

空間線量率分布の予測モデルの開発

木名瀬 栄（原子力機構）

1. 調査目的

本調査では、正確性に信頼のおける放射線測定器等によって測定された空間線量率測定データをもとに、生活圏における多様な土地利用種別ごとの環境半減期（放射性セシウムの物理減衰による影響を除いた、人為的な影響を含む自然環境における移行挙動の影響をひとまとめにして評価した空間線量率の半減期）を導出するとともに、環境半減期をパラメータとした分布状況予測モデルを検討してきた。

福島第一原発から 80 km 圏内の環境半減期は一律ではなく、地域特性に応じた環境半減期の評価が必要である¹。また、土壌侵食系などを対象に実施された放射性セシウムの移行メカニズム調査においても、走行サーベイや航空機モニタリングでは測定が困難な森林内の空間線量率の経時変化が分かってきた。

平成 25 年度は、これまでに得られた空間線量率測定データ及び原子炉事故時の環境影響評価（レベル 3PSA）手法²の知見を活用した空間線量率の長期的予測手法を検討した。

2. 調査内容

本調査で開発した空間線量率の長期的予測手法では、空間線量率の起因となるセシウム 134、セシウム 137 に対する 2 成分 1 コンパートメントモデルを使った分布状況予測モデルを次の式 (1) で表す。

$$D(t) = (D_0 - D_{BG}) \left\{ f_{fast} \exp(-\ln 2 / T_{fast} \cdot t) + (1 - f_{fast}) \exp(-\ln 2 / T_{slow} \cdot t) \right\} \frac{k \exp(-\lambda_{134} t) + \exp(-\lambda_{137} t)}{k + 1} + D_{BG} \quad (1)$$

ここで、

$D(t)$: 経過時間 t [y] における空間線量率 [μ Sv/h]

D_0 : 初期空間線量率 [μ Sv/h]

D_{BG} : バックグラウンド空間線量率 [μ Sv/h]

f_{fast} : 減衰が速い成分の割合 [-]

T_{fast} : 減衰が速い成分の環境半減期 [y]

T_{slow} : 減衰が遅い成分の環境半減期 [y]

k : セシウム 134 のセシウム 137 に対する初期空間線量率比 [-]

λ_{134} : セシウム 134 の壊変定数 [1/y]

λ_{137} : セシウム 137 の壊変定数 [1/y]

である。

¹ S. Kinase, T. Takahashi, S. Sato, R. Sakamoto, K. Saito, "Development of Prediction Models for Radioactive Caesium Distribution within the 80 km Radius of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant", Radiat. Prot. Dosim., doi:10.1093/rpd/ncu014.

² 日本原子力学会, 日本原子力学会標準 原子力発電所の確率論的安全評価に関する実施基準(レベル 3PSA 編), AESJ-SC-P010 (2008).

本調査では、福島第一原発から 80 km 圏内を対象に将来の空間線量率の経時変化を推定するため、現時点において式(1)のモデルパラメータとして適切と考えられる初期値などを導出・設定した。

(1) 福島第一原発から 80 km 圏内のメッシュ分割

平成 24 年度及び平成 25 年度の調査では、福島第一原発から 80 km 圏内において、約 1 km メッシュ間隔で地上 1 m 高さの空間線量率の詳細測定を実施した。また、走行サーベイによる空間線量率測定では、統計的なばらつきを低減させるため、約 100 m メッシュ内に含まれる空間線量率の測定値を平均してメッシュの代表値としている。さらに、航空機モニタリングにおいても、対地高度 150~300 m の場合、航空機直下の地表面に対して直径約 300~600 m 円内の測定結果を平均化し測定データとしている。

本調査では、セシウム 137 由来のガンマ線が空気中の分子と衝突せずに飛行する平均距離が約 108 m であることも勘案し、福島第一原発から 80 km 圏内のメッシュ分割は約 100 m メッシュに対応させることとした。

(2) 空間線量率の初期値の設定

推定する空間線量率は、住民の生活圏を対象にしたものが望まれる。住民の生活圏を横断する道路の中央の空間線量率の環境半減期が、生活圏を反映する式(1)のモデルパラメータとして利用できることを踏まえると、広範囲かつ生活圏内に測定箇所数が多い走行サーベイによる空間線量率測定データを式(1)の空間線量率初期値として活用することができると考えた（参考：モデル作成のための狭域詳細調査を参照のこと）。

本調査では、福島第一原発から 80 km 圏内の 100 m メッシュ区画すべてに対して、第 6 次走行サーベイ（平成 25 年 6 月 3 日から平成 25 年 7 月 4 日）による測定データがある場合にはその値を使用した。走行サーベイによる測定データがない場合には第 6 次走行サーベイと第 7 次航空機モニタリング（平成 25 年 9 月 27 日）による測定データの比率を用いて、第 7 次航空機モニタリングによる測定データを走行サーベイによる測定に相当するデータに換算した。いずれの場合においても、歩行サーベイによる測定データとの比率によって補正した。これらの値は、これまでに得られた他の測定データとともに指数関数に対してフィッティングした後、平成 23 年 3 月 15 日相当の値として空間線量率の初期値とした。

なお、帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域からなる避難指示区域内と避難指示区域外とでは人間活動などによる放射線場の擾乱程度が異なると想定されたため、それぞれの区域を分けて測定データの比率を調べた。

(3) モデルパラメータの設定

福島第一原発事故から 2 年 6 ヶ月後の平成 25 年 9 月の時点でも、これまでに得られた測定データにおいては、式(1)に示される 2 成分 1 コンパートメントモデルの特徴が明示的に確認できる測定箇所は多くない。しかしながら、先行研究³には、放射性セシウムが土壌に沈着した約 4 年後から空間線量率の減少傾向が緩やかになると記載されている。こうした状況を踏まえ、本調査では、測定データとレベル 3PSA 手法の研究成果を活用し、現時点で適切と考えられる式(1)のモデルパラメータを設定した。具体的には、式(1)のモデルパラメータのうち、減衰が速い成分の割合及び減衰の遅い成分の環境半減期に、レベル 3PSA に

³ H. J. Gale, D. L. O. Humphreys and E. M. R. Fisher, Weathering of Caesium-137 of Soil, Nature, 4916, 257-261 (1964).

関する日本原子力学会標準の値²を適用し、第1次から第6次走行サーベイの測定データに対する最小二乗法により減衰の速い成分の環境半減期を導出した(図-1)。

なお、同一評価箇所での測定データが最大で6点と限られており、式(1)のうち空間線量率初期値と減衰の速い成分の環境半減期を最小二乗法に適用することは困難であったため、本調査では、あらかじめ1成分1コンパートメントモデルのフィッティングにより平成23年3月15日相当の空間線量率初期値及び環境半減期を算定し、それぞれの値を2成分1コンパートメントモデルの空間線量率初期値や収束計算のための条件(初期値に利用)とした最小二乗法により、減衰の速い成分の環境半減期を導出した。

避難指示区域内外では、人間活動などによる放射線場の擾乱程度が異なると想定されたため、それぞれの区域または全域に対してALOS⁴土地利用種別ごとの環境半減期を導出した。

(4) 将来の空間線量率の推定

本調査では、将来の空間線量率分布予測の第一段階として、避難指示区域内のALOS土地利用種別が「都市」に分類されるメッシュに対し、次の3つのケースについて空間線量率の経時変化を推定した。

- ケース1: 避難指示区域内外のモデルパラメータを同等にした。福島第一原発から80 km圏内全ての区域に対して、ALOS土地利用種別ごとに第1次から第6次走行サーベイの測定データをもとに導出した減衰の速い成分の環境半減期のうち、中央値を適用した。
- ケース2: 避難指示区域内で得られた走行サーベイ測定データより導出した減衰の速い成分の環境半減期のうち、中央値を適用した。
- ケース3: 放射性セシウムの物理減衰のみによる効果を適用した。

3. 結果及び考察

(1) 空間線量率の初期値とモデルパラメータ

歩行サーベイ、走行サーベイ、航空機モニタリング結果など、平成25年度の調査で得られた最新の空間線量率のデータ及びレベル3PSA手法などの知見より、空間線量率の初期値とパラメータを設定した(表-1)。同一メッシュに対する第6次走行サーベイと第7次航空機モニタリングによる空間線量率の関係を図-2に示す。図に示すように、避難指示区域外の比率(走行サーベイ/航空機モニタリング)は避難指示区域内の比率より小さい。

第1次から第6次走行サーベイによる空間線量率測定データを用いて、ALOS土地利用種別の環境半減期について解析した結果を図-3に示す。福島第一原発から80 km圏内全域を対象に解析した結果を図-3(a)に、避難指示区域内を対象に解析した結果を図-3(b)に示した。避難指示区域内の環境半減期は、80 km圏内全域の環境半減期に比べ長く(放射性セシウムの $\ln 2$ /環境半減期)が小さい)、ALOS土地利用種別間の相違が顕著でない。したがって、本調査では、避難指示区域全域内外それぞれに対して、式(1)のモデルパラメータである減衰の速い成分の環境半減期(中央値)を導出し、試験的予測に適用した(表-2)。避難指示区域内の環境半減期(中央値)については、ALOS土地利用種別間の相違が大きくないことにより区域内同一と見なすことにした。

⁴ 宇宙航空研究開発機構, “陸域観測技術衛星「だいち」”, 宇宙航空研究開発機構ホームページ, http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/index_j.htm .

