

初期被曝評価のための放出放射能シミュレーション計算

作業報告書

平成 25 年 2 月 5 日

株式会社 ヴィジブル インフォメーション センター

目次

1. 概要.....	1-1
2. 作業内容.....	2-1
3. 計算モデル.....	3-1
3.1. 気象モデル：RAMS.....	3-2
3.2. 粒子モデル：HYPACT	3-2
3.3. 沈着モデル.....	3-3
3.3.1. 乾性沈着.....	3-3
3.3.2. 湿性沈着.....	3-3
4. 解析条件.....	4-1
5. 計算結果.....	5-1
5.1. ^{131}I 及び ^{137}Cs の大気中濃度	5-1
5.2. ^{131}I 及び ^{137}Cs の沈着量	5-11
5.3. ^{133}Xe の大気中濃度	5-20
6. 検証計算.....	6-1
6.1. ^{131}I 大気中濃度と空間線量率との比較.....	6-1
6.2. ダストサンプリングとの比較.....	6-8
6.2.1. 福島県内.....	6-8
6.2.2. 飯舘村周辺域.....	6-12
6.3. 空間線量率との比較.....	6-17
7. まとめ.....	7-1
8. 参考文献.....	8-1

1. 概要

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東京電力福島第一発電所事故により周辺市町村は大規模な放射能汚染を受けた。なかでも、福島第一原発から北西方向 30～45km に位置する飯舘村は、当初の避難指示区域に含まれず、飯舘村村民の大部分は一カ月以上にわたって放射能汚染の中での生活を続けその間放射線被曝を受け続けた。

本件では、「福島第一原発事故による飯舘村住民の初期被曝放射線量評価に関する研究」の一環として、福島第一原発から放出された放射能について大気中輸送シミュレーション計算を行い、飯舘村で大規模な放射能汚染が生じたとされる 3 月 15 日から 16 日にかけての飯舘村全域に及ぶ大気中放射能の挙動を再現し、放射性キセノン、放射性ヨウ素ならびに放射性セシウムに関する空气中濃度ならびに地表沈着量を計算する。

2. 作業内容

作業内容を以下に示す。

- (1) 飯舘村における ^{131}I 、 ^{137}Cs 及び ^{133}Xe のシミュレーション
- (2) 計算結果の検証

3. 計算モデル

大気拡散シミュレーションの分野では、一般に、気流場を計算するためのモデルと、物質の移流・拡散を計算するためのモデルの結合又は組み合わせで解析が行われている。

本件では、気流場の解析を気象モデル RAMS4.4 (The **R**egional **A**tmospheric **M**odeling **S**ystem version 4.4)、放射性物質の移流・拡散計算を粒子モデル HYPACT 1.2 (The **H**Ybrid **P**article **A**nd **C**oncentration **T**ransport model version 1.2)を用いて行った。解析の流れを図 3-1 に示す。

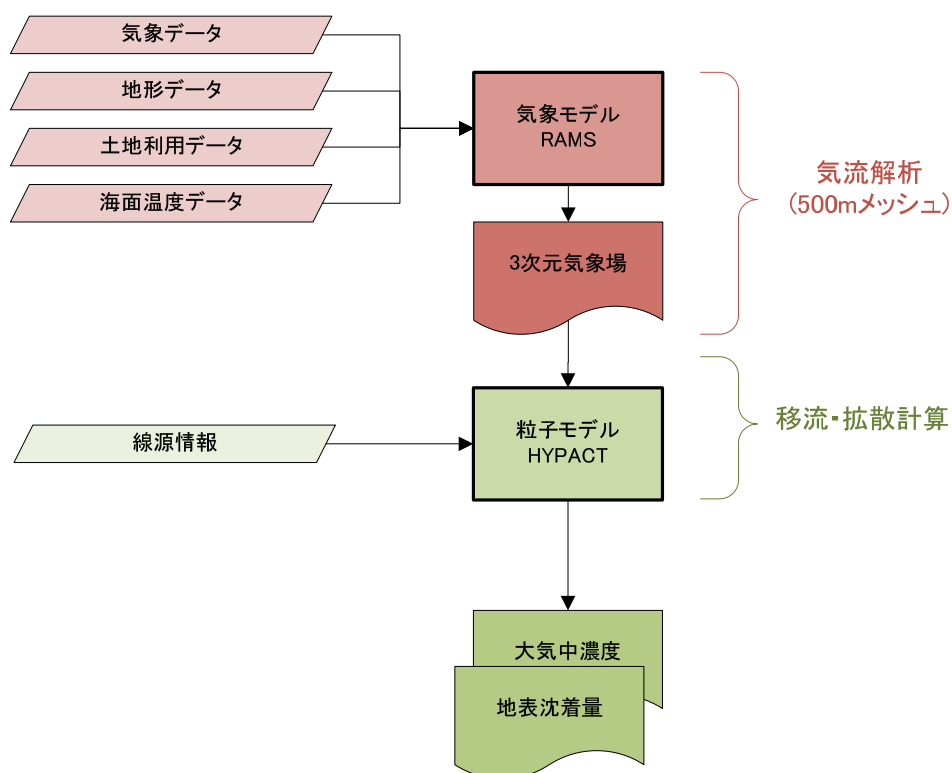


図 3-1 解析の流れ

3.1. 気象モデル：RAMS

RAMS コードは、オイラー型モデルによって気象及び物質の拡散を計算するコードであり、米国コロラド州立大学と Mission Research 社の協力の下で開発され、現在 ATMET 社が保守等を行っている。基本方程式として、非静力学、非定常粘性流を考慮した Navier-Stokes 式を用いている。また多重格子計算法 (ネスティング法) を使用しているため、局所領域のメッシュを細分化することで微小空間の計算が可能である。乱流パラメタリゼーションには Mellor and Yamada のレベル 2.5 スキームを使用することができ、バルク法による微小物理モデルを組み込んでいるなど、詳細な物理過程をモデル化している。

これらの特徴により、現実の局域的な地形を反映した気象情報を、時間及び空間的に比較的精度良く求めることができる。RAMS コードはメソスケール (1km~1000km のオーダー) における計算コードとして代表的なコードであり、この範囲における地域天気予報や大気拡散の基礎研究など、世界 30 ヶ国以上で広く利用されている。

3.2. 粒子モデル：HYPACT

HYPACT コードは、RAMS と同じ開発元が開発した物質輸送計算コードであり、オイラー型モデル、ラグランジュ型粒子モデル及びこの 2 つを組み合わせたハイブリッドモデルを内蔵している。HYPACT は基本的な設計思想では、観測値など含んだ任意の入力に対応するものとされているが、入力設定項目では、RAMS における解析データとの関係を考慮に入れるものが多く、また、垂直方向の風向きや乱流エネルギーなど、局地性が高いパラメータ又は直接観測できないパラメータが必要とされる。そのため、HYPACT による拡散計算を実施する際には、RAMS の計算結果を利用するのが一般的である。

拡散物質の放出に関する設定は、時間・空間的に詳細に定義でき、点、面、体積線源などを定義できる。

このシミュレーションでは、ラグランジュ型粒子モデルをベースとして、放射性物質の物理的減衰、乾性及び湿性沈着を考慮できるよう改良したモデルを使用した。沈着モデルについては、次節に示す。

3.3. 沈着モデル

乾性沈着及び降水による湿性沈着の計算式を以下に示す。

3.3.1. 乾性沈着

乾性沈着は接地層のみで起こるものとする。その寄与率は高度に依存し、沈着速度 v_g に比例する。計算式を (3.1) 式に示す。ここで、 v_g は文献値からヨウ素を含む全ての粒子状核種について、 0.2 (cm/s) とする。

$$q_{dry} = k \cdot v_g \cdot q_n \dots\dots\dots (3.1)$$

$$k = \max\left(\frac{2}{\Delta z_s} \left(1 - \frac{z_p}{\Delta z_s}\right), 0\right) \dots\dots\dots (3.2)$$

- q_{dry} : 粒子の乾性沈着率 (Bq/s)
- q_n : 粒子の持つ放射能 (Bq)
- v_g : 粒子の沈着速度 (m/s)
- z_p : 粒子の高度 (m)
- Δz_s : 接地境界層の高さ (m)

3.3.2. 湿性沈着

大気中の放射性物質は、降水によって一様に除去されるものとし、湿性沈着率は (3.3) 式で計算する。洗浄率は (3.4) 式で計算される。ここで、洗浄係数パラメータは、 $a=1.2 \times 10^{-4}$ 、 $b=0.5$ とする。

$$q_{wet} = \Lambda \cdot q_n \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\Lambda = a \cdot I^b \dots\dots\dots (3.4)$$

- q_{wet} : 粒子の湿性沈着率 (Bq/s)
- q_n : 粒子の持つ放射能 (Bq)
- Λ : 洗浄率 (1/s)
- I : 降水強度 (mm/hr)
- a : 洗浄係数パラメータ (hr/mm/s)
- b : 洗浄係数パラメータ (-)

4. 解析条件

計算条件を表 4-1 に示す。解析領域を図 4-1、その地形(標高)を図 4-2 に示す。なお、計算結果は、協議の結果、500m メッシュでまとめることとした。

表 4-1 計算条件

項目	内容		出典
計算モデル	気象モデル：RAMS 粒子モデル：HYPACT		ATMET
計算期間(JST)	2011/3/11 9:00～3/26 0:00 (※予備解析により仕様から変更)		
水平方向格子	福島県全域 (図 4-1 参照) Grid0(関東域)：130×200、2km メッシュ Grid1(福島県全域)：188×140 km、1 km メッシュ Grid2(飯舘村)：42×42 km、500 m メッシュ		
鉛直方向格子	σ -z 座標系、上空 20 km まで Grid0：接地レイヤー高度を 100 m として 30 分割 Grid1, 2：接地レイヤー高度を 31 m として 36 分割		
放出点	福島第一原子力発電所 北緯：37.421389 [deg] 東経：141.033611 [deg]		
線源核種	^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Xe		
放出率	^{131}I 、 ^{137}Cs	原子力安全委員会による推定値 (図 4-3 参照)	参考文献 [1], [2]
	^{133}Xe	Stohl らによる推定値(図 5-20)	参考文献[3]
放出高さ	通常：20 m ベント時：120m 1 号機爆発時 (体積線源)：100×100×100m 3 号機爆発時 (体積線源)：100×100×300m		参考文献 [1], [2]
乾性沈着速度	0.2 [cm/s]		
洗浄係数パラメータ α	1.2×10^{-4}		参考文献[4]
洗浄係数パラメータ β	0.5		参考文献[4]
計算タイムステップ	10 [sec]		
タイムステップ当たりの 放出粒子数	500		
気象データ	MSM 等気圧面データ 解析雨量		気象庁
地形データ	50 m メッシュ数値地図		国土地理院

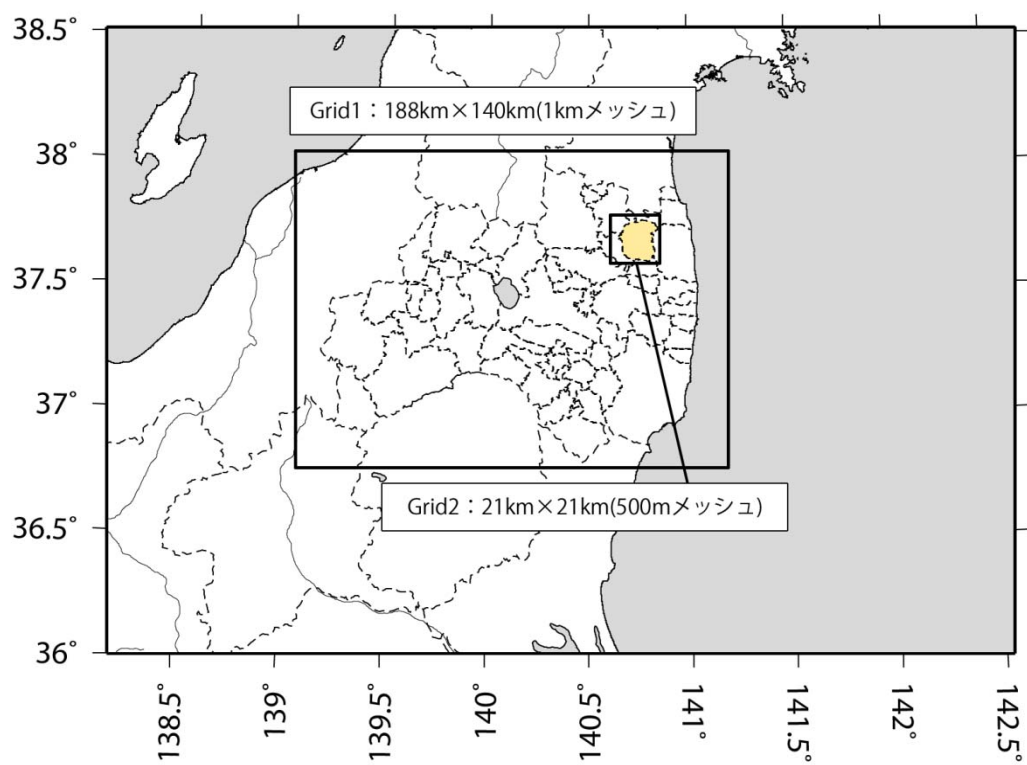
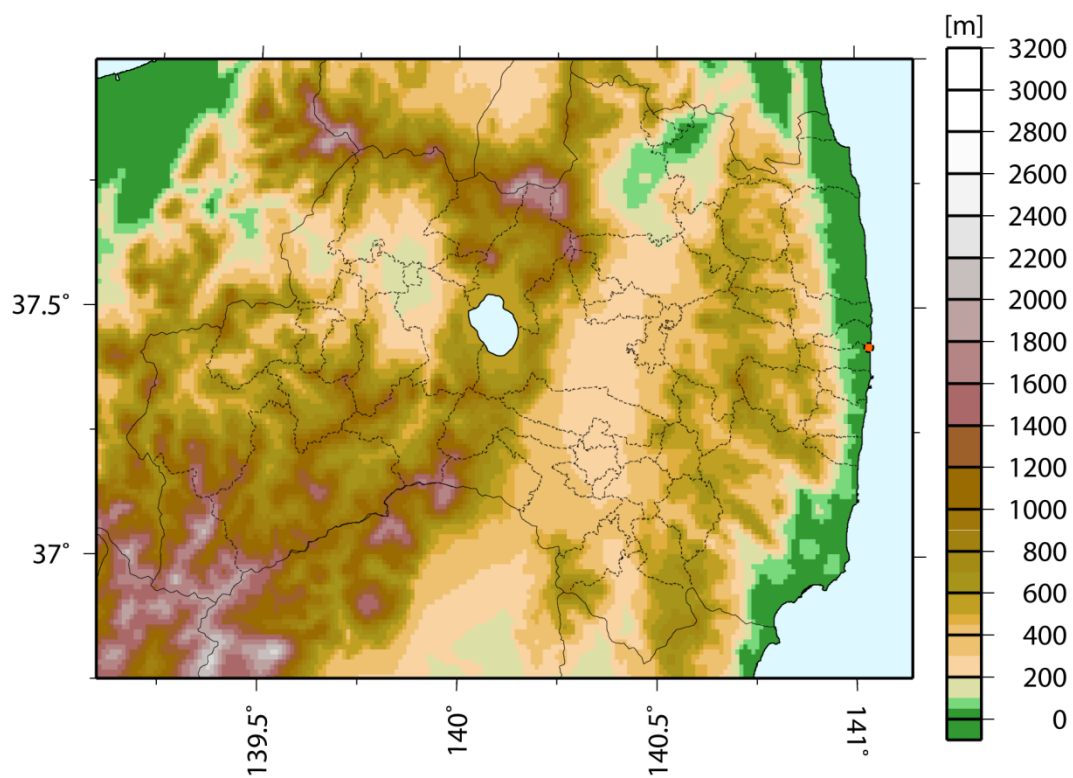
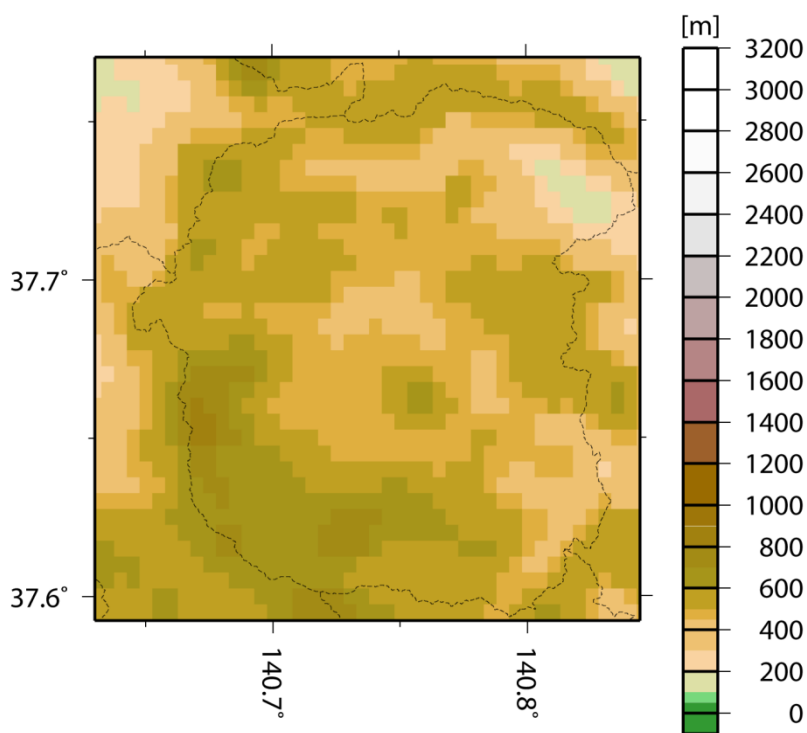


図 4-1 計算領域

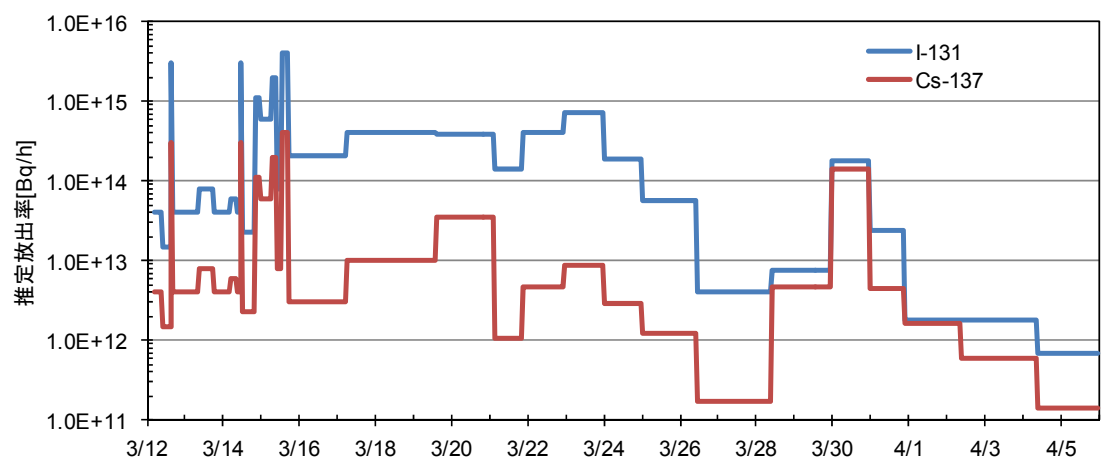


(a) 福島県全域(Grid1)



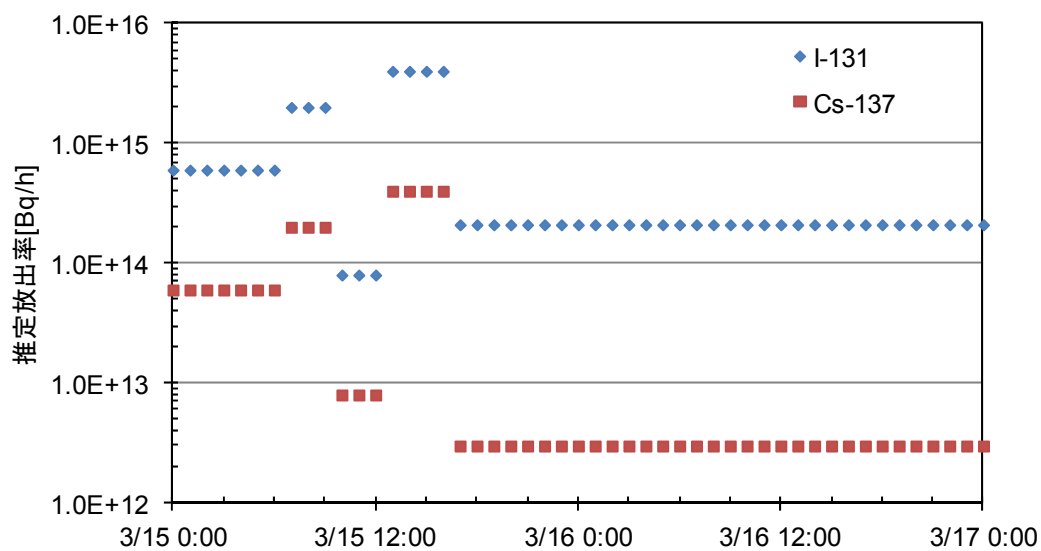
(b) 飯舘村(Grid2)

図 4-2 解析領域の地形 (標高)



3/12 9:00-14:00 : ベント, 3/12 6:30-7:00 : 1 号機爆発, 3/14 11:30-12:00 : 3 号機爆発

(a) 全期間



(b) 3/15~3/17

図 4-3 原子力安全委員会による ^{131}I 及び ^{137}Cs の推定放出量

5. 計算結果

5.1. ^{131}I 及び ^{137}Cs の大気中濃度

予備解析により、飯舘村における ^{131}I を含む放射性プルームの飛来は、図 5-1 に示す通り、3/12、3/15、3/20 及び 3/22 の 4 回になることがわかった。そのため、本解析では計算期間を 3/12 5:00～3/26 0:00 として計算を行い、計算結果をダスト観測地点における経時変化及び飯舘村における分布図としてまとめた。ダスト観測地点の一覧を図 5-2、位置を図 5-2 に示す。

^{131}I の吸入による甲状腺等価線量について(参考)

^{131}I の吸入による甲状腺等価線量は、地表大気中濃度から線量係数を用いて、(5.1)式から計算した。プルーム通過中は屋外にいたものとして、線量係数を $1.4 \times 10^{-3}(\text{mSv/Bq})$ [5]、呼吸率(活動時)を $0.31(\text{m}^3/\text{h})$ [6]とした。なお、普通の生活を仮定し、屋内及び屋外の滞在時間をそれぞれ 16 時間、8 時間として、家屋のフィルター効果を考慮すると($1/4=0.25$)[7]、線量は $1/2$ となる。

$$D_e = Df_e \cdot M \cdot \sum_{i=1}^{NT} C_{air,i} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、

D_e	: 甲状腺等価線量 (Sv)
Df_e	: 甲状腺等価線量係数 (Sv/Bq)
M	: 呼吸率 (m^3/h)
$C_{air,i}$	: ある時間 i における地表空气中核種濃度 (Bq/m^3)
NT	: 放射性雲の滞留時間 (h)

である。

計算結果について

2011/3/12～3/26 の ^{131}I と ^{137}Cs の大気中濃度の経時変化及びその寄与割合を、それぞれ図 5-3～図 5-4、図 5-5～図 5-6 に示す。各地点における ^{131}I 及び ^{137}Cs の時間積算濃度の一覧をそれぞれ表 5-2、表 5-3 に示す。

飯舘村役場(図 5-4 (b))における大気中濃度のピークは、3/12 18:30 頃、3/15 19:00 から深夜にかけて及び 3/20 15:00 頃、3/22 16:00 頃の 4 か所があり、寄与割合はそれぞれ約 17%、64%、13%、16%となった。参考に、飯舘村役場における ^{131}I の吸入による小児甲状腺等価線量の経時変化を図 5-7 に示す。3/12 5:00～3/26 0:00 における ^{131}I の時間積算濃度を、小児甲状腺等価線量の分布を図 5-9 に示す。同 ^{137}Cs の時間積算濃度を図 5-10 に示す。

- ・ 飯舘村における ^{131}I 時間積算濃度は $10^4 \sim 10^5(\text{Bq}/\text{m}^3)$ オーダーであり、最大値は $156(\text{kBq}/\text{m}^3)$ となった。
- ・ 飯舘村における ^{131}I の吸入による小児甲状腺等価線量(屋内滞在時間 0 時間)は数～数十 (mSv)のオーダーであり、最大値は 67mSv となった。

