

7. 海洋のモニタリングデータの評価

7.1 海水中のトリチウム濃度データの解析

福島第一原発敷地内のタンクに保管されているALPS処理水（以下「処理水」という。）の海洋への放出が令和5年8月24日に開始され、これまで4回（第1回：令和5年8月24日～9月11日、第2回：同10月5日～10月23日、第3回：同11月2日～11月20日、第4回：令和6年2月28日～3月17日）にわたって合計約3万m³の処理水が希釈され海洋へ放出された。これに伴い、図7-1に示すモニタリングデータの報告レベルフローチャートに従い、データ公開から1週間以内を目途に海水中のトリチウム濃度の評価を実施し、その結果を意思決定者（原子力規制庁）へ報告する体制を構築し運用してきた。ここでは、特に処理水の海洋への放出前後のトリチウム濃度の変動に着目して評価解析結果の概要を報告する。

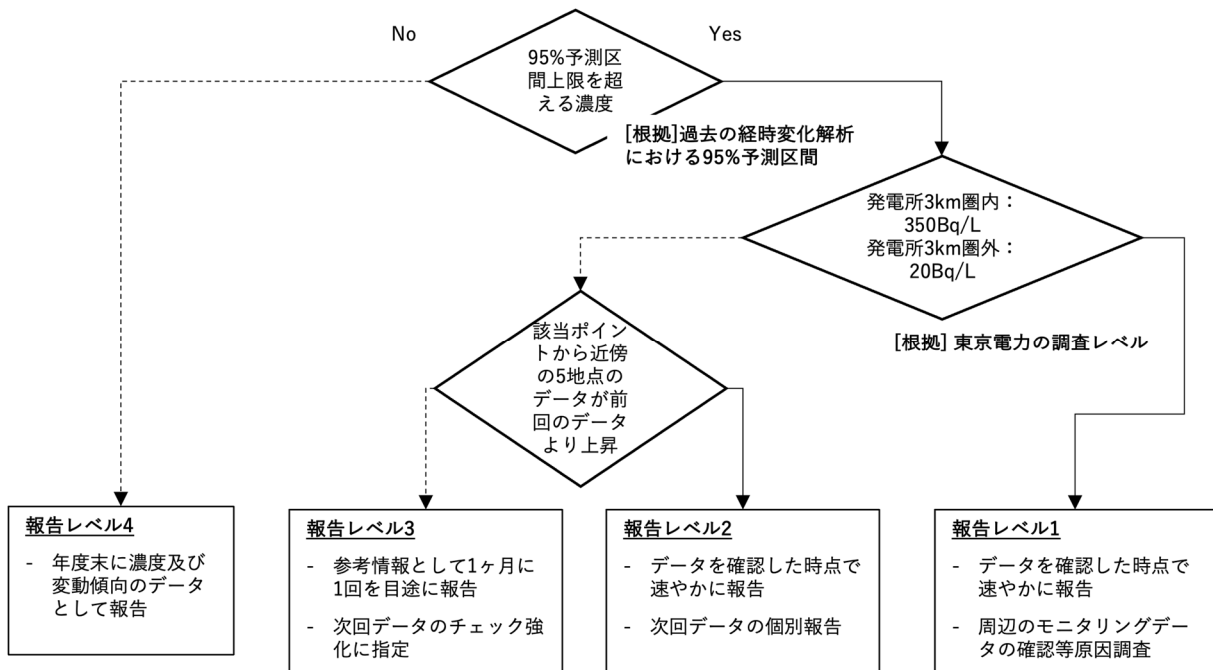


図 7-1 モニタリングデータの報告レベルフローチャート

7.1.1 海水のモニタリング計画

海水のモニタリングに関する実施計画は、総合モニタリング計画の別紙に記載されている。総合モニタリング計画（令和5年3月16日改訂³³⁾）に記載がある採取ポイント、分析頻度及び検出下限値を表7-1にまとめる。実施機関としては、東京電力、環境省、原子力規制委員会及び福島県の4者であり、福島第一原発からの距離に応じて、モニタリングの頻度や検出下限値が設定されている。これらのモニタリングポイント及び東京電力が実施する福島第一原発の港湾内（以下「港湾内」という。）のモニタリングポイントについて表7-2のように番号を割り振る。また、モニタリングポイントを図7-2に示す。本節で使用したモニタリングデータは、参考文献の45～48である。なお、東京電力が実施している迅速分析の結果は採用していない。

表 7-1 総合モニタリング計画に記載されている海水モニタリング

実施機関	採取ポイント	採取深度	分析頻度	検出下限値 (Bq/L)
東京電力	T-1, T-2, T-0-1, T-0-2, T-0-3, T-0-1A, T-0-3A, T-A1, T-A2, T-A3	表層	1 回/週	0.4
	T-3, T-6, T-5, T-D1, T-D5, T-D9	表層	1 回/週	0.1 (当面は 0.4)
	T-S1, T-S2, T-S3, T-S4, T-S5, T-S7, T-S8, T-B1, T-B2, T-B3, T-B4, T-13-1, T-7, T-18, T-12, T-17-1, T-20, T-22, T-MA, T-M10	表層	1 回/月	0.1 (当面は 0.4)
環境省	E-S18, E-S31, E-S33, E-S36, E-S32 (ALPS 処理水海域モニタリング)	表層	1 回/3 ヶ月	0.1
	E-S1, E-S3, E-S4, E-S5, E-S10, E-S13, E- S14, E-S15, E-S16, E-S17, E-S19, E-S20, E-S21, E-S22, E-S23, E-S24, E-S25, E- S26, E-S27, E-S28, E-S29, E-S30, E-S34, E-S35 (ALPS 処理水海域モニタリング)	表層/底層	1 回/3 ヶ月	0.1
	福島沿岸 (海水浴場) (E-SK1, E-SK2, E- SK3, E-SK4, E-SK5, E-SK6)	表層	2 回/年	0.1
原子力規制 委員会	M-101, M-102, M-103, M-104	表層	1 回/月	0.1
	M-B1, M-C3, M-D3, M-E3, M-E5, M-F3, M-G3, M-G4, M-H1, M-H3, M-I1	表層	1 回/3 ヶ月	0.1
	M-C1, M-D1, M-E1, M-F1, M-G1	表層/底層	1 回/3 ヶ月	0.1
福島県	F-P01, F-P02, F-P03, F-P04, F-P05, F-P06, 福島沿岸 (浅海漁場), F-P29, F-P30, F-P31, F-P32, F-P33, F-P34, F-P35	表層	1 回/月	0.5
	F-P07, F-P08, F-P09, T-1, T-2, F-P10, F-P11	表層	1 回/3 ヶ月	0.5
	F-P12	表層	1 回/年	0.5
	福島沿岸 (海水浴場) F-P36, F-P37, F-P38, F-P39, F-P40, F-P41, F-P42, F-P43, F-P44, F-P45, F-P46, F-P47, F-P48, E-71, E-72, E-73, E-74, E-75, E-76, E-77, E-78, E-79, E-7A, E-7B, E-7F, E-7G, E-7H, E-7I	表層	2 回/年	0.5

表 7-2 海水モニタリングポイントの番号割り振り (1/2)

No.	実施機関	採取ポイント	No.	実施機関	採取ポイント
1_T	東京電力	T-1(東京電力)	37	東京電力	T-D9
1_F	福島県	T-1(福島県)	38	東京電力	T-S1
2_T	東京電力	T-2(東京電力)	39	東京電力	T-S2
2_F	福島県	T-2(福島県)	40	東京電力	T-S3
3	東京電力	T-0-1	41	東京電力	T-S4
4	東京電力	T-0-2	42	東京電力	T-S5
5	東京電力	T-0-3	43	東京電力	T-S7
6	東京電力	T-0-1A	44	東京電力	T-S8
7	東京電力	T-0-3A	45	東京電力	T-B1
8	東京電力	T-A1	46	東京電力	T-B2
9	東京電力	T-A2	47	東京電力	T-B3
10	東京電力	T-A3	48	東京電力	T-B4
11	環境省	E-S1	49	東京電力	T-13-1
11L	環境省	E-S1	50	東京電力	T-7
12	環境省	E-S4	51	東京電力	T-18
12L	環境省	E-S4	52	東京電力	T-12
13	環境省	E-S5	53	東京電力	T-17-1
13L	環境省	E-S5	54	東京電力	T-20
14	環境省	E-S13	55	東京電力	T-22
14L	環境省	E-S13	56	東京電力	T-MA
15	環境省	E-S14	57	東京電力	T-M10
15L	環境省	E-S14	58	環境省	E-S18
16	環境省	E-S16	59	環境省	E-S31
16L	環境省	E-S16	60	環境省	E-S33
17	環境省	E-S3	61	環境省	E-S36
17L	環境省	E-S3	62	環境省	E-S19
18	環境省	E-S10	62L	環境省	E-S19
18L	環境省	E-S10	63	環境省	E-S20
19	環境省	E-S15	63L	環境省	E-S20
19L	環境省	E-S15	64	環境省	E-S21
20	原子力規制委員会	M-101	64L	環境省	E-S21
21	原子力規制委員会	M-102	65	環境省	E-S22
22	原子力規制委員会	M-103	65L	環境省	E-S22
23	原子力規制委員会	M-104	66	環境省	E-S23
24	福島県	F-P01	66L	環境省	E-S23
25	福島県	F-P02	67	環境省	E-S24
26	福島県	F-P03	67L	環境省	E-S24
27	福島県	F-P04	68	環境省	E-S25
28	福島県	F-P07	68L	環境省	E-S25
29	福島県	F-P08	69	環境省	E-S26
30	福島県	F-P09	69L	環境省	E-S26
31	環境省	E-S17	70	環境省	E-S27
32	東京電力	T-3	70L	環境省	E-S27
33	東京電力	T-6	71	環境省	E-S28
34	東京電力	T-5	71L	環境省	E-S28
35	東京電力	T-D1	72	環境省	E-S29
36	東京電力	T-D5	72L	環境省	E-S29

表 7-2 海水モニタリングポイントの番号割り振り (2/2)

No.	実施機関	採取ポイント	No.	実施機関	採取ポイント
73	環境省	E-S30	117	原子力規制委員会	M-C3※福島県沖
73L	環境省	E-S30	118	原子力規制委員会	M-D3
74	環境省	E-S34	119	原子力規制委員会	M-E3
74L	環境省	E-S34	120	原子力規制委員会	M-E5
75	環境省	E-S35	121	原子力規制委員会	M-F3
75L	環境省	E-S35	122	原子力規制委員会	M-G3
76	環境省	E-SK1	123	原子力規制委員会	M-G4
77	環境省	E-SK2	124	原子力規制委員会	M-H3
78	環境省	E-SK3	125	原子力規制委員会	M-B1
79	環境省	E-SK4	126	原子力規制委員会	M-H1
80	環境省	E-SK5	127	原子力規制委員会	M-I1
81	環境省	E-SK6	128	原子力規制委員会	M-C1※福島県沖
82	福島県	F-P05	128L	原子力規制委員会	M-C1※福島県沖
83	福島県	F-P06	129	原子力規制委員会	M-D1
84	福島県	F-P10	129L	原子力規制委員会	M-D1
85	福島県	F-P11	130	原子力規制委員会	M-E1
86	福島県	F-P12	130L	原子力規制委員会	M-E1
87	福島県	F-P29	131	原子力規制委員会	M-F1
88	福島県	F-P31	131L	原子力規制委員会	M-F1
89	福島県	F-P32	132	原子力規制委員会	M-G1
90	福島県	F-P33	132L	原子力規制委員会	M-G1
91	福島県	F-P34	133*	東京電力	5号機取水口前
92	福島県	F-P35	134*	東京電力	港湾内北側
93	福島県	F-P36	135*	東京電力	物揚場前
94	福島県	F-P37	136*	東京電力	港湾内西側
95	福島県	F-P38	137*	東京電力	港湾中央
96	福島県	F-P40	138*	東京電力	1~4号機取水口内北側 (東波除堤北側)
97	福島県	F-P41	139*	東京電力	1~4号機取水口内南側 (遮水壁前)
98	福島県	F-P42	140*	東京電力	港湾内南側
99	福島県	F-P44	141*	東京電力	港湾内東側
100	福島県	F-P48	142*	東京電力	港湾口(T-O)
101	福島県	E-71			
102	福島県	E-72			
103	福島県	E-73			
104	福島県	E-74			
105	福島県	E-75			
106	福島県	E-76			
107	福島県	E-77			
108	福島県	E-78			
109	福島県	E-79			
110	福島県	E-7A			
111	福島県	E-7B			
112	福島県	E-7F※木戸川			
113	福島県	E-7G※請戸川			
114	福島県	E-7H※熊川			
115	福島県	E-7I			
116	環境省	E-S32			

No.に*付きは「総合モニタリング計画外のモニタリング地点(福島第一原発港湾内)」を意味する。

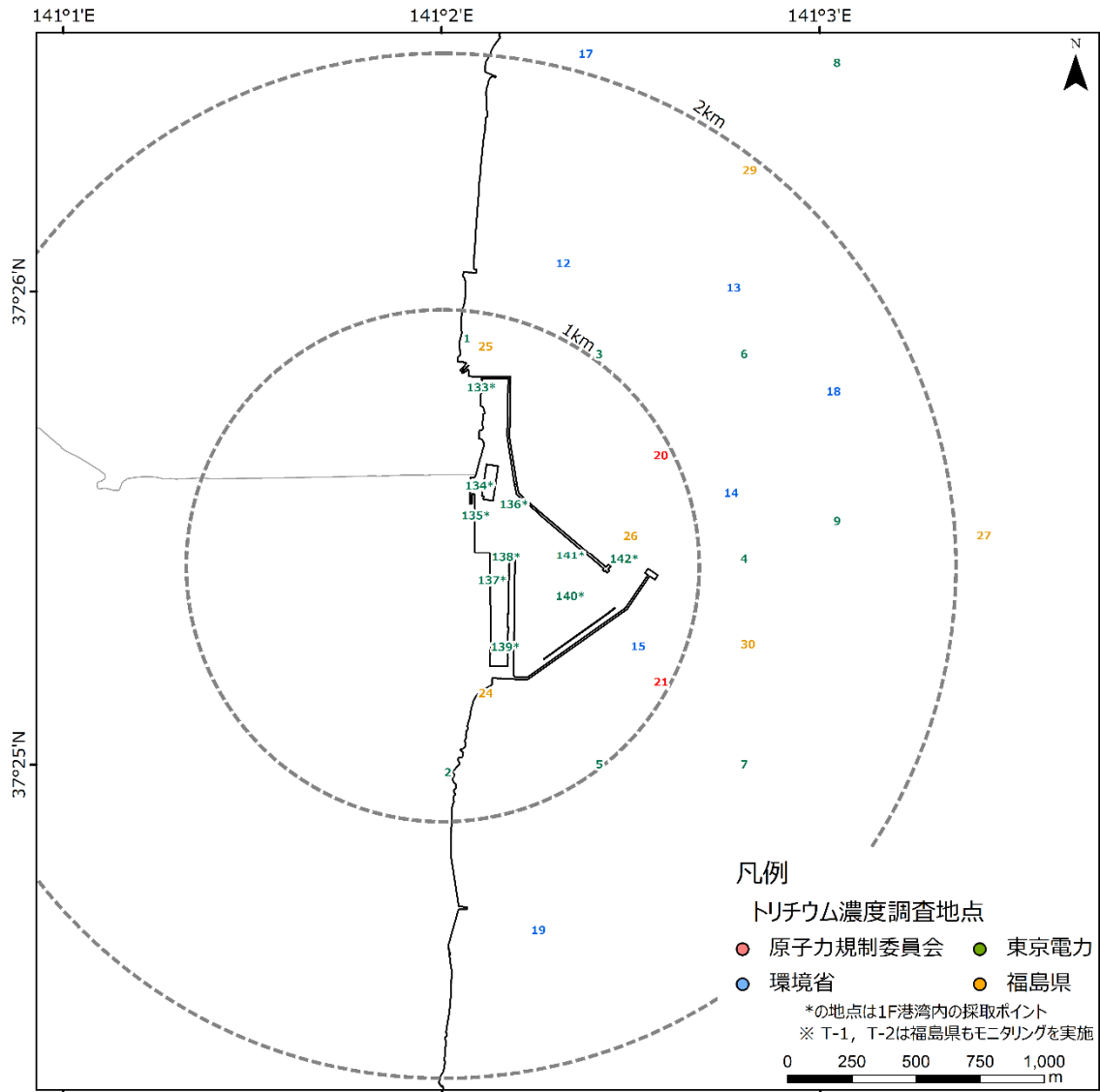


図 7-2 海水中のトリチウム濃度モニタリングポイント (1/6)
 (福島第一原発から半径 2 km)
 (背景図は国土数値情報⁴²⁾ (行政区域データ) を加工して作成)

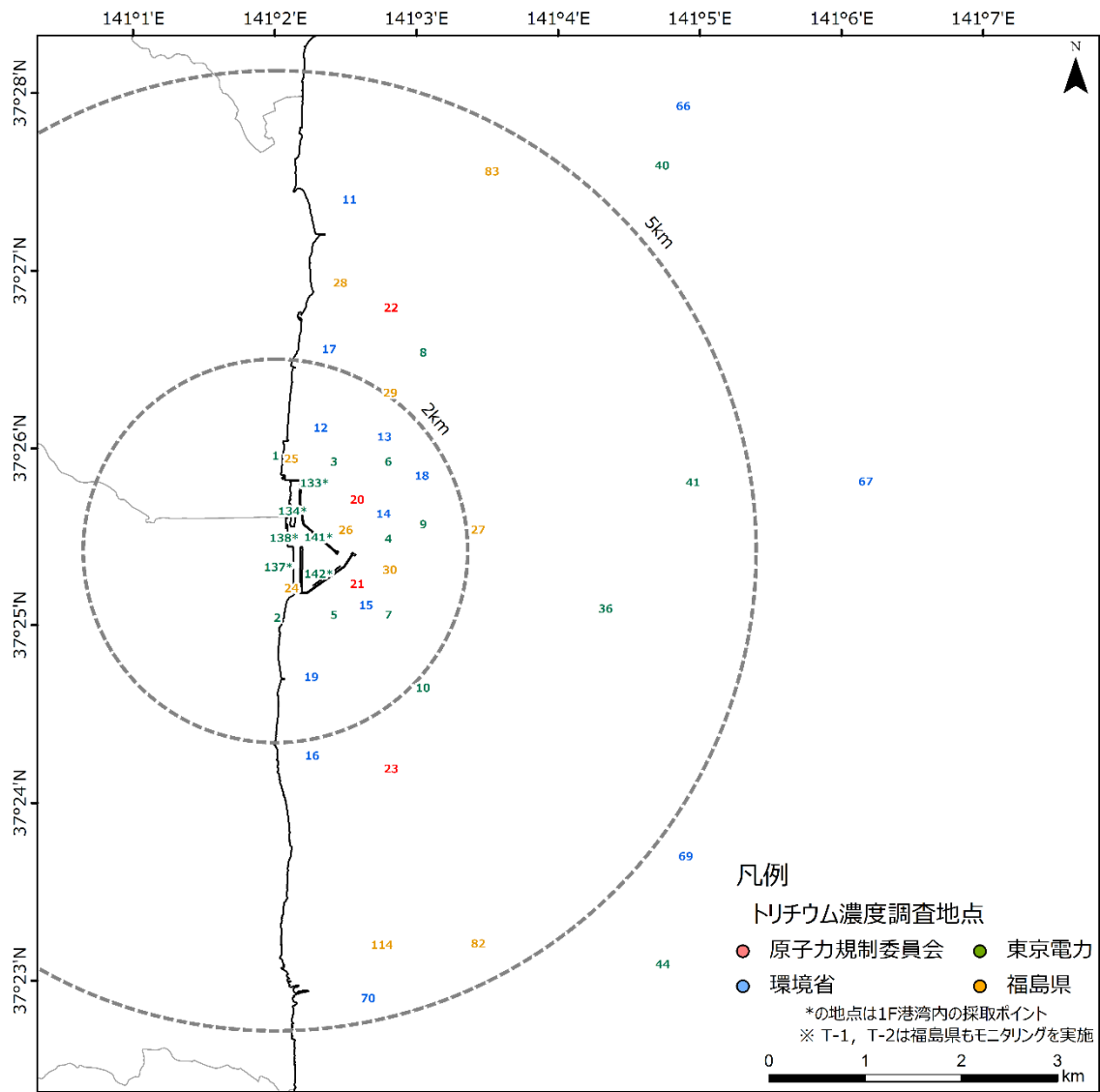


図 7-2 海水中のトリチウム濃度モニタリングポイント (2/6)
 (福島第一原発から半径 5 km)
 (背景図は国土数値情報⁴²⁾ (行政区域データ) を加工して作成)

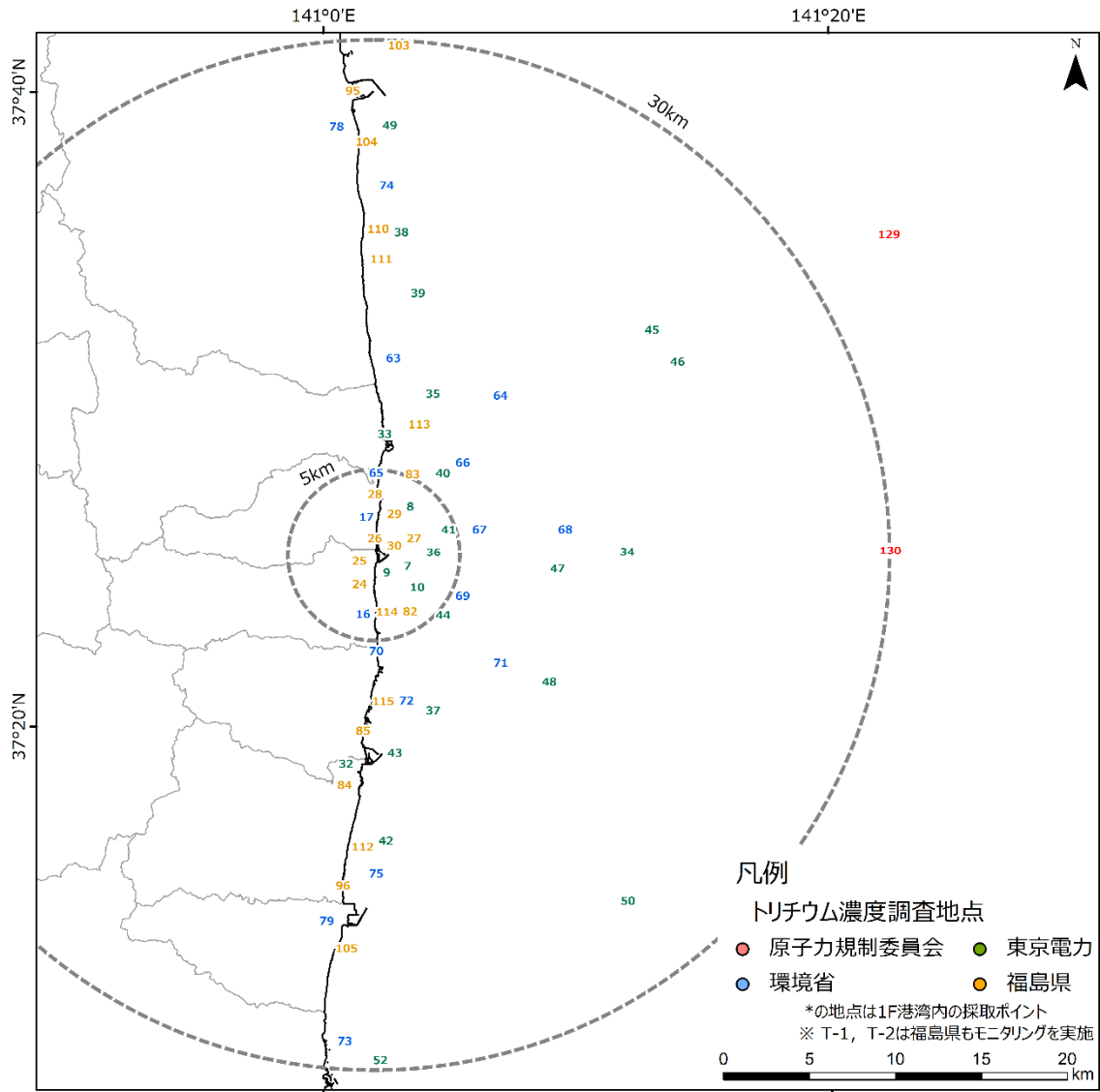


図 7-2 海水中のトリチウム濃度モニタリングポイント (3/6)
 (福島第一原発から半径 30 km)
 (背景図は国土数値情報⁴²⁾ (行政区域データ) を加工して作成)

