

「福島第 1 原発事故にともなういわき市
の放射能汚染マップ作成と初期被曝量評
価に関する研究」
実績報告書

2017 年 3 月 1 日

福谷 哲
今中哲二

京都大学原子炉実験所

I. はじめに

2011 年 3 月 11 日の地震・津波をきっかけとして発生した福島第 1 原発事故は、原子力安全委員会や原子力安全・保安院が原子力防災の対象として想定していた規模を大きく越える事故となり、福島県はもちろん、東京を含む関東地方から東北地方の太平洋岸一体に大規模な放射能汚染をもたらすに至った。

当時の原子力防災計画は、原発から半径 10km 以内を対象としており、その範囲を超える市町村では、原子力防災の備えはなかった。広範囲に広がった放射能汚染に対して、政府原子力災害対策本部や福島県原子力災害対策本部が、緊急放射線モニタリングに取り組んだが、地震にともなう交通網や通信網の被害、さらには政府内での緊急時対応の混乱などが重なり、事故初期の放射能汚染に対して十分なデータが得られなかった。

福島県民の初期被曝については、福島県が実施している県民健康調査の一環として、調査アンケート回答者を対象に、事故がはじまってから 4 カ月間、つまり 2011 年 7 月 11 日までの外部被曝の見積りが行われている。しかしながら、県民健康調査が用いている評価方法の詳細は公開されておらず、また内部被ばくについての見積りはなされていないなど、事故から 6 年経過しても、福島県民の被曝量について十分な評価がなされているとは言い難い状況にある。

私どものグループは、福島第 1 原発事故が発生した直後から、行政とは離れた立場から、飯舘村を中心として放射能汚染調査を行ってきた[1-3]。さらに、広島・長崎の原爆放射線評価研究やチェルノブイリ原発事故調査などの経験を生かして、飯舘村における初期被曝量評価に関する研究を行い、一定程度の成果を上げてきた[4]。

一方、2011 年 10 月に設立された「認定 NPO 法人いわき放射能市民測定室 たらちね」は、いわき市を中心に、放射能測定や甲状腺検診など原発事故の影響に関連してさまざまな活動を行っている[5]。本研究の担当者である今中は、たらちね主催の講演会に講師として招かれたり、放射能測定に関する相談を受けたりしてきた。そうした関係の中で、今中は、所属している京都大学原子炉実験所原子力基礎工学研究部門廃棄物管理工学研究分野の分野長・福谷と一緒に、いわき市での初期被曝評価を目的として受託研究を受けるに至った。

- 研究題目：福島第 1 原発事故にともなういわき市の放射能汚染マップ作成と初期被曝量評価に関する研究
- 研究期間：2016 年 1 月 1 日から 2016 年 12 月 31 日
- 研究経費：65 万円（うち、直接経費 50 万円、間接経費 15 万円）

本報告は、上記受託研究の報告書である。

II. 本研究で行う被曝評価の内容

● 初期被曝の定義

「初期被曝」について学術的な定義がとくにあるわけではないが、本研究では、福島県民健康調査[5]の対象期間に合わせた「最初の4カ月（2011年7月11日まで）」と、また UNSCEAR（国連放射線影響科学委員会）[6]や WHO（世界保健機構）[7]の福島原発事故報告書と合わせて「最初の1年（2012年3月11日まで）」の2つの期間を初期被曝評価の対象期間とする。なお、半減期の短い放射性ヨウ素による被曝については、最初の4カ月のみで考慮する。

● 内部被曝と外部被曝

放射線被曝は、外部被曝と内部被曝の2つに大別される。外部被曝とは、放射線源が身体の外に存在し、外部からの放射線によって身体臓器が放射線を浴びる被曝である。

原発事故にともなう一般人の外部被曝としては、原発から大気中に放出された放射性物質を含む空気塊（以下、放射性プルーム）が上空を通過するときに、放射性プルームからの放射線による外部被曝（クラウド・シャインと呼ばれる）と、放射性プルームが通過する際に、放射性物質が地表に沈着し、その地表の放射性物質からの放射線に被曝する外部被曝（グラウンド・シャイン）がある。

内部被曝とは、放射性物質を体内に取り込んでしまって、その放射性物質から放出される放射線による身体組織の被曝である。取り込み方としては、呼吸にともなって大気中の放射性物質を取り込む吸入摂取と、汚染された飲食物を取り込んでしまう経口摂取とに分かれる。

なお、被曝計算は、外部被曝、内部被ばくともに UNSCEAR 報告[6]にならって、大人、子ども（10歳）、幼児（1歳）の年齢区分に対して行う。

● 評価項目

ー外部被曝量

- ・空間放射線量モニタリングデータに基づく被曝評価：空間放射線量率について毎時または毎日のモニタリングデータがある場所については、そのデータを積算する。
- ・土壌測定、航空機サーベイデータを用いた間接的評価：航空機サーベイデータからセシウム 137 の沈着マップを作成し、まず当該地点のセシウム 137 沈着量を求める。次に、セシウム 134、ヨウ素 131、テルル 132/ヨウ素 131 の沈着量を、セシウム 137 との沈着比のデータから求め、沈着核種からのガンマ線によるグラウンドシャインを計算する。

ー内部被曝

- ・吸入摂取：UNSCEAR 報告の大気拡散シミュレーション結果を用いて、計算対象地点におけるヨウ素 131 とセシウム 137、セシウム 134 の積算空気中濃度を割り出し、吸入被曝評価を行う
- ・経口摂取
 - ー水道水から：いわき市の上水道水中のヨウ素 131 データを用いて、いわき市全体に対する平均的な濃度を求めて内部被曝量を求める
 - ー食品から：いわき市の食品データだけでは不十分なので、福島県全体の食品汚染データから平均的な汚染レベルを求め、その値をいわき市に適用する。

Ⅲ. 初期被曝評価の対象地点

いわき市は、1966年に14市町村が合併して出来た市で、現在は13地区に分かれている。本研究での被曝評価対象地点は、それぞれの地区の支所が位置している13カ所に、汚染レベルが大きな川前地区志田名の公民館位置を加えた14カ所を被曝評価の対象地点とした。図1に初期被曝対象地点の位置、表1に、GoogleEarthを用いて所在地から割り出した緯度経度を示す。いわき市の福島第1原発からの距離は、南へ25kmから60kmである。

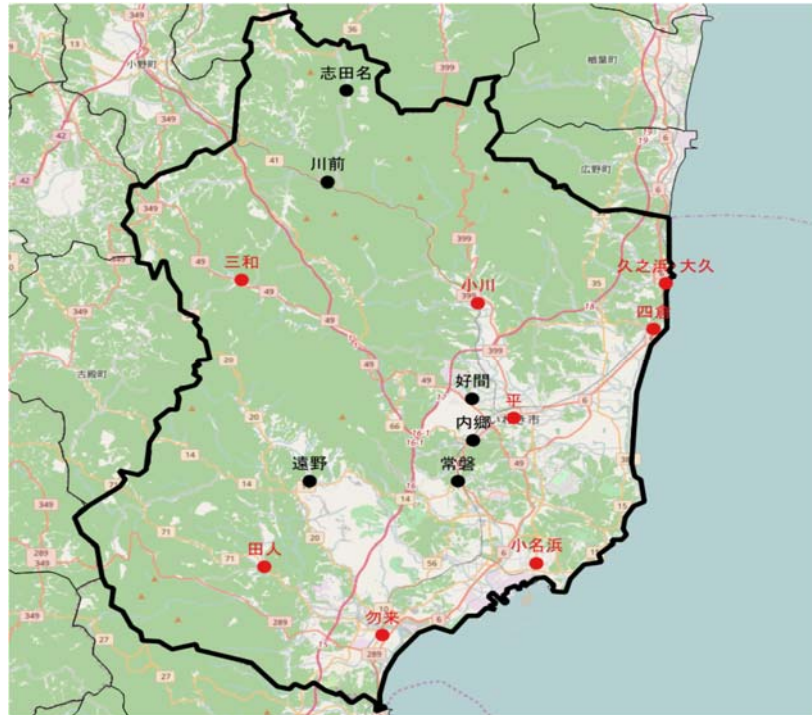


図1. 被曝量評価地点（赤字は、空間モニタリングデータがあるところ）

表1. 被曝量評価地点の名前と座標

No	地区	場所	経度	緯度	人口、人
1	平	いわき合同庁舎	140.88695	37.05036	98,206
2	小名浜	小名浜支所	140.90375	36.95469	77,655
3	勿来	勿来支所	140.79088	36.90683	50,408
4	常磐	常磐支所	140.84607	37.00846	34,825
5	内郷	内郷支所	140.85716	37.03579	26,700
6	四倉	四倉支所	140.98943	37.10980	15,113
7	遠野	遠野支所	140.73772	37.00881	6,048
8	小川	小川支所	140.86104	37.12732	7,175
9	好間	好間支所	140.85691	37.06335	13,286
10	三和	三和支所	140.68787	37.14270	3,411
11	田人	田人支所	140.70483	36.95221	1,976
12	川前	川前支所	140.75095	37.20718	1,104
13	久之浜・大久	久之浜・大久支所	140.99791	37.14004	5,741
14	志田名	志田名集会所	140.76459	37.26717	250

人口は、2011年3月1日のいわき市役所データ。総人口 34 万 1898 人。

IV. いわき市に放射能汚染をもたらしたイベント

● 福島第1原発から大気中への放射能放出パターン

福島原発事故にともなって大気中に放出された放射エネルギーについては、いくつかの報告があるが、ここでは、最近の報告で最も詳しいと思われる Katata らの論文[8]のデータから、ヨウ素 131 とセシウム 137 の放出放射エネルギーの推移を図 2 に示す。

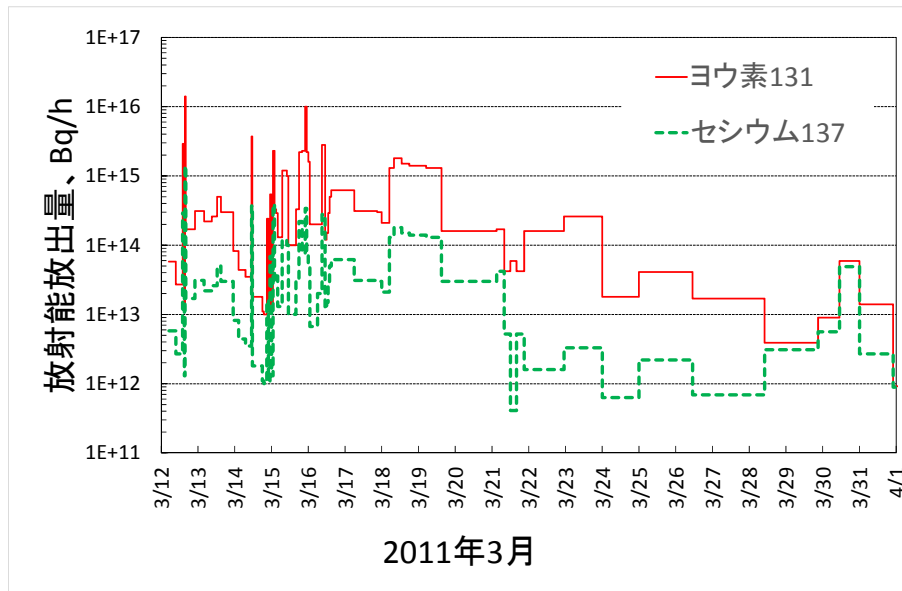


図 2. 福島原発事故による大気中放射能放出の推移の推定 (2011 年 3 月中)

図 2 は、縦軸が対数表示であることもあって、イメージがつかみにくいので、縦軸を普通の直線表示にして、棒グラフで毎日放出量を図にしたものを図 3 に示す。

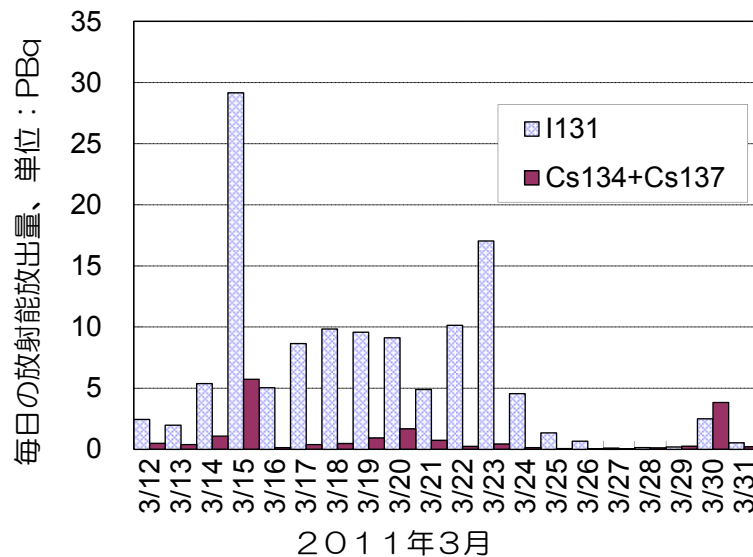


図 3. ヨウ素 131 と放射性セシウム (セシウム 137 + セシウム 134) の毎日放出量の推定値.

