

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2015～2019

課題番号：15H05833

研究課題名(和文)ニュートリノ観測から制約する核-マントルの化学組成

研究課題名(英文)Core-mantle chemical composition restricted by neutrino observations

研究代表者

田中 宏幸(Tanaka, Hiroyuki)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：20503858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 83,900,000円

研究成果の概要(和文)：第一に、地球ニュートリノ流量モデリング法を地球科学的アプローチから見直すことにより、地震波トモグラフィのデータが得られればほぼ自動的にニュートリノフラックスを計算する方法が開発され、今後、世界的に爆発的な蓄積量増加が期待される地球ニュートリノ観測データに対応できる方法論を確立した。第二に、地球ニュートリノデータの安定取得方法論を確立した。第三に、到来方向検知型検出器の原理検証を模擬粒子を用いて行い、将来の地球ニュートリノイメージングに向けた技術基盤とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国が巨大反電子ニュートリノ検出器(KamLAND)を用いて、地球内部放射性元素起源のニュートリノ(地球ニュートリノ)の検出に、世界に先駆けて成功してから15年が経ち、データ蓄積量が地球深部における放射性元素の直接観測が可能レベルに達している。しかしながら、マントル内の主要な熱源である放射性元素の種類と量は未だに分かっておらず、核-マントルの熱進化の理解が進んでいない。本研究では地球ニュートリノ流量モデリング法を地球科学的アプローチから見直し、マントル中のU、Th濃度、さらには放射性熱量を決定するための方法論を確立し、長期的に世界をリードする基盤を形成した。

研究成果の概要(英文)：Firstly, the geo-neutrino flux modeling was reviewed and improved from the point of view of earth sciences. As a consequence, the computational technique to automatically derive the geo-neutrino flux from the seismic tomography data was developed, and the methodology to model the geo-neutrino data that are expected to be accumulated further in the near future, was established. Secondly, the stable geo-neutrino data taking method was developed. Thirdly, the proof of principle experiments of the directionally-sensitive detector were conducted to establish a base technology towards near-future geo-neutrino imaging of the Earth.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：地球ニュートリノ コア マントル

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国が巨大反電子ニュートリノ検出器(KamLAND)を用いて、地球内部放射性元素起源のニュートリノ(地球ニュートリノ)の検出に、世界に先駆けて成功してから15年が経ち、データ蓄積量が地球深部における放射性元素の直接観測が可能なレベルに達している。しかしながら、マントル内の主要な熱源である放射性元素の種類と量は未だに分かっておらず、核-マントルの熱進化の理解が進んでいない。また、現時点では、反電子ニュートリノの到来方向を知る方法がないために、地球ニュートリノを用いた地球内部イメージングができていない。本研究ではKamLANDデータについての理解を深めると同時に地球ニュートリノ流量モデリング法を地球科学的アプローチから見直し、マントル中のU、Th濃度、さらには放射性熱量を決定するための方法論を確立する。また、革新的新技術である到来方向検知型ニュートリノ検出器の開発を推進し、長期的に世界をリードする基盤を形成する。

2. 研究の目的

KamLAND近傍の地球ニュートリノ流量モデリングは2005年に構築されたが、地球ニュートリノ流量のうち約70%を占める地殻部分の見積もりは世界の平均的な地殻構造と放射性元素濃度が用いられており、我が国における地球科学の知見がいかされていない。我が国には、他国には見られない膨大な地震波データがあり、また地震観測井等を利用した高密度の地殻熱流量測定も実施されている。3次元の地震波度構造情報、熱流量データの整理と解析による地下温度構造モデリング、日本国内で産出される岩石試料の分析結果を組み合わせ、島弧地殻内のウラン、トリウムを3次元的に分布を精度良く求めることによって、地球ニュートリノ流量モデリングの高精度化・高信頼度化が実現できる。本年度の研究では火山岩の化学分析結果を組み合わせ、主要元素と微量元素組成の間の相関関係を見出し、トモグラフィから得られる地殻浅部構造の情報及び、岩石の地震波速度を活用することで、日本島弧地殻の岩石組成モデルを構築することで、新たな地球ニュートリノ流量モデリング技術の開発を完成させ、これをKamLANDデータに適用することで、マントルに含まれる放射性元素(ウラン、トリウム)濃度測定を世界に先駆けて行うことを目的とする。一方、地球の高解像度3次元マッピングを将来可能とする検出器については、これまでに、リチウム含有液体シンチレーターと高位置分解能イメージング検出器の開発結果を合わせることで地球ニュートリノの到来方向が検知できること、その効果が示されている。保有するリチウム化合物を用いることでプロトタイプ検出器を作成し、中性子線源による地球ニュートリノ飛跡決定のデモンストレーションを行い、革新的観測技術による到来方向検知精度を定量化することで、検出器デザインを完成させることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、以下の3つを実施する。(A)モデルに依存しないマントル中のウラン、トリウム濃度の決定方法の確立。地表で観測される地球ニュートリノ流量は地殻とマントル起源のものが混ざり合ったものであるため、日本列島の地殻を構成する岩石とその組成を明らかにし、地殻に由来するKamLAND近傍の地球ニュートリノ流量をモデルバイアスなく決定する方法を開発することで、マントル起源の地球ニュートリノ流量を推定する。(B)原子炉の停止という地球ニュートリノ観測にとって好条件のデータの安定取得の為にKamLANDを安定的に稼働し、そのデータを最大限に活かすために、地球ニュートリノ観測の背景ノイズの理解、検出器由来の系統誤差の低減を行う。また、近年中韓仏を中心として進められている原子炉ニュートリノ観測実験の結果をもとに、KamLANDでの原子炉ニュートリノスペクトルの予測精度を高める。更に長期的展望も視野に入れ、(C)方向検知型地球ニュートリノ検出器の試作器開発を並行して行い、地球深部のウラン、トリウム分布のイメージングの観測精度の見積もりと実機搭載に向けた検出器のデザインを行う。

