

テーマ（1）放射線健康管理に資する線量評価等に関する研究
（1 / 2）

- 1-1 大気拡散シミュレーションによる時間空間放射能データベースを用いた
避難行動パターン毎の初期線量評価
主任研究者：鈴木 元（国際医療福祉大学クリニック） ……………1
- 1-2 避難行動データの多角的解析に基づく福島原発事故初期の内部被ばく線量推計
主任研究者：栗原 治（量子科学技術研究開発機構） …………… 17

大気拡散シミュレーションによる時間空間放射能データベースを用いた 避難行動パターン毎の初期線量評価

鈴木 元（国際医療福祉大学クリニック・院長・教授）

研究要旨

2011 年 3 月に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故に伴い ^{131}I や $^{132}\text{I}/^{132}\text{Te}$ や ^{133}I などの照射性核種が大量に環境中に放出された。これらの核種は甲状腺に取り込まれる傾向があるため、福島県の住民は子ども達の甲状腺がんリスクが増加すると懸念している。しかし、事故後の甲状腺実測値は少なく、甲状腺等価線量の分布など全体像は判っていなかった。私たちの研究グループは、大気拡散シミュレーションの一種である世界版緊急時環境線量情報予測システム (WSPEED) と最新の放出源情報 (ソースターム) を用いて計算された放射性核種濃度の時間空間放射能密度分布のデータベース (WSPEEDI_2019DB) を用いて線量再構築を行ってきた。住民の行動の多様性を反映するため、市町村毎に 100~1000 人の 19 歳以下の行動調査票を入手し、それを使って 3 月 12 日から 3 月 25 日までの滞在場所の緯度経度を用いて、WSPEEDI_2019DB から地上 1m の ^{131}I (蒸気状ヨウ素元素、有機化ヨウ素、粒子状ヨウ素、総ヨウ素) の 1 時間毎の大気濃度を参照し、吸入被ばく線量を推計した。避難地区等 7 市町村の解析データは 2020 年 1 月に論文報告し、「原子放射線の影響に関する国連科学委員会」(以下 UNSCEAR と略す) 2020 年報告書の線量評価改訂に貢献した。今回、避難地区 7 市町村に加え、周辺 9 市町村の 1 歳児の吸入被ばく線量を評価した。推計された ^{131}I -甲状腺等価線量は、1080 名の小児甲状腺実測値から評価された甲状腺等価線量の分布と整合性が高く、シミュレーションの精度が高いことが確認された。短半減期核種の吸入被ばくによる甲状腺等価線量の平均値は、小高区の 14.9mSv を除くと全ての市町村で 10mSv 未満であり、95 パーセンタイル値で 30mSv を超すのは双葉町のみであった。

UNSCEAR 2020 年報告書と比較検討した結果を合わせて報告する。行動調査票の移動開始時間、移動時間帯にどの地点の大気中放射能濃度を使うのかに関し、UNSCEAR を含め 4 種類の手法により線量を比較検討した。その結果、多くの避難シナリオで線量評価の不確実性は大きくないことが判明した。

キーワード: 東京電力福島第一原子力発電所事故、甲状腺等価線量、大気拡散シミュレーション、行動調査票

研究協力者

大葉 隆 (福島県立医大・医・放射線健康管理学講座・助教)

石川徹夫 (福島県立医大・医・放射線物理化学講座・教授)

長谷川有史（福島県立医大・医・放射線災害医療講座・教授）

長井晴康（日本原子力研究開発機構・原子力基礎研究センター・ディビジョン長）

I. 研究目的

福島第一原発事故後の周辺住民の甲状腺直接測定は凡そ 1200 人と少なく、甲状腺被ばく線量の地域的、年齢階層別の線量分布は判っていない。そこで、避難地域および周辺 16 市町村の 19 歳以下住民の行動調査票を無作為抽出して、個人毎に WSPEEDI_2019DB と行動調査票をベースに吸入被ばく線量および経口被ばく線量（水道水）を推計する手法を確立する。もって市町村の甲状腺等価線量の統計値（平均、中央値、25・75-および 95-パーセンタイル）を推計する。また、これらの推計値の不確実性の幅を評価する。この線量推計のプログラムは、将来の福島県県民健康調査で発見された甲状腺がんの解析に貢献する。

II. 研究方法

II-1. 行動調査票をベースに吸入被ばく線量を評価

WSPEEDI_2019DB は、NetCDF という言語で書かれたデータベースで、一時間毎の 1Km メッシュないし 3Km メッシュの代表地点の緯度経度毎の放射性核種（総 ^{131}I 、蒸気状 ^{131}I 、粒子状 ^{131}I 、有機化 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{132}Te ）の地上 1m の放射能濃度および地上沈着量を格納している(1)。NetCDF のデータベースを Windows Excel で利用できるようにするため、Python 言語で書かれたプログラムを開発し、利用した。福島県民健康調査基本調査の中から避難地区およびその周辺地町村の 19 歳以下の行動調査票を無作為に 100~1000 抽出し、個人毎に 2011 年 3 月 12 日から 3 月 25 日までの居場所の緯度経度情報を鍵に WSPEEDI_2019DB の放射性ヨウ素データと照合することにより、吸入被ばく線量を推計する。吸入被ばくの推計は、国際放射線防護委員会 ICRP の定義に従い、年齢階層別の一日換気量、甲状腺等価線量換算係数を用いる(2)。吸入被ばく線量の補正項として、屋内退避による吸入被ばく低減係数、および日本人甲状腺ヨウ素取り込み率の低さを反映させるための補正項を使用する。屋内退避による低減係数に関しては、Hirouchi 等の報告(3, 4)をベースに福島県の家屋の建造年代の比率および風速 2.5m/秒、屋内退避時間 6 時間の平均値として 0.5 を採用する。甲状腺取り込み率の補正項は、Kudo らの報告(5)にしたがい 0.62 (=18.6/30) を用いる。それぞれの補正による不確実性の幅を以下のように評価する。屋内退避の防護効果は、同じ建造年代でも防護効果に幅があるため、その確率密度関数を三角分布（最小 0.1,最大 0.95,ピーク 0.5）とし、甲状腺取り込み量の補正項の確率密度関数を正規分布（平均 $18.6 \pm 6.0/30$ ）と仮定し、それらの合成不確実性幅をモンテカルロシミュレーション法で推計する(6)。飯舘村に関しては、水道がなく井戸水を利用している地域は水の汚染がないとし、水道供給のある地域に関しては主要な 3 浄水場により汚染レベルが異なることより、吸入被ばくに加えて飲水による経口被ばく線量を個々の行動調査票毎に合算する。また、水道普及率 0.7 を反映させるため、水道水から

の内部被ばく線量に関しては、水道水利用割合の確率密度関数を二項分布とし、甲状腺取り込み率の確率密度分布を上記の正規分布としてそれらの合成不確実性幅をモンテカルロシミュレーション法で評価する(6)。 ^{131}I の吸入被ばく等価線量から他の半減期核種 (^{133}I , $^{132}\text{I}/^{132}\text{Te}$) を含めた甲状腺等価線量を推計するために、私たちは、体表面汚染検査で実測した ^{131}I と ^{133}I や $^{132}\text{I} \cdot ^{132}\text{Te}$ との核種比をもちいて比例計算により推計する(7)。この点は UNSCEAR2020 報告書と異なるところであり、代表的避難シナリオ毎にその影響を評価する必要がある。

先行研究で富岡町、大熊町、双葉町、楡葉町、浪江町、飯舘村および南相馬市の解析を行い論文発表した(6)。本研究で新たにいわき市から 1000 サンプル、田村市、伊達市、相馬市から各々 300 サンプル、川俣町、広野町、新地町、川内村、葛尾村から各々 100 サンプル行動調査票を無作為抽出し、解析する。

II-2. 行動調査票ベースの線量評価における不確実性

Ohba 論文(6)においては、移動開始時間や移動中の経路の不確実性、および WSPEEDI での大気拡散シミュレーションを行う際に利用している気象場データの不確実性を考慮し、また、Python 解析プログラムの限界も有り、行動調査票 1 件ごとの移動経路の全ての緯度経路に最も近い地点の WSPEEDI_2019DB の情報を使うのではなく、一日を 6 時間毎の 4 時間帯 (AM1, AM2, PM1, PM2) に分割し、それぞれの時間帯で一番長く滞在して居た場所の緯度経度と最も近い 152 カ所のランドマークの核種濃度情報を使った。一方、UNSCEAR 2019 年報告書では、Ohba 論文(6)で私たちが提案した避難市町村別 4 ないし 5 の代表的避難シナリオ毎に、6 時間の時間帯の始まりに出発し、到着地の移動経路を一時間毎に滞在場所を按分してその途上の全ての緯度経度に最も近い地点の WSPEEDI_2019DB 核種データを使い線量を評価した。本年度は、行動調査票の移動時間帯の居場所の不確実性を、【方法 1】 6 時間毎の代表的ランドマーク 152 カ所での線量情報を使う評価法、【方法 2】 緯度経度は行動調査票通りの情報を使い、6 時間の時間帯に拘らず、移動時間帯の前半は出発点、後半は目的地の線量情報を使う評価法、【方法 3】 6 時間の時間帯に拘らず、緯度経度情報は行動調査票の情報を使い、出発点と目的地の直線距離を一時間毎に定速で移動したと仮定して 1 時間毎の線量情報を使う評価値を UNSCEAR2020 の評価値と比較する。

II-3. 行動調査票をベースに飲水による経口被ばく線量を評価

Hirakawa 等の調査(8)により、東日本大震災直後は、生産地から地域の集積所さらには市場そして小売店に至る流通経路が寸断されたため、避難住民および福島県民は大震災以前にストックされていた食品を摂取していたと考えられる。また、流通が再開された後には、県外産の野菜や牛乳等が小売店に出荷されたが、それらは暫定規制レベルをクリアした食品のみが流通したため、甲状腺等価線量への寄与は少ないと判断した。一方、福島県内の水道は、震災後一旦断水となっていたが 3 月 14 日頃から徐々に断水が解消され、県民は水道水を調理水や飲料水として利用した。このため、3 月 15 日以降の内陸に向かった放射性プルームにより汚染した水道水からの内部被ばくは無視することはできず、水道水利用による甲状腺等価線量を推計した。

福島県内の水道水で放射性ヨウ素を継続的に実測していた市町村は少なかったため、WSPEEDI

による取水地への ^{131}I 沈着量と実測値を組み合わせて実質的な移行係数を求めるワン・コンパートメント・モデルにより市町村別の水道水の汚染濃度を推計した(9, 10)。その後、アンケート調査により年齢階層別の水分摂取量を調べ、その全量を水道水から摂取したと仮定して摂取量を改定すると共に、飯舘村に関しては住所情報をもとに、供給されている浄水場別の水道水汚染濃度を使い、再評価した(10)。また、吸入被ばくと同様に甲状腺等価線量の補正項を使用した（上記）。今年度は、南北に広しいわき市に関して、主要な浄水場により水道水の濃度を別個に推計し、線量評価を精緻化する。

（倫理面への配慮）

本研究計画書は、国際医療福祉大学および福島県立医大の倫理委員会により承認を受け、実施している。国際医療福祉大学研究倫理審査承認番号 13-B-339 「大気拡散シミュレーションによる時間空間放射能データベースを用いた避難行動パターン毎の初期線量評価」（平成 31 年 3 月 28 日）、福島県立医科大学一般倫理委員会 整理番号 一般 2019-003 「大気拡散シミュレーションによる時間空間放射能データベースを用いた避難行動パターン毎の初期線量評価」（令和元年 7 月 16 日、変更申請分 令和 2 年 1 月 6 日）

III. 研究結果

III-1. 行動調査票をベースに吸入被ばく線量を評価

先行調査では、放射線医学総合研究所から提供された Python プログラムを使い、UNSCEAR_2019DB からの線量情報抽出を半自動で実行した。このため、緯度経度情報を代表的な 152 ランドマークに限定せざるをえず、ランドマークの密度が粗い市町村に関しては精緻な線量評価になっていなかった。今回、大量の行動調査票を扱うに当たり、Python プログラムを新規に開発し直し、行動調査票に書かれている緯度経度を全て網羅的に使い、線量を自動的に評価する手法に切り替えた。次節で比較検討結果を述べるが、行動調査票の取り扱いで、以下の 3 手法を比較検討できるようになっている。すなわち、先行研究で採用した従来法である【方法 1】152 ランドマークの放射能情報と 6 時間ステップの時間帯に最も長く滞在した居場所の緯度経度を使い、その居場所に最も近いランドマークの放射能情報を用いて吸入被ばく線量を積算する方法と、【方法 2】行動調査票の緯度経度情報に従い、行動調査票の A 地点から B 地点へ移動した場合、移動時間の前半は A 地点、後半は B 地点の緯度経度の放射能情報を使い一時間毎の線量を積算する方法、そして【方法 3】行動調査票の緯度経度情報に従い、A 地点から B 地点に移動している場合には A 地点から B 地点の距離を移動時間で割り、一時間毎の移動場所の緯度経度を求めてその放射能情報を使い一時間毎の線量を積算する方法の 3 種類である。【方法 3】は、UNSCEAR2020 で採用されている手法であるが、UNSCEAR は、Ohba 論文(6)の 6 時間ステップの行動記録をベースにしており、移動開始時間を特定できなかったため、移動している場合は移動中の 6 時間ステップの最初の時間から移動が始まっているとして計算している。結論的に【方法 2】と【方法 3】

は、福島第一原発に近い双葉町や大熊町で若干の違いが出たが、ほぼ同じ結果であり、原発から 30Km 圏外の市町村は【方法 2】で十分であることが判った。

表 III-1、表 III-2 は、方法 2 による 1 歳児甲状腺等価線量(mSv)の集計表である。Scientific Reports 誌に発表した 152 ランドマークの線量情報を使った時と比較すると、3 月 12 日避難開始前後の居場所の精度が高くなった影響で、双葉町、大熊町で約 1.7 倍、富岡町、楡葉町で約 1.2 倍評価値が高くなった。一方、ランドマーク地点が比較的多かった浪江町、小高区、原町/鹿島区、および福島第 1 原発から 30Km 圏外で吸入被ばくより経口被ばくの寄与が大きかった飯館村に関しては両者の違いは 1mSv 未満であった。短半減期核種による甲状腺等価線量は、南相馬市小高区を除く 16 市町村全てにおいて、1 歳児の吸入被ばくによる甲状腺等価線量の平均値は 10mSv 未満であり、また、95 パーセンタイル値は、一番高い双葉町で 37.9mSv であり、その他の市町村では 30mSv 未満であった。

表 III-3 は、Kim 等(11)が 2011 年 3 月下旬に実施した 1080 名の小児甲状腺実測値から評価された甲状腺等価線量と我々の推計値の比較である。シナリオ 1 およびシナリオ 2 は、それぞれ 3 月 15 日の急性曝露と 3 月 15 日から甲状腺測定までの期間の均等慢性被ばくである。私たちの評価値は、シナリオ 1 により近い評価となっている。一方、水道水からの内部被ばくを考慮すると、いわき市および川俣町の評価値は、1~2 mSv 過大に評価している可能性もあるが、屋内退避や甲状腺取り込み率の不確実性幅を考慮すると、極めて整合性の高い評価結果となっている。

表 III-1. 【方法 2】による 1 歳児 ¹³¹I による甲状腺等価線量 (mSv)

	川俣町	川内村	葛尾村	田村市	伊達市	いわき市	広野町	相馬市
平均値	1.5	1.2	0.6	1.0	0.7	5.0	2.0	7.9
中央値	1.6	0.9	0.3	1.0	0.7	4.0	1.0	5.5
25%-tile	1.1	0.5	0.1	0.7	0.7	1.1	0.3	2.9
75%-tile	1.8	1.1	0.6	1.2	0.8	7.9	2.5	13.6
95%-tile	2.3	3.6	2.2	1.8	0.9	13.8	8.5	15.2
新地町	大熊町	富岡町	楡葉町	双葉町	浪江町	南相馬市		飯館村*
						小高区	原町区・鹿島区	
7.7	4.2	1.3	2.6	6.1	4.2	9.8	5.1	9.5
9.2	1.1	0.8	1.7	1.6	1.1	9.7	3.5	7.7
3.7	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	6.6	2.8	1.9
11.3	4.7	1.5	4.0	4.2	4.7	12.2	4.6	17.4
12.7	19.0	6.8	8.8	24.0	19.0	19.7	22.8	20.2

*水道水利用による経口被ばくと吸入被ばくの合計値

表 III-2. 【方法 2】による 1 歳児 短半減期核種 (^{131}I , $^{132}\text{I}/^{132}\text{Te}$, ^{133}I) による甲状腺等価線量 (mSv)

	川俣町	川内村	葛尾村	田村市	伊達市	いわき市	広野町	相馬市
平均値	1.6	1.3	0.6	1.1	0.7	5.2	2.2	9.3
中央値	1.7	0.9	0.3	1.0	0.7	4.1	1.0	7.1
25%-tile	1.2	0.5	0.1	0.8	0.7	1.2	0.3	4.5
75%-tile	1.9	1.2	0.6	1.3	0.8	8.1	2.7	15.3
95%-tile	2.5	3.7	2.3	1.9	0.9	14.1	9.2	16.7
新地町	大熊町	富岡町	檜葉町	双葉町	浪江町	南相馬市		飯舘村*
						小高区	原町区・鹿島区	
9.0	5.9	1.4	2.8	9.1	5.9	14.9	6.7	9.8
10.7	1.3	0.8	1.8	1.8	1.3	15.3	5.2	8.1
5.0	0.5	0.4	0.5	0.6	0.5	10.5	4.4	1.9
12.7	5.8	1.7	4.3	5.1	5.8	19.3	6.6	17.9
14.1	29.6	6.9	9.5	37.9	29.6	26.9	24.3	20.7

*水道水利用による経口被ばくと吸入被ばくの合計値

表 III-3. 5 歳児の甲状腺実測値に基づく ^{131}I -甲状腺等価線量(mSv)と【方法 2】による ^{131}I -甲状腺等価線量(mSv)の比較

	いわき市			川俣町			飯舘村**		
	Kim et al. (N=48)		本研究	Kim et al. (n=333)		本研究	Kim et al. (n=99)		本研究
	シナリオ 1	シナリオ 2		シナリオ 1	シナリオ 2		シナリオ 1	シナリオ 2	
25th パーセントाइル	0*	0*	1.2 [§]	0*	0*	3.1 ^{&}	0*	0*	1.5
中央値	5	2.6	6.0 [§]	0*	0*	3.7 ^{&}	7.3	3	7
75th パーセントाइル	10.6	5.2	9.8 [§]	5.9	2.7	4.2 ^{&}	14.7	11.9	14

*Kim らの報告(11)の 0 mSv は、測定が行われた 2011 年 3 月下旬にバックグラウンドの線量率が高かったこともあり、甲状腺の ^{131}I 活性が検出限界以下であったことを意味しており、必ずしも被ばくがなかったことを意味している訳ではない。

§ いわき市では、水道水からの経口被ばくによる甲状腺等価線量が平均 2.0 mSv 追加される、

& 川俣町では、水道水からの経口被ばくによる甲状腺等価線量が平均 2.5mSv 追加される

**飯館村の甲状腺等価線量は、個人毎に吸入被ばくと居住地区の水道水からの経口被ばくを合算した甲状腺等価線量である

III-2. 行動調査票ベースの線量評価における不確実性

UNSCEAR2020 では、Terada 等のソースタームと WSPEEDI で用いた大気拡散シミュレーションを使い、代表的避難シナリオに関しては、Ohba 論文で提唱した避難地区 7 市町村毎 4~5 避難シナリオを採用している。ここまでは我々と共通である。一方、①時間帯の扱いおよび②行動調査票の緯度経度情報の取り扱いが違っている。UNSCEAR は、移動の開始時間を常に 6 時間ステップの開始時間（例えば 3 月 12 日 12:00 あるいは 18:00）とし、移動中の居場所を【方法 3】と同じく出発地から目的地まで一時間毎に居場所を按分し、一時間毎の ^{131}I 濃度を用いて線量を積算している。一方、私たちは、既に述べたように Ohba 論文では 6 時間ステップの滞在時間の多い居場所の 6 時間の平均 ^{131}I 濃度を使って線量を積算した。今回、【方法 2】【方法 3】では、行動調査票通りの出発時間を採用し、【方法 2】では移動時間を折半し、移動前と移動先の ^{131}I 濃度を一時間毎積算しており、一方【方法 3】では、移動中の緯度経度を 1 時間毎按分し、それぞれの緯度経度に対応した ^{131}I 濃度を使って線量を積算している。③また UNSCEAR は、短半減期核種の線量寄与の計算法に関しても私たちと異なっている。さらに、④移動中の屋内退避の防護係数に関して、我々は乗用車の内循環モード時の換気率が外気導入運転時の十分の一に減少することより、建造物の屋内退避防護効果と同じ吸入被ばく低減係数を用いている。一方、UNSCEAR2020 では、自動車での避難途中は外気を吸入していたとして、低減係数を適用していない。④に関しては、自動車の空気質に関する文献より、車室内換気量は停車中も走行中も外気導入モードに比して内気循環モードで約 1/10 に下がること、PM2.5 の粉塵や超微粒子の車室内濃度も内気循環モードでは外気導入モード時の約 40%に低下すると報告されていることより(12)。自動車での避難は屋内退避と同等のプルームからの吸入被ばく低減効果があると考えて良いと思われる。

行動調査票の移動時間や移動経路の取り扱いによる線量への影響を検討するために、【方法 1】代表的避難シナリオ毎に Ohba 論文の 6 時間ステップ+152 代表地点による評価法、【方法 2】、【方法 3】で計算した吸入被ばく ^{131}I -甲状腺等価線量と UNSCEAR2020 の Table A-22.4 の ^{131}I -吸入被ばくによる甲状腺吸収線量の平均値を比較検討した。多くの避難シナリオで私たちと UNSCEAR の評価値に大きな差異はない。一方、青でハイライトしたシナリオは、私たちの評価値が UNSCEAR より 1.5 倍以上高かった避難シナリオ、肌色でハイライトしたシナリオは、UNSCEAR の評価値が私たちの評価値より 1.5 倍以上高かった避難シナリオである。例えば、FT2 や FT4 および FT5 などの避難シナリオでは、避難開始時刻を何処に設定するかで大きく異なる事が UNSCEAR 2020 報告書 Table A-22.5 で述べられており、その影響もあると思われる。違いが大きいシナリオは、3 月 12 日午後に浪江町や南相馬市に滞在しているシナリオであり、プルームとどの時間帯に遭遇したとするかにより、線量評価が違っていると思われる。一方、私たちの 3 種類の方法論は、お互いに齟齬がないことを強調しておく。

短半減期核種の寄与に関して、私たちと UNSCEAR の方法論は異なっており、それに関しては考察で触れることとする。

表 III-4 ¹³¹I- 1 歳児甲状腺線量：UNSCEAR2020 報告書と私たちの評価値の比較

線量比較	UNSCEAR 2020	Ohba 論文	方法 2	方法 3		線量比較	UNSCEAR 2020	Ohba 論文	方法 2	方法 3
避難シナリオ(利用率 %)	Table A-22.4 (mGy)	吸入被ばく ¹³¹ I-甲状腺等価線量 (mSv)				避難シナリオ(利用率 %)	Table A-22.4 (mGy)	吸入被ばく ¹³¹ I-甲状腺等価線量 (mSv)		
OK1 (29.0)	3.1	2.4	2	1.9		NM1 (16.0)	3.3	2.9	2.9	3.6
OK2 (40.0)	3.6	3	3.2	4.3		NM2 (6.0)	10.9	20.1	19.3	17.3
OK3 (7.0)	2.7	2.9	3.5	3.4		NM3 (55.0)	1	0.3	0.4	0.5
OK4 (19.0)	0.8	1	0.9	0.9		NM4 (7.0)	6.9	5	5.6	5.6
OK5 (16.0)	4.3	10.8	8.3	8.2		NM5 (16.0)	10.2	7	7.2	7.2
NR1 (11.2)	0.9	0.6	0.9	0.9		OD1 (6.3)	25.7	16	19.8	19.8
NR2 (34.7)	3.3	4	3.4	3.4		OD2 (9.6)	0.1	8.2	7.7	7.1
NR3 (6.1)	7.7	10.1	9.4	9.4		OD3 (6.2)	0.2	0.1	0.4	0.4
NR4 (44.9)	0.3	0	0.3	0.3		OD4 (71.5)	18.9	10.2	10.4	10.3
NR5 (3.1)	4.5	4.3	6	6.4		OD5 (6.3)	10.7	20.3	20	17.5
TM1 (18.0)	0	0	0.3	0		HK1 (80.5)	3.3	2.9	3.1	3.1
TM2 (8.0)	1.6	1.5	1.7	1.7		HK2 (6.8)	0.5	0.4	2.5	2.1
TM3 (69.0)	1.2	0.7	0.9	0.9		HK3 (3.8)	7.6	10.2	9.7	9.7
TM4 (5.0)	7.6	10.1	9.2	9.2		HK4 (8.9)	13.7	16	15.7	15.7
FT1 (72.6)	1.1	1.3	1.9	1.8		IT1 (30.0)	7.9	5.8	5.7	5.8
FT2 (6.1)	12.1	3.3	6.8	6.8		IT2 (24.0)	0.3	0.3	0.3	0.3
FT3 (6.1)	7.6	7.6	7.9	7.7		IT3 (25.0)	3.2	5.3	5.8	5.8
FT4 (6.1)	9.8	23.7	24.3	31.5		IT4 (21.0)	4	6.2	6.1	5.7
FT5 (9.1)	0.5	18.8	14.2	10.9						

IV. 考察

今回、先行調査で解析した避難地区 7 市町村に加えて、その周辺の 9 市町村の ¹³¹I-吸入被ばく線量および短半減期核種 (¹³¹I, ¹³²Te・¹³²I, ¹³³I) の平均値、中央値、25 パーセンタイル値、75 パーセンタイル値、95 パーセンタイル値を報告する事ができた。水道水からの内部被ばくに関しては、一部の自治体に関する解析ができていますが、全体像は最終年度に報告したい。私たちの評価値は、表 III-3 に示すように 1080 人の甲状腺実測に基づく線量評価と整合性が高く、信頼性は高い。短半減期核種の吸入被ばくによる甲状腺等価線量の平均値は、小高区の 14.9mSv を除くと全ての市町村で 10mSv 未満であり、95 パーセンタイル値で 30mSv を超すのは双葉町のみであった。最新の小児甲状腺がんのプール解析結果(13)を踏まえれば、東電福島第一原発事故により環境に

拡散した放射性物質の影響による甲状腺等価線量は低く、甲状腺がんが増加する可能性は極めて低いと思われる。

大気拡散シミュレーション (ATDM) である WSPEEDI に基づく線量評価は、不確実性を伴う。しかし、大気拡散シミュレーションそのものの不確実性は、私たちにはコントロールできないため、最終的な甲状腺等価線量の評価値が実測値からの評価値とどの程度整合しているかどうかにより評価するしかない。そのためには、ATDM 以外の不確実性を少なくし、不確実性の幅を理解しておくことが重要である。今回、私たちは、行動調査票の避難開始時間や避難途上にどの場所の放射性プルームを吸入していたかに関する解釈により、どの程度線量評価が変わるかを検討した。表 III-4 は、同じ WSPEEDI_2019DB を使い、同じ避難シナリオを使って UNSCEAR の手法を含め 4 種類の評価法で線量を評価したものである。3 月 12 日午後に浪江町や小高区、原町区を通過する避難パターンで UCSCEAR と我々の間で齟齬が認められた。既に Ohba 論文で私たちの評価と南相馬市小高区からの避難住民 (OD4 に近い避難パターン) の実測に基づく評価値に齟齬がないことを確認している。しかし、私たちの評価値が大きかったその他の避難パターンに関しては、十分なバリデーションがなされておらず、UNSCEAR と私たちのどちらの評価が実際に近いのかは判っていない。

