

平成 28 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 29 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 28 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	3
3. 無人飛行機 (UARMS)	6
4. 検出器の開発	8
4.1 概要	8
4.2 基本方針	8
4.3 シミュレーションによる弁別測定性能評価手法	10
4.3.1 検出器の構造	10
4.3.2 線源分布	11
4.3.3 大気中の放射性物質による検出器への沈着	12
4.3.4 放射性物質の沈着量	14
4.3.5 検出器のレスポンス計算条件	14
4.4 シミュレーション結果	15
4.5 試作機の開発	18
4.5.1 試作機の構成	18
4.5.2 LaBr の自己汚染による同時計測	20
4.5.3 ラドンチャンバにおける同時計数率測定試験	22
5. 放射性プルームの予測計算手法の検討	26
5.1 はじめに	26
5.2 大気拡散シミュレーション	27
5.2.1 放射性プルーム大気拡散予測モデル	27
5.2.2 気象データ	28
5.2.3 比較検討	35
5.2.4 放射性プルーム拡散予測プログラムの仕様	40
5.3 フライトプラン作成アルゴリズムの試作	42
5.3.1 大気拡散予測計算を基にしたフライトプラン作成アルゴリズム	42
5.3.2 放射性プルーム探索アルゴリズムの検討	45
5.3.3 関数の最小化アルゴリズム	46
5.3.4 探索範囲を制限した最大濃度位置探索アルゴリズム	48
5.4 フライトプラン作成アルゴリズムの試作	49
6. まとめと今後の予定	52
参考文献	52

Table list

Table 3-1 UARMS の主な諸元	7
Table 4-1 シミュレーションで使用了した ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{131}I の推定沈着速度	13
Table 4-2 検出器や地表面への放射性物質の沈着量	14
Table 4-3 計算概要	15
Table 4-4 線源核種と飛距離	15
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	16
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	16
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	17
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	17
Table 4-11 コインシデンス計数率と全計数率の比率	17
Table 4-12 各配置パターンによる同時計数率	22
Table 4-13 ラドン濃度と同時計数率	25
Table 5-1 大気安定度に対する P の値	29
Table 5-2 MSM データの仕様	31
Table 5-3 LFM データの仕様	31
Table 5-4 ターナーの安定度階級	32
Table 5-5 風速と実効日射インデックスに対する安定度分類	32
Table 5-6 太陽高度に対する実効日射インデックス	32
Table 5-7 パスキル安定度階級分類（日中）	35
Table 5-8 パスキル安定度階級分類（夜間）	35
Table 5-9 検討に用いたモデルのケース	35
Table 5-10 放射性プルーム拡散計算条件	36
Table 5-11 拡散パラメータ式の係数	41

Figure list

Fig. 2-1 主な無人機の性能比較	5
Fig. 3-1 UARMS の構成	7
Fig. 4-1 空中で測定する場合の放射線の放出源イメージ	9
Fig. 4-2 検出器の基本構成と同時計測イメージ	9
Fig. 4-3 検出器の概観	10
Fig. 4-4 β 線のエネルギーと透過率の関係	10
Fig. 4-5 線源のジオメトリ	11
Fig. 4-6 大気安定度 D におけるパスキル・ギフォード図	12
Fig. 4-7 乱流場における粒子の沈着速度の計算例 ²⁾	13
Fig. 4-8 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. 4-9 試作した検出器の構成	19
Fig. 4-10 試作した検出器の外観	19
Fig. 4-11 試作した検出器の γ 線スペクトル	20
Fig. 4-12 検出器の配置パターン	21
Fig. 4-13 ウラン系列と主な γ 線エネルギー	23
Fig. 4-14 ラドンチャンバ内の試作機の配置	23
Fig. 4-15 チャンバ内のラドン濃度の変化と測定のタイミング	24
Fig. 4-16 ラドン子孫核種測定時の γ 線スペクトル (ラドン濃度 4.5 kBq m^{-3})	24
Fig. 5-1 フライトプラン作成アルゴリズムの概要	26
Fig. 5-2 GPV データによる大気安定度の比較	33
Fig. 5-3 放出開始時刻(2017/2/28 15:00(JST))の風速場の比較	37
Fig. 5-4 放出開始時刻(2017/2/28 15:00(JST))の風速場の比較	38
Fig. 5-5 各モデルによる時間積算濃度分布計算結果の比較	39
Fig. 5-6 地表空気中濃度と風速ベクトルの可視化結果	42
Fig. 5-7 フライトの流れ	44
Fig. 5-8 フライトプラン作成フロー	44
Fig. 5-9 蛇行飛行の概要	45
Fig. 5-10 放射性プルームの水平方向探索手順	48
Fig. 5-11 最遠プルーム境界濃度点を求める手順	49
Fig. 5-12 放射性プルーム描画例	50
Fig. 5-13 水平方向濃度分布	50
Fig. 5-14 プルーム濃度のコンター画像	51
Fig. 5-15 放射性プルーム拡散予測結果と測定結果の同視点表示結果	51
Fig. 6-1 プルーム測定事業の計画	52

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いる。大気拡散モデルを用いて再現計算を行った例は多くの機関で実施されている。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LaBr3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)}。本研究例では、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 100 km) 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や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およ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、ガンマ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、より高精度な測定を実現を目指す。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。

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。UAMRS 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 Pengu B は UAMRS 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¹⁴⁾。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いらないこと等メリットは多い¹⁵⁾。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¹⁶⁾。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¹⁷⁾。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 の外観及び遠隔操縦用のコントロール PC の画面を示す。

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、上空から図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。

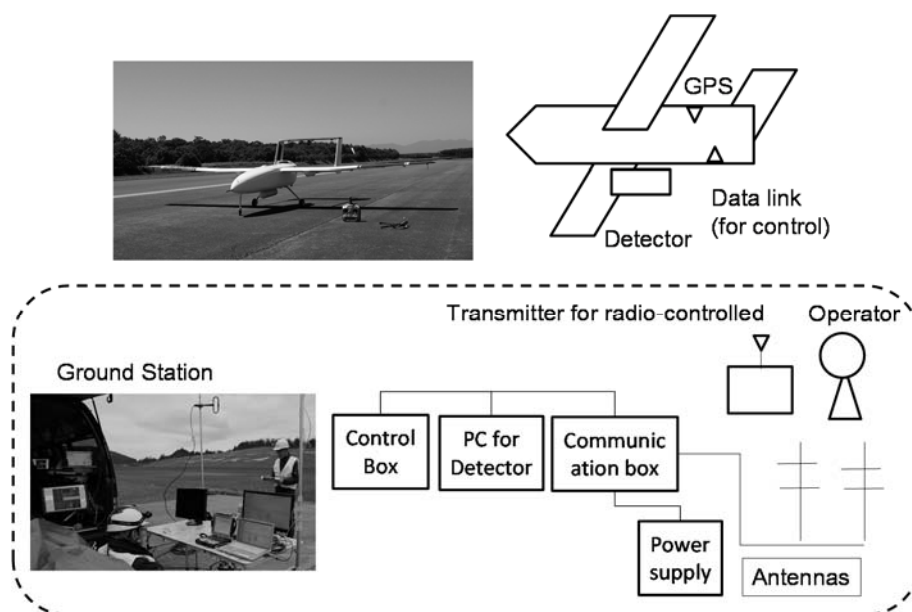


Fig. 3-1 UARMS の構成

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. 検出器の開発

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爆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爆リスクの軽減が期待でき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性格に評価ができない懸念があった。今回、それぞれ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。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、弁別能力を検証した。

4.2 基本方針

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の沈着に分かれ、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、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と γ 線のエネルギー分解能のよい LaBr₃ 検出器 (LaBr₃) 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 シンチレーション検出器 (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。

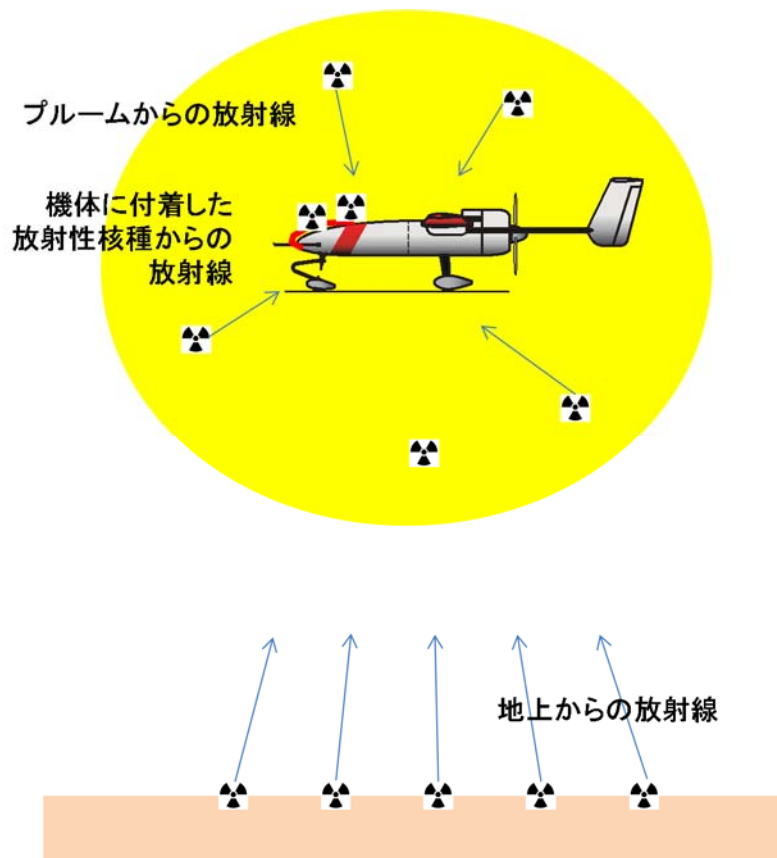
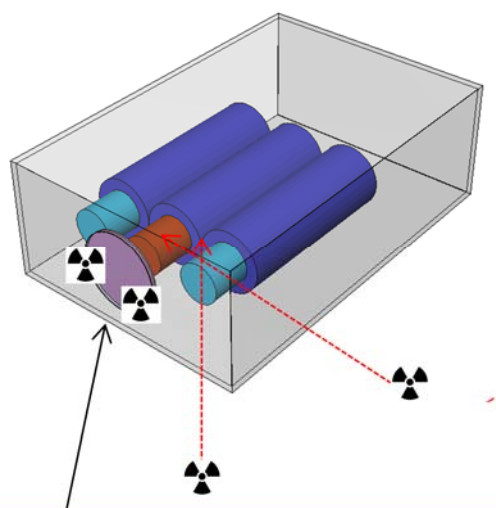


Fig. 4-1 空中で測定する場合の放射線の放出源イメージ

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 シミュレーションによる弁別測定性能評価手法

4.3.1 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¹⁸⁾。一部、計算には PHITS を用いた¹⁹⁾。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. 4-3 に示す。なお、 β 線は Fig. 4-4 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。

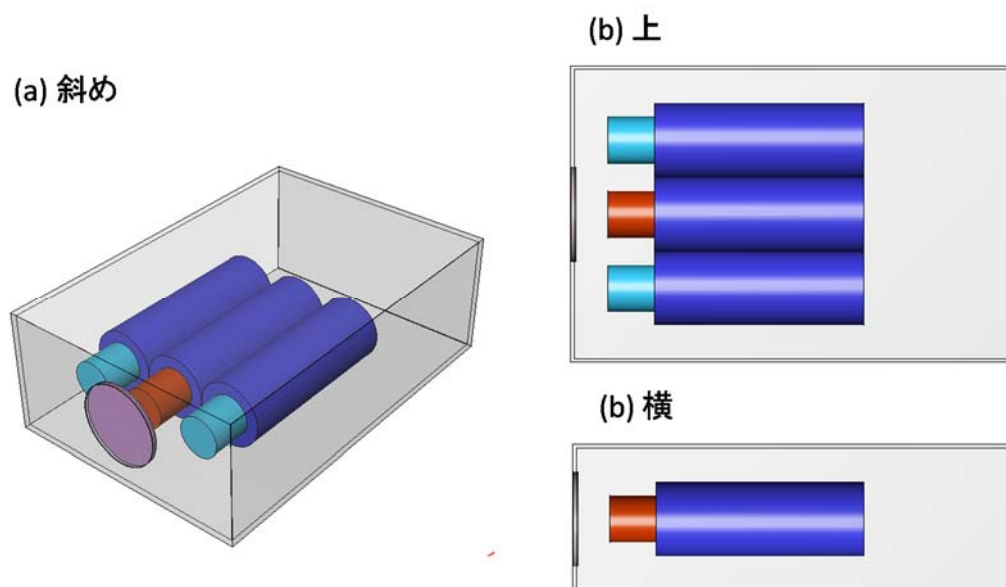


Fig. 4-3 検出器の概観

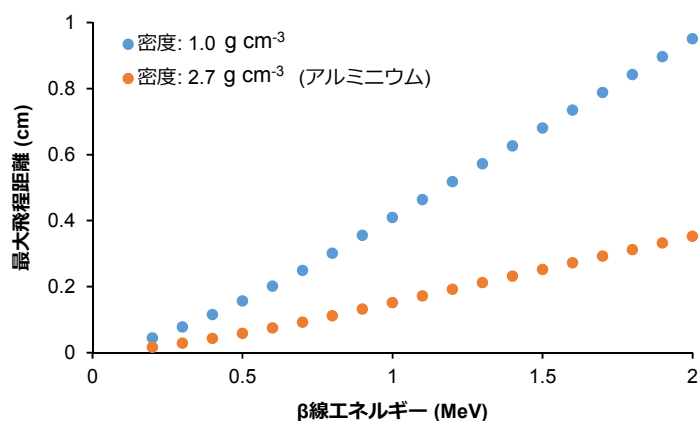


Fig. 4-4 β 線のエネルギーと透過率の関係

4.3.2 線源分布

模擬した線源のジオメトリについて Fig. 4-5 に示す。空中のプルームはサブマージョン線源(直径 200 m の球内に均一の線源分布)を模擬した。地表面における線源は、無限平板の形状で表面沈着(土壌深さ方向への沈着状況を表す重量緩衝深度 $[\beta]$: 0 g cm^{-2})とした。検出器に付着し放射性物質は検出器の外壁に均一分布とした。線源核種は、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs および ^{131}I を対象とした。なお、プルームの性状は必ずしもサブマージョンではなく様々な形状が想定される。ここでは、検出器のレスポンス計算のためのシミュレーションであるため、必ずしも実際のプルームの大きさを模擬する必要はないが、直径 200 m という数値が移流拡散上どのような数値なのかを言及しておく。一般的に、放出源から大気中に放出された汚染物質はガウス分布に則った濃度分布を形成するといわれており、プルームの大きさは風下への距離に比例する。風下距離とプルームの大きさの関係を表すパスキル・ギフォード図の例について Fig. 4-6 に示す。本図は、大気安定度の平均的な数値である D として計算している。図からみると、プルーム直径 200 m は拡散幅 100 m に相当するため、鉛直方向の風下距離は 6,000m 地点及び水平方向は風下距離 1,500m 地点程度となる。

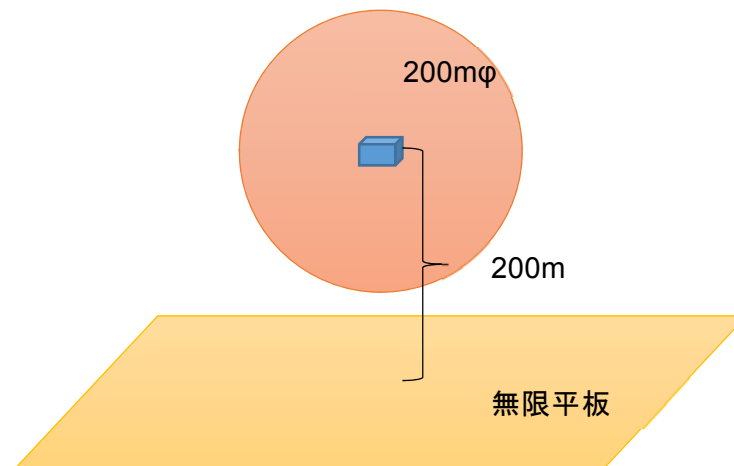


Fig. 4-5 線源のジオメトリ

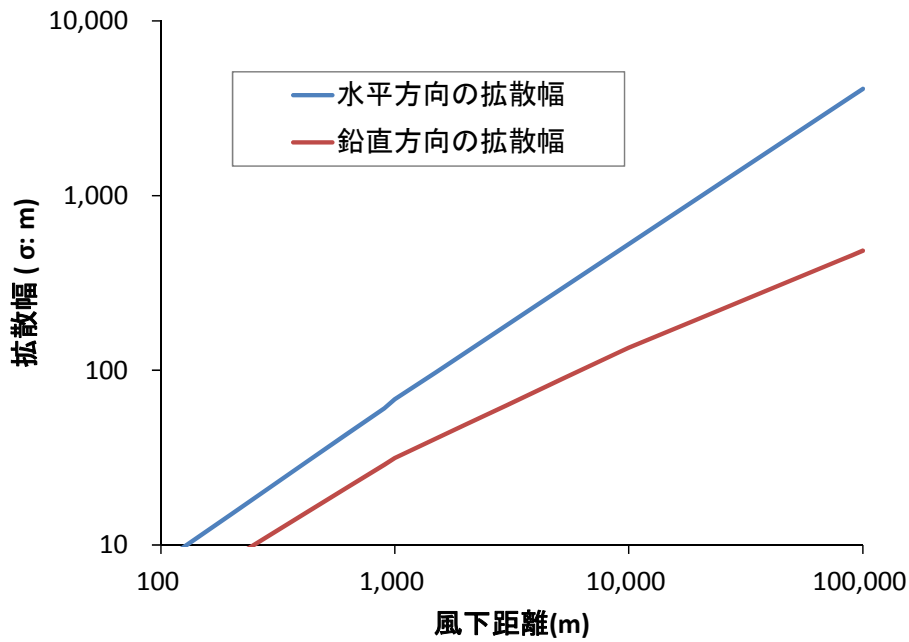


Fig. 4-6 大気安定度 D におけるパスキル・ギフォード図

4.3.3 大気中の放射性物質による検出器への沈着

大気中のエアロゾルが検出器へ沈着する程度は、検出器周辺の大気中の放射能濃度 (Bq m^{-3}) の積算値と沈着速度 V_d (m s^{-1}) から検出器に沈着した濃度 ($\text{Bq m}^{-2} \text{s}$) を計算することができる。沈着速度 V_d は静止場等のさまざまな場でその算出方法が定義され、本研究は無人航空機で飛行中の沈着を検討することから、乱流場における沈着速度の以下の式[1]を用いた²¹⁾。

$$V_d(\theta) = \frac{V_t \cos(\theta)}{\exp \left\{ \frac{V_t \cos(\theta)}{\left(\frac{m}{\pi} \right) \sin \frac{\pi}{m} \sqrt{K_e D^{m-1}}} \right\} - 1} \quad [1]$$

