# 溜め池底質用放射性セシウム鉛直分布測定パイプと 多地点同時測定システムの開発

小川 浩1\*、 南 公隆2、 川本 徹2、 金井 羅門3、 石川 晃平3、 上村 竜一3

1産業技術総合研究所 機能材料コンピュテーショナルデザイン研究センター

(〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2)

2 産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門 (〒 305-8565 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第5)

3東京パワーテクノロジー株式会社 環境事業部分析センター

(〒267-0056千葉県千葉市緑区大野台2-3-6)

# Development of Sensing Pipe and Multipoint Monitoring System for On-site Measurement of Radiocesium Distribution in Pond Sediment

Hiroshi OGAWA<sup>1\*</sup>, Kimitaka MINAMI<sup>2</sup>, Tohru KAWAMOTO<sup>2</sup>, Ramon KANAI<sup>3</sup>, Kohei ISHIKAWA<sup>3</sup>, and Ryuichi KAMIMURA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Research Center for Computational Design of Advanced Functional Materials, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). (1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, Japan)
<sup>2</sup>Nanomaterials Research Institute, National Institute of

Advanced Industrial Science and Technology (AIST). (1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki, Japan) <sup>3</sup>Analysis Center, Environmental Affairs Division, Tokyo Power Technology Ltd.

(2-3-6 Onodai, Midori-ku, Chiba, Japan)

#### Summary

A new apparatus for on-site measurement of radiocesium vertical distribution in pond sediment was developed. Gamma-ray count rates measured by an array of PIN photodiodes were converted to the vertical distribution of radiocesium in sediment by the maximum entropy method. A 1.6 kg sensing pipe was constructed by assembling photodiodes, a GPS module, and the newly-released Raspberry Pi Zero. It operates about 5 hours by a mobile battery inside the pipe, and can be controlled from a web page via Wi-Fi. A multipoint monitoring system using multi sensing pipes was also developed for effective measurement and convenient visualization of horizontal distribution in pond sediment. On-site test of the apparatus at an undecontaminated pond in Fukushima prefecture reproduced the core-sampling data successfully. High correlation was found between the results obtained by these two methods. The test also revealed the possible shift of contamination peak from sediment top to inside the sediment during the years after 2011. The present method is useful for reducing the labor for core-sampling, and is effective for long-time monitoring since it does not assume any specific vertical distribution such as exponential function.

Key Words: Radiocesium, Sediment, Vertical distribution, Maximum entropy method, Raspberry Pi

#### 1. はじめに

2011年の福島第一原発事故によって放出・降下した放射性 セシウムの一部が農業用ため池底に堆積しており<sup>1)</sup>、農作物等 への影響や風評被害が懸念されている。そのため宅地等の除 染に引き続いて溜め池の除染も進められている。工法的には 池水を抜いて高濃度に汚染された底質表層を除去する方法や、 底質を池水と共にポンプで吸引し分級・除染後に池内に戻す 方法等があるが<sup>21</sup>、いずれも事前に底質の汚染状況を正確に 把握することが重要である。同じ池内でも地形や流入・流出口 の位置によって濃度が異なる。また除染する深さも重要で、

<sup>\*</sup>Corresponding author: E-mail:h.ogawa@aist.go.jp

汚染物質の降下直後は底質表層に濃度のピークがある指数関 数分布が多いが<sup>3-5)</sup>、時間経過や環境によりその後様々に変化 する<sup>6,7)</sup>。よって除染前の調査では池内の複数地点での鉛直分 布測定が必要となる。また除染後においても降雨等に伴う、 水系毎に未除染の山林から溜め池や湖沼<sup>8,9)</sup>、河川<sup>10,11)</sup>、ダ ム<sup>12)</sup>への放射性セシウムの移動が想定されるため、長期に渡 る底質モニタリングの継続が望ましい。

