

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和2年6月8日現在

機関番号：12601
研究種目：特別推進研究
研究期間：2014～2019
課題番号：26000003
研究課題名（和文） 中性子同時計測を用いた超新星ニュートリノ観測
研究課題名（英文） Observation of supernova neutrinos with neutron tagging
研究代表者
中畑 雅行 (NAKAHATA, Masayuki)
東京大学・宇宙線研究所・教授
研究者番号：70192672
交付決定額（研究期間全体）（直接経費）：456,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、スーパーカミオカンデ (SK) にガドリニウム (Gd) を導入して中性子を同時計測することにより、宇宙の初期から起きてきた超新星爆発によって蓄積されたニュートリノ（超新星背景ニュートリノ）の世界初観測を目指す。そのために、2018年度にSKタンクを改修してタンクの水漏れを止めるとともに、Gd溶解装置及びGdを含んだ水を循環・純化する装置を製作・設置した。また、放射性不純物の少ない $Gd_2(SO_4)_3$ の製造もおこなった。これらにより、2020年春より0.01%の濃度でGdを導入し、50%の中性子捕獲効率で観測を開始することができるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超新星背景ニュートリノが観測されれば、宇宙初期からの超新星爆発の頻度及び爆発時の平均ニュートリノエネルギーに関する情報を与ることができる。現在、星の生成率から予想される爆発頻度と実際に観測されている爆発頻度とに違いがあり、超新星背景ニュートリノ観測によってその問題が解決できる。違いの原因として超新星爆発時のブラックホール形成が考えられ、それが実証できれば画期的な成果となる。

研究成果の概要（英文）：In this research, gadolinium (Gd) is introduced into Super-Kamiokande (SK) in order to observe supernova relic neutrinos for the first time in the world. For that purpose, a refurbishment of the SK tank was performed in order to fix water leak, and Gd dissolving and recirculation systems have been constructed. In addition, radio-pure $Gd_2(SO_4)_3$ was produced. Those works enabled us to load 0.01% Gd, which corresponds to 50% neutron capture efficiency, to the SK tank in spring 2020.

研究分野：ニュートリノによる天体素粒子物理学

キーワード：超新星、ニュートリノ、スーパーカミオカンデ、ガドリニウム

1. 研究開始当初の背景

超新星爆発は、大質量星がその一生の最後におこす現象であり、鉄の中心核が重力崩壊して中性子星やブラックホールになることをきっかけとしておこると考えられている。その際に莫大なエネルギーが約10秒間という短い時間の間に発生し、そのほとんどのエネルギーがニュートリノによって星から放出される。実際、カミオカンデは超新星SN1987Aの爆発においてそうしたニュートリノを捉え、超新星爆発の基本的なシナリオが正しいことを示した。しかし、捉えられたニュートリノの数は高々10事象程度であり、爆発の詳細まで探ることはできなかった。また、これはあくまで「ひとつ」の星の超新星爆発であり、爆発機構を詳しく探るためにはたくさん超新星爆発事象を対象とした研究が必要である。本研究の最も主要な観測対象は、宇宙の始まりから起きてきた超新星爆発からのニュートリノ（「超新星背景ニュートリノ」）である。超新星背景ニュートリノは未だに観測されておらず、本研究はその世界初観測を目指すためのものである。

