



# Unfolding法を利用した放射性核種放出量推定手法の提案

梅川, 修輔  
足立, 遼太  
金崎, 真聡  
梶野, 瑞王  
小田, 啓二

---

## (Citation)

神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 16:41-45

## (Issue Date)

2019

## (Resource Type)

departmental bulletin paper

## (Version)

Version of Record

## (JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011872>

## (URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011872>



# Unfolding 法を利用した放射性核種放出量推定手法の提案

## Method for Estimating of Release Rate of Radionuclides by Using Unfolding Method

梅川修輔\*、足立遼太\*、金崎真聡\*、梶野瑞王\*\*、小田啓二\*

Shusuke UMEKAWA, Ryota ADACHI, Masato KANASAKI, Mizuo KAJINO, Keiji ODA

(令和元年7月12日受付)

### Abstract

It is important to estimate the release rate of radionuclides from a damaged nuclear power plant in order to understand the radiation effects on the surrounding environment. So, the reverse problem may be valid, which is a method to quickly estimate the release rate from the dose rate to be measured at observation points apart from the source. In order to realize this process, it is necessary to acquire plural observation data with high precision. So, we focused on radiation measurement on the sea, which is not affected by geographic obstacle and can be installed arbitrary points. Now, we try to use multiple buoys which equipped with suitable radiation detector, GPS device, communication device, and so on. In particular, we aim to establish a calculation method where we can estimate the release rate from the observation data, using The Lagrangian Model.

(Received July 12 2019)

### 1. はじめに

2011年3月、東北地方太平洋沖地震が発生しそこで生じた津波は東北地方を中心とする太平洋沿岸部に壊滅的な被害をもたらした。また、東京電力福島第一原子力発電所が被災し、土壌のみならず、海洋や河川など広範囲に放射性物質が拡散されるという事態を招いた。我が国では放射性物質が放出される緊急時に備え、周辺環境における放射性物質の大気中濃度及び被ばく線量など環境への影響を予測する SPEEDI システム<sup>[1]</sup>が開発されていた。SPEEDI システム運用には原発からの放射性物質の放出量を推定する必要があるが、福島原発事故時には電源喪失に伴い原発周辺のモニタリングが十分行えず、SPEEDI を有効に活用することができなかった。しかし広域にわたる放射能分布を予測できる SPEEDI の能力の高さは疑う余地がなく、迅速かつ正確に放出量を推定することが重要となる。

現在の原子力防災体制では、モニタリングポスト及びモニタリング車といった陸上での放射線測定が基本となっている。また原子力発電所の多くは海岸に設置されており、福島事故でも7割を超える放射性物質が海側に放出されている。このような観点から陸上での放射線計測を補う海上モニタリングの実現は放出量推定において重要な要素であると考えられる。そこで船舶や海上特殊ブイを用いた海上の大気モニタリングシステムの構築を目指している。

本報では、海上ブイに搭載され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迅速に逆推定する手法の確立を目的としている。

### 2. 逆推定手法

放射性核種の放出量を推定するためには、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。そのなかで放出量と測定値の関係を明確化することが重要になる。

---

\*神戸大学大学院海事科学研究科

\*\*気象庁気象研究所

## 2.1 従来の逆推定手法<sup>[2]</sup>

従来の逆推定手法の概要を図1に示す。この逆推定手法の特徴として大気拡散モデルと海洋分散モデルを組み合わせることで逆推定を二回行なっている点である。第一段階として放射性プルームが陸側に流れた場合に大気中の放射能濃度や地表への沈着量、空気中の吸収線量率など陸上でのモニタリングデータを基に、大気拡散モデルを用いて放出率を推定する。第二段階では陸側のデータから推定された放出率を初期条件として、サンプリングされた海水中の放射能濃度と海洋分散モデルによる計算から逆推定を行い、放出率を推定している。

このように、大気中におけるモニタリングデータと海水中のモニタリングデータを活用して、放射性物質放出量の逆推定を行なっている。また逆推定に、被害を免れた地点において正常に作動した放射線モニターによる Cs-134 や Cs-137 など比較的半減期の長い核種の沈着量データに合うように放出率の時間変化を繰り返し計算する、というマニュアル的な手法である。そこで unfolding 法という、よりシステムティックかつ迅速な評価手法の確立を目指した。

