乗用車バッテリーで）	
	09:25	消防車による淡水注入開始（ホウ酸入り）	
	09:36	ベントによりドライウエル（D/W）圧の低下を確認	
	10:30	所長，海水注入の準備を指示	
	12:20	淡水注入完了（防火水槽の淡水枯渇）	
	12:30	圧力抑制室（S/C）ベント AO 弁を開（空気ボンベ交換）	
	13:12	消防車による海水注入開始（余震のため準備難航）	
	3/14	01:10	海水補給のため，消防車注水を停止
		03:20	消防車海水注入再開
09:05		逆洗弁ピットへの海水補給を開始（高線量，アクセス難で難航）	
10:26		自衛隊給水車（5t，7 台）到着，逆洗弁ピットに配置	
11:01		建屋爆発（4・5 階部分） 消防車やホースが損傷し，海水注入停止	
15:30 頃		海水注入再開	
3/15	07:55	建屋上部に蒸気を確認	

表 5 福島第一原子力発電所事故時系列【4号機】

月日	時刻 (JST)	発生した事象
3/11	14:46	地震の発生（震度 6 強） 2010 年 11 月 30 日から定期検査中（原子炉停止中）だった 使用済み燃料プールに燃料 1535 体貯蔵 全外部電源喪失→非常用ディーゼル発電機（D/G）1 台の自動起動 スロッシング（液体の揺動）により使用済み燃料プール水が漏れ、水 位低下（0.5m 以下と推定）
	15:35	津波の襲来 全交流電源喪失+劣悪環境・暗闇 ■直流電源の喪失→電源盤，計測・制御設備が使用不能へ→冷却機能 の喪失（残留熱除去系など） ■使用済み燃料プール冷却用の海水系ポンプの喪失→冷却機能の喪失 （最終ヒートシンク喪失） 使用済み燃料の崩壊熱により，使用済み燃料プール温度は徐々に上昇 し，蒸発により水位低下へ
3/14	04:08	使用済み燃料プール温度 84℃と確認
	11:01 頃	3号機爆発
3/15	06:14	大きな音が発生 原子炉建屋損傷（4・5 階部分） 爆発によりゲートが開いて隣のプールから水が流れ込み，水位が回復 （推定）
3/16	09:38	原子炉建屋 3 階より火災発生 11:00 頃 現場確認にて自然鎮火 ヘリコプターにより，使用済み燃料プール水位を確認（燃料頂部より 4～5m 上部）
3/20	08:21	使用済み燃料プールへの注水開始（以降，断続的に注水）

## 1.4 研究の経緯

著者は平成 26 年 7 月から長崎大学大学院工学研究科客員研究員となり、本論文のテーマである福島第一原発事故による放射性物質の大気拡散について研究を重ねてきた。Ogawa and Saito<sup>23)</sup> では放射性物質による汚染形状の評価にフラクタル次元の適用が有効であることを示した。Saito and Ogawa<sup>24)</sup> では本論文で用いる移流計算の初期モデルを構築し、Saito and Ogawa<sup>25)</sup> にて粒径や放出高さを変えた複数の粒子による計算を実施し、評価を行った。Saito and Ogawa<sup>26)</sup> では更に本論文と同様に乾性沈着と湿性沈着を同一のアルゴリズムにて計算を実施し、良好な結果を得た。Saito and Ogawa<sup>27)</sup> では再度汚染形状の特徴に着目し、移流計算から求めた汚染形状の空間分布及びフラクタル次元のパターンについて検証を行っている。なお、長崎大学大学院工学研究科客員研究員となる以前は Ogawa and Saito<sup>28)</sup>、Ogawa and Saito<sup>29)</sup>、Ogawa and Saito<sup>30)</sup>、Ogawa and Saito<sup>31)</sup>を共著発表している。

著者は本論文執筆時現在、地理空間情報コンサルタントである国際航業株式会社に勤務しており、GIS や写真測量といった技術を利用する業務に従事している。研究歴としては国際航業株式会社デジタルセンシングセンターにて技師として 3 年間研究活動を行った。その活動の中で齋藤・大泉(2006)<sup>32)</sup>を執筆したほか、関連特許を 3 本取得している。

国際航業株式会社入社前は立正大学および立正大学大学院に所属し、研究活動に従事した。GIS 及びリモートセンシングを専門分野とし、それを軸に様々な分野の研究を行った。

環境系の分野では Saito et al.<sup>33)</sup>、音羽・齋藤ほか<sup>34)</sup>にて衛星画像を利用した奥多摩湖周辺の LAI (=Leaf Area Index: 葉面積指数) の推定や水質モニタリングを行ったほか、Saito et al.<sup>35)</sup>、Saito et al.<sup>36)</sup>、Saito et al.<sup>37)</sup>、完野・齋藤ほか<sup>38)</sup>、齋藤・小川ほか<sup>39)</sup>、屋代・齋藤ほか<sup>40)</sup>にて表層土壌における水収支に関する研究を行った。

防災関連では、小川・齋藤<sup>41)</sup>、齋藤・小川ほか<sup>42)</sup>、齋藤・小川<sup>43)</sup>では東京都が管理・運用する水道管理システムを利用し、東京区部において大規模地震が発生した場合の水道管路の被害と必要水量の推定を行った。また、Saito and Ogawa<sup>44)</sup>、Saito and Ogawa<sup>45)</sup>、小川・齋藤ほか<sup>46)</sup>、齋藤・小川<sup>47)</sup>、齋藤・小川<sup>48)</sup>では 9918 号台風による埋立地内の水害シミュレーションを行い、被害の原因について検証を行った。

## 第2章 方法

第2章では本研究の方法を説明する。本研究で行う解析・評価は大きく3つで構成される。

- ① 粒子モデルと高精度気象データを組み合わせた移流計算
- ② 空間線量分布計算
- ③ 汚染形状の定量的評価

①について、まず、本研究で粒子モデルを用いた放射性物質の移流計算を実施するにあたり、粒子モデルと、一般的によく利用されている大気拡散モデルについて解説する。また、それらを利用した既往モデルの概要と現状について触れる。その後、本研究における粒子モデルを用いた移流計算方法について説明する。説明にあたり、利用した風向風速データ、降水データ、地形データについても紹介する。

②では①の移流計算結果を利用し、空間線量分布計算を実施する。実施にあたり、その具体的な方法と利用するモニタリングデータ（モニタリングポストによる空間線量観測および航空機モニタリングによる空間線量観測データ）について紹介する。

③では①の移流計算結果を利用し、汚染形状について定量的な評価を行う。そのための空間分布の計算方法について説明する。更に、フラクタルの概念を取り入れた空間分布の評価を行うため、フラクタルおよびフラクタル次元の説明を行った上で本研究における評価手法について説明する。また汚染形状と比較する気象データについても紹介する。

## 2.1 粒子モデルを利用した放射性物質の移流計算

### 2.1.1 大気拡散モデルの概要<sup>48)</sup>

大気中での放射性物質の移流解析については、大別して大気拡散モデルと粒子モデルが利用される。本研究では前述したとおり、粒子モデルを利用して放射性物質の移流計算を実施するが、ここでは一般的によく利用される大気拡散モデルおよび粒子モデルの概要について説明する。

大気拡散モデルはガス状の汚染物質の移動過程を求めるのによく利用されるモデルである。大気拡散モデルの代表的な計算方法は以下のとおりである。

#### (1) 拡散計算

大別してパフモデルとプルームモデルに分けられる。両者は風速により分けられ、風速 1m/s 未満ではパフモデル、それ以上ではプルームモデルが用いられる。

パフモデル：

$$C_0 = \int_0^T \frac{q}{2\pi\sigma_y^2 h} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_y^2}\right) dt \quad (1)$$

ここで、 $C_0$ ：均一濃度、 $T$ ：計算時間、 $q$ ：排出強度、 $h$ ：鉛直混合層高さ、 $x$ ：風下方向距離、 $y$ ：横方向距離、 $\sigma_y$ ：横軸  $y$  方向への拡散幅である。

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + at \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{y0}$ ：初期拡散幅でグリッドサイズの 1/2 の値、 $a$ ：ターナー線図のパラメータ、 $t$ ：時間(hr)である。

プルームモデル：

$$C_0 = \frac{q}{\sqrt{2\pi}\sigma_y^2 U h} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (3)$$

ここで、 $C_0$ ：均一濃度、 $q$ ：排出量、 $U$ ：風速、 $h$ ：鉛直混合深さ、 $y$ ：横方向距離、 $\sigma_y$ ：横軸  $y$  方向への拡散幅で、次式で表される。

$$\sigma_y = \tan \sigma_{wd} \times x + \sigma_{yp} + \sigma_{y0} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{wd}$ ：風向変動の標準偏差、 $\sigma_{yp}$ ：パスキル線図による拡散幅、 $\sigma_{y0}$ ：初期拡散幅でグリッドサイズの 1/2 の値である。

パフモデルでは方向性無し、プルームモデルでは風下 1 方向につき拡散計算を行い、排出グリッド以外の計算グリッドの中心(x,y)における物質濃度  $C_0(x,y)$  について求める。グリッド内の高さ方向は、混合層内で均一に分布すると仮定し混合層高さごとに大気安定度を決定する。

## (2) 沈着計算

乾性沈着と湿性沈着による濃度現象を評価する。乾性沈着定数  $k_{dry}[1/s]$  は、乾性沈着速度  $V_{dry}[m/s]$  と混合層高さ  $h[m]$  とから求められる。湿性沈着定数  $k_{wet}$  は雨洗い係数とグリッドでの降水量  $Rain[m/s]$  とから算出する。

## (3) 計算濃度

到達濃度 = 拡散濃度 - 沈着と分解による減少分 で各計算グリッドにおける濃度を得る。各計算グリッドにつき、全排出グリッドからの到達濃度の寄与分の和を求める。排出グリッドの、そのグリッド濃度への寄与は、排出幅と混合層高さにつき補正した濃度とする。

## (4) 計算時の主な仮定

計算時の主な仮定は以下のとおり。

- ① 混合層内で排出する。排出位置をグリッドの中心点におく。月平均の排出量が基本であり、式の  $q[kg/d]$  となる。
- ② 移流・拡散：2次元プルームであり、高さ方向は混合層内で一定濃度とする。
- ③ パフ：排出グリッドにおける区分気象条件で中心点から対照的に拡散する。1秒間隔などで時間積和を求めて中心の濃度とする。時間積分で誤差のない切り方  $\Delta t$ 。
- ④ プルーム：排出グリッドにおける区分気象条件で風下 1 方向に拡散する。4時間後の濃度で受け側の計算グリッド中心の濃度を計算する。
- ⑤ いずれも排出源グリッド濃度は中心濃度では過大になるため、拡散幅と混合層高さで補正する。

### (5) 気象データの扱い

アメダス等の毎時データベースから取得した評価期間に関する風向・風速・その他のデータの平均値を利用する。風速  $u$ [m/s]は一定高度で代表させるものとし、べき乗側で補正する。ここでべき乗即は次式であらわされる。(Brutsaert, 1982).

$$U_s = U_{ref} \left( \frac{h_s}{Z_{ref}} \right)^p \quad (5)$$

ここで  $U_s$ (m/s) : 風速,  $h_s$  : 高さ(m),  $U_{ref}$  : 実測風速(m/s),  $Z_{ref}$  : 実測高さ(m),  $P$  : 大気安定度と環境に応じて表 6 より決定する。

表 6 大気安定度<sup>48)</sup>

大気安定度	A	B	C	D	E	F
郊外域	0.07	0.07	0.10	0.15	0.35	0.55
都市域	0.15	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30

### (6) 問題点

ここまで示した大気拡散モデルについては、以下に挙げる問題点が内在する。

- ① 大気拡散モデルは大気安定度, 煙突高さ, 混合層高さ, 沈着速度といった様々なパラメータが必要となる。それぞれの妥当性についての検証が必要となる。
- ② 拡散の形状が正規分布の連続となることから, 詳細な落下地点が特定できない。そのためホットスポットのような局地的な汚染の再現ができない。
- ③ 格子ごとに濃度計算を連続的に実施する必要があるため計算量が膨大になり, トレードオフとして計算の解像度(空間解像度, 時間解像度)が荒くなる傾向があり, 局所風などのデータが扱えない。



### 2.1.2 粒子モデルの概要<sup>50)</sup>

前述の通り、大気中での放射性物質の移流解析については、前項にて解説した大気拡散モデルと粒子法を用いた粒子モデルが利用される。

粒子モデルは流体問題、特にきわめてダイナミックに運動する流体挙動をわかりやすく表現する数値シミュレーションとして開発された<sup>51)</sup>。

粒子法による流体力学のコンピュータシミュレーションでは、はじめに、空間と時間の離散化を行う必要がある。空間は3次元とする。時間は1次元である。

空間の離散化では、流体を複数の粒子の集まりとして表す。1個の粒子はある大きさの流体の塊であると考えられる。たとえば、10kgの流体を100個の粒子の集まりとして表現すると、1個の粒子は0.1kgの流体の塊である。10kgの流体を1,000個の粒子の集まりとして表現すると、1個の粒子は0.01kgの流体の塊である。

ここで用いる「粒子」は計算のために導入した仮想的な考え方であり、実際の流体には存在しない。もちろん、流体は分子という粒から構成されていて、その分子は実在するが、大きさは1ナノメートル(=10<sup>-9</sup>)よりも小さい。さらに、分子には複数の原子から構成されている。水の場合、1つの分子H<sub>2</sub>Oと表され、水素原子Hが2個と酸素原子Oが1個から構成されている。この実在する粒子として計算する方法は分子動力学とよばれる。この分子動力学は実在する小さな分子を計算する方法であるのに対し、粒子法は流体を任意の大きさの塊に離散化してそれを仮に粒子という存在として計算する方法である。

次に時間の離散化を行う。粒子にある時間間隔ごとに、その位置を計算するものとする。実際の時間は連続的であるが、計算のために飛び飛びの時刻で考える。粒子が少しずつ動くように時間間隔は十分短くする。

空間および時間に対して離散化された粒子法によるコンピュータシミュレーションの概念を図7に示す。粒子の番号を下添字*i*で表す。たとえば、100個の粒子の集まりとして流体を表す場合は、*i*は1から100までの値をとる。時刻は上添字*k*で表す。古い時刻*k*の値は既知であり、それを用いて新しい時刻*k*+1の未知の値を計算する。時刻間隔 $\Delta t$ （「時間刻み幅」とよぶ）は、その間に粒子の動きがあまり大きくならないように決める。

各粒子には基本的に速度 $\mathbf{u}_i^k$ と位置 $\mathbf{r}_i^k$ を変数としてもたせる。ここで太字はベクトルを表し、空間3次元でも3つの変数を含んでいる。速度ベクトルおよび位置ベクトルがそれぞれもつ3変数はx,y,z成分を意味する。すなわち、 $\mathbf{u}_i^k = (u_{ix}^k, u_{iy}^k, u_{iz}^k)$ および $\mathbf{r}_i^k = (r_{ix}^k, r_{iy}^k, r_{iz}^k)$

である。(図 8)

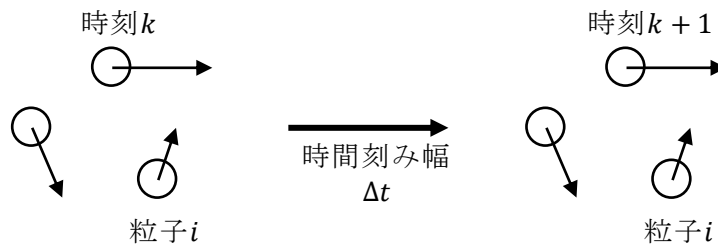


図 7 粒子法による時間と空間の離散化 <sup>50)</sup>

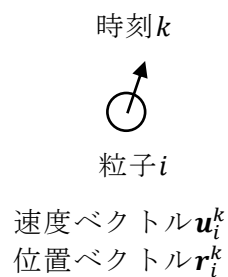


図 8 粒子の表記 <sup>50)</sup>

粒子法の計算手法としての特徴は以下の 3 点である。

- ① 格子が不要
- ② ラグランジュ記述
- ③ 簡単な離散化式

それぞれに特徴について以下に示す。

① 格子が不要

粒子法では格子が必要ない。これは従来の流れのシミュレーションがしていることと比べて、大きな特徴である。

格子法では格子点上に速度などの変数を配置し、粒子法では粒子上に変数を配置する。したがって、変数を配置する場所であるということについては、格子点と粒子は同じ役割を持っている。

そもそも格子法では格子点だけでなく、格子点の間を線で結ぶ必要がある。その理由は、その線によって格子点間のつながりを明示したいからである。2 個の格子点間が 1 本の線で結ばれているのは、2 個の格子点どうしが隣り合っていることを意味している。そして、

支配方程式を離散化するとき、線で繋がっている格子点を使って離散式を構築する。

粒子法では粒子間相互作用モデルによって離散式を作るが、影響半径 $r_e$ 内の近傍粒子を用いる。近傍粒子は粒子間距離が影響半径未満であることにより簡単に判別できる。また、粒子が移動するたびに粒子間距離を再度計算して、近傍関係を更新する。したがって、粒子法では近傍関係をあらかじめ明示しておく必要がなく、格子法における線は必要ない。

格子法では本計算の前処理としての格子生成の作業が行われる。3次元の複雑な形状に対しては格子生成作業に多くの時間と労力が費やされる。場合によっては、煩雑な手作業が求められることになったりする。本計算よりも格子生成の方に時間がかかるということも頻繁である。粒子法ではこれまでの格子生成作業を大幅に軽減することができる。粒子法でも粒子を配置することは必要なので、従来の格子生成作業がまったくなくなるわけではない。それでも、粒子生成と格子生成では、粒子生成の方が簡単である。

## ② ラグランジュ記述

流れに対して流れとともに視点が移動する記述をラグランジュ記述とよび、空間に固定された視点による記述をオイラー記述とよぶ。粒子法はラグランジュ記述であり、ナビエ-ストークス方程式のラグランジュ微分がそのまま時間微分になる。一方、格子を空間に固定する格子法ではオイラー記述になり、ラグランジュ微分が時間微分項と対流項に分離される。そして、対流項を新たに計算しなければならない。対流項の離散化には代表的なものとして風上差分や中心差分があるが、数値拡散や数値振動の問題を生じることが知られており、計算精度が悪くなる。

自由表面流れを格子法で解くことを考える。空間に固定された格子において、液相の存在率を変数として対流項を計算する。液相が存在する場合は液相の存在率が1.0、液相が存在しない場合は0.0とする。自由表面は液相の存在率が0.5の位置であると見なすことにする。初期に液相が存在する格子点では1.0、存在しない格子点では0.0の値を与えれば、その時点においては明瞭に自由表面を描くことができる。しかし、液相の存在率に対する対流項を風上差分によって計算すると、数値拡散により0.0と1.0の間の値をとる計算点が増えていく。こうなると液相の存在率の分布がぼやけてきて、自由表面の動きが不自然になったり、急に消えてしまったりするようになる。また、対流項を中心差分によって計算すると、数値振動によって1.0より大きな値や0.0より小さい値が現れるようになる。こうした値は物理的にありえないだけでなく、不合理な自由表面があちらこちらに現れるよ

うな計算結果が得られる。いずれにしても、オイラー記述の格子法では自由表面の動きを計算することが難しく、その原因は対流項を精度よく計算することが難しいことによる。

格子法では対流項をいかに精度よく安定に計算するかが大きな研究課題であり、様々な研究がなされてきた。粒子法はラグランジュ記述のため対流項を計算する必要がなく、流れのシミュレーションにおけるこの長年の課題を根本的に解決することができる。

また、格子法では自由表面の動きに合わせてラグランジュ記述により格子を移動させることもできる。この場合は粒子法と同様に対流項を計算する必要がなくなるが、しぶきが飛ぶ場合など自由表面の激しい変形が生じると、これにあわせて格子を移動させることができなくなる。格子法では格子点だけでなくその間のつながりを明示している線もいっしょに動かさなくてはならないため、自由表面の複雑な運動に対しては、格子が絡み合ってしまうのである。したがって、格子法において格子を移動させることでラグランジュ的な計算をする場合は、自由表面の比較的緩やかな移動しか扱うことができない。一方、粒子法では離散式を構成する近傍粒子が計算中に他の粒子と入れ替わったとしても、粒子間距離を再計算することで近傍粒子かどうかは簡単に判別することができる。格子が絡み合うという問題も生じない。そのため、しぶきが飛ぶような自由表面の激しい変形が生じても、特に問題なく計算を進めることができる。

こうした粒子法の特徴をいかせる問題は、自由表面の激しい動きを伴う流れや、界面の複雑な動きを伴う混相流である。このような自由表面流れの問題が現れる分野としては、海岸工学、河川工学、船舶海洋工学などが考えられる。混相流の問題では、原子炉における気液二相流、空調機器に関わる気液二相流などが考えられる。

### ③ 簡単な離散式

粒子法では、粒子間相互作用モデルによる離散化が格子法の離散化と比較して相対的に簡単である。たとえば、2次元空間と3次元空間の違いを考えてみると、考慮すべき座標の数が $(x,y)$ の2個から $(x,y,z)$ の3個に増えることになる。格子法では空間微分をそれぞれの座標について行うことになり、項の数が増える。一方、粒子法の粒子間相互作用モデルでは、基本的に粒子間距離の計算において座標の数の増加を考慮するだけでよく、項の数は増えない。そのため、粒子法では2次元と3次元で計算プログラムの長さがあまり変わらない。

このように粒子法では離散式が簡単であることから、多数の物理現象の相互作用（マル

チフィジックス)の問題に適している。たとえば、混相流において相変化を伴う減少を扱うことが容易である。具体的には、鑄造における凝固を伴う熱流動現象、溶接に関わる溶融と凝固を伴う熱流動現象なのである。また、固体力学と流体力学の連成問題や、燃焼などの化学反応を伴う熱流動現象にも適していると考えられる。漂流物を伴う津波の陸への遡上や、航空機の着水といった問題にも適用されている。

粒子法によるシミュレーションが適している現象は、複雑な自由平面や界面の運動、および相変化や流体と固体の相互作業などのマルチフィジックスである。こうした現象は複雑であるため、大規模な3次元計算では結果をわかりやすく可視化することによって、人間が理解しやすくなる。したがって、粒子法では計算結果の可視化が特に重要である。

### 2.1.3 既往モデルの概要<sup>51)</sup>

福島第一原発事故による大気汚染についての計算は東京電力による放射性物質の大気中への放出量の推定や SPEEDI を利用したものをはじめ、多くのモデルにて計算が行われてきた。以下にそれぞれの概要について列記する。

東京電力では前述の報告書<sup>51)</sup>にて DIANA (Dose Information Analysis for Nuclear Accident) を用いて計算を実施している<sup>16)</sup>。DIANA は、放射性希ガス・よう素および粒子状物質が大気中に放出された場合を想定して、10 分毎に原子力発電所周辺の 3 次元移流拡散現象を模擬し、任意の地点における空間線量率を評価することが可能なシステムである。計算方法は、測定された気象データ（発電所内の風向、風速）を元に、評価領域内（発電所を含む、東西 50km×南北 50km×高さ 2000m の範囲、計算メッシュ：1km×1km×100m）の 3 次元の風場を地形の影響を考慮し作成し、粒子による移流拡散を計算するラグランジュ型仮想粒子拡散モデルである。拡散粒子は 0.5MeV 換算の粒子を仮定し、放出箇所は同時刻の放出を仮定する地点は一箇所としている。計算ステップは 10 分毎（10 分間は一定の放出率を仮定する）としている。なお、沈着速度については大気拡散の計算で一般的な表 7 の数値<sup>52) 53) 54)</sup>を利用する。

表 7 乾性沈着の場合の沈着速度（乾性沈着の場合）<sup>51)</sup>

大気安定度	よう素 (cm/s)	セシウム (cm/s)
A~F	0.3	0.3

降雨の条件は、同時刻において評価範囲領域内で均一な降雨であると仮定している。沈着評価範囲は発電所北側 25km、南側 25km、東側（海側）、20km、西側（陸側）は 30km としている。

日本学術会議 総合工学委員会原子力事故対応分科会では、広域における環境汚染の低減に必要なさまざまな作業のために重要な情報となるような、現存するモデルによる計算結果の不確実性を評価することを目的にいくつかのモデルの比較・評価を行っている。

CEREA (Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique) ではオイラー型化学輸送モデル Polar3D を用いた拡散シミュレーションがなされている。ここでは乾性沈着は  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{I}$  それぞれに一定速度を与えている。湿性沈着による洗浄率は Brandt et

al.<sup>55)</sup>をもとにしている。水平解像度は 0.05°, 水平格子数は 270×260 であり, 鉛直層数は地表から 8,000 m までの 15 層である。計算には 3 時間ごと, 空間解像度 0.25°×0.25°の ECMWF による気象場を気象モデル WRF の初期値および側面境界とし, 空間解像度 0.05°×0.05°, 1 時間ごとの濃度場および沈着量分布を推定した。

電力中央研究所では放射性物質の大気輸送シミュレーションに関し, 化学輸送モデルとして CAMx<sup>56)</sup>を, 気象モデルとして WRF<sup>57)</sup>を使用した。CAMx においてガスおよび粒子状の各放射性物質の移流, 拡散, 放射性壊変, 乾性および湿性沈着について考慮するようモデルを拡張している。粒子状放射性物質の大気中での振る舞いについては, 微小粒子状物質 PM2.5 (粒径 2.5 μm 以下の粒子状物質) にて近似している。計算対象領域は東日本域であり, 水平解像度は 5 km, 鉛直層数は高度 100 hPa までの 34 層である。湿性沈着過程は Seinfeld and Pandis<sup>58)</sup>をもとに, 降雨による高度方向への再配分を考慮するよう修正している。粒子状物質の乾性沈着速度は Zhang et al.<sup>59)</sup>を, ガス状物質の乾性沈着速度は Zhang et al.<sup>60)</sup>をそれぞれ元としている。気象モデル WRF の初期値および側面境界として気象庁メソ解析 (MANAL) を使用している。また計算領域内における MANAL を用いた気象場に対するナッジングもあわせて適用している。

IRSN (Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire)では, オイラー型化学輸送モデル IdX を用いて放射性物質の大気拡散シミュレーションを行なった。乾性沈着過程は一定速度を仮定し,  $2 \times 10^{-3}$  m/s としている。湿性沈着過程は, ECMWF の気象場における降水量 P (mm/h) および放射性物質の種別ごとの除去定数を用いている。

日本原子力研究開発機構(JAEA)では緊急時環境線量情報予測システム SPEEDI を拡張した大気拡散予測システム WSPEEDI<sup>61)</sup>にてシミュレーションを行った。WSPEEDI は非静力メソスケール気象モデル MM5<sup>62)</sup>とラグランジュ型粒子拡散モデル GEARN<sup>63)</sup> とを組み合わせたものである。MM5 は世界中で広く使われており, いくつかの国においては気象予報モデルとして現業的に使用されている。GAREN は, 放出源からの放射性物質の大気拡散を多数 (通常数百万程度) の粒子の動きから求めるものである。水平方向の座標系は MM5 と同一のものを, 鉛直方向には z\*座標系をそれぞれ適用している。個々の粒子の動きには MM5 によって計算された気象場を用い, グリッドスケールの気象場による移流とサブグリッドスケールの乱流による渦拡散とを考慮している。大気中の放射能については大気擾乱による地表への沈着 (乾性沈着) と降雨による沈着 (湿性沈着) とを考慮してい

る。乾性沈着は *Sehmel*<sup>64)</sup> をもとに乾性沈着速度を設定している。湿性沈着については希ガスを除き、MM5 における対流性および非対流性の降雨強度を用い、洗浄率を計算している。洗浄係数は *Brenk and Vogt*<sup>65)</sup> をもとに求めている。各格子点における大気中濃度については、出力時間ごとに存在する粒子の寄与の平均値を求め、地表および海洋表面上への積算沈着量については各格子点に沈着した粒子による影響をすべて積算することによって求めている。放射線量については大気中濃度と土壌沈着量に変換係数を乗じて求めている<sup>66)</sup>。

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) では領域化学輸送モデル *WRF/Chem*<sup>57)</sup> を使用し、<sup>131</sup>I および <sup>137</sup>Cs の移流、拡散、乾性沈着および湿性沈着を組み込んでいる。計算対象領域は東日本域であり、水平分解能は 3km である。また鉛直層数は高度 100 hPa までの 35 層である。湿性沈着過程は *Maryon et al.*<sup>67)</sup> をもとにしている。また <sup>131</sup>I の乾性沈着速度については *Maryon et al.*<sup>68)</sup> を <sup>137</sup>Cs の乾性沈着速度については *Klug*<sup>70)</sup> をそれぞれもとにしている。気象場の側面境界および初期値は気象庁メソスケールモデルを使用している。また計算領域内の気象場については、気象庁メソスケールモデルおよび気象庁による地表観測へのナッジングを行っている。

気象庁(JMA)は「原子放射線の影響に関する国連委員会」の要請により、世界気象機関に設立された福島第一原発事故に関するタスクチームに協力し、現業メソ解析(MESO)およびレーダー解析雨量(RAP)、気象庁領域大気輸送モデル(JMA-RATM)による計算結果を提供している。JMA-RATM は MESO 解析の気象場を用いる化学輸送モデルである。本モデルはラグランジュ型モデルであり、多数の粒子の移流、鉛直および水平拡散、重力沈降、乾性および湿性沈着などの諸過程を考慮することにより放射性物質の大気拡散を計算している<sup>70) 71)</sup>。本来、JMA-RATM は日本域における光化学オキシダント予測情報<sup>72)</sup>ならびに火山灰降下予測情報<sup>73)</sup>などを提供するために開発されたものである。放射性物質の予測のため、モデルに導入されている乾性および湿性沈着過程の修正を行っている。湿性沈着過程としては雨滴による除去(雲下過程)のみを考慮しており、除去率は *Kitada (1994)*<sup>74)</sup> をもとにしている。粒径分布としては平均粒径 1 $\mu$ m、標準偏差 1 (上限 20 $\mu$ m) の正規分布を、また粒子の密度は 1g/cm<sup>3</sup> をそれぞれ仮定している。

気象庁気象研究所(JMA-MRI)では領域化学輸送モデル *RAQM2*<sup>75) 76)</sup> を使用した。本モデルは 3 モーメントのモーダル法エアロゾルモデルであり、各モードにおける粒径分布は正規分布を仮定している。本モデルではエアロゾルの核形成、凝縮、凝集、乾性沈着、雲水



および氷雲粒子生成とそれに付随する雲微物理過程によるエアロゾル粒子の取り込み（雲内過程による湿性沈着）、雨滴による除去過程（雲下過程による湿性沈着）などの過程を考慮している。気象場については気象庁非静圧気象モデル(NHM-LETKF)を用いたアンサンブルカルマンフィルタによるデータ同化 (Kunii)<sup>77)</sup>を行ったものを使用した。NHM-LETKF および RAQM2 はともに 3 km 格子、213 × 257 格子での計算を行った。NHM-LETKF の鉛直層数は 50 hPa までの 50 層であり、また RAQM2 の鉛直層数は高度 10 km までの 20 層である。放射性エアロゾルについては、本研究においては乾燥時幾何平均径  $D_{g,n,dry}$  を 100 nm、標準偏差  $\sigma_g$  を 1.3、粒子密度  $\rho_p$  を  $2.0 \text{ g/cm}^3$ 、吸湿性  $\kappa$  を 0.4 と仮定した。また混合過程として内部混合を仮定している。 $I_2$  の化学形態としてはガス状であると仮定しており、放出時には  $^{131}\text{I}$  のうち 20% がガス状  $I_2$ 、80% が微小粒子状物質であると仮定している。

国立環境研究所 (NIES) では  $^{137}\text{Cs}$  の大気拡散に関するシミュレーションを領域気象モデル WRF<sup>78)</sup> および三次元領域化学輸送モデル(CMAQ)<sup>79)</sup>を用いて行った。計算期間は 2011 年 3 月 10 日から 4 月 20 日までの間である。乾性沈着については沈着速度抵抗モデルを用いている。 $^{137}\text{Cs}$  はすべて粒子状であり、Sportisse<sup>80)</sup>をもとに粒径を  $1 \mu\text{m}$  と仮定している。計算対象領域は東北地方のほぼすべてを含む  $711 \times 711 \text{ km}^2$  であり、水平解像度は 3 km である。また鉛直層数は 34 層であり、大気最下端での層厚はおよそ 60 m である。WRF による領域気象シミュレーションの際には、気象庁メソスケールモデルによる 5 km 格子、3 時間間隔の 3 次元気象場へのナッジングを行っている。福島第一原発からの放出シナリオは Terada et al. (2012)<sup>81)</sup>を用いている。領域化学輸送モデル CMAQ において、粒子状物質の湿性沈着過程については雲内での汚染物質濃度、雲の時間スケール、湿性沈着による除去時間で求められる。

