

KamLAND 実験と地球ニュートリノ

その物理と観測の現状

東北大学大学院理学研究科附属 ニュートリノ科学研究センター
榎本 三四郎

sanshiro@awa.tohoku.ac.jp

2005年8月31日

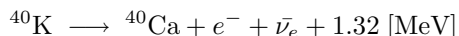
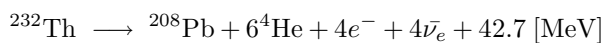
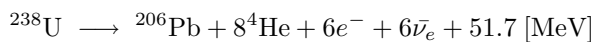
1 はじめに

今年7月, KamLAND 実験グループは, 地球内部起源ニュートリノ (地球ニュートリノ) の初の実験的研究となる, 1000 ton 液体シンチレータによる地球ニュートリノ観測の結果を発表した [1]. 地球ニュートリノは, 地球内部の組成や地球全体の熱収支に関する直接的でユニークな知見をもたらすものとして 1960 年代から観測が期待されていたが, その極めて小さな反応断面積とエネルギーの低さにより, 実際に観測されたことのなかったものである. KamLAND 実験では, 1000 ton という大容量の液体シンチレータと, 徹底的に不純物を取り除くことにより実現した超低バックグラウンド環境により, この地球ニュートリノの観測を可能にした. 現段階ではまだ統計的に十分とは言えないものの, この研究は地球内部起源という新しいニュートリノの探索を初めて行っただけでなく, ニュートリノによる地球科学という新しい研究手法が現実のものとなったことを示すものでもある.

ここでは, ニュートリノ観測により実現する新しい地球物理学を, 既存の地球科学との関連も含めてやや詳しく解説し, KamLAND における地球ニュートリノ観測の現状と将来について, 最近発表したデータ [1] を中心に紹介する.

2 ニュートリノと地球科学

地球ニュートリノは, 地球内部に存在する放射性元素のベータ崩壊により生成されるもので, そのほとんどは ^{238}U 系列, ^{232}Th 系列および ^{40}K による.



ここから明らかなように, 地球ニュートリノの発生量は, これらの放射性物質の量およびその崩壊による発熱量との間に直接的な関係がある. ニュートリノはその極めて小さい反応断面積により, 生成されてからほとんどまったく相互作用をせずに検出器まで到達するので, 地球内部, 特に地球深部における化学組成と, 放射性熱源の量に関する直接の情報をもたらすと期待される.

現在の地球科学では, 地球内部に存在するウラン, トリウムやカリウムの総量は, おもに隕石組成の解析により推定されている. いろいろな種類の隕石の中で, 特に炭素質コンドライト隕石と呼ばれるものが, その中に水や硫黄などの低温凝集物を多く含んでいることと, 揮発性成分をのぞいた元素存在度が太陽大気のそれと類似していることにより, 地球を生成した始原物質に近いと考えられている. この始原物質推定から, 地球生成時の揮発性物質の減少を考慮して, 地球全体の平均組成が推定される. 現在の固体地球は, 中心部分のコアと呼ばれる鉄質の部分 (metallic Earth) とその外側のマントルや地殻などの石質の部分 (silicate Earth) に分離しており (図 1), 親石元素であるウランやトリウムなどはほとんどすべて石質の部分に含まれていると考えられている. コアの分化を考慮した後の石質部分の平均組成は BSE (bulk silicate Earth) モデルとして参照されており, これは現在の地球化学のパラダイムのひとつとなっている.

BSE モデルに基づけば, 放射性元素からの発熱量は, ウランおよびトリウムがそれぞれ 8 TW ずつ, カリウムが 3 TW で, 合計 19 TW 程度となる. 一方で, 地表における地殻熱流量の測定値は 44 TW (最近の再解析で 31 TW) となっており, このことは地球全体の熱収支においてこれらの放射性熱源が大きな寄与をしていることを示している. 放射性熱源は, 元素の崩壊により量が急速に減少するので, 逆に言えば過去の地球においてはより大きな熱源であったことになる. 他の熱源としては, 地球

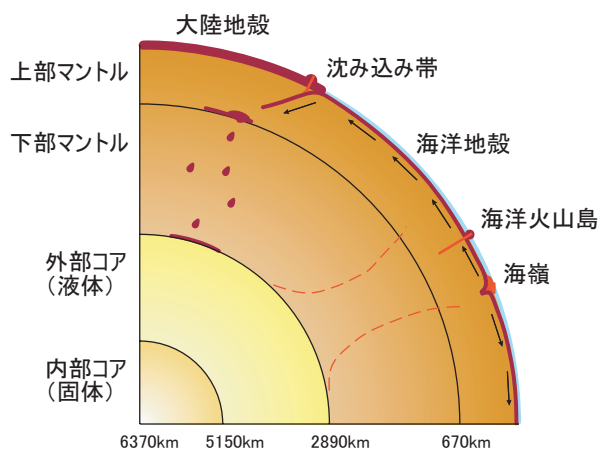


図 1: 地球内部構造．地球内部は，中心部分にある主に鉄とニッケルの合金から構成されるコアと，その周りにある岩石質のマントルおよび地殻から構成される．コアは 2 層に分離しており，外部は液体，内部は固体になっている．地殻は地表付近の非常に薄い層で，性質の大きく異なる大陸地殻と海洋地殻からなる．海洋地殻は海嶺で生成され，プレートテクトニクスにより移動して，海溝でマントルへと沈み込む．海洋地殻の沈み込みは岩石の部分溶解を引き起こし，このマグマが上昇・累積することにより大陸地殻が成長する．

