原 著

動的予測サーベイメータの ^{60}Co 汚染検査への応用

飯田治三, 鎌田貴志*, 渡井勝範*, 天野 豁**, 白川芳幸

独立行政法人 放射線医学総合研究所

263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

*応用光研工業株式会社

197-0003 東京都福生市熊川 1642-26

**株式会社 天野研究所

108-0074 東京都港区高輪 4-19-11

2008 年 5 月 29 日 受理

原子力事故,あるいは放射線事故の時,サーベイメータは表面汚染の検査に必須の検出器である。同時に放射線施設の日常管理に使われる代表的な装置である。表面汚染に用いられるサーベイメータは計数率 (min^{-1}) を求めるものである。通常,時定数が 10 秒の時,1 箇所あたりの測定には約 30 秒,より正確な測定には 60 秒程度の時間が必要である。緊急時,あるいは日常管理においても多数の箇所を測定するためには多くの時間を必要とし,作業者に重労働を強いることになる。また緊急時には迅速な測定が必要である。この課題を解決するために,静止時,移動時を問わず最終応答を待たずに応答初期の段階で最終値を予測する方法をこれまで原理的に検証してきた。本論文では限界性能の検証の観点と同時に実運用を想定して原子力発電所における管理区域外持ち出し管理レベルである ^{60}Co で 0.8 Bq/cm^2 の汚染が予測可能かを実験により確かめ,良好な成績を得ることができた。

Key Words : survey meter, time constant, beta ray, gamma ray, response, dynamic prediction method

1. はじめに

放射性物質による表面汚染の検査においてサーベイメータは必須の放射線検出器である。表面汚染の検査の一般的な手順は,1)サーベイメータを対象物から 10 mm ほど離して,毎秒約 50 mm のゆっくりとした速さで移動させ,2)計数率がバックグラウンドに対して有意に大きくなったと感じた場所で静止させ,3)30 秒程(時定数 10 秒の場合)待ってから指示値を読むものである。この手順が汚染箇所を全て見つけるまで繰り返される。このことは原子力事故時あるいは放射線事故時などの緊急時,あるいは日常管理においても多数の箇所を測定する際,多くの時間と労力を要することを意味

する。また移動測定においてはサーベイメータの指示値は静止時の最終応答値のわずか 10% から 20% 程度(移動速度に依存)であり,熟練者でないと汚染を発見すること自体が難しい。著者らは静止時において最終応答を待たずに応答初期の段階で最終値を予測し検査に要する時間を大幅に短縮する方法¹⁾を示し,続いて移動測定において最終応答を予測することにより汚染検査時間を大幅に短縮し汚染検査を容易にする方法²⁾を提案し,それぞれ実験により検証した。本論文では現時点での限界性能の検討を目的とし,かつ実運用を想定し原子力発電所における管理区域外持ち出し管理レベルである ^{60}Co で 0.8 Bq/cm^2 の予測可能性を検証した。

2. 原 理

2.1 数学的取扱

ここでは2.2で述べる計算アルゴリズムの理解のために予測原理を数式とグラフを用いて示す。サーベイメータの応答を一次遅れ系³⁾として近似し、応答の特徴を表わす時定数を予め設定し、サーベイメータを移動させながら測定したとする。その出力値である計数率 (min^{-1}) の測定値を2点用いて、この出力値を得た近傍で静止させて測定した場合に得られる最終応答値を予測する原理を示す。

大きさ N_0 のステップ入力を与えられてからの経過時間を t 秒、1次遅れ系の時定数を T 秒とすると、途中の応答値 N は、

$$N = N_0 (1 - \exp(-t/T)) \quad (1)$$

で示すことができる。経過時間 t_1 秒のときの応答値を N_1 、経過時間 t_2 秒のときの応答値を N_2 とし、予め設定する時定数 T とし、定数 C を

$$C = \exp(-(t_2 - t_1)/T) \quad (2)$$

と定義する。(1)式から

$$N_1 = N_0 (1 - \exp(-t_1/T)) \quad (3)$$

$$N_2 = N_0 (1 - \exp(-t_2/T)) \quad (4)$$

となる。ただし $t_2 > t_1$ である。この(3)式、(4)式を連立して N_0 について解くと、経過時間 t_1 秒における応答値 N_1 と経過時間 t_1 秒から t_2 秒までの応答変化分 $N_2 - N_1$ に $1/(1 - C)$ を乗じた項の和と解釈できる次式、

$$N_0 = N_1 + (N_2 - N_1)/(1 - C) \quad (5)$$

が得られる。この式が2点を用いて最終応答値 N_0 を求める予測原理式²⁾である。

(5)式が応答の任意の2点で成立することを次に示す。サーベイメータが検出する放射線を入力と考えると、いかなる入力の時系列も、ある時間持続する矩形パルスの合成で十分に近似

