

潜水調査船「しんかい2000」を利用した シロウリガイ群生地でのガンマ線探査

吉田則夫*¹ 塚原弘昭*¹

1986年5月15・16日の二日間に亘り、潜水調査船「しんかい2000」の船体に直径5インチのNaI(Tl)シンチレーション検出器を取り付け、相模湾初島沖南東約6km、水深約1200mの海底でガンマ線のスペクトル強度測定を行った。又採取した底泥・海水中のウラン(²³⁸U)、トリウム(²³²Th)、カリウム(⁴⁰K)、ラジウム(²²⁶Ra)含有量を非破壊放射化法と自然放射能測定により求めた。この地域は、シロウリガイの群生地が散在しており、そこでは下から物質の供給が示唆されている。ガンマ線スペクトル分析の結果、シロウリガイ群生地でのラドン(²²²Rn)の娘核種であるビスマス(²¹⁴Bi)濃度は、底泥の分析値から算出した値の1.5～1.6倍となった。これは、地下から気体ラドン(²²²Rn)が現在供給されていることを示している。NaI(Tl)シンチレーション検出器と波高分析器を組み合わせた本方法により、コロニーの地下から流体の上昇があることが確認され、更に本方法が海底活構造の活動度の検出に有効であることが示された。

A γ -RAY SPECTRAL SURVEY ON GIANT CLAM (*CALYPTOGENA SOYOA*) COLONIES USING THE SUBMERSIBLE *SHINKAI 2000*

Norio YOSHIDA*²
Hiroaki TSUKAHARA*²

A γ -ray spectral survey was carried out on the ocean bottom in Sagami Bay about 6 km southwest of Hatsushima Island at a depth of about 1,200 m. The detector used for the γ -ray measurement was made of a NaI(Tl) crystal 5 inches in diameter installed in an aluminum high-pressure vessel (2 cm thick, 25 cm in diameter and 70 cm in length). The high-pressure vessel was attached to the head of *SHINKAI 2000* in order to maintain contact with the sea-floor. The recording system for the γ -ray spectrum was set up in the cockpit of *SHINKAI 2000*.

Colonies of the giant clam *Calyptogena soyoae* are distributed zonally in this deep-sea area. It is expected that the zonal area provides nutrition for the clam from the depth of the sea-bed under the colonies. Measurements were made at three sites, two in the colonies of the clam and one on the ordinary sea-floor with no shellfish in sight at a distance of 200 m from the colonies.

*¹ 国立防災科学技術センター

*² National Research Center for Disaster Prevention

Each observation period was 3,000 seconds. Spectrometry of the observed γ -ray revealed that the intensities of the γ -ray from ^{214}Bi , daughter of ^{222}Rn , at the colonies were 1.5 – 1.6 times that estimated from the chemical composition of the sediments around the sites. The U, Th, K and Ra contents of bottom sediments and sea water were measured in order to calculate the spectrum of the γ -ray emitted from the sediments and sea water around the sites.

The results of the γ -ray survey indicate that ^{222}Rn emanates from the bottom substrata in the colonies of the giant clam. This suggests an upwelling of some kind of fluid including ^{222}Rn (gas) in this zonal area. Thus the distribution of the colony is an indicator of active areas such as active faults and volcanoes. The study confirmed that γ -ray surveys by a multichannel pulse height analyzer with NaI(Tl) scintillation detector using the submersible *SHINKAI 2000* are useful for detecting crustal active regions on the deep sea-floor.