の冷却熱（地球生成時の重力エネルギーが熱に変換され，地球内部に残ったもの）やコアの凝固熱（液体の外部コアが固体の内部コアに凝固し放出される熱）などが考えられ，それぞれに異なった熱源分布や時間発展を持っている．したがってこれらの熱収支を理解することは，熱源の量と分布，その時間変化を理解することであり，これはプレートテクトニクスや地球磁場をはじめとするすべての地球ダイナミクスを理解，さらには，地球の生成後の発展を理解するための基礎となるものである．

BSE モデルは現在の地球化学の基本的パラダイムであり，また，そこから見積もられる放射性元素の存在量は全地球ダイナミクスや地球発達史の基礎であるが，実際のところ，BSE 自体の理解はそれほど進んでいない．地震波などから得られる詳細な地球深部の物理的特徴の情報に比べ，地球深部の化学組成に関する情報は少ない．地球半径 6400 km，あるいはマントル・コア境界の深度 5000 km と比較して，人類が到達した最大深度はわずか 4km，「大」深度ボーリング実験でもその到達深度はせいぜい数 10 km である．捕獲岩と呼ばれる，深部で生成され上昇流に捕獲されて地表に噴出した岩や，深部に起源を持つ

マグマは，対応する生成深度の化学組成に関する直接の情報を与えるが，その生成深度はせいぜい数 100 km である．また，深部の岩石が地表に噴出するという特殊な環境にある岩石が，その深度の組成を代表できるかという点も疑わしい．結局のところ，下部マントルなどの深部の化学組成を知るためには，隕石解析と地球モデルに基づく推定，高圧実験と地震波速度を再現できる（一意でない）結晶構造の推定，などの間接的方法に頼らざるをえない状況にある（他にも，地殻熱流量，重力異常，電気伝導度，地磁気などの測定量も地球深部に関する重要な情報を与えるが，いずれも物理量の測定であり，化学組成の推定には自明でないモデリングを伴う）．

ニュートリノによる地球科学のユニークな点は，それが地球深部の化学組成を直接与えることにある．また，放射性熱源の量に直接関係するため，地球全体の熱収支を理解するための重要なパラメータを与える．モデルの上に構築されたパラダイムを独立な方法で検証することの意義はいうまでもない．

3 KamLAND におけるニュートリノ地球物理

KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector) は，大容量高純度液体シンチレータを用いて，低エネルギーニュートリノの検出を行う実験である．神岡鉱山内地下 1000 m の地点に設置され，1000 ton の液体シンチレータとそれを取り囲む 1879 本の光電子増倍管から構成される．KamLAND 検出器についてはすでに本誌 [2] で詳細に取り上げられているので，ここでの説明は省略する．

KamLAND は，原子力発電所からのニュートリノを検出してニュートリノ振動現象を精密に測定することを第一の目的に設置されたが，同時に，地球ニュートリノに感度のある最初の検出器でもある．シンチレータを構成する陽子がニュートリノのターゲットとなり，逆ベータ崩壊反応 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ によりニュートリノを検出する．この反応の閾エネルギーは 1.8 MeV であり， ^{238}U 系列の地球ニュートリノ ($E_{\text{max}} = 3.3\text{MeV}$) と ^{232}Th 系列の地球ニュートリノ ($E_{\text{max}} = 2.3\text{MeV}$) の一部を観測する． ^{40}K ($E_{\text{max}} = 1.3\text{MeV}$) のニュートリノは閾値以下で検出できない．この逆ベータ崩壊反応は電子型反ニュートリノだけを選択的に検出するので，フラックスの大きい太陽ニュートリノに邪魔されず，地球ニュートリノと原子炉起源ニュートリノだけを観測することができる．

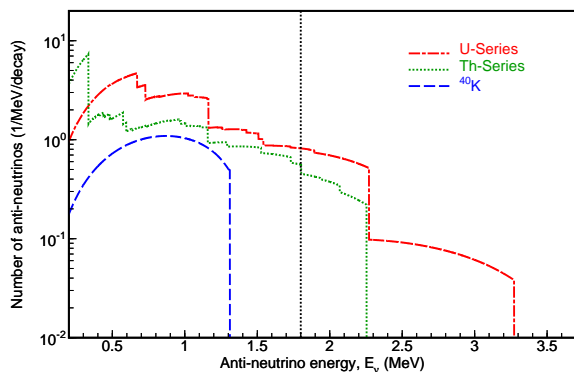


図 2: 地球ニュートリノのエネルギースペクトル

図 2 に ^{238}U , ^{232}Th および ^{40}K のニュートリノスペクトルを示す。基本的には普通のベータ崩壊のエネルギースペクトルで計算できるが、原子核電場の効果(フェルミ関数)により、ベータ崩壊の最大エネルギーの部分(電子の運動エネルギー 0 に対応)に特徴的なエッジが現れる。ウラン系列およびトリウム系列のスペクトルは、崩壊鎖に含まれる多くのベータ崩壊の足し合わせにより、多くのエッジを持つスペクトルとなる。

KamLAND における地球ニュートリノのフラックスは、ウランやトリウムの総量だけでなく、その分布にも依存する。同じ量のウラン・トリウムでも、検出器から離れた位置にあれば、当然フラックスは小さい。したがって、KamLAND でのフラックスを見積もるためには、ウランやトリウムがどこにどれくらいあるのかというモデル化をしなければならない。