Fig. 1 Pulse input and its response.
(time constant : 10 sec)

Fig. 2 Step inputs and their responses.
(time constant : 10 sec)

できる。大きさ 100 min^{-1} の矩形パルスとその応答の様子を Fig. 1 に示す。ここではパルスの開始時刻を 1 秒、持続時間 4 秒、終了時刻を 5 秒とした。またサーベイメータの時定数を 10 秒とした。このパルスに対する応答は、時刻 1 秒から 5 秒まで、すなわちパルスが継続している間は上昇し、パルスがゼロになった時刻 5 秒以降はゼロに向かって減衰する。

この矩形パルスは Fig. 2 のように大きさ 100 min^{-1} 、開始時刻 1 秒の + ステップ入力と、仮想的な大きさ -100 min^{-1} 、開始時刻 5 秒の - ステップ入力に分解できる。したがって Fig. 3 の時刻 1 秒から 5 秒までは + 応答上の P_1 と P_2 の 2 点と (5) 式を用いて N_0 として 100 min^{-1} を得る。次に時刻 5 秒以降の減衰する応答に対して考察する。減衰過程の 2 点として P_3 と P_4 、

Fig. 3 Explanation of prediction principle.
(case of step inputs, time constant : 10 sec)

対応する時刻の+ステップ入力に対する+応答上の2点である U_3 と U_4 , 対応する時刻の-ステップ入力の-応答上の2点である D_3 と D_4 を考える。すると U_1 と U_2 の2点と(5)式を用いて N_0 として 100 min^{-1} を得る。同様に D_3 と D_4 の2点と(5)式を用いて N_0 として -100 min^{-1} を得る。一方,

$$P_3 = U_3 + D_3 \quad (6)$$

$$P_4 = U_4 + D_4 \quad (7)$$

である。ここで P_3 と P_4 を(5)式に代入する。すると,

$$\begin{aligned} N_0 &= P_3 + (P_4 - P_3) / (1 - C) \\ &= (U_3 + D_3) + ((U_4 + D_4) - (U_3 + D_3)) / (1 - C) \\ &= (U_3 + (U_4 - U_3) / (1 - C)) + \\ &\quad (D_3 + (D_4 - D_3) / (1 - C)) \\ &= (+100) + (-100) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

が得られる。すなわち(5)式は応答の減衰過程では最終応答値 N_0 として0を示す。したがって応答の任意の2点(ただし時刻5秒をはさむ2点を除く)で(5)式は成立する。すなわちサーベイメータの応答値から入力の矩形パルスを予測できる。

サーベイメータが移動中のある時刻(応答値 N_1)と直後の時刻(応答値 N_2)を考えると, この時間で移動した場所の入力(計数率

Fig. 4 Pulse input with statistical fluctuation and its response. (time constant : 10 sec)

Fig. 5 Step inputs with statistical fluctuation and their responses. (time constant : 10 sec)

min^{-1}) が一定であれば, 時刻の選び方, 移動速度の大小に拘わらず, (5)式により, 通過場所の近傍でサーベイメータを静止させて測定した場合に得られる最終応答値を予測できる。

2・2 計算アルゴリズム

(5)式が成立する為には, 連続した時刻 t_1, t_2 における応答値 N_1, N_2 が完全な1次遅れ系でなければならない。しかし, 実際の測定では線源からの放射線の放出及びサーベイメータでの検出は統計的変動の影響を受け完全な1次遅れ系にはならない。そのため最終応答値 N_0 の精度を確保する計算アルゴリズムが必要である。

擬似的な統計的変動を付加した平均的な大きさ N_0 のステップ入力を加えた場合, 2・1で示したFig.1, 2, 3に対応したFig.4, 5, 6が

Fig. 6 Explanation of prediction principle.
(case of step inputs with statistical fluctuation, time constant : 10 sec)