溜め池や湖沼の底質の放射能汚染調査はコアサンプリング 法を用いるのが一般的である。これは測定地点毎に底質コア を採取し、一定間隔で切断して放射能分析により鉛直分布を 求める手法である。池や湖沼の全域をカバーするには多くの 時間と労力が必要であり、より簡便な手法の開発が望まれる。 既に幾つかの新しい底質用測定機器が開発されて、湖沼底や 海洋底での測定に使用されている13-17)。しかしそれらの多くは 鉛直分布を直接測定しないγ線スペクトロメータによる底質表 面スキャンによる手法であり、装置によっては100 kg近い重 量や電源確保のために測定対象が限られるなど、簡便にコア サンプリングと同等の結果を得るには至っていない。指数関数 分布に近い汚染状況では有効な手法でも、年月の経過に伴い 鉛直分布が変動すると誤った結果を与える場合もある<sup>18-20)</sup>。著 者らは最近、市販の低価格パーツを用いた新しい底質用放射 性セシウム濃度鉛直分布測定法を開発した<sup>21)</sup>。これは1本の パイプ内に配置した複数のセンサーにより底質中のγ線量の鉛 直分布を計測し、有線接続したパイプ外設置の演算ボード上 で、最大エントロピー法に基づく逆解析により放射性セシウム 濃度の鉛直分布を得る手法である。本稿ではこの手法をべー

 水面
 パイプ

 水面
 k

 池水
 k

 地底
 正達y線

 直達y線
 E

 正質中減衰
 E

図1 解析に用いたモデル。底質中の小矩形体は 積分計算における層L内の体積素片を示す

スに著者らがその後に行った、解析部一体型測定パイプの開発、水平分布測定効率的のための多地点同時測定システムの開発、未除染の溜め池で行った性能試験の結果、およびそこで判明した原発事故後の鉛直分布の経年変化について述べる。

#### 2. 手法

#### (1) 測定原理

本測定法の原理は、複数の $\gamma$ 線センサーによって得た底質 中の $\gamma$ 線量の鉛直分布を、逆解析で放射性セシウム濃度鉛直 分布へ変換するものである。定式化の詳細は既報<sup>21)</sup>に記した ので、本節ではその要点を述べる。まず溜め池底質の密度お よび放射性セシウム濃度分布に水平一様を仮定する。次に底 質を表面から下方へ $N_L$ 枚の層に分割し、層L内での放射性セ シウム濃度を $A_L$ と置く(図1)。層L内の放射性セシウムから 射出された $\gamma$ 線が底質および池水で減衰・散乱されて、パイプ 内に設置した $N_i$ 個のうちのi番目のセンサーにて計測される $\gamma$ 線計数率の $A_L$ に対する比を、Lからiへの $\gamma$ 線到達係数 $T_{iL}$ と定義する。 $T_{iL}$ の値は底質層の深さと層厚、センサーの底質 表面からの深さの他に、放射性セシウムの $\gamma$ 線放出割合、放 出 $\gamma$ 線のエネルギー、底質密度の鉛直分布、水深、およびセン サーの感度特性に依存して変化する。底質全層からi番セン サーへ届 $\langle\gamma$ 線の計数率 $c_L$ は次式で求められる。

$$c_i = \sum_{L=1}^{N_L} T_{iL} A_L, \quad i = 1, ..., N_i.$$
 (1)

この式は行列TによるベクトルAからベクトルcへの変換式 であり、 $N_i \ge N_L$ の条件下で直ちに逆変換式 $A = T^{-1}c$ が得られ る。ここで $T^{-1}$ はTの擬似逆行列である( $N_i = N_L$ では通常の 逆行列)。しかしセンサーに隣接しない土壌層起源の $\gamma$ 線を 遮蔽しない測定条件では、行列Tは非対角項に相当する成分 が大きく $T^{-1}$ は一般に悪条件となる。よってこの擬似逆行列で 求まる放射能分布Aは、cの測定誤差が拡大された偽の振動 を多く含んだものとなる<sup>21,22)</sup>。そこで本手法では最大エントロ ピー法<sup>22-24)</sup>に基づく逐次式により $A_L$ を計算する。

