

5. 空間線量率及び放射性セシウム土壌沈着量の実効半減期の評価

5.1. 目的

事故から8年が経過し、事故直後から実施してきた本事業の測定データから環境中の空間線量率は放射性セシウムの物理的減衰よりも速いペースで減少してきていることが分かっている。そこで令和元年度は、空間線量率や放射性セシウム土壌沈着量の減少速度すなわち実効半減期を評価した。実効半減期 T_{eff} は以下の式 (6) で表される。

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{Cs}} + \frac{1}{T_{eco}} \quad (6)$$

ここで、 T_{Cs} は放射性セシウムの壊変による半減期及び T_{eco} は環境半減期である。環境半減期は、天候等の環境要因による減少率として定義される。

環境中における放射性物質の変化は、核実験場での継続的なモニタリングやチェルノブイリ原子力発電所事故のモニタリングから、多項の指数関数で近似できることが知られている。ここでは、これまでの測定データの変化傾向を定量的に把握するため、測定データの指数関数近似について検討した。その結果として求められる実効半減期は、測定データ間の数値の推定や将来の空間線量率の推定に重要なパラメータとなる。

5.2. 測定結果の変化傾向

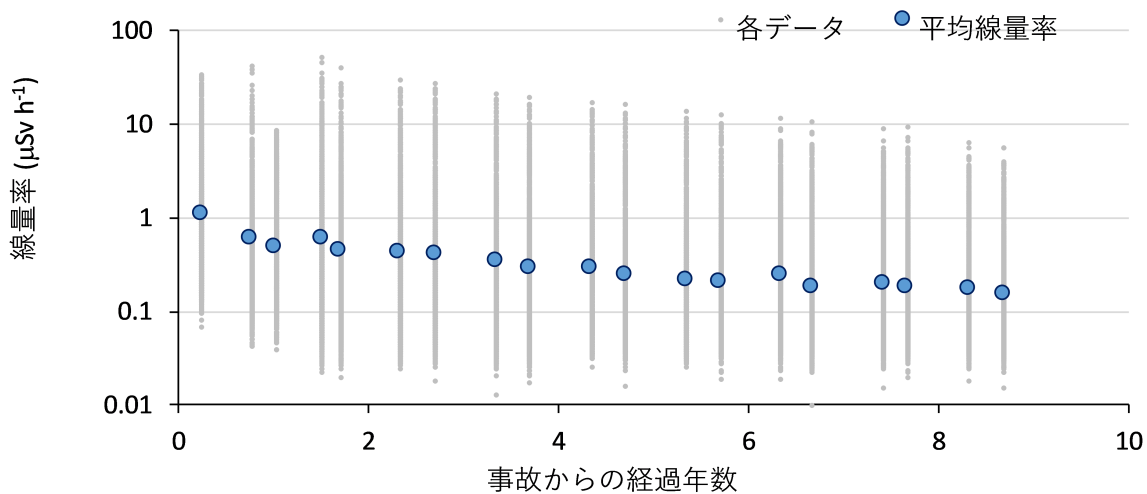
平成23年度から令和元年度までを対象に、測定結果の経時変化傾向を走行サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び無人ヘリサーベイで得られた空間線量率について図5-1に、in-situ測定による土壌中放射性セシウム沈着量について図5-2それぞれ示す。各データは、基準地域メッシュ(1km)ごとに平均した値を、さらに80km圏内で測定値がある10,168メッシュについて平均した線量率(または沈着量)としている。

走行サーベイは、第1回から4,000メッシュ以上の場所について測定が行われている。他の測定と比較すると網羅的に80km圏内の地域を測定している。しかしながら、走行ルートについては、避難指示区域の解除等の理由から毎回異なること、測定対象が舗装された車道上であることに注意が必要である。定点サーベイは、住宅地内にある公共施設など開けた舗装されていない平坦地及び空間線量率が狭い範囲で急激に変化しない場所を選定しているため、他の測定結果と比較して、エリアを代表する数値として使用しやすい。ただし、第1回及び第2回において、迅速な汚染範囲の調査を目的としたため、測定点数が他の測定に比べて極端に少ない。歩行サーベイについては、定点サーベイで選定された測定点の周辺車道や歩道を測定対象としており、第3回以降では一定の場所での測定データが得られている。in-situ測定については、ガンマ線スペクトルを利用しバックグラウンドの影響なしに測定でき、直接的に物理的半減期との比較が可能である。一方、測定時間がかかるため測定点数は多くない。

このように過去の地上で得られたデータは、空間線量率や放射性物質の沈着状況を面的に把握することを目的としていた。さらに測定法の特徴を整理すると、定点サーベイでは測定点における線量率、歩行サーベイでは歩行経路に沿った線量率、走行サーベイでは道路上の線量率と、それぞれの測定手法に応じて限定的な条件下での線量率情報が得られる。このため、沈着量分布の全体像及

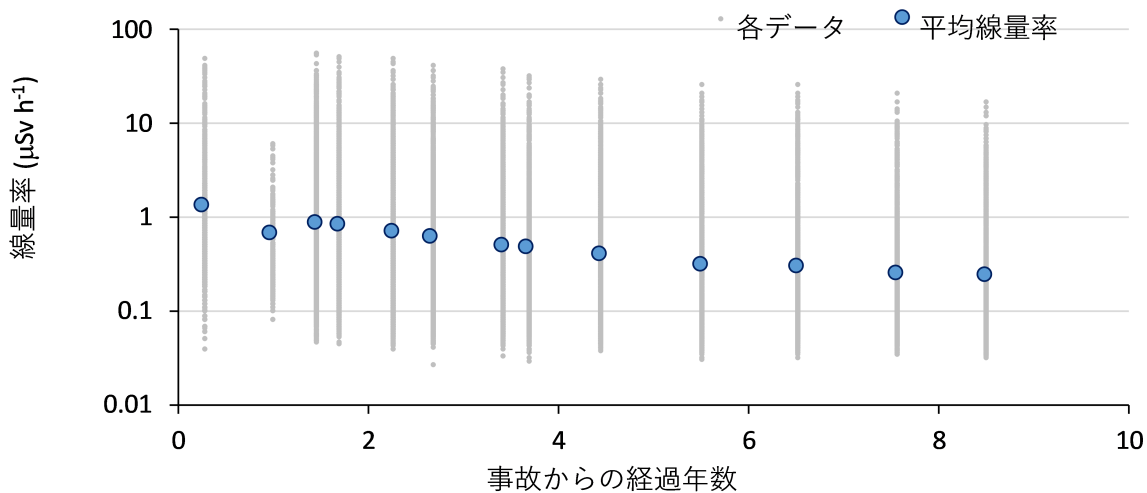
びその減衰傾向を考察するにあたっては面的及び時間的に不連続なデータの取り扱いが課題となる。また、近年では、放射性セシウムによる空間線量率が減少し、天然放射性核種によるバックグラウンドの空間線量率が無視できない状況となっている。よって、それぞれの課題を解決し、現状の放射線分布の変化量について定量的に表すには、バックグラウンド減算及びデータの測定場所等の条件をそろえ、かつデータ点数を考慮する必要がある。これらを考慮し、最適なデータセットの検討及び実効半減期の算出を試みた。

