

空間線量率の統合評価

1. 調査目的

本事業においては、これまでに数種類の異なる測定方法を用いて空間線量率分布の大規模調査を行ってきた。本事業外においても航空機モニタリングが継続的に行われ、広域の空間線量率分布マップが作成されてきた。各測定方法はそれぞれの特徴を有しており、異なる性質を有する空間線量率情報が蓄積されてきている。これらの空間線量率分布情報を統合することにより、対象領域全域に対する精度と空間分解能の高いマップを作成することが可能である。

ローレンスバークレー国立研究所(LBNL)のMurakamiらは階層ベイズ統計を応用し、異なる方法で測定された空間線量率の分布マップを統合する手法を開発し、福島市周辺の狭い地域を対象にしてマップ統合が適切に行われることを検証した¹。昨年度、村上らが開発した統合手法を避難指示区域全域に適用し、歩行サーベイ、走行サーベイ、航空機モニタリングの結果を統合し、人間の生活する場を対象とする歩行サーベイを全域で行ったことを想定した統合空間線量率マップを作成した²。今年度は、80 km 圏内全域を対象とした統合空間線量率マップを作成することとした。本報告では、統合のための基本情報である各測定データ間の相関関係、歩行サーベイ結果の自己相関関係(バリオグラム)及び検証結果とともに統合したマップの結果を示す。

2. 調査内容

(1) 異なる測定方法による空間線量率の特徴

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モニタリングの結果を統合するが、これらはそれぞれ異なる特徴を有する。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る、空間線量率の場所により変化を詳細に捉えた測定が可能である等の特徴を持つが、人間の歩行によるため80 km 圏内の全てをカバーした測定は不可能である。走行サーベイでは、KURAMAを利用することにより広範囲を対象に膨大な量のデータを地上で取得することが可能であり、得られた大量データは統計解析による空間線量率分布の特徴解明に活用することができる。しかし、道路のない地域の測定は行えない。航空機モニタリングは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ず、また空間線量率には系統的な誤差が含まれる^{1,2}。一方、測定対象とする地域全域をカバーできるという他にない大きな特徴を有している。これら異なる測定手法により得られたデータの特徴を生かしつつ、空間線量率データを統合して精度と空間分解能が高い空間線量率マップを作成する。高い位置分解能と精度を持つがカバーできる範囲が限られる歩行サーベイ、位置分解能と精度は劣るが対象領域全域をカバーできる航空機モニタリング、その中間的な性質を持つ走行サーベイの各データを統合する。

(2) 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用いて、歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機モニタリングで得られた空間線量率分布を統合したマップを作成するとともに、統合された空間線量率マップの信頼区間を明らかにする。原子力機構と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手法¹を応用する。

統合の概略は、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 z_w , 走行サーベイの測定データセット z_c , 航空機モニタリングの測定データセット z_A が得られた時に、最も信頼のおける空間線量率分布 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で表した条件確率 $p(y|z_w, z_c, z_A)$ が最大になるような y 及びその分散を求めるものである。 $p(y|z_w, z_c, z_A)$ は、 z_w, z_c, z_A が観測されたという条件で空間線量率分布が y である確率を意味する。 $p(y|z_w, z_c, z_A)$ 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。

$$p(y|z_w, z_c, z_A) \propto p(z_A|y) p(z_c|y) p(y|z_w) \quad (1)$$

$p(z_A|y)$: 空間線量率分布が y の時に z_A が観測される確率

$p(z_c|y)$: 空間線量率分布が y の時に z_c が観測される確率

$p(y|z_w)$: z_w が観測された時に空間線量率が y である確率

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）であると想定する。すなわち、歩行サーベイの測定データが存在する地点の空間線量率はその値を用い、測定データが存在し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ことになる（図-1 参照）。

(1) 式の条件を満たした 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。 $p(z_A|y)$ 及び $p(z_c|y)$ を規定するデータモデルは、航空機モニタリング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決定される。歩行サーベイのデータがある地点においては、そのデータが y そのものの要素になるからである。

$p(y|z_w)$ を規定するプロセスモデルは、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データの相関関係が距離によりどのように減少するかを解析する。データモデル及びプロセスモデルの基となる環境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わかっているので、土地利用状況別に統計解析を実施しその結果を用いる。これらの関係を利用しながら確率が最大となる y とその信頼区間（分散）を推定する作業を行う。

