

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 7 年以上が経過し、事故直後から実施してきた本事業の測定データは蓄積しつつある。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早いペースで減少してきていることは平成 29 年度までの本事業報告書で報告した通りである。平成 30 年度は、継続的に蓄積してきた環境モニタリングデータを基に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する検討を開始した。実効半減期 T_{eff} は以下の式 (7) で表される。

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{Cs}} + \frac{1}{T_{eco}} \quad (7)$$

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、多重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

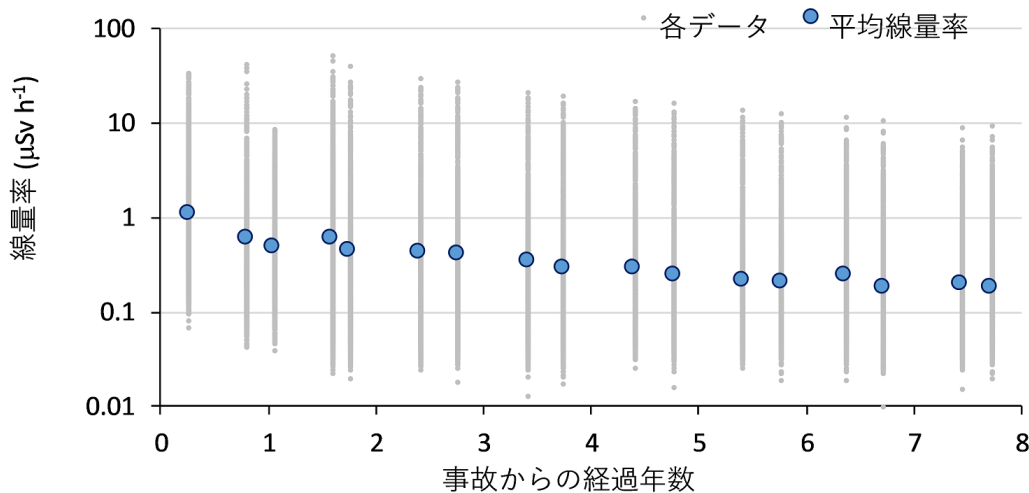
平成 23 年度から平成 30 年度までを対象に、測定結果の経時変化傾向を走行サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び無人ヘリサーベイで得られた空間線量率について図 5-1 に、in-situ 測定による土壌中放射性セシウム沈着量について図 5-2 にそれぞれ示す。各データは、政府の定めた統計に用いる標準地域メッシュ (1 km メッシュ) ごとに平均化している。ここでは、80 km 圏内の地域 10,168 メッシュが対象となる。

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 80 km 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道路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、迅速な汚染範囲の決定を目的としたため、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、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ものの、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

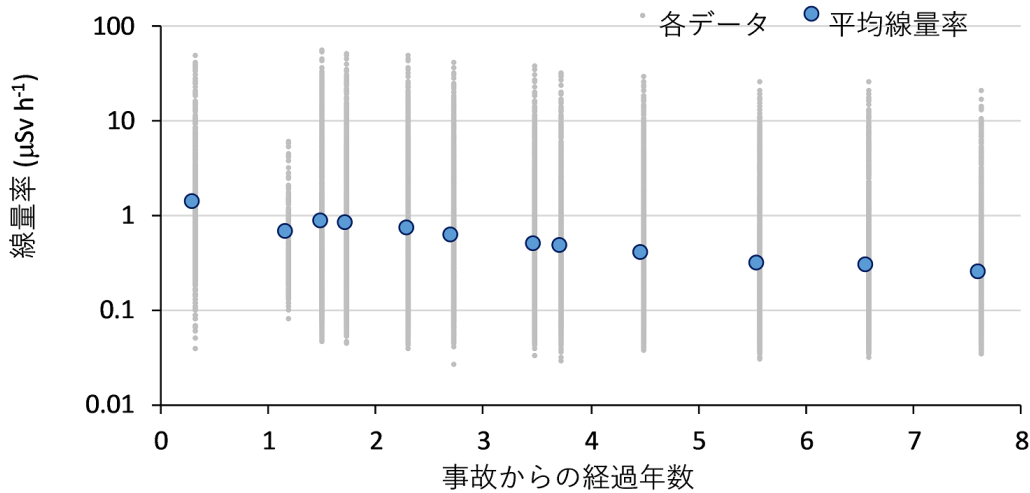
あたっては面的及び時間的に不連続なデータの取り扱いが課題となる。また、近年では、空間線量率が減少傾向にあり、天然放射性核種によるバックグラウンドの空間線量率が無視できない状況となっている。また、現状の放射線分布の変化量について定量的に表すには、バックグラウンド減算及びデータの測定場所等の条件をそろえ、かつデータ点数を考慮する必要がある。これらを考慮し、最適なデータセットの検討及び実効半減期の算出を試みた。