Seoul National University (SNU) では領域化学輸送モデル(ADAM2)<sup>82)</sup>をもとにした(ETM)を開発した。ADAM2 は 11 の粒径サイズをもつビン法エアロゾルモデルであり、各ビンにおける粒径サイズは正規分布を仮定し、各々の中心半径は  $0.1 \mu\text{m}$  から  $37 \mu\text{m}$  の間ではほぼ等間隔になるよう設定している。ETM での放射性物質シミュレーションに際しては、 $^{137}\text{Cs}$  の粒径分布について Stohl et al.<sup>83)</sup>をもとに正規分布を仮定した。またガス状物質についても取り扱えるよう ADAM2 から修正を加え、 $^{131}\text{I}$  についてはガス状を仮定している。ETM の水平解像度は 27 km であり、計算対象領域の中心を福島第一原発に設定した。気象場については領域気象モデル MM5 を使用した。放射性物質の湿性沈着過程については

降水強度および ADAM2 の診断的雲モデルによる雲水量を用いている<sup>84)</sup>。

これらのモデルの結果の概要を図 9 に示す。これらを比較すると福島第一原発から北西に強い汚染が広がっているという大まかな結果は一致しているものの、詳細にみるとその形状や濃度については各モデル間の結果に差が生じていることがわかる。日本学術会議総合工学委員会原子力事故対応分科会においても、各モデルとも、観測された放射性物質の分布の主要な特徴を再現しているが、定量的にはモデル間の差が大きく、湿性沈着過程についてのモデル間差が大きいと結論づけている。

また、計算にはいずれも大型コンピュータの並列処理が不可欠となっており、より簡便かつ、これらのモデルに近い結果を得られる方法が必要である。

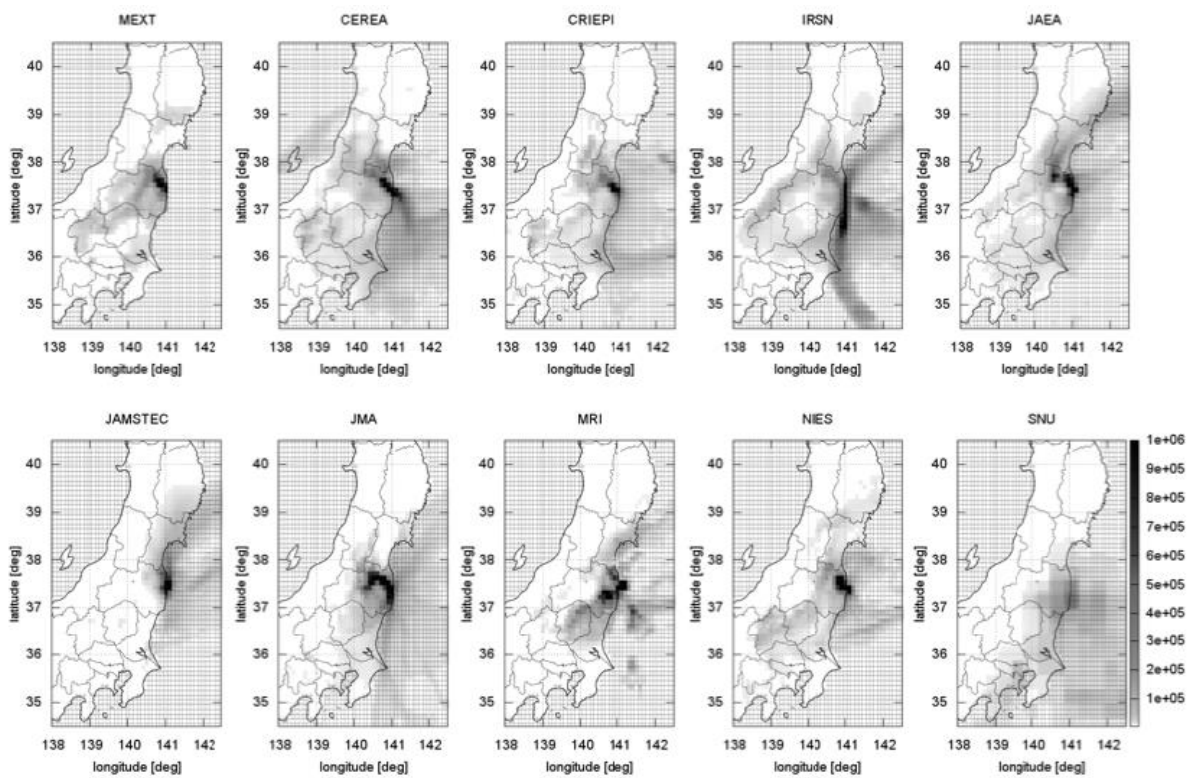


図 9 各モデルを用いて計算された  $^{137}\text{Cs}$  積算沈着量の緯度—経度分布図<sup>51)</sup>

#### 2.1.4 粒子モデルを利用した放射性物質の移流計算

本研究では放射性物質を粒子として扱う。本来放射性物質はガス状のものと考えられているが、実際には水素爆発の際のコンクリート砕や大気中のエアロゾルに付着することで、ある程度大きな塊（結晶）となり、それが大気中を移動し落下する。このことは被災当時、「原発から爆発で飛んできた断熱材の一部が大きな雪玉のようにふわっと音もなく舞い落ちてくるのが見えた」<sup>85)</sup>という住民の証言からも妥当であり、実際に起こった事象でもあるといえる。ここでは放射性物質そのものの粒径ではなく、結晶の粒径を 0.01~0.1mm (0.01mm ずつ 10 段階) と仮定して計算を行うこととした。

一般的な粒子モデルでは粒子間の距離を求め、近隣の粒子との関係から移動量を求める方法をとる。ただし、今回の手法では計算をより簡便にするため、近隣の粒子との関係（摩擦）をゼロとし、移動に関する条件（風向、風速、降水、地形）をメッシュ上に与え、その情報から移動量を求めることとした。各気象の条件として、最新の気象予測にも利用される高精度気象データを採用することで、本来であれば超高性能コンピュータや並列処理が必要な計算を簡略し、通常のパソコンとエクセルなどの表計算アプリケーションレベルで実施できるまでモデルを単純化した。これにより、災害発生時に個人レベルでも汚染シミュレーションが行え、避難の判断や減災に役立てることができる。本研究でも主に、一般的に市販されているノート PC（Panasonic 社製 CF-SX4）と Microsoft Excel 2013 を利用して計算を行った。なお、地図上への結果表示には ESRI 社の ArcGIS 10.2 を利用した。

以降に計算方法の詳細について記載する。

##### (1) 計算領域

福島第一原発を原点とし、西方向及び南北方向 100km の範囲を計算領域とした。なお、福島第一原発の東側は海域であり、気象条件等が異なるため、10km の範囲を計算対象とした。（図 10 赤枠）

なお、計算に利用するデータは計算対象の外周に更に一回りメッシュ分を利用することで対象領域境界付近の境界条件の考慮を不要とした。

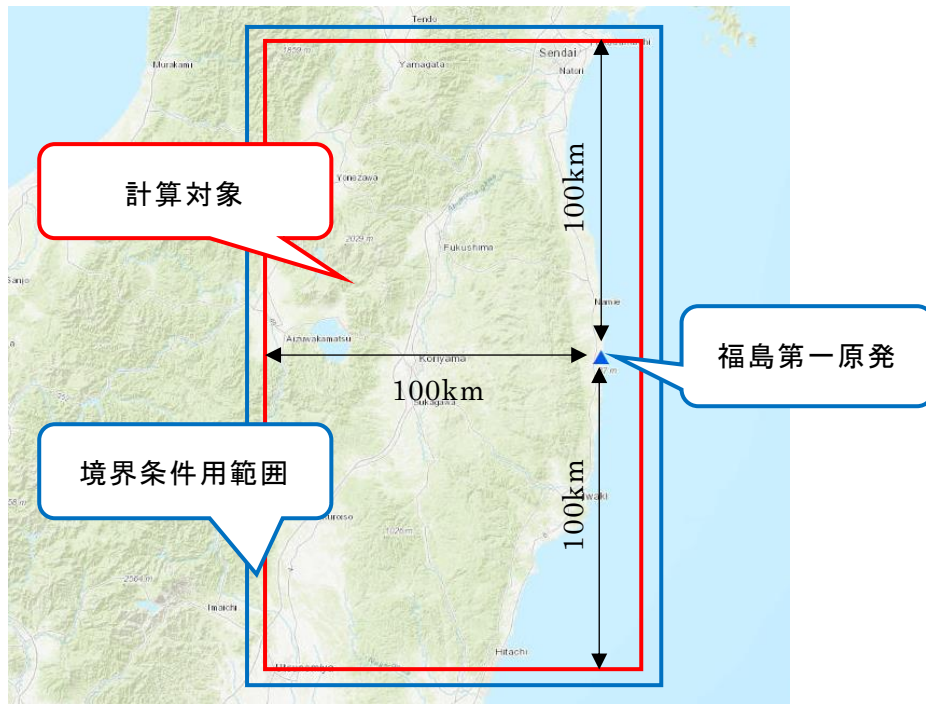


図 10 計算領域

## (2) 初期条件

放射性物質の発生源は福島第一原発であり，ここから粒子を出発させる．詳細な位置情報は以下の通り．

所在地：福島県双葉郡大熊町大字夫沢字北原 22

東経：141.037390 度 北緯：37.414242 度 (10 進)

世界測地系 2000 第Ⅷ系

X：105811.346 Y：159049.574

粒子は煙のように上昇したものと水素爆発のエネルギーで上空に飛ばされたものの 2 種類があるが，ここでは区別せず，後述する毎時大気解析 GPV の高さ (10m~1000m の 6 段階) それぞれから粒子を放出する方法で計算を行った．

## (3) 水平方向の移動

水平方向の移動については風向風速データを利用して求めた．

$$\Delta x = v_u \times d \times \Delta t \quad (6)$$

$$\Delta y = v_v \times d \times \Delta t \quad (7)$$

ここで $\Delta x$ : x方向の移動量(m),  $\Delta y$ : y方向の移動量(m),  $v_u$ : 風の東西成分(m/s),  $v_v$ : 風の東西成分(m/s),  $d$ : 空気抵抗を考慮した補正係数である. 本計算では,  $d$ を0.7とした.

なお, 後述するとおり, 風向風速及び地形などのメッシュデータは緯度経度単位で整理されている. よって粒子の移動量 $\Delta x$ ,  $\Delta y$ は m 単位で計算を行うが, 粒子の位置の特定と次の移動量のパラメータとなる風向風速等のデータを取得するため, その都度座標変換して求めた. 緯度経度と平面直角座標系とを相互変換する仕組みは国土地理院が公開している「TKY2JGD」<sup>86)</sup>などが挙げられるが, 本研究では Microsoft Excel のアドインである「ConvBLXY2000」<sup>87)</sup>を利用した. 「ConvBLXY2000」は測位座標系(BL)と平面座標系(XY)間の投影計算を行う関数を組み込むものである. 本研究で採用した理由は以下の通りである.

- ① 国土地理院の変換パラメータを利用しており, 国土地理院長の承認を得ている.
- ② エクセルの関数として利用できるため, 移流計算過程に簡単に組み込める.

ConvBLXY2000 アドインをエクセルに組み込むと, 表 8 に示す 4 つのユーザー定義関数が組み込まれ, 通常の間数と同様に利用することができる.

表 8 ConvBLXY2000 アドイン機能表

関数名	機能	備考
Bltoxy	緯度経度から X Y 座標に変換	日本測地系用
bltoxy2000	緯度経度から X Y 座標に変換	世界測地系用
Xytobl	X Y 座標から緯度経度に変換	日本測地系用
xytobl2000	X Y 座標から緯度経度に変換	世界測地系用

※日本測地系は, 楕円体に「ベッセル楕円体」を使用

※世界測地系は, 楕円体に「GRS80 楕円体」を使用

※縮尺係数はどちらも「0.9999」を使用

緯度経度から X Y 座標に変換する場合の具体的な入力方法は以下の通り.

<p>= bltoxy (緯度, 経度, 系, 出力値)</p> <p>または</p> <p>= bltoxy2000 (緯度, 経度, 系, 出力値)</p>
--

緯度：「DDMMSS」形式（例：39度5分43.504秒 → 390543.504）で入力するか、その形式で入力されているセルを指定

経度：緯度と同じ形式で指定、系：原点となる座標系を入力するか、その値が入力されているセルを指定（値の範囲：1～19）

出力値：XとYのどちらを出力するかを0か1で指定（0=X座標, 1=Y座標）

XY座標から緯度経度に変換する場合の具体的な入力方法は以下の通り。

=xytobl (X座標, Y座標, 系, 出力値)

または

=xytobl2000 (X座標, Y座標, 系, 出力値)

X座標：X座標(m)を入力するか、その形式で入力されているセルを指定

Y座標：X座標と同じ形式で指定

系：原点となる座標系を入力するか、その値が入力されているセルを指定

出力値：緯度と経度のどちらを出力するかを0か1で指定（0=緯度, 1=経度）

なお、移流計算では最終的に落下（沈着）した場所がわかるだけでなく、放出量の逆推定ができるよう、放出された時刻、放出された初期高さ、粒径を属性として持たせた。また、直線  $(x, y) - (x_{\Delta t}, y_{\Delta t})$  データを作成し、各粒子が移動した軌跡を地図上に表示できるようにした。これにより、最終的な落下地点を明らかにするだけでなく、移流の様子も確認することができる。

#### (4) 鉛直方向の移動

鉛直方向の移動（落下）についてはストークス式を利用して求めた。

$$v_s = \frac{D^2(\rho_p - \rho_a)}{18\mu} \quad (8)$$

$$\Delta s = v_s \times \Delta t \quad (9)$$

ここで、 $v_s$ ：落下速度(m/s),  $\rho_p$ ：粒子の密度(2650kg/m<sup>3</sup>),  $\rho_a$ ：空気の密度(1.225kg/m<sup>3</sup>),  $\mu$ ：粘性係数(1.8・10<sup>-5</sup>Pas)である。

粒子の水平方向と鉛直方向の移動のイメージを図11に示す。

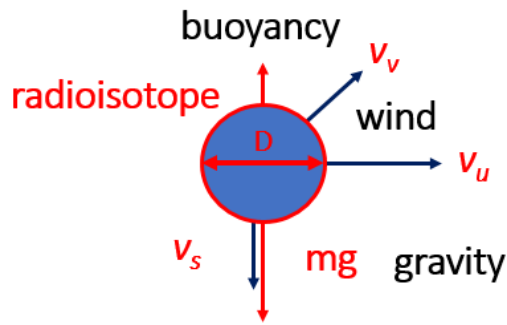


図 11 粒子モデルのイメージ

なお，落下 (=沈着) の判定には数値地形データを利用した．標高と移動後の鉛直方向位置とを比較し，標高の方が高くなった時点で着地したと判定した．これにより，阿武隈山地などの地形を計算に反映させる．風向風速データと地形データの関係は図 12 のとおり．各粒子が着地したと判定された場合及び計算領域から外れた場合，計算終了とした．

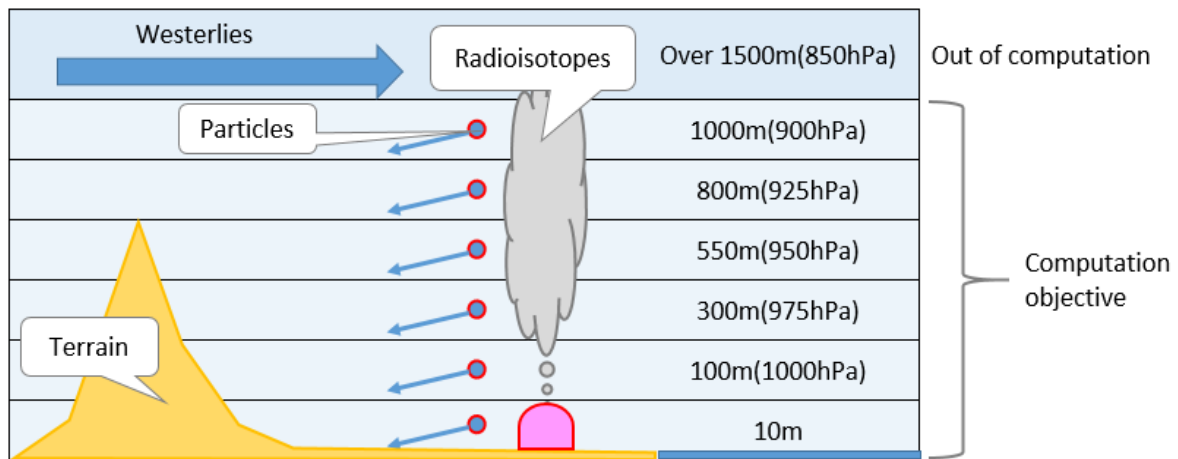


図 12 粒子と風向風速データの対応イメージ

#### (5) 乾性沈着/湿性沈着

乾性沈着，湿性沈着の区別は，後述する時系列降水メッシュデータを利用し，粒子が移動した際，降水メッシュと重なったか否かで判定した．すなわち，粒子が移動を開始して地表面に着地するまでに，降水メッシュがなかった場合は乾性沈着，降雨が少しでもあった場合（降水量  $R > 0$ ）は湿性沈着とした．

#### (6) 計算時間

計算時間は福島第一原発に津波が押し寄せた 2011 年 3 月 11 日 15 時 30 分を含むよう、2011 年 3 月 11 日 15 時(JST)から 2011 年 3 月 31 日(JST)までの期間とした。時間解像度 ( $\Delta t$ ) は計算メッシュサイズが 1kmであることを考慮し、10分とした。なお、後述する計算に利用した風向風速データ等の時間は UTC (世界標準時) で管理されるため、データ処理時に JST (日本標準時) に統一し扱うこととした。よって本論においても特段の断りが無い限り時間は JST で表記する。



## 2.1.5 風向風速データ<sup>87)</sup>

風向風速の高度別データは、気象庁の毎時大気解析 GPV を利用した。毎時大気解析 GPV の概要は表 9 のとおり。また、可視化した画像例を図 13 に示す。

表 9 毎時大気解析 GPV の概要

①解析時刻	毎正時（1日24回）
②格子系	等緯度経度
③格子間隔	地上は 0.05 度×0.0625 度（格子数 505×481）
④領域	(47.6N,120E)北西端, (22.4N,150E)南東端とする領域
⑤データ量	約 18MB/回×24 回 = 432MB/日
⑥フォーマット	GRIB2

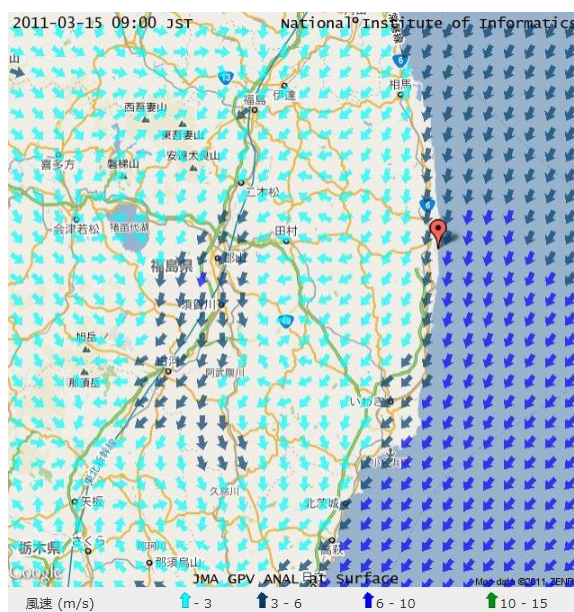


図 13 地表面の風向風速可視化画像例（3月15日9時）<sup>90)</sup>

毎時大気解析 GPV はメソ予報モデル(MSM)の風予想値と各種観測データを利用して風の三次元分布の解析を行う。毎時の解析データを利用することで強風域や収束域の変化・移動を把握することが可能である。解析には最適内挿法を使用し、MSM の風予想値を第一推定値とし、これをウィンドプロファイラ等の観測値で修整して作成する。なお、地上風は、高層風と独立して解析を行い、アメダス観測値で修整する。修整量は図 14 に示すよう、

- ① 観測点での第一推定値と観測値との差をもとに、その点での修整量を決める。なお、観測の誤差が考慮されるため、修整後の値は観測値と同じ値にはならない。

② 各格子点における調整量を，観測点から離れるほど小さくなるように決める．  
 という方法で求める．格子点の周囲に複数の観測値がある場合はそれぞれの調整量を加算し，観測値がない場合は調整しない．

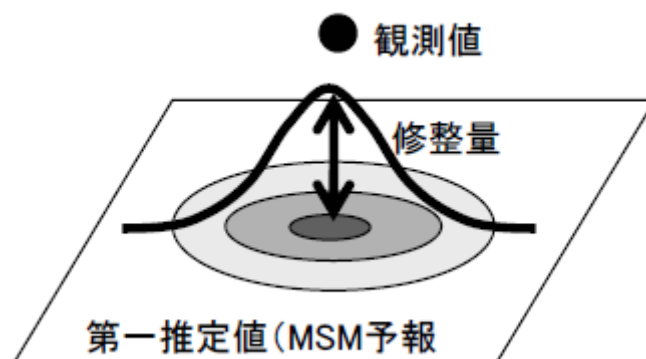


図 14 調整量の決め方の模式図<sup>87)</sup>

本データは「GRIB2 通報式による毎時大気解析格子点値データフォーマット」仕様にしたがって格納されている．各格子の情報には本仕様第 7 節「資料節」に格納されている．ただし，値は単純圧縮オクテット列にて圧縮されているため，次式にて復元する必要がある．

$$Y = (R + X \times 2^E) \div 10^D \quad (10)$$

ここで  $Y$ =圧縮された元のデータ， $E$ =二進尺度因子， $D$ =十進尺度因子， $R$ =参照値， $X$ =圧縮後の値．二進尺度因子，十進尺度因子，参照値については第 5 節「資料表現節」に格納されている．

上記の通り，アメダス等のウィンドプロファイラの実測値が利用できる場合は，その値と距離等によって MSM の値を補正するため，精度の高い風向・風速データを提供するが，ウィンドプロファイラの利用の可否に関らずフォーマットが一定であるため，常時一様な計算が可能となる．空間解像度は 0.05 度×0.0625 度，高さ方向は地上風，高層風（1000～100hPa の 16 階層）である．本研究では内陸に沈着した放射性物質を対象とするため，偏西風の影響を大きく受ける 850hPa（地上 1500m）以上の高層風は計算対象から除外した．

## 2.1.6 降水データ<sup>91)</sup>

降水データは気象庁のレーダアメダス解析雨量を使用した。レーダアメダス解析雨量の概要は表 10 のとおり。また、可視化した画像例を図 15 に示す。

表 10 レーダアメダス解析雨量の概要

①解析時刻	30 分ごと
②格子系	等緯度経度
③格子間隔	1km メッシュ (45 秒×30 秒) (格子数 2560×3360)
④領域	(48N,118E)北西端, (20N,150E)南東端とする領域
⑤フォーマット	GRIB2
⑥データ内容	雨量



図 15 レーダアメダス解析雨量可視化画像例 (3 月 15 日 22 時)<sup>90)</sup>

レーダアメダス解析雨量は、国土交通省水管理・国土保全局、道路局と気象庁が全国に設置しているレーダー、アメダス等の地上の雨量計を組み合わせ、降水量分布を 1km 四方の細かさで解析したものである。解析雨量は 30 分ごとに作成され、例えば、9 時の解析雨量は 8 時～9 時、9 時 30 分の解析雨量は 8 時 30 分～9 時 30 分の 1 時間雨量となる。

一般的に利用されるアメダスは雨量計により正確な雨量を観測するが、雨量計による観測は面的には隙間が生じる。一方、レーダーは雨粒から返ってくる電波の強さにより、面的に隙間のない雨量が推定できるが、雨量計の観測に比べると精度が落ちる。両者の長所

を生かし、レーダーによる観測をアメダスによる観測で補正すると、面的に隙間のない正確な雨量分布が得られる(図 16)。解析雨量では精度をより高めるために、国の他機関や都道府県の雨量計による観測も、アメダスと合わせて利用している。

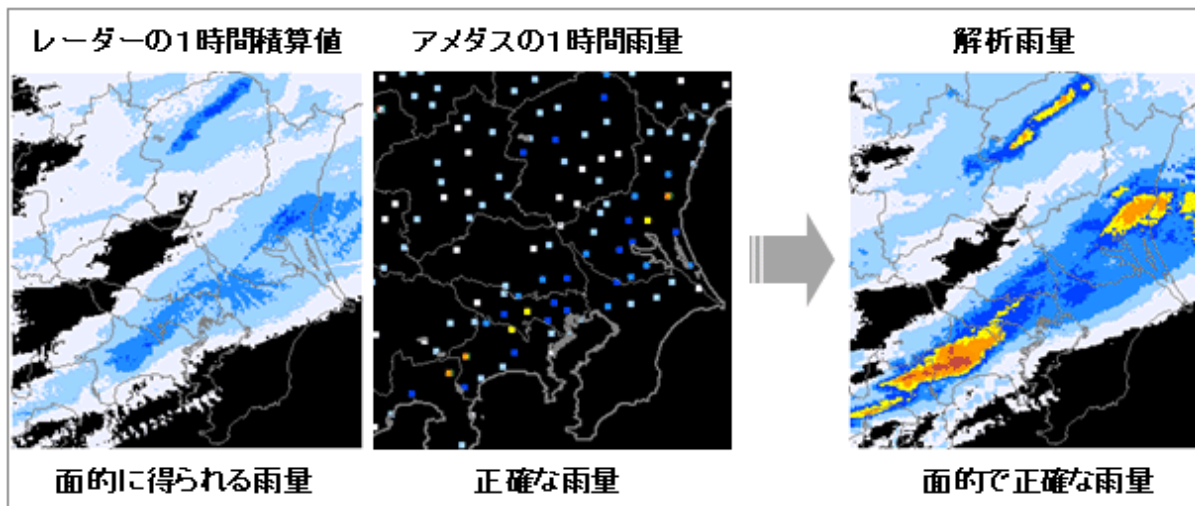


図 16 解析雨量データの作成イメージ<sup>91)</sup>

このデータも地上アメダスの利用の可否に関らずフォーマットが一定であるため、本研究のように災害により付近の地上アメダスが利用できない場合でも常時一様な計算が可能となる。本研究ではこのデータを乾性沈着・湿性沈着の判定に利用した。

### 2.1.7 地形データ<sup>92)</sup>

地形データは国土交通省国土政策局が公開する国土数値情報の標高傾斜度 3 次メッシュ第 2.2 版を用いた。本データは国土地理院「基盤地図情報 数値標高モデル（10m メッシュ, 250m メッシュ）」の情報を元に、標高（平均, 最高, 最低）、最大傾斜角度・方角、最小傾斜角度・方角について 3 次メッシュ（1km メッシュ）毎に整備したものである。標高傾斜度 3 次メッシュの概要は表 11 のとおり。また、可視化した画像例を図 17 に示す。

表 11 標高傾斜度 3 次メッシュの概要

①元データ	基盤地図情報 数値標高モデル（10m メッシュ, 250m メッシュ）
②格子系	等緯度経度
③格子間隔	1km メッシュ（45 秒×30 秒） （格子数 2560×3360）
④領域	(48N,118E)北西端, (20N,150E)南東端とする範囲
⑤フォーマット	SHP
⑥データ内容	標高（平均, 最高, 最低）, 最大傾斜角度・方角, 最小傾斜角度・方角

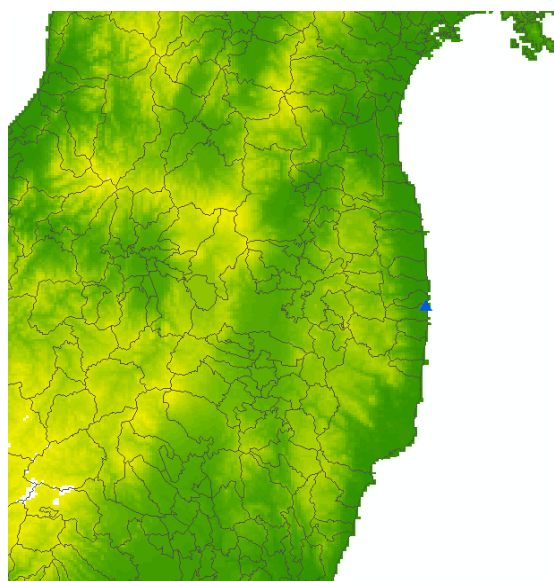


図 17 標高傾斜度 3 次メッシュ

日本国内で公開されている数値地形データには更に詳細なものが存在する（例えば基盤地図情報標高）が、風向風速・降雨データの空間解像度及び後述する時間解像度との整合性を考慮し、本データを利用することとした。本データには平均・最高・最低が記録されているが本研究では平均の値を用いた。

## 2.2 空間線量分布計算

### 2.2.1 空間線量分布計算

前項における移流計算結果から、3月12日から31日までに落下した粒子の数を単位メッシュごとにカウントし、日ごとに換算係数を乗じて累積することにより、空間線量を求める。手順は以下の通り。

- ① 移流計算結果から、単位メッシュあたりの落下粒子数を日ごとにカウントする。
- ② モニタリングポストで記録された空間線量から日ごとの換算係数を決定する。
- ③ 単位メッシュごとに粒子数と換算係数を乗じ、3月12日から31日分を合計する。
- ④ 3×3の平滑化フィルタを適用する。

上記手順で求めた空間線量分布図を後述する航空機モニタリング結果と比較・検証する。前述したとおり、粒子は様々な放射性物質が付着したエアロゾルや結晶を想定しているため、特定の放射性同位体の特性はここでは考えない。

#### (1) 粒子数のカウント

前項の方法にて放射性物質の移流計算を行うと、粒子が落下(=沈着)した位置が放出した時間ごとに特定される。その結果から落下した粒子の数を日ごとに1kmメッシュ(1km<sup>2</sup>)単位でカウントする。イメージを図18に示す。

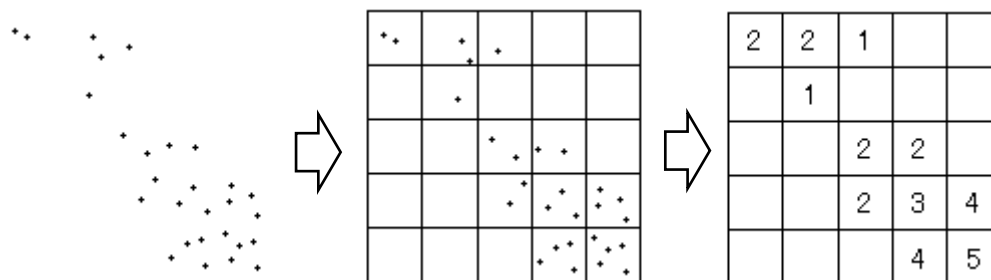


図18 粒子のカウント

粒子のカウントには Microsoft Excel を利用した。具体的な手順は以下の通り。

- ①各落下点の座標から、計算メッシュにおける行番号と列番号を求める。
  - ②求められた行番号と列番号を条件とし、COUNTIFS 関数を利用して個数を求める。
- COUNTIFS 関数の記述方法は以下の通り。

=COUNTIFS[条件範囲 1,条件 1[,条件範囲 2,条件 2···]

条件範囲：条件判定の対象となるデータが入力されているセル範囲を指定

条件：カウント対象のデータを検索するための条件を指定。

指定した「条件」に合致するデータを「条件範囲」から探し、条件に合致したデータの個数を返す。

## (2) 換算係数

後述するモニタリングポストデータを利用し、換算係数を決定した。モニタリングポストデータはモニタリングポイントの位置や風向き、周辺環境の影響を受けるため、10-20%の変動は誤差範囲であると考えられる。特に4つの炉から放出されたことを考慮するのは非常に難しい。よってここでは、モニタリングポストにおける観測値の最大空間線量を日別に集計し、最大であった3月15日および3月16日を1として、日ごとの最大値に応じて換算係数を決定した。使用した換算係数は表12の通り。