(3) 対象地域と測定データの時期

今年度は、昨年度の避難指示解除から対象地域を広げて 80 km 圏内全域に対するマップ統合を実施した。図-2 は対象地域の土地利用状況³を表しているが、黄色で示した森林が大半の地域を占めていることがわかる。図-3 は、航空機モニタリング、走行サーベイ及び歩行サーベイで得られた空間線量率マップ、並びにこれらを単純に重ねた空間線量率マップを示している。今回の統合では、空間線量率はいずれも平成 28 年秋に測定された結果を使用した。過去に行った空間線量率予測モデル開発における解析で、各測定結果間の関係が避難指示区域内と外で異なることが明らかになっているため、避難指示区域内外を分割した解析を行った。

3. 結果と考察

(1) 走行サーベイと歩行サーベイの比較

$p(z_c|y)$ 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との空間線量率を土地利用別に比較した。避難指示区域内に関する比較を図-4 に、区域外に関する比較を図-5 にそれぞれ示す。青い丸は走行サーベイと歩行サーベイとで測定地点の距離が最も近い

データ同士を比較した結果、ピンクの丸は走行サーベイの 100 m メッシュ内に含まれる、歩行サーベイの 20 m メッシュデータ全てを単純平均したものと比較した結果をそれぞれ示す。避難指示区域内外のいずれの土地利用状況においても、歩行サーベイの結果が走行サーベイの結果に比べてわずかに高めに出る傾向にある。区域内では非常に良い相関関係が見られるのに対して、区域外ではデータのばらつきが大きくなり相関関係も相対的に弱くなる傾向にある。区域内外いずれにおいても平均値を計算することで相関係数が改善される。この関係をもとに、走行サーベイによる空間線量率と 100 m メッシュ内で平均した歩行サーベイの空間線量率と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た。

(2) 航空機モニタリングと歩行サーベイの比較

$p(z_a|y)$ のデータモデルを決めるために、避難指示区域内の航空機モニタリングと歩行サーベイとの空間線量率を土地利用別に比較し、避難指示区域内の結果を図-6 に区域外の結果を図-7 にそれぞれ示した。青い丸は航空機モニタリングと歩行サーベイで測定地点の距離が最も近いデータを比較した結果、ピンクの丸は距離の関数で歩行サーベイデータに加重して平均し航空機モニタリングデータと比較した結果をそれぞれ示す。加重は、航空機モニタリング測定データに対する地上汚染の寄与割合が水平距離によりどのように変化するかを、Malins らのシミュレーション結果⁴を基に考慮して行った。航空機モニタリングの結果は走行サーベイの結果よりも高めに出ていることがわかる。全般的に良い相関関係が見られるが、区域外の市街地ではデータの相関が他のケースに比べて低い。これは、人間が生活する市街環境では場所による空間線量率の変動が大きいことを示唆している。加重平均値を計算することで相関係数が明らかに改善する。この結果をもとに、航空機モニタリングによる空間線量率と加重平均した歩行サーベイの空間線量率と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ることとした。

(3) 歩行サーベイ結果の空間パターンの解析

$p(y|z_w)$ 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パターンの解析（バリオグラム解析）を行った。バリオグラム解析結果を3つの土地利用状況別に異なる色を用いて、避難指示区域内及び区域外に対して図-8 と図-9 にそれぞれ示した。セミバリアンスは2点間で観測される空間線量率の自己相関性の指標で、セミバリアンスが大きくなるほど空間線量率が同じ値を示す確率が小さくなる。一定の距離を越えるとセミバリアンスはほぼ一定値になり、それ以遠の空間線量率は相関を持たない。市街地や農地では森林に比べて空間線量率の場所によるばらつきが大きい。避難指示区域内外を比べると、避難指示区域内のほうが遠い距離まで自己相関性が高い傾向が見られる。いずれも人間活動の影響が線量率のばらつきに影響を与えていることを示唆する結果となっている。このグラフの形状を指数関数で近似してプロセスモデルとして用いた。

(4) 統合結果

航空機モニタリング、走行サーベイ及び歩行サーベイにより測定した 80 km 圏内全域の空間線量率を統合したマップを図-10 に示す。区域内外それぞれに対して、上記の別々に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しこれを合成したものである。本統合では 80 km 圏内全域において 50 m メッシュ毎の空間線量率データが得られており、図-10 はこれをマップ化したものである。図-3 に示された元のマップと比べると、系統的に高めに出ていた航空機モニタリングの結果が全体的に補正されるとともに、細かな空間線量率の分布が再現されている。

