



Japan Atomic Energy Agency

原子力緊急時支援・研修センターと連携した研究 — 航空機モニタリングの経緯と防災への適用 —

日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門
安全研究センター

眞田 幸尚

平成27年度 安全研究センター報告会
平成28年1月22日
富士ソフト アキバプラザ

本発表には、「平成26年度原子力施設等防災対策等委託費及び放射性物質測定調査委託費
(80 km圏内外における航空機モニタリング)事業」の成果の一部を含む。

・福島第1原子力発電所事故後、周辺は放射性セシウムにより広範囲に汚染。

航空機モニタリングによる広域な測定の必要性

(我が国における航空機モニタリング技術)

・1980年代後半にTMI事故を契機に原研で開発が進められる。

・その後、原子力安全技術センター(NUSTEC)に技術移転

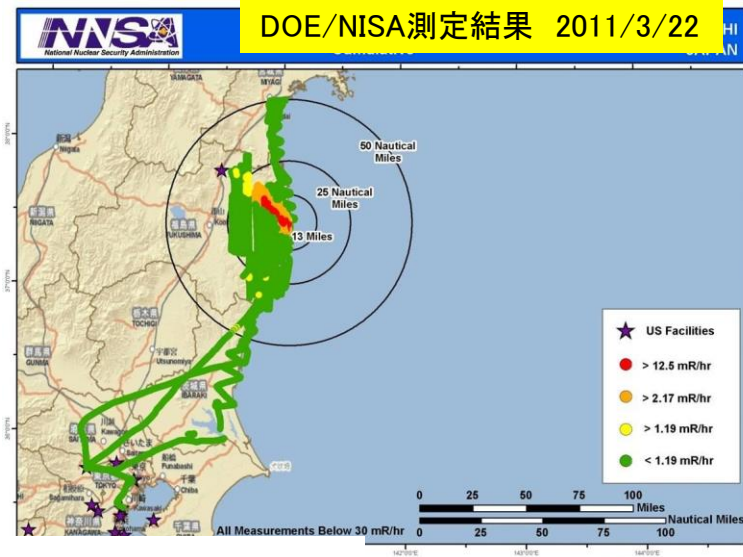
・福島事故前の指針(緊急時環境放射線モニタリング指針)では実施のみ記載

☆広域な汚染に対応できる体制・手法の確立がなされていなかった。



・事故後、2011年3月22日
米国エネルギー省(DOE/NISA)により
発電所周辺で航空機モニタリングを初めて実施

・汚染状況の広域調査および経過観察のため
原子力機構を中心に手法の開発・整備



JAERI-M
89-017

原研技術資料

緊急時における航空機サーベイ法確立とシステム実用化に関する検討

1989年2月

森内 茂・長岡 鋭・坂本 隆一・堤 尚藤 公明・天野 光・松水 武・柳瀬 笠井 篤

NUSTEC航空機サーベイシステム



事故後の航空機モニタリングの経緯

- ・事故後、原子力機構は福島研究開発部門を中心に航空機モニタリング技術を開発・整備しつつ、全国のモニタリングを実施。
- ・その後、比較的線量の高い地域を中心に継続的にモニタリングを実施。



原子力防災への航空機モニタリングの適用

- ・次の事故への体制構築
- ・発電所のバックグラウンド測定
- ・緊急時適用の課題



航空機モニタリングの課題と高度化

- ・国際比較
- ・核種別の評価(ヨウ素の測定)
- ・高精度化
- ・測定条件の拡大(地形、天候、海上)



年	2011				2012				2013				2014				2015			
月	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12
80 km 圏内	第1次 (4/6-4/29) 				第5次 (6/22-6/28) 				第7次 第8次 (8/27-9/28) (11/2-11/19) 				第9次 (9/1-9/20) 				第10次 (9/12-9/30) 			
	第3次 第4次 (5/31-7/2) (10/25-11/5) 				第6次 (10/31-11/16) 				警戒区域・計画的避難準備区域 (6.5次) (3/4-3/11) 											
<div style="border: 1px solid red; padding: 2px; display: inline-block;">福島原子力発電所事故</div>																				
80 km 圏外	第2次 80-120km圏内 (5/18-5/26) 				西日本+北海道全域 京都・滋賀～沖縄 (1/30-5/31) 															
	東日本第1次 青森～福井・岐阜・愛知 (6/22-10/10) 				東日本第2次 東日本第3次 (4/2～5/7) (10/31～12/28) 				東日本第4次 (9/3～11/4) 				東日本第5次 (9/21～11/7) 				東日本第6次 (10/2～11/4) 			

データ取得

- 検出器: NaI (12L)、スペクトル
- GPS
- 1秒毎のデータ保存



Flight height above the ground ~300m

測定範囲: 300~600m



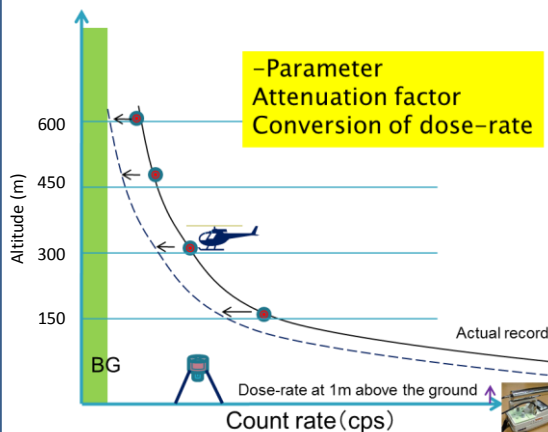
パラメータ取得

テストライン

- 線量率の勾配が小さい
- 地形がフラット

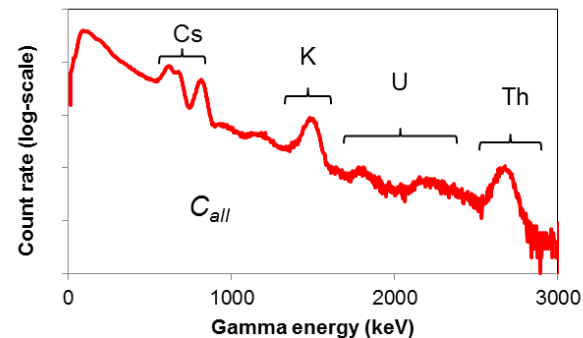
地上測定

- テストラインにおける地上の線量率を詳細に測定



解析及びマッピング

- 地上高さ1mの線量率
 - 放射性セシウムの沈着量
- ガンマ線スペクトル分析

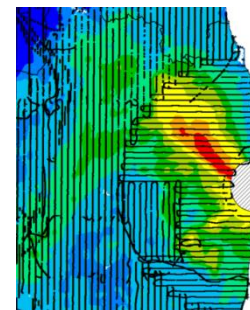


妥当性確認

地上における測定結果との比較
他部署・他機関の結果と比較

マッピング

IDW: Inverse
Distance
Weighted



項目	仕様
製造メーカー	RSI (Canada)
検出器サイズ	2" x 4" x 16" NaI 3本で1unit x 2 (1 unit:6.3Lx 2)
MCA ch	1024 ch
測定エネルギー範囲	0.02 ~ 3 MeV
ヘリコプター	<ul style="list-style-type: none"> ・機内積み込み型 ・底に燃料タンクのない機体を選定
サンプリングタイム	1秒
国内における整備	原子力規制庁 (4式保有) 原子力機構福島 (1式保有)
測定条件	対地高度: 300m, 速度: 80ノット
検出下限値 (平均的な天然放射性核種を想定)	線量率: 0.011 μ Sv/h 放射性セシウム沈着量: 16 kBq/m ²

