

福島第一原子力発電所の事故により 放出された放射性物質の大気中での動態

鶴田 治雄*・中島 映至*

(2012年6月1日受付, 2012年6月11日受理)

Radioactive materials in the atmosphere released by the accident of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

Haruo TSURUTA* and Teruyuki NAKAJIMA*

* Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8568, Japan

Massive radioactive materials were released into the atmosphere after the accident of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FD1NPP) caused by the Tohoku Earthquake and Tsunami on 11 March 2011, and transported and deposited to the land surface in a regional scale. A large amount of dataset has been opened such as the routine monitoring of radiation dose, fall-out, and the regional map of radionuclides deposited to the surface soils by an intensive field measurement and aircraft monitoring by MEXT. In contrast, continual field measurements for atmospheric radioactivity were made only at seven stations in the Kanto area, while they are necessary to evaluate the initial radiation exposure, to validate results of atmospheric transport models, and to estimate the emission inventory of radionuclides. In this review, the following five points are introduced. (1) Summary of release rate estimation from the FD1NPP by the combination of WSPEEDI-II with atmospheric radioactivity of ^{131}I and ^{137}Cs and radiation dose. (2) The possible mechanisms of many peaks of radiation dose during 11-16 March 2011 which were measured at the monitoring posts near the FD1NPP. (3) Possible mechanism of regional transport and the surface deposition of radionuclides. (4) Summary of atmospheric ^{131}I in aerosols and gases, and $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ in the atmospheric radioactivity. (5) An intensive one-year field measurement of atmospheric radioactivity of ^{137}Cs at Fukushima and Koriyama since May 2011.

Key words: Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Atmospheric radioactivity, Radiation dose, ^{131}I , ^{137}Cs , Regional air pollution, Re-suspension

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災と津波によって引き起こされた福島第一原子力発電所の事故により、大量の放射性物質が大気中に放出され、広範囲に輸送され、地表へ沈着した。それによる人への内部・外部被ばくだけでなく、環境への影響は、2011年3月下旬に水道水中から大量の放射性物質が検出された（厚生労働省、2011）ことをはじめ、野菜などの食品やお茶の葉、農地の牧草や稲わらなど、また河川中の淡水魚や、太平洋沿岸の海域で獲れた魚にも、基準以上の放射性物質が含まれていた（厚生労働省、2012; 農林水産省、2012; 水産総合研究センター、2012）。さらに、下水汚泥や焼却灰などでも、大量の放射性物質が含まれているデータが報告され（環境省、2011）、その影響が様々な分野に広範囲に及んでいることが明らかになっている。一方、環境中での放射性物質の測定データは、文部科学省が各自治体に委託している空間放射

* 東京大学大気海洋研究所

〒277-8568 千葉県柏市柏の葉5-1-5 総合研究棟

働省、2011) ことをはじめ、野菜などの食品やお茶の葉、農地の牧草や稲わらなど、また河川中の淡水魚や、太平洋沿岸の海域で獲れた魚にも、基準以上の放射性物質が含まれていた（厚生労働省、2012; 農林水産省、2012; 水産総合研究センター、2012）。さらに、下水汚泥や焼却灰などでも、大量の放射性物質が含まれているデータが報告され（環境省、2011）、その影響が様々な分野に広範囲に及んでいることが明らかになっている。一方、環境中での放射性物質の測定データは、文部科学省が各自治体に委託している空間放射

線量率や大気降下物などの様々なモニタリングデータをはじめ、多くの研究機関が独自に調査した結果を含めて、膨大なデータが、それぞれのホームページなどで公表されている。そこで、それらのデータをもとに、放射性物質の放出率推定、放射性物質の原発周辺での挙動、そして広域汚染の概要、最後に、その後の大気中の放射性物質の長期変化を中心に、これまでにわかったことをまとめて、陸域を対象として、本総説で報告する。なお本稿は、最新のデータを盛り込むため、最近の学会・シンポジウム等で発表されたデータも多く含めており、学術論文以外からの引用が多いこと、また、使用した多くのデータはそれぞれの機関のHPに掲載されているので文献に引用していないこと、をお許し頂きたい。

2. 福島第一原子力発電所からの放射性物質の放出量推定

原発事故により、大気中に放出された放射性物質質量

の時間変化は、対象領域が25 km×25 km で設定された緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム、いわゆる SPEEDI (The System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information) (MEXT, 2007) や、さらに広域で放射性物質量を予測可能にするために、日本原子力研究開発機構 (JAEA) が開発した WSPEEDI-II (Worldwide Version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information-II) (Terada *et al.*, 2008) と、空間放射線量率やダストサンプリングによるヨウ素-131とセシウム-137の大気中の放射能濃度を用いて推定された (Chino *et al.*, 2011; Katata *et al.*, 2011)。その後、原子炉で起こった事象からの放出量推定も一部取り入れられており (Katata *et al.*, 2012; Terada *et al.*, 2012)、それらを取りまとめたもの (茅野, 2012) を、Fig. 1に示す。放出率が一定の期間は、用いた大気観測データの時間分解能に依存しているところが多い。ヨウ素-131とセシウム-137の放出率比は、3月

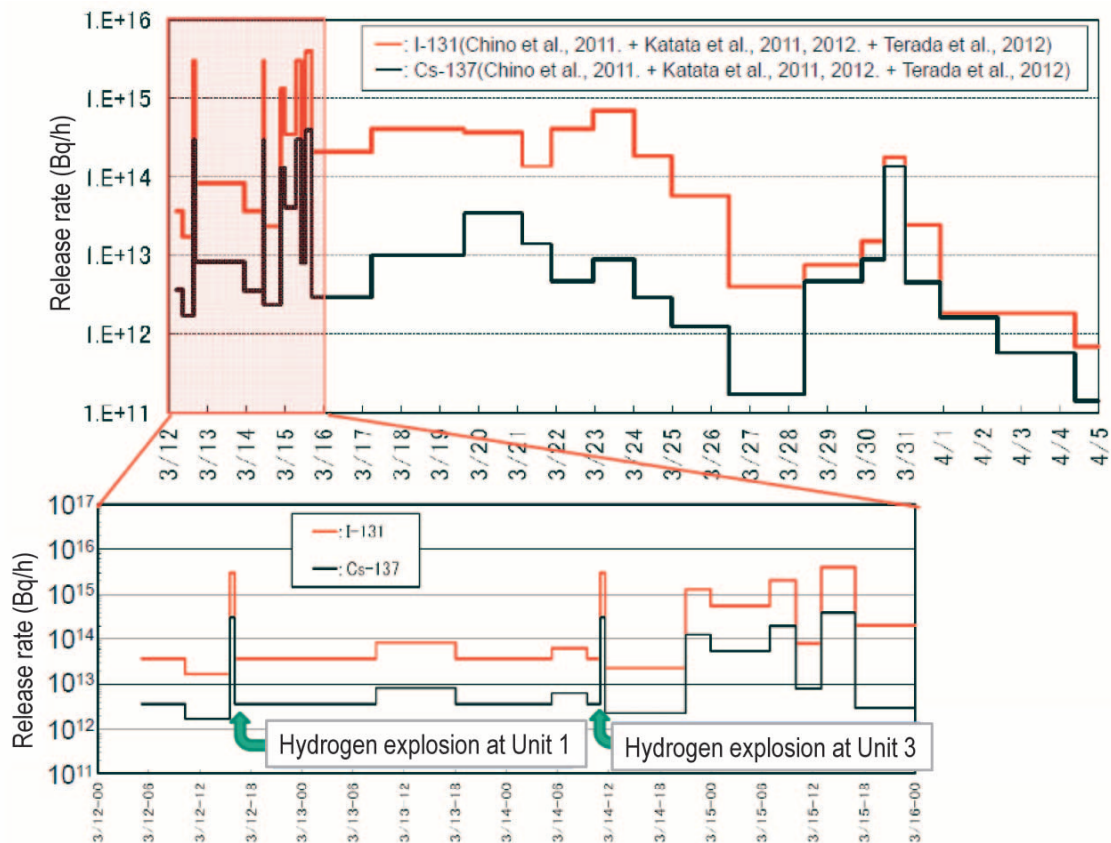


Fig. 1 Summary of estimated release rates of ^{131}I and ^{137}Cs into the atmosphere after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident (Chino, 2012) (This figure is quoted from the website of JAEA Open Workshop, 2012).

