

原 著



山岳地域における原子力発電所事故由来の残留放射性物質分布 — プルーム, 地形, 地表条件と自然放射線の存在 —

保科静香*, 黒澤景一*, 高橋翔太*, 加藤浩太*, 吉村公佑*, 奥村幸弘*,
松本尚貴*, 横山雅彦*, 中田正文*, 日比谷孟俊**, 神原陽一***,†

* 慶應義塾大学理工学部体育會山岳部

223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1

** 慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究所

223-8526 神奈川県横浜市港北区日吉4-1-1

*** 慶應義塾大学理工学部

223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1

† kamihara_yoichi@keio.jp

2017年11月13日 受付

2018年7月1日 受理

福島第一原子力発電所事故由来の ^{134}Cs の分布を, 南東北, 北関東, 南関東, 及び甲信越などの山岳地域において, シンチレーションスペクトロメータを用いて測定した。吾妻山及び八溝山では, 高度が低くなると放射線強度が増し, 一方, 御前山, 及び大山では高度が高くなると放射線強度が増すことがわかった。このことは, 特定の高度にその中心を有する放射性物質雲(プルーム)が存在し移動したことを示唆している。

Key Words: mountainous area, Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident, radioactive caesium, plume, topography, surficial geology

1. 緒 言

2011年3月11日の東日本大震災にともなって生じた, 東京電力福島第一原子力発電所事故によって, 東北及び関東地方に多量の放射性物質が飛散した。

放射性物質拡散の状況を明らかにするために, 鳥居ら¹⁾は, 航空機を用いて上空から放射線量を測定した。Oura et al.²⁾ならびに Tsuruta et al.³⁾は, 各地の大気汚染モニタリングポストに設置された大気中粉塵調査用テープろ紙に付着した放射性物質を分析し, 原子力発電所の事故で発生した放射性物質雲(プルーム)が風によって運ばれ, 降水により地上に降下したことを報告している。

これらの測定は, 放射性物質の地表での分布を示したものである。放射性物質を運んだプ

ルームの移動軌跡は, 各モニタリングポストで検出された放射線強度の時間変化から推察されている。一方, プルームの移動高度に関しては Nakajima et al.⁴⁾によって, 高層気象データと対比しつつコンピュータ・シミュレーションがなされてはいるものの, 大気鉛直構造の再現は不十分である。

プルームが移動した高度に関する情報を得るには, 山岳地域での測定が有効である。Saito et al.⁵⁾は, 富士山において ^{134}Cs 及び ^{137}Cs による γ 線強度を高さの関数として測定し, 高度2500m以上では放射性物質がほとんど検出されていないと報告している。Hososhima and Kaneyasu⁶⁾は日光連山における残留 γ 線強度を測定し, 高度1000–1400mで γ 線強度が最も高く, それ以上あるいは以下の高度では, いずれも減少していることを見いだしている。

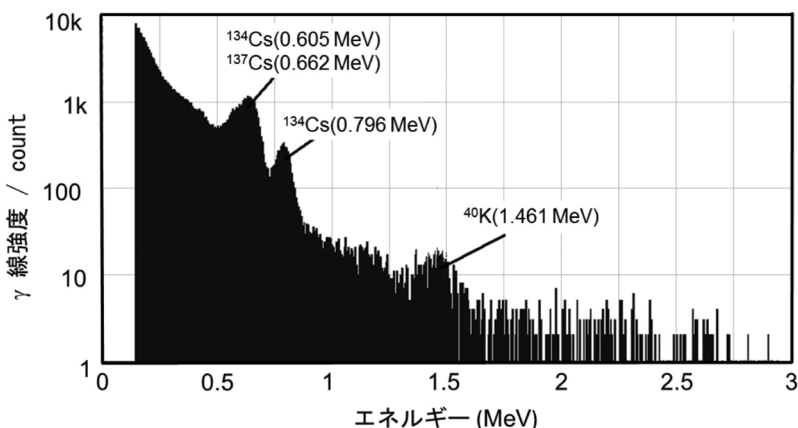


Fig. 1 シンチレーションスペクトロメータ TC300S で測定した放射性 Cs からの γ 線スペクトラム。八溝山妙見 2014 年 9 月 14 日

日本勤労者山岳連盟⁷⁾、ならびに、野口及び浦添⁸⁾は登山者の安全を図ることを目的として、広範囲の山岳地域においてシンチレーションカウンタ等による福島第一原子力発電所事故後の放射線量測定を実施している。しかし、シンチレーションカウンタによる測定では、花崗岩や安山岩などに含まれる⁴⁰Kによる自然界由来の放射線と、原子力発電所事故由来の放射線とを分離することが不可能である。

我々は、南東北、北関東、南関東及び甲信越における登山活動の機会を利用して、シンチレーションスペクトロメータを用いた放射線測定を実施した。測定地点の高さの関数として測定結果を整理し、プルームの移動経路及び移動高度について考察を行う。放射線量の分布がプルームの通過のみならず、地形や地質にも影響されることを明らかにし、原子力発電所事故由来の放射線と自然界由来の放射線を区別して評価する。

2. 方 法

2.1 測定機器

環境中の γ 線エネルギースペクトル測定を、テクノエービー社製携行型 CsI (TI) シンチレーションスペクトロメータ Mini SURVEY METER TC300S を用いて行った。本機器をタブレット

型パーソナルコンピュータ (PC) に接続し、別途インストールした機器専用のデータ処理プログラムにより、スペクトルデータを得た。測定条件は地上 1m の高さで 15 分間とし、これより注目する放射性物質の 1 分間あたりの線量率を算出した。また、一部の測定点では空間における β 線及び γ 線の強度測定を、メジャーワークス社製ガイガーカウンタ Inspector Plus を用いて行った。測定条件は地上 1m の高さで 5 分間とし、1 分間あたりの線量率を求めた。本研究ではスペクトロメータの測定結果を中心に議論し、ガイガーカウンタの測定結果は補助的に用いた。

