

平成21年 5月13日現在

研究種目：特別推進研究  
 研究期間：2004～2008  
 課題番号：16002002  
 研究課題名（和文） 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  
 研究課題名（英文） High Precision and High Sensitivity Measurements of Electron Anti-Neutrinos  
 from Reactors and inside the Earth, and Electron Neutrinos from the Sun  
 研究代表者  
 鈴木 厚人 (SUZUKI ATSUTO)  
 東北大学・大学院理学研究科・名誉教授  
 研究者番号：00100818

研究成果の概要：原子炉起源反電子ニュートリノが飛行中に減少・復元を繰り返すニュートリノ振動を2周期にわたって観測し、ニュートリノ振動パラメータの精密測定に成功した。また、地球内部起源反電子ニュートリノの観測に成功しニュートリノ地球科学を創出するとともに、高精度化により地球モデルの現実的な検証が可能となった。さらに低エネルギーの太陽起源ニュートリノ観測に必要な、液体シンチレータの高度純化およびデッドタイムフリー電子回路の開発に成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	329,000,000	98,700,000	427,700,000
2005年度	159,800,000	47,940,000	207,740,000
2006年度	84,600,000	25,380,000	109,980,000
2007年度	46,300,000	13,890,000	60,190,000
2008年度	28,200,000	8,460,000	36,660,000
総計	647,900,000	194,370,000	842,270,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（実験）

## 1. 研究開始当初の背景

(1) カムランドでの原子炉反電子ニュートリノ消失減少の発見は、太陽ニュートリノ問題を解決したが、ニュートリノ振動の直接証拠や質量情報の精密測定は未達であった。

(2) 地球内部起源ニュートリノや低エネルギー太陽ニュートリノの実時間観測も実現されていなかった。

## 2. 研究の目的

(1) ニュートリノ振動の直接証拠を取得し、ニュートリノ振動パラメータを精密に決定する。

(2) 地球内部起源のニュートリノを初検出しニュートリノ地球科学を創出する。

(3) 低エネルギー太陽ニュートリノを観測し、標準太陽模型を検証する。

## 3. 研究の方法

(1) 時間、位置、エネルギー較正精度を向上し、安定的にデータを蓄積する。また、原子炉起源、地球起源反電子ニュートリノを網羅する広いエネルギー範囲での統合解析により、それぞれの高精度精密測定を実現する。

(2) 低エネルギー太陽ニュートリノのバックグラウンドとなる、液体シンチレータ中に

ごく微量含まれる放射性希ガス・放射性重元素を除去するための装置を開発し、液体シンチレータを高度に純化する。また、宇宙線起源のバックグラウンドを識別するためデッドタイムフリー電子回路を開発・導入する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 原子炉起源反電子ニュートリノ

ニュートリノ振動現象の直接証拠となる原子炉反電子ニュートリノのエネルギースペクトルの歪みを検出した。さらに、データ蓄積、系統誤差の改善、解析手法の改良などによって大幅に観測精度を向上し、ニュートリノ振動によるニュートリノの減少・復元を2サイクルにわたって観測した。図1では、ニュートリノの生存確率を（距離180km÷エネルギー）の関数として表示してあり、赤点がカムランドの観測結果、青線はニュートリノ振動でのフィット、黒破線は原子炉が全て180kmの距離にあるとした場合のニュートリノ振動の様子を示している。

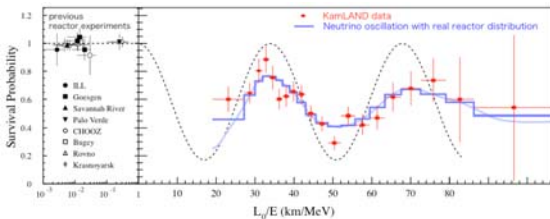


図1、ニュートリノの生存確率

さらに、明確なニュートリノ振動観測からニュートリノ振動パラメータの精密測定を実現した（図2）。質量2乗差では2.7%という高精度を実現し、混合角の下限も決定した。太陽ニュートリノ観測結果と統合して得られた振動パラメータは、以下の通りである。

$$\Delta m_{21}^2 = 7.59_{-0.21}^{+0.21} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.47_{-0.05}^{+0.06}$$

