

空間線量率の統合評価

齋藤公明、三上智、安藤真樹、関暁之、武宮博（原子力機構）
村上治子、Jinsong Chen（LBNL）

1. 調査目的

分布状況調査においては、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。分布状況調査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。

ローレンスリバモア国立研究所(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ここでは村上らが開発した統合手法を福島第一原発周辺のより広い地域に適用し、分布状況調査及び航空機モニタリングで得られた空間線量率を統合したマップを作成することを目的とする。今年度は、避難指示区域内を対象に、走行サーベイ、歩行サーベイ、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空間線量率マップを作成する。

2. 調査内容

(1) 異なる測定方法による空間線量率の特徴

分布状況調査では平成23年6月に開始した第1次調査から継続して定点測定及び走行サーベイを実施してきた。さらに、平成24年には福島第一原発近傍での無人ヘリコプターによる測定を、平成25年には歩行サーベイをそれぞれ開始し、その後継続して行ってきた。また、分布状況調査外のプロジェクトにおいて、事故直後から航空機モニタリングが実施されてきている。これら異なる測定方法はそれぞれの特徴を有し、取得された空間線量率も異なる性質の情報を含む。

サーベイメータを用いて毎回同一地点で実施する定点測定は、土地の状況が経時的にあまり変化しない地点における、精度の高い基準となる空間線量率を提供する。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所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有用に用いられる。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高空での測定を行うため数100 mの広範囲からのガンマ線の平均値を測定することになり、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。一方、測定を行いたい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。無人ヘリコプターを用いた測定では、測定高度が相対的に低いため、位置分解能が航空機モニタリングに比べて高いという特徴を有し、航空機モニタリングを補完する測定として位置付けられる。図-1には、地中に指数関数分布した放射性セシウム線源を想定したシミュレーションにより得られた、線源半径と空間線量率への寄与割合の関係を示す²。航空機モニタリングの実施高度に相当する300 mの高

度では、100 m 半径からやってくるガンマ線の寄与は 10%程度であり、航空機モニタリングの結果をその直下の空間線量率と直接結びつけることは難しいことがわかる。無人ヘリ測定では高度 80 m 程度の測定を行うため、位置分解能は航空機モニタリングに比べて明らかに高くなる。

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ことが望まれる。今回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モニタリングのデータを統合することを目指した。高い位置分解能と精度を持つがカバーできる範囲に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こととした。

(2) 統合手法の概要

空間統計学の分野で発展的に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、最も信頼のに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ある地点の空間線量率はその値を用い、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ことになる。

(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 $p(z_c|y)$ と関連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得られる。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。

$p(y|z_w)$ 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ととした。

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。 y を決定する具体的な手続きのイメージは次のようなものである。歩行サーベイデータ z_w をもとに内挿により対象地域全体の y 並びに確率 $p(y|z_w)$ を求めることができる。さらに得られた y に対して $p(z_a|y) p(z_c|y)$ を計算することができるため、 $p(y|z_w, z_c, z_a)$ が得られる。内挿の方法を様々に変えて確率を計算することで、確率が最大となる y が得られることになる。実際にはこのような試行錯誤的な手続きは踏まないが、手法を理解するには上記の手順をイメージすることは有効である。

推定の特徴として、図-2 に示すように、歩行サーベイデータが存在する領域の近くでは信頼区間幅の狭い、すなわち不確実性が小さい推定値が得られるのに対し、航空機モニタリングのみが存在する領域においては信頼区間幅が大きな、すなわち不確実性が大きな推定結果となる。航空機モニタリングの持つ系統的な偏りは全体的に補正される。

(3) 対象地域と測定データの時期

今年度は、避難指示解除が順次始まりつつある避難指示区域内を対象としたデータ統合を行うこととする。図-3 に空間線量率統合の対象地域を示す。左図は対象地域の土地利用状況を表しているが、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。右図は、航空機モニタリングの空間線量率マップの上に走行サーベイ及び歩行サーベイの結果を単純に重ねた結果を示している。今回の統合では、空間線量率はいずれも平成 27 年秋に測定された結果を使用した。得られる統合マップは 50 m メッシュ毎の位置分解能を有している。

