

東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に係る 個人線量の特性に関する調査

Researches on the Characteristics of Personal Doses
after the Accident of TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

日本原子力研究開発機構
放射線医学総合研究所

Japan Atomic Energy Agency
National Institute of Radiological Sciences

October 2015

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency/National Institute of Radiological Sciences, 2015

東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に係る個人線量の特性に関する
調査

日本原子力研究開発機構

放射線医学総合研究所

(2015 年 3 月 31 日受理)

東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に係る避難指示区域の見直しが完了し、解除が始まった。本調査では、住民の方々の帰還後の被ばく線量の評価に資するため、避難指示解除準備区域及び居住制限区域内の代表的な生活場所において、個人線量計を用いた実測・評価を行い、空間線量と個人線量の関係について実測・実験的に実証するとともに、帰還後想定される社会生活パターンにおける個人線量の推定を試みた。本稿はその結果報告である。

本研究は、日本原子力研究開発機構と放射線医学総合研究所が共同で実施した研究の成果である。本報告書は、放射線医学総合研究所 放医研資料 NIRS-M-270 の内容と同じものである。

核燃料サイクル工学研究所：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

放射線医学総合研究所：〒263-0024 千葉県千葉市稲毛区穴川 4 丁目 9-1

Researches on the Characteristics of Personal Doses after the Accident of TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

National Institute of Radiological Sciences
Inage-ku, Chiba-shi, Chiba-ken

(Received March 31 , 2015)

The review of the evacuation area due to the accident of TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station has completed and the deregulation has begun in some regions. This research was started in order to contribute to the understanding of individual dose that is assumed after the return of the residents. Measurements and evaluation using personal dosimeters were conducted at the typical living locations in the area where the evacuation orders are ready to be lifted and the residence restriction area. So the relationship between air dose and personal dose equivalent there was demonstrated observationally and experimentally. In addition, the estimation of the residents' personal doses in the pattern of their social lives expected after returning home.

Keywords : Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, Radioactive Cesium,
Personal Dose, Personal Dosimeter

This work has been performed in cooperation with National Institute of Radiological Sciences. This report is equivalent to NIRS report, NIRS-M-270.

目次

1	目的と理論的背景	1
1. 1	目的	1
1. 2	理論的背景	2
2	調査	4
2. 1	事前調査	4
2. 2	本調査	4
2. 3	調査方法	5
2. 4	測定方法	6
3	結果	11
3. 1	空間線量率の区分別平均値	11
3. 2	本調査における代表的な波高分布	13
3. 3	個人線量計による測定結果	15
3. 4	建屋等による低減効果	21
4.	考察	24
4. 1	個人線量	24
4. 2	建屋等による低減効果	25
4. 3	モデルケースにおける年間個人線量	28
4. 4	航空機サーベイデータとの比較	40
5.	結論	45
5. 1	個人線量計測定値の妥当性	45
5. 2	空間線量から個人線量を推定することの妥当性	45
5. 3	個人線量の推定の可能性	45
5. 4	航空機サーベイデータの個人線量推定への活用の可能性	46
6.	今後に向けた課題	47
6. 1	空間線量率から個人線量の推定	47
6. 2	事故以前の空間線量率（バックグラウンド）の評価	48
6. 3	ガンマ線波高分布データの活用	48
6. 4	生活時間の推定	48
	謝辞	49
	参考資料	49

Contents

1	Purpose and theoretical background	1
1. 1	Purpose	1
1. 2	Theoretical background	2
2	Investigation	4
2. 1	Preliminary survey	4
2. 2	This survey	4
2. 3	Investigative method	5
2. 4	Measuring method	6
3	Results	11
3. 1	Classification by average value of the spatial dose rate	11
3. 2	Typical and wave height distribution in this study	13
3. 3	The measurement results of the personal dosimeter	15
3. 4	The reduction effect by building, etc	21
4.	Consideration	24
4. 1	Individual dose	24
4. 2	The reduction effect by building, etc	25
4. 3	The annual individual dose in the model case	28
4. 4	Comparison of the aircraft survey data	40
5.	Conclusion	45
5. 1	Validity of individual dose measurement value	45
5. 2	Validity of that to estimate the individual dose from space dose	45
5. 3	Possibility of estimation of individual dose	45
5. 4	The possibility of the use of the individual dose estimates of aircraft survey data	46
6.	Challenges for future	47
6. 1	Estimation of individual dose from air dose rate	47
6. 2	Evaluation of accident previous space dose rate (background)	48
6. 3	Use of gamma-ray pulse-height distribution data	48
6. 4	Estimation of life time	48
	Acknowledgment	49
	References	49

表リスト

表 2-1.	実験に用いた電子式個人線量計の仕様・・・・・・・・・・	9
表 2-2.	実験室で用いた個人線量計校正用ファントム・・・・・・	10
表 2-3.	回転照射ジオメトリにおいて成人人体形状計算モデルに入射する単一エネルギー光子に対する自由空气中単位カーマあたりの実効線量(E/Ka)と周辺線量当量($H^*(10)/Ka$)及び両者の比・・・・・・・・・・	10
表 3-1.	空間線量率の実測値・・・・・・・・・・	12
表 3-2.	正面照射におけるレスポンス・・・・・・・・・・	19
表 3-3.	背面照射レスポンス/正面照射レスポンス・・・・・・・・・・	19
表 3-4.	回転照射におけるレスポンス・・・・・・・・・・	20
表 3-5.	車両による低減効果に関する予備測定結果・・・・・・・・・・	23
表 4-1.	調査対象地点の測定結果を組み合わせ推定した代表的な職業従事者の年間個人線量レベルー川内村・・・・・・・・・・	34
表 4-2.	調査対象地点の測定結果を組み合わせ推定した代表的な職業従事者の年間個人線量レベルー田村市都路町・・・・・・・・・・	35
表 4-3.	調査対象地点の測定結果を組み合わせ推定した代表的な職業従事者の年間個人線量レベルー飯舘村・・・・・・・・・・	36
表 4-4.	年間個人線量推定に使用したデータ(川内村)・・・・・・・・・・	37
表 4-5.	年間個人線量推定に使用したデータ(田村市都路町)・・・・・・・・・・	38
表 4-6.	年間個人線量推定に使用したデータ(飯舘村)・・・・・・・・・・	39
表 4-7.	第7次航空機モニタリングにより推定された1m空間線量率と1m空間線量率実測値との比較ー調査市町村別・・・・・・・・・・	41
表 4-8-1).	第7次航空機モニタリングにより推定された1m空間線量率と1m空間線量率実測値との比較ー除染の有無 1) 未除染エリア・・・・・・・・・・	41
表 4-8-2).	第7次航空機モニタリングにより推定された1m空間線量率と1m空間線量率実測値との比較ー除染の有無 2) 除染済みエリア・・・・・・・・・・	42

図リスト

図 1-1.	外部被ばくの防護に係る諸量の関係図	3
図 2-1.	調査対象地区全体図	5
図 2-2.	ファントム (P-40) に取り付けした個人線量計	8
図 2-3.	山林内でのガンマ線波高分布の測定風景	8
図 2-4.	回転照射装置に設置した RANDO ファントムと個人線量計	11
図 3-1.	公民館 1 の前庭の波高分布	15
図 3-2.	学校 3 校庭の波高分布	15
図 3-3.	民家 1 屋内の波高分布	15
図 3-4.	民家 5 屋内の波高分布	15
図 3-5.	各調査員 (A-E) が着用した個人線量計 A1 から求めた個人線量 (縦軸) と、行動記録と実測した空間線量率から推定した空間線量 (横軸) との相関	16
図 3-6.	ファントムに取り付けした個人線量計 (A1~D) から求めた積算個人線量 (縦軸) と、空間線量率から推定した積算空間線量 (横軸) との相関	17
図 3-7.	ガンマ線エネルギースペクトル測定結果に基づいて推定したガンマ線平均エネルギーと個人線量計指示値/実効線量 E(ROT)比の相関図	18
図 3-8.	個人線量計指示値/周辺線量当量 $H^*(10)$ の比較	20
図 3-9.	屋内外空間線量率実測値 (表 3-1) から算出した低減係数	22
図 4-1.	民家及び公民館に対する低減係数-線量率モデルと実測から求めた低減係数	27
図 4-2.	公共機関・学校に対する低減係数-線量率モデルと実測から求めた低減係数	27
図 4-3.	航空機モニタリングより推定された空間線量率と実測空間線量率の関係	42
図 4-4.	航空機モニタリングより推定された空間線量率と実測空間線量率の関係	43
図 4-5.	航空機モニタリングより推定された空間線量率と実測/航空機モニタリング空間線量率比の関係	44

実施体制

本調査は、内閣府原子力被災者生活支援チームの依頼により、(独)放射線医学総合研究所及び(独)日本原子力研究開発機構が実施したものである。

本調査において、避難指示解除準備区域・居住制限区域内の代表的な生活場所における個人線量計を用いた実測および空間線量と個人線量の関係の解析については、両者で行った。その他、(独)放射線医学総合研究所は帰還後想定される社会生活パターンにおける個人線量の推定を、(独)日本原子力研究開発機構は個人線量計の特性の調査をそれぞれ担当している。

「東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に係る個人線量の特性に関する調査」
対応チーム

(実施当時の所属)

【日本原子力研究開発機構】

核燃料サイクル工学研究所

放射線管理部

百瀬 琢磨

放射線管理部線量計測課

高田 千恵, 中川 貴博, 山崎 巧, 滝本 美咲, 星 勝也, 小島 尚美¹

放射線管理部放射線管理第1課

佐川 直貴

放射線管理部放射線管理第2課

中村 圭祐

原子力科学研究所

放射線管理部放射線計測技術課

谷村 嘉彦

原子力基礎工学研究部門

環境・放射線科学ユニット 放射線防護研究グループ

高橋 史明

【放射線医学総合研究所】

赤羽 恵一, 及川 将一, 大町 康, 大森 康孝, 金 ウンジュ, 栗原 治,
酒井 一夫, 四野宮 貴幸, 高島 良夫, 高田 真志, 取越 正己, 藤島 亮,
矢島 千秋, 米原 英典

¹ 富士電機株式会社

1 目的と理論的背景

1. 1 目的

国は、平成 25 年 8 月にはすべての避難指示対象市町村において、避難指示区域の見直しを完了した。また、避難指示解除に向けて、原子力規制委員会は線量水準に応じた防護措置の在り方に関して、同年 11 月に取りまとめを行い、「帰還に向けた安全・安心対策に関する基本的考え方（線量水準に応じた防護措置の具体化のために）」¹⁾を提言した。その中で、個人が受ける被ばく線量に着目することの重要性について述べ、「帰還後の住民の被ばく線量の評価は、空間線量率から推定される被ばく線量ではなく、個人線量を用いることを基本とすべきある。」としている。同時に、「帰還後に想定される住民の個人線量の高さについて事前に把握しておくことが重要である。」ことにも言及している。

帰還後の個人線量は個人が線量計を着用することにより実測することができ、この値は個人個人の生活を反映したものになると期待されている。一方で、帰還後に想定される住民の個人線量を帰還前に把握するためには何らかの手法による推定が必要となる。事故後、最も一般的に用いられている線量評価方法は、ある地点の空間線量率から幾つかの仮定（家屋による遮蔽係数：0.4、1 日の屋内生活時間：16 時間、1 日の屋外生活時間：8 時間）の下にその場所で生活した場合の年間積算線量を求めるものである。この手法は、航空機モニタリングの結果等と組み合わせることにより、避難や除染等の方針を決める際等に有効に利用されてきた。一方、この方法では、住民一人一人の個人線量の推定に利用することには限界がある。家屋の特性や生活パターン等を考慮した上で、空間線量率から十分な精度で個人線量を推定することができれば、帰還前の評価がより正確になる上、帰還後も、個人が線量計を携帯する負担を軽減できる可能性がある。

平成 26 年 4 月には田村市都路町の避難指示解除が決定されたところであり、他地域においてもインフラや生活関連サービスの復旧、除染の進捗等の条件が整い次第、避難指示が解除され、住民の帰還が進むことが想定される。本事業では、今後の避難指示解除に向け、住民が帰還した際の個人線量を事前に把握するため、また、現地での個人線量計の応答特性や空間線量からの個人線量の推定精度等の実証調査を行い、以下の 4 点について検討を行った。

- ① 生活環境における個人線量計測定値の妥当性
- ② 空間線量率と個人線量との関係
- ③ 建屋等による線量低減効果
- ④ 代表的な生活パターンにおける個人線量の推定

1. 2 理論的背景

外部放射線による線量を評価する量は、防護量と実用量に大別される。防護量とは、人の放射線リスク（確率的影響、健康影響）に関連した量であり、人体の組織や臓器における吸収線量に基づいて計算される等価線量や実効線量がある。実用量とは、実測が不可能な防護量に関連付けられた測定可能な量として定義され、以下に述べる周辺線量当量や個人線量当量などがある。防護量と実用量は共に、放射線場の基礎特性となるフルエンスや空気カーマといった物理量から計算することが可能であり、そのために必要なデータは国際放射線防護委員会の刊行物²⁾に与えられている。

実用量である周辺線量当量と個人線量当量は、それぞれ場のモニタリングと人のモニタリングの目的のために導入された量である。周辺線量当量は、放射線場の1点に全ての方向からくる放射線を整列・拡張した場にICRU球を置いたとき、整列場の方向に対向する球の半径上の深さ d において生じる線量当量である。周辺線量当量の定義から、周辺線量当量の測定器は、その応答の方向特性が等方的である必要がある。個人線量当量は、人体上のある指定された点における深さ d における線量当量である。ただし、個人線量計の校正に際しては、統一した基準線量当量の設定が必要となるため、その対象として人の体幹部を模擬したICRUスラブファントムが定められている。なお、深さ10 mmでの周辺線量当量 ($H^*(10)$ と表記) 及び深さ10 mmでの個人線量当量 ($H_p(10)$ と表記) は、法令上はいずれも1センチメートル線量当量と呼ばれ、放射線管理上は防護量である実効線量の代わりに用いられてきた。

空間線量（率）を測定するサーベイメータと身体に着用される個人線量計では、それぞれが指示する線量当量が異なることに留意する必要がある。すなわち、サーベイメータでは周辺線量当量 $H^*(10)$ 、個人線量計では個人線量当量 $H_p(10)$ を校正基準としている。これらの校正では、通常、各測定器の基準方向に対して前面照射（AP）条件となる様に基準線量を照射する。その際、個人線量計の校正は、サーベイメータの校正には要しないファントムに設置して行われる。こうした条件の違いにより、同一の放射線場に置かれたサーベイメータと個人線量計の両者の指示値に差異が生じることは当然考えられる。図1-1には、以上述べた外部被ばく防護に係る線量当量諸量の関係を示した。なお、周辺線量当量（率）は一般的に空間線量（率）と呼ばれることが多いので、本報告書では次章以降、特に断りのない限り、両者は同一のものとして扱う。

避難指示解除準備区域等に見られる地表面に広く放射性核種が分布する状況は、個人線量計等の校正の照射条件とは大きく異なっている。したがって、帰還後の住民の個人線量を適切に測定するには、その地域における放射線場を詳細に調査するとともに、個人線量当量、周辺線量当量、実効線量がどのような大小関係になるのかを実測により明らかにする必要がある。これらに関する十分な知見を得ることが、本調査を行う意義である。

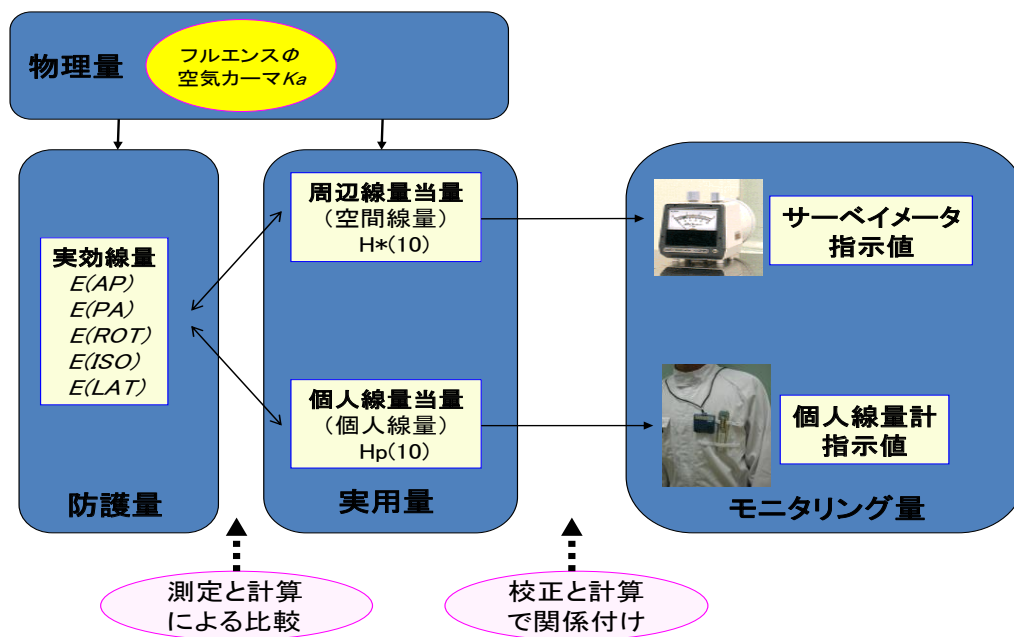


図 1-1. 外部被ばくの防護に係る諸量の関係図

E は実効線量を表し、括弧内は照射ジオメトリ（AP:前方照射、PA:後方照射、ROT:回転照射、ISO:等方照射、LAT:側方照射）を表す。

2 調査

調査対象地域

調査対象地域としては、早期に住民帰還が開始される見込みであった（事業開始当時）田村市都路町及び川内村が選定された。また、空間線量と個人線量の関係について統計的精度の高いデータを得るため比較的空間線量率の高い地域での測定が必要であったため、田村市の比較的空間線量率の高かった林道（除染済）、そして川内村の山林ならびに飯舘村の比較的空間線量率の高い地域（いずれも平成 25 年 9 月調査当時未除染）について調査を行った。なお、調査対象地域については、各自治体と調整・相談の上選定した。