図 2 と図 3 を眺めると、放射能放出が最も大きかったのは 3 月 15 日で、この日の午前中に 2 号機の格納容器が破壊されたと考えられている。

● いわき市に汚染をもたらした放射性プルームの通過

原発事故が発生し、3月14日に急遽、いわき市役所隣の福島県合同庁舎とその近くの中央台北小学校に、可搬型の放射線モニタリングポストが設置された[9,10]。3月20日頃からは、三和支所、小川支所など8カ所で、サーベメータを用いた定期的モニタリングが開始されている[11]。それらの測定データから、放射性プルームがいわき市をいつ通過したかの情報が得られる。図4A、4Bは、2011年3月中のモニタリングデータである（4Aと4Bは同じデータであるが、4Aは縦軸がリニア表示（普通目盛り）で、4Bはログ表示（対数目盛り）という違い）。いわき市に主な放射性プルームが通ったのは、3月15日、16日、21日、22日であったと判断できる。

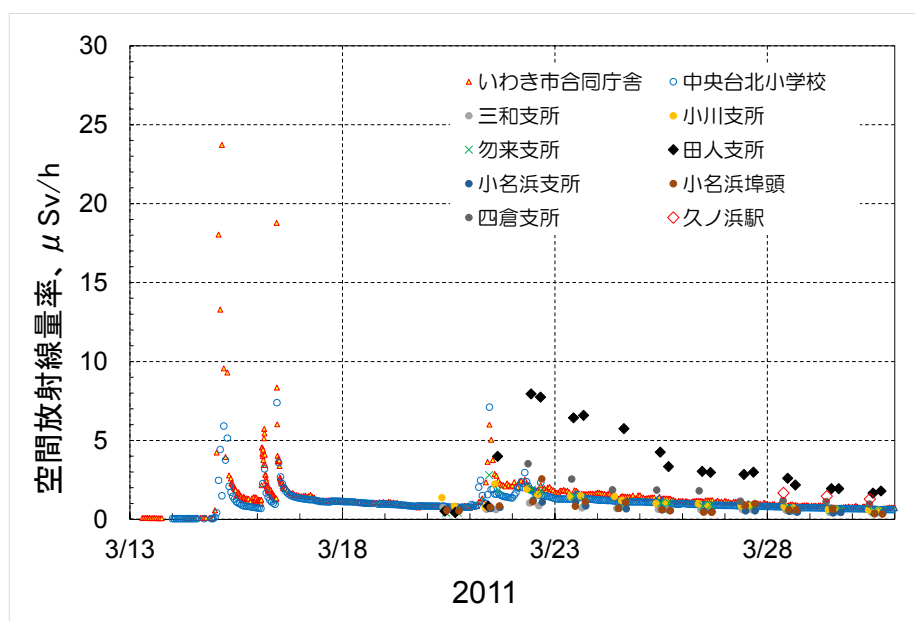


図4A. いわき市の2011年3月のモニタリングデータ．縦軸はリニア（線形）

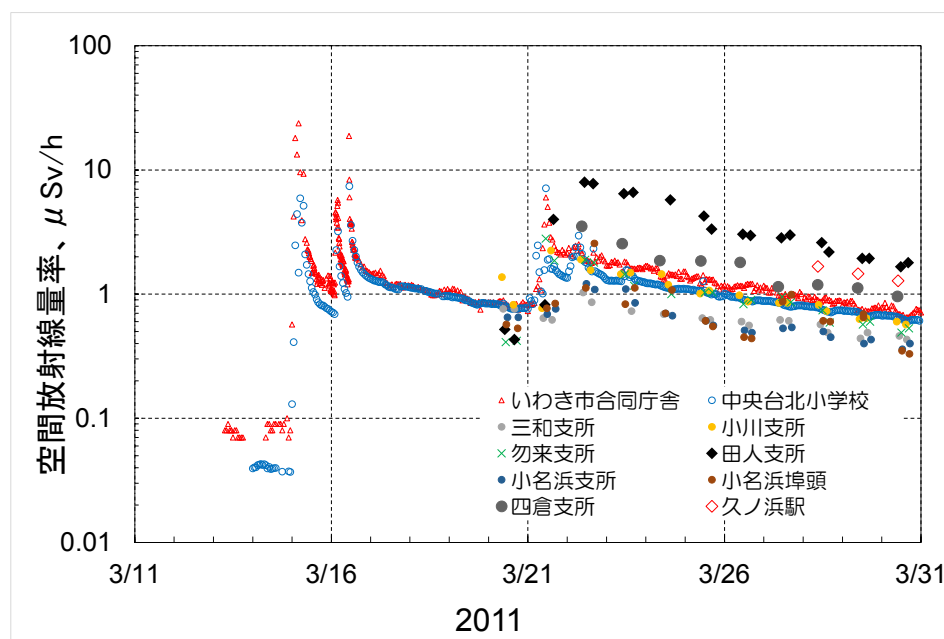


図4B. いわき市の2011年3月のモニタリングデータ．縦軸はログ（対数）

今中らは 2013 年～2014 年に、飯舘村の初期被曝評価に関連して環境省からの受託研究を実施したが、その際に（株）VIC に放射性プルームの大気拡散シミュレーションを依頼した[12]。シミュレーションの一環として作成した動画[13]と気象庁のレーダーアメダス[14]と降水量データ[15]を合わせて、放射性プルーム通過時のいわき市の状況を検証してみた（図 5A～F）。図 5 F（3 月 16 日午前 0 時）は、志田名に大きな汚染をもたらしたと思われる状況である。

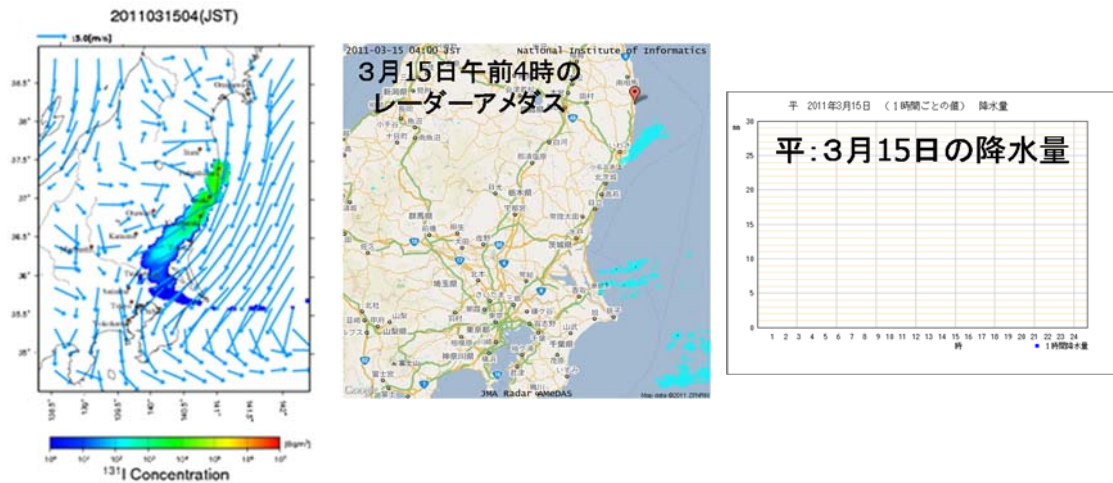


図5A. 2011 年 3 月 15 日午前4時 合同庁舎 23.7 $\mu\text{Sv/h}$

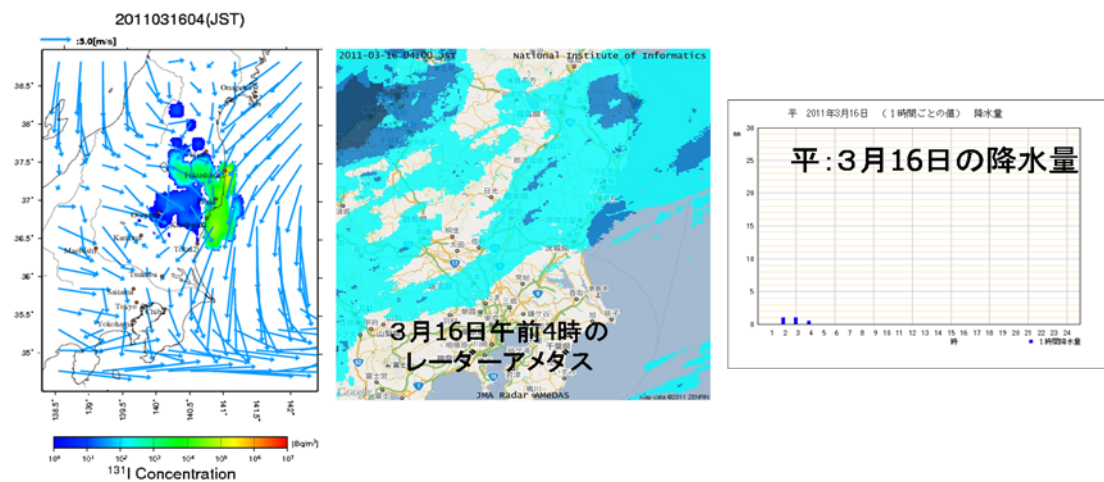


図5B. 2011 年 3 月 16 日午前 3 時 50 分 合同庁舎 5.72 $\mu\text{Sv/h}$

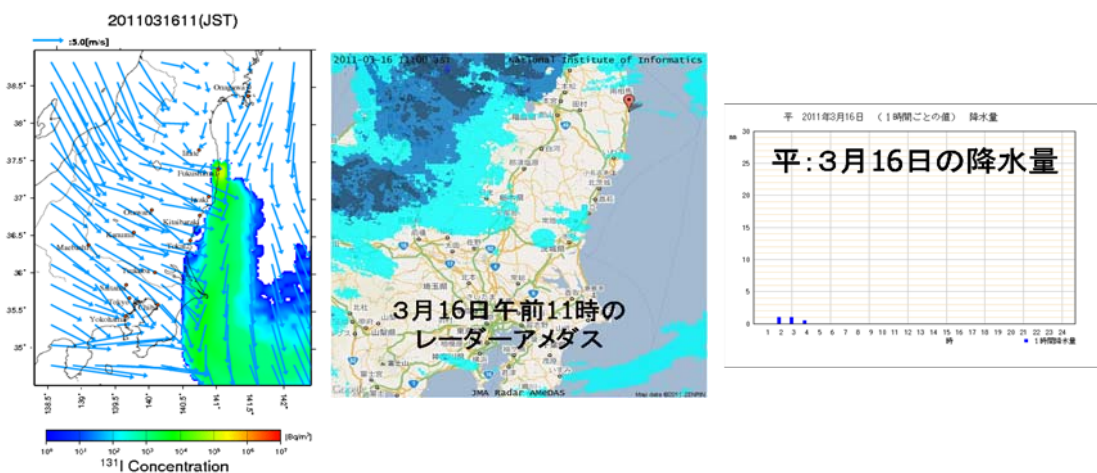


図5C. 2011 年 3 月 16 日午前 10 時 50 分 合同庁舎 18.78 $\mu\text{Sv/h}$

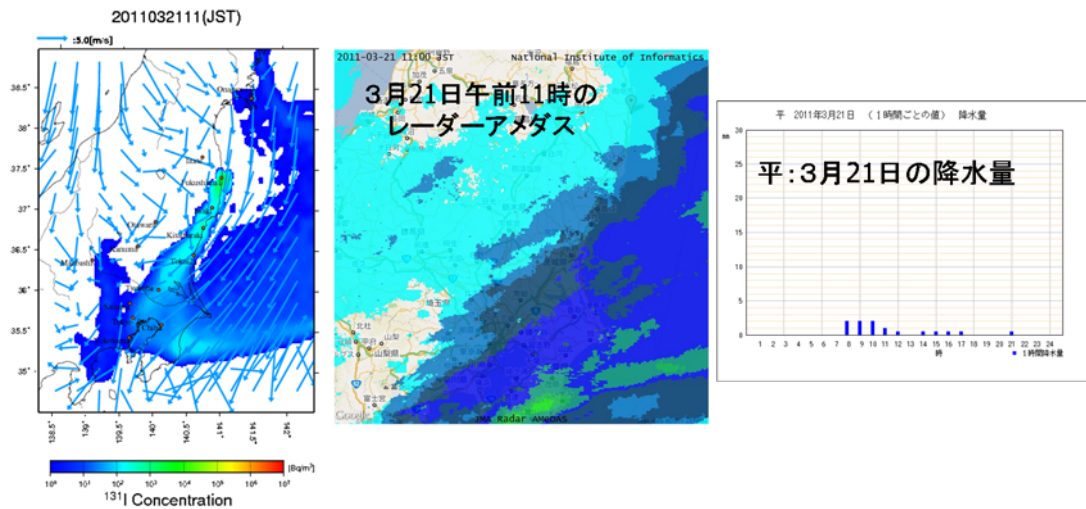


図5D. 2011年3月21日午前11時 合同庁舎 6.0 $\mu\text{Sv/h}$

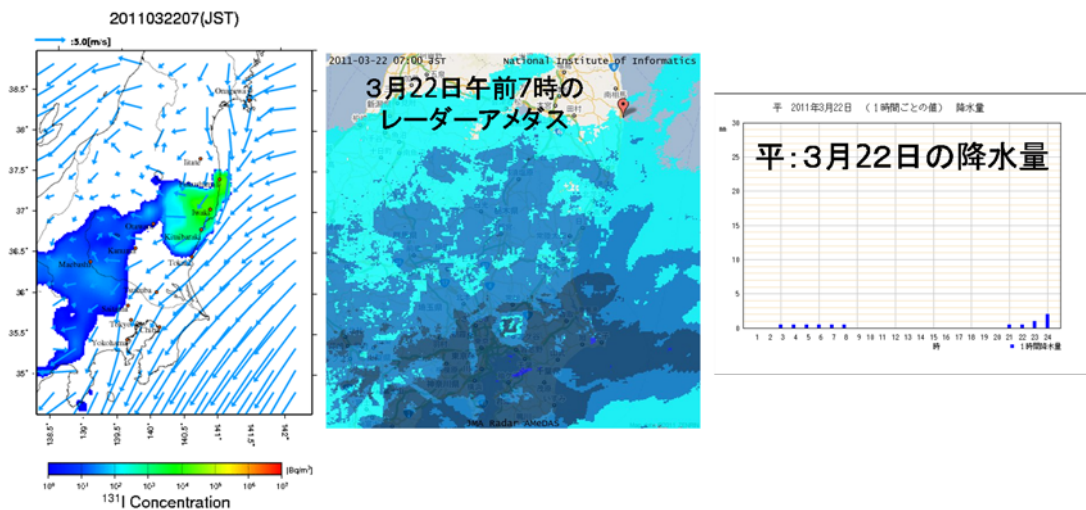


図5E. 3月22日午前7時 合同庁舎 2.96 $\mu\text{Sv/h}$ 10時35分 田人支所 7.95 $\mu\text{Sv/h}$

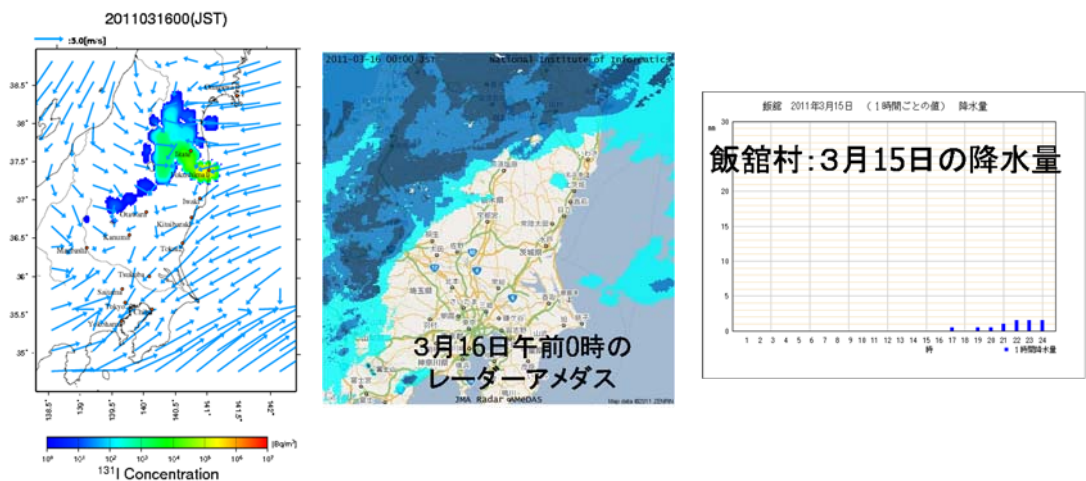


図5F. 3月16日午前0時 飯舘村役場 38.3 $\mu\text{Sv/h}$ 、平の中央台北小 1.06 $\mu\text{Sv/h}$

図4と図5A-Fより、いわき市に大きな地表汚染をもたらしたのは、大きな空間放射線量を記録した3月15日、16日より、放射性プルームと雨が重なった、3月21日から22日にかけてであったと判断される。

