

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

生野 元昭*

株式会社環境総合テクノス 環境部 (〒541-0052 大阪府大阪市中央区安土町1-3-5)

Development of the Radiocesium *in situ* Measurement System Using the Benthic Radiation Sensor “*Minasoko*”

Motoaki IKUNO*

Environmental Engineering Department, The General Environmental Technos Co., Ltd.
(1-3-5 Azuchi-machi, Chuo-ku, Osaka 541-0052, Japan)

Summary

The radioactive materials that were released from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant hit by a tsunami after the Great East Japan Earthquake have been causing serious environmental problems to the surrounding aquatic environments. An instrumental system named “*Minasoko*” was developed to measure activity concentration of the sediment *in-situ* up to 200m in depth without sampling specimens by encapsulating a NaI(Tl) scintillation detector. *Minasoko* has a feature of calculating the benthic activity concentration of radiocesium (Bq/kg-wet) by the simulation using gamma ray counting data with a set of the distribution of cesium deposit thickness and soil density. A good correlation ($r=0.97$) was observed between the activity concentration indicated by *Minasoko* and radiocesium concentrations of the sediment analyzed by a germanium semiconductor detector. It shows a satisfactory reliability of the *in-situ* measurement of aquatic radioactivity. *Minasoko* is also equipped with an underwater camera that can provide the information about the precise position of the sensor against the bottom surface for the reason that the sensor position has a significant influence on the calculation of radiation values in this system. This enables us to adjust the calculation of radiation values according to the exact position at which the sensor has set down to the bottom surface. It is anticipated in future that *Minasoko* will be widely utilized to facilitate decontamination operations in Fukushima area through the immediate measurement of the benthic radiations in lakes, reservoirs, rivers and coasts.

Key Words: Cesium, Benthic radiation, NaI, Bq/kg, Measuring instrument

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故により環境中に放出された放射性物質は、依然として周辺地域に深刻な環境問題をもたらしている。福島県では除染作業が進み、2015年10月末現在では公共施設で87.3%、農地で85.1%、住宅で76.2%の除染が実施済みとされている¹⁾。しかし、農業用ダム・ため池においては、未だ除染作業は行われていない。福島県と農林水産省によると、県内3,730か所のうち、1,939か所で底土の放射性物質を測定した結果、10,000 Bq/kgを超える放射性セシウムが444か所で検出された²⁾。これを受け、復興庁は「営農

再開支援」と「空間放射線量への影響」を考慮し、農業用ダム・ため池の除染を2015年秋から本格的に開始すると発表した³⁾。

放射性物質を含んだ底質の除去工事を実施する場合には、除染効果を確認するために除染前後の濃度を把握することが重要となる。陸上では放射線量を測定する機器(例えばNaIシンチレーションサーベイメータ)はあるものの、通常はこれらの機器は水中では使用できない。そのため現状の底質に関する放射線量あるいは放射性物質測定は、ため池等の底泥サンプルを採取し、実験室で分析することになり、結果が判明するまでに時間を要する。また、湖沼やダム、河川、海城

*Corresponding author: E-mail: ikuno_motoaki@kanso.co.jp

等における底質に吸着されたセシウム挙動や水生生態系に与える影響に関する研究における調査でも同様な課題がある。

このような課題解決のために、近年、すでに様々な研究機関や企業で水底の放射性物質を現場で測定する機器開発が行われている。東京大学生産技術研究所等では曳航式 γ 線計測システムによって海底の放射性セシウム濃度を測定する研究開発が行われ、福島沖海底の濃度分布が明らかにされている⁴⁾。同研究ではモンテカルロシミュレーションにより、光電ピークの γ 線カウント数から ^{137}Cs および ^{134}Cs の濃度に変換することが可能とされている。しかし、同システムの空中重量は135 kg、水中重量でも115 kgで、ため池や湖沼で使用する小型ボートには搭載できない。また、いであ株式会社でも曳航式水中放射線量計測システムの開発が行われており、こちらは重量約20 kgと軽量で小型船での測定が可能とのことである⁵⁾。しかし、同社のシステムでは空間線量率($\mu\text{Sv/h}$)の算出までで、底質の放射性セシウム濃度(Bq/kg)が得られるまでには至っていない。さらに、日本原子力研究開発機構では、ため池等を対象に比較的水深の浅い場所を対象とした底質の放射性セシウム濃度を測定する *in-situ* 用の測定機器(p-Scanner)の開発が行われている⁶⁾。同システムはプラスチックシンチレーションファイバを用いて最大20 mまでのライン状の濃度が同時に測定できる特長を有しているが、逆にライン状の水底面に凹凸があったり、水草等の障害物があるような場所では誤差要因が増えるといった課題が記されている。

筆者はこれらの課題を解決し、ため池、湖沼、河川、海底のいずれの測定場所においても対応可能とする耐水圧型の水

底放射能測定装置「みなそこ」(以下、「みなそこ」と称する)を開発した。「みなそこ」はスポット測定であることから水底面の起伏や障害物による影響を受ける可能性が少ない利点がある。これらの現場測定の柔軟性に加えて、 γ 線カウント数から放射性セシウム濃度(Bq/kg)に変換するシミュレーションロジックを開発したことから、オンサイトで濃度算出ができる機能も有しており、臨機応変な現場調査が可能となっている。

本報告では今回開発した「みなそこ」の機能と特長について紹介したい。

2. 「みなそこ」とは

「みなそこ」の構成は基本的に水中の放射線検出部と船上制御部からなる(図1)。放射線検出部はNaI(Tl)の結晶(ヨウ化ナトリウムに微量のタリウムが添加された結晶)をセンサーとするシンチレーション検出器を耐圧容器に封入したもので、得られたスペクトルデータを船上PC(パーソナルコンピュータ)で処理するシステムになっている。船上から検出部を水底面に降ろして測定する場合、検出部の耐圧容器底面(「みなそこ」のセンサー面)が必ずしも水底面に平行にかつ安定して密着しているとは限らない。この着底状態は測定精度に大きな影響を与えるため、肉眼では確認できない深度の場合、センサー面の状況を確認する機能が必要となってくる。そこで、この対策として水中カメラを付随させてセンサー面の着底状況を監視する機能も付加した。

