

調査研究報告

福島沿岸の岩礁に残留する放射性セシウム

一般社団法人 エコスタディーズ

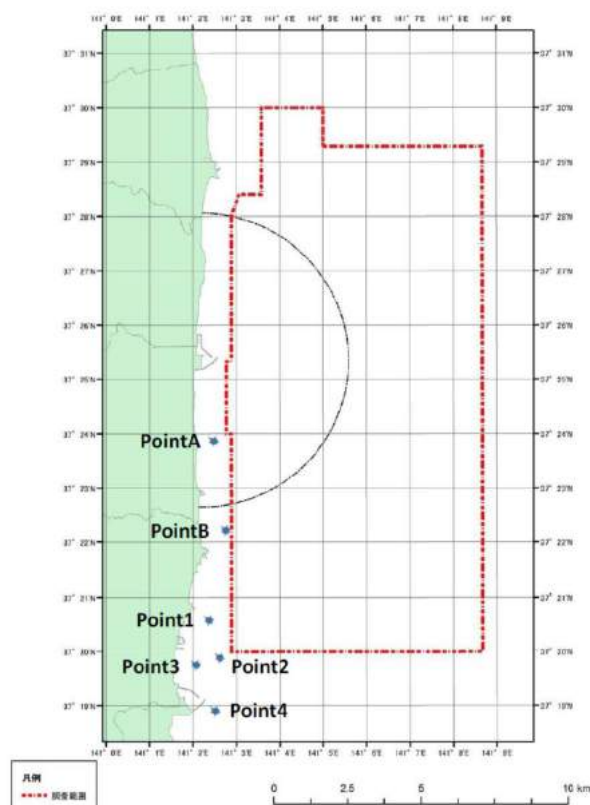
2017年3月

福島沿岸の岩礁に残留する放射性セシウム

1. はじめに

a2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震によって引き起こされた東京電力福島第一原子力発電所の事故以後これまでに、海底に堆積した放射性物質の分布を平面的に捉える調査研究がいくつかおこなわれている。大規模な例として原子力規制庁委託事業がある。事業に参加する大学や試験・研究機関は福島沖海域で格子状に調査測線を設定し、曳航型の検出器を大型調査船、沿岸近くは小型漁船で曳航してデータを収集している。海底土の調査は採泥器を下して採泥し、船上あるいは陸上に設置した計測器で調べる方法をとっている^{1~4)}。これらの研究によって、かなり広範囲にわたって第一原発および第二原発沖の海底の放射性物質の平面的分布およびその経年変化が明らかにされてきている。しかし、沿岸にごく近い岩礁に関しては、曳航型検出器が使えないために詳しい調査・研究が十分には行われてない。本調査研究では常温で使用可能な可搬型γ線スペクトロメーターを海底に静置して岩場表面に残留する放射性セシウムの定量化を試みた。

第1図に本調査で計測した地点と原子力規制庁委託事業で調査されてきた海域を示す。



第1図 本調査で計測したポイント（星印）と原子力規制庁委託事業が調査測線を設定した海域（赤破線）（参考文献3、p23、図3-2より）。

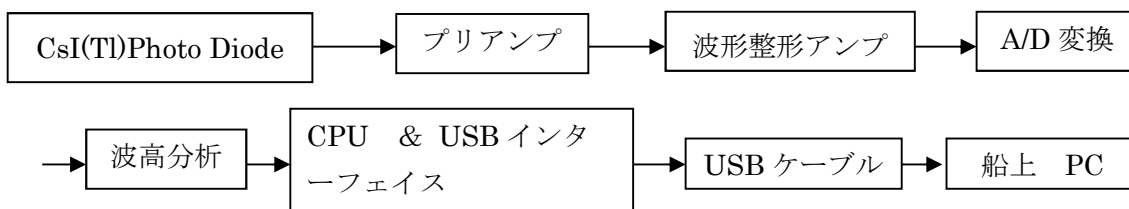
2. 検出器本体

常温で使用可能な可搬型の γ 線スペクトロメーターはNaI (Tl) シンチレーターと光電子増倍管の組み合わせが一般的であるが、光電子増倍管は機械的衝撃に弱いという欠点があり、慎重な取扱が求められる。検出器を船上から海底に沈める際にどのような衝撃が加わるかわからない状況では、NaI(Tl)シンチレーターと光電子増倍管の組み合わせは選択し難い。一方、CsI (Tl) シンチレーターはNaI (Tl) シンチレーターと比較してエネルギー分解能は多少低下するが、発光領域⁵⁾が可視光帯であるので市販のフォトダイオードを結晶に直接貼り付けて発光を電気パルスに変換することが可能である。また、機械的衝撃に強く、検出器本体の占める体積も小さくなる。