$$A_L^{(n+1)} = A_L^{(n)} \exp D_L, \qquad (2)$$

ここで $c_i^{obs} c_i$ はそれぞれ $\gamma$ 線計数率の実測値と式(1)に よる計算値、 $\sigma_i$ は $c_i^{obs}$ の測定誤差、 $\lambda$ はラグランジュの未定 定数で、(*n*)は*n*回反復時の値であることを示す。初期値  $A_L^{(0)}$ には通常フラットな分布を用い、 $c_i(n)$ が $c_i$ と測定誤差 範囲内で一致した時の $A_L^{(n)}$ を解として採用する。測定誤差の 範囲内でcの情報エントロピー<sup>25)</sup>を最大にすることで、偽の振 動を抑えた鉛直プロファイルを得ることができる。また擬似逆 行列法と異なり $N_i$ の値に制限がないため、任意の底質層分割 への対応が可能である。

実際の逆変換に用いる $\gamma$ 線到達係数 $T_{il}$ は、散乱線を含め た全ての $\gamma$ 線を 662 keVの単色光で近似して、底質各層内の体 積素片から当該エネルギーでのコンプトン吸収・散乱特性<sup>26)</sup> により、底質および池水を経由してセンサーへ到達する直達光 から4次散乱光までの和を多重体積積分により計算した。放 射性セシウムは<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csとの混合物と考えて、原発事故 時の両者の存在割合を1:1<sup>27)</sup>とした場合の測定日時点におけ る混合比から $\gamma$ 線放出割合を計算した。底質の層分割は同時 に行ったコアサンプリングに合わせて5 cm間隔とし、底質の 密度は1.3 g/cm<sup>3</sup>で深さ方向に一定とした。センサーの絶対 感度は日本アイソトープ協会の<sup>137</sup>Cs標準線源で定量した。な お池水面上空から入射する $\gamma$ 線に関する定式化や、底質中の <sup>40</sup>Kの影響については既報<sup>21)</sup>を参照されたい。

#### (2) 測定装置

上述の測定原理を実装する装置として既報21)では測定パイ プと、それに有線接続されたコントロールボックス、操作用 Web 端末での構成を紹介した。しかしその後に市販された超 小型パーツの利用により、測定パイプとコントロールボックスの 一体化が可能となった。本稿における装置構成は一体化され た測定パイプとWi-Fiステーション、およびWeb端末である。 後の2者には市販品(モバイルWi-Fiルーター、およびPC・ タブレット・スマホ等の汎用Wi-Fiデバイス)がそのまま利用 できる。今回の測定パイプは一端を石突き加工した外径 42 mm、長さ約1.5mの塩ビ製パイプで、内部構成を図2に示 す。底質へ挿入する際に下側となる石突き側に複数のγ線セン サーを等間隔に配置し、池底付近から底質中にかけてのγ線 量の鉛直分布を測定する。 y 線センサーには前回と同様に Radiation-Watch 製PocketGeiger Type 6<sup>28)</sup>を用いた。これ はPINフォトダイオードで感知したy線カウントを0.1秒毎に USBで出力するものである。各センサーの計数値はUSBハブ を経由して、新しく市販された超小型Linux演算ボード Raspberry Pi Zero<sup>29)</sup>(ラズパイzero)へ送られる。一方、水 面側となるパイプ上部には位置情報取得用のGPSモジュール と通信用のWi-Fiドングルを配置し、共にUSBハブ経由でラ ズパイzeroに接続した。電源はパイプ内に納まる市販の5,000 mAhの円筒形モバイルバッテリーで、これ1個で約5時間稼 働する。パイプ全体の重量は約1.6 kgで以前より0.3 kg 増加 したが、外部との有線接続が無いため操作性が格段に向上している。石突き加工代を含めた構成パーツの総額は前回同様約10万円である。なお水深が概ね1m以上ではGPSモジュールおよびWi-Fiドングルが水面下となり信号の送受信に支障をきたすため、測定パイプの上部に継ぎ足す長さ1.6mの延長パイプも新たに製作した。

