

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02649

研究課題名(和文) 海上放射線モニタリングによる原子力事故時放射性物質放出率の早期推定手法の確立

研究課題名(英文) Source term estimation method of radioactive materials during nuclear power plant accident by maritime radiation monitoring

研究代表者

小田 啓二(Oda, Keiji)

神戸大学・海事科学研究科・名誉教授

研究者番号：40169305

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：原子力発電所が発災した際、あらかじめ設置していた放射線モニターの測定データから放射性物質の放出率を迅速に逆推定する新たな手法の確立を目的として研究を実施した。本課題では、計算モデルによって得られる放射性物質の移流・拡散をレスポンス関数として計測地点で得られる放射能データから unfolding法でソースタームを推定する手法を確立した。また、地形の影響を受けにくく、線量率やスペクトルデータを任意の地点で計測可能な海上特殊ブイの開発に関する検討を行い、海上放射線モニタリングシステムの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子力発電所事故時における迅速な放射性物質放出量推定は、地域住民の避難経路策定や環境への影響を評価する上で重要な指標となる。本研究は、その推定手法を確立するとともに、海上放射線モニタリングシステムの開発により測定点を増やすことで、放出量推定精度の向上も期待できることから、原子力災害時における社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：The quick source term estimation of radioactive materials is important for the evacuation of local residents and evaluation of the effect on the environment during a nuclear power plant accident. To reveal the emission rate of the radioactive materials, we have developed the source term estimation method using an inverse process, i.e. unfolding method. The developed method was applied to derivation of the response functions which have been obtained by the advection-diffusion simulations. In addition, a maritime radiation monitoring system using buoys has been established to contribute to the quick source term estimation.

研究分野：原子力学

キーワード：原子力災害 放射線モニタリング ブイ

1. 研究開始当初の背景

2011年3月、東北地方太平洋沖地震が発生し、東北地方を中心とする太平洋沿岸部において甚大な被害を被った。この地震により福島第一原発では原子炉建屋への外部電源が失われ、炉心を冷却するポンプが停止した。さらに非常用電源として備えていたディーゼル発電機で原子炉の冷却を試みたが、それも間もなく津波によって全ての電源機能を失ってしまった。その後、炉心損傷、水素爆発と被害が拡大し最も深刻なレベルの原子力事故を引き起こした。福島原発事故では土壌のみならず、海洋や河川など広範囲に放射性物質を拡散していると考えられる。福島原発事故のような原子力災害が発生したときに、環境への放射線影響を予測することは重要である。また、放射線被害を把握するためには、放射線モニターによる測定データから放射線物質の種類や放出量などの特性、即ち、ソースタームを迅速に推定する必要がある。

しかし、福島原発事故時には、オフサイトセンターやモニタリングポストなど陸上を拠点とした放射線測定が基本となっており、津波による電源喪失で十分な計測が行えなかった。また、原子力発電所の多くは海岸に設置されており、当該事故では7割を超える放射性物質が海側に放出されたことも考慮すると、陸上での放射線計測を補う海上放射線モニタリングの実現は、放射性物質放出量の推定において重要な要素であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題では、原子力発電所が発災した際、あらかじめ設置していた放射線モニターの測定データから放射性物質の放出率を迅速に逆推定する新たな手法の確立を目的としている。発生源からの放射性物質(粒子)の移流・拡散は、その時点での気象データと粒子輸送モデルを用いれば推定することができる。ある距離離れた測定点での沈着量が積分方程式で表されることに着目し、これを unfolding 法で解く手法を開発した。また、陸上の交通網・電力網・通信網が使えない場合の動作を想定し、地形の影響を受けず、さらに任意の地点を設定できるという利点がある海上特殊ブイを用いた放射線モニタリングシステムを開発した。