本調査研究は海底の岩場の表面にどの程度放射性セシウムが残留しているかを調べるのが目的であって、未知の放射性物質の探査を目的としていないため、検出器のエネルギー分解能は ^{137}Cs の662keVピークで8%程度あれば十分と考えた。そこで、関西電子(株)が試作したCsI (Tl) を使った γ 線スペクトロメーターの仕様と付属ソフトウェアを検討し、これを海底調査用の検出器本体として利用できると判断した。検出器本体に合わせて水深50mに耐える耐圧容器の製作も関西電子(株)に依頼した。

用いられているCsI(Tl)シンチレーター結晶の大きさは1インチ ϕ ×1インチである。

第2図に検出器本体ブロック図を示す。写真1に検出器本体と検出器本体を収納する耐圧ケースを示す。



第2図 検出器本体ブロック図

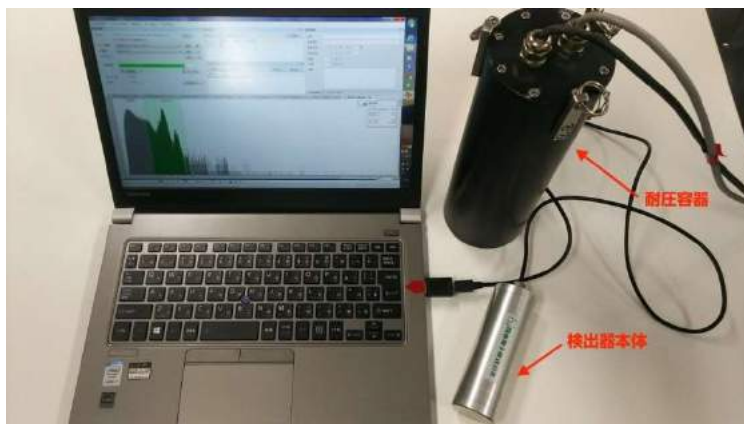


写真1 検出器本体、耐圧容器（黒色のアルミニウムケース）、PC

写真 1 に示すように、検出器本体は 40mm ϕ \times 120mm, $t=2$ mm のアルミニウム円筒に納められている。検出器本体とパーソナルコンピュータ (PC) は 50m の USB ケーブルでつないでいる。

3. 検出器本体の特性

3-1 ^{137}Cs 板状線源による検出器の校正 —— 積算カウント数から Bq/cm^2 ——

前項でも記したように、本調査研究の目的は海底の岩場の表面にどの程度放射性セシウムが残留しているかを調べるのが目的である。岩場表面に付着した放射性物質は岩の表面から微細な割れ目を伝って内部に侵入している可能性が高いが、砂や泥土の場合と異なって、表面のごく近い所にとどまっているものと仮定する。その場合は、放射性物質の残留量は単位面積当たりのベクレル数 Bq/cm^2 で表すのが適当と考える。

ここでは、最も実地的な方法、すなわち、知られた Bq 数の ^{137}Cs 平面線源 $10 \times 10 \text{cm}^2$ $100 \text{Bq}/\text{cm}^2$ (日本アイソトープ協会 コード 211 線源番号 0017, 2011 年 12 月 1 日時点) に第 4 項で記述する耐圧容器に入れた検出器を接触させてスペクトラムを計測し、第 10 項で述べるデータ処理方法で ^{137}Cs の光電ピーク下の積算カウント数を求め、カウント数と Bq 数の関係を求めた。実際に岩の表面に残留している放射性セシウムは、ある程度平面的に広がった状態にあると想定されるので、板状線源を校正に使った。検出器の窓面積は 5.1cm^2 で平面線源の面積は 100cm^2 であるので、面積比から見て、この校正方法は種々の補正を必要としない実地的な方法と考えられる。求めたカウント数と Bq 数の関係は 1cps が ^{137}Cs $6.32 \text{Bq}/\text{cm}^2$ であった。

