



JAEA-Research

2020-006

DOI:10.11484/jaea-research-2020-006

平成 30 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)

Development of Measurement System of Radioactive Plume
using Unmanned Airplane in the Fiscal Year 2018
(Contract Research)

眞田 幸尚 越智 康太郎 石崎 梓

Yukihisa SANADA, Kotaro OCHI and Azusa ISHIZAKI

福島研究開発部門

福島研究開発拠点

福島環境安全センター

Fukushima Environmental Safety Center

Fukushima Research Institute

Sector of Fukushima Research and Development

July 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

平成 30 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)

日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門 福島研究開発拠点 福島環境安全センター
真田 幸尚、越智 康太郎、石崎 梓⁺¹

(2020 年 3 月 26 日 受理)

原子力施設の事故時において、住民の避難計画の決定には放出された放射性プルームの挙動予測が不可欠である。現在は、大気拡散シミュレーションを基本とした予測システムは原子力防災のツールとして実用化されているものの、放射性プルームを実測できるツールは存在しない。本研究では、技術革新の著しい無人飛行機を用いて、大気中の放射性物質濃度を地上からの寄与や機体への汚染と弁別して測定できるシステムの試作機の開発を行った。また、開発した検出器を無人機に搭載し、空気中のラドンを計測することにより、基本性能を評価するパラメータを得た。さらに、検出システムの開発とともに、プルームの動きをリアルタイムに予測し、最適なフライトプランを導出するアルゴリズムの開発を行った。本レポートは 3 か年計画の 3 年目の成果をまとめたものである。

本研究調査は、原子力規制庁からの受託事業である「平成 30 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。

福島環境安全センター (南相馬駐在) : 〒975-0036 福島県南相馬市原町区萱浜字巢掛場 45-169
+1 安全研究・防災支援部門 安全研究センター

**Development of Measurement System of Radioactive Plume using Unmanned Airplane
in the Fiscal Year 2018
(Contract Research)**

Yukihisa SANADA, Kotaro OCHI and Azusa ISHIZAKI⁺¹

Fukushima Environmental Safety Center
Fukushima Research Institute
Sector of Fukushima Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Minamisoma-shi, Fukushima-ken
(Received March 26, 2020)

At the accident of nuclear facilities, a prediction of the behavior of released radioactive plume is indispensable to make a decision on a refuge plan of inhabitants. Currently, prediction system which is based on atmospheric dispersion simulation has been implemented as a tool of the atomic energy disaster prevention. However, the direct measurement method of the radioactive plume has not existed. In this study, some component technologies were developed for the establishment of direct measurement methods of radioactive plume using unmanned aerial vehicle whose technological innovation is remarkable. In addition, the spray test using mock aerosol was conducted to obtaining the deposition rate to the airplane body. The algorithm of making a flight plan was developed based on a prediction model of the radioactive plume. This report summarized the outcome of the last year of the three-year plan.

Keywords: Radioactive Plume, Unmanned Airplane, Coincidence Measurement, Atmospheric Dispersion Simulation

This report summarized results that Japan Atomic Energy Agency carried out as the commissioned business by “the project of the development of measurement system of radioactive plume using unmanned aircraft” of the Nuclear Regulation Authority in the fiscal year 2018.

⁺¹ Nuclear Safety Research Center, Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

目次

1. はじめに	1
2. 無人機の開発状況について	4
3. 原子力防災への無人機適用の課題	7
4. 無人飛行機プラットフォーム (UARMS)	9
5. 無人機用検出器の開発	11
5.1. 概要	11
5.2. 基本設計	11
5.3. 検出器の構成	13
5.4. 同時計数率の方向特性	14
5.5. ホスウィッチ検出器による β 線及び γ 線の弁別	16
5.6. 海上におけるフライト試験	19
5.6.1. 試験条件	19
5.6.2. 同時計数率の測定結果	20
5.7. グランドシャインとサブマージョンの弁別レベル	22
6. フライトプラン作成及び可視化のための総合システムの構築	24
6.1. フライトプラン作成・可視化システムの概要	24
6.2. フライトプラン作成機能	25
6.3. UFOMS 代替システム	29
6.3.1. 旋回性能を考慮した実飛行経路の計算	29
6.3.2. 風の影響を考慮した実飛行経路の計算	29
6.3.3. 飛行高度を考慮した実飛行経路の計算	31
6.3.4. 実飛行経路上の放射能濃度の取得	32
6.4. 飛行経路最適化機能の試作	33
6.4.1. 可視化機能	34
6.4.2. リアルタイムモード	34
6.4.3. 非リアルタイムモード	34
6.5. UFOMS 代替システム用放射能濃度分布データベースの整備	36
6.5.1. 気象条件の選定	36
6.5.2. ソースターム	38
6.5.3. 大気拡散計算	42
6.5.4. 計算結果例	45
6.6. GUI 制御と動作試験	49
6.7. まとめ	57
7. まとめと今後の予定	58
謝辞	58
参考文献	58

Contents

1. Introduction.....	1
2. Development status of unmanned airplenes	4
3. Subjects of the unmanned aircraft application to atomic energy disaster prevention	7
4. Unmanned airplane for radiation monitoring system (UARMS)	9
5. Development of detector system for unmanned airplane.....	11
5.1. Outline	11
5.2. Basic design.....	11
5.3. Detector structure	13
5.4. Anglar response of conincidence count rate.....	14
5.5. Divided measurement of b and g ray using phoswitch type radiation detector	16
5.6. Flight test above the sea area.....	19
5.6.1. Test condition.....	19
5.6.2. Results of conincidence count rate.....	20
5.7. Discrimination level of grand shine and sub-mersion	22
6. Construction of the total system for flight plan making and visualization	24
6.1. The total system for flight plan making and visualization	24
6.2. System for flight plan making	25
6.3. Substituting system of UFOMS.....	29
6.3.1. Calculation of the true flight path in consideration of turning performance ...	29
6.3.2. Calculation of the true flight path in consideration of wind effect.....	29
6.3.3. Calculation of the true flight path in consideration of flight altitude.....	31
6.3.4. Calculation of radioactive concentration through the true flight path.....	32
6.4. Trial of the flight path optimization function	33
6.4.1. Visualization function	34
6.4.2. Mode for real-time	34
6.4.3. Mode for batch calculation	34
6.5. Databese of radionuclide distribution for substituting system of UFOMS	36
6.5.1. Wether condition.....	36
6.5.2. Source term.....	38
6.5.3. Calculation	42
6.5.4. Result exaple.....	45
6.6. GUI control and comprehensive test.....	49
6.7. Summary	57
7. Conclution and Future plan	58
Acknowledgement	58
References	58

Table list

Table 4-1	UARMS の主な諸元	10
Table 5-1	主なβ線放出核種と最大飛程	17
Table 5-2	フライト試験条件	19
Table 5-3	海上試験による同時計数率	21
Table 6-1	fpmake.inp の入力項目	26
Table 6-2	fpmake.out の出力項目	27
Table 6-3	実飛行経路計算条件	33
Table 6-4	OSCAAR 解析条件	37
Table 6-5	移流解析条件	37
Table 6-6	気象ビン設定	38
Table 6-7	選定された気象シーケンス	38
Table 6-8	UNSCEAR (2013) の全放出量	39
Table 6-9	各シーケンスのソースターム	39
Table 6-10	各シーケンスの炉内インベントリ	40
Table 6-11	UNSCEAR (2013) に基づくソースターム	40
Table 6-12	TW-DWF のソースターム	41
Table 6-13	TB-DWF のソースターム	41
Table 6-14	TB-CV のソースターム	41
Table 6-15	RAMS の解析条件	42
Table 6-16	HYPACT の解析条件	43
Table 6-17	試験条件	49

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	事故時の区域設定条件とタイミング	8
Fig. 3-2	福島第一原子力発電所を例にした対応シミュレーション例	8
Fig. 4-1	UARMS の構成	10
Fig. 5-1	空中で測定する場合の放射線の放出源イメージ	12
Fig. 5-2	検出器の基本構成と同時計測イメージ	12
Fig. 5-3	試作した検出器の構成	13
Fig. 5-4	検出器の外観	14
Fig. 5-5	試作した検出器のγ線スペクトル	14
Fig. 5-6	同時計数率の方向特性実験の体系	15
Fig. 5-7	同時計数率の方向特性	15
Fig. 5-8	プルーム内飛行による自己汚染弁別イメージ	17
Fig. 5-9	ホスウィッチ検出器の構成	17

Fig. 5-10 γ 線源 (^{137}Cs +アクリル板) による距離と計数率の関係.....	18
Fig. 5-11 β 線源 (^{90}Sr) による距離と計数率の関係.....	18
Fig. 5-12 $\beta+\gamma$ 線源 (^{137}Cs) による距離と計数率の関係.....	18
Fig. 5-13 海上試験風景.....	19
Fig. 5-14 時間間隔スペクトル例.....	20
Fig. 5-15 海上試験における同時測定率結果.....	21
Fig. 5-16 地表線量率ごとの空气中放射性物質濃度の検出下限値.....	23
Fig. 6-1 システムの概要.....	24
Fig. 6-2 fpmake.out 出力例.....	28
Fig. 6-3 フライトプランと旋回半径を考慮した実飛行経路.....	30
Fig. 6-4 風向ごとの実飛行経路.....	30
Fig. 6-5 飛行高度を考慮した実飛行経路と考慮しない場合の実飛行経路.....	31
Fig. 6-6 時間内挿の概念.....	32
Fig. 6-7 飛行経路の比較.....	33
Fig. 6-8 リアルタイムモードの可視化の流れ.....	35
Fig. 6-9 非リアルタイムモードの可視化の流れ.....	36
Fig. 6-10 RAMS の解析領域.....	44
Fig. 6-11 Case1 の地表大気中放射能濃度分布.....	45
Fig. 6-12 Case1 の地表面沈着量分布.....	45
Fig. 6-13 Case2 の地表大気中放射能濃度分布.....	46
Fig. 6-14 Case2 の地表面沈着量分布.....	46
Fig. 6-15 Case3 の地表大気中放射能濃度分布.....	47
Fig. 6-16 Case3 の地表面沈着量分布.....	47
Fig. 6-17 Case4 の地表大気中放射能濃度分布.....	48
Fig. 6-18 Case4 の地表面沈着量分布.....	48
Fig. 6-19 GUI の表示画面 (1).....	50
Fig. 6-20 GUI の表示画面 (2).....	51
Fig. 6-21 GUI の表示画面 (3).....	52
Fig. 6-22 GUI の表示画面 (4).....	53
Fig. 6-23 パフ中心位置および拡がり σ	53
Fig. 6-24 放射性プルーム濃度.....	54
Fig. 6-25 放射性核種地表面沈着量.....	54
Fig. 6-26 初期飛行経路.....	55
Fig. 6-27 更新飛行経路 (リアルタイムモード).....	55
Fig. 6-28 UFOMS 飛行経路および測定結果 (リアルタイム).....	56

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及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）や移流経路及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方法が有効であると考えられる。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ヤマハ発動機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、国立研究開発法人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 100 km) 及び航続時間が長い (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、計測システム及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° 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及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 及び 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¹³³Xe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¹³¹I、¹³²I 及び¹³⁷Cs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。無人飛行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、無人飛行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、地上からの放射線及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及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。

2016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⁾。

2017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求めた係数で再評価を実施した。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。さらに、小型無人機に小型の放射線測定器を搭載したフライト試験及び実際の運用を想定した現状の UARMS の電波通信試験を行った¹⁵⁾。

2018年度は、検出器の小型化及び無人機に搭載した実証試験を行った。また、フライトプラン作成ソフトウェアについては、ソフトウェア化を実施した。

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	再計算	
	機体へのエアロゾル付着試験		環境試験 風洞試験	
	同時測定機能の試作	試作機開発	線源試験	線源試験
	検出システムの製作		実用機開発	データ制御部の作成 解析ソフトウェア開発
	ラドンチャンバでのサブマージョン模擬試験	チャンバン試験	チャンバン試験	
	無人飛行機との接続試験	地上接続試験		
	無人飛行機の長距離通信試験			地上電波試験
	海上での総合試験(無人ヘリ)			フライト試験
	基本設計	基礎設計		
	測定計画アルゴリズム開発	基礎アルゴリズム開発	アルゴリズム開発	
ソフトウェア化			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 UARMS 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効な候補である。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当初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ど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 C 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¹⁶⁾。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 AE 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のメリットは多い¹⁷⁾。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 AE 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¹⁸⁾。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ヤマハ発動機社の 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、さらに性能が向上している¹⁹⁾。本機はヤマハ発動機社が独自に、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への活用は難しい。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及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 C

RQ-20B Puma AE

R-MAX G1

Fazer R G2

名称	UARMS	Penguin C	RQ-20B Puma AE	R-MAX G1	Fazer R G2
開発メーカー(国)	JAEA-JAXA開発中 (日本)	Penguin C UAV factory Ltd. (ラトビア)	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	22.5	6.3	100	81
燃料	混合油	ガソリン	バッテリー	混合油	ガソリン
航続時間 (min)	360	1,320	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	カタパルト+パラシュート	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. 原子力防災への無人機適用の課題

福島第一原子力発電所事故後、原子力規制庁により「原子力災害対策マニュアル」が策定された。本マニュアルでは、原子力災害時における枠組みや事故後の緊急時モニタリングはオフサイトセンター内に設置される緊急時モニタリングセンターが実施することとなっており、現在、対応のための資材準備等が行われている。OIL（運用上の介入レベル：Operational Intervention Level）のための区域設定やスクリーニングの重要性分類のための放射線モニタリングは、迅速かつタイムリーに行われる必要がある。前述のように、福島第一原子力発電所事故後の対応において、発電所周辺の放射線分布測定のため無人ヘリコプター等の無人機が活用されている^{5,6)}。無人機によるモニタリングは、車両や人によるモニタリングと比較して、モニタリング要員の被ばくを防ぐことができるほか、住民の避難との干渉を防ぐことができるなど、モニタリングポストのような点での測定と比較して面的な評価が可能となるメリットがあると考えられる。しかしながら、現状の技術は原子力災害時にすぐ適用できる状況にはなく、上記の「原子力災害対策マニュアル」の枠組みを考慮し、活用シーンに合わせた要素技術開発が必要である。

防災措置は、原子力施設の地理的条件等を考慮して地域を区分して講じられる。この地域を「原子力災害対策重点区域」という。事故初期には予防的防護措置を準備する区域（PAZ：Precautionary Action Zone）と緊急時防護措置を準備する区域（UPZ：Urgent Protective Action Planning Zone）が設定され、住民の退避を行う。Fig. 3-1に「原子力災害対策マニュアル」に記載のあるUPZ及びPAZの設定の条件やタイミングについて示す。事故対応のフェーズは概ね次の3つの時間区分に分けることができる。

事故が発生し敷地外への放出がない「事故対応準備段階」

敷地外への放出が確認された後10日間ほどの「事故初期対応期」

それ以降の「事故回復対応期」

これらの区域設定には放射線モニタリングが必要となるが、①及び②の初期段階では施設周辺のモニタリングポストの数値を基本にすることになっている。しかしながら、福島第一原子力発電所事故時には、モニタリングポストにも給電がしばらく復旧できず事故から1～2日で非常用発電の電源がなくなったという事例があることモニタリングポストはランニングコストがかかり多数の設置は難しいことなど課題もある。そのようなモニタリング機能のバックアップとして無人機の使用が考えられる。実際に現状国内で適用可能なのはFig. 2-1に示した国内製の無人ヘリコプターであるが、機体のフライト時間や遠隔操縦可能な距離に制限があり、事故初期の対応には制限が多い。例えば、敷地外に放射性物質が放出された場合、数時間以内にUPZ内のOIL1区域の住民は避難もしくは屋内退避が必要になる。そのような区域の特定のためモニタリング要員が安全に無人機を運用するためには、少なくともUPZ外の30km以遠からの操縦が必要になる。現状の無人ヘリの遠隔操縦距離は電波の制限から最大5km程度でありこの対応は難しい。また、現状データをリアルタイムに地上にリンクするシステムはないこと、上空からの測定では地上換算に距離補正の処理が必要であることから測定結果の共有まで時間がかかること、稼働時間が1.5時間程度であること及び夜間飛行ができないことなども課題として挙げられる。Fig. 3-2に福島第一原子力発電所事故の時系列を例に無人機のモニタリングをシミュレーションした例を示す。



Fig. 3-1 事故時の区域設定条件とタイミング

	1日目		2日目		3日目					
	12-18	18-24	0-6	6-12	12-18	18-24	0-6	6-12	12-18	18-24
原子力施設事故対応例	▽14:00 地震発生 ▽16:00 施設敷地緊急事態 PAZ避難準備・避難実施				▽16:00 全面緊急事態 UPZ屋内退避準備					
既存の無人機システムによる運用想定	→ 移動・飛行準備 1h → 敷地境界のフライト 1h → データ解析 2h ※リアルタイムのデータ解析不可能		※夜間飛行不可能 (雨天時飛行不可能)		※屋内からの操縦不可能 (目視内飛行) ※UPZ外からの操縦不可能 (操縦範囲2-3 km)					
本研究で目指す無人機システムによる運用想定	→ 移動・飛行準備 1h 敷地境界のフライト 20 h データリアルタイム解析+共有		★敷地外放出の確認		★OIL1, 2区域特定		UPZ内のフライト 20 h データリアルタイム解析+共有			

Fig. 3-2 福島第一原子力発電所を例にした対応シミュレーション例

4. 無人飛行機プラットフォーム (UARMS)

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

無人飛行機は福島第一原子力発電所事故以前より 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. 4-1 に UARMS の外観及び構成を示す。

UARMS の主要諸元について Table 4-1 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・バルサプランクを用い、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。

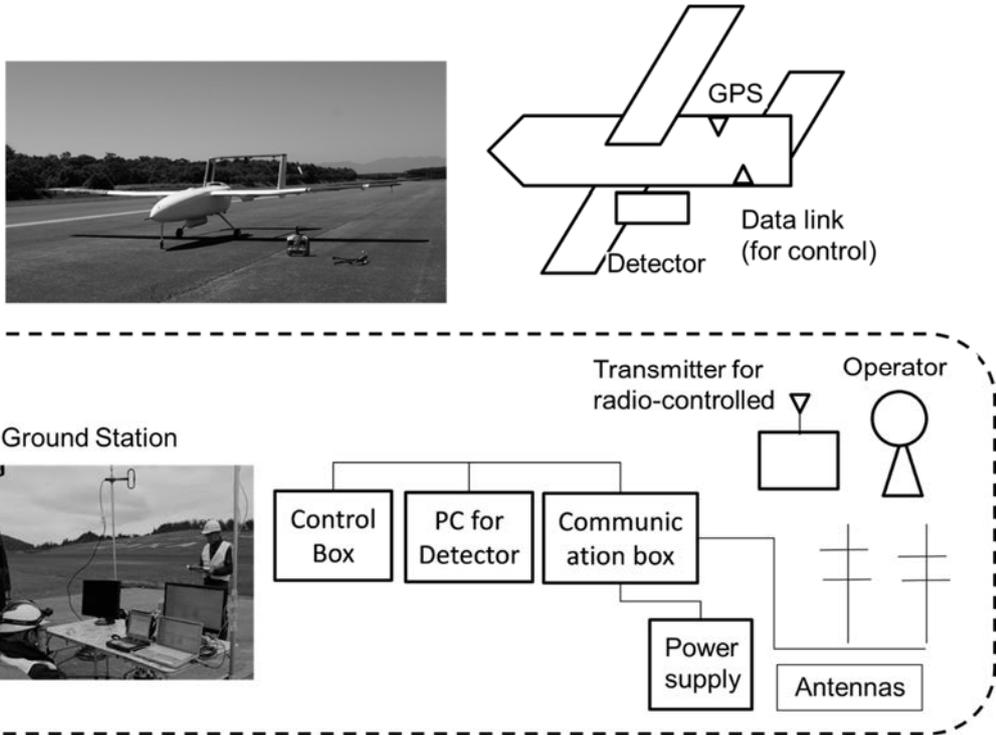


Fig. 4-1 UARMS の構成

Table 4-1 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

5. 無人機用検出器の開発

5.1. 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、無人飛行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、空気中に分布する放射性物質、無人飛行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。石崎ら(2018)は、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飛行機用の検出器を設計した¹⁴⁾。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、求めた付着効率から再評価を行った¹⁵⁾。

2018年度は実用機として製作した検出器について、実際に無人機に搭載し、空気中のラドンを長時間計測することで、地上の影響と弁別するパラメータを獲得することを目的とした。

5.2. 基本設計

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. 5-1 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. 5-2 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)²⁰⁾ 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。

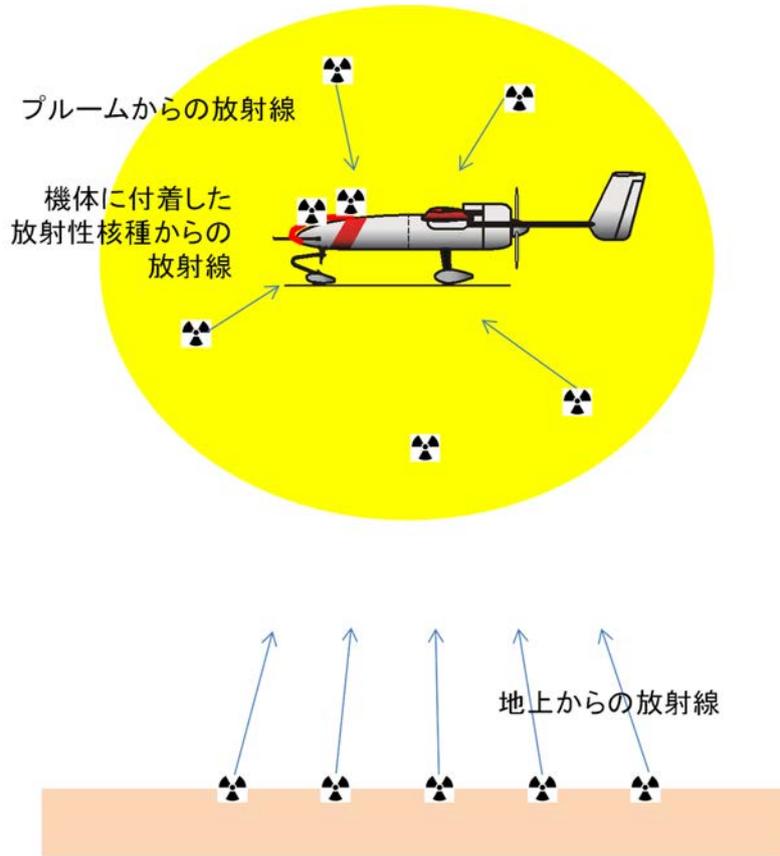
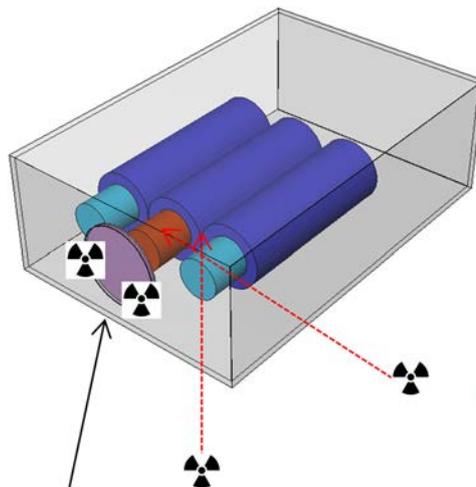