表12 換算係数

Day	Dose	Conversion factor	Day	Dose	Conversion factor
March 11	0.067	0.000	March 21	2452	0.206
March 12	385.5	0.032	March 22	352.3	0.030
March 13	1038.2	0.087	March 23	414.7	0.035
March 14	3130	0.262	March 24	230.9	0.019
March 15	11930	1.000	March 25	540	0.045
March 16	10850	1.000	March 26	184.4	0.015
March 17	4175	0.350	March 27	214	0.018
March 18	5055	0.424	March 28	216	0.018
March 19	3882	0.325	March 29	236	0.020
March 20	3337	0.280	March 30	188	0.016
			March 31	164	0.014

## (3) 空間線量図の作成

上記の方法で求めた日にちごとに算出した放射線量を合計し、空間線量図を作成した。ただし、粒子モデルによる移流計算では落下した地点を特定するが、汚染は落下した点のみにとどまらず、その周囲も汚染する。よってここでは合計した値に図19に示す3×3の平滑化フィルタをかけた。

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

図 19 平滑化フィルタ



## 2.2.2 放射性物質放出データ<sup>92)</sup>

放射能放出状況は東京電力が公表する構内モニタリングポストデータを使用した。東京電力ではモニタリング MP1～8 の 8 箇所と可搬型モニタリングポスト、モニタリングカーにおいて空気中の放射線量を測定している。計測地点は図 20 のとおり。本研究では前項にて説明した換算係数を決定するためにモニタリングポストの空間線量を利用した。モニタリングポストの観測値を図 21 に示す。



図 20 平成 23 年 3 月 27 日時点のモニタリングポスト<sup>92)</sup>

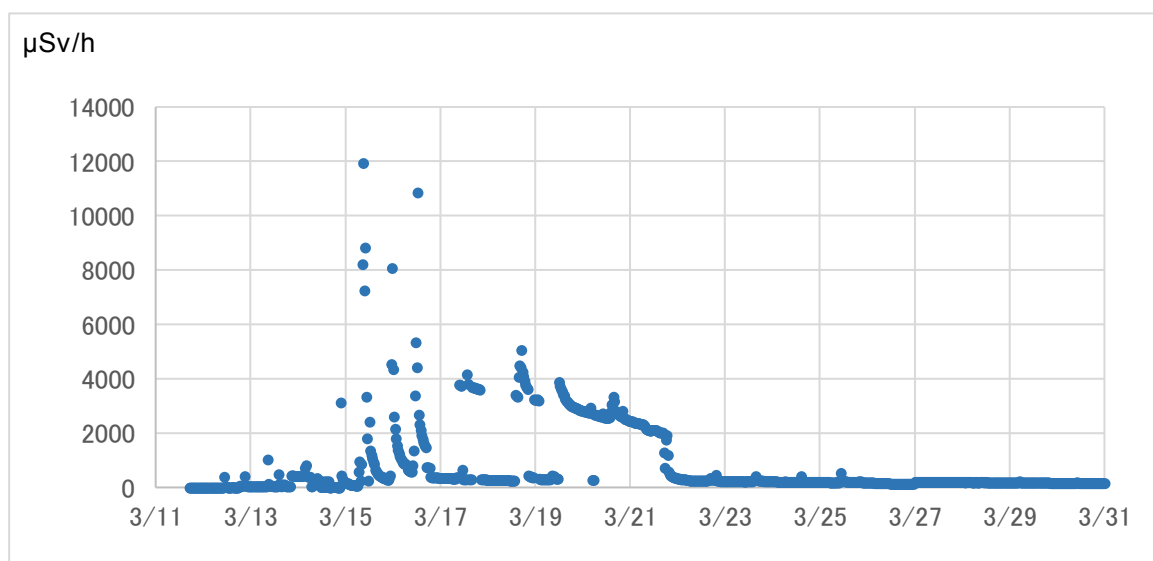


図 21 モニタリングポストの観測結果

### 2.2.3 航空機モニタリング<sup>93)</sup>

空間線量計算結果を評価するため、文部科学省の航空機モニタリング結果（図 22）との比較を行う。航空機モニタリングの詳細は以下の通り。

#### (1) 航空機モニタリングの概要

広域の放射性物質による影響の把握、今後の避難区域等における線量評価や放射性物質の蓄積状況の評価のため、文部科学省及び米国エネルギー省（以下、「米国 DOE」と言う。）が共同で航空機モニタリングを実施し、福島第一原発から 80km の範囲内において、地表面から 1m の高さの空間線量率、及び地表面への放射性物質の蓄積状況を確認するために実施した。航空機モニタリングは、地表面の放射性物質の蓄積状況を確認するため、航空機に高感度で大型の放射線検出器を搭載し、地上に蓄積した放射性物質からのガンマ線を広範囲かつ迅速に測定する手法にて実施した。

#### (2) 航空機モニタリングの詳細

○ 測定実施日：4月6日～29日

○ 航空機：

①文部科学省（(財)原子力安全技術センター）

・民間ヘリコプター（BELL412）

②米国DOE

・小型飛行機（C-12）、ヘリコプター（UH-1）

○ 対象項目：福島第一原発から 80km の範囲内の地表面から 1m の高さの空間線量率、及び地表面に蓄積した放射性物質（Cs134、Cs137）の蓄積状況

※米国 DOE においては福島第一原発から 60km の範囲内、文部科学省においては 60～80km の範囲内について航空機モニタリングを実施。

○ マップ作成作成条件

・ 文部科学省及び米国 DOE による航空機モニタリング結果をもとに作成した。

・ 地上面の空間線量率は、航空機下部の直径約 300m から 1500m（飛行高度により変化）の円内の空間線量率の値を平均化した。

・ 猪苗代町東部については、山間部であるため、低高度の飛行が困難であることから、測定結果がない。

- ・ 福島第一原発直上は、発電所からの直接の空間線量率を測定してしまうため、航空機モニタリングは実施していない。
- ・ 空間線量率及び地表面への放射性物質の蓄積状況は、放射性物質の減衰を考慮し、当該モニタリングを実施した最終日の4月29日現在の値に換算したものである。

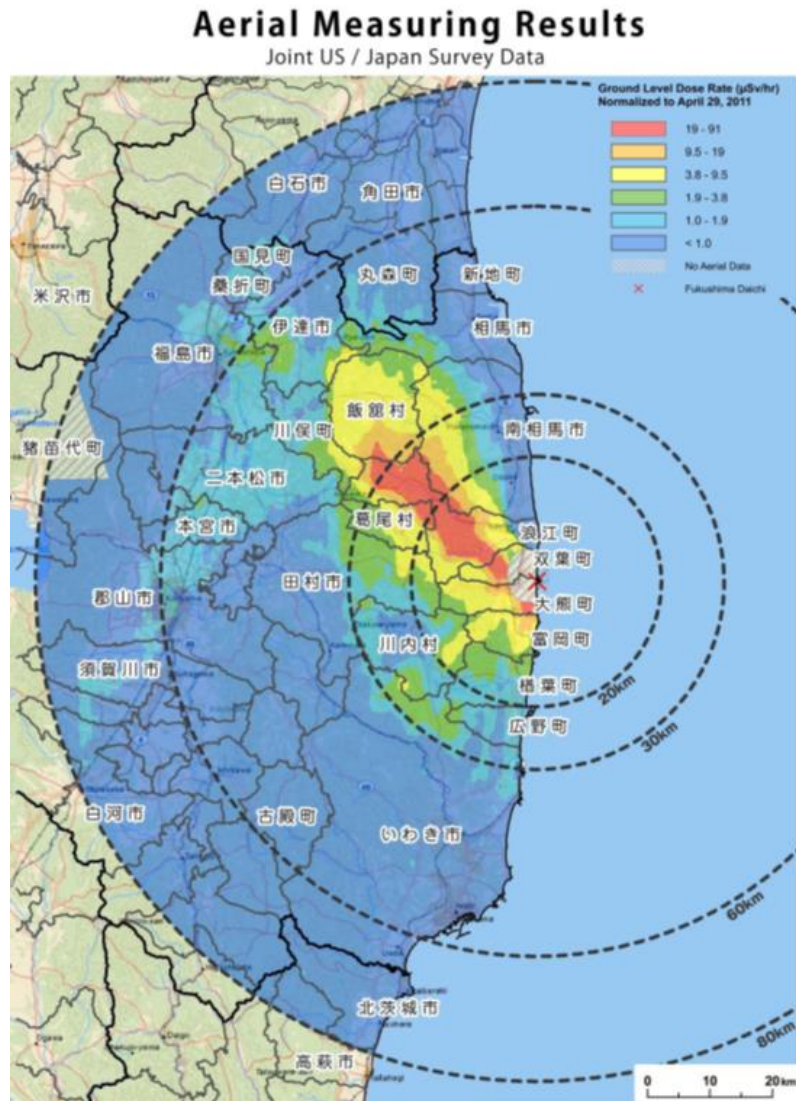


図 22 航空機モニタリング<sup>93)</sup>

## 2.3 汚染形状の定量的評価

### 2.3.1 空間分布型の特定

粒子モデルを利用した移流計算で求めた放射性物質の分布について、その特徴を以下の方法で定量的に評価する。

- ①日ごとに原点（福島第一原発）と粒子の落下点との距離についてヒストグラムを作成する。
- ②①で作成したヒストグラムが形成する分布曲線から、図 23 に示す通り分布型を特定する。特定の根拠には相関係数を利用することとし、相関係数の高い分布型を採用した。

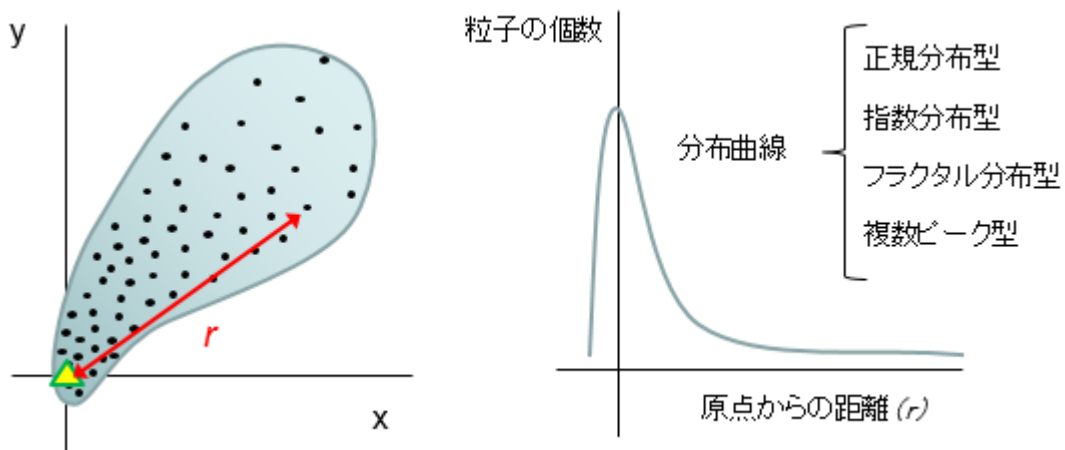


図 23 分布型の決定

- ③②とは別に、ヒストグラムからフラクタル次元を求めることで、汚染形状の評価を行う。フラクタル及びフラクタル次元の詳細については次項以降で解説する。

### 2.3.2 フラクタルとは<sup>94) 95)</sup>

フラクタルは、部分と全体との関わりで扱うことのできる図形、構造、現象、分布を指す言葉で、その概念は、複雑な現象や偏った現象を解明する道具として用いることができ、特徴的な長さを持たない様な図形や構造、現象などの総称である。

フラクタルの発展はめざましく、自然科学の各種の分野だけでなく、社会科学にまで影響をおよぼしている。異なる分野に属する現象同士に類似性のあることが、フラクタルを通して明らかになった例もある。フラクタルは、細分化された現代科学の各分野を結びつける横糸のような役割を果たしつつあると言える。

自然界に存在するあらゆる形や、人類が今までに考えたあらゆる図形は、おおまかに 2 つに分類することができるといえる。一方は特徴的な長さを持つ図形であり、もう一方は特徴的な長さを持たない図形である。特徴的な長さを持つ形の基本的なものは、幾何学的に単純な形であるが、それらの基本的な形には共通する大切な性質がある。それは、その形を構成する線や面の滑らかさである。もう一つの特徴的な長さを持たない形は、例えば積乱雲の形を取り上げると、もくもくとわき上がった雲の各部分は球に近い形に見えるかもしれないが、球にみなそうと思った形の中にも無視できないほどの凹凸があり、さらに小さい球を持って来なければよい近以にならないことが分かる。同じことがその小さい球についても、またさらに小さい球についても言える。つまり、特徴的な長さを持つ図形を使って近似しようとするればいつでも、実際の雲の形に比べ、無視できないくらい大きなずれが生じ、それを減らすために大きさの異なる図形を無数に用意しなければならないのである。

フラクタル構造は、以下の 3 つの性質をもつのが特徴である<sup>97)</sup>。

#### (1) 自己相似性 (Self-similarity)

全体の幾何学構造が、それ自身を縮小して構成した部分の和として表される。大きなスケールでも、小さなスケールでも同じような構造が見える性質を指す。

#### (2) 階層的な偏り

実次元空間の次元 (E) よりフラクタル構造 S の持つフラクタル次元 (D) が小さい場合、その構造 (S) は階層的に偏るといえる。この様に偏りの中にさらに偏りがある構造を階層的な偏りという。

### (3) 簡単な数式（べき乗型）表現

基本式は以下の様なべき乗型の簡単な数式で表せる。

$$N = C \times a^{-D} \quad (11)$$

ここで、 $a$ :あるパラメータ,  $N$ :パラメータ,  $a$ に関連した個数,  $D$ :フラクタル次元,  $C$ :定数である。

この事は複雑な形も非常に簡単なプログラムで表現できることを示している。複雑な図形の中に見られるフラクタル性をコッホ曲線と呼ばれる有名な図形(図 24)を用いて示す。

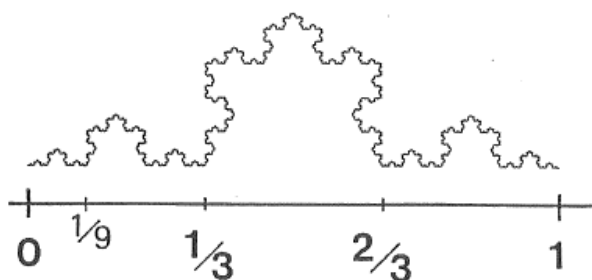
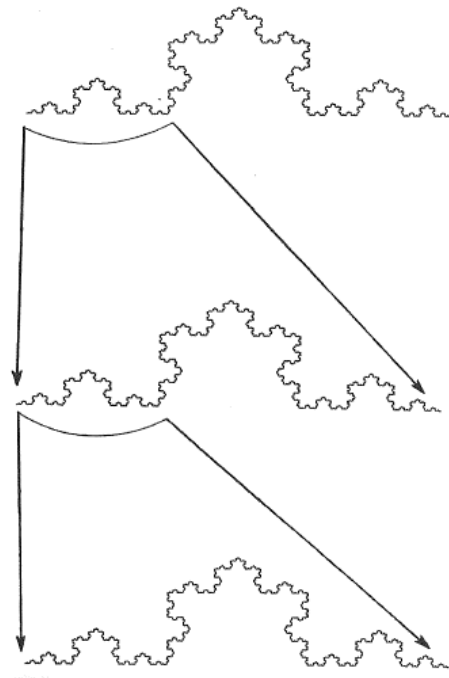


図 24 コッホ曲線<sup>96)</sup>

特徴的な長さを持たない図形の大切な性質は、自己相似性である。自己相似性とは考えている図形の一部を拡大してみると、全体と同じ様な形になっている。コッホ曲線の場合、図 25 に示す全体を三分割し、その左端の区間  $[0, 1/3]$  における図形を 3 倍に拡大すると元の図形と全く同じ形になることが分かる、右端の区間  $[2/3, 1]$  における図形に対しても同様であり、傾いてはいるが途中の区間  $[1/3, 1/2]$ ,  $[1/2, 2/3]$  の図形に関しても言える。区間  $[0, 1/9]$  における図形を 9 倍してもやはり元と同じ図形が出てくる。さらに小さな部分についても同様である。いくら小さな部分でも、そこを適当な大きさに拡大すれば元と同じ図形が得られる。

積乱雲についても、雲の一部を望遠鏡などで拡大して観測しても、肉眼で見たのと同じ様な形に見えるはずである。さらに倍率を変えていっても、形は似たようなものになっている、雲の場合にはコッホ曲線のように部分と全体が全く相似形になっているわけではなく、同じ様な複雑さを持った形に見えるのであり、統計的な意味で自己相似になっているわけである。



コッホ曲線の一部分を拡大する

図 25 一部を拡大すると同じ図形が出てくる<sup>95)</sup>

### 2.3.3 フラクタル次元<sup>94) 95)</sup>

次元とは、空間や構造の任意の点を指定するのに必要な独立な変数の数、つまり空間の自由度という意味で用いられることが多い。我々は、点は0次元、直線は1次元、平面は2次元、空間は3次元であることを知っている。このような次元はすべて整数値であり、自由度と一致する。しかし、100年ほど前にこの様な次元に対して問題が提起された。それが図26に示すようなペアノ曲線である。

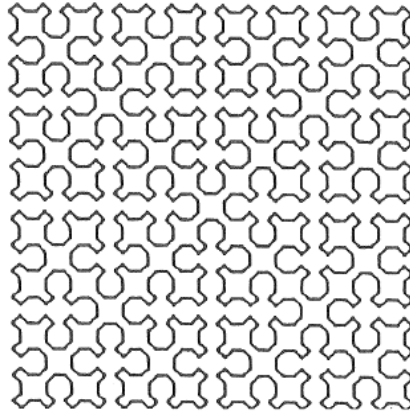


図 26 ペアノ曲線<sup>96)</sup>

ペアノ曲線は平面（二次元空間）を完全に覆い尽くすような1本の曲線である。2次元空間である正方形を埋め尽くしているが一筆書きできる曲線なので、図形上のどの点の位置も1変数で指定できる。一方、ペアノ曲線はその極限として得られる図形が平面を覆い尽くすことを考えると、面と同じ二次元となる、先ほどの次元の定義からいえば、ペアノ曲線は一次元であるが、このような矛盾をさけるため数多くの次元が定義されてきた。その中で一番わかりやすく、しかもフラクタルと親密な関係があるのが、相似性次元と呼ばれる量である。

線分、正方形、立方体の次元を相似性に基づいて考える。図27に示すように各図形を2等分すると、線分は半分の長さの線分2個に、正方形の場合は1辺が元の1/2の正方形4個に、立方体の場合は1辺が元の立方体の1/2の立方体8個になる。つまり、1/2にした相似形2, 4, 8個によって全体が構成されるとみなすことができる。この2, 4, 8は指数表示すると $2^1$ ,  $2^2$ ,  $2^3$ と書き表すことができる。このときの指数が前述した各次元に一致する。



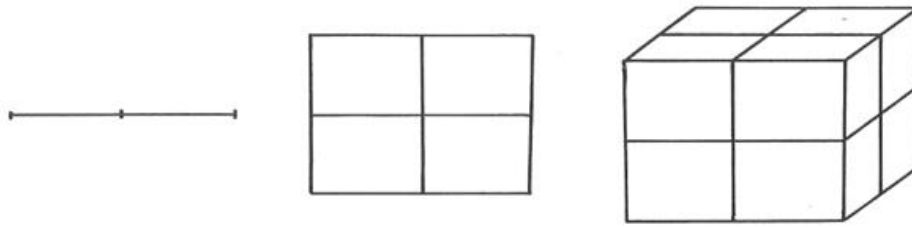


図 27 線分・正方形・立左体の単位長さを半分に分割する<sup>96)</sup>

一般的に言うと、ある図形を全体の $1/a$ に縮小した相似図形 $a^D$ 個によって構成されているとき、この指数 $D$ が次元の意味を持つわけである。この次元を相似性次元と呼ぶ。つまり、ペアノ曲線は全体を $1/2$ に縮小した図形4個で構成されている。 $4=2^2$ であるからペアノ曲線の相似性次元は2となり、正方形の次元に一致する。

相似性次元 $D$ は整数である必要が全くないのである。ある図形が全体の $1/a$ に縮小した相似図形 $b$ 個で構成されているならば、 $b = a^D$ より、相似性次元は

$$D = \frac{\log b}{\log a} \quad (12)$$

となる。コッホ曲線の場合全体を $1/3$ にした相似図形4個によって構成されているため、相似性次元は、

$$D = \frac{\log 4}{\log 3} = 1.2618\cdots \quad (13)$$

という非整数の値になる。

コッホ曲線は、1次元というには複雑すぎ、かといってペアノ曲線のように2次元というには単純すぎるという見方をすれば1.26次元という値は的を射ているようにも思える。

この非整数値の次元がコッホ曲線の複雑さを定量的に表しているのである、フラクタル図形は、一般に複雑な形をしているが、その複雑さが非整数の次元によって定量化される。異なる非整数の次元を持つフラクタル図形が2つある場合、次元の高い図形の方が一般的により複雑であることが分かる。

複雑な構造を解析するための手順を要約すると次のようになる。

- ①与えられた構造の部分を拡大したものが、全体と同じように見えるかどうかを確かめ、その構造がフラクタルかどうかを確認する。
- ②差し渡しは何分の1のものが平均何個集まって全体を構成しているのかを調べ、フラクタル次元を対数グラフを使って求める。

以上の二つを調べれば、ある構造の複雑さを特徴づけたことになる。

#### 2.3.4 フラクタルを用いた既往研究<sup>94)</sup>

フラクタル概念は、従来より様々な分野への適用が試みられてきた。例えば地学関係（地形、川、地震）、生物関係（肺や血管の構造、植物の構造と虫の数）、宇宙関係（星の空間的分布、クレータや小惑星の直径分布）、物理化学関係（固定表面、ランダムウォーク等）などをはじめ、所得の分布や株価の変動など、非常に多くの分野で取り入れられている。

フラクタルを指標とした近年の論文としては、河川設計・岩盤の亀裂分布、地すべりの分布や不同沈下量の推定等、一部を抜粋しただけでも多岐に渡っていることが分かる。

大野ら<sup>97)</sup>は、海岸線の形状、河川の分岐や山肌の形状など自然景観のもつかたちの法則性について着目し、フラクタル次元を用いた景観設計への適用の可能性を示唆している。

久保田<sup>98)</sup>は、地すべり発生個数と占有面積の関係にフラクタル性を指摘し、航空写真判読から地すべり地跡の輪郭について、フラクタル次元を求めることで、発生の多数並びに発生形態の複雑さを表現できるとしている。同様なものとして、佐々木ほか<sup>99)</sup>は、斜面崩壊の規模と発生数の関係にフラクタルを応用し、ある規模の斜面崩壊について最大幅と個数の関係にフラクタル性を見いだしている。

脇田・松尾<sup>100)</sup>は、地盤沈下で生じる不同沈下の性質をフラクタル的な性質として捉え、それを応用した沈下量の推定を試みている。大野・小島<sup>101)</sup>、大野・小島<sup>102)</sup>、大野・小島<sup>103)</sup>は、フラクタル的な幾何パターンに着目して岩盤の亀裂や割れ目の分布やバラツキにフラクタル特性を見いだしている。同様な見地から佐藤・市川<sup>104)</sup>による岩盤フラクチャーのフラクタル次元と水理特性の相関や平田<sup>105)</sup>による断層とフラクタルの関係など地質分野での利用も多く見られる。

阿部・小川<sup>106)</sup>、小川・阿部<sup>107)</sup>は舗装の縦断凹凸やひびわれといった舗装損傷の評価にフラクタルを用いており、その結果、鉛直相対変異の標準偏差（平坦性）とフラクタル次元と正の相関が認められ、かつ経年変化とともに単調増加するパラメータであると結論づけている。

佐藤・磯打ほか<sup>108)</sup>は、景観の定量的評価にフラクタルを用い、フラクタル次元とアンケートによる空間評価の比較を行っている。また酒見<sup>109)</sup>、熊沢<sup>110)</sup>も都市空間の定量的評価にフラクタルを利用しており、大規模区画整理の影響や山間部の街路区間構造について言及している。

### 2.3.5 距離の関係から求めるフラクタル次元<sup>11)</sup>

本研究では2つの方法を利用してフラクタル次元の計算を行う。粒子法による放射性物質の移流計算結果から求めた汚染形状は中心からの距離、湿性沈着があったと推定される時間帯の雲形状は正方形による細分からフラクタルを算出する。本項および次項でその方法の考え方について解説する。

距離の関係からフラクタル次元を求める方法はフラクタルが非整数次元の測度を持つことを利用して、次元を定義する。

立方体の1辺の長さを2倍にすると、2次元測度である表面積は、 $2^2$ 倍になり、3次元測度である体積は $2^3$ 倍になる。したがって、もし単位長さを2倍にしたときに $2^D$ 倍になるような量があったとすれば、その量は $D$ 次元的存在であるといってもよいだろう。

再びコッホ曲線を例にとりて考えてみる。この場合に非整数次元の測度をもつ量は、曲線の長さである。実際コッホ曲線を3倍に拡大したとき、曲線の長さはもとの $4 = 3^{\log_3 4}$ 倍になる。つまり、この曲線の長さは $\log_3 4$ 次元の特性をもっているわけである。

一般に、長さを $L$ 、面積を $S$ 、体積を $V$ としたとき、次の関係式が成り立っている。

$$L \propto S^{1/2} \propto V^{1/3} \quad (14)$$

この関係式の意味は、 $L$ を $k$ 倍にすると $S^{1/2}$ も $V^{1/3}$ も $k$ 倍になるということである。 $D$ 次元速度をもつ量を $X$ とすると式(12)は次のように一般化できる。

$$L \propto S^{1/2} \propto V^{1/3} \propto X^{1/D} \quad (15)$$

この関係式より次元を決めるには、例えば次のようにする。いま、島の海岸線のフラクタル次元を測ることを考える。島の面積を $S$ 、海岸線の長さを $X$ とする。島の面積は明らかに2次元測度をもつ量なので、 $S^{1/2} \propto X^{1/D}$ によって、海岸線のフラクタル次元 $D$ を求めるわけである。 $X$ の次元が未知であるという立場をとるので、少々工夫を必要とする。一番便利でよく用いられる方法は、空間を量子化し、面積 $S$ も、長さ $X$ も自然数にしてしまう方法である。

まず、考えている平面をできるだけ細かい格子によって、小さな正方形の集合に分割する。次にそれらの正方形のうち、少しでも島を含むものを黒く塗る。黒い正方形の個数を $S_N$ とし、白い正方形と接している黒い正方形の個数を $X_N$ とする。単位正方形の大きさが十分小さければ $S \propto S_N, X \propto X_N$ が成り立つと考えてもよいだろう。たくさんの面積の異なる島に対して $S_N$ と $X_N$ を同じ方法で求め、

$$S_N^{1/2} \propto X_N^{1/D} \quad (16)$$

となるような関係を満たす  $D$  が存在すれば、海岸線のフラクタル次元は  $D$  であるということになる。ここで単位の正方形の大きさが小さければ小さいほど、誤差は少なくなる。粗視化による方法と一番異なる点は、単位の正方形の大きさを変えずに、できるだけ小さく固定しておくことである。

同じ問題を面積と海岸線の長さではなく、海岸線の長さ、その直線距離  $L$  とで考えることもできる。大きな海岸線の一部を考えたとき、その海岸線両端の直線距離  $L$  と海岸線の長さ  $X_N$  との関係を調べるのである。調べる海岸線の部分の大きさをいろいろ変えて、たくさんの  $L$  と  $X_N$  との組み合わせを得たときに、 $L$  と  $X_N$  との間に、

$$L \propto X_N^{1/D} \quad (17)$$

という関係式が成り立っていれば、この  $D$  もやはり海岸線のフラクタル次元を与えることになる。

空間に分布している点の集合、例えば宇宙の星の分析に対しても、似たような考え方でフラクタル次元を定義することができる。

ある点を中心として、半径  $r$  の球を考える。この球の内部に含まれる点の総数を  $M(r)$  とする。もしも、点の分布が直線点であるならば、 $M(r) \propto r^1$  となるであろう。また、もしも点の分布が平面的であるならば、 $M(r) \propto r^2$  となり、3次元空間を一様に点が分布していれば、 $M(r) \propto r^3$  となるはずである。したがってこれを一般化し、

$$M(r) \propto r^D \quad (18)$$

という関係を満たすような場合には、点の分布のフラクタル次元は  $D$  であるといってもよいだろう。ここででてきた  $M(r)$  は、必ずしも点の個数でなくとも構わない。例えば、宇宙の質量分布のフラクタル次元を求めようとするときには  $M(r)$  を半径  $r$  の球内の総質量としてもよい。

実際にこの方法によって点の集合のフラクタル次元を求めようとするとき、1つの問題が生じる。それは、どこを球の中心とすればよいのか、ということである。上手に中心を選ばないと、きれいに式(16)のような関係が出てこないことが多いからである。いくつか中心を変えて測定し、平均をとる、というのもよい方法であるが、一番手っ取り早いのは、点の分布の重心を球の中心にする方法である。もしも、点の分布がフラクタルになっているならば、この方法によって式(16)の関係を見出すことができるであろう。



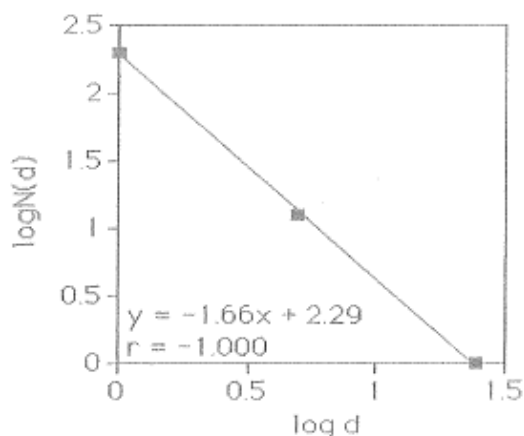


図 29  $d$  と  $N(d)$  の関係<sup>113)</sup>

直線的な配置であるため、この線形はフラクタル性を有しているということになる。そのフラクタル次元は直線の傾きから求める。傾き及び切片は、最小二乗法により求める。求める一次関数が  $y = ax + b$  であるならば、

$$a = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{n \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \quad (20)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i y_i}{n \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \quad (21)$$

である。これにより、傾きは-1.66であり、フラクタル次元は1.66となる。また、相関係数は

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (22)$$

である。ただし、

$$S_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N} \quad (23)$$

$$S_x = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (24)$$

$$S_y = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N} \quad (25)$$

で求められる。相関係数( $r$ )が-1に近いほど、フラクタル構造を有することを示している。

### 2.3.7 フラクタル次元による空間分布解析

#### (1) 汚染形状のフラクタル次元計算

汚染形状を定量的に評価することにより、汚染の原因やメカニズムを解明するため、汚染形状のフラクタル次元を日ごとに算出する。汚染形状のフラクタル次元は前項で解説したとおり距離の関係から次式にて求める。

$$N \propto r^{-D} \quad (26)$$

$$r = \sqrt{(x_t - x_0)^2 + (y_t - y_0)^2} \quad (27)$$

ここで  $N$  : 粒子の個数,  $r$  : 原点 (福島第一原発) から各落下地点までの距離,  $D$  : フラクタル次元, 原点座標 :  $(x_0, y_0)$ , 落下座標 :  $(x_t, y_t)$  である。

#### (2) 雲のフラクタル次元計算

雲のフラクタル次元はボックスカウンティング法にて求めることとし、次式にてフラクタル次元を求めた。

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N}{\log r} \quad (28)$$

ここで、 $N$  : 雨雲のピクセル数,  $r$  : ピクセルの大きさ,  $D$  : フラクタル次元である。

### 2.3.8 雲形状データ <sup>114)</sup>

本研究では汚染形状と雨雲の形状を比較することで湿性沈着による特性を検討する。その際、雲形状のデータとして気象レーダー（雨雲レーダーデータ）を利用する。

気象レーダーは、アンテナを回転させながら電波（マイクロ波）を発射し、半径数百 km の広範囲内に存在する雨や雪を観測するものである。発射した電波が戻ってくるまでの時間から雨や雪までの距離を測り、戻ってきた電波（レーダーエコー）の強さから雨や雪の強さを観測する。また、戻ってきた電波の周波数のずれ（ドップラー効果）を利用して、雨や雪の動きすなわち降水域の風を観測することが可能である。概念図を図 30 に示す。

