

福島第一原子力発電所事故に伴う放射線航空機モニタリング

結城 洋一*・前島 正道*・平田 諒次*・松井 雅士**

Airborne radiation monitoring in the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident

Youichi Yuuki*, Masamichi Maeshima*, Ryouji Hirata*, and Masashi Matsui**

Abstract

In order to investigate the pollution range of the radioactive contamination by Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, which was caused by the Great East Japan Earthquake, OYO Corp. carried out the airborne radiation monitoring of the Japanese whole region after half a year from the earthquake disaster using the manned helicopter. Moreover, we carried out, as a contractor of the Japan Atomic Energy Agency, the airborne radiation monitoring of the warning area within the sphere of 20 km, and the planned evacuation area from the nuclear power plant nine months after the earthquake disaster using the unmanned helicopter. These results were utilized as basic data of planning of the determination of regulation ranges, such as a warning area and an evacuation zone, and a decontamination plan.

The airborne radiation monitoring can measure the dose rate of a wide area in a short time, and also can measure a dose rate at the place where people cannot come into, such as the high concentration areas of the nuclear power plant neighborhood for a long time. We utilized the know-how of the airborne radioactive exploration technology cultivated by geological surveys so far conducted, or unmanned helicopter airborne electromagnetic survey technology. These activities have contributed to development and operation of airborne monitoring technology.

Keywords: Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, Radioactive contamination, airborne radiation monitoring

(要 旨)

東日本大震災により発生した東京電力(株)福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性物質の汚染範囲を調査するため、応用地質株式会社は、独立行政法人日本原子力研究開発機構の依頼によって、震災から半年後、有人ヘリコプターを用いて日本全域の放射線航空機モニタリング（以下、航空機モニタリング）を実施した。また、震災から9か月後、無人ヘリコプターを用いて原発から20 km圏内の警戒区域、計画的避難区域の航空機モニタリングを実施した。これらの結果は放射線の空間線量率や沈着量の分布図などにまとめられ、警戒区域や避難区域などの規制範囲の決定、除染計画の立案の基礎データとして活用された。

航空機モニタリングは、短時間に広域の空間線量率を測定できるほか、原発周辺の高濃度地域のように人が長時間立ち入ることができない場所でも空間線量率を測定することができる。応用地質株式会社は、地質調査で培った空中放射能探査技術や無人ヘリコプター空中電磁探査技術のノウハウを航空機モニタリングの有人ヘリコプターモニタリング、無人ヘリコプターモニタリングで活用し、航空機モニタリング技術の開発と実施に貢献した。

キーワード: 福島第一原子力発電所事故, 放射能汚染, 放射線航空機モニタリング

* 応用地質(株)工務本部 ** 応用地質(株)震災復興本部

* OYO Corporation Logistics Headquarters

** OYO Corporation Earthquake Disaster Prevention Division

1. まえがき

2011年3月11日に起きた東日本大震災によって発生した東京電力(株)福島第一原子力発電所事故(以下、原発事故)によって、環境中に放出された放射性物質の汚染範囲を調査するため、文部科学省(以下、文科省)は「文部科学省航空機モニタリング行動計画」に基づいて、米国エネルギー省(Department of Energy, 以下、DOE)と共同して、航空機に搭載した放射線検出器を使用した原発施設上空のモニタリングを開始した。しかしながら、我が国においては原子力防災技術として航空機モニタリングが位置づけられてはいたが、想定したモニタリングは原発から放出されたプルームがどちらに流れるかを確認するためのモニタリングで、環境中に放出された放射線のモニタリングではなかった。

航空機モニタリング技術については、国際原子力機関(International Atomic Energy Agency, 以下、IAEA)が指針を出しており^{1), 2)}、米国においてはDOEが放射線モニタリング専門の部署を組織している。原発事故直後の航空機モニタリングについては、DOEのオペレーションマニュアルを参考に実施された。

その後、文科省は独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下、JAEA)に航空機モニタリングのデータ取得方法やデータ解析方法について検討を依頼し、JAEAを中心に我が国のモニタリング方法が構築された^{3)~5)}。

応用地質株式会社(以下、応用地質)は、日本全域で実施された航空機モニタリングの初期から参加し、JAEAが構築するモニタリング技術の開発に全面的に協力してきた。また、原発事故直後は民間飛行機が飛行禁止だったエリアにおいて、広域モニタリングを実施するためにJAEAが開発した無人ヘリコプターモニタリングシステムについて、開発段階から参画し、無人ヘリコプターモニタリング技術の構築に貢献した。

航空機モニタリングは現在、全国規模のモニタリングを終了し、放射線濃度が高い地域の継続的モニタリングに移行している。応用地質では、これらのモニタリングも継続的に参加している。本稿では、原発事故に伴う調査で実施した一連の航空機モニタリング技術の概要を紹介する。

2. 有人ヘリコプターモニタリング

2.1 概要

放射線探査技術は、ウラン鉱床探査のために開発された。地質調査の分野では、放射能(放射線を出す能力)と岩石との関係から地質を推定することから、「放射線探査」と呼ばれている。1940年代にはカナダで航空機を用いた放射線探査(空中放射線探査)が行

われている。1960年代になると、核実験による核生成物調査のため、ガンマ線スペクトロメータが開発された⁶⁾。日本では、1955年に地質調査所がウラン探鉱のために空中放射線探査を実施したのが最初である⁷⁾。民間では、1981年から落合⁸⁾が断層、温泉、地下水調査で空中放射線探査を実施している。空中から調査する検出器は、大型のヨウ化ナトリウム検出器(以下、NaI(Tl)検出器)が用いられる。放射線航空機モニタリングは、米国スリーマイル島や旧ソ連チェルノブイル原子力発電所事故の後、欧米を中心に技術開発が進められてきた。また、1990年代から始まったGPSの民間利用から、データと測定位置が簡単に結び付けられるようになり、大量のデータ処理もパソコンの発達によって短時間で安価にできるようになった。この結果、空中放射線探査、航空機モニタリング技術はマッピングの技術となり、測定結果は例えば空間線量率強度分布図として表現される。

表-1に、原発事故後、これまでに国内で実施された航空機モニタリングの一覧を示す。測定及び解析の「○」は、応用地質が参加した航空機モニタリングを表す。2011年8月から2012年5月まで実施した東日本・西日本航空機モニタリングの飛行測線距離は約47,000 kmにおよぶ。

表-1 モニタリングの実績

Table 1 Track records of the monitoring.

