

平成26年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価用〕

◆記入に当たっては、「平成26年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書等記入要領」を参照してください。

平成26年 4月 25日現在

研究代表者 氏名	鈴木 厚人	所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時)	東北大学・名誉教授
研究課題名	原子炉起源、地球起源反電子ニュートリノと太陽起源電子ニュートリノの高精度精密測定		
課題番号	16002002		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 鈴木 厚人（東北大学・名誉教授）		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成16年度	329,000 千円
平成17年度	159,800 千円
平成18年度	84,600 千円
平成19年度	46,300 千円
平成20年度	28,200 千円
総計	647,900 千円

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

「原子炉起源反電子ニュートリノ」

研究期間内に、原子炉起源反ニュートリノが振動していることの直接的な証拠 (No. 1) を報告し、引き続き高精度化によって質量 2 乗差を 2.8% の精度で測定することに成功 (No. 2) していた。

その後も、東日本大震災による原子炉停止期間も含めてデータ取得を継続し、さらなる高精度化とバックグラウンドの検証を行った。研究終了後に発表した論文では、No. 1 の論文によって 3 世代の混合があることを始めて示唆し、論文 No. 8 では世界最高精度となる 2.4% の精度で 1-2 世代間のニュートリノ質量 2 乗差を決定するとともに、原子炉の運転と関連するニュートリノフラックスを観測し、バックグラウンドの検証も実現した。これらの研究展開は、ニュートリノ研究の近年の大きな進展の基盤であり、加速器を使った長基線ニュートリノ実験などのニュートリノ研究の進展に大きく寄与している。

「地球起源反電子ニュートリノ」

研究期間内には、論文 No. 3 によって地球起源反電子ニュートリノを観測できることを実証し、ニュートリノ地球物理学を創出した。

その後は、蒸留による高度な純化を行い、放射性不純物起源のバックグラウンドを大幅に低減するとともに、原子炉が停止し地球起源反電子ニュートリノ観測と競合する原子炉ニュートリノが極端に少ない期間の観測によって、測定精度を大幅に改善した。論文 No. 5 では、地球ニュートリノ観測によって放射性地熱生成が地球表面での地熱流の半分程度しかないことを示し、地球科学の基礎的な知見である地球が冷え続けていることを初めて実験的に証明することに成功した。論文 No. 8 では、さらに踏み込んだ地球モデルの選別が可能となり、マントルの一層対流を支持する Geodynamical model を 89% の信頼度で排除することに成功し、ニュートリノ地球物理学を力強く推進している。地殻からの寄与を精度良く見積もることで、さらに元素比に基づいた Geochemical model と同位体比に基づいた Cosmochemical model の識別が視野に入ってきたことで、素粒子研究と地球物理研究が融合する素粒子地球物理学が大いに活気づいている。

「太陽起源電子ニュートリノ」

研究期間内に行った純化および全位置での較正 (期間後 No. 9) による系統誤差の縮小により、太陽ニュートリノの内、高エネルギー成分の ^8B 太陽ニュートリノの観測を実現した。また、低エネルギーの ^7Be 太陽ニュートリノに関しては、不安定なバックグラウンド状況に対処するための高度な解析を構築していき、これらの研究によって 4 名が博士号を取得し、現在雑誌への論文投稿を準備中である。

「その他」

極低放射能かつ巨大な観測装置によって、原子炉反ニュートリノを上回るエネルギー領域においても世界でも厳しい反電子ニュートリノフラックスの制限を与えている (No. 10) ほか、宇宙線ミューオンが引き起こす原子核破砕反応を網羅的に観測 (No. 4) し、世界の液体シンチレータを用いた地下実験装置を設計する上で必須の情報を提供している。

さらに、ニュートリノ観測と並行して、既存の環境を最大限に活用することで ^{136}Xe を使ったニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索を、迅速かつ比較的低コストで開始した。論文 No. 2 では、それまで 5 倍以上の食い違いがあったニュートリノを伴う二重ベータ崩壊の寿命に対して決着をつけるとともに、当時世界最高感度でのニュートリノレス二重ベータ崩壊に対する制限を与えることに成功した。また、論文 No. 6 では、理論上の仮説であるマヨロンに対して直接探索において世界でも最も厳しい制限を与えることに成功した。論文 No. 3 では、現状で世界最高感度での探索を実現しており、競合実験の結果と組み合わせることで、当面の目標であった ^{76}Ge を用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊発見の主張を否定することに成功した。同時に、主要なバックグラウンドを特定し、キセノンの脱気によるオン・オフ測定が可能なことも実証した。

