

## 特集：東日本大震災特集 放射性物質の健康影響

## ＜総説＞

## 福島第一原子力発電所から放出された放射性物質の大気中の挙動

大原利眞, 森野悠, 田中敦

独立行政法人国立環境研究所

Atmospheric behavior of radioactive materials  
from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

Toshimasa OHARA, Yu MORINO, Atsushi TANAKA

National Institute for Environmental Studies

## 抄録

平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災によって発生した、東京電力福島第一原子力発電所の事故によって、大量の放射性物質が大気中に放出された。放出された放射性物質は、福島県だけでなく、東北南部や関東地方を含む広い範囲で、土壌、水道水、牧草、農産物、畜産物、上下水道汚泥など様々な環境汚染を引き起こしている。また、将来的に、半減期の長い<sup>137</sup>Cs などによる長期の環境影響が懸念される。本稿では、これまでに公表された放射性物質の放出量や測定結果に係る各種資料、及び、大気シミュレーション結果に基づき、福島原発から放出された放射性物質の大気中の挙動に関する知見を整理する。

福島原発から 4 月初めまでに大気中に放出された<sup>131</sup>I と<sup>137</sup>Cs の総量は、それぞれ  $1.5 \times 10^{17}$  Bq と  $1.5 \times 10^{16}$  Bq 程度と推計され、特に 3 月 15 日午前中の 2 号機からの放出が多かったと考えられている。放射性物質の大気への放出によって、茨城県北部で測定された空間線量には 3 つの大きなピーク（3 月 15 日、16 日、21 日のいずれも午前中）が認められる。これらのピークは、放射性プルームが北風によって南に運ばれたことと、このプルームが降水帯に遭遇して放射性物質が地表面に湿性沈着したことによって説明できる。また、筑波での測定結果は、放射性核種の構成比が時間的に大きく変化すること、<sup>131</sup>I のほとんどはガス状であるが一部は微小粒子として存在しているのに対し放射性セシウム（<sup>134</sup>Cs と<sup>137</sup>Cs）は数ミクロンの粒子として存在していることを示す。

大気シミュレーションによって計算された<sup>131</sup>I と<sup>137</sup>Cs の沈着量の空間分布によると、放射性物質の影響は福島県以外に、宮城県や山形県、関東地方、中部地方東部など広域に及んでいる。また、時間的には、空間線量のピークが認められた 3 月 15 日～16 日と 3 月 21 日以降の数日の 2 期間で集中している。更に、3 月に放出された<sup>131</sup>I の 35%、<sup>137</sup>Cs の 27% がモデル領域内に沈着したこと、<sup>131</sup>I 沈着量のほとんどは乾性沈着したのに対して<sup>137</sup>Cs は湿性沈着が支配的であること、放出された<sup>131</sup>I と<sup>137</sup>Cs のうち南東北と関東の 1 都 10 県に沈着した割合はどちらも 13% 程度であり、<sup>131</sup>I は福島県、茨城県、栃木県、<sup>137</sup>Cs は福島県、宮城県、群馬県、栃木県などで沈着量が多いことなどが示された。

キーワード：放射性物質、原子力発電所事故、大気シミュレーション、湿性沈着、放射性プルーム

## Abstract

The nuclear accident in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP) accompanying the Great Tohoku Earthquake and Tsunami on 11 March 2011 resulted in the release of enormous amounts of radionuclides into the atmosphere. Radionuclides cause many types of radioactive contamination in soil, water, pasture, agricultural products, livestock products, sludge from

連絡先：大原利眞

〒 305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

16-2 Onogawa, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken 305-8506, Japan.

Tel: 029-850-2491

E-mail: tohara@nies.go.jp

[平成 23 年 8 月 25 日受理]

water and sewage treatment, and others in Fukushima prefecture as well as over a wide area, including South Tohoku and the Kanto region. This paper presents a summary of the atmospheric behaviors of radioactive materials from the FDNPP based on publications related to emissions estimates and field measurements, as well as the results of numerical simulation.

The total amounts of  $^{131}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$  emitted from the FDNPP into the atmosphere until the beginning of April were estimated at around  $1.5 \times 10^{17}$  Bq and  $1.5 \times 10^{16}$  Bq, respectively. A huge amount of emission from the second reactor in the morning of March 15 was reported by the Nuclear and Industrial Safety Agency. There were three sharp peaks in radioactivity in the atmosphere measured in the northern part of Ibaraki prefecture between March 15 and April 20. The reasons for these peaks, seen on the mornings of March 15, 16, and 21 were considered to be as follows: (1) the radioactive plume was transported from the FDNPP to northern Ibaraki due to the north wind, and (2) the radionuclides in the plume were deposited on the Earth's surface by wet deposition when it encountered the rain band. The atmospheric concentrations of radionuclides measured in Tsukuba demonstrated that the radionuclide composition showed a large degree of temporal variability and the gaseous fraction of  $^{131}\text{I}$  was dominant, while  $^{137}\text{Cs}$  was present all in particulate matter with diameters of several micrometers.

Simulated areas of high  $^{131}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$  deposition extend widely from Fukushima prefecture to the surrounding area (southern Tohoku, Kanto, and eastern Chubu). The high deposition rates were concentrated in two periods from March 15 – 16 and a few days since March 21 when the peaks of radioactivity in the atmosphere were detected. On average, the amounts of deposition for  $^{131}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in ten prefectures in southern Tohoku and Kanto were about 13% of the emissions from FDNPP for both species.  $^{137}\text{Cs}$  deposition rates are also the highest in Fukushima, followed by Miyagi, Gunma, and Tochigi.

