

“セシウム花粉”の 内部被ばく影響は砂埃に比べて 無視できるほど小さい

検垣 正吾
Higaki Shogo

1. はじめに

2011年3月の東京電力(株)福島第一原子力発電所事故により大気中に大量の放射性物質が拡散した。放射性プルームが東京に初めて飛来した2011年3月15日に、筆者は東京大学の本郷キャンパス(文京区)にて、徹夜で屋外の空間線量率の測定を連続的に行っていた。その際、スギ花粉対策として市販の不織布製マスクを着用していた。そのマスクに付着した放射性物質をGe半導体検出器で定性定量分析し、ダストサンプルの定性定量分析結果と比較することで、事故直後の放射性プルームの吸入による内部被ばくに対して、マスクによる低減効果を確認して報告した¹⁾。特に、放射性セシウムはほとんど全てがマスクに捕集された。その後、2011年5月までには福島第一原子力発電所からの直接の大気への放出はバックグラウンドレベルにまで減少したことが、様々な研究機関の測定で明らかになった。

福島第一原子力発電所事故によって環境中に放出された放射性物質の中で人体への影響が大きいのは、大気への放出量が多く、半減期が比較的長い放射性セシウム¹³⁴Cs及び¹³⁷Csである。大気中に放出された放射性セシウムは、大部分が雨などによって土壌表面に沈着する。セシウムは1価の陽イオンとなりやすいため、沈着当初は有機物や粘土鉱物構造末端の持つ負電荷に保持される。しかし、時間の経過とともにシート状の構造を持った2:1型層状ケイ酸塩鉱物の層間に保持されるようになり、より強く

固定されることが知られている²⁾。一旦固定されてしまうと、雨などが降ってもイオンとして溶出する割合は極めて小さくなる。また、森林では、放射性セシウムは表面積の大きい葉にも沈着する。土壌や葉に沈着した放射性セシウムは経根吸収などによって植物体内へ分配され、その後、植物体内での再分配が起こる。日本は国土の2/3が森林であり、特にスギによる花粉症は国民病の1つである(筆者も重症患者である)。そのため、2012年春に放射性セシウムを含んだスギ花粉(いわゆる“セシウム花粉”)が大気中に再拡散され、一般市民が吸入して内部被ばくする可能性があるとの懸念があり、社会的な関心事となった。林野庁は、2011年11月~2012年1月に福島県ほか15都県のスギ林182か所からスギの雄花を集めて、含まれる放射性セシウム濃度を調査した。この調査での雄花の放射性セシウム濃度の最高値は、福島県浪江町の253 kBq/kgであり、花粉に含まれる放射性セシウムの濃度がこの値に等しいと仮定すると、人が吸入した場合の花粉飛散時期の被ばく線量率は0.553 μ Svとなる試算を発表した³⁾。しかし、一般市民が日常生活を送る中で、呼吸によって放射性セシウムをどの程度取り込むおそれがあるのかは不明であった。

そこで、筆者らの研究グループでは、2012年2月19日~4月14日の8週間にわたり、東日本在住の一般市民に市販のかぜ・花粉用不織布製マスクを日常生活と同様に着用してもらい、マスクに付着した放射性セシウムを測定し

て、一般市民の吸入による内部被ばく線量を推定し、スギ花粉による放射性セシウムの再飛散の有無を調べた⁴⁾ので、紹介する。

2. 調査と測定手法

本調査の被験者は、福島県及び東京都在住各10名、青森・岩手・宮城・秋田・山形・茨城・栃木・群馬・埼玉・千葉・神奈川・静岡の各県在住各4名の合計68名で、年齢は20～59歳、68名のうち男性27名、女性41名であった。なお、福島県以外の各県在住の被験者の測定結果は、東京都在住の被験者と同様の傾向であったため、福島県及び東京都在住の被験者合計20名の調査結果から得られた内容に限り紹介する。

被験者に着用してもらったマスクは、市販の不織布製マスクであり、直径 $3\mu\text{m}$ の粒子を95%以上ブロックする性能を持つ（メーカー調べ）。着用の際には少なくとも1日ごとに新品のマスクに交換してもらい、1枚ずつチャック袋に密閉して返送してもらった。マスクの着用時間も記録してもらった。着用時間の平均値は福島県在住の方で76時間/週、東京都在住の方で70時間/週であった。

マスクに付着した放射性セシウム及びスギ花粉は以下の手法で定量した。まず、各被験者が各1週間に着用した少なくとも7枚のマスクを1試料とし、Ge半導体検出器により放射性セシウムを測定した。測定時間は1試料当たり6時間で、検出下限値は ^{137}Cs 、 ^{134}Cs それぞれ0.20 Bqであった。