12日～15日までは約10であるが、3月15日17時から3月19日15時にかけて70から40と大きな値となっている。しかし、その後は3月21日21時まで再び約10と小さくなるが、3月21日21時から3月26日11時までは、87から45と再び大きな値が続いている。これらの放出率の時間変化と、5節で後述する大気中のヨウ素-131とセシウム-137の放射能濃度比の経日変化とは、よく似ていることに注意されたい。大気化学輸送モデルの計算では、放出量はこれらの数値を用いて、大気中の濃度や大気からの沈着量が推定されているので、今後は、原子炉内部で起こった事象の詳細な解析から、どのくらいこれらの放射性核種が放出されたかを推定していく必要がある。

3. 福島第一原子力発電所周辺での放射性物質の挙動

東京電力株式会社（東電）による福島第一原子力発電所（F1）のモニタリングポストで、主にMP-4（F1から約1.5 km 北西方向）と正門（MG, F1から西南西約1 km）における空間線量率の時系列を、Fig. 2に

示した（3月17日以降は省略）。また、その他に、福島県原子力センターが設置したモニタリングポストで、F1の事務本館から約5 km ほど西南西に位置する大野、またF1から南側12 kmにある福島第二原子力発電所（F2）のモニタリングポストのMP-4で測定された空間線量率も、Fig. 2に示した。これらのデータと、東電から公表されている事故時の対応と、F1内のモニタリングカー、大野、および気象庁のAMeDAS 地点で測定された地上風のデータとを併せて解析した（これらの地点の場所をFig. 3に示した）。さらに、炉内の状況やベントの開始などは、(独)原子力安全基盤機構の報告（2011）、日本原子力学会の特別セッションの報告（東電、2012）およびTanabe（2012a, 2012b）を参照した。これらを詳細に検討して、4地点の空間線量率のピークの多くは、ベントや炉内建屋の異常や風向の変化などによって説明が可能となったが、原因が不明のピーク（たとえば、Fig. 2の？）もいくつか存在する。

これらから総合的に判断すると、3月11日～16日までは、最初に第1号機、つぎに第3号機、そして第2号

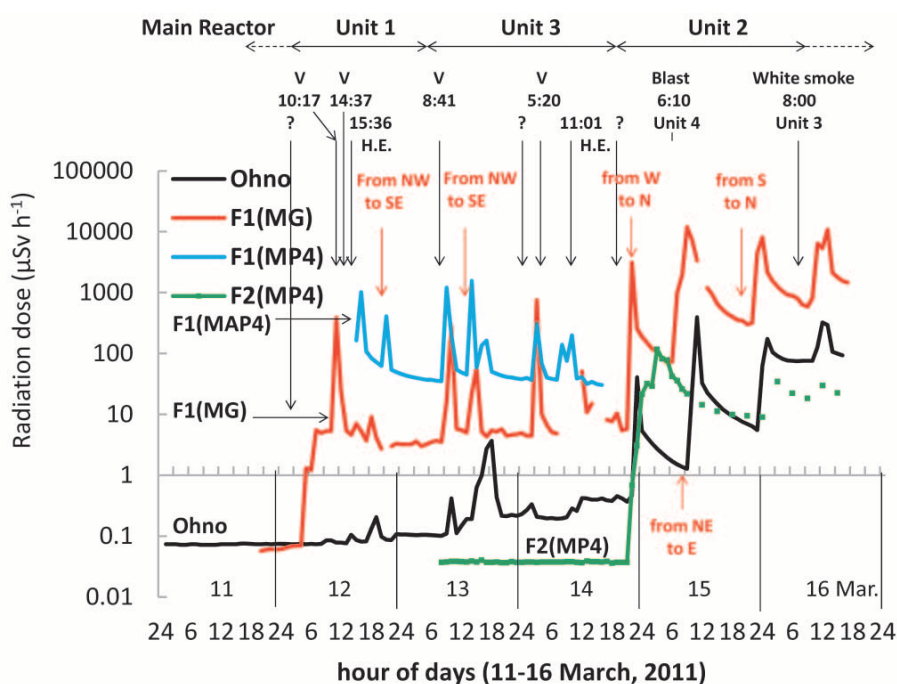


Fig. 2 Time series of radiation dose measured at 4 monitoring posts near the FD1NPP and main reactors who could cause massive release of radionuclides into the atmosphere following high peaks of radiation dose at the monitoring sites (11-16 March, 2011). Some high peaks could be caused by the shift of wind direction such as from S to N. 4 monitoring posts: Ohno, F1 (MG, Main Gate), F1 (MP4), and F2 (MP4). V: Vent; H. E.: Hydrogen explosion, ?: the cause of high peaks is unknown.

機からの放射性物質の放出が、主な放出源と推測される。3月12日は、午前4時頃から、正門での放射線量が増加し始めたので、大気中への放出が始まったと推

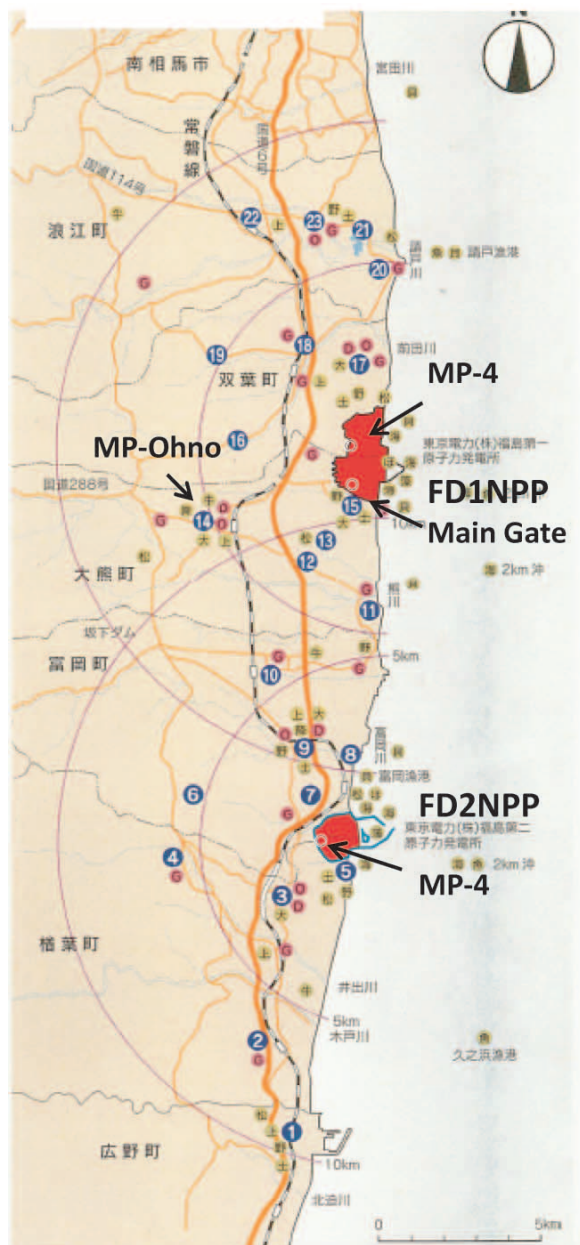


Fig. 3 Map of 4 monitoring posts (MPs) near the FD1NPP and FD2NPP. MP-Ohno was established by the Environmental Radioactivity Monitoring Center of Fukushima (ERMCF). F1 (MP-4) and F1 (Main Gate) in the area of FD1NPP, and F2 (MP-4) in the area of FD2NPP, were established by Tokyo Electric Power Company. The original map is quoted from a brochure made by the ERMCF in Japanese.