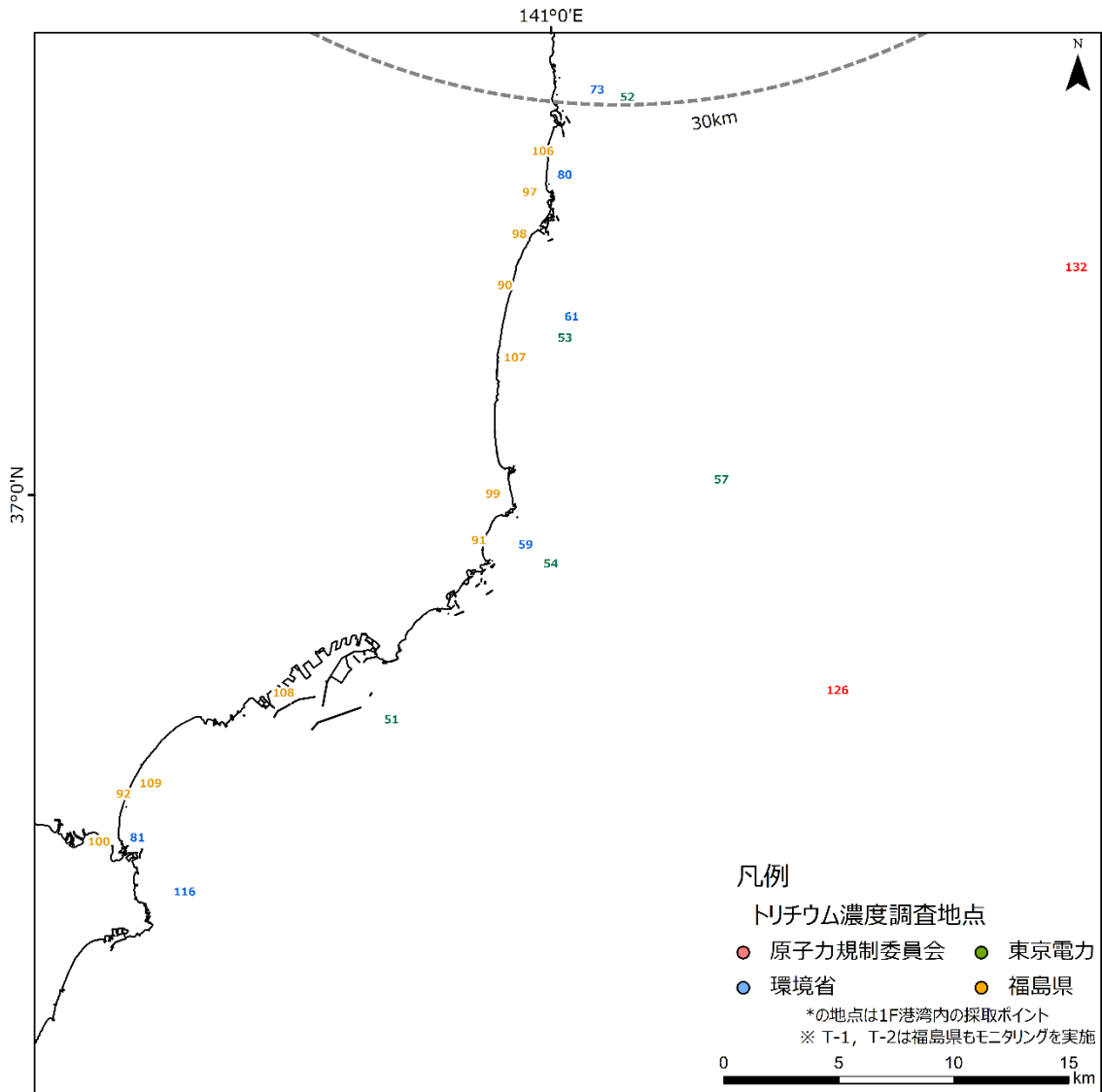


図 7-2 海水中のトリチウム濃度モニタリングポイント (4/6)
 (福島第一原発から半径 30 km 以遠 (主に南側))
 (背景図は国土数値情報⁴²⁾ (行政区域データ) を加工して作成)

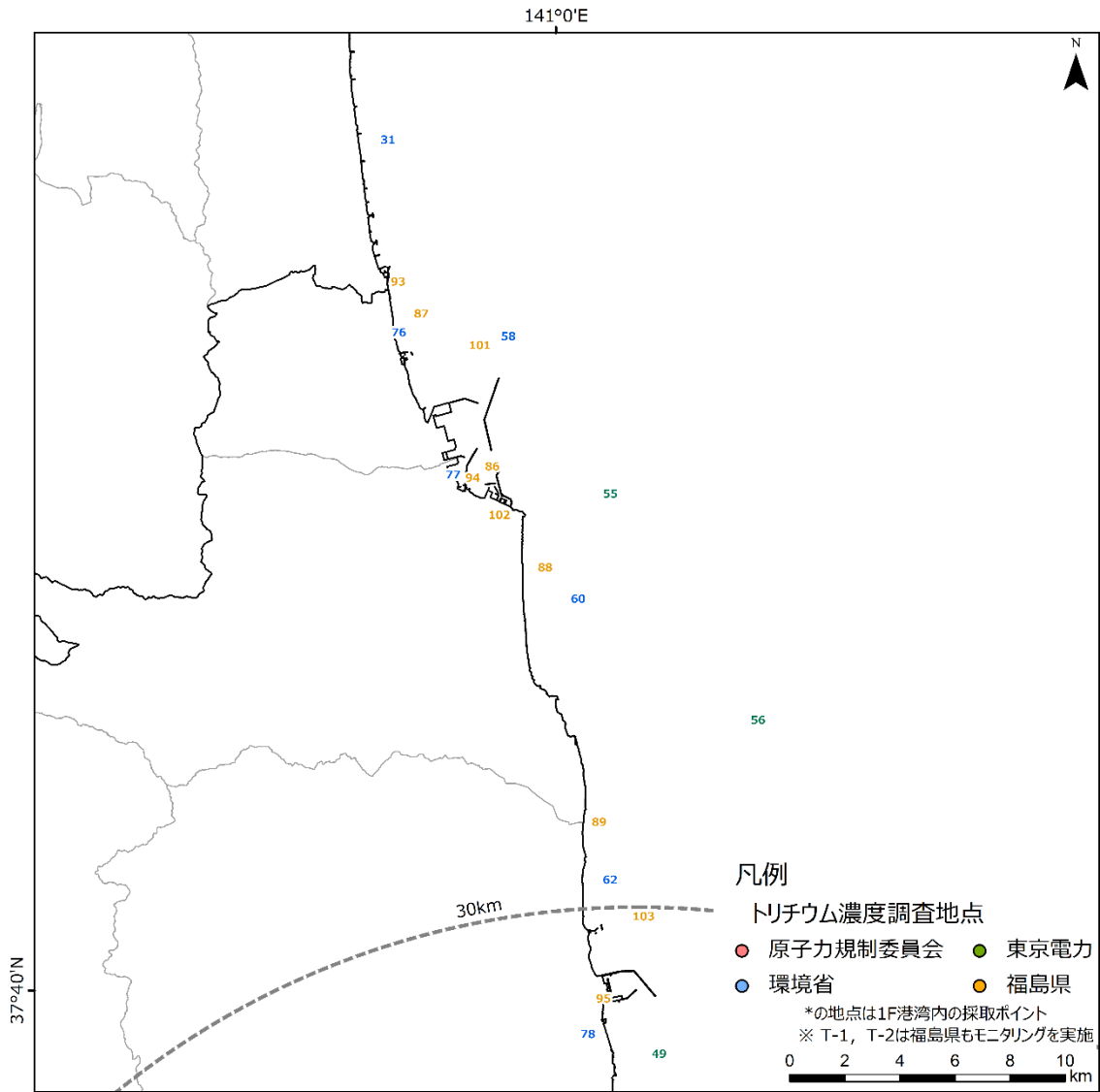


図 7-2 海水中のトリチウム濃度モニタリングポイント (5/6)
 (福島第一原発から半径 30 km 以遠 (主に北側))
 (背景図は国土数値情報⁴²⁾ (行政区域データ) を加工して作成)

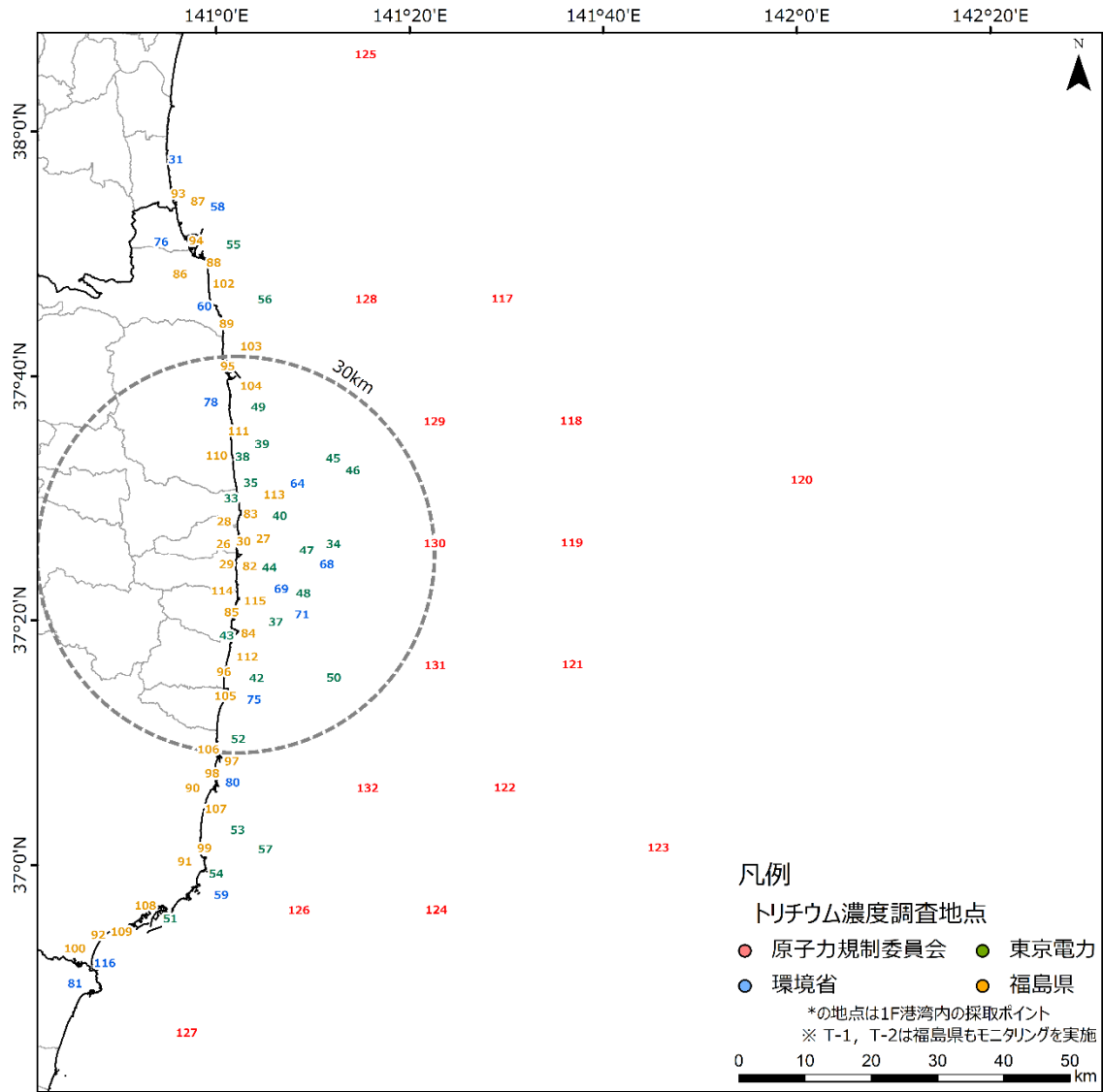


図 7-2 海水中のトリチウム濃度モニタリングポイント (6/6)
 (福島第一原発から半径 30 km 以遠 (主に東側))
 (背景図は国土数値情報⁴²⁾ (行政区域データ) を加工して作成)

7.1.2 測定結果

令和 5 年 1 月から令和 5 年 12 月までに公表された海水中のトリチウム濃度の分析数を図 7-3 に示す。処理水の海洋への放出が開始された令和 5 年 8 月 24 日以降、モニタリングが強化され、分析数 (報告数) が大幅に増加したことが分かる。測定結果を処理水の放出前と放出後に分けて図 7-4 に箱ひげ図として示す。トリチウムの濃度は、処理水放出前の港湾内については 1 Bq/L を超えているが、港湾外のポイントではほぼ 1 Bq/L を下回り、10 km 以上離れたポイントでは 0.1 Bq/L 付近にとどまっていることが分かる。一方、処理水放出後については、港湾内の濃度が放出前とほとんど変わらないのに対して、半径 30 km 圏内 (0-3 km、3-10 km 及び 10-30 km) では放出前よりも濃度が上昇した。ただし、その濃度は最大で 14

Bq/L であり、東京電力が設定した発電所から 3 km 圏内における放出停止判断レベル（700 Bq/L）や調査レベル（350 Bq/L）に対して十分低い。

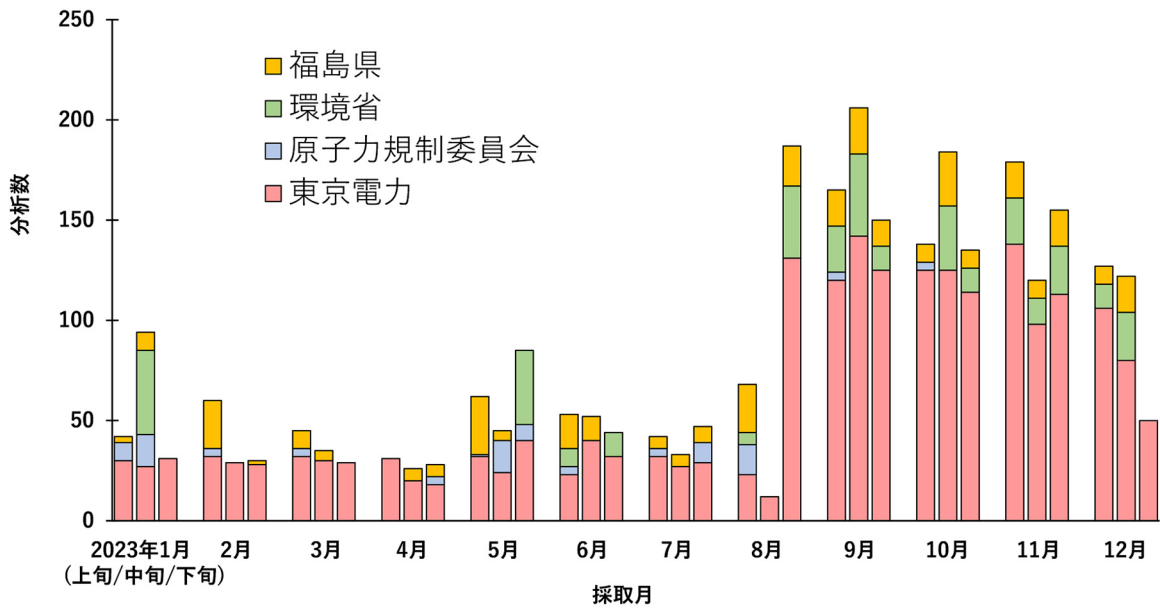


図 7-3 海水中のトリチウム濃度の分析数
(各月で左から上旬/中旬/下旬)

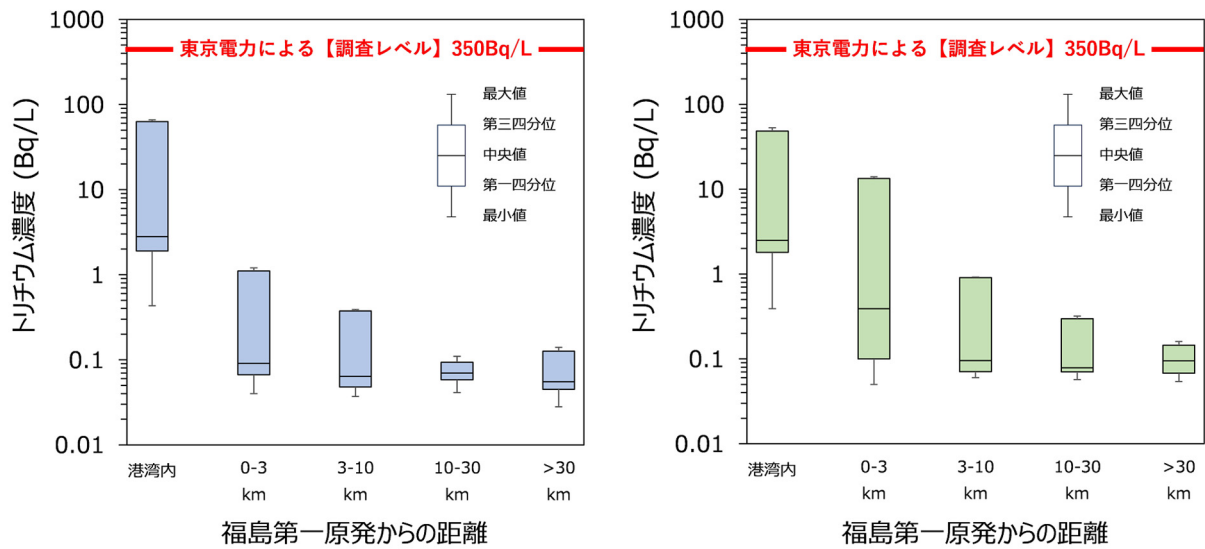


図 7-4 処理水の放出前（左）と放出後（右）における海水中のトリチウム濃度
(令和 5 年 1 月以降に採取され、令和 5 年 12 月末までに公表された結果)

7.1.3 報告レベル判定

図 7-1 に示した報告レベルフローチャートに基づき、海水中のトリチウム濃度の変動傾向を評価した結果を表 7-3 に示す。報告レベル 1 あるいは 2 に該当する判定結果は認められず、

報告レベル3に該当する判定結果が31地点で合計38回確認された。報告レベル3の判定結果があった地点は、おおむね福島第一原発から半径10 km圏内のモニタリングポイントに集中している(図7-5)。

レベル3判定が3回あった地点は、T-0-1Aであり、処理水放出口から最も近いモニタリングポイントである(図7-6)。当該ポイントでは第1回の処理水放出期間に2.6 Bq/L、第2回の放出期間に5.2 Bq/Lと14 Bq/Lのトリチウム濃度が報告された。これらはいずれも2017年から2022年の6年間の濃度から算出した95%予測区間の上限を超える濃度であったものの、当該モニタリング地点近傍の5地点の濃度がすべて上昇傾向ではなかったことからレベル3判定となった。

レベル3判定が2回あった地点は、F-P01、T-2、F-P09、T-6、T-S8の5地点である。このうち、F-P01とT-2は福島第一原発の南側沿岸に位置し、レベル3判定時のトリチウム濃度はF-P01で0.34 Bq/Lと0.33 Bq/L、T-2で1.3 Bq/Lと0.9 Bq/Lであった(図7-7)。両地点では処理水の放出前の6年間に上記よりも高いトリチウム濃度が確認されており、現段階でこれらレベル3判定が処理水の放出による影響なのかを判断することは難しい。また、F-P09、T-6、T-S8についてもレベル3判定時のトリチウム濃度がそれぞれ0.12 Bq/Lと0.27 Bq/L、0.062 Bq/Lと0.098 Bq/L、0.81 Bq/Lと0.92 Bq/Lと低濃度であり、これらレベル3判定が処理水の放出による影響なのかは不明である(図7-8)。

上記の他に、レベル3判定が1回あった地点は25地点あり、このうちトリチウム濃度が1 Bq/Lを超える測定結果が認められたのは、E-S13、M-103、T-0-1、T-0-2、T-0-3、T-1、T-A-2のいずれも福島第一原発から3 km圏内の7地点であった。

海水中のトリチウム濃度の変動傾向の解析結果から、処理水の放出前は濃度が減少傾向(回帰式の傾きが負)であったものが、放出後に上昇傾向(回帰式の傾きが正)に転じた地点が5地点認められた。令和5年度に採用している報告レベルフローチャートではこのように濃度が上昇傾向にある地点でも95%予測区間の上限を超えない場合には、報告レベル4に判定された。処理水の放出影響と考えられる濃度の上昇傾向が認められる地点の監視を強化する観点から、令和6年度以降は図7-9に示すように、95%予測区間の上限を超える濃度が確認されない場合であっても濃度の上昇傾向が認められる場合には、報告レベル3以上のデータチェック強化地点と認識できるように改良する予定である。

なお、モニタリングを実施する機関毎で検出下限値や測定間隔が異なるため、別機関で実施しているデータの相互比較時には注意が必要であり、特に、検出下限値付近のデータについては、単純な数値の比較だけでなく、過去のトレンド、検出下限値以上のデータの特性及びサンプリングや測定プロセスの不確かさなどを考慮し、総合的な判断が求められる。分析機関間の相互比較を行う方法等についてさらなる検討を行うことが今後の課題として挙げられる。

表 7-3 報告レベル 3 判定のモニタリングポイント

報告回数	モニタリングポイント
3 回	T-0-1A(表層)
2 回	F-P01(表層)、F-P09(表層)、T-2(表層)、T-6(表層)、T-S8(表層)
1 回	E-S1(表層及び低層)、E-S4(表層及び底層)、E-S21(表層及び低層)、 以下表層のみ：E-S13、E-S16、E-S19、E-S27、E-S28、E-S31、F-P02、F-P04、 F-P05、F-P06、F-P07、F-P08、M-103、T-0-1、T-0-2、T-0-3、T-0-3A、T-1、T-A2

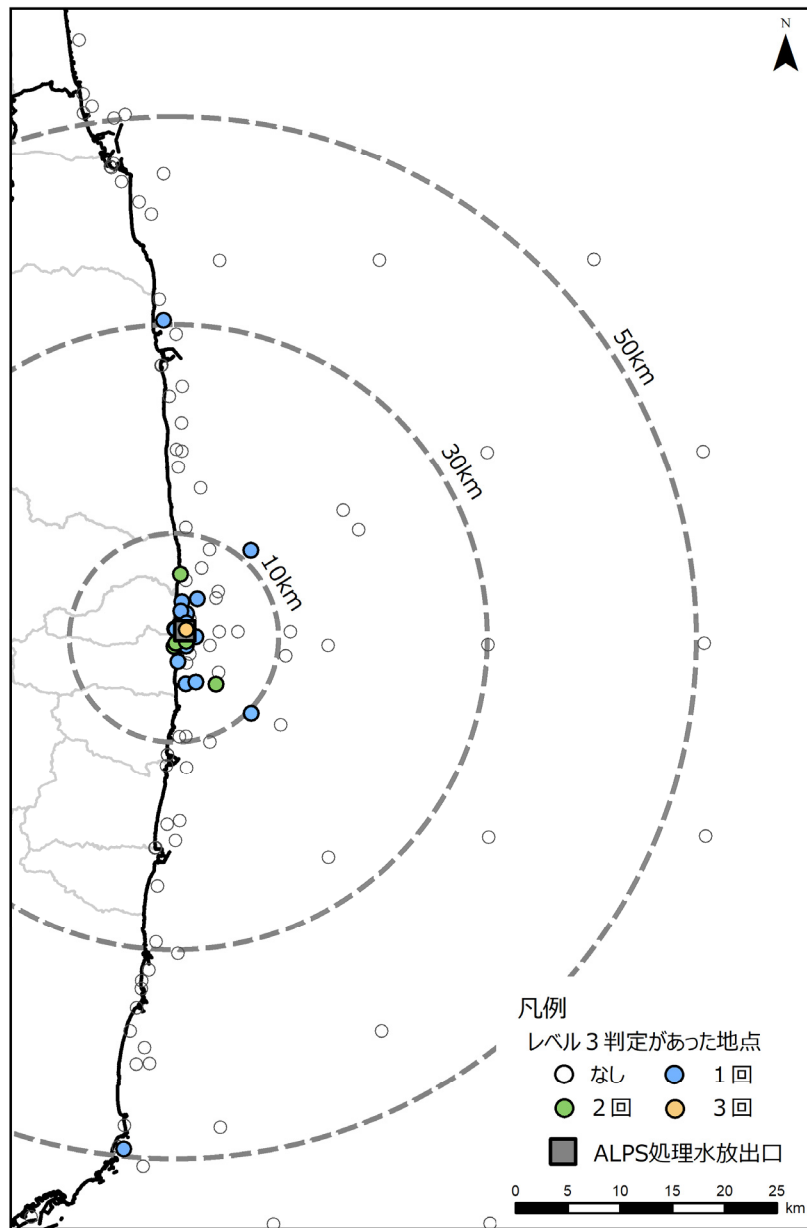


図 7-5 報告レベル 3 判定のモニタリングポイント
(背景図は国土数値情報⁴²⁾(行政区域データ)を加工して作成)