ウランやトリウムなどのイオン半径の大きい元素は不適合元素と呼ばれ、一般に地球深部の高密度の結晶中から排除される傾向を持つ。高密度環境で溶解した岩石が徐々に冷却固化していけば、不適合元素は液相中に取り残される。コアは鉄とニッケルを主成分とする超高密度状態で、その中にはウランやトリウムなどはほぼ完全に含まれていないと考えられている。海洋地殻は海嶺において上部マントルの部分溶解で生成され、この過程でウラン・トリウムは海洋地殻に濃集する。大陸地殻は海洋地殻の沈み込みにもなう部分溶解で生成したマグマが噴出・集積して生成されたもので、ここでウラン・トリウムはさらに濃集される。およそ 40 億年にわたるプレートテクトニクスと、それによる大陸地殻の生成により、初期マントルに含まれていたウランやトリウムはどんどん大陸地殻へ濃集し、現在の地球では全地球の約半分のウランとトリウムが大陸地殻に濃集していると考えられている。大陸の総質量が地球のわずか 0.4% であることを

考えると、この濃集がいかに大きいか、理解できることと思う。

KamLAND における地球ニュートリノのフラックスを見積もり、また、KamLAND での観測に基づき地球物理学的な議論をするためのフレームワークを提供するために、既存の地球科学の成果を集大成して地球参照モデルを構築した。大陸地殻と海洋地殻の組成は地質学・地震学・岩石学の知見をもとに大陸形成モデルを加味して見積もられた値を参照する。マントルについてはほとんど何も分かっていないという立場に立ち、地球全体の組成(BSE モデル)から地殻の組成を差し引いたものをマントル全体の平均組成とした。マントル全体が均一だとすれば、これはマントルの組成になる。この参照モデルによれば、ウランの量はマントルで ~ 0.01 ppm, 海洋地殻で ~ 0.1 ppm, 大陸地殻で ~ 1 ppm となり、トリウムはすべての場所でウランの約 4 倍である。ウランとトリウムはともにイオン半径の大きい不適合元素であり、地球深部での化学的性質は酷似している。そのため、地球のほとんどの場所で安定した U/Th 存在比を示す。ウラン・トリウム共に、マントルから海洋地殻、大陸地殻へと、ほぼ 1 桁づつ濃集していく様子が分かる。参照モデルの詳細については、[3, 4] を参照してほしい。

この参照モデルによれば、KamLAND での地球ニュートリノフラックスは、U 系列からのものが $2.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$, Th 系列からが $2.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ と計算される。ここで、ニュートリノ振動パラメータは、最新の KamLAND および太陽ニュートリノ実験により決定された値 $\Delta m_{12}^2 = 7.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta_{12} = 0.82$ を用いた。 10^{32} 個の標的陽子(シンチレータ 1.2 kton に相当)で 1 年間観測した場合のイベント数 30.5 と 8.0 にそれぞれ対応する。図 2 に示すように、U 系列と Th 系列では地球ニュートリノのエネルギースペクトルが異なり、それにより検出効率が変わるので、フラックスが同じくらいであるにもかかわらず、イベント数は U 系列が Th 系列のおよそ 4 倍になっている。

参照モデルの予測フラックスにエラーをつけることがよく要求されるが、これはなかなか難しい。少なくとも、ニュートリノ振動パラメータの不定性に起因するエラー 6%はつくが、参照モデルの中で使われている地球化学的パラメータのエラーは簡単ではない。BSE モデルの値には Th で 15%, U で 20% の「主観的エラー (*subjective judgement of the uncertainty*)」はついているものの、他のすべての見積もり値にはエラーはついていない。ある 1 つの岩石サンプルの分析値にエラーをつけることは簡単であるが、「どこそこの平均組成(地殻全体, 日本列島, etc)」の類には、サンプリングのバイアスやモデル化の不

定性などを考慮せねばならず、定量化が難しいからである。

参照モデルでは、一様なマントルモデルを仮定した。これは、最近の詳細な地震波解析による地球トモグラフィに支持されている。地震波解析によると、マントルは深さ 670 km のところで密度が大きく変化し、そこで上部マントルと下部マントルに分けられる(図 1)。しかし、より詳細にマントル内部の地震波速度分布を調べると、マントルのグローバルな対流を示唆する大きな循環パターンが見えてくる。この対流は上部マントルと下部マントルの境界を突き抜け、マントル全体を攪拌する。この、地震波トモグラフィに基づく 1 層対流モデルは、均一なマントルモデルを支持する。

一方で、岩石学的な立場は、上部マントルと下部マントルの化学的分離を支持する。境界での密度差が大きく、そこを通過するための結晶構造の組み換えに大きなエネルギーを必要とするため、密度差は物質交換の障壁になっていると考える。これに基づけば、上部マントルは 40 億年のプレートテクトニクスにより、ウランやトリウムなどの不適合元素を地殻に吸い取られているので、その含有量は下部マントルよりもだいぶ少なくなっているはずである。

この、マントル組成が均一か分化しているかというのは、現在の地球科学の大きな論点のひとつとなっている。このモデル不定性により KamLAND におけるフラックスがどのくらい変化するか調べるために、参照モデルを変更してみる。極端な場合として、上部マントルに含まれるすべてのウラン・トリウムを下部マントルに均一に分布させると、KamLAND におけるマントル起源のフラックスは約 12% 減る。全体のフラックスに対してだと、3% 程度の減少に対応する。地球科学的根拠はないが、逆に下部マントルのウラン・トリウムをすべて上部マントルに移動すると、KamLAND における総フラックスは 8% 程度増加する。