3-2 ^{137}Cs 点線源による検出効率の測定

耐圧容器に入れた検出器と Bq 数が知れた ^{137}Cs 点線源 (Amersham コード CDR8 番号 DE815, $2.42 \times 10^6 \text{Bq}$) をルール上に置き、検出器と線源間の距離を変えて γ 線スペクトルを計測した。 ^{137}Cs の 662keV 光電ピーク下のカウント数を線源強度と検出器—線源間の距離から計算した入射 γ 線の数で除した値は距離に関係なく一定の値 0.20 を得た。したがって、本検出器の検出効率は ^{137}Cs の 662keV の光電ピークだけを用いて求めた場合には 20% であった。

3-3 エネルギー分解能

^{137}Cs の 662keV 光電ピークの半値幅は $57 \sim 58 \text{keV}$ であり、これからエネルギー分解能は $8.7 \pm 0.1\%$ であった。

4. 耐圧容器

水深 50m に耐える耐圧容器として、 $85 \text{mm} \phi \times 240 \text{mm}$, $t=10 \text{mm}$ のアルミニウム円筒形ケースを製作した(写真 1)。円筒底面の検出器の窓部に当たる $40 \text{mm} \phi$ の部分の肉厚は

1mm に削り落としてある。円筒上面の USB ケーブル取り出し口および検出器と USB ケーブルの途中にある中継増幅回路（後述）への電源供給ケーブルの取り出し口の防水には日本 AVC（株）の AVC 高防水型金属製ケーブルグランドを使用した。

5. USB 信号ケーブル

検出器と船上のノート PC を結ぶ USB 信号ケーブルは、市販で入手可能な最長 50m のものを選んだ。この USB ケーブルは約 15m 毎に 3 か所増幅 IC 回路を持っているが回路部分は全く防水されていない。そこで、回路部分をシリコン樹脂でモールドし、その上をさらに自己融着テープで被覆した。

6. 外部電源

電力は AC100 V を船上で DC12V に変換し、約 100m のキャブタイヤケーブルを使って検出器直前に置かれた DC-DC 変換器まで輸送される。そこで DC5V に変換して検出器及び USB ケーブルに電力を供給している。