- ・ 飯舘村における ^{137}Cs の時間積算濃度は $10^3 \sim 10^4 (\text{Bq}/\text{m}^3)$ オーダーであり、 ^{131}I より一桁小さい値となった。最大値は $28 (\text{kBq}/\text{m}^3)$ となった。

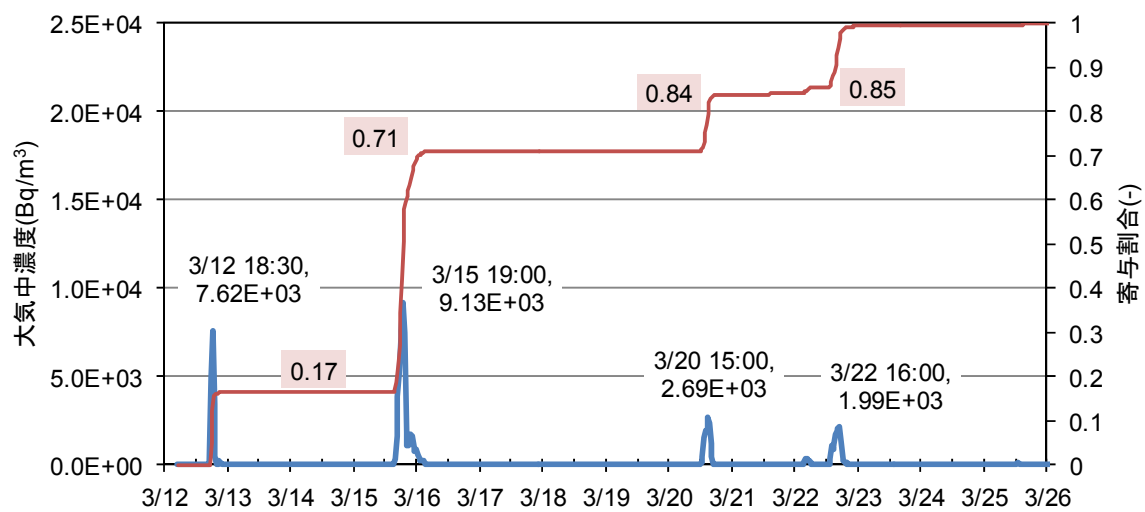


図 5-1 飯舘村役場における 2011 年 3 月の ^{131}I プルームの飛来頻度とその寄与

表 5-1 観測地点一覧

地点名	経度(deg)	緯度(deg)
川俣町山木屋大洪	140.6654	37.6085
飯舘村八木沢	140.7945	37.682
浪江町津島仲沖	140.7471	37.56
飯舘村長泥	140.7491	37.6128
飯舘村役場	140.7386	37.67617

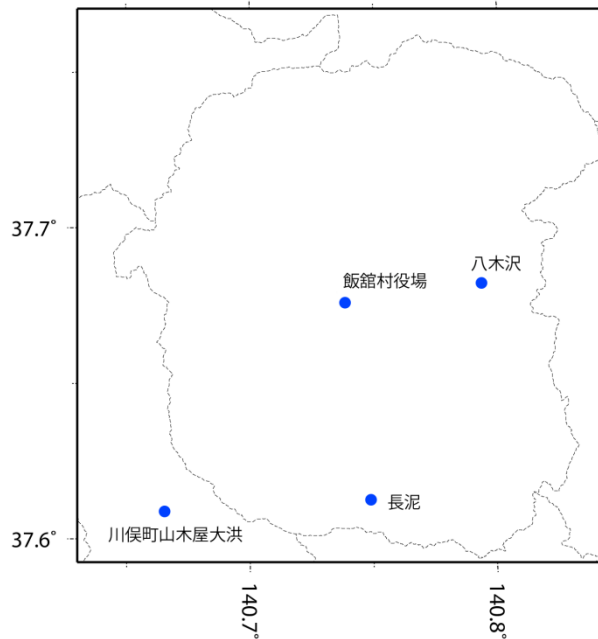


図 5-2 ダスト観測地点

表 5-2 2011/3/12 5:00～3/26 0:00 の各地点における ^{131}I 時間積算濃度及び

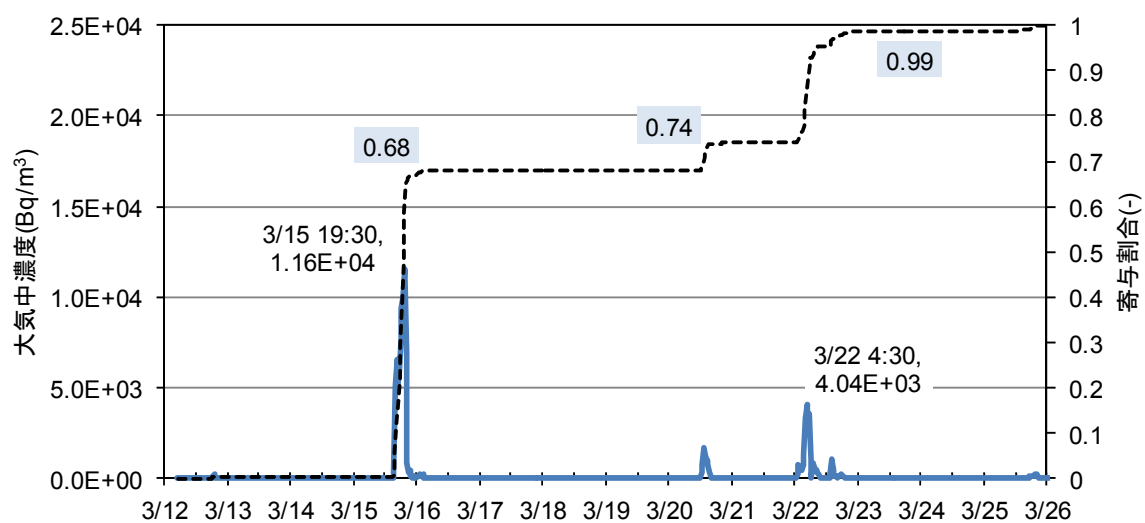
^{131}I の吸入による小児甲状腺等価線量

地点名	時間積算濃度 ($\text{Bq}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$)	小児甲状腺等価線量(mSv)※		
		屋内滞在時間(h)		
		0	16	24
川俣町山木屋大洪	5.30E+04	23	11	6
飯舘村八木沢	6.11E+04	27	13	7
飯舘村長泥	8.19E+04	36	18	9
飯舘村役場	5.16E+04	22	11	6

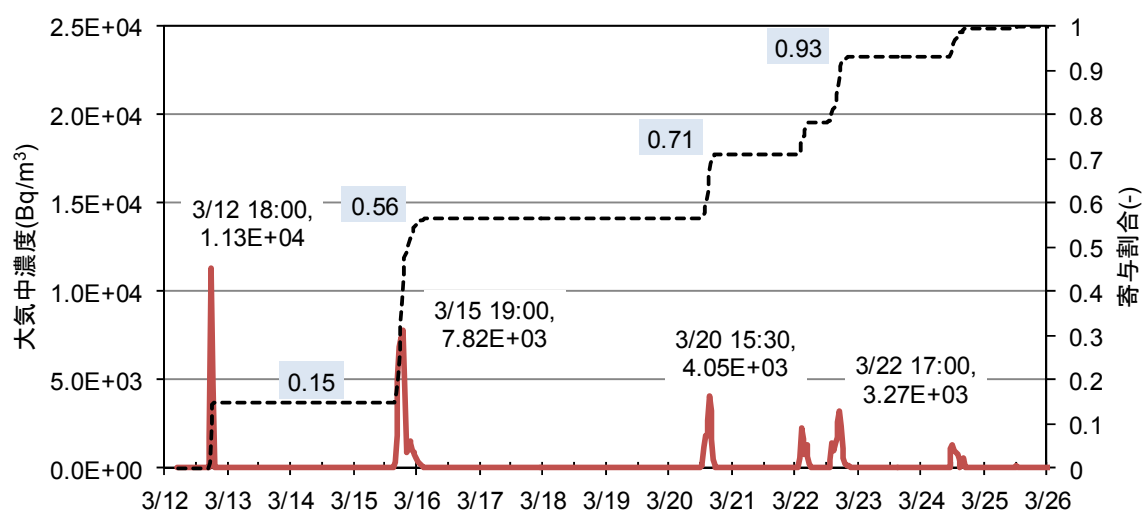
※呼吸率：0.31(h/m^3)、線量係数：1.4E-03($\text{mSv per Bq}/\text{m}^3$)、屋内滞在時のフィルター効果：0.25

表 5-3 2011/3/12 5:00～3/26 0:00 の各地点における ^{137}Cs 時間積算濃度

地点名	時間積算濃度 ($\text{Bq}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$)
川俣町山木屋大洪	6.60E+03
飯舘村八木沢	4.80E+03
飯舘村長泥	9.56E+03
飯舘村役場	5.05E+03

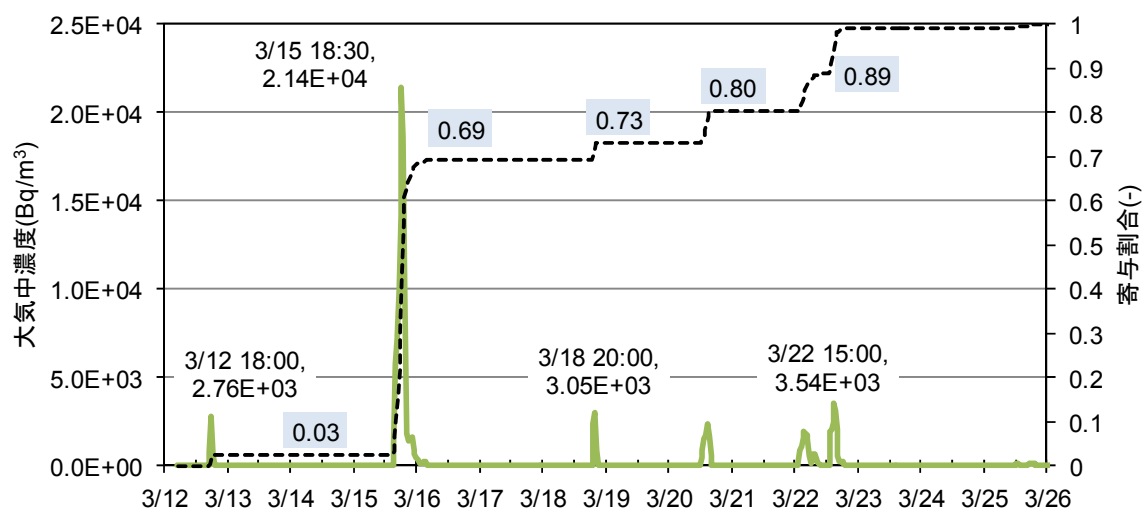


(a) 川俣町山木屋大洪

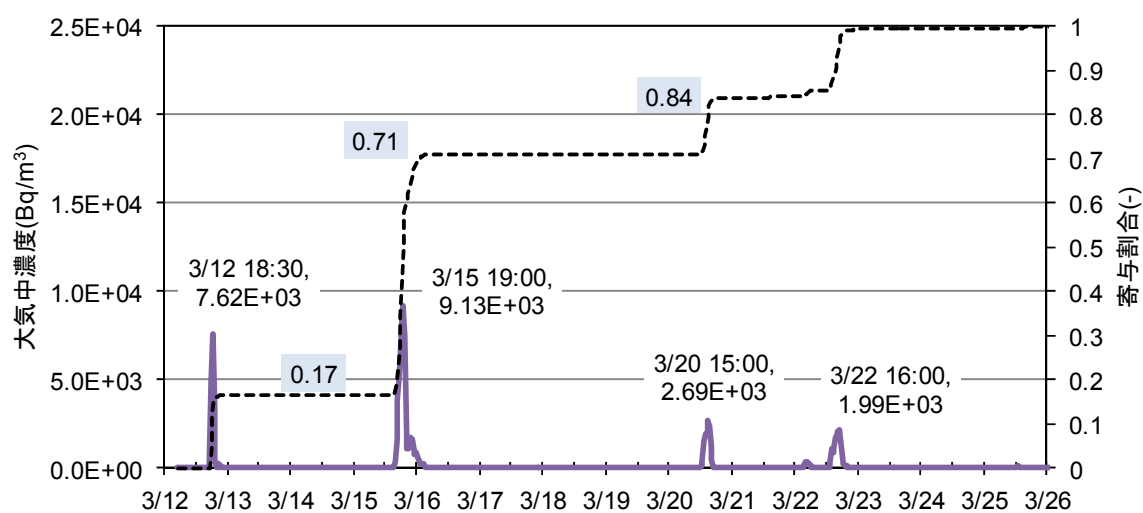


(b) 飯舘村八木沢

図 5-3 2011/3/12 5:00～3/26 0:00 の飯舘村における
 ^{131}I の大気中濃度の経時変化と寄与割合(1/2)

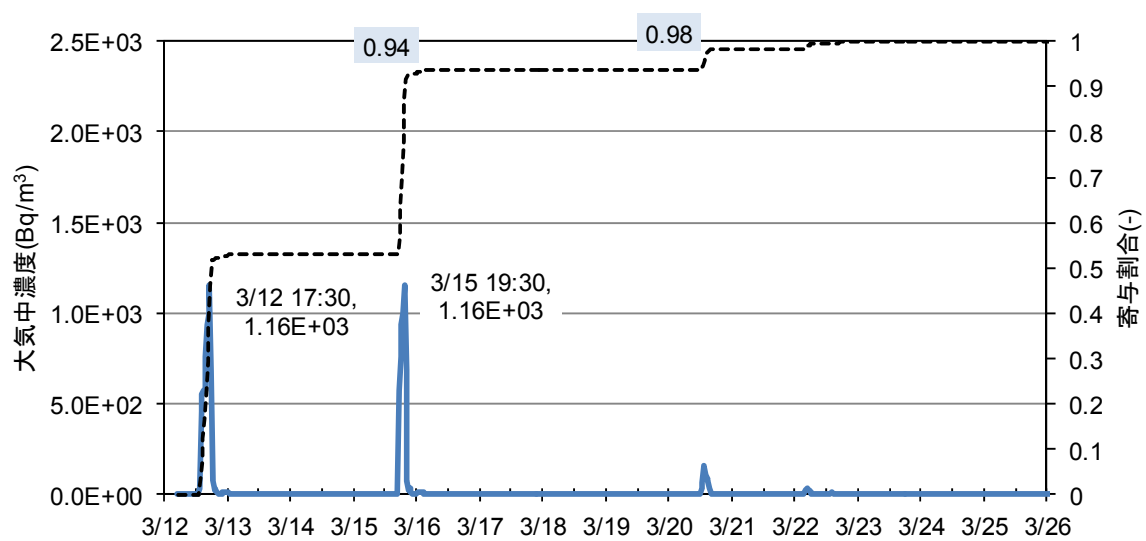


(a) 飯館村長泥

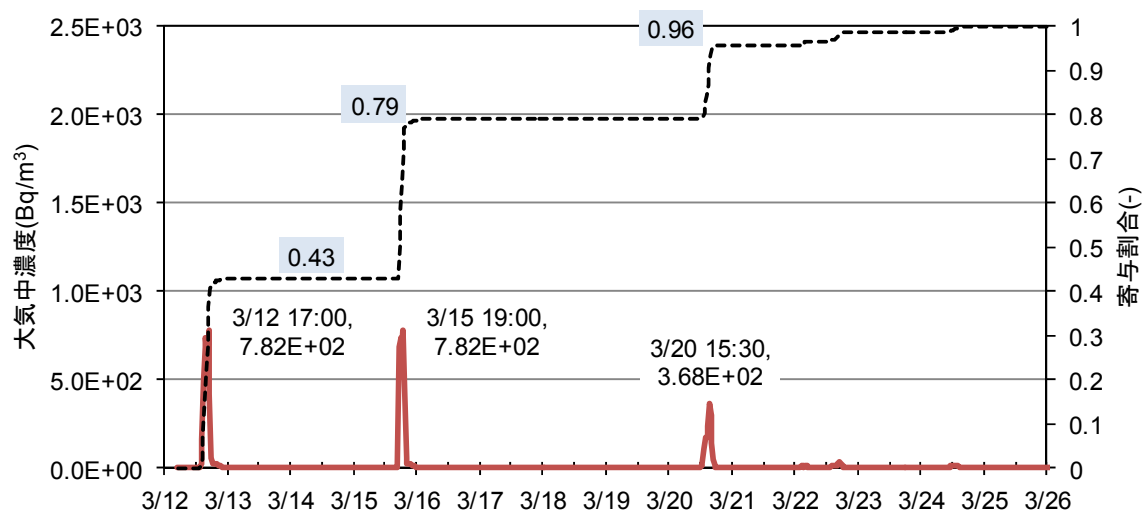


(b) 飯館村役場

図 5-4 2011/3/12 5:00～3/26 0:00 の飯館村における
 ^{131}I の大気中濃度の経時変化と寄与割合(2/2)

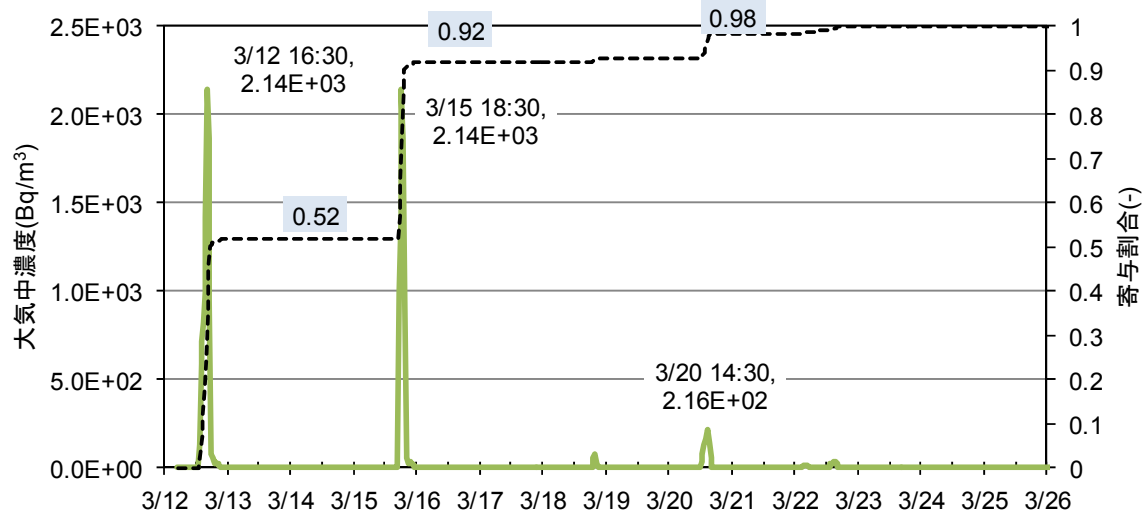


(a) 伊達郡川俣町山木屋大洪

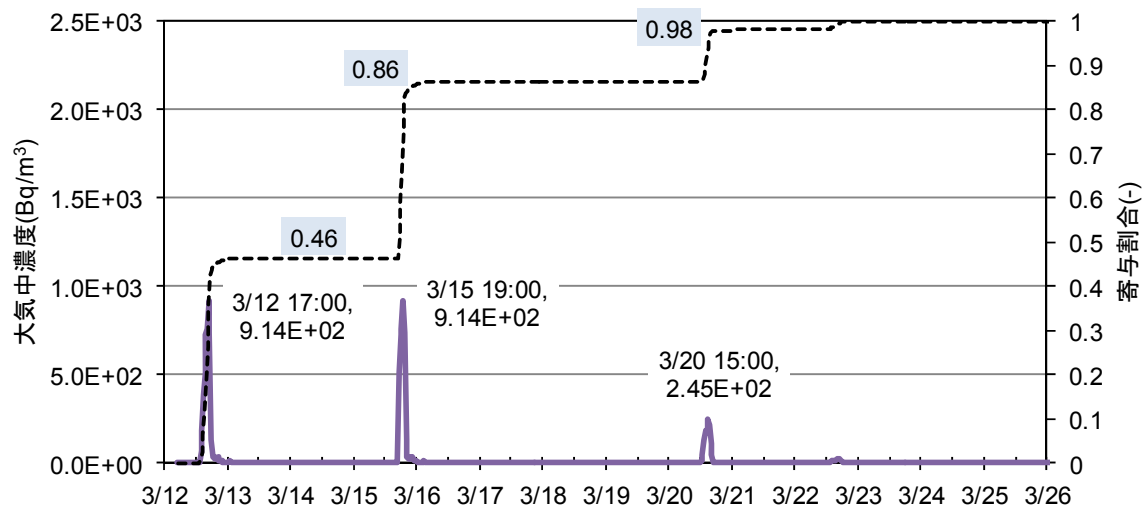


(b) 相馬郡飯舘村八木沢

図 5-5 2011/3/12 5:00～3/26 0:00 の飯舘村における
¹³⁷Cs の大気中濃度の経時変化と寄与割合(1/2)



(a) 相馬郡飯舘村長泥



(b) 飯舘村役場

図 5-6 2011/3/12 5:00～3/26 0:00 の飯舘村における
 ^{137}Cs の大気中濃度の経時変化と寄与割合(2/2)

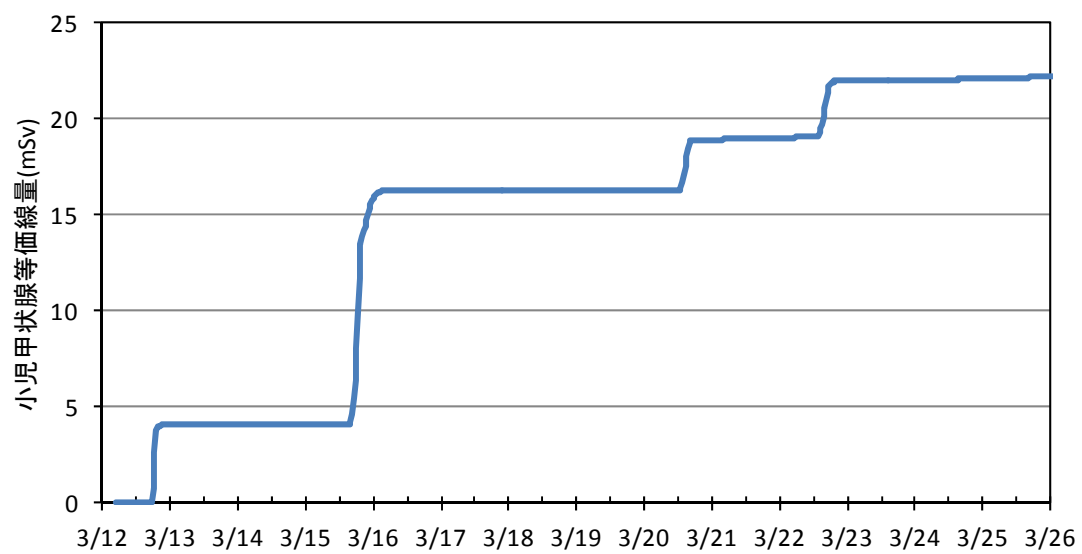


図 5-7 参考：飯舘村役場における小児甲状腺等価線量の経時変化

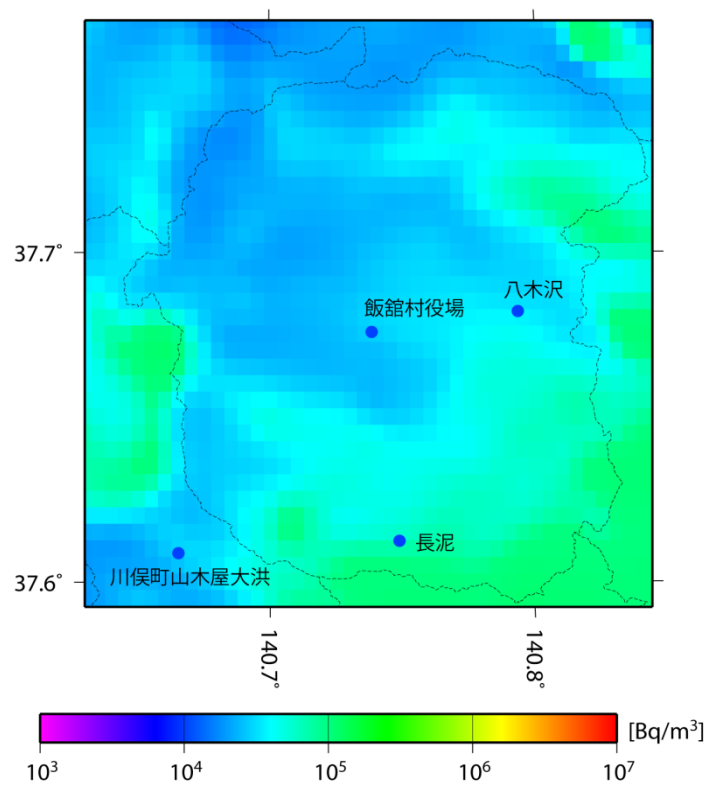


図 5-8 飯館村における ^{131}I 時間積算濃度 (2011/3/12 5:00～3/26 11:00(JST))