他にも参照モデルには多くのモデル依存の部分があり、それらはだいたい 5~10% 程度のフラックス変化をもたらす。それらは、不定性と言えは不定性であるが、逆に言えばニュートリノ観測によって新しい知見がえられる部分でもある。10% 程度の精度でニュートリノフラックスを決められればそれは BSE のテストになるし、さらに進んで数 %、あるいは多地点での観測ができれば、マントルモデルやその他さまざまな地球科学の不定性に有用な情報をもたらす。

最後に、KamLAND 周辺の局所的な地質の影響に触れておこう。発生源から見た KamLAND の立体角は $1/(4\pi r^2)$ で増えるから、KamLAND で観測するニュー

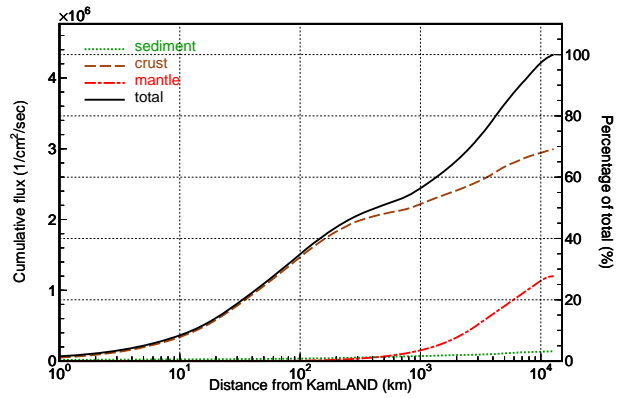


図 3: 累積フラックスと KamLAND からの距離

トリノはほとんどが周辺から来たものではないかとよく聞かれる。しかし、半径 r の球殻の表面積は r^2 に比例するので、結局近距離からのフラックスは単位半径あたり $1/r^2 \times r^2$ に比例したものとなり、発散することはない。この、すべての半径から同じ量のニュートリノが来る(ウラン・トリウムの濃度が一定でニュートリノ振動を無視した場合)という事実は、ニュートリノ振動の影響を単純化するのに重要な役割を果たす。結局のところ、ニュートリノ振動の影響は地球全体からの総フラックスを $1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta$ 倍にするという近似が 1% 程度より良い精度で成り立ち、また、ニュートリノ振動によるスペクトルの変形を無視できるレベルにする。

しかしながら、近距離の局所的なウラン・トリウム量の変化が KamLAND における総フラックスに大きな影響を持つという点は変わらない。図 3 に、KamLAND からの距離の関数として、その内側から来るニュートリノの累積フラックスを示す。この図から読み取れるように、フラックスの 3/4 は大陸地殻に由来し、マントルの寄与は 1/4 程度である。また、半径 50 km の範囲がフラックスの 1/4 を占め、半径 500 km で半分になる。このことは、地球全体やマントルなどの地球深部の物理のためには、KamLAND 周辺の地質を理解することが重要であることを示している。ちなみに、KamLAND が設置されている神岡鉱山茂住抗周辺の寄与は 1% 程度である。

半径 50 km と言えは、だいたい神岡から富山までの距離に相当する。500 km は、ほぼ本州がすっぽり収まるくらいだ。あまり気が乗らなかったが、神岡周辺と日本列島の地質調査を開始した。

まずはじめに探したのが、日本列島全体の 3 次元のウランとトリウムの分布地図。そんなものは存在しない。なければ作るとデータを集めにかかるが、もちろんそんなに簡単なことではない。しかし、集めたデータを見ると、

火成岩ではウランの濃度は 0.04 ppm から 5.55 ppm と数桁におよぶのに比べ、堆積岩は 1.55 ppm から 3.44 ppm と比較的狭い範囲に収まる。これは、火成岩がマグマの生成や上昇の環境などにより成分が多様化するのに対し、堆積岩は浸食の作用によりさまざまな岩が混ぜられ、平均化されたためと考えられる。この平均化のスケールが流域面積程度だとすると、ニュートリノフラックスも半径 50 km 程度を平均化するので、同じことが起こるはずと考え、表層地質図をもとに現実的なスケールでウランやトリウム濃度を割り当ててみた。結果、フラックス変化は 20% 程度に収まることが分かった。表層地質の多様性が深さ 5 km まで続いていると仮定して計算すると、これは総フラックスの 3% 程度の不定性に対応する（さらに保守的に、上部地殻すべてとしても 10% 程度）。

神岡鉱山が特殊な場所だったらどうするか（鉱山はもともと地質的に特別な場所）。幸い、鉱山の地質は 3 次元的に徹底的に調べられているので、構造的な把握は比較的容易だった。鉱山提供の 3 次元地質図（手書き）に基づき、鉱山の協力で岩石をサンプリングして、その成分分析を行う。結果、ウランやトリウムの特別な濃集は見られなかった。もし、近くに未発見のウラン鉱床があったらどうなるか。世界最大級のウラン鉱床が KamLAND から 1 km の位置にあったとしても、フラックスは全体の 3% 程度と計算される。

