

米国 NNSA 航空機サーベイデータを用いた福島第一原発事故によるセシウム 137 地表汚染のマッピングと解析

沢野伸浩

さわの のぶひろ
金沢星稜大学*

2011年3月11日、6基のBWR原子炉を抱えた東京電力福島第一原子力発電所は、東北地方太平洋沖地震とそれにもなう津波に襲われた。その結果、安全審査では想定不要とされていた長期にわたる全電源喪失が発生し、運転中であった3基の原子炉がいずれもメルトダウンに至った。大気中に放出された放射能は風に運ばれ、200 km 南西に位置する東京にも達し、東日本全域に深刻な放射能汚染をもたらした。経済産業省原子力安全・保安院(当時)は、事故発生の直後、原発事故の規模を国際的な評価尺度(INES)に従って“局地的な影響の事故”を意味するレベル4と判定した。しかし、1週間後に、“広範囲に影響をもたらす事故”であるレベル5に、さらに、1カ月後に1986年のチェルノブイリ事故と同じく、原発事故として最悪の規模であるレベル7に引き上げた。

福島原発事故による放射能汚染の長期的影響を考えると最も重要な放射性核種は半減期30年のセシウム137である。大気中に放出されたセシウム137の放射エネルギーについては、以下のようないくつかの推定値が発表された。

(1)旧原子力安全委員会による見積もりでは 1.2×10^{16} Bqのセシウム137が大気中に放出された¹⁾。この推定は、実際のモニタリングデータと文部科学省所管の大気拡散シミュレーションシステムSPEEDIの計算結果という2種類の値を組

み合わせて得られた。

(2)旧原子力安全・保安院は、炉心溶融プロセスのシミュレーション計算をもとに 1.5×10^{16} Bqというセシウム137の大気中放出量を報告している²⁾。

(3)ノルウェー大気研究所のA. Stohlらは、CTBT(包括的核実験禁止条約)の関連で整備された地球規模モニタリングネットワークのデータを用いて、 3.58×10^{16} Bqのセシウム137が放出されたと見積もっている³⁾。

一方、チェルノブイリ事故によるセシウム137の放出量は 8.5×10^{16} Bqと見積もられており⁴⁾、福島に比べると2~7倍の規模に相当する。京都大学の今中によると、上記の福島原発事故によるセシウム137の放出量には、液体として太平洋へ放出された分が含まれていない。液体での放出分と、セシウム134とセシウム137の比のチェルノブイリと福島での違いを考慮すると、チェルノブイリでの放射性セシウムの放出量は福島の2.5~5倍と述べている⁵⁾。

福島第一原発事故発生の知らせを受けて、米国エネルギー省(DOE)の専門機関である核安全保障局(NNSA)は、福島第一原発周辺の放射能汚染調査のため放射線モニタリング専門家33名と専用機材を積載した輸送機を3月14日に出発させた。NNSAチームは、3月16日未明に在日米軍横田基地に到着し、翌17日から福島第一原発上空を含む空域で、空中測定システム(AMS: Aerial Measuring System)を用いた航空機サーベイを開始している⁶⁾。NNSAのAMS調査は5月末まで実施され、

*一著者は2015年3月に死去。本稿は投稿準備がなされていた英文遺稿をもとに今中哲二氏が翻訳・作成したもの。末尾の付記参照。

そのデータは2011年10月からNNSAのホームページで公開されている⁷⁾。

本稿では、GIS(地理情報システム)ソフトArcGIS⁸⁾を用いて、NNSAの公開データをもとに福島原発周辺のセシウム137汚染地図を作成し、セシウム137による陸上汚染の規模を解析して、福島原発事故とチェルノブイリ原発事故との比較検討を試みる。

NNSA 調査チームの活動

NNSA 調査チームは、3月17日から5月末の調査終了までに、以下のような広範な調査を実施している⁹⁾。

①ヘリコプターと固定翼機による福島原発周辺約200 kmでのAMS 航空機サーベイ

②AMS データと照合するための地上ガンマ線スペクトル計測(In-situ ground gamma spectrometry survey)

