

福島第一原発 2011 年 3 月事故による 放射能汚染と健康リスク評価

早川 由紀夫

群馬大学教育学部地学教室

(2013 年 9 月 18 日受理)

Radioactive contamination and health risk evaluation from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident in March, 2011

Yukio HAYAKAWA

Department of Earth Science, Faculty of Education, Gunma University

Maebashi, Gunma 371-8510 Japan

(Accepted on September 18th, 2013)

Abstract

In the afternoon on March 11, 2011, a huge earthquake and tsunami which occurred in the Pacific Ocean off the coast of East Japan crippled the Fukushima I (Daiichi) Nuclear Power Plant. In the following two weeks, a large amount of radioactive materials leaked from the plant. Areas as far away as Iitate, 40 kilometers northwest of the plant, got severely contaminated. Nakadori (middle third) of Fukushima Prefecture, and the northern Gunma and Tochigi were also badly contaminated. Eastern part of the Tokyo Metropolitan region and southern Iwate were also contaminated.

In the evening of April 8, 2011, the Nuclear Team of the Disaster Response Group of Fukushima Prefecture announced the dose rates at 1,648 schools and kindergartens in Fukushima. I found the data on the Internet, and picked one or two high numbers in each municipality, plotted them on the Google Map, and made the map public that day with the three isopleths of 8, 2, and 0.5 $\mu\text{Sv/h}$. That was the first of the radiation contour maps. Ms. Sachiko Hagiwara beautifully stylized the map, and it was published on the Internet on April 21, 2011 as the first version map. I continued to collect information, and published the revised version on June 18, 2011. This version was the first to depict the contamination in northern Tochigi and Gunma, eastern Tokyo Metropolitan region, and southern Iwate. I revised the map every 3 months, and the current map is the 8th edition.

Wind determined the distribution of radioactive contamination. Volcanic ashes from the volcanic eruption are transported by the wind at a high altitude of several kilometers and higher. However, radioactive materials leaked from the Fukushima I Nuclear Power Plant were transported by the wind near the ground surface. Looking at the meteorological data of that time period, wind directions at an altitude of 1 kilometer

and higher cannot explain the distribution. I believe radioactive materials were carried by the surface wind whose altitude was dozens of meters off the ground at most. That is the reason why the isopleths of radiation seem to follow the ups and downs of geography, such as basins and mountain sides.

The radioactive fog that passed over Minami Soma in Fukushima Prefecture at 9PM on March 12 continued over Sendai Bay and reached Onagawa in Miyagi Prefecture at 2AM on March 13. The contamination on March 15 was the worst. The radioactive fog that passed over Iwaki City in Fukushima Prefecture at 4AM reached Kanto Plain at 6AM. Since it was not raining, the fog then headed west and north until it hit the mountainous regions in Kanto and northern part of Gunma and Tochigi Prefecture, where, for the first time, it met the rain, and radioactive materials came fell to the ground with the rain. The contamination of Fukushima Nakadori also happened on that day. Radioactive materials that crossed the Abukuma Mountains came down with the snow. In the afternoon, a particularly dense radioactive fog was spewed from the nuclear plant. Carried by the wind, it went straight in the northwesterly direction, and contaminated the areas all the way to Iitate and Fukushima City, which the fog hit at 6PM. In the evening of March 20, areas near the Miyagi-Yamagata border and southern Iwate were contaminated. After that, the wind turned south, sending the fog past Mito City in Ibaraki Prefecture at 6AM on March 21, and reaching Shinjuku, Tokyo at 9AM. For 3 days from March 21 to 23, the Kanto region had intermittent rains. Moderate contamination seen in the eastern part of the Tokyo Metropolitan region is from this time period.

The dates and times of contamination that I have just explained above do not coincide with the dates and times of explosions that took place at Fukushima I Nuclear Power Plant. Unit 1 exploded at 3:36PM on March 12, and Unit 3 exploded at 11:01AM on March 14. It was not at these moments that the large amount of radioactive materials leaked from the plant; the release of radioactive materials into the atmosphere coincide with sharp fluctuations in the reactor pressure.

要旨 2011年3月11日に起こった大きな地震と津波のあとしばらくして、大量の放射性物質が福島第一原発から大気中に出た。私はその汚染分布を迅速に把握して地図に表現し、インターネットで即座に公表した。放射性物質は原発から連続的定常的に放出されたのではなかった。3月12日、3月15日、それから3月20-21日に大きな放出イベントがあった。原子炉格納容器の圧力が低下あるいは上昇したときに対応する。順に1号機、2号機、3号機からの放出だった。大気中に出たセシウムは1京1000兆ベクレル(11PBq)。1986年のチェルノブイリ原発事故で出たセシウムの1/12である。しかし人口密度を考慮すると、被害は両者ほぼ同じかフクシマが3倍深刻である。芝生や森の林床だけでなく、アスファルトの上でも2011年3月に降り積もったセシウムはほとんど移動していない。そういった場所の放射線量率の自然減衰はセシウム134と137の半減期でよく説明できる。この事故で放出されたセシウムに起因するがん死の増加は5300人と見積られる。今後50年間の福島中を通りにおける放射能リスクは交通事故リスクの1/2である。

1. 各地の汚染を私が把握した月日と放射能汚染地図の改訂

福島第一原発の 2011 年 3 月事故の直後に、私が放射能汚染地図を作って公開して、それを何度も改訂した経緯はすでに報告した(早川、2013)。ここでは、私が各地の汚染をいつ把握したかと初版から八訂版に至る改訂でそれぞれ何を新しく盛り込んだかを説明しよう。

福島市がひどく汚染されたことに私が気づいたのは 3 月 16 日 07:09 だった。その時刻に私はツイッターでこのようにツイートした。「福島市、28 マイクロシーベルトきのう。NHK」飯館村が汚染されたことに気づいたのは 3 月 24 日 16:53 だった。こうツイートした。「飯館村の雑草 265 万ベクレル 福島、野菜を大幅上回る」(福島民報)。

4 月 8 日、福島県教育委員会が県内 1600 の学校・幼稚園で放射線量率を測ってインターネットで公表したのを見つけ、すぐさまグーグルマップで地図を作って 22:31 に公表した(図 1)。そこでは、8、2、0.5 μ Sv/h の 3 本の等値線だけを引いた。これが、私が作った放射能汚染地図の最初である。地図を作ってみて、福島中通りがひどく汚染されたことがわかって呆然としたことをよく覚えている。その翌日 9 日 11:25 には、柏市が中程度に汚染されていたのを知ることになる。

放射能汚染地図の初版をインターネットに置いたのは、4 月 21 日である(図 2)。やはり 8、2、0.5 μ Sv/h

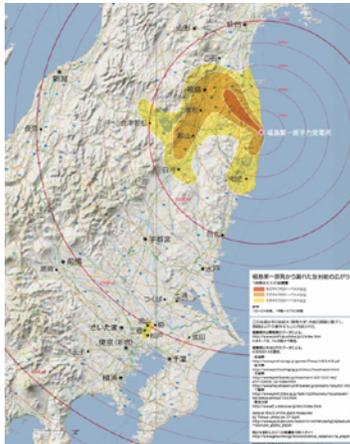
線のみだった。福島中通りの汚染が白河の関を超えて栃木県に深く侵入していたのをまだ知らなかった。柏の汚染は 0.5 μ Sv/h で無理やり表現した。そして、私のこの作戦は「当たった」。心配する市民の声に突き上げられた自治体が放射能を測定せざるを得なくなり、このあとたくさんの計測値がインターネット上で報告されるようになった。