「みなそこ」の水中部は様々なニーズに合わせて、基本式、小型軽量式、リアルタイム式、スタンドアロン式の4種類を開

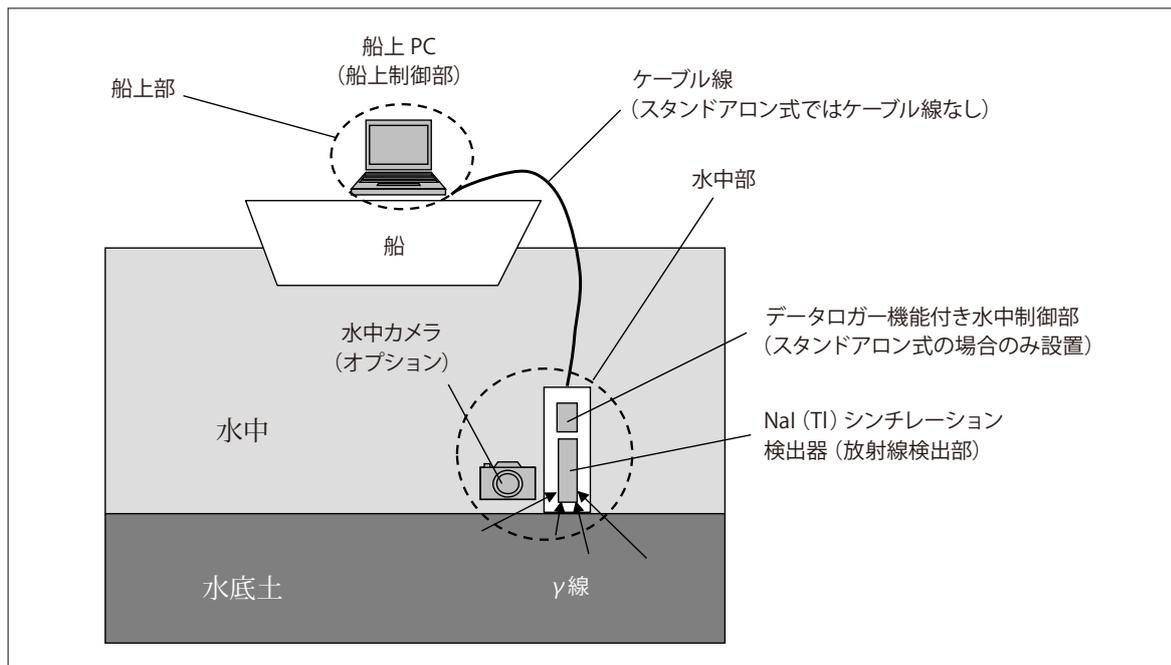


図1 「みなそこ」の基本的構成図

発した。小型軽量式はゴムボートを利用する「ため池」対応仕様である。リアルタイム式は船上においてリアルタイムでデータを観察できる。スタンドアロン式はデータロガー機能のある水中制御部を放射線検出部に付随させ、これら水中部（水中

制御部および放射線検出部）を揚収後、事後確認する方式で、測定上の制約条件が少ないメリットがある。各タイプの特徴を表1に、それぞれの概観を写真1～5に示す。

表1 「みなそこ」のタイプ一覧

項目	基本式	小型軽量式	スタンドアロン式	リアルタイム式
対象水深	～10 m 程度	～5 m 程度	～200 m 程度	～50 m 程度
対象場所	池、川、湖沼	池、川	湖沼、ダム、海	海
使用船	ボート	ボート	ボート、漁船、大型船	クレーン付漁船
カメラ式	なし (小型水中カメラ取付可能)	なし (小型水中カメラ取付可能)	小型水中カメラ	ハイディフィニションカメラ
制御	船上 PC	船上 PC	水中 PC	船上 PC
ケーブル線	有線	有線	なし	有線



写真1 基本式「みなそこ」水中部



写真2 小型軽量式「みなそこ」水中部

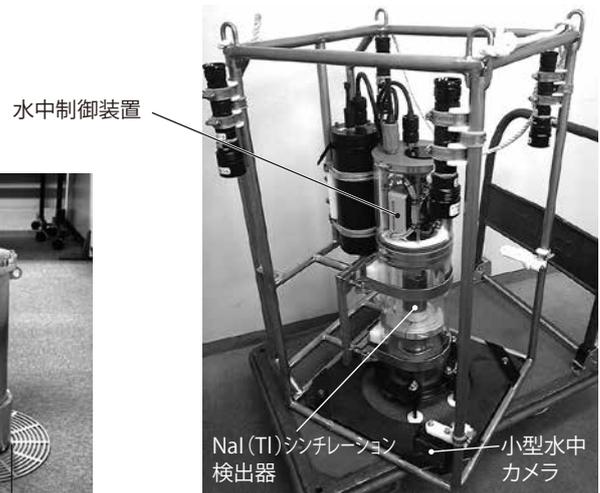


写真3 スタンドアロン式「みなそこ」水中部

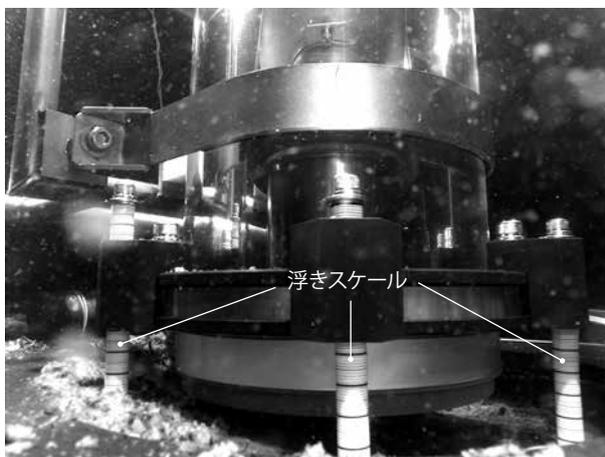


写真4 小型水中カメラによる着底状態の写真(水深152 m)