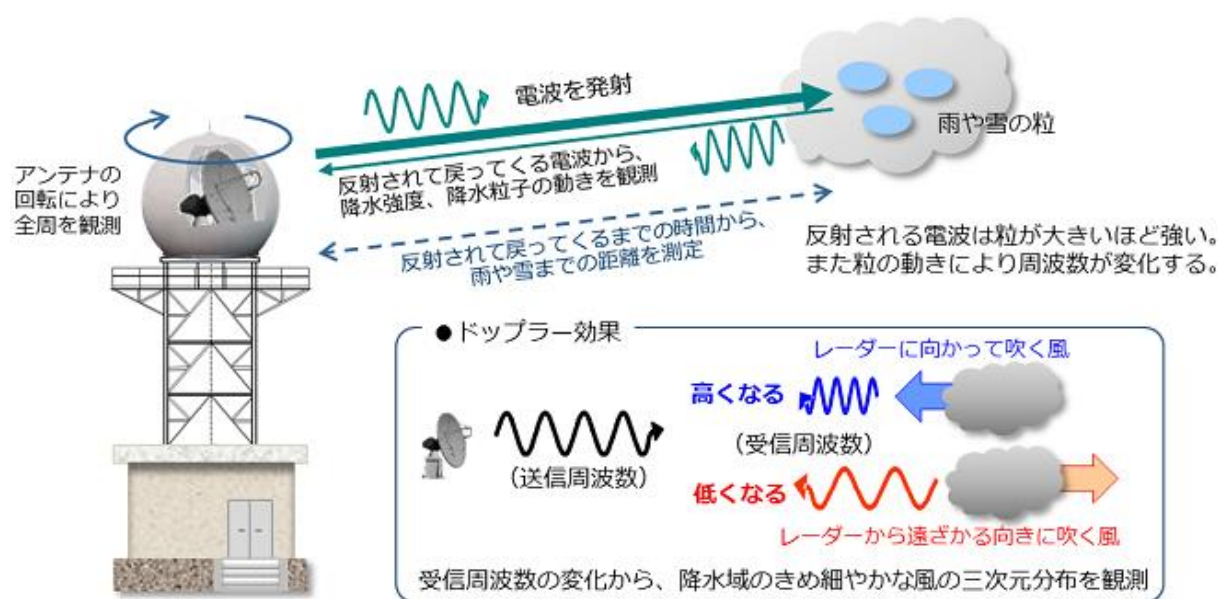


図 30 気象レーダーによる観測の概要 <sup>114)</sup>

気象庁は 1954 年に気象レーダーの運用を開始し、現在、全国に 20 か所設置している。気象レーダーで観測した日本全国の雨の強さの分布は、リアルタイムの防災情報として活用されるだけでなく、降水短時間予報や降水ナウキャストといった予報の作成にも利用されている。

前項で挙げたレーダアメダス解析雨量は降水の有無の判定及び強度の把握に用いるが、当時の雲の有無の判定及び雲形状自体の解析を行う場合はアメダス等の補正がない気象レーダーが適していると言える。



本研究では気象レーダーの可視化データがアーカイブとして公開されている「福島第一原発周辺気象データアーカイブ」<sup>89)</sup>の画像データを利用した。図 31 に可視化画像例を示す。本サイトは国立情報学研究所に設置されたサイトで、東日本大震災（東北地方太平洋沖地震・東北関東大震災）に関連する気象情報を中心に、マスメディア情報や放射線情報、エネルギー情報、震災からの復興などに関する最新情報など、多種多様な大規模データを統合したデータベースを提供するとともに、大地震に関する記録を後世に継承する「東日本大震災デジタルアーカイブ」として公開されているものである。



図 31 気象データ可視化画像例（3月15日23時）<sup>89)</sup>

## 第3章 結果

第3章では第2章にて説明した方法で求めた結果について記載する。結果に対する考察は次章にて取りまとめることとし，ここでは解析・評価の結果と概要を列記する。

### 3.1 粒子モデルによる移流計算

放射性物質の放出が始まった3月12日から31日までの移流計算結果を図32に示す。

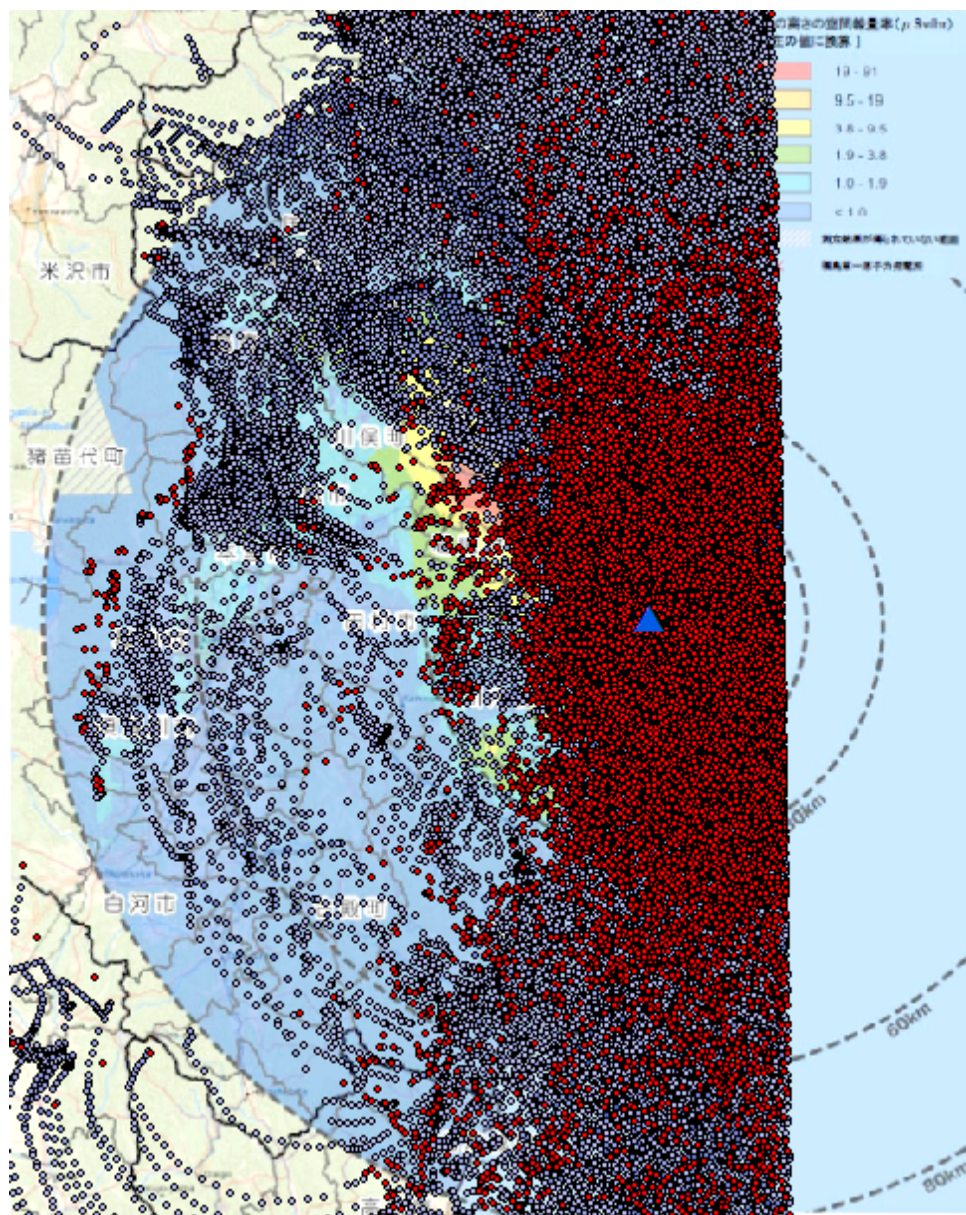


図32 移流計算結果（3月12日～3月31日）

図32は移流計算によって得られた粒子の落下点（=沈着箇所）である。降水の影響を受けず自然落下した「乾性沈着」を赤，降水の影響によって落下した「湿性沈着」を青で表示し，湿性沈着の場合は沈着当時の降水量に応じて色の濃淡を変化させて表現した。

次に，3月12日から31日までの日別の移流計算結果を図33～52に示す。

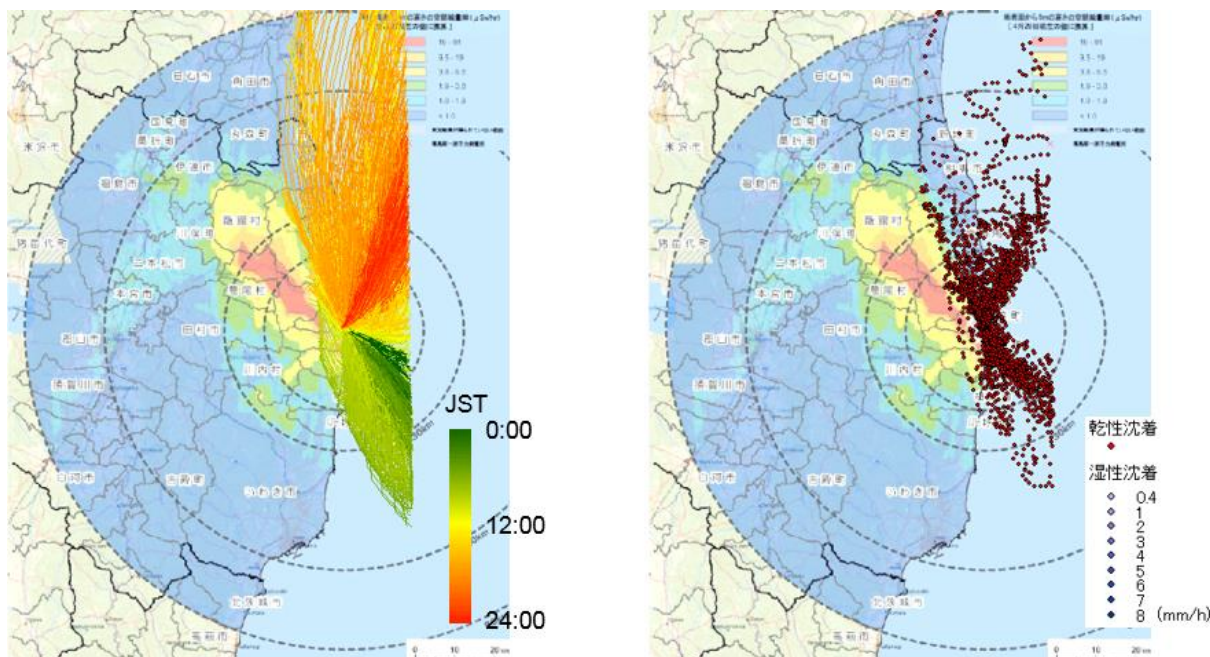


図 33 移流計算結果（3月12日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

図 33 左は移流計算によって得られた粒子の軌跡を表す。放射性物質が放出した時刻に従って線色を緑から赤に変化させて表現した。図 33 右は図 32 同様、移流計算によって得られた粒子の落下点（=沈着箇所）である。降水の影響を受けず自然落下した「乾性沈着」を赤、降水の影響によって落下した「湿性沈着」を青で表示し、湿性沈着の場合は沈着当時の降水量に応じて色の濃淡を変化させて表現した。以下、図 52 までは同様の表現にて図を表現する。

3月12日は12時ごろまで西から北の風が卓越していたが、午後になると一転して西から南の風に変化した。このため、放射性物質の大半は太平洋側に抜けたが阿武隈高地東側の沿岸部上空を多く飛来しており、そのうち粒径が大きいものが20~30km付近まで多く落下した。また、この日降水量はゼロであり、乾性沈着のみが生じた。そのため、この付近の風速については平均的な値であったが、結果として遠くまで放射性物質を運ぶこととなった。もし降水があった場合、もっと多くの放射性物質が沿岸部に落下したと考えられる。

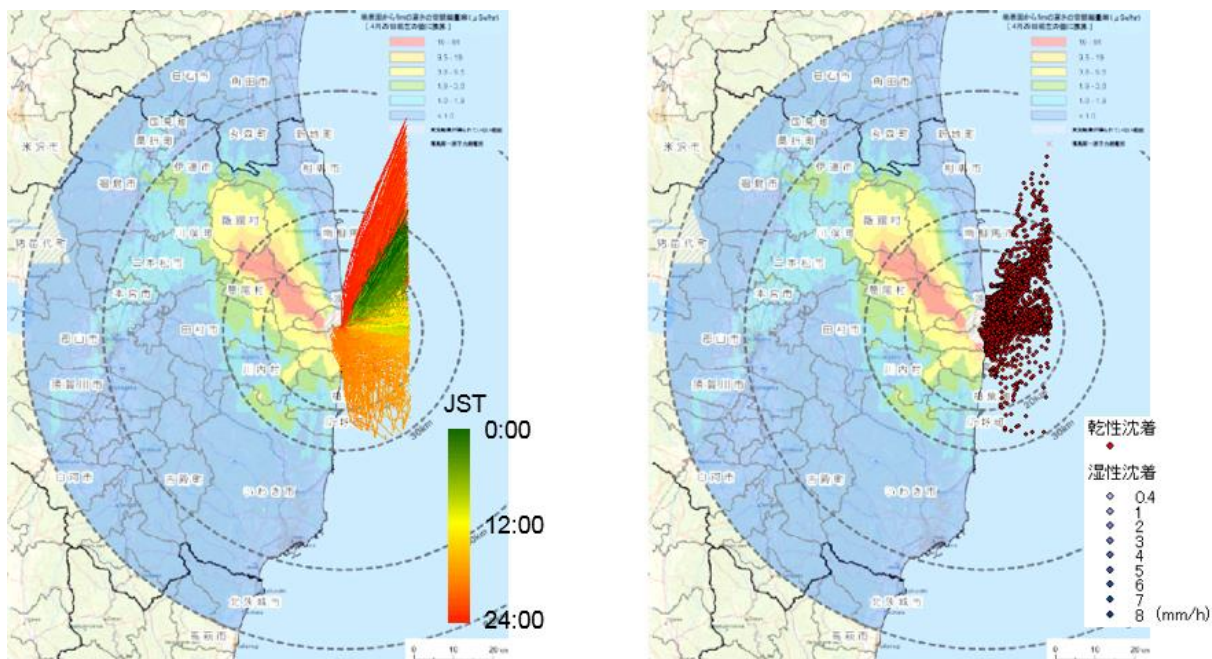


図 34 移流計算結果 (3月13日)

(左：粒子の軌跡 右：落下位置)

3月13日は終始太平洋側に抜ける風向だったため、放射性物質についても太平洋へと抜けた。この日も降水量はゼロであり、沈着の種別としては乾性沈着であった。

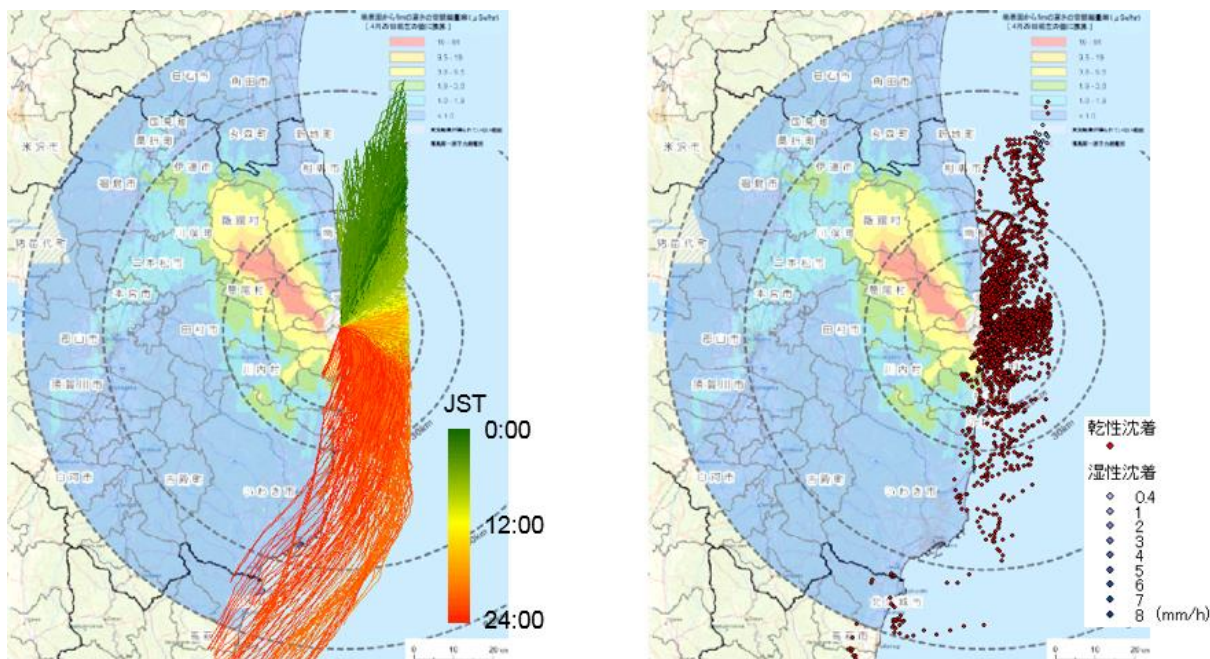


図 35 移流計算結果（3月14日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

3月14日は南西の風から北風に変化したため、福島第一原発南側の沿岸部付近を放射性物質が通過した。ただし、この日も降水はなく、乾性沈着のみが発生したと考えられる。よって福島第一原発南側 80km 以内の陸域に落下した粒子は少なく、むしろ関東以遠まで飛来し落下したと推測される。

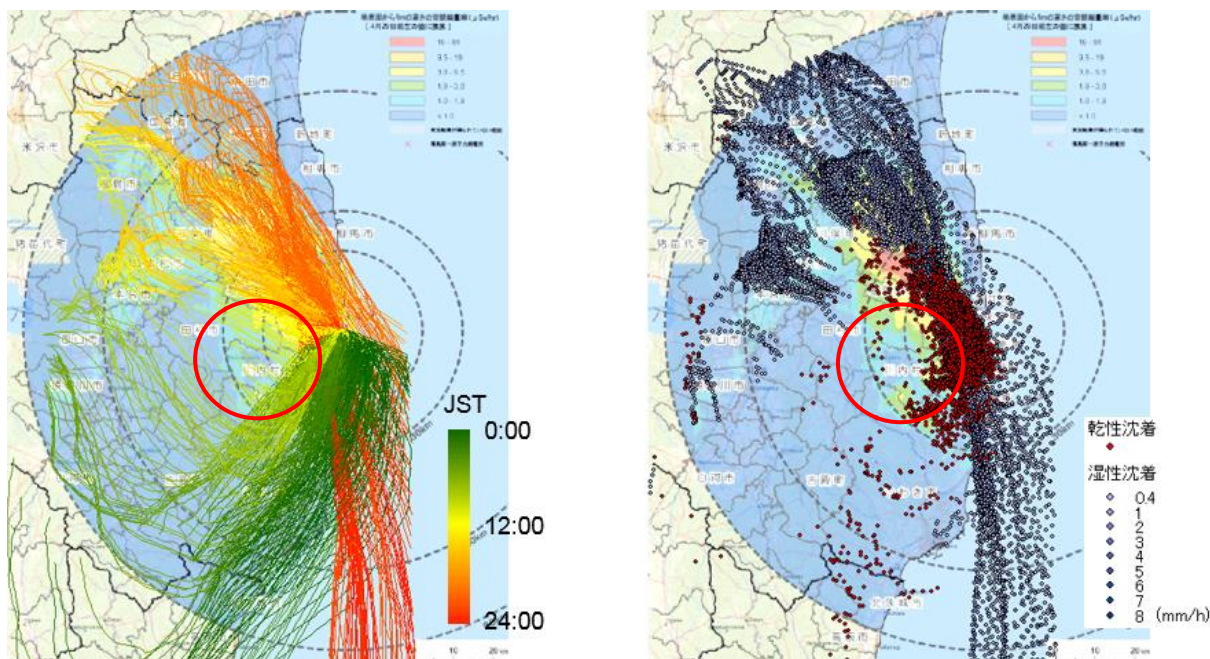


図 36 移流計算結果 (3月15日)

(左：粒子の軌跡 右：落下位置)

3月15日は、午前中は北東の風、午後になると南東の風が吹き、終始内陸側に放射性物質が流れ込む風が続いた。特徴的な軌跡として、赤丸で示した部分については風がよける形となり、風下側で巻いていることがわかる。ここは大滝根山(1192m)など標高が高い山が連なっているため、その山肌に沿って風が流れる傾向となった。そのため、大彦根山山頂付近上空は汚染物質が通過せず、その結果、落下する粒子はほとんどない結果となった。また、大彦根山の西側斜面についても落下する粒子が減少した。反対に東側斜面については山肌にぶつかる粒子が増えるため、放射性物質が多く沈着した。また、3月15日は16時ごろから夜半にかけて降水があった。それにより、南東の風に乗って移動した粒子と雨雲がぶつかる形となり、強い湿性沈着が生じた。この湿性沈着により、福島第一原発北西部に位置する飯館村や福島市、二本松市に強い汚染が生じた。

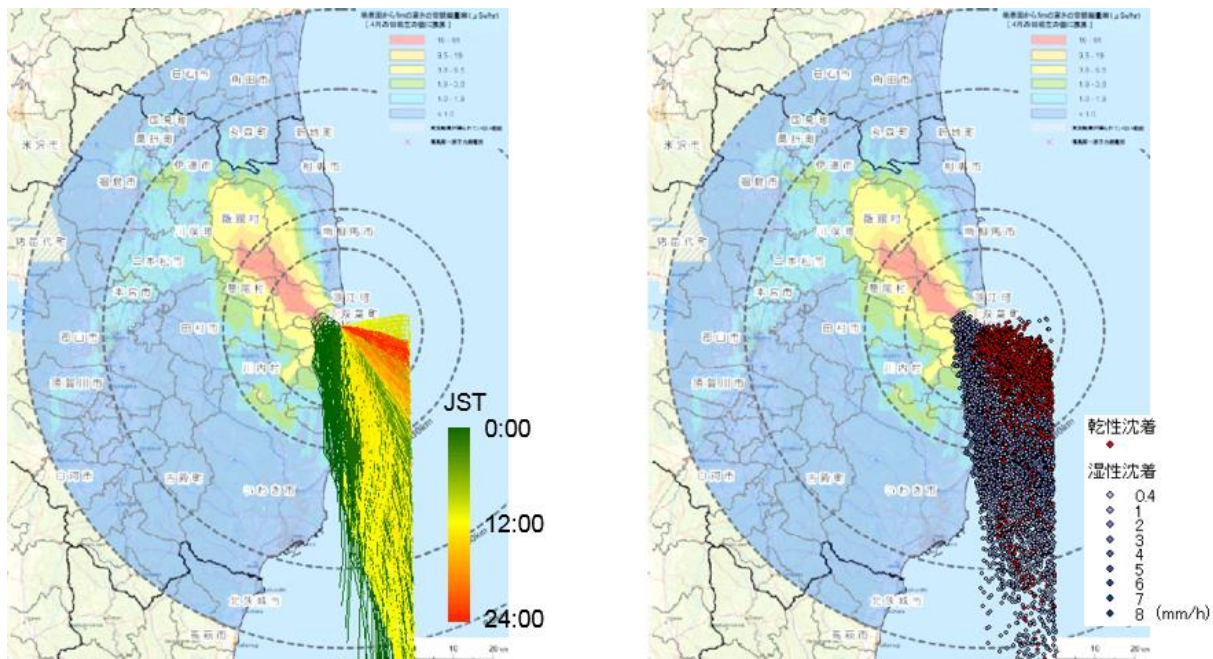


図 37 移流計算結果（3月16日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

3月16日は北から西の風が比較的強く吹いた。また、15日から引き続き降水があったため、福島第一原発南側の30km圏内の沿岸部に湿性沈着が生じた。太平洋側に抜けた粒子についても海上で降水があったため、その多くが太平洋に落下し、関東以南への影響は少なかったものと推測される。



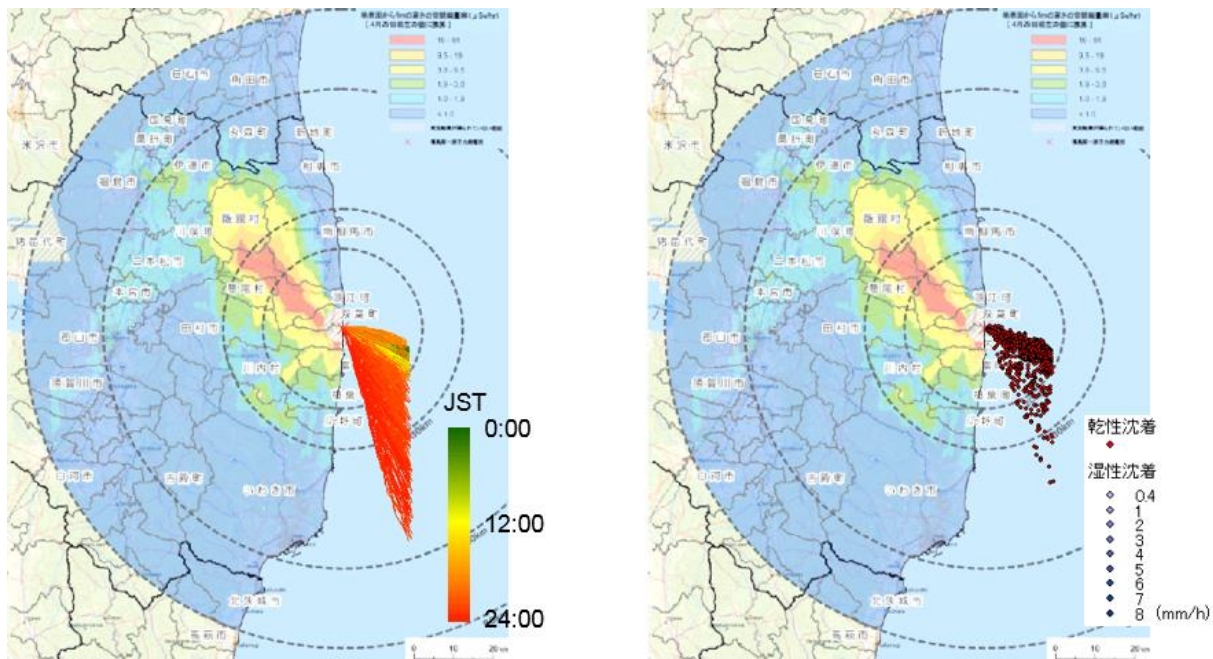


図 38 移流計算結果 (3月17日)

(左：粒子の軌跡 右：落下位置)

3月17日は終日北西の風が卓越し、風速も6m程度と強かったため、放射性物質についてはほぼすべてが太平洋側に抜ける結果となった。

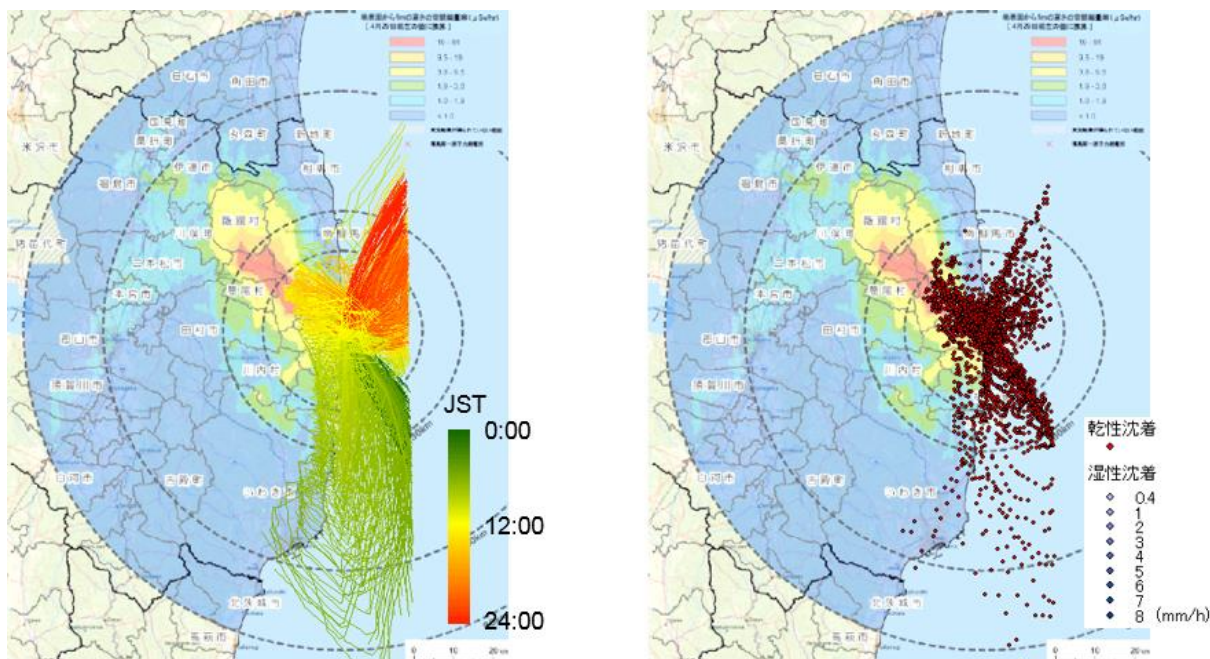


図 39 移流計算結果（3月18日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

3月18日は様々な向きの風が生じた。最も卓越した風は未明の北西の風と夜間の南西の風であるが、日中は北風と南東の風が吹いた。また、降水はなく乾性沈着となったため、福島第一原発南側の沿岸部の広い範囲に放射性物質が落下する結果となった。ただし、福島第一原発北西側については15日のように広範囲には及ばず20km圏内に留まる結果となった。