1. はじめに

日本周辺の海底には多くの活断層が存在し、その断層上で、しばしば巨大地震が発生するため、海底に存在する活断層の位置・活動度を推定することは、地震予知研究の上で重要なことである。活断層からはラドン (^{222}Rn) が放出されていると考えられており、断層上では、その娘核種であるビスマス (^{214}Bi) が放出するガンマ線強度が高くなると報告されている [Hatuda (1953) ; 貞広・見野 (1980)]。このラドン (^{222}Rn) を利用した地震予知研究は、ソ連・中国で盛んに進められており、地震予知の成功例も幾つかある [Ulomov and Mavashev (1971) ; 尾池・他 (1975)]。日本では、1976年に伊豆半島、東海地方において地下水中のラドン濃度の観測が開始され、その後、観測点も急速に増え前兆変化も数例報告されている [Wakita et al. (1980) ; 吉田 (1986)]。地上でのガンマ線強度測定による活断層の探査は、気象上・地形上の影響を受け易いため必ずしも良い結果が得られてはいない。海底では、それらの影響を受けない質の高いデータを得ることが出来ると考えられる。我々は、昭和61年度に海洋科学技術センター所属の「しんかい2000」を利用した海底ガンマ線探査を実施する機会を得たので、その結果を報告する。

2. 潜航の概要

5月15日はシロウリガイ群生地から東へ約200 m離れた平坦な海底に着底し、ガンマ線スペクトル強度の測定と底泥・海水の採取を行った後、シロウリガイ群生地へ移動して同様な測定、採取を実施した。5月16日はシロウリガイ群生地と、その西側で探査を行う予定であったが天候悪化のため、シロウリガイ群生地での探査のみにとどまった。表1に潜航記録を示す。

3. 探査地点

シロウリガイ群生地は相模湾初島沖南東約6 km、水深約1,200 mの海底に、ほぼ南北方向に約7 kmにわたり散存していることが、海洋科学技術センターの曳航式カメラによる調査で確認されている。最近の研究で、この地域の底層水には高濃度のメタンが含まれていることが明らかとなり [酒井・他 (1986)]、又この群生地の南西約20 kmには、しばしば群発をくり返す伊豆半島東方沖群発地震の震源域があり [堀 (1986)]、海底活断層も近くにある [活断層研究会 (1980)] ことから相模湾西部は地震予知研究の上で重要な地域と言える。今回、ガンマ線探査を行った地点は群生地の北端に近い、北緯35度00分、東経139度14分付近の生きているシロウリガイが多く分布している二地点

表 1 潜航の概要
Table. 1 Summary of the dives.

潜航年月日	潜航地点	最大潜航深度	r線測定点数	潜航時間	観察者
1986年 5月15日 (Dive 216)	相模湾初島沖約 6 km 北緯35度00分 東経139度14分	1,210 m	平坦部 1 シロウリガイ 群生地 1	5 時間 7 分	吉田則夫
1986年 5月16日 (Dive 217)	相模湾初島沖約 6 km 北緯35度00分 東経139度14分	1,160 m	シロウリガイ 群生地 1	2 時間 51 分	吉田則夫

と、その東側の平坦な海底一地点の合計三地点である。(図1)

4. 調査方法

4.1 海底ガンマ線探査

ラドン (^{222}Rn) はラジウム (^{226}Ra) を直接の親核種とする半減期 3.825 日の、ウラン (^{238}U) 系列に属する不活性な気体の放射性核種である(図2)。ラドン (^{222}Rn) 自体は α 壊変をして、ポロニウム (^{218}Po)、鉛 (^{214}Pb) を経て半減期 19.7 分のビスマス (^{214}Bi) になる。これらの娘核種は閉じた系のなかでは、その娘核種の10倍程度の時間、つまり 4 時間程度で平衡が形成され、親核種であるラドン (^{222}Rn) と同じ壊変率をもつようになる。この平衡に達するまでの時間が短いため、そしてラドン (^{222}Rn) は不活性気体であるため、化学的に取り除かれることは殆んどないと考えられる。そのため、海底の堆積物中ではラドン (^{222}Rn) とビスマス (^{214}Bi) との間には、平衡が成立している。ラドン (^{222}Rn) 自体はガンマ線を放出しないため、海底でのガンマ線スペクトル探査はビスマス (^{214}Bi) から放出される 609Kev, 769Kev, 1,120Kev, 1,765Kev などのエネルギーをもつガンマ線のうち 609Kev のものを測定することと、 ^{40}K が放出する 1,461Kev のエネルギーのガンマ線強度を測定することにより行った。ガンマ線探査に使用した検出器は ^{137}Cs (662Kev) のガンマ線に対し、約 7 % の分解能をもつ、直径 5 インチの NaI (TI) シンチレーション検出器である。この検出器は高い計数効率を有するので、海底のようにガンマ線