実際の測定操作はラズパイに搭載したソフトウエアにより実行される。まずWeb端末に表示された操作画面上のボタンを 押すことで、Wi-FiステーションおよびWi-Fiドングル経由で測 定パイプへ測定開始指示を送信する。それに従いソフトウエア は各センサーへ計測開始信号を送る。計測中は計数データの 収集と逆変換を逐次行い、放射性セシウム濃度鉛直分布と GPS位置を表示したWeb画面を構成してWeb端末へ送信す る。これらの機能は操作ボタンと条件入力欄を配置したhtml、 POSTデータに応じて動作するCGI、およびFortranで書か れた逆解析コードにより実装されている。これらの自作ソフト の他に、汎用ツールとしてグラフ作成用にGnuplot、GPS地図 等の画像変換用にImageMagickを利用した。

#### (3) 多地点同時測定システム

本手法で測定されるのは射出したγ線がセンサーへ到達可 能な領域内での放射性セシウム(<sup>134</sup>Cs+<sup>137</sup>Cs)の鉛直濃度分 布である。密度 1.3 g/cm<sup>3</sup>の底質中における 662 keVのγ線 の1/10線減衰距離が約22 cmであることと、測定パイプの半 径と散乱y線(特に前方散乱光)の寄与を考慮すると、本手法 の測定値は測定パイプから半径およそ30 cmの範囲内で平均 化された値と考えられる。この意味においては、本手法の1回 の測定と一箇所当たり3~4本のコアを採取して平均を取る一 般的なコアサンプリング法とは類似の測定条件にあると言え る。実際の溜め池底質の測定ではより広い範囲の汚染状況を 把握するため池内で場所を変えて測定を行うが、コアサンプ リング法では採取するコアの本数が増大し、放射能分析にも 相応の手間が掛かる。一方で本手法の場合は、測定パイプの 数を増やして異なる地点で同時並行的に測定することで、測定 の効率化を図ることが可能である。そのような目的で多地点同 時測定システムを新たに開発した。

このシステムは複数パイプの測定データをサーバで収集し、 多地点データの一括描画画面を送信するものである。データ 収集機能としては、まず測定パイプ用に定義したIPアドレス



図2 測定パイプ内のパーツ構成

空間を走査して稼働中のパイプを検出し、各パイプの測定デー タを一定時間間隔でサーバヘコピーする。描画機能では収集 したデータを基に、複数地点における鉛直分布グラフや深さ 方向・水平方向のカラーマップ、数値テーブル等を作成し、 Webページとして発信する。Web端末上ではブラウザのタブや ウィンドウを切り替えながら各パイプの操作とサーバ表示が行 えるため、個別の測定と並行した溜め池内の水平分布の把握 に効果的である。各パイプの測定は同時である必要はなく、 パイプ稼働の停止後でも転送済みのデータを用いての表示が 可能である。過去の日付のデータ表示についても同様である。 この多地点サーバ用ソフトは測定パイプ内のラズパイへの実装 も可能であるが、測定動作とサーバ動作で処理能力が不足す る可能性があるため、サーバ用のラズパイを別途用意する方が 無難である。 サーバ専用のラズパイとWi-Fiステーションお よびモバイルバッテリーを一組として池付近の適切な場所に設 置することで、多地点同時測定システムが稼働する。途中障 害物のない場所で2.4 GHz帯で行った通信試験では、Wi-Fi ステーションから30mの距離に置いた3本の測定パイプの測 定操作とサーバ表示が安定して動作することを確認した。