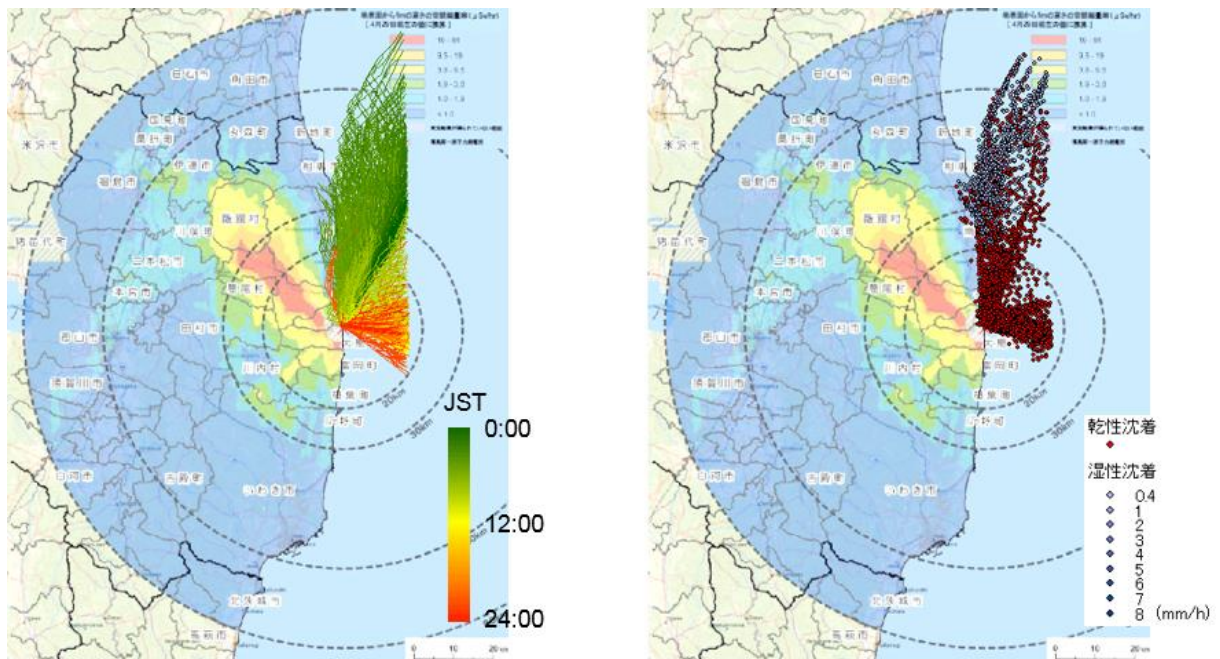


図 40 移流計算結果（3月19日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

3月19日は南西の風が終日卓越したため、原発の北側の沿岸部で若干の乾性沈着および湿性沈着があったが、内陸部への沈着はほとんどない結果となった。

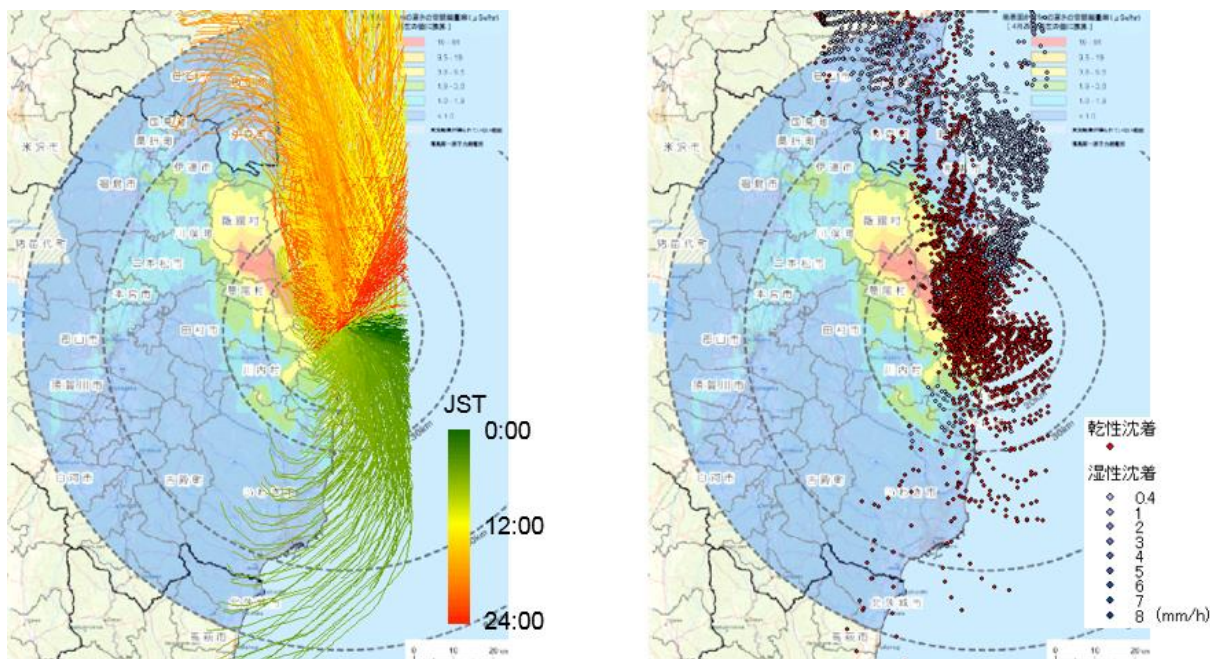


図 41 移流計算結果（3月20日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

3月20日は阿武隈高地を大きく迂回するような風の間となった。そのため大きく北上または南下したのち粒子が内陸に入り込むような流れとなった。この日は福島第一原発の北側で3月16日以来の降水があったため、南の風が吹いた時間帯において北側の広範囲で湿性沈着が発生した。ただし、南側の範囲では乾性沈着となったため、北側と比較すると落下する放射性物質は少なく、浮遊したまま関東方面に流れたと考えられる。

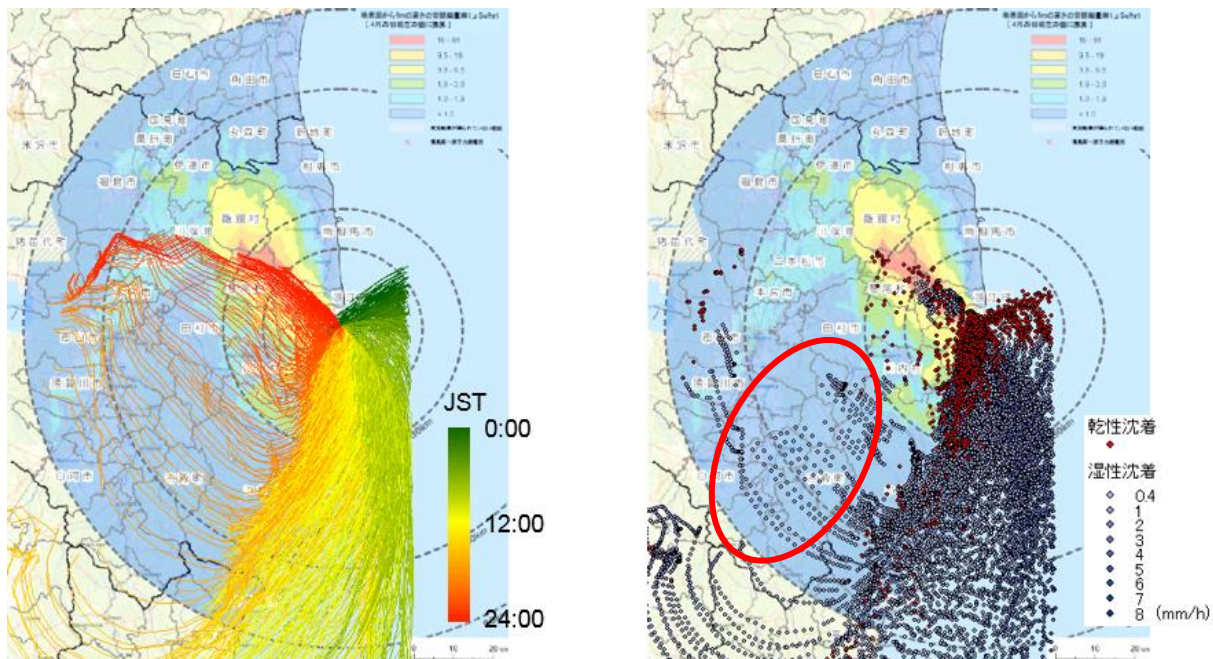


図 42 移流計算結果（3月21日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

3月21日は午前中は西から南の風が吹き、放射性物質は太平洋側に流れたが、昼ごろから北風が大きく内陸側に回りこむような流れとなった。この日も前日と同じく降水があり、放射性物質が飛来した時間帯と降水が重なったため、福島第一原発の南から南西にかけて広い範囲で湿性沈着が生じた。赤丸で示した箇所は標高が高いため、800m~1000mの層の風に乗った粒径の小さい粒子が湿性沈着する結果となった。夜中になると南東の風が吹いたがこの頃には降水がなかったため湿性沈着せず、奥羽山脈の山肌まで飛来して乾性沈着する結果となった。

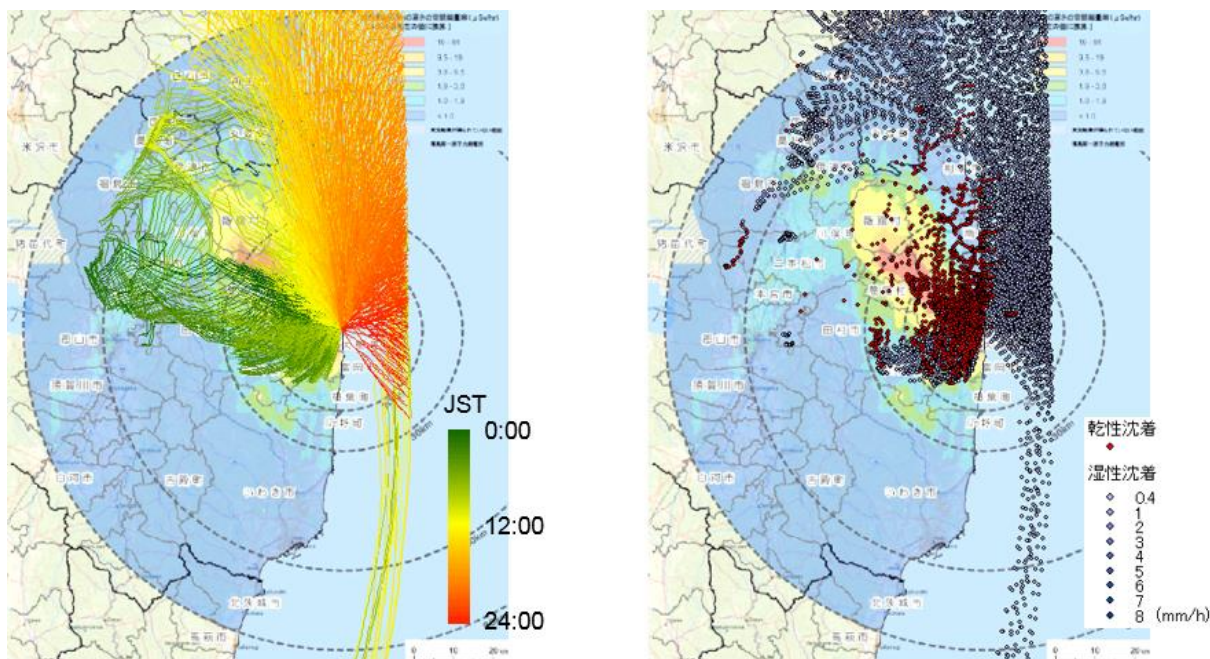


図 43 移流計算結果 (3月22日)

(左：粒子の軌跡 右：落下位置)

3月22日は前日からの東の風が午前中まで続いた。ただし、この時間帯の降水は少なかったため、多くの放射性物質は上空を通過し、低いものだけが阿武隈高地の山肌につつき乾性沈着した。午後は風は南の風に変わり、降水があったため福島第一原発の北側 80km 付近で湿性沈着が生じた。その後は更に東の風に徐々に変わってゆき、多くの放射性物質が太平洋上に落下する結果となった。

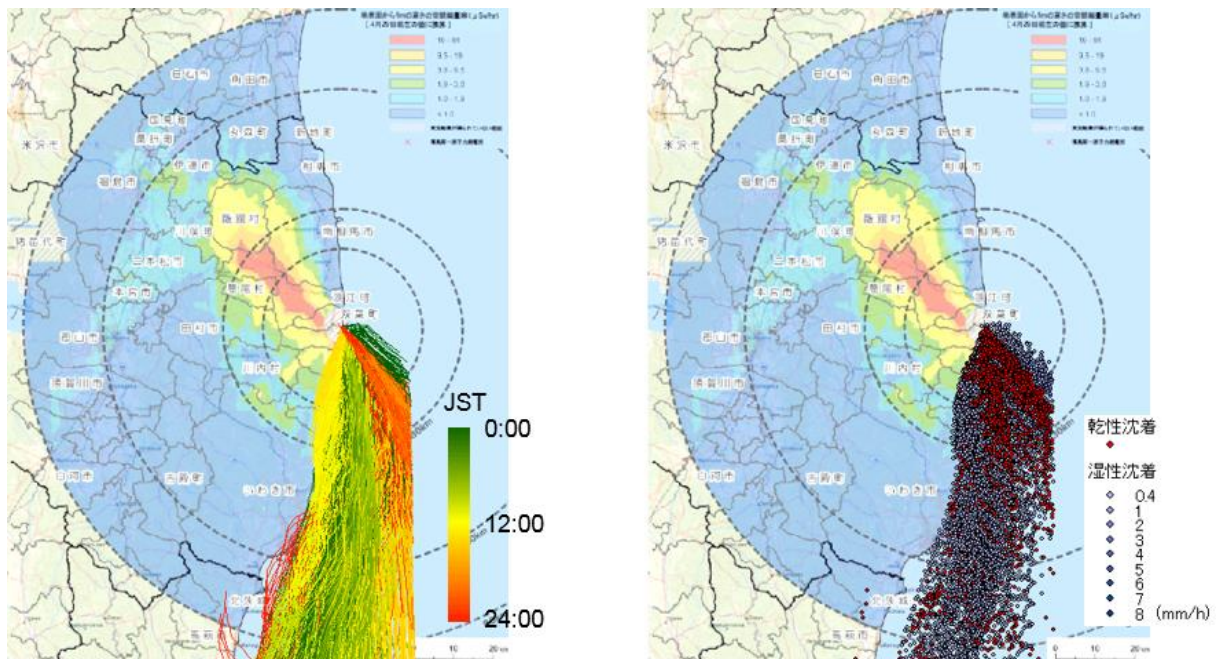


図 44 移流計算結果 (3月23日)  
 (左: 粒子の軌跡 右: 落下位置)

3月23日は全体的に北からの風が続いた。また降水もあったため、福島第一原発から南の広い範囲で湿性沈着が生じた。大半は太平洋に落下したが、一部は沿岸部に湿性沈着した。

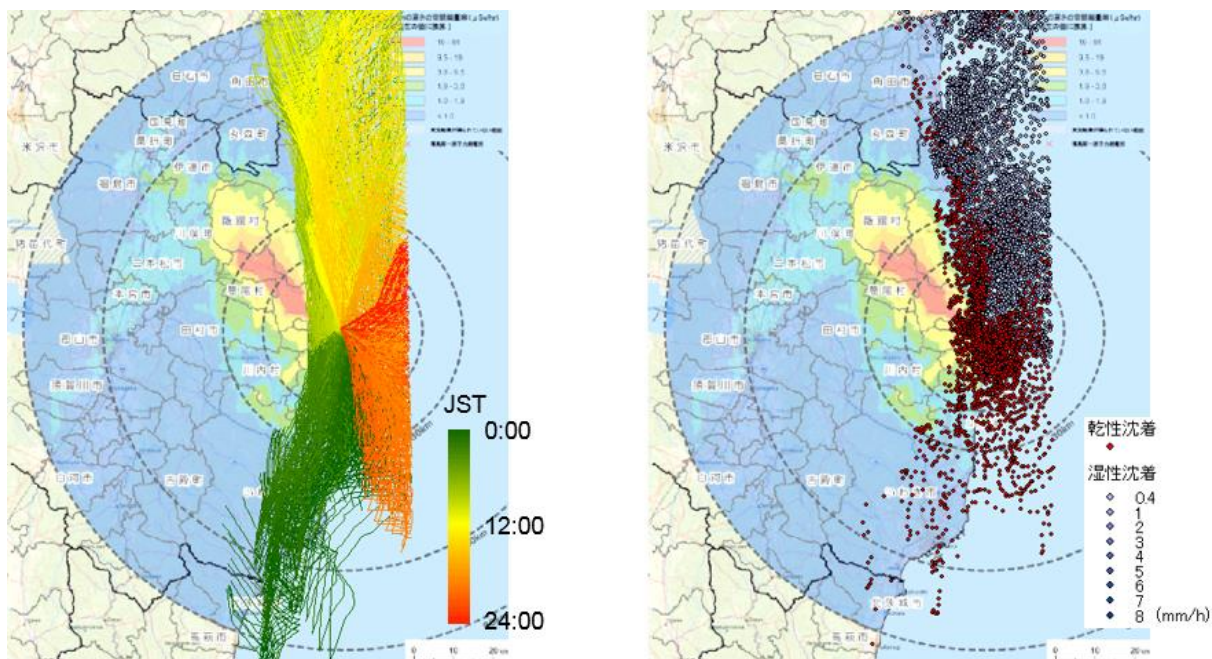


図 45 移流計算結果（3月24日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

3月24日は様々な向きの風が生じたが、結果的に阿武隈高地の上空を越えず、東向き斜面に沿って放射性物質が沈着することとなった。福島第一原発南側については、12時前後は降水があったため湿性沈着となったが、大部分は太平洋上に落下した。



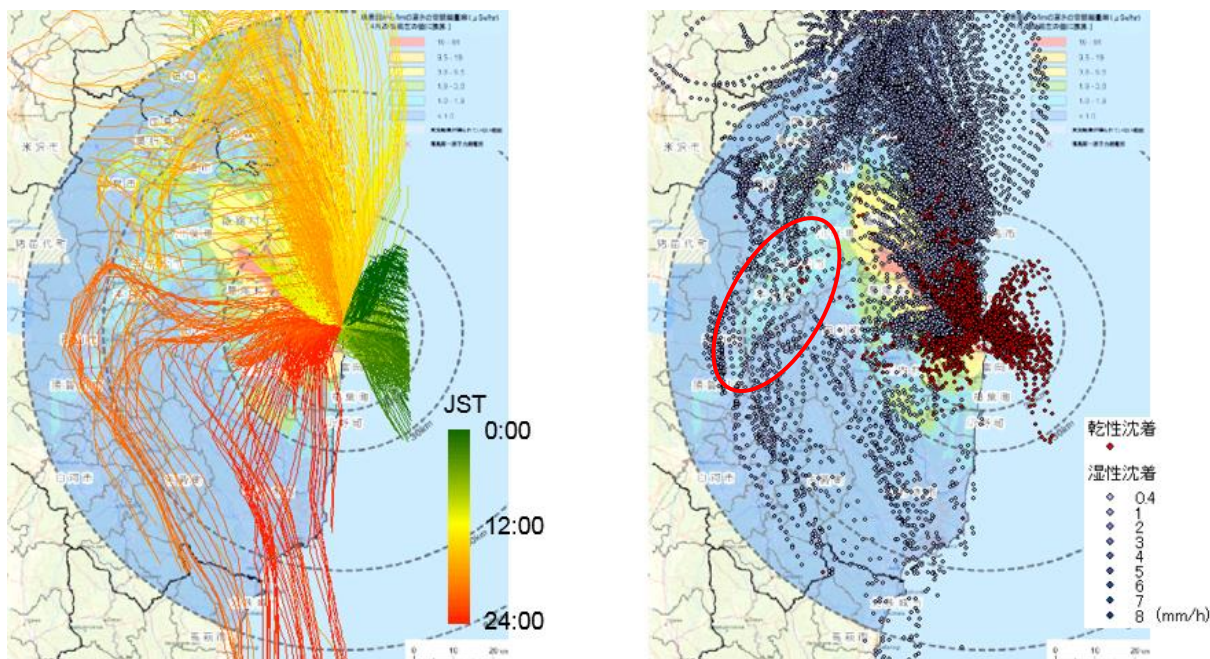


図 46 移流計算結果 (3月25日)

(左：粒子の軌跡 右：落下位置)

3月25日は午前の早い時間帯は西風であったが、昼には南風となり、更に夜には東の風へと変化した。また、20日、21日の風と同様、阿武隈高地を回りこんで内陸に入り込む風の間となった。それに加え、昼からは広範囲で降水があったため、内陸部で多くの放射性物質が湿性沈着した。空間線量計測結果で周囲よりも若干線量が高いとされた郡山盆地付近(赤丸)にも落下する結果となった。

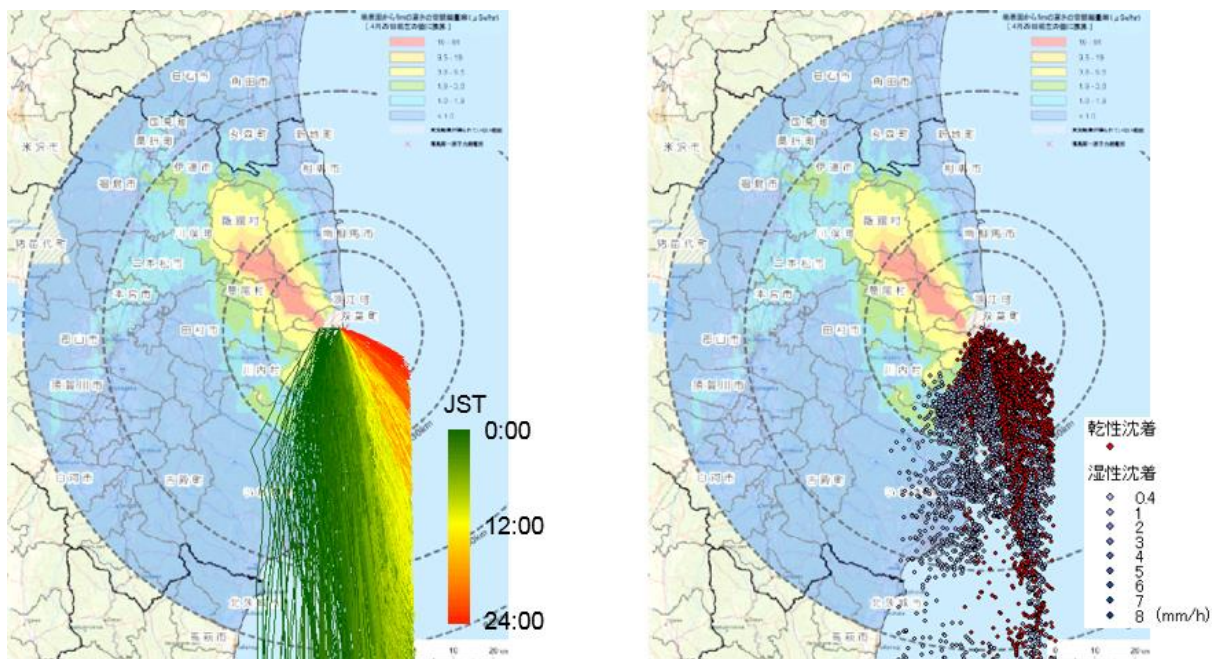


図 47 移流計算結果（3月26日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

3月26日は3月23日同様、全体的に北からの風が続いた。また降水もあったため、福島第一原発から南の広い範囲で湿性沈着が生じた。大半は太平洋に落下したが、一部は沿岸部に湿性沈着した。

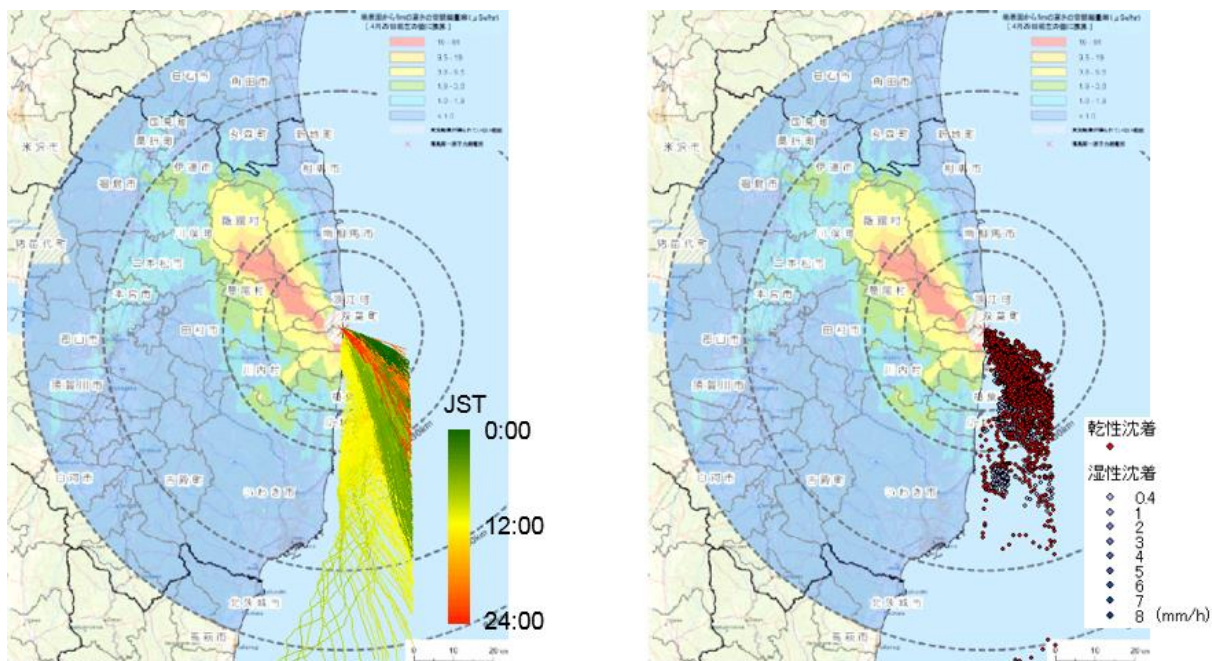


図 48 移流計算結果 (3月27日)

(左：粒子の軌跡 右：落下位置)

3月27日は3月17日同様、終日北西の風が卓越したため、放射性物質についてはほぼすべてが太平洋側に抜ける結果となった。

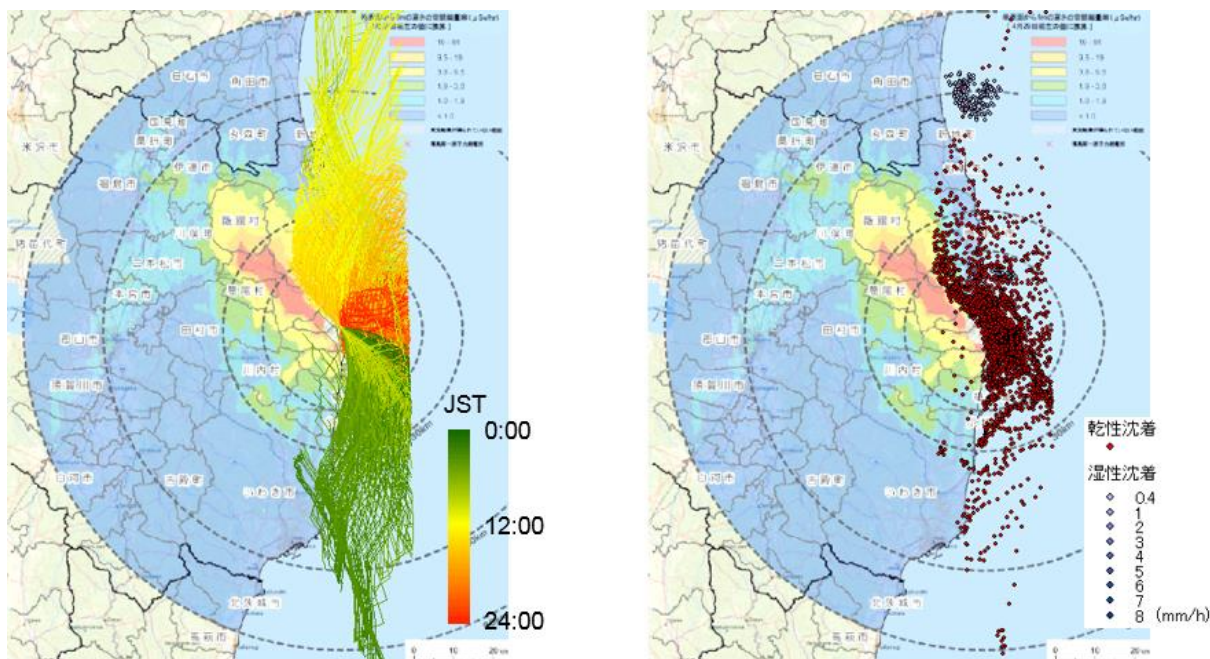


図 49 移流計算結果（3月28日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

3月28日は午前中は北風が吹き、その後一度南の風になった後、西の風に変化した。午前中の北風については他の日同様沿岸部付近を通過する風となったが、昼前後の南風については、同様に南風となった24日と比較すると阿武隈高地に沿うというよりも東側からぶつかる形となり、若干内陸まで放射性物質が入り込む形となった。なお、この日は降水がほとんどなく、概ね乾性沈着となった。

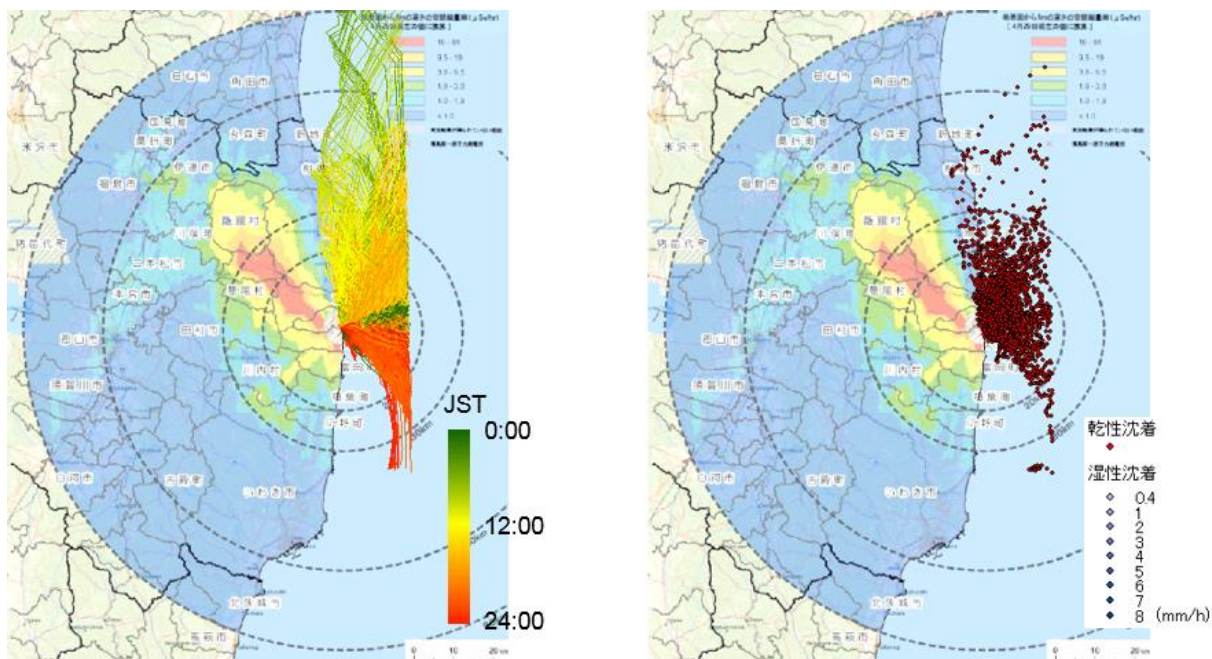


図 50 移流計算結果（3月29日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

3月29日は3月19日同様、西から南西の風が終日卓越したため、福島第一原発の北側の沿岸部で乾性沈着があったが、内陸部への沈着はほとんどない結果となった。この日も降水がなかったため乾性沈着となった。

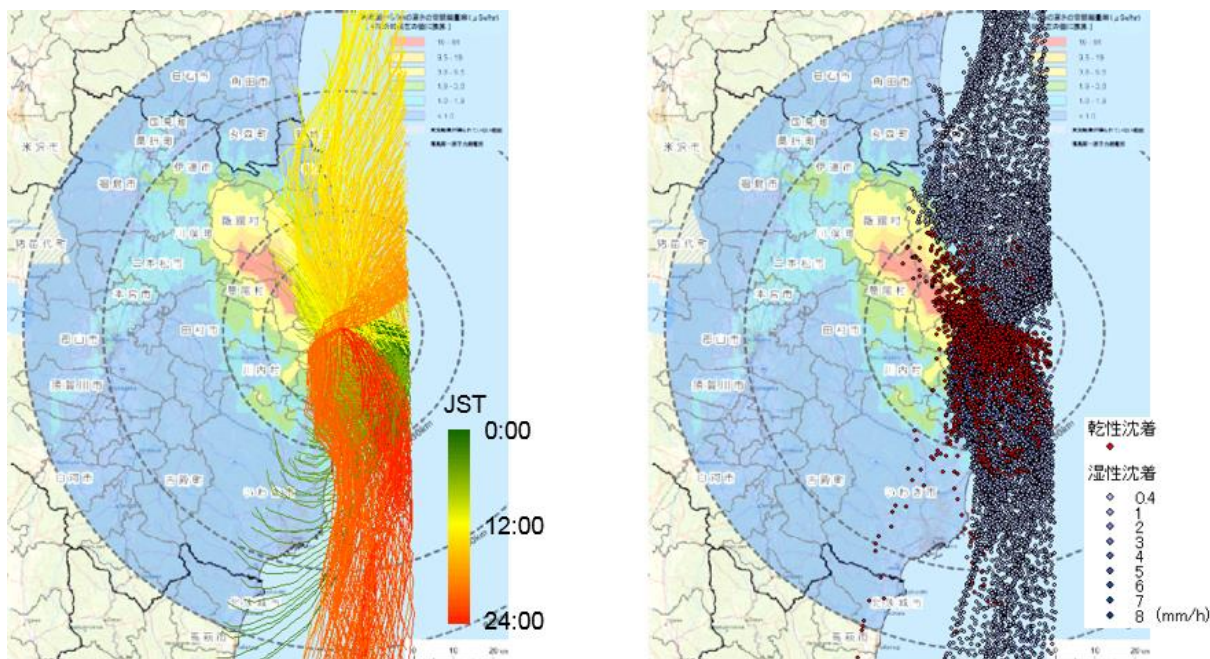


図 51 移流計算結果（3月30日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

3月30日は3月24日同様、様々な向きの風が生じたが、午前中に福島第一原発周辺で乾性沈着が発生した。その後南から北風に変化したが、その時間帯には降水があったため湿性沈着となった。ただし、全体としては太平洋上に落下したものが多く、福島第一原発の半径30km以内の沿岸部付近にのみ影響する結果となった。