NO	モニタリング名	測定地域	測定	解析	測定実施期間
1	第1次航空機モニタリング	発電所から80km圏内			2011/4/6-4/29
2	第2次航空機モニタリング	発電所から80-100km圏内			2011/5/18-5/26
3	第3次航空機モニタリング	発電所から80km圏内			2011/5/31-7/2
4	東日本航空機モニタリング(1)	東北~北陸、中部	○	○	2011/6/22-10/20
5	第4次航空機モニタリング	発電所から80km圏内		○	2011/10/22-11/5
6	西日本、北海道航空機モニタリング	近畿~沖縄、北海道	○	○	2012/1/30-5/31
7	警戒区域、計画的避難区域モニタリング	警戒区域、計画的避難区域			2012/2/6-2/10
8	東日本航空機モニタリング(2)	東日本地域(0.2μSv/h以上)	○	○	2012/4/2-5/7
9	第5次航空機モニタリング	発電所から80km圏内	○	○	2012/6/22-6/28
10	第6次航空機モニタリング	発電所から80km圏内	○		2012/10/31-11/16
11	東日本航空機モニタリング(3)	東日本地域(0.2μSv/h以上)			2012/10/31-12/28
12	警戒区域、計画的避難区域モニタリング	警戒区域、計画的避難区域			2013/3/4-3/11
13	第7次航空機モニタリング	発電所から80km圏内	○	○	2013/8/27-9/28
14	東日本航空機モニタリング(4)	東日本地域(0.2μSv/h以上)	○	○	2013/9/3-11/4
15	第8次航空機モニタリング	発電所から80km圏内	○	○	2013/11/2-11/19

2.2 モニタリングの方法

有人ヘリコプターモニタリングでは、大型のNaI(Tl)検出器をヘリコプターに搭載し、地上から放射されるガンマ線を測定する。測定は応用地質が保有する放射線モニタリングシステムと、JAEAが文科省から貸与されたモニタリングシステムによって行った。それぞれのモニタリングシステムの外観を図-1に示す。応用地質が保有するシステム(図-1上図)は東日本航空機モニタリング(1)、西日本、北海道航空機モニタリングで使用された。それ以降のモニタリングでは文科省が保有するシステム(現在は、原子力規制庁が管理、図-1下図)でのみ実施している。

測定データはGPS時と同期されており、GPSで測定した位置情報とガンマ線の計数率を1秒毎にサンプリングする。測定は、あらかじめ一定間隔で平行に設定した飛行測線に沿って飛行測定を行う。測線間隔は、地質調査が目的の空中物理探査では通常50～250mであるが、有人ヘリコプターモニタリングでは、短期間に広域を調査するために、東日本（青森県から愛知県まで）では3km間隔（原発周辺は1.8km間隔）、西日本・北海道では5km間隔で測定飛行を行った。飛行高度は対地1000ft（＝約300m）を基準とした。



図-1 航空機モニタリングシステム
Fig. 1 Airborne Monitoring System.

2.3 解析方法

2.3.1 高度補正と計数率-線量率換算

測定データは、NaI(Tl) 検出器に入射するガンマ線の個数（計数率）として得られる。これをまず、高度の影響を除去して基準高度1000ftの計数率にする。高度補正は、地域ごとに設定したテストライン（3km程度の直線がとれる平坦な場所）において高度を変化させ測定し、空気減弱係数を求める。空気減弱係数と高度補正の関係式を(1)に示す。

$$HF = \exp (AF \cdot (H_{sd} - H_a)) \quad (1)$$

AF: 実効的空気減弱係数

HF: 高度補正係数

H_{sd} : 基準高度 (1000 ft = 約 300 m)

H_a : 飛行高度 (対地高度)

計数率を基準高度1000ftで正規化した後、テストラインでの基準高度1000ftの計数率とテストライン下の地上において測定したNaI(Tl)サーベイメータによる空間線量率とを比較して求めた線量率換算係数を使用して、地上高さ1mでの空間線量率に換算した。

2.3.2 放射性セシウム沈着量バックグラウンド補正

ヘリコプターによるモニタリングでは、地盤から放出される自然由来の放射線（天然核種による自然放射線）、宇宙から放射される宇宙線なども同時に測定している。特に自然放射線は、西日本全域における天然核種による空間線量率の平均値が東日本全域の平均値に比して高い。一方、東日本地域で測定した結果から、原発事故で放出された放射性物質は西日本地域には航空機モニタリングで検出できる程度には飛散していないことが予想されるので、もし西日本地域で高い空間線量率が測定される場合には、それは天然核種による可能性が高い。これらを考慮せずに空間線量率分布図を作成した場合、実際には原発事故由来の放射性物質がないにもかかわらず、放射能汚染地域としてマッピングされることになりかねない。

天然核種と原発事故由来の放射性核種（人工核種）を区別する方法として、Rybacha et al.⁹⁾は、人工グロスカウント法（MMGC法；Man Made Gross Count Methods）を提案した。これは、原子力発電所から発生する¹³⁴Co、¹³⁷Cs、¹³¹Iなどが、1.4 MeV以下の低エネルギーであることを利用した方法である。MMGC比（ V_{MMGC} ）は(2)～(4)式で表現される。

$$V_{MMGC} = \frac{GC_1}{GC_2} \quad (2)$$

ここで

$$GC_1 = \sum_{400keV}^{1400keV} I_E (cps); \quad (3)$$

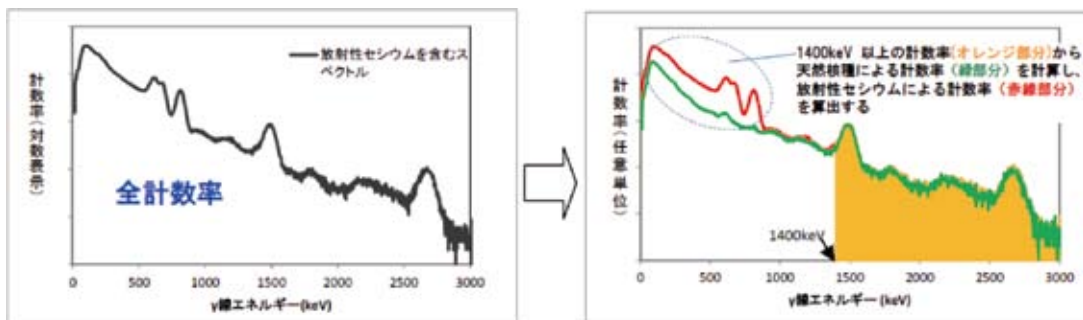


図-2 放射性セシウムの有意なエネルギースペクトルが存在する地点の計数率のイメージ

Fig. 2 Explanatory of the counting rate of a point where the significant energy spectrum of radioactive cesium exists.

$$GC_2 = \sum_{1400\text{keV}}^{3000\text{keV}} I_E \text{ (cps);} \quad (4)$$

I_E : 航空機モニタリング測定値 (計数率).