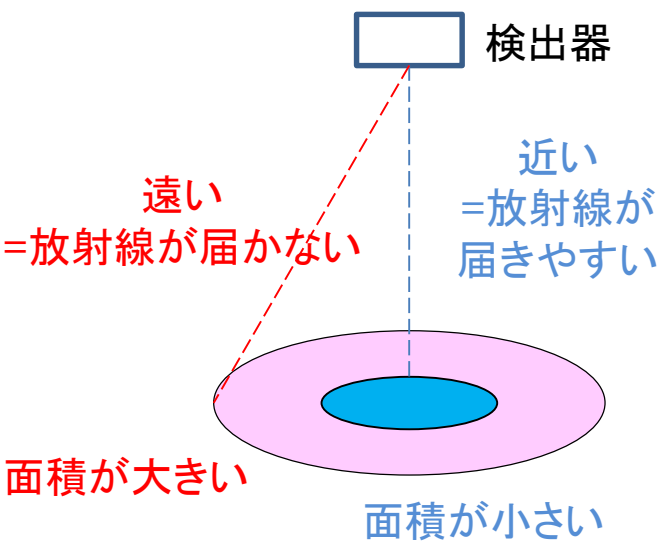
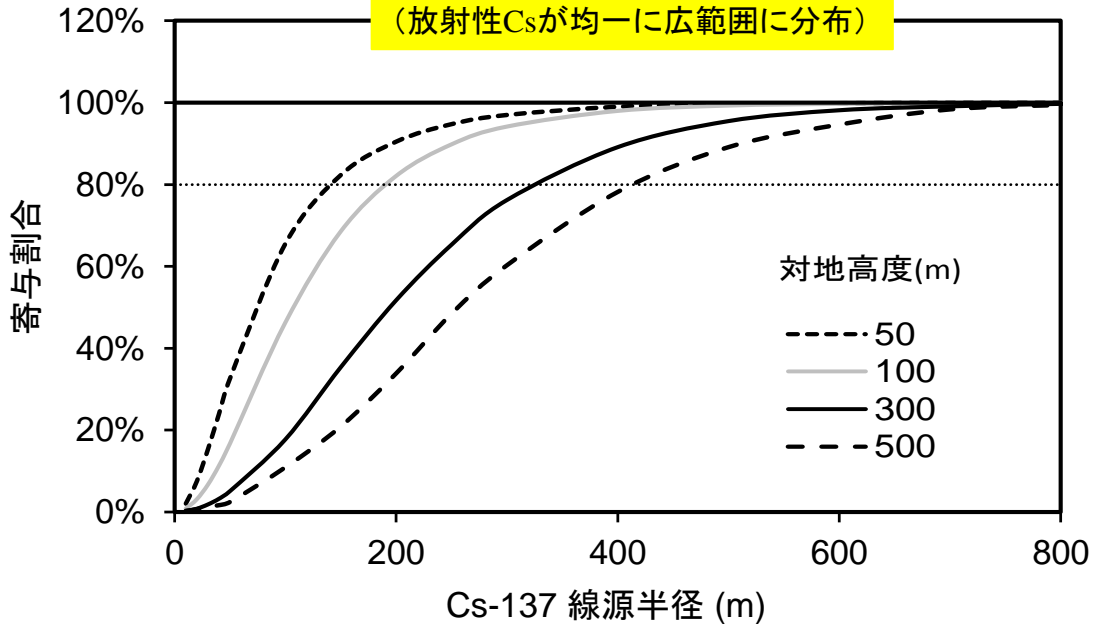


Bell 430
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製

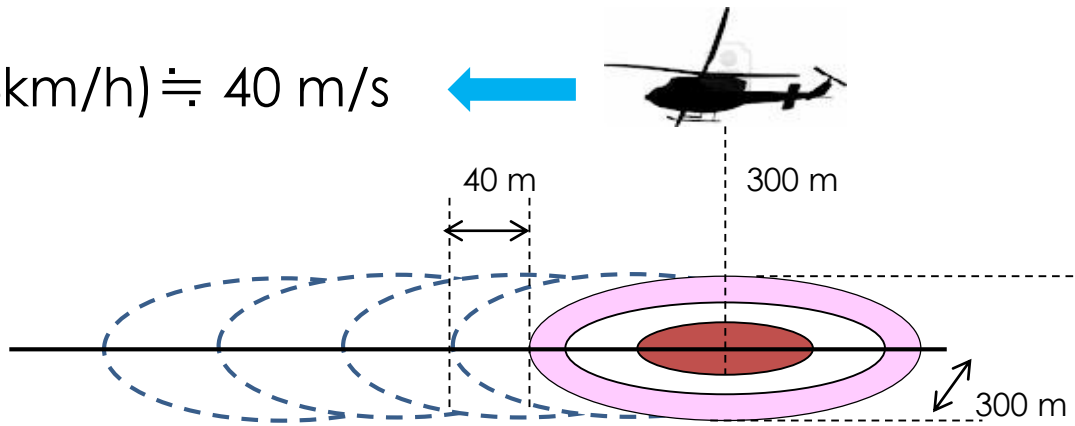


Bell 412
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製

無限平板線源
(放射性Csが均一に広範囲に分布)

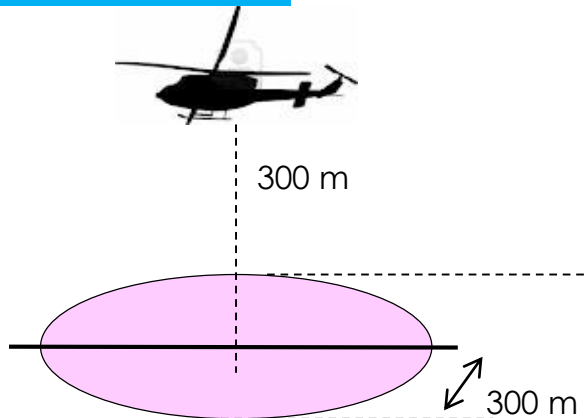


80 knots (148km/h) ≒ 40 m/s



300 m上空からは、地上の半径300 mの円内の放射線の平均値が測定されている

空からの測定



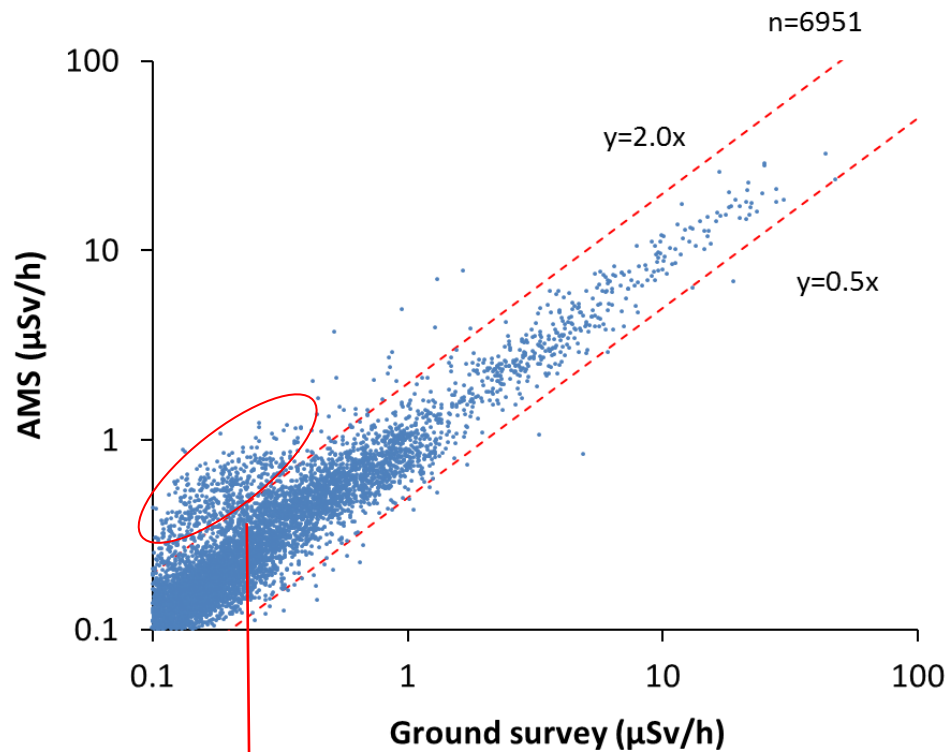
検出器を中心に半径300 mの範囲

地上の測定

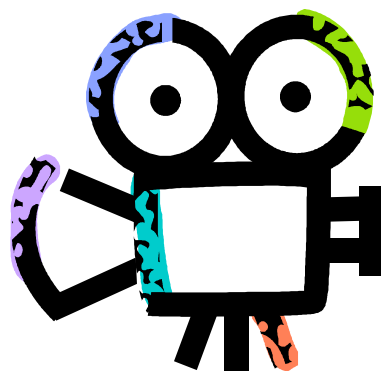


検出器を中心に半径50mの範囲

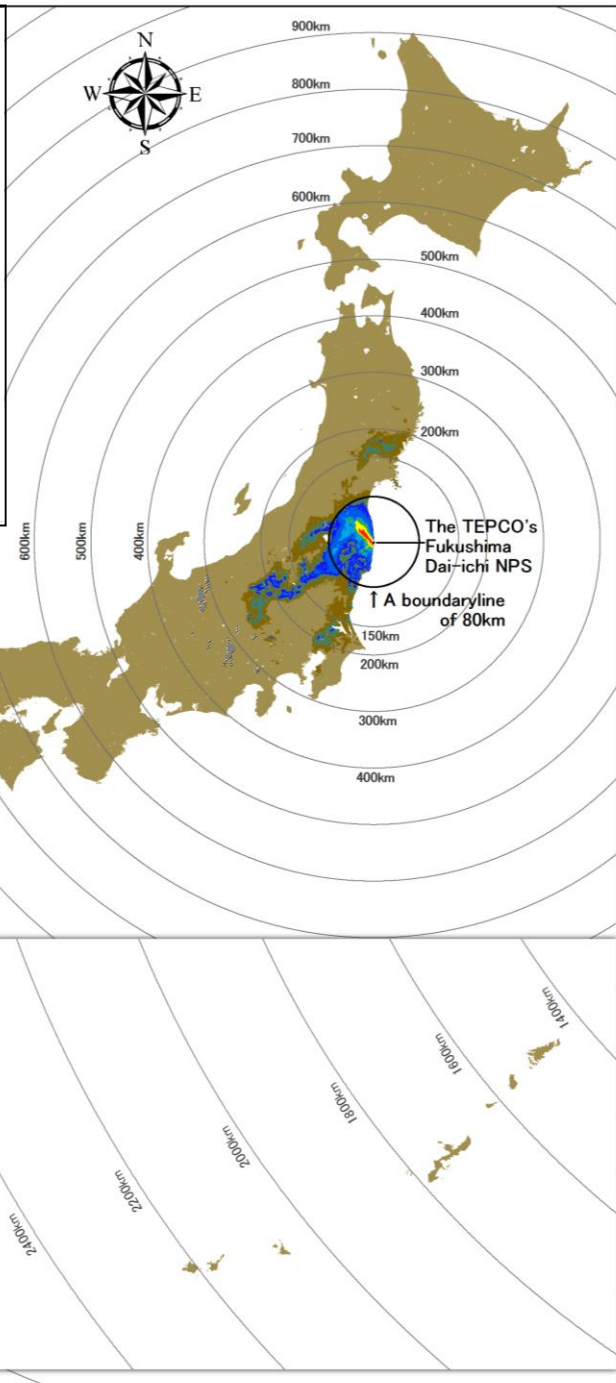
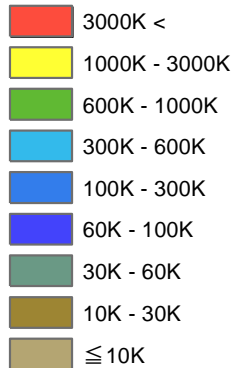
空と地上の測定例