那須と日光が汚染されていたのを私が知ったのは、それから 1ヵ月後の 5 月 21 日 04:18 である。こうツイートした。「栃木県調査 1266 地点。北部深刻。那須町は 1.2 マイクロ(町調査の 2 倍)。深刻な汚染が日光市の山のほうまで(0.5 マイクロ)」群馬県の川場村が汚染されていたのを私がツイートしたのは、その 4 日後の 5 月 25 日 13:37 である。「恐れていたとおり沼田市と川場村がやられてしまっていた。群馬県 5 月 24 日発表(5 月 20-22 日測定)」川場村が深刻に汚染されているらしいうわさは、かなり前から聞いていた。しかし(群馬県の測定で)確実になるまで私はひとことも言わなかった。そのころ私は測定器をもっていなかった。那須も、雨どいが高濃度に汚染されている断片的情報を 5 月 21 日の 10 日くらい前に入手していたが、ツイートすることはなかった。

一関市が汚染されていたのを知ったのは 6 月 10 日 17:04 である。こうツイートした。「岩手県千厩が 0.24。4 月に通ったあのどかな町が汚染されていた。女川から千厩をかすめて一ノ関に向かったルートでうまく説明できる。有壁駅付近の高濃度汚



図 1 4 月 8 日 22:31 に公表したグーグルマップ。
@ichijiaka さんが 8 分後に保存したものを提供してくれた。



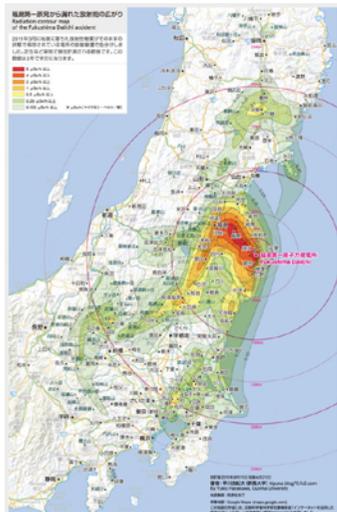
初版 (2011年4月21日)



改訂版 (6月18日)



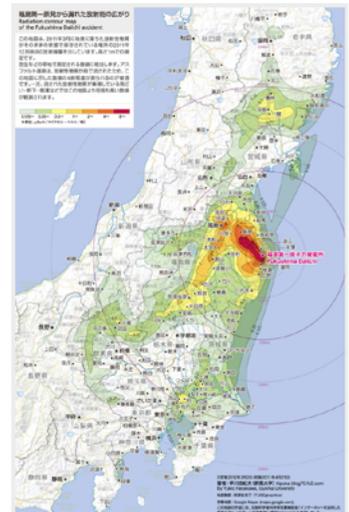
三訂版 (7月26日)



四訂版 (9月11日)



五訂版 (12月9日)



六訂版 (2012年3月2日)



七訂版 (7月28日)



八訂版 (2013年2月8日)

図2 事故後2年間に迅速発表した放射能汚染地図8種。
六訂版まではウェブ公開。七訂版と八訂版は紙印刷配布。

染の続報はみつからない。」

以上の新知見を地図に表現して、改訂版を 6 月 18 日にインターネットで公表した。この時点で、国と地方自治体が 7000 を超える地点で放射線量率を測定してインターネットで公表していた。その範囲は福島県内だけでなく、関東地方全域と東北地方南部に及んでいた。それら測定点の位置を @nnistar さんがひとつ一つ地図の上で確かめて、測定値ごとに色分けしてプロットしていた。たいへんな御苦労である。改訂版の等値線は、@nnistar さんのプロットによるところが大きい。したがって私の改訂版地図は、国と自治体が測定して発表した数値を火山灰分布の表現を専門とする私が解釈して作ったものである。通常の火山灰マップと同じように 8、4、2、1、0.5、0.25 と、逐次半分になる等値線群を引いた。群馬、日光那須、一関の汚染を表現した。この時点で、文部科学省による航空機モニタリング地図はまだ 100km 圏内までしか公表されていなかったから（表 1）、この版は大きな衝撃をもって社会に受け止められた。たくさんの雑誌・新聞・テレビに取り上げられ、衆議院予算委員会でもパネルにして 7 月と 9 月に紹介された。

三訂版は 7 月 26 日に公開した。6 月 18 日以後に公開された情報と、測定器を取得した私自身の独自調査結果に基づいて等値線に修正を施した。本質的な変更はない。欧州旅行に発つ前に最新情報を盛り込んで急いで改訂したので不細工である。

欧州旅行から帰って 9 月 11 日に四訂版を公表した。外側に $0.125\mu\text{Sv/h}$ 線を追加した。盛岡・船形山・関東山地・熱海の汚染を表現した。

五訂版は 12 月 9 日に公表した。赤城-那須-白河-福島汚染は飯館と別個で、南東からだったと判断変更して等値線を引き直した。

六訂版は 2012 年 3 月 2 日に公表した。主な変更点は次の 3 つである。1) 一関の汚染は 3 月 12 日に女川経由だったのではなく、3 月 20 日に奥羽山脈経由だった。2) 五訂版で釜石から北に延ばした $0.125\mu\text{Sv/h}$ 線は自然放射能を誤認したものであったので、元に戻した。3) 群馬県と栃木県の等値線をやや拡大した。

表 1 文部科学省による航空機モニタリング地図発表の日

2011年

(4月21日 初版)

5月6日 80km 圏内

6月16日 100km 圏内

(6月18日 改訂版)

7月8日 80km 圏内、比較のため再度。

7月20日 宮城県

(7月26日 三訂版)

7月27日 栃木県

8月30日 茨城県

9月8日 山形県

(9月11日 四訂版)

9月12日 福島県西部

9月27日 群馬県

9月29日 埼玉県、千葉県

10月6日 東京都、神奈川県

10月12日 新潟県、秋田県

11月11日 岩手県、静岡県、長野県、山梨県、

岐阜県、富山県

11月25日 愛知県、青森県、石川県、福井県

(12月9日 五訂版)

2012年

(3月2日 六訂版)

5月11日 九州地方、沖縄県

5月18日 四国地方

6月8日 近畿地方

6月15日 中国地方

7月27日 北海道

(7月28日 七訂版)

() 内に、私の放射能汚染地図の発表日を示した。

七訂版の発表は2012年7月28日だった。初めて紙に印刷した。A2サイズ両面カラー印刷である。主な変更点は次の5つである。1) 原発から北西方向に16 μ Sv/h線を新設した。2) 福島中通りの2、1、0.5 μ Sv/h線を大幅に変更した。3) 女川を閉曲線で表現した。4) 奥多摩、千葉県、岩手県などの0.125 μ Sv/h線を変更した。5) 丹沢に0.125 μ Sv/h

閉曲線を新設した。

八訂版の発表は2013年2月8日だった。現地調査に基づいて等値線を精密化した。とくに茨城県内を大きく変更した。裏面に置いた汚染の日時図を大幅に変更した。今回、この論文のためにモノクロ簡略版を用意した(図3a)。