放射性セシウム測定後に、スギ花粉の定量を行った。スギ花粉は、直径 $30\mu\text{m}$ 程度の球に円錐が1つ生えている特徴的な形状をしているため、光学顕微鏡を用いた計数が行いやすい。しかし、不織布は表面の凹凸が大きく、そのままではピントが合わせづらく計数が難しいため、マスク1枚ごとに濾紙上に集塵したものを計数試料とした。また、着用後のマスクの輸送によって花粉が脱落する可能性があるため、

チャック袋の内側を流水によって内容を濾紙上に集めて計数試料として、マスクから集塵したものと合算した。この手法により、スギ花粉の全てを濾紙上に集めることができた。さらに、光学顕微鏡による計数を行いやすくするため、ヨウ素デンプン反応によって、スギ花粉を紫色に染色後に計数した（図1）。

3. 放射性セシウムの定量結果と内部被ばく線量

^{137}Cs が有意な値で検出されたマスクの9割程度から ^{134}Cs も検出された。また、調査時期（2012年2～4月）における $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は約0.73となり、2011年3月11日現在に減衰補正するとほぼ1となる。これらのことから、付着した放射性セシウムは福島第一原子力発電所事故由来であるといえる。

福島県在住の被験者10名のうち、9名から放射性セシウムが検出された一方で、東京都在住の被験者で放射性セシウムが検出されたのは4名であった。福島県在住の被験者で検出された方9名の平均値は、8週間の合算で ^{137}Cs が $6.6\pm 0.21\text{ Bq}$ 、 ^{134}Cs が $4.5\pm 0.12\text{ Bq}$ であった。東京都在住の被験者では、8週間の合算で最大でも ^{137}Cs が $0.58\pm 0.06\text{ Bq}$ 、 ^{134}Cs が $0.33\pm 0.05\text{ Bq}$ であった。

検出された放射性セシウムが最大となった被

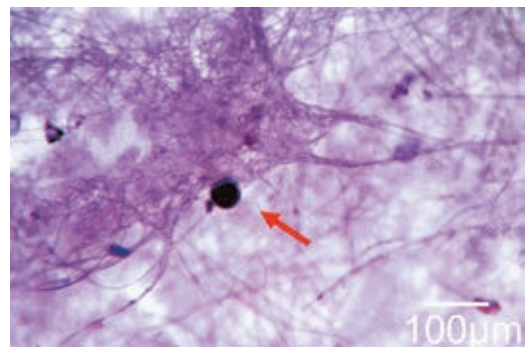


図1 実際に着用したマスクに付着したスギ花粉（矢印）の光学顕微鏡写真（濾紙上に集めてヨウ素で染色したもの）

験者は福島県郡山市在住の商工自営業の50歳代男性で、8週間の合算で¹³⁷Csが 21 ± 0.36 Bq、¹³⁴Csが 15 ± 0.22 Bqであった。図2にこの被験者の週ごとの¹³⁷Cs放射能の変動と福島県在住の被験者の平均値の変動を示す。この被験者の調査期間8週間における吸入による内部被ばくを算定する。ICRP Publ.68によると、一般公衆の内部被ばくを算定する場合、放射性物質の正確な粒径が不明な際には、粒径1 μ mと仮定することが推奨されている。さらに、セシウムは迅速に吸収されるシナリオ（半減期10分で吸収）の実効線量係数である、¹³⁷Csに対して 4.6×10^{-3} [μ Sv/Bq]、¹³⁴Csに対して 6.6×10^{-3} [μ Sv/Bq]を用いて算出した。さらに、マスクを着用していない時間でも同じ割合で放射性セシウムを吸入すると想定して、この被験者のマスク着用時間の割合で除した結果、調査期間8週間で 0.494μ Svの内部被ばく線量となった。仮に、この放射性セシウム量の付着が調査期間以外も継続するとして、年間の内部被ばく線量を見積もると、 0.494μ Sv \div 8週 \times 52週 $=$ 3.2 μ Svとなった。これは、公衆の年間被ばく限度である1mSvの310分の1である。

4. スギ花粉の定量結果

スギ花粉は、測定した全てのマスクから検出された。福島県在住の被験者10名の平均値は、474個/週、最大値は6,114個/週であり、東京都在住の被験者10名の平均値は595個/週、最大値は18,272個/週であった。図3にマスクに付着した放射性セシウムが最大となった被験者（福島県在住）の週ごとのスギ花粉量の変動及び福島県在住の被験者の平均値、東京都在住の被験者の平均値の変動を示す。この被験者のスギ花粉量の変動は、福島県在住の被験者の平均的な変動とほぼ等しかったことが分かる。平均値の変動傾向は、気候条件やスギ花粉源の違いを反映しており、東京都では、調査の第3週目（3月4～10日）福島県では第6週目（3月25～31日）にピークを迎えていた。