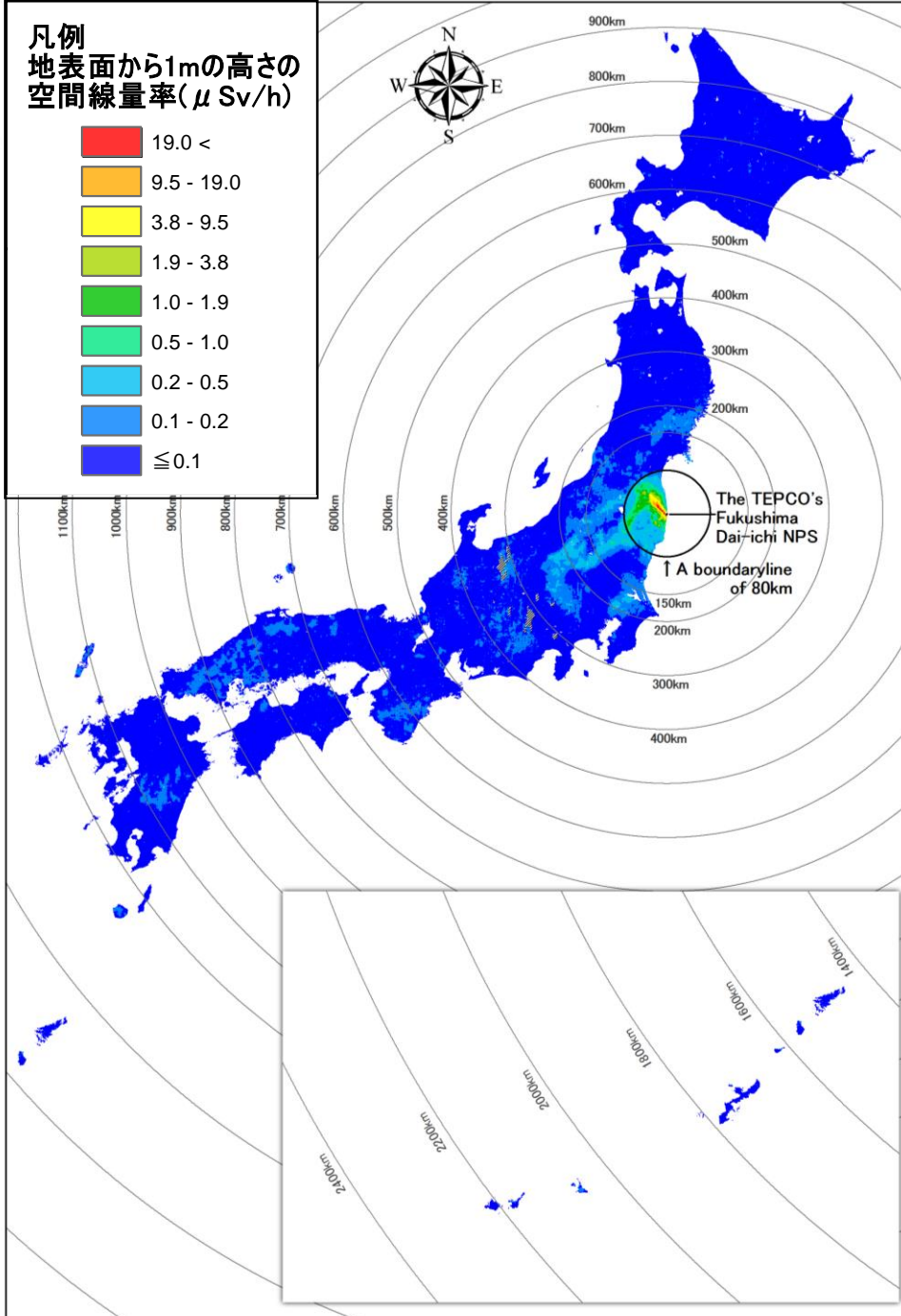
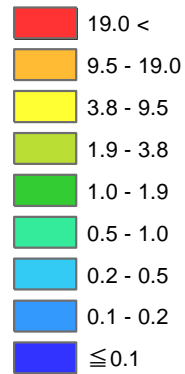
除染等の局所的な線量の低下した地域を捉えていない？

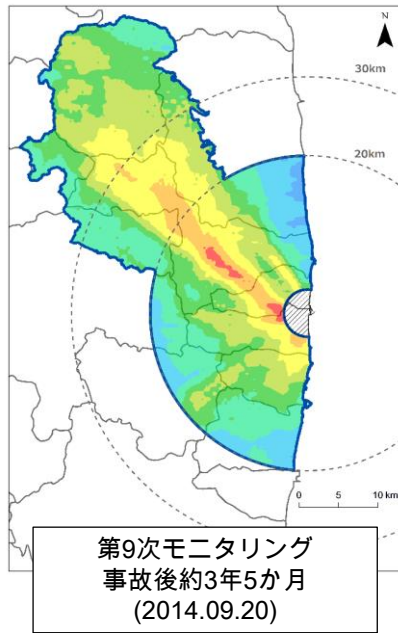
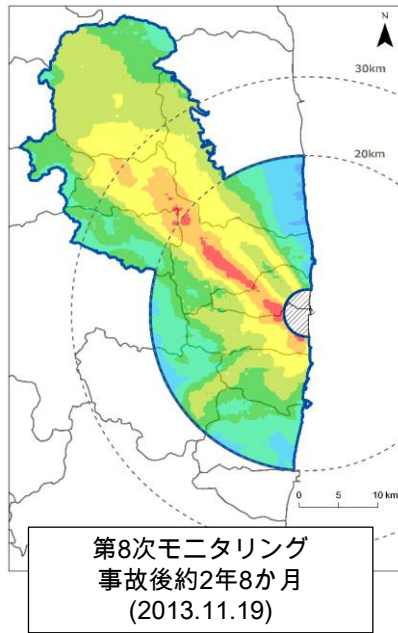
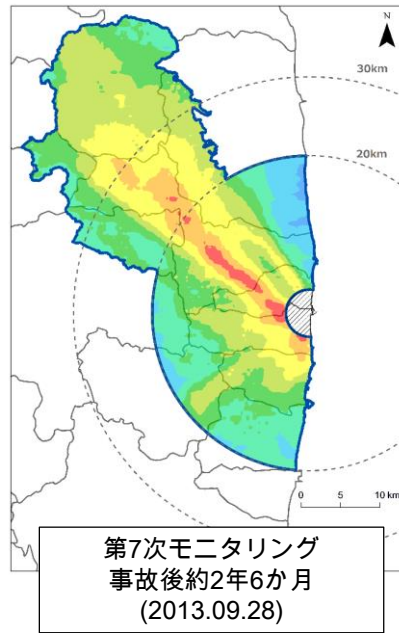
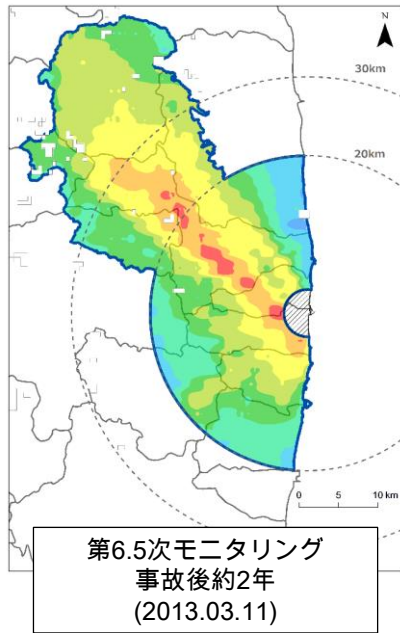
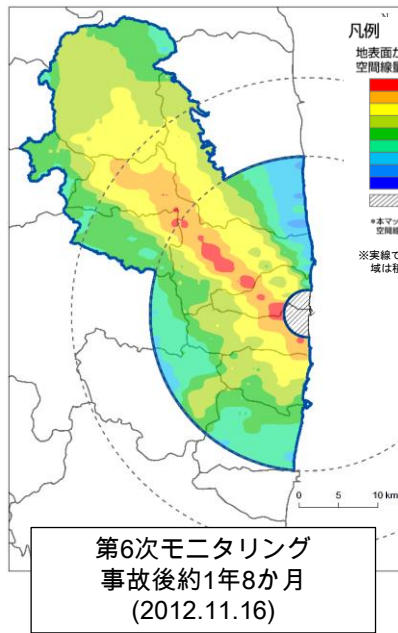
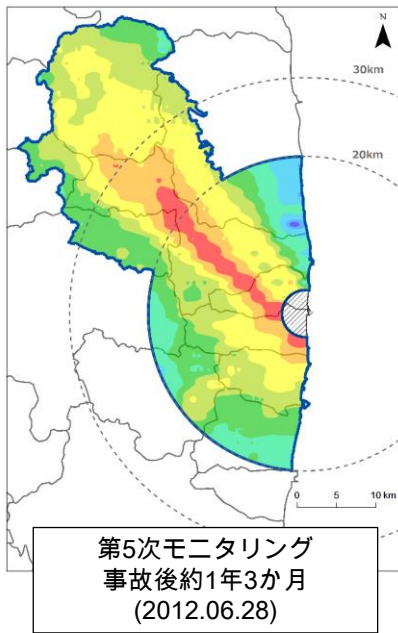
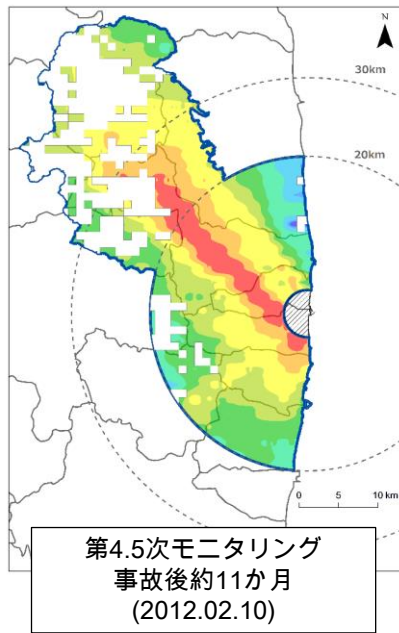
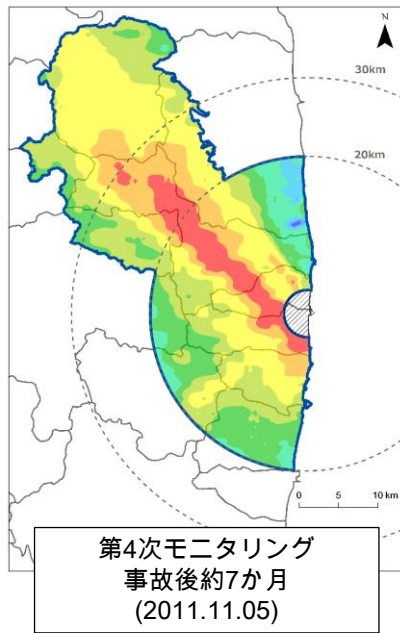