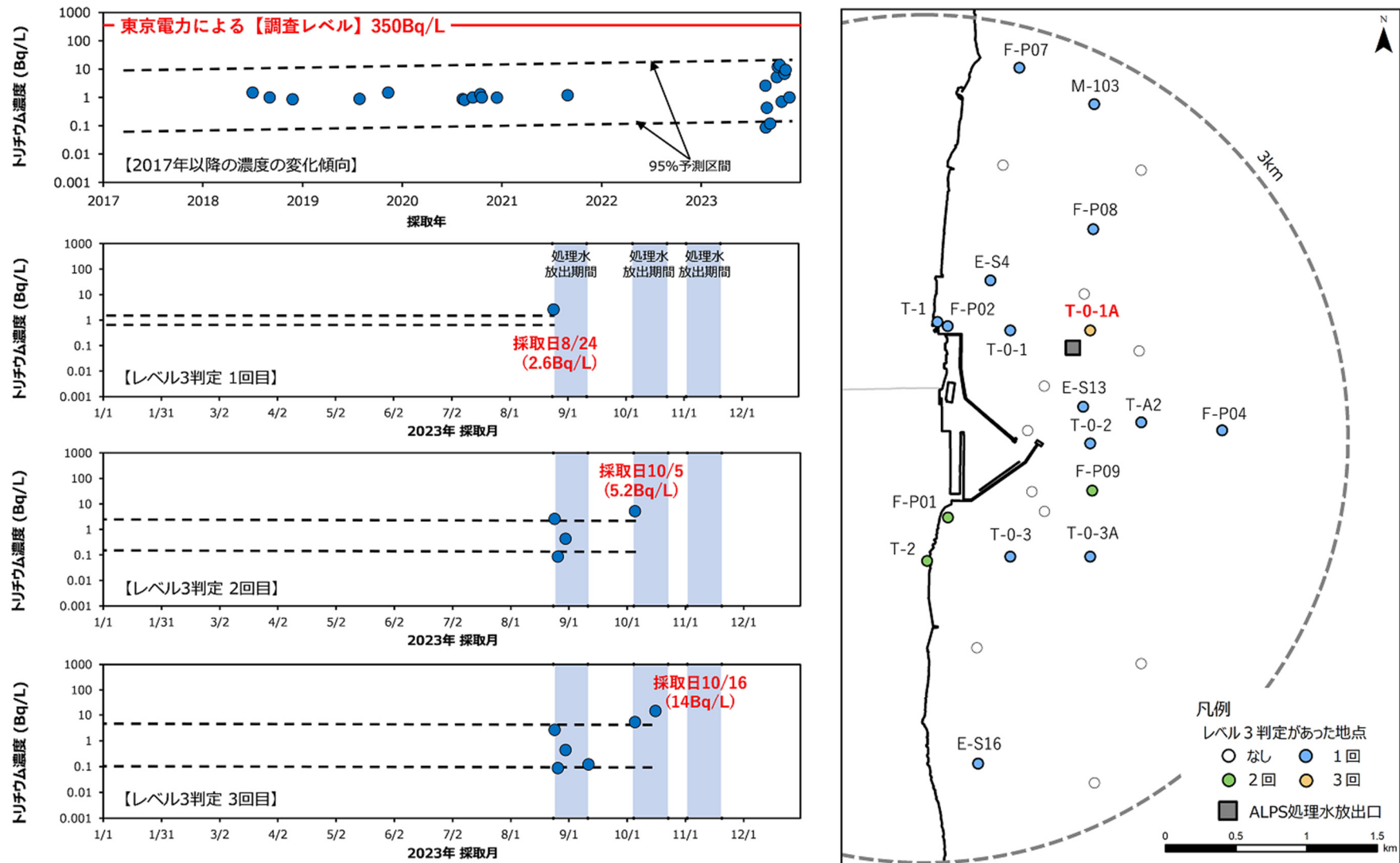


図 7-6 報告レベルが3回あったモニタリングポイント (T-0-1A)
 (右図の背景図は国土数値情報⁴²⁾ (行政区画データ) を加工して作成)

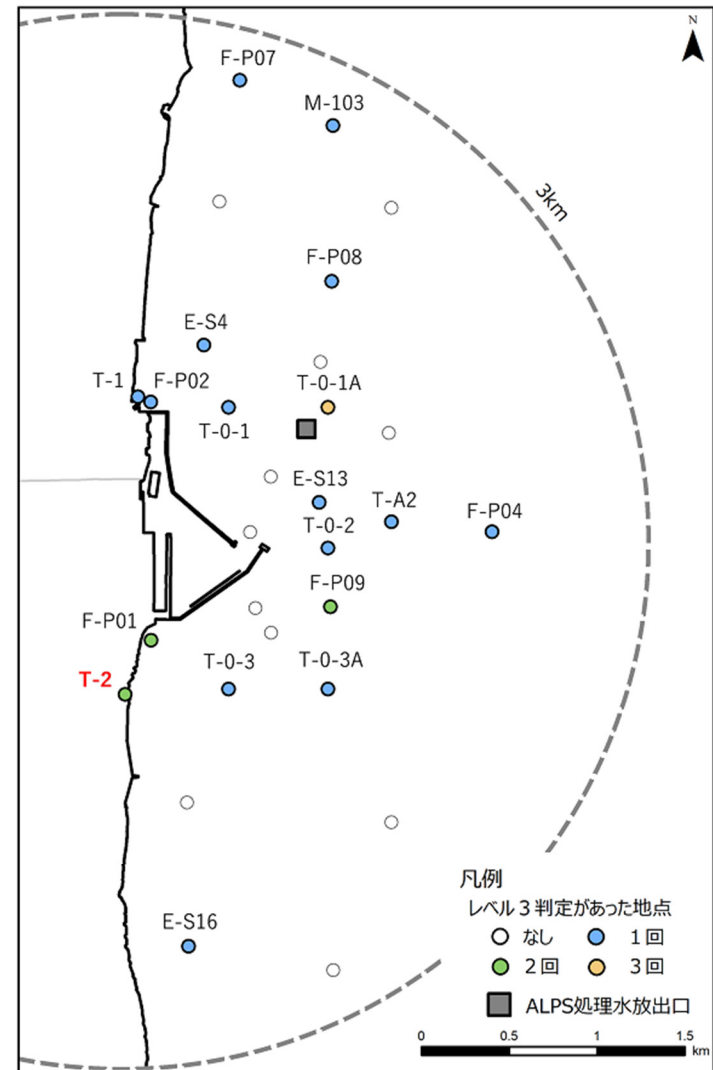
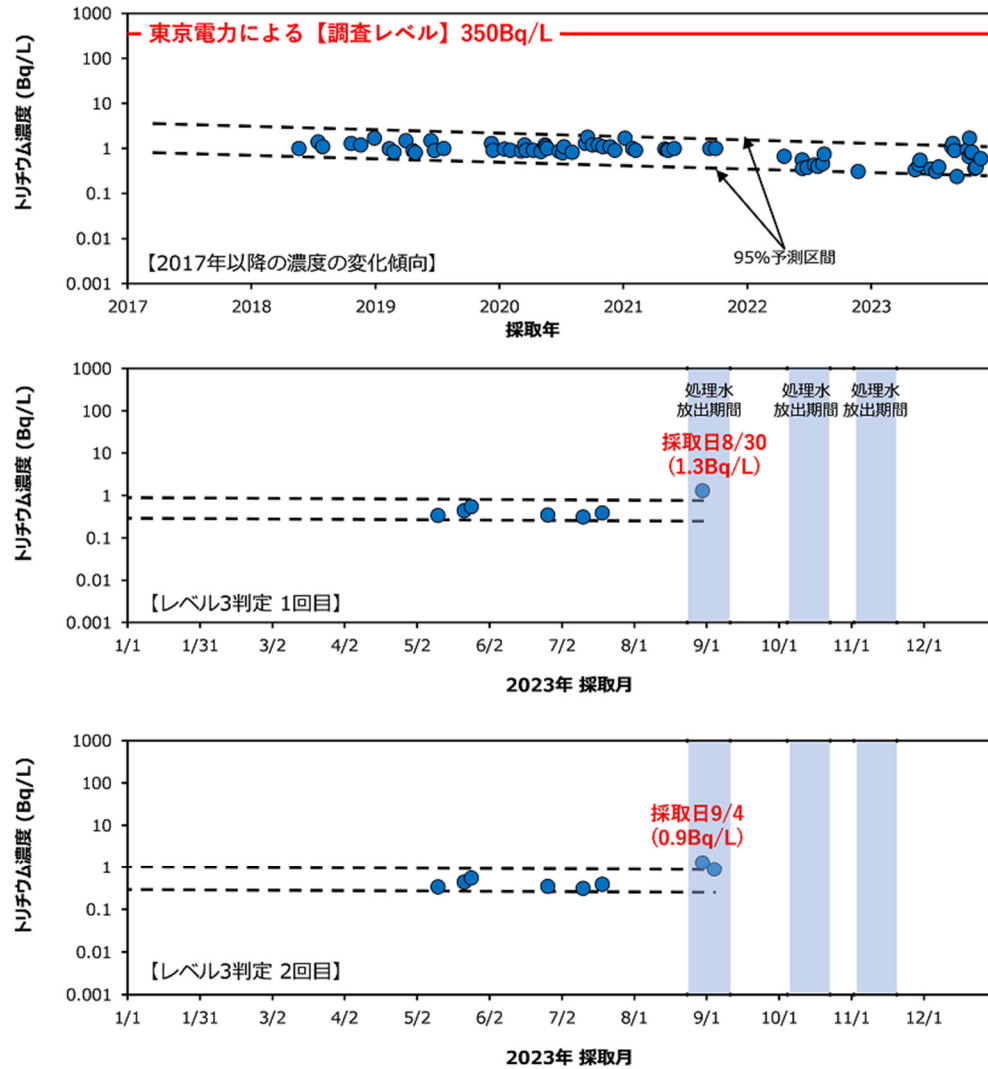


図 7-7 レベル3判定が2回あったモニタリングポイントの例 (T-2)
 (右図の背景図は国土数値情報⁴²⁾(行政区域データ)を加工して作成)

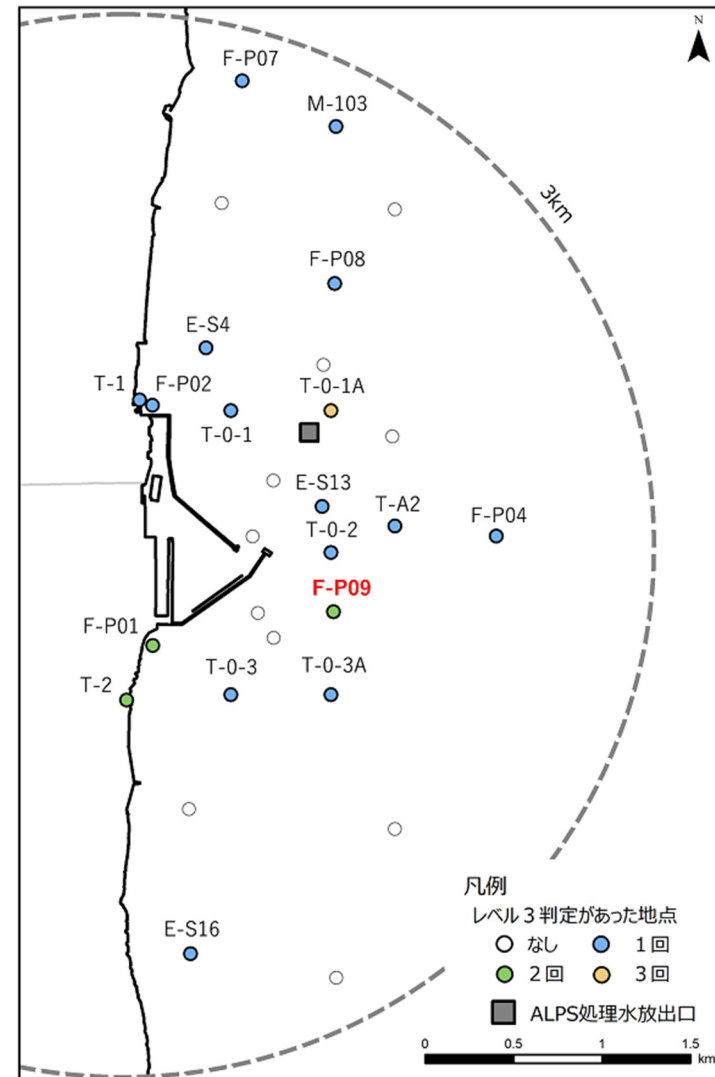
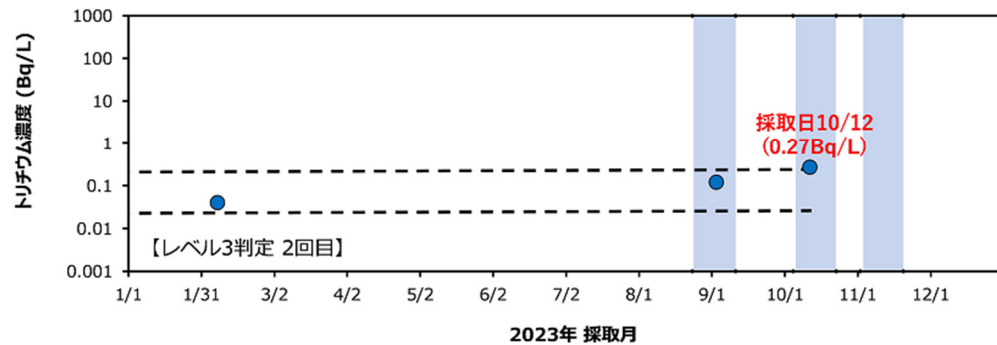
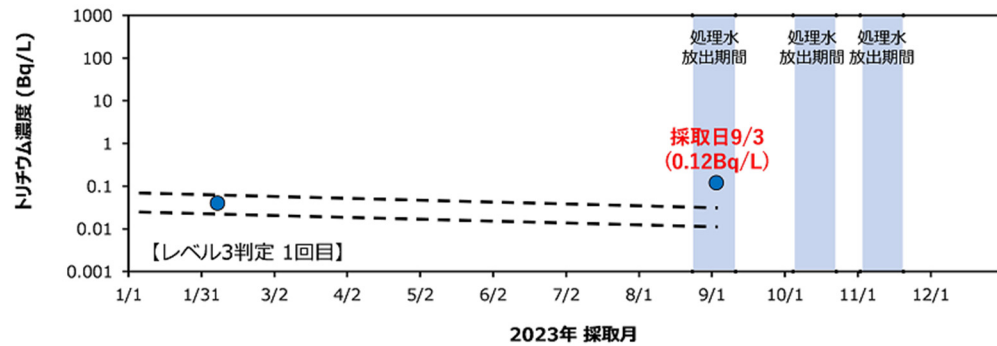
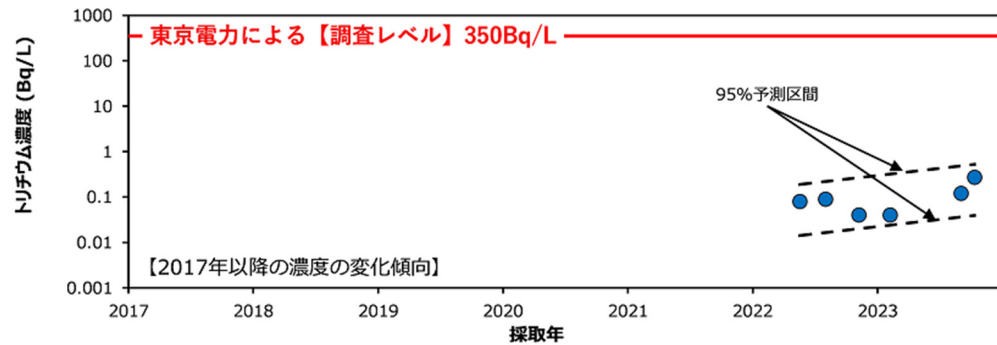


図 7-8 レベル 3 判定が 2 回あったモニタリングポイントの例 (F-P09)
 (右図の背景図は国土数値情報⁴²⁾(行政区域データ)を加工して作成)

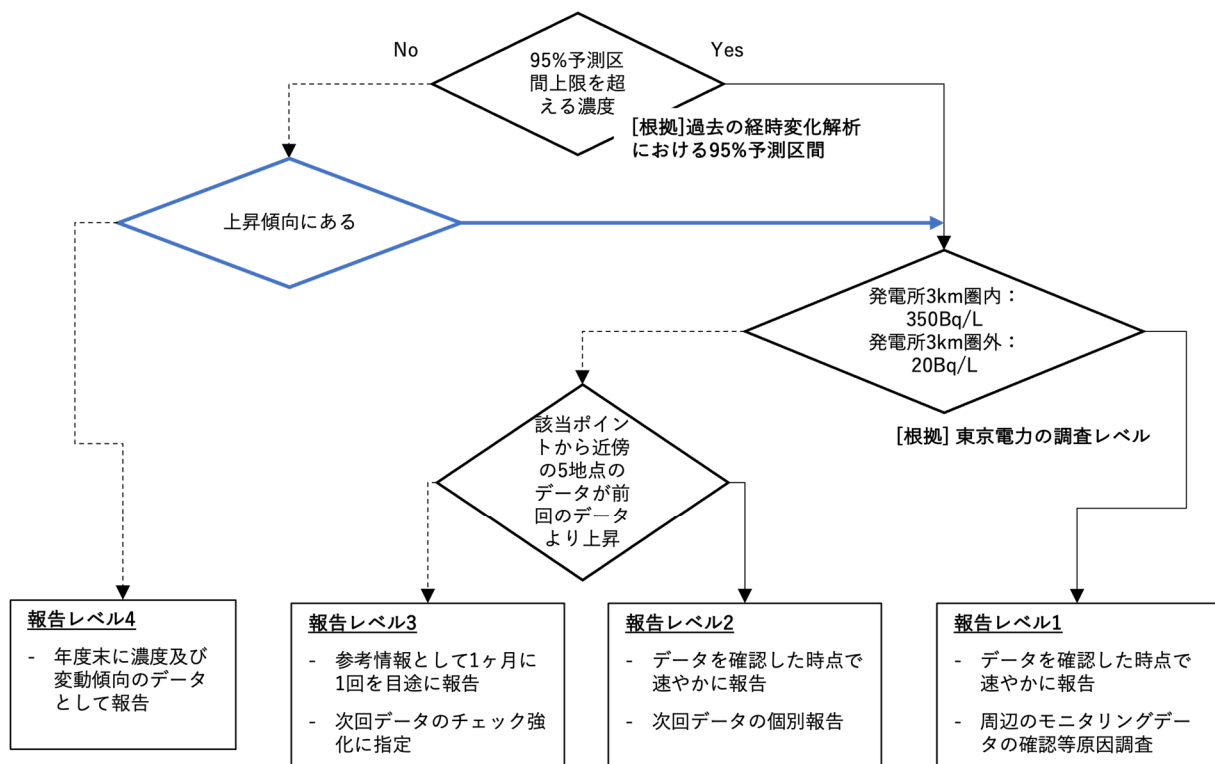


図 7-9 モニタリングデータの報告レベルフローチャート改定案

7.2 海生生物中のトリチウム濃度データの解析

海生生物中のトリチウム濃度についても、海水中のトリチウム濃度の報告レベルフローチャートに倣い、データ公開から 1 週間以内を目途に評価結果を意思決定者（原子力規制庁）へ報告する体制を構築し、運用してきた。ここでは、その評価解析結果の概要を報告する。

7.2.1 モニタリング計画

海生生物のモニタリングについても総合モニタリング計画³¹⁾の別紙に実施計画の詳細が記載されている。総合モニタリング計画（令和 5 年 3 月 16 日改訂）に記載がある採取海域、対象、分析頻度及び検出下限値を表 7-4 に、実施海域のイメージを図 7-10 に示す。実施機関は、東京電力、水産庁、環境省の 3 者である。また、表 7-4 に表示す検出下限値は分析の際の目標値であり、実際の測定ではこの目標値よりも低い濃度の測定結果が報告されている。本節では、参考文献の 45、46 及び 49 で公開されているモニタリングデータを使用している。なお、水産庁が実施する分析は、検出下限値を 10 Bq/L 程度とする迅速分析（全トリチウム濃度の測定）を含む。

表 7-4 総合モニタリング計画に記載されている海生生物モニタリング

対象海域	対象	検出下限値 (Bq/L)	分析頻度	実施機関
沿岸海域	魚類	1×10 ⁻¹ (組織自由水型) 5×10 ⁻¹ (有機結合型)	1 回/月	東京電力
近傍海域	海藻類	1×10 ⁻¹ (組織自由水型) 5×10 ⁻¹ (有機結合型)	3 回/年	
沿岸海域 沖合海域 外洋海域	水産物	3×10 ⁻¹ ~1	380 検体/年	水産庁
近傍海域 沿岸海域	魚類	1×10 ⁻¹ (組織自由水型) 5×10 ⁻¹ (有機結合型)	4 回/年	環境省

近傍海域：東電福島第一原発近傍で監視が必要な海域

※ 2号機排気筒と3号機排気筒の中間地点から概ね3kmの海域

沿岸海域：岩手県から宮城県、福島県、茨城県の海岸線から

概ね30km以内の海域（河口域を含み、近傍海域を除く）

沖合海域：海岸線から概ね30~90kmの海域

外洋海域：海岸線から概ね90km以遠の海域

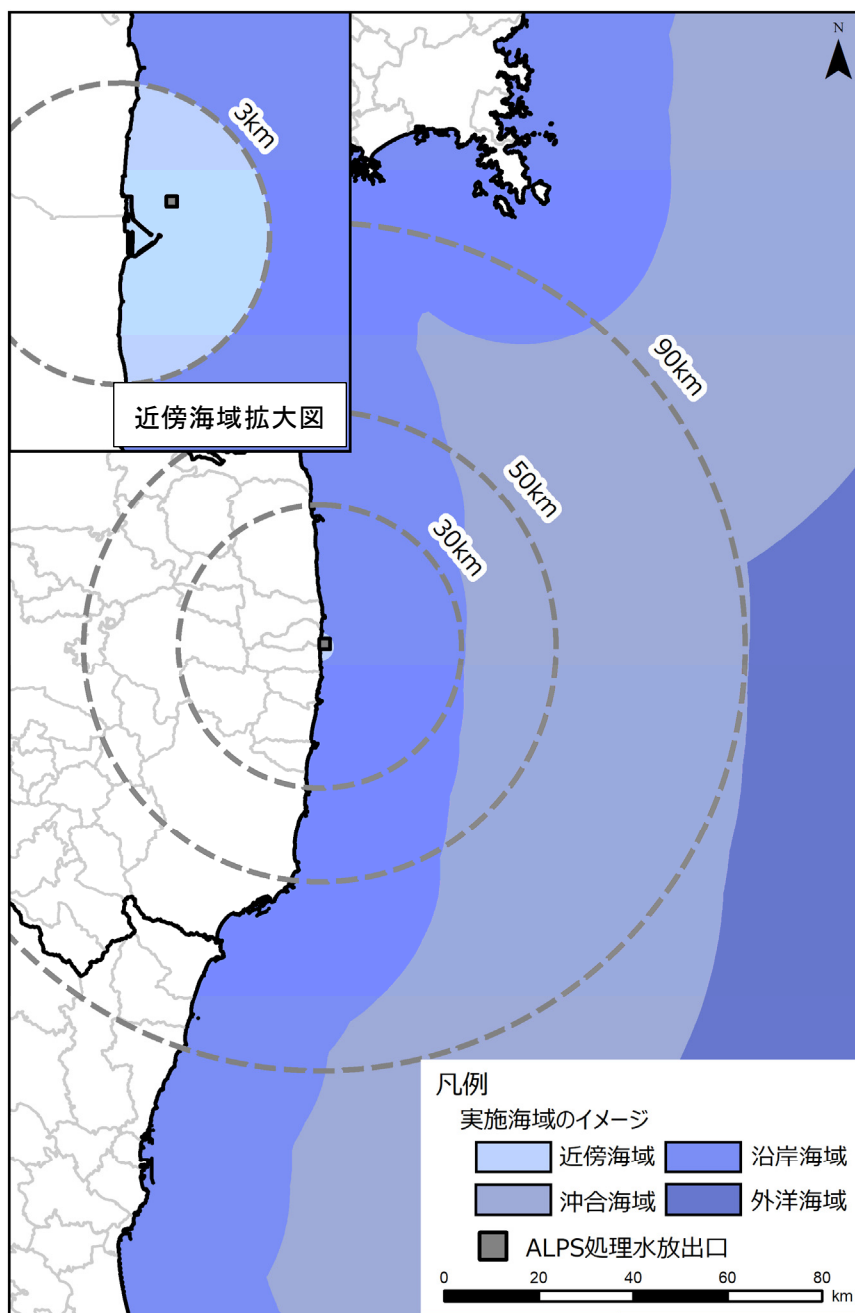


図 7-10 総合モニタリング計画に記載されている海生生物モニタリングの実施海域
(国土数値情報⁴²⁾(行政区画データ)を加工して作成)

7.2.2 測定結果

令和5年1月から令和5年12月までに公表された海生生物中のトリチウム濃度の分析数を図7-11に示す。処理水の海洋への放出が開始された令和5年8月24日以降、特に水産庁による海産物のモニタリングが強化され、分析数(報告数)が大幅に増加したことが分かる。

測定結果を表7-5に示す。東京電力が沿岸海域で実施した魚類(ヒラメ)の組織自由水型トリチウムTFWT(Tissue Free Water Tritium)濃度は0.054~0.18 Bq/L、近傍海域で実施した海藻類(こんぶ、ほんだわら)のTFWT濃度は0.086 Bq/Lと非常に低濃度であった。

環境省が近傍海域・沿岸海域で実施した魚類（ヒラメ、カスザメ等）の結果も同様に TFWT 濃度が 0.036～0.12 Bq/L であった。また、水産庁が沿岸海域・沖合海域・外洋海域で実施した水産物（ヒラメ、ホウボウ、マゴチ、マダイ等）の迅速分析（全トリチウム）及び TFWT 測定結果はいずれも検出下限値以下であった。有機結合型トリチウム OBТ (Organically Bound Tritium) の濃度測定は、東京電力及び環境省が実施したが、魚類・海藻類ともにそれぞれの検出下限値以下の濃度であった。