③大気サンプリング

④携行型放射線測定装置による地表空間線量測定

⑤土壌サンプリング

在日米軍は、UH-1NやUH-60ヘリコプター、C-12飛行機を出動させてNNSAチームのAMSサーベイに協力した。2011年5月28日のミッション終了までに、100回以上、延べ525時間のAMS調査飛行が実施された。初期のミッションでは、測定器の配置について様々な方法が試された。航空機モニタリングの目的は地表に沈着した放射能の測定であったが、低濃度ながらも大気中に存在している放射能の影響を受けるため、両者を区別する必要があった。いくつかの試験的飛行の結果、AMS検出器セットの標準的な配置として、燃料タンクや機器に遮蔽されず、検出器が地上を向く位置が選ばれた。

検出器セットは、光電子増倍管とデジタル波高分析機を備えた5 cm×10 cm×40 cmの大きさのNaI検出器3つで構成されていた。3つのNaI検出器からのデジタルデータはデータ集約器につながり、ひとつのデータとして扱われる⁶⁾。

NNSAによるAMS航空機サーベイの調査結果は、翌日には日本政府に伝えられていたが、それらのデータが汚染地域の人々の避難や緊急対策に利用されることはなかった¹⁰⁾。この問題は、2012年7月に国会で取り上げられ、データを利用しなかったことについて、当時の枝野幸男経産大臣が参院予算委員会で公式に陳謝している。

AMS 航空機サーベイデータ

先にも述べたように、事故後にNNSAによって取得されたデータは、2011年10月21日より、同機関のウェブサイトを通して全世界に公開され、ダウンロード可能となった⁷⁾。公開されたデータ形式は、前節に示した①のデータがKMZ形式、②～⑤がCSV形式であり、②～⑤についてはいずれもWGS84座標による緯度経度、計測時間、計測値が1行に並べられ、表計算ソフトなどに読み込めば、「いつ」「どこで」データ取得が行われたかを文字と数字で表示させることができる。

さらに、2012年7月6日よりNNSAはパスワード登録者に対し、より詳しいデータを専用サーバから公開するようになった¹¹⁾。本稿での解析に使用したのは、AMS航空機サーベイデータ(以後、AMSデータ)のうち、パスワード登録サイトよりダウンロードした「ヘリコプターデータ(DOE AMS Helicopter)」と「航空機測定データ(US AMSデータ)」の2つである。公開されているAMSサーベイのデータ取得点数(レコード数)は、計測値がゼロやマイナスのものを除き、初期的に公開が行われたAMSデータが10万7000レコード、パスワードが必要なサイトからダウンロードできるものは、その合計が31万0600レコードとなっている。

公開されたAMSデータは、いずれも、計測日、時刻、緯度、経度、飛行高度、標高、地表放射線量率、セシウム134およびセシウム137沈着密度の2011年6月30日における換算値をカンマで区切り、1レコードを構成する形式のデータであり、「地理情報システム」ソフト(以後、GISソフト)に読み込ませることで、既存地図との重ねあ

クリギングによる汚染地図の作成

クリギング(Kriging)は、鉱山学から発展した手法で、点として把握されているデータをもとに、面的、すなわち空間的な拡がりとして内挿値を算出するための方法である。「空間統計学」(Spatial Statistics)や「地球統計学」(Geo-statistics)といった範疇で語られることが多い。点データの空間的な内挿方法としては、逆距離加重法(IDW)やスプラインが一般的だが、これらの手法は、使われる数学的な関数によって結果が完全に支配される。データの空間的な偏りや方向、データ間に存在する自己相関性を加味したものではなく、これらの手法によって行われる「内挿」は、空間的に解釈すると「データの平滑化」と表現するほうがより正しい。一方、クリギングはデータ間の方向性など、実測値の空間的な従属性(バリオグラム)を考慮した一種の回帰式を作り、その式を用いて未知な地点の「予測値」を内挿値とするものである。したがって、クリギングにはバリオグラムを数学的にモデル化する方法により、いくつかの手法が存在する。