2.2 解析方法

シンチレーションスペクトロメータによる測定結果は、接続したタブレット型 PC 内の専用プログラムにより処理され csv (comma-separated values) ファイルとして出力される。これを Fig. 1 に示すように、横軸にエネルギー、縦軸に 15 分間で測定した強度 (count) をとったエネルギースペクトルとした。これより特定のエネルギーの γ 線を放射する物質が識別できる。核分裂生成物の一つである放射性 Cs に関しては、¹³⁴Cs (0.605 MeV)、¹³⁷Cs (0.662 MeV) 及び¹³⁴Cs (0.796 MeV) の 3 つの主要な γ 線ピー

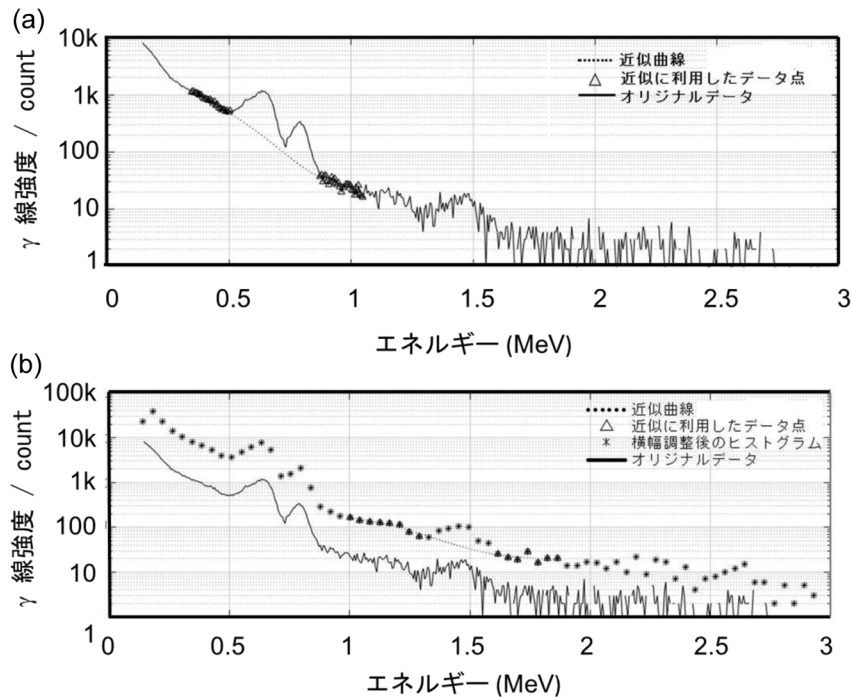


Fig. 2 (a) 0.796 MeV にピークを有する ^{134}Cs における γ 線強度を決定するための, バックグラウンドの決定法。実線はオリジナルデータ, Δ は近似に利用したデータ点, 破線はバックグラウンドの近似曲線 (八溝山妙見 2014 年 9 月 14 日)。(b) 1.461 MeV にピークを有する ^{40}K における γ 線の強度を決定するための, バックグラウンドの決定法。実線はオリジナルデータ。 ^{40}K に起因する強度は低くばらつきが大きくなるので, 横軸におけるデータ採取の間隔を通常の 0.006 MeV から 7 倍の 0.042 MeV とし, その間の強度の総和を * としてプロットした。 Δ は近似に利用したデータ点, 破線はバックグラウンドの近似曲線 (八溝山妙見 2014 年 9 月 14 日)

クが存在している。しかしながら, 本測定器のエネルギー分解能は ^{137}Cs の特性エネルギー 0.662 MeV に対し 10% 程度であるので, ^{134}Cs (0.605 MeV) と ^{137}Cs (0.662 MeV) とのピークを分離することが困難である。さらに, このエネルギー領域では, 自然界, 特に岩石や土壌中に多く含まれる ^{214}Bi (0.609 MeV) による γ 線の影響を測定上避けがたい。

一方, ^{134}Cs からの 0.796 MeV における γ 線ピークは明確に独立して認識できることから, このスペクトルピークに着目して, バックグラウンドの強度を差し引くことで γ 線の強度を評価した。ちなみに, 0.605 MeV と 0.796 MeV の ^{134}Cs の生成率はほぼ 1:1 であるが, ここで定義する ^{134}Cs の γ 線強度とは, 特に断らない

限り 0.796 MeV における値である。また, 自然界に多く存在する ^{40}K の γ 線については 1.461 MeV におけるピークに注目した。

測定時の気象条件によりスペクトロメータをタブレット型 PC に接続できず, csv ファイルとしてデータが得られないこともあった。このような場合には, 測定器の液晶モニタに表示されたエネルギースペクトルの画像を撮影し, 画像から座標を読み取るフリーソフトウェア “g3data”⁹⁾ を用いて csv ファイル形式の γ 線強度データを抽出した。この場合の読み取り誤差は 10% 程度と考えられる。なお, 一般に関心のある当量線量率との換算は, テクノエーピー社カタログによれば, $1\mu\text{Sv/h}$ あたり 44,200 cpm (コンプトン・ノイズを含む) である。ガイガー

