

7. 実測データの統合的解析

7.1. 調査目的

分布状況調査においては、平成 28 年度より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。分布状況調査以外においても、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いる。各測定方法にはそれぞれ固有の特性があることから、精度と空間分解能の異なる多様な空間線量率情報が蓄積されている。これらの空間線量率情報を統合することで、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統合評価の目的である。

本目的のために、平成 28 年度においては、異なる方法で測定された空間線量率の分布マップを階層ベイズ統計により統合する手法²²⁾を避難指示区域に適用し、平成 27 年度に測定された歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機モニタリングの結果を統合して、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²³⁾。また、平成 29 年度は 80km 圏内全域に解析対象を広げ、平成 28 年度に測定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統合した統合空間線量率マップを作成した。平成 30 年度は、平成 29 年度に測定された各種測定データを統合して 80km 圏内の統合空間線量率マップを作成するとともに、平成 25 年度以降に実施された測定データを対象に、統合のための基本的な情報である各測定データ間の相関関係を解析し、統合空間線量率マップを作成した。

7.2. 調査内容

7.2.1. 異なる測定方法による空間線量率の特徴

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モニタリングの結果を対象とするが、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る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 80km 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 システム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有用に用いられる。しかし、調査領域が道路上に限定される。航空機モニタリングは 300m 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。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。本調査では、これら異なる測定手法により得られたデータの特徴を活かしつつ、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した。具体的には、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した。

7.2.2. 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した。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手法²²⁾を応用した。

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。

$$p(y|z_w, z_c, z_A) \propto p(z_A|y) p(z_c|y) p(y|z_w) \quad (11)$$

$p(z_A|y)$: 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分布が y である確率

ここで、 $p(y|z_w)$ を事前確率と呼び、観測値 z_w に基づき得られた空間線量率分布を事前分布と呼ぶ。また、 $p(y|z_w, z_c) \propto p(z_c|y) p(y|z_w)$ や $p(y|z_w, z_c, z_A)$ を事後確率と呼び、得られた空間線量率分布 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 (11) 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。

$p(y|z_w)$ 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）を推定した。

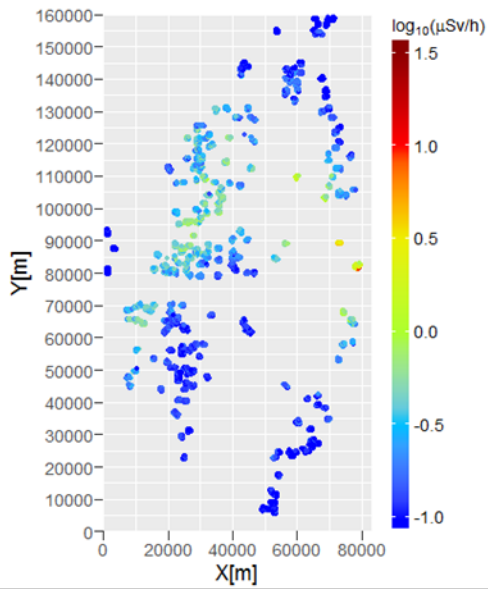
7.2.3. 対象地域と測定データの時期

平成 30 年度は、平成 29 年度と同様に 80 km 圏内全域に対するマップ統合を実施した。今回

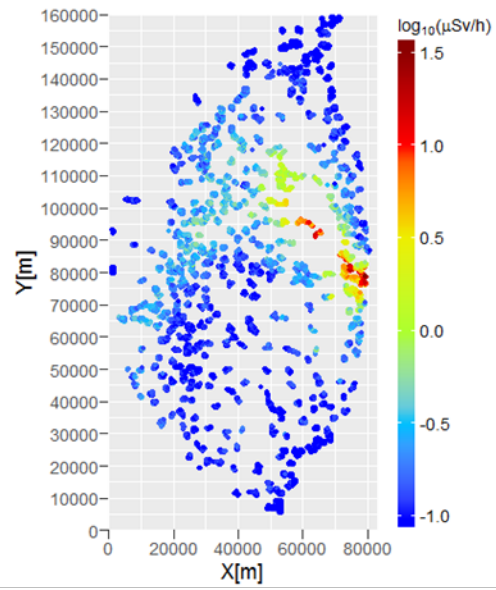
の統合では、

- ・平成 29 年 11 月に測定された結果を用いた最新の統合空間線量率マップの作成、
- ・平成 25 年 11 月,平成 26 年 11 月および平成 27 年 11 月に測定された結果を用いた当該年における統合空間線量率マップの作成

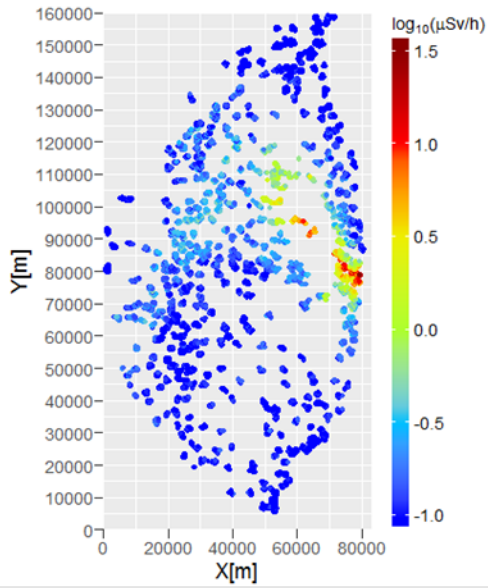
を実施した。統合に用いた歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機モニタリングの測定結果を図 7-1、図 7-2 及び図 7-3 に各々示す。なお、過去に実施した解析により、各測定結果間の関係が避難指示区域内と区域外で異なることが明らかになっていることから、平成 30 年度の解析においても避難指示区域内外を分割した解析を行った。また、対象領域における土地利用状況によっても放射性物質の分布状況および変化傾向が異なることが明らかになっていることから、JAXA より公開されている高解像度土地利用データ²⁴⁾に基づき測定データを分類して解析を実施した。80km 圏内における避難指示区域の境界および土地利用状況を図 7-4 に示す。