1) 走行サーベイ



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回	第14回	第15回	第16回	第17回	第18回	第19回
事故からの経過年	0.23	0.76	1.02	1.51	1.69	2.32	2.70	3.34	3.68	4.34	4.70	5.34	5.70	6.33	6.66	7.41	7.67	8.31	8.68
平均線量率	1.09	0.60	0.47	0.58	0.45	0.43	0.40	0.33	0.29	0.28	0.25	0.21	0.20	0.24	0.17	0.20	0.18	0.17	0.15
標準偏差	2.62	1.82	0.87	2.01	1.52	1.49	1.38	1.11	0.95	0.89	0.77	0.66	0.61	0.61	0.45	0.46	0.47	0.39	0.31
測定エリア数	4536	3518	2908	6149	4994	6160	5746	5312	5496	5156	5224	5481	5100	4044	5510	3874	3832	3883	4966
初回からの平均値の割合	100	55	43	53	41	39	36	31	26	26	22	19	19	22	16	18	17	15	13

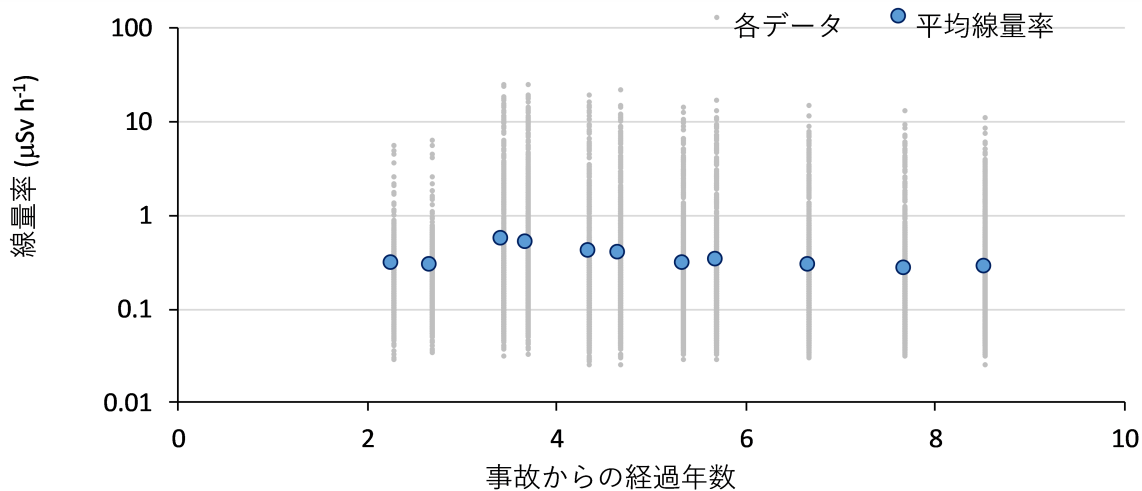
2) 定点サーベイ



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回
事故からの経過年	0.27	0.98	1.45	1.69	2.26	2.67	3.41	3.68	4.44	5.50	6.51	7.56	8.49
平均線量率	1.30	0.65	0.85	0.80	0.69	0.60	0.47	0.46	0.39	0.30	0.29	0.24	0.23
標準偏差	3.60	0.86	2.70	2.50	2.30	1.90	1.60	1.60	1.30	1.00	1.00	0.77	0.70
測定エリア数	1998	354	6419	6403	6406	6404	6422	6415	6424	6407	6414	6399	5024
初回からの平均値の割合	100	50	65	62	53	46	36	35	30	23	22	18	18

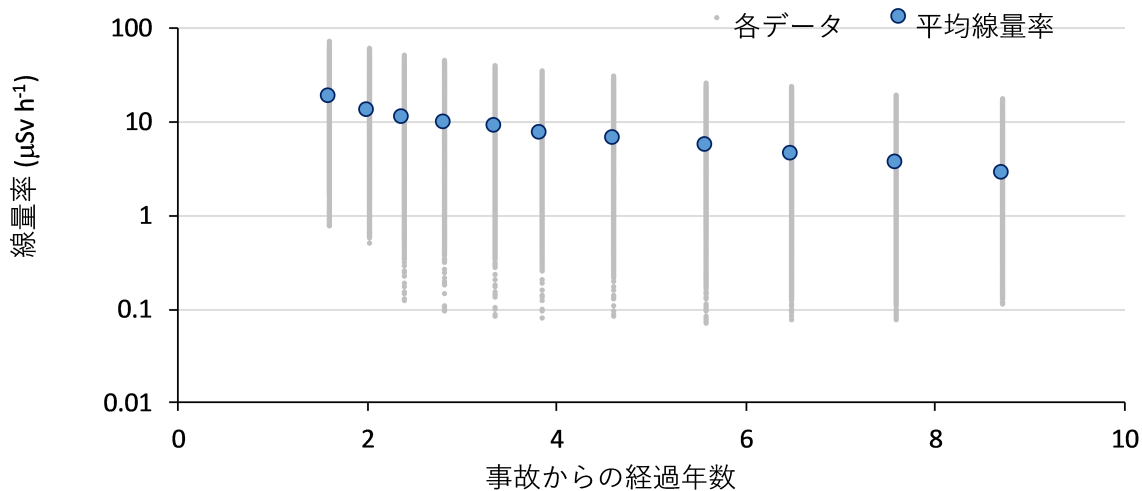
図 5-1 本事業で得られた空間線量率の変化傾向 (1/2)
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

3) 歩行サーベイ



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回
事故からの経過年	2.27	2.68	3.43	3.69	4.34	4.67	5.34	5.69	6.67	7.68	8.53
平均線量率	0.30	0.28	0.54	0.49	0.41	0.39	0.30	0.32	0.29	0.26	0.27
標準偏差	0.46	0.41	1.80	1.60	1.40	1.30	0.88	1.00	0.84	0.71	0.65
測定エリア数	739	878	1960	1977	1964	1946	2000	1976	2118	2117	1766
初回からの平均値の割合	100	93	180	163	137	130	100	107	97	87	90

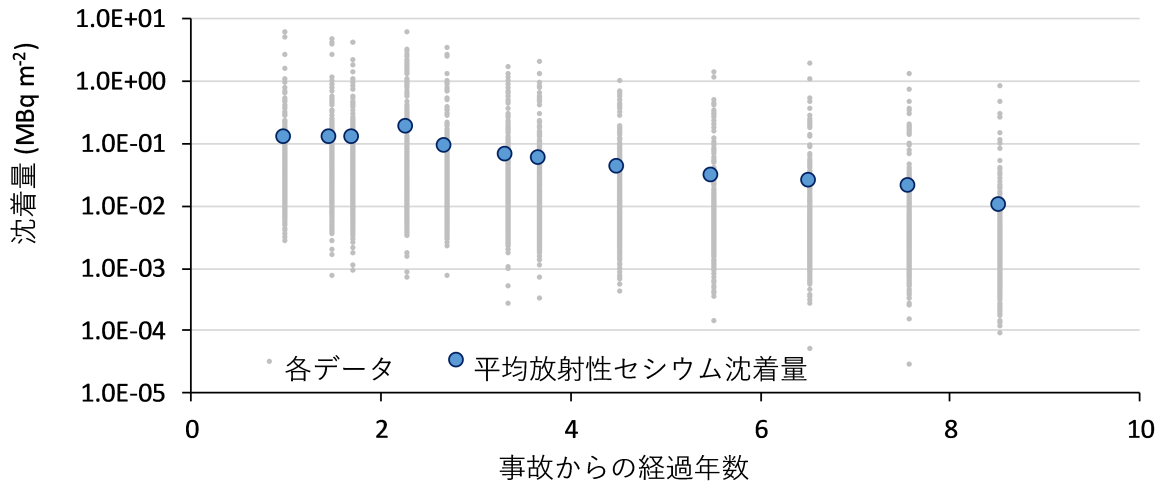
4) 無人ヘリサーベイ



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回
事故からの経過年	1.60	2.02	2.38	2.82	3.35	3.84	4.61	5.58	6.48	7.59	8.71
平均線量率	18	13	11	9.4	8.6	7.4	6.6	5.4	4.5	3.6	2.7
標準偏差	15	12	9.4	8.2	7.4	6.3	5.6	4.7	4.2	3.3	2.5
測定エリア数*	1761	4624	5377	5382	5382	5376	5385	5385	6139	6139	7420
初回からの平均値の割合	100	72	61	52	48	41	37	30	25	20	15

