

# 異なる手法で測定した空間線量マップ の統合に向けた取り組み

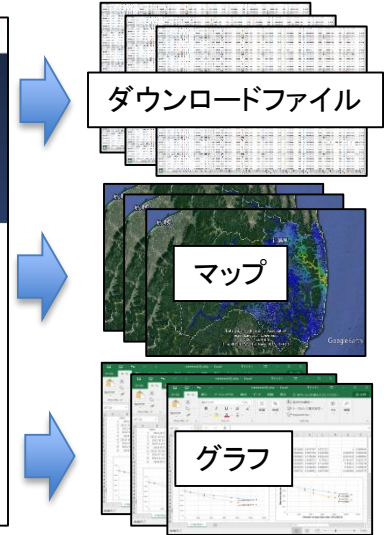
2018年3月4日

第1回福島県環境創造シンポジウム  
「生活を見守るモニタリング」

日本原子力研究開発機構  
関 暁之

# 環境モニタリングデータの公開

日本原子力研究開発機構は、1F事故に伴い、福島県や国や研究機関などが公開している環境モニタリングデータを包括的に収集し、利活用しやすいように整形し、判り易いようにマップ化・グラフ化して一般公開している(放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト:  
<http://emdb.jaea.go.jp/emdb/>)



## 航空機モニタリング



- ✓ 測定対象地域全体をカバーできる
- ✓ 精度・空間分解能が低い

## 走行サーベイ



- ✓ 地上での広域のデータを取得できる
- ✓ 道路上の空間線量率

## 歩行サーベイ

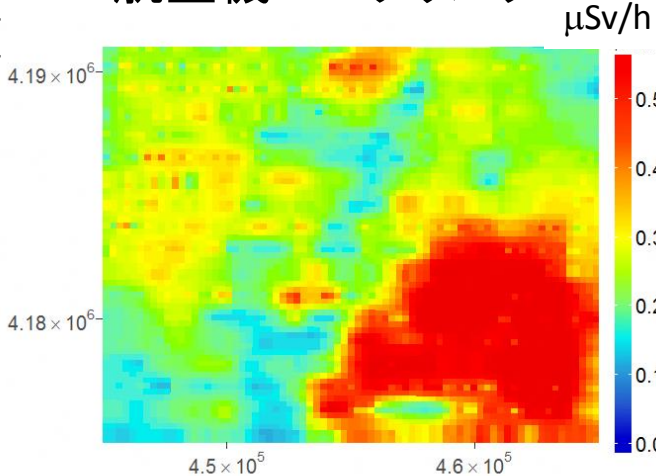


- ✓ 人間生活に直結した空間線量率が得られる
- ✓ 測定可能な範囲が限られる

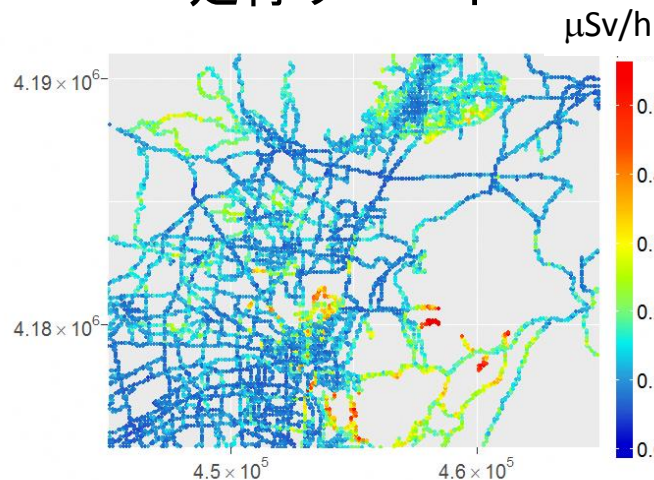
# 異なる手法で測定した空間線量率の特徴

## 航空機モニタリング

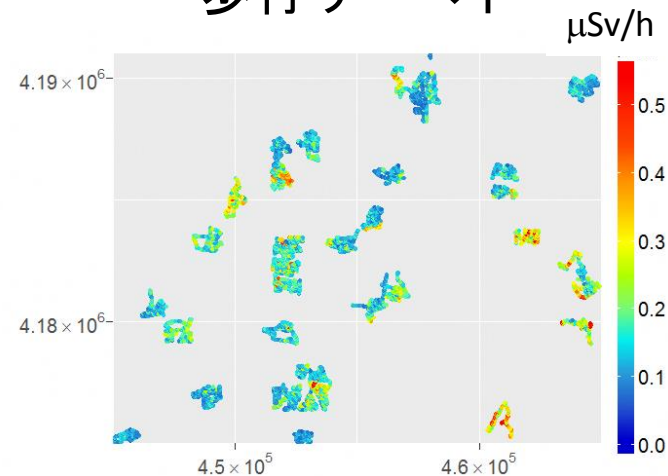
基準点から北方への距離(m)



## 走行サーベイ



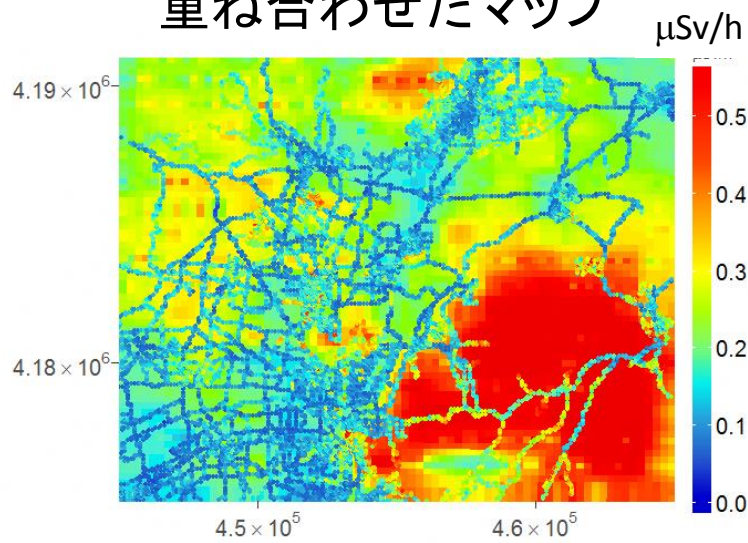
## 歩行サーベイ



基準点から東方への距離(m)

## 重ね合わせたマップ

基準点から北方への距離(m)

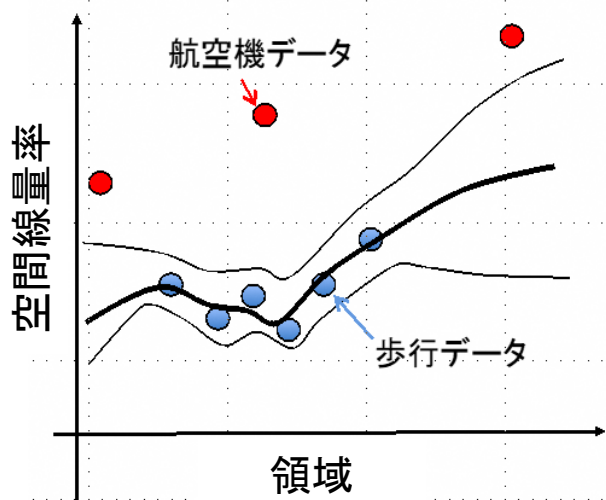


基準点から東方への距離(m)