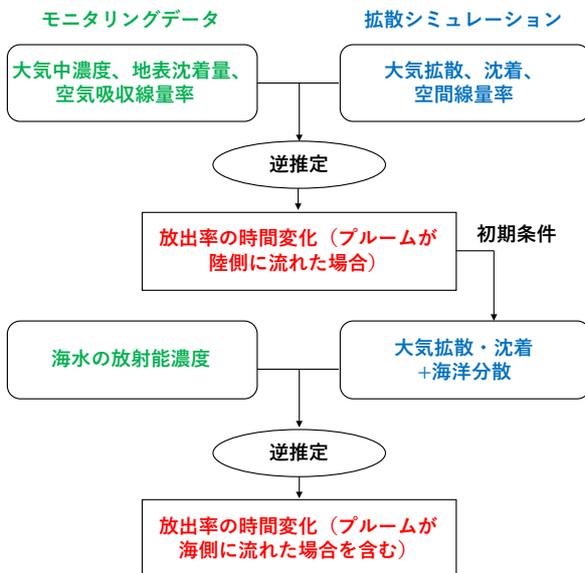


図1 逆推定手法概要<sup>[2]</sup>

## 2.2 unfolding 法概要<sup>[3]</sup>

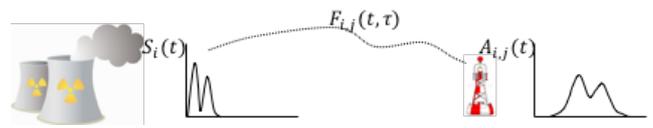


図2 unfolding 法のイメージ図

図2に示すように放射性核種 $i$ 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、

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

と表すことができる。ここで $F_{i,j}(t, \tau)$ はその核種が時刻 $t$ 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 $\tau$ で観測点に沈着する割合である。今回放出量を推定するために被積分関数である $S_i(t)$ を求める必要がある。このような積分方程式は中性子のエネルギースペクトルの推定などの放射線計測の分野でしばしば見かけられる。そこで放射線計測で使用される unfolding 法を移流・拡散分野に適用し、正確度の高い推定手法を確立することを考えている。

unfolding 法<sup>[3]</sup>は設定した初期推定解に修正係数を $k$ 回( $k = 1, 2, 3 \dots$ )繰り返し計算することで解を真の値に近づけていく方法である。

式(1)において $i = 1, j = 1$  ( $i \neq 1, j \neq 1$ は後述)と仮定する。また放射能の観測時間を $M$ 個、放出時間を $N$ 個にそれぞれ分割し、行列として計算を行う。 $m, n$ は $0 \leq m \leq M, 0 \leq n \leq N$ の範囲を満たすとする。

$n$ 番目の時刻に放出される放射性物質の放出量の初期推定解を

$$S_n^{[0]} = I \quad (2)$$

と定める( $I$ は任意の定数、右肩の添え字は繰り返し回数を表す)。 $n$ 番目の時刻に放出され、 $m$ 番目の時刻に計測される放射能 $a_{i,j}^{[k]}$ は、レスポンス関数 $F_{m,n}$ との積で