(4) 統合過程の検証

今回の統合が適切に実施されていることを確認するために、避難指示区域内外それぞれにおいて土地利用状況ごとの検証を行った。それぞれのケースで 100 の歩行サーベイデータをランダムに削除した上でマップ統合を行い、統合により推定された結果と削除したデータとを比較した。その結果を図-11 と図-12 に示す。推定値は相関図上で 1 対 1 の近辺に分布しており、全体的に統合が適切に行われたことが確認できた。

4. まとめ

階層ベイズ統計手法を応用し 80 km 圏内全域を対象として、航空機モニタリング、走行サーベイ、歩行サーベイにより平成 28 年秋に取得した空間線量率分布データを統合し、統合マップを作成した。統合の基本的な考え方としては、歩行サーベイを対象領域全域で実施したと想定した場合に得られるであろうマップを作成することを目指した。避難指示区域内外で測定データ間の相関関係が異なることを考慮し、区域内と区域外のデータを分けて相関解析を行い、それぞれの結果を用いて統合を行った。統合により、地上の細かな空間線量率分布を反映しつつ全体的な航空機モニタリングの偏りを補正した統合マップが得られた。歩行サーベイ結果の一部を検証用データとして用い、それを除いて得た統合マップと検証用データが整合することが示されたことにより、今回の統合が適切に行われたことを確認した。

参考文献

- 1) Haruko Murakami Wainwright, Akiyuki Seki, Jinsong Chen, Kimiaki Saito, A multiscale Bayesian data integration approach for mapping air dose rates around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Journal of Environmental Radioactivity, 167, 62–69 (2017).
- 2) Wainwright HM, Seki A, Chen J, Saito K: A multiscale Bayesian data integration approach for mapping air dose rates around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant-17166. Proceeding of WM2017 Conference, March 5–9, 2017, Phoenix, Arizona, USA (2017).
- 3) Takahashi, M., Nasahara, K. N., Tadono, T., Watanabe, T., Dotsu, M., Sugimura, T., & Tomiyama, N., JAXA High Resolution Land-Use and Land-Cover Map of Japan. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International (pp. 2384–2387). IEEE, 2013.
- 4) Malins A, Okumura M, Machida M, Takemiya H, Saito K: Field of view for environmental radioactivity. Proceedings of the 2015 International Symposium on Radiological Issues for Fukushima's Revitalized Future, Paruse Iizaka, Fukushima City, Japan, May 30–31, 2015 (2015).

