

空間線量率分布の予測モデルの開発、実測データとの比較及び検証

木名瀬 栄（原子力機構）

1. 調査目的

本調査の目的は、住民帰還などの復興に資するため、環境中の放射性セシウムを起因とした空間線量率分布の長期的予測手法を開発することである。

これまで、福島第一原発から 80 km 圏内の第 3 次地域区画 1/10 細分区画（約 100 m メッシュ）を対象に、第 1 次走行サーベイ（平成 23 年 6 月 4 日から 6 月 13 日）から第 8 次走行サーベイ（平成 26 年 6 月 23 日から 8 月 8 日）の空間線量率測定データをもとに、土地利用形態ごとに環境半減期（放射性セシウムの物理減衰による影響を取り除き、放射性セシウムの環境中での挙動に影響を及ぼすウェザリングや人間活動などの様々な要因により、環境中の空間線量率が半分の値になるまでの時間）を導出し、この環境半減期をモデルパラメータとした空間線量率の分布状況変化モデルを開発してきた^{1, 2, 3, 4, 5, 6}。

平成 27 年度は、第 1 次から第 8 次走行サーベイの空間線量率測定データに第 9 次（平成 26 年 11 月 4 日から 12 月 5 日）走行サーベイ等の空間線量率測定データを加え、分布状況変化モデルのモデルパラメータの更新を行った。また、モンテカルロ計算により分布状況変化モデルの不確かさ解析を行うとともに、空間線量率の実測結果との比較により分布状況変化モデルの妥当性を検証した。なお、空間線量率分布の長期的予測手法は、今後新たな測定データ・知見が得られれば、その都度見直しを実施し、さらなる検討を加える。

2. 調査内容

空間線量率分布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 を対象とする、2 成分 1 コンパートメントモデルである分布状況変化モデルを次の式-1 で表す。

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

¹ 日本原子力研究開発機構，“平成 26 年度放射性物質測定調査委託費（東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約及び移行モデルの開発）事業成果報告書”日本原子力研究開発機構ホームページ、(<http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry07.html>)。

² S. Kinase, T. Takahashi, S. Sato, R. Sakamoto, K. Saito, “Development of Prediction Models for Radioactive Caesium Distribution within the 80km-Radius of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant,” Radiat. Prot. Dosim. 160(4), 318–321(2014).

³ S. Kinase, S. Sato, T. Takahashi, R. Sakamoto, K. Saito, “Ecological Half-life of Radioactive Caesium within the 80 km Radius of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant,” IRPA2014 Abstract Book 163–166(2014).

⁴ S. Kinase, S. Sato, R. Sakamoto, H. Yamamoto, K. Saito, “Changes in Ambient Dose Equivalent Rates around Roads at Kawamata after the Fukushima Accident,” Radiat. Prot. Dosim. 167, 340–343(2015).

⁵ S. Kinase, T. Takahashi, S. Sato, H. Yamamoto, K. Saito, “Prediction of Ambient Dose Equivalent Rates for the Next 30 Years after the Accident,” Proceedings of International Symposium on Radiological issues for Fukushima’s Revitalized Future 40–43(2015).

⁶ S. Kinase, T. Takahashi, S. Sato, H. Yamamoto, K. Saito, “Uncertainty in Predictions of Ambient Dose Equivalent Rates for 30 Years following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident,” Proceedings of the NSFS XVII Conference 27–33(2016).

ここで、

$D(t)$: 経過時間 t [y]における空間線量率 [$\mu\text{Sv}/\text{h}$]
D_0	: 空間線量率の初期値 [$\mu\text{Sv}/\text{h}$]
D_{BG}	: バックグラウンド空間線量率 [$\mu\text{Sv}/\text{h}$]
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(同じ濃度) [-]
λ_{134}	: セシウム 134 の壊変定数 [y^{-1}]
λ_{137}	: セシウム 137 の壊変定数 [y^{-1}]

である。

(1) モデルパラメータの設定

本調査では、福島第一原発から 80 km 圏内を対象に事故 30 年後までの空間線量率分布の経時変化を予測可能にするため、走行サーベイ等の空間線量率測定データ（表-1）を用いて、現時点において適切と考えられる式-1 のモデルパラメータを導出した。

減衰が遅い成分の環境半減期とその変化の範囲は、先行研究の結果を踏まえ、公衆や環境影響を対象にする確率論的リスク評価（レベル 3PRA）に関する日本原子力学会の値⁷ や米国原子力規制委員会の値⁸ を、減衰が速い成分の環境半減期、減衰が速い成分の割合とそれらの変化の範囲は、第 1 次から第 9 次走行サーベイの空間線量率測定データと「総合モニタリング計画」（モニタリング調整会議決定）に基づき実施されている第 20 巡までの走行サーベイの詳細モニタリング結果⁹ をもとに、大局的(global)検索を発見的(heuristic)な手法である CRS (Controlled Random Search) 法で、局所的(local)な検索を共役傾斜法 (conjugate gradient 法) で行う 2 段階で最適解を求める手法により導出した。なお、減衰が速い成分の割合は、避難指示区域内には ALOS 土地利用形態別のうち森林（落葉樹、常緑樹）か否かの群別に、避難指示区域外には ALOS 土地利用形態別に導出した。避難指示区域内の減衰が速い成分の割合は、その信頼性および合理性を図るために、減衰が速い成分の環境半減期を定数とし、初期の空間線量率と減衰が速い成分の割合の 2 つのパラメータを対象にした共役傾斜法の適用により導出した。得られた減衰が速い成分の割合は、避難指示区域内である帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域それぞれの ALOS 土地利用形態別のうち森林（落葉樹、常緑樹）か否かの群別に、避難指示区域外には ALOS 土地利用形態別に分類し、中央値とその変化の範囲を導出した。

避難指示区域内と避難指示区域外では人間活動などによる地表面の様子のかく乱程度が異なると想定されたため、それぞれの区域を対象にして第 9 次走行サーベイと第 9 次航空機モニタリング（平成 26 年 9 月 1 日から 11 月 7 日）による測定データの比率、走行サーベイによる測定データと歩行サーベイによる測定データの比率¹ を調べた。

⁷ 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).

⁸ J. L. Sprung, J. A. Rollstin, J. C. Helton and H-N Jow, "Evaluation of Severe Accident Risks: Quantification of Major Input Parameters, MACCS Input," NUREG/CR-4551 SAND86-1309 Vol. 2, Rev. 1, Part 7, Sandia National Laboratories, Albuquerque (1990).

⁹ 原子力被災者生活支援チーム、避難指示区域における詳細モニタリング結果(モニタリングカーによる走行サーベイ第二十巡)の公表について、(http://www.metei.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/150331/monitor00_01.pdf).

(2) 分布状況変化モデルの不確かさ解析

分布状況変化モデルによる推定値の不確かさ解析として、式-1に示される3つのモデルパラメータである、減衰が速い成分の割合、減衰が速い成分の環境半減期、減衰が遅い成分の環境半減期の統計分布を考慮したモンテカルロ計算により、空間線量率の経時変化を調べた。モンテカルロ計算に用いるパラメータサンプリングは、クリアランスレベル導出¹⁰などに利用されたLHS (Latin Hypercube Sampling) コード¹¹により行った。LHS コードにより、累積分布関数の累積頻度の割合が等間隔になるようにサンプル数で分割し、各領域内から代表値を1つずつランダムに選択してパラメータの組み合わせを決定した。なお、減衰が遅い成分の環境半減期の統計分布は先行研究の結果⁷を踏まえ一様分布と仮定した。

(3) 分布状況変化モデルによる推定値の妥当性検証

分布状況変化モデルの妥当性を検証するため、第9次走行サーベイ（平成26年11月4日から12月5日）の空間線量率測定データを基準とした分布状況変化モデルを用いて第10次走行サーベイ（平成27年6月29日から8月4日）の測定対象メッシュの空間線量率を推定し、第10次走行サーベイの空間線量率測定データと比較した。

