

平成 29 年度原子力施設等防災対策等委託費
(放射性プルーム測定技術確立等)事業

報告書

平成 30 年 3 月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

本報告書は、原子力規制庁による「平成 29 年度原子力施設等防災対策等委託費（放射性プルーム測定技術確立等）事業」の成果をとりまとめたものである。

目次

1.	はじめに	1
2.	無人機の開発状況について	4
3.	無人飛行機 (UARMS).....	7
4.	計算シミュレーションによる弁別性能再評価.....	9
4.1.	概要	9
4.2.	基本的な考え方	9
4.3.	エアロゾル噴霧試験.....	11
4.3.1.	試験概要	11
4.3.2.	エアロゾル沈着試験方法	11
4.3.3.	エアロゾル沈着速度.....	13
4.4.	シミュレーションによる弁別測定性能評価手法.....	14
4.4.1.	検出器の構造	14
4.4.2.	線源分布	15
4.4.3.	地表面の放射性物質の沈着量	16
4.4.4.	計算結果	16
5.	放射線検出器実用機の開発	19
5.1.	実用機の構成	19
5.2.	同時計数率の方向特性.....	21
5.3.	ラドンチャンバにおける同時計数率測定試験.....	23
5.4.	ホスウィッチ検出器による β 線放出核種の検出.....	26
6.	放射性プルームの予測計算手法の検討	27
6.1.	はじめに	27
6.2.	計算条件	28
6.3.	計算結果.....	28
7.	UARMSの長距離通信試験	33
7.1.	試験概要	33
7.2.	試験方法	33
7.2.1.	UHF系の地上・機上局の単体評価試験.....	33
7.2.2.	UHF系及び2.4GHz-SS系の地上・機上局の総合評価試験	33
7.2.3.	UHF系の地上-機上局間の受信電力の理論値の推定.....	33
7.3.	通信試験場所	34
7.4.	通信試験結果	36
7.5.	試験結果総括	38
8.	まとめと今後の予定.....	39
9.	謝辞.....	40
10.	参考文献	40

Table List

Table 3-1	UARMS の主な諸元.....	8
Table 4-1	仕様機器一覧.....	12
Table 4-2	試験条件一覧.....	12
Table 4-3	試験結果.....	14
Table 4-4	地表面への放射性物質の沈着量.....	16
Table 4-5	空中・検出器・地上から放出された全エネルギーの検出器の応答.....	17
Table 4-6	空中・検出器・地上から放出された全エネルギーの検出器応答の比率.....	17
Table 4-7	空中・検出器・地上から放出された光電ピークの検出器の応答.....	17
Table 4-8	空中・検出器・地上から放出された光電ピークの検出器応答の比率.....	17
Table 4-9	検出器・地上から放出された全エネルギーの検出器応答の比率.....	18
Table 4-10	検出器・地上から放出された光電ピークの検出器応答の比率.....	18
Table 4-11	コインシデンス計数率と全計数率の比率.....	18
Table 5-1	同時計数率の方向特性.....	22
Table 5-2	下方照射とサブマージョン線源との同時計数率の差.....	26
Table 5-3	β 線源及び γ 線源のホスウィッチ検出器の測定結果.....	26
Table 6-1	試験計算条件.....	28
Table 7-1	地上局 UHF 系無線設備の仕様.....	36
Table 7-2	地上局及び機上局の単体評価結果.....	36
Table 7-3	電波環境試験の結果.....	37
Table 7-4	電波環境試験(UHF)の推定計算結果.....	37

Figure List

Fig. 1-1	本研究の実績とスケジュール	3
Fig. 2-1	主な無人機の性能比較	6
Fig. 3-1	UARMS の構成	8
Fig. 4-1	空中で測定する場合の放射線の放出源イメージ	10
Fig. 4-2	検出器の基本構成と同時計測イメージ	10
Fig. 4-3	試験体系	12
Fig. 4-4	エアロゾル発生器からの発生粒子の粒径分布	13
Fig. 4-5	試験時における風速の変化	13
Fig. 4-6	検出器の概観	14
Fig. 4-7	B線のエネルギーと透過率の関係	15
Fig. 4-8	線源分布と機体のジオメトリ	15
Fig. 4-9	地上に分布した放射性物質のガンマ線が上空で飛来する方向	18
Fig. 5-1	試作した検出器の構成	19
Fig. 5-2	検出器の外観	20
Fig. 5-3	試作した検出器の γ 線スペクトル	20
Fig. 5-4	同時計数率の方向特性実験の概略図	21
Fig. 5-5	各検出器の方向特性	22
Fig. 5-6	各検出器の方向特性	22
Fig. 5-7	ウラン系列と主な γ 線エネルギー	24
Fig. 5-8	ラドン試験風景	24
Fig. 5-9	チャンバ内のラドン濃度の変化と測定のタイミング	25
Fig. 5-10	ラドン子孫核種測定時の γ 線スペクトル例	25
Fig. 6-1	フライトプラン作成アルゴリズムの概要	27
Fig. 6-2	シミュレーション結果及び無人機の飛行軌跡	29
Fig. 6-3	無人飛行機で観測される放射性物質濃度(相対値)	29
Fig. 6-4	フライトプランの3次元可視化	30
Fig. 6-5	フライトアルゴリズムの10分間隔の表示	31
Fig. 7-1	試験位置関係	34
Fig. 7-2	長距離試験詳細図	35
Fig. 7-3	試験体系イメージ	35
Fig. 7-4	電波環境試験と推定計算の結果	38

1. はじめに

原子力発電所事故が発生した際、迅速な住民の避難計画立案および被ばく線量評価を行う上で、発電所から放出される放射性プルームの性状(構成する放射性核種や放射性核種ごとの放射能濃度)や移流経路および分布を迅速かつ精度よく把握する必要がある。2011年に発生した福島第一原子力発電所事故後、放射性プルームの性状や移流経路に関する研究が行われており、大気拡散モデルを用いた再現計算は多くの機関で実施されている。例えば、Katata et al., 2015は大気拡散モデルに WSPEEDI-II、海中拡散モデルに SEA-GREAN-FDM を使用して再現計算を行っている¹⁾。再現計算の結果は、航空機モニタリングや地上測定から得られた地上沈着量データと比較することで妥当性を検証している。また、放射性プルームがモニタリングポストの上空を通過した際の γ 線検出器のデータや LaBr_3 シンチレーション検出器による地上の測定結果と計算シミュレーションで求めたレスポンス計算を組み合わせ、放射性プルーム中に含まれていた放射性核種濃度推計を試みた例がある^{2,3)}。当該研究例では、実際には、スペクトルの一定の精度における再現性が確認されたものの、放射性プルームは地上数十メートルから放出され、上空を移流するため高さ方向の情報を得ることが難しいことが考察されている。これらの先行研究例から、プルームの移流経路や分布を実測するには、計算コードと放射線のシミュレーション計算を組み合わせたと考えられる。ただし、地上からの測定データでは、沈着した放射性核種からの γ 線がバックグラウンドとなり高高度にあるプルームの特定が困難であると予想される。

近年、ドローン等の無人飛行体(UAV)の開発は著しく、福島第一原子力発電所事故後、放射線検出器と組み合わせたシステムが開発されている。国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、JAEA)では、福島第一原子力発電所周辺のモニタリングや河川敷のモニタリングにYAMAHA社製の自律型無人ヘリコプターを活用している^{4,6)}。また、宇宙航空研究開発機構(以下、JAXA)と共同で燃費が良い飛行機型UAVに放射線検出システムを搭載したモニタリングシステム(Unmanned Airplane Radiation Monitoring System: UARMS)を開発している⁷⁻⁹⁾。UARMSはすでに試作機まで開発されており、福島第一原子力発電所周辺で実用機開発のための基礎データを取得しつつ、実用機の開発が進められている¹⁰⁾。UARMSの特徴は、長距離通信での無人飛行が可能(最大約100km)及び航続距離が長い(最大約6時間)ことが挙げられ、現在、原子力規制庁が実施している有人ヘリコプターを用いた航空機モニタリングの代替技術としての適用が期待されているほか、将来的には原子力防災への適用が可能と考えられている。このような、UAVを用いた放射線計測技術をプルームの実測に適用することは、無人であるため人員の被ばく低減が可能であること及び空気中でプルームを近い距離で実測できることから、利点が大きいと考えられる。

一方、UAVを用いた放射性プルーム測定のためには、現状のシステムに加えて、計測システムおよび解析手法の開発が必要である。従来のUARMSに搭載されている計測システムは地表から放出される γ 線を測定するために設計されているが、放射性プルームを測定する場合には検出器周辺360度方向に気体状の放射線源(サブマージョン線源)が存在するため、気体の計測に対応した検出器および解析方法が必要となる。つまり、 γ 線の飛来方向に応じた弁別が必

要となる。 γ 線の方向弁別には複数検出器もしくは複数検出器結晶を用いた同時計数測定が考えられる。白川 (2001)は、NaI および BGO シンチレーション検出器を組み合わせたホスウィッチ検出器を用いて同時計測される確率の方向特性により放射線の入射方向を特定する検出器の開発を行っている¹¹⁾。福島第一原子力発電所事故後、カナダにおいて同時計数を用いた事故起源の ^{133}Xe を航空機モニタリングで測定した例も報告されている¹²⁾。このように同時計数と波高弁別による解析技術を応用することにより、高精度な放射性プルーム核種弁別が実現できると考えられる。加えて、放射性プルームの測定には高いエネルギー分解能が必要である。放射性プルームには多種類の核種が含まれており、それぞれの核種によるエネルギーピークを分解することが求められる。特に ^{131}I 、 ^{132}I および ^{137}Cs はエネルギースペクトル上のピークが近接しているため、これらの定量を行う際には高い分解能を持った検出器の選定が必要である。

さらに、測定システム以外にも機体の汚染によるバックグラウンドの影響に関する検証も必要となる。無人航空機は放射性プルーム中を飛行するため、機体や測定システム外装へのプルームの付着が懸念される。そのため、放射性プルームに含まれる粒子が付着しづらい材料の選択やどの程度粒子が付着し、どういった影響が及ぼされるかという情報が必要である。このような検証のためには、プルームに含まれるエアロゾルの性質を把握しなければならない。福島第一原子力発電所事故時にエアロゾルサンプリングから放射性プルームに含まれていたエアロゾルの粒径や化学形態が調査されている¹³⁾。

そこで、本事業では、無人航空機を用いた放射性プルームの性状測定技術と運用に必要なツールの開発を行う。具体的には、プルームによる自己汚染、地上からの放射線および上空におけるプルームの濃度を測定できる UAV に搭載可能な検出器の開発を行う。また、迅速な測定のための効率的な飛行測線の設定も重要である。そこで、放射性プルーム放出時の気象データと大気拡散計算から迅速に飛行測線を最適化できる飛行計画作成アルゴリズムの開発を行う。さらに、測定結果を逐次フィードバックすることにより、さらに最適な飛行測線の更新を行うことによって、より高精度な測定の実現を目指す。以上のように、無人飛行機による放射性プルームモニタリングに必要な技術開発および運用に必要なツールの開発を平行して実施することにより、緊急時の迅速かつ高精度な放射性プルームモニタリングに備えることが期待できる。

Fig. 1-1 に本受託研究の実績とスケジュールを示す。平成 28 年度は、モンテカルロ計算コードを用いたサブマージョンと地表面からの放射線の弁別測定を実現するための基礎設計及び同時計測システムの試作を行った。また、粒子拡散モデルをベースとしたフライトプラン作成アルゴリズムの開発を実施した¹⁴⁾。平成 29 年度は、検出器の計算上課題であった実際の機体へのエアロゾルの付着効率について実試験から係数を求め再評価を実施した。また、検出器システムについて検出部及びデータ処理部の構築を行った。

大項目	小項目	2016年度 (平成28年度)	2017年度 (平成29年度)	2018年度 (平成30年度)
プルーム測定用 検出器の開発	計算コードを用いた基礎設 計・評価	モンテカルロシミュレーション 	機体への付着効率を考慮した 再計算 	
	機体へのエアロゾル付着 試験		 	
	同時測定機能の試作			
	検出システムの製作		検出器の構築 	制御ソフトウェア開発 
	ラドンチャンバでのサブ マージョン模擬試験			
	無人飛行機との 接続試験			
	無人飛行機の長距離通信 試験			
測定計画アルゴリズム 開発	基本設計	基礎設計 		
	基礎アルゴリズム開発	アルゴリズム構築 	シミュレーション計算 	
	ソフトウェア化			

Fig. 1-1 本研究の実績とスケジュール

2. 無人機の開発状況について

前章で記載したように、近年無人機の技術革新は目覚ましく、国内外で様々な製品が開発されている。原子力災害時にプルームを測定する観点から無人機に求められる必要な最低限の性能は以下の項目が挙げられる。

- ① 機体と操作員間の距離が 5 km 以上取れること(操作員の被ばく防止)。
- ② 航続時間が 1 時間以上 (目安) であること。
- ③ 最大積載重量が 10 kg 以上であること。
- ④ プログラム飛行が可能であること。

これらの性能を有する国内外の無人機の例を Fig. 2-1 に示す。無人機の種類は、固定翼機(飛行機タイプ)と回転翼機(ヘリコプタータイプ)に分けられる。両タイプの一般的な利点・欠点は以下のとおりである。

・固定翼機

(利点)燃費が良く航続時間が長い。

(欠点)離着陸のための滑走路が必要(カタパルト方式で離陸できる機体もある)。

・回転翼機

(利点)ホバリングできるため、固定点での長時間測定等が可能。

(欠点)固定翼機に比べると燃費が悪い。

国内で開発されている JAEA と JAXA が共同開発している UAMRS は、航続時間 6 時間で中継器を用いた 20 km 以遠からのオートパイロットの操縦実績があり、プルーム測定へ適用する無人機の有力な候補である。本機体は実用機の試験段階で製品化はされていないが、日本のメーカーが開発に 1 から携わっていることから細かい部分のカスタマイズが可能なところに強みがある。UARMS の詳細は、次章で示す。国外に目を移すと米国にいくつか候補がある。UAV factory 社の Penguin B は UARMS と似た設計の固定翼機で、20 時間の航続時間が優位である¹⁵⁾。また、数多くの納入実績を持ち、オプションとして衛星通信を使えることやカタパルト方式の離陸オプションがあることなど製品として完成されていると言ってよい。ただし、日本での運用実績がないことが唯一の課題と言える。また、AeroViroment 社の Puma AP は、他の 2 機種に比べると航続時間が短く、最大積載量が小さいが手投げで離陸可能であること、バッテリー駆動が可能であること、胴体着陸型のため滑走路が必要ないこと等メリットは多い¹⁶⁾。本機は日本において運用実績があり、国立研究開発法人情報通信研究機構では、Puma AP に携帯電話の中継器を搭載することで孤立地域の連絡手段を確保するための研究を日本各地で実施している¹⁷⁾。回転翼機では、すでに福島第一原子力発電所事故後の環境放射線モニタリング等に利用されている YAMAHA 発動機社製 R-MAX G1 が挙げられる。航続距離は、固定翼機に及ばないものの、1 時間 30 分のフライトが可能であり、全国の農薬散布業務に国内で 1,000 台以上が運用されていること、操縦者の免許制度や保守・メンテナンスの工場が全国に配備されていることなど、実運用面で優位な点が多い。さらに、2017 年 4 月から後継機になる Fazer R G2 がリリースされ最大積載重量が 3 倍以上に増加されたこと及び衛星通信に対応し、機体と基地局の機体と操作員間の距離に制限がなくなったこと等、更に性能が向上している¹⁸⁾。本機は

YAMAHA 発動機が独自に、10 年以上前から開発を重ねてきたものであり、製品としての完成度が高く福島第一原子力発電所事故後の環境放射線モニタリングの運用において 100 時間以上のフライトを行っているが、人的ミス以外の事故がなく信頼性も高いことも魅力である。

バッテリーで駆動するマルチローターのヘリコプター（ドローン）は航続時間が最大でも 30 分程度であり、最大積載量も小さいため、原子力災害時のプルーム測定には活用は難しい。しかしながら、現在、様々な機関において開発が行われていることおよび操作方法が簡単であることからドローンの開発状況については今後も注意深く確認していく必要がある。

UARMS



Penguin B



UAV factory HP: <http://www.uavfactory.com/product/46>

R-MAX G1



Fazer R G2



YAMAHA Fazer R G2 カタログ

RQ-20B Puma AE



AeroViroment HP: https://www.avinc.com/uas/small_uas/puma

名称	UARMS	Penguin B	RQ-20B Puma AP	R-MAX G1	Fazer R G2
開発メーカー(国)	JAEA-JAXA開発中 (日本)	UAV factory Ltd. (米国)	AeroViroment, Inc. (米国)	YAMAHA Co. Ltd. (日本)	YAMAHA Co. Ltd. (日本)
大きさ	4 m (翼長)	3.3 m (翼長)	2.8 m (翼長)	4 m (ローター長)	4 m (ローター長)
離陸重量 (kg)	50	21.5	6.3	100	81
燃料	混合油	ハイオク	バッテリー	混合油	混合油
航続時間 (min)	360	1,200	180	90	100
巡航速度 (m/s)	25	22	13	20 (最大速度)	20 (最大速度)
離陸方法	滑走のみ	滑走, カタパルト	手投げ, カタパルト	—	—
機体との最大離隔距離 (km)	5 (中継器で20 kmの 実績あり)	∞ (衛星通信対応)	5	5	∞ (衛星通信対応)
最大積載量 (ペイロード: kg)	10	10	0.5	10	35