#### 3. 現地性能試験

本手法による測定例として福島県天栄村S池の結果を既 報<sup>21)</sup>で報告したが、その測定は底質の除染後に行われたもの で、鉛直分布は人為的な影響が加わったものであった。そこ で今回は除染が行われていない溜め池を対象に現地試験を 行った。測定対象は福島県中通り地方にある直径約20m、 深さ約30 cmの未除染の溜め池で、原発事故後6年余におけ る鉛直分布が自然な状態で観察できると考えられる。当池は 個人管理のため本稿では便宜的にX池と呼ぶことにする。測 定は2017年4月中旬に、X池内の3地点A~Cにおいて本手 法とコアサンプリング法による測定を行った。本手法による測 定は各地点で3回ずつ行った。内訳は、6 cm間隔で設置した 7個のγ線センサーの底質表面に対する挿入深さに関して、下 5個のセンサーが底質側で上2個が池水側となる測定を各2 回、全てのセンサーが底質側となる測定を各1回である。パイ プの挿入深さはパイプ側面に記した目盛りに対する池水面の位 置で把握した。測定時間は全て10分間とした。解析では池 水面の上空から入射するγ線を考慮した計算も行ったが、池水 による遮蔽効果が充分大きく結果への影響は見られなかった。 コアサンプリングは池内の同じ3地点で底質コアを採取し、5 cm間隔で切断、半導体検出器(ORTEC GEM25P4-70、 GEM30-70)とスペクトル分析装置(SEIKO EG&G MCA7-200、ORTEC DSPEC jr2.0)で<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csの濃度を定量 し、両濃度の和を取った。

地点A~Cにおける本手法の結果(7センサーが全て底質中 のもの)とコアサンプリング測定との比較を図3に示す。3地点 とも底質表面より下層で放射性セシウム濃度が高く、深さ20 cm付近にピークがあることが推定された。当池は未除染のた めS池と比べると値が少し高めであるが、深さ20 cm付近で 値が高く底質表面で低い鉛直分布は共通している。S池は除 染作業の影響を受けているが、当池の鉛直分布は自然に形成 されたものである。当池の中層域のピークは、原発事故直後に は底質表層付近にあったと想定される汚染ピークが、降雨等 に伴う土砂の流入・堆積を経て下方へ移動したものと推測され る。その他の鉛直分布変化の原因としては、放射性セシウム が付着した微細粒子の底質内での沈降や流動、有機物の分解 で生成したアンモニウムイオンによる吸着セシウムの脱離30)と 移動等が考えられる。本手法とコアサンプリングとの比較では、 採取できたコアの全長が短く底質深部での比較が不充分なも のの、採取された範囲での両手法の値は良く一致している。 図3には測定開始後3分間のみの線量データに基づいて解析 した結果も破線で示した。汚染ピークの濃度値や深さに若干 の相違はあるものの、10分間測定での傾向を既に良く捉えて いる。 これは当池のような 2~3 kBq/kg-wet 程度の放射性





セシウム濃度の場合、測定時間3分でおおよその鉛直分布が 把握できることを示唆している。3分間で得られた各センサー のγ線カウント数は60~150程度でその測定誤差はおよそ 10%あり、擬似逆行列法ではその誤差が更に拡大される。こ のような大きな測定誤差を含む条件でも安定した鉛直分布が 得られるのが最大エントロピー法の特長である。また本手法 で用いているPINフォトダイオードはNaIシンチレータ等と比 べてγ線感度がかなり低いにもかかわらず、数分から10分程 度で鉛直分布が測定可能であることで、当手法が費用対効果 において優れていると言える。

図4は、図3に示した当手法とコアサンプリング法の測定 データ間の相関図である。各線が各測定地点での鉛直プロ ファイル間の相関を示しており、左下側が底質表面、右上側が 底質中深部のデータに相当する。地点Bの最深部1点のデー タで若干の相違が認められるが、全体には非常に良い相関に あることが分かる。原点通過直線回帰における地点A~Cの 鉛直プロファイル間の決定係数 R<sup>2</sup>はそれぞれ 0.914、0.825、 0.931 である。また回帰直線における比例定数(本手法/コア サンプリング法)もそれぞれ 1.0054、1.1709、1.0401 と、1に 非常に近い。これはy線到達係数 T<sub>iL</sub>の絶対値が精度良く計 算できていることを意味しており、本手法がコアサンプリング 法への有効な補助または代替の手段となり得ることを示唆して いる。