凡例
Cs-134及びCs-137の
合計の沈着量(Bq/m²)



凡例
地表面から1mの高さの
空間線量率(μSv/h)



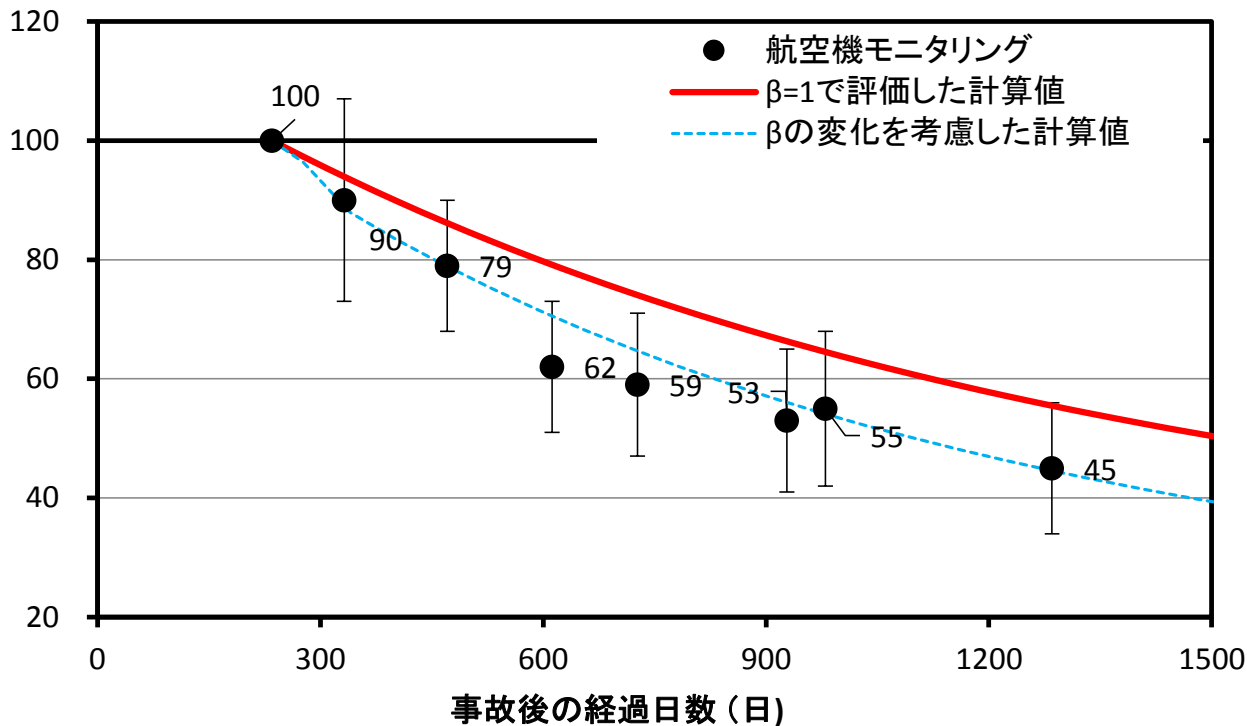


凡例
 地表面から1mの高さの
 空間線量率 (μSv/h)

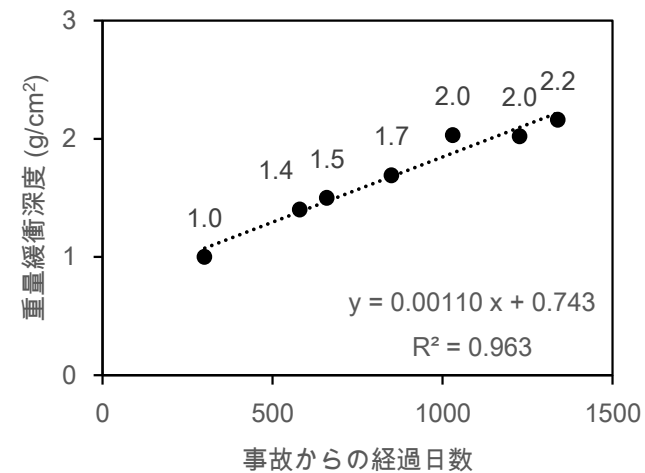
190 <
95 - 190
38 - 95
1.9 - 38
1.0 - 1.9
0.5 - 1.0
0.2 - 0.5
0.1 - 0.2
≤ 0.1