日本の航空機モニタリングでは、DOE が用いた MMGC 法をもとに、各地域における天然核種の影響を評価する手法が検討された。

放射性セシウム ^{134}Cs , ^{137}Cs を含むとき、その放射線のエネルギースペクトルでは 600 keV から 800 keV の範囲にピークが観測される。そこで、測定対象箇所に有意な放射性セシウム ^{134}Cs , ^{137}Cs が存在するか否かの判定を以下の手順で求めた計数率の比によって行った。(図-2)

- ① 全エネルギー領域における計数率 (放射性セシウム, 宇宙線を含む) を求める。
- ② ガンマ線のエネルギーが 1400 ~ 2800 keV の計数率 (放射性セシウムを含まない) を求める。
- ③ 2800 KeV 以上 (宇宙線) の計数率を求める。
- ④ 自然放射線のスペクトルインデックスとして計数率の比 (I_{BG}) = ①/② を求める。また、③はあらかじめ海上で高度を変えて (300 ~ 2400 m) で測定したデータから宇宙線スペクトルインデックス (CR インデックス) (ICR) = ①/③ を求める。これら設定したインデックスを (5) 式に当てはめて、放射線セシウム由来の計数率 C_{CS} を算出する。

$$C_{CS} = C_{all} - (C_{>1400\text{KeV}} * I_{BG}) - (C_{>2800\text{KeV}} * I_{CR}) \quad (5)$$

C_{CS} : 放射性セシウム由来の計数率

C_{all} : 全計数率

$C_{>1400\text{KeV}}$: 1400 ~ 2800 KeV の計数率

$C_{>2800\text{KeV}}$: 2800 KeV 以上の計数率

この計数率の特徴を実測データにもとづいて分析したところ、放射性セシウムの有意なエネルギースペクトルが検出されていない箇所では、測定地域によらず概ね一定であることがわかった。バックグラウンド補正では、放射性セシウムの有意なエネルギースペクトルが検出されている地点における天然核種による計数率について、計数率の比を用いて放射性セシウムの存在を評価した。

2.3.3 放射性セシウムの沈着量の計算

地表面への放射性セシウムの沈着量は、前述の方法で求めた空間線量率 (放射線被曝による人体への影響の度合いを表す, $\mu\text{Sv/h}$) から放射性セシウムの沈着量 (単位面積当たりの放射能の壊変強度を表す単位, Bq/m^2) へ換算する係数を求めて算出している。この換算係数は、文部科学省マニュアル¹⁰⁾により、あらかじめ決められた地点において、In-situ (原位置) 測定用の Ge 検出器を用いて行った土壌表面の ^{134}Cs 及び

^{137}Cs の測定結果と空間線量率の相関関係を基にして、放射性セシウムの沈着量から算出した。

2.4 モニタリングの結果

解析結果を地表面から 1 m 高さの空間線量率マップ及び放射性セシウムの沈着量マップにまとめた。図-3 に 2012 年 5 月までに実施した日本全域の空間線量率マップ、図-4 に沈着量マップを示す¹¹⁾。これらのマップは測定箇所によって測定日が異なるため平成 24 年 5 月 31 日の値に減衰補正を行った。

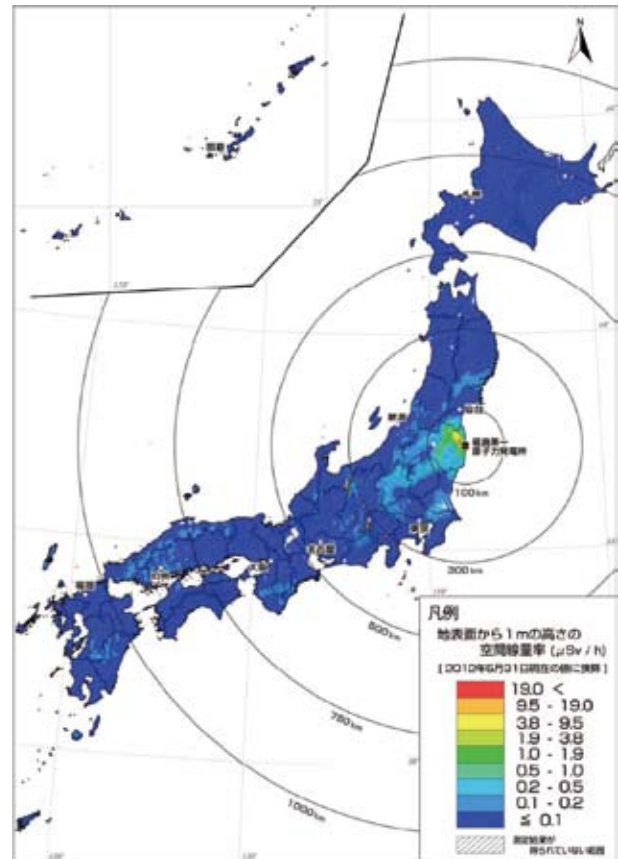


図-3 日本全国の地表面から 1 m 高さの空間線量率分布 (平成 24 年 5 月 31 日の値に減衰補正) (文献 11) より引用)

Fig. 3 Air dose rates at 1 m height above the ground surface measured nationwide (Compensated value as of May 31, 2012) (Quoted from the literature 11)).

空間線量率は福島第一原発から北西方向に高い地域があり、そこから屈曲して南西方向に高い地域が分布し、栃木県北部、群馬県に連なる。空間線量率分布には自然放射線が含まれるが、バックグラウンド補正を施したセシウム沈着量の図では、自然由来の放射線を補正した結果、原発からの放射性物質の拡散した地域が明瞭である。

千葉県北部、茨城県南部、宮城県南部にも高い地域が分布していることが分かる。

図-5 に、図-3 の空間線量率のカラースケール区分を細かくした図を示す¹²⁾。福島県から南西方向に延びる高線量率地域は、原発事故による放射性物質拡散

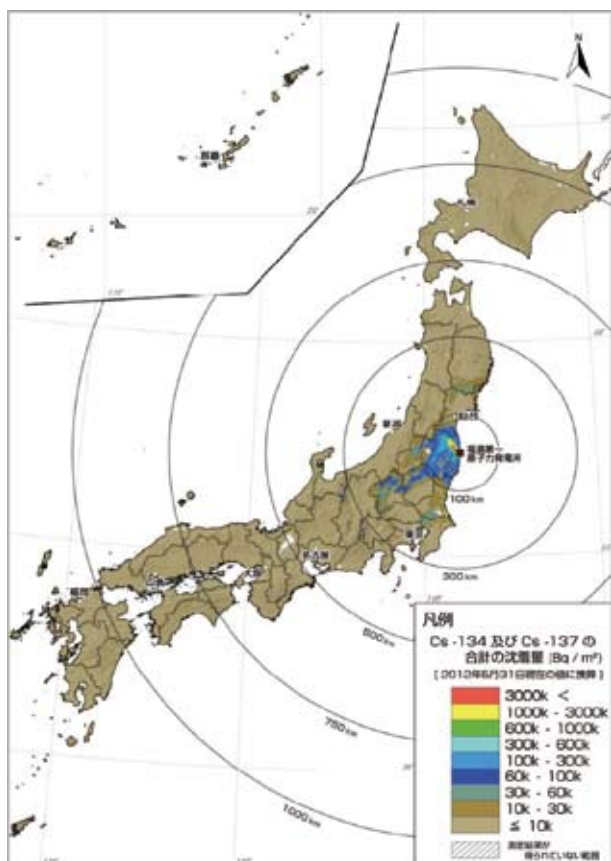


図-4 日本全国の地表面へのセシウム 134, 137 の沈着量の合計 (平成 24 年 5 月 31 日の値に減衰補正) (文献 11) より引用

Fig. 4 Total deposition of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs on the ground surface nationwide (Compensated value as of May 31, 2012) (Quoted from the literature 11).