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
事故からの経過年	0.25	0.8	1.0	1.6	1.7	2.4	2.7	3.4	3.7	4.4	4.8	5.4	5.8	6.4	6.7	7.4	7.7
平均線量率	1.1	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
標準偏差	2.6	1.82	0.9	2.0	1.5	1.5	1.4	1.1	0.9	0.9	0.8	0.7	0.61	0.61	0.45	0.46	0.47
測定エリア数	4536	3518	2908	6149	4994	6160	5746	5312	5496	5156	5224	5481	5100	4044	5510	3874	3832
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

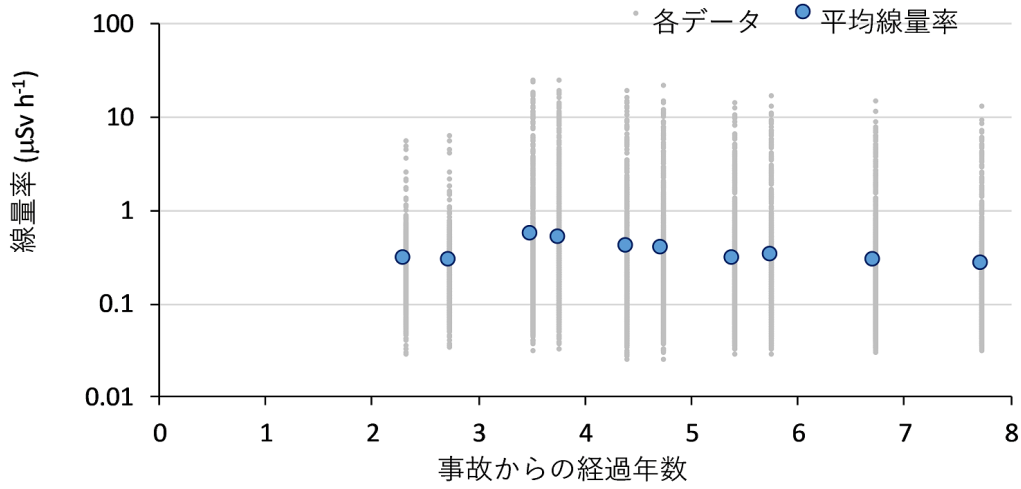
2) 定点サーベイ



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
事故からの経過年	0.32	1.2	1.5	1.7	2.3	2.7	3.5	3.7	4.5	5.6	6.6	7.6
平均線量率	1.3	0.65	0.85	0.80	0.69	0.60	0.47	0.46	0.39	0.30	0.29	0.24
標準偏差	3.6	0.86	2.7	2.5	2.3	1.9	1.6	1.6	1.3	1.0	1.0	0.8
測定エリア数	1994	353	6415	6402	6406	6403	6421	6414	6424	6405	6413	6397
初回からの平均値の割合	100	49	65	61	53	46	36	35	29	23	22	18

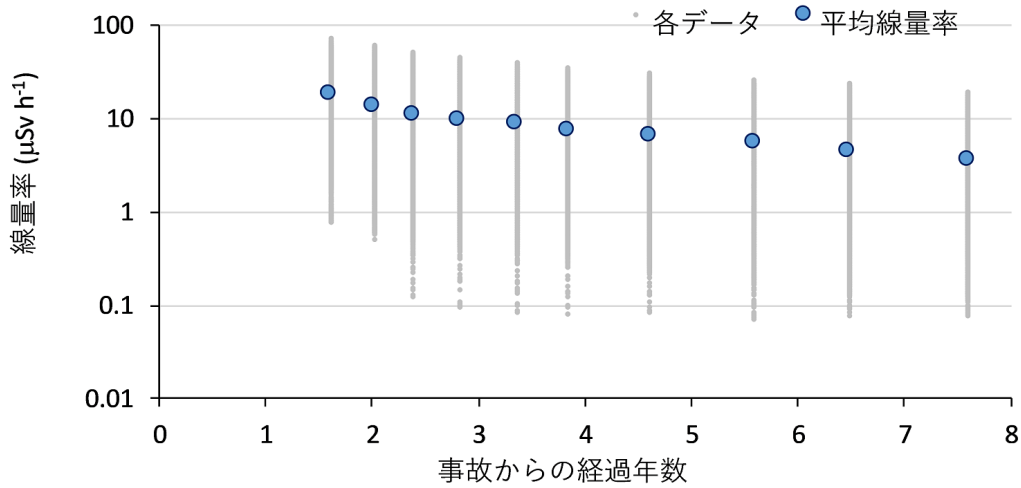
図 5-1 本事業で得られた空間線量率の変化傾向 (1/2)
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

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
事故からの経過年	2.31	2.7	3.5	3.8	4.4	4.7	5.4	5.7	6.7	7.7
平均線量率	0.3	0.28	0.54	0.49	0.41	0.39	0.30	0.32	0.29	0.26
標準偏差	0.5	0.41	1.8	1.6	1.4	1.3	0.9	1.0	0.8	0.7
測定エリア数	739	878	1960	1977	1964	1946	2000	1976	2118	2117
初回からの平均値の割合	100	93	177	161	134	129	97	106	94	84

