

研究成果報告会
-ふくしまの環境回復に係るこれまでの取組-
(2015年11月10日)

無人機を用いた
放射線モニタリング技術の開発

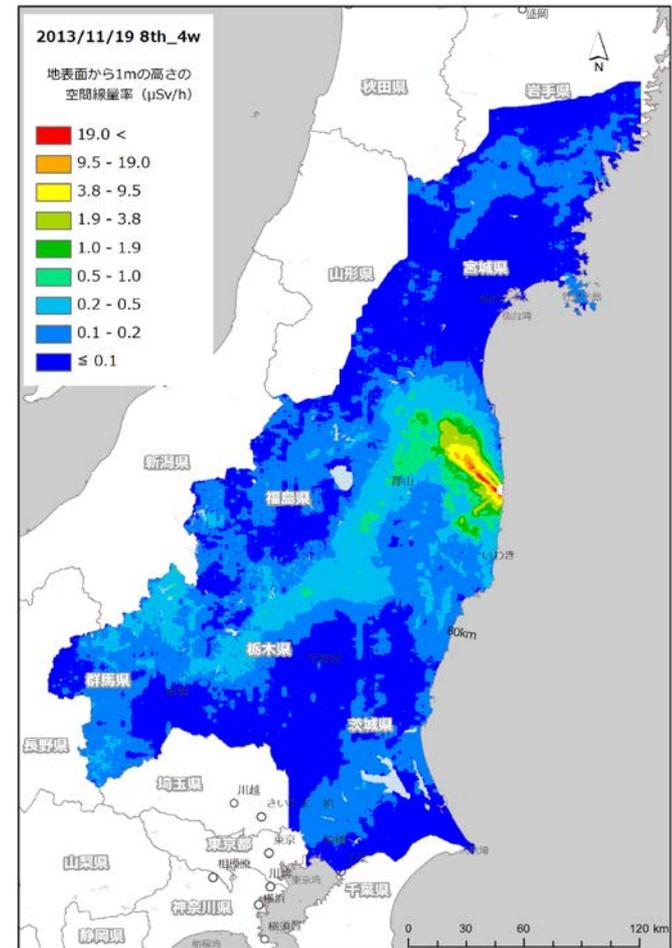
日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門 福島環境安全センター
真田 幸尚

・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が分布。

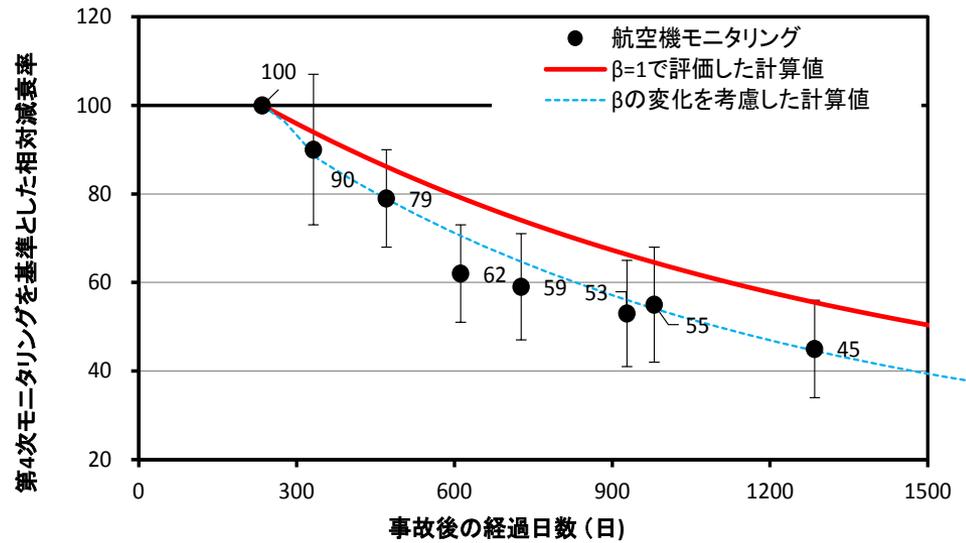
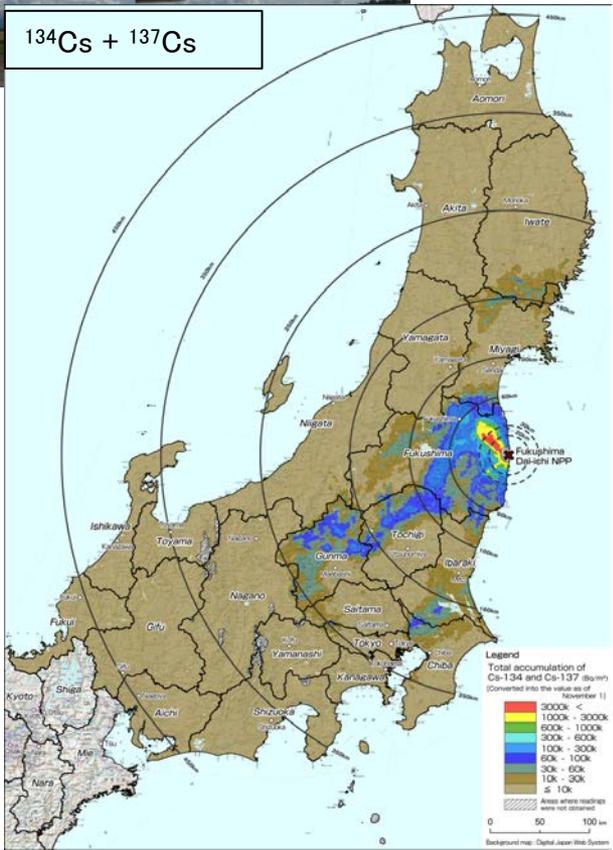


・復興、住民帰還の促進のため、迅速で正確かつ様々な特殊な場所に対応できる放射線計測方法が求められている。

(ex) 高線量、森林、水底、水中



有人のヘリコプターを用いたモニタリングを事故直後から現在まで継続的に実施

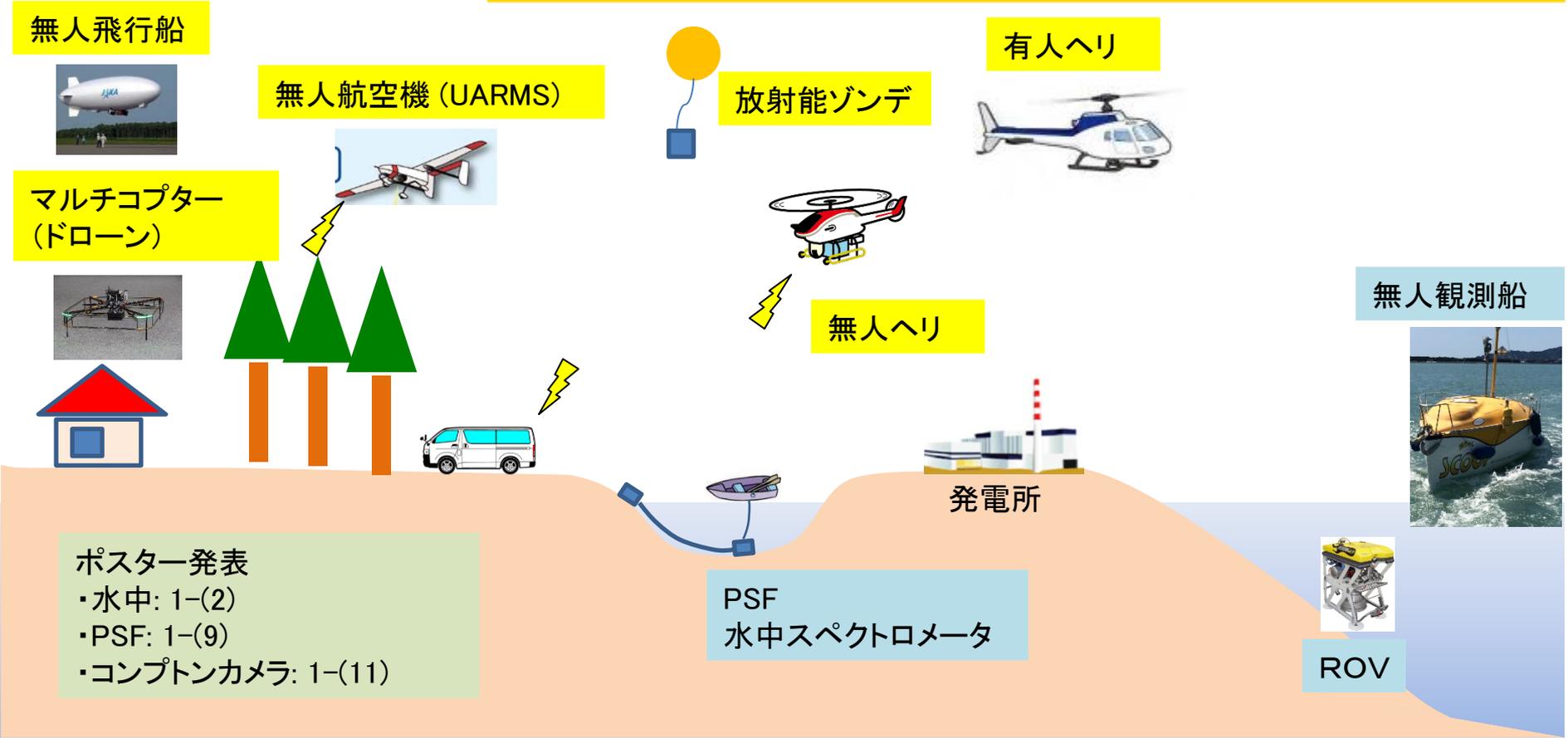


広域で迅速なモニタリング
 →全体像の把握
 →全国のBGモニタリングの開始 (H27)
 原子力防災技術への適用

⇒H26の結果: ポスター1-(10)
 ⇒地形補正: ポスター1-(15)

★ 空からの遠隔・無人放射線モニタリング技術⇒発電所周辺の放射線量分布状況の把握

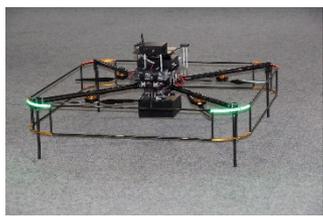
・避難指示区域の設定・除染区域の決定・住民帰還の加速化



★ 水底の直接モニタリング技術⇒ため池・ダム・河口域等の放射性物質濃度分布状況

・営農再開の加速化・放射性物質の挙動理解

- 放射線の分布状況を空から測定する
 - どのように、なにを測定しているのか
 - 発電所周辺の線量率分布の変化
無人ヘリコプターによる測定
 - 森林の放射線量を評価するには
放射線測定用ドローンの開発
 - 原子力防災のためのツール開発
無人航空機 (UARMS)
 - 環境創造センターと将来の展開

	Manned helicopter	Unmanned airplane	Unmanned helicopter	Multicopter
				
Detector				
Standard altitude of ground level	300 m*	150 m	80 m	10 m
Standard air speed	185 km/h	108 km/h	28.8 km/h	7.2 km/h
Flight time	90 min	360 min	90 min	10 min
Maximum payload	100 kg*	10 kg	10 kg	3 kg
Distance of remote	-	5 km	5 km	1 km