測され、これは10時17分のベントによる大きなピークの前であり、すでに1号機で異常が起っていた可能性が大きい。また、3月14日の21時ごろから正門、大野、およびF2のMP-4での空間線量率が増大し始めており、2号機のベント開始とされる3月15日0時02分（なお、東電（2012a）によれば数分後に弁閉であることを確認、と報告されている）よりも早く放出が始まっているが、その放出の原因はまだよくわかっていない。なお、F2のMP-4での空間線量率は、正門や大野と同じところに急激に増加し始め、3月15日の2～3時頃に最大となり、この汚染気塊はその後、関東地方に輸送された。これらのデータと地上風系とから、原発から放出された放射性物質が南方の陸上に輸送されたのは、この時が初めてであり、それまでは、北西風や南よりの風のため、北方や海上に輸送されたと推測される。

4. 広域汚染の概要

放射性物質による広域汚染の実態では、文科省が公表した航空機モニタリングから推定した土壌への沈着量マップ（文部科学省，2012）が、よく用いられる（Fig. 4）。これは、2011年6月～7月前半に実施した福島県東部の2 km メッシュでの調査（1地点あたり5ヶ所の土壌を採取・分析）で得られた土壌中のセシウム-134とセシウム-137と、航空機で測定された空間線量率とが良い対応関係があることを利用して、航空機観測から作成した広域の土壌への沈着量マップである。このマップから、放射性物質の沈着量がいかに多いかが一目瞭然となった。現在、この沈着量分布を再現するために、多くの領域モデルによる数値シミュレーションが行われ、その結果（たとえば、Morino *et al.*, 2011）とモデル間の相互比較については、JAEA（2012）が開催した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」で詳しく報告されているので、その資料を参照して頂きたい。また、全球での輸送に関しては、Take-mura *et al.* (2011) は、MIROC と SPRINTARS モデルを用いて、原発からの放射性物質がどのように地球規模で輸送されているかを、世界の数地点での観測結果と比較しながら、議論している。また、Stohl *et al.* (2011) は、世界各地の CTBT の観測データなどを用いて、逆に放出源からキセノン-133とセシウム-137が、いつごろどのくらいの量が放出されたかを推定している。なお、その後、観測データも飛躍的に増えて

きたので、これらのモデルの高精度化が望まれる。

さて、これらの領域モデルの結果を参考にしながら、前述した土壌への沈着量マップに示された広域汚染の実態を、文科省などの空間線量率や大気降下物のデータ、および自治体などで非常に密に測定された空間線量率マップ（鶴田ほか, 2012a）などや、AMeDASなどの気象データを主に用いて解析した（Figs. 2~4を参照）。また、福島県の地上風系のメソ解析結果（中

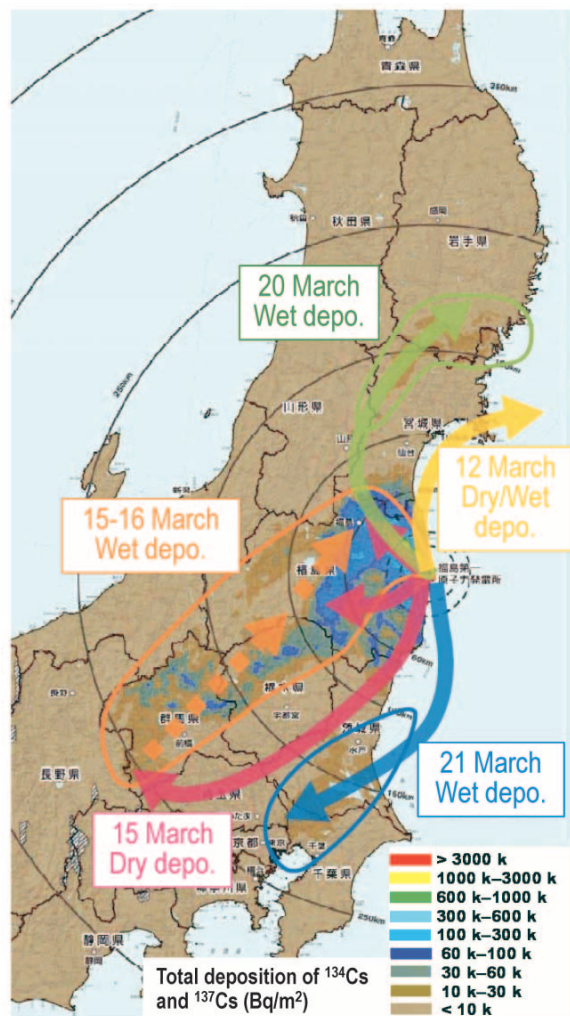


Fig. 4 Major pathways and dry/wet deposition of radioactive materials released by the FD1 NPP accident in a period of 12-21 March 2011 estimated from numerical simulations by atmospheric transport models (The figure is quoted from the website of JAEA Open Workshop, 2012). The original map used in the figure, the regional deposition of ^{137}Cs (Bq/m^2) on the surface soils from the aircraft monitoring, was published by MEXT (2011).

村ほか, 私信)も随時参考にした。よく知られているように、関東地方や東北地方南部まで広範囲に汚染気塊が輸送されたのは、3月15日~16日と3月20日~23日である。しかし、その他の3月12日~14日および3月18日~19日でも原発から北側への輸送がしばしば見られたが、降水がほとんどなかったので、地表面への沈着は少なかったと推測される。

(1) 3月12日~13日：原発から北側へ東北地方南東部までの沿岸域への輸送：関東北部から東北南部の太平洋沿岸域に吹いていた南よりの風で、原発でのベントや水素爆発などで放出された放射性物質は、北方に輸送されて宮城県南東部を南から北へ通過したと推測された（降水は無し）。すでに3月12日午前9時前後には原発から北西5~6 kmの浪江町高瀬で約 $15\mu\text{Sv}/\text{h}$ の空間線量率が測定されており、また、原発から北へ約24 kmに位置する南相馬市で、3月12日の20時頃空間線量率が急上昇（最大 $20\mu\text{Sv}/\text{h}$ ）し、約100 km北北東の女川原発でも13日0~2時頃に急上昇（最大 $21\mu\text{Sv}/\text{h}$ ）した（Fig. 4の黄色の曲線）。3月13日から14日にかけて、移動性高気圧の通過に伴い、東北地方太平洋沿岸域の沖合では南よりの風となり、一方、陸上では西よりの強い風でフェーン現象となった。そのため、3月13日も、原発周辺では午前3時ごろから南風となっており（なお10~13時は北西風）、12時頃には原発から約12 km北北西の地点では、 $30\mu\text{Sv}/\text{h}$ 以上と増大し、仙台市内でも18時半に $0.65\mu\text{Sv}/\text{h}$ と増加し、汚染気塊が通過した。

(2) 3月15日~16日：福島県、東北南部、関東甲信越静地方の広範囲な地域への輸送：早朝は原発から関東南部へ輸送され（乾性沈着, Fig. 4の赤い曲線）、そして関東北部に輸送されてさらに中通り南部に到達するとともに降水により地表面に沈着したと推定される（湿性沈着, Fig. 4の橙色の点線）。また、汚染気塊の一部は、関東地方を取り囲む山塊を越えて、静岡市、長野市、南魚沼市などへも輸送された。一方、午後には、南東風により原発から北西方向へ輸送されるとともに、福島市から中通りを南へ輸送され降水により地表面に沈着した（湿性沈着, Fig. 4の原発から北西方向の赤い曲線）。中通りへは、汚染気塊が北方と南方から輸送され降水により沈着されたと推定されるが、モデルではその再現がまだ不十分で、今後の研究課題である。また、その一部は、会津から新潟県の阿賀町へ、北方には3月15日の夜から3月16日の早朝に、山形・宮城方面に輸送された。

