

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

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

文部科学省の平成23年度放射能測定調査委託事業による委託業務として、日本原子力研究開発機構が実施した平成23年度「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」の成果を取りまとめたものである。

目次

1. はじめに	1
2. 航空機モニタリングの経緯.....	2
3. 航空機モニタリングシステム.....	10
3.1 MEXT システム.....	11
3.2 NUSTEC システム	12
3.3 OYO システム	13
3.4 FUGRO システム	14
3.5 システムの比較.....	15
3.5.1 点線源によるレスポンス確認.....	15
3.5.2 リファレンスライン.....	18
3.6 計算コードによる MEXT システム特性評価.....	21
4. データ採取及び解析方法.....	23
4.1 事前確認.....	23
4.1.1 検出器の健全性確認.....	23
4.1.2 機体の汚染確認.....	24
4.1.3 ヘリコプタの機底の遮蔽.....	25
4.2 データ採取方法.....	27
4.2.1 ヘリコプタの選定.....	27
4.2.2 フライト方法.....	31
4.2.3 テストライン.....	32
4.2.4 結果の妥当性確認のための地上測定.....	33
4.3 解析方法.....	34
4.3.1 線量換算係数 (CD).....	35
4.3.2 空気減弱係数(AF).....	39
4.3.3 線量率-放射能換算係数.....	41
4.3.4 バックグラウンドの減算方法.....	41
4.3.5 海拔高度による宇宙線の影響.....	46
4.3.6 Rn 子孫核種の影響.....	46
4.3.7 減衰補正.....	48
4.3.8 検出下限値及び信頼性.....	49
4.3.9 全線量率の検出下限.....	50
4.3.10 全線量率換算の不確かさ.....	51
4.3.11 放射性 Cs の沈着量の検出下限.....	52
4.3.12 放射性 Cs の沈着量の不確かさ.....	53

4.4	マッピング方法	53
4.4.1	補間方法	54
4.4.2	他の補間法との比較	55
5.	結果	58
5.1	線量率マップ	58
5.2	放射性 Cs の沈着量マップ	58
6.	考察	63
6.1	地上の測定結果との比較	63
6.2	測定時期における比較	64
6.3	三次元マップ	67
6.4	海拔高度と放射性物質の分布	68
6.5	降雪の影響	71
6.6	地質図との比較	73
6.6.1	北海道	76
6.6.2	東北地方	79
6.6.3	関東地方	82
6.6.4	中部地方	84
6.6.5	近畿地方	86
6.6.6	中国地方	88
6.6.7	四国地方	91
6.6.8	九州地方	93
6.6.9	南西諸島	96
6.6.10	地質図との対比のまとめ	96
7.	まとめ	98
	謝辞	99
	参考文献	99
Appendix 1	航空機モニタリング検討委員会	102
Appendix 2	テストラインデータ	138
Appendix 3	BG-index 及び Cs-index	152
Appendix 4	In-situ Ge 測定データ	159
Appendix 5	県別の線量率及び放射性 Cs の沈着量マップ	164

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に起因して、福島第1原子力発電所の事故（以下、福島原発事故）が発生した。事故により、周辺環境に放射性物質が拡散し、その影響を評価することが急務となった。短時間で、広域のモニタリングを実施する方法として、航空機モニタリング（Aerial Radiation Monitoring: ARM）が挙げられる。

航空機モニタリングのスリーマイル島の事故やチェルノブイル原子力発電所事故を受けて、欧米では技術開発が進められており、特に米国では核実験場等を測定した多くの実績を有し、多数の機器を所有しており、緊急時における運用方法が整備されている^{1,2)}。

我が国において航空機モニタリングは、1979年に起きたスリーマイル原子力発電所事故に利用されて以来、我が国にでも日本原子力研究所を中心に開発が進められた。森内らは1980年から5年間にわたって航空機γ線サーベイシステム（Aerial radiological survey and assessment system; ARSAS）の開発を行い、基本的な航空機サーベイの方法を確立した^{3,4)}。また、Saito and Moriuchiはガス状の放射性物質を航空機モニタリングで測定する際の換算係数をシミュレーション計算から求め、係数として与えている⁵⁾。その後、航空機モニタリングの技術は原子力安全技術センターに引き継がれ、原子力防災における放射線分布を早期に計測するツールとして整備されてきた⁶⁾。

福島原発事故時には、事故直後から米国エネルギー省（DOE）と文部科学省により、航空機モニタリングを実施してきた。しかしながら、我が国においては指針等⁷⁾で原子力防災としての航空機モニタリングが位置づけられてはいたが、今回のような広範囲の測定に対応できるような、航空機モニタリングのデータ採取方法やデータ解析方法については、事故時点においてルーチンベースで整備されていたとは言い難く、今回、モニタリングと並行してモニタリング方法を構築するとともに、得られた結果を考察しつつ、結果に影響を与えるパラメータについて考察してきた。特に、バックグラウンドとなる天然の放射線との識別方法や地上の線量に換算するパラメータの設定には、試行錯誤を重ねてきた⁸⁾。

本モニタリングは、我が国初の、大規模な原子力災害における日本全域の航空機モニタリングを行った結果であり、すでに文科省のHP等で公開されている汚染マップは様々なメディアや研究に活用されている⁹⁾。本資料では、事故後から1年かけて実施した航空機モニタリングの結果とその方法についてまとめる。

2. 航空機モニタリングの経緯

航空機モニタリングは、平成 23 年 3 月 25 日に文科省によりプレス発表された「文科省航空機モニタリング行動計画¹⁰⁾」に則り、平成 23 年 4 月 5 日から米国エネルギー省 (DOE) と NUSTEC によって「第 1 次モニタリング」として発電所から 80 km 圏内を実施した。また、平成 23 年 5 月 17 日から「第 2 次モニタリング」として NUSTEC により原発 80-100 km 圏内が実施された。その後、平成 23 年 5 月 30 日から行われた「第 3 次モニタリング」からは、文部科学省が主体として実施することになり、日本原子力研究開発機構 (以下、原子力機構) が加わって、発電所から 80 km 圏内を実施した。さらに、100 km 圏外にも放射性物質が拡散していることが予想されたため、平成 23 年 6 月 21 日から福島周辺県の宮城県、栃木県、茨城県を実施した後、平成 23 年 8 月 2 日から、文科省委託事業として、原子力機構が主体となり「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」として、東日本全域の航空機モニタリングが実施された。その後、発電所周辺を、平成 23 年 10 月 22 日から「第 4 次モニタリング」として 80 km 圏内を、平成 24 年 2 月 6 日からは、「警戒区域及び計画的避難区域における航空機モニタリング」として実施した。また、本委託事業を拡大する形で、平成 24 年 1 月 30 日からは、西日本等における航空機モニタリングを実施した。航空機モニタリングの一連のスケジュールと実績について Table 2-1 及び Table 2-2 に示す。

Table 2-1 Aerial monitoring schedul

機器・機体		2011年										2012年					
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	
MEXT-1	C-12,UH-1	[第1次] 60 km 圏内															
	UH60			[第3次] 40 km 圏内					[第4次] 42 km 圏内								
	防災隊			[宮城]	[栃木]	[茨城]	[山形]	[群馬]									
	民間機							[秋田]	[山梨/富山/愛知]				[警戒区域及び 計画的避難区域]	[大分/宮崎/ 熊本/鹿児島]	[沖縄]	[栃木]	[宮城]
MEXT-2	S76											[三重/滋賀]					
	Bell430														[三重/ 滋賀]	[京都/ 兵庫]	[北海道]
MEXT-3	Bell412SP											[長崎/佐賀/福岡]	[山口/ 広島]				
	Bell412EP														[群馬]	[鳥取/ 島根]	[福島西部/ 群馬残分]
NUSTEC	Bell412EP	[第1次] 60-80 km	[第2次] 80-100 km	[第3次] 40-80 km			[福島西部]	[新潟]	[長野]	[青森]	[第4次] 40-80 km			[奈良/和歌山/大阪]	[茨城]	[北海道]	
OYO	AS350B3						[埼玉]	[岩手]	[石川]				[愛媛/高知/徳島/香川/岡山]			[北海道]	
FUGRO	AS350B1						[千葉/東京神奈川/静岡/岐阜/福井]										

Table 2-2 Detail schedule of Aerial monitoring

モニタリング名	実施場所	システム	ヘリ	実施主体	実施者	開始日	終了日	フライト時間 (回数)	備考 (プレス発表日)
第1次	発電所 60 km 圏内	—	米軍機 (C-12,UH-1)	DOE	DOE	H23/04/06	H23/04/29	(42 回)	1~2 km 間隔メッシュ (H23/05/06)
	発電所 60-80 km	—	民間機 (Bell412EP)	MEXT	NUSTEC				
第2次	発電所 80-100 km 南側 120 km 程度	—	民間機 (Bell412EP)	MEXT	NUSTEC	H23/05/18	H23/05/26	(13 回)	3~5 km 間隔メッシュ (H23/06/16)
第3次	発電所 40 km 圏内	MEXT-1	防衛省 (UH60)	MEXT	NUSTEC,JAEA	H23/05/31	H23/07/02	(29 回)	2 km 程度間隔メッシュ (H23/07/08)
	発電所 40-80 km	NUSTEC	民間機 (Bell412EP)	MEXT	NUSTEC				
宮城県	発電所 100 km 以遠の 北部	MEXT-1	防災ヘリ (BK117)	MEXT	NUSTEC,JAEA	H23/06/22	H23/06/30	20:00 (12 回)	3 km 間隔メッシュ (H23/07/20)
栃木県	栃木県全域	MEXT-1	防災ヘリ (Bell412EP)	MEXT	NUSTEC,JAEA	H23/07/12	H23/07/16	19:30 (12 回)	3 km 間隔メッシュ (H23/07/27)
茨城県	発電所概ね 120 km 以 遠の南部	MEXT-1	防災ヘリ (川崎 BK117-C2 型)	MEXT	NUSTEC,JAEA	H23/07/26	H23/08/02	11:30 (8 回)	3 km 間隔メッシュ 県南一部は 1.5 km 間隔メッシュ (H23/08/30)
山形県	発電所概ね 100 km 以 遠の全域	MEXT-1	防災ヘリ (AS365N2)	MEXT	NUSTEC,JAEA	H23/08/09	H23/08/15	31:00 (24 回)	3 km 間隔メッシュ (H23/09/08)
福島県西部	発電所概ね 100 km 以 遠の全域	NUSTEC	民間機 (Bell412EP)	MEXT	NUSTEC,JAEA	H23/08/16	H23/08/28	19:30 (8 回)	3 km 間隔メッシュ (H23/09/12)

モニタリング名	実施場所	システム	ヘリ	実施主体	実施者	開始日	終了日	フライト時間 (回数)	備考 (プレス発表日)
群馬県	群馬県全域	MEXT-1	防災ヘリ (Bell412EP)	MEXT	JAEA	H23/08/23	H23/09/08	21:00 (11回)	3 km 間隔メッシュ (H23/09/27)
埼玉県	埼玉県全域	OYO	民間機 (AS350B3)	MEXT	OYO	H23/09/08	H23/09/12	16:00 (16回)	3 km 間隔メッシュ (H23/09/29)
千葉県	千葉県全域	FUGRO	民間機 (AS350B1)	MEXT	FUGRO	H23/09/09	H23/09/12	20:00 (9回)	3 km 間隔メッシュ (H23/09/29)
東京都及び 神奈川県	東京都及び 神奈川県全域	FUGRO	民間機 (AS350B1)	MEXT	FUGRO	H23/09/14	H23/09/18	29:30 (10回)	3 km 間隔メッシュ 東京都北東部一部は 1.5 km 間隔メッシュ (H23/10/06)
新潟県	新潟県全域	NUSTEC	民間機 (Bell412EP)	MEXT	NUSTEC	H23/08/30	H23/09/23	57:30 (28回)	3 km 間隔メッシュ (H23/10/12)
秋田県	秋田県全域	MEXT-1	民間機 (Bell412SP)	MEXT	JAEA	H23/09/14	H23/09/28	36:00 (15回)	3 km 間隔メッシュ (H23/10/12)
岩手県	岩手県全域	OYO	民間機 (AS350B3)	MEXT	OYO	H23/09/14	H23/10/13	61:00 (70回)	3 km 間隔メッシュ 県南一部は 1.5 km 間隔メッシュ (H23/11/11)
静岡県	静岡県全域	FUGRO	民間機 (AS350B1)	MEXT	FUGRO	H23/09/23	H23/09/30	38:30 (13回)	3 km 間隔メッシュ (H23/11/11)

モニタリング名	実施場所	システム	ヘリ	実施主体	実施者	開始日	終了日	フライト時間 (回数)	備考 (プレス発表日)
長野県	長野県全域	NUSTEC	民間機 (Bell412EP)	MEXT	NUSTEC	H23/09/24	H23/10/07	51:30 (23回)	3 km 間隔メッシュ (H23/11/11)
山梨県	山梨県全域	MEXT-1	民間機 (Bell412SP)	MEXT	JAEA	H23/09/30	H23/10/04	17:00 (10回)	3 km 間隔メッシュ (H23/11/11)
岐阜県	岐阜県全域	FUGRO	民間機 (AS350B1)	MEXT	FUGRO	H23/10/05	H23/10/12	46:30 (15回)	3 km 間隔メッシュ (H23/11/11)
富山県	富山県全域	MEXT-1	民間機 (Bell412SP)	MEXT	JAEA	H23/10/07	H23/10/09	12:30 (7回)	3 km 間隔メッシュ (H23/11/11)
愛知県	愛知県全域	MEXT-1	民間機 (Bell412SP)	MEXT	JAEA	H23/10/16	H23/10/20	18:00 (8回)	3 km 間隔メッシュ (H23/11/25)
青森県	青森県全域 (前半)	NUSTEC	民間機 (Bell412EP)	MEXT	NUSTEC	H23/10/07	H23/10/20	36:00 (16回)	3 km 間隔メッシュ (H23/11/25)
	青森県全域 (後半)	NUSTEC	民間機 (Bell412EP)	MEXT	NUSTEC	H23/11/01	H23/11/01	4:30 (2回)	3 km 間隔メッシュ (H23/11/25)
石川県	石川県全域	OYO	民間機 (AS350B3)	MEXT	OYO	H23/10/17	H23/10/24	17:00 (16回)	3 km 間隔メッシュ (H23/11/25)
福井県	福井県全域	FUGRO	民間機 (AS350B1)	MEXT	FUGRO	H23/10/17	H23/10/20	21:00 (7回)	3 km 間隔メッシュ (H23/11/25)

モニタリング名	実施場所	システム	ヘリ	実施主体	実施者	開始日	終了日	フライト時間 (回数)	備考 (プレス発表日)
第4次	発電所 42 km 圏内	MEXT-1	防衛省 (UH-60J)	MEXT	NUSTEC, JAEA	H23/10/25	H23/10/28	31:00 (7回)	1.8 km 程度間隔メッシュ 沿岸部は 300 m 間隔メッシュ (H23/12/16)
	発電所 40-80 km	NUSTEC	民間機 (Bell412EP)		NUSTEC	H23/10/25	H23/11/05	40:00 (20回)	1.8 km 程度間隔メッシュ (H23/12/16)
警戒区域及び 計画的避難区域	警戒区域及び 計画的避難区域全域	MEXT-1	民間機 (Bell430EP)	MEXT	NUSTEC, JAEA	H24/02/06	H24/02/10	17:30 (7回)	1.8 km 程度間隔メッシュ (H24/02/24)
九州地方 沖縄県	長崎県、佐賀県、 福岡県全域	MEXT-3	民間機 (Bell412SP)	MEXT	JAEA	H24/01/30	H24/02/16	37:30 (18回)	5 km 間隔メッシュ (H24/05/11)
	大分県、宮崎県、 熊本県、鹿児島県全域	MEXT-1	民間機 (S76)	MEXT	JAEA	H24/02/16	H24/03/22	84:30 (32回)	5 km 間隔メッシュ (H24/05/11)
	沖縄県全域	MEXT-1	民間機 (S76)	MEXT	JAEA	H24/03/24	H24/03/29	11:00 (6回)	5 km 間隔メッシュ (H24/05/11)
四国地方	愛媛県、高知県、 徳島県、香川県全域	OYO	民間機 (AS350B3)	MEXT	OYO	H24/02/10	H24/02/28	64:30 (43回)	5 km 間隔メッシュ (H24/05/18)
近畿地方	三重県及び滋賀県全 域 (前半)	MEXT-1, MEXT-2	民間機 (S76)	MEXT	JAEA	H24/02/05	H24/02/12	13:00 (5回)	5 km 間隔メッシュ 2/12 のみ MEXT-1 機材使用 (H24/06/08)

モニタリング名	実施場所	システム	ヘリ	実施主体	実施者	開始日	終了日	フライト時間 (回数)	備考 (プレス発表日)
	三重県及び滋賀県全 域 (後半)	MEXT-2	民間機 (Bell430)	MEXT	JAEA	H24/04/10	H24/04/15	16:30 (9回)	5 km 間隔メッシュ (H24/06/08)
	奈良県、和歌山県、大 阪府全域	NUSTEC	民間機 (Bell412EP)	MEXT	NUSTEC	H24/02/08	H24/02/20	38:30 (17回)	5 km 間隔メッシュ (H24/06/08)
	京都府全域	MEXT-2	民間機 (Bell430)	MEXT	JAEA	H24/04/19	H24/04/21	12:00 (7回)	5 km 間隔メッシュ (H24/06/08)
	兵庫県全域	MEXT-2	民間機 (Bell430)	MEXT	JAEA	H24/04/23	H24/04/25	18:00 (10回)	5 km 間隔メッシュ (H24/06/08)
中国地方	山口県及び広島県全 域	MEXT-3	民間機 (Bell412SP)	MEXT	JAEA	H24/02/16	H24/02/27	31:30 (13回)	5 km 間隔メッシュ (H24/06/15)
	岡山県全域	OYO	民間機 (AS350B3)	MEXT	OYO	H24/03/07	H24/03/14	19:30 (12回)	5 km 間隔メッシュ (H24/06/15)
	鳥取県及び島根県全 域	MEXT-3	民間機 (Bell412EP)	MEXT	JAEA	H24/04/10	H24/04/24	33:30 (15回)	5 km 間隔メッシュ (H24/06/15)
北海道	道北及び道東方面	NUSTEC	民間機 (Bell412EP)	MEXT	NUSTEC	H24/04/27	H24/05/08	40:30 (20回)	5 km 間隔メッシュ
	道北及び道東方面	MEXT-3	民間機 (Bell412EP)	MEXT	JAEA	H24/05/17	H24/05/31	56:00 (20回)	5 km 間隔メッシュ

モニタリング名	実施場所	システム	ヘリ	実施主体	実施者	開始日	終了日	フライト時間 (回数)	備考 (プレス発表日)
	道央方面	MEXT-2	民間機 (S76)	MEXT	JAEA	H24/05/09	H24/05/18	35:30 (13回)	5 km 間隔メッシュ
	道南方面	OYO	民間機 (AS350B3)	MEXT	OYO	H24/05/10	H24/05/20	36:30 (27回)	5 km 間隔メッシュ
栃木県	栃木県全域	MEXT-1	民間機 (Bell430)	MEXT	JAEA	H24/04/02	H24/04/08	23:30 (10回)	3 km 間隔メッシュ
群馬県	群馬県全域 (前半)	MEXT-3	民間機 (Bell412EP)	MEXT	JAEA	H24/04/02	H24/04/07	19:00 (12回)	3 km 間隔メッシュ
	群馬県全域 (後半)	MEXT-3	民間機 (Bell412EP)	MEXT	JAEA	H24/05/05	H24/05/07	8:00 (4回)	3 km 間隔メッシュ
茨城県	発電所 80 km 以遠の 茨城県全域	NUSTEC	民間機 (Bell412EP)	MEXT	NUSTEC	H24/04/02	H24/04/07	31:00 (14回)	3 km 間隔メッシュ
宮城県	発電所 80 km 以遠の 宮城県全域	MEXT-1	民間機 (Bell430)	MEXT	JAEA	H24/04/10	H24/04/14	28:00 (10回)	3 km 間隔メッシュ
福島県西部	発電所 80 km 以遠の 福島県全域	MEXT-3	民間機 (Bell412EP)	MEXT	JAEA	H24/04/26	H24/05/01	22:00 (9回)	3 km 間隔メッシュ

3. 航空機モニタリングシステム

航空機モニタリングのシステム (Aerial radiation monitoring system: ARMS) は、通常大型の NaI 検出器が用いられる。我が国において、事故直後に、航空機モニタリングに使用できる機器は、NUSTEC が所有する機器 1 台 (以下、NUSTEC システム) と応用地質株式会社が所有する物理探査用の機器 1 台 (以下、OYO システム) であった。早急に測定を行う必要があったため、DOE から 1 台、オーストラリアのエアボーンメーカーである FUGRO 社から 1 台調達し、東日本の測定を行った。その後、DOE に借り受けた機器と同スペックの機器 (RSI 社製; 以下 MEXT システム) を 2 台導入し、測定を行った。システムの基本的な特徴を Table 3-1 に示す。また、それぞれのシステムの詳細な構成や特徴について以下に述べる。

