

福島土壤の放射能汚染度と空間放射線量の分布と将来予測について



大瀧 慈¹、大谷 敬子¹、今中 哲二²、
遠藤 暁³、星 正治¹

1. 広島大学原爆放射線医科学研究所
2. 京都大学原子炉実験所
3. 広島大学大学院工学研究院

第1部 福島土壌の放射能汚染データの解析

昨年、実施された文科省による福島第一原子力発電所近隣地域の土壌放射能汚染調査データに基づいて、土壌放射能汚染の地理分布の現状実態を把握し、空間放射線量率との関連性について、分析することを目的とする。

福島土壌放射能汚染調査の概要

- 調査期間：2011年6月4日～7月8日
- 調査対象地域：福島県およびその周辺地域
(計2181地点)
- 調査担当者：大阪大学を中心に組織された全国の大学などの研究者および学生

福島土壤放射能汚染調査の概要

- 調査期間: 2011年6月4日
～7月8日
- 調査対象地域: 福島県およびその周辺地域
(計2181地点)
- 調査担当者: 大阪大学を中心に組織された全国の大学の研究者および学生

I. 空間線量率(1センチメートル線量等量率)の測定及び土壌試料の採取実施記録									
班 名		記録シートID: 201106230002		年月日		2011年 6月 23日			
構成員の氏名 (番号は確認者コード)		①	測定(採取)日時		時刻		時		分
		②							
		③							
測定(採取)場所		緯度(北緯) <60進表記>			経度(東経) <60進表記>				
		度	分	秒	度	分	秒		
		N ° ' "			E ° ' "				
住 所									
確認者									
II. 空間線量率(1センチメートル線量当量率)測定記録									
測定器の型式 及び識別番号等		☐ NaI(Tl)シンチレーション式		測定方法		γ線: サーベイ法			
		☐ 電離箱式(30μSv/h以上の場合)		バックグラウンド値		(μSv/h)			
		型式		校正定数		(平成 年 月 日)			
		識別番号		(校正線源)		(平成 年 月 日)			
				(校正有効期限)		(平成 年 月 日)			
読み値(μSv/h)		線量当量率(μSv/h)		天候・特記事項		確認者			
注1)測定位置は、地表から約1mの高さとし、カメラの三脚等で固定する、腕を伸ばすなどの状態で測定する。									
注2)線量当量率(μSv/h)は、読み値(μSv/h)×測定器の校正定数									
III. 土壌試料採取状況記録									
資料番号		採取者							
容器種別		☐ U-8型		土壌の種類 (容器の写真撮影)		☐ 済			
線量当量率(μSv/h) (土壌試料採取容器表面)		①	②	③	④	⑤			
地 目 (土地の使用状況)		水田・畑・樹園地(果樹園・桑園・茶畑)・草地・荒地・裸地・ その他(); (土地の使用状況:)							
番号	チェック項目								確認者
1	測定点が私有地である場合について、事前に許可は得られているか。								
2	周囲約5mまでに大きな遮蔽物(車、建物等)がないこと。								
3	周囲約3×3mまでに急激な線量当量率の変化(数倍以上)がないこと。								
4	容器表面、封入袋への資料番号および採取年月日等の情報のラベリング								
5	土壌試料採取後の容器、採取器類の除染の実施								
6	土壌採取地点を含む周辺環境がわかる写真を撮影したか。								

調査方法

放射線量等分布マップ作成用DBの構築に関する検討メモ

2011年6月22日
システム計算科学センター

1. 管理対象とするデータについて

以下のデータを管理対象とする。

- (1) 計測・分析実施機関にて作成した計測・分析データ。
- (2) マップ作成に必要な被災等の補正や入力ミスの修正を施した修正・修正データ。
- (3) 成層圏となるマップデータ（空間線量率マップ、土壌線量率マップ（ ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs ）を作成予定。その他の核種や河川・地下水および土壌30cm深さ方向のマップは検討中）

2. データの登録について

計測・分析作業担当機関から直接登録させることは、セキュリティ上からもデータ整合性維持の観点上からも好ましくない。当初メールによる送付を検討していたが、1回の送付毎に制限があること、紛失、漏洩の危険性があることから、アップロードサーバへのSSL/VPNを用いたデータ送付を検討している。計測・分析担当機関から送付されたデータのDBへの登録はシステム計算センター（以下、CCSE）が一括して実施する。SSL/VPN利用に必要なハードウェアトークン（one-time パスワード発行装置）は、CCSEから各機関に提供予定。

3. 登録データの送付形式について

計測・分析作業は既に実施されており、多くのデータについて形式が定められていることから、計測・分析実施機関によって策定された形式に基づく電子データを送付いただく。一部手書きのデータに関しては郵送いただき、CCSEが電子化する。

4. 送付データのDB登録形式について

早期のマップ公開が要求されている福島県内走行サーベイデータ、土壌採取時に測定した空間線量率データ、土壌分析データから図に、各機関からの送付データに関する格納形式を検討中。

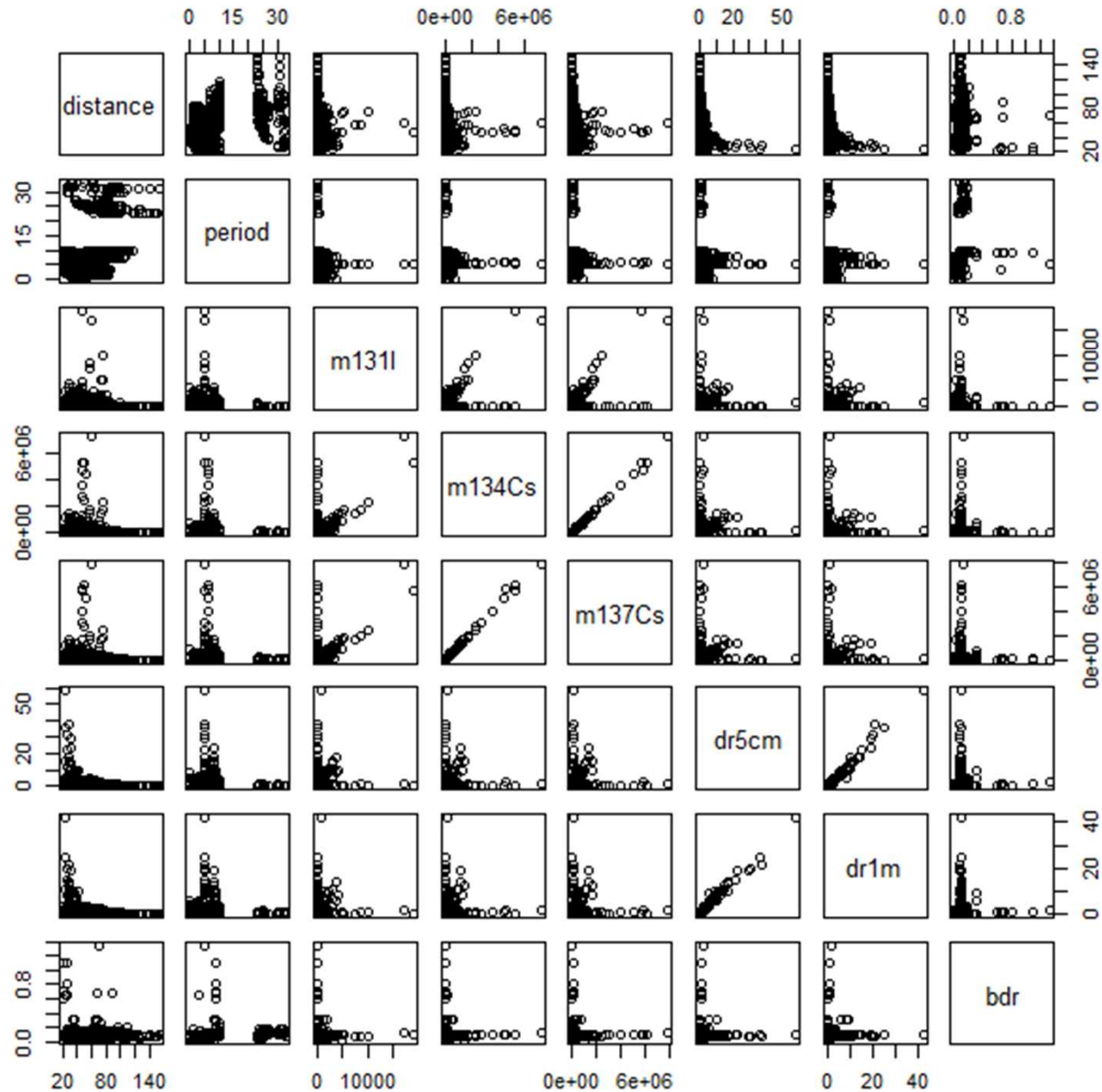
5. 登録データへのアクセスについて

- 登録したデータへのアクセスに関しては、3レベルの制限を想定する。
- (1) 管理者レベル：全てのデータに対して登録、削除、放出が可能。
 - (2) 参加機関レベル：全てのデータに対して読出しが可能。
 - (3) 一般レベル：文科省が公開すると認可した（ex. マップデータ等成果物）に対して