東京電力及び環境省が実施した魚類の TFWT 濃度の時間変化を図 7-12 に示す。これまでに公表された処理水の放出後の測定結果を見ても、顕著な濃度の上昇は認められなかった。

なお、令和 6 年 1 月以降に公開された環境省の近傍海域・沿岸海域の魚類（令和 5 年 10 月 18 日採取試料）の測定結果⁴⁶⁾では、TFWT 濃度が 0.84～1.6 Bq/L であった。また、これまで検出下限値以下であった OBТ 濃度についても 0.30～0.73 Bq/L の値が検出された。以上より、今後、海生生物についても処理水の放出影響が認められる可能性があることから、濃度変動傾向解析を引き続き実施し、海水と同様に異常な濃度が検知されないか監視を継続することが重要である。また、総合モニタリング計画のモニタリング対象となっている海底土、セシウム、ストロンチウム等のトリチウム以外の核種についても同様に監視していくことが今後の課題として挙げられる。

表 7-5 海生生物中のトリチウム濃度の測定結果

実施機関	対象海域	対象	分析頻度	試料名	分析項目*	放射能濃度		
						検出値	検出下限値	単位
東京電力	沿岸海域	魚類	1回/月	ヒラメ	TFWT	0.054 ~ 0.18	-	Bq/L
						0.042 ~ 0.14		Bq/kg 生重量
					OBТ	検出されず	0.24 ~ 0.29	Bq/L
							0.032 ~ 0.05	Bq/kg 生重量
東京電力	近傍海域	海藻類	3回/年	こんぶ、ほんだわら	TFWT	0.086	-	Bq/L
						0.065 ~ 0.073		Bq/kg 生重量
					OBТ	検出されず	0.2 ~ 0.21	Bq/L
							0.014 ~ 0.022	Bq/kg 生重量
水産庁	沿岸海域 沖合海域 外洋海域	水産物	380検体/ 年	ヒラメ、ホウボウ、マゴチ、 マダイ、メイタガレイ等 ヒラメ、ホタテガイ、マダラ、 スケトウダラ、スルメイカ等	迅速分析(全 トリチウム)	検出されず	7.15 ~ 9.45	Bq/kg
					TFWT		0.206 ~ 0.389	
環境省	近傍海域 沿岸海域	魚類	4回/年	ヒラメ、カスザメ、アカエイ、 混合魚種、ツマリカスベ等	TFWT	0.036 ~ 0.12	-	Bq/L
						0.028 ~ 0.096		Bq/kg 生重量
					OBТ	検出されず	0.3 ~ 0.4	Bq/L
							0.04 ~ 0.06	Bq/kg 生重量

* TFWT：組織自由水型トリチウム、OBТ：有機結合型トリチウム

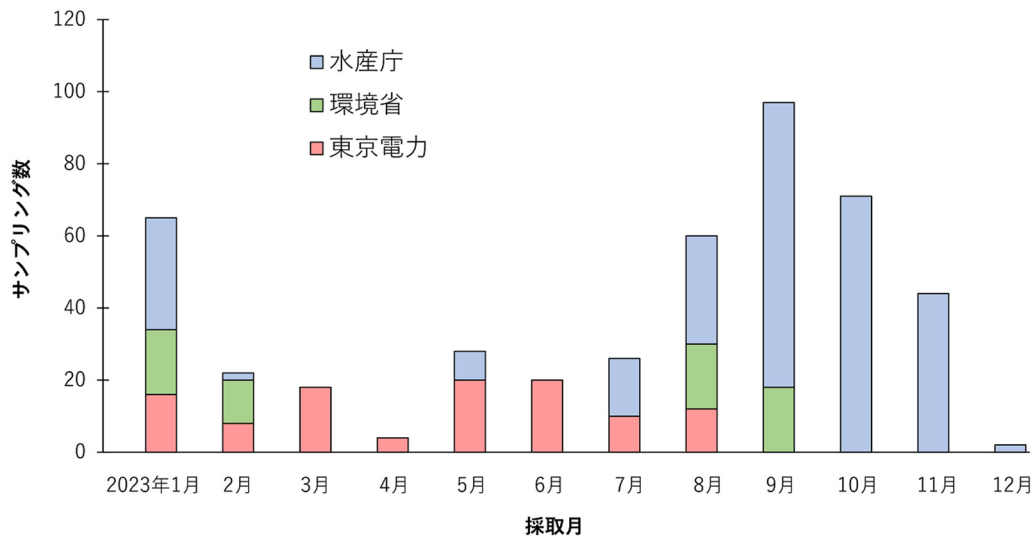


図 7-11 海生生物中のトリチウム濃度の分析数

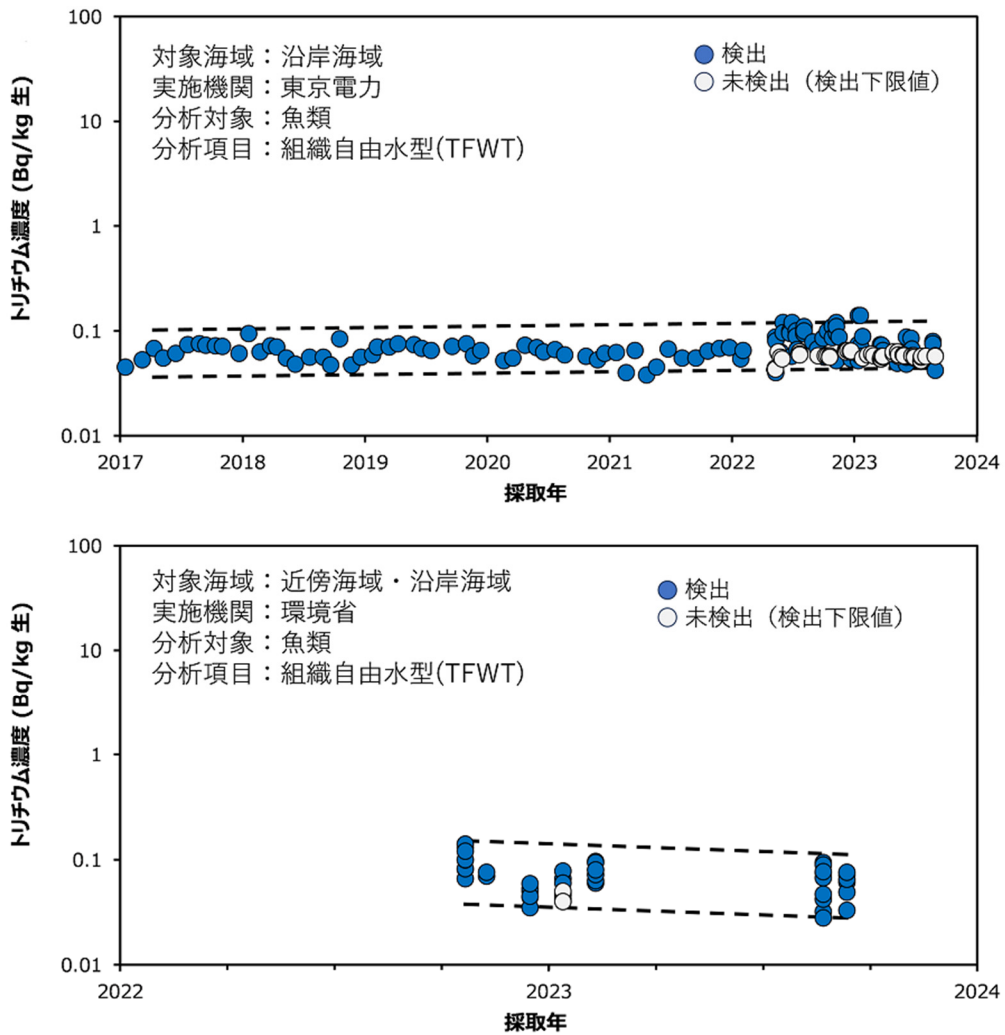


図 7-12 海生生物中のトリチウム濃度の変動傾向 (上：東京電力実施、下：環境省実施)

7.3 海域モニタリング地点の重要度分類

本節では、令和 5 年度までに総合モニタリング計画で実施された海域モニタリング（海水・海底土）の測定結果について集約するとともに、事故による影響が大きいセシウム 137 に関して過去からの変動や濃度などの測定結果の評価を行った。なお、モニタリングデータの評価には公開されているデータ⁴⁵⁻⁵¹⁾を使用した。

7.3.1 調査内容

総合モニタリング計画に記載された、放射性セシウム濃度を測定している海水モニタリング地点全 376 地点及び海底土モニタリング地点全 202 地点における令和 5 年 3 月期までの測定結果を用い、以下の 3 項目について解析を実施した。なお、評価方法については、平成 31 年度及び令和 2 年度放射性物質測定調査委託費（福島県近沿岸海域等における放射性物質等の状況調査）事業^{52,53)}（以下これらをそれぞれ「平成 31 年度海域事業」及び「令和 2 年度海域事業」という。）並びに令和 3 年 3 月期までのデータを解析した令和 3 年度調査⁵⁴⁾で用いた方法を適用した。

- ① 事故から 6 年後以降（平成 29 年 4 月から令和 5 年 3 月まで）の平均放射性物質濃度（以下「現状の濃度」という。）の算出。
- ② 放射性物質濃度の変動ファクターの算出： 事故後 2 年目以降のモニタリングデータについて経過時間に対する対数線形回帰分析を行った。実測値と回帰関数から得られた予測値との相対誤差を求め、得られた誤差の標本標準偏差（標準誤差）の 2 倍を変動ファクター（90-95%信頼限界値）と定義した。
- ③ 実効半減期の算出： 上記の対数線形回帰直線の傾きから事故から 2 年目以降の実効半減期を求めた。

評価例として、福島第一原発 5 号機及び 6 号機放水口北側に位置する T-1 地点における海底土のセシウム 137 の測定結果と近似直線を図 7-13 に示す。

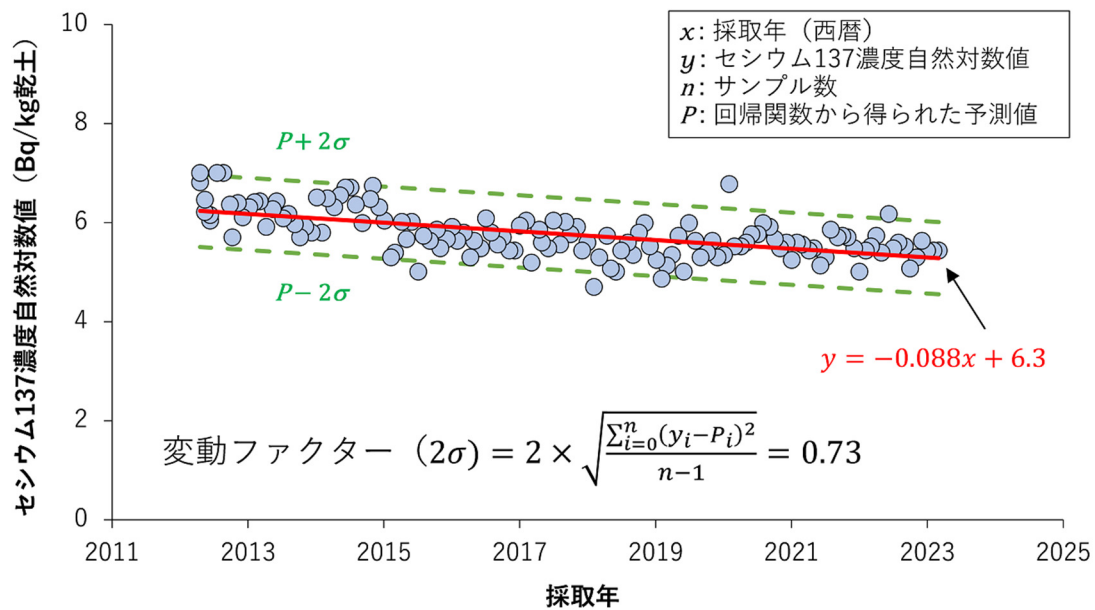


図 7-13 海底土のセシウム 137 濃度の測定結果例
(実線は近似曲線、点線は標本標準偏差 (標準誤差) の 2 倍を意味する。)

7.3.2 調査結果

1) 海水モニタリングの解析

全 376 地点のセシウム 137 のモニタリング結果について 7.3.1 項に示した 3 項目の解析を行った。採取ポイントの重要度について相互比較を行うため、以下の 2 段階の判定基準を設定し、6 ランクに分類した。なお、後述する過年度評価結果との比較では、過年度に採水されていない (比較できない) 地点及び検出下限値が 1 Bq/L 以上で ND (不検出) の 154 地点については対象外とした。

• 第 1 段階

「現状の濃度」及び「変動ファクターから推測される 95 パーセンタイル値^b (現状の濃度×変動ファクター、以下「95 パーセンタイル値」という。)」の 2 つの数値を用いて以下のように判定する。

ランク A : 現状の濃度が 0.5 Bq/L 以上

ランク B : 現状の濃度は 0.5 Bq/L 未満だが、95 パーセンタイル値が 0.5 Bq/L を超過する可能性がある

ランク C : 0.5 Bq/L 超過の可能性は低いが、現状の濃度が平常の変動上限値 0.01 Bq/L 以上、又は 95 パーセンタイル値が 0.01 Bq/L 超過の可能性がある

ランク D : 現状の濃度が平常の変動上限値 0.01 Bq/L を下回り、95 パーセンタイル値

^b 試料数により 95-97.5 パーセンタイル値となるが、本報告書では保守的に 95 パーセンタイル値と標記する。

も 0.01 Bq/L を超過する可能性が低い

判定基準である 0.5 Bq/L は、濃縮係数を 100⁵⁵⁾ とした場合の水産物の基準値 (100 Bq/kg 湿潤) に相当する海水濃度値 (1 Bq/L) に濃度値の誤差やバラつきを考慮した安全係数 2 で除した数値として設定した。もう一つの判定基準となる平常の変動上限値 0.01 Bq/L については、事故前の放射性セシウム濃度レベル (2006~2010 年 (平成 18~22 年)) 度の「海洋環境放射能総合評価事業」におけるモニタリング結果⁵⁶⁾ の最大値 (0.004 Bq/L) 及び「平常時モニタリングについて」(平成 30 年 4 月 4 日付原子力災害対策指針補足参考資料) の陸水セシウム 137 濃度測定目標値 (0.008 Bq/L) を参考として設定した。

• 第 2 段階

第 1 段階においてランク B 及び C に該当した採取ポイントについて、実効半減期がセシウム 137 の物理的半減期相当である 30 年を超えた場合、新たな流入影響の可能性が考えられるため、それぞれランク B*及び C*として区別した。表 7-6 に各海域のランク分け結果について示す。また、図 7-14 に令和 5 年度調査 (令和 5 年 3 月期までのデータを採用) でのランク結果を示す。

表 7-6 各海域 (海水採取ポイント) のランク分け結果

	A	B*	B	C*	C	D	評価対象外	計
岩手県	0	0	0	0	0	0	D:4	4
宮城県	0	0	0	0	0	14	D:24	38
福島県	0	0	3	0	46	16	A:1 C*:4 C:10 D:73	153
茨城県	0	0	0	0	0	0	D:22	22
沖合	0	0	0	0	0	84		84
外洋	0	0	0	1	0	49		50
東京湾	0	0	0	0	1	8	D:16	25
計	0	0	3	1	47	171	154	376

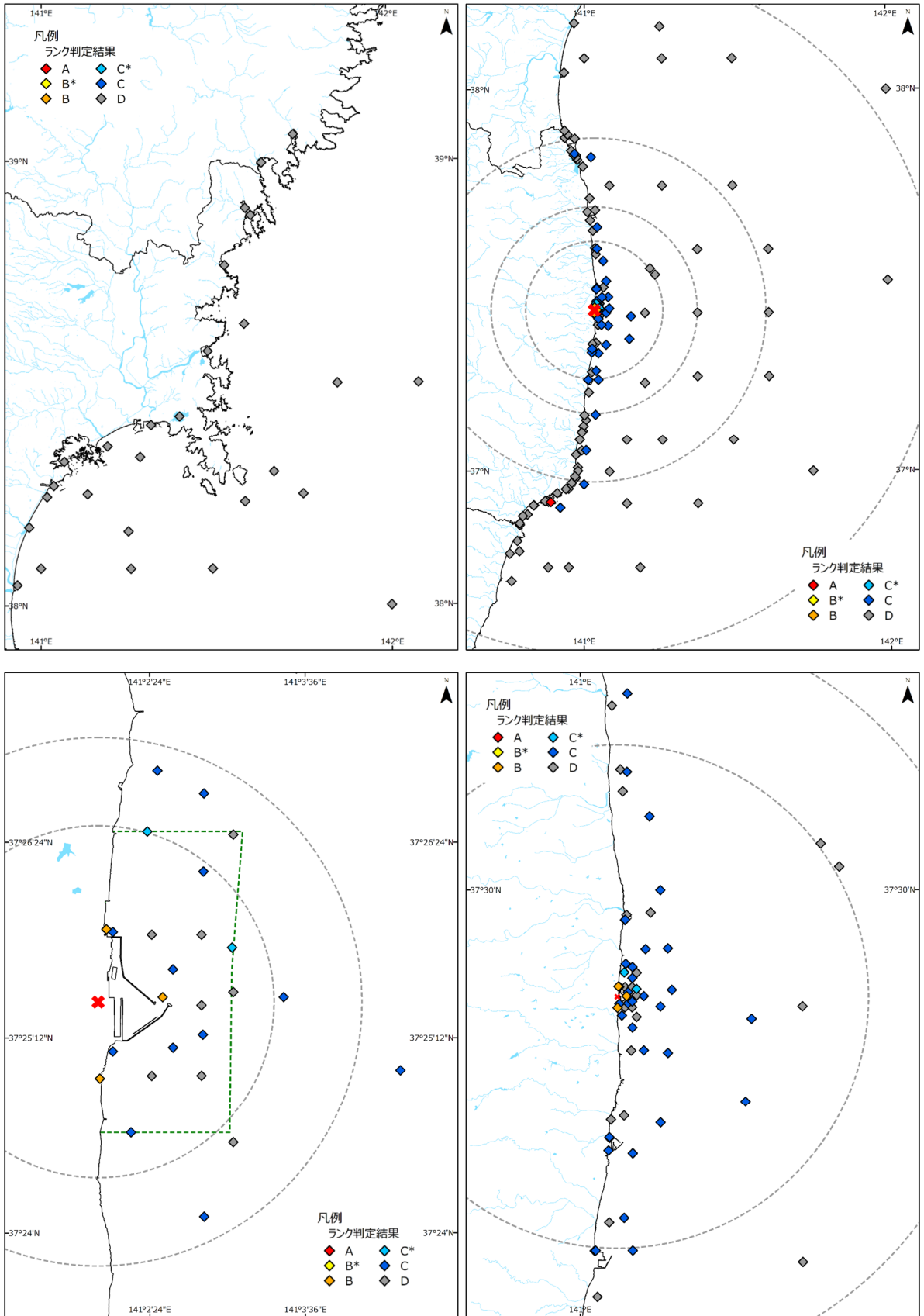


図 7-14 海水モニタリング地点及び令和 5 年度調査でのランク結果 (1/2) (背景図は国土数値情報⁴²⁾ (行政区域データ) 及び ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c) Esri Japan^o)

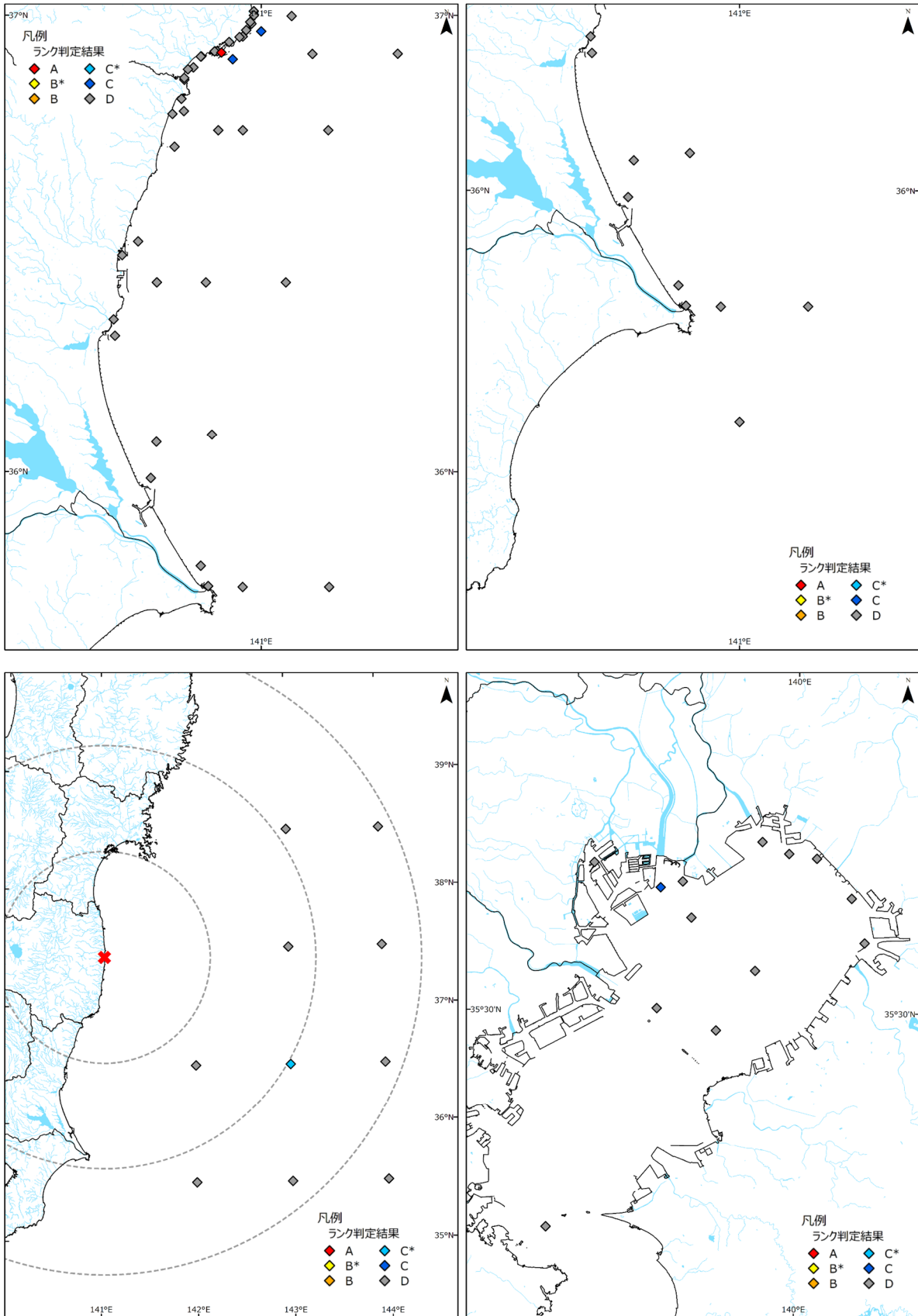


図 7-14 海水モニタリング地点及び令和 5 年度調査でのランク結果 (2/2) (背景図は国土数値情報⁴²⁾ (行政区域データ) 及び ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c) Esri Japan。)

2) 海底土モニタリングの解析

全 202 地点のセシウム 137 のモニタリング結果について 7.3.1 節に示した 3 項目の解析を行った。海水と同様、採取ポイントの重要度について相互比較を行うため、以下の 2 段階の判定基準を設定し、6 ランクに分類した。なお、後述する過年度評価結果との比較では、過年度に採泥されていない（比較できない）3 地点については対象外とした。

・ 第 1 段階

「現状の濃度」及び「変動ファクターから推測される 95 パーセンタイル値（現状の濃度×変動ファクター）」の 2 つの数値を用いて以下のように判定する。

ランク A：現状の濃度が 50 Bq/kg 乾土以上

ランク B：現状の濃度は 50 Bq/kg 乾土未満だが、95 パーセンタイル値が 50 Bq/kg 乾土を超過する可能性がある

ランク C：50 Bq/kg 乾土超過の可能性は低いが、現状の濃度が 10 Bq/kg 乾土以上、又は 95 パーセンタイル値が 10 Bq/kg 乾土超過の可能性がある

ランク D：現状の濃度が平常の変動上限値 10 Bq/kg 乾土を下回り、95 パーセンタイル値も 10 Bq/kg 乾土を超過する可能性が低い

判定基準である 50 Bq/kg 乾土は、原子炉等規制法に定められる放射性セシウムのクリアランスレベル（100 Bq/kg）を参考とし、濃度値の誤差やバラつきを考慮した安全係数 2 で除した数値を設定した。もう一つの判定基準となる平常の変動上限値 10 Bq/kg 乾土については、事故前の放射性セシウム濃度レベル（2006～2010 年（平成 18～22 年）度の「海洋環境放射能総合評価事業」におけるモニタリング結果⁵⁶⁾の最大値（9.5 Bq/kg 乾土）及び「平常時モニタリングについて」（平成 30 年 4 月 4 日付原子力災害対策指針補足参考資料）の陸水セシウム 137 濃度測定目標値（3 Bq/kg 乾土）を参考として設定した。