4) 無人ヘリサーベイ

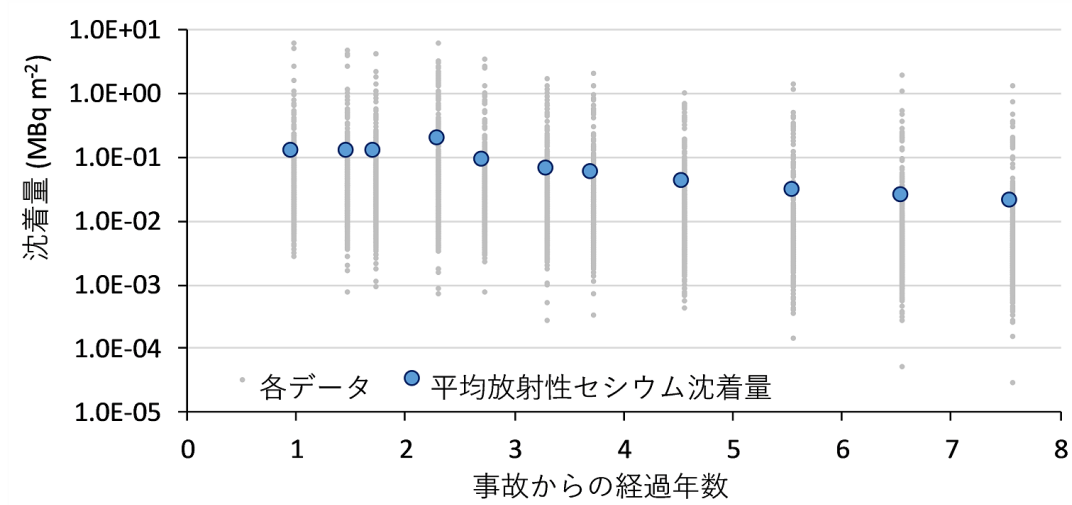


測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回
事故からの経過年	1.60	2.0	2.4	2.8	3.4	3.8	4.6	5.6	6.5	7.6
平均線量率	18	13	11	9.4	8.6	7.4	6.6	5.4	4.5	3.6
標準偏差	15	12	9.4	8.2	7.4	6.3	5.6	4.7	4.2	3.3
測定エリア数 *	1761	4624	5377	5382	5382	5376	5385	5385	6139	6139
初回からの平均値の割合	100	72	59	51	47	40	36	30	24	20

* 100 mメッシュ

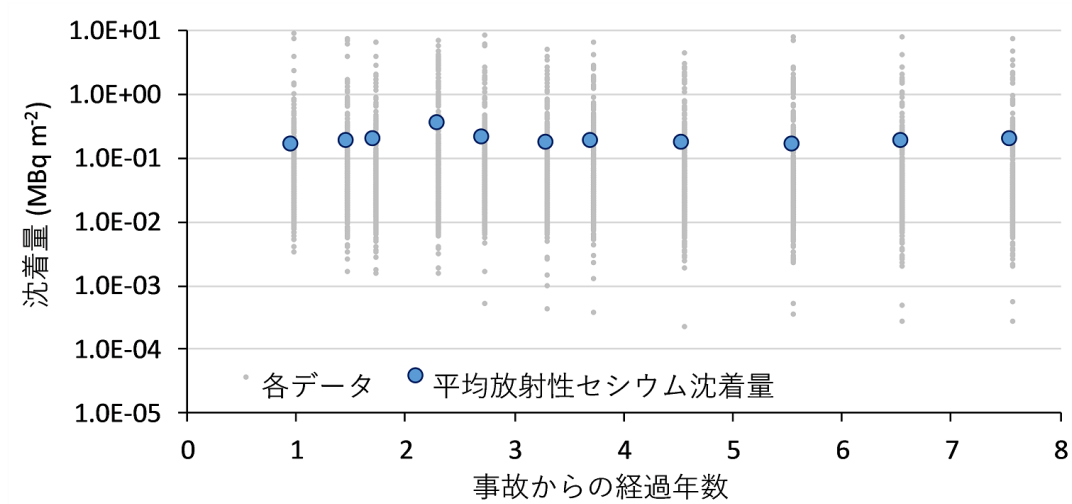
図 5-1 本事業で得られた空間線量率の変化傾向 (2/2)
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

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
事故からの経過年	1.0	1.5	1.7	2.3	2.7	3.3	3.7	4.5	5.5	6.5	7.5
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
標準偏差	0.46	0.42	0.42	0.53	0.29	0.17	0.18	0.11	0.11	0.12	0.089
測定エリア数	374	386	392	425	401	403	402	402	402	400	400
初回からの平均値の割合	100	101	101	158	76	53	49	35	25	21	17

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
事故からの経過年	1.0	1.5	1.7	2.3	2.7	3.3	3.7	4.5	5.5	6.5	7.5
平均セシウム沈着量	0.16	0.18	0.19	0.33	0.20	0.16	0.17	0.16	0.15	0.17	0.19
標準偏差	0.66	0.67	0.67	0.97	0.68	0.48	0.56	0.46	0.60	0.89	0.88
測定エリア数	374	386	392	425	402	404	403	403	404	404	404
初回からの平均値の割合	100	114	121	214	127	106	110	103	97	112	119