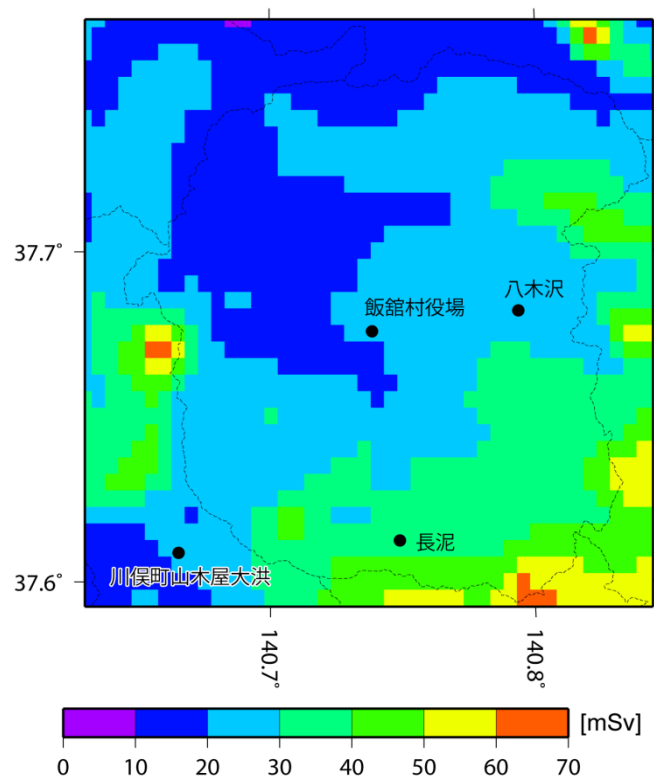


図 5-9 参考：飯館村における ^{131}I の吸入による小児甲状腺等価線量
(2011/3/12 5:00～3/26 11:00(JST))

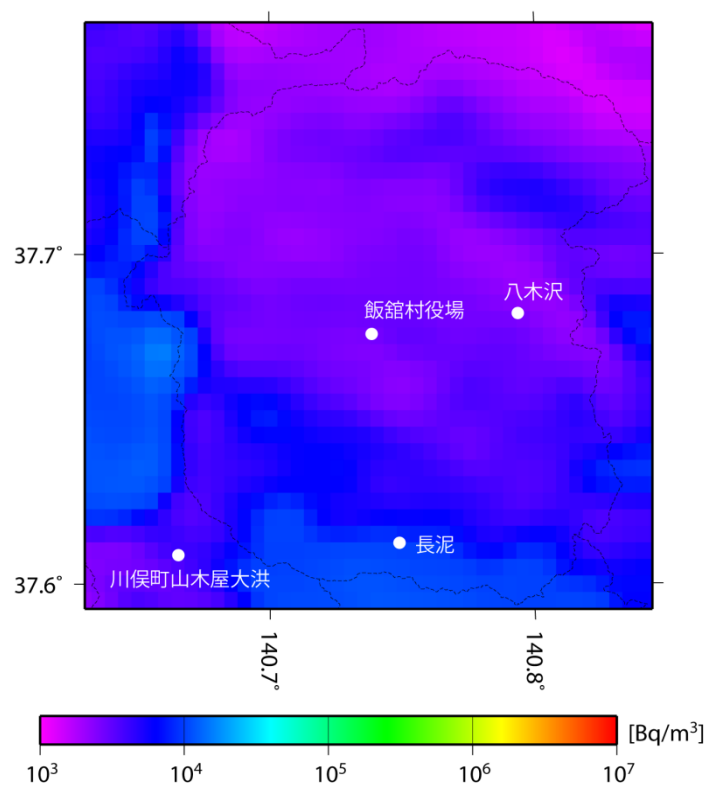


図 5-10 飯舘村における ^{137}Cs の時間積算濃度(2011/3/12 5:00～3/26 11:00(JST))

5.2. ^{131}I 及び ^{137}Cs の沈着量

飯舘村役場における 2011/3/12～3/26 の ^{131}I 及び ^{137}Cs の沈着量の計算を行った。観測値[8]との比較のため、各核種の沈着量は ^{131}I の半減期を 8.04 日、 ^{137}Cs の半減期を 30 年として、2011/3/31 8:00(JST)までの物理減衰を考慮した。観測地点(抜粋)を図 5-11 に示す。

^{131}I 及び ^{137}Cs の観測値との比較の一覧を表 5-4 に示す。また、飯舘村の各地点における ^{131}I 及び ^{137}Cs 降下量の経時変化をそれぞれ図 5-12～図 5-13、図 5-14～図 5-15 に示す。飯舘村における ^{131}I 及び ^{137}Cs の積算降下量をそれぞれ図 5-16、図 5-17 に示す。

- ・ 飯舘村における ^{131}I 積算降下量は $10^4 \sim 10^6 (\text{Bq}/\text{m}^2)$ オーダーであり、最大値は $1772 (\text{kBq}/\text{m}^2)$ となった。 ^{137}Cs の積算降下量は $10^3 \sim 10^5 (\text{Bq}/\text{m}^2)$ オーダーであり、最大値は $619 (\text{kBq}/\text{m}^2)$ となった。
- ・ 全体として計算値は過小評価だが、オーダーは捉えている。 ^{137}Cs の方が ^{131}I よりも過小評価の度合いが大きい。
- ・ 計算値における長泥の値が低いのは、プルーム飛来時に降水(元データは解析雨量、1km メッシュ)の範囲から外れたためと考えられる(図 5-18(b)～(d)(19:00～20:00)参照：飯舘村南端がきれいに外れている)。

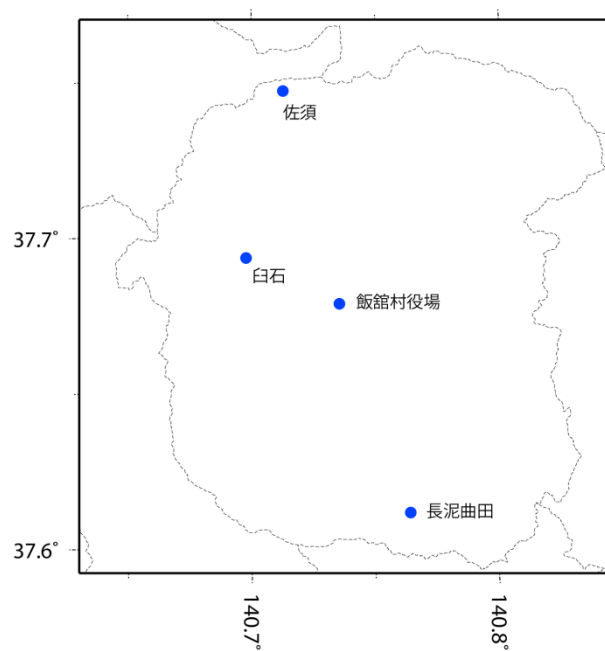
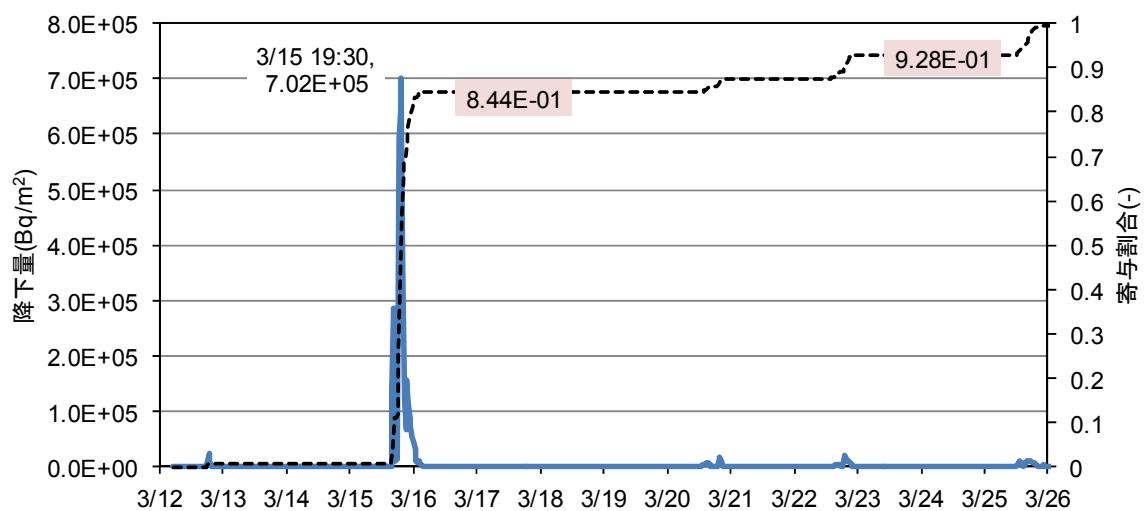


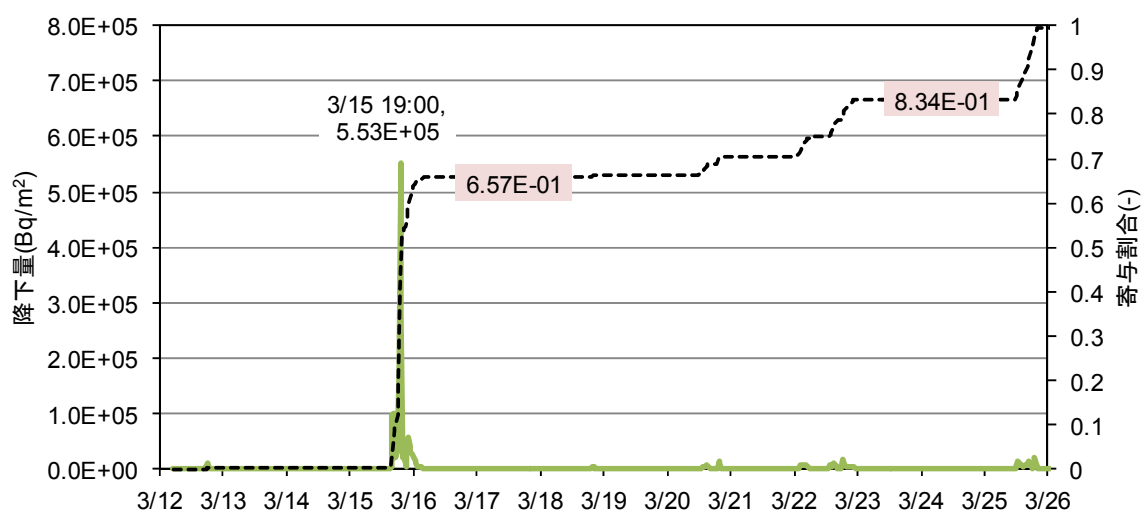
図 5-11 ^{131}I 及び ^{137}Cs 観測地点(抜粋)

表 5-4 観測値[8]との比較

場所	$^{131}\text{I}(\text{kBq}/\text{m}^2)$			$^{137}\text{Cs}(\text{kBq}/\text{m}^2)$		
	計算値	観測値	観測値/計算値	計算値	観測値	観測値/計算値
村役場	1120	1600	0.7	319	740	0.4
長泥曲田	651	3600	0.2	152	2200	0.1
白石	840	2400	0.4	253	1000	0.3
佐須	924	2300	0.4	266	840	0.3
山津見	1120	1900	0.6	319	590	0.5



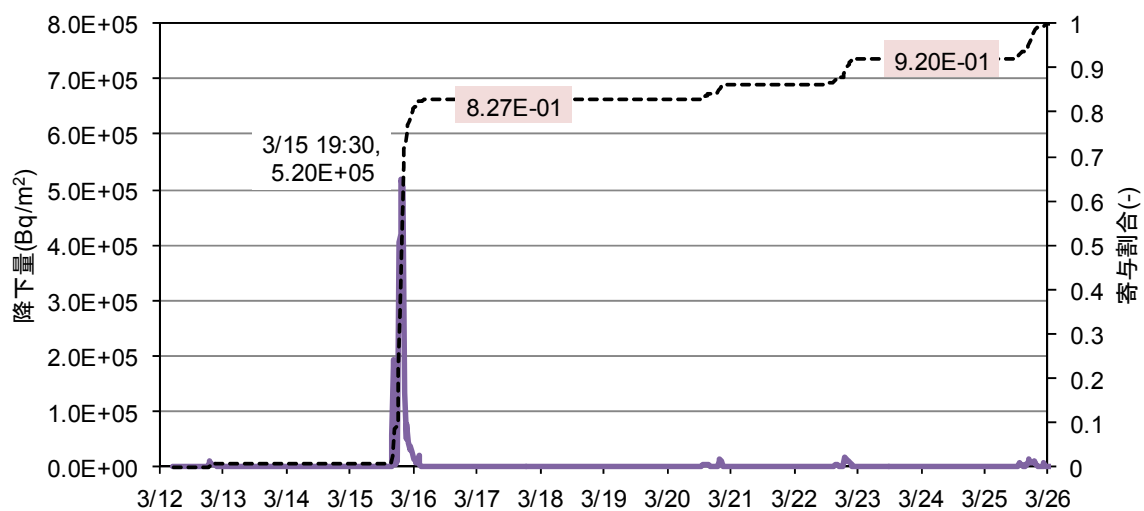
(a) 飯舘村役場



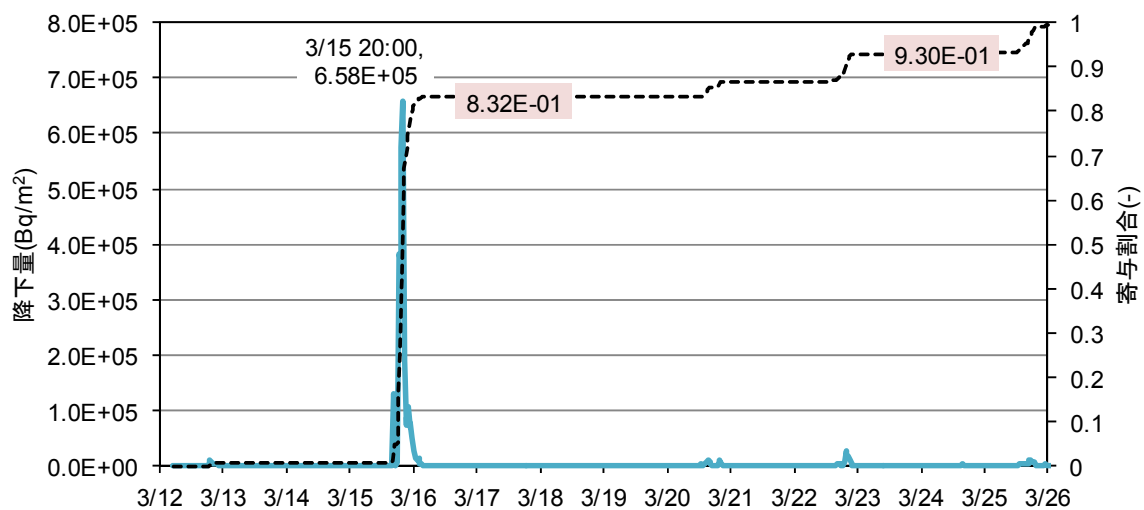
(b) 白石

※寄与割合については、3/31 8:00 の時点に換算している

図 5-12 2011/3/12 5:00～3/26 0:00 の飯舘村における ^{131}I 沈着量の経時変化と寄与割合(1/2)



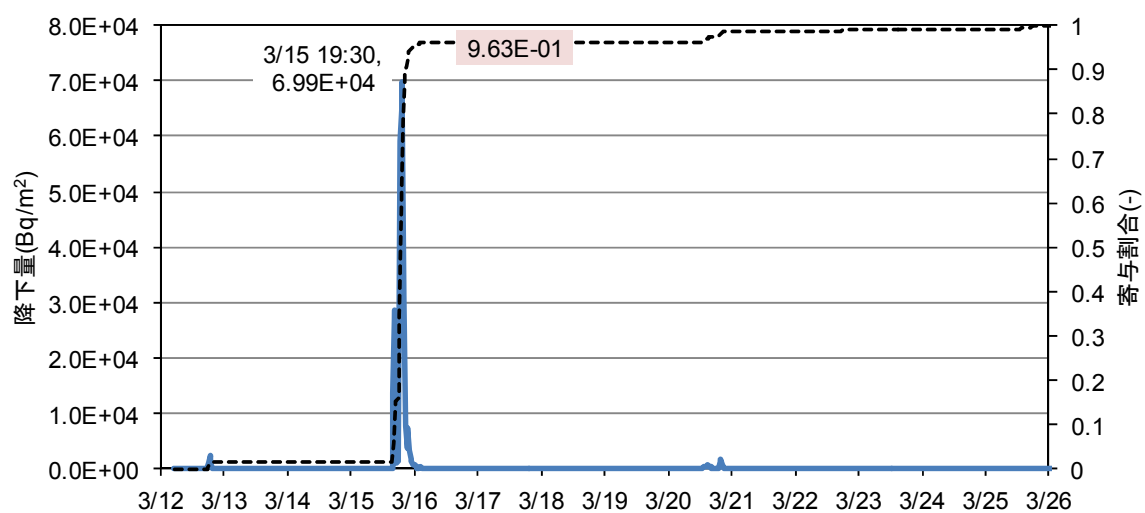
(a) 長泥曲田



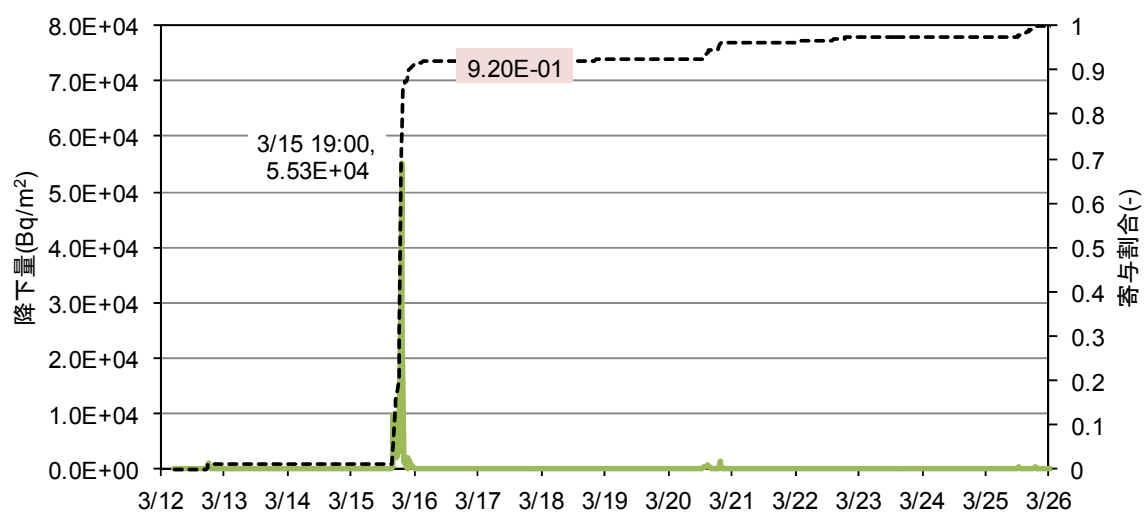
(b) 佐須

※寄与割合については、3/31 8:00 の時点に換算している

図 5-13 2011/3/12 5:00～3/26 0:00 の飯舘村における ¹³¹I 沈着量の経時変化と寄与割合(2/2)



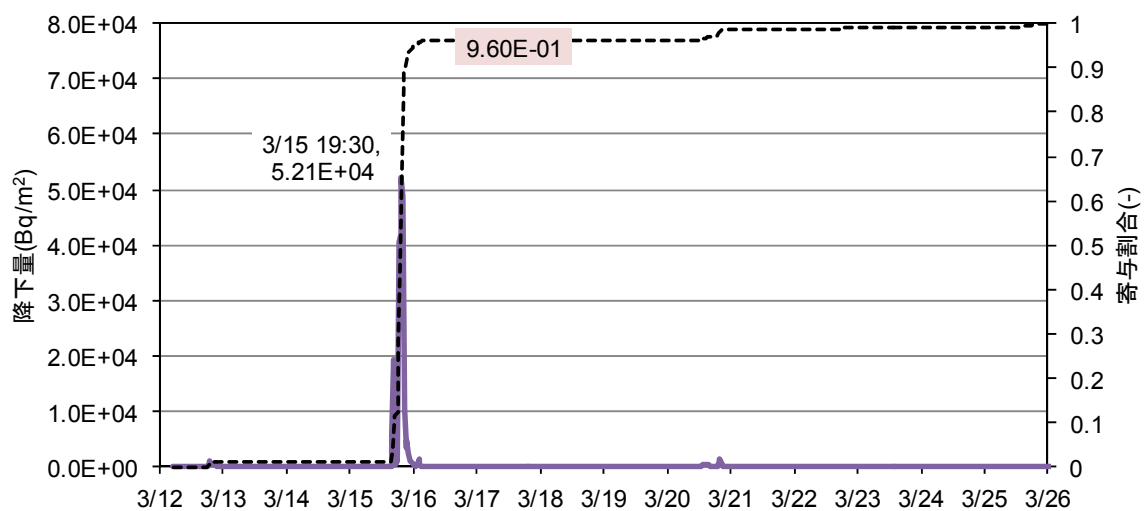
(a) 飯舘村役場



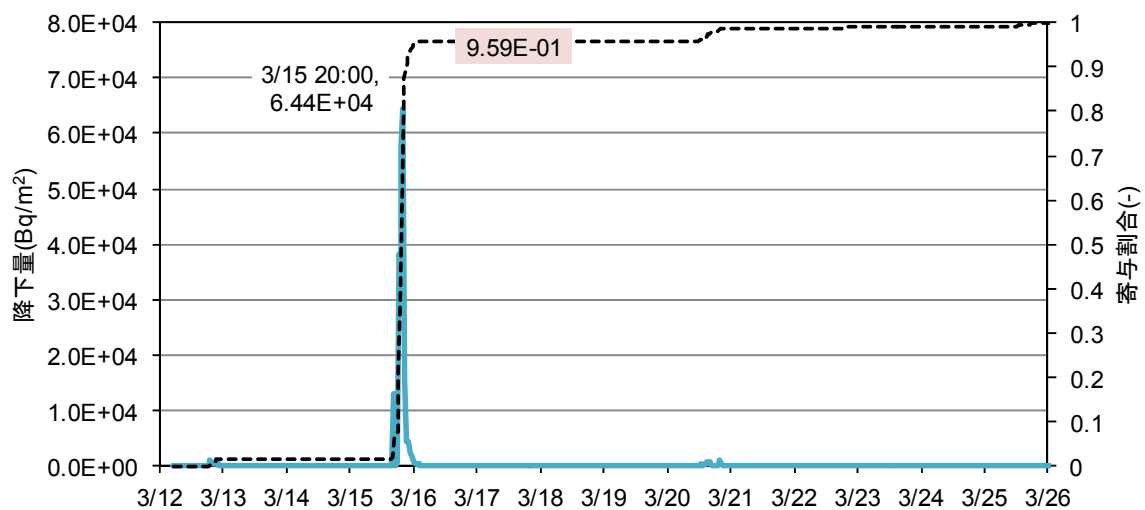
(b) 白石

※寄与割合については、3/31 8:00 の時点に換算している

図 5-14 2011/3/12 5:00～3/26 0:00 の飯舘村における ¹³⁷Cs 沈着量の経時変化と寄与割合(1/2)



(a) 長泥曲田



(b) 佐須

※寄与割合については、3/31 8:00 の時点に換算している

図 5-15 2011/3/12 5:00～3/26 0:00 の飯舘村における ^{137}Cs 沈着量の経時変化と寄与割合(2/2)