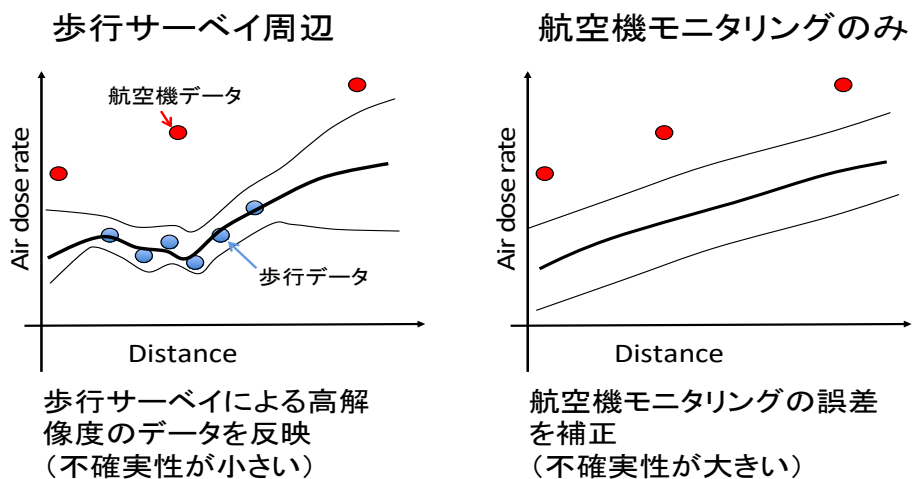


図-1 データ統合の概念図

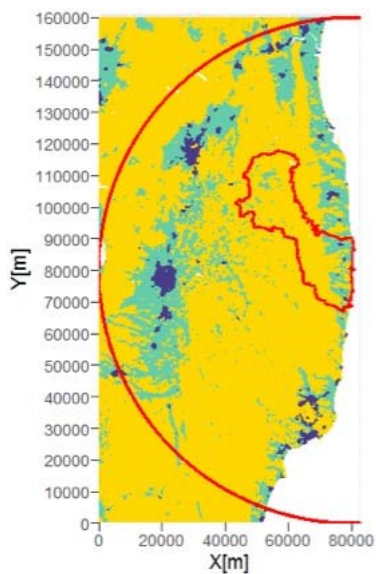


図-2 80 km 圏内における土地利用状況
 青：市街地 緑：農地 黄色：森林

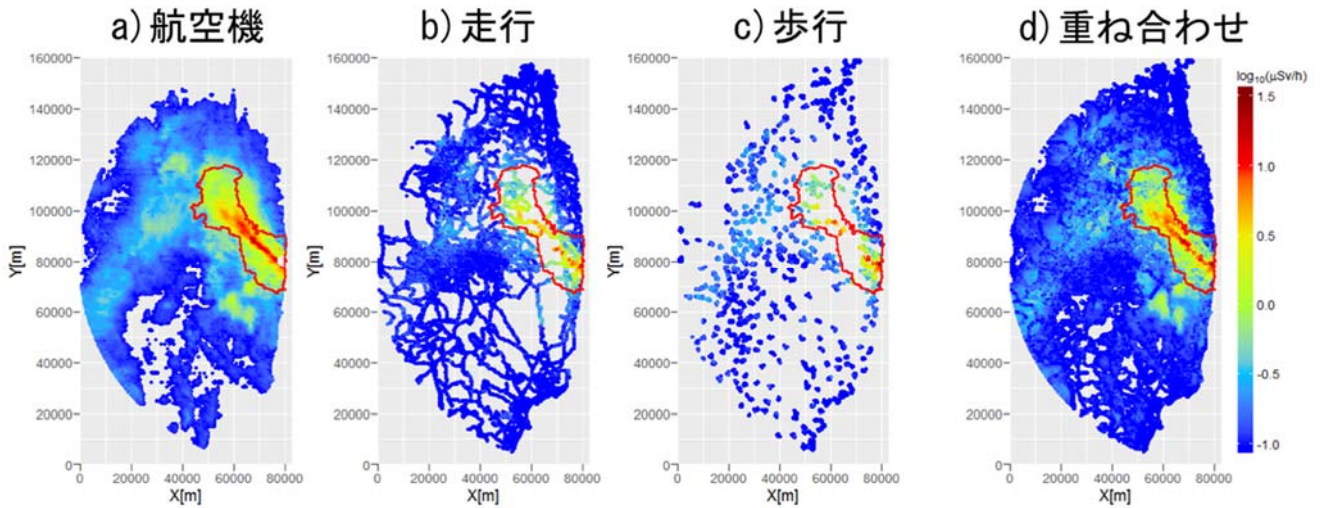


図-3 80 km 圏内における航空機モニタリング、走行サーベイ、歩行サーベイによる空間線量率マップ及びこれらを単純に重ねた空間線量率マップ

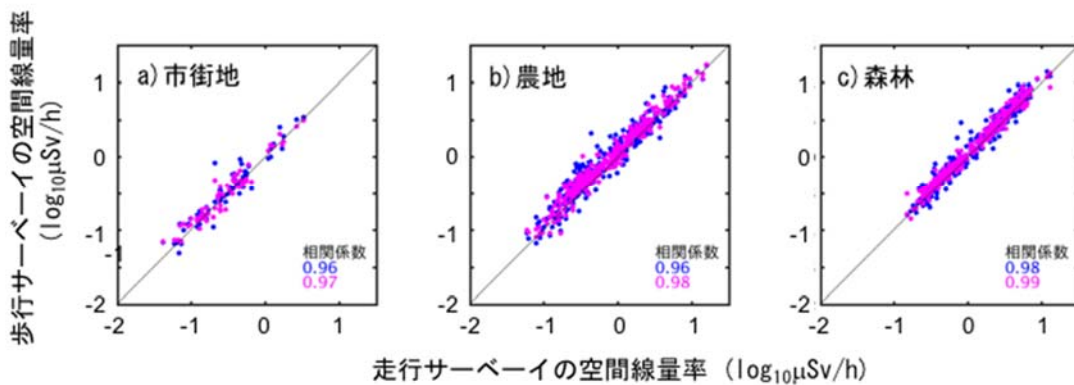


図-4 避難指示区域内における走行サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の比較
 青い丸は測定地点間の距離が近いデータ同士の比較を、ピンクの丸は
 走行サーベイの100 mメッシュ内に含まれる20 mメッシュ歩行サーベイ結果全てを
 単純に平均した値との比較を示している。それぞれのケースに対する相関係数を色分け
 して図中右下に示す。直線は $y=x$ の関係に相当する。

