

東京電力福島第一原子力発電所近隣地域における 空間放射線量率と直下土壌の放射能汚染度との 関連について

大瀧 慈¹・大谷 敬子¹・今中 哲二²・遠藤 暁³・星 正治⁴

(受付 2013 年 2 月 19 日; 改訂 7 月 10 日; 採択 8 月 19 日)

要 旨

2011 年 6 月～7 月に実施された文部科学省による東京電力福島第一原子力発電所近隣地域の土壌放射能汚染調査データに基づいて、土壌放射能汚染の地理分布の現状実態を把握し、空間放射線量率との関連性について分析した。土壌の放射能汚染度と空間放射線量率の相関は、測定日に降水がある場合高くなり、決定係数は 64%であったが、降水のない日のデータでは相関が低く、決定係数は 28%であった。今回の分析により、空間放射線量率の約 20%～35%程度は直下の土壌放射能汚染では説明できず、土壌放射能汚染のみを対象とした局所的な除染では、空間放射線の低減効果に限界があることが示唆された。

キーワード： 回帰分析, 空間放射線量率, 除染, 土壌放射能汚染, 福島第一原子力発電所事故。

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に、東日本東方沖を震源とする M9 の巨大地震(東日本大地震)が発生した。その直後、高さ 14 m 以上の巨大津波が東京電力福島第一原子力発電所(以下、福島第一原発と略称する)を襲い、その全ての電源が喪失し、1号機から3号機までの原子炉の溶融に至り、原子炉建屋内での水素爆発などを通じて、多くの放射能物質が環境中に漏出された(Strickland, 2011; 星, 2012)。原子炉建屋の外に漏出した放射性物質は、大気や海洋へ拡散して、首都圏を含む東日本の広い地域を汚染するに至った(Leelossy et al., 2011; 大瀧 他, 2012)。拡散した放射性物質は、主にヨウ素 131, セシウム 134 およびセシウム 137であった。放射能汚染による人の健康影響を考える場合、地上 1 m での空間放射線量率(今回の調査では、 $\mu\text{Sv/h}$)の方が土壌の放射能汚染濃度(同、地表 1 m² の範囲で 1 秒間に崩壊する原子核数)よりも放射線被曝の危険度を直接的に表す指標となっている。また、土壌中の放射能汚染の程度を計測するよりは、空間放射線量率を計測する方が容易なために、地域での放射能汚染に関する環境指標として後者がよく扱われている。一方、土壌中の放射能汚染は空間放射線量率を大きく規定している因子と考えられること、食物を通じての内部被曝の危険度を把握する上で、その実

¹ 広島大学 原爆放射線医科学研究所：〒734-8551 広島市南区霞 1 丁目 2-3

² 京都大学 原子炉実験所：〒590-0494 大阪府泉南郡能取町朝代西 2 丁目

³ 広島大学大学院 工学研究院：〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1 丁目 4-1

⁴ 広島大学 名誉教授：〒734-8551 広島市南区霞 1 丁目 2-3

態把握をすることに大きな意義があると考えられている。

本稿は、2011年6月～7月に実施された文部科学省による福島原発近隣地域の土壌放射能汚染調査で採取されたデータに基づいて、土壌放射能汚染の地理分布の現状実態を把握し、この調査で同時に計測されている空間放射線量率との関連性について分析することを目的とする。

