

# 有機シンチレーターを用いた地球反ニュートリノの検出

井上 邦雄

## Geo-Neutrino Observation with Organic Scintillator

Kunio INOUE

KamLAND utilizes the world-largest and cleanest organic liquid scintillator and revealed how neutrinos travel through an observation of reactor anti-neutrinos. It also succeeded to apply well-understood neutrinos to a direct observation of the interior of the earth. Future improvements of the precision will make the geo-neutrino observation a new practical method to investigate earth formation/evolution/composition and dynamics related to earthquake, eruption of volcano and geomagnetism. This “neutrino geo-science” is very hot not only among neutrino-physicists but among geo-scientists.

**Key words:** organic liquid scintillator, geo-neutrino, KamLAND

地球をも容易にすり抜けるニュートリノは、光では直接観察できない天体内部の情報をもたらす新しい道具としての利用が期待できる。その事例として、地球反ニュートリノの初観測と将来の展望について紹介する。この観測は、自身がニュートリノ標的として機能し、光学的にもすぐれた特徴を有する有機液体シンチレーターだからこそないうるものである。

### 1. ニュートリノ

ニュートリノは素粒子の一種である。物質を構成する素粒子は、クォークとレプトンに分類される。電磁力、弱い力、強い力、重力のうち強い力がはたらかないのがレプトンで、例えば電子が属する。原子は原子核と電子から構成されるが、原子核を構成する陽子や中性子は2種類のクォークで構成される。クォークは質量の重いものも含めて6種類、レプトンも6種類存在する。電子、 $\mu$ 、 $\tau$ と、それらのペアとなる3種類のニュートリノ ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ) である。さらに、反粒子である反ニュートリノ ( $\bar{\nu}_e$ ,  $\bar{\nu}_\mu$ ,  $\bar{\nu}_\tau$ ) も数えると、合計6種類のニュートリノが存在する。ニュートリノは電荷をもたず電磁力もはたらかないため、身近

に感じることはまずないが、宇宙全体では多数を占めている。平均すると、宇宙背景放射といわれるビッグバン起源の光子が約400個/cm<sup>3</sup>の最大数で、ニュートリノは約300個/cm<sup>3</sup>で2番目である。電子やクォークは1cm<sup>3</sup>あたり約1億分の1個しかない。地球では、ビッグバン起源のもの以外にも、太陽からくるニュートリノが1cm<sup>2</sup>あたり1秒間に660億個も突き抜けており、ほかにも、宇宙線起源、地球内部起源、原子炉や加速器でもつくられ、われわれの体ですら、体内に含んだカリウムが1日に3億個程度のニュートリノを放出している。

電磁力のはたらかないニュートリノの観測は非常に困難である。人間がものを見るのは、目の中で光が起こす電磁相互作用によるものであるし、高度な電子回路も電気信号しか取り扱えない。ニュートリノの相互作用のしにくさ・透過性の高さは、その反応断面積で理解できる。例えば、原子炉が放出する典型的なニュートリノ (エネルギー4 MeV) では、水素原子核を標的とした反応断面積は約 $7 \times 10^{-43}$  cm<sup>2</sup>しかなく、水なら約20光年もないと衝突しない計算である。われわれの周囲に満ちるニュートリノも、大部分はただ通り過ぎるだけで何の痕跡も残さない。

このようなニュートリノの観測は、ごくまれな反応となるため、大量の物質と極低バックグラウンド環境が不可欠である。バックグラウンドの原因は、宇宙線や装置中の放射性不純物などで、必然的に宇宙線の届かない地下深くに高純度の観測装置を用意することになる。

ニュートリノ自体の研究が、大統一理論や宇宙の物質・反物質の非対称性、元素合成など広い分野に波及し、基礎研究を進めるうえで重要なのは明白である。さらに、ニュートリノの透過性を利用すれば、われわれがこれまで観測できなかった銀河の中心、恒星内部、地球内部などを透視できる可能性がある。ただし、ニュートリノ観測を通して天体内部を直接観察するには、ニュートリノの伝搬を正確に理解する必要がある。特に太陽・地球が放出する  $\nu_e$ ・ $\bar{\nu}_e$  に対しては、太陽の明るさから算出した核融合反応量と飛来する  $\nu_e$  量の間には2~3倍のひらきがあり、1968年以来続く「太陽ニュートリノ欠損問題」として、重大な研究対象であった。

