



海洋科学掘削によるマントル到達への挑戦  
—地球最大のフロンティアに挑む—

# 掘削とニュートリノ： マントルを見る

渡辺 寛子

William F. McDonough

**Drilling and Neutrinos : view the mantle**

**Hiroko Watanabe • William F. McDonough**

わたなべ ひろこ : 東北大学ニュートリノ科学研究  
センター

William F. McDonough : University of Maryland  
/ 東北大学理学研究科地球科学専攻  
/ 東北大学ニュートリノ科学研究  
センター

地球内放射性物質起源の反ニュートリノである地球ニュートリノの観測は、地球内放射化熱量を直接測定できる唯一の方法である。これまでの観測で地球科学的知見が得られることが示され、大陸を離れて海洋底でマントルの寄与を直接観測する計画が進んでいる。マントル掘削と相まって地球深部の理解の新展開が期待できる。

## 1. はじめに

150年以上も前からケルビン卿をはじめとする科学者たちは「太陽や地球を動かしているものは何か？地球はいつ誕生し、寿命はどれくらいなのか？エネルギー源は何か？」という根源的な問いに挑んできた。現在では地球は46億年前に誕生し、太陽はコアでの核融合をエネルギー源としてわかっている。地球内の熱量は、マントル対流による大陸移動や地震活動の源となり、地磁気を形成して太陽からの放射線を防ぎ、海洋や大気を生み出すという様々な地球活動の源となり、生命活動にも関わりが深い。しかし、地球内の熱量について、その燃料はどれくらい残り寿命はいつ尽きるのかという根本的な問いに我々は未だに解を持たない。地球はハイブリッドカーのように「原始の熱」と「放射化熱」という2つの燃料を持つ。原始の熱は46億年前の地球の集積と核の形成時に放出された重力エネルギー、放射化熱は熱生成元素である地球内放射性物質(U・Th・K)の崩壊を起源とする。地表からの熱流量は多地点でのボーリング調査や温度勾配の観測から $47 \pm 2$  TW (Davies, 2010)もの熱量を放出していると予測されているが、原始の熱と放射化熱のそれぞれの占める割合はわからない。地球ニュートリノ観測は、地球の巨大な熱量を担う燃料のバランスに観測ゲージを与える唯一のツールとして多分野から期待を集めている(図1)。

## 2. 地球ニュートリノとその観測

物質を形作る最小単位である素粒子の一種のニュートリノは、電荷を持たず極端に軽い質量を持つことから何者でもすり抜ける高い透過性を持

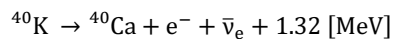
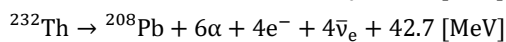
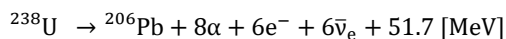
地球の熱量 = 「原始の熱」と「放射化熱」のハイブリッド

図 1に地球の熱源と燃料バランス.



つ、この宇宙には電子やクォークといった他の粒子は  $10\text{m}^3$  当たり約 1 億分の 1 個しか存在しないのに対し、ニュートリノは約 300 個も存在しており、この宇宙はニュートリノで満ちていると言える。地球では太陽からくるニュートリノが  $10\text{cm}^2$  当たり 1 秒間に 660 億個も突き抜けており、他にも宇宙背景放射といわれるビッグバン起源、宇宙線起源、地球内部起源、原子炉や加速器でも作られ、我々の体ですら体内のカリウムが 1 日に 3 億個ものニュートリノを放出している。

ニュートリノの性質故に検出は困難であるが、巨大な高感度検出器の実現により、素粒子としての性質の理解を進めた小柴 (2002 年) と梶田 (2015 年) にノーベル物理学賞をもたらしたことは記憶に新しい。地球内部に存在する放射性元素のベータ崩壊によって生成される反ニュートリノは「地球ニュートリノ」と呼ばれ、地球内部の化学組成や熱量に関する直積的でユニークな知見をもたらすものとして 1900 年代から観測が期待されていた。地球ニュートリノの殆どは  $^{238}\text{U}$  系列、 $^{232}\text{Th}$  系列及び  $^{40}\text{K}$  による。



ここから明らかのように、地球ニュートリノの発生量は放射性物質に焼き直すことができ、更にはその崩壊による発熱量と直接的な関係がある。素粒子ニュートリノの性質の理解が進み、ニュートリノを不可視の天体内部を観測する道具として用いることが現実のものとなっている。