宇宙はビッグバンによって生まれたが、その際には水素、ヘリウム程度の軽い元素しか合成さ

れなかった。その後の大質量星の進化の過程、そしてその最後の超新星爆発によって、多種多様な元素が合成されたと考えられている。したがって、大質量星の歴史を探ることは宇宙の物質の進化を探るうえで極めて重要である。星生成率から予想した超新星爆発頻度(SNR)と比べて観測結果は約半分ぐらいしかないと言われている。この違いは光学観測によるものであるが、明るさが暗い超新星があるのか、光を遮るものがあるため見えないのか、といった可能性が考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、こうした過去の超新星爆発をニュートリノによって観測する。ニュートリノは物質とほとんど反応せずに飛んでくるため、直接超新星爆発頻度を議論することができる。地球での観測においては、10MeV以下に原子炉からのニュートリノ、30MeV以上には大気ニュートリノからのバックグラウンドがあるが、10-30MeVの範囲では、超新星背景ニュートリノが主要な反電子ニュートリノ源である。超新星背景ニュートリノの強度は極めて弱く、期待される事象数はスーパーカミオカンデ(SK)の有効体積22.5ktonをもってしても年間1-7事象程度である。今までにSKで行われてきた観測方法は、反電子ニュートリノが陽子と反応した際に発生する陽電子を探す方法であったが、宇宙線起源のバックグラウンドが数万倍以上あり、信号を選び出すことができなかつた。本研究ではSKの50000トンタンクにガドリニウム(Gd)を溶解し中性子を捉える機能を付加させ、超新星背景ニュートリノ観測を実現させる。

我々の銀河で超新星爆発が起これば、例えば10kpcの距離で起きた場合、約7000個のInverse Beta Decay(IBD)反応($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)事象と300個の電子散乱事象($\nu + e \rightarrow \nu + e$)が期待される。IBD反応では陽電子の方向と元のニュートリノは方向の相関を持たないが、電子散乱事象の場合には方向相関を持つ。したがって、本研究によって反電子ニュートリノの事象を同定できれば、それを除いて角度分布を作り、超新星の方向を探ることができる。定量的には約2.5°(90%信頼度)の精度で超新星の方向を決定できるようになる。超新星爆発からニュートリノが放出されてから、星の外層まで衝撃波が伝わり、星が輝き始めるまでには数時間から1日の時間がかかるが、いち早く超新星の方向を世界の光学観測者へ向けて発信することは極めて重要である。

3. 研究の方法

本研究では、IBD反応($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)の際に発生する陽電子と中性子を同時計測することによって、真のIBD反応を同定する(図1)。中性子の信号を捉えるためにGdをSKタンクに溶解させる。Gdは化合物として溶解させるが、具体的には硫酸ガドリニウム($Gd_2(SO_4)_3$)を溶解させる。Gdは中性子の捕獲断面積が非常に大きい物質であり、0.01%の濃度(0.02%の $Gd_2(SO_4)_3$)でも50%の中性子捕獲効率を持ち、0.1%のGd濃度で90%の中性子捕獲効率になる。中性子がGdに捕獲されると総エネルギー8MeVのガンマ線が放出される。SKは水中で荷電粒子が発するチェレンコフ光を11000本の20インチ光電子増倍管によって捉える装置であるが、陽電子が発生するチェレンコフ光とGd捕獲ガンマ線が発するチェレンコフ光とを別々の事象として観測する。これらの事象は時間的には数十マイクロ秒差でおこり、それぞれの事象は50cm程度以内で発生するため、これらの事象の時間的、空間的な相関をとることによってバックグラウンドを4ケタ以上落として、年間数事象しかない超新星背景ニュートリノを観測できるようになる。GdをSKに導入するためには、(1)SKタンクを改修してタンクの水漏れを止めること、(2)Gdを導入する「Gd溶解装置」及びGdを含んだ水を循環・純化する「Gd水循環・純化装置」を製作・設置すること、(3)放射性不純物の少ない $Gd_2(SO_4)_3$ を製造することが必要であり、本研究においてそれらをおこなった。

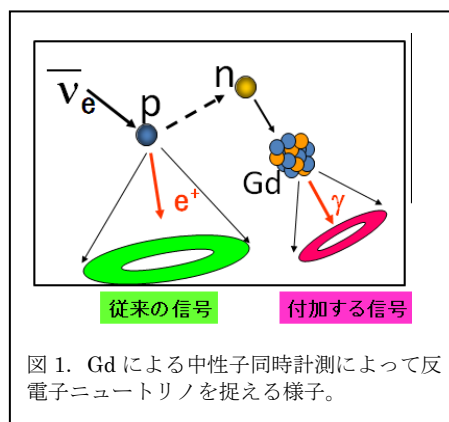


図1. Gdによる中性子同時計測によって反電子ニュートリノを捉える様子。

4. 研究成果

本研究を進めるにあたり、「研究の方法」で述べたようにSKタンクの改修、Gd溶解装置およびGd水循環・純化装置の製作・設置、放射性不純物の少ない $Gd_2(SO_4)_3$ の製造を行った。