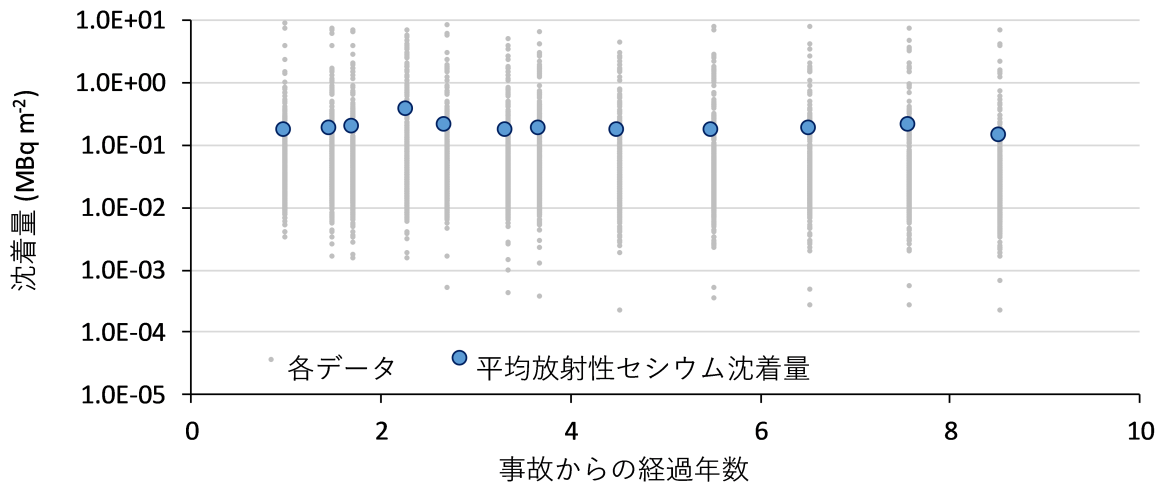
図 5-1 本事業で得られた空間線量率の変化傾向 (2/2)
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

1) in-situ測定（セシウム134）



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回
事故からの経過年	0.98	1.47	1.70	2.27	2.68	3.33	3.67	4.50	5.50	6.52	7.56	8.52
平均セシウム沈着量	0.12	0.12	0.12	0.18	0.088	0.062	0.056	0.041	0.029	0.024	0.020	0.010
標準偏差	0.460	0.420	0.420	0.530	0.290	0.170	0.180	0.110	0.110	0.120	0.089	0.056
測定エリア数	374	386	392	425	401	403	402	402	402	400	400	382
初回からの平均値の割合	100	100	100	150	73	52	47	34	24	20	17	8

2) in-situ測定（セシウム137）



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回
事故からの経過年	0.98	1.47	1.70	2.27	2.68	3.33	3.67	4.50	5.50	6.52	7.56	8.52
平均セシウム沈着量	0.160	0.180	0.190	0.360	0.200	0.170	0.180	0.170	0.160	0.180	0.200	0.140
標準偏差	0.660	0.670	0.680	1.000	0.690	0.490	0.570	0.470	0.620	0.900	0.910	0.790
測定エリア数	374	386	392	425	402	404	403	403	404	404	404	385
初回からの平均値の割合	100	113	119	225	125	106	113	106	100	113	125	88

図 5-2 本事業で得られた放射性セシウム沈着量の変化傾向

5.3. 実効半減期算出方法

令和元年度実施した空間線量率測定においては、事故から8年が経過しているため、空間線量率はバックグラウンドである天然放射性核種による空間線量率に比較的近い数値を示す場所が多くなってきている。変化傾向を定量化する場合、天然放射性核種による空間線量率を正確に減算する必要がある。分布状況調査における KURAMA-II による走行サーベイ結果を基に、東日本の市町村別のバックグラウンド線量率が評価されている¹⁸⁾。ここでは、このバックグラウンド線量率データを採用し減算に用い、市町村ごとに放射性セシウム由来の空間線量率を算出した。

実効半減期算出には、走行サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイのデータを基準地域メッシュ(1km)ごとに集計し、平均値を使用した。また、他事業になるが、航空機サーベイのデータについても同様な評価を行った。さらに無人ヘリサーベイの結果については、測定範囲が狭いため、100mメッシュの平均値を計算した。指数関数近似に用いたデータは、それぞれの測定手法ごとに、調査期間すべてにおいてデータがそろっているメッシュのみ抽出した。本解析には、80km全域のデータ及び人為的なかく乱など環境変化の影響や高空間線量率エリアでの影響を考察するため、避難指示区域(平成31年4月時点)のデータを対象とした。測定期間については、データ数を考慮し、走行サーベイ、無人ヘリサーベイ、航空機サーベイ及び in-situ 測定について全期間、定点サーベイについては第3回(平成24年度調査の1回目)以降、及び歩行サーベイについては第1回(平成25年度1回目)以降のデータを使用した。

抽出したデータについて、走行サーベイ、無人ヘリサーベイ及び航空機サーベイについては、式(7)に示した二項の指数関数近似を行い、実効半減期を算出した。

$$D = a \exp\left(-\frac{0.693}{t_{short}} \times t\right) + b \exp\left(-\frac{0.693}{t_{long}} \times t\right) \quad (7)$$

ここで、 D は空間線量率、 t_{short} は実効半減期の速い成分、 t_{long} は実効半減期の遅い成分、 t は事故からの経過時間(年)を表す。なお、ここで切片である $a+b$ は事故直後の空間線量率となる。近似曲線については最小二乗法により平均値の95%の信頼区間を計算するとともに、実効半減期についても95%の信頼区間を計算した。走行サーベイ、無人ヘリサーベイ及び航空機サーベイ以外のデータについては、指数関数近似を行い、その傾きから実効半減期を算出した。なお、今回は実効半減期 t_{short} 及び t_{long} の導出が主目的であり、事故初期の数値を表す係数 a や b については今後評価を進めることとした。

5.4. 空間線量率の実効半減期

それぞれの測定手法について二項の指数関数または指数関数近似により評価した実効半減期について表5-1にまとめる。走行サーベイの変化傾向及び二項の指数関数近似を行った結果を図5-3に示す。80km圏内全域のデータについて、速い成分は0.53年及び遅い成分は3.64年となった。セシウム134とセシウム137の半減期と比較しても速い速度で減少していることが分かる。この要因の一部としては道路上のセシウムの洗い流し効果や、4.1節で示した放射性セシウムの土壌の深度方向への移動が考えられる。