短半減期核種の寄与に関しても、UNSCEAR2020 年報告書と私たちで違いがある。短半減期核種の寄与に関しては、私たちは先行研究で実施した衣服の核種分析結果を元に ^{131}I ベースの甲状腺等価線量に 3 月 12 日のプルーム、3 月 15~16 日のプルーム、3 月 18 日以降のプルームに分けて短半減期核種の寄与割合で補正する推計法を採用している。具体的には 3 月 12 日の午後に北に向かった放射性プルームの組成に関して、避難住民の汚染衣服データの核種解析より $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比を一律 2.4 と仮定し、また $^{133}\text{I}/^{131}\text{I}$ 比を一律 1.14 と固定した。一方、UNSCEAR は、WSPEEDI-2019DB の ^{132}Te (^{132}I) の濃度情報をそのまま使い、 ^{133}I に関しては 3 月 12 日 12:00 時点で $^{133}\text{I}/^{131}\text{I}$ 比=1.1 と仮定し、その後は物理的減衰に応じて比は減少するとした。 ^{133}I の減衰を私たちは考慮していないため、3 月 12 日の夜にプルーム曝露した南相馬市や相馬市においては、 ^{133}I による甲状腺線量が低下しているため数%過大評価になっている。一方、WSPEEDI-2019DB では、森口班の南相馬市原町の浮遊状粒子物質 (SPM) の $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比を重視し、ソースタームの段階で $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比を小さくとっている。その結果、3 月 12 日に南相馬市や相馬市、新地町に到達したプルームの $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比は小さくなっている (表 IV-1)。しかし、私たちの評価法では元々 $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ の線量寄与率は 1 歳児で 16%程度であるので、その寄与が 1/10 以下になったとしても、その影響は ^{133}I の減衰分を含めても 1 歳児の甲状腺等価線量が 20%程度の低下で収まっている。

一方、WSPEEDI の $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比の仮定に関しても不確実性が残っている。原子炉内の $^{137}\text{Cs}/^{131}\text{I}$ 比や $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比は、燃料棒を装着してから核分裂を継続した経過時間により一義的に決まるが、炉内ではガス状であった核種は炉外に漏れ出すと沸点の違い (ヨウ素 184.3°C vs. セシウム 671°C vs. テルル 988°C) により固化 (他の非放射性粒子への付着) や水への溶解スピードが変わるため、存在比は変わっていく。急激に温度変化をもたらす湿性ベント操作では、ガス状の放射性核種が放出されやすく、高温のまま炉から漏れ出した場合であっても沸点の高い核種ほど環境中の粒子等に付着するスピードが早い。このため、 $^{137}\text{Cs}/^{131}\text{I}$ 比や $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比は炉内より小さくなる。一般

的には、遠方になればなるほどこれらの比は小さくなる。さらに複雑なのは、ヨウ素はガス状の元素ヨウ素と有機化ヨウ素および粒子型の 3 形態をとるため、衣服に付着した核種の分析結果は大気中の核種組成そのものではないし、SPM モニタリングのフィルター上に残っていた核種から計算された $^{137}\text{Cs}/^{131}\text{I}$ 比も大気中の核種組成そのものではない。SPM のフィルターの解析では原町ステーションとそれより遠方の新地ステーションで一貫した傾向は認められておらず、前者より後者の方が $^{137}\text{Cs}/^{131}\text{I}$ 比は大きくなっていった。結論として 3 月 12 日に複数の核種組成のプルームが漏れ出ていた可能性が高く、短半減期核種の寄与の大きさに関しては不確実性が残っている。実際の短半減期核種の寄与は、UNSCEAR と私たちの評価の間にあるものと思われるが、上述したように私たちの手法であっても、過大評価の程度は 20%程度である。

表 IV-1. 甲状腺線量評価における $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比の仮定

日時	UNSCEAR2020/WSPEEDI_2019DB						Ohba 論文
	双葉町 広町	浪江町 役場	小高区 小高駅前	原町区 南相馬市市役所	相馬駅	新地町 新地	
2011/3/12/13:00	1.635886	1.704989	1.642902				2.4
2011/3/12/14:00	0.234166	1.74179	1.688866	1.696134			2.4
2011/3/12/15:00	0.84597	0.25448	0.780309	1.678543	1.77E+00		2.4
2011/3/12/16:00	0.258086	0.243617	0.666822	0.430369	1.65E+00	1.67E+00	2.4
2011/3/12/17:00	2.158452	1.264796	0.411788	0.91848	3.27E-01	1.61E+00	2.4
2011/3/12/18:00	2.137049	2.161094	0.468721	0.662157	6.22E-01	2.68E-01	2.4
2011/3/12/19:00		1.736871	0.451288	0.586576	5.09E-01	4.17E-01	2.4
2011/3/12/20:00		0.170848	0.368609	0.587648	5.07E-01	4.01E-01	2.4
2011/3/12/21:00		2.179248	2.110374	0.207335	4.56E-01	5.86E-01	2.4
2011/3/12/22:00		2.305844	2.04221	1.660225	4.72E-01	4.51E-01	2.4
2011/3/12/23:00		2.513218	2.124347	2.465321	2.12E+00	1.24E+00	2.4
2011/3/13/00:00		#DIV/0!	2.256866	2.504152	2.28E+00	2.00E+00	2.4

表のハイライト部分は、1 歳時の甲状腺等価線量が 1mSv を超えた時間帯

V. 結論

避難地区 7 市町村に加え、周辺 9 市町村の 1 歳児の吸入被ばく線量を評価した。私たちの方法論で推計した ^{131}I -甲状腺等価線量は、1080 名の小児甲状腺実測値から評価された甲状腺等価線量の分布と整合性が高く、短半減期核種の吸入被ばくによる甲状腺等価線量の平均値は、小高区の 14.9mSv を除くと全ての市町村で 10mSv 未満であり、95 パーセンタイル値で 30mSv を超すのは双葉町のみであった。線量が低いことより、東電福島第一原発事故により環境に拡散した放射性

物質の影響で甲状腺がんが増加する可能性は極めて低いと思われる。

VI. 次年度以降の計画

当面ソースタームの改定は予定されておらず、従って ATDM による放射性ヨウ素等の大気中濃度の再評価も予定されていない。そこで、令和 3 年度（最終年度）の研究では、避難地区周辺市町村の線量評価結果とその不確実性の解析を進め、論文化を目指す。吸入線量と経口摂取線量の合算を個人ベース行えるように python プログラムを作成し、将来の個人線量をベースとした疫学研究のための基盤を確立する。

VII. この研究に関する現在までの研究状況、業績

ア) 論文・雑誌等

- 1) Hirakawa S, Yoshizawa N, Murakami K. et. al.: Surveys of food intake just after the nuclear accident at the Fukushima Daiichi nuclear power station. *Shokuhin Eiseigaku Zasshi*, 58(1): 36-42, 2017.
- 2) Ohba T, Hasegawa A, Kobayakawa Y, Kondo H, et al.: Body-surface contamination levels of residents under different evacuation scenarios after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Health physics* 117(3): 175-182, 2017.
- 3) Kawai M, Yoshizawa N, **Suzuki G.**: ¹³¹I dose estimation from intake of tap water in the early phase after Fukushima Daiichi Power Plant accident. *Radiation Protection Dosimetry*, 179: 43-48, 2017. Doi:10.1093/rpd/ncx208.
- 4) Miyatake H, Yoshizawa N, **Suzuki G.**: ESTIMATION OF EFFECTIVE DOSE FROM EXTERNAL EXPOSURE DUE TO SHORT-LIVED NUCLIDES IN THE PREFECTURES SURROUNDING FUKUSHIMA. (14) *Radiation Protection Dosimetry*, 2018;182(3):370-6, doi:10:1093/rpd/ncy075.
- 5) Ohba T, Hasegawa A. and **Suzuki G.**: Estimated thyroid inhalation doses based on body surface contamination levels of evacuees after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. *Health Physics*, 117 (1): 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000990>.
- 6) H. Miyatake, M. Kawai, K. Murakami, et al.: Estimation of internal dose from tap water after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident using newly obtained data. *J. Radiat. Res.* 61(2):231-236 (2020) <https://doi.org/10.1093/jrr/rrz089>

- 7) T. Ohba, T. Ishikawa, H. Nagai, et al.: Reconstruction of residents' early internal doses after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *Sci. Rep.* (2020) 10:3639 / <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60453-0>
- 8) **Suzuki G.** Communicating with residents about 10 years of scientific progress in understanding thyroid cancer risk in children after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident. *J.Rad.Res.* 62 (Suppl.1) i7-i14 (2021). Doi: 10,1093/jrr/rrea097.

イ) 学会発表等

- 1) なし
- 2)

ウ) 書籍・総説

- 1) 滝澤真理、義澤宣明、河合理城、宮武裕和、平川幸子、村上佳菜、佐藤 理、高木俊治、鈴木 元 「福島第一原発事故後の食品からの内部被ばく線量の考察」安全工学 55(1): 26-33, 2016
- 2) 宮武裕和、義澤宣明、河合理城、平川幸子、滝澤真理、村上佳菜、佐藤 理、高木俊治、鈴木 元 「福島第一原発事故後の栃木県内の外部被ばく線量評価」安全工学 55(2): 101-106, 2016
- 3) 鈴木元 「福島の環境汚染—過去、現在、そして未来」 エネルギーレビュー 2017 2: 38-41
- 4) 鈴木 元 「福島住民における甲状腺被ばく線量推計の方法論・現状と課題」 公衆衛生情報 48(9): 6-7, 2018
- 5) 鈴木 元 「原子力のいまと明日」 (日本原子力学会編) 第6章分担 「6.1 事故による放射線の健康影響」 pp. 126-136 , 丸善出版、東京, 2019. 3
- 6) 鈴木 元 「放射線医学の事典」 (日本影響学会編) 分担執筆 「1.9 福島原発事故による環境汚染と健康影響」 (朝倉書店、2019. 10, 東京)
- 7) 鈴木 元 「東電福島第一原発事故後の小児甲状腺被ばく線量の再評価—UNSCEAR2013年報告書より大幅に低くなる」 ISOTOPE NEWS 2021(2): 773, 40-43.

エ) 受賞

- 1) なし
- 2)

オ) 特許

- 1) なし
- 2)

カ) 環境行政への活用・貢献実績

- 1) UNCEAR2020 年報告書の線量評価に貢献
- 2) 福島県民健康調査の甲状腺がん疫学調査（症例対照研究研究計画）に貢献

VIII. 引用文献

1. Terada H, Nagai H, Tsuduki K, et al. Refinement of source term and atmospheric dispersion simulations of radionuclides during the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. *J Environ Radioact.* 2020;213:106104.
2. ICRP. ICRP PUBLICATION 71. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4. Inhalation Dose Coefficients.
3. Hirouchi J, Takahara, S., Komagamine, H., et al. Factors affecting the effectiveness of sheltering in reducing internal exposure. *ASTRAM2017-1001*, 2017.
4. Hirouchi J, Takahara, S., Komagamine, H., et al.. Investigation of reduction factor of internal exposure for sheltering in Japan. 2018.
5. Kudo T, Inano A, Midorikawa S, et al. Determination of the Kinetic Parameters for ¹²³I Uptake by the Thyroid, Thyroid Weights, and Thyroid Volumes in Present-day Healthy Japanese Volunteers. *Health Phys.* 2020;118(4):417-26.
6. Ohba T, Ishikawa T, Nagai H, et al. Reconstruction of residents' thyroid equivalent doses from internal radionuclides after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *Sci Rep.* 2020;10(1):3639.
7. Ohba T, Hasegawa A, Kohayagawa Y, et al. Body Surface Contamination Levels of Residents under Different Evacuation Scenarios after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Health Phys.* 2017;113(3):175-82.
8. Hirakawa S, Yoshizawa N, Murakami K, et al. Surveys of Food Intake Just after the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. *Shokuhin Eiseigaku Zasshi.* 2017;58(1):36-42.
9. Kawai M, Yoshizawa, N., Suzuki, G. ¹³¹I Dose estimation from intake of tap water in the early phase after Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Radiat Prot Dosimetry.* 2017.
10. Miyatake H, Kawai M, Yoshizawa N, et al. Estimation of internal dose from tap water after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident using newly obtained data. *J Radiat Res.* 2020;61(2):231-6.
11. Kim E, Yajima K, Hashimoto S, et al. Reassessment of Internal Thyroid Doses to 1,080 Children Examined in a Screening Survey after the 2011 Fukushima Nuclear Disaster.

- Health Phys. 2020;118(1):36-52.
12. 岩下剛. 自動車車室内の空気質の知覚に関する基礎的検討. J.Japan Association on Odor Environment. 2011;42(6):413-9
 13. Lubin JH, Adams MJ, Shore R, et al. Thyroid Cancer Following Childhood Low-Dose Radiation Exposure: A Pooled Analysis of Nine Cohorts. J Clin Endocrinol Metab. 2017;102(7):2575-83.
 14. Miyatake H, Yoshizawa, N., Suzuki, G. Estimation of effective dose from external exposure due to short-lived nuclides in the prefectures surrounding Fukushima. Radiat Prot Dos. 2018.

Estimation of doses in the early phase of accident utilizing a spatiotemporal radionuclides' distribution database by atmospheric transport, diffusion and deposition model simulation and the evacuation patterns of residents.

Gen Suzuki

International university of Health and Welfare Clinic ・ Director and Professor

Key word: thyroid dose, ATDM simulation, Fukushima Daiichi Nuclear Plant Accident, personal behavioral record

Abstract

A large amount of radionuclide such as ^{131}I , ^{132}Te , ^{132}I , and ^{133}I was released into the environment after the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS) accident in March 2011. As these radionuclides tend to accumulate in the thyroid gland, Fukushima residents are concerned about the risk of thyroid cancer in their children. However, the measurements of ^{131}I activities in the thyroid had not been systematically conducted in large scale, and the thyroid-dose distribution among children was not elucidated. Our research group have been conducting the dose reconstruction of thyroid doses using the spatiotemporal distribution database of radionuclides' density that was simulated by the World-wide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (WSPEEDI). In order to reflect the diverse behavioral patterns after the accident, 100 to 1000 whereabouts questionnaire sheets under 20-year-old residents were randomly selected from each 16 municipalities around the FDNPS, and the individual thyroid doses were estimated based on the latitude and longitude of their evacuation routes as a key to refer hourly ^{131}I concentrations (elemental-, particulate- and methylated-forms) at 1m height in the database from 12 March to 25 March 2011. Our work on 7 municipalities in the evacuation ordered area was published in January 2020 and contributed the update of dose reconstruction in 2020 by the United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR), UNSCEAR 2020 Report. In the present study, thyroid equivalent doses in 1-year-old children in 9 municipalities surrounding 7 municipalities in the evacuation ordered area were evaluated. Estimated ^{131}I -thyroid equivalent doses were consistent with those figures based on 1080 thyroid measurements in Iwaki city, Katsurao town and Iitate village in March 2011, which validated the appropriateness of our methodology. Mean thyroid equivalent doses in 1-year-old children from ^{131}I , ^{132}Te , ^{132}I and ^{133}I were less than 10 mSv except for 14.9 mSv in Odaka ward, Minamisoma city, and 95th percentiles more than 30 mSv was recorded only in Futaba town.

In the study, we evaluated 4 different modalities including UNSCEAR 2020 Report one to treat evacuation timing or route from a whereabouts questionnaire sheet that did not specified detailed information, and compared the doses by different modalities. The present analyses demonstrated the differences were not great.

避難行動データの多角的解析に基づく福島原発事故初期の 内部被ばく線量推計

栗原 治（量子科学技術研究開発機構）

研究要旨

最新の大気拡散シミュレーション及び再編した避難行動データを用い、東電福島第一原発事故初期における浪江町解析対象者の放射性プルームによるばく露状況を再現するとともに、 ^{131}I 及び ^{137}Cs の吸入摂取量を算定した。前年度の研究では、3月12日の避難行動が線量に影響する可能性があることを報告したが、本研究ではそれを裏付ける結果が得られた。 ^{131}I の吸入摂取による甲状腺等価線量は1歳児の90%頻度値で22 mSvであり、他の研究による推計値と同程度であったものの、12日15時地点の居場所により大きく線量が変わる結果となった（20 km 圏外の場合は8.1 mSv、20 km 圏内の場合は36.3 mSv）。 ^{137}Cs の推計値でも同様な傾向となったが、計算した ^{137}Cs 全身残留量は WBC 測定値を大幅に過小評価する結果となった。吸入摂取量比 ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$) については、いわき市から提供された WBC 測定データと同市の小児甲状腺被ばくスクリーニング検査データから導出し、その結果は4.2–4.3であった。その他、本研究では、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の再評価や今後の初期内部被ばく線量推計に活用するアーカイブデータの拡充を行った。

キーワード

福島第一原発事故	線量評価	初期内部被ばく
ヨウ素	セシウム	避難行動

研究協力者

石川 徹夫（福島県立医科大学）

飯本 武志（東京大学）

I. 研究目的

東京電力福島第一原発事故から10年が経過し、この間、国内外の専門家により、避難住民を含む一般公衆に対する事故由来の放射線被ばく線量の推計に関する研究が数多く行われてきた^{1,2)}。しかしながら、その大半は、事故発生から時間が経過した、いわゆる現存被ばく状況を対象とした研究であり、現在も課題とされている事故直後における放射性ヨウ素に代表される短寿命核種による内部被ばく線量の推計については、まだ大きな不確実性を残している。その理由は、線量推計の基礎となる事故初期の人及び環境（飲食物を含む）の実測データが十分に得られなかった

ことに加えて、個人の避難中の行動様式の多様性や複雑さによる。これまで研究代表者らは、限られた人の実測データ（甲状腺中ヨウ素測定やホールボディカウンタ（WBC）を用いた内部被ばく検査）を基礎として、大気拡散シミュレーション等を補完的に活用した初期内部被ばく線量の推計を行ってきた³⁻⁸⁾。2012 年度に環境省の委託研究の成果として研究代表者らが公表した線量推計値は、その後の研究においても概ね妥当であったことが示されつつあるものの^{9, 10)}、福島県内で現在でも継続されている甲状腺検査の結果の解釈、すなわち、甲状腺がんと放射線被ばくとの因果関係を科学的に示すために、より正確できめ細かい線量推計が望まれている。そこで、本研究では、研究代表者らの先行研究を発展させ、福島第一原発近傍の自治体住民の避難行動を多角的に解析するとともに、初期内部被ばくとの関連性を明らかにしてゆくことを目的とする。昨年度は、研究代表者らが先行研究で入手した避難行動データ等を解析目的に応じて加工し、その後の研究のためのアーカイブデータとして整理・集約した。今年度は、それらのデータを活用し、避難行動と内部被ばく線量との関係や大気拡散シミュレーションによる内部被ばく線量推計等に関する解析を行った。初期内部被ばく線量の正確な推計は、福島県民健康調査に有益な情報をもたらす他、将来の原子力災害への備えとして、効果的な公衆被ばく線量推計を検討する上での材料となり得る。

II. 研究方法

昨年度作成したアーカイブデータを利用した。詳細は昨年度の研究報告書¹¹⁾に記載のとおりである。今年度は、1 時間毎に再編した避難行動データと最新の WSPEEDI-II による大気拡散シミュレーション¹²⁾を用いた吸入による初期内部被ばく線量の推計を行うため、放射性プルームによる解析対象者のばく露状況を再現したマップを作成し、視覚的に検証を行えるようにした。WSPEEDI-II は対象核種の 1 時間毎の平均空気中濃度を出力するため、これに年齢に応じた 1 時間呼吸量を乗じて時間積分すれば吸入摂取量が得られる。WSPEEDI-II の計算出力は 2011 年 3 月 12 日から 3 月末日までである。また、解析対象者の避難行動データから各時刻（毎時）における居場所の緯度経度から、これに最も近い WSPEEDI-II の計算格子点の空気中濃度を抽出し、吸入摂取量の計算に用いた。解析対象者が移動中の場合は、出発地点と到着地点を結ぶ直線上を等速で移動したものと仮定した。さらに、屋内滞在時における防護効果を 0.5、それ以外は 1.0（防護効果なし）に設定した。その他、研究代表者らがいわき市から提供を受けた住民の WBC データを用い、研究代表者らの先行研究（Kim et al. 2016c）⁵⁾と同様な手法により、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の結果と併せて事故初期の¹³¹I と¹³⁷Cs の（吸入）摂取量比を導出した。

（倫理面への配慮）

甲状腺中ヨウ素または全身セシウムを対象とした人の実測値及び個人の避難行動データの本研究での利用については、研究代表者らが所属する量研及び福島医大の臨床研究審査委員会での承認を得ている（量研 13-011, 福島医大 1892）。研究目的外での利用、また、他機関への譲渡はしない。

III. 研究結果

1. 大気拡散シミュレーション及び避難行動データを用いた吸入被ばく線量の推定

昨年度の研究において、浪江町の解析対象者（約 1,600 名）の WBC 結果と避難行動データを解析したところ、福島第一原発 1 号機建屋の水素爆発を生じた 3 月 12 日 15 時 36 分の前後での居場所によって、 ^{137}Cs の検出率が顕著に異なることを見出した。具体的には、12 日 15 時の段階で、福島第一原発から 20km 圏外に避難したグループ（G1）と 20km 圏内に残留したグループ（G2）に避難行動データから分類した場合、前者の ^{137}Cs 検出率が約 20%（対象者は全体の約 8 割）であったのに対し、後者の ^{137}Cs 検出率が約 60%（対象者は全体の約 2 割）であった¹³⁾。この違いが 1 号機建屋の水素爆発により生じた放射性プルームによる影響であることを確認するため、WSPEEDI-II から出力された ^{131}I 及び ^{137}Cs の時系列大気中濃度マップデータと解析対象者の避難行動データを同時刻で突合し、それぞれの核種の吸入摂取量を算定した。 ^{137}Cs に関しては、解析対象者の WBC による体内残留量の計測値が得られているため、摂取から測定までの経過日数に応じて吸入摂取量を補正して比較を行った。

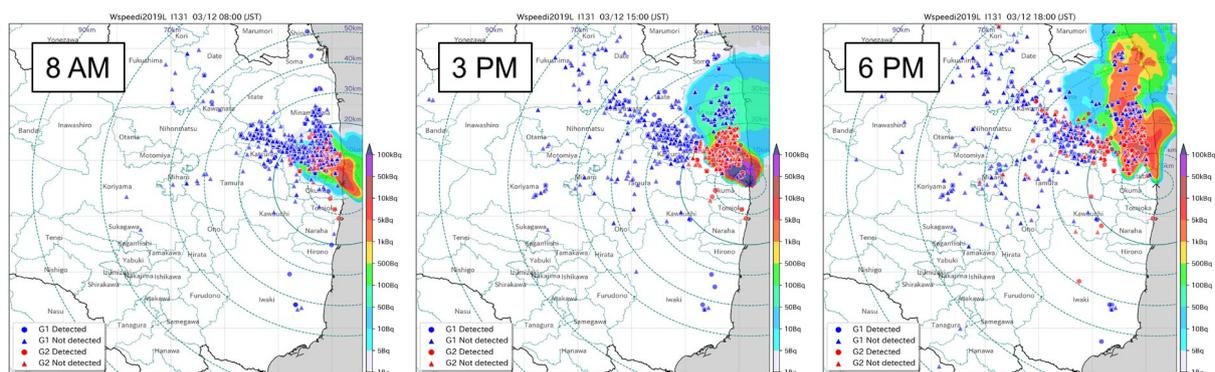


図 III-1 3 月 12 日の各時刻（左から午前 8 時、午後 3 時及び午後 6 時）における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青プロット：G1 グループ、赤プロット：G2 プロット）

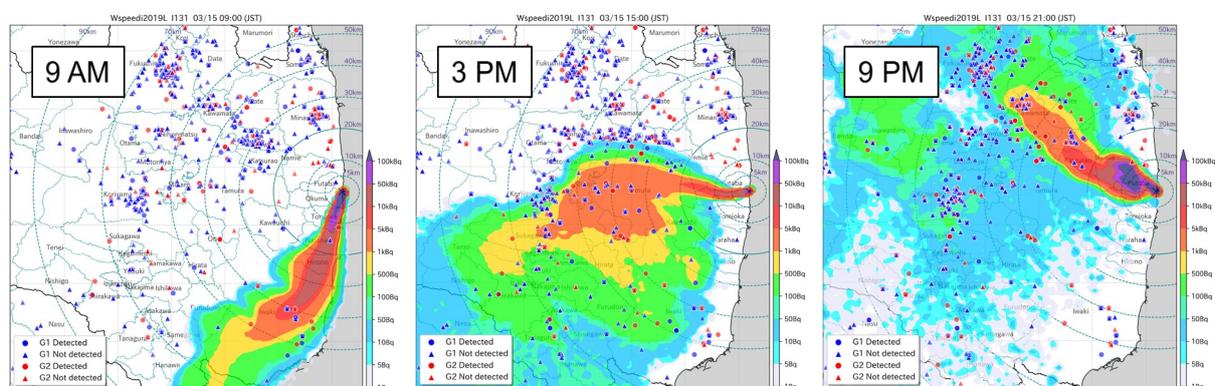


図 III-2 3 月 15 日の各時刻（左から午前 9 時、午後 3 時及び午後 9 時）における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青プロット：G1 グループ、赤プロット：G2 プロット）

図 III-1 及び図 III-2 は、地表高での ^{131}I 空気中濃度マップに解析対象者の滞在場所を同時刻で重ねた結果である。図 III-1 は 3 月 12 日、図 III-2 は 3 月 15 日の各表示時刻の結果であり、放射性プルームによるばく露状況を示している。（付録に 3 月 12 日、13 日、15 日、16 日、18 日、19 日、20 日、21 日の各時刻における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所を同時刻で重ねた結果を示す。）

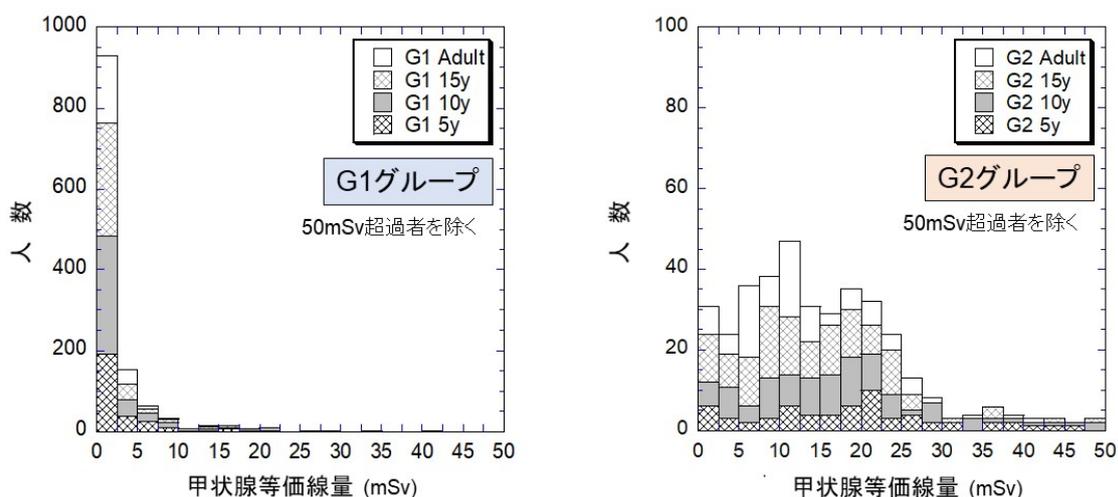


図 III-3 ^{131}I の吸入摂取による甲状腺等価線量の分布（左：G1 グループ、右 G2 グループ）
 図中の Adult（18 歳以上）、15y（13 歳以上～18 歳未満）、10y（8 歳以上～13 歳未満）、
 5y（3 歳以上～13 歳未満）は ICRP による各年齢グループ

表 III-1 ^{131}I の吸入摂取による甲状腺等価線量の分布（mSv）

	G1 グループ (1,245)				G2 グループ (376)			
	Adult	15y	10y	5y	Adult	15y	10y	5y
年齢 Gr	(217)	(363)	(386)	(279)	(91)	(125)	(98)	(62)
最大値	13.1	39.0	35.1	42.0	42.4	49.8	48.6	46.9
95%頻度値	5.3	14.1	9.8	13.4	26.6	26.8	39.6	38.7
90%頻度値	3.9	5.8	6.8	6.2	21.1	23.3	30.3	35.6
75%頻度値	2.2	2.1	2.5	4.1	17.6	18.5	21.9	24.6
中央値	0.7	0.8	0.9	1.1	11.2	11.7	16.4	18.0