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、避難指示区域内の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図-4 に示した。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。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が、非常に良い相関関係が見られる。平均値を計算することで相関係数がわずかに改善されるが、最短距離同士の比較で既に相関係数が十分に高いため、この改善は図中の相関係数の数字には現れていない。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ることとした。

(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図-5 に示した。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走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。加重は図-1 に示した距離ごとの空間線量率への寄与割合を参考に行った。全般に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。いずれの土地利用状況でも、良い相関関係が見られるが、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とがわかる。加重をしない単純な平均でも相関係数は完全されるものの、改善の程度は加重をした場合の方が大きい。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。

以上、走行サーベイと歩行サーベイの比較、ならびに航空機モニタリングと歩行サーベイの比較のいずれにおいても、福島市近辺を対象にして以前に行った解析¹⁾に比べ、データのばらつきが小さく良い相関関係が見られている。人間の活動の頻度がデータのばらつきに影響していることが考えられる。

(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。図-6は、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で示している。縦軸に示されたセミバリエンスが大きいほど、空間線量率の不均質性が高いことを示す。また、距離ゼロからの立ち上がりが高くなるほど、空間線量率の空間相関依存性が高い（空間線量率がなだらかに変化する）ことを示す。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ことがわかる。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る。

(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避難指示区域内の空間線量率を、以上の解析結果を基にして統合したマップを図-7に示す。図-3b)に示されたマップと比べると、系統的に高めにし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ことがわかる。データの不確かさの程度を示す標準偏差は、地上のデータがある部分で小さいこと、地上データが無い部分においては農地で大きいことがわかる。農地で標準偏差が大きい理由は、図-5b)で示されたデータのばらつきを反映していると考えられる。

(5) 統合結果の検証

データ統合が適切に行われたことを検証するために、各土地利用状況の歩行サーベイ測定データを100ずつ意図的に取り除いた後にデータ統合を行い、推定された空間線量率と取り除いておいた空間線量率との比較を行った（図-8）。図において、青い丸は航空機モニタリングと歩行サーベイの空間線量率の最近距離データを比較した結果を、赤い丸はデータ統合により推定された空間線量率を実測値と比較した結果をそれぞれ表している。また、赤い線は推定の99%信頼区間を示している。推定された空間線量率は図中の1対1の直線近くに分布しており、また、ほとんどの推定値が99%信頼区間内に含まれていることがわかる。この結果から、今回のデータ統合が適切に行われたことが確認された。

4. まとめ

階層ベイズ統計手法を応用し避難指示区域内を対象として、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27年秋に取得した空間線量率分布データを統合し、統合マップとデータの信頼区間を提示した。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。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。歩行サーベイの測定値の一部を恣意的に除

くことにより統合結果の検証を行い、統合が適切に行われたことを確認した。以前に福島市周辺を対象に行ったデータ統合のケースと比べ、今回のケースは空間線量率が全体的に高く人間の活動が少ない地域を対象としたが、異なる条件においても空間線量率の統合が適切に行われた。本手法では、現時点で最も信頼がおけると考えられる統合マップに加えて、データの不確かさをユーザが判断できるデータも提供するため、マップの適用範囲や信頼度が大きく広がることが予想される。今後、統合の対象地域を 80 km 全域に広げるとともに、実測データセットが存在する他の時期に対しても同手法を適用したマップ統合を行う予定である。

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*, Available online 8 December 2016, ISSN 0265-931X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.11.033>.
- 2) 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)
- 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.