$$a_{m,n}^{[k]} = F_{m,n} S_n^{[k]} \quad (3)$$

となる。さらに時刻 $m$ で計測される放射能は

$$A_m^{[k]} = \sum_{n=1}^N a_{m,n}^{[k]} \quad (4)$$

と表される(図3参照)。

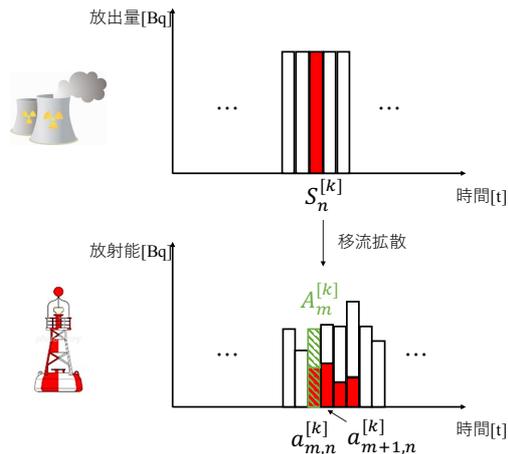


図3 放出量と放射能の関係

$k$ 回目の荷重係数 $W_{m,n}^{[k]}$ は

$$W_{m,1}^{[k]} = a_{m,1}^{[k]} / A_m^{[k]} \quad (n=1)$$

$$W_{m,n}^{[k]} = \frac{a_{m,n}^{[k]} + a_{m,n-1}^{[k]}}{2} / A_m^{[k]} \quad (n=2, 3, \dots, N)$$

(5)

$k$ 回目での修正係数 $C_n^{[k]}$ は、

$$C_n^{[k]} = \sum_{m=1}^M W_{m,n}^{[k]} \ln \left( \frac{A_m}{A_m^{[k]}} \right) \quad (6)$$

ここで $A_m$ は計測された放射能を表している。

最後に $k+1$ 回目の放出量は

$$S_n^{[k+1]} = S_n^{[k]} \exp C_n^{[k]} \quad (7)$$

と表される。ここで求められた放出量 $S_n^{[k+1]}$ を式(3)の放出量 $S_n^{[k]}$ に代入し、その後式(3)~式(7)を繰り返し計算することで正確度の高い解を求めることができる。

また、 $i \neq 1, j \neq 1$ の場合、行列の行にそれぞれの観測点もしくは放射性核種のデータを追加することで計算を行うことができる。ただし、この計算手法では、いずれの観測データも同等なものとして計算するため、観測点による信頼度の重み付けができておらず検討が必要である。

### 3. 実気象データを用いた逆推定の試み

前節で述べた unfolding 法の適用可能性を確かめるために、実海域での気象データを用いて逆推定を試してみた。今回の計算条件として、御坊火力発電所(東経 135.15 度、北緯 33.86 度)を原子力発電所と仮定し、2017 年 10 月 6 日 9 時から 10 月 8 日 3 時の期間、放射性核種 Cs-137 が 1 時間あたり 10 PBq 放出したとする。さらに放射能を計測

する観測点を図 4 に示す A(東経 134.75-134.875 度、北緯 33.5-33.6 度)、B(東経 134.75-134.875 度、北緯 33.7-33.8 度)、C(東経 134.75-134.875 度、北緯 33.3-33.4 度)、D(東経 135-135.125 度、北緯 33.5-33.6 度)、E(東経 134.5-134.625 度、北緯 33.5-33.6 度)の 5 地点とした。



図4 計算に使用した観測点

移流・拡散シミュレーションである The Lagrangian Model(LM)<sup>[4]</sup>を用いて原発事故時における放射性核種の挙動を再現し、unfolding 法の移流・拡散分野への適用実現性を検討する。

LM は大気中に放出された放射性物質が気象条件により移流・拡散され、任意の観測点における放射能を計算するシミュレーションコードである。図 5 に LM のイメージ図を示す。SPEEDI と比べると精度は落ちるが、気象情報を解析データで利用するため計算負荷が軽く、大型計算機がなくても計算可能であるという特徴がある。

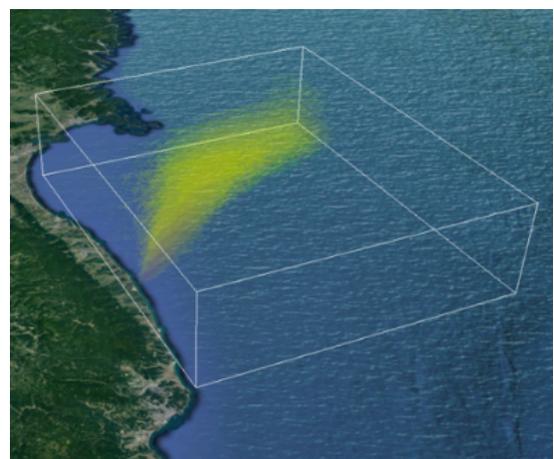


図5 LM イメージ図

LM を動かすために必要な気象場として気象庁メソ解析データ (GPV-MSM)<sup>[5]</sup> を用いた。GPV-MSM は約 11 km 間隔の等気圧面の気象解析値であり、3 時間ごとの気象データとなっている。