2. 調査の概要

福島第一原発事故の約3ヶ月後である2011年6月4日～7月8日の時期に、福島県およびその周辺地域を対象として、福島第一原発から80km内で2kmのメッシュ地点での空間放射線量率および土壌の採取・分析によるセシウム137、セシウム134、ヨウ素131の核種に関する汚染濃度が計測されることになった。データの採取を梅雨末期に見込まれた大雨の前に完了することを目指したことやその後の解析に要する期間を勘案して上記のような調査の企画が行われ、土壌の採取には大阪大学と日本原子力研究開発機構(JAEA)が中心となり、94の大学等研究協力機関と民間企業3社から409人の科学者等が参加し、計2181地点での計測と試料採取が実施された。調査項目は「土壌サンプリングの日時と場所(緯度、経度)」、「核種別土壌汚染度(ヨウ素131、セシウム134、セシウム137)」、「空間放射線量率(高度1m, $\mu\text{Sv/h}$)と地表放射線量率(高度5cm, $\mu\text{Sv/h}$)」、「天候状況(調査時(日)での降水の有無)」および「サンプリング地点の特徴(自由記載)」である。各測定箇所における地表面から1m高さの空間放射線量率($\mu\text{Sv/h}$)は、GPSを活用して測定地点を特定した上で、 $30\mu\text{Sv/h}$ 以下の場所においては、校正済みのNaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータを使用し、それを超える空間放射線量率の場所においては、校正済みの電離箱式サーベイメータを使用して、測定されている。また、各測定箇所におけるヨウ素131やセシウム134、137の単位面積あたりの地表面への沈着量(Bq/m^2)は、各測定箇所で行われた最大5地点の複数の土壌試料をそれぞれ攪拌した上で、校正済みのゲルマニウム半導体検出器を用いて核種分析を実施し、それらの結果を平均化したものを使用している。これらのデータは大阪大学のホームページから実際の数値を含めて見ることができる(谷畑, 2011)。

3. 調査結果の概要

図1に、福島の土壌の放射能(セシウム)汚染(Bq/m^2 の値の常用対数値)の分布状況を示す。土壌汚染の地理分布の特徴として、事故原発周辺およびその北西近隣地区では 10^7Bq/m^2 を超えていた。その放射能汚染の範囲はかなり広く、事故原発から北西30km辺りに位置している飯館村でも 10^6Bq/m^2 程度となっていた。また、 10^5Bq/m^2 程度の汚染は福島県のほぼ全域に及んでいた。

図2は、福島県および周辺地区における地上1mの高度での空間放射線量率($\mu\text{Sv/h}$ の常用対数値)の地理分布を表す。そのパターンの概要は土壌汚染の地理分布と類似しているが、相対的にやや単純な分布をしていることが分かった。さらに詳しい空間放射線量率やセシウムおよびヨウ素131の土壌汚染調査結果については、大阪大学より汚染地図としてURLで公表されている(谷畑, 2011)。また、今井(2011)により福島原発事故前の日本全国の自然空間放射線量率地図がURL上に公表されているので参照されたい。

図3は、調査日当日における降雨の有無別調査地点の地理分布を表している。青いマークの地点では調査当日に降雨があったことを示しており、茶色のマークの地点では降雨がなかったことを示している。調査時点で降雨があった地点は対象地区全般に一樣に分布しているのではなく、福島県の北部や宮城県南部、会津地方東部、郡山市周辺および県南部に集積していることが分かる。表1に調査期間中で測定日別の降水の有無別測定地点数を示す。降水があった