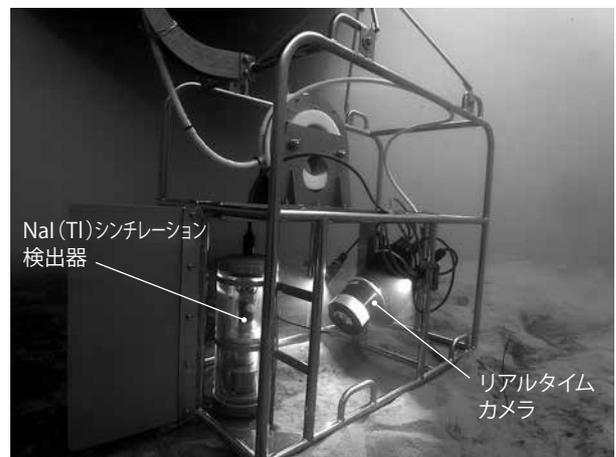


写真5 リアルタイム式「みなそこ」水中部

3. 濃度算出モデルの基本的考え方

底質土壌に含まれる放射性物質から発せられるγ線は「みなそこ」の検出器 (NaI(Tl) 結晶) に捕捉されるまでに途中の土壌、水、耐圧容器や鉛の遮蔽板を透過する間に一定の割合で減衰される。この減衰割合はγ線のエネルギーの大きさと透過する物質によって透過距離当たり一定の係数を設定することで求められる。本システムでは土壌に点線源を3次元的に配置し(図2)、各位置からの受信強度を3次元的にモデル化して計算することによって、検出器が受ける土壌全体からのγ線強度を決定する。底質土壌の放射性セシウム濃度B(Bq/L)

は、検出器で捕捉されるカウント数Iから式1で算出される。

$$B = \alpha I / S \dots\dots\dots (式1)$$

ここで、Iは図3の¹³⁴Cs(低エネルギー側)+¹³⁷Csの合計カウント数のうちの¹³⁷Csのみを対象とし、コンプトン散乱等のバックグラウンド等も差し引いたものとする。式1のα(Bq・L⁻¹・カウント⁻¹)はγ線カウント数I(カウント)から¹³⁷Cs濃度Bに変換する本システム固有の定数であり、後述する標準体積線源による実験で求められる。また、Iは通常10分間積算値とし、Sは

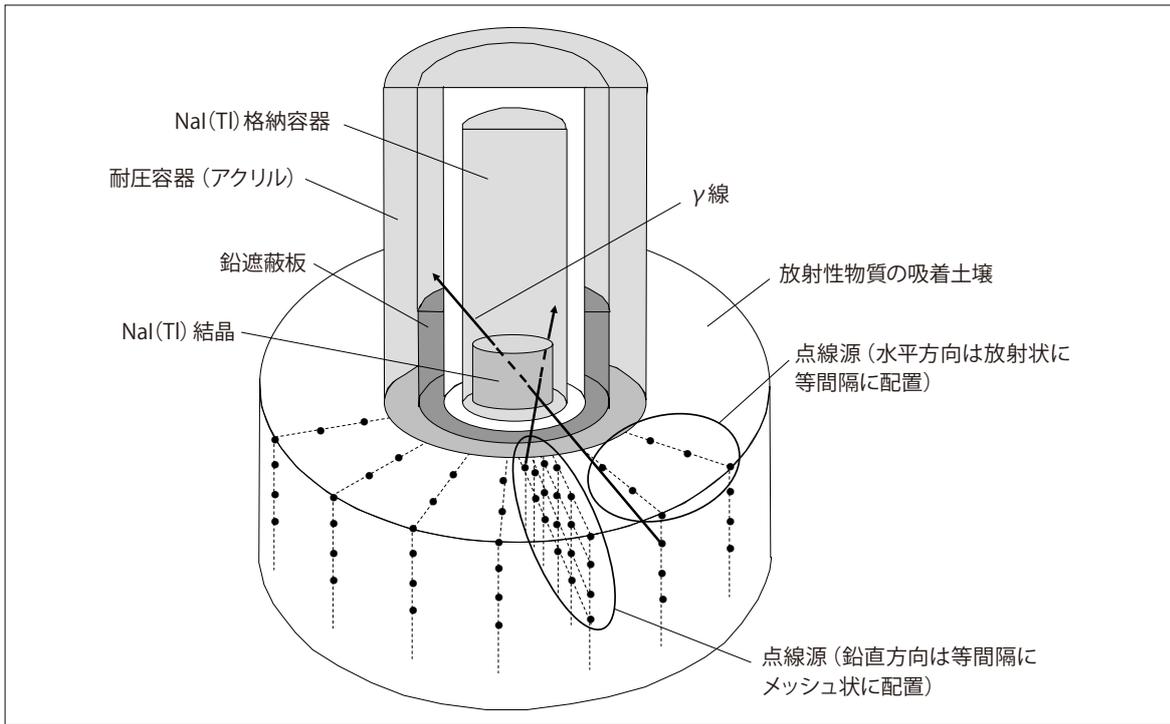


図2 底質土壌の放射性物質から発せられるγ線がNaI(Tl)結晶に捕らえられる模式図

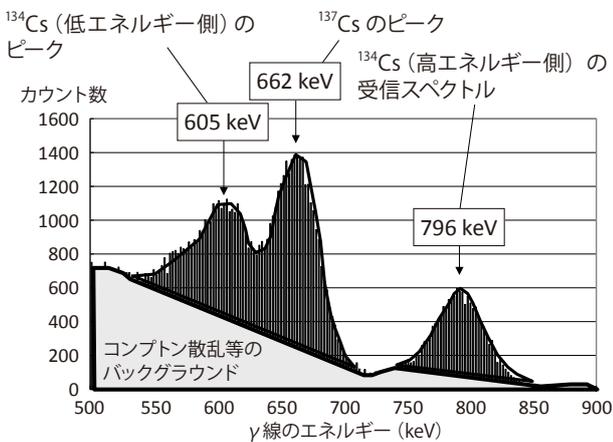


図3 NaI(Tl)による受信スペクトル実測例

後述する式4以降で述べるシミュレーション値である。

一般に、底質土壌の放射性セシウム濃度はBq/kg単位で表記されるので、対象土壌の密度ρ(g/cm³)で割った濃度B₁(Bq/kg)を求める必要がある。「みなそこ」で測定する土壌は水分を含んでいるので、B₁はBq/kg-wetで表記する。したがって、計算に用いる土壌密度は水分を含んだ真密度である。なお、含水量を考慮すれば乾燥土壌の濃度Bq/kg-dryへの換算も可能である。

最終的に求めるべき¹³⁷Csの濃度B₁(Bq/kg-wet)は以下の式となる。

$$B_1 = \alpha I / \rho S \dots\dots\dots (式2)$$

ここで、式2のSを求めるために¹³⁷Csの分布層厚d(cm)を設定する必要があるが、「みなそこ」では採泥せずに濃度を求めることから、確かな情報がなければ通常10cmと設定している(設定根拠と誤差については後述するが、この値における誤差は概ね30%程度以内)。密度ρと分布層厚dは明らかでないことが多い。そこで、測定対象に応じた適切なρやdを設定しておけば、単位面積当たりの放射性セシウム濃度を求めることができ、ユーザーとしては扱いやすくなる。そこで、式3も算出式の一つと考えている。

$$B_2 = \beta I/S \dots\dots\dots (式3)$$

ここで、B₂は単位面積当たりの¹³⁷Cs濃度でありBq/m²-wetで表記する。β(Bq・m²・かつ⁻¹)もαと同様、本システム固有の定数である。なお、β=10αの関係にある。