(3) 3月16日：原発から南方向に北茨城方面への輸送：3月16日の午前中に、F2のMP-4 (Fig. 3), およびいわき市や北茨城方面で放射線量の増大が見られたが、その後風系が変化したので、それより南の陸上には到達しなかった。

(4) 3月18日～19日：原発から北側への輸送：主に南よりの風で、北方に輸送されたことが、南相馬の空間線量率の増加により観測された。3月18日は、AMeDASの相馬でのデータでは17時から南風となり、南相馬でも18時に $7\mu\text{Sv h}^{-1}$ のピークが観測された。3月19日も同様に北側に輸送された。

(5) 3月20日～23日：福島県、東北中部、関東甲信静地方の広範囲な地域への輸送：3月20日午後の南東風により、汚染気塊は福島市に輸送され（降水は無しで、中通り南部には輸送されなかった）、20日の夜から21日の未明にかけて、山形県東部や盛岡などの東北中部まで輸送され、降水により沈着されたと推定される (Fig. 4の緑の曲線)。一方、関東南部では3月21日早朝から吹き始めた北東風で汚染気塊が輸送され、長時間の降水により広域に沈着し、また、静岡県東部まで輸送された (Fig. 4の青の曲線)。しかし、関東北部へはほとんど輸送されなかった。

(6) 気象場の特徴：大気安定度は、汚染物質の挙動に大きな影響を与えるが、気温などの鉛直分布の測定は、福島県内ではなされていなかった。茨城県館野の高層気象データによれば、3月15日は、気温の逆転層が高度500～1,000 mに存在していたので、福島県内も同様の逆転層が存在していた可能性があり、特に中通りで沈着量が多かった原因として、この逆転層により、汚染気塊が下層に滞留して輸送されたためと、推測される。一方、関東地方ではこの時期に多い北東気流が、3月15日や3月21日～23日にも形成され、そのため、関東地方に原発からの汚染気塊が輸送され、降水により広範囲な地域で沈着するとともに、千葉の東葛地域に最も多く沈着した。

(7) 稲わら汚染：放射性物質は、このように広域に輸送されて地表面に沈着後土壌が汚染され、環境へ大きな影響を与えたので、ここではその事例解析を紹介する。収穫後に水田に放置されていた稲わらが、高濃度の放射性セシウムに汚染されていた事実が明らかになったので、このような汚染が起り得るものかを検討するため、同一地点で、公表された稲わらの放射性セシウム濃度 (^{134}Cs と ^{137}Cs の合計) と、土壌に沈着した量とを比較した。一般によく用いられている、

稲わらの収穫後の土壌表面への散布量を 5 ton ha^{-1} とすると、この量は 500 g m^{-2} に相当する。ある地点で汚染された稲わらの放射性セシウム ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) 濃度は、 $22,045\text{ Bq kg}^{-1}$ であり、この量は稲わらへの沈着量 11.02 kBq m^{-2} に相当する。一方、この地点での土壌への沈着量は、 126.5 kBq m^{-2} だったので、土壌への沈着量の約10%が、稲わらの表面に付着したことになる。同様に、稲わらの放射性セシウム濃度が $3,647\text{ Bq kg}^{-1}$ の場合は、稲わらへの沈着量は 1.82 kBq m^{-2} となり、土壌への沈着量 30.9 kBq m^{-2} の6%だった。このように、これらの2地点での稲わらへの沈着量は、土壌への沈着量の約10%であり、十分に起り得ることを示している。

5. 大気中のヨウ素-131とセシウム-137の放射能濃度の経日変化

大気中を放射性物質がどのように輸送されたかについては、いろいろなモデルによる数値シミュレーションの結果は示されているが、観測値が非常に少ないため、その実態の解析は不十分である。これまでに紹介してきたように、土壌への沈着量分布や、空間線量率の分布については、広域な調査結果が得られているが、それらから、大気中の放射性物質の量を推定することは困難である。その理由は、大気中を輸送された放射性物質の一部が、降水によって沈着したものであり、また空間線量率はその地点を通過した大気中の放射性物質だけでなく、地表面に沈着した物質からの影響も受けるからである。大気中の放射能濃度の時空間分布は、内部被曝にとっても、大気モデルの検証にとっても、重要であるにもかかわらず、検討がまだまだ進んでいない。

(1) 大気中の放射能濃度の連続測定地点：原発周辺では、福島県原子力センター、東電や文科省などが、いろいろな地点で短時間のダストサンプリングをしているが、事故直後から大気を連続採取して放射性核種の分析をして、データを公表している機関とその地点は、すべて関東地方に存在する (Table 1)。そのなかで、エアロゾルと気体とに含まれるヨウ素-131を別々に採取・分析したのは、東海村のJAEA核燃料工学サイクル研究所 (古田ほか, 2011) と、つくばの国立環境研究所/高エネルギー加速器研究機構だった (土井ほか, 2011)。なお日本分析センターでは、採取は別々にされたが分析はいっしょにされた (Amano *et al.*, 2011)。一方、高崎では、CTBT (包

Table 1 Measurements of radionuclides in the atmosphere after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident.

Sampling Station (Sampling/Measurement Org.)	Sampling Equipment (Filters)	Radioactivity of ¹³¹ I in aerosols(A) & gases(G)	Ref.
Tokaimura (Ibaraki pref.) (JAEA-TRDC)	L.V. (HE-40T & CHC-50)	A & G (separated)	Furuta et al. (2011)
Tsukuba (Ibaraki pref.) (NIES/KEK)	H.V. (QF & ACF-TG)	A & G (separated)	Doi et al. (2011)
Takasaki (Gunma pref.) (CTBT)	RASA (PP-filter)	A	Yonezawa and Yamamoto (2011)
Wako (Saitama pref.) (RIKEN)	L.V. (HE-40T)	A	Haba et al. (2012)
Chiba (Chiba pref.) (JCAC)	L.V. (HE-40T & CP-20)	A + G (total)	Amano et al. (2011)
Setagaya (Tokyo M.) (TMITRI)	H.V. (GB100R)	A	Nagakawa et al. (2011)
Tajima (Kawasaki City) (KMRIEP & AORI (Univ. of Tokyo)/Osaka Univ.)	H.V. (QF)	A	Kawasaki City (2012)

L. V.: Low-volume air sampler. H. V.: High-volume air sampler. QF: Quartz fiber filter.

JAEA-TRDC : Japan Atomic Energy Agency, Tokai Research and Development Center.

NIES: National Institute for Environmental Studies.

KEK: High Energy Accelerator Research Organization.

CTBT: Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty.

RIKEN: RIKEN Wako Institute.

JCAC: Japan Chemical Analysis Center.

TMITRI: Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute.

KMRIEP: Kawasaki Municipal Research Institute for Environmental Protection.

AORI: Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo.