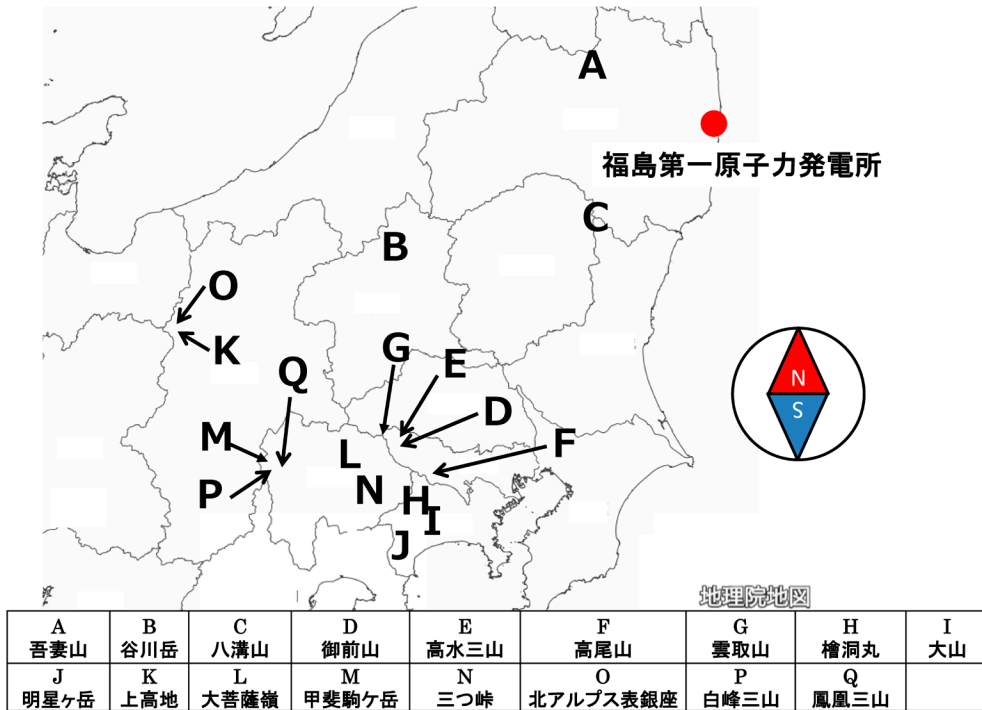


Fig. 3 測定を行った17の山域 (Color online)

カウンタでは、 $1\mu\text{Sv/h}$ あたり334cpmである。

2.3 MATLABによる解析方法

注目するピークに対応した γ 線強度を求めるには、MathWorks社製数値解析ソフトウェアMATLAB¹⁰⁾を用いた。csvファイルを読み込み、それぞれのピークについて、そのピークを含む近傍のデータからバックグラウンドに相当する曲線をCurve Fitting Toolboxによって求めた。ここでは、その中の平滑化スプラインオプションを用いた。Fig. 2(a)(b)にオリジナルのデータ(実線)、近似に使ったデータ点(Δ)及び解析結果としての近似曲線(点線)を示す。放射性CsのピークにおいてはFig. 2(a)に Δ で示すように、近似曲線の計算に用いるデータ範囲を0.35~1.05MeVとした。これは0.35MeV以下では強度の絶対値が大きく、また1.05MeV以上では強度の絶対値が小さくなることで、それぞればらつきが大きくなるからである。

^{134}Cs (0.605MeV)及び ^{137}Cs (0.662MeV)の混合ピークと ^{134}Cs (0.796MeV)の単独ピークとの間の点は近似に用いず、低エネルギー側の混合ピークにおいては、その低エネルギー側のテール、また、高エネルギー側のピークにおいては高エネルギー側のテールを矛盾なく接続するような近似曲線を求めた。これは2つのピークのテールの重なりによる、ベースラインの局所的な上昇を考慮したためである。バックグラウンドの曲線をさし引いた後、積分値、すなわち γ 線強度を計算した。なお、Csの γ 線強度を求めるに当たり、本来は ^{40}K のコンプトン散乱の影響を差し引いて考えなければならない。しかし、本研究においては ^{40}K のコンプトン散乱の強度が 10^1 程度であり、かつ ^{134}Cs の強度は 10^2 程度であるので考慮していない。

福島第一原子力発電所事故当時における放射性Csの分布を推察するために、それぞれの測定日時における γ 線強度 $I(\text{cpm})$ から、 ^{134}Cs の半減期2.06年を用いて原子力発電所事故当時

Table 1 山岳地域においてシンチレーションスペクトロメータによって測定された, 0.796 MeV における ^{134}Cs による γ 線強度 (cpm) と, この値から半減期を考慮して推算した事故当時の強度, 及び 1.461 MeV における ^{40}K による γ 線強度 (cpm)