電磁力の働かないニュートリノの観測は非常に困難で、我々の周囲に満ちているニュートリノもその大部分は何の痕跡も残さず透過する。必然的に大量の反応物質と極めて静かな環境が不可欠である。ニュートリノの観測は、荷電粒子が液体中で損失するエネルギーによりシンチレーション光という蛍光を発する「液体シンチレーター」と呼ばれる有機液体を用いる。同じ荷電粒子の通過により水の約 100 倍の明るさの光を発する事から水に比べて低エネルギーの粒子に感度があり、蒸留による放射性不純物の除去が容易で大量に用意できる利点がある。液体シンチレーターを構成する水素原子核 (陽子) がターゲットとなり、逆ベータ崩壊反応 ( $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ ) という高い信号識別能力をもつ反応を利用してニュートリノを検出する。ニュートリノが陽子と反応して陽電子と中性子を放出し、その陽電子の運動エネルギーと陽電子-電子の対消滅でできる  $511\text{keV}$  の 2 本の  $\gamma$  線を先発信号、中性子が液体シンチレーター中

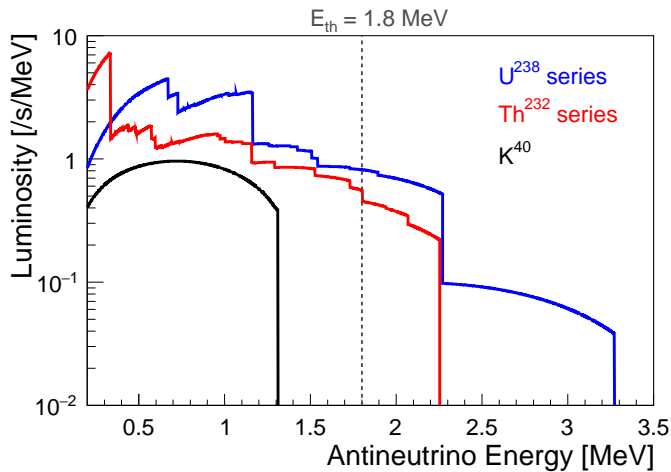


図2 地球ニュートリノのエネルギー分布.

を平均 210 $\mu$  秒散乱して陽子に捕獲されて放出する 2.20 MeV の  $\gamma$  線を後発信号とし、特徴的な時間的・空間的に相関のある 2 つの信号を遅延同時計測することで反電子型ニュートリノを選択的に検出できる。この反応はニュートリノが 1.8 MeV 以上のエネルギーを持つ時に起こることから、図 2 に示すように  $^{238}\text{U}$  系列の地球ニュートリノ (最大エネルギー = 3.3 MeV)、 $^{232}\text{Th}$  系列の地球ニュートリノ (最大エネルギー 2.3 MeV) の一部を観測できる。 $^{40}\text{K}$  (最大エネルギー = 1.3 MeV) のニュートリノは逆ベータ崩壊反応の閾値以下に分布するため、電子散乱といった他の観測技術を用いなければ観測できず、その地球科学的な重要性から活発に技術開発が行われている。

### 3. ニュートリノ地球科学

地球ニュートリノ観測によって地球内部を理解する新研究分野は「ニュートリノ地球科学」と呼ばれ、素粒子物理学・地球科学の分野横断的研究分野として発展してきた。素粒子物理学は実験により地球ニュートリノ事象数を観測し、地球科学がその観測結果に地球科学的意味を与える。

KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector) は、2002 年から稼働している大容量超純液体シンチレーターを用いて低エネルギーのニュートリノ観測を目的とした実験であ

る。岐阜県神岡鉱山内の地下 1000m に設置され、岩盤によって地上に降り注ぐ宇宙線ミューオンを 10 万分の 1 に遮蔽している。世界最大量である 1000 トンの液体シンチレーターを直径 12m のナイロン製バルーンに内包し、それを取り囲むように設置された 1879 本の光電子増倍管でシンチレーション光を観測する。2005 年に地球ニュートリノの世界初観測 (Araki et al., 2005) を成し遂げて以降、現在でも世界最高精度で観測を続けている。KamLAND での地球ニュートリノフラックスは  $4.1 \times 10^6 / \text{cm}^2 / \text{s}$  と大量に到達しているが、このような巨大な検出器を持ってしても観測している地球ニュートリノ事象は 1 ヶ月に 1 事象程度と極少数統計観測であるため、バックグラウンド事象の正確な理解とその低減が重要課題である。原子炉由来の反ニュートリノ (観測時間 4397 日の 2019 年の予備結果 (Watanabe, 2019) : 629 事象)、検出器内  $^{210}\text{Po}$  を起源とする ( $\alpha, \text{E}$ ) 反応 (212 事象)、検出器内放射性不純物起源の偶発事象 (122 事象)、宇宙線ミューオンによる核破砕反応 (4.4 事象)、高速中性子 (< 4.1 事象) といった事象がバックグラウンドとなる。最も深刻なバックグラウンドは、地球ニュートリノのエネルギー領域を完全にカバーし約 8.5 MeV までの分布を持つ原子炉ニュートリノであり、同じニュートリノであるため地球ニュートリノ信号との分離は不可能であ

る。KamLAND では 2011 年の東日本大震災以降に日本の原子炉が停止したことにより、最大時の 5% まで原子炉ニュートリノフラックスが減少し（韓国の原子炉からの寄与）、観測精度の向上や詳細なエネルギースペクトル測定が可能になった。