SKタンクの改修

1996年にSKが観測を開始して以降、SKタンクでは観測に問題とはならないレベルであるが、一日約1トンの純水が漏れていた。そこで、Gdを導入するにあたり、水漏れを止める改修工事をおこなう必要があった。SKタンクの内壁は厚さが3-4mmのステンレス(SUS)パネルで構成されている。タンクの側面においては、高さ2m、長さ6mのSUSパネル同士が溶接されて面を作っており、底面も同様の構造になっている。2018年6月から10月にかけて行われた改修工事ではこうした溶接によるつなぎ目(溶接線)や貫通物がある部分の周りに伸縮性のある止水材料を塗って止水補強した。(図2参照)その止水材料は純水中で使用しても不純物の溶出がないこと、ラドンなどの放射性物質を出さないことを満たす必要があった。本研究において業者と共同してそれらの条件を満たす止水材料を開発した。その材料に対して、引っ張り強度試験、長期安定性試験、止水能力試験、接着強度試験、溶出試験、ラドン放出量測定試験をおこない、本研究の要件を満たすことを確認した。

この改修工事では、タンク内の水配管の改良もおこなった。以前からSKは60トン毎時の流速で水を循環純化させていたが、一回循環処理するのに35日を要していた。Gdを導入した後はなるべく早くタンク内を一樣なGd濃度にする必要があり、また、その後も常に良い透過率に保つためには、流速を上げて処理する必要があった。そこで、タンク内の配管を120トン毎時(一循環に要する日数を17日)で通水できるように増強した。SKタンクは直径39m、高さ41mの円柱形タンクであるが、壁から2m分を「外水槽」(OD)、その内側を「内水槽」(ID)としており、その間は光が行き来できないようにシートが貼られており、水流も制限されている。また、同様にタンクの底部(bottom)、側部(barrel)、上部(top)にも仕切りのためのシートがある。このように仕切られた各部分をバランスよくGdを含んだ水を循環させることができるように水配管に工夫を施した。(図3参照)

改修工事は、2018年10月に完了し、その後2019年1月末にかけて超純水の給水をおこなった。その後、タンク水の循環を止めて水漏れ試験を行った。図4はその試験の結果を示す。改修工事後には水漏れは確認されず、漏れはたとえあったとしても以前の1/200以下であるという結果を得た。この値は神通川下流域での濃度に換算して、河川水に自然に存在するGd濃度に比べて十分低く、環境保全の問題とならないことが示された。

本研究に先立ち、SKを模擬した200トンの検出器(EGADS(Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems))を神岡鉱山内に建設し、Gdを溶解した水の循環・純化方法を確立した。EGADSのタンク内にはSKと同じ光電子増倍管を240本、衝撃波防止ケース、ブラックシートなどを取り付けた。このEGADSで開発したGd水の循環・純化方法をベースとしてSK用のGd溶解装置、循環・