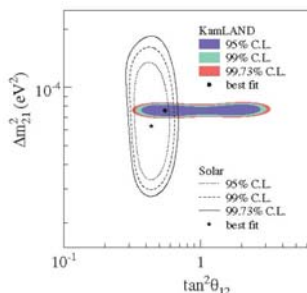


図2、ニュートリノ振動パラメータの測定結果

##### (2) 地球起源反電子ニュートリノ

地球内部に存在するウランやトリウムの崩壊に伴って生成される地球反電子ニュートリノの世界初検出に成功した。これらの崩壊起源の放射化熱は、地球内部の主要なエネ

ルギー源であり、地球内部運動や地球形成・進化を理解する上で基本的な要素である。地球反電子ニュートリノの検出は、地球科学研究に新たな手段を提供しニュートリノ地球科学を創出した。さらに、ニュートリノ源としての地球モデルの構築も行い、地球ニュートリノ観測による地球モデルの検証方法を確立した。

データの安定的蓄積と解析手法の改善は、地球起源反電子ニュートリノ観測の高精度化も実現し、 $2.8\sigma$ 以上の有意性を得た。同時に、地球モデルが予測するウラン・トリウム崩壊からのニュートリノフラックス： $4.14 \times 10^6 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$  (69.7 事象)に対し、一致する観測結果： $(4.4 \pm 1.6) \times 10^6 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$  (73 ± 27 事象)を得ており、地球内部でのウラン・トリウムの崩壊による熱生成を実証し、現実的なモデル検証を実現した。ニュートリノ地球科学は、地球物理に残る大問題にたいし決定的な知見を与えると期待されており、将来の大いなる発展が見込まれる。

##### (3) 太陽起源電子ニュートリノ

放射性希ガス・重元素除去装置を完成させ、対流による新旧液体シンチレータ混合の防止手法を確立したことで、 ${}^7\text{Be}$  太陽ニュートリノ領域 (400–700keV) のバックグラウンドを1万分の1に低減した。これにより、特徴的なスペクトルを使い ${}^7\text{Be}$  ニュートリノの観測が可能となった。また、800keV以上で支配的な宇宙線起源バックグラウンドを識別除去するためのデッドタイムフリー電子回路を開発し、導入中である。これにより、CNO太陽ニュートリノの観測が現実的になる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

(1) A. Suzuki (24/82), K. Inoue (8/82), J. Shirai (21/82), M. Koga (11/82), T. Mitsui (14/82), Y. Kishimoto (10/82), (KamLAND collaboration), “Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND”, Phys. Rev. Lett. 100: 221803, 2008. (査読有)

(2) S. Enomoto, E. Ohtani, K. Inoue, A. Suzuki, “Neutrino Geophysics with KamLAND and Future Prospects”, Earth and Planetary Science Letters 258 (2007) 137–159. (査読有)

(3) K. Nakajima, K. Inoue, K. Owada, F. Suekane, A. Suzuki, G. Hirano, S. Kosaka, T. Ohta, T. Tanaka, “A Simple Model of Reactor Cores for Reactor Neutrino Flux Calculations for the KamLAND Experiment”, Nucl. Instrum. Meth. A569: 837–844, 2006.

(査読有)

- (4) A. Suzuki (24/89), K. Inoue (7/89), J. Shirai (22/89), M. Koga (10/89), T. Mitsui (13/89), Y. Kishimoto (8/89), (KamLAND collaboration), “Search for the Invisible Decay of Neutrons with KamLAND”, *Phys. Rev. Lett.* 96: 101802, 2006. (査読有)
- (5) A. Suzuki (23/87), K. Inoue (8/87), J. Shirai (21/87), M. Koga (11/87), T. Mitsui (14/87), Y. Kishimoto (10/87), (KamLAND collaboration), “Experimental Investigation of Geologically Produced Antrineutrinos with KamLAND”, *Nature* 436: 499-503, 2005. (査読有)
- (6) A. Suzuki (24/93), K. Inoue (7/93), J. Shirai (22/93), M. Koga (12/93), T. Mitsui (15/93), Y. Kishimoto (11/93), (KamLAND collaboration), “Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND: Evidence of Spectral Distortion”, *Phys. Rev. Lett.* 94: 081801, 2005. (査読有)
- (7) K. Inoue, “Reactor Neutrino Oscillation Studies with KamLAND”, *New Journal of Physics* 6: 147, 2004. (査読有)