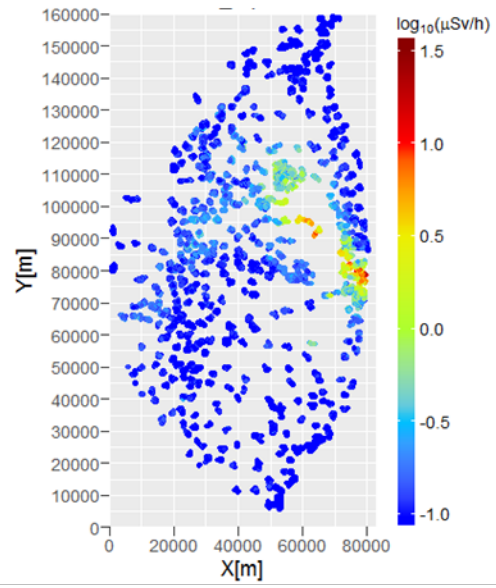
平成25年度



平成26年度

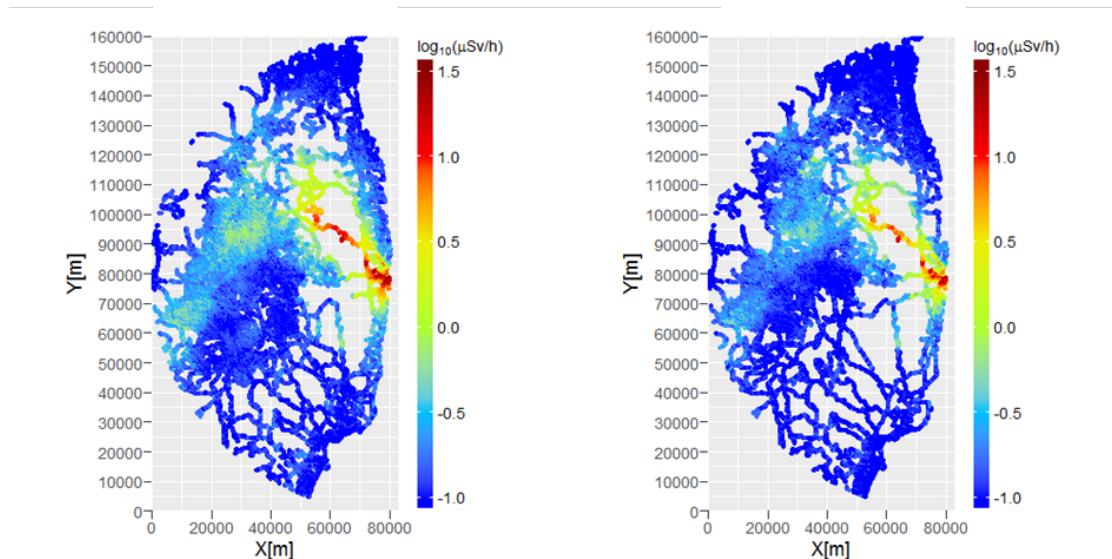


平成27年度



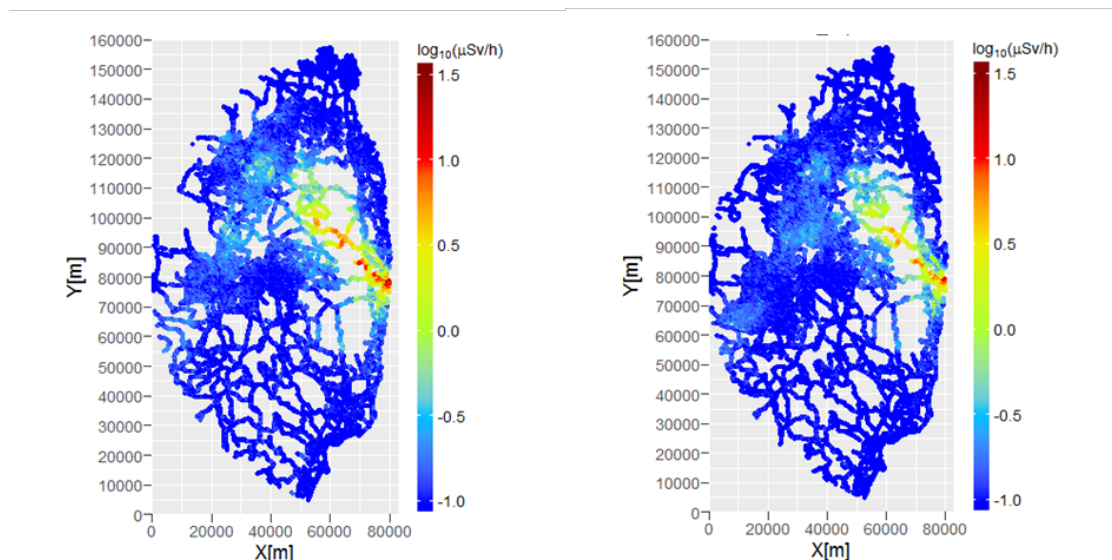
平成29年度

図 7-1 平成 25、26、27 年度及び平成 29 年度(各年度 11 月期)に実施された歩行サーベイ結果
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)



平成25年度

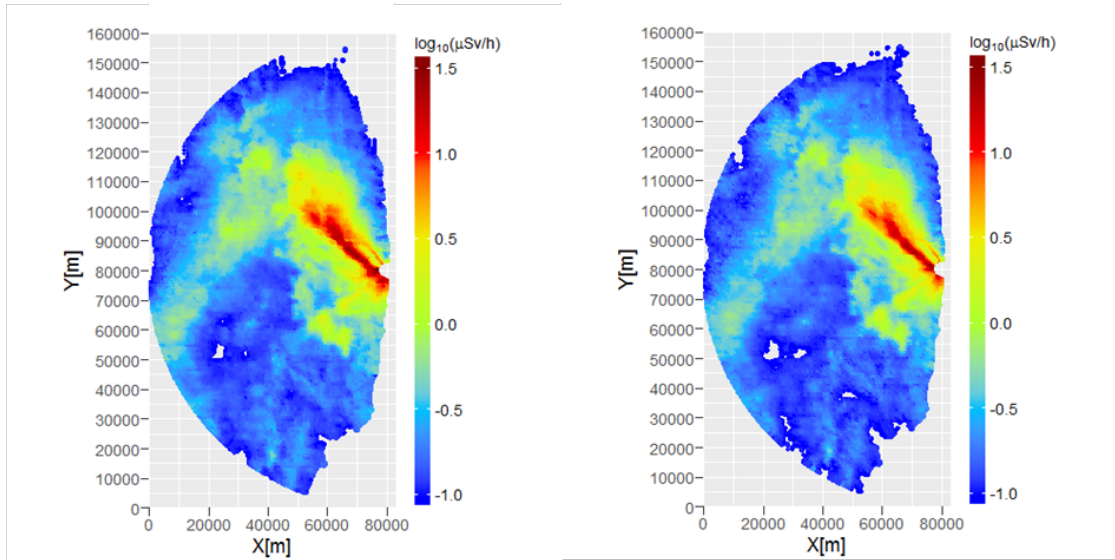
平成26年度



平成27年度

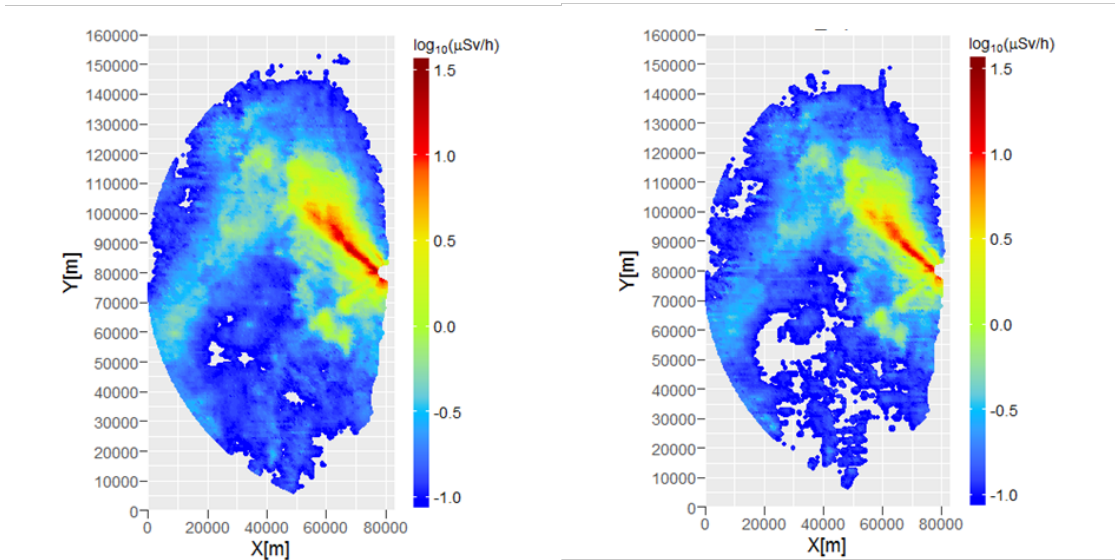
平成29年度

図 7-2 平成 25、26、27 年度及び平成 29 年度(各年度 11 月期)に実施された走行サーベイ結果
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)



平成25年度

平成26年度



平成27年度

平成29年度

図 7-3 平成 25、26、27 年度及び平成 29 年度(各年度 11 月期)に実施された航空機モニタリング結果
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

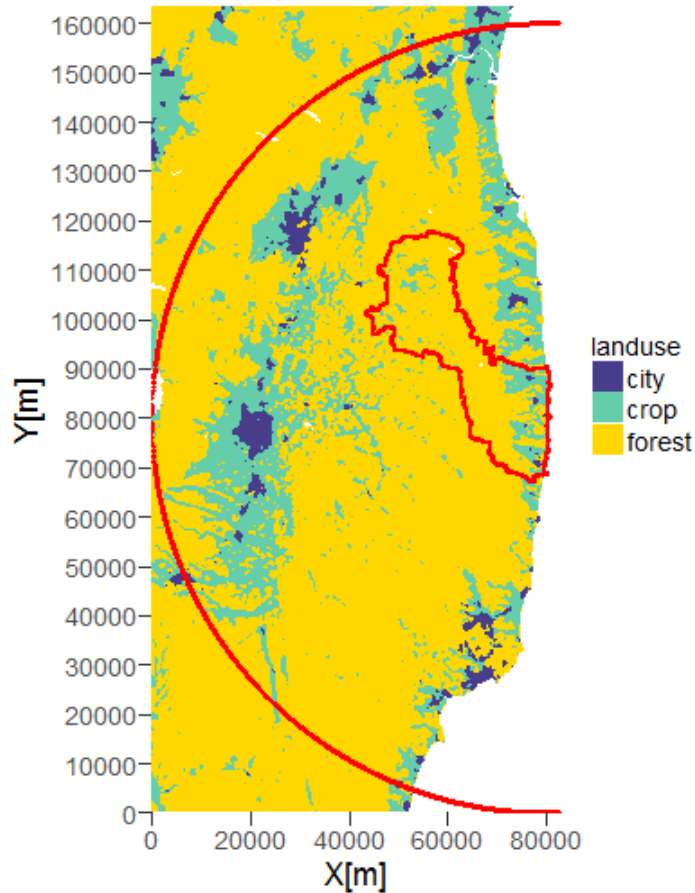


図 7-4 80km 圏内における土地利用状況
 (青:市街地、緑:農地、黄色:森林、赤線:避難指示区域境界及び80km境界)
 (背景図は、高解像度土地利用図²⁴⁾((c)JAXA)を使用)