・ 第 2 段階

第 1 段階においてランク B 及び C に該当した採取ポイントについて、実効半減期がセシウム 137 の物理的半減期相当である 30 年を超えた場合、新たな流入影響の可能性が考えられるため、それぞれランク B*及び C*として区別した。表 7-7 に各海域の海底土ランク分け結果について示す。また、図 7-15 に令和 5 年度調査（令和 5 年 3 月期までのデータを採用）でのランク結果を示す。

表 7-7 各海域（海底土採取ポイント）のランク分け結果

	A	B*	B	C*	C	D	評価 対象外	計
岩手県	0	1	0	0	0	5		6
宮城県	8	1	4	0	5	1		19
福島県	42	4	38	0	17	10	A:2 D:1	114
茨城県	0	0	2	0	3	0		5
沖合	4	0	1	0	17	10		32
東京湾	4	3	2	1	11	5		26
計	58	9	47	1	53	31	3	202

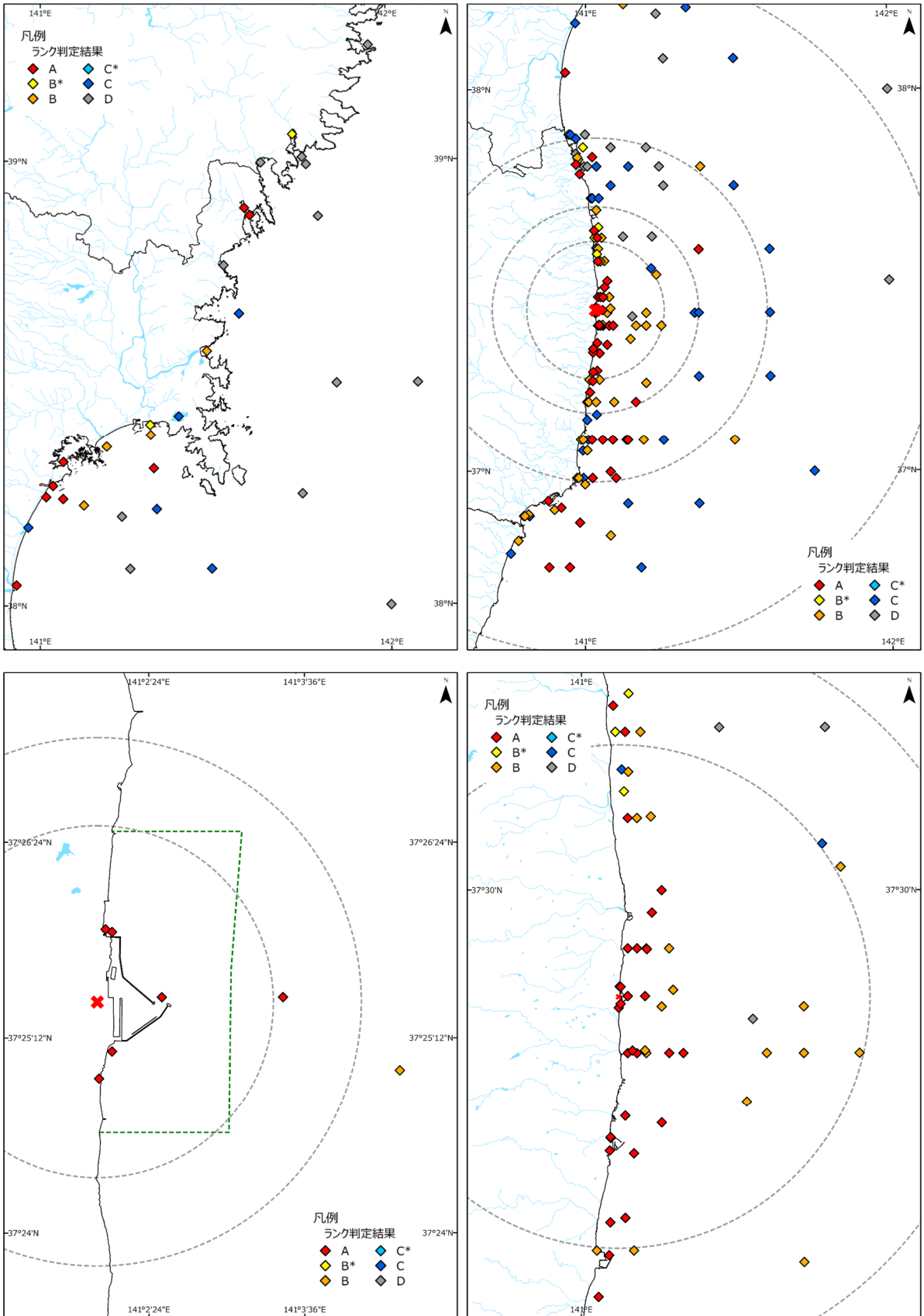


図 7-15 海底土モニタリング地点及び令和 5 年度調査でのランク結果 (1/2) (背景図は国土数値情報⁴²⁾ (行政区域データ) 及び ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c) Esri Japan。)

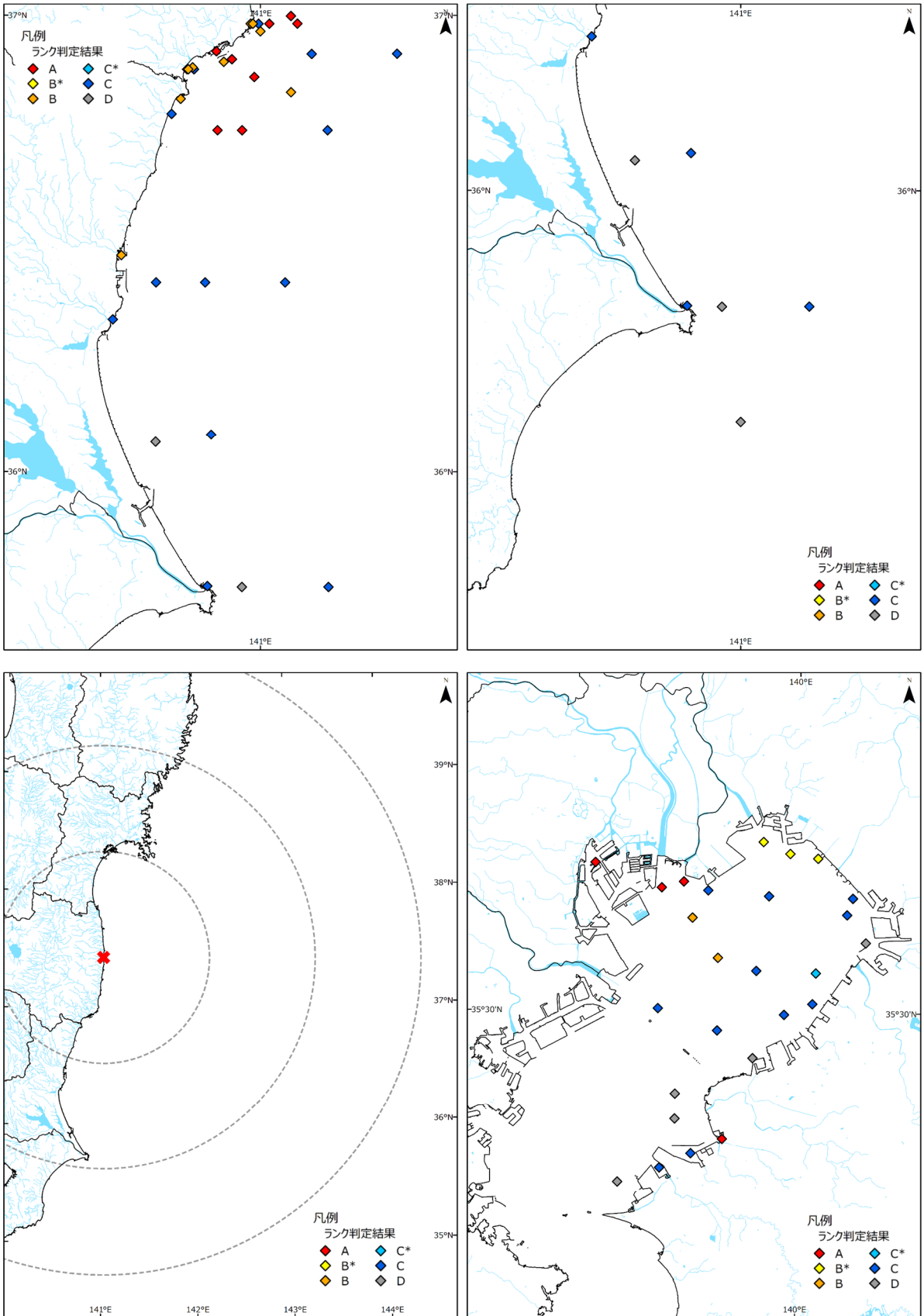


図 7-15 海底土モニタリング地点及び令和 5 年度調査でのランク結果 (2/2) (背景図は国土数値情報⁴²⁾ (行政区域データ) 及び ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c) Esri Japan。)

7.3.3 過年度評価結果との比較

7.3.2 項で評価したランク分け結果について、令和 4 年度調査の結果から変化した地点を表 7-8 及び表 7-9 に整理した。令和 4 年度調査での評価結果からランクが上昇した採取ポイントは、海水で該当地点なし、海底土で 3 地点 (1.5%) であった。また、令和 4 年度調査での評価結果からランクが下降した採取ポイントは、海水で 4 地点 (1.2%)、海底土で 8 地点 (4.0%) であった。すなわち、海水の採取ポイントの 99%、海底土の採取ポイントの 94% で、1 年分 (令和 4 年 4 月期～令和 5 年 3 月期) のモニタリングデータを追加しても、評価ランクが変動しなかったことになる。このことから、平成 31 年度 (令和元年度) 及び令和 2 年度海域事業で策定したモニタリングデータの解析方法は、効率的かつ効果的な海域モニタリングの在り方について検討するにあたり、長期的な変動傾向の評価に一定の有効性があると考えられる。

令和 5 年度にランクが変動した海水の採取地点は、4 地点 (T-MG6、T-18、T-22 及び T-MA (表 7-8)) である。これらの点はいずれも令和 4 年度と比較してランクが下がった地点であり、令和 5 年度のランクは D となっている。また、令和元年度から比較すると、C から D のランクで推移しており、長期的にランクが大きく変動する可能性は少ないと考えられる。

令和 5 年度にランクが上昇した海底土の採取地点 (表 7-9) は 3 地点 (E-T4、F-P61 及び E-4H) であった。この 3 地点に対して、令和 4 年度調査までのデータから予測した範囲内かどうか検討した (図 7-14)。令和 4 年度までのデータから予測した範囲内であった E-T4 及び F-P61 は、いずれも近傍河川の河口から 5 km 以内であった。特に E-T4 は三方を陸に囲まれるような湾内の地点であり、細かな粒子が堆積しやすい地形形状である可能性がある。継続的にランクが上昇する可能性がある地点は、放射能濃度分析のみではなく、粒度分析など物性も評価していく必要があると考えられる。一方、E-4H は、1 回だけ令和 4 年度までのデータから予測した範囲外であったが、この地点は平成 27 年以降年 1 回のみのモニタリングであり、データ数が少ない。

今回適用した評価方法では、一時的な濃度変化によってもランクが変化するため、ランクの変更にあたっては、濃度変化が継続的なものであるか、十分に検討すべきと考えられる。例えば、令和元年度から令和 5 年度まででランクが変動した地点は、66 地点ある。そのうち、ランクが上昇・下降した回数が 3 回の地点はわずか 1 地点のみであった。また上昇・下降が 2 回の地点も 8 地点であった (表 7-10)。したがって、都度ランクを変更するのではなく、複数年の結果を踏まえて評価することによって、海域モニタリングの効率化・重点化をより適切に進めることができると考えられる。

表 7-8 令和 4 年度調査での評価結果からランクが変化した地点（海水）

		令和 4 年度調査での評価ランク（2022年3月までのデータを使用）					
		A	B*	B	C*	C	D
令和5年度調査でのランク（2023年3月までのデータを使用）	A						
	B*						
	B						
	C*						
	C						
	D					(宮城県) T-MG6 (福島県) T-18 T-22 T-MA	

表 7-9 令和 4 年度調査での評価結果からランクが変化した地点（海底土）

		令和 4 年度調査での評価ランク（2022年3月までのデータを使用）					
		A	B*	B	C*	C	D
令和5年度調査でのランク（2023年3月までのデータを使用）	A		(福島県) F-P61				
	B*	(福島県) T-13-1		(東京湾) E-T4			
	B	(福島県) F-P69	(東京湾) K-T1				
	C*						
	C			(福島県) T-12 E-76 (沖合) M-J1			(宮城県) E-4H
	D					(福島県) T-B3 F-P29	

表 7-10 令和元年度海域事業から令和 5 年度調査にかけてのランク変化状況

	地点数	期間中の 変動回数	地点数
令和元年度と令和 5 年度を比較した際にランクが上昇した	25 地点	上昇 3 回	1 地点
		上昇 2 回	4 地点
		上昇 1 回	20 地点
令和元年度と令和 5 年度を比較した際にランクが下降した	31 地点	下降 2 回	4 地点
		下降 1 回	27 地点
令和元年度から令和 5 年度までランクが一定だった	133 地点	-	-
令和元年度と令和 5 年度でランクが同じだが、途中でランクの上昇と下降が見られた	10 地点	-	-

全てR4年度予測内

1回だけR4年度予測外

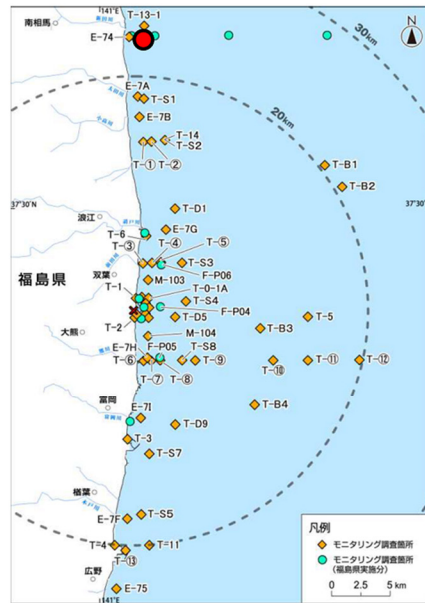
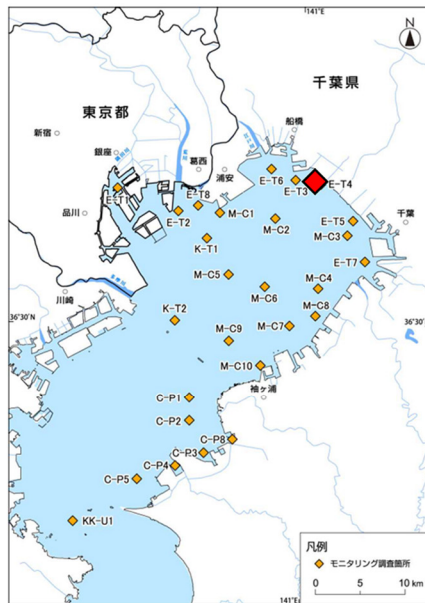
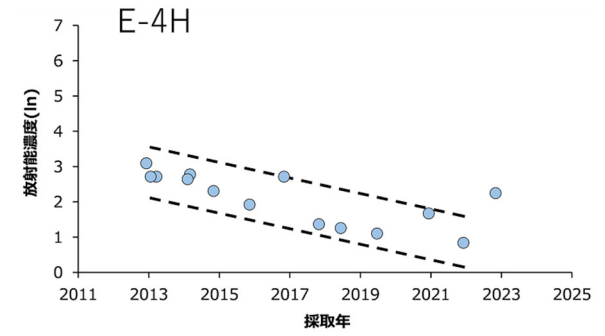
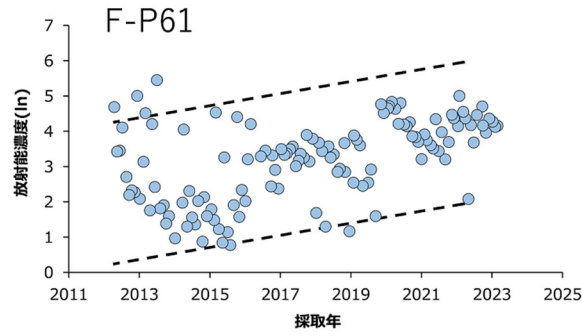
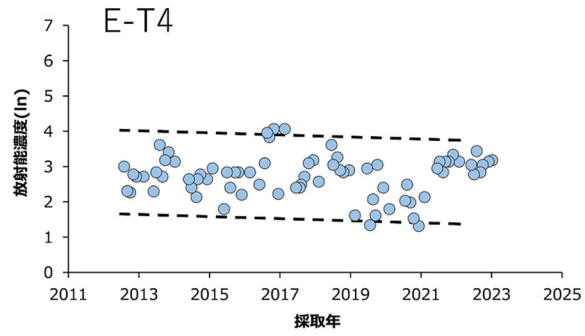


図 7-16 令和 4 年度調査での評価結果からランクが上昇した地点（海底土：E-T4、 F-P61 及び E-4H）
 （上図の破線は令和 4 年度までのデータから予測した範囲内を示している。下図 31)は測定地点の位置を赤色で示している。）

8. 実測データの統合的解析

8.1 調査目的

分布状況調査では、80 km 圏内を中心に数種類の異なる測定方法を用いて空間線量率分布に関する大規模な調査を行ってきた。また、航空機サーベイ²⁸⁾では、人が立ち入れない場所を含むより広域を対象として空間線量率分布マップが作成されている。これら空間線量率の各測定方法にはそれぞれ固有の特性があり、測定精度や測定データの空間分解能が異なる。これらの異なった測定手法の特性を考慮して空間線量率情報を統合することは、統一的な分かりやすい情報の提供を可能とし、政策決定や被ばく評価に有益であると考えられる。本章の統合的解析の目的は、多様な空間線量率情報を地図上で統合表示した高精度かつ空間分解能の高い詳細な空間線量率分布マップ（以下「統合マップ」という。）を作成することである。統合マップの作成には、異なる方法で測定された空間線量率データを階層ベイズ統計により統合する手法⁵⁷⁾を適用した。

分布状況調査では、平成 28 年度に統合マップ作成を開始し、人間の生活する場を対象とする歩行サーベイを避難指示区域全域で行ったことを想定し、歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機サーベイの結果を統合した⁵⁸⁾。平成 29 年度及び平成 30 年度調査では統合対象地域を 80 km 圏内とし^{59,60)}、令和元年度調査以降は対象をさらに福島県全域に広げた⁶¹⁻⁶⁴⁾。その際、80 km 圏外での歩行サーベイデータの不足を補うために新たな測定データを導入した。

令和 5 年度調査では、令和 4 年度と同様に、当該年度に測定されたデータ等を統合し 80 km 圏内及び福島県全域の統合マップを作成した。

8.2 調査内容

8.2.1 統合マップ作成に用いた空間線量率測定データ

統合マップの作成においては、統計解析を行うのに十分なデータ量を有する歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機サーベイの結果を用いた。歩行サーベイは人間が生活する様々な環境における空間線量率を取得でき、空間線量率の場所による変化を詳細に捉えた測定が可能であるが、人間の歩行による測定であるため 80 km 圏内あるいは福島県の全てをカバーすることは不可能である。走行サーベイでは、広範囲を対象に膨大な量のデータを取得することが可能であるが、測定は自動車が行ける道路上に限定される。航空機サーベイは 300 m 高度での測定を行うため地上の細かな空間線量率の変化を捉えることはできないが、測定地域全域をカバーできるという他にない特徴を有している。

福島県全域の解析において 80 km 圏外での歩行サーベイ測定データの不足を補うために、分布状況調査では以下の工夫を行ってきた。令和元年度は、福島県が実施した「モニタリングメッシュ調査」⁶⁵⁾の結果を利用した。令和 2 年度はさらなる高精度化を目指し、林野庁による「福島県内に所在するレクリエーションの森等における空間線量率調査」⁶⁵⁾及び「旧避難

65) 福島県内を 2 km メッシュに分け、福島県内（帰還困難区域を除く）の主な生活道路等を対象として、原則としてメッシュごとに 1 調査地点を選定し、サーベイメータを用いた定点測定により地表面から高さ 1 m の空間線量率を測定している³⁹⁾。測定地点は約 2,900 点である。

指示区域等国有林内におけるモニタリング調査事業」⁶⁶⁾（以下「林野庁調査」^dという。）の測定データを従来の統合解析データに追加した場合の統合マップに与える影響について検証し統合マップの精度向上を確認した⁶²⁾。令和3年度以降は、当該年度内に測定された歩行サーベイ、走行サーベイ、航空機サーベイに定点サーベイ、モニタリングメッシュ調査及び林野庁調査の結果を加え統合し、80 km 圏内及び福島県全域の統合マップを作成した⁶³⁾。なお、林野庁調査の結果は前年度の測定データとなるため放射性セシウムの半減期による減衰補正をしている。定点サーベイ、福島県によるモニタリングメッシュ調査及び林野庁調査では、いずれも地上1 m 高さの空間線量率を測定していることから、歩行サーベイと同等とみなし解析を行った（以下では、このように歩行サーベイと同等とみなし得るデータを「歩行サーベイ相当データ」と呼ぶ）。

8.2.2 測定データ統合手法の概要

空間統計学の分野で用いられてきた階層ベイズモデルを、空間線量率分布を統合したマップへ応用するためのアルゴリズムは、原子力機構と米国ローレンス・バークレー国立研究所（LBNL）との共同研究により開発され、福島市周辺の狭い地域を対象に検証済みである⁵⁷⁾。ここでは、統合マップ作成の理論について概説する。

上記手法は、同じ地域を対象とした同時期の測定により歩行サーベイの測定データセット \mathbf{z}_W 、走行サーベイの測定データセット \mathbf{z}_C 、航空機サーベイの測定データセット \mathbf{z}_A が得られた時に、最も信頼のおける空間線量率分布 \mathbf{y} を統計手法により推定するものである。具体的には以下の式 (14) で表した条件確率 $p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W, \mathbf{z}_C, \mathbf{z}_A)$ が最大になるような \mathbf{y} 及びその分散を求める。 $p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W, \mathbf{z}_C, \mathbf{z}_A)$ は、 \mathbf{z}_W 、 \mathbf{z}_C 及び \mathbf{z}_A が観測されたという条件で空間線量率分布が \mathbf{y} である確率を意味する。 $p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W, \mathbf{z}_C, \mathbf{z}_A)$ はベイズの定理により以下のように分けて書くことができる。

$$p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W, \mathbf{z}_C, \mathbf{z}_A) \propto p(\mathbf{z}_A|\mathbf{y}) p(\mathbf{z}_C|\mathbf{y}) p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W) \quad (14)$$

ここで、

$p(\mathbf{z}_A|\mathbf{y})$: 空間線量率分布が \mathbf{y} の時に \mathbf{z}_A が観測される確率

$p(\mathbf{z}_C|\mathbf{y})$: 空間線量率分布が \mathbf{y} の時に \mathbf{z}_C が観測される確率

$p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W)$: \mathbf{z}_W が観測された時に空間線量率分布が \mathbf{y} である確率とする。

$p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W)$ を事前確率と呼び、観測値 \mathbf{z}_W に基づき得られた空間線量率分布 \mathbf{y} を事前分布と呼ぶ。また、 $p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W, \mathbf{z}_C, \mathbf{z}_A)$ を事後確率と呼び、得られた空間線量率分布 \mathbf{y} を事後分布と呼ぶ。前項で述べたように、歩行サーベイでは人間の生活に密着した空間線量率が得られるので、歩行サーベイにより得られた空間線量率が実際の空間線量率（統合により得たい空間線量率）であると仮定する。すなわち、歩行サーベイの測定データがある地点の空間線量率はその値を用

^d 「福島県内に所在するレクリエーションの森等における空間線量率調査」⁶⁵⁾は福島県内に所在する国有林野のうちレクリエーションの森等の約 200 地点において、「旧避難指示区域等国有林内におけるモニタリング調査事業」⁶⁶⁾は旧避難指示区域等国有林内の約 1,400 地点において、サーベイメータを用いて地表面から高さ 1 m の空間線量率を測定している。

い、測定データがない地点に対しては、仮に歩行サーベイをその地点で実施した時にどのような値が得られるかを推定する。

式 (14) の条件を満たした \mathbf{y} を求めるために、右辺の 3 つの確率関数の基礎データを測定データの統計解析により取得することになる。 $p(\mathbf{z}_A|\mathbf{y})$ 及び $p(\mathbf{z}_C|\mathbf{y})$ と関連するデータモデルは、航空機サーベイと歩行サーベイの相関関係、走行サーベイと歩行サーベイの相関関係の解析により得られる。

$p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W)$ と関連したプロセスモデルは、歩行サーベイ結果の空間パターンの解析から得られる。具体的には歩行サーベイにおいて、離れた 2 メッシュ間の空間線量率が距離によりどのように変化するかを解析した。データモデル及びプロセスモデルの基となる環境モニタリング測定データ間の相関関係は土地利用状況により異なることが分かっているので、土地利用状況別に統計解析を実施しその結果を用いた。これらの関係を利用しながら確率が最大となる \mathbf{y} とその信頼区間（標準偏差）を推定した。