測定を実施する具体的な場所としては、最終的に帰還住民の生活パターンによる年間実効線量の推定を行うために、典型的な生活空間として①家屋内、②家屋周辺、③学校等の公共施設内とその周辺、④田畑、⑤山林、⑥広場（駐車場等）を定めた。個人宅の測定に際しては、自治体を通じて所有者に了解を得た。

今回の調査では、下記の日程・地域で事前調査及び本調査を行った。図 2－1 に調査対象地区全体図を示す。

2. 1 事前調査

- ① 平成 25 年 8 月 7 日 田村市 都路町古道地区
- ② 平成 25 年 8 月 21 日 川内村 貝ノ坂地区
- ③ 平成 25 年 8 月 29 日 飯舘村 飯樋地区、小宮地区、蕨平地区、学校

2. 2 本調査

- ① 平成 25 年 9 月 2～5 日 飯舘村 ((a) 飯樋地区、(b) 小宮地区、(c) 草野地区)
いずれの地区も、居住制限区域である。
- ② 平成 25 年 9 月 5、6 日 田村市都路町（公共機関、学校、公民館（2 か所）、
個人所有の農地（2 か所））
公共機関、学校は 20 km 圏外で居住地域にあるが、それ
以外は避難指示解除準備区域である古道地区（100 %除染
が完了した地区）。
- ③ 平成 25 年 9 月 17、18 日 川内村 ((a) 貝ノ坂地区、(b) 五枚沢地区、(c) 学校、
(d) 北川原地区、(e) 熊ノ坪地区、(f) 荻地区、
(g) 貝ノ坂地区山林(村有林))
(a)、(f)、(g) は居住制限区域であり、(b) は避難指示
解除準備区域。その他の地区は 20 km 圏外で居住地域。

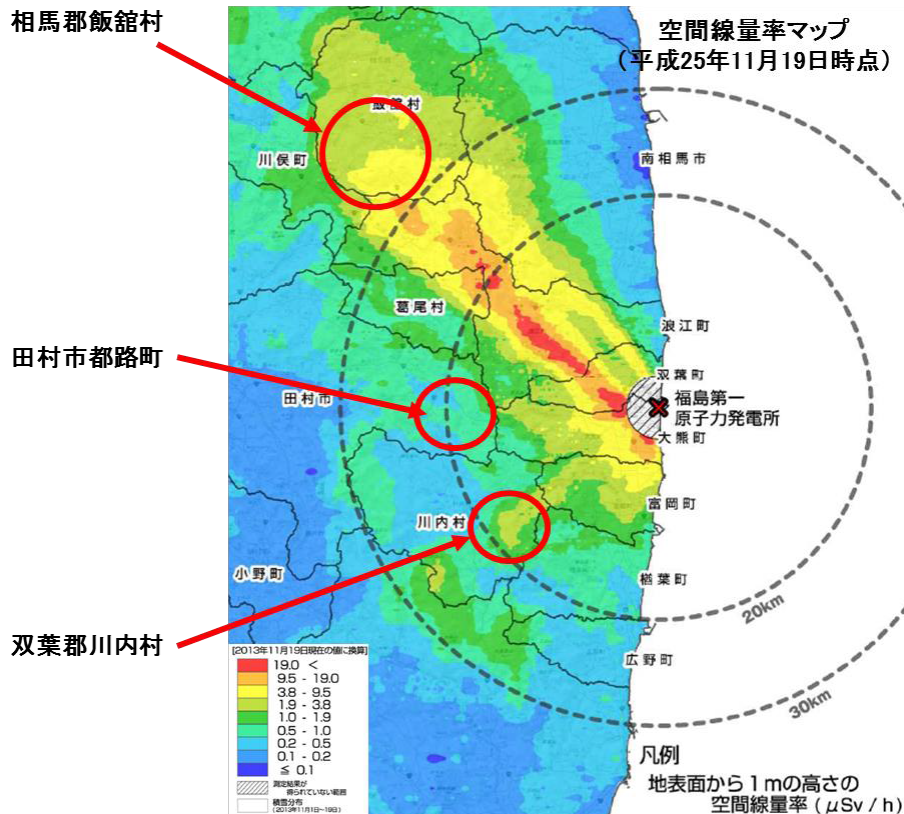


図2-1. 調査対象地区全体図 (航空機サーベイ結果の地図は原子力規制委員会モニタリング情報のウェブページから許可を得て転載。)

URL : http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/9000/8909/24/362_20140307.pdf

2. 3 調査方法

以下の場所において、空間線量(率)、個人線量及びガンマ線波高スペクトルを測定した。これらの測定により、空間線量率から個人線量を推定するのに必要となる両者の関係や建屋による線量低減率、調査対象地区における代表的生活場所の空間線量を把握することができる。

① 民家

- ・屋内及び家屋周囲の複数点の空間線量率を測定
- ・最も滞在時間が長いと思われる場所(例えば居間や寝室等)にファントムを設置し、個人線量を測定(24時間以上)
- ・一部の民家では家屋の庭にもファントムを設置して、個人線量を測定

② 学校

- ・校舎内、校舎周辺及び校庭の多数点の空間線量率を測定
- ・校舎内の部屋の一部にファントムを設置し、個人線量を測定(24時間以上)
- ・校庭にファントムを設置し、屋外での個人線量を測定

③ 公民館等

- ・ 建屋内外の空間線量率の測定
(ただし、建屋内での測定ができない場合には建屋周辺のみ測定)

④ 農地

- ・ 個人所有の農地において、多数点の空間線量率を測定
- ・ 状況に応じてファントムを設置し、個人線量を測定 (24 時間以上)

⑤ 山林

- ・ 自治体や個人の所有の山林において、複数点の空間線量率を測定
- ・ 数地点においてファントムを設置し、個人線量を測定 (24 時間以上)

⑥ その他

- ・ 調査対象場所周辺の道路等のサーベイを実施

2. 4 測定方法

(1) 空間線量率測定

NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータ (日立アロカメディカル製 TCS-172B) を主に用いた。時定数を 10 秒とし、測定開始から 30 秒経過後、5 秒程度の間隔で 5 回計測し、その平均値を測定位置での空間線量率とした。測定に際しては、測定者自身によるガンマ線の遮蔽を考慮して、サーベイメータはできるだけ体から離し、計測向きも記録した。

屋内での測定：個人家屋では居室を中心に数部屋を対象とした。各室内の中央、四隅において高さ約 1 m で測定した。部屋の中央では、空間線量率の方向分布を調べるために、体の向きを変えて四方向で測定した。また、個人の姿勢が個人線量へ及ぼす影響を調べるために、床からの高さを変えて空間線量率を測定した。

公共の建物 (公民館、学校等) 内部でも、個人家屋と同様に測定したが、これらの建屋では一般家屋に比べて窓面積が広いため、建屋側壁と窓における屋外からのガンマ線遮蔽効果の違いにも着目して測定を行った。

屋外での測定：家の周囲を壁から 1～3 m ほど離れて、4～5 m 間隔で屋内と同様に、高さ 1 m で空間線量率を測定した。広いエリアも同様の方法で、4～5 m の間隔で 1 m の高さで空間線量率を測定した。特に校庭など広い場所では、歩行サーベイの方法を利用した。

(2) 個人線量測定

個人線量計による測定は、実際に調査員が着用する方法と個人線量計の校正用のファントムに取り付ける方法の 2 通りの方法で実施した。

1) 調査員が着用した個人線量計による測定

個人線量計は、以下の 4 種類のものを測定者が着用し、作業開始前に測定を開始し、作業終了時に内部メモリーに蓄積されたデータを読み出した。後日、各個人の行動記

録と GPS の位置情報を組み合わせ、屋内と屋外のさまざまな滞在場所の個人線量を、個人線量計 (A1) の読み値から導出した。

- ・個人線量計 A1 (A 社) 1 分毎、0.001 μ Sv 単位でデータ取得。標準仕様では空間線量率・積算線量測定用の機種を特別に個人線量当量測定用に校正したもの。
- ・個人線量計 A2 (A 社) 1 分毎、1 μ Sv 単位でデータ取得
- ・個人線量計 C (C 社) 1 時間毎、0.01 μ Sv 単位でデータ取得
- ・個人線量計 D (D 社) 1 μ Sv 増加ごとにデータ取得

2) ファントムに取り付けた個人線量計による測定

個人線量計は以下の 5 種類を用いた。

- ・個人線量計 A1 (A 社) 特別に、個人線量当量測定用に校正したものを使用。
- ・個人線量計 A2 (A 社)
- ・個人線量計 B (B 社)
- ・個人線量計 C (C 社)
- ・個人線量計 D (D 社)

人体における放射線の散乱、遮蔽を模擬するためのファントムとして、日本工業規格 JIS Z 4331 に定める個人線量計校正用ファントム (30 cm×30 cm×15 cm メタクリル樹脂板 (P-30) または 40 cm×40 cm×15 cm メタクリル樹脂板 (P-40)) を用いた。ファントムの設置位置は、原則としてファントムの中心が地面または床面から高さ 1m の位置になるようにした。但し、個人宅の寝室等では、人の就寝時の姿勢を模擬するために床に直接設置した。

個人線量計は、ファントムの両面に 1 種類毎に 1 個または 2 個ずつ、線量計のセンサー部分が P-30 では中央の 10 cm×10 cm、P-40 では 20 cm×20 cm の範囲内に入るように設置した。図 2-2 にファントム (P-40) に取り付けた個人線量計を示す。

ファントムを設置した場所の空間線量率の測定には前述のガンマ線用 NaI (Tl) シンチレーションサーベイメータを用いた。同場所の空間線量率分布を確認するため、ファントム中心及び中心から前後、左右それぞれ 1 m と 2 m、上下 0.5 m の位置で空間線量率を測定した。さらに NaI (Tl) シンチレーション検出器 (2 インチ直径、2 インチ長さ) を組み込んだスペクトロメータ (BNC 社製 SAM-940 スペクトロサーベイメータ) を用いて、ガンマ線エネルギースペクトルを測定した。なお、アンフォールディングに使用したスペクトロメータの応答関数は、MCNP-4C コードによる計算結果を用いて作成されており、スペクトロメータの校正は (独) 日本原子力研究開発機構 (以下、JAEA) の原子力科学研究所放射線標準施設の校正用 ^{137}Cs 及び ^{60}Co 線源を用いて行われたものである。



図 2-2. ファントム（P-40）に取り付けた個人線量計

（3）ガンマ線波高分布

NaI(Tl)シンチレーション検出器（3 インチ直径、3 インチ長さ）を用いて、建屋内部と屋外の代表的なポイントの高さ 1 m で、10 分間、ガンマ線波高分布を測定した。必要に応じて高さを変えた測定も実施した。身体による散乱吸収を減らすために、測定器は三脚に固定し、測定者はできるだけ離れた。図 2-3 に波高分布測定の様子を示す。



図 2-3. 山林内でのガンマ線波高分布の測定風景

表 2 - 1. 実験に用いた電子式個人線量計の仕様

機種	A1	A2	B	C	D
メーカー	A社		B社	C社	D社
検出器	シリコン半導体検出器				
測定線種	γ (X) 線	γ (X) 線	γ (X) 線	γ 線	γ (X) 線
測定範囲	積算線量 0.000mSv～ 99.99mSv 線量率 0.00 μ Sv～ 999.9 μ Sv	積算線量 0.001mSv～ 999.9mSv 線量率 0.001mSv/h～ 999.9mSv/h	積算線量 1 μ ～10Sv (表示は 0.1 μ Sv～) 線量率 0 μ Sv/h ～1.000Sv/h	積算線量 0.1 μ Sv～ 99.9999mSv 線量率 0.1 μ Sv～ 1000 μ Sv	積算線量 1 μ Sv～ 10Sv 線量率 0.1 μ Sv/h～ 20Sv/h
測定精度	積算線量 $\leq \pm 10\%$ 線量率 $\leq \pm 15\%$	線量当量 $\leq \pm 10\%$ 線量当量率 $\leq \pm 10\%$ (~ 100 mSv/h)	積算線量 $\leq \pm 10\%$ 線量率 $\leq \pm 20\%$	線量率 $\leq \pm 10\%$ (2 μ Sv/h～ 1000 μ Sv/h)	積算線量 $\leq \pm 10\%$ (^{137}Cs) $\leq \pm 19\%$ (X線16keV) 積算線量 $\leq \pm 20\%$ (~ 10 Sv/h、 ^{60}Co 及び X線20keV)
測定エネルギー 範囲	60keV～ 1.5MeV	35keV～3MeV	50keV～ 1.5MeV	JIS Z 4312の G2型を満足 約50keV～	15keV～7MeV
エネルギー 依存性	$\leq \pm 30\%$	$\leq \pm 20\%$ (60keV～ 1.5MeV)	$\leq \pm 30\%$	^{60}Co γ 線で $\leq \pm 30\%$	$\leq \pm 20\%$
方向特性	$\leq \pm 25\%$ 垂直 $\pm 180^\circ$ 水平 $-60^\circ \sim$ $+240^\circ$	$\leq \pm 15\%$ 水平垂直 $\pm 60^\circ$	$\leq \pm 20\%$ 水平垂直 $\pm 75^\circ$	$\leq \pm 30\%$ 水平垂直 $\pm 60^\circ$ G2型を満足	-29% $\sim +67\%$ $\pm 60^\circ$

(4) 走行サーベイ・歩行サーベイ

移動時の空間線量率を測定するために、放射線医学総合研究所で開発したラジプローブシステム³⁾を用いた。本システムは、検出器として CsI (Tl) シンチレーション式スペクトロサーベイメータ (ミリオンテクノロジーズ社製 HDS-100G) を用い空間線量率を測定すると共に、GPS と組み合わせて測定位置も同時に記録することができる。測定は5秒間隔で行い、電波時計を基にした時刻もデータとして記録された。

走行サーベイは主に事前調査で行った。自動車のダッシュボードに検出器を置き、走行中の車内の空間線量率を連続測定した。

歩行サーベイでは校庭等の広い場所の空間線量率分布を測定する際に、測定者が手持ちし、歩行しつつ測定した。手持ちに際しては体幹部から 50 cm以上離れた。

(5) ^{137}Cs ガンマ線標準照射場を用いた個人線量計の特性試験

ファントムに取り付けた個人線量計の応答を実験的に検証するため、JAEA核燃料サイクル工学研究所計測機器校正施設に設置されている ^{137}Cs ガンマ線照射装置を用いて照射試験を実施した。この実験では、基本的な応答特性を評価するために正面照射及び背面照射

を行なった。また、本調査対象地域では ^{137}Cs が地表に広く分布し、その線量は水平方向からの寄与が大きいことが予想されることから、線量計を取り付けたファントムを回転させ（回転照射ジオメトリ）、照射の基準点における周辺線量当量 $H^*(10)$ 等と個人線量計の指示値との関係を調査した。実験に用いた個人線量計は、福島県内で住民の個人線量測定に用いられている電子式個人線量計5種類とした。実験に用いた線量計の仕様は表2-1の通りである。図2-4に回転照射装置に設置したRANDOファントムと個人線量計を示す。

また、ファントムの大きさ及び形状の違いによる影響を確認するため、実験には表2-2に示すP-30、P-40及びRANDOの3種類のファントムを使用した。照射の基準点となるファントムの回転軸の位置は、個人線量計の実効中心（P-30、P-40の場合）あるいは、ファントムの中心（RANDOの場合）として、後者の場合には、照射の基準点と線量計の実効中心の違いに関する補正を行った。回転照射においては、ICRP74より662keV γ 線における回転照射ジオメトリにおける実効線量 $E(ROT)$ と周辺線量当量 $H^*(10)$ の関係は、表2-3から、 $E(ROT)=0.679 \times H^*(10)$ と計算されると仮定した。

表2-2. 実験室で用いた個人線量計校正用ファントム

名称	形状・寸法	材質	準拠規格等
P-30	直方体 300W×300H×150D mm	メタクリル樹脂	JIS Z 4331
P-40	直方体 400W×400H×150D mm	メタクリル樹脂	JIS Z 4331
RANDO	人体形状 胸囲95cm、全長（頭部～大腿部上側）97.5cm	生体等価プラスチック	RANDO® Phantom Manual, The Phantom Laboratory, http://www.phantomlab.com/

表2-3. 回転照射ジオメトリにおいて成人人体形状計算モデルに入射する単一エネルギー光子に対する自由空气中単位カーマあたりの実効線量(E/Ka)と周辺線量当量($H^*(10)/Ka$)及び両者の比（ICRP Publ. 74に基づく）

光子エネルギー(MeV)	$E(ROT)/Ka(\text{Sv/Gy})$	$H^*(10)/Ka(\text{Sv/Gy})$	$E(ROT)/H^*(10)$
0.600	0.814	1.21	0.673
0.662 (注)	0.816	1.20	0.679
0.800	0.821	1.19	0.690

(注) 0.662MeVのデータについては、ラグランジェ4点補間法によって算出



図 2-4. 回転照射装置に設置した RANDO ファントムと個人線量計

^{137}Cs γ 線照射装置からの 0.662MeV γ 線がファントム全体に概ね均一に照射される。

RANDO ファントムの体軸を中心として回転するためファントム及び個人線量計は回転照射ジオメトリでの照射となる。

3 結果

3. 1 空間線量率の区分別平均値

各建屋の屋内外において空間線量率を多数測定し、その平均値と標準偏差を表 3-1 に示した。同表の括弧内の数値は、各場所での測定データ数である。また、歩行サーベイで示した値は、歩行しつつ 5 秒毎に測定した値の平均値とその標準偏差を示す。