Fig. 2-1 主な無人機の性能比較

3. 無人飛行機 (UARMS)

UARMS のプラットフォームとなる無人航空機のベースは JAXA の技術を使用している。無人航空機の詳細は、既報の論文⁷⁻¹⁰⁾に詳しい。ここでは、概要を述べる。

無人航空機は事故以前より JAXA と民間企業の間で研究開発が進められており、低燃費化及びシステムの信頼性向上の結果、これまで連続滞空 20 時間以上の飛行性能が実証されている。本機体は、離着陸時のマニュアル操縦を除いて、プログラムによる自動飛行が可能である。UARMS はこの機体技術をベースとし、ベース機と機能向上機の 2 段階で現在開発している。ベース機では、放射線検出器を搭載した状態で無人飛行機と放射線検出器の基本性能を調査し、機能向上機ではさらに安全性の向上を目指して機能を付加するとともに、長距離通信機器の装備による長距離プログラム飛行、山間地での飛行を想定して対地高度をほぼ一定に保つように地形追従機能を持たせたものとして開発している。Fig. 3-1 に UARMS の外観及び構成を示す。

UARMS の主要諸元について Table 3-1 に示す。機体形式は、高翼双胴単発機で、エンジン及びプロペラを胴体後方に配置するプッシュ方式を採用している。主翼構造は、主桁ボックスに CFRP (炭素繊維強化プラスチック) を用いた発泡スチロールコア・バルサプラックを用い、胴体構造には GFRP (ガラス繊維強化プラスチック) を採用した。

機上のシステムは、センサ類(対気速度、気圧高度、対地高度及び外気温等を計測)、自動操縦装置(GPS/INS、操縦信号処理装置、サーボ)、通信装置(データダウンリンク)、推進装置、電源装置及び緊急回収用パラシュート等で構成される。主要機器は、耐故障性を向上させるため、冗長方式を採用しており、例えば、操縦舵面であるエレベータを 3 分割、エルロンを 2 分割し、舵面当たり 1 台のサーボを取り付け単一故障による機体制御への影響を小さくしている。

地上のシステムは、パイロットが使用するプロポ、自動操縦オペレータの使用するコンソール及びデータリンク・システム等で構成される。オートパイロットは、専用の飛行運用管理ソフトウェア (UFOMS: UAV Flight Operation and Management system) により、表示される地図上で飛行計画を作成できるだけでなく、フライト中の機体の情報や健全性を確認することができる。また、速度、高度及び飛行経路の変更や RTB (Return to base) 等のコマンド送信も行える。

また、放射線測定用の特別な機能として、地形追従の機能が付加されている。一般的に放射線は距離により減衰し、上空から測る場合は高度により地上の放射線を測定する範囲が変化する。そのような高度による減衰効果の補正には、後述するパラメータを使って補正を行うことが可能であるが、対地高度を一定にフライトすることでより正確な測定が可能になる。そこで、地上の DEM (Digital Elevation Model) データを基に、自動的に高度を調整する機能 (地形追従機能) を開発した。実際には、飛行プログラムの設定時、高度変更のコマンドを自動的にプログラム内に含める処理を行っている。また、本機能は、放射線を正確に計測するためだけでなく、地上からの距離を一定に保てるため、安全上の効果もあると考えられる。

実際の運用方法は以下の項目を想定している。

- 1) モニタリング対象となる地域から 100 km 程度離れた地上基地局から遠隔操縦で離着陸し、飛行測定する。
- 2) 自動操縦により、モニタリングを行う。
- 3) 高度は航空法の制限内(150~250 m 以下)とする。
- 4) モニタリングデータは、地上基地局にダウンリンクし、リアルタイムで測定状況を把握する。
- 5) 帰投・着陸後にモニタリングデータをダウンロードし、詳細解析を行う。
- 6) UARMS の運用は遠隔操縦者(パイロット)を含め、数名程度とする。

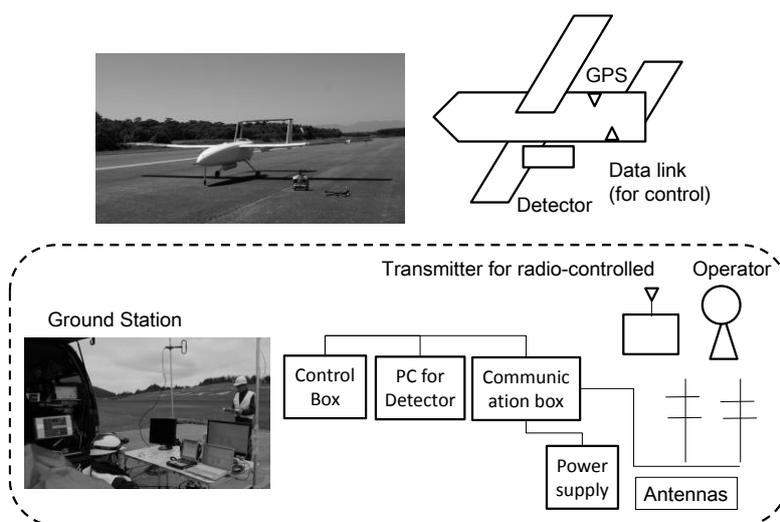


Fig. 3-1 UARMS の構成

Table 3-1 UARMS の主な諸元

Length	2,700 mm
Span	4,200 mm
Height	1,315 mm
Cruise speed	30 m/s
Max. take-off weight	50 kg
Engine displacement	100 cc
Fuel	Gasoline
Max. pay load	10 kg
Propellers	26 in x 12 pitch (2 blades)
Communications	2.4 GHz, UHF, Iridium

4. 計算シミュレーションによる弁別性能再評価

4.1. 概要

原子力事故により放射性物質が環境中に放出された場合、その空気中の放射性物質の濃度を把握することは住民の被ばくリスクを軽減する上で非常に重要である。空中の放射能濃度を測定するには、直接プルームを測定する方法が確実であり、無人航空機は人が搭乗しないことから被ばくリスクの軽減が期待できる有用なツールである。しかし、これまでの検出器では、空气中に分布する放射性物質、無人航空機に付着する放射性物質、地表面に沈着した放射性物質を弁別することを考慮しておらず、空気中の放射性物質濃度を正確に評価ができない懸念があった。著者ら過去に、電子・光子輸送電場カスケードモンテカルロコードで検出器の応答を計算し、空気中と地上からの放射線を弁別する新たな無人航空機用の検出器を設計した。計算の前提として、プルームから機体に付着する放射性核種の付着効率について文献値を採用したが、今回より計算精度を高めるため、実際にエアロゾルの噴霧実験を実施し、付着効率を求め再計算を行った。

4.2. 基本的な考え方

原子力事故時において、環境中に放出された放射性核種は大気中に存在するものと地表面へ沈着するものに分かれ、上空から直接的にプルームを計測するには地上の影響と弁別する必要がある。また、フライト最中に機体に付着する放射性核種からの放射線との弁別が必要になる。Fig. 4-1 にプルーム測定の際の放射線の放出源イメージについて示す。このような放射線の線源位置を弁別する手法として同時計測を利用する手法が考えられる。ここでは、複数の検出器を横に並べ各々の検出器信号の同時計測率の差を利用し、上空の線源 (サブマージョン) 及び地上の線源を弁別する構成を採用する。また、機体に付着した放射線との区別は、ホスウィッチ検出器を採用し、検出器表面に付着した放射性核種起源の β 線と γ 線の同時計数率とサブマージョン線源からの γ 線を区別する構成とした。検出器の基本構成と同時計測のイメージについて Fig. 4-2 に示す。また、検出器は γ 線を計測する検出器として NaI シンチレーション検出器 (NaI) と γ 線のエネルギー分解能のよい LaBr₃ 検出器 (LaBr₃)¹⁹⁾ を採用し、付着した放射性核種との弁別用には、プラスチックシンチレーション検出器 (PS) と NaI を組み合わせたホスウィッチ検出器を想定した。これらの基本構成による弁別性能について、シミュレーションを行った結果を次章以降に示す。

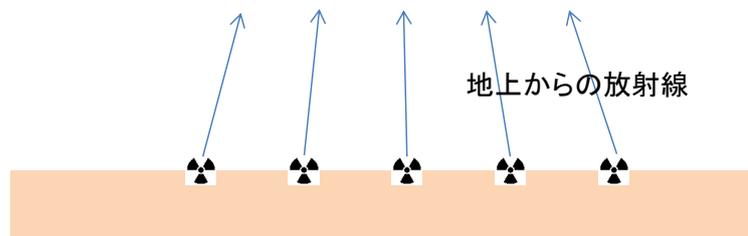
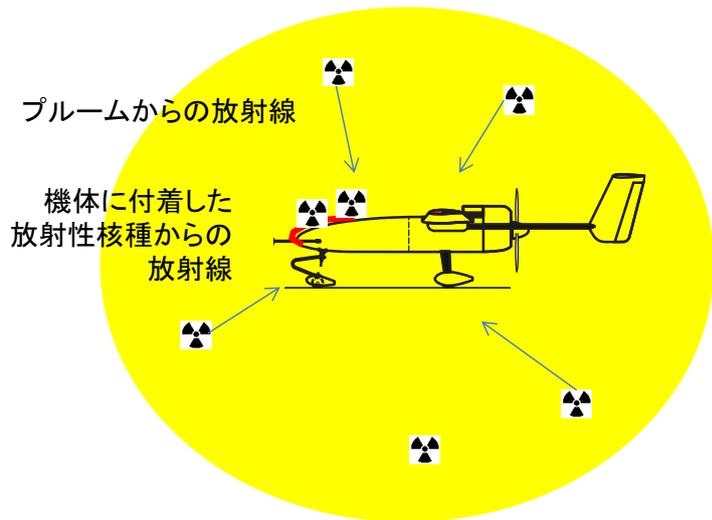
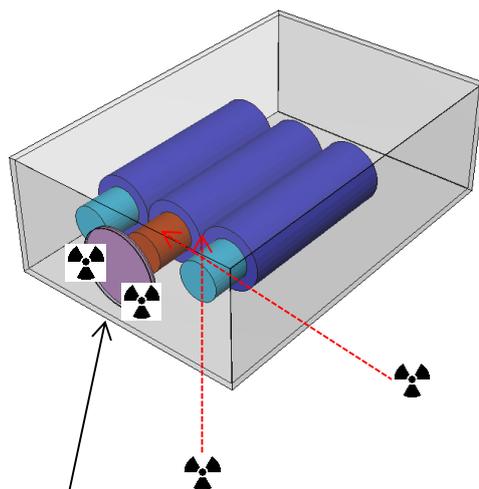


Fig. 4-1 空中で測定する場合の放射線の放出源イメージ

プルームと地上からの放射線の弁別
 →複数の検出器を用いた同時計測率による弁別



付着した放射性物質からの放射線の弁別
 →ホスウィッチ検出器を用いたβ-γ同時計測

Fig. 4-2 検出器の基本構成と同時計測イメージ

4.3. エアロゾル噴霧試験

4.3.1. 試験概要

空気中放射性物質濃度から機体への付着効率及び機体の位置における違いを確認するため、エアロゾル沈着試験を実施した。試験はオープンフィールドおよびチャンバ内で実施した。噴霧したエアロゾル及び機体に沈着したエアロゾルは、それぞれダストろ紙及びスミヤでエアロゾルを捕捉し、原子吸光法を用いてエアロゾル量の測定を行った。沈着速度は空気中のエアロゾル量及び機体へ沈着したエアロゾル量の割合で評価した。

4.3.2. エアロゾル沈着試験方法

試験は実際の飛行を模擬するためエアロゾル発生装置から発生させたエアロゾルを機体に吹き付けた。エアロゾルは酢酸カリウムを原料として生成した。発生させたエアロゾルはエアロゾル計測器で粒径分布を測定した。無人飛行機周辺のエアロゾルをダストサンプリングによりろ紙上に、機体に付着したエアロゾルをスミヤにそれぞれ採取した。採取したエアロゾルは原子吸光法によりカリウムを定量し、空気中のカリウム量と機体に付着したカリウム量から機体への沈着量を求めた。オープンフィールドで行った試験風景及びチャンバ内で行った試験風景について、Fig. 4-3 に示す。また使用した機器について、Table 4-1 に示す。チャンバは、地方独立行政法人 大阪産業技術研究所和泉センターの人工気象室で実施した。人工気象室は風速 3 m から 10 m まで設定ができる。Table 4-2 に試験条件について示す。オープンフィールド試験では主に各部位に選択的に噴霧し原子吸光での測定が可能かどうかの試験条件選定を目的とした。オープンフィールド試験時に測定したエアロゾル発生器からの粒径分布について Fig. 4-4 に示す。50-70 nm を中央値とした 500 nm 以下の粒子が生成されている。Doi et al., (2013) はつくばで観測した放射性核種の粒径分布から放射性セシウム (^{137}Cs 、 ^{134}Cs) の平均的な粒径が 1.0 μm 、 ^{131}I は 0.7 μm であったと報告しており²⁰⁾、事故時環境と比較すると小さい粒子での試験となった。それらの知見を基に、チャンバ内に機器での試験を行った。チャンバ内での試験中 (No. 3 及び No.4) における各測定点での風速の変化について Fig. 4-5 に示す。このように一定の風速が確保された。

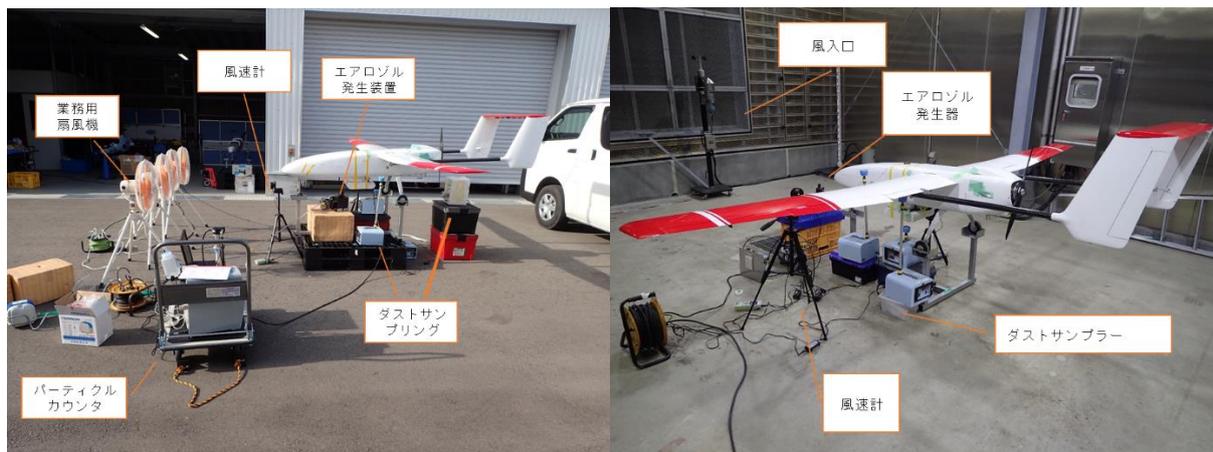


Fig. 4-3 試験体系

(左: オープンフィールドでの試験風景、右: チャンバ内での試験風景)

Table 4-1 仕様機器一覧

装置等	数量	型番等
ダストサンプラー	3 式	日本放射線エンジニアリング製 ES-7404, 最大流量 6 (L/min)
サンプリングろ紙	適量	Advantec 社 HE-40T
風速計(ロガー付)	1 式	AH-4207SD
エアロゾル発生装置	1 式	トランステック社製 six-jet atomizer model 9306
エアーポンプ	1 個	GAST 社製 K48ZZEFL
パーティクルカウンター	1 式	トランステック社製 Electrostatic Classifier Model 3082 及び ultrafine condensation particle counter mode I3776
扇風機	4 台	スイデン SF-45VS-1VP2, 最大風速 345(m/min)
酢酸カリウム	適量	
スミヤろ紙	適量	コイン型(25φ)

Table 4-2 試験条件一覧

試験No	試験場所	条件	風速 (m/s)		吹き付け時間 (時間)
			飛行機先端	主翼左	
1	オープン	吹き付けなし (BG*)	7.1	-	4
2	オープン	検出器への吹き付け	3.3	3.9	1
3	チャンバ	全体への吹き付け	1.7	1.9	5
4	チャンバ	全体への吹き付け	7.1	7.1	5