地域	山城	測定日	測定地点	標高(m)	スペクトロメーター測定結果		
					^{134}Cs (0.796 MeV) 測定値 N (cpm)	^{134}Cs (0.796 MeV) 推算値(事故当時) No (cpm)	^{40}K (1.461 MeV) 測定値 cpm
南東北	A 吾妻山	2014/9/13	不動沢バス停	1200	98	319	19
	A 吾妻山	2014/9/13	慶應山荘前	1562	43	141	4
	A 吾妻山	2014/9/14	一切経山頂	1949	14	45	8
	A 吾妻山	2014/9/14	五色沼コル	1820	15	50	10
	A 吾妻山	2014/9/14	浄土平	1600	84	275	8
北関東	B 谷川岳	2015/9/2	肩の小屋	1963	0	0	27
	C 八溝山	2014/9/14	山頂	1022	156	508	20
	C 八溝山	2014/9/14	妙見社	870	229	746	18
南関東	D 御前山	2013/12/1	奥多摩湖	995	3	8	23
	D 御前山	2013/12/1	惣岳山 (御岳)	1365	26	66	3
	D 御前山	2013/12/1	御前山	1405	71	177	7
	D 御前山	2013/12/1	鞘口山	1142	22	56	9
	D 御前山	2013/12/1	鋸山	1109	29	73	5
	D 御前山	2015/5/3	川井キャンプ場	245	4	17	18
	D 御前山	2015/5/4	鳩ノ巣駅	323	1	4	17
	E 高水三山	2016/4/30	川井キャンプ場	245	1	15	18
	E 高水三山	2016/5/1	惣岳山 (高水)	756	14	217	6
	E 高水三山	2016/5/1	岩葺石山	792	0	0	6
	F 高尾山	2014/4/19	山頂	599	5	12	9
	F 高尾山	2015/4/12	山頂	599	0	1	12
	G 雲取山	2016/5/4	山頂	2017	2	36	7
	H 檜洞丸	2014/5/25	山頂	1600	25	73	1
	I 大山	2015/5/24	山頂	1252	39	159	6
I 大山	2015/5/24	ふれあい会館	319	3	13	7	
J 明星ヶ岳	2016/5/29	塔ノ峰	566	3	13	1	
J 明星ヶ岳	2016/5/30	山頂	923	3	15	2	
甲信越	K 上高地	2013/8/13	小梨平ケビン表層	1535	8	57	29
	L 大菩薩嶺	2014/5/3	福ちゃん荘	1820	7	19	6
	L 大菩薩嶺	2014/5/4	塩山バス停	437	0	1	19
	L 大菩薩嶺	2014/5/5	大菩薩嶺	2056	5	13	17
	M 甲斐駒ヶ岳	2015/9/12	甲斐駒ヶ岳山頂	2967	0	0	187
	N 三つ峠	2015/11/29	三つ峠	1785	0	0	47
	O 北アルプス表銀座	2016/9/1	中房温泉	1462	0	0	26
	O 北アルプス表銀座	2016/9/3	殺生ヒュッテ	2860	0	0	27
	P 白峰三山	2016/9/12	大門沢小屋	1765	0	0	0

の強度 I_0 (cpm) を式(1)に示すように求めた。

$$I_0 = I \exp\left(\frac{\ln 2}{2.06} t\right) \quad (1)$$

t は2011年3月から測定日時までに経過した時間(年数)である。なお、ここでは放射性Csの沈着した土壌の流出等による減少はないものとした。 ^{40}K についてもCsの場合と同様に ^{40}K のピークの両脇のデータ(1.28~1.57 MeV)を用いて近似曲線を求め、積分値を計算した。しかしながら、 ^{40}K (1.461 MeV)のピーク近傍は強度が低くばらつきが大きくなるので、横軸におけるデータ採取の間隔を通常の0.006 MeVから7倍の0.042 MeVに取り、その間の強度の総和を取ってピークの把握を容易にした。この様子をFig. 2(b)に*で示す。

2.4 測定山域

測定を実施した山域をFig. 3に示す。南東北、北関東、南関東及び甲信越の17山域において、2013年12月から2016年9月にかけて測定を行った。また、測定は降水や降雪のない日に行った。測定山域の中で放射線測定を行った場所を測定地点と呼ぶ。Fig. 3中の記号A, B, C...QはTable 1におけるA, B, C...Qと対応している。なお、Q鳳凰三山においてはガイガーカウンタのみの測定であるので、Table 1には含まれていない。放射線強度と測定地点における高度との関係に注目して測定を行った、A吾妻山、D御前山及びE高水三山における測定地点を、Fig. 4(a), 4(b)及び4(c)に示す。

3. 結果及び考察

各測定地点における、スペクトロメータによる測定結果をまとめてTable 1に示す。0.796 MeVにおける ^{134}Cs の強度については、測定された値 I (cpm) と、この値から式(1)により2011年3月11日当時の値 I_0 (cpm) に推算した値の双方を示した。ここでは、山岳地域で測定された放射線強度に関し、高度依存性及びプ

(a)



(b)



(c)

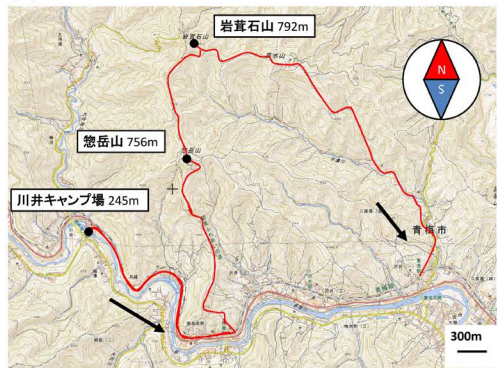


Fig. 4 (a)吾妻山, (b)御前山及び(c)高水三山における放射線測定順路。国土地理院地図に加工を加えた (Color online)

ルームの移動、ついで地形及び地表の効果について論じ、最後に自然界に存在する放射線について述べる。

3.1 放射性Csの濃度と高度依存性

Fig. 5に放射線強度と測定地点の高度との関係を、A吾妻山(◆), C八溝山(●), D御前山(□)及びI大山(X)の場合について示す。吾妻

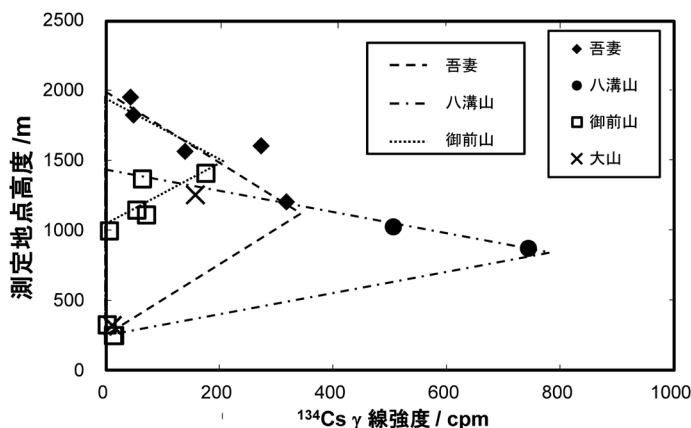


Fig. 5 吾妻山, 八溝山, 御前山, 高水三山及び大山における, 測定地点高度と ^{134}Cs による γ 線強度との関係のモデル。吾妻山と八溝山では高度が下がると残留 γ 線強度が増加する傾向にあるが, 御前山, 大山においては高度が高くなると減少している。点線(…)は御前山, 破線(---)は吾妻山, 並びに一点破線(-.-)は八溝山における測定値より推定される高度分布を表す