括的核実験禁止条約)の国際監視制度により、世界共通の放射性核種観測機器で測定されているが、関東地域の他の測定地点の採取方法と質的に異なっており、また、機器内の汚染がみられ、まだ確定データが公表されていない(米沢・山本, 2011)ので、ここでは検討の対象としなかった。また、東京都と川崎市のデータは、それぞれ、永川ほか(2011)と川崎市原子力施設安全対策協議会(2012)により、すでに公表されている。さらに、理研和光研究所でのデータは、Haba *et al.* (2012)で公開されている。

(2) ヨウ素-131のエアロゾルと気体での存在割合：つくばと東海村で測定された、エアロゾル中のヨウ素-131が全ヨウ素-131(気体中のヨウ素-131(G)とエアロゾル中のヨウ素-131(A)の和)に占める割合(R)は、Fig. 5に示すように、採取方法が質的に異なっているにもかかわらず、汚染気塊中では0.5~0.8で、他の時期は0.2~0.4だった。なお、そのときの両地点でのヨウ素-131とセシウム-137の放射能濃度の経日変化を、Fig. 6に示す。汚染気塊中で粒子状ヨウ素が多

かった原因は、放出時の形態と、その後の大気中での気体からエアロゾルへの変質によると推定される。原発事故直後になされたベントがウェットベントであれば、圧力調整容器中で、高温の気体状ヨウ素の大半が冷やされて粒子状に変化した後に、大気中に放出された可能性もある。(なお、全部のベントがウェットベントであったという確証はない)。なお、千葉の柏でも気体状と粒子状のヨウ素-131を2011年5月に測定したが、Rは0.1~0.3と小さかった(鶴田ほか、未発表)。

(3) 測定地点中で原発が一番近い東海村では、3月15日の6~9時に1,600 Bq m⁻³という非常に高濃度のヨウ素-131が観測された(Fig. 6)。なお、東京の世田谷でも1~2時間毎に大気エアロゾルが採取されており、3月15日の10~11時にヨウ素-131の濃度は約240 (R=0.5とすると、約480) Bq m⁻³で、東海村の約15% (30%)という最高濃度が測定されており、短時間では大量の放射性物質が放出されていたことがわかった(Fig. 7)。一方、東海村では3月20日21時か

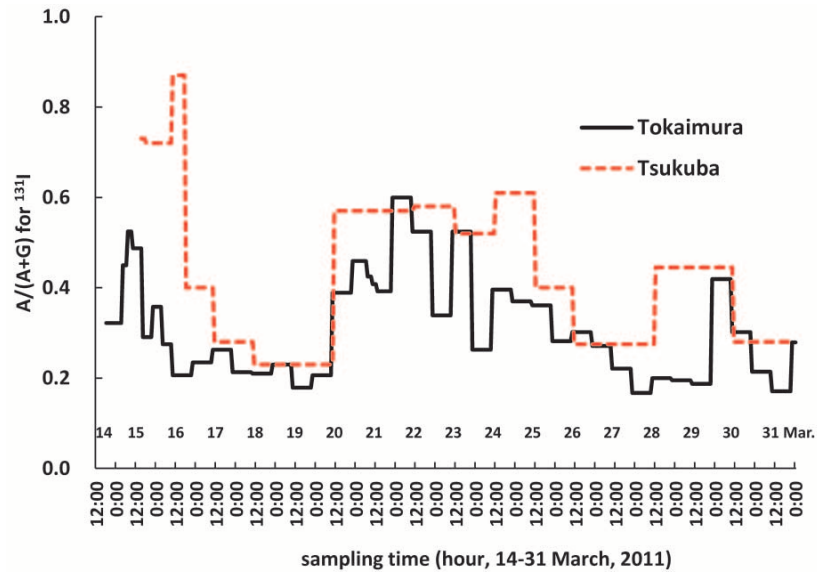
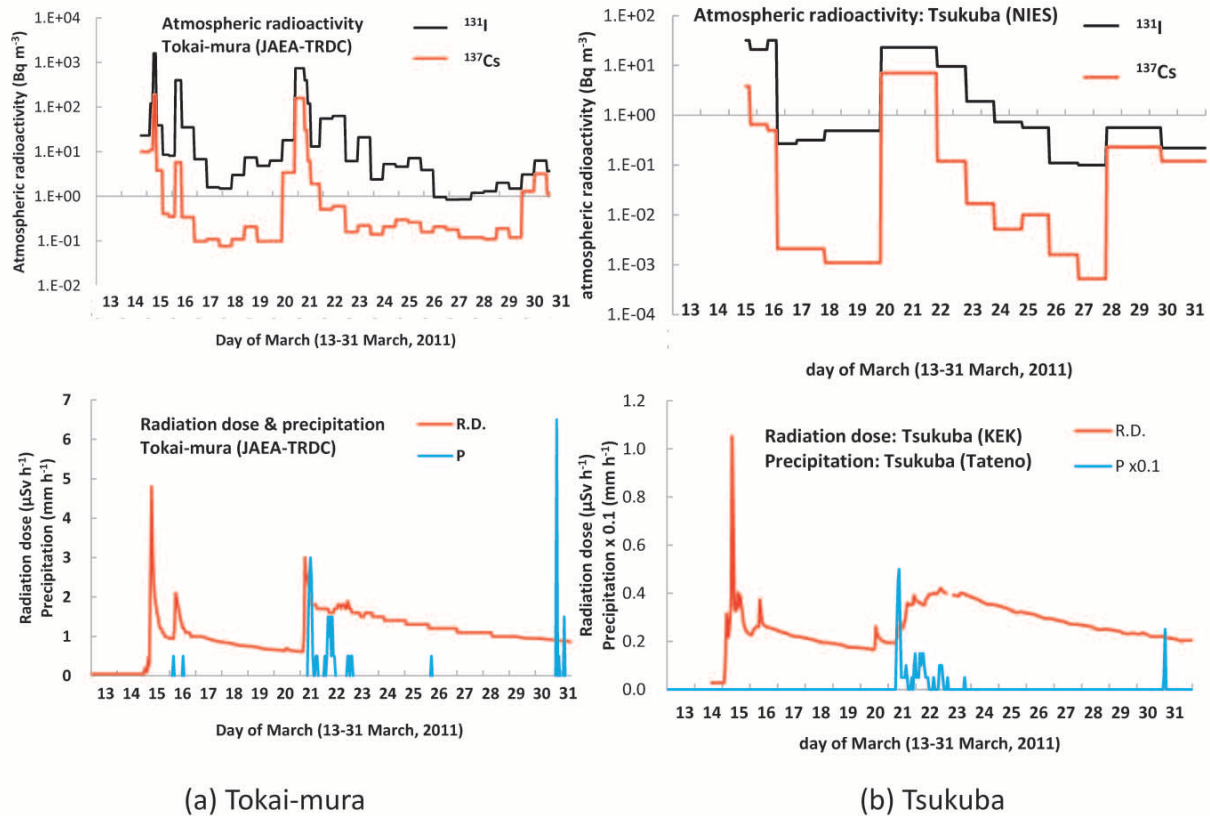


Fig. 5 Time series of the ratio of particulate ^{131}I (A) to the total ^{131}I (sum of A and gaseous ^{131}I (G)) measured at Tokaimura and Tsukuba (14-31 March, 2011). These graphs were made based on the data (Furuta *et al.*, 2011) and the figure (Doi *et al.*, 2011).



(a) Tokai-mura

(b) Tsukuba

Fig. 6 Time series of (top) atmospheric radioactivity of ^{131}I and ^{137}Cs and (bottom) radiation dose (R.D.) and precipitation (P) at (left) Tokai-mura (Furuta *et al.*, 2011) and (right) Tsukuba (Doi *et al.*, 2011), in a period of 13-31 March, 2011.

ら3月21日6時の間に、再び 740 Bq m^{-3} と高濃度が測定されたが、東京では3月21日の8~10時に約15(30) Bq m^{-3} の最高濃度が測定され、東海村の4%と小さかった。これは、東海村では3月21日の6時までは雨が降っていなかったが、東京では8~10時に5.5 mmの雨が降り始めたので、降水に取り込まれたために、大気中の放射能濃度が低かったためと推測されるが、東海村の高濃度の汚染気塊が通過しなかった可能性もある。

(4) 大気中のヨウ素-131とセシウム-137の特徴：汚染気塊が関東地方に輸送された3月15日~16日と3月20日~23日に、すべての地点で放射性物質の濃度が高くなり、またどの地点でも常に、ヨウ素-131はセシウム-137より濃度が高かった。例として Fig. 7 に、東京と千葉の大気中の1時間~1日間の平均濃度と日降水量の経日変化を示す。ヨウ素-131とセシウム-137の濃度比は、日によって異なり、3月20日~21