KamLAND での地球ニュートリノ観測は地球内のどこから飛来するものを観測しているのだろうか。発生源である  $^{238}\text{U}$  と  $^{232}\text{Th}$  が地球のどこにどれだけ存在し、検出器からどれだけ離れているのかということに依存する。(Enomoto et al., 2007) (Enomoto, 2007) で見積もられた各寄与の内訳について紹介する。地殻は地球の 2% の体積であるが  $^{238}\text{U}$  と  $^{232}\text{Th}$  の存在量が多く検出器にも近いので、KamLAND で観測している地球ニュートリノフラックスの 3/4 を占めるマントルは地球の 82% を占め  $^{238}\text{U}$  と  $^{232}\text{Th}$  全体量の 60% が存在するが、観測している地球ニュートリノフラックスに占める割合は 1/4 程である。また、半径 50 km の範囲がフラックスの 1/4 を占め、本州が収まる半径 500 km に広げると半分になる。このことは、地球全体やマントルといった地球深部について地球ニュートリノを用いて調べるには、検出器周辺の地質、特に寄与の大きい地殻を正確に理解することが重要であることを示している。地震波観測や地球化学的分析手法といった地球科学的知見を統合してどこにどれだけ  $^{238}\text{U}$  や  $^{232}\text{Th}$  が存在するかというモデルを構築し、観測地点での地球ニュートリノフラックス計算モデルを構築することは地球ニュートリノ観測結果を理解する上で不可欠であり、国内外で研究が行われている。

#### 4. 地球ニュートリノ観測実験結果の現状と課題

地球ニュートリノ観測は地球内の  $^{238}\text{U}$  と  $^{232}\text{Th}$  の存在量に制限を与えることができる。その知見を用いることで、(1)地球内の難揮発性元素の絶対量に制限を与え、そこから BSE (bulk silicate Earth, 地殻 + マントル) の化学組成を決定し、(2) 主要な地球活動（マントル対流、プレートテクトニクス、火山活動、地磁気生成と維持など）の駆動源

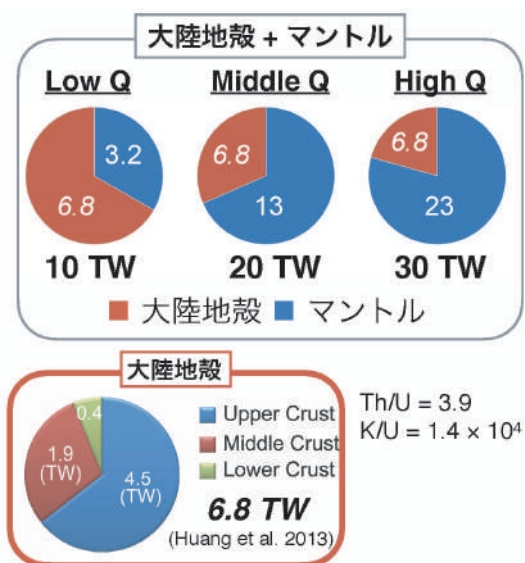


図3 地球内放射化熱モデル。

である地球内放射化熱量を直接測定することができるという特徴がある。この地球ニュートリノによる新たな観測量は、地球科学分野で構築された地球の化学組成や熱進化史の複数存在するモデルに対して制限を与えることができる。図3に示すように、地球内放射化熱量についての現在の理解では BSE（地殻とマントルの合計量）については 10 ~ 30 TW、マントルのみについては 3.2 ~ 238 TW と大きな開きがある。(Šrámek et al, 2013) と (Šrámek et al, 2016) で Low-Q (10–150 TW) (Javoy et al., 2010), Middle-Q (17–22 TW) (McDonough and Sun, 1995), High-Q (> 25 TW) (Turcotte and Schubert, 2002) と分類されている。

これまでに日本の KamLAND 実験とイタリアの Borexino 実験のみで観測実績があり、その観測精度は地球科学的知見を得られるレベルに到達している。両実験とも 2019 年に最新結果を発表しており ((Watanabe, 2019) (Agostini, 2020)), ここではそれらの結果を紹介する。KamLAND での観測は約 12 年間の全観測時間のうち 2011 年以降の低原子炉運転期間のデータが約 40% を占め、地球