Table 3-1 Specification of 4 ARMS systems

項目	MEXT システム	NUSTEC システム	OYO システム	FUGRO システム
製造メーカー	RSI 社 (Canada)	・システム：関西電子(株) ・検出器：EXPLORANIUM 社 (Canada)	・システム：SINTREX 社 (Canada) ・検出器：PICODAS 社 (Canada)	EXPLORANIUM 社 (Canada)
製造年度	2009 年度	2001 年度	1994 年度	1996 年度
検出器サイズ	2"x 4"x 16" NaI 3 本:1unit x 2 (1 unit :6.3L x 2)	低線量率用 4"x4"x16":4 本 中線量率用 3"φx3":1 本	4"x4"x16"NaI 下方検出器 8 本 (33.6L) 上方検出器 1 本 (4.2L)	4"x4"x16" NaI 検出器 4 本 (容量計：16.8L)
MCA ch	1024 ch	256 ch	256 ch	256 ch
測定エネルギー	0.02 ~ 3 MeV	0.05 ~ 3 MeV	0.2 ~ 3 MeV	0.05 ~ 3 MeV
ヘリコプター	・機内積込型のため機体を選ばない ・底に燃料タンクがない機体を選定	・検出器が機外取付型のため専用機 Bell412EP	・検出器が機外取付型のため専用機 AS350B3 (専用機)	・機内積込型のため機体を選ばない ・底に燃料タンクのない機体を選定 AS350B1 (アエロスパシアル社製)
サンプリングタイム	1 秒	1 秒	1 秒	1 秒

3.1 MEXT システム

MEXT システムのブロック図を Fig. 3-1 に示す。MEXT システムは、事故当時に DOE が持ち込んだシステムであり、RSI 社 (Canada) 製の機内に装着するタイプである。スペクトルは 1024 ch を有し、測定を開始すると 1 秒ごとにスペクトルデータ及び GPS による位置データがシステムに保存される。データ収集を行う RS501 に接続しているパソコン上には、現在の機体の位置及び計数率が表示される。また、外付けのバッテリーで駆動し、満タンの充電で 5 時間稼働が可能である。今後、MEXT のシステムは、DOE から借りたシステムを MEXT-1 とし、文部科学省が委託費で購入した 2 台を MEXT-2、MEXT-3 と表記する。

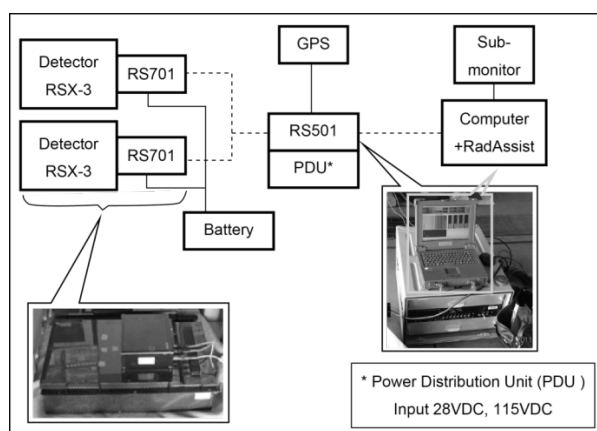


Fig. 3-1 Block diagram of MEXT system

3.2 NUSTEC システム

MEXT システムのブロック図を Fig. 3-2 に示す。NUSTEC システムは、事故当時に日本で唯一稼働できた原子力災害のために整備されてきた航空機モニタリングシステムである。検出部は、EXPLORANIUM 社 (Canada) であり、システムを 関西電子株式会社の製品を利用している。検出器は機外に配置し、低線量率用と中線量率用の 2 つの検出器が配置されている。位置データは GPS で計測するとともに、レーザー高度計で対地高度を測定できる。また、CCD カメラが搭載されており、測定場所を撮影することが可能である。システムの電源は機体から供給されているため、電源の心配はないが、搭載できる機体が航空法の修理改造検査に合格していなければならず、機体は専用機 (中日本航空 Bell 412) となる。本システムには、機体の位置情報をリアルタイムに表示できる機能がないため、別のアシスト PC により位置を確認しながらフライトする。

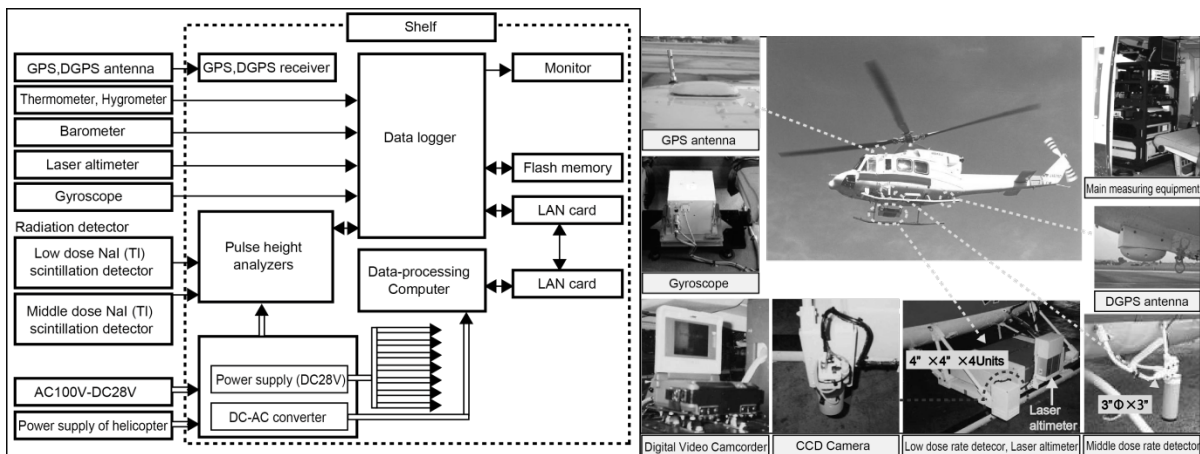


Fig. 3-2 Block diagram of NUSTEC system

3.3 OYO システム

OYO システムのブロック図を Fig. 3-3 に示す。本システムは、物理探査用に使用されてきたシステムであり、応用地質株式会社が所有している。本システムは、物理探査用であるが、 γ 線を測定できるシステムであったため、今回の作業に使用した。検出部は、PICODAS 社 (Canada)、システムを SINTREX 社 (Canada) の製品を利用している。検出器は、4 システムの中で一番大型であるが、ノイズ低減のため、低エネルギー側の計数をカットしており、線源効率は NUSTEC システム及び FUGRO システムと同程度になっている。位置データは GPS で採取している。本システムの検出器は機外搭載型であり、NUSTEC システムと同様に搭載できる機体が航空法の修理改造検査に合格していなければならない、機体は専用機 (中日本航空 AS350B3) となる。本システムには、機体の位置情報をリアルタイムに表示できる機能がないため、別のアシスト PC により位置を確認しながらフライトする。

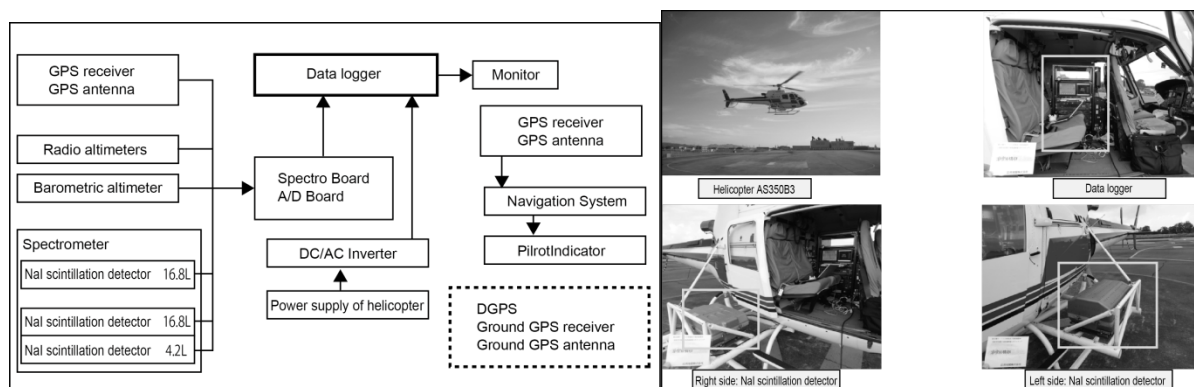


Fig. 3-3 Block diagram of OYO system

3.4 FUGRO システム

FUGRO システムのブロック図を Fig. 3-4 に示す。本システムは、オーストラリアのフグロエアボーン社が所有するシステムであり、東日本の測定時に投入した。検出部は、EXPLORANIUM 社 (Canada) の製品を利用している。本システムは、機内据え付け型であり、基底に遮蔽がなければ、機体を選ばない。また、位置情報は GPS で採取できるが、機体の位置情報をリアルタイムに表示できる機能がないため、別のアシスト PC により位置を確認しながらフライトする。

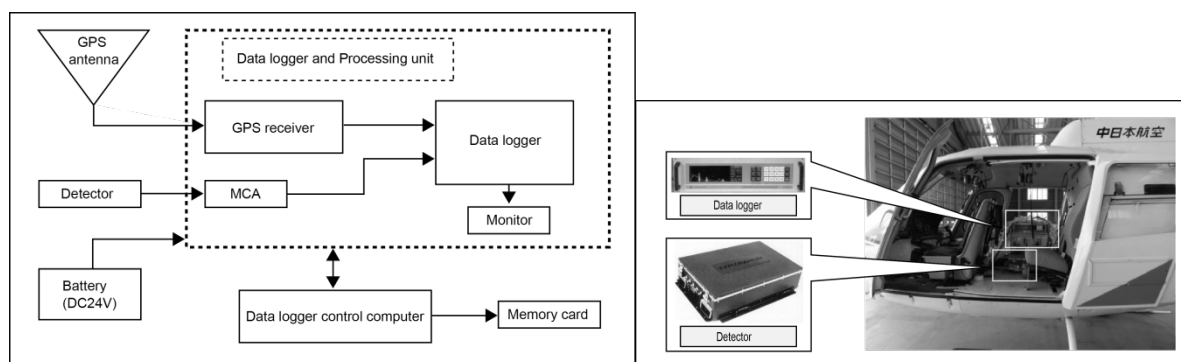


Fig. 3-4 Block diagram of FUGRO system

3.5 システムの比較

3.5.1 点線源によるレスポンス確認

各システムの比較を行うために、100 μCi (3.7 MBq) の ^{137}Cs 線源 (0.25 $\mu\text{Sv/h}$ at 1 m: 2012/4/1) により、1 $\mu\text{Sv/h}$ 当たりの計数率 (以下、レスポンス) を求めた。以下、線量率は周辺線量等量率 ($\mu\text{Sv/h}$) に統一して表記する。試験は検出器から 1 m 離れた場所に線源を置き、全計数率を測定した。レスポンスの表記は比較しやすいように、標準的な減弱係数である 0.0065 m^{-1} から 1000 ft (= 300 m) における換算係数として換算した。なお、MEXT システム以外は、航空機に設置されている条件で試験した。Table 3-2 に各システムのレスポンスを示す。このように、検出器の体積が大きな MEXT システムのレスポンスが一番よく、その他のシステムはほぼ同様であった。OYO システムの検出器は MEXT システムより大きい、低エネルギー側 (200 keV 相当) までノイズカットを目的として計測しないようにしていることが原因と考えられる。

Table 3-2 Response of ARMS by Cs-137 point source

System	Response of system (cps/ $\mu\text{Sv/h}$ at 1000 ft)	Ratio (Standardized MEXT-1)	Dead time (μs) #
MEXT-1	$1.93 \times 10^4 \pm 2.0 \times 10^2$	1.0	0.67
MEXT-2	$2.18 \times 10^4 \pm 2.8 \times 10^3$	1.1	-
MEXT-3	$2.36 \times 10^4 \pm 4.1 \times 10^3$	1.2	-
NUSTEC	$7.04 \times 10^3 \pm 3.8 \times 10^2$	0.61	16
OYO	$7.85 \times 10^3 \pm 7.7 \times 10^2$	0.68	-
FUGRO	$7.74 \times 10^3 \pm 4.7 \times 10^2$	0.67	-

*AF= 0.0065 m^{-1} として換算

Dead time: システム全体の不感時間 (システムは不感時間の補正機能を持つ)

また、MEXT-1 システム及び NUSTEC システムについて、2 線源法により、不感時間の測定を行った。MEXT-1 システムは $0.67 \mu\text{s}$ 、NUSTEC システムは $16 \mu\text{s}$ であった。各々の不感時間と計数率の関係を Fig. 3-5 に示す。NUSTEC システムは 10000 cps で数え落しが 16 % 程度となる。一方、MEXT-1 システムは、200000 cps でも 13 % 程度であり、ダイナミックレンジが広いことが分かる。すべてのシステムについて、Dead time 補正機能はついているものの、高線量地域の測定等では、数え落しの考慮が必要となる。なお、OYO、FUGRO のシステムについては、高線量区域の測定の予定がなかったため、データ採取していない。

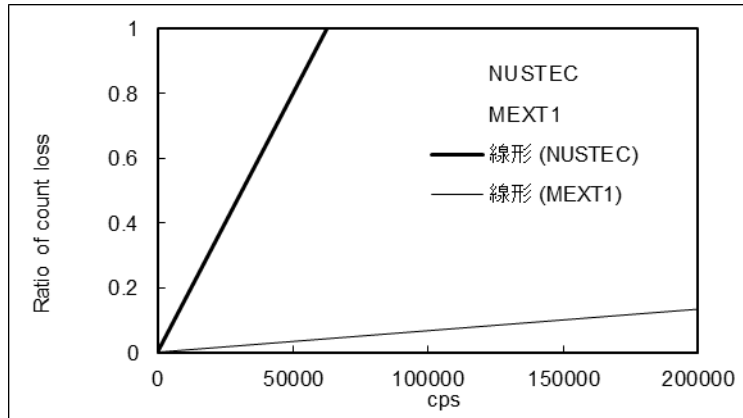


Fig. 3-5 Counting loss of NUSTEC and MEXT-1 system

Fig. 3-6 に MEXT-1 システムの ^{137}Cs 線源を計測した場合のスペクトルを示す。このように、 ^{137}Cs の全吸収ピークが確認できるとともに、低エネルギー側にコンプトン散乱によるスペクトルが確認できる。また、高エネルギー側には、自然放射性核種である ^{40}K や ^{208}Tl のピークが確認できる。検出器の大きさと線源距離の関係を確認するために、MEXT の 3 システムで行った線源と検出器の距離と計数率の関係を Fig. 3-7~3-9 に示す。線源と検出器の距離が 100 cm-300 cm までは指数関数でよく近似できが、50 cm では近似曲線から外れることが分かった。100 cm 以下では検出器のサイズから平行ビームとしてとらえられないことが分かる。また、各システム間に大きな差はなく、レスポンスも同等であることが分かった。線源による試験では 100 cm 以上の距離を取ることが望ましい。

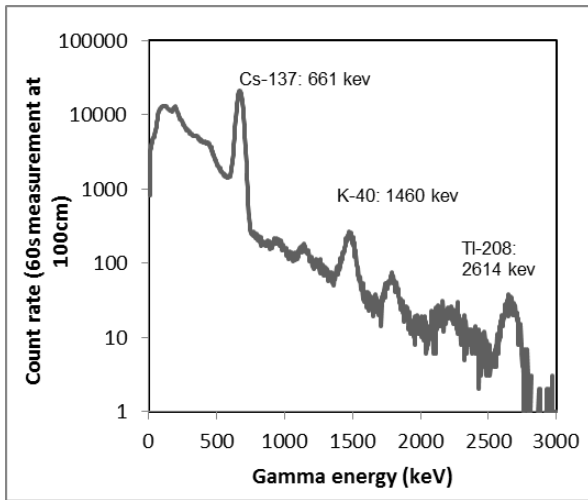


Fig. 3-6 Spectrum of MEXT-1 using ^{137}Cs source

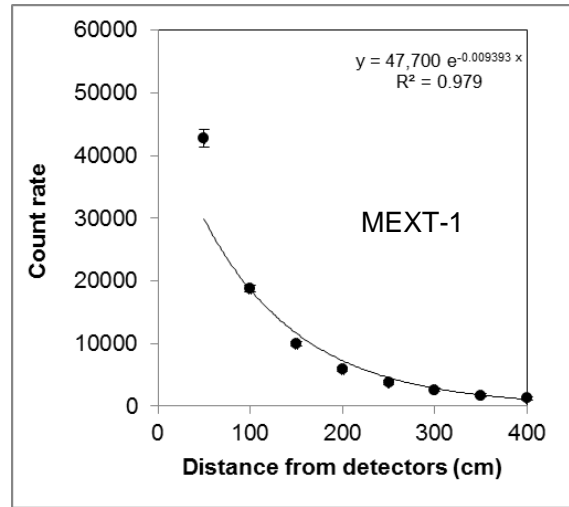


Fig. 3-7 Distance of between detector and ^{137}Cs source (MEXT-1)

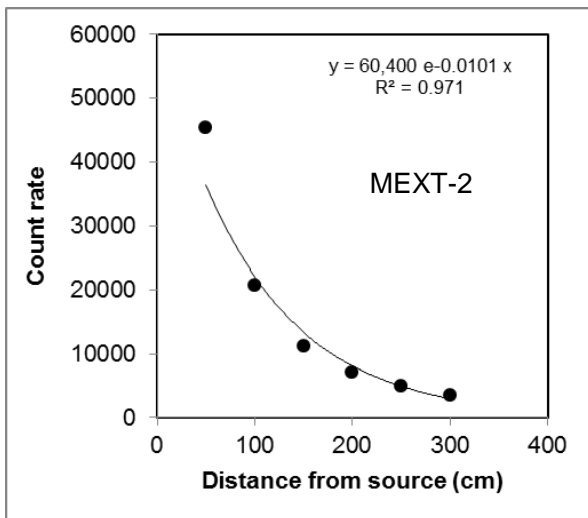


Fig. 3-8 Distance of between detector and ^{137}Cs source (MEXT-2)

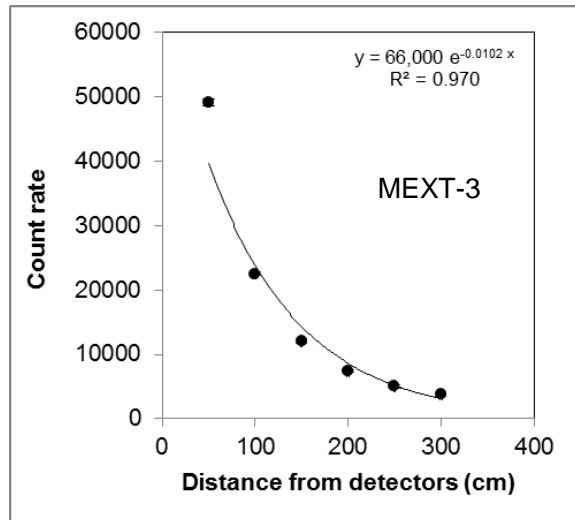


Fig. 3-9 Distance of between detector and ^{137}Cs source (MEXT-3)

3.5.2 リファレンスライン

各システムのレスポンスを比較するために、線量が一定な直線道路沿いの3 km程度の場所を福島県須賀川市と栃木県宇都宮市に設定し、上空を対地高度 1,000 ft (= 300 m) でフライトし、データを採取した。Fig. 3-10, 3-11 にリファレンスラインの場所を示す。リファレンスラインは、地上にてラインを中心として 600 m 程度のメッシュ状に 25 点、NaI サーベイメータで測定を行い、平均値を算出した。Table 3-3 に、地上測定の結果と 1000 ft (= 300 m)におけるレスポンスを示す。MEXT システムは、他のシステムに比べて、1.3~1.5 倍程度レスポンスがよいことが分かった。リファレンスライン上の計数率の変化について、Fig. 3-12 及び Fig. 3-13 に示す。計数率の変動は、すべてのシステムで同様な傾向を示した。

Table 3-3 Response of ARMS system at reference line

System	Sukagawa ref. line: Response of system (cps/ μ Sv/h at 1000 ft)	Utsunomiya ref. line: Response of system (cps/ μ Sv/h at 1000 ft)	Note
MEXT-1	1.33x10 ⁴	1.48x10 ⁴	Dose rate at 1 m (μ Sv/h) Sukagawa: 1.5 Utsunomiya : 0.09
MEXT-2_1#	-	1.53x10 ⁴	
MEXT-2_2*	-	1.56x10 ⁴	
MEXT-3	-	1.45x10 ⁴	
NUSTEC	1.06x10 ⁴	9.89x10 ³	
OYO	1.12x10 ⁴	8.16x10 ³	
FUGRO	1.22x10 ⁴	-	