3. 研究の方法

3.1 Unfolding 法を用いたソースターム推定手法

放射性核種の放出量を推定するため、原発が発災した際に、あらかじめ設置していた放射線モニターの測定データから放射性物質の放出量を推定する。その計算手法を検討するために放出量と観測される放射能の関係性を把握する必要がある。放射性物質が大気中に放出された場合、図1に示すように風や降水に伴い大気中を移流・拡散し広範囲に放射線影響を及ぼす。放射性核種*i*の放出量の時間変化を $S_i(t)$ 、*j*番目の地点で観測された放射能の時間変化を $A_{i,j}(t)$ とすると、観測点における放射能は式(1)で表すことができる。

$$A_{i,j}(t) = \int F_{i,j}(t, \tau) S_i(t) d\tau \quad (1)$$

ここで、 $F_{i,j}(t, \tau)$ は核種が時間*t*に放出され、その時点での気象条件で移流・拡散して、遅れ時間*τ*で観測地点に沈着する割合である。また、この値は気象データが与えられれば粒子輸送計算法で求めることができる。本研究では、粒子輸送に移流拡散モデルである The Lagrangian Model(LM)を用いて $F_{i,j}(t, \tau)$ を求めた。放出量推定のためには、式(1)において被積分関数 $S_i(t)$ を求める必要がある。そこで時間的に連続である放出量、放射能、沈着割合を離散化し、行列計算として取り扱った。

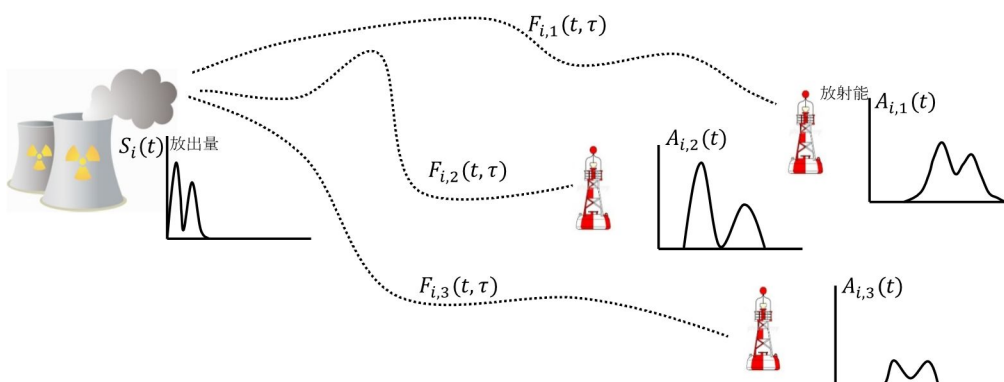


図1 放射性物質の放出量と観測地点における放射能の関係

ソースタームの推定に unfolding 法が有用であることを確かめるため、本研究では、御坊火力発電所を原子力発電所に見立て、放射性物質 Cs-137 が放出した場合に、図 2 で示す各地点で観測される放射能濃度の時間変化を LM によるシミュレーションで求めた。これを放射能データとしてインプットすることで、unfolding 法により、ソースタームを推定した。その際、観測点が 1 地点の場合と、複数点組み合わせた場合の推定精度の比較、及び、初期推定解に対する誤差の変動を考察した。また、海上放射線モニタリングの有用性を検討するため、離島にモニタリングポストが設置されている玄海原子力発電所においても同様の計算を実施し、計算メッシュの細分化を行うことで、より詳細なブイ設置場所の検討を行なった。

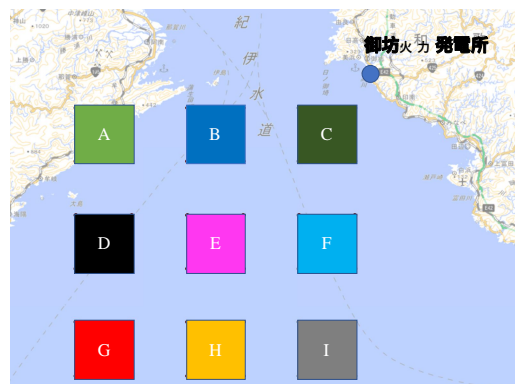


図 2 放射能データ観測地点

3.2 海上特殊ブイを用いた放射線モニタリングシステムの開発

本研究では、発災したサイトから 5 km までの領域と 5 ~ 30 km の領域に分けて、複数のブイから構成されるモニタリングシステムを開発した。前者は比較的近距离であるため、定点観測に加え、非常時に設置数を増やすことを想定して、比較的小型のブイを想定する。また近距离であるため、データ回収方法はドローンを用いることとした。開発した小型ブイのプロトタイプを作成し、実海域における実証実験を実施した。