なお、上記において空間線量率は全て対数変換し解析を実施している。

8.3 80 km 圏内を対象とした統合マップの作成

8.3.1 統合マップ作成に使用した測定データ

80 km 圏内を対象として、令和 5 年度に測定された各種データを用い統合マップを作成した。使用したデータの一覧を表 8-1 に示す。令和 2 年度の検討により、林野庁調査等の定点サーベイを加えることで統合マップの精度が向上することが確認できたことから、歩行サーベイ相当データとして、定点サーベイ、モニタリングメッシュ調査及び林野庁調査結果を含んでいる。測定された全ての空間線量率を放射性セシウムの物理減衰を考慮して令和 5 年 11 月 27 日（航空機サーベイの補正基準日）での値となるように補正した。なお、後述の歩行サーベイの空間分布パターン解析を円滑に行うため、歩行サーベイ相当データのうち歩行サーベイの測定点に近すぎるもの及び歩行サーベイ相当データ内で測定点間距離が近すぎるデータ対の片方を取り除いた。データ対の片方を取り除く距離の基準は 18 m 未満とした。また、航空機サーベイについては 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ 未満のデータを削除した（以下、同様）。統合化を行う歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機サーベイの測定結果を歩行サーベイ相当データとともに図 8-1 に示す。以下では、統合化に使用する歩行サーベイデータには、断らない限り歩行サーベイ相当データを含んでいる。なお、歩行サーベイ相当データは、歩行サーベイのような連続測定ではないため、20 m メッシュでの平均化は行っていない。

過去に実施した解析により、各測定結果間の関係が平成 28 年 7 月 12 日時点における避難指示区域内と区域外で異なることが明らかになっていることから、今回の解析においても避難指示区域内外を分割した解析を行った。また、対象領域における土地利用状況によっても放射性物質の分布状況及び変化傾向が異なることが明らかになっていることから、宇宙航空研究開発機構（JAXA）より公開されている高解像度土地利用土地被覆図⁶⁷⁾（ver.23.12）に基づき測定データを分類して解析を実施した。今回の解析に使用した土地利用状況を図 8-2 に示す。また、令和 5 年 5 月 1 日時点の避難指示区域区分（図 8-3 参照）を使用した。

表 8-1 80 km 圏内統合マップ作成に使用したデータ一覧

種別	実施者	測定年度	備考
航空機サーベイ	原子力規制庁	令和 5	
走行サーベイ	原子力規制庁	令和 5	2 回目 (通算第 27 回)
歩行サーベイ	原子力規制庁	令和 5	
歩行サーベイ相当 データ	原子力規制庁	令和 5	定点サーベイ
	福島県	令和 5	モニタリングメッシュ調査
	林野庁	令和 4	国有林内調査

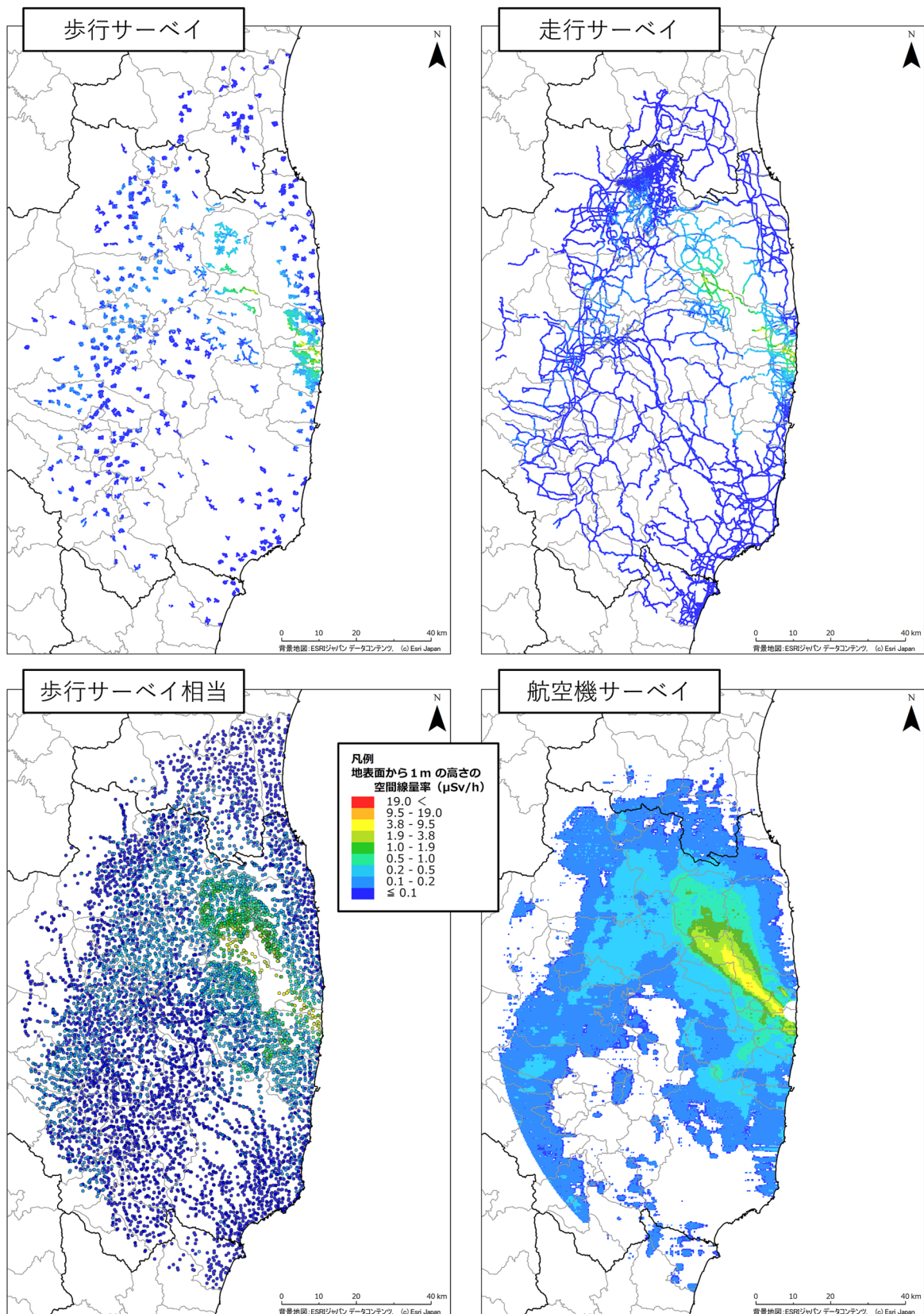
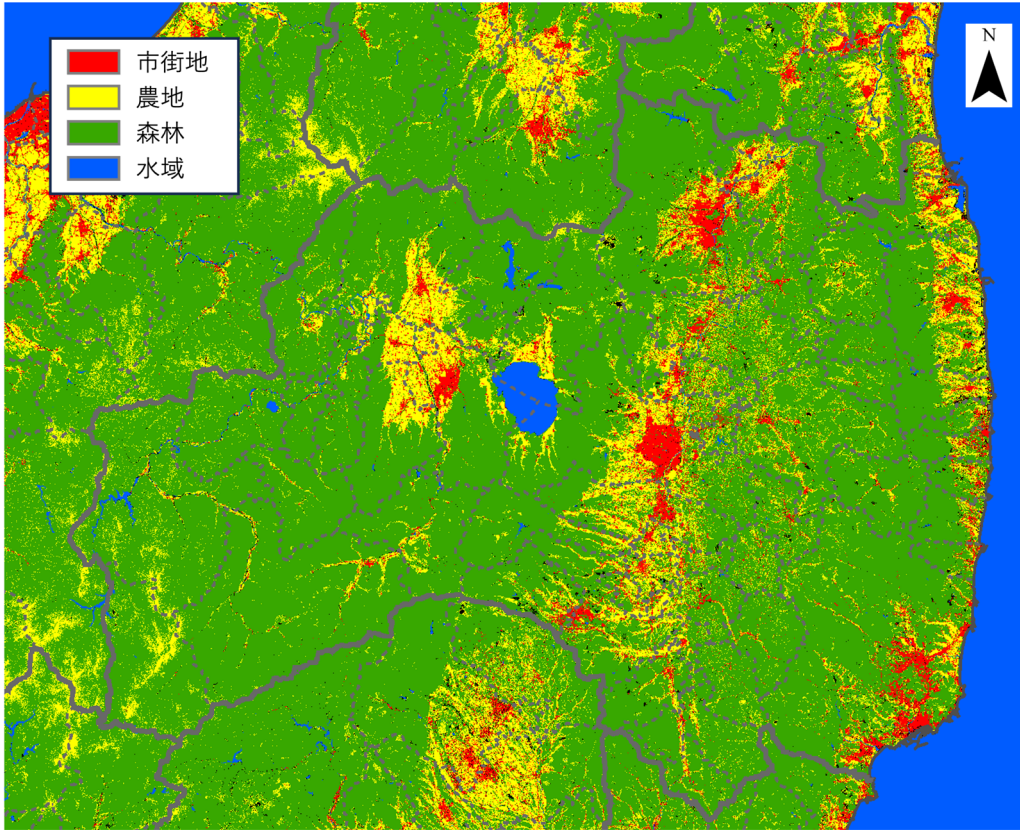


図 8-1 令和 5 年度の統合マップ作成に使用した空間線量率データ (80 km 圏内)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図：ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c) Esri Japan。)



背景地図：ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c)EsriJapan

図 8-2 JAXA の高解像度土地利用土地被覆図に基づく土地利用状況

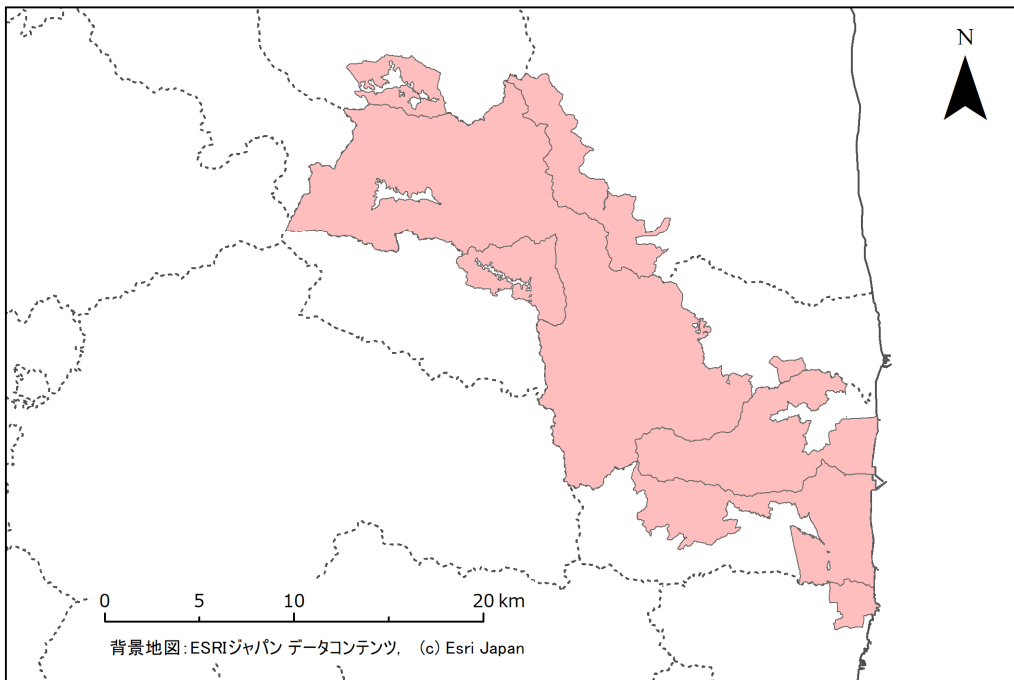


図 8-3 令和 5 年 5 月 1 日時点の避難指示区域（色塗り箇所）

8.3.2 歩行サーベイ結果の空間分布パターンの解析

$p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_w)$ のプロセスモデルを決めるために、避難指示区域内外の歩行サーベイデータに関する空間分布パターンの解析（バリオグラム解析）を行った。避難指示区域内及び同区域外（ただし 80 km 圏内。以下、本節において同様とする。）におけるバリオグラム解析を、市街地、農地、森林の 3 種の土地利用状況ごとに実施した。バリオグラム解析結果を図 8-4 に示す。縦軸の値はセミバリエンスと呼ばれる量を表しており、2 点間で観測される空間線量率の差と距離の相関を示す指標である。セミバリエンスの定義を式 (15) に示す。

$$\Gamma(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} (z_i - z_j)^2 \quad (15)$$

ここで、 $N(h)$ は 2 点間の距離が h となる測定値の集合である。一般に、一定の距離を越えるとセミバリエンスはほぼ一定値になり、それ以遠の空間線量率は距離との相関を持たなくなる。バリオグラムのフィッティング関数は、式 (16) に示す指数関数型を採用した。

$$f(h) = n + (s - n) \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{r}\right) \right] \quad (16)$$

距離とセミバリエンスの相関がほぼ無くなる時点での距離の値をレンジ r 、セミバリエンスの値をシル s と呼ぶ。シルは空間線量率のばらつきの大きさ（分散）を表す。距離 d がゼロのときの値をナゲット n と呼び、ランダムノイズの効果の大きさを表している。

各パラメータの初期値を複数設定し、最小二乗フィッティングを行ったうえで、最適なパラメータセットを決定した。図から認められるように、避難指示区域内のシルが区域外のシルよりも大きい値となっている。これは、区域内の方が空間線量率のばらつきが大きいためである。

歩行サーベイによる空間線量率測定結果を式 (14) の \mathbf{z}_w として用い、本分析において避難区域内外及び土地利用ごとに採用したシルやレンジ、ナゲットの値を用いてグラフの形状を上記の指数関数で近似しプロセスモデルとして用いることで、空間線量率の事前分布 \mathbf{y} を作成した。

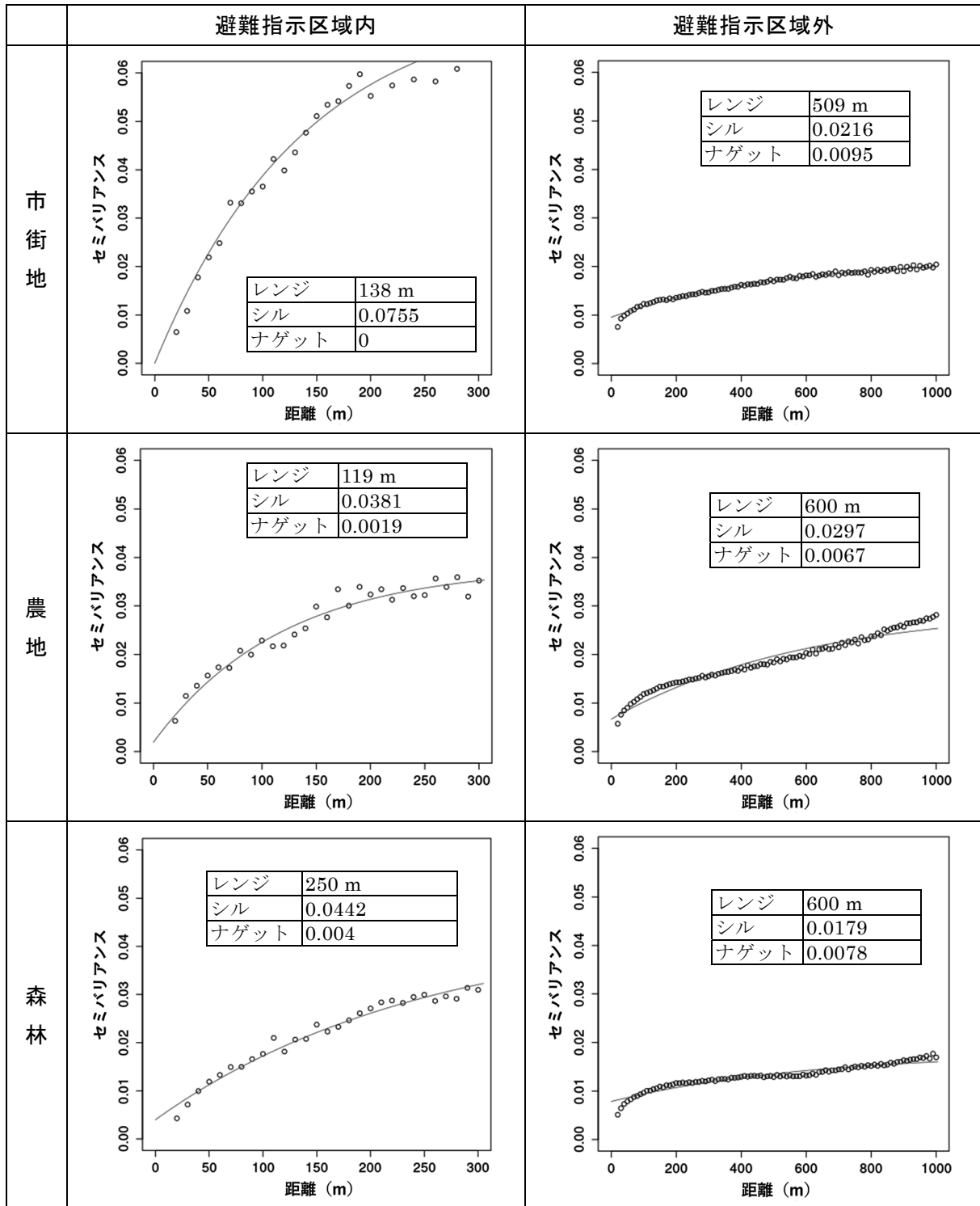


図 8-4 令和 5 年度に実施された避難指示区域内外における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム解析結果

8.3.3 走行サーベイと歩行サーベイの比較

$p(\mathbf{z}_c|\mathbf{y})$ のデータモデルを決めるために、走行サーベイと歩行サーベイの避難指示区域内、同区域外及び区域内外を区別しない全域（80 km 圏内）での空間線量率を土地利用別に比較した。比較結果を図 8-5 に示す。平成 29 年度の解析により、歩行サーベイのデータを走行サーベイの 100 m メッシュごとに平均化したものと比較した方が、相関が改善されるという知見が得られたことから、今回の解析においても平均化した歩行サーベイ結果と走行サーベイ結果の相関を分析した。この相関分析結果を基に、走行サーベイによる空間線量率と 100 m メッシュ内で平均化した歩行サーベイの空間線量率が対数軸上で線形関係にあるとしたデータモデルを用いて走行サーベイデータを補正し、式 (14) における \mathbf{z}_c として用いた。得られた相関分析結果に関し、森林及び農地における相関分析結果においては 0.7 を超える相関係数が得られている。市街地については、特に避難指示区域内において 0.5 程度と相関は低いものとなっている。区域内外を区別せず 80 km 圏内全域で比較すると、避難指示区域内外を区別した場合よりも空間線量率の範囲が広がるため、相関係数は大きくなる。

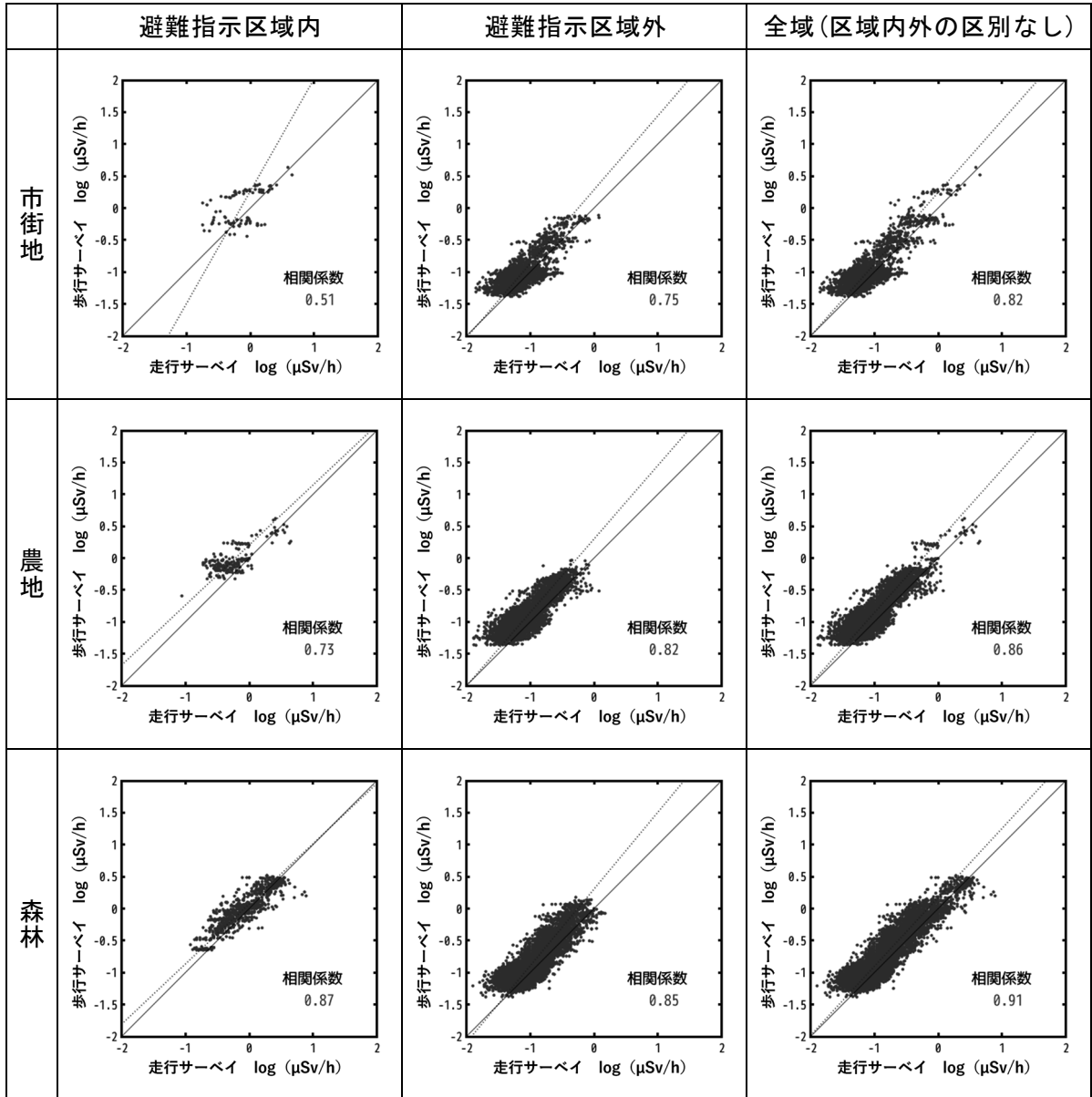


図 8-5 80 km 圏内の統合マップ作成に用いた避難指示区域内外及び全域（区域内外の区別なし）における走行サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析結果

（図中の破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $y=x$ の直線。天然放射核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

8.3.4 航空機サーベイと歩行サーベイの比較

$p(\mathbf{z}_A|\mathbf{y})$ のデータモデルを決めるために、避難指示区域内外の航空機サーベイと歩行サーベイの空間線量率を土地利用状況ごとに比較した。比較結果を図 8-6 に示す。平成 29 年度の解析により、歩行サーベイのデータを比較対象である航空機サーベイのデータポイントまでの距離に応じて加重平均化したもの（参考文献 57）の inverse-distance weighted (IDW) averaging) と比較することで、相関が改善されるという知見が得られたことから、今回の解析においても航空機サーベイ結果と距離に応じて加重平均した歩行サーベイ結果の相関を分析した。航空機サーベイとの相関についても避難指示区域内外を区分しないケースの方が全体的に相関係数の向上が見られた。この相関分析結果を基に、加重平均した歩行サーベイ結果と航空機サーベイ結果が対数軸上で線形関係にあるとしたデータモデルを用いて航空機サーベイデータを補正し、式 (14) における \mathbf{z}_A として用いた。表 8-2 に前項及び本項における相関パラメータの一覧を示す。

表 8-2 相関のパラメータ

($\log_{10}(\text{走行})=a \times \log_{10}(\text{歩行})+b$ で最小二乗フィットしたときの傾き、切片及び分散)

	走行サーベイ			航空機サーベイ		
	避難指示 区域内	避難指示 区域外	80 km 圏内 全域	避難指示 区域内	避難指示 区域外	80 km 圏内 全域
市街地						
傾き a	0.57	0.86	0.89	0.70	0.84	0.87
切片 b	-0.15	-0.25	-0.22	0.10	0.37	0.07
分散	0.068	0.021	0.022	0.016	0.010	0.011
農地						
傾き a	1.06	0.87	0.89	0.86	0.95	0.96
切片 b	-0.22	-0.26	-0.24	0.20	0.16	0.17
分散	0.040	0.021	0.021	0.023	0.014	0.014
森林						
傾き a	1.06	0.83	0.93	0.83	0.83	0.89
切片 b	-0.08	-0.25	-0.16	0.28	0.04	0.09
分散	0.028	0.021	0.024	0.019	0.020	0.023