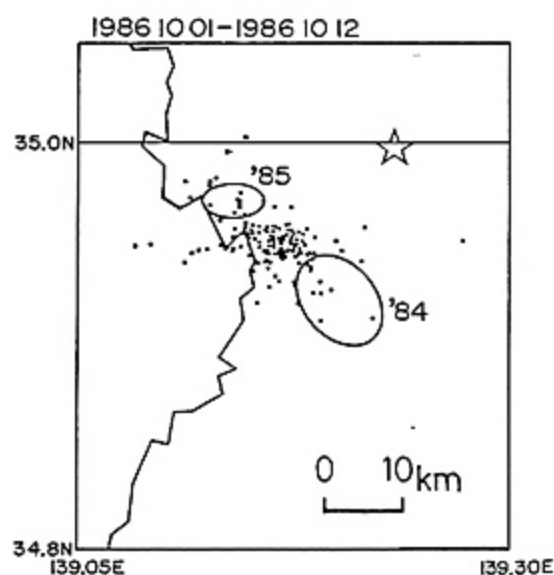


図1 ガンマ線探査地点と伊豆半島東方沖群発地震活動

Fig. 1 Location of γ -ray survey point and microearthquake swarms.
Star indicates γ -ray survey point, dots indicate earthquake epicenters during 1984-1986, and circles indicate the areas of earthquake swarms in 1984 and 1985. (earthquake data from S. Hori, 1986)

強度が低い場所では有効である。そして、この高い分解能のため、マルチチャンネル波高分析装置と組み合わせることにより核種の固定も可能である。この検出器を直径約25cm、高さ約70cm、空中重量約35kgの円筒型のアルミニウム製耐圧容器に納め、

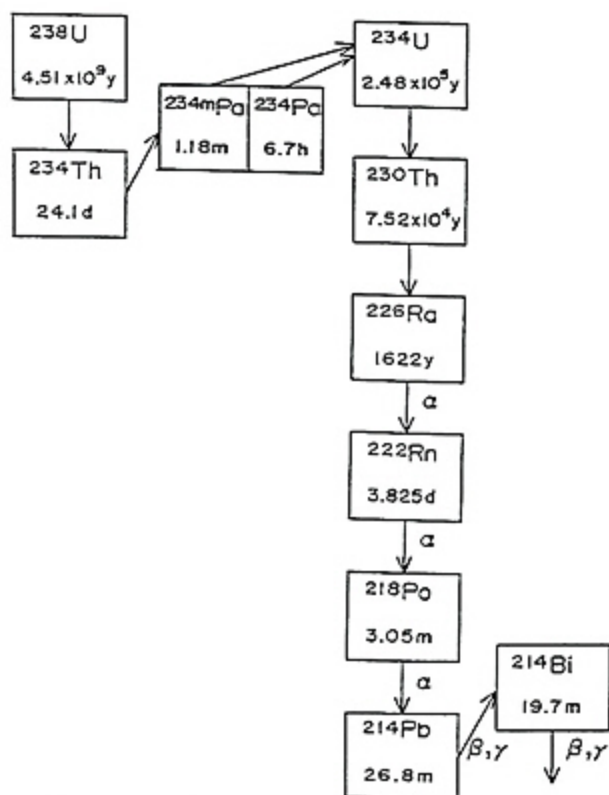


図2 ウラン系壊変図

Fig 2 The decay processes of the uranium series.