ニュートリノ事象を  $168.8^{+26.3}_{-26.5}$  事象観測し観測精度が 15.6% にまで到達しており、地球ニュートリノフラックスモデルの 20% の不定性を下回る結果である。また、エネルギースペクトルの形状を精度よく測定できたため、 $^{238}\text{U}$  と  $^{232}\text{Th}$  の寄与の独立観測に成功している。これは、放射化熱を発生する元素の現在の地球へのそれぞれの寄与を観測することで、地球のこれまでの放射化熱史にも知見を与えることができることを示している。Borexino 実験は 2007 年から 2021 年まで観測を行っていた約 300t の液体シンチレータ検出器を用いた実験で、地球ニュートリノ観測のほか、その極低放射性物質環境を生かした太陽ニュートリノの観測にいくつもの大きな成果を挙げた。原子炉からの距離も遠いため、全観測期間を通して原子炉ニュートリノが地球ニュートリノに比べて 30% 程度のフラックスの環境で観測していた。約 9 年間の観測時間のデータを用い地球ニュートリノ事象を  $56.2^{+9.4}_{-8.6}(\text{syst.})^{+2.7}_{-2.1}(\text{stat.})$  観測し、観測精度は約 18.6% である。統計テストによりマントル地球ニュートリノが無いことを 99.0% の信頼度で排除したと主張している。両実験の地球内放射化熱量についての結果は、 $^{238}\text{U}$  と  $^{232}\text{Th}$  の観測結果に 19% の  $^{40}\text{K}$  の寄与を加えると、KamLAND は  $15.3 \pm 4.9 \text{ TW}$ 、Borexino は  $38.2^{+13.6}_{-12.7} \text{ TW}$  となり異なるモデルを好んでいる。地球ニュートリノ観測値を放射化熱量に変換する際には、地球ニュートリノフラックス計算モデルを使用する必要があり変換結果への影響が大きい。また、観測値は地殻とマントルの合計量であるため、マントルの寄与について議論する際はモデルで見積もった地殻分の寄与を観測値から差し引いて求める。現在の放射化熱量の見積もりに約 10 倍もの開きがあるマントルについて知見を得るためには、地球科学的知見を用いて地殻の三次元モデルを構築し、高信頼度・高精度の地球ニュートリノフラックスを見積もることが地球科学分野に求められている課題である。一方で、現在も観測中の KamLAND に加え、SNO+ (カナダ, 1kt) もほぼ建設が終了し、中国では JUNO (20kt) が建設中、Jinping (1kt)



図4 1.5kt OBD検出器の概要図。

が計画中である。観測値=地殻+マントル ( $y = x + b$ ) という関係を使い、地殻の寄与 ( $x$ ) を各地点で正確に求めることができれば、マントルは一樣という仮定のもとに複数実験の統合解析によるマントルの寄与の見積もりが可能である。

### 5. 海洋底ニュートリノ観測計画「Ocean Bottom Detector」

地球ニュートリノ観測により地球科学的知見を得られるものの、大陸上の検出器では地殻とマントルという2つのパラメータが存在するため、特に検出器近傍の地殻の寄与に決定的に依存する。そこで、大陸の発生源から遠く離れ、大陸地殻より薄く (~6.5 km) 単純で、少ない  $^{238}\text{U} \cdot ^{232}\text{Th}$  量 (1/20) の地殻である海洋で観測を行うことが発案された (Raghavan et al., 1998)。その後ハワイ大学と Makai Ocean Engineering の共同研究により「Hanohano」プロジェクトとして検出器の設計や技術開発が行われた (Learned et al., 2007)。(Šrámek et al., 2013) によるとハワイ沖ではマントルの寄与が全ニュートリノフラックスの 70% を占め、太平洋を南北に縦断して複数点で観測することでマントルの構造やマントル深部の化学組成の不均一性の特定が可能であることを示した。このように、海洋で観測を行うことで (1) マントルの寄与の直接測定により放射化熱量を決定し、(2) 移動式であるためマントル深部のより詳細な理解が可能、という大陸上の検出器では不可能な特徴



	信号			バックグラウンド					
	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	合計	原子炉 $\bar{\nu}_e$	アクシデント	( $\alpha, n$ )	核破砕反応	高速中性子	合計
全領域 (<8.5MeV)	6.59	1.64	8.23	4.13	1.92	3.88	0	<2.42	9.93
地球 $\bar{\nu}_e$ 領域 (<2.6MeV)				1.53	1.90	2.96		<0.58	6.39

表1 ハワイ沖4kmの深海に設置した1.5kt OBDの有効体積内の1年間の予測イベント数. 地球ニュートリノ数はMiddle-Qを仮定した. 地球ニュートリノ8.23事象のうち, Eマントル起源は6.17事象, 地殻起源は2.06事象になる.

があり, ニュートリノ地球科学のブレークスルーとなる.

2007年の検出器開発以降具体的な進展はなかったが, 2019年にニュートリノ実験を主導する東北大学と海洋実験・海洋工学の拠点である海洋研究開発機構の共同研究が開始され, 「OBDプロジェクト」として研究が開始された (Sakai, 2021; Watanabe et al., 2020). 低温・高圧の海底環境は既存のニュートリノ検出器の実験環境とは全くことなるが, 両組織の積み上げられた知見や既存の装置を用いることで低コストでタイムリーな検出器開発を行っている. 2022年には液体シンチレーター30Tg程度を有する小型検出器を長期間深さ1km程度の海底に設置する予定であり, 世界初の海底での液体シンチレータを用いた観測を行う. 深海での検出器の設置・稼働・回収の技術開発や, 宇宙線ミュオンによる海底でのフラックス測定を行い大型化する際の検出器デザインのインプットパラメータとする. 現実的な観測期間でマントル地球ニュートリノが観測可能な1.5ktサイズを次計画とし, その後10-50ktといった更に大きな検出器で成熟したサイエンスへとつなげていく.