定点サーベイについて指数関数近似を行った結果を図5-4に示す。定点サーベイでは、データ数が少ない事故直後の測定データを除外したため、速い成分の分析はできなかったが、遅い成分は80

km 圏内で 2.62 年及び避難指示区域で 2.90 年となった。図 5-4 のプロットを見ると直近の 3 年分のデータが近似直線から外れている。80 km 圏内と避難指示区域で遅い成分の実効半減期が異なる要因として、速い成分の影響が無視できない、又はバックグラウンド減算の誤差が影響している可能性が挙げられる。また、避難指示区域において除染作業や中間貯蔵施設の建設が始まっており、人為的な環境変化の影響も考えられる。

歩行サーベイについて指数関数近似を行った結果を図 5-5 に示す。歩行サーベイは、平成 25 年度に調査を開始したため、速い成分の分析はできなかったが、遅い成分は 80 km 圏内で 2.82 年、となった。この数値は定点サーベイの 2.62 年と近い値だが、走行サーベイの 3.64 年より小さい。これは、フィッティングに用いた指数関数モデルの違いによると考えられる。すなわち、二項の指数関数とした走行サーベイに対して 1 成分のみであり、速い成分の影響が無視できない可能性が挙げられる。

無人ヘリサーベイについては、測定範囲が福島第一原発から 5 km 圏内と限られている。実効半減期は、速い成分は 0.59 年及び遅い成分は 3.73 年となった。この数値は、航空機サーベイの評価で得られた数値と等価であり、走行、定点及び歩行のような地上からアプローチできない森林の影響が加味されているものと考えられる。

表 5-1 評価された実効半減期の一覧

項目	対象	測定手法	実効半減期 (年)			
			80 km圏内		避難指示区域 (平成31年4月時点)	
			速い成分	遅い成分	速い成分	遅い成分
空間線量率	車道上	走行サーベイ	0.53	3.64	-	-
			(0.41 - 0.64)	(2.81 - 4.46)		
	平たん地上 (土壌上)	定点サーベイ	-	2.62	-	2.90
				(2.51 - 2.73)		(2.70 - 3.10)
	歩道上	歩行サーベイ	-	2.82	-	-
				(2.60 - 3.04)		
平均値	無人ヘリサーベイ	-	-	0.59	3.73	
				(0.30 - 0.88)	(3.26 - 4.20)	
平均値	航空機サーベイ	0.69	4.96	0.53	4.06	
		(0.54 - 0.85)	(3.87 - 6.05)	(0.36 - 0.71)	(3.37 - 4.76)	
放射性セシウム沈着量	Cs-134	In-situ	1.69		-	
			(1.40 - 1.97)			
	Cs-137		28.3		-	
			(-12.7 - 69.3)			

* () 内は 95%信頼区間を示している。

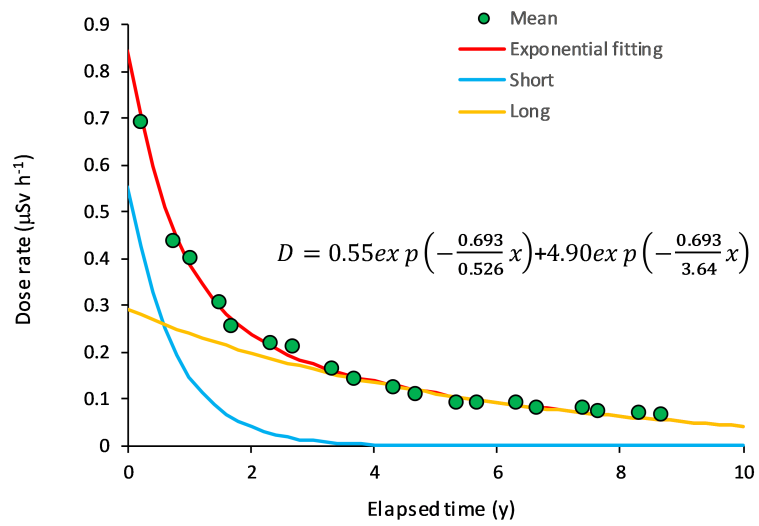
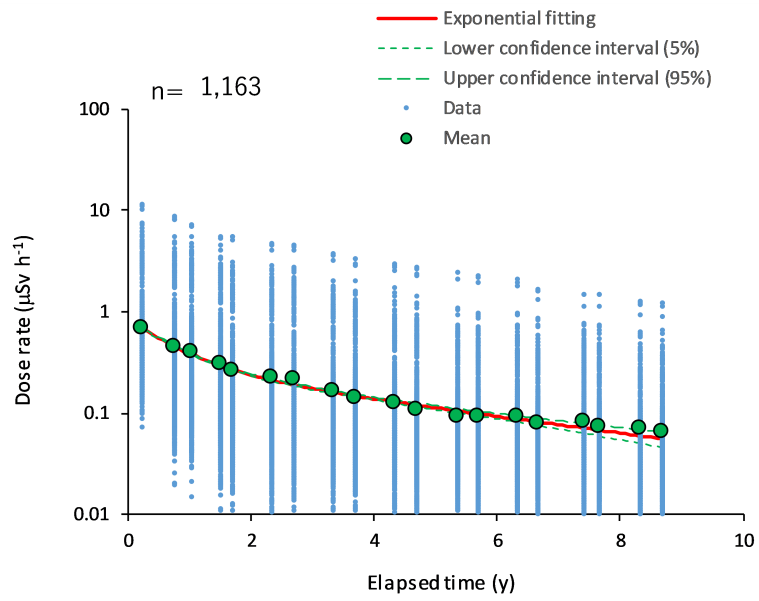


