

令和4年度(2022) 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名 和文：スーパーカミオカンデを用いた宇宙素粒子研究

英文：Astroparticle physics using the Super-Kamiokande detector

研究代表者 東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設・教授・中畑雅行

参加研究者 以下の大学・研究機関から総勢248名(2023年1月)

KEK、神戸大学、京都大学、岡山大学、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、東海大学、宮城教育大学、岐阜大学、横浜国立大学、東京理科大学、福岡工業大学、静岡福祉大学、慶應大学、ボストン大学、カリフォルニア州立大学、デューク大学、ストーニーブルック大学、カリフォルニア大学アーバイン校/デービス校、ハワイ大学、ソウル大学校、全南大学校、光州科学技術院、成均館大学、National Center for Nuclear Research、ワルシャワ大学、BC工科大学、トライアンプ研究所、トロント大学、ウィニペグ大学、ブリティッシュコロンビア大学、清華大学、マドリード自治大学、インペリアル・カレッジ・ロンドン、キングスカレッジロンドン大学、リバプール大学、オックスフォード大学、シェフィールド大学、ラザフォード・アップルトン・ラボラトリー、ウォーリック大学、INFNパドバ大学、INFNナポリ大学、INFNローマ支部、INFNバリ支部、エコールポリテクニク、ベトナムIFIRSE

研究成果概要

本研究では、スーパーカミオカンデ(以下、SK)が観測する大気・太陽ニュートリノデータを用いて精密なニュートリノ振動研究をおこなうとともに、超新星ニュートリノの観測等を通して天体物理学の研究もおこなっている。また、陽子崩壊事象の探索をおこない、未知なる大統一理論の解明を目指す研究もおこなっている。

2020年にガドリニウム(Gd)をタンク水に導入し、データ取得を行ってきた。Gdにより中性子がタグできるようになり、反電子ニュートリノの同定による高感度の超新星背景ニュートリノの探索、ニュートリノ/反ニュートリノの識別による大気ニュートリノ観測の向上を進めている。2020年には0.01%のGd導入を行ったが、2022年度はGd濃度の増量を行った。2022年6月1日から7月4日にかけて26トンの $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ をタンク水に溶解した。

今回の溶解によりGdの濃度が0.01%から0.03%に増加した。それにより中性子の捕獲効率が50%から75%に増加し、1.5倍捕獲効率がよくなった。導入はタンクの上から0.01%Gd濃度の水を循環システムへ戻し、追加導入した0.03%Gd濃度の水をタンクの底部から給水した。図1に日付を横軸、積算 $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ 量を縦軸

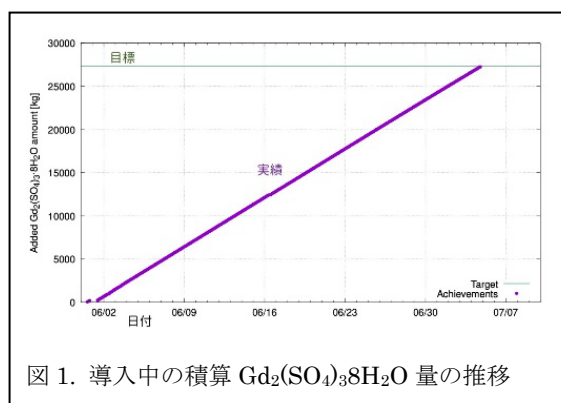


図1. 導入中の積算 $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ 量の推移

にとった図を示すが、極めて順調に導入が行われたことがわかる。また、図2は横軸にタンク水の導電率、縦軸がタンクのZ座標(高さの位置)をとり、導入中のそれぞれに日

に測定した分布を示しているが、タンク下から日を追って徐々に上の方へ 0.03% の Gd 水が満たされていったことが分かる。つまり、ほとんど対流することなく、タンク水を一回循環させる間に導入が行われたことを示している。導入後、タンク水は 120 トン毎時の流速で Gd 水循環・純化装置を通して循環させた。宇宙線ミュオン粒子を使って測定した水の透過率の時間変化を確認したところ、導入中は 76m まで低下したが循環・純化により向上し、9 月初めには 83m 程度まで回復し、その後はその値で安定している。最近の特質すべき研究成果としては、0.01%Gd 濃度で取得した 552 日分のデータを使用し、超新星背景ニュートリノ探索

をおこなったことがあげられる。エネルギー帯域によっては SK-IV の 2970 日のデータを凌駕する結果も得られている。また、Gd 導入により向上した中性子捕獲効率を利用して、酸素原子核にミュオン粒子が捕獲された場合の中性子多重度を高い精度で測定した。また、SNWATCH（自動超新星警報）のプログラムを機械学習を利用して数分で警報を発することができるように改良を進めている。Gd が導入された後のデータから太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ、超新星背景ニュートリノを選び出す解析を進めるため、エネルギー-エネルギー較正、シミュレーションのチューニングなども進めている。

最近の発表論文

- (1) “Neutron tagging following atmospheric neutrino events in a water Cherenkov detector”, K. Abe et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), *Journal of Instrumentation*, Volume 17, October 2022, arXiv:2209.08609.
- (2) “Searching for Supernova Bursts in Super-Kamiokande IV”, M. Mori et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), *ApJ*, 938, 35 (2022), arXiv:2206.01380 .
- (3) “Search for proton decay via $p \rightarrow \mu + K^0$ in 0.37 megaton-years exposure of Super-Kamiokande”, R. Matsumoto et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. D* 106, 072003 (2022), arXiv:2208.13188 .
- (4) “Pre-supernova Alert System for Super-Kamiokande”, L. N. Machado et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), *ApJ*, 935, 40 (2022) (2022), arXiv: 2205.09881 .
- (5) “Search for solar electron anti-neutrinos due to spin-flavor precession in the Sun with Super-Kamiokande-IV”, K. Abe et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), *Astroparticle Physics*, 139, 102702 (2022), 2012.03807 .
- (6) “First Gadolinium Loading to Super-Kamiokande”, K. Abe et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* 1027, 166248 (2022), arXiv:2109.00360 .

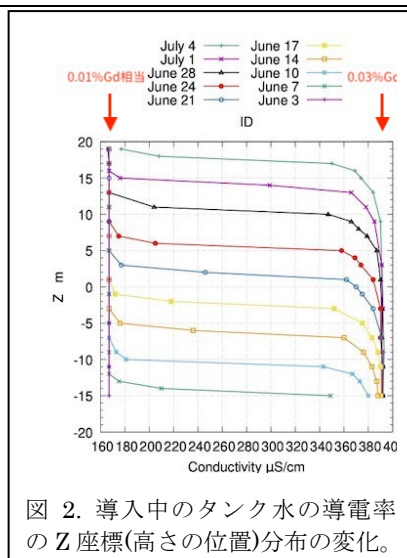


図 2. 導入中のタンク水の導電率の Z 座標(高さの位置)分布の変化。