**Keywords:** radioactive materials, atmospheric simulation, nuclear accident, wet deposition, radioactive plume

## I. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災によって発生した、東京電力福島第一原子力発電所（以下、福島原発）の事故によって、大量の放射性物質が大気中に放出された。放出された放射性物質は、福島県だけでなく、岩手県、宮城県、関東 1 都 6 県、静岡県などの広い範囲で、土壌、水道水、牧草、農産物、畜産物、上下水道汚泥など様々な環境汚染を引き起こしている。また、将来的に、半減期の長い  $^{137}\text{Cs}$  などによる長期の環境影響が懸念される。

本稿では、これまでに公表された放射性物質の放出量や環境測定結果に係る各種資料、私達の研究チームにおいて進めてきた大気シミュレーション結果に基づき、福島原発から放出された放射性物質の大気中の挙動に関する知見を整理する。

## II. 原子力発電所から放出された放射性物質

福島原発からの放出量について、これまでに発表された資料をもとに整理する。最も早く発表されたのは、原子力安全委員会による 4 月 12 日の「推定的試算値」である [1]。この推計結果によると、3 月 11 日から 4 月 5 日までの大気中への放出総量は、 $^{131}\text{I}$  が  $1.5 \times 10^{17}$  Bq、 $^{137}\text{Cs}$  が  $1.2 \times 10^{16}$  Bq と試算された。（独）日本原子力研究開発機構は、その一か月後の 5 月 12 日に改訂値を発表しているが、その結果は 4 月 12 日発表の結果とほぼ同様であり、4 月 5 日までの総放出量は、 $^{131}\text{I}$  と  $^{137}\text{Cs}$  はそれぞれ  $1.5 \times 10^{17}$  Bq と  $1.3 \times 10^{16}$  Bq とされている（図 1） [2]。これらの 2 種類の試算結果は、大気モデル計算値と環境モニタリングデータの比較から逆推計されたものであり、その不確実性

は大きいと考えられ、さらに、3 月 14 日以前の放出量は環境モニタリングデータが無いために対象外であることに注意を要する。一方、原子力安全・保安院は 6 月 6 日に、1 号機～3 号機の炉心状態の解析結果を発表し、その中で、3 月 16 日 0 時までの放射性物質の大気中への放出量の推計結果を示している [3]。その結果によれば、 $^{131}\text{I}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の放出量はそれぞれ  $1.6 \times 10^{17}$  Bq と  $1.5 \times 10^{16}$  Bq であり、対象期間は異なるものの、前述した原子力安全委員会及び日本原子力研究開発機構の推計値に極めて近い。原子炉別に見ると、1 号機～3 号機のそれぞれからの放出量は、 $^{131}\text{I}$  については  $1.2 \times 10^{16}$  Bq、 $1.4 \times 10^{17}$  Bq、 $7.0 \times 10^{15}$  Bq、 $^{137}\text{Cs}$  については  $5.9 \times 10^{14}$  Bq、 $1.4 \times 10^{16}$  Bq、 $7.1 \times 10^{14}$  Bq であり、両物質ともに 2 号機からの放出が多かったことを示す。

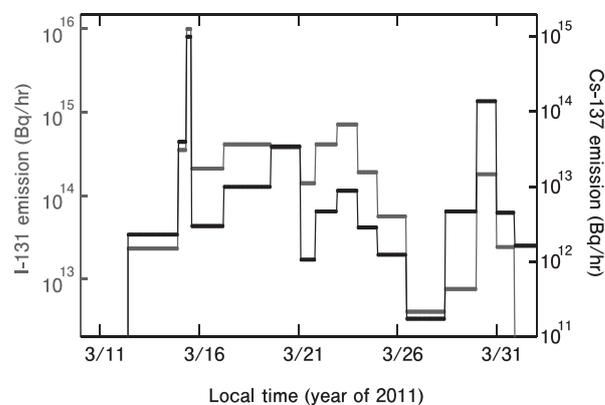


図 1 福島原発からの  $^{131}\text{I}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の大気放出量。  
出典：原子力研究開発機構 [2]

次に、放出量の時間変化に着目する。前出の(独)日本原子力研究開発機構の資料[2]によると、放出量は3月15日に最も多く、この大量放出は2号機の圧力抑制室の爆発音以降であり、2号機からの放出の可能性が高いとしている。原子力安全・保安院の解析結果[3]でも同様に、3月15日の2号機からの大量放出が示されているが、同日0時頃に実施された格納容器ドライウェルベント直後の放出が最も多く、6時頃の圧力抑制室の爆発音後の放出は、それに比べると少ない結果となっている。このように、方法論が異なる2種類の推計結果は2号機からの放出が多かったことでは共通しているが、その原因については異なる見方をしていることになり、今後の詳細な解析が待たれる。

それでは、<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Cs以外には、どのような放射性核種が大気中に放出されたのであろうか?表1には、福島原発から放出された放射性物質の推計量と原発敷地内で測定された放射性核種の大気濃度の1例を示す。福島原発から放出された放射性物質は、<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csの他には、<sup>134</sup>Cs、放射性テルル類、<sup>133</sup>Xeのような希ガスなどが多いと推計されている。一方、福島原発の放出源近くの大気濃度結果[4]からは、放射性ヨウ素(<sup>131</sup>I, <sup>132</sup>I, <sup>133</sup>I)、放射性セシウム(<sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs)、<sup>132</sup>Teなどが検出されており、放出量の推計結果との大きな矛盾はない。