によるものであるが、図-3のセシウム沈着量の結果から、長野県以西、秋田県・青森県以北は原発からの放射性物質の影響ではなく、自然放射線の影響によるものである。

日本の自然放射線データに関する既往データとしては、古川 (1993)¹³⁾ や湊 (2006)¹⁴⁾ が地表γ線の空気吸収線量率分布をまとめている。また、今井は産総研から公表されている地球化学図をもとに空間線量率を推定している¹⁵⁾。航空機モニタリング結果とこれらの分布図は大局的に調和的であるが、詳細に見てみると、航空機モニタリング結果とは違う個所が多くある。地球化学図や空気吸収線量分布図は地上の測定データをベースにしているが、測定密度や質、測定時期にばらつきがある。これに比較して航空機モニタリングは、短期間に一定間隔で連続的に測定を実施している。測線上の測定間隔は1秒間隔であり、測線上では概ね35～45 mに1点のデータで分布図を作成した。航空機モニタリングデータは大量のデータからなっていて均質であり、その結果図は放射性物質の拡散だけでなく、非汚染地域にあっては自然放射線強度分布を良く表している。

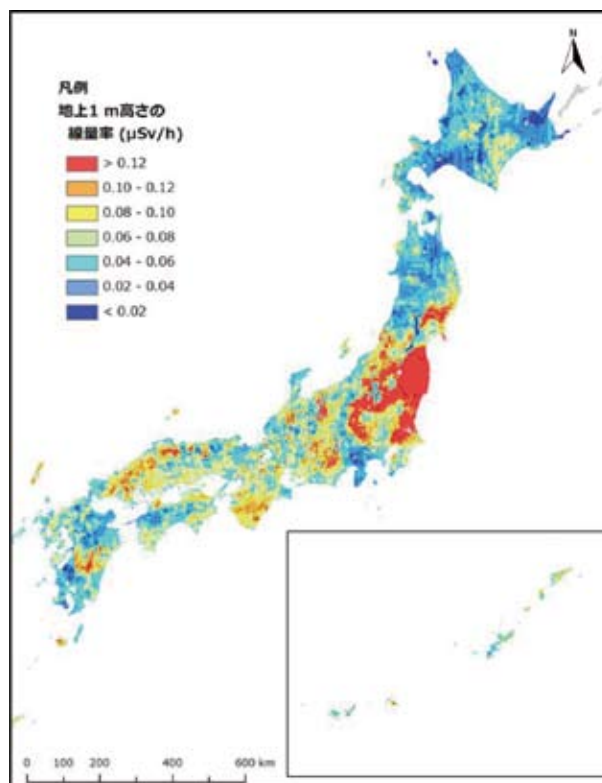


図-5 日本全国の地表面から1 m高さの空間線量率分布2 (平成 24 年 5 月 31 日の値に減衰補正) (文献 12) より引用

Fig. 5 Air dose rates at 1m height above the ground surface measured nationwide 2 (Compensated value as of May 31, 2012) (Quoted from the literature 12).

2.5 空間線量率分布と地質

2.5.1 大地からの自然放射線

大地から放射される自然放射線の線源となる放射性核種は、⁴⁰K, ⁸⁷Rb, ¹⁴⁷Sm, ¹⁷⁶Lu, ²³²Th, U など13核種ほどであるが、空間線量率への影響が大きな核種は、⁴⁰K (半減期 12.5 億年) と ²³²Th (同 140.5 億年) と U (同 44.7 億年) である。この3種の元素は鉱物結晶の形で岩石に含まれているが、種々の岩石の中でもケイ酸塩の含有率が高い深成岩の花崗岩類により多く含まれている。ただし、同じ花崗岩類でもその起源岩の差異によって、東北日本に広く分布する遠野花崗岩体 (K₂O 2.17%, Th 6.07ppm, U 1.98ppm : 55.29 nGy/h) と中部日本に分布する土岐苗木花崗岩体 (K₂O 4.49%, Th 27.8 ppm, U 7.3 ppm : 172.85 nGy/h) では放射線量にも3倍以上の開きがある。自然放射線核種が濃集しやすい地質構造があれば、岩石起源の放射線は強くなる。花崗岩は他の岩種より放射能が高く、ウラン鉱床の源岩になる岩種である¹⁶⁾。

日本では堆積岩中に砂岩型ウラン鉱化作用より濃集したウラン資源が大部分を占めている。花崗岩類に含まれるウランが風化、浸食作用により酸化し、地下水中に溶脱され、濃集したものと考えられている。これは、白亜紀後期～古第三紀貫入の花崗岩類を基盤とし、これを不整合に覆う中新世～鮮新世の陸成砂岩を

母岩とする構造に強く規制される。すなわち、ジュラ紀以前の古い堆積岩や付加コンプレックスと後からそれに貫入した花崗岩のペアの存在に強い関係がある。付加コンプレックスとは、海洋プレートが沈み込むときに大陸プレート側に残った付加体を構成する岩石をいう。海溝に堆積した泥岩や砂岩、深海堆積物、そして海嶺で海洋プレートをつくった玄武岩などからなる。付加コンプレックスは、その後の白亜紀後期、第三紀初期の花崗岩の貫入によって地表にまで隆起した岩体が花崗岩の貫入を受けて破碎され、その境界部にウランが濃集し高放射能となる。従って、ウラン、トリウム、カリウムの放射性元素の起源岩としての花崗岩とその貫入の場としての付加コンプレックスはウランの濃集の場として極めて重要な役割を果たしている¹⁷⁾。図-6に、産業技術総合研究所地質調査総合センターのシームレス地質図¹⁸⁾からウラン濃集の可能性が高い地質だけを抽出した地質図を示す。この地質区分と全国の比較的高い空間線量率分布域について検証した結果、大部分のエリアは珪長質深成岩類(花崗岩類)と古い時代の堆積岩類、付加コンプレックス、変成岩類との接触部のようなウラン濃集が起りやすい地質構造の分布と概して一致していた³⁾。

なお、今回の原子力事故で明らかになったように、全国レベルの空間線量率のバックグラウンドを把握することは重要であり、定期的に測定することが望まれる。

2.5.2 西日本地域の空間線量率分布と地質

西日本地域の空間線量率分布から、西日本地域の自然放射線と地質の関係を検討した。自然放射線の日本平均は、古川(2003)によれば、79.7±18.8 nGy/h、西南日本は86.4±16.1 nGy/hであるとされる。ここでGy(国際単位系(SI)の吸収線量の単位)とSvの換算計数を環境放射線モニタリング指針¹⁹⁾に準拠して0.8とすれば、西南日本は69.12±12.88 nSv/hである。