* バックグラウンド

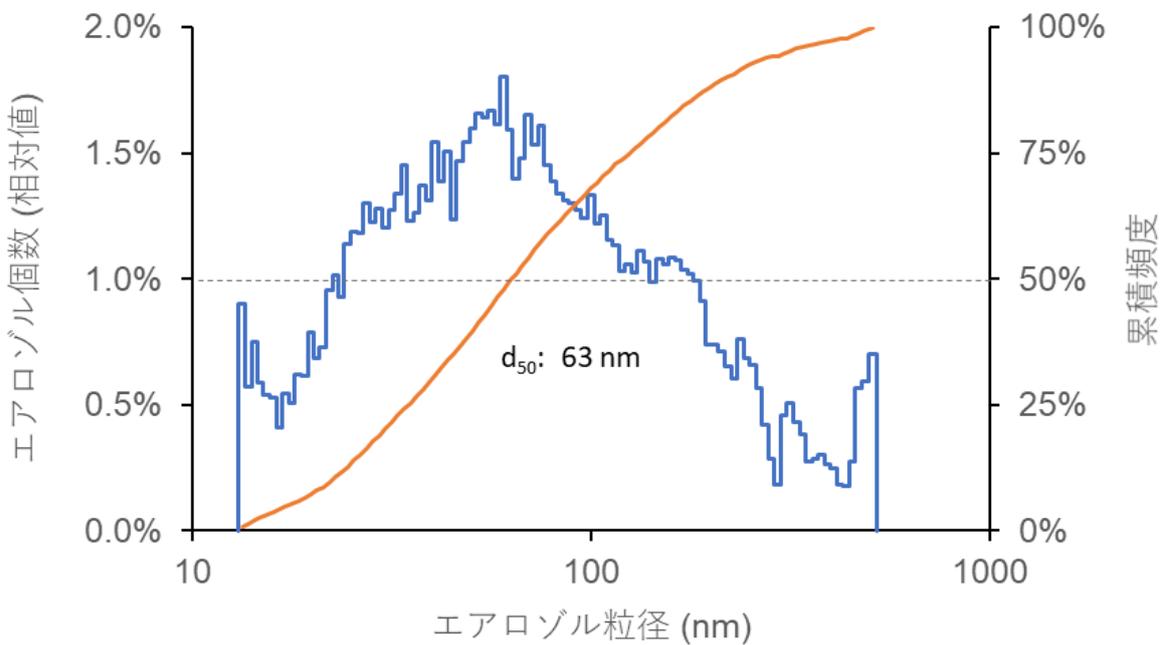


Fig. 4-4 エアロゾル発生器からの発生粒子の粒径分布
(試験 2)

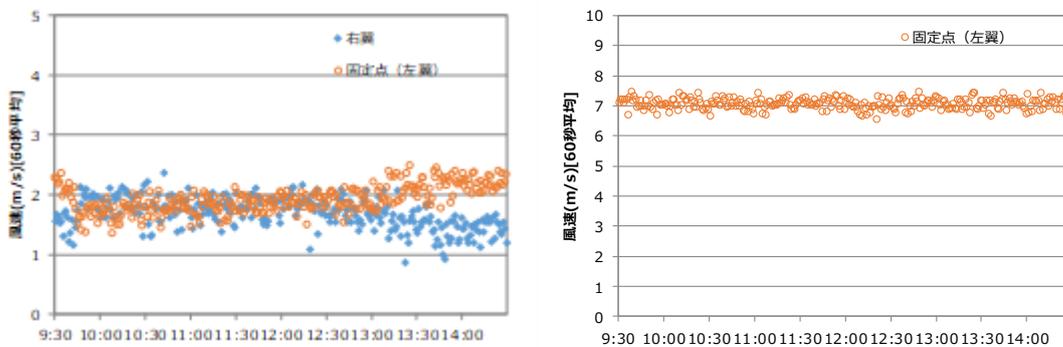


Fig. 4-5 試験時における風速の変化
(左: 試験 3; 右: 試験 4)

4.3.3. エアロゾル沈着速度

試験の結果を Table 4-3 に示す。ダストサンプラーによる空気中の酢酸カリウム濃度に対する機体表面のスミヤ試料中の酢酸カリウムの濃度の割合を沈着速度と定義する。最大の沈着速度を示したのは、試験 4 の胴体下部で得られたデータであり、 4.2×10^{-3} m/s であった。最も測地絵に影響を受けると考えられる検出器下部では、試験 3 及び 4 における沈着速度は、それぞれ

2.3×10^{-3} m/s 及び 2.1×10^{-3} m/s とほぼ同等の結果が得られた。この結果を元に、検出器のシミュレーションを実施した。

Table 4-3 試験結果

No	スミヤ試料による機体表面の 酢酸カリウム ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$)			ダストサンプラーによる大気中の 酢酸カリウム濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			沈着速度 (m/s)		
	検出器下部	胴体下部	主翼左側下部	検出器下部	胴体下部	主翼左側下部	検出器下部	胴体下部	主翼左側下部
1	7.9.E-03	D.L	D.L	2.7E+00	D.L	D.L	-	-	-
2	8.0.E-01	D.L	D.L	2.7E+02	D.L	D.L	3.0E-03	D.L	D.L
3	1.4.E-01	1.6.E-01	8.8.E-02	5.5E+01	-	2.7E+01	2.3E-03	-	2.6E-03
4	1.4.E-01	2.5.E-01	1.5.E-01	6.1E+01	5.7E+01	5.2E+01	2.1E-03	4.2E-03	2.5E-03

4.4. シミュレーションによる弁別測定性能評価手法

4.4.1. 検出器の構造

シミュレーションのための計算コードは電子・光子輸送電場カスケードモンテカルロコード EGS5 を利用した²¹⁾。一部の計算には PHITS を用いた²²⁾。検出器の計算コードに入力する構造は、1.0 inch (=2.54 cm) の LaBr_3 の両側に 1.0 inch の NaI を地面と平行に並べた。 LaBr_3 はエネルギー分解能が優れることから、核種を評価するスペクトル解析に用いる。検出器の前方に β 線透過窓のついた PS を設置し、検出器に付着した放射性物質の β 線源を検出する。検出器を模擬した体系について Fig. 4-6 に示す。なお、 β 線は Fig. 4-7 のように飛程距離が短いことから、PS が電子を検出するためには透過窓を軽量の材質で薄くする必要がある。そこで、計算における透過窓は、材質をポリエチレン (密度 0.9 g cm^{-3}) 製で 0.5 mm 厚とした。測定ボックスの大きさは、16 cm x 24cm x 8 cm とした。

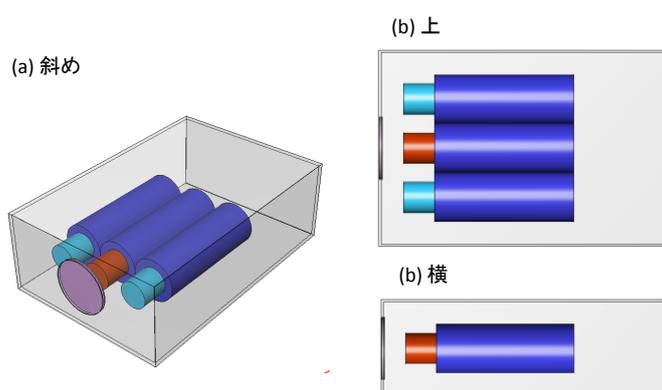


Fig. 4-6 検出器の概観

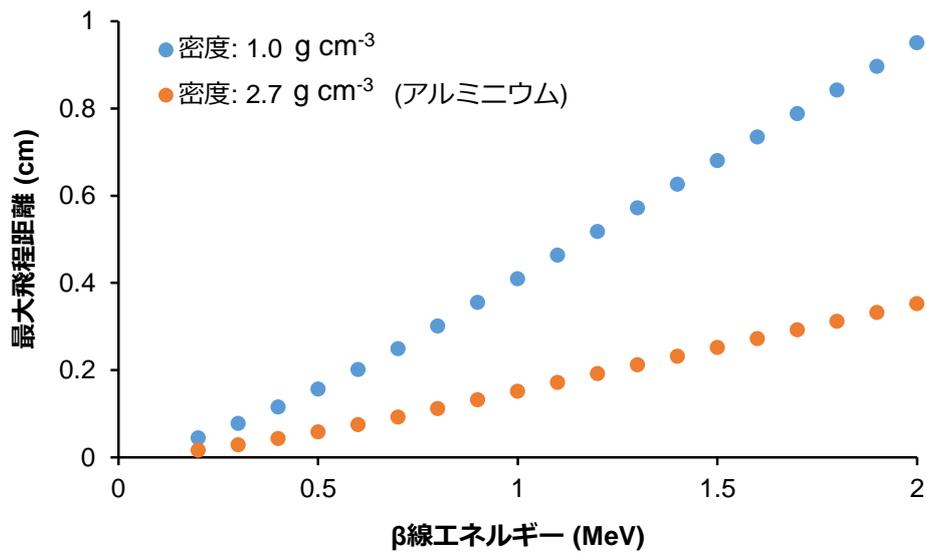


Fig. 4-7 β線のエネルギーと透過率の関係

4.4.2. 線源分布

線源の分布 Fig. 4-8 のように空气中、地表面と機体の表面の三種類を考慮した。空气中の線源分布は対地高度 200m において半径 100m の均一分布、地表面は無限平板の均一分布とした。また、機体表面は、無人航空機および放射線検出器の体系を簡略化し、各部位の主要箇所の表面に分布させた。各部位で放射能濃度を設定できるようにし、検出器の上部・下部・前部・後部・左部・右部、胴体の上部・下部・左部・右部と主翼の上部・下部と、尾翼の上部・下部・左部・右部とした。

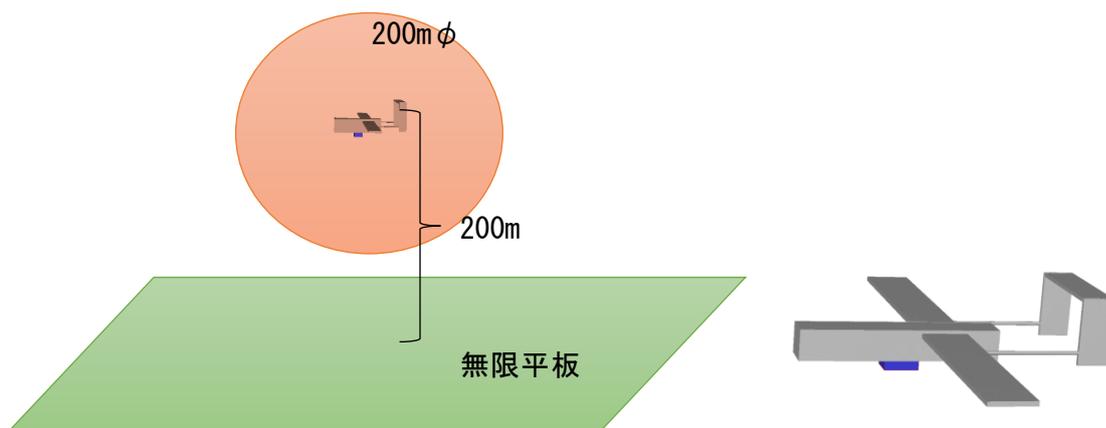


Fig. 4-8 線源分布と機体のジオメトリ

4.4.3. 地表面の放射性物質の沈着量

地表面への放射性物質の沈着速度は WSPEEDI-II²³⁾を参考にし、I-131 と Cs の乾性沈着速度である $3.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ を設定した。沈着時間は事故直後のモニタリングを想定し 5 時間とした。Table 4-4 に地上への沈着量を含めた沈着量を示す。

Table 4-4 地表面への放射性物質の沈着量

沈着速度 (m/s)	ヨウ素 : 3.0×10^{-3} セシウム : 1.0×10^{-3}
沈着時間 (時)	5
放射能濃度 (Bq/m ²)	ヨウ素 : 5.4×10^1 セシウム : 1.8×10^1

4.4.4. 計算結果

空気中と検出器の表面、地表面に 3 種類の放射性物質が分布した際の検出器の波高値をシミュレーションにより計算した。放射性核種や検出素子、線源分布ごとに計算した全エネルギーの計数率を Table 4-5 に、そして線源分布ごとの割合を Table 4-6 に示す。無人航空機がプルームの中を飛行したときに検出された空中由来の放射線の割合が LaBr3 と NaI の検出素子で約 80% 以上となり、LaBr3 と NaI で検出された計数を空中由来として放射能濃度が評価できると考えられる。光電ピークの計数率を Table 4-7 に、その比率を Table 4-8 に示す。全計数率と同様に空中由来が支配的な結果となった。

無人飛行機がプルームを通過した後に地上由来の放射能濃度を評価できるか検討するため、空中由来の結果を除いて集計した。Table 4-9 に示す LaBr3 と NaI の合計計数率は地上由来と検出器由来でほぼ同じ比率なのに対し、PS は検出器由来の比率が高くなった。これは、PS が検出器に付着した核種のベータ線を検出しているためである。また、Table 4-6 に示す光電ピークの計数率の比率を見ると、検出器由来が支配的であった。したがって、これらの比率の差異を利用することで、検出器由来の放射線を弁別できると期待できる。

最後にコインシデンスの計数率と LaBr3 と NaI の合計計数率の比率を Table 4-9 に示す。コインシデンスで検出できる計数率は、飛来する放射線の数%であることが分かった。特に地上由来の放射線の割合が低くなった。地上由来の放射線は Fig. 4-9 のように下から飛来する割合が高く、横方向から飛来する割合は半分以下になる。このため、地上由来のコインシデンスの比率が低くなったと考えられる。

Table 4-5 空中・検出器・地上から放出された全エネルギーの検出器の応答

	Cs-134			Cs-137			I-131		
	PS	LaBr+NaI	コインシデンス	PS	LaBr+NaI	コインシデンス	PS	LaBr+NaI	コインシデンス
空中	8.7E-03	4.4E-01	5.7E-03	3.4E-03	1.7E-01	2.2E-03	8.7E-03	4.4E-01	2.3E-03
検出器	1.8E-03	4.7E-02	5.9E-04	1.4E-03	2.1E-02	4.3E-04	1.4E-03	2.1E-02	6.0E-04
地上	6.6E-04	4.2E-02	2.8E-04	3.0E-04	1.5E-02	8.6E-05	8.4E-04	4.6E-02	2.0E-04
合計	1.1E-02	5.3E-01	6.5E-03	5.1E-03	2.0E-01	2.7E-03	1.1E-02	5.0E-01	3.1E-03

Table 4-6 空中・検出器・地上から放出された全エネルギーの検出器応答の比率

	Cs-134		Cs-137		I-131	
	PS	LaBr+NaI	PS	LaBr+NaI	PS	LaBr+NaI
空中	78%	83%	66%	82%	80%	87%
検出器	16%	9%	28%	10%	13%	4%
地上	6%	8%	6%	8%	8%	9%

Table 4-7 空中・検出器・地上から放出された光電ピークの検出器の応答

	Cs-134	Cs-137	I-131
	LaBr+NaI	LaBr+NaI	LaBr+NaI
空中	1.0E-02	1.2E-02	5.6E-03
検出器	3.6E-03	4.7E-03	5.2E-04
地上	8.1E-05	1.2E-04	8.0E-04
合計	1.4E-02	1.7E-02	6.9E-03

Table 4-8 空中・検出器・地上から放出された光電ピークの検出器応答の比率

	Cs134	Cs137	I-131
	LaBr+NaI	LaBr+NaI	LaBr+NaI
空中	73%	72%	81%
検出器	26%	28%	7%
地上	1%	1%	12%

Table 4-9 検出器・地上から放出された全エネルギーの検出器応答の比率

	Cs134			Cs137			I-131		
	PS	LaBr+NaI	コインシデ ンス	PS	LaBr+NaI	コインシデ ンス	PS	LaBr+NaI	コインシデ ンス
検出器	73%	53%	68%	82%	58%	83%	62%	31%	75%
地上	27%	47%	32%	18%	42%	17%	38%	69%	25%

Table 4-10 検出器・地上から放出された光電ピークの検出器応答の比率

	Cs134	Cs137	I-131
	LaBr+NaI	LaBr+NaI	LaBr+NaI
検出器	98%	98%	39%
地上	2%	2%	61%

Table 4-11 コインシデンス計数率と全計数率の比率

	Cs134	Cs137	I-131
空中	1.30%	1.31%	0.52%
検出器	1.24%	2.05%	2.87%
地上	0.66%	0.56%	0.44%