単一点線源の1方向のみのγ線がNaI(Tl)結晶に捕捉される状況を図4(a)に示す。この捕捉されるγ線強度sは以下の式で求めることができる。

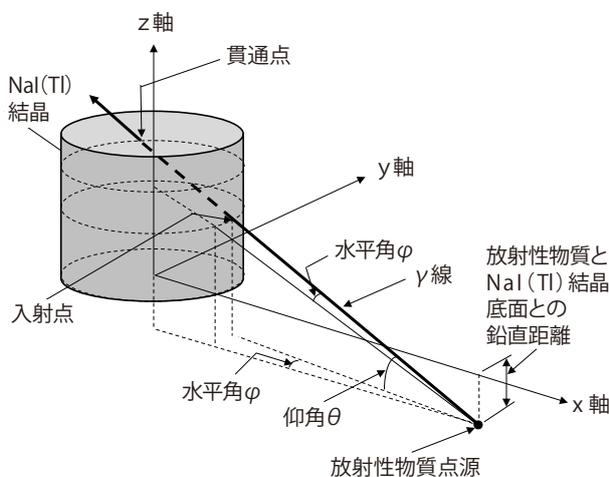
$$s = P \cdot \{1 - \exp(-\mu_n L_n)\} \cdot \exp(-\mu_w L_w) \cdot \exp(-\mu_s L_s) \cdot \exp(-\mu_t L_t) \cdot \exp(-\mu_b L_b) \cdot \exp(-\mu_p L_p) \dots\dots\dots (式4)$$

ここで、各値は以下のとおりである。

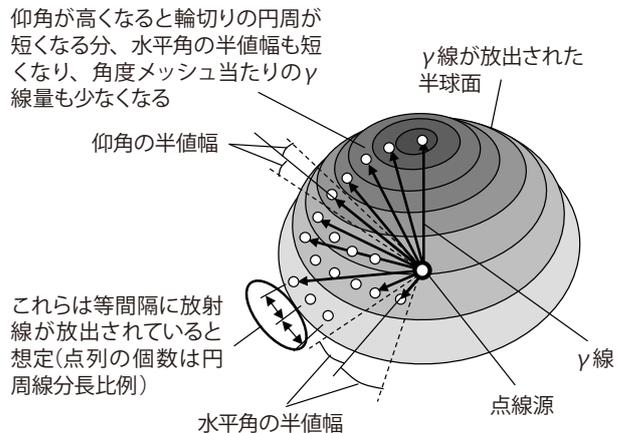
- P : 点線源が放射する角度メッシュ幅(後述)当たりのγ線放出強度比(半球面での強度を100%とする)
- μ_n : NaI(Tl)結晶のγ線減弱係数
- L_n : NaI(Tl)結晶を貫くγ線の透過距離
- μ_w : 水中のγ線減弱係数
- L_w : 水中のγ線の透過距離
- μ_s : 土中のγ線減弱係数(水分込みの底質土の密度により設定)
- L_s : 土中のγ線の透過距離
- μ_t : 耐圧容器中のγ線減弱係数
- L_t : 耐圧容器中のγ線の透過距離
- μ_b : NaI(Tl)結晶を包む物質によるγ線減弱係数(NaI(Tl)結晶格納筐体内)
- L_b : NaI(Tl)結晶を包む物質を透過する距離(NaI(Tl)結晶格納筐体内)
- μ_p : 鉛遮蔽板中のγ線減弱係数
- L_p : 鉛遮蔽板中のγ線の透過距離

この段階でのsの意味するところは、1点から放射されたγ線の上側半球の総量を100%とした場合、透過時の減衰を考慮した上でNaI(Tl)結晶が捕らえることのできるγ線1本の受信割合(%)である。ここで、γ線の放射方向を水平方向および鉛直(仰角)方向に変化させながらsを式4で計算しつつ合算すれば1点から放出されるγ線がNaI(Tl)結晶に何%捕捉されるかを見積もることができる。γ線は水平方向に1°、鉛直方向に3°の角度メッシュ間隔で計算するロジックにしている(点線源がNaI(Tl)結晶直下にある場合は5°間隔)。この計算角度を中心とした角度間隔の半値幅(±0.5°、±1.5°、±2.5°)を角度メッシュ幅として計算する。なお、検出器に入る単位角度当たりの放射線量は仰角に依存するので、γ線放出率は仰角に応じて変化させる必要がある(図4(b))。

以上のように求めたsの和をさらに、点線源の位置を立体的に展開して合算することにより、対象土壌全体からのγ線強度を計算することができる。なお、水平角、仰角はコンピュータの処理能力によって適当な間隔を設定することになり、角度



(a) 点線源から発せられるγ線とNaI(Tl)結晶との位置関係図



(注) γ線は全方位均等に放射されるので、仰角θが高くなると輪切りの円周が短くなる分、その円周当たりのγ線総量も少なくなる。

(b) 点線源から放射状に発せられるγ線の放射状況模式図

図4 シミュレーションにおける幾何学的補足説明図

メッシュ幅によってPの値が変わることに留意する必要がある。
1本の γ 線強度sから最終的なSは以下のように求められる。

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p \sum_{r=1}^q s(i, j, k, r) M(k) \dots\dots\dots (式5)$$

ここで、 i, j, k, r は以下の変数とする。

- i : 計算している当該 γ 線が水平角で第*i*番目であることを示す添え字 (水平角は0 ~ 180° 範囲)
- j : 計算している当該 γ 線が仰角で第*j*番目であることを示す添え字 (仰角は0 ~ 90° 範囲)
- k : 計算している当該点線源の位置が水平方向で第*k*番目であることを示す添え字 (水平距離は0 ~ 30cm 範囲)
- r : 計算している当該点線源の位置が深さ方向で第*r*番目であることを示す添え字 (深さは0 ~ 10cm 範囲)

$M(k)$: 第*k*番目の点線源が代表する水平位置の面積

なお、以上の濃度算出モデルについては平成26年6月27日に「放射能濃度測定システム」(出願No.2014-132737)として特許出願済みである。このロジックに基づく濃度算出および γ 線カウント数から濃度に変換する変換係数 α を後述する標準体積線源による実験値で求めた点において「みなそこ」は新規性があると考えられる。