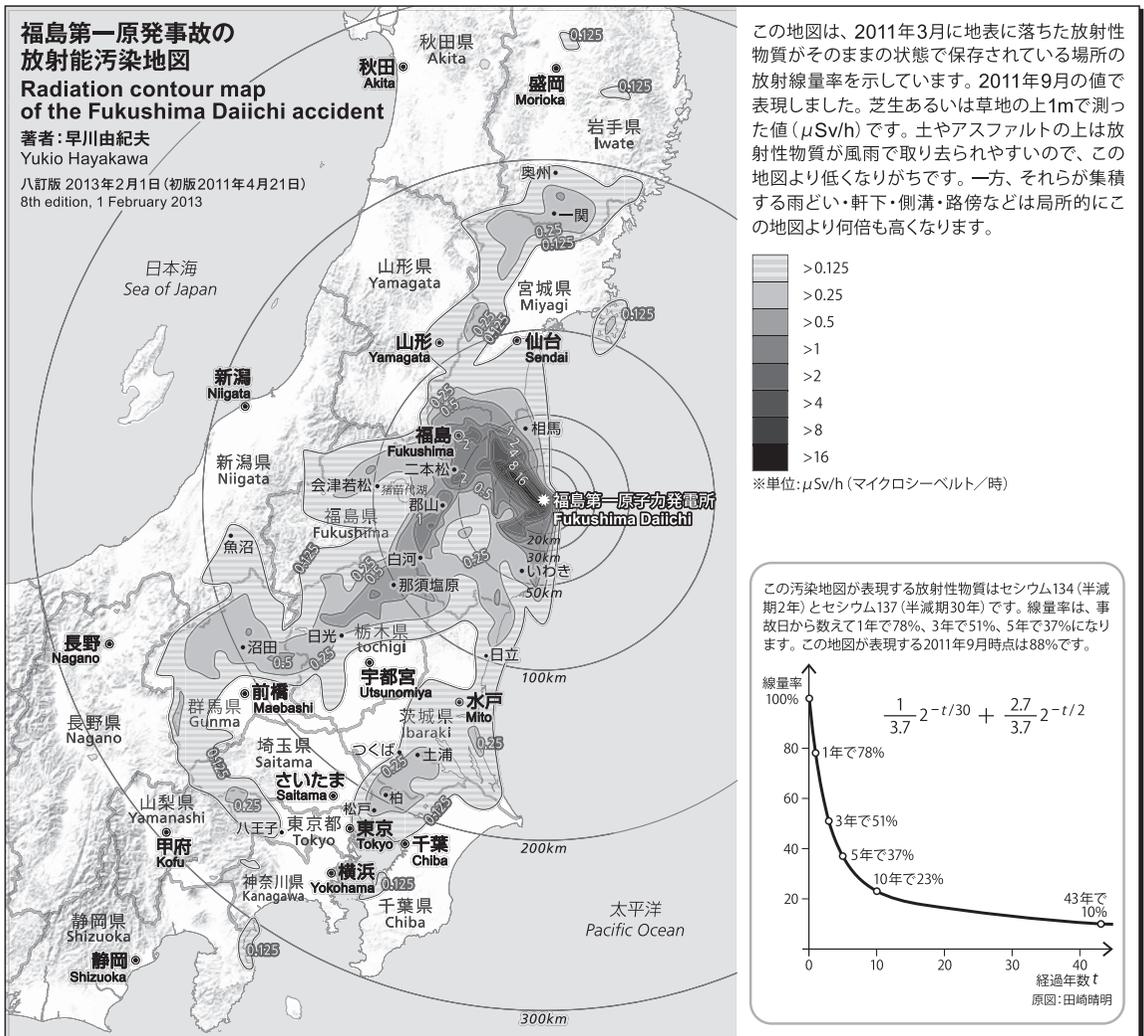


図3 a 最新の放射能汚染地図 (八訂版)

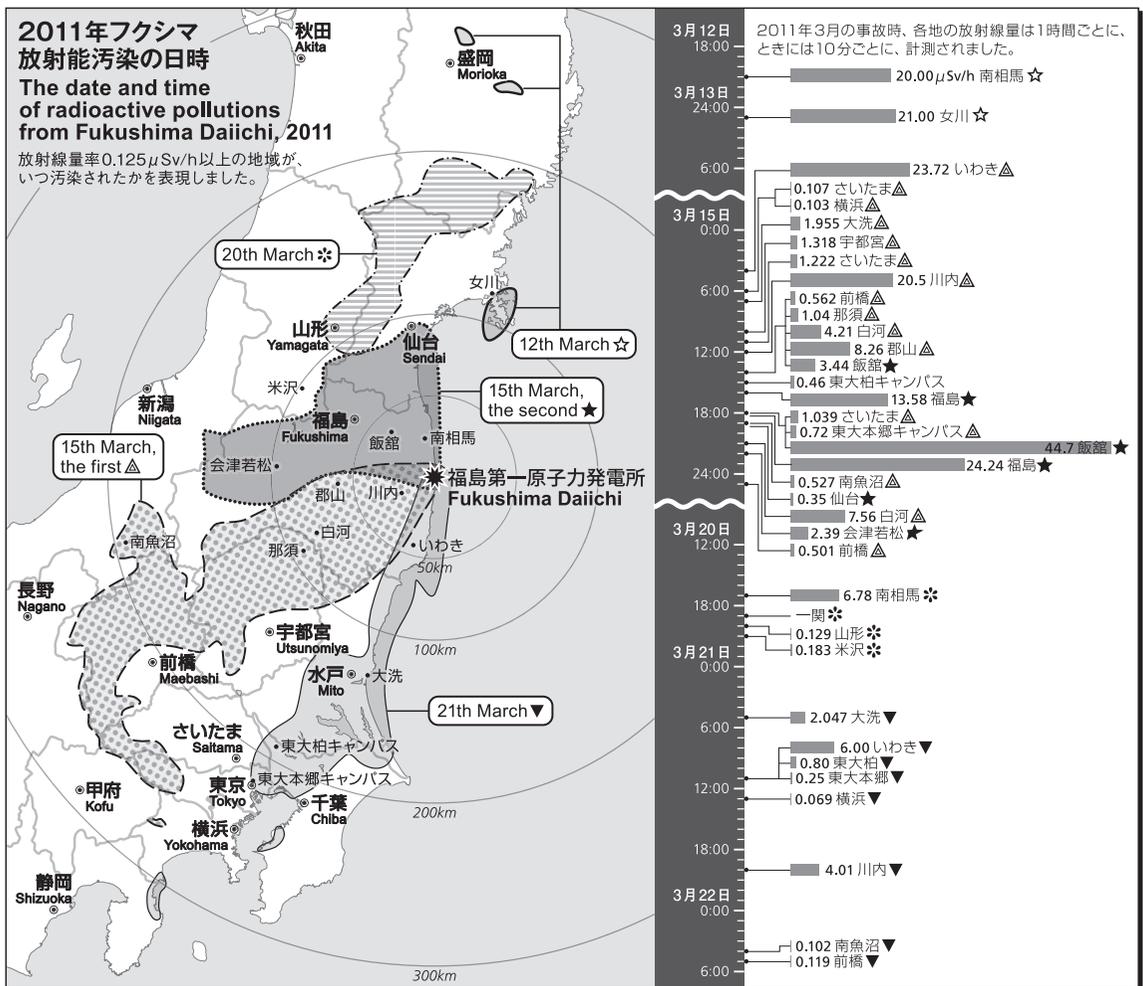


図3 b 放射能汚染の日時

2. 各地が放射能に汚染された日時

原発事故で大気中に放出された放射性物質の挙動を支配するのは風である。噴火によって火山から吹き出された火山灰は上空数 km から十数 km を吹く高空の風で移動する。しかし、福島第一原発から 2011 年 3 月に漏れ出した放射性物質は地表のすぐ上を吹く風に乗って移動した。当時の気象データを見ると、上空 2km 以上の風向きでこの分布を説明することはできない (図 4)。放射性物質は、地表と高さ数十 m の間を吹いた風に乗って地表をなめるように移動したと思われる。目に見えない霧が地表の上を移動して行ったと考えると理解しやすい。汚染を示した等値線が盆地や山肌など地形の起伏をよく感じ取っているのはそのためである。