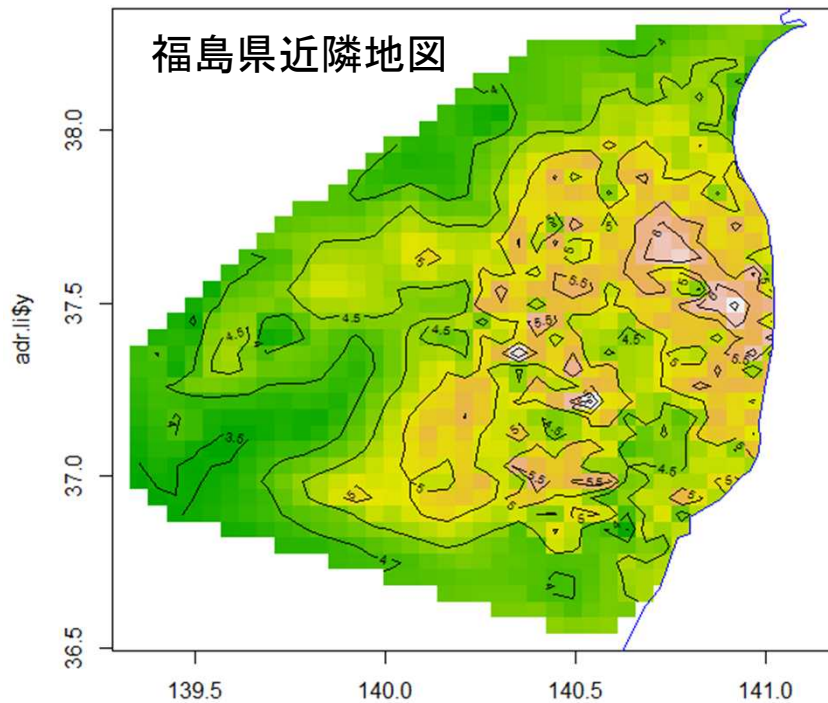
- 土壌サンプリングの日時と場所（緯度、経度）
- 福島第一原子力発電所からの直線距離
- 核種別土壌汚染度（ ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs ）
- 空間線量率（高度1m、 $\mu\text{Sv/h}$ ）と地表線量率（高度5cm、 $\mu\text{Sv/h}$ ）
- 個人線量の値（ μSv ）
- 天候状況（調査時（日）での降水の有無）
- サンプリング地点の特徴（自由記載）



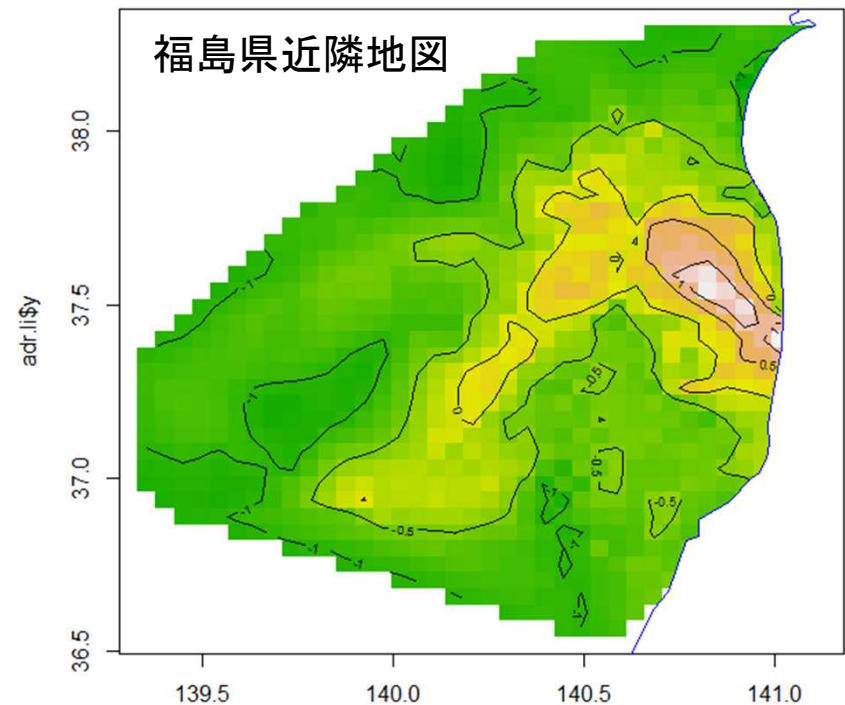
主な変数の相関プロット



福島県の放射能(Cs134 & Cs137)汚染と 空間放射線量率(地上1m)

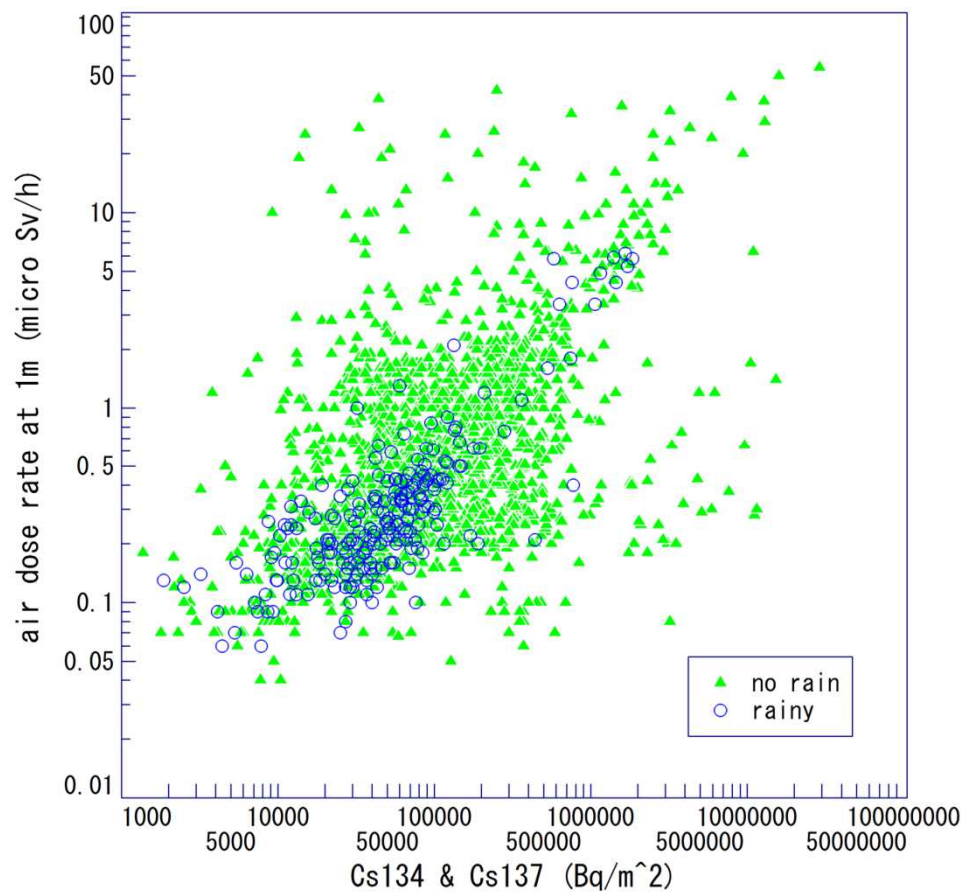
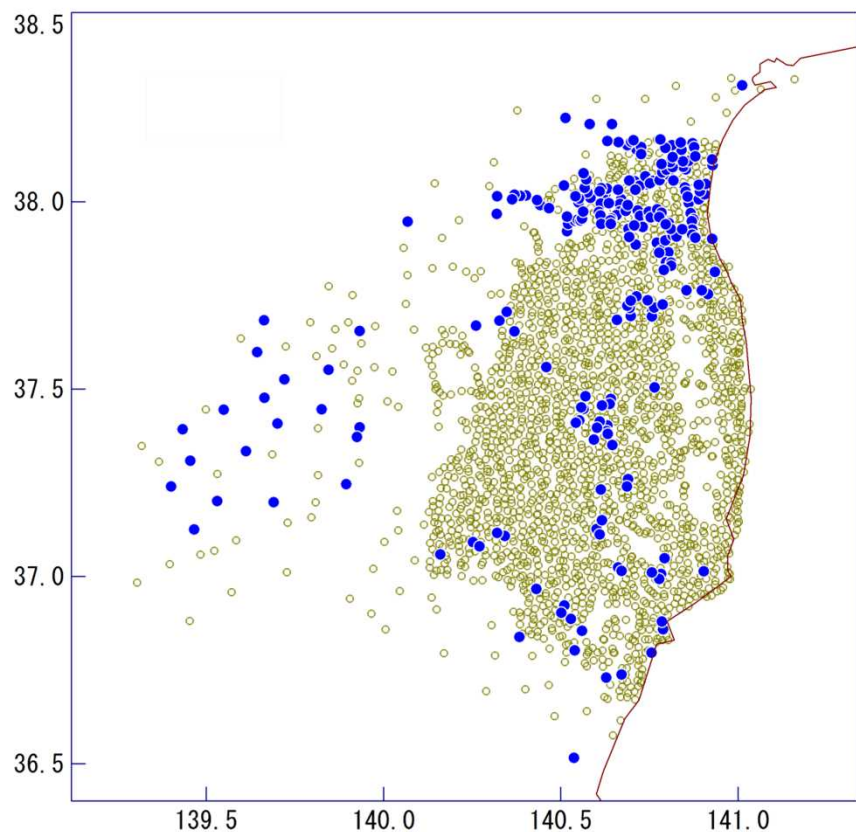