ここで、 $V_d(\theta)$ は、重力の向きと沈着面の法線がなす角度が θ であるような壁面に沈着する沈着速度であり、例えば鉛直下向きの面では $\theta = 0$ 、上向きの面では $\theta = \pi$ である。タービン翼やプロペラ翼で乱流混合されている垂直円筒容器内での粒子の沈着では、式[1]中の K_e 、 m の値がそれぞれ $K_e \approx 7.5(2\varepsilon_0/15V)^{0.5}$ 、 $m \approx 2.7$ で与えられることが実験から見出されており、粒子沈着に及ぼす乱流の効果を乱流消費エネルギー（媒質単位質量あたり乱流によって消費されるエネルギー） ε_0 の形で評価できることになる²²⁾。さらに、一様な電界や温度勾配中に存在する粒子のように、粒子が場所に関わらず一定の力を受ける場合には、外力による粒子の英道速度を式[1]中の $V_t \cos(\theta)$ に加えればよい。この式から粒径との関係 Fig. 4-7 となる。

このように沈着速度は粒径により影響されることから、福島第一原子力発電所事故で放出された ^{137}Cs 、 ^{134}Cs および ^{131}I の粒径を過去の文献から調査した。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 $1.0 \mu\text{m}$ 、 ^{131}I は $0.7 \mu\text{m}$ だと報告している²³⁾。放射性セシウムは環境中に粒子状で存在するが、 ^{131}I は粒

子状と気体状で存在しており、高濃度時に 5-8 割が粒子状との報告があるため²⁴⁾、気体状の¹³¹I の影響は今後検討する必要がある。ここでは、粒子状の¹³¹I のみを考慮する。沈着速度は、粒径以外に乱流消散エネルギーにも依存する。乱流消散エネルギーは乱流による抵抗によって消費されるエネルギーで粒子の密度、気体速度および検出器に帯電した静電気によっても沈着速度が変化すると考えられる。このように、実際の沈着速度を推定することは難しいが、代表的な数値として、Fig. 4-7 に示した図から $\varepsilon = 90.7$ と仮定し、Table 4-1 に示した数値をシミュレーションに使用した。

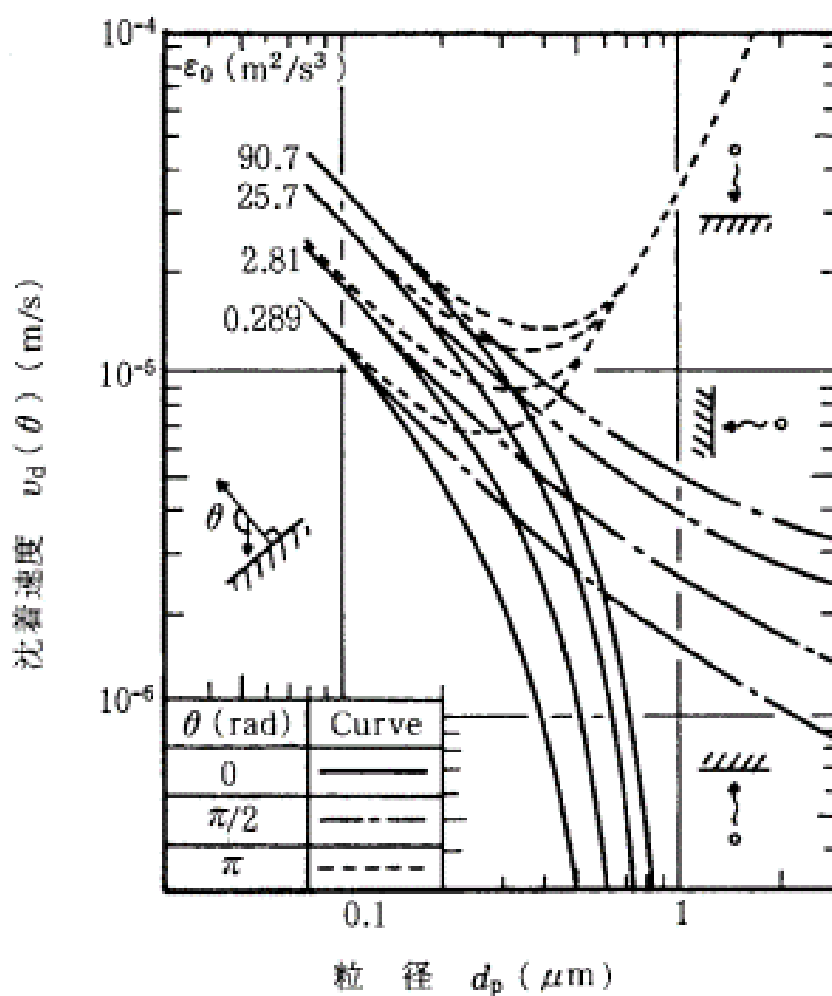


Fig. 4-7 乱流場における粒子の沈着速度の計算例²¹⁾

Table 4-1 シミュレーションで使した¹³⁴Cs、¹³⁷Cs、¹³¹I の推定沈着速度

	¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs	¹³¹ I
$\theta = \pi$	4 E-4	2 E-4
$\theta = \pi/2$	5 E-5	7 E-5
$\theta = 0$	0	1 E-6

4.3.4 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放射性物質の移流拡散シミュレーションアルゴリズムの一種である (WSPEEDI) で用いられている数値²⁵⁾を参考にし、放射性セシウムと¹³¹Iの乾性沈着速度をそれぞれ $3.0 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ とした。地面への放射性物質の沈着量はプルーム濃度と沈着速度と沈着時間の積算で求められる。ここでは事故初期を想定し、検出器の沈着時間は 30 分及び地上への沈着時間は 60 分とした。Table 4-2 にシミュレーションで使用した沈着量の数値を示す。

Table 4-2 検出器や地表面への放射性物質の沈着量

	空中	検出器	地上
沈着時間(分)	-	30	60
飛行機の移動速度 (m s^{-1})	-	30	-
放射能濃度 ($\text{Bq m}^{-2} \text{ or } \text{m}^{-3}$)	1	ヨウ素 : 2.7×10^{-1} セシウム : 9.2×10^{-1}	ヨウ素 : 9.9×10^0 セシウム : 3.3×10^0

4.3.5 検出器のレスポンス計算条件

今回の計算体系において空中や地上由来の放射線が検出器へ入射する確率がとても低いことから、検出器の応答計算に時間が必要になる。そこで計算効率を上げるために線源から検出器周辺へ入射したフルエンスをはじめに求め、そのスペクトルを線源として検出器周辺から照射する手法を用いた。計算内容を Table 4-3 に示す。

空中に分布した放射性核種が放出する β 線 (5 番) は、最大飛程距離から遠方は検出器に届かず計算の無駄となるため、線源の半径を Table 4-4 に示す最大飛程距離とした。ただ、照射した電子により励起される光子は検出器に到達することから別途 100 m の球で計算して応答を求めた (3 番、4 番)。

地上由来の γ 線は空中や検出器由来と異なり等方から検出器に照射されないと考えられる。そこで飛来方向や γ 線エネルギー等を保持したダンプデータを作成し (8 番)、それを線源として検出器へ照射した (9 番)。

Table 4-3 計算概要

(9 番の計算については PHITS を利用)

核種	サブマージョン			検出器		地上
	ガンマ線源	ベータ線源 光子	電子	ガンマ線源	ベータ線源	ガンマ線源
1回目	線源 半径100mの球内 To 検出器周辺	半径100mの球内 To 検出器周辺	球内 飛程距離	検出器ボックス	検出器ボックス	地表面半径1km To 検出器周辺
	番号 1	3	5	6	7	8
2回目	線源 球表面2.5m	球表面2.5m	-	-	-	球表面2.5m ダンプ
	番号 2	4				9

Table 4-4 線源核種と飛距離

核種	最大電子 エネルギー (MeV)	飛程 (g cm ⁻²)	空中の飛距離 (cm)	線源体積 (m ³)
¹³¹ I	0.61	0.20	158	16.4
¹³⁴ Cs	0.66	0.23	177	23.1
¹³⁷ Cs	1.18	0.50	390	248.7

4.4 シミュレーション結果

シミュレーションを用いて空中、機体への自己汚染 (検出器)、地表面に 3 種類の放射性物質が分布した際の検出器の同時計数率を計算した。放射性核種、検出素子や線源分布ごとに計算した全エネルギーの計数率の一覧を Table 4-5 に、そして線源分布ごとの割合を Table 4-6 に示す。すべての検出素子で空中由来の放射線の割合が 96 %以上となり、プルームの中を測定するときは検出された計数を空中由来とみな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。

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、空中由来を除いた検出器と地表面由来の全計数率の比率を求めた。Table 4-9 に示す LaBr と NaI の合計計数率は地上由来の比率が高いのに対し、PS は異なる傾向を示し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 β 線を検出しているためである。また、Table 4-10 に示す光電ピークの計数率の比率を見ると、検出器由来が高くなった。このようにこれらの比率を利用することで、検出器由来を弁別できると期待できる。最後に同時計数率の計数率と LaBr と NaI の合計計数率の比率を Table 4-11 まとめた。このように、地上からの放射線の同時計数率は、比較的低い。この地上からの同時計数率をもたらし状況を理解するために、地上由来からの放射線の検出器への入射方向をシミュレーションした。シミュレーションには、検出器を中心として 40 分割したエリアへの放射線の計数率を求めた。シミュレーション結果を検出器に入射した計数率を 1 とした比率として Fig. 4-8 に示す。このように、横方向から飛来する割合が低いため、同時計数率が低くなることが分かった。

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

cps Bq ⁻¹ m ³ 全計数	Cs134			Cs137			I-131		
	PS	LaBr+Nal	同時計数率	PS	LaBr+Nal	同時計数率	PS	LaBr+Nal	同時計数率
空中	8.7E-03	4.4E-01	5.7E-03	3.4E-03	1.7E-01	2.2E-03	4.7E-03	2.5E-01	2.3E-03
検出器	9.5E-05	1.9E-03	4.6E-05	7.1E-05	7.7E-04	1.8E-05	4.1E-05	6.8E-04	1.1E-05
地上	1.3E-04	8.3E-03	5.5E-05	6.1E-05	3.1E-03	1.7E-05	1.7E-04	9.2E-03	4.0E-05
合計	8.9E-03	4.5E-01	5.8E-03	3.5E-03	1.7E-01	2.2E-03	4.9E-03	2.6E-01	2.3E-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

	Cs134			Cs137			I-131		
	PS	LaBr+Nal	同時計数率	PS	LaBr+Nal	同時計数率	PS	LaBr+Nal	同時計数率
空中	97%	98%	98%	96%	98%	98%	96%	96%	98%
検出器	1%	0%	1%	2%	0%	1%	1%	0%	0%
地上	1%	2%	1%	2%	2%	1%	3%	4%	2%

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

cps Bq ⁻¹ m ³	LaBr+Nal	LaBr+Nal	LaBr+Nal
空中	1.0E-02	1.2E-02	2.5E-02
検出器	1.5E-04	1.7E-04	2.3E-04
地上	1.6E-05	2.4E-05	1.6E-04
合計	1.0E-02	1.3E-02	2.5E-02

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

	LaBr+Nal	LaBr+Nal	LaBr+Nal
空中	98%	98%	98%
検出器	1%	1%	1%
地上	0%	0%	1%

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+Nal	同時計数率	PS	LaBr+Nal	同時計数率	PS	LaBr+Nal	同時計数率
検出器	42%	19%	45%	54%	20%	51%	19%	7%	22%
地上	58%	81%	55%	46%	80%	49%	81%	93%	78%

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+Nal	LaBr+Nal	LaBr+Nal
検出器	90%	88%	59%
地上	10%	12%	41%

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	1.3%	1.3%	0.9%
検出器	2.4%	2.3%	1.6%
地上	0.7%	0.6%	0.4%

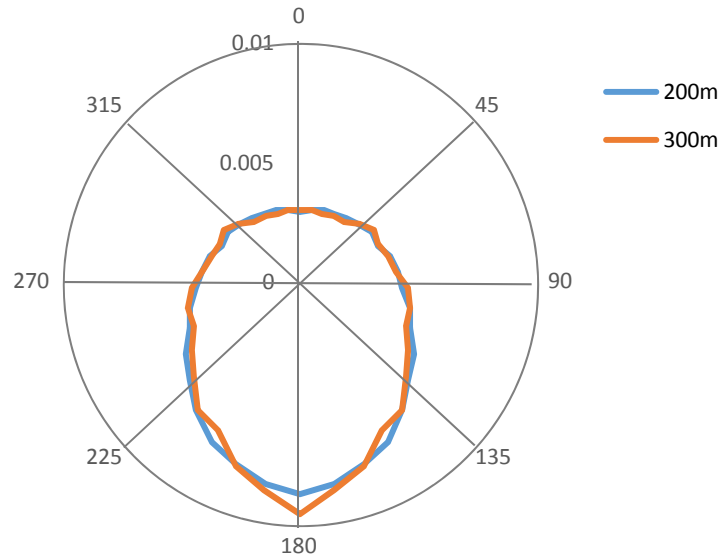


Fig. 4-8 地上に分布した放射性物質のガンマ線が上空で飛来する方向

4.5 試作機の開発

4.5.1 試作機の構成

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. 4-9 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. 4-10 に示す。検出器の名称は、Det_NaI01、Det_LaBr、Det_NaI02 と表記する。NaI 検出器及び LaBr 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. 4-11 に示す。LaBr 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 線を放出する。また、²²⁷Th、²²³Ra、²¹⁹Rn、²¹⁵Po 及び ²¹¹Bi からの α 線が放出される²⁶⁾。