調査船本体の底面と容器底面が同じ水平面になるように容器を船体外側に取り付け、調査船が着底した状態で3,000秒間の測定時間で、海底とその周辺海水からのガンマ線のスペクトル強度測定を行った。検出器からの出力信号は長さ約5 mの信号用同軸ケーブルを通して、調査船コックピット内のマルチチャンネル波高分析器に伝送される。このマルチチャンネル波高分析器は4,096のメモリーチャンネルをもち、最高四つのメモリー領域に分割することが出来る。

今回の探査では、一回の測定で1,024チャンネルのメモリーを使用し、0～3,000 keVのエネルギー範囲でガンマ線スペクトル強度の測定を行った。得られたデータはカセットテープに収録する。収録したデータはパーソナルコンピュータに移し、ガンマ線スペクトルの解析を行う。今回の潜航で得られたガンマ線スペクトルの例を図3に示す。

4.2 底泥・海水の採取

マニピュレータでコア採取器をつかみ、海底に

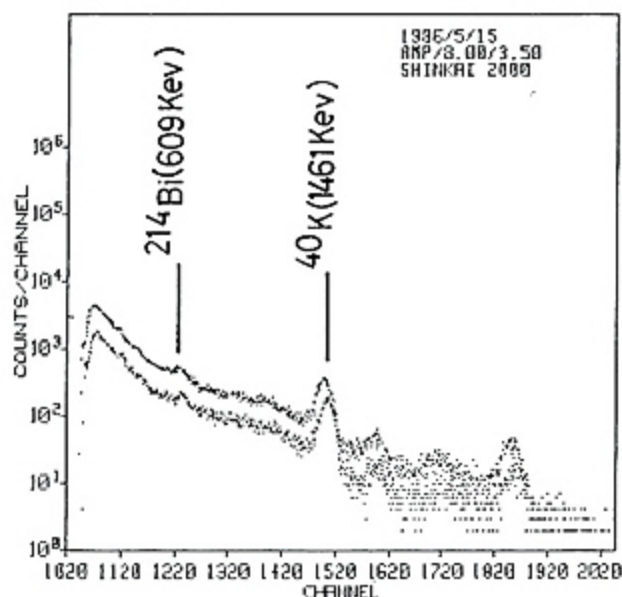


図3 海底でのガンマ線スペクトル
(下: シロウリガイ群生地,
上: 平坦部)

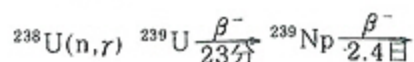
Fig.3 γ -ray spectra observed at the ocean bottom.
(lower : giant clam colony,
upper : ordinary seafloor)

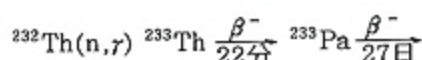
先端を突き差して探査地点の堆積物を採取した。採取したコアの長さは最大のものでも20 cm程度である。コアの内部には小さな貝殻もいくつか入っており、全体は黒っぽい色をした粗粒の堆積物である。海水は、「しんかい2000」前部に取り付けられた採水筒により採取した。この採水筒は筒の両端に付けられたゴム栓が、バネの力で閉じる構造になっているもので、調査船の内部からの操作で海水を採取する方式である。一回の採水で約1 lの海水を採取することが出来る。

4.3 底泥・海水の分析

4.3.1 ウラン (^{238}U)・トリウム (^{232}Th) の放射化分析

採取した底泥・海水中のウラン (^{238}U)・トリウム (^{232}Th) の含有量は、非破壊放射化法により求めた。この分析法は





の核反応により生成する半減期 2.4 日のネプツニウム (^{239}Np) が放出する 106 keV, 228 keV, 278 keV のエネルギーのガンマ線強度と半減期 27 日のプロトアクチニウム (^{233}Pa) が放出する 300 KeV, 311 KeV, 341 KeV のエネルギーのガンマ線強度をそれぞれ測定することにより、ウラン (^{238}U) とトリウム (^{232}Th) の量を求めるもので、多数量の試料を一度に分析でき、かつ分析感度も高いため、海底堆積物や海水中のウラン (^{238}U)、トリウム (^{232}Th) のように微量にしか含まれていない元素の分析には、都合の良い分析法である。