## 2. カムランド実験

超新星・太陽ニュートリノの観測でノーベル賞をもたらしたカミオカンデ実験は、スーパーカミオカンデ (SK) の開始とともに役目を終え、東北大学に移管された。東北大学では、太陽ニュートリノ問題の解決を主目的とし、ニュートリノ伝搬の理解にはその発生量を算出できる人工の発生源が好ましいと考え、原子炉ニュートリノ観測に主眼を置いたカムランド検出器へつくり換えた。太陽が核融合反応（還元すると  $4p \rightarrow \alpha + 2e^+ + 2\nu_e + 26.73 \text{ MeV}$ ）によって電子ニュートリノを放出するのに対し、原子炉は核分裂反応（例えば  $^{235}\text{U} + n \rightarrow X + Y + 6.1e^- + 6.1\bar{\nu}_e + 2.5n + 202 \text{ MeV}$ ）によって反電子ニュートリノを放出する。カムランドから 180 km 周辺の距離には原子炉が多数分布し、過去の実験が 1 km 程度だったのに比べ2桁も遠距離での研究が可能となる。

### 2.1 ニュートリノ捕獲反応

遠距離では反応頻度が小さくなるので（カムランドでの原子炉ニュートリノの反応は2日に1事象程度）、信号識別能力が高まる特徴的な反応を使う。水素原子核（陽子）による反電子ニュートリノ捕獲反応 ( $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ ) は、特徴的な遅延同時計測が可能である。弱い力によって相互作用した  $\bar{\nu}_e$  は、電磁相互作用をする陽電子を生み出す。同時に陽子が中性子に変化し、この中性子が遅れて周囲の原子核に捕獲され、 $\gamma$  線などのやはり電磁相互作用をする粒子を発生する。カムランドでは平均  $210 \mu\text{s}$  で陽子に捕獲され、2.2 MeV の  $\gamma$  線を放出する。この時間差のある2

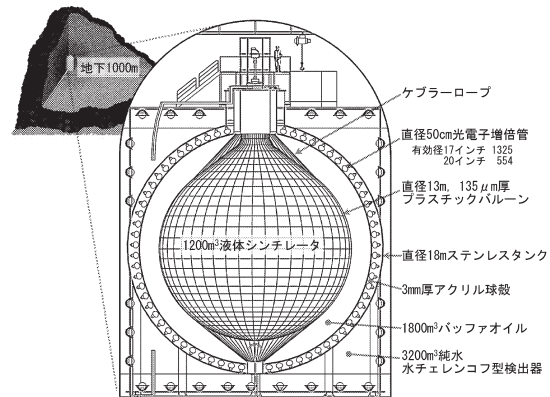


図1 カムランド検出器の概略図。

つの反応により、信号識別能力は格段に向上する。この反応は 1.8 MeV 以上で起こり、逆反応となる中性子の寿命測定 ( $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ) から、0.2% という高精度で反応断面積を計算できる。

水素原子を含む化合物は水や有機物など多種あるが、高純度で大量に用意するには液体が有利である。水の場合は、荷電粒子が媒質中の光速を超えて運動した際に放出するチェレンコフ光が利用でき、周囲に配置した光電子増倍管 (PMT) でチェレンコフ光を観測するのが SK の手法である。しかし、チェレンコフ光は非常に微弱で、SK での 1 MeV あたり光電子 6 個程度（量子効率約 20%）では、中性子捕獲時の 2.2 MeV の  $\gamma$  線の観測は困難である。有機化合物には、荷電粒子の運動が残すイオン化エネルギーを光に変換し、シンチレーション光を発するものがある。有機液体シンチレーターを使うカムランドは、約 500 個/MeV の光電子を捕らえ、2.2 MeV の  $\gamma$  線も観測できるので、反ニュートリノ観測に適している。この名前も、神岡液体シンチレーター反ニュートリノ観測装置の英語表記 (Kamiooka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector) からきている。カムランドでは、反ニュートリノ観測を中心に、大光量を生かして、他ではできない低エネルギーのニュートリノ・反ニュートリノ観測を目指している。