- ✓ 航空機モニタリングは対象領域全体をカバーしているが、地上で測定している走行サーベイや歩行サーベイより系統的に空間線量率が高い領域がある
- ✓ 走行サーベイは、放射性物質が取り除かれやすい道路上を測定するため、他の測定より系統的に空間線量率が低い
- ✓ これら特徴を考慮した、**広域で、かつ空間線量率の精度や空間分解能の高い統合マップを作成したい**

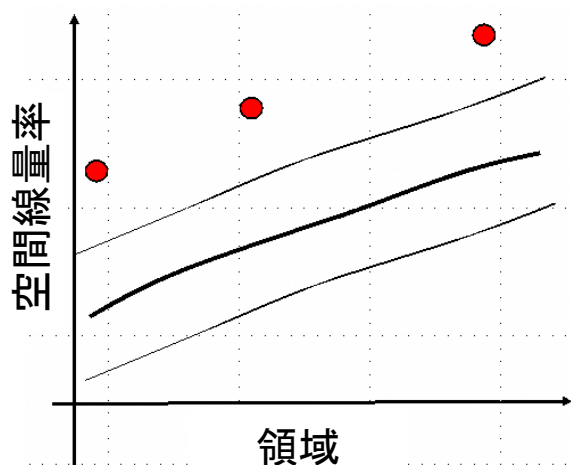
# 統合マップの手法

歩行サーベイデータが存在する領域



- ✓ 統合マップの作成には、ローレンス・バークレー国立研究所のMurakami氏が開発した統合手法を用いる。
- ✓ 歩行サーベイを全域で実施したことを想定した時に得られる空間線量率 $y$ とその信頼区間を階層ベイズモデルにより推定する。
- ✓ 推定の特徴は、歩行サーベイデータが存在する領域においては、歩行サーベイデータに近い推定値が得られる。航空機モニタリングデータのみが存在する領域においては、信頼区間が広い(不確実性が大きい)推定値となるが、航空機モニタリングが持つ系統的な偏りは全体的に補正される

航空機モニタリングデータのみが存在する領域



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

$z_w, z_c, z_A$ : 歩行、走行、航空機による測定データ

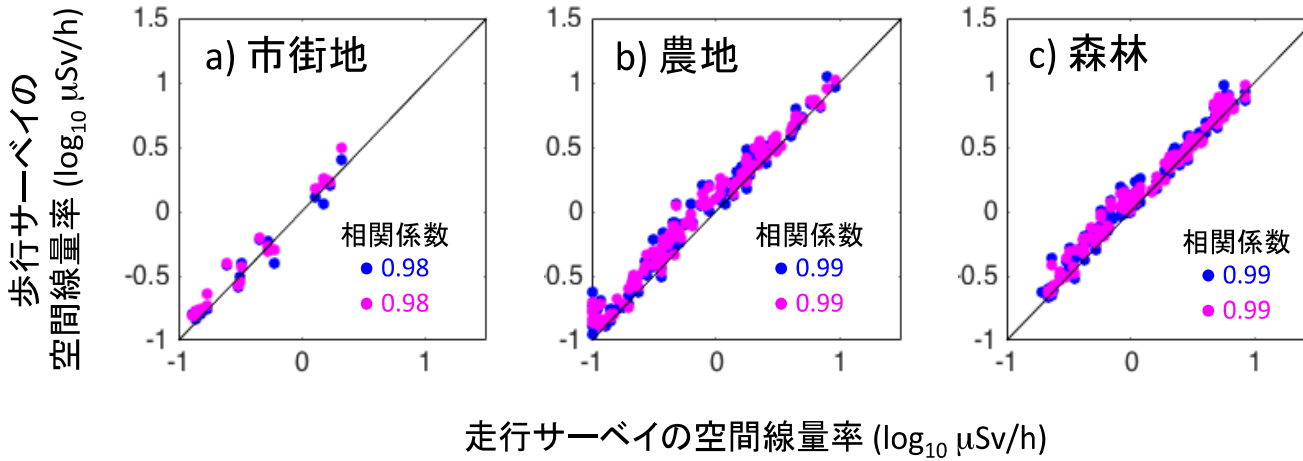
$p(y | z_w, z_c, z_A)$ :  $z_w, z_c, z_A$  が得られた時に空間線量率が  $y$  である確率分布

$p(z_c | y)$ :  $y$  が得られた時に走行サーベイの結果が  $z_c$  である確立分布(データモデル1)

$p(z_A | y)$ :  $y$  が得られた時に航空機モニタリングの結果が  $z_A$  である確立分布(データモデル2)

$p(y | z_w)$ :  $z_w$  が得られた時に空間線量率が  $y$  である確立分布(システムモデル)

# 歩行サーベイと他の測定結果の相関関係



歩行サーベイと走行サーベイの相関からデータモデル1を決定

$$z_{C,i} \sim N(\sum w_{C,i,j} y_i, \varepsilon_{C,j})$$

$z_{C,j}$  : 走行サーベイの値

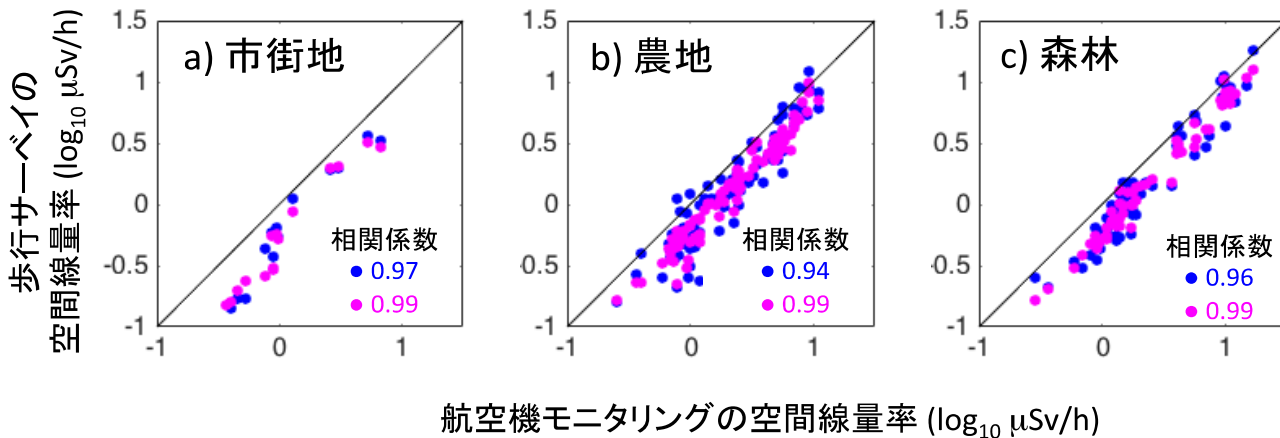
$N(\cdot)$  : 正規分布

$w_{C,i,j}$  : 単純平均の係数(100m以内)