Fig. 5-1 空中で測定する場合の放射線の放出源イメージ

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. 5-2 検出器の基本構成と同時計測イメージ

5.3. 検出器の構成

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. 5-3 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 とのホススイッチ検出器とした。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 μs 以内と設定した。試作した検出器の外観を Fig. 5-4 に示す。以下、検出器の名称は、Det_NaI、Det_LaBr、Det_Phos_PS/Det_Phos_NaI と表記する。実際のデータダンプは、パルスの入射した時間と対応するチャンネル情報を 3 検出器分リスト形式で出力される。また、パルスの成型によるパルス時間幅が不感時間となるため、信号はスペクトル測定と時間間隔測定に分岐し、時間間隔測定にはパルスの立ち上がりのみを検知するように工夫した。

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. 5-5 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 及び ²⁰⁷Tl のβ壊変によりさらに 1,400 keV までのβ線及び、²²⁷Th、²²³Ra、²¹⁹Rn、²¹⁵Po 及び ²¹¹Bi からのα線が放出される²¹⁾。

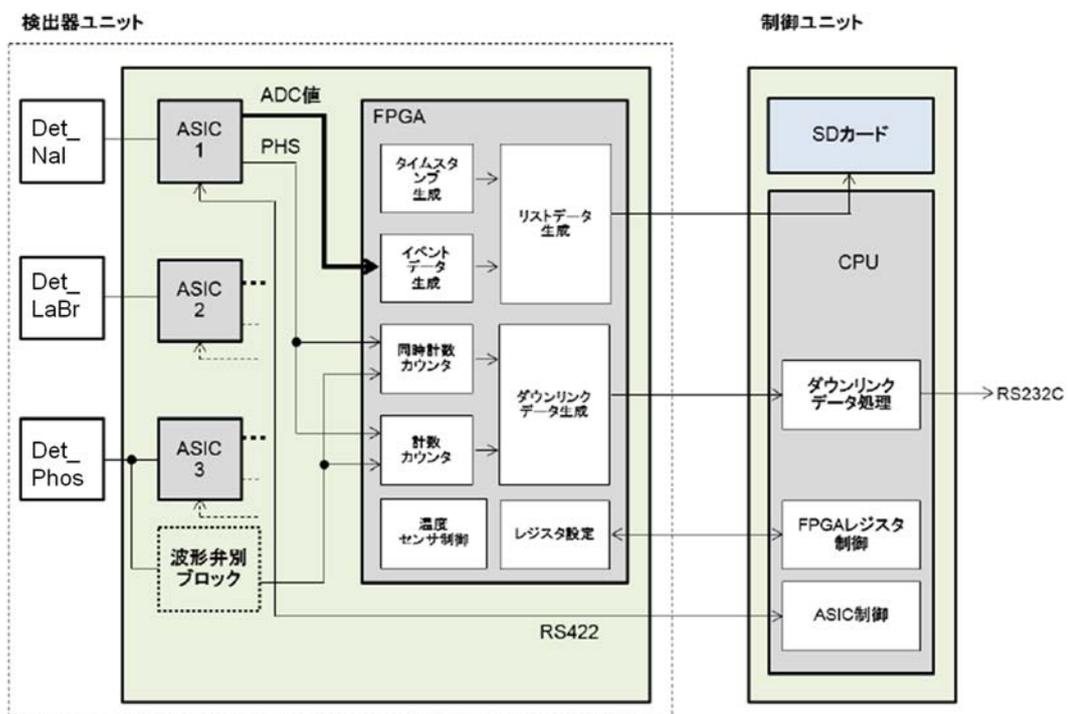


Fig. 5-3 試作した検出器の構成

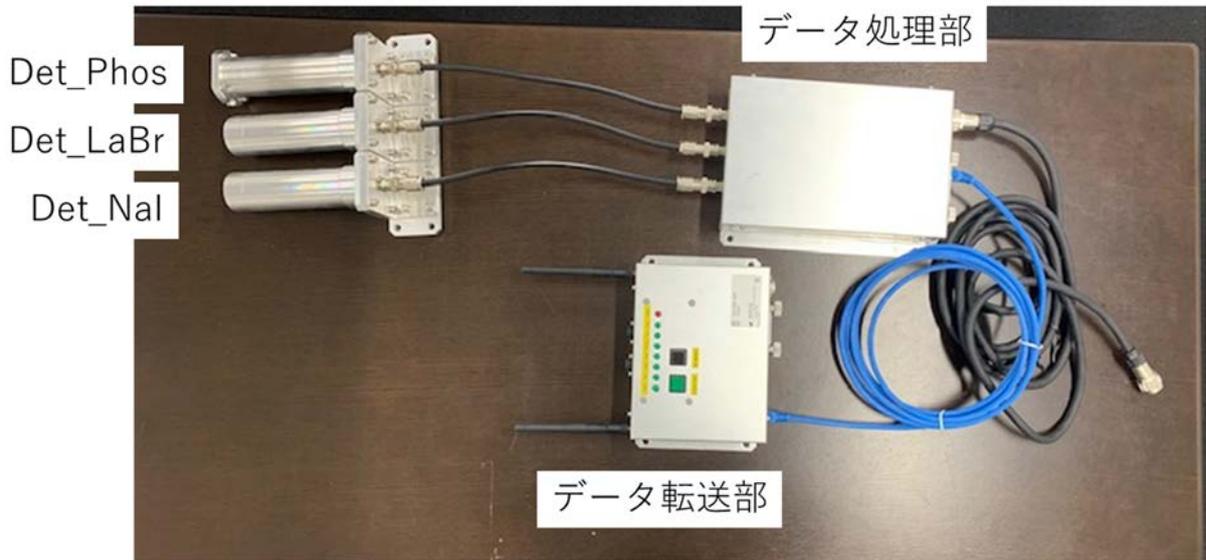


Fig. 5-4 検出器の外観

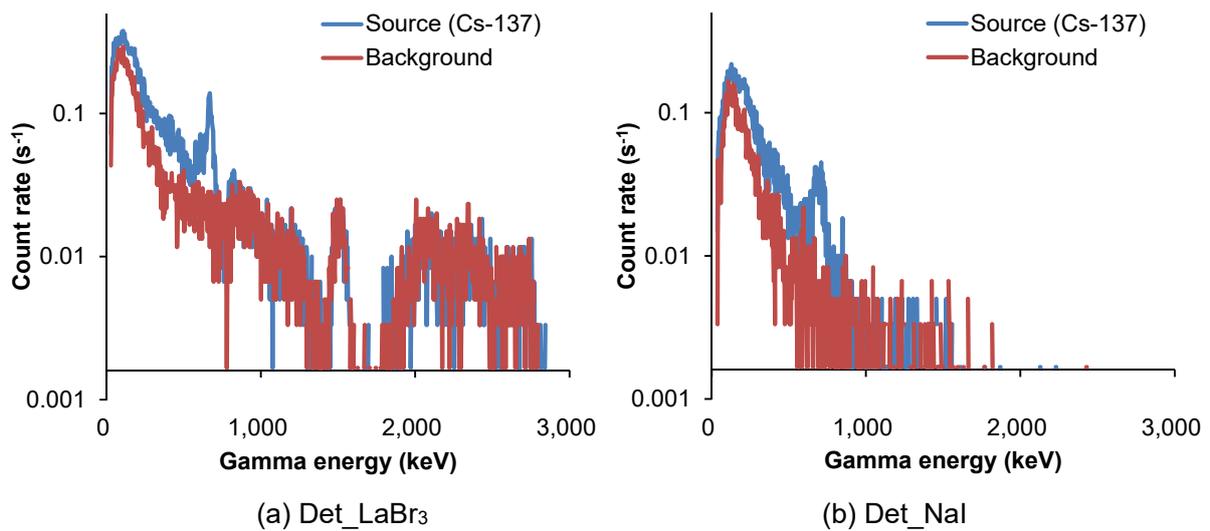


Fig. 5-5 試作した検出器の γ 線スペクトル

5.4. 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. 5-6 に示す。はじめに BG 計測を 3,600 秒間行った。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 $50 \pm 1 \text{ cm}$ 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 360° まで移動させ、各線源位置において γ 線計測を 300 秒間行った。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 Fig. 5-7 に示す。中心に設置されている Det_LaBr の計数率に対し、Det_LaBr と Det_NaI もしくは Det_Phos_NaI の同時計数率の割合をそれぞれ RC_{NL} 及び RC_{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、上下方 (0° or 180°) 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。

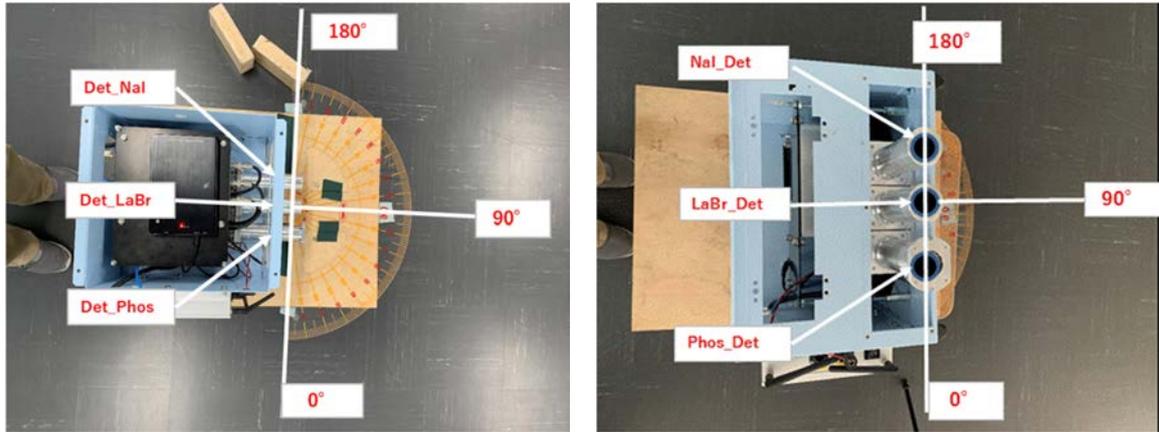


Fig. 5-6 同時計数率の方向特性実験の体系
 (左) 横方向の照射試験体系 (右) 縦方向の照射試験体系

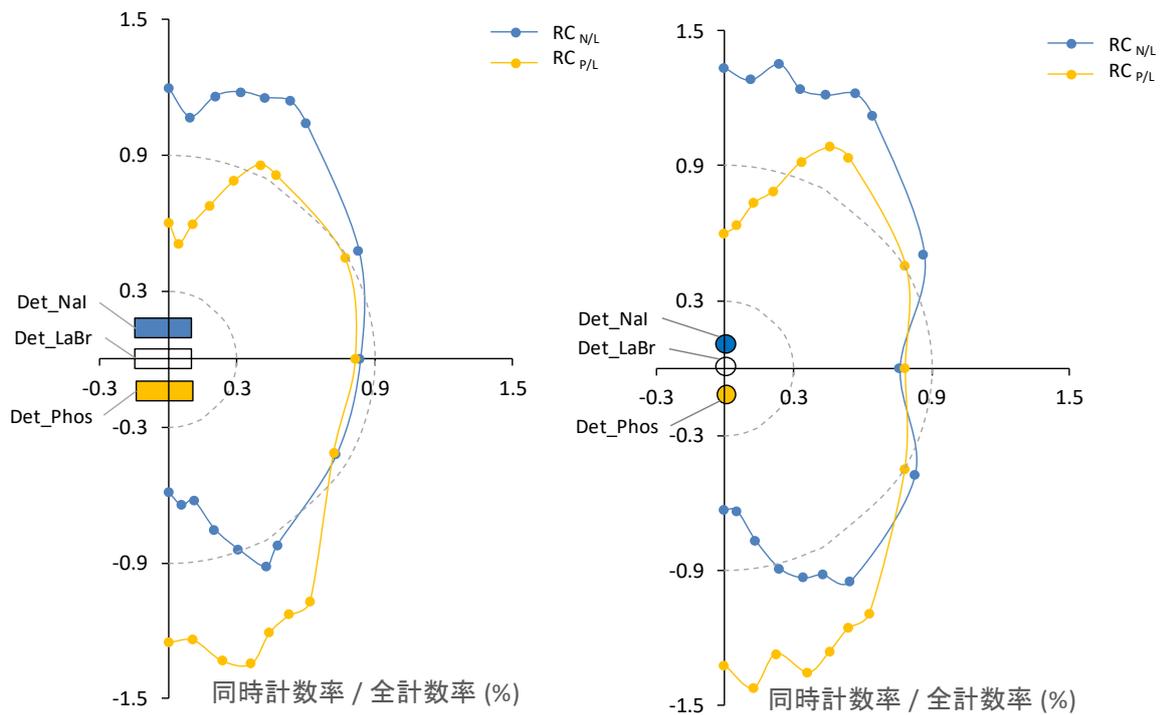


Fig. 5-7 同時計数率の方向特性

5.5. ホスウィッチ検出器によるβ線及びγ線の弁別

プルーム内の計測において、機体表面への放射性物質の付着（自己汚染）は測定の課題となると考えられる。Fig. 5-8 に自己汚染の検出器計数率に与える影響のイメージについて示す。機体表面の放射性物質から放出される放射線は検出器までの距離が近いのでバックグラウンドとなる。プルーム内通過後、自己汚染があった場合、プルームから出たとしても計数率の変動だけでは実際のプルームなのか機体表面なのか判別ができない。そこで、β線に着目し、β線とγ線の計数率の比を指標とすることを考案した。Fig. 5-8 に示したように機体飛行時の計数率だけでなく、β線とγ線の計数率の比の変動から一定の自己汚染の影響を評価することができると考えられる。Table 5-1 に主な放射性核種と放出するβ線のエネルギーと最大飛程について示す。空気中においてβ線の飛程はエネルギーの高い⁹⁰Yの放出するβ線で100 cm程度および水中での最大飛程は1 cm程度であることが分かる。ここで、事故直後のプルームの核種組成は短半減期の核種が多く含まれることが予想されるが、プルーム内におけるβ線とγ線の比率は大きく変化しないことは前提となる。

上記の状況を考慮し、試作したホスウィッチ検出器の構成についてFig. 5-9に示す。前面のプラスチックシンチレータの厚さはSr-Yのβ線の検出を考慮し、10 mmとした。一般的にプラスチックシンチレータとNaI検出器の弁別には消光時間の違いを利用し、発生するパルスの立ち上がり時間で弁別する²²⁾。通常ホスウィッチ検出器では、本システムでは検出器からの信号を時間間隔用とスペクトル用に分けて処理しているため、スペクトル測定も同時に実施可能である。

試作した検出器について、線源により基本性能の確認を行った。仕様線源は、¹³⁷Cs及び⁹⁰Sr電着線源とし、それぞれの放射能は試験日の2019年4月11日時点で2,919 Bq及び2,666 Bqである。γ線のみ照射については、¹³⁷Cs線源の表面に0.5 cmの亚克力板を配置することにより¹³⁷Csのβ線を遮蔽した。これらの3条件（γ線：¹³⁷Cs線源+亚克力板、β線：⁹⁰Sr線源、β+γ線：¹³⁷Cs線源）で距離を変化させて検出器の計数率を確認した。Fig. 5-10～Fig. 5-12にそれぞれの検出器の計数率及びその計数率比を示す。計数率比を見ると、γ線及びβ線のみを照射した場合は、距離による変化はない。一方、β+γ線の場合は、距離が20 mmまで比は増加し、それ以降は一定となっている。これば、¹³⁷Csのβ線の空気中での最大飛程（0.514 MeV: 13.5 mm）を考慮するとβ線が検出器及び線源間の空気中で遮蔽されたことを示している。この試験結果は、表面に放射性物質が付着した場合と付着していない場合で、計数率比が変わることを示しており、この計数率比を測定中に確認することにより、相対的に付着状況を評価できることが示唆される。この条件については、実際には、プルームとの距離やプルームの核種組成により変化することが考えられるため、今後より多種の条件を模擬した検討が必要である。

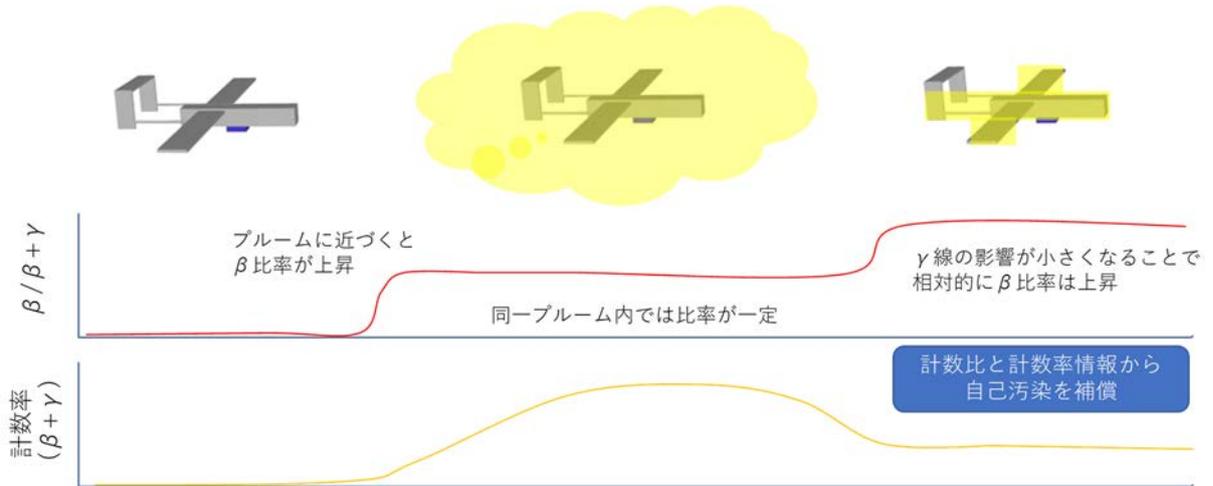
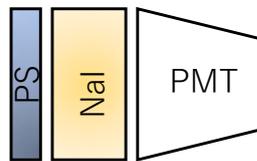


Fig. 5-8 プルーム内飛行による自己汚染弁別イメージ

Table 5-1 主なβ線放出核種と最大飛程

放射性物質	半減期	エネルギー (MeV)	放出割合	最大飛程 (cm)		
				アルミニウム中	空気中	水中
				2.70 g/cm ³	0.001205 g/cm ³	1 g/cm ³
⁹⁰ Sr	28.79年	0.546	100%	0.065	147	0.177
⁹⁰ Y	64.00時間	2.28	100%	0.408	915	1.103
¹³¹ I	8.02070日	0.248	2.10%	0.022	49	0.059
		0.334	7.20%	0.033	74	0.090
¹³⁴ Cs	2.0648年	0.606	89.50%	0.076	169	0.204
		0.0886	27.30%	0.0050	12	0.014
		0.415	2.50%	0.0450	100	0.121
¹³⁷ Cs	30.1671年	0.658	70.20%	0.0850	190	0.228
		0.514	94.40%	0.0600	135	0.162
		1.176	5.60%	0.187	419	0.504



プラスチックシンチレータ (25.4 mmΦ × 10 mmH)
NaIシンチレータ (25.4 mmΦ × 25.4 mmH)