土壌の放射能汚染度



空間放射線量率

降雨の有無別サンプリング地点の地理分布と 土壌のセシウム濃度と空間放射線量率



降水有りの日のデータに対する単回帰分析

目的変数: 降水有りの日でのサンプリングによる地上1mでの空間放射線量率

説明変数: 同直下の土壌放射能 (Cs134 & Cs137) 濃度 (Bq/m²)

- `adr <- read.csv("adr_rain.csv")`
- `> mCs.lg <- adr$lmCs` # Cs濃度の常用対数値
- `> dr1m <- adr$dr1m`
- `> dr1m.lg <- log(dr1m,10)` # 空間放射線量率の常用対数値
- `> res <- lm(dr1m.lg ~ mCs.lg)` # 単回帰分析
- Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-3.6776	0.1559	-23.60	<2e-16 ***
mCs.lg	0.6565	0.0331	19.82	<2e-16 ***
- -----
- Residual standard error: 0.2507 on 222 degrees of freedom
- Multiple R-squared: 0.6388, Adjusted R-squared: 0.6372

降水有りの日のデータに対する重回帰分析

目的変数: 降水有りの日でのサンプリングによる地上1mでの空間放射線量率

説明変数: 同直下の土壌放射能 (Cs134 & Cs137) 濃度, 緯度, 経度, 距離

- `> adr <- read.csv("adr_rain.csv")`
- `> xe <- adr$longitude-141.0` # 測定地座標(経度)
- `> yn <- adr$latitude-37.4` # 測定値座標(緯度)
- `> mCs.lg <- adr$lmCs`
- `> dist <- adr$distance` # 原発からの直線距離(km)
- `> dr1m <- adr$dr1m`
- `> dr1m.lg <- log(dr1m,10)`
- `> res <- lm(dr1m.lg ~ mCs.lg + dist + yn + xe + yn*xe)`

- Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-3.01227	0.22400	-13.447	< 2e-16 ***
mCs.lg	0.57952	0.03860	15.012	< 2e-16 ***
dist	-0.00606	0.00141	-4.302	2.56e-05 ***
yn	-0.04520	0.09502	-0.476	0.63481
xe	-0.30231	0.09679	-3.123	0.00203 **
yn:xe	-0.18788	0.19145	-0.981	0.32751

- Residual standard error: 0.2357 on 218 degrees of freedom

- Multiple R-squared: 0.6866, Adjusted R-squared: 0.6794

降水無しの日へのデータに対する単回帰分析

目的変数: 降水無しの日でのサンプリングによる地上1mでの空間放射線量率

説明変数: 同直下の土壌放射能 (Cs134 & Cs137) 濃度 (Bq/m²)

```
> adr <- read.csv("adr_nonrain.csv")
> mCs.lg <- adr$lmCs                # Cs濃度の常用対数値
> dr1m <- adr$dr1m
> dr1m.lg <- log(dr1m,10)           # 空間放射線量率の常用対数値
> res <- lm(dr1m.lg ~ mCs.lg)       # 単回帰分析
```

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-2.67487	0.08498	-31.48	<2e-16 ***
mCs.lg	0.47466	0.01695	28.00	<2e-16 ***

Residual standard error: 0.4413 on 1955 degrees of freedom

Multiple **R-squared: 0.2863**, Adjusted R-squared: 0.2859

降水無しの日へのデータに対する重回帰分析

目的変数: 降水無しの日でのサンプリングによる地上1mでの空間放射線量率

説明変数: 同直下の土壌放射能(Cs134 & Cs137)汚染度, 緯度, 経度, 距離

- `adr <- read.csv("adr_nonrain.csv")`
- `> xe <- adr$longitude-141.0` # 測定地座標(経度)
- `> yn <- adr$latitude-37.4` # 測定値座標(緯度)
- `> mCs.lg <- adr$lmcS` # Cs濃度の常用対数値
- `> dist <- adr$distance` # 原発からの直線距離(km)
- `> dr1m <- adr$dr1m`
- `> dr1m.lg <- log(dr1m,10)` # 空間放射線量率の常用対数値
- `> res <- lm(dr1m.lg ~ mCs.lg + dist + yn + xe + yn*xe)`

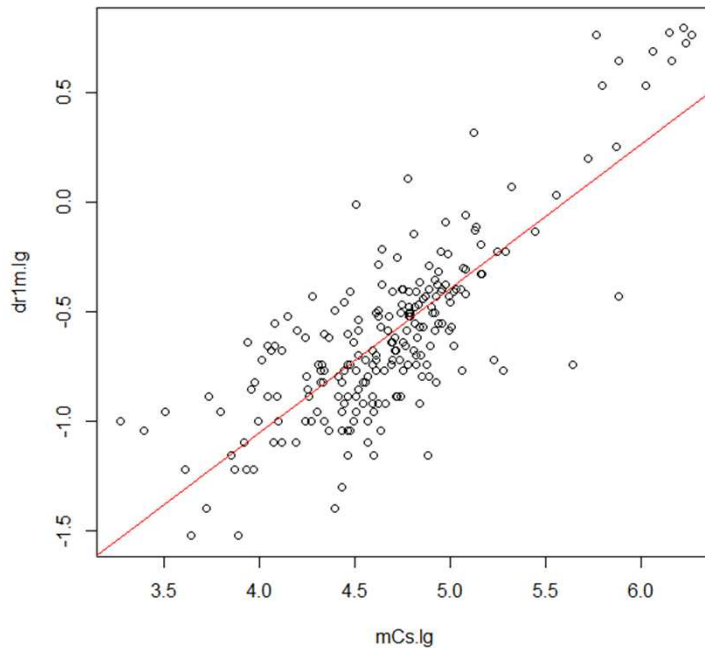
• Coefficients:

- | | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-------------|----------|------------|---------|-------------|
| (Intercept) | -1.05797 | 0.08985 | -11.775 | < 2e-16 *** |
| mCs.lg | 0.27077 | 0.01557 | 17.387 | < 2e-16 *** |
| dist | -0.01619 | 0.00062 | -26.299 | < 2e-16 *** |
| yn | 0.43384 | 0.04600 | 9.432 | < 2e-16 *** |
| xe | -0.70995 | 0.04822 | -14.724 | < 2e-16 *** |
| yn:xe | 0.31184 | 0.10812 | 2.884 | 0.0040 ** |

- -----
- Residual standard error: 0.3641 on 1951 degrees of freedom
- Multiple R-squared: 0.515, Adjusted R-squared: 0.514

調査時降雨の有無別空間放射線量率と 土壌放射能汚染度の相関

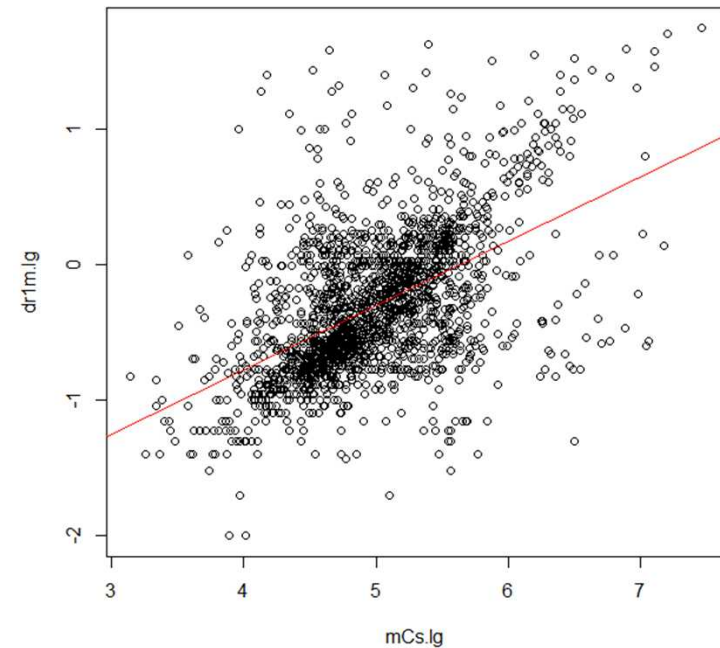
降雨有り



$$R^2 = 0.639$$

(背景要因を追加使用した
重回帰分析による $R^2 = 0.69$)

降雨無し

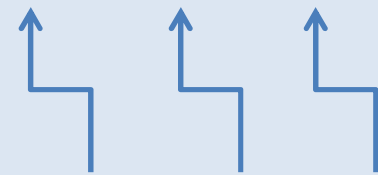


$$R^2 = 0.286$$

(背景要因を追加使用した
重回帰分析による $R^2 = 0.52$)