表1 福島原発から放出された放射性物質の推計値と原発敷地内で測定された放射性核種の大気濃度の例。

| 核種                 | 放出量(Bq)                   |                          | 大気濃度 <sup>***)</sup> (Bq cm <sup>-3</sup> ) |                        |
|--------------------|---------------------------|--------------------------|---|------------------------|
|                    | 日本原子力研究開発機構 <sup>*)</sup> | 原子力安全・保安院 <sup>**)</sup> | ガス  | 粒子                     |
| <sup>131</sup> I   | 1.5 × 10 <sup>17</sup>    | 1.6 × 10 <sup>17</sup>   | 5.9 × 10 <sup>-3</sup>                      | 1.1 × 10 <sup>-3</sup> |
| <sup>132</sup> I   | —                         | 4.7 × 10 <sup>14</sup>   | 2.2 × 10 <sup>-3</sup>                      | 3.8 × 10 <sup>-4</sup> |
| <sup>133</sup> I   | —                         | 6.8 × 10 <sup>14</sup>   | 3.8 × 10 <sup>-5</sup>                      | —                      |
| <sup>134</sup> Cs  | —                         | 1.8 × 10 <sup>16</sup>   | ND  | 2.2 × 10 <sup>-3</sup> |
| <sup>137</sup> Cs  | 1.3 × 10 <sup>16</sup>    | 1.5 × 10 <sup>16</sup>   | ND  | 2.4 × 10 <sup>-3</sup> |
| <sup>106</sup> Ru  | —                         | 2.1 × 10 <sup>9</sup>    | 2.1 × 10 <sup>-4</sup>                      | —                      |
| <sup>129m</sup> Te | —                         | 3.3 × 10 <sup>15</sup>   | ND  | —                      |
| <sup>132</sup> Te  | —                         | 7.6 × 10 <sup>14</sup>   | 6.7 × 10 <sup>-5</sup>                      | —                      |
| <sup>144</sup> Ce  | —                         | 1.1 × 10 <sup>13</sup>   | ND  | —                      |
| <sup>133</sup> Xe  | —                         | 1.1 × 10 <sup>19</sup>   | —   | —                      |

<sup>\*)</sup> 日本原子力研究開発機構の2011年5月12日発表資料<sup>2)</sup>より。

<sup>\*\*)</sup> 原子力安全委員会の2011年4月12日発表資料<sup>1)</sup>より。

<sup>\*\*\*)</sup> 原子力安全・保安院の2011年3月25日発表資料<sup>4)</sup>より。福島原発敷地内において、3月19日11:53-12:13に採取された大気試料の測定結果。

### Ⅲ. 放射性物質の大気中の広がり と沈着

#### 1. 大気中の挙動

図2は、福島原発から放出された放射性物質の大気中における挙動を示す模式図である。大気中に放出された放射性物質は、風によって風下に運ばれながら(移流)、風の乱れによって水平・鉛直方向に広がる(拡散;以後、移

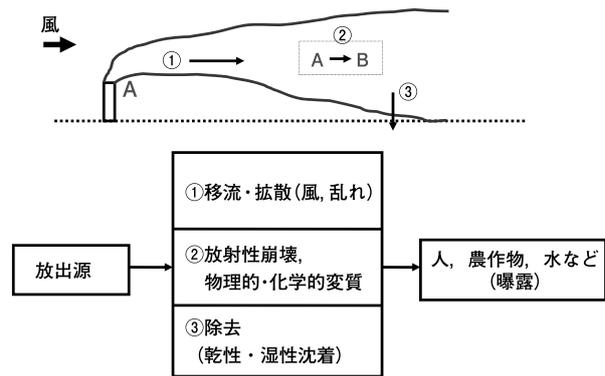


図2 放射性物質の大気中の挙動(模式図)。

流と拡散を合わせて輸送と呼ぶ)。大気中を輸送される過程において、放射性物質は物質ごとに異なる半減期で放射性崩壊して徐々に減衰する。また、大気中でガスと粒子の両方の状態で存在しうる<sup>131</sup>Iのような物質の場合には、ガス/粒子変換を引き起こす。最終的に、大気中の放射性物質は、風の乱れ等による鉛直物質輸送によって(乾性沈着)、あるいは、降水に取り込まれて(湿性沈着)大気中から除去され、地表面に負荷される。

風が一定方向に吹いている場合には、放射性物質はブルーム(羽毛)状に大気中を輸送される。これが、いわゆる放射性ブルームである。しかし、風が時空間的に一定・一様に吹くことは少なく、地形や地表面状態、海陸風や山谷風などの局地風、高低気圧などの総観気象などの影響を受けて複雑に変化する。福島原発周辺でも、西側にある山岳や局地風の影響を受けて複雑な気流場が形成され、このために放射性物質は複雑に輸送されたと考えられる。放射性物質は、大気中を輸送される過程において、乾性・湿性沈着によって大気中から除去されるが、一般的に、粒子はガスよりも乾性沈着しにくく、湿性沈着しやすい。このため、大気中で粒子と存在している<sup>137</sup>Csは、乾性沈着よりも湿性沈着によって大気中から除去されやすく、その大気濃度が高い所で雨・雪が降り始めた場合に、沈着量が大きな地域(いわゆる「ホットスポット」)が出現する。一方、<sup>131</sup>Iは乾性沈着しやすいため、その沈着量は<sup>137</sup>Csほど降水現象に依存しない。

#### 2. 空間線量の時間変化

図3は、日本原子力研究開発機構のモニタリングポストで計測された空間線量率の時間変化を示す[5]。茨城県北部の福島原発近くにあるMP-19, 17, 7, 5, 2の線量に着目すると、3月15日から4月20日の間に、大きな3つのピークが認められる。第一のピークは、3月15日午前中に計測された期間最高のピークであり、MP-19では最高値で5.5 μSv/hを超える値が観測されている。その後、一旦は減少するが、再び、3月16日の午前中に上昇して2番目のピークを示し、その後の5日間程度はゆっくりと減少する。そ

