

**共同利用実施報告書(研究実績報告書)**  
(特定共同研究(B))

1. 課題番号            2014-B-17

2. 研究課題名 (和文、英文の両方をご記入ください)

和文：指向性を持つ小型反ニュートリノ検出器の開発とその素粒子地球物理への応用

英文：Development of small-size detector for anti-neutrino directionality and construction of “Neutrino Geoscience”

3. 研究代表者所属・氏名 東北大学ニュートリノ科学研究センター・井上邦雄

(地震研究所担当教員名) 田中宏幸

4. 参加者の詳細 (研究代表者を含む。必要に応じ行を追加すること)

氏名	所属・職名	参加内容
井上邦雄	東北大学ニュートリノ科学研究センター・教授	KamLAND 実験統括
白井淳平	東北大学ニュートリノ科学研究センター・准教授	KamLAND 実験運営
三井唯夫	東北大学ニュートリノ科学研究センター・准教授	光学系設計
古賀真之	東北大学ニュートリノ科学研究センター・准教授	KamLAND 実験現場運営
池田晴雄	東北大学ニュートリノ科学研究センター・助教	液体シンチレータ開発統括
清水格	東北大学ニュートリノ科学研究センター・助教	データ解析統括
石徹白晃治	東北大学ニュートリノ科学研究センター・助教	光学系統括
渡辺寛子	東北大学ニュートリノ科学研究センター・助教	小型検出器統括
石尾昌平	東北大学ニュートリノ科学研究センター・修士1年	光学シミュレーション
中島淳一	東北大学・教授	地球ニュートリノ計算モデリング
川勝均	東京大学・教授	地球ニュートリノ計算モデリング
竹内希	東京大学・准教授	地球ニュートリノ計算モデリング
角野浩史	東京大学・助教	地球ニュートリノ計算モデリング
武多昭道	東京大学・助教	多チャンネル読み出し回路開発
中川貴司	JAMSTEC・主任研究員	地球ニュートリノ計算モデリング
Fabio Mantovani	University of Ferrara	到来方向観測技術応用シミュレーション
Marica Baloncini	University of Ferrara	到来方向観測技術応用シミュレーション
Steve Dye	Hawaii Pacific University	地球ニュートリノ計算モデリング
John Learned	University of Hawaii	地球ニュートリノ計算モデリング
William McDonough	University of Maryland	地球ニュートリノ計算モデリング
榎本三四郎	University of Washington	地球ニュートリノ計算モデリング
Nikolai Tolich	University of Washington	地球ニュートリノ計算モデリング
Jason Detwiler	University of Washington	地球ニュートリノ計算モデリング
John Hernlund	東京工業大学	地球ニュートリノ計算モデリング

5. 研究計画の概要（800字以内でご記入ください。計画調書に記載した「研究計画」から変更がある場合、変更内容が分かるように記載してください。）

東北大学ニュートリノ科学研究センター(東北大学 RCNS)では、液体シンチレータ(Liquid Scintillator, LS)反ニュートリノ観測装置 KamLAND での観測により、地球内部放射性物質起源反ニュートリノ(地球ニュートリノ)の観測に世界に先駆けて成功し、「ニュートリノ地球物理」を牽引している。積極的なバックグラウンドの除去や、近年の稼働原子炉の減少による大幅な雑音低下によって更なる観測精度の向上が見込まれ、ニュートリノ観測という全く新しい独立した観測手法により地球物理における重要な知見を得ることへの期待が高まっている。本研究では、東北大学 RCNS において進められてきた、反ニュートリノ検出器の不可能を克服する新技術”反ニュートリノの到来方向観測”をタイムリーに実現するため、既に実装・開発実績を持つ東京大学地震研究所主導のミュオグラフィ観測技術を応用し、小型検出器の開発を目指す。