3. 結果及び考察

(1) モデルパラメータ

モデルパラメータは、走行サーベイなどで得られた最新の空間線量率測定データ及びレベル3PRA手法などの知見を踏まえ導出した（表-2）。第1次から第9次走行サーベイによる空間線量率測定データを用いて、減衰が速い成分の環境半減期について解析した結果を図-1に示す。避難指示区域外の減衰が速い成分の環境半減期として、ALOS 土地利用形態別に解析した結果を図-1(a)に、避難指示区域内の減衰が速い成分の環境半減期として、ALOS 土地利用形態別のうち森林（落葉樹、常緑樹）か否かの群別に解析した結果を図-1(b)に示した。図-1(a)と(b)の比較より、減衰が速い成分の環境半減期は、避難指示区域内外で異なり、避難指示区域外に較べ人間活動が少なかった避難指示区域内の方が、減衰が速い成分の環境半減期は長くなることが示唆された。また、図-1(a)より、避難指示区域外では、ALOS 土地利用形態が常緑樹の場合、減衰が速い成分の環境半減期が0.1年未満であると解析上導出される場合が15%程度あり、その統計分布は他のALOS 土地利用形態別の減衰が速い成分の環境半減期の統計分布と相違があることが示された。減衰が速い成分の環境半減期の導出に用いるための事故後0.1年未満に取得した空間線量率測定データが十分ないこと、事故後1年内に得られた測定データの不確かさがやや大きいと考えられることなどから、0.1年未満の減衰が速い成分の環境半減期について再評価することは困難であるが、事故5年が経とうとしている現時点では、初期の空間線量率の著しい減衰に寄与する0.1年未満の減衰が速い成分の環境半減期をモデルパラメータとして適用しないことは、将来予測を目的とする分布状況変化モデルへの適用の観点から、過度な誤推定の原因にならないと考えられる。本調査では、表-3に示すように、ALOS 土地利用形態別や森林（落葉樹、常緑樹）か否かの群別について、式-1のモデルパラメータである減衰が速い成分の環境半減期の中央値等を導出した。全体的な傾向として、減衰が速い成分の環境半減期は、避難指示区域内外で異なり、ALOS 土地利用形態別間の相違は顕著でない。

図-2(a)と(b)に走行サーベイの空間線量率測定データを用いて解析した、避難指示区域

¹⁰ 高橋知之、武田聖司、木村英雄、"クリアランスレベル設定のための確率論的解析コードシステム:PASCLR ユーザーズマニュアル," JAERI-Data/Code 2000-041 (2001).

¹¹ R. L. Iman and M. J. Shortencarier, "A FORTRAN 77 Program and User's Guide for the Generation of Latin Hypercube and Random Samples for Use with Computer Models," NUREG/CR-3624 (1987).

外及び避難指示区域内の減衰が速い成分の割合(累積頻度分布)を示す。また、その5%値、中央値及び95%値を表-4に示す。図-2(a)に示すように、避難指示区域外の減衰が速い成分の割合は、ALOS土地利用形態間の相違が顕著である。とくに、常緑樹に分類されたメッシュにおける減衰が速い成分の割合は、都市など他の土地利用形態に分類されたメッシュの値に較べ小さい。また、図-2(b)に示すように、避難指示区域内である帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域それぞれの減衰が速い成分の割合については、人間活動などが比較的多い避難指示解除準備区域の方が他の区域に比べ大きく、分散も大きくなる傾向が示された。

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相当データに補正する線形回帰式(1次関数)の傾きは、第9次走行サーベイと第9次航空機モニタリングの測定データ間では、避難指示区域内で0.61、避難指示区域外で0.56となった。なお、 $0.1 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 未満の空間線量率測定データはバックグラウンド空間線量率のばらつきの影響が含まれる可能性があるため線形回帰の解析対象から除外した。

(2) 分布状況変化モデルの不確かさ

分布状況変化モデルを用いて、事故30年後までの避難指示区域内外それぞれの空間線量率の経時変化を推定した。避難指示区域である帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域については、ALOS土地利用形態別のうち森林(落葉樹、常緑樹)か否かの群別に、避難指示区域外については、ALOS土地利用形態別に空間線量率を求め、バックグラウンド空間線量率を除く初期の空間線量率で規格化した。

分布状況変化モデルにより推定した空間線量率の経時変化について、図-3(a)～(h)に避難指示区域外の値(絶対値ではなく、事故発生時点の空間線量率で規格化した相対値)を、図-4(a)～(f)に避難指示区域内の値を示す。ここで、本分布状況変化モデルは、統計的な分布を有する3つのパラメータを入力として計算を行うため、同一時点における推定値も統計的な分布(=不確かさ)を有する。この不確かさを考慮するため、それぞれの図においては、50%値(推定値が有する分布の中央値)に加えて、90%信頼区間下限値(推定値が有する分布の5%値)、90%信頼区間上限値(推定値が有する分布の95%値)の各場合における推定値を記載(=不確かさ解析)している。

(3) 分布状況変化モデルの妥当性検証

図-5に避難指示区域外の空間線量率について、第9次走行サーベイ(平成25年11月5日から12月12日)の空間線量率測定データを基準とした分布状況変化モデルによる第10次走行サーベイの時点(平成26年6月23日から8月8日)の推定値と、第10次走行サーベイによる空間線量率の測定データ(実測値)の比較結果を示す。両者間は、 $0.1 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 以上となる空間線量率について、係数2(実測値に対して推定値が最大で2倍や2分の1程度であること)の範囲で概ね一致するとともに、測定データの多くは係数2よりも高い精度で一致していることが確認できた。

4.まとめ

福島第一原発から80km圏内を対象に、事故30年後までの空間線量率分布の長期的予測手法を開発するとともに、これまでの知見を適用して避難指示区域内外の地域特性に応じたモデルパラメータを導出した。減衰が速い成分の環境半減期は、避難指示区域内外で異なり、ALOS土地利用形態間の相違は顕著でないこと、減衰が速い成分の割合は、人間活動の多寡が反映される避難指示区域内外、ALOS土地利用形態間の相違が顕著であることが示唆された。

また、福島第一原発事故 30 年後までの空間線量率分布の経時変化を推定するとともにモデルの不確かさ解析及び妥当性検証を行った。この結果からは、人為的な影響を含むかく乱がこれまでと同程度と仮定したうえで、分布状況変化モデルを用いて将来の空間線量率を推定する場合、係数 2 度程の不確かさで推定できる可能性が示唆された。

空間線量率等の長期的予測手法は、環境半減期などのモデルパラメータを用いた計算により、避難指示区域内外それぞれの生活圏において空間線量率分布を簡便に推定することが可能であるため、住民帰還などの復興に役立つと考える。

表-1 モデルパラメータ導出に用いたデータ

空間線量測定データ	測定実施日	データ数
走行サーベイ	1次：平成23年6月4～13日	1次：42,090
	2次：平成23年12月5～28日	2次：33,887
	3次：平成24年3月13～30日	3次：59,037
	4次：平成24年8月20日～10月12日	4次：126,249
	5次：平成24年11月5日～12月12日	5次：87,991
	6次：平成25年6月12日～8月8日	6次：128,270
	7次：平成25年11月5日～12月12日	7次：115,985
	8次：平成26年6月23日～8月8日	8次：104,630
	9次：平成26年11月4日～12月5日	9次：109,239
「総合モニタリング計画」に基づき実施されている走行サーベイ	1巡：平成23年8月2～30日	1巡：97,512
	2巡：平成23年8月31日～10月9日	2巡：114,971
	3巡：平成23年10月1日～11月4日	3巡：119,660
	4巡：平成23年11月5日～12月12日	4巡：134,376
	5巡：平成23年12月14日	5巡：135,724
	～平成24年1月30日	
	6巡：平成24年2月4日～3月10日	6巡：132,692
	7巡：平成24年3月12日～4月16日	7巡：144,644
	8巡：平成24年5月16日～6月18日	8巡：145,295
	9巡：平成24年7月4日～8月6日	9巡：148,560
	10巡：平成24年9月4日～10月18日	10巡：153,136
	11巡：平成24年10月31日～12月7日	11巡：152,960
	12巡：平成25年1月9日～2月18日	12巡：142,435
	13巡：平成25年3月18日～4月19日	13巡：153,242
	14巡：平成25年6月4日～7月8日	14巡：154,560
	15巡：平成25年8月27日～10月8日	15巡：155,963
	16巡：平成25年11月6日～12月3日	16巡：154,696
	17巡：平成26年3月18日～4月22日	17巡：158,506
	18巡：平成26年6月3日～7月4日	18巡：158,493
	19巡：平成26年8月25日～9月30日	19巡：160,387
	20巡：平成26年10月21日	20巡：161,912
	～平成27年1月19日	