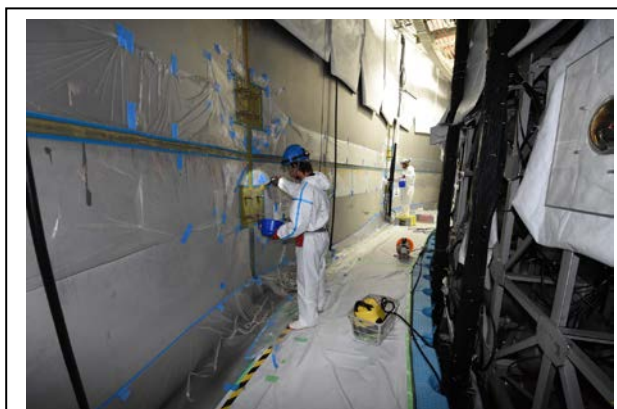


図2. 2018年6月から10月にかけて行われた改修工事での止水補強作業の様子。

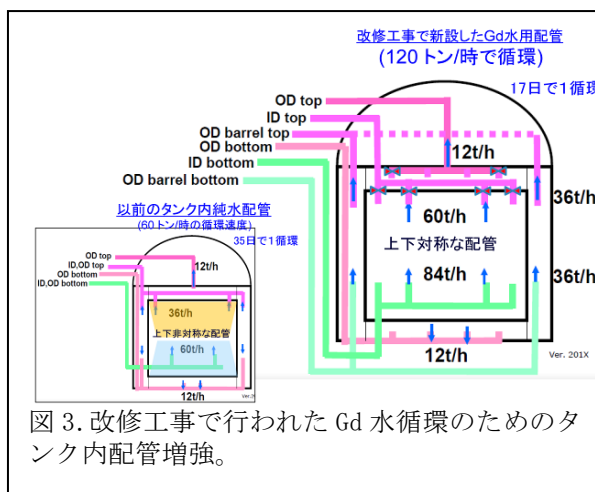


図3. 改修工事で行われたGd水循環のためのタンク内配管増強。

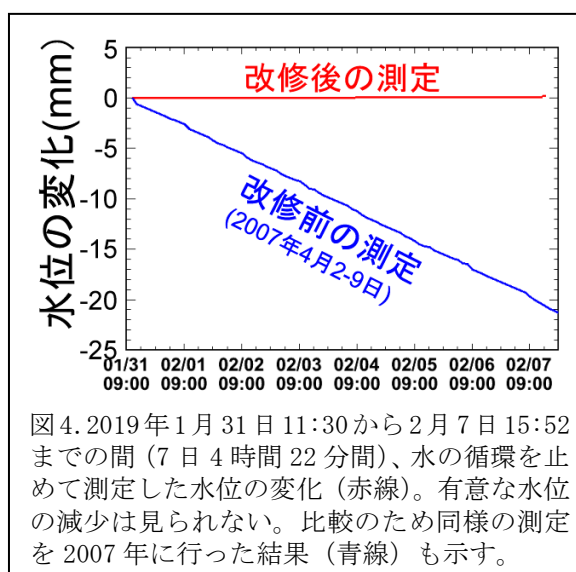


図4. 2019年1月31日11:30から2月7日15:52までの間(7日4時間22分間)、水の循環を止めて測定した水位の変化(赤線)。有意な水位の減少は見られない。比較のため同様の測定を2007年に行った結果(青線)も示す。

純化装置を本研究のもとで建設した。図5にフロー図を示し、図6に実際の装置の写真を示す。SKでは0.01%Gd濃度の場合 $Gd_2(SO_4)_3$ を約10トン、0.1%Gd濃度の場合には $Gd_2(SO_4)_3$ を約100トン溶かすことになるため、500kgのフレコンバッグから2段のホッパーを通して粉末を自動で送り出すシステムを構築した。溶解部で粉末をある程度高い濃度で溶かす。その際に使用する純水はSKからの戻り水の一部である。溶解後、前処理部において紫外線(UV)酸化、 $Gd_2(SO_4)_3$ に不活性なカチオン交換樹脂、アニオン交換樹脂、UV殺菌灯を通して純化する。それをSKからの戻り水と混合することによって目標とするGd濃度に調整した後、循環部をとおしてSKタンクへGd水を送る。循環部は前処理部と同じエレメントを流量に合わせて大型化するとともに、ウルトラフィルター(UF)を加えたシステムである。純化装置では最大120m³/時の流速で純化処理ができる。Gdを導入するに先立ち、Gd水用循環・純化装置の性能を試験するため、2019年12月24日よりSKタンクの純水の循環を従来から使用してきた純水装置からGd水用循環・純化装置へ切り替えた。(ただし、循環する水はまだGdを含まない純水である。) 図7は2019年2月以降(2018年に行った改修作業後の期間)におけるSKタンク水の透過率の変化を示す。2019年12月に循環装置を切り替えた後も90m以上の透過率が保たれており、Gd水用循環・純化装置の性能が確認された。