[学会発表] (計 9 6 件)

1. 米澤栄斉、「カムランド太陽ニュートリノ観測のためのデッドタイムフリー電子回路 MoGURA の開発 III: システムデザイン及びトリガ基板の設計開発」、日本物理学会、2009. 3. 28、立教大学
2. 竹本康浩、「カムランド太陽ニュートリノ観測のためのデッドタイムフリー電子回路 MoGURA の開発 VI: KamLAND における実試験と全数評価」、日本物理学会、2009. 3. 28、立教大学
3. 榎本三四郎、「汎用データ収集システム KiNOKO の最近の発展」、日本物理学会、2009. 3. 28、立教大学
4. 寺島亜寿紗、「KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験 2-現在の開発状況」、日本物理学会、2009. 3. 27、立教大学
5. 森川拓矢、「液体シンチレータによる反電子ニュートリノ方向検出法の開発 I」、日本物理学会、2009. 3. 27、立教大学
6. 高橋永、「液体シンチレータによる反電子ニュートリノ方向検出法の開発 II」、日本物理学会、2009. 3. 27、立教大学
7. Y. Gando, “KamLAND: Updated Results and Future Prospect”, Asia Science Seminar on Frontier Science at High-Intensity Proton Accelerators, 20 October 2008, Beijing, China.
8. A. Suzuki, “History of Neutrino Telescope/Astronomy”, 400 years of Astronomical Telescopes, 30 September 2008, Noodrwijk, Netherlands.
9. 寺島亜寿紗、「KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験について」、日本物理学会、2008. 9. 21、山形大学
10. 渡辺寛子、「反ニュートリノの方向測定に向けたリチウム含有液体シンチレータの開発」、日本物理学会、2008. 9. 21、山形大学
11. I. Shimizu, “KamLAND Results”, Neutrino Oscillation Workshop 2008, 8 September 2008, Otranto, Italy.
12. Y. Gando, “KamLAND: updated results and future plan”, Fundamental Physics using Atoms, 19 August 2008, Sendai, Japan.
13. J. Shirai, “New KamLAND Results”, IV International Workshop on Neutrino Oscillations in Venice, 17 April 2008, Venice, Italy.
14. 吉田斉、「KamLAND 実験の現状」、日本物理学会、2008. 3. 25、近畿大学
15. 榎本三四郎、「カムランド太陽ニュートリノ観測のためのデッドタイムフリー電子回路 MoGURA の開発 1: 設計と製造」、日本物理学会、2008. 3. 25、近畿大学
16. 竹本康浩、「カムランド太陽ニュートリノ観測のためのデッドタイムフリー電子回路 MoGURA の開発 2: 動作検証と性能評価」、日本物理学会、2008. 3. 25、近畿大学
17. 中島恭平、「KamLAND 実験における低エネルギー太陽ニュートリノ観測-液体シンチレータの純化によるバックグラウンドの低減-」、日本物理学会、2008. 3. 24、近畿大学
18. 寺島亜寿紗、「KamLAND における Double beta decay 実験の可能性について」、日本物理学会、2008. 3. 24、近畿大学
19. 嶺川幸江、「KamLAND 実験における原子炉反ニュートリノの解析 1」、日本物理学会、2008. 3. 23、近畿大学
20. 清水百合、「KamLAND 実験における原子炉反ニュートリノの解析 2-系統誤差の改善」、日本物理学会、2008. 3. 23、近畿大学
21. 岐部佳朗、「KamLAND 実験における原子炉反ニュートリノの解析 3」、日本物理学会、2008. 3. 23、近畿大学
22. 渡辺寛子、「反ニュートリノの方向測定に向けたリチウム含有液体シンチレータの開発」、第 14 回 ICEPP シンポジウム、2008. 2. 18、白馬村
23. 中島恭平、「KamLAND による低エネルギー