山では高度1949mから1200mと低くなると, また八溝山では, 高度1022mから870mと低くなるに伴い, 放射線強度が高くなる傾向にあった。一方, 南関東の御前山では995mから1405m, また大山では319mから1252mと高度が増すに伴い放射線強度が高くなっている。Hososhima and Kaneyasu⁶⁾は, 日光連山で残留放射線の強度を測定し, 1200 \pm 200mの高度において強度のピークを観測したことから, 特定の高度において放射性物質を含む雲(プルーム)が通過したと報告している。すなわち, 吾妻山では1200m以下に, また, 八溝山では800m以下の高度に最大濃度を持つプルームが通過したと考えられる。この様子を, モデルとしてFig. 5に示す。Fig. 5の破線(---)は吾妻山, 一点破線(-.-)は八溝山において推定されるプルームの高度分布を表す。事故直後の4月における吾妻山及び安達太良山での福島大学による測定によれば, 安達太良山域において高度が1730mから1000mと低くなると放射線強度が高くなることを示しており, このことは本研究の結果と同様の傾向を示す。

一方, 南関東の山においては, 高度が増すと放射線強度が高くなる傾向にあり, 御前山

の場合にはプルームの中心は1400m以上の高さにあったことを示唆している。御前山山域において, 高度245m(川井キャンプ場)及び323m(鳩ノ巣駅)における放射線強度が他の場所と比べて著しく低くなっている。Fig. 5の点線(…)は御前山において推定されるプルームの高度分布を表しており, このモデルより御前山においては, 高度1000m以下の測定地点において, プルームは通過していないと考えられる。よって, これらの2地点で放射線強度が低くなったと考えられる。

プルームの通過高度を示す実測データは, Saito et al.⁵⁾, Hososhima and Kaneyasu⁶⁾及び福島大学から報告されている。本研究による吾妻山, 八溝山及び関東東での測定において放射線強度に顕著な高度依存性が存在することから, 事故後数年は経過しているがプルームの鉛直分布を確認することができた。

3.2 プルームの移動経路

事故後に各山岳地域に拡散した放射性Csの放射線量は, 原子力発電所からの距離だけに依存するものではない。Table 1より, 原子力発電所からの距離86kmのC八溝山の頂上直

下に位置する妙見社（八溝山頂三角点から南方約400mの林間にある）の事故当時の ^{134}Cs 線量推算値746cpmは、原子力発電所からの距離77kmのA吾妻山における最高値である不動沢バス停アスファルト上及び浄土平における推算値、すなわち、319cpm及び275cpmよりも高くなっている。ちなみに、八溝山妙見社での事故当時における0.796MeVの ^{134}Cs γ 線強度746cpmをもとに、0.605MeVにおける ^{134}Cs 、及び0.662MeVにおける ^{137}Cs のピークの寄与をも含む値として γ 線強度を見積もると、4000cpm程度と推測される。これは生物学的線量率当量として $0.1\mu\text{Sv/hr}$ 程度であったと、テクノエーピー社製携行型CsI (TI) シンチレーションスペクトロメータMini SURVEY METER TC300Sのカatalogより推測される。一方、野口及び浦添²⁾は、2012年1月八溝山において $0.89\mu\text{Sv/h}$ と高い値を観測している。この原因として、野口及び浦添による測定が早い時期に行われたことから、我々の測定までの時期にCsが移動した可能性があること、また、シンチレーションカウンタによる測定の場合には、バックグラウンドノイズの補正を行っていないために高めの値が観測され易いことが考えられよう。

Tsuruta et al.³⁾は、各地域での放射性Cs降下量に影響する要因は、福島第一原子力発電所からのプルームの移動経路及び降水であるとしている。プルームは発生時刻の順にP1からP9に分類される。そのうち八溝山域に影響を与えたと思われる、プルームP3及びP8の軌跡をFig. 6に模式的に示す。Tsuruta et al.³⁾及びNakajima et al.⁴⁾を解釈すれば、プルームP3(図中P3 12h)は3月15日の昼に福島第一原子力発電所から、海岸沿いの通称浜通りを南下した後、いわき市付近で西方に転じ八溝山をかすめるようにし、白河から郡山方面に向かったと推定される。一方、午後には原子力発電所から北西に向かい、福島市付近で風向きの変化により中通りを東北本線に沿って南に下っている(P3

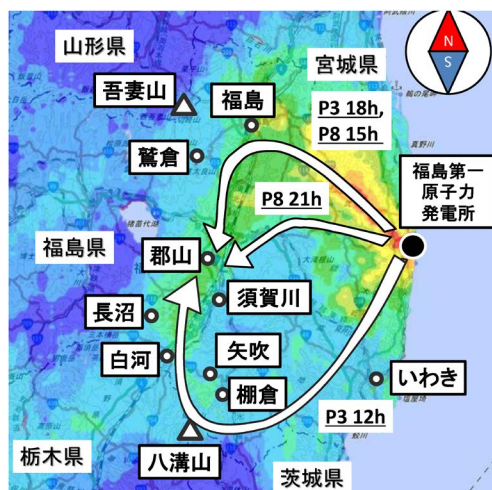


Fig. 6 プルームP3及びP8の移動経路。「放射線量等分布マップ拡大サイト」に所載の、平成23年11月5日時点(第4次)における、地表面から1mの高さにおける空間線量率の図に、引用文献4に記載の内容を参照して作成した。<http://ramap.jmc.or.jp/map/>図中のhは各地点へのプルーム発生時の時刻を表している (Color online)