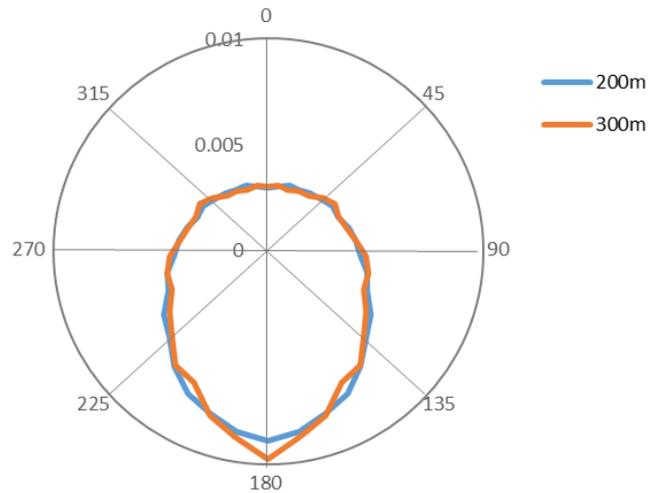


Fig. 4-9 地上に分布した放射性物質のガンマ線が上空で飛来する方向

5. 放射線検出器実用機の開発

5.1. 実用機の構成

前述したようなシミュレーション結果を基に、プルーム計測用の検出器の試作を行った。試作した検出器の構成を Fig. 5-1 に示す。検出器は、中央に核種弁別測定用の LaBr₃ 検出器 (1”×1”) を配置し、左右に NaI 検出器 (1”×1”) とした。左右の NaI 検出器の 1 つは PS とのホスウィッチ検出器とした。各検出器の信号は、線量の ASIC (application specific integrated circuit: 特定用途向け集積回路) に入力し、 γ 線スペクトルと各検出器との同時計数 (コインシデンス) を処理できるようにした。同時計数とする時間は、検出器から出力される波形幅や不感時間を考慮し 1.2 μ s 以内と設定した。試作した検出器の外観を Fig. 5-2 に示す。以下、検出器の名称は、Det_NaI、Det_LaBr₃、Det_Phos_NaI/PS と表記する。NaI 検出器及び LaBr₃ 検出器のバックグラウンドスペクトル及び ¹³⁷Cs 線源を照射した際のスペクトルを Fig. 5-3 に示す。LaBr₃ シンチレータは、¹³⁷Cs の放出する γ 線のエネルギーピークに対し、半値幅が 1.8 %~2.0 % とエネルギー分解能に優れている。しかしながら、自己汚染があることが知られ、²²⁷Ac の子孫核種、La の放射性同位元素である ¹³⁸La が主な成分となる。²²⁷Ac の子孫核種は、²¹¹Pb および ²⁰⁷Tl の β 壊変によりさらに 1,400 keV までの β 線を及び、²²⁷Th、²²³Ra、²¹⁹Rn、²¹⁵Po 及び ²¹¹Bi からの α 線が放出される²⁴⁾。

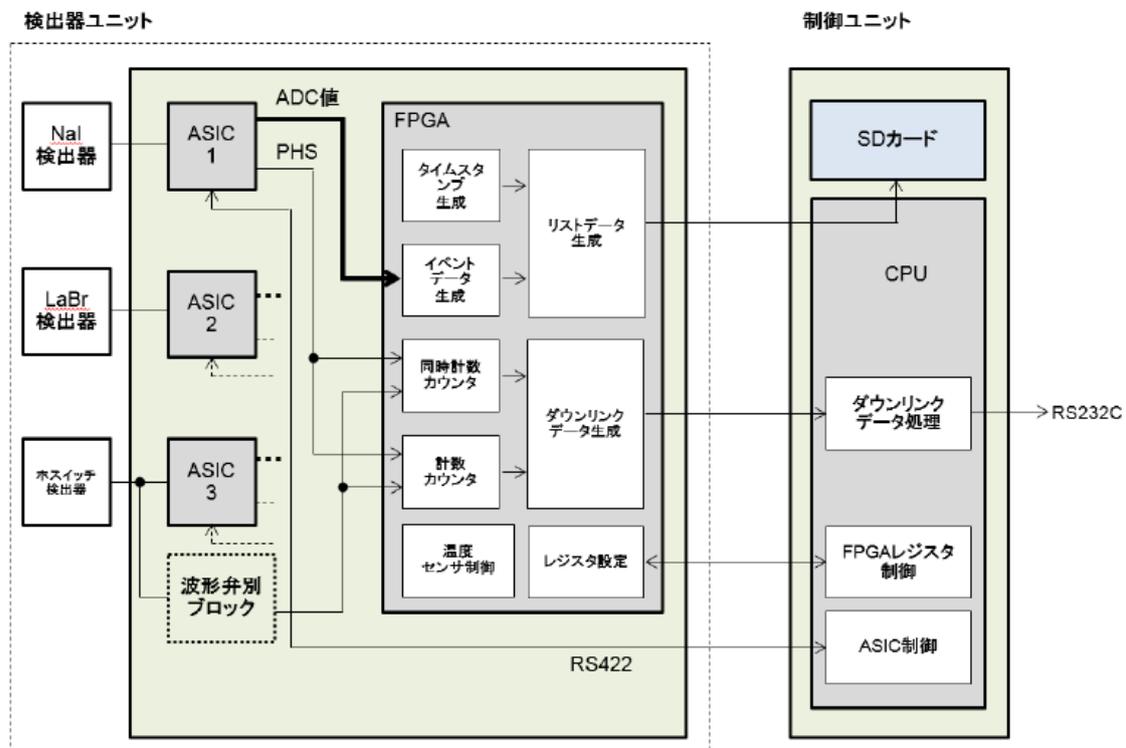


Fig. 5-1 試作した検出器の構成

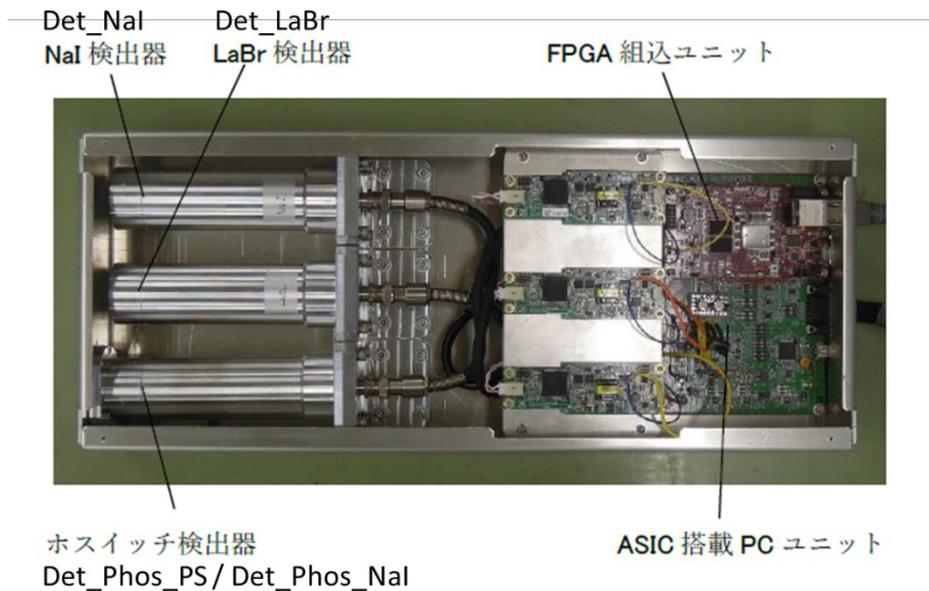


Fig. 5-2 検出器の外観

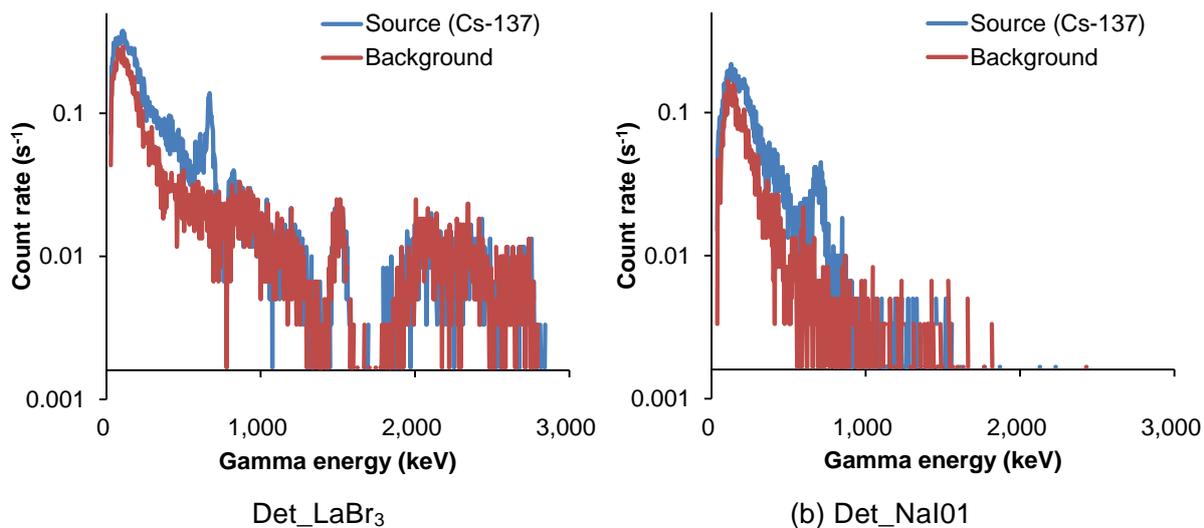


Fig. 5-3 試作した検出器の γ 線スペクトル

5.2. 同時計数率の方向特性

プルーム計測用の検出器による放射線飛来方向推定の可能性を検討するため、 ^{137}Cs 点線源の位置変化による同時計数率の変化に係る実験を実施した。本実験の概略図を Fig. 5-4 に示す。はじめに BG 計測を 3600 秒間行なった。次に ^{137}Cs 線源と検出器を同じ高さになるよう固定し、レーザー距離計を用いて線源-検出器実効中心間距離が $60 \pm 1 \text{ cm}$ となるよう線源を設置した。検出器の正面に線源を設置したときの線源位置を 0° とし、線源を左右に 30° 刻みで 90° まで移動させ、各線源位置においてガンマ線計測を 300 秒間行なった。このような測定を実施して得られた同時計数率の変化を Table 5-1 に示す。線源の位置により、各検出器の計数率は変化し、側方に配置されている Det_NaI01 及び Det_Phos_NaI 検出器は設置方向の計数率が最大を示した。一方、中心部の Det_LaBr₃ については、角度 0° に最大値を示した。

Fig. 5-6 に同時計数率の方向特性について示す。同時計数率に関しては、中心に設置されている Det_LaBr₃ の計数率に対し、Det_LaBr₃ と Det_NaI もしくは Det_Phos_NaI の同時計数率の割合をそれぞれ $\text{RC}_{\text{NL}}/\text{RC}_{\text{PL}}$ と表記する。 RC_{NL} は線源位置 0° を基準にほぼ左右対称形となった。角度 $\pm 90^\circ$ の場合は、側方に配置されている Det_NaI01 及び Det_Phos_NaI/PS が遮蔽となり、散乱線が LaBr に検出されにくくなることから、微妙な照射位置によって差が大きくなる。一方、下方からの照射時には、同時計数率が低くなる。この同時計数率の変化はシミュレーション通りであり、サブマージョン線源による同時計数率との差を見ることにより、 γ 線飛来方向推定への応用が期待できる。次章では、サブマージョン線源を模擬するため、ラドンチャンバでの試験を実施した。

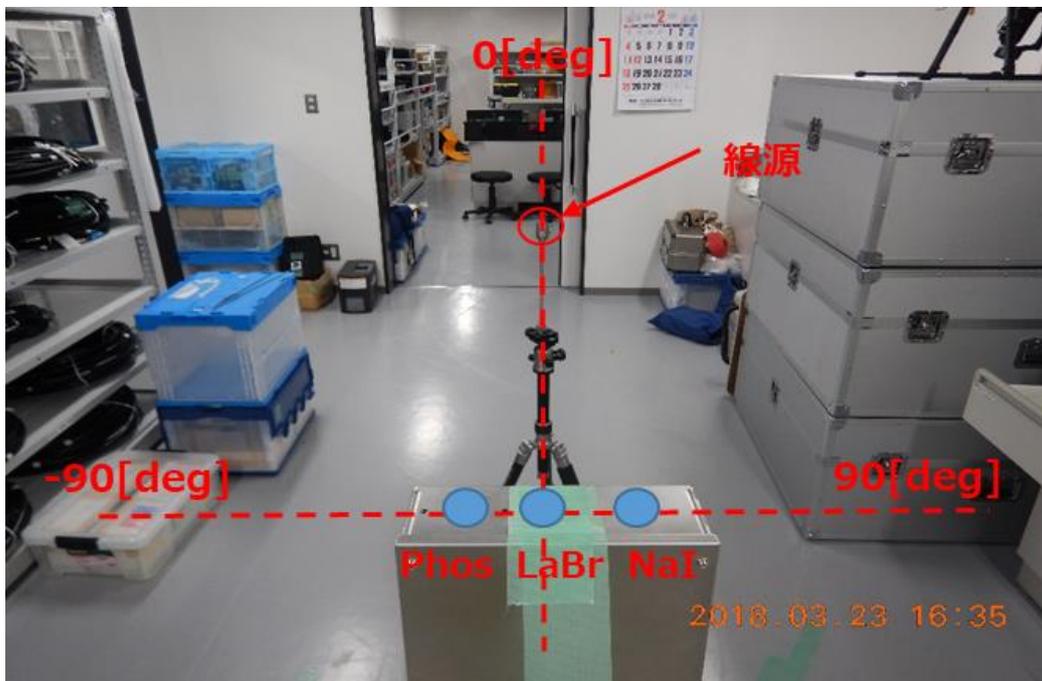


Fig. 5-4 同時計数率の方向特性実験の概略図

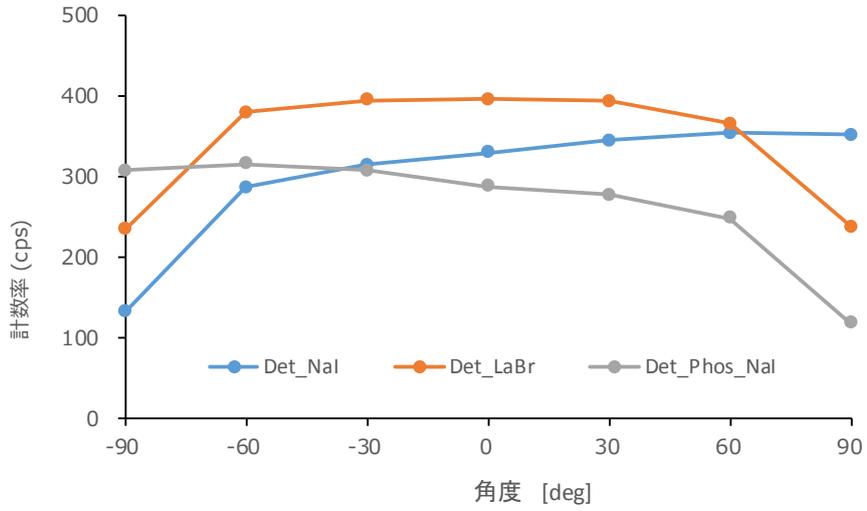


Fig. 5-5 各検出器の方向特性

Table 5-1 同時計数率の方向特性

線源位置 (deg)	同時計数率(%)	
	RC _{N/L}	RC _{P/L}
-90	0.74	0.80
-60	1.3	0.95
-30	0.98	0.91
0	0.88	0.74
30	1.0	0.85
60	1.3	1.1
90	1.4	0.67

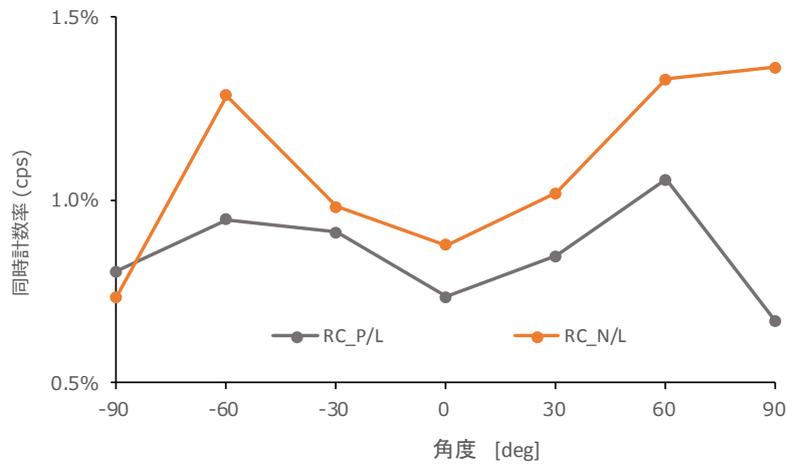


Fig. 5-6 各検出器の方向特性

5.3. ラドンチャンバにおける同時計数率測定試験

プルーム線源による同時計数率と陸上からの放射線照射時の同時計数率の違いを模擬するために、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所内にあるラドン実験棟においてラドン子孫核種の暴露試験を実施した。ラドン実験棟内には床面積約 10 m² (2.72 m × 3.61 m) のチャンバが設置されており、その内部に ²²⁶Ra 線源から放出されるラドン子孫核種の量を調整することにより、サブマージョン状態が模擬できる²⁵⁾。ラドン濃度は通気型電離箱式の検出器である Genitron 社製の AlphaGUARD PQ2000PRO を用いて測定される。ウラン系列のラドン子孫核種から放出される γ 線及び壊変系列について、Fig. 5-7 に示す。このように、ラドンチャンバ内では複数の γ 線の測定が可能である。