以上のように、研究期間終了後も個々の研究がさらに深化しているだけでなく、さらに新たな研究展開も生み出している。

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

ニュートリノ研究に関する貢献：

論文発表

- (1) A. Suzuki and M. Koshiba: History of Neutrino Telescope/Astronomy, Exp. Astron. 25, 209 (2009).
- (2) A. Suzuki, KamLAND and T2K : Progress in Particle and Nuclear Physics 65, 1 (2010) .
- (3) T. Kajita, M. Koshiba and A. Suzuki : On the Origin of the Kamiokande Experiment and Neutrino Astrophysics, Eur. Phys. J. H 37, 33 (2012).

国際会議発表

1. Majorana Neutrino Searched at ILC: International Workshop on Double Beta-Decay and Neutrinos, Osaka, November 14-17, 2011.
2. Neutrino Physics: Perspectives, KamLAND and International Linear Collider (ILC), Neutrino Oscillation Workshop, Otranto, Italy, Sep. 9-16, 2012.
3. History of Geo-Neutrino Research and Dream: Neutrino Geoscience 2013, Takayama, Japan, 21-23, March, 2013.

加速器科学の推進に貢献：

1. High Energy Physics Plans in Asia: HCP 2009, Evian, November 20, 2009.
2. Big Science and International Collaboration: Symposium on the 10th Anniversary of KRCFST, Seoul, October 7, 2009.
3. Scientific/Technological Applications of Linacs: XXV Linear Accelerator Conference, LINAC10, Tsukuba, September 12-17, 2010.
4. Status and Future Plans of KEK: Neutrino Telescope, Venice, March 17, 2011.
5. Multinational Labs: How the World Comes Together to Build Global Scientific Tools: Advancing Science Serving Society Annual Meeting (AAAS), Vancouver, February 16-20, Canada.
6. ICFA Point of View of Situation and Plans for Period 2011-2012-Post for ILC: International Workshop on Future Linear Collider (LCWS11), Granada, Spain, September 26-30, 2011.
7. Japanese Roadmap: International Workshop on Future Linear Collider (LCWS11), Granada, Spain, September 26-30, 2011.
8. An Outlook from Asia: European Physics Symposium, Grenoble, July 27, 2011.
9. Laser/Plasma Accelerators: Aspiring from High Energy Physics Field, International Symposium, 日本学術会議, Tokyo, February, 2011.
10. High Energy Accelerators: Present & Future: IBS (Institute for Basic Science) Inauguration Ceremony, Daejeon, Korea, May 16, 2012.
11. Particle Physics Projects in Japan: Hadron Collider Physics Symposium 2012, Kyoto, November 12-16, 2012.
12. Update on the Japanese Strategy: European Linear Collider Workshop, ECFA LC2013, Hamburg, May 27-31, 2013.
13. The Japan Effort for HL-LHC: 3rd Joint Annual Meeting of HL-LHC, Daresbury (UK), November 11-15, 2013.
14. Colored ILC: International Workshop on Future Linear Collider, LCWS13, Tokyo, November 11-15, 2013.
15. Strategic HEP Program in Japan: KMI International Symposium 2013, Nagoya.
16. ILC Related Activities in Japan: Asia-Pacific High Energy Physics Panel, January 17, 2014
17. High Field Laser and High Energy Physics: Optics & Photonics International Congress 2014, Yokohama, April 22-25, 2014.

