

稿  
投

## 個人線量計でみる海の放射線

月出 章

### 1. はじめに

環境からの放射線は大地放射線（地面や建物などからの $\gamma$ 線）、宇宙線、それに希ガスのラドン（ $^{222}\text{Rn}$ ）によるものがある。海中では海底（砂、岩、泥、海藻、珊瑚などを含む）からの $\gamma$ 線に加え、宇宙線と、海水に溶けている $^{40}\text{K}$ や浮遊物による $\gamma$ 線となる。海底からの放射線は海底から離れると急激に減少する。 $^{40}\text{K}$ の $\gamma$ 線もそれほど強くはない。宇宙線にはエネルギーが高く透過力の非常に大きい成分があり、普通の海域では、数十mの深さまでは宇宙線が主なものとなる。

福島第一原子力発電所の事故で多量の放射性核種が海に放出された<sup>1)</sup>。その影響を知る上でも、広い範囲にわたった海中の放射線の測定が急務となっている。また、潜水作業員の被曝線量の管理や、東日本の海水浴場では安心を担保する測定が必要である。放出された核種は主にCsで、海中に溶けているか、瓦礫や岩、砂などに付着しているか、あるいは海洋生物に取り込まれていると思われる。

海の放射線の測定は海水や海底土、海産生物などの試料を採取し、それに含まれている放射性核種を検出する方法が採られている。しかし、それにはGeガンマ線分光器など高価な機器と専門的知識が必要である。また、放射線量[Bq/L]から線量率[Sv/h]を得るには複雑な計算を必要とする。ここでは、個人線量計（積

算型線量計, dosimeter) を使って、海中で線量率を直接測定することを試みた。本格的調査にはどのような器材や測定方法が必要かなどの情報収集も目的としている。測定方法は基本的には文献2)で述べたもので、線量[ $\mu\text{Sv}$ ]の差を時間差で割り線量率[ $\mu\text{Sv/h}$ ]を得る。海面から大深度までの測定に耐える器材とした。ここでいう大深度とは水深40m辺りをいう。普通の空気のタンクによるファンダイビングはこの辺りの深さまでである。水深40mになると宇宙線はかなり減衰する<sup>3,4)</sup>。

### 2. 測定方法

使用した線量計はアロカ(株)製マイドーズミニE PDM-111で、 $\gamma$ 線用で、検出器はシリコンPN接合半導体である<sup>2)</sup>。宇宙線はエネルギー付与が非常に大きく、NaIやCsIシンチレータは感度が高いが、 $\gamma$ 線の測定を目的とした放射線測定器(radiometer)では信号が飽和してしまい、測定できない。例えば、CsI結晶を使用する(株)堀場製作所製の放射線測定器Radi(PA-1000)とクリアパルス(株)製のMr. Gamma(A2700)は、5cmの鉛の遮蔽により、20分の1以下まで減少し、宇宙線に対する感度がないことを示す。シリコン半導体は線質の違いに対して感度が一定であり、また薄いので宇宙線によるエネルギー付与が大きくなると考えられる。表示はデジタル式なので、十分な線量の

変化 ( $0.01 \mu\text{Sv}$  までの表示なら  $0.10 \mu\text{Sv}$  程度以上) がある時間間隔で測定することが望ましい。

測定は海底と、海底からの  $\gamma$  線が無視できる高さの海中の2つを一組にして行うと後の解析に都合が良い。海水に含まれる放射性核種による  $\gamma$  線が無視できるとすると、海中の線量率は宇宙線によるもので、海底で測定される値は宇宙線と海底からの  $\gamma$  線の寄与の和でよい。もし、海水中に含まれる放射性核種が多ければ、海底の値にはそれによる海中の線量率の半分が加わる。今回は海中での測定は海底から 1 m とし、海底の測定では水による減衰があるため、海底になるべく接するように約 3 cm で測定した。