18h)。P8の場合も、3月20日の午後に福島第一原子力発電所より北西に向かい、風向きの変化に伴い、P3同様に福島付近から中通り沿いに南下し八溝山方面に向かった(P8 15h)と考えられる。さらに同日21:00頃には西に向かうプルームが記録されており、これも中通りを南に向かった(P8 21h)と推定される。これらの風向きの変化は、低気圧に伴う前線の通過¹¹⁾によるものと理解される。

Table 2に示すように、八溝山から北方に20~30kmの棚倉、矢吹及び白河(位置関係はFig. 6参照)では、これらのプルームの移動を示すものとして、粉塵調査用テープろ紙に付着した ^{137}Cs 放射能強度の時間変化が確認されている²⁾。最も東に位置する棚倉で最初に放射能強度が上昇していることから、プルームが午前から昼にかけて東から西に移動していることがわかる。特に矢吹では、3月15日12:00–13:00において 316Bq/m^3 を記録し、同日の11:00までに記録されている 0.2Bq/m^3 以下から急激に

Table 2 2011年3月15, 20及び21日に, 棚倉, 矢吹及び白河の大気汚染モニタリングポストにおいてテープろ紙法により観測された, ^{134}Cs を含むブルームの移動。 ^{134}Cs の放射能強度は, 0.605MeV及び0.695MeVにおける値の総和である。Oura, Y., et al.による²⁾

ブルーム番号	棚倉		矢吹		白河	
	通過日時	放射能 (Bq/m ³)	通過日時	放射能 (Bq/m ³)	通過日時	放射能 (Bq/m ³)
P3	2011/3/15 11:00-12:00	92.7 ± 2.7	2011/3/15 12:00-13:00	316 ± 8.0	2011/3/15 13:00-14:00	107 ± 3.0
P8	2011/3/20 16:00-17:00	6.0 ± 0.4	2011/3/21 0:00-1:00	36.7 ± 1.3	2011/3/20 21:00-22:00	6.3 ± 0.5
P8	2011/3/21 4:00-5:00	10.1 ± 0.6	2011/3/21 3:00-4:00	17.0 ± 0.8	2011/3/21 2:00-3:00	32.1 ± 1.3

* 0.605MeV および 0.695MeV における ^{134}Cs の放射能の総和である

増加した。そして, 同日の15:00以降は5.0Bq/m³程度まで再び降下した。その後, 午後にはP3は北西に移動し, 福島付近で方向を変え, 東北本線に沿って中通りを南下したと推定される。八溝山では, この移動方向を変化させたブルームP3の影響をも受けたことになる。また, 3月20日にはP8が15h, 21hの2回八溝山方面に到達している。

3.3 気象条件

次に, 各山域での γ 線強度を左右する要因として, その山域の事故当時の天候について考察する。Tsuruta et al.³⁾は, ブルームの通過と降水との組み合わせによって放射性物質の顕著な降下が生じることを指摘している。Table 1に示すように, 吾妻山及び八溝山ではどちらも放射性Csが検出されている。なお吾妻山においては, 3月15日にP3(P3 18h), 3月20日午後にはP8(P8 15h)のブルームが通過したと推定される。これらの山域において, ブルームが山域を通過する際に降水があったことが影響していると考えられる。高濃度のブルームP3が発生した3月15日の16時から, 吾妻山近くの鷲倉及び八溝山近くの白河ではそれぞれ0.5mm以下の降水が確認された¹¹⁾。また, 白河から中通り沿いの北にある須賀川では3月15日の13:00~14:00に263±7Bq/m³の放射能強度の増加が確認されており, 須賀川近くの長沼では15日の1日に2.5mmの降水が記録されている¹¹⁾。

高い放射能強度が観測された山域及び測定地点の周辺に, 3月15日に降水があった地点が複数あることは, 放射性物質の降下と降水に相関があることを示す。

一方, 降水によらない乾性沈着の存在も報告されている⁴⁾。かつ山岳地域について考えると, 山の上では気温が低く空気は露点に達しやすいので, 降水確率が上がる。これらの山岳地帯でブルームが通過したときに降水がなくても, 気温が低くなって, 水蒸気が結露して葉や枝に着くので, 放射性物質もそのなかに取り込まれて沈着した可能性がある。

3.4 吾妻山と八溝山における放射性Csの降下量の違い

以上の考察から, 八溝山においては吾妻山よりも放射性Csの降下量が多かった理由として, 以下のことが考えられる。(1)当初は浜通りを南下し, いわき市付近から西に向かったブルームP3が, Fig. 6に示すように午後には福島近傍から中通りを南下したために, 八溝山には東側と北側からブルームが移動してきたと推測され, これにより八溝山は2度にわたってブルームの影響を受けたと考えられる。(2)福島から南下したブルームP3は, 樋状の阿武隈川の谷筋(中通り)を移動した。吾妻山は2000mもの高度があるためブルームの影響は比較的受けにくいだが, (3)1000mの八溝山では北側からのブルーム移動に対して壁の効果が有り, プ

ルームは山を這い登ったと推測される。(4)ブルーム P8 においても、中通りを南下している。結果として、吾妻山よりも高い濃度の放射性 Cs が降下したものと考えられる。