表-2 空間線量率の将来推定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
将来推定の初期値	—	$t=0$	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
減衰が速い成分の環境半減期	y	T_{fast}	表-3 参照
減衰が遅い成分の環境半減期 (上限値及び下限値)	y	T_{slow}	92 ⁷ (45–135) ⁸
減衰が速い成分の割合	—	f_{fast}	表-4 参照
セシウム 134 のセシウム 137 に対する 空間線量率比(同じ濃度)	—	k	2.7
セシウム 134 の壊変定数	y^{-1}	λ_{134}	$\ln 2 / 2.0648^{12}$
セシウム 137 の壊変定数	y^{-1}	λ_{137}	$\ln 2 / 30.1671^{12}$
走行サーベイによる空間線量率	$\mu \text{Sv/h}$	—	(地点別)
航空機モニタリングによる空間線量率	$\mu \text{Sv/h}$	—	(地点別)
生活圏の空間線量率への補正係数	—	—	避難指示区域内 : 1.11 避難指示区域外 : 1.23
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 : 0.61 避難指示区域外 : 0.56

表-3 減衰が速い成分の環境半減期

区域	ALOS 土地利用形態	減衰が速い成分の環境半減期[年]		
		5%値	中央値	95%値
	水域	0.17	0.46	1.75
	都市	0.21	0.59	1.40
	水田	0.12	0.56	1.55
避難指示	畑地	0.17	0.64	1.55
区域外	草地	0.13	0.55	1.63
	落葉樹	0.09	0.57	1.70
	常緑樹	0.07	0.47	2.03
	裸地	0.20	0.59	1.43
避難指示	森林	0.41	1.10	2.82
区域内	森林以外	0.22	1.03	2.69

¹² ICRP, Nuclear Decay data for Dosimetric Calculations, ICRP Publication 107 (2008).

表-4 減衰が速い成分の割合

区域	ALOS 土地利用形態 /属性	減衰が速い成分の割合 [-]		
		5%値	中央値	95%値
	水域	0.64	0.75	0.88
	都市	0.57	0.78	0.90
	水田	0.57	0.73	0.91
避難指示	畠地	0.55	0.72	0.90
区域外	草地	0.52	0.72	0.86
	落葉樹	0.50	0.70	0.90
	常緑樹	0.40	0.66	0.90
	裸地	0.56	0.75	0.88
	帰還困難区域, 森林	0.35	0.50	0.64
	帰還困難区域, 森林以外	0.35	0.51	0.67
避難指示	居住制限区域, 森林	0.40	0.55	0.75
区域内	居住制限区域, 森林以外	0.41	0.58	0.77
	避難指示解除準備区域, 森林	0.42	0.62	0.84
	避難指示解除準備区域, 森林以外	0.24	0.61	0.85

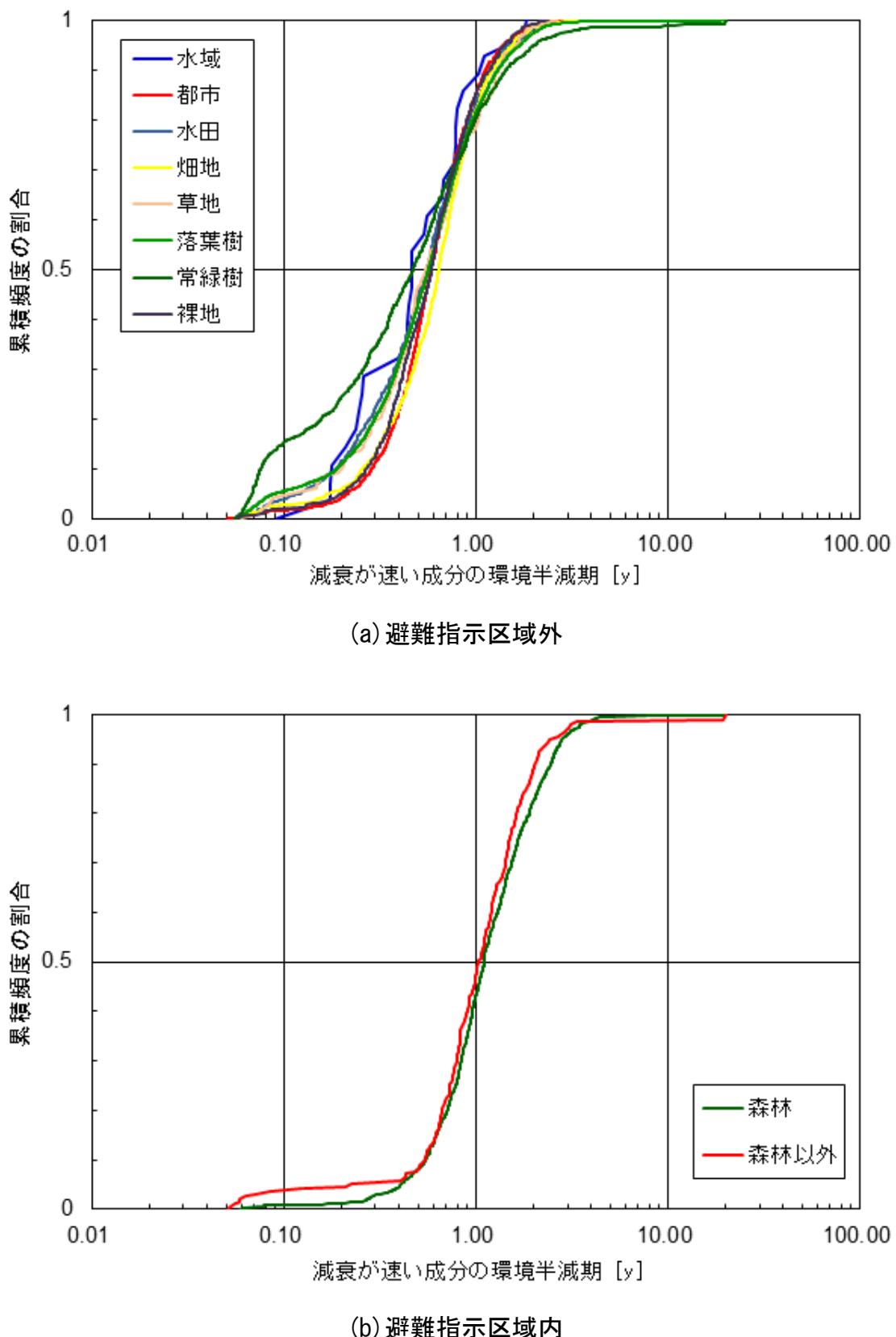
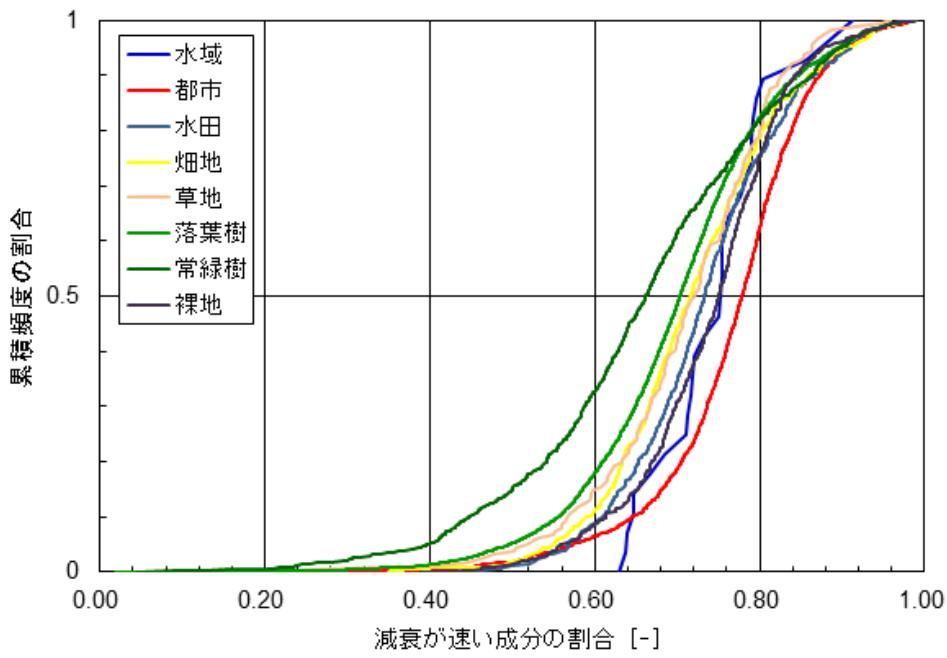
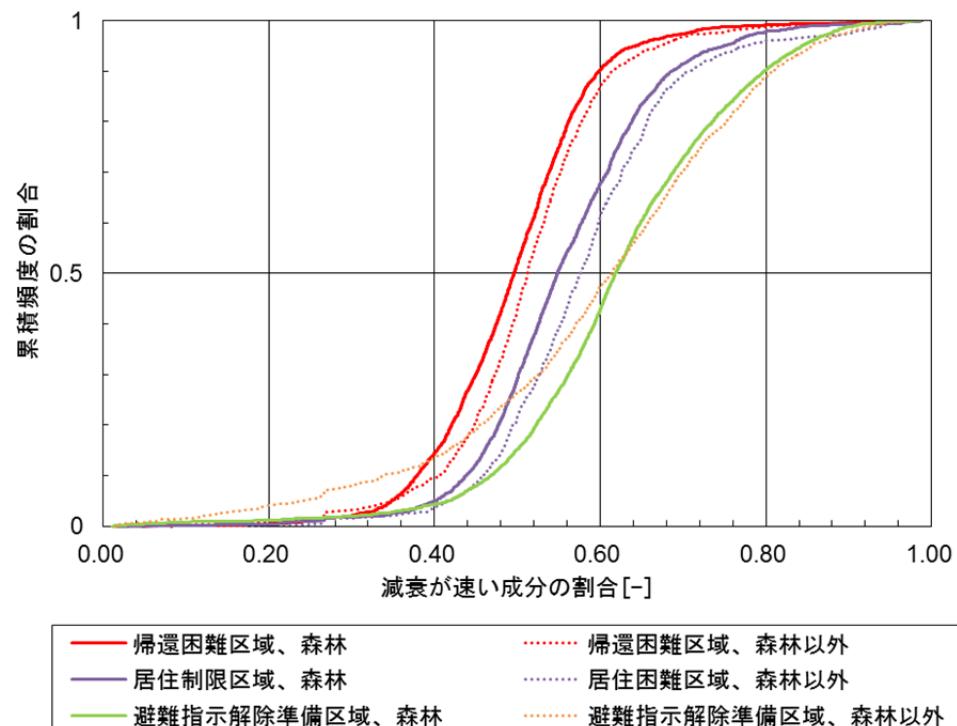