他にも、日本の下の沈み込みプレートの影響、日本海の地質の特殊性など、考えられる限りの地質効果を列挙し、不定性を見積もった。その結果、50 km から 500 km スケールの地質の影響は、すべて合わせても 10% 程度となった。これは、BSE モデルの不定性である 20% よりも小さく、KamLAND での観測により全地球的な物理が議論できることを意味する。

4 KamLAND 実験における地球ニュートリノ検出

すでに述べたように、KamLAND では反ニュートリノを逆ベータ崩壊反応 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ により選択的に検出する。この反応は、時間的および空間的に相関する 2 つの信号を作る。先発信号は陽電子およびその対消滅による 1 MeV のガンマ線により作られ、そのエネルギーはニュートリノのエネルギーから 0.8 MeV 差し引いたものになる。地球ニュートリノの最大エネルギーは 3.3 MeV なので、地球ニュートリノイベントの先発信号のエネルギー範囲は陽電子の最小エネルギーに対応する 1.0 MeV から最大ニュートリノエネルギーに対応する 2.5 MeV ま

でとなる。遅延信号は、陽子による熱中性子捕獲で放出される 2.2 MeV のガンマ線によるもので、中性子の熱化と捕獲に要する $\tau = 210 \mu\text{sec}$ だけ遅れて発生する。これら先発信号と遅延信号の相関した 2 つの信号の同時計数（遅延同時計数, delayed coincidence）を行うことで、バックグラウンドを効果的に抑えることができる。

イベントセレクションは、基本的に原子炉ニュートリノ解析のもの [5] と同等である。すなわち、宇宙線ミュオンおよびミュオン後の一定時間の除去後、後発イベントのエネルギーが 2.2 MeV であるような空間的・時間的に近接したイベントペアを探す。ただし、原子炉ニュートリノの場合と異なり、地球ニュートリノのエネルギーは低く、シンチレータ内外の放射性不純物による偶発同時計数が桁違いに多い。これは地球ニュートリノがウランやトリウムの崩壊に由来することを考えると、信号とバックグラウンドが同じエネルギーレンジにあるのはある意味当然なことではある。この多量の偶発同時計数バックグラウンドを減らすため、イベントペアを選択する際の空間相関カットには原子炉ニュートリノの 200 cm からより厳しい 100 cm に、時間相関カットは 2 msec から 1 msec にと設定し、また、有効体積についても、原子炉ニュートリノの半径 550 cm から半径 500 cm に縮小した。

地球ニュートリノを観測する際の最大のバックグラウンドは原子炉起源のニュートリノで、年間およそ 41 イベント、地球ニュートリノの予測イベント数のおよそ 4.5 倍におよぶ。これ自体は、KamLAND の第一目的であるニュートリノ振動の観測のための重要な信号なのであるが、地球ニュートリノの観測にあっては、単にもっとも大きなバックグラウンドでしかない。しかも、本物のニュートリノによるイベントなので、それを地球ニュートリノのイベントと区別することはできない（ニュートリノ到来方向が分かればある程度の情報になるが、シンチレーション検出器である KamLAND では、いまのところこれは非常に難しい）。幸い、原子炉起源ニュートリノ観測が KamLAND 実験の第一目的だということで、そのスペクトルやフラックス、システムティクスは詳細に理解されており、十分な統計がたまれば地球ニュートリノイベントをなんとか抽出することができる。電力会社の協力により、原子炉運転出力や反ニュートリノスペクトルは、2% 程度以下の不定性で理解されている。現在のところ最大の不定性はニュートリノ振動パラメータによるもので、イベント数換算で 5.5% のエラーとなっている。

KamLAND は、当初「バックグラウンドフリー」な検出器と宣伝されていた。超高純度シンチレータと遅延同時計測による信号識別により、ニュートリノ信号に対

するバックグラウンドという意味では、放射性不純物による偶発同時計数と、宇宙線ミュオン起源の原子核破砕反応と検出器外ミュオンによる高速中性子しか予測されていなかった。ミュオン起源の原子核破砕反応はミュオン通過後の一定時間を解析から除くことによりほぼ完全に除去することができ、高速中性子については、KamLAND で実際に観測されたミュオンを詳細に調べることにより、無視できる量であることが分かった。偶発同時計数も、前述した厳しめのカットにより、かなり減らすことができる。これらのニュートリノ以外のバックグラウンドイベントはすべて合わせても年間わずか 1.3 ± 0.1 イベントで、原子炉起源ニュートリノ数 41.2 や予測地球ニュートリノ数 9.2 と比べてきわめて小さい。

しかしながら、地球ニュートリノ解析で行うのは、バックグラウンドの中からの新しい信号の抽出である。バックグラウンドを詳細に見積もり、予測より多い観測数をもって、その有意性を主張する。したがって、バックグラウンドの見積もりにはより慎重でなければならない。バックグラウンドの見落としは、そのまま、虚偽の信号となる(この目的でスペクトル解析はもちろん重要であるが、初期の統計の少ない状況では必ずしも効果的とは限らない)。