その他、将来の加速器科学の推進のための講演多数。特に、日本が将来大型国際プロジェクトを受け持つための、組織・運営方式を提案。これらは、将来の国際大型研究を日本に誘致するための基本的手段を構築。2009年～2011年に ICFA (International Committee for Future Accelerator) 議長として、今後の大型加速器プロジェクトの国際推進に尽力。

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

該当なし

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

多岐にわたり多くの知見が得られたので、主要なものを以下に箇条書きで示す。特に最初の2群が直接的かつ重要な成果である。

- ・ 原子炉反電子ニュートリノが振動すること。
- ・ 最も高精度な1-2世代間ニュートリノ質量2乗差の値。
- ・ 電子ニュートリノと反電子ニュートリノ間でのニュートリノ振動パラメータの一致。
- ・ ニュートリノ振動の確立。

- ・ 地球ニュートリノが地球内部観測に利用可能であること。
- ・ 放射性地熱は地球表面の熱流量の半分程度であり地球が冷え続けていることの直接的実験的証明。
- ・ マントルの一層対流を支持するGeodynamical modelは不十分であること。
- ・ 地球内原子炉はあっても非常に弱いこと。
- ・ 地球の始原隕石を地球ニュートリノ観測で特定できる可能性があること。
- ・ 地球ニュートリノ観測によってマントル対流を考察できること。

- ・ 液体シンチレータ検出器で太陽ニュートリノを観測できること。
- ・ ^8B 、 ^7Be ニュートリノとともに標準太陽模型およびニュートリノ振動の予測と矛盾しないこと。

- ・ 中性子がニュートリノに崩壊する寿命が非常に長いこと。
- ・ 太陽内での電子ニュートリノから反電子ニュートリノへの転換が小さいこと。
- ・ 地下での ^{12}C に対するミューオンによる原子核破碎反応。

- ・ ニュートリノ観測装置が極低放射能環境として希な現象の探索に応用可能であること。
- ・ ^{136}Xe のニュートリノを伴う二重ベータ崩壊の寿命が、過去に考えられていたより5倍以上短いこと。
- ・ マヨロンを伴う二重ベータ崩壊が小さいこと。
- ・ ^{136}Xe のニュートリノレス二重ベータ崩壊の寿命が非常に長く、マヨラナニュートリノによる二重ベータ崩壊では、 ^{76}Ge でのニュートリノレス二重ベータ崩壊発見の主張を説明できないこと。
- ・ キセノン含有液体シンチレータを用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊探索では、オン・オフ測定が可能であること。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

原子炉ニュートリノ振動の観測は、30年以上続いた太陽ニュートリノ問題を解決し、ニュートリノ振動を確立した。10に満たないニュートリノ振動パラメータの内の2つに対して高精度な測定結果を与えており、その後の長基線ニュートリノ実験に必須のデータを与えている。

ニュートリノ地球物理は、本研究が創出したものであり、イタリア（Borexino）での観測があるほか、カナダ（SNO+）でも観測が始まろうとしており、多地点での観測網が期待されている。多様な素粒子研究の展開が見込まれ、地球物理にも全く新しい情報をもたらすため、素粒子物理学者と地球科学者の間での連携が大きく進んでおり、多くの国際的な研究会（<http://www.awa.tohoku.ac.jp/rcns/?p=5425> など）が開催され、大型の実験計画（JUNO, RENO-50, LENA, Hanohano 等）も提案されている。東北大学ニュートリノ科学研究センターにおいては、東京大学地震研究所と部局間協定を結んでニュートリノ地球物理（素粒子地球物理）の展開を後押ししている。

また本研究によって構築された極低放射能環境をもとに、特別推進研究「ニュートリノ観測装置カムランドを用いたニュートリノレス二重 β 崩壊の研究」（井上邦雄研究代表）が展開するなど、極低放射能を特徴とした研究の多様化が進んでいる。この展開に関連して、KamLAND2-Zen 計画が、宇宙線共同研究者会議による中規模計画の評価において「最優先で推す課題」として推薦される他、高エネルギー研究者会議においても重要な研究として取り上げられ、日本学術会議の「第22期学術の大型研究計画に関するマスタープラン」においても取り上げられた。