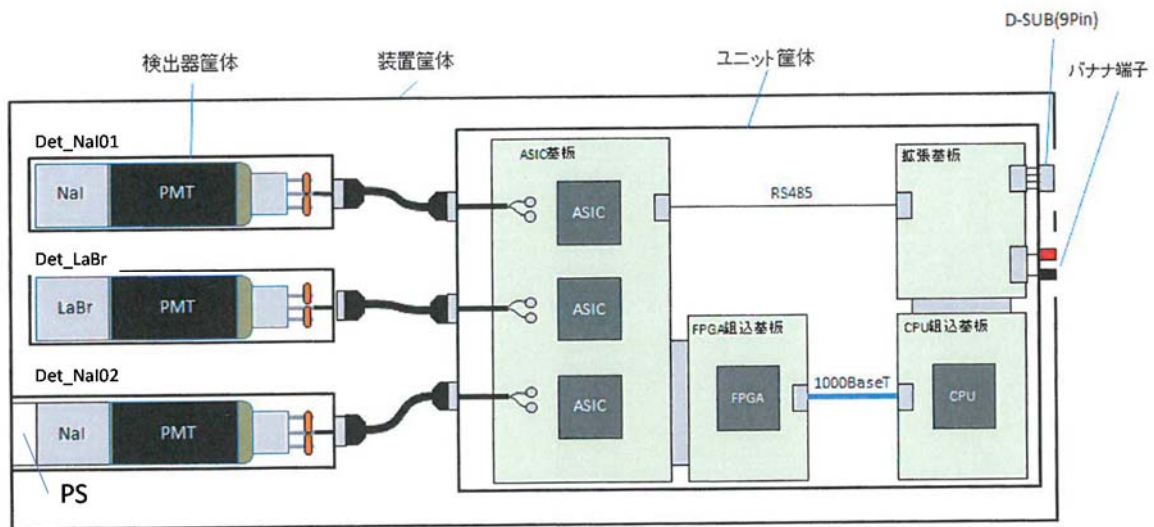


Fig. 4-9 試作した検出器の構成

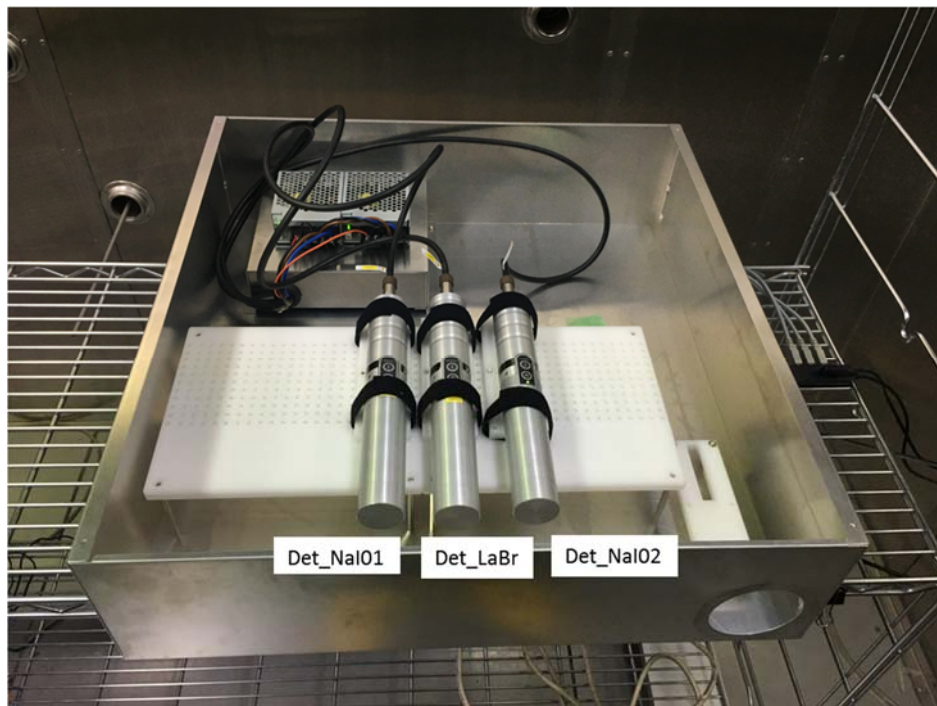


Fig. 4-10 試作した検出器の外観

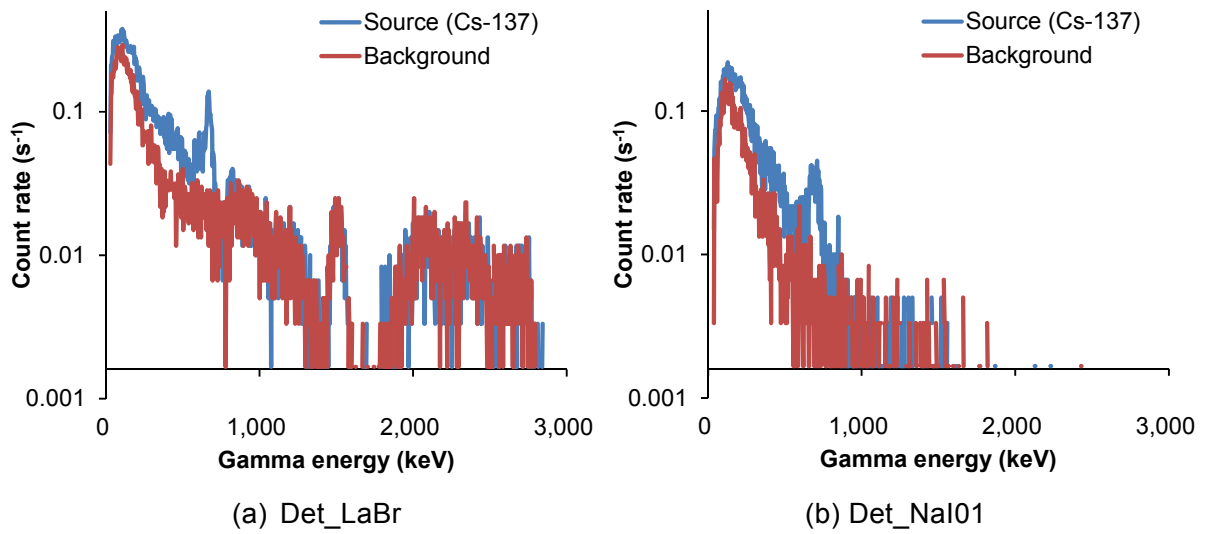


Fig. 4-11 試作した検出器の γ 線スペクトル

4.5.2 LaBr の自己汚染による同時計測

前述したように、LaBr シンチレータは γ 線のエネルギー分解能が優れているものの、 γ 線放出核種を含めた自己汚染があることが知られている。シンチレータから放出される γ 線は隣に配置される検出器と距離が近いいため、同時計数率のバックグラウンドが上昇すると考えられる。ここでは、Det_LaBr を中心に配置した場合の同時計数率について実験を行った。なお、以降、同時計数率とは、以下のような1つの検出器の全計数率を分母とした同時計数の割合と定義する。

$$RC_{N1/L} = \frac{CC_{N1/L}}{C_L} \quad [1]$$

$$RC_{N2/L} = \frac{CC_{N2/L}}{C_L} \quad [2]$$

$$RC_{N1/N2} = \frac{CC_{N1/N2}}{C_{N1}} \quad [3]$$

ここで、RC は同時計数率、CC は1秒当たりの同時計数、C は全計数率を示す。N1/L は Det_NaI01 をキッカーパルスとした Det_LaBr の同時計数、N2/L は Det_NaI02 をキッカーパルスとした Det_LaBr の同時計数および N1/N2 は Det_NaI01 をキッカーパルスとした Det_NaI02 の同時計数と定義した。

Fig. 4-12 に同時計数率の比較測定を行った検出器の配置パターンを示す。配置パターン1として通常の配置（検出器間の距離 60 mm）、配置パターン2として検出器の距離を取った配置、配置パターン3として Det_NaI01 と Det_LaBr 間に鉛遮蔽を配置したパターンおよび Det_LaBr を後方に配置したパターンとした。これらの配置パターンで、バックグラウンドを600秒計測し同時計数率を求めた。各配置パターンの同時計数率の測定結果を Table 4-12 に示す。配置パターンの同時計数率をみると隣り合った検出器の同時計数率はそれぞれ 0.0058 および 0.0044 となった。一方、Det_LaBr を後方に配置した配置パターン4では NaI 同士の同時計数率も配置

パターン 1 で得られた数値と同等であったため、この同時計数は空気中のラドン子孫核種や地上からの放射線に起因するものと考えられる。すなわち、LaBr の自己汚染に起因する同時計数は無視できる。一方、距離を話した配置パターン 2 では顕著に同時計数率が減少したこと、鉛遮蔽を行った配置パターン 3 では同時計数率が上昇したことから、検出器自身が散乱体となり同時計数率に大きな影響を与えていることが示唆される。

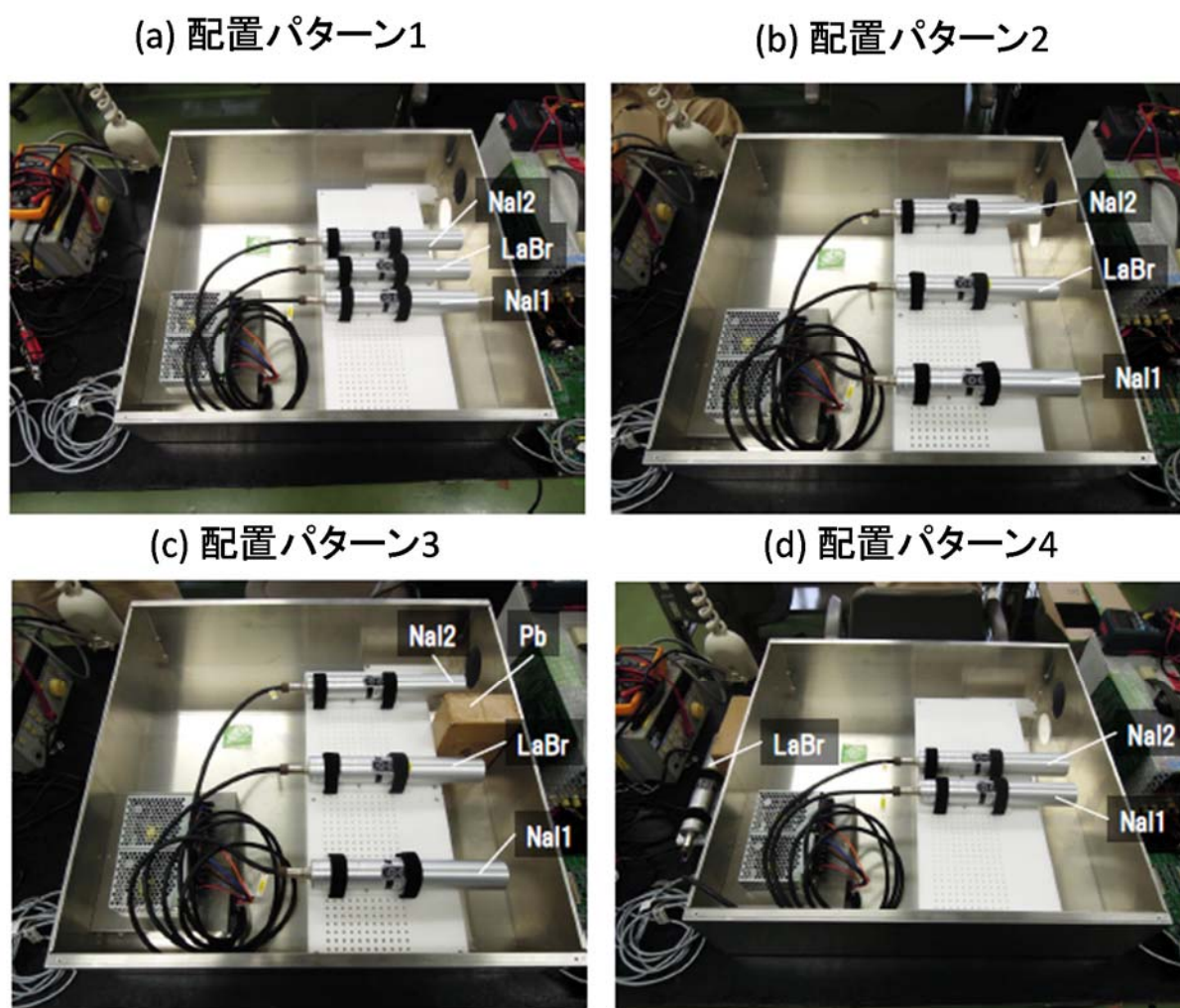


Fig. 4-12 検出器の配置パターン

Table 4-12 各配置パターンによる同時計数率

配置概要		同時計数率 (%)		
		RC _{N1/L}	RC _{N2/L}	RC _{N1/N2}
配置パターン1	検出器間 60 mm	<u>0.58</u>	<u>0.44</u>	0.03
配置パターン2	検出器間 150 mm	0.09	0.09	0.04
配置パターン3	Det_NaI01とDet_LaBr間に5 cmの鉛ブロックを配置	0.14	0.01	0.02
配置パターン4	Det_LaBrを背面に配置	0.01	0.02	<u>0.48</u>

4.5.3 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 Ra-226 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²⁷⁾。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. 4-13 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. 4-14 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、3 kBq m⁻³ および 4.5 kBq m⁻³ となった際に 30 分間行った。Fig. 4-15 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. 4-16 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 4-17 に示す。表には比較としてチャンバ内で計測した Cs-137 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。なお、0 Bq m⁻³ (BG) における RC_{N2/L} と RC_{N1/N2} は設定の不調でデータ取得ができなかった。RC_{N1/L} における Cs-137 の下方照射及びラドン暴露時を比較すると、同時計数率に約 0.01 % 程度の差があることが分かった。一方、では、0.9 % の差があり RC_{N1/L} の数値と一致しなかった。これは、ラドン濃度が変化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、Det_NaI01 と Det_NaI02 の位置関係の違いによると考えられる。また、Cs-137 の下方照射時の RC_{N1/L} 及び RC_{N1/L} の差については、原因が不明であるため、今後再試験等を実施する必要があると考えられる。しかしながら、ラドン暴露時と下方照射時における同時計数率に明確な差が出たため、システムのコンセプトとしては妥当であると考えられる。

ウラン (^{238}U) 系列

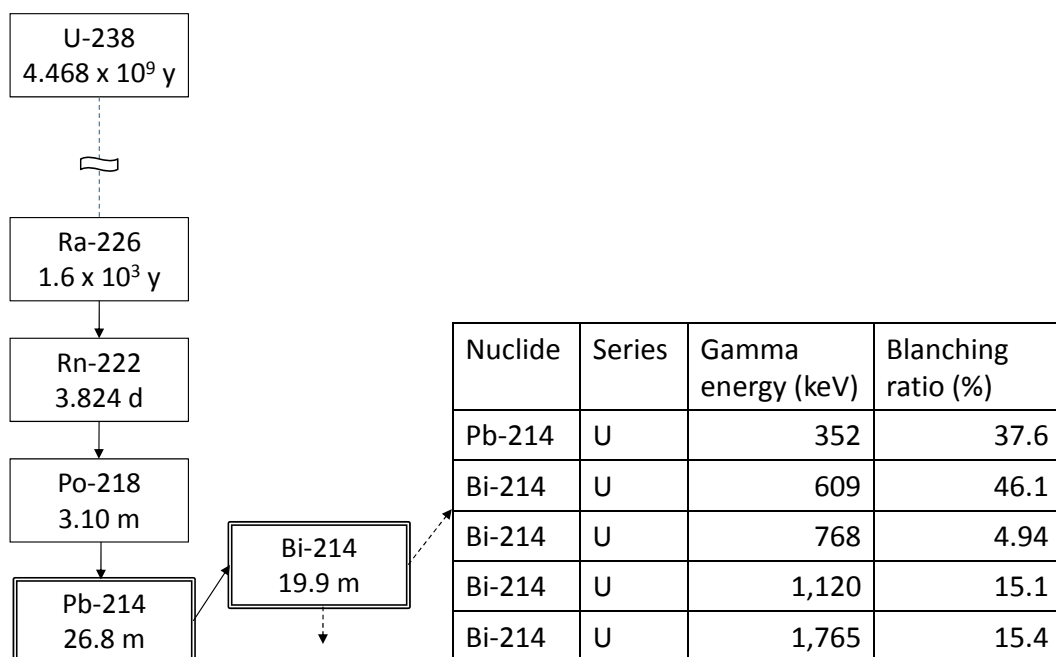


Fig. 4-13 ウラン系列と主な γ 線エネルギー

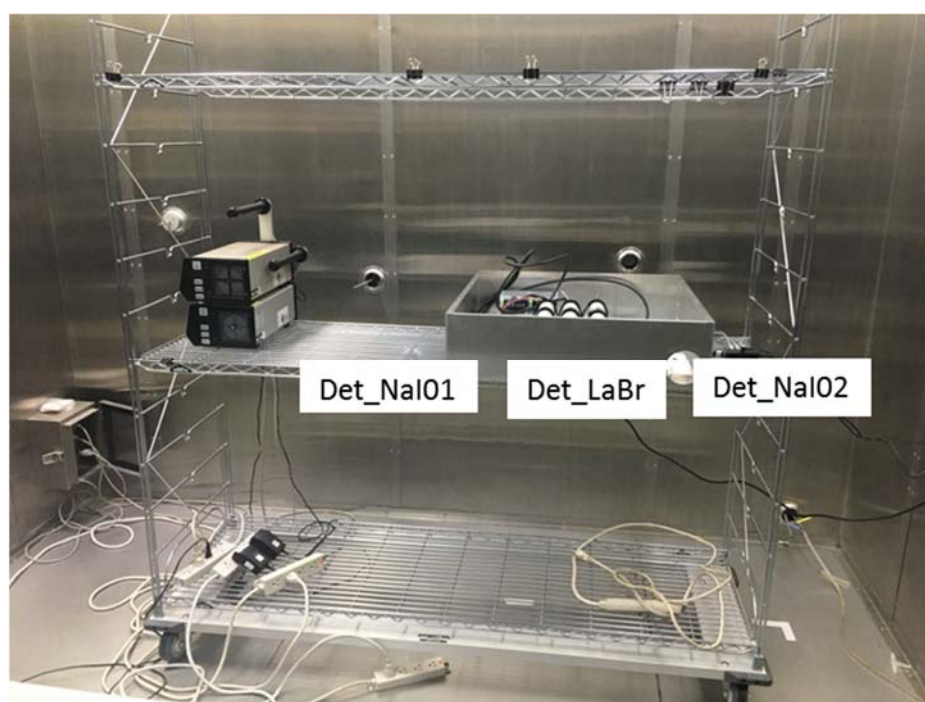


Fig. 4-14 ラドンチャンバ内の試作機の配置

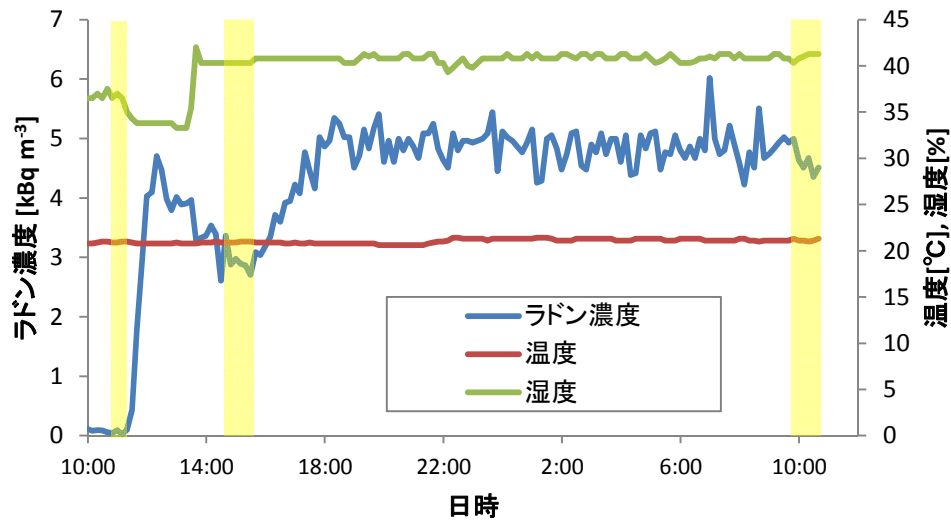


Fig. 4-15 チャンバ内のラドン濃度の変化と測定タイミング

黄色で示した時間帯に測定を実施。

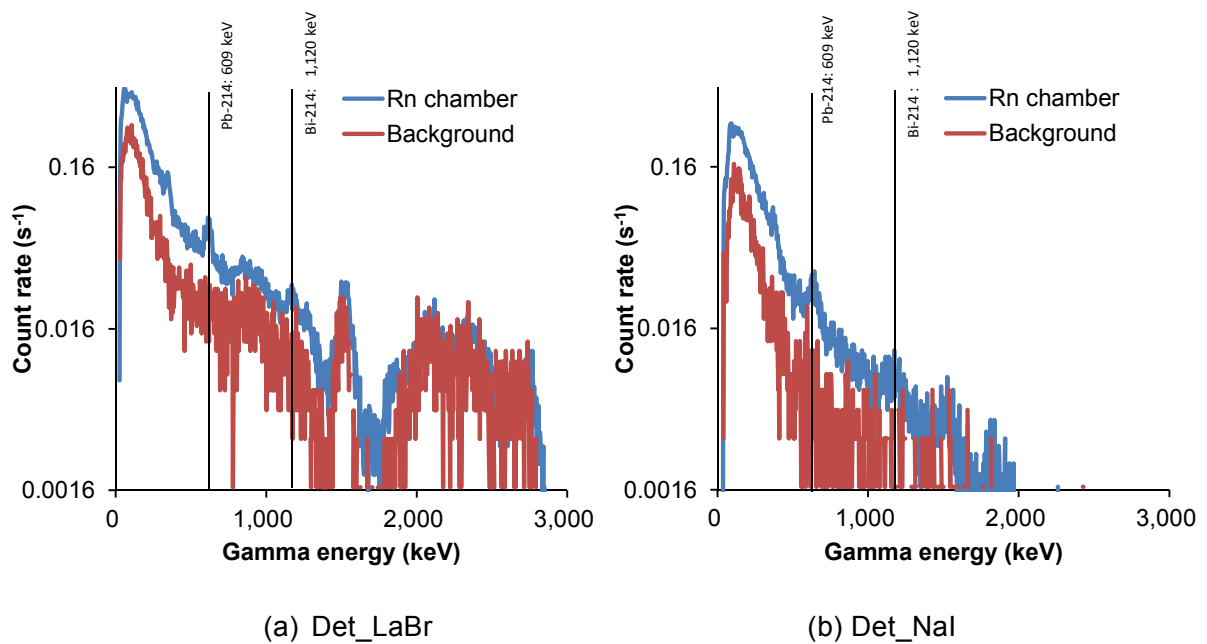


Fig. 4-16 ラドン子孫核種測定時の γ 線スペクトル (ラドン濃度 4.5 kBq m^{-3})