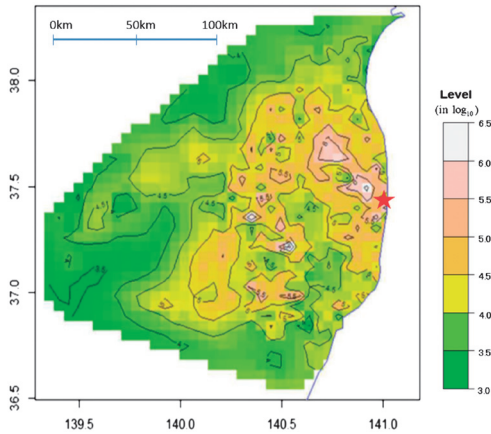


図 1. 福島県近隣の土壌放射能汚染地図。★印は福島第一原発の位置を示す。

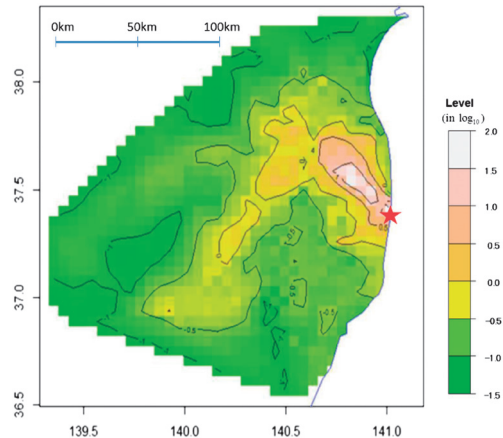


図 2. 福島県近隣の空間放射線量率。★印は福島第一原発の位置を示す。

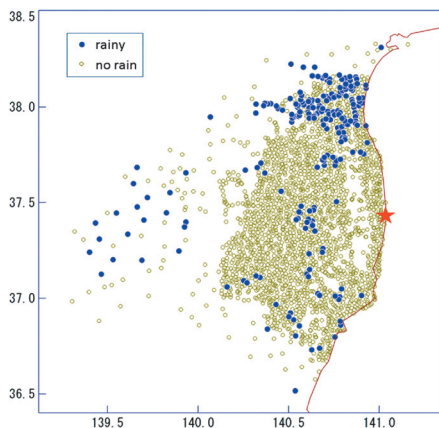


図 3. 降雨の有無別調査地点地図。★印は福島第一原発の位置を示す。

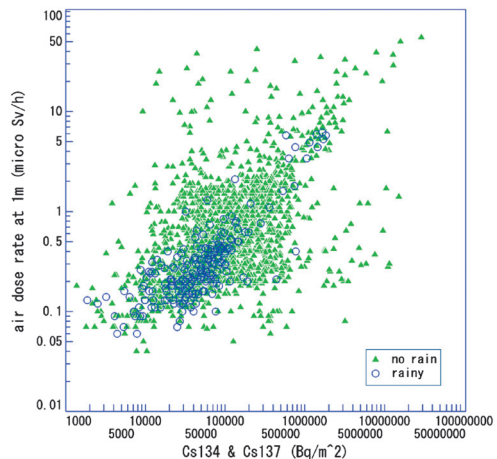


図 4. 降雨の有無別空間放射線量率と土壌汚染濃度の相関図。

という地点が最も多かった日は 2011 年 6 月 27 日で、121 地点で当日測定対象であった地点が 135 地点であった。その日に限って言えば、全体の 89.6% の地点で降水が観測されている。次いで降水が多く観測された日は、6 月 11 日の 43 地点(同、28.7%)であった。また、少なくとも 1 地点以上で降水が観測された日は、全測定日 22 日中で 9 日(40.9%)であった。

4. 土壌放射能汚染と空間放射線量率の相関

今回の福島第一原発事故に起因した放射能汚染は、原子炉内で発生した放射線(ガンマ線)を直接被曝したことによるものではなく、事故発生時に原子炉内で生成されていた放射性物質の微粒子が環境中に放出され広範囲の大気や土壌に拡散されたことによるものである。したがっ

表 1. 測定日別降水の有無別測定地点数.

番号	測定日	降水無し	降水あり	計
1	2011年6月4日	38	0	38
2	6月5日	150	3	153
3	6月6日	158	4	162
4	6月7日	150	0	150
5	6月8日	164	1	165
6	6月9日	168	0	168
7	6月10日	190	0	190
8	6月11日	107	43	150
9	6月12日	157	0	157
10	6月13日	159	0	159
11	6月14日	106	8	114
12	6月27日	14	121	135
13	6月28日	128	33	161
14	6月29日	93	0	93
15	6月30日	56	4	60
16	7月1日	29	0	29
17	7月2日	2	0	2
18	7月4日	24	0	24
19	7月5日	17	7	24
20	7月6日	27	0	27
21	7月7日	12	0	12
22	7月8日	8	0	8
	計	1957	224	2181