データ取得

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



Flight speed
70 - 80 knots

Flight height above the ground ~300m

測定範囲: 300~600m



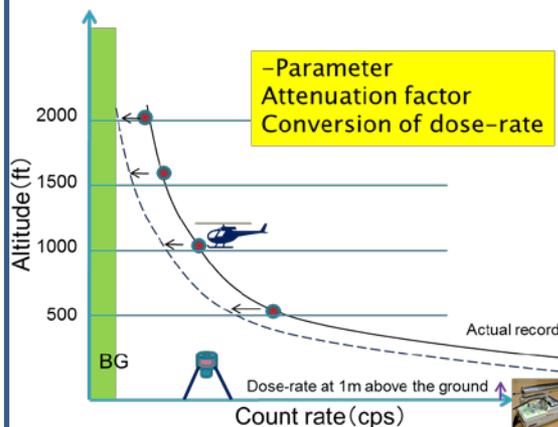
パラメータ取得

テストライン

- 線量率の勾配が小さい
- 地形がフラット

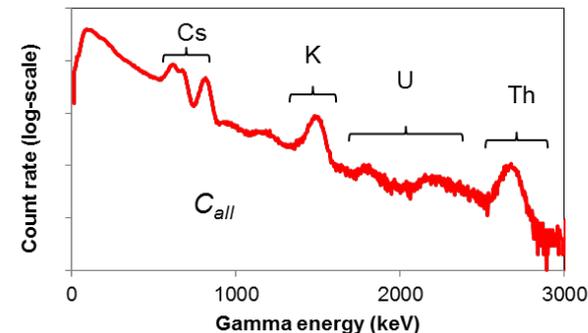
地上測定

- 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

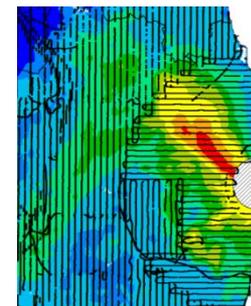


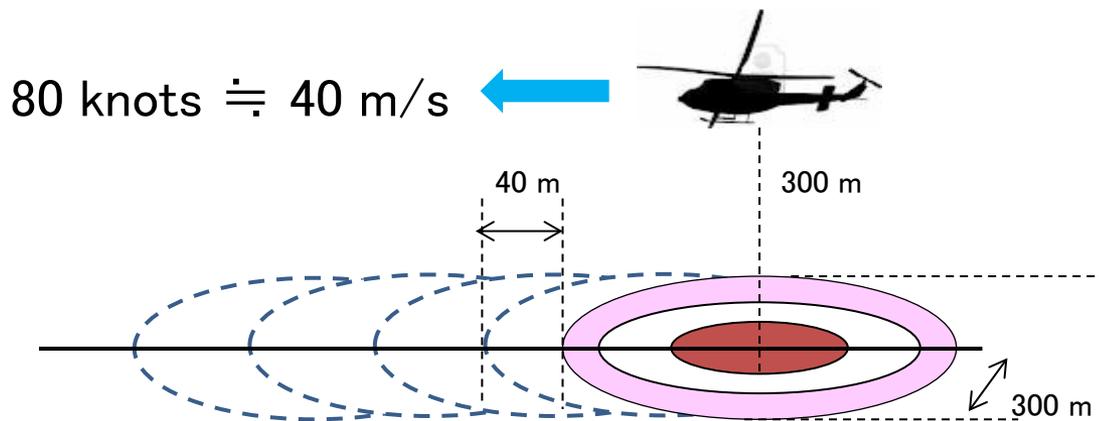
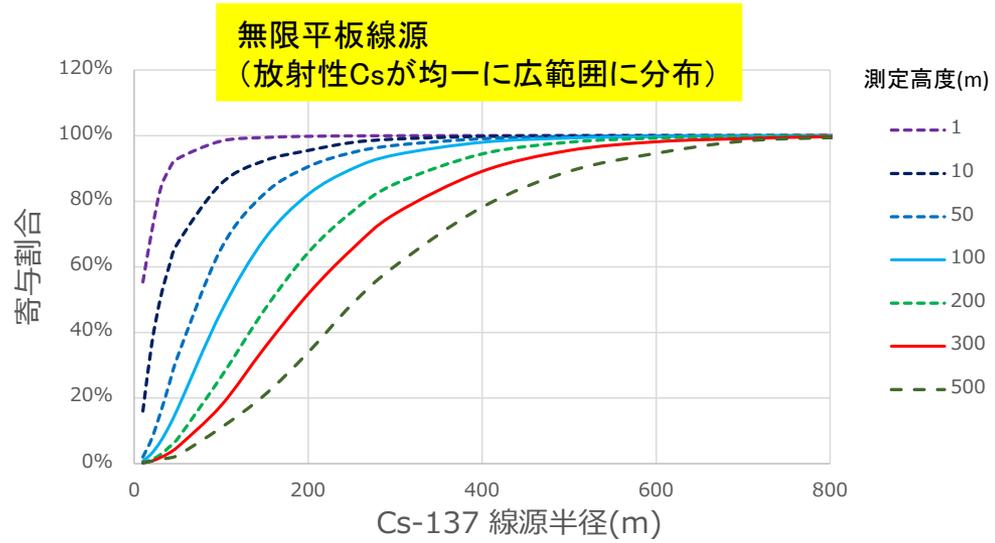
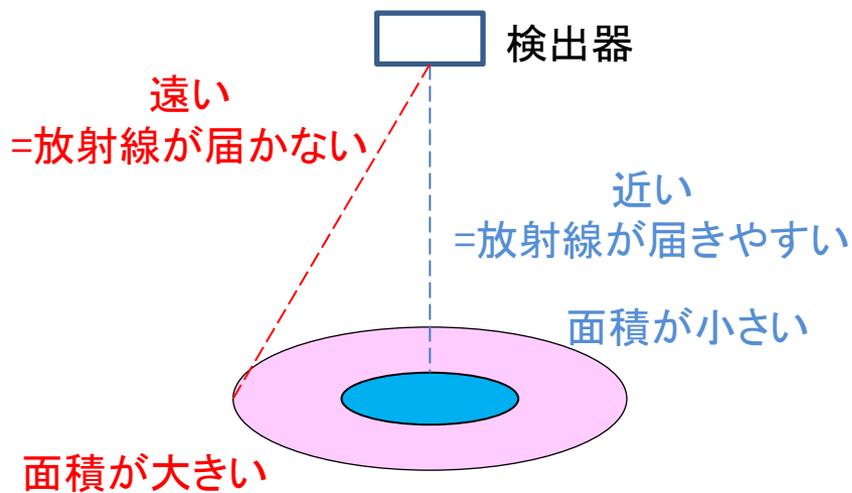
妥当性確認

- 線量率測定結果
- 他事業の結果と比較

マッピング

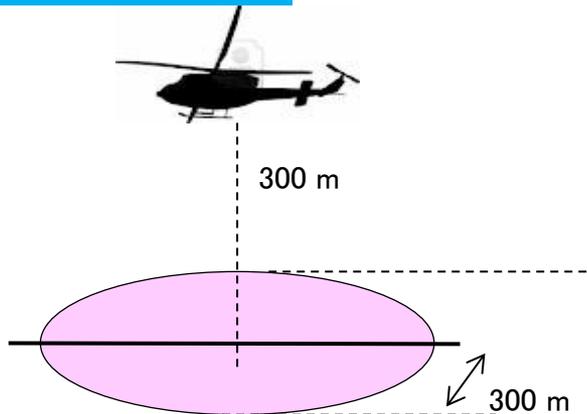
IDW: Inverse
Distance
Weighted





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



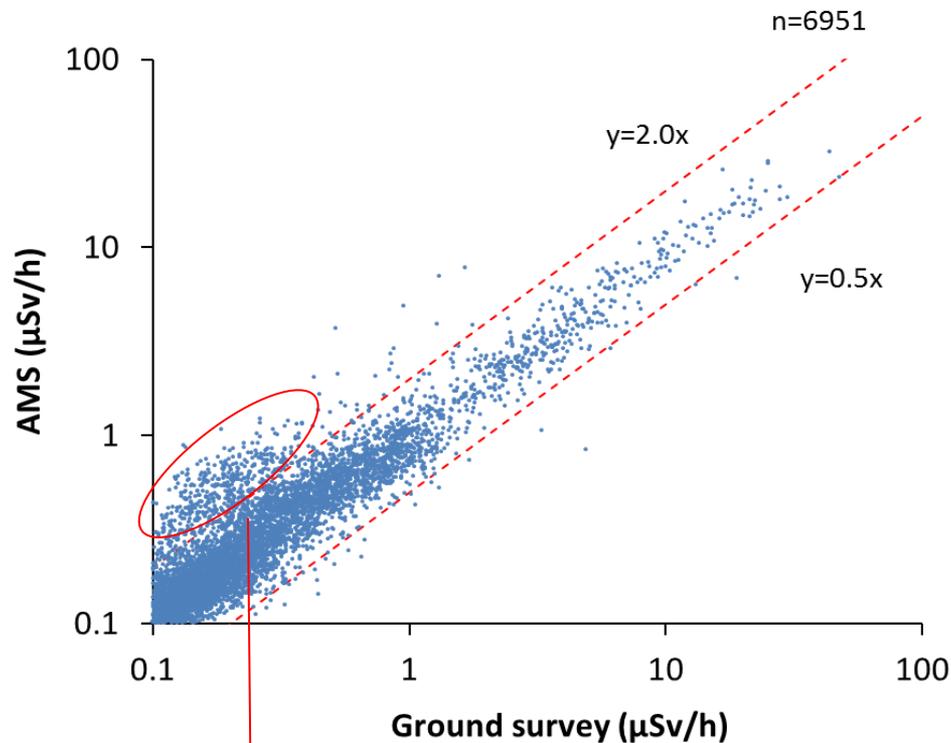
検出器を中心に半径300 mの範囲

地上の測定



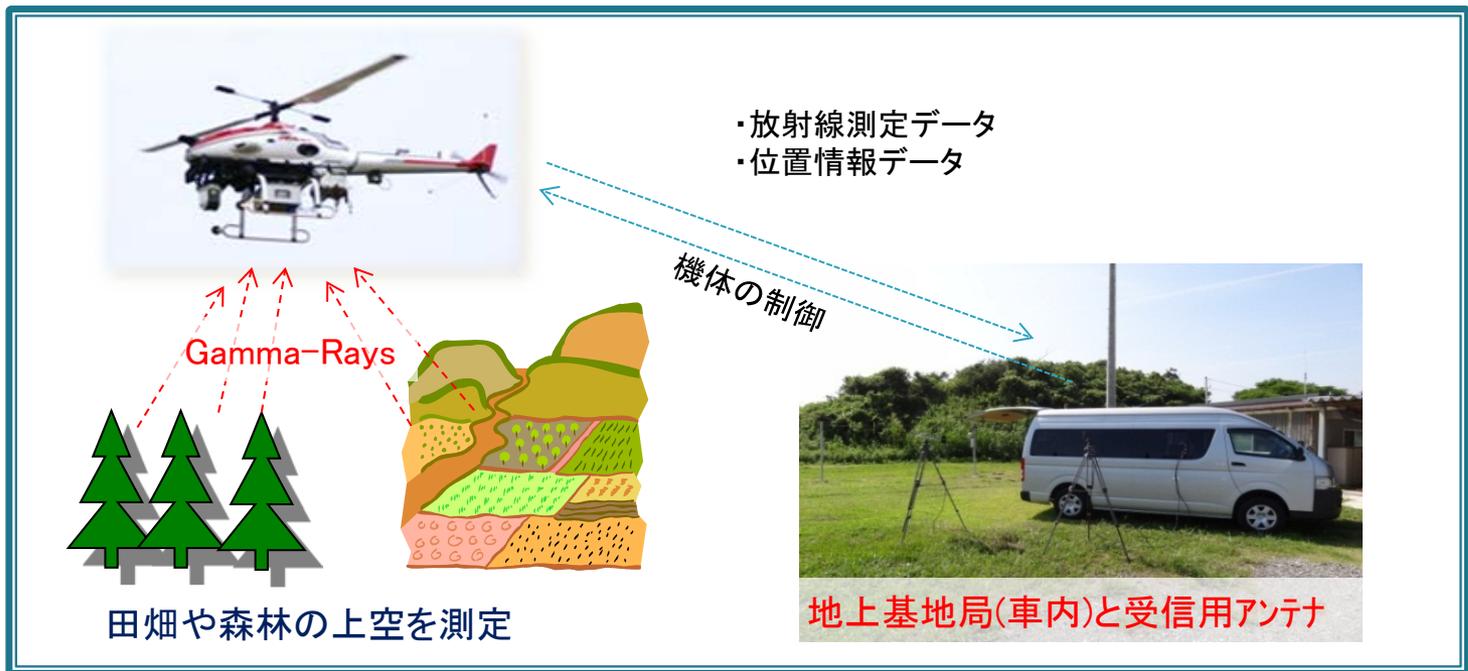
検出器を中心に半径5-10 mの範囲

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？

- 放射線の分布状況を空から測定する
 - どのように、なにを測定しているのか
 - 発電所周辺の線量率分布の変化
 - 無人ヘリコプターによる測定
 - 森林の放射線量を評価するには
 - 放射線測定用ドローンの開発
 - 原子力防災のためのツール開発
 - 無人航空機 (UARMS)
 - 環境創造センターと将来の展開



《特長》

1. 人が容易に立ち入れない場所(高線量率場、森林、田んぼ等)での測定が可能
2. 地上局を安全な場所に設置できる(眺望の良いところ; < 数 km)
3. 放射線その他、映像もリアルタイムで把握できる
4. 位置が正確に把握できる(GPS、自律飛行)
5. 事前に飛行プログラムが設定できる(定期観測が可能) - 除染前後、経時変化
6. 低高度(< 300m)での観測が可能(航空法の対象外)
7. ホバリングも可能 * モニタリング場所の周辺には人がいないこと。