空間放射線，土壤放射線と降雨の関係

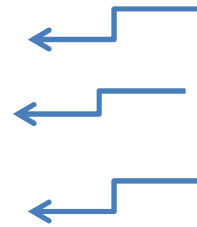
空間放射線量



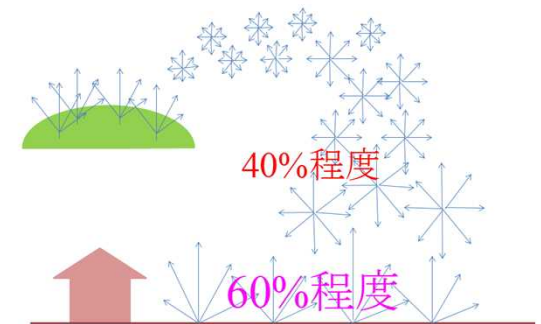
土壤放射線量

2012/11/18

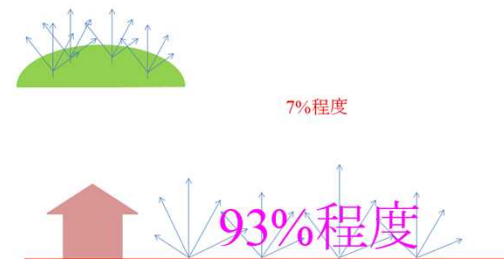
森など



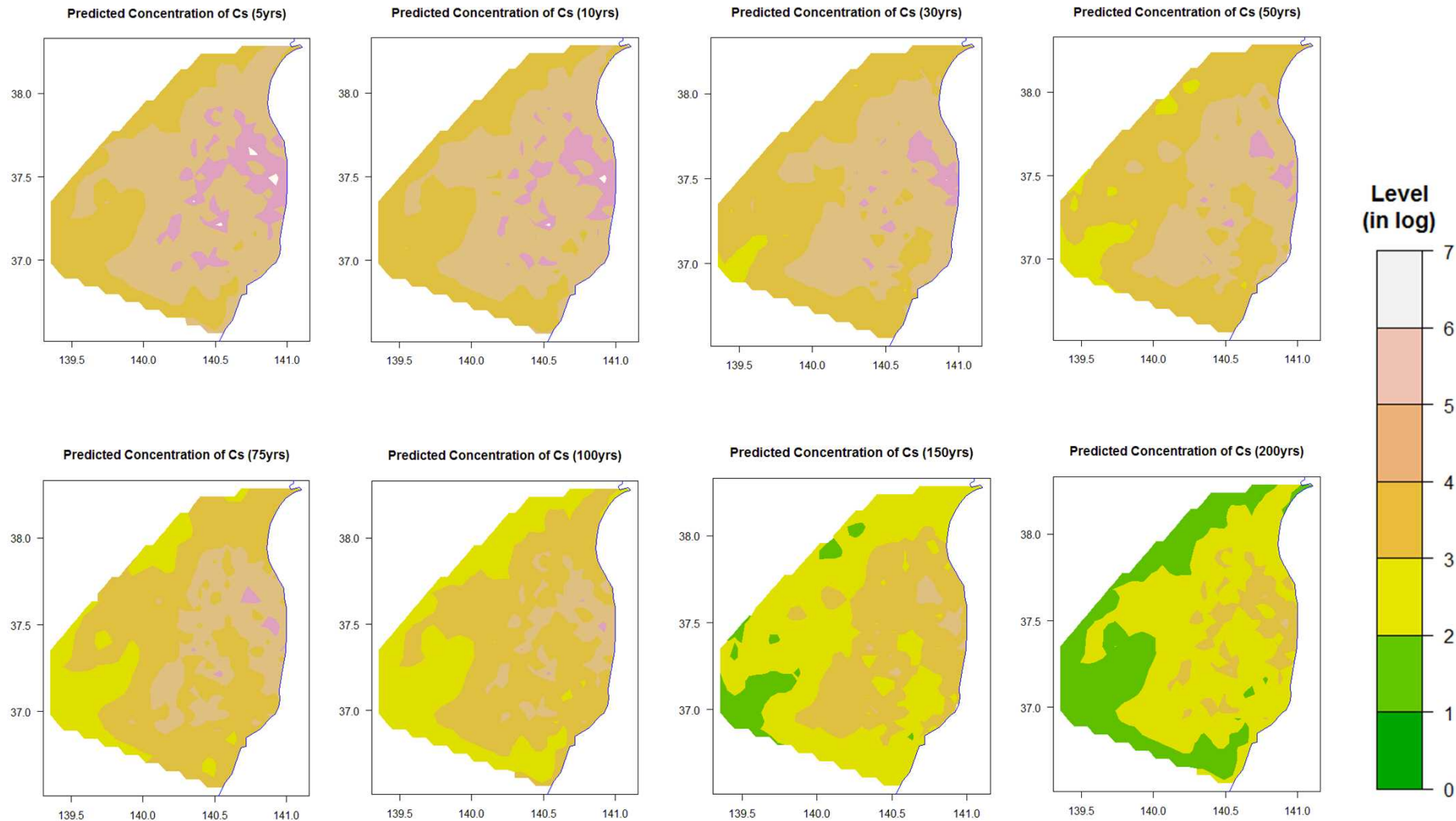
晴れや曇りの日の放射線被曝(仮説)



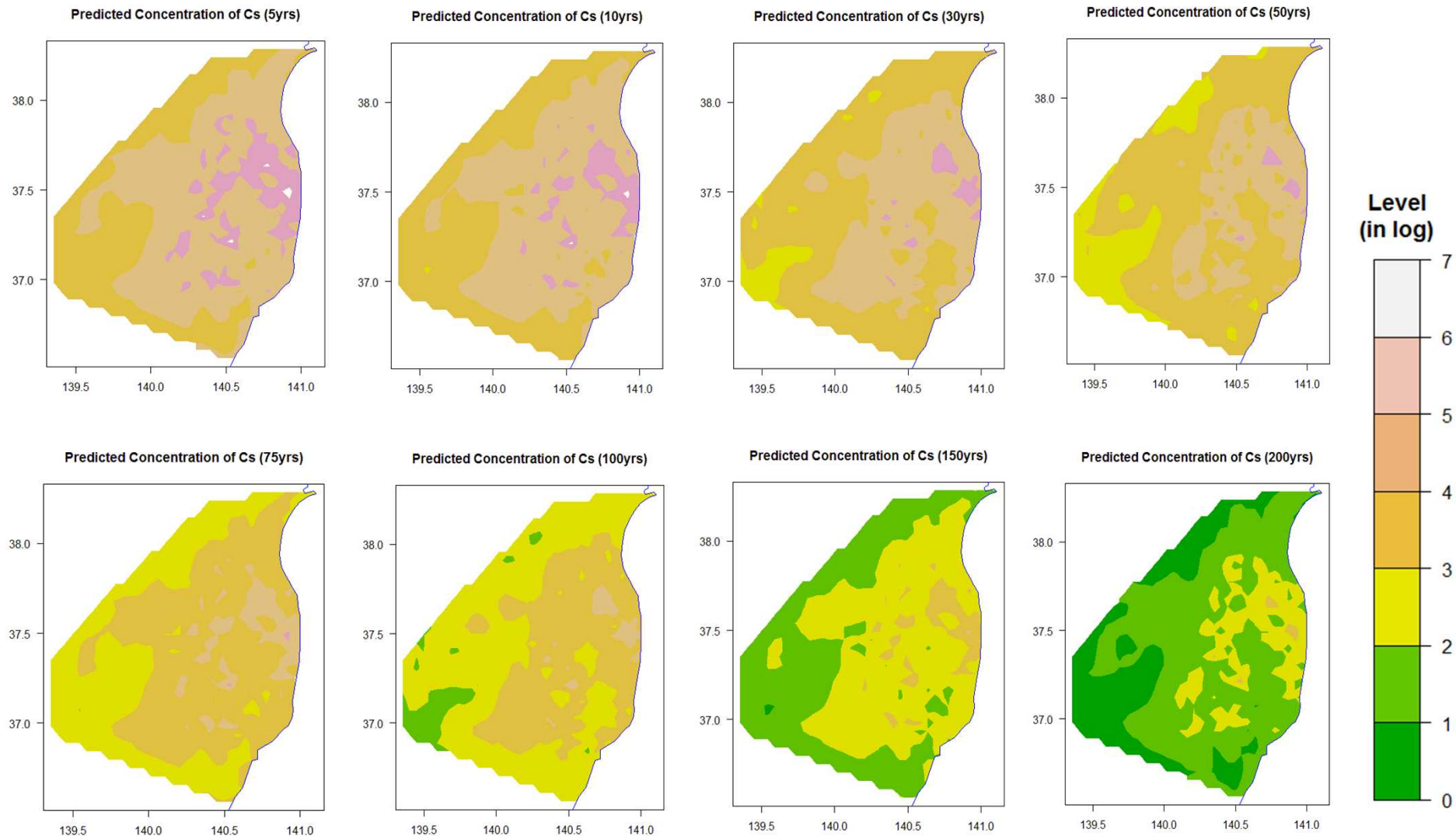
雨の日の放射線被曝(仮説)



福島土壤の放射能汚染状況の将来予測 (超過減少率0%/年とした場合)



福島土壤の放射能汚染状況の将来予測 (超過減少率1%/年とした場合)



第1部のまとめ

- 福島第一原子力発電所の近隣地区の土壌の放射能汚染度と空間放射線量率の地理分布を推定した。
- 土壌の放射能汚染度と空間放射線量率の相関は、測定日に降水がある場合高くなり、決定係数は64%になったが、降水のない日のデータでは、相関が低く、決定係数は29%であった。
- 土壌の放射能汚染度の地理分布の将来予測を試行した。福島県の東部を中心に、 1000 Bq/m^2 以上の汚染が100年以上継続することが予測された。