$y_i$  : 歩行サーベイの推定値

$\varepsilon_{C,j}$  : データのバラつき

- : 歩行サーベイデータと距離が最も近い走行サーベイデータの相関
- : 100mメッシュ内に入る歩行サーベイデータを単純平均したデータと走行サーベイデータの相関



歩行サーベイと航空機モニタリングの相関からデータモデル2を決定

$$z_{A,i} \sim N(\sum w_{A,i,j} y_i, \varepsilon_{A,j})$$

$z_{A,j}$  : 航空機モニタリングの値

$N(\cdot)$  : 正規分布

$w_{A,i,j}$  : 加重平均の係数(600m以内)

$y_i$  : 歩行サーベイの推定値

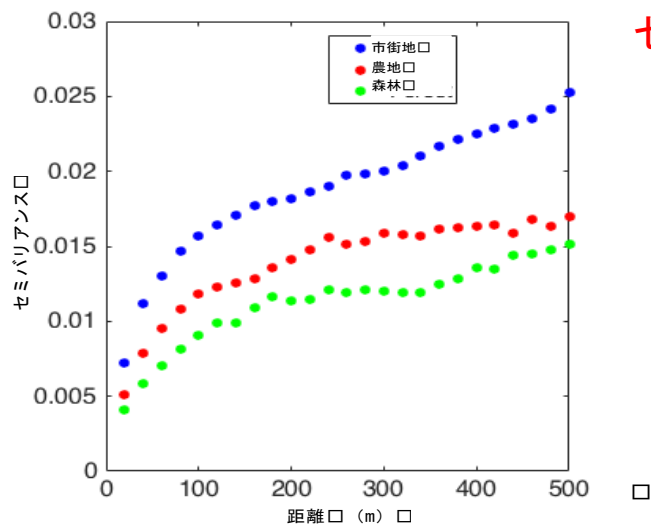
$\varepsilon_{A,j}$  : データのバラつき

- : 歩行サーベイデータと距離が最も近い航空機モニタリングデータの相関
- : Malinsらによるシミュレーションをもとに距離に応じて加重平均した歩行サーベイデータと航空機モニタリングデータの相関

# 歩行サーベイの自己相関関係とモデルのイメージ図

## セミバリエンス

距離の離れた2点間の空間線量率の相関。セミバリエンスが大きくなるほど空間線量率が同じ値になる確率が小さくなる。



セミバリエンスの特徴からシステムモデルを決定

$$y_i \sim N(\sum w_{W,i,j} z_{W,j}, \tau^2 I + \sigma^2 H(\varphi))$$

$y_i$ : 歩行サーベイの推定値

$N(\cdot)$ : 正規分布

$w_{W,i,j}$ : 加重平均の係数

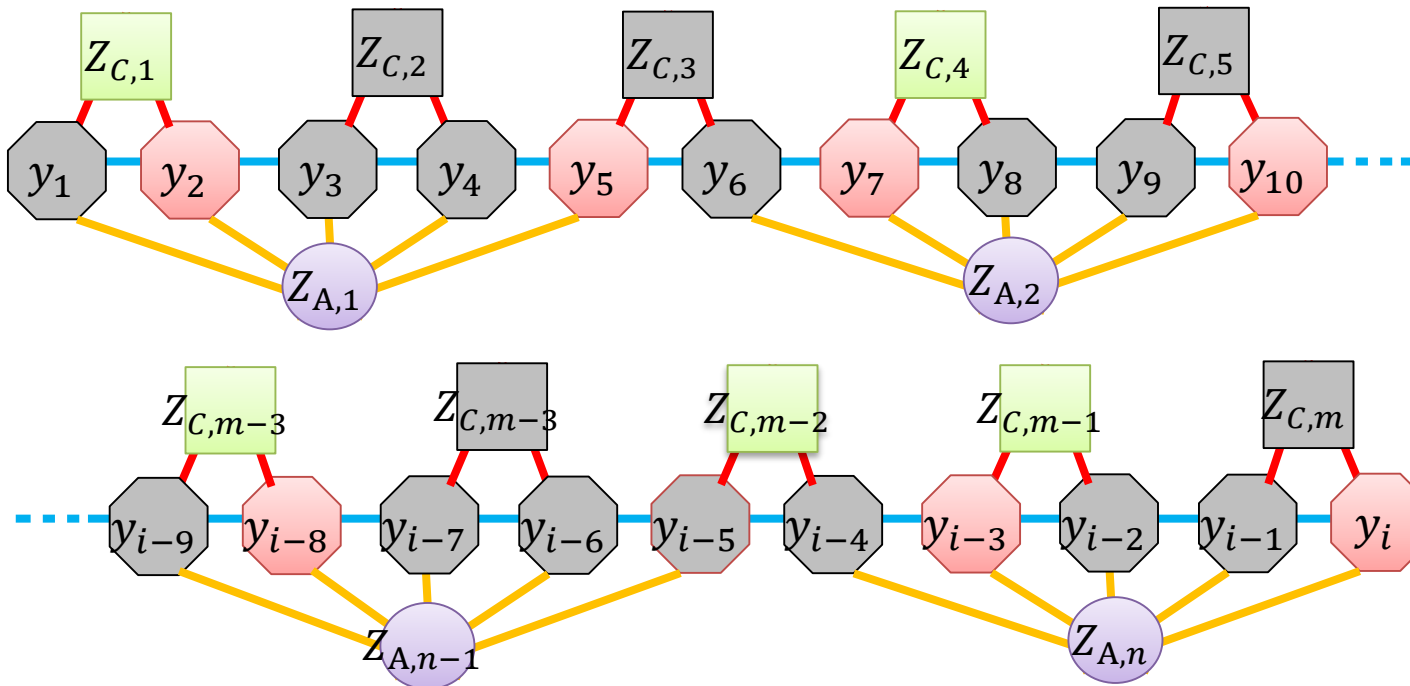
$z_{W,j}$ : 歩行サーベイの実測値

$\tau^2$ : ナゲット

$\sigma^2$ : シル

$H(\varphi)$ : レンジに依存する関数(指数関数で近似)