値には地域的ばらつきがあるため、ここでは便宜的に0.1 μSv/h(100 nSv/h)を閾値として検討を行った。検討にあたっては、シームレス地質図をデータ

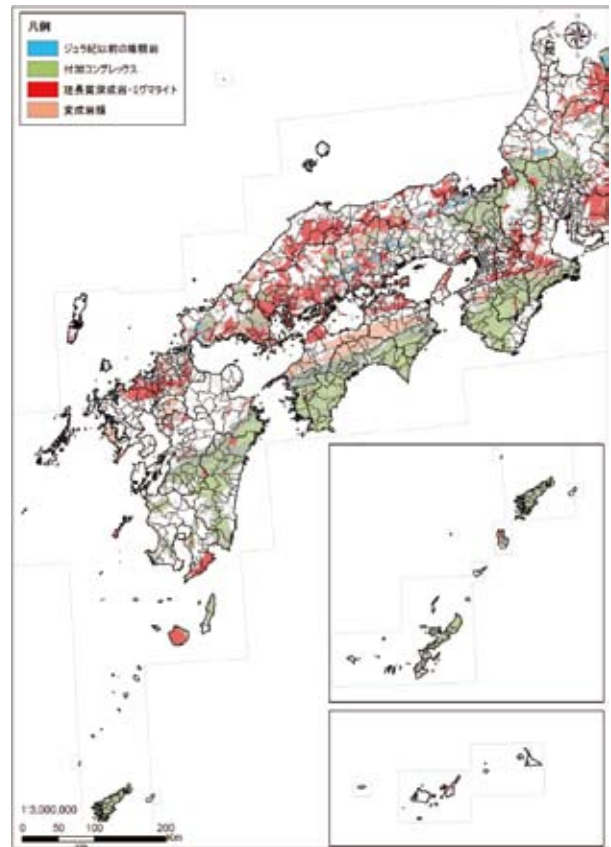


図-6 ウラン濃集の可能性が高い地質図(文献18)のデータを利用

Fig. 6 A geologic map with a high possibility that uranium will accumulate (After the data of literature 18)).

ベースとして使用した。検討結果を表-2に示す。地域別に地質区分と空間線量率が0.1 μSv/h以上の面積の関係をまとめた。なお、地質区分の「湖水・河川・海」については、放射線は本来水により遮蔽されて検出されないが、モニタリング範囲内では測定データを測線間で内挿補間するため、その周辺の平均的領域の値が与えられる。この領域のデータも機械的に抽出した。図-7に西日本地域の地質区分と空間線量率の関係をグラフに示す。

この結果から、西日本地域の地質的特徴と0.1

表-2 西日本地域の地質区分別面積と0.1 μSv/h以上の地域の面積(文献3)データを集計)

Table 2 Area according to geology of a western part of Japan and Area of higher than 0.1 μSv/h (After literature 3)).

地質区分	近畿			中国			四国			九州・沖縄		
	全面積(km ²)	>0.1 μSv/h(km ²)	%	全面積(km ²)	>0.1 μSv/h(km ²)	%	全面積(km ²)	>0.1 μSv/h(km ²)	%	全面積(km ²)	>0.1 μSv/h(km ²)	%
湖水・河川・海	327.6	24.6	7.5	223.1	34.4	15.4	183.2	1.0	0.5	391.6	14.5	3.7
火山岩	4,234.9	338.2	8.0	10,454.3	2,181.1	20.9	387.8	0.6	0.2	14,661.8	212.8	1.5
深成岩	3,705.5	443.6	12.0	9,088.4	3,320.1	36.5	1,341.7	219.4	16.4	2,964.8	319.9	10.8
堆積岩類	11,654.2	436.2	3.7	6,852.2	793.8	11.6	3,937.7	111.9	2.8	13,809.9	634.5	4.6
付加コンプレックス	11,214.1	1,880.8	16.8	2,777.8	379.0	13.6	8,982.9	63.7	0.7	10,810.5	1,616.8	15.0
変成岩	1,152.0	24.0	2.1	2,161.5	343.9	15.9	3,862.7	21.5	0.6	1,670.8	34.1	2.0
面積計(km ²)	32,288.3	3,147.4	9.7	31,557.3	7,052.3	22.3	18,696.0	418.1	2.2	44,309.4	2,832.6	6.4

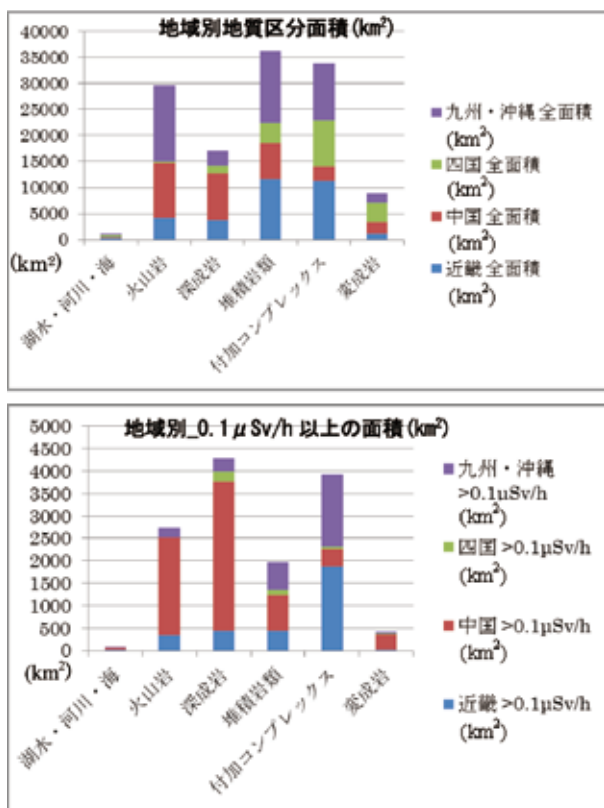


図-7 西日本地域の地質・空間線量の関係 (文献3) のデータを集計

Fig. 7 Relation between the geology and air dose rate of a western-part-of-Japan area (After the data of literature 3)).

0.1 μSv/h 以上の空間線量率分布域は以下のようにまとめることができる。

- ① 九州地方の地質は火山岩が33%を占める。次いで、堆積岩類が31%、付加コンプレックスが24%を占める。深成岩は6%、変成岩は4%であった。空間線量率0.1 μSv/h以上の地域は全体の6.4%であった。この地域の地質で空間線量率が占める割合の高い地質は付加コンプレックスであり、次いで深成岩の地域に多く分布する。
- ② 四国地方の地質は付加コンプレックスが全体の48%を占め、堆積岩類と変成岩の地域がそれぞれ20%を占める。空間線量率が占める割合の高い地質は深成岩である。付加コンプレックスの分布域には空間線量率の高い部分はほとんど分布しない。
- ③ 中国地方の地質は火山岩、深成岩の地域が約60%を占める。次いで堆積岩類、付加コンプレックスが約30%分布する。空間線量率0.1 μSv/h以上の地域は全域の22%にのぼり、この地域の地質で空間線量率が占める割合の高い地質は、深成岩、火山岩で、堆積岩類、付加コンプレックス、変成岩の分布域にも10%以上の地域が分布する。
- ④ 近畿地方の地質は堆積岩類、付加コンプレックスの地域が約70%占めており、火山岩、深成岩の地域は25%である。空間線量率0.1 μSv/h以上の地域は全

体の9.7%で、この地域の地質で空間線量率が占める割合の高い地質は、付加コンプレックスの地質で、次いで火山岩・深成岩の地質に分布する。

以上のとおり、西日本地域では近畿、中国、九州では空間線量率が高く、四国は低い地域となっている。これには深成岩の分布と付加コンプレックスの分布、成因が関係していると考えられる。