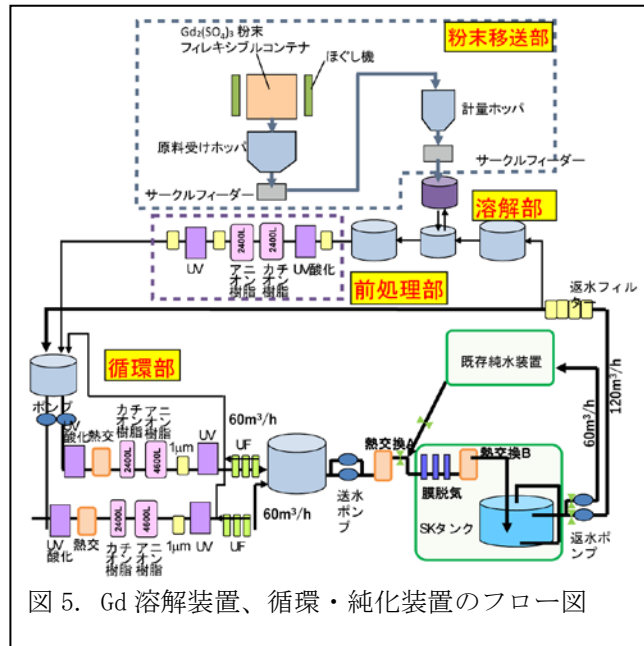


図5. Gd溶解装置、循環・純化装置のフロー図



図6. SK用のGd溶解装置、循環・純化装置

が保たれており、Gd水用循環・純化装置の性能が確認された。

SKは太陽ニュートリノ観測を初めとして数多くの研究が行われており、放射性バックグラウンドに対して厳しい要求がある。また、本研究の対象である超新星背景ニュートリノにおいてもウランの自発核分裂が中性子を伴うバックグラウンドとなるため、その条件も加わる。図8にそれぞれの崩壊系列の同位体に対して、市販されている典型的な $Gd_2(SO_4)_3$ の放射能、目標とする値を示した。典型的な値は目標の10倍から2000倍高く、 $Gd_2(SO_4)_3$ の純化が必要であった。本研究において複数企業と純化のための開発を行い、ゲルマニウム検出器(Ge)及びICP/MSによる測定結果を図8に示した。企業Bにおいてはすべての条件を満たす $Gd_2(SO_4)_3$ を製造することができた。(^{228}Th の上限値は目標値より上であるが、 ^{232}Th が条件を満たしていることから放射平衡および化学処理が同位体に寄らないことにより、目標を満たしていることが分かる。 ^{228}Ra も上限値は目標値より上であるが、たとえそのレベルの ^{228}Ra があったとしても

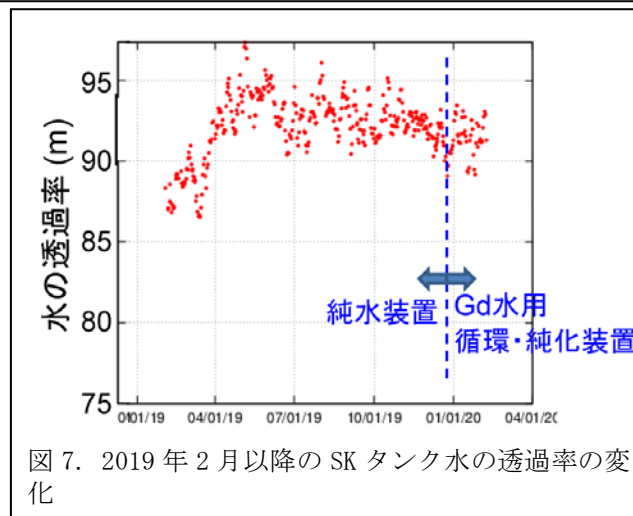


図7. 2019年2月以降のSKタンク水の透過率の変化

企業Bにおいてはすべての条件を満たす $Gd_2(SO_4)_3$ を製造することができた。(^{228}Th の上限値は目標値より上であるが、 ^{232}Th が条件を満たしていることから放射平衡および化学処理が同位体に寄らないことにより、目標を満たしていることが分かる。 ^{228}Ra も上限値は目標値より上であるが、たとえそのレベルの ^{228}Ra があったとしても