X池での測定は実際には1本の測定パイプで行われたが、 多地点同時測定システムの動作確認のために、3地点の測定 データを別々の測定パイプへ転送した上でサーバによるデータ 収集と描画表示の試験を行った。結果を図5に示す。図5(a) は3地点、合計9回の測定で得られた濃度鉛直分布の一括グ ラフ表示、(b)は全9回の測定を横に並べた濃度鉛直分布の カラーマップ表示である。これら2種の表示は地点毎の鉛直



図4 X 池内 3 地点における本手法(10分間)と コアサンプリング測定による鉛直プロファイルの相関図

プロファイルの把握に適しており、パイプ毎や測定番号毎等への表示切替ボタンもWebページ上に実装している。図5(c)は 特定の深さにおける水平濃度分布を、Gnuplotのpm3dによる 補間機能を用いて池周辺の地形図上にカラーマップ表示した ものである。独立測定地点が3か所のため、青線で示された 池の内側の小さな三角形領域内での内挿マップであるが、測 定点を増やすことで描画領域の拡大や水平分解能の向上が期 待できる。また深さを変えながら水平分布を描画することで3



- 図 5 多地点同時測定システムによるX池測定データの表示例 (a) 鉛直分布の一括グラフ表示
  - (b) 鉛直分布のカラーマップ表示
  - (c) 深さ 12.5 cm における水平分布のカラーマップ表示
- ※(a)と(b)における英字+数字は測定パイプ(本稿では測定地点)と測定 番号を示す。(c)における茶線と青線はそれぞれ等高線と溜め池外周を 示し、池内の三角形の各頂点が測定地点(下から左回りに地点A、B、C) で、各地点間の濃度の内挿値をカラーマップ表示している。

次元的な汚染状況の把握が容易となる。これらのサーバ表示 は測定の進行とともに自動更新されるため、現場での迅速な測 定結果の把握に有効である。なお単一パイプでの測定でもこ れらのサーバ表示は可能である。

# 4. まとめ

市販のγ線センサーと小型演算ボードの組み合わせにより、 軽量で低価格の溜め池底質用放射性セシウム濃度鉛直分布測 定装置を開発した。超小型演算ボードのラズパイzeroの使用 によりセンサー部と解析・電源部が一体化され、測定パイプ の操作性が向上した。γ線計数率分布から放射能濃度分布へ の逆変換に最大エントロピー法を用いることで誤差に強い、数 分から10分程度での短時間測定が可能である。 この高い操 作性と短時間測定の特長を活かして、面的な測定を効率的に 行うための多地点同時測定システムも併せて開発した。福島県 内の未除染の溜め池で行った現地性能試験では、コアサンプ リング法による測定結果と良く一致する鉛直プロファイルが得 られ、両手法の測定値間の高い相関が確認された。同池での 底質中の放射性セシウム濃度鉛直分布は深さ20 cm程度に ピークがあり、原発事故後6年余の経時変化で指数関数型分 布からの乖離が進行していることが分かった。指数関数等の 仮定を用いる他の手法とは異なり、本手法は鉛直分布が変化 した溜め池にも適用が可能なため、今後の長期的な底質モニ タリングへの活用が期待される。またコア採取不要でその場で 測定結果が得られるため、コアサンプリング測定の補助や測定 作業の負荷低減に有効である。

### 謝 辞

X池での測定と取得データの提供にご協力下さった東京電 力ホールディングス株式会社福島復興本社除染推進室の関係 者の方々に感謝いたします。

#### 参考文献

- 「平成28年度福島県内のため池における放射性物質の 調査結果について」福島県HP(https://www.pref. fukushima.lg.jp/sec/36045d/h28tameike.html), 2017 年11月閲覧.
- 農林水産省東北農政局、「ため池の放射性物質対策技術マニュアル」、http://www.maff.go.jp/j/nousin/saigai/tamemanu\_zentai.html.
- K. Yoshimura, Y. Onda, T. Fukushima: Sediment particle size and initial radiocesium accumulation in ponds following the Fukushima DNPP accident. *Sci. Rep.*, 4, 4514 (2014).
- H. Kato, Y. Onda, M. Teramage: Depth distribution of <sup>137</sup>Cs, <sup>134</sup>Cs, and <sup>131</sup>I in soil profile after Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident. *J. Environ.*

Radioact., 111, 59-64 (2012).