屋外の空間線量率は局所的に高い場所があり、その影響のために屋内においても（同じ室内でも）空間線量率の勾配が認められた。例えば、表 3-1 に示す校舎の周囲では、除染区域と未除染区域が混在しているため、校舎の屋内外において顕著な線量勾配がある。

屋内の空間線量率の測定結果は 2 階の方が 1 階よりも高い傾向、また、床面に近い方で線量率が低くなる傾向を示した。ベランダと窓際は線量率が高い傾向を示した。屋外は逆に、地面に近いほど線量率が高い傾向を示した。田村市都路町と川内村の学校校舎内（表 3-1 の 27. 学校 2 と 28. 学校 3）の空間線量率は、校庭や校舎の周辺の除染が進んでいるため、事故以前のバックグラウンドレベルまで下がっている。他方、校舎内の場所ごとの線量率分布に大きな差は見られなかった。

表 3 - 1 . 空間線量率の実測値 (単位 $\mu\text{Sv/h}$) (1/2)

	区 分	地 域		平均値 (測定点の数)	備考 ^{a)}
1	民家 1	飯舘村飯樋地区	屋内	0.79 ± 0.18 (21)	居住制限区域、未除染。
			周辺	2.02 ± 0.48 (24)	
2	民家 2	飯舘村小宮地区	屋内	1.26 ± 0.26 (20)	居住制限区域、未除染。 家屋裏は山林。
			周辺	2.91 ± 1.02 (17)	
3	民家 3	川内村貝ノ坂地区	屋内	0.37 ± 0.07 (19)	居住制限区域、除染済み。 母屋。
			周辺	0.75 ± 0.12 (24)	
4	民家 4	川内村五枚沢地区	屋内	0.27 ± 0.04 (6)	避難指示解除準備区域、 除染済み。
			周辺	0.58 ± 0.10 (29)	
5	民家 5	川内村熊ノ坪地区	屋内	0.22 ± 0.02 (16)	居住区域、除染対象外地 区。母屋。
			周辺	0.30 ± 0.08 (9)	
6	公民館 1	飯舘村蕨平	屋内	2.62 ± 0.61 (8)	居住制限区域、未除染。
			周辺	5.64 ± 0.40 (18)	
7	公民館 2	田村市都路町	屋内	0.17 ± 0.01 (5)	避難指示解除準備区域、 除染済み。
			周辺	0.21 ± 0.02 (6)	
8	公民館 3	田村市都路町	屋内	0.14 ± 0.01 (6)	避難指示解除準備区域、 除染済み。
			周辺	0.20 ± 0.05 (6)	
9	公民館 4	川内村北川原地区	屋内	0.12 ± 0.01 (5)	居住区域、 除染対象外地区。
			周辺	0.16 ± 0.01 (5)	
10	公民館 5	川内村五枚沢地区	周辺	0.49 ± 0.11 (8)	避難指示解除準備区域、 除染済み。
11	公民館 6	川内村荻地区	周辺	1.54 ± 0.20 (6)	居住制限区域、除染済み。
12	農地 1	飯舘村飯樋地区		2.37 ± 0.04 (5)	居住制限区域、未除染。
13	農地 2	飯舘村小宮地区		3.28 ± 0.03 (4)	居住制限区域、未除染。
14	農地 3	川内村貝ノ坂地区		1.32 ± 0.17 (9)	居住制限区域、除染済み。
15	農地 4	川内村五枚沢地区		1.25 ± 0.05 (6)	避難指示解除準備区域、 除染済み。
16	農地 5	川内村熊ノ坪地区		0.62 ± 0.06 (歩行サ)	居住区域、 除染対象外。
17	農地 6	田村市都路町		0.42 ± 0.02 (5)	避難指示解除準備区域、 除染済み。
18	農地 7	田村市都路町	あぜ道	0.29 ± 0.02 (12)	避難指示解除準備区域、 除染済み。

表 3－1. 空間線量率の実測値（単位 $\mu\text{Sv/h}$ ）（2/2）

19	山林 1	飯舘村小宮地区		3.42 ± 0.17 (4)	居住制限区域、未除染。
20	山林 2	川内村貝ノ坂地区		1.96 ± 0.45 (4)	居住制限区域、未除染。
21	山林 3	田村市都路地区		1.09 ± 0.18 (4)	避難指示解除準備区域、 除染済み。
22	広場 1	飯舘村草野地区		1.20 ± 0.13 (14)	居住制限区域、除染済み。
23	広場 2	飯舘村運動施設		2.68 ± 0.13 (9)	居住制限区域、未除染。
24	広場 3	飯舘村運動施設		2.98 ± 0.26 (10)	居住制限区域、未除染。
25	公共機関	田村市都路町	屋内	0.13 ± 0.00 (5)	居住区域、除染済み。
			周辺	0.19 ± 0.04 (9)	
26	学校 1	飯舘村	校舎	0.27 ± 0.08 (25)	居住制限区域、未除染。
			周辺	2.22 ± 0.38 (歩行サ) ^{b)}	
			校庭	2.63 ± 0.50 (歩行サ)	
27	学校 2	田村市都路町	校舎	0.10 ± 0.01 (41)	居住区域、除染済み。
			周辺	0.22 ± 0.05 (30)	
			校庭	0.14 ± 0.03 (歩行サ)	
28	学校 3	川内村	校舎	0.09 ± 0.02 (22)	居住区域、除染済み。

a) : 避難指示区域の種別と、除染状況（平成 25 年 9 月調査当時）を示す。

b) : (歩行サ) は歩行サーベイを示す。

3. 2 本調査における代表的な波高分布

ここでは、計測した波高分布を図 3－1 ～ 3－4 に示すと共に、測定場所の放射線場（どのような放射線がどの様に分布しているか等）の特徴を示す。

(1) 公民館 1(飯舘村蕨平)の前庭におけるガンマ線波高分布

今回の調査において最も空間線量率が高い場所で測定したガンマ線波高分布の例として、結果を図 3－1 に示す。測定は建屋正面側 (Front Yard) の外壁からの距離 (D) が 0.4、9.5 m 離れた位置、建屋側面側 (Side Yard) の外壁からの距離 (D) が 4 m の位置、正面入り口 (Entrance) で、測定器中心の地面からの高さ (L) を 1 m にして、実施した。ガンマ線波高分布上の ^{134}Cs と ^{137}Cs のピークは、空間線量率の高い未除染の林や樹木に近いほど大きくなる。またセシウム後方散乱ピーク (188 keV) を確認できることから、林などからのガンマ線が周囲の土壌、空気中で散乱して、飛来していると考えられる。建屋の入口で計測されたセシウムピークは、他の場所よりも小さくなっていることから、建屋入口のコンクリート敷きなどからのガンマ線は少ないと考えられる。2 MeV 以上の ^{208}Tl 成分

は、場所によらず一定である。

(2) 学校3 (川内村)の校庭中央で測定したガンマ線波高分布

十分に除染された場所で測定されたガンマ線波高分布の例として、結果を図3-2に示す。明確なセシウムのピークを確認できず、天然核種である ^{40}K と ^{208}Tl のピークを確認できることから、校庭、校舎の周囲が十分に除染されていると考えられる。

(3) 民家1 (飯館村飯樋地区)の屋内で測定したガンマ線波高分布

図3-3は、空間線量率の比較的高い個人宅及びその近接したアスファルト道路で測定したガンマ線波高分布である。本家屋と隣の家屋との間の通路上で測定したガンマ線波高分布(図中の Outside、Side Road)に現れた顕著なセシウムのピークは、家屋周辺の未除染の植込みなどからのガンマ線によると考えられる。家屋内は屋外と比較してセシウムのピークは小さくなっており、家屋建屋による遮蔽効果と考えられる。家屋より約150 m離れた田畑は、除染が実施されているにも関わらず、高いセシウムのピークが計測されている。また、セシウムの後方散乱ピークと500 keV以下の低エネルギー成分の増加から、この田畑の放射線環境は、遠方の周辺山林から飛来しているガンマ線によるものと考えられる。ガンマ線エネルギー1.5 MeV以上の成分に変化が無いことから、自然放射線成分は場所による変化はないと考えられる。

(4) 民家5 (川内村熊ノ坪地区)の屋内で測定したガンマ線波高分布

家屋周辺は除染されているが、周囲の田畑が除染されていない家屋で計測した波高分布の例として、結果を図3-4に示す。屋外である玄関前駐車場の波高分布のセシウム成分は、家屋内1階の波高分布のセシウム成分よりも大きく、2階の波高分布のセシウム成分より小さくなっている。これは、2階は1階に比べより広い範囲からのガンマ線の飛来を受けること、及び玄関前駐車場では家屋の裏側に広がる除染されていない田畑からのガンマ線が家屋により遮蔽されることの両方が影響した結果と考えられる。このように周囲の放射線環境、汚染状況、家屋の遮蔽の影響などにより、屋内のセシウム成分が屋外より高くなることもありえる。また、屋外の ^{208}Tl と ^{40}K のピークが、屋内と比較して少し高くなっていることから、駐車場の土壌成分が、その周辺と異なることが考えられる。

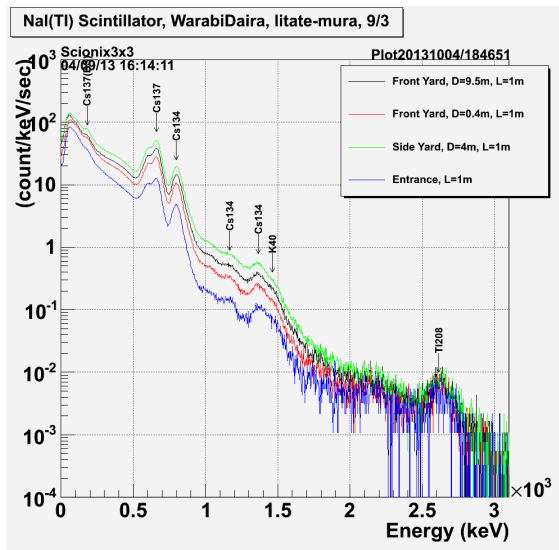


図 3-1. 公民館 1 の前庭の波高分布。D は外壁からの距離、L は地面からの高さを示す。

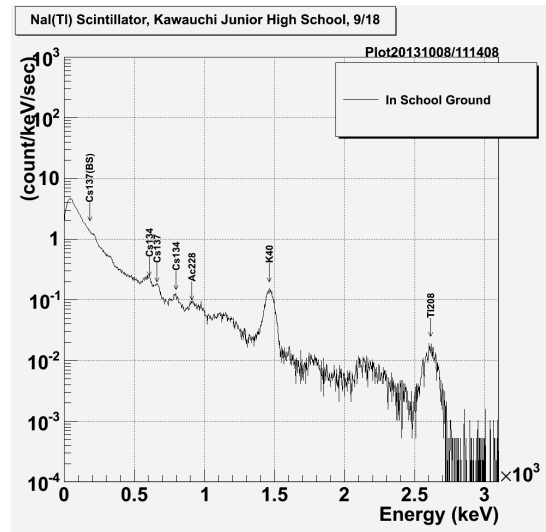


図 3-2. 学校 3 校庭の波高分布

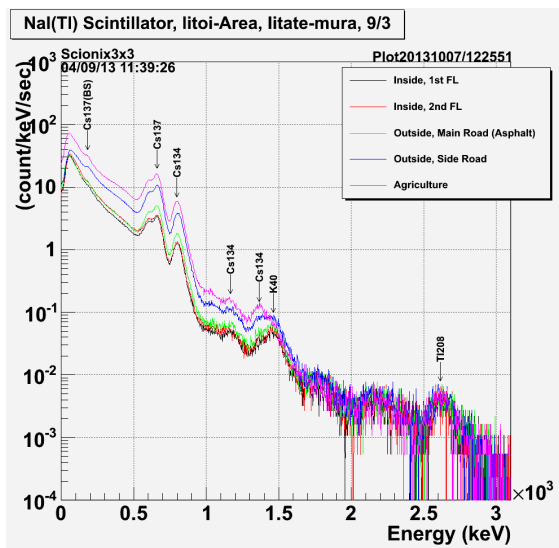


図 3-3. 民家 1 屋内の波高分布

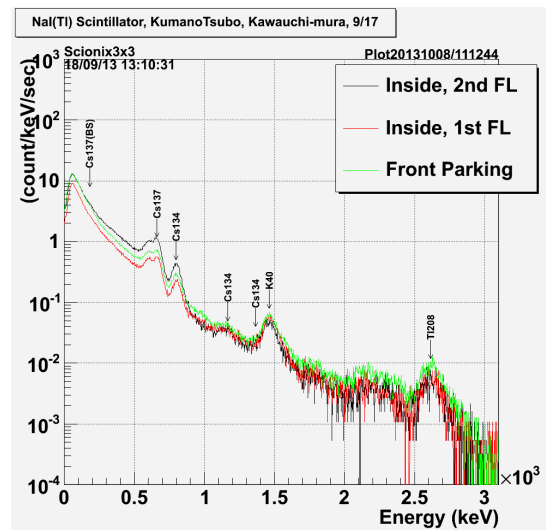


図 3-4. 民家 5 屋内の波高分布

3. 3 個人線量計による測定結果

(1) 調査員が着用した個人線量計による個人線量測定結果

各調査員（A-E）が調査時に着用した個人線量計 A1 で測定された値から算出した個人線量の積算値（縦軸）と、行動記録と実測した空間線量率から推定した積算空間線量（横軸）の相関を図 3-5 に示す。積算個人線量を算出するために必要な滞在時間は、行動記

録を基にしている。測定データ点は、住居屋内と屋外、学校、山林、集会所など、さまざまな場所、異なる空間線量率で取得したもので構成されている。個人線量計が示す積算個人線量は、矢印で示したデータ E の 1 例を除き、空間線量率から推定される積算空間線量よりも低くなる結果となった。推定積算空間線量に対する実測積算個人線量の比は調査員 (B) を除き、中肉中背の成人男性 4 名ではいずれも概ね 0.7 となり、行動パターン、場所による変化によるばらつきも含め、良い相関を示しており、今回の調査区域（山間部）においては、両者の関係は以下の様に表すことができる。

（標準的な体型の成人男性が着用した個人線量計で実測した積算個人線量）

$$= \underline{0.7} \times (\text{空間線量率から推定される積算空間線量})$$

調査員 (B) は他の調査員に比べ体格が良く、その個人線量計の実測値は、空間線量率から推定される値の 0.6 倍になっている。これは、調査員 (B) の場合、背後から飛来するガンマ線の体による遮蔽効果が他の調査員よりも大きいため、個人線量計の読み値が約 10% 小さくなったと考えられる。

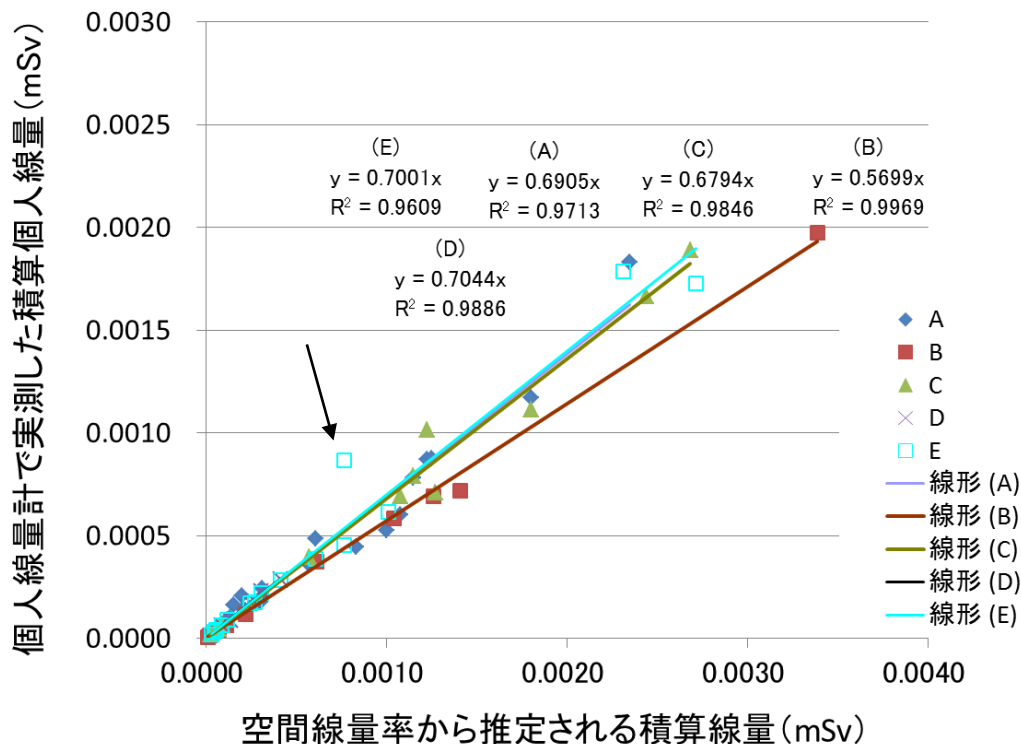


図 3-5. 各調査員 (A-E) が着用した個人線量計 A1 から求めた個人線量（縦軸）と、行動記録と実測した空間線量率から推定した空間線量（横軸）との相関

(2) ファントムに取り付けた個人線量計による個人線量測定結果

1) 実際の環境放射線場における個人線量計の特性調査

ファントムに取り付けた個人線量計 (A1～D) から求めた積算個人線量 (縦軸) と、空間線量率から推定した積算空間線量 (横軸) との相関を図 3－6 に示す。屋内と屋外、異なる除染実施状況などのデータを含むため、放射線状況の違いによるばらつきはあるが、概ね一次式で近似が可能である。またその傾きは線量計の種類により、若干の差異がみられるものの、0.6～0.7 の範囲であった。上記 (1) の人が着用した線量計と同じ個人線量計 A1 の指示値は、空間線量の積算値の 0.66 倍であった。これは標準的な体型の成人男性が着用して実測した個人線量と空間線量の積算値との比 0.7 と良く一致している。従って (1) と同様、今回の調査区域 (山間部) においては、両者の関係は以下の様に表すことができる。

$$\begin{aligned} & \text{(ファントムに取り付けた個人線量計で実測した積算個人線量(個人線量計 A1))} \\ & = 0.7 \times (\text{空間線量率から推定される積算空間線量}) \end{aligned}$$