我々が導入したカチオン交換樹脂によって除去することができる。) 2019年には0.01%Gd濃度での導入のために、約13トンの $Gd_2(SO_4)_3$ (正確には硫酸ガドリニウム八水和物の重量)を企業Bにより製造した。

このように0.01%Gd濃度(0.02%の $Gd_2(SO_4)_3$ 濃度)でSKへ導入する準備がすべて完了し、2020年4月に導入を開始する予定であった。しかし、新型コロナウイルスの感染防止のため緊急事態宣言が出されたこととともない、導入作業をおこなう業者の技術者、研究者が神岡へ来ることができなくなり、延期することとした。導入が始まれば、約35日の運転でGdの導入が完了する。その後、2~3か月間120 m^3 /時の流速で循環させてタンク内のGd濃度を一様にさせ、各種キャリブレーションをおこなった後、本格観測に入る。

単位: [mBq/kg ($Gd_2(SO_4)_3$)]				* 0.2% $Gd_2(SO_4)_3$ に対する目標					
系列	同位体	典型値	目標*	企業A		企業B		企業C	
				Ge	ICPMS	Ge	ICPMS	Ge	ICPMS
238U	238U	50	< 5	-	~ 0.04	< 11	< 0.04	< 10	< 0.04
	226Ra	5	< 0.5	-	—	< 0.2	—	< 0.2	—
232Th	232Th	100	< 0.05	-	~ 0.09	—	0.02	—	0.06
	228Ra	10	< 0.05	-	—	< 0.3	—	< 0.2	—
	228Th	100	< 0.05	-	—	< 0.3	—	< 0.3	—
235U	235U	30	< 3	-	—	< 0.4	—	< 0.3	—
	227Ac/ Th	300	< 3	-	—	< 1.7	—	< 1.2	—

図 8. $Gd_2(SO_4)_3$ の放射性不純物のまとめ。ウラン、トリウム系列の主要な同位体に対して、市販されて製品の典型値、本研究で目標とした値、それぞれの企業(A, B, C)と開発した製品をゲルマニウム検出器(Ge)及びICP/MSを用いて測定した結果を示す。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (全15件、一部のみを以下に記載、全リストはホームページ参照)

- [1] Sensitivity of Super-Kamiokande with Gadolinium to Low Energy Antineutrinos from Pre-supernova Emission, C. Simpson, M. Nakahata, Y. Koshio et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), *Astrophys. J.* 885, 2 (2019), arXiv: 1908.07551.
- [2] Evaluation of gadolinium's action on water Cherenkov detector system with EGADS, L. Marti, Y. Koshio, M. Nakahata et al, *Nucl. Inst. Meth. A*959, (2020) 163549. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163549>
- [3] SuperK-Gd: The Gd future of Super-Kamiokande, L. Marti-Magro on behalf of the Super-Kamiokande Collaboration, PoS(ICRC2019)957 <https://pos.sissa.it/358/957/pdf>
- [4] The road to SuperK-Gd, L. Marti-Magro for the Super-Kamiokande Collaboration, PoS(ICHEP2018)009.
- [5] Supernova neutrinos in SK-Gd and other experiments, H. Sekiya, *Journal of Physics: Conference series*, 888(2017) 012041.
- [6] The Super-Kamiokande Gadolinium Project, H. Sekiya, PoS(ICHEP2016), 982 (2016)
- [7] Prospects for supernova neutrino detection, T. Mori, M. Nakahata, Y. Koshio et al., *Nucl. Part. Phys. Proc.* 265-266 (2015) 120-122.
- [8] Supernovae Neutrino detectors, M. Nakahata, *Proceedings of VHEPU conference*, (2015).