底泥は 110℃ で一日乾燥した後、約 600 mg を秤量して二重にしたポリエチレン袋に封入、海水はガラス容器に約 20 cc 入れ秤量し、それぞれ測定用試料とした。測定用試料はカドミウムカバーをして武蔵工業大学原子力研究所の TRIGA-II 型、最大出力 100 kW の原子炉で、底泥は 5 時間、海水は 25 時間照射を行い、6～20 日間の冷却期間の後、Ge(Li) 検出器により測定を行った。照射・測定条件を表 2 に示す。

4.3.2 カリウム (^{40}K)・ラジウム (^{226}Ra) の放射能分析

乾燥細粉化した底泥及び海水を内径 4.3 cm、高さ 6.5 cm のプラスチック容器に詰め、Ge(Li) 半

導体検出器とマルチチャンネル波高分析器で、半減期 1.28×10^9 年のカリウム (^{40}K) が放出する 1.461 KeV のエネルギーのガンマ線強度と半減期 1.60×10^3 年のラジウム (^{226}Ra) が放出する 186 KeV のエネルギーのガンマ線強度を測定した。測定時間は一試料につき 25～54 時間である。

4.3.3 ラジウム (^{226}Ra) の補正

ラジウム (^{226}Ra) が放出する 186.2 KeV のエネルギーのガンマ線ピークは、 ^{235}U の 185.7 KeV, ^{230}Th の 185.8 KeV, ^{234}Pa の 185.9 KeV, ^{234}Th の 184.8 KeV のエネルギーのガンマ線ピークと重なるので底泥中に含まれるウラン (^{238}U) の量から補正係数を求め、ラジウム (^{226}Ra) の量を鈴木 (1987) の方法により補正した。海水中にはウラン (^{238}U) は底泥の 1,000 分の 1 程度しか含まれていない (表 3) ため、底泥中のウラン (^{238}U) を考慮するだけで充分である。補正式を以下に示す。

$$F = 1 - 0.753 \times ^{238}\text{U}(\text{pCi/g}) / ^{226}\text{Ra}(\text{pCi/g})^*$$

$$^{226}\text{Ra}(\text{pCi/g})^{**} = F \times ^{226}\text{Ra}(\text{pCi/g})^*$$

$^{238}\text{U}(\text{pCi/g})^*$: 放射化分析で求めたウラン量

$^{226}\text{Ra}(\text{pCi/g})^*$: 放射能分析で求めたラジウム量

$^{226}\text{Ra}(\text{pCi/g})^{**}$: 補正後のラジウム量

F : 補正係数

表 2 今回の潜航で採取した試料の照射・測定条件
Table.2 Irradiation and measurement condition for the samples collected in this survey

熱中性子束 ($\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$) 照射場所	照射時間	冷却時間	測定時間	測定位置 Ge(Li)検出器 垂直方向	分析元素
7.0×10^{11} 照射溝 Cd カバー (カドミウム比 15)	5 hr	6 day	15 min, 60 min	2 mm	U, (Th) } 底泥 (U), Th }
		13-20 day	12 hr	2 mm	
			18 hr	2 mm	
	25 hr	8 day	11 hr	2 mm	U } 海水 Th }
		14-15 day	14 hr	2 mm	

表3 底泥・海水の分析結果とガンマ線探査結果
Table 3 Analytical results of the sediments, sea water
and γ -ray spectrometry survey.