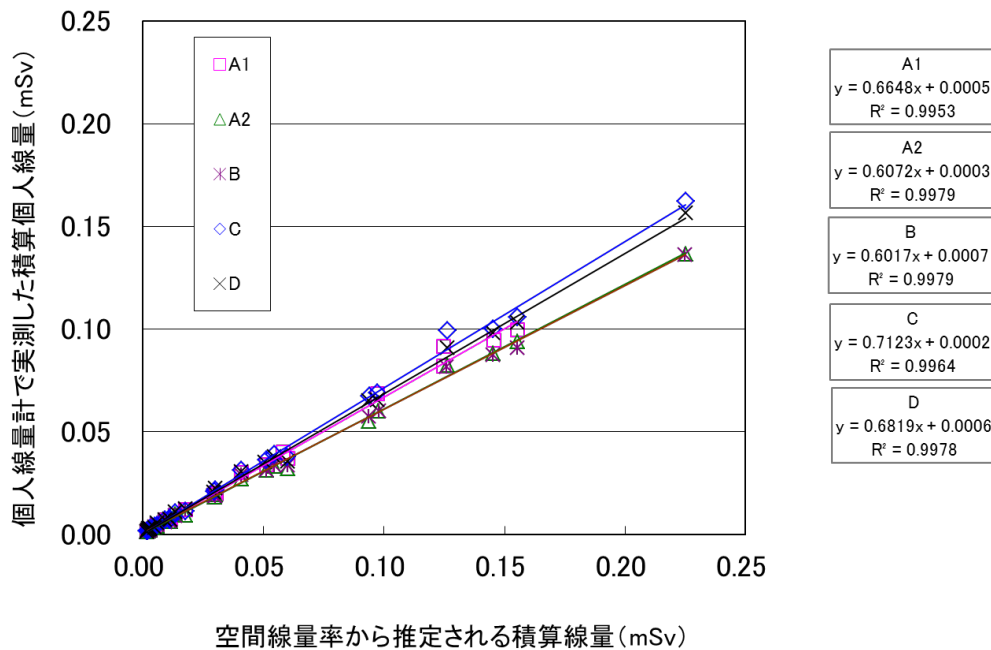


図 3－6. ファントムに取り付けた個人線量計 (A1～D) から求めた積算個人線量 (縦軸)

と、空間線量率から推定した積算空間線量 (横軸) との相関

- ・ 空間線量率はファントムの中心および中心から前後左右 1 m の点及び上下 0.5 m の点合計 7 地点の位置でシンチレーションサーベイメータによって測定したものの平均値
- ・ 個人線量計の値はファントム両面に取り付けた個人線量計の指示値の平均値

2) 個人線量計の指示値と測定したガンマ線エネルギースペクトルから推定した実効線量 $E(ROT)$ の関係

ガンマ線エネルギースペクトロメータの波高分布からアンフォールディングによって求めたガンマ線エネルギースペクトルに基づき、測定を行った放射線の入射方向の分布が回転照射 (ROT) ジオメトリと仮定して実効線量 $E(ROT)$ を推定した。この値とファントム上の個人線量計の指示値との比をガンマ線のエネルギーの相関図として図 3-7 に示す。ガンマ線スペクトル測定を実施したすべての地点のうち未除染の 1 地点を除き個人線量計指示値／実効線量 $E(ROT)$ 比は概ね 1 を超えており、除染が行われた区域においては、個人線量計の指示値が実効線量を過小評価することなく適切に評価していることが確認された。また、除染が進んでいる地域では相対的に ^{40}K などの天然放射性核種から放出されるガンマ線の割合が増加し、平均エネルギーが大きくなる傾向があるが、そのような状況では、個人線量計の指示値は実効線量を過大評価する傾向が見受けられた。なお、本図において個人線量計指示値／ $E(ROT)$ の値が実験室系での結果と異なり 1.0～2.0 の範囲に分布する理由については、個人線量計のエネルギー特性や方向特性、放射線の方向分布などとの関係も含めて今後の検討課題である。

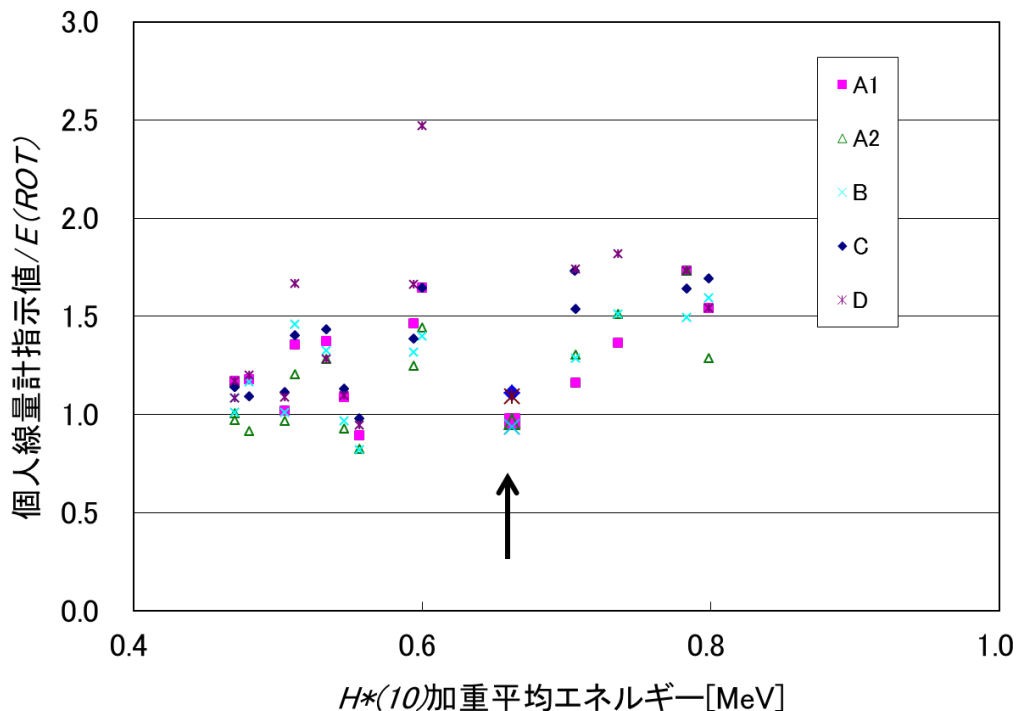


図 3-7. ガンマ線エネルギースペクトル測定結果に基づいて推定したガンマ線平均エネルギーと個人線量計指示値／実効線量 $E(ROT)$ 比の相関図

a) 飯館村、田村市都路町、川内村における測定結果

b) 図中矢印は ^{137}Cs ガンマ線照射装置で照射したときの値を示している。

3) ^{137}Cs ガンマ線標準照射場を用いた個人線量計の特性試験

第2章で述べたように、 ^{137}Cs ガンマ線標準照射場を用いた照射実験では、国内外4社製5種の線量計を3種類のファントム（P30、P40、RANDO）に設置して照射を行ない、線量計の指示値/周辺線量当量 $H^*(10)$ （以下レスポンス）を評価した。

正面照射のレスポンス結果を表3-2に示す。Cは設計段階から福島第一原子力発電所事故後の住民の個人線量測定への適用を考慮しており、校正時の基準線量の考え方が他の放射線業務従事者への適用を前提とした個人線量計と異なるため、1.11と最も高いレスポンスを示した。

背面照射のレスポンス/同一ファントムにおける正面照射のレスポンスを表3-3に示す。5機種の中で、相対的にA1及びDが背面照射のレスポンスが高いことが判明した。

表3-2. 正面照射におけるレスポンス（フリーエアにおける値をアクリル製水ファントム上のレスポンス相当に換算したもの）

A1	A2	B	C	D
0.95	1.01	0.98	1.11	1.02

表3-3. 背面照射レスポンス/正面照射レスポンス

線量計	P30	P40	RANDO
A1	0.46	0.48	0.33
A2	0.36	0.38	0.27
B	0.37	0.38	0.31
C	0.41	0.42	0.27
D	0.45	0.46	0.33

回転照射におけるレスポンスを表3-4及び図3-8に示す。回転照射におけるレスポンスは、一般に個人線量計の感度のエネルギー特性、方向特性など個人線量計固有の特性とファントムの形状や密度等の組み合わせによって決まると考えられるが、実験の結果から、個人線量計指示値/周辺線量当量 $H^*(10)$ には線量計の種類毎に系統的な差があり、個人線量計Cについては0.73～0.75、個人線量計Bについては0.64～0.60と個人線量計の種類によって14%～25%の違いがあることがわかった。正面照射及び背面照射のレスポンスが高いCやDが回転照射でもレスポンスが高いことが分かった。一方、実験に用いたファントムの違いによる影響は比較的小さく、それぞれファントム別に平均するとP30で0.69、P40で0.67、RANDOで0.67とほぼ等しかった。レスポンスの全体的な平均は0.68であり、計算で求めた $E(ROT)=0.679 \times H^*(10)$ の関係とも良く一致した。なお、一部の線量計について

は、線量計の指示値がこの関係を10%程度下回るケースもあるが、放射線防護の観点からは十分に実用的な精度の範囲内であるものの、線量評価の目的に応じて回転照射条件を考慮した補正が必要な場合があると考えられる。

以上のことから、実験に用いた個人線量計とファントムの組み合わせの範囲内ではあるが、 ^{137}Cs の γ 線回転照射における線量計の指示値は、校正における基準線量の考え方の違いや背面照射のレスポンスに機種毎の差があるものの実効線量の良い尺度となることが実験的に確認された。

表 3-4. 回転照射におけるレスポンス

線量計	P30	P40	RANDO
A1	0.66	0.63	0.67
A2	0.65	0.64	0.63
B	0.64	0.62	0.60
C	0.75	0.73	0.75
D	0.74	0.72	0.70
平均(ファントム別)	0.69	0.67	0.67
平均(全体)	0.68		

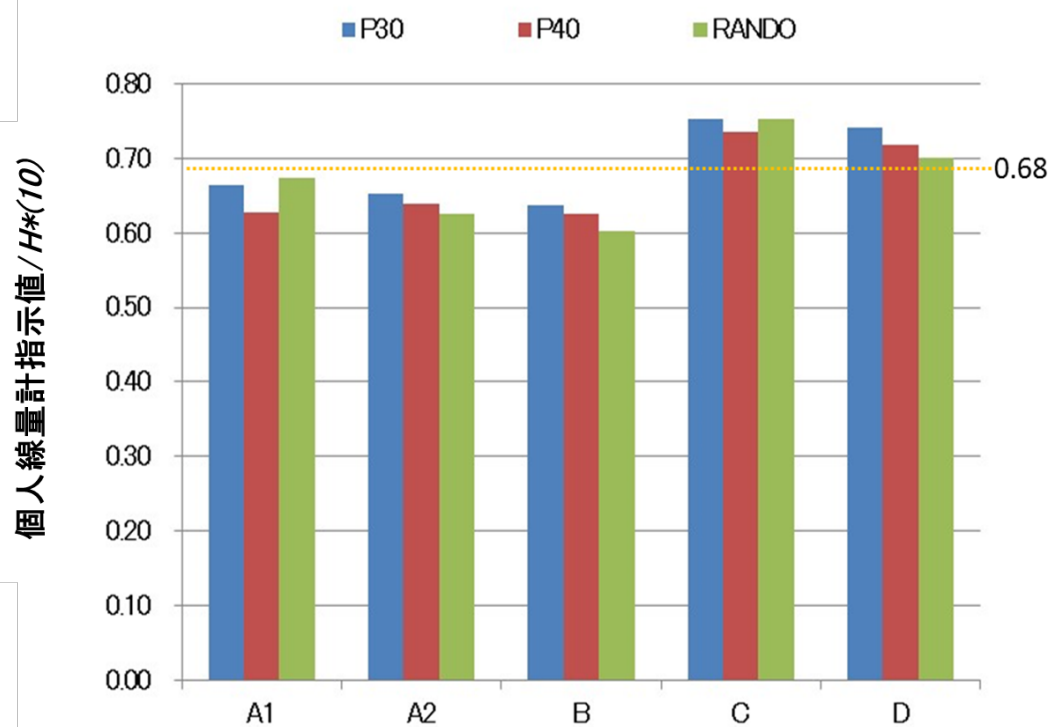


図 3-8. 個人線量計指示値／周辺線量当量 $H^*(10)$ の比較

3. 4 建屋等による低減効果

(1) 建屋等による低減効果

地表に沈着した放射性物質からのガンマ線による被ばくは建屋内部では建材による放射線遮蔽等のため低減される。建屋の屋内外空間線量率比として定義した低減係数を求めて低減効果の目安とする。低減係数の値が小さいほど低減効果が大きい。

$$\text{低減係数} = (\text{屋内空間線量率}) / (\text{屋外空間線量率})$$

本調査における屋内外空間線量率実測値（表 3－1）から算出した低減係数を、図 3－9 に示す。ここで、四角印は表 3－1 中の民家 1～5、同じくひし形印は公民館 1～4、三角印は公共機関と学校 1～3 の低減係数を表す。民家及び公民館は、規模、築年数、建材構成など詳細は様々ではあるが、いずれも木造であった。屋外空間線量率が 2～6 $\mu\text{Sv/h}$ の領域における民家及び公民館の低減係数は 0.39～0.46 であったが、これらは国際原子力機関（IAEA）の文書（IAEA-TECDOC-225）⁴⁾ に示されている沈着した放射性物質からのガンマ線に対する平屋及び 2 階建て木造家屋の低減係数代表値 0.4 に近い値である。屋外空間線量率が 2～6 $\mu\text{Sv/h}$ の領域における公共機関・学校の低減係数は 0.12 であったが、この値は IAEA-TECDOC-225 で示されている沈着した放射性物質からのガンマ線に対する 1～2 階建てブロックあるいは煉瓦造家屋の低減係数代表値 0.2 と、各階床面積が 5,000～10,000 ft^2 （約 460～930 m^2 ）の 3～4 階建て建築物の 1～2 階の低減係数代表値 0.05 の間にある。公共機関と学校は 3～4 階建てコンクリート造りであり、IAEA-TECDOC-225 における構造あるいは場所の分類に直接は当てはまらない。民家及び公民館、公共機関・学校のどの場合も屋外空間線量率が 1 $\mu\text{Sv/h}$ 以下では線量率が小さくなるほど低減係数が増大する傾向が見られた。

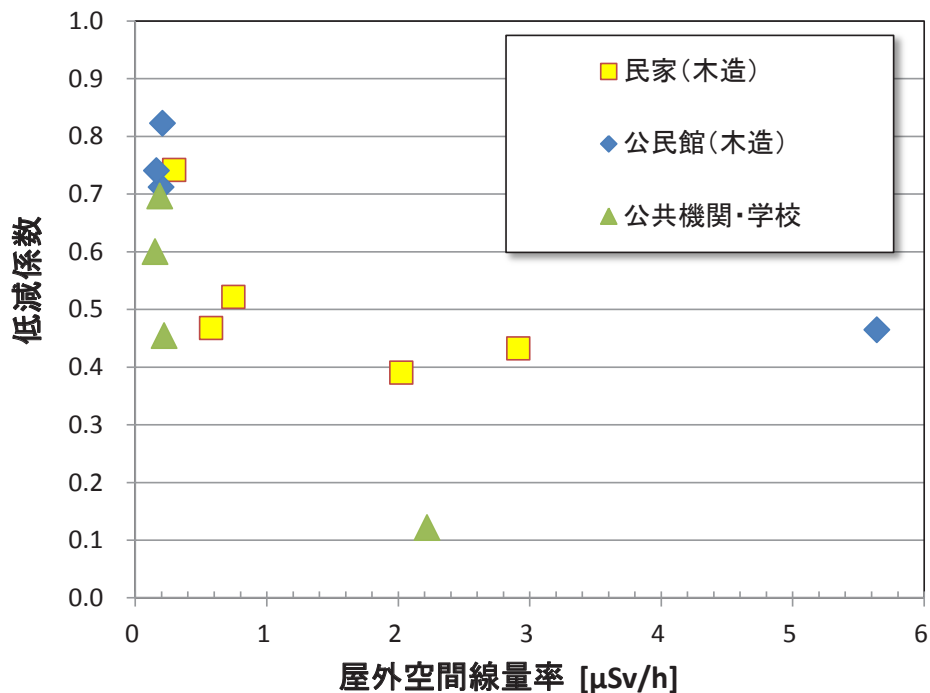


図 3－9．屋内外空間線量率実測値（表 3－1）から算出した低減係数

（２）車両による低減効果

自動車等の車両内の空間線量率も車外の空間線量率に比べて低減されと考えられる。表 3－5 に田村市都路町における事前調査時及び本調査後に福島市内で別途実施した車両による低減効果に関する予備測定の結果を示す。

$$\text{車両による低減係数} = (\text{車内空間線量率}) / (\text{車外空間線量率})$$

3つの測定から得られた低減係数は0.6～0.8の範囲となった。福島市内の舗装された駐車場で実施した軽自動車タイプの同一車両による2つの測定では、車外空間線量率が比較的低い場所（0.25 μSv/h）における低減係数は、空間線量率が高い場所（0.37 μSv/h）における低減係数よりも総じて大きな値となったが、その度合いは一律ではなかった。車外空間線量率が低いほど低減係数が大きくなる傾向は、図 3－9 で見られた建屋等における屋外空間線量率と低減係数が示す傾向と同じである。車両による低減効果には、車両の構造、材料、搭載荷物、乗車人数、乗車位置、空間線量率（線源）分布など様々な要因が影響すると考えられる。しかしながら、本予備測定のデータ数はそれら要因に関する系統的議論には現時点では十分ではなく、本結果は参考値であることに留意されたい。