ラドンチャンバ内にプルーム測定用検出器を配置した写真を Fig. 5-8 に示す。検出器は金属ラック上の約 1 m に設置した。測定は、チャンバ内のラドン濃度が 0 Bq m⁻³ のときに 30 分間、20 kBq m⁻³、13 kBq m⁻³ 及び 9 kBq m⁻³ となった際に 60 分間行った。Fig. 5-9 に試験時のラドンチャンバ内のラドン濃度の変動及び温湿度の変動について示す。なお、図内の黄色枠の時間内に測定を行っている。Fig. 5-10 にラドン暴露時の γ 線スペクトルの例を示す。このようにラドン子孫核種から放出される γ 線を検出していることが分かる。このような測定を実施した際の同時計数率について Table 5-2 に示す。表には比較としてチャンバ内で計測した ¹³⁷Cs の点線源を下方に配置し同時計数率を測定した結果を示す。RC_{Ni/L} における ¹³⁷Cs の下方照射及びラドン暴露時を比較すると、同時計数率に差が見られなかった。一方 RC_{P/L} では、0.2 % の差があり、Table 4-9 で求めたシミュレーション結果と傾向は一致した。両者の同時計数率の違いは、ラドン濃度が増加しても同様な傾向であったことからシステムの特長ではなく、チャンバ内で壁面に沈着したでの位置関係の違いが要因として考えられる。そこで、13 kBq m⁻³ 及び 9 kBq m⁻³ 時に検出器の場所を移動し、測定を行った。Table 5-2 に示すように傾向に大きな違いは見られなかった。実際の環境中での測定は、オープンスペースであり、チャンバや線源試験時には室内で行わざるをえず壁面へのラドンの付着状況や壁面での散乱などが本結果に影響を与えていると考えられる。今後、詳細な試験により要因を突き詰めた。

ウラン (^{238}U) 系列

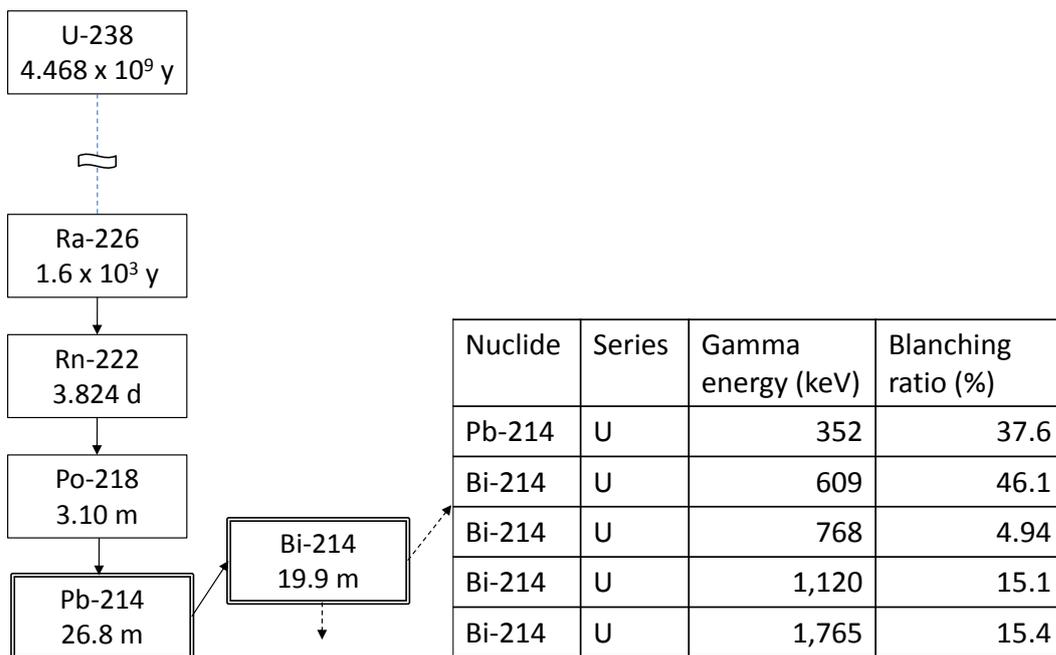


Fig. 5-7 ウラン系列と主な γ 線エネルギー

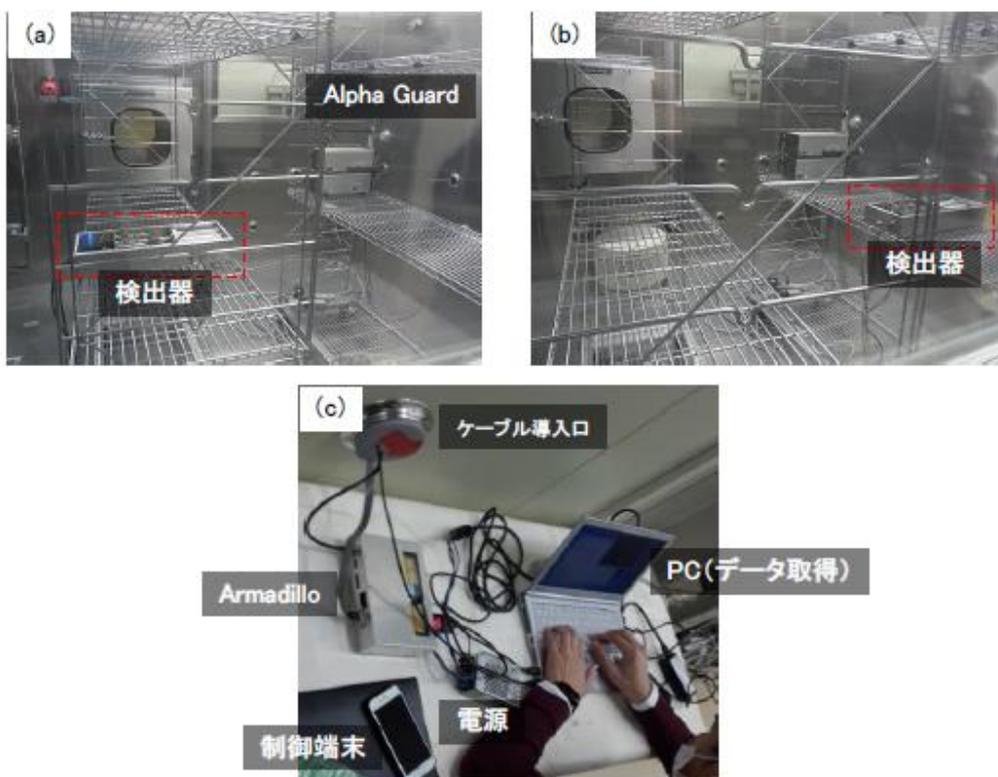


Fig. 5-8 ラドン試験風景

(a) チャンバ内 (チャンバ中心), (b) チャンバ内 (検出器位置), (c) チャンバ外

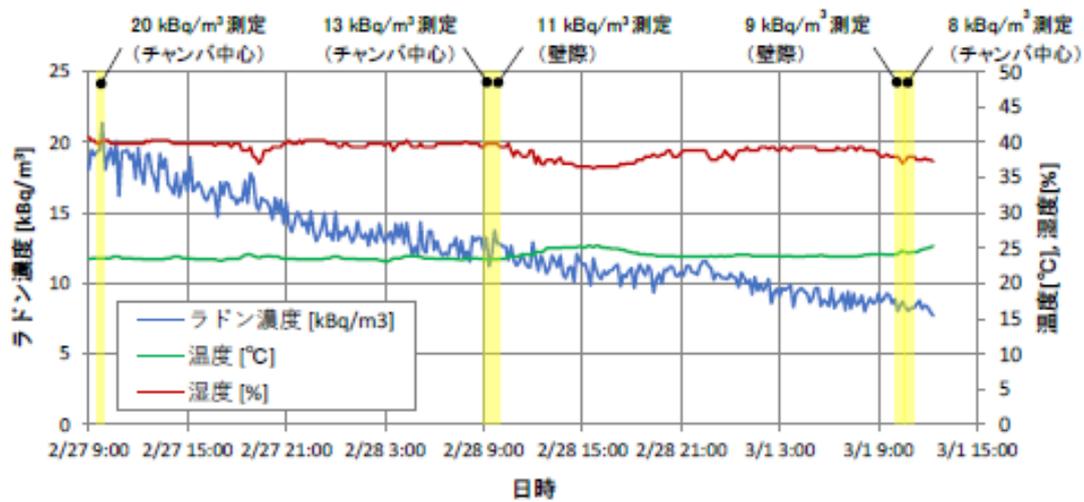
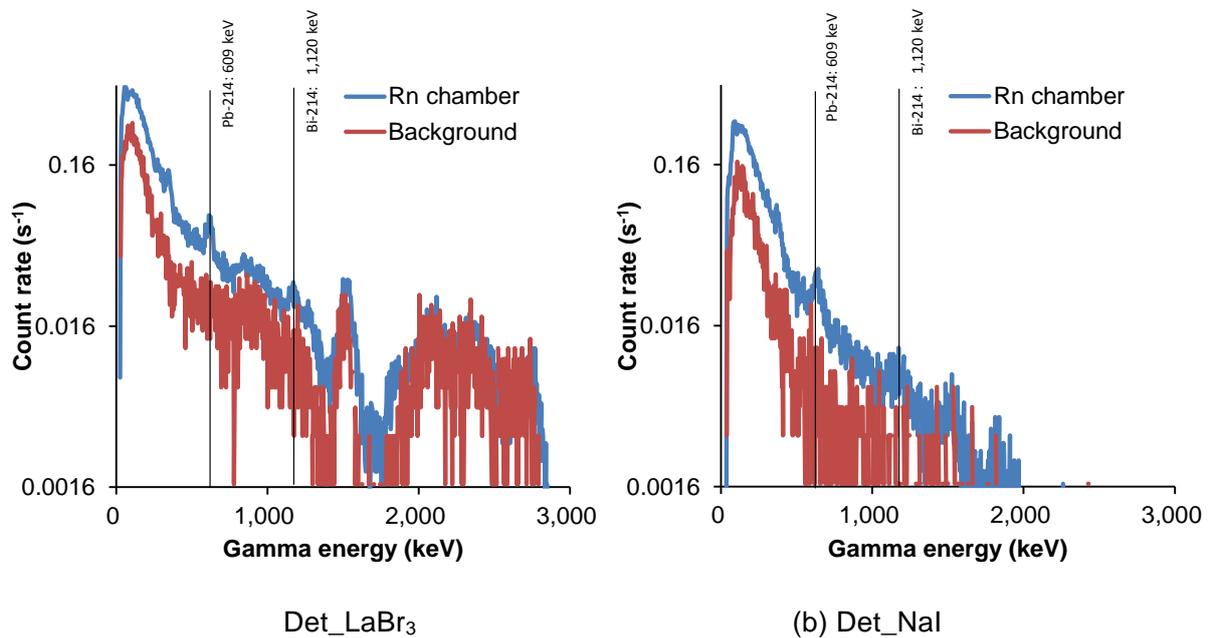


Fig. 5-9 チャンバ内のラドン濃度の変化と測定の実施
(黄色で示した時間帯に測定を実施)



Det_LaBr₃ (b) Det_Nal
Fig. 5-10 ラドン子孫核種測定時のγ線スペクトル例
(ラドン濃度 4.5 kBq m⁻³)

Table 5-2 下方照射とサブマージョン線源との同時計数率の差

試験条件	同時計数率 (%)		
	RC_N/L	RC_P/L	RC_P/N
BG	0.56	0.42	0.022
¹³⁷ Cs 下方照射	0.88	0.74	0.10
チャンバ中心	20 kBq m ⁻³	0.85	0.91
	13 kBq m ⁻³	0.75	0.85
チャンバ壁際	11 kBq m ⁻³	0.90	0.98
	9 kBq m ⁻³	0.85	0.85

5.4. ホスウィッチ検出器によるβ線放出核種の検出

前述のようにホスウィッチ検出器の設置理由は、β線を測定することにより、検出器への放射性物質の付着の指標として使えることにある。今回、Sr-90 及び Cs-137 の線源を測定し、ホスウィッチ検出器がβ線放出核種を測定できる能力があることを確認した。試験結果を Table 5-3 に示す。Sr-90 線源を測定した場合には、NaI の検出器で計数されず PS のみが計数されている。一方、Cs-137 線源では、両者が計数されている。この結果から、制作したホスウィッチ検出器はβ線放出核種を検出可能であることが分かった。今後、β線核種を検出した場合の自己汚染減算について検討していく。

Table 5-3 β線源及びγ線源のホスウィッチ検出器の測定結果

試験条件	計数率		
	Det_Phos_NaI	Det_Phos_PS	PS/NaI
⁹⁰ Sr	0.04	38.6	965
¹³⁷ Cs	71.3	100	1.4

6. 放射性プルームの予測計算手法の検討

6.1. はじめに

原子力災害時におけるプルーム測定のためのフライトプランを自動的に作成するアルゴリズムを試作した。システムは、事故時に大気放出された放射性雲の移流経路を予測し、無人飛行機で測定するためのフライトプランを作成し、結果を表示するものである。システムは、大気拡散シミュレーションプログラム、フライトプラン作成プログラム、予測情報可視化プログラム及び測定データ可視化プログラムから構成される。作成されたフライトプランは UFOMS (Unmanned aerial vehicle Flight Operation and Management System) に入力される。システムの構成を Fig. 6-1 に示す。気象データ、地形等に関するデータ、放射性プルーム放出に係る情報から大気拡散モデルを用いて放射性プルームの移流および拡散計算を行い、予測情報を 10 分間隔で出力する。この予測情報を基に、無人機に纏わる情報と合わせてフライトプランの作成を行う。フライトプランに沿った飛行および測定を実施しながら逐次、測定データを地図上に可視化する。平成 28 年度に制作したアルゴリズムについて、原子力発電所からの放出をシミュレーションし、データ解析を実施した。

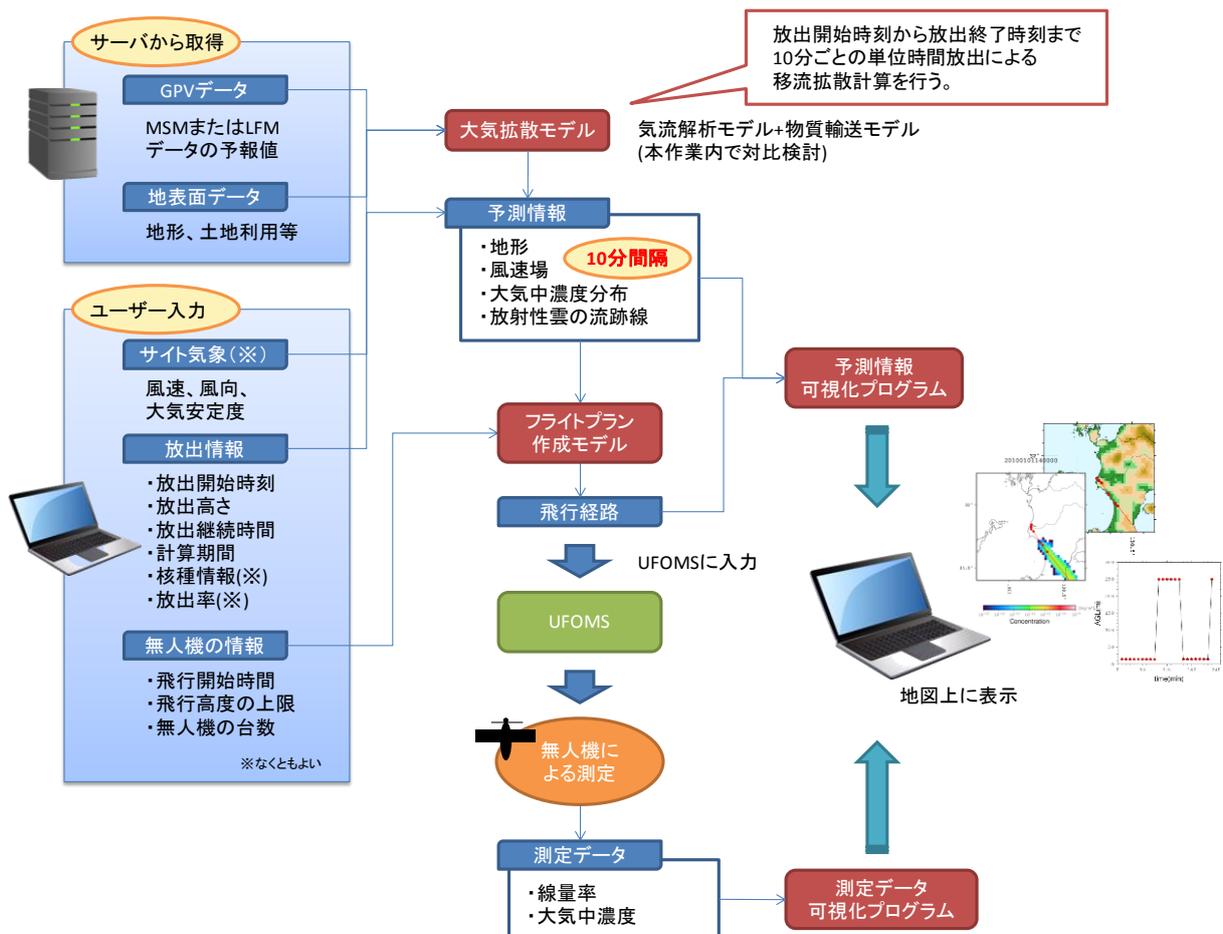


Fig. 6-1 フライトプラン作成アルゴリズムの概要

6.2. 計算条件

試験計算は、福島第1原子力発電所の事故を模擬し、Table 6-1の条件で実施した。放出量はUNSCEAR (原子放射線の影響に関する国連科学委員会 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR)のレポート²⁶⁾を参照し、 4×10^{15} Bq/hとした。無人飛行機は放出から10分後に、福島空港から飛び立ち、プルームの拡散を追いかけるようにプログラムした。