今回の AMS データを見ると、汚染源は事故を起こした福島第一原子力発電所、すなわち空間的には「点」からの発生であり、風の影響を強く受け、高濃度な汚染が北西方向を中心に広がっていることがわかる。加えて、降雨や降雪などの効果により発生源から距離が離れた地点にいわゆる「ホットスポット」の形成も散見される。計測値から2つのデータのペアをランダムに作った場合、その計測値の差と2点間の距離の分布には正規性が成り立つことが予測され、このような場合、選択すべきクリギングの手法としては、「通常クリギング(OK: Ordinary kriging)」と「逐次非線形クリギング(DK: Disjunctive kriging)」が考えられる。

文部科学省が2011年6月から7月にかけて福島第一原発周辺で実施した土壌調査データ¹²⁾に対し、OK法とDK法の2つのクリギングを適用し、計測値と内挿値の差の2乗平均平方根(RMS)を求

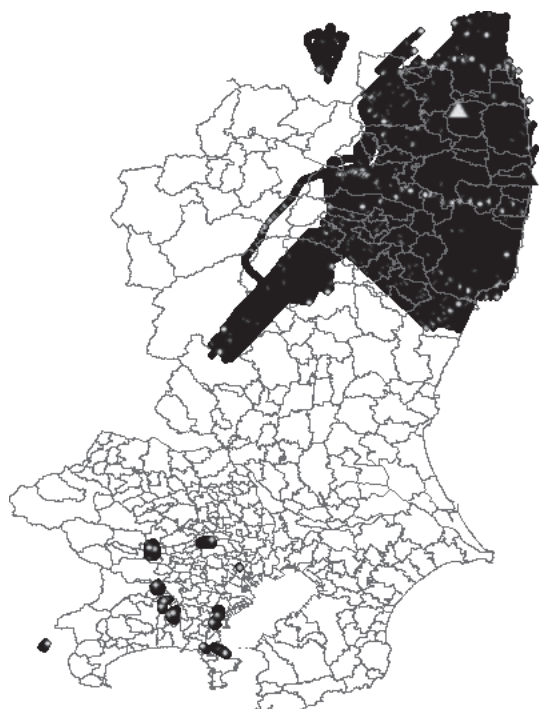


図1—NNSAによってAMS航空機サーベイが実施された領域

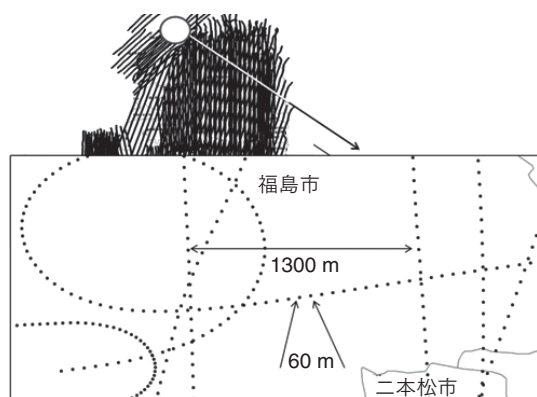


図2—福島市周辺におけるAMS航空機サーベイの軌跡拡大図
点がAMSのデータポイントを示す。

わせや解析が可能となる。図1は、公開されたAMSデータの調査範囲で、図2には、福島市近郊での飛行軌跡の詳細を示した。図2のドット点はデータサンプリング点を示している。図1に示すとおり、飛行調査は福島県を中心に、宮城県、茨城県、埼玉県、東京都、神奈川県、静岡県の上空で行われた。飛行軌跡の間隔は500 mから1500 m程度で、飛行中のAMSデータサンプリング間隔は約60 mで行われている。

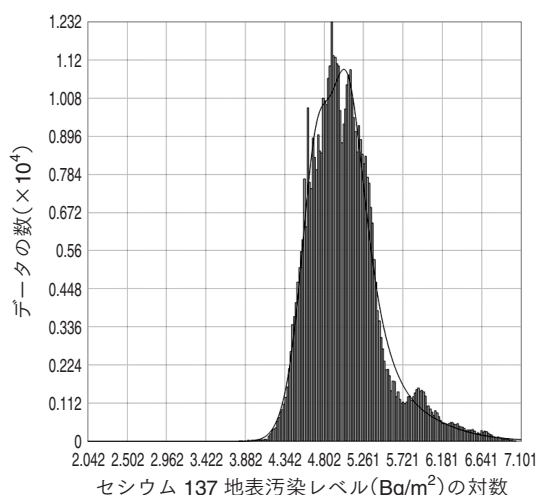


図3—NNSA/AMS データにもとづくセシウム 137 地表汚染のヒストグラム(横軸：対数変換値)