図4に検出器シミュレーションによってデザインされた1.5ktサイズのOBD検出器の概要図を示す. 最内層は直径12m, 高さ14mのアクリルタンクに入った1.5ktの液体シンチレーターで, 高さ3mのバッファー層を介してステンレスタンク (直径18m, 高さ20m) の内側に取り付けられた耐水圧シールド付きの光電子増倍管 (3232本) でシンチレーション光を観測する (内部検出器). この周りの海水中に光電子増倍管を数珠状に配して

宇宙線ミュオンによる海水中のチェレンコフ光を観測し, バックグラウンド源である宇宙線ミュオンを識別して除去する (外部検出器). 以下に各検出器構成物の現時点でのデザインについて説明する.

- 液体シンチレーター

リニアアルキルベンゼンという高透過率で引火点の高い (約150°C) 有機溶剤にPPO (2,5-Diphenyloxazole) という発光物質を3.0g/L程度溶かし込んだものの使用を想定している. 密度は約0.8g/cm<sup>3</sup>と海水よりも軽いので, 検出器を海底に沈めるには荷重して重量バランスをとることが必要になる. 海底の高圧で収縮し3%程度体積が減少するので, 減少分を補償する液体シンチレーターをフレキシブルなバッグに入れて液体シンチレーター層に接続しておく必要がある.

- バッファー層

発光せず液体シンチレーターと同密度な有機溶剤で満たし, 光電子増倍管とその耐圧シールドに含まれる放射性物質の崩壊によるバックグラウンドの液体シンチレーター層への到達を防ぐ.

- 外部検出器

大陸上の実験は岩盤中に掘った穴に検出器を設置しているため外部検出器は限られた厚さになり, 宇宙線ミュオンの検出効率が低下する原因となるが, 海水を使う場合はその限りではない. 通常純水が使われ透過度の維持のために常に循環しフィルターなどで不純物を除去し続ける必要があるため, OBD検出器では内部検出器と一体型にするのは現実的とは言えない. 海中

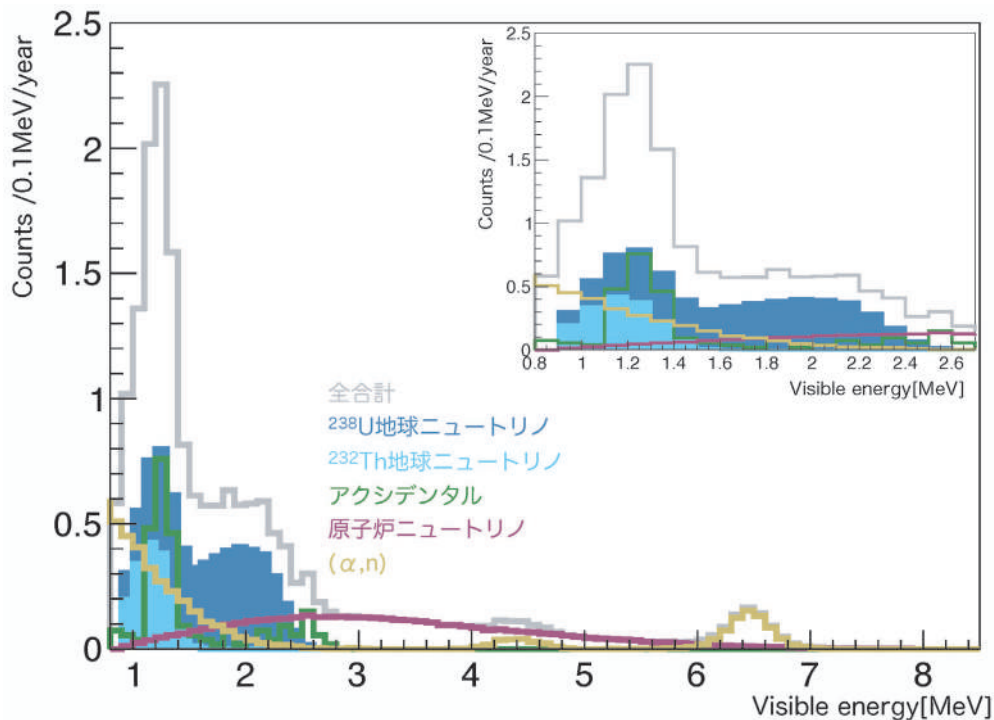


図5 1.5 kt OBD検出器の予想エネルギースペクトル. 右上のパネルは地球ニュートリノのエネルギー領域 (2.6MeV以下) のみを拡大したもの.