V. 外部被曝量の見積もり

● 空間放射線量モニタリングデータ

図4に2011年3月のいわき市のモニタリングデータを示したが、図6A、Bは2012年3月末までの1年間のモニタリングデータである。平については1年間ほぼ毎時のモニタリングポストデータで、他の場所については、だいたい午前と午後の2回のサーベイ測定データである。

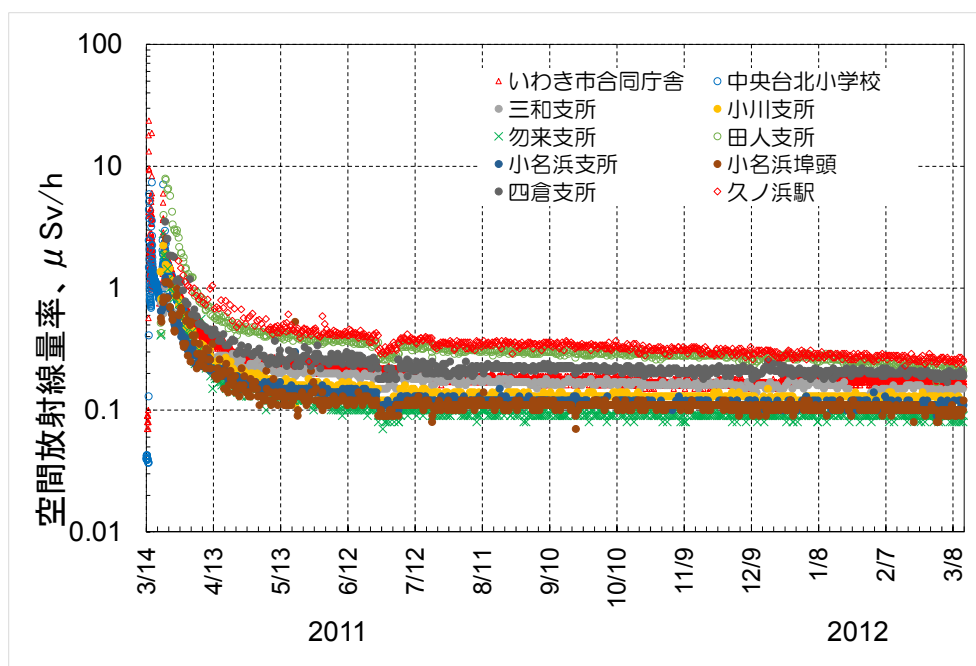
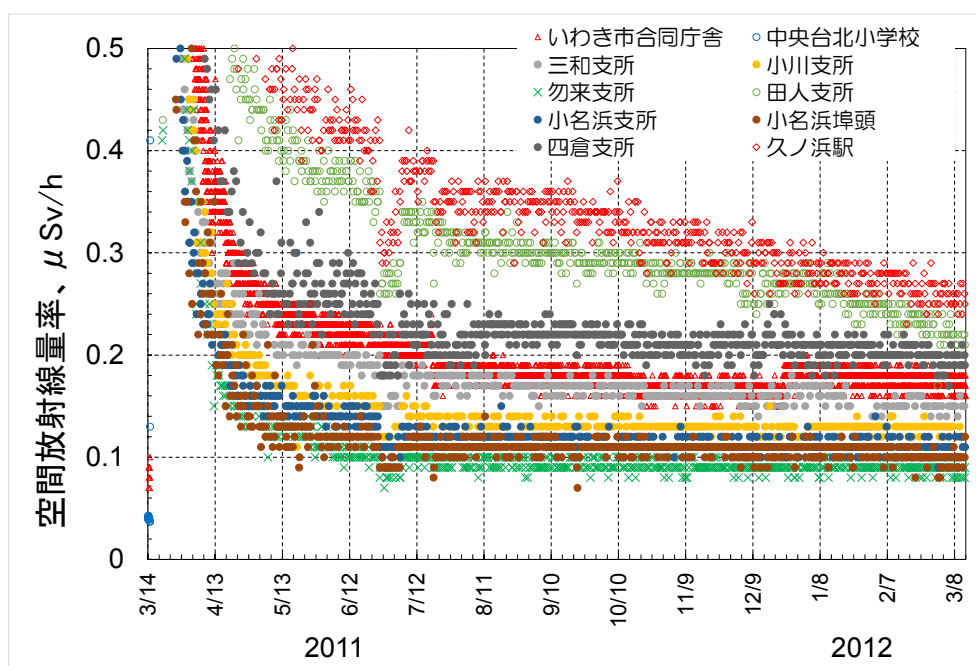


図 6 A. 2011 年 3 月から 1 年間の空間線量モニタリングデータ. 縦軸は対数.

図 6 B. 2011 年 3 月から 1 年間の空間線量モニタリングデータ. 縦軸をリニアにして拡大.



● 積算空間線量：モニタリングデータがあるところ（図1の赤字）

図6の空間線量率データを毎日足し合わせて行けば、当然のことながら、積算空間線量の値が得られる。図7は最初の1年間の積算線量をプロットしたものである。ただし、自然バックグラウンドとして $0.05\mu\text{Sv/h}$ をさっ引いてある。

いわき市合同庁舎（平地区）以外でモニタリングがはじまったのは3月20日以降なので、モニタリング開始までの積算線量については、合同庁舎と平北小学校でのそれまでの積算線量の値を参考にして、3月20日までデータがない期間の値を推定した。たとえば、三和支所の最初のモニタリングは3月20日08:54の $0.76\mu\text{Sv/h}$ であるが、同日10時の合同庁舎と平北小学校の平均値線量は $0.815\mu\text{Sv/h}$ でそれまでの平均積算線量は $211.8\mu\text{Sv}$ であった。そこで、3月20日までの三和支所での積算空間線量は、 $211.8 \times (0.76/0.815) = 197.5\mu\text{Sv}$ とした。

表2は、モニタリングデータがある支所についての、初めの4カ月と1年間の積算空間線量である。

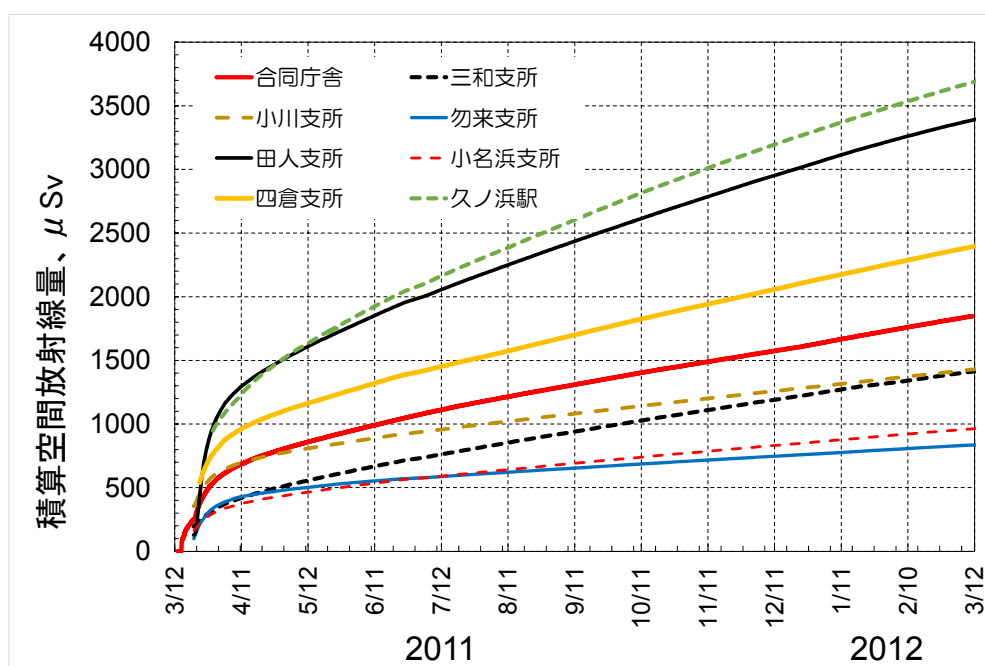


図7. モニタリングデータに基づくはじめの4カ月間の積算空間線量.

表2. モニタリングデータがある支所での積算空間線量. 単位: μSv

場所	4カ月間 (～11/7/11)	1年間 (～12/3/11)
平合同庁舎	1100	1800
三和支所	760	1400
小川支所	960	1400
勿来支所	590	840
田人支所	2100	3390
小名浜支所	590	960
四倉支所	1500	2400
久ノ浜駅	2200	3700

- 積算空間線量：モニタリングデータがないところ（図1の黒字）

モニタリングデータがない6カ所（常磐支所、内郷支所、遠野支所、好間支所、川前支所、志田名集会所）については、今中らがこれまで飯舘村の初期外部被曝評価などで用いてきた間接的手法を用いて空間放射線量を推定する[4]。つまり、まず航空機サーベイデータを用いて地表に沈着したセシウム 137 量を推定する。次に、土壌測定データなどから、セシウム 137 沈着量に対する他の核種の比を仮定して地表沈着組成を決定し、それらからのグラウンドシャインを計算する方法によって空間放射線量を推定する。

- ・航空機サーベイに基づくセシウム 137 沈着量の推定

本報告では、文科省が公開している第3次航空機サーベイデータ（2011年7月）[16]を用いてセシウム 137 の汚染マップを作成した（図8）。マップの作成には地理情報ソフト ArcGIS[17]を用いた。文科省航空機サーベイデータでは、約 500m メッシュでのセシウム 137 沈着量（2017年7月2日換算値）が提供されている。図8左は、福島県広域の汚染マップで、図8右は、いわき市の汚染マップである。ArcGIS を用いると、汚染マップ中の任意の地点について座標（緯度、経度）を指定すれば、セシウム 137 沈着量を抽出できる。

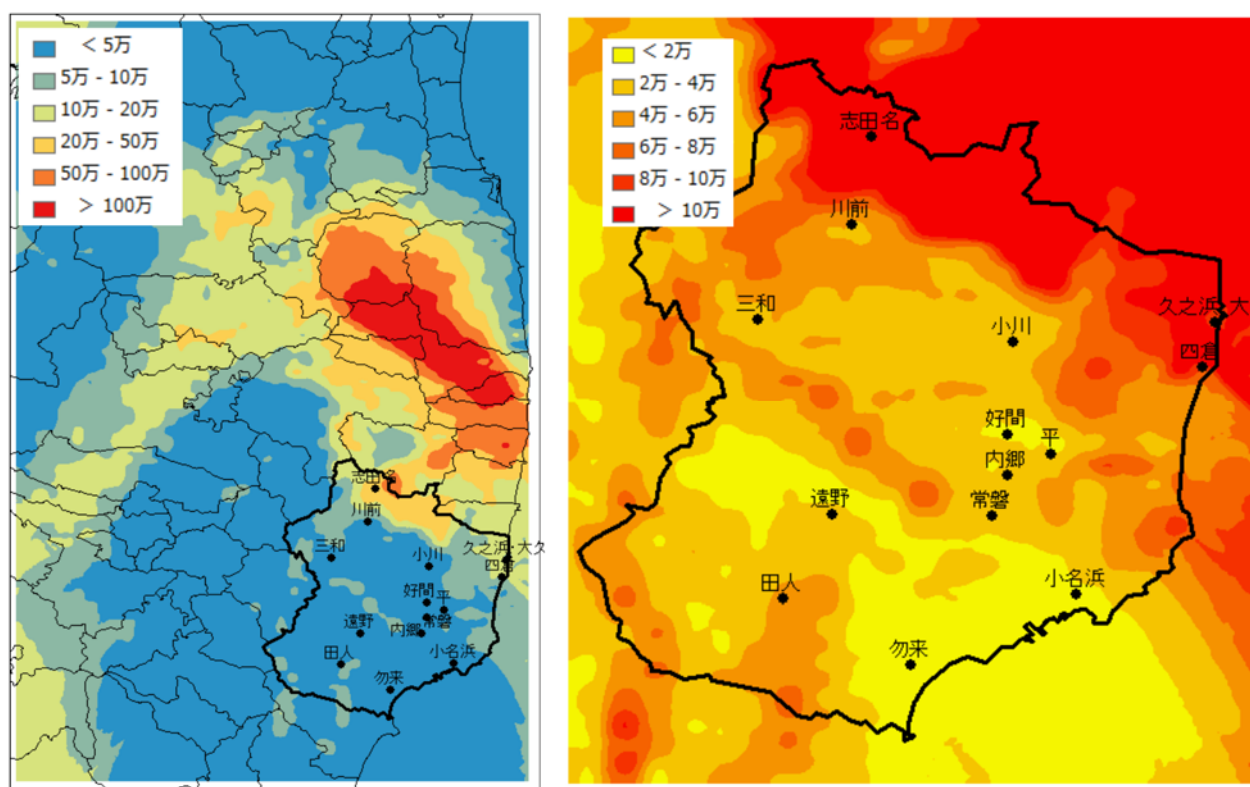


図8．文科省第3次航空機サーベイデータに基づくセシウム 137 地表沈着量マップ。左：福島県広域、右：いわき市。

・文科省土壤測定データに基づくヨウ素 131/セシウム 137 沈着比

福島原発事故が発生した直後、大学関係者が中心となって福島原発周辺の土壤汚染測定チームが組織され、2011 年 6 月から 7 月にかけて、福島第 1 原発から 80km 圏で 2180 カ所の土壤サンプリングを実施し測定結果が UNSCEAR 報告の Attachment としてまとめられている[18]。セシウム 137 とセシウム 134 については全てのサンプル場所で検出されているが、そのうち 413 カ所ではヨウ素 131 も検出されている。その 413 カ所のデータからヨウ素 131/セシウム 137 沈着比を求め、その比をマッピングしたものが図 9 である。いわき市の評価対象 14 地点について、図 9 からヨウ素 131/セシウム 137 沈着比を抽出し、先に求めたセシウム 137 沈着量と合わせて表 3 に示した。テルル 132/セシウム 137 沈着比については、Endo 論文[19]を参考に 7.5 とした。