3. 無人ヘリコプターモニタリング

3.1 概要

原発事故直後は、原発から20 km圏内で民間航空機の飛行が禁止されたため、原子力発電所周辺の広域モニタリングが制約された。無人ヘリコプターは、航空法により有人航空機が飛行できないエリアでも飛行可能である。このため、警戒区域、計画的避難区域において、無人ヘリコプターを使った詳細なモニタリングが実施された。独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所の委託を受けて、応用地質は事故の4か月後福島県飯舘村で農地の除染技術評価のためのモニタリングを実施した²⁰⁾。2011年11月からは、警戒区域、計画的避難区域において、除染実施計画策定の参考とする詳細な空間線量率分布図を作成するため、住居等及び農用地を中心に、詳細なモニタリングを実施した。実施は、内閣府からJAEAが委託され、応用地質が測定と解析を行った。2012年2月からは、飛行禁止区域が原子力発電所から3 km圏内に縮小され(2013年2月から3 km圏内の高度1500 m以上は飛行制限区域を解除された)、2012年度から発電所から3~5 km圏内の帰宅困難地域(2012年12月制定)内の高線量地域で無人ヘリコプターを使った詳細なモニタリングを実施している。表-3にこれまでに実施した実績を示す。

モニタリングに使用するヘリコプターは内臓パソコンにより自律制御が可能な機体を使用している。この自律型無人ヘリコプターは、あらかじめプログラミングした飛行測線を、設定した高度と速度で自動的に姿勢制御しながら飛行することができる。航続時間は1時間以上で、最大飛行速度は70 km/hである。地上局に設置するパソコンで無人ヘリコプターを制御し、ヘリコプターからは映像がリアルタイムでダウンリンクされる。自律型無人ヘリコプターは2機1セットで運航している。予備機としてマニュアル制御の無人ヘリコプターも2機運用する。

自律型無人ヘリコプターの特徴は、プログラム制御による飛行が可能であるため、同じ位置での繰り返し測定が可能なことである。このため、除染前後の放射線量のモニタリング、時間経過による継時変化を捉えるためのモニタリングに適している。また、有人機のモニタリングよりも低高度、高密度で飛行可能であるため、詳細で高分解能な分布が把握できる。また、航空法の制約を受けないので国土交通省航空局への申請

表-3 無人ヘリコプター測定実績

Table 3 Track records of the unmanned helicopter.

件名	実施場所	実施時期	調査箇所
放射性汚染水田土壌の対策技術の評価試験業務	福島県相馬郡飯館村伊丹沢	2011年7~9月	2
無人ヘリコプターによるサーベイの実施及び放射線量率等のマッピング	除染モデル地区、5mSv/年境界、河川他	2011年12月~2012年3月	100
避難指示解除準備区域における無人ヘリによる線量率測定	福島県田村市	2012年5月	5
福島第1原子力発電所3km圏内における無人ヘリによる線量率測定	3km圏内試験	2012年9月	5
除染モデル実証試験後の区域を含む高線量区域の汚染状況調査	河川(阿武隈川、請戸川他)、3km圏内周辺	2012年10月~2013年3月	250
福島第一原子力発電所近隣エリアにおける無人ヘリモニタリング業務	3km圏内(2回)	2012年10月~2013年3月	38
平成25年度福島第1原子力発電所近隣エリアにおける無人ヘリモニタリング業務	5km圏内(2回)	2013年6月~2014年1月	122



図-8 自律型無人ヘリコプター測定システム (上左:無人ヘリコプター, 上右:アンテナ, 下左:測定飛行状況, 下右:制御装置)

Fig. 8 Self-controlled unmanned helicopter system (Upper left : unmanned helicopter, Upper right : Antennas, Lower left : measurement flight situations, Lower right : control devices)

等は必要なく、機動性がある調査が可能である。

3.2 モニタリングの方法

無人ヘリコプターを利用した放射線測定の測定方法は、その測線間隔、飛行高度、飛行速度は異なるものの、測定の手順は基本的に有人ヘリコプターの場合と同じである。測定仕様を表-4に示す。

使用する放射線検出器は、モニタリング開始当初はプラスチックシンチレータ検出器を使用していたが、現在は放射性セシウムの¹³⁴Csと¹³⁷Csが弁別可能なLaBr₃(ランタンプロマイド)シンチレータを検出器とするシステムを使用する。

無人ヘリコプターの測定システムは、無人ヘリコプター本体、機体運航制御用パソコン搭載車両、無線アンテナ(データ、画像伝送用)、地上GPSからなる。無人ヘリコプターシステムの概観を図-8に示す。

3.3 解析方法

データは航空機モニタリングと同様の手法で、高度補正や地上測定との比較、半減期の減衰補正を行い、

表-4 システムの仕様

Table 4 Specification of the system.

項目	仕様
無人ヘリコプター	<ul style="list-style-type: none"> 機体名: ヤマハ製自律飛行型無人ヘリコプター-RMAX G1 最大重量: 94kg 飛行時間: 90分 全長・全幅・全高: 3,630mm・720mm・1,220mm 最大搭載可能測定器重量: 10kg 最高速度: 72km/h 搭載機器: 全方位CCDカメラ、GPSセンサー 予備機: ヤマハ製高々度型無人ヘリコプター RMAX
検出器	<ul style="list-style-type: none"> LaBr₃検出器の仕様 寸法: LaBr₃ 1.5" φ × 1.5" 検出器 3本 温度補償型アンプ: ¹³⁷Cs ピークにて±2%以内 ピーク位置補正: ⁴⁰K 及び ²¹⁴Bi のピーク位置自動補正 計数率: 約300 KHz・チャンネル数: 1024 ch 最大計数: 65535 カウント/ch プラスチックシンチレーション検出器の仕様 サイズ: 30 cm × 30 cm × 2 cm Cs 感度: 7000s-1/μSv/h 以上 データ転送周期: 0.2 秒~60 秒
測定諸元	<ul style="list-style-type: none"> 測線間隔: 50~80m、飛行高度: 50~150m 速度: 4~8m/秒(15~30km/時間) 飛行方法: 測線沿いに飛行

地表から高さ1 mでの空間線量率や地表面における放射性セシウムの沈着量を求めた。さらに、それらに図化データ内挿法を用いて、放射線の空間線量率やその沈着量の強度分布図を作成した。ただし、原発周辺は原子力発電所からの放射性物質による人工放射線強度が高いので、自然由来の放射線強度の影響については考慮していない。

地上の測定範囲は飛行高度によって変化するが、無人ヘリコプターが測定する測定範囲は、地上からの高度と概ね同じ半径の空間線量率の平均値を求めている。これまでの無人ヘリで測定した空間線量率と地上でのサーベイメータ(NaI(Tl)、電離箱)による線量率の比較(約600箇所)の結果、0.75-1.5倍の範囲内で一致する¹²⁾。図-9に地上におけるサーベイメータによる線量率の測定結果と同地点における無人ヘリコプターによる線量率の測定結果比較を示す。

3.4 モニタリングの結果

これまでに実施した無人ヘリコプターモニタリングの代表的結果を示す。

3.4.1 除染計画策定のためのモニタリング

平成23年度に環境省が除染実施計画策定のために実施した各種モニタリングで、無人ヘリコプターは空間線量率5 mSv/hの境界を調査した²¹⁾。図-10にその結果図を示す。この結果には、他機関が実施した車両に搭載した検出器による測定や人員による地上からの測定結果も含まれている。