- 5) D. Ambe, H. Kaeriyama, Y. Shigenobu, K. Fujimoto, T. Ono, H. Sawada, H. Saito, S. Miki, T. Setou, T. Morita, T. Watanabe: Five-minute resolved spatial distribution of radiocesium in sea sediment derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. J. Environ. Radioact., **138**, 264-275 (2014).
- G. Matisoff: Activities and geochronology of <sup>137</sup>Cs in lake sediments resulting from sediment resuspension. *J. Environ. Radioact.*, **167**, 222-234 (2017).
- N. Matsuda, S. Mikami, S. Shimoura, J. Takahashi, M. Nakano, K. Shimada, K. Uno, S. Hagiwara, K. Saito: Depth profiles of radioactive cesium in soil using a scraper plate over a wide area surrounding the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Japan. *J. Environ. Radioact.*, **139**, 427-434 (2015).
- 8) 久保田 富次郎,申 文浩,濱田 康治,人見 忠良:阿武 限高地に立地するNため池における水中の放射性セシ ウムのモニタリング. 農工研技報, 217, 85-100 (2015).
- 9) K. Matsuda, K. Takagi, A. Tomiya, M. Enomoto, J. Tsuboi, H. Kaeriyama, D. Ambe, K. Fujimoto, T. Ono, K. Uchida, T. Morita, S. Yamamoto: Comparison of radioactive cesium contamination of lake water, bottom sediment, plankton, and freshwater fish among lakes of Fukushima Prefecture, Japan after the Fukushima fallout. *Fish Sci.*, **81**, 737-747 (2015).
- 10) K. Yoshimura, Y. Onda, A. Sakaguchi, M. Yamamoto, Y. Matsuura: An extensive study of the concentrations of particulate/dissolved radiocaesium derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident in various river systems and their relationship with catchment inventory. J. Environ. Radioact., 139, 370-378 (2015).
- K. Tanaka, H. Iwatani, A. Sakaguchi, Q. Fan, Y. Takahashi: Size-dependent distribution of radiocesium in riverbed sediments and its relevance to the migration of radiocesium in river systems after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*, **139**, 390-397 (2015).
- H. Kurikami, A. Kitamura, S.T. Yokuda, Y. Onishi: Sediment and <sup>137</sup>Cs behaviors in the Ogaki Dam Reservoir during a heavy rainfall event. *J. Environ. Radioact.*, **137**, 10-17 (2014).
- D.G. Jones: Development and application of marine gamma-ray measurements: a review. *J. Environ. Radioact.*, 53, 313-333 (2001).