Helicopter type: # S76 * Bell 430EP



Fig. 3-10 Sukagawa reference line

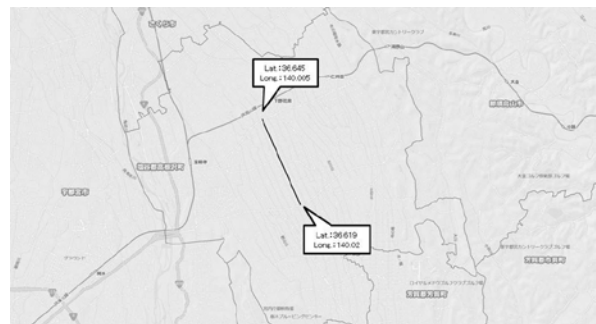


Fig. 3-11 Utsunomiya reference line

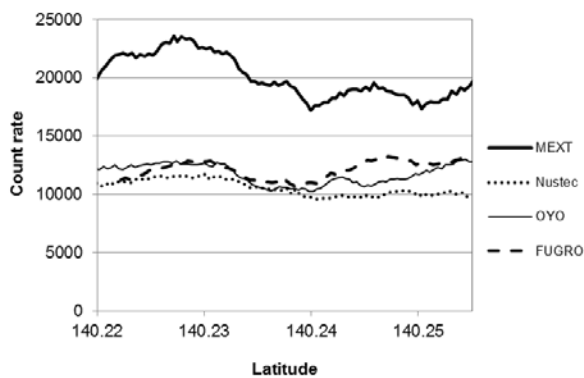


Fig. 3-12 Count rate of Sukagawa reference line

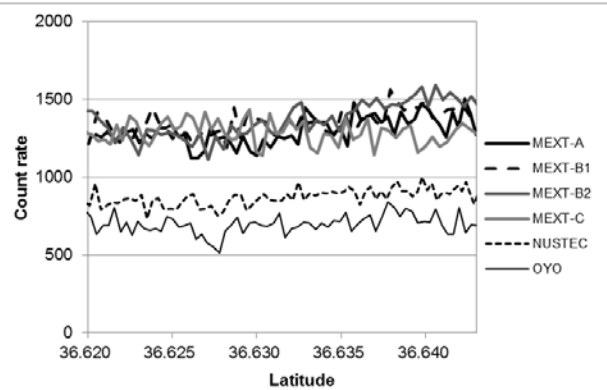


Fig. 3-13 Count rate of Utsunomiya reference line

Fig. 3-14 にリファレンスラインで採取したデータを積算したエネルギースペクトルを示す。各々、 ^{137}Cs , ^{134}Cs のエネルギーピークが検出されている。また、高エネルギー側には、自然放射性核種である ^{40}K や ^{208}Tl のピークが確認できる。さらに、最大の ch には宇宙線起源の計数が積算されていることが分かる。各スペクトルを比較するために、500-1000 keV までの計数と 0-500 keV の計数の比をピークコンプトン比として計算し、Table 3-4 に示す。MEXT システムは他の機器と比較して、検出器の厚みが薄いため、数値が低いと考えられる。

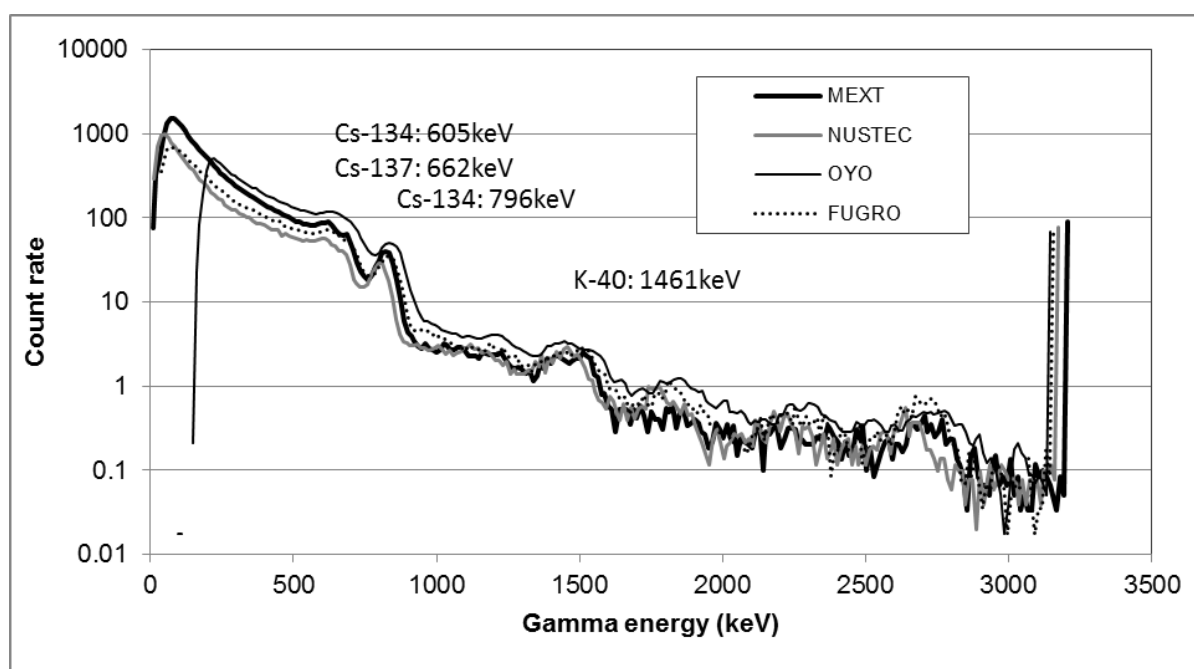


Fig. 3-14 Gamma spectra of ARMS system on the reference line (Sukagawa)

Table 3-4 Ratio of Peak and Compton of ARMS system at reference line

System	Sukagawa	Utsunomiya	Note
MEXT-1		4.0	4.1
MEXT-2_1 #		-	4.2
MEXT-2_2 *		-	4.3
MEXT-3		-	4.1
NUSTEC		3.2	3.3
OYO		3.2	3.7
FUGRO		3.0	-

Helicopter type: # S76 , * Bell 430EP

3.6 計算コードによる MEXT システム特性評価

計算コードを用いて、検出器の特性を明らかにするために、モンテカルロ計算コードを用いて MEXT システムの体系化を試みた (Fig. 3-15)。EGS5 で作成した体系が正しいことを確認するために、 ^{137}Cs の点線源を MEXT のシステムに照射した場合のスペクトルを計算し、実測値と比較した。計算コードには、光子・電子挙動シミュレーション用として実績のあるカスケードモンテカルロ計算コード EGS5 を使用した。EGS5 では検出器中の沈着量のエネルギー分布を求め、そのデータに検出器の波高出力形状に合わせたガウス関数処理を行い、最終的な波高分布を求めた。今回の校正試験では、コリメータを使用していないため、全計数率には実験室の床、壁や天井の散乱線の寄与が含まれることから、計算体系に実験室の床、壁や天井を含めた。計算結果を Fig. 3-16, 3-17 に示す。実験値と計算値はピークエネルギー計数率および全計数率比較で、形状、絶対値ともよい一致を示した(ピーク位置で 5%)。さらに、検出器のエネルギー特性を評価するため、検出器システムのみでの計算体系にし、平行ビーム入射での波高分布を計算した。

また、上空 300 m (= 1,000 ft) における測定範囲を推定するため、10 m の円状線源を検出器の真下から 100 m 毎に移動した場合の検出器のレスポンスを計算した。結果を Fig. 3-18 に示す。検出器の真下位置から 300 m で 10% 程度となった。これに、地上の検出器位置を中心とした円の面積をかけると、実際の空中で得られる計数の場所における割合となる。Fig. 3-19 に結果を示す。このように、300 m までの計数の割合は、積算で 70% 程度となる。検出器の周辺に遮蔽がない場合、300 m 上空から地上の半径 300 m の円内の放射性物質を計測しているといつてよい。

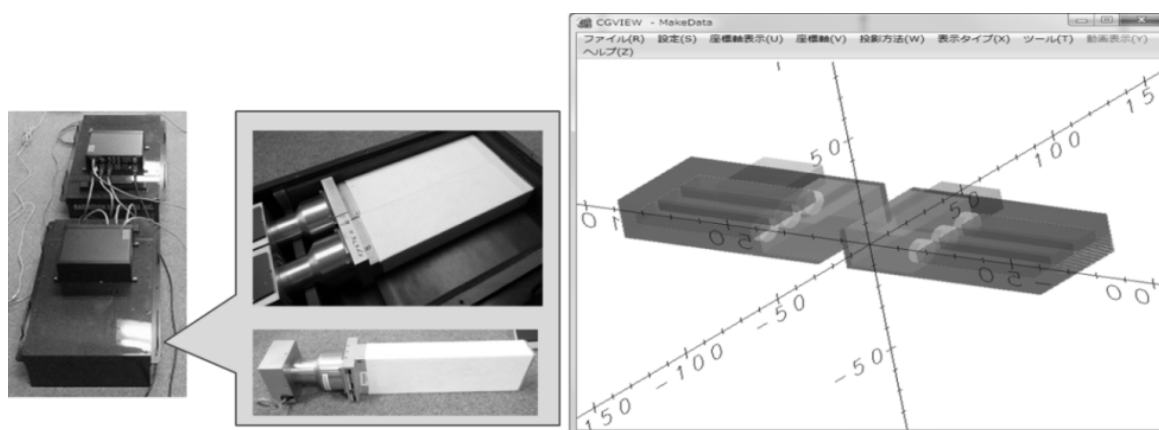


Fig. 3-15 Model of MEXT system

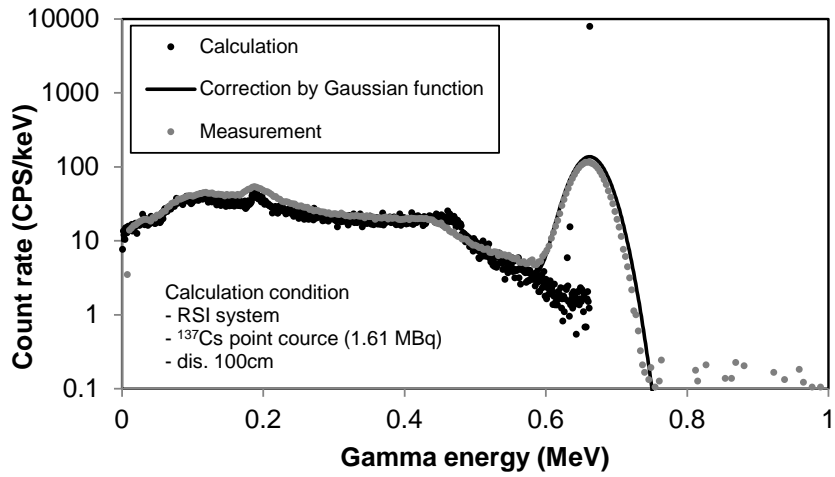


Fig. 3-16 Simulated spectrum of ¹³⁷Cs point source

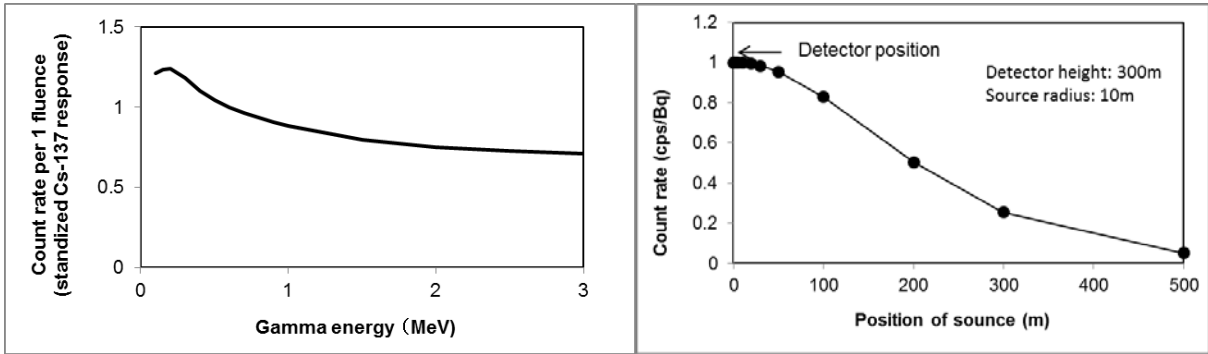


Fig. 3-17 Energy response of MEXT system using EGS5

Fig. 3-18 Distribution of angular response of MEXT system using EGS5

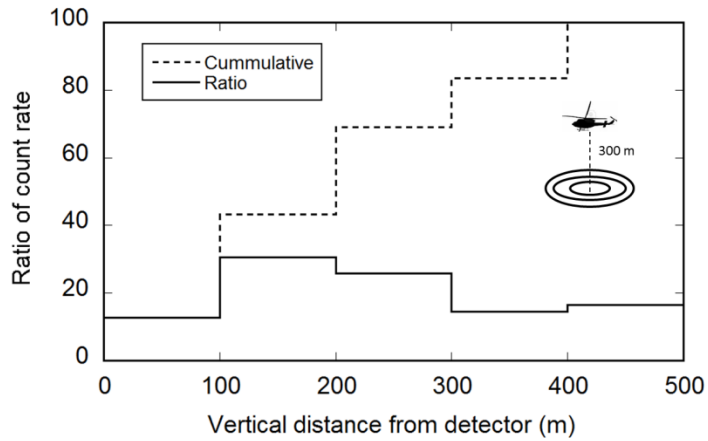


Fig. 3-19 Ratio of count rate at 300 m above the ground
(Detector response x square the circle)

4. データ採取及び解析方法

4.1 事前確認

フライトデータの確認の前に、以下の事項を確認した。

4.1.1 検出器の健全性確認

検出器のスペクトルデータを採取し、 ^{208}Tl の放出する 2614 keV のピーク半値幅が既定のあらかじめ定められた基準値以内であること（毎日）。Fig. 4-1 に FWHM と Gain の測定例を示す。気温の上昇に応じて、FWHM や Gain が上昇している。

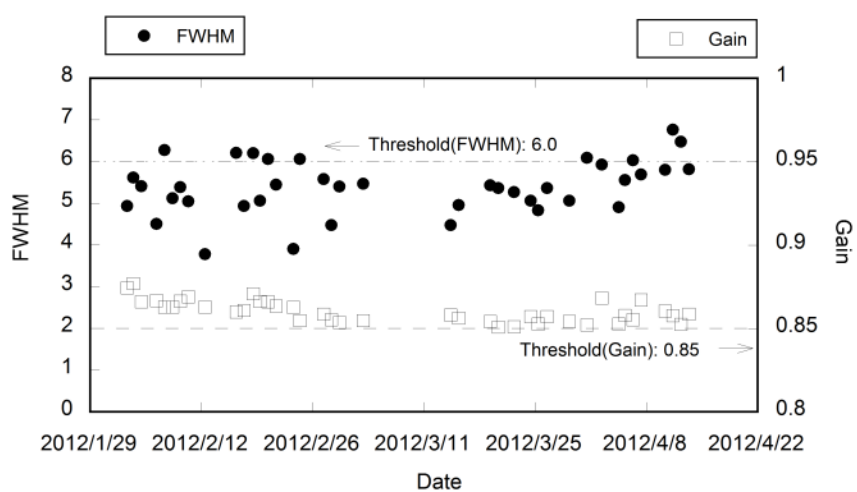


Fig. 4-1 System check of MEXT-1

4.1.2 機体の汚染確認

モニタリングの初期に機体に汚染が認められる機器で飛行した。汚染がある場合、バックグラウンドの計数が上昇し誤差要因となる。除染時の外観と除染前後における機内での MEXT-1 機器のスペクトルを Fig. 4-2 に示す。汚染は、ゴムパッキン等に付着しており、容易に除染できなかった。民間のヘリコプタでも事故直後に原発周辺をフライトした機体があるため、今後も確認が必要である。

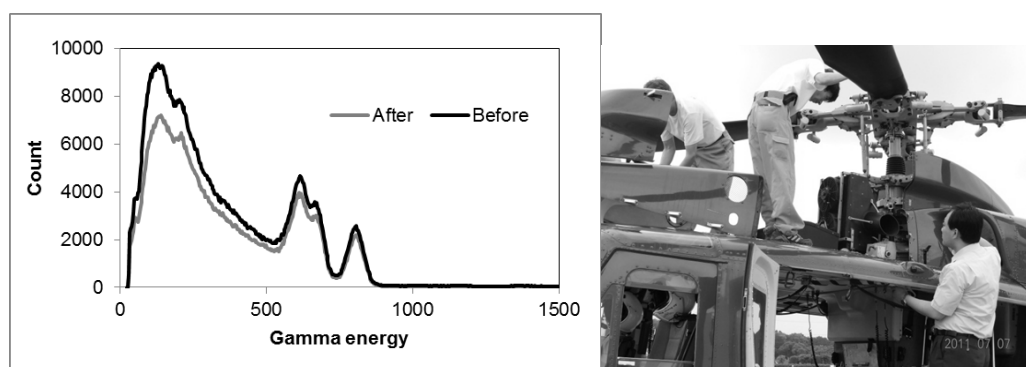


Fig. 4-2 Decontamination of helicopter

4.1.3 ヘリコプタの機底の遮蔽

ヘリコプタの機底には、構造物や燃料タンク等の放射線の遮蔽となるものが配置されていることが多い。特に、燃料タンクはフライト中に遮蔽状況が変化することが考えられ、解析時における補正が難しくなる。Fig. 4-3 に ^{137}Cs 線源で燃料量と遮蔽効果を確認した結果を示す。宮城県で用いた BK117 は燃料が単純に一つのタンクの中から消費されるため、フライト時間と平均燃費から遮蔽効果を補正することができる。一方、茨城県で使用した BK117 は燃料タンクがいくつかに分かれており、単純に燃料が減っていかないため、補正することが難しい。初期に使用したヘリコプタの機底の遮蔽状況について Table 4-1 に示す。このことから、ヘリコプタは機底に燃料タンクのない型を選定することとした。

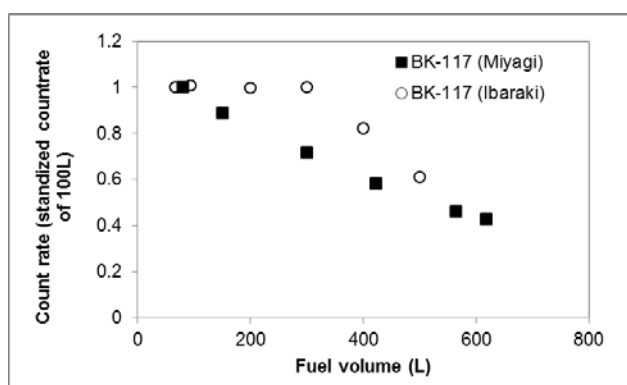


Fig. 4-3 Shielding by fuel tank in BK117

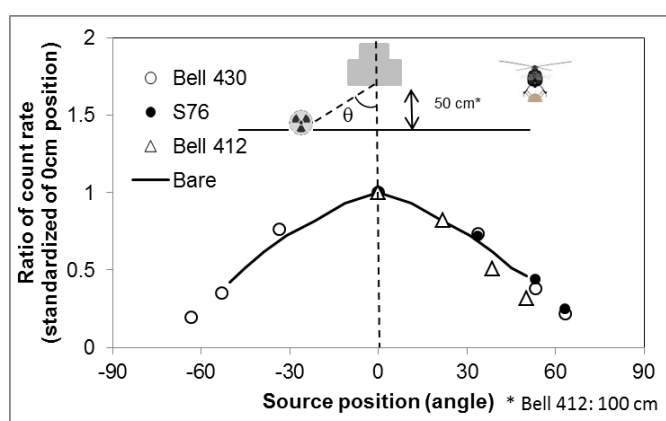


Fig. 4-4 Angler response of MEXT-1 in Helicopter

選定した3種のヘリコプタ (Bell 430, Bell 412, S76) の機底に線源を置いて進行方向に垂直に線源を移動した場合のレスポンスの変化を Fig. 4-4 に示す。また、Fig. 4-5, 4-6 に進行方向に平行に線源を移動した場合のレスポンスの変化を示す。ヘリコプタ外の結果と比較して、Bell430, S76 に

については同じ傾向にあり、機底の遮蔽厚が一定であることが分かる。一方、Bell412は 30° 以遠でレスポンスが減少することが分かった。これは、Bell412の機底の両端に燃料タンクが設置されていることに起因するものと考えられる。Fig. 4-5に示すように、Bell412の検出器から真下の遮蔽効果は、ヘリがない場合と比較してもほとんどない。これらの、遮蔽効果の違いを考慮し、解析することが必要である。

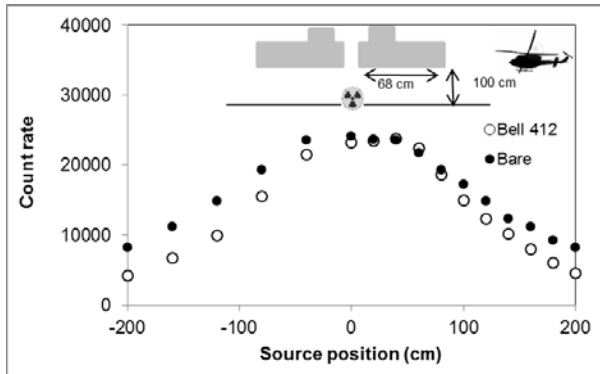


Fig. 4-5 Angler response of MEXT (Bell412)

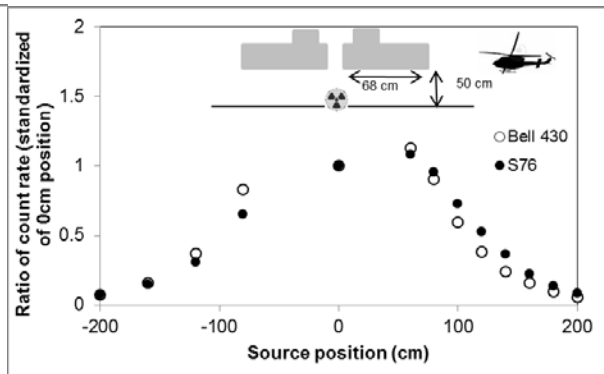


Fig. 4-6 Angler response of MEXT (Bell430, S76)

4.2 データ採取方法

4.2.1 ヘリコプタの選定

使用したヘリコプタを Table 4-2 に示す。全 14 機体を用いて実施した。ヘリコプタは比較的大型のものを選定し、機内搭載型の検出器を搭載する場合には、操作員と機器が干渉しないスペースが (目安として客室床面積 : 3.6 m² 以上) が確保されることを選定の基準とした。