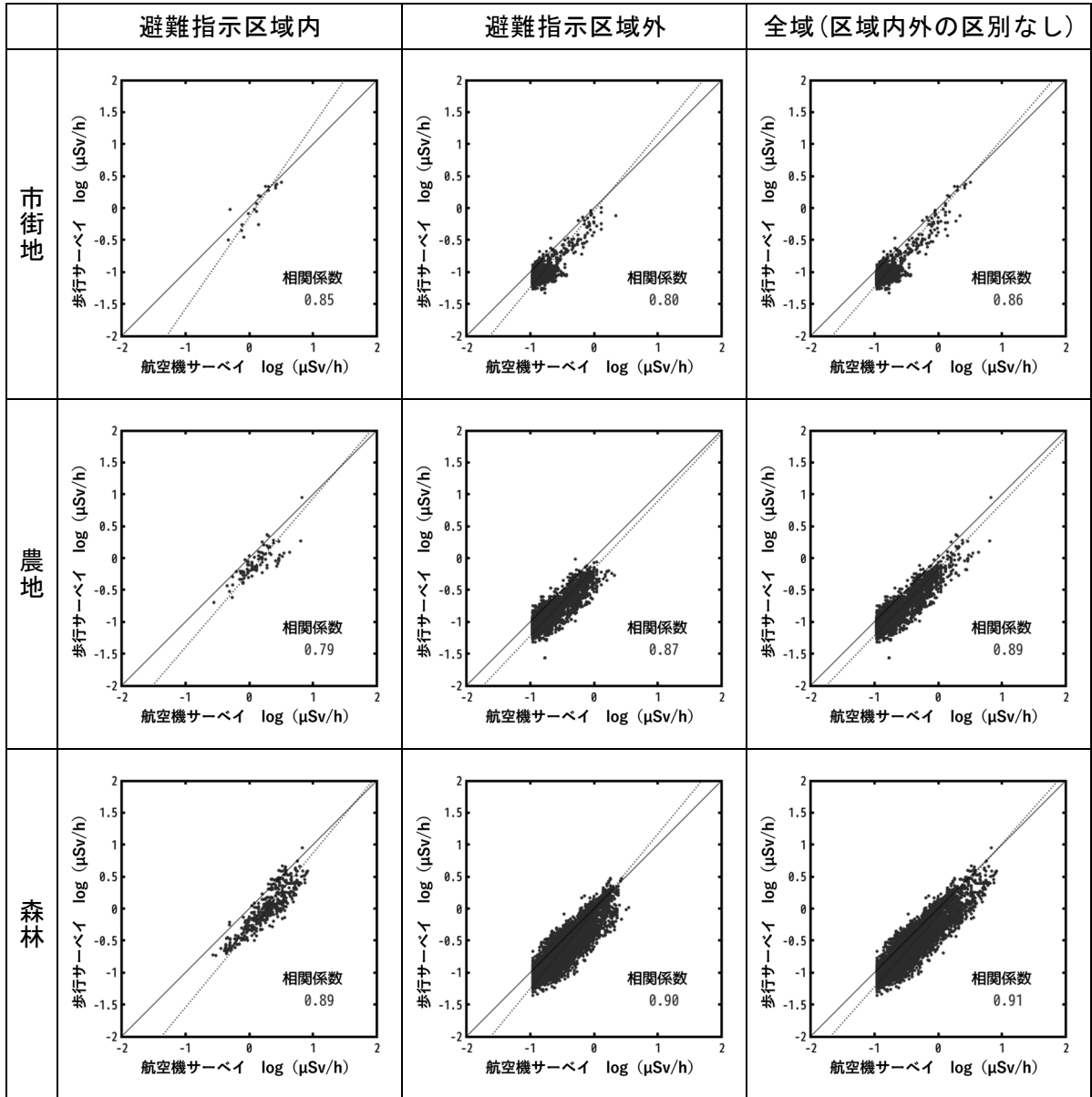


図 8-6 80 km 圏内の統合マップ作成に用いた避難指示区域内外及び全域（区域内外の区別なし）における航空機サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析結果

（図中の破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $y=x$ の直線。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

8.3.5 統合結果

令和 5 年度に実施された歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機サーベイによる測定データを統合した 80 km 圏内の統合マップを図 8-7 に示す。避難指示区域内外それぞれに対して解析した結果により得られたモデルパラメータを用いて統合を行い、その結果を合成したものである。なお、相関パラメータについては避難指示区域内外を区別したときよりも相関係数が良好となる全域の値を採用した。図 8-1 に示した歩行、走行及び航空機サーベイ結果と比較すると、空間線量率分布が航空機サーベイ結果よりも全体的に低くなっており、また

歩行サーベイや走行サーベイ結果と同等の詳細かつ連続的な空間線量率分布が得られている。標準偏差分布については、歩行サーベイ、走行サーベイが実施されている地点で小さい値となっており、これらの測定によってマップの精度が高まっていることが分かる。避難指示区域内外において値のギャップが見られるが、これはバリオグラム解析における避難指示区域内外のシルの値の違いに依存している。シルは空間線量率分布のコントラストの大きさを反映していることから、避難指示区域内ではシルが大きい値となり（図 8-4）、標準偏差も大きい値となっている。なお、統合マップは空間線量率を対数で扱うことから、標準偏差は空間線量率分布の倍率を示すこととなる。図中の標準偏差は常用対数で表示しているため、0.1 は $10^{\pm 0.1}$ すなわち平均値から 0.79～1.26 倍の範囲を、0.2 は $10^{\pm 0.2}$ すなわち平均値から 0.63～1.58 倍の範囲を意味する。

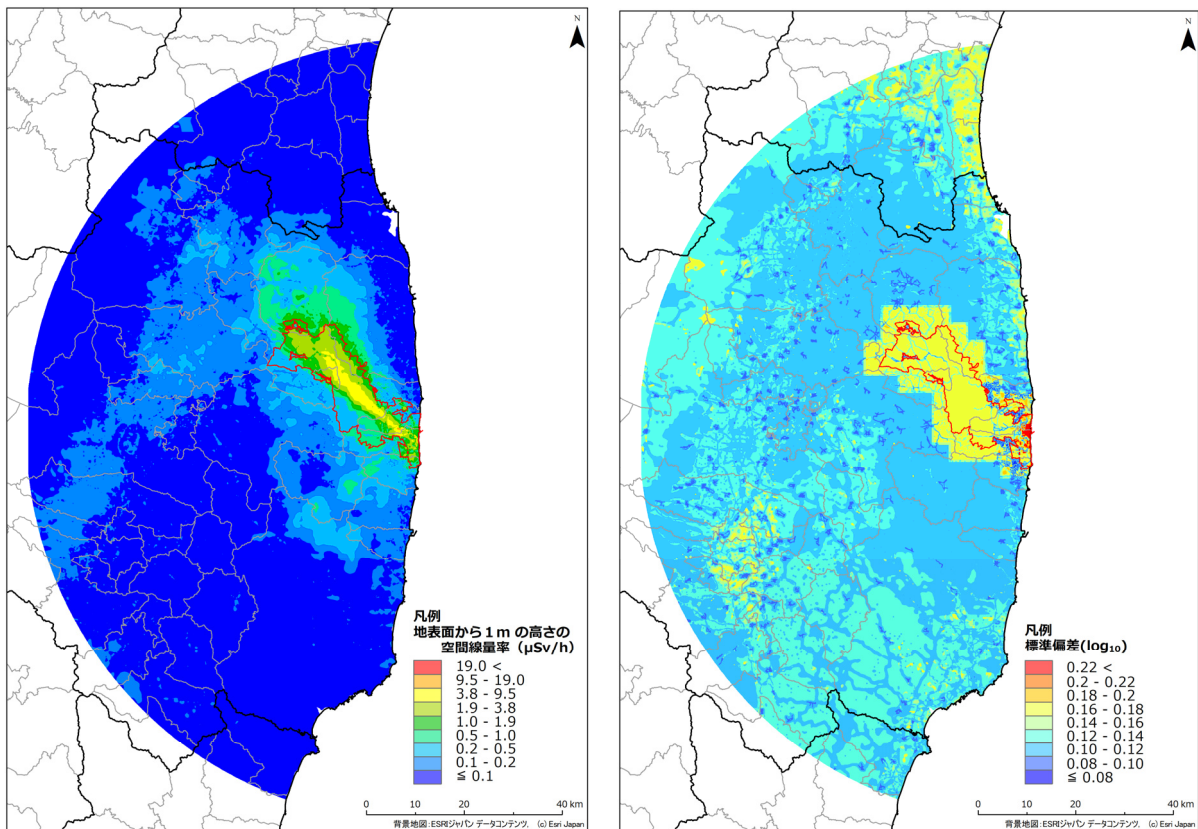


図 8-7 令和 5 年度に実施された各種測定結果を統合した 80 km 圏内の統合マップ（左）及びその標準偏差分布（右）

（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。図中の赤枠線は避難指示区域境界を示している。背景地図：ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c) Esri Japan。）

8.4 福島県全域を対象とした統合マップの作成

8.4.1 対象とした測定データ

福島県全域を対象として、令和5年度に測定された各種データを用い空間線量率の統合化を行った。使用したデータの種類及び測定年度は表8-1に示した80 km圏内と同一であり、データの処理方法も抽出範囲を福島県全域に広げた点を除いて同一である。空間線量率の統合に用いた各データを図8-8に示す。土地利用状況データには図8-2に示したものを使用した。福島県全域を対象とした統合マップ作成においては、80 km圏内を対象とした統合マップと同様、避難指示区域内外を分割して解析を実施した。

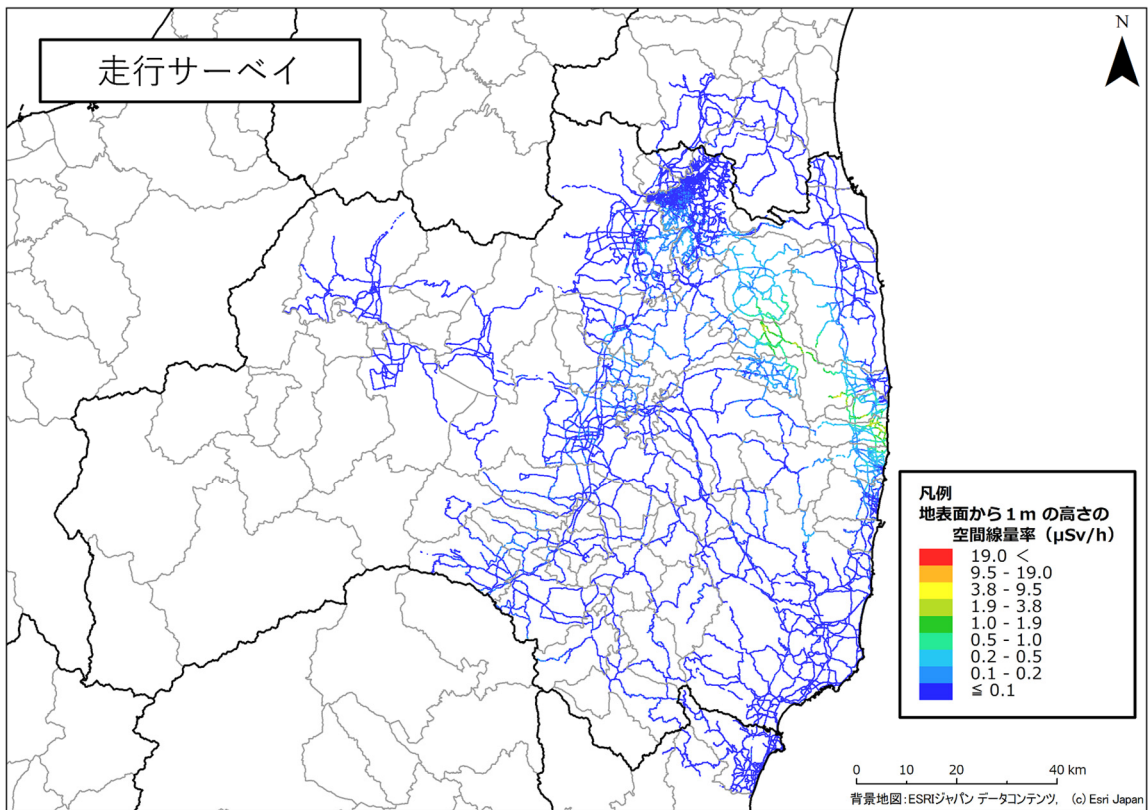
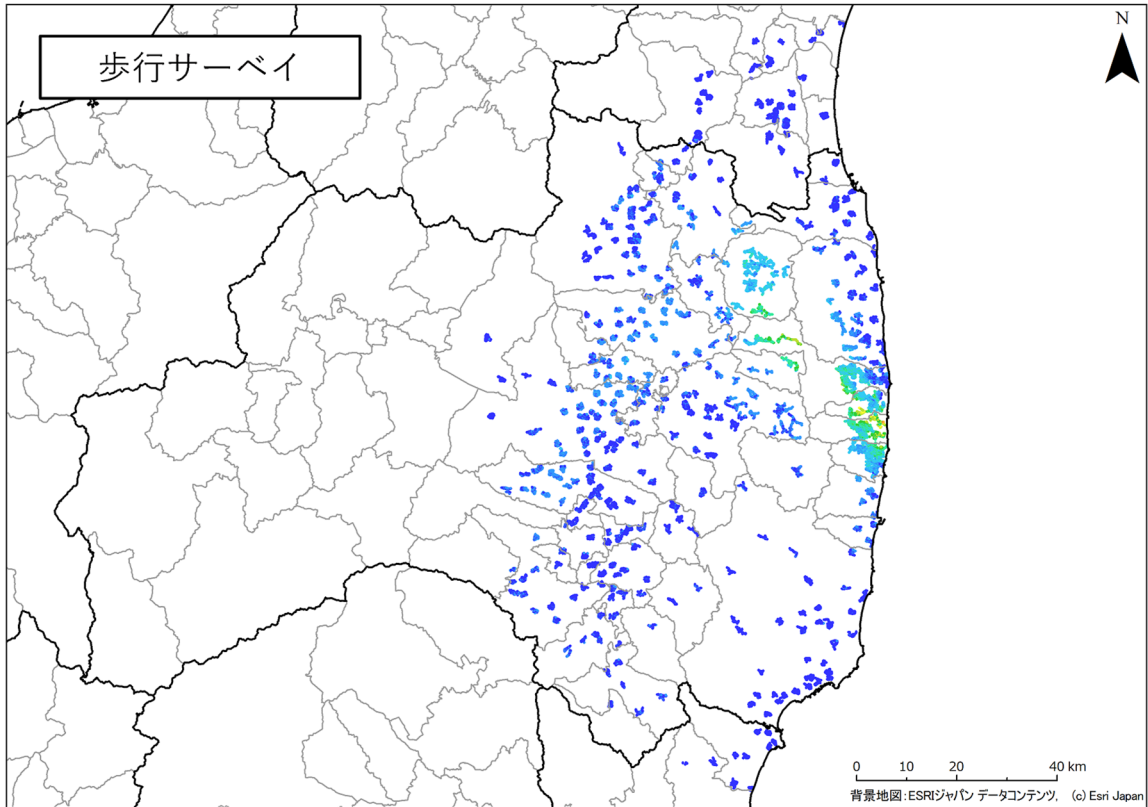


図 8-8 令和 5 年度の統合マップ作成に使用した空間線量率データ（福島県全域）（1/2）
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる）

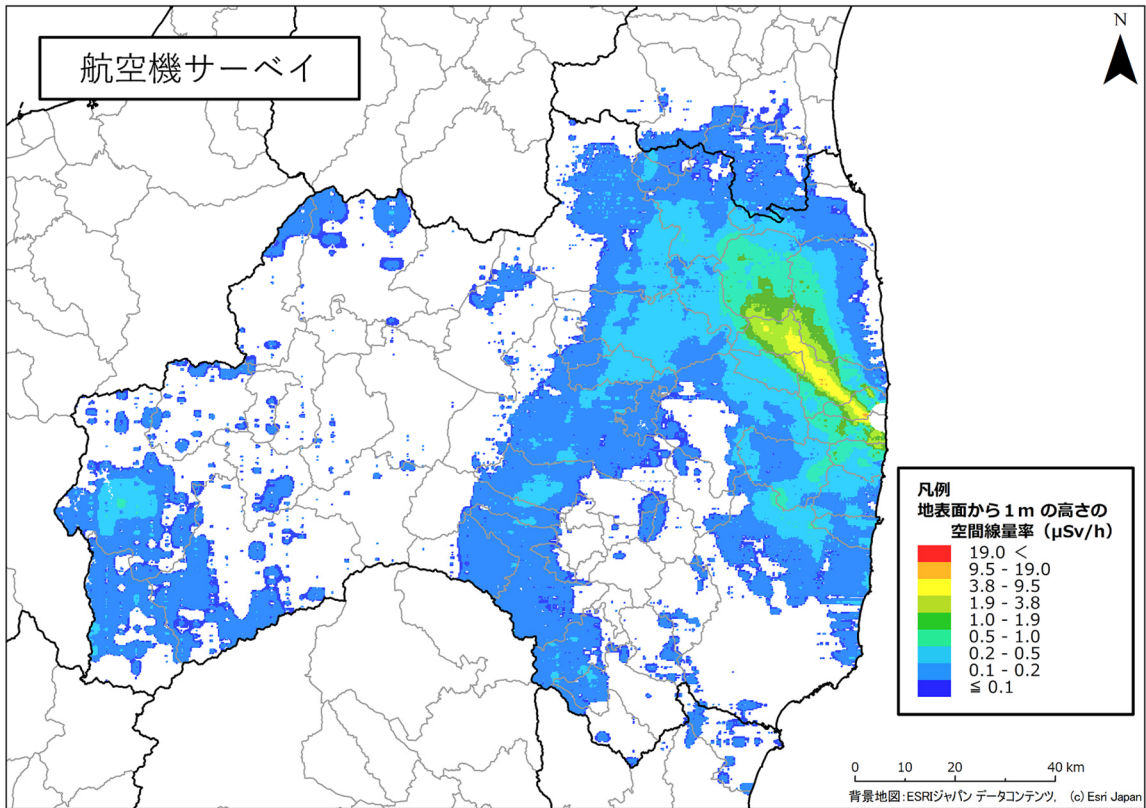
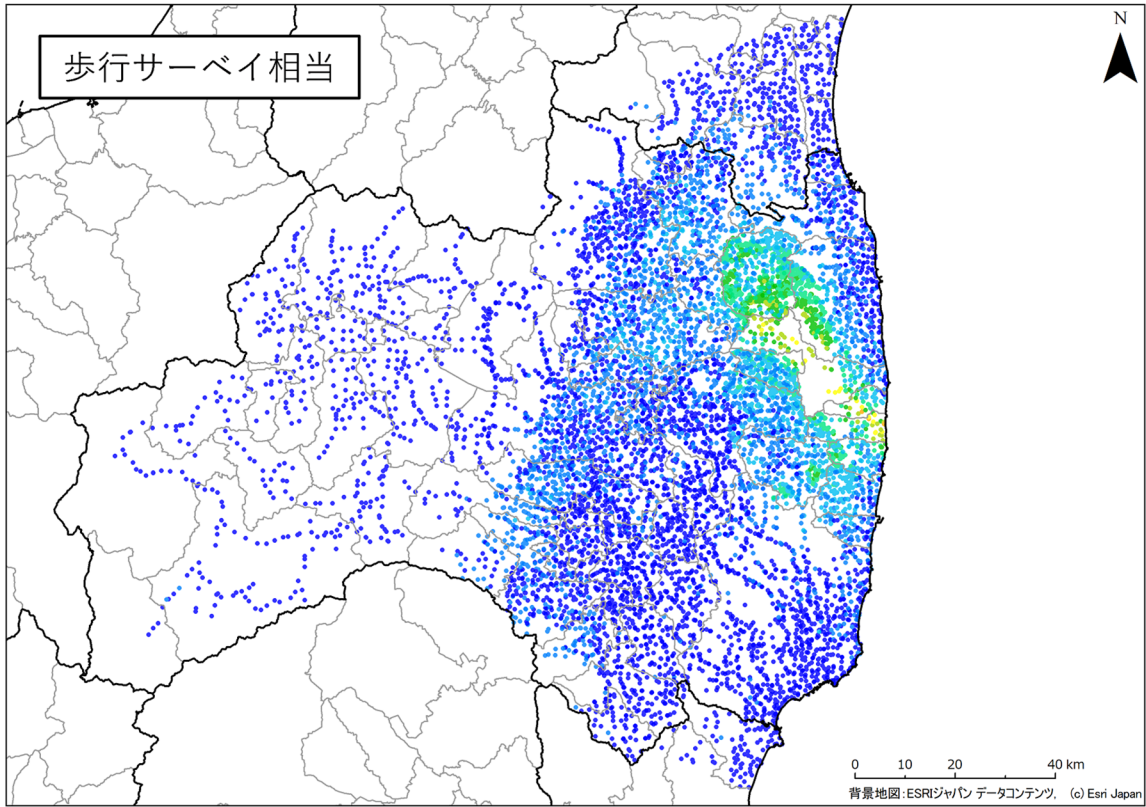


図 8-8 令和 5 年度の統合マップ作成に使用した空間線量率データ (福島県全域) (2/2)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる)

8.4.2 歩行サーベイを対象とした空間パターンの解析

歩行サーベイのデータを対象にバリオグラム解析を行った結果を図 8-9 に示す。これらの結果は、図 8-5 で示した 80 km 圏内の避難指示区域外の結果とほぼ同等であった。本分析において採用したシルやレンジ、ナゲットの値を用いてグラフの形状を指数関数で近似しプロセスモデルとして用いることで、空間線量率の事前分布 y を作成した。

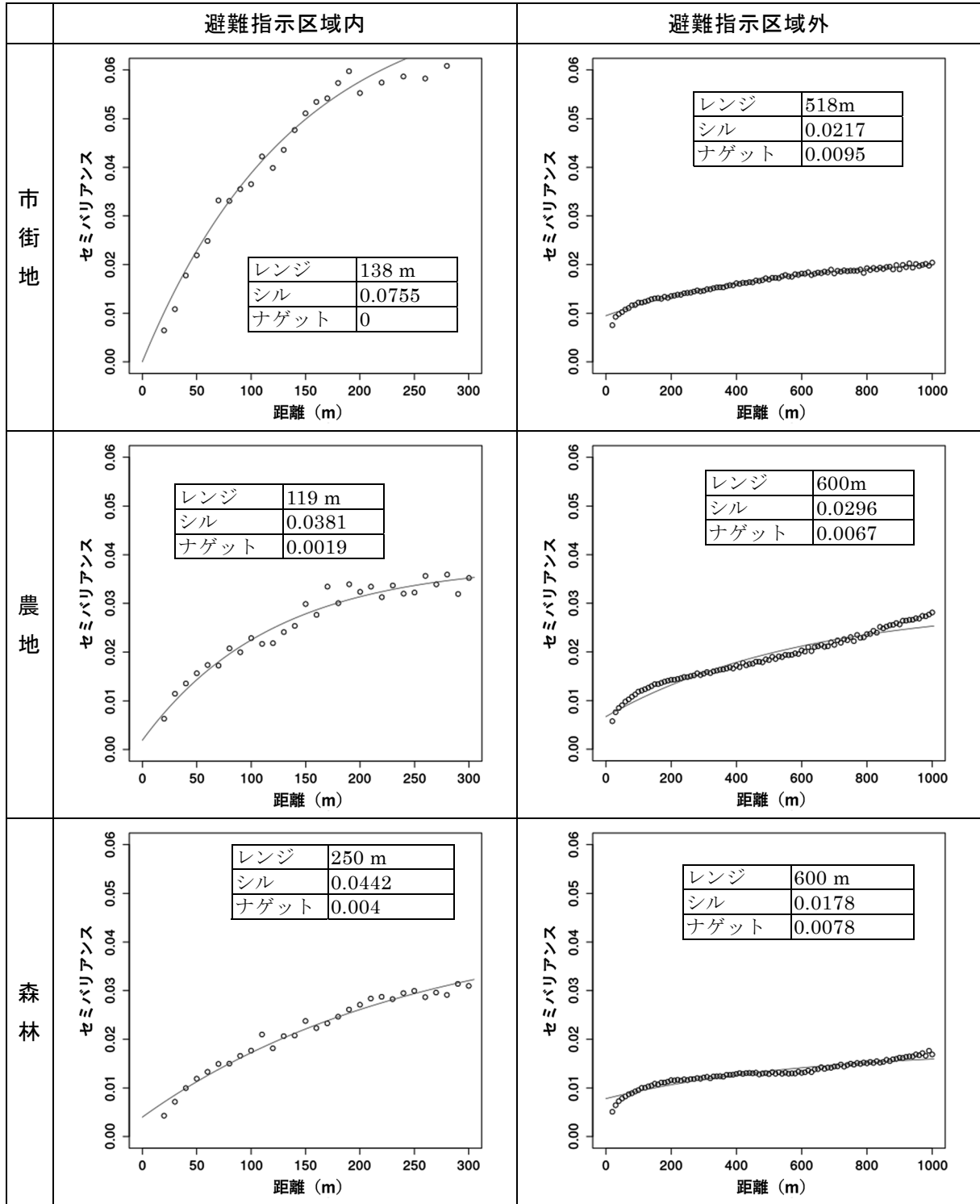


図 8-9 令和 5 年度に実施された福島県全域における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム解析結果

8.4.3 走行サーベイデータと歩行サーベイデータの比較

歩行サーベイと走行サーベイのデータに対して土地利用別に相関分析を実施した。福島県全域を対象とした分析結果を図 8-10 に示す。これらの結果は、図 8-5 で示した 80 km 圏内の結果とほぼ同等であり、解析領域を広げることによる相関への影響は少ないことを示している。この相関分析結果をもとに、走行サーベイによる空間線量率と 100 m メッシュ内で平均化した歩行サーベイの空間線量率が対数軸上で線形関係にあるとしたデータモデルを用いて走行サーベイデータを補正し、式 (14) における z_A として用いた。