図 5-3 走行サーベイ結果(80 km 圏内)における二項指数関数の近似

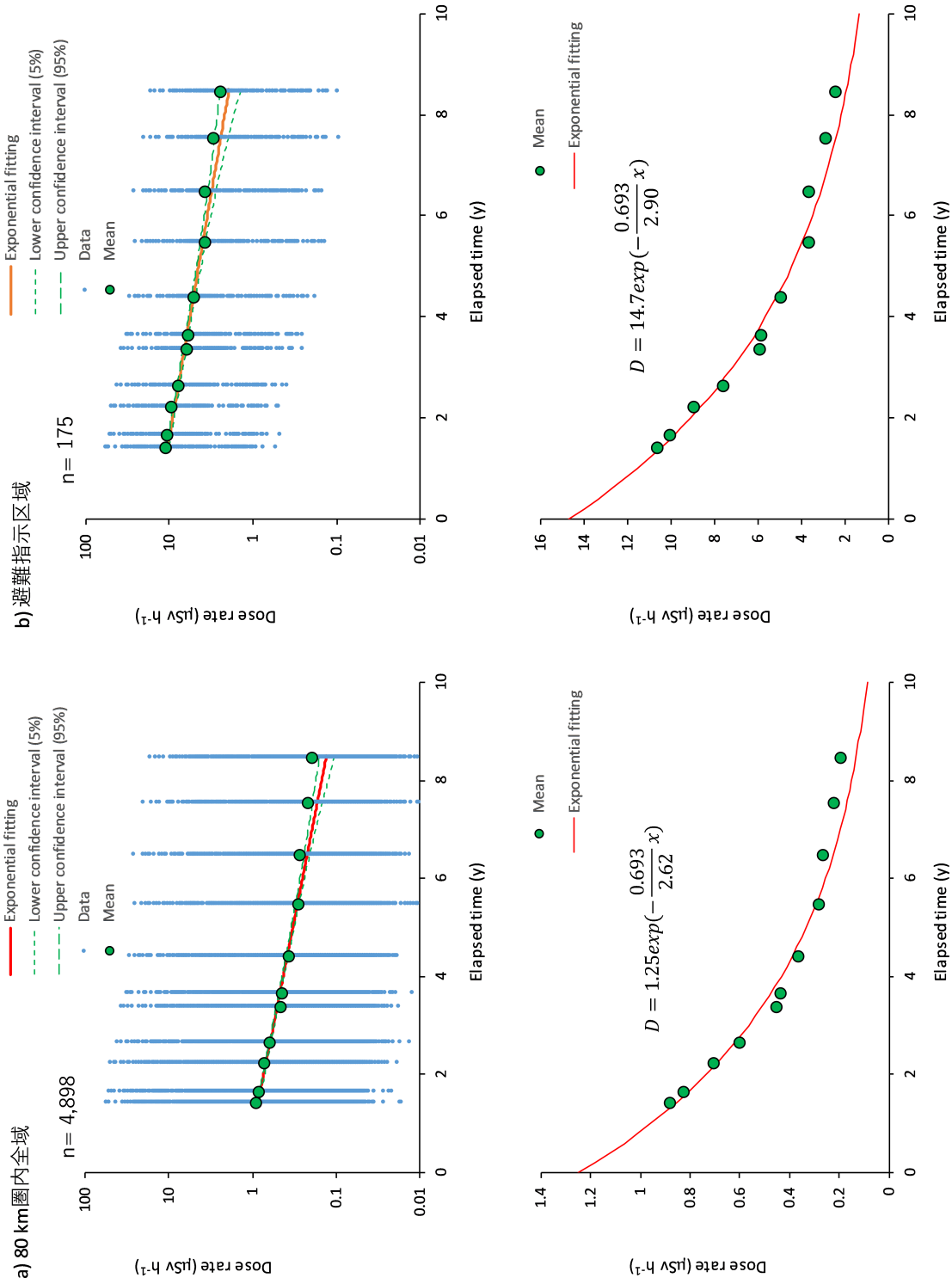


図 5-4 定点サーベイ結果における指数関数の近似

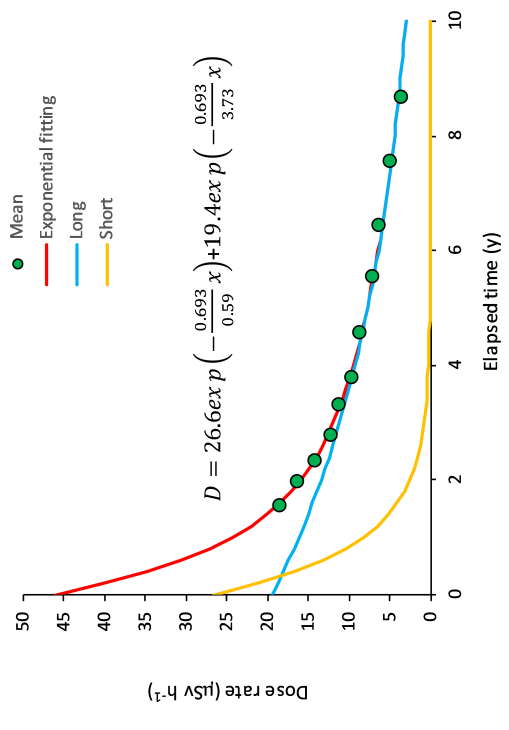
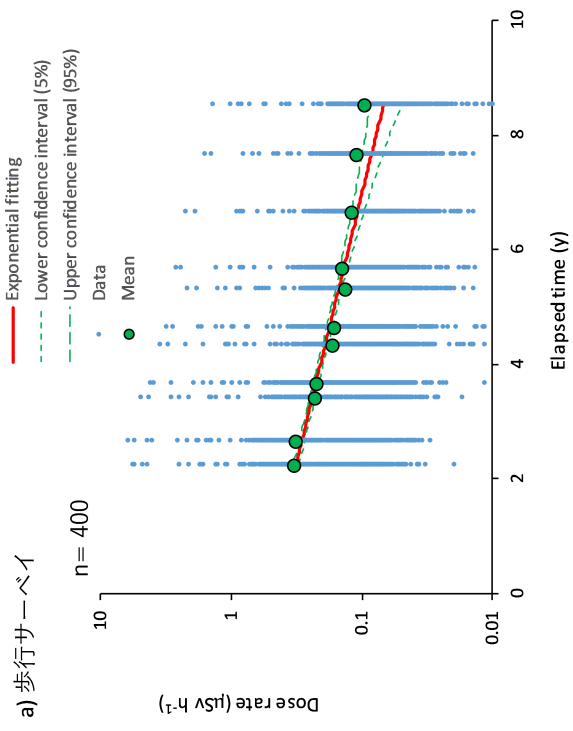
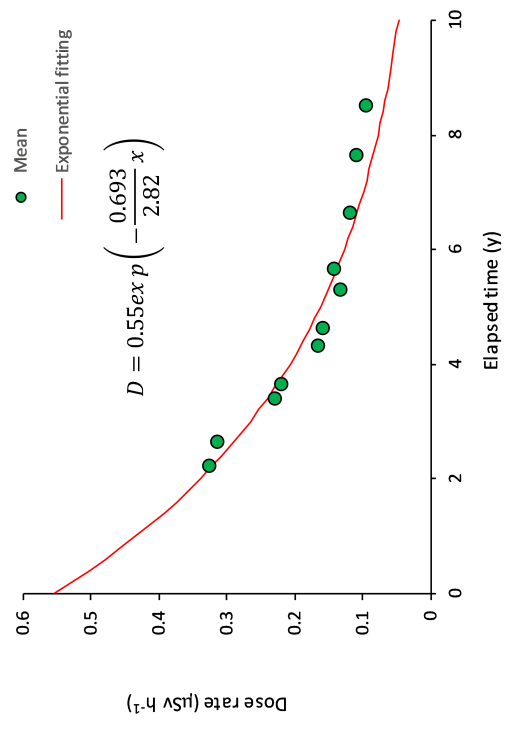
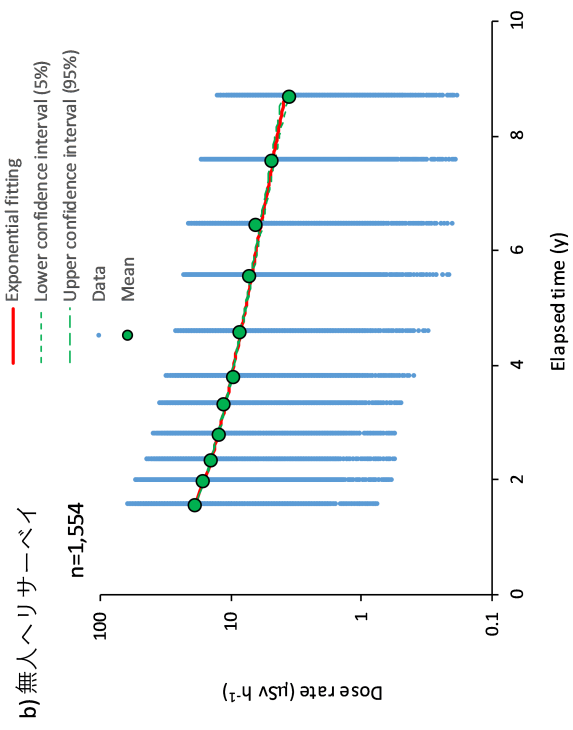