ヤマハ発動機(株)自律飛行型無人ヘリコプターRMAX G1

①機体全長及び重量

- ・全長: 4m未満(ローター含む)
- ・重量: 100kg未満

②飛行性能

- ・最大速度: 70km/h以上(対気速度: 測定は7 - 14 km/h)
- ・連続時間: 60分以上
- ・最高高度: 150m以上
- ・ホバリング精度: 3m以下
- ・飛行範囲: 3km以上
- ・制御信号途絶時に自動帰還可能

③制御性能

- ・座標指定によるプログラム飛行が可能
- ・姿勢が安定した状態で空中停止、前後、左右、上下に移動可能
- ・飛行用カメラを搭載していること

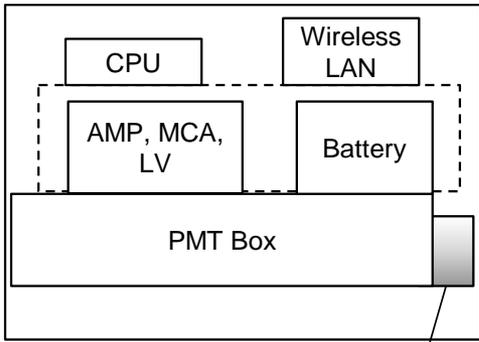
④搭載性能

- ・搭載重量: 10kg以上(標高0m)

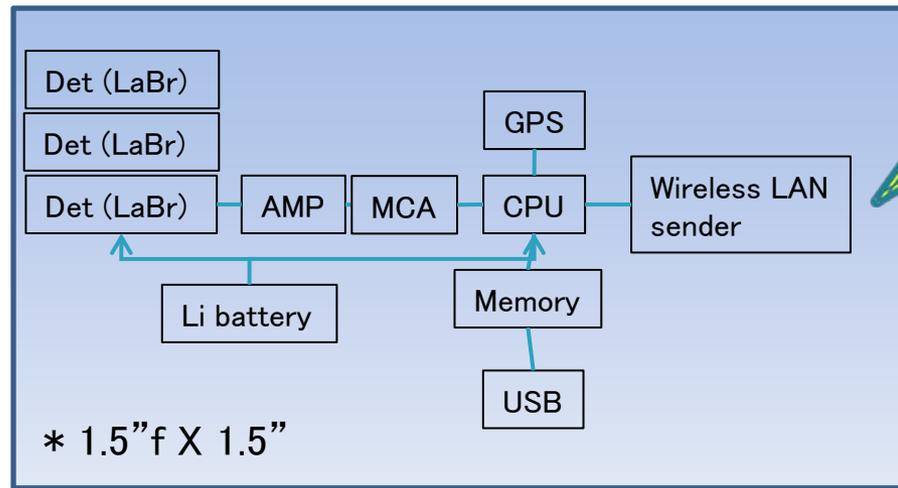
⑤情報伝達

- ・ヘリからの映像入力装置(地上からコントロール化)
- ・ヘリの飛行制御用通信以外に機体と地上局の双方向の外部通信機能を備え、地上局にて表示可能

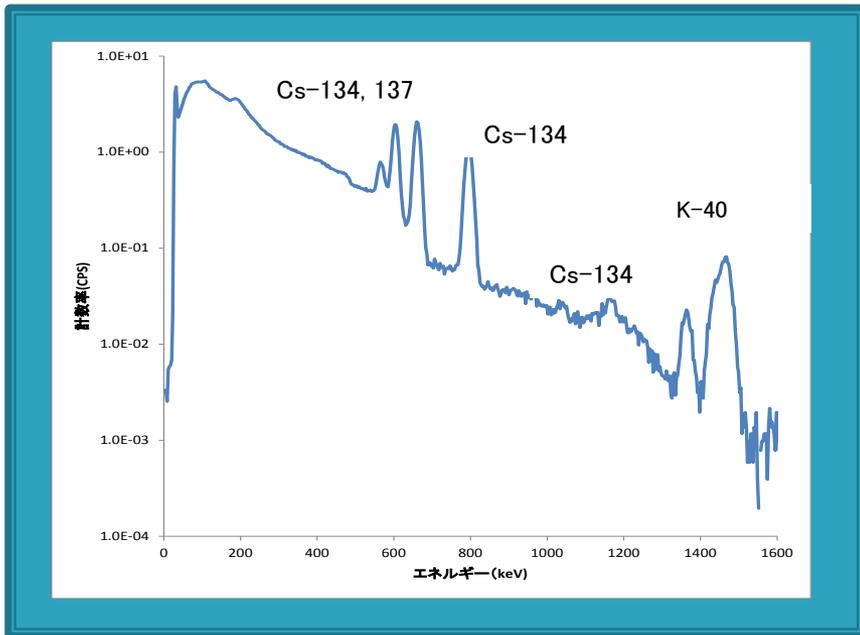
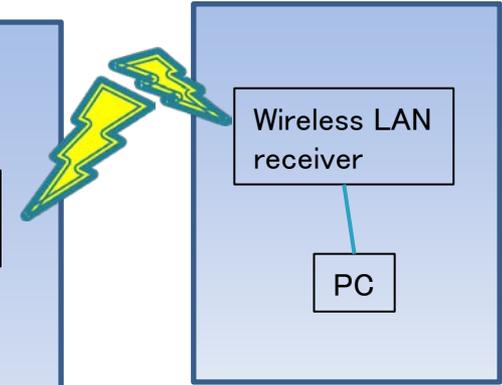




1.5" LaBr3検出器 × 3



* 1.5" f X 1.5"



カメラ

検出部

- ・検出器内部でのGPS/計数率データ保存
- ・位置情報は、機体制御情報から
- ・独立した無線LANによりダウンリンク

γ線は、放出される放射性核種によりエネルギーが異なる。
 エネルギーを弁別する測定手法
 (γ線スペクトロメリー)

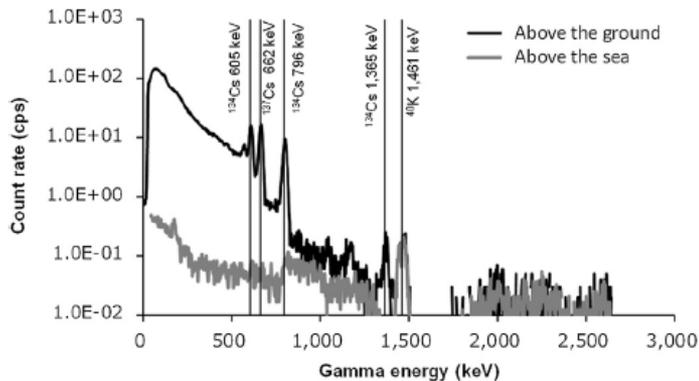
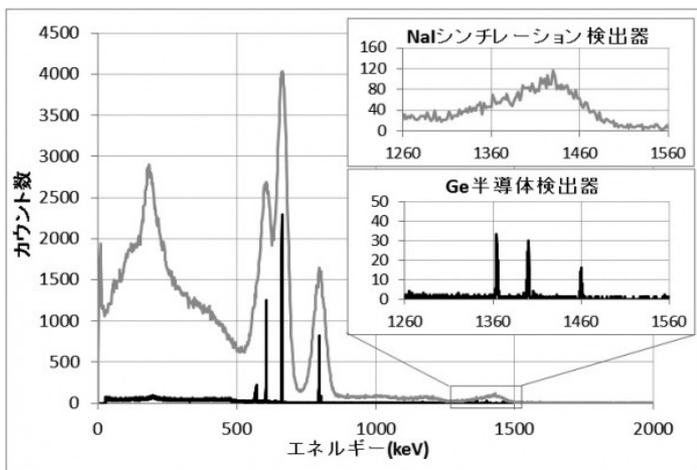
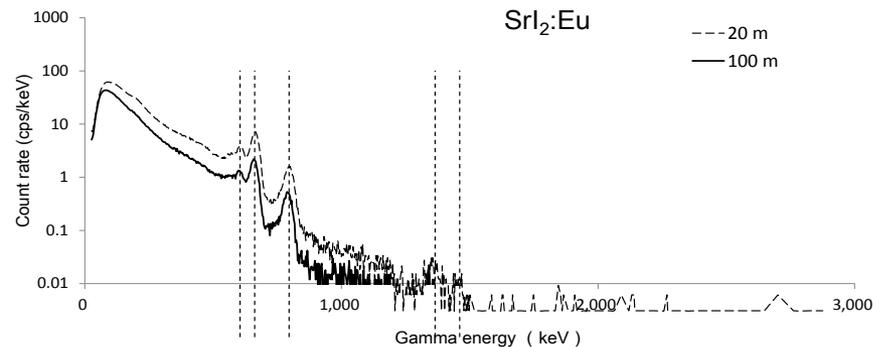
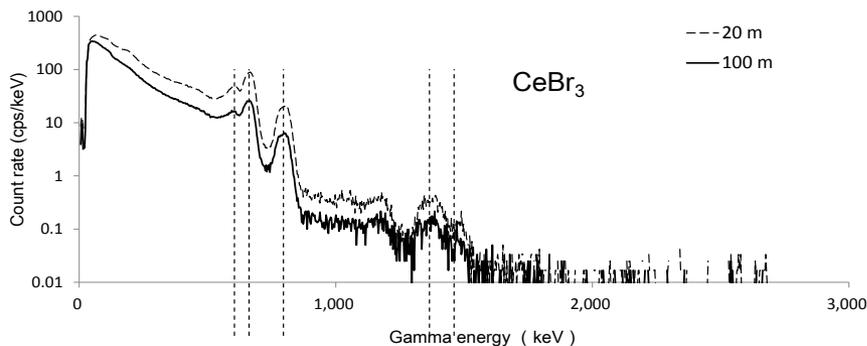
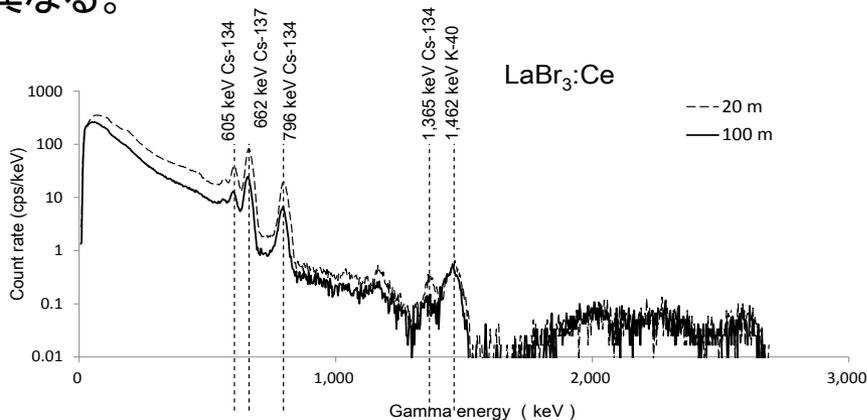
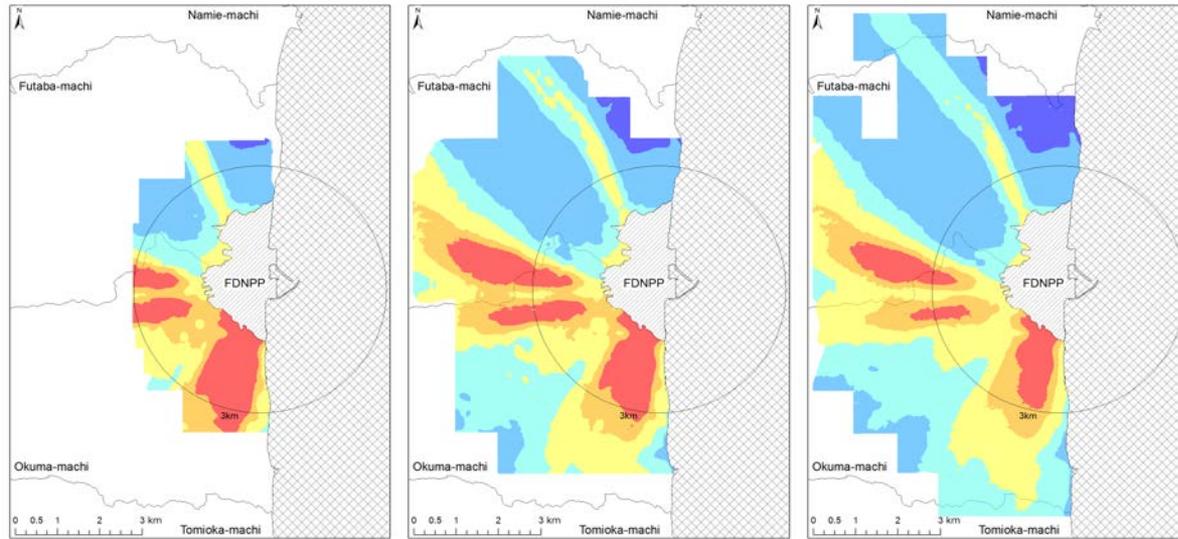


Fig. 1. Gamma spectra of the ARMS (three LaBr₃:Ce detectors) above the ground and above the sea in Futaba-machi, 5 km from the FDNPP. Measurement time was 100 s. Measurement date was 22 December 2012.