最初の汚染は 2011 年 3 月 12 日だった (図 3b)。21 時に南相馬を通過した放射能霧 (radioactive fog) が仙台湾を越えて、翌 13 日 2 時に女川を通過した。そのあとも北上を続けて早池峰山を経て盛岡まで達した。弘前大学が 3 月 16 日にルート測定したとき、盛岡がすでに汚染されていたことがわかっている (Hosoda *et al.*, 2011)。

15 日にもっともひどい汚染が生じた (図 5a)。前日の 14 日 23 時に原発から出発した放射能霧は、4 時にいわきを通過して、6 時には関東平野に達した。しかし予報されたにもかかわらず、そこで雨が降らなかった。雨を免れた放射能霧は関東平野を横切って西と北に向かい、原発を出発してから 24 時間後に関東山地と群馬栃木北部の山々に突き当たった。そこで初めて雨に出会って放射性物質が地表に落ちた。那須高原と福島中通り南部もこのとき汚染された。放射能霧の移動速度は 4m/s (14km/h) だった。24 時間かけて 340km を移動した。

福島中通り北部が汚染されたのもこの日だった。15 日 11 時に原発から出発した放射能霧は、18 時ころ飯舘・福島・二本松に達した (図 5b)。阿武隈山地を越えて福島盆地に入り込んだ放射性物質は雪といっしょに地表に降り積もった。その移動速度は 2m/s (7km/h) だった。原発から出たばかりの 11 時は、北北東風だったのでいったん南南西に流された

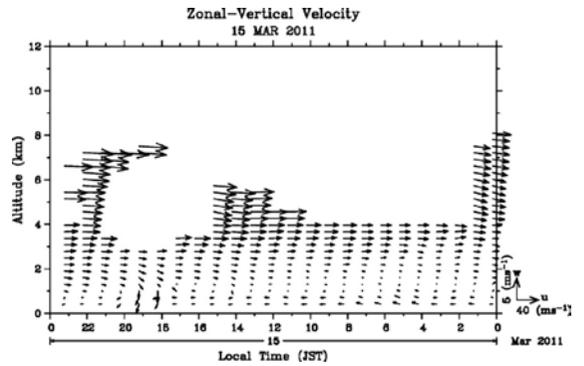


図 4 2011 年 3 月 15 日水戸の Wind プロファイル (気象庁)。2km 以上の風だと東の海上に行ってしまう。

が、12 時ころから風向きが変わって北西方向に向かった。汚染の帯が原発を通らないで 4km ほど南にずれているのはこのためである。

この日 3 度目、夕刻 18 時に原発から出発した放射能霧は、11 時に出発した放射能霧が通った帯のすぐ北側を平行に進んで、双葉厚生病院から吉沢牧場に向かう細い汚染帯を残した。

会津盆地は、前夜 23 時に出発して 24 時間かけて戻って来た放射能霧にも汚染されたが、11 時に出発して福島盆地経由で北東から侵入してきた放射能霧によりひどく汚染された。3 月 15 日の汚染時刻とルートの解明には、ツイッターにおける @neko3no3te さんの貢献が大きい。

20 日夕刻、宮城/山形県境と岩手県南部が汚染された。一関は、弘前大学の 3 月 16 日ルート測定ではまだ汚染されていなかったが、4 月 11 日ルート測定では汚染されていた (Hosoda *et al.*, 2011)。一関が汚染されたのは 20 日 19 時ころだったことが、その時間帯にわずか 10 分だけ使用した @guotier さんの COACH の傘が $0.25\mu\text{Sv/h}$ に汚染されていた事実から知ることができる。栗原市にある宮城県立循環器・呼吸器病センターの毎日観測で、3 月 20 日まで $0.06\mu\text{Sv/h}$ だった数値が 21 日に $0.26\mu\text{Sv/h}$ に急上昇した。このあと風は南に回った。

20 日 23 時ころ原発を出発した放射能霧は、6m/s (20km/h) で太平洋上を南に進んだ。そして翌 21 日

5時に大洗、6時に銚田を通過して、7時20分に霞ヶ浦上で雨雲と衝突した。この放射能霧が移動した痕跡は、幅5kmの帯内にあるスギ林がひどく汚染されているのを、いまでも確認できる。雨雲と衝突したあとも放射能霧は雨雲の下層を南西に向かって進み続け、阿見・守谷・柏の地表を放射性物質で汚染した。9時には東京新宿に達した。首都圏東部に見られる

中程度の汚染と南部の木更津や熱海に見られる軽微な汚染はこのとき生じた。それは断続的な降雨に伴って23日まで続いたが、初日21日の汚染がもっともひどかった。ただしヨウ素は22日にも大量の降水があった。