Table 4-13 ラドン濃度と同時計数率

	同時計数率 (%)		
	RC _{N1/L}	RC _{N2/L}	RC _{N1/N2}
BG	0.19	-	-
¹³⁷ Cs下方照射	0.50	0.09	0.00
3 kBq/m ³	0.59	1.07	0.00
4.5 kBq/m ³	0.58	1.12	0.00

5. 放射性プルームの予測計算手法の検討

5.1 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. 5-1 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。

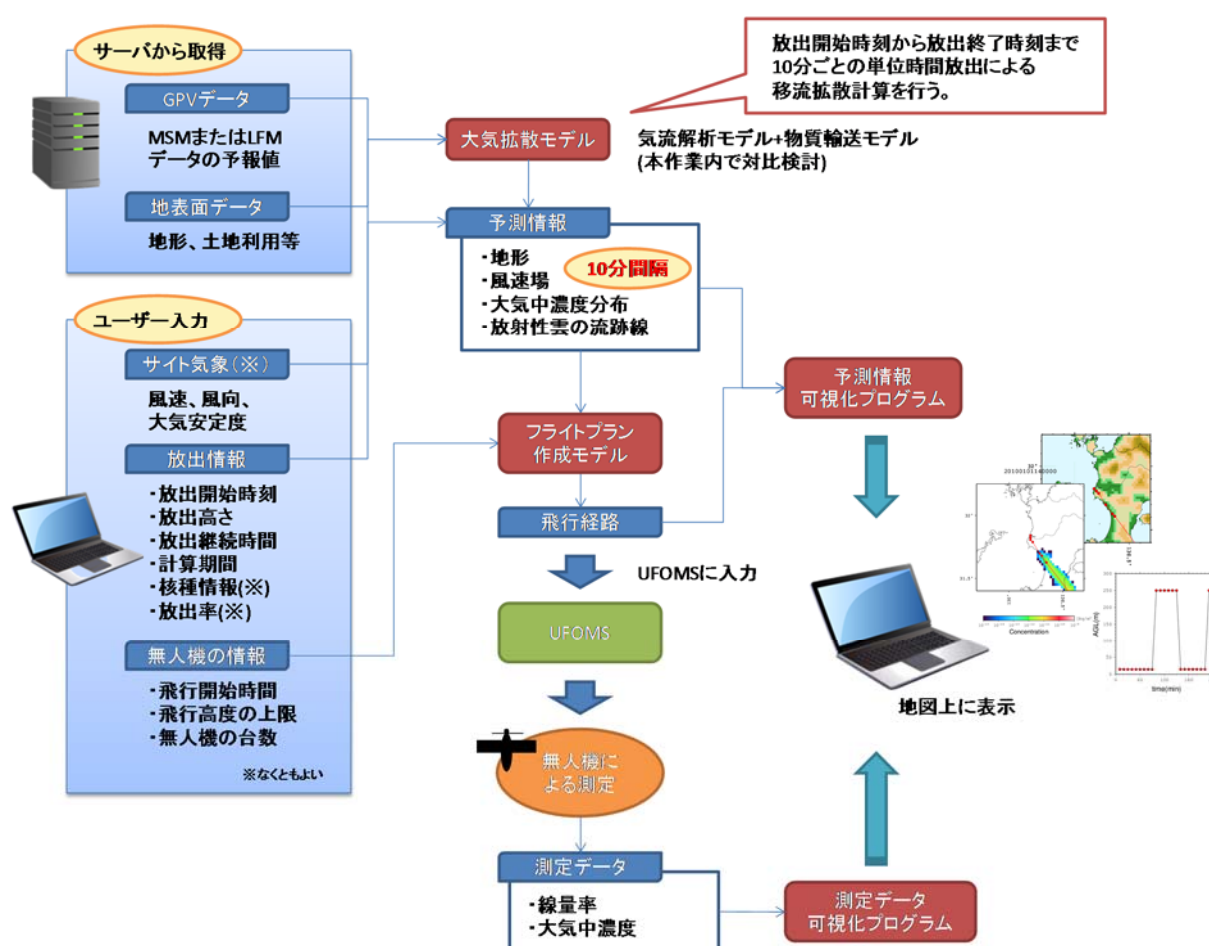


Fig. 5-1 フライトプラン作成アルゴリズムの概要

5.2 大気拡散シミュレーション

事故時に放出された放射性プルームの移流経路を予測するためのリアルタイム拡散予測システムの構築のために必要なデータ及び数値モデルについて調査し、対比検討を行った。

5.2.1 放射性プルーム大気拡散予測モデル

放射性プルーム大気拡散予測モデルとして、ガウスプルームモデル^{28, 29)}、ガウスパフモデル^{30, 31)}、粒子モデル^{32, 33)}が考えられる。

ガウスプルームモデルはプルームが定常的に放出され、平坦な地形かつ一定風向と仮定した場合、風向に対して鉛直方向、直角方向の濃度分布をガウス分布で表現したモデルである。一方、ガウスパフモデルはプルーム進行方向に対する拡散も含めた3次元的な拡散をガウス分布で表現したモデルである。また、プルームの流れを微小時間間隔で放出されるパフの重なりとして計算するため、非定常・日均質な拡散場での濃度計算に適している。粒子モデルは物質を多数の粒子で模擬し、平均風と乱流による粒子の移動を追跡するモデルである。物質の移流を詳細に表現することが可能であるが、高精度で計算を行うためには大量の粒子を必要とするため、計算コストがかかる。本研究のような迅速性が求められる計算には適合しない。よって、ガウスパフモデルが適当であると考えられる。以下のガウスパフモデルについて記述する。

ガウスパフモデルは煙流の流れを微小時間間隔で放出される、一つ一つの煙塊の重なりとして移流・拡散を表現するモデルである。非定常・非均質な拡散場での濃度推定に利用でき、計算コストも少ない。

パフの移流は風向と風速のデータをもとに計算される。時刻 $t + \Delta t$ におけるパフ中心の (x, y, z) 座標は、時刻 t におけるパフ中心の (x, y, z) 座標から式[4]に基づいて計算する。

$$\begin{aligned} xp_{t+\Delta t} &= xp_t + \Delta t \cdot u_t \\ yp_{t+\Delta t} &= yp_t + \Delta t \cdot v_t \\ zp_{t+\Delta t} &= zp_t + \Delta t \cdot w_t \end{aligned} \quad [4]$$

xp_t, yp_t, zp_t : 時刻 t におけるパフの中心の座標 (m)

Δt : パフの放出時間間隔 (s)

u, v, w : 地点 (xp, yp, zp) における x, y, z 方向の風速成分 (m/s)

核種の濃度はパフの中心部を最大濃度とし、中心から離れるに連れて濃度が減少するというガウス分布（正規分布）で表される。図中の σ_x 、 σ_y 、 σ_z は濃度分布の x 軸方向、 y 軸方向、 z 軸方向の広がりパラメータであり、濃度分布の標準偏差を示す。パフモデルでは $\sigma_x = \sigma_y$ として扱う。濃度分布の広がりパラメータは気象指針の濃度分布の計算式に従う。

評価地点 (x, y, z) における、パフ IP による核種 i の大気中濃度は数式[5]で求める。

$$\begin{aligned} \chi_{i,IP,x,y,z} &= \frac{Q_{i,IP}}{(2\pi)^{1.5} \times \sigma x_{IP} \times \sigma y_{IP} \times \sigma z_{IP}} \cdot \exp\left(-\frac{(xp_{IP} - x)^2}{2\sigma x_{IP}^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(yp_{IP} - y)^2}{2\sigma y_{IP}^2}\right) \\ &\quad \cdot \left\{ \exp\left(-\frac{(zp_{IP} + z)^2}{2\sigma z_{IP}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(zp_{IP} - z)^2}{2\sigma z_{IP}^2}\right) \right\} \times R_i \end{aligned} \quad [5]$$

$\chi_{i,IP,x,y,z}$: 評価地点 (x, y, z) の点における、パフ IP による核種 i の大気中濃度 (Bq m^{-3})

$Q_{i,IP}$: パフ IP 中の核種 i の核種量 (Bq)

$\sigma_{XIP}, \sigma_{YIP}, \sigma_{ZIP}$: パフ IP の濃度分布の x, y, z 軸方向の広がりパラメータ (m)

x, y, z : 評価地点の座標(m)

$x_{pIP}, y_{pIP}, z_{pIP}$: パフ IP の中心座標(m)

R_i : パフ中核種の残存率

パフは放出後、物理崩壊、乾性沈着、湿性沈着によってパフ中の核種量が減少するため、残存率 R_i は物理崩壊による残存率 R_{Li} 、乾性沈着による残存率 $R_{d,i(t)}$ 、湿性沈着による残存率 $R_{w,i(t)}$ から以下の式[6]から計算する。

$$R_i = R_{Li} \times R_{d,i} \times R_{w,i} \quad [6]$$

また、 R_{Li} 、 $R_{d,i}$ 、 $R_{w,i}$ はそれぞれ以下の式[7]から算出する。

$$\begin{aligned} R_{Li} &= \exp(-\lambda_i \times t) \\ R_{d,i(t)} &= R_{d,i,(t-\Delta t)} \times \exp(-\Lambda_{d,i,(t)} \times \Delta t) = \prod_{IT=1}^{NT} \exp(-\Lambda_{d,i,(IT \times \Delta t)} \times \Delta t) \\ R_{w,i(t)} &= R_{w,i,(t-\Delta t)} \times \exp(-\Lambda_{w,i,(t)} \times \Delta t) \\ &= \prod_{IT=1}^{NT} \exp(-\Lambda_{w,i,(IT \times \Delta t)} \times \Delta t) \end{aligned} \quad [7]$$

λ_i : 核種 i の物理的崩壊定数 (s^{-1}) ($=\ln(2)/HL_i$)

HL_i : 核種 i の物理的半減期 (s)

t : パフが放出されてからの経過時間 (s)

Δt : パフの時間間隔 (s)

$\Lambda_{d,i,(t)}$: 放出後 t 秒後における全地表面への核種 i の相対乾性沈着率 (s^{-1})

NT : パフが放出されてからの経過ステップ数

$\Lambda_{w,i,(t)}$: 放出後 t 秒後における核種 i の洗浄係数 (s^{-1})

$$\Lambda_{w,i,(t)} = a \cdot I^b$$

a, b : 洗浄係数パラメータ[-]

I : 降水強度[mm/h]

5.2.2 気象データ

ガウスパフモデルを用いて放射性プルームの移流経路をリアルタイムで予測するためには放出開始時刻から無人機による測定終了時刻までの期間の、風向、風速、大気安定度のデータが必要となる。気象データとしては、サイト気象、GPV データ³⁴⁾、その他の地上気象観測値が挙げられる。

5.2.2.1 サイト気象

サイト気象は該当地域の事業所等で観測されている気象データのことである。サイト気象を使用する場合はサイト気象の風向、風速、大気安定度及び測定高度を用いて、放出高度における一様風を作成する。評価対象領域の気象はサイト気象(風速、風向、大気安定度、降水量)で

代表されると仮定し、ユーザーが設定したサイト気象のみを用いて、一様な風速場を作成する。地形は考慮しない。サイト気象と放出高度に差異がある場合には、風速のべき乗則を用いて風速の高度補正を行うある地上高さ z での風速は、式[8]に示す風速のべき乗則で計算することができる。P 値は Table 5-1 から大気安定度を基に設定する³⁵⁾。

[8]

$$u_z = u_s (z / z_s)^P$$

u_s : 観測点での風速[m/s]

z_s : 観測点の高度[m]

u_z : 高さ z での風速[m/s]

P : Pasquill 安定度(表 4-2)

Table 5-1 大気安定度に対する P の値

Pasquill 安定度	A	B	C	D	E	F,G
P	0.1	0.15	0.20	0.25	0.25	0.3

5.2.2.2 GPV データ

GPV データは気象庁や米国海洋大気局等の気象予測モデルをスーパーコンピュータで計算した予測値を指す。気象庁から配信されている GPV データは解像度、データ範囲の違いごとに全球モデル(GSM)、メソモデル(MSM)、局地モデル(LFM)に分けられる。GDM は全球モデルであり解像度の粗さから、本研究には不相当と判断し、MSM および LFM の利用を検討する。各データの仕様を Table 5-2 および Table 5-3 に示す。GPV データには初期時刻における解析値と予報値が含まれている。予報時間は MSM が 39 時間、LFM が 9 時間であり、これらの予報値を使用することで、現在時刻から最大 24 時間程度の予測計算が可能である。GPV データには、東西方向及び南北方向の風速成分が格子状に収められている。格子点間隔は MSM が約 5km、LFM が約 2km である。また、それぞれのデータには 33 時間及び 9 時間の予報値が含まれているため、それらを使用することで現在時刻から最大 24 時間程度の予測計算が可能である。また、GPV 上層のデータには鉛直 P 速度(Pa/s)が収められている。これを鉛直速度(m/s)に変換することで、鉛直方向の風速場も得ることができる。一般に、鉛直 P 速度(hPa/h)は、0.03 を乗じて鉛直速度(m/s)に換算する。なお、鉛直 P 速度は、上昇流のとき負の値を、下降流のとき正の値を取る。

気象指針等で用いられる基本拡散式における拡散パラメータは、大気安定度によって分類されている。基本拡散式に基づいたプルームモデルもしくはパフモデルを使用する場合は、気象条件から大気安定度を求めておく必要がある。MSM 及び LFM 地上データには、上層・中層・下層の雲量が収められていることから、大気安定度は、風速、太陽高度及び雲によって分類する、ターナーの大気安定度分類を用いて決定する。ターナーの安定度階級³⁵⁾を Table 5-4 エラー! 参照元が見つかりません。、安定度は Table 5-5 に示す安定度分類表を用いて、評価時の風速と

実効日射インデックスから取得することができる。

実効日射インデックスは雲量と雲底高度から以下の(1)～(2)の手順で決定する。雲量は、上・中・下層の雲量の最大値とし(マキシマム・オーバーラップ法)、雲底高度は、下層の雲量が 0 の場合は 7,000ft (2,133m)、下層及び中層の雲量が 0 の場合は 1,6000 ft (4,877m)とした。

(1) 雲量 10/10、雲底高度 7000ft 以下では 0 とする。

(2) 夜間については雲量 $\leq 4/10$ の場合は-2 とし、雲量 $> 4/10$ の場合は-1 とする。

(3) 昼間については太陽高度を基に、日射インデックスを決定することができる。雲量 $\leq 5/10$ の場合は太陽高度に応じた実効日射インデックスを Table5-6 から抽出する。雲量 $> 5/10$ の場合は Table5-6 から抽出した実効日射インデックスに修正が必要となる。雲底高度 $< 7,000\text{ft}$ の場合は Table5-6 から抽出した日射インデックスから 2 を差し引く。雲底高度 $\geq 7,000\text{ft}$ の場合は同様に 1 を差し引き、雲量 10/10 の場合は 1 を差し引く。これらのいずれの条件にも適合しない場合は修正の必要はない。

ここで、太陽高度 θ の算出方法を示す。太陽高度 θ は放出地点の緯度・経度及び日時から、[9] 式から計算される。

$$\sin \theta = \cos \xi = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cosh$$

$$\delta = \sin^{-1}\{0.39795 \cdot \sin(\omega - 1.355074)\}$$

$$\omega = M + 0.033439 \cdot \sin M + 0.000349 \cdot \sin 2M$$

$$M = 0.017214 \cdot (t' - 2.36)$$

$$M = 0.017214 \cdot (t' - 2.36)$$

[9]

θ : 太陽高度(deg)

ξ : 天頂角(deg)(=90°- θ)

φ : 緯度(deg)

λ : 経度(deg)

t_G : 協定世界時(h)

t' : 1 年の始めを起点として数えた日数(1/1=0、12/31=364)

h : 太陽の時角(deg)

δ : 太陽の赤緯(deg)

以上の手法を用いて、実際に計算した例を Fig. 5-2 に示す。気象データは 2017/2/9 06(UTC) の GPV データを用いている。

Table 5-2 MSM データの仕様

項目		内容
配信回数		1 日 8 回
初期時刻		00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21(UTC)
配信時刻		00, 06, 12, 18(UTC) : 初期時刻+2 時間 10 分頃 03, 09, 15, 21(UTC) : 初期時刻+2 時間 30 分頃
予報時刻	地上	初期時刻から 39 時間、1 時間間隔
	上層	初期時刻から 39 時間、3 時間間隔
範囲		北緯 : 22.4~47.6° 東経 : 120~150°
水平方向 解像度	地上	南北 0.05°×東西 0.0625°(505×481 メッシュ)
	上層	南北 0.1°×東西 0.125°(253×241 メッシュ)
鉛直方向	上層	16 層 1000, 975, 950, 925, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100(hPa)
	地上	海面更正気圧, 地上気圧, 地上 10m 東西方向風速成分, 地上 10m 南北方向風速成分, 気温, 相対湿度, 時間降水量, 雲量
気象要素	上層	高度, 東西方向風速成分, 南北方向風速成分, 気温, 上昇流, 相対湿度(300hPa まで)

Table 5-3 LFM データの仕様

項目		内容
配信回数		1 日 24 回
初期時刻		毎正時(UTC)
配信時刻		初期時刻+1 時間 30 分頃
予報時刻	地上	初期時刻から 9 時間、30 分間隔
	上層	初期時刻から 9 時間、1 時間間隔
範囲		北緯 : 22.4~47.6° 東経 : 120~150°
水平方向 解像度	地上	南北 0.02°×東西 0.025°(1261×1201 メッシュ)
	上層	南北 0.04°×東西 0.05°(631×601 メッシュ)
鉛直方向	上層	16 層 1000, 975, 950, 925, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100(hPa)
	地上	海面更正気圧, 地上気圧, 地上 10m 東西方向風速成分, 地上 10m 南北方向風速成分, 気温, 相対湿度, 時間降水量, 雲量
気象要素	上層	高度, 東西方向風速成分, 南北方向風速成分, 気温, 上昇流, 相対湿度(300hPa まで)