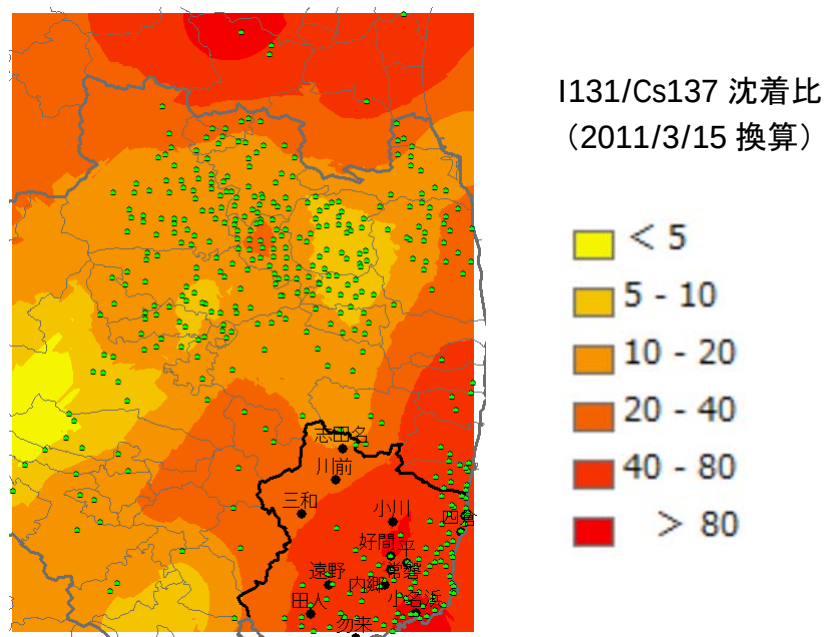


図 9．文科省土壤データに基づくヨウ素 131/セシウム 137 沈着比マップ。緑点がデータ場所。

表 3．被曝量評価地点のセシウム 137 沈着量（2011 年 3 月 15 日 18 時換算）と沈着量比と座標

No	場所	セシウム 137 沈着量 Bq/m ²	ヨウ素 131/セシウム 137 沈着量比	テルル 132/セシウム 137 沈着量比
1	いわき合同庁舎	2.2 万	73	7.5
2	小名浜支所	1.5 万	90	7.5
3	勿来支所	1.2 万	80	7.5
4	常磐支所	2.2 万	75	7.5
5	内郷支所	2.8 万	79	7.5
6	四倉支所	9.7 万	50	7.5
7	遠野支所	2.6 万	55	7.5
8	小川支所	2.3 万	79	7.5
9	好間支所	1.8 万	82	7.5
10	三和支所	3.3 万	37	7.5
11	田人支所	4.9 万	48	7.5
12	川前支所	4.2 万	35	7.5
13	久之浜支所	8.5 万	44	7.5
14	志田名集会所	36.6 万	21	7.5

・グラウンドシャイン計算値とモニタリングデータの比較

表3に示した沈着組成を基に、地表1mの空間線量率を計算できる。福島の地表汚染によるガンマ線で考慮すべき核種は、セシウム137、セシウム134、ヨウ素131、ヨウ素132、テルル132の5つである[1,4]。セシウム134の沈着量は、セシウム137と1対1であったことは多くのデータが示している。また、ヨウ素132（半減期2.3時間）は、テルル132（半減期3.2日）の娘核種であり放射平衡を仮定できる。表4は、本報告で用いた空間線量率換算係数である。地表1mでの空気吸収線量率（ $\mu\text{Gy/h}$ ）を求めるBeckの値[20]に、周辺線量当量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）に変換するため1.2をかけてある。

表4. 地表汚染密度から空間線量率への換算係数

核種	半減期	空間線量率換算係数 ($\mu\text{Sv/h}$) / (kBq/m^2)
セシウム137	30.08 年	0.00262
セシウム134	2.065 年	0.00717
ヨウ素131	8.025 日	0.00178
ヨウ素132	2.295 時	0.01033
テルル132	3.204 日	0.00095

表3の沈着組成と表4の換算係数を用いて計算したグラウンドシャインとモニタリングデータの比較を図10に示す。グラウンドシャインのプロットには自然BG値 $0.05\mu\text{Sv/h}$ を足してある。

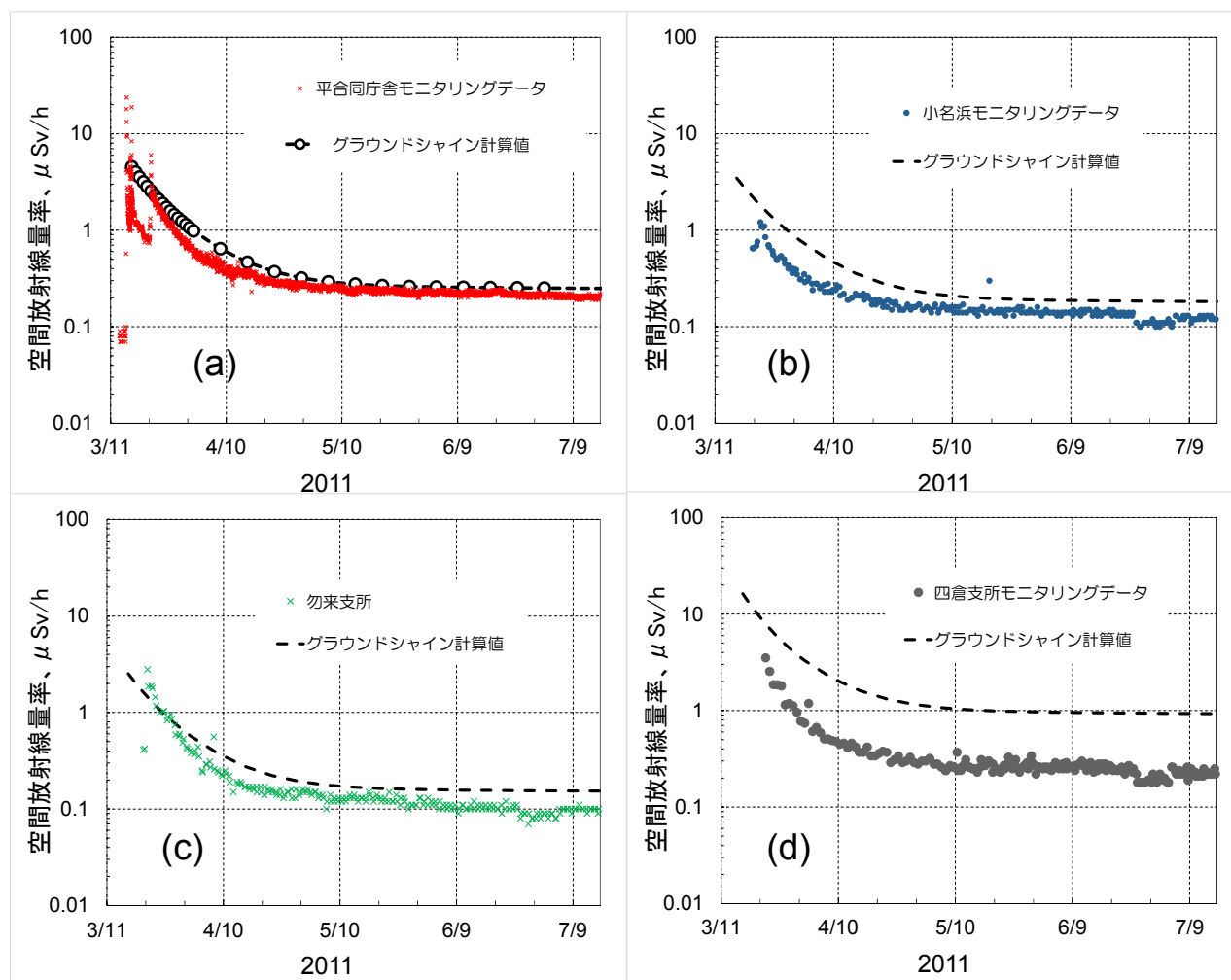


図10. グラウンドシャイン計算値とモニタリング測定値との比較：はじめの4カ月.

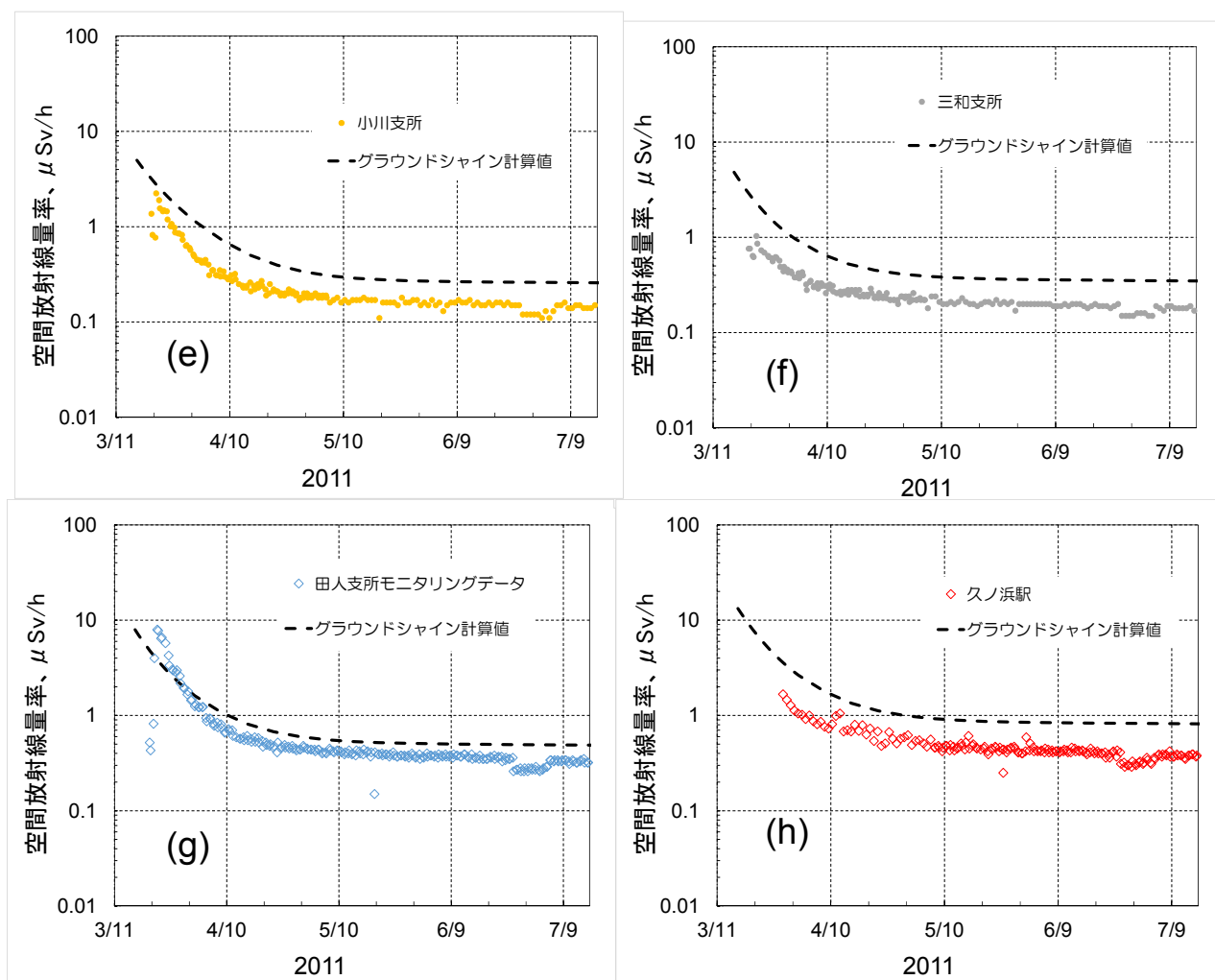


図 10 つづき. グラウンドシャイン計算値とモニタリング測定値との比較：はじめの4カ月.