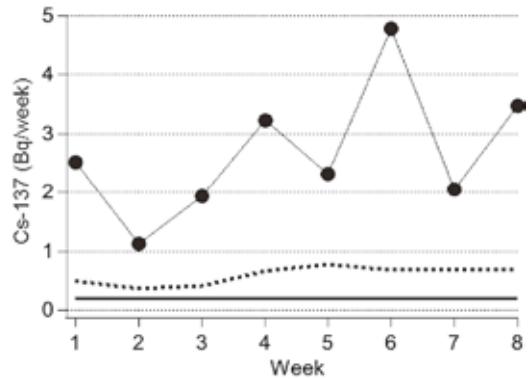


図2 マスクに付着した放射性セシウムが最大となった被験者（福島県在住）の¹³⁷Cs量の変動
点線は福島県在住の被験者の平均値の変動、太線は検出下限値の0.20 Bqを示す

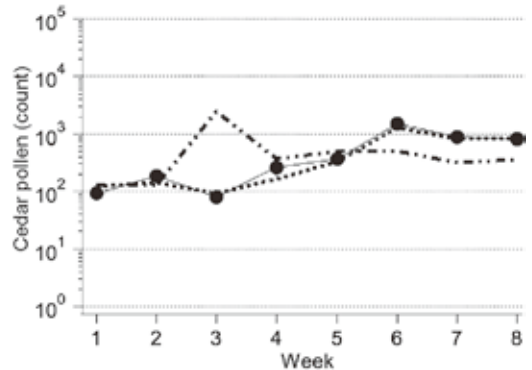


図3 マスクに付着した放射性セシウムが最大となった被験者（福島県在住）のスギ花粉数の変動
点線は福島県在住の方の平均値の変動、二点鎖線は東京都在住の方の平均値の変動を示す

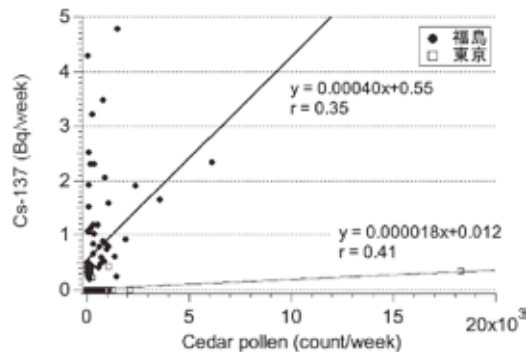


図4 マスクに付着した放射性セシウムとスギ花粉数との相関
福島、東京ともに中程度の相関の強さであった

マスクに付着した放射性セシウムとスギ花粉数との相関を図4に示す。相関係数は、福島県在住のグループで0.35，東京都在住のグループで0.41となり，中程度の相関の強さであった。

5. 放射性セシウム源の特定

検出された放射性セシウムがスギ花粉由来であるかを以下の手法によって確かめた。

①イメージングプレートでマスク上の放射性セシウムの分布を観察し，スポットがある部分を光学顕微鏡で観察して花粉の有無を確認

→放射性セシウムがある部分と花粉の位置は一致しなかった。

②スギ花粉を集塵して，その濾紙をGe半導体検出器で放射能測定

→検出限界値以下であった。

③集塵して花粉が除去されたマスクを再度イメージングプレート及びGe半導体検出器で放射能測定

→①と同様にスポットがある画像が得られ，1枚のマスクから ^{137}Cs が 1.1 Bq ， ^{134}Cs が 0.81 Bq 検出された。

④このマスクのスポットがある位置を，再度光学顕微鏡で観察

→図5に，実際に被験者が着用したマスクとマスクに付着した放射性セシウム源のイメージングプレート像との合成像と，その部分の光学顕微鏡写真を示す。マスクへの付着物のうち，スギ花粉は全て集塵されるが，砂埃とみられる不定形の物質は，不織布繊維に引っかかるか，高密度のため集