水中ライトのアルミニウム製耐水容器 (Hartenberger 製) に、ガラス窓から線量が読めるよう鏡 (直径 3 cm の点検鏡) を取付けた PDM-111 を入れ、潜水線量計として使用した (図 1)。容器は外径 7 cm、長さ 16.5 cm の円筒形で把手が付いている。中央部がやや細く、内径は 6 cm である。最大水深 100 m。線量計を含む重さは 550 g。水中重量が 100 g ほどになるように鉄のバラストを付けた。おもり 3 個で海底に固定した (図 2)。また、空気を入れた PET ボトルで水中に浮かべられる。潜水線量計は保護のためプラスチックの籠の中に入れられた。海底の測定には PET ボトルの空気を抜き、籠の中にもおもりを入れる。PET ボトルは海中で器材を運ぶリフトの役も果たす。籠には記録用の水中ノートが備えられている。

前記の潜水線量計のほかに (株) 東芝のプラスチック製の水中ライトも用いた (図 3)。こちらは普通の懐中電灯の形で、前部の直径 10 cm、握り部分 4.5 cm、長さ 35 cm である。最大水深 50 m。これは点検鏡を取り付けられる場所が限られていて、数値が読みにくく、副測定器として線量率がより高い海底線量の測定に用いた。すなわち、容器に入れる前に数値を読み、潜水線量計と一緒に持ち運ぶことで設置と

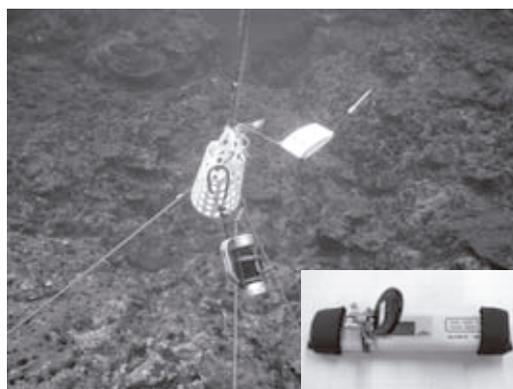


図 1 潜水線量計による海中線量率の測定  
海底から 1 m 上に設置。測定中は本体 (中央下) を籠の中に入れる。右上は記録用の水中ノートと鉛筆 (撮影: 富永基之氏)。挿入写真は線量計 PDM-111 と点検鏡。検出部は右

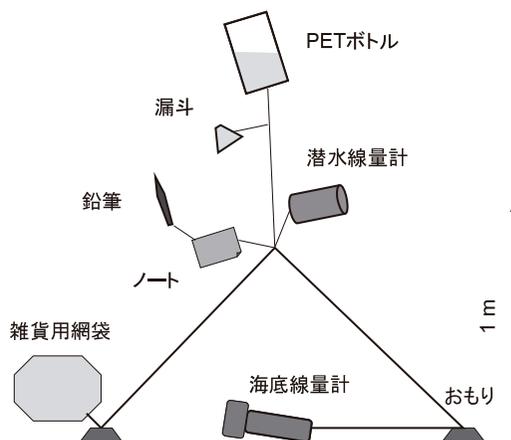


図 2 海中と海底の線量率測定



図 3 海底線量計  
測定部は中央寄り。中央列は左から、点検鏡、緩衝板、紙筒、おもりの電池。海底に固定するため両端に計 1 kg のおもりを付ける

回収の間は同じ線量を受けると仮定し、線量は回収後容器を開けて読む。

また、ECOTEST 製の放射線測定器 TERRA MKS-05 も Hartenberger 製の容器に入れて試した。これは GM 管を使用している。鉛の遮蔽を使った実験室と龍河洞での測定では、宇宙線に対しても感度があることを示した。エネルギー特性は 0.05~1.25 MeV で ±25% である。