4. 研究成果

(A)本研究により得られた結果を図1に示す。地殻深部・上部マントル由来の岩石試料の化学分析結果を日本列島の地震波トモグラフィの結果にインコーポレートし、リソロジーに最大の相関を仮定することで、モデルバイアスフリーなマントル由来のニュートリノフラックスの誤差が見積もられた[1]。(B)PMTのタイミング再構成や補正方法の見直しによるエネルギー再構成精度の向上、バックグラウンド見積もり精度の向上、原子炉ニュートリノスペクトル見積もりの高精度化による地球ニュートリノフラックス観測不定性の低減(17%(2016年)15.6%)を行い、その結果、放射熱(マントル+地殻, U+Th)、マントル由来のフラックスはそれぞれ 12.4 ± 4.9 TW、 $0.67 + 0.63 / - 0.64 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ と見積もられ、HighQモデルを2以上で排除することが可能となった(2019 Preliminary) [2]。(C)図2に示すように、一方向からの中性子(ニュートリノを模した粒子)のイメージングはシミュレーションと同等の性能を示しており、この成果を3次元へと展開することで、中性子の到来方向が検知できるようになることが期待される。

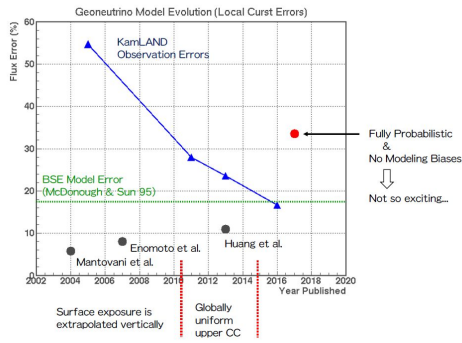


図 1：本研究で見積もられたマントル由来のニュートリノフラックスの誤差。

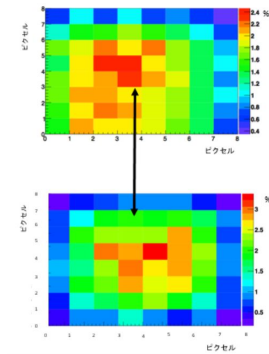


図 2：本研究でニュートリノ模擬粒子（中性子）のイメージング（上：観測、下：シミュレーション）。

結論として、第一に、地球ニュートリノ流量モデリング法を地球科学的アプローチから見直すことにより、地震波トモグラフィのデータが得られればほぼ自動的にニュートリノフラックスを計算する方法が開発され、今後、世界的に爆発的な蓄積量増加が期待される地球ニュートリノ観測データに対応できる方法論を確立した。第二に、地球ニュートリノデータの安定取得方法論を確立した。第三に、到来方向検知型検出器の原理検証を模擬粒子を用いて行い、将来の地球ニュートリノイメージングに向けた技術基盤とした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 N. Takeuchi, K. Ueki, T. Iizuka, J. Nagao, A. Tanaka, S. Enomoto, Y. Shirahata, H. Watanabe, M. Yamano, H. K. M. Tanaka	4. 巻 288
2. 論文標題 Stochastic modeling of 3-D compositional distribution in the crust with Bayesian inference and application to geoneutrino observation in Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of the Earth and Planetary Interiors	6. 最初と最後の頁 37-57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.01.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Liu F.L., Liu C.H., Itano K., Iizuka T., Cai J. and Wang F.	4. 巻 300
2. 論文標題 Geochemistry, U-Pb dating, and Lu-Hf isotopes of zircon and monazite of porphyritic granites within the Jiao-Liao-Ji orogenic belt: Implications for petrogenesis and tectonic setting.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Precambrian Research	6. 最初と最後の頁 78-106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precamres.2017.08.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 M G Aartsen, K. Hoshina, A. Taketa, H.K.M. Tanaka et al.	4. 巻 44
2. 論文標題 PINGU: a vision for neutrino and particle physics at the South Pole	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/44/5/054006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Itano K. & Iizuka T.	4. 巻 32
2. 論文標題 Unraveling the mechanism and impact of oxide production in LA-ICP-MS by comprehensive analysis of REE-Th-U phosphates.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Analytical Atomic Spectrometry	6. 最初と最後の頁 2003-2010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2017.11.033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 田中宏幸	4. 巻 125
2. 論文標題 ニュートリノを用いた地球内部のイメージング	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 地学雑誌	6. 最初と最後の頁 647-659
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.125.647	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iizuka T., Yamaguchi T., Itano K., Hibiya Y. & Suzuki K	4. 巻 274-275
2. 論文標題 What Hf isotope isotopes in zircon tell us about crust-mantle evolution	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 304-327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2017.01.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kenta Ueki, Hikaru Iwamori	4. 巻 17