図 5-5 歩行サーベイ及び無人ヘリサーベイ結果における指数関数の近似

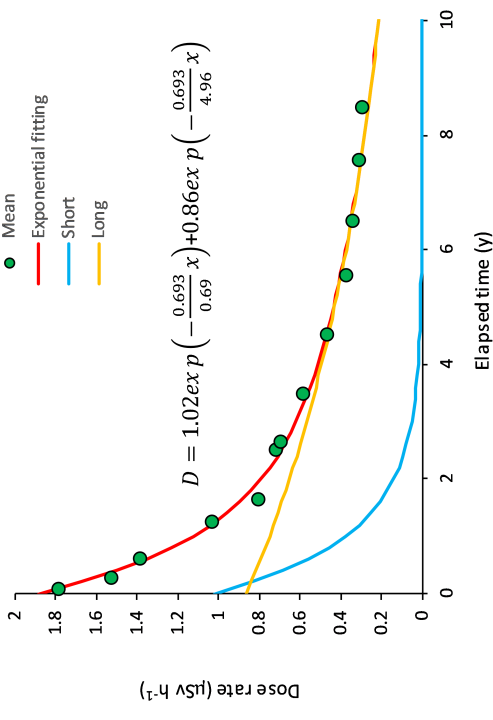
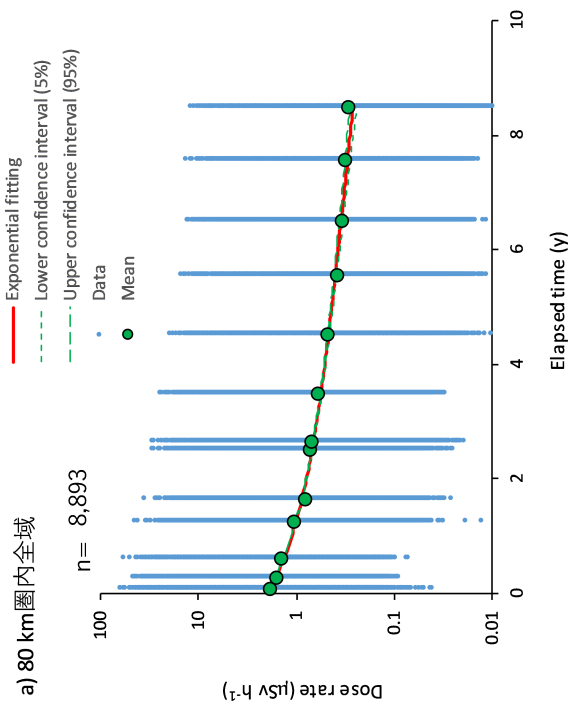
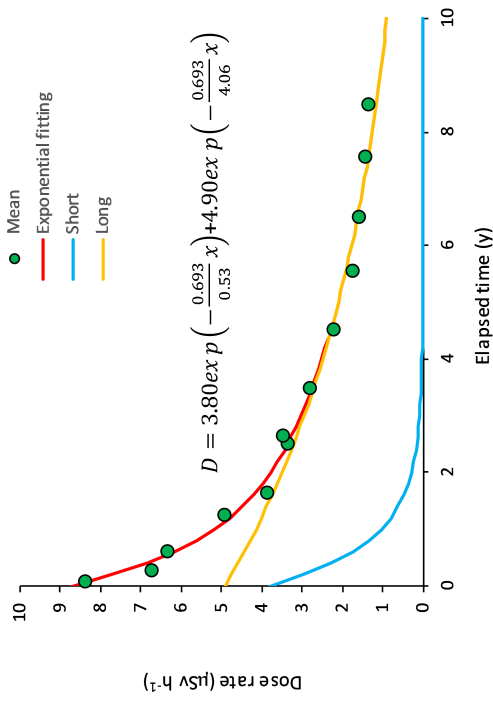
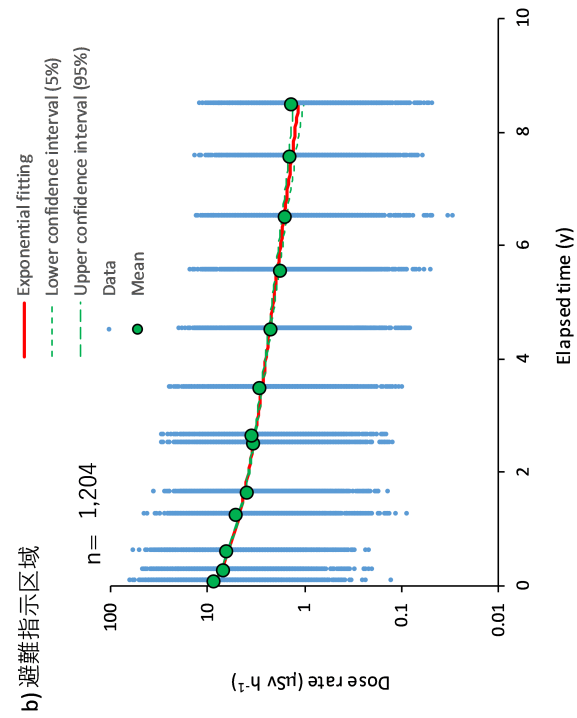


図 5-6 航空機サーベイ結果における指数関数の近似

5.5. 放射性セシウム沈着量の実効半減期

in-situ 測定による土壤中放射性セシウムの沈着量に対して指数関数フィッティングした結果を図 5-7 に示す。図に示すようにセシウム 134 は近似曲線にプロットが乗っているものの、セシウム 137 については、ばらつきが比較的大きいようにみえる。この理由ははっきりしていないが、in-situ 測定の測定誤差の影響か、測定場所の環境変化による影響が考えられる。セシウム 134 とセシウム 137 の実効半減期はそれぞれ、1.69 年及び 28.3 年となり、物理的半減期と比較すると速い数値となった。この数値の違いの原因としては、人為的な測定場所の環境変化が考えられる。今後、測定場所の土地利用による依存性や除染等の影響の有無について検討が必要と考える。