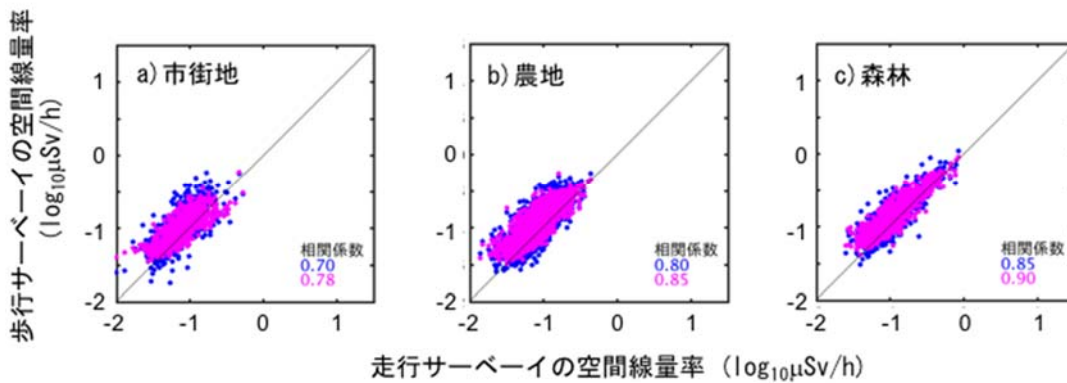


図-5 避難指示区域外における走行サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の比較
 青い丸は測定地点間の距離が近いデータ同士の比較を、ピンクの丸は
 走行サーベイの 100 m メッシュ内に含まれる 20 m メッシュ歩行サーベイ結果全てを
 単純に平均した値との比較を示している。それぞれのケースに対する相関係数を色分け
 して図中右下に示す。直線は $y=x$ の関係に相当する。