小笠原諸島父島は、福島第一原発から1200km離れている。2012年6月18日に八王子市民測定室に

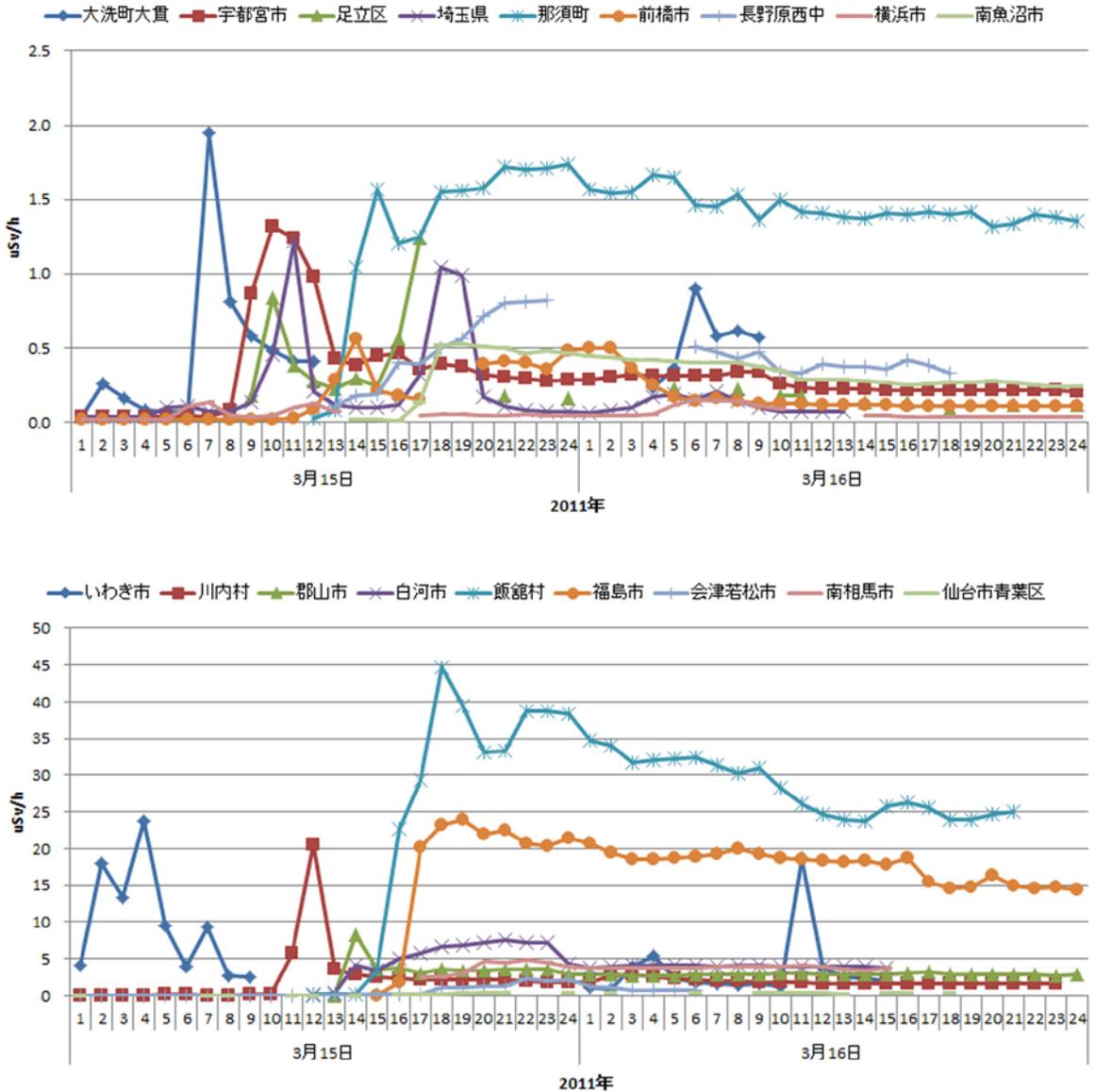


図5 2011年3月15-16日の放射線量率上昇。a) 関東地方、b) 福島県。自治体発表による。ただし長野原西中と仙台市青葉区は個人が測定してインターネットに公表したデータによる。

持ち込まれたドブ泥のセシウム合計が35Bq/kgあったという。内訳は、セシウム134が16.3Bq/kg、セシウム137が19.0Bq/kg。福島第一原発によって汚染されたに間違いはない。汚染された日時は不明だが、4月5日7時の可能性がある。その日、ヨウ素が宮崎(2.5Bq/m²)と沖縄(4.8Bq/m²)に降った。風シミュレーションを見ると、3月23日8時だった可能性もある。

ここで説明した汚染の日時は、原発で起こった爆発の日時と合わない。1号機は3月12日15時36分

に、3号機は3月14日11時01分に爆発したが、原発から大量の放射性物質が漏れたのはその瞬間ではなかった。そのタイミングは、ドライウェル(原子炉格納容器)の圧力変化とよく符合する。3月12日14時に1号機で急降下、14日23時に2号機で急上昇、15日11時に2号機で急降下、15日16時から3号機で緩やかな降下、20日5時から3号機で緩やかな降下があった(図6)。

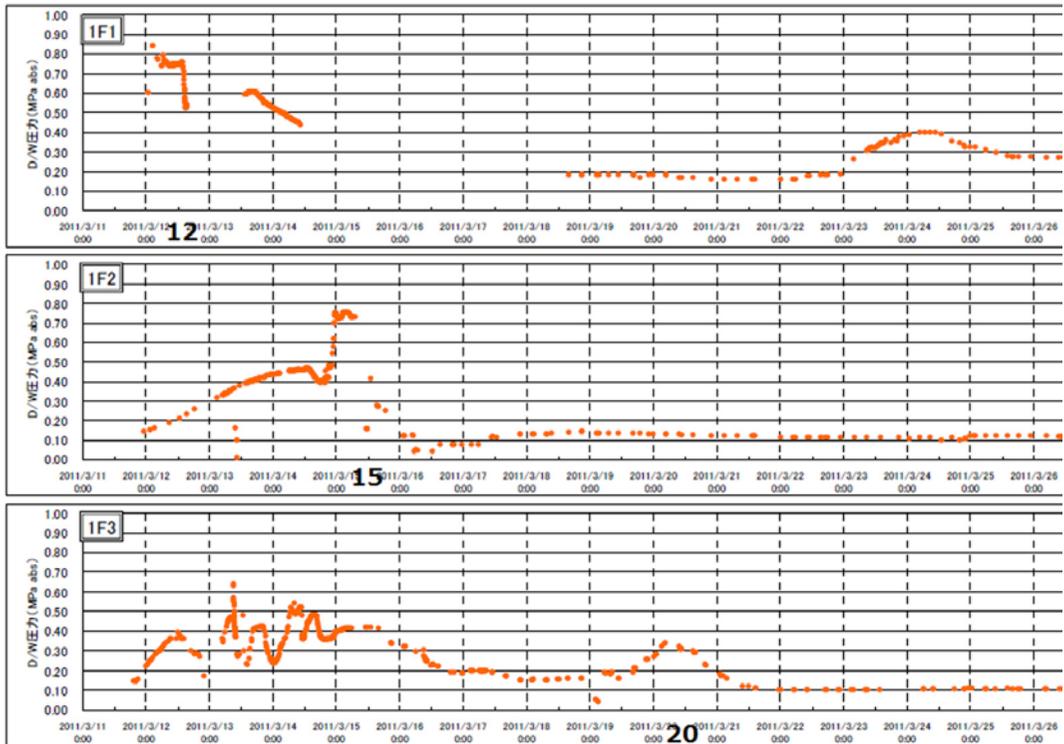


図6 ドライウェル圧力の変化。東京電力株式会社 (2011、p.74)

3. フクシマ事故で放出されたセシウムの総量

福島第一原発の 2011 年 3 月事故で放出されたセシウムの総量を、放射能汚染地図（八訂版）を使って計測した。等値線が囲む面積は、@pluredroさんと@kyakkyauhuhuhuさんによる独立測定がよく一致することを確かめた。表 2 には@pluredroさんによる測定結果を示した。

フクシマ事故で放出された放射性セシウムは 134 と 137 がベクレルで測ってほぼ等量含まれていた。そのシーベルト比は 2.5 : 1.0 だから、セシウム 137 の寄与は 0.29 である。 $1\mu\text{Sv/h} = 480\text{kBq/m}^2$ を仮定して、セシウム 137 のベクレル総量を、等値線とその囲む面積を 12.2 倍すると得られるとみる火山学における経験式 (Hayakawa, 1985) を用いて、それぞれのシーベルト等値線について計算した。ただし自然放射線による寄与を $0.03\mu\text{Sv/h}$ と見積もって引いた。使用した計算式は次である。

$$\text{セシウム 137 (GBq)} = 0.29 \times 480 (\text{kBq/m}^2) \times \text{放射線量率} (\mu\text{Sv/h}) \times 12.2 \times \text{面積} (\text{km}^2)$$

ただし地図が表現する 2011 年 9 月は、当初と比べてセシウムシーベルトが 88% に減じていたので、0.88 で割って放出量を求めた。

その平均は 5600 兆ベクレルである。ただし $16\mu\text{Sv/h}$ 線が囲む面積は他と比べて飛びぬけて狭い (図 7)。警戒区域に阻まれて測定精度が悪かったためだと解釈して、これを除いて平均した。