(2) 事故後の空間線量率の推定

避難指示区域内のALOS土地利用種別が「都市」に分類されるメッシュについて、ケース1からケース3の空間線量率の経時変化を図-4に示す。本図の特徴は、「福島第一原発事故後、放射性セシウムによる空間線量率の経時変化が2成分1コンパートメントモデルにしたがうとした場合の、放射性ヨウ素などの核種からの寄与がなくなった、第7次航空機モニタリング終了日の平成25年9月27日(事故後2.538年)のある空間線量率を基準とした推定」である。基準とした空間線量率は、事故後2.538年における避難指示区域内のALOS土地利用種別が「都市」に分類されたある地点の値(1.06 μ Sv/h)を採用した。

図に示されるように、ケース1及びケース2ともに、今後の空間線量率は時間とともに減少し、その程度は放射性セシウムの物理減衰(ケース3)より大きくなることが示唆される。現在適用している分布状況予測モデルにおいて、「都市(環境半減期(中央値)0.57年)」では「減衰が速い成分」の減少割合が大きいと評価されることにより、現時点ですでに「減衰が速い成分」が少なくなっているのに対し、「避難指示区域内(環境半減期(中央値)1.3年)」では未だ「減衰が速い成分」が残存していると評価されるため、現時点以降の空間線量率は「避難指示区域内(環境半減期(中央値)1.3年)」の方が低くなると評価される。

減衰の速い成分の割合を0.4、0.8としたケース1、ケース2の空間線量率の経時変化(減衰の速い成分の環境半減期のうち、環境半減期の中央値を適用)を図-5に示す。図に示すように、今後の空間線量率は、ケース1、ケース2ともに、放射性セシウムの物理減衰(ケース3)より大きく減少する。減衰の速い成分の割合を0.4、0.8とした場合、平成23年3月15日から10年後の空間線量率は、減衰の速い成分の割合を0.63とした空間線量率に対して、ケース1では0.93-1.05倍、ケース2では0.76-1.18倍になることが推定された。空間線量率の長期的予測手法においては、減衰の速い成分の割合を合理的に推定することが長期的線量評価上重要である。

減衰の速い成分の環境半減期を累積頻度の5%値、95%値としたケース1、ケース2の空間線量率の経時変化(減衰の速い成分の割合0.63を適用)を図-6に示す。図に示すように、ケース1及びケース2において、減衰の速い成分の環境半減期を変化(5%値、中央値、95%値)させた場合においても、今後の空間線量率は時間とともに減少し、その程度は放射性セシウムの物理減衰(ケース3)より大きくなる。減衰の速い成分の環境半減期を累積頻度の5%値及び95%値とした場合、平成23年3月15日から10年後の空間線量率は、減衰の速い成分の環境半減期を中央値とした空間線量率に対して、ケース1では0.74-1.07倍、ケース2では0.89-1.18倍になることが推定された。

表-1 空間線量率の将来予測に関する空間線量率初期値とモデルパラメータ

パラメータ	単位	記号	設定値
将来予測の基準日	—	$t=0$	平成 23 年 3 月 15 日
バックグラウンド空間線量率	$\mu\text{Sv/h}$	D_{BG}	0.05
減衰の速い成分の割合	—	f_{fast}	0.63 ²
減衰の速い成分の環境半減期	y	$T_{fast, i}$	表-2 参照
減衰の遅い成分の環境半減期	y	T_{slow}	92 ²
セシウム 134 のセシウム 137 に対する初期空間線量率比	—	k	2.7
セシウム 134 の壊変定数	1/y	λ_{134}	$\ln 2 / 2.0648^5$
セシウム 137 の壊変定数	1/y	λ_{137}	$\ln 2 / 30.1671^5$
走行サーベイによる空間線量率	$\mu\text{Sv/h}$	—	(箇所別)
航空機モニタリングによる空間線量率	$\mu\text{Sv/h}$	—	(箇所別)
生活圏の空間線量率への補正係数	—	—	避難指示区域内 : 1.15 避難指示区域外 : 1.30
航空機モニタリングによる測定データの走行サーベイによる測定相当データへの補正係数	—	—	避難指示区域内 : 0.76 避難指示区域外 : 0.60

表-2 走行サーベイの測定結果から導出した、ALOS 土地利用種別の環境半減期の相違

ケース	ALOS 土地利用種別	環境半減期(中央値) $T_{fast, i}$ [y]
1	水域	0.59
	都市	0.57
	水田	0.60
	畑地	0.67
	草地	0.71
	落葉樹	0.83
	常緑樹	0.98
	裸地	0.63
2	(避難指示区域内)	1.3
3	(避難指示区域内外)	環境減衰なし

⁵ ICRP, Nuclear Decay data for Dosimetric Calculations, ICRP Publication 107 (2008).