7. 検出器支持枠

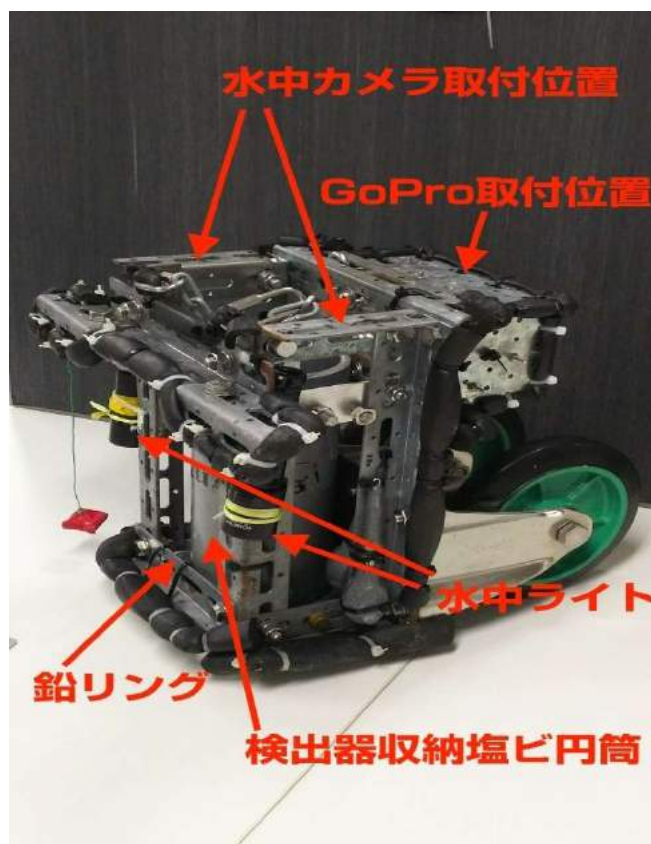
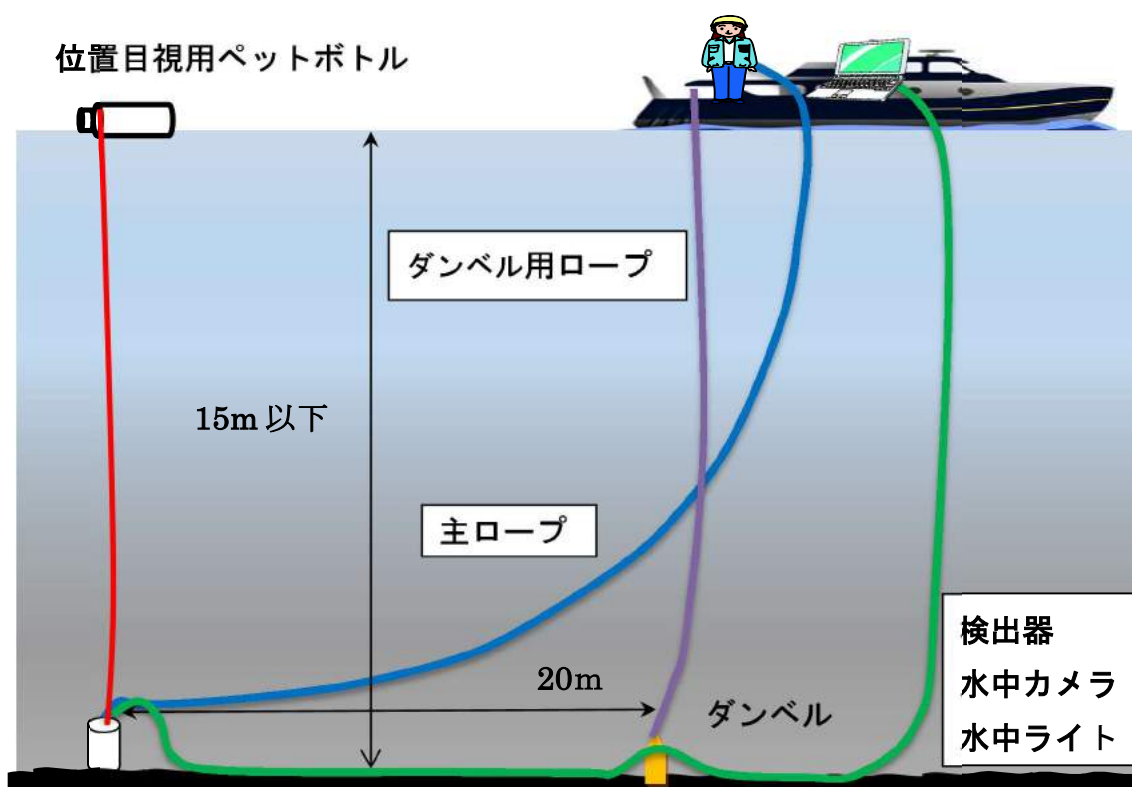


写真 2 検出器アセンブリー

鉄アングルで写真 2 のような枠を組み立て、中央に耐圧容器を収納する硬質ポリ塩化ビニールの円筒を固定してある。円筒底部に約 5kg の鉛リングを重りとして嵌めてある。アングル枠には海底の岩の斜面などに着底した場合には、安定な場所まで自重で滑り下ることを期待して車輪を 2 個取り付けてある。この車輪はアングル枠の姿勢維持にも寄与している。

着底状況をリアルタイムで知るために水中カメラと水中ライト（ファーストシーン（株）ビッグキャッチと防水ズームライト）を 2 か所に取り付けてある。また、着底した地点の海底表面の状況を記録するために、防水ケースに入れた GoPro で動画撮影している。GoPro の映像は検出器アセンブリーを引き上げる度にチェックする。水中カメラの信号ケーブルは全長 50m で、船上の 5 インチモニターに接続されている。

8. 船上計測



第 3 図 海底の検出器、ロープ、信号線、船上 PC の模式的関係

9mm φ のクレモナ金剛打ちロープで検出器アセンブリーの上げ下ろしを行う。検出器信号 USB ケーブル、電源供給ケーブル、水中カメラ信号ケーブルは 7mm φ のデベグラスロープに約 1m 間隔で結束されて一束になっている。海流が強く信号ケーブル束と上げ下ろし用のクレモナロープが海流で流され検出器アセンブリーを引き倒すような状況では、検