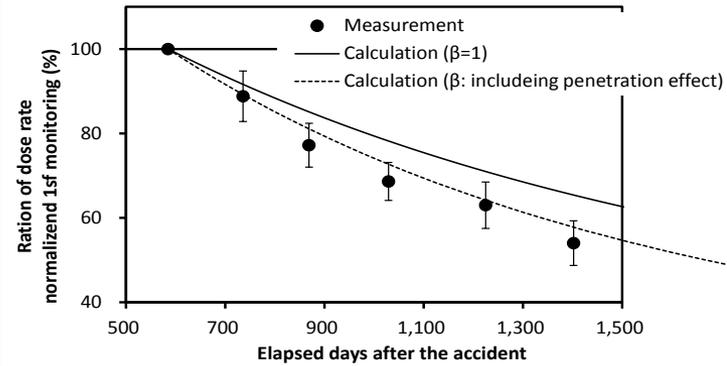




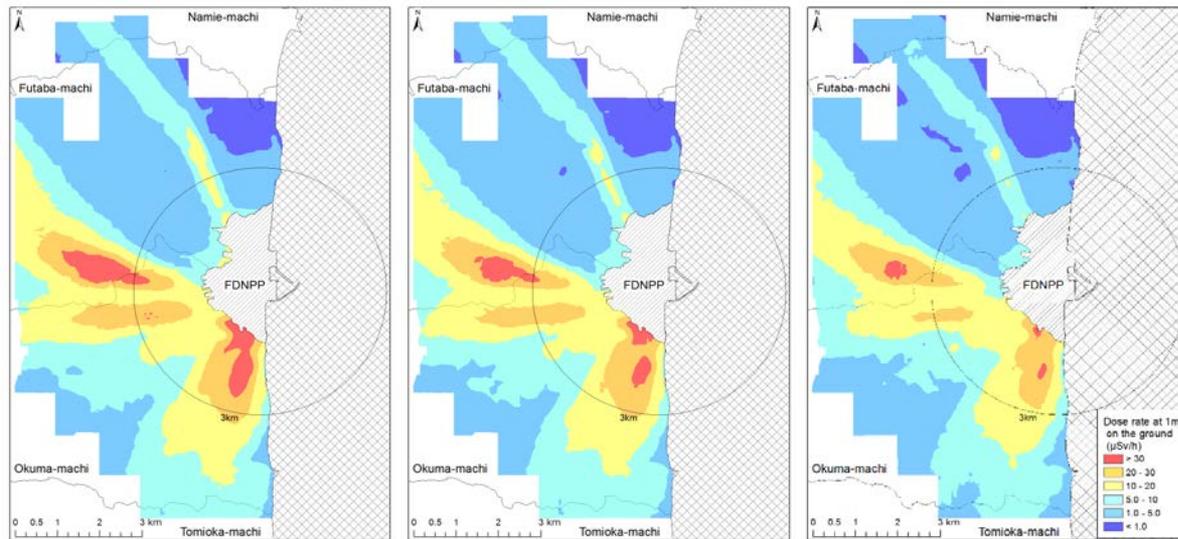
1st: 20 Oct. 2012

2nd: 20 Jan. 2013

3rd: 31 Jul. 2013



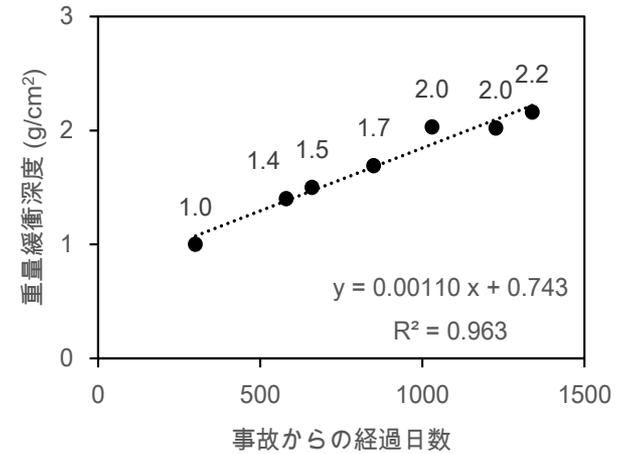
土壌の縦方向の浸透



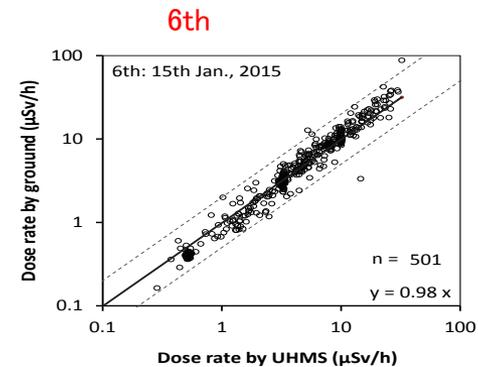
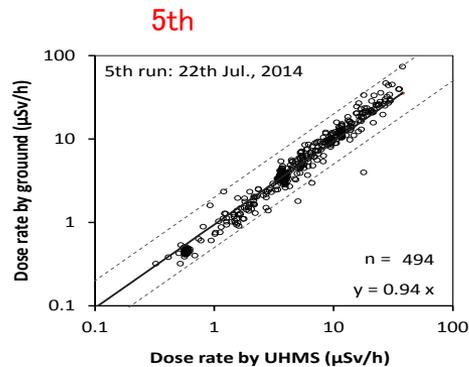
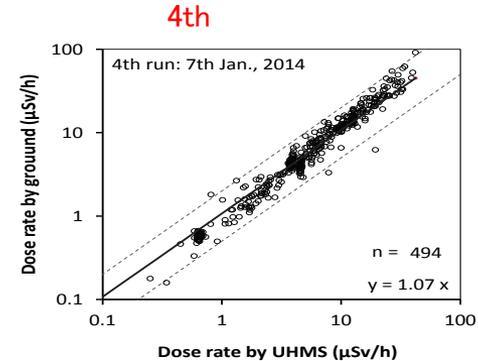
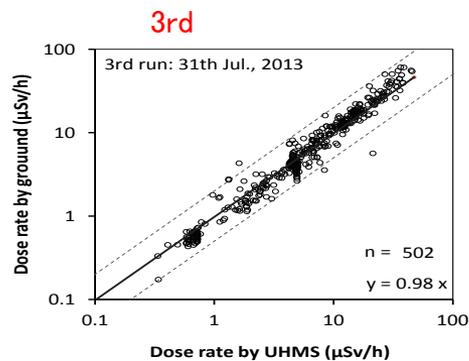
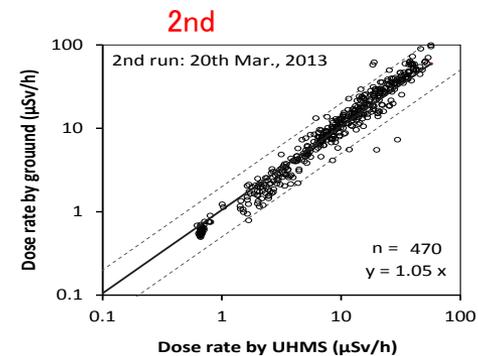
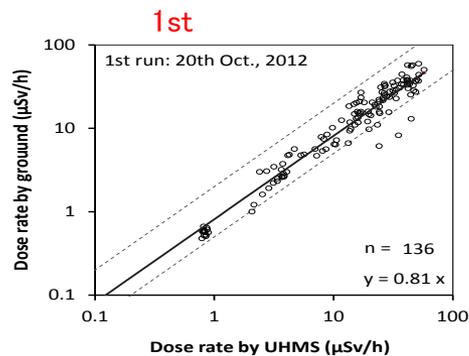
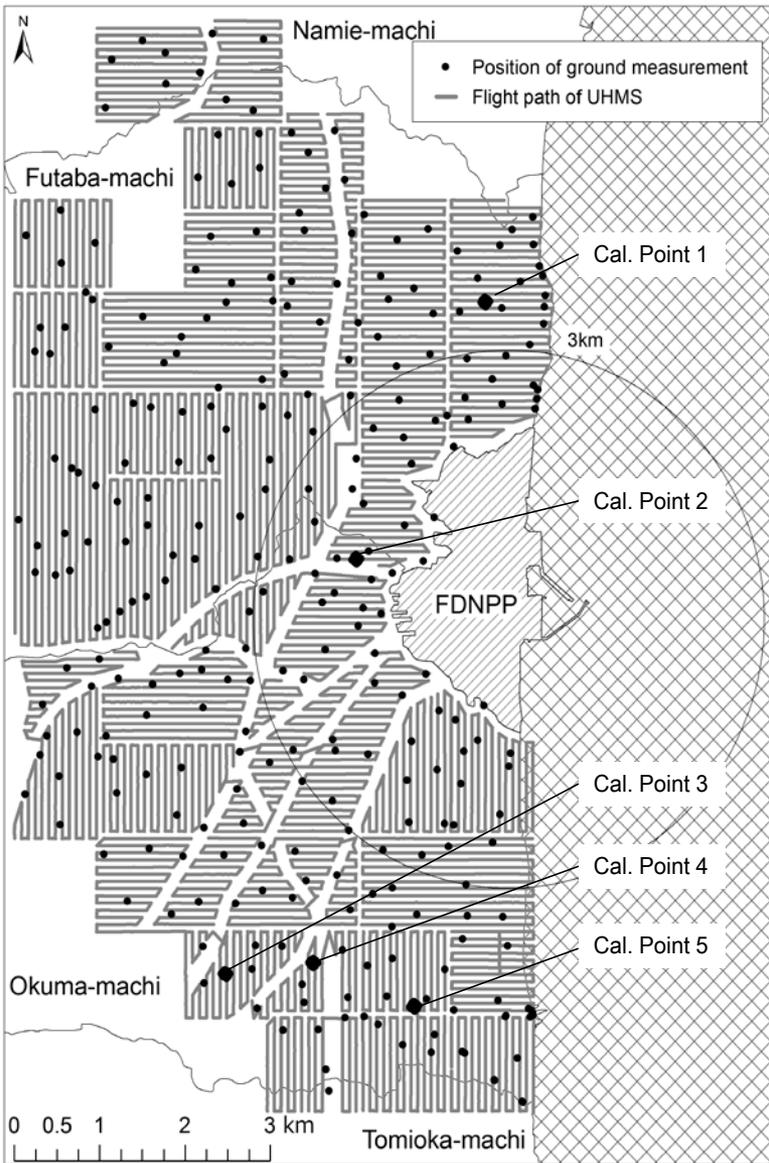
4th: 7 Jan. 2014

5th: 22 Jul. 2014

6th: 15 Jan. 2015

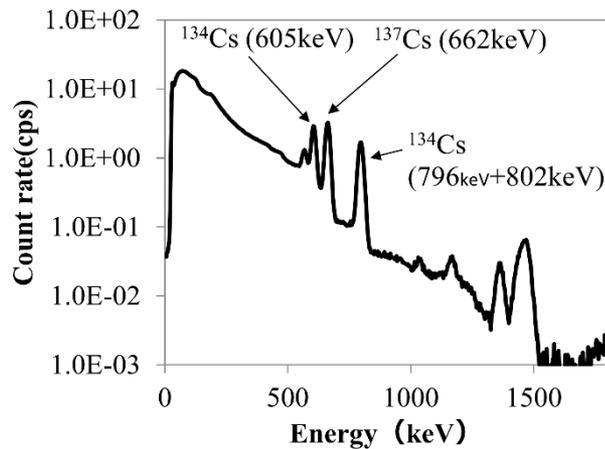


⇒ 詳細はポスター発表1-(1)