図-1 第1次から第9次走行サーベイによる空間線量率測定データを用いて導出した減衰が速い成分の環境半減期の累積頻度分布



(a) 避難指示区域外



(b) 避難指示区域内

図-2 走行サーベイによる空間線量率測定データを用いて導出した
減衰が速い成分の割合の累積頻度分布

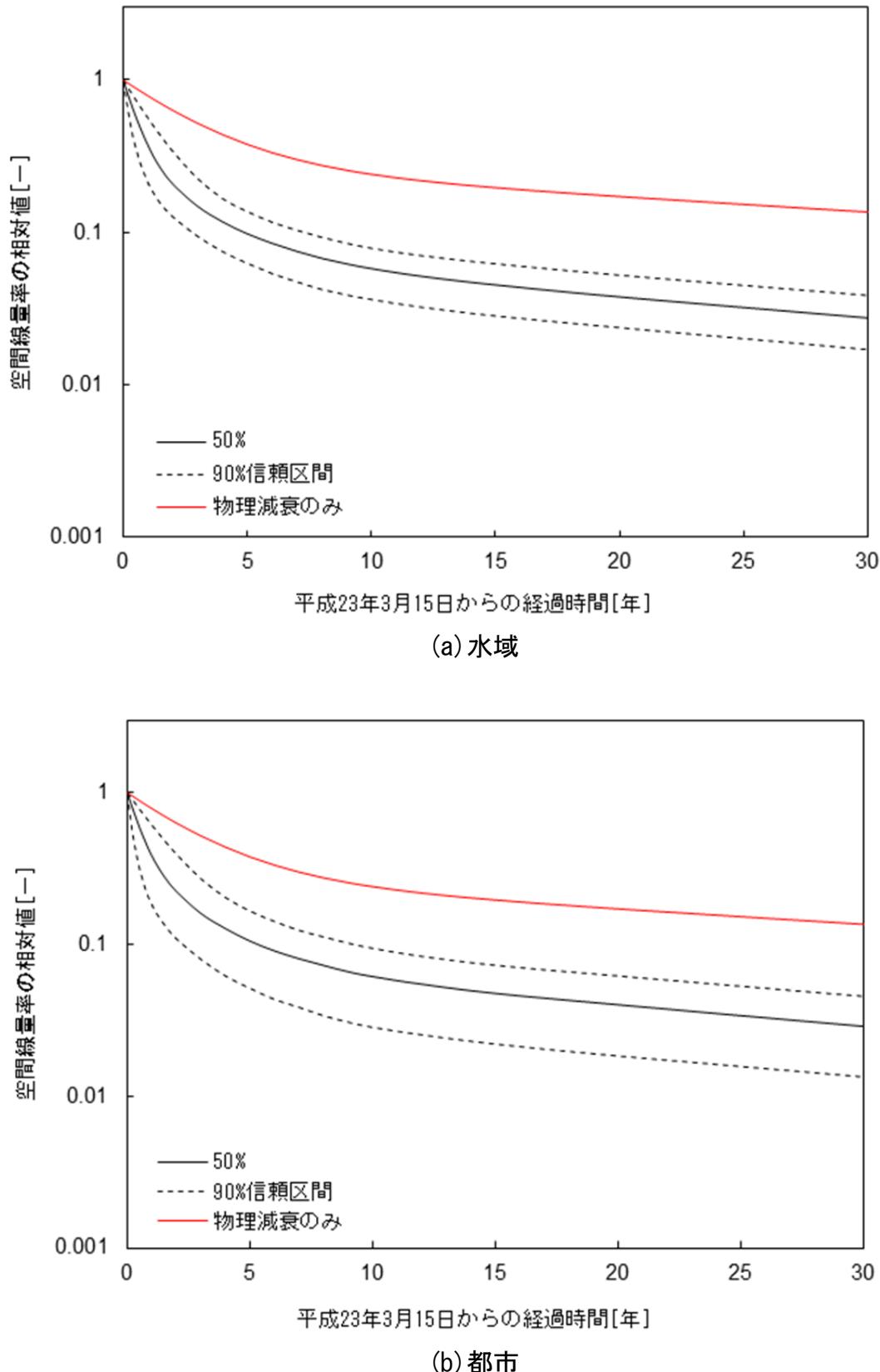
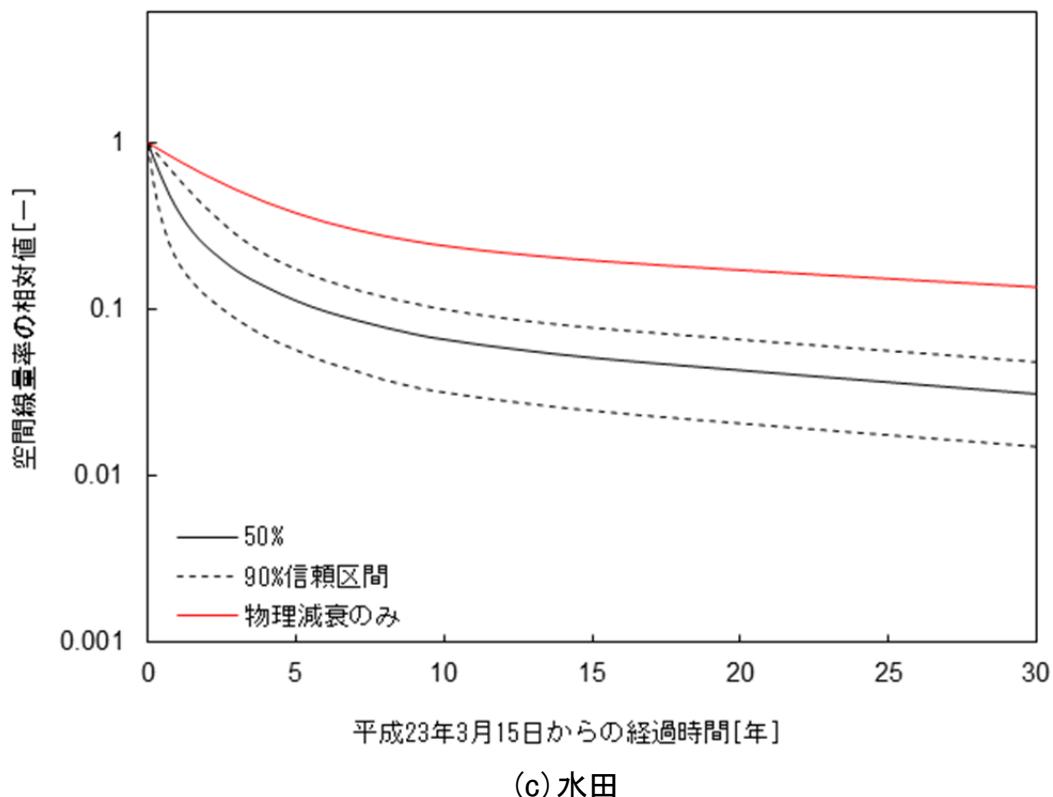
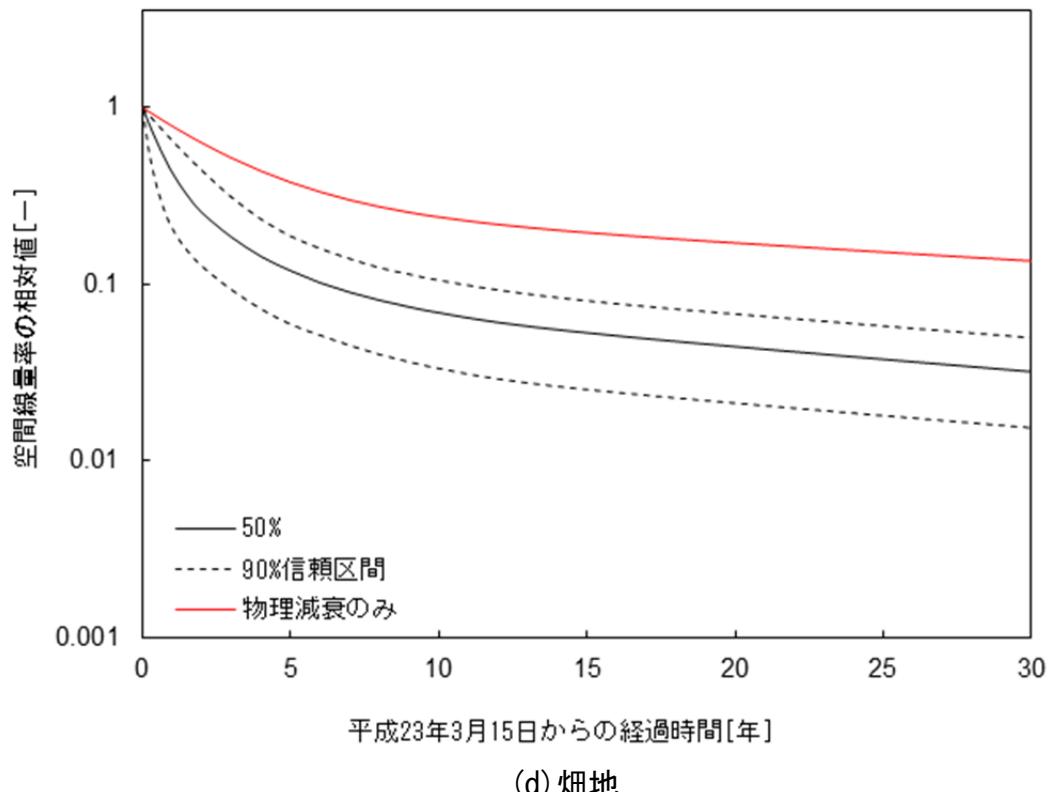