### 3. 結果

測定は海中と海底の 2 種類を高知県の海で行った (図 4)。結果を表 1 に示す。6 番までは、ファンダイビングのときの測定で時間は 30~60 分であった。このとき使用した潜水線量計は Hartenberger 製の容器のもの 1 つだけである。海底での値は水深 6~13 m で測り、表 1 に示すように 0.04~0.07  $\mu\text{Sv/h}$  の値を得た。海水の線量は水中作業を想定した移動中の測定 (深度、平均 16 m、最大 28 m) と、海底から 1 m の線量測定を行った。線量率はどちらも 0.03  $\mu\text{Sv/h}$  であった。海底の状態による線量率の差や海中の線量率が少ないことなど、それなりの傾向は見える。しかし、測定時間が足りない。

7~10 番の測定は専用の舟と 4 つの線量計を用意し、海底と海中を一組として水深 25 m と

40 m で長時間測定した。海中では水深が増すと線量率が減少することが観測された。一方、海底の線量率は水深よりも海底の状態によって決まるようである。また、砂地では水圧により深い所の砂は圧縮されていることも考えられる。

陸から離れると線量率は下がる。宿毛湾小筑紫港から沖の島までの往復の船上での値は 0.03~0.04  $\mu\text{Sv/h}$  であった。これは文献 2) のプール内での測定値、0.033  $\mu\text{Sv/h}$  とほぼ一致し、

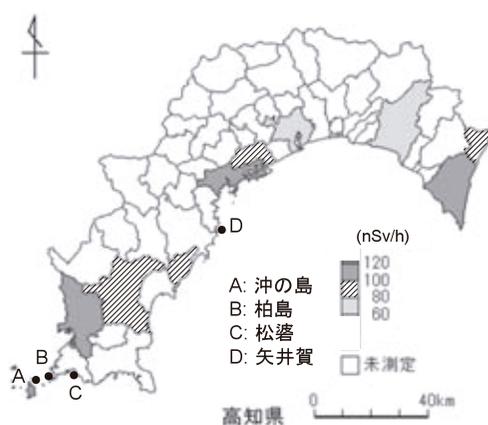


図 4 測定地点  
線量率は宇宙線の寄与を含む。(独)放射線医学総合研究所 HP より引用して改変<sup>5)</sup>

表 1 個人線量計 PDM-111 で測定された海の放射線量率

線量率は線量計自体の雑音 (0.015  $\mu\text{Sv/h}$ ) を含む。( ) 内は補正值

番号	日付 2011 年	場所 高知県	水深 (m)	透明度* (m)	測定時間 (h:m)	線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	備考
1	Sep. 4	沖の島 鳥首南	7	15	0:36	0.07	アンカー岩
2	Sep. 4	沖の島 久保浦	16 (max 28)	12	0:40	0.03 (0.03)	海中
3	Sep. 11	大月 松濤東	10	25	0:29	0.04	珊瑚
4	Sep. 11	大月 松濤南	7	20	0:58	0.03 (0.03)	海底から 1 m
5	Oct. 8	矢井賀 ミズシリ	6	10	0:45	0.04	砂地
6	Oct. 8	矢井賀 仲崎	13	7	0:51	0.06	岩盤
7	Oct. 19	柏島 後浜 1	25	10	1:56	0.04 (0.03)	砂地
8	Oct. 19	柏島 後浜 1	24	15 → 10	5:10	0.022 (0.012)	海底から 1 m
9	Oct. 19	柏島 後浜 1	42	10	2:01	0.05 (0.04)	砂地
10	Oct. 19	柏島 後浜 1	41	15 → 10	4:56	0.018 (0.005)	海底から 1 m