セシウム 134 も、事故当初はセシウム 137 と同量あった。だから、2011 年 3 月事故によって福島第一原発から放出されたセシウム合計は 1 京 1000 兆ベクレル (11PBq) である。図 3b に示した汚染面積を比較すると、おおむね 3 月 12 日が 5%、15 日が 60%、20 日が 15%、21 日が 20% を占める (表 3)。

この数値は、日本列島に降り積もったセシウムだけでなく、列島上空を通過して最終的にはグローバルに拡散したセシウムも含んだ見積もりである。た

表 2 フクシマ汚染の面積測定とセシウム 137 見積もり

等値線 (uSv/h)	放射線量率 (uSv/h)	面積 (km ²)	Cs137 (TBq)
16	15.97	87	2688
8	7.97	319	4901
4	3.97	655	5020
2	1.97	1226	4660
1	0.97	2748	5145
0.5	0.47	5962	5407
0.25	0.22	16469	6992
0.125	0.095	38758	7106
平均			5605

福島第一原発事故の放射能汚染地図（八訂版）を使って計測。自然放射線分 $0.03\mu\text{Sv/h}$ を引いた。面積は@pluredroさん測定。 $16\mu\text{Sv/h}$ を除いて平均した。

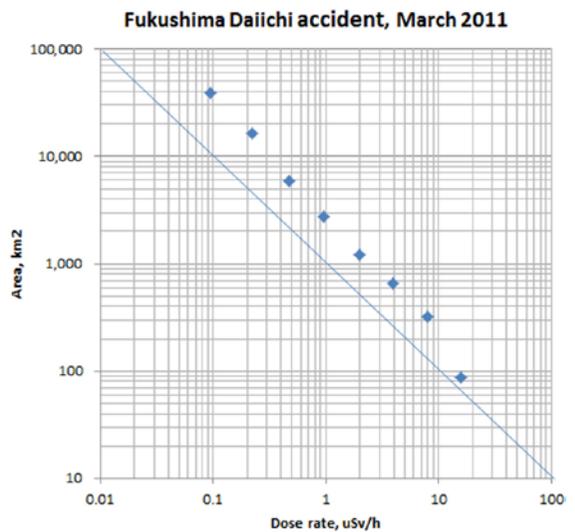


図 7 フクシマ汚染の放射線量率と面積の関係

表 3 日ごとのセシウム放出量

2011 年	セシウム
3 月 12 日	0.6 女川・盛岡
3 月 15 日	6.7 福島・郡山・那須・川場
3 月 20 日	1.7 山形・一関
3 月 21 日	2.2 いわき・柏
合計	11.2 PBq

だし西風に吹かれて原発から太平洋上に直接移動して陸上に痕跡をまったく残さなかったセシウムは検知できていない。しかしそれは無視できる量だろうと私は考えている。地図でつかまえた陸上部分の1割か2割程度であろう。

16から0.125 μ Sv/hまで8つのリングのセシウム137を積算すると2981TBqになる(表4)。これは、積を12.2倍して求めたセシウム137の放出総量5605TBqの53%にあたる。0.125 μ Sv/hの外側の陸上で捕捉された分も含めれば70%が日本列島上に降り積もったと見られる。太平洋上に直接移動して私の地図にかからなかったセシウムが2割あったとすれば、日本列島に降り積もったセシウムは放出総量の60%になる。

表4 フクシマ汚染のリング面積

等値線 (μ Sv/h)	放射線量率 (μ Sv/h)	リング面積 (km^2)	Cs137 (TBq)
16	15.97	87	308
8	7.97	231	408
4	3.97	336	295
2	1.97	570	252
1	0.97	1522	332
0.5	0.47	3213	343
0.25	0.22	10508	534
0.125	0.095	22288	508
合計			2981

リング面積は@pluredroさん測定。

4. 考察

(1) 定常放出だったか間欠放出だったか

南相馬市の海岸部から山間部に向かうと、放射線量率が顕著に上昇する。地図に表現すると、北西方向に等値線が密に平行する。すでに説明したように3月15日11時に出発した放射能霧は、いったん南に流されたあと、向きを変えて北西方向に進んだ。汚染の帯の延長が原発を通らない。18時に出発した放射能霧は、原発からまっすぐ北西方向に進んで、11時の放射能霧が作った汚染帯のすぐ北側に平行して細い汚染帯を残した。原発近傍に作られた高汚染領域がはっきりした帯をなすことは、放射性物質

の放出が特定の短時間に行われたことを強く示唆している。もし放出が何時間も定常的に行われたのなら、南に4kmずれた汚染の帯を11時の放射能霧が作ることはなかったであろう。原発をまっすぐ貫いたはずだ。1回の放出時間はおそらく30分程度だったと思われる。工場の煙突から出るブルーム(plume)を形成するような何日も何週間も続く単調な定常放出だったのなら、その間に風向きが四方八方に変わったから、放出源を中心とする円に近い等値線群になったはずである。

今回の汚染の過半(60%)を占める3月15日が3回の短時間放出だったことと、それが原子炉格納容器の圧力低下あるいは上昇のタイミングと合致することは、この事故全体の放出も定常的ではなく短時間の間欠的放出の繰り返しだったと疑わせるに十分である。じっさい3月15日だけでなく、汚染を地図に表現できた3月12日と3月20日にも原子炉格納容器の圧力が降下した事実がある(図6)。女川と盛岡を汚染した3月12日は1号機から、北関東と福島盆地を汚染した3月15日は2号機から、一関を汚染した3月20日と首都圏東部を汚染した3月21日は3号機からの放出だったと考えられる。

これまでに公表された多くのシミュレーションがそう仮定しているようだが、原発からの放射性物質の放出が定常的に2週間程度続いたと見れば、原発から東の太平洋上へ直接流れて陸上に痕跡をまったく残さなかった放射能霧があったことになるが、放出が間欠的だったと見ればそのようなことにはならない。太平洋に直接出た放射能霧がひとつ二つもしあったとしても、私が地図に表現した汚染の2割を超えることはないだろう。

(2) スギ林の放射能汚染

福島第一原発から南へ向かっていわき市を通過したあと、いったん海上に出て、茨城県ひたちなか市で再び上陸する幅5kmの汚染帯がある(図8)。その帯の中のスギ林だけがひどく汚染されている。鉾田市を通過して霞ヶ浦上で消滅する。

スギ林の高さは10から15mである。どれも林の北縁部がひどく汚染されている。近傍の芝生の上

1m で $0.1\mu\text{Sv/h}$ であっても、スギ林内は $1.5\mu\text{Sv/h}$ に達する。芝生の 10 倍を超える汚染だ。地表の放射線量率は地上 1m の 1 割増し程度で極端に高いことはない。この汚染は 2011 年 3 月 21 日に引き起こされたらしい。今回の事故で地上を移動した放射能霧の高さと形状を推量するとき、このスギ林汚染が貴重な情報を提供するだろうと期待される。

関東盆地を飛び越えて、長野県佐久市の内山牧場（標高 1250m）のモミ林も $0.8\mu\text{Sv/h}$ まで汚染されている。近くの草地は $0.1\mu\text{Sv/h}$ である。この汚染は 2011 年 3 月 15 日だったと思われる。