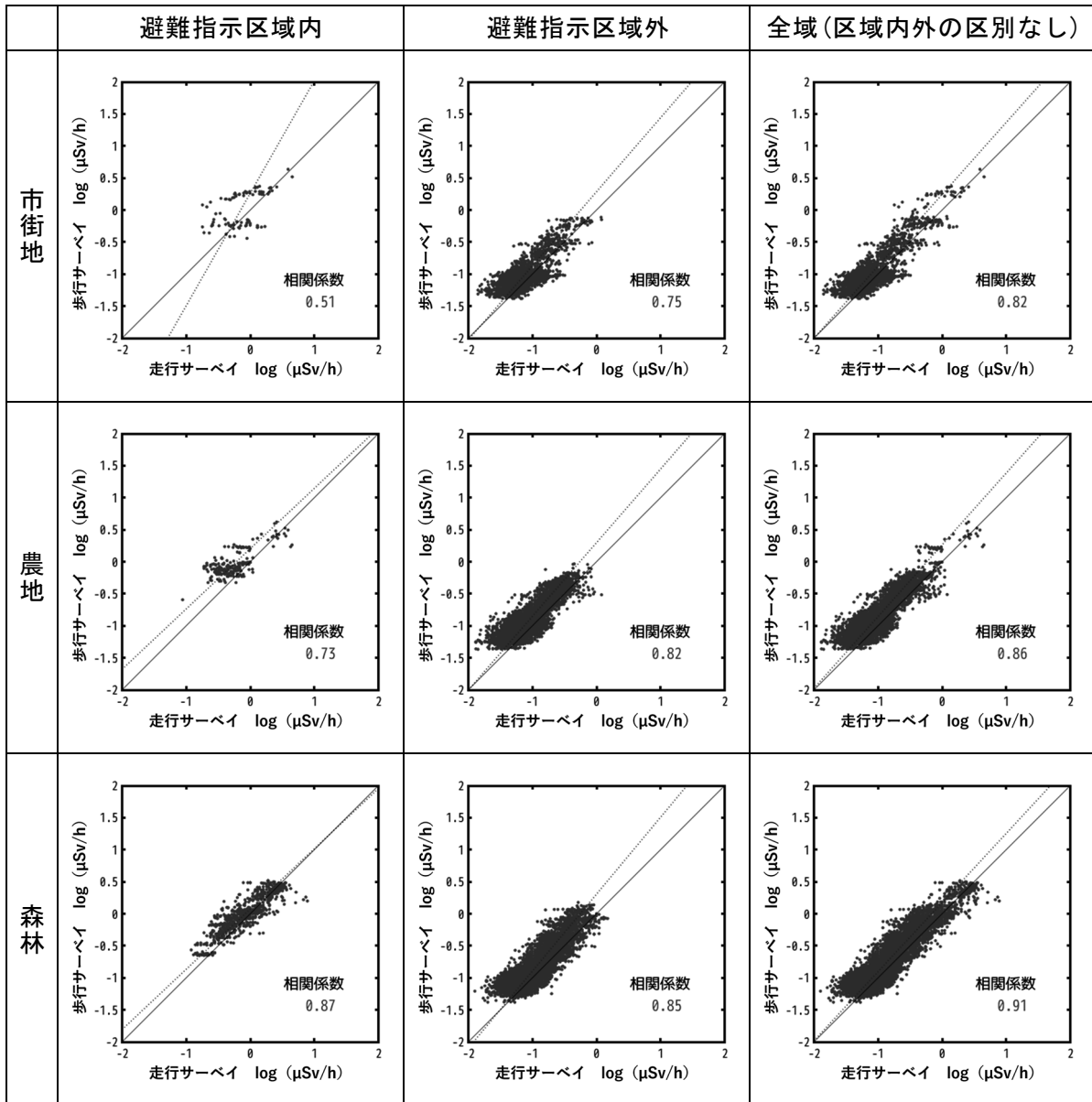


図 8-10 福島県全域の統合マップ作成に用いた走行サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析結果

(図中の破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $y=x$ の直線。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

8.4.4 航空機サーベイデータと歩行サーベイデータの比較

歩行サーベイと航空機サーベイのデータを土地利用別に比較した。福島県全域を対象とした分析結果を図 8-11 に示す。これらの結果は、やはり図 8-6 で示した 80 km 圏内の結果とほぼ同等であり、相関パラメータも表 8-2 で示したものと少数点以下第 2 位（分散については同第 3 位）まで同じであった。この相関分析結果をもとに、歩行サーベイ結果と加重平均した航空機サーベイ結果が対数軸上で線形関係にあるとしたデータモデルを用いて航空機サーベイデータを補正し、式 (14) における z_A として用いた。

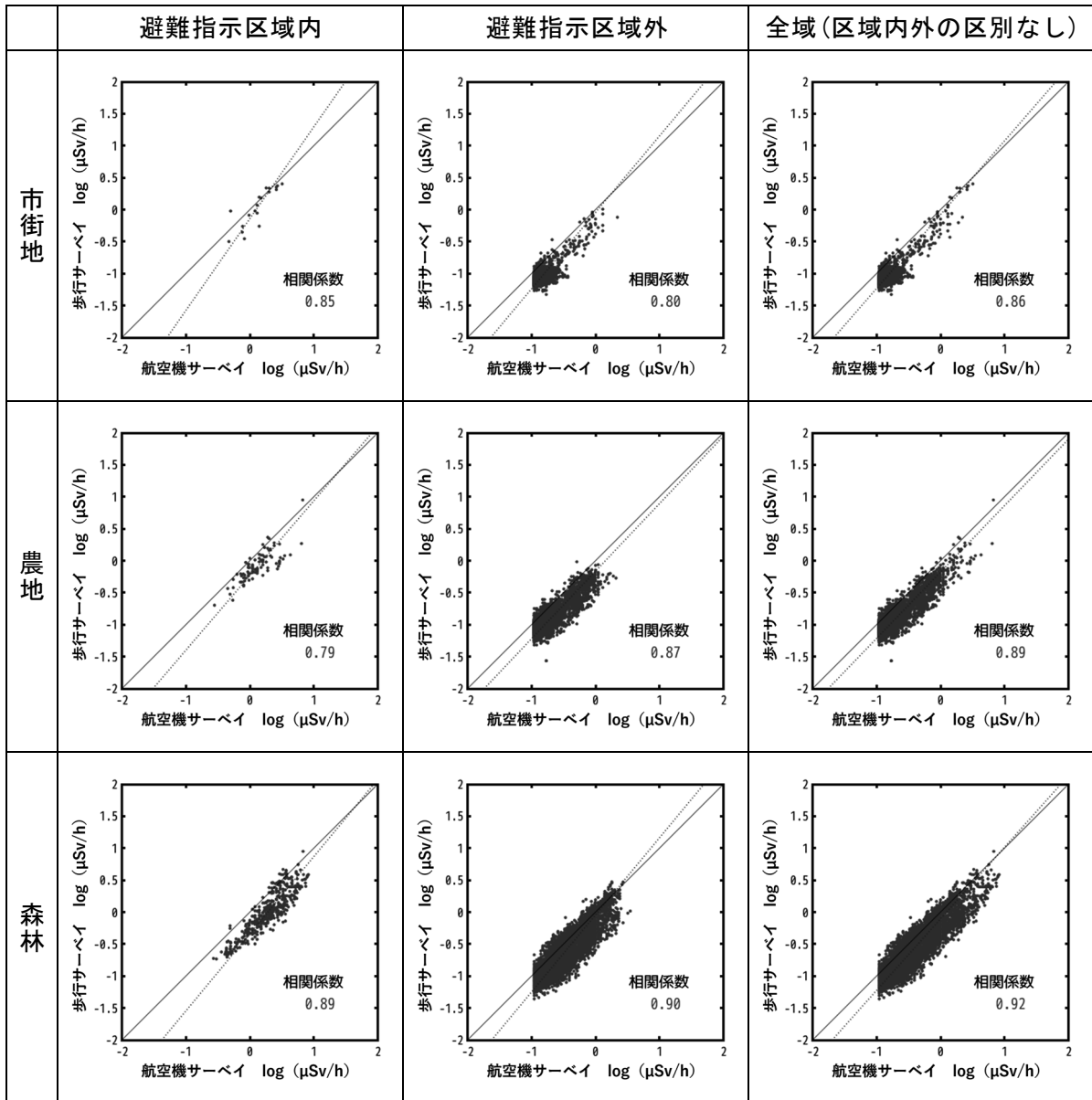


図 8-11 福島県全域の統合マップ作成に用いた航空機サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析結果

(図中の破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $y=x$ の直線。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

8.4.5 統合結果

令和5年度に実施された歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機サーベイの結果を用いた、福島県全域の統合マップを図8-12に示す。80 km圏内の統合マップと同様に、避難指示区域内外を区別しない全域の相関パラメータを使用した。80 km圏外については、歩行サーベイ、走行サーベイ、航空機サーベイの各種データが80 km圏内に比べて少ないものの、空間線量率及び標準偏差ともに80 km圏内を対象とした統合マップ（図8-7）と相違ない結果が得られている。

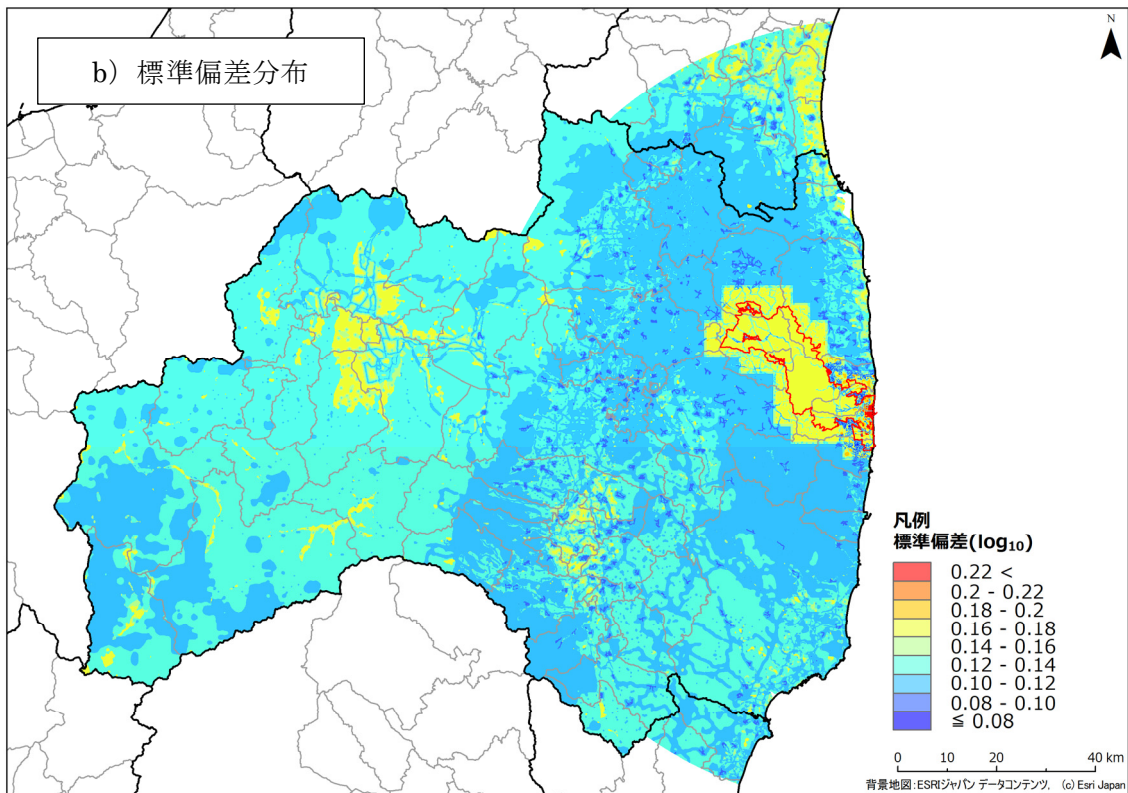
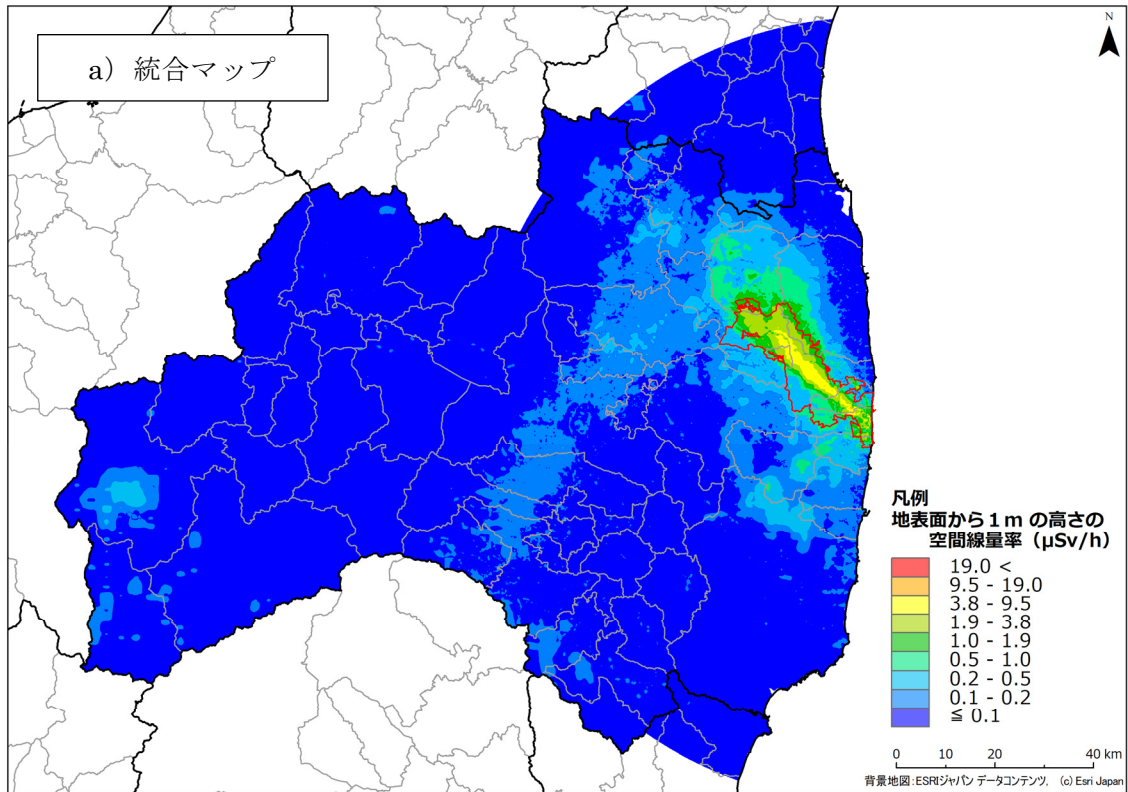


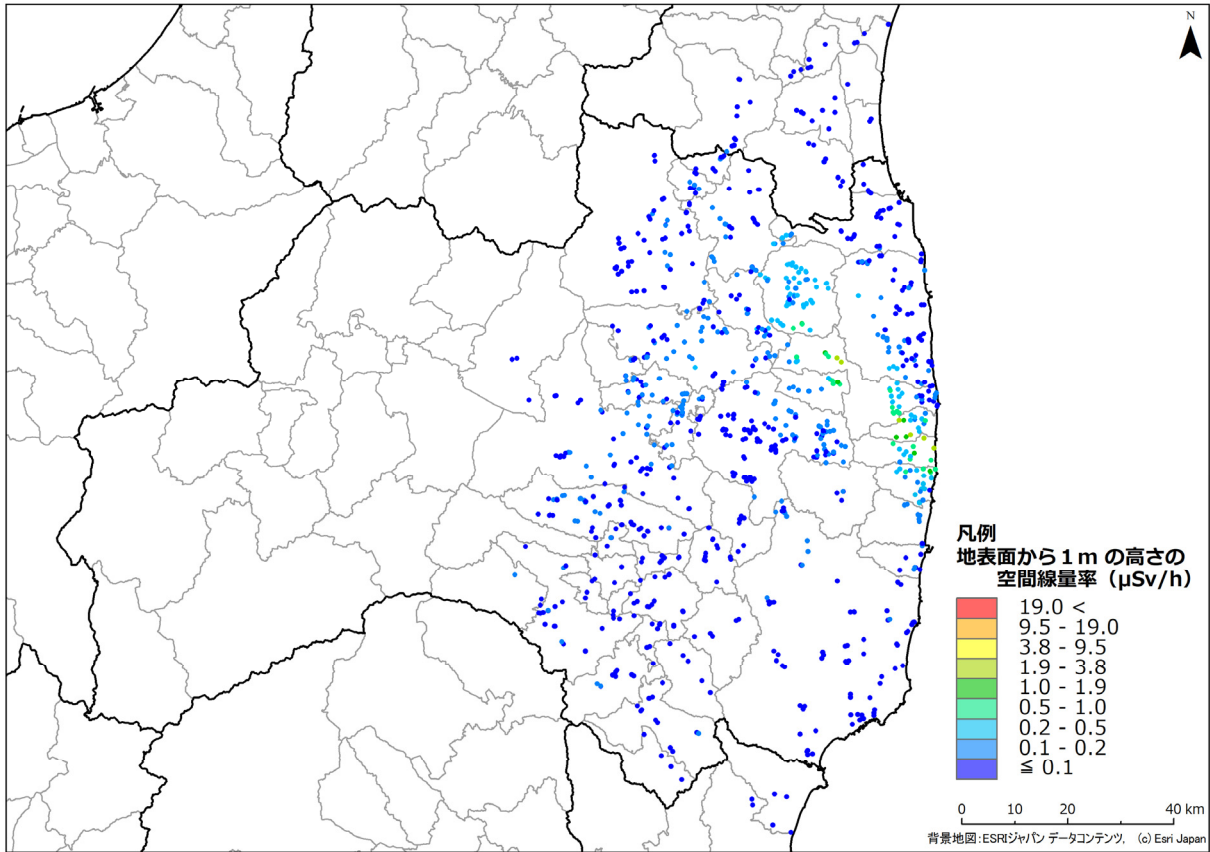
図 8-12 令和 5 年度に実施された各種空間線量率測定結果を統合した福島県全域及び 80 km 圏内の統合マップ（上）及びその標準偏差分布（下）（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。図中の赤枠線は避難指示区域境界を示している。）

8.5 統合マップの精度検証

統合マップでは標準偏差分布が得られるが、この標準偏差分布は使用するデータや相関分析手法に依存する。そのため、ここでは実態の精度を評価することを目的として、統合マップ作成時に歩行サーベイからの距離が近い等の理由で除外された歩行サーベイ相当データ（全データ数の10%程度）との比較を試みた。比較した歩行サーベイ相当データの場所について、図8-13に示す。このように除外された歩行サーベイ相当データは80 km圏内の全域に位置しており、不確かさ評価の対象データとして使用可能と考えられる。

比較には、令和5年度の福島県全域の統合マップと歩行サーベイ相当データの位置を重ね、同位置にあるデータを抽出し、歩行サーベイ相当データを横軸とした散布図及び相対偏差（（統合マップの空間線量率－歩行サーベイ相当データの空間線量率）／歩行サーベイ相当データの空間線量率）のヒストグラムとして比較した。比較結果を図8-14に示す。ヒストグラムの平均値を見ると0.049となり、歩行サーベイ相当データと比較して統合マップは5%ほど高くなっている傾向にあることが分かった。統合マップの空間線量率が高い傾向を示すのは、歩行サーベイと定点サーベイなど歩行サーベイ相当データが近い場合に、定点サーベイを優先して採用しており、歩行<定点という関係に影響を受けるためである。散布図を見ると両者の差の傾向に線量率の依存性は確認できない。また、ヒストグラムは正規分布に近い釣鐘型となっている。この結果から、統合マップは、利用しなかった歩行サーベイ相当データを再現しており、測定データのない箇所の空間線量率を良く推定していると言える。

令和5年度の統合マップを令和4年度の統合マップと比較するため、上記の手法と同様に分析を行った。すなわち、両年度の統合マップにおいて同位置にあるデータを抽出し、令和4年度の空間線量率を横軸、令和5年度の空間線量率を縦軸とした散布図及び相対偏差（（令和5年度の空間線量率－令和4年度の空間線量率）／令和4年度の空間線量率）のヒストグラムとして比較した。結果を図8-15に示す。ヒストグラムの平均値を見ると、令和5年度の統合マップの空間線量率は令和4年度の統合マップに比べて6%程低い傾向にある。



背景地図：ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c) Esri Japan

図 8-13 統合マップ作成時に除外された歩行サーベイ相当データの箇所

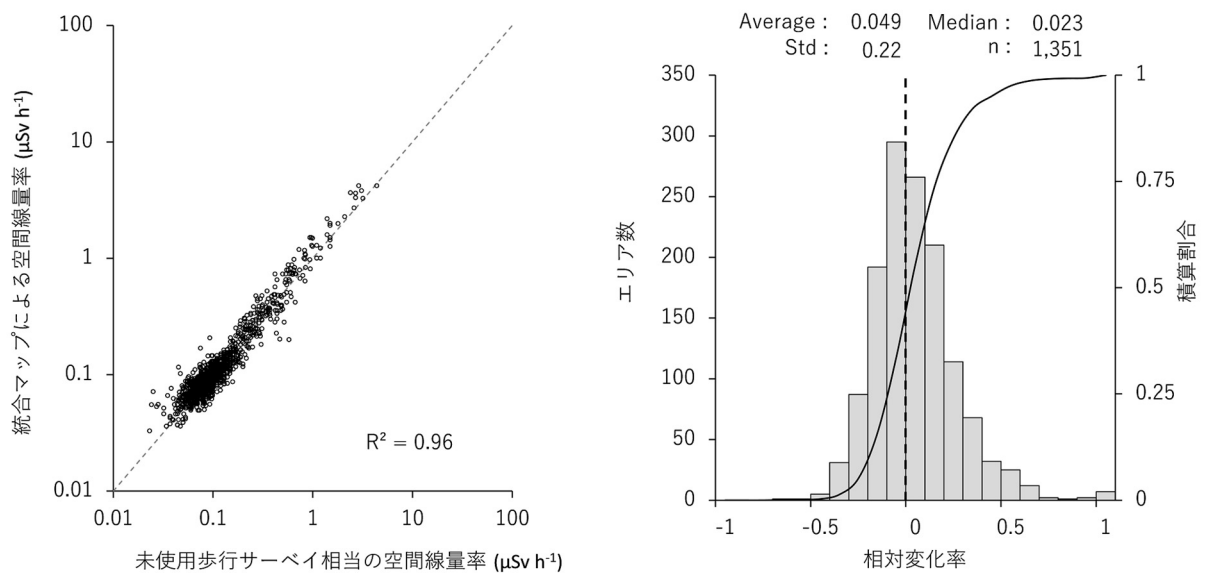


図 8-14 統合マップ作成時に除外された歩行サーベイ相当データの結果との比較 (相関図の破線は $y=x$ 、 R^2 は決定係数、Std は標準偏差、 n はデータ数を意味する。)

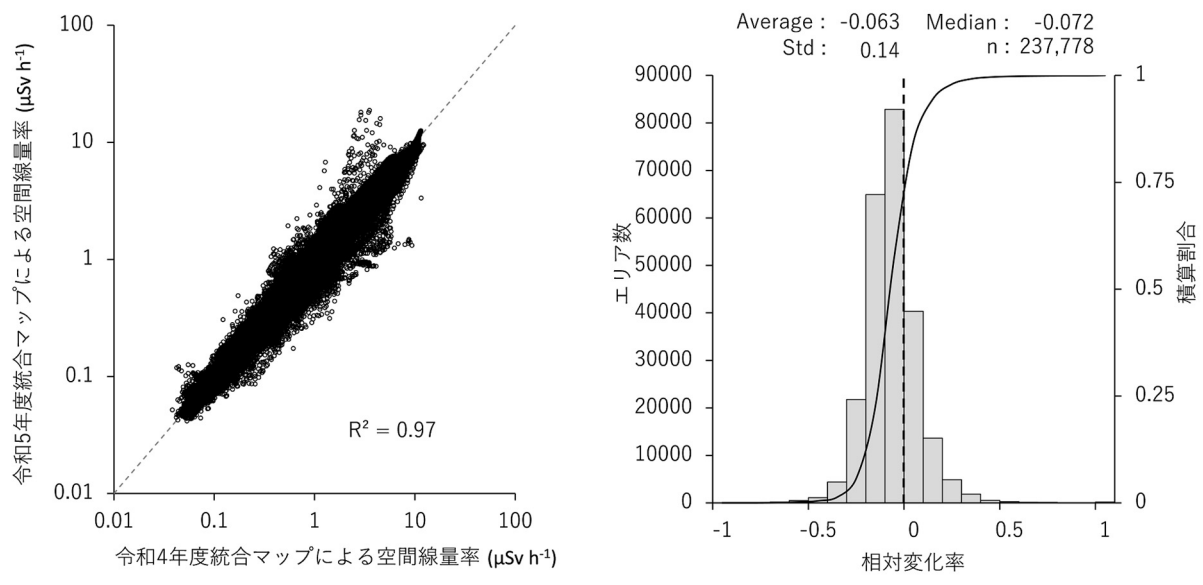


図 8-15 令和4年度統合マップとの比較
 (相関図の破線は $y=x$ 、 R^2 は決定係数、Stdは標準偏差、nはデータ数を意味する。)