Table 6-1 試験計算条件

放出開始時間	2011年3月15日 15:00
放出地点	福島第一原子力発電所 (緯度: 37.421389、経度: 141.033611)
放出高さ	地上 150 m
放出量	4×10^{15} Bq/h ²⁶⁾
気象データ	MSM GPV(地上及び上層のデータ)
解析時間ステップ	60 秒
結果の出力時間ステップ	60 秒
計算時間	2 時間
座標系	放出地点を投影原点とするポーラステレオ座標系
計算範囲	放出地点を原点として 南北に±50km、 東西-70km~30km
グリッド幅	東西南北ともに 1km

6.3. 計算結果

計算結果について、Fig. 6-2に示す。計算では、プルームの方向及びそれを測定するための無人機の飛行軌跡をシミュレートすることができる。無人機に搭載した検出器で測定される放射性物質濃度(相対値)を3次元プロットした結果についてFig. 6-3に示す。このように、飛行軌跡に従ってプルームの放射性物質濃度が測定できることが確認できる。Fig. 6-4に背景をDEMデータとして3次元的に示した例について示す。地形と機体及びプルーム位置について表示できる。また、シミュレートした時間(10分)ごとに動画の画像をキャプチャした例についてFig. 6-5に示す。このようなシミュレーションは事故の理解だけでなく、安全運航のための情報が抽出できる。

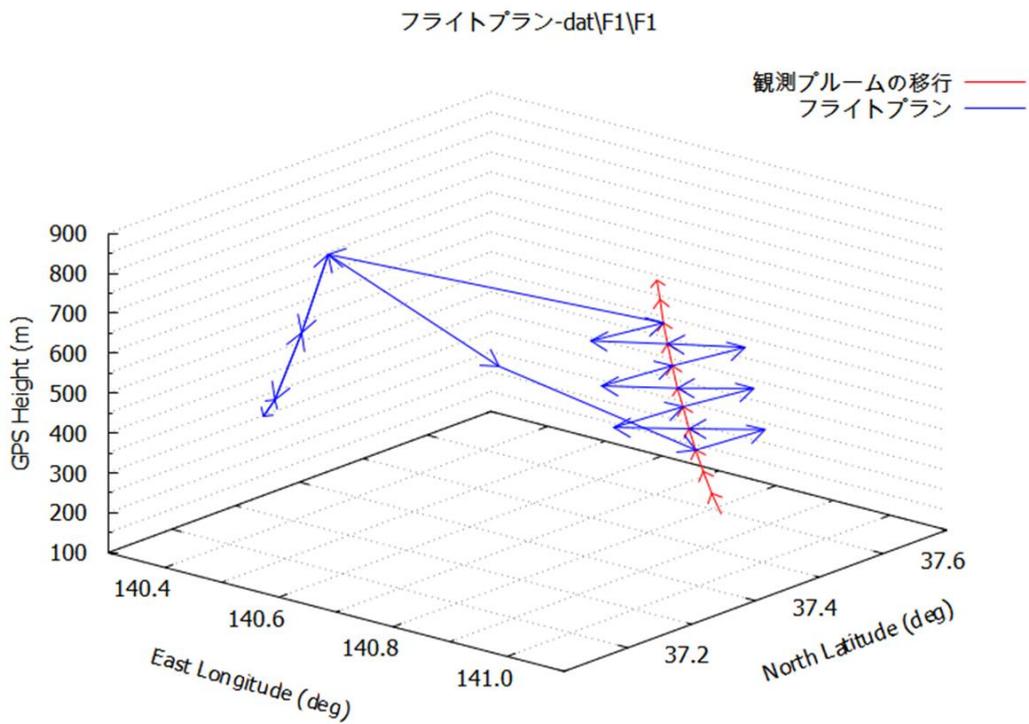


Fig. 6-2 シミュレーション結果及び無人機の飛行軌跡

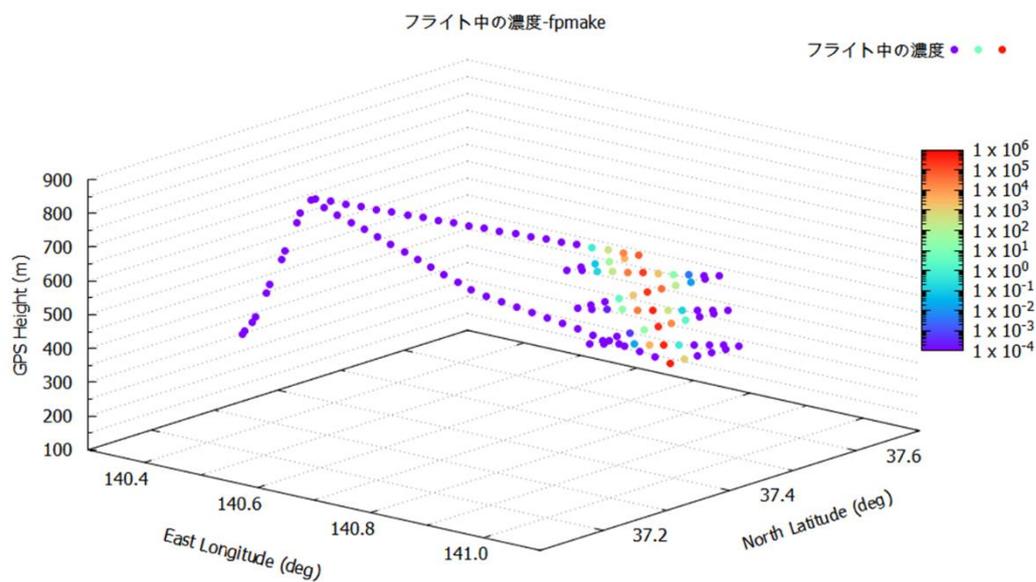


Fig. 6-3 無人飛行機で観測される放射性物質濃度 (相対値)

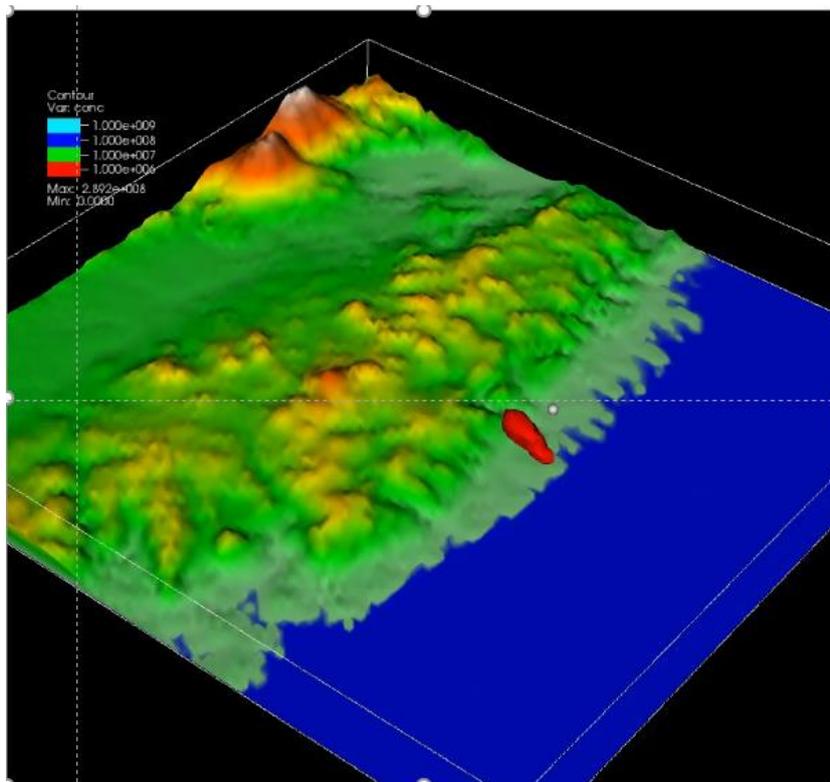
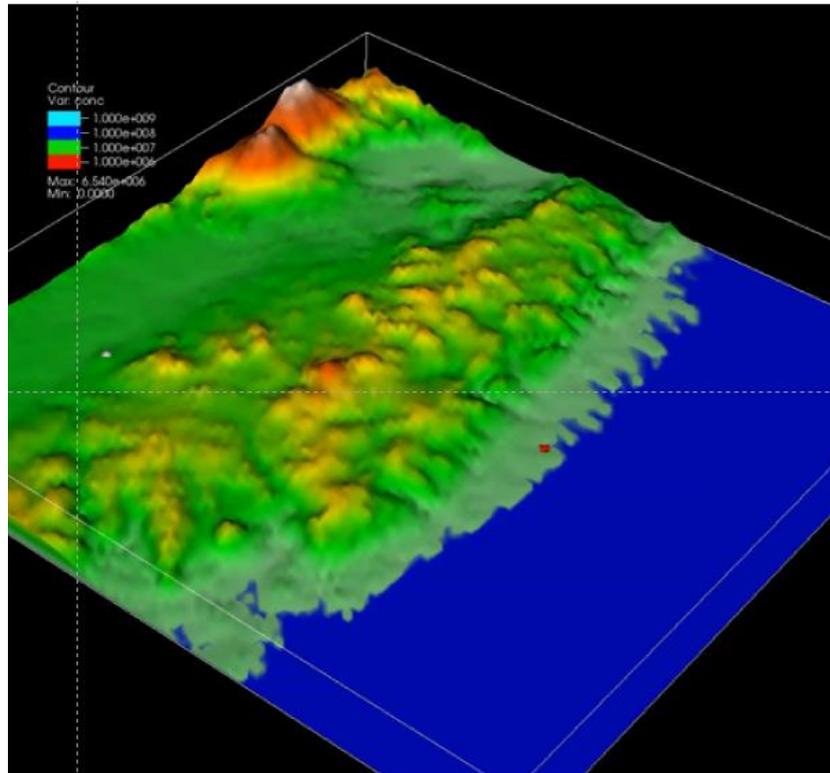
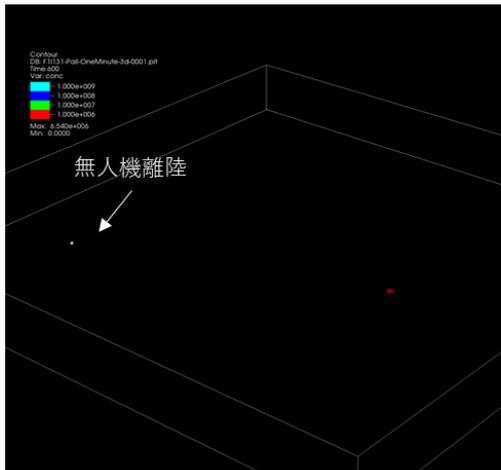
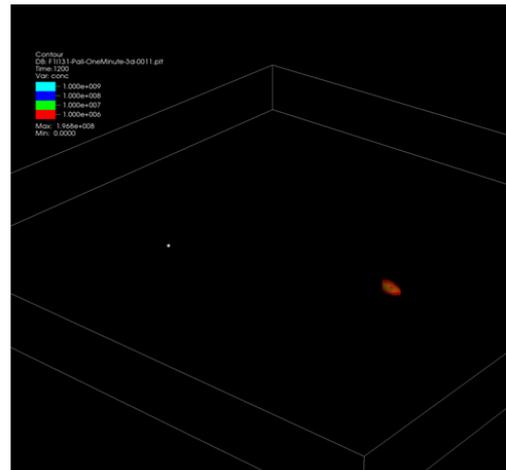


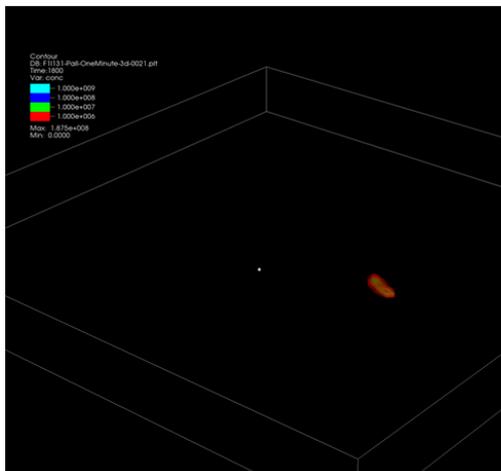
Fig. 6-4 フライトプランの3次元可視化



事故から10分後 (無人飛行機離陸)



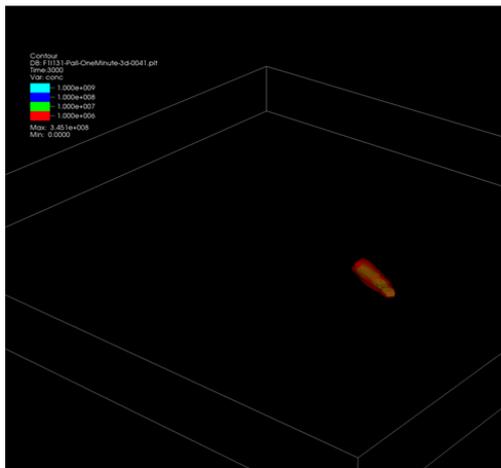
事故から20分後



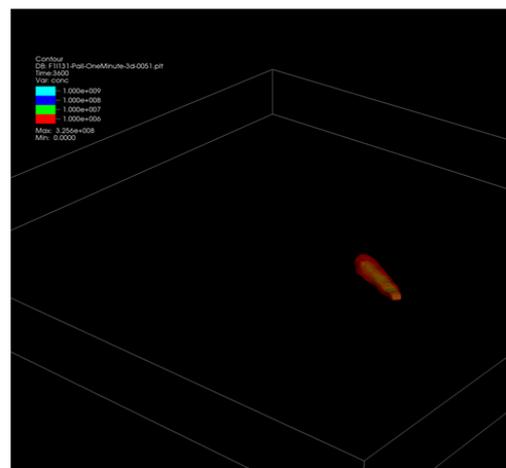
事故から30分後



事故から40分後



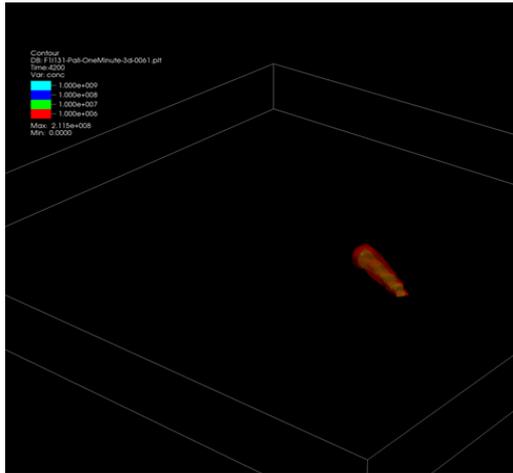
事故から50分後



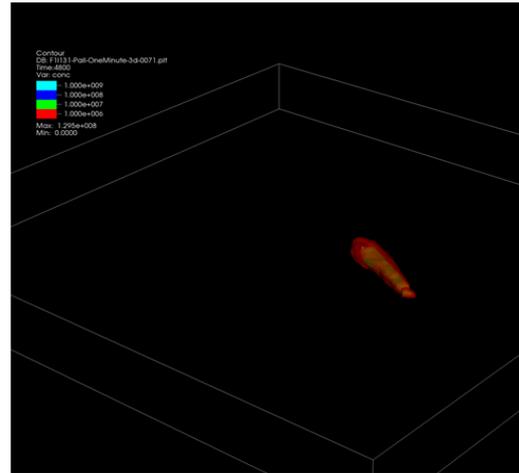
事故から60分後

Fig. 6-5 フライトアルゴリズムの 10 分間隔の表示

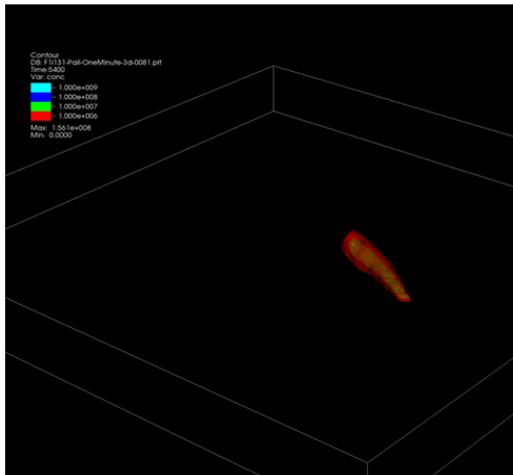
(1/2)