7.3. 結果と考察

7.3.1. 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区域外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。各年度における解析結果を図 7-5 と図 7-6 に示す。縦軸の値はセミバリア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。セミバリアンスの定義を式 (12) に示す。

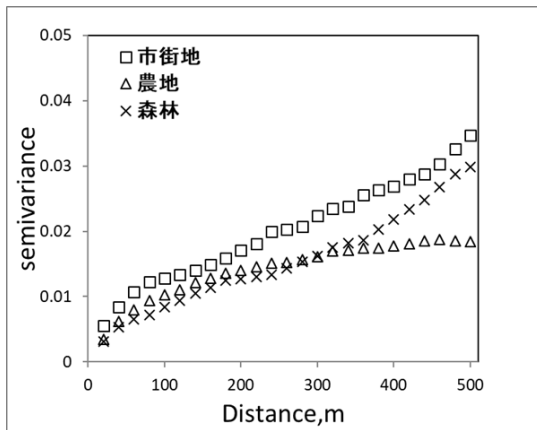
$$\gamma(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} (z_i - z_j)^2 \quad (12)$$

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。

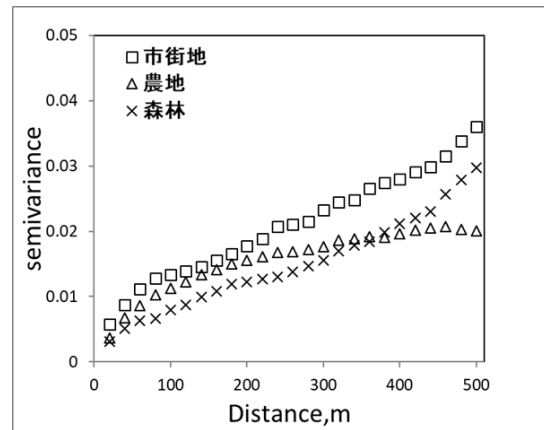
一般に、一定の距離を越えるとセミバリアンスはほぼ一定値になり、それ以遠の空間線量率は距離との相関を持たなくなる。距離とセミバリアンスの相関が無くなる時点での距離の値をレンジ、セミバリアンスの値をシルと呼ぶ。シルは空間線量率のばらつき(分散)を表す。

図 7-5 及び図 7-6 を比較すると、避難指示区域内のほうが遠くまで距離との相関を持つ傾向が見られる。また、避難指示区域内では、一旦収束に向かったセミバリアンスの値が再び増加する場合が見られる。これらは、距離と空間線量率の相関に関してスケールの異なる複数の要因が存在していることを示している。統合マップ作成において、歩行サーベイの測定データは局所的なスケールの空間線量率の分布特性を分析するために用いられ、広域的なスケールの空間線量率の分布特性の分析には航空機サーベイの測定データが用いられることから、本バリオグラムの解析においては、最も細かなスケールの相関を示すシル及びレンジの値を採用した。

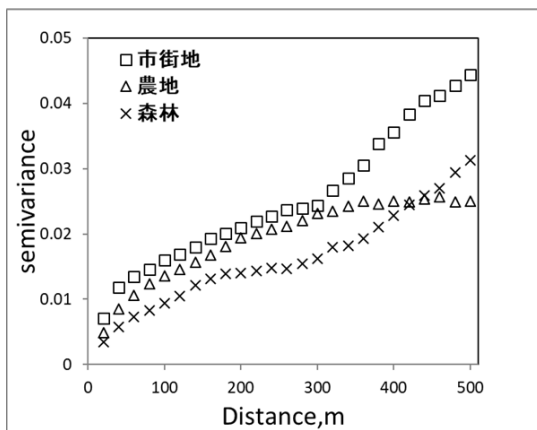
本分析において採用したシルやレンジの値を用いてグラフの形状を指数関数で近似しプロセスモデルとして用いることで、空間線量率の事前分布を作成した。



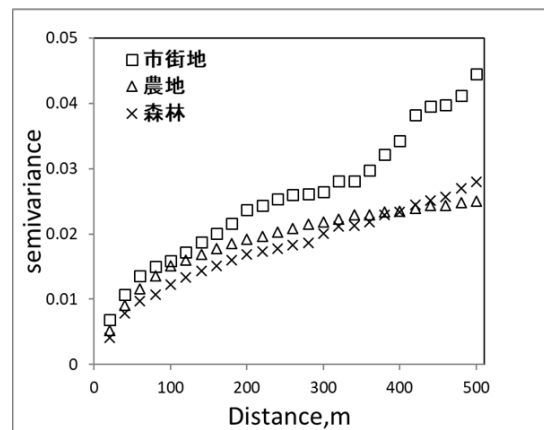
平成25年度



平成26年度



平成27年度



平成29年度

図 7-5 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

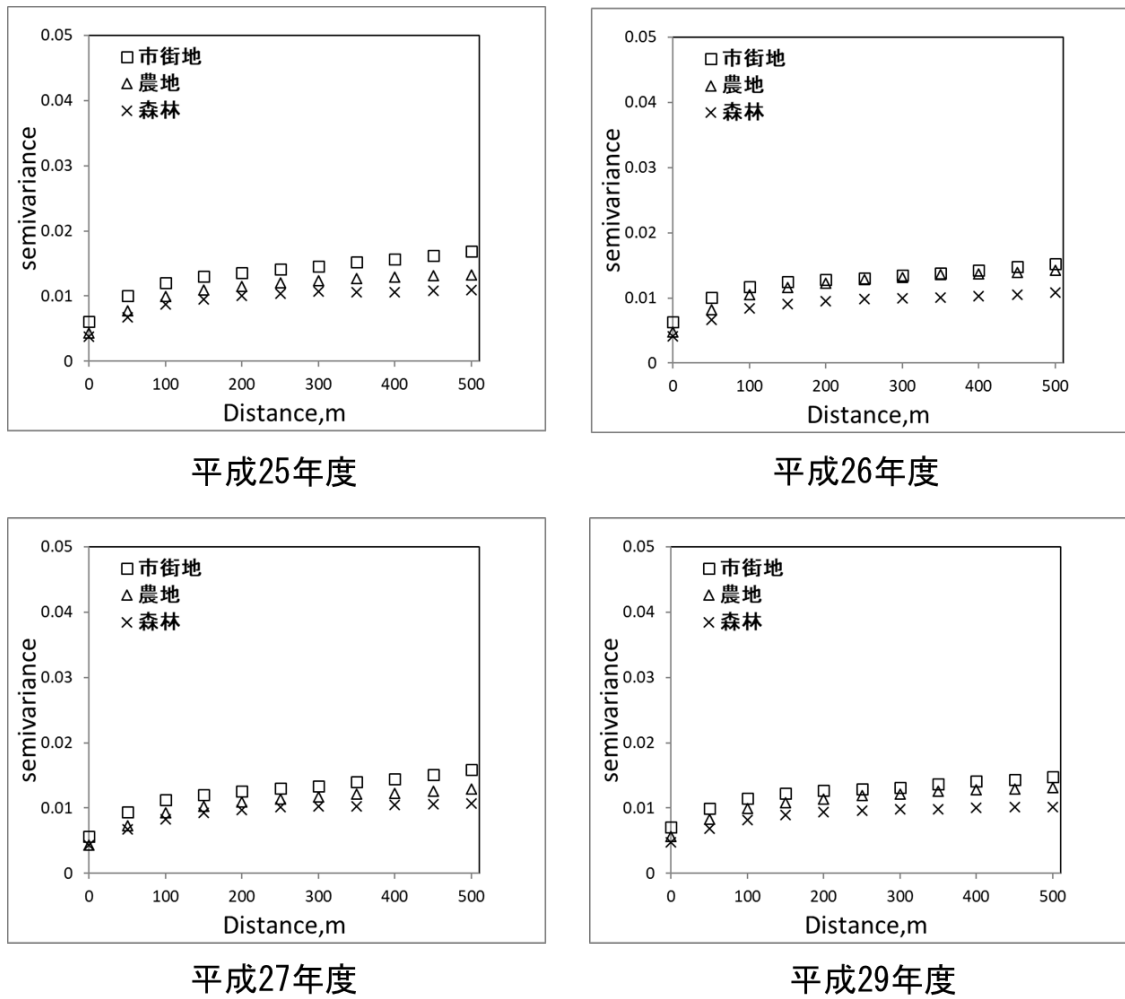
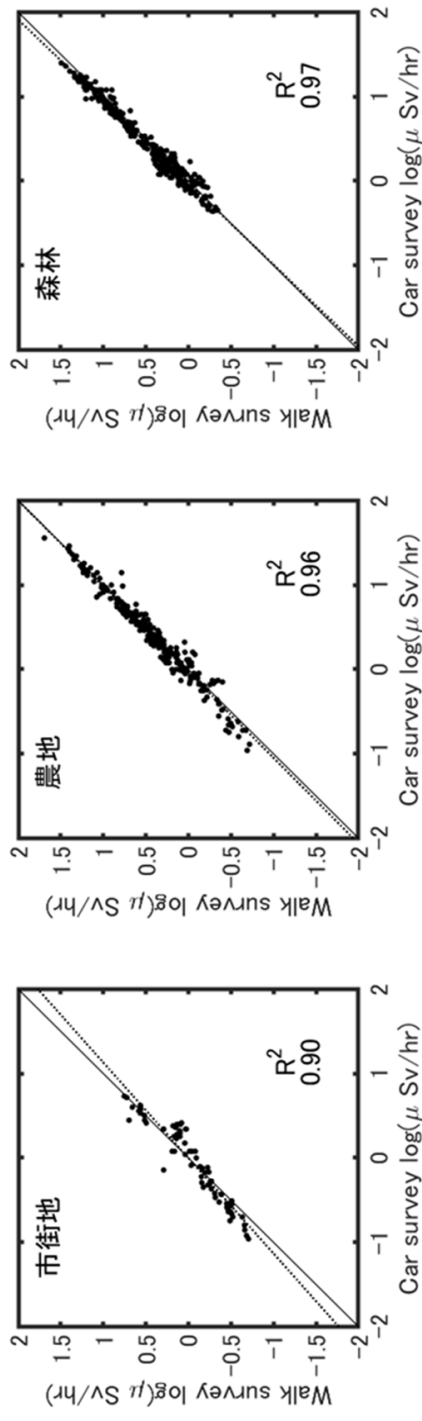