図-3 空間線量率の相対値の経時変化
(避難指示区域外(1/4))

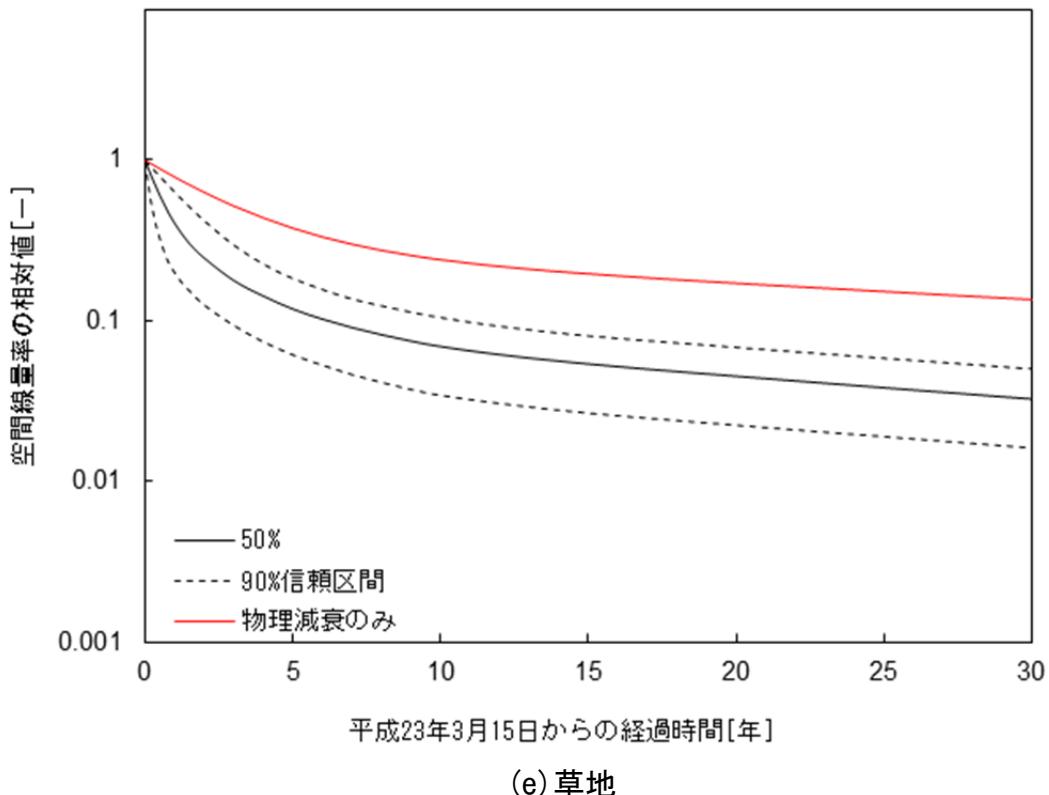


(c) 水田

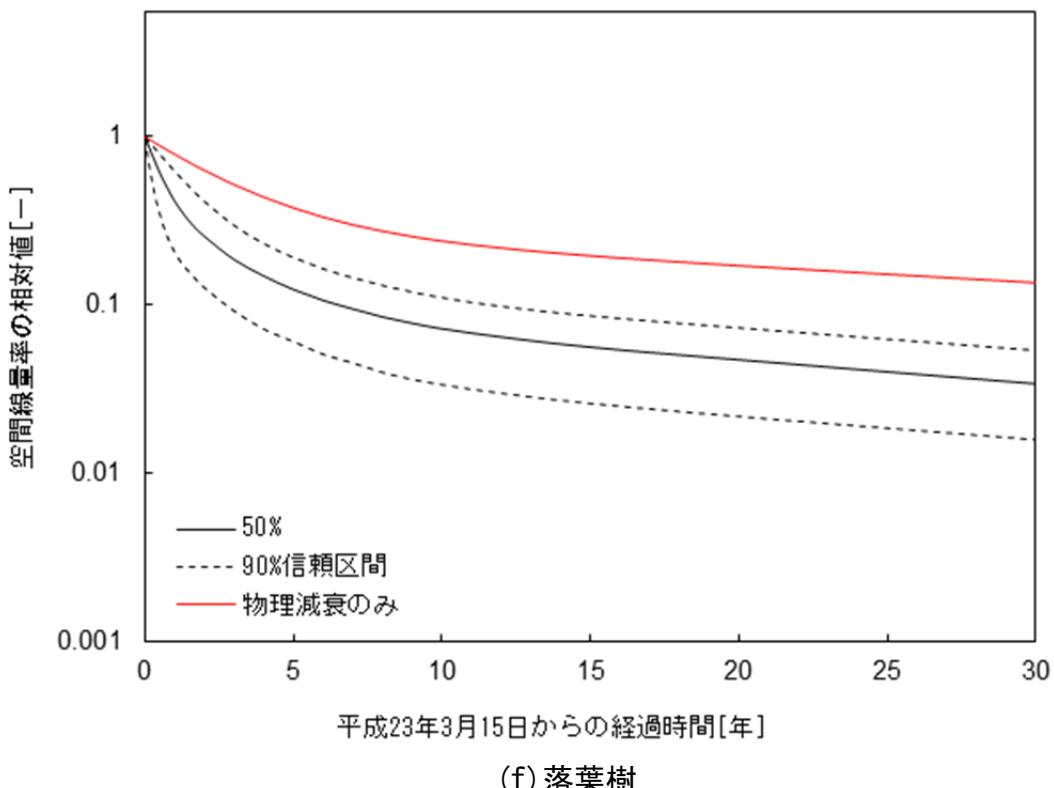


(d) 畠地

図-3 空間線量率の相対値の経時変化
(避難指示区域外 (2/4))

