

# 海底地殻中より発生する $\gamma$ 線の沿岸海域海底探査への応用に 関するフィージビリティ調査

(財) 日本海洋科学振興財団 むつ海洋研究所 島 茂樹

天然に存在する放射線は、宇宙線、自然界に存在する放射性核種から直接放出される $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線およびそれらの散乱線から構成される。後二者の中で $\gamma$ 線の透過力が最も高い。天然放射性核種が崩壊する際に放出される $\gamma$ 線は、放射性物質の種類(核種)によって特定のエネルギーを持っていることから $\gamma$ 線のエネルギーを測定することによって放射性核種が同定できる。自然界に存在する $\gamma$ 線放出核種には、カリウム( $^{40}\text{K}$ )、ルビジウム( $^{86}\text{Rb}$ )などをはじめとして、ウラン(U)、トリウム(Th)のように一連の親子関係(壊変系列)にある核種も存在する。

これらの核種は地球の内部に存在し、地殻変動、各核種の物理・化学的性質あるいは半減期の違いによって、地球上におけるそれらの空間的分布あるいは時間的変動が規定される。すなわち、天然の放射性核種の濃度分布とその変動を知ることが、地球科学上の諸問題を解明するための有力な手がかりとなりうる。このため、陸上では空間 $\gamma$ 線強度の変動を用いた断層および温泉調査に活用されており、また地震予知研究の一環として地下水中のラドン濃度の変動が追跡されている。一方、水中では放射線に対する遮蔽効果が大きいいため、陸上のような大規模な調査は限定されるが、海洋中においても、それらは海洋の環境把握のための基礎データのひとつであり、特に、海底火山域での熱水噴出や海底活断層域での間隙水上昇の検出など、海底下の地殻変動の解明や活動予測等に重要な情報を提供できる可能性がある。

このような地球科学的な見地からの調査目的に加え、原子力関連施設から環境への影響の安全性の検証の面から水中における $\gamma$ 線計測手法の整備がなされ、実用化試験等を経て、幾つかの研究機関において計測結果の蓄積が行われてきた。このような経緯を踏まえ、日本原子力研究所(現、独立行政法人日本原子力研究開発機構、深海用Ge半導体検出器)、海洋科学技術センター(現、独立行政法人海洋研究開発機構、以下JAMSTECと略す、熱水域等の主として深海域でのNaI検出器による計測)および財団法人日本海洋科学振興財団(浅海域でのNaIおよびGe検出器による計測、海底近くでの連続計測)の3機関は平成13年から15年にかけて「海洋放射能測定用検出器の運用とデータ解析手法に関する研究」と題する共同研究を実施し、興味ある結果が示された。

本研究では、この共同研究の中で提供された沿岸域での実用化試験時における計測データについて、現地計測を含めて地球科学的な側面から再解析した。さらに、沿岸域を対象に環境放射線が持つ時間情報を有効に活用する方策について検討した。

電源開発特別会計法(現エネルギー対策特別会計)に基づく委託研究として実施された「海洋モニタリングシステム整備調査」の一環として整備された係留式モニタリングブイによって、平成9年7月から平成10年9月にかけて、青森県むつ市関根浜沖水深40mで海底から約3m直上の海中でNaI検出器による $\gamma$ 線の連続計測が行われた。通常での $\gamma$ 線

の5分間積算値は概ね1200カウント(計数率としては4 cps)であったが、平成10年6月には時としてその値が倍近くに変動することが観測され、その原因は $\gamma$ 線検出器が何らかの理由により海底に近づいたためとされていた。この計数率は深海域の $\gamma$ 線異常海域に比べるとかなり低い値であるが、本研究ではこのデータを主たる対象として、計測データの詳細な解析(マトリックス法にてK、U系列、Th系列成分に分解)を行うとともに、同時に計測された水温、塩分および流向流速データとの関連について詳細に解析した。