- 14) ソーントンブレア,矢野裕亮,浦環:曳航式海底ガン マ線計測装置の開発.海洋調査技術,25,1~6(2013).
- 15) 眞田 幸尚, 髙村 善英, 卜部 嘉, 土田 清文, 西澤 幸康, 山田 勉, 佐藤 義治, 平山 弘克, 西原 克哉, 伊村 光生, 石田 睦司, 石橋 聖, 佐瀬 隆聡, 鈴木 元和, 森 英治, 米澤 重晃, 鳥居 建男: 水底の in-situ 放射線分布測定手法の開発, JAEA-Research, 2014-0005 (2014).
- 16) 生野 元昭:水底放射能測定装置「みなそこ」による放射性物質現場測定手法の開発.環境放射能除染学会誌, 4, 3-13 (2016).
- 17) 洞昭 仁, 今井 稔, 布宮 智也, 石倉 剛, 高田 真志,
   神野 郁夫, 戸田 昂人, 中村 尚司:土壌放射能濃度の
   深さ分布モニタの開発. 放射線, 40, 63-66 (2014).
- 18) T.C. Feng, M.Y. Jia, Y.J. Feng: Method-sensitivity of in-situ γ spectrometry to determine the depthdistribution of anthropogenic radionuclides in soil. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **661**, 26-30 (2012).
- W. Sowa, E. Martini, K. Gehrche, P. Marschner, M. M. Naziry: Uncertainties of In Situ Gamma Spectrometry for Environmental Monitoring. *Radiat. Protect. Dosimetry*, 27, 93-101 (1989).
- 20) J. MacDonald, C.J. Gibson, P.J. Fish, D.J. Assinder: An experimental comparison of in-situ gamma spectrometric methods for quantifying Cs-137 radioactive contamination in the ground. *IEEE Trans. Nucl.*, 46, 429-432 (1999).
- H. Ogawa, K. Minami, T. Kawamoto, R. Kanai, K. Ishikawa, R. Kamimura: Inversion analysis on vertical radiocesium distribution in pond sediment from γ-ray count measurement. J. Environ. Radioact.,

175-176, 158-163 (2017).

- S.F. Gull, G.J. Daniell: Image reconstruction from incomplete and noisy data. *Nature*, **272**, 686-690 (1978).
- 23) E.T. Jaynes: Information theory and statistical mechanics I. *Phys. Rev.*, **106**, 620-630 (1957).
- 24) D.M. Collins: Electron density images from imperfect data by iterative entropy maximization. *Nature*, **298**, 49-51 (1982).
- C.E. Shannon: A mathematical theory of communication. *Bell System Tech. J.*, 27, 379-423 (1948).
- 26) O. Klein, Y. Nishina: Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac. Z. Physik, 52, 853-868 (1929).
- 27) K. Hirose: 2011 Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: summary of regional radioactive deposition monitoring results. *J. Environ. Radioact.*, **111**, 13-17 (2012).
- 28) PocketGeiger Type 6, Radiation-Watch Inc., http:// www.radiation-watch.org.
- Raspberry Pi, Raspberry Pi Foundation, https:// www.raspberrypi.org.
- 30) R.N.J. Comans, J.J. Middelburg, J. Zonderhuis, J. R.W. Woittiez, G.J. De Lange, H.A. Das, C.H. Van Der Weijden: Mobilization of radiocaesium in pore water of lake sediments. *Nature*, **339**, 367-369 (1989).

2017年11月17日受付 2018年1月9日受理 (第6回研究発表会 座長推薦論文)

## 和文要約

溜め池底質中の放射性セシウム濃度鉛直分布の新たな測定装置を開発した。1本の塩ビ製パイプ内に複数のy線センサー、GPS モジュール、演算ボード、電源およびWi-Fiドングルを格納し、底質中に挿して得られるy線計数率分布を最大エントロピー法で放 射性セシウム鉛直分布へ変換する。測定操作と鉛直分布の表示はWi-Fi接続したWeb端末上で行う。測定パイプは約1.6 kgと軽 量で、ケーブル接続が不要のため現場での操作性が良く、内蔵の小型バッテリー1個で約5時間稼働する。また複数パイプを使用 して池内の放射性セシウム分布を効率良く測定・表示するための、多地点同時測定システムも併せて開発した。福島県内の未除染の 溜め池で行った性能試験では、測定時間10分でコアサンプリングと同等の鉛直分布データが得られ、両手法による測定値の間に高 い相関があることを確認した。原発事故後6年余が経過した自然環境下での放射性セシウム鉛直分布として、指数関数分布と異な る底質中層域にピークを持つ分布が観察された。本手法はコア採取不要、小型軽量でその場で溜め池底質の汚染状況を確認できる ため、従来のコアサンプリング測定での作業負荷低減が期待できる。また指数関数分布等を仮定する他の測定手法とは異なり、土 砂の流入等による鉛直分布の変化にも対応できるため、今後長期間に渡る底質モニタリングにも適している。