一方で、サイトから 5 ~ 30 km の領域では、恒常的に定点観測を行うための大型のブイを想定してシステムの開発を行なった。まず、恒常的に設置するブイの満たすべき法令及び条件を整理した。次に、観測データ回収方法の検討を行なった、海岸線から 5 km 以上離れた場合、携帯電話回線は繋がらず、また、ドローンの飛行も困難であるため、衛星通信が唯一の手段となる。そこで、測定データの回収に最適な衛星通信方式の選択とデータ回収用通信プロトコルを開発した。開発したシステム一式を小型船舶に搭載し、実海域での放射線モニタリング実験を実施した。

4 . 研究成果

4.1 Unfolding 法を用いたソースターム推定

Unfolding 法によるソースタームの推定結果を図 3 に示す。横軸は組み合わせた観測地点数、縦軸は二乗平均平方根誤差(RMSE)の平均値を現しており、値が小さいほど推定精度が高いことを示している。図 3 から unfolding に組み込む観測地点数が多いほど推定精度が高いことが分かった。また、LM による移流拡散シミュレーションでは、従来のメッシュサイズである 11 km 四方から、2.75 km 四方まで細分化を行っても、計算精度は変化しないことが分かった。即ち、メッシュ細分化により、放射線モニタリング用ブイのより詳細な設置場所を検討できることが分かった。

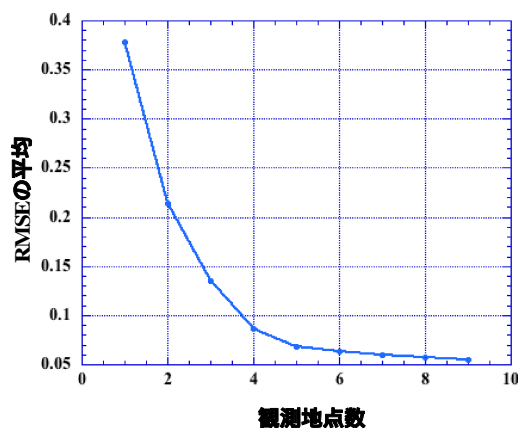


図 3 組み合わせ観測地点数による RMSE の平均の変化

4.2 海上特殊ブイを用いた放射線モニタリングシステム

サイトから 5 km までの海域における放射線モニタリング用ブイとして、図 4 のような中心部に放射線検出器、スティック PC、Wi-Fi ルータ、バッテリーを搭載した小型ブイのプロトタイプを作成した。実海域実験では、若狭湾沿岸部にブイを設置し、一定期間計測を行った後、地上から Wi-Fi 受信機を搭載したドローン操作し、ブイ近くで一定時間飛行することでデータ回収を行った。その結果、海上で計測したエネルギースペクトルデータを、地上の PC にて確認することができた。また、同型の計測体系を複数準備し、多点計測実験を行った。多点計測においても、通信は混線せず、それぞれの計測器からデータを回収することができた。以上より、ドローンによるデータ回収方式を含めた放射線モニタリング用小型ブイのシステム実証に成功した。