得られる。ここで、ある連続した時刻 t_1' , t_2' の2点間の入力に対する応答値 N_1' , N_2' が一定ではないため、入力の統計的変動の影響を減じる必要がある。

そこで、データを最小自乗法による n 次の多項式近似により、近似曲線の値から最終応答値 N_0 を得る方法を考案した。この方法は測定値を直接に用いず、近似曲線で計算される値、すなわち結果的に統計変動が減少した値を用いて最終応答値の精度を向上させるものである。

最小自乗法では、データ $m+1$ 個の値と近似した値との差の自乗和を最小にする n 次近似式の係数 $a_0 \sim a_n$ を求める (ただし、 $m \geq n$)。ここで n 次の多項式近似とし、 k 番目のデータ対を (x_k, y_k) 、近似多項式 j 次の係数を a_j とすれば、近似誤差 δ の自乗和は、

$$\sum_{k=0}^m \delta^2 = \sum_{k=0}^m (y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_k^j)^2 \quad (9)$$

となる。この式を近似多項式、 i 次の係数 a_i で偏微分した値が0となるような a_j ($j=0 \sim n$) を求めると、

$$\frac{\partial \sum_{k=0}^m \delta^2}{\partial a_i} = \sum_{k=0}^m -2x_k^i (y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_k^j) = 0 \quad (10)$$

Fig. 7 Pulse input with statistical fluctuation and its fitting response. (time constant : 10 sec)

Fig. 8 Step inputs with statistical fluctuation and their fitting responses.
(time constant : 10 sec)

$$\sum_{k=0}^m (-2x_k^i y_k + 2x_k^i \sum_{j=0}^n a_j x_k^j) = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{k=0}^m (x_k^i \sum_{j=0}^n a_j x_k^j) = \sum_{k=0}^m x_k^i y_k \quad (12)$$

$$\sum_{k=0}^m \sum_{j=0}^n a_j x_k^{j+1} = \sum_{k=0}^m x_k^i y_k \quad (13)$$

$$\sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^m a_j x_k^{j+1} = \sum_{k=0}^m x_k^i y_k \quad (14)$$

が得られる。ここで(13)及び(14)式における i に $0 \sim n$ を代入すれば、 $a_0 \sim a_n$ それぞれについての偏微分式が $n+1$ 個の連立方程式として得られ、これらを解いて a_j を求めることにより

Fig. 9 Explanation of prediction principle for fitting responses.

(case of step inputs with statistical fluctuation, time constant : 10 sec)

n 次の近似多項式が得られる。

連立方程式は Gauss-Jordan 法で解き，ここで $n=4$ とし，4 次多項式近似とすると Fig. 4, 5, 6 はそれぞれ Fig. 7, 8, 9 となり，得られる応答値が近似によって理論値に近づいたことがわかる。

3. 実験体系

精度確認の実験のために 3 水準の ^{60}Co 線源，サーベイメータ及びデータ収集装置等を準備した。以下に各々説明する。最後にこれらを用いた実験方法について述べる。

3.1 線源

核種は各原子力発電所で管理対象となっている ^{60}Co とし，その水準は法規制の表面汚染に関する限度レベルである 40 Bq/cm^2 ，管理レベルである 4 Bq/cm^2 ，実運用管理レベルである 0.8 Bq/cm^2 を用意した。それぞれの仕様を示す。

1) ^{60}Co : 40 Bq/cm^2 (日本アイソトープ協会製)⁴⁾

放射能 : 4 kBq (2006 年 11 月 8 日)

形状 : $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$

2) ^{60}Co : 4 Bq/cm^2 (自製)

放射能 : 211 Bq (2007 年 12 月 13 日)

形状 : ろ紙 $\phi 82 \text{ mm}$

Fig. 10 Plastic scintillation survey meter in use of experiments.