て、空間放射線量率は直下の土壌の放射能汚染濃度の影響を受けているものであり、両者間には強い正相関の存在が想定される。図 4 に、土壌のセシウム濃度と空間放射線量率の相関図を両対数プロットとして示す。青い円型マークは降雨有りの地点での観察値を示し、緑色の三角型マークは降雨無しの地点での観察値を示している。この図より、降雨が有った地点での相関係数が 0.80 であり、降雨が無かった場合の相関係数の 0.53 に比べて高いことが得られた。この相関関係から、降雨無しの日の空間放射線量率の測定値間変動は、その直下の土壌の放射能汚染強度で 28% 程度に止まっているが、降雨有りの場合は、約 2/3 程度にまで上昇することを示唆している。

降雨の有無による土壌放射能汚染と空間放射線量率の相関とその変動に関わる背景要因についての統計的探索を目的として、いくつかの回帰分析を行った。用いた変数の名前とその説明を表 2 に記す。

降水有りの日に測定されたデータに対する回帰分析

まず、降水有りの日に測定された計 224 地点のデータに対する目的変数を「地上 1 m での空間放射線量率の常用対数値」 dr1m.lg 、説明変数を「同直下の土壌放射能セシウム濃度の常用対数値」とした単回帰分析(回帰分析 A1)を行った。分析の結果を表 3 に示す。この単回帰分析で

表 2. 回帰分析に用いられた変数の名前とその説明.

変数名	説明
mCs.lg	Cs134 と Cs137 濃度 ((Bq/m ²) の和の常用対数値
dr1m.lg	空間放射線量率 ((μ Sv/h) の常用対数値
Dist	福島第一原発からの直線距離(10km 単位)
th	福島第一原発からの方角 (ラジアン, 真北であれば $\pi/2$)
th2	th ² (th の自乗)
th3	th ³ (th の 3 乗)
th4	th ⁴ (th の 4 乗)

表 3. 降水有りの日のデータに対する単回帰分析 (回帰分析 A1) の結果.

Coefficients:	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-3.323	0.141	-23.59	<2e-16 ***
mCs.lg	0.595	0.030	19.86	<2e-16 ***

***: $p < 0.001$

Residual standard error: 0.227 on 222 degrees of freedom,

Multiple R-squared: 0.640, Adjusted R-squared: 0.638

の決定係数は 0.640 であり, 降水有りの日の測定では, 空間放射線量率(の対数値)の変動の約 2/3 が直下のセシウムによる汚染濃度(の対数値)により説明できることが分かった.

次に, 降水有りの日における直下のセシウム汚染濃度以外の要因を探索するために, 目的変数を, 回帰分析 A1 と同じく (dr1m.lg) とし, 説明変数として, 回帰分析 A1 で使用した「直下の土壌の放射能汚染度(セシウム 134 とセシウム 137)濃度」(mCs.lg) 以外に, dist を用いた重回帰分析(回帰分析 A2)を行った. 表 4 にその解析結果を示す. この重回帰分析の結果として, 「直下のセシウム汚染濃度」の他に「原発からの距離」の高度に有意な寄与も検出されたが決定係数は 0.653 であり, 既述の単回帰分析 A1 による決定係数よりわずか 0.13 の上昇に止まるものであった. さらに, 説明変数として福島第一原発からの方角(th: 真東を 0 とした反時計回りのラジアン単位の角度)およびその冪乗(th2, th3, th4)と dist との積を追加した重回帰分析(回帰分析 A3)を行った. 表 5 にその解析結果を示す.