3・5 山岳地域における地形及び地表面が ^{134}Cs の測定値へ及ぼす影響

Fig. 5 より、吾妻山において高度が増えると放射線強度が減る傾向が示唆されている。しかしながら、浄土平(1600m)で測定された275cpm(2011年3月推算値)は、Fig. 5 より考えられる傾向から外れている。その理由は浄土平の測定地点が Fig. 7 に示すように窪地であり、周囲から水が流入しやすいため、高度の高い場所から放射性 Cs が集まったものと想像される。また、御前山における惣岳山(1365m)で測定された66cpm(2011年3月推定値)も、Fig. 5 より考えられる高度が増えると放射線強度が増加するという傾向から外れている。測定当時惣岳山の測定地点は、木々が生えておらず地面は固い土で覆われており、同山域に在る御前山山頂(1405m)は測定地点の周囲に木々が生え地面には落ち葉が堆積していた。惣岳山の測定地点のように固い地面に覆われ放射性 Cs を保持するような落ち葉などの堆積しない土地では放射性 Cs は周囲に発散すると考えられる。そのため、御前山のように落ち葉が堆積し放射性 Cs の移動が抑えられた地点と比較すると、その推定値がモデルより低くなったのではないかと考えられる。



Fig. 7 吾妻山浄土平における測定地点。周囲より低くなった窪地である (Color online)

3・6 地質による放射線量の影響

山岳地域において γ 線の強度をスペクトロメータで測定すると、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs による γ 線以外に、岩石に含まれる ^{40}K に由来する γ 線の存在が認められる。 ^{40}K の半減期は12.48

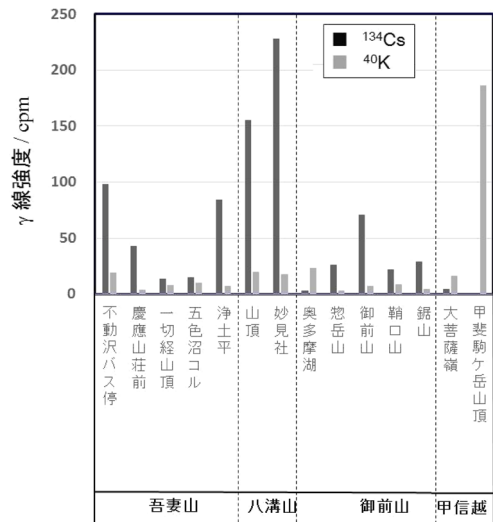


Fig. 8 吾妻山、八溝山、御前山、大菩薩嶺及び甲斐駒ヶ岳山頂における、原子力発電所事故由来の0.796MeVにおける ^{134}Cs からの γ 線と、1.461MeVにおける ^{40}K からの γ 線の強度比較

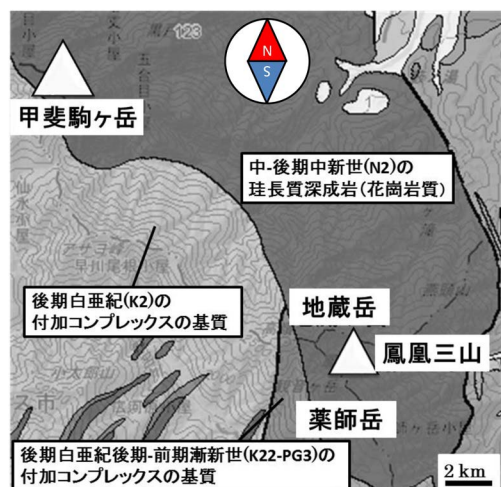


Fig. 9 甲斐駒ヶ岳及び鳳凰三山(地藏岳及び薬師岳)近傍の地質図。産総研地質調査総合センターウェブサイト¹³⁾よりダウンロードして加工使用 (Color online)

Table 3 ガイガーカウンタによる放射線強度測定結果。遮蔽鉄板を使用せずに測定。β線の寄与も含む

地域	山域	測定日	測定地点	放射線強度 (cpm)
甲信越	Q 鳳凰三山	2013/8/19	地藏岳	91
		2013/8/20	薬師岳	97
	M 甲斐駒ヶ岳	2015/9/12	甲斐駒ヶ岳山頂	94

* 遮蔽鉄板を使用していない。したがってβ線も含む。

億年である。

Fig. 8 に示すように、甲斐駒ヶ岳山頂においては ^{134}Cs に起因する γ 線は検出されなかったが、 ^{40}K 由来の γ 線強度は187cpmと、他の測定地点と比べて著しく高かった。 ^{40}K に起因する γ 線強度が甲斐駒ヶ岳頂上において著しく高いことは、甲斐駒ヶ岳特有の地質によるものと考えられる。Fig. 9 に甲斐駒ヶ岳周辺の地質図を示す¹²⁾。南アルプスの山が殆ど堆積岩で形成されている中で、甲斐駒ヶ岳山頂付近は例外的に珪長質深成岩類(花崗岩)で構成されている。これは火成岩の中でも特にカリウム濃度が高い岩石であり、必然的に放射性同位元素である ^{40}K も多く含まれる。この影響により高い値が記録されたものと考えられる。

Table 3 に示すように、鳳凰三山におけるガイガーカウンタの値に着目すると、高度2780mの薬師岳及び高度2764mの地藏岳の測定値97cpm及び91cpmは同じ地質に属する高度2967mの甲斐駒ヶ岳の94cpmと同等であることがわかる。ちなみに、吾妻山の一切経山においては地表面に安山岩が露出しているが、 ^{40}K の測定値は8cpm (Table 1) と上記の山と比較して低くなっている。

一方、鳳凰三山及び甲斐駒ヶ岳から東南東に20~30kmにある山梨県環境衛生研究所(甲府市)では、3月21~22日及び3月23~24日の降雨により、それぞれ36及び29MBq/km²の ^{137}Cs 起因の γ 線を検出している。しかしながら、空間線量率は原子力発電所事故前の範囲内であった¹³⁾。このことから、高度が3000mに近い甲斐駒ヶ岳及び鳳凰三山においては、 ^{134}Cs