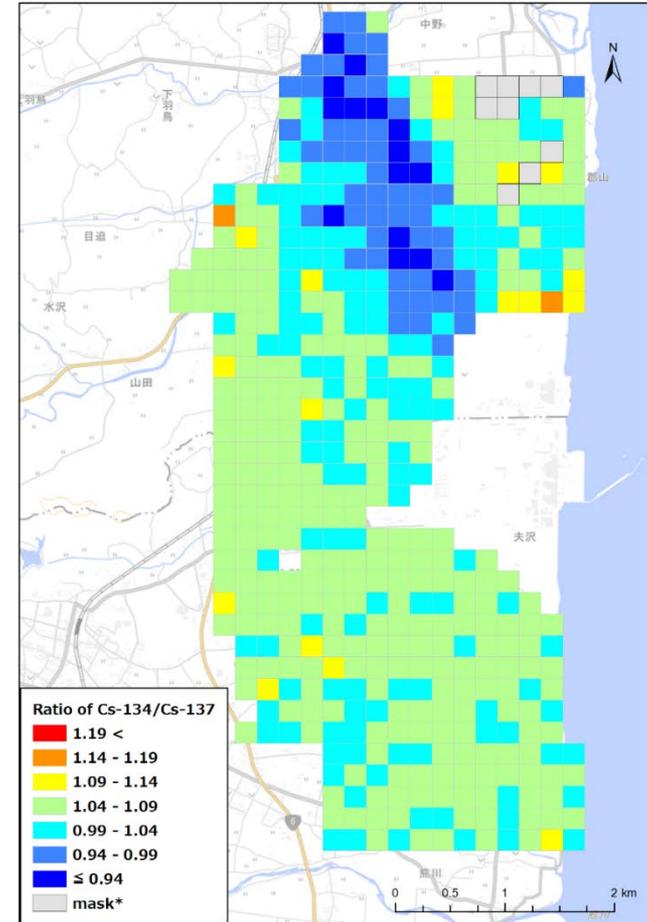


3km圏内の $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ の分布

$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ の分布 (2011/3/15に補正)

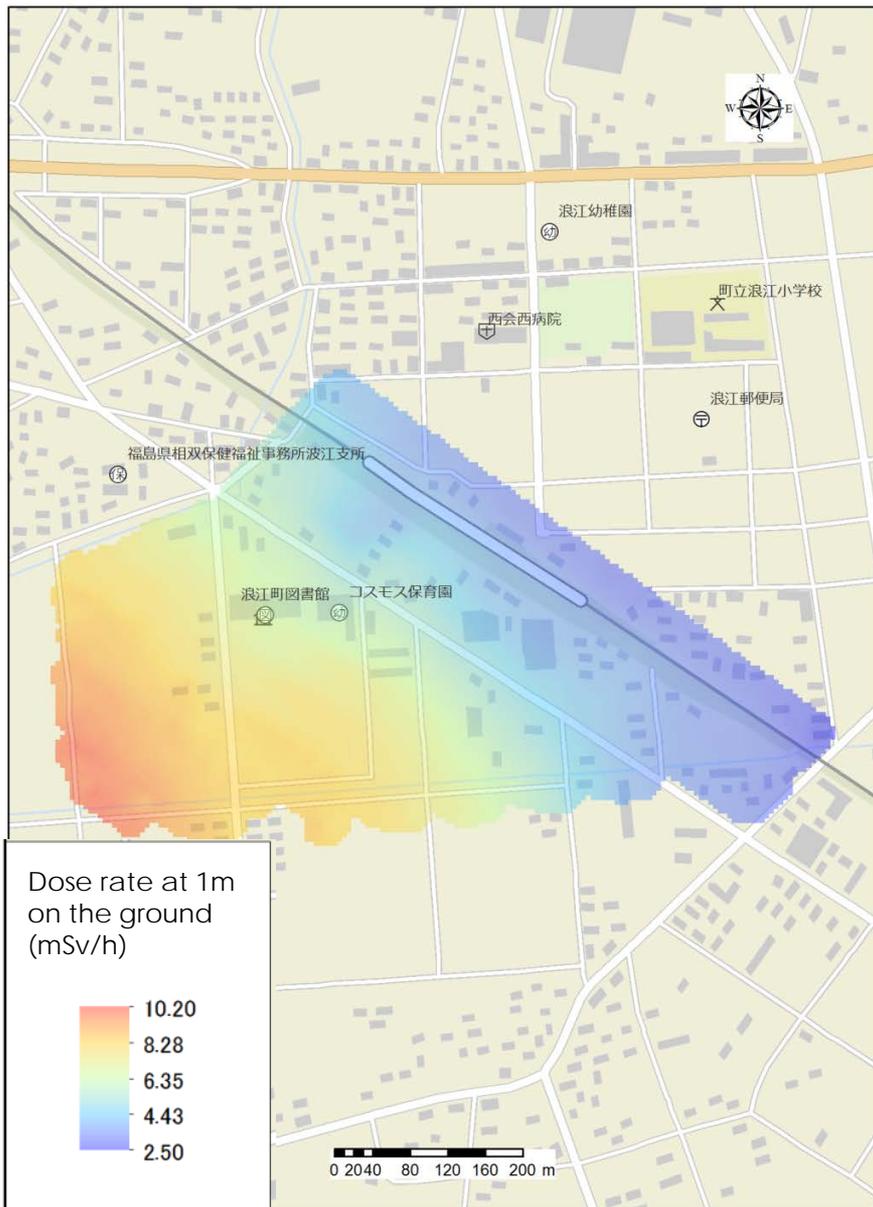


- コベル法により ^{134}Cs (796keV+802keV) と ^{137}Cs (662keV) のピーク計数率を算出
- 空気減弱係数やセシウム濃度換算係数は EGS5により計算

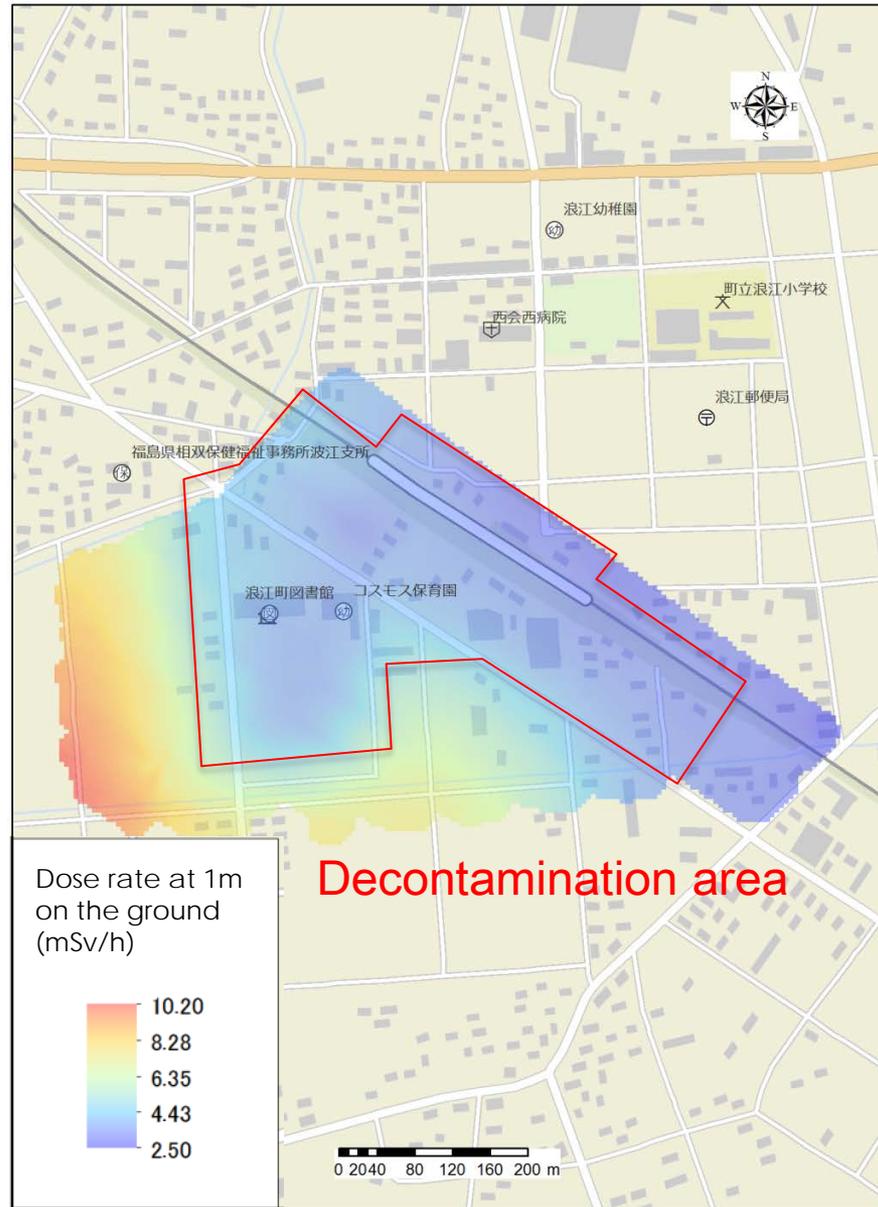


- 2012年10月測定データ
- 格子は200m四方
- 格子の値は放射性セシウム比率の中央値
- マスクした格子(灰色)はIQRが高く、信頼性が低いエリア

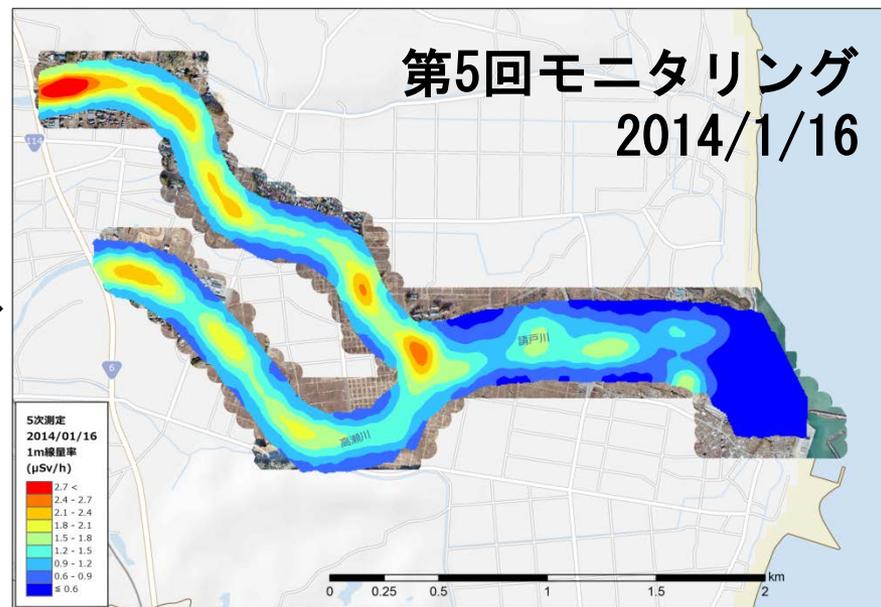
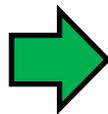
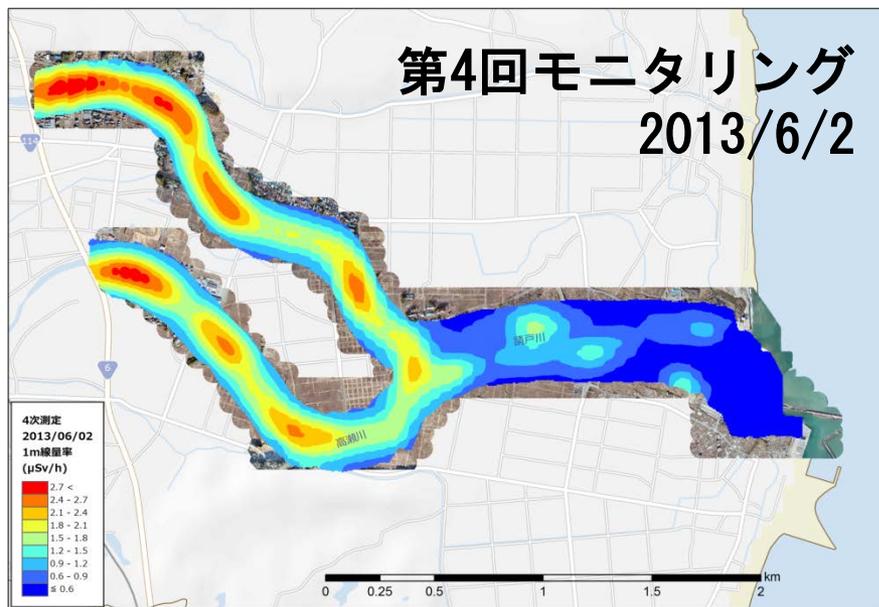
Before