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

平成 30 年度実施した空間線量率測定においては、事故から 7 年以上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¹⁷⁾。ここでは、このバックグラウンド線量率データを採用し、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。

データセットには、走行サーベイ、定点サーベイ及び歩行サーベイのデータを 1 km メッシュごとに集計し、平均値を使用した。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、80 km 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、走行サーベイ及び in-situ 測定について全期間、定点サーベイ及び歩行サーベイについては第 3 回以降のデータを使用した。

抽出したデータについて、走行サーベイについては、式 (8) に示した二重の指数関数近似を行い、実効半減期を算出した。

$$D = a \exp\left(-\frac{0.693}{t_{short}} \times t\right) + b \exp\left(-\frac{0.693}{t_{long}} \times t\right) \quad (8)$$

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 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} の導出を主目的としたため、係数 a や b については今後評価を進めたい。

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重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について、図 5-3 に示す。80km 圏内全域のデータでは、速い成分は 0.454 年及び遅い成分は 2.50 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。スクレーパープレートにより評価された実効的な重量緩衝深度を考慮して空間線量率の時間変化を計算し二重指数関数近似を行うと、速い成分の実効半減期は 1.5 年、遅い成分の実効半減期は 8.2 年と計算される。その数値と比較しても減少速度は速く評価されている。走行サーベイによる測定では車道上の影響が大きくなることから、この減少速度の速さの要因は道路上における放射性セシウムの洗い流しの効果が一因と考えられる。また、避難指示区域については、速い成分が 0.038 年となったものの、図 5-3 b) に示したようにデータ点数の不足や事故直後のデータのばらつきが影響しているものと考えられる。一方、遅い成分は 2.61 年となり 80 km 圏内とほぼ同等であった。

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、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 2.46 年及び避難指示区域で 3.02 年となった。図 5-4 のプロットを見ると過去 2 年分のデータが近似直線から外れている。80km 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 2.75 年及び避難指示区域で 2.69 年となり、ほぼ等価であった。なお、走行サーベイより若干大きい数値の理由は車道と歩道の洗い流し効果の違いが反映されているものと考えられる。

空間線量率の測定結果について、各年度の平均値に対して指数関数近似を行った結果を図 5-6 に示す。走行サーベイはそれ以外の測定手法と比較して空間線量率は低い。一方、近似直線の傾きは、すべての測定手法でほぼ同様であり、80 km 圏内全域において近年では、2.46–2.75 年の半減期で減少していると考えてよい。一方、避難指示区域においては、歩行サーベイの結果は定点サーベイと走行サーベイの間を推移している。この結果は、車道、平坦地及び歩道の測定場所の違いを反映している。

これらの近似手法は空間線量率の定量的な変化傾向の把握に有効である。

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			
			80 km圏内		避難指示区域	
			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	0.45	2.50	0.038	2.61
			(0.29–0.62)	(1.99–3.01)	(-35.1–35.2)	(2.39–2.83)
	平坦地上(土壌上)	定点サーベイ	-	2.46	-	3.02
				(2.29–2.63)		(2.70–3.35)
歩道上	歩行サーベイ	-	2.75	-	2.69	
			(2.24–3.25)		(2.20–3.19)	
放射性セシウム沈着量	セシウム134	in-situ	1.70		-	
			(1.20–2.19)			
	セシウム137		19.9		-	
			(-18.9–58.7)			