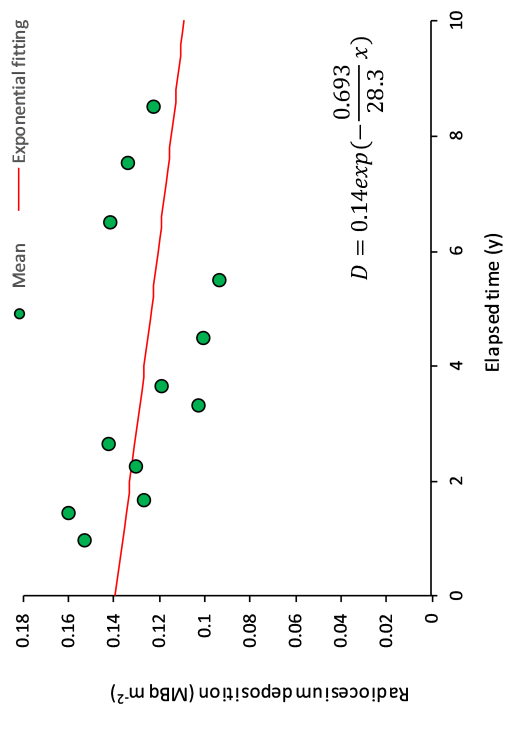
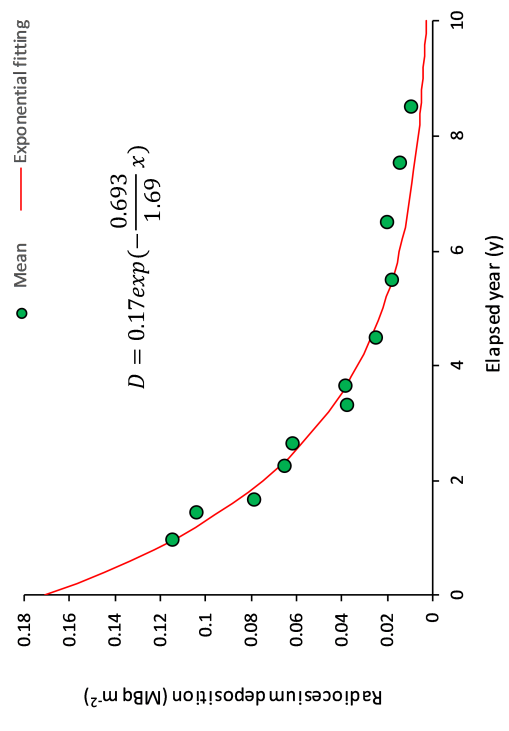
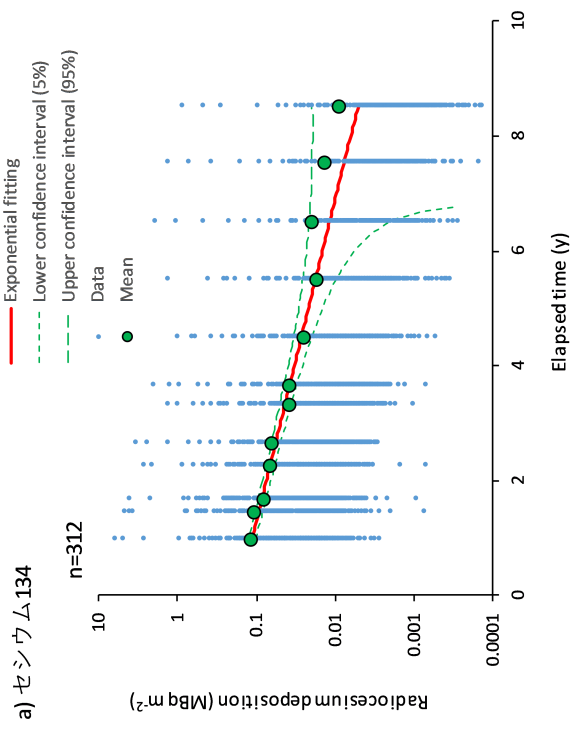
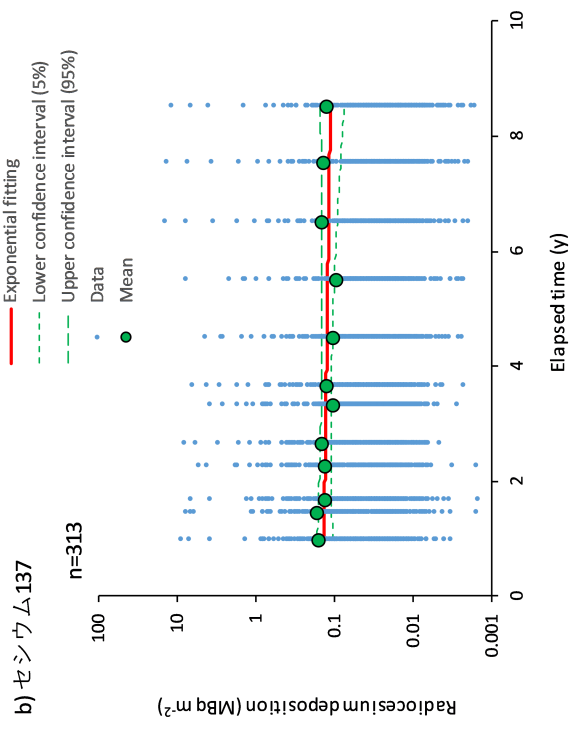


図 5-7 in-situ 測定結果における指数関数の近似

5.6. 同一メッシュにおける空間線量率の変化傾向

生活圏における空間線量率の変化傾向を考察するため、走行サーベイ、歩行サーベイ、定点サーベイ及び航空機サーベイすべての測定手法がそろっている調査メッシュ（基準地域メッシュ（1km））を抽出した。図 5-8 に抽出メッシュの場所を示す。図に示すように、可住地域を中心に約 1,000 箇所抽出できる。それぞれの測定手法の対象は以下のような特徴があるといえる。図 5-9 にそれぞれの測定手法のイメージと測定範囲について示す。

- ・ 走行サーベイ：舗装された道路上（Paved road）
- ・ 歩行サーベイ：家屋周辺の生活圏（Living area）
- ・ 定点サーベイ：未舗装の土壌面（Unpaved ground）
- ・ 航空機サーベイ：エリアの平均値（Area average）

図 5-10 に平成 23 年からの約 1,000 箇所における各測定手法の平均値及び式 (7) に示した二項の指数関数近似結果を示す。このように、空間線量率は航空機サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び走行サーベイの順に大きい傾向にあることが分かる。航空機サーベイと定点サーベイの傾向を見ると、事故後 2 年目までは数値が同じ傾向にあったが、3 年目以降は定点サーベイの方が低くなっている。これは、3 年目以降に本格化した除染作業の影響によるものと考えられる。また、歩行サーベイは定点サーベイや航空機サーベイに比べ低い傾向にある。これは、家屋周辺で重点的に行われた除染の影響や舗装道路上の放射性セシウムの雨水等による洗い流しが原因と考えられる。走行サーベイについては、他の 3 測定手法より低い傾向にある。これは、実効半減期の評価の章でも考察したように、舗装道路上の放射性セシウムの洗い流しの影響を受けているものと考えられる。これらの傾向は生活圏における放射性セシウムの挙動を反映しているものと考えられ、象徴的に本事業の成果を表している。