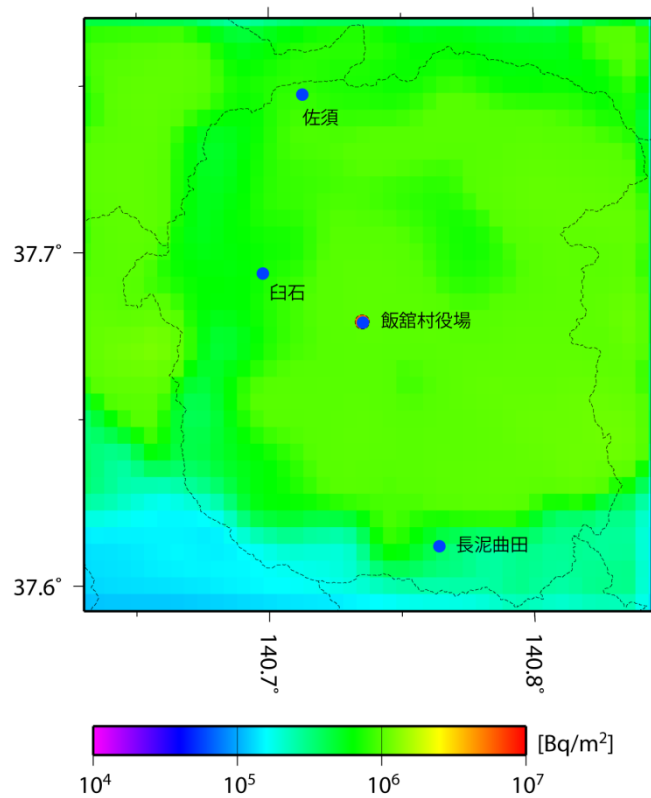


図 5-16 飯館村における ^{131}I の積算降下量(2011/3/12 5:00～3/26 11:00(JST)、
3/31 8:00(JST)における減衰を考慮)

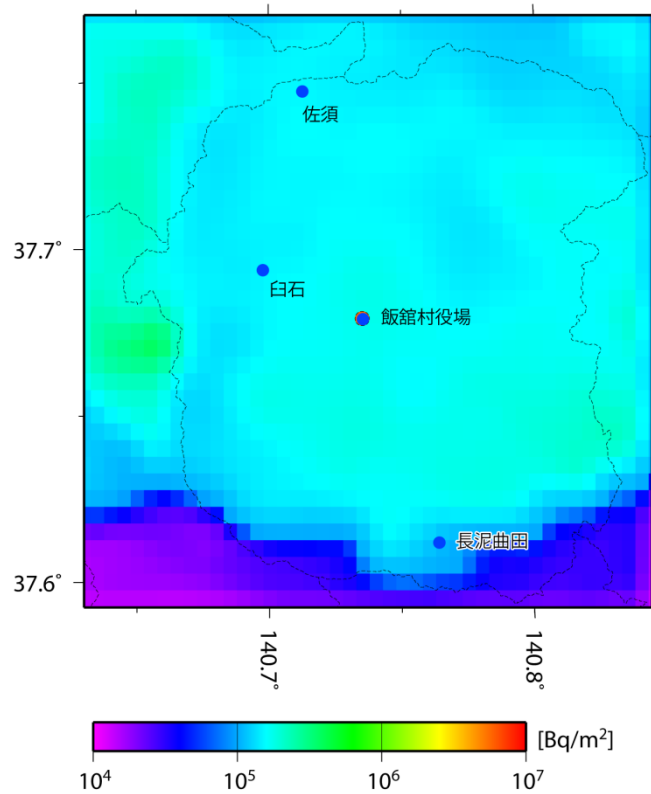
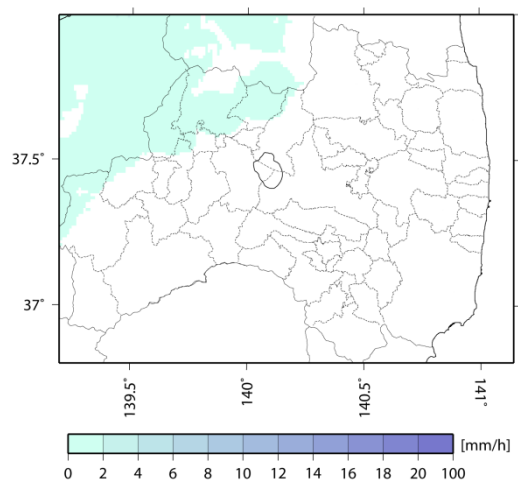
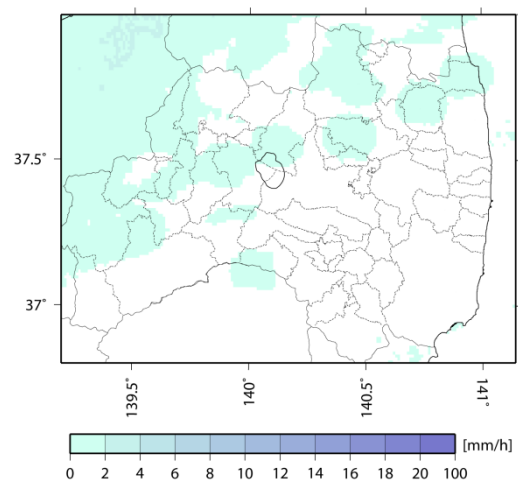


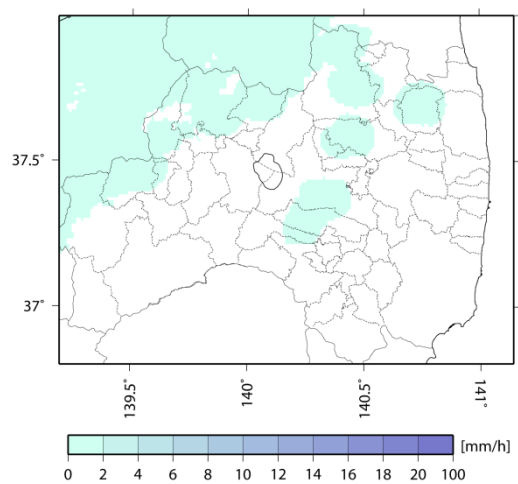
図 5-17 飯館村における ^{137}Cs の積算降下量(2011/3/12 5:00～3/26 11:00(JST)、
3/31 8:00(JST)における減衰を考慮)



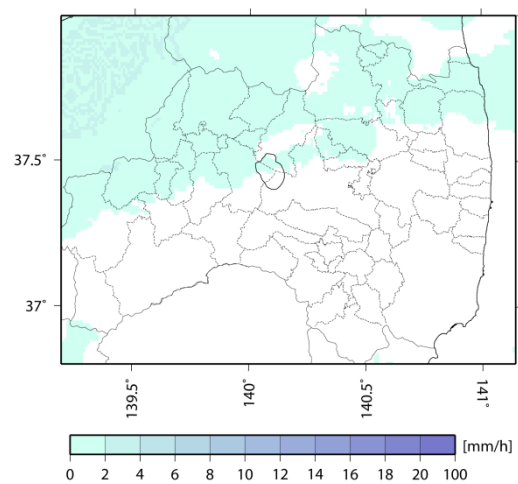
(a) 2011/3/15 16:00



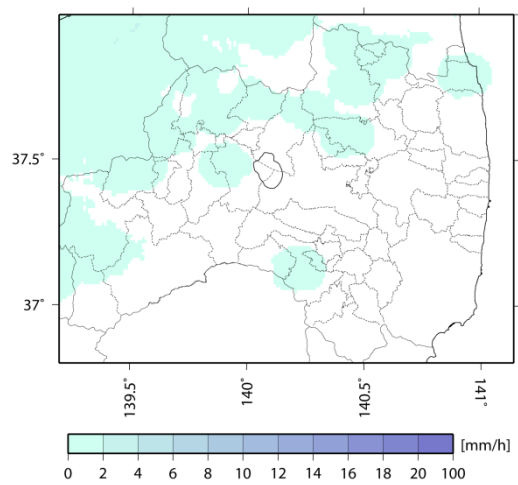
(b) 2011/3/15 19:00



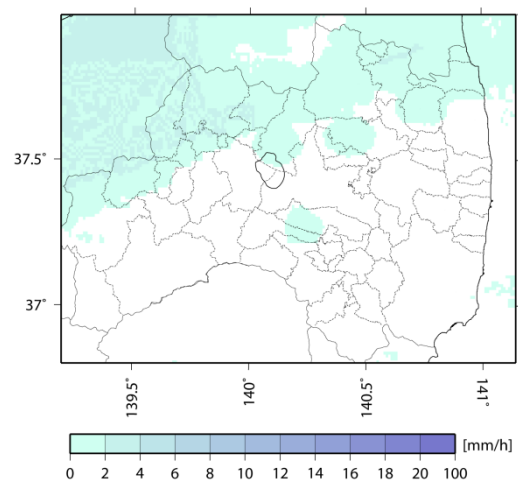
(c) 2011/3/15 17:00



(d) 2011/3/15 20:00

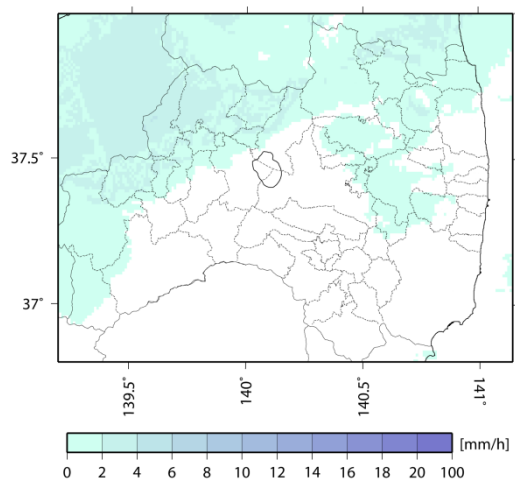


(e) 2011/3/15 18:00

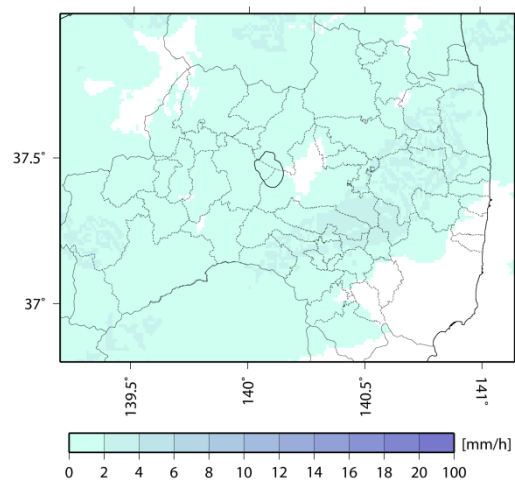


(f) 2011/3/15 21:00

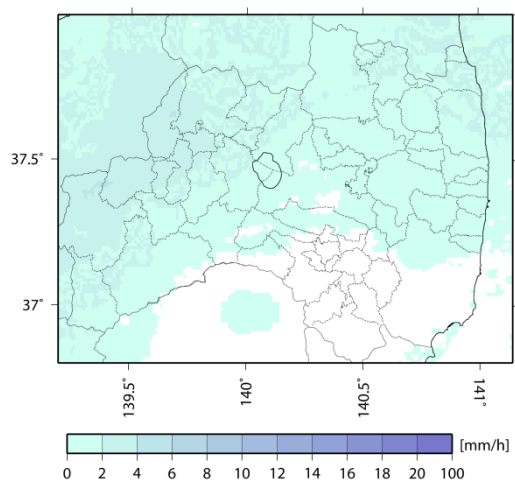
図 5-18 2011/3/15 16:00~21:00 の福島県における降水分布



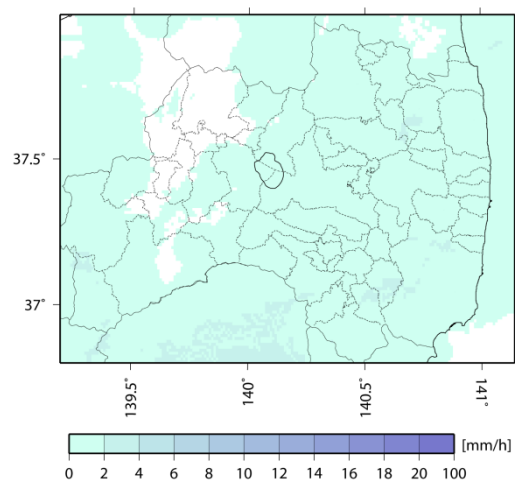
(a) 2011/3/15 22:00



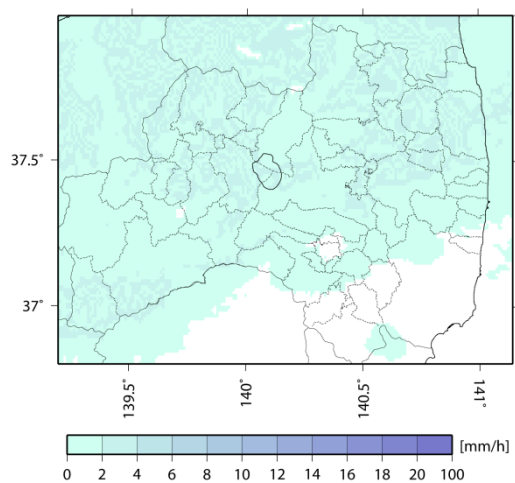
(b) 2011/3/16 1:00



(c) 2011/3/15 23:00



(d) 2011/3/16 2:00



(e) 2011/3/16 0:00

図 5-19 2011/3/15 22:00～3/16 2:00 の福島県における降水分布

5.3. ^{133}Xe の大気中濃度

シミュレーションの妥当性検証に資するものとして、図 5-20 に示す Stohl らによる ^{133}Xe の推定放出率を用いて、 ^{133}Xe の大気中濃度のシミュレーションを行った。なお、Stohl らの推定値は、大気拡散モデルと表 5-5 に示す全世界の CTBTO(Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization)における観測値を使用して逆推定したものである。ただし、逆推定に使用された観測値に、日本の測定データは含まれていない。

計算結果は、5.1 節で示した飯舘村周辺域の 4 地点についてまとめた。また、シミュレーション結果の検証を目的として、図 5-21 に示す女川町、JAEA 東海及び日本分析センターの観測値と比較した。サブマージョンによる ^{133}Xe の大気中濃度から実効線量率への換算係数は EPA-402-R-93-081 から、 $5.62\text{E-}06(\mu\text{ Sv/h per Bq/m}^3)$ [9]とした。

飯舘村周辺域 4 地点における時間積算濃度及び外部被ばく線量を表 5-6、各地点の経時変化を図 5-22～図 5-23、飯舘村における時間積算濃度分布を図 5-24 に示す。また、参考にプルーム通過中屋外にいた場合のサブマージョン外部被ばく線量の分布を図 5-25 に示す。

女川町、JAEA 東海及び日本分析センターにおける ^{133}Xe の大気中濃度及び空間線量率の経時変化を図 5-26～図 5-28 に示す。

飯舘村周辺域における ^{133}Xe

飯舘村における ^{133}Xe の時間積算濃度は $10^5\sim 10^6(\text{Bq/m}^3)$ であり、最大値は $822(\text{kBq/m}^3)$ であった。 ^{133}Xe の放射性雲によるサブマージョン外部被ばく線量は、上記の換算係数を使用すると、数～数十(μSv)となる。

実測値との比較について

女川町では、3/11 20:40 に 200nGy/h 、1:50 に $21\mu\text{ Sv/h}$ という測定値がある。計算値では、3/11 20:30 において 395nSv/h のピークがあり、観測値と概ね一致した。しかし、後半の $21\mu\text{ Sv}$ については、再現できていない。計算結果の濃度分布図を見ると、プルーム自体は当該時刻において女川付近を通過しているが、観測地点からわずかにそれているため、ピークが再現できなかったと考えられる。計算結果が東海 JAEA 及び日本分析センターについても、ピークは捉えているが、数値は～1桁程度低い値となっており、全体として過小評価となった。

表 5-5 Stohl らによる ^{133}Xe 逆推定に使用された観測値の一覧([3])

観測地点	経度	緯度	逆推定に使用 された観測値 の数	備考
Wake Island	166.6	19.3	40	CTBTO
Oahu	158	21.5	79	CTBTO
Sidney	123.4	48.7	38	I. Hoffman, personal communication (2011)
Richland	119.3	46.3	72	Bowyer et al. (2011)
Yellowknife	114.5	62.5	33	CTBTO
Ashland	99.8	37.2	79	CTBTO
Panama City	79.5	9	14	CTBTO
Charlottesville	78.4	38	76	CTBTO
Ottawa	75.7	45.4	27	CTBTO
St.John's	52.7	47.6	38	CTBTO
Schauinsland	7.9	47.9	39	CTBTO
Spitsbergen	15.4	78.2	79	CTBTO
Stockholm	17.6	59.2	79	CTBTO
Ulan-Bator	106.3	47.9	37	CTBTO
Guangzhou	113.3	23	39	CTBTO
Darwin	130.9	12.4	78	CTBTO
Ussuriysk	132	44.2	59	CTBTO

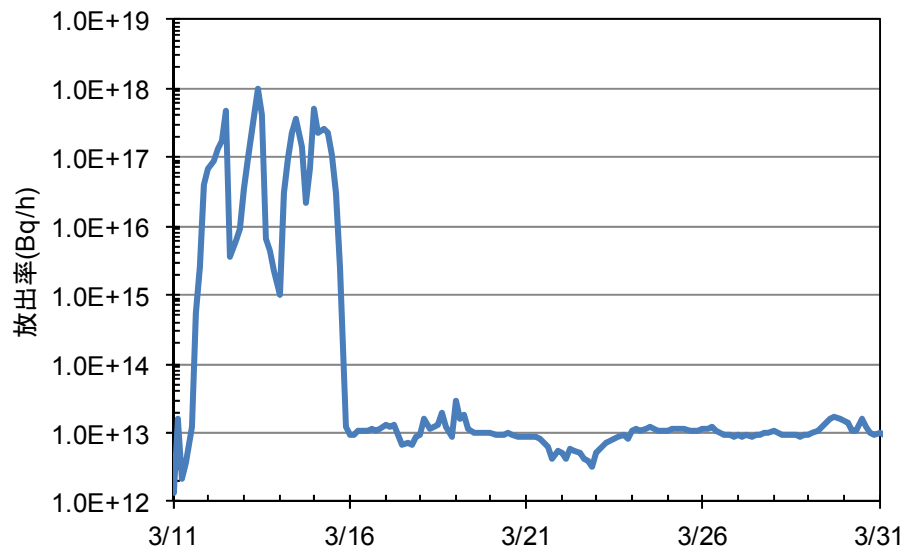
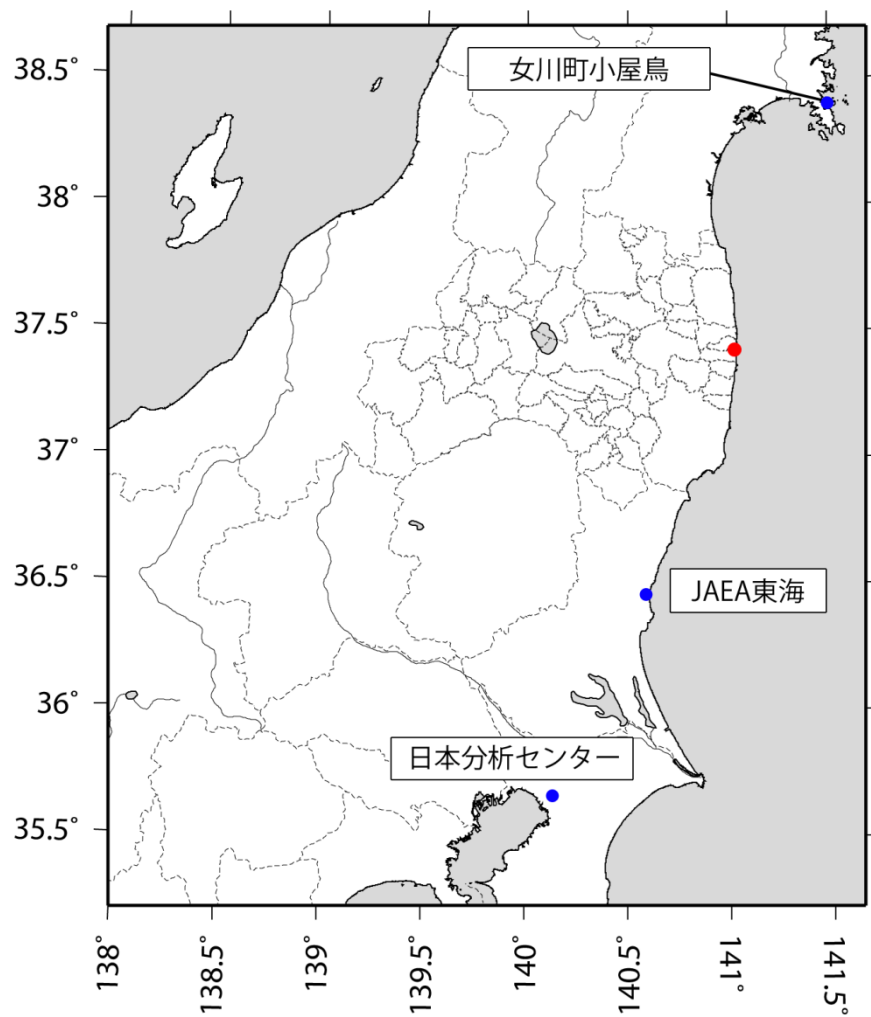


図 5-20 Stohl らによる ^{133}Xe の推定放出率[3]



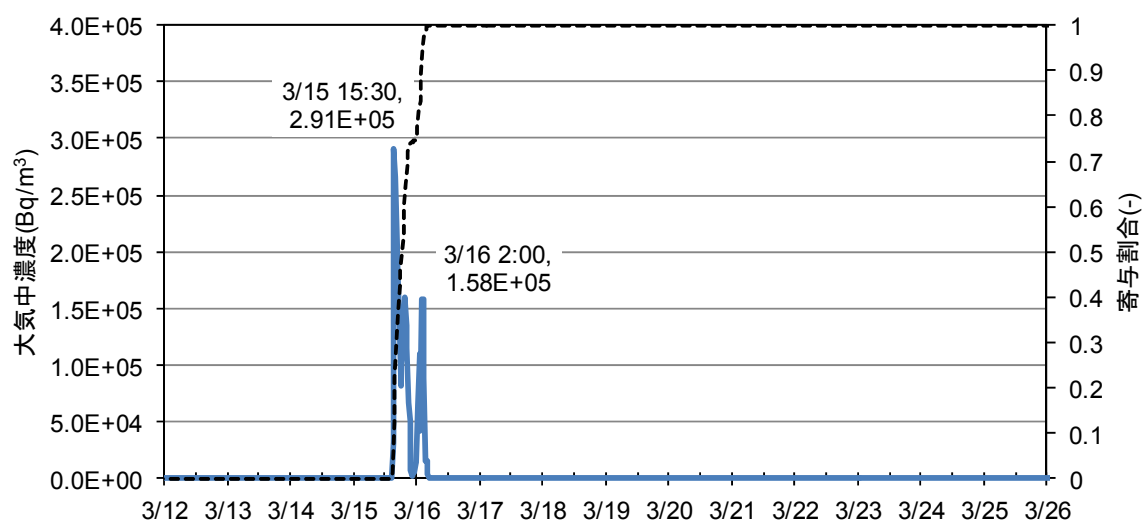
●：福島第一原子力発電所

図 5-21 ^{133}Xe 大気中濃度の観測地点

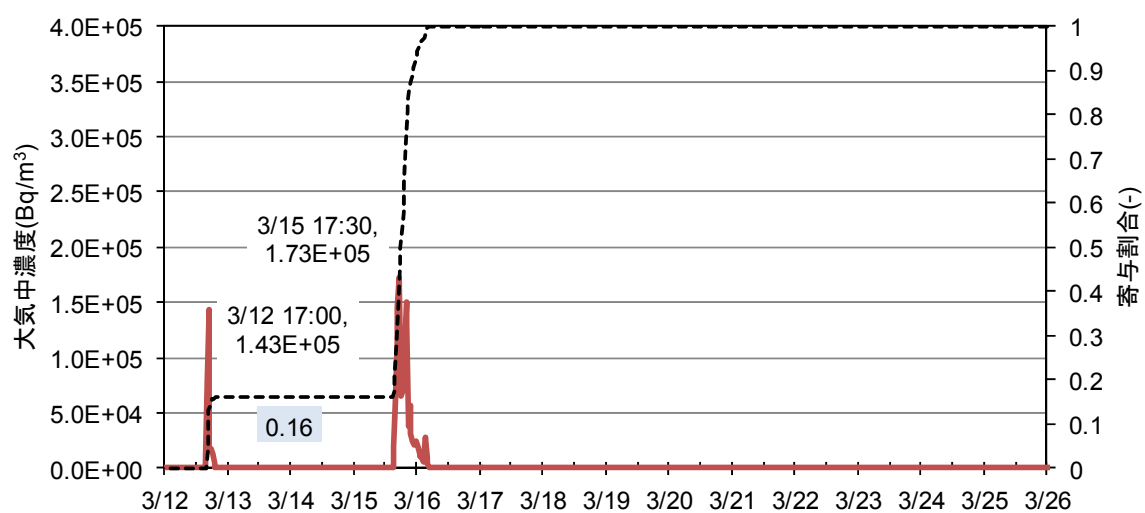
表 5-6 飯舘村における ^{133}Xe によるサブマージョン外部被ばく線量