### 2.2 カムランド液体シンチレーター

図1に示すように、直径 13 m の透明バルーンが 1200 m<sup>3</sup> (1000 トン) の液体シンチレーターで満たされ、ケブラーロープでシンチレーション光を発しないバッファオイル中に保持されている。アクリル球殻をはさんで直径 18 m のステンレスタンク内面に配置された 1879 本の PMT が、シンチレーション光を監視する。光子を検出する有感面積の割合は約 34% である。液体シンチレーターは、ニュートリノの標的として、ニュートリノ反応を光に変換する機

能材として、そして光を伝える媒質であるとともに外部から入り込む放射線を吸収する遮蔽材としての機能をあわせて持っている。表面にだけ PMT を配置する構造は、PMT 数を減らせるのでコスト・放射性不純物の両面で有利であるが、透過率が十分高い必要がある。また、遅延同時計測を生かすには 2 つの信号発生点を精度よく算出する必要があり、シンチレーション光が PMT に到達する時間差を使って発生点を逆算するために、発光は十分高速でなければならない。

カムランドの液体シンチレーターは、1,2,4-トリメチルベンゼン (PC) とドデカン (炭素数 12 の直鎖アルカン, N12) を体積比 20% : 80% で混合した溶媒に、発光物質である 2,5-ジフェニルオキサゾール (PPO) を 1.52 g/liter 溶かしたものである。バッファーオイルは、N12 と平均炭素数 14 のイソパラフィン を約 50% : 50% で混合し、液体シンチレーターが少しだけ (0.04%) 重くなるように調節されている。密度はともに 0.78 g/cm<sup>3</sup> である。一般に発光量を増やすには、二重結合をもつ PC のような溶媒を増やし、発光溶質の濃度を高める必要があるが、いずれも自己吸収により透過率が減少する。N12 はできるだけ発光量を落とさずに PC を薄めるために導入した。小実験では、光を長波長に変換する POPOP や Bis-MSB といった第二溶質を用いることがあるが、第二溶質の吸収・発光波長が十分分離されておらず、カムランドでは第一溶質の PPO のみを利用している。PPO の吸収ピーク波長は 303 nm、発光波長は平均 370 nm で発光時定数は 1.6 ns である。さらに、自己吸収を抑えるため通常の 10 分の 1 程度の PPO 濃度としている。得られた発光量は約 8000 光子/MeV で、標準的な液体シンチレーター (10000 ~ 12000 光子/MeV) からあまり遜色はなく、減衰長は 10 倍程度の約 10 m が得られた。検出器の中心で発生したシンチレーション光は、6.5 m 分の液体シンチレーターを通過し、1 MeV あたり 280 光電子程度の信号をつくと期待していたが、実際には約 500 光電子の信号が観測され、減衰の主因は単純な吸収ではなく再発光をとまうようである。

光量が減少しないことで期待以上のエネルギー分解能  $\sigma/E \sim 6.2\% / \sqrt{E [\text{MeV}]}$  が得られたが、遅れて到達する光子の増加は、時間特性を悪化させる。バイアルでの発光時間測定では、 $n(t) = 0.69/4.0 \times \exp(-t[\text{ns}]/4.0) + 0.31/8.6 \times \exp(-t[\text{ns}]/8.6)$  が得られ、主要成分の時定数は 4 ns であった。カムランドでは、PMT の 1 ns 程度の時間分解能にもかかわらず、時定数は 10 ns 以上で、位置再構成の分解能は  $\sigma \sim 11.4 [\text{cm}] / \sqrt{E [\text{MeV}]}$  程度である。ま