検出器アセンブリーと船との間にロープおよびケーブル類を海底に固定するためのアンカーとして重さ 10kg のダンベルを入れる。海流が弱い場合には、アンカーは必要なくロープおよびケーブル類を海底に這わせておくだけとする。

9. 操船

検出器アセンブリーを投入した位置を目視するために、検出器アセンブリーの上部にテグスを固定し、水深とほぼ同じ長さのところに 2 リットルのペットボトルを縛り付けて海面に浮かせておく。同時に、操舵室の GPS で船の位置をマークしておき、計測中は可能な限りこのマークから船がずれないように操船をお願いしている。検出器アセンブリーを引き上げるときには位置確認用ペットボトルの近くまで船を移動してから引き揚げるようにする。これは、検出器アセンブリーが横倒しになった状態で岩場を引ずられてアングル枠に取り付けられたカメラや水中ライトが挽ぎ取られることを防ぐためである。

10. データ処理

OriginLab Co. のデータ解析ソフト Origin を使って、エネルギー 450keV から 900keV の領域で、 ^{134}Cs の 796keV と 605keV の 2 本のピーク、 ^{137}Cs の 662keV のピークの合計 3 本のピークを、3 個のガウス関数と、スプライン法で決めるバックグラウンドで、フィッティングを行った。

フィッティングの前提として、662keV のピークと 796keV の 2 本のピーク幅は校正時に測定した ^{137}Cs の 662keV の単独ピークの幅と同じとした。ピーク位置は、計測の前後に ^{137}Cs テスト線源、または 2011 年に第一原発付近で採取した落葉を使って作成した簡易テスト線源を用いて検出器の動作確認した時に得た値を用いている。 ^{134}Cs の 605keV のピーク位置はチャンネル—エネルギー関係式から求まる位置とし、3 本のピークの高さをフィッティングパラメーターとした。

フィッティングの結果のもっともらしさのチェックとして、 ^{137}Cs の 662keV のピークと ^{134}Cs の 796keV のピーク下の積算カウント数の比と、計測した年月日における ^{134}Cs と ^{137}Cs の残留 Bq 数の比をそれぞれの半減期から求め（2011 年 3 月 15 日の放出時の Bq 数の比は 1:1 として）、さらに 1Bq 当たりの放出 γ 線数を使ってそれぞれのピーク強度比を求めて、フィッティングした結果と比較した。ただし、 ^{134}Cs の 796keV のピーク領域の S/N はフィッティングの良し悪しを議論できるほど高くなく、 ^{134}Cs の残留量を定量的に議論するまでには至らなかった。したがって、 ^{137}Cs の残留量のみを以下に示す。

11. 計測結果

第 4 図に計測地点を再掲する。第 1 表に各地点の GPS 座標と ^{137}Cs の残留量 (Bq/cm²) を示す。



第 4 図 計測地点

	Point	GPS		137Cs
		N	E	Bq/cm ²
第 1 回 2015/9/4	1	37.20.553	141.02.399	1.2
	1	37.20.506	141.02.182	1.3
	2	37.19.918	141.02.584	1.2
	4	37.19.825	141.02.043	4.3
	5	37.18.930	141.02.526	0.85
第 2 回 2015/12/20	1	37.20.703	141.02.667	1.8
	2	37.19.918	141.02.587	0.47
第 3 回 2016/5/21	1	37.20.498	141.02.387	2.7
	3	37.19.899	141.02.602	2.4
	4	37.19.814	141.02.054	2.9
第 4 回 2016/7/16	A	37.23.850	141.02.501	2.4
	1	37.20.557	141.02.395	2.5
	2	37.19.900	141.02.601	1.4
	3	37.19.811	141.02.050	1.3
	4	37.18.933	141.02.533	2.6
第 5 回 2016/12/18	1-3	37.20.060	141.02.417	1.7
	1-4	37.20.555	141.02.405	4.3
	1-5	37.20.560	141.02.425	2.1
	1-6	37.20.562	141.02.423	2.3
	3	37.19.810	141.02.077	1.5
	4	37.18.950	141.02.538	0.97
	4-2	37.18.953	141.02.542	1.5