表 3-5. 車両による低減効果に関する予備測定結果

測定 ID	測定場所	車両タイプ		測定点	空間線量率 ^{b)} [μ Sv/h]	低減係数 = (車内空間線量率) /(車外空間線量率)
1	田村市都路町 駐車場(地面)	ステーション ワゴン	車外	助手席ドア外	0.36 $\pm$ 0.01	—
			車内	助手席ダッシュボード	0.22 $\pm$ 0.01	0.61 $\pm$ 0.05
2	福島市 ① 駐車場(舗装)	軽自動車 ^{a)}	車外	周囲平均	0.37 $\pm$ 0.05	—
			車内	助手席ダッシュボード	0.24 $\pm$ 0.01	0.64 $\pm$ 0.09
				運転席	0.25 $\pm$ 0.01	0.66 $\pm$ 0.09
				後部左席	0.28 $\pm$ 0.02	0.74 $\pm$ 0.11
3	福島市 ② 駐車場(舗装)	軽自動車 ^{a)}	車外	周囲平均	0.25 $\pm$ 0.04	—
			車内	助手席ダッシュボード	0.16 $\pm$ 0.01	0.66 $\pm$ 0.12
				助手席	0.18 $\pm$ 0.01	0.73 $\pm$ 0.11
				運転席	0.20 $\pm$ 0.01	0.81 $\pm$ 0.13
				後部左席	0.19 $\pm$ 0.01	0.76 $\pm$ 0.12

a) 同一車両を使用

b) 測定 1 では CsI (TI) シンチレーション式スペクトロサーベイメータ (ミリオンテクノロジーズ社製 HDS-100G) を測定に使用した。測定 2 及び 3 では NaI (TI) シンチレーション式サーベイメータ (日立アロカメディカル社製 TCS-172B) を測定に使用した。空間線量率測定値には自然放射線の寄与を含む。

4 考察

4. 1 個人線量

個人線量計によって測定される量は、第1章(1)で述べたとおり、個人線量当量である。個人線量計は放射線業務従事者の個人線量管理に用いられることを想定しているため、その校正は基準放射線を個人線量計の前方から照射することで行われる。その際、人体による放射線の散乱や吸収を模擬するために、個人線量計の校正はファントムに設置して行われる。しかしながら、福島県環境では追加被ばくの線源となるセシウムが広く屋外に分布するため、人体への照射条件は、通常の個人線量計の校正条件と大きく異なることが想定される。したがって、本章では、このような環境下で測定された個人線量計がどのような意味を持つのかを中心に、調査の結果を踏まえて考察する。

(1) 個人線量測定値と空間線量との関係

空間線量は、一般的に周辺線量当量(率)・空気吸収線量(率)・空気カーマ(率)のいずれかで示される。単位が Sv または Sv/h の場合は周辺線量当量(率)、単位が Gy または Gy/h の場合は空気吸収線量(率)あるいは空気カーマ(率)である。空気吸収線量(率)と空気カーマ(率)は、条件(光子のエネルギー、荷電粒子平衡)により、同レベルとみなすことができる。

ICRP Publ. 74「外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数」には、各線量指標間の換算係数が示されている(Publ. 74の改訂版として、Publ. 116⁵⁾が既に出ているが、ここでは現行法令及び福島県「県民健康管理調査」の外部被ばく線量の推計方法との整合性を鑑み、Publ. 74を引用する)。この中では、5種類の照射ジオメトリにおける値が示されている(前方-後方: AP、後方-前方: PA、側方: LAT、回転: ROT、等方: ISO)。福島県民健康管理調査における外部被ばく線量の推計では、ISO ジオメトリを想定した計算を行っている⁶⁾が、除染が行われた生活環境の場合は上下方向からの照射は少ないと考えられるため、本調査研究ではROT ジオメトリを想定した。

ICRP Publ. 74のTable A. 24. に「自由空気中空気カーマからICRUスラブ中の $H_p(10, 0^\circ)$ への換算係数と角度依存係数 $R(10, \alpha)$ 」がある。光子ではSv/Gyの最大値は0.06 MeVのときの1.903で、セシウムガンマ線に近いエネルギーレベルでは、0.600 MeVで1.226、0.800 MeVで1.190である。すなわち、正面から放射線が入射したときの個人線量計の値は、計算上、空気カーマよりも2割程度高い値になる。換算係数は入射角度によって異なり、例えば 45° と 0° のときの比は、0.600 MeVで1.007、0.800 MeVで1.009となっているが、 75° と 0° では、比は0.600 MeVで0.868、0.800 MeVで0.892 MeVである。横から入射するほど、線量は低くなっていく傾向があることがわかる。

事故後の福島県における環境モニタリングや航空機モニタリングでは、測定値が周辺線量当量(率)として表されることが多い。ICRP Publ. 74には、周辺線量当量と個人

線量当量を直接比較した図表は掲載されていないが、Publ. 74 の Fig. 64 に、 $E(ROT)$ 、 $H_{p,slab}(10, ROT)$ 、 $H^*(10)$ 、 $H'(10, ROT)$ に対する換算係数 (Sv/Gy) が示されているため、間接的に比較することができる。それによると、セシウムガンマ線エネルギーレベルでは、 $H^*(10)$ が約 1.2、 $H_{p,slab}(10, ROT)$ が約 0.9 であり、同じ放射線（ガンマ線）場では、周辺線量当量の方が個人線量当量よりも 3 割ほど高い値を示すことがわかる。逆に言えば、周辺線量当量を 1 としたとき、個人線量当量はおおよそ 0.75 となる。これは、周辺線量当量には入射放射線の方向依存性が無いのに対し、個人線量当量では方向依存性があるからである。すなわち、ROT ジオメトリにおける個人線量当量は、ファントムに対して後方から入射する放射線は、前方からのものに比べ、より多く吸収されるためである。

以上のことから、モニタリングポストやサーベイメータ、航空機モニタリングの値よりも、個人線量計が示す値の方が小さいことがわかる。本研究の測定結果も、このことを支持するものになっている。

(2) 個人線量測定値と実効線量との関係

ICRP Publ. 74 の Fig. 65 に、ROT 照射ジオメトリにおける光子エネルギーの関数として表した、実効線量 E と個人線量当量 $H_{p,slab}(10, ROT)$ 及び $H'(10, ROT)$ との関係が示されている。また、ICRP Publ. 74 中には「このジオメトリでは、 $H_p(d)$ は実効線量の非常に良い尺度になりそうなことが見られる。」「約 40keV 以上の光子エネルギーでこの一致の良さがよくわかる。」との記述がある。すなわち、計算上は ROT ジオメトリでは、個人線量当量が実効線量の値に近くなる。先述の ICRP Publ. 74 の Fig. 64 でも、 $E(ROT)$ と $H_{p,slab}(10, ROT)$ は、近い値を示している。

これらのことから、ROT ジオメトリでは、個人線量計が示す値 ($H_{p,slab}(10, ROT)$) と実効線量 E は、ほぼ同様の値になることがわかる。本調査研究の測定でも、同様の結果となっている。

体型・体格が異なれば、同じ放射線場でも被ばく線量は異なり、成人に比べて小さな子どもの方が線量は高くなる。これについては、モンテカルロシミュレーションの値が報告されており、福島県「県民健康管理調査」基本調査の外部被ばく線量評価でも考慮されている。日本原子力学会放射線工学部会線量概念 WG が、関連する内容を報告書として出している⁷⁾。

4. 2 建屋等による低減効果

図 3-9 では屋外空間線量率が低いほど低減係数が増大する傾向が見られた。この傾向があらわれる主な要因は屋内外空間線量率への自然放射線の寄与の扱いにあると考えられる。そこで、簡略化した低減係数の屋外空間線量率依存性考察モデル（以後、低減係数－線量率モデル）を導入し考察を進める。

(1) 低減係数—線量率モデル

$$A = (\text{屋外空間線量率} - \text{BG}) \times R \text{ / } (\text{屋外空間線量率})$$

$$B = \text{BG} \times 1.0 \text{ / } (\text{屋外空間線量率})$$

$$A+B = \{ (\text{屋外空間線量率}) \times R + (1.0 - R) \times \text{BG} \} \text{ / } (\text{屋外空間線量率})$$

ここで、

BG：自然放射線の空間線量率への寄与。簡単のため屋内外で同じ値（屋外 BG は建屋で低減されない）と仮定し、定数として扱う。ここでは、政府が福島住民の追加被ばく線量推定に用いている値である、BG = 0.04 μ Sv/h を用いた

R：IAEA-TECDOC-225 における低減係数代表値

平屋あるいは 2 階建の木造家屋 0.4

1～2 階建てブロックあるいは煉瓦造家屋 0.2 *

*：本調査の対象となった公共機関・学校は比較的大規模な 3～4 階建てコンクリート造りであり、IAEA-TECDOC-225 における構造あるいは場所の分類に直接は当てはまらない。ここでは公共機関・学校（コンクリート造り）に対し IAEA の 1～2 階建てブロックあるいは煉瓦造家屋 の低減係数 0.2 を参照して保守的な評価を行う

(屋外空間線量率—BG) $\times$ R：¹³⁴Cs、¹³⁷Cs 由来ガンマ線による屋内空間線量率。現在、追加被ばく線量は環境中に沈着した ¹³⁴Cs、¹³⁷Cs からのガンマ線による外部被ばく線量が中心となっている

A+B：¹³⁴Cs、¹³⁷Cs 由来のガンマ線及び自然放射線（BG）を考慮した場合の低減係数

(2) モデルと実測値の比較

図 4-1 に民家及び公民館に対する低減係数—線量率モデル曲線と実測から求めた低減係数を、図 4-2 に公共機関・学校に対する低減係数—線量率モデル曲線と実測から求めた低減係数を示す（図 3-9 参照）。A+B のモデル曲線は、低線量率側に向かうほど大きくなり、屋外空間線量率が BG に等しい（環境中の放射能汚染がない）場合に A+B = 1 となる。高線量率側において、A+B のモデル曲線は図 4-1 では 0.4 に、図 4-2 では 0.2 に近づく。図 4-1、図 4-2 とともに A+B のモデル曲線は実測値から求めた低減係数を再現しており、導入した低減係数—線量率モデルにより屋外空間線量率が低い場合に低減係数が IAEA-TECDOC-225 が示す値（木造家屋：0.4、ブロック・煉瓦造家屋（コンクリート造りに参照）：0.2）を大きく上回る事実をよく説明している。

低減係数は屋外空間線量率から屋内空間線量率を推定し、屋内滞在時の外部被ばく線量を評価する場合に重要となる。より厳密な議論のためには、建屋の構造や建材、自然放射線の評価、地表に沈着した放射性物質の分布（線源分布）、屋内の放射性物質汚染状況、屋内外の空間線量率を測定する位置など、様々な情報を把握あるいは条件を決定する必要がある。本調査の考察結果をより広い範囲で実証するためにも、屋外空間線量率

が 1～6 $\mu\text{Sv/h}$ またはそれ以上の場所における実測データの追加取得が望まれ、今後の課題の一つである。

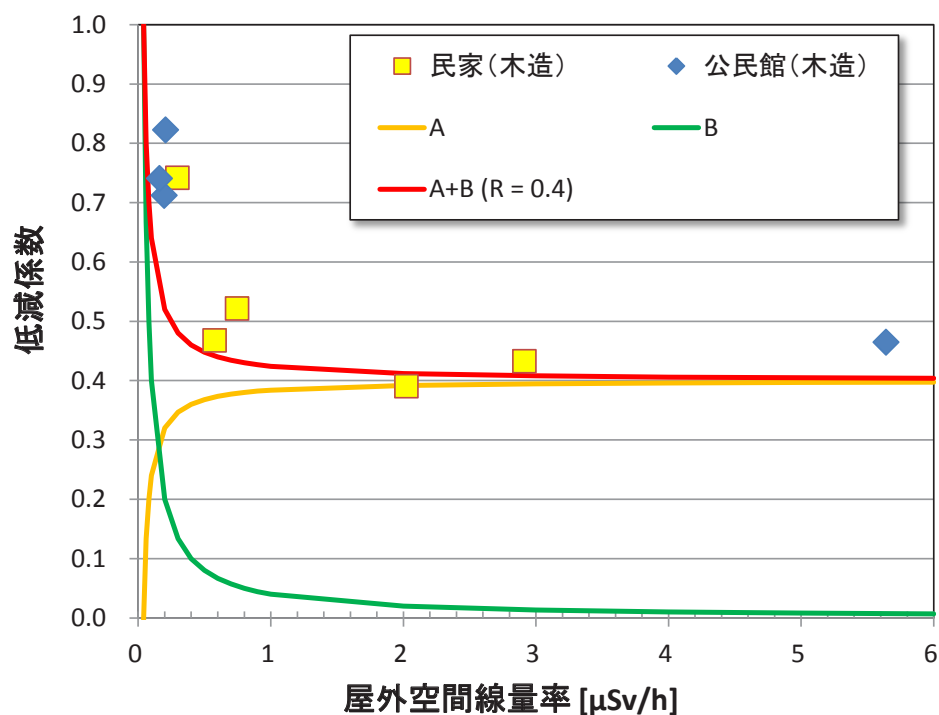


図 4－1．民家及び公民館に対する低減係数-線量率モデルと実測から求めた低減係数

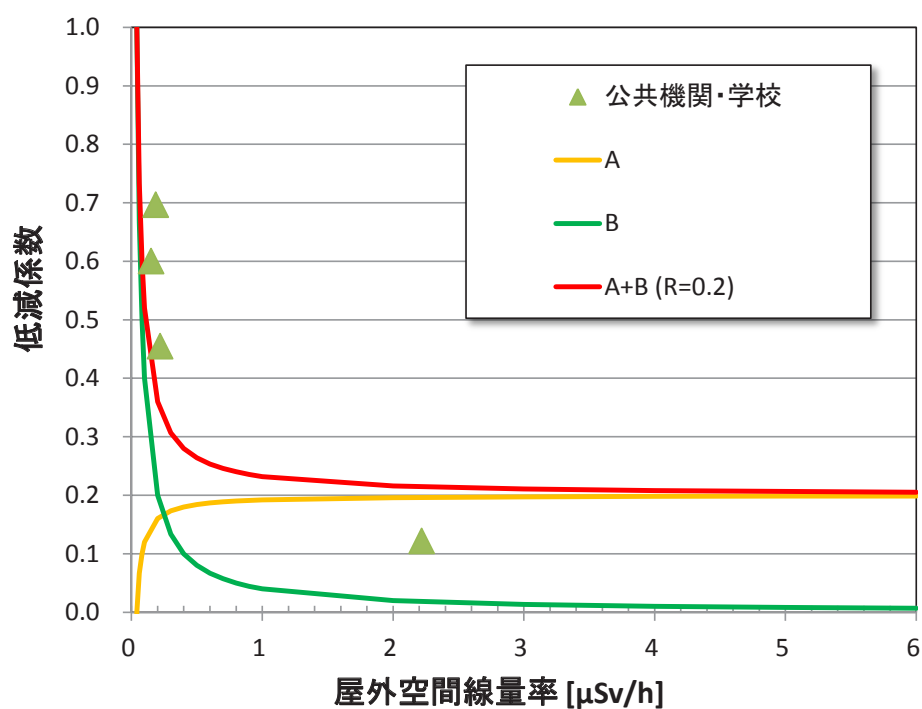


図 4－2．公共機関・学校に対する低減係数-線量率モデルと実測から求めた低減係数

4. 3 モデルケースにおける年間個人線量

福島原発事故により避難された住民の方々が帰還した場合を想定し、追加の年間個人線量について、第3章で得られた避難指示解除準備区域（田村市都路町）並びに 居住制限区域（双葉郡川内村：貝ノ坂、五枚沢地区他、相馬郡飯舘村：飯樋地区、小宮地区、蔵平地区他）における測定結果を踏まえ、公的な統計データに則した生活パターンを仮定して、推定を行った。

この推定で得られた値については、居住制限区域を含む調査地点の測定値と、仮定した生活パターンを用いた推定であり、川内村、田村市都路町、飯舘村の代表値を示すものではなく、また実測値でもない。また、推定は、平成25年9月時点の空間線量率を基に実施しており、その後の除染の状況や現在の空間線量率を反映したものではない。

なお、個人としては、標準的な体型の成人を想定した。以下に具体的な個人線量推定方法を示す。

（1）線量推定の詳細

1) NaI サーベイメータを用いて実測した屋内と屋外の空間線量率は、 $H^*(10)$ を使用し、誤差は、各屋内外の場所内の測定場所による測定値のばらつきから導出した。

2) 通勤時の自家用車内の空間線量率は、車内での実測値を用いた。

一部の想定した経路で、車内実測値がないものがあつたため、当該経路での積算線量は、JAEA が別途実施した走行サーベイの結果（車外の空間線量率として公表されている）を採用し、その値を0.6倍して車内の空間線量率として評価した。