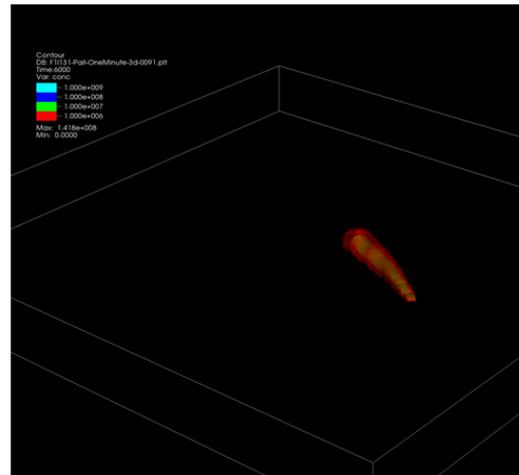
事故から70分後



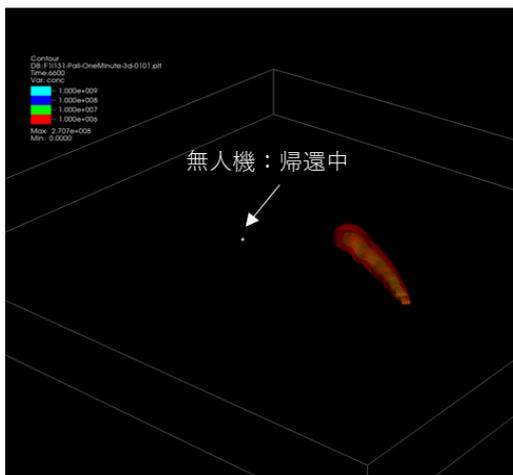
事故から80分後



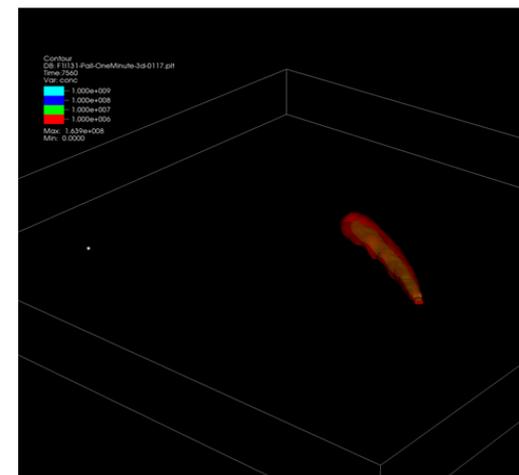
事故から90分後



事故から100分後



事故から110分後



事故から136分後 (無人飛行機着陸)

Fig. 6-5 フライトアルゴリズムの10分間隔の表示

(2/2)

7. UARMS の長距離通信試験

7.1. 試験概要

実際に事故後の無人飛行機の運用を考えた際に、電波は重要な検討事項である。現在の UARMS の仕様は、2.4 GHz の電波及び UHF(460MHz)の電波で通信する。地上で無線通信試験を実施することで、地上局と機上局が通信できる距離を定量的に評価した。

7.2. 試験方法

7.2.1. UHF 系の地上・機上局の単体評価試験

2018年2月19-20日に、UARMS の UHF 系の地上・機上無線設備の単体評価試験を実施した。評価対象としたパラメータは、周波数偏差、送信出力、占有帯域幅、帯域外不要発射、スプリアス領域不要発射である。帯域外発射とは、変調の過程において必要周波数帯の外に生じる、スプリアス発射を除く不要発射のことを指す。スプリアス発射とは、必要周波数帯の外に生じ、かつ情報の伝送に影響を及ぼすことなく低減しうる不要発射のことを指す。これらの不要発射は小さいほど好ましい。

7.2.2. UHF 系及び 2.4GHz-SS 系の地上・機上局の総合評価試験

2018年2月20-23日に UARMS を架台に載せ、パラメータ(発動機の発動及び停止、バンクの有無、機上局と地上局の相対方向、遠隔距離)を変化させた時の UHF 系及び 2.4GHz-SS 系の通信状況と各無線設備への電波干渉の影響を、電波スペクトロアナライザ及び広帯域受信機を用いて観測した。

7.2.3. UHF 系の地上-機上局間の受信電力の理論値の推定

前項で実施した通信試験を評価するために、UHF 系の地上-機上局間の距離が 0.01, 0.1, 1, 10, 100km の際の、受信電力の理論値の推定を行った。計算に使用するパラメータは機上局(送信電力 P_t 、BPF(Band Pass Filter)損失 L_{bpf} 、給電線損失 L_t 、Ant 利得 G_t 、自由空間伝搬損失 L_p)、地上局(Ant 利得(D_p) G_r 、BPF 損失 L_{bpf} 、給電線損失 L_r)である。受信電力を表す地上局受信機入力幅レベル R は以下の式で算出される。

$$R = (P_t - L_{bpf} - L_t + G_t - L_p - L_x) + (G_r - L_{bpf} - L_r)$$

自由空間伝搬損失 L_p は、下記の式で算出される。

$$L_p = (4\pi d/\lambda)^2$$

$d(\text{km})$ は、地上局と機上局の2点間の距離を指す。周波数 $f(\text{MHz})$ は、 $\lambda(\text{km})$ と $c(\text{km}/\mu\text{s})$ を用い、以下の式で算出される。

$$\lambda = c/f = 0.3/f$$

よって、

$$L_p = (4\pi d/\lambda)^2 = (4\pi d f/c)^2 = (4\pi d f/0.3)^2$$

となる。これをデシベル dB で表現すると、

$$L_p = 32.44 + 20 \log(f) + 20 \log(d)$$

となる。その他のパラメータは一般的な UHF 通信の際の値を参照した。UHF 系の地上-機上局間の距離が 100km の時のみ、電波が山にあたり回折(山岳回折)することを考慮し、機上局のパラメータである近接自由リッジ付加損失 L_x を計算に組み込んだ。各回線のマージン M は、地上局受信機入力幅レベル R と受信機感度限界値 S を用い、以下の式で算出される。

$$M = R - S$$

7.3. 通信試験場所

長距離通信試験場所は見通しを考慮し、福島県相馬市にある松川浦漁港と天明高原を、短距離試験場所は松川浦港湾内を選定した。機体と基地局の位置関係について、Fig. 7-1, 7-2 に示す。長距離試験については、2 地点の見通し距離(Fig. 7-2 の斜辺の長さ)が、約 10km になるように場所を選定した。試験体系について Fig. 7-3 に示す。

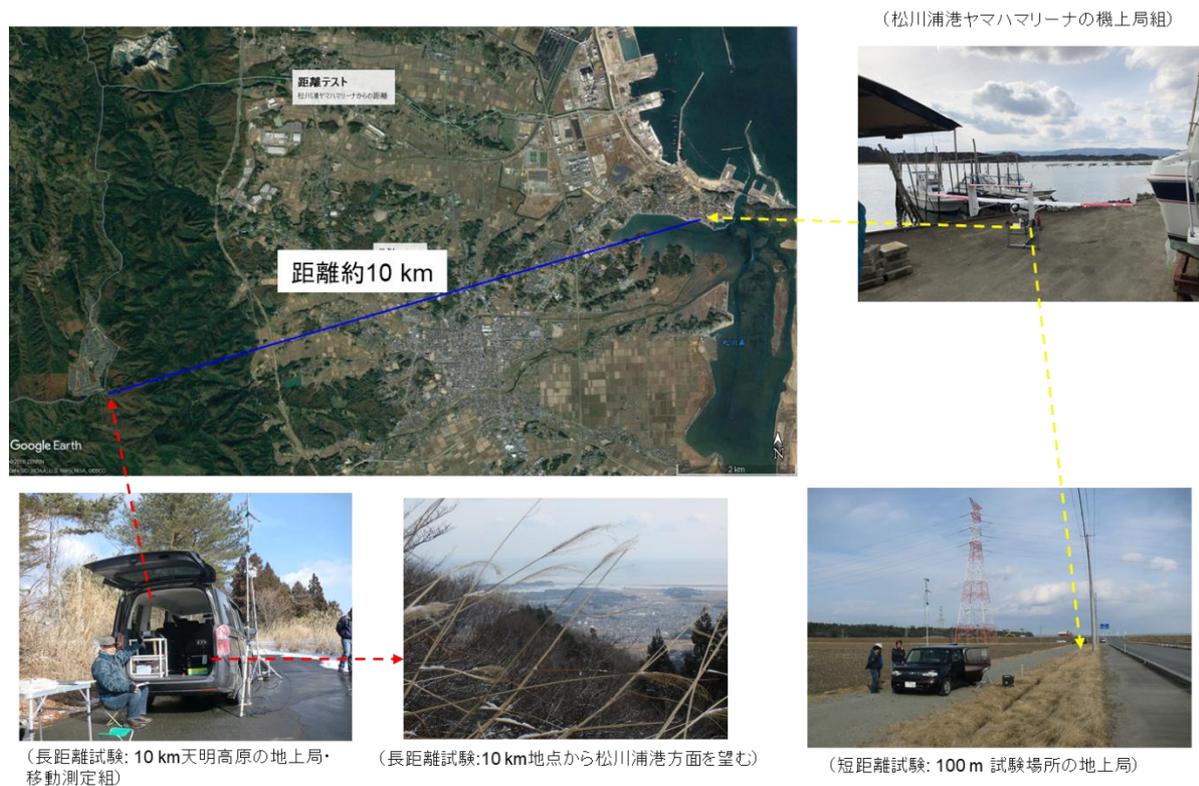


Fig. 7-1 試験位置関係

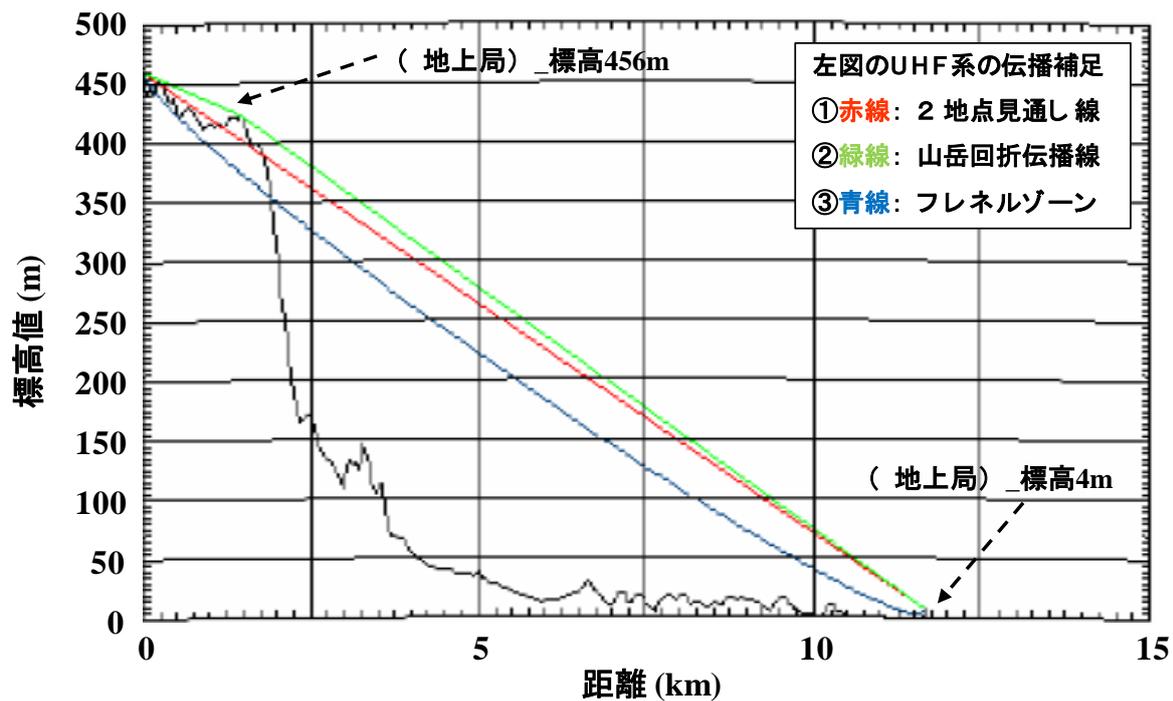


Fig. 7-2 長距離試験詳細図

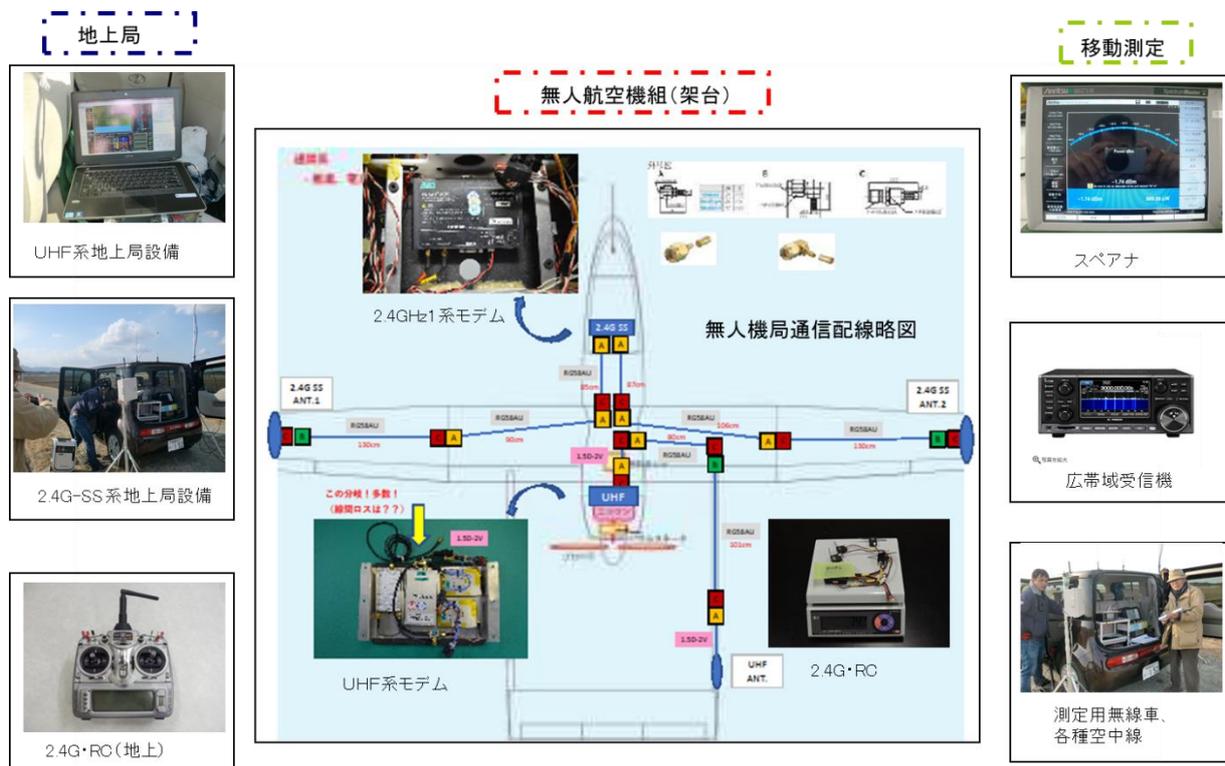


Fig. 7-3 試験体系イメージ

7.4. 通信試験結果

地上局及び機上局無線設備の仕様を Table7-1 に示す。また地上局及び機上局の単体評価試験の結果を Table7-2 に示す。試験の結果、地上局及び機上局どちらも全てのパラメータが規格を満たしていることが確認できた。

次に、UHF 系及び 2.4GHz-SS 系の地上・機上局の総合評価試験の結果を Table7-3 に示す。その結果、距離に応じてバンクの有無や発動機の発動・停止、機首の相対方位によりわずかに受信電力が変化したが、電波の干渉もなく、良好な感度を示した。そのため、今回試験した範囲内であれば、UARMS の地上局-機上局間の電波通信は良好に行われると考えられる。

電波環境試験(UHF)の計算結果を Table7-4 に示し、実測値と計算値の比較を Fig.7-4 に示す。UHF 通信の受信電力値の実測値が計算値に比べわずかに低いことが分かった。これは、長距離通信のために用いた直接偏波の性質として、空気や障害物の影響により電波の減衰が起こったためと考えられる。また、UHF に比べ 2.4GHz 通信の受信電力値が低いのは、周波数が高くなることで電波の直進性が増すことにより、遮蔽物の影響を受けやすいためと考えられる。

Table 7-1 地上局 UHF 系無線設備の仕様

装置番号	中心周波数 (MHz)	送信出力		電波型式
		(W)	(dBm)	
1	468.950	1	30	8K50FID
2	458.025	1	30	8K50FID

※機上局試験の際、装置番号1と2の中心周波数は逆

Table 7-2 地上局及び機上局の単体評価結果

パラメータ	規格	UHF系無線設備					
		地上局		機上局1号機		機上局2号機	
		1*	2	1	2	1	2
周波数偏差 (MHz)	対象とする中心周波数から ±1.374-1.407	468.94964	458.02482	458.024230	468.94979	458.024900	468.949840
送信出力 (W)	0.5-1.2	0.91	0.59	0.71	0.75	0.81	0.83
占有帯域幅 (kHz)	≦8.5	5.81	5.63	6.4	6.5	5.7	6.5
帯域外不要発射 (μW)	≦25	0.3	0.2	0.1	0.1	0.01	0.1
スプリアス領域不要発射 (μW)	≦25	9.1	0.2	1.4	1.4	0.01	1.4