Fig. 5-9 ホスウィッチ検出器の構成

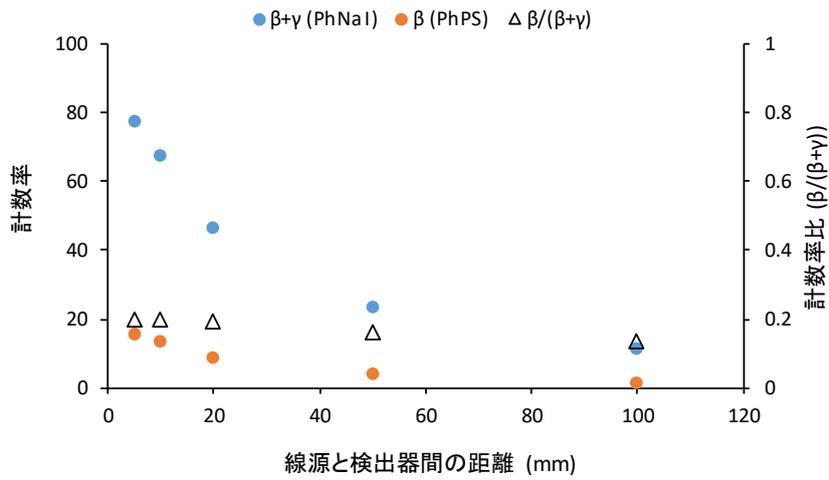


Fig. 5-10 γ 線源 (^{137}Cs +アクリル板) による距離と計数率の関係

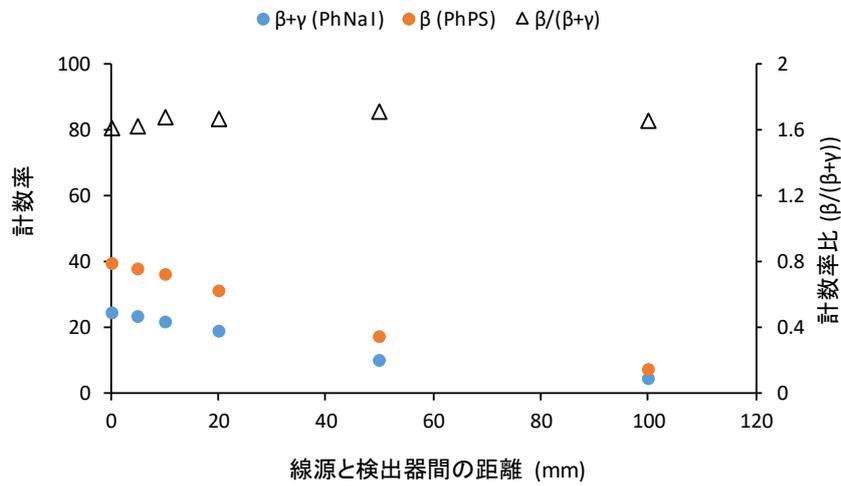


Fig. 5-11 β 線源 (^{90}Sr) による距離と計数率の関係

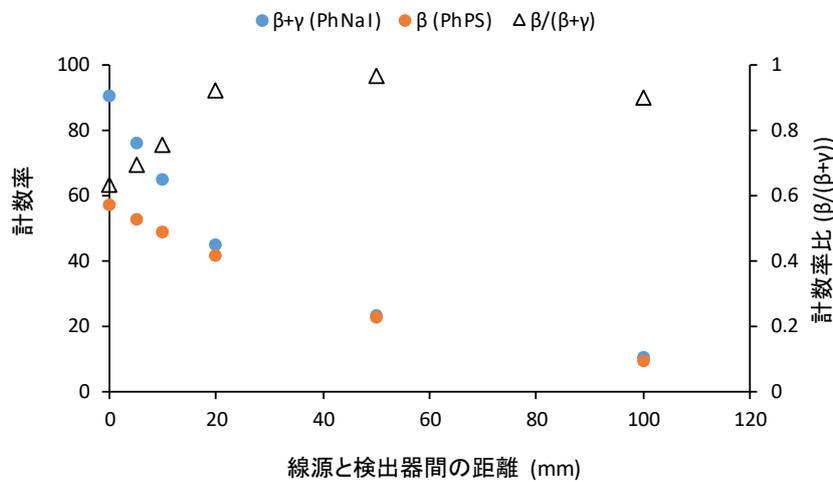


Fig. 5-12 $\beta + \gamma$ 線源 (^{137}Cs) による距離と計数率の関係

5.6. 海上におけるフライト試験

5.6.1. 試験条件

実際に地上からの放射線（グラウンドシャイン）とブルームからの放射線（サブマージョン）の同時計数率の違いを確認するため、陸上と海上における長時間フライトを実施し、同同時計数率の測定を実施した（Fig. 5-13）。測定場所は南相馬沖約 2 km の地点とし、高度を 50 m, 100m 及び 150 m の 3 パターンで各 1 時間程度のデータを取得した。陸上でのデータは計数率を合わせるため高度 50 m において約 10 分程度ホバリングを実施した。全データ取得の試験条件について Table 5-2 に示す。



Fig. 5-13 海上試験風景

Table 5-2 フライト試験条件

No	Date	Start time	Stop time	Analyzed data						
				Above the ground			Above the sea			
				Start	Stop	Mea. Time	Start	Stop	Mea. Time	Altitude
1		10:06:48	11:21:50	9:42:45	9:52:50	0:10:05	10:36:50	10:46:50	0:10:00	50
2	21. Feb. 2019	11:31:25	12:46:27				12:01:25	12:11:25	0:10:00	100
3		12:59:12	14:11:51				13:29:13	13:39:13	0:10:00	150
4		9:51:41	11:05:13	9:19:05	9:29:10	0:10:05	10:21:41	10:31:41	0:10:00	50
5	22. Feb. 2019	12:40:14	13:54:01				13:20:14	13:30:14	0:10:00	100
6		15:30:59	16:42:33				16:00:59	16:10:59	0:10:00	150
7		9:41:33	10:58:34	9:21:48	9:32:08	0:10:20	10:11:33	10:21:33	0:10:00	50
8	25. Feb. 2019	11:06:22	12:22:00				11:36:22	11:46:22	0:10:00	100
9		13:43:43	14:56:07				14:13:43	14:23:43	0:10:00	150
10		9:41:17	10:54:39	9:13:07	9:23:08	0:10:01	9:41:17	9:51:17	0:10:00	50
11	26. Feb. 2019	11:03:04	12:14:56				11:33:04	11:43:04	0:10:00	100
12		13:46:03	14:57:27				13:46:03	13:56:03	0:10:00	150
13		9:38:11	10:54:51	9:18:56	9:28:58	0:10:02	9:38:11	9:48:11	0:10:00	50
14	27. Feb. 2019	11:04:02	12:15:02				11:04:02	11:14:02	0:10:00	100
15		13:31:33	14:44:45				13:31:33	13:41:33	0:10:00	150

5.6.2. 同時計数率の測定結果

陸上及び海上におけるパルス間時間間隔を $0.2 \mu\text{s}$ ごとに積算し計数率のスペクトルとして Fig. 5-14 に 1 例を示す。このように、 $0 \sim 0.5 \mu\text{s}$ の間に有意な計数率が得られこの計数の組み合わせを同時計数として定義できる。計数率の高い状況になると偶発同時計数の確立が高くなるが今回の測定条件では無視できる。また、陸上での結果よりも海上の結果の方が同時計数率の高い傾向にあった。

この違いを定量的に評価するために、同時計数率の測定結果について Table 5-3 及び Fig. 5-15 に示す。測定日や高度によって測定結果に大きな違いはなく、陸上での結果は $\text{RC}_{\text{N/L}}$ が 0.71% 及び $\text{RC}_{\text{P/L}}$ が 0.65% であった。一方、海上での結果は、高度 50 m における $\text{RC}_{\text{N/L}}$ が 2.6% 及び $\text{RC}_{\text{P/L}}$ が 2.6% であり、陸上よりも高い結果となった。この結果は地上からの放射線（グラウンドシャイン）とブルームからの放射線（サブマージョン）の同時計数率の違いが反映されている。この結果を利用して、次章に事故時におけるグラウンドシャインとサブマージョンの弁別レベルについて論ずる。

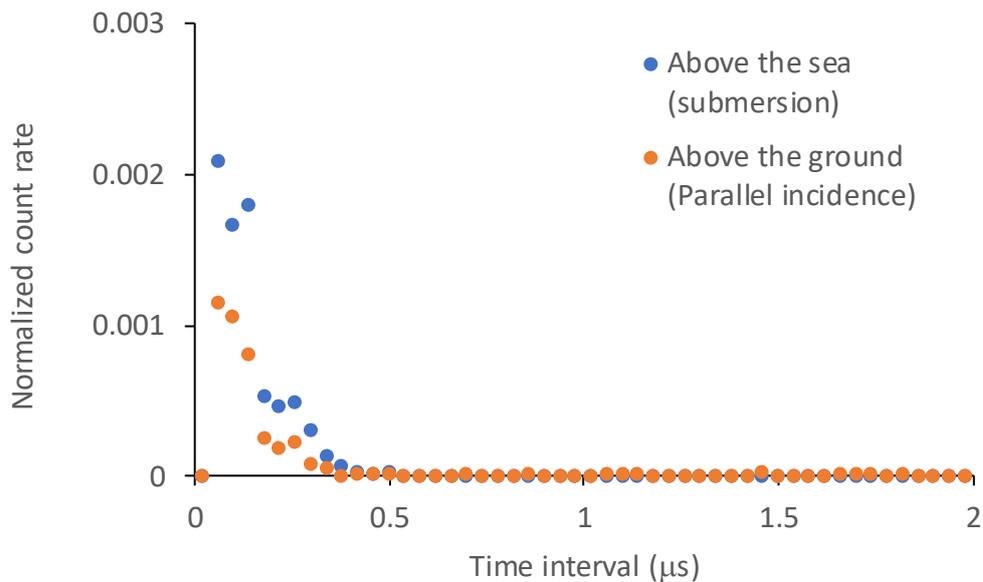


Fig. 5-14 時間間隔スペクトル例

Table 5-3 海上試験による同時計数率

RC_P/L	Coincidence rate (%)					Mean
	21/02/2019	22/02/2019	25/02/2019	26/02/2019	27/02/2019	
Ground	0.85%	0.61%	0.61%	0.60%	0.85%	0.71%
50 m	3.0%	3.4%	2.3%	2.5%	1.8%	2.6%
100 m	2.9%	2.4%	2.5%	2.9%	2.6%	2.7%
150 m	2.6%	2.6%	2.6%	3.2%	2.1%	2.6%

RC_N/L	Coincidence rate (%)					Mean
	21/02/2019	22/02/2019	25/02/2019	26/02/2019	27/02/2019	
Ground	0.70%	0.69%	0.60%	0.64%	0.62%	0.65%
50 m	3.1%	2.8%	1.9%	2.7%	2.5%	2.6%
100 m	2.2%	2.9%	3.2%	2.3%	2.1%	2.5%
150 m	3.0%	3.2%	2.4%	2.4%	2.3%	2.7%

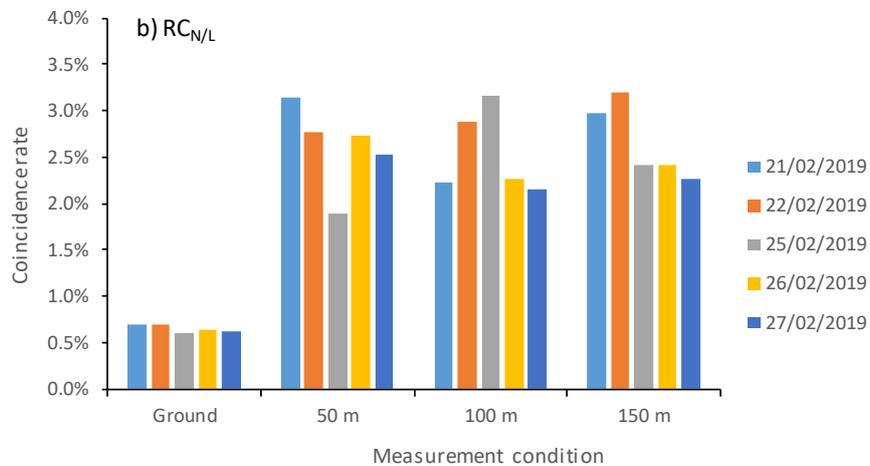
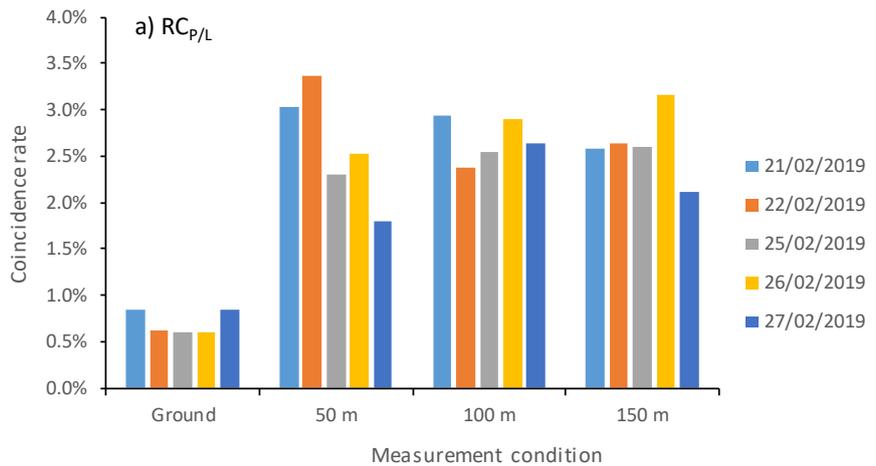


Fig. 5-15 海上試験における同時測定率結果

5.7. グランドシャインとサブマージョンの弁別レベル

同時計数率から弁別する理論式は以下の式で表される²³⁾。まず検出器の計数率 (N_{all}) と同時計数率 (N_{coin}) はそれぞれ式 (1) 及び (2) で表せる。

$$N_{all} = N_{sub} + N_{gd} \quad (1)$$

$$N_{coin} = \alpha \times N_{sub} + \beta \times N_{gd} \quad (2)$$

ここで N_{sub} はサブマージョン由来の計数率、 N_{gd} はグランドシャイン由来の計数率、 α はサブマージョンコインシデンス率 (フライト試験結果から 0.7 %) 及び β はグランドシャイン由来のコインシデンス率 (フライト試験結果から 2.7 %) である。この連立方程式を N_{sub} 及び N_{gd} ごとに解くと式 (3) 及び (4) のように整理できる。

$$N_{sub} = \frac{1}{\alpha - \beta} (N_{coin} - \beta N_{all}) \quad (3)$$

$$N_{gd} = \frac{1}{\beta - \alpha} (N_{coin} - \alpha N_{all}) \quad (4)$$

式に示すように、 N_{sub} に対して N_{gd} はいわゆるバックグラウンド計数率になるので、単純に以下の式 (5) から N_{sub} の検出下限値を求めることができる。

$$C_{sub} = \frac{4.653\sqrt{N_{gd} t} + 2.706}{t \beta \varepsilon_{sub}} \quad (5)$$

ここで、 N_{gd} は式 (6) のように定義する。

$$N_{gd} = D_{gd} \varepsilon_{gd} \alpha \quad (6)$$

ここでそれぞれのパラメータはフライト試験の結果や 2017, 2018 年度に行ったラドンチャンバでの試験結果^{14, 15)} から以下の数値を与えた。

- D_{gd} : 地上の線量率
- ε_{gd} : 上空 300 m における線量換算係数 (496 cps $\mu\text{Sv}^{-1} \text{h}$)^{*1}
- C_{sub} : 空气中放射性物質濃度 (Bq cm^{-3})
- t : 測定時間 (s)

e_{sub} : 空气中濃度換算係数 (0.0012 cps Bq⁻¹ m³)^{*2}

*1: 上空での測定試験より (Fig. 5-15)

*2: ラドンチャンバ試験結果より 14, 15)

これらの条件から計算した地表の線量率と空气中放射性物質濃度の関係を Fig. 5-16 に示す。測定時間は 6 秒、60 秒及び 600 秒で計算した。地表の線量率が上がるにつれ、検出下限値は上昇する。東京電力株式会社が再現評価した福島第一原子力発電所事故時の敷地内における全放射能は、約 20,000 Bq/m³ とされており²⁴⁾、それを目安とすると 300 m 上空から、600 秒の測定で地表面が 20 μSv/h であっても福島事故レベルのプルームの計測が可能であることを示している。

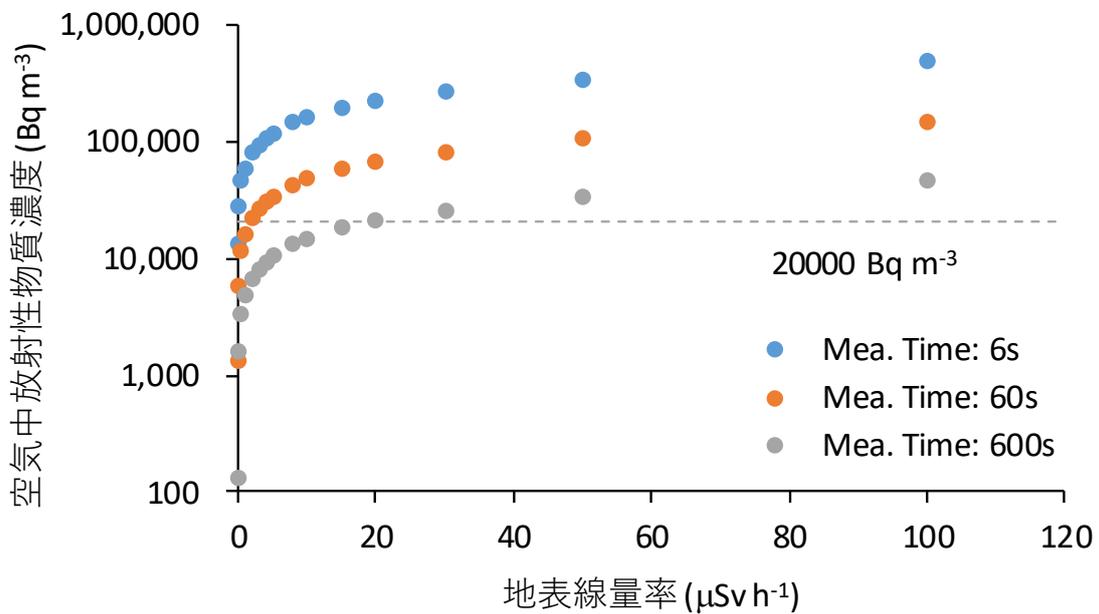


Fig. 5-16 地表線量率ごとの空气中放射性物質濃度の検出下限値

6. フライトプラン作成及び可視化のための総合システムの構築

6.1. フライトプラン作成・可視化システムの概要

2016年度にフライトプラン作成プログラムを作成し、予測気象に基づく大気拡散計算結果から無人飛行機の飛行経路を設定するためのプログラムを作成した。本事業では、プルーム測定を行う際に必要な飛行経路及び放射性核種の予測移流経路を可視化するシステムを作成し、既に整備されている飛行経路生成機能と統合した、フライトプラン作成・可視化システムを開発した。本システムの概念図を Fig. 6-1 に示す。本システムはフライトプラン生成機能と飛行経路及び測定結果の可視化機能に分けられる。システムの設定や実行指令等は全て GUI より行える。フライトプランは、無人飛行機が離陸する前に飛行経路作成プログラムで作成される初期飛行経路と飛行中に測定結果のフィードバックによる最適化後に更新される更新飛行経路の 2 種類が作成される。更新飛行経路を計算するアルゴリズムは今後の開発を見込んで、GUI 上では複数アルゴリズムが選択できるように作成している。

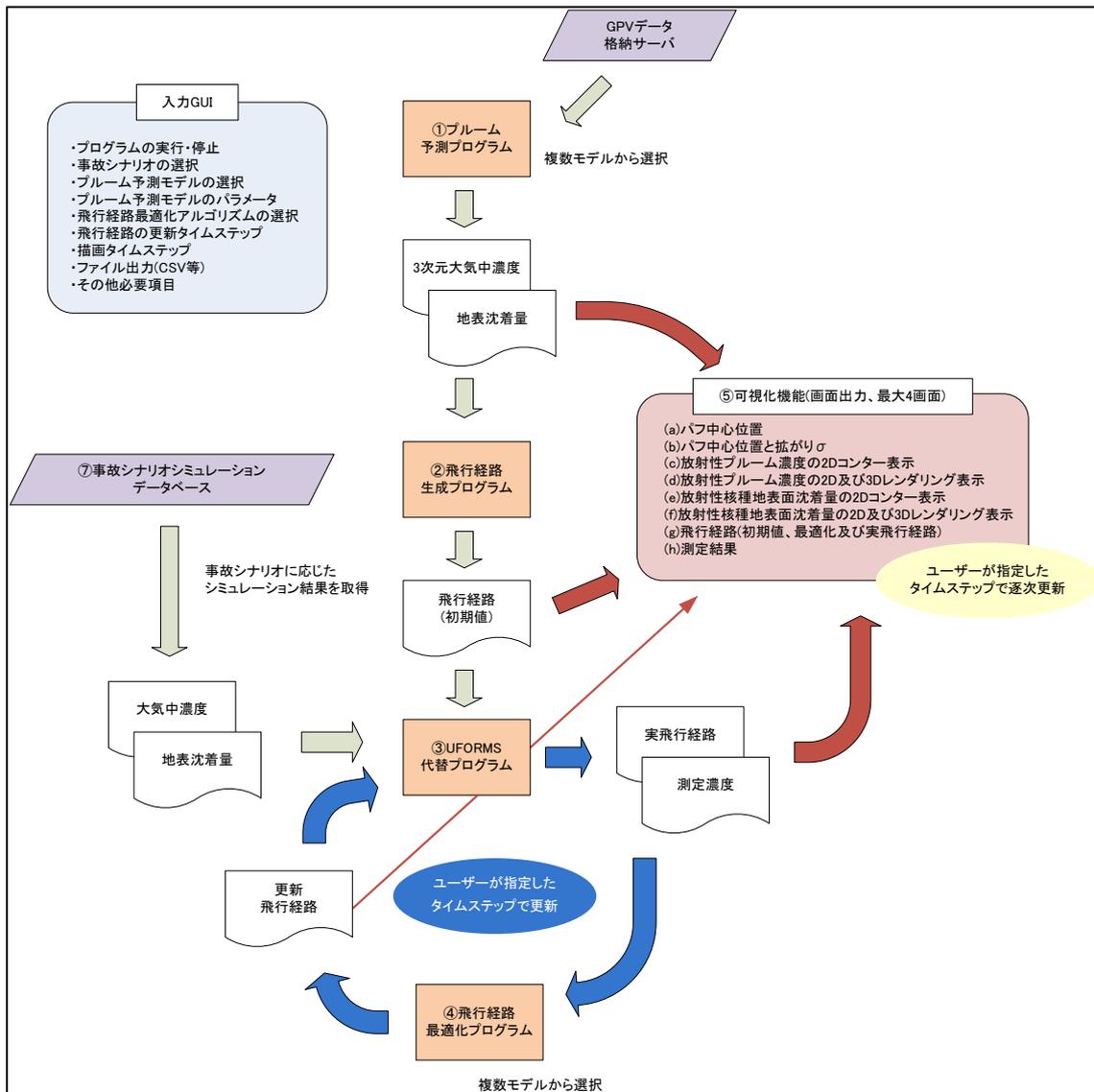


Fig. 6-1 システムの概要

6.2. フライトプラン作成機能

本システムでは、最初に気象庁が配信する GPV データ²⁵⁾ を基に、事故時の放射性プルームの移流・拡散の予測を行う。移流、拡散計算には、下式 (7) で示すガウスパフモデル²⁶⁾ を用いて計算を行った。

$$C = \sum_{i=m}^n C_{i,c} \times \exp\left(-\frac{D_i^2}{2\sigma_{i,h}^2}\right) \times \exp\left(-\frac{(z-z_{i,c})^2}{2\sigma_{i,v}^2}\right) \quad (7)$$

ここで、

C : 飛行経路のパフの濃度 [Bq/m³]

$C_{i,c}$: パフ i の中心濃度 [Bq/m³]

D_i : パフ i の中心座標から飛行経路点までの水平距離 [m]