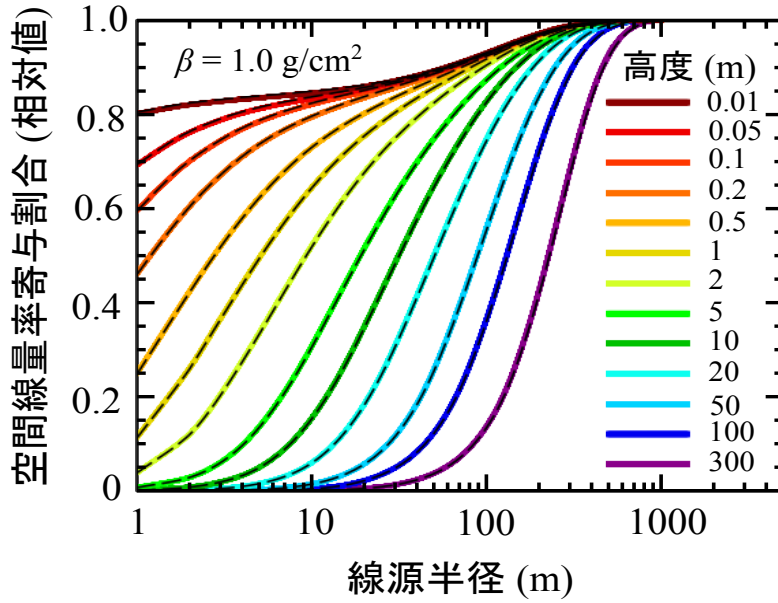


図-1 地中に指数関数分布した放射性セシウムの線源半径と空間線量率への寄与割合の関係
 (^{134}Cs 、 ^{137}Cs ともにほとんど同じ傾向を示す)