図 7-6 避難指示区域外における歩行サーベイによる空間線量率のパリオグラム

7.3.2. 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の空間線量率を土地利用別に比較した。各年度における避難指示区域内の比較例を図 7-7 に、区域外の比較例を図 7-8 にそれぞれ示す。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 100m 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、平成 30 年度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 100m 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、歩行サーベイデータ相当のデータを生成し、式 (11) における z_c として用いた。

平成25年度



平成26年度

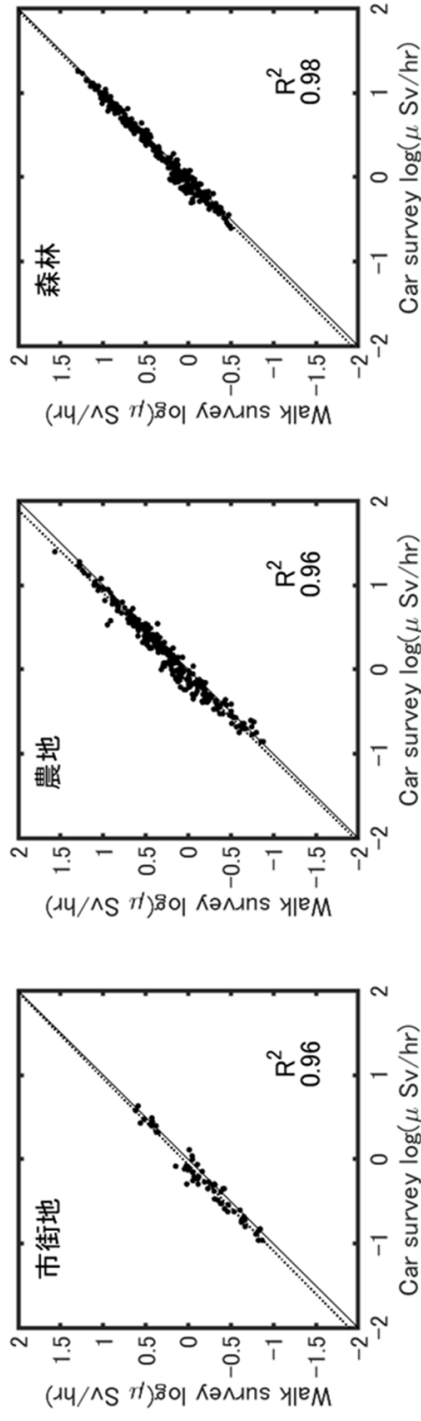
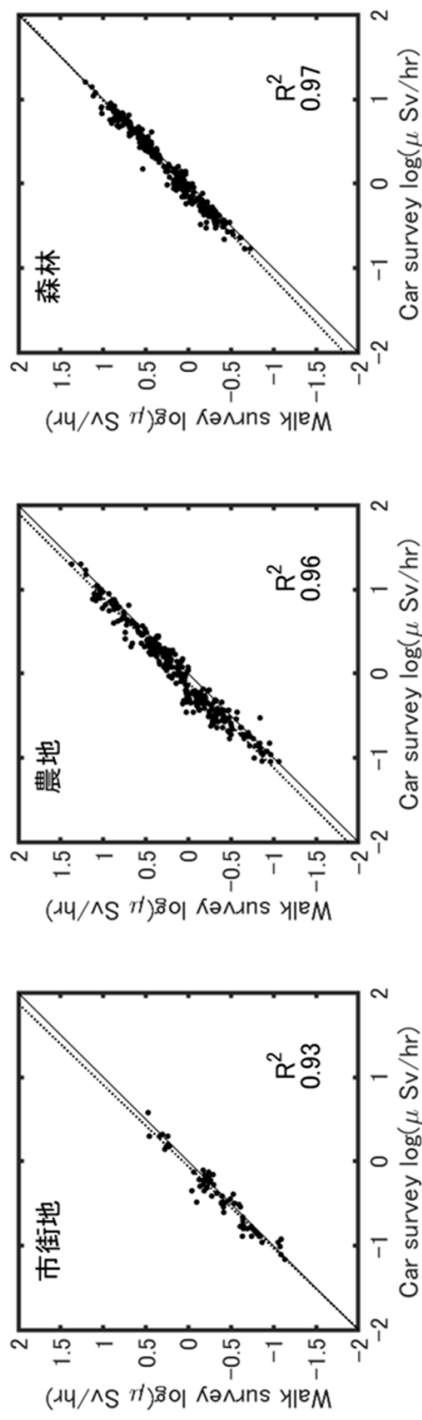


図 7-7 避難指示区域内における走行サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析(1/2)

(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、 R^2 は決定係数)

(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

平成27年度



平成29年度

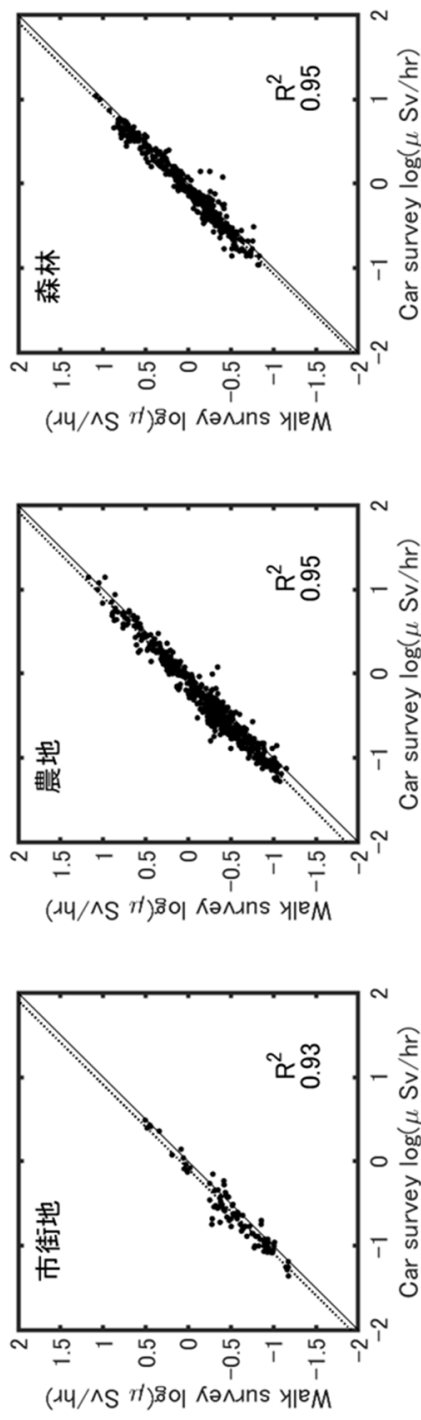
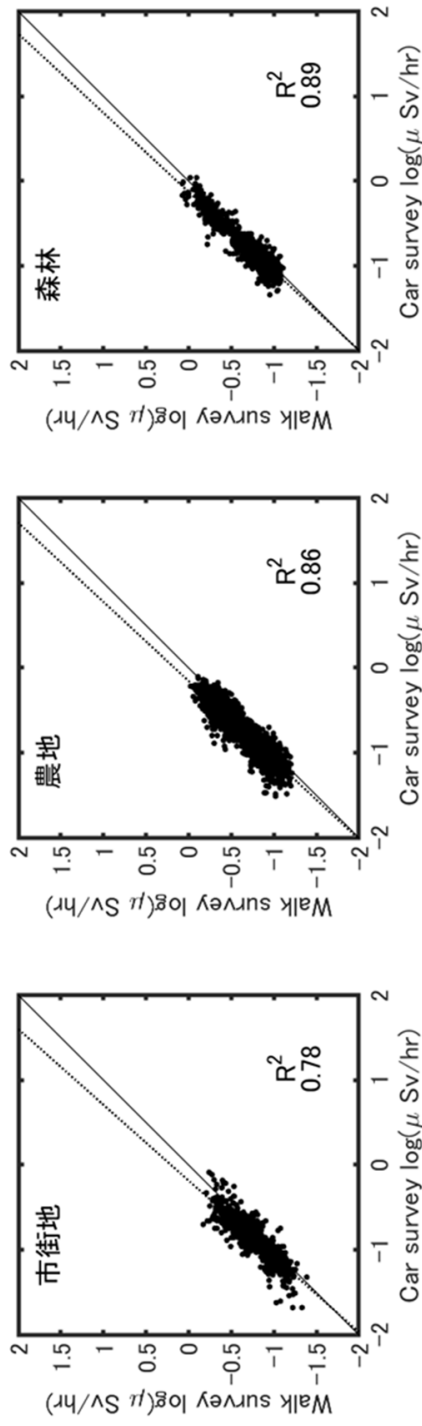