この観点から、考えられる限りのバックグラウンドプロセスを列挙し、そのイベント数を見積もった。放射性不純物起源のものとしては、短寿命核や長寿命励起状態による連続崩壊、自発核分裂、中性子放出やその他の特殊な崩壊モード、 (α, n) 反応、 (γ, n) 反応など。KamLAND では数 10 Hz でトリガがかかっており、これだけでも年間 10^9 程度のイベント数に対応する。放射性崩壊事象の大半がトリガ閾値以下であることを考えると、 10^{-10} 程度の分岐比でも、地球ニュートリノ観測のバックグラウンドとなりえる(α 粒子はクエンチングのため、数 MeV のエネルギーを持っていても、可視エネルギーではトリガ閾値以下になってしまう)。放射性不純物以外のバックグラウンドとしては、太陽ニュートリノによるシンチレータ中の重水素の分解(disintegration)、大気ニュートリノとシンチレータ中の炭素原子核の反応、原子炉使用済燃料からのニュートリノ、富山湾に停泊しているかもしれない秘密の原子力潜水艦からのニュートリノなど。ミュオンによる原子核破砕による生成物も、生成断面積はとりあえず忘れて、原理的に生成可能かという基準からもう一度調べなおした。KamLAND には、上部と下部、そして中心部に白金温度計が設置されていたが、ミュオンが温度計に命中したら何が起こるか分からないとの理由で、その周囲半径 1.2 m を解析対象から除外した。偶発同時計数についても、その見積もりが適切か、3 つの異なる方法によりチェックをした。別の方向からのアプ

ローチとして、ニュートリノ候補イベントの PMT ヒットパターンは正常か、その前後で異常なイベントはないか、イベントの空間分布や時間分布は正常か、などの徹底的なチェックを行った。

その結果、見落としていたバックグラウンドが見つかった。シンチレータ中に 1.1% の存在比で存在する ^{13}C に、 ^{210}Po の崩壊により生成されるトリガ閾値以下の α 粒子 (5.3 MeV) が衝突して発生する $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応である。この反応によって生成される中性子は最小 2.2 MeV から最大 7.5 MeV のエネルギーを持ち、この中性子に散乱された陽子の一部は地球ニュートリノイベントと同じ程度の可視エネルギーを作る。これが先発信号となり、中性子は熱化のあと陽子に捕獲され、遅延信号を作る。 ^{210}Po による α 崩壊は年間およそ 7.3×10^8 回発生するが、そのうちわずか 6×10^{-6} % がこの反応を起こし、年間およそ 20 イベントが地球ニュートリノのバックグラウンドとなる。

このバックグラウンドの見積もりは、さまざまな不定性に阻まれ、簡単なものではなかった。まず、 ^{210}Po の量が正確にわからない。これは、 α 粒子の可視エネルギーがクエンチングのため非常に小さくなっており、イベント位置の再構成に不定性が大きいためである。また、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応の断面積や角分布も、30 年以上前に測定されたエラーの大きいもの ($\sigma \sim 20\%$) があるだけであった。この反応で生成された中性子がどのようなスペクトルを作るかを計算するためには、シンチレータ中での中性子-陽子散乱をシミュレートし、さらにクエンチングを考慮して陽子の可視エネルギーを計算しなければならないが、このとき必要になる陽子のクエンチングファクタも正確には求まっていない。結局、すべての不定性を込みにして、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応の数に 24% のエラーを、さらにその可視エネルギースペクトルの横方向に 10% のエラーをつけることになった。これらは現在のところかなり大きめの保守的な値をとっているが、低エネルギー領域を使った独立な (α, n) バックグラウンド数の見積もりや、中性子線源によるクエンチングファクタの測定などが行われており、このあたりの不定性は将来かなり減らすことができると期待される。

この大量の ^{210}Po は、KamLAND 建設中にシンチレータに浸入したラドンが起源と思われる。ラドン自体は 3 日で崩壊するが、その子孫に寿命の長い鉛 (^{210}Pb , $\tau_{1/2} = 22.3$ year) があり、これが現在シンチレータ中に大量に存在する。ウランやトリウムなどの不純物に関しては、原子炉ニュートリノの解析に直接影響することもあり、細心の注意とともに、徹底的なクリーニングにより取り除いた。シンチレータ中に存在するウランおよびトリウム

の量は、KamLAND 完成後に KamLAND 自体により測定され、それぞれ 3.5×10^{-18} g/g および 5.2×10^{-17} g/g と、目標をはるかに上回る純度を達成した。ラドンに対しても、輸送タンクローリの内面を磨きあげ、その内側にラドンを透過させないフィルムを貼るなどの数々の対策を講じてはいたが、結果的にシンチレータ中に存在する ^{210}Pb はウランの放射平衡から計算される量の 5 桁近く多い量になってしまった。これだけの量のラドンが入った理由にははっきりしないが、坑内における純化・液入れの一連の過程でシーリングの不完全な部分があったためではないかと思われる（坑内の空気には外気の数 10 倍のラドンが含まれている）。ちなみに、現在および将来の KamLAND では、岩盤の表面が直接露出しないようにし、そこに坑外からのラドンフリーエアを供給して、さらにすべての配管系を嚴重にシールドするなどの対策をとっている。

今年 7 月に Nature に発表した論文 [1] は、KamLAND における 749.1 日のデータに基づくものである。これは 100% の検出効率での 4.87×10^{31} target-proton years の観測に対応する。図 4 に、予測されるスペクトルと実際に観測されたスペクトルを示す。バックグラウンドの見積もり 127 ± 13 (syst.) イベントに対し、ニュートリノイベント候補として 152 イベントが観測された。現在のところ、系統誤差は有効体積の見積もり 4.9% が支配的に効き、全体で 5.0% となっている。これらの系統誤差を考慮し、イベント数のみに着目すると、地球ニュートリノのフラックスはイベント数換算で 25^{+19}_{-18} と見積もられる。検出効率を含め、観測時間および標的陽子数で規格化すると、これは 51^{+39}_{-36} events/ 10^{32} -protons/year に相当する。