この結果から、放射性物質が拡散したエリアには方向性があり、原子力発電所周辺でも発電所の北側の海岸線に近い地域や南側の20 km圏内に近い地域では

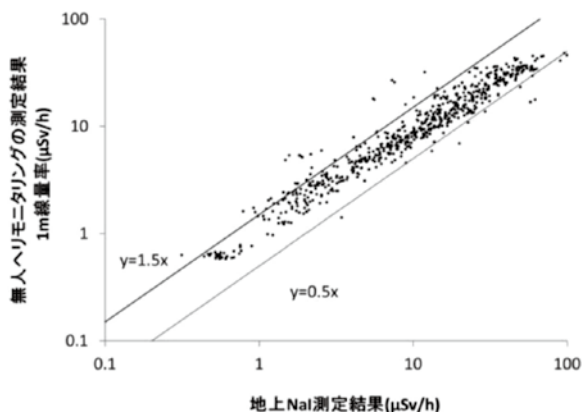


図-9 無人ヘリと地上の線量率測定結果比較 (文献 12) より引用)

Fig. 9 Comparison between the air dose rates of unmanned helicopter measurement and those of ground measurement (Quoted from the literature 12)).

低線量エリアがあることが確認された。

このデータや航空機モニタリング結果などを踏まえ、警戒区域の一部が避難指示解除準備区域として2012年8月に見直しされた。

3.4.2 原子力発電所3 km圏内モニタリング

平成24年度に発電所敷地境界から3 km圏内で実施した無人ヘリコプターモニタリングで、3 km圏内の空間線量率分布を明らかにした²²⁾。これまで3 km圏内の空間線量率は有人の航空機モニタリングでは測定できなかったが、無人ヘリコプターの航空機モニタリングによって始めて面的に明らかになった。図-11に測定結果を示す。有人の航空機モニタリングでは原子力発電所から北西方向に空間線量率が高くなっており、有人ヘリコプターと無人ヘリコプターの測定結果は調和的である。無人ヘリコプターの測定結果では、3 km圏内では北側は5 μSv/h以下のエリアが広く分布し、高濃度汚染地域は発電所西側と南方向から汚染が広がっていることから、原子力発電所からの放射性物質の拡散状況を詳細に確認することができた。

3.4.3 河川モニタリング

原子力発電所から北西に延びる高線量地域に源流ないし中流がある河川のモニタリングを実施した。実施した河川は9河川にのぼった。図-12に浪江町請戸川のモニタリング結果例を示す¹²⁾。請戸川では2012年3月と2012年10月の2回実施した。これら2回の実施結果では、河川沿いに上流から下流へ空間線量率の高い領域が拡散しているのが確認できた。河川そのものは水による遮へい効果のため線量率は低くなるから、線量率が高くなっているのは梅雨や台風などの多雨期に河川水によって運ばれる土砂であると考えるのが妥当であろう。このように、モニタリングを繰り返

し実施することによって、河川の上流から下流への放射性物質の移行を定量的にとらえることが可能になるため、今後の放射性物質の移動・集積・拡散現象の解明に効果的であると考えられる。この例では、請戸川と高瀬川との合流地点から上流にかけての流域で、空間線量率が10月測定で増加しているのが確認できる。

4. まとめ

航空機放射線モニタリングは、広域を短時間で調査できるモニタリング技術である。有人の航空機モニタリングは、原発事故後のモニタリングにおいて全国の空間線量率を明らかにし、定量的な情報を提供することで、国民の健康に対する不安を払拭するとともに、住民の避難区域策定においては、避難区域区分のための基礎データとして活用された。無人ヘリコプターのモニタリングは、有人の航空機が飛行できない地域の測定飛行を実施し、詳細な汚染状況の定量的情報を提供した。測定データは除染事業や避難区域策定の基礎資料として活用されている。

有人機と無人機の航空機モニタリングは現在も定期的実施されており、避難区域の見直しに継続的に活用されている。有人機の航空機モニタリングは、今後

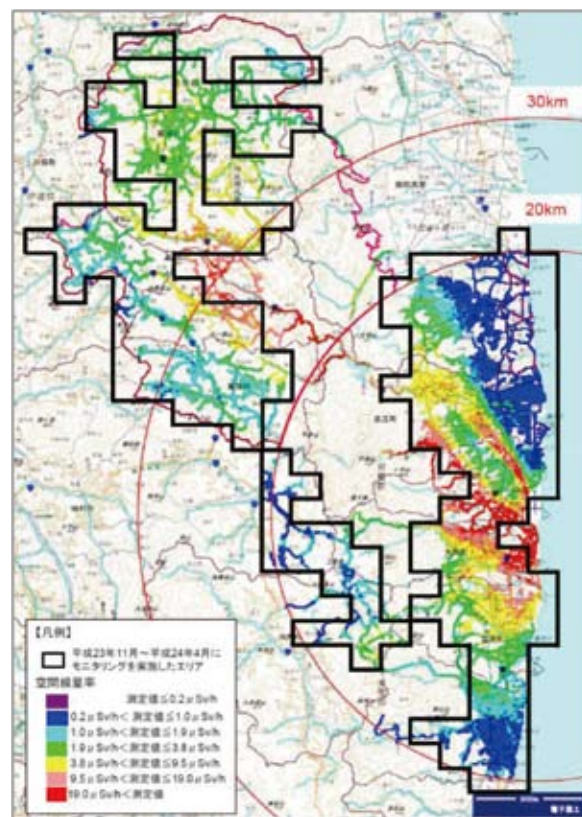


図-10 環境省除染計画策定のためのモニタリング結果 (2012年4月12日の値に減衰補正) (文献 21) より引用)

Fig. 10 Results of monitoring for formulating a decontamination plan by Ministry of the Environment (Compensated value as of April 12, 2012) (Quotes from the literature 21))

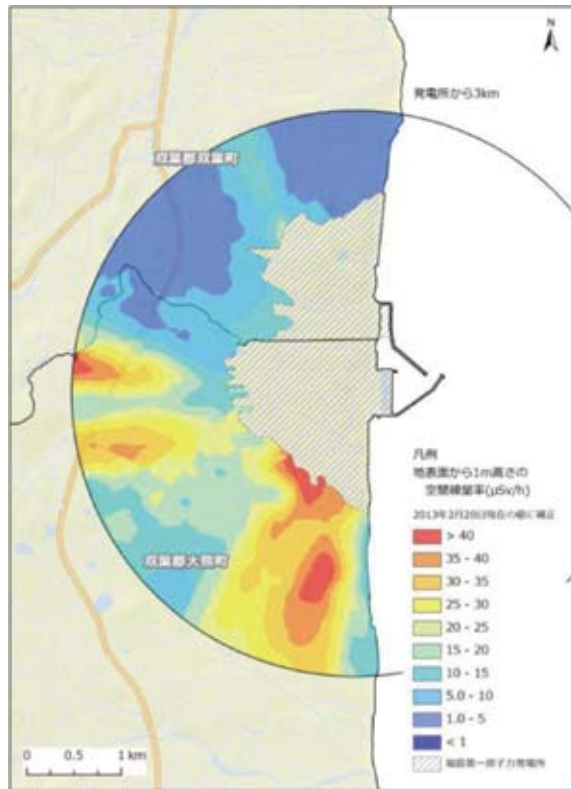


図-11 3 km 圏内における地表面から 1 m 高さの空間線量率 (平成 25 年 2 月 20 日の値に減衰補正) (文献 22) からの引用

Fig. 11 Air dose rate over 1 meter above ground level within a 3 km Zone of TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant (Compensated values as of February 20, 2012) (Quoted from the literature 22).