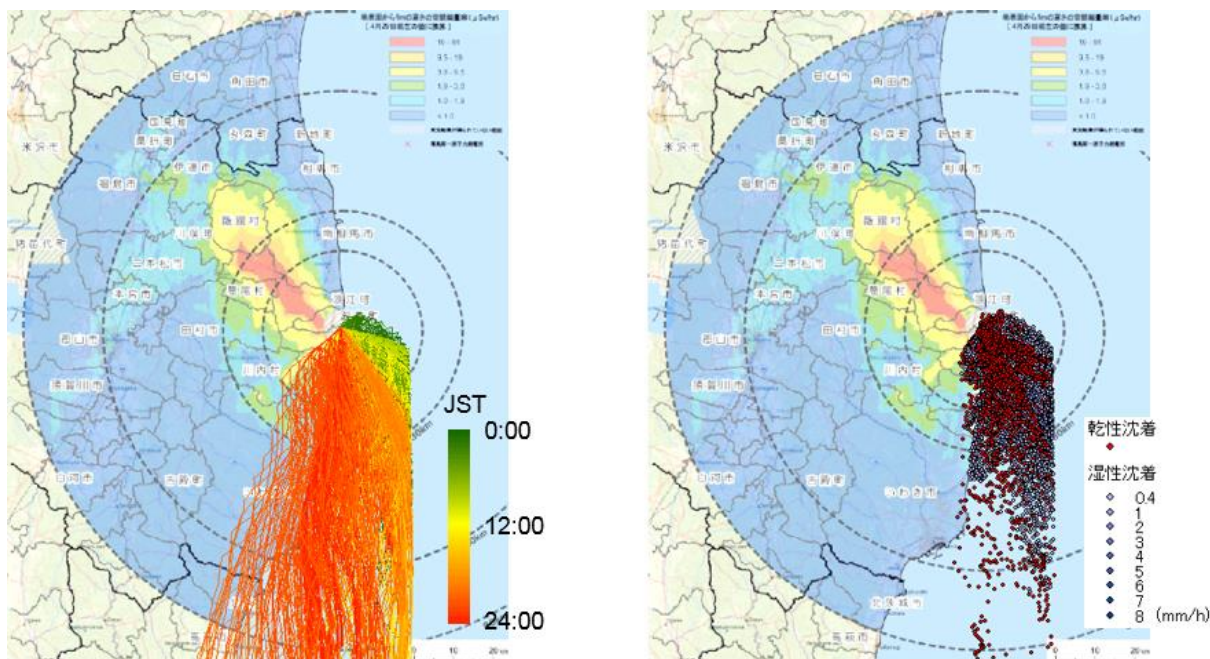


図 52 移流計算結果（3月31日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

3月31日は北西及び北東の風がその後南に向かって流れる傾向となった。そのため放射性物質の落下地点としては比較的広範囲にわたった。ただし、そのほとんどは太平洋側に落下する結果となり、内陸部への影響は福島第一原発の南側の沿岸部に限定される結果となった。

### 3.2 空間線量分布計算

空間線量分布は単位メッシュ（ $1\text{km}^2$ ）ごとに落下した粒子数をカウントし、モニタリング結果から決定した換算係数を乗じることで算出した。3月12日から31日の結果を図53に示す。

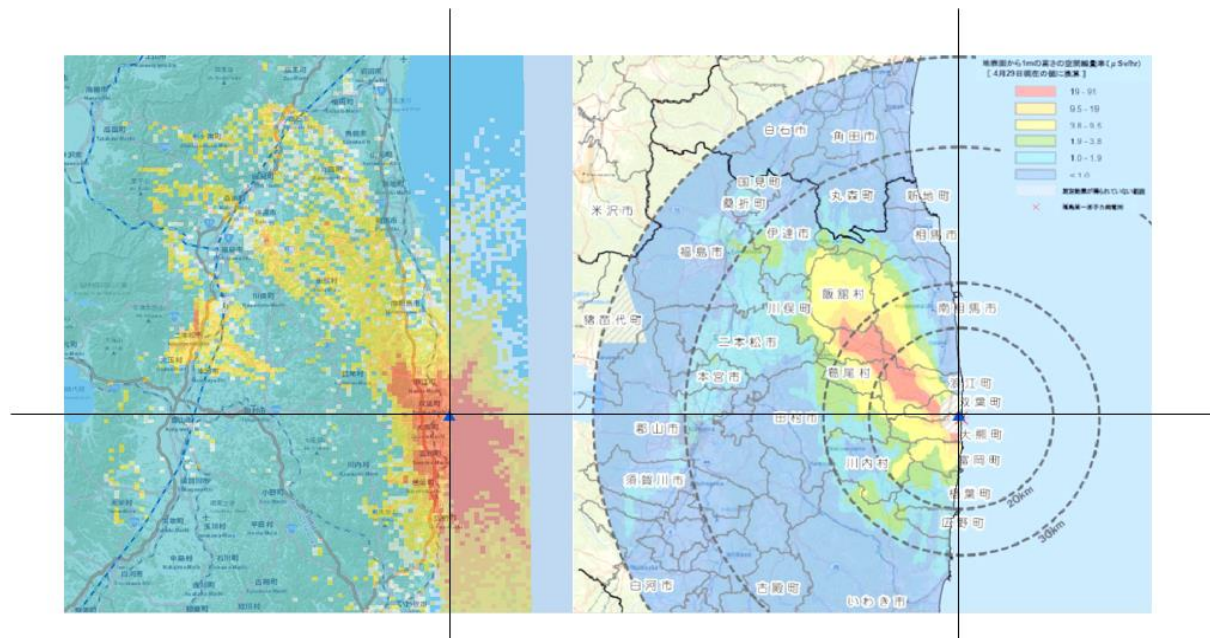


図 53 空間線量分布図

(左：計算結果 右：航空機モニタリング)

福島第一原発から北西側飯館村付近にかけて高濃度の汚染が伸びている様子や、阿武隈山地を回りこみ、郡山盆地に汚染が広がっているなど、概ねの傾向としては一致する結果となった。ただし、福島第一原発北西部の汚染が航空機モニタリングよりも北側に広範囲に広がるとともに全体的な空間線量は低くなる結果となった。また、郡山盆地付近の汚染については逆に空間線量の高い地域と低い地域の差が顕著に出る結果となった。これらの点については次章にて検証することとする。



### 3.3 汚染形状の定量的評価

3月12～30日の移流計算結果から日ごとの汚染範囲の空間分布を求めた。図54～73に示す。

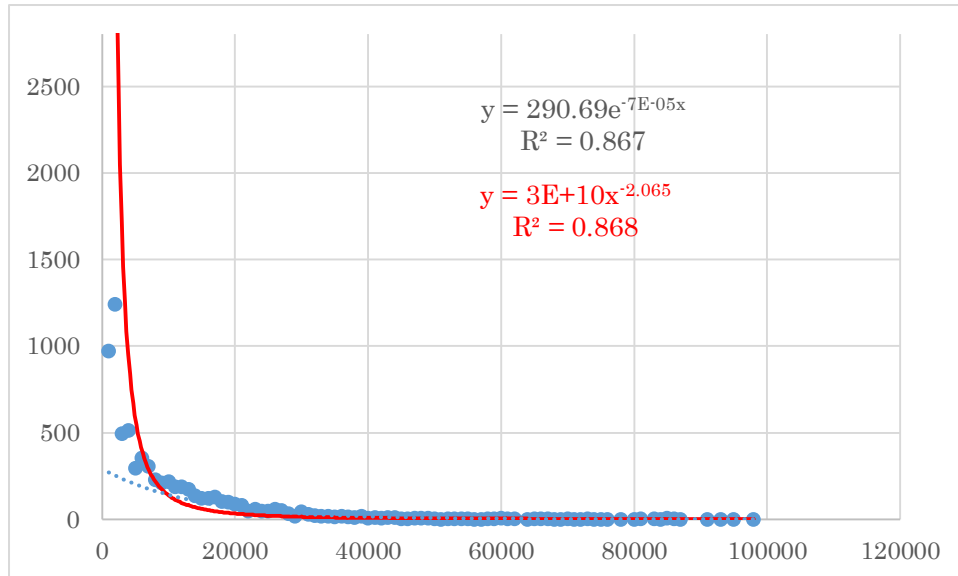


図 54 3月12日の空間分布（フラクタル型）

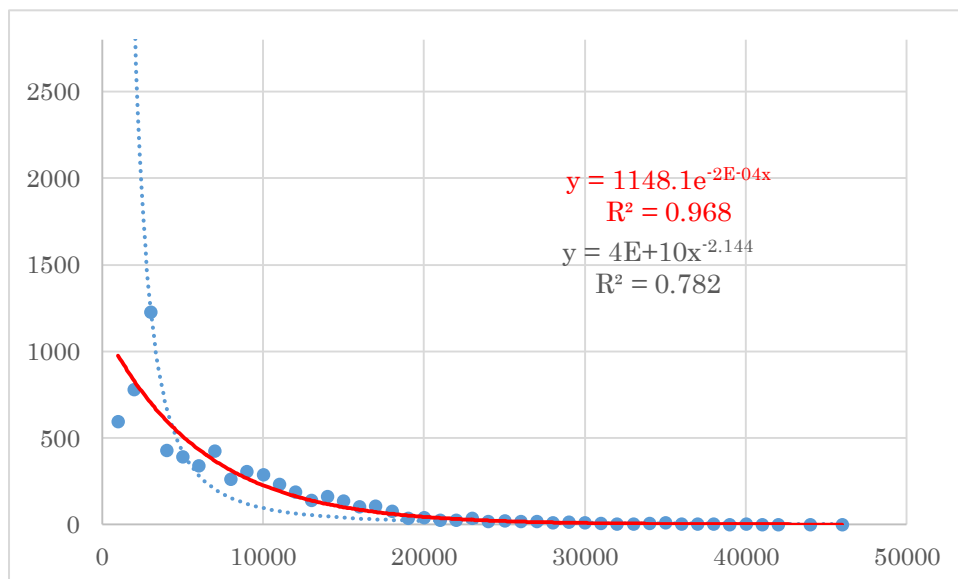


図 55 3月13日の空間分布（指数分布型）

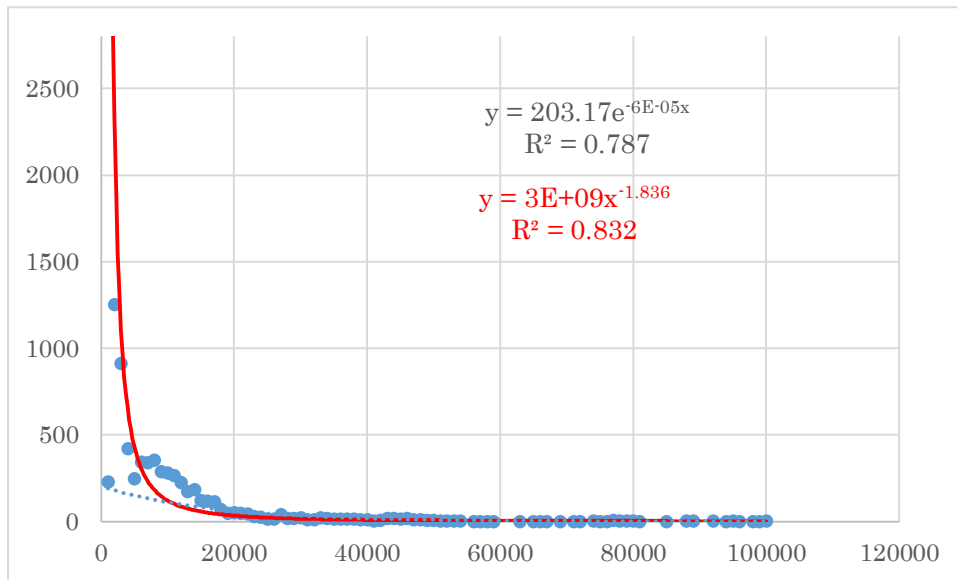


図 56 3月14日の空間分布（フラクタル型）

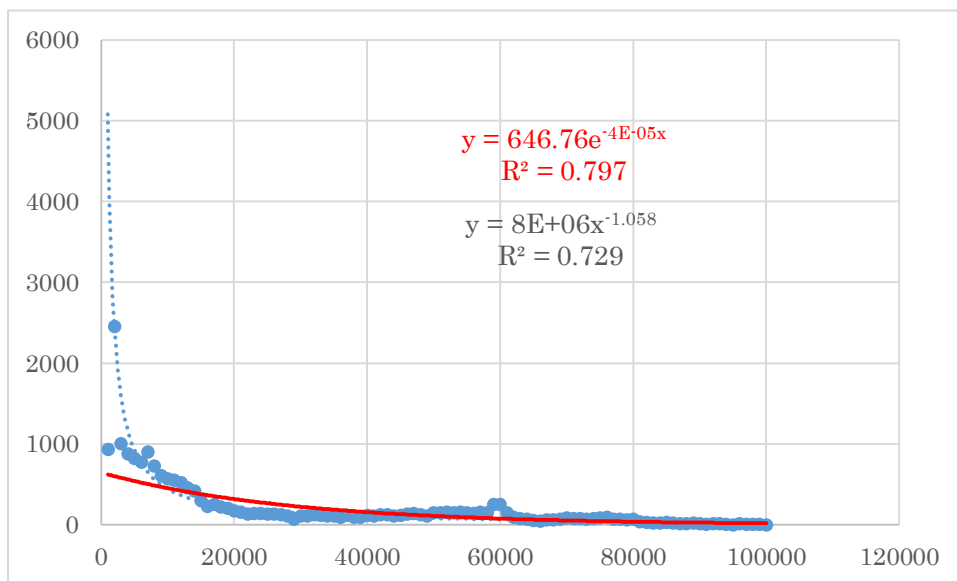


図 57 3月15日の空間分布（指数分布型）

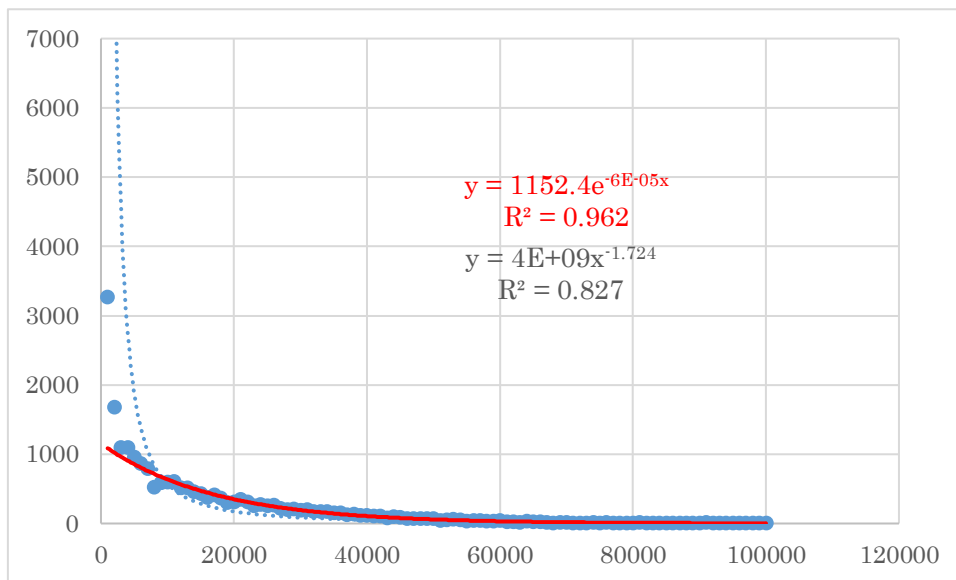


図 58 3 月 16 日の空間分布 (指数分布型)

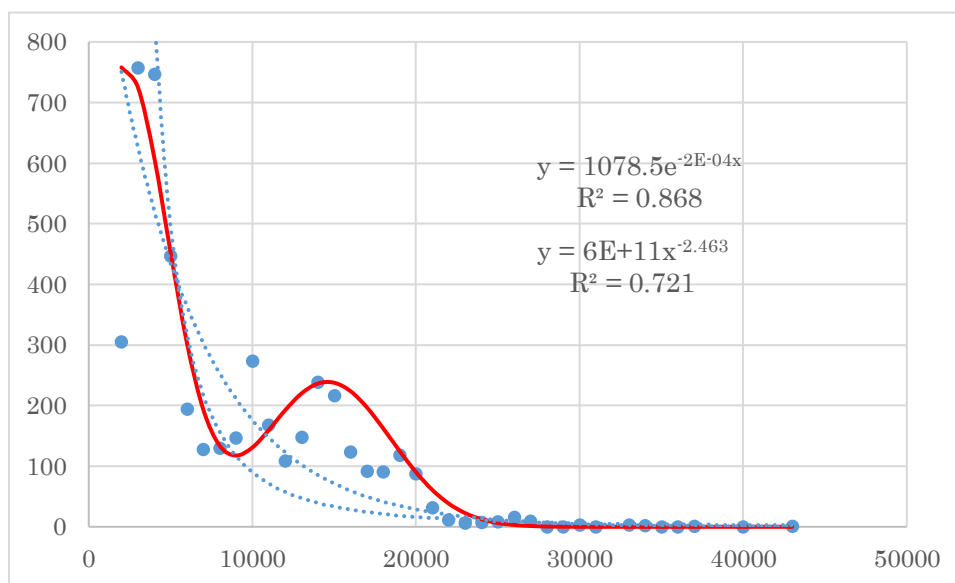


図 59 3 月 17 日の空間分布 (2 ピーク正規分布型)