の降下は、なかったものと理解できる。

4. 結 論

南東北、北関東、南関東、甲信越の山岳地域において、原子力発電所事故由来の残留 ^{134}Cs による γ 線強度を測定した。その結果、いずれの測定山域においても放射線強度の高度依存性を見出し、放射性物質を輸送したプルームの存在と通過経路ならびに通過高度について検討を行った。プルームの通過高度に関しては、高層気象データを参照にしたシミュレーション結果から議論されているが、今回の測定は、プルームの通過高度を実測したものであり、シミュレーションの結果と相俟ってプルーム鉛直構造の挙動の解明に役立つものである。

また、 ^{134}Cs は地形や地表面の状態により、流出、集積、残留という挙動をとることも明らかにできた。

甲斐駒ヶ岳において ^{134}Cs は検出されなかったが、 ^{40}K による強い γ 線を検出した。甲斐駒ヶ岳頂上付近の地質が ^{40}K を多量に含む珪長質深成岩類(花崗岩)からなるためである。山岳地域における、原子力発電所事故由来の残留放射線を議論する場合、自然界由来の放射線による影響を考慮しないと、測定された数値だけが独歩することが懸念される。

謝 辞

本研究に際して(独)日本原子力研究開発機構鳥居建男博士、佐藤仁士氏、藤木和男氏(同機構OB)、及び元東京大学大気海洋研究所鶴田治雄博士から、多くの有益な助言を頂いた。

ガイガーカウンタの使用にあたっては、慶應義塾大学教養センター大場茂教授のご理解とご協力を頂いた。山岳地域での測定では、慶應義塾大学理工学部体育會山岳部のメンバーの協力が大きかった。事故直後の2011年3月の吾妻山での放射線計測データについては、福島大学渡邊明教授にデータ開示して頂いた。本研究は慶應義塾大学理工学部体育會山岳部OB会本坊雄一基金の助成を受けたものである。これらの方々に誌上を借りて感謝申し上げる。

文 献

- 1) 鳥居建男, 眞田幸尚, 杉田武志, 田中 圭, 航空機モニタリングによる東日本全域の空間線量率と放射性物質の沈着量調査, 日本原子力会誌, **54**, 160–166 (2012)
- 2) Oura, Y., Ebihara, M., Tsuruta, H., Nakajima, T., et al., *Radiochem. Sci.*, **15**, 1–12 (2015)
- 3) Tsuruta, H., Oura, Y., Ebihara, M., Ohara, T., et al., First retrieval of hourly atmospheric radionuclides just after the Fukushima accident by analyzing filter-tapes of operational air pollution monitoring stations., *Sci. Rep.*, **4**, 6717 (2014)
- 4) Nakajima, T., Misawa, S., Morino, Y., Tsuruta, H., et al., Model depiction of the atmospheric flows of radioactive cesium emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident, *Prog. Earth Planet. Sci.*, **4**, 2 (2017)
- 5) Saito, T., Kurihara, Y., Koike, Y., Tanihata, I., et al., Altitude distribution of radioactive cesium at Fuji volcano caused by Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **303**, 1613–1615 (2015)
- 6) Hosohima, M. and Kaneyasu, N., Altitude-Dependent Distribution of Ambient Gamma Dose Rates in a Mountainous Area of Japan Caused by the Fukushima Nuclear Accident, *Environ. Sci. Technol.*, **49**, 3341–3348 (2015)
- 7) 監修 野口邦和, 編集 日本勤労者山岳連盟, 放射線と登山道, **79**, 桐書房, 東京, (2012)
- 8) 野口邦和, 浦添徳, 東北・関東地方を中心とした登山道の放射線測定, 登山医学, **33**, 18–27 (2013)
- 9) “g3data”, Jonus Frantz, <http://www.frantz.fi/software/g3data.php> (参照2017-5-13)
- 10) “MATLAB R2015b”, Math Works, <https://jp.mathworks.com/products/matlab.html> (参照2017-5-13)
- 11) “過去のデータ検索”. 気象庁 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>. (参照2017-5-13)
- 12) “地質図Navi”. 国立研究開発法人産業技術総合研究所/地質調査総合センター, <http://gsj-seamless.jp/labs/seamless2015/2d/>. (参照2017-5-13)
- 13) 山梨県衛生環境研究所, 降下物環境放射能測定結果(文部科学省委託調査平成23年3月19日から4月15日までの記録)

Abstract

**Distribution of Residual Radioactive Substance in Mountainous Area
Due to the Nuclear Power Plant Accident
—The Effect of Plume, Topography, Surficial Condition
and Natural Radiation—**

Shizuka HOSHINA^{*}, Keiichi KUROSAWA^{*}, Shota TAKAHASHI^{*}, Kota KATO^{*},
Kosuke YOSHIMURA^{*}, Yukihiro OKUMURA^{*}, Naoki MATSUMOTO^{*}, Masahiko YOKOYAMA^{*},
Masafumi NAKADA^{*}, Taketoshi HIBIYA^{*,**} and Yoichi KAMIHARA^{***,†}

^{*}Alpine Club, Faculty of Science and Technology, Keio University
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa Pref. 223-8522, Japan
^{**}Graduate School of System Design and Management, Keio University
4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa Pref. 223-8526, Japan
^{***}Faculty of Science and Technology, Keio University
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa Pref. 223-8522, Japan
[†]kamihara_yoichi@keio.jp

Distribution of radioactive ^{134}Cs due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident was measured using a scintillation spectrometer in the mountainous areas of southern part of the Tohoku, northern and southern parts of Kanto and Koshin-etsu regions. As a result, intensity of radiation increased with decrease of altitude in Mt. Azuma and Mt. Yamizo, whereas intensity increased with increase of altitude in Mt. Gozen and Mt. Oyama. This indicates that plumes (polluted air masses) with their center at the specific height moved depending on the meteorological condition. Although radioactive ^{134}Cs was not detected at Mt. Kaikoma, relatively intense γ -ray was observed due to radioactive ^{40}K from granite.

(Received November 13, 2017)

(Accepted July 1, 2018)