地点名	時間積算濃度 (Bq/m ³ *hr)	サブマージョン外部被ばく線量(μSv)※		
		屋内滞在時間(h)		
		0	16	24
伊達郡川俣町山木屋大洪	1.33E+06	8	7	7
相馬郡飯舘村八木沢	8.56E+05	5	4	4
相馬郡飯舘村長泥	1.82E+06	10	10	9
飯舘村役場	1.08E+06	6	6	5

※木造家屋の低減係数：0.9

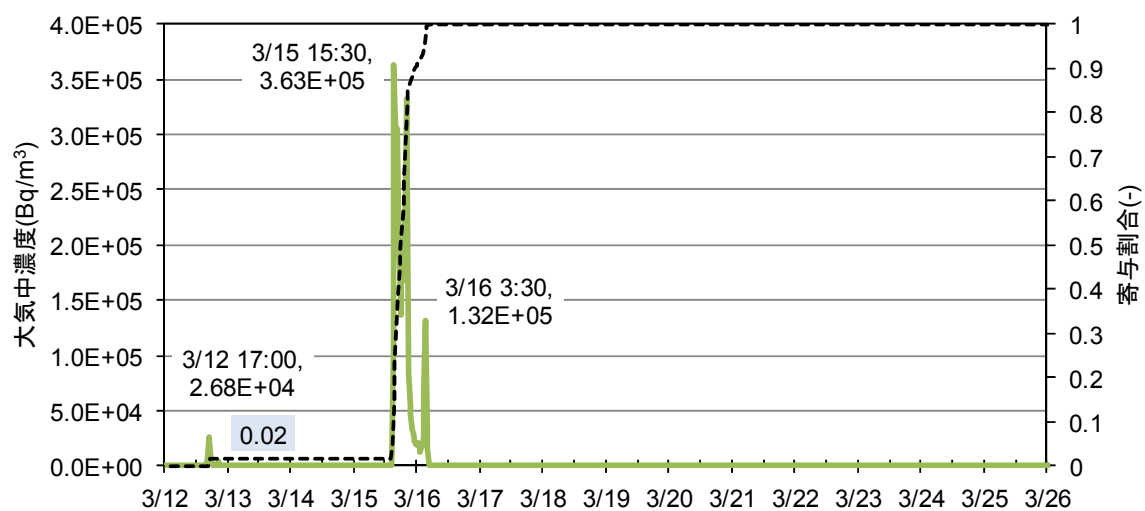


(a) 川俣町山木屋大洪

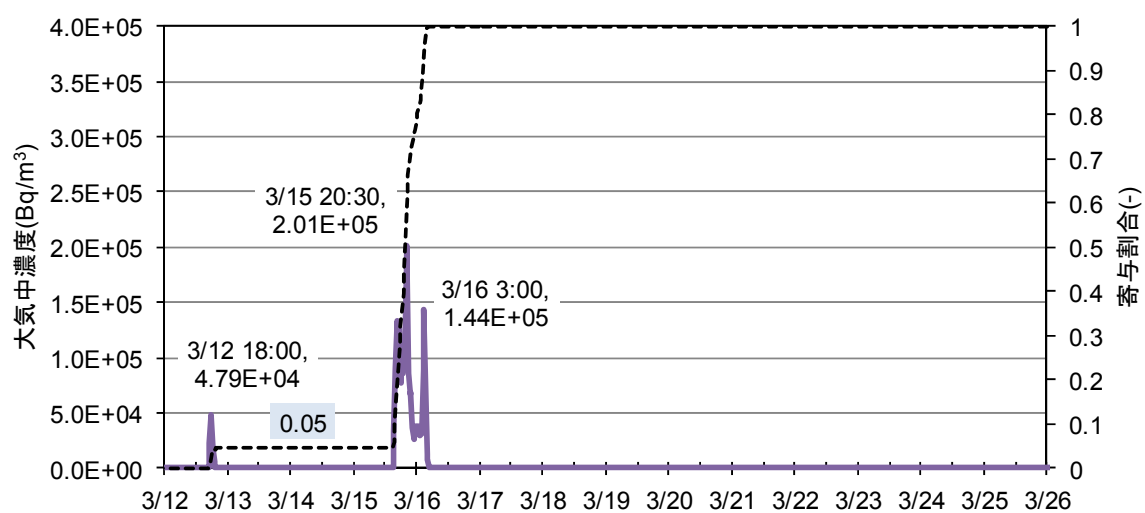


(b) 飯舘村八木沢

図 5-22 2011/3/11 9:00~3/26 0:00 の飯舘村における
¹³³Xe の大気中濃度の経時変化と寄与割合(1/2)



(c) 飯舘村長泥



(d) 飯舘村役場

図 5-23 2011/3/11 9:00~3/26 0:00 の飯舘村における
 ^{133}Xe の大気中濃度の経時変化と寄与割合(2/2)

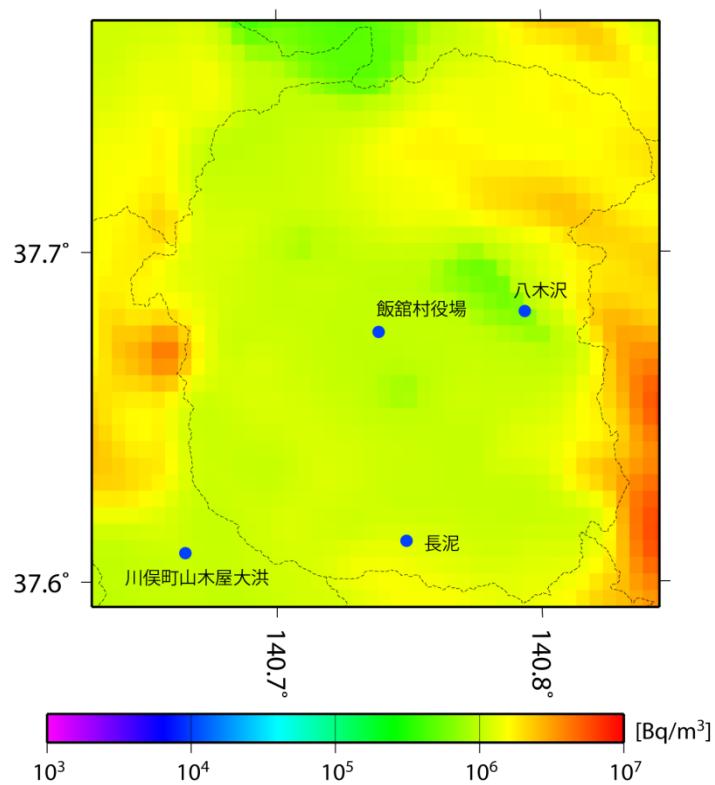


図 5-24 飯舘村における ^{133}Xe 時間積算濃度 (2011/3/11 9:00～3/26 0:00(JST))

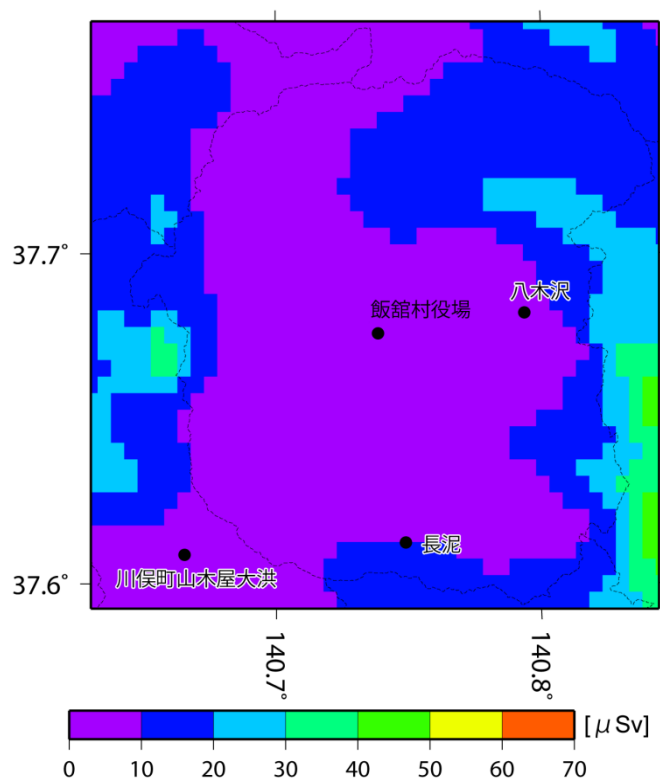
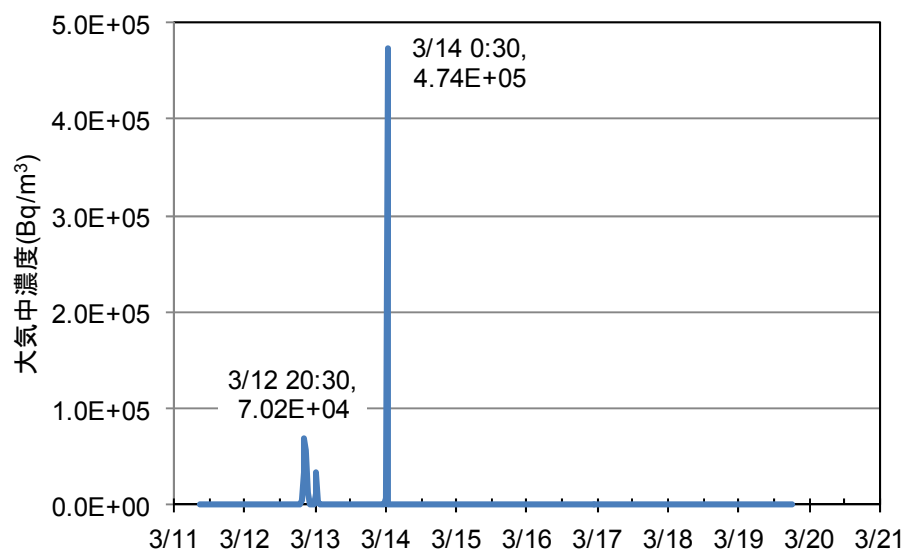
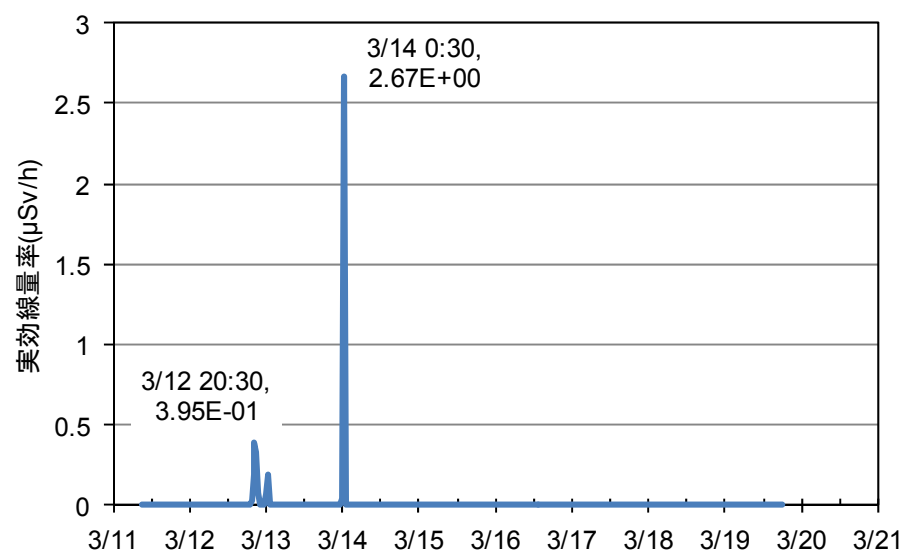


図 5-25 参考：飯舘村における ^{133}Xe によるサブマージョン外部被ばく線量 (2011/3/11 9:00～3/26 11:00(JST))

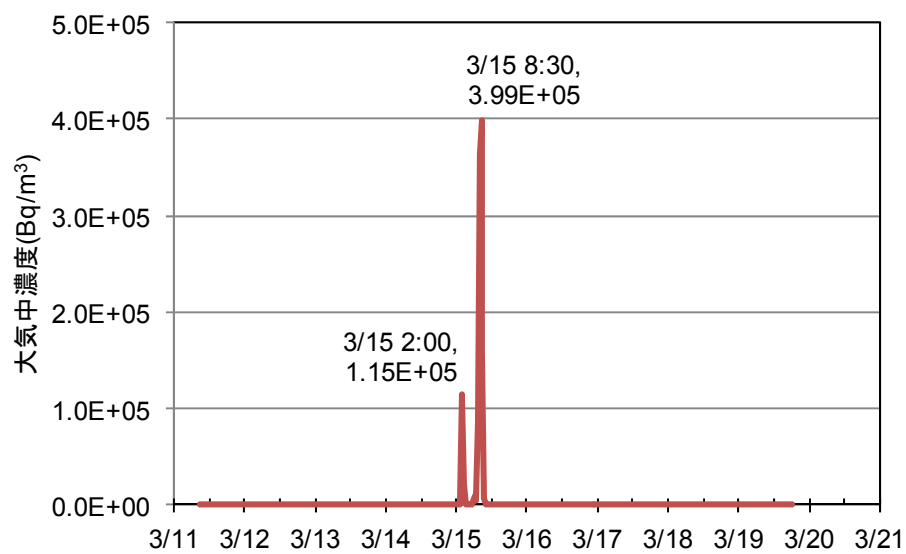


(a) 大気中濃度

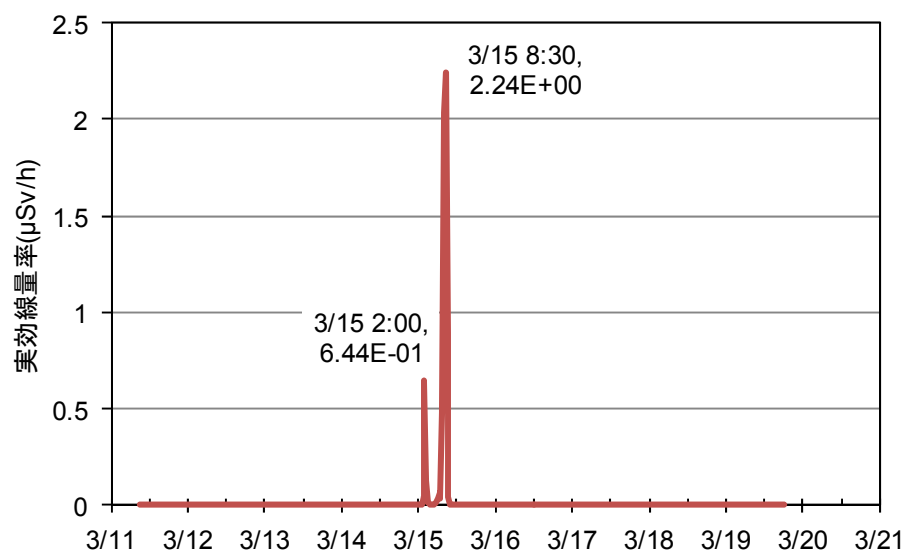


(a) 実効線量率

図 5-26 女川町小屋島における ¹³³Xe 大気中濃度と実効線量率

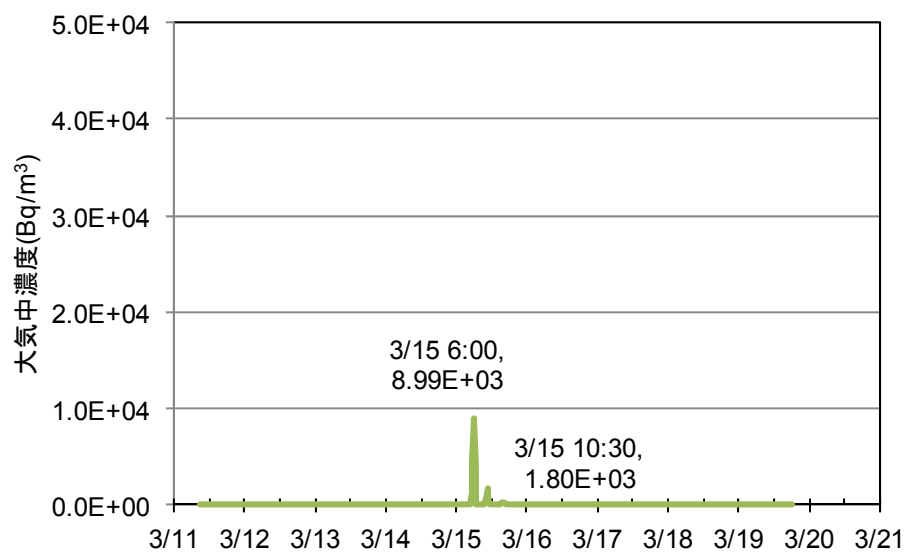


(a) 大気中濃度

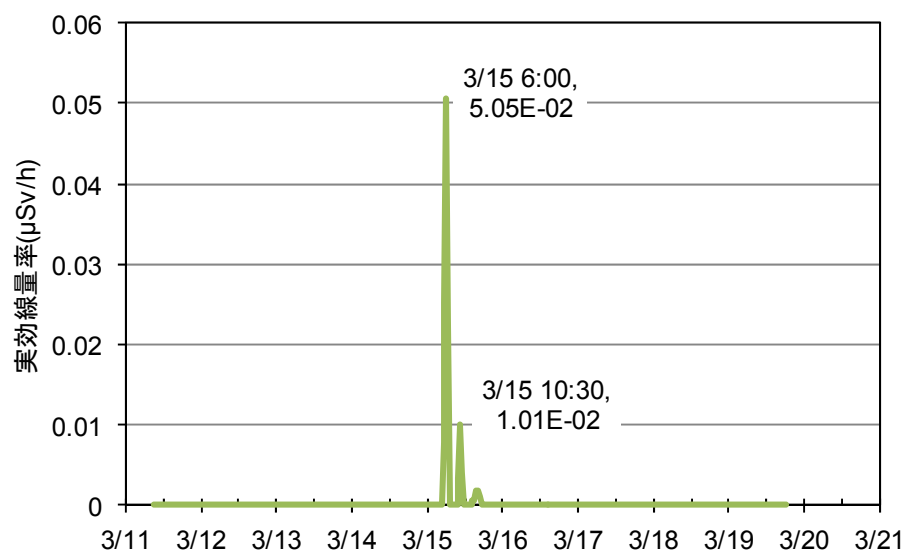


(b) 実効線量率

図 5-27 JAEA 東海における ^{133}Xe 大気中濃度と実効線量率



(a) 大気中濃度



(b) 実効線量率

図 5-28 日本分析センターにおける ^{133}Xe 大気中濃度と実効線量率

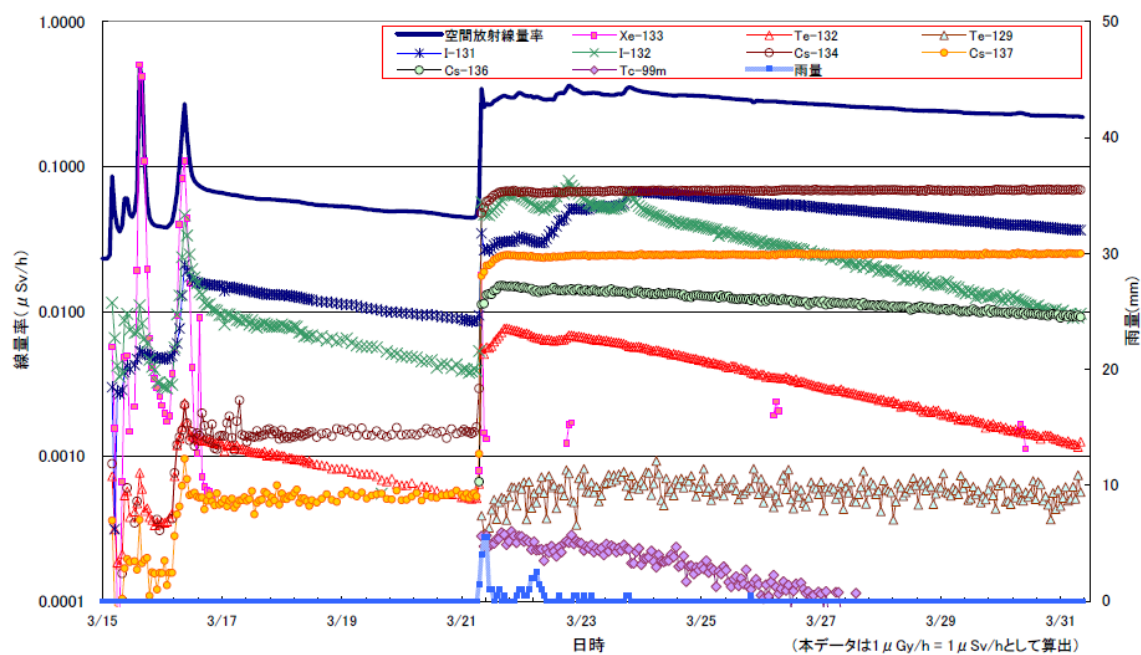


図 5-29 日本分析センターによる空間線量率測定値

6. 検証計算

6.1. ^{131}I 大気中濃度と空間線量率との比較

測定された空間線量率は、その寄与核種の内訳が不明であるため、計算値と値自体を比較することはできない。しかし、ピークが現れた際に放射性雲がその地点を通過していることは明らかである。本件では、放射性雲の動きがシミュレーション上で再現できていることを確認することを目的として、福島県内のモニタリング地点における 3/11～3/16 の空間線量率と計算結果の ^{131}I 地表大気中濃度の比較を行った。比較に使用したモニタリング地点の一覧を表 6-1、位置を図 6-1 に示す。

表 6-1 福島県内のモニタリング地点(抜粋)

地点名	緯度	経度	位置情報出典
大野	37.40669	140.98	2
山田	37.43139	140.9878	1
新山	37.45428	140.9979	1
上羽鳥	37.45439	140.981	1
浪江	37.49408	140.9907	1
飯舘村役場	37.67919	140.7352	1
川内村村役場	37.33204	140.8379	3
県北保健福祉事務所	37.76431	140.468	3
いわき合同庁舎	37.05055	140.8855	3
南相馬合同庁舎	37.63999	140.9728	3

- 1 : 日本の原子力関連施設における SPEEDI 環境放射線モニタリングと気象情報
<http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/radiation/speedi/>
- 2 : 参考文献[10]
- 3 : Knecht ジオコーディング <http://api.knecht.jp/geocoding>