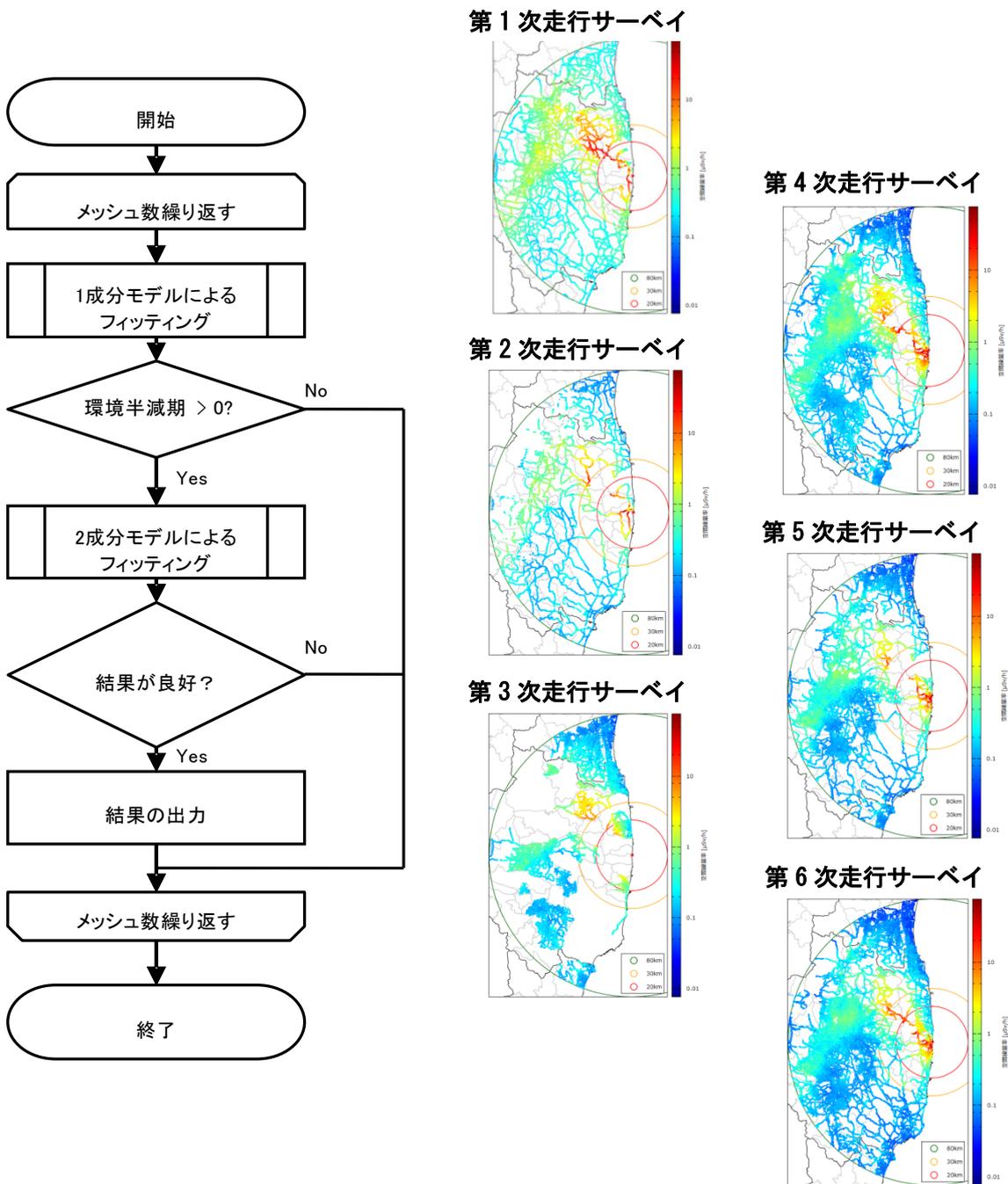


図-1 2成分1コンパートメントモデルの減衰が速い成分の環境半減期導出

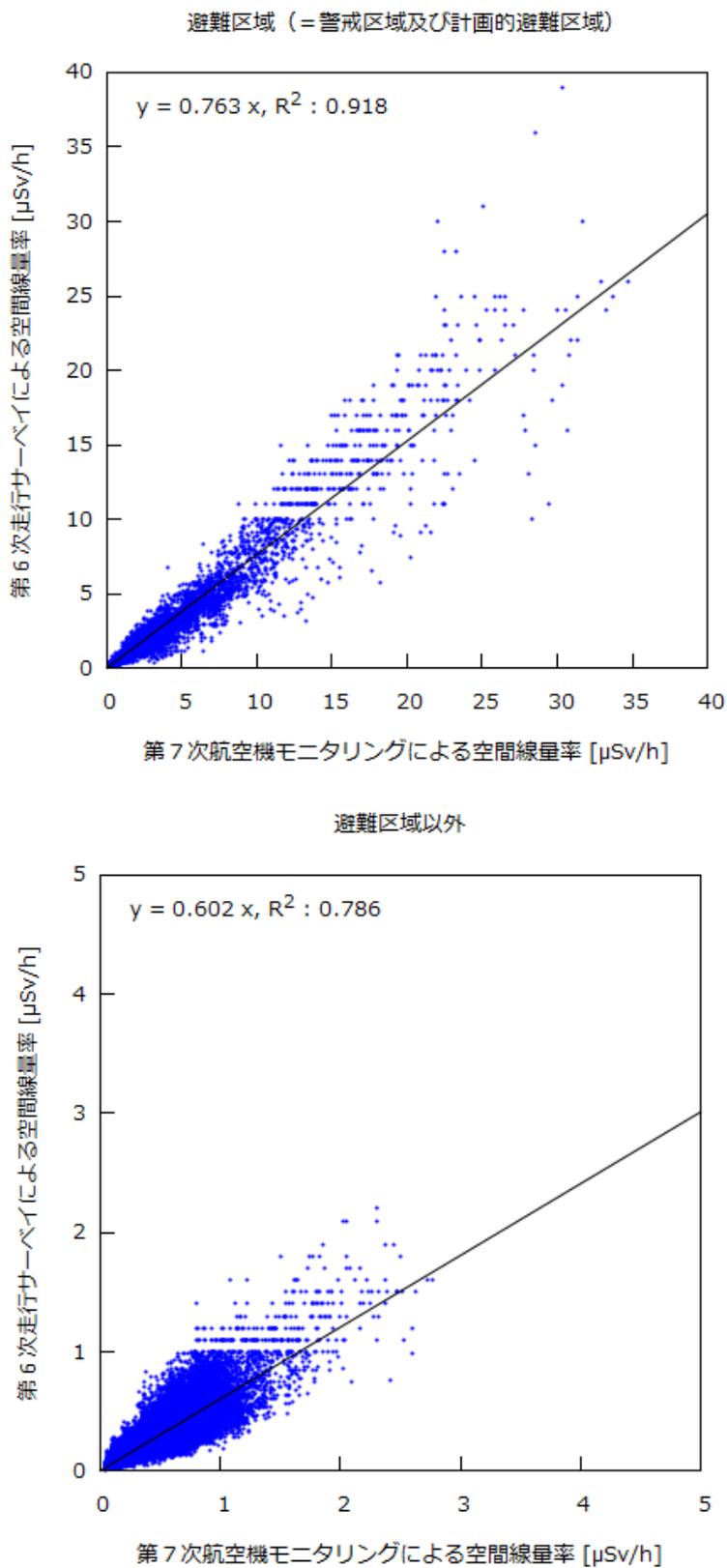
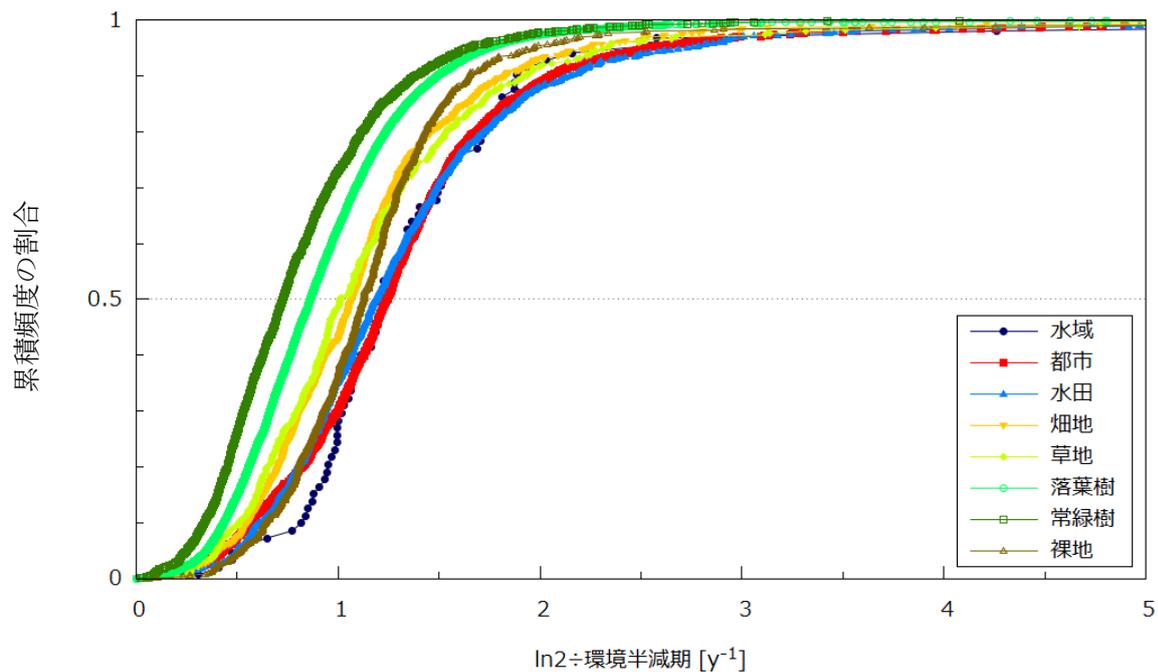
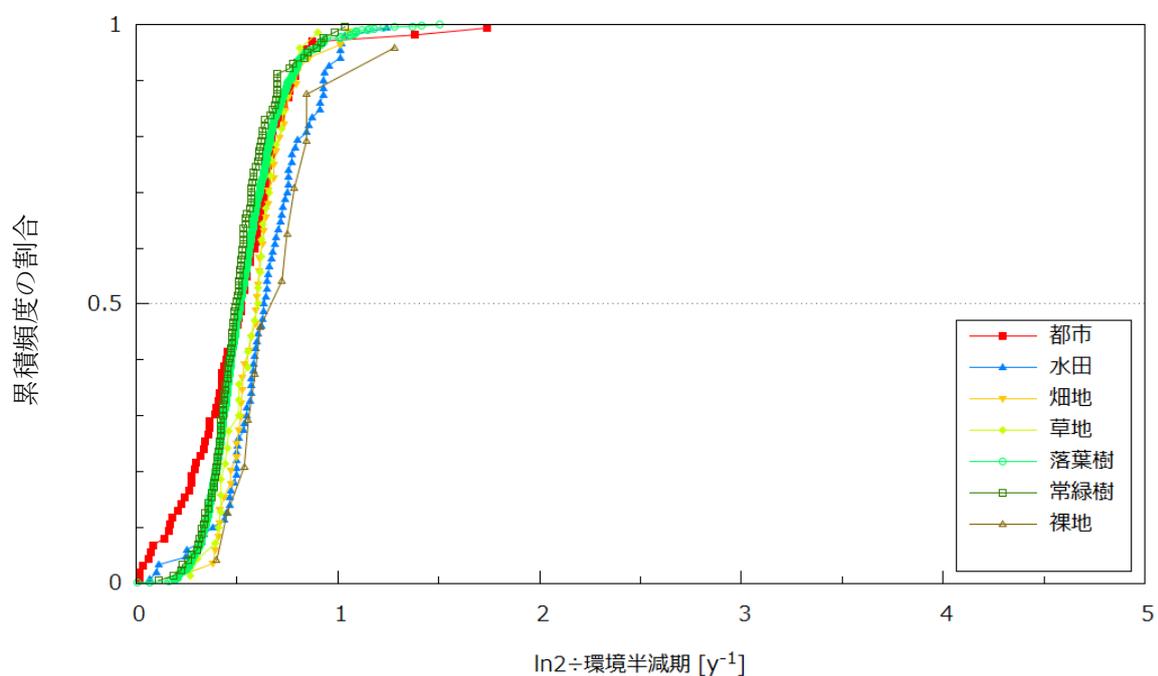