図 7-7 避難指示区域内における走行サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析(2/2)

(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、 R^2 は決定係数)

(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

平成25年度



平成26年度

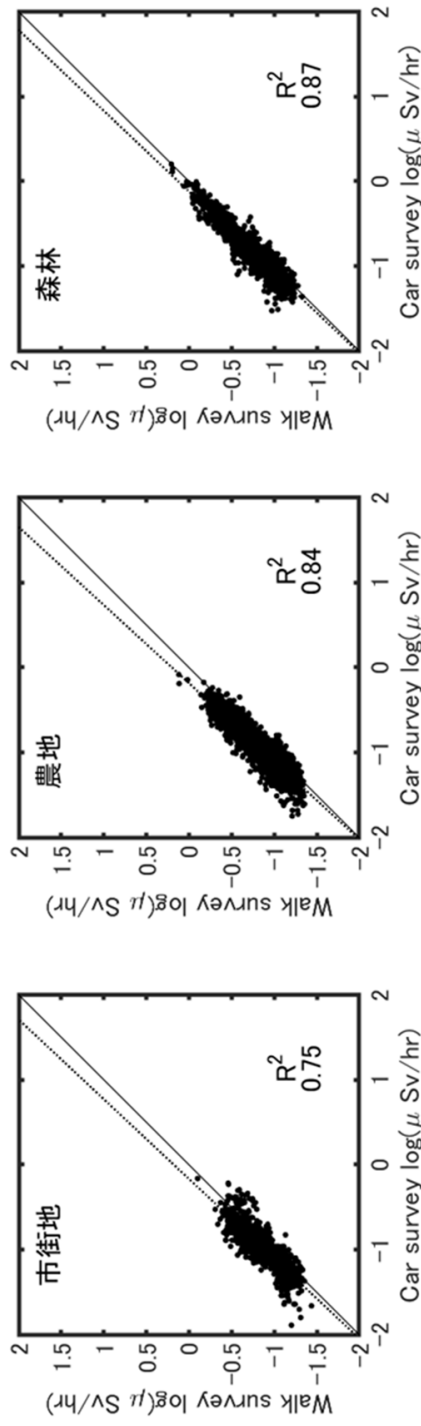
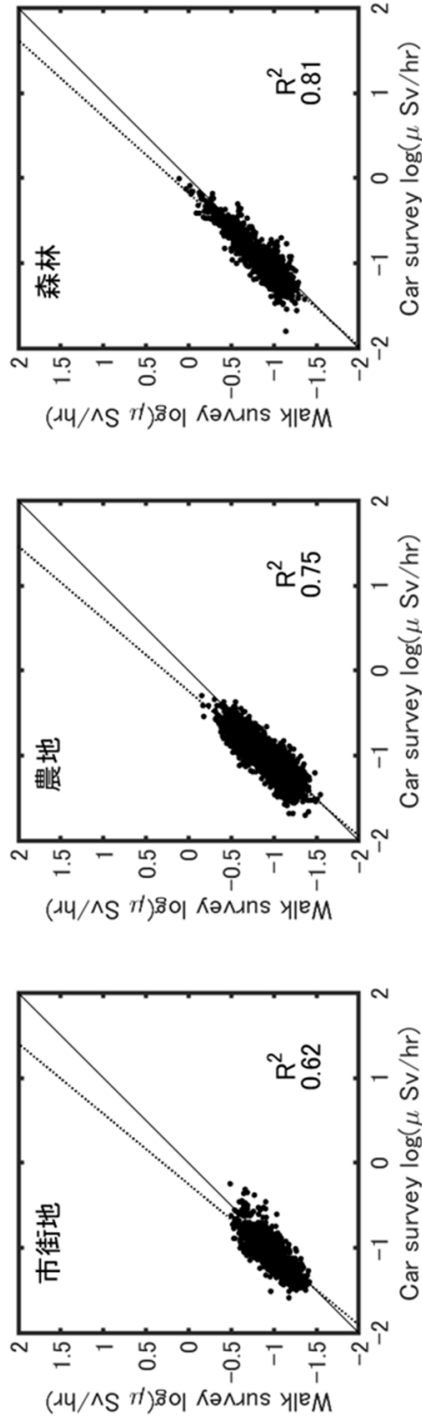


図 7-8 避難指示区域外における走行サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析(1/2)

(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、R²は決定係数)

(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

平成27年度



平成29年度

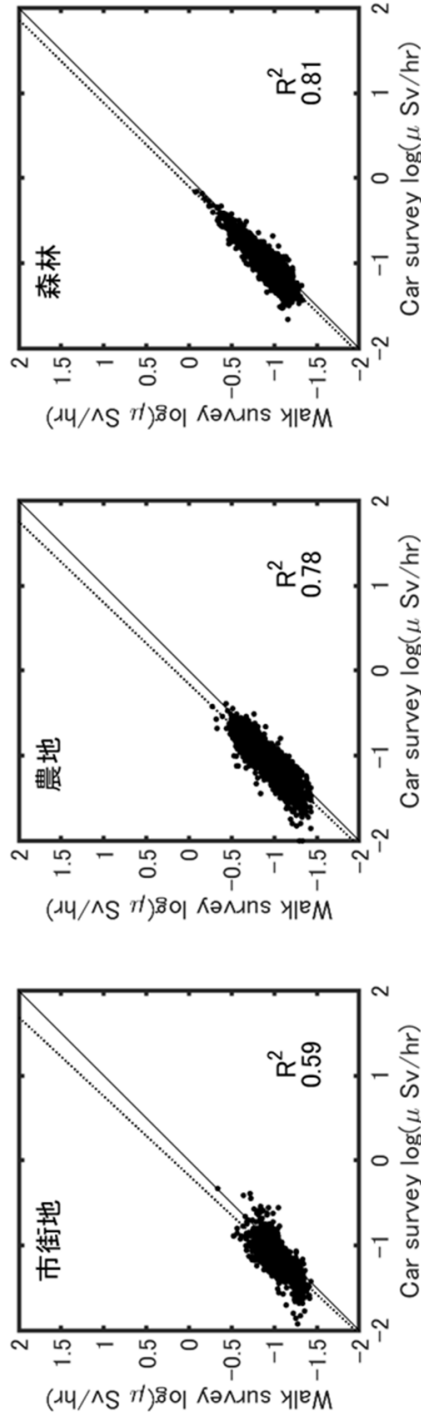


図7-8 避難指示区域外における走行サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析(2/2)

(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、 R^2 は決定係数)

(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

7.3.3. 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、避難指示区域内外の航空機モニタリングと歩行サーベイの空間線量率を土地利用別に比較した。各年度における避難指示区域内の比較例を図 7-9 に、同区域外の比較例を図 7-10 にそれぞれ示す。平成 29 年度の解析により、航空機モニタリングの結果を距離に応じて加重平均化したものと比較したデータと歩行サーベイのデータを比較することで、相関が改善されるという知見が得られたことから、平成 30 年度の解析においても、距離に応じて加重平均した航空機モニタリング結果と歩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、歩行サーベイ結果と加重平均した航空機モニタリング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、歩行サーベイデータ相当のデータを生成し、式 (11) における z_A として用いた。