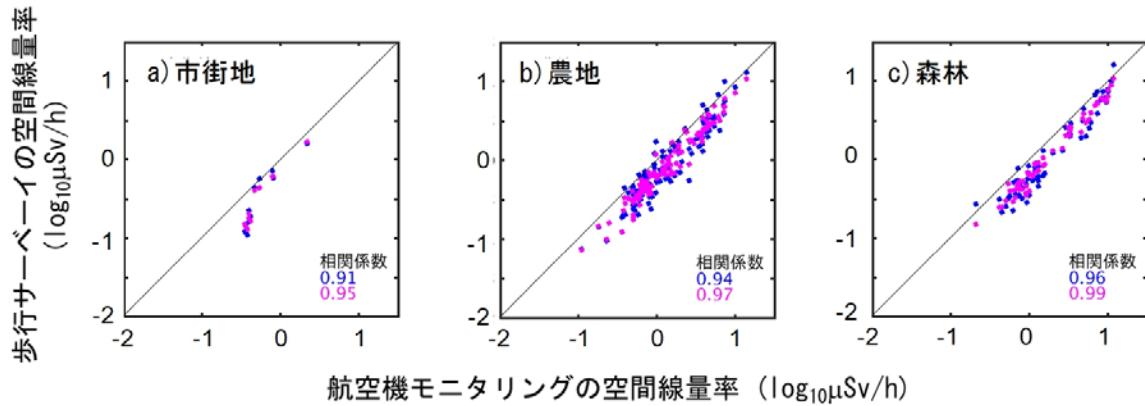


図-6 避難指示区域内における航空機モニタリングと歩行サーベイによる空間線量率の比較

青い丸は測定地点間の距離が近いデータ同士の比較を、
 ピンクの丸は距離の関数で加重平均した歩行サーベイ結果と
 航空機モニタリング結果との比較を示している。

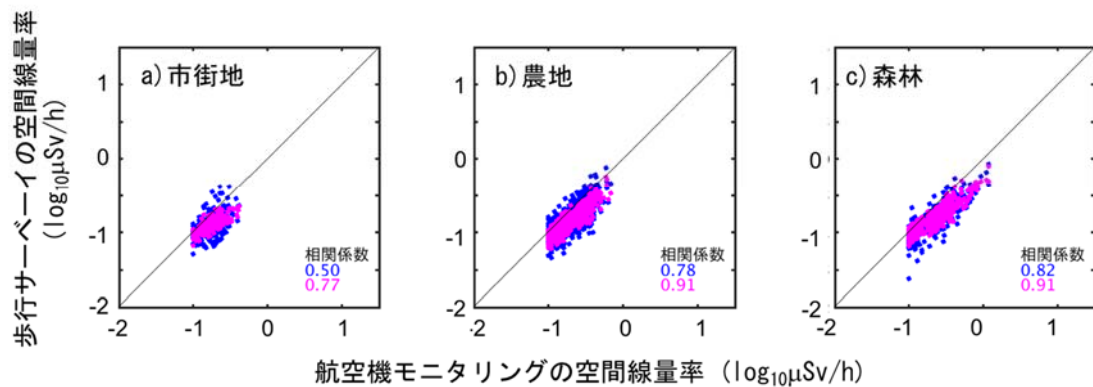


図-7 避難指示区域外における航空機モニタリングと歩行サーベイによる空間線量率の比較

青い丸は測定地点間の距離が近いデータ同士の比較を、
 ピンクの丸は距離の関数で加重平均した歩行サーベイ結果と