不規則に $\gamma$ 線計数率が増加した時期での5分計測毎の計数率の時間変動をより詳細に見ると、計数率の変動が計数誤差 $1\sigma$ 内でのもの(以下、通常期と称す)、通常時に比べ約2倍高いもの(以下、高計数期と称す)、並びに計数誤差 $1\sigma$ を越えた若干高い変動を示すようであった(以下、微増加期と称す)。それぞれ時期の $\gamma$ 線エネルギー波高分布には、1.46 MeV、2.61 MeVおよび1.76 MeVのエネルギー付近に吸収ピークが認められ、それぞれのピークは、 $^{40}\text{K}$ 、Th系列の $^{208}\text{Tl}$ およびU系列の $^{214}\text{Bi}$ によると考えられた。なお、UおよびTh系列に関しては、僅かではあるが、その他の全吸収ピークも見受けられる。高計数期では、特にTh系列からの全吸収ピークの面積が通常期の場合に比べて増加した波高分布となっている。いずれの区間とも $^{40}\text{K}$ の毎秒当たりの全吸収ピーク面積は0.17~0.21 cpsとほぼ一定であり、海底堆積物中に数%程度含まれるKに起因する $\gamma$ 線による全吸収ピーク面積の増加が見られないことから、検出器が海底面に著しく近づいたとは考えにくい。

試験海域は潜頭性の地熱地帯であり周辺には温泉などの湧出が多く見られ、UおよびTh系列に富む地下水による影響が考えられる。これらの水質は海水とは異なることが考えられるためその比較を行ったところ、高計数率期には、2~3℃の水温の低下、微増加期には、前者とは異なり1~2℃の水温の上昇を伴う場合が多かった。一方、塩分との関係では、水温の場合とは逆に、高計数率期には塩分は約0.2増加し、微増加期には約0.2塩分が低下する傾向が強い。しかし、一般に海水の水温および塩分は時間変動をしているため、必ずしも水温および塩分の変動が計数率の変動に1対1対応しているとは限らなかった。

海水の流れとの関係では、高計数率期には、東西および南北方向成分流速はほぼ零に近い状況であった。このような遅い流れの場により半減期が分程度であるUおよびTh系列の娘核種の $\gamma$ 線を検出できた要因と考えられる。

流向と $\gamma$ 線計数率の関係から、多くの計数率の上昇は北東あるいは南東に海水が流れている場合に出現していた。上記とは逆方向に流れている場合でも $\gamma$ 線計数率が高い傾向を示しているが、高計数率出現時に流れが反転しており、他のピーク出現時と同様に北東あるいは南東方向に海水が流れている場合に出現する傾向が高いことが明らかになった。

以上のことから計測地点の西側から $\gamma$ 線放出核種が流れてきたと考えられるが、計測地点周辺の近くには大きな河川はなく、しかも $^{208}\text{Tl}$ などの短寿命核種濃度が増加することから海底における地下水の湧出現象を観測した可能性がある。この湧出が常時起こっている現象なのかあるいは地震などの地殻変動に伴う一時的なものなのかは、同時期における震度3以上の地震発生の報告はなく明らかにできなかった。

また、本研究では同地点で再測定を試みた。これには「平成15年度海洋モニタリングシステム整備調査」によって整備した曳航式システムと呼ばれるNaI検出器を搭載した観測機器を文部科学省から無償貸与を受けて実施した。但し、今回は海底の極直上(約25 cm)での数時間計測を実施した。その結果、計測の前半と後半では計数率は、それぞれ13.4および14.2 cpsあり、約0.8 cps上昇した。計数率上昇の原因は、殆どが $^{40}\text{K}$ のピークより低い低エネルギー領域での上昇によるものであった。計数率上昇と前後して、水温の僅かな(0.1℃程度)上昇と下降が見られた。しかし、同時に投入した水中ビデオカメラの映像から曳航索によってシステムが引きずられその姿勢を変えることが観測されており、計数率の変動の主たる原因はNaI検出器と海底からの距離の変動に対応していることが想定された。平成10年6月における計数率の時系列データに見られる0.5 cps程度の変動は、ブイに取り付けられたNaI検出器の振り回りに対応しているものと解釈された。