※本マップには天然核種による
空間線量率が含まれています。
 ※実線で囲われた白色の領
域は積雪等のあった箇所

第4次モニタリングを基準とした相対減衰率



スクレーパプレートによる土壌への緩衝深度の実測結果



モニタリングの結果は規制庁

・JAEA HPで適宜公開

規制庁:放射線モニタリング情報

<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/index.html>



避難指示区域設定・除染範囲決定の基礎資料になっている



JAEA:放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト

<http://emdb.jaea.go.jp/emdb/>



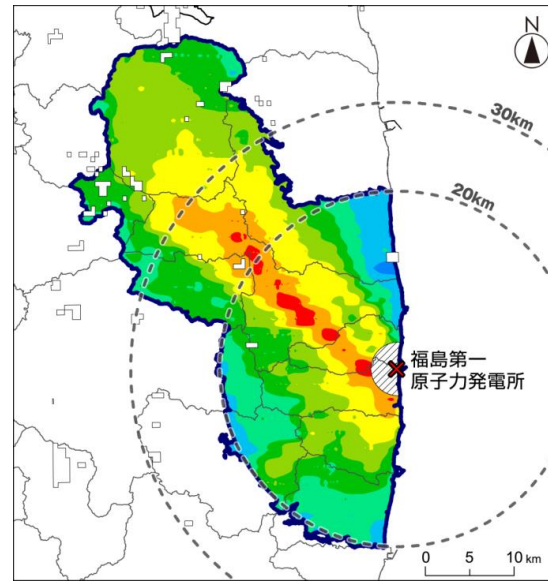
放射性物質モニタリングデータ

初めにご利用の方へ

マッピングツール

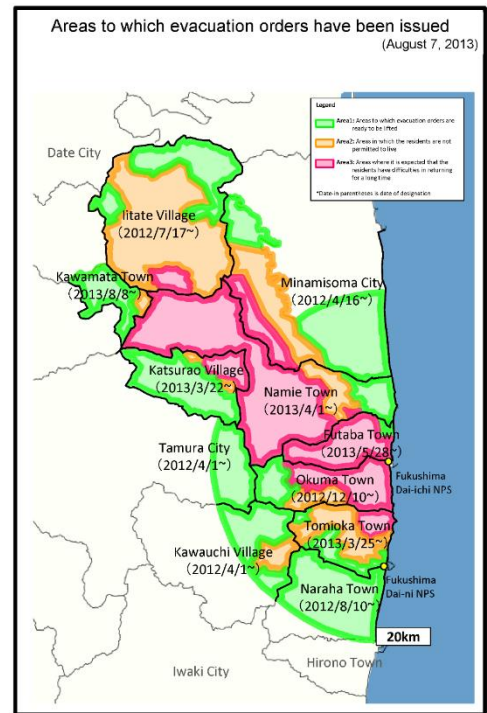
更新履歴

- 2013年12月14日: 2013年度のモニタリング結果を公開しました。
- 2013年12月10日: 2013年度のモニタリング結果を公開しました。
- 2013年11月29日: 2013年度のモニタリング結果を公開しました。
- 2013年11月11日: 2013年度のモニタリング結果を公開しました。



例: 事故2年後 (2013.03.11)

http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/20130807_01.pdf
(accessed 11 December 2013)



☆福島事故後の対応が認められ、「**原子力災害マニュアル**」に原子力機構が航空機モニタリングを実施することが記載される。

- ・平常時の活動として、...
- ① 福島周辺のモニタリングの継続
- ② 全国の発電所周辺のバックグラウンド(天然の放射性核種)モニタリング
- ・発電所周辺のフライトにおける技術的課題抽出
(フライト条件の最適化、モニタリングのシミュレーション)
- ・正確なBGを把握し、微少な放射線変化をとらえる
- ・技術の維持



原子力緊急時支援・研修センター内に
専門のチームを整備(約10名体制)



☆米国の状況 (DOE)

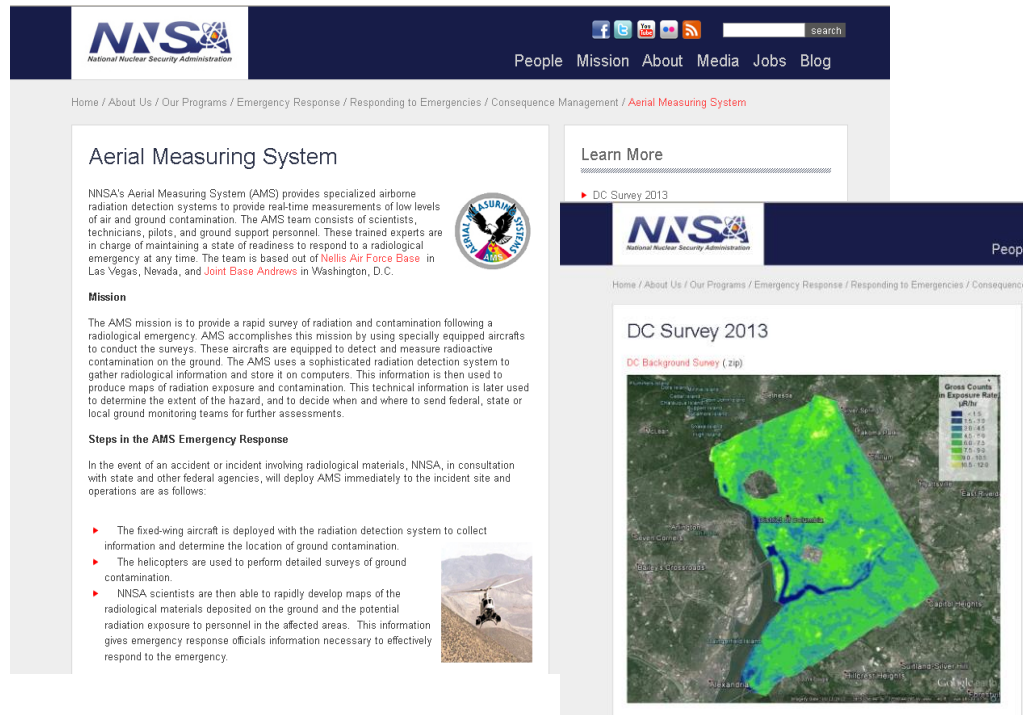
- ・DOE、軍、州警察、環境省等航空機モニタリングを行うチームが複数存在
- ・訓練やBGモニタリングを行い技術を維持
- ・原子力防災では、優先順位が高い(事故後、数時間以内に実施できる体制を整備)



☆我が国の課題

(体制等)

- ・対応体制・規定基準類の整備
- ・体制の最適化及び技術の継承・維持



The screenshot shows the NNSA Aerial Measuring System (AMS) website. The main heading is "Aerial Measuring System". Below it, a paragraph describes the AMS mission: "NNSA's Aerial Measuring System (AMS) provides specialized airborne radiation detection systems to provide real-time measurements of low levels of air and ground contamination. The AMS team consists of scientists, technicians, pilots, and ground support personnel. These trained experts are in charge of maintaining a state of readiness to respond to a radiological emergency at any time. The team is based out of Nellis Air Force Base in Las Vegas, Nevada, and Joint Base Andrews in Washington, D.C."

The "Mission" section states: "The AMS mission is to provide a rapid survey of radiation and contamination following a radiological emergency. AMS accomplishes this mission by using specially equipped aircraft to conduct the surveys. These aircraft are equipped to detect and measure radioactive contamination on the ground. The AMS uses a sophisticated radiation detection system to gather radiological information and store it on computers. This information is then used to produce maps of radiation exposure and contamination. This technical information is later used to determine the extent of the hazard, and to decide when and where to send federal, state or local ground monitoring teams for further assessments."

The "Steps in the AMS Emergency Response" section lists:

- ▶ The fixed-wing aircraft is deployed with the radiation detection system to collect information and determine the location of ground contamination.
- ▶ The helicopters are used to perform detailed surveys of ground contamination.
- ▶ NNSA scientists are then able to rapidly develop maps of the radiological materials deposited on the ground and the potential radiation exposure to personnel in the affected areas. This information gives emergency response officials information necessary to effectively respond to the emergency.

On the right side of the screenshot, there is a "DC Survey 2013" section featuring a radiation map of the Washington D.C. area. The map is color-coded by radiation levels, with a legend titled "Gross Counts in Exposure Rate (µR/h)" showing a scale from 1.5 to 95.5. The map shows higher radiation levels (yellow and red) in the central urban area and lower levels (green and blue) in the surrounding areas.

<http://www.nnsa.energy.gov/aboutus/ourprograms/emergencyoperationscounterterrorism/respondingtoemergencies-0-0>

(技術課題)

- ・解析技術の信頼性
- ・核種別の評価(ヨウ素の測定)
- ・測定条件の拡大(天候、海上)
- ・高精度化(地形、Rnの影響)

[課題] 世界標準との比較

☆欧州の航空機モニタリングの代表的な機関であるスコットランド大学連合環境研究センター(SUERC)と相互比較研究

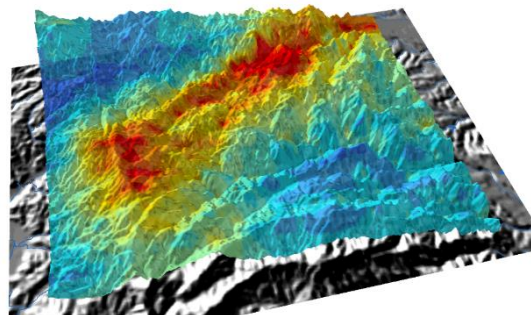
- SUERC及びJAEAの機材を持ち込み、福島で同フライト条件でデータを取得
- 概ね同様な結果⇒解析技術の信頼性を証明



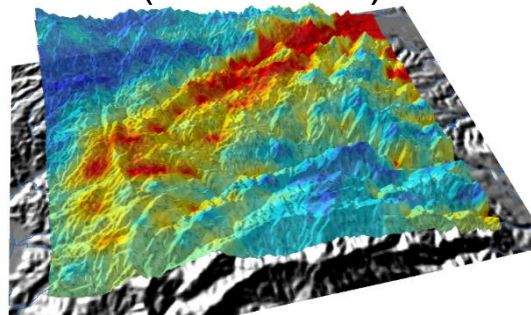
SUERCの航空機モニタリング機器



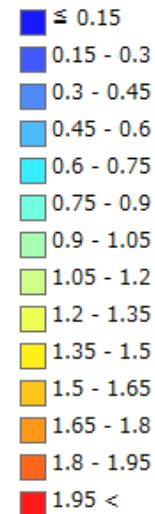
SUERC (高度300m)



JAEA (高度300m)



[$\mu\text{Sv/h}$]