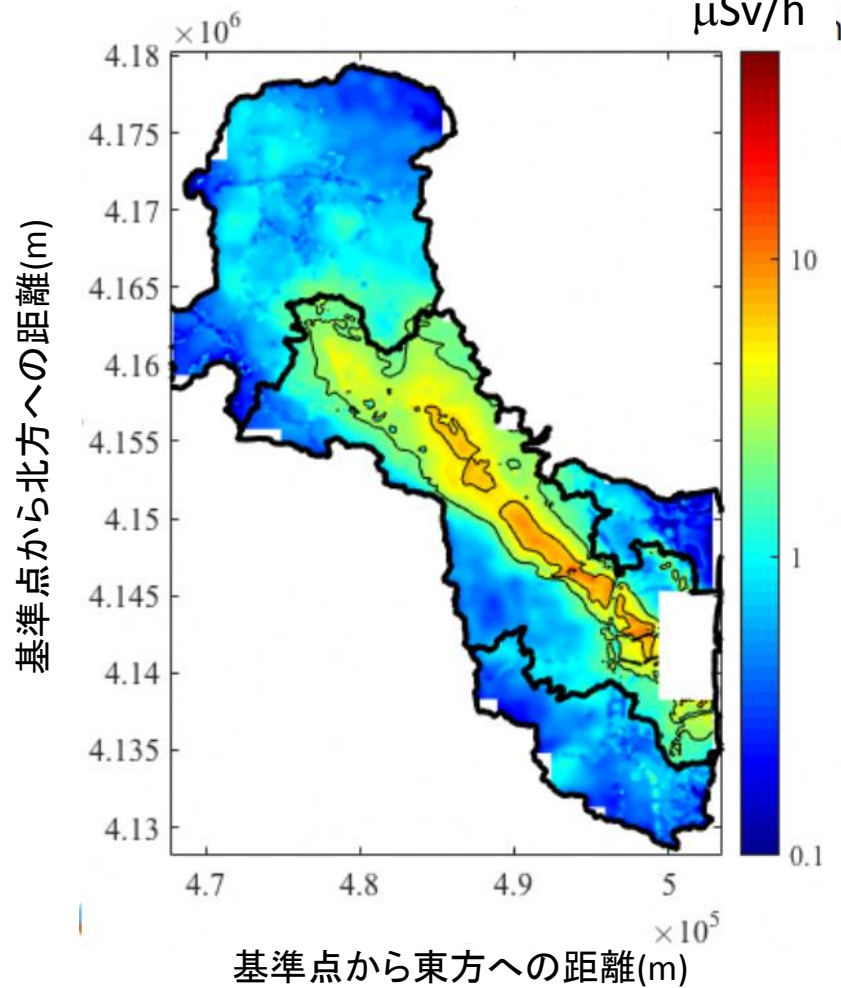
走行サーベイデータ  
推定値  
航空機モニタリングデータ



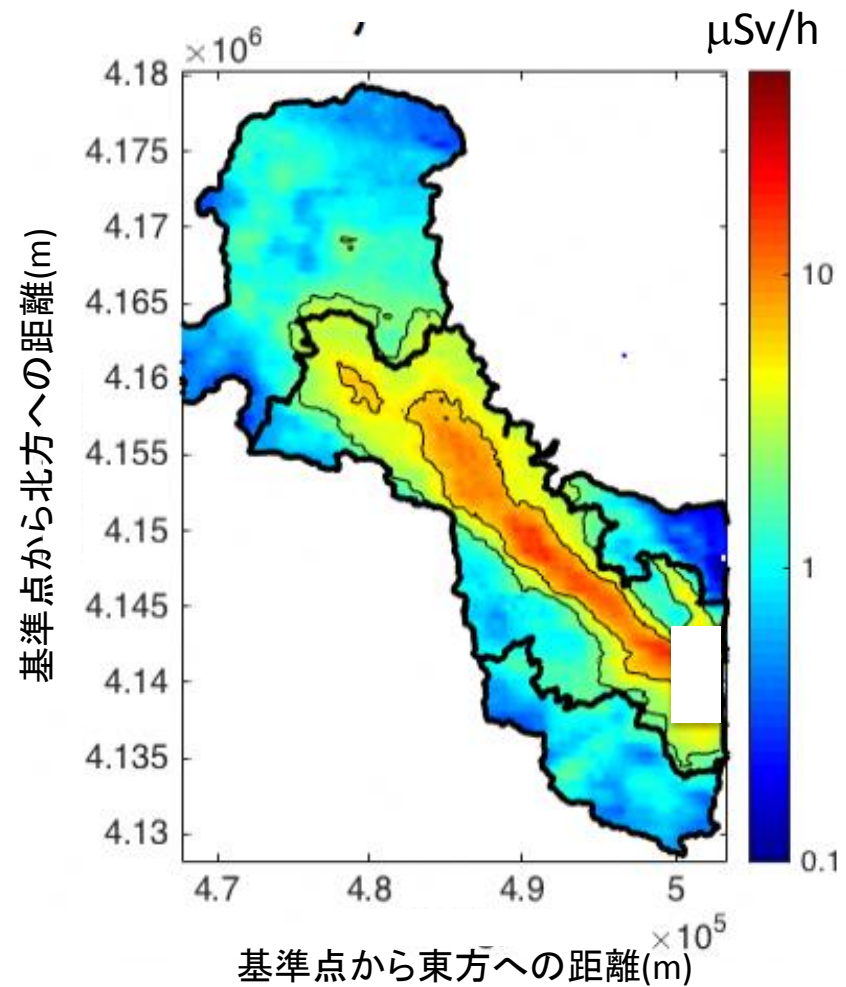
各変数の確率分布に対し、計算機を用いてサンプリングすることで最も尤もらしい空間線量率を推定