図 4 に示された信号およびバックグラウンドのスペクトルを使って、スペクトル形まで含めた解析も行った。図 5 にその結果を示す。この図から読み取れるように、KamLAND における観測は U+Th のイベント数の決定にはそれなりの感度があるが、U/Th イベント数比にはあまり感度が無い。一方で、前述したように、地球科学の第一の興味は U と Th の絶対量を定めることにあり、地球科学による Th/U 存在比の予測は絶対量の予測に比べ信頼できるものになっている。そこでこの地球科学による Th/U 存在比 3.9 を制約として含めて KamLAND のデータを解析すると、地球ニュートリノイベント数は 90% の信頼区間で 4.5 から 54.2 となる。中心値は 28 イベントで、これはイベント数のみによる解析の結果と一致する。また、信頼度 99% で、地球ニュートリノイベント数の上限は 70.7 となった。

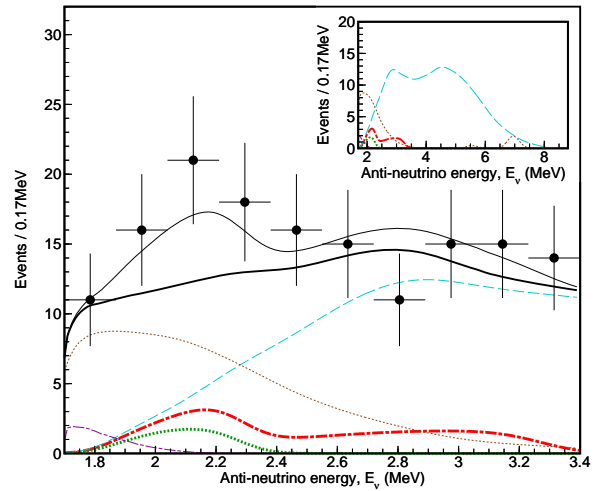


図 4: 予測スペクトルと観測データ。太い一点鎖線と点線が参照地球モデルから予測される U 系列と Th 系列の地球ニュートリノの信号、細い鎖線、点線と一点鎖線がそれぞれ原子炉ニュートリノ、 (α, n) 反応、偶発同時計数のバックグラウンドである。太い実線がバックグラウンドの合計で、細い実線がそれに予測される地球ニュートリノの信号を加えたものである。

5 KamLAND の結果と今後

前述した参照地球モデルによれば、KamLAND における 749.1 日の観測での予測イベント数は U 系列 14.9 イベント、Th 系列 3.9 イベントで、計 18.8 イベントである。参照モデルは地球化学の基礎となっている BSE モデルに基づいており、この予測フラックスはウランおよびトリウムによる発熱量 16 TW に対応している。現在のところ、KamLAND の観測による信号の有意性は 2σ (95.4%) に満たないものの、その観測値は参照地球モデルによる予測値と 1σ の範囲で一致する。99% 信頼度におけるフラックス上限は、参照モデル予測値の 3.8 倍になっている。現在のこのフラックス上限値は地球科学により与えられる制限をはるかに越えているため、この上限値を直接地球モデルに還元することはできないが、もしモデルを単純にスケールアップするならば、これは発熱量上限 60 TW 相当となる。地表における地殻熱流量の測定値が 44 TW あるいは 31 TW であることを考えると、熱源がすべてウランおよびトリウムの崩壊熱であると仮定してもその総量は 44 TW (31 TW) 相当を越えないはずで、現在の KamLAND が与えられる上限値 60 TW は、この地球科学から与えられる上限値よりも大きい。しかしながら、今回の KamLAND の観測結果は、地球ニュー