図 4 放射線モニタリング用小型ブイのプロトタイプ

サイトから 5 ~ 30 km の領域に設置する大型ブイについては、専門業者の協力を得て検討した。その結果、実用上のポイントとして、本課題で想

定している放射線モニタリングブイは航路標識法の適用を受け、許可標識に分類され、一定の光度を満たした灯標の設置を行う必要があること、漁業権が設定されている海域もあるため、自治体や漁業組合との打ち合わせが重要であること、及びブイの満たすべき条件として、最低でも10年は連続して使用が可能なほどプラットフォームとして強固であること、を明らかにした。また、数十km沖合に設置が可能な海上放射線モニタリングブイの要素開発として、衛星通信を用いたデータ回収実験を実施した。衛星通信モジュールを小型のLinux PCで制御し、Circuit Switched Data方式でデータ通信を行うプロトコルを作成した。作成したプロトコルを用いて、一定時間ごとに保存される線量率及びスペクトルデータを、遠隔地に設置したホストPCへ転送する予備実験を陸上にて実施し、問題なくデータが転送されることを確認した。陸上における予備実験の後、ブイに搭載予定の機器一式を小型船舶に載せて海上実験を実施した。海上実験の様子を図5に示す。海上実験では、実際に計測された線量率データおよびスペクトルデータを数KBのテキストデータとして、衛星通信によりデータを地上局に転送した。その結果、検出器からのデータ取得タイミングと、衛星通信によるデータ転送のタイミングを調整することで、可能な限りデータ損失を少なくすることに成功した。

以上のことから、提案した海上放射線モニタリングシステムが実海域で動作することを確認した。



図5 放射線モニタリング用大型ブイシステムの海上実験

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 吉田 直紀、金崎 真聡、梶野 瑞王、小田 啓二	4. 巻 18
2. 論文標題 原子力発電所事故に対応する海上放射線計測ブイの設置場所検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 神戸大学大学院海事科学研究科紀要	6. 最初と最後の頁 36-40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 梅川 修輔、金崎 真聡、小田 啓二、梶野 瑞王	4. 巻 40
2. 論文標題 Unfolding法を利用した放射性物質放出量推定手法の確立	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ESI-NEWS	6. 最初と最後の頁 9-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 梅川修輔、足立遼太、金崎真聡、梶野瑞王、小田啓二	4. 巻 16
2. 論文標題 Unfolding法を利用した放射性核種放出量推定手法の提案	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 神戸大学大学院海事科学研究科紀要	6. 最初と最後の頁 41-45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉田 直紀、金崎 真聡、山内 知也、梶野 瑞王、小田 啓二
2. 発表標題 原子力発電所事故時における海上放射線計測ブイの必要性に関する検討
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田代 研、安田 仲宏、能登 一輝、安藤 高涼、梅村 治輝、小田 啓二、金崎 真聡、吉田 直紀、小平 聡、北村 尚、福原 隆宏、今城 裕介、遠藤 倫崇
2. 発表標題 海上における多点での放射線計測手法の開発
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅川修輔、足立遼太、金崎真聡、梶野瑞王、小田啓二
2. 発表標題 海上観測データを用いた放射性核種放出量推定手法の確立と最適な観測地点の選定
3. 学会等名 日本保健物理学会第52回研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅川修輔、足立遼太、金崎真聡、梶野瑞王、小田啓二
2. 発表標題 原発事故時における海上モニタリングデータを用いた放射性核種放出率推定手法の提案(2)
3. 学会等名 日本原子力学会2019年秋の年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	小平 聡 (Kodaira Satoshi) (00434324)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学研究所 計測・線量評価部・研究統括 (82502)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	梶野 瑞王 (Kajino Mizuo) (00447939)	気象庁気象研究所・全球大気海洋研究部・主任研究官 (82109)	
研究分担者	安田 仲宏 (Yasuda Nakahiro) (30392244)	福井大学・附属国際原子力工学研究所・教授 (13401)	
研究分担者	河口 信義 (Kouguchi Nobuyoshi) (90234690)	神戸大学・海事科学研究科・名誉教授 (14501)	
研究分担者	金崎 真聡 (Kanasaki Masato) (90767336)	神戸大学・海事科学研究科・准教授 (14501)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	北村 尚 (Kitamura Hisashi)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学研究所	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------