日と3月21日~22日は小さく、その他の日は、非常に大きかった。また、3月22日~23日は、セシウム-137の濃度は非常に低くなったが、ヨウ素-131は高く、地点によっては3月15日~16日よりも高かった。つぎに、汚染気塊中での東京の全ヨウ素-131を、仮りに $R=0.5$ として $A=G$ の関係を用いて求めた。これらから、全ヨウ素-131とセシウム-137との比は、東海村、東京、千葉ではそれぞれ、3月15日は14, 12, 34, 3月20日は6, 5, 3, 3月21日は8, 6, 6, 3月22日は98, 101, 92となり、3地点での比は、日の違いによる差の方が地点間の差よりも大きかった。

(5) つぎに、大気中と降水物中の濃度が同時に測定された千葉での結果によれば、降水がほとんどなかった3月15日~16日の降水物は非常に少なかったが、3月20日~23日にかけては、降水により大量の放射性物質が沈着した (Fig. 7)。なお、ヨウ素-131とセシウム-137の比は、大気中と降水物中で良く一致

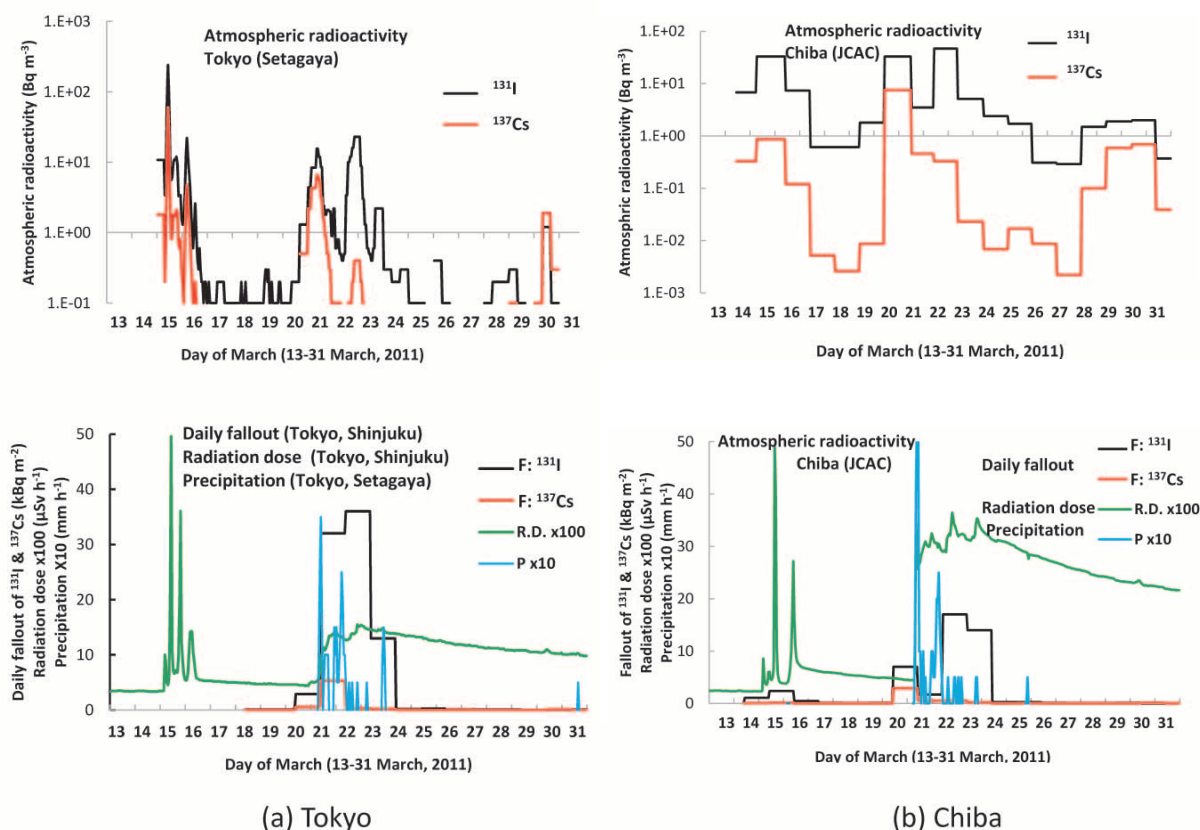


Fig. 7 Time series of (top) atmospheric radioactivity and (bottom) fallout (F) of ^{131}I and ^{137}Cs in daily average from 9:00 to 9:00 in the following day, radiation dose (R.D.) and hourly precipitation at (left) Tokyo (Nagakawa *et al.*, 2011) and (right) Chiba (Amano *et al.*, 2011). The fallout measurement at Tokyo started from 18 March, 2011, with no data available before that day.

しており、この関係は東京でも同様に見られた（なお、東京の降水物のデータは、新宿にある文科省のモニタリングポストで測定された値であり、他のモニタリングポストと同様に2011年3月18日から測定が開始されたため、それ以前のデータはない）。

(6) これらから、大気中のヨウ素-131とセシウム-137の挙動は、地点による違いよりも、日による違いの方が大きかったことがわかる。これは、放出時の状況をより強く反映しているためと推測される（Fig. 1参照）。

6. 大気中の放射性物質の長期変化

日本地球惑星科学連合・日本地球化学会・日本放射化学会連携緊急放射性物質調査研究チーム（代表：首

都大学東京海老原充教授）では、大気中の放射性物質の挙動を、原発事故後の2011年3月下旬ごろから福島県を含む広範な地域で観測中であり、本報告ではそのなかで3地点（福島県福島市、福島県郡山市、宮城県南部の丸森町）の結果の概要を紹介する（鶴田ほか、2012b）。これらの3地点では、2011年5月後半から現在まで（なお丸森町は、仙台市での観測を引き継いだため、2011年12月から開始）、ハイボリュームエアサンプラーで1~3日間連続で大気中のエアロゾルを石英繊維フィルターに採取し、ゲルマニウム半導体検出器で、セシウム-134とセシウム-137（初期はヨウ素-131も）を計測した。

(1) 福島と郡山では、大気中のセシウム-137の放射能濃度は、Fig. 8に示すように、2011年5月から次

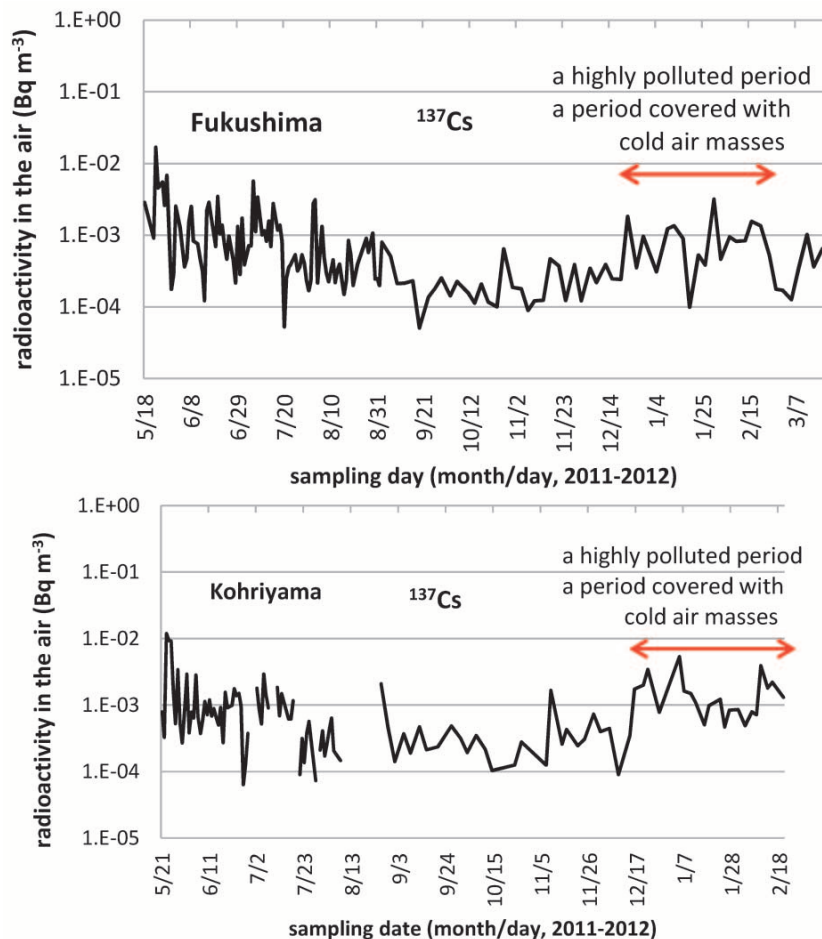


Fig. 8 Long-term trends of atmospheric radioactivity of ^{137}Cs at (top) Fukushima University (65 km northwest of FD1NPP) and (bottom) College of Engineering, Nihon University in Kohriyama (60 km west of FD1NPP) from May 2011 to Feb./Mar. 2012. Atmospheric aerosols were collected on quartz fiber filter by a high-volume air sampler for a 1-3 day sampling duration at both sites.