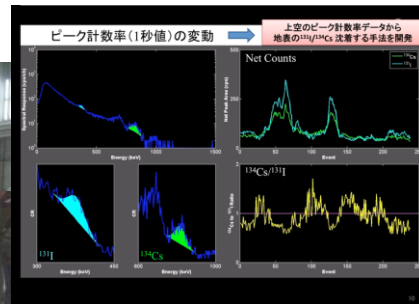
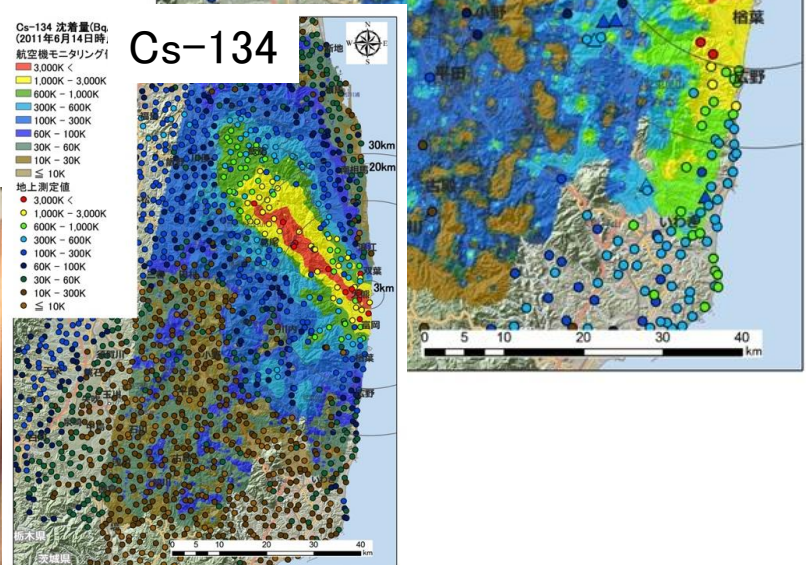
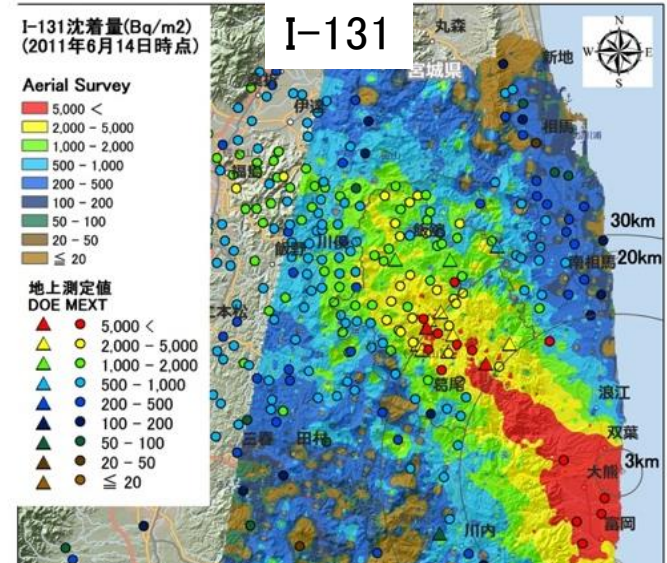


[課題] 事故時においては、多核種の評価が必要

☆事故時に取得した航空機データを核種毎に再解析を試みる

- 4月2, 3日の3フライトについて解析し、4月3日時点で評価
- ヨウ素-131のマップ作成に成功
- セシウムと同様に北西方向に高濃度
- 南部にも高濃度の広がり
- 地上測定結果(6月14日時点)と減衰補正した解析結果を比較=良く一致

➡ 本技術をベースとし、防災への適用研究



DOE航空機(C-12)

[課題] 海上への汚染水流出モニタリング

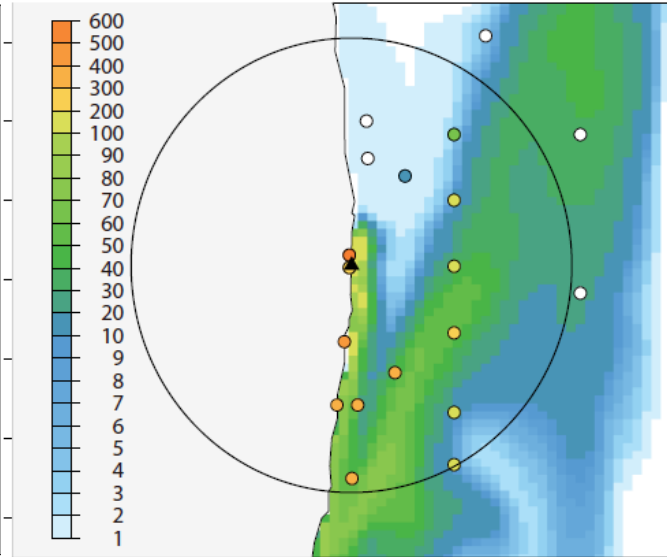
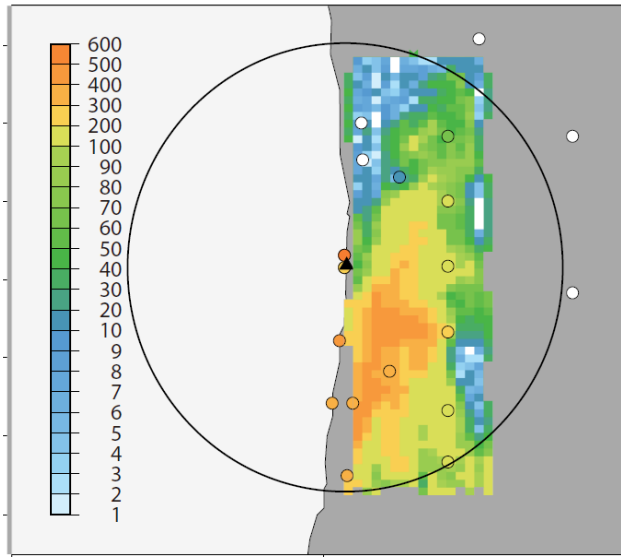
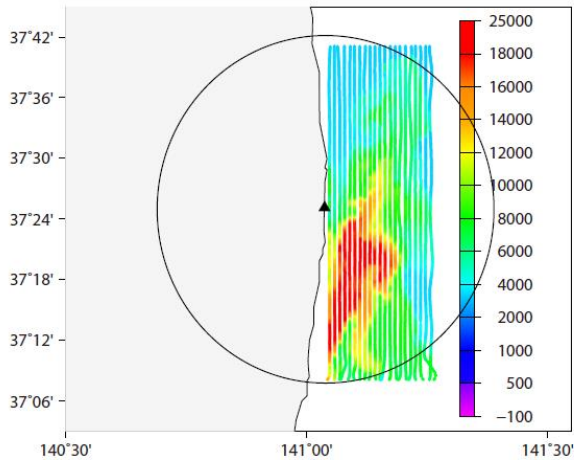
☆事故時に取得した航空機データを核種毎に再解析を試みる

- モデル、サンプリングとの整合性を確認 (I-131, Cs-134, Cs-137)
- 事故直後の海洋拡散状況調査への航空機モニタリングの適用可能性を示唆

全計数 (生データ)

放射性Cs濃度換算

Model simulation :
137Cs (Bq L⁻¹)