* () 内は 95%信頼区間を示している。

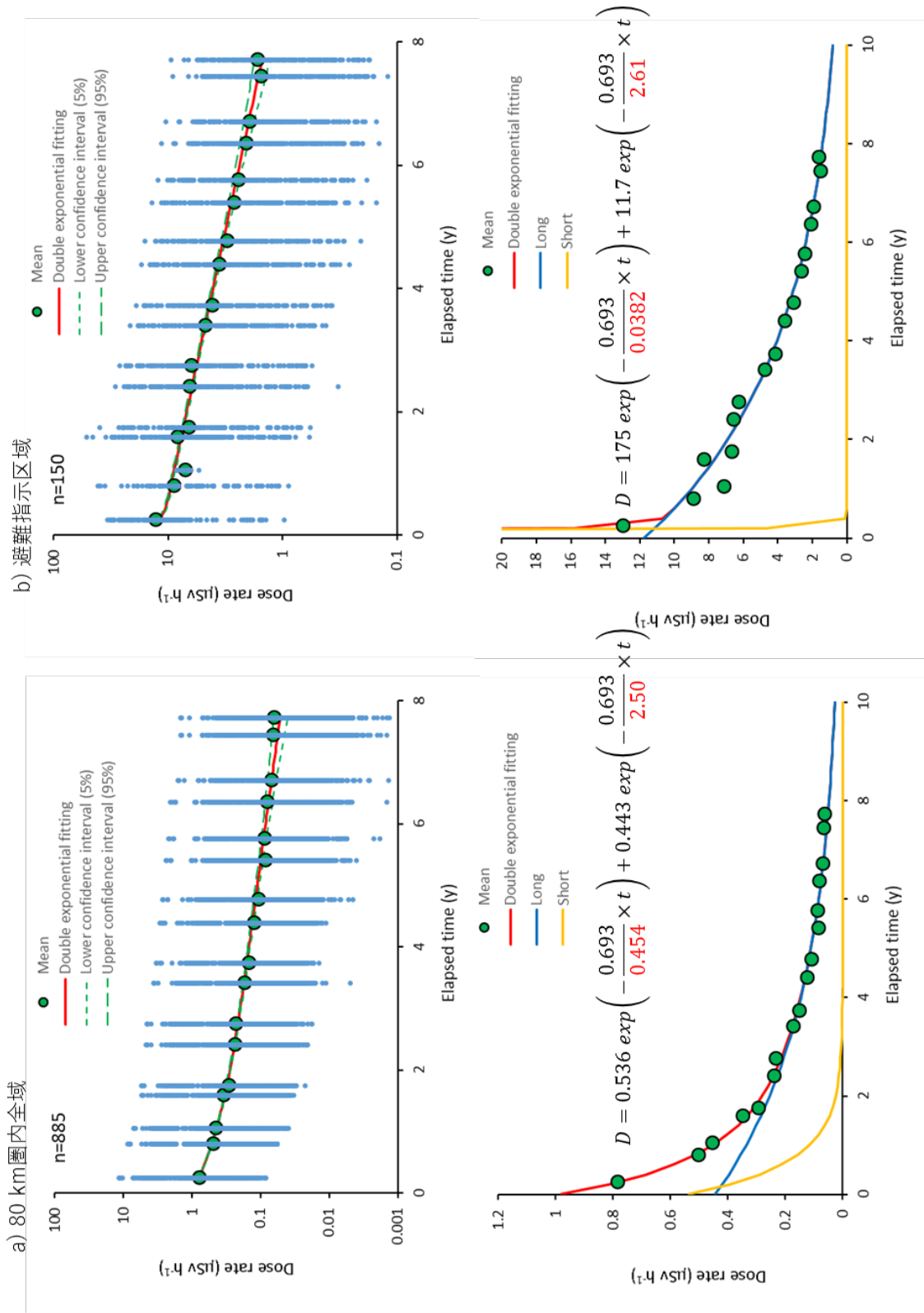


図 5-3 走行サーベイ結果における 2 重指数関数の近似