に光電子増倍管を設置して超高エネルギーのニュートリノ事象の観測を目的とした実験はすでに建設が始まっているものもあり (KM3NeT (Aiello et al., 2020)), OBD 実験への応用は容易である.

この他、海洋底という地上と隔絶された環境下での検出器への電源供給、データ取得システム、通信方法といった OBD 特有の技術については海洋実験のノウハウを生かしてデザインと開発を進めていく.

表1に検出器シミュレーションで求めたハワイ沖の46kmの深海に設置した1.5ktのOBD検出器の予測イベント数を示す. 内部検出器のアクリルタンク内の放射性不純物によりアクリルタンクに近い領域のアクシデンタルバックグラウンドが極端に多いため、アクリルタンク表面から70cmカットした領域を観測の有効体積としている. 全液体

シンチレーター領域の70%になる. 地球ニュートリノ数は Middle-Q モデルを仮定している. バックグラウンドについて特徴的なのは、宇宙線ミュオン起源の核破砕反応のバックグラウンドを0事象にできていることである. 宇宙線ミュオンのシールド能力は通過する物質質量に比例し、46kmの海水により KamLAND の場合の4.3%程度のレートになり、無視できる. 検出器内の放射性不純物量を更に減らすことによりアクシデンタルバックグラウンドと  $(\alpha, n)$  バックグラウンドは更に低減できる可能性がある. 地球ニュートリノ信号は一年間に8.23事象予想され、そのうち75%にあたる6.17事象がマントル由来、残り2.06事象が地殻由来となる. 図5に予測エネルギースペクトルを示す. 地球ニュートリノが存在する2.6 MeV 以下では地球ニュートリノがバックグラウンドの1.29倍となり、大陸上の検出器に比べ地殻

表2) マントル地球ニュートリノ観測感度.

地球熱量モデル	マントル地球 $\bar{\nu}_e$ 観測信頼度	観測期間
Low-Q (10TW)	99.37% ( $2.5\sigma$ )	10年
Middle-Q (20TW)	99.98% ( $3.5\sigma$ )	3年
High-Q (30TW)	99.99% ( $3.7\sigma$ )	1年

表3) 3年観測時の地球熱量モデルの排除確率.

地球熱量モデル	モデル排除確率		
	Low-Q	Middle-Q	High-Q
Low-Q (10TW)	-	92.0%	99.9%
Middle-Q (20TW)	92.0%	-	97.3%
High-Q (30TW)	99.9%	97.3%	-

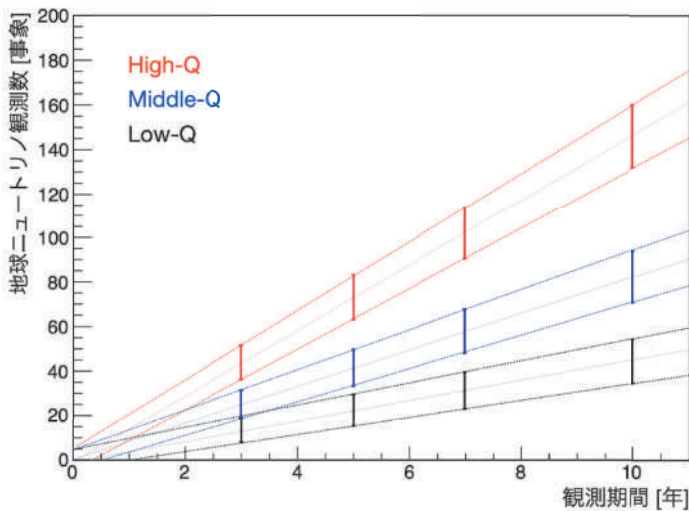


図6) 1.5kt OBD検出器での各地球熱量モデルの予測地球ニュートリノ観測数.

の寄与が少なく地球ニュートリノの絶対量が35%程度であるにも関わらず、地球ニュートリノを優位に観測できる実験環境であることが分かる。高エネルギーもほぼバックグラウンドフリーの環境であり、地球ニュートリノのみならず宇宙起源ニュートリノ、超新星爆発起源ニュートリノといった素粒子物理の観測対象にも有効な実験装置である。

1.5kt OBD 検出器の観測結果の地球科学的知見に関する観測感度を議論する。ハワイ沖での各地球熱量モデルによる予測地球ニュートリノ事象はそれぞれ、Low-Q :  $6.5^{+1.5}_{-1.3}$  TNU, Middle-Q :  $12.1^{+2.1}_{-2.6}$  TNU, High-Q  $21.4 \pm 2.3$  TNU となる (Šrámek et al, 2016)。TNUは Terrestrial Neutrino Unitで、約1ktの検出器で1年間に予想される観測事象数である。各地球熱量モデルを仮定しエネルギースペクトルを用いて統計検定を行い、観測