※括弧内の数値は解析対象者数

図 III-3 及び表 III-1 には、G1 グループ及び G2 グループの ^{131}I の吸入摂取による甲状腺等価線量分布を示す。ただし、甲状腺等価線量が 50mSv を超えた 16 名（内 4 名は G1 グループ）については除外している。これらの結果から両グループの甲状腺等価線量には顕著な差があり、昨年度の研究と同様に、1 号機建屋の水素爆発による影響を示唆する結果となった。両 Gr の甲状腺等価線量の差は集団の最大値から中央値に低くなるほどに大きく、中央値では G2 グループが G1 グループの 10 倍以上となった。

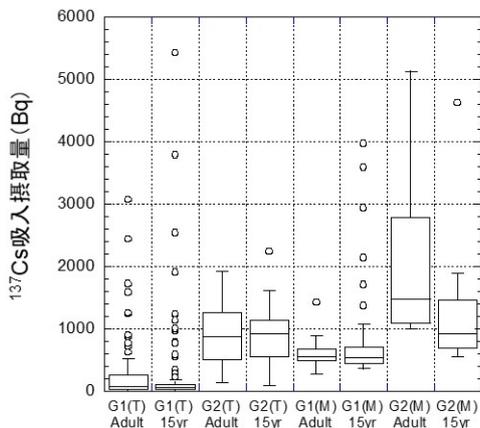


図 III-4 ^{137}Cs 吸入摂取量の分布（成人及び15歳）

Tは津島方面への避難者、Mは南相馬方面への避難者（図 III-5, 図 III-6 も同様）

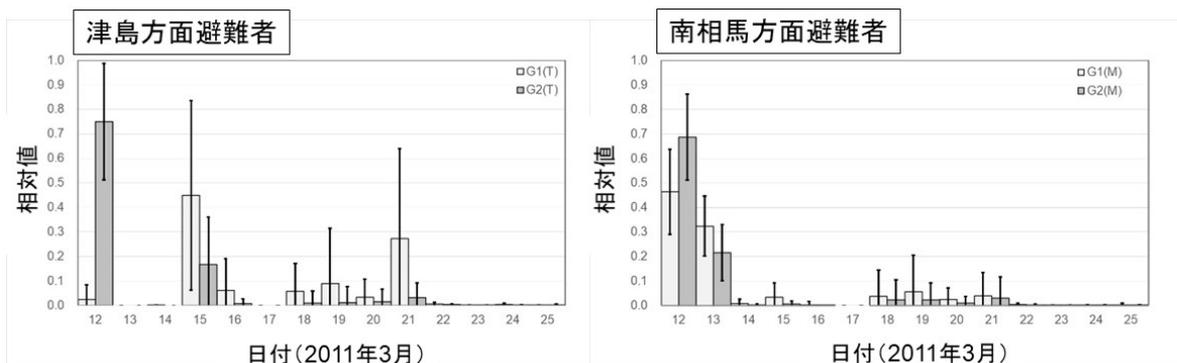


図 III-5 日毎 ^{137}Cs 吸入摂取量の相対値（成人及び15歳はまとめて解析，誤差バーは1σ）

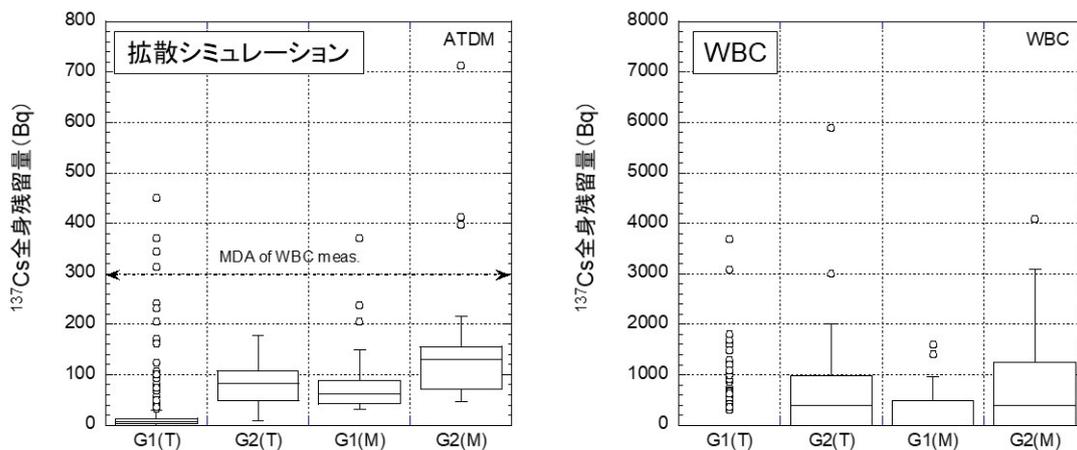


図 III-6 ^{137}Cs 全身残留量の分布（成人及び15歳はまとめて解析）

左：大気拡散シミュレーション，右：WBC

図 III-4 には大気拡散シミュレーションにより算出された ^{137}Cs 吸入摂取量の分布（成人及び 15 歳）を示した。ここでは、G1 及び G2 の各グループの内、津島方面または南相馬方面への避難者を抽出した。解析対象者は、G1 グループの津島方面と南相馬方面への解析対象者数が 231 名及び 64 名、G2 グループの津島方面と南相馬方面への解析対象者数が 37 名と 24 名（いずれも成人と 15 歳の合計）であった。その結果、G2 グループが G1 グループより吸入摂取量が多いことは ^{131}I と同様であるが、同一グループ間でも南相馬方面の避難者の方が大きい結果となった。図 III-5 には 2011 年 3 月 12 日から 3 月 25 日までの日毎の ^{137}Cs 吸入摂取量の相対値を各避難方面について比較した。同図から、津島方面避難者については、12 日の避難状況が同日の ^{137}Cs 吸入摂取量に大きく影響し、G2 グループでは 25 日までの総摂取量の約 7 割を 12 日のみで占める結果となった。他方、G1 グループでは 12 日の摂取は微量であり、15 日や 21 日の摂取の割合が相対的に大きくなる傾向となった。南相馬方面避難者については両グループの差異は比較的小さく、12 日に引き続き 13 日の摂取量も大きくなること示された。図 III-6 は、大気拡散シミュレーションにより得られた吸入摂取量を基に、測定日までの残留率を考慮して計算した ^{137}Cs 全身残留量の分布を WBC 測定値の分布と比較した。ここで、WBC 測定値については検出限界値（300 Bq 程度）があるために、未検出者が多い G1 グループについては中央値が決定できないことを注釈しておく。同図から各グループの分布形状は類似性がみられるものの、大気拡散シミュレーションから算出された ^{137}Cs 全身残留量は WBC 測定値を大幅に過小評価する結果となった（75%頻度値で比較すると前者は後者の 1~2 割程度）。

2. ヨウ素とセシウムの摂取量比

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の結果といわき市から提供を受けた同市住民の WBC 測定結果を用い、先行研究⁵⁾にならひ ^{131}I と ^{137}Cs の（吸入）摂取量比を導出した。導出方法を図 III-7 に示す。ここで導出に用いる WBC 測定結果を成人（18 歳以上）のみとしたのは、子どもについては ^{137}Cs （または ^{134}Cs ）の検出率が低く、全体の線量分布の把握や初期摂取量の評価が困難であったためである¹⁴⁾。なお、福島県住民の WBC 測定は事故発生から数カ月後以降に開始されたため、半減期の短い ^{131}I は既に検出できない状況であり、提供されたいわき市の WBC 測定結果は 2011 年 11 月から 2012 年 1 月末までに取得されたデータであった。小児甲状腺被ばくスクリーニング検査及び WBC 測定のデータ数はそれぞれ 134 名分と 793 名分（内、成人は 212 名分）であり、後者の年齢・性別構成は図 III-8 に示すとおりであった。

摂取量比は、それぞれの測定から評価された甲状腺等価線量（ ^{131}I 、子ども）と実効線量（ $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 、成人）の同一累積頻度値を比較することで導出される。図 III-9 に甲状腺等価線量と実効線量の累積頻度分布を、表 III-2 に導出した摂取量比（ $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ ）を示す。この結果、摂取量比は 4.2~4.3 となった。

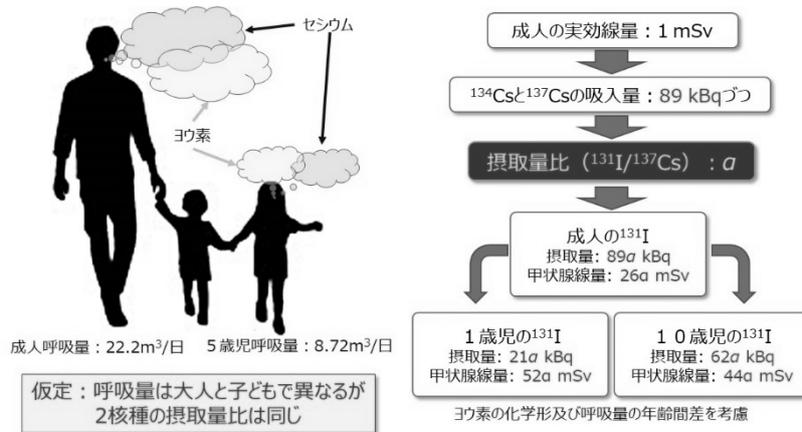


図 III-7 ヨウ素とセシウムの摂取量比の導出方法

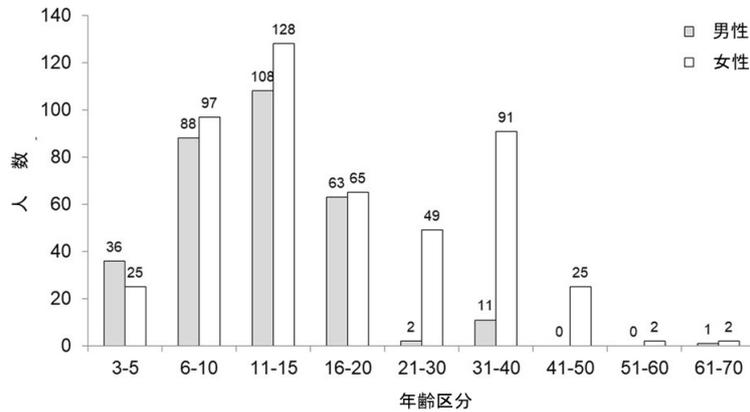


図 III-8 いわき市 WBC 被検者の年齢・性別構成

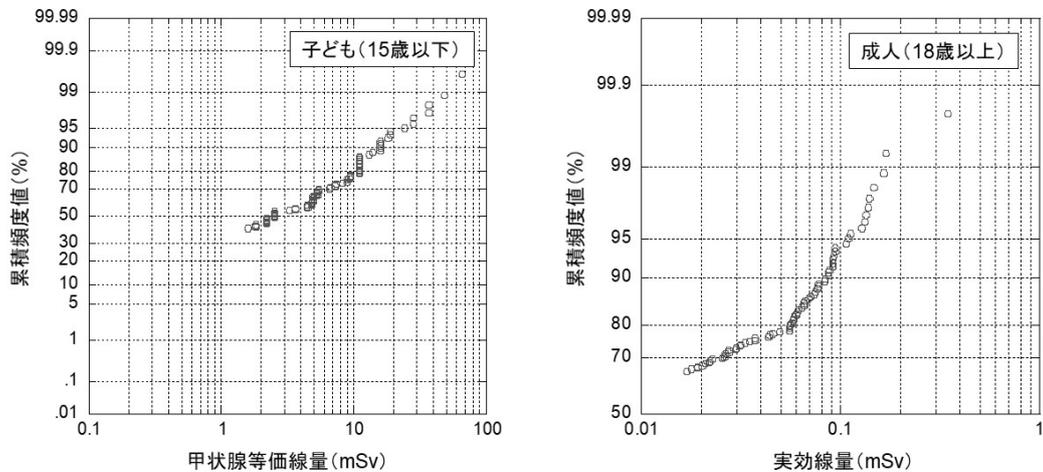


図 III-9 甲状腺等価線量（左）と実効線量（右）の累積頻度分布

表 III-2 甲状腺等価線量・実効線量の比較及び ¹³¹I/¹³⁷Cs 摂取量比

	被検者	80%頻度値	90%頻度値	95%頻度値
甲状腺等価線量 (mSv)	子ども ≤15 歳	10.6	15.9	20.9
実効線量 (mSv)	成人 ≥18 歳	5.69×10^{-2}	8.49×10^{-2}	1.09×10^{-1}
$^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 摂取量比		4.2	4.2	4.3

IV. 考察

1. 大気拡散シミュレーションによる初期内部被ばく線量推計

東電福島第一原発事故による住民の初期内部被ばく線量は、これに最も寄与する ^{131}I の実測値が乏しく、現時点でも正確な推計を困難なものとしている。一般公衆を対象とした ^{131}I の実測値は、国が行った小児甲状腺被ばくスクリーニング (1,080 件)¹⁵⁾、Tokonami らによる浪江町及び南相馬市からの避難住民を対象とした甲状腺測定 (62 件)¹⁶⁾、Matsuda らによる WBC を用いた長崎県での体外計測 (173 名)¹⁷⁾などを含めて 1,300 件程度しかない。そのため、基本的に吸入摂取のみが評価の対象となるが、大気拡散シミュレーションと避難行動データを用いた線量推計手法の可能性が示されれば大きな前進となる。

表 IV-1 には、複数の研究による浪江町住民 (1 歳児) の甲状腺等価線量の推計値を比較した結果を示す。本研究の推計値については該当する年齢群の解析対象者がいないため、10 歳グループの推計値に呼吸量と甲状腺等価線量係数の差異を補正したファクター (1.2) を乗じて 1 歳児の値とした。その結果、90%頻度値で 22 mSv (両グループ) となった。同表には、浪江町住民の代表的避難行動パターン (シナリオ 7 及び 13) を新旧の大気拡散シミュレーションを用いて計算した結果も示している。これらの推計値は研究間で条件が異なるため単純な比較はできないものの、本研究と同じ最新の WSPEEDI-II による大気拡散シミュレーションの結果を用いた Ohba et al (2020)¹⁰⁾の推計値と同程度となっている。ただし、本研究では WBC の実測値を有する個人の避難行動データを用いた推計値であるのに対し、Ohba らはランダムに抽出された避難行動データから代表的な行動パターンを作成し、それに基づいて屋内防護係数等の不確実性を考慮した推計を行っている。本研究では前述のとおり、12 日の避難行動の違いが線量に大きく影響する結果が得られている。新旧の大気拡散シミュレーションの違いによる線量推計の差異については、同一の避難行動パターンを用いて計算を行った。福島県住民の外部被ばく線量を推計する際に作成された各避難指示自治体の代表的避難行動パターンの内、シナリオ 7 とシナリオ 13 が浪江町住民に対するものである^{18, 19)}。いずれのシナリオも経路は同一であり、沿岸部の町中心部から津島地区を経由して二本松市に避難するものであるが、津島地区から二本松市に移動する時期が異なっている。先行研究⁴⁾では Terada et al (2012)²⁰⁾の大気拡散シミュレーションを用いて甲状腺等価線量を計算しており、その結果はシナリオ 7 で 91 mSv、シナリオ 13 で 104 mSv であったが、本研究で用いた Terada et al (2020)では評価地点の大気中濃度の大幅な減少により、それぞれ 25 mSv と 35 mSv となった。なお、これらの線量推定値は屋内防護係数を考慮していないため、いずれも過大評価が見込まれる結果である。その他、研究代表者らの別の先行研究の結果であるが、WBC 測定値と

摂取量比を用いて推計した結果は 20 mSv（90%頻度値）であった³⁾。また、Tokonami et al による浪江町及び南相馬市からの避難住民（0-9 歳）の実測値から評価された甲状腺等価線量は 21 mSv であった。

表 IV-1 浪江町 1 歳児甲状腺等価線量推計値（mSv）の比較

累積頻度	本研究			Kim et al	Kim et al	Kim et al	Ohba et al
	G1 グループ	G2 グループ	両グループ	(2016b) ⁴⁾ アップデート	(2016b) ⁴⁾	(2016a) ³⁾	(2020) ¹⁰⁾
95%頻度値	11.8	47.5	28.1	—	—	—	20 (5.0, 42) [‡]
90%頻度値	8.1	36.3	22.0	—	—	20	—
75%頻度値	2.9	26.3	8.1	—	—	—	—
中央値	1.0	19.7	1.6	—	—	—	0.8 (0.2, 1.7) [‡]
代表値	—	—	—	25 (S7) [†] 35 (S13) [†]	91 (S7) [†] 104 (S13) [†]	—	—

† 括弧内はシナリオナンバーを示す。

‡ 括弧内数値は 95 パーセント信頼区間

以上の結果から、最新の大気拡散シミュレーションによって、¹³¹I の甲状腺等価線量（吸入）については概ね妥当な推計値が得られると考えられる。しかしながら、¹³⁷Cs については WBC で実測された全身残留量を大幅に過小評価する結果となった（図 III-6）。この原因については未解明であるが、①WSPEEDI-II の大気中濃度の過小評価と②解析対象者の 2011 年 4 月以降の追加摂取の両方の可能性が考えられる。Terada et al (2020)による大気拡散シミュレーションは、初期のシミュレーション以降に取得された SPM 観測局のデータ、すなわち、大気中 ¹³⁷Cs 濃度の実測値を再現するようにソースタームや輸送・沈着スキーム等の最適化が図られている。そのため、大気拡散シミュレーションの精度は格段に向上したと考えられるものの、多くの住民が避難先として向かった福島県中通り地域において大気中 ¹³⁷Cs 濃度を過小評価する傾向が認められる（表 IV-2）。ただし、同地域では原発から距離があるために大気中濃度は低く、多少の摂取量の過小評価があったとしても、WBC 測定までの数カ月間（解析対象者の平均は 2011 年 3 月 12 日を起点として 155 日）で吸入摂取量の 1 割程度しか全身に残留しないことを踏まえると、その影響は小さいとも考えられる。すなわち、事故直後の ¹³⁷Cs 吸入摂取量が少なくとも 3,000 Bq 以上でないと、検出下限値が ~300 Bq である WBC では検出することはできない。大気拡散シミュレーションで算出した解析対象者の ¹³⁷Cs 吸入摂取量は、大半が 3,000 Bq 以下であった（図 III-4）。他方、追加摂取の可能性については、事故の急性期以降も地表に沈着した成分の再浮遊等で一時的に空気中濃度が上昇することはあるものの²¹⁾、吸入摂取量としては微量（~0.1 Bq/day）であったと考えられる。その

他、不溶性セシウムが存在や追加の経口摂取の可能性も検討したが、上記の原因は同定できなかった²²⁾。ただ重要な点としては、WBC 測定で検出されたセシウム全身残留量が追加摂取に起因するものであれば、12 日の避難行動の違いだけで分類した 2 グループのセシウム全身残留量に顕著な差異は生じないはずである。未検出者の割合が高いことから、WBC と大気拡散シミュレーションの双方の結果を直接比較すること自体が適当ではないが、両者の違いの原因をさらに調査する必要がある。

表 IV-2 2011 年 3 月 12 日から 22 日までの積算 ¹³⁷Cs 大気中濃度 (Bq m⁻³ h) の比較

	原町(南相馬市)	相馬市	新地	福島市	二本松市
WSPEEDI-II	7,450	3,900	3,830	80	20
SPM [†]	5,660	3,120	930	520±40 [‡]	950 [‡]

[†] 検出下限値以下は検出下限値の濃度として計算

[‡] 福島市は 4 か所の SPM 局があるため平均値と 1σ を表示

[‡] 3 月 12-14 日, 3 月 17-20 日は欠測

2. ヨウ素とセシウムの摂取量比

ヨウ素とセシウムの摂取量比の評価も初期内部被ばく線量推計には重要である。信頼性のある摂取量比が評価できれば、比較的件数の多い WBC 測定値から ¹³¹I による甲状腺等価線量を推定できる可能性があり、既に幾つかの報告もある^{5,6,24)}。事故が発生した 2011 年度の WBC 測定は、避難指示自治体の住民を対象に優先的に行われており、JAEA(日本原子力研究開発機構)では 2011 年 7 月上旬から 2012 年 1 月末までに 9,927 名を測定した¹⁴⁾。表 IV-3 には、人の測定値 (WBC 測定及び甲状腺測定) から導出したヨウ素とセシウムの摂取量比 (¹³¹I/¹³⁴Cs または ¹³¹I/¹³⁷Cs) に関するこれまでの報告値を比較した^{5,6,24-26)}。いずれの値も両同位体の大気中放出量の放射能比として推定されている値 (~10) と比較して低い傾向があり、その主な理由としては、日本人の甲状腺アップテークが線量係数等を算定するために ICRP が作成した標準人モデルで設定されている値 (0.3) よりも低いためと考えられた^{5,24)}。しかしながら、それを考慮しても、同表中の報告の幾つかは摂取量比がさらに低く評価されている。本研究の結果は 4.2~4.3 であり、同様な手法で評価した飯館村と川俣町の結果と比較して幾分高い数値となった。

摂取量比を低く評価する要因として、他には Cs 摂取量の過大評価の可能性が考えられる。自家用車での一時帰宅が開始された 2011 年 9 月以降、GM サーベイメータでは検知できない程度の着衣の汚染が WBC 測定の際に偽計数を生じることが頻発した²⁷⁾。そのため、その後の WBC 測定の際に、被検者に汚染のないガウンに着替えてもらう対策が施された。一方、いわき市については避難指示対象地域には該当せず、着衣の汚染による偽計数の影響は小さかったと予想される。経口摂取による Cs 摂取量の可能性も考えられる。すなわち、毎日 1 Bq の Cs の経口摂取が継続した場合、100 日後には約 100 Bq の全身残留量に達するため、WBC 測定値が検出限界値に近い場合には特に影響を受けやすくなる他、住民の WBC 測定において統一的に用いられた急性摂取シ

ナリオ（摂取日は 2011 年 3 月 12 日）によって摂取量を過大に評価し得る。こうした可能性は、事故の急性期から WBC 測定までの日数が経過するにつれて高くなると考えられるが、比較的早い段階で取得された人の測定値を用いて導出された摂取量比の報告の中には本研究よりも低い結果もある。

導出した摂取量比の不確実性の要因としては、前述のとおり、標準人モデルの体内動態パラメータや摂取シナリオの不確実性が大きいと予想される。前者に関して、Cs の生物学的半減期は日本人では標準人モデルよりも幾分短く（成人男性で約 90 日）で個人差も大きい^{28,29)}。また、成人女性は成人男性よりも生物学的半減期が 25–35%程度短く³⁰⁾、このことは本研究の解析対象者の Cs 検出率において、成人女性が 32.3%であったのに対し、成人男性が 52.5%（いずれも 18 歳以上で、¹³⁴Cs または ¹³⁷Cs のいずれかが検出された割合）であった結果と矛盾するものではないが、生物学的半減期の性差を考慮すれば、Cs が検出された成人女性の摂取量は急性摂取シナリオを過程するとさらに増加することになる。これまでの研究から、事故初期のヨウ素とセシウムの摂取量比は全般的に大気中濃度比よりも低かったことは確かであるように予想されるが、さらに調査が必要である。

表 IV-3 他研究で報告されたヨウ素とセシウムの摂取量比の比較

文献	¹³¹ I/ ¹³⁴ Cs または ¹³¹ I/ ¹³⁷ Cs	備考
Kim et al. Radiat. Prot. Dosim. (2016c) ⁵⁾	2.0–2.3（飯舘） 2.4–3.3（川俣）	小児甲状腺スクリーニング及び JAEA で行われた WBC（成人）から得られた 2 種類の線量分布を比較して導出。大半の WBC 測定は 2011 年 7 月から 8 月に行われた。
Kim et al. Health Phys. (2016d) ⁶⁾	3–5 (平均値: 3.8)	Tokonami らが行った甲状腺測定と放医研で行った WBC 測定の内、成人被検者について算出された ¹³¹ I 及び ¹³⁴ Cs の摂取量を 75, 90, 95% 頻度値で比較して導出。甲状腺測定は 4 月、WBC 測定は 7–8 月に実施。被検者は浪江町及び南相馬市の住民。
Morita et al. Radiat. Res. (2013) ²³⁾	0.89–40.32 (幾何平均値: 6.04)	福島県からの避難者及び福島県内の一時滞在者の WBC 測定において、 ¹³¹ I、 ¹³⁴ Cs、 ¹³⁷ Cs が同時に検出された被検者 49 名の体内残留量から評価。ヨウ素の物理化学的性状を粒子と仮定しているため、実際の性状を考慮すると摂取量比は 1.5 倍程度小さくなる。WBC 測定は長崎大学にてばく露後 2 週間以内に実施。
Hosoda et al. Environ. Inter. (2013) ²⁴⁾	0.1 –0.9 (幾何平均値: 0.2)	Tokonami らが 4 月に浪江町及び南相馬市の住民（避難者含む）に対して行った甲状腺測定において、 ¹³¹ I、 ¹³⁴ Cs、 ¹³⁷ Cs が同時に検出された被検者 5 名（全て成人）の体内残留量から評価。
Kurihara et al. Radiat. Prot. Dosim. (2016) ²⁵⁾	2.7–3.7	茨城県東海村にある JAEA 職員 3 名の甲状腺測定及び WBC 測定から評価。測定は 3 月中に実施。
Kim et al. Health Phys. (2020). 本研究 ²⁶⁾	4.2–4.3	Kim et al. RPD (2016c) と同様な方法で導出。いわき市の WBC は 2011 年 11 月から 2012 年 1 月末までに行われた。

V. 結論

最新の大気拡散シミュレーション及び個人の避難行動データを用いて、事故初期における放射性プルームによるばく露状況を再現するとともに、 ^{131}I と ^{137}Cs の吸入摂取量を算定し、それらの妥当性を考察した。浪江町住民の ^{131}I の吸入摂取による甲状腺等価線量の推定値は、先行研究の結果と同程度であり、1歳児の90%頻度値で22 mSvであった。また、Igarashi et al (2020)が報告した3月12日の避難行動が初期被ばくに影響を与えた可能性について、本研究でそれを裏付ける結果が得られた。ただし、WBC測定で取得された解析対象者の ^{137}Cs 全身残留量は、大きく過小評価する結果となった。いわき市から提供されたWBCデータを用い、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の結果と併せて同市の摂取量比は4.2~4.3と評価された。その他、2年間の本研究の成果として、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の再評価を報告するとともに⁸⁾、昨年度までに作成したアーカイブデータに大気拡散シミュレーションのマップ等を追加した（図V-1）。

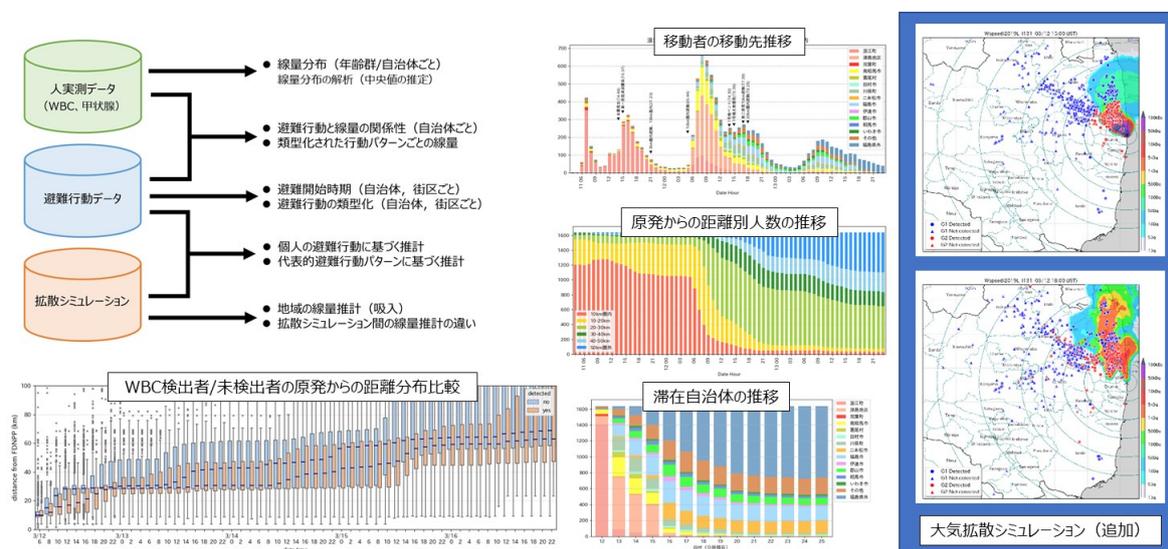


図 V-1 本研究で作成したアーカイブデータ

VI. 次年度以降の計画

次年度以降もこれまでの研究成果を基礎として、福島県住民の初期内部被ばく線量推計の精緻化に向けた研究を継続する（令和3年度 放射線健康管理・健康不安対策事業の研究課題に採択）。

VII. この研究に関する現在までの研究状況、業績

A. 論文：査読あり（先行研究分を含む）

- 1) Kim E, Kurihara O, Kunishima N, Momose T, Ishikawa T, Akashi M. Internal thyroid doses to Fukushima residents—estimation and issues remaining. J Radiat Res 57: i118–i126; 2016.
- 2) Kim E, Kurihara O, Tani K, Ohmachi Y, Fukutsu K, Sakai K, Akashi M. Intake ratio of ^{131}I to ^{137}Cs from thyroid and whole-body doses to Fukushima residents. Radiat Prot Dosim 168: 408–

- 418; 2016.
- 3) Kim E, Kurihara O, Kunishima N, Nakano T, Tani K, Hachiya M, Momomse T, Ishikawa T, Tokonami S, Hosoda M, Akashi M. Early intake of radiocesium by residents living near the TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant after the accident. Part 1: internal doses based on whole-body measurements by NIRS. *Health Phys* 111: 451–464; 2016.
 - 4) Kunishima N, Kurihara O, Kim E, Ishikawa T, Nakano T, Fukutsu K, Tani K, Furuyama K, Hashimoto S, Hachiya M, Naoi Y, Akashi M. Early intake of radiocesium by residents living near the TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant after the accident. Part 2: relationship between internal dose and evacuation behavior in individuals. *Health Phys* 112: 512–525; 2017.
 - 5) Kurihara O, Kim E, Kunishima N, Tani K, Ishikawa T, Furuyama K, Hashimoto S, Akashi M. Development of a tool for calculating early internal doses in the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident based on atmospheric dispersion simulation. *EPJ Web of Conferences* 153, 08007; 2017.
 - 6) Kim E, Yajima K, Hashimoto S, Tani K, Igarashi Y, Iimoto T, Ishigure N, Tatsuzaki H, Akashi M, Kurihara O. Reassessment of internal thyroid doses to 1,080 children examined in a screening survey after the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys* 118: 36–52; 2020.
 - 7) Igarashi Y, Kim E, Hashimoto S, Tani K, Yajima K, Iimoto T, Ishikawa T, Akashi M, Kurihara O. Difference in the cesium body contents of affected area residents depending on the evacuation timepoint following the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys* 119: 733–745; 2020.
 - 8) Kim E, Yajima K, Igarashi Y, Tani K, Hashimoto S, Nakano T, Akashi M, Kurihara O. Intake ratio of ^{131}I to ^{137}Cs derived from thyroid and whole-body doses to residents of Iwaki City in Japan's Fukushima Prefecture. *Health Phys* 120: 387–399; 2020.
 - 9) Kim E, Kurihara O. Thyroid doses in children from radioiodine following the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *J Radiat Prot Res* 45: 2–10; 2020.
 - 10) Kim E, Igarashi Y, Hashimoto S, Tani K, Ishikawa T, Kowatari M, Kurihara O. Estimation of the early ^{137}Cs intake of evacuees from areas affected by the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident using their personal behavioral data and the latest atmospheric transport and dispersion model simulation. *Health Phys* (accepted).