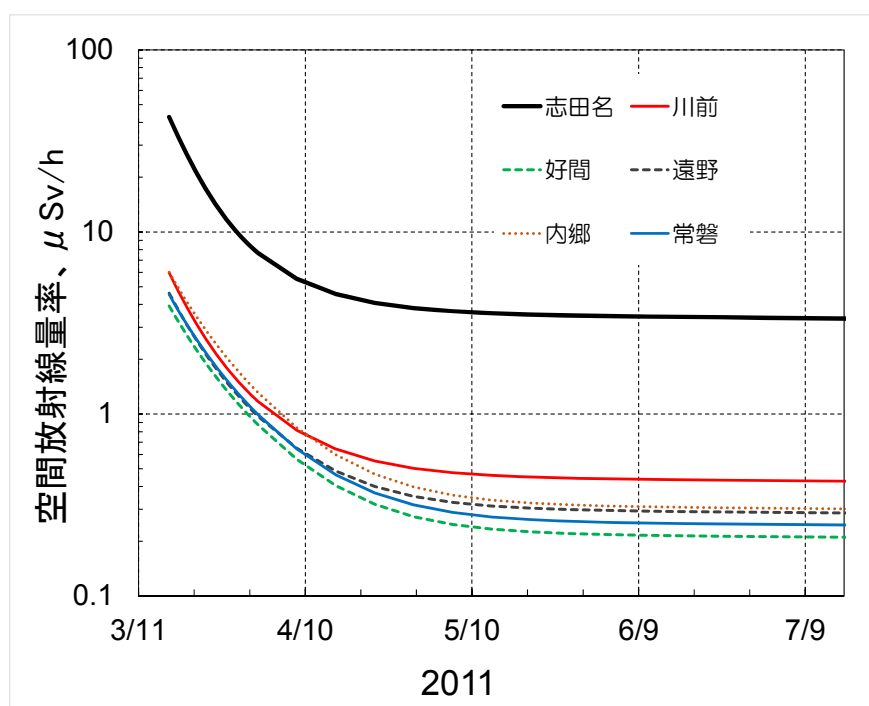


図 11. モニタリングデータがない6地点でのグラウンドシャイン計算値.

・グラウンドシャインモデルに基づく積算空間線量

図 10 の 8 カ所のプロットをながめると、グラウンドシャイン計算値では、平ではモニタリング測定値とよく一致、小名浜、勿来、田人は計算値が若干大きめだがまずまず、小川、三和、久ノ浜では 1.5 から 2 倍程である。四倉で計算値が 3、4 倍大きいのは、むしろモニタリングの代表性に問題があるのかも知れない（モニタリングの方が小さすぎる気がする）。

図 11 は、モニタリングデータが得られていない 6 地点についてのグラウンドシャイン放射線量率の計算値（+自然 BG $0.05\mu\text{Sv/h}$ ）で、図 12 は、グラウンドシャインによる 1 年間の積算空間線量（自然 BG なし）の推移を計算したものである。ただし、3 月 22 日午前 0 時までの積算については、沈着時期が不明だったり、プルームからのクラウドシャインの問題もあるので、平合同庁舎のモニタリングデータを参考に、3/22 0:00～7/12 0:00 の期間の積算の 38.3%としてある。

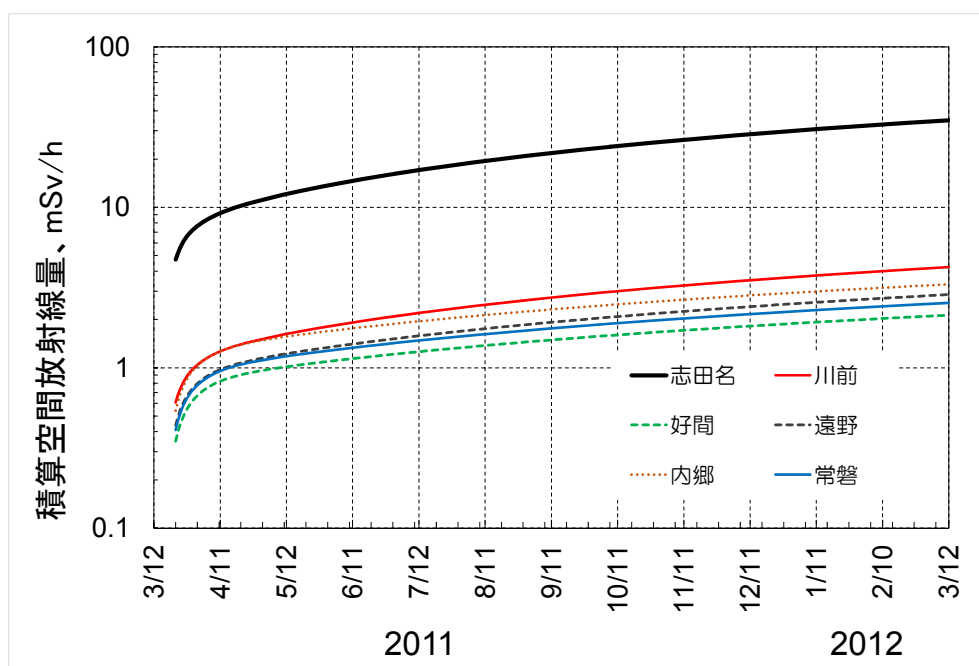


図 12. モニタリングデータがない 6 地点での積算空間線量推定値。

表 5. 評価対象地点における屋外積算空間線量：4 カ月と 1 年間

No	場所	4 カ月間、mSv (～2011/7/12 0:00)	1 年間、mSv (～2012/3/12 0:00)	備考
1	平合同庁舎	1.11	1.85	モニタリングデータ
2	小名浜支所	0.59	0.96	モニタリングデータ
3	勿来支所	0.59	0.84	モニタリングデータ
4	常磐支所	1.48	2.36	沈着モデル
5	内郷支所	1.95	3.11	沈着モデル
6	四倉支所	1.45	2.40	モニタリングデータ
7	遠野支所	1.58	2.53	沈着モデル
8	小川支所	0.96	1.43	モニタリングデータ
9	好間支所	1.26	2.01	沈着モデル
10	三和支所	0.76	1.41	モニタリングデータ
11	田人支所	2.05	3.39	モニタリングデータ
12	川前支所	2.20	3.51	沈着モデル
13	久之浜支所	2.16	3.69	モニタリングデータ
14	志田名集会所	17.07	27.31	沈着モデル

・外部被曝にともなう実効線量の見積もり

表5に、いわき市の被曝評価対象地点における屋外積算空間線量を、事故から最初の4カ月と1年間についてまとめた。ただし、沈着モデルの1年間は、モニタリング地点データを参考に4カ月間の1.6倍とした。空間線量を実効線量に換算するのに次の2つの仮定を置く。

◆日本家屋に居住し、住宅の放射線透過係数を0.4とする[21]。

◆1日のうち、屋内で16時間、屋外で8時間生活する。

そうすると、生活スタイルにともなう遮蔽係数 $S1 = (0.4 \times 16 + 8) \div 24 = 0.6$ となる。

また、空間線量（周辺線量当量 Sv）から（身体の自己遮蔽を考慮した）実効線量（Sv）への換算係数 S2 については、UNSCEAR 報告 Attachment[18]の C-12などを参考に、

◆大人 0.6、子ども 0.7、幼児 0.8

とする。表6に事故から4カ月間、表7に1年間の外部被曝実効線量を示す。

表6. いわき市の評価対象地点における外部被曝実効線量：4カ月間

No	場所	4カ月積算空間線量、mSv	実効線量、mSv		
			大人	子ども	幼児
1	平合同庁舎	1.11	0.40	0.47	0.54
2	小名浜支所	0.59	0.21	0.25	0.28
3	勿来支所	0.59	0.21	0.25	0.28
4	常磐支所	1.48	0.44	0.51	0.58
5	内郷支所	1.95	0.58	0.68	0.78
6	四倉支所	1.45	0.52	0.61	0.70
7	遠野支所	1.58	0.47	0.55	0.62
8	小川支所	0.96	0.34	0.40	0.46
9	好間支所	1.26	0.37	0.43	0.50
10	三和支所	0.76	0.28	0.32	0.37
11	田人支所	2.05	0.74	0.86	0.98
12	川前支所	2.20	0.65	0.76	0.86
13	久之浜支所	2.16	0.78	0.91	1.04
14	志田名集会所	17.07	6.15	7.17	8.19

表7. いわき市の評価対象地点における外部被曝実効線量：1年間

No	場所	1年間積算空間線量、mSv	実効線量、mSv		
			大人	子ども	幼児
1	平合同庁舎	1.85	0.67	0.78	0.89
2	小名浜支所	0.96	0.35	0.40	0.46
3	勿来支所	0.84	0.30	0.35	0.40
4	常磐支所	2.36	0.85	0.99	1.13
5	内郷支所	3.11	1.12	1.31	1.49
6	四倉支所	2.40	0.86	1.01	1.15
7	遠野支所	2.53	0.91	1.06	1.21
8	小川支所	1.43	0.51	0.60	0.69
9	好間支所	2.01	0.72	0.84	0.96
10	三和支所	1.41	0.51	0.59	0.68
11	田人支所	3.39	1.22	1.42	1.63
12	川前支所	3.51	1.26	1.47	1.68
13	久之浜支所	3.69	1.33	1.55	1.77
14	志田名集会所	27.31	9.83	11.47	13.11

VI. 内部被曝量の見積もり

VI-1. 吸入摂取

UNSCEAR2013 報告の Attachment C-9[18]に、放射性ヨウ素や放射性セシウムについての大気拡散シミュレーション計算結果が、1km メッシュの積算空気中濃度の形で Excel ファイルとして提供されている。そのデータを基に、ArcGIS を用いて積算空気中濃度のマップを作成した。図 13 にヨウ素 131 とセシウム 137 についてマップを示す。

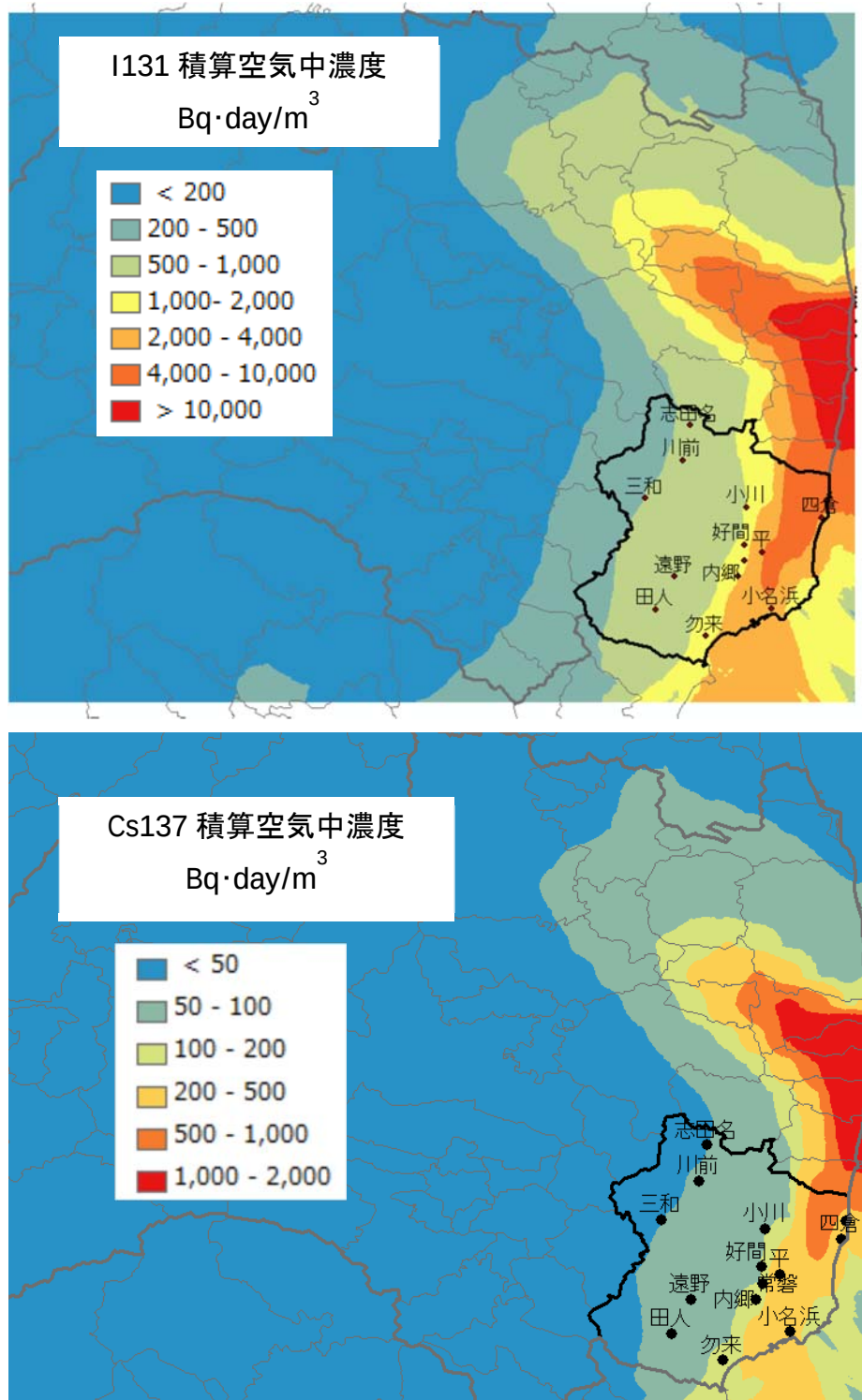


図 13. UNSCEAR2013 報告に基づくヨウ素 131 (上) とセシウム 137 (下) の空气中積算濃度

積算空気中濃度（ C ： $\text{Bq}\cdot\text{day}/\text{m}^3$ ）という単位は、空気中濃度の時間積和を表し、 $100\text{Bq}/\text{m}^3$ の濃度がまる 1 日（day）続いたとすれば、 $100\text{Bq}\cdot\text{day}/\text{m}^3$ の積算濃度となる。その積算濃度に呼吸率（ B ： m^3/day ）を乗ずると、吸入による取込量（ Q ： Bq ）が得られる。そして、吸入取込量（ Q ）に内部被曝換算係数（ K ： $\mu\text{Sv}/\text{Bq}$ ）を乗ずれば、内部被曝量（ D ： μSv ）が求まる。