積雪の評価

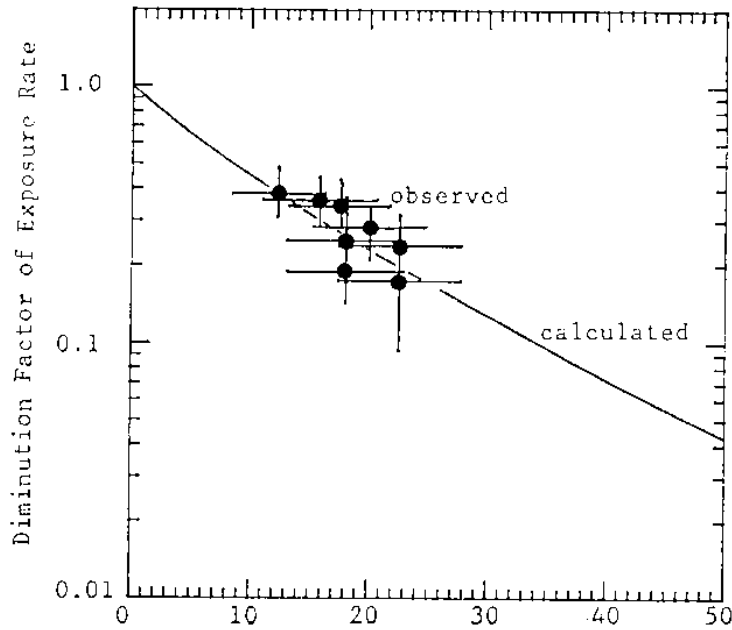
☆放出事故後、積雪があることを想定

先行研究

日本原子力研究所により、航空機モニタリングデータと積雪深さの実測値から積雪の遮蔽係数を評価。

データ点数が少ない。Csのデータがない。

放射線の減衰率



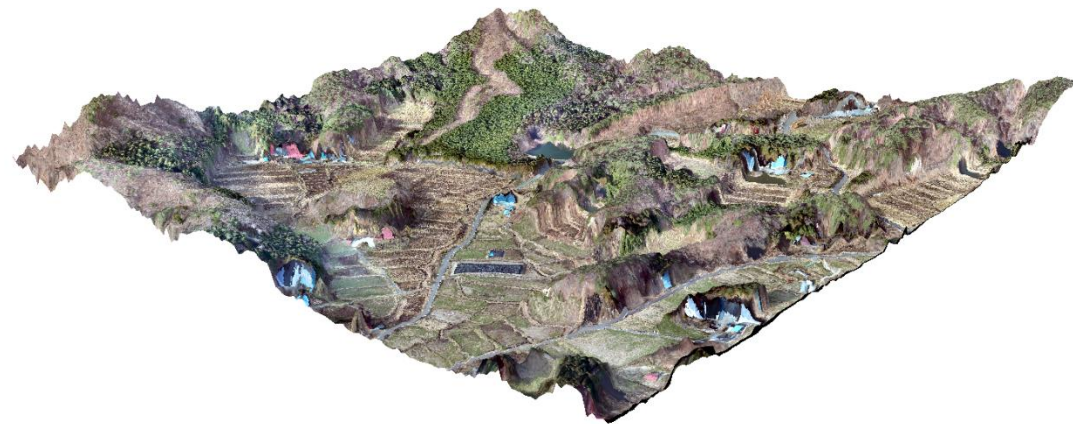
積雪深さ

Water Equivalent (g/cm²)
based on snow sampling

ソリューション

オルソ画像(写真データ)の視野差から作成する3Dマップを積雪の前後で作成。

同時に放射線を計測することにより、放射線の減衰と積雪の関係を導く。



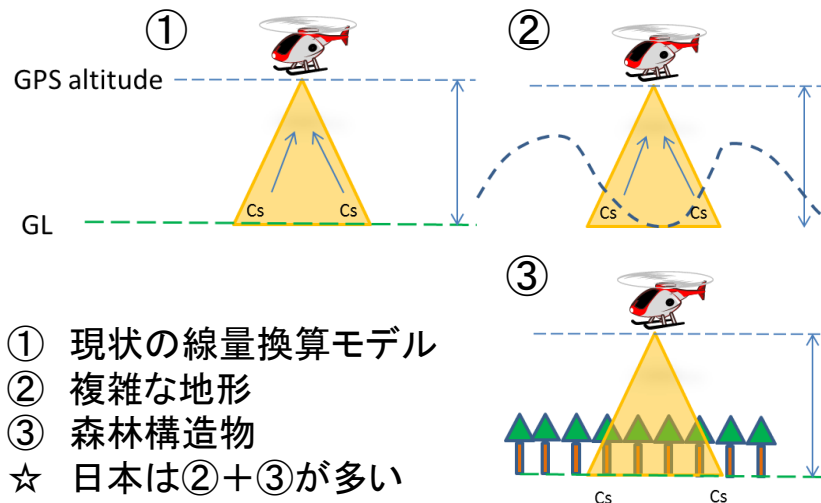
☆実測データ取得・解析を実施中

[課題] 日本は欧米に比べて急峻な地形

⇒山間部・森林部で合わない

☆放射線輸送コードを用いた地形の補正方法を検討

- 福島での測定結果へ適用
- 地上値との整合性が向上
- 大量なデータを処理できるような手法を検討



地上の線源から測定器に入射するγ線束φ

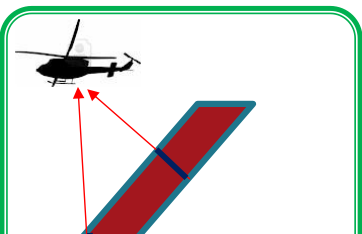
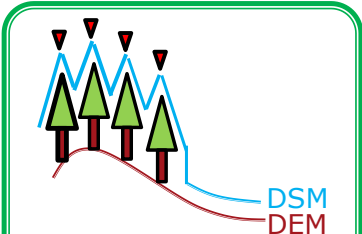
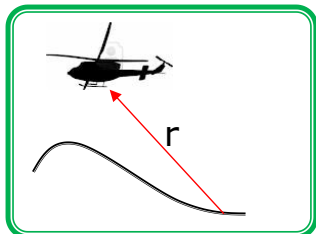
$$\phi = \sum_{i=0}^{N_s} V \frac{C \cdot B \cdot F}{4\pi r^2} \exp(-\mu t)$$

B:ビルドアップ係数
 Ns:線源数

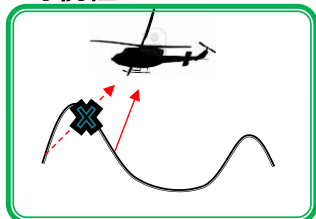
線源-測定器間距離: r

森林による減弱:F

土壌による減弱μと線源強度C



可視性: V

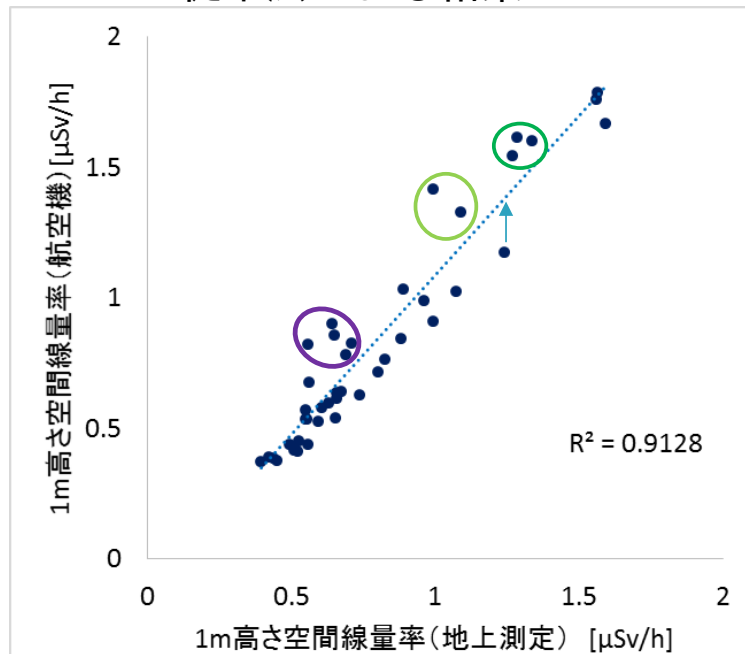


・ DSMとDEMの差分から樹木の領域を検出
 DSM: digital surface model
 DEM: digital elevation model

深度方向の汚染分布

$$C = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right)$$

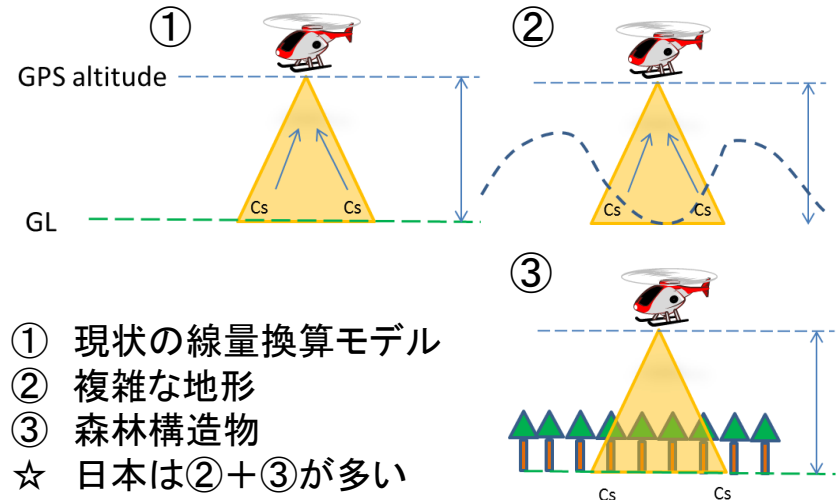
従来法による結果



[課題] 日本は欧米に比べて急峻な地形
 ⇒山間部・森林部で合わない

☆放射線輸送コードを用いた地形の補正方法を検討

- 福島での測定結果へ適用
- 地上値との整合性が向上
- 大量なデータを処理できるような手法を検討



地上の線源から測定器に入射するγ線束φ

$$\phi = \sum_{i=0}^{Ns} V \frac{C \cdot B \cdot F}{4\pi r^2} \exp(-\mu t)$$

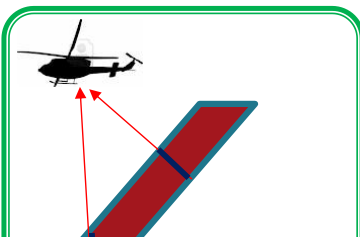
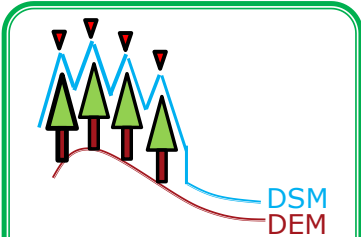
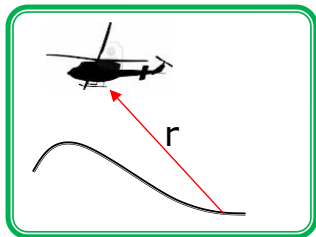
B:ビルドアップ係数
 Ns:線源数