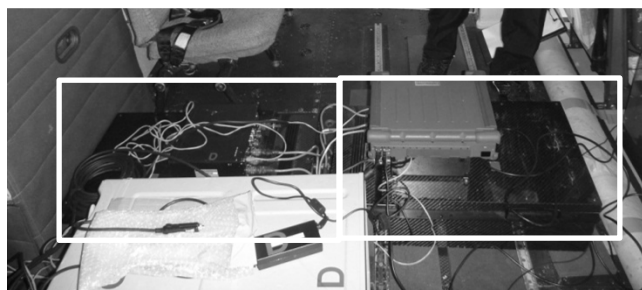
Table 4-1 Shielding factor of helicopter

Helicopter	Measurement Area	Detector position *	Conversion factor at 1000ft (cps/ μ Sv/h) #	Fuel attenuation factor (Max)
UH-60	Fukushima 40 km Area	Longi.config	1.83.E+04	0.98 (No tank)
BK117	Miyagi	Trans.config	1.40.E+04	0.43
Bell412EP	Tochigi	Longi.config	1.50.E+04	0.95 (No tank)
BK117	Ibaraki	Trans.config	1.28.E+04	0.61
AS365	Yamagata	Trans.config	1.83.E+04	0.72
Bell412EP	Gunma	Longi.config	1.45.E+04	0.82
Bell412SP	Akita etc.	Longi.config	1.81.E+04	0.95 (No tank)
S76	West japan	Longi.config	1.45.E+04	0.88 (No tank)

$\mu=0.0065 \text{ m}^{-1}$

* Detector position

(1) Longitudinal configuration



(2) Transversal configuration

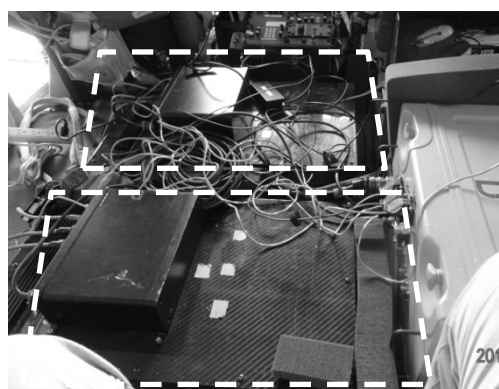


Table 4-2 Photo of helicopter

<p>所有元 : 防衛省 機 種 : UH-60 測定場所 : 第 3 次 (福島 10 km-40 km 圏内) 第 4 次 (福島 3 km-40 km 圏内)</p>	<p>所有元 : 宮城県防災航空隊 機 種 : BK117B-2 (JA9614) 測定場所 : 第 3 次 (宮城県)</p>
 <p>A black and white photograph of a UH-60 helicopter on a tarmac. Several people are visible around the helicopter, and a date stamp '2011 10 26' is in the bottom right corner.</p>	 <p>A black and white photograph of a BK117B-2 helicopter in flight against a clear sky. The helicopter is viewed from a side-on, slightly elevated angle.</p>
<p>所有元 : 茨城県防災航空隊 機 種 : BK117C-2 (JA298R) 測定場所 : 第 3 次 (茨城県)</p>	<p>所有元 : 群馬県防災航空隊 機 種 : Bell412EP (JA200G) 測定場所 : 第 3 次 (群馬県)</p>
 <p>A black and white photograph of a BK117C-2 helicopter on the ground. The helicopter is viewed from the side, and a date stamp '2011 07 22' is in the bottom right corner.</p>	 <p>A black and white photograph of a Bell412EP helicopter in flight. The helicopter is viewed from a side-on, slightly elevated angle, and a date stamp '2011 09 08' is in the bottom right corner.</p>
<p>所有元 : 山形県防災航空隊 機 種 : AS365N2 (JA98YA) 測定場所 : 東日本測定 (山形県)</p>	<p>所有元 : 朝日航洋株式会社 機 種 : Bell412SP (JA9616) 測定場所 : 東日本測定 (秋田県、山梨県、富山県、愛知県)</p>
 <p>A black and white photograph of an AS365N2 helicopter inside a hangar. The helicopter is viewed from the front-left, and a date stamp '2011 08 05' is in the bottom right corner.</p>	 <p>A black and white photograph of a Bell412SP helicopter in flight over a body of water. The helicopter is viewed from a side-on, slightly elevated angle, and a date stamp '2011 08 05' is in the bottom right corner.</p>

<p>所有元 : 中日本航空株式会社 機 種 : AS350B3 (JA02AH) 測定場所 : (OYO 班) 東日本測定 (埼玉県、岩手県、石川県) 西日本等測定 (愛媛県、高知県、徳島県、香川県、岡山県、北海道一部)</p>	<p>所有元 : 中日本航空株式会社 機 種 : AS350B1 (JA9743) 測定場所 : (FUGRO 班) 東日本測定 (千葉県、神奈川県、東京都、静岡県、岐阜県、福井県)</p>
	
<p>所有元 : 中日本航空株式会社 機 種 : Bell412EP (JA6767) 測定場所 : (NUSTEC 班) 第 1 次 (福島 60 km-80 km 圏内) 第 2 次 (福島 80 km-100 km 圏内) 第 3 次 (福島 40 km-80 km 圏内) 第 4 次 (福島 40 km-80 km 圏内) 警戒区域及び計画的避難区域 東日本測定 (福島西部、新潟県、長野県、青森県) 西日本等測定 (奈良県、和歌山県、大阪府、茨城県、北海道一部)</p>	<p>所有元 : 朝日航洋株式会社 機 種 : S76 (JA6655) 測定場所 : 西日本等測定 (B 班) (三重県一部、宮崎県、熊本県、大分県、鹿児島県、沖縄県、北海道一部)</p>
	

<p>所有元 : 朝日航洋株式会社 機 種 : Bell430 (JA6900) 測定場所 : 西日本等測定 (B 班中盤の測定) (三重県一部、滋賀県、京都府、兵庫県)</p>	<p>所有元 : 朝日航洋株式会社 機 種 : Bell412SP (JA9986) 測定場所 : 西日本等測定 (C 班) (長崎県、佐賀県、福岡県)</p>
	
<p>所有元 : 朝日航洋株式会社 機 種 : Bell412EP (JA6928) 測定場所 : 西日本等測定 (C 班) (鳥取県、島根県、群馬県、福島西部、北海道一部)</p>	<p>所有元 : 中日本航空株式会社 機 種 : Bell430 (JA05TV) 測定場所 : 東日本残分測定 (宮城県、栃木県)</p>
	

4.2.2 フライト方法

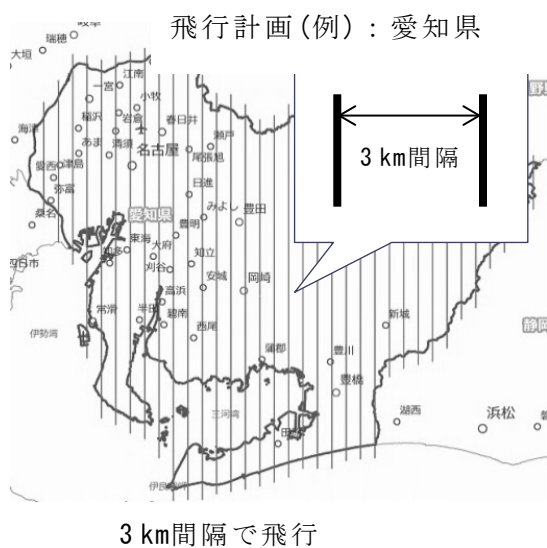
データを採取するためのフライト方法について以下に示す。

- ・測定対象 : ^{134}Cs , ^{137}Cs の放出する γ 線
- ・フライト航程 : 3 km メッシュ (80 km 圏内:1.8 km, 西日本・北海道: 5 km メッシュ)
- ・フライト方法 : サブモニタにメッシュ線を表示 (MEXT のみ)
- ・高度 : 対地高度 約 1,000 ft (= 300 m)
- ・速度 : 70~120 ノット (= 130~220 km/h)
- ・モニタリング条件 : 雨天の場合は基本的には中止
- ・人員 : 機器操作員 2 名

* 目安として、6000 ft (= 1800 m) 以上の測定は実施しなくてよい。

測線図の例を Fig. 4-7 に示す。測定員は、2 名乗車し、PC に表示される測線図を確認しながら測線に進入した時間と退出した時間をメモに残した。また、データは当日中にインターネット回線から指定したサーバーに転送し、解析作業に利用した。

① 東日本測定



② 西日本等測定

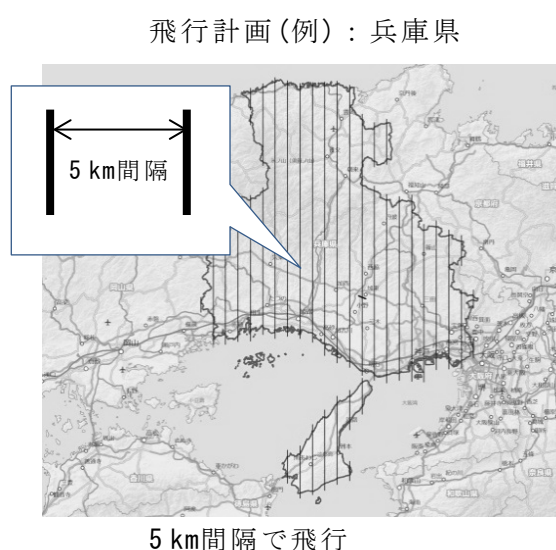


Fig. 4-7 Example of flight plan

4.2.3 テストライン

地上 1 m の線量率及び放射性 Cs の沈着量に換算するパラメータを算出するため、高度毎にデータを採取した。テストラインのイメージ図を Fig. 4-8 に示す。ここで、高度補正に用いる単位長さ当たりの放射線の減衰量を AF、線量率への換算係数を CD、線量率から放射能への換算係数を CF と表記する。テストラインは、線量が一定でヘリコプタのパイロットが目印となる道路上の約 3 km を 1 県ごとに設定し、その上空を 500 ft から 3,000 ft まで 500 ft 間隔で高度を変えながらフライトし、その間のデータを採取した。

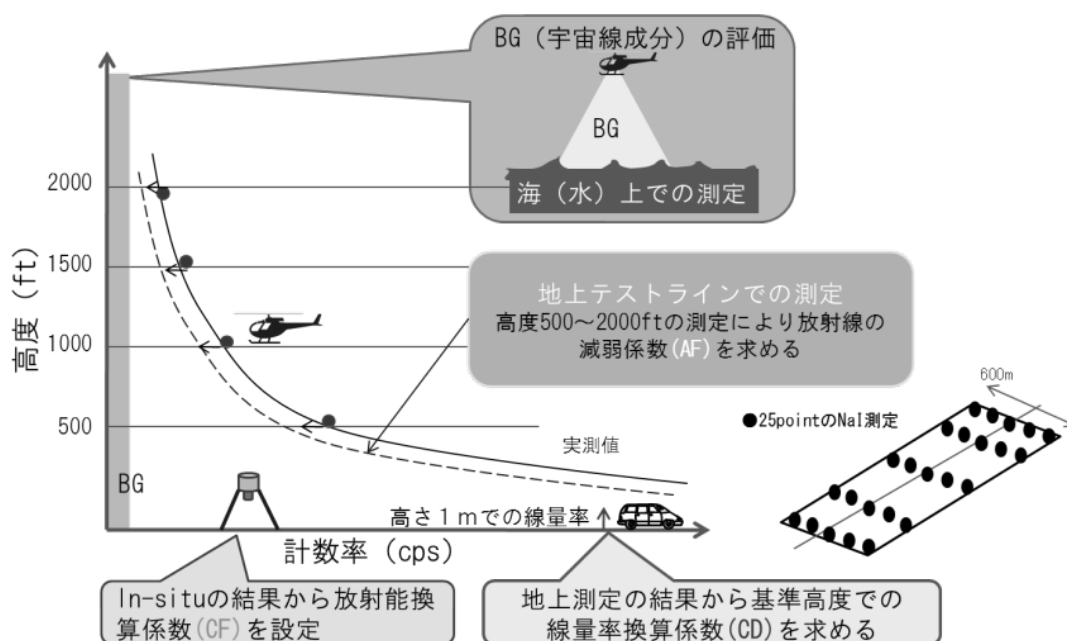


Fig. 4-8 Image of test-line flight

テストラインでは、地上から NaI サーベイメータによりテストラインを中心に 25 点データを採取した。テストラインにおける地上測定のイメージを Fig. 4-8 に示す。テストラインの NaI サーベイメータの測定結果を Fig. 4-9 に示す。選定したテストライン上のばらつきは 20 % 以内であった。

また、テストライン上では In-situ 測定用の Ge 検出器を用いて、地表面の放射性 Cs 濃度を東日本では 5 点、西日本・北海道では 3 点採取した。In-situ 測定用の Ge 検出器の測定方法は、文科省マニュアル¹¹⁾に従って実施した。解析は、鉛直分布を示すパラメータ $\beta=1$ で換算した。

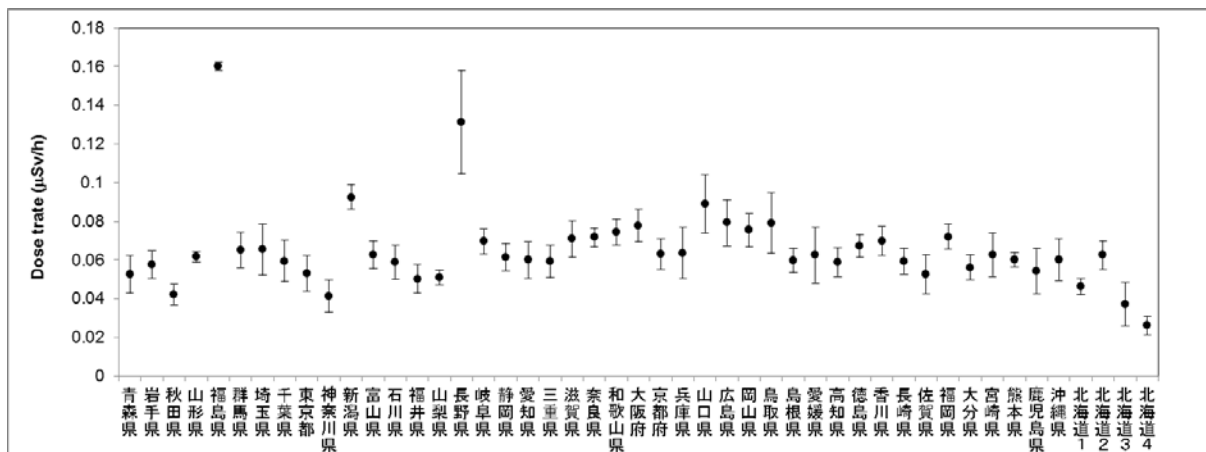


Fig. 4-9 Dose rate of test-line

4.2.4 結果の妥当性確認のための地上測定

航空機モニタリングによる結果の妥当性を検証するために、地上の NaI サーベイメータによる線量率測定を実施した。実施数は各県を 4 ブロックに分け、5 ポイントずつの合計 20 ポイント測定した。測定結果は、解析後の航空機モニタリング結果と比較し、妥当性を検証した。

また、各県の特徴的な場所（花崗岩地帯、高線量地域）において、In-situ Ge による測定を行った。In-situ Ge の測定結果を Appendix 4 に示す。

4.3 解析方法

解析手法のフローについて、Fig. 4-10, 4-11 に示す。解析は、一般的にわかりやすいように、①地表 1 m 地点における全線量率 ($\mu\text{Sv/h}$: 地上でのサーベイメータと比較可能)、②放射性 Cs の地表沈着量 (Bq/m^2 ; 原子力発電所の影響の確認)、③ ^{137}Cs の地表沈着量 (Bq/m^2) 及び④ ^{134}Cs の地表沈着量 (Bq/m^2) を計算することとした。初期に実施した時には、放射性 Cs のないバックグラウンドの状態におけるデータが取れていなかったため (自衛隊のヘリや防災隊のヘリ) バックグラウンドの減算を東日本の平均値である $0.0687 \mu\text{Sv/h}$ を差し引いていた¹²⁾。西日本・北海道の測定では、放射性 Cs のないバックグラウンドの状態におけるデータが採取できたこと、放射性 Cs の影響がほとんど考えられない地域であることから、バックグラウンドを減算する MMGC 法¹⁾ を適用した。詳細について、以下に示す。

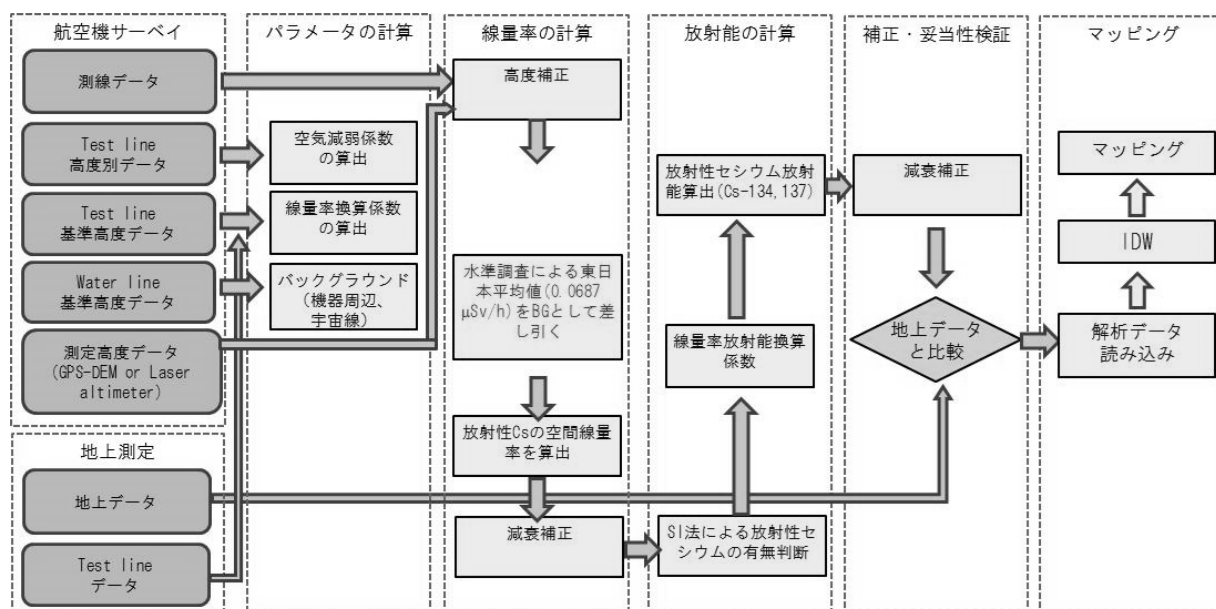


Fig. 4-10 Analysis flow of ARMS in west japan

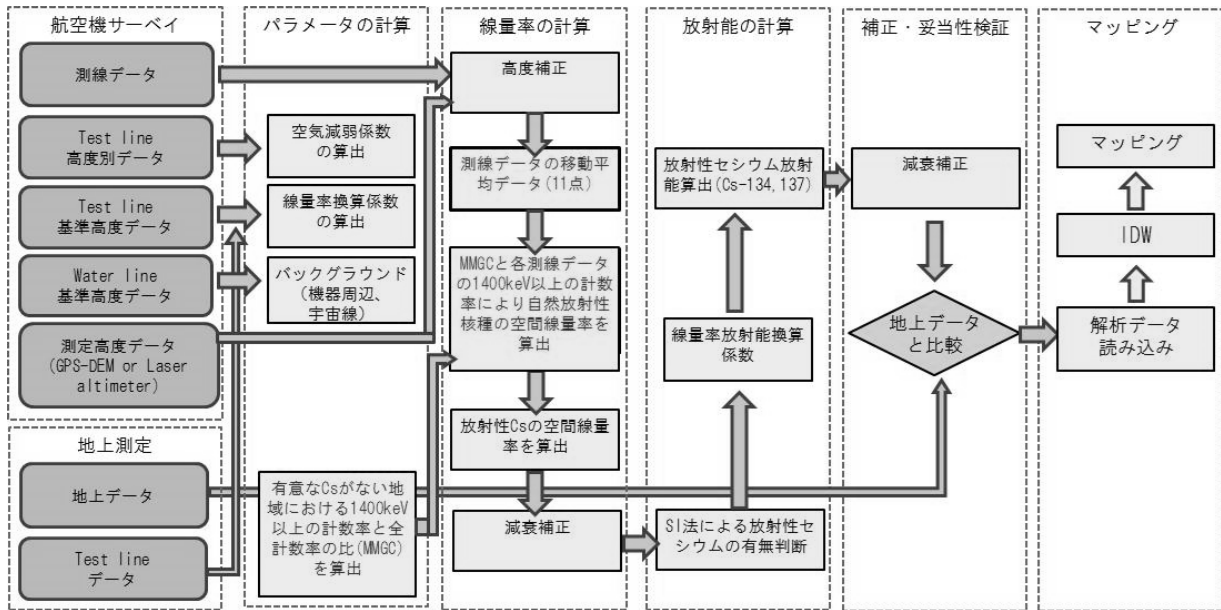


Fig. 4-11 Analysis flow of ARMS in east japan

4.3.1 線量換算係数 (CD)