B. 論文：査読なし

なし

C. 国内学会発表

なし

D. 国際学会発表

なし

E. 著書

なし

F. 講演

- 1) 栗原治. 2011 年東京電力福島第一原発事故における緊急時個人モニタリングの経験. 大規模原子力事故における人と環境の放射線防護に関する ICRP-QST シンポジウム. 2019 年 10 月 25 日(東京).
- 2) Kurihara O. Experiences of individual monitoring for internal exposure in the 2011 Fukushima nuclear disaster. The joint workshop of QST-NIRS, CEA and IRSN. 28-29 October 2019 (Chiba).
- 3) Kurihara O. Experiences in the role of monitoring results in decision making Fukushima accident. IRPA 15. 20 January 2021 (online).
- 4) Kurihara O. Effective population monitoring for internal thyroid exposure to the public after a serious nuclear accident in Japan. The 16th conference of WHO-REMPAN meeting. 22-24 March 2021 (online).

G. 主催した研究集会

なし

H. 特許出願・取得

なし

I. その他

なし

VIII. 参考文献

- 1) Ishikawa T. Radiation doses and associated risk from the Fukushima nuclear accident: a review of recent publications. *Asia Pac J Public Health* 29 (Suppl 2): S18–S28; 2017.
- 2) Kurihara O. Review: external and internal dose assessments of Fukushima residents after the 2011 nuclear disaster. *J Natl Inst Public Health* 67: 11–20; 2018.
- 3) Kim E, Kurihara O, Kunishima N, Momose T, Ishikawa T, Akashi M. Internal thyroid doses to Fukushima residents—estimation and issues remaining. *J Radiat Res* 57: i118–i126; 2016a.
- 4) Kim E, Tani K, Kurihara O, Kunishima N, Sakai K, Akashi M. Estimation of early internal doses to Fukushima residents after the nuclear disaster based on the atmospheric dispersion simulation. *Radiat Prot Dosim* 171: 398-404; 2016b.

- 5) Kim E, Kurihara O, Tani K, Ohmachi Y, Fukutsu K, Sakai K, Akashi M. Intake ratio of ^{131}I to ^{137}Cs derived from thyroid and whole-body doses to Fukushima residents. *Radiat Prot Dosim* 168: 408–418; 2016c.
- 6) Kim E, Kurihara O, Kunishima N, Nakano T, Tani K, Hachiya M, Momomse T, Ishikawa T, Tokonami S, Hosoda M, Akashi M. Early intake of radiocesium by residents living near the TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant after the accident. Part 1: internal doses based on whole-body measurements by NIRS. *Health Phys* 111: 451–464; 2016d.
- 7) Kunishima N, Kurihara O, Kim E, Ishikawa T, Nakano T, Fukutsu K, Tani K, Furuyama K, Hashimoto S, Hachiya M, Naoi Y, Akashi M. Early intake of radiocesium by residents living near the TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant after the accident. Part 2: relationship between internal dose and evacuation behavior in individuals. *Health Phys* 112: 512–525; 2017.
- 8) Kim E, Yajima K, Hashimoto S, Tani K, Igarashi Y, Iimoto T, Ishigure N, Tatsuzaki H, Akashi M, Kurihara O. Reassessment of internal thyroid doses to 1,080 children examined in a screening survey after the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys* 118: 36–52; 2020.
- 9) Kim E, Kurihara O. Thyroid doses in children from radioiodine following the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant. *J Radiat Prot Res* 45: 2–10; 2020.
- 10) Ohba T, Ishikawa T, Nagai H, Tokonami S, Hasegawa A, Suzuki G. Reconstruction of residents' thyroid equivalent doses from internal radionuclides after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *Sci Rep* 10: 3639; 2020.
- 11) 栗原治. 避難行動データの多角的解析に基づく福島原発事故初期の内部被ばく線量推計. 環境省. 平成 31 年放射線健康管理・健康不安対策事業（放射線の健康影響に係る研究調査事業）報告書.
- 12) Terada H, Nagai N, Tsuduki K, Furuno A, Kadowaki M, Kakefuda T. Refinement of source term and atmospheric dispersion simulations of radionuclides during the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *J Environ Radioact* 213: 106104; 2020.
- 13) Igarashi Y, Kim E, Hashimoto S, Tani K, Yajima K, Iimoto T, Ishikawa T, Akashi M, Kurihara O. Difference in the cesium body contents of affected area residents depending on the evacuation timepoint following the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys* 119: 733–745; 2020.
- 14) Kurihara O, Li C, Lopez M A, Kim E, Tani K, Tani, Nakano T, Takada C, Momose T, Akashi, M. Experiences of population monitoring using whole-body counters in response to the Fukushima nuclear accident. *Health Phys*. 115, 259–274; 2018.
- 15) Kim E, Kurihara O, Suzuki T, Matsumoto M, Fukutsu K, Yamada Y, Sugiura N, Akashi M. Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. In: *Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident*. National Institute of Radiological Sciences. Chiba, Japan, July 2012. NIRS-M-252, 59–66; 2012.
- 16) Tokonami S, Hosoda M, Akiba S, Sorimachi A, Kashiwakura I, Balonov M. Thyroid doses for

- evacuees from the Fukushima nuclear accident. *Sci. Rep.* 2, 507; 2012.
- 17) Matsuda N, Kumagai A, Ohtsuru A, Morita N, Miura M, Yoshida M, Kudo T, Takamura N, Yamashita S. Assessment of internal exposure doses in Fukushima by a whole body counter within one month after the nuclear power plant accident. *Radiat. Res.* 179, 663–668; 2013.
 - 18) Akahane K, Yonai S, Fukuda S, Miyahara N, Yasuda H, Iwaoka K, Matsumoto M, Fukumura A, Akashi M. NIRS external dose estimation system for Fukushima residents after the Fukushima Dai-ichi NPP accident. *Sci Rep* 3:1670; 2013.
 - 19) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Levels and Effects of Radiation Exposure Due to the Nuclear Accident After the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami. UNSCEAR 2013 Report Annex A; 2014.
 - 20) Terada H, Katata G, Chino M, Nagai H. Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. Part II: Verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion. *J Environ Radioact* 112: 141–154; 2012.
 - 21) Akimoto K. Annual and weekly cycle of radioactivity concentration observed in Fukushima city. *Health Phys* 108(1): 32–38; 2015.
 - 22) Kim E, Igarashi Y, Hashimoto S, Tani K, Ishikawa T, Kowatari M, Kurihara O. Estimation of the early ^{137}Cs intake of evacuees from areas affected by the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident using their personal behavioral data and the latest atmospheric transport and dispersion model simulation. *Health Phys* (accepted).
 - 23) Morita N, Miura M, Yoshida M, Kumagai A, Ohtsuru A, Usa T, Kudo T, Takamura N, Yamashita S, Matsuda N. Spatiotemporal characteristics of internal radiation exposure in evacuees and first responders after the radiological accident in Fukushima. *Radiat. Res.* 180, 299–306; 2013.
 - 24) Hosoda M, Tokonami S, Akiba S, Kurihara O, Sorimachi A, Ishikawa, T, Momose T, Nakano T, Mariya Y, Kashiwakura I. Estimation of internal exposure of the thyroid to ^{131}I on the basis ^{134}Cs accumulated in the body among evacuees of the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *Environ. Inter.* 61, 73–76; 2013.
 - 25) Kurihara O, Nakagawa T, Takada C, Tani K, Kim E, Momose T. Internal doses to three persons staying 110 km south of the Fukushima Daiichi nuclear power station during the arrival of radioactive plumes based on direct measurement. *Radiat. Prot. Dosim.* 170, 420–424; 2016.
 - 26) Kim E, Yajima K, Igarashi Y, Tani K, Hashimoto S, Nakano T, Akashi M, Kurihara O. Intake ratio of ^{131}I to ^{137}Cs derived from thyroid and whole-body doses to residents of Iwaki City in Japan's Fukushima Prefecture. *Health Phys* 120: 387–399; 2020.
 - 27) Momose T, Takada C, Nakagawa T, Kanai K, Kurihara O, Tsujimura N, Ohi Y, Murayama T, Suzuki T, Uezu Y, Furuta S. Whole-body counting of Fukushima residents after the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident. In: Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. National Institute of Radiological Sciences. Chiba, Japan, July 2012. NIRS-M-252, 67–

- 82; 2012.
- 28) Uchiyama M, Nakamura Y, Kobayashi S. Analysis of body-burden measurements of ^{137}Cs and ^{40}K in a Japanese group over a period of 5 years following the Chernobyl accident. *Health Phys.* 71, 320–325; 1996.
- 29) Uchiyama M. Re-evaluation of the biological half-time of caesium in Japanese male adults. *J Environ Radioact.* 41, 83–94; 1998.
- 30) International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides – Part 1. ICRP Publication 56, Ann. ICRP 20(2), Pergamon Press; 1989.

Estimation of the early internal dose to the public following the Fukushima nuclear power plant accident based on multilateral analyses of evacuation behavior data

Dr. Osamu Kurihara

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

Key word: Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, dose estimation, early internal dose, iodine, cesium, evacuation behavior

Abstract

In the present work, we attempted to reproduce the situation of exposure to radioactive plumes by Namie town's study subjects at the early phase of the 2011 TEPCO's Fukushima Daiichi nuclear power plant accident by using the latest atmospheric transport and dispersion model (ATDM) simulation and the re-edited personal behavioral data and also calculated the inhalation intake amounts of ^{131}I and ^{137}Cs . We reported last year that the personal behaviors on 12 March, the next day of the accident, would greatly influence the dose and obtained the results to support this finding. The 90 percentile-thyroid equivalent dose of hypothetical 1-y-old children in Namie town was estimated as 22 mSv. This result was comparable to estimates by the other relevant studies; however, our result suggested that the dose would greatly vary with the subject's location as of 15:00 on 12 March (8.1 mSv for those who moved outside the 20-km radius of the plant and 36.3 mSv for those who stayed inside the 20-km radius of the plant). A similar trend was also found for the ^{137}Cs intake; however, the calculated ^{137}Cs residual whole-body contents for the subjects were considerably lower than those measured with whole-body counters (WBC). Regarding the intake ratio of ^{131}I to ^{137}Cs , we derived the ratio for Iwaki city's residents from their WBC data (adults) and direct thyroid measurement data (children), resulting in the value of 4.2–4.3. In addition, we published the results of the reassessment of the thyroid doses of 1,080 children who underwent screening campaigns and expanded archive data for future studies on the reconstruction of the early internal doses of Fukushima residents.

付録

図 A1 から図 A32 は、3 月 12 日、13 日、15 日、16 日、18 日、19 日、20 日、21 日の各時刻における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所を同時刻で重ねた結果である。青いプロットは G1 グループを、赤いプロットは G2 グループを示す。

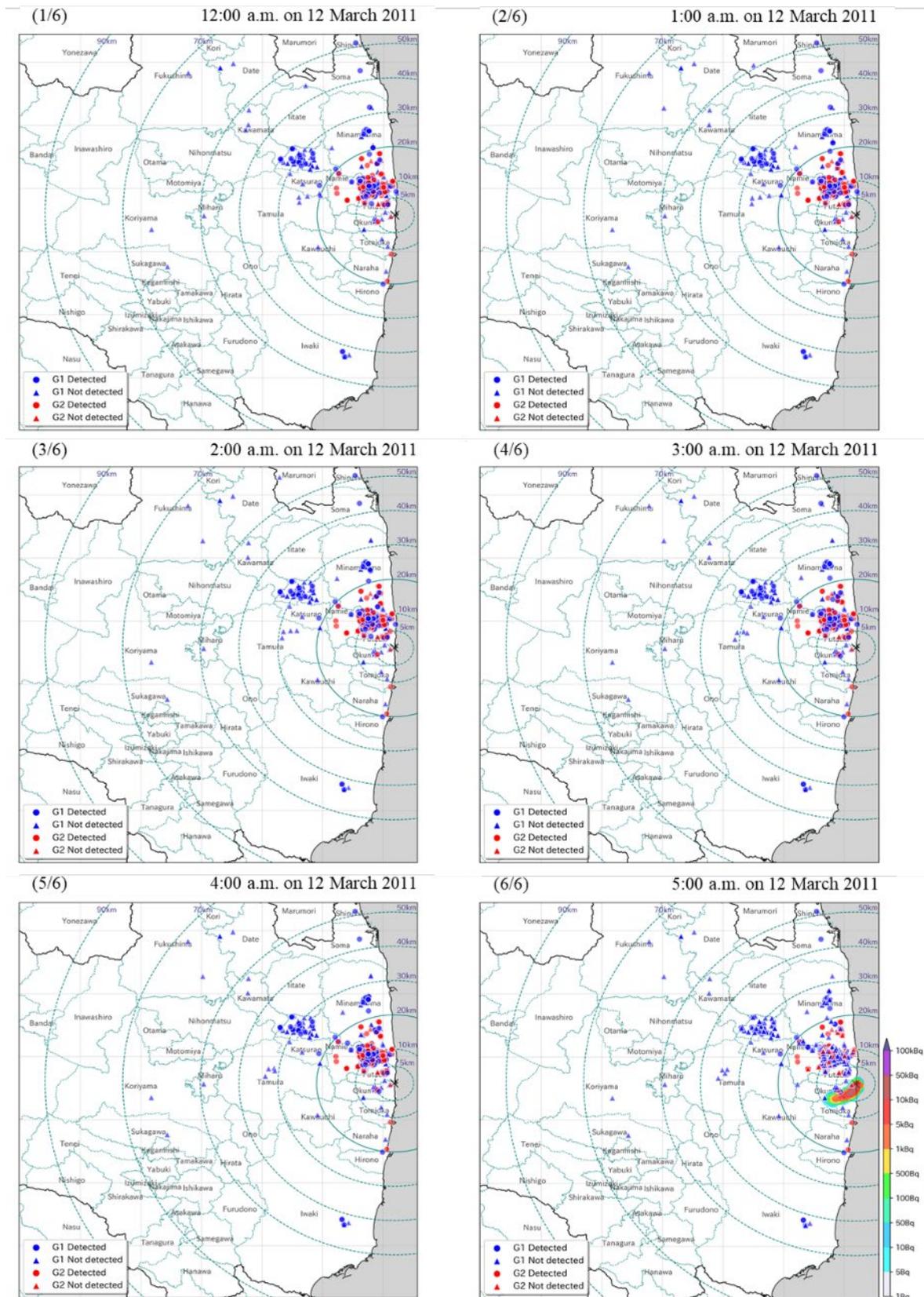


図 A1 3月12日0時(1/6), 1時(2/6), 2時(3/6), 3時(4/6), 4時(5/6), 5時(6/6)における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

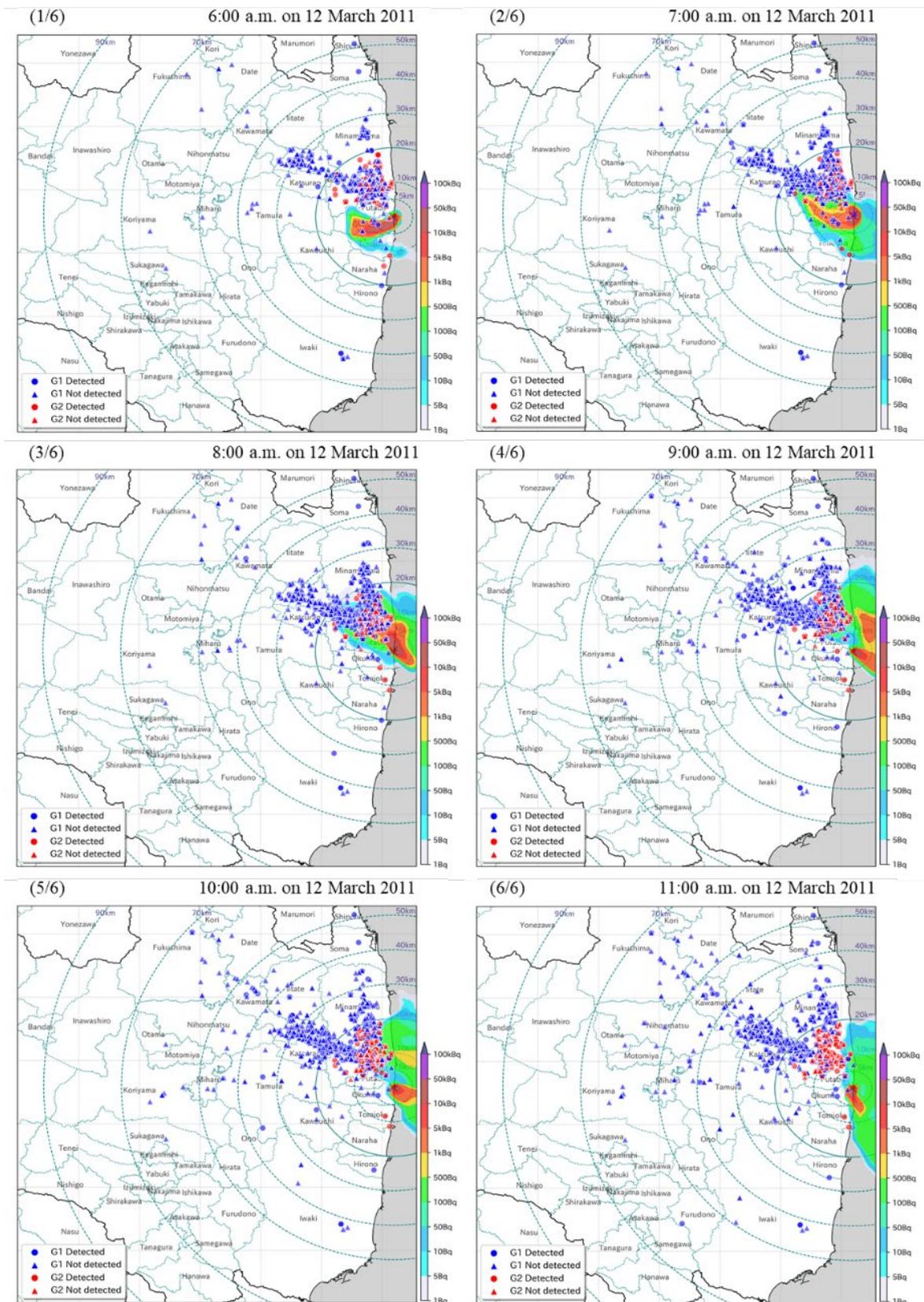


図 A2 3月12日6時(1/6), 7時(2/6), 8時(3/6), 9時(4/6), 10時(5/6), 11時(6/6)における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所 (青: G1 グループ, 赤: G2 グループ)

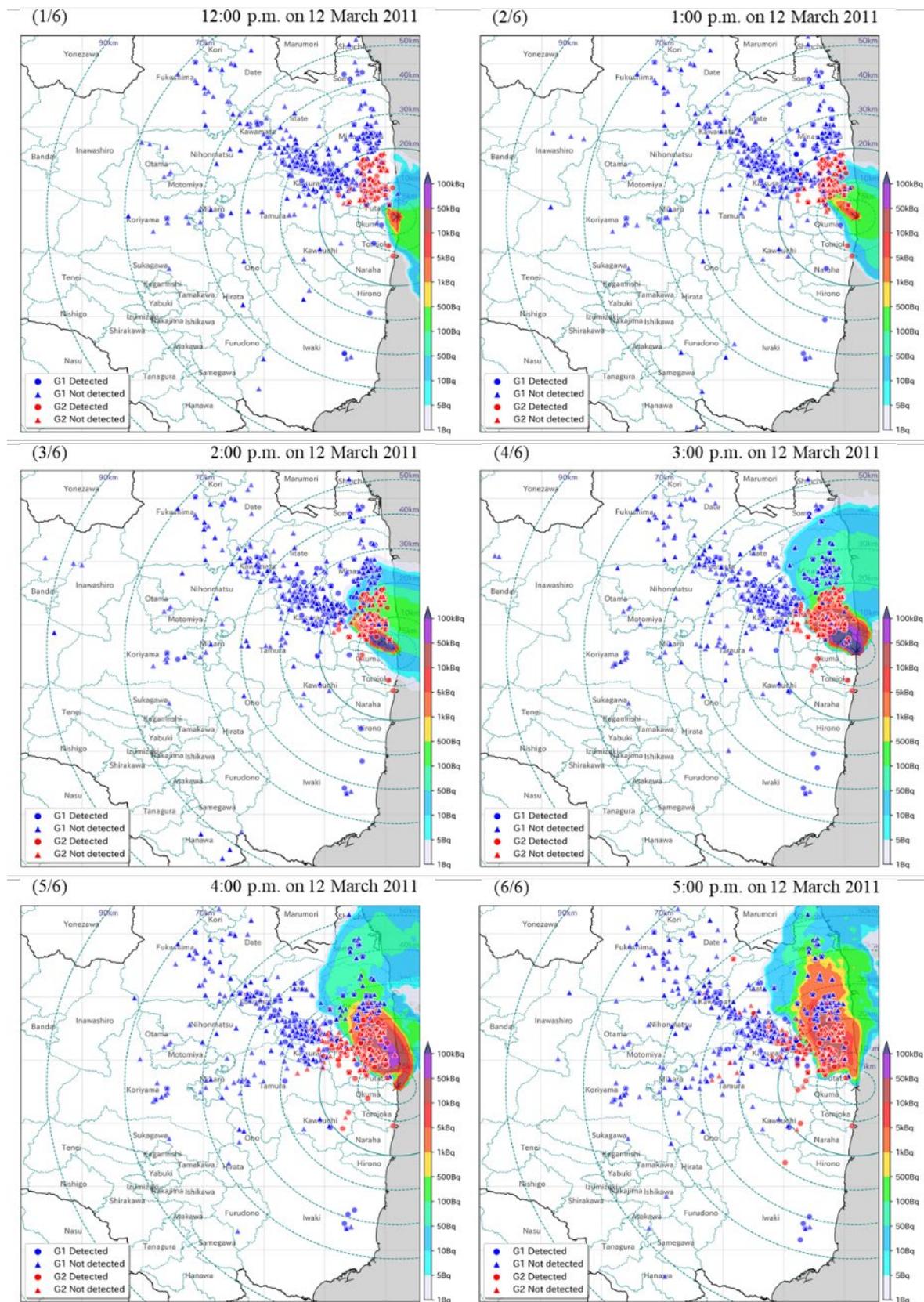


図 A3 3月12日12時(1/6), 13時(2/6), 14時(3/6), 15時(4/6), 16時(5/6), 17時(6/6)における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

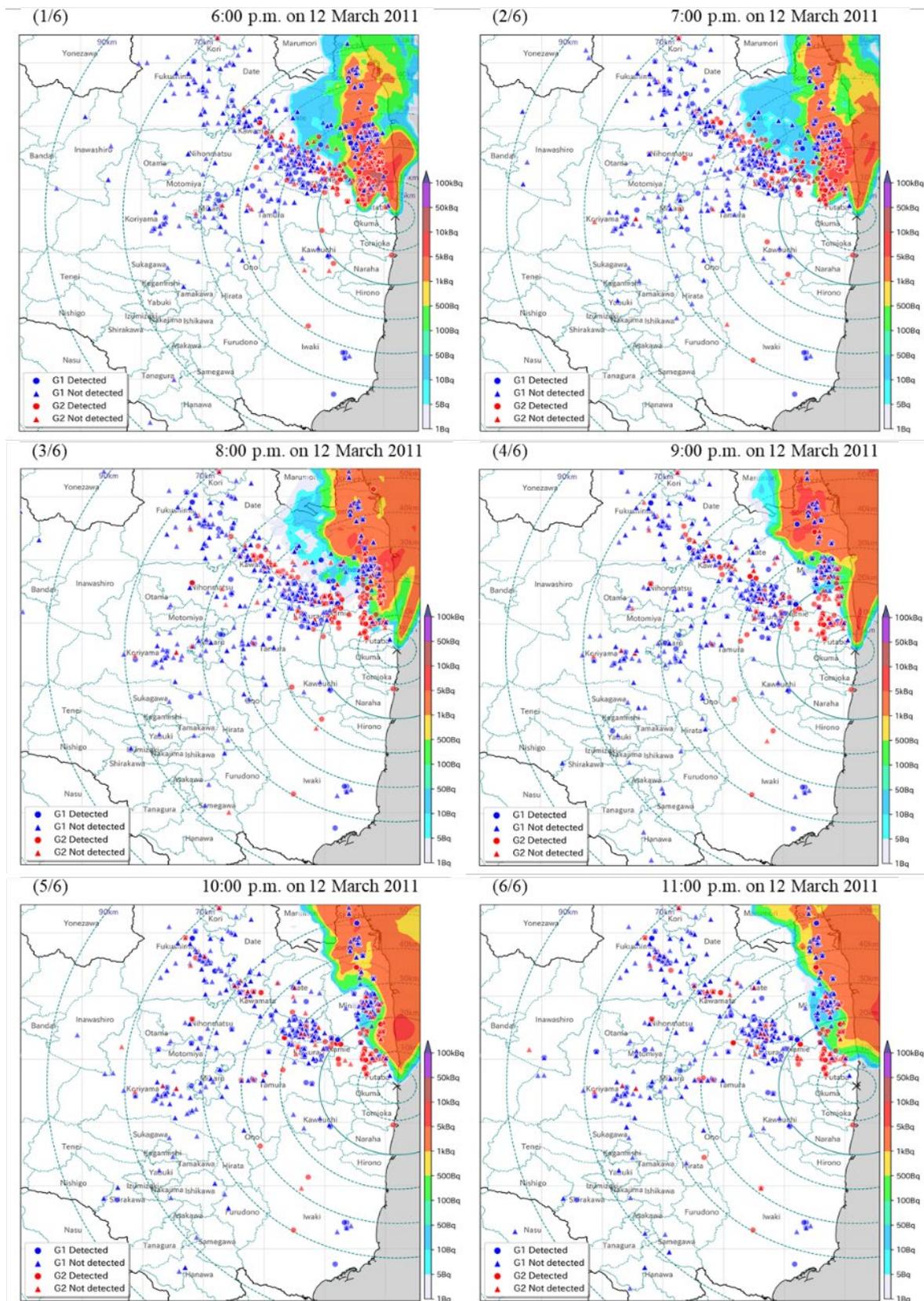


図 A4 3月12日18時(1/6), 19時(2/6), 20時(3/6), 21時(4/6), 22時(5/6), 23時(6/6)における ^{131}I 空气中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