Site	chemical analysis				γ -ray survey	
	^{238}U (ppm)	^{232}Th (ppm)	^{40}K (pcig $^{-1}$)	^{226}Ra (pcig $^{-1}$)	^{40}K (cps)	^{214}Bi (cps)
Giant clam colony (DIVE 217)	1.6	1.6	5.7	1.2	2.23 $\pm$ 0.04	0.67 $\pm$ 0.05
Ordinary seafloor (DIVE 216)	1.7	3.2	10.9	2.1	3.07 $\pm$ 0.04	0.49 $\pm$ 0.07
Giant clam colony (DIVE 216)	1.4	1.0	3.7	0.8	1.40 $\pm$ 0.03	0.47 $\pm$ 0.03
Sea water (DIVE 217)	<4.2 $\times 10^{-3}$	<14 $\times 10^{-3}$	<0.43	<0.16		

5. 探査結果と考察

底泥・海水の分析結果と海底でのガンマ線スペクトル強度の測定結果を表3に示した。ガンマ線スペクトル強度はピーク面積から、散乱成分を引いたNet値であり、1 σ を誤差として示した。

底泥中のカリウム(^{40}K)とラジウム(^{226}Ra)の分析結果を図4に示した。シロウリガイ群生地と東側平坦部の値は同じ直線上にプロットされる。これは、シロウリガイ群生地と東側平坦部の堆積物が同一起源であることを示した結果であり、堆積後、新たにラジウム(^{226}Ra)だけが供給されたり、あるいは除去されてはいないと言える。

底泥の放射能分析から求められたカリウム(^{40}K)濃度と海底でのガンマ線スペクトル計測により得られたカリウム(^{40}K)強度を図5に示した。シロウリガイ群生地の二地点での測定値は、いずれも原点を通る直線上にプロットされるが、東側平坦部での測定値は、この直線の下側にプロットされる。全く同一な条件でスペクトル計測が行われたならば、三つの測定値は同じ直線上にプロットされなくてはならない。東側平坦部の測定値だけが直線に乗らないということは、検出器の計数効率が何らかの原因で減少したことを意味する。東側

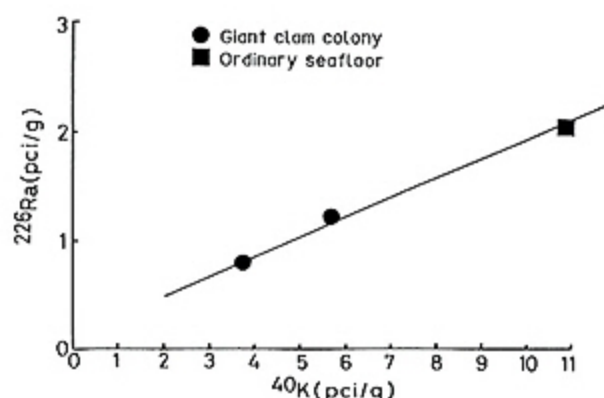


図4 底泥中の ^{40}K と ^{226}Ra 濃度

Fig.4 Relationship between ^{40}K and ^{226}Ra contents of the sediments, sea water collected at the γ -ray measurement sites.

平坦部ではシロウリガイ群生地と比べて計数効率は73.4%に減少している。この原因として、調査船の着底状況の変化、あるいはガンマ線測定系の不調などが考えられるが、図3に示したようにスペクトルに異常は見られず、計数効率の減少原因は測定系にはないと言える。検出器と海底との距離が長くなったことが計数効率の低下原因と考え