Table 5-4 ターナーの安定度階級

階級	安定度
1	強不安定
2	不安定
3	やや不安定
4	中立
5	やや安定
6	安定
7	強安定

Table 5-5 風速と実効日射インデックスに対する安定度分類

風速 (m/s)	実効日射インデックス						
	4	3	2	1	0	-1	-2
0～1.0	1	1	2	3	4	6	7
1.0～2.1	1	2	2	3	4	6	7
2.1～3.1	1	2	3	4	4	5	6
3.1～3.6	2	2	3	4	4	5	6
3.6～4.1	2	2	3	4	4	4	5
4.1～5.1	2	3	3	4	4	4	5
5.1～5.7	3	3	4	4	4	4	5
5.7～6.2	3	3	4	4	4	4	4
>6.2	3	4	4	4	4	4	4

Table 5-6 太陽高度に対する実効日射インデックス

太陽高度 θ (deg)	日射強度	日射インデックス
$60^\circ < \theta$	強	4
$35^\circ < \theta \leq 60^\circ$	中	3
$15^\circ < \theta \leq 35^\circ$	やや弱	2
$\theta \leq 15^\circ$	弱	1

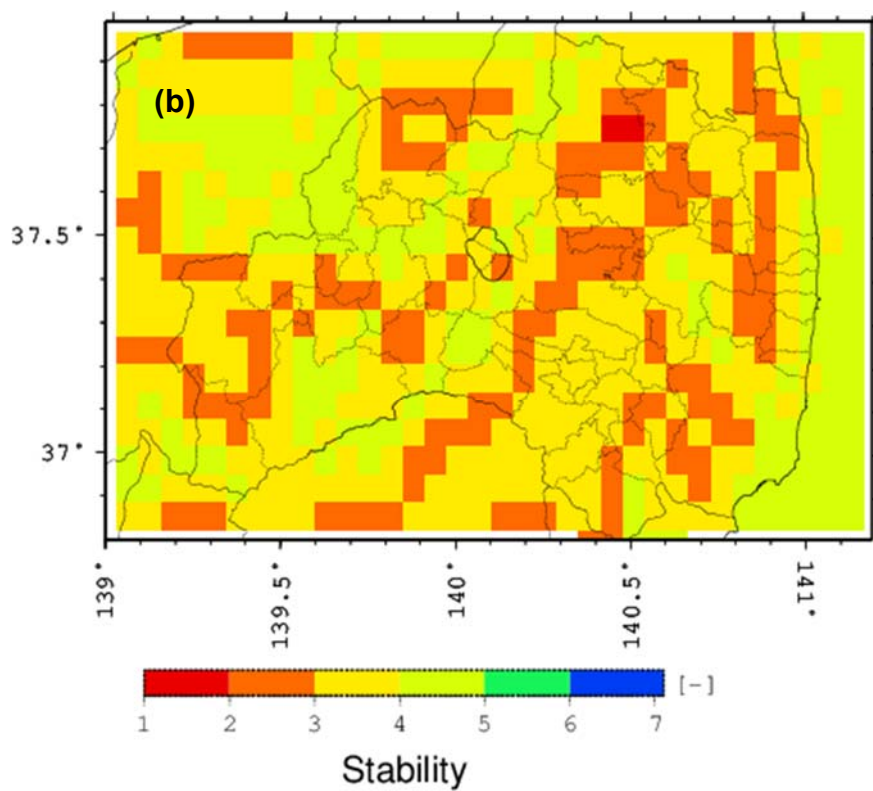
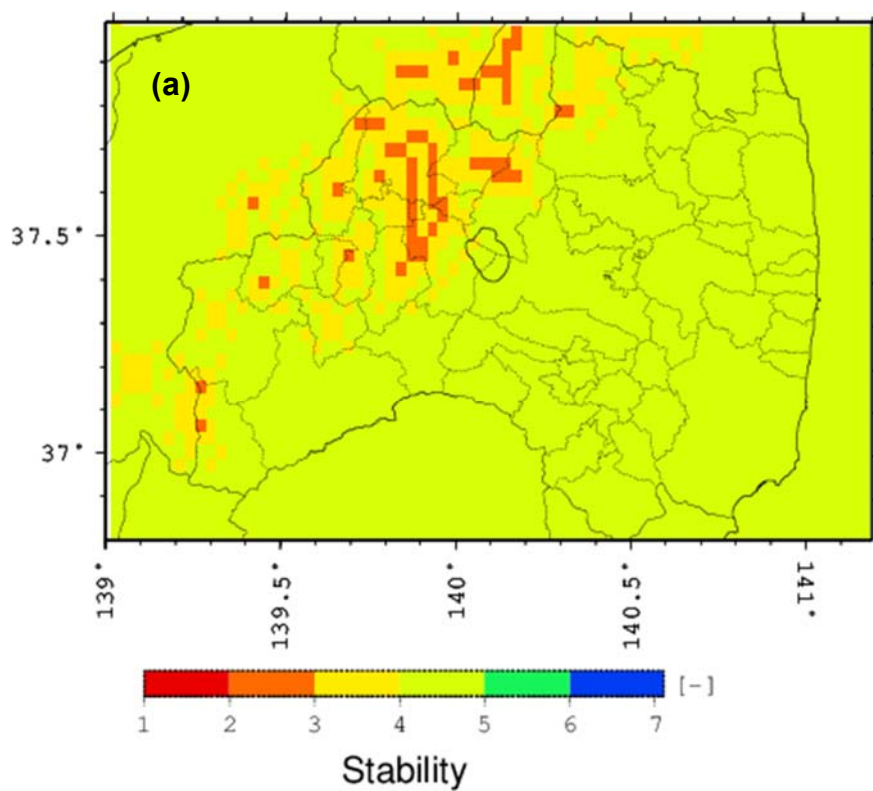


Fig. 5-2 GPV データによる大気安定度の比較
 (a) LFM(0.025° メッシュ)、(b) MSM(0.0625° メッシュ)

5.2.2.3 地上気象観測値

評価対象領域内のモニタリングポスト、アメダス等の地上気象観測値から気流場を計算する。評価対象領域におけるサイト気象、モニタリングポスト、気象官署及びアメダス等における地上気象観測値から、線形内挿により風速場を計算する。実測値を用いるため、拡散計算では気象観測時刻と同じ気象条件が続くと仮定した計算となる。また、鉛直方向の風速成分は得られないため、プルームの上下移動については考慮しない。

ある高さ z における任意地点 (x,y) の風速成分 (u,v,w) は[10]式から計算される。ここで、 w 成分は 0 とする。

$$U(x, y, z) = \frac{\sum_{iws=1}^{nws} \left(\frac{1}{R_{iws}^2} \times U0_{iws} \right)}{\sum_{iws=1}^{nws} \left(\frac{1}{R_{iws}^2} \right)} \quad [10]$$

$$V(x, y, z) = \frac{\sum_{iws=1}^{nws} \left(\frac{1}{R_{iws}^2} \times V0_{iws} \right)}{\sum_{iws=1}^{nws} \left(\frac{1}{R_{iws}^2} \right)}$$

$$W(x, y, z) = 0$$

nws : 観測点の数

$U0_{iws}$: iws 番目の観測点における風速の u 方向成分(m/s)

$V0_{iws}$: iws 番目の観測点における風速の v 方向成分(m/s)

R_{iws} : iws 番目の観測点から任意地点 (x,y) までの距離(m)

サイト気象やモニタリング地点において大気安定度が入手できる場合はそれを使用するが、何らかの理由でデータが得られない場合は、気象官署の観測値から推定する。気象官署のデータには、全天日射量、気温、露点温度及び雲量があるため、パスキル安定度階級分類^{38, 39)}から大気安定度を推定することができる。日中と夜間におけるパスキル安定度階級分類を Table 5-7 および Table 5-8 に示す。日中については風速と全天日射量、夜間については風速と放射収支量もしくは雲量によって分類される。なお、拡散計算に際しては、中間安定度 A-B、B-C 及び C-D はそれぞれ B、C、D に含める。また、夜間の風速 2m/s 未満の G は F に含める。雲底高度 LCL は気温と露点温度から、[11]式（ヘニングの式）によって計算する。

$$LCL = 125 \cdot (T - T_d) \quad [11]$$

LCL : 雲底高度(m)

T : 気温(°C)

T_d : 露点温度(°C)

Table 5-7 パスکیل安定度階級分類(日中)

風速 U(m/s)	日中 日射量 T(kW/m ²)			
	T $\geq$ 0.6	0.6>T $\geq$ 0.3	0.3>T $\geq$ 0.15	0.15>T
U $\leq$ 2	A	A-B	B	D
2<U $\leq$ 3	A-B	B	C	D
3<U $\leq$ 4	B	B-C	C	D
4<U $\leq$ 6	C	C-D	D	D
U $\geq$ 6	C	D	D	D

Table 5-8 パスکیل安定度階級分類(夜間)

風速 U(m/s)	夜間 放射収支量 Q(kW/m ²)			夜間 雲量(※)		
	Q $\geq$ -0.02	-0.02>Q $\geq$ -0.04	-0.04>Q	本雲 (8~10)	上層雲 (5~10) 中・下層雲 (5~7)	雲量 (0~4)
U $\leq$ 2	D	G	G	D	G	G
2<U $\leq$ 3	D	E	F	D	E	F
3<U $\leq$ 4	D	D	E	D	D	E
4<U $\leq$ 6	D	D	D	D	D	D
U $\geq$ 6	D	D	D	D	D	D

※雲量が全雲量しかない場合は、雲底高度 5,000m 以上を上層雲、
2,000m 以上 5,000m 未満を中層雲、2,000m 未満を下層雲とする。

5.2.3 比較検討

ガウスパフモデルに対して 5.2.2.1、5.2.2.2、5.2.2.3 にて候補として挙げた気象モデルの組み合わせた放射性プルーム拡散計算を行い、各気象モデルの比較検討を行った。比較のため、粒子モデルと気象モデルを用いた RAMS-HYPACT コードでより精緻な計算を行い各ケースとの比較を行った。検討を行ったモデルの組み合わせを Table 5-9 に示す。

Table 5-9 検討に用いたモデルのケース

Case	気流解析モデル			拡散モデル
	概要	時間変化	鉛直流	
1	サイト気象による一様風	なし	なし	パフモデル
2	MSM データ	1 時間毎+時間内挿	なし	パフモデル
3	LFM データ	1 時間毎+時間内挿	なし	パフモデル
4	気象モデル	1 時間毎+時間内挿	あり	粒子モデル

放射性プルーム拡散計算は福島県全域を評価範囲とし、福島第一原子力発電所から 2017 年 2 月 28 日 15:00 に放射性核種の放出を開始したと仮定して計算を行った。計算条件を Table 5-10 に示す。

各ケースでの放出開始時刻における風速場を Fig. 5-3 および 5-4 に示す。この風速場を用いて放射性プルームの移流経路の計算を行った結果を Fig. 5-5 に示す。Fig. 5-5 (a)はケース 1 の一様風を用いた場合であり、移流経路は南西方向に一直線に伸びている結果となった。Fig. 5-5 (b)の MSM データを使用した結果と Fig. 5-5 (c)の LFM モデルを使用した結果はどちらも移流経路の前半部分は西南方向に移流した後、西方向へ、さらにその後、再び西南方向に移流方向が変化している。移流方向の傾向は類似しているが、放射性プルーム濃度分布には差が生じているこれは、メッシュの大きさが違いが原因であると考えられる。一方、Fig. 5-5 (d)の RAMS-HYPACT の結果は他ケースの結果と比較して、移流経路が長く伸びている。これは、ガウスパフモデルが水平方向 2 次元の風速場を考慮した計算を行っているのに対して RAMS-HYPACT は鉛直方向の風速も考慮しているため、3 次元的な放射性プルームの移流を計算しており、放射性プルームが起伏のある地形を乗り越えて西側に移動したためである。実際に作成する放射性プルーム拡散予測プログラムでは、ガウスパフモデルに鉛直方向のパフの移動を考慮した計算が必要となる。

Table 5-10 放射性プルーム拡散計算条件

項目	内容
評価範囲	福島県全域
放出点	福島第一原子力発電所 緯度:37.421389(deg) 経度:141.033611(deg)
放出開始日時	2017/2/28 15:00(JST)
放出率	1Bq/h
放出高さ	地上 100m
放出継続時間	1 時間
大気安定度	D
計算期間	6 時間
出力間隔	10 分

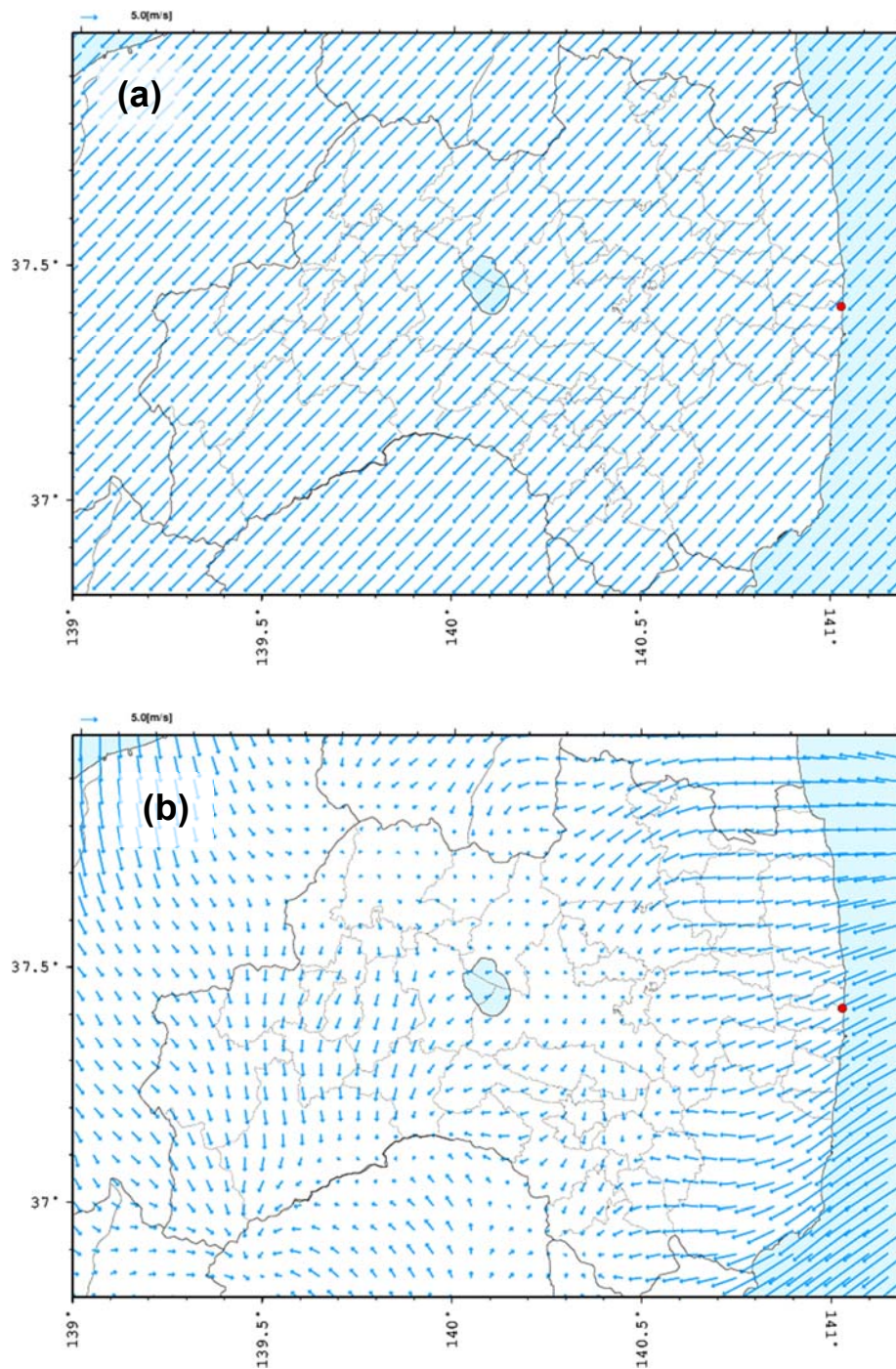


Fig. 5-3 放出開始時刻(2017/2/28 15:00(JST))の風速場の比較
 (a)ケース1:サイト気象による一様風、(b)ケース2:MSM データ