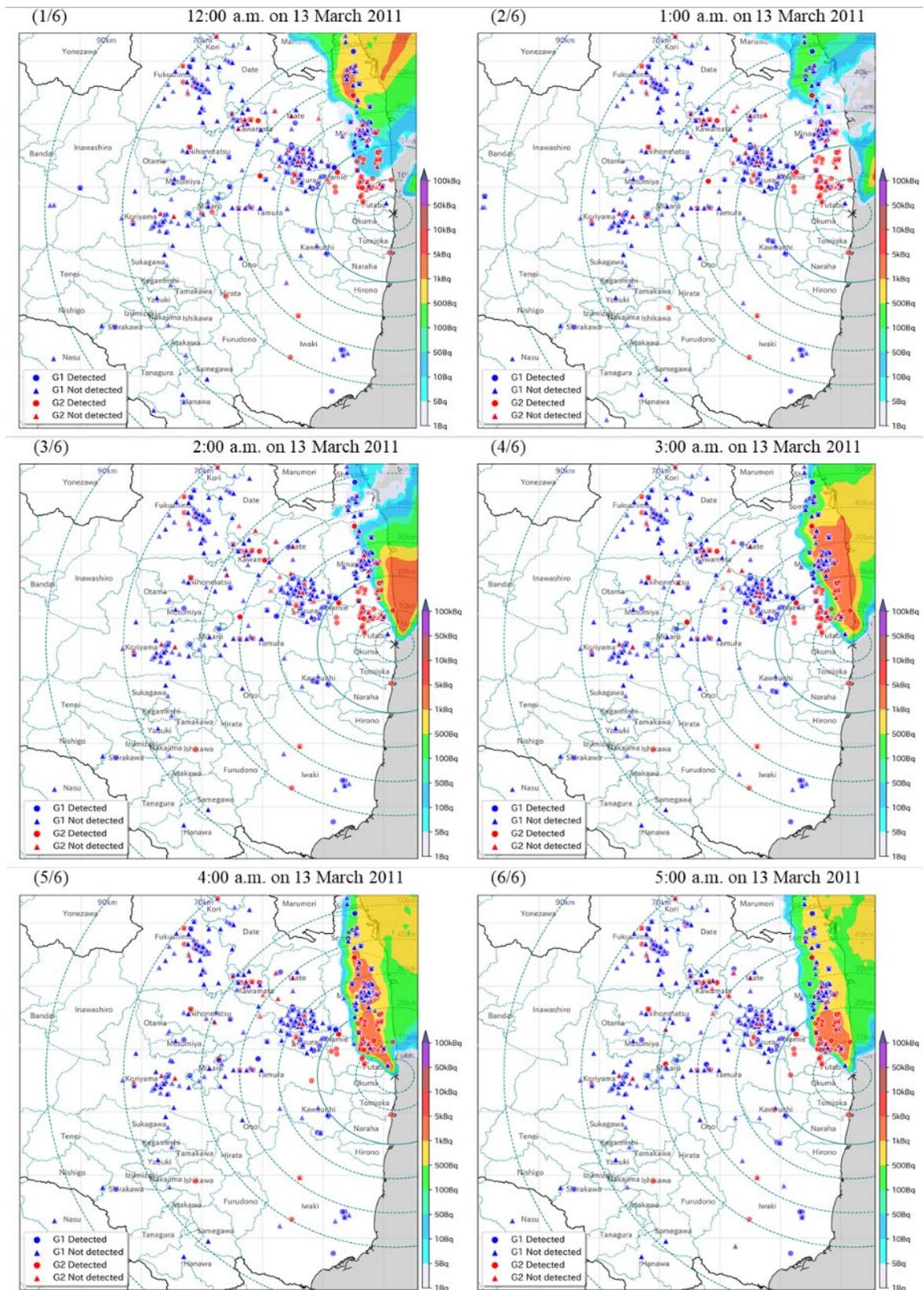


図 A5 3月13日0時(1/6), 1時(2/6), 2時(3/6), 3時(4/6), 4時(5/6), 5時(6/6)における¹³¹I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在场所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

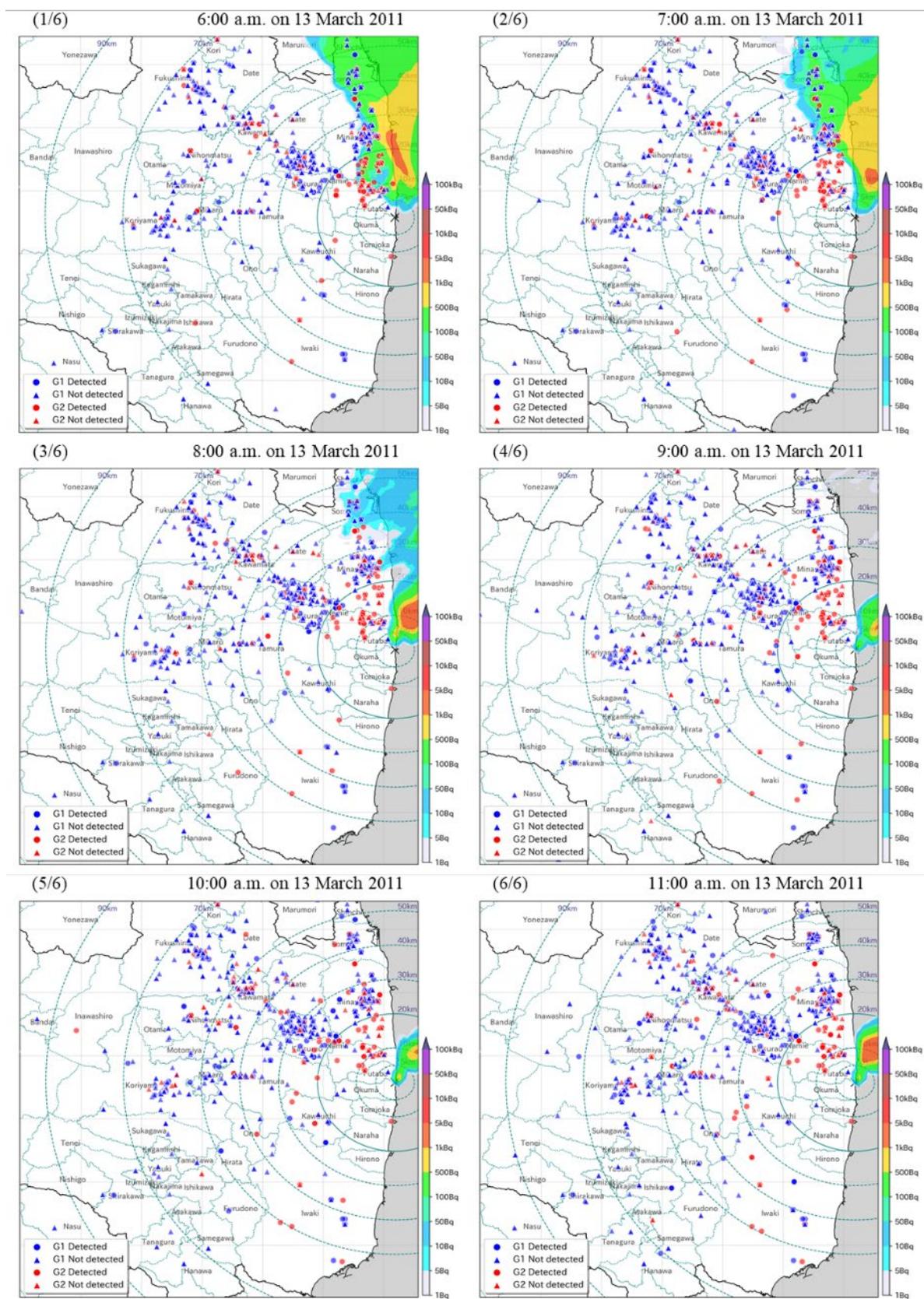


図 A6 3月13日6時(1/6), 7時(2/6), 8時(3/6), 9時(4/6), 10時(5/6), 11時(6/6)における¹³¹I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

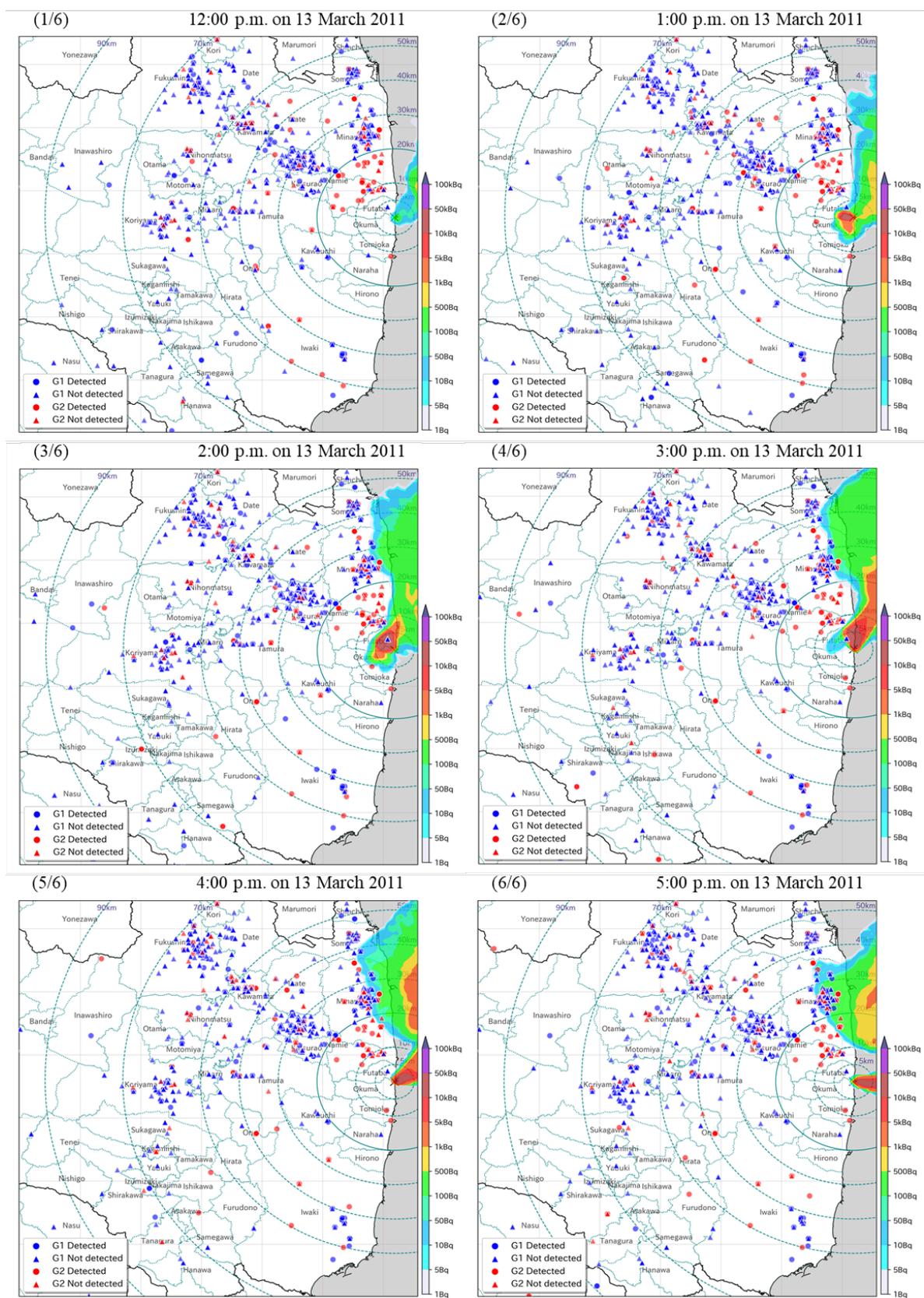


図 A7 3月13日12時(1/6), 13時(2/6), 14時(3/6), 15時(4/6), 16時(5/6), 17時(6/6)における¹³¹I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所 (青 : G1 グループ, 赤 : G2 グループ)

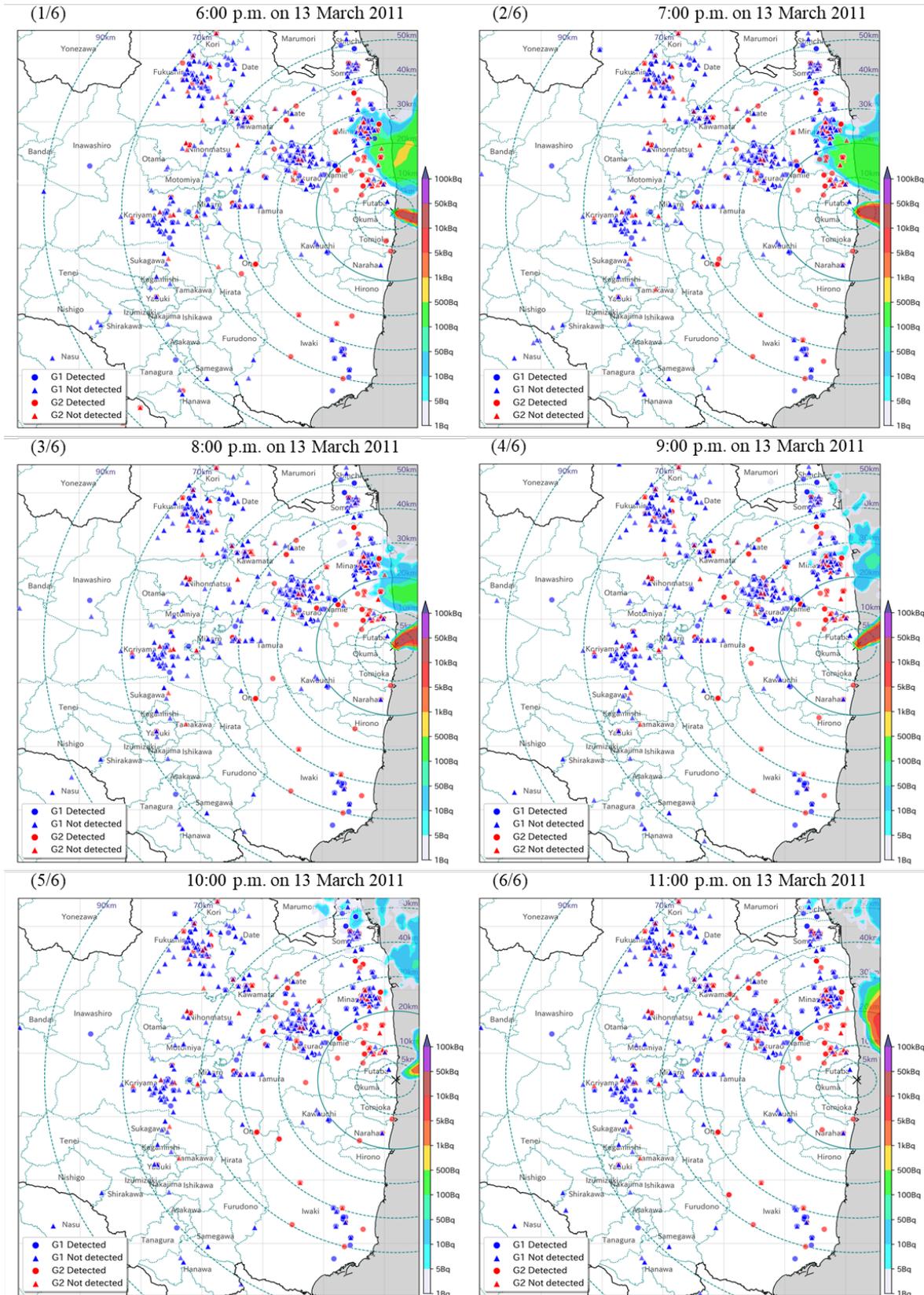


図 A8 3月13日 18時(1/6), 19時(2/6), 20時(3/6), 21時(4/6), 22時(5/6), 23時(6/6)における¹³¹I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

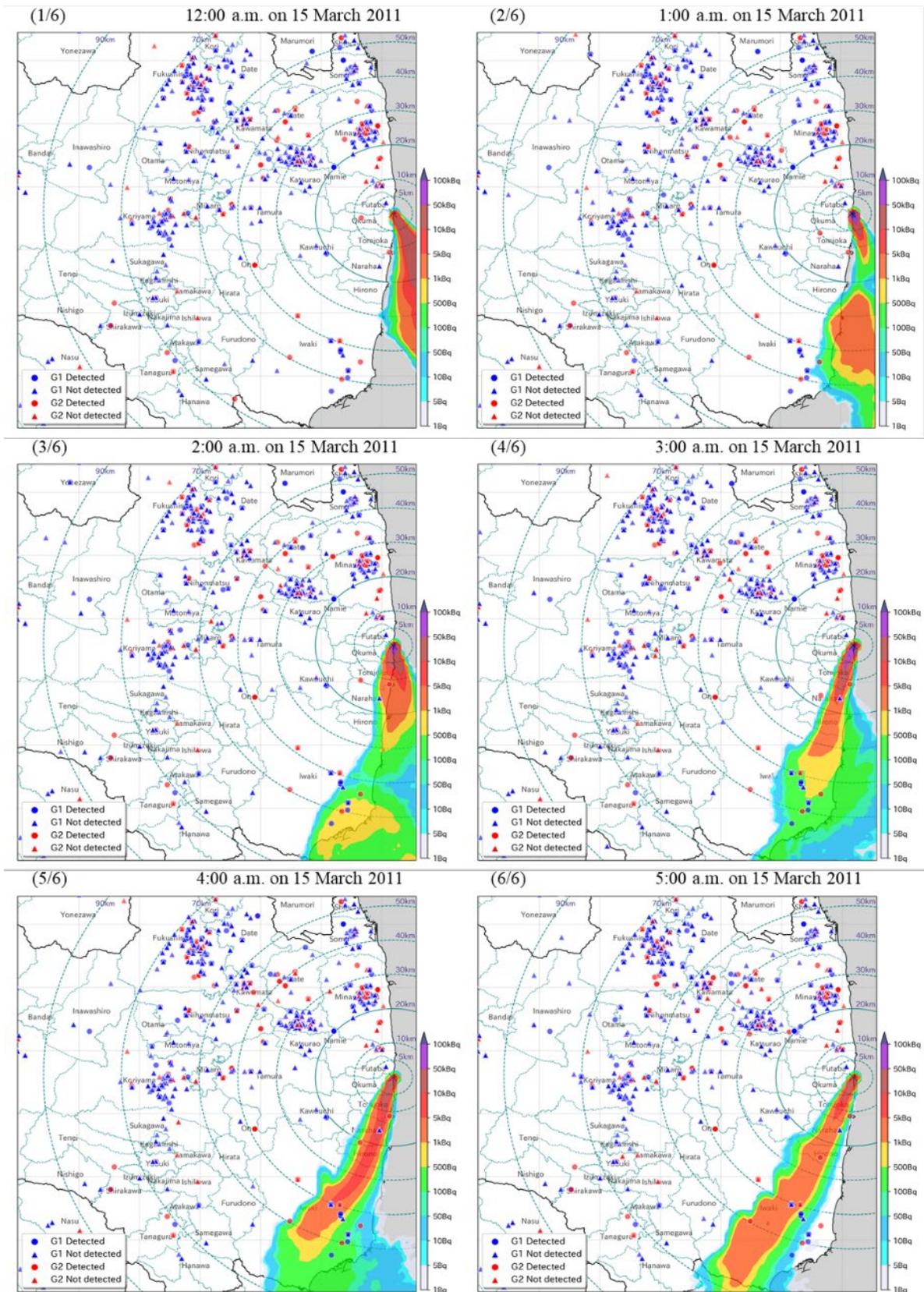


図 A9 3月15日0時(1/6), 1時(2/6), 2時(3/6), 3時(4/6), 4時(5/6), 5時(6/6)における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

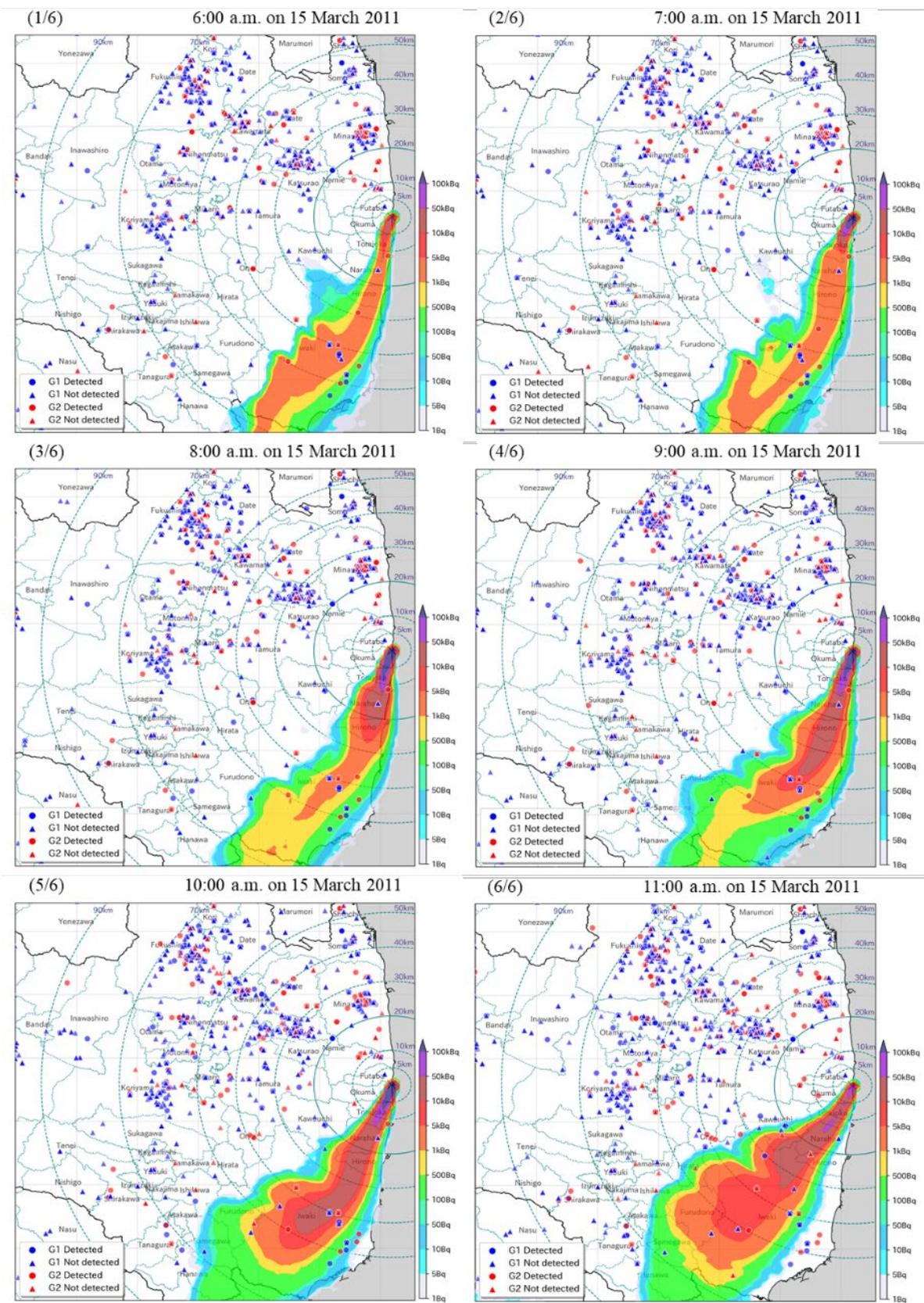


図 A10 3月15日6時(1/6), 7時(2/6), 8時(3/6), 9時(4/6), 10時(5/6), 11時(6/6)における ^{131}I 空气中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

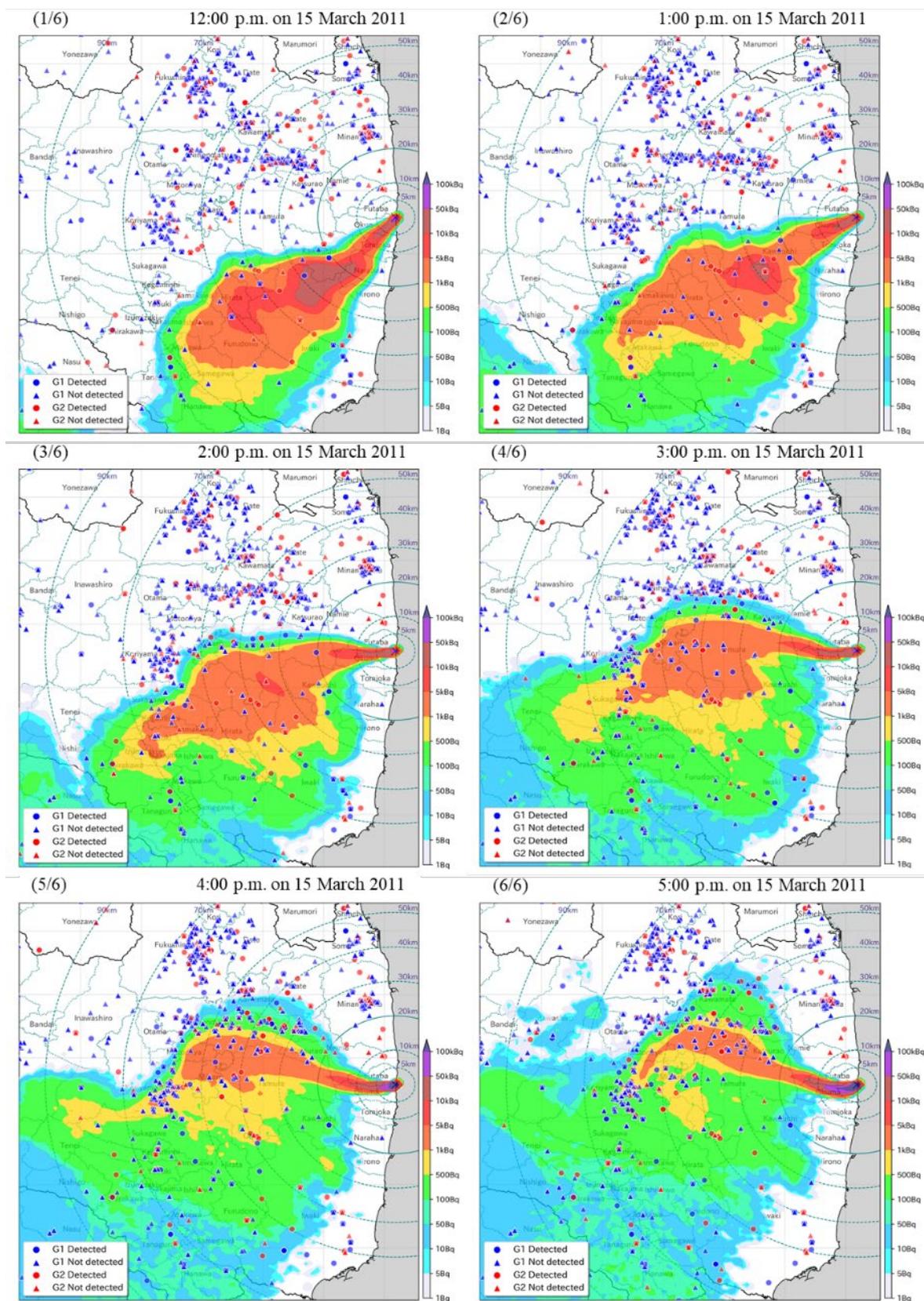


図 A11 3 月 15 日 12 時(1/6), 13 時(2/6), 14 時(3/6), 15 時(4/6), 16 時(5/6), 17 時(6/6)における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在场所 (青 : G1 グループ, 赤 : G2 グループ)