地球の理解という共通の目的を持ってはいるが、上記の地球ニュートリノ観測とミュオグラフィ、更に地球物理分野は個別に独自の発展を遂げている。従来、分野横断的に有効利用されるべき実験技術や観測量、全分野に共通な地球科学的興味や将来展望が機能的に共有されていないのが現状である。本研究を一つの発信元として国内外を問わず素粒子物理と地球物理の研究者から成るコミュニティを形成し、「素粒子地球物理の創成」という共通項の元に異分野間の積極的且つ継続した強化をはかる。

本研究では【1】指向性を持つ小型班ニュートリノ検出器の開発、【2】素粒子地球物理学創成に向けた異分野間の連携強化とコミュニティの形成を二本柱とし、地球理解という学際的分野の発展の流れに一石を投じたい。

## 6. 研究成果の概要 (図を含めて1~2頁で記入してください。)

キーワード (3-5程度) : 新観測技術、放射性物質分布、放射性熱源、地球ニュートリノ

### 【1】指向性を持つ小型反ニュートリノ検出器の開発

KamLAND の様な LS を用いた検出器は、地球ニュートリノ、原子炉ニュートリノといった低エネルギー領域の反ニュートリノに感度がある反面、その到来方向を観測出来ないという原理的不可能が存在する。特に地球ニュートリノ観測においては、到来方向情報を得ることで地殻とマントルの寄与の分離測定が実現し、より地球深部の放射性物質の分布を観測することができ、革新的発展が期待出来る。これまでに、①到来方向測定を可能にする Li 含有 LS の独自開発に成功し、更に②従来技術の光電子増倍管による測定では実現不可能な、発光位置の高精度測定を可能にするイメージング検出器の開発を進めて来た。これまでの成果を基盤にし、本研究によりコミュニティ間の実質的な協力体制を敷くことで、小型検出器の開発実現に向けた進展が得られた。以下に研究成果の概要を示す。

#### (1) ミラー系を用いたイメージング検出器の試作機の製作とその性能評価

開発目標である小型検出器の更に 1/2 サイズ (30cm 立方) の LS 容器を観測対象とした、図 1 に示す様なミラー系を設計・製作し、その反射率や位置分解能といった基本性能を評価した。LED ライトを用いた像の広がり測定により、位置分解能については概ね設計値を再現していることが確認できた。また、ミラーの自重による歪みが測定され、ミラーの治具の取り付け場所の工夫や厚さの最適化が必要であることが分かった。

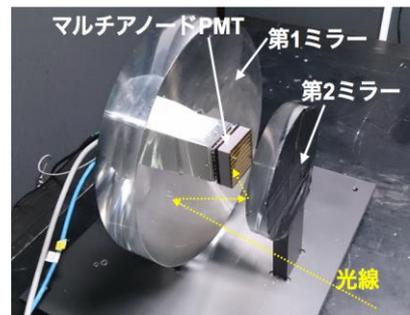


図 1: ミラー系の試作機

#### (2) レンズ系を用いたイメージング検出器の設計

上記(1)のミラー系は比較的多くの光量を取得出来る一方、高反射率の実現と奥行き方向にピントを合わせる事に難点がある。そこで、光量取得には難があるものの、高位置分解能を広い奥行き方向で実現出来るレンズ系についても設計を行った (図 2)。その結果、目標値である 4cm 以下の位置分解能に対して 1cm 以下のレンズ系の設計に成功し、2015 年度に試作機の製作・性能評価を行う。