After



年度	23				24				25			
	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3
測定期間				◆ 1st monitoring		◆ 2nd monitoring	◆ 3rd monitoring		◆ 4th monitoring			◆ 5th monitoring



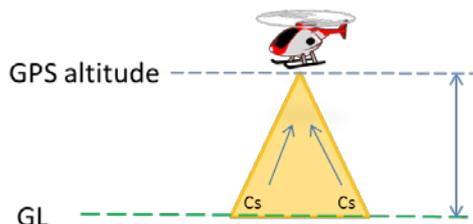
放射線の分布状況を空から測定する

- どのように、なにを測定しているのか
- 発電所周辺の線量率分布の変化
無人ヘリコプターによる測定
- 森林の放射線量を評価するには
放射線測定用ドローンの開発
- 原子力防災のためのツール開発
無人航空機 (UARMS)
- 環境創造センターと将来の展開

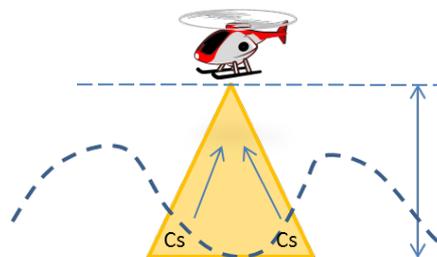
・現在の手法は、平面モデルで線量率を算出



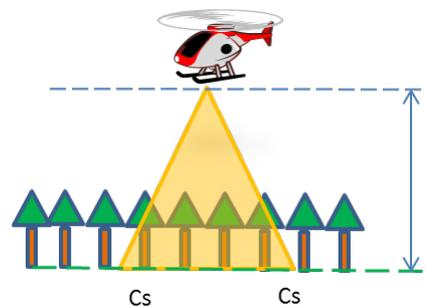
・山間部や森林部では、現手法では不確かさが生じている



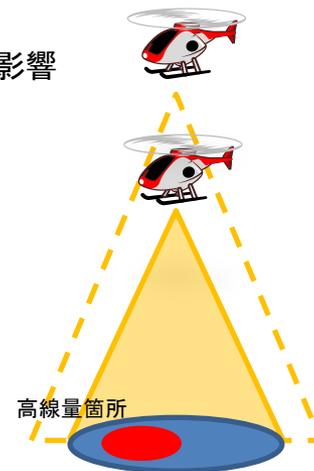
現状の線量換算モデル



① 複雑な地形



② 森林・構造物

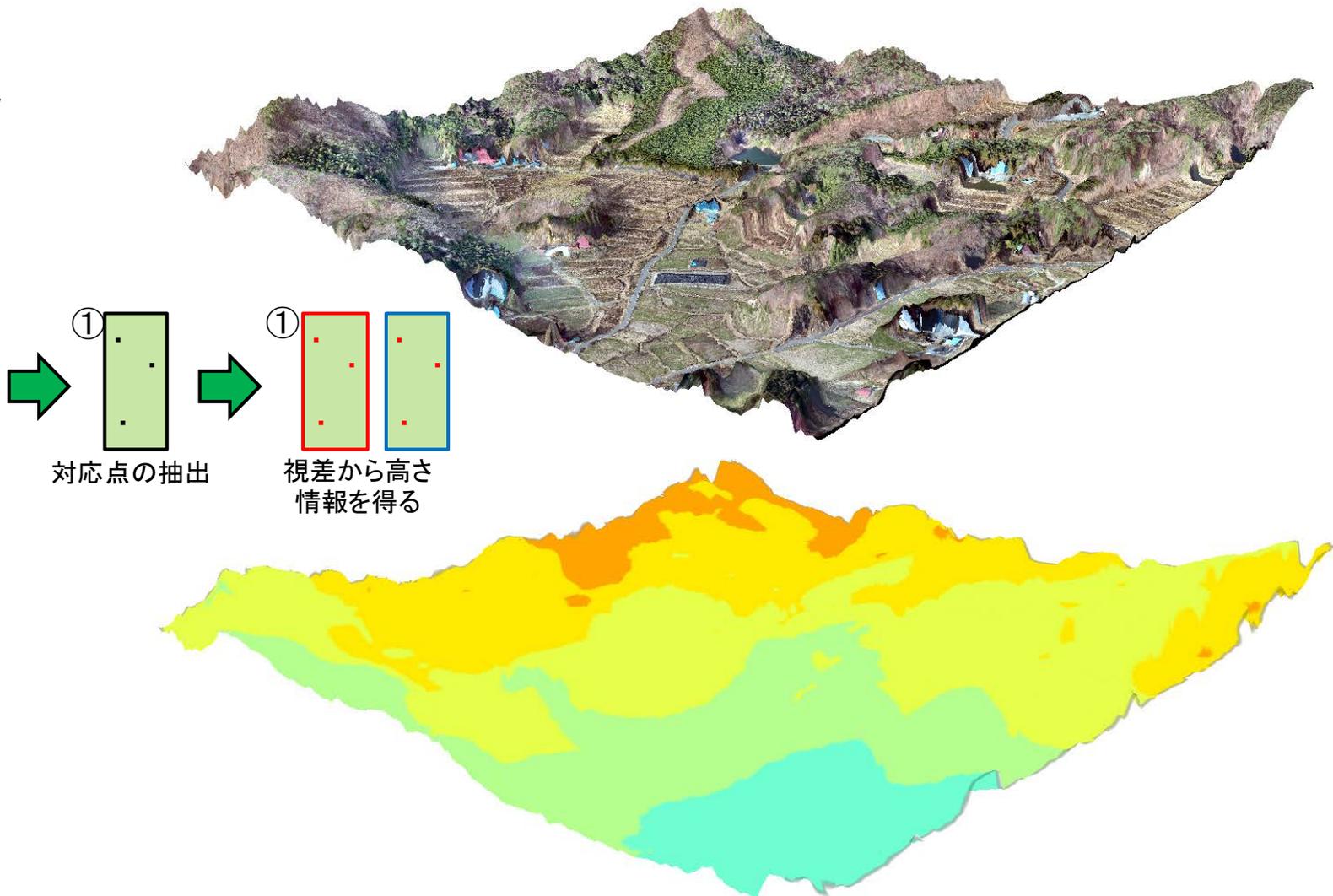
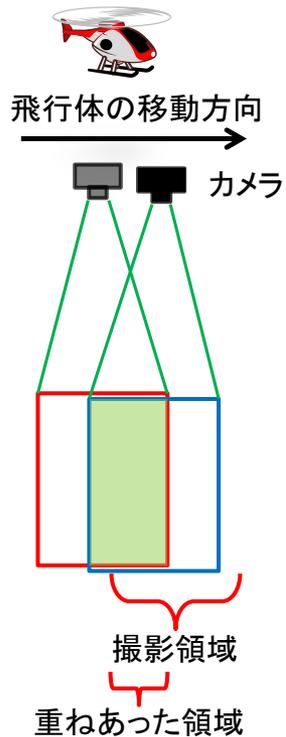


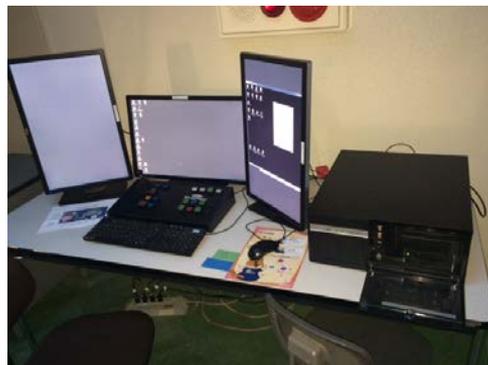
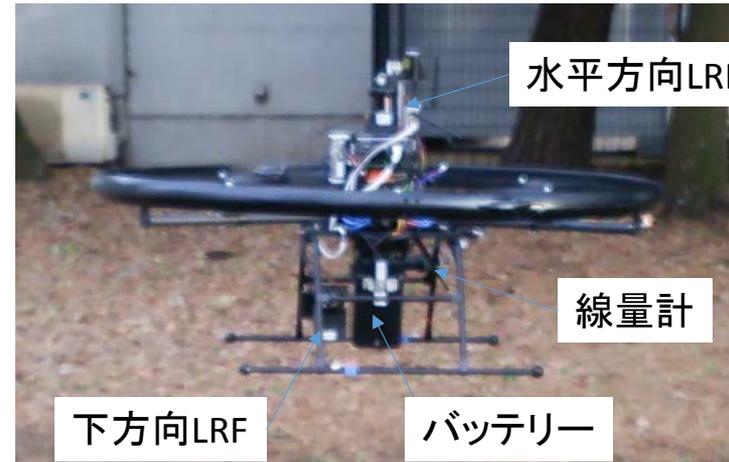
③ 線量の不均一

④ 測定高度の影響

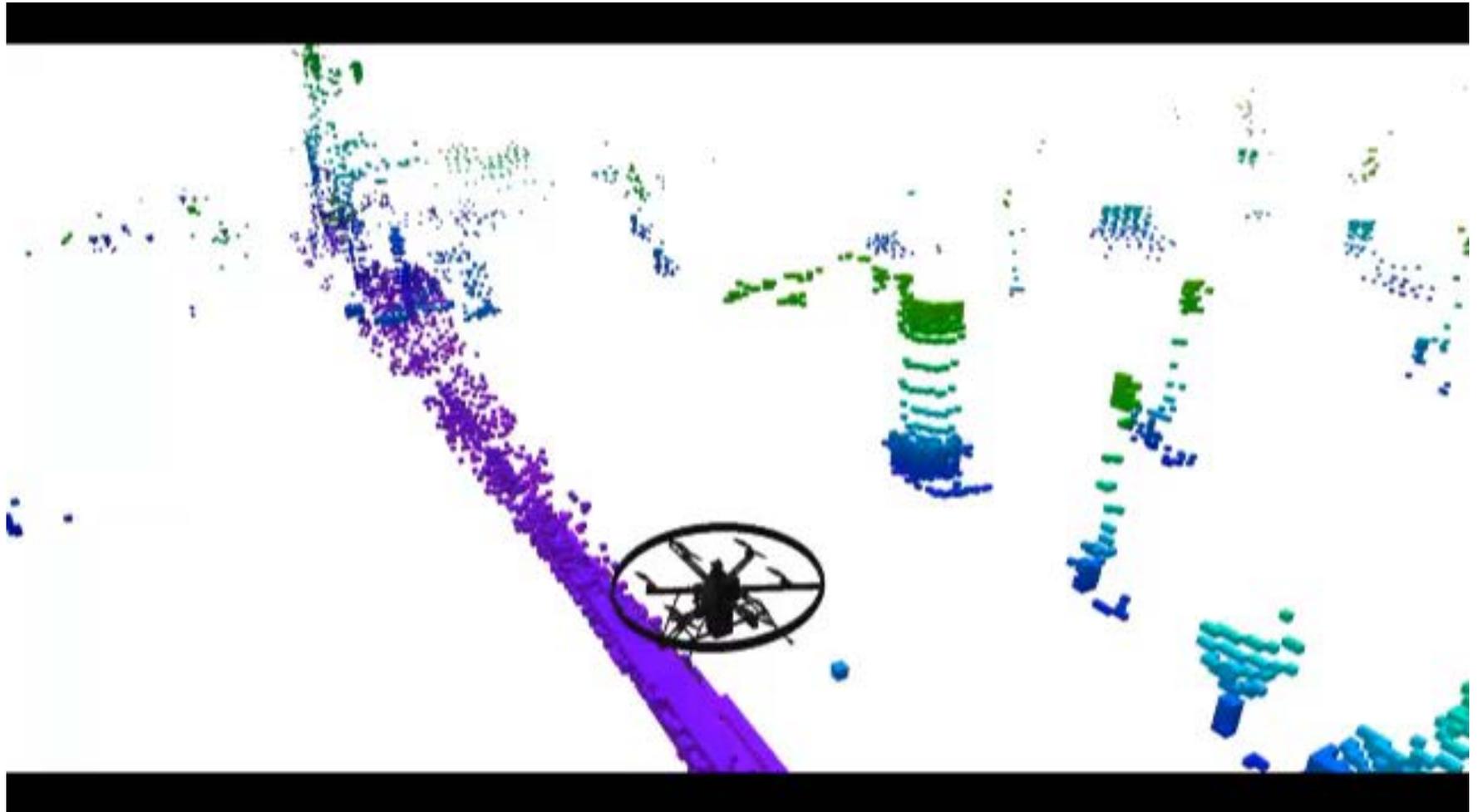
地形の情報を詳細に取得する











SLAM: Simultaneous Localization and Mapping (自己位置推定と地図作成)