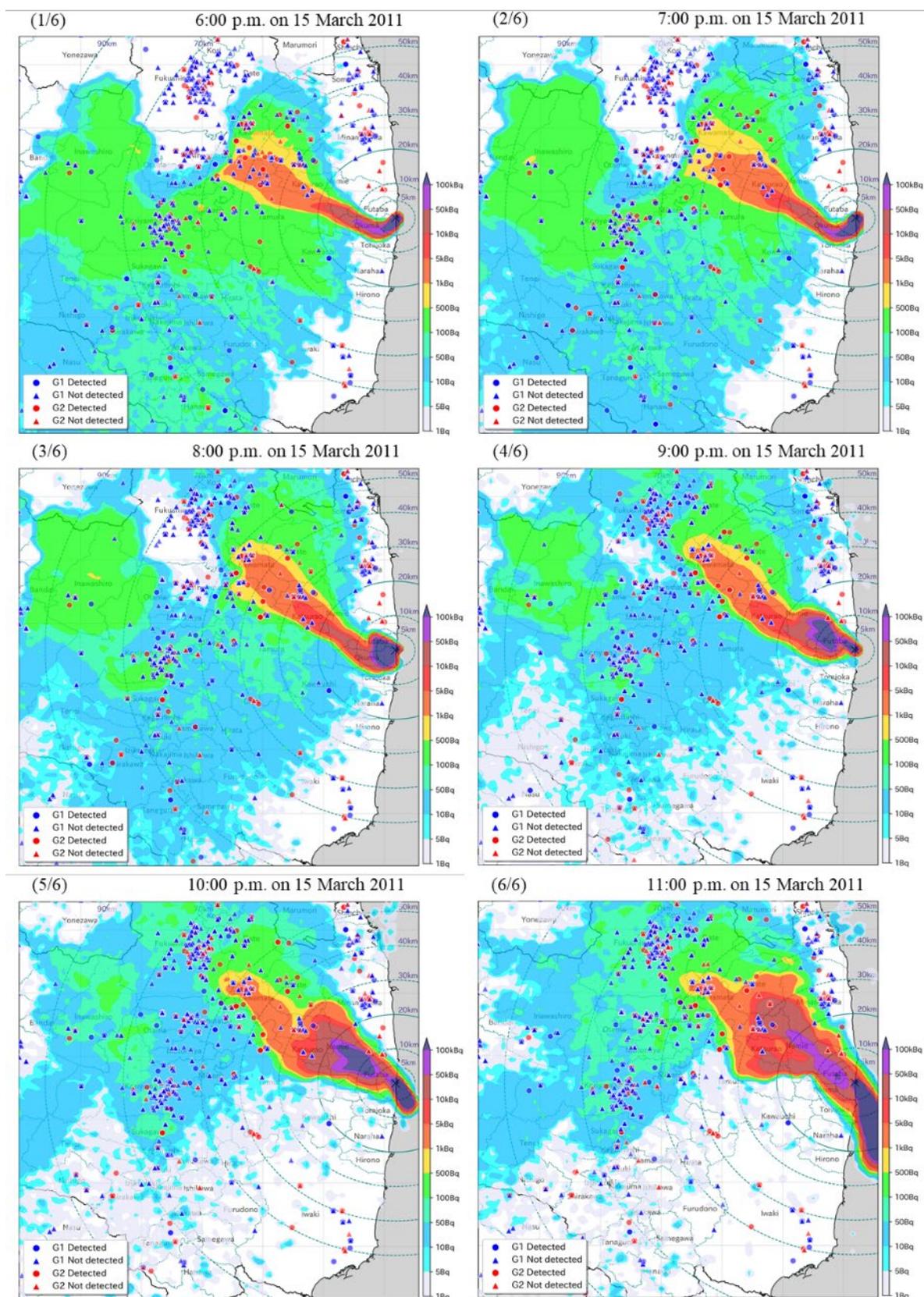


図 A12 3月15日18時(1/6), 19時(2/6), 20時(3/6), 21時(4/6), 22時(5/6), 23時(6/6)における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞り場所(青 : G1 グループ, 赤 : G2 グループ)

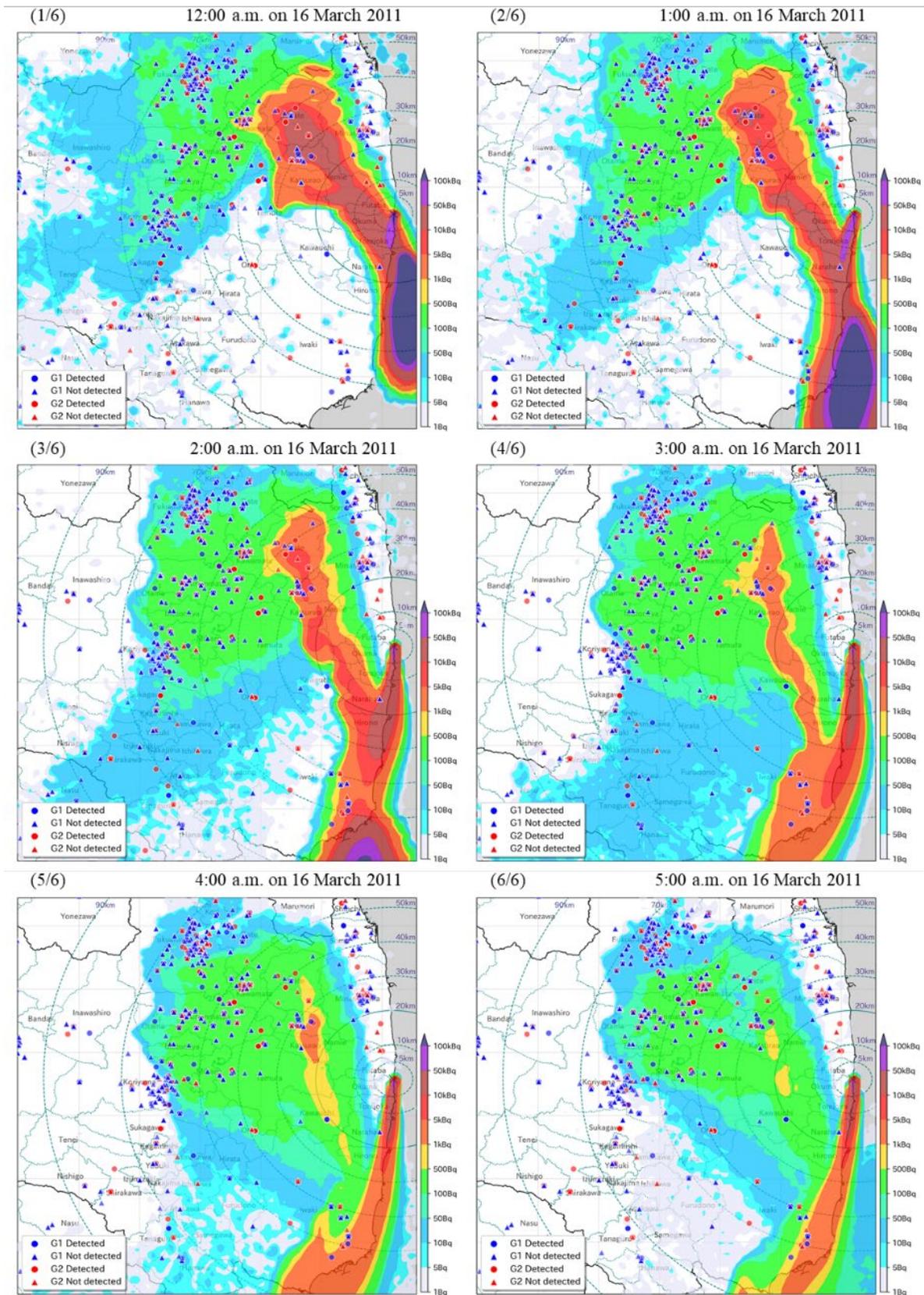


図 A13 3月16日0時(1/6), 1時(2/6), 2時(3/6), 3時(4/6), 4時(5/6), 5時(6/6)における¹³¹I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

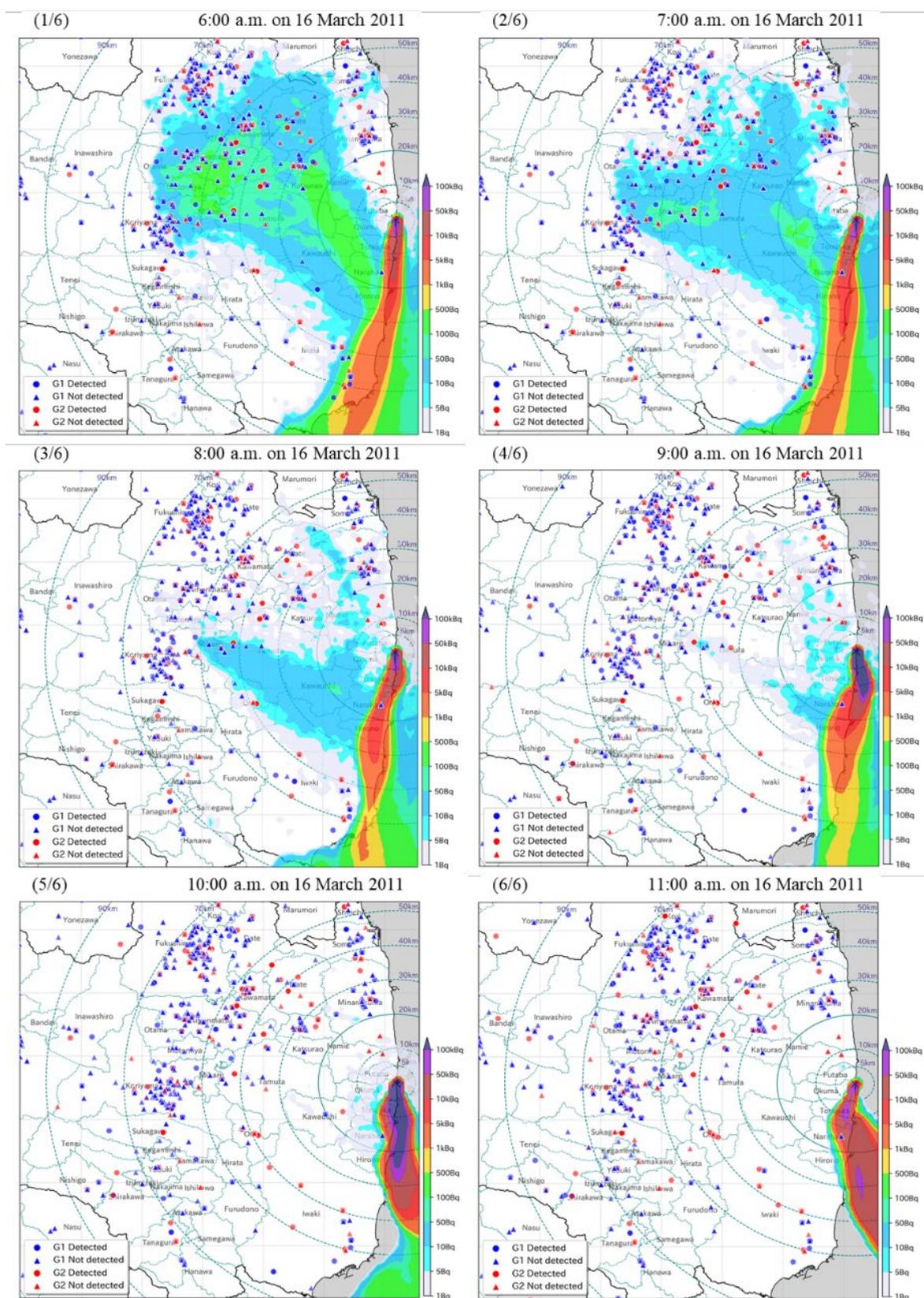


図 A14 3月16日6時(1/6), 7時(2/6), 8時(3/6), 9時(4/6), 10時(5/6), 11時(6/6)における ^{131}I 空气中濃度マップと解析対象者の滞在場所 (青 : G1 グループ, 赤 : G2 グループ)

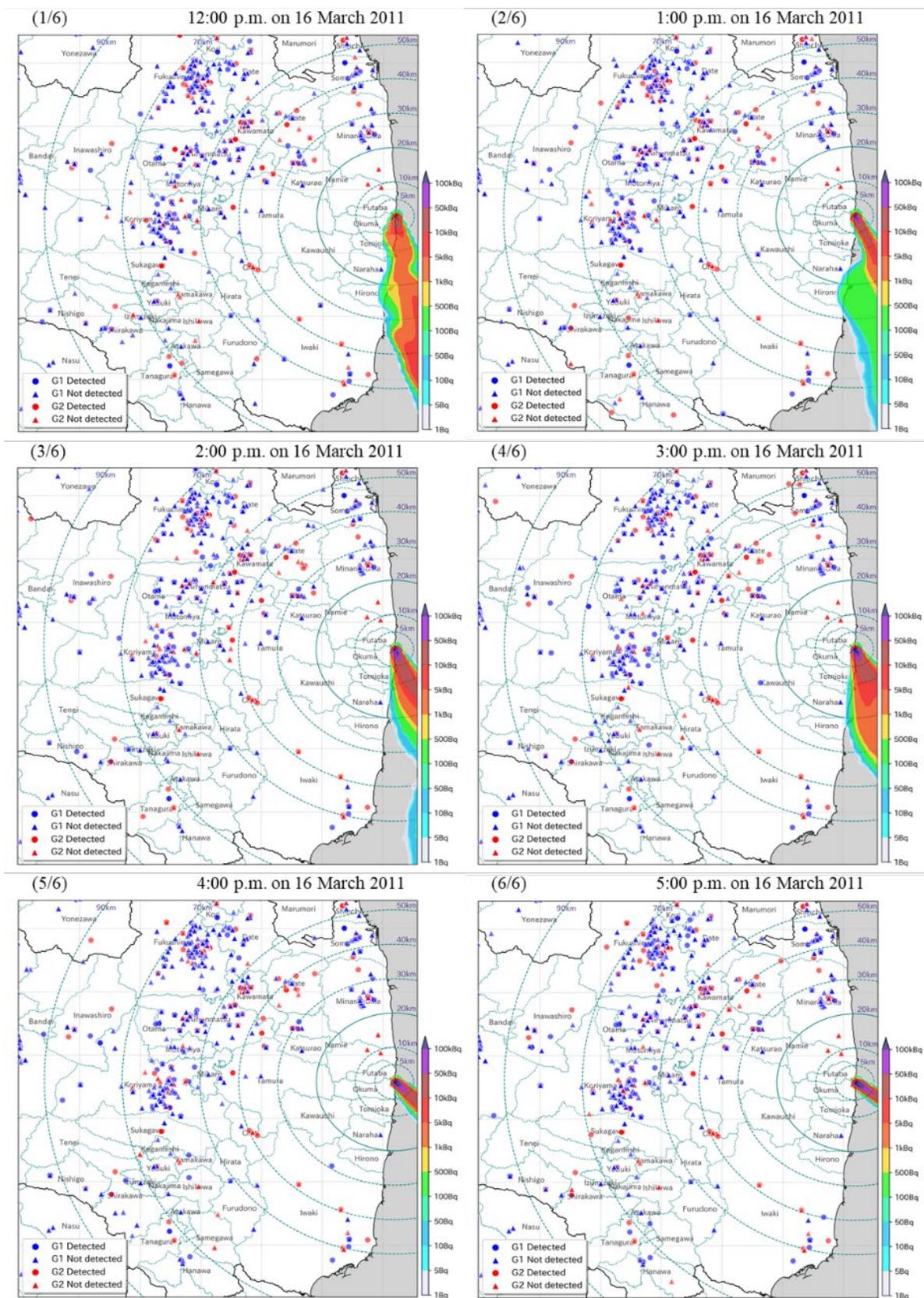


図 A15 3月16日12時(1/6), 13時(2/6), 14時(3/6), 15時(4/6), 16時(5/6), 17時(6/6)における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在场所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

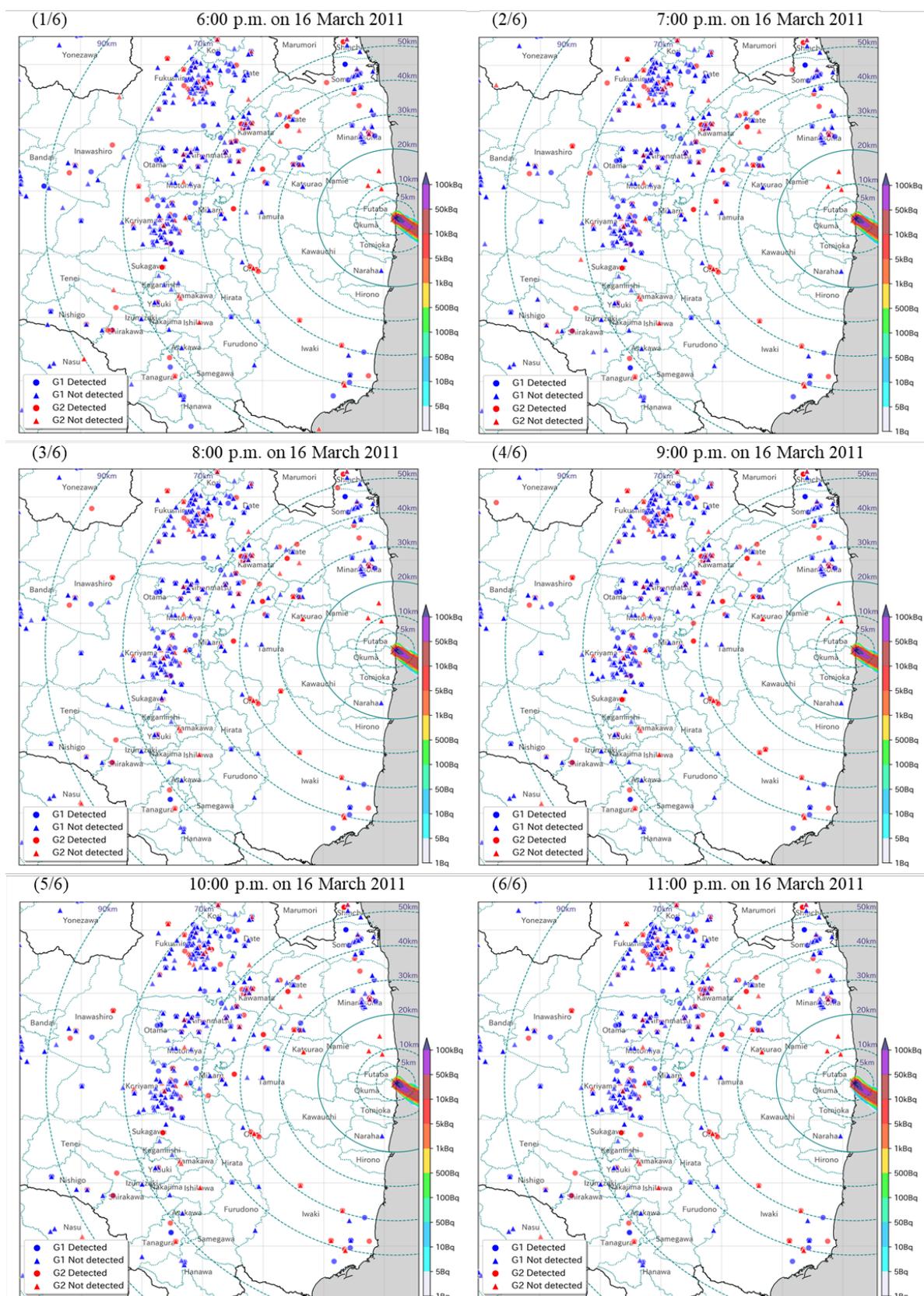


図 A16 3月16日18時(1/6), 19時(2/6), 20時(3/6), 21時(4/6), 22時(5/6), 23時(6/6)における¹³¹I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在场所 (青: G1グループ, 赤: G2グループ)

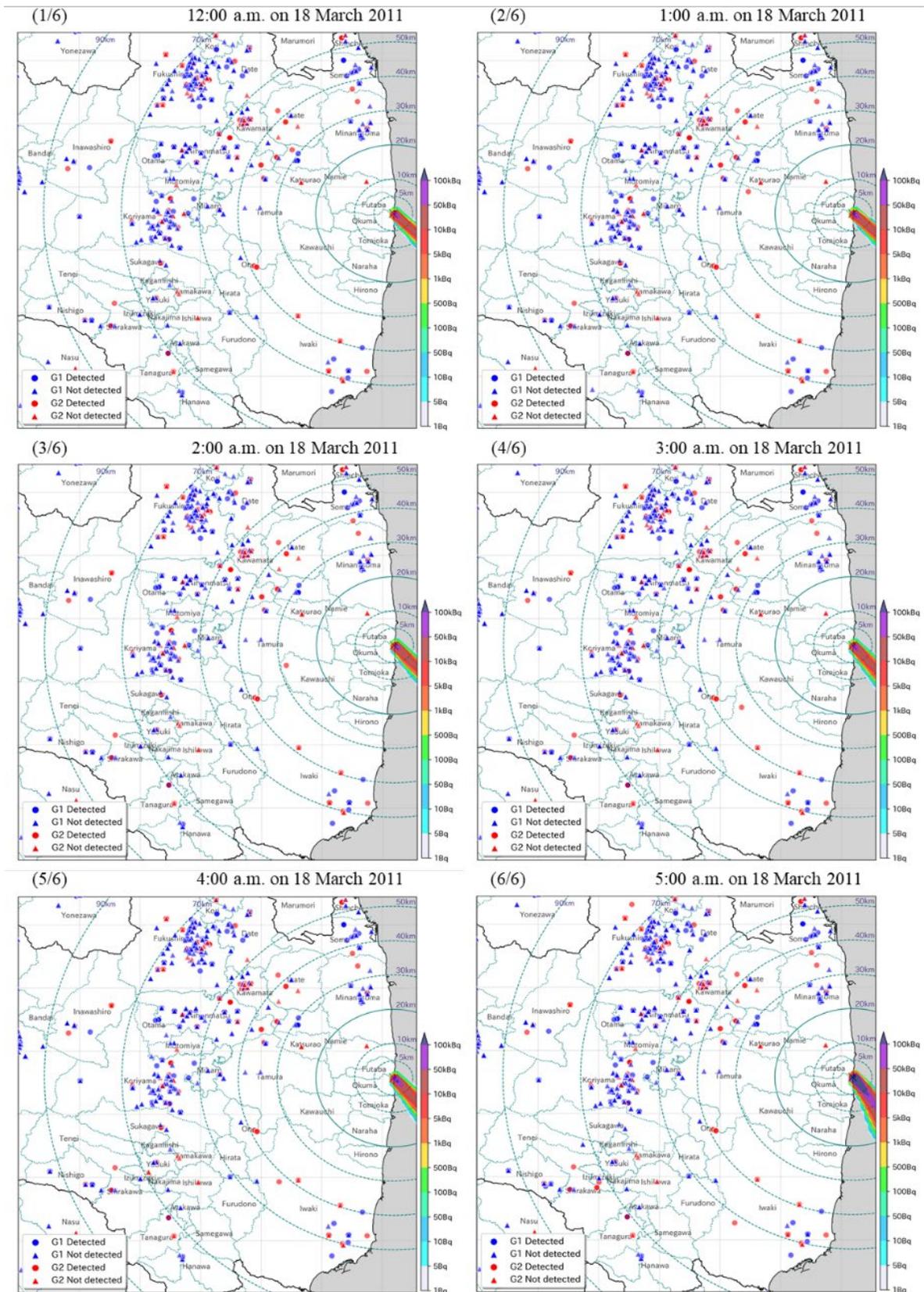


図 A17 3月18日0時(1/6), 1時(2/6), 2時(3/6), 3時(4/6), 4時(5/6), 5時(6/6)における¹³¹I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

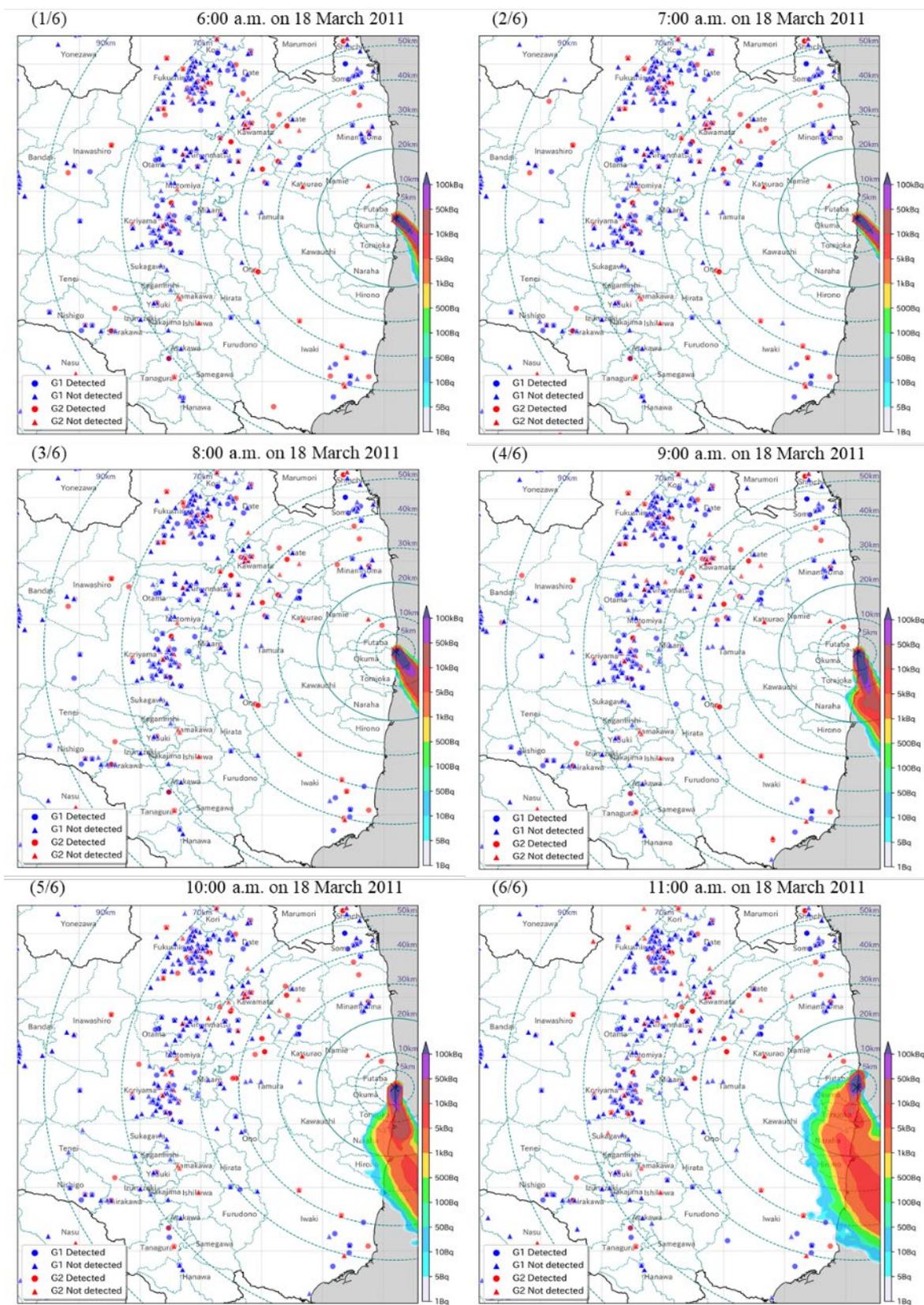


図 A18 3月18日6時(1/6), 7時(2/6), 8時(3/6), 9時(4/6), 10時(5/6), 11時(6/6)における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