\* 透明度は日々刻々変化する。測定時の値は必ずしも典型的なものではない

宇宙線によるものであり、文献値の年間0.3 mSvと同程度である<sup>5)</sup>。

MKS-05での測定結果(矢井賀, 12月7日)は水深9~12 mの海底は小石で0.09  $\mu\text{Sv/h}$ , 砂地ではやや低く0.07  $\mu\text{Sv/h}$ であった。また, 水面では0.05  $\mu\text{Sv/h}$ , 水深6~10 mの海中は0.04~0.05  $\mu\text{Sv/h}$ を示した。PDM-111と比べてやや高い値を示すが, 傾向は似ている。しかし, 測定時間が短い代わりに誤差が大きい。測定誤差率を指定すると長時間の測定となるが, 表示が0.01  $\mu\text{Sv/h}$ までしかないので, それ以上細かい数値は分からない。また, 2か所以上連続して測定する場合, どれだけの時間を待てば良いか不明瞭である。MKS-05は線量計としても使えるようになっているが, その場合の最小表示は0.001 mSvで感度が不足する。

#### 4. 考察

潜水線量計は, アクリル製の専用容器を作ることが望ましい。鏡を使うと読み間違いを起こしやすい。液晶の7セグメント表示の鏡文字の2と5は分かっている間違う。水中では頭の働きが低下するのでなおさらである。ダイブコンピュータの時計は水に入ると潜ってからの時間表示に替わってしまうので, 時計が付いていた方が使い勝手が良い。複数のダイバーが使うときには必要である。さらに, 背面に水中ノートがあると読んだ値がすぐに記入できる。

海中の宇宙線の主な成分である $\mu$ 中間子の強度(個数)は水深10 mから20 mになると半減し, 40 mでは1/4になる<sup>3)</sup>。しかし, 線量率の測定結果は水深40 mでも半分ほどにしかならない。線量計と耐水容器を神岡宇宙素粒子研究施設に送り, 測定して貰ったところ, 線量計自体の雑音が0.015  $\mu\text{Sv/h}$ であった。これから,  $\gamma$ 線と宇宙線の検出効率に差があることが推定される。ここでは次のような補正を試みた。

1) 海中の線量率はすべて宇宙線によるものとする。宇宙線の海面での値は0.3 mSv/yなの

で<sup>5)</sup>, 雑音0.015  $\mu\text{Sv/h}$ を引いたのち, プールでの測定値0.033  $\mu\text{Sv/h}$ に規格化する<sup>2)</sup>。

2) 海底からの $\gamma$ 線による線量率は, 海底での測定値から海中の測定値を引いた値。

3) 海底の線量率は2)の値に1)で得られた宇宙線の線量率を加える。

このようにして得られた補正値を表1の( )内に示す。浅い海中と海底の線量率の補正はそれほど大きくはないが, 25 mを超える海中では著しく大きくなる。

海中には12 Bq/Lの<sup>40</sup>Kが含まれる。<sup>40</sup>Kによる海中での線量率を推定すると0.001  $\mu\text{Sv/h}$ 程度となり, 今回使用した個人線量計での測定は難しい。環境省による海水中の放射性物質に係る目安のCs 50 Bq/L程度は測定可能になる。

沿岸部の透明度は海況により大きく変わる。海中の塵の線量率への寄与の評価は, まだ分からない。

海中の線量率を正しく測定するためには線量計自体から開発する必要がある。 $\gamma$ 線と宇宙線の測定に適した2つの検出器を内蔵した測定器の開発が望ましいが高価になる。宇宙線は緯度を考慮すれば深さ方向の変化は同じと見做される。汚染のない海であらかじめ測定することによる補正も考えられる。あるいは, CsIなど宇宙線に感度のない検出器を利用する方法もある。RadiとMr. Gammaは容器に納まらず今回は試すことができなかった。これらは0.001  $\mu\text{Sv/h}$ まで表示されるが, 測定時間が60秒と短い。線量率の小さい海中の測定では放射線測定器より, 長時間の測定で精度を増すことができる線量計の方が適していると思われる。

事故により海中に放出された放射性核種の濃度は, 拡散されたため陸上に比べ著しく低い<sup>1)</sup>。しかし, 魚介類では5~100倍に濃縮されるので, 仮に100 Bq/kgの影響を調べようとすると1 Bq/Lの寄与を測定しなければならない。その際, 問題になるのは海中に含まれる<sup>40</sup>K(12 Bq/L)である。最近の放射線測定器の中にはMr. Gammaのように分光機能が付いた機種が