特に本研究での成功を受けて、神岡地下の実験群が連携した地下コミュニティの構築が進んでおり、二重ベータ崩壊研究、暗黒物質研究、低エネルギーニュートリノ研究の相乗的な連携を目指し、「極低バックグラウンド素粒子原子核研究懇談会」の開催（<http://www.lowbg.org>）などによって、宇宙・天文・素粒子・原子核・地球物理など広い分野にまたがる地下素粒子原子核研究を支援する枠組みの構築も進んでいる。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	“Measurement of neutrino oscillation with KamLAND: Evidence of spectral distortion”, T.Araki et al. (KamLAND collaboration), Phys.Rev.Lett. 94 (2005) 081801	ニュートリノが変化・復元を繰り返すニュートリノ振動の明確で直接的な証拠	1182
2	“Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND”, S.Abe et al. (KamLAND collaboration), Phys.Rev.Lett. 100 (2008) 221803.	最も高精度なニュートリノ質量に関する情報を提供	651
3	“Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND”, T.Araki et al. (KamLAND collaboration), Nature 436 (2005) 499-503.	地球内部起源ニュートリノが観測できることを世界で始めて実証	262
4	“Neutrino geophysics with KamLAND and future prospects”, S.Enomoto, E.Ohtani, K.Inoue and A.Suzuki, Earth and Planetary Science Letters 258 (2007) 147-159.	地球ニュートリノ観測と地球物理を結びつけるための地球モデルを構築	49
5	“Reactor neutrino oscillation studies with KamLAND”, K.Inoue, New Journal of Physics 6 (2004) 147.	カムランドでの原子炉ニュートリノ振動研究についての詳報	24
6	“R&D for future improvements of KamLAND”, A.Terashima, Y.Takemoto, E.Yonezawa, H.Watanabe, S.Abe and M.Nakamura, J.Phys.: Conf.Ser. 120 (2008) 052029.	カムランドでの研究対象を拡大するための研究開発状況の報告	22
7	“Search for the invisible decay of neutrons with KamLAND”, T.Araki et al. (KamLAND collaboration), Phys.Rev.Lett. 96 (2006) 101802.	中性子がニュートリノに崩壊する現象に対する最も厳しい制限	15
8	“A Simple model of reactor cores for reactor neutrino flux calculations for the KamLAND experiment”, K.Nakajima, K.Inoue, K.Owada, F.Suekane, A.Suzuki, G.Hirano, S.Kosaka, T.Ohta, H.Tanaka, Nucl.Instrum.Meth. A569 (2006) 837-844.	原子炉からのニュートリノ放出量を基本的なパラメータで簡便に計算するための手法	14
9	“KamLAND”, F.Suekane for the KamLAND collaboration, Progress in Particle and Nuclear Physics 57 (2006) 106-126.	カムランドでの反ニュートリノ研究の総説	9
10	“KamLAND Status for Solar Neutrino Phase”, Y.Kishimoto for the KamLAND collaboration, J.Phys.:Conf.Ser. 120 (2008) 052010.	カムランドでの太陽ニュートリノ観測に向けた液体シンチレータ純化状況の報告	8