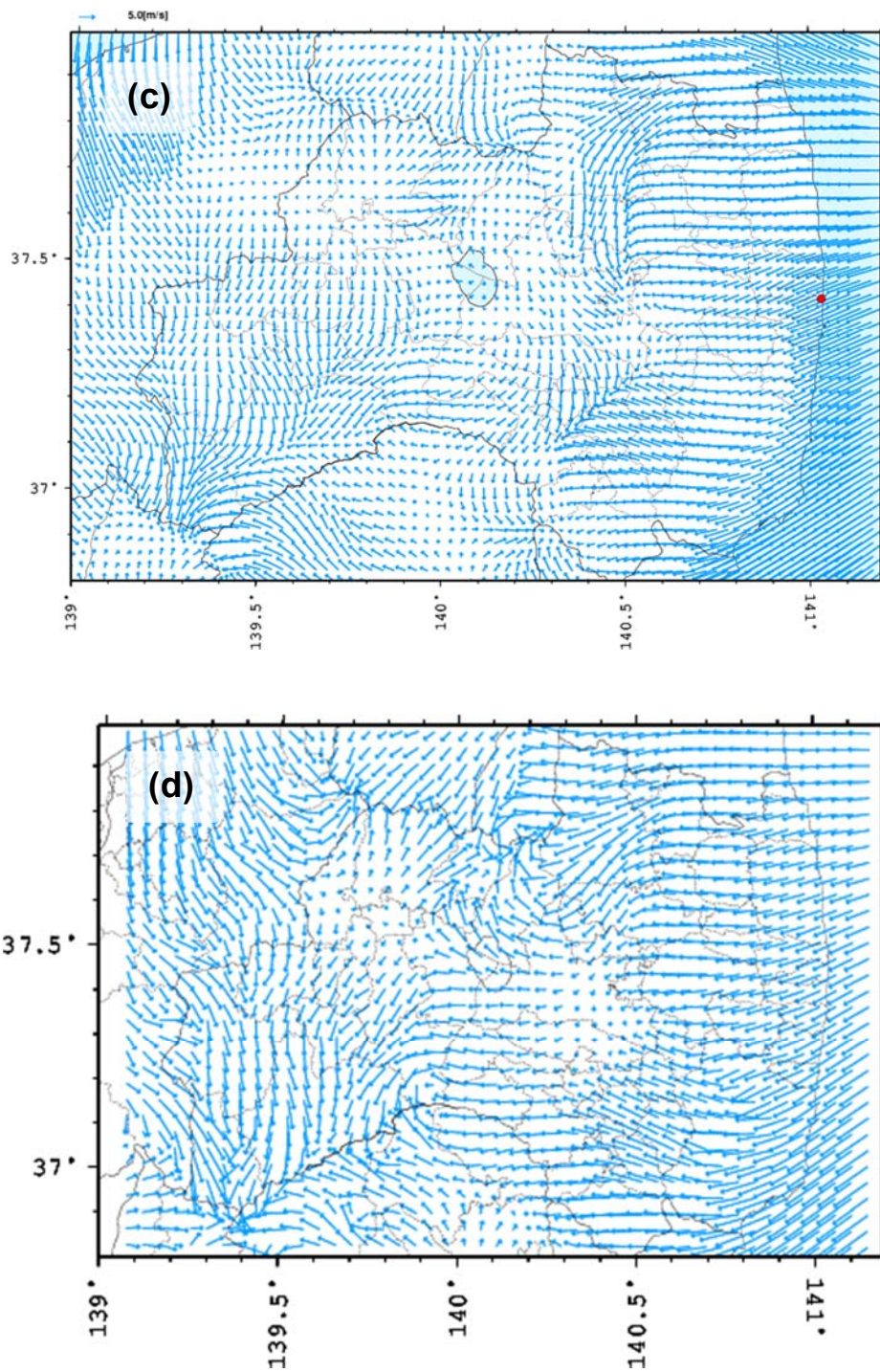


Fig. 5-4 放出開始時刻(2017/2/28 15:00(JST))の風速場の比較

(c) ケース 3: LFM データ、(d) ケース 4: 気象モデル

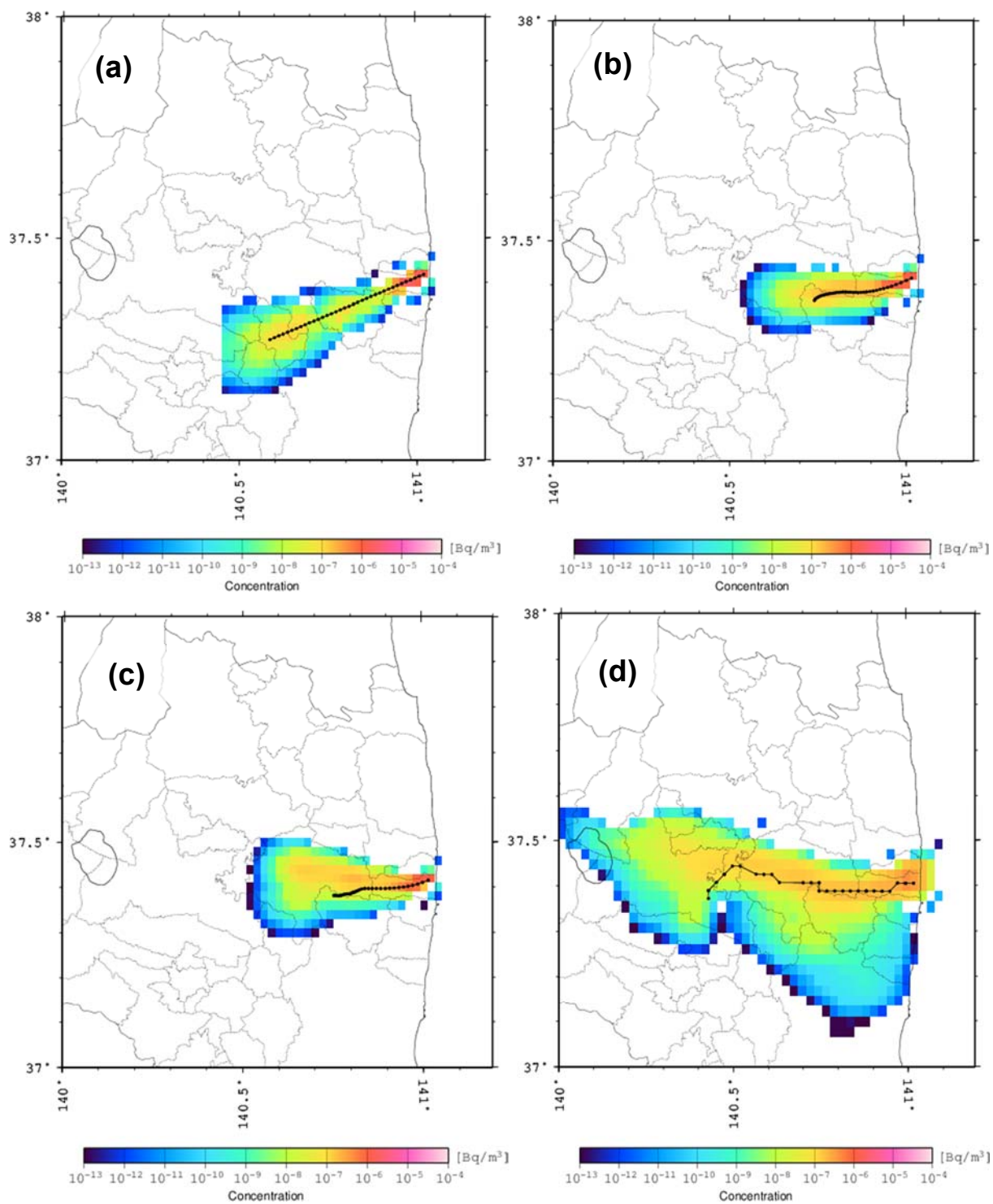


Fig. 5-5 各モデルによる時間積算濃度分布計算結果の比較

5.2.4 放射性プルーム拡散予測プログラムの仕様

前節までの検討に基づき、放射性プルーム拡散予測プログラムを試作した。試作版の基本的な構成は以下に示す(1)～(3)の通りである。

(1) 風速場の作成

風速場は GPV データから以下の手順で各評価時刻の風速場を計算する。

- ① 等緯度経度データである GPV 地上データの U 成分（緯度方向）、V 成分（経度方向）を読み込み、XY 直交座標メッシュへ内挿して 1 時間ステップの風速場を作成する。
- ② 各メッシュの大気安定度は、5.2.2.2 項の記述に従い GPV データから計算した後、XY 直交座標メッシュへ内挿する。
- ③ 風速ベクトル及び大気安定度を前後の 1 時間ステップの風速場から線形内挿して、評価時刻における風速場を計算する。

(2) パフの移流および拡散

パフの移流および拡散は 5.2.1 項で示したガウスパフモデルを用いて計算を行う。パフの中心位置の風速ベクトル及び大気安定度は、「評価時刻の風速場」から線形内挿して計算する。鉛直方向のパフの移動については、移動後のパフの中心位置直下の地表面の標高と、放出地点の標高、放出高さから、以下の[12]式により、パフの中心位置の標高を求める。

$$z_p = \begin{cases} e_0 + H & \text{when } e \leq e_0 \\ H + \frac{e}{2} & \text{when } e > e_0 \text{ and } e \leq e_0 + H \\ e + \frac{H}{2} & \text{when other} \end{cases} \quad [12]$$

Z_p : パフ中心の標高 (m)

e_0 : 放出地点の地表面の標高 (m)

H : 放出高さ (m)

e : パフの中心位置直下の地表面の標高 (m)

以上のように、鉛直方向のパフの移動を考慮することによって、地形に遮断されることなくパフが移流することができる。拡散パラメータはパフの移動距離 d_i から以下の[13]式を用いて計算する。

$$\sigma_{h,i} = A_y \cdot d_i^{0.9031} \quad [13]$$

$$\sigma_{z,i} = A_z \cdot d_i^q$$

A_y : 水平方向の拡散パラメータの係数 ($\text{m m}^{-0.9031}$)

d_i : パフ i の総移動距離 (m)

A_z : 鉛直方向の拡散パラメータの係数 (m m^{-q})

q : 鉛直方向の拡散パラメータのべき係数 (-)

[10]式で用いられる各係数は大気安定度およびパフの総移動距離に従い、Table 5-11 から求める。鉛直方向の拡散係数は表 Table5-11 に示す大気安定度別の混合層高度が上限となる。

(3) 出力ファイル

放射性プルーム拡散予測プログラムでは以下のファイルを出力する。

- ・ パフの流跡線データファイル

パフの流跡線データファイルは、パフの中心位置の緯度経度・高さ、中心位置の濃度等の情報をパフ毎に出力したテキスト形式のファイルである。このファイルのデータを元にしてフライトプランを作成することを想定している。

- ・ 空气中濃度等の空間分布データファイル

空气中濃度及び風速ベクトルの空間分布は netCDF 形式で出力する。netCDF 形式は様々な可視化ソフトが対応している。本プログラムの出力ファイルを、フリーの可視化ソフトである VisIt で可視化したものを Fig. 5-6 に示す。

Table 5-11 拡散パラメータ式の係数

大気安定度 Stability	A_y	d < 0.1 km		0.1 km ≤ d < 1 km		1 km ≤ d		混合層 高度 (m)
		A_z	q	A_z	q	A_z	q	
A	0.3658	0.192	0.936	0.00066	1.941	0.00024	2.094	1600
B	0.2751	0.156	0.922	0.0382	1.149	0.055	1.098	1200
C	0.2089	0.116	0.905	0.113	0.911	0.113	0.911	800
D	0.1471	0.079	0.881	0.222	0.725	1.26	0.516	560
E	0.1046	0.063	0.871	0.211	0.678	6.73	0.305	320
F	0.0722	0.053	0.814	0.086	0.74	18.05	0.18	200

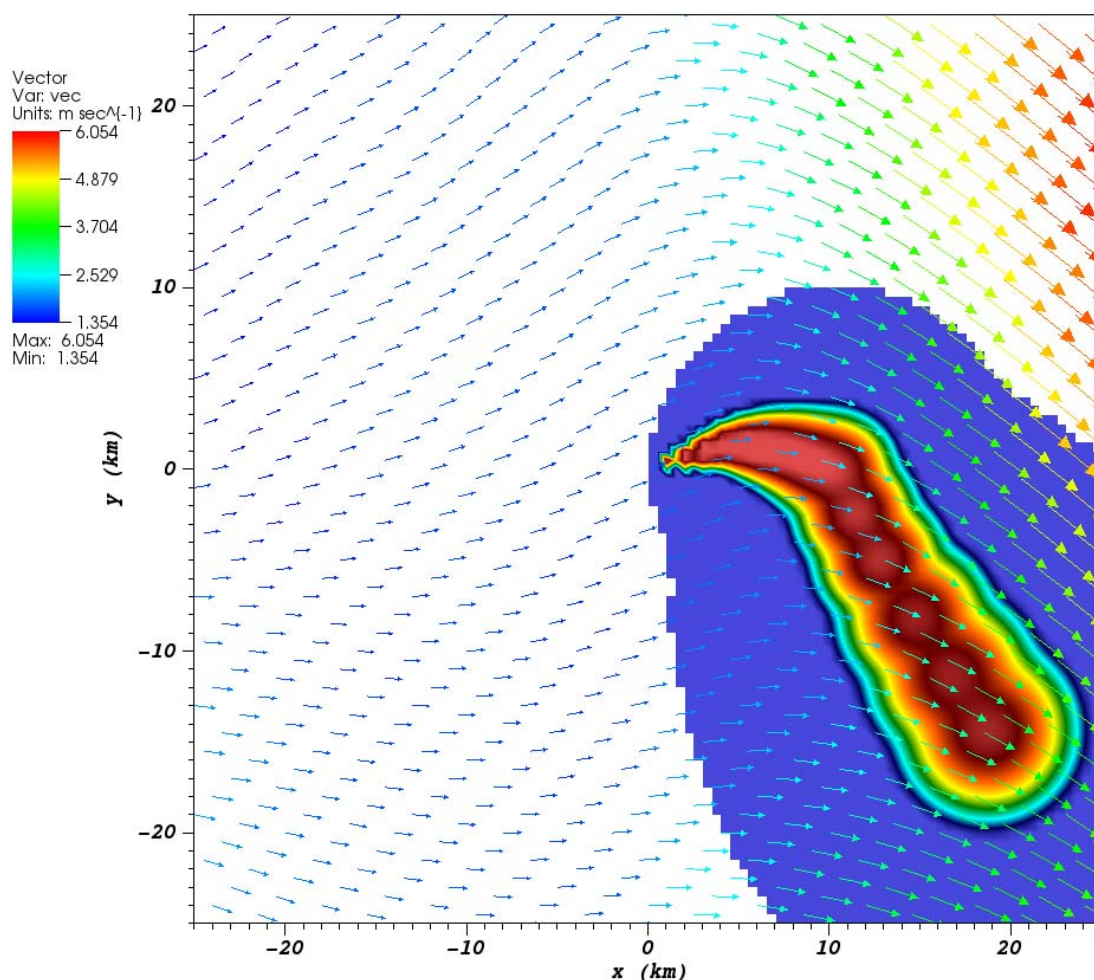


Fig. 5-6 地表空气中濃度と風速ベクトルの可視化結果

5.3 フライトプラン作成アルゴリズムの試作

大気拡散シミュレーション結果を基に放射性プルームの全体像を3次元的に把握できるようなフライトプラン作成のためのアルゴリズムの検討を行った。無人飛行機は放射性プルームに到達後、放射性プルームに追従しながら測定を行い、移流・拡散状況の把握を行う。フライトプランの作成には、離陸前に最初に到達目標とする放射性プルーム位置の設定、飛行条件に応じた飛行測線の設定が必要となる。また、大気拡散シミュレーション予測結果を基にしてフライトプランを作成した場合でも、予測値から実際の放射性プルームの挙動が逸脱している場合も予想される。その場合に備えて、探索アルゴリズムの検討も併せて必要である。

5.3.1 大気拡散予測計算を基にしたフライトプラン作成アルゴリズム

本アルゴリズムでは、放出開始時刻から無人機による測定終了時刻までの3次元大気中濃度分布の時系列データを用いて得られる移流経路情報からフライトプランの作成を行う。一連の

フライト経路は離陸、プルーム追跡、測定、帰還、着陸に分類できる (Fig. 5-7)。離陸経路と着陸経路はユーザーにより指定する。プルーム追跡経路、測定経路、帰還経路は大気拡散シミュレーション結果と最大飛行時間を基に設定する。

フライトプラン作成フロー図を Fig. 5-8 に示す。大気拡散シミュレーション開始からフライトプラン作成までの手順は以下の①～⑦の通りである。

- ① 放出開始時刻、計算期間、測定開始時刻、測定終了時刻を設定する。
- ② 放出開始時刻から測定終了時刻まで、単位時間放出による 10 分ごとの放射性物質の移流・拡散シミュレーションを行う。
- ③ ②の全結果から、各時間において最大濃度となった放射性雲の位置情報を抽出する。
- ④ ③で得られた最大濃度地点のうち、最短で到達できるものを選択する。
- ⑤ ④で選択した放射性雲へ飛行し、突入する。
- ⑥ 到達後は、最大濃度点に追従するように風下方向へ蛇行して飛行する。
- ⑦ 帰還限界に近付いたら基地に向かって飛行する。

測定終了点は飛行可能時間から離陸時間、追跡時間を差し引いた残時間内で帰還時間、着陸時間を確保できる測定時間の設定を行い、測定時間を巡航速度で乗じた値として算出する。

測定経路内では無人航空機はプルームの移流経路に合わせて飛行を行うが、移流経路に沿って飛行を続けるとプルームを追い越してしまう可能性があるため、Fig. 5-9 に示すように無人飛行機の飛行経路を蛇行させて、プルームの移流方向に対する無人飛行機の移動速度をプルーム移流速度に同調させる。蛇行測線の波長 L はプルーム予測時間間隔の 2 倍の間にプルームが進む距離とする。また、振幅 R は波長と追従ステップ s から以下の[14]式で計算する。

$$R = \sqrt{(s/2)^2 - (L/4)^2} \quad [14]$$

ただし、波長が追従ステップ飛行距離の 2 倍以上の場合は、蛇行経由地点を追加せず、直線的に飛行する。また、追従プルーム経路の各経由地点の直線飛行距離を算出し、最大飛行距離を超える場合はその経由地点以降を削除する。