た、 $\alpha$  線などのイオン化エネルギー密度が大きい粒子では、数十 ns 以上の遅い成分の割合が増加することを使って、小規模測定では  $\alpha$  線と  $\gamma$  線を 99% 以上の確度で分離できたが、カムランドではまだ明確に分離できておらず、再発光を減らすことは将来の改善項目のひとつと考えられる。

### 2.3 液体シンチレーターの純化

放射性不純物の低減は、ニュートリノ観測に不可欠である。超純水の作製には、逆浸透膜やイオン交換などの確立した手法がある。有機液体シンチレーターは油のようなもので、不純物であるイオンが油よりもずっと水に溶けやすいことを利用した純化が可能である。水と液体シンチレーターを混合すると不純物は水に移動し、分離した液体シンチレーターを回収することで、原理的には超純水より何桁も清浄な液体シンチレーターの作製が可能である。この液液抽出法で純化したカムランドの液体シンチレーター中に含まれる放射性不純物量は、重量比で  $^{238}\text{U} : 3.5 \times 10^{-18} \text{ g/g}$ ,  $^{232}\text{Th} : 5.2 \times 10^{-17} \text{ g/g}$  であった。これは通常物質と比べて 1 兆倍、SK の超純水より 100 倍もきれいであり、世界最高純度の観測装置といえる。ここまで少ない不純物量はカムランドでしか測定できず、完成後の測定ではじめて目標より 100 倍もきれいであることが判明した。現在は、さらなる純度を求め、イオン性以外のものにも効果のある蒸留を使った純化を始めようとしている。比較的容易に不純物を低減できる点は、有機液体シンチレーターのすぐれた特性のひとつである。

### 2.4 原子炉ニュートリノ

カムランドは 2002 年に実験を開始し、まず原子炉反ニュートリノ観測を行った。確認すべきは、太陽ニュートリノ問題にみられる電子ニュートリノ欠損が、有効距離 180 km で原子炉反電子ニュートリノでもみえるかである。太陽ニュートリノ問題を説明するモデルとしては、ニュートリノ振動が有力であった。これは、3 世代あるニュートリノが異なる質量固有状態の混合であるとき、距離とともにニュートリノの種類が変化・復元を繰り返すことで、ニュートリノ振動は質量の証拠にもなる。簡単のため 2 種類で考えると、 $(\nu_e, \nu_\mu)$  が異なる質量  $m_1, m_2$  ( $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2 \neq 0$ ) のニュートリノ ( $\nu_1, \nu_2$ ) の混合であるなら、混合角を  $\theta$  として、以下のように表現できる。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

すると、エネルギー  $E$  で生成された  $\nu_e$  が、真空中を距離  $L$  飛行後に  $\nu_e$  である確率は、



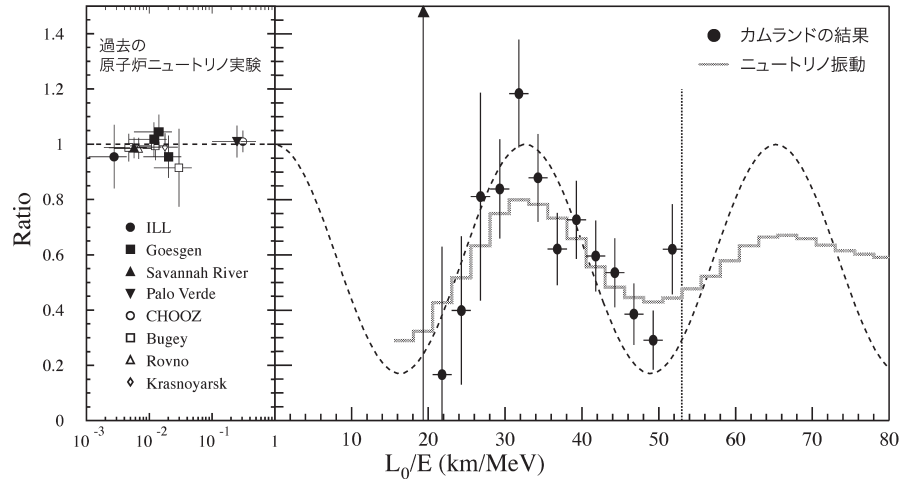


図2 原子炉ニュートリノ観測で得られたニュートリノ振動の様子。\$L\_0\$ は有効距離 180 km に固定、ヒストグラムは実際の原子炉分布を考慮したニュートリノ振動の最適値、破線は原子炉が 180 km の距離のみであると仮定した場合の様子。