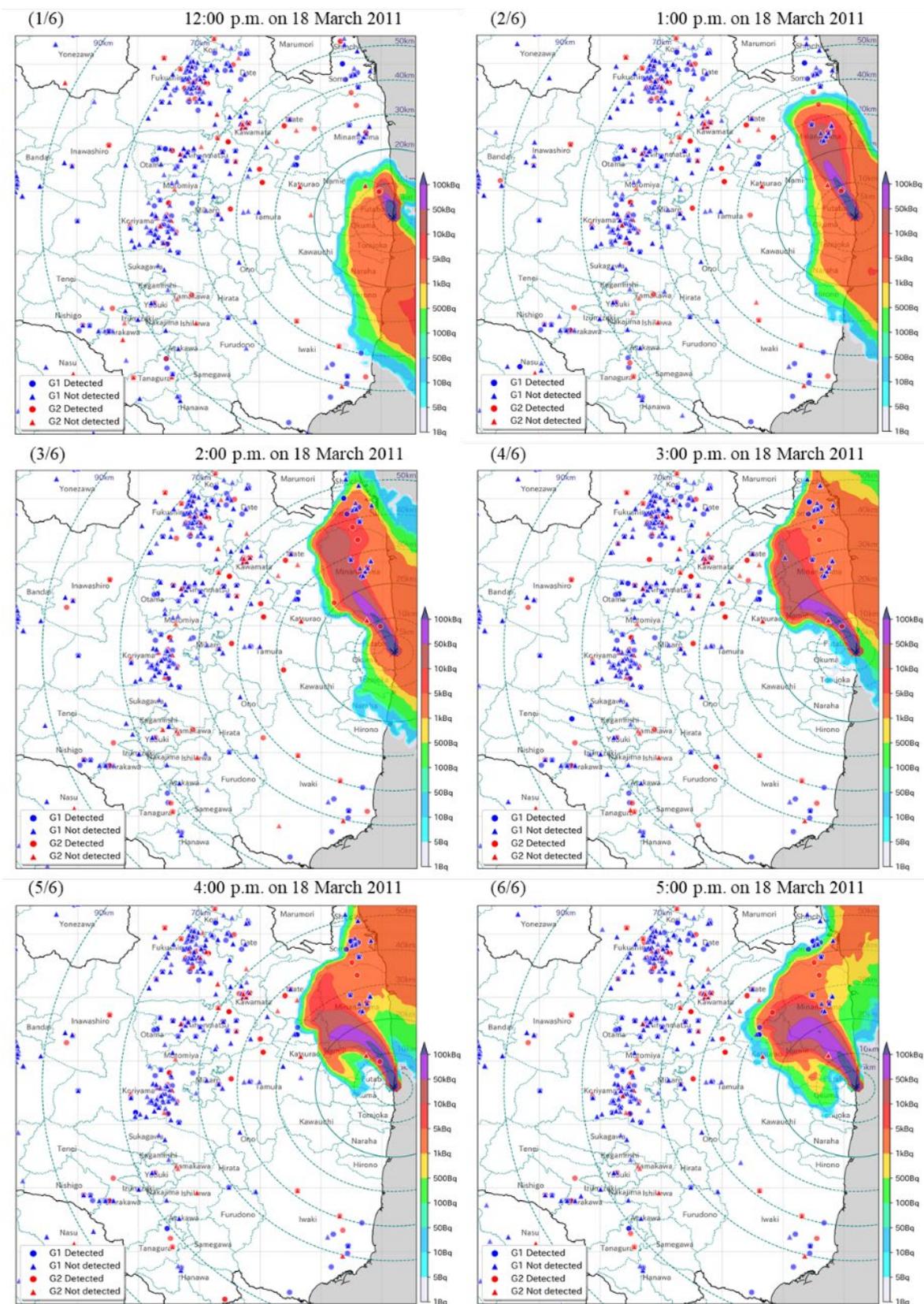


図 A19 3月18日 12(1/6), 13時(2/6), 14時(3/6), 15時(4/6), 16時(5/6), 17時(6/6)における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所 (青 : G1 グループ, 赤 : G2 グループ)

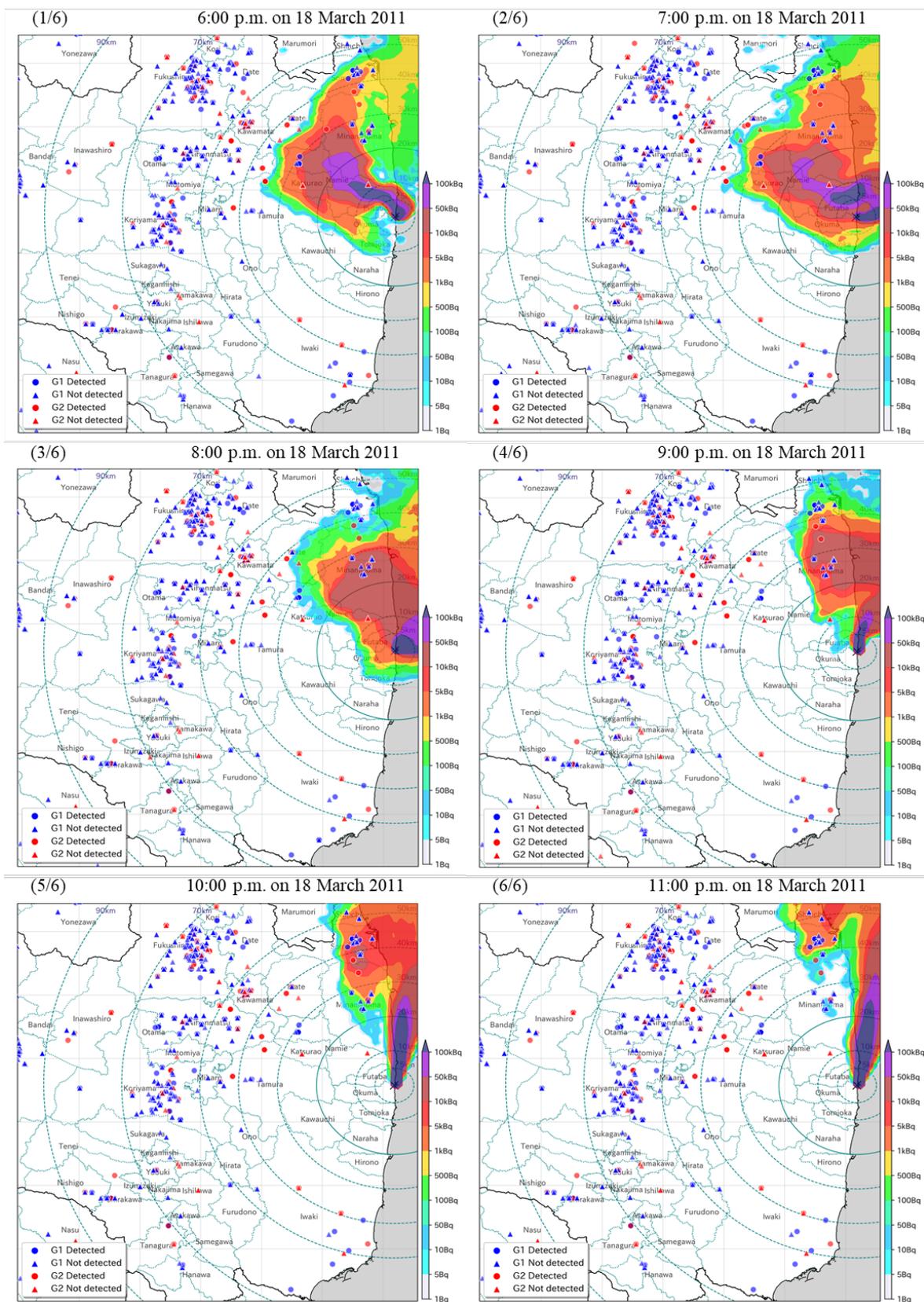


図 A20 3月18日18時(1/6), 19時(2/6), 20時(3/6), 21時(4/6), 22時(5/6), 23時(6/6)における ^{131}I 空气中濃度マップと解析対象者の滞在场所 (青: G1グループ, 赤: G2グループ)

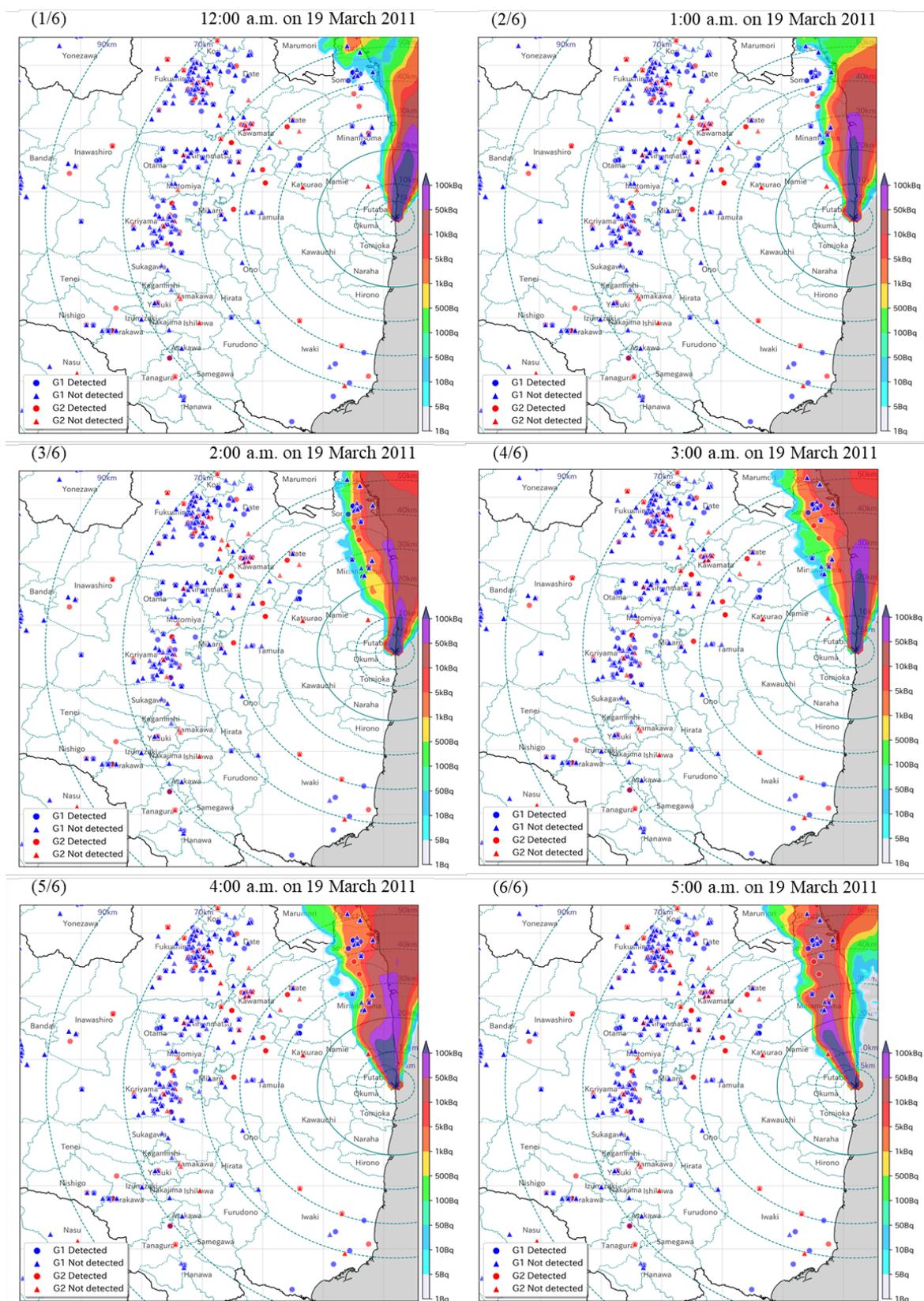


図 A21 3月19日0時(1/6), 1時(2/6), 2時(3/6), 3時(4/6), 4時(5/6), 5時(6/6)における¹³¹I 空気中濃度マップと解析対象者の滞り場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

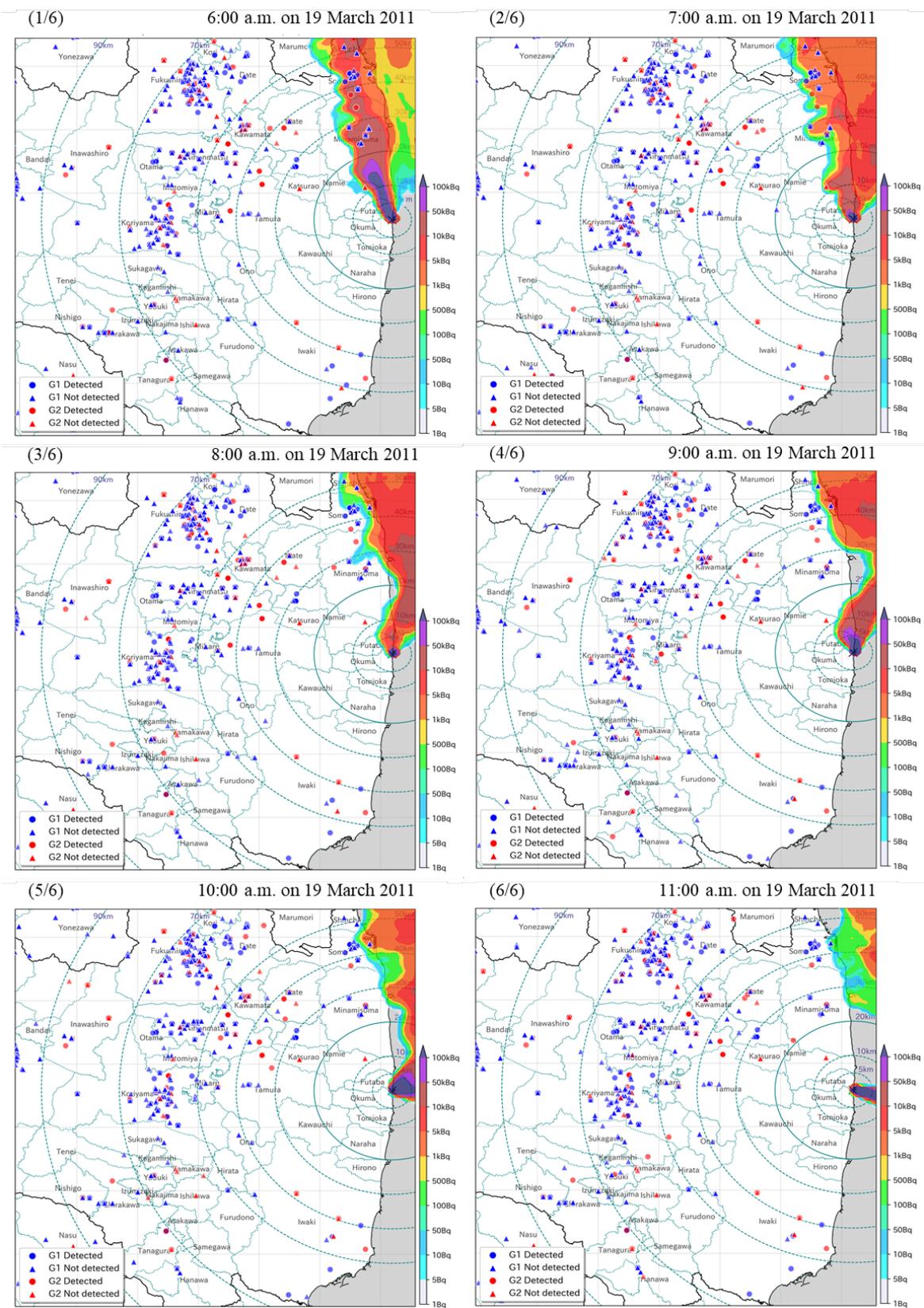


図 A22 3月19日6時(1/6), 7時(2/6), 8時(3/6), 9時(4/6), 10時(5/6), 11時(6/6)における¹³¹I 空气中濃度マップと解析対象者の滞り場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

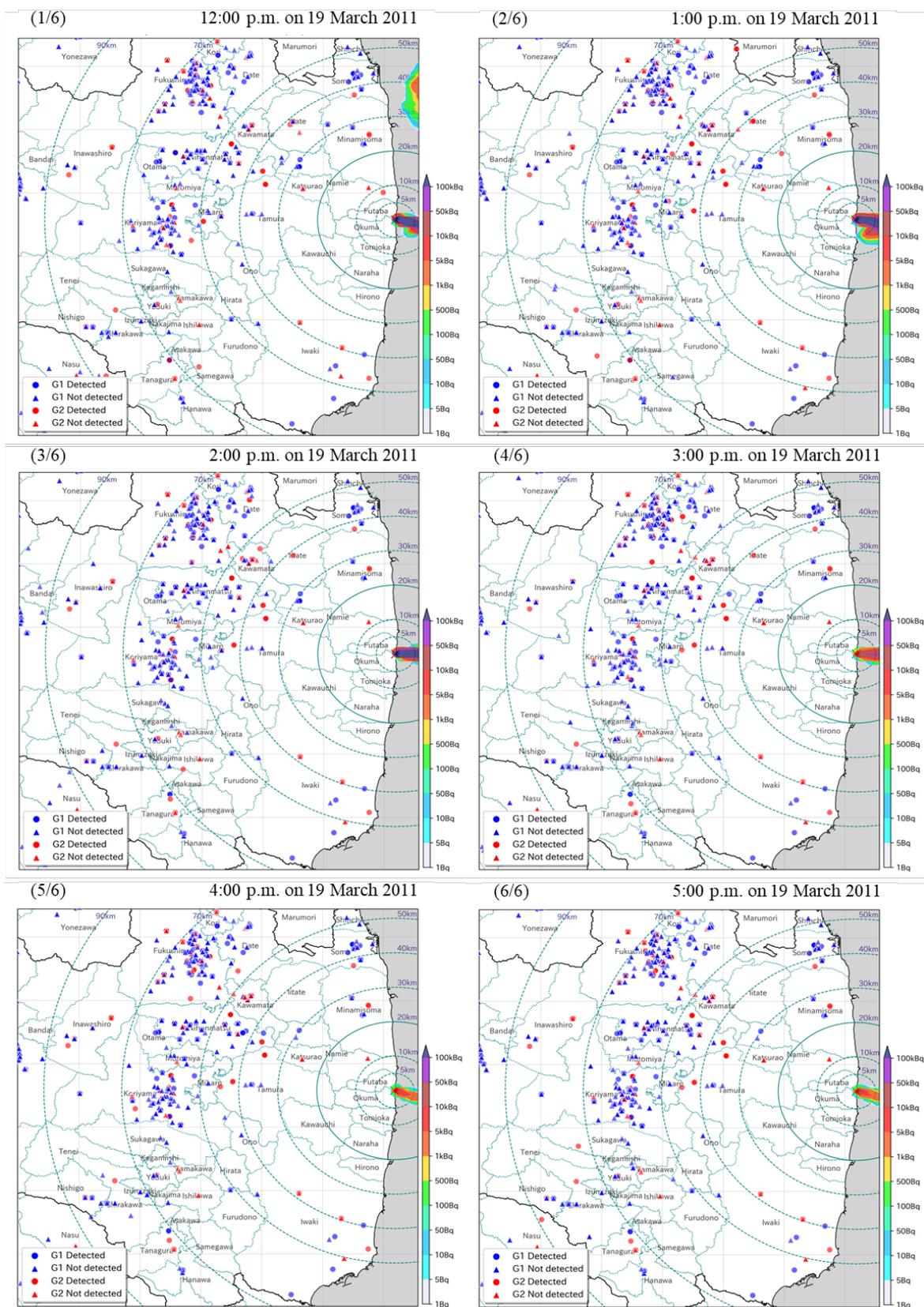


図 A23 3月19日12時(1/6), 13時(2/6), 14時(3/6), 15時(4/6), 16時(5/6), 17時(6/6)における ^{131}I 空气中濃度マップと解析対象者の滞り場所（青：G1グループ、赤：G2グループ）

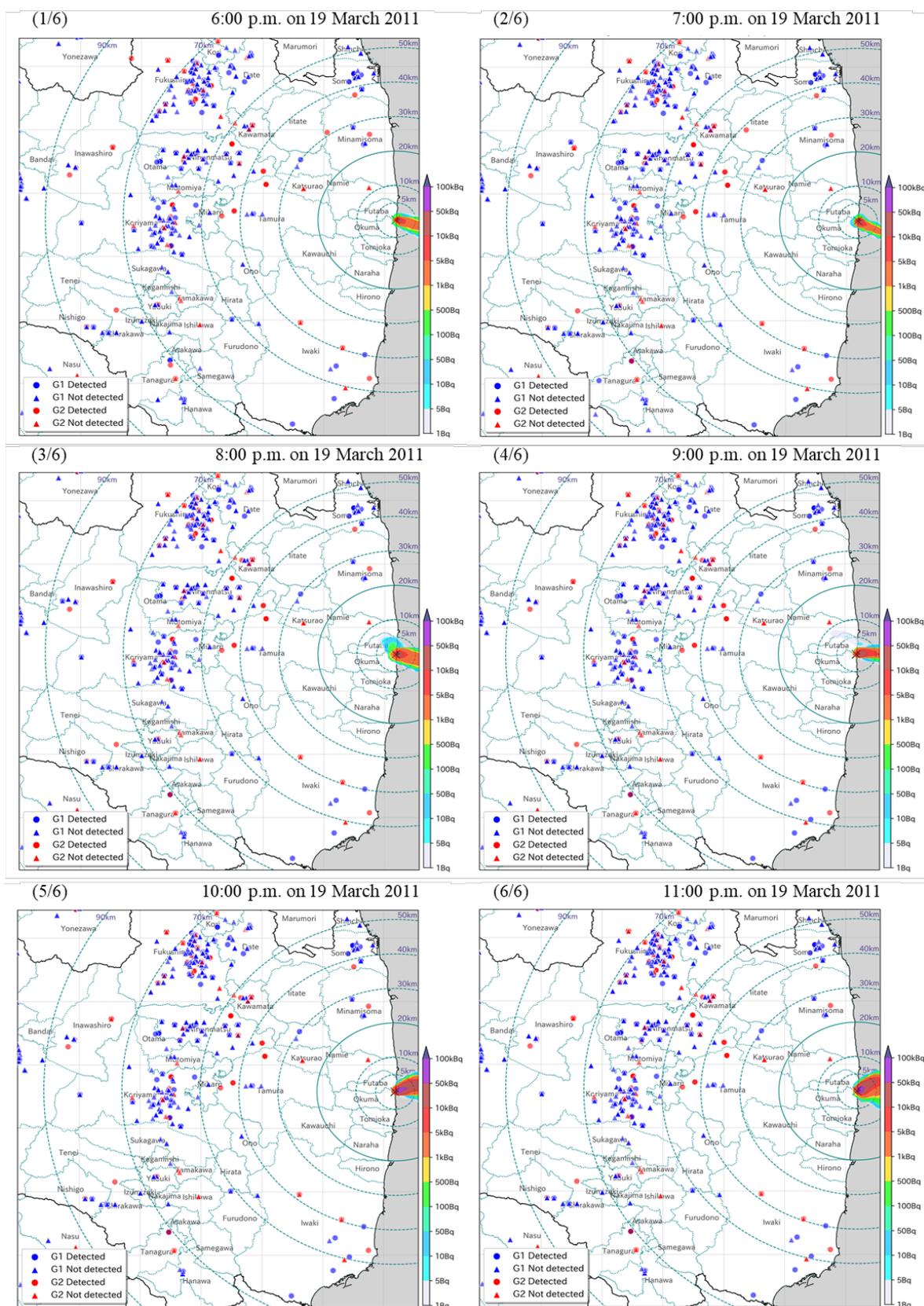


図 A24 3月19日18時(1/6), 19時(2/6), 20時(3/6), 21時(4/6), 22時(5/6), 23時(6/6)における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在场所 (青: G1 グループ, 赤: G2 グループ)

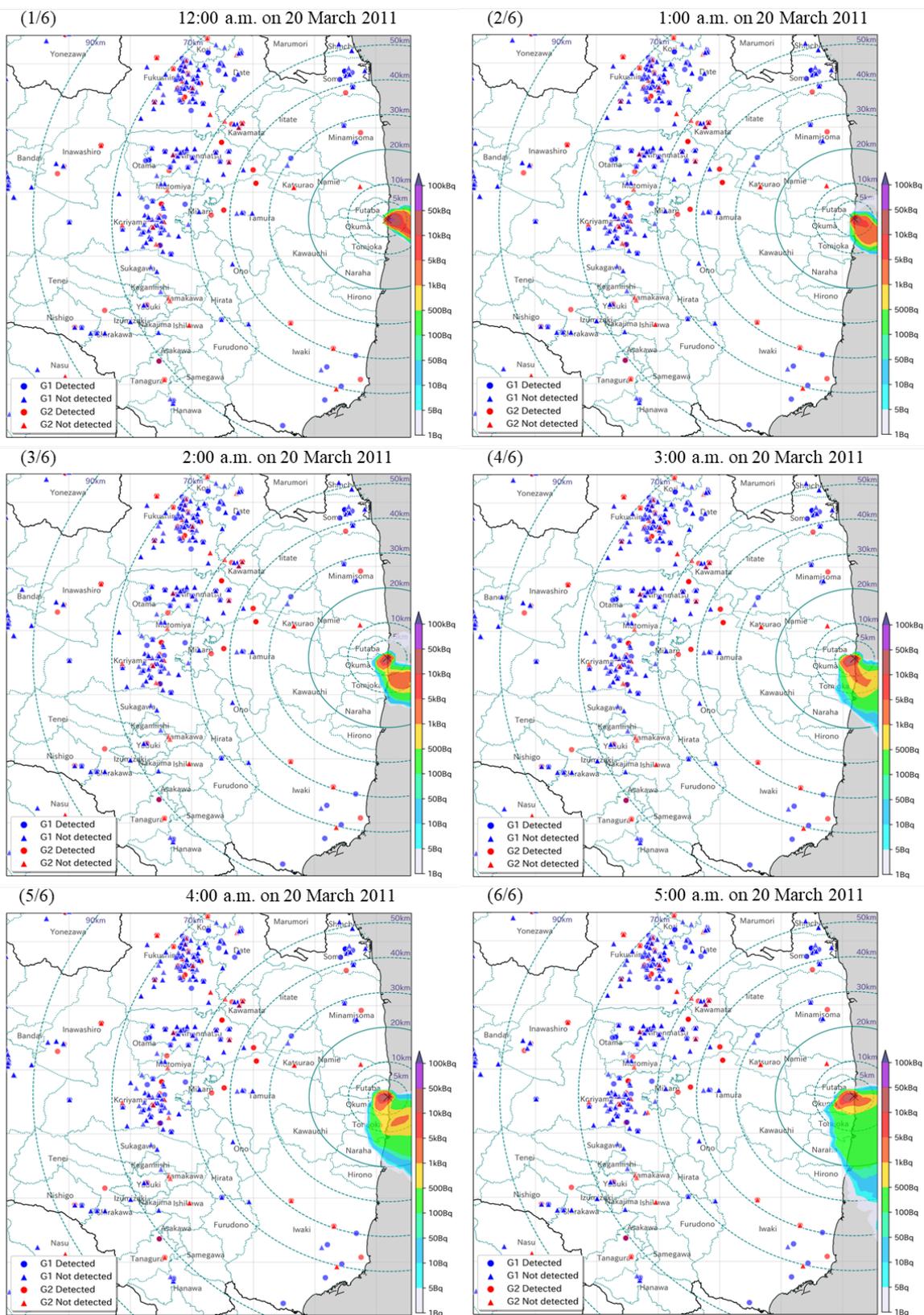


図 A25 3月20日0時(1/6), 1時(2/6), 2時(3/6), 3時(4/6), 4時(5/6), 5時(6/6)における ^{131}I 空气中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