感度を見積もった。

- マントル地球ニュートリノ観測感度

表2に各地球熱量モデルを仮定した場合のマントル地球ニュートリノの観測信頼度とかかる観測期間を示す。一般に $3\sigma$  (99.73%)を超える信頼度で観測すると「evidence」となり、その観測対象の存在の証拠と捉えられる。例えば現在KamLANDの観測結果で好まれているMiddle-Qモデルが真であった場合、3年間の観測でマントル地球ニュートリノの存在の証拠を示すことができる。

- 地球熱量モデル観測感度

表3に示すように、例えばMiddle-Qが真だった場合、3年間の観測でLow-Qを92.0%、High-Qを97.3%の確率で排除できる。1.5ktといった既存の掘削船でも海底への設置を検討できるような大きさの検出器でも、地球熱量モデルを決



定できる可能性は十分にある。図6に地球ニュートリノ観測数の各地球熱量モデルによる予測の観測期間による変化を示す。観測年数が長くなればなるほど、3つのバンドの乖離度が上がっていく、つまり、地球熱量モデルの決定精度が上昇するが、バンドの幅は地球熱量モデルの不定性によって制限されている。モデルの判別精度は、各地球熱量モデルの不定性を低減することによっても改善することができ、地球科学分野の課題である。

## 6. マントル掘削による新展開への期待

これまで地球ニュートリノ観測は地球科学・素粒子物理学の分野横断研究として発展し実績を挙げてきた。地球内放射化熱量という極めて重要な量の測定には、不定性の大きいマントルの寄与の直接測定が有効であり、大陸地殻の多大な影響を避けられる海洋底地球ニュートリノ観測計画が進められている。地球深部の解明という科学的興味の共有のみならず、技術や装置の共発展も望めるマントル掘削と地球ニュートリノ観測は大きな相乗効果を期待できる。

現存する大陸上の地球ニュートリノ観測の発展は、高信頼度・高精度の地殻の寄与の見積もりという課題を抱えている。例えば KamLAND の場合、地球ニュートリノ観測精度は 15.6% に達しているものの、近傍地殻の不定性は  $^{238}\text{U}$  で 17%、 $^{232}\text{Th}$  で 10%、グローバルな地殻の見積もりには 10–30% の不定性がある。海洋地殻は大陸地殻に比べてより単純だが、それでもハワイ沖で  $3.05 \pm 0.37$  TNU (Šrámek et al, 2016) と見積もられており、12% の不定性が存在する。OBD で 3 年間の測定で予想されている地球ニュートリノ事象の観測精度は Middle-Q の場合を例にとると 30% 程度であり、観測値から地殻の寄与を引いてマントルの寄与を求める精度に海洋地殻の不定性が影響を及ぼす。マントル掘削の際に得られるであろう、検出器の設置場所近傍の海洋地殻のより高信頼度・高精度の理解は地球内放射化熱量決定に必要である。また、海洋での観測でマントルの寄与を決定

できると、今度は大陸上の検出器での観測値からマントルの寄与を差し引き、「地殻を測る」ことができる。地殻の化学組成の理解に新たな観測量を与え、地球科学分野への波及効果も大きい。

海底下生命圏の理解はマントル掘削の重要な目的の一つである。(Sauvage et al., 2021) によると、海底体積物内の微生物は自然に発生する放射線による水の放射性分解によってエネルギーになる水素を得ている可能性を指摘している。放射線は放射性物質の崩壊や宇宙線ミューオン起源のものなど、身の回りにありふれている。宇宙線ミューオンは OBD 検出器の設置予定の深さである深海 4 km にも到達し、そのフラックスは通過する物質量に関係するため予測値があるが、実測値はあまり存在しないのが現状である。また、ある深さからは宇宙線ミューオンそのものよりも大気ニュートリノの反応によって生成されるミューオンが支配的になり、深海中でのミューオンレートは科学的に興味のある測定対象である。OBD 検出器では、液体シンチレータの内部検出器と海水を用いた外部検出器の両方で測定することで、深海中のミューオンや放射線量についての理解が進み、ひいては海底下生命圏の理解にあらたな観測量を与える可能性がある。

素粒子物理学とマントル掘削の地球ニュートリノ観測以外のつながりも期待できる。暗黒物質は、現在の宇宙の平均エネルギー密度の約 1/4 を占めるがその正体については複数のアイデアが存在し、理論的・実験的研究が世界中で盛んに行われている。実験的研究は暗黒物質と原子核の相互作用を探索する直接検出の実験が主要であり、大型化によって更なる感度向上を競っている。一方で、「Paleo-detector」という、古代の鉱物に残る暗黒物質の散乱の痕跡を探索する実験のアイデアがある (Baum et al., 2020)。マントル掘削で得られる鉱物の分析による暗黒物質の探索ができるというアイデアが提案されている。加えて、OBD 検出器の海底環境は岩盤に囲まれた大陸上の検出器よりも暗黒物質観測にとって最も深刻なバックグラウンド源である中性子が少ないという