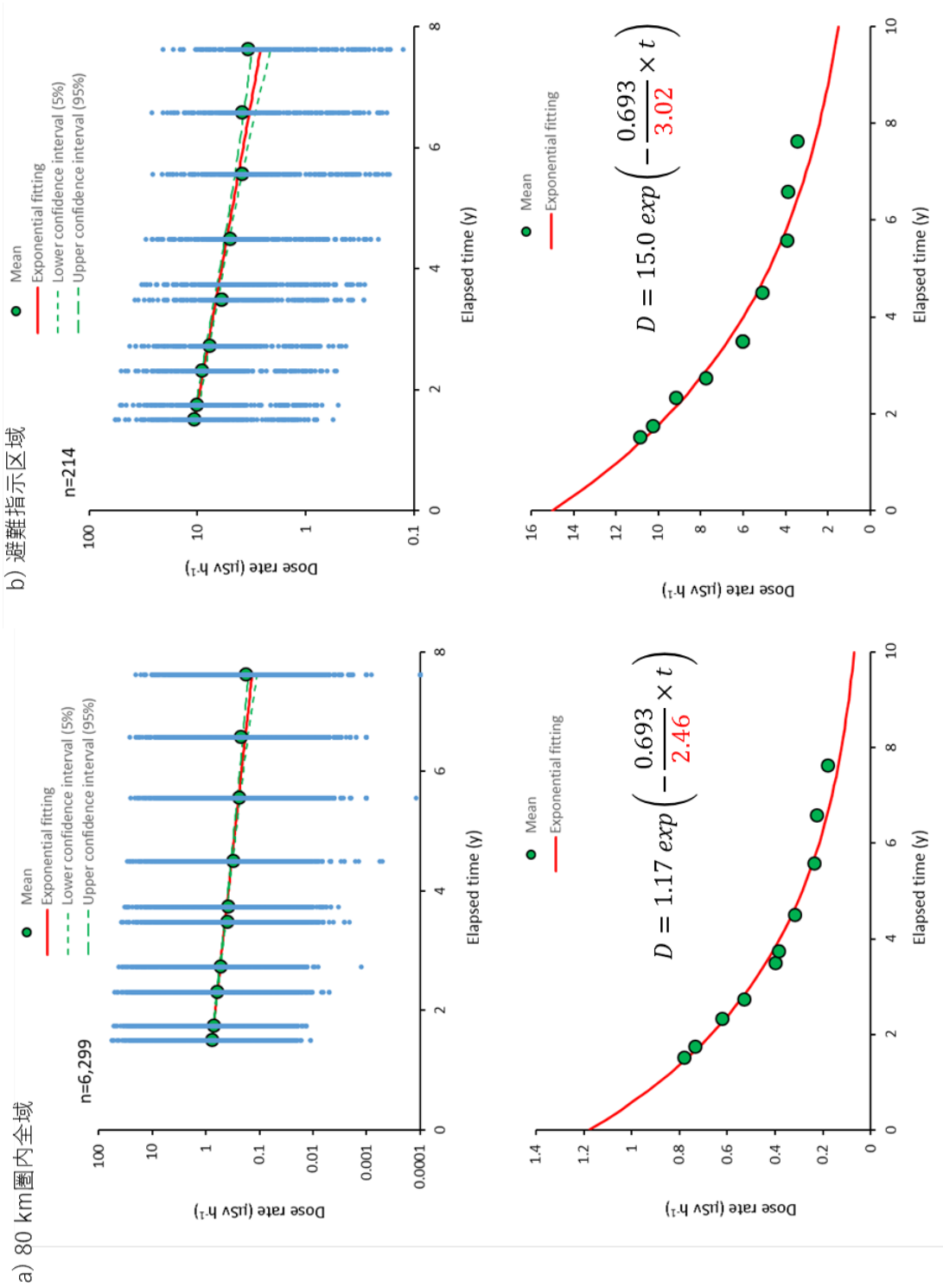
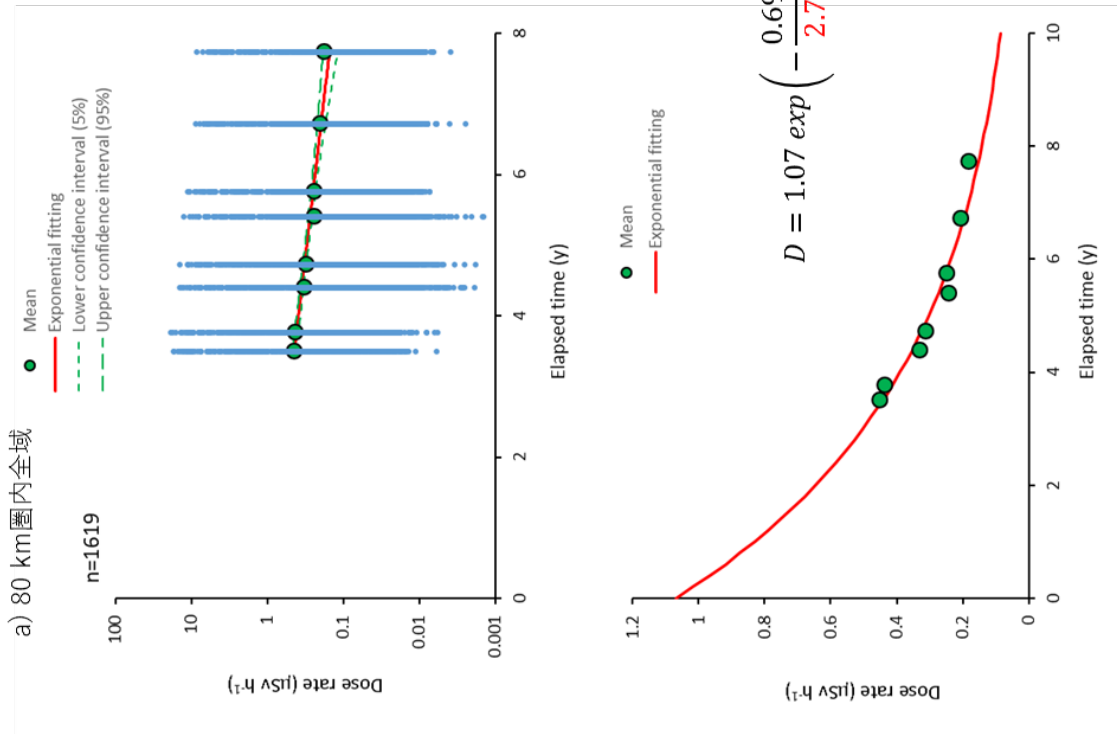