図-2 同一メッシュにある第7次航空機モニタリングと第6次走行サーベイの空間線量率の散布図



(a) 80 km 圏内全域



(b) 避難指示区域内

図-3 第1次から第6次走行サーベリの測定データから導出した、ALOS土地利用種別の相違による減衰が速い成分の($\ln 2$ /環境半減期)の累積頻度分布

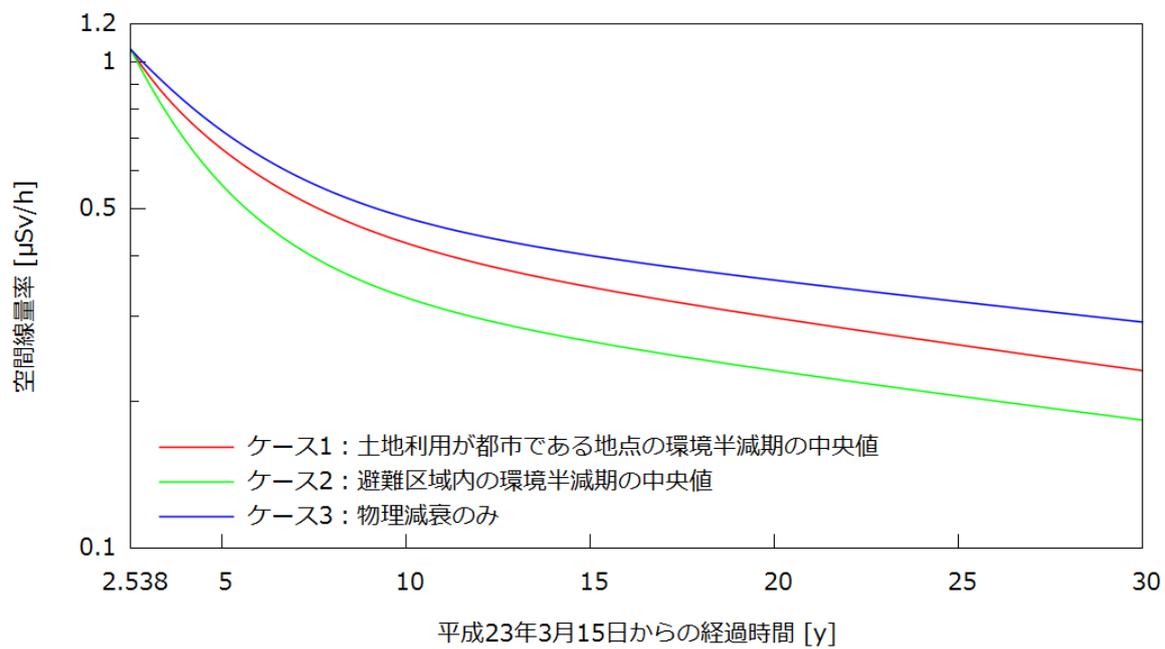
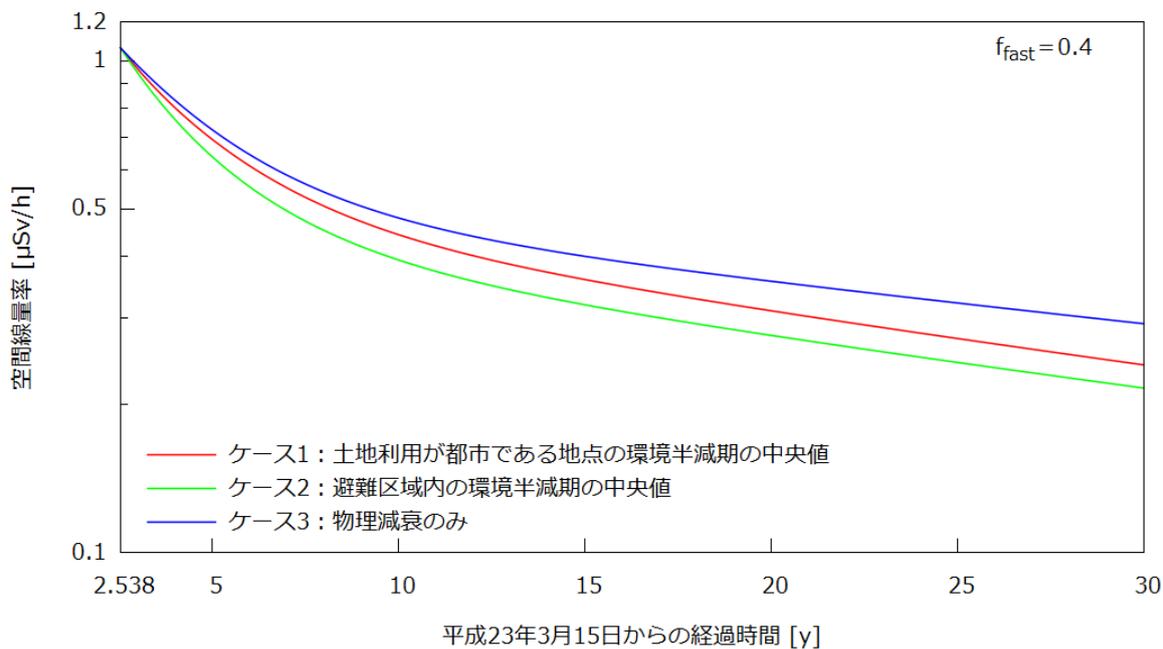
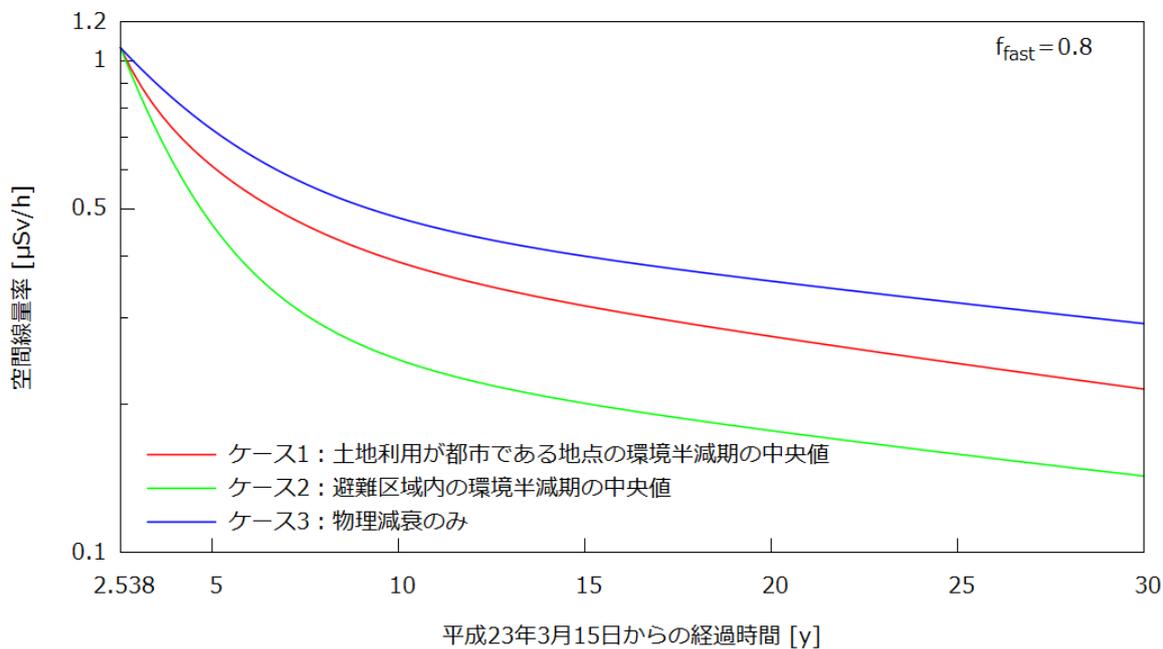


図-4 ALOS 土地利用種別が「都市」である箇所における解析ケース別の空間線量率経時変化(推定)



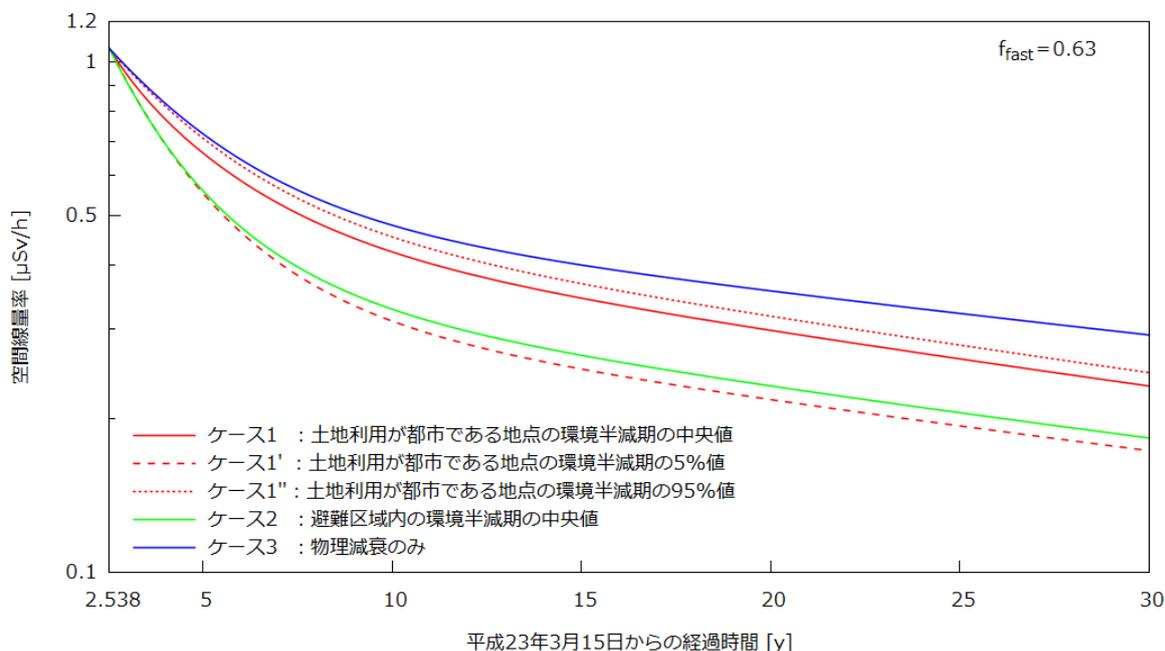
(a) 減衰の速い成分の割合を 0.4 にした場合



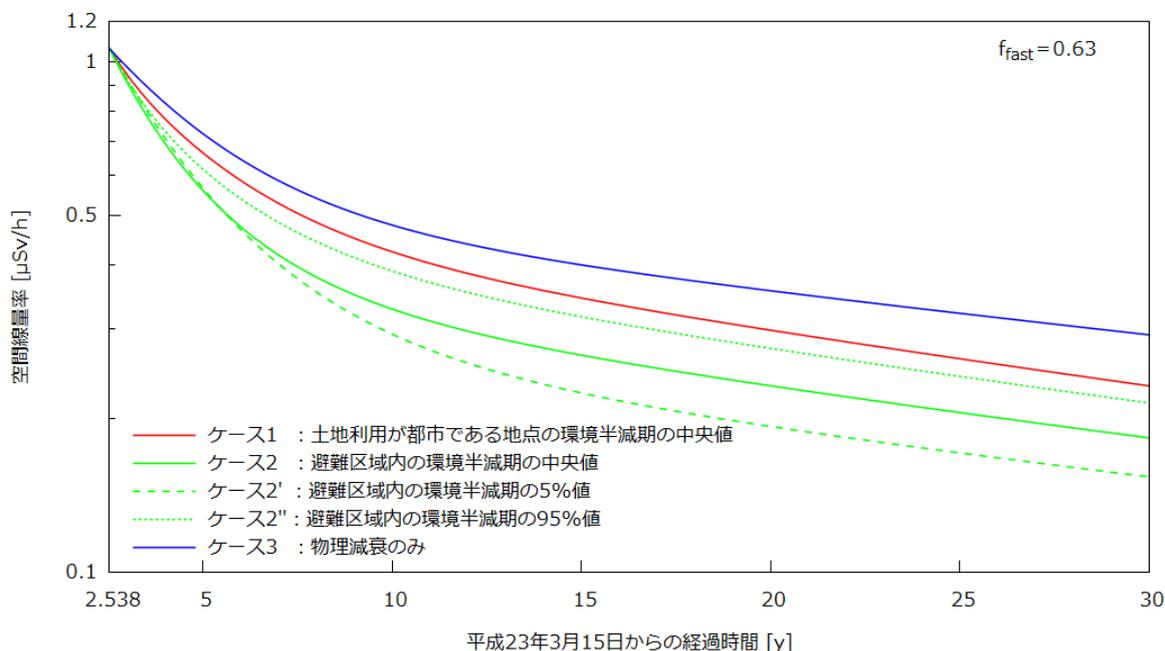
(b) 減衰の速い成分の割合を 0.8 にした場合

図-5 ALOS 土地利用種別が「都市」である地点における解析ケース別の空間線量率経時変化(推定)