第 1 表 GPS 座標と残留量 (単位 Bq/cm²)

12. 不確かさ

本調査結果 (Bq/cm^2) に含まれる不確かさは、検出器の校正を行った時のように検出器の窓が海底の岩の面に、理想的に接触しているかどうか最も大きい。水中カメラの映像から判断して、検出器の窓が岩の表面に密着している保証はない。したがって、ここに記載する数値は「最低限、この程度は残留している」というように受取るべきものである。 γ 線スペクトルのフィッティング過程に含まれる不確かさは、3本のピーク下のカウント数(統計精度)によってほぼ決定される。データ処理の項に記した放射性セシウムから放出される3本の γ 線のピーク下の総カウント数は数千カウントであって、おおよその統計精度は数%程度であるが、前述の検出器窓と岩表面と接触の不確かさに比べると小さい。例えば、耐圧容器と岩の表面との間に5mmの海水層があるとすると、単位時間当たりのカウント数は4.4%減衰する。また、検出器窓と岩表面の間に海藻類を挟む場合にも単位時間当たりのカウント数が数%減衰することがあり得る。また、計測中に海流によって検出器が移動しているケースが多くあり、計測地点は必ずしもピンポイントではなく表示地点の周囲の平均値と考えるのがより適切である。また、検出器窓と岩表面との接触状況は計測中に変化をしているはずであるので、この点についても定量化できない不確かさがある。したがって再度強調するが、ここに記載する数値 (Bq/cm^2) は「最低限、この程度は残留している」というように受取るべきものである。

13. 結語

福島沿岸にごく近い岩場の放射性セシウムの残留量の調査を行なった。関西電子製CsI(Tl)検出器を海底計測用に改良し、岩場に静置して γ 線スペクトルを取得し、 ^{137}Cs のピークから ^{137}Cs の残留量 (Bq/cm^2) を推定した。しかし、この数値には検出器と岩場との接触状態に起因する定量化できないかなりの誤差が含まれている。

今後も第一原発に向かって計測点を増やしていく予定である。また、岩場に残留する放射性セシウムの量の経時変化を計測することも重要と考えている。

参考文献

- 1) 海上技術安全研究所、原子力規制庁委託事業 平成25年度 放射性物質測定調査委託費(海域における放射性物質の分布状況の把握に関する調査研究)事業 成果報告書 2014
- 2) 海上技術安全研究所、原子力規制庁委託事業 平成26年度 放射性物質測定調査委託費(海域における放射性物質の分布状況の把握に関する調査研究)事業 成果報告書 2015
- 3) 海上技術安全研究所、原子力規制庁委託事業 平成27年度 放射性物質測定調査委託費(海域における放射性物質の分布状況の把握に関する調査研究)事業 成果報告書 2016

4) 小田野直光、放射線を面で捉える、(2) 水中の測定 RADIOISOTOPES, 65,35-43(2016)

5) 例えば

https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aJ-Chapter7.pdf

謝辞

本調査研究を開始するに当たって東京海洋大学教授荒川久幸先生から福島沖海底の汚染状況、計測方法、備船に関する事などについてご指導いただきました。福島アクアマリン環境研究所チームリーダーの富原聖一氏から、福島の海についての大変貴重な情報をいただくとともに海上での計測作業に関して貴重なアドバイスをいただきました。いわき市漁業協同組合は本調査研究の趣旨をご理解下さり備船手配等でご協力をいただきました。長栄丸石井宏和船長は沿岸の岩場への案内と計測中に船が風や潮流によってドリフトするのを最小限に収める操船をしていただきました。各位に深く感謝申し上げます。

本調査研究の参加者

エコスタディーズ： 塩谷亘弘、大橋英雄、伊藤勝芳、熊谷訓行、柴田裕実、岡田淳、佐藤研二、山田次郎、山田豊、鈴木芙美恵、古賀暁、室岡喜一郎、木下かずえ、野上謙一、篠田永美子

エコホールディングス（株）： 藤林久士、土田誠、中森行克、井上雄策、水落秀人

関西電子（株）： 進士国広、進士清孝、今関雅敬、山寄康司

本調査研究に関するご質問やご意見は下記にお寄せください。

塩谷亘弘

shiotani@ecostudies.jp

Tel 090 1847 0156