4.2.3 章に示したように、テストラインの地上における測定点の平均値とその上空 300 m (1,000 ft) をフライトした計数率の平均値の比を取って、線量換算係数を算出した。線量換算係数は、検出器とヘリコプタ機底の遮蔽状況に依存する。機器搭載型の MEXT や FUGRO の検出器は初期に実施した MEXT-1 によるモニタリング時には、搭載するヘリコプタが一定でなかったため、比較は難しいが、同じヘリコプタと検出器の組み合わせで平均値を標準偏差の 2 倍を Table 4-3 に示す。

なお、MEXT-2, 3 は線源によるレスポンスがほとんど同じだったため (Fig. 3-8,3-9)、結果を合算して計算した。また、東日本における結果を Table 4-4 に、西日本における結果を Table 4-5 に示す。MEXT の 3 システムについては、MEXT-1 と MEXT-2 がほぼ同様であった。MEXT-3 の感度が低いのは、S76 というヘリコプタに主に搭載していたためであると考えられる。S76 はヘリ底にタンクはないが Bell412 に比べると若干遮蔽効果が高いことが分かる (Table 4-1)。一方、NUSTEC, OYO, FUGRO システムについては、ほぼ同様な CD であることが分かった。各システムとも、標準偏差の 2 倍が平均値の 30 % 程度であり、線量率やテストラインの核種組成比に大きく影響を受けないことが分かる。NUSTEC システムについて若干ばらつきが大きかったのは、検出器の劣化が原因と考えられる。

Table 4-3 Summary of CD and AF

System	CD (cps/ μ Sv/h)			AF (m^{-1})		
	Average	Stdev. (2σ)	Data number	Average	Stdev. (2σ)	Data number
MEXT-1	17200	4800	9	-0.00634	0.00087	9
MEXT-2+3	15900	4900	16	-0.00650	0.00083	16
MEXT-2	17700	3800	8	-0.00661	0.00086	8
MEXT-3	14200	3100	8	-0.00640	0.00095	8
NUSTEC	11000	6700	13	-0.00666	0.00092	13
OYO	11700	3200	9	-0.00569	0.00092	9
FUGRO	10900	4400	5	-0.00650	0.00083	5

Table 4-4 CD and AF in east Japan

Measurement Area	Detector	Conversion Factor (cps/(μ Sv/h))	Attenuation Factor (m^{-1})
Fukushima 1th	MEXT-1	2.55E+04	-7.544E-03
Fukushima 3th		1.49E+04	-6.860E-03
Miyagi		1.86E+04	-6.462E-03
Ibaraki		1.62E+04	-6.888E-03
Tochigi		2.36E+04	-7.052E-03
Yamagata		1.28E+04	-6.289E-03
Gunma		1.21E+04	-6.961E-03
Fukushima 4th (~40 km, 10/25~27)		1.40E+04	-7.330E-03
Fukushima 4th (~40 km, 10/28)		1.31E+04	-7.711E-03
Fukushima 4th (40~80 km,)		1.26E+04	-7.981E-03
Akita		1.53E+04	-6.485E-03
Yamanashi		2.12E+04	-5.746E-03
Toyama		1.68E+04	-6.597E-03
Aichi		1.84E+04	-5.779E-03
Tochigi 2th		1.69E+04	-6.608E-03
Miyagi 2th		1.65E+04	-7.483E-03
Gunma 2th		MEXT-2	1.54E+04
Fukushima West 2th	1.55E+04		-7.026E-03
Fukushima 1th	NUSTEC	1.87E+04	-7.544E-03
Fukushima 2th		1.21E+04	-4.753E-03
Fukushima 3th		1.05E+04	-7.329E-03
Fukushima West		1.21E+04	-6.616E-03
Niigata		1.34E+04	-6.289E-03
Nagano		1.34E+04	-6.735E-03
Aomori		1.25E+04	-4.539E-03
Fukushima 4th (40~80 km,)		9.10E+03	-7.329E-03
Ibaraki 2th		8.70E+03	-7.598E-03
Saitama	OYO	1.14E+04	-6.418E-03
Iwate		1.36E+04	-6.921E-03
Ishikawa		1.31E+04	-5.778E-03
Chiba	FUGRO	8.90E+03	-6.912E-03
Tokyo		9.70E+03	-6.972E-03
Kanagawa		9.70E+03	-7.404E-03
Shizuoka		1.15E+04	-6.525E-03
Gifu		1.07E+04	-6.943E-03
Fukui		1.50E+04	-4.843E-03

Table 4-5 CD and AF in west Japan

Category	Measurement Area	Detector	Conversion Factor (cps/(μ Sv/h))	Attenuation Factor (m^{-1})	Application in Category
Kyusyu1	Fukuoka	MEXT-3	1.19E+04	-6.015E-03	-
	Nagasaki		1.27E+04	-5.625E-03	o
	Saga		1.60E+04	-6.684E-03	-
Kyusyu2	Miyazaki	MEXT-1	1.35E+04	-5.184E-03	o
	Kumamoto		1.95E+04	-7.990E-03	-
	Kagoshima		1.48E+04	-6.119E-03	-
	Oita		1.90E+04	-5.212E-03	-
Kyusyu3	Okinawa	MEXT-1	1.74E+04	-6.504E-03	o
Shikoku	Ehime	OYO	1.14E+04	-5.878E-03	-
	Kagawa		1.17E+04	-5.106E-03	o
	Kochi		1.37E+04	-5.113E-03	-
	Tokushima		1.02E+04	-5.005E-03	-
Kinki1	Mie	MEXT-2	1.63E+04	-6.302E-03	-
	Shiga		1.95E+04	-6.667E-03	o
Kinki2	Osaka	NUSTEC	1.01E+04	-4.981E-03	o
	Nara		8.10E+03	-6.861E-03	-
	Wakayama		7.70E+03	-7.734E-03	-
Kinki3	Kyoto	MEXT-2	1.93E+04	-6.678E-03	o
Kinki4	Hyogo	MEXT-2	2.04E+04	-4.768E-03	o
Chugoku1	Hiroshima	MEXT-3	1.61E+04	-6.926E-03	o
	Yamaguchi		1.46E+04	-5.550E-03	-
Chugoku2	Okayama	OYO	1.17E+04	-5.349E-03	o
Chugoku3	Tottori	MEXT-3	1.33E+04	-5.678E-03	o
	Shimane		1.50E+04	-8.073E-03	-
Hokkaido1	Hokkaido	MEXT-2	1.75E+04	-6.596E-03	o
Hokkaido2	Hokkaido	MEXT-3	1.37E+04	-6.646E-03	o
Hokkaido3	Hokkaido	NUSTEC	5.90E+03	-5.714E-03	o
Hokkaido4	Hokkaido	OYO	8.70E+03	-5.606E-03	o

4.3.2 空気減弱係数(AF)

高度補正を行うために、高度を変化させたフライトを行い、実効的な空気減弱係数を求めた。

Fig. 4-12 に 3.6 章で述べた計算コードを使用して、核種ごとの空気減弱係数を計算した結果を示す。

高度補正には、以下の計算式を用いて、高度補正係数 HF を算出した。対地高度を求めるための数値標高モデル (DEM:Digital Elevation Model) には、東日本では 90 m メッシュ¹³⁾ を西日本には 10 m¹⁴⁾ メッシュを利用した。

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

HF: 高度補正係数

H_{sd}: 基準高度 (1000 ft = 300 m)

H_a: フライト高度 (GPS 高度 - DEM)

¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs の減弱係数はほとんど変わらないが、天然核種である ⁴⁰K 及びウラン、トリウム系列の減弱係数は放射性 Cs と比較して、それぞれ 10 - 30 % 大きいことが分かった。原子力発電所近傍以外は、放射性 Cs が存在したとしても、天然核種と混在しているため、計算結果の中間程度の値となることが予想される。

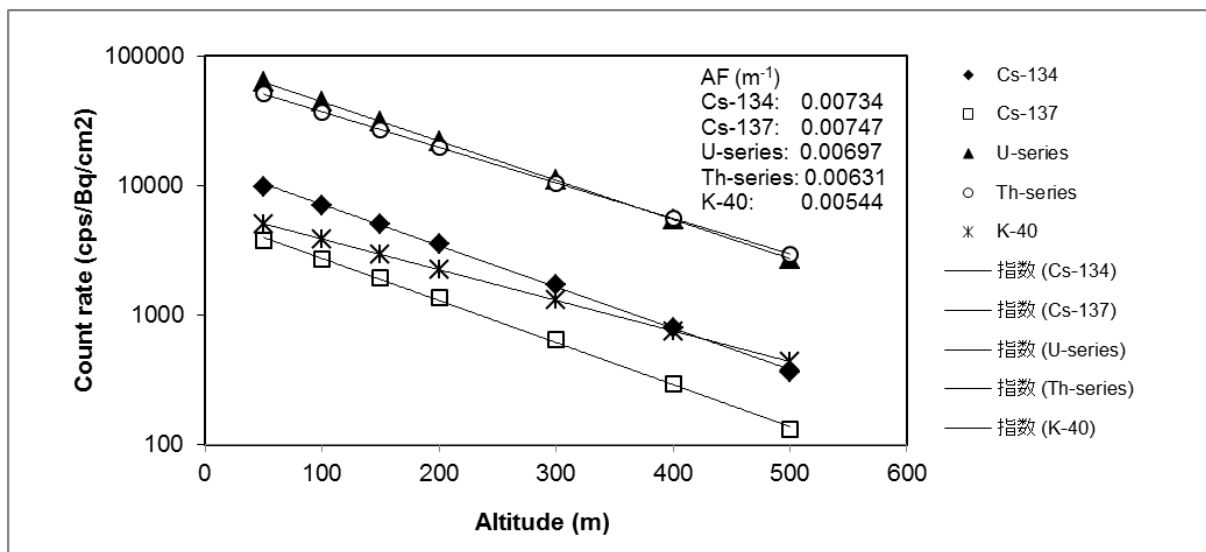


Fig. 4-12 Simulated attenuation factor using EGS5 (Source radius: 1000 m)

実測した AF の例を Fig. 4-13,4-14 に示す。AF は高度と計数率をプロットし、指数近似した傾きとして算出した。これらはホバリングで実施した場合とフライトラインを通過した場合の 2 つの方法で実施している。また、スペクトルを①450 keV 以下(放射性 Cs の光電ピークを含まない領域)、②450 keV 以上 (放射性 Cs の光電ピークを含む領域) 、③900 keV 以上 (天然の放射線を含む領域) 及び④全計数の 4 つに分類し、AF を比較した。まず、テストラインを通過する場合には、目印が

分かりやすいためパイロットがフライトしやすいが、テストラインの線量率が一定でなければならない。一方、ホバリングでは、地上の線量率は一定であるものの、同じ場所でのフライトが難しいことが挙げられる。テストラインのデータ採取方法は、地上の状況を考慮し、決定すべきである。一方、スペクトルの領域で分けると①-③ではほとんど値が変わらないものの、④では大きくなった。これは、計算コードの結果と矛盾しない。

AFの測定結果を、Table 4-4, 4-5にまとめ、システム毎の平均値と標準偏差をTable 4-3に示す。すべてのシステムで、標準偏差の2倍は平均値の15%程度であり、ばらつきは少なかった。また、OYOシステム以外は0.0065 m⁻¹程度であった。OYOシステムは若干大きな数字となったが、ノイズカットを目的として、低エネルギー側を計数しないように設定していることが原因と考えられる (Fig. 3-14)。

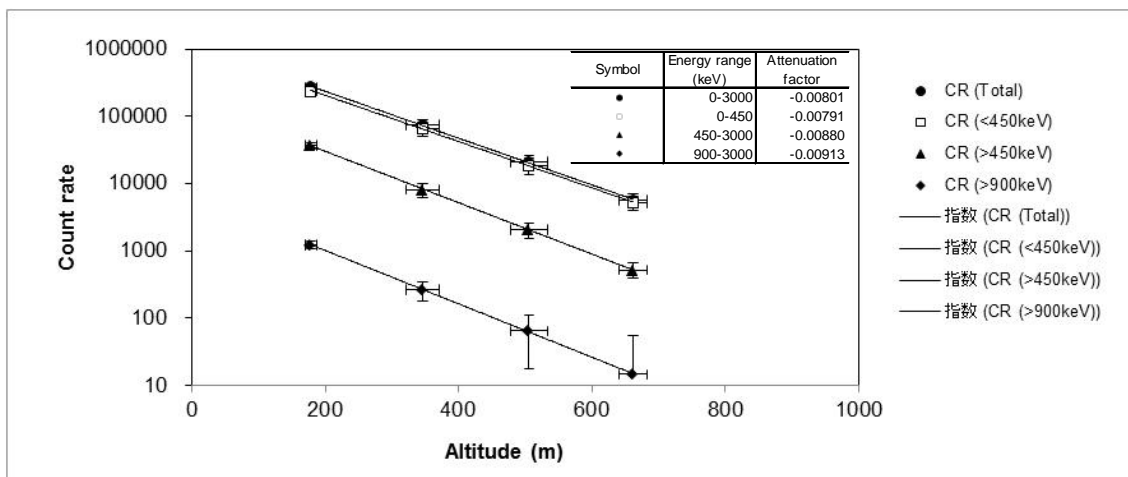


Fig. 4-13 Example for attenuation factor by hovering

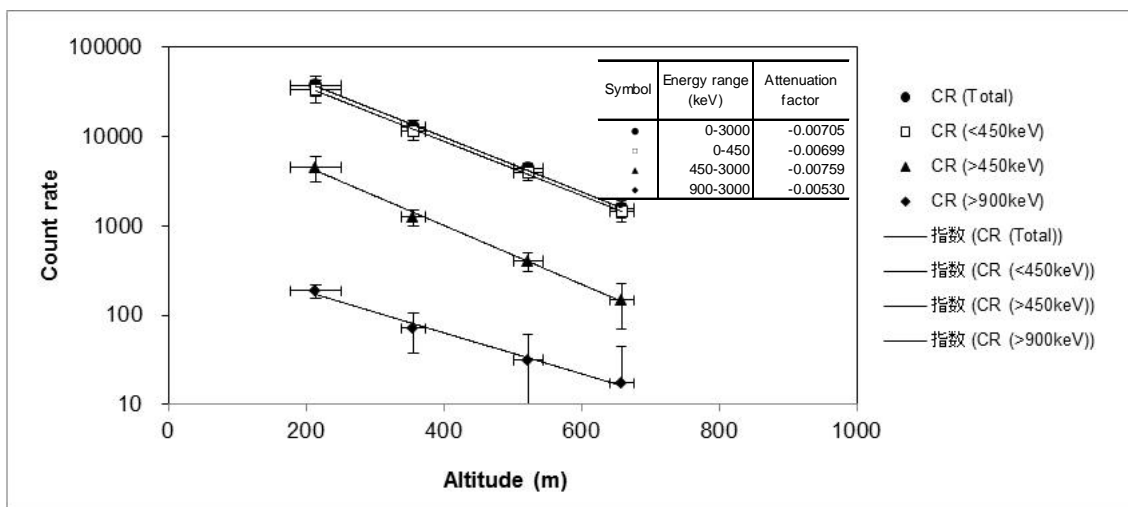


Fig. 4-14 Example for attenuation factor

4.3.3 線量率-放射能換算係数

線量率から放射能への換算は、文献¹¹⁾に記載のある $\beta = 1$ の場合の換算係数を適用し (^{134}Cs : $4.44 \times 10^{-3} (\mu\text{Gy/h})/(\text{kBq/m}^2)$, ^{137}Cs : $1.73 \times 10^{-3} (\mu\text{Gy/h})/(\text{kBq/m}^2)$)、あらかじめ求めておいた $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比を用いて、地上 1 m 地点における線量率から地表における ^{134}Cs , ^{137}Cs の放射性物質濃度に換算した。 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比は、2011 年 8 月 13 日に福島県で 50 ポイント以上の In-situ Ge による測定データを採取し、2011 年 8 月 13 日時点での $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs} = 0.917$ を基本とした。その基準日から、航空機モニタリングのデータ採取日に減衰計算して換算した。

4.3.4 バックグラウンドの減算方法

(1) BG-index の設定できる測定点について

放射性 Cs のない地域をあらかじめフライトし、スペクトルの領域ごとの指標を設定できるシステムとヘリコプタについては、設定した指標を用いてバックグラウンドを減算した。まず、放射性 Cs のない地域でフライトしたスペクトルに対し、(a) から (e) の領域でカウントを識別する。本方法は、米国エネルギー省が開発した方法を参考にしている^{1,2)}。

- (a) 全計数率
- (b) 450 keV から 2800 keV
- (c) 900 keV から 2800 keV
- (d) 1400 keV から 2800 keV
- (e) 2800 keV 以上の計数 (宇宙線)

Fig. 4-15 に識別したスペクトル領域のイメージを示す。これらの計数を、BG index = (a)/(d)、Cs index = (b)/(c) とし、設定する。また、(e) にあらかじめ高高度でフライトしたデータから、CR index = (a)/(e) を求めておく。設定したインデックスを以下のような手順で、解析を行う。

- ① フライトデータを (a) から (e) の領域に分けて計算する。
- ② (e) に CR index をかけて宇宙線のバックグラウンドとする。
- ③ 高高度もしくは海上をフライトしたデータから②を差し引き機体のバックグラウンドとする。
- ④ ①から②と③を差し引いた係数を C_{net} とし、テストラインデータで算出した CD, AF を用いて地表 1 m における全線量 D を算出
$$D = \frac{C_{\text{net}} \times F}{CD} \quad (2)$$
- ⑤ (d) に BG index をかけて全計数から引き算し、有意な計数を放射性 Cs の計数とする。
- ⑥ 有意になったスペクトルに対し、(b)/(c)をもとめ、Cs-index と比較し有意にならない

場合は放射性 Cs が検出されていないとする。

- ⑦ 換算した放射能を測定日に合わせて減衰計算する。
- ⑧ 減衰計算した値を CF から線量率に換算する。
- ⑨ 換算した線量率に天然放射線分を足し、全線量率とする。

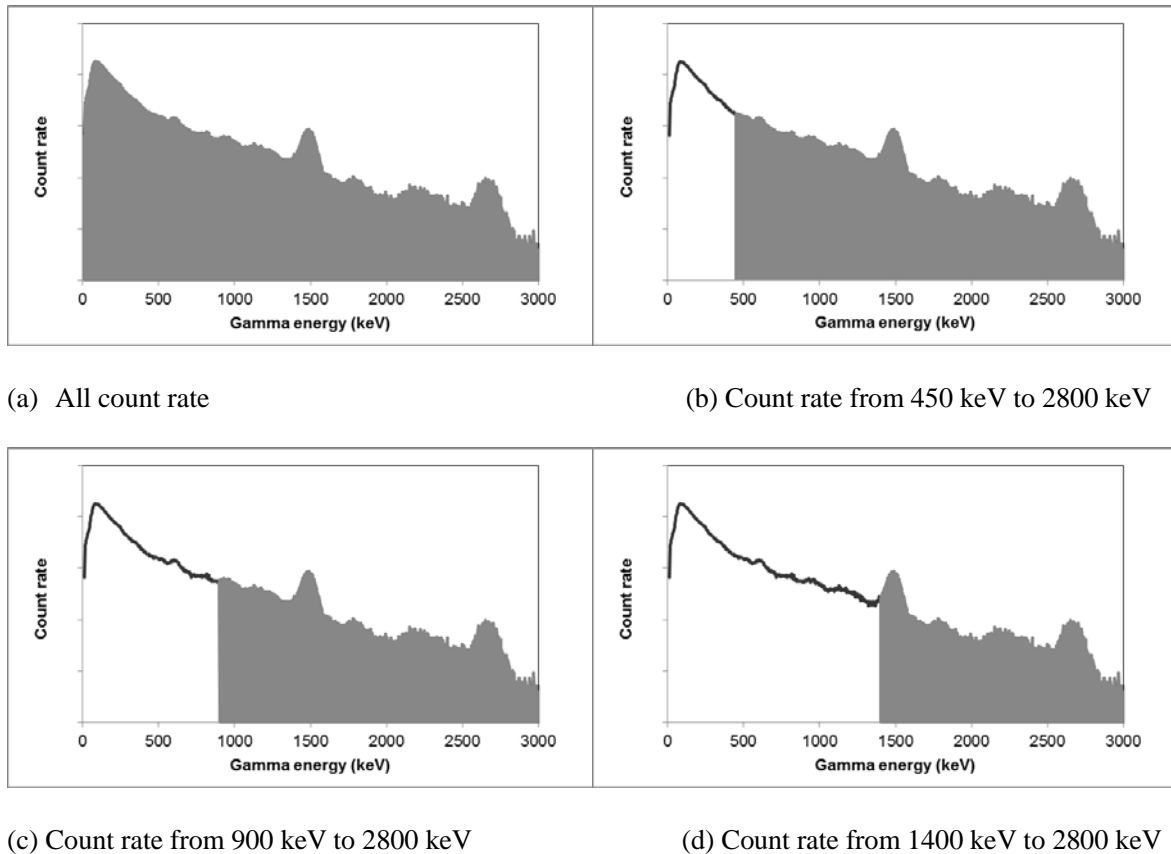


Fig. 4-15 Spectrum area for BG index and Cs index

(2) BG-index の設定できない測定点について

文献¹²⁾における全データをヒストグラムにして Fig. 4-16 に示す。本データは、各県で 10 点ほどの測定ポイントに対し、NaI サーベイメータで 5 年間測定したものであり、バックグラウンド放射線の代表的な値を示すものと考えられる。通常、航空機モニタリングでは、あらかじめ、放射性 Cs のない場所で、システムと機体の関係ごとにバックグラウンド測定を実施し、そのデータを実測値から差し引く方法が一般的である。しかしながら、初期のモニタリング(自衛隊のヘリや防災隊のヘリ)では、放射性 Cs のない場所をフライトすることができなかったため、Fig. 4-16 に示したような一般的なバックグラウンドの平均的な値 (0.0687 $\mu\text{Sv/h}$) を差し引いて、放射性 Cs の沈着量を算出することとした。算出式と手順を以下に示す。なお、文献¹²⁾におけるデータは、