— 減衰の速い成分の割合変化 —



(a) ケース1の環境半減期を変化させた場合



(b) ケース2の環境半減期を変化させた場合

図-6 ALOS 土地利用種別が「都市」である地点における解析ケース別の空間線量率経時変化(推定)

— 減衰の速い成分の環境半減期変化 —

(参考) モデル作成のための狭域詳細調査

木名瀬 栄 (原子力機構)

1. 調査目的

福島第一原発から 80 km 圏内を対象に開発する放射性セシウムの分布状況予測モデル⁶の妥当性検証、とくにモデル作成の基盤となる測定データ抽出の検証に役立てるため、事故前後の土地利用の履歴が明確な狭域の場所において、道路周辺に位置する生活圏の空間線量率を調査し、平成 24 年度からの経時変化を示す環境半減期の導出を目指した。

2. 調査内容

避難指示区域外の生活基盤が整っている地域がある一方、避難指示区域である山木屋地区を有している福島県伊達郡川俣町を対象に、平成 24 年 10 月より、KURAMA-II システムを用いた走行サーベイや NaI (TI) シンチレーション式サーベイメータによる道路周辺の空間線量率測定を実施した。

平成 25 年度は、これまでと同一の測定対象に対して、走行サーベイ、サーベイメータによる空間線量率の測定を行い、放射性セシウムの分布状況予測モデルのモデルパラメータ等を取得した。また、田の水張り期、台風期、積雪期の空間線量率の測定を行い季節的な変化を調べた。

(1) 走行サーベイ

川俣町では、これまで走行サーベイが 3 回実施され、国道 114 号線の道路上を主とした空間線量率分布が調べられた。本調査では、積雪時の平成 25 年 2 月の調査と同様に、5 月及び 7 月に走行サーベイを実施した。

(2) 道路周辺の地表面における空間線量率測定

平成 24 年度の調査では、NaI (TI) シンチレーション式サーベイメータを用いて、住民の主な生活圏である道路周辺と道路直交方向-の空間線量率を測定した。空間線量率は、道路中央から道路直交方向およそ 30 m 程度(1 m ごとに)、最大 100 m まで測定した。平成 25 年度は、平成 24 年度の調査と同一箇所において、土地利用が明確な箇所において空間線量率を測定し、道路周辺での放射性セシウムの環境半減期を導出した。

- (a) 測定箇所： 国土数値情報土地利用細分メッシュ(国土交通省)の土地利用種別において、田、その他の農用地、森林、建物用地と分類された道路とその周辺
- (b) 道路幅： 道路幅 4.0 m 以下、道路幅 4.0 m 超 6.0 m 以下及び道路幅 6.0 m 超
- (c) 周辺の空間線量率の状況： 1.0 μ Sv/h 未満及び 1.0 μ Sv/h 以上

また、田の周辺などでは、空間線量率と積雪の関係、空間線量率の季節変化についても

⁶ S. Kinase, T. Takahashi, S. Sato, R. Sakamoto, K. Saito, "Development of prediction models for radioactive caesium distribution within the 80 km radius of the Fukushima Dai ichi nuclear power plant", Radiat. Prot. Dosim., doi:10.1093/rpd/ncu014.

調査した。環境半減期の導出は、空間線量率測定データに対して次式のフィッティングにより導出した。

$$D(t) = (D_0 - D_{BG}) e^{-\left(\frac{\ln 2}{T_{env}}\right)t} \frac{ke^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t}}{k+1} + D_{BG} \quad (1)$$

$D(t)$:	経過時間 t (年)における空間線量率 (μ Sv/h)
D_0	:	初期空間線量率 (μ Sv/h)
D_{BG}	:	バックグラウンド値 (μ Sv/h)
T_{env}	:	環境半減期 (y)
k	:	セシウム 134 のセシウム 137 に対する初期空間線量率比
λ_1	:	セシウム 134 の壊変定数 (1/y) (= $\ln 2$ /セシウム 134 の物理半減期 (y))
λ_2	:	セシウム 137 の壊変定数 (1/y) (= $\ln 2$ /セシウム 137 の物理半減期 (y))

環境半減期は、走行サーベイで測定された道路上の空間線量率の測定データをもとに、平成 23 年 6 月 14 日時点の値に物理減衰の補正を行ったのち導出した。

2. 結果及び考察

(1) 走行サーベイ

平成 25 年 5 月における走行サーベイによる空間線量率測定結果を図-1 に示す。空間線量率分布は、川俣町を横断する国道 114 号線の道路上を主とし、時を隔てて複数回測定した。川俣町山木屋地区の道路上の空間線量率は、最大 2.6 μ Sv/h であった。これまでに実施した走行サーベイの空間線量率の度数分布を図-2 に示す。図-2 より、事故後時間を隔てて実施した走行サーベイの度数分布は、低空間線量率側に推移していることが確認できる。

平成 25 年 2 月の測定結果が低空間線量率側に推移したのは、道路周辺に積もった 20 cm 程度の雪による遮へい効果が大きいと考える。走行サーベイの空間線量率の経時変化データをもとに、ALOS (陸域観測技術衛星「だいち」: Advanced Land Observing Satellite) 土地利用種別の環境半減期について解析した結果を図-3 に示す。全体的にデータ数が少ないため、土地利用種別の環境半減期を評価し比較することは困難であるが、「落葉樹」として土地利用に分類された地域では減衰が遅く、「水域(河川・湖沼等)」、「都市」、「裸地」として土地利用に分類された地域では減衰が速いことが示唆された。「落葉樹」として土地利用に分類された地域の環境半減期は、積雪期の平成 25 年 2 月の測定データを環境半減期導出から除外した場合、50%値が約 2.0 年になった。

(2) 道路周辺の地表面における空間線量率測定

道路周辺での放射性セシウムの環境半減期について解析した結果を図-4~図-7 に示す。図には、生活圏の主な土地利用種別である田、その他の農用地(畑地)、森林、建物用地として分類される道路と道路直交方向の($\ln 2$ /環境半減期)の変化を示した。道路中央の環境半減期は、道路周辺の環境半減期に比べ著しく短いことはなかった。セシウム 137 由来のガンマ線が空気中の分子と衝突せずに飛行する平均距離が約 108 m であることも勘案する

と、環境半減期を導出する測定データの調査期間にもよるが、平成24年度から平成25年度の測定結果に基づいた住民の生活圏を横断する道路の中央の環境半減期は、生活圏を反映するモデルパラメータとして利用できると思う。

図-8に道路周辺の地表面の空間線量率と積雪の関係を示す。図には、平成24年10月(積雪前)、平成25年2月(積雪時)、平成25年4月(雪解後)の地上1m高さの空間線量率の経時変化を示した。道路周辺で約20cmの積雪があった平成25年2月の空間線量率は、道路周辺全体にわたって減少していた。

季節ごとに地表面の状況が大きく変化する田周辺の空間線量率の変化を図-9に示す。図には、平成24年11月(稲刈り後)、平成25年4月(代掻き期)、平成25年7月(水張り期)、平成25年10月(稲刈り後)の地上1m高さの物理半減期を補正した空間線量率を示した。避難指示区域外のすでに住民生活の基盤が整っている、地上1m高さの空間線量率が $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 未満の地区では、水田耕作がおこなわれており、田の水張りによる遮へい効果により、平成25年7月の田周辺の空間線量率はやや減少している。一方、地上1m高さの空間線量率が $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以上の山木屋地区では、水田耕作が行われていないため田の水張りによる遮へい効果はないものの、除染作業などによって、平成25年7月以降の田周辺の空間線量率が大きく減少した箇所がみられた。