JAEA の走行サーベイは第4次走行サーベイによる空間線量率の測定結果（平成24年8月20日～平成24年10月12日）⁸⁾の結果を用いた。

3) 生活パターンは、データブック国民生活時間調査2010年（NHK 放送文化研究所編）⁹⁾を参考にした。

（ア） 上記調査における生活行動様式：NHK の上記調査では、国民の生活における行動様式を以下のように分類している。

- (a) 睡眠
- (b) 食事
- (c) 身の回りの用事
- (d) 療養・静養
- (e) 仕事関係：仕事、仕事の付き合い
- (f) 学業：授業・学内の活動、学校外の学習
- (g) 家事：炊事・掃除・洗濯、買い物、子供の世話、家庭雑事
- (h) 通勤
- (i) 通学
- (j) 社会参加
- (k) 会話・交際

- (l) レジャー活動：スポーツ、行楽・散策、趣味娯楽(ネット)、同(以外)
- (m) マスメディア接触：テレビ、ラジオ、新聞、雑誌・マンガ・本、CD、テープ、ビデオ
- (n) 休息
- (o) その他・不明
- (イ) 農林業者の行動様式
 - ① 家屋内（自宅）：(a)睡眠、(b)食事、(c)身の回りの用事、(d)療養、静養、(g)家事（炊事・掃除・洗濯、子供の世話、家庭雑事）、(l)レジャー活動（趣味娯楽（ネット）、同(以外)）、(m)マスメディア
 - ② 屋外作業：(e)仕事関係、(l)レジャー活動（スポーツ、行楽・散策）、(n)休息
 - ③ 屋内作業（自宅外）：(f)学業、(g)家事（買い物）、(j)社会参加、(k)会話・交際
 - ④ 通勤：(h)通勤
- (ウ) 事務職の行動様式
 - ① 家屋内（自宅）：(a)睡眠、(b)食事、(c)身の回りの用事、(d)療養、静養、(g)家事（炊事・掃除・洗濯、子供の世話、家庭雑事）、(l)レジャー活動（趣味娯楽（ネット）、同(以外)）、(m)マスメディア
 - ② 屋外作業：(l)レジャー活動（スポーツ、行楽・散策）
 - ③ 屋内作業（自宅外）：(e)仕事関係、(f)学業、(g)家事（買い物）、(j)社会参加、(k)会話・交際、(n)休息
 - ④ 通勤：(h)通勤
- (エ) 無職者(高齢者等)の行動様式
 - ① 家屋内（自宅）：(a)睡眠、(b)食事、(c)身の回りの用事、(d)療養、静養、(e)仕事関係、(g)家事（炊事・掃除・洗濯、子供の世話、家庭雑事）、(h)通勤、(l)レジャー活動（趣味娯楽（ネット）、同(以外)）、(m)マスメディア、(n)休息
 - ② 屋外作業：(l)レジャー活動（スポーツ、行楽・散策）
 - ③ 屋内作業（自宅外）：(f)学業、(g)家事（買い物）、(j)社会参加、(k)会話・交際
- (オ) 基本評価のための時間算定上の留意点
 - ① 行動の分類で(i)通学は、この検討では対象外として除くこととした。またその時間は短いため、影響は小さい。
「(o)その他・不明」はアンケート調査時に未記入等に該当しており、行動には入れなかった。
 - ② 一般的に（ア）(a)～(o)までの総時間は24時間を超える。評価に用いる

時間として、全体が 24 時間となるように規格化した。但し、①で示した通り、(i)と(o)は対象外として、これらを除いた時間で規格化した。

- ③ 通勤時間(h)として、本調査における行動に基づく実際の時間を用いることとした。

その際、実際の時間が(h)の値に比べ増減がある場合は、(h)との差を自宅滞在時間に繰り入れた。(h)に比べ長い場合は、自宅滞在時間から差し引く等。)同様に(エ)無職者の通勤時間は自宅滞在時間に加算した。

④ 屋外作業

1. 農林業については作業場所（農地や山林）とした。しかし、レジャー活動は本来違う場所で行われると思われることから、積算線量の不確定要因となる。
2. 事務職に就いてはレジャー活動がその主な内容となっているが、活動場所を職場周辺とした。これも上記同様、本来は不確定要因である。

⑤ 屋内作業

1. 農林業についてはすべて自宅内を想定した。例えば家事の「買い物」は外出を伴い、自宅以外の場所に滞在するため、厳密には空間線量は異なるはずである。また(j)社会参加は必ずしも屋内とは限らないため不確定要因である。
2. 事務職では、屋内作業は全て職場を想定した。

(カ) 各作業分類における具体的な時間割

- ① 無職者：高齢者
 ② 農林業者：農作業従事者、林業従事者
 ③ 事務職：教職員、事務職員

	家屋内	屋外作業	屋内作業	通勤
無職者	21.67 hr	1.07 hr	1.23 hr	0.02 hr
農林業者	16.93 hr	6.27 hr	0.58 hr	0.18 hr
事務職	15.31 hr	0.48 hr	7.28 hr	0.85 hr



下記 6) (イ) ①、④を考慮した、実際に計算に用いた時間を示す。

	家屋内 ^{*)}	屋外作業	屋内作業	通勤 ^{*)}
無職者	22.93 hr	1.07 hr	0 hr	0 hr
農林業者	17.52 hr	6.27 hr	0 hr	0.18 hr
事務職	15.35 hr	0.48 hr	7.28 hr	0.85 hr

^{*)}：6) (イ) ③に記載する通り、この 2 つの時間は実際の通勤時間に応じて変化するものとする。

- 4) 空間線量率から個人線量率への換算 ($F(\text{amb} \rightarrow \text{person})$) は、以下の数値を使用。
- ・各場所における、標準的な体型の調査員が着用した個人線量計 A1 の測定値と空間線量率の実測値の数分間の積分値の比率

$$[F(\text{amb} \rightarrow \text{person}) = (\text{個人線量計 A1 測定値} \times T) / (H^*(10) \times T)] = 0.7$$

- 5) 自然放射線 (BG. 事故前から存在)

これまで多くの公開データの中で利用されている自然放射線の空間線量率である $0.04 \mu\text{Sv/h}$ を用いた。

- 6) 追加個人線量の計算

以下の式から一日あたりの追加個人線量を計算する。自宅や、農地、学校などの職場で実測した各滞在場所における空間線量率に、各滞在時間の平均値 ($T(1)$ 、上記の NHK データ参照) を掛け合わせ、さらに本調査で実測により得られた 1 cm 周辺線量当量率と個人線量計の読み値の相関係数 ($F(\text{amb} \rightarrow \text{person})$) を掛け合わせることで、自然放射線成分も含む一日あたりの個人線量率を推測した。次に一日当たりの自然放射線寄与による個人線量 (BG) を差し引くことで、一日あたり追加個人線量 ($H_p(10)/\text{day}$) を求めた。次に土日の行動の相違も含ませて、一年間の追加個人線量 ($H_p(10)/\text{year}$) を推測した。

$$(\text{ア}) \quad H_p(10)/\text{day} = \sum_l (H^*(10, l) \times T(l) - \text{BG} \times 24 (\text{hours})) \times F(\text{amb} \rightarrow \text{person})$$

$$H_p(10)/\text{year} = H_p(10)/\text{day} \times 365 \text{ (d/y)}$$

ここで、

- ・ $H^*(10, l)$: 行動した場所の空間線量率。インデックス l はそれぞれの行動を示す。

例えば、 $l=1$ を在宅とすれば、 $H^*(10, 1)$ は自宅内の平均の空間線量率とし、また、 $l=2$ を農作業とすれば、 $H^*(10, 2)$ は農地の平均の空間線量率とした。

- ・ $T(l)$: 行動 l の継続時間 (在宅時間や農作業時間、等)

- ・ 第 1 式は、行動の種類 (l) に従って和を取ることを意味する。

- (イ) 計算上の注意点

④ 行動時間は 3) (カ) の表からわかる通り、時間の 1 日の合計が 24 時間と異なることがある (無職者の場合は 1 日合計時間 24.48hr.)。この場合、合計時間が 24 時間になるように各項目の時間を規格化した。

⑤ 通勤時の個人線量評価では、通勤時間はデータブックの値ではなく、調

査委の際に走行した時間を用いた。

- ⑥ 通勤時間がデータブックの値と異なる場合は、その差分を自宅滞在時間に加算差引して調整し、作業時間は調査結果のままとした。
- ⑦ 農林業並びに無職者の屋内作業の場所は自宅とした。
教職員及び事務職員の場合の屋内作業の場所は職場(教職員は学校、事務職は公共施設)とした。

7) 不確定さの評価

- (ア) 周辺線量当量率：当該地域の平均値とし、不確定さは標準偏差とする。
- (イ) 空間線量率から個人線量率への換算係数の不確定さ：実測した空間線量率と個人線量計の読み値の分布の広がり(半値幅)は、10%であり、この実測値を用いた。
- (ウ) BG：定数として扱った。
- (エ) 行動時間：最も寄与が大きいと思われる生活パターンとそれに付随する滞在時間については、NHK データベース記載の各行動時間についての集計データの平均値に対する標準偏差を用いて評価した。
- (オ) 通勤時の個人線量：車内の通勤時の積算空間線量とし、不確定さはないとして扱った。

(2) 推定結果

川内村に関する推定結果を表4-1、田村市都路町に関して表4-2、飯舘村に関しては表4-3に示す。それぞれの推定に用いた空間線量率は地区毎に表4-4～4-6に示した。

職業は大きく、農業、林業、教職員、事務職、高齢者(無職)を想定した。表の中で農業A、林業A等と分類して記述しているが、これらは同一人物Aが農業や林業等を営むことを想定しており、同一人物が異なる行動(職業)の場合、どの程度の線量を受けるか、いわば行動と線量の比較が可能としている。例えば川内村のA氏が農業、林業、教員、高齢者という代表的な行動をとる場合の年間個人線量の推定値は1.8～5.5 mSvの範囲となることが分かる。これらを表4-1～4-3から抜き出して自治体別に整理すると以下のようになる。

川内村

A氏	1.8～5.5 mSv	(農業、林業、教職員、高齢者)
C氏	1.1～4.8 mSv	(農業、林業、教職員、高齢者)

田村市都路町

A氏	0.6～2.3 mSv	(農業、林業、事務職員、高齢者)
B氏	0.7～1.2 mSv	(農業、教職員、高齢者)

飯舘村

A 氏	3.8～8.8 mSv	(農業、林業、教職員、高齢者)
B 氏	5.8～10.7 mSv	(農業、林業、教職員、高齢者)
C 氏	11.2～17.0 mSv	(農業、林業、教職員、高齢者)

先ず特徴的に言えることは、いずれの場合も林業のケースが最も高い個人線量を示す。最も低い値は教職員または事務職員である。これは、未除染あるいは除染済みでも比較的線量の高い山林を調査対象としたこと、教職員又は事務職員の職場として想定した学校及び公共施設はコンクリート建屋で屋内の空間線量率が低かったことが、直接的に起因しているものと考えられる。

川内村の A 氏は居住制限区域に居住していることを想定した。教職員を想定した場合の個人線量が一番低いことが分かった。一方、C 氏は 20 km 圏外に居住していることを想定しており、教職員と高齢者という想定が一番低く、1.1 mSv であった。

田村市都路町は、林業を想定した場合であっても、いずれも低い値であり、値に大きな広がりはない。A、B 氏共に 1 mSv を超える値を示すのは、山林部に入った場合であった。

それに比べて対象地区がすべて居住制限区域であった飯舘村での推定値は、職業(行動)によって値に相当の開きがあることが分かる。C 氏の場合は調査対象地区で最も高い公民館 1 を自宅に想定しており、殆どの時間を屋内で過ごす高齢者であっても、他のケースの農業や林業に匹敵する値を推定した。

以上より、田村市都路町のように全体の放射線レベルの低い地区では、年間個人線量は行動によって大きく変わることはないと思われる。これらの地区では山林部への立ち入りであっても、総計で短時間であればそれ程影響は小さいと思われる。

一方、飯舘村の様に、今回の調査時点では未除染であり放射線レベルの高い地区の測定値をもとに推定した結果では、どのような行動をとるかで、年間個人線量に影響がある。逆に言えば、行動に十分注意することで個人線量の低減効果も大きいと考えることができる。

表 4-1. 調査対象地点の測定結果を組み合わせ推定した代表的な職業従事者の
年間個人線量レベル — 川内村

職業	区域種別	居住地区と職場 ^{a)}	推定年間個人線量 (mSv/y) ^{b)}	滞在時間
農業 A	居住制限区域	木造家屋 A → 田畑 A (貝の坂地区)	<u>3.5</u> (3.0-4.1)	自宅 : 17.69 時間 農地 : 6.27 時間
農業 B	避難指示解除準備区域	木造家屋 B → 田畑 B (五枚沢地区)	<u>3.0</u> (2.6-3.3)	
農業 C	20 km圏外	木造家屋 C → 田畑 C (熊ノ坪地区)	<u>1.7</u> (1.5-1.9)	
農業 D	20 km圏外	木造家屋 D (北川原地区) → 田畑 C (熊ノ坪地区)	<u>1.3</u> (1.1-1.4)	自宅 : 17.66 時間 農地 : 6.27 時間 通勤 : 0.03 時間
林業 A	居住制限区域	木造家屋 A → 山林 (貝の坂地区)	<u>5.5</u> (4.9-6.2)	自宅 : 17.62 時間 山林 : 6.27 時間 通勤 : 0.07 時間
林業 C	20 km圏外 → 居住制限区域	木造家屋 C (熊ノ坪地区) → 山林 (貝の坂地区)	<u>4.8</u> (4.3-5.3)	自宅 : 17.10 時間 山林 : 6.27 時間 通勤 : 0.59 時間
教職員 A	居住制限区域 → 20 km圏外	木造家屋 A (離れ) (貝の坂地区) → 学校	<u>1.8</u> (1.5-2.0)	自宅 : 15.51 時間 校舎 : 7.28 時間 校庭 : 0.48 時間 通勤 : 0.61 時間
教職員 C	20 km圏外	木造家屋 C (離れ) (熊ノ坪地区) → 学校	<u>1.1</u> (1.0-1.2)	自宅 : 15.82 時間 校舎 : 7.28 時間 校庭 : 0.48 時間 通勤 : 0.34 時間
高齢者 A	居住制限区域	木造家屋 A (貝の坂地区)	<u>2.1</u> (1.7-2.6)	自宅 : 22.93 時間 屋外 : 1.07 時間
高齢者 C	20 km圏外	木造家屋 C (熊ノ坪地区)	<u>1.1</u> (0.9-1.3)	

a) : 居住地区と職場は、表 4-4、表 3-1 の区分を参照のこと

b) : これらの値は、調査地点の測定値と仮定した生活パターンを用いた推定であり、川内村、田村市都路町、飯館村の代表値を示すものではなく、また実測値ではない。推計は平成 25 年 9 月時点の空間線量率をもとにしており、その後の除染の状況や現在の空間線量率を反映したものではない。

表 4－2. 調査対象地点の測定結果を組み合わせ推定した代表的な職業従事者の
年間個人線量レベル — 田村市都路町

職業	区域種別	居住地区と職場 ^{a)}	推定年間個人線量 (mSv/y) ^{b)}	滞在時間
農業 A	避難指示解除 準備区域	木造家屋 A→農地 A	<u>0.9</u> (0.7-1.0)	自宅：17.69 時間 農地：6.27 時間
農業 B		木造家屋 B→農地 B	<u>1.2</u> (1.1-1.3)	自宅：17.25 時間 農地：6.27 時間 通勤：0.44 時間
林業 A		木造家屋 A→山林	<u>2.3</u> (1.9-2.7)	自宅：16.34 時間 山林：6.27 時間 通勤：1.35 時間
教職 員 B	避難指示解除 準備区域→ 20 km圏外	木造家屋 B→学校	<u>0.7</u> (0.6-0.8)	自宅：15.87 時間 職場内：7.28 時間 戸外：0.48 時間 通勤：0.29 時間
事務 職員 A		木造家屋 A→公共機 関	<u>0.6</u> (0.5-0.7)	自宅：15.98 時間 職場内：7.28 時間 戸外：0.48 時間 通勤：0.18 時間
高齢 者 A	避難指示解除 準備区域	木造家屋 A	<u>0.6</u> (0.5-0.7)	自宅：22.93 時間 屋外：1.07 時間
高齢 者 B		木造家屋 B	<u>0.8</u> (0.7-0.9)	

a)：居住地区と職場は、表 4－5、表 3－1 の区分を参照のこと

b)：これらの値は、調査地点の測定値と仮定した生活パターンを用いた推定であり、川内村、田村市都路町、飯舘村の代表値を示すものではなく、また実測値ではない。推計は平成 25 年 9 月時点の空間線量率をもとにしており、その後の除染の状況や現在の空間線量率を反映したものではない。

