

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：10105

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20916

研究課題名（和文）ニュートリノ観測と火山の水蒸気測定で解き明かす海洋の終焉

研究課題名（英文）Unraveling the end of the ocean by observing neutrinos and measuring volcanic water vapor

研究代表者

丸藤 祐仁（Gando, Yoshihito）

帯広畜産大学・畜産学部・准教授

研究者番号：60396421

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：カムランド実験による地球ニュートリノの観測から、地球内部は徐々に冷えていることが示された。これにより、地熱によって成り立っている地中と地表の水循環が失われ、地球深部に水が閉じ込められ、いずれ地球上の海洋は終焉を迎えると考えられる。将来海洋が消失するのか、消失するのであればいつ消失するのかを予測する手法を確立するために、地球ニュートリノ観測の高精度化を進め、地熱の要素の一部であるウラン・トリウム崩壊熱の分離測定をおこなった。また、火山によって地中から地表へ戻ってくる水分量の測定のための測定技術の開発および測定方法の確立を目指した開発を進めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球ニュートリノ観測は、地球内部の化学組成を調査し、地熱の起源を探る手法として確立され、地球科学者と共同で地殻やマントルなど地球内部のテーマについて研究が進んできた。その一方、地表のテーマについては本格的に研究が進められてきておらず、地球内部の熱測定から地表の活動である海洋についての研究に拡張するという点で学術的意義を持つ。また、地表から海が無くなるという事は、地表から生存圏が消失することを意味する。遠い将来のことであるものの、限りある地球環境を意識し、我々は将来どのように生存していけばよいのか考えるきっかけになるという意味において社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：Observations of geo-neutrinos from the KamLAND experiment indicate that the Earth's interior is gradually cooling. As a result, the water cycle between the earth's interior and surface will be lost, water will be trapped in the earth's depths, and the earth's oceans will eventually disappear.

In order to establish a method for predicting whether the ocean will disappear in the future, and if so, when it will disappear, we will improve the accuracy of geoneutrino observations and investigate the decay heat of uranium and thorium, which is a component of geothermal heat. In addition, we are developing measurement techniques and methods for measuring the amount of water returned from the ground to the surface due to volcanic eruptions.

研究分野：数物系科学

キーワード：ニュートリノ 火山

1. 研究開始当初の背景

カムランド実験による地球内部ウラン・トリウム放射性崩壊起源のニュートリノ観測から、地熱の半分は地球形成時に蓄えられた原始の熱であり、地球内部は徐々に冷えていることが示された。この地熱が関係する地球活動の一つとして水循環が挙げられるが、海洋プレートに含まれている水は大陸プレートへ沈み込む過程で地熱によって加熱され、マグマの一部として地表に戻ってくることが知られている。この水循環の能力は地熱の減少によって徐々に失われ、地球深部に水が閉じ込められていくことによりいずれ地球上の海洋は終焉を迎えると考えられる。しかし、地熱減少量の変化、および地上へ戻ってくる水の量が正確に見積もられていないため、海洋消失の時期は6億年後から10億年以上先とも言われ、この予測が確立されているとは言い難い。

2. 研究の目的

将来海洋が消失するのか、消失するのであればいつ消失するのかを予測する手法を確立するために、

1. 現在の地熱生成量の正確な見積りとその熱源の種類を同定を行い、将来の地熱生成量の減少を予測するためのデータ取得
2. 現在火山によって地中から地表へ戻ってくる水分量の測定、そのための測定技術の開発および測定方法の確立

を行う。

3. 研究の方法

長期的な地熱生成量の変化を予測するには、これまでのニュートリノ観測を高精度化し、放射性核種ごとの熱生成量を見積もり、それぞれの半減期と組み合わせる必要がある。特に主要な熱源と考えられているウラン238(半減期:45億年)とトリウム232(半減期:141億年)起源ニュートリノの分離測定を行い、長期的な地熱減少スピードを求めるための情報を取得する。

地球ニュートリノ観測の高精度化のためには、観測データ中最大のノイズ事象である原子炉ニュートリノの見積りの正確さが要求される。現在日本各地の稼働原子炉数は少ないものの、稼働中のうち、検出器から最も近い若狭湾の原子炉は一部MOX燃料(ウラン・プルトニウム混合燃料)が装荷されている。ウラン燃料に対してプルトニウム燃料はニュートリノ生成数が少ないため、この影響がどの程度かを見積る。

カムランド実験では、国内の原子炉運転情報は各電力会社より提供され、韓国の原子炉運転情報はリアルタイムの公開情報を元にしている。その一方で、その他の国の運転データについては影響が小さいため、IAEAの過去の報告書を参考に平均値を求めて用いてきた。東日本大震災以降、全体の原子炉ニュートリノに対する日本・韓国以外の原子炉ニュートリノの寄与が相対的に大きくなってきているため、この数値を最新のIAEAの報告書を元にアップデートし、より正確な数値を求める。

これらを元に地球ニュートリノ観測に対する解析の高精度化を実現する。

火山の噴煙中の水蒸気を観測するために、電波天文学技術を応用したマイクロ波放射検出器を用いて火山測定用に最適化する。この検出器を用いて、地熱発電、原子力発電、工場の排気など、大量の水蒸気を放出する環境を用いて絶対値校正を行い測定精度を確認するとともに、これまで噴煙中の水蒸気測定で用いられてきたカメラ撮影を用いた手法と相互参照することで、精度を向上させた観測手法を開発する。この手法を確立後、継続的に噴火を繰り返している桜島を用いた実証観測を行う。