各地点における時系列データの比較を図 6-2～図 6-11 に示す。図から、シミュレーション結果は、概ねピークは捉えていることが確認できた。

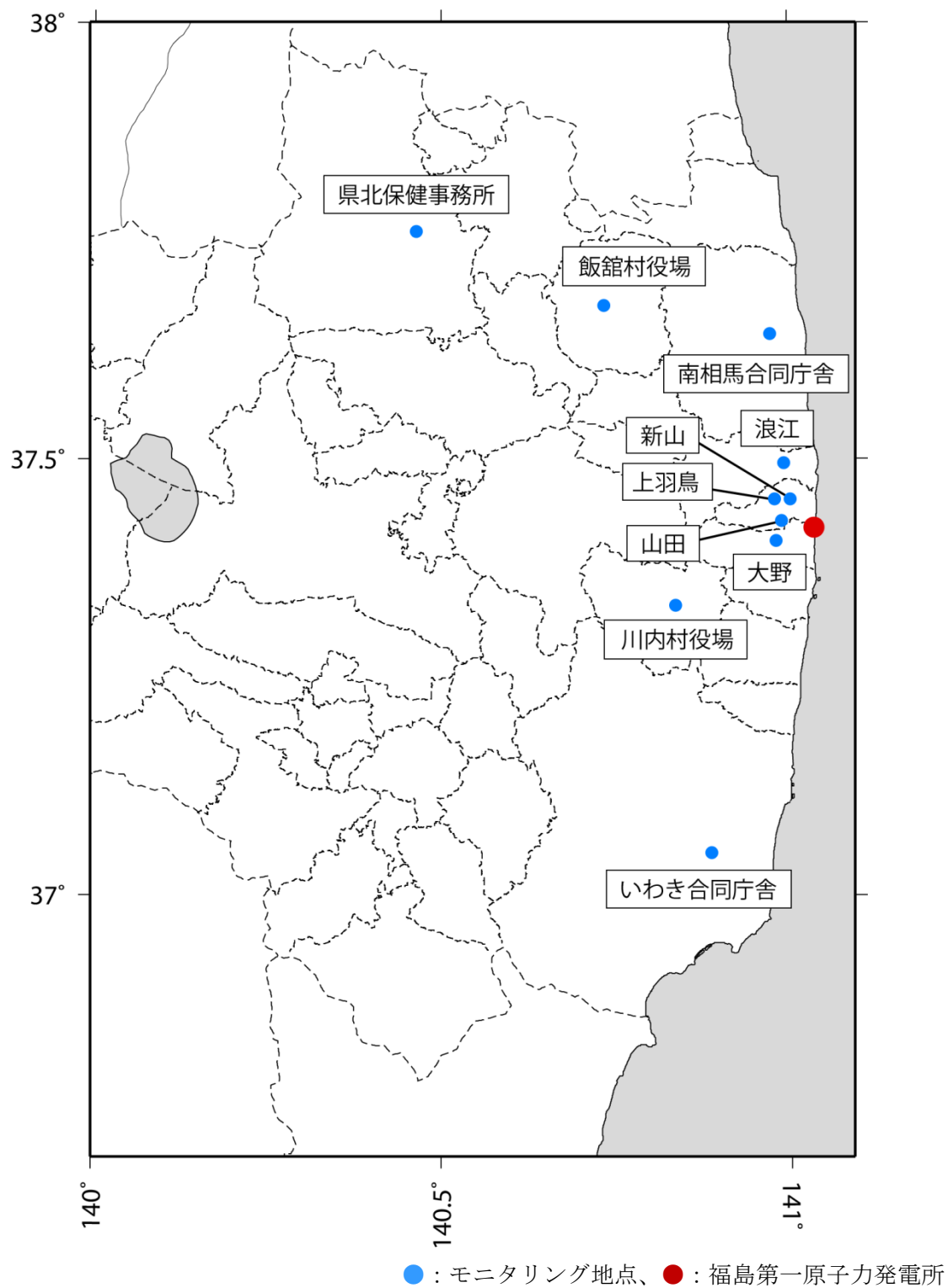


図 6-1 福島県のモニタリングポスト(抜粋)

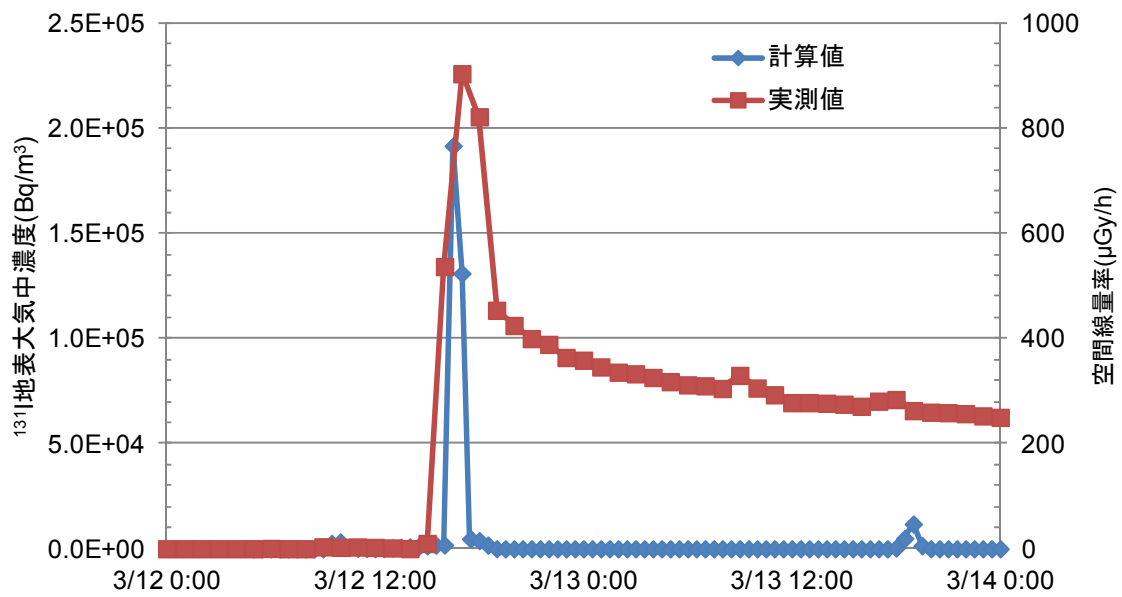


図 6-2 新山におけるモニタリング値(空間線量率)と ^{131}I 地表大気中濃度の比較

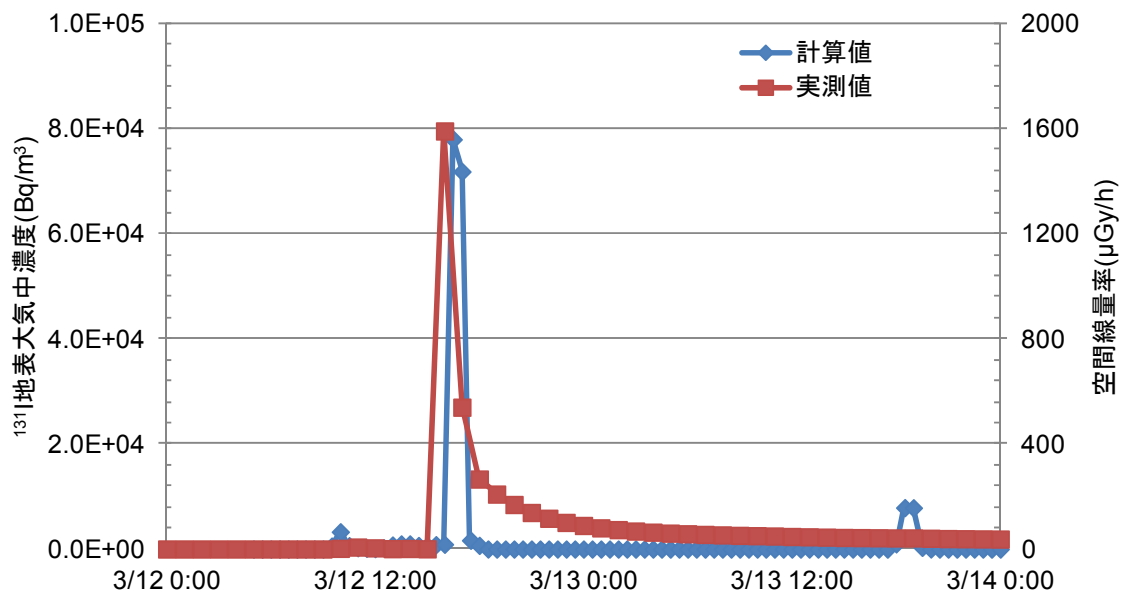


図 6-3 上羽鳥におけるモニタリング値(空間線量率)と ^{131}I 地表大気中濃度の比較

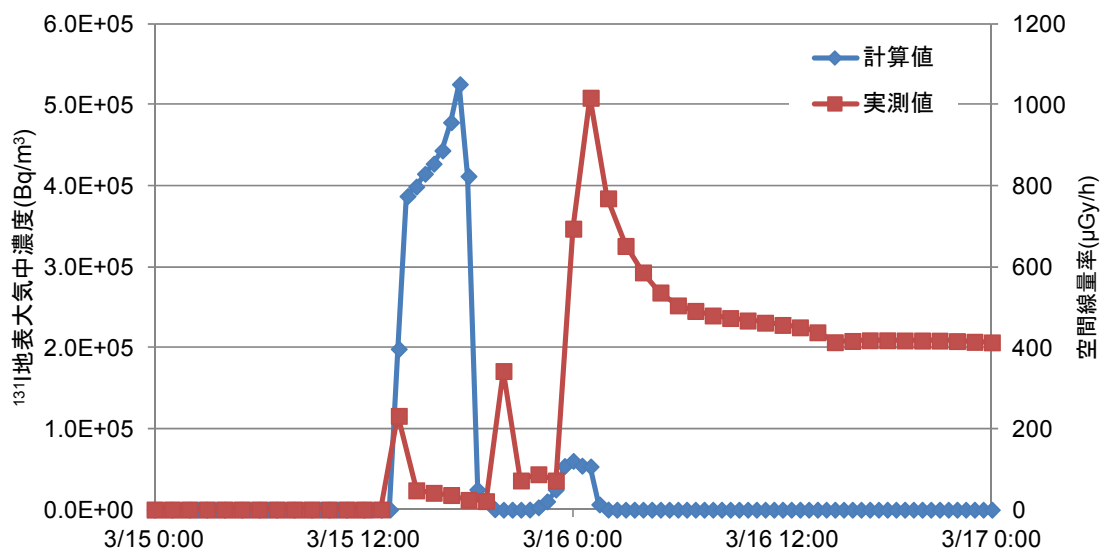


図 6-4 山田におけるモニタリング値(空間線量率)と ^{131}I 地表大気中濃度の比較

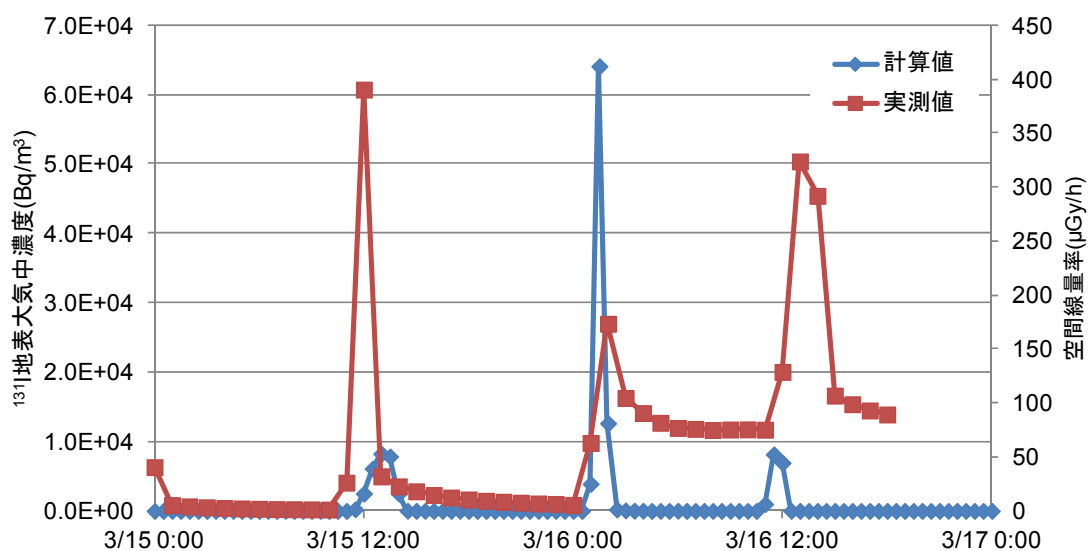


図 6-5 大野におけるモニタリング値(空間線量率)と ^{131}I 地表大気中濃度の比較

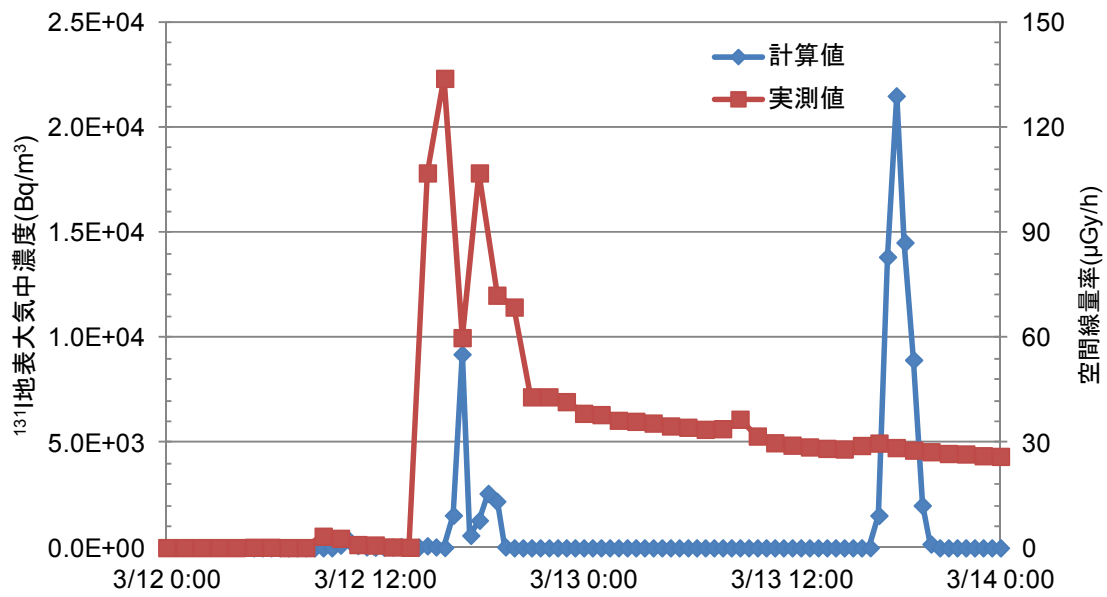


図 6-6 浪江におけるモニタリング値(空間線量率)と ^{131}I 地表大気中濃度の比較

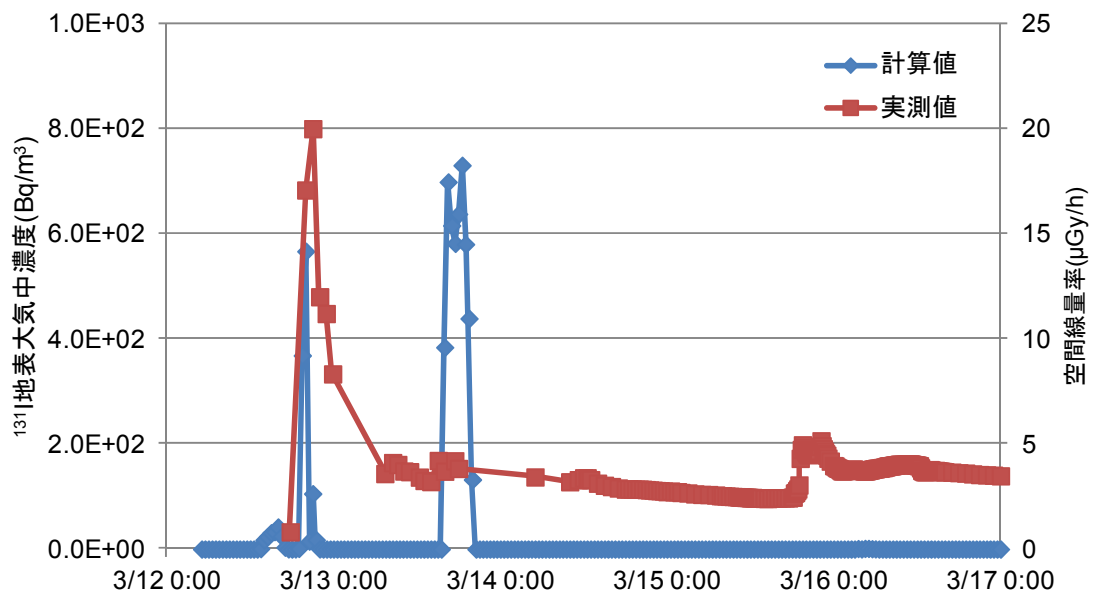


図 6-7 南相馬市におけるモニタリング値(空間線量率)と ^{131}I 地表大気中濃度の比較

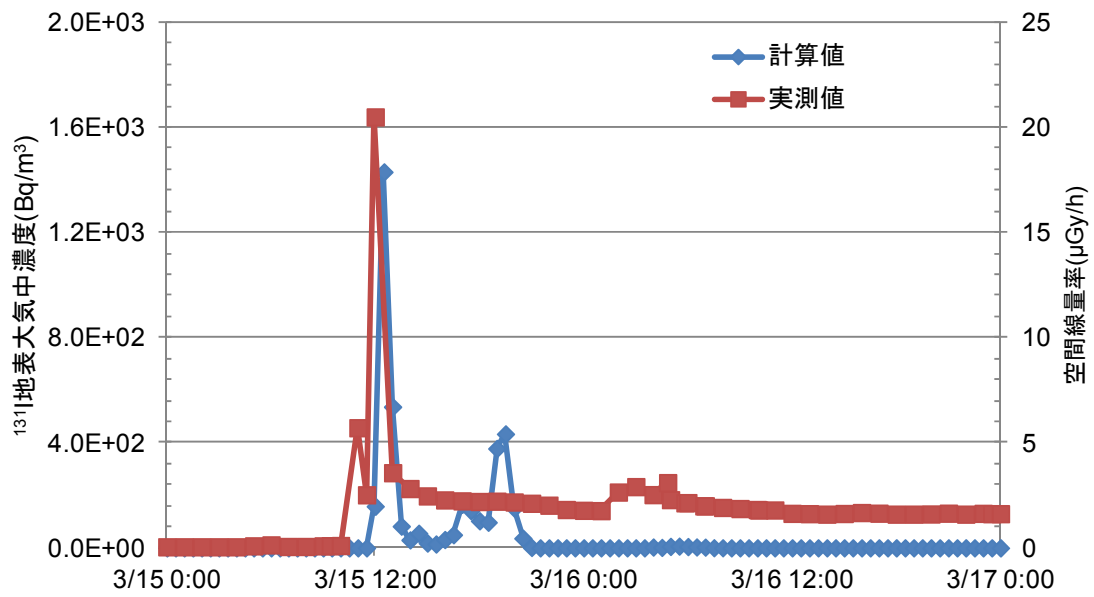


図 6-8 川内村役場におけるモニタリング値(空間線量率)と ^{131}I 地表大気中濃度の比較

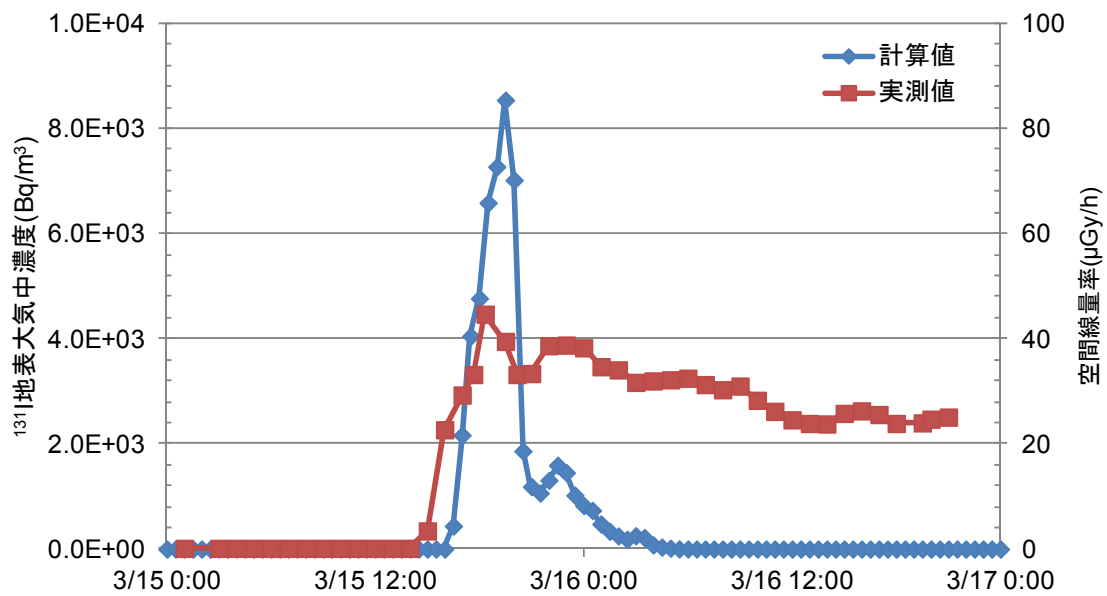


図 6-9 飯舘村役場におけるモニタリング値(空間線量率)と ^{131}I 地表大気中濃度の比較

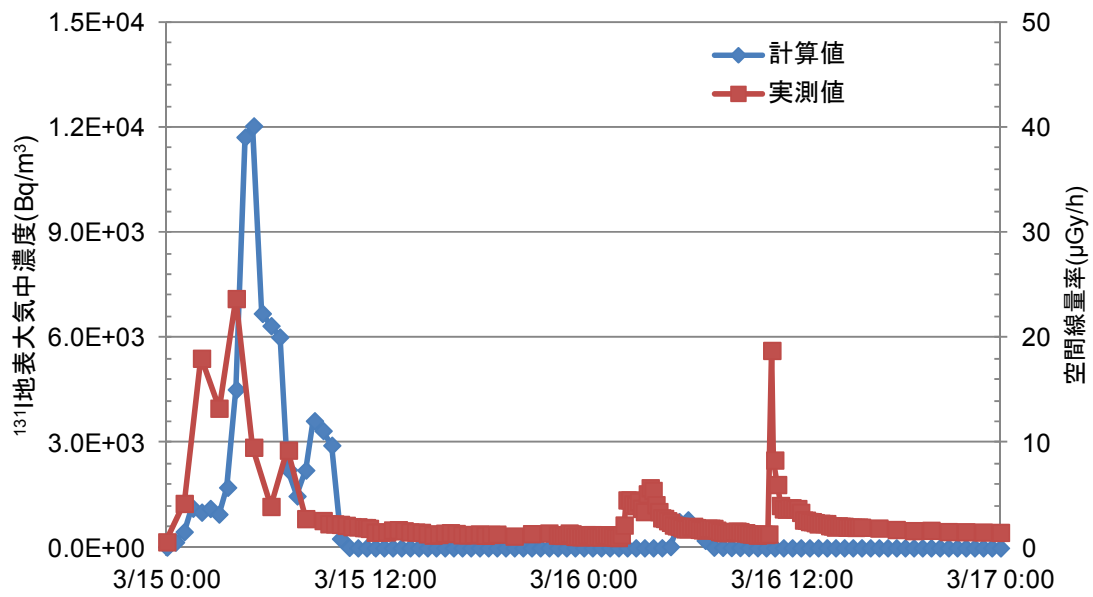


図 6-10 いわき市におけるモニタリング値(空間線量率)と ^{131}I 地表大気中濃度の比較

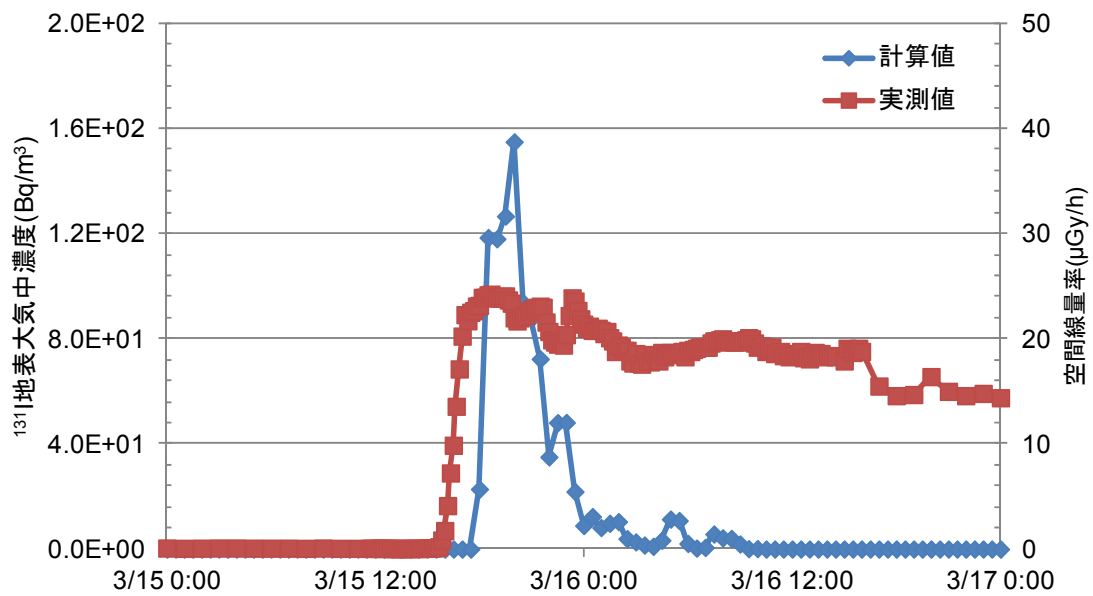


図 6-11 県北保健事務所(福島市)におけるモニタリング値(空間線量率)と ^{131}I 地表大気中濃度の比較

6.2. ダストサンプリングとの比較

シミュレーションの妥当性検討のため、福島県内及び飯舘村におけるダストサンプリングの結果と比較を行った。

6.2.1. 福島県内

シミュレーション結果の妥当性検証のため、3/12～3/13 において福島県内で行われたダストサンプリングの結果 [11] と比較を行った。なお、本件のソース情報として利用している原子力安全委員会が平成 23 年 8 月に発表した推定放出量の一部は、この測定結果から逆算されたものである。ダストサンプリング観測地点を図 6-12、観測値と計算結果との比較を表 6-2 に示す。また、参考までに各地点における大気中濃度の経時変化を図 6-13～図 6-14 に示す。