表 4－3．調査対象地点の測定結果を組み合わせ推定した代表的な職業従事者の
年間個人線量レベル　－　飯舘村

職業	区域種別	居住地区と職場 ^{a)}	推定年間個人線量 (mSv/y) ^{b)}	滞在時間
農業 A	居住制限区域	木造家屋 A → 田畑 A (飯樋地区)	<u>7.1</u> (6.0-8.2)	自宅：17.69 時間 農地：6.27 時間
農業 B		木造家屋 B → 田畑 B (小宮地区)	<u>10.7</u> (9.1-12.3)	自宅：17.69 時間 農地：6.27 時間
農業 C		木造家屋 C (蔵平) → 田畑 B (小宮地区)	<u>16.8</u> (13.6-19.9)	自宅：17.29 時間 農地：6.27 時間 通勤：0.40 時間
農業 D		木造家屋 C (蔵平) → 田畑 A (飯樋地区)	<u>15.2</u> (12.1-18.2)	自宅：17.01 時間 農地：6.27 時間 通勤：0.68 時間
林業 A		木造家屋 A (飯樋地区) → 山林 (小宮地区)	<u>8.8</u> (7.6-10.0)	自宅：17.42 時間 山林：6.27 時間 通勤：0.27 時間
林業 B		木造家屋 B → 山林 (小 宮地区)	<u>10.7</u> (9.1-12.3)	自宅：17.69 時間 山林：6.27 時間
林業 C		木造家屋 C (蔵平) → 山林 (小宮地区)	<u>17.0</u> (13.8-20.2)	自宅：17.29 時間 山林：6.27 時間 通勤：0.40 時間
教職 員 A		木造家屋 A (飯樋地区) → 学校	<u>3.8</u> (3.0-4.7)	自宅：16.02 時間 職場：7.28 時間 戸外：0.48 時間 通勤：0.15 時間
教職 員 B		木造家屋 B (小宮地区) → 学校	<u>5.8</u> (4.5-7.0)	自宅：15.84 時間 職場：7.28 時間 戸外：0.48 時間 通勤：0.32 時間
教職 員 C		木造家屋 C (蔵平) → 学校	<u>11.2</u> (8.5-13.9)	自宅：15.51 時間 職場：7.28 時間 戸外：0.48 時間 通勤：0.65 時間
高齢 者 A		木造家屋 A (飯樋地区)	<u>4.9</u> (3.8-6.1)	自宅：22.93 時間 屋外：1.07 時間
高齢 者 B		木造家屋 B (小宮地区)	<u>7.9</u> (6.2-9.7)	
高齢 者 C		木造家屋 C (蔵平)	<u>16.6</u> (12.7-20.6)	

a)：居住地区と職場は、表 4－6、表 3－1 の区分を参照のこと

b)：これらの値は、調査地点の測定値と仮定した生活パターンを用いた推定であり、川内村、田村市都路町、飯舘村の代表値を示すものではなく、また実測値ではない。推計は平成 25 年 9 月時点の空間線量率をもとにしており、その後の除染の状況や現在の空間線量率を反映したものではない。

表 4-4. 年間個人線量推定に使用したデータ (川内村)

川内村	平均 (μ Sv/h)	標準偏差	使用データ(表 3-1 参照)
木造家屋 A	0.37	0.07	民家 3 屋内
	0.45	0.04	民家 3 の離れ 1 階
木造家屋 B	0.27	0.04	民家 4 屋内
木造家屋 C	0.22	0.02	民家 5 屋内
	0.28	0.02	民家 5 の離れ 2 階
木造家屋 D	0.12	0.01	公民館 4
田畑 A	1.32	0.17	農地 3
田畑 B	1.25	0.05	農地 4
田畑 C	0.62	0.06	農地 5
山林	2.55	0.04	山林 2 から林道を除く
学校	0.10	0.01	学校 3 校舎のうち食堂
学校校庭	0.13	0.02	学校 3 校庭 (歩行サーベイ)
屋外 A	0.75	0.12	民家 3 周辺
屋外 C	0.30	0.08	民家 5 周辺

通勤経路 (片道相当)	積算線量 (μ Sv)	移動時間
D 氏宅→田畑 C	0.0019	0:00:52
A 氏宅→山林	0.0184	0:02:10
C 氏宅→山林	0.0752	0:17:44
A 氏宅→学校	0.0902	0:18:21
C 氏宅→学校	0.0160	0:10:19

表 4－5．年間個人線量推定に使用したデータ（田村市都路町）

田村市都路町	平均値 (μ Sv/h)	標準偏差	使用データ(区分は表 3－1 参照)
木造家屋 A	0.14	0.01	公民館 3 屋内
木造家屋 B	0.17	0.01	公民館 2 屋内
農地 A	0.29	0.02	農地 7
農地 B	0.42	0.02	農地 6
山林	1.09	0.18	山林 3
学校	0.10	0.01	学校 2 校舎
学校校庭	0.14	0.03	学校 2 校庭
事務職	0.13	0.00	公共機関
屋外 A	0.19	0.04	公共機関周辺
屋外 C	0.20	0.05	公民館 3 周辺
屋外 D	0.21	0.02	公民館 2 周辺

通勤経路(片道相当)	積算線量(μ Sv)	移動時間
木造家屋 B→農地 B ^{*)}	0.0627	0:13:08
木造家屋 A→山林	0.4475	0:40:30
木造家屋 B→学校	0.0433	0:08:40
木造家屋 A→公共機関	0.0088	0:05:24

*) : 公民館 2～県道の農地入口：車移動、県道入口～農地：徒歩移動

表 4-6. 年間個人線量推定に使用したデータ (飯舘村)

飯舘村	平均値 (μ Sv/h)	標準偏差	使用データ(区分は表 3-1 参照)
木造家屋 A	0.79	0.18	民家 1 屋内
木造家屋 B	1.26	0.26	民家 2 屋内
木造家屋 C	2.62	0.61	公民館 1 屋内
田畑 A	2.37	0.04	農地 1
田畑 B	3.28	0.03	農地 2
山林	3.42	0.17	山林 1
学校	0.27	0.08	学校 1 校舎
学校	2.63	0.50	学校 1 校庭
屋外 A	2.02	0.48	民家 1 周辺
屋外 B	2.91	1.02	民家 2 周辺
屋外 C	5.64	0.40	公民館 1 周辺

通勤経路(片道相当)	積算線量(μ Sv)	移動時間
C 氏宅→B 氏宅	0.3602	0:12:08
C 氏宅→田畑 A	0.5128	0:20:17
A 氏宅→B 氏宅	0.1526	0:08:05
A 氏宅→学校	0.0592	0:04:21
B 氏宅→学校	0.1609	0:09:32
C 氏宅→学校	0.4895	0:19:27

4. 4 航空機サーベイデータとの比較

第7次航空機モニタリング調査で推定された空間線量率と実際に測定した地上1 m空間線量率を対比し、航空機サーベイによる推定値の個人線量評価への応用に関して考察を行った。

具体的には、原子力規制委員会の東京電力福島第一原子力発電所事故による環境モニタリング等データベースより、「第7次航空機モニタリングの空間線量率の測定結果（平成25年9月28日換算）」¹⁰⁾の田村市、双葉郡川内村、相馬郡飯舘村のそれぞれのCSVファイルをダウンロードし、それぞれGoogle Earth上に表示を行った。そして、マップ上で実測地点の近傍における航空機モニタリングからの空間線量率の数値を拾い、実測データと比較を行った（表4-7、4-8、図4-3～4-5参照）。なお、航空機モニタリングによる測定の範囲は、航空機の対地高度によって変化するが、概ね600 mの円内の測定値を平均化したものとされている。

表4-7及び図4-3に示す通り、全調査点を俯瞰すると、航空機モニタリング推定空間線量率と実測値とは概ね3 $\mu\text{Sv/h}$ 以上の調査点では、空間線量率同士は直線的な関係がみられ、また推定空間線量率と実測値との比でも80 %程度であることから、航空機モニタリングは概ね地上1 mの空間線量率を評価できていると考えられた。しかし、3 $\mu\text{Sv/h}$ 以下では空間線量率同士の関係はばらつき、両者の比を見てみると、30 から110 %程度とばらついており一定の傾向は見られなかった。

同様の比較検討を、未除染エリア、除染済みエリアに分けて検討を行ったのが、表4-8、図4-4、4-5である。未除染エリアには、飯舘村の調査点と川内村の除染外エリアが含まれていたが、航空機モニタリング推定空間線量率と実測値の間には概ね良好な直線関係が認められた。航空機モニタリング推定空間線量率と実測値の比についてみると、飯舘村の調査点では80 %程度であったが、除染対象外の川内村の調査点では32、41、107 %と、調査地点によりばらついていった。32 %を示したのは、現在食品放射能分析場所として利用されている集会所であり、建屋周囲はコンクリート駐車場とアスファルト道路で囲まれていた。41 %を示したのは、山に囲まれた中の個人宅であるが、庭や家屋周辺は破碎した花崗岩で敷き詰められており、除染がされていた。107 %を示したのはこのお宅のすぐ裏手の田畑である。このエリアでは広大な田畑が広がり周囲を山々で囲まれた地形で、航空機モニタリング推定空間線量率はこれら山々・田畑がほぼ同程度の線量率（0.7 $\mu\text{Sv/h}$ 前後）であり、実測値も同様の値を示した。除染の手がついていない山々に囲まれたエリアにあっては、局所的に除染をしている、あるいは低い空間線量率を示す集落に関しては、航空機モニタリングによる位置分解能では詳細な空間線量の位置的变化を反映できていないものと推察された。

一方、除染済みエリアでは、航空機モニタリング推定空間線量率と実測値、両者の比いづれでもばらつきが大きく一定の傾向は認められなかった。航空機モニタリング推定空間線量率と実測値の比においても、多くの調査点が30～70 %程度に分布していた。これらの

調査地点も基本的に山々に囲まれた中の集落・施設であり、実測値が航空機モニタリングと比べて30～70 %と低くなったのは、航空機モニタリング推定空間線量が未除染の山林からの放射線の影響によって高めに出自していることが原因の一つと推察された。

表4-7. 第7次航空機モニタリングにより推定された1m空間線量率と1m空間線量率実測値との比較 — 調査市町村別

市町村	対象エリア	第7次航空機モニタリング結果(μSv/h)(H25.9.28)				平均値	1m空間線量率(実地測定平均値)	実測/空モニ(%)	
飯館村	民家2	3.2	3	3.5	3.4	3.28	2.85	87	未除染
	農地2					3.90	3.28	84	未除染
	山林1					3.90	3.42	88	未除染
	公民館1	5	5.3	5.3	5.9	5.38	5.64	105	未除染
	民家1	2.4	2.4	2.4	2.4	2.40	1.96	82	未除染
	農地1					2.60	2.37	91	未除染
	学校1	2.2				2.20	2.22	101	未除染
		2				2.00	2.63	132	未除染
	広場2	2.1	2.3			2.20	2.68	122	未除染
	広場3	2.3	2.2			2.25	2.98	132	未除染
	広場1	1.5	1.5	2	1.9	1.73	1.20	70	除染済み
	学校2	0.42	0.32			0.37	0.22	59	除染済み
	公共機関	0.44	0.32			0.38	0.19	50	除染済み
田村市	公民館2	0.52	0.54	0.44	0.46	0.49	0.21	43	除染済み
	公民館3	0.55	0.54	0.57	0.57	0.56	0.20	36	除染済み
	農地B	0.65				0.65	0.42	65	除染済み
	農地A	0.55	0.54	0.57	0.57	0.56	0.27	48	除染済み
	学校3	0.3	0.31			0.31	0.15	49	除染済み
						0.29	0.13	45	除染済み
						2.20	0.69	31	除染済み
川内村	民家3	2.2				2.20	1.22	55	除染済み
	農地3	2.2				2.60	1.96	75	未除染
	山林2	2.6	2.6			2.60	1.40	54	除染済み
	公民館6	2.6	2.6			2.60	0.43	31	除染済み
	公民館5	1	1.3	1.5	1.7	1.38	0.52	27	除染済み
	民家4	1.8	1.8	2	2	1.80	1.25	69	除染済み
	農地4	1.8				0.52	0.16	31	未除染(除染対象外)
	公民館4	0.52				0.58	0.24	42	未除染(除染対象外)
	民家5	0.49	0.64	0.53	0.65	0.58	0.62	107	未除染(除染対象外)
	農地5	0.49	0.64	0.53	0.65	0.58			

表4-8-1). 第7次航空機モニタリングにより推定された1m空間線量率と1m空間線量率実測値との比較 — 除染の有無 1) 未除染エリア

市町村	対象エリア		第7次航空機モニタリング結果(μ Sv/h) (H25.9.28)				平均値	実測/空モニ (%)	除染有無
飯館村	民家2	家屋周囲	3.2	3	3.5	3.4	3.28	87	未除染
	農地2	農地					3.90	84	未除染
	山林1	裏手山林					3.90	88	未除染
	公民館1		5	5.3	5.3	5.9	5.38	105	未除染
	民家1	家屋周囲	2.4	2.4	2.4	2.4	2.40	82	未除染
	農地1	農地					2.60	91	未除染
	学校1	校舎周囲	2.2				2.20	101	未除染
		校庭	2				2.00	132	未除染
	広場2		2.1	2.3			2.20	122	未除染
川内村	広場3		2.3	2.2			2.25	132	未除染
	山林2		2.6	2.6			2.60	75	未除染
	公民館4	公民館周囲	0.52				0.52	31	未除染(除染対象外)
	民家5	家屋周囲	0.49	0.64	0.53	0.65	0.58	42	未除染(除染対象外)
	農地5	農地	0.49	0.64	0.53	0.65	0.58	107	未除染(除染対象外)

表 4-8-2) . 第 7 次航空機モニタリングにより推定された 1m 空間線量率と
1m 空間線量率実測値との比較 — 除染の有無 2) 除染済みエリア

市町村	対象エリア	第7次航空機モニタリング結果($\mu\text{Sv/h}$) (H25.9.28)				平均値	実測/空モニ(%)	除染有無
飯館村	広場1	1.5	1.5	2	1.9	1.73	70	除染済み
田村市	学校2	0.42	0.32			0.37	59	除染済み
	公共機関	0.44	0.32			0.38	50	除染済み
	公民館2	0.52	0.54	0.44	0.46	0.49	43	除染済み
	公民館3	0.55	0.54	0.57	0.57	0.56	36	除染済み
	農地6	0.65				0.65	65	除染済み
	農地7	0.55	0.54	0.57	0.57	0.56	48	除染済み
川内村	学校3	0.3	0.31			0.31	49	除染済み
	校舎周囲							
	校庭					0.29	45	除染済み
	民家3	2.2				2.20	31	除染済み
	農地3	2.2				2.20	55	除染済み
	公民館6	2.6	2.6			2.60	54	除染済み
	公民館5	1	1.3	1.5	1.7	1.38	31	除染済み
	民家4	1.8	1.8	2	2	1.90	27	除染済み
	農地4	1.8				1.80	69	除染済み

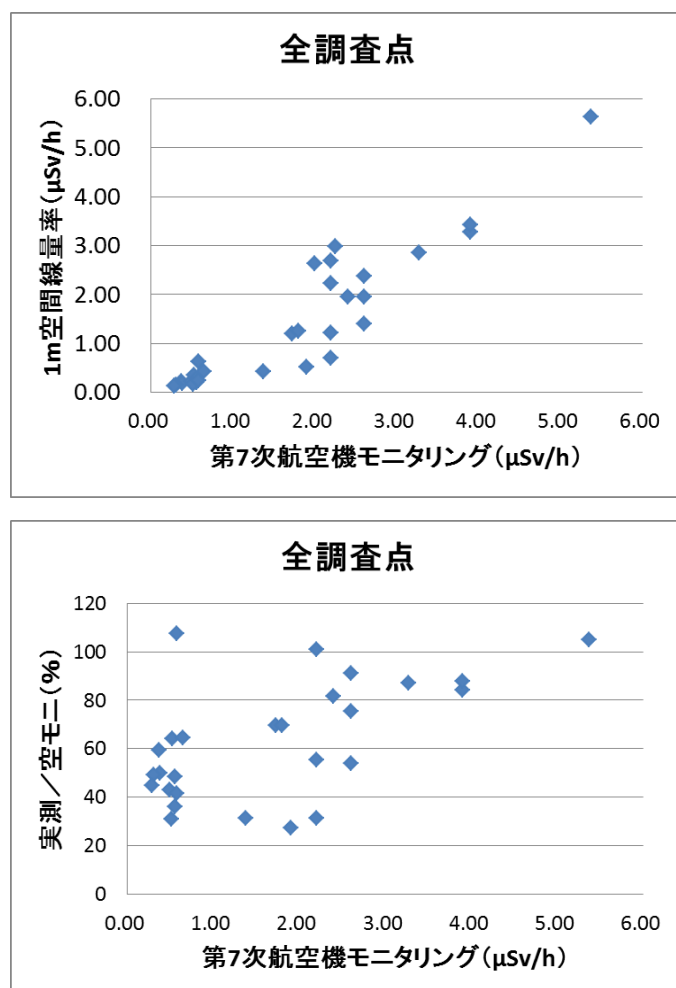


図 4-3. 航空機モニタリングより推定された空間線量率と実測空間線量率の関係
— 全調査点プロット図 空間線量率との比較 (左) 空間線量率比の比較 (右)