 航空機モニタリング結果との比較を示している。

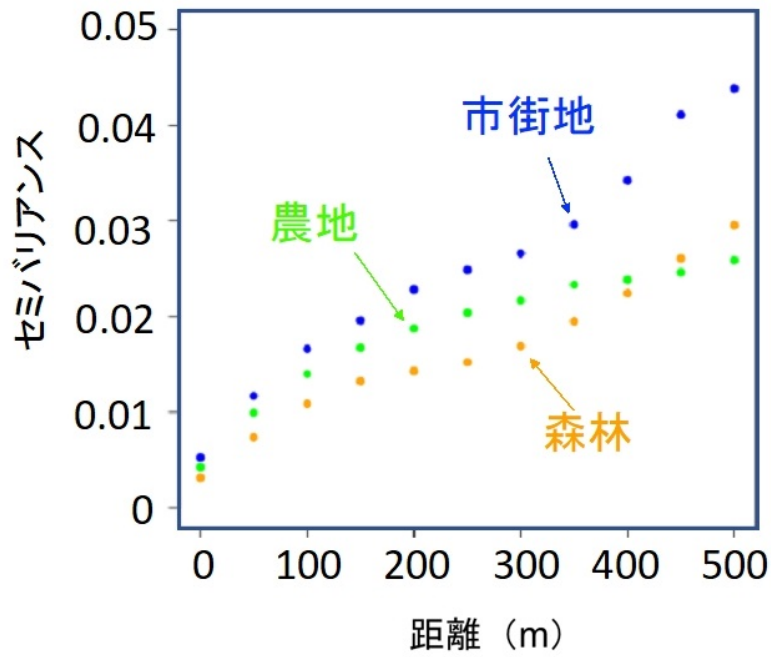


図-8 避難指示区域内における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム

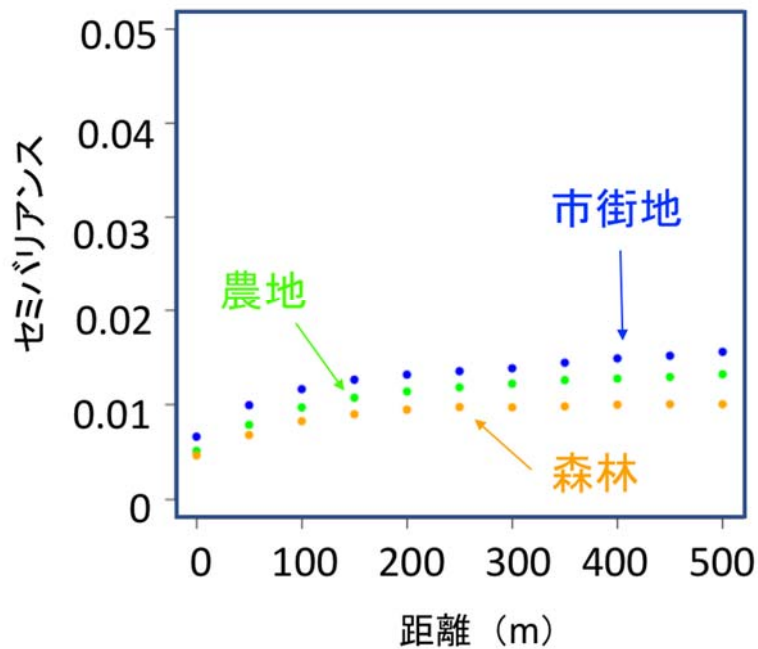


図-9 避難指示区域外における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム

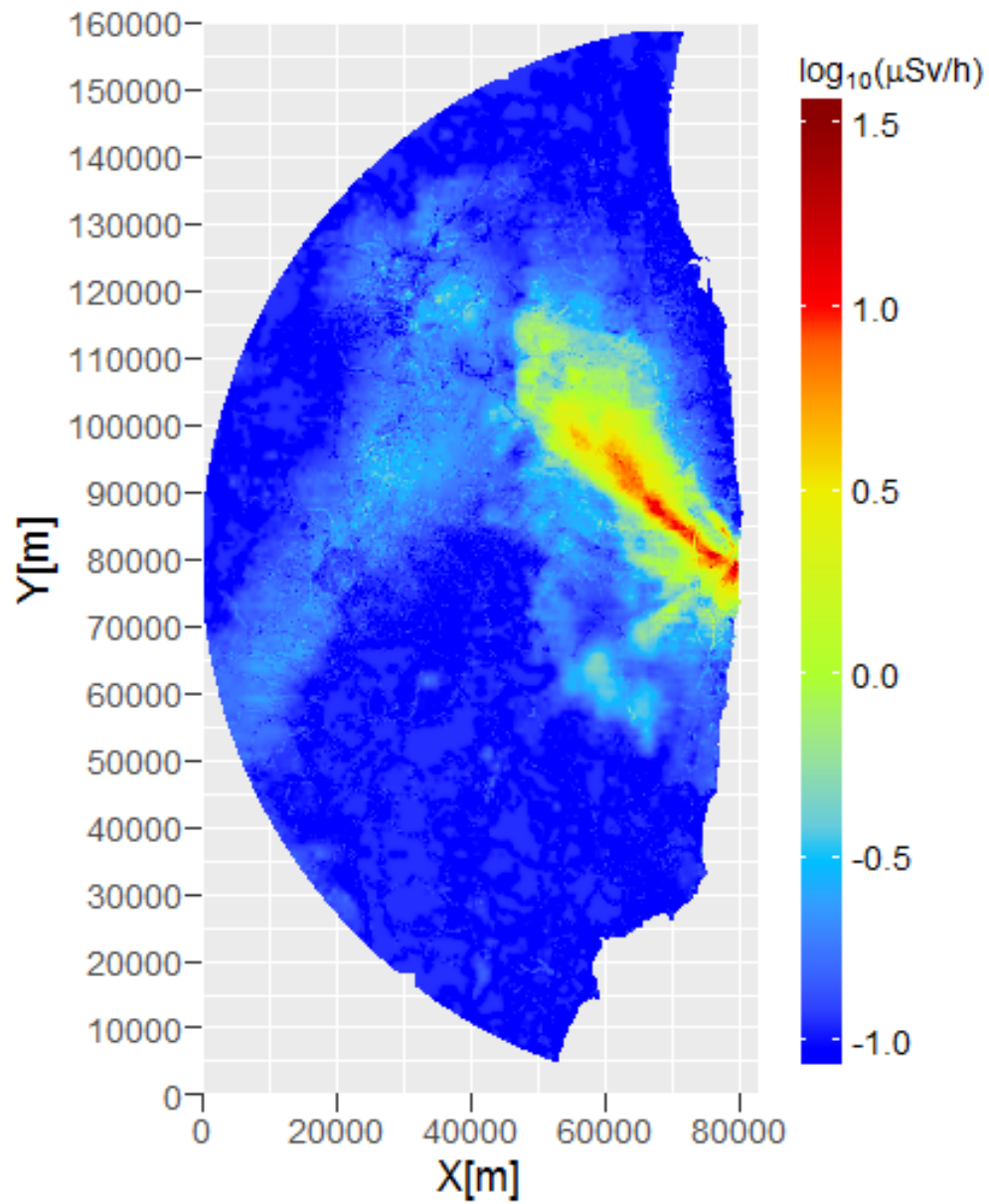


図-10 80 km 圏内全域を対象として統合された空間線量率マップ