$z_{i,c}$: パフ i の中心の GPS 高度 [m]

z : 飛行経路点の GPS 高度 [m]

$\sigma_{i,h}$: パフ i の水平方向の拡散幅 [m]

$\sigma_{i,v}$: パフ i の垂直方向の拡散幅 [m]

ガウスパフモデルでは、本来、連続的に放出される放射性核種を断続的なパフの放出とみなし、それぞれのパフがガウス分布的な広がりを持って移流するモデルである。パフの拡散幅は移流距離に応じて大きくなる。

次に、放射性プルームの移流・拡散予測結果を基に、飛行経路生成プログラムにて、無人飛行機の飛行経路を算出、設定する。飛行経路生成プログラムの入力ファイルとして、Table 6-1 の項目が記載された `fpmake.inp` が必要となるが、`fpmake.inp` は後述の GUI にて自動的に作成される。飛行経路生成プログラムにて生成される飛行経路出力ファイル `fpmake.out` の出力項目は Table 6-2 の通りであり、生成されるファイルの例を Fig. 6-2 に示す。

Table 6-1 fpmake.inp の入力項目

card	項目名	変数名	備考
1	計算モード	Ncalcflg	計算モードの選択。整数入力。 1 = フライトプラン作成 2 = フライトプラン作成 / 飛行経路の濃度計算
2	事故発生日時(yyyy-mm dd hh:mm)	Nadate	事故発生日時
3	出発日時(yyyy-mm dd hh:mm)	Nsdate	離陸開始日時
4	巡航速度(m/s)	Ncruise_Vel	真対気速度、常にこの速度で飛行。実数入力
5	巡航高度(m)	Ncruise_Height	GPS 高度、下限高度。実数入力
6	最大飛行時間(hr)	Ncruise_Time	離陸から着陸までの時間制限。実数入力
7	最大飛距離(km)	NdisRange	出発地点からの直線距離。実数入力 (無線が届く範囲の距離)
8	出発地点の位置情報 緯度(deg)、経度(deg)、 海拔高度(m)	Ndeparture	出発地点の位置情報。
9	離陸経路点数	Ntakeoff_point	1~100 点。整数入力。
10	離陸経路点の位置情報 緯度(deg)、経度(deg)、 海拔高度(m)	takeoffL NameList	1 点以上入力(離陸地点が必要)する。 離陸経路点数だけ入力。実数入力。
11	着陸経路点数	Nlanding_point	1~100 点。整数入力。
12	着陸経路点の位置情報 緯度(deg)、経度(deg)、 海拔高度(m)	landing NameList	1 点以上入力(着陸地点が必要)する。 着陸経路点数だけ入力。実数入力。

Table 6-2 fpmake.out の出力項目

card	項目名	備考
1	出発日時(年月日時)	離陸開始日時
2	巡航速度(m/s)	真対気速度、常にこの速度で飛行
3	最低巡航高度(m)	GPS 高度、下限高度
4	最大飛行時間(hr)	離陸から着陸までの時間制限
5	最大飛距離(km)	出発地点からの直線距離 (無線が届く範囲の距離)
6	離陸経路点数	1~100 点
8	着陸経路点数	1~100 点
10	フライトプラン 緯度(deg)、経度(deg)、GPS 高度 (m)、日時(年月日時)	1 行以上、作成したフライトプランを出力

```

出発日時:2017-02-28T15:10:00
巡航速度(m/s): 3.000000E+01
最低巡航高度(m): 1.000000E+02
最大飛行時間(hr): 2.000000E+00
最大飛距離(km): 1.000000E+02
離陸経路点数: 4
lat lon 海拔高度(m)
 3.722722E+01 1.404306E+02 3.720000E+02
 3.724592E+01 1.404295E+02 4.020000E+02
 3.726140E+01 1.404593E+02 5.720000E+02
 3.727454E+01 1.404910E+02 7.720000E+02
着陸経路点数: 4
lat lon 海拔高度(m)
 3.727454E+01 1.404910E+02 7.720000E+02
 3.726140E+01 1.404593E+02 5.720000E+02
 3.724592E+01 1.404295E+02 4.020000E+02
 3.722722E+01 1.404306E+02 3.720000E+02

フライトプラン
Lat(deg) Lon(deg) GPS 高度(m) 日時
BASE 3.722722E+01 1.404306E+02 4.150948E+02 2017-02-28T15:10:00
 1 3.724592E+01 1.404295E+02 4.450727E+02 2017-02-28T15:11:09
 2 3.726140E+01 1.404593E+02 6.150898E+02 2017-02-28T15:12:54
 3 3.727454E+01 1.404910E+02 8.151123E+02 2017-02-28T15:14:40
 4 3.728876E+01 1.407474E+02 5.975987E+02 2017-02-28T15:27:20
 5 3.741656E+01 1.409488E+02 3.800850E+02 2017-02-28T15:40:00
 6 3.749701E+01 1.409360E+02 4.039700E+02 2017-02-28T15:45:00
 7 3.741599E+01 1.409316E+02 4.278550E+02 2017-02-28T15:50:00
 8 3.733498E+01 1.409272E+02 4.482510E+02 2017-02-28T15:55:00
 9 3.741542E+01 1.409144E+02 4.686469E+02 2017-02-28T16:00:00
10 3.749613E+01 1.409046E+02 4.883529E+02 2017-02-28T16:05:00
11 3.741521E+01 1.408980E+02 5.080589E+02 2017-02-28T16:10:00
12 3.733428E+01 1.408915E+02 5.255700E+02 2017-02-28T16:15:00
13 3.741499E+01 1.408817E+02 5.430810E+02 2017-02-28T16:20:00
14 3.749590E+01 1.408748E+02 5.603675E+02 2017-02-28T16:25:00
15 3.741522E+01 1.408645E+02 5.776539E+02 2017-02-28T16:30:00
16 3.733455E+01 1.408543E+02 5.964116E+02 2017-02-28T16:35:00
17 3.741545E+01 1.408474E+02 6.151694E+02 2017-02-28T16:40:00
18 3.727454E+01 1.404910E+02 8.151123E+02 2017-02-28T16:59:35
19 3.726140E+01 1.404593E+02 6.150898E+02 2017-02-28T17:01:21
20 3.724592E+01 1.404295E+02 4.450727E+02 2017-02-28T17:03:06
21 3.722722E+01 1.404306E+02 4.150948E+02 2017-02-28T17:04:15
    
```

Fig. 6-2 fpmake.out 出力例

6.3. UFOMS 代替システム

実際のプルーム測定の際には、フライトプランを無人飛行機 (UARMS) の制御ソフトウェアである (UFOMS) へ送信し、UFOMS から出力される実飛行経路の GPS 座標、放射能濃度等の測定データを可視化システムで表示する。さらに、飛行経路最適化アルゴリズムへ入力し、更新飛行経路を算出する。現在、測定器及び無人飛行機は開発段階であるため、これらの代替として、模擬的に実飛行経路の GPS 座標、計数率等の測定データを出力する UFOMS 代替システムを構築した。

無人飛行機は、事前に設定したフライトプランに従って飛行するが、風や旋回性能等の影響から、当初の計画から外れた飛行経路を飛行することが予測される。また、その場合、予定した標高よりも高い標高や障害物に衝突しないように、標準入力ファイルにて、下限高度をユーザー側で設定することとなっており、下限高度を下回らないように飛行を行うようになっている。UFOMS 代替システムでは、これらの風、旋回性能、飛行高度の影響を考慮して、実飛行経路を出力する。これらの影響による実飛行経路の算出方法は 6.2.1 から 6.2.3 に示す。さらに、UFOMS 代替システムでは、放射性プルーム中を飛行した場合に測定される放射能濃度を仮想的に出力する。計数率出力機能については、6.2.4 に示す。

UFOMS 代替システムはあくまで、無人飛行機及び測定システムの代替であり、実際には、Fig.6-1 の③UFOMS 代替プログラムの部分を無人飛行機及び測定システムに切り替えて使用することとなる。

6.3.1. 旋回性能を考慮した実飛行経路の計算

飛行経路生成プログラムで作成されるフライトプランでは、UFOMS の旋回性能を考慮していない。実際には、旋回できる最小半径があり、実飛行経路ではこれを考慮する必要がある。最小旋回半径 R は以下の式から算出する。

$$R = \frac{V^2}{g \times \tan \theta_b} \quad (8)$$

ここで、

V : 真対気速度 [m/s]

g : 重力加速度 [m/s²]

θ_b : 旋回時の飛行機のバンク角 [deg]

バンク角 30° での旋回は有人飛行機でも使用される条件であり、この場合の旋回半径は巡航速度 30 m/s で 159 m となる。Fig. 6-3 に旋回半径を考慮していないフライトプランと、旋回半径を考慮した実飛行経路を示す。旋回が行われている箇所では、実飛行経路の方がフライトプランの飛行経路よりも膨らみがあることがわかる。

6.3.2. 風の影響を考慮した実飛行経路の計算

無人飛行機が風の影響を受けて計画飛行経路上から移動することを考慮した。無人飛行機は、風に流された後、再度、次の目標地点に向かって飛行を行う。巡航速度 30 m/s、旋回時のバンク角 30° 時における、風向条件に対する実飛行経路の計算結果を Fig. 6-4 に示す。

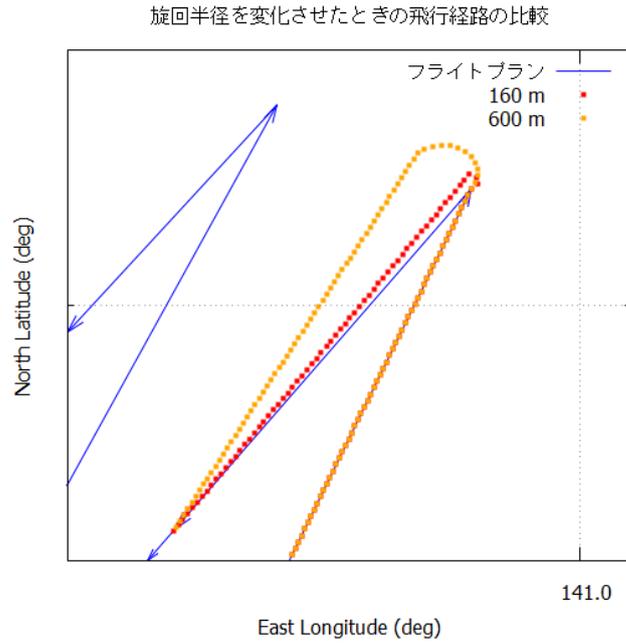


Fig. 6-3 フライトプランと旋回半径を考慮した実飛行経路

青線は旋回半径を無視した場合の経路、赤は旋回半径 160 m で飛行した場合の経路、
 橙は旋回半径 600 m で飛行した場合の経路

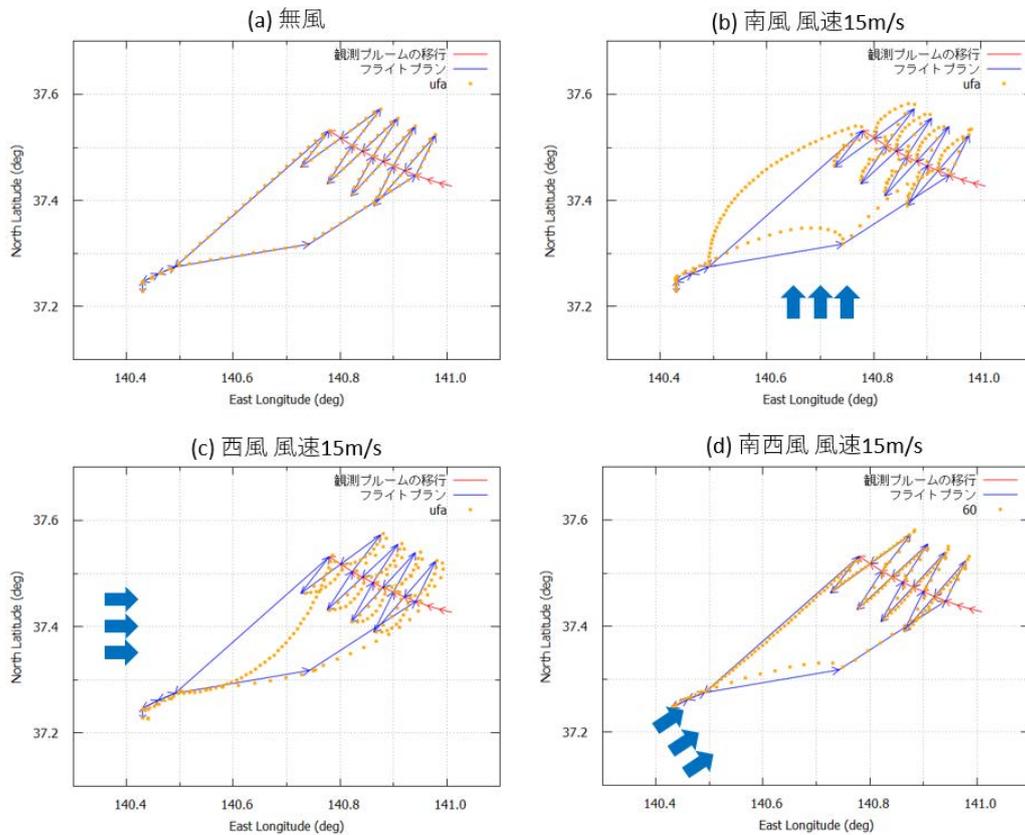


Fig. 6-4 風向ごとの実飛行経路

(a) 無風の場合、(b) 風速 15 m/s の南風、(c) 風速 15 m/s の西風、(d) 風速 15 m/s の南西風

6.3.3. 飛行高度を考慮した実飛行経路の計算

本システムで生成されるフライトプランでは、標高を考慮して飛行経路点の設定が行われているが、先述の風や旋回半径等の影響によって、計画した位置から外れた場合、高い標高や障害物に衝突しないように、飛行高度を補正する必要がある。本システムでは、ユーザーが下限高度と高度補正値を指定し、以下の式 (9) のように算出される移動成分に従い、飛行経路を変更する。

$$\begin{aligned} d_{zc} &= d_z + d_{dis} \times C_{ratio} \\ d_{dc} &= d_d - d_{dis} \times C_{ratio} \end{aligned} \tag{9}$$

ここで、

d_{zc} : 補正後の高さ方向の移動成分[m]

d_{dc} : 補正後の水平方向の移動成分[m]

d_z : 補正前の高さ方向の移動成分[m]

d_d : 補正前の水平方向の移動成分[m]

d_{dis} : 補正を行う時間ステップ中に航空機が移動する距離 d_{dis} [m]

C_{ratio} : 高さ補正の割合

高度の補正をしていない実飛行経路と、飛行経路点および航空機の高度を補正した実飛行経路の時間経過と高度の関係を Fig. 6-5 に示す。このとき、補正する際の下限高度は 100m、補正値は 0.01 として計算を行った。補正を行わない場合、航空機の高度が不十分な地点が存在するのに対し、高度を補正することで適切な高度を保った実飛行経路が計算されている。

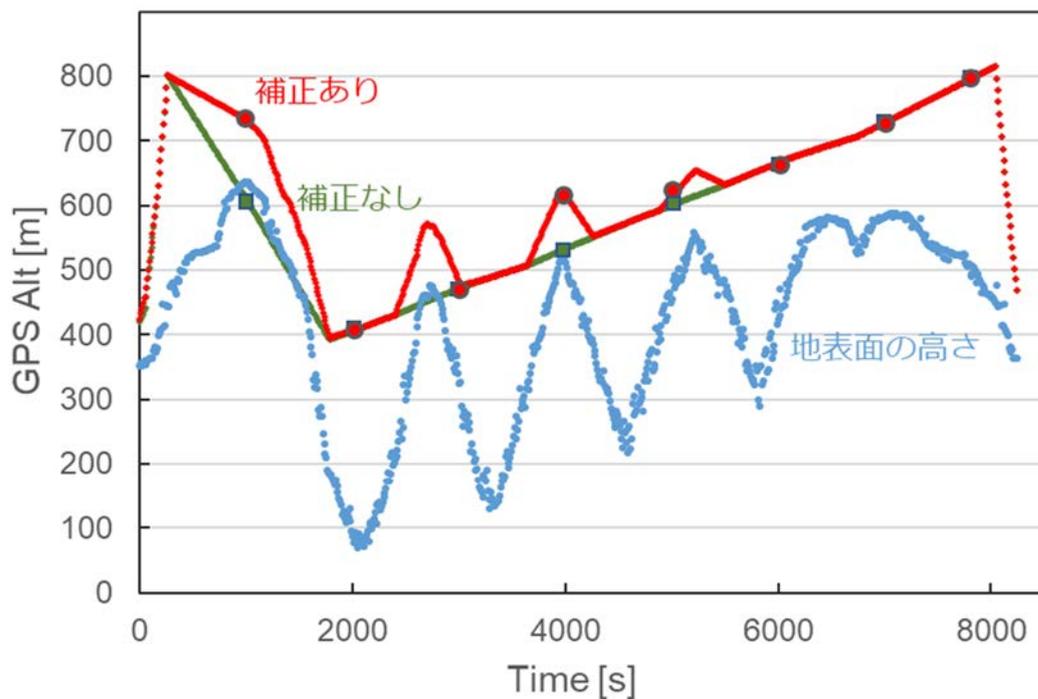


Fig. 6-5 飛行高度を考慮した実飛行経路と考慮しない場合の実飛行経路

6.3.4. 実飛行経路上の放射能濃度の取得

飛行経路上の濃度については、実際は、無人飛行機に搭載された測定器による測定値を基に取得される。現時点で測定システムは開発中であるため、測定システムの代替プログラムによって、放射能濃度データベースを基に、模擬的な濃度出力を生成する。放射能濃度データベースには、事前に粒子モデルによる詳細大気拡散計算により得られた放射能濃度シミュレーション結果の3次元メッシュデータが格納されている。次式(10)を用いて、航空機の位置ごとの放射能濃度シミュレーション結果を時間内挿することによって飛行経路の放射能濃度を取得している。

$$A(t) = \frac{dA}{dT} \times dt + A_1 \tag{10}$$

ここで、

$A(t)$: 求めたい時刻の実飛行経路の濃度 [Bq/m³]

dT : t_1 から t_2 までの時間変化量 [min]

dA : t_1 から t_2 までの濃度変化量 [Bq/m³]

dt : t_1 から求めたい時刻までの時間変化量 [min]

A_1 : t_1 の時刻の濃度 [Bq/m³]

この式では、時間変化量に対する濃度変化量の比を用いて $A(t)$ [Bq/m³]を算出している。(10)式およびFig. 6-6において、 t が求めたい実飛行経路の時刻、 $A(t)$ が求めたい時刻のときの濃度である。また、 t_1 および t_2 はそれぞれ大気中濃度データが存在する t の前後となる時刻であり、 A_1 [Bq/m³]および A_2 [Bq/m³]はそのときの濃度である。 t_1 から t までの時間変化量を dt [min]、そのときの濃度変化量を da [Bq/m³]とし、 t_1 から t_2 までの時間変化量を dT [min]、そのときの濃度変化量を dA [Bq/m³]とする。

本システムには、粒子モデルによる詳細大気拡散計算により得られた放射能濃度シミュレーション結果を数パターン整備している。放射能濃度シミュレーションの詳細については、6.5節に示す。

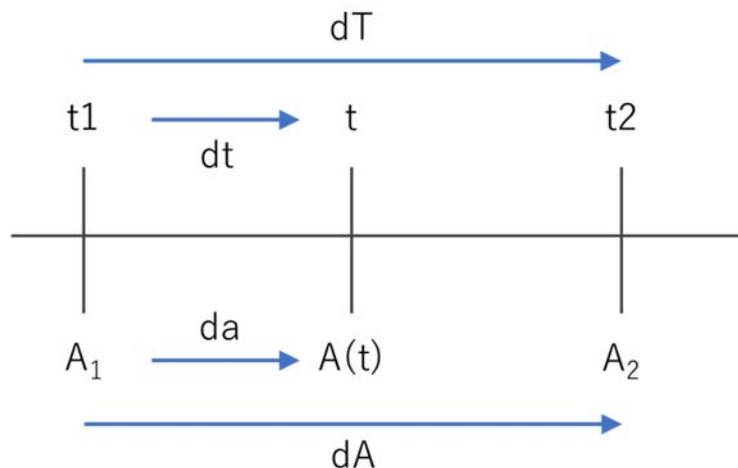


Fig. 6-6 時間内挿の概念

6.4. 飛行経路最適化機能の試作

飛行経路最適化とは、飛行中に時々刻々と変化する気象条件や UFOMS からの測定結果に応じて、任意の時間ステップごとに飛行経路を補正、更新することである。最適化アルゴリズムは様々な手法が考えられるが、初歩的な手法として、(1) 時間ステップごとにその時間に飛行している位置から再度、飛行経路ファイル生成プログラムを実行し、飛行経路の更新を行うアルゴリズムと(2) 時間ステップごとにその時間に飛行している位置から変動する気象場を考慮して再度、飛行経路ファイル生成プログラムを実行し、飛行経路の更新を行うアルゴリズムを作成した。Table 6-3 に示す条件について、最適化を行わない場合と最適化アルゴリズム(1)及び(2)を用いた場合に算出される飛行経路を Fig. 6-7 に示す。最適化を行わない場合は、概ね楕円の飛行経路となっている。アルゴリズム(1)で最適化した場合は、旋回による遅れや風による飛行位置のずれが起こり、当初に計画された飛行経路に戻ろうとする挙動が見られる。アルゴリズム(2)で最適化した場合は、変動する気象条件を考慮して飛行経路を更新するため、さらに複雑な飛行経路が描画されている。

Table 6-3 実飛行経路計算条件

設定項目	設定値
事故発生日時	2017年7月26日 01時00分
飛行機出発日時	2017年7月26日 01時10分
風速	0 m(影響なし)
巡航速度	30 m/s
最長飛行時間	6時間