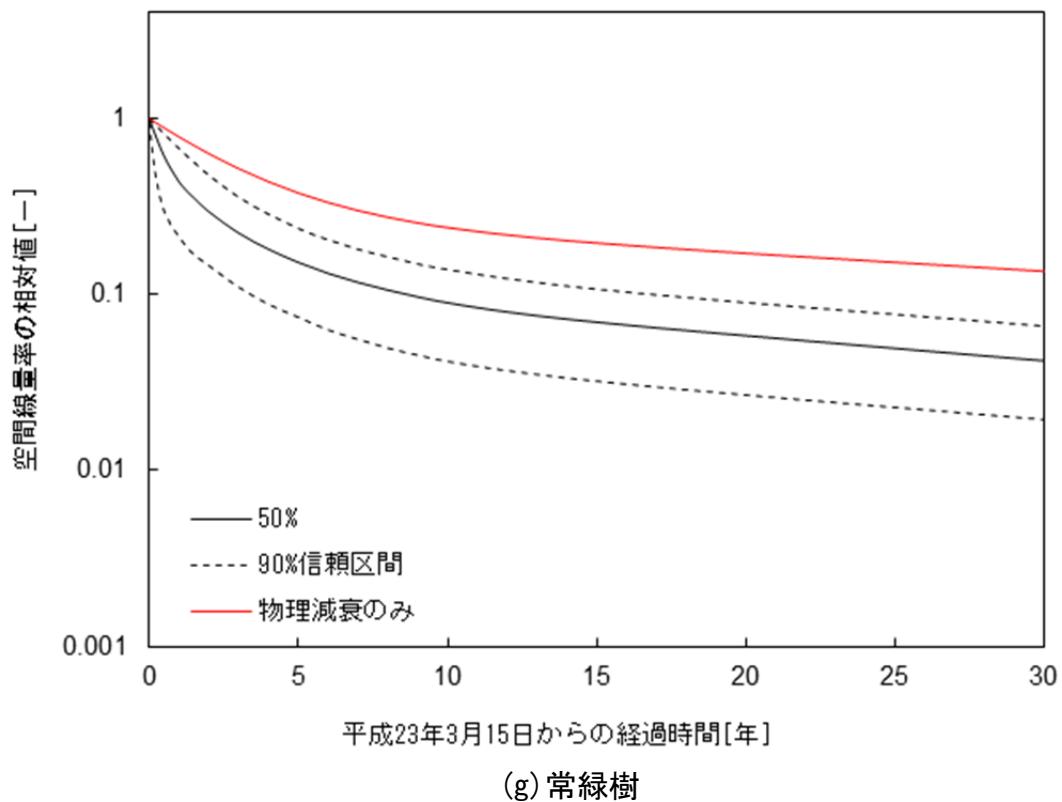


(e) 草地

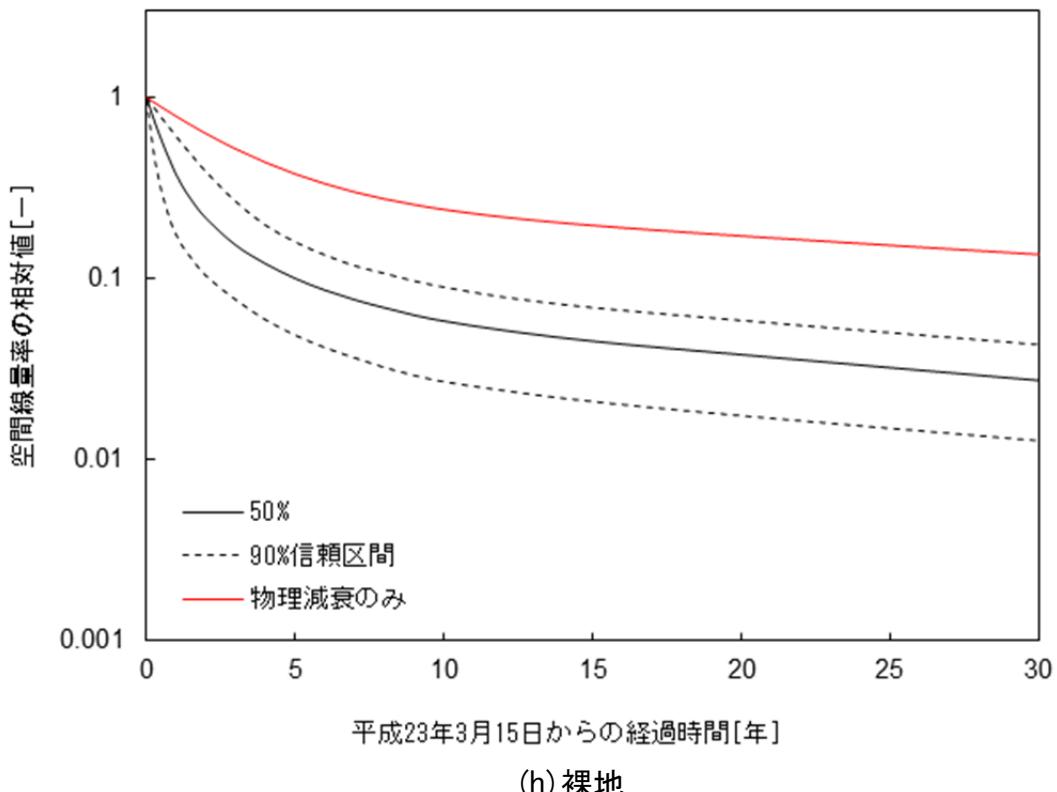


(f) 落葉樹

図-3 空間線量率の相対値の経時変化
(避難指示区域外(3/4))



(g) 常綠樹



(h) 裸地

図-3 空間線量率の相対値の経時変化
(避難指示区域外(4/4))