図 5-4 定点サーベイ結果における指数関数の近似

a) 80 km圏内全域



b) 避難指示区域

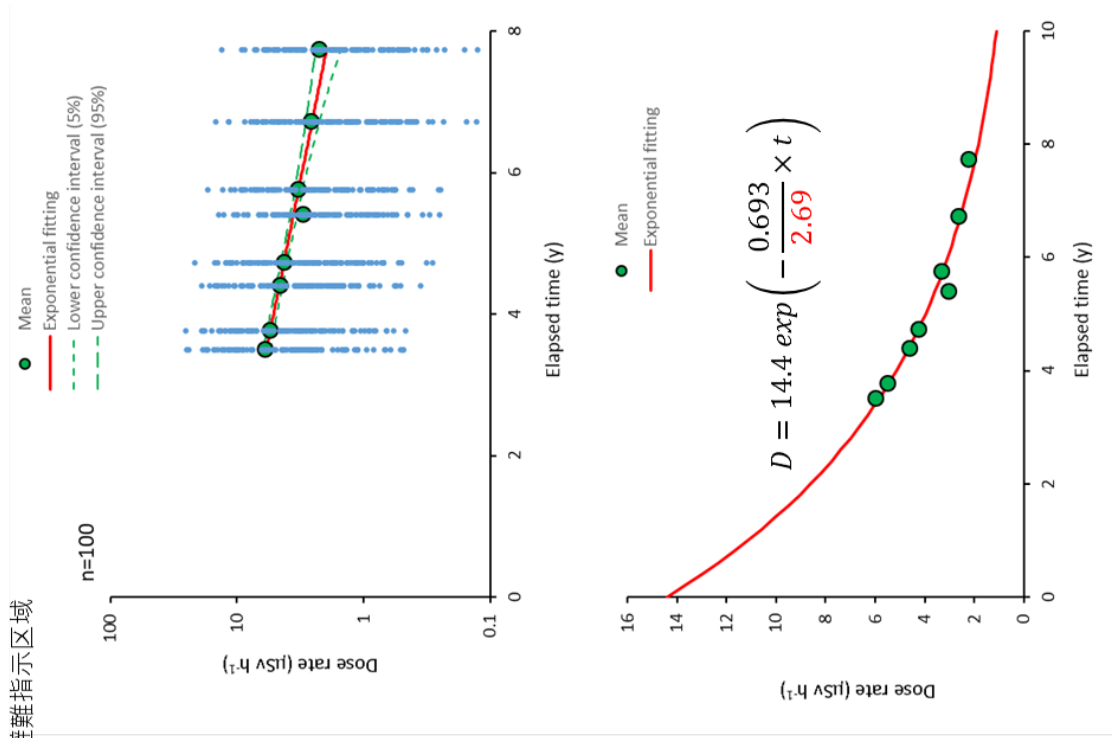


図 5-5 歩行サーベイ結果における指数関数の近似

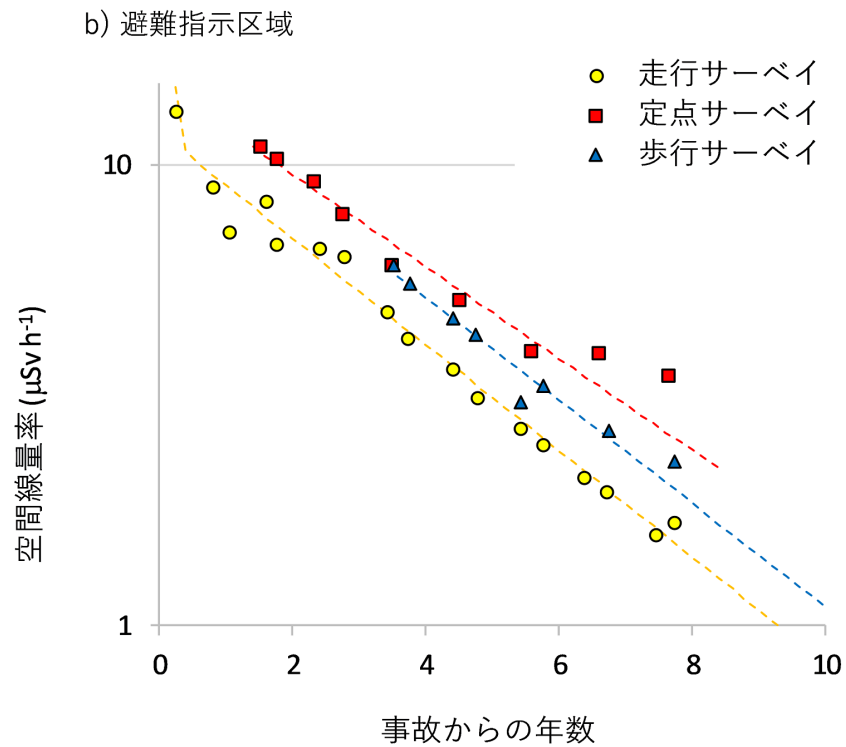
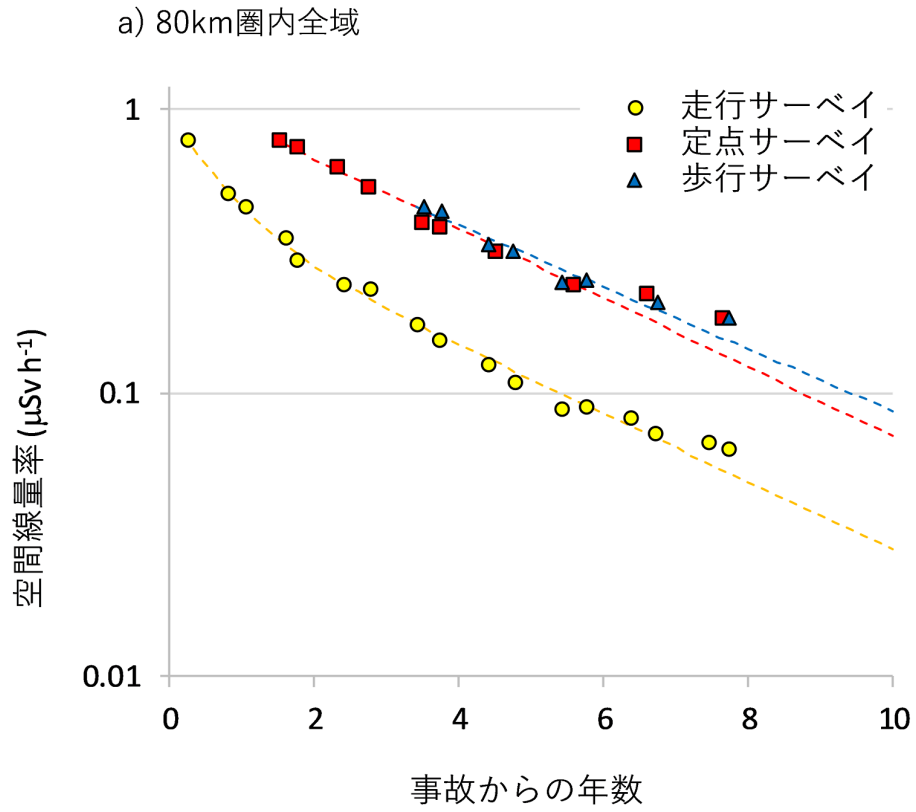