表 5 より, 直下の土壌の放射能汚染の程度に関して調整した場合でも空間放射線量率には, 方角(th や th の冪)の影響を強く受けており, それらを説明変数として使用することにより決定係数は 0.830 まで上昇したが, 直線距離(dist)の主効果の符号が反転しており dist だけは表現できない地形の複雑な背景要因が絡んでいることが示唆されており, 単純な解釈はできない結果となった.

降水無しの日に測定されたデータに対する回帰分析

同様に, 降水無しの日に測定された地点(計 1957 地点)のデータについても, 地上 1 m

表 4. 降水有りの日のデータに対する重回帰分析 (回帰分析 A2) の結果.

Coefficients:	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-2.912	0.2007	-14.51	< 2e-16 ***
mCs.lg	0.5413	0.0350	15.46	< 2e-16 ***
dist	-0.0226	0.0080	-2.83	0.005**

** : $0.001 \leq p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

Residual standard error: 0.223 on 221 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.653, Adjusted R-squared: 0.649

表 5. 降水有りの日のデータに対する重回帰分析 (回帰分析 A3) の結果.

Coefficients:	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-72.91	13.69	-5.325	2.56e-07 ***
mCs.lg	0.308	0.033	9.401	< 2e-16 ***
dist	6.734	1.824	3.692	2.8e-03 ***
th	91.97	19.63	4.684	5.0e-06***
th2	-41.88	10.26	-4.083	6.30e-05 ***
th3	8.031	2.330	3.447	6.82e-04***
th4	-0.5505	0.194	-2.832	5.06e-03**
dist:th	-8.605	2.638	-3.263	1.28e-03**
dist:th2	3.790	1.395	2.715	7.17e-03**
dist:th3	-0.689	0.321	-2.144	0.0332*
dist:th4	0.043	0.027	1.600	0.1110

* : $0.01 \leq p < 0.05$, ** : $0.001 \leq p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

Residual standard error: 0.159 on 213 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.830, Adjusted R-squared: 0.822

での空間放射線量率の常用対数値を目的変数とする単回帰分析 (回帰分析 B1) と重回帰分析 (回帰分析 B2, 回帰分析 B3) を行った. 表 6, 表 7 および表 8 に, それぞれの分析結果を示す. 降水無しの日に測定されたデータにおいては, 空間放射線量率 (の対数値) と直下のセシウム汚染濃度 (の対数値) の相関は弱く, その決定係数は 0.283 に止まった. 距離 (dist) を説明変数に加えた重回帰分析では, 決定係数は 0.422 となり, その回帰係数としては負値で高度に有意な値が推定された (表 7). さらに, 福島第一原発からの方角の情報を説明変数に加えた場合, モデ

表 6. 降水無しの日へのデータに対する単回帰分析 (回帰分析 B1) の結果.

Coefficients	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-2.675	0.085	-31.48	<2e-16 ***
mCs.lg	0.440	0.016	27.79	<2e-16 ***

***: $p < 0.001$

Residual standard error: 0.441 on 1955 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.283, Adjusted R-squared: 0.283

表 7. 降水無しの日へのデータに対する重回帰分析 (回帰分析 B2) の結果.

Coefficients	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-1.340	0.088	-15.20	< 2e-16 ***
mCs.lg	0.313	0.015	20.31	< 2e-16 ***
dist	-0.088	0.004	-21.59	< 2e-16 ***

***: $p < 0.001$

Residual standard error: 0.371 on 1954 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.422, Adjusted R-squared: 0.422

ルの説明力がかなり改善され、その決定係数は 0.651 となったが、dist の主効果の推定値が正値に反転した (表 8)。

表 5 と表 8 の比較により、空間放射線量率は降雨の無い日の方において降雨があった日より福島第一原発からの直線距離や同方向およびそれらの交互作用の影響をより強く (かつ高度に有意に) 受けていることが判った。