4. 研究成果

図1は原子炉内で核分裂する主要各種ごとのニュートリノのエネルギースペクトルを表している。このスペクトルおよび原子炉内の核分裂頻度のデータより、MOX燃料の装荷が25%~33%程度であった場合、ニュートリノ生成数に対して数%の減少になることが判明した。このニュートリノ流量変化の見積りを元に、実際のカムランド検出器での観測への影響を見積もった。MOX燃料を使用している原子炉の情報、検出器と原子炉の距離、その他稼働状況など時間変化の情報を加味したところ、カムランドでのデータ取得の全期間に対しては統計誤差より有意に小さい影響に収まり、無視できることが判明した。また、東日本大震災以降に発生した低原子炉稼働期間については、若狭湾に位置する原子炉に装荷されたMOX燃料の影響が相対的に大きくなるものの、地球ニュートリノエネルギー領域では0.5%程度の変

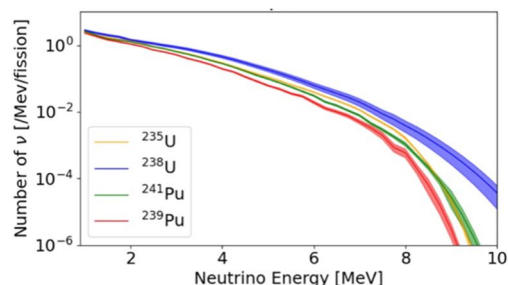


図1 核種ごとのニュートリノスペクトル

化であることが判明した。

海外原子炉の寄与について、IAEA の月毎の電気出力の報告書を元に日本・韓国以外の海外原子炉のニュートリノ生成数およびカムランドに到達する流量の時間変化の見積りを行った。カムランド全期間に対する流量変化は約 1%の増加、低原子炉稼働期間については 7–9%の増加と判明した。

上記のデータの改善をおこなった上で地球ニュートリノの解析を進めたところ、地球内部のウランの崩壊に由来するニュートリノとトリウムの崩壊に由来するニュートリノの分離測定に成功した(図2)。また、マントルにおけるウランとトリウムの均質な分布を仮定すると、それぞれの放射熱はウラン: $3.3^{+3.2}_{-0.8}$ TW, トリウム: $12.1^{+8.3}_{-8.6}$ TW となった。

今後モデルによる熱生成量の変化を確認し、ウラン・トリウム起源の熱生成量の変化を予測する計画を立てている。

火山の水蒸気測定のために既存のマイクロ波検出器を用いることを計画していたが、検出器の設置場所やその環境を考慮したところ、数 km 離れた場所から観測でき、噴煙の大きさ程度の範囲を区別することができる空間分解能をもつ検出器が必要になることが判明した。そのため、降雨による激甚災害予測のためのマイクロ波放射検出器を開発している研究者、および GNSS(英語名:GPS)を用いて水蒸気観測を目指している研究者と情報交換および共同研究を始めた。マイクロ波放射計へのパラボナアンテナの実装による指向性付与、および冷却することによるノイズの低減と感度向上が見込まれる検出器の開発を進めているが、Covid-19 による開発の遅れおよび実証観測を行う施設の立入不許可の長期化により、本研究期間内に火山の噴煙観測を行うことが叶わなかった。引き続き開発および実証観測計画は進め、数年以内に噴煙の水蒸気観測を行う予定となっている。

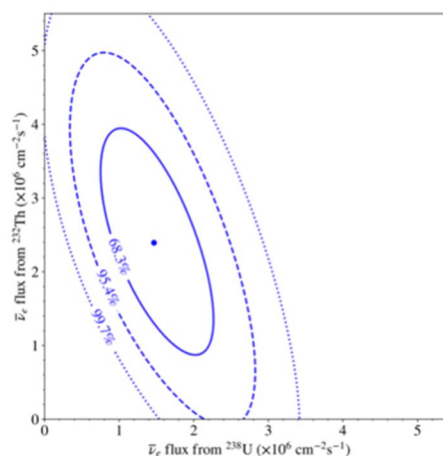


図2 ウラン・トリウムに起因するニュートリノ流量

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S. Abe et al., The KamLAND Collaboration	4. 巻 49
2. 論文標題 Abundances of Uranium and Thorium Elements in Earth Estimated by Geoneutrino Spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2022GL099566-
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2022GL099566	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 該当する

1. 著者名 Y. Gando et al., The KamLAND-Zen Collaboration	4. 巻 16
2. 論文標題 The nylon balloon for xenon loaded liquid scintillator in KamLAND-Zen 800 neutrinoless double-beta decay search experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P08023-1 - 22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/16/08/P08023	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

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 丸藤祐仁
2. 発表標題 ニュートリノ観測と火山の水蒸気測定で予測する海洋の寿命 概要説明 -
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川田七海、他KamLANDコラボレーション
2. 発表標題 KamLANDによる地球ニュートリノ観測の現状
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川田七海、他KamLANDコラボレーション
2. 発表標題 KamLANDによる地球ニュートリノ観測結果の報告
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
	Lawrence Berkeley National Laboratory	Massachusetts Institute of Technology	University of Washington	他6機関
米国				
オランダ	Nikhef and the University of Amsterdam			