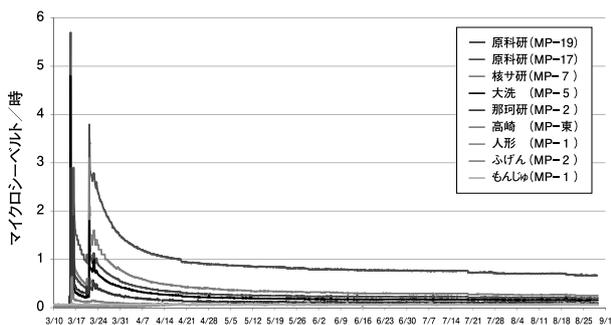


図3 日本原子力研究開発機構のモニタリングポストにおける線量率の推移。 出典：日本原子力研究開発機構 [5]

して、3番目は、3月21日午前中のピークである。このピークの特徴は、高レベルの線量がピーク後の数日間、継続したことである。

これらの時間変動は基本的に、福島原発から放出された放射性プルームの通過と降水によって説明できる。即ち、3月15日のピークは、大気中の放射性物質が北風によって南に運ばれてモニタリングポストを通過したことを示し、通過後の減少は、大気濃度が低下するとともに、乾性沈着した半減期の短い<sup>131</sup>Iのような放射性物質が放射崩壊したことを意味する。一方、3月16日と21日のピークは、15日のピークとは異なり、この時に降り始めた雨の影響が大きかったと考えられる。即ち、北風によって放射性プルームが通過したことによる線量の増加分に、降水によって湿性沈着して地表面に降下した放射性物質による線量の増加分が加算された結果と考えられる。特に、3月21日には、ピーク後の線量の時間減少が緩やかであることから、大量の放射性物質が地表面に湿性沈着したことが伺える。3月21日のピーク以降は、プルームもしくは湿性沈着の影響による多数の小さなピークが認められるが、全体の傾向として長期減少傾向を示し、新たに放出された放射性物質の影響が小さいことを示している。なお、3月15、16、21日の3つのピークには、低気圧が福島原発近くを通過したことが深く関係しており、北風によって放射性プルームが南に運ばれたことも、降水によって放射性物質が湿性沈着したことも、そのためである。

### 3. 筑波での大気測定結果

筑波の高エネルギー加速器研究開発機構と国立環境研究所は、事故直後から空間線量と大気中の放射性核種を測定し、分析結果をホームページで公開している [6,7]。図4は、3月14日から一ヶ月間の空間線量の時間変化 (図4(a))、<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csの大気濃度の時間変化 (図4(b))、及び大気中放射性核種の構成比 (図4(c))を示す。空間線量 (図4(a)) [8, 9]には、図3と同様に、3月15日と16日の午前中の鋭いピーク、3月21~22日の上昇とその後の緩やかな減少が認められる。このような線量の上昇時には、<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csの大気濃度も上昇している (図4(b)) ことから、放射性プルー

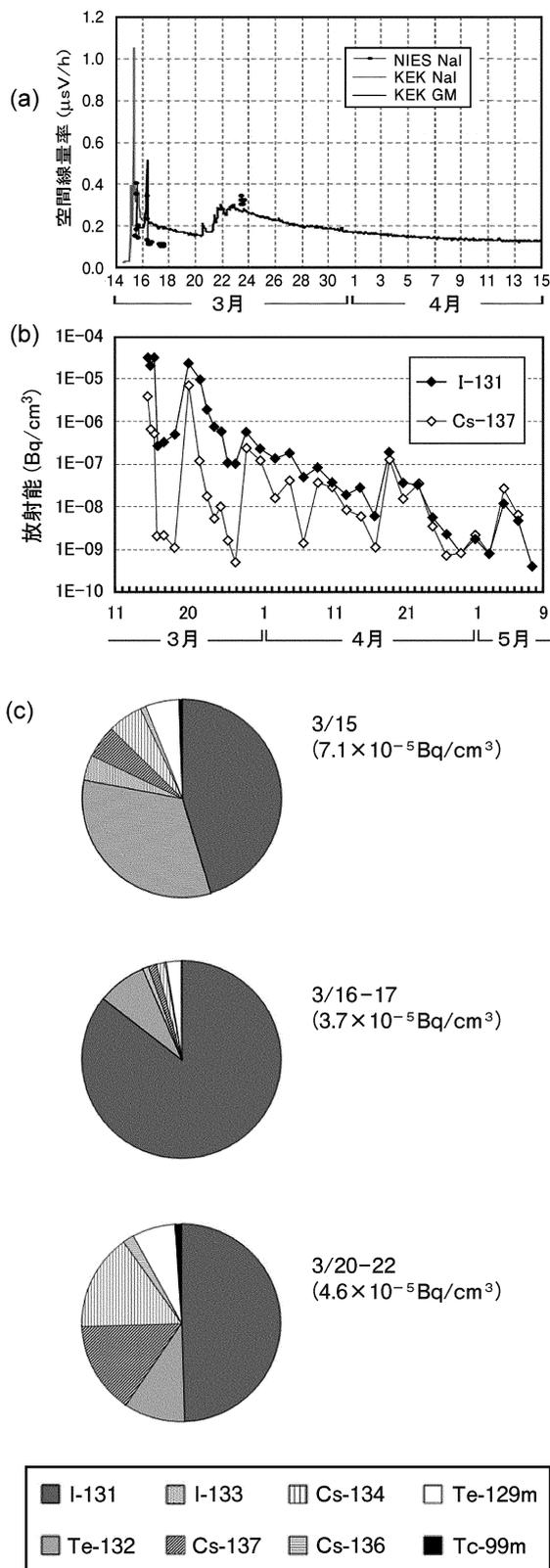


図4 筑波で測定された空間線量の時間変化 (図(a)) [8, 9]、<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csの大気濃度の時間変化 (図(b)) [7]、及び大気中放射性核種の構成比 (図(c)) [7]。