図-1 平成 25 年 5 月の走行サーベイによる空間線量率測定結果

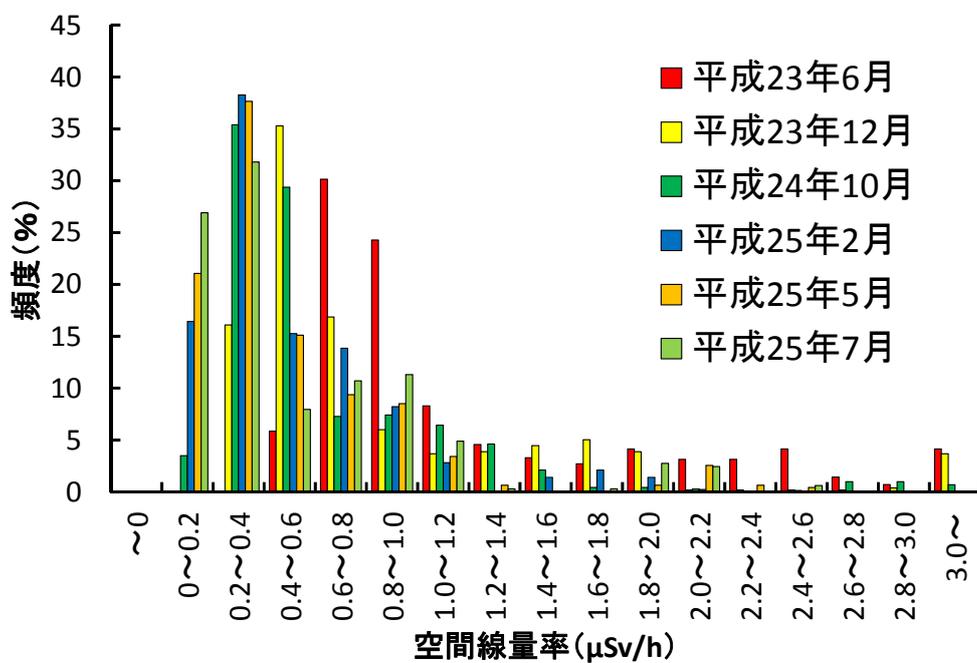
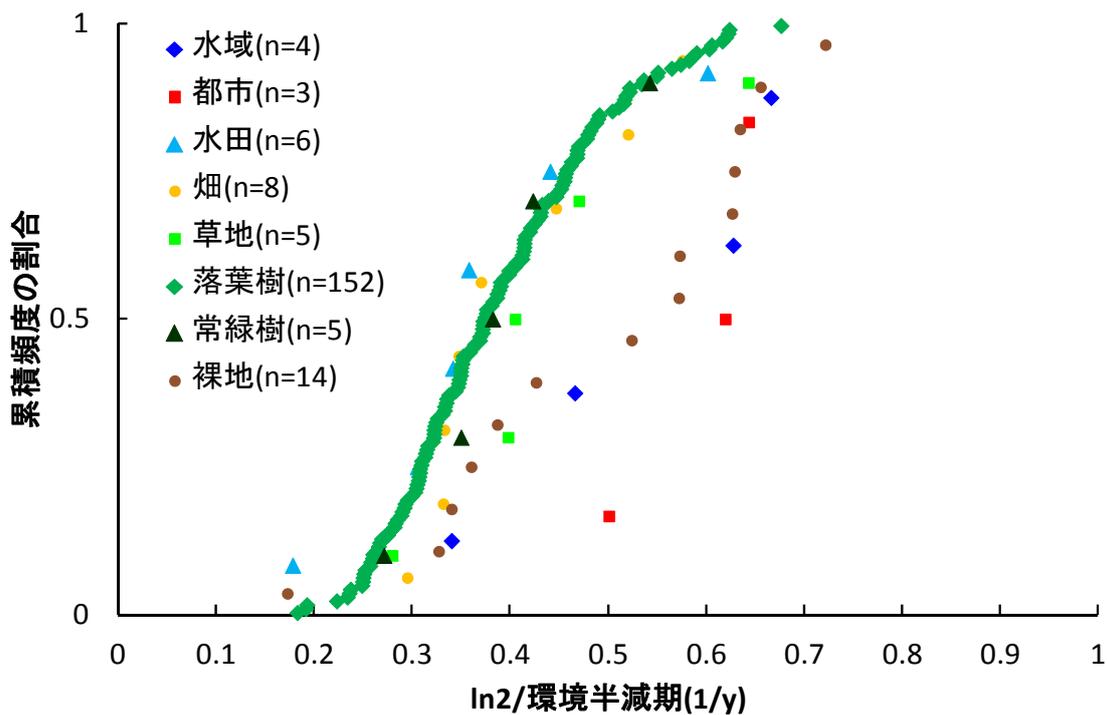
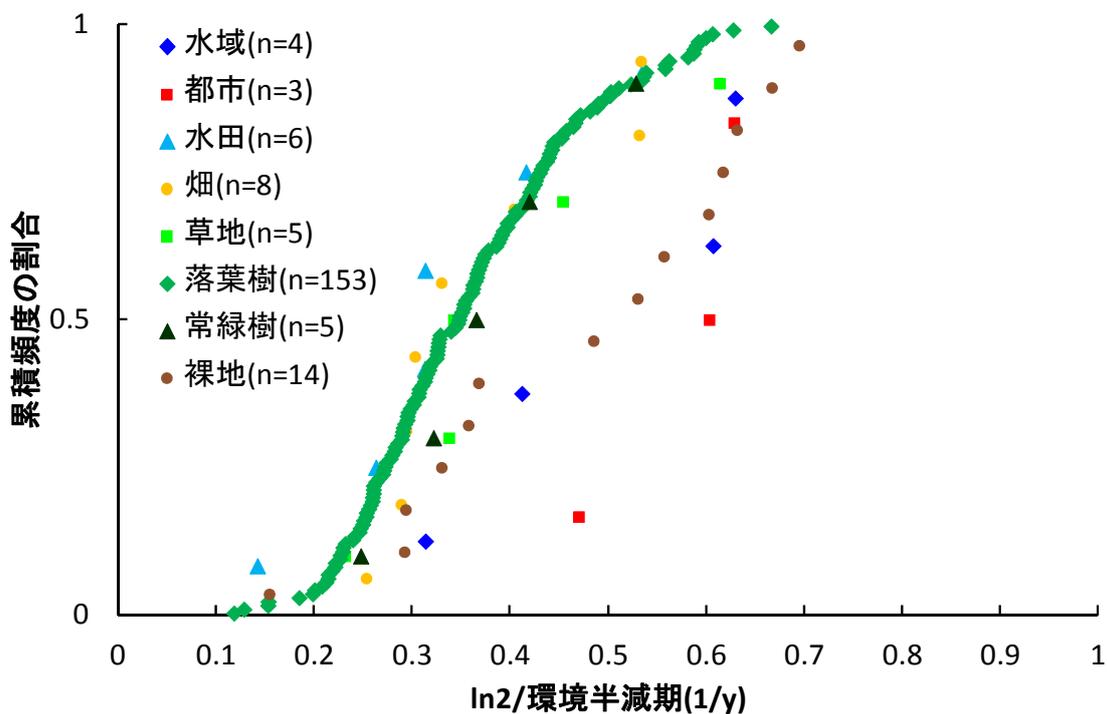


図-2 走行サーベイの空間線量率測定結果の度数分布

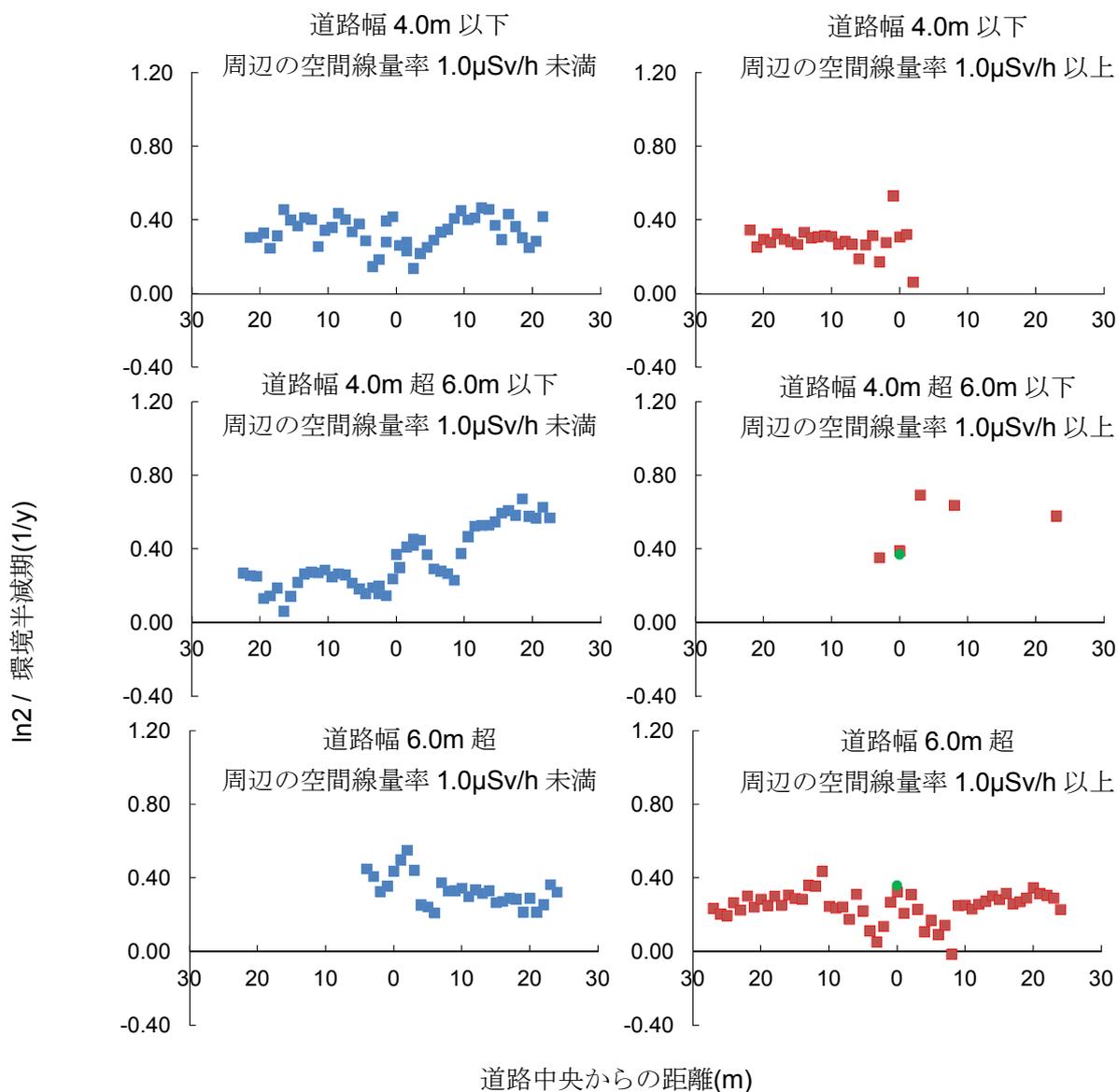


(a) 平成 25 年 2 月 (積雪期) データ含む



(b) 平成 25 年 2 月 (積雪期) データ除外

図-3 走行サーベイの空間線量率測定結果から導出した環境半減期の累積頻度分布 (ALOS 土地利用種別で分類)



(a) 田

図-4 道路周辺での放射性セシウムの環境半減期
(緑点は、走行サーベイの測定データより導出した当該箇所周辺の環境半減期を示す。)