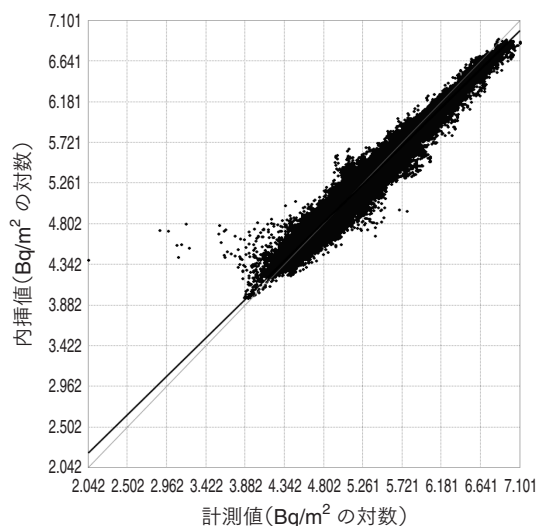


図4—セシウム地表汚染のNNSA/AMS計測値(横軸)とDK法を用いた内挿値(縦軸)の比較

めて再現性を比較してみた。その結果、OK法によるRMS値は0.370で、DK法では0.359と、DK法のほうが若干よい値が得られたので、本稿でのAMSデータ内挿にはDK法を用いることとした。また、内挿を適用する際には、計測値をそのまま用いるのではなく、対数変換を行うことでデータ分布の平滑化を行った。図3に、本稿で用いたセシウム 137 地表汚染データの対数変換後分布を示した。

AMSデータを内挿してセシウム 137 汚染マッ

プを作成する範囲は、NNSAのAMSデータ取得が行われている範囲の関係から、左上を福島市の北北西約20 km(東経139.658°, 北緯38.179°)、右下を日立市の海岸から約30 km(東経141.046°, 北緯36.579°)とする長方形の内部で、面積8200 km²である。元々のデータ取得密度の関係から、内挿値の解像度は密な取得が行われた範囲については100 m程度、比較的密度が低い周辺部については500 m程度である。図4にAMS計測値とDK法によって得られた内挿値の関係を示す。なお、計測値と内挿値の差のRMS値は0.071であった。

チェルノブイリと同じ基準を用いたゾーン分け

GISを用いることで、内挿により生成された任意地点や任意間隔の値を求め、それらを面として扱うことで「等高線」を描いたり、その「等高線」で囲われた範囲の地図上での同定や面積の計算などが可能となる。

今中⁵⁾によれば、1986年に旧ソビエトで発生したチェルノブイリ原発事故に対する対策では、セシウム 137の土壌汚染密度を基準に以下の4つの「ゾーン分け」が実施されている。ここでは、福島原発事故の陸上汚染規模をチェルノブイリ原発事故と比較するため、同じ基準によるゾーン区分を福島原発周辺の汚染地域に適用してみる。

- 第1ゾーン：強制避難(原子力関連要員等を除き一般民の居住は不可能)：148 万 Bq/m² 以上
- 第2ゾーン：移住義務(住民の居住は認められず、国家が責任をもって住民を移住させる)：55.5 万以上 148 万 Bq/m² 未満
- 第3ゾーン：移住権利(住民が希望すれば移住が認められる)：18.5 万以上 55.5 万 Bq/m² 未満
- 第4ゾーン：放射線管理(放射線管理を必要としつつ、居住は可能)：3.7 万以上 18.5 万 Bq/m² 未満

これらゾーンのうち、放射線管理が必要な第4ゾーンについては、NNSAのAMS調査領域を越えて広がっているため、残念ながら全領域を描くことができない。そこで、今回は下限値の3倍