ムが通過したことによる影響が大きかったと考えられる。4月上旬までの<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csの大気濃度の特徴は大きく異なり、<sup>131</sup>Iに比べて<sup>137</sup>Csの時間変動は大きく、また、濃度レベルは低い。しかし、4月中旬以降には、時間変動も濃度レベルもともに両核種間の違いが小さくなる。このような違いを生じる原因には、福島原発内の放出源の違いや、<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csの物性/沈着過程の違いを反映している可能性が考えられるが、今後解明すべき課題である。<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csの濃度比だけでなく、その他の放射性核種も含めて、構成比は時間的に大きく変化する(図4(c))。3月15日には<sup>131</sup>Iと<sup>132</sup>Teが多く、両者で8割程度を占めるが、放射性セシウムや<sup>129m</sup>Teの割合も比較的多い。それに対して、3月16日には<sup>131</sup>Iが多くて8~9割を占め、放射性セシウムは少ない。一方、3月20-22日には、<sup>131</sup>Iが半分、<sup>132</sup>Teが1割程度であり、放射性セシウムが3割程度を占める。また、図には示さないが、線量の時間変化が少ない(即ち、放射性物質の大気濃度が低い)期間には<sup>131</sup>Iが9割以上を占め、その他の核種の存在量は非常に少ないことが特徴的である。

筑波では、大気中の放射性核種の粒径分布も測定している。図5は、4月4~11日に、12段のインパクターと活性炭繊維フィルターのセットで測定された粒径分布を示

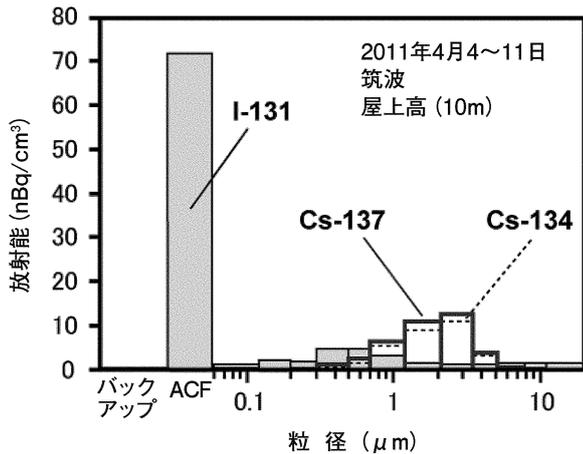


図5 筑波で測定された大気中放射性核種の粒径分布。

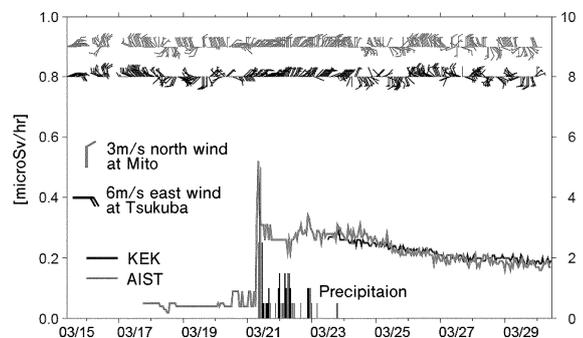


図6 3月21日前後に筑波付近で測定された空間線量、雨量、風の時間変化。  
 出典：(線量) 高エネルギー研究所(KEK) [6]、産業技術総合研究所(AIST) [10] (風向・風速、雨量) 気象庁 [11]

す。この結果によれば、<sup>131</sup>Iのほとんどはガス状であるが一部は微小粒子として存在していること、放射性セシウム(<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Cs)は数ミクロンの粒子として存在していることがわかる。

一方、図6は、3月21日前後に筑波で測定された空間線量と降水量、風の時間変化の関係を示す。3月21日早朝に線量が急激に上昇して鋭いピークとなり、その後、やや減少するものの、数日間にわたって高いレベルで推移しているのが特徴的である。21日早朝のピークは、低気圧の通過に伴う北風によって輸送された放射性プルームの到達と降水の開始がほぼ重なったことが原因である。また、その時に地表面に湿性沈着した放射性物質の影響、及び、その後の新たな放射性物質の流入と降水の継続によって、高い線量レベルが数日間、継続したものと考えられる。

4. 空間線量の空間分布

文部科学省と米国DOEが実施した航空機モニタリングによる、福島原発周辺の線量マップ(7月2日時点)を図7に示す[12]。空間線量は、福島原発を中心として北西方向の地域で高い。この特徴は、日本原子力研究開発機構のWSPEEDI(緊急時環境線量情報予測システム世界版)に

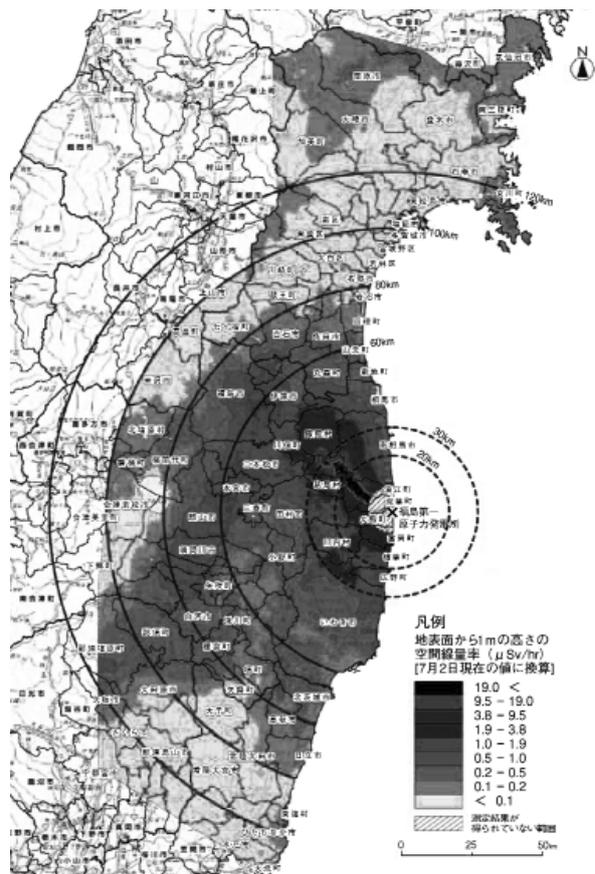


図7 文部科学省及び宮城県による航空機モニタリングの結果(福島第一原子力発電所から100、120km範囲内及び宮城県北部における空間線量率) [12]。

よってほぼ再現されており、3月15日午後放出されたプルームが西から北西方向に流れ、夕方以降の降雨帯と重なって湿性沈着したものと解釈されている[13]。また、飯館村あたりから中通り南部まで南西方向にやや高い線量の地域が伸びているが、この原因としては、3月15日午前放出されたプルームが当日15時頃に湿性沈着した影響が大きいと考えられている[13]。