【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	“Constraints on θ_{13} from A Three-Flavor Oscillation Analysis of Reactor Antineutrinos at KamLAND”, A. Gando et al. (KamLAND collaboration), Phys.Rev. D83 (2011) 052002.	カムランドでの原子炉ニュートリノ振動の精密測定と第3混合角に対する解析	168
2	“Measurement of the double-beta decay half-life of ^{136}Xe with the KamLAND-Zen experiment”, A. Gando et al. (KamLAND-Zen collaboration), Phys.Rev. C85 (2012) 045504.	カムランドを使った二重ベータ崩壊研究の最初の結果	101
3	“Limit on Neutrinoless $\beta\beta$ Decay of Xe-136 from the First Phase of KamLAND-Zen and Comparison with the Positive Claim in Ge-76”, A. Gando et al. (KamLAND-Zen collaboration), Phys.Rev.Lett. 110 (2013) 062502.	世界最高感度でのニュートリノレス二重ベータ崩壊に対する制限と、KKクレイムの排除	83
4	“Production of Radioactive Isotopes through Cosmic Muon Spallation in KamLAND”, S. Abe et al. (KamLAND collaboration), Phys.Rev. C81 (2010) 025807.	カムランドでの宇宙線起源原子核破碎反応の詳細結果	75
5	“Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements”, A. Gando et al. (KamLAND collaboration), nature geoscience 4 (2011) 647-651.	地球ニュートリノの観測によって放射性起源の地熱生成が地熱流の半分にすぎないことを実験的に証明	60
6	“Limits on Majoron-emitting double-beta decays of Xe-136 in the KamLAND-Zen experiment”, A. Gando et al. (KamLAND-Zen collaboration), Phys.Rev. C86 (2012) 021601.	マヨロンを放出する二重ベータ崩壊に対する世界で最も厳しい制限	26
7	“Measurement of the ^{10}B Solar Neutrino Flux with the KamLAND Liquid Scintillator Detector”, S. Abe et al. (KamLAND collaboration), Phys.Rev. C84 (2011) 035804.	カムランドでの太陽 ^{10}B ニュートリノの観測結果	25
8	“Reactor On-Off Antineutrino Measurement with KamLAND”, A. Gando et al. (KamLAND collaboration), Phys.Rev. D88 (2013) 033001.	原子炉停止時のデータも使用した原子炉ニュートリノバックグラウンドの検証と、地球ニュートリノの高精度測定、地球モデルの選別を開始	21
9	“The KamLAND Full-Volume Calibration System”, B. E. Berger et al. (KamLAND collaboration), JINST 4 (2009) P04017.	カムランド内の全位置での較正を可能にする装置	12
10	“A study of extraterrestrial antineutrino sources with the KamLAND detector”, A. Gando et al. (KamLAND collaboration), Astrophys.J. 745 (2012) 193.	宇宙起源の反ニュートリノに対する最も厳しい制限	7

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

毎年の行事として、約 1000 人の見学者を受け入れるジオ・スペース・アドベンチャー、平均 300 人程度となるスーパーサイエンスハイスクール対象の講義、50 名程度の選抜された中高生を対象とする夢のたまご塾での講義、800 人程度の一般の来訪があるオープンキャンパスのほか、仙台市天文台や仙台市科学館での展示、出前授業、市民講座などの不定期の企画、ウェブページや記者会見・新聞報道での発表、教育現場での活用を通して広く社会に還元している。また、ニュートリノ振動研究や地球ニュートリノ研究は、素粒子の教科書、高校教科書・参考書、科学雑誌・啓蒙書などで取り上げられている。

これらの活動で、知的好奇心に基づく基礎科学の発展や成果を広く発信することで、科学技術立国日本に必要な若い人材を引きつけ、国民の理科離れを食い止めることに貢献している。

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

研究期間中に東北大学の学生であったものからは、

東北大学助教 3名

東京大学、KEK、岡山大学、大阪大学、ワシントン大学の助教に各1名

東北大学、東京大学、MPIの研究員に各1名

を輩出している。

また、研究員であったものは、

東北大学准教授、講師、助教2名

東京大学助教

を輩出している。

また、助教であったものは、

東京大学、大阪大学の准教授に各1名が昇進している。

さらに、海外から研究員として受け入れていたものは、

Modane 地下研究所長(仏)、東京大学助教、のほか、CENBG(仏)やカールトン大(加)で研究者として活躍している。

また、期間中に本研究に関連して6名が博士号、17名が修士号を得た。

また、共同研究グループにまで広げると、補足できているものだけでも、学生から、

東京大学助教

ワシントン大学助教2名

ハワイ大学助教

アルカディア大学助教

UCLA助教

ローレンスバークレー国立研究所、ローレンスリバモア国立研究所、アルゴンヌ国立研究所の各物理学研究者

ローレンスリバモア国立研究所、ソウル大学、カリフォルニア大学デービス校、カリフォルニア工科大学、ル

イジアナ州立大学の各 postdoc

として活躍しているほか、

postdoc からは、

イリノイ大学教授

アラバマ大学教授

レジス大学准教授

サウスダコタ大学准教授

アムステルダム大学准教授

カンサス州立大学准教授

Imperial College 講師

コロラド州立大学助教

ハワイ大学助教

ミズーリ南州立大学助教

ロスアラモス国立研究所スタッフサイエンティスト, postdoc

サドバリーニュートリノ観測所地下研究所スタッフサイエンティスト

フェルミ国立研究所准サイエンティスト

ローレンスリバモア国立研究所、ロシア合同原子核研究所、香港中文大学の各物理学研究者を輩出している。