表 1—福島第一原発事故によるセシウム 137 地表汚染のゾーン別面積と住民数

県	市町村	汚染ゾーン							
		148 万 Bq/m ² 以上		55.5 万～148 万 Bq/m ²		18.5 万～55.5 万 Bq/m ²		11.1 万～18.5 万 Bq/m ²	
		面積(km ²)	人口(人)	面積(km ²)	人口(人)	面積(km ²)	人口(人)	面積(km ²)	人口(人)
宮城	白石町	—	—	—	—	0.99	129	22.96	3,000
	丸森町	—	—	—	—	—	—	70.37	3,992
福島	福島市	—	—	0.21	80	144.00	54,821	136.26	51,874
	郡山市	—	—	—	—	23.44	10,489	181.63	81,276
	いわき市	—	—	2.52	700	120.28	33,427	171.39	47,630
	白河市	—	—	—	—	2.28	483	54.04	11,454
	須賀川	—	—	—	—	28.10	7,969	85.18	24,157
	相馬市	—	—	—	—	49.15	9,398	19.19	3,669
	二本松市	—	—	—	—	202.08	35,101	87.47	15,194
	田村市	—	—	2.66	235	125.66	11,086	90.47	7,982
	南相馬市	36.03	6,410	85.59	15,227	92.59	16,472	61.48	10,938
	伊達市	—	—	11.33	2,824	101.86	25,391	70.09	17,471
	本宮市	—	—	—	—	50.74	18,176	23.03	8,248
	桑折町	—	—	0.96	287	20.12	6,017	16.00	4,785
	国見町	—	—	0.38	101	11.81	3,144	22.71	6,045
	川俣町	—	—	16.41	2,001	81.99	10,000	29.29	1,117
	大玉村	—	—	—	—	2.23	241	14.18	1,532
	天栄村	—	—	—	—	9.46	264	34.56	965
	西郷村	—	—	—	—	—	—	6.26	643
	泉崎村	—	—	—	—	—	—	3.58	688
	矢吹町	—	—	—	—	—	—	0.28	85
	棚倉町	—	—	—	—	—	—	0.45	42
	古殿町	—	—	—	—	—	—	0.83	31
	三春町	—	—	—	—	—	—	20.69	5,169
	広野町	—	—	—	—	37.06	3,439	20.36	1,086
	檜葉町	—	—	4.04	301	82.18	6,117	17.82	1,327
	富岡町	9.95	2,325	50.41	11,776	8.08	1,888	—	—
	川内町	—	—	23.13	331	82.02	1,172	51.39	734
	大熊町	32.47	4,749	35.13	5,138	11.09	1,623	—	—
	双葉町	29.11	3,926	19.77	2,666	1.99	269	0.57	77
	浪江町	126.09	11,817	62.03	5,813	21.32	1,998	10.83	1,015
	葛尾村	12.99	236	23.38	425	48.06	717	—	—
	飯舘村	25.79	696	157.52	4,252	46.14	1,245	0.61	16
茨城	高萩町	—	—	—	—	—	—	0.61	98
	北茨城市	—	—	—	—	—	—	1.90	479
栃木	那須塩原市	—	—	—	—	—	—	36.91	7,329
	那須町	—	—	—	—	—	—	2.64	190
(合計)		272.43	30,159	495.47	52,157	1404.72	261,076	1366.03	320,338