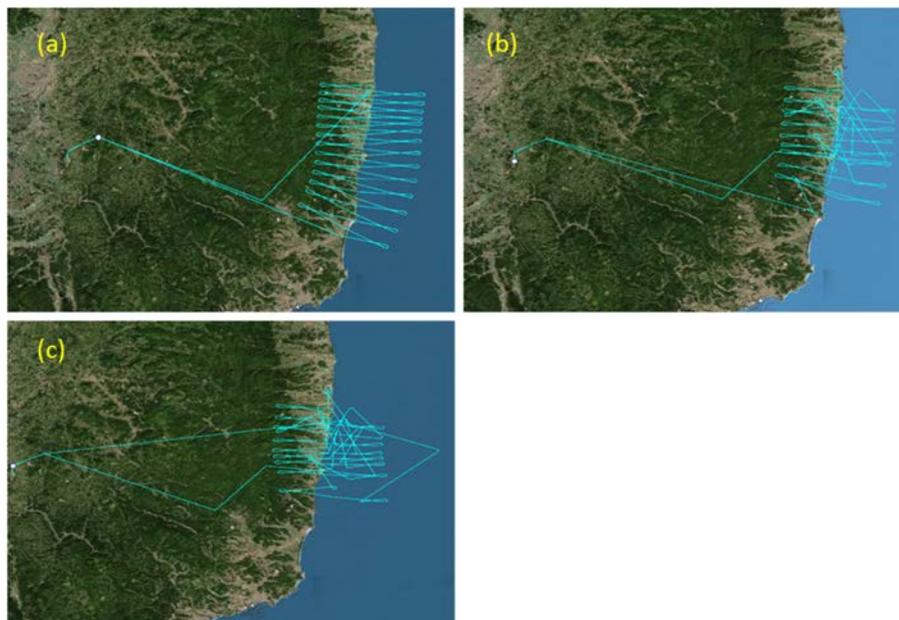


Fig. 6-7 飛行経路の比較

(a) 最適化なし、(b) アルゴリズム(1)で最適化を行った場合、(c) アルゴリズム(2)で最適化を行った場合

6.4.1. 可視化機能

本システムでは、放射性プルームの分布等の把握や無人飛行機の飛行経路を視覚的に確認するため、以下(ア)～(ク)の項目について、可視化を行う。

- (ア) プルーム予測モデル(ガウスパフモデル)によるパフ中心位置
- (イ) プルーム予測モデル(ガウスパフモデル)によるパフ中心位置及び拡がり σ の描画機能
- (ウ) プルーム予測モデルによる放射性プルーム濃度の 2D コンター表示機能
- (エ) プルーム予測モデルによる放射性プルーム濃度の 2D 及び 3D レンダリング表示機能
- (オ) プルーム予測モデルによる放射性核種地表面沈着量の 2D コンター表示機能
- (カ) プルーム予測モデルによる放射性核種地表面沈着量の 2D 及び 3D レンダリング表示機能
- (キ) 飛行経路(初期設定飛行経路、更新飛行経路、実飛行経路)描画機能
- (ク) UFOMS 飛行経路及び測定結果機能(測定値座標上に測定値をカラースケールで表示)

可視化機能は使用するタイミングに応じて、放射性プルームが放出されている最中にリアルタイムでモニターするためのリアルタイムモードと放射性プルームの放出が終了した後に測定期間内のデータを確認するための非リアルタイムモードの 2 つのモードを整備している。表示例は 3 章に動作試験結果として示す。

6.4.2. リアルタイムモード

実際に無人飛行機を用いてプルームを測定する際に使用することを想定した可視化モードである。リアルタイムモードにおける可視化の流れを Fig. 6-8 に示す。リアルタイムモードを用いる場合は、離陸前に初期飛行経路を作成し、表示画面をリアルタイムモードで起動する。リアルタイムでの可視化機能は RealTimeOutputCsv.exe で制御されており、リアルタイムで描画を行う飛行経路、測定データの情報を時間ごとに RTO.csv に書き込む。可視化機能は RTO.csv の再読み込みを行い、表示が更新される。これを繰り返し、任意の時間ステップで連続的な可視化を行う。現状では、模擬的な測定器からの出力として、UFOMS 代替システムにより時間ごとの測定値を作成し、ファイルに書き込んでいる。実際に測定器からの時間ごとの出力値を表示する場合は、RTO.csv に測定器の結果が書き込まれることになる。

6.4.3. 非リアルタイムモード

非リアルタイムモードは離陸前の初期飛行経路の表示用に使用されるモードである。非リアルタイムモードの可視化の流れを Fig. 6-9 に示す。リアルタイムモードのように更新は行わず、計算結果を単純に描画するモードである。

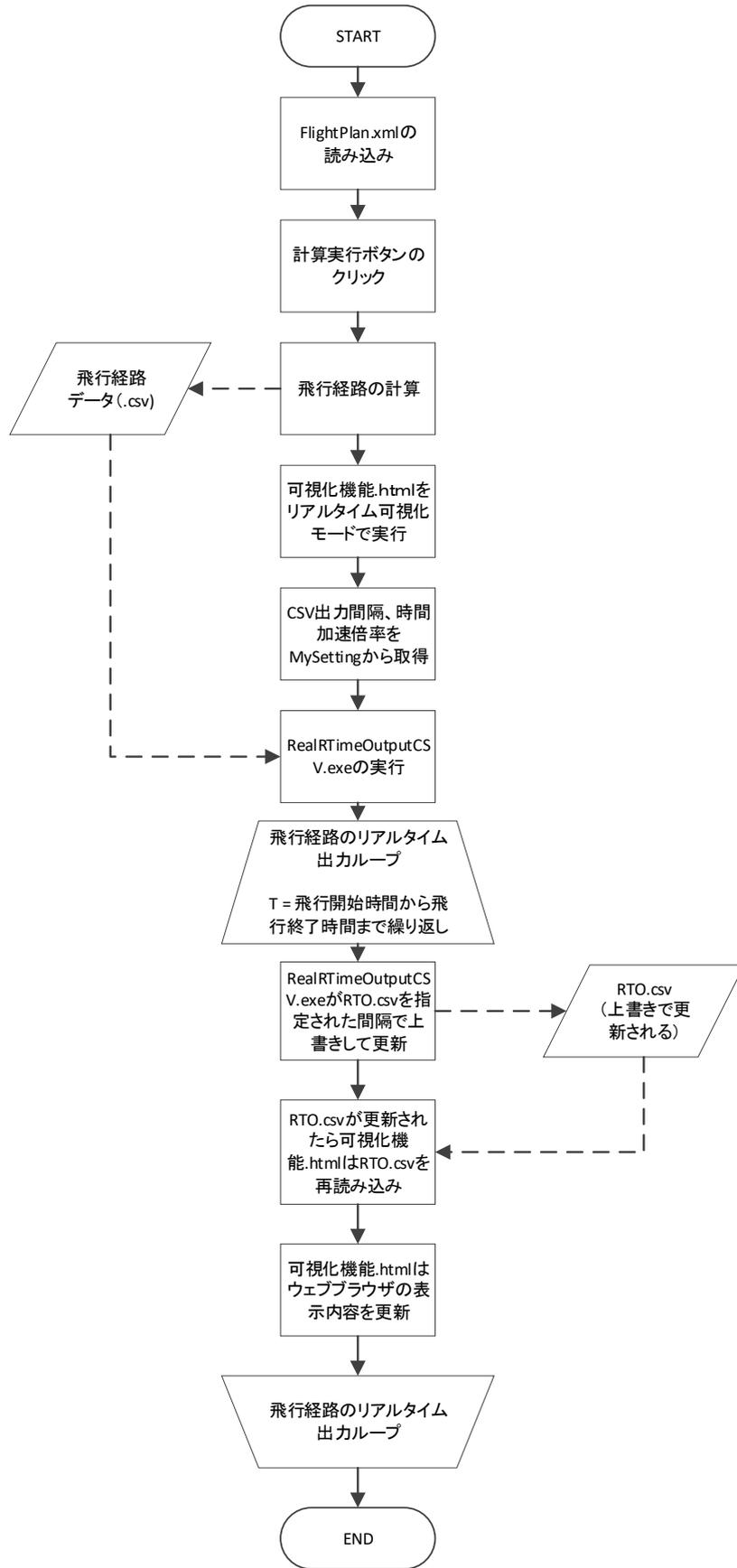


Fig. 6-8 リアルタイムモードの可視化の流れ

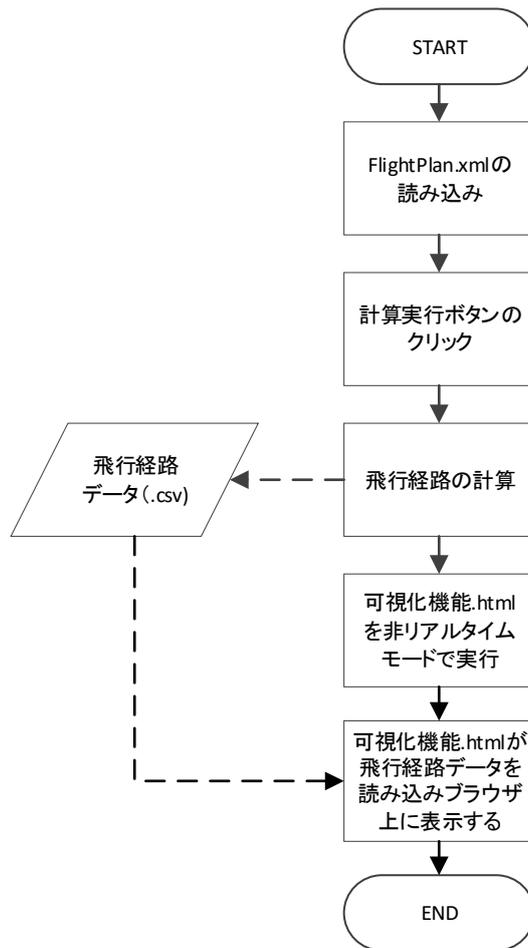


Fig. 6-9 非リアルタイムモードの可視化の流れ

6.5. UFOMS 代替システム用放射能濃度分布データベースの整備

UFOMS 代替システムにて出力する模擬的な測定データを作成するため、複数種類のソースターム及び気象条件について、粒子モデルを用いて大気拡散計算を行った。計算の各条件については、6.5.1 から 6.5.3 に示す。また、計算結果例を 6.5.4 に示す。

6.5.1. 気象条件の選定

対象サイトは福島第一原子力発電所とし、サイト周辺の気象を解析し、以下の条件となる気象条件を選定した。

- (1) OSCAAR²⁷⁾ の計算結果の 95%値に相当する気象シーケンス
- (2) OSCAAR の計算結果の 50%値に相当する気象シーケンス
- (3) 出現頻度が高い気象条件のうち、風が弱い季節のもの(おそらく夏)
- (4) 出現頻度が高い気象条件のうち、風が強い季節のもの(おそらく冬)

(1)及び(2)については、JAEA が所有する OSCAAR を使用して、Table 6-4 に示す条件の解析を行い、該当するシーケンスを抽出した。(3)及び(4)については、JAEA が所有する気象サンプリング支援システム ADV&MS による解析を Table 6-5 及び Table 6-6 に示す条件で実施し、その

サンプリング結果であるシーケンスファイルから、それぞれ以下の条件で絞り込み、選定した。

(3)に関する条件：

滞留時間の長い(=風が弱い)気象ビンに属する(BIN No.5, 8, 11)

内陸に向かう(風上方位番号 1(NNE)~8(S))

放出開始日時が夏に属する(6月、7月、8月のいずれか)シーケンスのうち、発生確率が最も高いシーケンス

(4)に関する条件：

滞留時間の短い(=風が強い)気象ビンに属する(BIN No.3, 6, 9)

内陸に向かう(風上方位番号 1(NNE)~8(S))

放出開始日時が冬に属する(12月、1月、2月のいずれか)シーケンスのうち、発生確率が最も高いシーケンス

これらの作業の結果、各項目に該当するシーケンスとして Table 6-7 に示すものを選定した。

Table 6-4 OSCAAR 解析条件

項目	設定値
対象核種	I-131
放出点緯度経度	北緯 37.4225、東経 141.03333
放出高さ	120 m
放出量	1.0E+10 Bq
放出継続時間	6 時間
線量	吸入による内部被ばく実効線量
評価地点	放出地点から 5.5km の地点
気象シーケンス	ADV&MS で作成した気象シーケンス(209 シーケンス)

Table 6-5 移流解析条件

項目	設定値
放出点緯度経度	北緯 37.4225、東経 141.03333
有効放出高さ	120 m
放出開始期間	2017 年 1 月 1 日 1 時~2017 年 12 月 31 日 24 時
ステップ間隔	15 分
移流範囲	100 km

Table 6-6 気象ビン設定

降水あり		
BIN No.	降水量	
1	5mm 未満	
2	5mm 以上	
降水なし		
BIN No.	大気安定度(6 分類)	滞留時間
3	不安定(A, B, C)	150 分未満
4		150 分以上 300 分未満
5		300 分以上
6	中立(D)	150 分未満
7		150 分以上 300 分未満
8		300 分以上
9	安定(E, F)	150 分未満
10		150 分以上 300 分未満
11		300 分以上

Table 6-7 選定された気象シーケンス

条件名	条件	放出開始日時(日本時間)
Case1	OSCAAR の計算結果の 95%値に相当する気象シーケンス	2017 年 7 月 26 日 1 時
Case2	OSCAAR の計算結果の 50%値に相当する気象シーケンス	2017 年 1 月 20 日 13 時
Case3	出現頻度が高い気象条件のうち、風が弱い季節のもの	2017 年 7 月 6 日 8 時
Case4	出現頻度が高い気象条件のうち、風が強い季節のもの	2017 年 2 月 17 日 10 時

6.5.2. ソースターム

ソースタームは新規規制基準を考慮して UNSCEAR (2013)²⁸⁾の福島事故ソースタームを基にして作成したソースターム 1 種類と、BWR で想定される様々な事故シナリオが発生した場合のソースタームが記載された JAERI-Research 2000-060²⁹⁾から 3 種類のソースタームを選定した。ソースタームの詳細については、以下の通りである。

(1) UNSCEAR(2013)を基にしたソースターム

UNSCEAR(2013)の福島事故ソースタームの各核種の総放出量 (Table 6-8) を Cs-137 が 100

TBq になるように規格化した。ただし、希ガスは規格化しない。放出継続時間は 6 時間とし、その期間内で一定放出するものとした。

(2) JAERI-Research 2000-060 のソースターム

JAERI-Research 2000-060 に記載されているソースタームから、以下の事故シーケンスを選択した。

- ・ 高圧系作動崩壊熱除去失敗ドライウェル破損 (TW-DWF)
- ・ 全交流電源喪失ドライウェル破損 (TB-DWF)
- ・ 全交流電源喪失格納容器ベント (TB-CV)

各シーケンスのインベントリは Table 6-9 に示す炉内インベントリに、Table 6-10 で示す主たる放出までの時間分の減衰を考慮し、同表の分類別放出割合を乗じたものとする。対象核種は、希ガスから 3 桁落ちまでの核種とする。以上の方法で決定した各シーケンスの核種放出量を Table 6-11～Table 6-14 に示す。

Table 6-8 UNSCEAR (2013) の全放出量

核種名	放出量(PBq)
Te-132	29
I-131	120
I-132	29
I-133	9.6
Xe-133	7300
Cs-134	9
Cs-136	1.8
Cs-137	8.8

Table 6-9 各シーケンスのソースターム

事故シーケンス		TW-DWF	TB-DWF	TB-CV
主たる放出までの時間(h)		42	31	14
放出継続時間(h)		25	11	24
放出高(m)		40	40	100
放出分類別の 全放出割合(-)	希ガス	9.7E-01	9.5E-01	9.3E-01
	有機ヨウ素	2.2E-03	1.7E-03	6.8E-05
	無機ヨウ素	4.2E-02	3.3E-02	1.3E-03
	Cs-Rb 類	5.5E-02	2.9E-02	1.2E-03
	Te-Sb 類	2.2E-02	6.4E-04	1.6E-04
	Sr-Ba 類	3.5E-04	3.1E-07	7.3E-08
	Ru 類	3.7E-06	2.7E-09	5.9E-10
	La 類	1.7E-06	1.2E-09	2.5E-10

Table 6-10 各シーケンスの炉内インベントリ

核種名	インベントリ (Bq)	核種名	インベントリ (Bq)
Co-58	2.80E+13	Te-131m	2.54E+17
Co-60	2.16E+14	Te-132	2.47E+18
Kr-85	1.87E+16	I-131	1.74E+18
Kr-85m	4.56E+17	I-132	2.51E+18
Kr-87	8.73E+17	I-133	3.55E+18
Kr-88	1.23E+18	I-134	3.89E+18
Rb-86	2.68E+15	I-135	3.32E+18
Sr-89	1.69E+18	Xe-133	3.56E+18
Sr-90	1.47E+17	Xe-135	1.01E+18
Sr-91	2.08E+18	Cs-134	2.36E+17
Y-90	1.52E+17	Cs-136	8.13E+16
Y-91	2.18E+18	Cs-137	2.01E+17
Zr-95	2.97E+18	Ba-140	3.05E+18
Zr-97	2.91E+18	La-140	3.13E+18
Nb-95	3.02E+18	Ce-141	2.94E+18
Mo-99	3.22E+18	Ce-143	2.68E+18
Tc-99m	2.82E+18	Ce-144	2.27E+18
Ru-103	2.71E+18	Pr-143	2.67E+18
Ru-105	1.83E+18	Nd-147	1.15E+18
Ru-106	9.31E+17	Np-239	3.63E+19
Rh-105	1.72E+18	Pu-238	3.28E+15
Sb-127	1.85E+17	Pu-239	7.48E+14
Sb-129	5.60E+17	Pu-240	1.05E+15
Te-127	1.84E+17	Pu-241	2.40E+17
Te-127m	2.47E+16	Am-241	2.43E+14
Te-129	5.52E+17	Cm-242	6.58E+16
Te-129m	8.30E+16	Cm-244	2.42E+15

Table 6-11 UNSCEAR (2013) に基づくソースターム

No.	核種名	総放出量(Bq)	放出率(Bq/h)
1	Te-132	3.30E+14	5.49E+13
2	I-131	1.36E+15	2.27E+14
3	I-132	3.30E+14	5.49E+13
4	I-133	1.09E+14	1.82E+13
5	Xe-133	7.30E+18	1.22E+18
6	Cs-134	1.02E+14	1.70E+13
7	Cs-136	2.05E+13	3.41E+12
8	Cs-137	1.00E+14	1.67E+13

Table 6-12 TW-DWF のソースターム

No.	核種名	放出量(Bq)	放出率(Bq/h)
1	Xe-133	2.74E+18	1.10E+17
2	I-131(無機)	6.28E+16	2.51E+15
3	Xe-135	4.05E+16	1.62E+15
4	Te-132	3.72E+16	1.49E+15
5	I-133(無機)	3.68E+16	1.47E+15
6	Kr-85	1.81E+16	7.25E+14
7	Cs-134	1.30E+16	5.18E+14
8	Cs-137	1.11E+16	4.42E+14
9	Cs-136	4.08E+15	1.63E+14
10	I-131(有機)	3.29E+15	1.32E+14
11	Sb-127	2.97E+15	1.19E+14

Table 6-13 TB-DWF のソースターム

No.	核種名	放出量(Bq)	放出率(Bq/h)
1	Xe-133	2.85E+18	2.59E+17
2	Xe-135	9.14E+16	8.31E+15
3	I-131(無機)	5.14E+16	4.67E+15
4	I-133(無機)	4.17E+16	3.79E+15
5	Kr-85	1.78E+16	1.61E+15
6	Cs-134	6.84E+15	6.21E+14
7	Cs-137	5.83E+15	5.30E+14
8	I-135(無機)	4.16E+15	3.78E+14
9	Kr-85m	3.58E+15	3.25E+14

Table 6-14 TB-CV のソースターム

No.	核種名	放出量(Bq)	放出率(Bq/h)
1	Xe-133	3.07E+18	1.28E+17
2	Xe-135	3.25E+17	1.35E+16
3	Kr-85m	4.86E+16	2.03E+15
4	Kr-88	3.75E+16	1.56E+15
5	Kr-85	1.74E+16	7.25E+14
6	I-133(無機)	2.89E+15	1.21E+14
7	I-131(無機)	2.15E+15	8.96E+13
8	I-135(無機)	9.85E+14	4.11E+13
9	Kr-87	3.94E+14	1.64E+13
10	Te-132	3.48E+14	1.45E+13

6.5.3. 大気拡散計算

RAMS/HYPACT²⁹⁾ を使用し、6.5.1 で選定した 4 種類の気象条件に対して、放射性物質の大気拡散シミュレーションを行った。RAMS 及び HYPACT の解析条件を Table 6-15 及び Table 6-16 に、解析領域を Fig. 6-10 に示す。

Table 6-15 RAMS の解析条件

項目	内容		出典
中心座標	Grid1	緯度：37.4 (deg)、経度：140.3 (deg)	
	Grid2	緯度：37.4 (deg)、経度：140.6 (deg)	
水平方向格子	Grid1	東西 188km×南北 200km、2km メッシュ	
	Grid2	東西 99km×南北 99km、500m メッシュ	
鉛直方向格子	Grid1	上空 20km までを 30 分割	
	Grid2	上空 20km までを 36 分割	
計算期間(JST)	Case1	2017/7/24 9:00～7/27 9:00	
	Case2	2017/1/19 9:00～1/21 9:00	
	Case3	2017/7/4 9:00～7/7 9:00	
	Case4	2017/2/16 9:00～2/18 9:00	
気象データ	MSM 等気圧面データ		気象庁
地形データ	50 m メッシュ数値地図		国土地理院
土地利用データ	RAMS 標準データ		USGS
海面温度データ	福島県沿岸における当該期間の平均海面温度(K) Case1 : 295.15 Case2 : 287.15 Case3 : 295.15 Case4 : 284.15		気象庁