2. 論文標題 Density and seismic velocity of hydrous melts at crustal and upper mantle conditions	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Geochem. Geophys. Geosyst.	6. 最初と最後の頁 1799-1814
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2015GC006242	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hikaru Iwamori, Kenta Yoshida, Hitomi Nakamura, Tatsu Kuwatani, Morihisa Hamada, Satoru Haraguchi, Kenta Ueki,	4. 巻 18
2. 論文標題 Classification of geochemical data based on multivariate statistical analyses: Complementary roles of cluster, principal component, and independent component analyses	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geochem. Geophys. Geosyst.	6. 最初と最後の頁 994-1012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2016GC006663	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 H. Tanaka
2. 発表標題 Restriction of the Core-Mantle Chemical Composition with Neutrino Observations
3. 学会等名 Joint symposium of Misasa 2019 & CMC Origin, Evolution & Dynamics of the Earth & Planetary Interiors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Yamano, H. Hamamoto, A. Tanaka, S. Goto, T. Matsumoto
2. 発表標題 Re-evaluation of surface heat flow data in Japan for better estimation of the temperature distribution in the crust
3. 学会等名 Joint symposium of Misasa 2019 & CMC Origin, Evolution & Dynamics of the Earth & Planetary Interiors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Watanabe
2. 発表標題 Development of New Technology for Geo-neutrino Directional Measurement
3. 学会等名 Joint symposium of Misasa 2019 & CMC Origin, Evolution & Dynamics of the Earth & Planetary Interiors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎本三四郎
2. 発表標題 地球ニュートリノ研究の現状と展望
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺寛子
2. 発表標題 Geo-neutrino Measurement with KamLAND
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Tanaka, M. Yamano
2. 発表標題 A review of thermal state of the shallow part of the Earth's lithosphere: What we know and do not yet know
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺寛子
2. 発表標題 Towards "Neutrino Geoscience" with Geo-neutrino Measurements
3. 学会等名 日本地球惑星連合2016年大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hamamoto H., M. Yamano, S. Goto, and A. Miyakoshi
2. 発表標題 Reconstruction of the thermal environment evolution from subsurface temperature distribution in and around Bangkok and Tokyo
3. 学会等名 AOGS 13th Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Ueki, K., Iwamori, H.
2. 発表標題 Effects of Water on Density and Seismic Velocity of Hydrous Melts Under crustal and Upper Mantle Conditions
3. 学会等名 Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 上木賢太, 中村仁美, 岩森光
2. 発表標題 マントル組成の東西半球構造と地球ニュートリノの関係性
3. 学会等名 地球惑星科学関連学会連合大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三井 唯夫 (Mitsui Tadao) (20283864)	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授 (11301)	
研究分担者	上木 賢太 (Ueki Kenta) (40646353)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門 (火山・地球内部研究センター)・技術研究員 (82706)	
研究分担者	山野 誠 (Yamano Makoto) (60191368)	東京大学・地震研究所・教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	飯塚 毅 (Iizuka Tsuyoshi) (70614569)	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授 (12601)	
研究分担者	渡辺 寛子 (Watanabe Hiroko) (70633527)	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教 (11301)	
研究分担者	榎本 三四郎 (Enomoto Sanshiro) (90400225)	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・客員科学的研究員 (12601)	