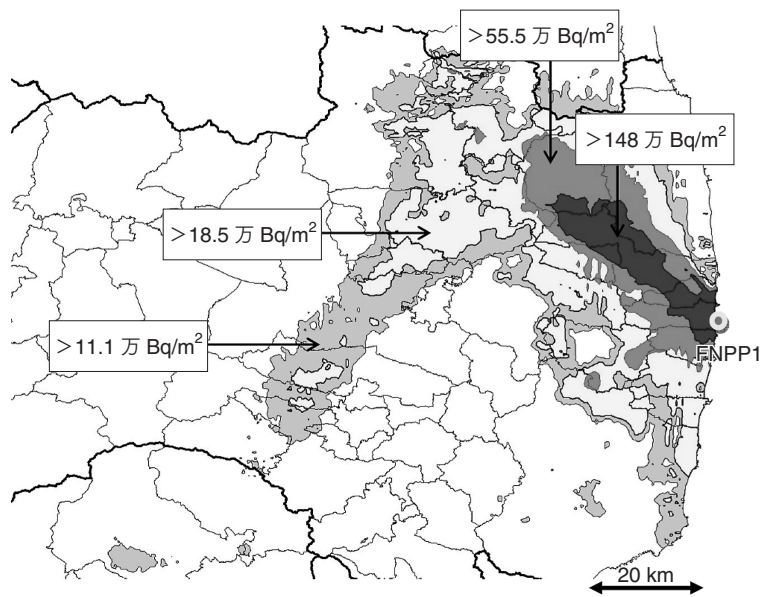


図5—NNSAのAMSデータにもとづく福島第一原発周辺のセシウム137地表汚染のマッピング

表2—福島第一原発事故とチェルノブイリ原発事故の陸地汚染面積と住民数の比較

	第1ゾーン		第2ゾーン		第3ゾーン	
	km ²	人口(人)	km ²	人口(人)	km ²	人口(人)
ロシア	300	5,000	2,100	110,000	5,720	218,000
ベラルーシ	2,200	9,000	4,200	95,000	10,200	267,000
ウクライナ	600	19,000	900	30,000	3,200	204,000
チェルノブイリ合計	3,100	33,000	7,200	235,000	19,120	689,000
福島	272	30,159	495	52,157	1,405	261,076
チェルノブイリ／福島比	11.4	1.1	14.5	4.5	13.6	2.6

今中補足：

- ・上記のチェルノブイリ第1ゾーンには、事故直後に原発30km圏から強制避難させられた11.6万人が含まれていない。
- ・文献13で沢野は、文部科学省が独自に実施した航空機AMSデータを用いて、NNSA/AMSが調査していない領域のデータを補充し、3.7万Bq/m²以上の汚染面積と住民数を求めている。その結果、福島原発事故による3.7万Bq/m²以上のセシウム137汚染の全面積と住民数は、8424km²と159万人になっている。チェルノブイリ原発事故の対応する値は、14万5000km²と591万人で、福島と比較すると17倍と3.7倍である。

にあたる11.1万Bq/m²で区切ってゾーンの同定を行った。図5は、NNSAのAMSデータをもとに、ArcGISを用いてDK法により内挿し、それぞれのゾーン範囲を等高線として区切った汚染地図である。また表1には、ArcGISの面積計算機能を使って求めた、市町村別の各汚染ゾーン面積と住民数を示す。住民数は、各市町村の人口密度に各ゾーンの汚染面積を乗じて算出した¹³。

表2は、第1ゾーンから第3ゾーンの汚染面

積と人口を、チェルノブイリ原発事故と福島第一原発事故とで比較したものである。チェルノブイリの陸上汚染面積は、福島の11～15倍であるが、福島の場合、敷地の東側は海であり、大気中に放出された放射能の多くが卓越する偏西風により太平洋のほうに流されたことを改めて指摘しておく。表2に明らかなように、汚染ゾーンの住民数の比は、汚染面積の比よりずっと小さくなっている。つまり、チェルノブイリと福島での人口密度の違

いを反映している。

原子力の専門家や識者から、福島原発事故の規模はチェルノブイリ原発事故に比べると10分の1で、福島はチェルノブイリに比べるとたいしたことはなかった、という言い方が時折なされる¹³⁾。“原発事故の規模”を定義することからして簡単ではないが、本稿の議論から、深刻な汚染を蒙った被災者の数ということでは、福島はチェルノブイリに比べて3分の1から4分の1となろう。

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」, 2011年4月12日
- 2—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」, 2011年6月6日
- 3—A. Stohl et al.: “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., No.12, 2313–2343(2012)

4—Chernobyl Forum: “Chernobyl’s Legacy: Health, environmental and socio-economic impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine”, IAEA(2005)

5—今中哲二: 放射能汚染と災厄, 明石書店(2013)