ある。一定の時間間隔で自動的に測定するように設定できれば、場所と時間を記録しておくことにより、後で値を取り出すことができる。

陸での自然放射線の測定には、いまだ空白部分が多い<sup>5)</sup>。線量率は同じ県内でも地域により2倍程度の差がある。さらに、近年では都市化による生活環境の変化があり、自然から受けている放射線の量とその内訳が変化してきた。ラドンや宇宙線による被曝の寄与を正しく測定する必要もある。そのためにも新しい測定器の開発が望まれる。普及型測定器は自然放射線より強い放射線の測定を想定して較正される。自然放射線の測定にはより正確な較正が必要である。較正や試験には宇宙線の影響が無視できる地下深くで、鉛や水の遮蔽を用いることも考えなければならない。

潜水線量計は、線量計の本来の目的である水中作業中の個人の線量を管理することに使える。また、水に溶けた放射能は試料を採取して測定すればよいが、瓦礫などに強い放射能があっても、近づくまで分からない。海中の作業には陸上以上に注意が必要で、警報器付の放射線測定器も必携である。また、水を入れたバケツの中で容器をポリ袋に入れて封じると、汚染や海水浴場での砂を噛むことによる浸水が避けられる。海辺の線量率は陸地より低い。東日本の海水浴場でも、海に入ると放射能の心配はない。家にこもらず海水浴に行って欲しい。

福島第一原発事故で海に流出した放射性核種は、海流に乗って拡散してゆく。海水の採取による調査だけでなく、海中と海底の線量率の測定を、汚染が広がる前に測定する必要がある。実際の測定では線量計を数組用意し、30~40分ほどの間に次々と設置して、数時間後に順次回収するという方法をとれば効率よく測定できる。また、[線量率]×[時間]を考慮し、おもりと浮きを付けて水中に沈め、沈める前と引き上げた後の値を読むと、任意の深さでの線量率を現地で知ることができる。海の線量の測定は組織的に行う必要があり、専門機関による調査

が急務である。

### 【謝辞】

線量計は高知大学 RI 実験施設から借用した。ダイビングショップ：エコ、シーエア柏島、及び矢井賀からの水中器材の提供と協力に感謝します。また、大月 PV から支援を得ました。大深度の測定では富永基之氏と原久恵氏にお世話になりました。線量計の雑音の評価をいただいた森山茂栄氏と助言をいただいた柴村英道氏他の方々に感謝します。

### 【付記】

水中の放射長（1 MeV の  $\gamma$  線が  $1/e \approx 0.37$  倍に減衰する長さ）は 14 cm で、空気中の 130 m に比べ著しく短い。海底から 1 m の高さは、陸では東京スカイツリーより高い 900 m に相当する。海底の線量率にはその状態の違いによる濃淡が出やすい。また、耐水容器の寸法は小さい方が良い。

海中に一樣に分布した放射性核種による線量率への寄与は、水による減衰のため有限となり、小さい値になる。点線源に対する実験室での  $r^{-2}$  則は海中では成り立たない。すなわち、“夜はなぜ暗いか”というオルバースの背理の心配はない。散乱を無視し、減衰長を  $r_0$  とすると、線量率は半径  $r_0$  内に含まれる放射性核種による減衰がないときの値に等しい。さらに、散乱を考慮するとその 2 倍強になる。

### 参考文献

- 1) 青山道夫, *Isotope News*, No.692, 10-14 (2011)
- 2) 月出章, *Isotope News*, No.695, 12-17 (2012)
- 3) Bugaev, E.V., *Phys. Rev. D*, **58**, 054001 (1998)
- 4) Bogdanova, L.N., et al., *Phys. Atom. Nucl.*, **69**, 1293-1298 (2006)
- 5) 阿部の環境における空間放射線レベルデータベース, <http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/ErlabeDB.html>

(高知大学 医療学系)