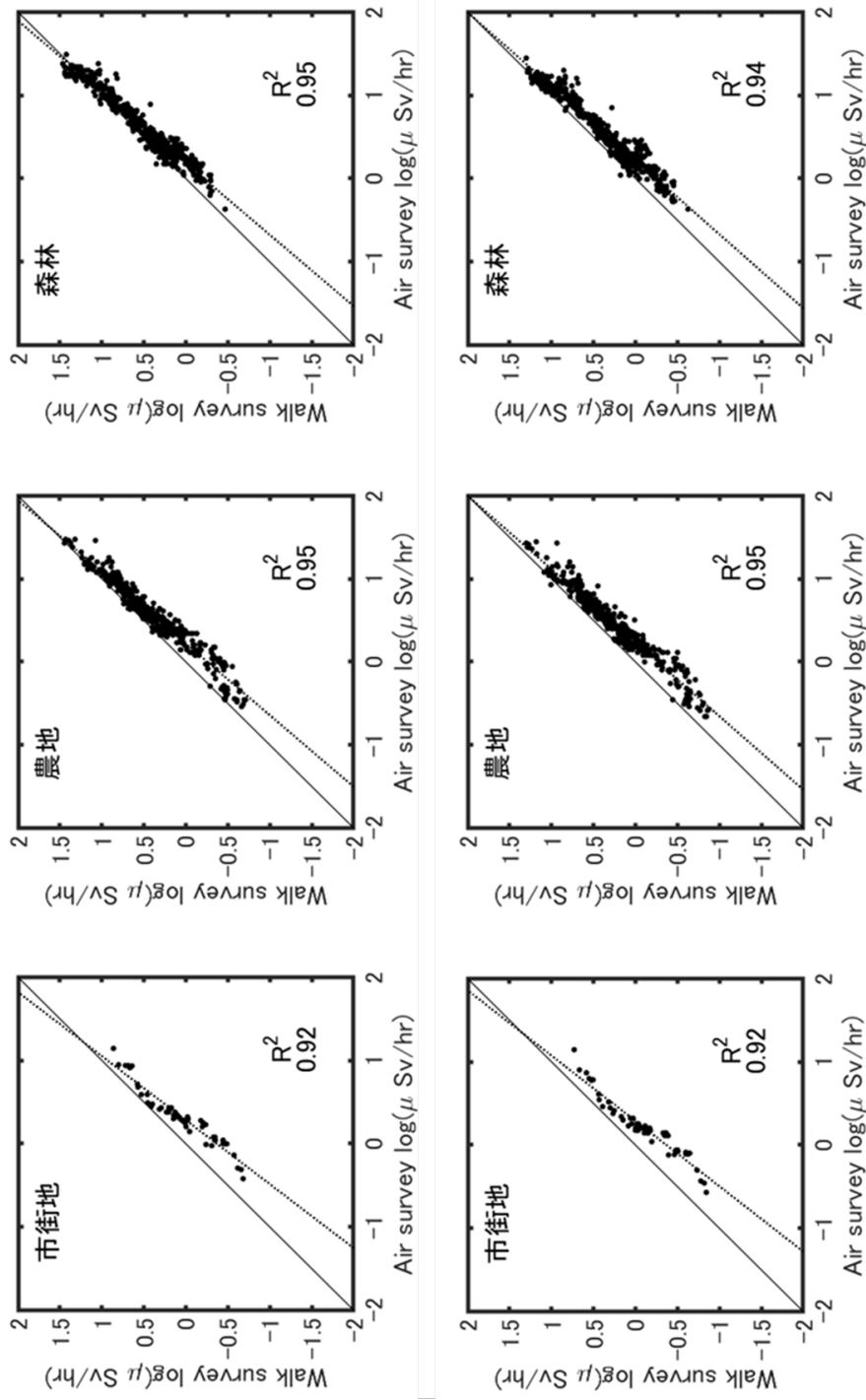


図 7-9 避難指示区域内における航空機モニタリングと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析(1/2)

(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、R²は決定係数)

(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

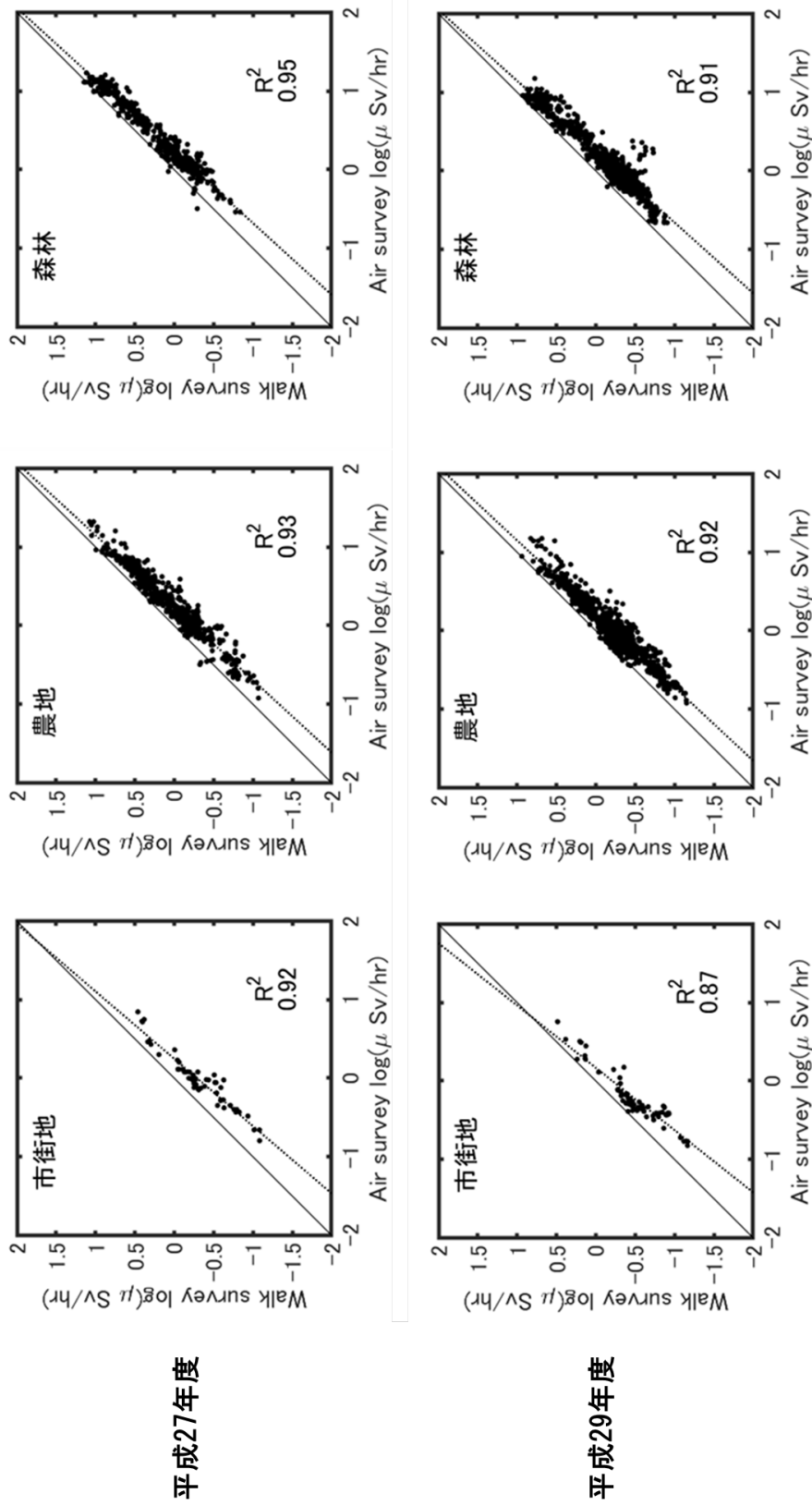


図 7-9 避難指示区域内における航空機モニタリングと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析(2/2)

(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、R²は決定係数)