Table 6-16 HYPACT の解析条件

項目	内容		出典
計算格子	RAMS の計算格子に準拠		
放出点	福島第一原子力発電所 北緯：37.421389 [deg] 東経：141.033611 [deg]		
ソースターム	UNSCEAR 2013 (Table 6-11) TW-DWF (Table 6-12) TB-DWF (Table 6-13) TB-CV (Table 6-14)		
放出率	総放出量を放出継続時間の間、一定の割合で放出。		
放出高さ	UNSCEAR 2013	120m	
	TW-DWF	40m	
	TB-DWF	40m	
	TB-CV	100m	
放出継続時間	UNSCEAR 2013	6 時間	
	TW-DWF	25 時間	
	TB-DWF	11 時間	
	TB-CV	24 時間	
放出開始日時	Case1	2017/7/26 1:00	
	Case2	2017/1/20 13:00	
	Case3	2017/7/6 8:00	
	Case4	2017/2/17 10:00	
降水量データ	解析雨量		気象庁
乾性沈着速度	有機ヨウ素	$5.0 \times 10^{-4} \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	
	粒子状物質	$1.0 \times 10^{-3} \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	
	希ガス	0.0	
ウォッシュアウト係数	ウォッシュアウト係数 $\lambda \text{ (s}^{-1}\text{)}$ を降水量 $I \text{ (mm h}^{-1}\text{)}$ の関数として、 $\lambda = A \times I/B$ により計算する。		
	有機ヨウ素	$A = 1.0 \times 10^{-6}, B = 0.8$	
	粒子状物質	$A = 1.0 \times 10^{-4}, B = 0.8$	
	希ガス	$A = 0.0, B = 0.0$	

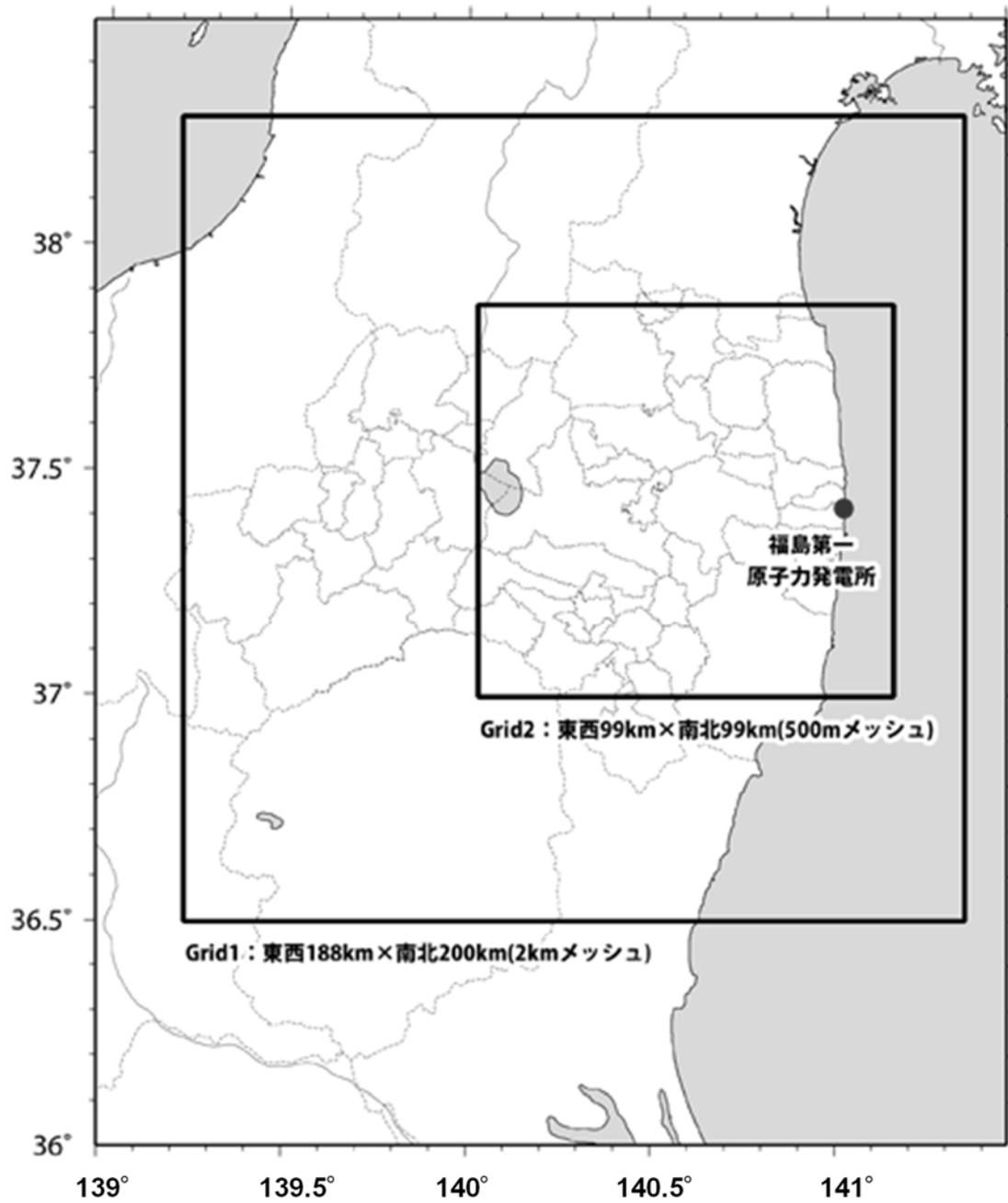


Fig. 6-10 RAMS の解析領域

6.5.4. 計算結果例

放射性核種濃度分布の計算結果例として、UNSCEAR 2013 を基にしたソースタームのうち、Te-132 についての大気中放射能濃度分布及び地表面分布計算結果 (Fig. 6-11~Fig. 6-18) を以下に示す。