4. セシウム濃度算出手順

基本的な濃度算出手順は以下のとおりである。

- a) 原発事故時には ^{137}Cs と ^{134}Cs は等量の放射性セシウムが放出されたと言われている⁷⁾ので、それぞれの半減期を用いて原発事故から「みなそこ」測定日までの経過日数による濃度減衰率を求める。
- b) 測定日における ^{134}Cs (低エネルギー側)と ^{137}Cs の配分割合を求め、受信スペクトルピークから ^{137}Cs のみのカウント数Iを算出する。

- c) 放射性セシウム分布層厚dと土壌密度 ρ から前述のシミュレーション手法によって受信強度のシミュレーション値Sを求める。
- d) 式2または式3で ^{137}Cs の濃度を求める。
- e) b)項の ^{134}Cs (低エネルギー側)と ^{137}Cs の比率を ^{137}Cs 濃度に掛けて ^{134}Cs の濃度を求める。

5. データ信頼性の検討

以上のようにして求めたモデル式について、測定実験により検証した。

(1) 標準体積線源による校正

はじめに、実際のフィールドを模擬した標準体積線源を作製し、カウント数から放射性セシウム濃度への変換係数を求めた。標準体積線源は直径50cm、高さ10cmの ^{137}Cs を含む塩化セシウム水溶液を用いた。実験装置を図5に示す。実験ケース(表2)は全部で12ケースとし、ケース1で係数 α を求めた。なお、本実験は放射線を取り扱う業務なので、放射線管理区域内の実験室で行った。

係数 α は積算時間が同一であれば、放射性物質の濃度、土壌密度や分布層厚等に関わりなく一定の値となる。実験ケース2~12では、ケース1で求めた係数 α が他の様々なケースに適用できるか検証した。実験諸元は表3に示すとおりである。

係数 α は水中に線源A(厚さ10cm)を置き、鉛遮蔽板ありの状態(表2のケースNo.1)での「みなそこ」の10分間積算値20回の平均値とシミュレーション値の対応関係から求めた。各値は表4に示すとおりである。

測定結果を式2に代入し、 α を求めた。

$$\alpha = B_i \rho S / I = 4,943 \times 1.0002 \times 102.44 / 19,102 = 26.5 \text{ (Bq} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{カウント}^{-1}\text{)}$$

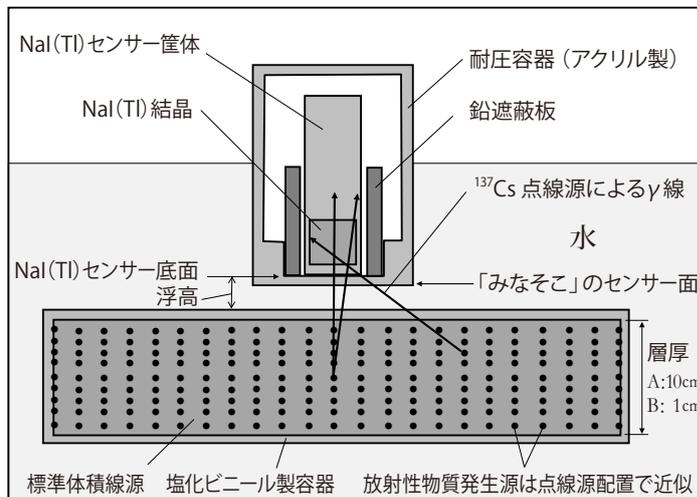


図5 標準体積線源による実験状況図

表2 標準体積線源による測定実験のケース一覧

No	目的	周辺媒体	線源 ⁽¹⁾	鉛遮蔽板の有無	浮高 ⁽²⁾ (mm)	繰り返し回数
1	α 算出	水	A	○	13	20
2			B	○	11	5
3	遮蔽板影響	空気	A	×	13	5
4				○	13	5
5	センサー面鉛直浮き影響	空気	A	○	31	2
6				○	51	2
7				○	71	2
8				○	31	1
9		水	A	○	51	1
10				○	71	1
11 ⁽³⁾	線源の不均一性影響	水	A (上) + B (下)	○	13	3
12 ⁽³⁾			B (上) + A (下)	○	13	3

⁽¹⁾ A:厚さ10cm、濃度4.943 Bq/g B:厚さ1cm、濃度15.02 Bq/g

⁽²⁾ 浮高: NaI(Tl)センサー面の標準体積線源からの鉛直方向浮き高さ

⁽³⁾ No.11とNo.12の実験は高濃度の線源が上層にある場合と下層にある場合で、それぞれ実測値通りに計算されるかどうかを確認するために行った。

表3 標準体積線源による「みなそこ」の校正実験諸元表

計算諸元		設定値	単位	備考		
NaI(Tl)直径		50.8	mm			
NaI(Tl)センサー高さ		50.8	mm			
NaI(Tl)結晶底面のNaI(Tl)筐体底面からの高さ		12	mm	指向性点線源で実測した結果		
γ線放射角の計算間隔	水平方向	1	度	センサー直下0~25mmに点線源を配置した場合は水平、鉛直とも5度メッシュ		
	鉛直方向	3	度			
仮想点線源配置間隔	線源 A (10 cm 厚)	水平方向	25	mm		
		鉛直方向	5	mm		
	線源 B (1 cm 厚)	水平方向	25	mm		
		鉛直方向	1	mm		
標準体積線源の容器厚さ		8	mm	塩化ビニール材質		
耐圧容器の隙間		11	mm	アクリル材質		
水中のγ線減弱係数(662 keV)		8.5×10^{-3}	/mm	NIST ^(注) ホームページより		
空気中のγ線減弱係数(662 keV)		1.03×10^{-5}	/mm	NIST ^(注) ホームページより		
NaI(Tl)センサー	NaI(Tl)結晶の吸収係数(662 keV)		2.7×10^{-3}	/mm	アイントープ手帳より	
	結晶と格納容器との隙間材質(662 keV)		8.5×10^{-3}	/mm	詳細不明のため、水を想定	
γ線減弱係数	標準体積線源	溶液	密度	1.0002	g/cm ³	塩化セシウム水溶液(CsCl:濃度50 μg/g)
			γ線減弱係数(662 keV)	8.502×10^{-3}	/mm	
	外枠	γ線減弱係数(662 keV)		1.06×10^{-2}	/mm	指向性点線源で実測した結果
		耐圧容器	γ線減弱係数(662 keV)		1.52×10^{-2}	/mm
	鉛遮蔽板	水平位置		48	mm	鉛10mm、ステンレス5mm
		厚さ		15	mm	
		密度	鉛	11.34	g/cm ³	
	ステンレス		7.83	g/cm ³		
	γ線減弱係数		0.10	/mm	NIST ^(注) ホームページより	
標準体積線源(¹³⁷ Cs)	線源 A (10 cm 厚)	濃度	4.943	Bq/g	校正時期:平成25年12月24日 50cmφ×10cm(H)	
		重量	19410.3	g		
	線源 B (1 cm 厚)	濃度	15.02	Bq/g	校正時期:平成25年12月24日 50cmφ×1cm(H)	
		重量	1935.2	g		