第2部

空間放射線量率の時空間分布

福島第一原子力発電所の事故により漏出した放射性物質に関して、放射性物質の半減期に基づく理論的空間放射線量率による調整を行った上で、事故後の東日本の各地点における時点ごとの空間放射線量率と、事故日からの経過日数、および降雨の有無などの天候状況との関連性について調べ、それらの時空間分布の特徴について検討する。

資料

〈市民生活への影響〉各地で観測された大気中の放射線量＝2011年5月30日朝刊

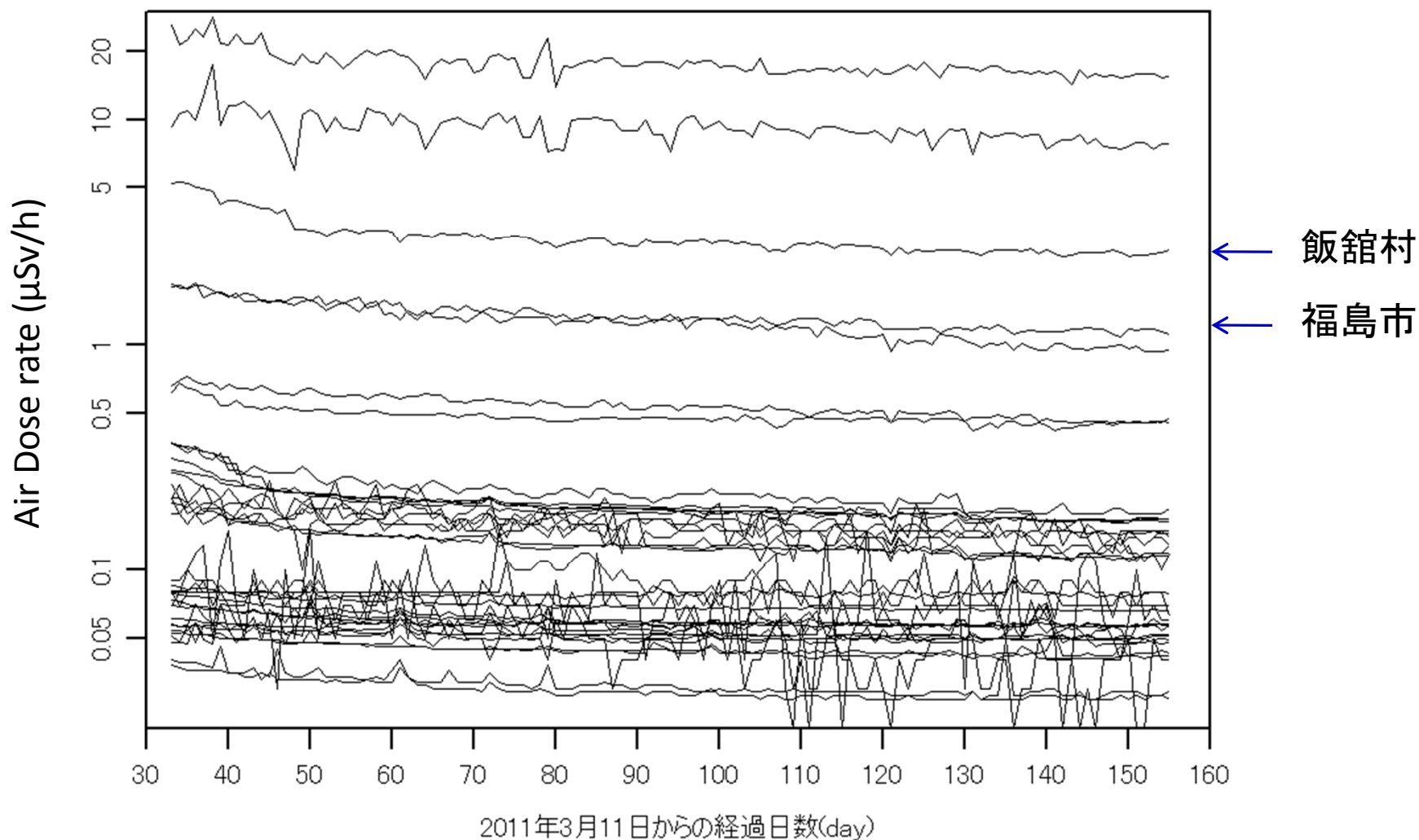


本研究で扱った資料は、
2011年4月13日から8月13日の123日間に亘って朝日新聞の朝刊に掲載された東日本の36地点で計測された空間放射線量率(μSv/h)である。
なお、この期間の測定地点ごとの天候情報については、気象庁のホームページに掲載されている測定点に最近隣のアメダスデータを使用した。

IIP	IP	longitude	latitude	distance	day	rad	meter	rainfall	wind	north	east	south	west
1	4100	140.87	38.27	95.401	33	0.09	1	0	4.8	0	0	0	1
1	4100	140.87	38.27	95.401	34	0.09	1	0	2.1	0	1	1	0
1	4100	140.87	38.27	95.401	35	0.1	1	0	2.2	0	1	1	0
}													
1	4100	140.87	38.27	95.401	153	0.08	1	0	3.3	0	0	0	1
1	4100	140.87	38.27	95.401	154	0.08	1	-9	2.6	0	0	0	1
1	4100	140.87	38.27	95.401	155	0.063	0	-9	3	0	0	1	0
2	4206	140.62	38	74.245	33	0.21	1	0	6.2	0	0	0	1
2	4206	140.62	38	74.245	34	0.24	1	0	4.8	0	0	0	1
2	4206	140.62	38	74.245	35	0.2	1	0	2.2	0	0	0	1
}													
2	4206	140.62	38	95.401	153	0.12	1	0	3.9	0	0	0	1
2	4206	140.62	38	95.401	154	0.1	1	0	3.5	0	0	0	1
2	4206	140.62	38	95.401	155	0.12	1	0	1.5	0	0	1	0
3	6201	140.35	34.25	111.094	33	0.053	0	0	3	0	0	1	1
3	6201	140.35	34.25	111.094	34	0.053	0	0	2.3	0	0	1	1

東日本の各地で測定された 空間放射線線量率の経日変動

37地点の空間放射線量の経時変化



放射性物質の半減期に基づく 理論的空間放射線量率

漏出された放射性物質が、汚染地点において固定されており、それから出される放射線の線量率は、放射性物質の半減期に従って減衰するものとした場合の、事故発生から t 日後の地点 i での理論的空間放射線線量率(1)で与えられる.

$$h(t | \beta_{1i}, \beta_{2i}) = C + \beta_{1i} \frac{2.7 \times 2^{-\frac{t}{753.7}} + 1.0}{3.7} + \beta_{2i} 2^{-\frac{t}{8.02}} \quad (1)$$

ここで、事故直前の自然空間放射線量率 $C=0.076 \mu \text{ Sv/h}$,
 Cs134 の半減期は2.065年, Cs137 の半減期は30.2年, I131 の半減期は, 8.02日とした.

天候などの他の共変量を考慮したモデル

天候などの環境状況に関する共変量ベクトル
が与えられている場合, (2) であらわされるモデルが考えられる.

$$y_i(t) = h(t \mid \beta_{1i}, \beta_{2i}) \exp(\gamma' z_{it} + \sigma_i \varepsilon_{it}) \quad (2),$$

ここで, γ' は未知母数ベクトルであり $\sigma_i \varepsilon_{it}$ は,
測定誤差などを表す項で $N(0, \sigma_i^2)$ に従う確率変数である.
(2)を対数変換すると, (3)式が得られる.

$$\log y_i(t) = \log h(t \mid \beta_{1i}, \beta_{2i}) + \gamma' z_{it} + \sigma_i \varepsilon_{it} \quad (3)$$

モデル その2

$$\log\{y_i(t)\} - \log\{h(t \mid \hat{\beta}_{1i}, \hat{\beta}_{2i})\} = \gamma_{1i} \cdot day_{it} + \gamma_{2i} \cdot rain_{it} + \\ \gamma_{3i} \cdot (rain_{it} \times day_{it}) + \gamma_{4i} \cdot (wind_{it}) + \gamma_{5i} \cdot (wind_{it} \times day_{it}) + \varepsilon_{it}, \\ \varepsilon_{it} \sim N(0, \Sigma_i)$$

day : 事故後の経過日数

$$rain = \begin{cases} 1 & (> 3mm / day) \\ 0 & (\leq 3mm / day) \end{cases} \quad (\text{一日合計雨量})$$

$$wind = \begin{cases} 1 & (> 1.5m / s) \\ 0 & (\leq 1.5m / s) \end{cases} \quad (\text{一日平均風速})$$

風向: 最大瞬間風速の風向

$rain \times day$: 事故後の経過日数と降雨の交互作用

$wind \times day$: 事故後の経過日数と南風の交互作用

一般化最小二乗法 (GLS)

$$y = X\gamma + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \Sigma)$$

重み付き最小二乗推定量は

$$\gamma_{GLS} = (X'\Sigma^{-1}X)^{-1}X'\Sigma^{-1}y$$

残差に一次の自己相関を仮定: $\varepsilon_t = \rho\varepsilon_{t-1}$

$$\Sigma = \sigma^2 \begin{bmatrix} 1 & \rho & \rho^2 & \cdots & \rho^{n-1} \\ \rho & 1 & \rho & \cdots & \rho^{n-2} \\ \rho^2 & \rho & 1 & \cdots & \rho^{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho^{n-1} & \rho^{n-2} & \rho^{n-3} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