月 24 日の 3 回に渡って放射線量率を測定した（図 9a）。どこも毎回ほぼ同じ値を示した。ただし初回測定 の 6 ヶ月後の第 2 回測定では平均 13% 減少していた（図 9b）。13 ヶ月後の第 3 回測定では平均 27% 減少していた。毎月 2% 減の割合である。この減少はセシウム 134 と 137 の半減期でうまく説明できる。つまりこの期間、地表のセシウムは風水によってほとんど移動しなかった。芝生あるいは草地の上 1m で放射線量率を測って地図を作った私の手法が有効だったことが確かめられた。芝生や森の中だけでなく、アスファルトの上のセシウムもほとんど移動していなかったのは意外だった。空隙の中に染み込んだままそこに留まっているのだろうか。ただし、2012 年 10 月 24 日に 2 か所のコケに放射線量率の上昇が



図 8 放射能に汚染されたスギ林。グーグルマップ利用。

(3) 放射能の自然減衰

都市空間のなかで、芝生やアスファルトに降り積もったセシウムがどのような挙動をとるかを知るために、さいたま市北区（福島第一原発から 210km）の 18 地点で 2011 年 9 月 14 日、2012 年 3 月 7 日、10

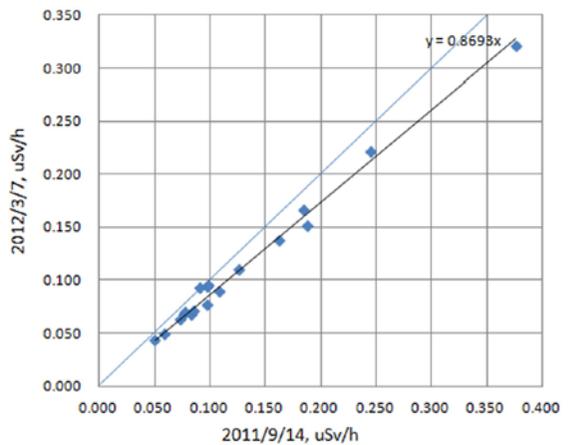
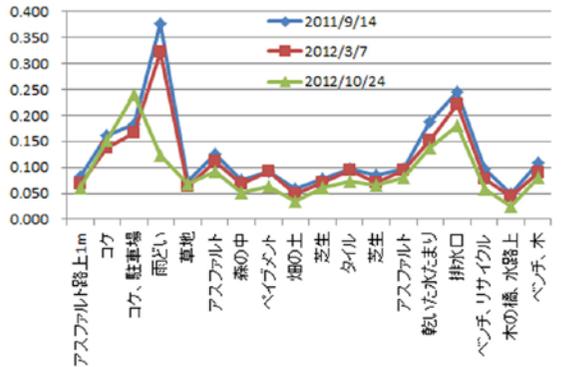


図 9 a) さいたま市北区の 18 地点で、2011 年 9 月 14 日、2012 年 3 月 7 日、10 月 24 日に測定した放射線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)。b) 前 2 回の測定値比較。6 ヶ月間で 13% 減少した。

見られた。セシウムを含んだ風塵が集積したのだろう。第3回の測定で顕著な減少が見られた雨どいの測定ポイントは、所有者が清掃作業したように見えた。

(4) チェルノブイリ事故との比較

1986年4月のチェルノブイリ原発事故と2011年3月のフクシマ原発事故で放出されたセシウムの量をくらべてみよう。2005年に行われた Chernobyl Forum で示された数字の計算方法はあきらかでないが、フクシマで採用した面積法をチェルノブイリ地図に適用して測定し直しても Chernobyl Forum とほぼ同じ値が得られた(表5)。フクシマ事故で放出されたセシウム137の量はチェルノブイリの12分の1である。

半減期30年のセシウム137だけで比較する。3章で説明したようにフクシマのセシウム137寄与率は29%である。 $1\mu\text{Sv/h}=480\text{kBq/m}^2$ を仮定すると、チェルノブイリの 555kBq/m^2 と私の地図におけるフクシマの $4\mu\text{Sv/h}$ がほぼ同じ汚染に当たる。フクシマで $4\mu\text{Sv/h}$ に汚染された土地に住んでいた人の数は、チェルノブイリで同程度に汚染された土地に住んでいた人と比べて3分の1だが、 $1\mu\text{Sv/h}$ 汚染と $0.25\mu\text{Sv/h}$ 汚染の土地に住む人の数はほぼ同じである(表6)。セシウム134まで考慮すると、フクシマの人口がチェルノブイリの3倍になる。事故としての規模(セシウム放出量)はチェルノブイリが12倍だが、被害の程度はフクシマが大きいと言ってよい。

表5 チェルノブイリとフクシマのセシウム比較

	Chernobyl (2005)	Chernobyl (this study)	Fukushima (this study)
Cs134	47		5.6
Cs137	85	66	5.6

単位は 10^{15} Bq (PBq)

出典: Chernobyl (2005) は、2005年に行われた Chernobyl Forum で示された数字。Fukushima (this study) は、本論文で採用した等値線とその面積の積を12.2倍する方法。Chernobyl (this study) も同じ方法で測定した。面積は @kyakkyauhuhuhu さん測定。

表6 チェルノブイリ汚染地域とフクシマ汚染地域に住む人の数

Chernobyl 1986		Fukushima 2011	
kBq/m ²	人	$\mu\text{Sv/h}$	人
555	190,000	4	60,000
185	770,000	1	810,000
37	5,150,000	0.25	4,600,000

チェルノブイリの人口は1995年時点。

(5) 健康リスク評価

フクシマ原発事故では、1京1000兆バクレルのセシウムが環境にまき散らされた。これは、1986年4月に起こったチェルノブイリ原発事故の12分の1である。ここではセシウムによる健康リスクを評価してみる。ヨウ素のリスクについてはデータ不足のため評価しない。

チェルノブイリ事故から約20年たった2005年9月にウィーンで開かれた国際会議に出席した金子正人はこう報告している(金子, 2007)。「被ばくの多かった除染作業員、避難した人々、汚染地区の居住者など約60万人の中からこれまでの死亡者を含めて約4000人が放射線被ばくが原因で死亡するとの予測が示された。」同じ会議に出席した長瀧重信のまとめをセカンドオピニオンとして見てみよう(児玉, 2011)。「不確実ではあるが、事故の大きさの概略の印象のため、今後の癌死亡者数を推定すると4000人(あるいは9000人)である。数万、数十万人ということはない。」チェルノブイリ原発事故によるがん死者数の見積もりとして4000人の数字がこの国際会議でコンセンサスとして認められたのは確かなようだ。

高度情報科学技術研究機構(RIST)のページによると、Cardis *et al.*, (1996) が平均被ばく量に人口を掛け算する手法によって、旧ソ連(ベラルーシ、ウクライナ、ロシア)の高汚染地域の住民60万人の過剰がん死亡は4000人、その周辺の740万人の過剰がん死亡は9000人と推定したという。2005年9月の国際会議は、おそらくこの研究に基づいてコンセンサスを得たのであろう。

同様の試みをフクシマでしてみよう。直線閾値なし (LNT) 仮説を極低線量まで延長してみる。出発点は広く認められている「100 ミリシーベルトで 0.5% ががん死する」に置く。致死量は 20 シーベルトになる。