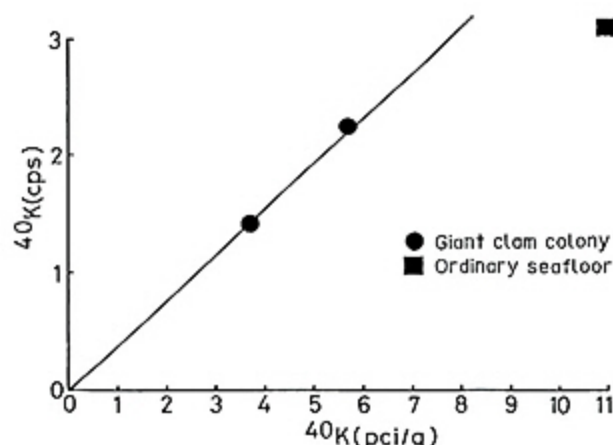


図5 底泥中の ^{40}K 濃度と海底で計測された ^{40}K 強度

Fig.5 Relationship between ^{40}K contents of the sediments and ^{40}K γ -ray intensity measured at the ocean bottom.

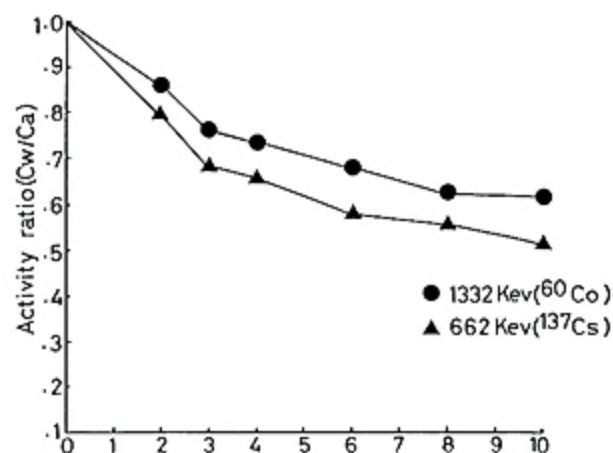


図6 海水によるガンマ線の吸収

Fig.6 Absorption of γ -ray in sea water

られる。そこで、カリウム (^{40}K 1,461Kev)・ビスマス (^{214}Bi 609Kev)と同程度のエネルギーのガンマ線を放出するコバルト (^{60}Co 1,332Kev)とセシウム (^{137}Cs 662Kev)の線源を用いて、計数効率の補正係数を求める実験を行った。

ガンマ線源を検出器底面から遠ざけていった時のスペクトル強度変化を、NaI (TI) シンチレーション検出器とマルチチャンネル波高分析器で測定した。検出器と線源の間には、今回の潜航で採取した海水をポリエチレン袋に入れたものを置き、ガン

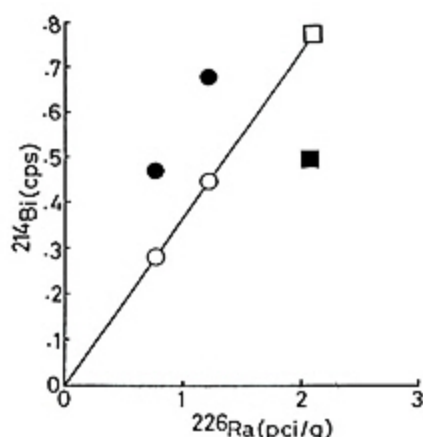


図7 底泥中の ^{226}Ra 濃度と海底で計測された ^{214}Bi 強度。黒丸と黒四角は、それぞれシロウリガイ群生地と平坦部での値である。

白丸はシロウリガイ群生地の底泥中の ^{226}Ra から計算で求められる ^{214}Bi 値である。白四角は、平坦部でのNaI(Tl)シンチレーション検出器の計数効率から黒四角を補正した値である。

Relationship between ^{226}Ra contents in the sediments collected from the ordinary seafloor and γ -ray from ^{214}Bi measured at the ocean bottom.

Solid circle and square indicate γ -ray at the colonies and the seafloor, respectively.

Open circle indicates calculated ^{214}Bi value from ^{226}Ra contents in the sediments at colonies.