(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

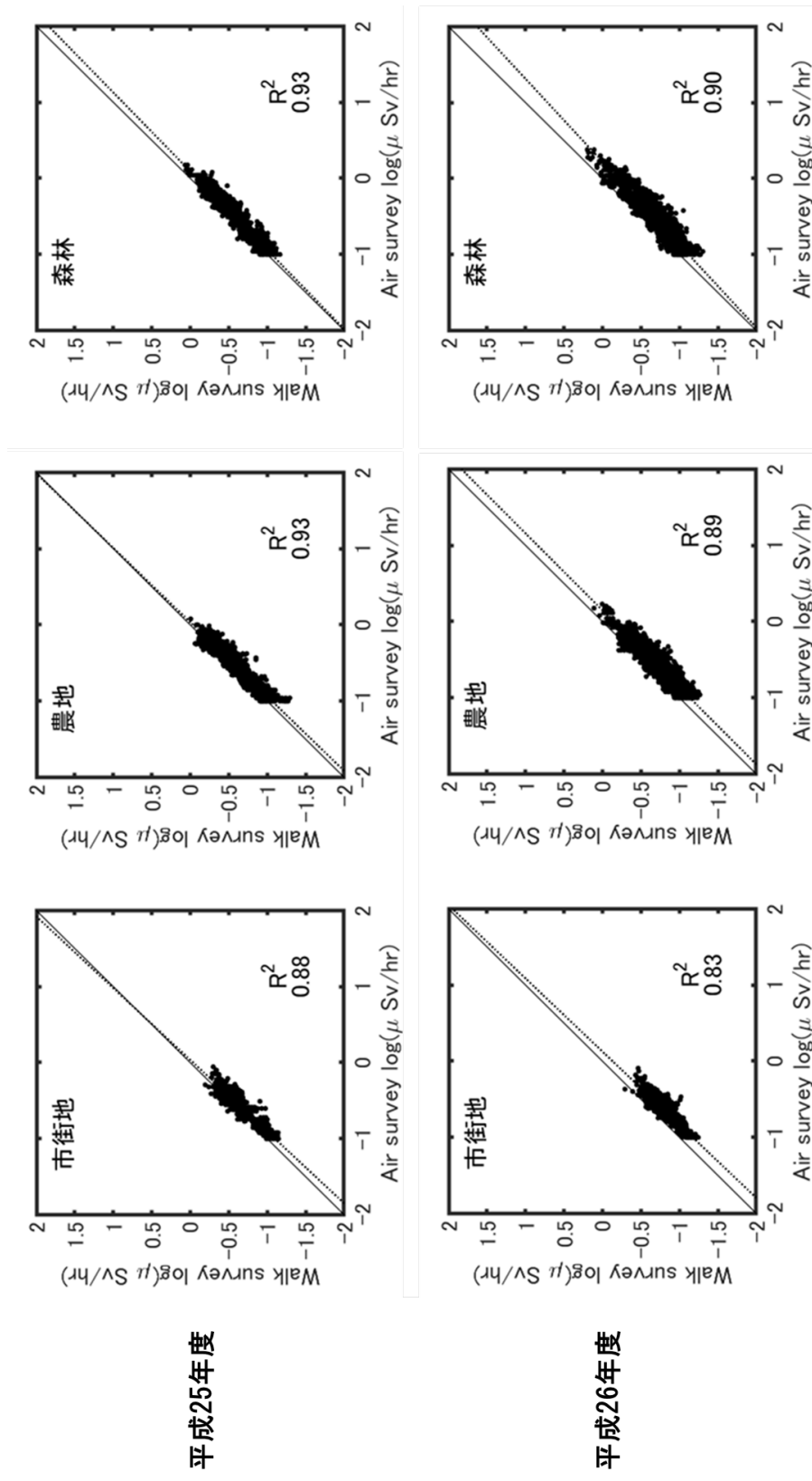
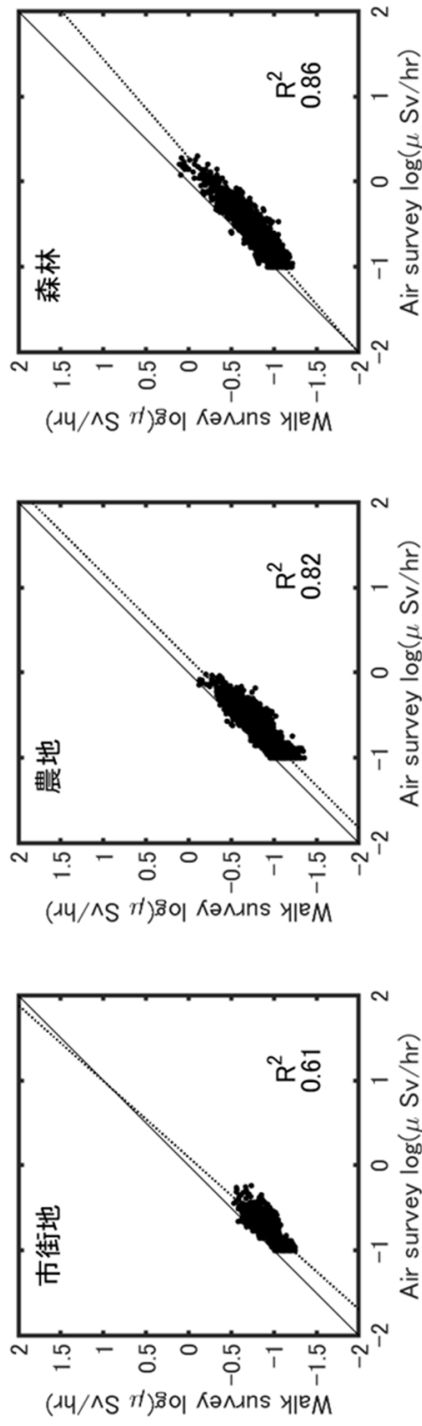


図 7-10 避難指示区域外における航空機モニタリングと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析(1/2)

(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、 R^2 は決定係数)

(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

平成27年度



平成29年度

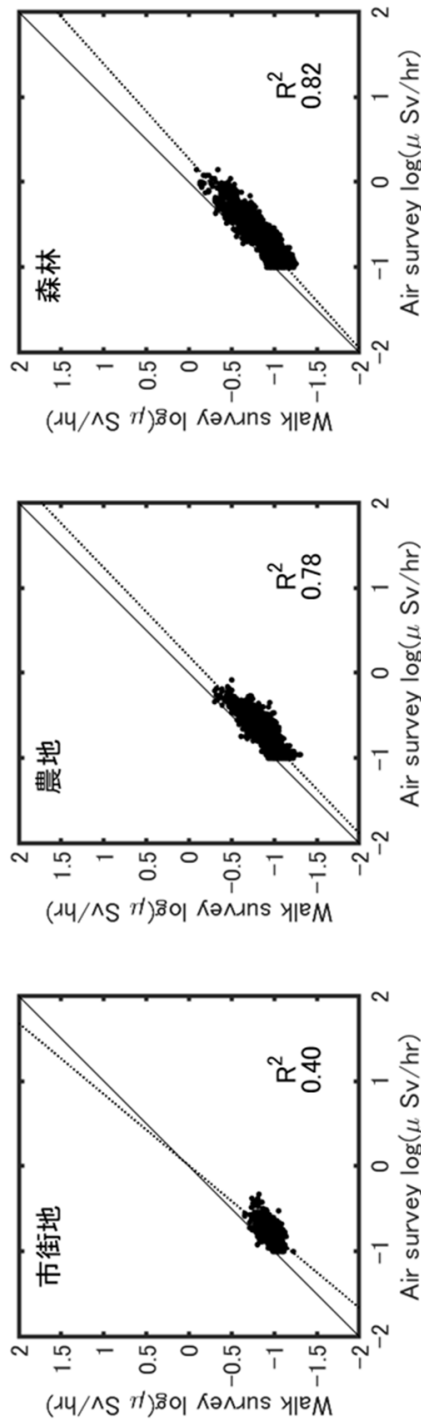


図 7-10 避難指示区域外における航空機モニタリングと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析(2/2)

(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、 R^2 は決定係数)

(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

7.3.4. 平成 25 年度測定データを用いた統合マップの作成

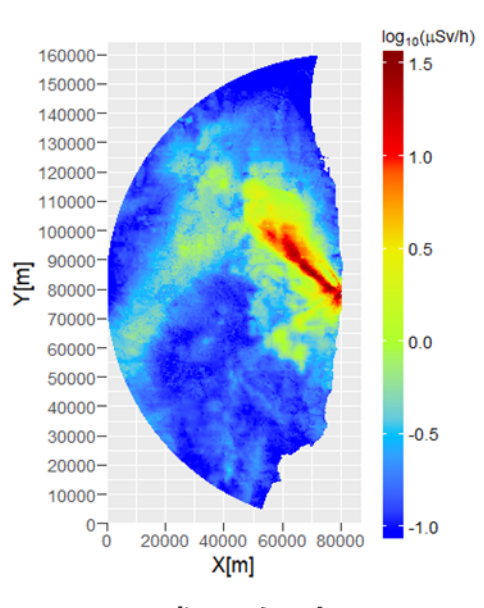
平成 26 年度、平成 27 年度及び平成 29 年度に実施された測定においては、統計解析の実施に十分な数のデータが得られていることから、7.3.1～7.3.3 で得られたデータを用いて統合空間線量率マップの作成を実施した。しかし、平成 25 年度の測定においては、避難指示区域内で測定された歩行サーベイのデータ数が少ないことから、バリオグラム解析や走行サーベイ、航空機サーベイとの相関分析を実施することができない。そこで、平成 26 年に実施された歩行サーベイのデータを補正して使用することにした。補正の具体的な手順は以下のとおりである。