一方、関東地方を含むより広域的な空間分布についても、文部科学省や地方自治体の定点測定や移動測定の結果を重ね合わせてマップ化(例えば、[14])することにより、その全体像が把握できるようになりつつある。この線量マップによると、原発周辺以外で線量が比較的高い地域として、福島県中通南部、北関東、宮城県南部、茨城県南西部から千葉県北西部などをあげることができ、放射性物質が南東北と関東の広い地域に、まだら状に沈着したことが推測できる。なお、このようなマップでは、測定機や測定法の違い、器差を考慮せずに測定値が表示されていることが多いので注意を要する。

#### IV. 放射性物質の広域シミュレーション

大気中に放出された放射性物質の挙動を把握するためには、大気シミュレーションが有効である。わが国における放射性物質の大気シミュレーションモデルとしては、文部科学省のSPEEDI(緊急時環境線量情報予測システム)[15]と前述のWSPEEDIが良く知られている。どちらのモデルも基本的には同様な構造で、気象庁の数値予報データ(GPV)をもとに地域気象モデルを使用して風や降水などの地域気象を計算し、この気象データと放出量データを用いて、ラグランジュ型の物質輸送モデルにより、放射性物質の輸送過程を計算する。SPEEDIのグリッドは2km、計算対象領域は福島県東端を含む東西100km×南北100kmであり、原発周辺の比較的狭い対象領域内で精緻に予測計算することを主眼としている。一方、WSPEEDIのグリッドは3km、計算対象領域は東西390km×南北570kmであり、東北地方南部や関東地方を含む比較的広い範囲での放射性物質の挙動を予測計算することを目的としている。

本章では、WSPEEDIと同様の計算領域において、広域大気汚染予測用の大気シミュレーションモデルを用いて、3月10日～3月30日における放射性物質の広域的な挙動を解析した結果について紹介する。[16]

##### 1. モデルの概要

使用した大気シミュレーションモデルは、米国EPAで開発された3次元化学輸送モデル(オイラー型モデル)のCMAQ[17]である。このモデルを使用し、大気中の放射性物質の移流・拡散・放出・乾性/湿性沈着・放射性崩壊の各過程を考慮した。グリッドは6km、計算対象領域は関東・南東北地方を含む東西700km×南北700kmである。計算対象物質は<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csであり、それぞれ、ガスと粒径1μmの粒子として大気中に存在するものと仮定した。

CMAQで使用する気象データは、GPVデータをもとに地域気象モデルWRF[18]を使用して計算した。また、放出量データには、(独)日本原子力研究開発機構の2011年5月12日発表データ[2](2章参照)を使用した。

モデルの結果を検証するために、文部科学省が全国46都道府県で実施した定時降水物モニタリングデータ[19]、並びに、筑波で観測された<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csの大気濃度データ(図4(b)参照)と比較し、観測された降水量と濃度の時空間変化やレベルを、モデルがほぼ再現していることを確認した。しかし、放出条件(量、時間変動、放出高度)、気象場(特に、風と降水)、沈着パラメータなどにおける不確実性が大きい結果であることに留意されたい。

##### 2. モデル計算された沈着量の空間分布

モデルで計算された<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csの沈着量の空間分布によると、放射性物質の影響は福島県以外に、宮城県や山形県、関東1都6県、静岡県、山梨県、長野県、新潟県など広域に及んでいる。図8は、沈着量が多かった3月23日までの<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csの累積沈着量の空間分布を示す。大気中の<sup>131</sup>Iはガスとして存在する割合が高いため、乾性沈着が多く、湿性沈着は少ない。そのため、沈着量は大気濃度に強く依存し、福島原発からの放射性プルームが何度となく通過した福島県東部や茨城県などの関東地方北東部で沈着量が多い。一方、大気中の<sup>137</sup>Csは粒子として存在するため、乾性沈着が少なく、湿性沈着が多い。そのため、沈着量は大気濃度と降水量の両方に依存し、大気濃度が高い降水域で沈着量が増大する。このことを反映して、原発周

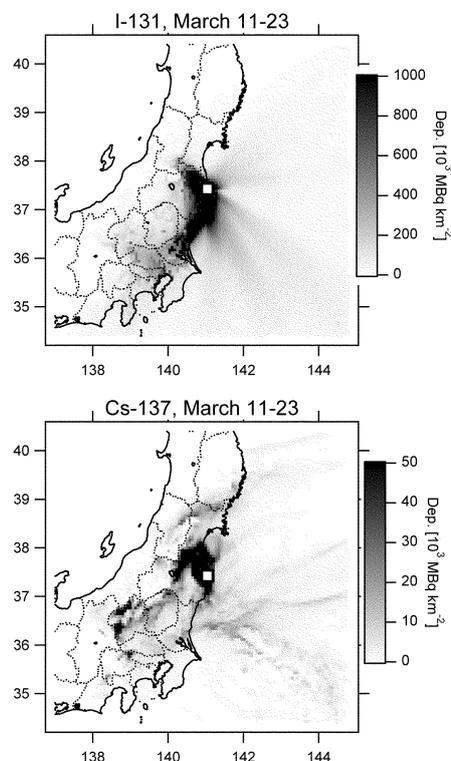


図8 3月11-23日に地表面に沈着した<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csの積算量。