# 避難指示区域内の空間線量率の統合マップ(2016)

統合マップ



参考) 航空機モニタリング

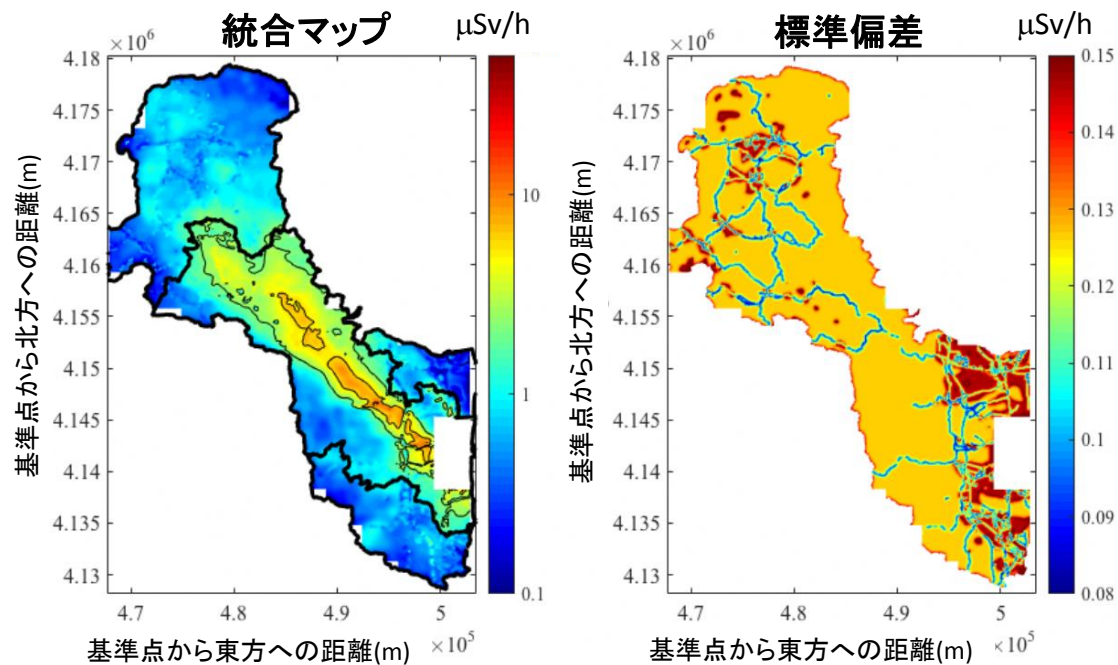


✓ 空間線量率の細かな構造が再現される

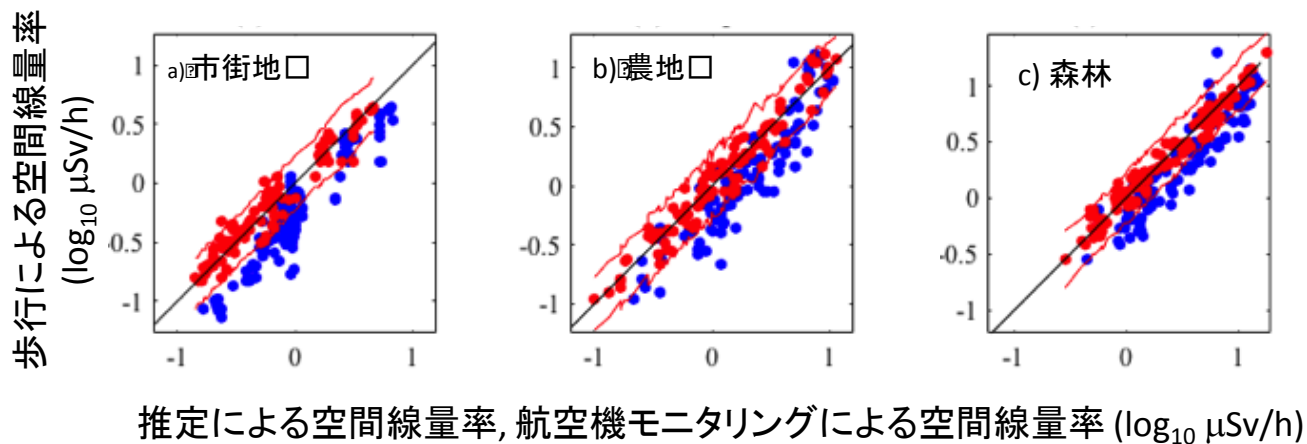
※黒の太線は2016年7月12日時点の避難指示区域(外側)と帰還困難区域(内側)

※黒の細線は年間の被ばく線量が20mSvと50mSvを示す等値線

# 統合マップの標準偏差と推定の検証



この統合手法により、不確かさの程度を示す標準偏差も計算される。標準偏差の赤い場所ほど値のばらつきが大きい。

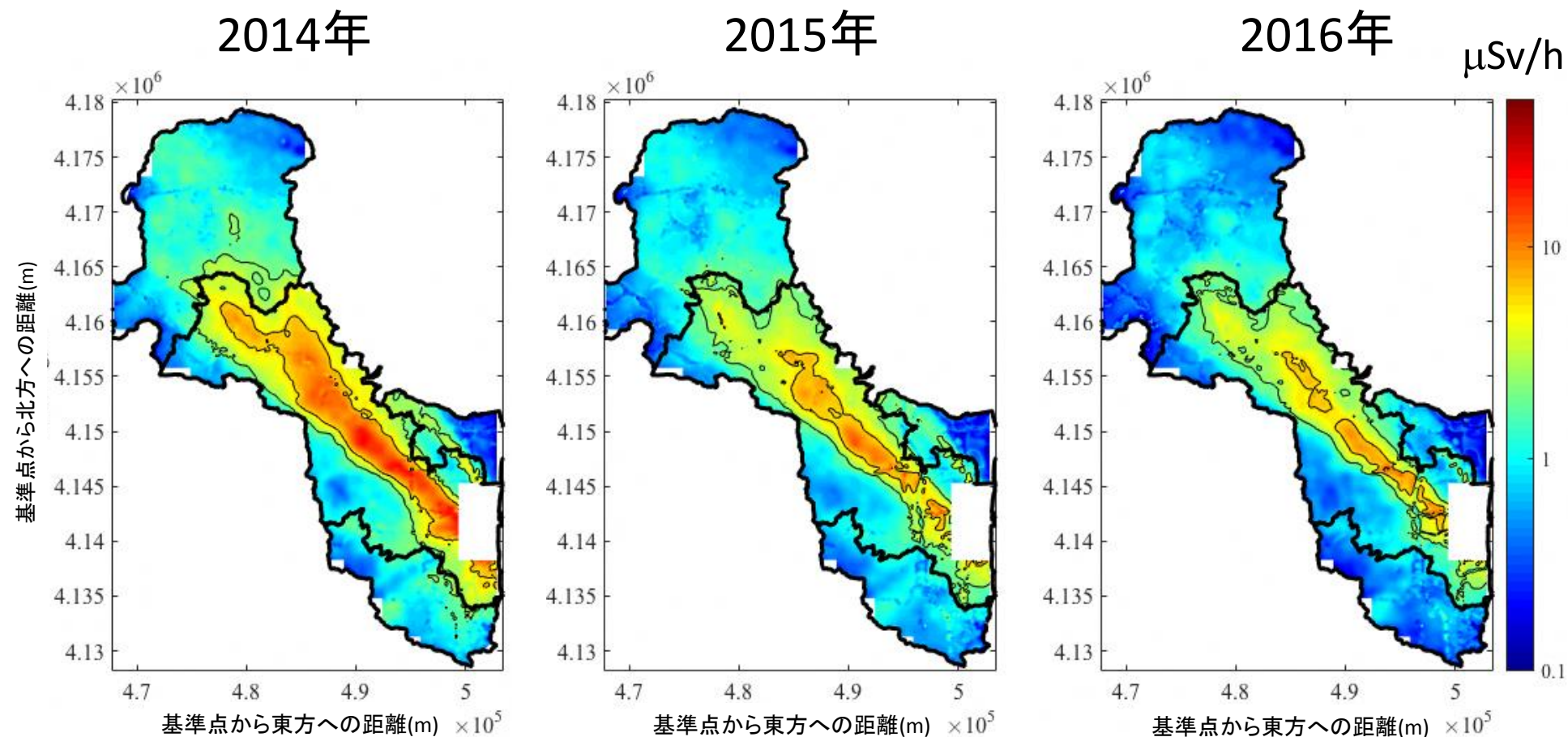


各土地利用状況における歩行サーベイデータを100点ずつ意図的に取り除いた後に推定を行い、99%信頼区間を求めた。推定した空間線量率と取り除いておいたデータの相関が、ほぼ99%信頼区間内に含まれ、1対1の直線近くに分布している。

—: 推定値の99%信頼区間、●: 推定値と歩行サーベイの相関、  
●: 航空機モニタリングと歩行サーベイの相関



# 避難指示区域内の3年間の空間線量率統合マップ



✓ 年間の被ばく線量が20mSvと50mSvを示す等値線(黒の細線)のかこむ領域が年々小さくなっている

※黒の太線は2016年7月12日時点の避難指示区域(外側)と帰還困難区域(内側)