- 1) 平成 25 年度と平成 26 年度に避難指示区域内の同一場所で測定された歩行サーベイ結果を比較し、1 年間における空間線量率の平均減衰率を求める。避難指示区域における空間線量率の減衰傾向は森林と森林以外で異なることから、土地利用データを用いて歩行サーベイデータを森林と森林以外の 2 種類に分類し、各々で平成 25 年度と平成 26 年度の歩行サーベイデータの相関分析を行う事で、平均減衰率を算出する。
- 2) 1) で求めた平均減衰率を用いて平成 26 年度に測定された歩行サーベイデータを補正する。
- 3) 2) で補正した平成 26 年度の歩行サーベイデータ及び平成 25 年度に測定された歩行サーベイデータをあわせたデータを平成 25 年度の歩行サーベイデータとみなし、バリオグラム解析を実施するとともに、走行サーベイデータ及び航空機サーベイデータとの相関分析を実施して、統合マップを作成する。

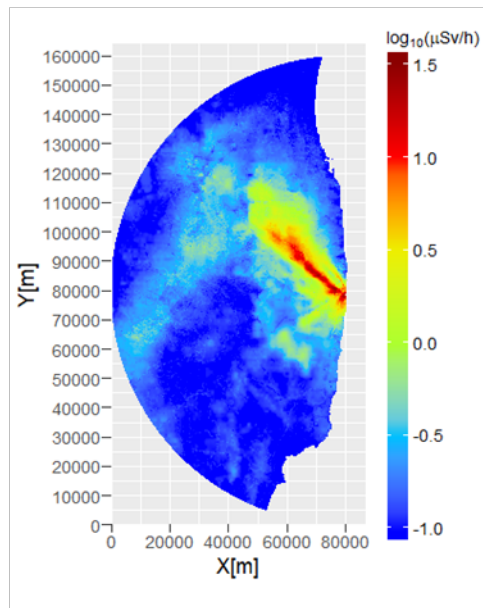
7.3.5. 統合結果及び妥当性検証

各年度に実施された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る 80 km 圏内全域の空間線量率測定結果を統合したマップを図 7-11 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。平成 29 年度同様、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。

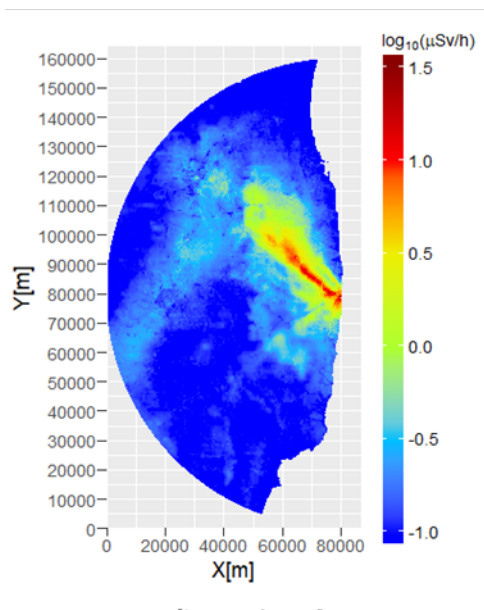
次に、統合マップの妥当性を検証するために、各年度に実施された歩行サーベイデータを避難指示区域内外に分類し、各々において土地利用種ごとに 100 点をランダムに抽出し、抽出点を除外した歩行サーベイデータを用いて 7.3.1～7.3.3 に示した手順に基づき作成した統合マップ結果と抽出データを比較した。比較結果を図 7-12 に示す。図において、緑線は階層ベイズ統計手法に基づき算出された 99%信頼区間を示す。各年度共に、信頼区間に含まれなかった抽出データ（外れ値）の比率は、避難指示区域外で～1%、避難指示区域内で～5%程度に抑えられており、また、回帰直線の傾きが 1 に近い値になっていること、高い決定係数 ($R^2=0.82\sim0.98$) となっていることから、信頼性の高い統合マップが作成されたと考えられる。



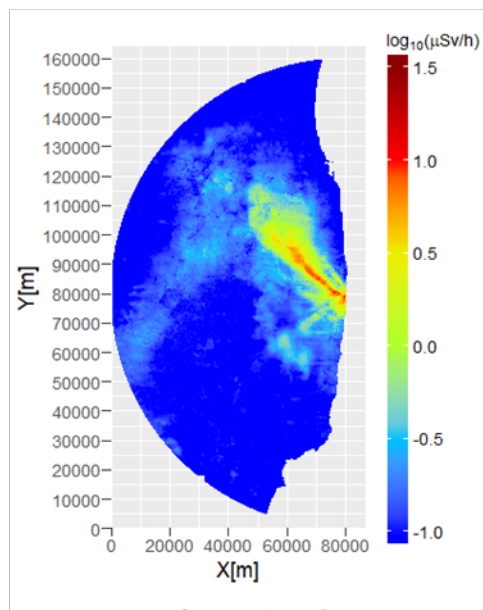
平成25年度



平成26年度



平成27年度



平成29年度

図 7-11 80 km 圏内全域の空間線量率測定結果を統合したマップ
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

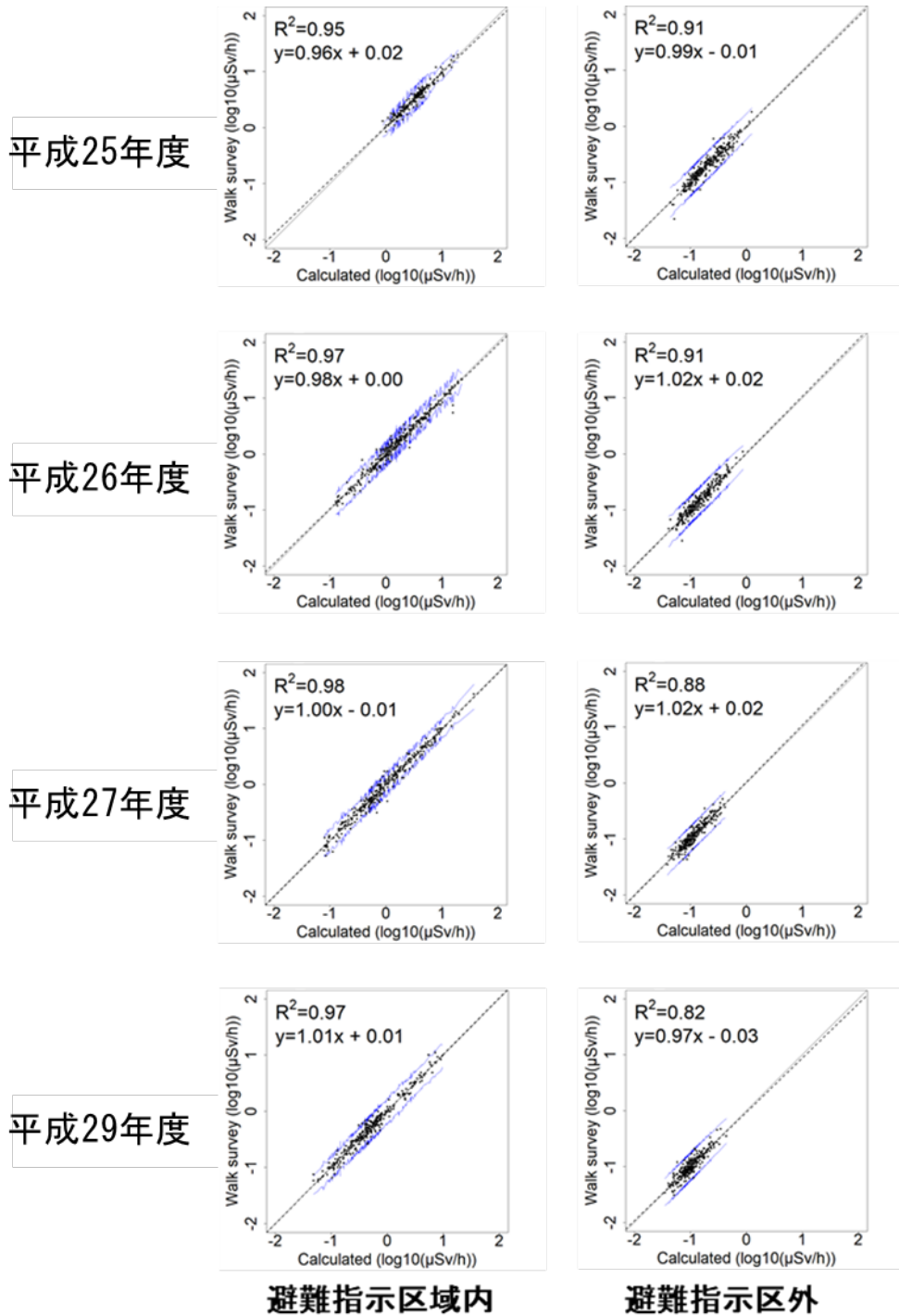


図 7-12 計算から除外した歩行サーベイデータの空間線量率との比較による妥当性検証
 統合マップ計算結果と計算から除外した歩行サーベイデータの相関
 (図中の R² は決定係数、破線と数式は最小二乗法による回帰直線、青色の線は 99%信頼区間)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)