第に減少して秋期に最低となった。この減少割合は、原発付近の東電モニタリング地点でのダストサンプリングによる大気中の放射能濃度との比較から、原発からの直接の放出量の減少傾向とほぼ一致した（北ほか, 2012）。なお、滝川（2012）のモデルによる計算値は、時間の経過とともに、実測値より小さくなったが、これは土壌からの再飛散などの間接的な影響をモデルでは考慮していないため、と推測される。

(2) 福島と郡山の2地点では、セシウム-137は、冬期の2011年12月16日（福島は12月22日から）から2012年2月22日まで再び増大した。福島と郡山における、冬期（2011年12月～2012年2月）のセシウム-137の平均濃度は、秋期（2011年9月～11月）のそれぞれ3倍と4倍だった。東電（2012b）によれば、2012年1月の1時間当たりの放出量は前月の1.1倍だったが、2月の放出量は1月の14%に減少したので、この冬期の

放射能増大が原発からの放出による直接の影響ではないことがわかった。一方、丸森町では、放射能濃度の冬期の増大はみられず、福島と郡山より低かった（図は省略）。この期間は、冬の強い寒気流入時期と一致し、3地点とも気温が平年よりも低くなった（気象庁, 2012）。

(3) Fig. 9に示すように、福島の冬期のセシウム-137は、降水量の多い日は低下し、降水がなく風速の大きいときに増大した。

(4) なお2012年1月21日の降雪後の約25日間の積雪期間中（Fig. 9の上段のA）、セシウム-137はほとんど減少しなかったが、この期間は風速が大きく湿度が低かった。一方、2月24日から3月10日までも積雪期間だったが、セシウム-137は前述した積雪期間（Fig. 9の上段のB）よりも約1/10に減少した。なお、この期間は風速が小さく湿度も高かった。

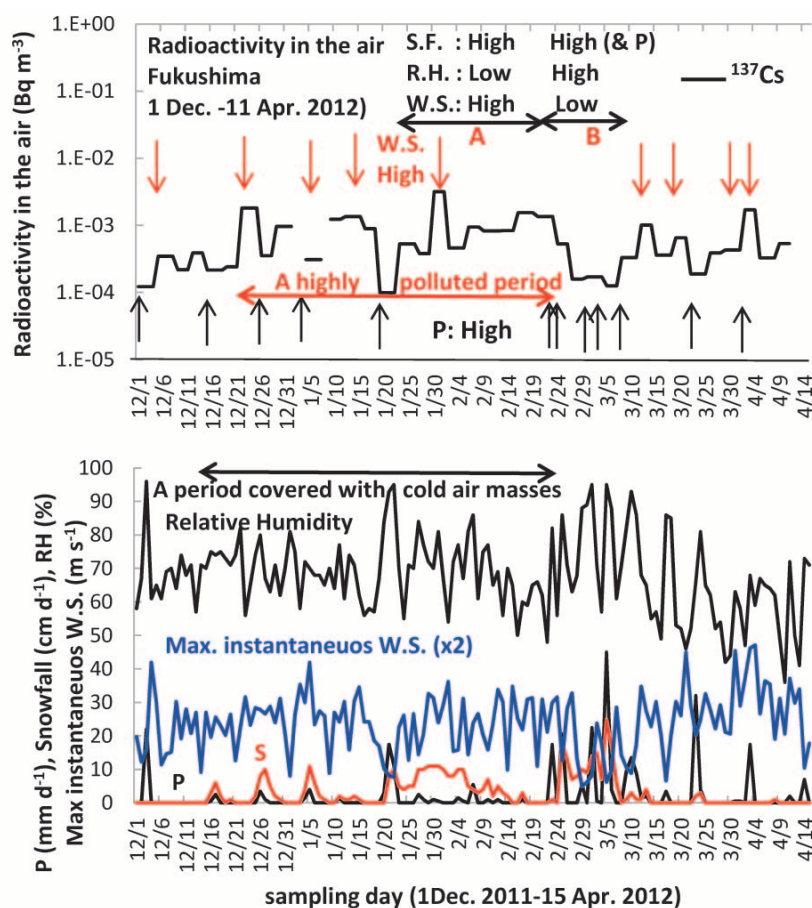


Fig. 9 Time series of (top) atmospheric radioactivity of ¹³⁷Cs and (bottom) relative humidity (R. H.), instantaneous maximum wind speed (W. S., x 2), snowfall amount (S), and precipitation (P) at Fukushima (Dec. 2011-Apr. 2012). Daily meteorological data used was measured at the Fukushima AMEDAS station by Japan Meteorological Agency.

(5) これらから、冬期の増大の主要因は、大気が乾燥して風速が大きくなったため、汚染された土壌や森林などからの放射性物質の再飛散によると推測された。しかし、この推測は、他のデータによる検証が必要であり、今後も総合的で長期的な調査が必要である。

7. 今後の課題

原発事故から1年以上が経過し、何がまだわからないのか、また、今後何を明らかにすべきかについて、いろいろな機関や研究者が議論されているが、その重要な課題を次に示す。

(1) 原発からの放出量推定：2012年3月の原子力学会で、原子炉容器内のいろいろなデータの解析結果が示され、当時何が起こったか、議論が深まってきた。しかし、依然として、いつ頃、原子炉内がどのような状況になって、どのような物質が、どこから、どのくらい、どのような形態で、大気中への放出されたか、については不確実性が非常に大きいので、ぜひとも、さらに解析を深めて、その結果を公表することが望まれる。

(2) 初期の大気中の放射性物質の濃度および土壌などへの沈着量のデータの発掘：2012年3月のJAEA公開ワークショップ(2012)で、放射性物質の汚染気塊の拡散と輸送経路と、モデルによる数値シミュレーション結果との比較についての理解が深まった。しかし、事故直後の大気中の放射能データは、NaIシンチレーションスペクトルデータなど、未だに発掘途上であり、ぜひとも、それらのデータを早急に公表することが望まれる。また、事故直後の土壌への沈着量で、未公開なものは、初期被曝を考慮する上で、なくてはならない貴重なデータなので、できる限り早急に公開することが望まれる。

(3) モデルと観測結果との比較検討：本稿では、モデルによる数値シミュレーションについて詳しく紹介するスペースはなかったが、放出量の推定値に大きな不確実性があるため、モデルによる大気中の放射能濃度や土壌への沈着量などの推定値にも影響を与える。また、乾性沈着と湿性沈着とをよりよい精度で求める工夫が必要であり、さらに、福島県中通りの沈着量の再現には、空間分解能のさらに細かいモデルも必要となってくるので、モデルの高精度化が望まれる。