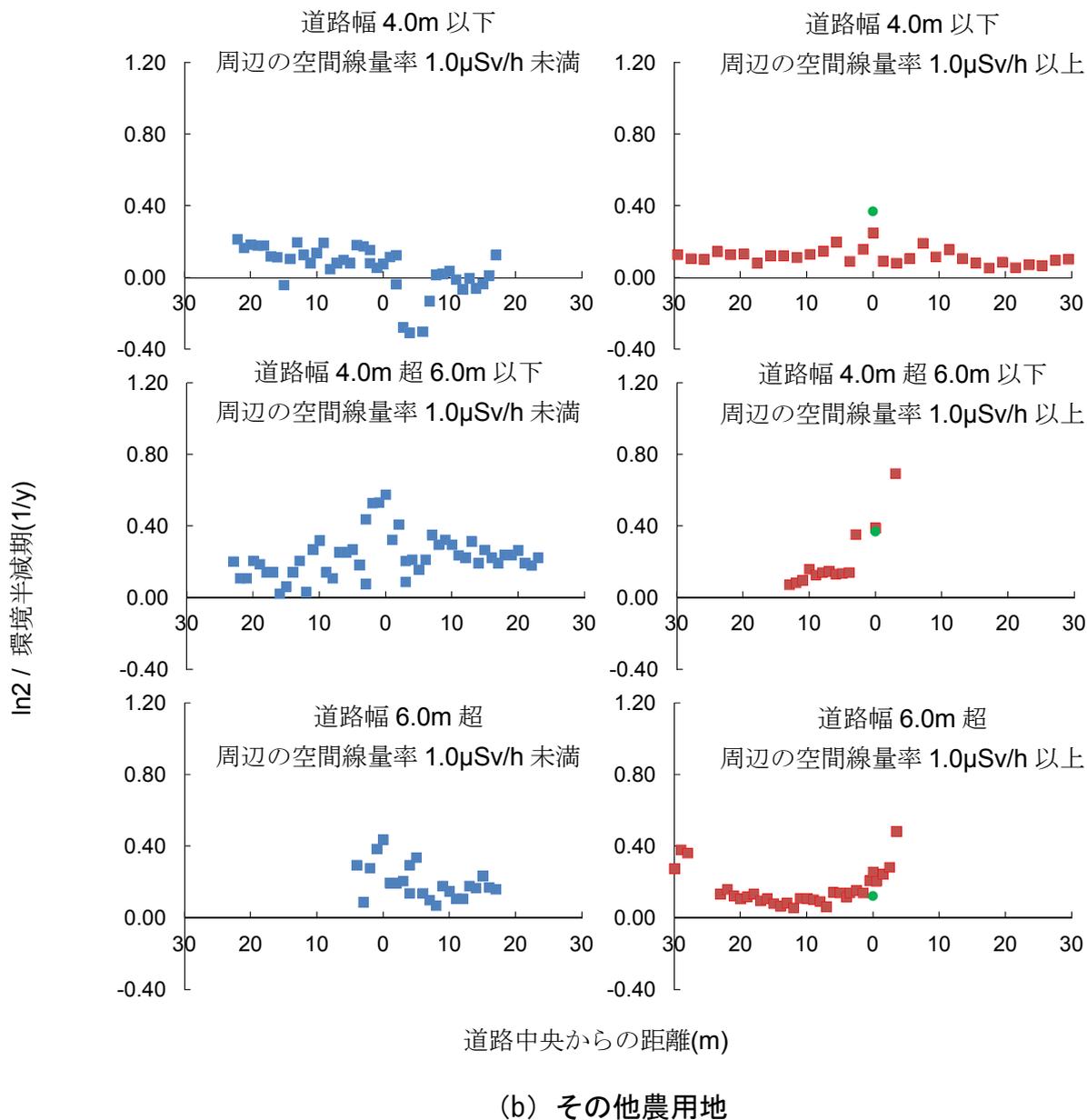
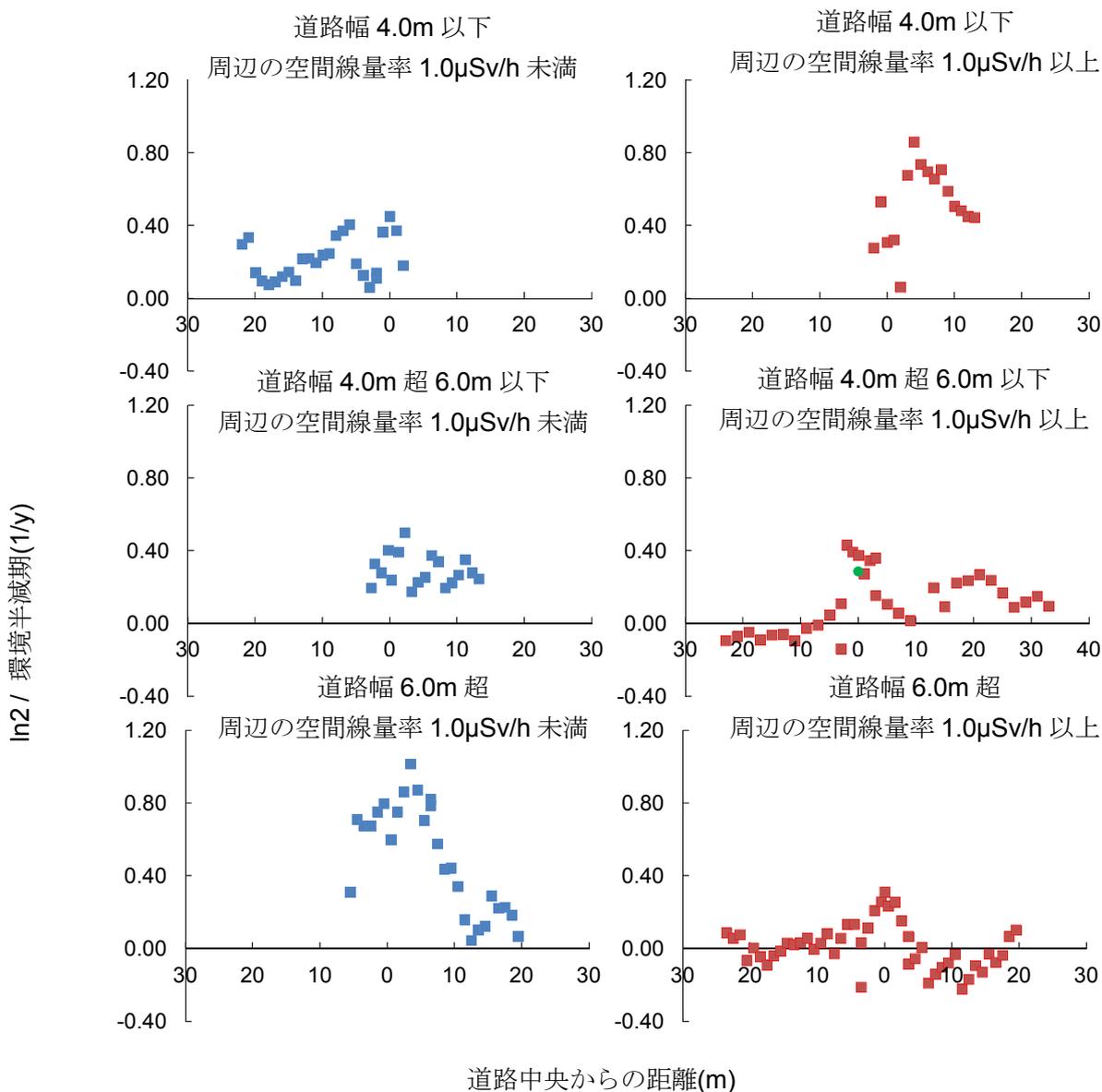


図-5 道路周辺での放射性セシウムの環境半減期
(緑点は、走行サーベイの測定データより導出した当該箇所周辺の環境半減期を示す。)



(c) 森林

図-6 道路周辺での放射性セシウムの環境半減期
(緑点は、走行サーベイの測定データより導出した当該箇所周辺の環境半減期を示す。)