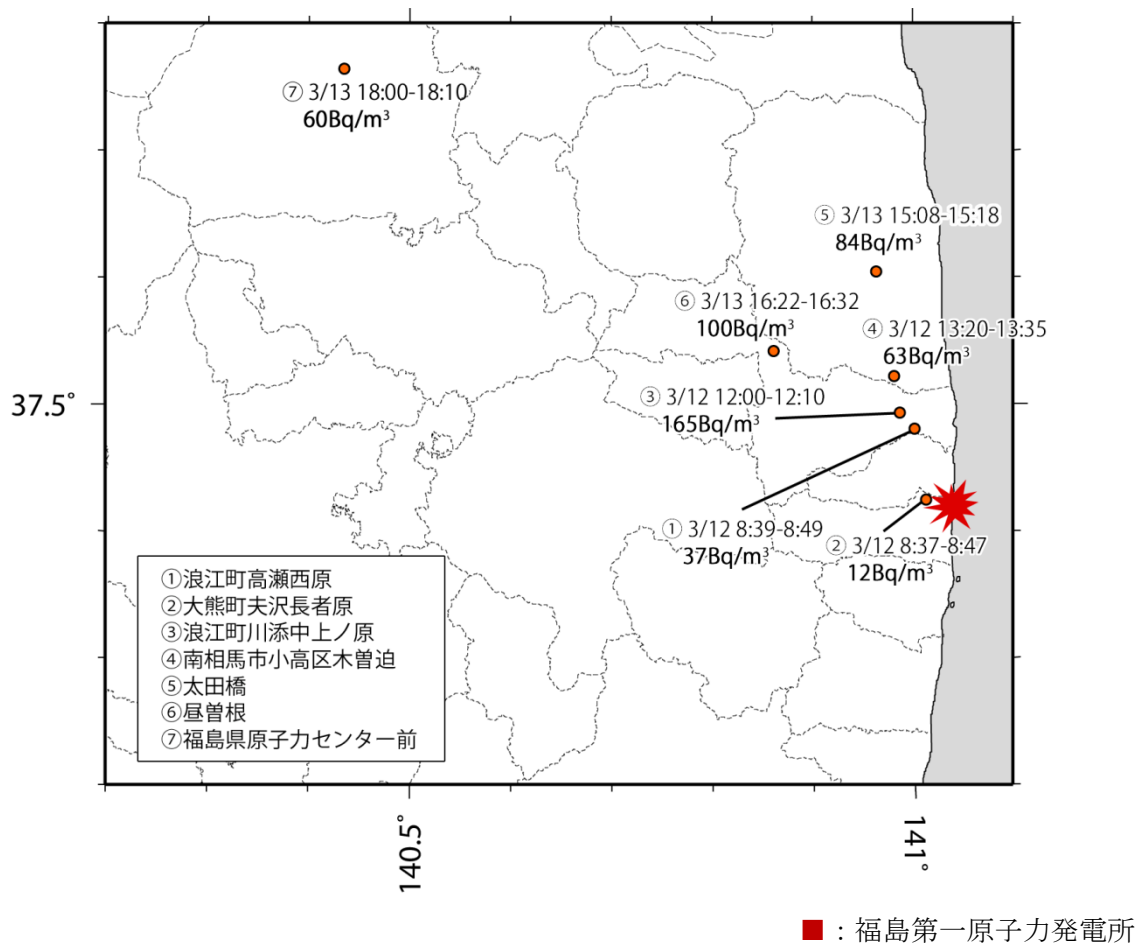
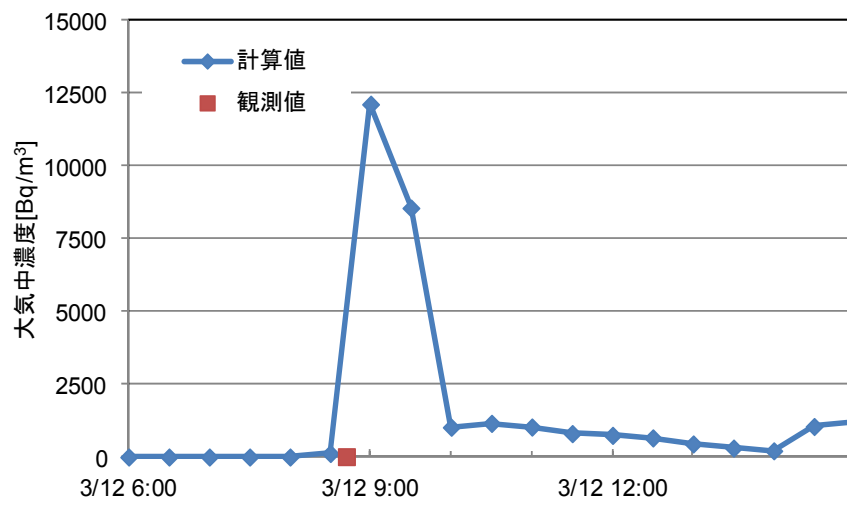


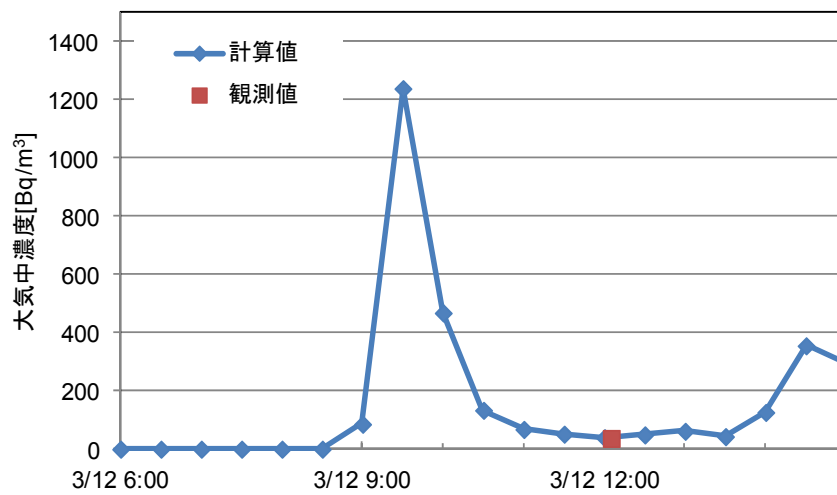
図 6-12 3/12～3/13 の福島県内におけるダストサンプリング観測 [11]

表 6-2 福島県内におけるダストサンプリングとの比較(3/12～3/13)

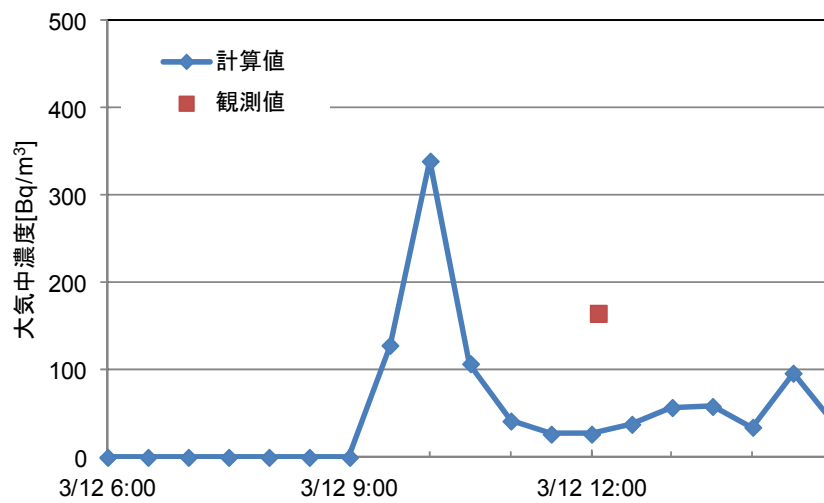
観測地点	観測日時	大気中濃度[Bq/m ³]	
		観測値	計算値
大熊町夫沢長者原	3/12 8:37-8:47	12	12126
浪江町高瀬西原	3/12 8:39-8:49	38	86
浪江町川添中上ノ原	3/12 12:00-12:10	165	38
南相馬市小高区上浦木曾迫	3/12 13:20-13:35	63	59
太田橋	3/13 15:08-15:18	85	250
昼曽根	3/13 16:22-16:32	100	0
福島県原子力センター前	3/13 18:00-18:10	60	



(a) 大熊町夫沢長者原

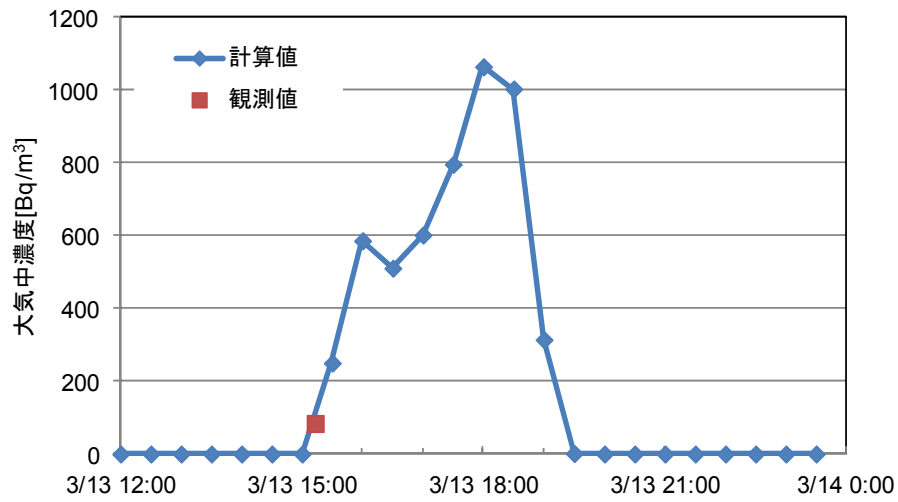


(b) 浪江町高瀬西原

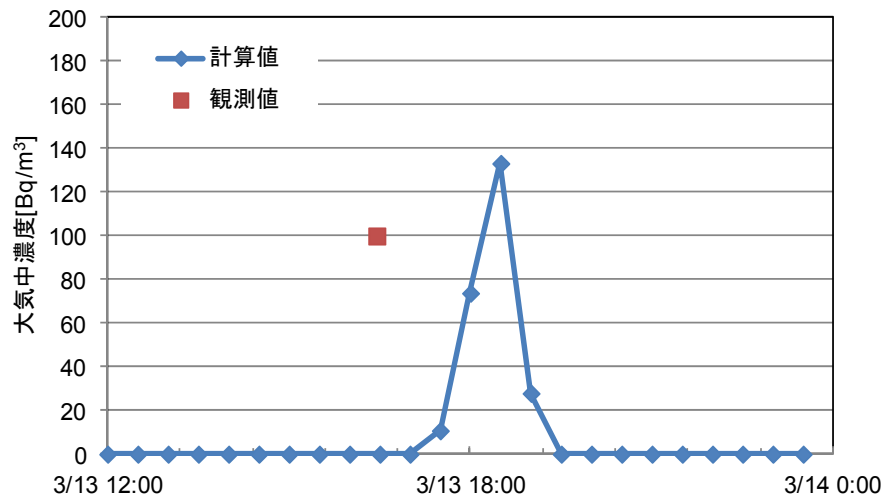


(a) 浪江町川添中上ノ原

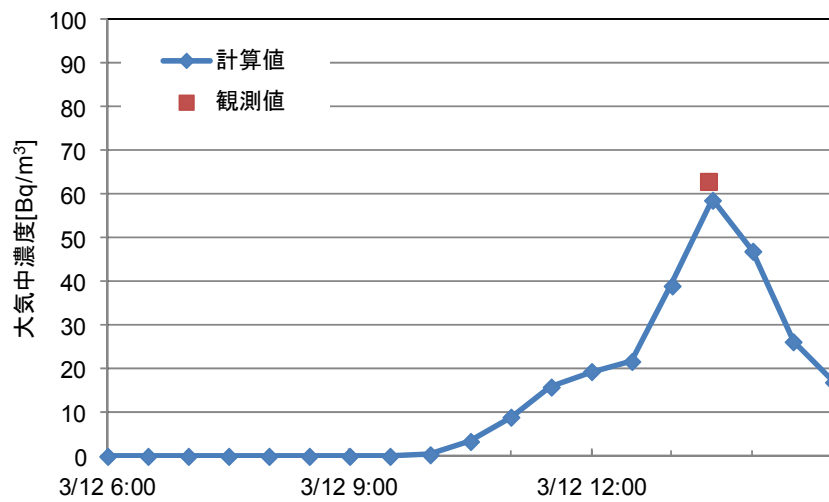
図 6-13 ダストサンプリング測定値と大気中濃度の経時変化(1/2)



(a) 太田橋



(b) 昼曽根



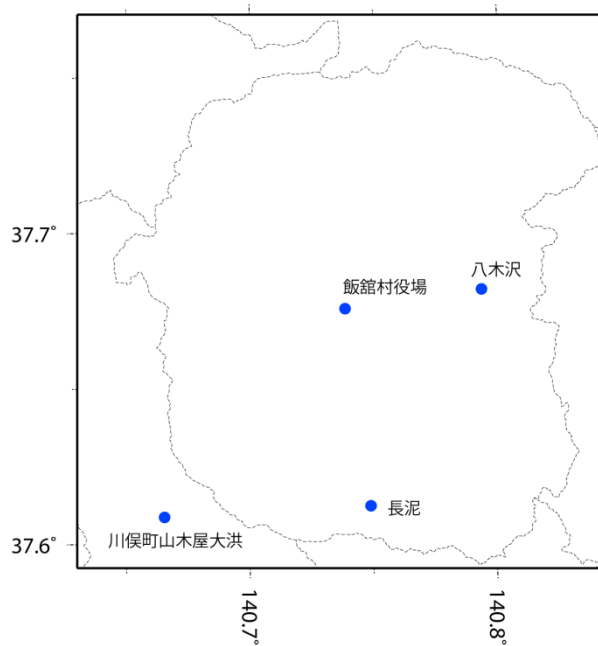
(c) 南相馬市小高区上浦木曽迫

図 6-14 ダストサンプリング測定値と大気中濃度の経時変化(2/2)

6.2.2. 飯舘村周辺域

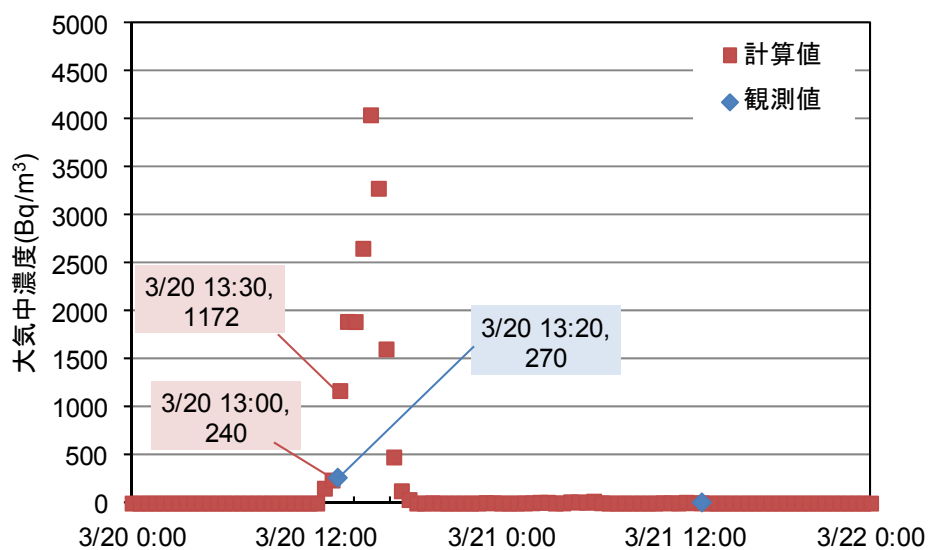
飯舘村周辺域では、2011/3/20 以降に、八木沢、長泥及び川俣町山木屋において、ダストサンプリングが行われている。 ^{131}I 及び ^{137}Cs の大気中濃度の計算結果との比較をそれぞれ図 6-16～図 6-17、図 6-18～図 6-19 に示す。

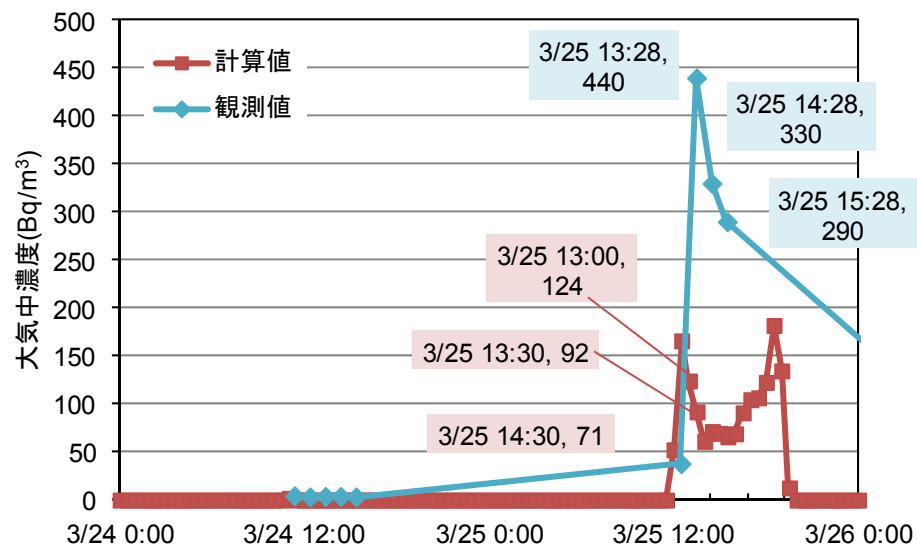
図から、放射性雲が当該の時間帯に観測地点付近に飛来していることは確認できた。しかし、値については、最大 10 倍(川俣町山木屋)の差があった。



※飯舘村役場の観測値はない

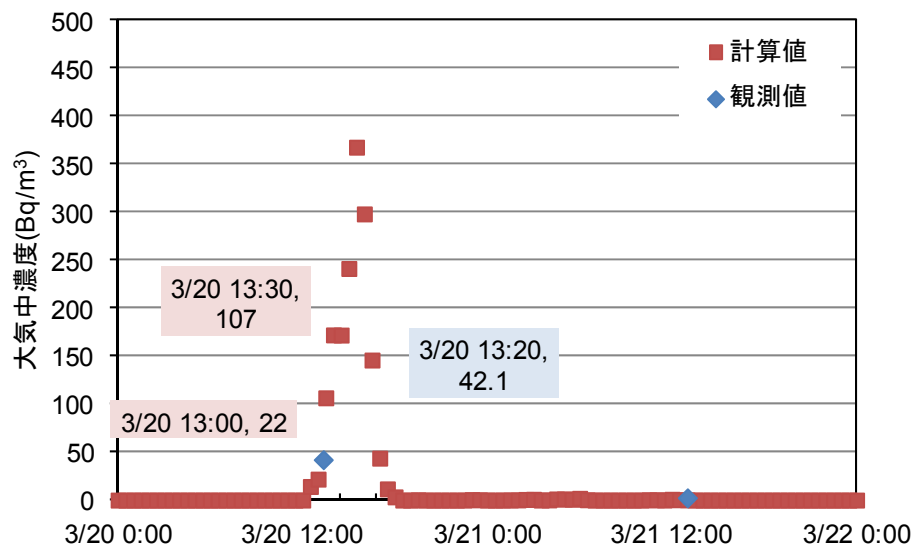
図 6-15 ダスト観測地点



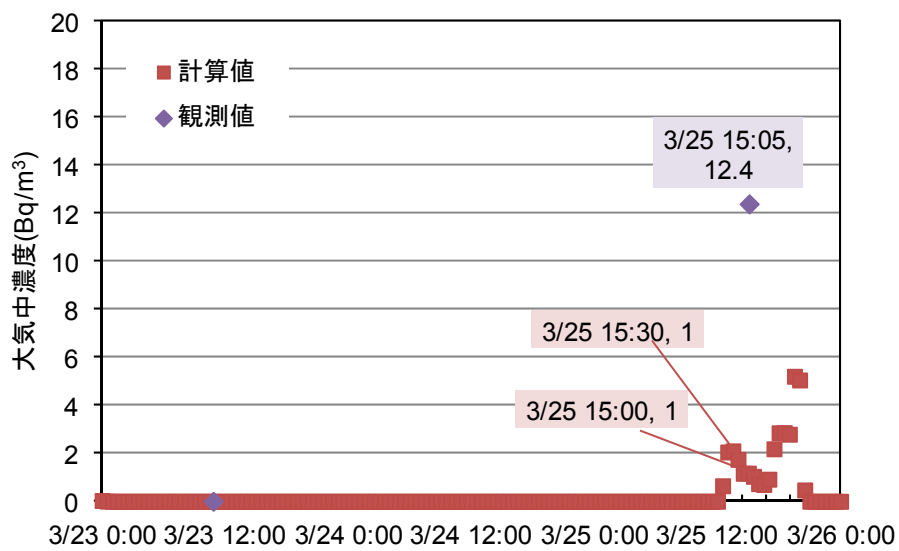


(a) 飯舘村長泥

図 6-17 地表大気中 ^{131}I 濃度の計算値と実測値との比較(2/2)

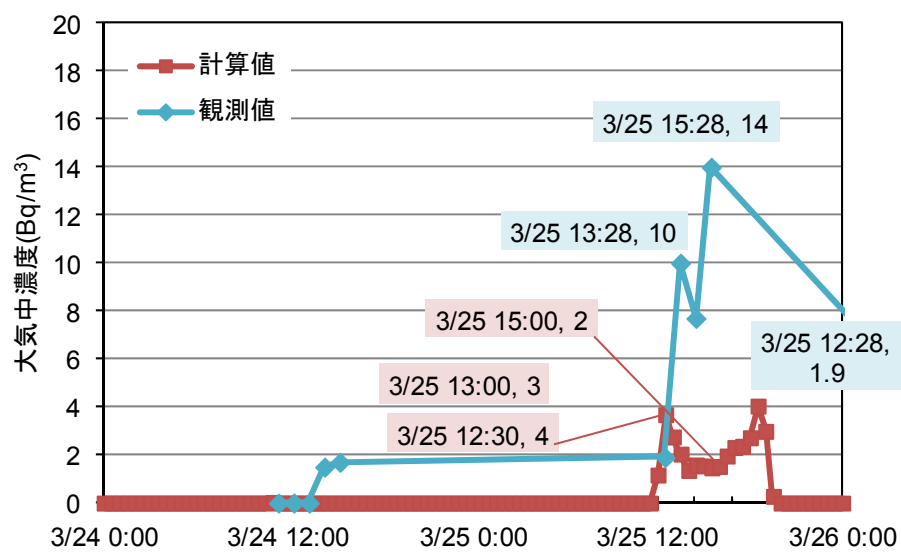


(a) 飯舘村八木沢



(b) 川俣町山木屋

図 6-18 地表大気中 ^{137}Cs 濃度の計算値と実測値との比較(1/2)



(a) 飯舘村長泥

図 6-19 地表大気中 ^{137}Cs 濃度の計算値と実測値との比較(2/2)

6.3. 空間線量率との比較

ダストサンプリングはデータが非常に少ないため、ダスト濃度との比較のみでシミュレーション全体の検証を行うことはできない。また、観測値が限られた期間しかなく、飯舘村において最も寄与が大きいと推察される 3/15 については、データがない。

そこで、本件では観測値の豊富な空間線量率との比較を行い、シミュレーションの妥当性検証に資することとした。

空間線量率は、寄与が大きいと考えられる核種として、 ^{129m}Te 、 ^{132}Te 、 ^{131}I 、 ^{133}Xe 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs を考慮し、その合計とした。ここで、 ^{133}Xe 、 ^{131}I 及び ^{137}Cs については、計算値をそのまま使用するが、その他の核種については、これらの計算結果を基にダストサンプリングの濃度比から算出した。