地形補正を行った結果

線源-測定器間距離: r

森林による減弱: F

土壌による減弱 μt と線源強度 C

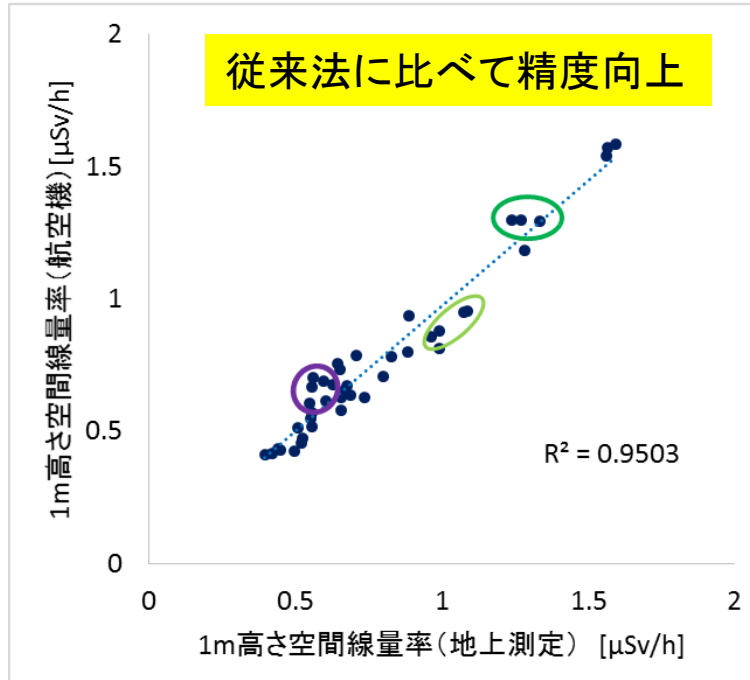


可視性: V

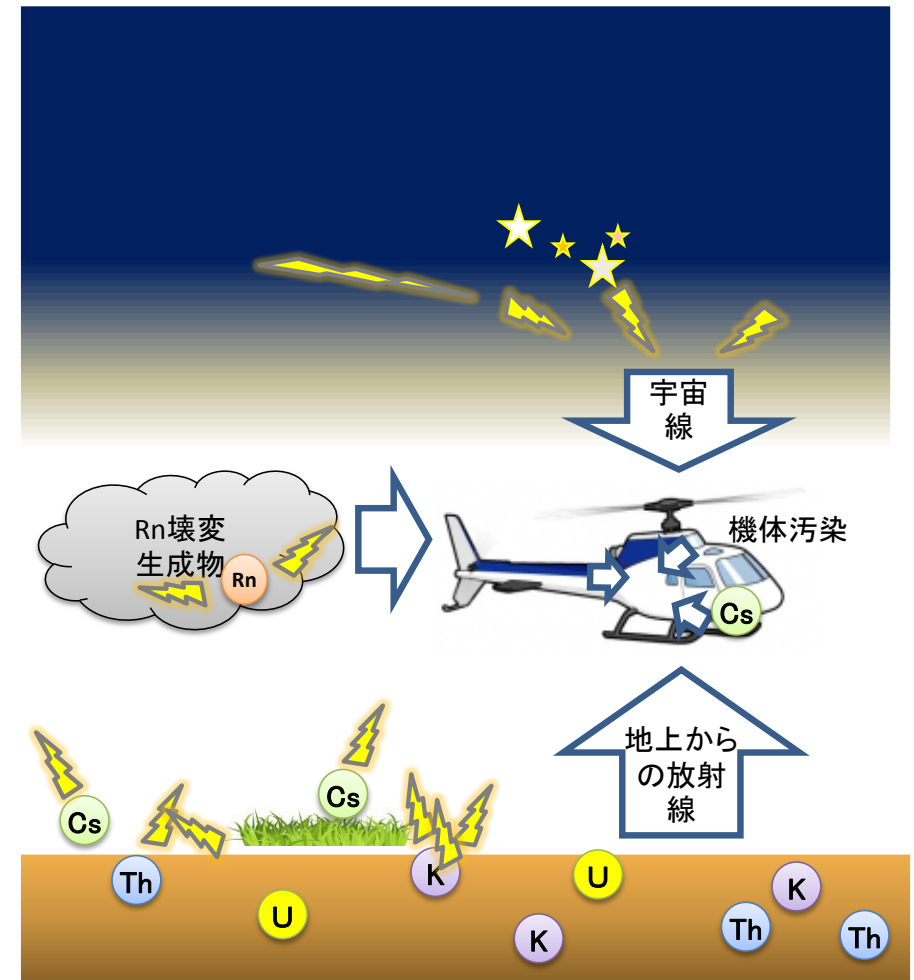
・ DSMとDEMの差分から樹木の領域を検出
 DSM: digital surface model
 DEM: digital elevation model

深度方向の汚染分布

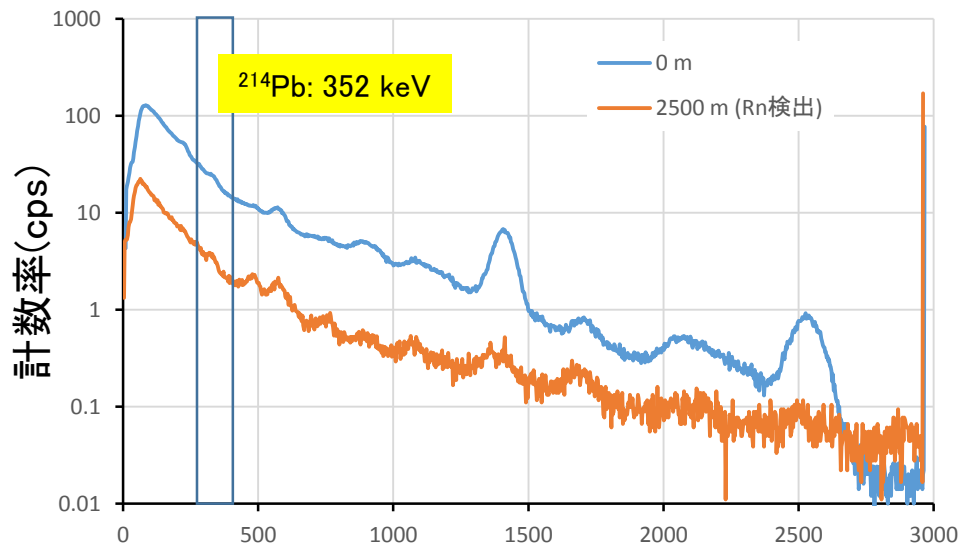
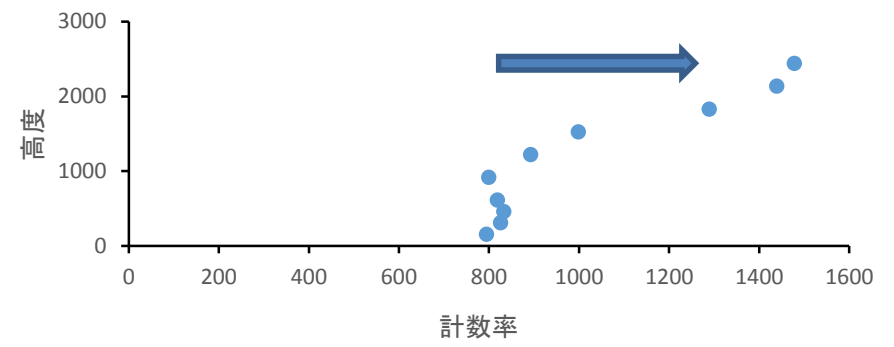
$$C = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right)$$



航空機モニタリングにおけるバックグラウンド要因



九州沖で取得した Rn子孫核種の検出例



☆実測データ取得・解析を実施中

事故後の航空機モニタリングの経緯

- ・事故後、原子力機構は福島研究開発部門を中心に航空機モニタリング技術を開発・整備しつつ、全国のモニタリングを実施。
- ・その後、比較的線量の高い地域を中心に継続的にモニタリングを実施。



- ・広域な放射線分布の変化を確認
- ・避難区域、除染区域の設定

原子力防災への航空機モニタリングの適用

- ・次の事故への体制構築
- ・発電所のバックグラウンド測定
- ・緊急時適用の課題



- ・原子力緊急時支援・研修センター内に専門のチームを整備
- ・川内原子力発電所のバックグラウンドモニタリング実施

航空機モニタリングの課題と高度化

- ・核種別の評価(ヨウ素の測定)
- ・国際比較
- ・高精度化
- ・測定条件の拡大(地形、天候、海上)



- ・研究開発を継続的に実施

ご静聴ありがとうございました

(参考文献)

Sanada et. al., The aerial radiation monitoring in Japan after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, Prog. Nuc. Sci. Tech. 4, 76-80, 2014

鳥居ら, 航空機モニタリングによる東日本全域の空間線量率と放射性物質の沈着量調査, 日本原子力学会誌(ATOMOZ), 54, 160-165, 2012

鳥居ら, 広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査, JAEA-Technology, 2012-036, 2012