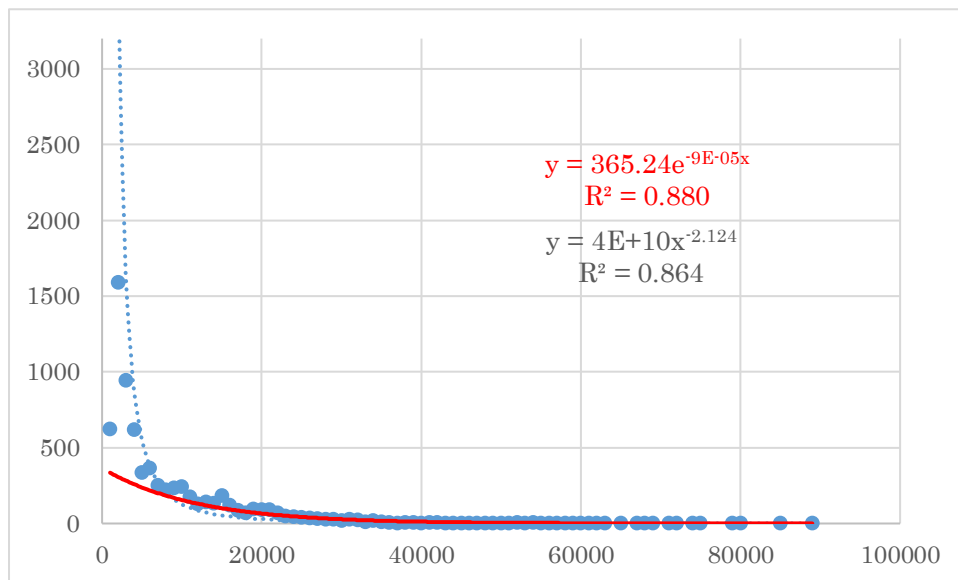


図 60 3月18日の空間分布（指数分布型）

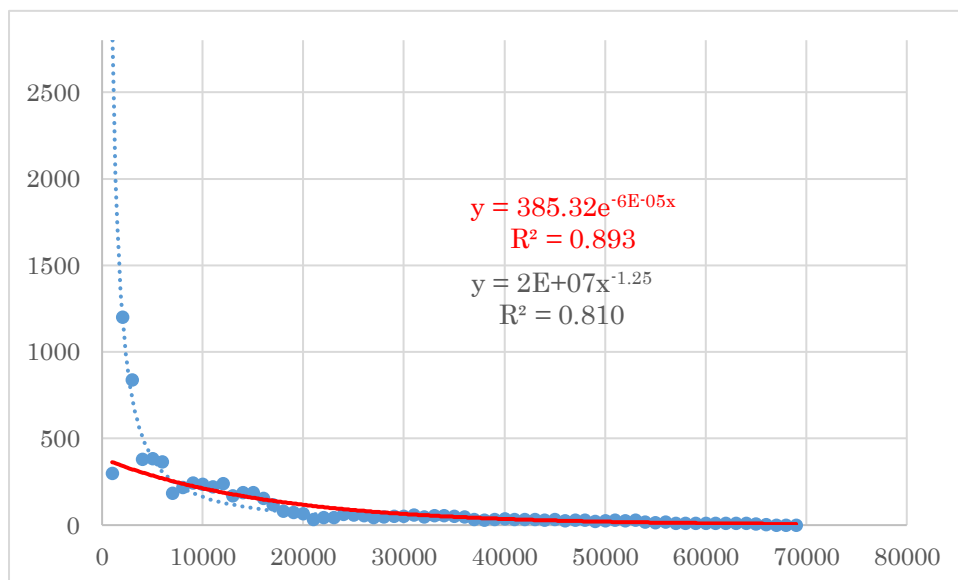


図 61 3月19日の空間分布（指数分布型）

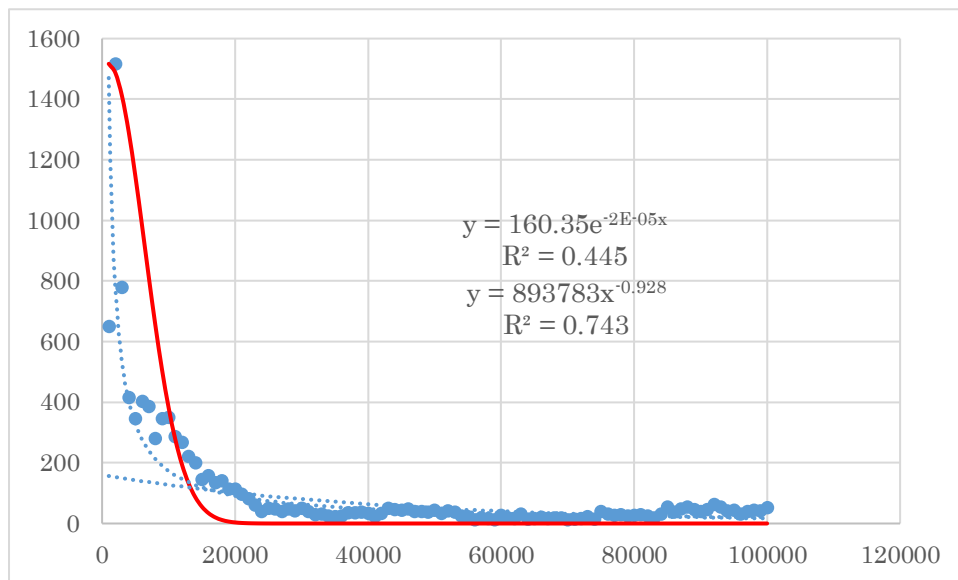


図 62 3月20日の空間分布（正規分布型）

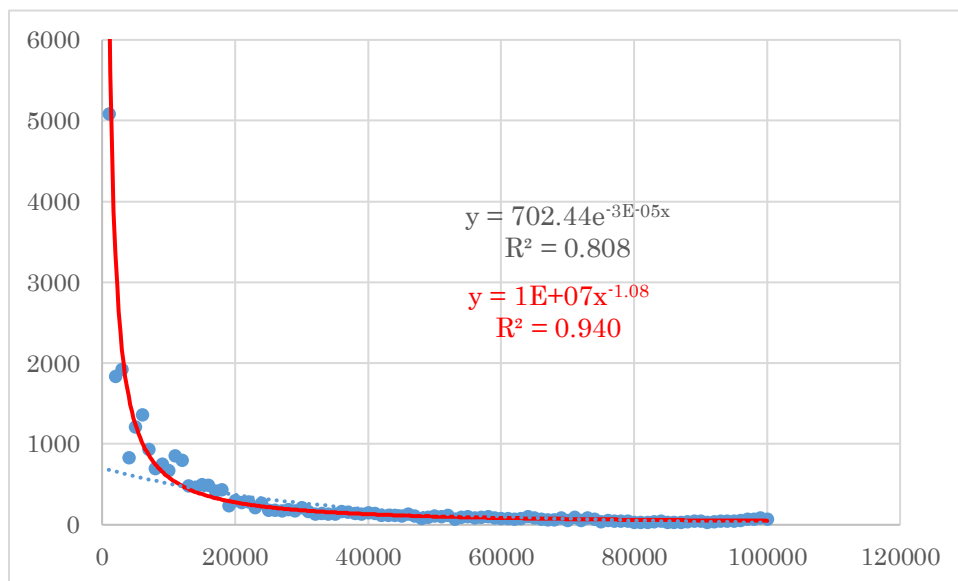


図 63 3月21日の空間分布（フラクタル型）

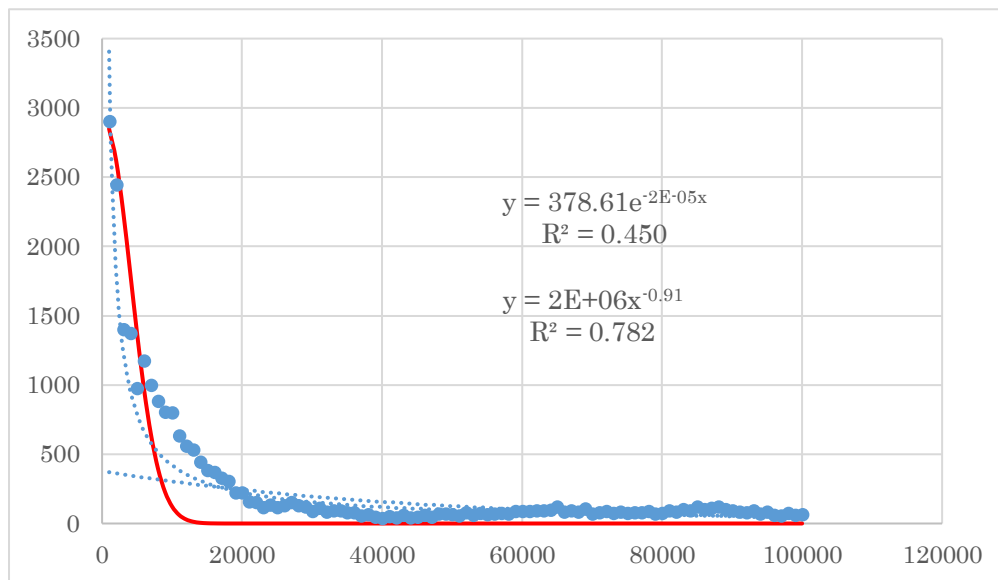


図 64 3月22日の空間分布（正規分布型）

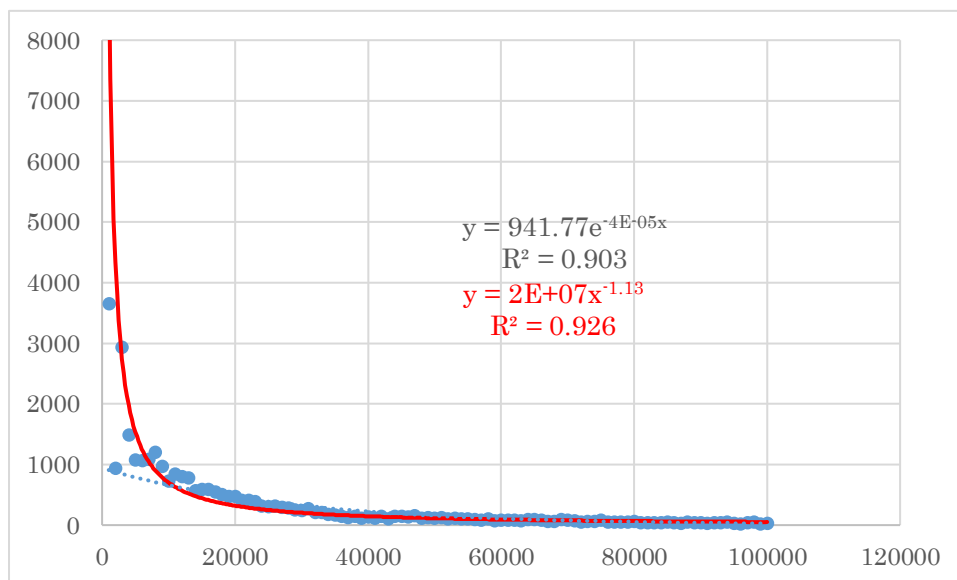


図 65 3月23日の空間分布（フラクタル型）

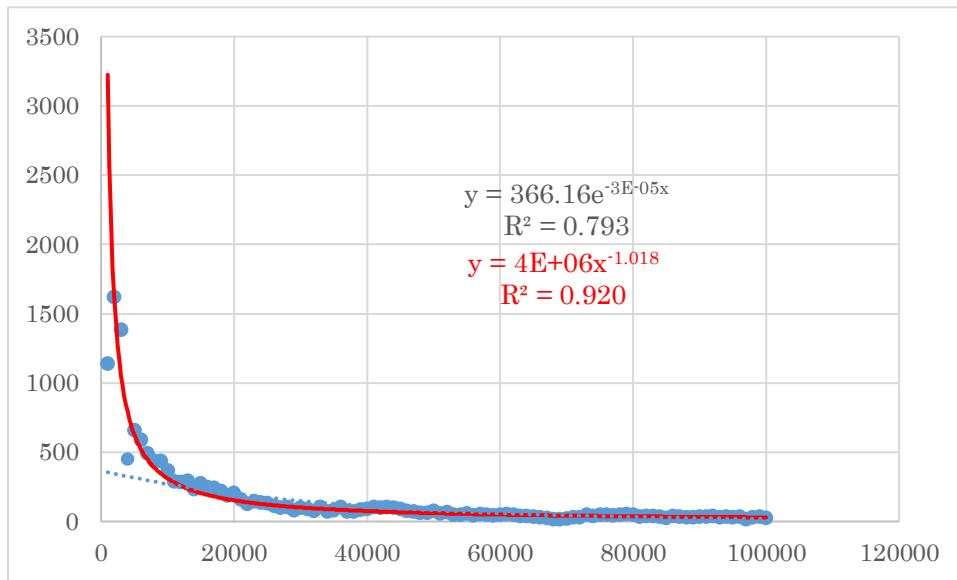


図 66 3月24日の空間分布（フラクタル型）

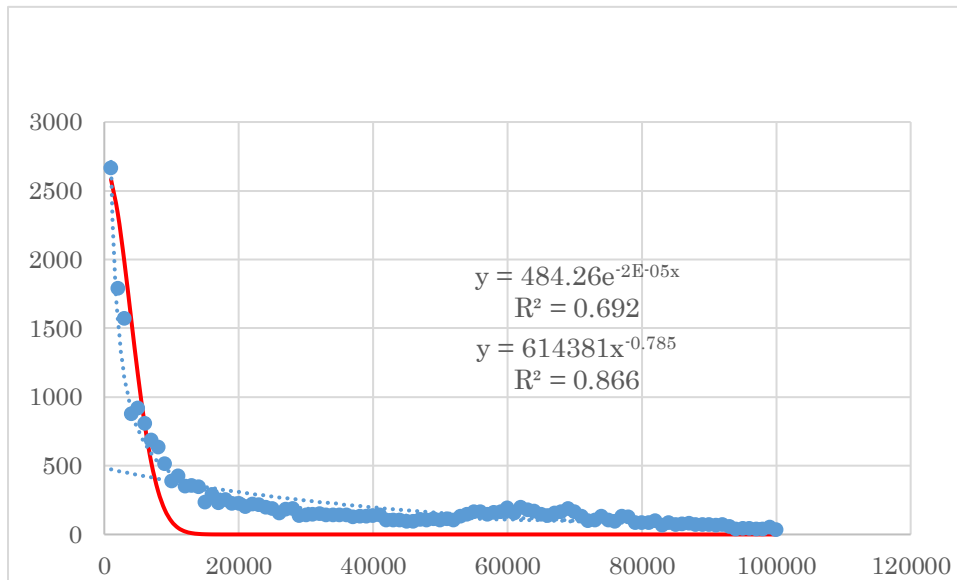


図 67 3月25日の空間分布（正規分布型）

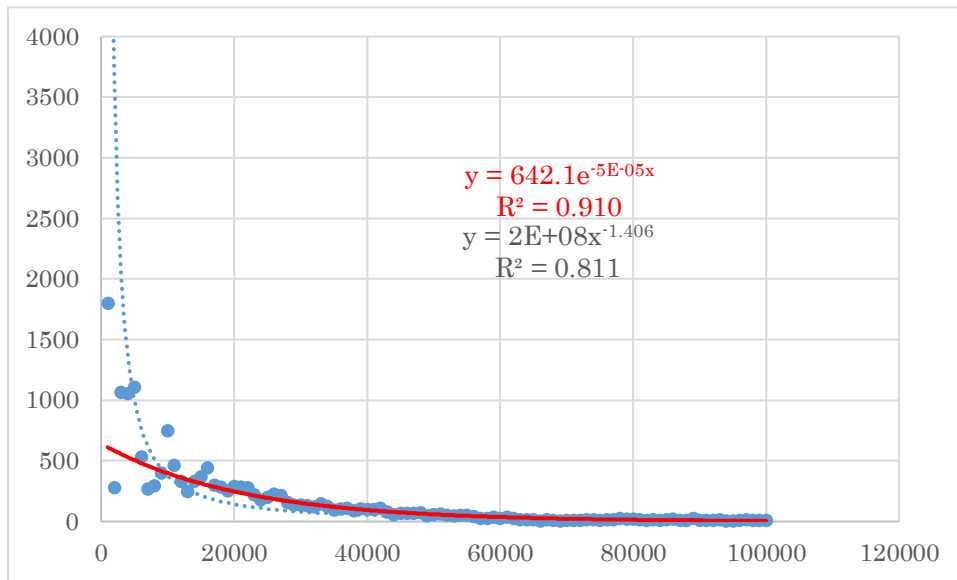


図 68 3月26日の空間分布（指数分布型）

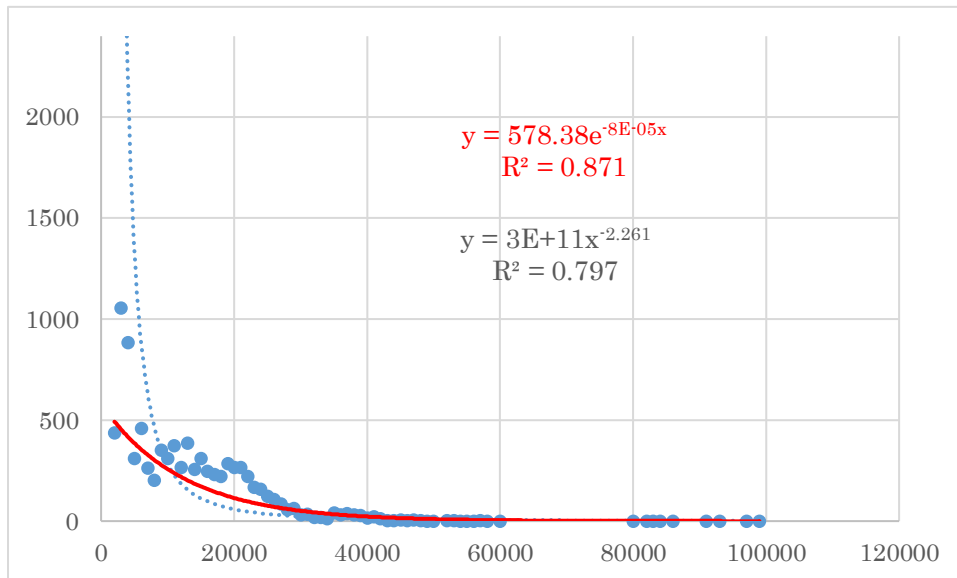


図 69 3月27日の空間分布（指数分布型）



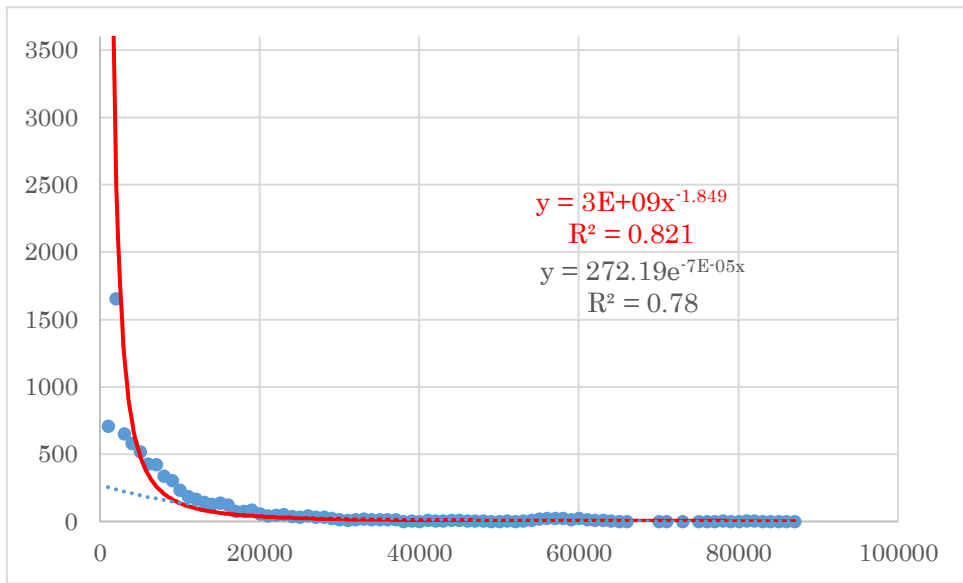


図 70 3月28日の空間分布（フラクタル型）

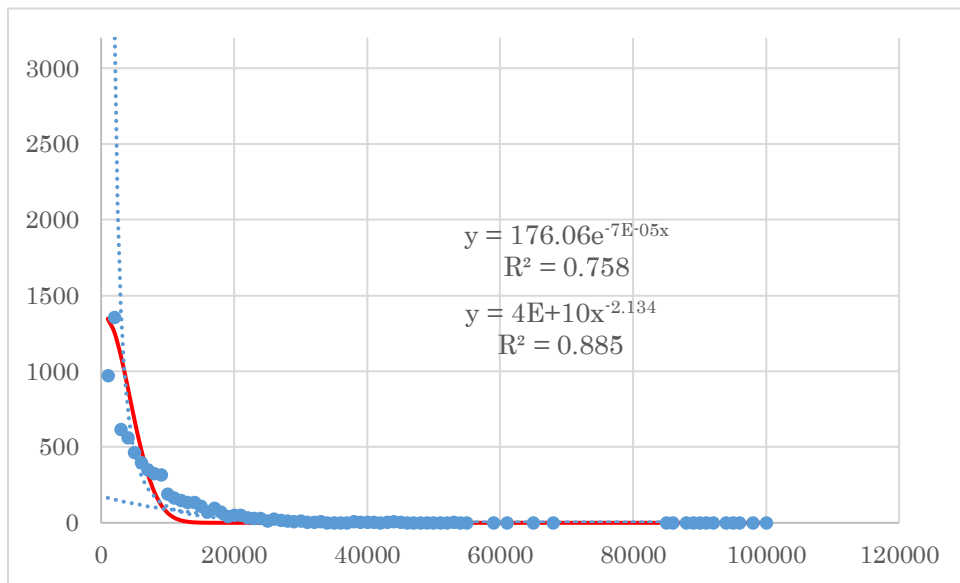


図 71 3月29日の空間分布（正規分布型）

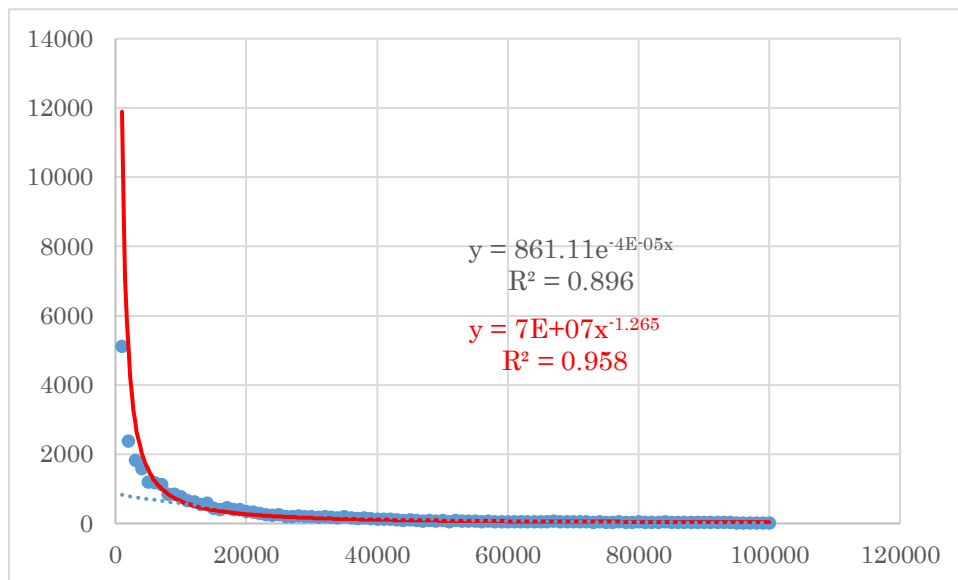


図 72 3月30日の空間分布（フラクタル型）

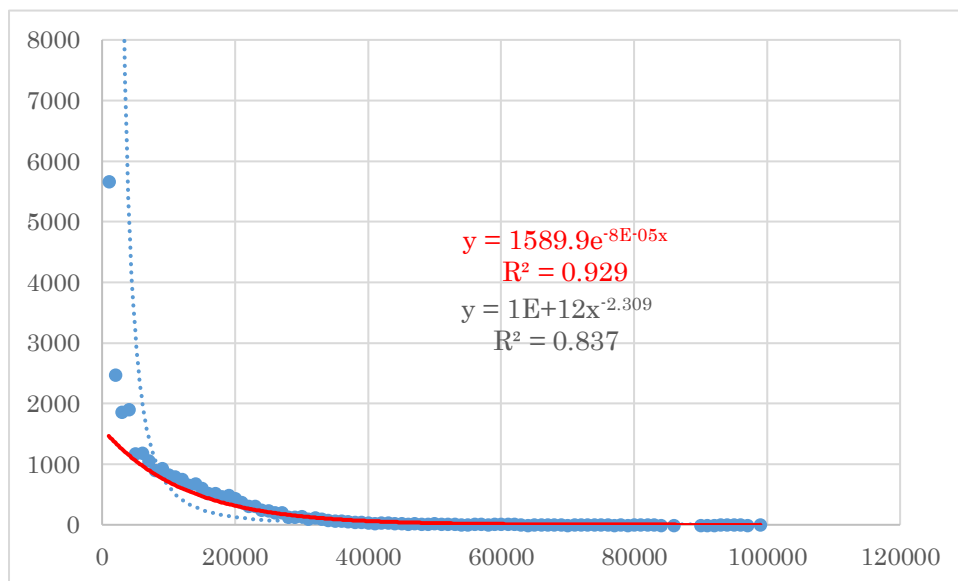


図 73 3月31日の空間分布（指数分布型）

移流計算を行った 3/12~31 の日ごとの結果についてフラクタル次元  $D$  を計算した。結果をこれまでに明らかにした日ごとの空間分布種類とあわせて表 13 に示す。

表 13 空間分布型とフラクタル次元計算結果

Date	Wind speed	Deposit	D	Distribution
3/12	2.9 m/s	Dry	2.07	Fractal
3/13	2.6	Dry	2.14	Exponential
3/14	3.2	Dry	1.84	Fractal
3/15	3.5	Wet	1.06	Exponential
3/16	6.3	Wet	1.72	Exponential
3/17	8.5	Dry	2.46	Two peaks normal
3/18	4.7	Dry	2.12	Exponential
3/19	4.4	Dry	1.25	Exponential
3/20	2.6	Wet	0.93	Normal
3/21	3.0	Wet	1.08	Fractal
3/22	2.7	Wet	0.91	Normal
3/23	6.0	Wet	1.13	Fractal
3/24	3.5	Wet	1.02	Fractal
3/25	3.0	Wet	0.79	Normal
3/26	7.9	Wet	1.41	Exponential
3/27	6.3	Dry	2.26	Exponential
3/28	2.9	Dry	1.85	Fractal
3/29	2.5	Dry	2.13	Normal
3/30	2.7	Wet	1.27	Fractal
3/31	2.5	Wet	2.31	Exponential

次に 3 月 15 日の雲形状のフラクタル次元を表 14 に示す。

表 14 雲形状のフラクタル次元 (3月15日)

Time	D
21:00	1.34
22:00	1.46
23:00	1.58
0:00	1.57
1:00	1.57
2:00	1.64
3:00	1.59
4:00	1.59
5:00	1.51

## 第 4 章 考察

第 4 章では第 3 章で得た結果を踏まえ考察を行うことで、本研究で得た結果を評価し、有用性について検討する。また、検討により今後の課題となった点についても触れる。

#### 4.1 粒子モデルによる移流計算

##### (1) ホットスポット

粒子モデルを利用した計算では放射性物質が沈着した箇所を粒子ごとに特定するため、ホットスポットのように連続の汚染とならない局所的な汚染形態を表現することができた。例を図 74 に示す。湿性沈着の場合は降水が断続的に続くため、結果として汚染形状も連続的になる傾向がある。一方、乾性沈着の場合は局所的な風向風速、地形の影響を強く受けるため、結果として図中青丸で示したようなホットスポットの形態を表現することができた。

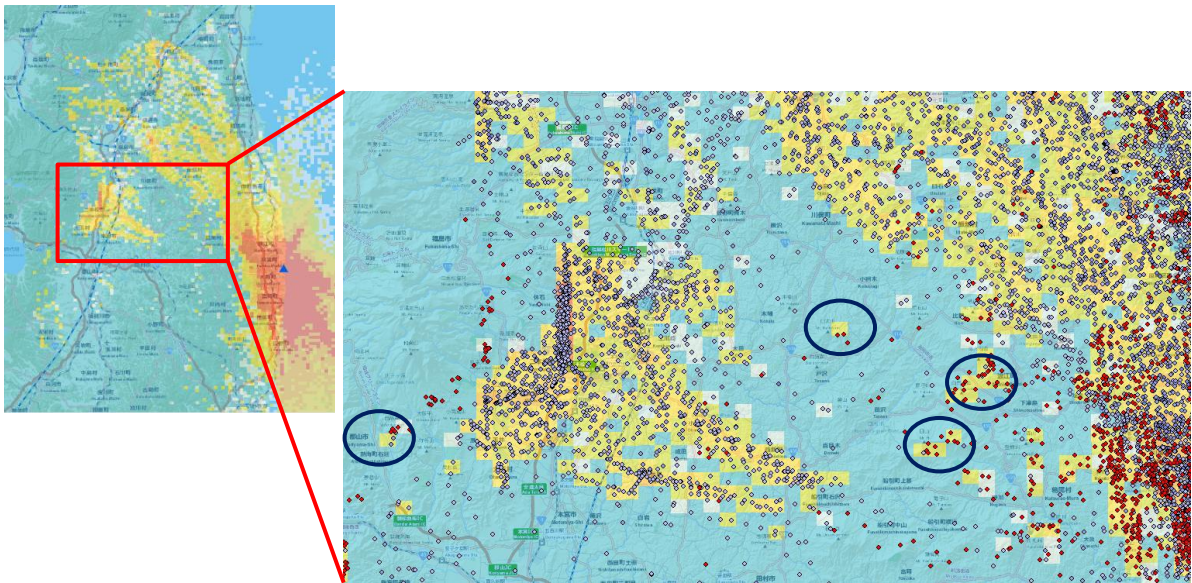


図 74 ホットスポットの例

##### (2) 乾性沈着と湿性沈着の分離

図 75 に 3 月 15 日の乾性沈着と湿性沈着の計算結果を示す。3 月 15 日は、16 時ごろから福島第一原発北西部で降水（降雪）があった。雨雲は西から福島市上空を通過し、福島県東部で同日 21 時に飛来した汚染粒子を捉えた。降雨は翌朝まで続き、その間はほとんどの汚染粒子は湿性沈着したと推定される。本研究では移流計算を実施する際、乾性沈着と湿性沈着を同一のアルゴリズムで計算したが、粒子ごとに沈着種別を情報として持たせることにより、当該箇所の汚染が乾性沈着によるものだったのか湿性沈着によるものだったのかを明確に分けることができた。これにより、飯館村や二本松市の汚染の主な原因が湿性沈着であったことが明確に示された。

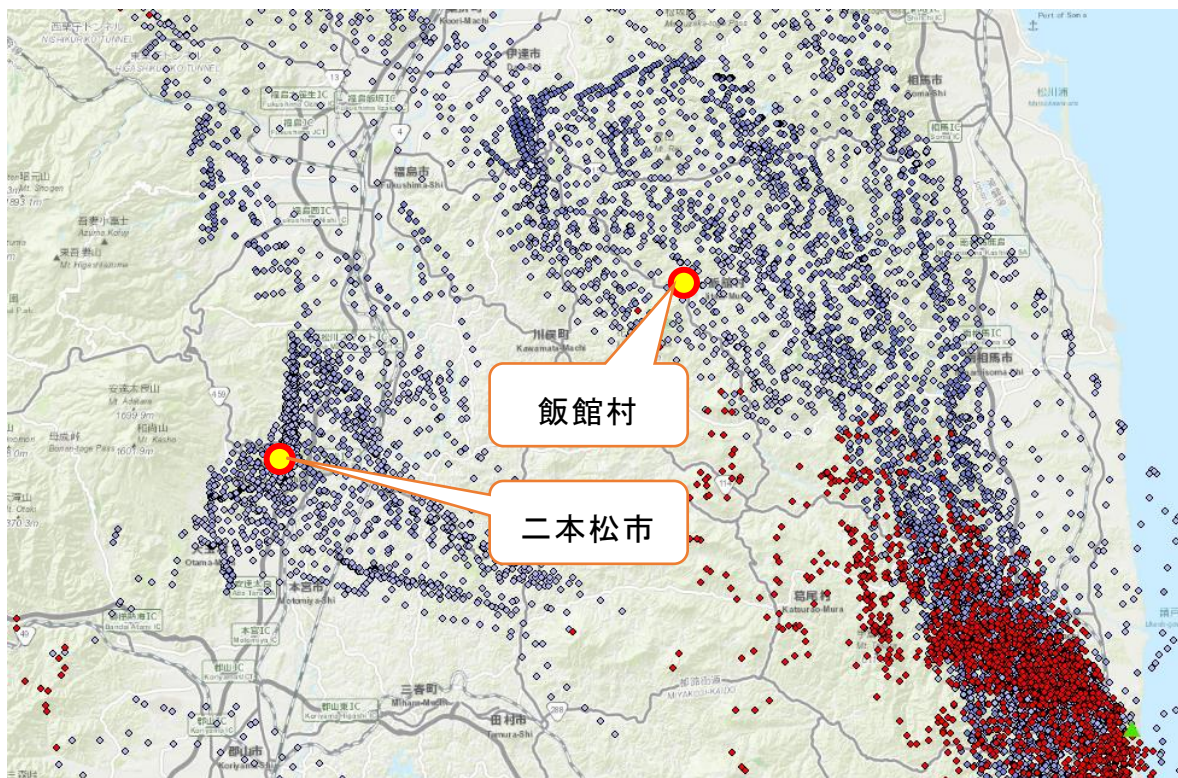


図 75 落下した粒子の沈着種類 (3月15日)

(赤が乾性沈着, 青が湿性沈着)

### (3) 地形の影響

前項の通り, 本研究では乾性沈着と湿性沈着を分離して検証することが可能である. そのため, 乾性沈着・湿性沈着が両方発生した箇所でも, どちらかの沈着にのみ着目して検証することも可能である. 乾性沈着の場合, 標高の高い山地の東側斜面や風の通り道となる谷などに沈着し, 山の陰となる西側斜面には沈着しない結果が顕著となった. 例として3月15日の乾性沈着の結果を図76に示す. 阿武隈山地に属する大滝根山(1122m)方面に南西の風に乗った放射性物質が流れたが, 大滝根山を越えることができず, 結果として北東斜面に沈着したことがわかる.

また, 福島第一原発から北西に伸びる汚染については幹線道路に沿って粒子が落下していることがわかる. このことからこの幹線道路部分が谷間となり, 風の通り道を形成しており, そこを放射性物質が通過・落下することで汚染が拡大したことが確認できた.

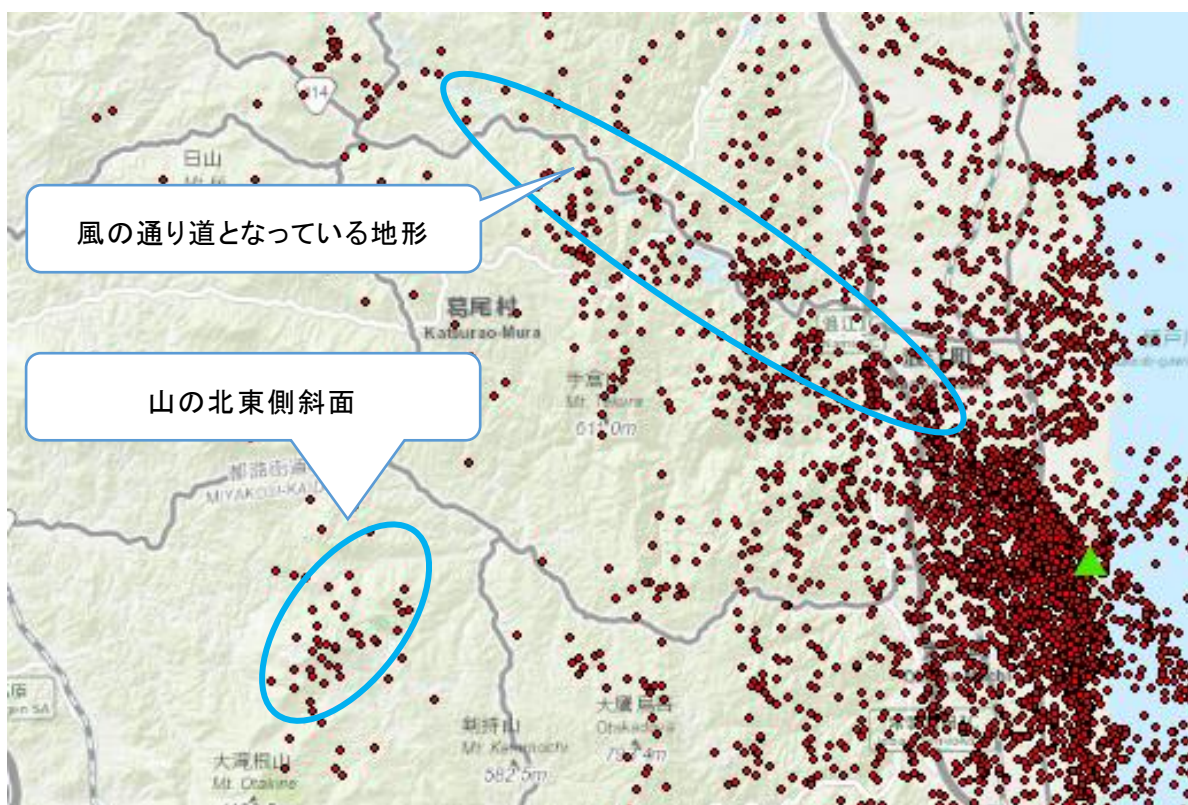


図 76 粒子の落下位置と標高（3月15日乾性沈着）

#### (4) 放出と汚染の因果関係

粒子法を用いた移流計算では粒子ごとに放出された時刻と落下した地点が求められた。その結果、以下の点が明らかになった。

- ①粒子の軌跡
- ②モニタリングポストの空間線量が高かった時間帯に放出された粒子の落下地点
- ③地上汚染濃度の高い地点に落下した粒子の放出時の時刻と空間線量

3月18日の例を図77に示す。モニタリングポストの空間線量は前述の通り、モニタリングポストの位置や風向き、周辺の影響を受けるため、観測された値と落下地点の空間線量の強度とは完全に一致しない。ただし、モニタリングポストで高い線量が観測されていた場合、放射線強度の強い放射性物質が近傍を通過したことは事実であり、放出と汚染の因果関係を結びつけることができる。図77の例では、午前中に北風に乗って移動・沈着した放射性物質については、放出した際の空間線量はこの時期の平均的な値であったが、南から南東の風で原子力発電所の北西側に移動・沈着した放射性物質については、放出した際の空間線量は非常に高く、全体の汚染度への寄与率が高かったことが伺える結果を示し



ている．よって，今後検証を進める上でモニタリングポストのデータと航空機モニタリングの結果の整合がつかない部分については逆推定を行うことで当該時間帯の放射性物質の放出強度を見積もることが可能となることを示唆している．

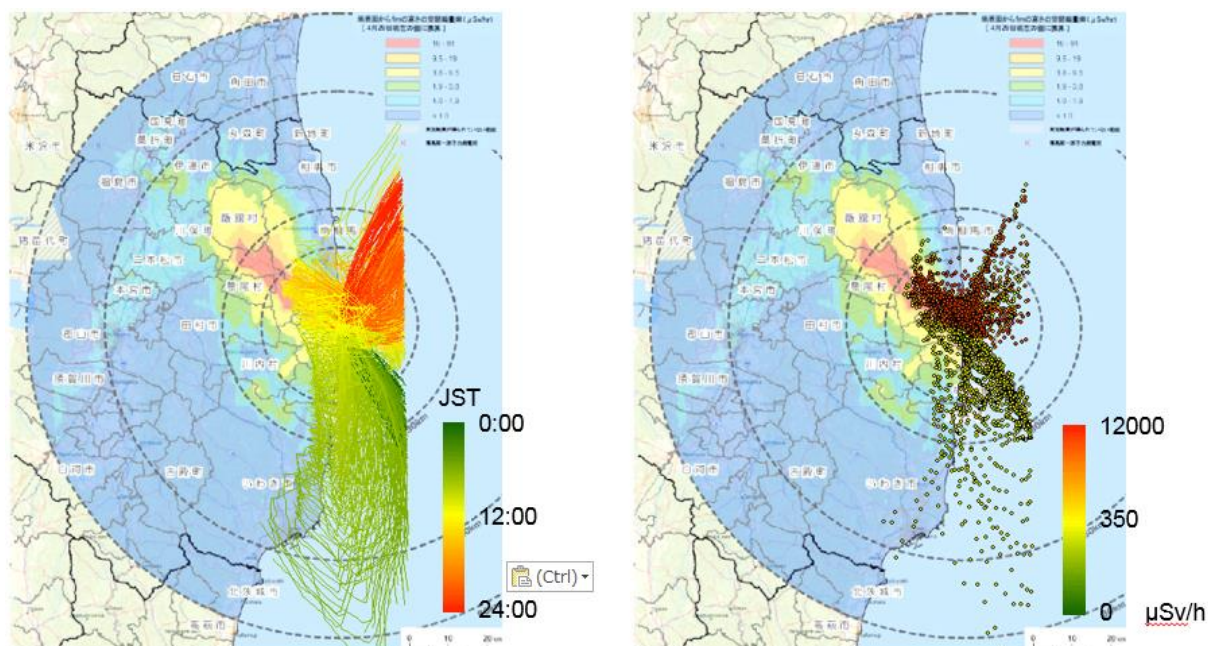


図 77 粒子の軌跡と落下した粒子が発射された時間の空間線量（3月18日）

（左：粒子の軌跡 右：落下位置）

#### (5) 発生した事象との整合性

高濃度の放射性物質が大気中に放出されたと考えられる時間帯及び放射線量の顕著な増加が見られる時間帯について，個別に計算結果を確認する．高濃度の放射性物質が大気中に放出されたと考えられる時間帯は表 15 の通り．

表 15 高濃度放射性物質が大気中に放出されたと考えられる時間帯

時刻 (JST)	発生した事象	空間線量 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	風向き	降雨
3/12 10:17	1号機ベント開始	4.3	N	なし
14:30	1号機ベント開始	10	S	なし
15:36	1号機水素爆発	270.5	SE	なし
3/13 8:41	3号機ベント開始	307.8	SW	なし
11:00	2号機ベント開始	54.3	NW	なし
3/14 5:20	3号機ベント開始	420	NE	なし
11:00	3号機水素爆発	259.4	W	なし
20:00	2号機燃料損傷	5.4	N	なし
3/15 0:02	2号機ベント開始	188.9	NW	なし
6:00	4号機水素爆発	73.2	N	なし
6:10	2号機水素爆発	73.2	N	なし
8:00	2号機燃料損傷	873.1	NE	なし
12:00	2号機放射性物質放出	2431	SE	なし
3/16 4:00	2号機圧力容器破損	1047	N	あり

表 15 から福島第一原発北西部の汚染は、3月12日の1号炉の爆発と3月15日の2号炉の放射性物質放出が大きく寄与した可能性が高い。

東京電力のモニタリングポストによる放射量の観測により、空間線量の高かった3月12日～21日までの時系列に、福島第一原発北西部の汚染に関与したと考えられる風（風向東～南）が吹いていた時間を整理した。結果を図78に示す。

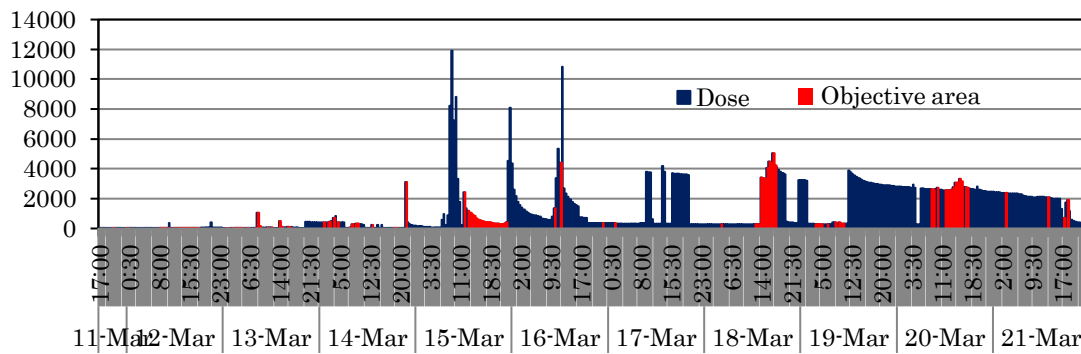


図 78 放射性物質放出の時系列

グラフは各時刻の空間線量を示す。そのうち、赤で示す部分は風向が東～南だった時間帯である。3月18日及び3月20日も空間線量が高く、風向きが東～南だったことが確認されたため、これらの時間帯についても注目することとした。

3月12日の汚染:結果は前章図33の通り。この時間帯は高度により風向が大きく異なった。そのため、粒形の大きな粒子は福島第一原発から北西方向に落下したが、小さい粒子は北方向から太平洋側へ流される傾向にあった。爆発によって拡散された粒子は風と地形の効果によって阿武隈山地以西には到達しなかったことが伺える。

3月15日の汚染:結果は前章図36の通り。16時には福島第一原発北西部で降雨があった。雨雲は西より福島市上空を通過し、福島県東部で同日21時に飛来した汚染粒子を捉えた。その結果、放射性物質は阿武隈山地を越え、山地の西側にも汚染粒子が到達し、24:00までにほとんどの汚染粒子は湿性沈着したと推定される。

3月18日の汚染:結果は前章図39の通り。この日はほとんどの粒径の粒子が北西に向かい、阿武隈山地を越えず、およそ15km圏内の比較的近い場所に集中して落下する結果となった。ただし、粒径が0.02mmより小さい粒子についてはそのまま落下せず、北上するような傾向となった。

3月20日の汚染：結果は前章図41の通り。この日の汚染粒子はほぼすべての高さ，粒径で一様に北北西に向かう傾向となった。水平方向の分布も他の3日よりも広範囲にわたっており，より広範囲に汚染粒子が到達したことが明らかとなった。

## 4.2 空間線量分布計算

空間線量分布計算結果について、航空機モニタリングによる汚染図との比較を行った。福島第一原発から北西側の飯館村付近にかけて高濃度の汚染が伸びている様子や、阿武隈山地を回りこみ、郡山盆地に汚染が広がっているなど、概ねの傾向としては一致する結果となった。このことは本手法が非常に簡便ながら、既往モデルと比較し、同等の結果が得られていると言える。大型コンピュータや特殊なソフトウェアを利用しないシミュレーションは早急な判断が迫られる時にこそ必要であり、その意義は大きいと言える。