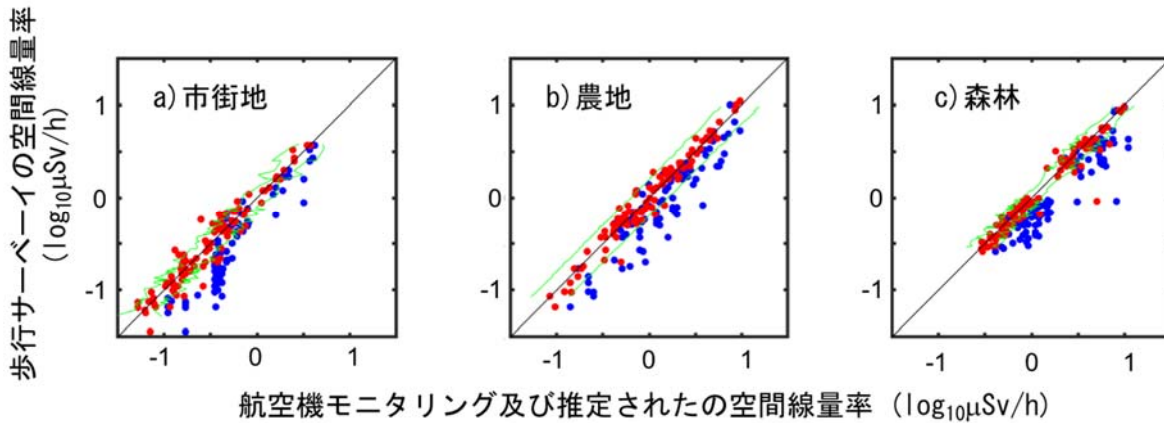


図-11 避難指示区域内を対象とした統合過程の検証結果
 青い丸は航空機モニタリングと歩行サーベイ結果の比較を、
 赤い丸は統合により推定された結果と歩行サーベイ結果の比較を、
 緑の線は統合の信頼区間をそれぞれ示している。

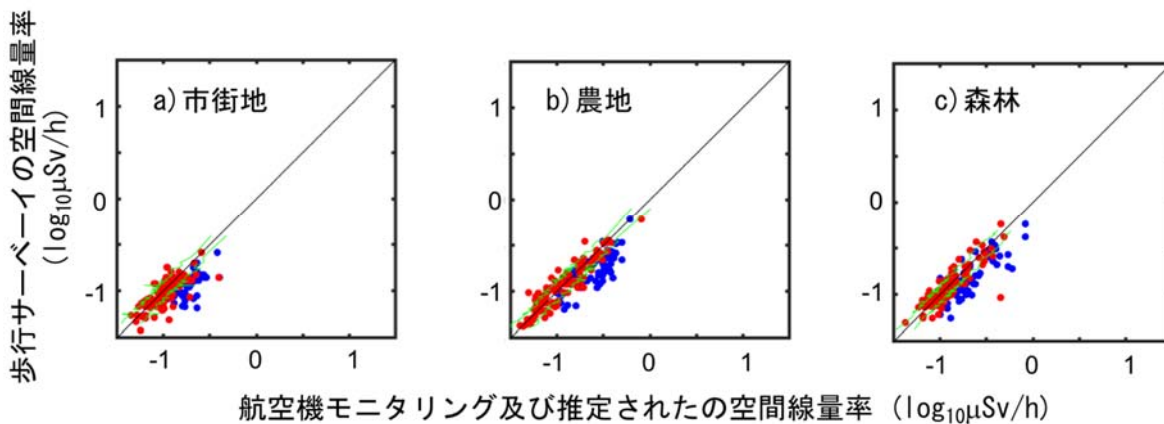


図-12 避難指示区域外を対象とした統合過程の検証結果
 青い丸は航空機モニタリングと歩行サーベイ結果の比較を、
 赤い丸は統合により推定された結果と歩行サーベイ結果の比較を、
 緑の線は統合の信頼区間をそれぞれ示している。