JAEA のレポート(JAEA-Review 2011-035)[12]では、茨城県東海村におけるダストサンプリングの結果から、3/15 付近の大気中濃度の比率として、以下の値が報告されている。

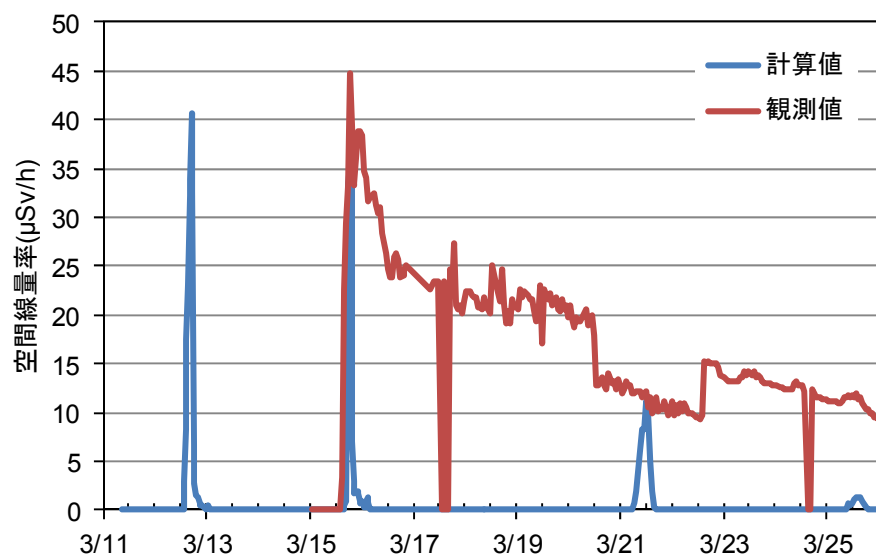
$^{129m}\text{Te}/^{137}\text{Cs}$	: 10
$^{132}\text{Te}/^{129m}\text{Te}$	: 10
$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$	: 0.8

本件では、 ^{137}Cs の計算値から、上記の比率を用いて、 ^{129m}Te 、 ^{132}Te 、 ^{134}Cs による空間線量率を概算した。線量換算係数を表 6-3 に示す。飯舘村における空間線量率の計算値と観測値の比較を図 6-20 に示す。なお、飯舘村における空間線量率の観測値は、3/15 以降となっている。核種別の空間線量率を図 6-21～図 6-22 に示す。また、参考として、茨城県東海村村松における空間線量率の観測値との比較を図 6-23 に示す。3/15 以前については、新山、浪江及び南相馬市における観測値と比較した。比較結果を図 6-24 に示す。

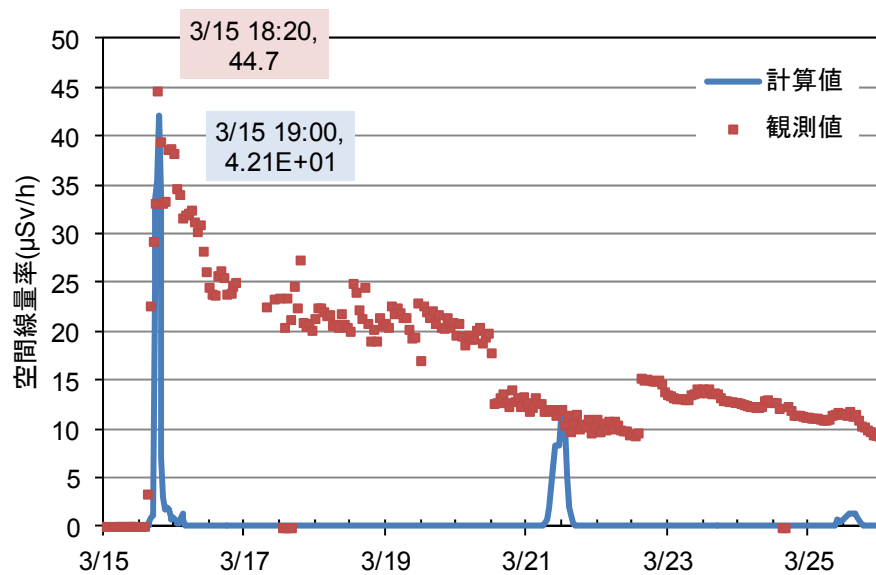
3/15 については、計算結果は各地点の空間線量率をよく再現し、計算が妥当であることが確認できた。3/12 については、新山の結果はよく一致しているが、距離が離れた北の浪江、南相馬については過小評価となった。この原因としては、①シミュレーションの結果が実際よりも西側にずれている、②各放射性物質の存在比が 15 日のものと違うことなどが考えられる。

表 6-3 サブマージョン実効線量換算係数(EPA-402-R-93-081)[9]

核種	短半減期子孫核種 ()内は分岐比	サブマージョン実効線量係数 (mSv/h per Bq/m ³)
^{129m}Te	^{129}Te (0.65)	1.20E-08
^{132}Te	^{132}I (1.0)	4.40E-07
^{131}I		6.55E-08
^{133}Xe		5.62E-09
^{134}Cs		2.73E-07
^{137}Cs	^{137m}Ba (0.946)	9.81E-08

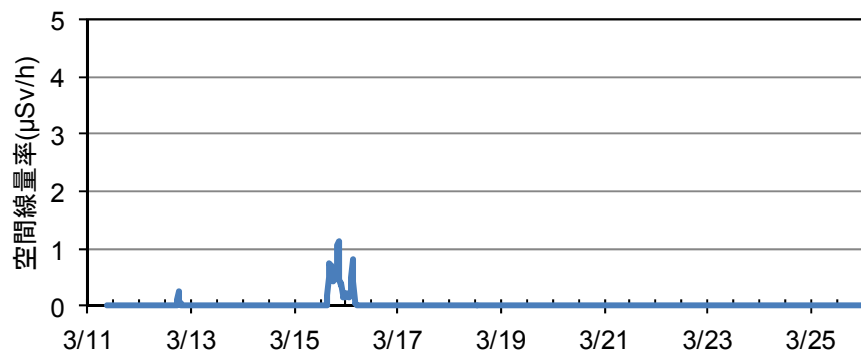


(a) 2011/3/11～3/26

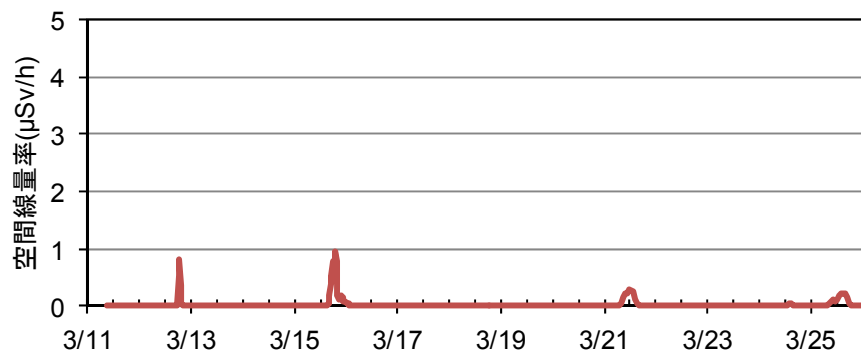


(b) 2011/3/15～3/26((a)の拡大)

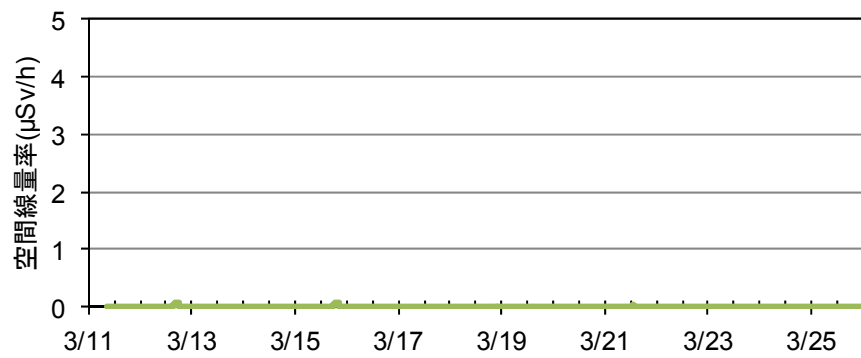
図 6-20 飯舘村役場における空間線量率の比較



(a) ^{133}Xe

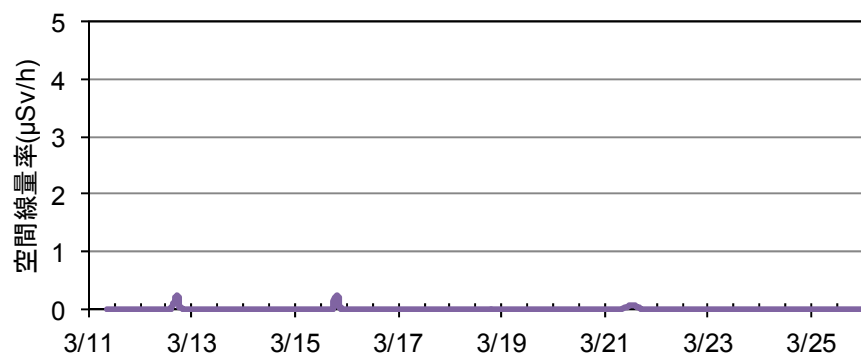


(b) ^{131}I

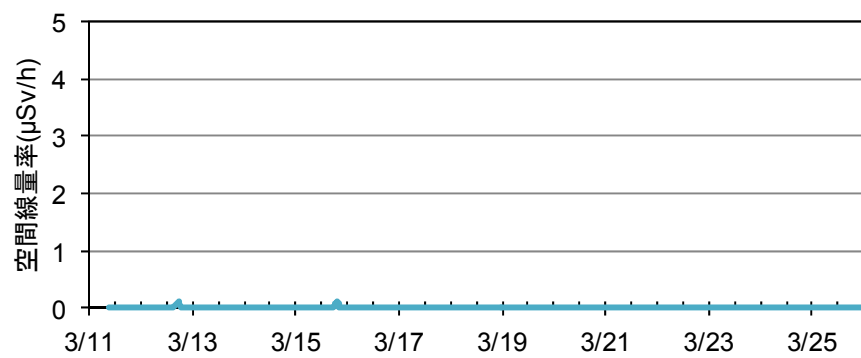


(c) ^{137}Cs

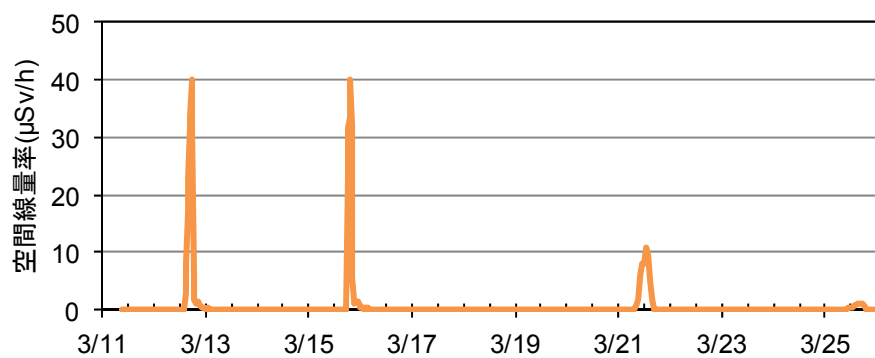
図 6-21 飯舘村役場における ^{133}Xe , ^{131}I 及び ^{137}Cs による空間線量率



(a) ^{134}Cs



(b) $^{129\text{m}}\text{Te}$



(c) ^{132}Te

図 6-22 飯舘村役場における ^{134}Cs , $^{129\text{m}}\text{Te}$ 及び ^{132}Te による空間線量率
(^{137}Cs の大気中濃度から推定)

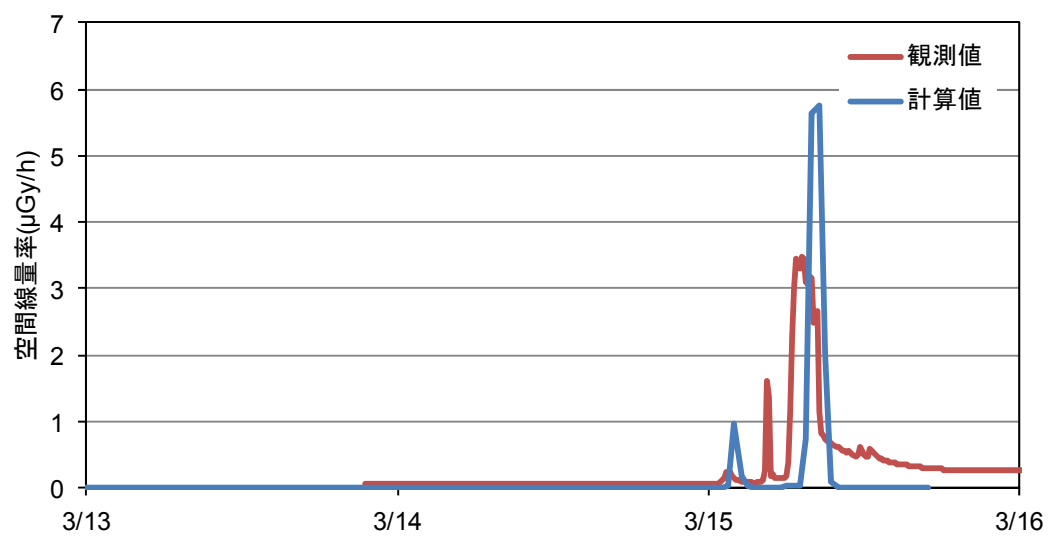
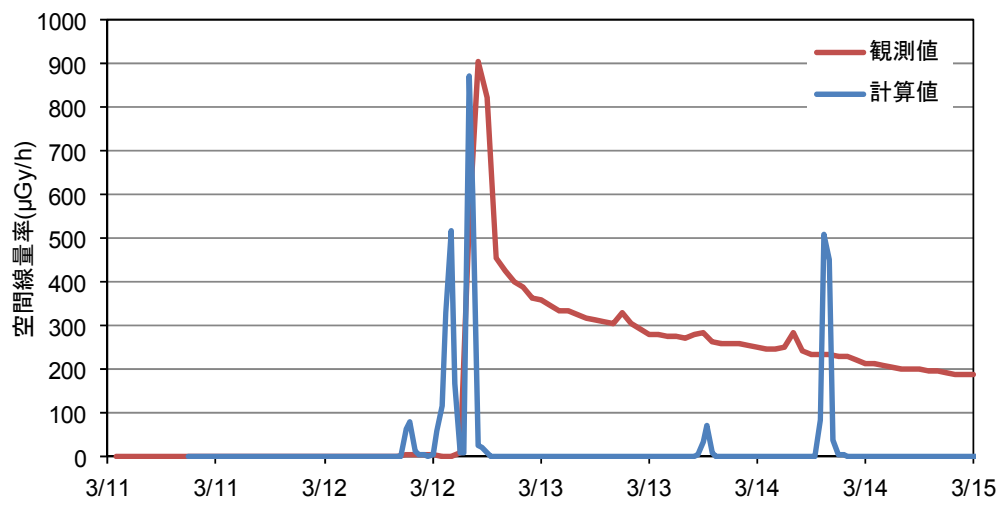
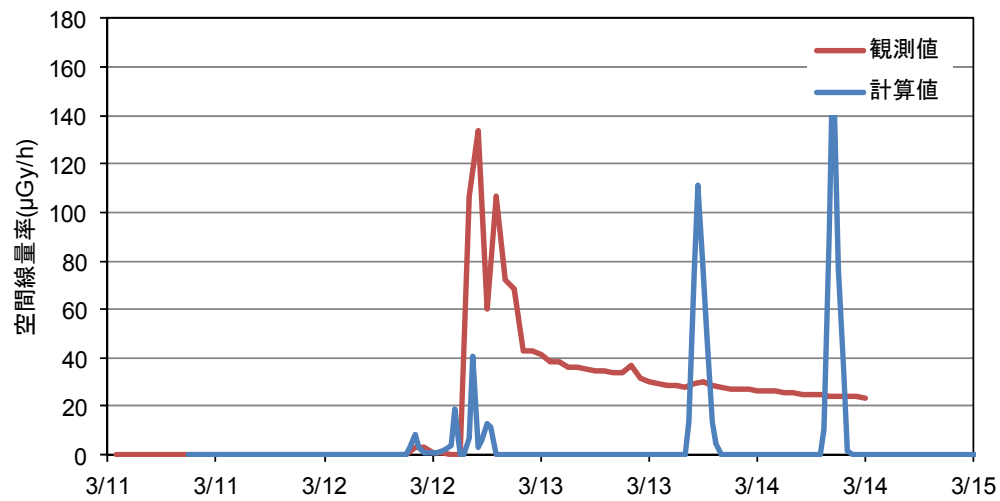


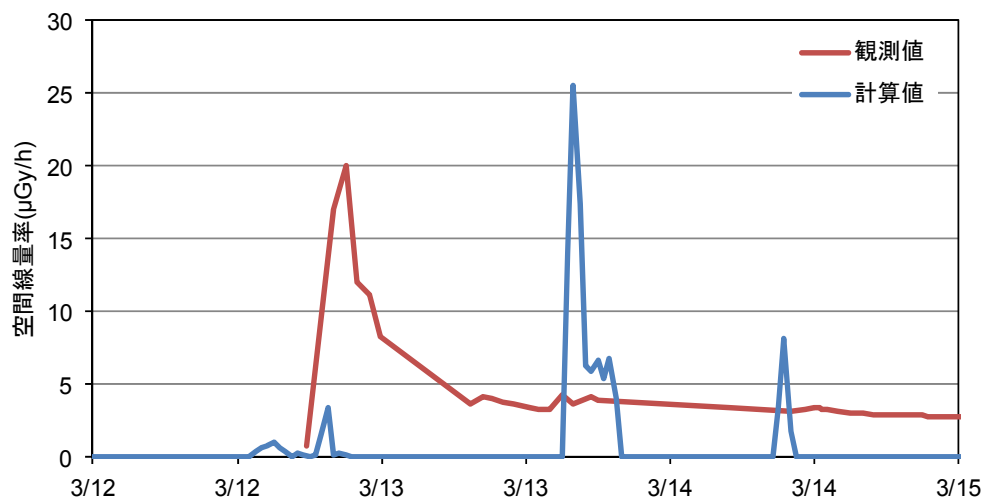
図 6-23 茨城県東海村村松における空間線量率との比較



(a) 新山



(b) 浪江



(c) 南相馬市

図 6-24 2011/3/12 の福島県における空間線量率との比較

7. まとめ

本作業の作業内容と得られた知見を以下にまとめる。

(1) 飯舘村における ^{131}I 、 ^{137}Cs 及び ^{133}Xe のシミュレーション

2011/3/11～3/26 にかけて、飯舘村における東京電力福島第一原子力発電所を放出源とした、 ^{131}I 、 ^{137}Cs 及び ^{133}Xe の大気拡散シミュレーションを行った。

^{131}I 、 ^{137}Cs の大気中濃度について

- ・ 飯舘村役場における大気中濃度のピークは、3/12 18:30 頃、3/15 19:00 から深夜にかけて及び 3/20 15:00 頃、3/22 16:00 頃の 4 か所にあり、寄与割合はそれぞれ約 17%、64%、13%、16%となった。
- ・ 飯舘村における ^{131}I 時間積算濃度は $10^4 \sim 10^5 (\text{Bq}/\text{m}^3)$ オーダーであり、最大値は $156 (\text{kBq}/\text{m}^3)$ となった。
- ・ 飯舘村における ^{131}I の吸入による小児甲状腺等価線量(屋内滞在時間 0 時間)は数～数十 (mSv) のオーダーであり、最大値は 67mSv となった。
- ・ 飯舘村における ^{137}Cs の時間積算濃度は $10^3 \sim 10^4 (\text{Bq}/\text{m}^3)$ オーダーであり、 ^{131}I より一桁小さい値となった。最大値は $28 (\text{kBq}/\text{m}^3)$ となった。

^{131}I 、 ^{137}Cs の沈着量について

- ・ 飯舘村における放射性物質の沈着は 9 割が 3/15 夜～3/16 早朝に発生する結果となった。
- ・ 飯舘村における ^{131}I 積算降下量は $10^4 \sim 10^6 (\text{Bq}/\text{m}^2)$ オーダーであり、最大値は $1772 (\text{kBq}/\text{m}^2)$ となった。 ^{137}Cs の積算降下量は $10^3 \sim 10^5 (\text{Bq}/\text{m}^2)$ オーダーであり、最大値は $619 (\text{kBq}/\text{m}^2)$ となった。
- ・ 計算結果は、実測値とオーダーで一致したが、全体として過小評価であった。また、 ^{137}Cs の方が ^{131}I よりも過小評価の度合いが大きかった。
- ・ 計算値における長泥の値が低いのは、プルーム飛来時に降水(元データは解析雨量、1km メッシュ)の範囲から外れたためと考えられる。

^{133}Xe について

- ・ 飯舘村における ^{133}Xe の時間積算濃度は $10^5 \sim 10^6 (\text{Bq}/\text{m}^3)$ であり、最大値は $822 (\text{kBq}/\text{m}^3)$ であり、 ^{133}Xe の放射性雲によるサブマージョン外部被ばく線量は、数～数十 (μSv) となった。

(2) 計算結果の検証

(1)で行ったシミュレーションの検証のため、各地のダストサンプリング及び空間線量率の測定値と計算値の比較を行った。

ダストサンプリングとの比較

- ・ ダストサンプリングとの比較では、放射性雲が当該の時間帯に観測地点付近に飛来していることは確認できた。しかし、値については、非常によく一致しているもの、10 倍(川俣

町山木屋)の差があるものがあり、地点及び期間について一致度に差が見られた。

空間線量率との比較

- ・ 3/15 の飯舘村については、計算値と測定値は非常によく一致し、計算が妥当であることが確認できた。
- ・ 3/12 については、観測値のある原子力発電所北方における観測値と比較した結果、計算値の過小評価が見られた。これについては、シミュレーションの結果が実際よりも西側にそれている、各核種の存在比が 3/15 と違うなどの可能性が考えられ、検討が必要である。

8. 参考文献

- [1] (独)日本原子力研究開発機構, 第 31 回原子力安全委員会 資料第 4-2 号 福島第 1 原子力発電所事故に伴う ^{131}I と ^{137}Cs の大気放出量に関する試算, 平成 23 年 5 月 12 日.
- [2] (独)日本原子力研究開発機構, 第 63 回原子力安全委員会 資料第 5 号 福島第一原子力発電所事故に伴う ^{131}I と ^{137}Cs の大気放出量に関する試算(II) — 3 月 12 日から 15 日までの放出率の再推定 —, 平成 23 年 8 月 22 日.
- [3] Stohl et al., “Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition”, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 2313–2343, 2012
- [4] 日本原子力学会, 原子力発電所の確率論的安全評価に関する実施基準(レベル 3PSA 編) : 2008, 2009.
- [5] ICRP, ICRP Publication 72 Age-dependent doses to member of the public from intake of radionuclides: Part 5 Complication of ingestion and inhalation dose coefficients, 26, 1, 1996.
- [6] ICRP, ICRP Publication 71 Age-dependent doses to member of the public from intake of radionuclides: Part 4 inhalation dose coefficients, 25, 1995.
- [7] 原子力安全委員会, 原子力安全委員会指針集 改訂 13 版, p.1545, 2011.
- [8] T. Imanaka et al., “Early radiation survey of IITATE village, which was heavily contaminated by the Fukushima Daiichi Accident, conducted on 28 and 29 March 2001.”, *Health Physics*, 102, 6, 2012.
- [9] K. F. Eckerman and J. C. Ryman, External exposure to radionuclides in air, water, and soil, Federal guidance report 12 (1993).
- [10] 福島県原子力安全対策課, モニタリングポストの NaI スペクトルデータについて (大熊町 夫沢・双葉町 郡山・富岡町 富岡・楡葉町 繁岡, 平成 24 年 3 月 14 日.
- [11] 原子力安全・保安院, 福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所周辺の緊急時モニタリング調査結果について (3 月 11 日～15 日実施分) , 平成 23 年 6 月 3 日.
- [12] 古田 定昭ほか, 福島第一原子力発電所事故に係る特別環境放射線モニタリング結果 — 中間報告 (空間線量率、空气中放射性物質濃度、降下じん中放射性物質濃度) —, JAEA-Review 2011-035 (2011).