つまり、

$$D（被曝量）= K（換算係数）\times B（呼吸率）\times C（積算空気中濃度）$$

の式を使って、吸入による内部被曝量を計算できる。

いわき市の被曝評価地点における積算空気中濃度については、図 13 のマップを使って、先に地表沈着放射能について行ったのと同じように値を抽出した。

計算に必要な呼吸率と内部被曝換算係数（表 8）は UNSCEAR 報告と同じにした。表 9 に、ヨウ素 131 の吸入にともなう甲状腺等価線量の計算結果を、大人、子ども、幼児に分けて示す。

（UNSCEAR の大気拡散計算では、ヨウ素は粒子状とガス状に分けて扱われている。）

表 9 の値は、『放射性プルームがやって来たときにずっと屋外にいた』という計算結果なので、明らかに過大評価の方向にある。そこで、『木造家屋内にいたときは屋外濃度の 4 分の 1 になる』[22]と仮定し、滞在確率は屋内が 2/3（16 時間）、屋外 1/3（8 時間）というモデルを適用すると、取込量は半分で被曝量も半分になる。このモデルを適用した甲状腺被曝量を表 10 に、セシウム 137 とセシウム 134 の吸入による実効線量（預託実効線量）を表 11 に示す。

表 8．計算に用いた呼吸率と内部被曝換算係数

項目	大人	子ども	幼児
空気呼吸率、 m^3/day	22.2	15.3	5.2
甲状腺等価線量換算係数 ヨウ素 131（粒子状）、 $\mu\text{Sv}/\text{Bq}$	0.15	0.37	1.4
甲状腺等価線量換算係数 ヨウ素 131（ガス状）、 $\mu\text{Sv}/\text{Bq}$	0.39	0.95	3.2
実効線量換算係数 セシウム 137、 $\mu\text{Sv}/\text{Bq}$	0.0046	0.0037	0.0054
実効線量換算係数 セシウム 134、 $\mu\text{Sv}/\text{Bq}$	0.0066	0.0053	0.0073

表 9．いわき市におけるヨウ素 131 の吸入にともなう甲状腺等価線量
ずっと屋外の空気を吸入していたというモデル

No	場所	積算空気中濃度、 $\text{Bq}\cdot\text{day}/\text{m}^3$	甲状腺等価線量、 mSv		
			大人	子ども	幼児
1	平合同庁舎	4026	22.3	37.7	45.0
2	小名浜支所	3242	17.5	29.5	35.3
3	勿来支所	1638	9.0	15.1	18.0
4	常磐支所	1889	10.3	17.3	20.6
5	内郷支所	1636	9.2	15.6	18.4
6	四倉支所	4055	22.5	37.9	45.3
7	遠野支所	627	4.1	6.9	8.2
8	小川支所	1072	6.5	10.9	12.8
9	好間支所	1401	8.1	13.7	16.2
10	三和支所	502	3.0	5.0	6.0
11	田人支所	596	3.8	6.4	7.7
12	川前支所	573	3.7	6.2	7.4
13	久之浜支所	4774	26.7	45.1	54.0
14	志田名集会所	555	3.5	5.9	7.1

表 10. いわき市におけるヨウ素 131 の吸入にともなう甲状腺等価線量
 屋内の空气中濃度は屋外の 4 分の 1 で滞在確率は屋内 2/3 で屋外 1/3 というモデル

No	場所	屋外の積算空气中 濃度、Bq・day/m ³	甲状腺等価線量、mSv		
			大人	子ども	幼児
1	平合同庁舎	4026	11.2	18.8	22.5
2	小名浜支所	3242	8.7	14.7	17.6
3	勿来支所	1638	4.5	7.6	9.0
4	常磐支所	1889	5.1	8.7	10.3
5	内郷支所	1636	4.6	7.8	9.2
6	四倉支所	4055	11.2	18.9	22.7
7	遠野支所	627	2.1	3.5	4.1
8	小川支所	1072	3.2	5.4	6.4
9	好間支所	1401	4.1	6.8	8.1
10	三和支所	502	1.5	2.5	3.0
11	田人支所	596	1.9	3.2	3.8
12	川前支所	573	1.8	3.1	3.7
13	久之浜支所	4774	13.4	22.6	27.0
14	志田名集会所	555	1.8	3.0	3.5

表 11. いわき市におけるセシウム 137 とセシウム 134 の吸入にともなう実効線量
 屋内の空气中濃度は屋外の 4 分の 1 で滞在確率は屋内 2/3 で屋外 1/3 というモデル

No	場所	屋外積算空气中濃度 (セシウム 137+134) Bq・day/m ³	実効線量、mSv		
			大人	子ども	幼児
1	平合同庁舎	762	0.047	0.026	0.013
2	小名浜支所	600	0.037	0.021	0.010
3	勿来支所	277	0.017	0.010	0.005
4	常磐支所	293	0.018	0.010	0.005
5	内郷支所	266	0.017	0.009	0.004
6	四倉支所	666	0.041	0.023	0.011
7	遠野支所	136	0.008	0.005	0.002
8	小川支所	175	0.011	0.006	0.003
9	好間支所	234	0.015	0.008	0.004
10	三和支所	94	0.006	0.003	0.002
11	田人支所	122	0.008	0.004	0.002
12	川前支所	120	0.007	0.004	0.002
13	久之浜支所	747	0.046	0.026	0.012
14	志田名集会所	101	0.006	0.003	0.002

表 10 のヨウ素吸入による甲状腺被曝量計算結果をながめると、図 13 で積算空气中濃度の大きい、いわき市の海寄りの久ノ浜、四倉、小名浜、平では子どもで 20～30mSv、大人で 10～20 mSv の被曝量になっている。一方、外部被曝が大きかった志田名の被曝が小さくなっている。

表 11 の放射性セシウムの吸入被曝で大きいのは、平、四ツ倉、久ノ浜の大人での 0.04～0.05 mSv であるが、これらの値を表 6、表 7 の外部被曝量と比較すると 10 分 1 程度である。

いずれにせよ、大気拡散シミュレーション計算の確かさについてもっと検証しておく必要がある。

VI-2. 経口摂取

VI-2-1. 水道水

2011 年に検査された水道水の測定結果は、下記の厚労省ホームページに掲載されている[23]。その PDF データから、2011 年 3 月中旬から 4 月はじめにかけて、ヨウ素 131 が検出されたいわき市の上水道データを選び出すと 41 件であった。図 14 はそのデータをすべてプロットしてみたもので、実線は、目分量で平均値をなぞったものである。

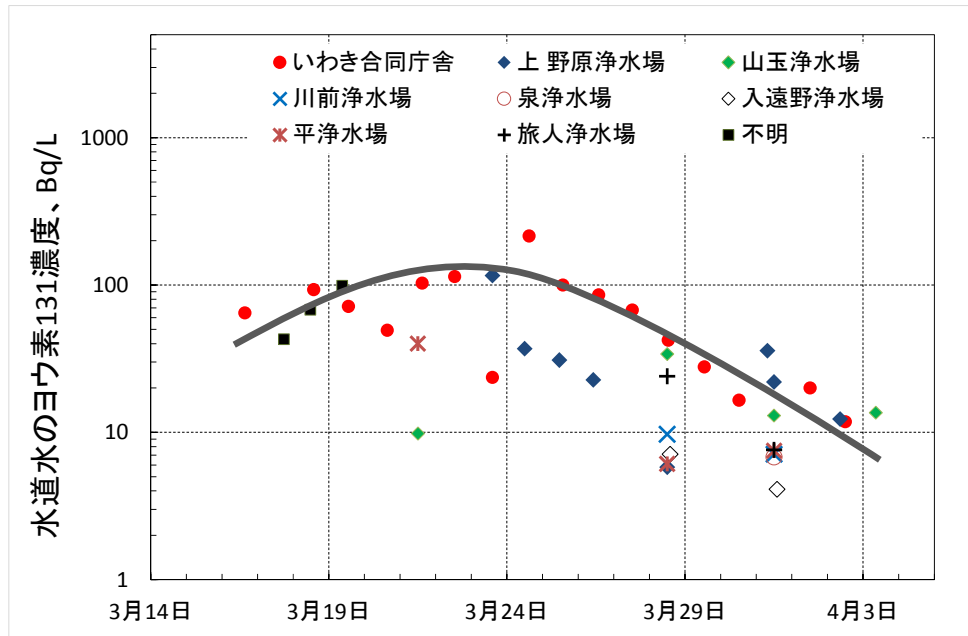


図 14. いわき市の上水道中のヨウ素 131 濃度。

空間線量や空気中放射能濃度のように、図 14 のデータからいわき市の評価対象地区別に水道水汚染を評価するのは無理なので、いわき市全体が図 14 の実線のようなヨウ素 131 濃度であったと考える。すると、毎日の濃度は次の表 12 のようになる。

表 12. いわき市の水道水中ヨウ素 131 濃度：2011 年 3 月 16 日～4 月 3 日。単位：Bq/L。

3月16日	3月17日	3月18日	3月19日	3月20日	3月21日	3月22日	3月23日	3月24日	3月25日
40	55	75	90	110	120	130	130	120	100
3月26日	3月27日	3月28日	3月29日	3月30日	3月31日	4月1日	4月2日	4月3日	
80	60	45	35	25	18	14	9	6	

このデータから、積算水道水中ヨウ素 131 濃度を求めると、1262 Bq・day/L となる。吸入と同様に、積算水道水中濃度、水道水毎日摂取量、換算係数から、以下の式で被曝量を計算できる。

$$D(\text{被曝量}) = K(\text{換算係数}) \times B(\text{毎日摂取量}) \times C(\text{積算水道水中濃度})$$

水道水毎日摂取量、甲状腺被曝換算係数を UNSCEAR2013 報告[18]と同じ値にして甲状腺等価線量を計算した結果が表 13 である。

表 13. 水道水からの甲状腺被曝計算結果

項目	大人	子ども	幼児
水道水の毎日摂取量、L/day	2.0	1.0	0.75
甲状腺等価線量換算係数、 $\mu\text{Sv/Bq}$	0.43	1.0	3.6
甲状腺等価線量、 μSv	1090	1260	3410
甲状腺等価線量、mSv	1.09	1.26	3.41

VI-2-2. 食料品

2011年3月から1年間の間に、食品を通じて、いわき市民が摂取した放射エネルギーを正確に見積もることは困難である。入手できる当時の食品汚染データを眺めながら、“バナナの叩き売り方式”で当時の平均的汚染濃度を定め、平均摂取量を用いて食品摂取にともなう内部被曝を計算してみる。また、いわき市のデータだけでは不十分なので、福島県全体の平均をいわき市に適用する。計算結果は、目安程度のものと考えて頂きたい。

参考にしたデータは、UNSCEAR2013 報告 Attachment にある食品汚染データ C-8 Suppl の Excel データ[18]と農水省ホームページ提供の Excel データ[24]である。

ヨウ素 131 については、最初の 4 カ月、セシウム 137 とセシウム 134 については最初の 4 カ月と 1 年に分けて被曝を見積もった。

●図 15 (a) ～図 15(g)は、UNSCEAR データにある食品汚染データからいわき市のものを種類別に選んでプロットしたものである。多くのデータで、Cs137+Cs134 の値が 20Bq/kg (図 15e の牛乳の場合はすべて) となっているのは、測定結果が ND (検出限界以下) については Cs137 と Cs134 とともに 10Bq/kg を割り振っているためである。