# 統合マップの今後の展開

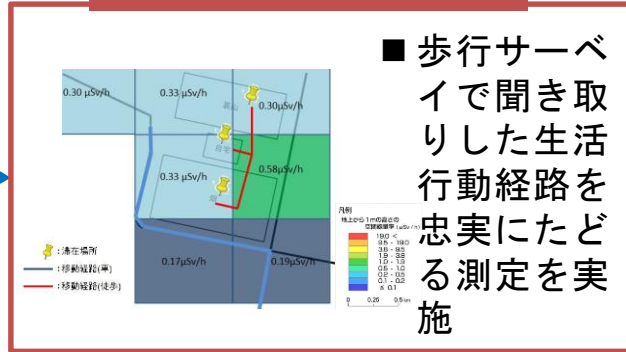
## 1. 生活行動パターン・経路に沿った空間線量率測定による個人線量推定

帰還後の具体的な生活行動経路の聞き取り

経路/場所の	地点(郡県)	移動手段	開始時刻	終了時刻
1	自宅(搬入)		0:00	5:30
2	自宅(リビング)		5:30	8:00
3		徒歩	8:00	8:05
4	裏山	徒歩	8:05	11:55
3		徒歩	11:55	12:00
2	自宅(リビング)		12:00	13:00
5		徒歩	13:00	13:05
6	畑	徒歩	13:05	13:50
7		徒歩	13:50	14:00

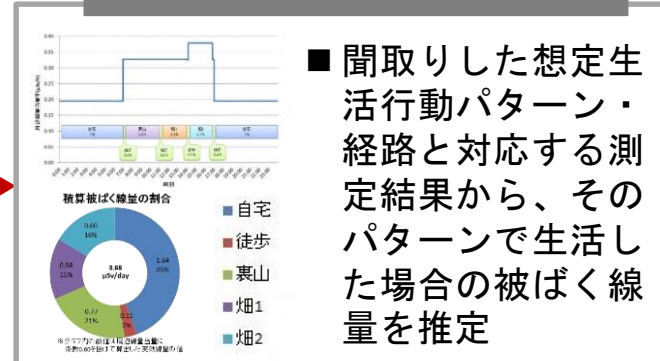
■ 帰還後に想定される生活について、滞在場所、滞在時間、移動経路、移動手段を聞き取り調査

行動経路に沿った詳細な空間線量率測定



■ 歩行サーベイで聞き取りした生活行動経路を忠実にたどる測定を実施

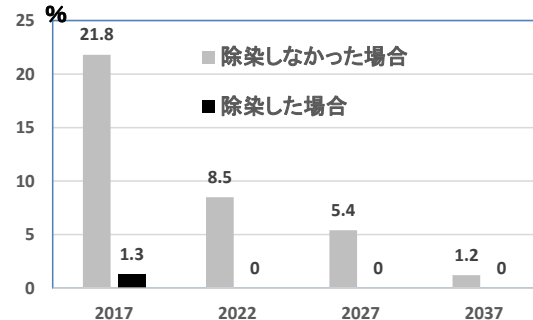
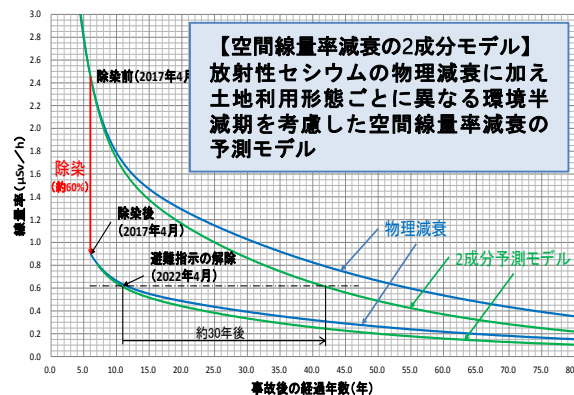
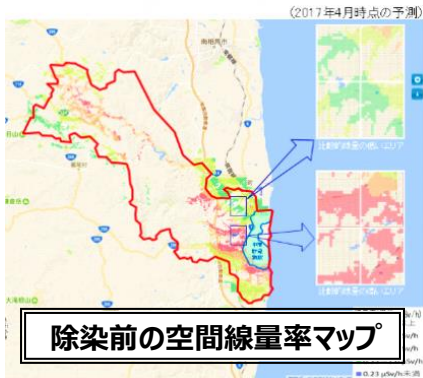
想定生活行動パターンにおける被ばく線量の推定



■ 聞き取りした想定生活行動パターン・経路と対応する測定結果から、そのパターンで生活した場合の被ばく線量を推定

歩行サーベイによる測定結果を統合マップからわかる空間線量率に変えることで任意のパターンの個人線量推定にも対応

## 2. 帰還困難区域での除染効果を考慮した空間線量率の予測



被ばく線量が年間20mSv以上相当の農地と宅地の割合

除染前の空間線量率マップを統合マップに変えることで、除染効果を空間的に高い分解能で確認

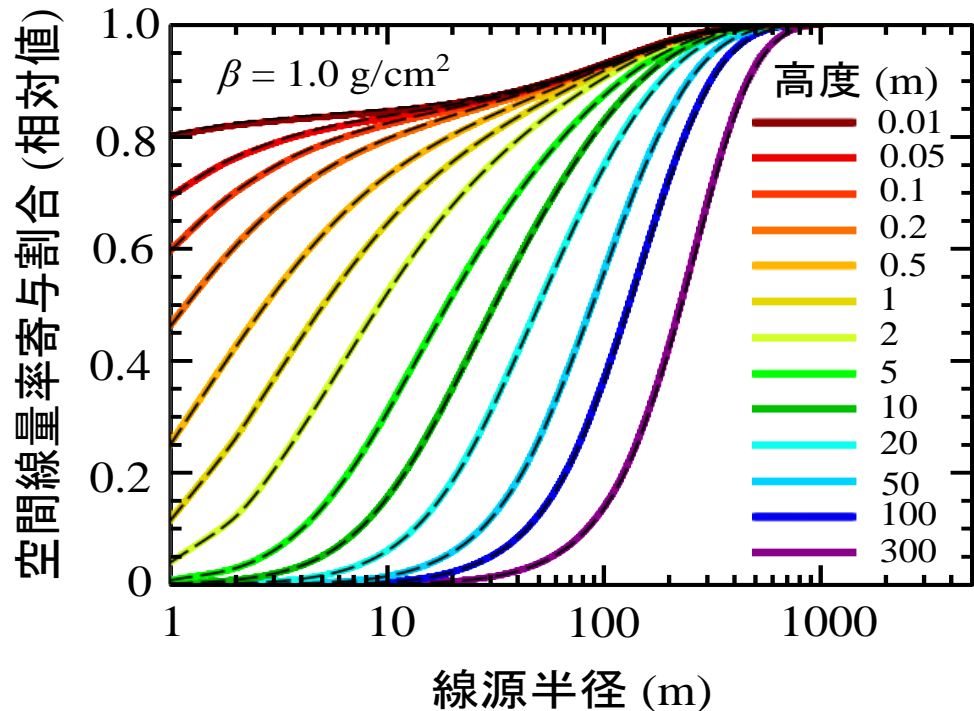
# まとめ

- ✓ 様々な空間線量率測定の特徴を考慮し、広域かつ精度や空間分解能の高い統合マップを階層ベイズモデルを用いて作成した。
- ✓ この統合手法を用いることで、系統的に偏っていた値が全体的に補正されるとともに、細かな分布状況が再現された。
- ✓ 統合マップの結果は、生活行動パターン・経路に沿った空間線量率測定による個人線量推定や、帰還困難区域での除染効果を考慮した空間線量率の予測に利用される予定。