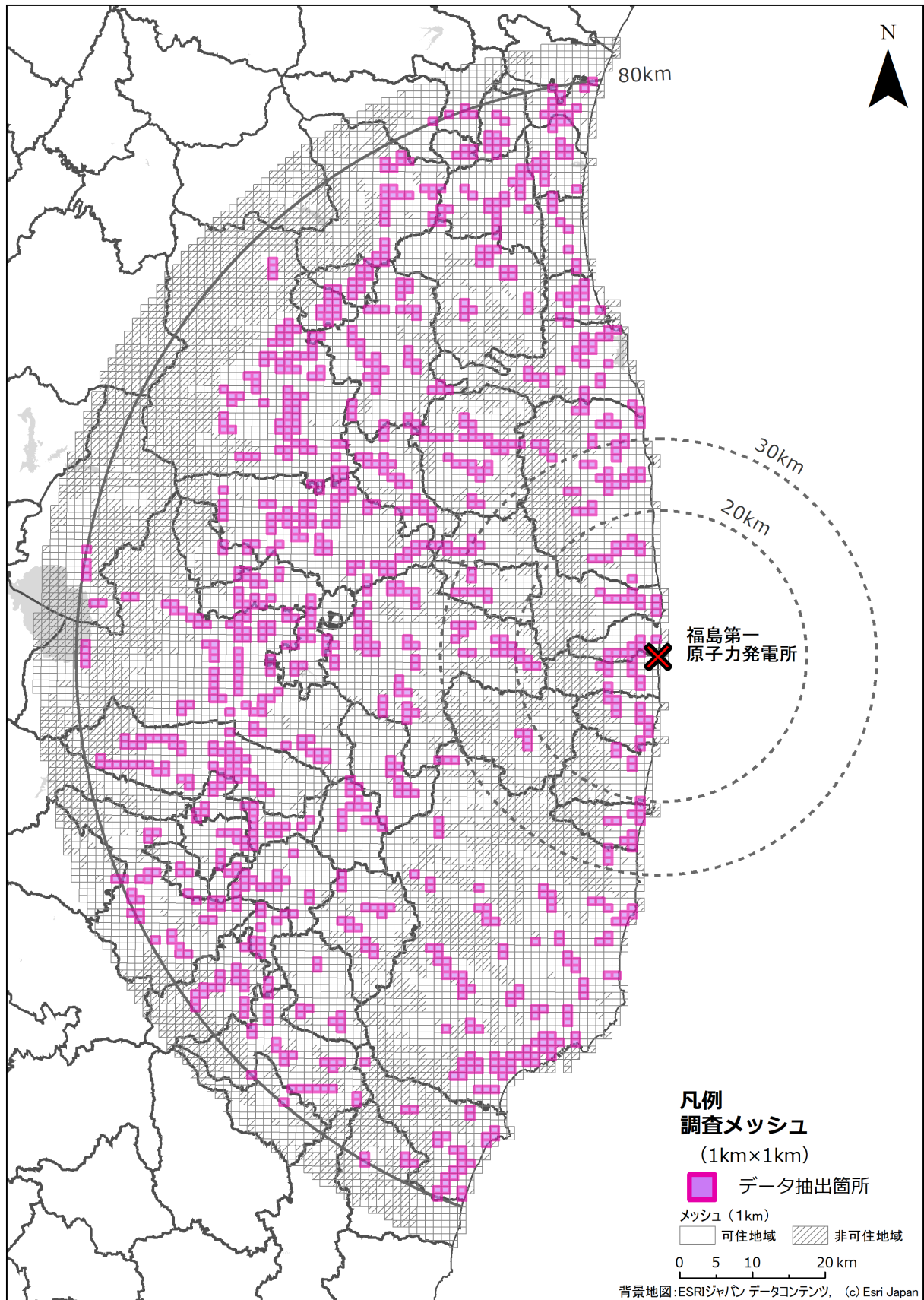


図 5-8 走行サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び航空機サーベイの全測定データセットがある調査メッシュ箇所

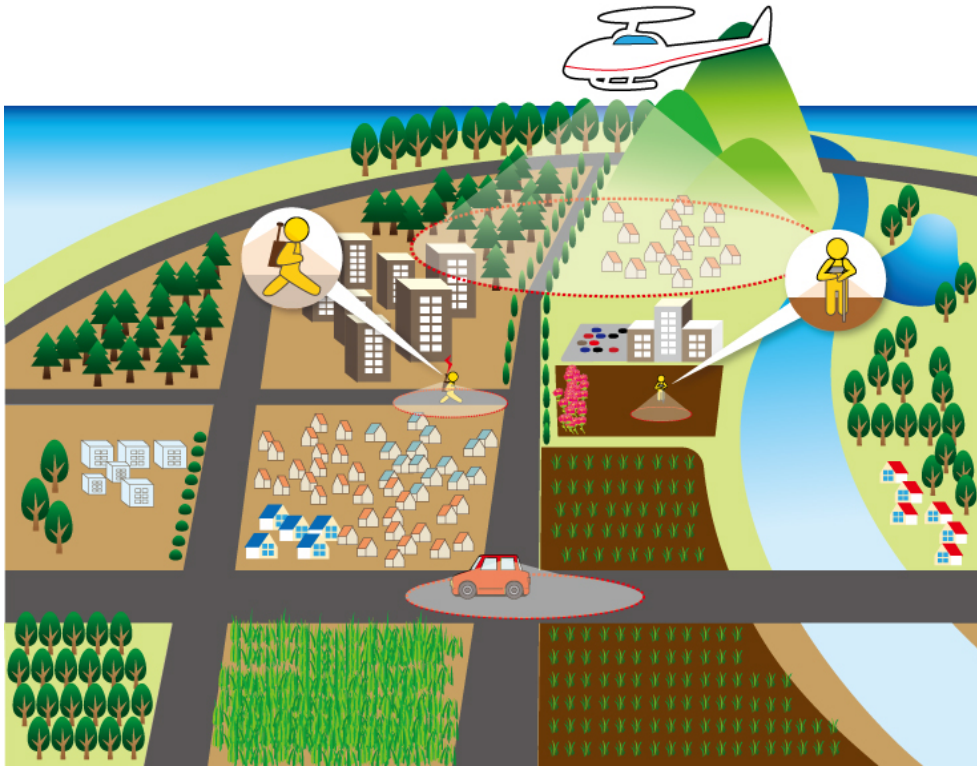


図 5-9 各モニタリングのイメージと測定対象

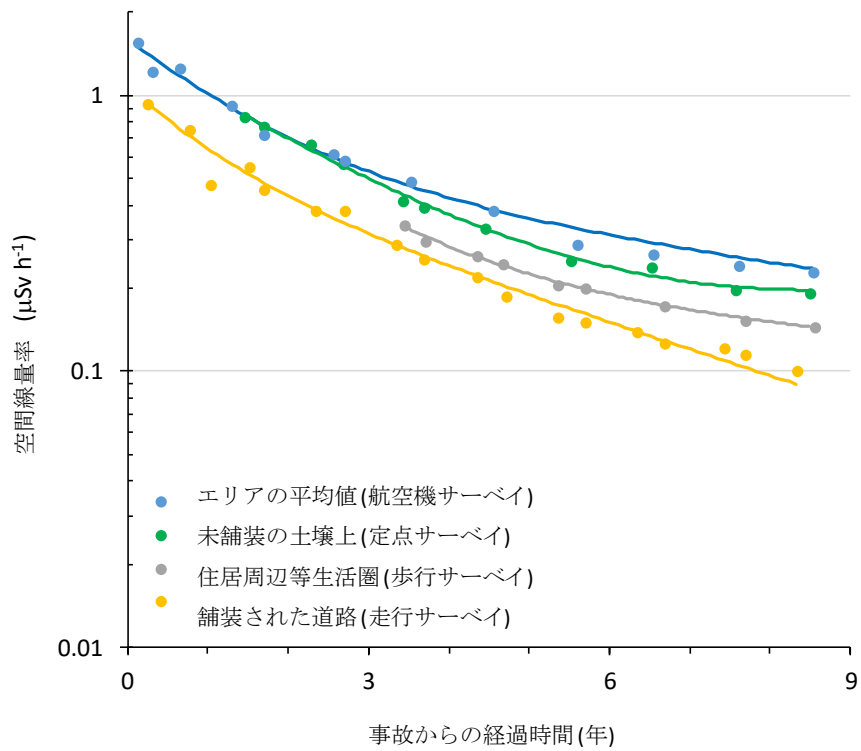


図 5-10 全測定データセットがある調査メッシュにおける空間線量率の変化傾向