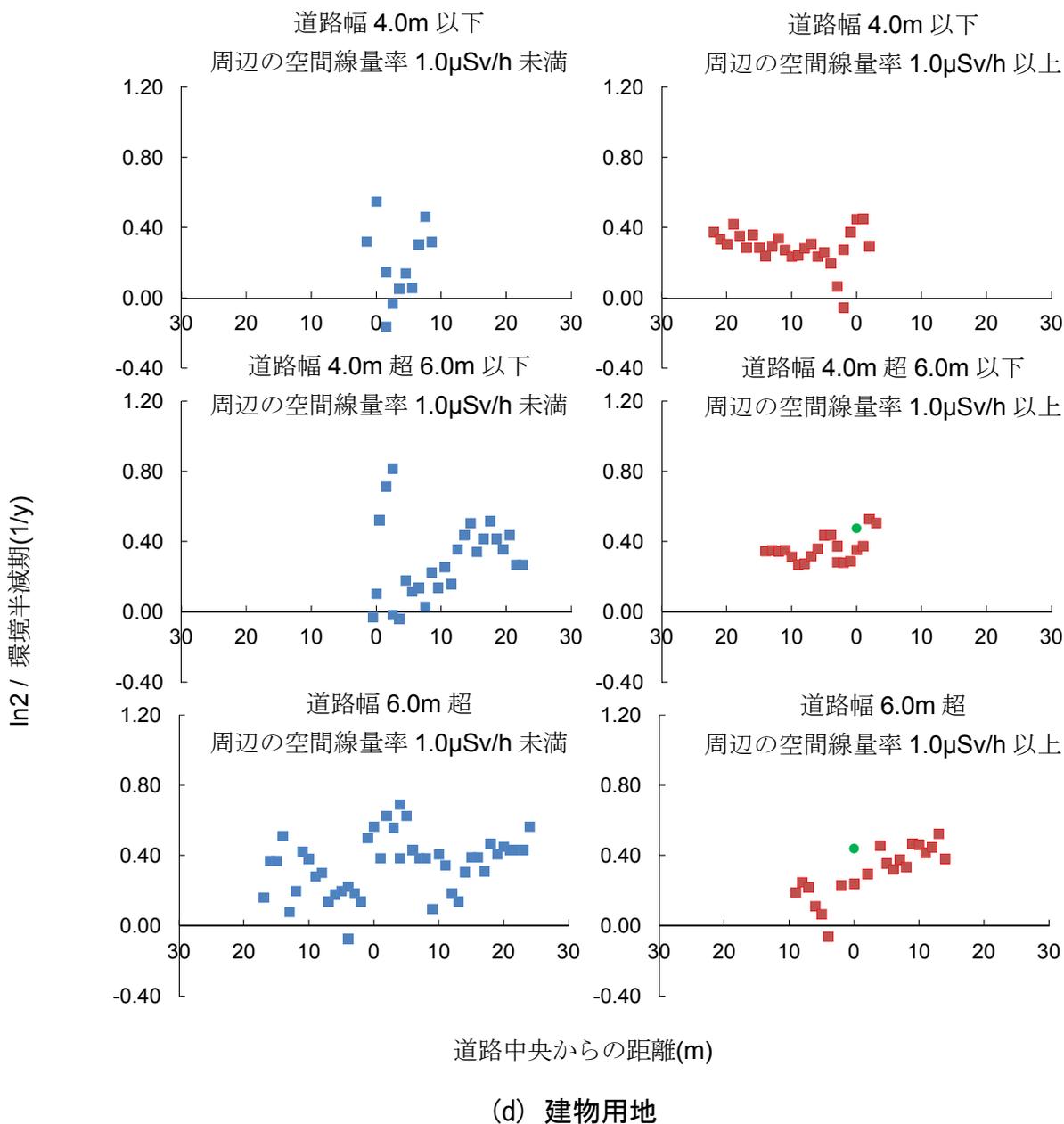


図-7 道路周辺での放射性セシウムの環境半減期
 (緑点は、走行サーベイの測定データより導出した当該箇所周辺の環境半減期を示す。)

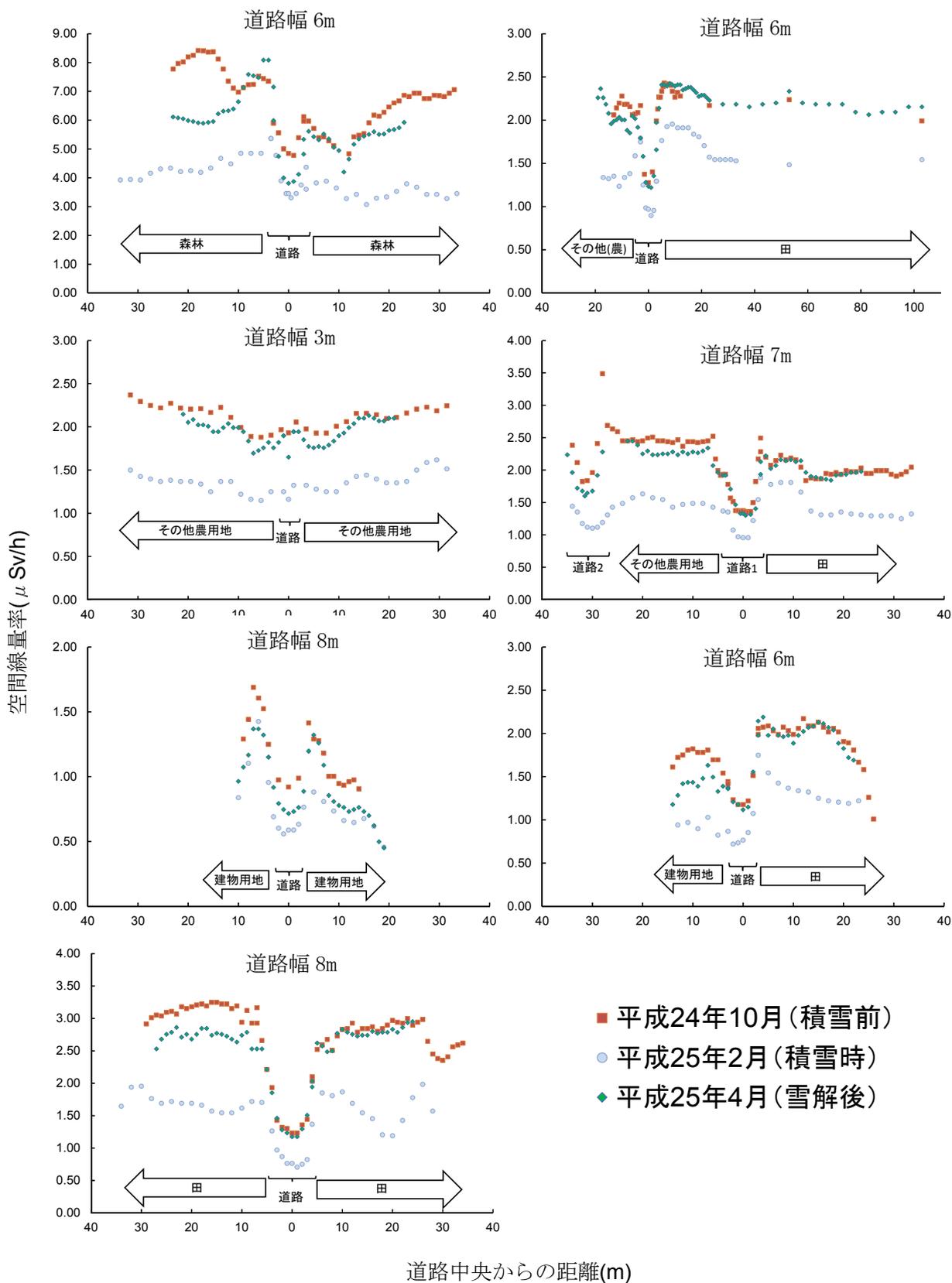


図-8 積雪期前後の空間線量率の変化
(周辺の空間線量率 1.0 μSv/h 以上)

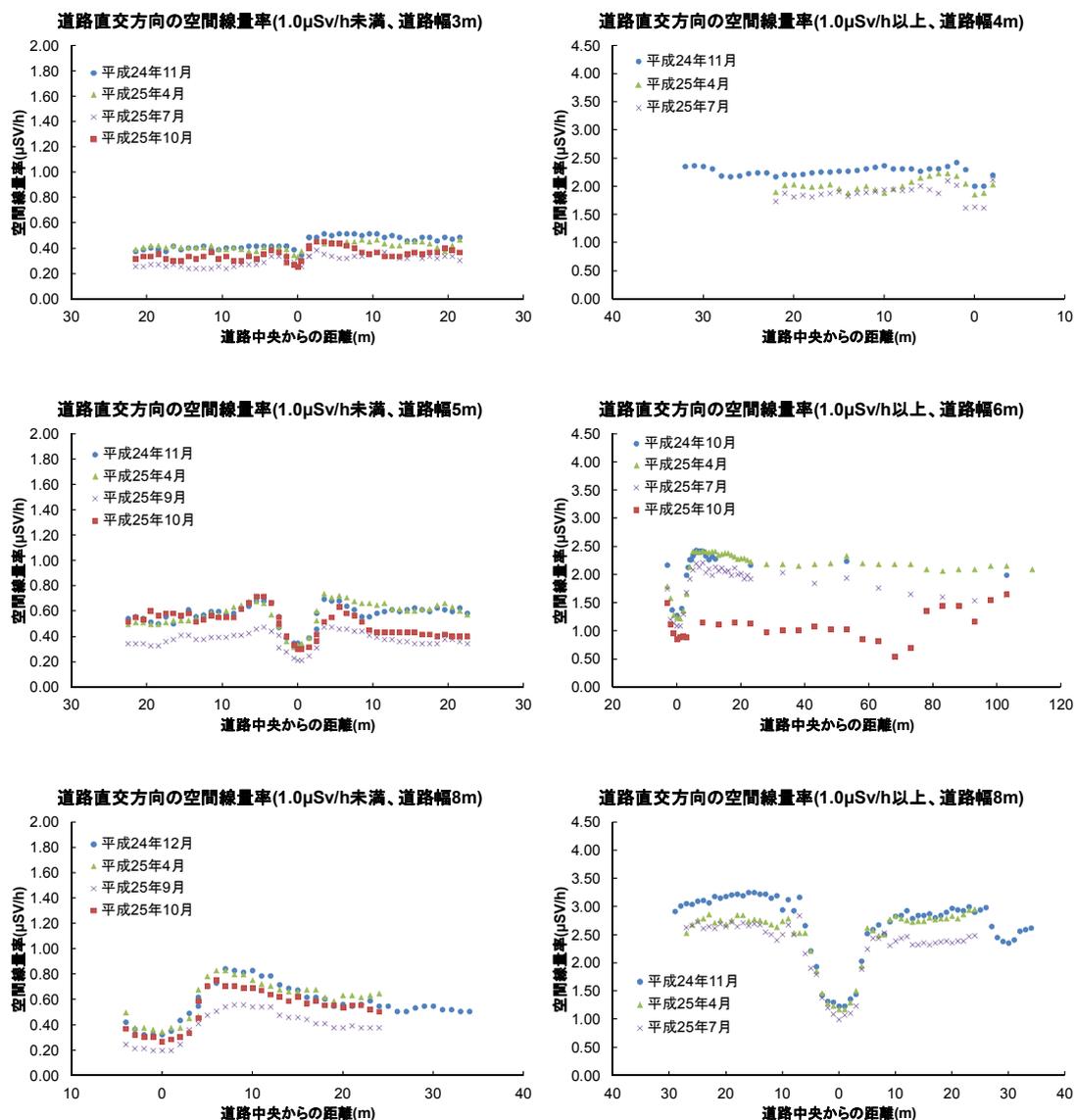


図-9 田周辺の空間線量率の経時変化

(空間線量率の変化が著しい箇所は、道路と田の境界となる路肩、路側帯(空間線量率の高い方が田)。)