ご清聴ありがとうございました

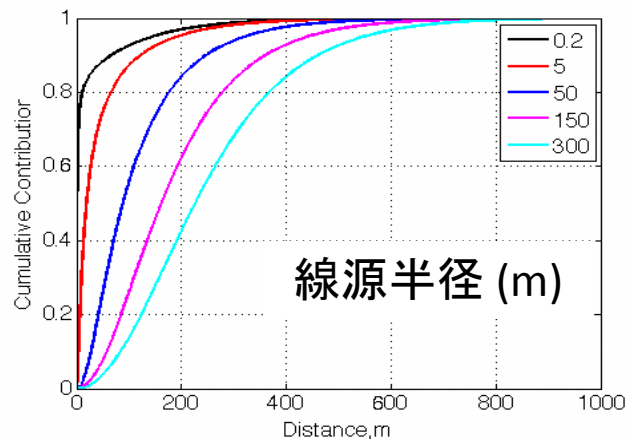
# 補足説明

# 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

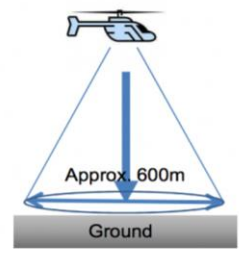


● 航空機モニタリングは半径 500 m 程度の広い範囲からのガンマ線を測定している

# 指数関数分布した放射性セシウム地中線源の線源半径と空間線量率への寄与割合の関係



Gamma rays from the ground are detected by NaI scintillators installed in an aircraft (e.g. helicopter) while flying approximately 300m above the ground with every 1 second in a row.



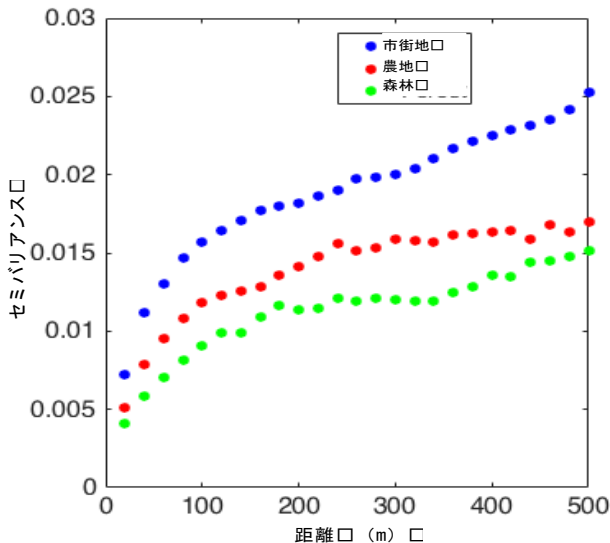
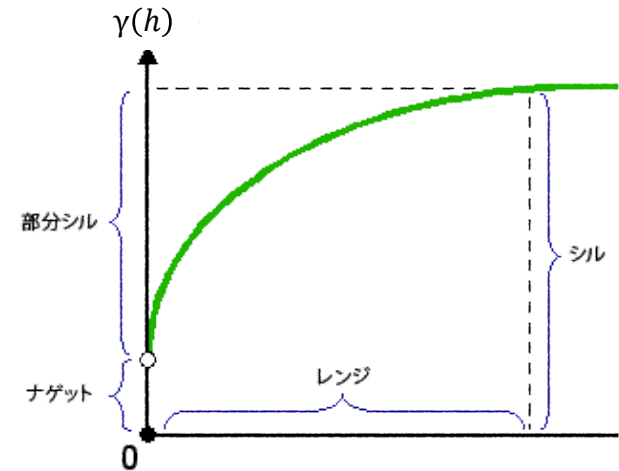
Malins et al. (2015)

# 歩行サーベイの自己相関関係

セミバリエンス: 距離の離れた2点間の空間線量率の相関。セミバリエ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。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2Nh} \sum_{j=1}^{N_h} (z_{W,j+h} - z_{W,j})^2$$

$\gamma$ : セミバリエンス  
 $N_h$ : 実測値の数  
 $z_{W,j}$ : 歩行サーベイの実測値



セミバリエンスの特徴からシステムモデルを決定

$$y_i \sim \text{Normal}(\sum w_{W,i,j} z_{W,j}, \tau^2 \mathbf{I} + \sigma^2 \mathbf{H}(\varphi))$$

$y_i$ : 歩行サーベイの推定値  
 $\text{Normal}(\cdot)$ : 正規分布  
 $w_{W,i,j}$ : 加重平均の係数  
 $z_{W,j}$ : 歩行サーベイの実測値  
 $\tau^2$ : ナゲット  
 $\sigma^2$ : シル  
 $\mathbf{H}(\varphi)$ : レンジに依存する関数 (指数関数で形状を近似)

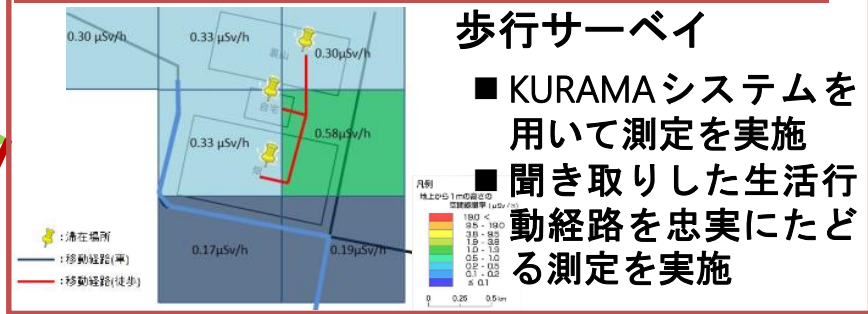
以上より、データモデル1、2とプロセスモデルが決定した。これらの分布関数(今回は全て正規分布)に、計算機を用いてサンプリングすることで、最も尤もらしい空間線量率を推定する

## 帰還後の具体的な生活行動経路の聞き取り

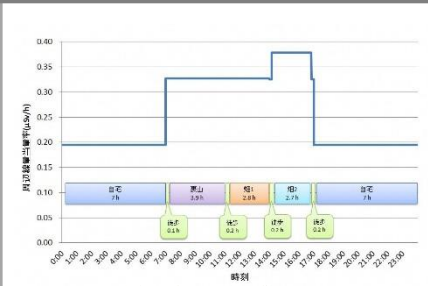
経路/場所ID	地点(部屋)	移動手段	開始時刻	終了時刻
1	自宅(寝室)		0:00	5:30
2	自宅(リビング)		5:30	8:00
3		徒歩	8:00	8:05
4	裏山		8:05	11:55
3		徒歩	11:55	12:00
2	自宅(リビング)		12:00	13:00
5		徒歩	13:00	13:05
6	畑		13:05	13:50
7		徒歩	13:50	14:00