マ線の減衰率を測定した(図6)。

この測定結果から、カリウム (^{40}K 1,461Kev)のガンマ線スペクトル強度が初期値から73.4%まで減衰した時、ビスマス (^{214}Bi 609Kev)は63.5%までガンマ線スペクトル強度が減少することが判る。

底泥に含まれるラジウム (^{226}Ra)濃度とガンマ線スペクトル計測で得られたビスマス (^{214}Bi)の強度との関係を図7に示した。

表3に示すように海水中的カリウム (^{40}K)・ラジウム (^{226}Ra)濃度は底泥の値の10分の1以下であり、海底で計測されたカリウム (^{40}K)とビスマ

ス (^{214}Bi) のガンマ線は、主に底泥からのものであると考えられる。黒丸と黒四角は、それぞれ海底でのガンマ線計測で得られたシロウリガイ群生地と東側平坦部における実測値であり、白四角は検出器の計数効率の補正係数 0.64 を用いてビスマス (^{214}Bi) を補正した値である。白四角と原点を結ぶ直線上の白丸の値が底泥に含まれるラジウム (^{226}Ra) 濃度から計算されるビスマス (^{214}Bi) の値である。シロウリガイ群生地でのビスマス (^{214}Bi) の実測値は、いずれもこの直線上の値の 1.5 ~ 1.6 倍程度高い値を示す。この過剰のビスマス (^{214}Bi) の存在は、海底下から親核種である気体のラドン (^{222}Rn) が現在放出されていることを示している。ラドン (^{222}Rn)、ビスマス (^{214}Bi) の半減期が、それぞれ 3.8 日、19.7 分と短いことから考えて、この高い濃度は、過去に蓄積されたものではなく、現在の活動によるものである点も重要である。更に、ここでラドンガスだけが地下から湧出していることは考えにくく、他の流体と共に上昇してくるのがあるのが自然である。 γ 線スペクトル探査は、海底の活構造の調査、特に現在の活動度を評価するのに大変有効であることが示された。

謝辞

この研究は海洋科学技術センター所属の「しんかい2000」、及び母船「なつしま」を利用して行った。皆様に深く感謝致します。

参考文献

Hatuda, Z., 1953, Radon Content and its Change in Soil Air near the Ground Surface, Mem. Coll. Sci., Univ. Kyoto, Ser. B, XX, 285-306.

堀貞 喜, 1986, 伊豆半島東方沖群発地震活動, 第58回地震防災対策強化地域判定会資料.

活断層研究会編, 1980, 日本の活断層, 東京大学出版会

尾池和夫・志知竜一・浅田敏, 1975, 中国における地震予知, 地震 2, 28, 75-94.

酒井均・蒲生俊敬・石橋純一郎・遠藤圭子・柳沢文孝・白木亮司・石井輝秋・石塚明男・日下部実・赤木右・小寺雅子・五十嵐丈二・堀田宏・太田透, 1986, 相模湾初島沖白うり貝コロニーの地球化学的特性, 第3回「しんかい2000」研究シンポジウム予稿集, 11-14.

貞広太郎・見野和夫, 1980, 活断層における γ 線測定(I), 地震 2, 33, 51-70.

鈴木隆司, 1987, 非破壊法による新しい ^{226}Ra の分析法, Radioisotopes, 36, 18-22.

Ulomov, V. I., Mavashev, B. Z., 1971, In the Tashkent Earthquake of 26 April, 1966, Akademia Nauk, Uzbekskoi, SSR, FAN, (Tashkent), pp. 188.

Wakita, H., Nakamura, Y., Notsu, K., Noguchi, M., Asada, T., 1980, Radon Anomaly: A Possible Precursor of the 1978 Izu-Oshima-Kinkai Earthquake, Science, 207, 882-883.

吉田則夫, 1986, 東京都府中市におけるラドン濃度の連続観測結果(1985年5月~10月) —1985年10月4日千葉・茨城県境付近の地震前のラドン濃度の異常—, 地震予知連絡会会報, 35, 190-192.

(原稿受理 1987 年 3 月 16 日)