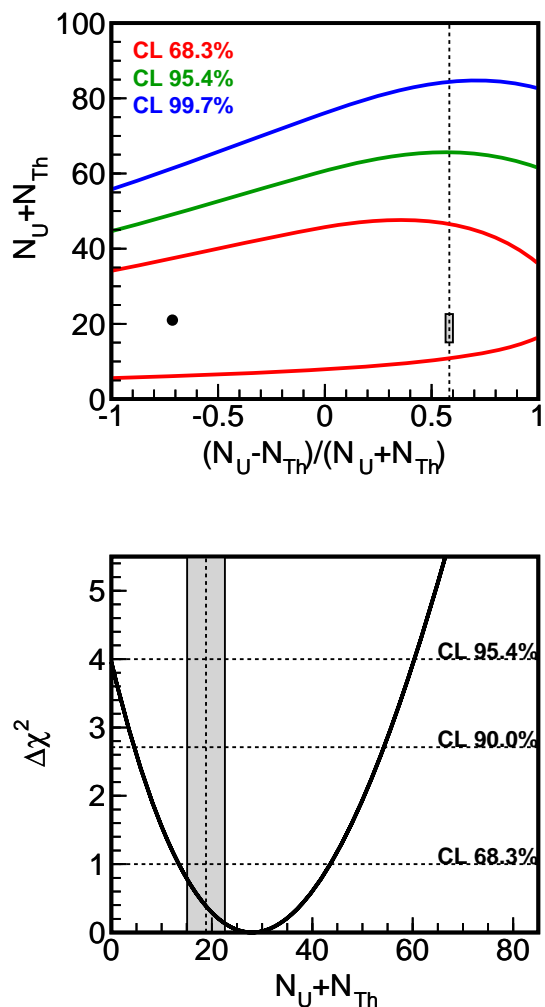


図 5: イベント数とスペクトル形の解析による地球ニュートリノイベント数の信頼区間。上図の等高線は内側から順に 68.3%, 95.4%, 99.7% の信頼区間を表し, 縦軸は地球ニュートリノの総数 $N_U + N_{Th}$, 横軸は U 系列ニュートリノと Th 系列ニュートリノの比を表す $(N_U - N_{Th}) / (N_U + N_{Th})$. 点はベストフィットで, U 系列 3 イベント, Th 系列 18 イベントとなった。縦の点線は地球化学による Th/U 比の予測 3.9 を示し, その上の長方形は参照地球モデルによる予測値とそのエラーの範囲を示す。この Th/U 比 3.9 の線に沿った χ^2 の分布が下図で, この制約のもとでの地球ニュートリノ数の信頼区間を示す。塗りつぶされた長方形は参照地球モデルの予測とそのエラーを示す。

トリノによる初の実験的研究の成果であり, ニュートリノによる地球物理学の探求が現実のものとなったことを示すものであると言えよう。

現在, KamLAND は, 次期 ^7Be 太陽ニュートリノ観測へ向けて, シンチレータのさらなる純化の研究を行っ

ている。蒸溜と窒素パージングにより, 現在シンチレータ中に含まれる ^{210}Pb や ^{85}Kr , ^{39}Ar などの放射性不純物を 4~6 桁除去することを目標にしている。すでに基本的な開発の大半を終わらせており, 神岡鉱山内における実機の建設が間もなく始まろうとしている。

これらの再純化は, 太陽ニュートリノの観測を第一の目的としたものであるが, 地球ニュートリノ観測にもたらすメリットも大きい。放射性不純物の量を無視できるレベルにするので (地球ニュートリノ観測には 2 桁でも十分!), 量も不定性も大きい (α, n) バックグラウンドを無視できる量まで減少させる。偶発同時計数によるバックグラウンドも大幅に削減されるので, 遅延同時計測の選択条件を緩めることができ, また, 有効体積も大きくとれる。 ^{210}Pb の 4 桁の削減を想定し, 現在の原子炉ニュートリノ解析と同じ緩い選択条件, 大きい有効体積による観測を評価してみたところ, 現在と同じ 749 日の観測により, 地球ニュートリノの量を 35% の精度で決めることができることが分かった (参照モデルの予測フラックスに基づく見積もり。詳細については [3] を参照)。現在の測定のエラー 54% と比べると, 大幅に向上していることが分かる。このデータを現在すでにあるデータと組み合わせると, フラックス見積もりのエラーは 28%, 信号の有意度は 99.96% に達する。99% 信頼度のフラックス上限は 30 TW 相当程度になり, いよいよ地球科学の与える上限と比較できるレベルになる。

ニュートリノによる地球科学が現実のものとなったことを受けて, 最近, 多くの地球ニュートリノ観測実験が提案されてきている。その中でも特に興味深いのは, ハワイにおける観測である。地球ニュートリノの特に優れている点は, 何と云っても他の手段では観測することのできない地球深部の組成について直接の情報をもたらすことである。この観点から, ウランやトリウムが多い大陸地殻から遠く離れているハワイにおける観測の意味は大きい。周囲に原子力発電所がないという立地条件も重要である。すでにいくつかのグループにより提案されているように, 深海における移動式の検出器をもし作ることができるなら, 多地点観測による局所地質不定性の排除や, 海嶺やマントル上昇流などの地球科学的に興味のある地点でのピンポイント観測などが可能になり, さらに化学組成の全地球トモグラフィやそれによる地球発達史の解明など, ニュートリノによる地球科学探求の可能性は尽きない。

1960 年代より提案され, ユニークな観測手段として期待され続けてきた地球ニュートリノの観測が, 大容量高純度シンチレータ検出器 KamLAND により, ついに現実のものとなった。ニュートリノによる地球物理学とい

う新しい研究分野の今後の発展と，そこから得られる新しい地球科学の発見が楽しみである．

謝辞

この研究を行うにあたりお世話になった神岡鉱山，神岡消防署および地元神岡の皆様，そして原子炉運転データを提供していただいた東京電力をはじめ各電力会社の皆様に深く感謝をします．また，ニュートリノ実験技術の基礎を築き，発展させてきた先人たちの偉業，特に神岡におけるニュートリノ実験の開拓的研究とその成果に対し，感謝と敬意を表したいと思います．

KamLAND 実験グループ

東北大学，アラバマ大学，カリフォルニア大学バークリー校，ローレンスバークリー国立研究所，カリフォルニア工科大学，ドレクセル大学，ハワイ大学，カンザス州大学，ルイジアナ州大学，ニューメキシコ大学，スタンフォード大学，テネシー大学，デューク大学，ノースカロライナ大学，中国高能研究所，ボルドー大学

参考文献

- [1] T.Araki *et al.* (KamLAND Collaboration), *Nature* **436**, 499-503 (2005)
- [2] 白井・未包・井上, *高エネルギーニュース* **22-1**, 1-10 (2003)
- [3] S.Enomoto *et al.*, arXiv:hep-ph/0508049 (2005)
- [4] S.Enomoto, Doctoral Dissertation, Tohoku Univ. (2005)
- [5] T.Araki *et al.* (KamLAND Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **94**, 081801 (2005)