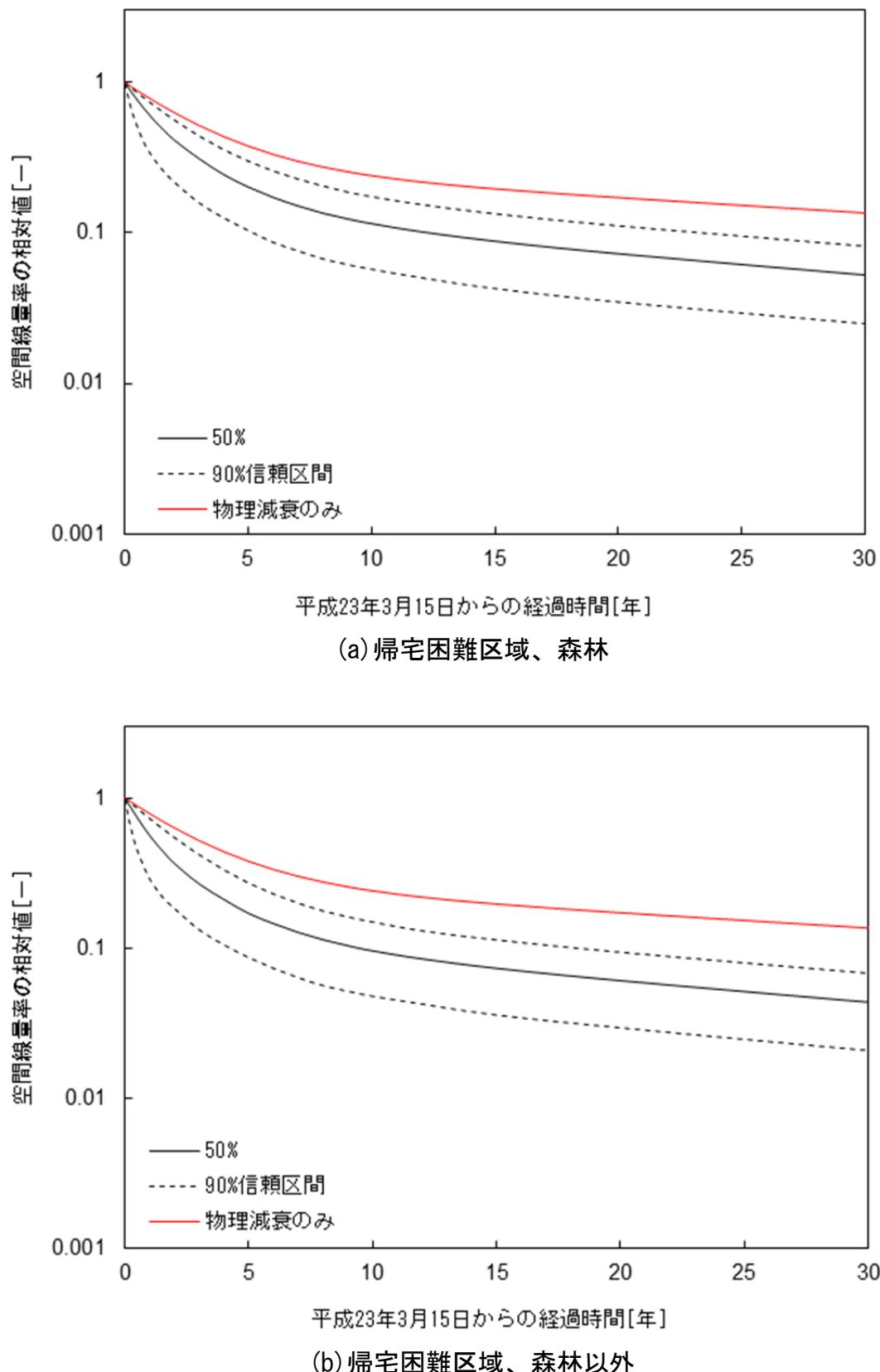


図-4 空間線量率の相対値の経時変化
(避難指示区域内(1/3))

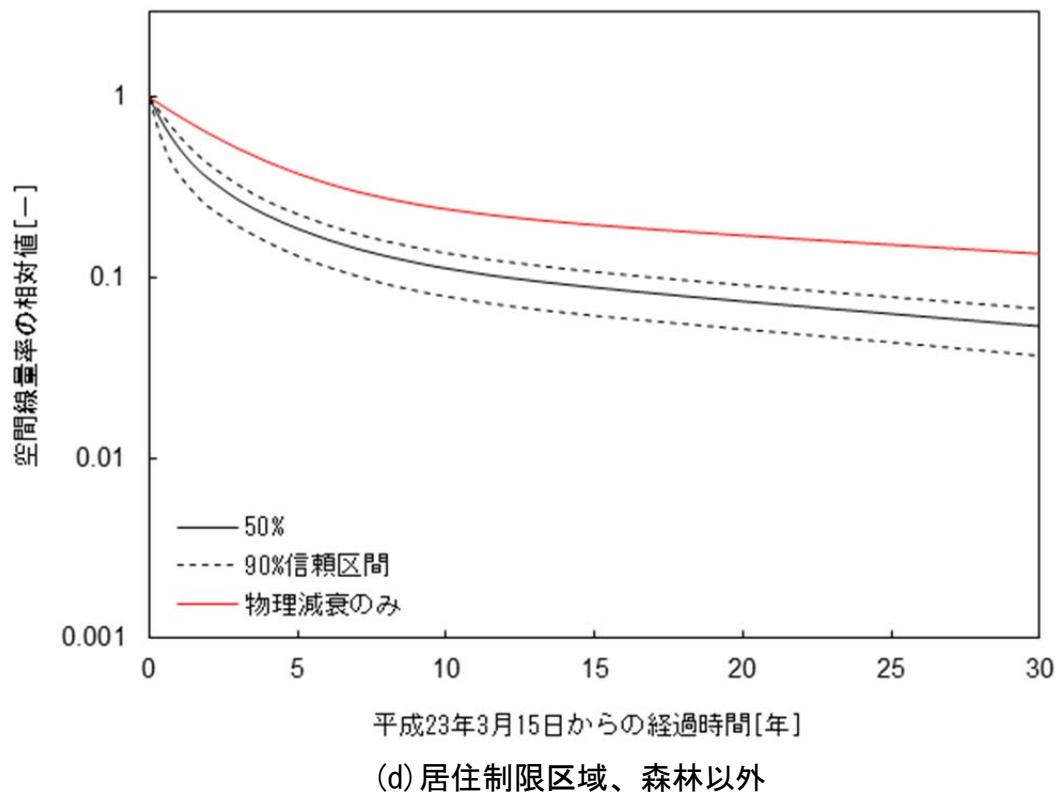
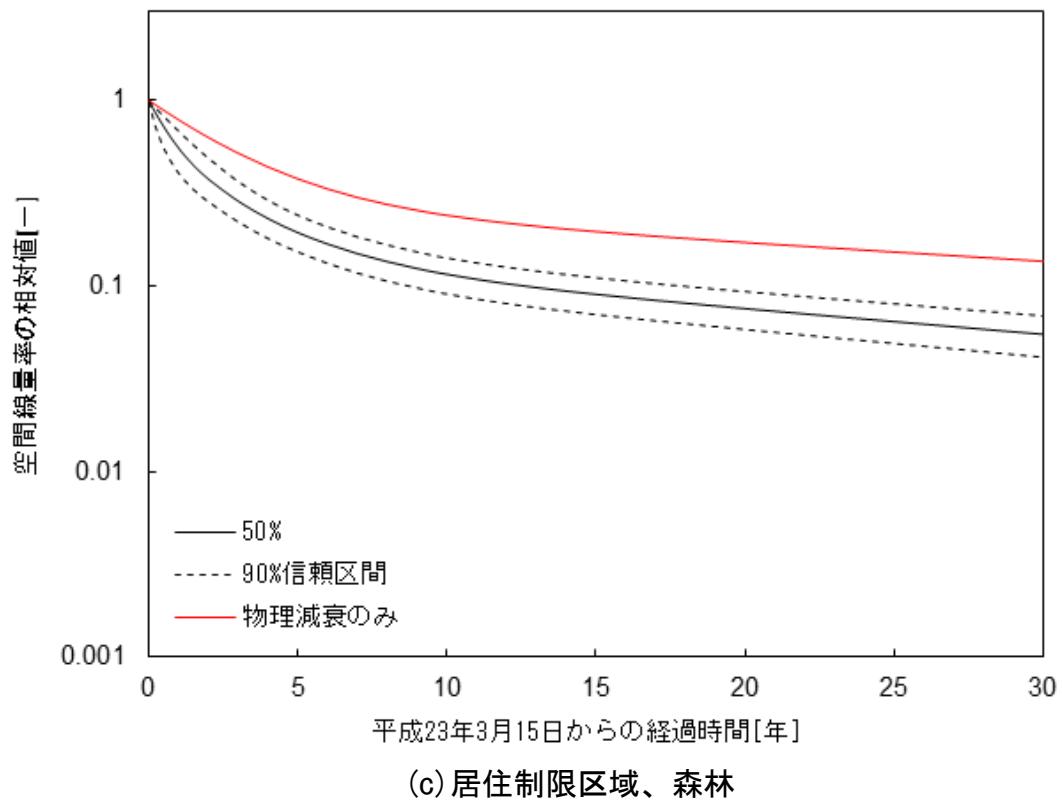


図-4 空間線量率の相対値の経時変化
(避難指示区域内(2/3))