辺だけでなく、風によって放射性物質が輸送され、且つ、降水があった福島県東部、宮城県南部、関東北部・西部などの地域で沈着量が多い。これらの空間的な特徴は、3.4節で概説した線量マップ（4月以降は半減期の長い放射性セシウムの影響が支配的と考えられる）とほぼ一致する。但し、線量マップで比較的高い線量になっている茨城県南西部から千葉県北西部では、モデル沈着量は目立った増加を示しておらず、この特徴を作りだした3月21日の事象をモデルは正確に再現できていないと考えられる。

それでは、放射性物質は、いつ沈着したのであろうか？モデル結果によると、図3や図4(a)において空間線量のピークが認められた3月15日～16日と3月21日以降の数日の2期間で集中していることがわかる（図は示さない）。即ち、福島原発周辺において、高濃度の放射性プルームが通過し、更に、その通過と降水帯のタイミングが合った2期間に、大量の放射性物質が沈着したと言える。

図9は、3月11-29日にモデル領域内の地表面に沈着した放射性物質の総量とプロセス別・地域別の割合を示す。放出された<sup>131</sup>Iの35%、<sup>137</sup>Csの27%がモデル領域内に沈着し、それ以外はモデル領域外（ほとんどが太平洋上）に流出した。領域内に沈着した<sup>131</sup>Iのほとんどは乾性沈着したものであるのに対して、<sup>137</sup>Csは湿性沈着が支配的である。また、放出された<sup>131</sup>Iと<sup>137</sup>Csのうち、福島県、宮城県、山形県、新潟県、及び、関東1都6県に沈着した割合は各々、

13%と14%であり、都県別には、<sup>131</sup>Iは福島県、茨城県、栃木県、<sup>137</sup>Csは福島県、宮城県、群馬県、栃木県の順に多い。

### 3. 大気沈着に起因する環境汚染

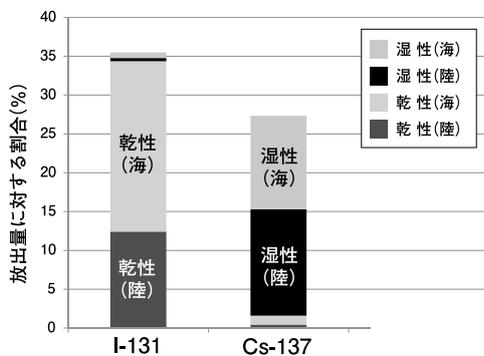
大気から地表面に沈着した放射性物質は、様々な環境汚染をもたらしている。既に大きな社会問題となっているところでは、校庭や公園などの土壌、水道水、牧草、稲わら、茶や野菜などの農産物、畜産物、上下水道汚泥、災害廃棄物などがあげられ、今後も新たな問題が発生する危険性がある。これらの放射能汚染問題は、基本的に、大気に放出された放射性物質が地表面に沈着したことによって、もしくは、沈着したものが環境中を移行したことによって発生した汚染である。例えば、水道水汚染に関しては、福島県内では3月17日から3月24日まで、関東地方では3月22日から3月23日付近で、放射性ヨウ素が最も高い濃度で検出された。この現象は、地表面に沈着した放射性ヨウ素が、雨水とともに短期間に河川に流出し、放射性ヨウ素を含む河川水が水道原水の取水口に流入したことに起因するものと考えられる [20]。

## V. おわりに

本稿では、これまでに公表された放射性物質の放出量や測定結果、大気シミュレーション結果に基づき、福島原発から放出された放射性物質の大気中の挙動について概説した。これまでに、観測データとシミュレーションモデルによって明らかになってきたことは多いが、依然として未解明の点も多く、また、放射能汚染が重要な社会問題になっていることを踏まえると、観測とモデルによる環境調査・研究を更に強力に推進し、また、原子力分野、環境分野、影響分野などの専門家の連携を強めて、放射能汚染の全容解明に向けた取り組みを加速する必要がある。

最後に、放射能汚染への対処法を考える上で重要と考えられる2つの点を提起したい。一点目は、大気中に放出された放射性物質によって引き起こされる様々な環境影響を予測・評価するためには、どの地域で、どれだけの放射性物質が地表面に沈着したのかを正確に把握することが極めて重要であるということである。そのためには、きめ細かく沈着量を測定することが有効であるが、その際に、モデルの結果をもとにして測定地域の優先順位を決めるといったことも必要である。2点目は、現在問題となっている多くの汚染はたまたま発生したのではなく、基本的には自然の法則に従って発生したということである。勿論、汚染牛肉の出荷問題などは、自然の法則だけでなく人為的側面が強いと考えられるが、それでも、牛に与えた稲わらの汚染は大気中の放射性物質の沈着によって引き起こされたものである。自然の法則に従って問題が発生したということは、逆に言えば、予見できる可能性があるということを意味する。今後、環境測定結果やモデル沈着量などをもとにして、発生しうる問題を予見し、問題発生前に対応策を講じるこ

(a) 乾性/湿性沈着別、海/陸別の割合



(b) 都県別の割合

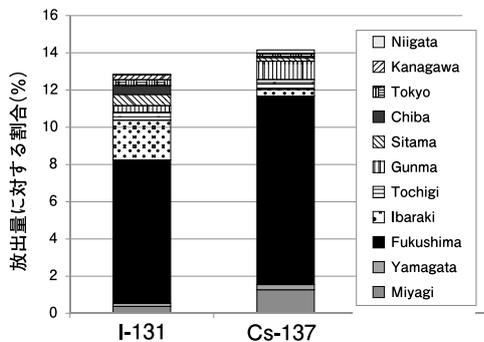


図9 3月11-29日にモデル領域内の地表面に沈着した放射性物質

とが重要である。一方、科学的な予見のためには、大気から地表面に沈着した放射性物質が、その後、様々な環境媒体に移行する経路と量、及びその結果としての各媒体中での存在量（即ち、ルート、フロー、ストック）を、多媒体モデリングと戦略的・長期的モニタリングによって明らかにすることが喫緊・重要な課題である。