^(注) NISTとは「The National Institute of Standards and Technology」を意味し、ここで示されている「Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients」から各値を求めた (<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/chap2.html>)。

表4 変換係数αを求める実験結果(表2の実験ケースNo.1)とシミュレーション値

項目	変数	数値	単位
標準体積線源の放射能濃度	B ₁	4,943	Bq/kg
「みなそこ」によるカウント数(10分間値)	I	19,102	カウント
線源 A (10 cm 厚) によるγ線のシミュレーション値	S	102.44	-
標準体積線源密度	ρ	1.0002	g/cm ³

(2) モデルの検証

前項の係数 α 、標準体積線源の線量およびケース No.2 ~ 12 のそれぞれの実験状態に応じた S を用いて算出したカウント値 (計算値) を「みなそこ」で測定したカウント値 (実測値) と比較した (図 6)。その結果、計算値と実測値はよく一致し、以下のことが明らかとなった。

- a) 係数 α をケース No.2 ~ 12 に適用した場合、計算値と実測値の差は 5% 以内に収まり、シミュレーションのロジックは妥当である。
- b) ケース No.1 および 2 の結果から、線源の層厚の変化に応じた計算ができる。
- c) ケース No.3 に対する 4 の比から、鉛遮蔽板による γ 線の遮蔽効果は、実測で 33.8%、計算で 30.2% となり、実測値と計算値はほぼ同じである。
- d) センサー面が浮いた場合 (No.1 に対して No.8 ~ 10) でも、シミュレーションで対応可能である。
- e) 放射性セシウム濃度の鉛直方向の変化や層厚の変化 (No.11, 12) があっても、シミュレーションで対応可能である。

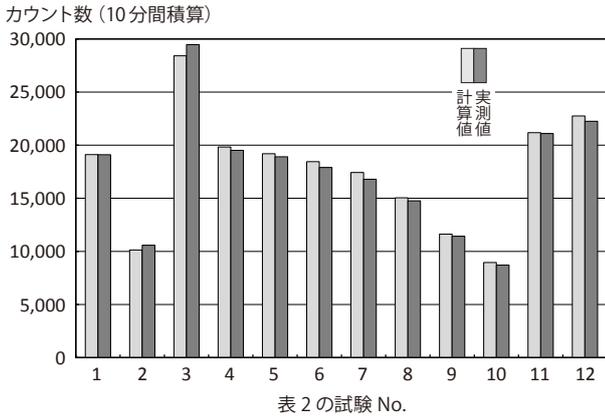


図 6 標準体積線源による実験値と計算値の比較結果図

(3) ゲルマニウム半導体検出器による分析値との比較検証

前述のシミュレーション手法について、野外条件で検証を行った。放射性セシウム濃度の異なる複数地点において「みなそこ」による測定を行い、10 分間カウント数から水底土の ^{137}Cs および ^{134}Cs の濃度を算出した。さらに、同時に底質試料を採取してゲルマニウム半導体検出器で分析した。データ総数は 26 件である。底質試料は 17 件については深さ 20 cm の柱状採泥、9 件についてはスミスマッキンタイヤによる採泥である。土壌密度はいずれも概ね $\rho = 1.7 \text{ g/cm}^3$ である。柱状コアの濃度鉛直分布は必ずしも均一ではなく、これは「みなそこ」での算出濃度の誤差要因となった。

両者の比較を行い (図 7)、以下の点が明らかとなった。

- a) 「みなそこ」算出値と試料分析値の間には強い正の相関関係 ($r = 0.974$ 以上) があり、ほぼ 1:1 の関係にある。
- b) ^{137}Cs と ^{134}Cs の単独あるいは合計に係わらず、良い相関を示す。
- c) 個々のデータについて見ると、いくつかの地点では乖離が生じている。この点については、次のような理由が考えられる。

- ・「みなそこ」のセンサーに対する土壌からの γ 線の寄与は深さによって異なり、下層からの γ 線は上層の土壌中を透過する間に減衰し、寄与が小さくなる。一方で、底質試料の分析値は全層単純平均しているため、鉛直的な不均一性がある場合には「みなそこ」算出濃度とは差として現われる。これは試料の深さ別濃度を検証した結果、明らかとなったものである (図 8)。