利点があり、既存の実験環境では実現できない特徴がある。地球ニュートリノ観測というニュートリノを地球理解の道具として用いる一方で、海底実験・マントル掘削は素粒子物理の大問題にも複数の方法で挑むことができる。

## 7. まとめと今後の展望

ニュートリノ観測は2つのノーベル賞をもたらした世界を牽引する研究分野であり、ニュートリノの性質の歴史的発見によって理解が大きく前進した。その成果を礎に発展した新分野「ニュートリノ地球科学」は、2005年にKamLANDが世界初観測を発表してから現在も世界最高精度で観測を続けている日本発の研究分野である。これまでの観測成果により、地球内放射化熱量モデルに制限を与え地球科学的知見を得られるレベルに達しているものの地殻成分の不定性が大きいという課題があり、地球科学分野の研究や複数の検出器による観測結果の統合解析といった研究が進んでいる。大陸上の現存する検出器の不可能を克服するアイデアである「海洋底ニュートリノ観測計画(OBD)」は、マントルを知るという共通の科学的興味のもと、素粒子物理・地球科学・海洋工学、更にはマントル掘削や海底下生命圏の理解といった新たなつながりによってこれまでに積み上げられた知見や技術を結びつけ、未知の変革をもたらす知見を見出す新たな研究分野の創出が期待できる。本稿では、マントル地球ニュートリノの直接観測が可能な1.5 kt OBD 検出器の観測感度について詳述した。地球内放射化熱量が20TWと予測するMiddle-Qを仮定した場合、3年観測でマントル地球ニュートリノの証拠を示し、10TW・30TWのLow-Q・High-Qモデルを高い信頼度で排除できることがわかった。海洋地殻のより高精度の理解により、観測結果の改善が期待できる。異分野間の連携関係をより強固にし、地球深部理解のブレークスルーとなるOBD検出器実現に向け、実績を挙げていくことが重要である。

## 参考文献

- [1] Watanabe, H. (2019). Neutrino Geoscience 2019.
- [2] Davies, J. H. and Davies, D. R. (2010). Earth's surface heat flux. *Solid Earth*, 1, 5.
- [3] Araki, T. et al. (KamLAND Collaboration) (2005). Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND. *Nature*, 436, 499-503.
- [4] Agostini, M. et al. (Borexino Collaboration) (2020). Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino. *Phys. Rev. D*, 101, 012009.
- [5] Šrámek, O., McDonough, W. F., Kite, E. S., Lekić, V., Dye, S. T., Zhong, S. (2013). Geophysical and geochemical constraints on geoneutrino fluxes from Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 361, 358-366.
- [6] Šrámek, O., Roskovec, B., Wipperfurth, S. A., Xi, Y., McDonough, W. F. (2016). Revealing the Earth's mantle from the tallest mountains using the Jinping Neutrino Experiment. *Scientific Reports*, 6 (1), 33034.
- [7] Turcotte, D. L. and Schubert, G. (2002). *Geodynamics, Applications of Continuum Physics to Geological Problems*, second ed. Cambridge University Press.
- [8] McDonough, W. F. and Sun, S. (1995). The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, 120, 223-253.
- [9] Javoy, M., et al. (2010) The chemical composition of the earth: Enstatite chondrite models. 293(3-4), 259-268.
- [10] Enomoto, S., Ohtani, E., Inoue, K., Suzuki, A. (2007). Neutrino geophysics with KamLAND and future prospects. *Earth and Planetary Science Letters*, 325(1-2), 147-159.
- [11] Learned, J. G., Dye, S. T., Pakvasa, S. (2007). Hanohano: A deep ocean anti-neutrino detector for unique neutrino physics and geophysics studies. arXiv:0810.4975.
- [12] Raghavan, R. S., Schoenert, S., Enomoto, S., Shirai, J., Suekane, F., Suzuki, A. (1998). Measuring the Global Radioactivity in the Earth by Multidetector Antineutrino Spectroscopy. *Phys. Rev. Lett.*, 80 (3), 635.
- [13] Sakai, T. (2021). Study of Ocean Bottom Detector (OBD) for observation of geo-neutrinos from the mantle. In XIX International Workshop on Neutrino Telescopes Proceedings, 10.5281/zenodo.5046560.
- [14] Watanabe, H., Inoue, K., Sakai, T., McDonough, W. F., Abe, N., Araki, E., Kasaya, T., Kyo, M., Sakurai, N., Ueki, K., Yoshida, H. (2020). Snowmass2021-Letter of Interest Ocean Bottom Detector.
- [15] Aiello, S. et al. (2020). Deep-sea deployment of the KM3NeT neutrino telescope detection units by self-unrolling. *Journal of Instrumentation*, 15, P11027.
- [16] Sauvage, J. F. et al. (2021). The contribution of water radiolysis to marine sedimentary life. *Nat Commun*, 12, 1297.
- [17] Baum, S. et al. (2020). Searching for dark matter with paleo-detectors. *Phys. Lett. B*, 803, 135325.