[学会発表] (全141件、一部のみを以下に記載、全リストはホームページ参照)

- [1] M. Nakahata, Supernova Neutrino Detection, *Supernova Neutrinos in the Multi-Messenger Era*, SNEWS2.0, Sudbury, Canada, June 15-16, 2019.
- [2] M. Nakahata, 20 Years of Super-Kamiokande and Gd New Era, the 27th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2019), Bari, Italy, June 3-8, 2019.
- [3] M. Nakahata, Detection of supernova neutrinos at Super-Kamiokande, The sixth Astrophysical Multimessenger Observatory Network (AMON) Workshop, Chiba, Japan, May 21-22, 2019.
- [4] Y. Koshio, Super-Kamiokande, XVIII International Workshop on Neutrino Telescopes, Venice, Italy, March 18-22, 2019.
- [5] M. Nakahata, NNN2018 Summary, The International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN18), Vancouver, Canada, Nov. 1-3, 2018.
- [6] Y. Koshio, CCSN neutrino detection with Super-Kamiokande and Hyper-Kamiokande, Workshop on core-collapse supernova neutrino detection, Paris, France, July 4, 2018.
- [7] M. Nakahata, Neutrino Physics at Kaimioka, IBS Conference on Dark World, Daejeon,

Korea, Oct. 30- Nov. 3, 2017.

[8] M. Nakahata, Observation of Supernova Neutrinos - Past and Now -, Kavli IPMU 10th anniversary, symposium, Kashiwa, Japan, Oct.16-18, 2017.

[9] M. Nakahata, SN1987A and its heritage, Recent Development in Neutrino Physics and Astrophysics, Assergi and L'Aquila, Italy, Sep.4-7, 2017.

[10] M. Nakahata, 30 years after SN1987A, WIN2017, California, USA, June 19-24, 2017.

[11] M. Nakahata, Results and prospects of underground physics research in Japan, International Session-Conference of SNP PSD RAS, Nalchik, Russia, June 6-8, 2017.

[12] M. Nakahata, Neutrino experiments at Kamioka, The 3rd Toyama International Workshop on "Higgs as a Probe of New Physics 2017", Toyama, Japan, March 1-5, 2017.

[13] M. Nakahata, Supernova neutrino detection overview, 8th Symposium on Large TPCs for Low-Energy Rare Event Detection, Paris, France, Dec. 7, 2016.

[14] M. Nakahata, Neutrino experiments -- 30 years at Kamioka --, International workshop on "Double beta decay and underground science", Osaka, Japan, Nov.8, 2016.

[15] M. Nakahata, Supernova neutrinos and Supernova Relic Neutrinos using a Water Cherenkov, Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2016, Tokyo, Japan, May 13, 2016.

[16] M. Nakahata, Recent results from Super-Kamiokande, Quarks to Universe in Computational Science, Nara, Japan, Nov. 4, 2015.

[17] M. Nakahata, Recent results from Super-Kamiokande, 17th Lomonosov conference, Moscow, Russia, Aug. 21, 2015.

[その他]

ホームページ等

http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~nakahata_s/tokusui/

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：小汐 由介

ローマ字氏名：(KOSHIO, Yusuke)

所属研究機関名：岡山大学

部局名：自然科学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)： 80292960

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：岸本 康宏

ローマ字氏名：(KISHIMOTO, Yasuhiro)

研究協力者氏名：ヴァギンズ マーク

ローマ字氏名：(VAGINS, Mark)

研究協力者氏名：池田 一得

ローマ字氏名：(IKEDA, Motoyasu)

研究協力者氏名：中島 康博

ローマ字氏名：(NAKAJIMA, Yasuhiro)

研究協力者氏名：竹内 康雄

ローマ字氏名：(TAKEUCHI, Yasuo)

研究協力者氏名：作田 誠

ローマ字氏名：(SAKUDA, Makoto)

研究協力者氏名：石野 宏和

ローマ字氏名：(ISHINO, Hirokazu)

研究協力者氏名：マルチマグロ ジュイス

ローマ字氏名：(MALTI-MAGRO, Lluís)

研究協力者氏名：スミー ミハエル

ローマ字氏名：(SMY, Michael)

研究協力者氏名：ラバルガ ルイス

ローマ字氏名：(LABARGA, Luis)