※装置番号

Table 7-3 電波環境試験の結果

地上-機上 局距離(km)	番号	機上局 発動機	機上局		地上局		無線通信状況			
			機首の相 対方位	バンク	各無線局の状態		広帯域受信機受信電力(dBm)		スペアナの画面	
					UHF系	2.4GHz-SS	UHF系	2.4GHz-SS	UHF系	2.4GHz-SS
0.01	1	停止	0	無	○	○	-25	-49	○	○
0.1	1	停止	0	無	○	○	-45	-66	○	○
	2	停止	0	有	○	○	-45	-66	○	○
	3	発動	0	無	○	○	-47	-68	○	○
	4	停止	90	無	○	○	-42	-69	○	○
1	1	停止	0	無	○	○	-70	-80	○	○
	2	停止	0	有	○	○	-72	-81	○	○
	3	発動	0	無	○	○	-70	-80	○	○
	4	停止	90	無	○	○	-66	-80	○	○
10	1	停止	0	無	○	△	-81	-87	○	○
	2	発動	0	無	○	△	-80	-87	○	○
	3	停止	90	無	○	△	-84	-87	○	○
	4	停止	0	無			-91		○	

Table 7-4 電波環境試験(UHF)の推定計算結果

項目	パラメータ	地上局-機上局間の距離 (km)				
		0.01	0.1	1	10	100
機上局	送信電力Pt (dBm)	30	30	30	30	30
	BPF損失Lbpf (dB)	1	11	1	1	1
	給電線損失Lt (dB)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	Ant利得 (dB)	0	0	0	0	0
	自由空間伝搬損失Lp (dB)	45.6	65.6	85.6	105.6	125.6
	近接リッジ付加損失Lx (dB)	0	0	0	0	1.4
地上局	Ant利得 (dB)	3	3	3	3	3
	BPF損失Lbpf (dB)	1	1	1	1	1
	給電線損失Lr (dB)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
地上局受信機入力端レベルR (dBm)		-16.5	-36.5	-56.5	-76.5	-96.5
受信機感度限界値S (dBm)		-110	-110	-110	-110	-110
回線マージンM (dB)		93.5	73.5	53.5	33.5	13.5

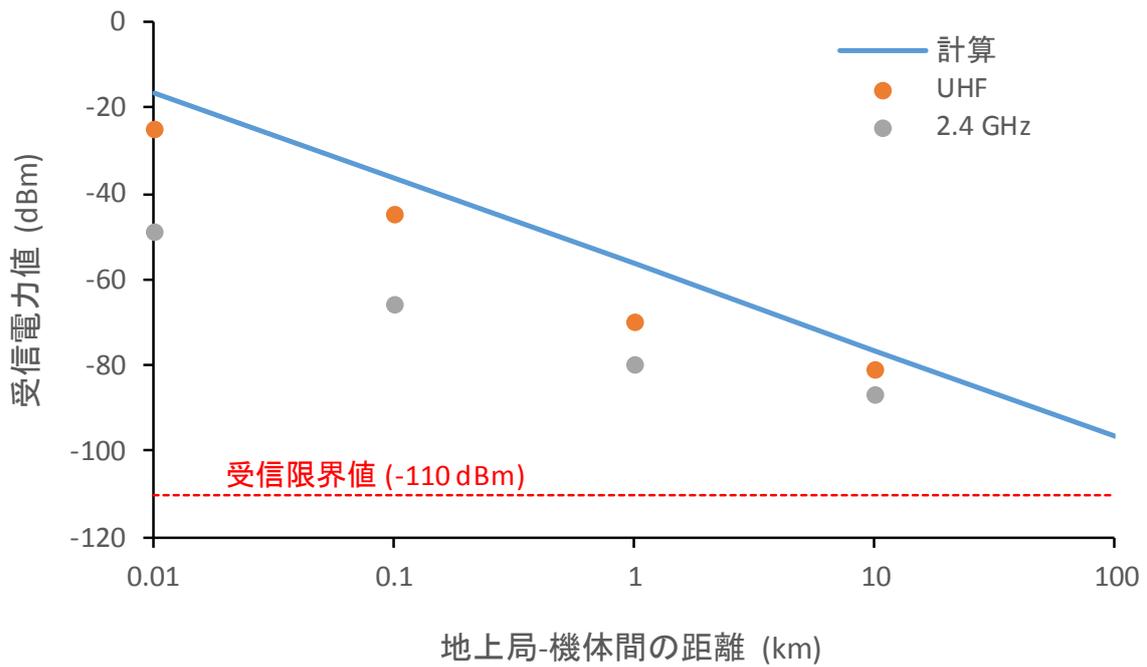


Fig. 7-4 電波環境試験と推定計算の結果

7.5. 試験結果総括

今回の電波試験の結果から、UHF 通信は地上-機上局間の距離が 10km、2.4GHz 通信は地上-機上局間の距離が 1km まで感度が良好であることが分かった。今後、緊急時対応行う際により長距離の通信を目指すのであれば、指向性の強い八木アンテナや回転偏波無線を使うことで、それらの実現が示唆される。

8. まとめと今後の予定

3ヶ年で計画している無人機を用いたブルームの測定技術の開発を行った。2年目となる今年度は、昨年度実施したブルームを測定するための検出器の基礎設計及び基礎データの取得及びフライトプランを決定するためのアルゴリズムの開発成果をもとに、シミュレーション精度向上のためのエアロゾル噴霧試験、検出器の実用機開発、無人機長距離通信のための地上試験及びフライトプランアルゴリズムを用いた実事故シミュレーションを実施した。

エアロゾル噴霧試験では、機体への沈着速度の実験的な数値を求めることができた。本数値をシミュレーションに組み込みより精度の高い検出シミュレーションを行った。

検出器の実用機開発では、計算シミュレーションを用いた検討を元に、ブルームからの寄与と地上からの寄与を弁別するために複数の検出器の同時計数を利用することの有効性を確認した。シミュレーション結果を基に実用機を開発し、線源やラドンチャンバを用いた実測試験を実施した。

無人機の長距離通信のための地上試験では、UHF 及び 2.4 GHz の電波帯について通信試験を実施し、見通し距離 100 km での通信の確立を証明した。

フライトプランアルゴリズムの開発では、既存の拡散シミュレーションをベースとしてブルームの放出例を計算し、測定に必要なフライト手法を抽出した。さらに測定結果を3次元表示するための手法を検討した。

来年度以降、無人機に搭載するための実用機開発を行い、最終的には搭載試験を実施する予定である。そのために検証する事項としては以下のことが考えられる。

- ・ 検出器の無人機搭載のための軽量化およびノイズ耐性等の最適化
- ・ 検出器の開発後、フライトプランおよび3次元可視化アルゴリズムのシステム化
- ・ システム統合後のフライト試験による問題点抽出

9. 謝辞

本研究調査は、「平成 29 年度原子力施設等防災対策委託費(放射性プルーム測定技術確立等)事業」の成果をとりまとめたものである。ラドン暴露実験の実施に際し、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構放射線総合医学研究所のラドン標準場を使用させていただきました。ここに謹んで御礼申し上げます。

10. 参考文献

- 1) Katata, G. et al., Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model, *Atmospheric Chem. Phys.*, 15, 2015, pp. 1029–1070.
- 2) Hirayama, H. et al., Estimation of Radionuclide Concentration in Plume Using Pulse Height Distribution Measured by LaBr₃ Scintillation Detector and Its Response to Radionuclides in Plume Calculated with egs5, *J. At. Energy Soc. Jpn. At. Energy Soc. Jpn.* 12, 2013, pp. 304–310.
- 3) Hirouchi, J. et al., Estimation of surface anthropogenic radioactivity concentrations from NaI(Tl) pulse-height distribution observed at monitoring station, *Radiat. Prot. Dosimetry.* 164, 2015, pp. 304–315.
- 4) 眞田幸尚ほか, 原子力発電所事故後の無人ヘリコプターを用いた放射線測定, *JAEA-Research* 2013-049, 2014.
- 5) Sanada, Y., and Torii, T. Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter. *J. Environ. Radioact.*, 139, 2015, pp. 294-299.
- 6) Sanada, Y. et al., Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima Daiichi nuclear power plant. *Expl. Geophys.*, 45, 2014, pp. 3-7.
- 7) 佐藤昌之ほか, Multiple Model Approach による構造化ロバスト制御器設計法を適用した放射線モニタリング無人固定翼機の飛行制御則設計-福島県浪江町における放射線モニタリング飛行-, 計測自動制御学会論文集, 51, 2015, pp. 215-225.
- 8) 鳥居健男ほか, 無人飛行機による放射線モニタリングシステムの開発, *Isot. News.*, 727, 2014, pp. 30-34,.
- 9) 眞田幸尚ほか, 福島原子力発電所事故後における無人機を用いた放射線モニタリング - UARMS の開発状況 -, 第 53 回飛行機シンポジウム講演論文集, 2015, 2A05.
- 10) Sato, M. et al., Flight Controller Design of Unmanned Airplane for Radiation Monitoring System via Structured Robust Controller Design Using Multiple Model Approach -Radiation Monitoring Flight in Namie-machi in Fukushima Prefecture-, *Trans. Soc. Instrum. Control Eng.*, 51, 2015, pp. 215–225.
- 11) 白川芳幸, タンデム検出器による γ 線の飛来方向とエネルギーの同時計測に関する基礎的検討, *RADIOISOTOPES*, 50, 2001, pp. 117-122.

- 12) Sinclair, L.E. et al., Aerial measurement of radionuclide concentration of the west coast of Vancouver island following the Fukushima reactor accident, *J. Environ. Radioact.*, 102, 2011, pp. 1018-1023.
- 13) Minty, B. R. S., A review of airborne gamma-ray spectrometric data-processing techniques, Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, Report 255, 1988.
- 14) 石崎ほか, 平成 28 年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立(受託研究), JAEA-Research 2017-012, 2018, in print.
- 15) UAV factory 社ホームページ, <http://www.uavfactory.com/product/46> (2018 年 3 月閲覧).
- 16) AeroViroment 社ホームページ, https://www.avinc.com/uas/small_uas/puma (2018 年 3 月閲覧).
- 17) 情報通信研究機構ホームページ, NICT news 2013.5, <https://www.nict.go.jp/publication/NICT-News/1305/01.html> (2018 年 3 月閲覧).
- 18) YAMAHA 発動機社ホームページ, http://global.yamaha-motor.com/jp/news/2016/1011/fazer_r.html (2018 年 3 月閲覧).
- 19) Casanovas, R. et al., M., Energy and resolution calibration of NaI(Tl) and LaBr₃(Ce) scintillators and validation of an EGS5 Monte Carlo user code for efficiency calculations, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res.*, A675, 2012, pp. 78-83.
- 20) Doi, T. et al., Anthropogenic radionuclides in the atmosphere observed at Tsukuba: characteristics of the radionuclides derived from Fukushima, *J. Environ. Radioact.*, 122, 2013, pp.55-62.
- 21) Hirayama H, Namito Y, Bielajew FA, et al. The EGS5 code system. Ibaraki, Japan: High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Stanford Linear Accelerator Center (SLAC); 2005. (KEK Report 2005-8, SLACR-730).
- 22) Sato, T., et al., Particle and Heavy Ion Transport code System, PHITS, version 2.52. *J. Nucl. Sci. Technol.* 50, 2013, pp. 913-923.
- 23) 波戸真治, 本間俊充, 境域野外拡散試験データを用いた大気拡散モデルの妥当性の検討, JAEA-Research, 2008-094, 2009.
- 24) Nicolini R. et al., Investigation of the properties of a 1" x 1" LaBr₃:Ce scintillator, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res.*, A582, 2007, pp. 554-561.
- 25) 一坪宏和ほか, 放医研ラドン実験棟における廃棄汚染モニタリング, 日本放射線安全管理学会誌, 4, 2005, pp.62-70.
- 26) UNSCEAR, 2013 report Vol. I Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, 2013.

別添 国際学会での当該事業関連情報について

(1) 概要

「ENVIRA2017 Conference*」において石崎は福島県内の一般家屋における除染前後での線量低減係数の変動、Pratama は福島県において放射性セシウムにより汚染された下水汚泥の放射能が 100 Bq/kg になるまでの期間予測モデルについて、それぞれ口頭発表を行なった。また出張者らは本会議において、環境放射線の計測・解析手法や放射性核種の環境動態等に関する最新情報を収集した。

* ENVIRA2017 Conference: the International Conference on Environmental Radioactivity organized by the Centre for Physical Sciences and Technology (Institute of Physics) in Vilnius, Lithuania from Monday, May 29 to Friday, June 2, 2017: 環境放射能に関する国際会議
<http://envira2017.ftmc.lt/>

(2) 成果

本会議は2年毎に開催されており、前回は2015年にギリシャのテッサロニキで開催された。今回はリトアニアのビリニウスにて開催され、28件の招待講演、73件の口頭発表および115件のポスター発表があった。発表テーマは地球環境(大気圏、水圏、生物圏および土壌圏)における放射性核種の動態、加速器質量分析(AMS)、低レベル放射能の検出法、放射線モニタリング技術、放射性廃棄物の管理、そしてチェルノブイリ事故や福島事故によって影響を受けた地域の復旧活動等と多岐にわたっており、各セッションで活発な議論が行なわれた。

石崎は”Estimation of dose reduction factor before and after decontamination”というタイトルで除染による線量低減係数の変化に関する口頭発表を行なった。除染前後で一般家屋の中と外で空間線量率測定を行ない、それらの比である線量低減係数を求めた。除染前後で線量低減係数が変動していることが観察された。線量低減係数の変動の要因として除染による屋外周辺の汚染分布の変化について考察し、シミュレーション結果との比較を行なった。

Pratama は”Time-dependent behaviour analysis and identification of factors affecting radiocaesium transfer to separate sewers in Fukushima Prefecture”というタイトルで口頭発表を行なった。本研究では放射性セシウムにより汚染された下水汚泥の量を推定し、その管理に資することを目的として、下水汚泥中の放射性セシウム濃度が 100 Bq/kg 以下になるまでの期間(t_{100})を予測する一般モデル構築を行なった。解析対象とした福島県内 10 箇所の下水処理施設の内、放射性セシウムの沈着量が 10^4 Bq/m² 以下と推定された地域に位置する 4 箇所を除いて、実測データと構築したモデル間で t_{100} がよく一致したことを報告した。発表後の質疑では 100 Bq/kg 以下を目安とした理由を問われたが、日本の法律(平成 17 年経済産業省令第 112 号)に定められている、放射性セシウムのクリアランスレベルを参考にすると回答した。

以下に興味深かった発表の概要を記載する。

“Deposition of radionuclides by fog droplets on plants”(Olivier Masson, IRSN)

降雨による湿性沈着と晴天時の乾性沈着の中間として霧が発生した場合のエアロゾルの挙動に

ついて福島事故時の測定結果等を基に沈着の評価に関する内容であった。大きさは $3\mu\text{m}$ から $30\mu\text{m}$ の霧粒子がエアロゾルと結合することにより、粒径が $50\mu\text{m}$ 程度になり、沈着速度が増加する(additional deposition)ことが報告された。また、霧の発生頻度が多い箇所として、川沿いや標高が高い場所があげられ、そのような箇所におけるレーザー回折による粒子径測定(Particle Vision and Measurement; PVM)の結果も示された。さらに、植物への沈着量について数種類の植物について評価が行われた。今後は湿度と沈着量の関係について検討するということであった。“Outdoor ^{222}Rn concentrations in a city located nearby a large phosphogypsum repository” (Gutiérrez-Álvarez, Univ. Huelva)

本発表はスペインの Huelva City にて ^{222}Rn の大気中濃度の計測を行ない、その変動を示したものであった。計測期間は 2015 年春から 2016 年冬であった。計測地点における日々の気象状況(降雨、風向・風速、日射量等)も記録されており、 ^{222}Rn 空気中濃度の変動と気象状況の相関性について考察がなされた。 ^{222}Rn 大気中濃度は夏に高く(最大で 53.4Bq/m^3)、冬に低く(最大で 36.4Bq/m^3)なり、また 1 日の内では夜間に高く、日の出の時間帯にピークとなり、日中に低くなる傾向が見られた。これらの傾向から、日射量および日射時間の増加により大気の大気対流が起こり、大気中の ^{222}Rn がより効率的に希釈されると考えられた。本研究の計測地点から南東方向に 1 km 程度離れた場所に ^{222}Rn を放出するリン石膏の堆積層が存在しており、その影響も考えられた。しかしながら、南東から風が吹いたいずれの日も、 ^{222}Rn 大気中濃度の最大値は 20Bq/m^3 程度であり、一方南西から風が吹いた日はいずれも最大値が 40Bq/m^3 を上回っていた。この結果から、リン石膏の堆積層による ^{222}Rn 空気中濃度への影響は無いものと考えられた。ただし南東から風が吹いた日は計測期間中で 7 日間のみであり、その内 5 日間は当日または前日に降雨があり、リン石膏の堆積層からの ^{222}Rn 放出率に影響を与えた可能性があるとのことであった。