推定された回帰係数（飯舘村）

Variable	Value	Std.Error	t-value	p-value
(Intercept)	0.0373	0.02146	1.736	0.085
day	-0.0004	0.00021	-1.78	0.078*
rain	-0.047	0.01829	-2.576	0.011**
wind	0.0284	0.05027	0.565	0.573
day × rain	0.0002	0.00019	1.298	0.197
day × wind	-0.0002	0.00079	-0.301	0.764

*: $0.05 < p < 0.1$; **: $0.01 < p \leq 0.05$; ***: $p < 0.01$

$$R^2 = 0.388$$

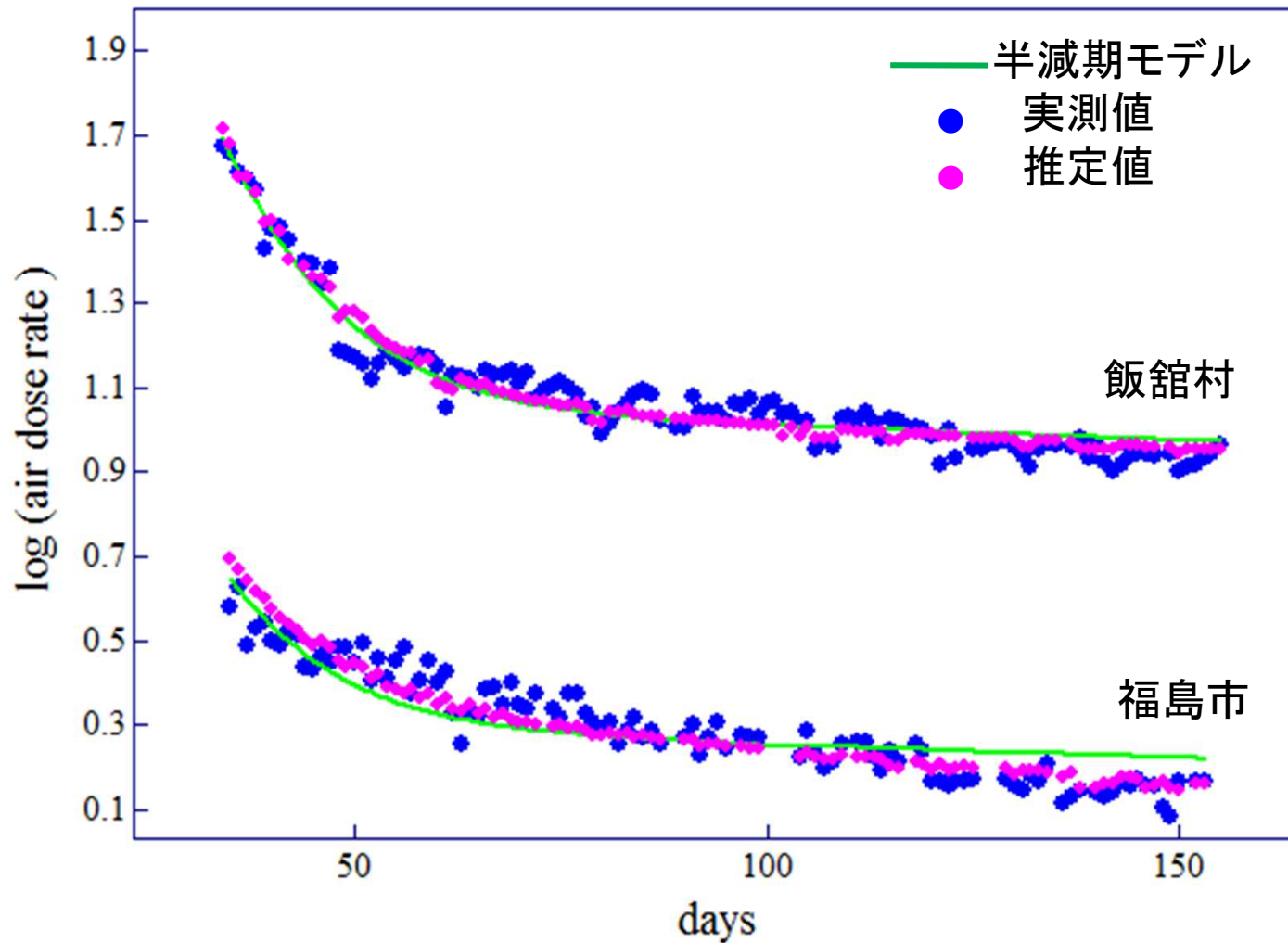
推定された回帰係数(福島市)

Variable	Value	Std.Error	t-value	p-value
(Intercept)	0.07771	0.02495	3.115	0.002
day	-0.0009	0.00026	-3.521	0.001***
rain	0.01227	0.0241	0.509	0.612
wind	0.03944	0.02067	1.909	0.059*
day × rain	-0.0002	0.00023	-0.953	0.343
day × wind	-0.0004	0.00021	-1.8	0.075*

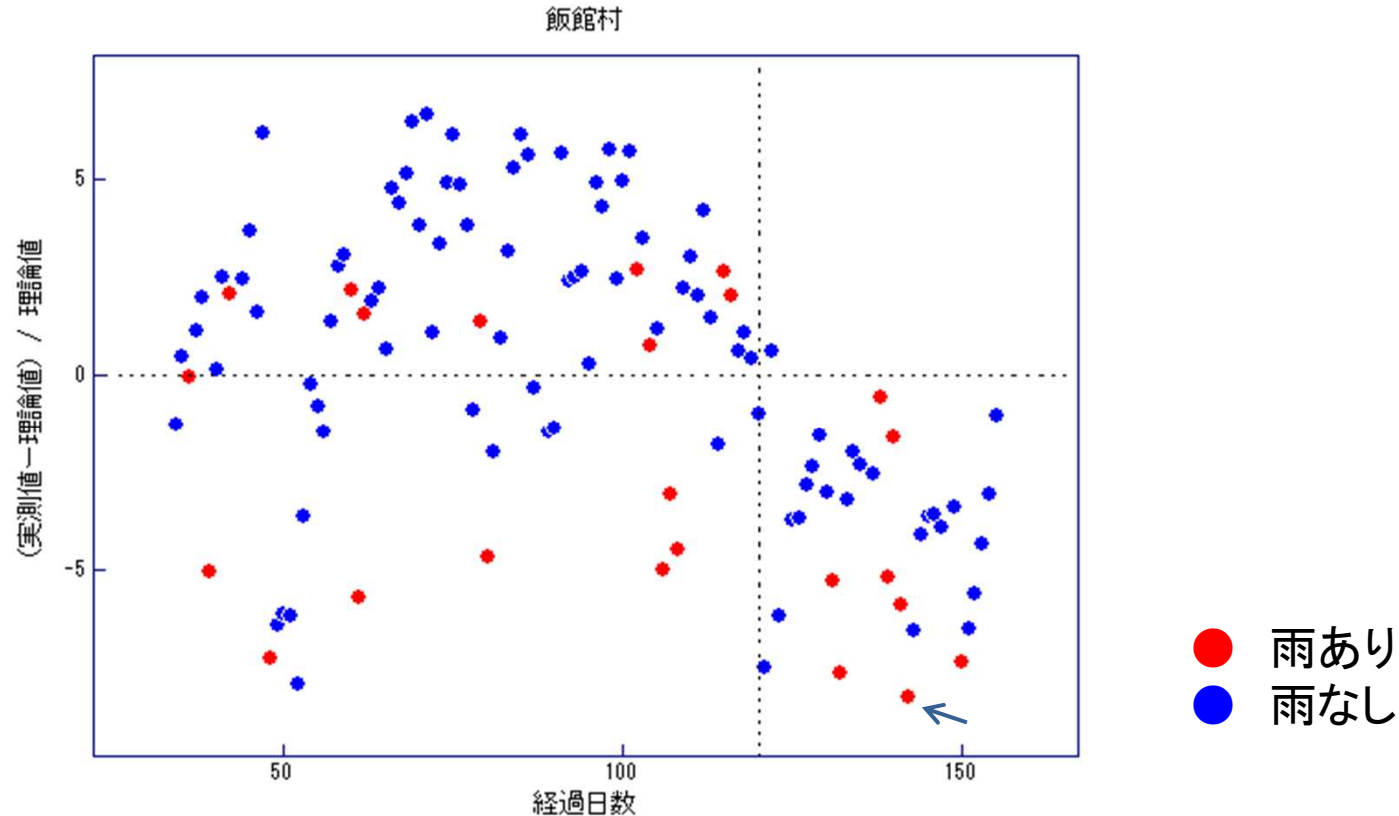
*: $0.05 < p < 0.1$; **: $0.01 < p \leq 0.05$; ***: $p < 0.01$