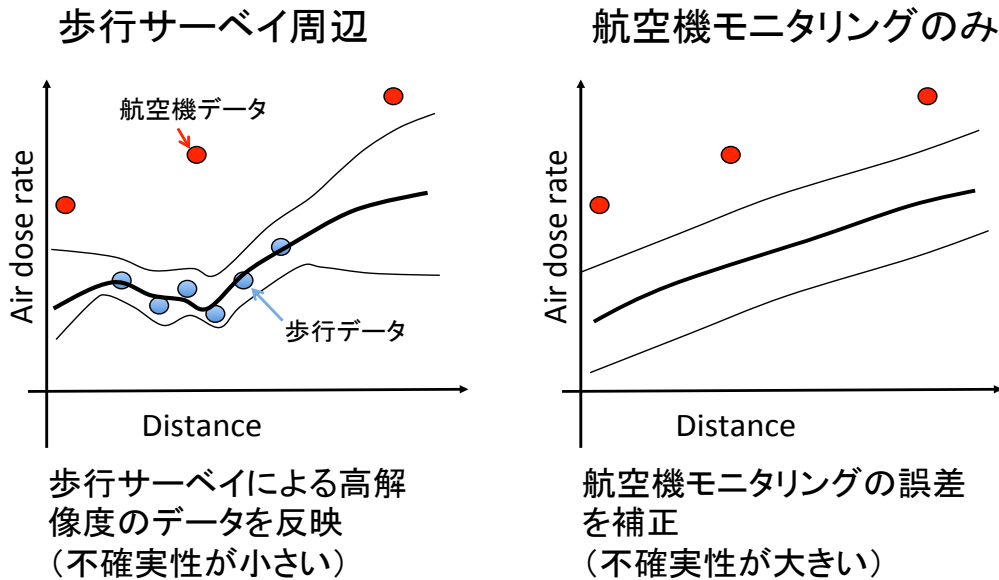


図-2 統合したデータの不確実性に関する概念図

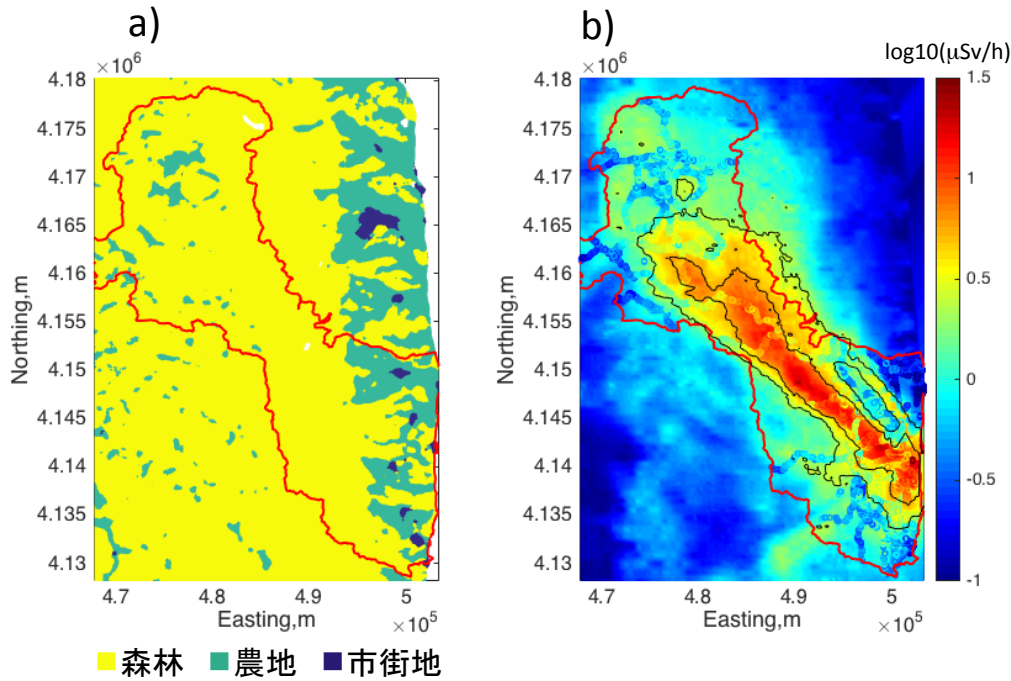


図-3 統合対象地域における a) 土地利用状況、ならびに b) 航空機モニタリング、
 走行サーベイ、歩行サーベイの空間線量率を単純に重ねた図
 Easting と Northing は UTM 座標を示す。

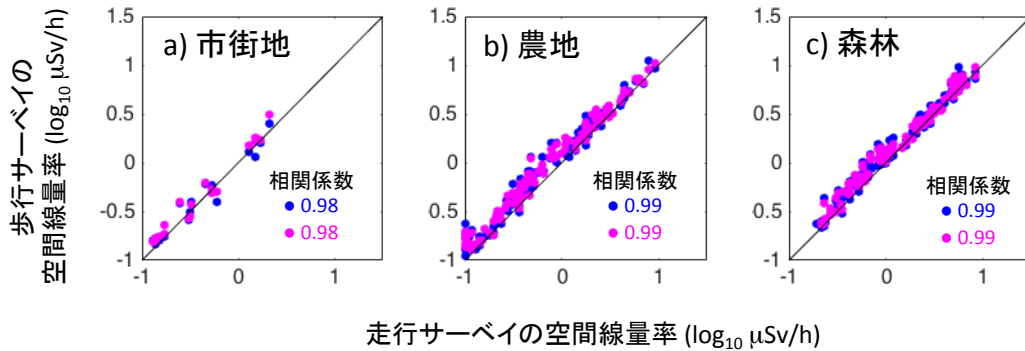


図-4 走行サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の比較
 青い丸は測定地点間の距離が近いデータ同士の比較を、ピンクの丸は
 走行サーベイの 100 m メッシュ内に含まれる 20 m メッシュ歩行サーベイ結果全
 てを単純に平均した値との比較を示している。