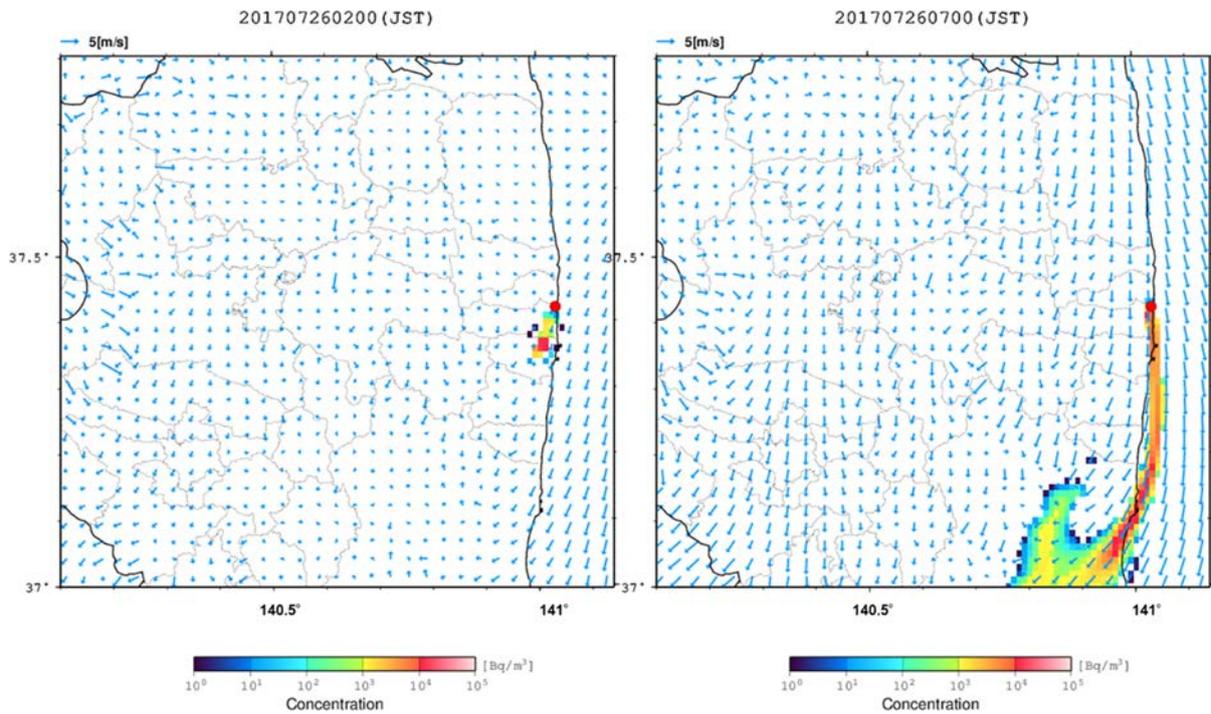


Fig. 6-11 Case1 の地表大気中放射能濃度分布

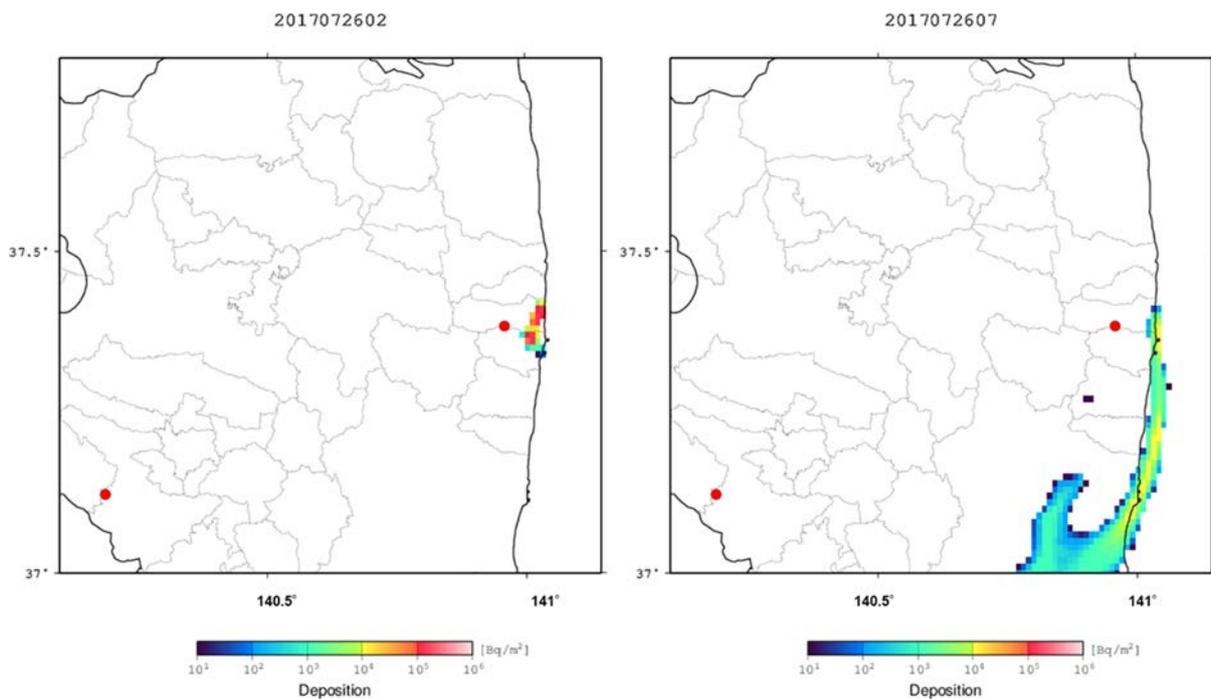


Fig. 6-12 Case1 の地表面沈着量分布

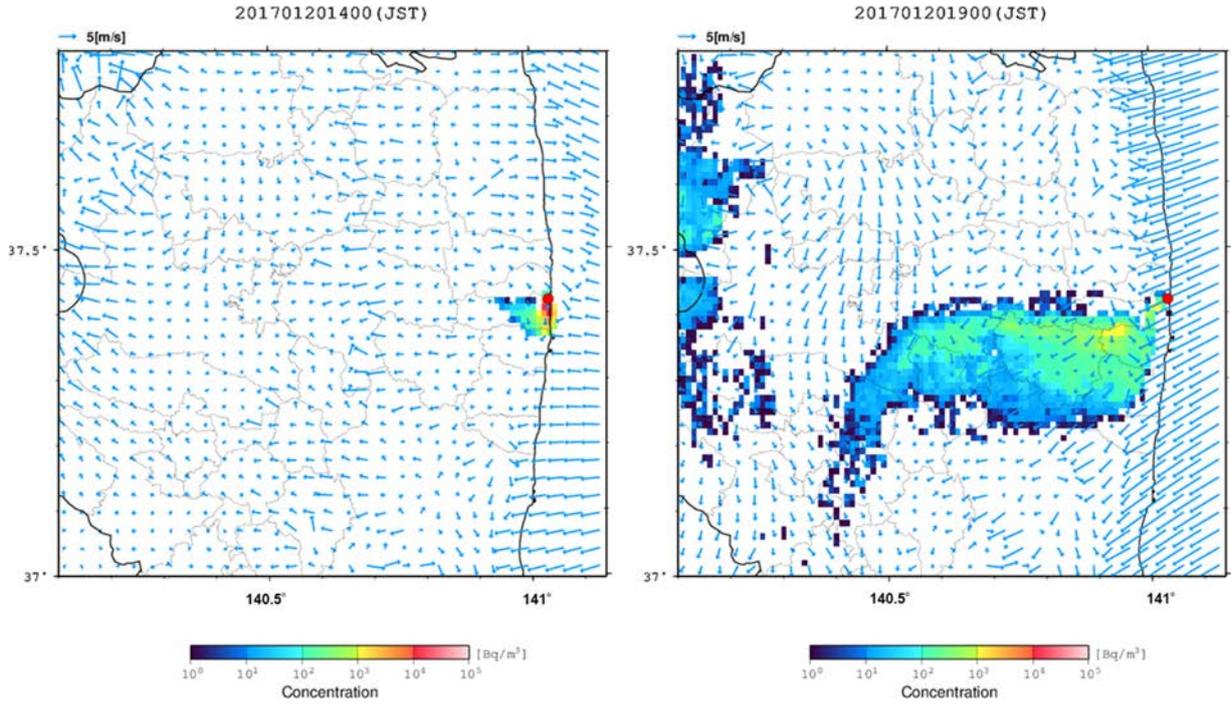


Fig. 6-13 Case2 の地表大気中放射能濃度分布

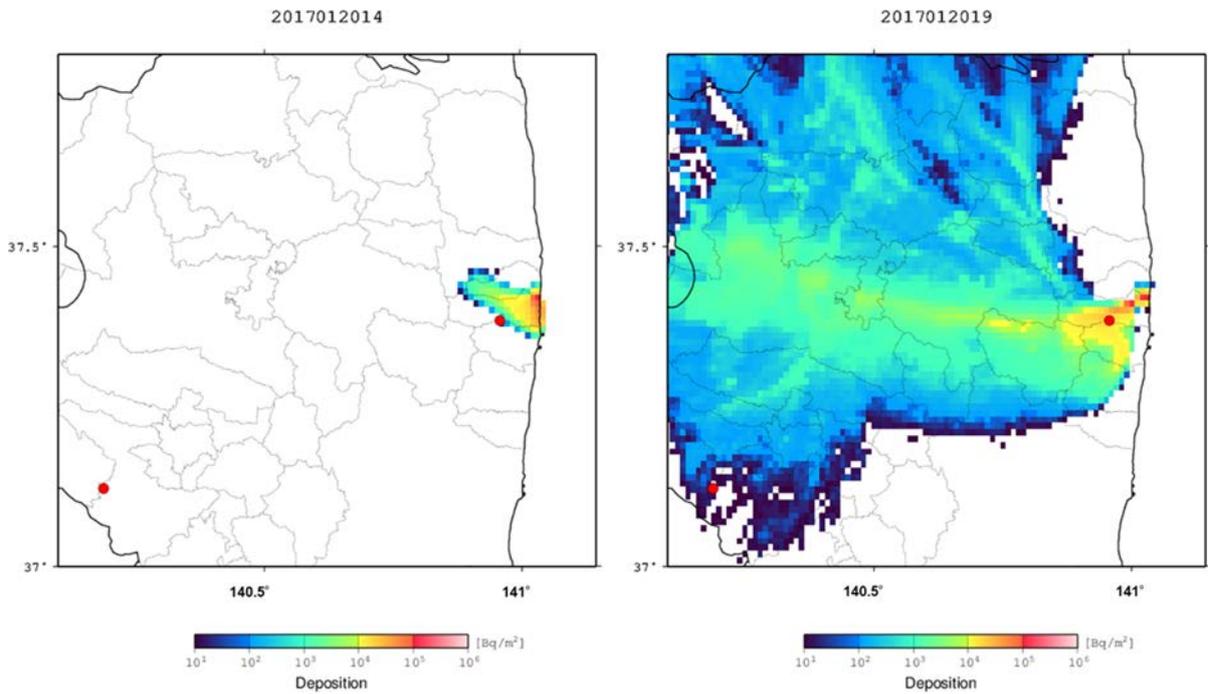


Fig. 6-14 Case2 の地表面沈着量分布

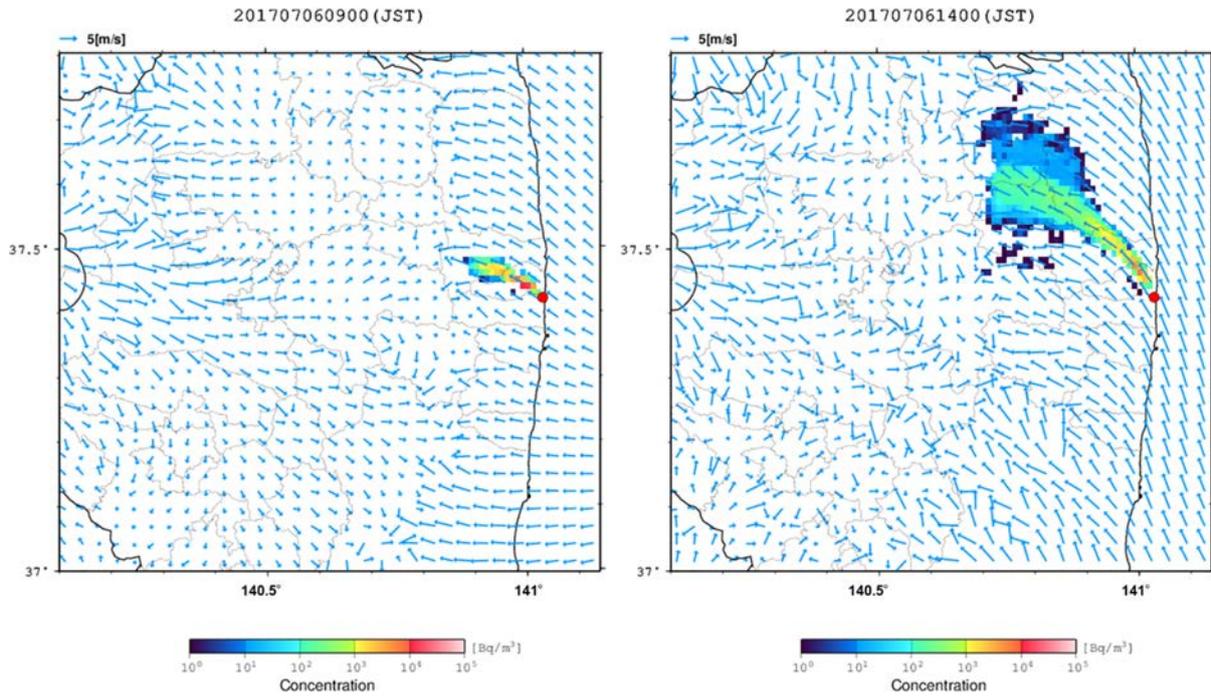


Fig. 6-15 Case3 の地表大気中放射能濃度分布

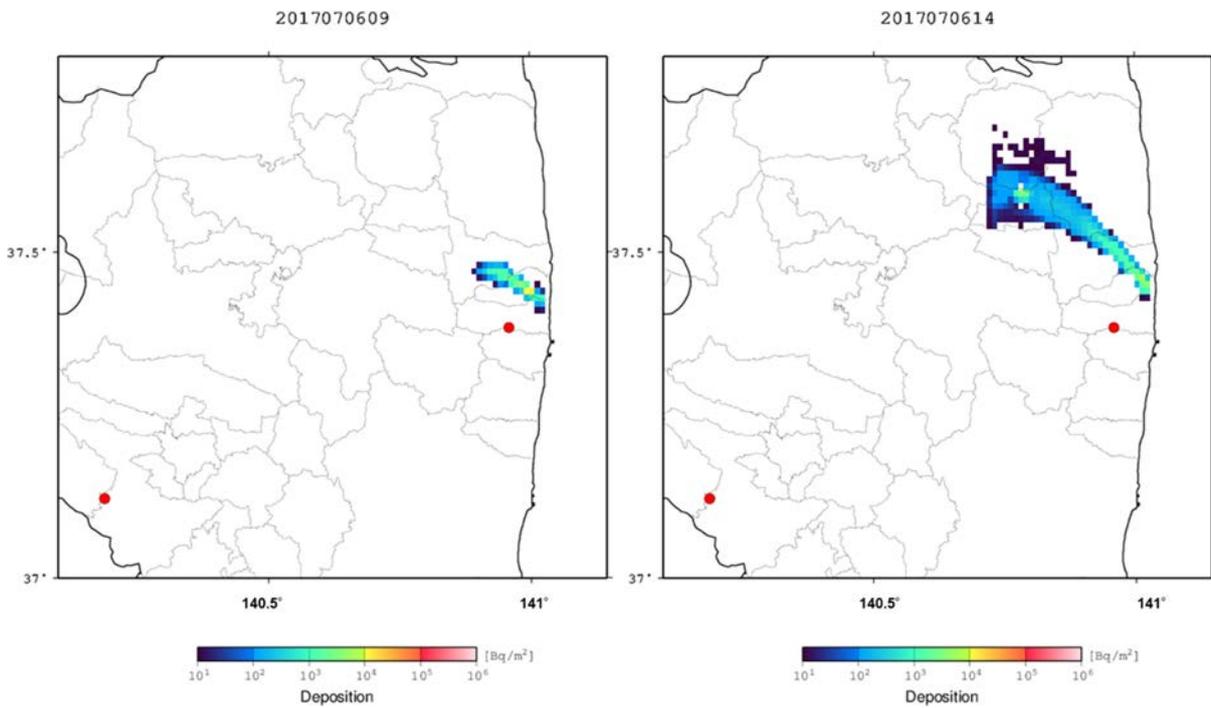


Fig. 6-16 Case3 の地表面沈着量分布

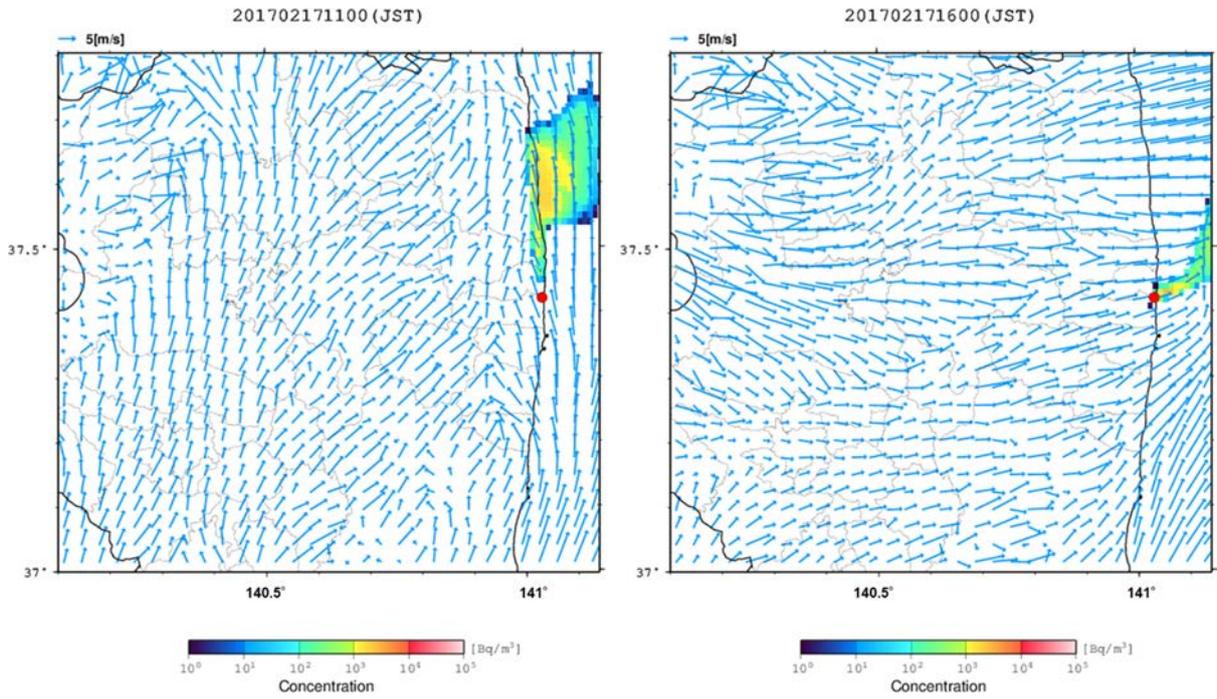


Fig. 6-17 Case4 の地表大気中放射能濃度分布

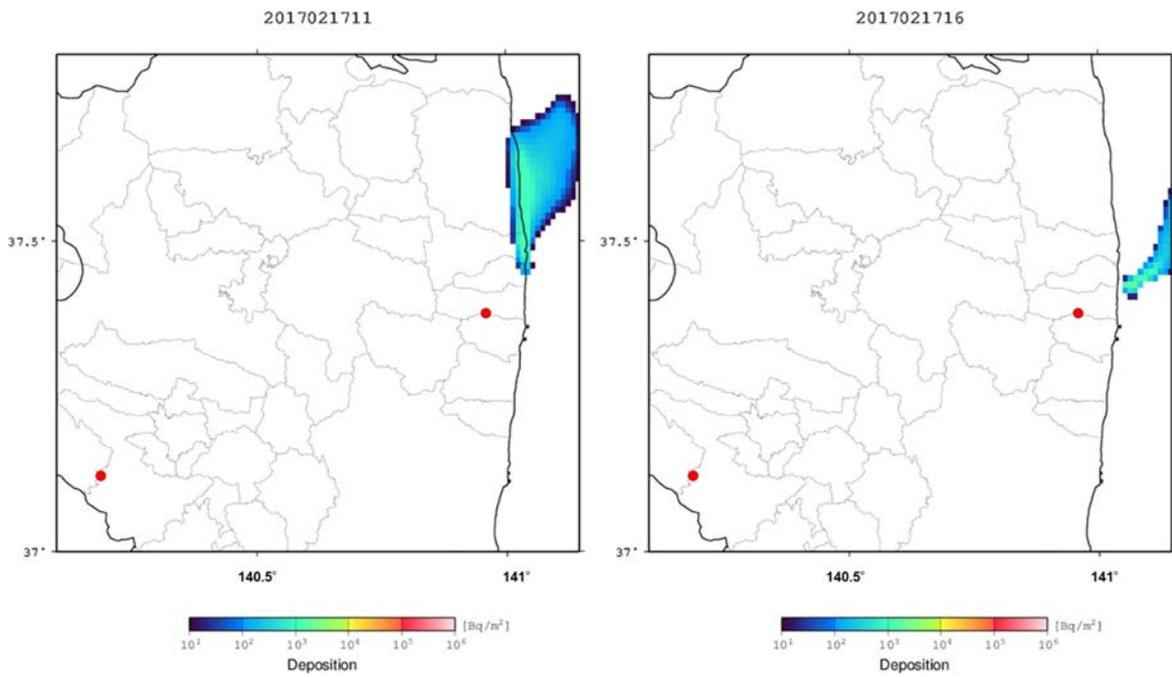


Fig. 6-18 Case4 の地表面沈着量分布

6.6. GUI 制御と動作試験

本システムの制御は全て GUI 上で行える。実際に、フライトプラン作成及び可視化を本システム上で行う動作試験を実施した。試験条件を Table 6-17 に示す。GUI 上での各設定項目を Fig. 6-19～Fig. 6-23 に示す。システムを立ち上げると、Fig. 6-20 のような GUI 画面が Fig. 6-19 に示される。画面上部から、事故シナリオ、プルーム予測モデル、飛行経路最適化、飛行経路情報、UFOMS の設定、可視化に関する設定の順に項目が配置されている。事故シナリオは事前に事故シナリオファイルとして、設定項目を保存することができる。実際の運用では、サイトごとに想定されるソースタームを保存しておくべきと考える。中断はプルーム予測モデル、飛行経路最適化、飛行経路情報、UFOMS の設定のタブが配置されており、タブをクリックすることで設定画面を選択できる。プルーム予測モデルタブでは、飛行経路生成に用いるプルーム予測計算に関する設定を行う。予測モデルは、現状、ガウスパフモデルのみとなっているが、将来的に新しい予測モデルの開発を見込んで、選択できるようにしている。さらに、核種の崩壊定数や沈着パラメータも設定できるが、事故シナリオの設定における放出核種の選択によって、ライブラリに格納されている該当核種の定数が入力されるようになっている。飛行経路最適化タブでは、飛行経路最適化を行うタイミングと使用する最適化アルゴリズムを設定することができる。飛行経路情報タブでは、無人飛行機の飛行に関する設定が行える。巡航速度、巡航高度、最大飛行時間、基地局からの距離上限は頻繁に変動しないと考え、ライブラリよりデフォルト値が入力されるようになっている。また、離陸経路及び着陸経路の設定では、経路の緯度、経度、高度を入力する。UFOMS の設定タブでは、UFOMS 代替プログラムの設定を行う。濃度を計算する核種の選択では、測定値として、UFOMS 代替プログラム用に整備された放射能濃度データから、選択された核種の濃度を取得、出力する。下段の可視化情報の選択では、可視化する情報を選択できる。本試験によって計算された各情報を可視化した画像を Fig. 6-23～Fig. 6-28 に示す。Fig. 6-23 はパフ中心位置とその拡がりを円で現している。Fig. 6-24 と Fig. 6-25 は、それぞれ、放射性プルームの大気中放射能濃度と沈着量の分布を表している。Fig. 6-26 は離陸前に計算した飛行経路を図示している。Fig. 6-27 は飛行中に飛行経路最適化アルゴリズムによって更新された飛行経路を初期飛行経路にオーバーラップさせて図示している。Fig. 6-28 は無人飛行機によって測定された結果と実際の飛行経路を図示している。時間が進むにつれて、飛行経路が長くなっているのがわかる。

Table 6-17 試験条件

項目	条件
ソースターム	UNSCEAR2013Cs-137 100TBq 規格化
サイト	福島第一原子力発電所
放出開始日時	2017/01/20 13:00
飛行開始日時	2017/01/20 13:30

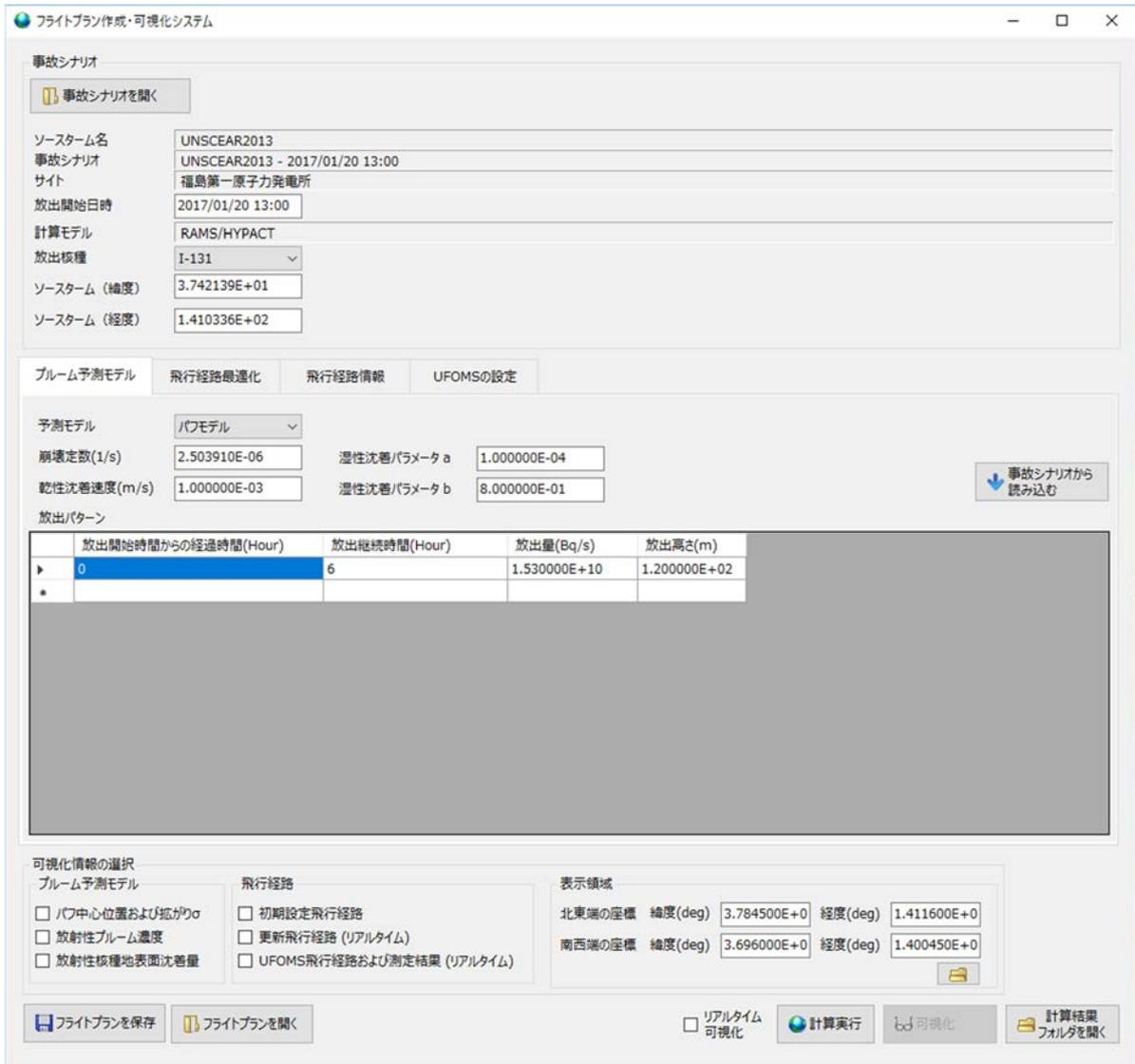


Fig. 6-19 GUI の表示画面 (1)

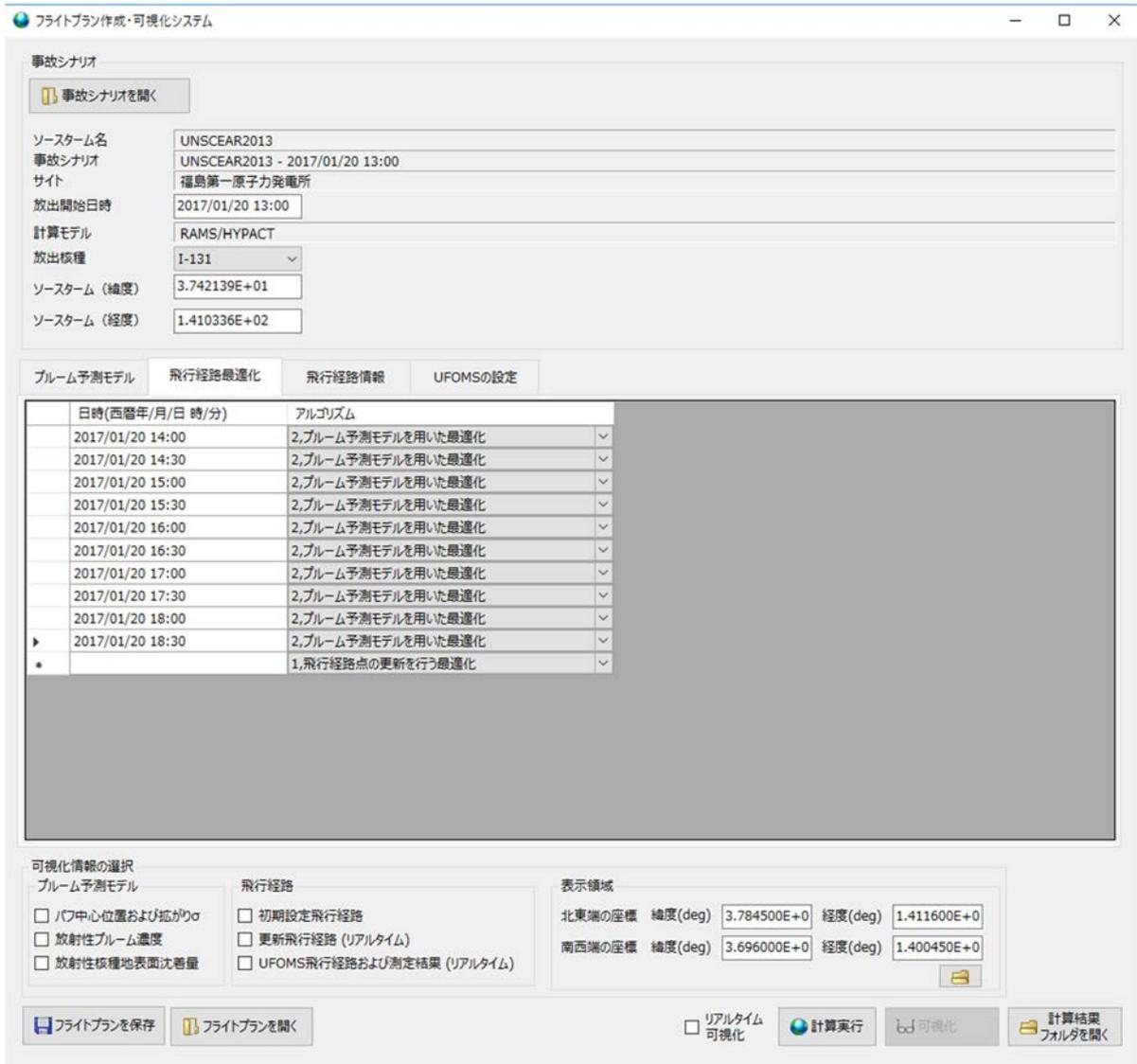


Fig. 6-20 GUI の表示画面 (2)

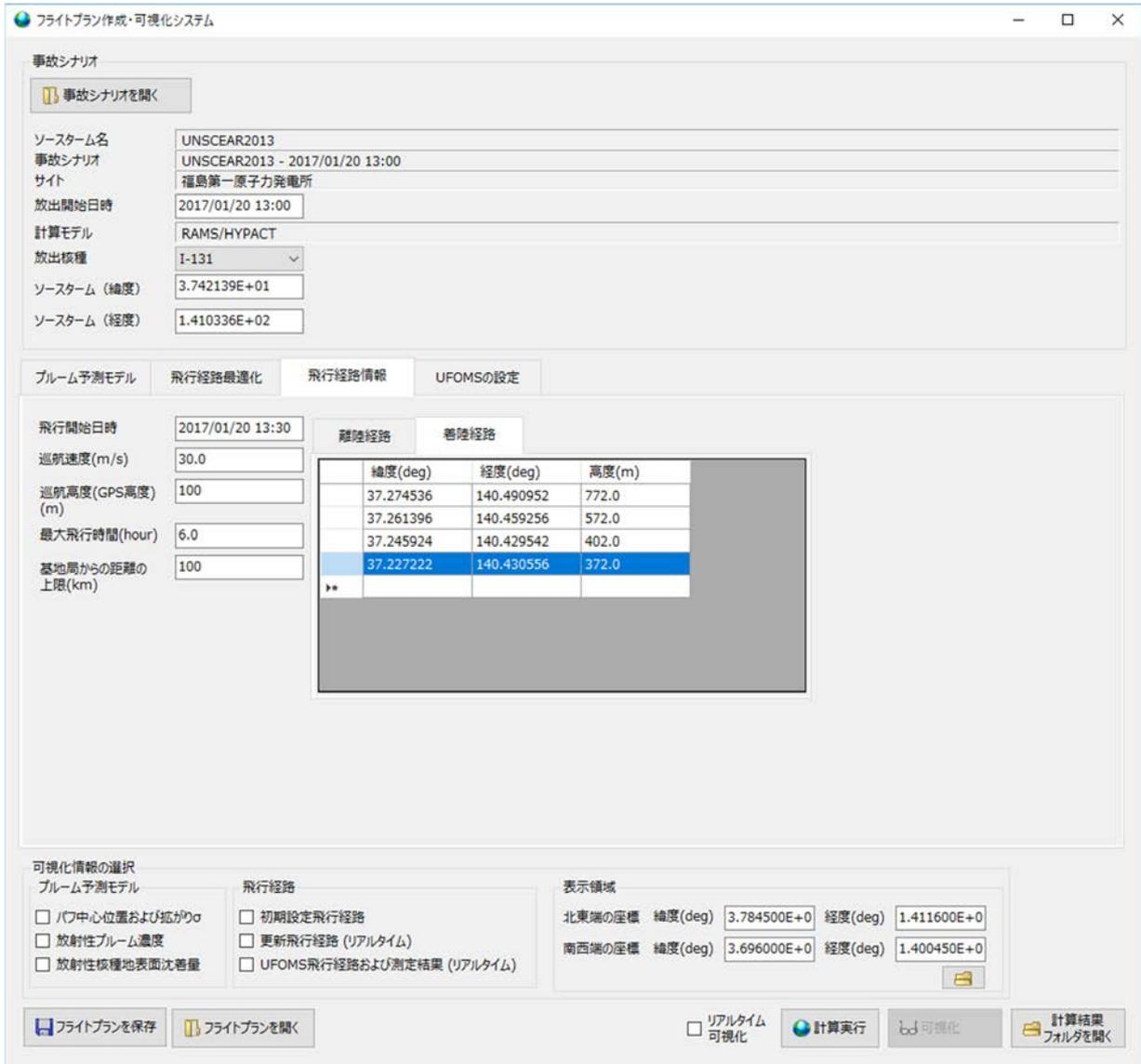


Fig. 6-21 GUI の表示画面 (3)

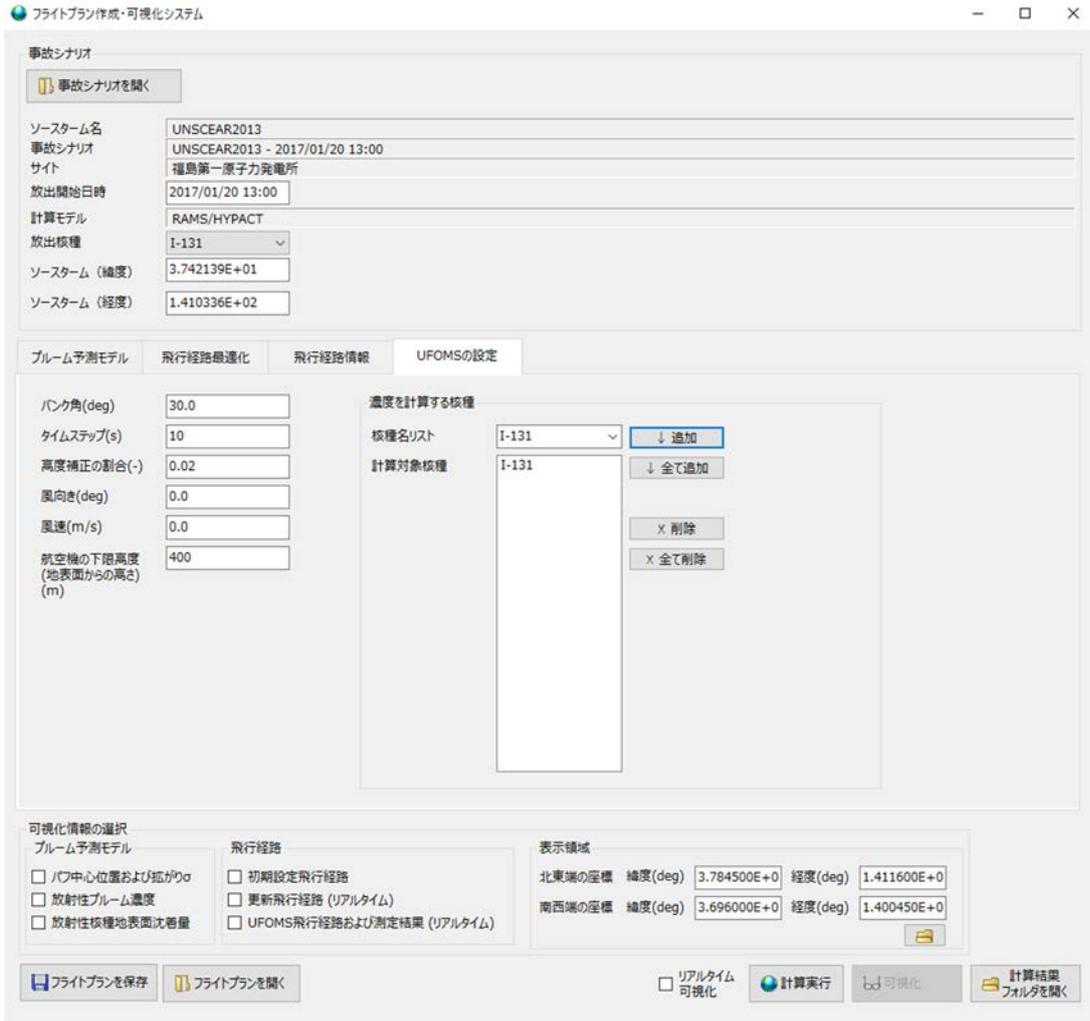


Fig. 6-22 GUI の表示画面 (4)