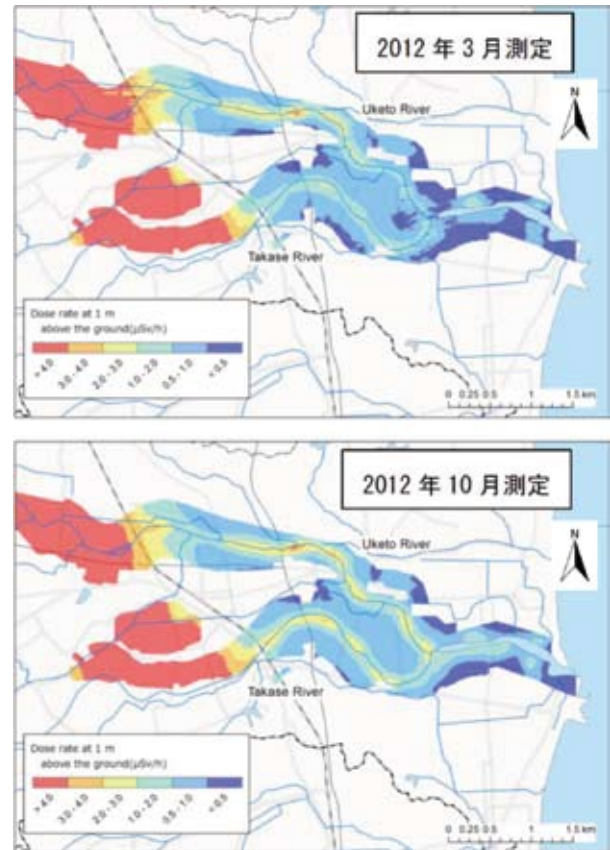


図-12 浪江町請戸川モニタリング結果 (空間線量率の経時変化) (平成 24 年 10 月測定 の値に減衰補正) (文献 12) より引用

Fig. 12 Results of the air dose rate measurements at the Uketo rivers (Namiemachi) (Compensated values as of Oct., 2012) (Quoted from the literature 12)

も地域を横断した広域の空間線量率測定によって、放射線の減少をモニタリングで監視することが期待される。また、無人機のモニタリングは、狭いエリアの測定や、有人機が飛行できない原子力発電所周辺の継続的監視、河川などの放射性物資が移動するような場所での挙動監視に活用が期待される。このほかに、航空機モニタリング技術は森林のモニタリングなどさまざまな分野からのニーズがあり、多様なニーズに応えられる技術が求められている。筆者らは今後も航空機モニタリング事業に取り組んでいくとともに、さまざまなニーズに応えるべく、モニタリング技術の向上と開発に取り組んでいきたいと考えている。

謝辞

本稿で取り上げたモニタリング事例は、JAEA の依頼によって実施したものである。本稿を執筆するに当たり、JAEA 福島技術本部福島環境安全センターの眞田幸尚氏には多くのご教示、ご助言を頂くとともに、各種資料の使用のご了解を頂いた。ここに記して深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) IAEA (1991), Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying, Technical Reports Series No.323
- 2) IAEA (2003), Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363
- 3) 鳥居建男他, 広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査, JAEA-Technology, 2012-036, 2012
- 4) 鳥居建男・眞田幸尚・杉田武志・田中圭(2012), 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, 日本原子力学会誌, **54**, 160-165
- 5) 眞田幸尚・近藤敦也・杉田武志・鳥居建男(2012), 航空機モニタリングによる放射性セシウムの汚染分布, 放射線, **38**, 137-140
- 6) 今泉眞之・土原健雄・吉本周平・石田 聡・内山貞幸・結城洋一(2009), プラスチックシンチレータ検出器による放射能探査法の開発, 農村工学研

- 究所技報第209号
- 7) 佐藤光之助・岩崎章二・佐野浚一(1956):岡山県南部地域および鳥取県中部地域空中探査報告,地質調査月報, **7**, 137-140
 - 8) 落合敏郎(1992), 地下水 温泉調査のための放射能探査法(1992), リーベル出版
 - 9) Rybacha, L. B. Bucher, G. Schwarz (2001), Airborne surveys of Swiss nuclear facility sites, *Journal of Environmental, Radioactivity*, **53**, 291-300
 - 10) 文部科学省(2008), ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法, 放射能測定法シリーズ, NO.33
 - 11) 原子力規制委員会, 放射線モニタリング情報, 北海道の航空機モニタリングの測定結果及び②東日本全域の航空機モニタリングの結果の天然核種の影響を詳細に考慮した改訂について, <<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5847/view.html>> [閲覧日2014年1月31日].
 - 12) 眞田幸尚, 鳥居建男(2013), 空から見た放射線分布と今後の展望, 平成25年度応用地質学会シンポジウム予稿集, 28-36
 - 13) 古川雅英(1993), 日本列島の自然放射線レベル, 地学雑誌, **102**, 868-877
 - 14) 湊進(2006), 日本における地表 γ 線の線量率分布, 地学雑誌, **115**(1), 87~95.
 - 15) 今井 登, 日本の自然放射線量, 日本地質学会 <<http://www.geosociety.jp/hazard/content0058.html>> [閲覧日2014年1月31日].
 - 16) 石堂昭夫(2013), 航空機広域モニタリングによる放射能汚染分布と地質の関係, デコミッションング技術特別号, RANDEC
 - 17) 日本のウラン資源(II)(1988), 動力炉・核燃料開発事業団
 - 18) 20万分の1 日本シームレス地質図(2009), 産業技術総合研究所地質調査総合センター
 - 19) 環境放射線モニタリング指針(2008), 原子力安全委員会
 - 20) 石田聡・今泉眞之・吉本周平・結城洋一・平田諒次・奥島修二・中達雄(2012), 気球およびラジコンヘリコプターを用いた農地の空間ガンマ線スペクトル測定, 農業農村工学会大会講演会
 - 21) 放射性物質汚染対処特措法に基づき国が除染を実施する地域における詳細モニタリングについて(2012), 環境省
 - 22) 第3次分布状況等調査進捗状況説明資料「無人ヘリコプターを用いた福島第一原子力発電所から3 km 圏内の空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の分布状況の把握, 及び河岸周辺における空間線量率, 放射性セシウムの沈着量の分布状況の把握」, 原子力機構福島技術本部 HP
- <<http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/tyouki-eikyou/giji/05/pdf/5-1-2.pdf>> [閲覧日2014年1月31日].