放射線検出器
(GAGGシンチレータ)

[特徴]

・安全性の高い設計

- RTB (設定した範囲から逸脱した場合の自動帰還機能)
- 暴走防止のための緊急動作停止機能
- 高性能の放射線検出器
- ローターを防御するガード
- フライトログ
- 小型カメラによる3D地図



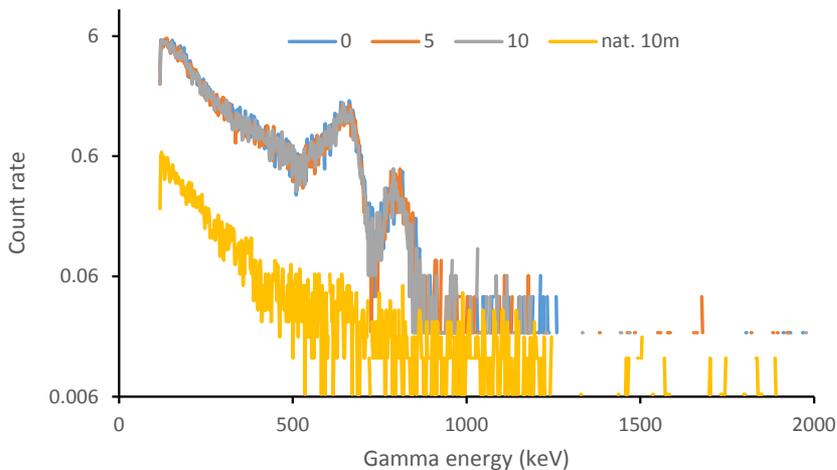
本マルチコプターをベースに森林や敷地内の測定ニーズに応えていく

検出器

- ・GAGG:Ce, ガドリニウム
アルミニウム ガリウム ガーネット
1インチ x 1インチ

機能

- ・1秒ごとに γ 線スペクトル採取



感度: 約2,000 cps/ μ Sv/h at 10m

福島県(0.2 μ Sv/h)と
静岡県(天然核種)でのデータ比較

3D地図作成用カメラ

- ・定期的に写真を撮影、画像再構成(3D map)



・放射線の分布状況を空から測定する

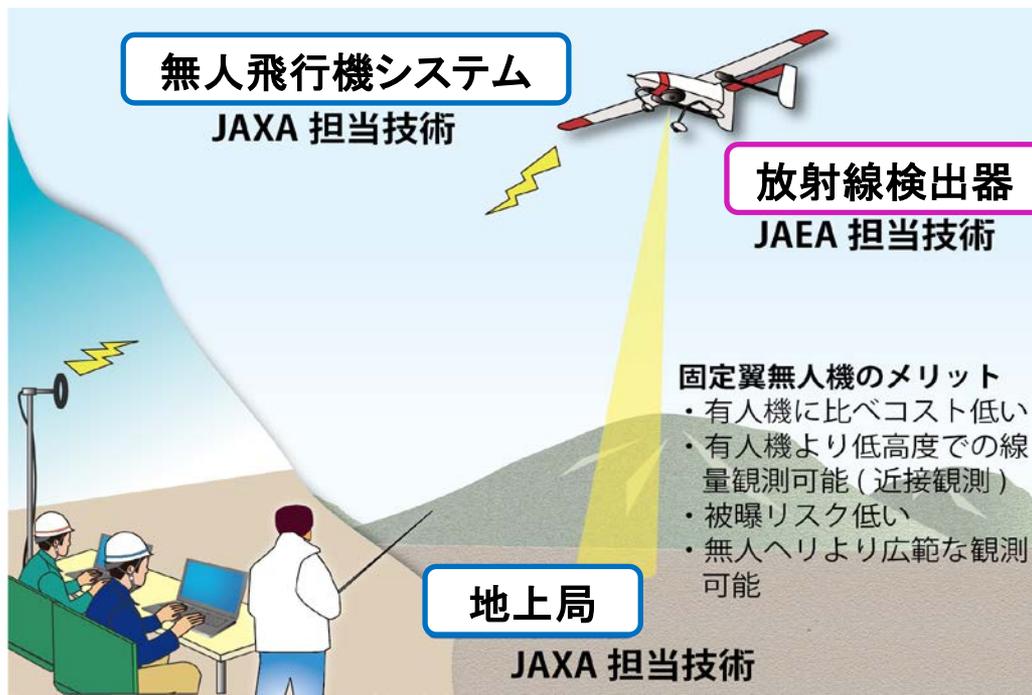
- どのように、なにを測定しているのか
- 発電所周辺の線量率分布の変化
無人ヘリコプターによる測定
- 森林の放射線量を評価するには
放射線測定用ドローンの開発
- 原子力防災のためのツール開発
無人航空機 (UARMS)
- 環境創造センターと将来の展開

☆ 有人ヘリと無人ヘリの間のニーズを埋めるツールの開発

UARMS (Unmanned Airplain Radiation Monitoring System) → JAXAとの共研

- 放射線検出器を無人飛行機に搭載し、地上局より**長距離(100km程度)の遠隔操縦が可能**でかつ**長時間(6時間程度)**のフライトを可能とする「放射線測定システム」を開発する。
- 開発した無人飛行機を山間部等の広域放射能分布・移行調査研究に活用する。
- また、将来的には森林火災等の緊急時にも対応できる遠隔モニタリングツールとしての利用を目指す。

共同研究実施期間
H24～26年度
・JAEA: 福島研究開発部門
・JAXA: 航空本部



⇒ポスター1-(3)



項目	要求仕様	ベース機(現在)	機能向上機
質量/搭載	50 kg程度	◎	
推進	エンジン(ガソリン Max 4L)	◎	
飛行時間	6時間(日中)	○	6~8時間に長大
飛行速度	25~35m/s (90~126km/h)	◎	
離着陸距離	200~300m	◎	
飛行高度	250m未満(航空法準拠)	◎	
操縦	プログラム飛行(地形追従モード), 離着陸は手動	○	地形追従/観測パターン
安全対策	パラシュート, システム冗長化, 長距離通信(多重化), など	○ (パラシュート, RTB)	システム冗長化, 不時着機能
ペイロード	最大3-10 kg	○	推定機能向上
気象条件	日中, 小雨可, 地上風15 m/s 以下	○	環境条件データ取得
飛行区域	目視内(住宅の少ない地域)	○(目視内)	目視外を含む

・ 開発のポイント

- 1) 軽量化と高効率のトレードオフ (検出器を大きくすれば重くなる)
- 2) 機体の傾きに対応した方向特性の小さな形状
- 3) 機体からの電源供給、ダウンリンクを可能とする
- 4) 地上における線量率に換算するための実測データ取得

試作機



重量 : 約5.8 kg

(検出部+データ処理部)

搭載検出器 :

- ・プラスチックシンチレーション検出器 (200 mm×200 mm×30 mm)
- ・NaI検出器γ線スペクトロメータ (50 mmφ×50 mm)

データ

- ・測定データは内部メモリに、設定された時間間隔毎に保存 (通常1秒)
- ・リアルタイムデータを無線モデムを介し地上PCに送信

実用機



重量 : 約4.9 kg

(検出部+データ処理部)

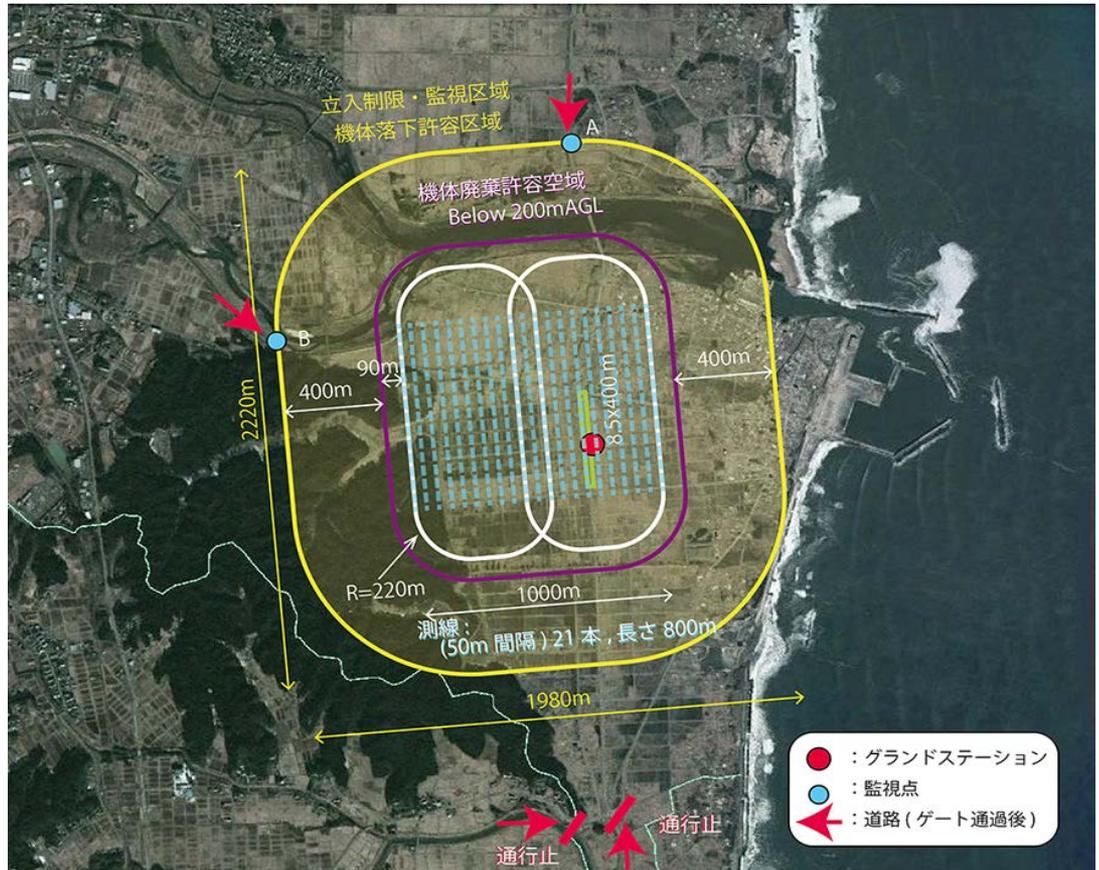
搭載検出器 :

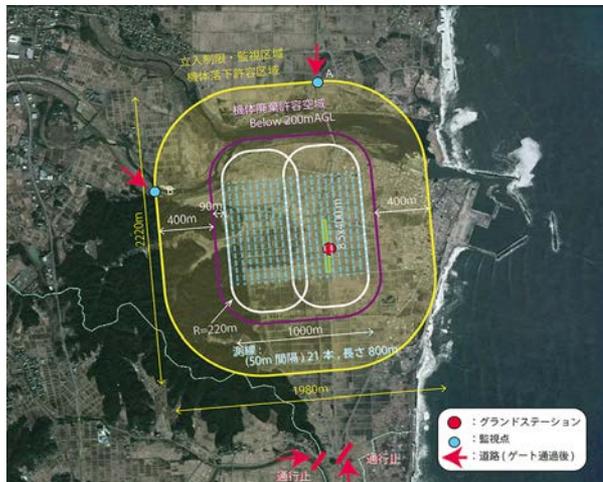
- ・プラスチックシンチレーション検出器 (76 mmφ × 76 mm)
- ・NaI検出器γ線スペクトロメータ (50 mmφ × 50 mm)

データ

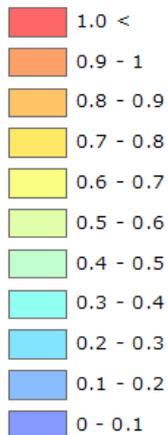
- ・測定データは内部メモリに、設定された時間間隔毎に保存 (通常1秒)
- ・リアルタイムデータを無線モデムを介し地上PCに送信

1. 試験日時 : 平成26年1月23日 7:00~12:00 (準備)
平成26年1月24日 7:00~12:00 (飛行試験)
2. 試験場所 : 浪江町請戸港付近(県道254号線を滑走路に使用)
3. 飛行距離 : キャリブレーション 800 m × 10測線(8km)
測線 800 m × 21測線(16.8km)
4. 飛行時間 : 合計1時間程度
5. 飛行高度 : 約150 m (対地)