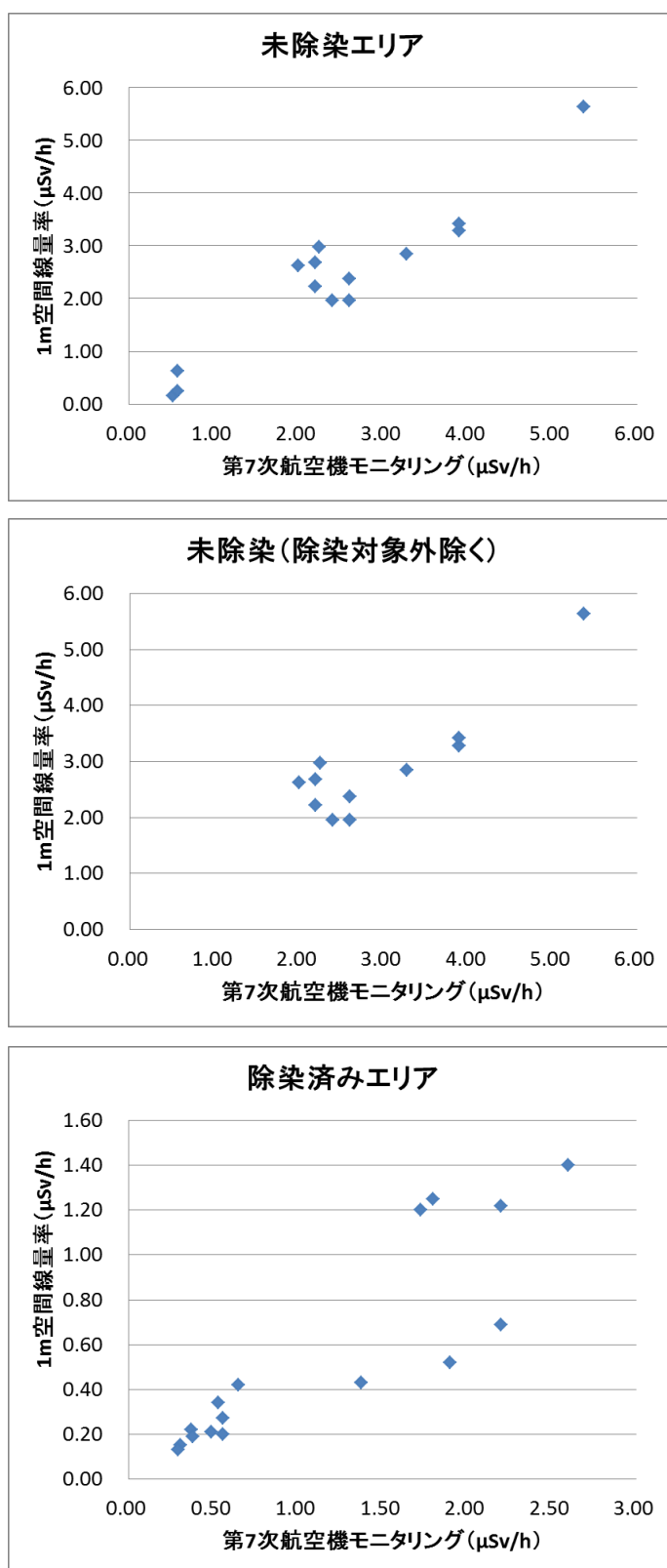


図 4-4. 航空機モニタリングより推定された空間線量率と実測空間線量率の関係

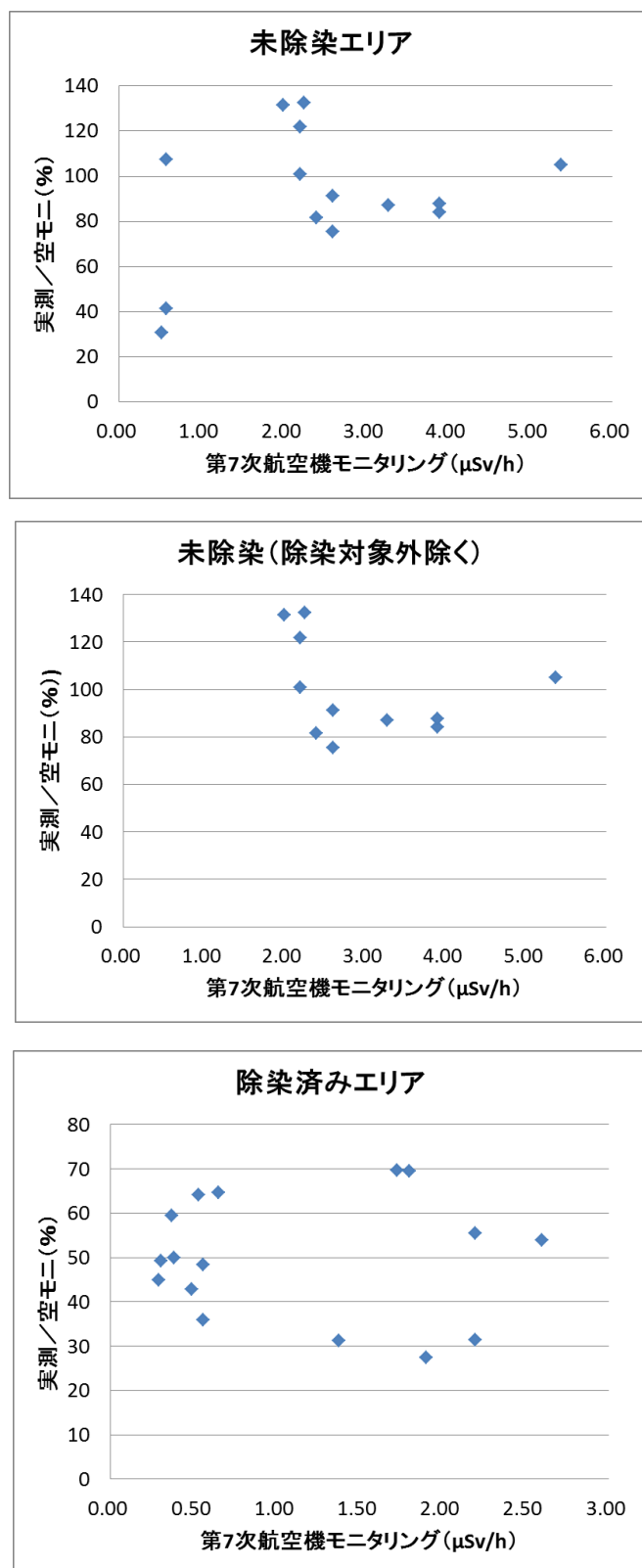


図4-5. 航空機モニタリングより推定された空間線量率と実測/航空機モニタリング
空間線量率比の関係

5 結論

5. 1 個人線量計測定値の妥当性

住民の線量測定に用いられている電子式個人線量計について福島県内の実際の環境放射線場における照射試験及び ^{137}Cs ガンマ線標準照射場を用いた回転照射試験を行った。その結果、個人線量計指示値と空間線量との関係は、ICRP Publ. 74 によって報告されている個人線量 $H_p(10)$ と周辺線量 $H^*(10)$ の関係と良く一致した。また、個人線量計の指示値は実効線量の良い指標であることを、ガンマ線スペクトロメータの結果及び ^{137}Cs ガンマ線標準照射場を用いた回転照射試験によって実験的に確認した。これらのことから、個人線量当量 ($H_p(10)$) に対して校正されている電子式個人線量計は、放射性物質が地表面に分布しているような放射線場において、住民の実効線量をほぼ過小評価することなく評価できることを実証した。

5. 2 空間線量から個人線量を推定することの妥当性

帰還した住民の環境は、住宅及びその周辺、公共施設、道路、農地など基本的に除染が完了している場所であるが、場合によっては森林など除染が行われない場所への立ち入りも想定される。このような場所は空間線量率の勾配が比較的小さいこと及び実際の人の向きは様々な方向を向くことから等方照射場あるいは回転照射場あるいはその混在と考えると良い。もし人体に入射する放射線がほぼ等方的と見なせるのであれば、周辺線量当量（空間線量）にある定数を乗ずることによって個人線量を適切に推定することができる。すなわち、今回の実験結果から、様々な場所においてファントム上の個人線量計の指示値とその場所における空間線量との関係は概ね直線関係にあるため、両者の比に基づき空間線量から個人線量を推定することは妥当であると考えられる。

5. 3 個人線量の推定の可能性

今回の調査の結果、空間線量と個人線量との関係がほぼ明確になったことから、今回の調査区域のような山間部においては、空間線量率分布と、そこでの生活における行動時間を知ることで、ある程度の個人線量を推定することが可能になったと考えられる。その推定に際して、最も不確定差の大きい要因は行動時間である。しかし、空間線量率の低い地域では、場所による線量率の変化が比較的小さくなる傾向にあることから、行動時間に多少の不確定さがあっても、通年の個人線量で考えれば、大きな推定誤差は生じないと思われる。

また、行動とその時間を仮定した際に、個人線量をある程度予測できることから、帰還予定地域の生活の場の空間線量率を調べることにより、帰還後の生活においてどの程度の個人線量になるかについて見積もることが可能となると考えられる。

5. 4 航空機サーベイデータの個人線量推定への活用の可能性

今回の調査結果をもとに航空機モニタリング結果と比較したところ、飯舘村のような、今回の調査時点では未除染のために比較的空間線量率が高いエリアでは、航空機モニタリングで推定された地上 1 m の空間線量率とサーベイメータで実測した地上 1 m 空間線量率は概ね同様の値であり、両者の相関は大変良好であったが、除染済みエリアでは場所により大きくばらつくことがわかった。今回の調査区域（山間部）においては、実効線量が空間線量率の概ね 0.7 倍として評価できるということからすると、そして今後これまで以上に多くの避難指示解除準備区域で生活環境における除染が進む状況を考えると、実効線量推定のもととなる空間線量率は位置分解能に限界のある航空機モニタリングの値と地上における実測値の違いに留意して、個人線量の推定を行うことが必要と考えられる。

航空機モニタリングによる地上 1 m 空間線量率の推定においては航空機モニタリング検討委員会において検討され、地上の測定結果推定精度を上げる努力がなされおり、JAEA から「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報告書」として報告がされている¹¹⁾。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報告書によると、地上における測定結果と航空機モニタリングによる空間線量率は正の相関関係にあり、相互の比は 0.5～1.5 の範囲内にあるとされている。このことから、航空機モニタリングの結果と生活環境における空間線量率の実測値との違いに起因する不確かさが±50 %程度伴うことを前提とすれば、航空機モニタリングの結果に基づいて個人の線量推定を行うことは可能であると考えられる。また、今回の調査結果から、除染が行われていない区域では、航空機モニタリングによる結果と地上での空間線量率の実測値は比較的一致する傾向にあり、線量推定に伴う不確かさはそれより小さくなる傾向にあることも判明した。しかしながら、同報告書において「航空機モニタリングは、対地高度約 300 m 上空で測定しているため、600 m 程度の円内の平均値を求めているのに対し、地上の測定では、周辺 10 m 程度の平均値を測定しているため、狭い範囲で線量の勾配が大きい場所や山裾等のヘリコプタの横から放射線を受ける場所および森林内等の上方に遮蔽がある場所等では、値が大きくなる場合が考えられる」とあるように、また、今回の調査委においても同様の傾向が観察されたことから、地上の空間線量率を推定するに当たっての限界はあり、例えば今回の調査対象区域に見られたような、地表近くのホットスポットや、周りが山に囲まれている中の除染済みエリアの検出は困難であり、現時点ではやはり地上 1 m 空間線量率の評価には、サーベイメータを用いて測定する必要があると考えられる。避難指示解除準備区域では、国や自治体における 1 m 空間線量率のデータも蓄積されていることから、帰還前に個人線量を推定する場合、それらデータの利用も合わせて検討することが効率的と思われる。

6 今後に向けた課題

放射線測定と防護に用いられている線量指標には、空気吸収線量、空気カーマ、周辺線量当量、個人線量当量など、数多くの種類がある。今回、福島県の放射線場の条件下における個人の線量評価という観点で調査・検討を行った結果、第1章の1. 目的で示した「1. 福島県内の避難地域で、住民が付けた個人線量計により個人線量が正しく評価できることの調査、2. 空間線量率と個人線量との関係、3. 建屋等による低減効果、4. 生活パターンの変化による個人線量の変化の把握」を通して、個人の生活パターンが予測できれば、実用量（周辺線量当量・個人線量当量）のいずれかを測定することにより、個人が受ける線量を大まかに推定できることなどが示された。今後、線量推定の精度をより向上させるための課題も明らかになってきたことから、以下にそれらの幾つかを上げる。

6. 1 空間線量率から個人線量の推定

・体格差が個人線量測定に与える影響

今回の調査は成人のみを対象に行い、児童は含めなかった。この理由は、児童に実際に個人線量計を着用しての測定が困難であるためである。体格の違いにより、同一の放射線場においても外部放射線の人体への入射条件が異なるため、個人線量にも差異が生じることが予想される。成人と体格が異なる児童において、空間線量と個人線量の関係が、今回の成人を用いた結果とどの程度異なるのかを把握することは重要である。今後、児童を模擬したファントムを用いて、現地および実験室において測定を行う必要があると考えられる。さらに、自治体の行っている個人線量測定結果について、児童と成人の結果の比較といった既存データの解析も有効と考えられる。

・屋内と屋外で個人の姿勢が個人線量に及ぼす影響 個人線量に影響を及ぼす影響の要因の一つに姿勢が挙げられる。特に、職業上、長時間にわたって同じ姿勢を取り続ける場合等の影響は重要である。今回の調査では、屋外では歩行するケースが大部分であったため、農作業の様に必要に応じ前屈姿勢等をとるケースに関しては詳細な調査は行っていない。また屋内においては、多くの時間は座位が多いと思われる。姿勢への影響は空間線量分布と密接にかかわることから、空間線量分布の詳細な調査と姿勢の影響をケーススタディーとして行うことも、将来的に必要と思われる。

・個人線量計のエネルギー応答特性の影響

各メーカーの個人線量計はそれぞれ固有のエネルギー応答特性を有することから、生活環境における様々な場所の放射線場に対する応答は、各メーカーの個人線量計間で系統差があるものと予想される。今回の調査で実施したように、同一環境での複数タイプの個人線量計の比較試験を更に蓄積するとともに、場のガンマ線スペクトルの分類化を行うことが、

個人線量測定の精度向上に有効であると考えられる。

・空間線量分布の影響

屋内と屋外の放射線分布の不均一性の影響、建物の形状による屋内の放射線分布の変化の影響、周囲の建屋による放射線遮蔽状況の影響、積雪と降雨の気象条件の影響は個人線量に影響を及ぼし得る。しかし、実地測定の下でこれらすべての影響に関する知見を得ることは困難であり、シミュレーション等を援用した調査が有効である場合がある。これらの調査は、個人線量の低減方法を検討する上で重要な知見を与えると思われる。

また、第 4 章の 2. で述べたように、空間線量率の高い環境での建屋の低減係数に関する実測データが不足している。実測データは上記のシミュレーション等を裏付ける意味で重要であり、追加測定が望まれる。

・地理的影響

今回の調査区域（山間部）においては、空間線量に一定の定数（0.7）を乗ずることによって個人線量（大人）を適切に推定できることがわかったが、地形や照射方向などの条件が異なる山間部以外地域においても同じ定数を用いて個人線量を推定できるか否かについては、当該地域において今回同様、空間線量率と個人線量の関係について調査し、確認する必要がある。

6. 2 事故以前の空間線量率（バックグラウンド）の評価

本調査において、生活パターンによる個人線量の推定では、自然放射線（バックグラウンド）による空間線量率を $0.04 \mu\text{Sv/h}$ と仮定した。この数値は厳密には地域差があるものと思われるが、必要に応じて見直すことも考えられる。

6. 3 ガンマ線波高分布データの活用

今回は一部しか行っていないが、建屋内外で計測されたガンマ線波高分布をアンフォーリングすることにより検出器に入射するガンマ線エネルギースペクトルを得ることができる。得られたガンマ線スペクトルから、セシウムと自然放射線のそれぞれの線量寄与を分離して評価することが可能となる。

6. 4 生活時間の推定

本調査を基にした年間個人線量の推定では、NHK の国民生活時間調査 2010 のデータ⁹⁾を用いたが、より精緻な個人線量の推定を行うためには、地元住民の実際の生活行動に関する情報が必要である。但し、その際、個人のプライバシーにも十分に配慮する必要がある。他方、除染が行われ空間線量率が概ね $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 以下となった地域においては、屋内外の滞在時間の際による個人線量の推定誤差は小さいと予想される。

謝辞

今回の調査に際しては、田村市役所、都路行政局、川内村役場、飯舘村役場の方々、また測定のために自宅やその農地をご提供いただいた住民の方々に多大な協力をいただきました。ここに改めまして感謝の意を表します。

参考資料

- 1) 原子力規制委員会, 第4回帰還に向けた安全・安心対策に関する検討チーム,
平成25年11月11日,
URL:http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/kan_kentou/20131111.html
(2014年4月17日閲覧).
- 2) International Commission on Radiological Protection (ICRP). Conversion
Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation:
ICRP Publication 74 (1996).
- 3) 四野宮貴幸 他, 放射線モニタリングシステム「ラジプローブ」, 資源環境対策,
48(1), pp. 58-61(2012).
http://www.nirs.go.jp/information/press/2011/10_18.shtml (2014年4月17日閲覧).
- 4) IAEA: Planning For Off-Site Response to Radiation Accidents in Nuclear
Facilities (IAEA-TECDOC-225),
URL:http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/11/531/11531386.pdf (2014年4月17日閲覧).
- 5) International Commission on Radiological Protection (ICRP), Conversion
Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation
Exposures: ICRP Publication 116 (2010).
- 6) K. Akahane, S. Yonai, S. Fukuda, N. Miyahara, H. Yasuda, K. Iwaoka, M. Matumoto,
A. Fukumura, M. Akashi, NIRS external dose estimation system for Fukushima
residents after the Fukushima Dai-ichi NPP accident, Sci Rep. 3:1670, doi:
10.1038/srep01670.
- 7) 日本原子力学会放射線工学部会線量概念検討WG, 「測定値(空气中放射線量)と実
効線量」(2012年7月改訂).
URL:http://www.aesj.or.jp/~rst/fukushima/120726_01.pdf (2014年4月17日閲覧).
- 8) 原子力規制委員会, 「東京電力福島第一原子力発電所事故による環境モニタリング等
データベース」
URL:https://mapdb.jaea.go.jp/mapdb/portals/102005/?prefectures=07&category_

b=b102&year=2011%2C2012 (2014 年 4 月 17 日閲覧).

9) NHK 放送文化研究所(編), データブック国民生活時間調査 2010 年, NHK 出版(2011).

10) 原子力規制委員会, 「東京電力福島第一原子力発電所事故による環境モニタリング等データベース. 第 7 次航空機モニタリングの空間線量率の測定結果(H25. 9. 28 換算)」.

URL:<http://radb.jaea.go.jp/mapdb/portals/670/>? (2014 年 4 月 17 日閲覧).

11) (独) 日本原子力研究開発機構, 「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報告書」, 平成 24 年 6 月.

URL:http://www.jaea.go.jp/fukushima/airbornemonitoring_report.html (2014 年 4 月 17 日閲覧).

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b)ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d)ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f)放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe≡ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

(a) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≡ 」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