図 5-6 各測定手法による空間線量率平均値に対する指数関数近似結果の比較

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の結果について図 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、1.70 年及び 19.9 年となり、物理的半減期と比較すると早い数値となった。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。

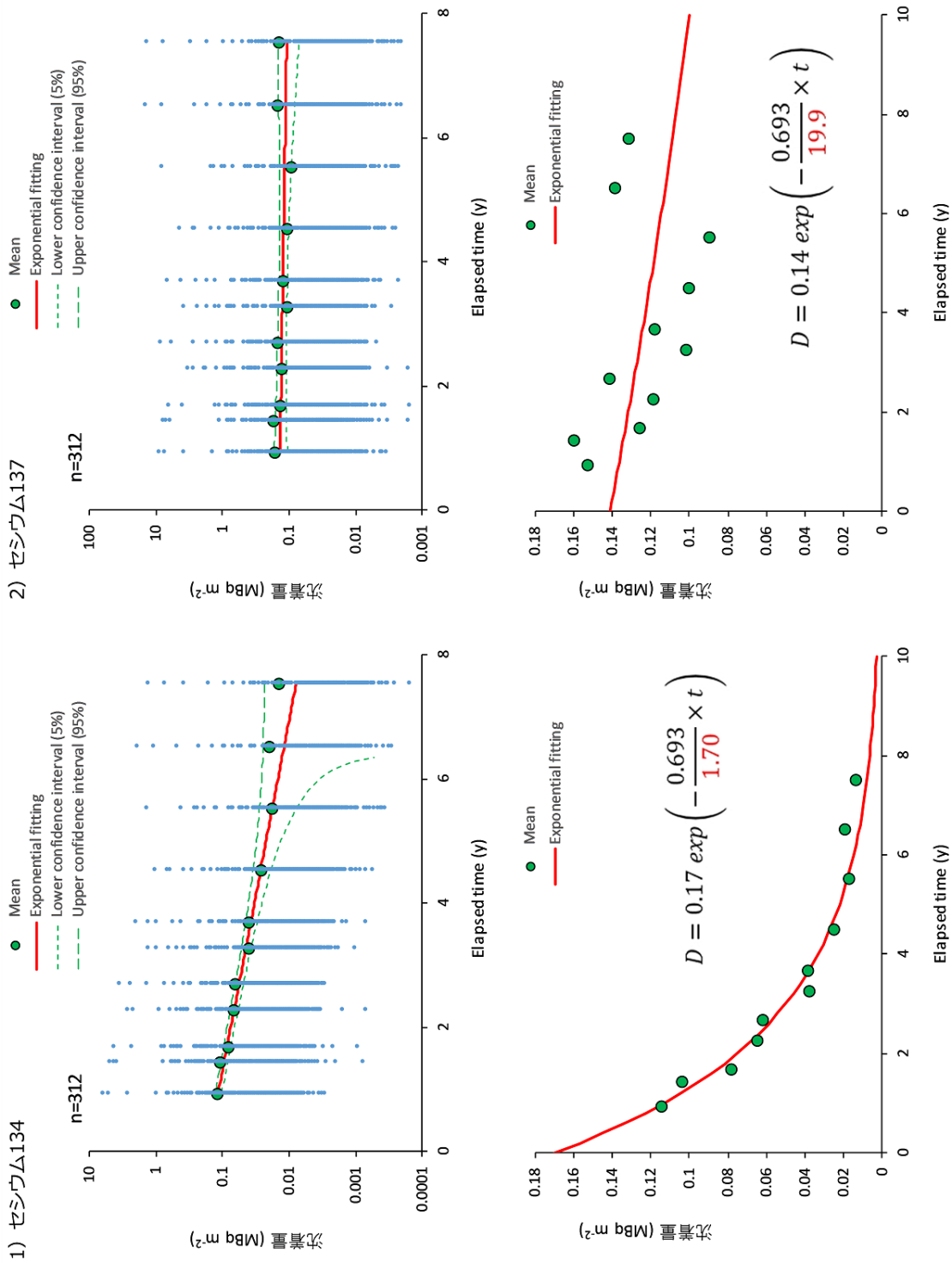


図 5-7 in-situ 測定結果における指数関数の近似