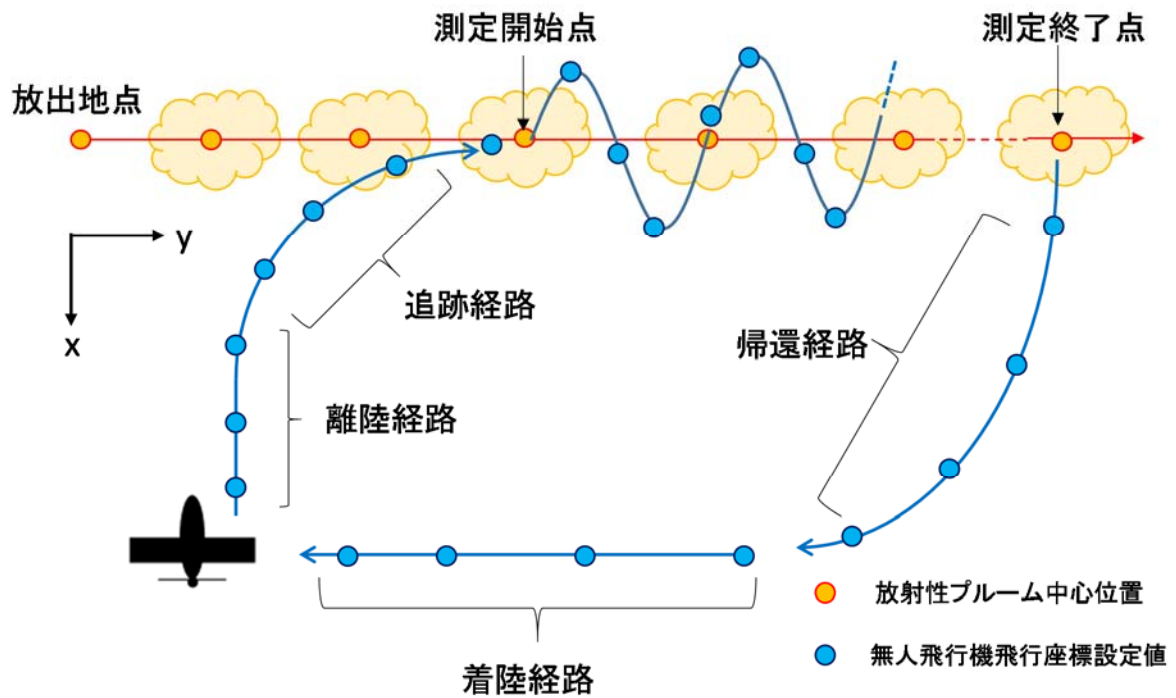


Fig. 5-7 フライトの流れ

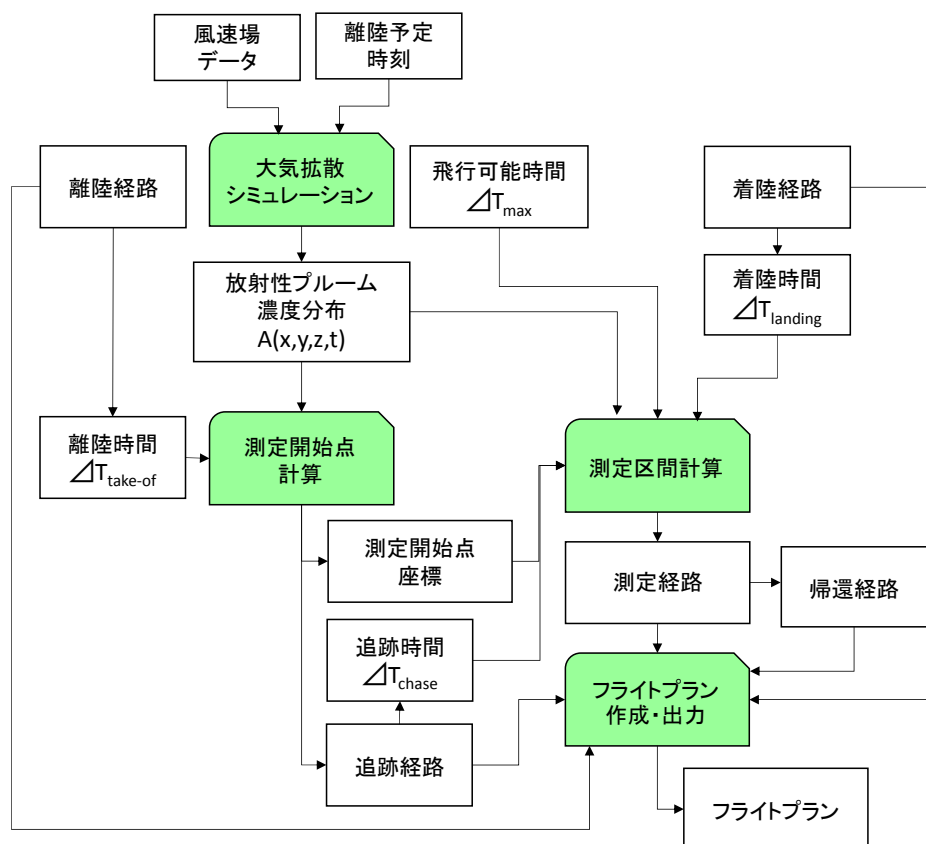


Fig. 5-8 フライトプラン作成フロー

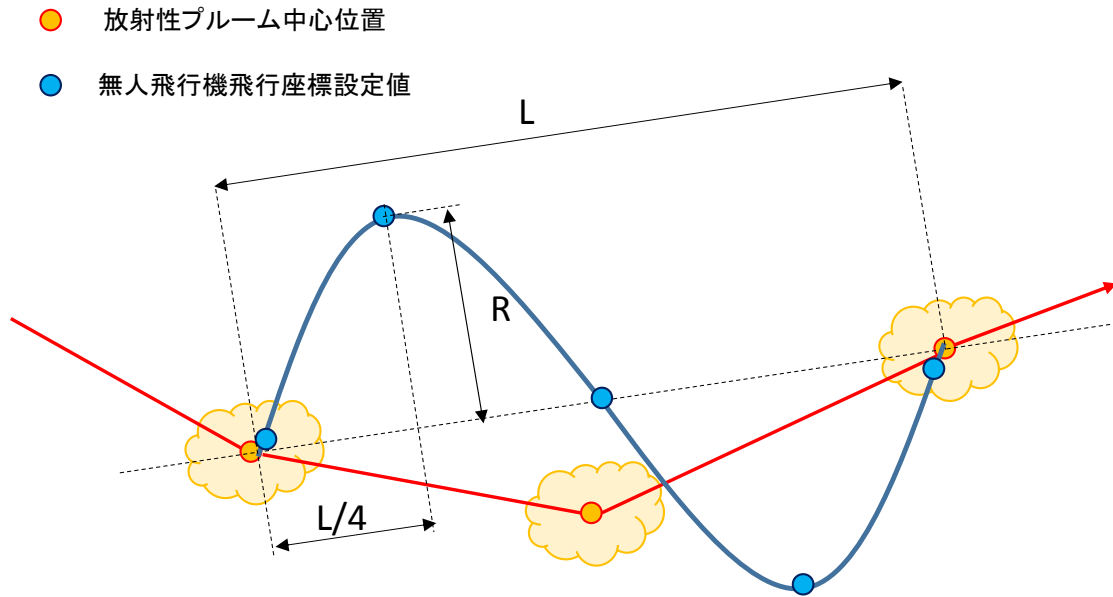


Fig. 5-9 蛇行飛行の概要

5.3.2 放射性プルーム探索アルゴリズムの検討

大気拡散予測計算の結果が実際の放射性プルームの挙動と大きく異なっていた場合、フライトプランに沿った飛行を行っても放射性プルームを捉えることができない。そのため、測定値を基にプルームを探索し、適切な放射性プルームの測定が行えるフライトプランに修正する必要がある。そこで、放射性プルーム探索を行うアルゴリズムの検討を行う。

放射性プルーム拡散予測に基づいて設定された測定開始点に無人飛行機が到達した場合、以下の①～③の状況が考えられる。

- ① 放射性プルーム拡散予測通りに放射性プルームに到達できておらず、測定結果も得られていない。
- ② 放射性プルーム拡散予測通りに放射性プルームに到達できていないが、何らかの測定値が得られた。
- ③ 放射性プルーム拡散予測通りに放射性プルームに到達できた。

①の場合、サイト固有の情報などから半固有の探索経路を予め与えるか、シミュレーションの結果を頼りに可能性の高い場所を探索する経路を生成する必要があると考えられる。

①により、②の状態に移行した場合は、次の手順としてプルームの中心に近づくことを目標とした探索が必要となる。この探索に用いるアルゴリズムとして、Artificial Bee Colony アルゴリズム、Particle Swarm Optimization アルゴリズムの検討を行ったが、アルゴリズムの性質上、本目的には不適當という結論に至った。そこで、数値計算における関数の最小化アルゴリズムを適用を検討した。その中でも、多次元領域の探索に有用であると考えられる Powell³⁸⁾の方法について検討する。

③では、プルームの広がり把握することを目指す。しかし、プルームに到達して③の状態に至ってもプルームを再び見失う可能性があるため、継続的にプルームの中心あるいはそ

れに相当するものを追跡していく必要がある。したがって、③のアルゴリズムは②で検討する関数の最小化アルゴリズムを修正・拡張していくことが有効であると考えられる。

以降に②の状態での利用が検討される関数の最小化アルゴリズム、③の状態での利用が検討される関数の最小化アルゴリズムを修正した手法として、探索範囲を制限した最大濃度位置探索アルゴリズムについて記述する。

5.3.3 関数の最小化アルゴリズム

数値計算における関数の最小化の中でも Powell の方法は多次元領域の探索に有用である。Powell の方法では以下の(1)～(3)の手順で探索が行われる。

- (1) 出発点 A から一筆書き的に探索領域の基底ベクトルに沿って最小点を探す。
- (2) 出発点 A から(1)の最終最小点 B へのベクトルに沿って最小点を探して、これを解候補兼次の出発点とする。
- (3) A から B への単位ベクトルを、一筆書き的に探すベクトル群の 1 つと入れ替えて(1)に戻る。

一般的な Powell の方法では方向集合は最終的に互いに共役となるが、実際には線形従属になる傾向がある。そこで、厳密でない代わりに簡単な方法として、最大減少方向を捨てる Powell の方法（修正 powell 法）がより適応可能であると考えられる。しかし、以下のような課題がある。

- ・飛行機を直線に沿って放射能濃度の最大点まで飛行した場合、プルームの放出点まで遡ってしまうという事象の発生

- ・プルーム中心の上方もしくは下方を飛行している場合、無人飛行機が鉛直に飛行できないという性質上、平行方向に探索し続けても目標となる放射性プルーム中心に到達できない場合があるということ

無人飛行機が鉛直方向に飛行できないことから、修正 powell 法の適用は水平方向 2 次元の探索のみとし、鉛直方向の探索は他の手法を検討する必要がある。

水平方向の探索において、プルームの濃度分布としてガウス分布を考えた場合、平行する二つの直線状における最大濃度点を直線でつなぐと、ガウス分布の中心を通る。先述の powell 法の計算手順 1)～3)において、最初の直線飛行で観測した最大濃度点を出発点とし、これに直交する方向と平行する方向を探索に使用すると、先述の計算手順(1)-(3)の 1 巡でガウス分布の中心に到達することになる (Fig. 5-10)。実際には、理想的なガウス分布でないため複数回繰り返す必要がある。直交する 2 つの水平方向の直線にて、最大濃度点の移動が発生しない場合、これをその高度における最大濃度点とし、鉛直方向の探索に切り替える。

鉛直方向の探索では、異なる高度による水平飛行による測定を行う。プルームに到達したと判断して探索を終了しない限り、最終的には、濃度の高い高度を挟み込みによって探索することを目指す。ただし、その過程で、より濃度が高い高度・水平位置を発見するだろうが、その場合そこから水平方向の探索に繋げることで、水平方向と鉛直方向を交互に探索することにする。最大濃度高度の挟み込みを行うには、まずその出発点として、最大濃度高度を含む区間を探す必要があるが、その区間の探索自体が異なる高度の測定を必要とする。水平方向の探索中

に得られた情報からプルームの拡散具合を鉛直方向にも仮定する。プルームの濃度分布の局所的近似として、風速の影響を受けて水平方向の1方向に伸びた分散したガウス分布を考え、水平方向で直交する2つの直線上の分散から垂直方向の分散の取りうる値を類推する。プルームの濃度の近似として[15]式のガウス分布 $G(x,y,z)$ を考える。ただし、各方向の広がり係数 σ_x 、 σ_y 、 σ_z について、 $\sigma_x \geq \sigma_y = \sigma_z$ とする。

$$G(x,y,z) = a \cdot \exp \left\{ -\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2} \right\} \quad [15]$$

プルームの中心を原点とし、風速の影響を受けて x 方向に分散が大きくなったとし、次に高度一定にて x 軸に対し角度 θ で濃度を測定することを考える。 x 切片 x_0 からの距離 s に対して、 x および y が[16]式のように表せるとする。

$$\begin{cases} x = x_0 + s \cos \theta \\ y = s \sin \theta \end{cases} \quad [16]$$

[15]式および[16]式から、 s に対する分散 σ_s は[17]式のように表せる。

$$\frac{1}{\sigma_s^2} = \frac{\cos^2 \theta}{\sigma_x^2} + \frac{\sin^2 \theta}{\sigma_y^2} \quad [17]$$

また、 s と水平方向で直交、すなわち、角度 $\theta + 90^\circ$ の測定にて分散 σ_t が得られていたとすると、[18]式を得ることができる。

$$\frac{1}{\sigma_t^2} = \frac{\sin^2 \theta}{\sigma_x^2} + \frac{\cos^2 \theta}{\sigma_y^2} \quad [18]$$

ここで、[17]式と[18]式の和から以下の[19]式が得られる。

$$\frac{1}{\sigma_s^2} + \frac{1}{\sigma_t^2} = \frac{1}{\sigma_x^2} + \frac{1}{\sigma_y^2} \quad [19]$$

分散 σ_x の取りうる値は σ_y から ∞ であり、これより、 $(\sigma_y)^2$ すなわち $(\sigma_z)^2$ の取りうる範囲は $1/(1/\sigma_s^2 + 1/\sigma_t^2)$ の1倍から2倍までとなる。プルーム探索の初期では、半値半幅を鉛直方向探索における初期区間探索の刻み幅とする。なお、初期区間を探る過程でも、より濃度が高い高度・水平位置を発見した場合は、そこから水平方向の探索に繋げるものとする。最大濃度高度を含む初期区間が決定した場合、挟み込みでこれを探索する。基本的なアルゴリズムは、測定済みの3点の高度にガウス関数への補間を行い、そのガウス関数の中心を次の探索高度として飛行機を飛ばして測定し、計4点の測定済み高度から適切な3点を選んでこれを繰り返す。ガウス関数の補間が不適切な場合は、黄金分割法をその代わりに用いる。この探索の過程で、より濃度が高い高度・水平位置を発見すると考えられるが、その場合、そこから水平方向の探索に繋げることにより、水平方向と鉛直方向を交互に探索することにする。また、探索中にプルームに到達したと判断する規定濃度を測定し、探索を終了するよう基準を設ける。

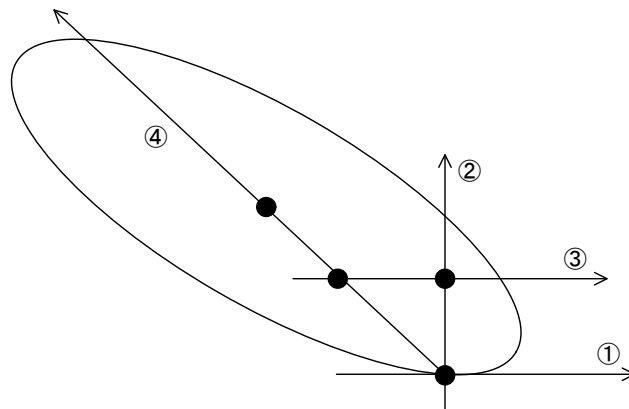


Fig. 5-10 放射性プルームの水平方向探索手順

5.3.4 探索範囲を制限した最大濃度位置探索アルゴリズム

UARMS の飛行速度は 30m/s と風速を無視できる程度ではないため、測定中におけるプルームの移流・拡散・変動を無視することができない。よって、プルーム内を限なく探索するのではなく、プルームの中心を追跡する手順の中でその周囲を測定することが現実的であると考えられる。放射性プルームから離れることなく測定を継続していくため、以下の(1)～(2)の手順を繰り返しながら測定を行う必要がある。

- (1) 抽出領域における最大濃度点の水平・鉛直方向の測定・算出を行う。
- (2) その最大濃度がプルーム境界濃度に達していない場合、最大濃度点を起点として新たな抽出領域を定める。プルーム境界濃度に達している場合は最大濃度点を基に最遠プルーム境界濃度点を求め、この点を起点として新たな抽出領域を定める。

抽出領域内の最大濃度点を求める方法として、直線上の測定において、最大濃度が極大点として抽出領域内に発見できる限り、5.3.3 項の手順②で行う領域内探索を実行する。直線上の測定にて濃度が上昇する方向に向かうと抽出領域の境界線にぶつかる場合は境界線上を探索する方法（境界線探索）に切り替える。

境界線探索では、濃度が上昇する方向に向かうことによって他の境界線と交差する場合、交差した境界線にて探索の続きを行う。ここで、2つの境界線の交点がそれぞれの境界線における最大濃度点であることが分かった場合は、この交点を抽出領域内の最大濃度点と見なす。境界線上で最大濃度となる極大点が見つかった場合は、これに直交する直線上の測定を行い、濃度の上昇方向が抽出領域内側に向いていれば領域内部探索に切り替え、外側に向いていればこの極大点を抽出領域内の最大濃度点と見なす。最遠プルーム境界濃度点を求める手続きは以下の(1)～(3)の通りである (Fig. 5-11)。

- (1) 放出点を原点とした直線にてプルームの内部から外部への境界点を求める。
- (2) (1)の直線と直行な直線にて、プルームの2つの境界点および最大濃度点（もしくは2つの境界点の中点）を求める。
- (3) 2つの境界点の距離が許容距離以下になるまで(1)と(2)を繰り返し、得られた境界点を最遠境界点と見なす。

実際には、最遠か否かの判断は放射性プルームの一部分だけからでは判断できず、局所的に凸であればそこに収束する可能性がある。特に、プルームが山脈などの影響で分離しているような複雑な形状になった場合は、どの放射性プルームを追跡するかは人の手で介入することが必要になると考えられる。

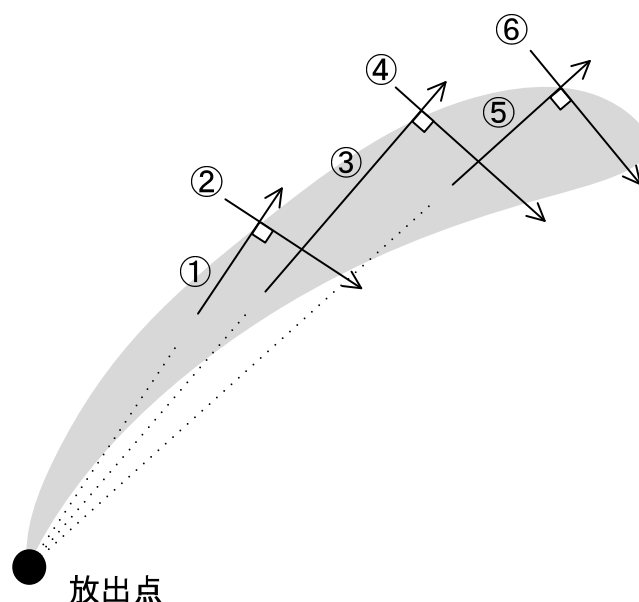


Fig. 5-11 最遠プルーム境界濃度点を求める手順

5.4 フライトプラン作成アルゴリズムの試作

放射性プルーム拡散予測計算および無人飛行機による測定データを3次元的に表示する手法を検討する。3次元描画のためのソフトウェアとして、ParaView/VTKを選定した。ParaViewはデータ分析及び3D描画を行うことのできる高機能なアプリケーションで、オープンソースで公開されている。ParaViewはVisualization Tool Kit (VTK) という3D描画エンジンを用いて作成されており、ParaView上で構築した描画構造を用いて、VTKを用いた独自のアプリケーションを作ることができるようになっている。米国の公的な研究機関などで多くの実績を持ち、我々の用途にも十分であると考えられる。