## 引用文献

- [1] 原子力安全委員会. 福島第一原子力発電所から大気中への放射性核種（ヨウ素 131, セシウム 137）の放出総量の推定的試算値について. 平成 23 年 4 月 12 日. <http://www.nsc.go.jp/NSCenglish/geje/2011%200412%20press.pdf> (accessed 2011-07-20).
- [2] (独)日本原子力研究開発機構. 福島第 1 原子力発電所事故に伴う  $^{131}\text{I}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の大気放出量に関する試算. 第 31 回原子力安全委員会資料第 4-2 号. 平成 23 年 5 月 12 日. <http://www.nsc.go.jp/anzen/shidai/genan2011/genan031/siryu4-2.pdf> (accessed 2011-07-20).
- [3] 原子力安全・保安院. 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る 1 号機, 2 号機及び 3 号機の炉心の状態に関する評価について. 平成 23 年 6 月 6 日. <http://www.meti.go.jp/press/2011/06/20110606008/20110606008-.pdf> (accessed 2011-07-20).
- [4] 原子力安全・保安院. 地震被害情報（第 52 報）（3 月 25 日 19 時 30 分現在）及び現地モニタリング情報. 発電所敷地内における空气中放射性物質の核種分析結果について. 平成 23 年 3 月 25 日. <http://www.meti.go.jp/press/20110325012/20110325012-2.pdf> (accessed 2011-07-20).
- [5] 日本原子力研究開発機構. 原子力機構各拠点のモニタリングポスト（代表点）における線量率の推移. <http://www.jaea.go.jp/jishin/monitor.pdf> (accessed 2011-07-20).
- [6] 高エネルギー加速器研究機構. つくば（KEK）の放射性線量. [http://rcwww.kek.jp/norm/official\\_data/all\\_60min.dat](http://rcwww.kek.jp/norm/official_data/all_60min.dat) (accessed 2011-07-20).
- [7] 高エネルギー加速器研究機構. 環境放射線の測定結果（1）つくば市で観測された空气中の放射性物質の種類と濃度の測定結果. <http://www.kek.jp/quake/radmonitor/> (accessed 2011-07-20).
- [8] 佐波俊哉, 佐々木慎一, 飯島和彦, 岸本祐二, 齋藤究. 茨城県つくば市における福島第一原子力発電所の事故由来の線量率とガンマ線スペクトルの経時変化. KEK Preprint 2011-4. May 2011. <http://ccdb4fs.kek.jp/tiff/2011/1127/1127004.pdf> (accessed 2011-07-20).
- [9] 土井妙子, 田中敦, 柴田康行, 榎本和義. 福島第一原子力発電所事故後の茨城県つくば市における環境大気中の放射性核種測定. 国立環境研究所公開シンポジウム 2011.
- [10] 産業技術総合研究所（AIST）. つくばセンター放射線測定結果. 空気中の線量測定結果. <http://www.aist.go.jp/taisaku/ja/measurement/index.html> (accessed 2011-07-20).
- [11] 気象庁. 気象統計情報. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (accessed 2011-07-20).
- [12] 文部科学省. 文部科学省及び宮城県による航空機モニタリングの測定結果について. 平成 23 年 7 月 20 日. [http://www.mext.go.jp/component/a\\_menu/other/detail/\\_icsFiles/afildfile/2011/07/20/1305819\\_0720.pdf](http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/_icsFiles/afildfile/2011/07/20/1305819_0720.pdf) (accessed 2011-07-20).
- [13] 日本原子力研究開発機構. 東京電力福島第一原子力発電所事故によるプラント北西地域の線量上昇プロセスを解析（お知らせ）. 平成 23 年 6 月 13 日. <http://www.jaea.go.jp/02/press2011/p11061302/index.html> (accessed 2011-07-20).
- [14] 国・自治体による高さ 1m・0.5m 計測を中心とした放射線量マップ. <http://www.nnistar.com/gmap/fukushima.html> (accessed 2011-07-20).
- [15] 文部科学省. SPEEDI 緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム. 平成 20 年 2 月. [http://www.bousai.ne.jp/vis/torikumi/download\\_data/speedi.pdf](http://www.bousai.ne.jp/vis/torikumi/download_data/speedi.pdf) (accessed 2011-07-20).
- [16] 大原利真. 福島第一原発からの放射性物質の大気中の挙動. 厚生労働省・水道水における放射性物質対策検討会. 水道水における放射性物質対策中間取りまとめ. 参考資料(2). 平成 23 年 6 月. <http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000001g9fq-att/2r9852000001g9jp.pdf> (accessed 2011-07-20).
- [17] Byun D, Schere KL. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system. *Appl Mech Rev.* 2006; 59(1-6): 51-77.
- [18] Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda MG, Huang XY, Wang W, Powers JG. A description of the advanced research WRF Version 3. (NCAR/TN.475+STR). Boulder, Colo: National Center for Atmospheric Research; 2008.
- [19] 文部科学省. 定時降下物のモニタリング. 2011. [http://www.mext.go.jp/a\\_menu/saigaijohou/syousai/1305495.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/saigaijohou/syousai/1305495.htm) (accessed 2011-07-20)
- [20] 厚生労働省・水道水における放射性物質対策検討会. 水道水における放射性物質対策中間取りまとめ. 平成 23 年 6 月. <http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000001g9fq-att/2r9852000001g9jp.pdf> (accessed 2011-07-20).