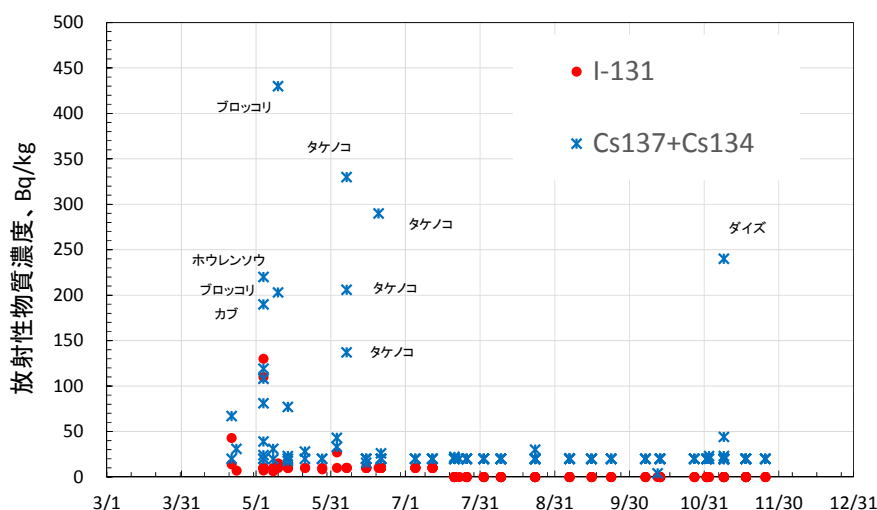


図 15(a) 2011年 いわきの野菜・豆類: UNSCEAR169サンプル

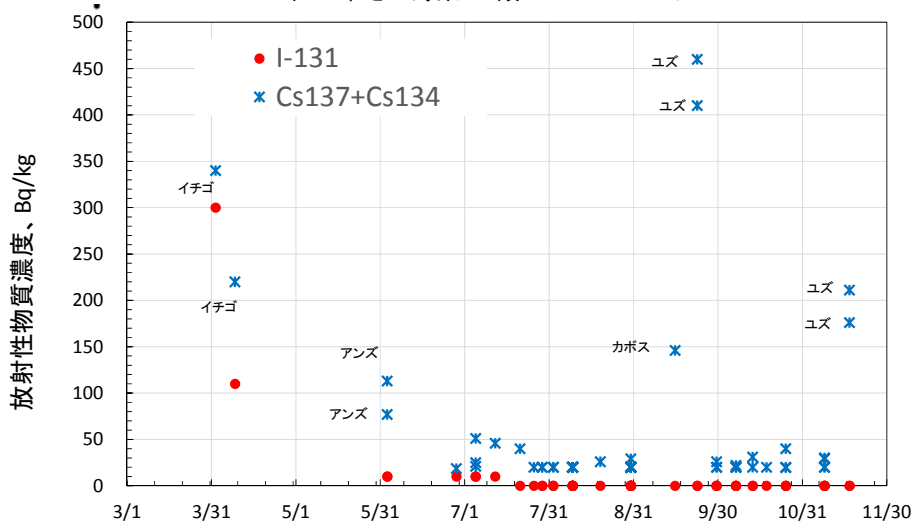
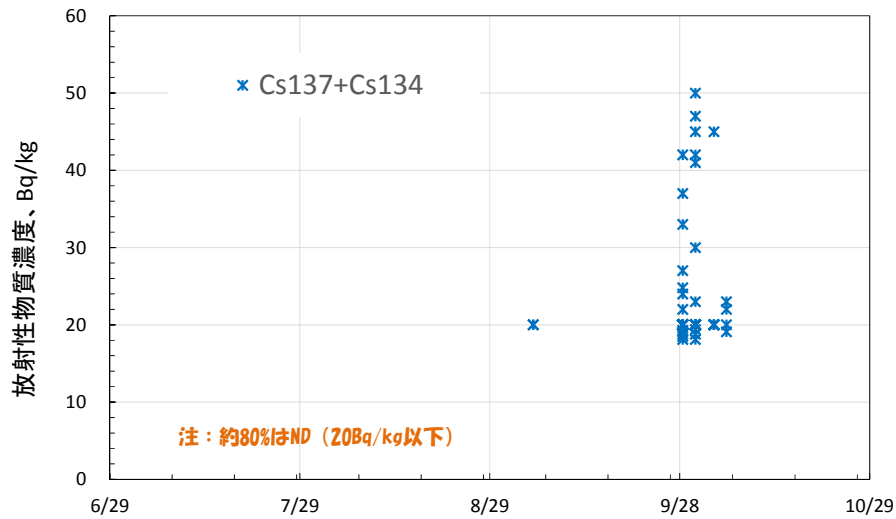
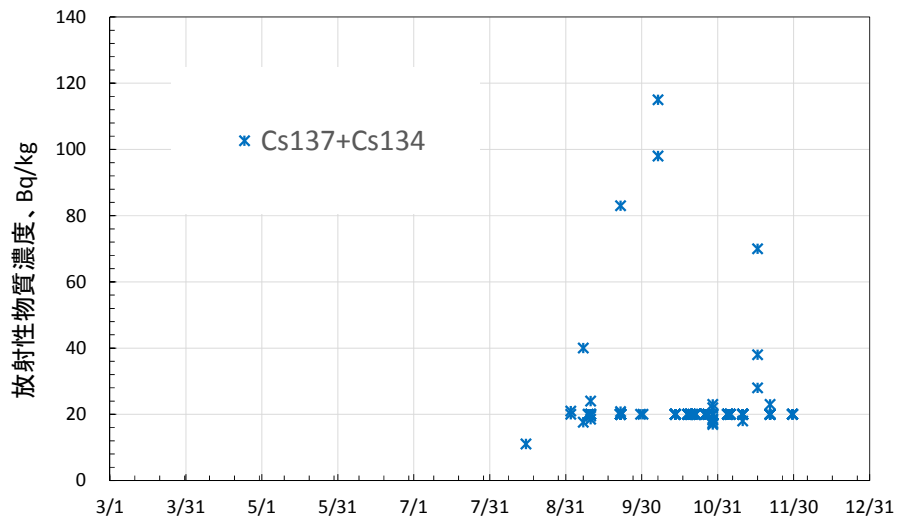


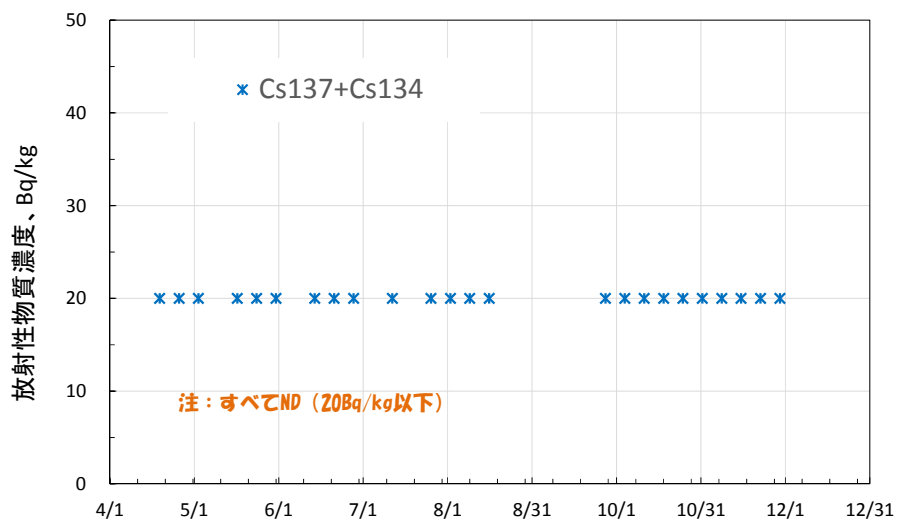
図 15(b) 2011年 いわきの果物類 UNSCEAR:75サンプル



☒ 15(c) 2011年： いわきの米 UNSCEAR 107サンプル



☒ 15(d) 2011年： いわきの牛肉 UNSCEAR 172サンプル



☒ 15(e) 2011年： いわきの牛乳 UNSCEAR 30サンプル

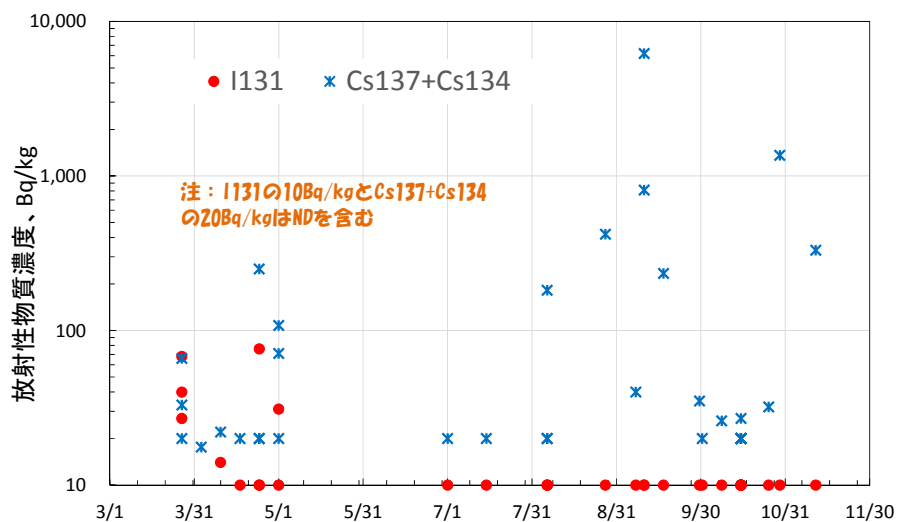


図 15(f) 2011年：いわきのキノコ類 UNSCEAR 43サンプル

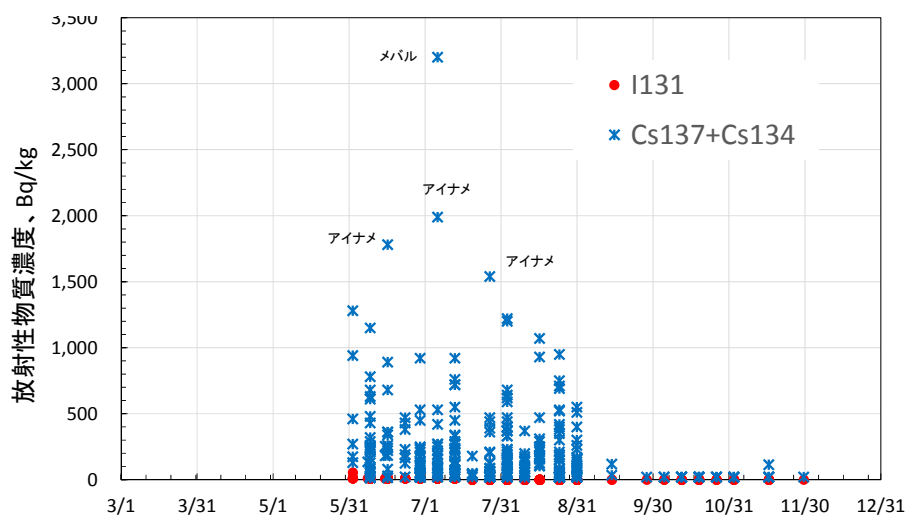


図 15(g) 2011年：いわきの魚 UNSCEAR:391サンプル

● 図 16(a)～図 16(d)に、農水省データから、福島県といわき市の、ハウレンソウ、コメ、モモ・リンゴ・牛肉のデータを示す。

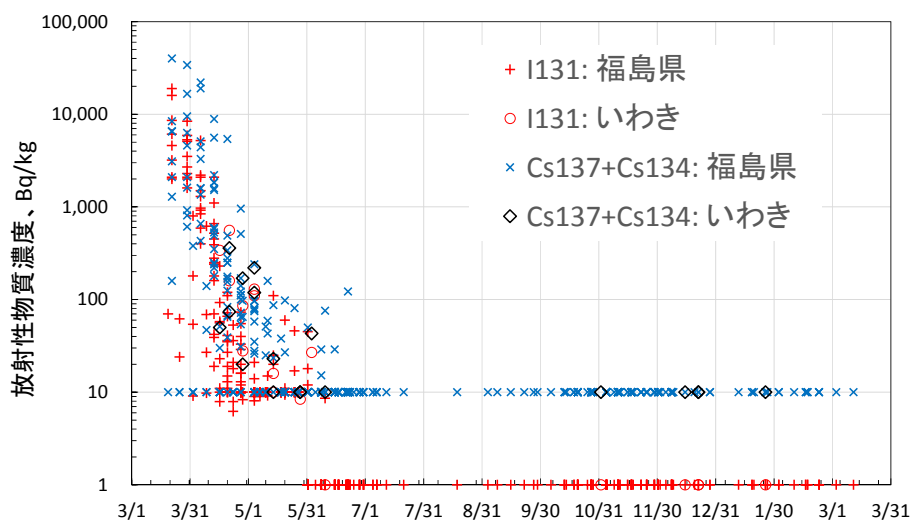


図 16(a) 2011年：ハウレンソウ いわき(18) 福島県(385) 農水省データ

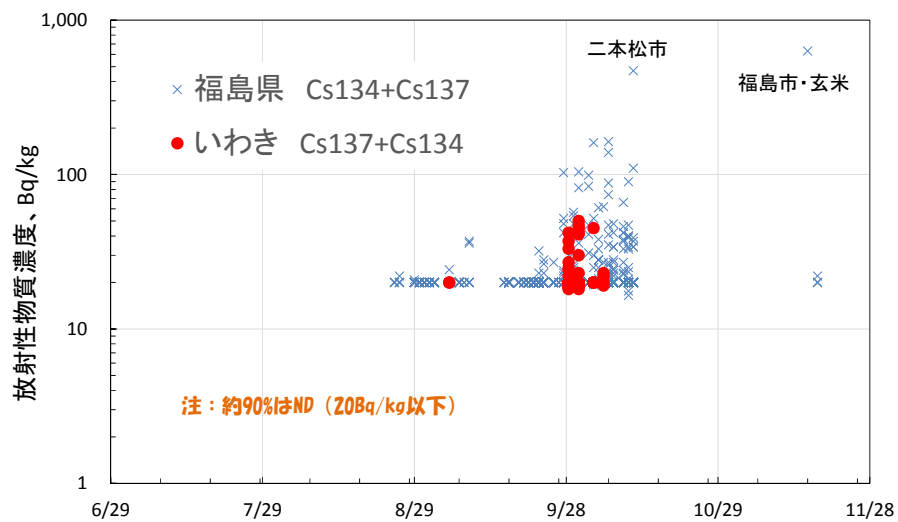


図 16(b) 2011年：米 農水省データ：福島県(1152) いわき(107)

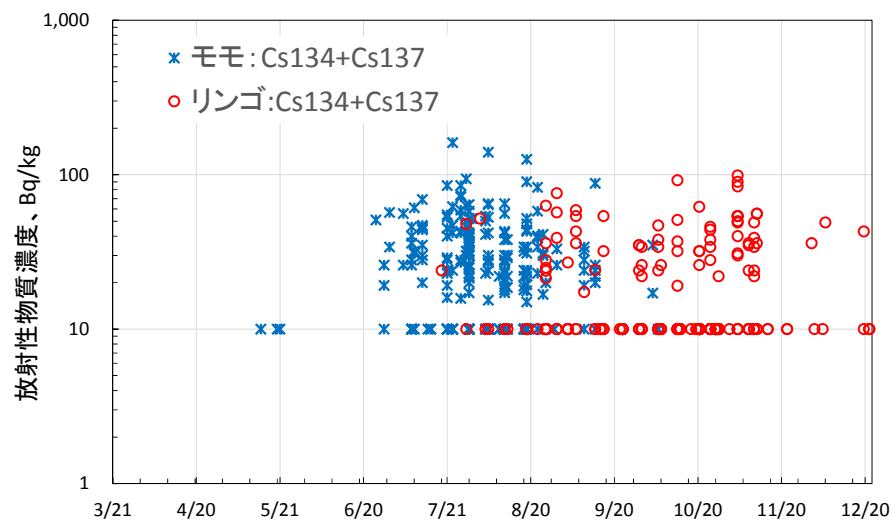


図 16(c) 2011年：福島県のモモ(247)とリンゴ(222) 農水省データ

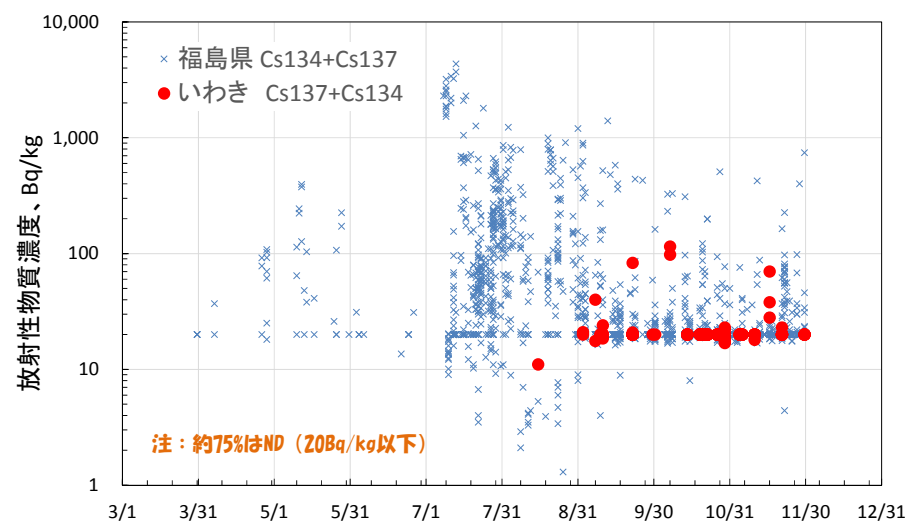


図 16(d) 2011年：牛肉 UNSCEAR 福島県(約3000) いわき(172)