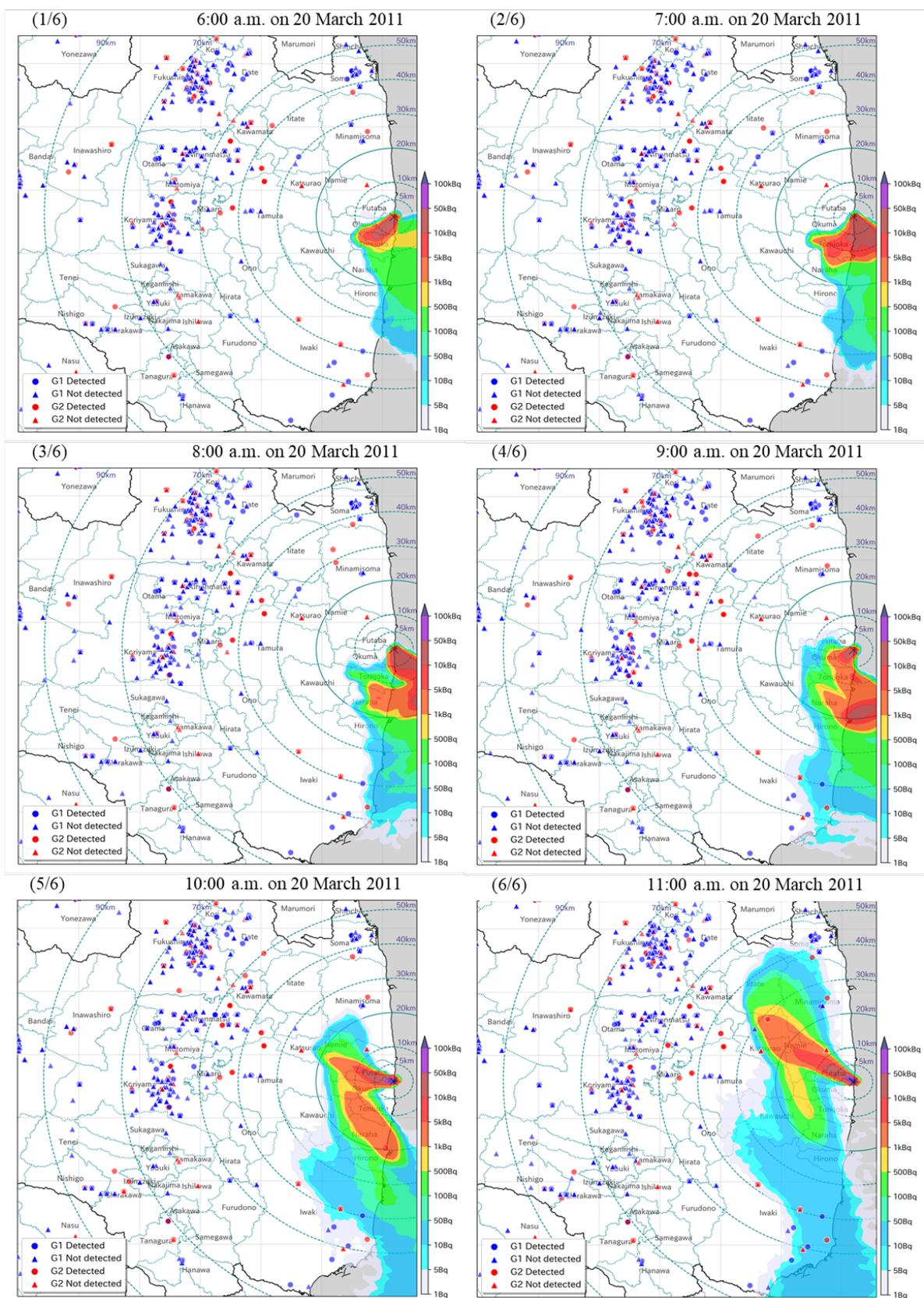


図 A26 3月20日6時(1/6), 7時(2/6), 8時(3/6), 9時(4/6), 10時(5/6), 11時(6/6)における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所 (青 : G1 グループ, 赤 : G2 グループ)

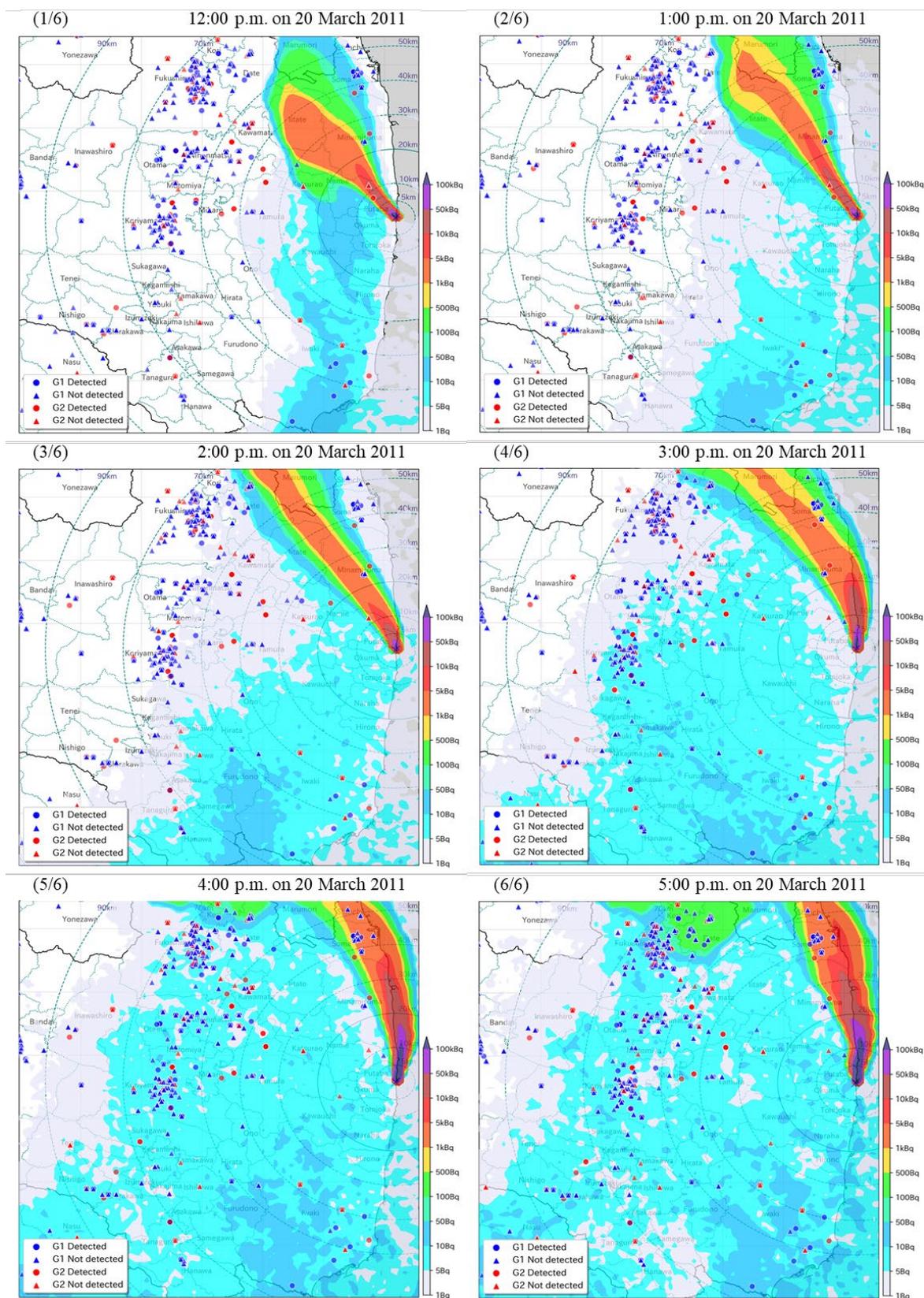


図 A27 3月20日12時(1/6), 13時(2/6), 14時(3/6), 15時(4/6), 16時(5/6), 17時(6/6)における ^{131}I 空气中濃度マップと解析対象者の滞在场所（青：G1グループ、赤：G2グループ）

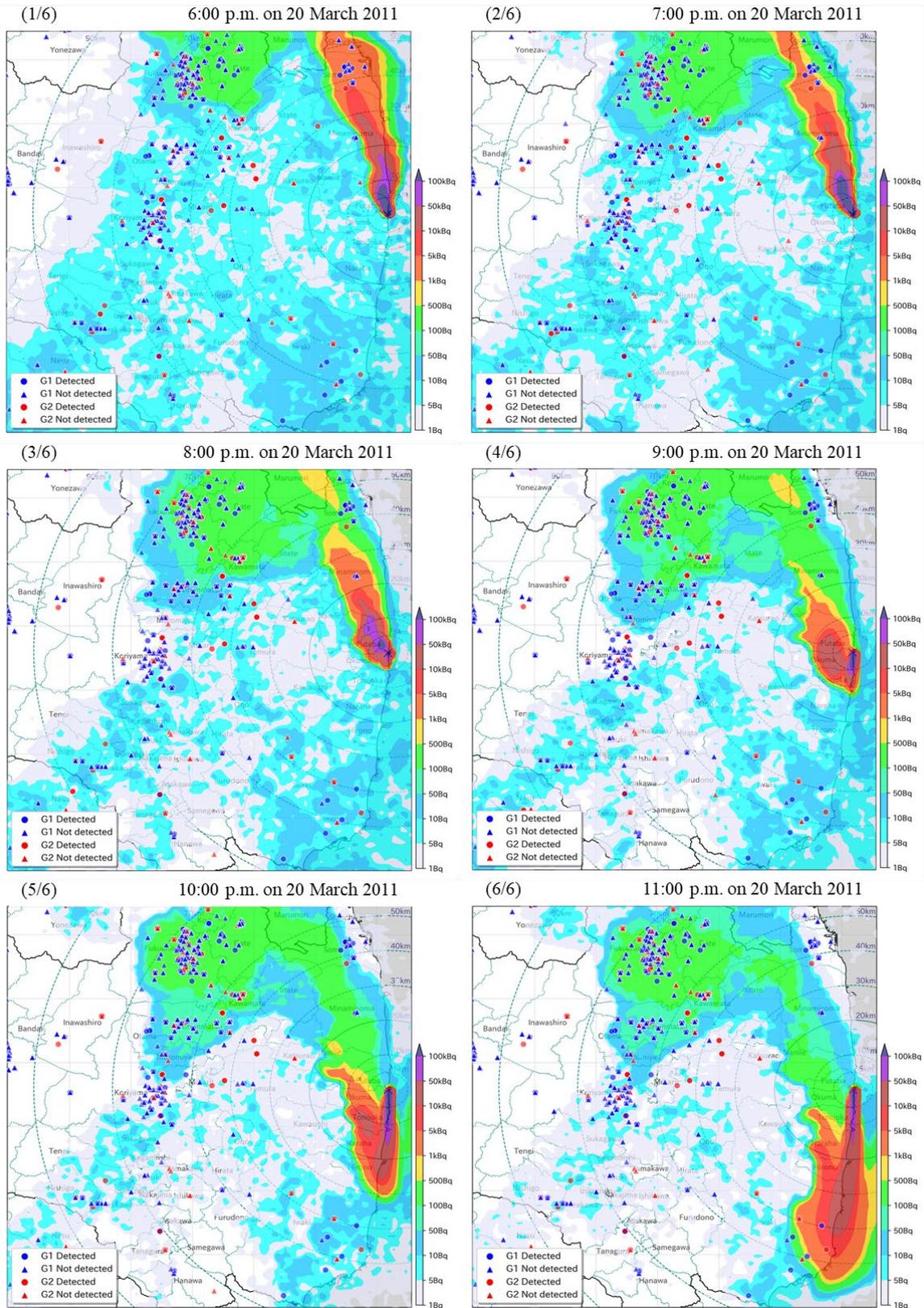


図 A28 3月20日18時(1/6)、19時(2/6)、20時(3/6)、21時(4/6)、22時(5/6)、23時(6/6)における¹³¹I 空气中濃度マップと解析対象者の滞在场所（青：G1グループ、赤：G2グループ）

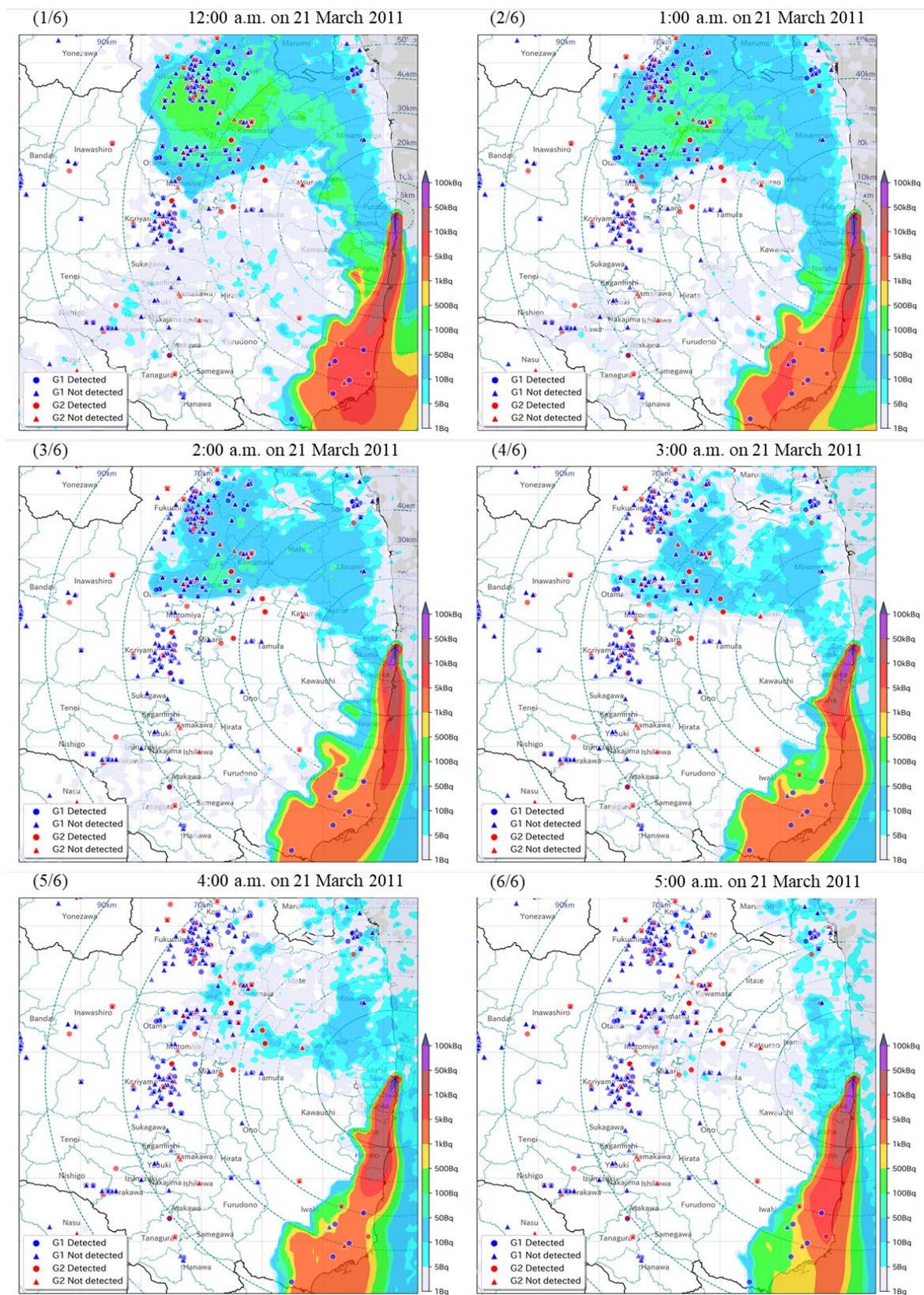


図 A29 3月21日0時(1/6), 1時(2/6), 2時(3/6), 3時(4/6), 4時(5/6), 5時(6/6)における¹³¹I 空气中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

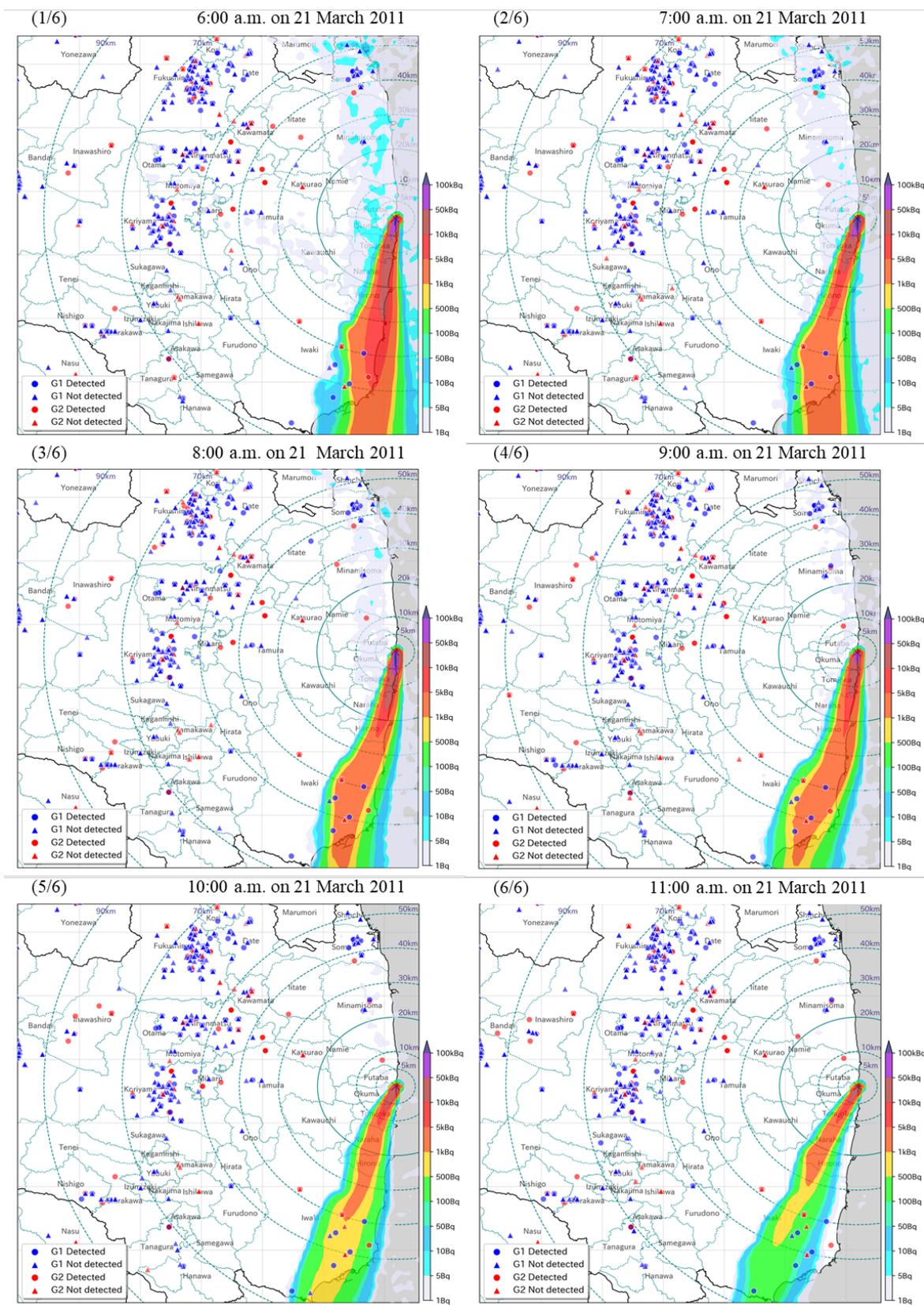


図 A30 3月21日6時(1/6), 7時(2/6), 8時(3/6), 9時(4/6), 10時(5/6), 11時(6/6)における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞在場所（青：G1グループ，赤：G2グループ）

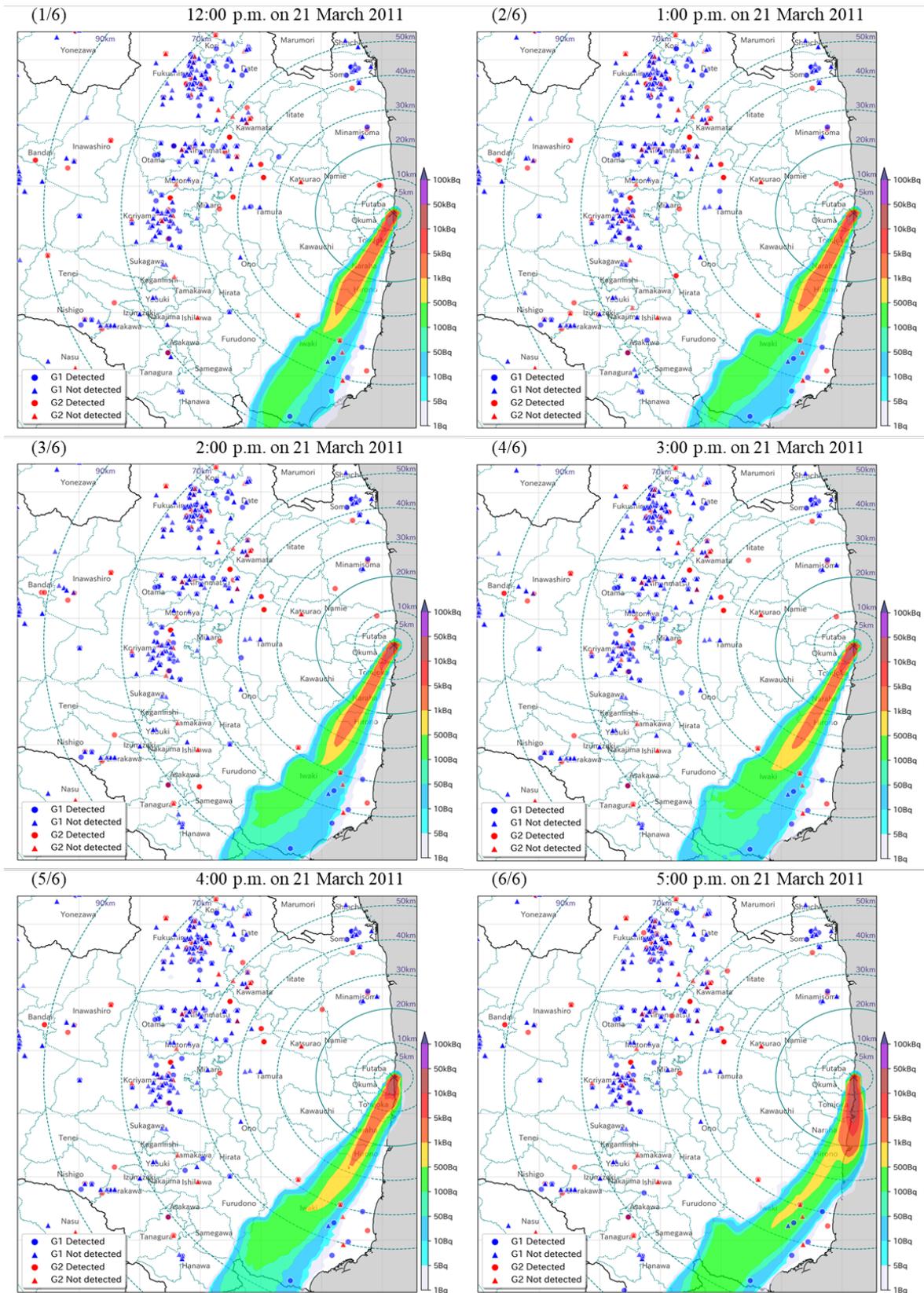


図 A31 3月21日12時(1/6), 13時(2/6), 14時(3/6), 15時(4/6), 16時(5/6), 17時(6/6)における¹³¹I 空气中濃度マップと解析対象者の滞り場所（青：G1グループ、赤：G2グループ）

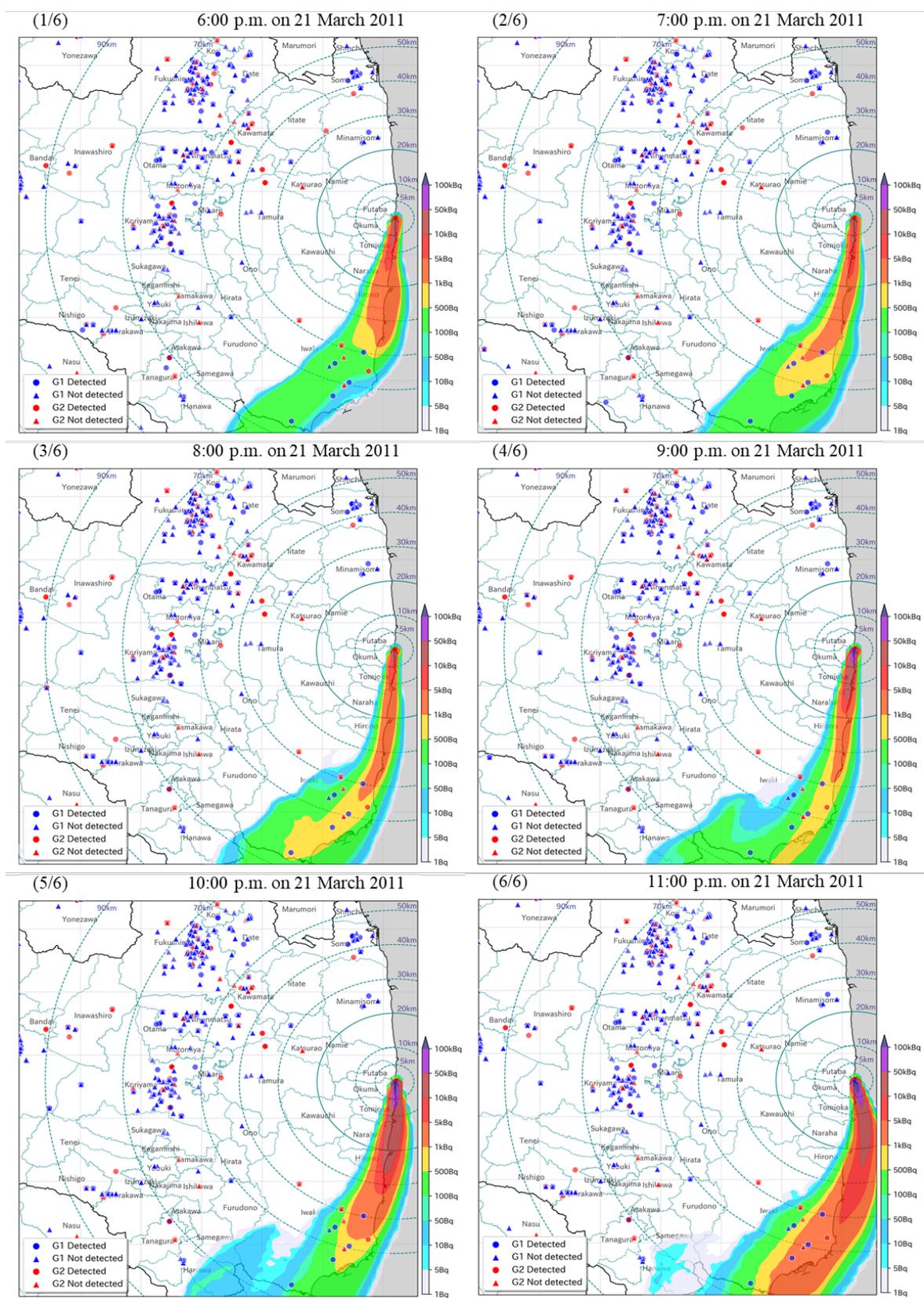


図 A32 3月21日 18時(1/6), 19時(2/6), 20時(3/6), 21時(4/6), 22時(5/6), 23時(6/6)における ^{131}I 空気中濃度マップと解析対象者の滞り場所（青：G1グループ、赤：G2グループ）