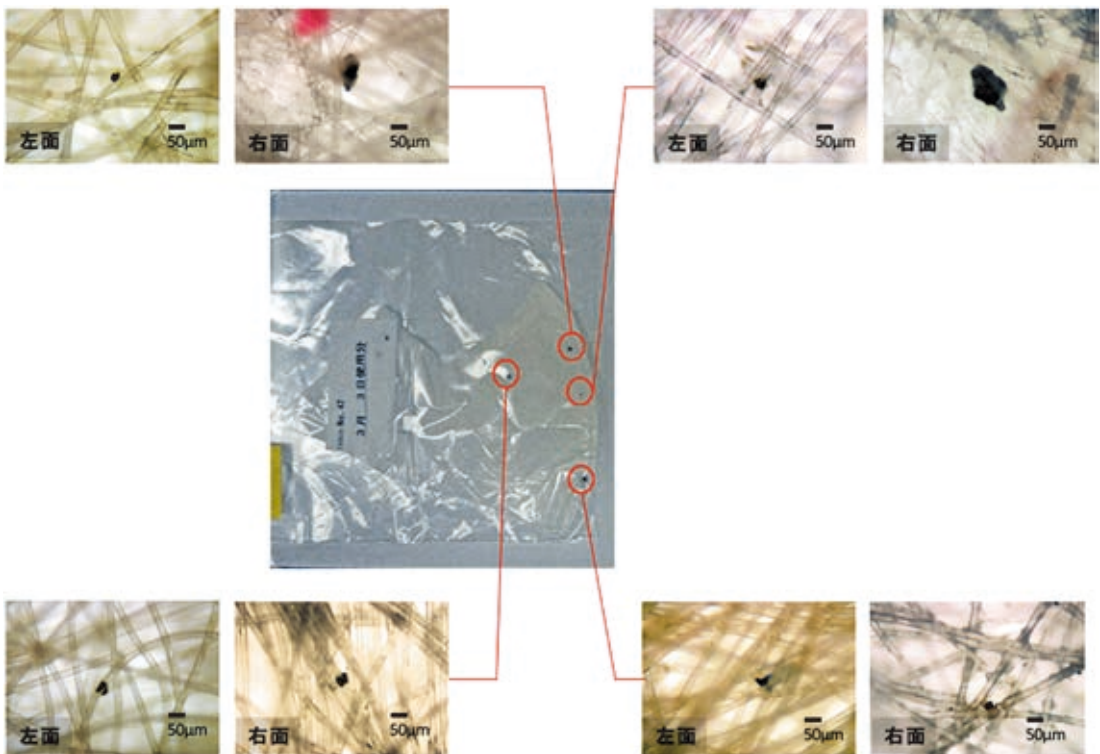


図5 被験者が実際に着用したマスクとマスクに付着した放射性セシウム源のイメージングプレート像との合成像と，その部分の光学顕微鏡写真
各写真の右下のスケールは50 μmの長さを表す

塵されないため除去されず残る。イメージングプレート像でスポットが観察された部分には、全て砂埃とみられる不定形の物質が存在しており、これが放射性セシウム源であるといえる。

これらのことから、一般市民に吸入による内部被ばくを引き起こす可能性のある放射性セシウム源はスギ花粉ではなく、砂埃とみられる不定形の物質によるものであることを示した。このことは、砂埃の吸入を防ぐことにより、内部被ばく線量を低減できることを示唆している。

6. 今後の計画

マスクに付着した放射性セシウム量が他県に比べて有意に高かった福島県では、継続的な調査が必要と判断したため、本調査は、2013年春、2014年春にもそれぞれ対象者20名、期間4週間の規模で継続している。継続調査の詳細は割愛するが、マスクに付着した放射性セシウム量の経年変動は、物理学的減衰よりも速く減少しており、住環境の除染が進行していることがうかがえる。

【謝辞】

本稿の内容は、ITEA 東京環境アレルギー研究所の白井秀治氏、信州大学ヒト環境科学研究支援センターの廣田昌大助教、東京大学アイソトープ総合センター（当時）の矢野有希子氏（現・カリフォルニア大学バークレー校大学院博士課程）、ユニ・チャーム（株）の武田英輔氏、柴田彰氏、三嶋祥宜氏、山元ひろみ氏、宮澤清氏との共同研究の成果である。ここに記して感謝を申し上げる。

参考文献

- 1) Higaki, S. and Hirota, M., *Health Phys.*, **104**, 227–231 (2013)
- 2) 日本土壤肥料学会，土壤・農作物等への原発事故影響WG，原発事故関連情報(2)：セシウム(Cs)の土壌でのふるまいと農作物への移行(2013年改訂)，<http://jssspn.jp/info/nuclear/cs.html> (2013)
- 3) 林野庁，スギ雄花に含まれる放射性セシウムの濃度の調査結果について，<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hozen/120208.html> (2012)
- 4) Higaki, S., *et al.*, *Health Phys.*, **107**, 117–134 (2014)
(東京大学アイソトープ総合センター)