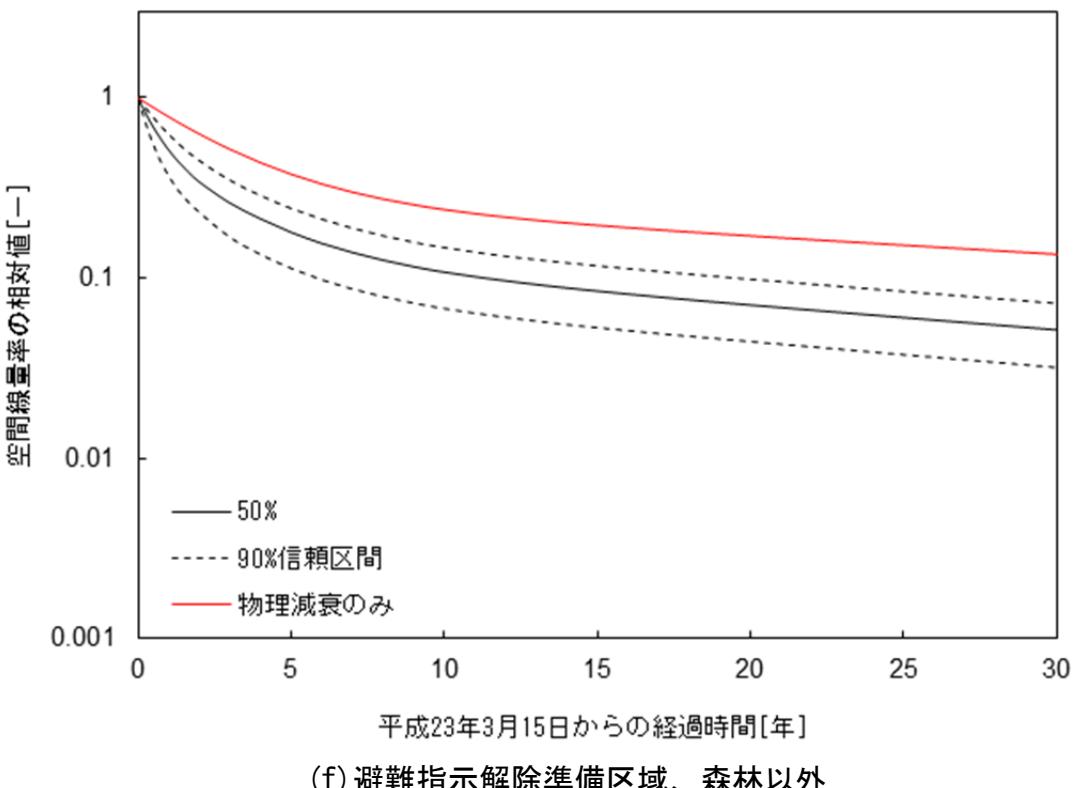
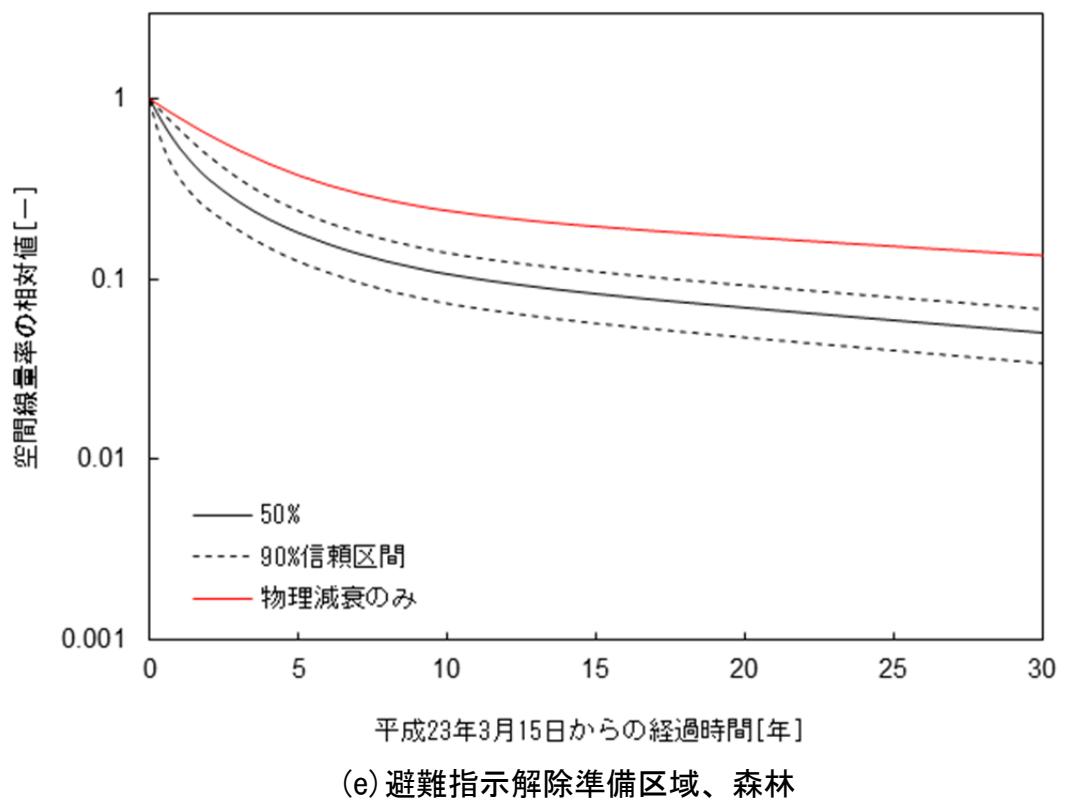


図-4 空間線量率の相対値の経時変化
(避難指示区域内 (3/3))

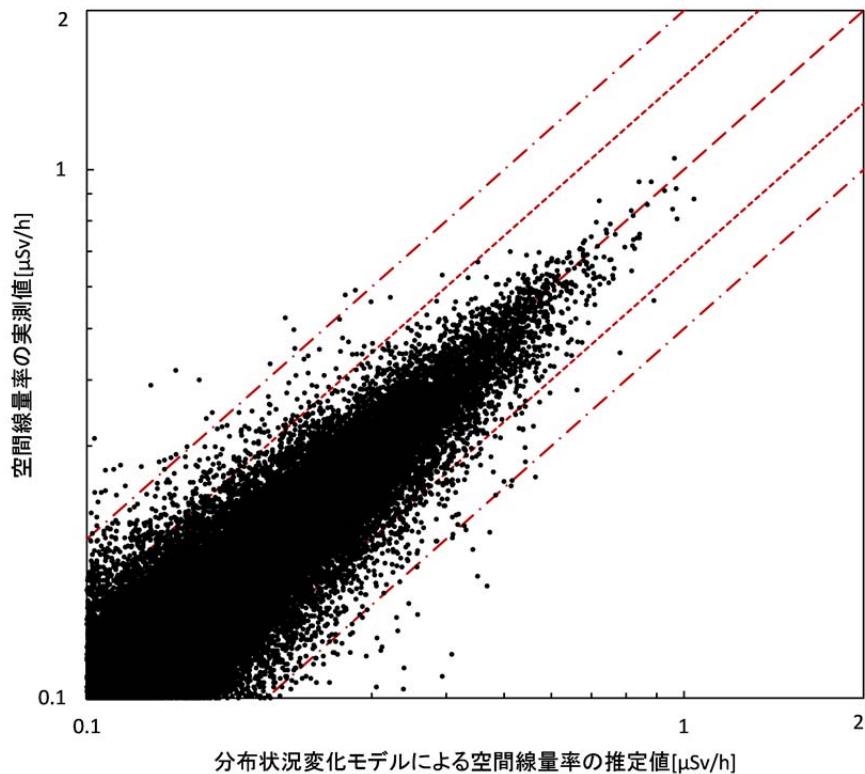


図-5 分布状況変化モデルによる推定値（第9次走行サーベイ（平成26年11月4日から12月5日）の空間線量率測定データを入力とし、分布状況変化モデルにより算出された第10次走行サーベイ（平成27年6月29日から8月4日）の時点の推定値）と第10次走行サーベイの空間線量率測定データとの比較

（赤線は、図中上から、推定値と実測値の関係が、1:2、2:3、1:1、3:2、2:1 である場合を示す）