吸収線量 (Gy) で示されているが、ここでは、 $Sv = Gy$ として Sv で算出した。

- ① フライトデータから全計数率を計算。
- ② テストラインデータで算出した CD, AF を用いて地表 1 m における全線量 D を算出

$$D = \frac{C_{all} \times F}{CD} \quad (3)$$

D : 全線量率, C_{all} : 全計数率 (cps)

- ③ D から東日本の平均値 $0.0687 \mu Sv/h$ を減算し、 CF から放射能に換算する。
- ④ 換算した放射能を測定日に合わせて減衰計算する。
- ⑤ 減衰計算した値を CF から線量率に換算する。
- ⑥ 換算した線量率に $0.0687 \mu Sv/h$ を足し、全線量率とする。

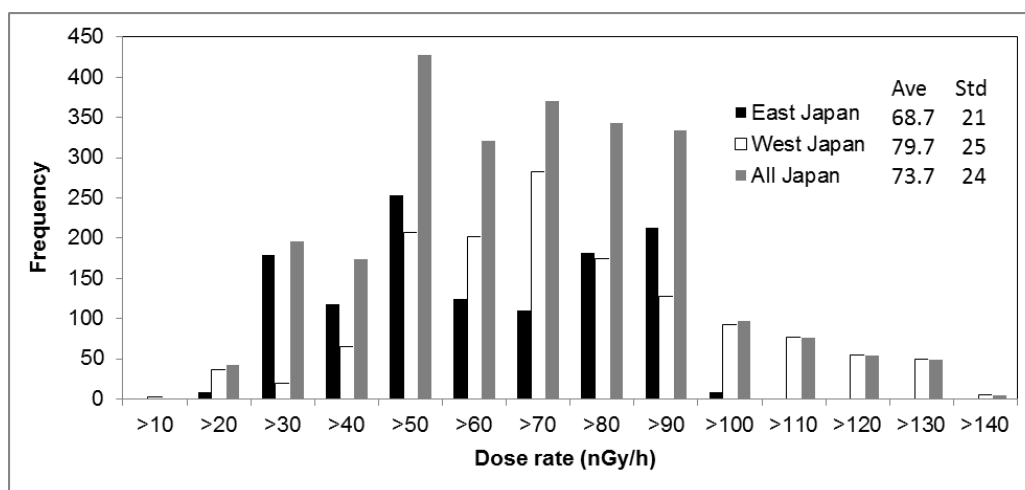


Fig. 4-16 Background dose rate using NaI survey meter (2005-2009)¹²⁾

4.3.4.1 BG-index

あらかじめ放射性 Cs の影響がない地域において求めた BG-index を、ヒストグラムとして、Appendix 3 に示す。また、MEXT-2 で採取した九州における BG-index の例を Fig. 4-17 に示す。Fig. 4-18 に示すように、全計数率と 1400 keV 以上の計数率の関係は正の相関関係にあり、比をとると平均ヒストグラムはいずれも正規分布の形を示した。BG-index はシステムとヘリコプタに依存する。Fig. 4-19 及び Fig. 4-20 に MEXT-3 と OYO の BG-index について示す。このように、システムの遮蔽状況やスペクトルのエネルギーカット設定によって、数値は変わるが、いずれも正規分布の形をとっている。

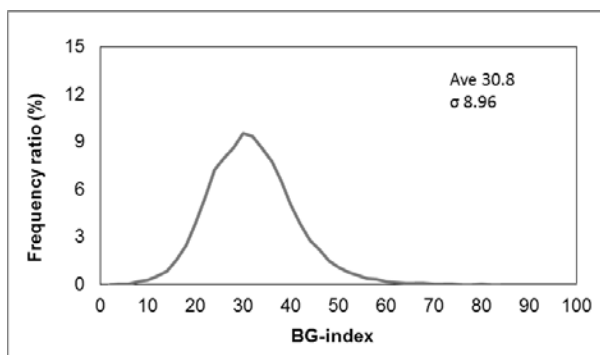


Fig. 4-17 Histogram of BG-index at MEXT-2

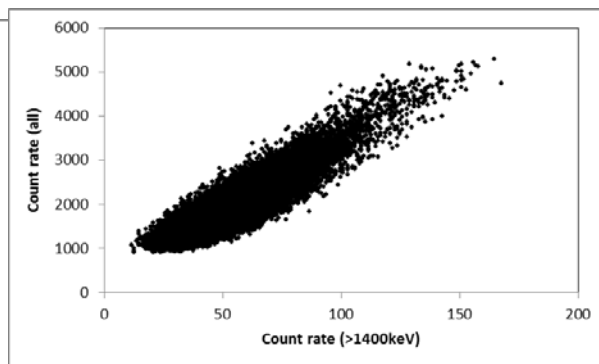


Fig.4-18 Comparison with all count rate and >1400 keV count rate at MEXT-2

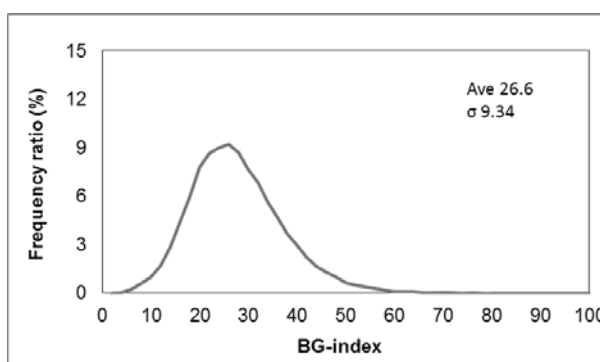


Fig. 4-19 Histogram of BG-index at MEXT-3

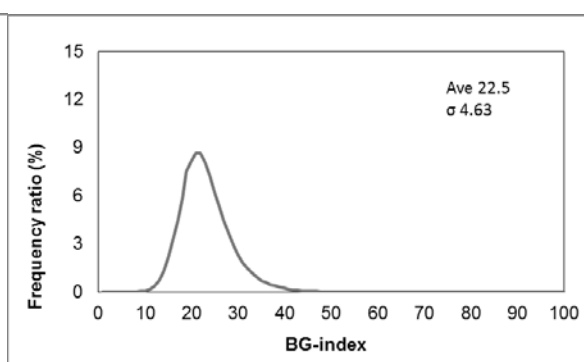


Fig. 4-20 Histogram of BG-index at OYO

4.3.4.2 Cs-index

あらかじめ放射性Csの影響がない地域において求めたCs-indexを、ヒストグラムとして、Appendix 3に示す。BG-indexのように、900 keV以上には、 ^{134}Cs の1365 keVの γ 線が領域に含まれるため、Csと天然核種が混在するスペクトルから天然核種のみを減算することはできないが、計数が多い領域の比であるため、実際に測定したスペクトルで比較することによって、CsのあるなしをBG-indexより低いレベルで判断することができる。Fig. 4-21に放射性Csのある地域と少ない地域で測定したCs-indexの例を示す。このように、放射性Csがある地域は、値が高くなり、あらかじめ閾値を設定しておくことによって（例えば、放射性Csのない地域で求めたCs-indexの平均値+3 σ ）、天然か放射性Csかの判断基準となる。Fig. 4-22にMEXT-1で採取したCs-indexをヒストグラムにして示す。

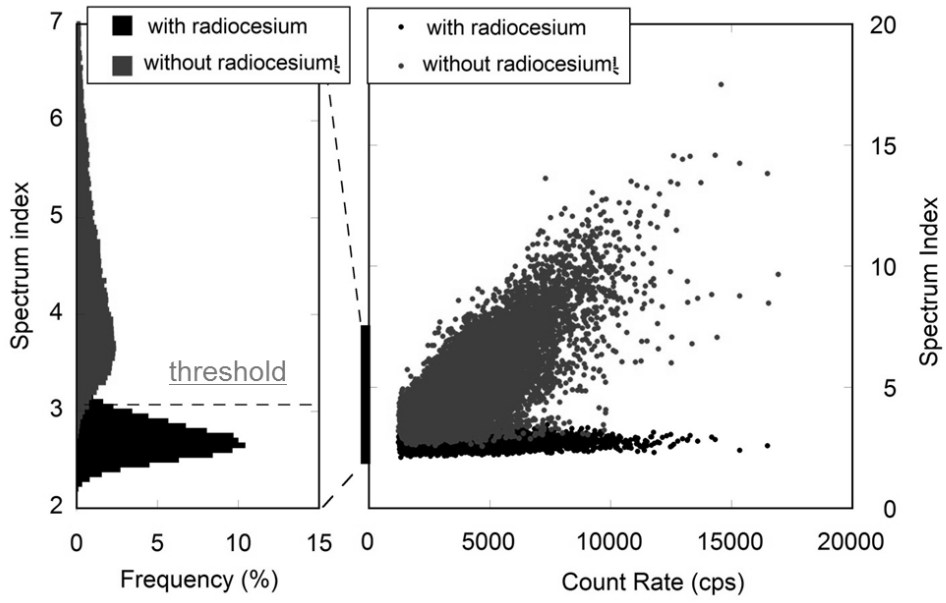


Fig. 4-21 Example for Cs-index in MEXT-1

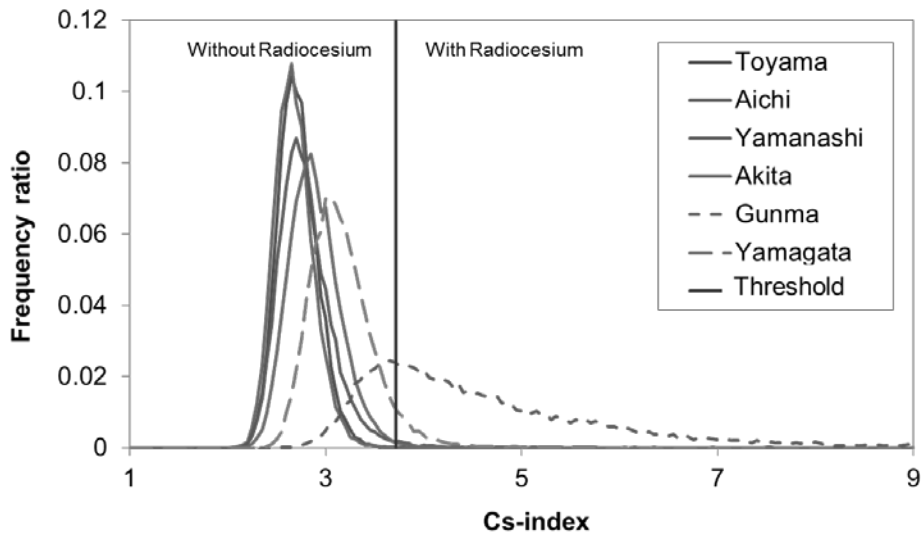


Fig. 4-22 Example for histogram of Cs-index in MEXT-1

4.3.5 海拔高度による宇宙線の影響

フライトする対地高度は、1000 ft (= 300 m) を保ちフライトするが、山間部など海拔高度が高くなる場所をフライトする場合がある。海拔高度が高くなると宇宙線の影響が大きくなる。Fig. 4-23 に海拔高度と 2800 keV 以上の計数率の関係を示す。このように、1000 ft ごとに宇宙線起源の計数は 2000 ft で 1.2 倍ほどになる。現在までの測定結果からすると、時期や場所で大きな変化がないため、あらかじめ機器ごとに、海上や 5000 ft 以上で採取したスペクトルから全計数率/>2800 keV の計数率の比 (以下、CR-index, I_{CR}) を設定しておき、測定スペクトルから>2800 keV の計数率をもとめ CR-index を掛けることにより、全体の宇宙線計数を差し引くこととした。

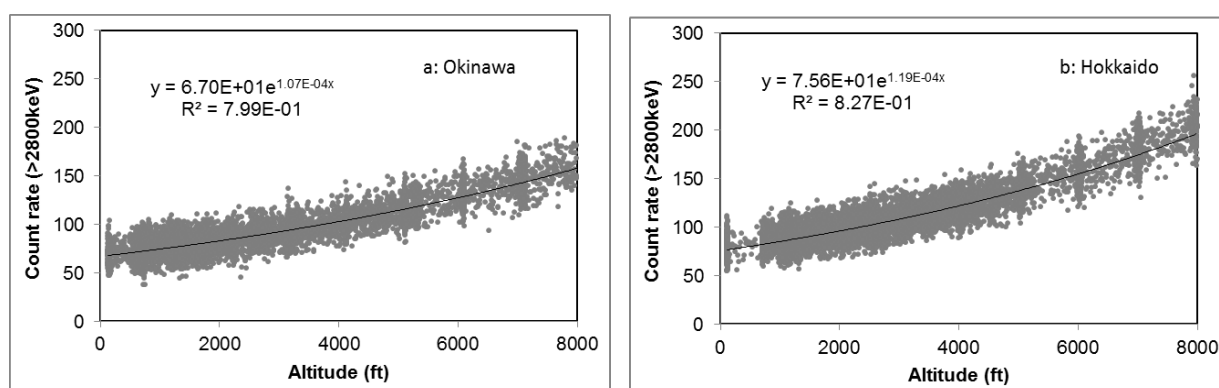


Fig. 4-23 Count rate of cosmic-ray above sea

4.3.6 Rn 子孫核種の影響

これまでの海上での測定結果から、フライトの時期や高度によって機体周辺の空気中の Rn 子孫核種が計数されることが分かっている。Rn 子孫核種が厄介であるのは、濃度が一定しないこととなる。Fig. 4-24 に海上で高度を変化させてフライトした計数率から宇宙線の影響を除いた例を示す。

Fig. 4-24 (a) の北海道のデータのように Rn 子孫核種の影響がなければ、計数率は一定になるはずであるが、Fig. 4-24 (b) の対馬沖で採取したデータのように、Rn 子孫核種の影響により、計数率が上昇する例がある。また、計数率が上昇する高度も場所も一定ではない。これまでの経験では、MEXT システムで最大 600 cps 程度になる場合があり、平均的な CD で換算すると地上 1 m の線量率として 0.04 μ Sv/h 相当になる。高い精度が求められる場合には、今後、何らかの評価方法を加えることが望ましい。

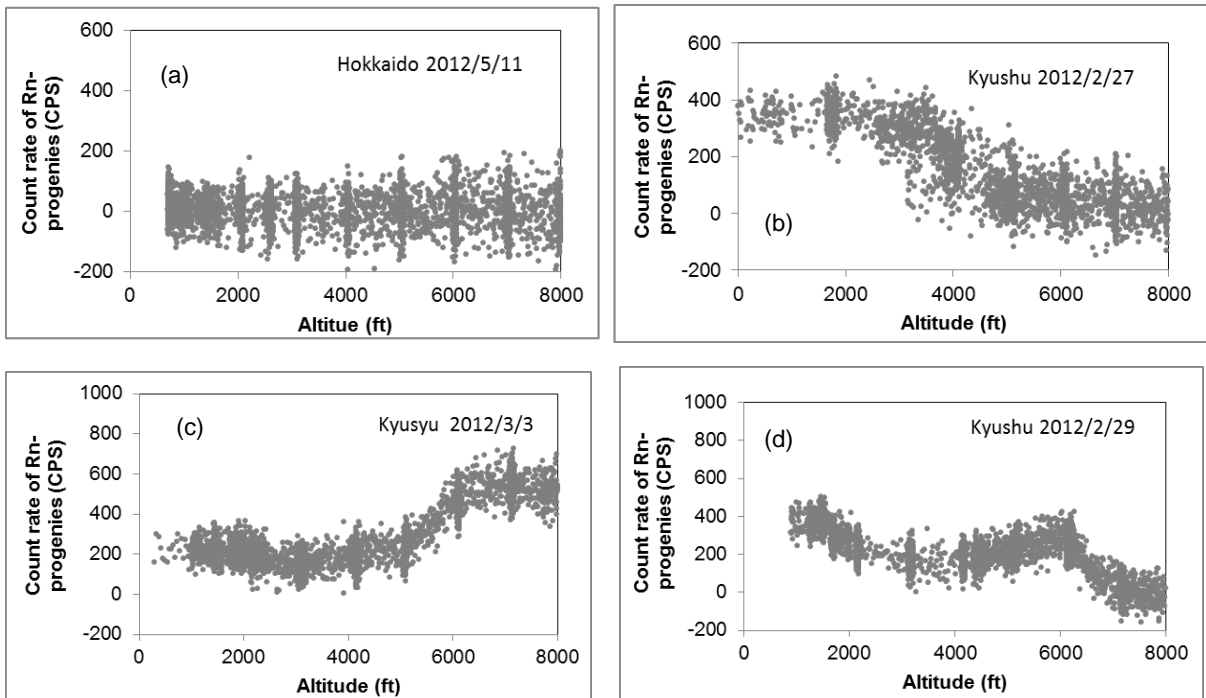


Fig. 4-24 Count rate of Rn-progeny above sea

4.3.7 減衰補正

福島原発の放射性核種が放出されてから時間が経過しており、半減期の短い核種はほぼ減衰しており、平成 23 年 8 月 13 日以降では、 ^{134}Cs と ^{137}Cs が評価核種である。ここでは、線量率からの ^{137}Cs 換算係数及び $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比、および測定時点の線量率を評価時点の線量率に補正する係数を暫定的に算出方法について記述する。4.3.3 章でも記載した通り、線量率から放射能への換算は、文献¹¹⁾に記載のある $\beta = 1$ の場合の換算係数を適用し (^{134}Cs : 4.44×10^{-3} ($\mu\text{Gy/h})/(\text{kBq/m}^2)$), ^{137}Cs : 1.73×10^{-3} ($\mu\text{Gy/h})/(\text{kBq/m}^2)$)、あらかじめ求めておいた $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比を用いて、地上 1m 地点における線量率から地表における ^{134}Cs , ^{137}Cs の放射性物質濃度に換算した。文献¹¹⁾に記載のある β と CF の関係について Fig. 4-25 に示す。 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比は、2011 年 8 月 13 日に福島県で 50 ポイント以上の In-situ Ge による測定データを採取し、2011 年 8 月 13 日時点での $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}=0.917$ を基本とした。その基準日から、航空機モニタリングのデータ採取日に減衰計算して換算した。評価時における ^{137}Cs 及び ^{134}Cs の濃度 $C_{\text{Cs}137}, C_{\text{Cs}134}$ は、航空機サーベイデータから求まる全線量率から天然核種によるバックグラウンドの線量率を引いた線量率 $E_{\text{Cs}137+\text{Cs}134}$ ($\mu\text{Sv/h}$) を用い

$$C_{\text{Cs}137} = A * E_{\text{Cs}137+\text{Cs}134} \quad (1)$$

$$C_{\text{Cs}134} = C_{\text{Cs}137} * B \quad (2)$$

となる。

ここで、評価時の線量率からの Cs-137 濃度換算係数 A は、

$$A = D_{\text{Cs}137} * \exp(-\lambda_{\text{Cs}137} * t) / (K_{\text{Cs}137} * D_{\text{Cs}137} * \exp(-\lambda_{\text{Cs}137} * t) + K_{\text{Cs}134} * B_0 * D_{\text{Cs}137} * \exp(-\lambda_{\text{Cs}134} * t)) \quad (3)$$

である。 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ と A の関係について Fig. 4-26 に示す。

線量率の換算方法は、以下のような手順を設定した。

- ① 換算した放射能を測定日に合わせて減衰計算する。
- ② 減衰計算した値を CF から線量率に換算する。
- ③ 換算した線量率に $0.0687 \mu\text{Sv/h}$ を足し、全線量率とする。

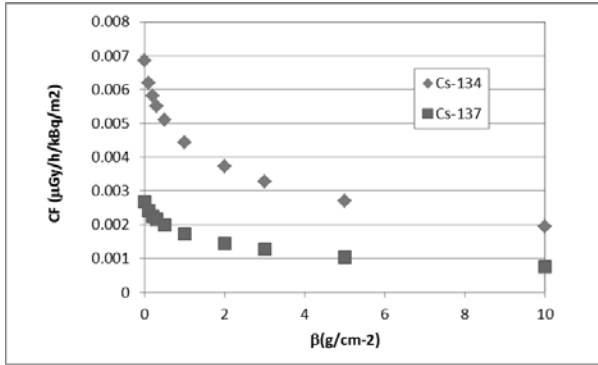


Fig. 4-25 CF in β (g/cm^2)⁸⁾

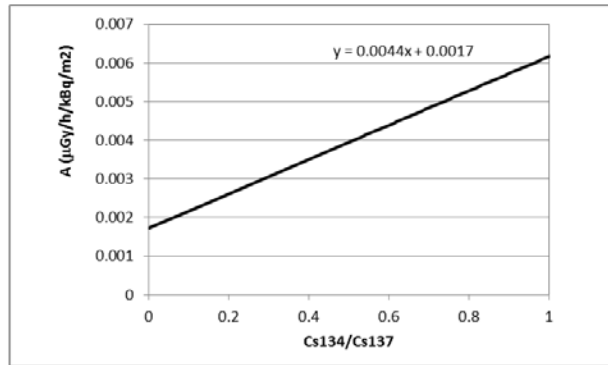


Fig. 4-26 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ and A

4.3.8 検出下限値及び信頼性

検出下限 (limit of detection) と信頼性について評価を行った。まず、式 (x) 及び式 (x) に ARS における全線量への換算方法及び放射性 Cs の沈着量の換算式について示す。

$$D = (C_{all} - BG_{self} - BG_{cos}) \times CD \times \exp(-AF \times (H_{std} - H_m)) \quad (x)$$

$$Rd_{134} = (C_{all} - BG_{nat} - BG_{cos} - BG_{self}) \times CD \times \exp(-AF \times (H_{std} - H_m)) \times CF \times R_{\frac{134}{134+137}} \times DC_{134}$$