3) ^{60}Co : 0.8 Bq/cm^2 (自製)

放射能 : 42.2 Bq (2007 年 12 月 13 日)

形状 : ろ紙 $\phi 82 \text{ mm}$

3.2 サーベイメータ

表面汚染検査には，従来は圧倒的に GM 管式サーベイメータが使われてきたが， β 線のみならず γ 線にも検出効率が良いこと，検出面を大面積化できることからプラスチックシンチレータを装備したサーベイメータも普及してきた。このことを考慮し，後者を実験に使用した。外観を Fig. 10 に示す。また主たる仕様⁵⁾を下記に示す。

検出器 : プラスチックシンチレータ

測定対象 : β 線 (γ 線)

測定範囲 : 計数率 $0 \sim 100\,000 \text{ min}^{-1}$

受感面 : 100 cm^2 ($140 \text{ mm} \times 72 \text{ mm}$)

時定数 : 3, 10, 30 sec

3.3 応答実験装置

線源及びサーベイメータをセットし，計数率データを収集するための装置を製作した。この装置の概観を Fig. 11 に，主たる仕様を以下に示す。

装置構成 : 台車スライド装置，台車 (線源用)，
操作盤，データ収集装置

Fig. 11 Experimental set-up.

移動距離：0 ～ 1 500 mm

移動速度：毎秒 50 mm

入 力：サーベイメータからの出力 0 ～ 10 mV

デ ー タ：計数率 (min^{-1})

静止測定：300 点のデータ収集（例：0.2 秒ごと）

移動測定：300 点のデータ収集（5 mm ごと）

この装置の動作について説明する。まず移動測定について述べる。この装置では、台車に線源を固定し、毎秒 50 mm で移動させることができる。サーベイメータをスライド装置に付属する 0 ～ 1 500 mm の定規の任意の位置に固定治具を用いて固定する。例えばサーベイメータ受感面の中心を 500 mm、線源との距離を 5 mm とする。サーベイメータのアナログ出力（0 ～ 10 mV）端子に専用のケーブルを差し込み、データ収集装置と接続する。その時のサーベイメータのレンジ及び時定数をデータ収集装置の PC 画面に入力する。操作盤のボタンを押すと、台車が動き、5 mm ごとにアナログ出力がサンプリングされ、計数率 (min^{-1}) に変換され 300

点記録される。静止測定では上記と同様な設定で、台車を移動させ、サーベイメータの中心位置に対して任意の位置に静止させる。十分に応答する時間が経過した後、例えば 0.2 秒ごとにサンプリングし 300 点、60 秒分のデータを記録する。

3・4 実験方法

サーベイメータの受感面中心を 500 mm の位置に、線源と受感面の距離を 5 mm になるようにサーベイメータを固定治具で固定する。サーベイメータの時定数は 10 秒とする。

まず静止応答測定を実施する。線源の中心を 300 mm から 700 mm 程度の範囲の各位置にセットし、1 分以上の時間を経過した後、0.2 秒ごとに 300 点の出力を記録し、その平均を静止応答値とする（前述の、各位置における N_0 に相当）。

次に線源を 0 mm の位置にセットし、台車を毎秒 50 mm の速さで 1 500 mm まで移動させる。サーベイメータの出力を 5 mm ごとに収集し、記録する。この値を移動応答値とする。

Fig. 12 Responses for a ^{60}Co source. (activity : 40 Bq/cm^2 , time constant : 10 sec)

3.5 予測応答処理

予測応答計算に用いる移動応答値には線源の壊変の確率現象，サーバイメータの検出における確率現象などが統計変動として含まれている。これを考慮して，以下の手続きを行う。

- 1) 移動応答値が基準バックグラウンド+標準偏差 σ 以上の時のみ以下の手続きに進む。
- 2) 現時刻を含め前 20 点前後の応答値から近似曲線を作り，近似曲線上の現時刻の値，直前の値を用い(5)式によって最終応答値を予測する。
- 3) 予測値が移動応答値以下になった時点で予測を終了する。

4. 実験結果と考察

個々の線源に対する静止応答，移動応答，移動応答値のサンプリングデータを(5)式に代入して求めた予測値をグラフに示す。

4.1 ^{60}Co : 40 Bq/cm^2 に対する応答

静止応答，移動応答及び予測値を Fig. 12 に示す。静止応答の最大値は 500 mm の位置で 7996 min^{-1} であった。移動応答の最大値は 570 mm の位置で 1725 min^{-1} であった。静止応答最大値と比較すると 22% の応答が得られた。予測値の最大値は 535 mm の位置で 7757 min^{-1} であり，静止応答最大値との差は -3.0% であった。