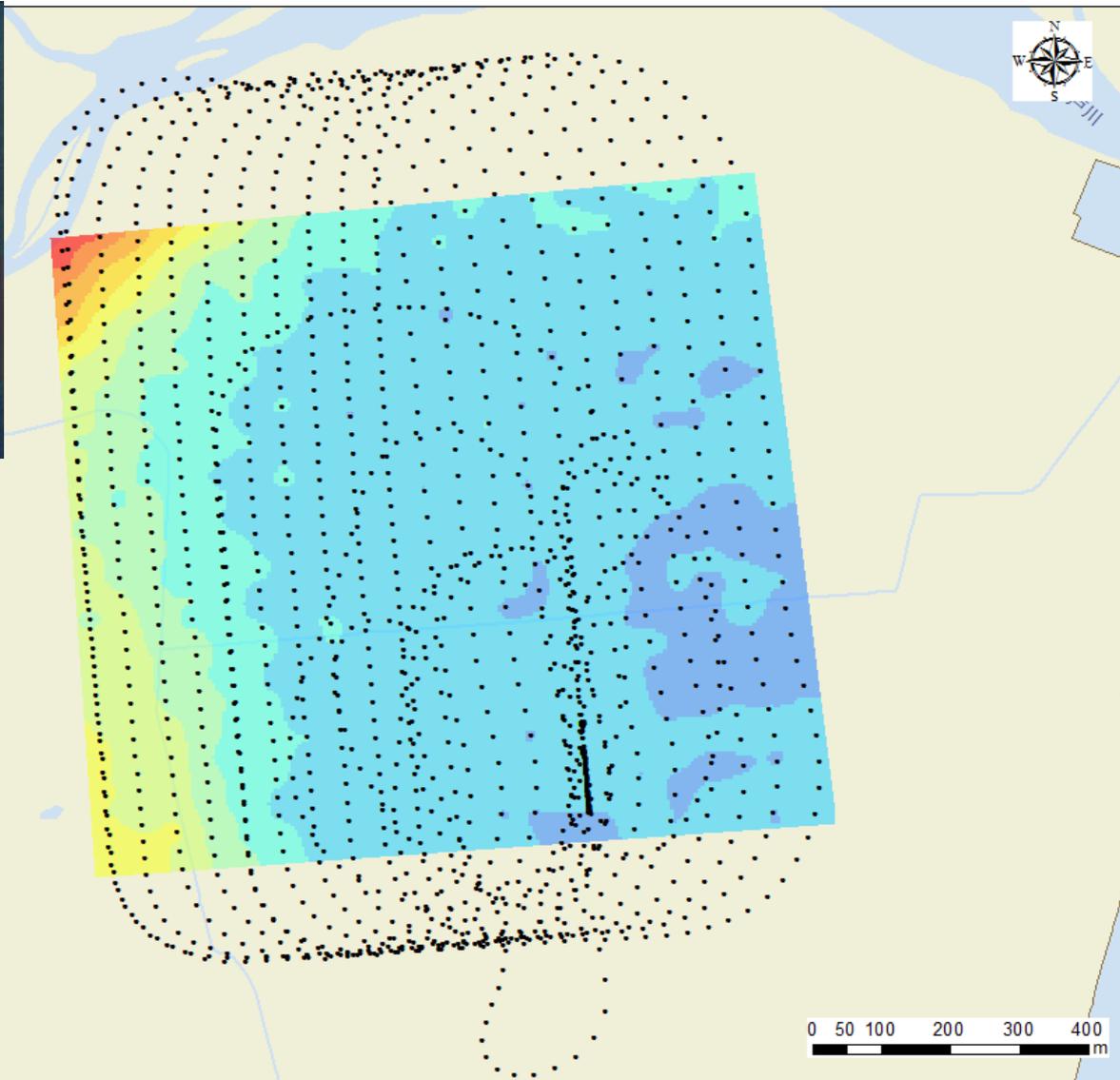




地上1m空間線量率
($\mu\text{Sv/h}$)



• 軌跡



■機能向上機(検出器Ver.2搭載)による飛行

✓ふくしまスカイパーク周辺と同等の傾斜を模擬した経路を飛行。

飛行軌跡(水平・鉛直面内)

飛行番号:FE1009, 2014.10.19

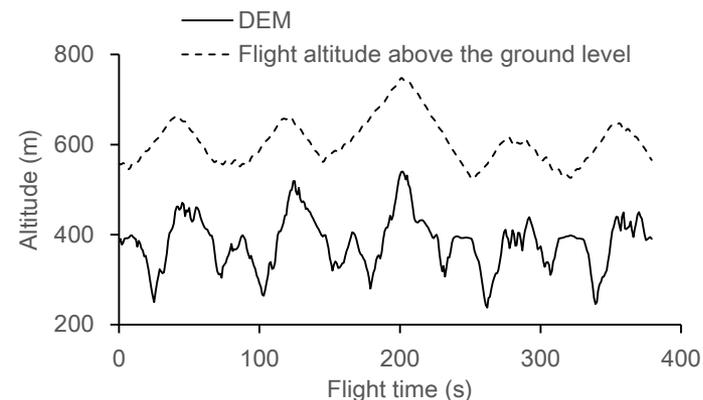
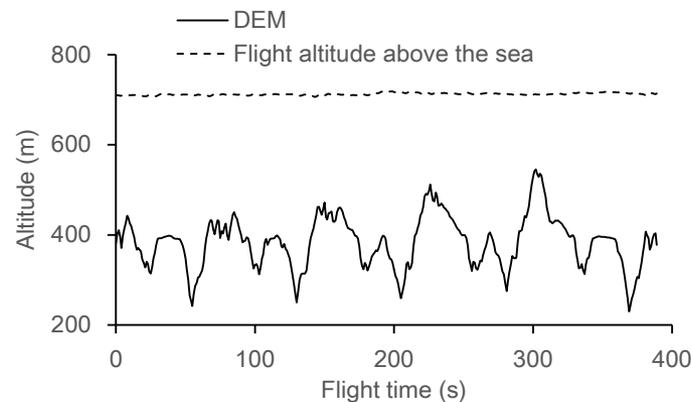
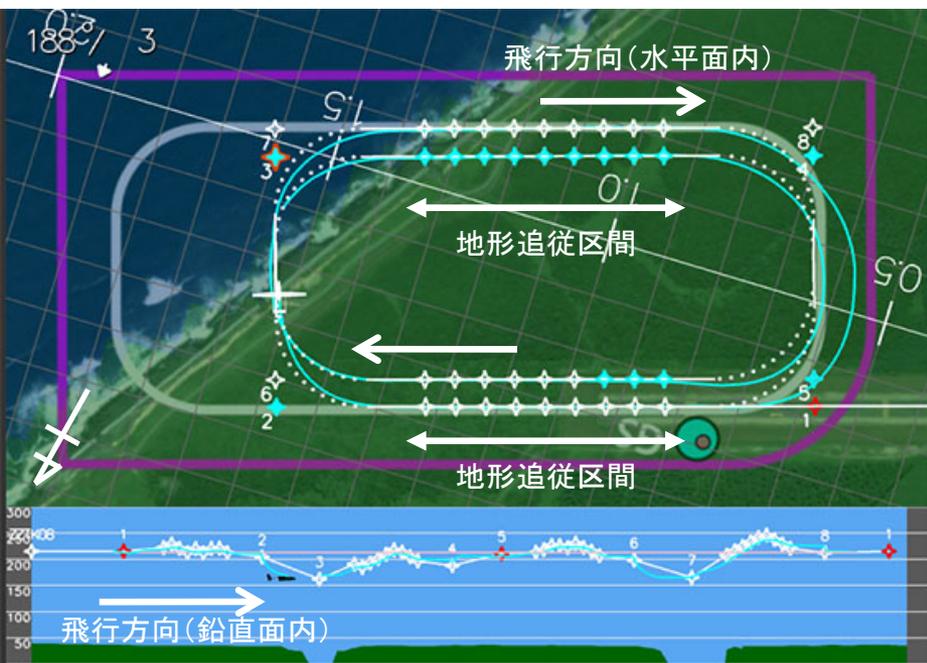


Fig. 6 Upper: Valiation of flight altitude of consant altitude above sea level. Lower: Valiation of flight altitude of consant altitude above ground level.

放射線の分布状況を空から測定する

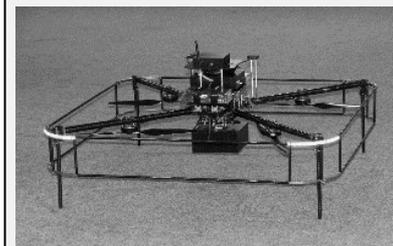
- どのように、なにを測定しているのか
- 発電所周辺の線量率分布の変化
無人ヘリコプターによる測定
- 森林の放射線量を評価するには
放射線測定用ドローンの開発
- 原子力防災のためのツール開発
無人航空機 (UARMS)
- 環境創造センターと将来の展開

11/1より拠点移動。

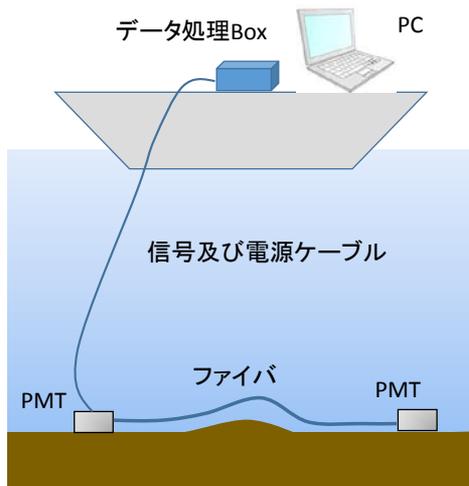
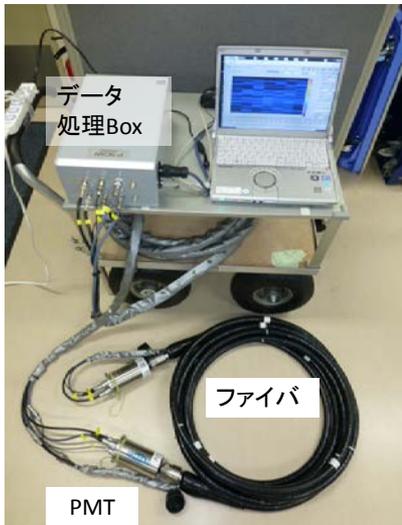
- 1Fから約30km (30分程度)
- イノベーションコースト構想(ロボット実証区域)



範囲	広域 > 100 km	準広域 > 10 km	中域 > 1 km	狭域 ~ 100 m
機種	ヘリコプター	無人飛行機	無人ヘリ	ドローン
高度	~ 300 m	~ 150 m	~ 50 m	< 10 m
コスト	高	低	中	極低



福島事故対応で培った技術の高度化・原子力防災への応用



水底をダイレクトに測定する技術の展開
 ・プラスチックシンチレーションファイバ



・農業用ため池の水底マップ作成
 ⇒水土里ネットふくしま技術移転

水深 (m)	10	100	1000	10000	面積 (ha)
10000		大規模 ・海 (沿岸域、河口域)			海洋調査船 無人観測船
100		中規模 ・湖沼、ダム			
10	小規模 ・ため池		(ロボット・無人探査機)		
1	人力				



(水中)

「開発要素」

・ダム、ため池、沿岸域

潜水艇型ロボット
 無人観測船



比較的浅い水域



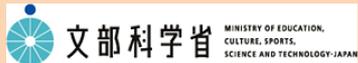
ROV

水深100メートルまで

(水底)

Government

- Nuclear Regulation Authority (NPA)
- Ministry of the Environment
- Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT)
- Fukushima pref.



Fukushima Environmental Safety center,
Fukushima Radiation measurement Group



University

- Scottish Universities Environmental Research Centre (SUERC)
- Tokyo university
- Tokai university
- Fukushima university
- Chiba university



Manufacturer

- Yamaha Motor Co., Ltd.
- Japan Radiation Engineering Co.,Ltd.
- enRoute Co., Ltd.
- Areva NP
- Meisei electric Co., Ltd
- NESI

株式会社 NESI



Etc.

- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
- Tokyo Electric Power Company (TEPCO)
- OYO Corporation
- Aero Asahi Corporation.
- Nakanihon Air Service CO.,LTD.
- Korea Institute of Nuclear Safety (KINS)



ご静聴ありがとうございました