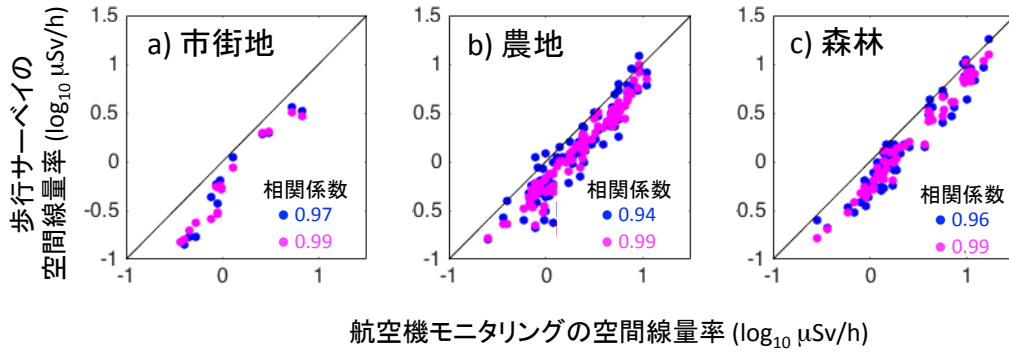


図-5 航空機モニタリングと歩行サーベイによる空間線量率の比較
 青い丸は測定地点間の距離が近いデータ同士の比較を、
 ピンクの丸は距離の関数で加重平均した歩行サーベイ結果と
 航空機モニタリング結果との比較を示している。