■ 帰還後に想定される生活について、滞在場所、滞在時間、移動経路、移動手段を聞き取り調査

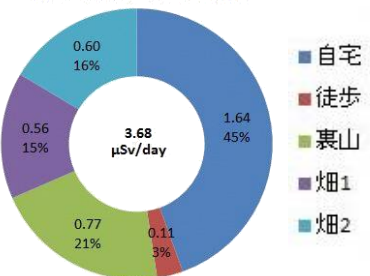
## 行動経路に沿った詳細な空間線量率測定



## 想定生活行動パターンにおける被ばく線量の推定



積算被ばく線量の割合

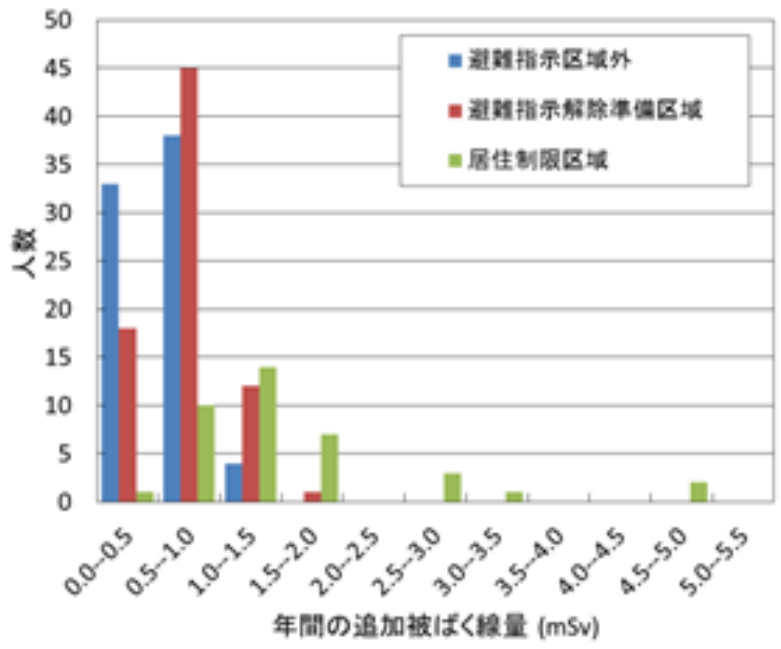


※グラフ内の数値は周辺線量当量に係数0.60を掛けて算出した実効線量の値

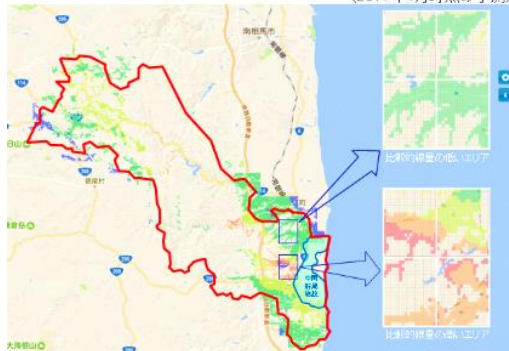
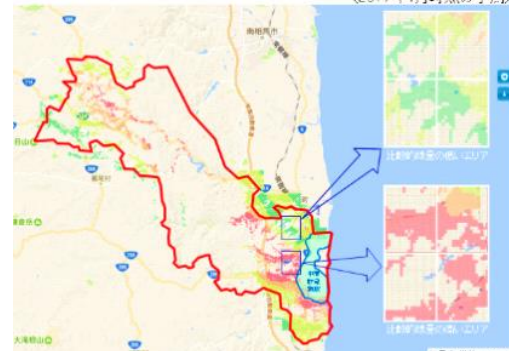
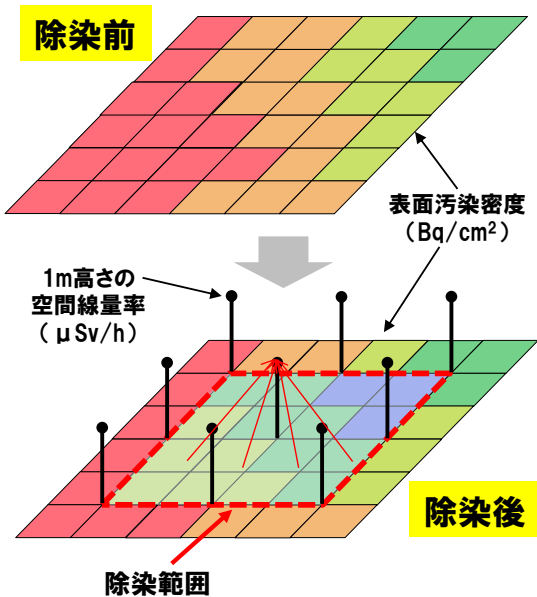
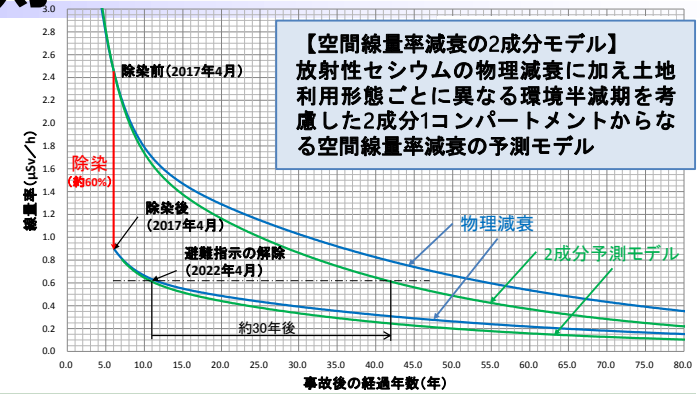
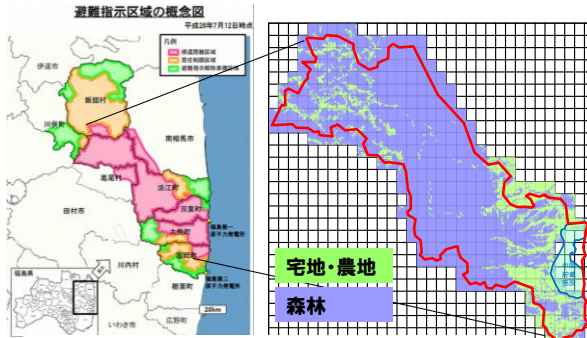
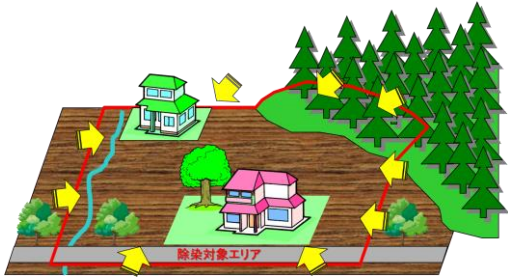
■ 聞き取りした想定生活行動パターン・経路と対応する測定結果から、そのパターンで生活した場合の被ばく線量を推定

■ 1日の生活における場所ごとの空間線量率や、被ばく量の割合を可視化

■ 複数のパターンを想定し年間の被ばく量も推定



# 帰還困難区域での除染効果を考慮した 空間線量予測



0.23  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ : 除染実施地域を定める際の基準(年間追加被ばく線量1 mSv相当)  
 1.0  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ : 除染ロードマップで示された段階的な除染実施区分の目安のひとつ  
 2.5  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ : 除染特別地域の作業における除染電離則の適用基準  
 3.8  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ : 避難指示解除の基準である年間の追加被ばく線量20mSvに相当