5. 考察

現在、放射能汚染を速やかに低減させるべく福島県東部地域を中心に各地で除染作業が進められているが、それらの作業では、土壌汚染濃度の測定は技術的に煩雑で、実務的要素の強い「除染作業」でそれを指標として使用することは非現実的であるという理由により、土壌放射能汚染濃度そのものを尺度とするのではなく、空間放射線量率を 1mSv まで低下させることを目標にして行われている。自然な推察として、空間放射線量率はその直下の土壌の放射能汚染と密接な関連があると考えられる。しかし、今回の調査・解析の結果によれば、その両者の相関係数の大きさは意外に低く、測定日に降雨があった場合に 0.8 程度、測定日に降雨が無い場合は 0.5 程度の水準に止まっていた。決定係数でみた場合、それぞれ、64% と 28% であるので、空間放射線量率の地理的変動は直下の土壌の放射能汚染の度合いでは降水のある日で 2/3 程

表 8. 降水無しの日へのデータに対する重回帰分析 (回帰分析 B3) の結果.

Coefficients	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-5.854	3.983	-14.70	< 2e-16 ***
mCs.lg	0.179	0.013	14.19	< 2e-16 ***
dist	7.620	0.679	-11.22	< 2e-16 ***
th	74.62	5.537	13.48	< 2e-16 ***
th2	-34.04	2.788	-12.21	< 2e-16 ***
th3	6.583	0.606	10.87	< 2e-16 ***
th4	-0.460	0.048	-9.578	< 2e-16 ***
dist:th	-10.31	0.945	-10.91	< 2e-16 ***
dist:th2	4.884	0.477	10.231	< 2e-16 ***
dist:th3	-0.981	0.104	-9.420	< 2e-16 ***
dist:th4	0.071	0.008	8.562	< 2e-16 ***

***: $p < 0.001$

Residual standard error: 0.289 on 1946 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.651, Adjusted R-squared: 0.649

度, 同無い日で 1/3 弱程度しか説明できないことが判明したことになる. 重回帰分析の結果として, 空間放射線量率に影響を与えている要因として直下の放射能汚染濃度以外に福島第一原発からの直線距離(dist)や方角(th およびその冪)が寄与を有していることが得られたが, 何れも測定日に降水が有った地点と比べて降水が無かった地点で, それらの説明力が増大したことは, 空間放射線量率の日変化の機序に関する重要な示唆を与えているものと思われる. なお, 朝日新聞(2011)および気象庁(2011)から公表されたデータを用いた大瀧 他(2012)の解析によれば, 福島第一原発事故の直後の 2011 年 4 月 13 日から同年 8 月 13 日に観測された東日本の地点毎の空間放射線量率は, 当地の天気の影響を受けており, 事故原発の近隣地区では雨天の場合に低下するが, 事故原発から遠い地区では, 逆にやや上昇する傾向の在ることが報告されている. 一つの仮説ではあるが, 降雨が無くある程度の風が吹いていた日の場合, 各地点での空間放射線の一部は近隣の放射能汚染のより高い周辺地区からの汚染微粒子の飛来があったのではないかと推察される. 降雨が有る日の場合には, 汚染された微粒子が地上に雨滴と共に落下することで, 直下の放射能汚染以外の環境要因の寄与が減少しているのかもしれない. 直下の土壌放射能汚染と福島第一原発からの距離のみを説明変数とした重回帰分析より, 測定日での降雨の有無別で空間放射線量率が 10 km 当たり 2.2% および 8.8% 減少している(表 4, 表 6). このような空間放射線量率の福島第一原発からの距離依存性は, 上述の近隣の放射能汚染による二次汚染の可能性が降雨の無い日に, より高くなることを示唆しているものと思われる. なお, 測定日での降水の有無により相関係数が大きく異なったことに関する他の背景要因として, 降水の有った日の測定地点が高汚染地域と極低汚染地域にやや二極化された分布をしていること, 及びその一方で降水の無かった日の測定地点は高汚染地域から極低汚染地域までほぼ