- ・水深が深い場合には、「みなそこ」で測定した場所と試料分析値の泥の位置がずれる可能性があり、水平的な放射性セシウムのムラが影響した可能性がある。

一部のケースでは測定値の若干のずれが生じるものの、本システムは野外での現場観測に十分適用できるシステムであると考えられる。

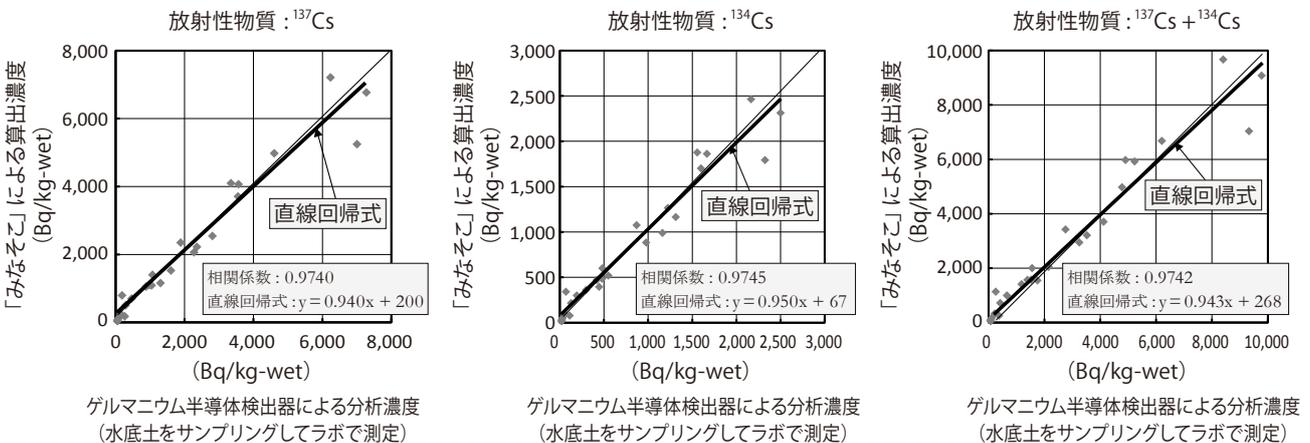


図 7 ゲルマニウム半導体検出器による試料分析濃度と「みなそこ」による算出濃度の相関

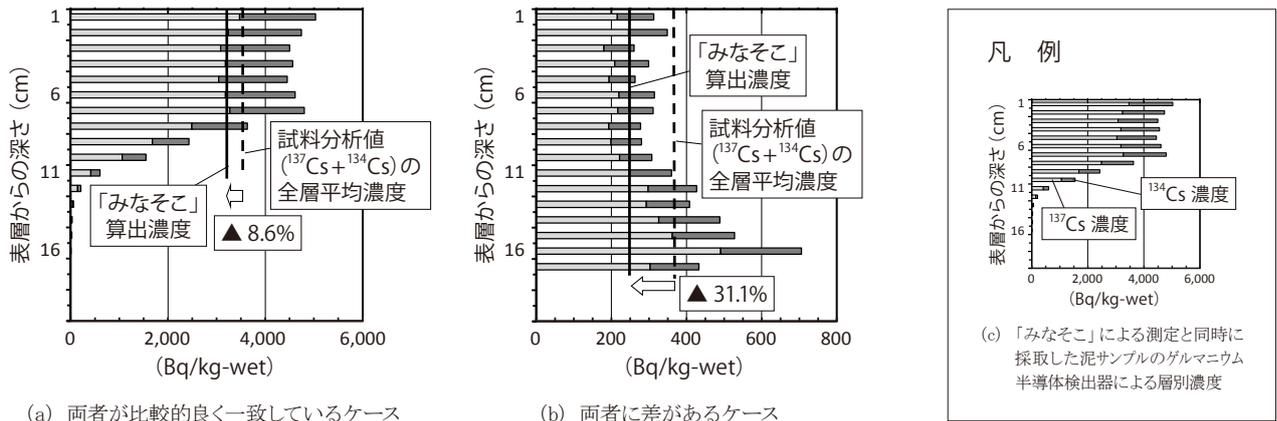


図8 ゲルマニウム半導体検出器による試料分析濃度と「みなそこ」による算出濃度の差の原因(例)

6. 「みなそこ」による濃度算出時の留意点

「みなそこ」で水底の放射性セシウム濃度を求めるには、以下に示すいくつかの条件に留意する必要がある。

(1) 受信スペクトルからの ¹³⁷Cs の分離比率

NaI(Tl) 結晶はエネルギー分解能が低く、図3に示すように ¹³⁷Cs の 662 keV の γ 線のピークは幅広な分布形を示す。このピークは ¹³⁴Cs (低エネルギー側) のピークと重なるため、¹³⁷Cs のみを分離する必要があるが、¹³⁷Cs と ¹³⁴Cs の半減期が異なることから測定日時によってこの2山の分離割合は変化する。

(2) 層厚と土壤密度の設定誤差

「みなそこ」では以下の2つの計算諸元については、通常は推定値を設定する必要があり、誤差要因になる。

- ・放射性セシウムが分布している層厚 d (汚染深さ : cm)
- ・水底土の土壤密度 ρ (g/cm³)

ただし、鉛直濃度分布が均一とし、 $\rho = 1.7$ g/cm³、 $d = 10$ cm と仮定した場合、 ρ が 1.4 ~ 2.0 g/cm³ の範囲内であれば、実際の d が 5 ~ 20 cm の範囲で変化しても概ね 30% 程度以下の誤差で収まることが分かった。したがって、水底土壌の密度に大きな設定誤差がなければ、層厚を 10 cm に設定しても 30% 程度の誤差範囲で濃度を求めることができる。ただし、軟泥のように限りなく水に近い土壌 ($\rho \approx 1.0$ g/cm³) であるにもかかわらず、 $\rho = 1.7$ g/cm³ と設定した場合の誤差範囲は 90% 程度まで拡大してしまう。

この対策として、測定対象のため池や湖沼等の規模にもよるが、通常、「みなそこ」で数十箇所の測定を実施する場合、代表的な 2 ~ 3 箇所で土壌コアを採取し、ゲルマニウム半導体検出器で濃度を分析している。この分析結果を ρ と d に反映させれば大きく実態と外れることはないと考えられる。それでも場所による層厚差や密度差は避けられないので、ここでは設定値の近傍である $\rho = 1.4 \sim 2.0$ g/cm³、 $d = 5 \sim 20$ cm の範囲で変化させた誤差を見積もった。

なお、濃度分布が不均一であればそれも誤差要因となるの

で、実際の鉛直分布の情報をモデル化してシミュレーションすることが望ましい。

(3) センサー面の水底面からの乖離距離

「みなそこ」のセンサー面が水底に密着していない場合は、水底面とセンサー面の間の水が新たな遮蔽物になり、これを考慮せずに算出した濃度は過小評価となる。その対策として、水中カメラでセンサー面の浮き高さ(乖離距離)を捉え、後にシミュレーションで補正する。また、水底土壌が軟泥でセンサー面が沈み込む場合にはフロートを付けて水中重量を軽くすることでこれを防止することができる。それでも沈み込む場合は水中カメラで沈み込んだ深さを確認し、後ほどシミュレーションで補正することが可能である。以上の補正はシミュレーションロジックを開発したことにより可能となった特長である。浮きセンサーや沈み込み防止用フロート、あるいは水中カメラは現場状況に応じてオプションで付加できるような構成になっている。なお、水中部が傾斜あるいは転倒したり、水流や船の動きによって不安定に動揺していることが水中カメラで確認された場合は再測定する。

(4) 定量下限値

「みなそこ」では図3に示した γ 線の受信スペクトルピークから濃度を求めるが、このスペクトルにはコンプトン散乱等のバックグラウンドがノイズ成分となる。¹³⁷Cs + ¹³⁴Cs (=R) の信号に対してノイズ成分 (=N) が相対的に大きい場合には、データ信頼性が劣ることになる。R が N の 3 倍を超える場合を信頼性のあるスペクトルピークとすると、以下の式で定量下限値を求めることができる。

$$R \geq W(p^2 R^2 - R \cdot N)^{1/2} \dots\dots\dots (式5)$$

ここで、 p は「みなそこ」で用いているキャンベラ社製のスペクトル解析ソフト Genie-2000⁸⁾ で表示される信号 R の信頼性を示す値 (%)、 W はスペクトル幅で決まる係数である。