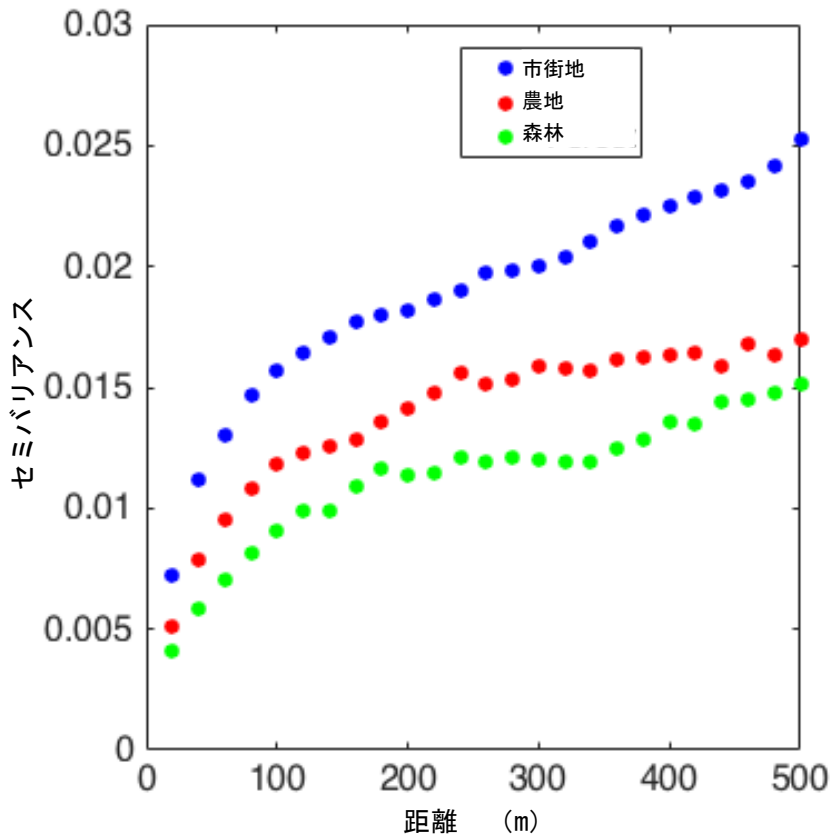


図-6 歩行サーベイによる空間線量率の空間パターンの解析結果
 セミバリアンスが小さいほど、距離による空間線量率の変動が小さいことを示している。

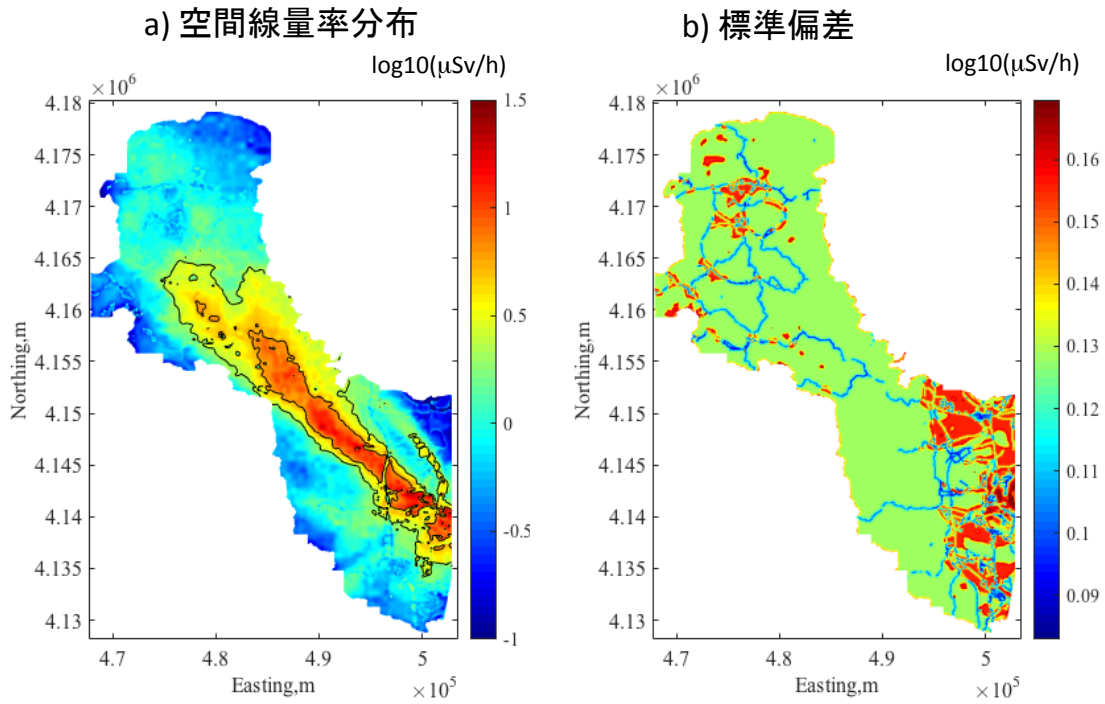


図-7 統合された空間線量率マップと信頼区間の標準偏差

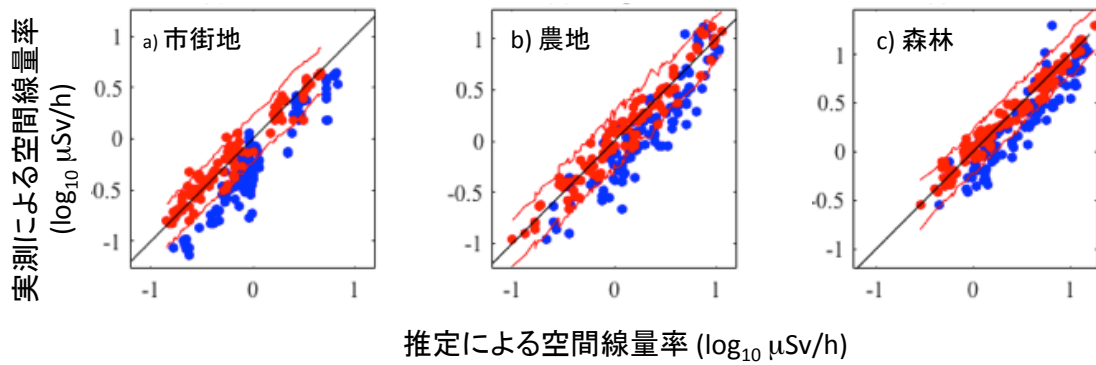


図-8 マップ統合結果の検証

青い丸は航空機モニタリングと歩行サーベイデータの比較結果を、赤い丸は推定した空間線量率と歩行サーベイ結果の比較をそれぞれ示している。赤い線は推定値の99%信頼区間を示している。