私の放射能汚染地図 (八訂版) で $1\mu\text{Sv/h}$ の中の人口は 81 万人だ (表 6)。半減期を考慮して 50 年積算すると 114 ミリになる (田崎 2012 の表 5.3)。ただし、私の地図は芝生の上 1m での値である。集落空間の平均線量はその 0.5 倍程度であろう。屋内では遮へい効果が働いて、さらにその 0.6 倍程度になるであろう。これに加えて、人体模型による見積もりで実効線量が 0.7 倍程度になるようだ。結局、生活者が受ける放射線量は芝生の上 1m の値の 0.21 倍になると見られる。24 ミリだ。81 万人と 24 ミリの積は 1 万 9000 シーベルト・人だ。20 シーベルトで割ると死者 1000 人が得られる。

次に中程度に汚染された地域を計算する。首都圏東部を含む $0.25\mu\text{Sv/h}$ すなわち 50 年積算 6 ミリの地域に 460 万人が住んでいる。2 万 8000 シーベルト・人だ。20 シーベルトで割ると死者 1400 人になる。

最後に軽微に汚染された地域を計算する。人口密集地である首都圏全体 3000 万人は $0.06\mu\text{Sv/h}$ すなわち 50 年積算 1.5 ミリの追加被ばくを受けると見られる。4 万 5000 シーベルト・人だ。20 シーベルトで割ると死者 2300 人になる。上記 3 地域を合計すると 4700 人だ。

これは外部被ばくによる死者数見積もりだが、内部被ばくについても考えてみよう。体内に取り込んだセシウムから出る放射線の害毒の評価はむずかしいが、15 億ベクレルでひとり死亡の見積もりがもっともらしい。この見積もりを適用すると、福島県の 2011 年産米を全部食べることによって死ぬ人の期待値は 2 人になる。すべての食料だと、その 10 倍で死者 20 人くらいだろう。今後 50 年だと、その 30 倍の 600 人程度だろう。内部被ばくリスクは外部被ばくリスクの 8 分の 1 程度だと見られる。

フクシマ原発事故によるがん死者数の見積もりをまとめる。外部被ばくによる死者 4700 人、内部被ば

くによる死者 600 人。合計 5300 人である。外部被ばくだけに注目すると、福島中通り 81 万人から 1000 人死亡、首都圏東部など 460 万人から 1400 人死亡だ。ただしこれは、毎年の死亡率ではない。50 年間の死亡率だ。単純に 50 で割ると、福島中通りで毎年 4 万 1000 人に 1 人死亡、首都圏東部で毎年 16 万人に 1 人死亡である。460 万人が住むこの地域で今後 50 年間の死者数は 250 万人程度であろう。死者 1 万人のうち 6 人がこの事故による犠牲者だ。0.06% にあたる。

日本における交通事故死のリスクは、いま毎年 2 万人に 1 人である。今後 50 年間の視野に入れた福島中通りの放射能リスクは、交通事故リスクの 0.5 倍。首都圏東部の放射能リスクは、交通事故リスクの 0.12 倍である。放射能がん死と交通事故死は、死に至らない病気やけがを数十倍伴っている点もよく似ている。

上の計算では 20 シーベルトでひとり死亡としたが、致死量は 2 シーベルト程度だとする意見もある。その場合の放射能リスクは上の計算の 10 倍になる。逆に、LNT 仮説は極低線量では成り立たないとする意見もある。その場合の放射能リスクは限りなくゼロに近づく。

最後に、半減期による外部被ばくリスクの時間変化を計算しておく。50 年間の平均を 1 とすると、1 年目のリスクは 5 倍、2 年目は 4 倍だった。このあと、3 年目 3 倍、4 年目 2.5 倍と、ゆっくり低減していく。

5. まとめ

福島第一原発の 2011 年 3 月事故によって大気中に放出された放射性物質は、短軸 5km 程度の楕円形をした霧のひとかたまり (放射能霧 radioactive fog) として、地表から数十 m までの高さを速さ 2~6m/s でゆっくり移動した。工場の煙突から長時間連続して出る煙の形状 (plume) ではなかった。放射性物質の大量放出は、大きく分けて 3 回あった (3 月 12 日、15 日、20-21 日)。どれもあいにく風が内陸に向かっていているときだった。東の太平洋に向かって流れた放射性物質は、あったとしても、全体の 1 割か 2 割に

すぎない。放射性物質はグローバルに広がったが、その6割が日本列島上に降り注いだ。大気中に放出されたセシウム総量は1京1000兆ベクレル。チェルノブイリ原発事故の1/12である。人口密度の違いがあるから、セシウム137に汚染された土地に住んでいた(いる)人の数は、両者ほぼ同じである。セシウム134まで考慮するとフクシマの被災人口はチェルノブイリの3倍である。この事故で放出されたセシウムに起因するがん死の増加は5300人と見積もられる。今後50年間を視野に入れた福島中通りの放射能リスクは、交通事故リスクの1/2である。原発から200km離れていながら中程度に汚染された首都圏東部の放射能リスクは、交通事故リスクの1/8である。放射能がん死リスクと交通事故死リスクは、死に至らない病気やけがを数十倍伴っている点でもよく似ている。

謝辞 放射能汚染地図のデザイン・レイアウトは、萩原佐知子さんの手によるものです。東北関東への調査旅行には、2011-2013年度科研費(基盤C、インターネットを活用した情報共有による新しい地学教育)と400人を超える一般の方から寄せられた奨学寄付金を利用させていただきました。3月15日の汚染時刻とルートの解明には、ツイッターにおける@neko3no3teさんの貢献が大きい。等値線の面積測定は@pluredroさんと@kyakkyauhuhuhuさんにさせていただきました。冒頭の英文は、放射能汚染地図の裏面に書いた解説を@EXSKFさんに翻訳していただいたものです。この論文は、投稿前に草稿をインターネットで公開しました。誤記の指摘はもちろ

ん、貴重な情報提供や加筆示唆を多くの方からいただいた原稿を改良しました。

引用文献

- E Cardis, *et al.* (1996) Estimated long term health effects of the Chernobyl accidents. *Proceedings of the International Conference, One decade after Chernobyl, Summing up the Consequence of the Accident, Vienna*, 241-279
- Y Hayakawa (1985) Pyroclastic geology of Towada volcano. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **60**, 507-592.
- 早川由紀夫 (2013) 火山学者が見た2011年3月の福島第一原発事故。群馬大学教育学部紀要。自然科学編、**61**、59-78.
- M Hosoda, S Tokonami, A Sorimachi, S Monzen, M Osanai, M Yamada, I Kashiwakura & S Akiba (2011) The time variation of dose rate artificially increased by the Fukushima nuclear crisis. *Scientific Reports 1*, Article number: **87** doi: 10.1038/srep00087
- 金子正人 (2007) チェルノブイリ20年の真実 事故による放射線影響をめぐって。日本原子力学会誌、**49**、24-28.
- 児玉龍彦 (2009) チェルノブイリ原発事故から甲状腺癌の発症を学ぶ エビデンス探索20年の歴史を辿る。医学のあゆみ、**231**、306-310.
- 田崎晴明 (2012) やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識。朝日出版社、160p.
- 東京電力株式会社 (2011) 福島原子力事故調査報告書(中間報告)。130p、2011年12月2日。

注：この論文は、「早川由紀夫の火山ブログ」<http://kipuka.blog70.fc2.com>に書きためた文章を再構成したものである。ブログの図はカラーで表現されている。また、出典へのリンクも施してある。