$$R^2 = 0.338$$

空間放射線線量率の測定値と回帰モデルにより 当てはめられた値の例（福島市と飯舘村）

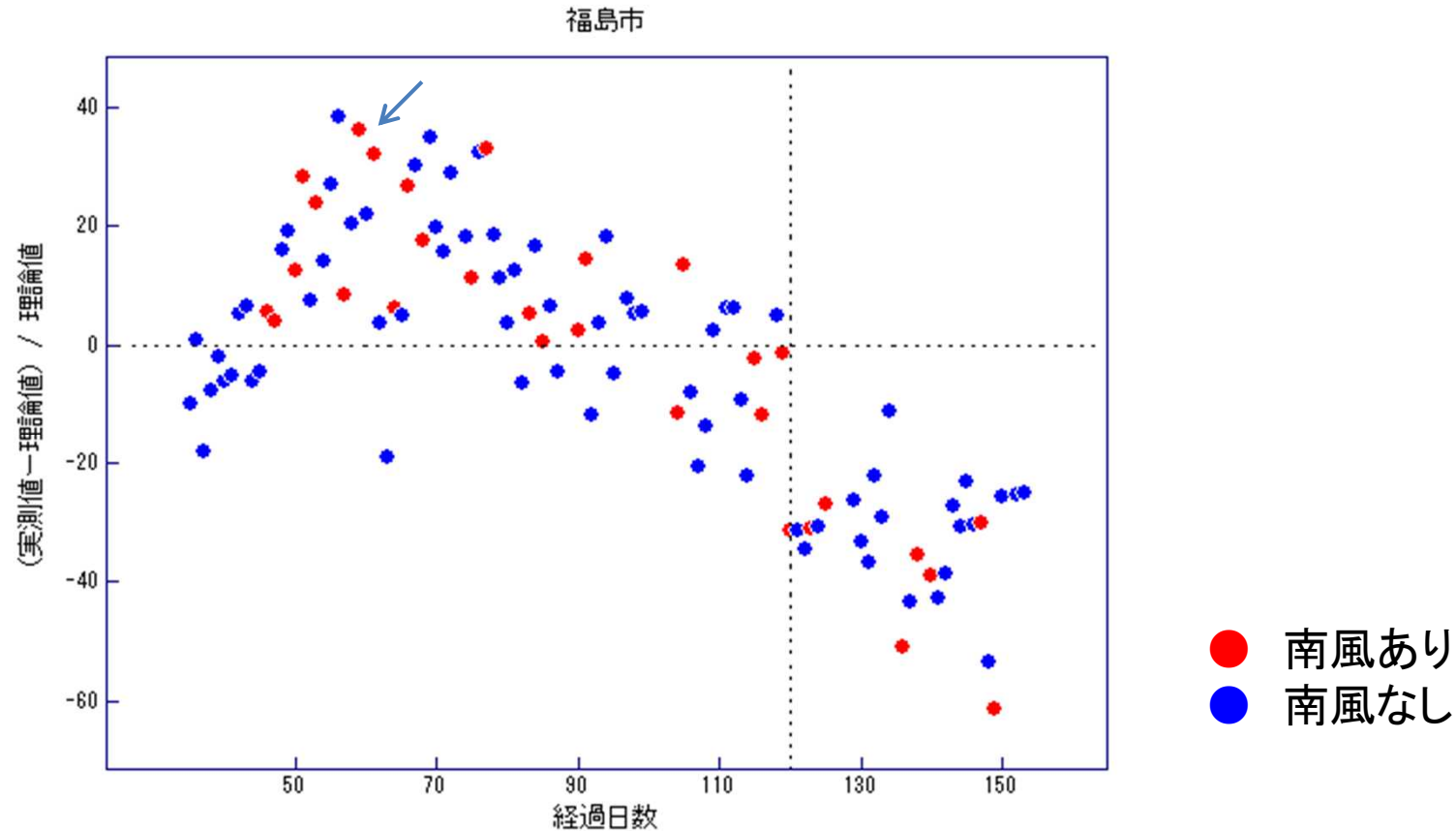


飯舘村



- 空間放射線量率は、事故後経過日数が経つにしたがい減少しており、事故後120日目くらい(7月初旬)から、半減期に基づく理論値より実測値が低くなる傾向にあった。
- 雨の日の空間放射線量率は、雨が降らない日に比べて低い傾向にあった。
- 事故後142日目(7/27から7/31まで、雨が続けていた)の実測値は、理論値の約8%低い値を示していた。

福島市

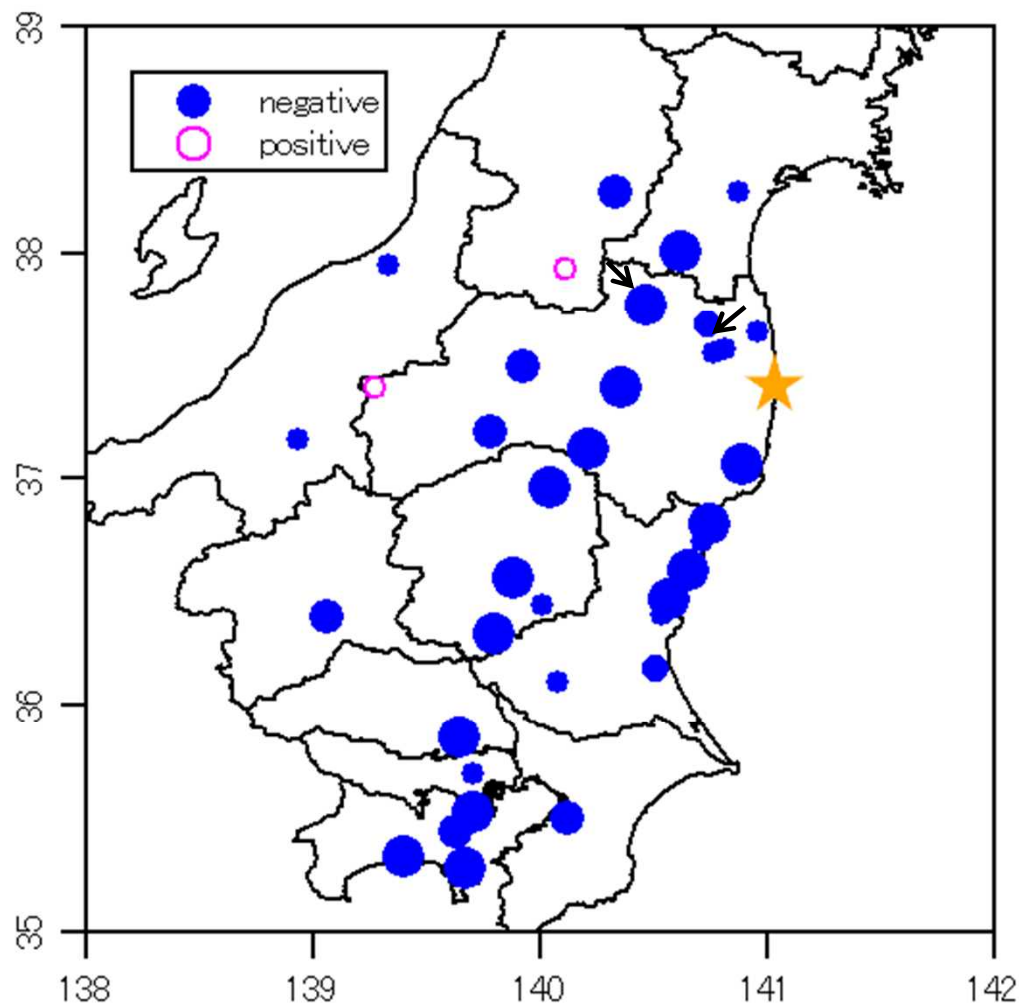


・空間放射線量率は、事故後の経過日数が経つにしたがい減少しており、事故後120日目（7月初旬）くらいから、理論値より実測値が低くなる傾向にあった。事故後149日目（8月7日）の実測値は理論値の約61%低い値を示していた。