ここで、

D: 全線量率 ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)

C_{all} : 全計数率 (cps)

BG_{self} : 機体の汚染 (cps)

CD: 線量率換算係数 (cps/ $\mu\text{Sv}/\text{h}$)

AF: 空気減弱係数 (m^{-1})

H_{std} : 基準高度 (m)

H_m : 測定高度 (m)

Rd_{134} : 放射性 Cs の沈着量 (Bq/m^2) * ^{137}Cs の場合は 134 を 137 に読み替える

BG_{nat} : 天然起源の計数率 (cps) $C_{BG} \times I_{BG}$ (C_{BG} : 1400-2800 keV の計数率; I_{BG} : BG index)

BG_{cos} : 宇宙線起源の計数率 (cps) $C_{cos} \times I_{cos}$ (C_{cos} : >2800 keV の計数率; I_{cos} : CR index)

CF: 線量率-放射能換算係数 ($(\mu\text{Gy}/\text{h})/(\text{Bq}/\text{m}^2)$)¹¹⁾

R: 放射性 Cs に対する ^{134}Cs (^{137}Cs) の割合

DC: 減衰補正係数

4.3.9 全線量率の検出下限

全線量率は BG_{self} と BG_{cos} に依存する。 BG_{cos} は 4.3.5 章に記載した通り、測定した海拔高度に依存する。これまでの測定結果を見ると概ね 200-500 cps の範囲に入ることが分かっている。ここでは、検出下限値を評価するため、500 cps として評価する。 BG_{cos} は C_{cos} にあらかじめ求めた I_{cos} をかけて算出するため、計数誤差が伝播し 30 % 程度の不確かさが生じる。そこで単純な標準偏差ではなく、 500 ± 150 cps として検出下限を計算する。また、 BG_{self} は 4.3.5 章に示したように、海上の測定データから宇宙線成分を減算し、算出する。後述する初期のモニタリングに使用した機体以外では、MEXT のシステムを搭載したヘリコプタにおいては、概ね 400 ± 60 cps 程度であった。ここから、誤差の伝播を考慮し、 $BG_{self} + BG_{cos} = 900 \pm 162$ cps となる。よって、検出下限は、162 cps となり、Table 4-1 に示した MEXT 機器の標準的な CD (17000 cps/ μ Sv/h) から計算すると、 0.0095 μ Sv/h となる。これは、機体の汚染のない MEXT 検出器による、地上 1 m 地点における線量率の検出下限といえる。同様に、その他のシステムについて計算すると、Table 4-6 のようになった。

一方、モニタリングの初期には、 BG_{self} は各県で湖や海上などで測定した。 BG_{self} を Fig. 4-27 に示す。このように、モニタリングの初期に実施したヘリコプタには検出器に影響がある程度の汚染があったことが分かる。この値は、機体の汚染と宇宙線の影響を含むものであるが、3 分間の水上フライトにおけるデータしかないため、参考までに、この最大値 $8,800$ cps の標準偏差の 10 倍を検出下限 (limit of detection) とし、Table 4-3 に示した MEXT 機器の標準的な CD (17000 cps/ μ Sv/h) から計算すると、 0.055 μ Sv/h となる。

Table 4-6 Limit of detection of ARMS

System	Limit of detection	
	Dose rate at 1m above the ground (μ Sv/h)	Radioactivity of deposition radiocesium (kBq/m^2) *
MEXT	0.0095	16
NUSTEC	0.015	26
OYO	0.014	24

* Total BG count: 3,000 cps

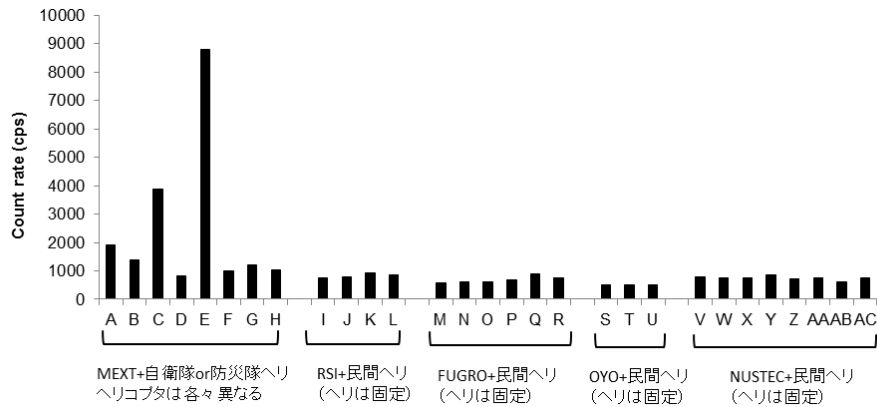


Fig. 4-27 value of BG_{self} each prefecture

4.3.10 全線量率換算の不確かさ

地上 1 m 高さにおける線量率を算出する不確かさを論ずる上で、CD と AF は重要なファクターとなる。Table 4-1 に示したように、CD 及び AF は各県に設定したテストフライト 1 箇所から算出しており、測定する場所によるばらつきが大きいと考えられる。CD は、Fig. 3-17 に示した計算コードによるエネルギーレスポンス計算を考慮すると、 γ 線のエネルギーに大きく影響しないと考えられるため、機体の遮蔽状況が同じであれば、定数として考えてよい。

Table 4-7 Dispersion of CD and AF

System	CD (cps/ μ Sv/h)			AF (m ⁻¹)		
	(1)	(2)	(2)/(1)	(1)	(2)	(2)/(1)
	Average	Stdev. (2 σ)	Dispersion	Average	Stdev. (2 σ)	Dispersion
MEXT-1	17200	4800	0.28	-0.00634	0.00087	0.14
MEXT-2+3	15900	4900	0.31	-0.00650	0.00083	0.13
MEXT-2	17700	3800	0.21	-0.00661	0.00086	0.13
MEXT-3	14200	3100	0.22	-0.00640	0.00095	0.15
NUSTEC	11000	6700	0.61	-0.00666	0.00092	0.14
OYO	11700	3200	0.27	-0.00569	0.00092	0.16
FUGRO	10900	4400	0.40	-0.00650	0.00083	0.13

Table 4-1 で示した CD および AF の実測値の標準偏差の 2 倍の平均値に対する割合をばらつきと定義し、Table 4-7 に示す。現状では、CD は平均値からおよそ 30 % のばらつきがある (NUSTEC システムでは 60 %; 機器の劣化が原因)。これは、地上測定と上空での測定の誤差を含んでいると考えられる。当初は、各県で測定した CD をそのまま適用していたため、 $\pm 30\%$ の不確かさが否めないが、テストラインの測定を何回も経験し、平均値の当たりがついてきた、後半の測定で

は、この不確かさ要因は小さくなっていると考えられる。

一方、AFは15%程度のばらつきがある。AFの違いで高度補正係数(HF)にどの程度影響が出るかを評価するために、Fig. 4-28にAFが 0.0056 m^{-1} と 0.0072 m^{-1} (Table 4-1に示したMEXTシステムの最大、最小値)におけるHFの比を示す。現在、対地高度で、150 mから500 m程度であれば、高度補正を行っている(それ以外のデータは欠測としている)、AFによる不確かさは $\pm 20\%$ 程度であると考えられる。一方、基準高度(300 m)でのフライトデータは高度補正の必要がない。よって、測定した対地高度によるが、HFは最大で20%の不確かさを含んでいるが、ストライクの測定を何回も経験し、平均値のあたりがついてきた、後半の測定では、この不確かさ要因は小さくなっていると考えられる。これらを考え合わせると、CD、HFのパラメータによる不確かさは、 $\pm 36\%$ 程度であると評価できる。

これらのパラメータによる不確かさの他に、4.3.6.章で示したRnの子孫核種については、現方法でも補正ができていない。Rnの子孫核種の補正方法は、検出器の上側に、Rn測定用の検出器を配置し、その値を差し引くことが一般的であるが^{1,2)}、今回用いたシステムには搭載されていない。これまでの経験では、地上1 mの線量率に換算した時に、最大で $0.04 \mu\text{Sv/h}$ 分の影響があると考えられる。よって、空中にRnの子孫核種が存在する場所において、最大 $0.04 \mu\text{Sv/h}$ 過剰に評価する可能性があるとして評価できる。

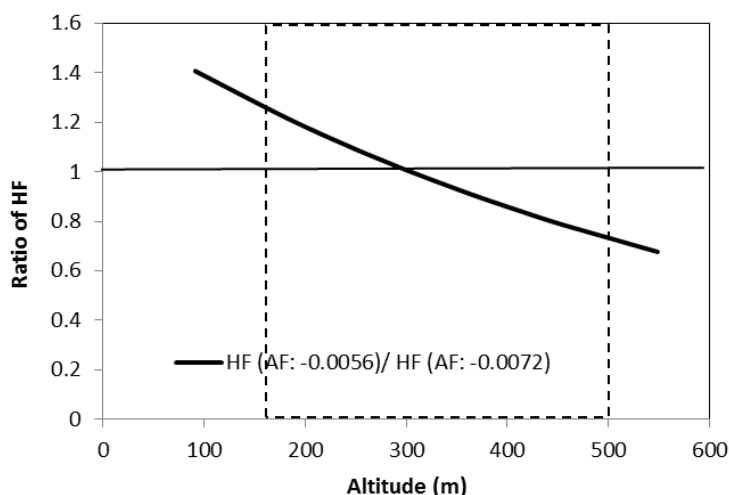


Fig. 4-28 Relationship of AF and altitude

4.3.11 放射性Csの沈着量の検出下限

放射性Csの沈着量は、4.3.4.章で述べたように、 γ 線スペクトルのデータから、バックグラウンド(Rn子孫核種、宇宙線、機体の汚染)を差し引いている。放射性Csの沈着量の検出下限を求める上で、実際の測定データから、差し引くバックグラウンドを考慮し、各々の計数誤差(=放射性Csの計数率の検出下限)の 3σ を計算した。バックグラウンドの合計と放射性Csの計数率

の検出下限を Fig. 4-29 に示す。当たり前ではあるが、バックグラウンド計数率が上昇すると、検出下限も上昇する。この計数率の検出下限を、Table 4-3 に示した MEXT 機器の標準的な CD (17000 cps/ $\mu\text{Sv/h}$) 及び AF (0.0065 m^{-1}) で線量率に換算し、2012 年 5 月 30 日に換算した。結果を Fig. 4-30 に示す。このように、ばらつきはあるものの、放射性 Cs の沈着量の検出下限は、最大で 15 kBq/m^2 程度であることが分かる。同様に計算した、NUSTEC 及び OYO の検出下限値について Table 4-6 に示す。

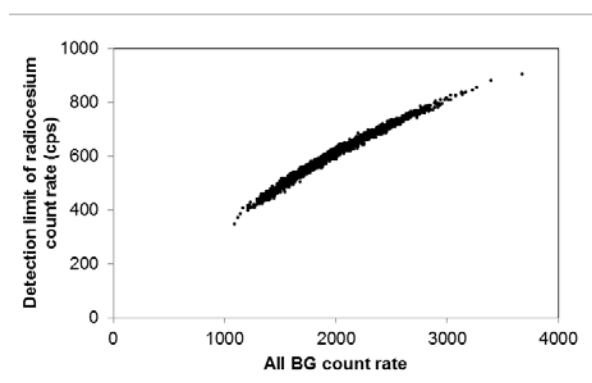


Fig. 4-29 Detection limit of radiocesium count rate

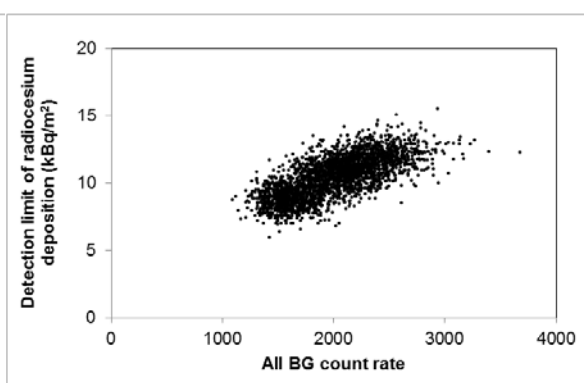


Fig. 4-30 Detection limit of radiocesium deposition (kBq/m^2)

4.3.12 放射性 Cs の沈着量の不確かさ

放射性 Cs の沈着量の不確かさ要因としては、4.3.10.章で述べた、線量率と変わらない。したがって、パラメータによって、 $\pm 50\%$ の不確かさである。また、空中の Rn の子孫核種による影響はスペクトルで差し引かれるため、放射性 Cs の沈着量には大きな影響はないと考えられる。

4.4 マッピング方法

航空機モニタリングの測定器が測定する範囲は、対地高度によって変化するが、対地高度 $150 \sim 300 \text{ m}$ の場合は、航空機下部の地表面を直径約 $300 \sim 600 \text{ m}$ の円内の測定値を平均化したものである。また、前述のように地域によって測線間隔は異なるが、測定器による直接測定ができない範囲をどうしても生じてしまう。精度を良くするためには、単純に測線間隔を短くすればよいのだが、測定期間が大幅に増加し、公表までのスケジュールが遅れてしまう問題もある。

そこで、航空機モニタリングで得られた地点のサンプリングデータから内挿し、未測定範囲を補間した。つまり、“点” から空間線量率や放射性セシウム沈着量の“面”の分布を求めた。Table 4-8 に、航空機モニタリングを実施した地域の測定地点数を示す。また、“面”を生成するためには、あらかじめマスクデータが必要となるため、陸域データは国土交通省国土地理院の「基盤地

図情報」を使用した。次に、湖沼についての空間線量率や放射性セシウム沈着量は測定できないことから、国土交通省国土政策局の「国土数値情報」を用いて、さらに、航空法に基づく福島第一原子力発電所近傍の飛行禁止区域や飛行が困難である標高 2000 m 以上の山岳地域を陸域データから取り除いた。Fig. 4-31 にそれらマッピングの手順を示す。

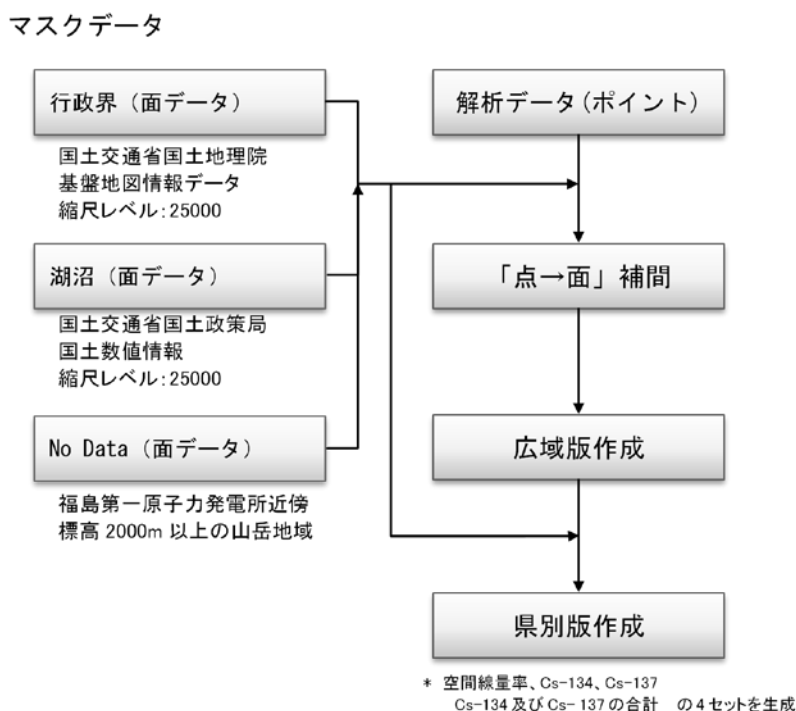
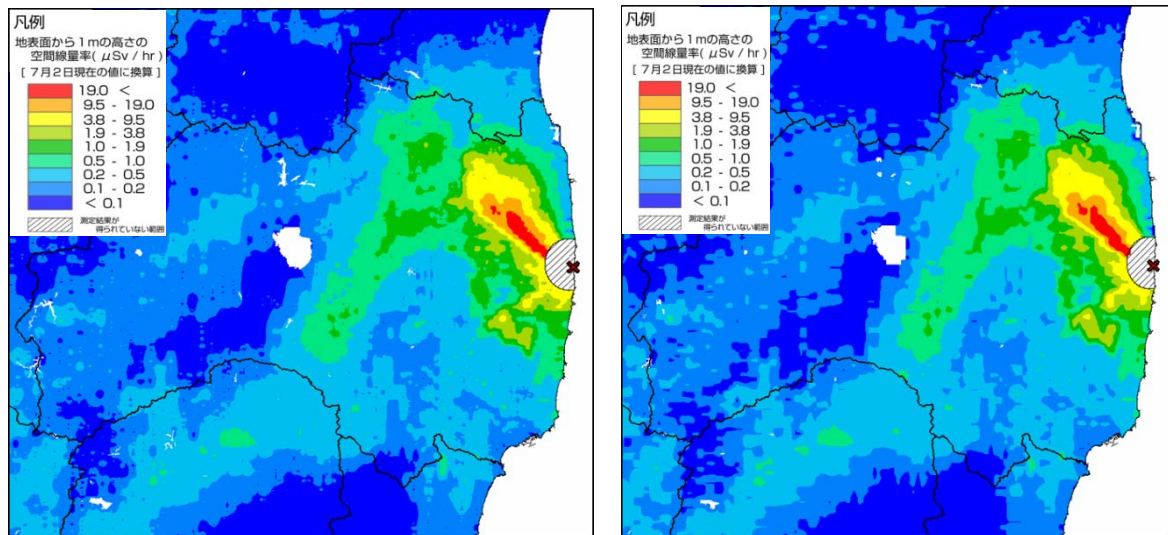


Fig. 4-31 Methods of mapping

4.4.1 補間方法

線量率や放射性物質のマッピングについては、IAEA より標準的な方法が示されている¹⁴⁾。今回、補間方法には、IDW (Inverse Distance Weighted : 逆距離加重法)、クリギング (Kriging)、スプライン (Spline)、Natural Neighbor 等の多くの方法が存在する。本事業では、2011年4月6日～29日にかけて実施された第1次航空機モニタリングの解析を担当した米国エネルギー省 (DOE) が用いた IDW を踏襲し、それ以後の解析を行った。IDW は、補間する地点の近傍にある複数の地点の測定値を平均し、推定する方法である。補間する条件として「測定地点からの距離が遠くなるにつれて、影響が小さくなること」が前提になる。そのため、各地点の測定値が局所的影響をもち、推定する (平均) 値は、対象となる測定値の最高値より大きくなり、最低値より小さくならない。また、IDW には複雑なパラメータ設定が不要である。必要となるのは、距離に応じて影響度を制御する乗数と内挿処理の対象となる地点数の2つである。本事業では、乗数 2.3、対象となる地点 180 を採用した。ちなみに、第3次航空機モニタリングの空間線量率の RMS 誤差

(Root Mean Square: 二乗平均平方根) は 0.208 であった。Fig. 4-32 にパラメータ設定の異なる場合の空間線量率マップを示す。一般的に、乗数が高いほど、近傍データの影響力が大きくなり、推定値の詳細度が高くなる。Fig. 4-32 の a) と b) を比べると、両者とも概ねの分布傾向は一緒であるが、福島第一原子力発電所から北西に延びる高線量地域をみると a) の方が詳細にマッピングされていることがわかる。



a) 乗数 2.3 対象地点数 180

b) 乗数 2 対象地点数 12

*第3次航空機モニタリングの測定結果を使用

Fig. 4-32 Parameter of IDW method

4.4.2 他の補間法との比較

Fig. 4-33 に他の補間方法との比較を行った。IDW は、処理する各セルの近傍にあるサンプルデータポイントの値を平均することによりそのセルの値を推定する方法であり、推定するセルの中心にポイントが近いほど、平均化処理への影響、つまり加重が大きくなる。また、Kriging は、Z 値を持つ散らばったポイントセットから推定サーフェスを作成する高度な地球統計学的手法である。他の内挿法よりも高度であるため、出力サーフェスを作成する最適な推定方法を選択する前に、Z 値によって表される現象の空間的な振舞いを徹底的に調査する必要がある。Natural Neighbor 内挿法は、検索ポイントに最も近い入力サンプルのサブセットを検出し、検出された入力サンプルに値を内挿するために比例エリアに基づいて重みを適用する。スプライン (Spline) は、サーフェス全体の曲率を最小にする数学関数によって値を推定する内挿法を使用して、入力ポイントを正確に通過するスムーズなサーフェスが得られる。

IDW、Kriging、Natural Neighbor に大きな分布傾向の違いは生じなかった。その理由として、航空機モニタリングが規則正しく、非常に多くの地点を測定しているからではないかと考えられる。一方、スプラインは推定値全体の曲率を最小化するようなスプライン曲線を用いて補間する。