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E [\text{MeV}]} \right) \quad (2)$$

と計算できる。ニュートリノと反ニュートリノが同じ混合なのかは興味深い研究対象であるが、一般には同じ混合と信じられており、原子炉反ニュートリノでも欠損があれば、太陽ニュートリノ問題を一気に解決できる可能性があった。

カムランドの原子炉反ニュートリノ観測は2編の論文にまとめられ、1編目は原子炉反ニュートリノ欠損の証拠<sup>1)</sup>、2編目はニュートリノ振動を明確に示すエネルギースペクトルの歪みの証拠<sup>2)</sup>を報告した。エネルギースペクトルの歪みは、式(2)に従って距離÷エネルギーとして変換すれば、距離に応じて変化・復元を繰り返す様子と読み替えられる。図2は距離を有効距離 180 km に固定し（距離÷エネルギー）を横軸に、（観測量÷振動がない場合の計算値）を縦軸にとったもので、過去の短距離実験は欠損がなく、カムランドでは欠損していたニュートリノが復元・欠損・復元を繰り返している様子がみてとれる。この観測により、太陽ニュートリノ欠損もニュートリノ振動が原因とわかり、30年以上続いた太陽ニュートリノ問題の解決とともに、道具として使えるまでにニュートリノの伝搬を理解できた。

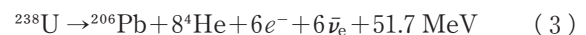
### 3. 地球反ニュートリノ

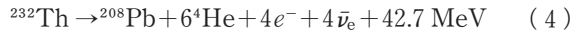
地球は、46億年前に隕石が集積して形成されたと考えられている。当初は重力エネルギーにより溶融しており、重い成分が沈降して核を形成し、現在では地震波観測で知

られるような固体内核・液体外核・マントル・地殻といった層構造になっている。地球がどのように発展して現在の姿になったのかは精力的に研究されているが、地球内部の組成は直接観測できないので、地球を形成したのと同種と思われる隕石の分析や、火山・マグマなどの噴出物の研究、実験室での高温高压実験などから、物理的・化学的に推定しているのが現状である。

地球の発展の歴史や現在のダイナミクス・組成を理解するうえで、地熱は特に重要である。地熱はマントル対流を駆動することにより、大陸移動や火山活動・地震といった生活に直結する現象ももたらす。この対流も、地球物理学的には一層対流と考えられるが、地球化学的には多層対流を支持するというように、確実な理解ではない。また、地磁気は太陽風や宇宙線から地上の生命を守る重要な役目を担っているが、これは、鉄を主成分とする電磁流体の外核が地熱によって対流することで維持されている。地球は44 TW程度の熱を放出していると計算されているが、限られた観測点から地球全体を評価するのは容易でなく、31 TWだという計算もある。他方、隕石分析や元素の揮発性の研究などに基づいたモデルでは、地球内部に含まれる放射性物質が発生する熱量は20 TW程度と見積もっており、放射性物質が地熱の主要因であることがわかる。また、もし放射性物質の分布に関連する情報を得ることができれば、同様の化学的親和性をもった元素の分布の理解にもつながる。