一様に分布していることが挙げられるかもしれない。しかし、回帰分析の結果として、単回帰分析および重回帰分析の何れも降水の有った日の測定値の寄与率が大きかっただけでなく残差の標準偏差の値も小さくなっていることより、測定日の降水の有無による空間放射線量率と直下土壌の放射能汚染の程度との相関の違いに、測定点の分布の違いが本質的な影響を与えているものとは考えにくい。もし、上記の仮説が真実に近いものであるならば、(今回の重回帰分析によれば)空間放射線量率の約20%~30%程度は直下の放射能汚染では説明できず、直下の放射能汚染のみを対象とした除染による空間放射線の低減効果に限界が有ることになる。

本研究により、土壌放射能汚染度と空間放射線量率の関連性について、降水の有無による地域変動に焦点を当てて検討を行ったが、今回の解析で扱ったデータは観測地点毎に1回(1日)のみの測定の結果採取されたものであり、断定的な結論を出すには明らかに情報が少なすぎる。空間放射線や土壌放射能汚染の動向について、中長期的視野からの除染の効果を評価しうるような確実性の高い将来予測を行うには、同一地点での繰り返し観察やより詳しい天候情報を含むデータの収集と解析が必要と思われる。

謝 辞

本研究は日本学術振興会交付の平成24年度科学研究費補助金・基盤研究(A)課題番号24249039と統計数理研究所共同研究プログラム・課題番号・共研4102からの援助を受けたものである。本原稿の作成において建設的な助言や査読をしていただいた編集委員および査読者の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 朝日新聞(2011). 原発事故の市民生活への影響>各地で観測された大気中の放射線量, http://www.asahi.com/photonews/gallery/infographics/110324radiation_24am8.html.
- 星 正治(2012). 福島における原子力発電所の事故の経過と今後, 日本統計学会誌, **42**(1), 145-151.
- 今井 登(2011). 日本の自然放射線量, <http://www.geosociety.jp/hazard/content0058.html>.
- 気象庁(2011). 過去の気象データ・ダウンロード, <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>.
- Leelossy, A., Mészáros, R., Lagzi, I. (2011). Short and long term dispersion patterns of Radio-nuclides in the atmosphere around the Fukushima Nuclear Power Plant, *Journal of Environmental Radioactivity*, **102**(12), 1117-1121.
- 大瀧 慈, 大谷敬子, 富田哲治, 佐藤健一(2012). 福島第一原子力発電所事故後の東日本での空間放射線量率の時空間分布, 日本統計学会誌, **42**(1), 91-101.
- Strickland, E. (2011). Explainer: What went wrong in Japan's nuclear reactors, *IEEE Spectrum*, <http://spectrum.ieee.org/tech-talk/energy/nuclear/explainer-what-went-wrong-in-japans-nuclear-reactors>.
- 谷畑勇夫(2011). 福島土壌調査, <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/dojo/>.

Relevance of Degree of Radiation Contamination of Soil
and Air Radiation Dose Rate in Neighborhood of
Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

Megu Ohtaki¹, Keiko Otani¹, Tetsuji Imanaka², Satoru Endou³ and Masaharu Hoshi⁴

¹Research Institute for Radiation Biology and Medicine, Hiroshima University

²Kyoto University Research Reactor Institute

³Graduate School of Engineering, Hiroshima University

⁴Professor Emeritus, Hiroshima University

The Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology in Japan conducted a survey on the soil radioactive contamination and air radiation dose rate in the neighborhood of the Fukushima Daiichi nuclear power plant in June-July, 2011. We thus analyzed the association between the air dose rate and the soil radiation contamination. When precipitation occurred on the measurement date, the determination coefficient became 64%, and it reduced to 28% when there was no precipitation. According to this analysis, about 20% to 35% of air radiation dose rate cannot be explained by the degree of soil radioactive contamination directly beneath. It suggests that local decontamination may have a limited effect on reducing the air radiation dose rate.