・風の日々の空間放射線量率は風が吹かない日に比べて高くなる傾向にあった。

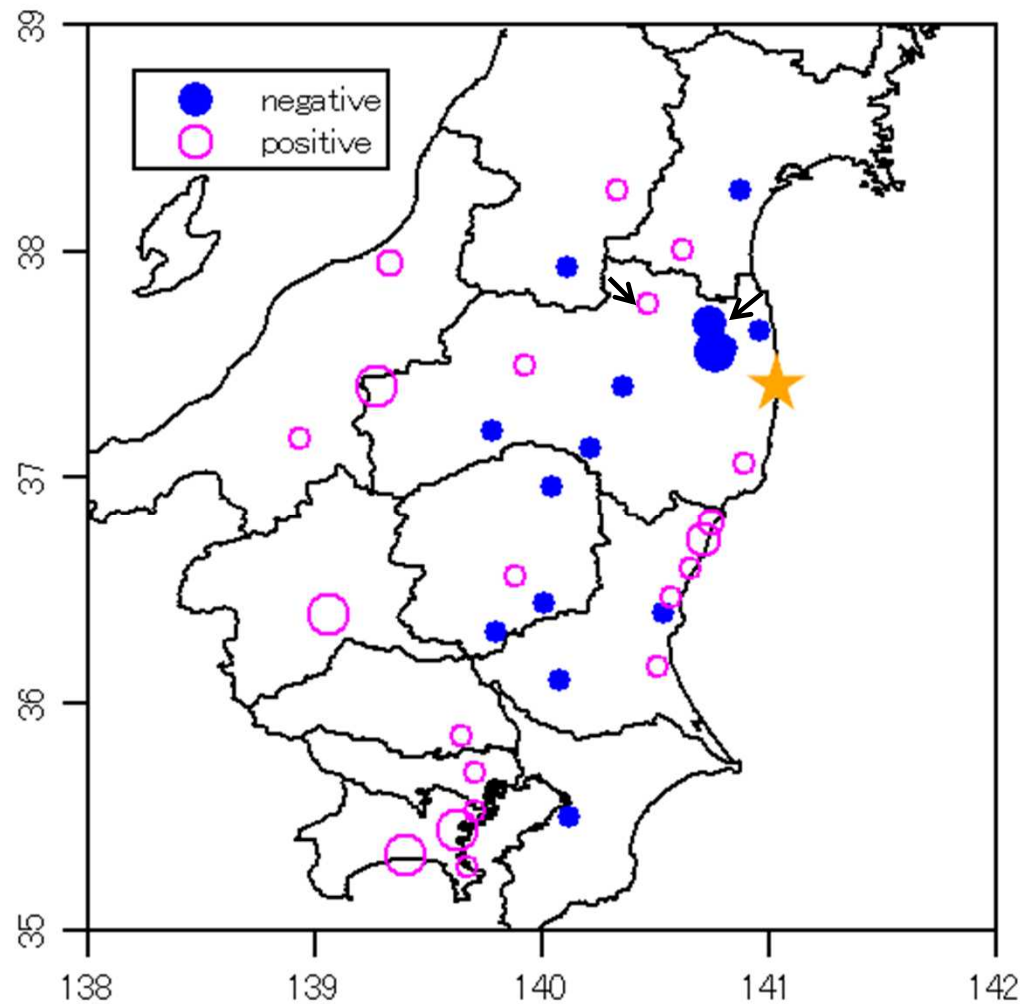
・事故後59日目（5月9日）で風ありの日の実測値は、理論値の約36%高い値を示していた(→)。

事故日からの経過日数の影響



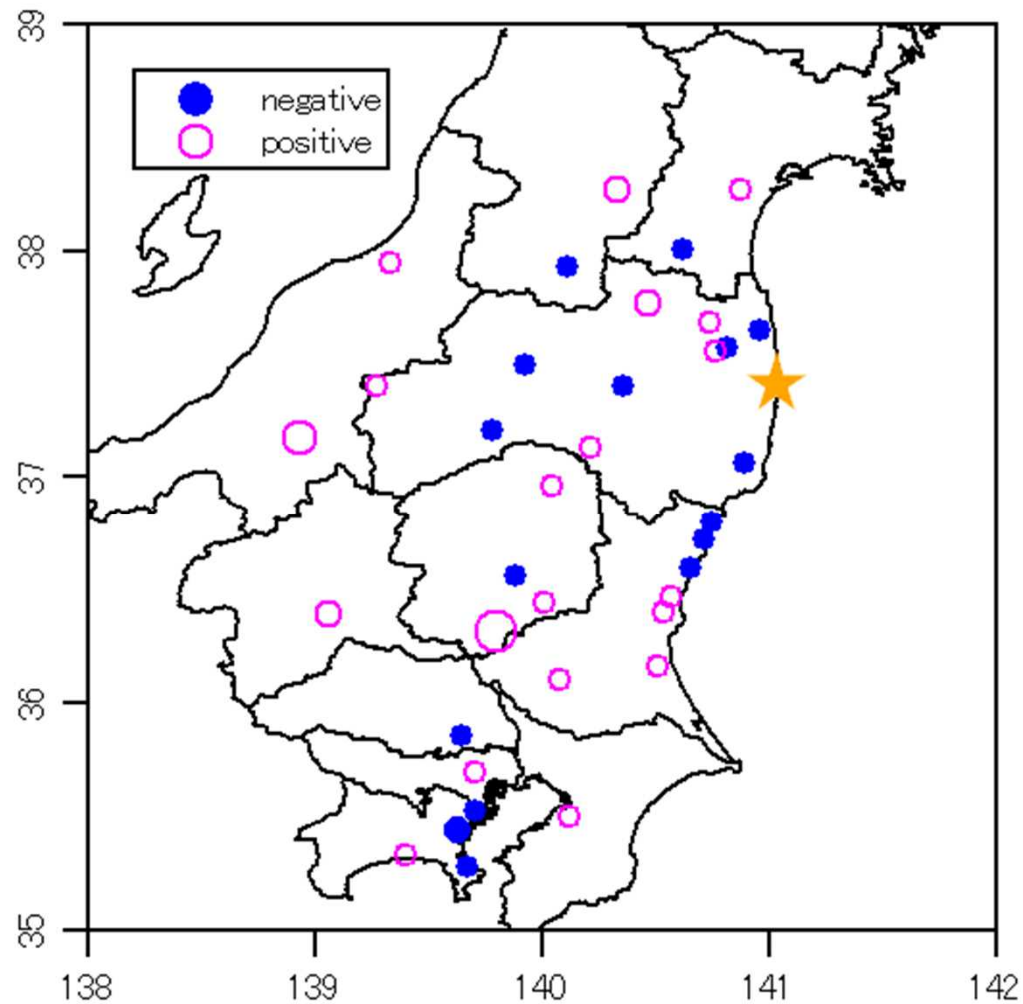
事故日からの経過日数に従い空間放射線量率は減少していた.

降水の有無の影響



第一原発付近では、雨が降れば空間放射線量率は減少し、遠い地域では増大する傾向にあった。

南風の影響

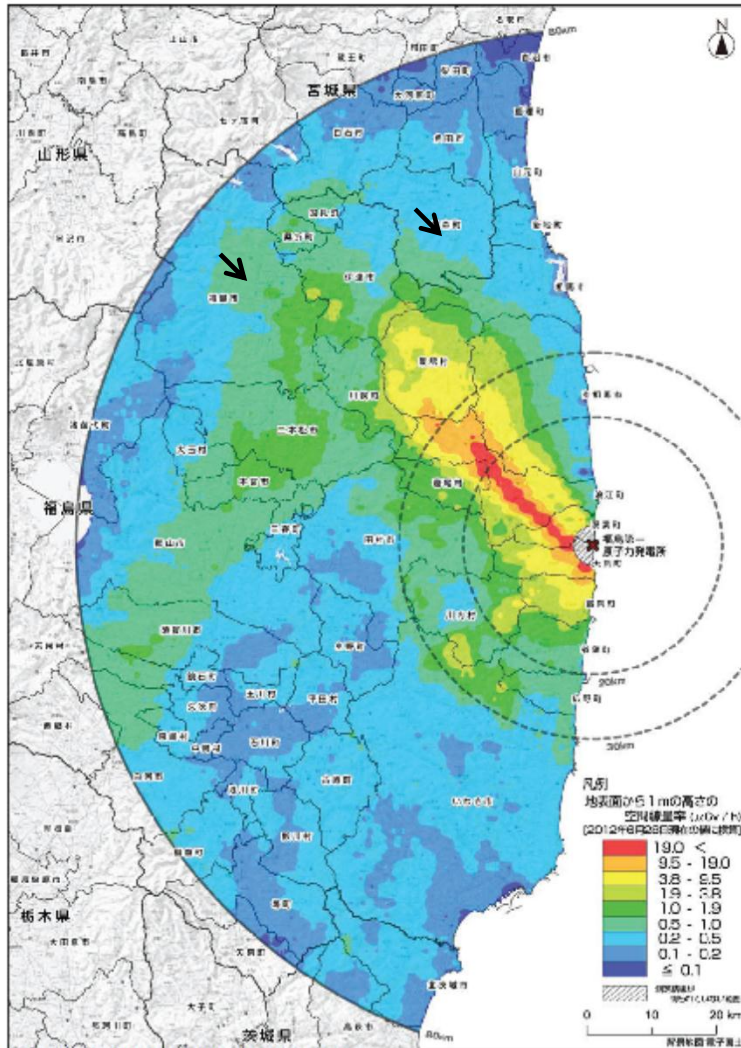


南風の影響の、はっきりとした地理的局在性は、認められなかった。

文部科学省による第5次航空機モニタリングの測定結果(平成24/9/28)

別紙1

文部科学省による第5次航空機モニタリングの結果
(福島第一原子力発電所から80km圏内の地表面から
1m高さの空間線量率) (平成24年6月28日時点)



※本マップには天然核種による空間線量率が含まれている。

今回の調査結果に関する考察

福島第一原子力発電所から80km圏内における空間線量率の減少傾向は、放射性セシウムの物理的減衰に伴う空間線量率の減少よりも大きいことが確認された。この要因としては、第4次航空機モニタリングと第5次航空機モニタリングとの間の期間における降雨等の自然環境の影響が考えられるが、.....

(文部科学省発表)

おわりに

提案したモデルにより推定された空間放射線量率は、放射性物質の半減期に基づく半減期モデルによる理論値より1年当たり、平均28%の減少率が推定されたが、その大部分は環境中でのCs137の移動（より深い地中に移動し固定されること）より説明できるものと考えられる。移動効果は時間と共に減少することが考えられるので、今後の空中放射線線量率の変動を正確に把握するためには、さらに長期の年単位のデータを集積し再解析することが必要と思われる。また、除染による効果も今後の検討課題である。



ご静聴ありがとうございました。