Fig. 13 Responses for a ^{60}Co source. (activity : 4 Bq/cm^2 , time constant : 10 sec)

Fig. 14 Responses for a ^{60}Co source. (activity : 0.8 Bq/cm^2 , time constant : 10 sec)

4.2 ^{60}Co : 4 Bq/cm^2 に対する応答

静止応答，移動応答及び予測値を Fig. 13 に示す。静止応答の最大値は 500 mm の位置で 1005 min^{-1} であった。移動応答の最大値は 565 mm の位置で 369 min^{-1} であった。静止応答最大値と比較すると 37% の応答が得られた。予測値の最大値は 530 mm の位置で 986 min^{-1} であり，静止応答最大値との差は -1.9% であった。

4.3 ^{60}Co : 0.8 Bq/cm^2 に対する応答

静止応答，移動応答及び予測値を Fig. 14 に示す。静止応答の最大値は 510 mm の位置で 370 min^{-1} であった。移動応答の最大値は 575 mm の位置で 276 min^{-1} であった。静止応答最大値と比較すると 25% の応答であった。予測値の最大値は 555 mm の位置で 371 min^{-1} であ

り、静止応答最大値との差は+0.3%であった。

4.4 考察

前前報¹⁾及び前報²⁾において予測値を与える(5)式の原理の検証はされており、本実験は前回から確認されている低レベル放射能に対しての予測応答値の精度低下を改善する為の計算処理手法及び検出下限の検証のため実施された。それぞれの結果より合理的な精度(目標で予測値と最終応答値の差が相対的に±10%)で予測できたと考える。ここで予測値の最大値位置の後方へのシフトは、すなわち予測応答に要する時間と考えることができる。

5. 結 論

本実験により原子力発電所における管理区域外持ち出し管理レベルである⁶⁰Co: 0.8 Bq/cm²においてもサーベイメータの最終応答値を精度よく予測できることが検証された。このことに

より、最大でも1秒未満で最終応答を予測することが可能となり実運用レベルにおいても汚染検査時間を大幅に短縮できることが示された。今後は試作機において様々な環境下での精度の再検証及び、データ処理方法の再検討、予測限界の更なる向上を進めていきたい。

文 献

- 1) 白川芳幸, サーベイメータの応答性の高速化, *RADIOISOTOPES*, **54**, 199-204 (2005)
- 2) 飯田治三, 他, 動的予測によるサーベイメータ応答の高速化, *RADIOISOTOPES*, **57**, 351-357 (2007)
- 3) Ogata, K., *Modern Control Engineering* Third Edition, pp.670-679, Prentice-Hall, New Jersey (1997)
- 4) 日本アイソトープ協会, 協会製密封線源カタログ (2006)
- 5) 応用光研工業, サーベイメータカタログ (2006)

Abstract**Application of a Dynamic Prediction Survey Meter
to ^{60}Co Contamination Monitoring**

Haruzou IIDA, Takashi KAMATA*, Katsunori WATAI*,
Hiro AMANO** and Yoshiyuki SHIRAKAWA

National Institute of Radiological Sciences
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba Pref. 263-8555, Japan

*OKEN Co. Ltd.

1642-26 Kumakawa, Fussa-shi, Tokyo 197-0003, Japan

**Amano & Associates Co. Ltd.

4-19-11 Takanawa, Minato-ku, Tokyo 108-0074, Japan

A survey meter is a detector indispensable to inspection of the surface contamination in the nuclear accident or radiation accident. It is also a typical device used for daily management at nuclear or radiation facilities. The time of about 30 seconds is necessary for an accurate measurement when the time constant is set to be 10 seconds. A lot of time is needed to measure a lot of areas, and heavy labor will be compelled to the worker in the emergency or the daily management. Moreover, a prompt measurement is strongly required for the emergency case. The method of forecasting the final value at the initial stage of response regardless of geostationary or moving was proposed and examined by using small sealed sources. This paper introduces the improved method with higher accuracy than the previously reported method in practical fields such as a controlled area at a nuclear plant where the low activity of 0.8 Bq/cm^2 of ^{60}Co is the critical level. The improved method has been estimated by experiments and proved to be effective for such low activity measurements.

(Received May 29, 2008)