(4) 環境影響の総合的な長期調査：放射性物質の生態系や森林土壌および河川などへの移行過程など、今後、長期的に取り組むべき課題が山積しており、分

野横断的な総合調査が必要である。また、大気中での再飛散などを監視するモニタリングも引き続き長期的な視点にたって、再構築して継続することが望まれる。

引用文献

- Amano, H., Akiyama, M., Chunlei, B., Kawamura, T., Kishimoto, T., Kuroda, T., Muroi, T., Odaira, T., Ohta, Y., Takeda, K., Watanabe, Y. and Takao, M. (2011) Radiation measurements in the Chiba metropolitan area and radiological aspects of fallout from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, **111**, 42-52.
- Chino, M., Nakayama, H., Nagai, H., Terada, H., Katata, G. and Yamazawa H. (2011) Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into atmosphere. *Journal of Nuclear Science and Technology*, **48**, 1129-1134.
- 茅野政道 (2012) 大気放出量推定. 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」, 2012/3/6, 東京, <http://nsed.jaea.go.jp/ers/environment/envs/FukushimaWS/jaea1.pdf>
- 土井妙子・榎本和義・豊田晃弘・田中敦・柴田康行 (2011) 福島第一原子力発電所事故後に茨城県つくば市で検出された大気中放射性核種濃度. 日本放射線安全管理学会第10回学術大会, 2011/11/30~12/2.
- 独立行政法人原子力安全基盤機構 (2011) 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 報告書 平成23年9月.
- 古田定昭・住谷秀一・渡辺均・中野政尚・今泉謙二・竹安正則・中田陽・藤田博喜・水谷朋子・森澤正人・國分祐司・河野恭彦・永岡美佳・横山裕也・外間智規・磯崎徳重・根本正史・檜山佳典・小沼利光・加藤千明・倉知保 (2011) 福島第一原子力発電所事故に係る特別環境放射線モニタリング結果—中間報告(空間線量率, 大気中放射性物質濃度, 降下じん中放射性物質濃度)—. *JAEA-Review*, 2011-035, 1-89.
- Haba, H., Kanaya, J., Mukai, H., Kambara, T. and Kase, M. (2012) One-year monitoring of airborne radionuclides in Wako, Japan, after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident in 2011. *Geochemical Journal*. (in press).
- JAEA 公開ワークショップ資料 (2012) 日本原子力研究開発機構 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」, 東京, <http://nsed.jaea.go.jp/ers/environment/envs/FukushimaWS/index.htm>
- 環境省 (2011) 16都県の一般廃棄物焼却施設における焼却灰の放射性セシウム濃度測定結果一覧. <http://www.env.go.jp/jishin/attach/waste-radioCs-16pref-result-20110829.pdf>
- Katata, G., Terada, H., Nagai, H. and Chino, M. (2011) Numerical reconstruction of high dose rate zones due to the

- Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, **111**, 2–12.
- Katata, G., Ota, M., Terada, H., Chino, M. and Nagai, H. (2012) Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident: Part I: Source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, **109**, 103–113.
- 川崎市原子力施設安全対策協議会 (2012) 川崎市における福島第一原子力発電所事故に関する環境放射能調査結果. 平成22年度 (2010年度) 川崎市における環境放射能調査報告書, 16–18.
- 気象庁 (2012) 平成24年冬の天候と大気の流れの特徴について. 気象庁発表資料, 平成24年2月27日.
- 北和之・笠原理絵・渡邊明・鶴田治雄・植松光夫・松垣正吾・吉田尚弘・豊田栄・山田桂大・篠原厚・三上正男・五十嵐康人・恩田裕一・末木啓介・滝川雅之・日本地球化学会・日本地球惑星科学連合・日本放射化学会連携緊急放射性物質サンプリングチーム大気班および分析班 (2012) 2.2 大気放射性物質の広域観測と土壌からの再飛散の影響, 2011年秋季大会スペシャルセッション「放射性物質輸送モデルの現状と課題」報告 (近藤裕昭ほか). 天気, **59**, 240–241.
- 厚生労働省 (2011) 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.
- 厚生労働省 (2012) 食品中の放射性物質検査の結果について (平成24年3月31日以前に採取された検体分). <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002bxys-att/2r9852000002by4f.pdf>
- MEXT (2007) SPEEDI System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information, A pamphlet of SPEEDI. http://www.bousai.ne.jp/vis/torikumi/download_data/speedi.pdf
- 文部科学省 (2012) 平成23年度科学技術戦略推進費「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」『放射性物質の分布状況等に関する調査研究』報告書. 平成24年3月13日.
- Morino, Y., Ohara, T. and Nishizawa, M. (2011) Atmospheric behavior, deposition and budget of radioactive materials from Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011. *Geophysical Research Letters*, **38**, L00G11.
- 永川栄泰・鈴木隆司・金城康人・宮崎則幸・関口正之・櫻井昇・伊勢洋昭 (2011) 福島第一原発事故による放射性物質漏洩に関わる都内環境放射能測定及び被曝線量測定. *Radi isotopes*, **60**, 467–472.
- 農林水産省 (2012) 平成23年度農産物に含まれる放射性セシウム濃度の検査結果. http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/s_chosa/23index.html
- Stohl, A., Seibert, P., Wotawa, G., Arnold, G., Burkhart, I. F., Eckhardt, S., Tapia, C., Vargas, A. and Yasunari, T. J. (2011) 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. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **11**, 28319–28394.
- 水産総合研究センター (2012) 放射性物質影響解明調査事業報告書. 平成24年3月.
- Takemura, T., Nakamura, H., Takigawa, M., Kondo, H., Satomura, T., Miyasaka, T. and Nakajima, T. (2011) A numerical simulation of global transport of atmospheric particles emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *SOLA*, **7**, 101–104, doi:10.2151/sola.2011-026.
- 滝川雅之 (2012) 2.8 領域化学輸送モデルを用いた放射性物質沈着量の推定, 2011年秋季大会スペシャルセッション「放射性物質輸送モデルの現状と課題」報告 (近藤裕昭ほか). 天気, **59**, 244–245.
- Tanabe, F. (2012a) Analyses of core melt and re-melt in the Fukushima Daiichi nuclear reactors. *Journal of Nuclear Science and Technology*, **49**, 18–36.
- Tanabe, F. (2012b) A scenario of large amount of radioactive materials discharge to the air from the Unit 2 reactor in the Fukushima Daiichi NPP accident. *Journal of Nuclear Science and Technology*, **49**, 360–365.
- Terada H., Nagai, H., Furuno, A., Kakefuda, T., Harayama, T. and Chino, M. (2008) Development of worldwide version of system for prediction of environmental emergency dose information: WSPEEDI 2nd version. *Atomic Energy Society of Japan*, **7**, 257–267. (in Japanese with English abstract)
- Terada, H., Katata, G., Chino, M. and Nagai, H. (2012) Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Part II: verification of the source term and regional-scale atmospheric dispersion. *J. Environ. Radioact.*, **112**, 141–154.
- 東京電力 (2012a) (3) 福島第一原子力発電所事故 3) 事故時の対応状況とプラント挙動. 原子力学会春の年会・福島第一原子力発電所事故特別セッション, 1–30 (pdf), 福井, http://www.aesj.or.jp/information/2012spr_spsession/3-3miyata.pdf
- 東京電力 (2012b) 1–3号機格納容器からの放射性物質 (セシウム) の1時間当たりの放出量. 政府・東京電力中長期対策会議資料.
- 鶴田治雄・司馬薫・佐藤陽祐・橋本真喜子・荒井俊昭・山田裕子・中島映至 (2012a) 2.3 原発事故による放射性物質の地表面沈着の広域分布とその要因. 2011年秋季大会スペシャルセッション「放射性物質輸送モデルの現状と課題」報告 (近藤裕昭ほか). 天気, **59**, 241.
- 鶴田治雄・荒井俊昭・山田裕子・中島映至・渡邊明・長林久夫・谷津俊幸・石田真士・篠原厚・横山明彦・松垣正吾・本多照幸・日本地球惑星科学連合・日本地球化学会・日本放射化学会連携緊急放射性物質調査研究チーム (2012b) 大気中の放射性物質の長期変化. 第1回環境放射能除染研究発表会講演要旨集, 4.
- 米沢伸一郎・山本洋一 (2011) 核実験監視用放射性核種観測網による大気中の人工放射性核種の測定. ぶんせき, **8**, 451–458.