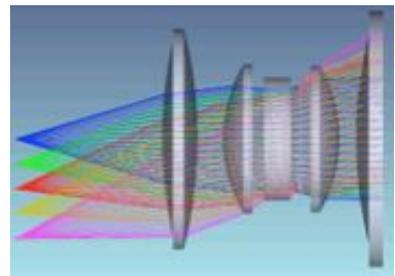


図 2: 設計したレンズ系

#### (3) 多チャンネル読み出しエレクトロニクスの技術共有

光学系で集光した光は高い位置分解能を得る為に、ピクセル化された画像として読み出される。現在検出器として 256 チャンネルのマルチアノード PMT の使用を予定しており、多チャンネル読み出しが可能なエレクトロニクスが不可欠である。東京大学地震研究所主導で進められているミュオグラフィではすでに開発実績があり、その技術を共有することで、上記試作機の性能評価を短期間で進められた。小型検出器への応用に向けて更なる多チャンネル化が見込まれる事から、データ取得系の構築技術等も共有していく。

## 研究成果の概要（続き）

### 【2】素粒子地球物理学創成に向けた異分野間の連携強化とコミュニティの形成

KamLAND では LS の純化と、主要なバックグラウンドの要因であった国内稼働原子炉数の低下により、地球ニュートリノ観測精度の向上が見込まれている。一方で、多数存在する地球の内部構造モデルの分離精度を向上させるためには、観測精度の向上だけではなく、地球ニュートリノ流量計算モデルの高信頼度・高制度化も必要不可欠である。2005 年の初観測時に構築された、世界の平均的な放射性物質と地殻の厚さを適用した計算モデルを現在でも用いており、KamLAND における地球ニュートリノの半分以上を占める日本島弧の蓄積された知見が有効に用いられていない。本研究では、高信頼度・高精度地球ニュートリノ計算モデルの構築に向け、日本国内におけるコミュニティ形成の推進と、多数得ることが出来た海外からの研究者と共に日本発の観測量を世界に向けて発信し、「素粒子地球物理」創成に向けて国内外を問わない連携強化を行った。以下に研究成果の概要を示す。

#### (1) 「素粒子地球物理」創成に向けたコミュニティの確立

2014 年 5 月に開かれた日本地球惑星連合大会において「Particle Geoscience」という国際ユニオンセッションを企画し、日本の研究機関に加えて米国、欧州からの発表者の参加を得て、最新結果や将来展望を共有・発信した。

#### (2) 日本近傍地殻の地震波トモグラフィと岩層分析を用いた地球ニュートリノ計算モデルの高精度化に向けた要件の明確化・体系化

2015 年 1 月に「International Workshop on KamLAND Geoscience」（東京）を 2 日間に渡って開催し、本研究の参加者を主要メンバーとしたワーキンググループを組織した。議論に十分な時間を取り、互いの分野の相互理解を深め、具体的な計画立案を行った。第一段階として日本島弧の蓄積された知見を用いた地球ニュートリノ計算モデルの構築に向けて、具体的な手法の立案や使用するデータの吟味を行い、その後も月一回のペースで議論の場を持ち、着実に進められている。

【1】と【2】をつなぐ成果として、論文発表 ”<sup>6</sup>Li-loaded directionally sensitive anti-neutrino detector for possible geo-neutrino-graphic imaging applications” (Nature Scientific Report, 4708 (2014)) が挙げられる。【1】の到来方向観測技術とミュオグラフィ解析技術を融合した計算機シミュレーションを行い、地球内部を透視する地球ニュートリノグラフィへの適用可能性を考察した。本技術を使えば、破局噴火を起こす様な巨大マグマだまり、地球形成過程で局在化したコア・マントル境界の巨大不均質構造等の直接観測を行える可能性を示すことが出来た。

7. 研究実績（論文タイトル、雑誌・学会・セミナー等の名称、謝辞への記載の有無）

(1) 査読付き論文

H. K. M. Tanaka and H. Watanabe,  $^6\text{Li}$ -loaded directionally sensitive anti-neutrino detector for possible geo-neutrinographic imaging applications, Nature Scientific Report 4708 (2014)

<http://www.nature.com/srep/2014/140424/srep04708/full/srep04708.html>

(2) 国際ワークショップ主催

- International Workshop on KamLAND Geoscience, Tokyo, Japan, January 15-16, 2015

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamGeo/Home.html>