● 毎日の食品摂取量

経口摂取からの被曝計算に用いる毎日食品摂取量は、UNSCEAR 報告 Attachment[18]の C-12 文書と、旧原子力安全委員会の資料[25]を参考にしながら、表 14 のように決めた。

表 14. 計算に用いた毎日の食品摂取量、g/日数

種類	大人	子ども	幼児
葉野菜	100	80	60
その他野菜	200	160	120
米・穀類	500	400	250
海産物*	100	80	40
果物	200	150	180
肉	90	90	80
ミルク	80	250	150
その他	500	300	300

* ; 福島県漁連は、2011 年 3 月 15 日から操業自粛したので、海産物からの被曝は計算しない。

● 食品の汚染レベル

図 15(a)～図 15(f)、図 16(a)～(d)を眺めながら、福島原発事故後にいわき市民が食べていた食品の汚染レベルを以下のように設定した。

表 15. いわき市民が食べていた食品の汚染レベル：ヨウ素 131、Bq/kg

種類	3 月	4 月	5 月	6 月以降
葉野菜	5000	500	50	0
その他野菜	500	50	5	0
米・穀類	50	5	0.5	0
果物	50	5	0.5	0
肉	50	5	0.5	0
ミルク	50	5	0.5	0
その他	50	5	0.5	0

表 16. いわき市民が食べていた食品の汚染レベル：セシウム 137+セシウム 134、Bq/kg

種類	3 月	4 月	5 月	6 月以降
葉野菜	5000	500	50	20
その他野菜	500	50	30	20
米・穀類	10	10	10	10
果物	10	10	10	10
肉	50	50	50	50
ミルク	10	10	10	10
その他	20	20	20	20

●経口摂取の内部被曝換算係数

経口摂取にともなう内部被曝換算を表 17 に示す。

表 17. 計算に用いた経口摂取にともなう内部被曝換算係数

項目	大人	子ども	幼児
ヨウ素 131：甲状腺等価線量換算係数、 $\mu\text{Sv/Bq}$	0.43	1.0	3.6
セシウム 134：実効線量換算係数、 $\mu\text{Sv/Bq}$	0.019	0.014	0.016
セシウム 137：実効線量換算係数、 $\mu\text{Sv/Bq}$	0.013	0.010	0.012

●経口摂取にともなう内部被曝計算結果

表 18 にヨウ素 131 による甲状腺等価線量、表 19、20 にセシウム 134 とセシウム 137 による実効線量（はじめの 4 カ月とはじめの 1 年）を示す。表をながめると、甲状腺線量、実効線量とも葉野菜の寄与が大きい。つまり、直後にどんな野菜を食べていたかで被曝量に大きく変わってくる。

表 18. 食品のヨウ素 131 汚染にともなう甲状腺被曝：甲状腺等価線量

種類	甲状腺等価線量、mSv		
	大人	子ども	幼児
葉野菜	4.15	7.72	20.85
その他野菜	0.83	1.54	4.17
米・穀類	0.21	0.39	0.87
果物	0.08	0.14	0.63
肉	0.04	0.09	0.28
ミルク	0.03	0.24	0.52
その他	0.21	0.29	1.04
合計	5.55	10.42	28.36

表 19. 食品のセシウム 134 とセシウム 137 汚染にともなう実効線量：はじめの 4 カ月

種類	実効線量、mSv		
	大人	子ども	幼児
葉野菜	0.156	0.093	0.082
その他野菜	0.036	0.022	0.019
米・穀類	0.009	0.006	0.004
果物	0.004	0.002	0.003
肉	0.008	0.006	0.007
ミルク	0.001	0.004	0.002
その他	0.019	0.008	0.010
合計	0.233	0.141	0.127

表 20. 食品のセシウム 134 とセシウム 137 汚染にともなう実効線量：はじめの 1 年間

種類	実効線量、mSv		
	大人	子ども	幼児
葉野菜	0.163	0.098	0.085
その他野菜	0.050	0.030	0.026
米・穀類	0.060	0.036	0.026
果物	0.024	0.014	0.019
肉	0.024	0.018	0.018
ミルク	0.004	0.010	0.007
その他	0.053	0.024	0.028
合計	0.377	0.228	0.210

VI-3. 内部被曝のまとめ

●ヨウ素による甲状腺被曝：表 10 の吸入、表 13 の水道水、表 18 の食品からのヨウ素 131 取込にともなう甲状腺被曝量を表 21～表 23 に示す。表 21 の吸入は、表 1 に示した 14 カ所の人口によって重み付けした平均値である。表 22 は吸入最大の久之浜で、表 23 は吸入最小の三和である。

表 21. ヨウ素 131 の取込にともなう甲状腺被曝の平均値：14 カ所平均

区分	甲状腺等価線量、mSv		
	大人	子ども	幼児
吸入（14 カ所平均）	7.75	13.06	15.60
水道	1.09	1.26	3.41
食物	5.55	10.42	28.36
合計	14.4	24.7	47.4

表 22. ヨウ素 131 の取込にともなう甲状腺被曝の最大値：久之浜地区

区分	甲状腺等価線量、mSv		
	大人	子ども	幼児
吸入（久之浜）	13.37	22.56	26.99
水道	1.09	1.26	3.41
食物	5.55	10.42	28.36
合計	20.0	34.2	58.8

表 23. ヨウ素 131 の取込にともなう甲状腺被曝の最小値：三和地区

区分	甲状腺等価線量、mSv		
	大人	子ども	幼児
吸入（三和）	1.48	2.49	3.00
水道	1.09	1.26	3.41
食物	5.55	10.42	28.36
合計	8.1	14.2	34.8

ちなみに、UNSCER2013 報告では、内部被曝によるいわき市の甲状腺等価線量は、大人、子ども、幼児について、16.6、30.1、50.6mSv（Attachment[18]の C-16 文書）で、本報告の値とまずまず一致している。といっても、本報告では、多くのデータを UNSCEAR2013 報告に依拠しており、当然の結果ではある。

●セシウムによる実効線量：表 11 の吸入、表 19 の食品（4 カ月）、表 20 の食品（1 年）のセシウム取込にともなう実効線量を表 22 にまとめた。

セシウムの吸入にともなう実効線量の最大値は平地区で、大人、子ども、幼児について、0.047、0.026、0.013mSv だった。食品からの被曝に比べて小さいので、合計値はあまり変わらない。

表 24. セシウム 134 とセシウム 137 の取込にともなう実効線量平均値：4 カ月と 1 年

区分	実効線量、mSv		
	大人	子ども	幼児
吸入（14 カ所平均）	0.031	0.017	0.009
食品（4 カ月）	0.233	0.141	0.127
食品（1 年）	0.377	0.228	0.210
合計（4 カ月）	0.264	0.158	0.136
合計（1 年）	0.408	0.245	0.219

VII. 実効線量のまとめ

表 6、表 7 の外部被曝、表 21 と表 24 の内部被曝を合わせた実効線量の合計値を表 25（4 カ月間）と表 26（1 年間）に示す。ヨウ素甲状腺被曝の実効線量は、表 21 の甲状腺等価線量に、組織荷重係数 0.05 を乗じた値である。

表 25 と表 26 は、本研究で得られた、いわき市の平均的な被曝状況であるが、初めの 1 年の被曝のうち、80～90%が初めの 4 カ月の被曝であったことを示している。

表 25. いわき市の初期被曝のまとめ：はじめの 4 カ月（14 カ所の実効線量平均値）

区分	実効線量量、mSv		
	大人	子ども	幼児
外部被曝（14 カ所平均実効線量）	0.36	0.42	0.48
ヨウ素甲状腺被曝（実効線量）	0.72	1.24	2.37
セシウム内部被曝（実効線量）	0.26	0.16	0.14
合計	1.35	1.82	2.99

表 26. いわき市の初期被曝のまとめ：はじめの 1 年（14 カ所の実効線量平均値）

区分	実効線量量、mSv		
	大人	子ども	幼児
外部被曝（14 カ所平均実効線量）	0.63	0.73	0.84
ヨウ素甲状腺被曝（実効線量）	0.72	1.24	2.37
セシウム内部被曝（実効線量）	0.41	0.25	0.22
合計	1.75	2.21	3.42

表 27（4 カ月）と表 28（1 年）は、実効線量の平均値、最大値、最小値である。志田名の被曝が大きいのは、セシウムの地表汚染が際だって大きく、その外部被曝に由来する。表 28 には、UNSCEAR 報告の値（Attachment[18]の C-14 文書）も示してある

表 27. いわき市の初期被曝のまとめ：はじめの 4 カ月の実効線量

区分	実効線量量、mSv		
	大人	子ども	幼児
14 カ所平均の実効線量	1.35	1.82	2.99
最大の実効線量：志田名	6.81	8.05	10.1
最小の実効線量：三和	0.92	1.17	2.24

表 28. いわき市の初期被曝のまとめ：はじめの 1 年の実効線量

区分	実効線量量、mSv		
	大人	子ども	幼児
14 カ所平均の実効線量	1.76	2.22	3.43
最大の実効線量：志田名	10.6	12.4	15.1
最小の実効線量：三和	1.30	1.53	2.63
UNSCEAR2013 報告：いわき市	2.19	3.04	4.13

●結論：いわき市の子どもの甲状腺被曝は、等価線量として 30～60mSv 程度。いわき市のはじめの 1 年間の実効線量の平均は、大人で 1～2mSv、子どもで 2～3mSv。ただ、セシウム汚染が際立って大きかった志田名では、外部被曝が大きいので大人と子どもの違いは小さく、10～13mSv の被曝量になった。

『本報告の値がどれだけ確かか』という問題は今後の課題であるが、国や東電が未だキチンとした被曝評価を怠っているなかで、本報告のような仕事にも意味があるだろうと考えている。

文献

1. 今中哲二、遠藤暁ほか、「福島原発事故にともなう飯舘村の放射能汚染調査報告」、科学 .81 巻 pp594-600 (2011).
2. T. Imanaka, S. Endo et al, “Early radiation survey of the Iitate Village heavily contaminated by the Fukushima Daiichi accident, conducted on March 28th and 29th, 2011”, Health Physics Vol.102 pp680-686 (2012).
3. 原子力安全研究グループ HP : <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/>
4. 今中哲二ほか、「飯舘村住民の初期外部被曝量の見積もり」、科学 84 巻 pp322-332 (2014).
5. 福島県民健康調査 HP : <https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/21045b/>
6. UNSCEAR 事故報告書 : http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_1.html
7. WHO 事故報告書 : http://www.who.int/ionizing_radiation/pub_meet/fukushima_dose_assessment/en/
8. Katata G et al. “Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model” Atoms. Chem. Phys. 15, 1029-1070 (2015)
9. 福島県 HP : 県内 7 方部環境放射能測定結果
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/h22-24-7houbu.html>
10. 福島県 HP : 20km～50km 圏付近環境放射能測定結果
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/kako-monitoring.html>
11. 福島県 HP : 県内各市町村環境放射能測定結果
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/h22-23-kakutihou.html>
12. 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
http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/etc/VICreport_H25-2-5.pdf
13. ヨウ素 131 大気拡散シミュレーション動画 : http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/etc/VIC_I131-a.mp4
14. 福島第一原発周辺気象データアーカイブ : 2011 年 3 月 11 日～25 日 / レーダーアメダス
<http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/weather/data/radame-20110311/>
15. 気象庁 : 過去の気象データ検索 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
16. 放射性物質の分布状況等調査航空機モニタリング : <http://emdb.jaea.go.jp/emdb/portals/b224/>
17. ArcGIS : <https://www.esri.com/products/arcgis/>
18. UNSCEAR Attachment : http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_1_Attachments.html
19. Endo S et al, “Measurement of soil contamination by radionuclides due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident and associated estimated cumulative external dose estimation” J Environ. Radioact. 111, 18-27, 2012
20. Beck H.L. “Exposure rate conversion factors for radionuclides deposition on the ground” EML-378, 1980
21. 「原子力施設の防災対策について」 付属資料 10、原子力安全委員会、2003 年
22. 原子力規制庁 HP : <https://www.nsr.go.jp/activity/bousai/measure/00000217.html>
23. 厚労省 HP : 水道水中の放射性物質に関する検査の結果
http://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/kentoukai/houshasei_monitoring.html
24. 農水省 HP : http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/s_chosa/H24gaiyou.html
25. 「飲食物摂取制限に関する指標について」 原子力安全委員会、1998 年

◇ 研究経費の支出実績

研究経費	500,000 円
<内訳>	
給与	451,319 円
消耗品費	12,576 円
その他	36,105 円
間接経費	150,000 円
合計	650,000 円