各放射性物質は、崩壊の過程で熱とともに反電子ニュートリノを放出する。





地球内部で生成されたニュートリノは容易に地表に到達するので、これを観測できれば、地球内部の放射性物質の量や分布に関係した情報を得られ、地球科学に対するインパクトは非常に大きなものとなる。ただし、上記の崩壊で放出される反ニュートリノの最大エネルギーはそれぞれ 3.27 MeV, 2.25 MeV, 1.31 MeV で、陽子による捕獲反応を使った場合は、反応閾値 1.8 MeV を超えないカリウムは将来の課題となる。これら地球内部の放射性物質からのニュートリノのことを、地球ニュートリノという。

ところで、地磁気の維持にはさらに熱生成が必要との指摘もあり、地球には予想以上の放射性物質が含まれるかもしれない。100 万年のスケールで繰り返される地磁気反転も理解されておらず、この説明のために熱生成をオン・オフする機構を提唱する研究者もいる。重いウランが沈降し臨界点を越えた時点で天然原子炉として核分裂の連鎖反応を起こし、燃え尽きたら次の沈降集積を待つということである。このモデルなら、ハワイなどの溶岩中に含まれる過剰な  $^3\text{He}$  も説明できると指摘されている。この奇抜なモデルも、原子炉同様に反電子ニュートリノを生成するので、観測による検証が可能である。

#### 4. カムランドでの地球ニュートリノ観測

カムランドは、原子炉ニュートリノ観測によるニュートリノ伝搬の理解に続き、ニュートリノ利用の実践として地球ニュートリノ観測に挑戦した。双方とも同種の反電子ニュートリノであるが、地球ニュートリノのほうが低エネルギーで、エネルギースペクトルによって統計的に区別が可能である。原子炉ニュートリノが 8 MeV 程度までなのに対して、地球ニュートリノは 3.27 MeV までである。そこで、地球ニュートリノの影響がない 3.4 MeV 以上でニュートリノ振動パラメータを決定し、そのパラメータから地球ニュートリノ領域での原子炉ニュートリノの影響を算出する。

低エネルギーではバックグラウンドが増加するため、信号選択条件をより厳しくし、液体シンチレーターの有効半径を小さくすることで、バックグラウンドを抑える。現在の基準では、原子炉ニュートリノ解析で有効半径 5.5 m・検出効率 89.8% のところ、地球ニュートリノ解析では有効半径 5 m・検出効率 68.7% としている。2002 年 4 月～2004 年 10 月までの有効時間 749 日のデータ解析<sup>3)</sup>では、

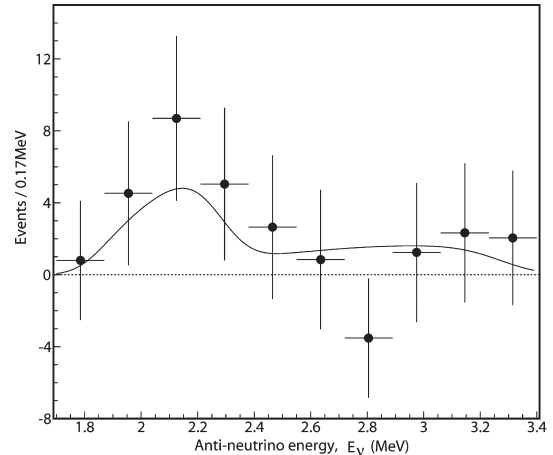


図3 地球ニュートリノスペクトル。データ点はバックグラウンド差し引き後のカムランドの観測結果、実線はモデルの予想する地球ニュートリノエネルギースペクトル。

152 事象が観測された。原子炉ニュートリノが最大のバックグラウンドで  $80.4 \pm 7.2$  事象、その他も含めた合計バックグラウンド数は  $127.4 \pm 13.3$  事象と評価された。統計誤差も考慮すると、差し引き  $25^{+18}_{-10}$  事象の地球ニュートリノが観測されたことになる。比較的安定である Th/U 比を 3.9 に固定すると、特徴的なエネルギースペクトルの情報を利用して統計誤差を若干改善することができ、その結果は  $28^{+18}_{-10}$  事象となった。統計検定では、95% 以上の信頼度で地球ニュートリノを観測したことになる。