ただし、詳細に結果を比較すると図 79 に示すように航空機モニタリング結果と整合が取れていない箇所がある。これらについて考察する。

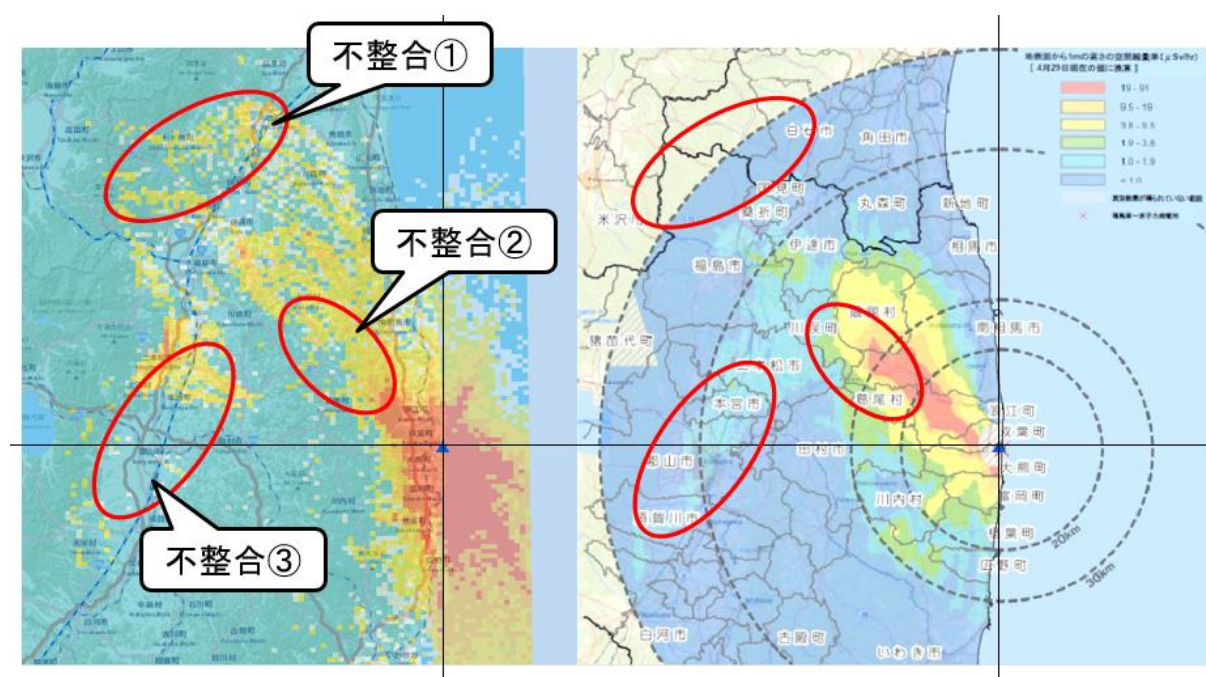


図 79 空間線量分布図不整合箇所

(左：計算結果 右：航空機モニタリング)

不整合箇所①：この範囲の汚染について移流計算結果を確認すると 3 月 15 日の湿性沈着が主な原因であることがわかった。モニタリング結果については 4 月 29 日換算の値であるため 40 日以上之差が生じている。ここで考えられるのは放射性物質の流出である。当該箇所は湿性沈着であるが、粒子の軌跡を見るとこの地点で大きく風が巻いていた。奥羽山脈の斜面が壁になり、山肌に沿うような風が吹いていたと推測される。その影響で山肌近くに湿性沈着する形となったが、沈着後、そのまま雨水と一緒に傾斜方向、すなわち南東

側に流出したと考えられる。これを明らかにするには地表面落下後の放射性物質の移動について検討する必要がある、地形や土地被覆などから検証する必要がある。

不整合箇所②：この範囲の汚染についても移流計算結果から 3 月 15 日の湿性沈着が大きく影響していることが確認された。粒子の軌跡がモニタリング結果と一致していないため、不整合箇所①同様、地表面に落下した後の移動（二次汚染）について検討する必要がある。ただし、軌跡と汚染が一致したとしても空間線量の値に大きな乖離が生じる懸念があるため、アルゴリズムの側から考察する。本研究において湿性沈着の扱いについては前述したとおり、少しでも降水があれば ( $R>0$ ) 湿性沈着として扱い、その降水強度 (=単位時間当たりの降水量) については考慮していない。雨が強ければその分たくさんの汚染物質が落下するとするならば、降水量は補正要素となると考えられる。また、降水時間についても同様で、降水時間が長くなれば空气中を移動する放射性物質が洗浄されるため、補正要素となる可能性がある。

不整合箇所③：この汚染についても移流計算結果から 3 月 15 日の湿性沈着の影響を強く受けていると考えられる。ただし、本研究の計算結果では汚染箇所については二本松市付近の限定された地域であり、その分空間線量が高くなる結果となっている。ここから推測できるのは盆地地形と交通網による二次汚染である。地表に沈着した放射性物質は土壌への沈着、水による移動、風による移動などによる二次汚染を引き起こす。当該箇所は盆地となっており、奥羽山脈または阿武隈高地から回り込んだ風が吹き込む傾向がある。また、国道 6 号線や主要鉄道などが集中しており、それらの交通網を介して、またはそれらが引き起こす風の場合によって拡散した可能性がある。

以上のことより、モニタリングとの不整合についてはアルゴリズムの改良の余地である部分も存在するが、地表へ落下した後の二次汚染について詳細に評価する必要があることが示唆された。

### 4.3 汚染形状の定量的評価

表 13 で求めた結果について，風速とフラクタル次元の関係について分布図を作成してその傾向を確認した．分布図を図 80 に示す．その結果，風速そのものとフラクタル次元の相関は相関係数 0.058 と弱い結果となった．ただし，風速 4m/s 以上を高速，4.0m/s 未満を低速として分類すると一定の関係性が現れた．関係性について表 16 に示す．

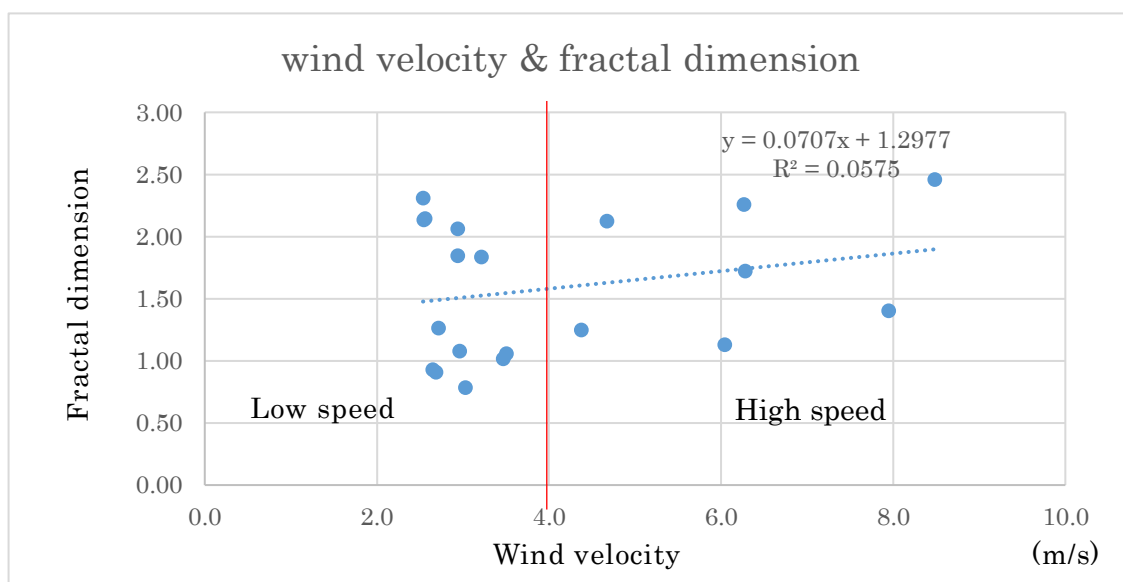


図 80 風速とフラクタル次元の関係

表 16 風速・沈着種類・フラクタル次元の関係

Flow type	Deposit type	Fractal dimension
Low speed	Dry	1.8-2.0
Low speed	Wet	1.1-1.2
High speed	Dry	2.0
High speed	Wet	1.4-1.7

この結果，風速（高速/低速）と沈着種類（乾性/湿性）のパターンによって汚染形状のパターンが変化することが示唆された．

更に表 13 の結果を汚染パターン(高速/低速，乾性/湿性)ごとに空間分布型との対応を整理した．その結果，表 17 に示すとおり，風速（高速/低速）と沈着種類（乾性/湿性）の 4 通りの汚染パターンにおいて，それぞれ異なる分布型が現れる傾向となった．

表 17 4つの汚染パターンの空間分布特性

Flow type	Deposit type	Pollution pattern
Low speed	Dry	Fractal
Low speed	Wet	Normal
High speed	Dry	Two peaks normal
High speed	Wet	Exponential

従来の大気拡散モデルで計算できるのは、正規分布のパフモデル、対数正規のプルームモデルのみであったのに対し、粒子モデルではフラクタルと指数分布が新たに加わり、その出現条件（風の傾向、沈着の種類）が判明した。それにより 2 ピークやホットスポットの特徴も捉えることができるようになった。相関係数についても概ね 0.8 以上と高い結果となっていることから、それぞれの分布型へ適合の度合いは非常に高いと言える。以上のことから、汚染形状の分布型を求めることで、そのメカニズムを推測できることが示唆された。



## 第5章 結論

本研究では粒子モデルを用いて移流計算を実施した。粒子モデルは流体を構成する素片（流体の一部をなす基本単位）をモデル化したもので、これにより流体の自由な大変形が表現可能となった。粒子モデルでは粒子の初期位置，初期速度を決定し，粒子の速度（単位時間×加速度ベクトル）を求め，粒子を移動させる。本研究では，水素爆発，ベント，建屋内の圧力上昇による漏出によって福島第一原発から放出された放射性物質が水素爆発の際のコンクリート砕や大気中のエアロゾルに付着した状態で大気中を移動したと仮定し，粒子モデルを採用して移流計算を行った。

その結果，高精度気象データを利用することで大型コンピュータや特別なソフトウェアがなくても簡便で精密な移流計算を行うことが可能となった。小さい粒子は遠くへ，大きな粒子は近くに落下する傾向が連続的にあらわれる一方で，地表面への沈着については粒子ごとに個別の挙動となり，ホットスポットのような汚染形態を表現することができた。また，DEM を利用し，地形効果を考慮した結果，空中を移動した放射性物質は乾性沈着の場合，標高の高い山地にぶつかる方向の斜面や風の通り道となる谷間などに沈着し，陰となる斜面には沈着しない傾向が顕著となった。福島第一原発の近辺では落下した粒子が多いため，その傾向は目立たないが，20km 以遠になると，その傾向が顕著となり，阿武隈高地や奥羽山脈の東側向き斜面に放射性物質が多く沈着することとなった。また，阿武隈高地を回りこむような風が盆地部分に放射性物質を沈着させたことも確認された。このことから，地形そのものや，それによってもたらされる局所的な風の方が汚染の形状に大きく影響していたことが明らかになった。

また，放射性物質が放出した時刻と沈着した場所の関係を明らかにすることで，移流計算における抵抗などの要素の再検討や，放出量の補正・見直しが可能となる。計算した空間線量と航空機モニタリングとの不整合については地上に沈着してからの放射性物質の移動（二次汚染）も大きく影響していることが示唆された。また，アルゴリズムの面からすると湿性沈着の取扱いに検討の余地があることが示唆された。本研究では乾性沈着と湿性沈着を同一のアルゴリズムで計算したが，今後は特に湿性沈着の取扱いに関するアルゴリズムの改良を行うとともに，二次汚染のメカニズムについても明らかにする必要がある。

更に，本研究では汚染形状の空間分布の特徴とフラクタル次元を算出・整理することに

より、その特徴について定量的な分類を試みた。

その結果、風速そのものとフラクタル次元の相関は弱いものになったが、風速 4.0m/s 以上を高速、風速 4.0m/s 未満を低速と分けると傾向を大別できる結果となった。大気拡散方程式を利用する場合、大気安定度を考慮するが、粒子モデルを利用した場合、風向風速データにより 4.0m/s を境に高速と低速に区別することで汚染形状の特徴量であるフラクタル次元との関連性を見出すことができた。汚染パターンごとの空間分布型について整理した結果、風速（高速/低速）、沈着種類（乾性/湿性）の 4 つの汚染パターンにおいて、それぞれ分布型が異なる傾向が現れた。従来の大気拡散モデルで計算できるのは、正規分布のパフモデル、対数正規のプルームモデルであったのに対し、粒子モデルではフラクタルと指数分布が新たに加わり、その出現条件（流れの形態、沈着の種類）が判明した。それにより 2 ピークやホットスポットの特徴も捉えることができるようになった。相関係数についてもそれぞれ概ね 0.8 以上と高い結果となっていることから、それぞれの分布型へ適合の度合いは非常に高いと言える。以上のことから、汚染形状の分布型を求めることで、発生した汚染のメカニズムを推測できることが示唆された。

## 謝辞

本論文を執筆するにあたり、長崎大学大学院工学研究科 小川進教授には研究テーマの選定から基礎的な考え方、研究の方向性、論文の書き方まで、終始丁寧にご指導、ご助言をいただきました。心より感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 気象庁, 平成 23 年 3 月 地震・火山月報 (防災編), 2011.
- 2) 消防庁災害対策本部, 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災) について (第 155 報), 2017
- 3) 富士通(株)雑誌 FUJITSU 企画編集グループ, 緊急時迅速放射能影響予測 (SPEEDI) ネットワークシステム, FUJITSU2008-9 月号, pp. 482-489, 2008.
- 4) 山澤弘実, 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」パネルディスカッション資料 2 発表資料, 2012.
- 5) 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中への放出量の推定について, 2012.
- 6) 気象庁, 気象庁技術報告, **133**, pp. 11-12, 2012.
- 7) 消防庁災害対策本部, 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災) について (第 119 報), 2012.
- 8) 国土地理院, 東北地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, **86**, pp. 184-272, 2011.
- 9) Minoura, K. and Nakaya, S., Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: some examples from northern Japan., *J. Geology*, **99**, pp. 265-287, 1991.
- 10) 原子力災害対策本部, 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－東京電力福島原子力発電所の事故について－, III, pp. 27-32, 2011.
- 11) 大前研一, 原発再稼働 最後の条件「福島第一」事故検証プロジェクト最終報告書, pp. 31, 2012.
- 12) 経済産業調査室・課, 福島第一原発事故と 4 つの事故調査委員会, 調査と情報, **756**, pp. 4, 2012.
- 13) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, 国会事故調報告書, 徳間書店, 2012.  
<http://naiic.go.jp>
- 14) 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, 政府事故調中間報告, 2012.  
<http://icanps.go.jp/post-2.html>
- 15) 福島原発事故独立検証委員会, 調査・検証報告書, 2012.
- 16) 東京電力, 福島原子力事故調査報告書, 2012.

[http://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1205628\\_1834.html](http://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1205628_1834.html)

- 17) Newton, Newton Press, 2014 年 4 月号.
- 18) NHK スペシャル「メルトダウン」取材班, 福島第一原発事故 7つのなぞ, 講談社, 2015.
- 19) NHK ETV 特集取材班, ホットスポット, ネットワークで作る放射能汚染図, 講談社, pp. 114-144, 2012.
- 20) 中西友子, 土壌汚染, フクシマの放射性物質のゆくえ, NHK 出版, pp. 60-63, 2013.
- 21) T. Ueda, T. Tatsumi et al., 東日本大震災クロニクル, 3.11-5.11, 2011, Disaster, Infrastructure and Society: Learning from the 2011 Earthquake in Japan = 災害・基盤・社会—東日本大震災から考える (1), pp. 13- 134, 2011.
- 22) 防災科学技術研究所社会防災システム研究領域災害リスク研究ユニット, 別表東日本大震災タイムライン (2011 年 3 月 11 日より 6 月 18 日まで: 100 日間の主な出来事), 防災科学技術研究所 主要災害調査, **48**, pp. 1-13, 2011.
- 23) S. Ogawa and K. Saito, Fractal analysis for radioisotope pollution patterns by nuclear power plant accidents, The 35th Asian Conference on Remote Sensing, **35**, 2014.
- 24) K. Saito and S. Ogawa, Fractal dimensions for radioisotope pollution patterns by nuclear power plant accidents, The International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences, XL-7/W3, pp. 919-925, 2015.
- 25) K. Saito and S. Ogawa, Radioactive pollution estimate for Fukushima nuclear power plant by a particle model, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B8, pp. 163-168, 2016.
- 26) K. Saito and S. Ogawa, Estimation of radioactive pollutant advection for Fukushima nuclear power plant by a particle model, The 38th Asian Conference on Remote Sensing, **38**, 2017.
- 27) K. Saito and S. Ogawa, Estimation of radioactive pollution for Fukushima nuclear power plant by a particle model, FORMA, to be submitted.
- 28) S. Ogawa and K. Saito, Fractal analysis for radioisotope pollution patterns by nuclear power plant accidents, The 35th Asian Conference on Remote Sensing, **35**, 2014.
- 29) S. Ogawa and K. Saito, Secondary pollution of Fukushima nuclear power plant, 51st Environmental Research Forum, **51**, pp. 100-102, 2014.
- 30) S. Ogawa and K. Saito, Water environment pollution of Fukushima nuclear power plant, 水文

水資源学会研究発表会, 2014.

- 31) S. Ogawa and K. Saito, Spatial distribution patterns for radioisotope pollution by nuclear power plant accidents, 日本リモートセンシング学会第 53 回学術講演会, 2014.
- 32) 齋藤恵介・大泉純也, ネットワーク型 RTK-GPS を用いた水準測量の可能性, 応用測量論文集, **17**, pp. 41-48, 2006.
- 33) K. Saito, S. Ogawa, M. Aihara, and K. Otowa, Estimates of LAI for forest management in Okutama, The 22nd Asian Conference on Remote Sensing, pp. 600-605, 2001.
- 34) 音羽和弘, 齋藤恵介, 森山萌, 小川進, Landsat TM による奥多摩湖水質モニタリング, 日本リモートセンシング学会年次学術講演会, pp. 3-4, 2001.
- 35) K. Saito, S. Ogawa, and A. Kita, Groundwater recharge estimate with drinking and sewage water leakage in the Nogawa River watershed, Annual Report of Graduate School of Geo-Environmental Science, Risho University, **4**, pp. 36-42, 2004.
- 36) K. Saito, S. Ogawa, and A. Kita, Estimated groundwater recharge in the Nogawa River watershed, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004.
- 37) Saito, K., Y. Yashiro, S. Ogawa, and H. Takamura, Estimated groundwater recharge including water pipes leakage in Kumagaya City, The 24th Asian Conference on Remote Sensing, 2003.
- 38) 菅野正人, 齋藤恵介, 屋代裕介, 小川進, GIS による雨水浸透ますの地下水涵養効果の推定, 日本写真測量学会年次学術講演会, 2004.
- 39) 齋藤恵介, 小川進, 高村弘毅, 熊谷市の上下水道の漏水を含む地下水涵養量の推定, 土木学会第 58 回年次学術講演会, 2003.
- 40) 屋代裕介, 齋藤恵介, 小川進, 熊谷市内における表層土壌の透水係数の空間分布, 日本写真測量学会年次学術講演会, pp. 129-130, 2003.
- 41) 小川進, 齋藤恵介, 上水道の地震時被害想定と応急給水量の推定, 立正大学大学院地球環境科学研究科紀要, **2**, pp. 45-60, 2001.
- 42) 小川進, 齋藤恵介, 土屋十圀, 木下武雄, 川合将文, 篠原斉四郎, 栗原浩, 東京都区部における水道管路の震害影響の推定, 水文水資源学会研究発表会, pp. 199-200, 2002.
- 43) 齋藤恵介, 小川進, 東京都区部における水道管路の震害想定と必要水量の推定, 日本写真測量学会秋季学術講演会, pp. 123-126, 2001.
- 44) K. Saito and S. Ogawa, Hydraulic analysis of submergence damage by Typhoon 9918, Bulletin

- of Geo-Environmental Science, Risho University, **5**, pp. 37-42, 2003.
- 45) K. Saito and S. Ogawa, An estimate of flood damage by 9918-typhoon in New Moji reclaimed land, The 23rd Asian Conference on Remote Sensing, 2002.
- 46) 小川進, 齋藤恵介, 岡田尚樹, 新門司埋立地の高潮水害の再現, 日本写真測量学会年次学術講演会, pp. 147-150, 2010.
- 47) 齋藤恵介, 小川進, 9918号台風による新門司地区水害のシミュレーション, 日本写真測量学会年次学術講演会, 2004.
- 48) 齋藤恵介, 小川進, 9918台風による新門司埋立地水害の推定, 日本写真測量学会学術講演会, pp. 255-258, 2002.
- 49) 中西準子, 花井荘輔他, 大気拡散から暴露まで, ADMER・METI-LIS, 2007.
- 50) 越塚誠一, 柴田和也, 室谷浩平, 粒子法入門, 丸善出版, pp. 1-11, 2014.
- 51) 日本学術会議総合工学委員会, 東京電力福島第一原子力発電所事故によって環境中に放出された放射性物質の輸送沈着過程に関するモデル計算結果の比較, pp. 71-76, 2014.
- 52) R.J. Engelmann, The Calculation of Precipitation Scavenging in Meteorology and Atomic Energy, 1968.
- 53) W.K. Crandall et. al, An Investigation of Scavenging Of Radioactivity From Nuclear Debris Clouds, Research In Progress, Lawrence Livermore Laboratory, 1973.
- 54) G.A. Sehmel, Particle and Gas Dry Deposition: A Review, Atmospheric Environment, **14**, pp. 983-1011, 1980.
- 55) J. Brandt, J.H. Christensen, and L.M. Frohn, Modeling transport and deposition of caesium and iodine from the Chernobyl accident using the DREAM model, Atmos. Chem. Phys. **2**, 397-417, 2002.
- 56) ENVIRON, CAMx 5.40 User's Guide, 2011,  
[http://www.camx.com/files/camxusersguide\\_v5-40.aspx](http://www.camx.com/files/camxusersguide_v5-40.aspx)
- 57) G.A. Grell, S.E. Peckham, R. Schmitz, S.A. cKeen, G. Frost, W.C. Skamarock, and B. Eder, Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. Atmospheric Environment, **39**, 6957-6975, 2005.
- 58) J.H. Seinfeld and S.N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change, John Wiley and Sons, Inc., NY., 1998.

- 59) L. Zhang, S. Gong, J. Padro, and L. Barrie, A sizesegregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module, *Atmos. Environ.*, **35**, 549-560, 2001.
- 60) L. Zhang, J. R. Brook, and R. Vet, A revised parameterization for gaseous dry deposition in airquality models, *Atmos. Chem. Phys.*, **3**, 2067-2082, 2003.
- 61) H. Terada, H. Nagai, A. Furuno, T. Kakefuda, T. Harayama, and M. Chino, Development of worldwide version of system for prediction of environmental emergency dose information: WSPEEDI 2nd version, *Trans. At. Energy Soc. Japan*, **7**, 257-267, 2008 (in Japanese with English abstract).
- 62) G.A. Grell, J. Dudhia, and D.R. Stauffer, A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Tech, Note NCAR/TN-3921STR, **122**, pp. 35, 1994.
- 63) H. Terada and M. Chino, Development of an atmospheric dispersion model for accidental discharge of radionuclides with the function of simultaneous prediction for multiple domains and its evaluation by application to the Chernobyl nuclear accident. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **45**, 920-931, 2008.
- 64) G.A. Sehmel, Particle and gas dry deposition, A review. *Atmos. Environ.* **14**, 983-1011, 1980.
- 65) H.D. Brenk and K.J. Vogt, The calculation of wet deposition from radioactive plumes, *Nuclear Safety*, **22**, 362-371, 1981.
- 66) International Commission on Radiological Protection (ICRP), ICRP Publication 71: Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4 Inhalation Dose Coefficients, *Ann. ICRP*, **25/3-4**, Pergamon, Oxford, U. K., **50**, 1995.
- 67) Maryon, R.H., J. Saltbones, D.B. Ryall, J. Barnicki, H.A. Jakobsen, and E. Berge, An intercomparison of three long range dispersion models developed for the UK meteorological office, DNMI and EMEP. *UK Met Office Turbulence and Diffusion Note*, **234**, ISBN: 82-7144-026-08, pp. 44, 1996.
- 68) R.H. Maryon, F.B. Smith, B.J. Conwy, and D.M. Goddard, The UK nuclear accident response model (NAME), *Progress in Nuclear Energy*, **26**, 85-104, 1992.
- 69) W. Klug, G. Graziani, G. Gripa, D. Pierce, and C. Tassone, Evaluation of long range atmospheric transport models using environmental radioactivity data from the Chernobyl



- accident, the ATMES report, Technical report, Elsevier Applied Science, 1992.
- 70) T. Iwasaki, T. Maki, and K. Katayama, Tracer transport model at Japan Meteorological Agency and its application to the ETEX data, *Atmos. Env.*, **32**, 4285-4295, 1998.
- 71) N. Seino, H. Sasaki, J. Sato, and M. Chiba, High-resolution simulation of volcanic sulfur dioxide dispersion over the Miyake Island, *Atmos. Env.*, **38**, 7073-7081, 2004.
- 72) I. Takano, Y. Aikawa, and S. Gotoh, Improvement of photochemical oxidant information by applying transport model to oxidant forecast, *CAS/JSC WGNE Res. Act. Atmos. Ocea. Model.*, **37**, 5.35-5.36, 2007.
- 73) T. Shimbori, Y. Aikawa, and N. Seino, Operational implementation of the tephra fall forecast with the JMA mesoscale tracer transport model, *CAS/JSC WGNE Res. Act. Atmos. Ocea. Model.*, **39**, 5.29-5.30, 2009.
- 74) T. Kitada, Modelling of transport, reaction and deposition of acid rain, *Kishou Kenkyu Note*, **182**, 95-117, 1994 (in Japanese).
- 75) M. Kajino, Y. Inomata, K. Sato, H. Ueda, Z. Han, J. An, G. Katata, M. Deushi, T. Maki, N. Oshima, J. Kurokawa, T. Ohara, A. Takami, and S. Hatakeyama, Development of the RAQM2 aerosol chemical transport model and predictions of the Northeast Asian aerosol mass, size, chemistry, and mixing type, *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 11833-11856, 2012. doi:10.5194/acp-12-11833-2012.
- 76) K. Adachi, M. Kajino, Y. Zaizen, and Y. Igarashi, Emission of spherical cesium-bearing particles from an early stage of the Fukushima nuclear accident, *Nature Scientific Reports*, 2013.
- 77) M. Kunii, Mesoscale data assimilation for a local severe rainfall event with the NHM-LETKF system, *Weather and Forecasting*, e-View, 2013.  
doi: <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-13-00032.1>
- 78) W. C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M.G. Duda, X.Y. Huang, W. Wang, and J.G. Powers, A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech. **32** Note NCAR/TN-475+STR, pp. 113, 2008.
- 79) D. Byun, and K. Schere, Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, *Appl. Mech.*, 51-77, 2006.

- 80) B. Sportisse, A review of parameterizations for modeling dry deposition and scavenging of radionuclides, *Atmospheric Environment*, **41**, pp. 2683-2698, 2007.
- 81) H. Terada, G. Katata, M. Chino, and H. Nagai, 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**, pp. 141-154, 2012.
- 82) S.-U. Park, A. Choe, M.-S. Park, and Y. Chun, Performance tests of the Asian Dust Aerosol Model 2 (ADAM2), *J. of Sustainable Energy and Environ.*, **1**, pp. 77-83, 2010.
- 83) A. Stohl, P. Seibert, G. Wotawa, D. Arnold, J. F. Burkhart, S. Eckhardt, C. Tapia, A. Vargas, and T. J. Yasunari, 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**, pp. 2313-2343, 2012.
- 84) J.S. Chang, R.A. Brost, I.S.A. Isaksen, S. Madronich, P. Middleton, W.R. Stockwell, and C.J. Walcek, A three-dimensional Eulerian acid deposition model: Physical concepts and formulation, *J. Geophys. Res.*, **92**, 14, 681-700, 1987.
- 85) 木村真三, 「放射汚染地図」の今, 講談社, pp. 70, 2014.
- 86) 国土地理院, 座標変換ソフトウェア TKY2JGD,  
<http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/ky2jgd.html>
- 87) 菰口恵, ConvBLXY2000—座標変換関数アドイン, Ver. 2.00
- 88) 気象庁予報部, 毎時大気解析 GPV の提供について, 配信資料に関する技術情報 (気象編) **196**, 2005.  
<http://www.data.jma.go.jp/add/suishin/jyouhou/pdf/196.pdf>
- 89) 国立情報学研究所, 東日本大震災デジタルアーカイブ : Digital Archives of 2011 Great East Japan Earthquake.  
<http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/>
- 90) 気象業務支援センター, 解析雨量.  
<http://www.jmbasc.or.jp/jp/offline/cd0100.html>
- 91) 国土政策局, 国土数値情報, 標高・傾斜度 3 次メッシュデータ.  
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G04-a.html>

- 92) 東京電力, 福島第一原子力発電所構内でのモニタリングポスト計測状況.  
<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/index-j.html>
- 93) 原子力規制委員会, 文部科学省及び米国エネルギー省航空機による航空機モニタリングの測定結果について.  
[http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/4000/3710/24/1305820\\_20110506.pdf](http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/4000/3710/24/1305820_20110506.pdf)
- 94) 内田篤志, フラクタル解析とゆらぎ解析を用いた多様な環境共存場の状態評価に関する研究, 長崎大学学術研究成果リポジトリ, 2002.
- 95) 高安秀樹・高安美佐子, フラクタルって何だろう, ダイヤモンド社, pp. 28-61, 1993.
- 96) マンフレッド・シュレーダー (竹迫一雄訳), フラクタル・カオス・パワー, 森北出版, pp. 140-250, 1997.
- 97) 大野博之, 河川構成要素の自然度評価の試み, 応用地質年報, 8, pp. 39-63, 1997.
- 98) 久保田哲也, 地すべり Fractal 特性の危険度調査指標への適用について, 地すべり, 31, 3, pp. 9-15, 1994.
- 99) 佐々木靖人・阿部昌彦・平野勇, 斜面崩壊の規模と発生数に関するフラクタル, 応用地質, 32, 3, pp. 100-109, 1991.
- 100) 脇田英治・松尾稔, 不同沈下のフラクタル的特性とそれを応用した沈下推定, 土木学会論文集, 529, III-33, pp. 69-81, 1995.
- 101) 大野博之・小島圭二, 岩盤中の割れ目系に見られるフラクタル, 応用地質, 29, 4, pp. 11-18, 1988.
- 102) 大野博之・小島圭二, 岩盤割れ目のフラクタル (その1), 応用地質, 33, 3, pp. 133-136, 1992.
- 103) 大野博之・小島圭二, 岩盤割れ目のフラクタル (その2), 応用地質, 34, 2, pp. 58-72, 1993.
- 104) 佐藤邦明・市川正憲, 岩盤フラクチャーのフラクタル次元と水理特性の相関, 土と基礎, 35, 12, pp. 13-18, 1988.
- 105) 平田隆幸, 断層とフラクタル, 物理探査, 41, 6, pp. 401-408, 1988.
- 106) 阿部忠行・小川進, 舗装ひびわれのフラクタル解析, 土木学会論文集, 442/V-16, pp. 119-126, 1992.
- 107) 小川進・阿部忠行, 舗装の縦断凹凸のフラクタルによる評価, 土木学会論文集, 490/V-

23, pp. 131-136, 1994.

108) 佐藤隆洋・磯打拓也他, フラクタル解析を用いた景観の数値化と適用事例, こうえいフォーラム, **16**, pp. 1-7, 2007.

109) 酒見浩平, フラクタル解析を用いた日本の都市空間の複雑さに関する研究, 九州大学修士論文予稿集, 2012.

110) 熊沢翔太郎, 空間解析の結果から見た日本の都市空間の特性に関する研究, 九州大学修士論文予稿集, 2015.

111) 高安秀樹, フラクタル, 朝倉書店, pp. 18-20, 1986.

112) 石村貞夫・石村園子, フラクタル数学, 東京書籍, pp. 246-254, 1990.

113) 芹沢弘, 3次元フラクタル紀行, 森北出版, pp. 102-105, 1995.

114) 気象庁, 気象レーダー.

<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/radar/kaisetsu.html>