曳航式システムでは鹿児島湾等にてモニタリングシステムとしての性能調査が行われた。

この際に取得した放射線データの再解析も行った。特に、鹿児島湾では「たぎり」と呼ばれる海底ガス噴気孔が存在し、JAMSTEC の潜水艇による調査も行われている海域である。水深 80 m で曳航式システムの着底位置を僅かに (数十 cm ~ 数 m) 移動させるだけで  $\gamma$  線の 0.1 ~ 3 MeV エネルギー領域の計数率は約 34 ~ 51 cps と変化した。但し、関根浜沖で観測されたような時間変動は観測されていない。その際の  $\gamma$  線エネルギーの波高分析結果によると  $^{40}\text{K}$  と  $^{208}\text{Tl}$  のピークが見られ、着底地点同士の計数率の差も、主として堆積物中の Th 系列核種および  $^{40}\text{K}$  濃度の違いによると考えられた。たぎり付近の堆積物中  $^{40}\text{K}$  および Th 系列核種濃度は、水平的な差が大きいと推測され、噴出孔の極近傍に沈積しているという、JAMSTEC の調査結果と矛盾しない。

ウランおよびトリウム系列を構成する元素の水中での存在形態は、入手可能な熱力学データを用いた地球化学計算コードによる結果では、Ra, Ac, Tl は溶存形であり、Rn (気体) を除くものは無電荷形であった。このため、後者の元素は海底に沈降する傾向を有する。また、これら元素の放射性崩壊定数も  $\mu$  秒から数千年程度までの広い範囲にある。このような元素の物理的および化学的な特性を加味した情報を現場でうまく計測できれば有益な情報が得られると期待される。

このため、 $\gamma$  線に対するエネルギー分解能が高い Ge 半導体検出器を用いれば、より詳細な核種の同定が可能であり、浅深海域でも使用可能なものも開発されている。しかし、その検出効率が低いことによる十分な計測時間の確保および消費電力の多さに問題点を有している。さらに、ウランおよびトリウム系列に属する核種には崩壊時に  $\gamma$  線を放出しないものやそのエネルギーが低いものも多く含まれるという問題点がある。

一方、放射線のエネルギー情報からではなく、放射線パルスの発生時間間隔から特定の核種の同定、定量を行なうパルス時間間隔解析 (Pulse time interval analysis; TIA) 法と言われる手法が開発された。これはある任意の設定時間内に発生するパルスの時間間隔を全て記録し、そのパルスの時間間隔情報から親の壊変後、特定の短半減期を有する娘核種の壊変を放射線由来の時間間隔として選択的に抽出し、定量を行なう手法である。この手法により天然試料から極微量のミリ秒オーダーの半減期を有する  $^{216}\text{Po}$  ( $^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{216}\text{Po}$  (半減期 145 ms)  $\rightarrow$  (トリウム系列) や  $^{215}\text{Po}$  ( $^{219}\text{Rn} \rightarrow ^{215}\text{Po}$  (半減期 1.78 ms)  $\rightarrow$  (アクチニウム系列)  $^{214}\text{Po}$  ( $^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po}$  (半減期 164  $\mu\text{s}$ )  $\rightarrow$  (ウラン系列) がそれぞれ定量された。

この方法は、 $\alpha$  線あるいは  $\beta$  線の入射をトリガーとしてその後に入射する放射線との時間相関を取っているが、海水中ではこれら放射線を検出することは技術的な制約を伴い、ある程度の耐圧を有する市販品はないのが現状である。このため、KEK 放射線科学センター、ミシガン大学および SLAC によって開発された電子・光子の物質中での輸送現象をモンテカルロ法によって計算するコンピュータープログラムコード EGS5 によって、水中に浸漬した検出器内への  $\beta$  および  $\gamma$  線の入射挙動について解析を行った。その結果、条件を整えば  $\beta$  線を含めたそのようなパルス時間間隔解析が行えることは明らかとなったが、実際の現象においてどの程度まで有効であるかは確認できていない (解析に対応できるほど十分な環境  $\gamma$  線レベルがあるかどうか)。しかし、NaI 検出器による  $\gamma$  線エネルギー分析と  $\gamma$ - $\gamma$  パルスあるいは  $\beta$ - $\gamma$  パルス時間間隔解析システム (耐圧性のある  $\beta$  線検出器の開発が必要) を併用した半自走式の計測機器を活用すれば、沿岸域での海中  $\gamma$  線強度の変動の計測、引いては、沿岸域での海底地質等において有益な情報を得ることが期待される。

なお、パルス時間間隔解析手法については同手法の開発者である橋本哲夫新潟大学理学部名誉教授のご指導を受けたことをここに記し、感謝の意を表わします。