unfolding 法を用いて放出量を推定するためには、計測データである放射能とレスポンス関数が必要になる。そこで LM を用いて連続的に一定量放出した場合の放射能を観測データ、3 時間連続的に一定量放出した場合の放射能をレスポンス関数として扱う。観測点 A における放射能の観測データ、レスポンス関数の一例を図 6 に示す。

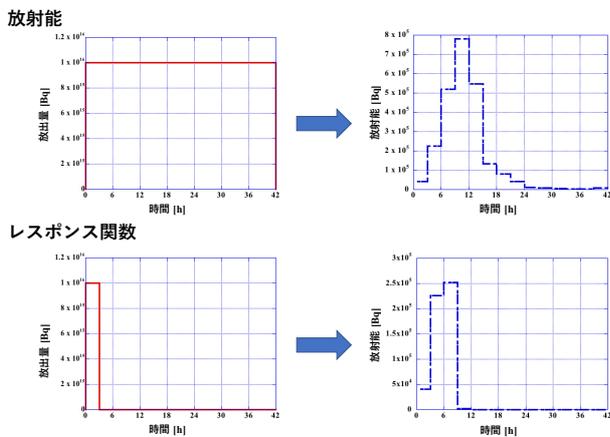


図 6 放射能とレスポンス関数の例  
(左:原発からの放出量、右:観測点における放射能)

これらの観測データ及びレスポンス関数から放出量を推定可能であるか検討を行う。

### 1) 観測点 1 点

5 つの観測点から 1 つの放射能データを入力した場合の放出量推定結果を図 7 に示す。縦軸が放出量の相対値を表していることから 1 に近づくほど精度の高い計算結果であると考えられることができる。

図 7 より、原発に近く多量の放射能を計測している観測点 D の放射能データから推定された放出量は精度が高いことがわかる。一方で観測点 E では大きな誤差が生じていることが確認できる。

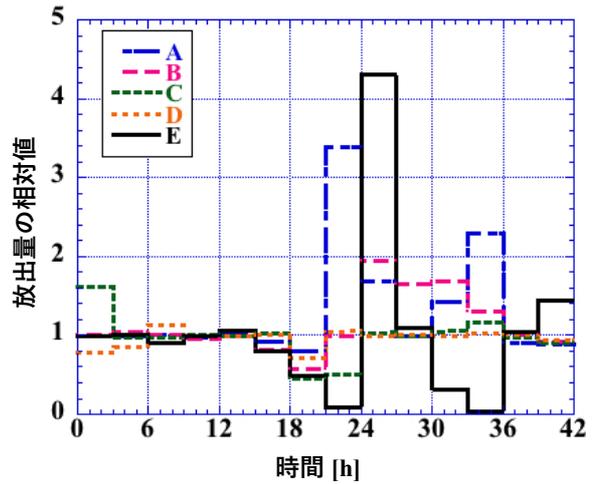


図 7 観測点 1 点から推定される放出量

### 2) 複数の観測点

最も大きな誤差を示した観測点 E のデータに複数の観測データを組み合わせ、誤差を減らすことを試みた。まず、観測点 E のデータに E 以外の観測データを 1 点加え、2 点の観測データを逆推定に使用してみた。