地形情報の上へのプルームを描画では、Volume Renderingを行う。本可視化ソフトの目的の一つに、プルームの大きさの把握があるため、濃度が健康被害に及ぶ閾値に達していないグリッドは、あらかじめVolume Renderingの対象から除外しておく。これにより、プルームの境界を形成することができる。また、プルーム内の濃度分布の表示は白から黒へのグラデーションを濃度の対数に対して割り当てることによって表示する。Fig. 5-12に地形にプルームを重ねた描画を示す。プルーム内部の濃度の情報について定量的に把握するため、プルームの断面にて濃度分布を表示する。プルームの断面として、海拔高度を指定した水平断面 (Fig. 5-12 [a]) と地形に沿った均一対地高度の断面 (Fig. 5-12 [b]) が考えられる。また、水平方向断面濃度分布をより定量的に把握するため、コンター画像も有益であると考えられる。Fig. 5-14はFig. 5-12 (b)の分布をコンター処理したものである。

UARMS により測定される、大気中濃度及び線量率データを 3 次元で表示する方法を検討する。計算によるプルームの予測と UARMS による測定データは、画面のカメラ操作（視点操作）を同期させた別画面で表示する。また、測定データの表示は、測定値に対応するカラーの広がり（濃度）と飛行の軌跡を地形上に描画する（Fig.5-15）。ここで、測定された濃度は時間の経過と共に移流・拡散を生じるため、測定結果の表示は点的な表示よりも単純に測定点からのガウシアンによる表現にて、濃度に応じたカラーにて、透明度を持たせて表示させる。透明度は、計測時刻からの時間経過に応じて透明化させていく方法の他、すべての測定を同等の透明度で表示させる方法も用意し、用途に応じて切り切り替えを行う。

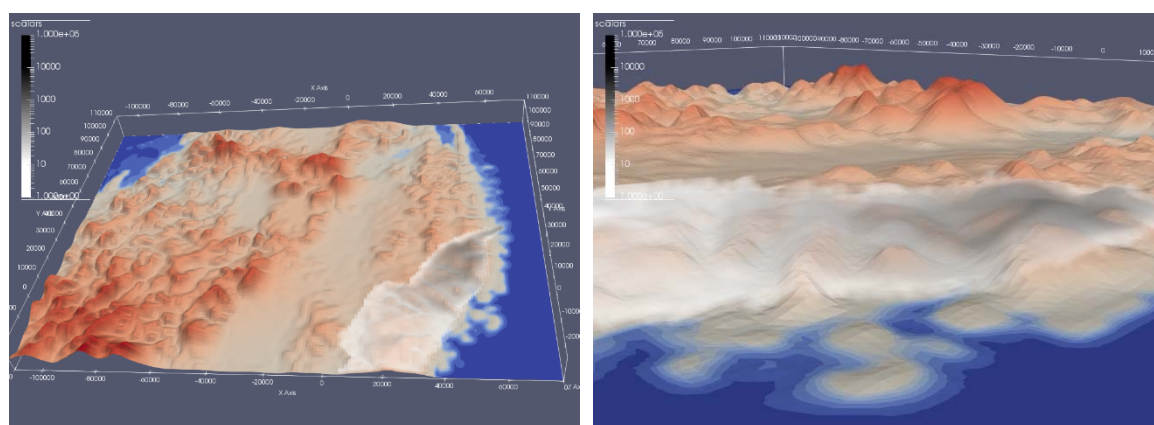


Fig. 5-12 放射性プルーム描画例

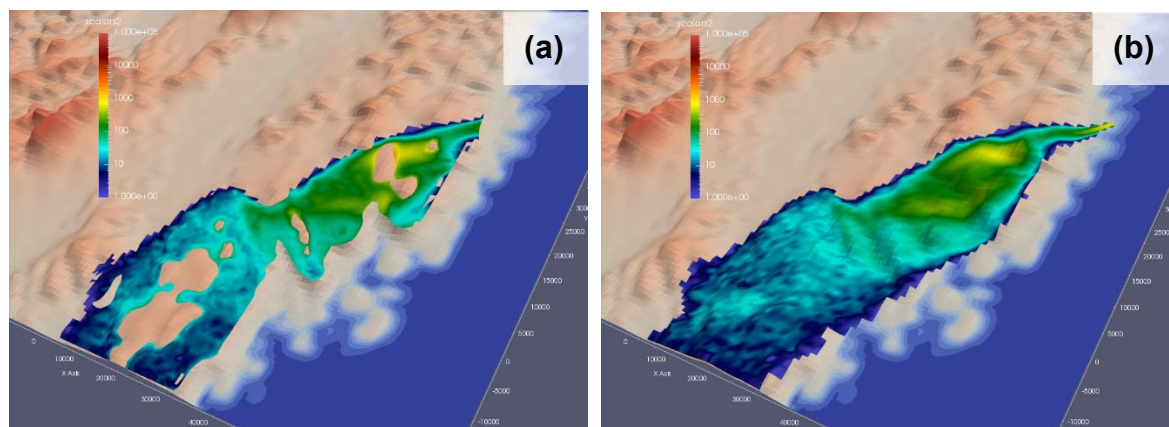


Fig. 5-13 水平方向濃度分布

(a) 海拔高度を指定した水平断面、(b) 地形に沿った均一対地高度の断面

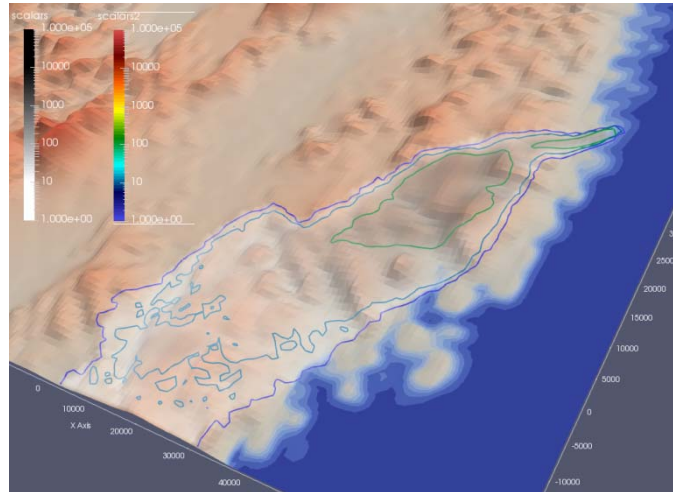


Fig. 5-14 プルーム濃度のコンター画像

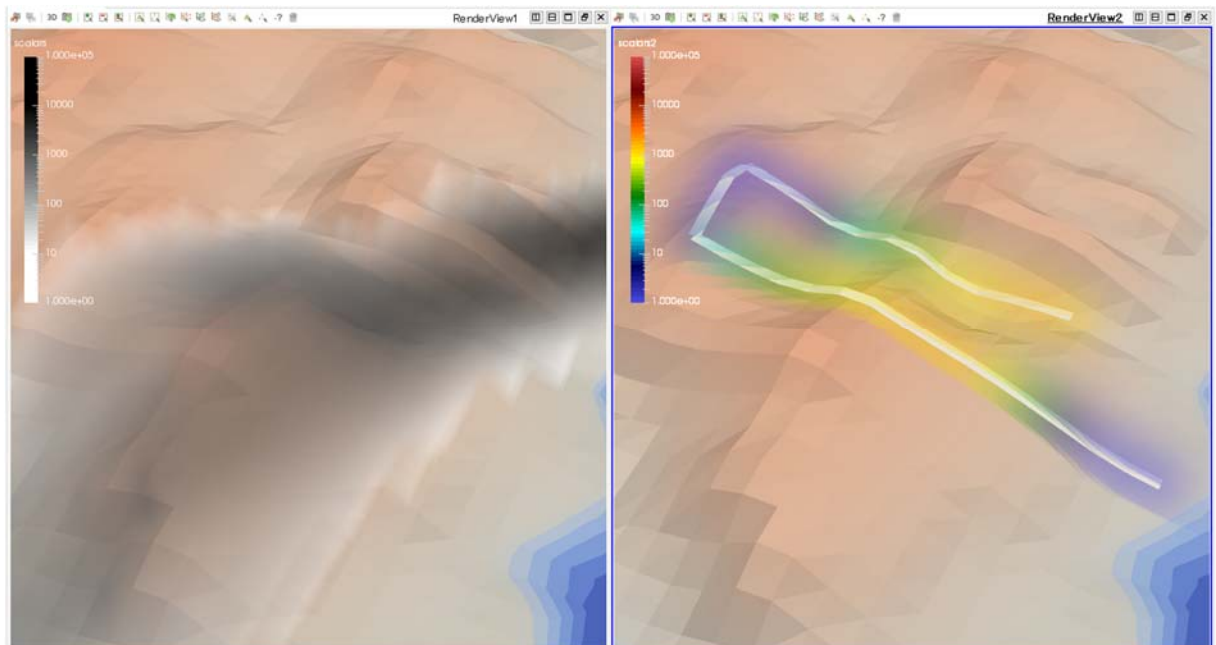


Fig. 5-15 放射性プルーム拡散予測結果と測定結果の同視点表示結果
(左)放射性プルーム濃度分布、(右)飛行測線と測定結果

6. 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プルームの測定技術の開発を行った。初年度となる今年度は、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を実施した。検出器の基礎設計では、計算シミュレーションを用いた検討を元に、プ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試作機を開発し、線源やラドンチャンバを用いた実測試験を実施した。

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。また、プルームを探索するためのいくつかの探索アルゴリズムを検討した。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。

- (1) プルーム内に機体の自己汚染の評価
- (2) 検出器の無人機搭載のための軽量化およびノイズ体制等の最適化
- (3) 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
- (4) システム統合後のフライト試験による問題点抽出

来年度以降の計画について Fig. 6-1 に示す。

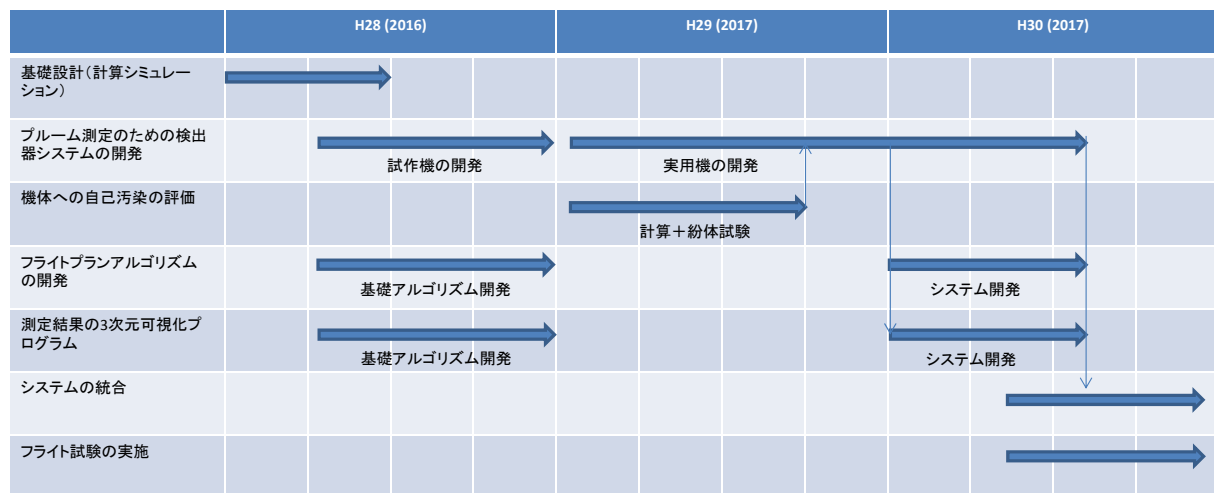


Fig. 6-1 プルーム測定事業の計画

参考文献

- 1) Katata, G., Chino, M., Kobayashi, T., Terada, H., Ota, M., Nagai, H., Kajino, M., Draxler, R., Hort, M.C., Malo, A., Torii, T., Sanada, Y., 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 1029–1070. (2015).

- 2) Hirayama, H., Matsumura, H., Namito, Y., Sanami, T., 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. 12 304–310. (2013).
- 3) Hirouchi, J. Yamazawa, H., Hirao, S., Moriizumi, J., Estimation of surface anthropogenic radioactivity concentrations from NaI(Tl) pulse-height distribution observed at monitoring station, Radiat. Prot. Dosimetry. 164, 304–315. (2015).
- 4) 眞田幸尚, 西澤幸康, 山田勉, 池田和隆, 松井雅士, 土田清文, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 石田睦司, ト部嘉, 志風義明, 杉田武志, 近藤敦哉, 鳥居建男, 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, 294-299 (2015).
- 6) Sanada, Y. A. Kondo, T. Sugita, Y. Nishizawa, Y. Yuuki, K. Ikeda, Y. Shoji and T. Torii, Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima Daiichi nuclear power plant. Expl. Geophys., 45, 3-7 (2014).
- 7) 佐藤昌之, 村岡浩治, 穂積弘毅, 眞田幸尚, 山田勉, 鳥居建男, 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, 215-225 (2015).
- 8) 鳥居健男, 眞田幸尚, 山田勉, 村岡浩治, 穂積弘毅, 佐藤昌之, 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, 30-34, (2014).
- 9) 眞田幸尚, 鳥居建男, 村岡浩治 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, 2A05, (2015).
- 10) M. Sato, K. Muraoka, K. Hozumi, Y. Sanada, T. Yamada, T. Torii, 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, 215–225, (2015).
- 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, 117-122, (2001).
- 12) L.E. Sinclair, H.C.J. Seywerd, R. Fortin, J.M. Carson, P.R.B. Saull, M.J. Coyle, V. Brabant, R. A, J.L. Buckle, S.M. Desjardins, R.M. Hall, Aerial measurement of radioxenon concentration of the west coast of Vancouver island following the Fukushima reactor accident, J. Environ. Radioact., 102, 1018-1023 (2011).
- 13) B. R. S. Minty, A review of airborne gamma-ray spectrometric data-processing techniques, Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, Report 255, (1988).
- 14) UAV factory 社ホームページ, <http://www.uavfactory.com/product/46> (2017 年 3 月閲覧)
- 15) AeroViroment 社ホームページ, https://www.avinc.com/uas/small_uas/puma (2017 年 3 月閲覧)

- 16) 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> (2017 年 3 月閲覧)
- 17) YAMAHA 発動機社ホームページ,
http://global.yamaha-motor.com/jp/news/2016/1011/fazer_r.html (2017 年 3 月閲覧)
- 18) Casanovas, R., Morant, J. J. and Salvado, 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, pp.78-83 (2012) .
- 19) Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., Hashimoto, S., Iwamoto, Y., Noda, S., Ogawa, T., Iwase, H., Nakashima, H., Fukahori, T., Okumura, K., Kai, T., Chiba, S., Furuta, T., Sihver, L., Particle and Heavy Ion Transport code System, PHITS, version 2.52. J. Nucl. Sci. Technol. 50, 913–923 (2013).
- 20) 公害研究対策センター, 窒素酸化物総量規制マニュアル, (2000).
- 21) 島田 学, 向阪 保雄, エアロゾル粒子の物体表面への沈着現象、日本エアロゾル学会、Vol. 3, 273-282, (1988).
- 22) Okuyama, K., Kousaka, Y., Yamamoto, S. Hosokawa, T, Particle loss of aerosols with particle diameters between 6 and 2000 nm in stirred tank., J. Colloid Interface Sci., 110, 214-223 (1986).
- 23) Doi, T. , Masumoto, K., Toyoda, A., Tanaka, A., Shibata, Y., Hirose, K., Anthropogenic radionuclides in the atmosphere observed at Tsukuba: characteristics of the radionuclides derived from Fukushima, J. Environ. Radioact., 122, 55-62 (2013).
- 24) 中島映至編, 大原利眞編, 植松光夫編, 恩田裕一編, 原発事故環境汚染, 東京大学出版会, P72 (2014)
- 25) Sehmel, G.A., Particle and gas dry deposition: a review, Atmos. Environ., 14, 983-1011 (1980).
- 26) Nicolini R., Camera F., Blasi N., Brambilla S., Bassini R., Boiano C., Bracco A., Crespi F.C.L., Wieland O., Benzoni G., Leoni S., Million B., Montanari D. and Zalite A., Investigation of the properties of a 1" x 1" LaBr₃:Ce scintillator, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res., A582, pp.554-561 (2007).
- 27) 一坪宏和, 山田裕司, 小泉彰, 下道国, 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, 62-70 (2005).
- 28) Pasquill, F., Atmospheric diffusion, Ellis Horwood, (1974).
- 29) 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).
- 30) 矢野雄幸, 佐藤弘三, 拡散方程式入門, 公害研究対策センター, 1978
- 31) Ramsdell, J. V., et al.: MESOI Version 2.0; An interactive mesoscale lagrangian puff dispersion model with deposition and decay, NEUREG/CR-3344, (1983)
- 32) R. A. Pielke, W. R. Cotton, R. L. Walko, et al., A comprehensive meteorological modeling system—RAMS. Meteorology and Atmospheric Physics, 49(1), 69-91, (1992).
- 33) Walko RL. HYPACT Hybrid PArticle and Concentration Transport Model version 1.2.0 User's Guide. Mission Research Corporation, (2001).
- 34) 気象庁ホームページ,

<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-4.html> (2017 年 3 月閲覧) .

- 35) T. S. Walters; The importance of diffusion along the mean wind direction for ground-Level crossing line source, Atmospheric Environment., 3, 461-466. (1969)
- 36) Turner, D. B., A diffusion model for an urban area, J. Applied Meteorology and Climatology, 3, 83-91 (1964).
- 37) Pasquilli, F., The estimation of the dispersion of windborne material. The Meteorological Magazine., 90, 33-49, (1961).
- 38) 発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針, 1982, 原子力安全委員会.
- 39) Powell, M. J. D., An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives, Computer Journal, 7 (2), 155-162, (1964)



この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。