6—C. Lyons & D. Colton, “Aerial measuring system in Japan”, Health Phys., 5(102), 509–512(2012)

7—<https://catalog.data.gov/dataset?q=fukushima>

8—(株)esri ジャパン: <http://www.esri.com/products/arcgis-for-desktop/>

9—S. V. Musolino et al.: “Environmental measurements in an emergency: This is not a drill”, Health Phys., 102(5), 516–526(2012)

10—明石昇二郎:「政府が黙殺した米軍データ『福島汚染地図』を完全解析!」, 週刊プレイボーイ, 2012年8月6日号

11—<http://www.nnsaresponsesdata.net>

12—文部科学省:「文部科学省による放射線量等分布マップ(線量測定マップ)の作成について」, 2011年8月2日

13—沢野伸浩: 本当に役に立つ「汚染地図」, 集英社新書(2013)

付記: 沢野さんとのこと

今中哲二

本稿は、2015年3月10日に急逝された沢野伸浩さんが、英文雑誌に投稿するために準備していた原稿を私が翻訳し、科学誌向きに若干手を入れたものである。

私が沢野さんと知り合ったのは、福島原発事故が起きた翌年の2012年7月だった。原発問題を通じての古い知り合いであるジャーナリストの明石昇二郎さんから、福島の放射能汚染地図が送られてきた。日本政府が当時発表していたものよりはるかに詳細な汚染地図で、金沢星稜大学の沢野さんがGIS(地理情報システム)技術を使って作成したものとのことだった。避難地域の一軒一軒の位置でのセシウム137の汚染レベルを判別できるほどの分解能だった。

飯舘村の放射能汚染調査に関わっていた私はその地図をみて「これで飯舘村の初期被曝評価が可能となる!」と勇み立った。一軒一軒の汚染レベルを特定できる沢野地図を使えば、放射能汚染が起きてから避難するまでの被曝量を村民一人ひとりについて見積もることができる。さっそく沢野

さんと連絡をとり、初期被曝評価の作業への協力要請を行った。幸い、飯舘村の初期被曝評価というテーマでの申請が環境省の公募研究に採択され、それから2年間、私と沢野さんは濃密な共同作業を行った。2年目には、大学研究者、NPO活動家、フリージャーナリストあわせて25人のチームを組み、放射能汚染が起きてから避難するまでの飯舘村の人々の行動についてインタビュー調査を行う『飯舘村初期被曝評価プロジェクト』を実施した。その結果、飯舘村住民の3割にあたる約500戸、1800人の行動調査データが得られ、2014年春に、飯舘村の人々の初期外部被曝評価として平均7ミリシーベルトという結果をまとめた(本誌2014年3月号, pp. 322–332)。

2年あまりの共同作業を通じて、沢野さんのバイタリティと集中力に私は驚嘆していた。2015年3月には、つくばで開催された環境放射能研究会でともに発表するはずであった。ところが、2月の段階で沢野さんから「体調がよくないので発表を取りやめる」とのメールが入った。めずらしいことと思いながらも気に留めていなかったが、その環境放射能研究会の3日目に明石さんから

「沢野さんが亡くなった」というメールを受け取った。

沢野さんはもともと流体力学が専門だったと聞いているが、1997年のナホトカ号重油流出事故の頃から、海岸線の環境評価との関連でGISと取り組み始めたそう。その後、GISと衛星写真を組み合わせて、ベトナム戦争で使われた枯れ葉剤問題の解析を行うなど、GISを災害に応用するプロフェッショナルとして活躍されていた。その沢野さんが、ちょっとしたきっかけで、2011年

11月に米国NNSAのAMSデータを“発見”し、福島放射能汚染問題に関わり始めた(その間の事情は、沢野伸浩『本当に役に立つ「汚染地図」』集英社新書、2013に詳しい)。

沢野さんは私より10歳ほど下で享年54。亡くなってもうすぐ2年になる。いつも、ちょっとはにかんで人なつっこい、あの沢野さんに会えなくなり、GISについて教えてもらえなくなったことが今でも悔しい。

(いまなか てつじ 京都大学原子炉実験所)