単一実験の事象数測定だけから放射性物質量を逆算するには、分布の遠近で事象数が変化するので、分布を仮定したモデルとの比較をすることになる。同時にニュートリノ振動の考慮も必要である。周囲の岩石中の放射性物質量は既知であるし、表層部なら日本全域のデータもある。地殻厚や日本列島下の沈み込み帯形状なども地震波観測で知られていることから、これらの知識を統合したモデル計算 (hep-ph/0508049) をしたところ、U・Th から 16 TW の熱生成を得るこのモデルでは、19 の事象を予測した。図3はバックグラウンドを差し引いた観測結果と、モデルが予測するスペクトルを示しており、観測データとモデルが矛盾していないことがわかる。まだまだ誤差が大きく、分布の違いや地表の熱放出 44 TW 以上の熱生成があるかどうかなどを実質的に議論できないが、地球内部の情報を直接観測する新しい手段を与え、「ニュートリノ地球科学」を創出したことは非常に意義深いことである。

#### 5. 今後の展望

カムランドでの地球ニュートリノ観測を受けて、より地球ニュートリノ観測に適した場所（原子炉がない場所）で

の新しい実験が多く計画されるようになった。地球構造的に特徴のある多地点での観測は、地球内部を立体的に高精度で観測することとなり、ニュートリノ地球科学は加速度的に進展するものと期待される。

カムランドにおいても、さらなるバックグラウンドの低減、統計精度の向上に加えて、反ニュートリノの到来方向に感度をもつように液体シンチレーターを改良できないかと研究・開発を行っている。等方的に発光するシンチレーターではその発光パターンから粒子の運動方向を得られないが、陽子の  $\bar{\nu}_e$  捕獲で生成される陽電子と中性子のうち、中性子はニュートリノの進行方向に反跳し、陽電子の発生点と中性子の捕獲点を結ぶベクトルがニュートリノの進行方向を与える。この特性を生かすには、位置再構成の精度向上と、中性子捕獲で荷電粒子を放出する元素の導入が必要である。これには再発光の抑制とリチウムの導入 ( ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \alpha + {}^3\text{H}$ ) が有効と考えており、リチウム含有液体シンチレーターの開発を行っている。方向感度をもつシンチレーターなら、反ニュートリノ写真を撮ることもでき、素粒子研究やニュートリノ地球科学にとどまらず、原子炉の燃焼状態監視等にも役立つかもしれない。

研究対象としてのニュートリノが、道具として利用されはじめた実例として、地球反ニュートリノ観測を紹介した。カムランドは世界初の低エネルギー太陽ニュートリノの実時間観測も目指しており、この観測は、生命を育む太

陽を理解し監視するという意味で、ニュートリノ天文学の推進とともに非常に長期的な危機管理につながる。ニュートリノ研究はさらに多方面に波及し、カムランドもその発展に引き続き貢献できるものと期待している。これらの研究は、ニュートリノの標的となる有機液体シンチレーターが不純物量、透過率、高速応答性、コスト等の点ですぐれた特性をもっていることによって実現されたものであり、添加物による機能付加が容易であることは将来のさらなる発展・波及へとつながる。

カムランド実験は、日米中仏の国際共同研究であり、文部科学省および米国エネルギー省の補助により運転している。原子炉ニュートリノ解析には、国内電力会社の協力が不可欠であり、円滑な実験の運営には、神岡鉱山や国立情報学研究所の SuperSINET サービスなどが大きく貢献した。この場を借りて、改めて感謝の意を表す。

## 文 献

- 1) K. Eguchi *et al.* (KamLAND collaboration): "First results from KamLAND: Evidence for reactor antineutrino disappearance," *Phys. Rev. Lett.*, **90** (2003) 021802.
- 2) T. Araki *et al.* (KamLAND collaboration): "Measurement of neutrino oscillation with KamLAND: Evidence of spectral distortion," *Phys. Rev. Lett.*, **94** (2005) 081801.
- 3) T. Araki *et al.* (KamLAND collaboration): "Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND," *Nature*, **436** (2005) 499.

(2006年6月25日受理)