(5) 岩石土壌に含まれるウランやトリウムから発せられる妨害成分

測定場所の水底が岩石土壌の場合、「みなそこ」の受信スペクトルピークのエネルギー範囲(532.8～709 keV)に²¹⁴Bi(609 keV)や²⁰⁸Tl(583 keV)の光電ピークが混入する可能性がある。²¹⁴Biは²³⁸Uが崩壊して安定核種の²⁰⁶Pbに至る崩壊系列の途中で発生する⁹⁾。また、²⁰⁸Tl(583 keV)は²³²Thが崩壊して²⁰⁸Pbになる崩壊系列の途中で発生する⁹⁾。その光電ピークが¹³⁷Csや¹³⁴Csあるいはコンプトン散乱等のバックグラウンドレベルに比べて十分小さい場合には問題はないが、岩石土壌の中には²¹⁴Biや²⁰⁸Tlが相対的に強いために¹³⁷Csや¹³⁴Csの算出結果に妨害成分として影響する場合がある。この判断のためにも対象土壌のゲルマニウム半導体検出器による分析を併用することが望ましい。

7. まとめ

基本的な測定特性を説明してきたが、本システムの特長をまとめると以下ようになる。

- NaI(Tl)結晶が測定する γ 線のカウンタ数から、放射性セシウムの分布層厚と土壌密度を設定することにより、福島第一原発事故に由来する水底土の放射性セシウム濃度(¹³⁷Csおよび¹³⁴Cs)をBq/kgあるいはBq/m²として算出可能である。
- 調査現場において即座に濃度が算出できるので、濃度結果を見ながら臨機応変な調査が可能である。
- 水底表面に凹凸がありセンサー面が水底表面に密着していなくても、浮きスケール(センサー面が水底面から浮いている乖離距離を測定する目盛り)で乖離距離が測定でき、後に補正が可能である。また、軟泥でセンサー面が沈み込んでいる場合でもその量を測定することで、同様に補正が可能である。
- リアルタイム式の特長は以下のとおりである。
 - 測定状況をリアルタイムで確認できるので、着底状況、センサー面の安定性、障害物の有無等が即座に分かる。
- スタンドアロン式の特長は以下のとおりである。
 - 比較的軽量(空中重量32 kg)なため、数人乗りボートでも測定が可能である。
 - 水深200 mまでの測定が可能である。
 - 水中部に測定用制御装置が内蔵されているので、船体からの切り離し測定が可能である。吹送流や潮流で船体が流される場合でも船体の移動に左右されないメリットがある。

f) 小型軽量式の特長は以下のとおりである。

- コンパクトで軽量(空中重量9 kg)なので、2人乗りゴムボートでも測定可能である。

様々な検討を経て、十分な精度で水底の放射性セシウム濃度を算出できる4種類のタイプの「みなそこ」を開発してきた。「みなそこ」を用いることにより、今後、福島県等のため池、湖沼、ダム、河川や海域等において、水系の放射性セシウム監視活動や放射性セシウムの挙動、影響評価に関する実態解明が期待できる。

謝 辞

「みなそこ」は、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センターの「拠点化計画促進研究開発事業補助金」によって開発させていただきました。また、研究開発に当たりましては、国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センターの齋藤則生博士、柚木彰博士、海野泰裕博士にご指導を賜りました。ここに、厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 福島県生活環境部除染対策課：「福島県の除染対策について」, p5, (2015年12月3日).
福島県 HP (<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/143064.pdf>), 2015年12月14日閲覧。
- 農林水産省：「東日本大震災への対応と今後の取組」, p22, (2014年3月).
農林水産省 HP (https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo02/godo/pdf/zen_250311.pdf), 2015年12月14日閲覧。
- 福島民報の2014年3月23日付オンライン記事 (http://www.minpo.jp/pub/topics/jishin2011/2014/03/post_9657.html), 2015年12月14日閲覧。
- ソートン ブレア：海底土放射性セシウムの連続測定による分布調査。船と海のサイエンス(国立研究開発法人海上技術安全研究所の広報誌), Autumn号, 13-15 (2013).
- 木下 裕士郎, 笠原 勉, 早坂 裕幸, 古殿 太郎, 小笠原 透, 大久保 豊：曳航式水中放射線量測定システム. i-NET(いであ株式会社の技術広報誌), 38, 4-5 (2014).
- 眞田 幸尚, 高村 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-Reserch, 2014-005 (2014).
- 河田 燕, 山田 崇裕：原子力事故により放出された放

- 放射性セシウムの $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比について. Isotope News, No.697, 16-20 (2012). 11 版], pp.10-11, 公益社団法人 日本アイソトープ協会 (2012).
- 8) Canberra Industries, Inc., Genie TM 2000 Version 3.2.1. 2015 年 9 月 24 日受付
- 9) 公益社団法人 日本アイソトープ協会:「アイソトープ手帳」 2015 年 12 月 15 日受理

和 文 要 約

東日本大震災にともなって福島第一原子力発電所から環境中に放出された放射性物質は、依然として周辺地域の水底土に深刻な環境問題をもたらしている。そこで、これまでは空間線量率の測定に用いられている NaI(Tl) シンチレーション検出器を耐圧容器(耐圧 200 m)に封入し、底泥を採取することなく放射能を現場で即座に測定できるシステム(「みなそこ」)を開発した。「みなそこ」の特長はセシウム分布層厚と土壌密度を設定することにより、ガンマ線カウント数から水底の放射性セシウム濃度(Bq/kg-wet)を算出できる点にある。「みなそこ」で観測した放射性セシウム濃度を、同時に採取した泥のゲルマニウム半導体検出器による分析値と比較すると、 $r=0.97$ という良好な相関係数が得られ、十分なデータ信頼性を確認することができた。また、センサー部の着底状態は測定結果の精度に大きな影響を与えるため、本システムに水中カメラを備え、センサー着底状態を観察する機能も開発した。これによりセンサーの着底状態に応じた測定値の補正も可能である。今後、福島地域の除染対策や湖沼、ダム、河川や海域等の水底土の放射能濃度測定への活用が期待される。