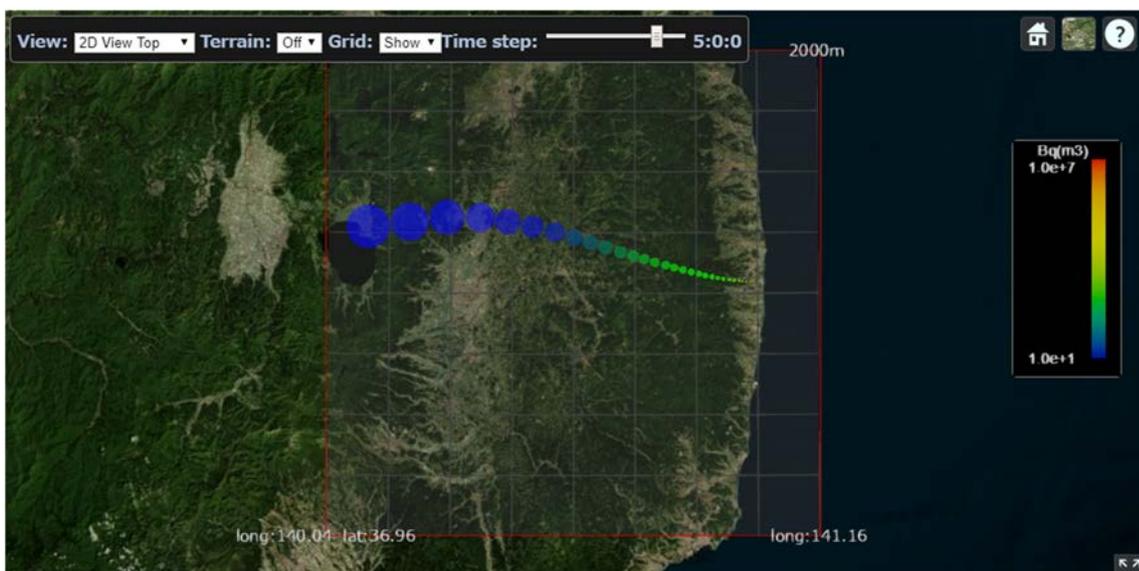


Fig. 6-23 パフ中心位置および拡がりσ
(背景地図: 地理院地図_電子国土 web)

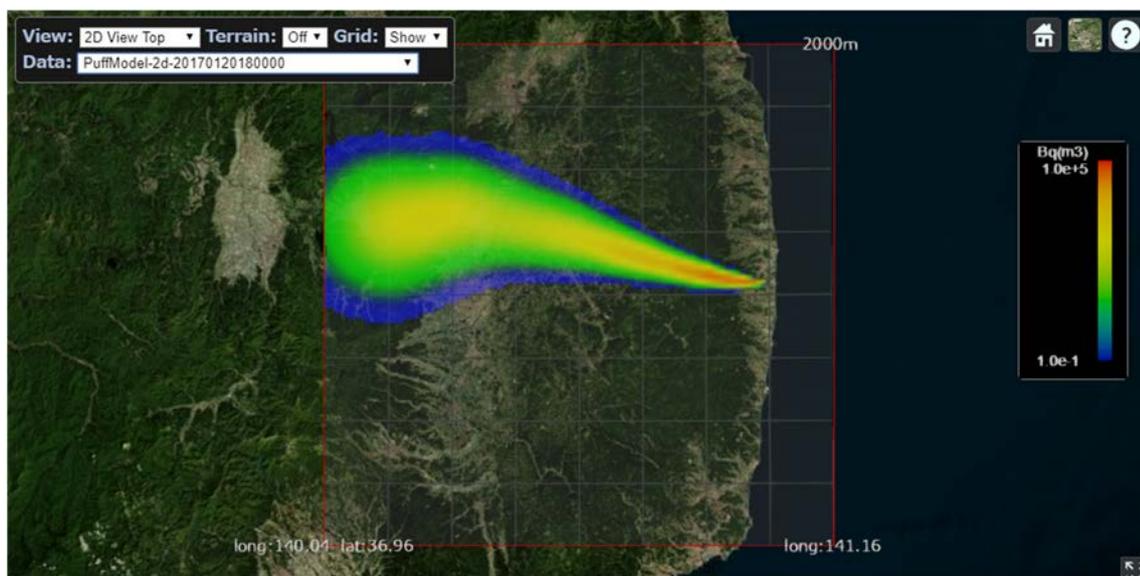


Fig. 6-24 放射性プルーム濃度
 (背景地図: 地理院地図_電子国土 web)

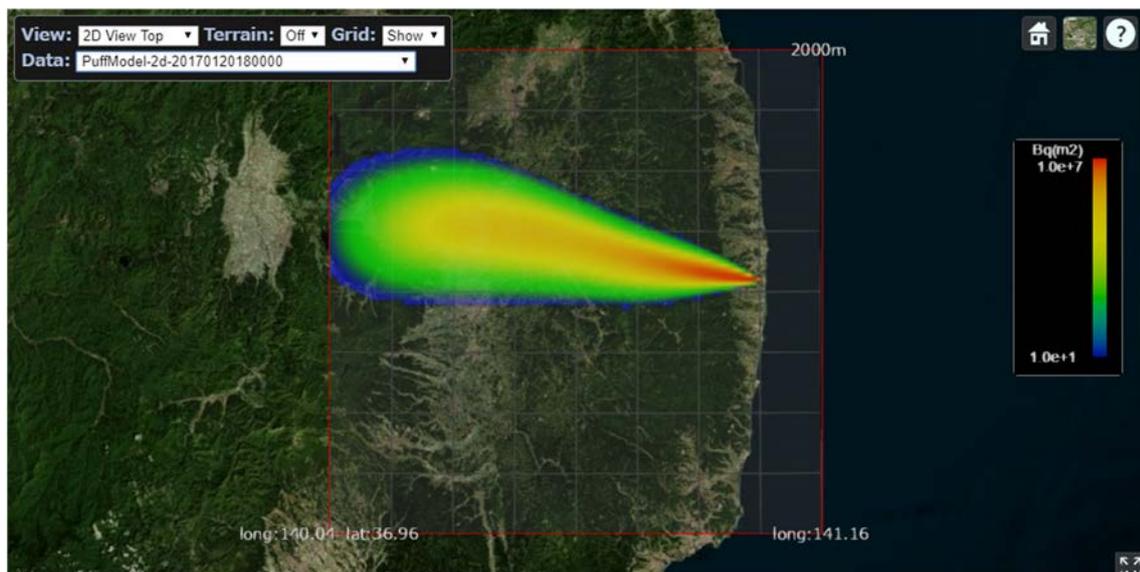


Fig. 6-25 放射性核種地表面沈着量
 (背景地図: 地理院地図_電子国土 web)

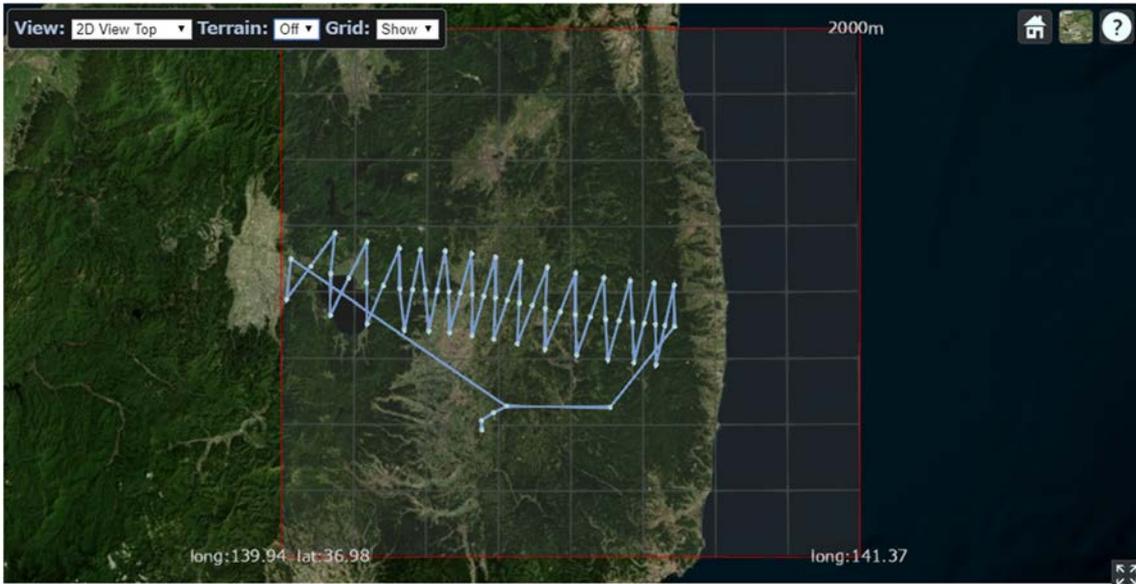


Fig. 6-26 初期飛行経路
(背景地図: 地理院地図_電子国土 web)

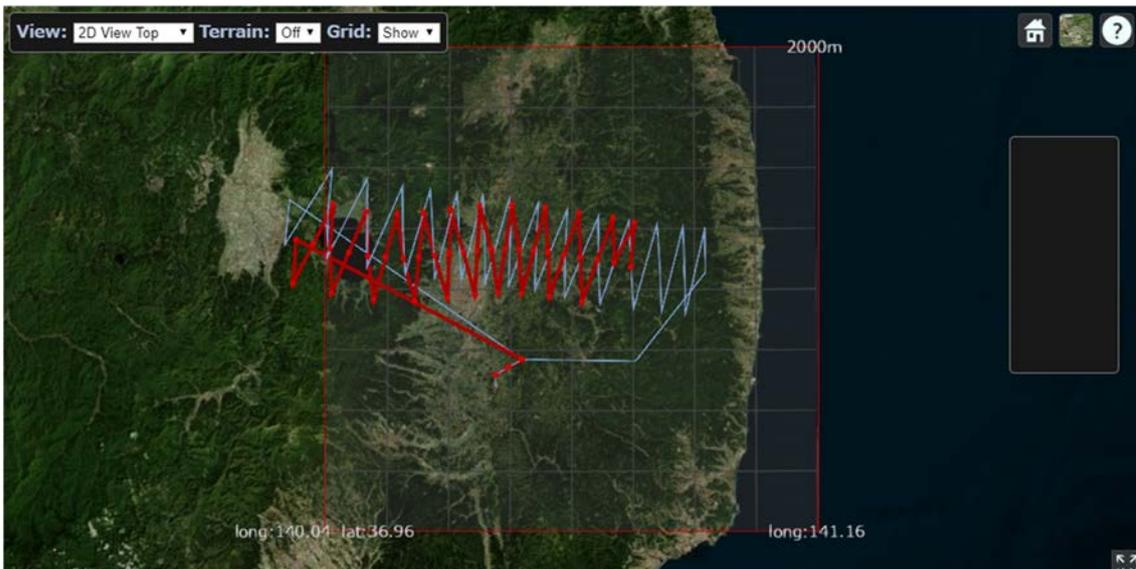


Fig. 6-27 更新飛行経路 (リアルタイムモード)
青線は初期飛行経路、赤線は更新飛行経路を示す。
(背景地図: 地理院地図_電子国土 web)

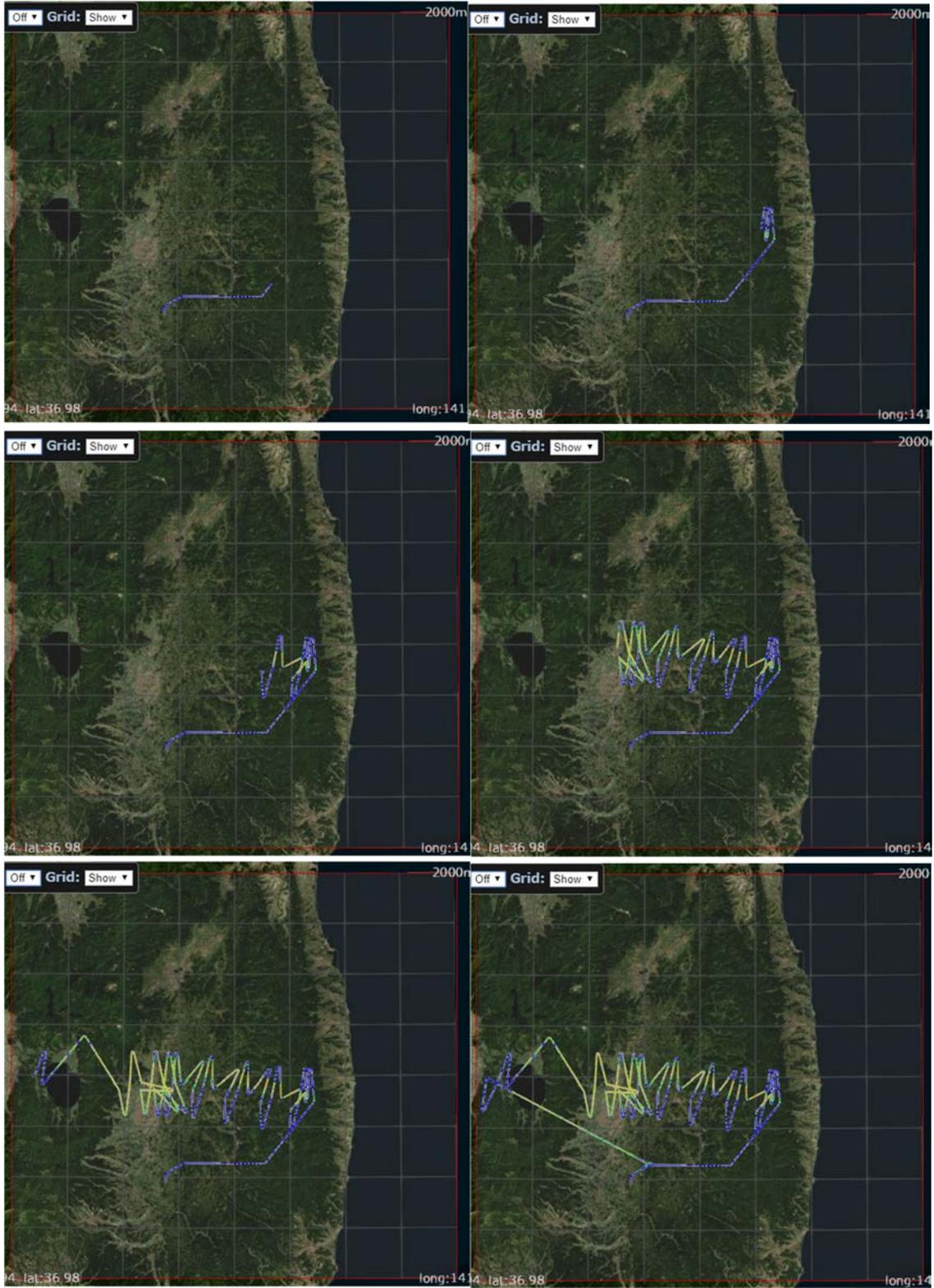


Fig. 6-28 UFOMS 飛行経路および測定結果 (リアルタイム)

(背景地図: 地理院地図_電子国土 web)

6.7. まとめ

無人飛行機による放射性プルーム測定用フライトプラン作成・可視化システムを作成した。本システムには放射性プルーム測定に必要な機能を整備し、その機能について、動作試験を通して確認した。

現状のシステムは無人飛行機や測定システムの代わりに、模擬的な出力システムであるUFOMS 代替システムからの出力を表示しており、今後は無人飛行機や測定システム等の実機とのリンクを行う予定である。本システムは設計の際に、実機とのリンクが少ない改修で行えるように設計されているため、入出力フォーマット等の調整を始めとする小規模改修によって、実機とのリンクが可能であると考えられる。さらに、測定精度の向上のための飛行経路作成及び飛行経路最適化アルゴリズムの開発、計算速度を向上させるための工夫、無人飛行機 UFOMS 以外の無人ヘリコプター等の他の飛行体への搭載、インターネットが使用できず、GPV データが使用できない場合の対応等についても想定・検討する必要がある。今後の課題としては以下の項目が挙げられる。

- ・ システムは無人飛行機や測定システム等の実機とのリンク
- ・ 飛行経路作成及び飛行経路最適化アルゴリズムの開発
- ・ 計算の高速化
- ・ 無人ヘリコプター等の無人飛行機以外の飛行体への搭載
- ・ インターネットが使用できず、GPV データが受信できない場合の対応

7. まとめと今後の予定

3か年で計画している無人機を用いたプルームの測定技術の開発を行った。3年目となる2018年度は、2017年度実施したプ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、検出器の製作、制御ソフトウェアの構築及びフライトプランのソフトウェア化を行った。

検出器開発では、過去2年の成果を集約し、同時計測のリスト測定を実現した。完成したシステムを用いて福島県沖の海上試験からグラウンドシャインとサブマージョンの弁別測定が可能であることを確認した。

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プ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。得られた情報を元にソフトウェア化し、GUIによって簡便な操作を実現した。本3か年の事業により、事故時におけるプルームの測定を可能とする基礎技術を構築できた。今後、さらなる最適化及び具体的な無人機とのマッチングが期待される。

謝辞

本研究調査は、「平成30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。検出器の試験については、日本放射線エンジニアリング株式会社の山田勉氏に多大の寄与をいただきました。無人ヘリの運航では、応用地質株式会社の皆さんに協力いただきました。ここに謹んで御礼申し上げます。

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, *Atmo. Chem. Phys.*, Vol. 15, No. 2, 2015, pp. 1029-1070.
- 2) 平山英夫ほか, LaBr_3 シンチレーション検出器の波高分布測定値と egs5 によるプルーム中放射性核種の検出器応答を用いたプルーム中放射性核種濃度の推定, *日本原子力学会和文論文誌*, Vol. 12, No. 4, 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. Dosim.*, Vol. 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, 129p.
- 5) Sanada, Y., and Torii, T., Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter, *J. Environ. Radioact.*, Vol. 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.*, Vol. 45, No.1, 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ー福島県浪江町における放射線モニタリング飛行ー, 計測自動制御学会論文集, Vol. 51, No. 4, 2015, pp. 215-225.
 - 8) UARMS 開発チーム, 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.*, No. 727, 2014, pp. 30-34.
 - 9) 眞田幸尚ほか, 福島第一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 Demonstration of Simple Preview Altitude Control Algorithm for Unmanned Airplane, *J. Aircr.*, Vol. 54, No. 4, 2017, pp. 1-9.
 - 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*, Vol. 50, No. 4, 2001, pp. 117-122.
 - 12) Sinclair, L.E. et al., Aerial measurement of radioxenon concentration off the west coast of Vancouver island following the Fukushima reactor accident, *J. Environ. Radioact.*, Vol. 102, No. 11, 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) 石崎梓ほか, 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, 58p.
 - 15) 眞田幸尚ほか, 平成 29 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 2018-009*, 2019, 48p.
 - 16) UAV factory, Penguin C UAS, <https://www.uavfactory.com/product/74> (2020 年 3 月閲覧).
 - 17) AeroViroment, PUMA 3AE, https://www.avinc.com/uas/small_uas/puma (2020 年 3 月閲覧).
 - 18) 三浦龍ら, 大規模災害で孤立した地域を上空からつなぐ!ー小型無人飛行機を活用した無線中継システムー, *NICT news 2013. 5*, pp. 1-5, <https://www.nict.go.jp/publication/NICT-News/1305/01.html> (2019 年 3 月閲覧).
 - 19) ヤマハ発動機株式会社, 大容量 32L の薬剤搭載を実現“攻めの農業”に応える産業用無人ヘリ「FAZER R」を発売 10 月 12 日~15 日の「2016 年国際航空宇宙展」に出展, http://global.yamaha-motor.com/jp/news/2016/1011/fazer_r.html (2020 年 3 月閲覧).
 - 20) 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. Instrum. Methods. Phys. Res. A.*, Vol. 675, 2012, pp. 78-83.
 - 21) Nicolini, R. et al., Investigation of the properties of a 1” x 1” LaBr₃:Ce scintillator, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, Vol. 582, No.2, 2007, pp. 554-561.
 - 22) Henning, W. et al., Design of a phoswich well detector for radioxenon monitoring, 28th

- Seismic Research Review, 2006, pp. 801-810.
- 23) Hirouchi, J. et al., Development and application of a method for discriminating the influence of radon progenies in air from aerial radiation monitoring data, Appl. Radiat. Isot., Vol. 141, 2018, pp. 122-129.
 - 24) 東京電力株式会社, 福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大気中への放出量の推定について, 平成 24 年 5 月,
https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120524j0105.pdf (2020 年 3 月閲覧).
 - 25) 気象庁, 全球モデル, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-5.html> (2020 年 3 月閲覧).
 - 26) 日本原子力学会, 発電所の確率的リスク評価に関する実施基準 (レベル 3PRA 編): 2018, AESJ-SC-P010: 2018, 2018.
 - 27) Homma, T. et al., Uncertainty and Sensitivity Studies with the Probabilistic Accident Consequence Assessment Code OSCAAR, Nucl. Eng. Technol., 37, 2005, pp. 245-258.
 - 28) UNSCEAR, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Vol. 1: Report to the General Assembly Scientific Annex A, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2013 report to the General Assembly with scientific annexes, New York: United Nations. 2013.
 - 29) 本間俊充ほか, 軽水炉モデルプラントの広範な事故シナリオに対する環境影響評価, JAERI-Research 2000-060, 2000, 80p.
 - 30) 田村淳二ほか, 長期野外拡散試験データを用いた大気拡散モデルの妥当性評価, JAEA-Research 2008-103, 2009, 94p.

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号 rad 及び sr が用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号 sr を単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) については CIPM 勧告 2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SI に属さないが、SI と併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SI に属さないが、SI と併用される単位で、SI 単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SI に属さないが、SI と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI 単位との数値的關係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応關係を示すものである。

表 10. SI に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