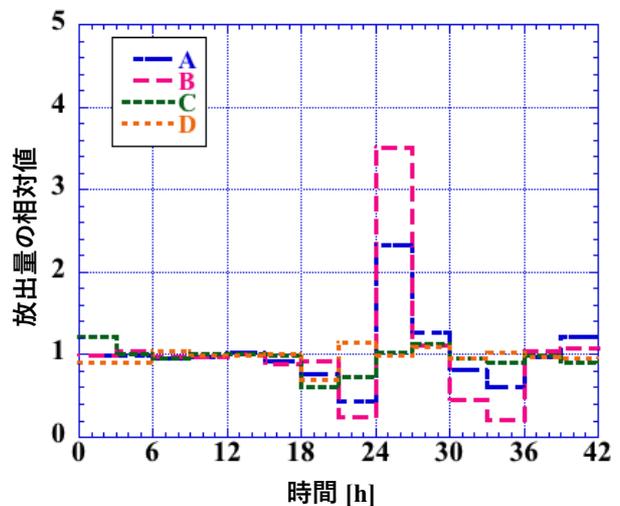


図 8 観測点 2 点から推定される放出量

図 8 が観測点を 2 点にした場合の推定結果である。観測点 D と組み合わせた場合の推定精度が高いことが確認できる。また観測点 1 点の場合、観測点 E から求められる平均二乗誤差は 0.853 であった。一方で観測点 2 点の場合の誤差は表 1 に示すように誤差が小さくなっていることが確認できる。

表1 観測点2点平均二乗誤差

A, E	B, E	C, E	D, E
0.152	0.490	0.0197	0.00934

同様に3点、4点と観測点を増やした場合の平均二乗誤差を表2及び表3に示す。

表2 観測点3点平均二乗誤差

A, B, E	A, C, E	A, D, E	B, C, E	B, D, E	C, D, E
0.0974	0.0188	0.0114	0.0166	0.00498	0.0135

表3 観測点4点平均二乗誤差

A, B, C, E	A, B, D, E	A, C, D, E	B, C, D, E
0.00802	0.00722	0.0148	0.0102

さらにA,B,C,D,E全ての観測データを使用した放出量を図9に示す。

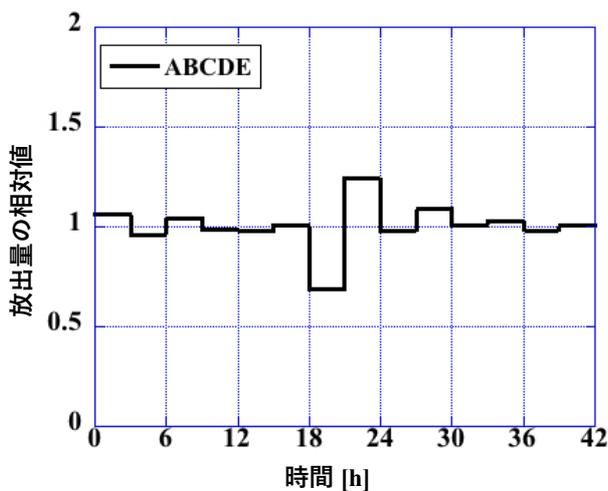


図9 観測点5点から推定される放出量

また、観測点5点の場合、平均二乗誤差は0.0108となっている。これらの結果から観測点を1点から2点、3点と増やすことで誤差が縮小傾向であることが確認された。観測点を4点から5点に増やした場合、平均二乗誤差はやや増加している。5点以上増やした場合、他の観測点やより広範囲でモニタリングを行なった場合の推定値を今後検討する必要がある。

#### 4. まとめと今後の課題

原発事故時に放射線モニターの測定値から放射性核種の放出量を推定することが重要になる。そのために陸上のモニタリングシステムを補う海上ブイを利用した放射線計測が必要になると考えている。そこで放射線計測で用いられる unfolding 法を利用し放出量を逆推定することを考えた。unfolding 法を用いることで観測データの増加に伴い正確度の高い放出量を推定することができた。今後の課題として、より高精度の推定を行うために観測点ごとのレスポンス関数に重み付けをすることを考えている。また、ブイを設置する最適な観測点の決定や沿岸での計測を実現させるために気象データの細分化などの課題に取り組んでいく必要がある。

#### 参考文献

- [1] 原子力規制委員会  
<http://www.nsr.go.jp/activity/monitoring/monitoring6-4.html>
- [2] Katata et al., *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 1029-1070, (2015)
- [3] 梶原将司 他, 神戸大学大学院海事科学研究科紀要, **9**, 20-25, (2012)
- [4] Kajino et al., *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 13149-13172, (2016)
- [5] 京都大学生存圏研究所  
<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/>