その際、全測定地点を通過するように補間するため、分布が滑らかではなく、場合によっては不自然な地域が生じてしまう。

現在、最適な方法は、**Kriging** と考えられるが、パラメータ設定の煩雑さにより、設定値によっては、マップが大きく変わってしまう可能性がある。航空機モニタリングは、測定点が規則的であるため、今回は、**IDW** を採用することとした。

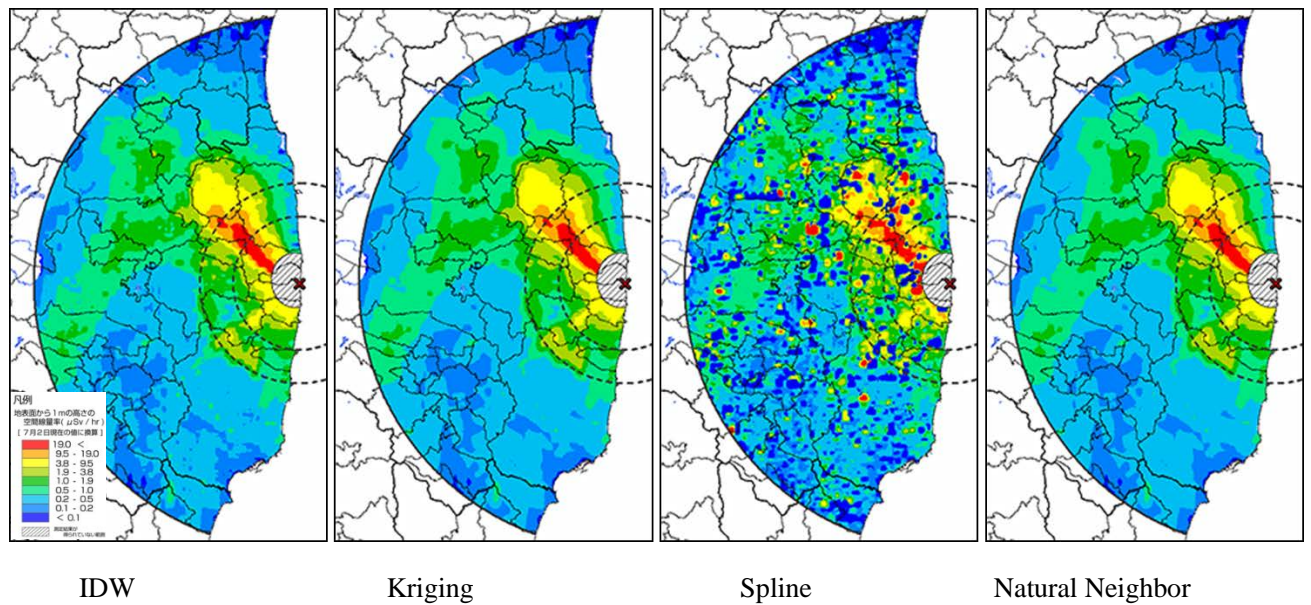


Fig. 4-33 Comparison of map by approximate interpolation method

Table 4-8 Number of measurement point

80 km圏内 (測線間隔：1～2 km)	第1次	167,726	第2次*1	236,158 (68,432)
	第3次	140,122	第4次	142,129
	第4.5次*2	27,796		
東日本 (測線間隔：3 km)	青森県	76,672	岩手県	181,147
	宮城県*3	41,312	秋田県	68,908
	山形県*3	54,107	福島県*3	30,761
	茨城県*3	36,913	栃木県*3	38,241
	群馬県	31,196	埼玉県	47,124
	千葉県	51,138	東京都	24,854
	神奈川県	23,937	新潟県	93,205
	富山県	24,840	石川県	46,967
	福井県	45,549	山梨県	25,991
	長野県	98,586	岐阜県	105,138
	静岡県	81,359	愛知県	34,986
	三重県	24,738	滋賀県	14,810
	京都府	24,054	大阪府	14,314
	兵庫県	36,640	奈良県	24,483
和歌山県	34,182	鳥取県	14,698	
西日本・北海道 (測線間隔：5 km)	島根県	28,690	岡山県	33,348
	広島県	38,706	山口県	30,201
	徳島県	11,884	香川県	30,517
	愛媛県	35,530	高知県	48,063
	福岡県	24,839	佐賀県	12,851
	長崎県	22,431	熊本県	30,291
	大分県	24,816	宮崎県	28,725
	鹿児島県	39,662	沖縄県	12,505
	北海道	356,636		

*1 第2次は80～100km（福島第一原子力発電所の南側については、120 km程度）の範囲内を測定。80 km圏内は、第1次の結果を減衰補正した値を使用。

() 内の数字は、80～100km 圏内で取得した測定地点数。

*2 警戒区域および計画的避難区域のみを測定。

*3 第1次から第4.5次に含まれる測定地点は除く。

5. 結果

5.1 線量率マップ

空間線量率分布図を Fig. 5-1 に示す。原子力発電所から北西に放射線量の高い区域が広がり、奥羽山脈に沿うように福島県の中通り地方を抜けて、栃木県から群馬・埼玉県まで広がっている。また、茨城県から千葉県にかけて広い範囲で線量率が $0.1 \mu\text{Sv/h} \sim 0.2 \mu\text{Sv/h}$ と比較的高い地域が見られた。さらに、線量率が相対的に高い地域が、中国地方や九州地方の中部、長野県や岐阜県、富山県などにも散見された。これらの地域は花崗岩と見られる地質データとも符合しており、天然核種の影響と考えられた。各県の放射線量マップを Appendix 5 に示す。

5.2 放射性 Cs の沈着量マップ

放射性 Cs の沈着量の分布図について Fig.5-2 に、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の分布図についてそれぞれ Fig. 5-3, 5-4 に示す。地表面での放射性 Cs (^{134}Cs , ^{137}Cs) の沈着量は、放射線量と同様に、原子力発電所から北西に放射線量の高い区域が広がり、奥羽山脈に沿うように福島県の中通り地方を抜けて、栃木県から群馬・埼玉県まで広がっている。一方、中国地方や九州地方の中部、長野県や岐阜県、富山県などの線量率が高い地域では、放射性 Cs のスペクトルはほとんど認められず、線量率が比較的高い地域でも、放射性 Cs の沈着量は 10 kBq/m^2 以下となっている。

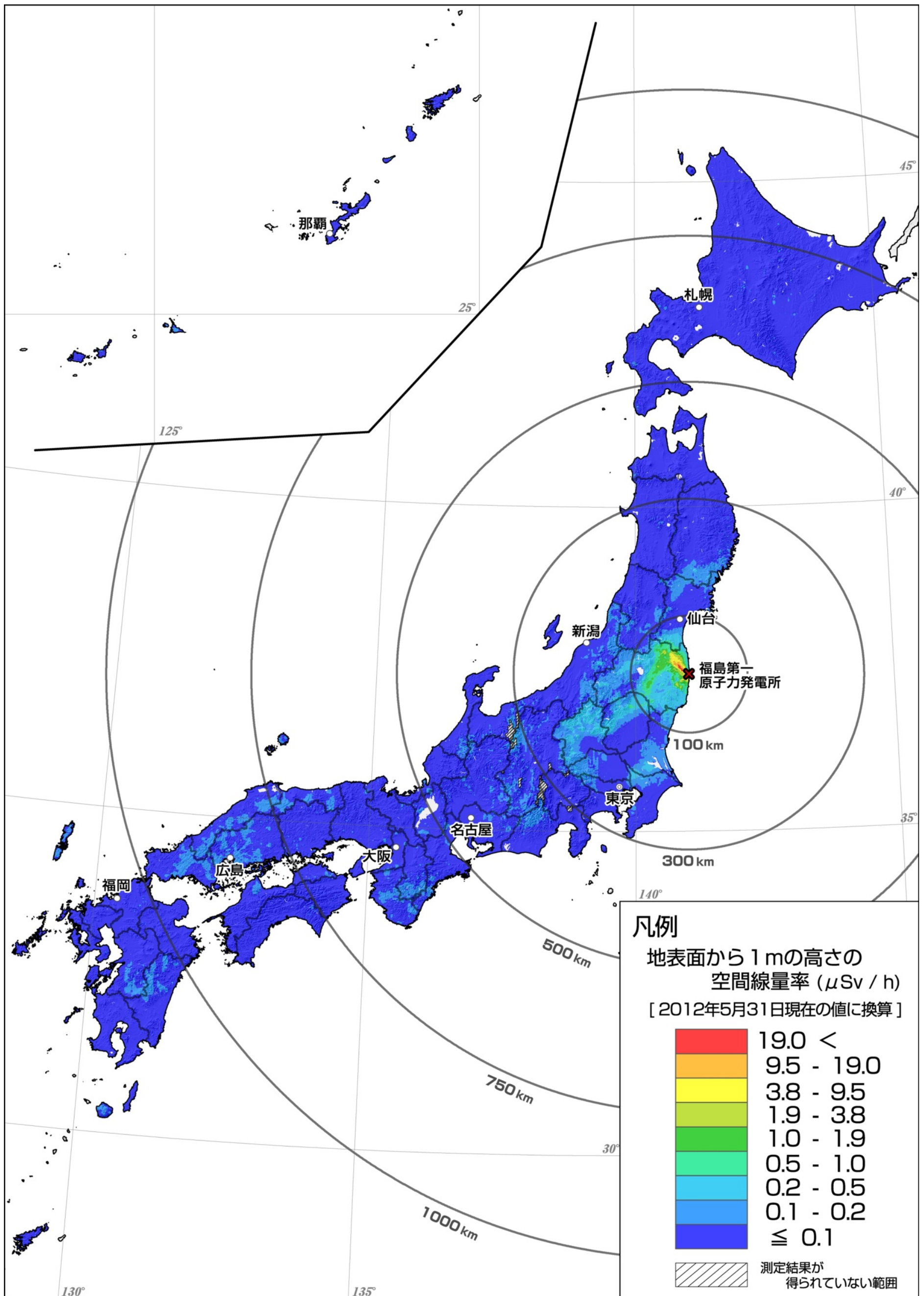


Fig. 5-1 Dose rate of Japan (This result includes the influence of a natural radioactive nuclide.)

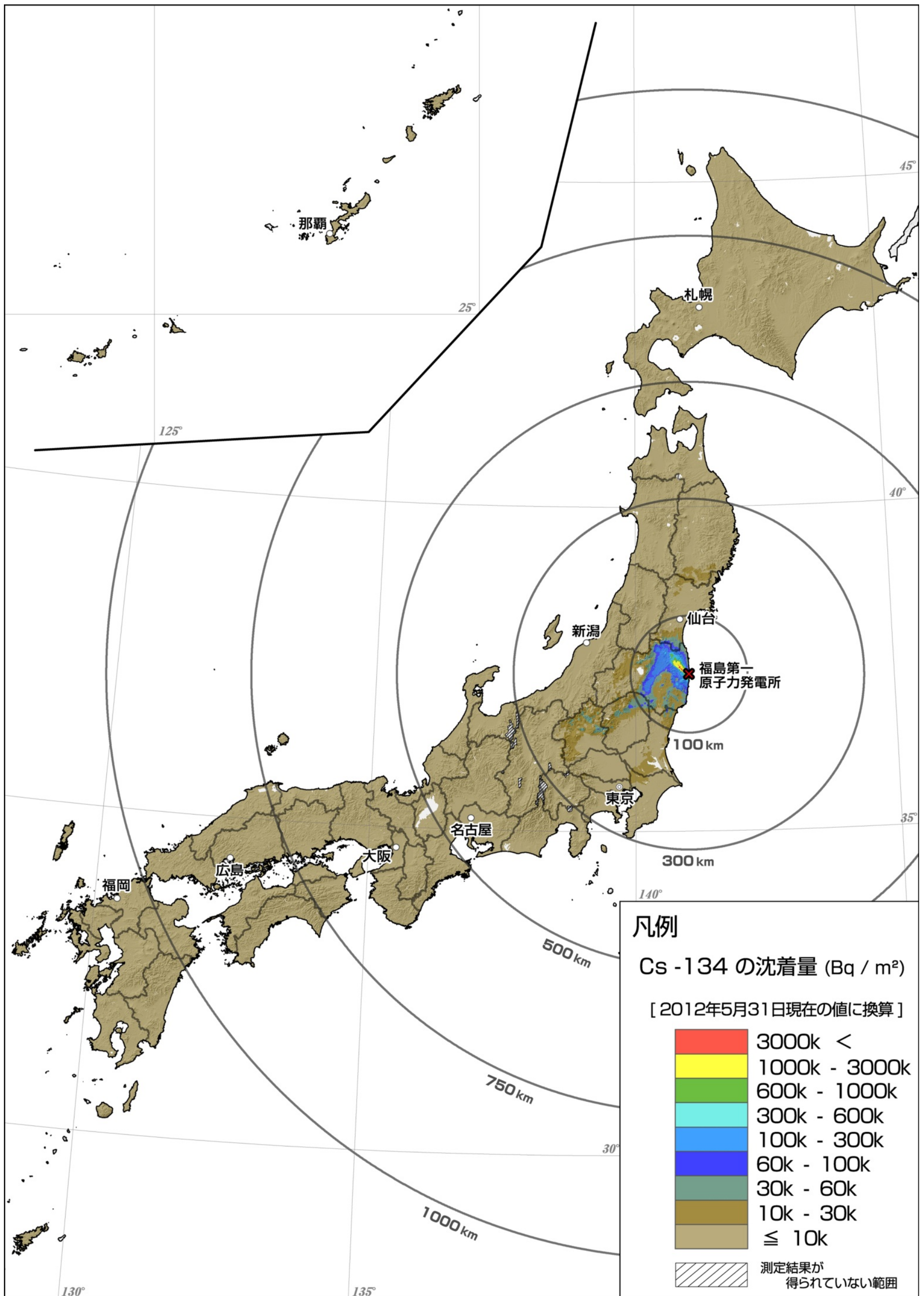


Fig. 5-2 Deposition of ¹³⁴Cs of Japan

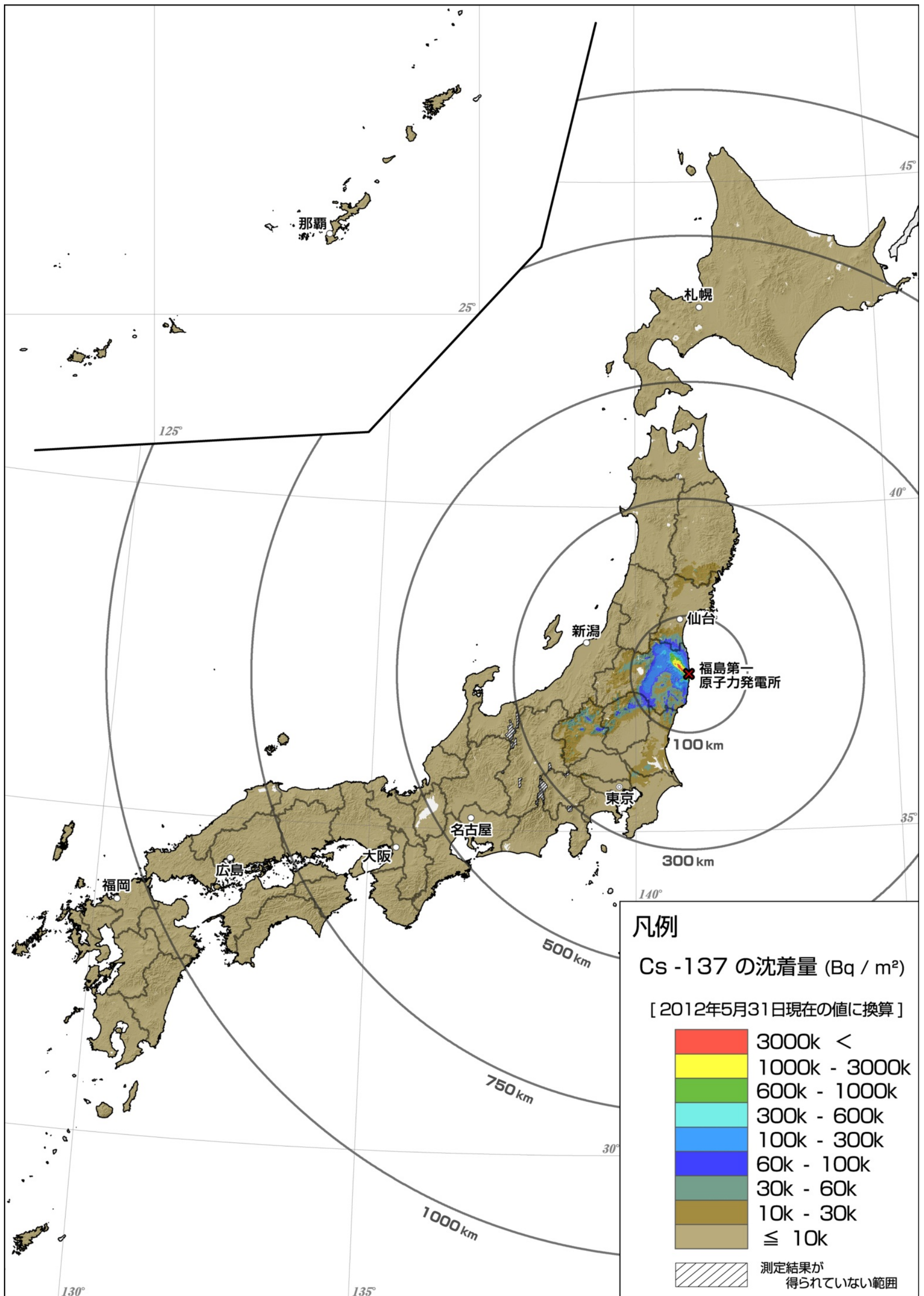


Fig. 5-3 Deposition of ¹³⁷Cs of Japan

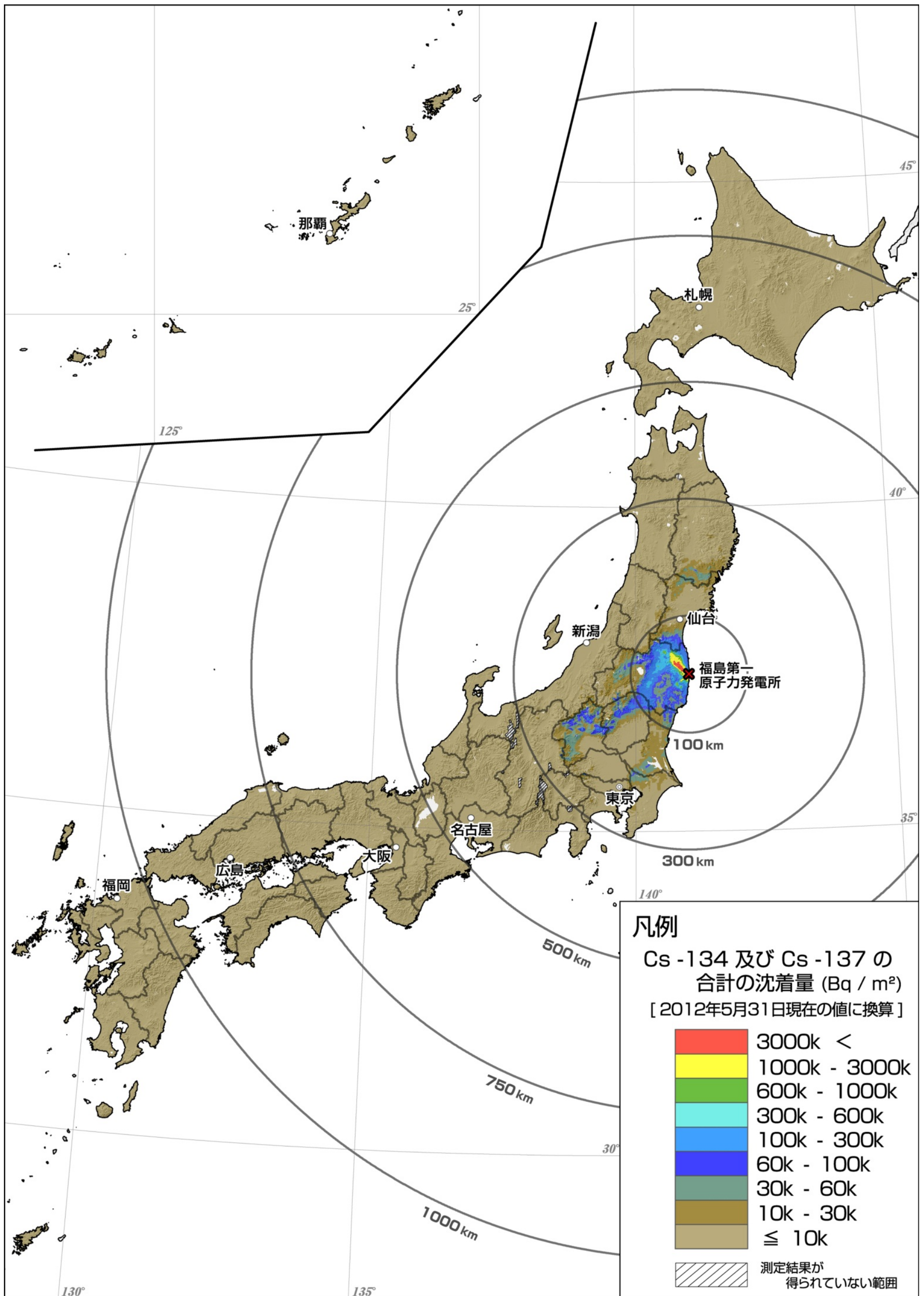


Fig. 5-4 Deposition of ¹³⁴Cs+¹³⁷Cs of Japan