- 太陽ニュートリノに向けた研究」、第14回 ICEPP シンポジウム、2008. 2. 18、白馬村
24. I. Shimizu, "Status of KamLAND Anti-Neutrino Analysis and Future Prospects", 6th symposium "Exploring New Science by Bridging Particle-Matter Hierarchy", 13 December 2007, Sendai, Japan.
  25. Y. Kishimoto, "Status for Solar Neutrino Phase", KEK theory symposium, December 2007, Tsukuba, Japan.
  26. I. Shimizu, "Recent Results from KamLAND", 21st workshop on Cosmic Neutrinos, 2 November 2007, Kashiwa, Japan.
  27. S. Yoshida, "KamLAND solar phase and Borexino result", 21st workshop on Cosmic Neutrinos, 2 November 2007, Kashiwa, Japan.
  28. H. Watanabe, "R&D for possible future improvement of KamLAND", 10th international conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics 2007, 14 September 2007, Sendai, Japan.
  29. K. Nakajima, "Quality Study of Purified Liquid Scintillator", TAUP2007, 14 September 2007, Sendai, Japan.
  30. I. Shimizu, "KamLAND anti-neutrino status", TAUP2007, 14 September 2007, Sendai, Japan.
  31. Y. Kishimoto, "KamLAND purification status", TAUP2007, 12 September 2007, Sendai, Japan.
  32. I. Shimizu, "Present Status and Future Prospects of KamLAND", International Workshop on Double Beta Decay and Neutrinos 2007, 12 June 2007, Osaka, Japan.
  33. A. Suzuki, "Present Status and Future Outlook of Neutrino Mass and Oscillation Experiments", International Nuclear Physics Conference, 4 June 2007, Tokyo, Japan.
  34. K. Nakamura, "Current status of the KamLAND distillation system", Deep Ocean Anti-Neutrino Observatory Workshop, 25 March 2007, Honolulu, USA.
  35. 中島恭平、「濃縮法による LS 用高感度ラドン検出器の開発」、日本物理学会、2007. 3. 25、首都大学
  36. 清水百合、「液体シンチレータ用ラドン検出器の開発」、日本物理学会、2007. 3. 25、首都大学
  37. 岐部佳朗、「KamLAND 実験における 7Be 太陽ニュートリノ観測」、日本物理学会、2007. 3. 25、首都大学
  38. S. Yoshida, "KamLAND and Solar Neutrinos", Workshop on Low-energy, Astroparticle Underground, Neutrino Physics and Cosmology in Heidelberg, 21 March 2007, Heidelberg
  39. J. Shirai, "KamLAND: Neutrinos from Reactors to the Earth and More...", KEKPH07, 3 March 2007, Tsukuba, Japan.
  40. I. Shimizu, "Current Status and Future Prospects of KamLAND", The 6th KEK Topical Conference: Frontiers in Particle Physics and Cosmology, 7 February 2007, Tsukuba, Japan.
  41. K. Inoue, "Neutrinos", Joint meeting of the US PDF, JPS and the Particle Physicists of the Pacific Region DPF06, 3 November 2006, Honolulu, USA.
  42. I. Shimizu, "Prospects for Solar Neutrino Observation in KamLAND", DPF06, 29 October 2006, Honolulu, USA.
  43. I. Shimizu, "Directional Measurement of Anti-neutrinos", Neutrino Oscillation Workshop 2006, 14 September 2006, Otranto, Italy.
  44. J. Shirai, "KamLAND Results", Neutrino Oscillation Workshop 2006, 11 September 2006, Otranto, Italy.
  45. Y. Kishimoto, "Present and Future Liquid Scintillator Detectors for Geo- and Supernova- Neutrinos", The 6th RECONTRES DU VIETNAM, 11 August 2006, Hanoi, Vietnam.
  46. K. Inoue, "New Results from Non-Accelerator Neutrino Experiments", XXXIII International Conference on High Energy Physics ICHEP06, 2 August 2006, Moscow, Russia.
  47. K. Nakamura, "KamLAND past, present and future", ICHEP06, 28 July 2006, Moscow, Russia.
  48. T. Mitsui, "KamLAND and Solar Neutrino", The 19th workshop on cosmic neutrinos, 6 July 2006, Kashiwa, Japan.
  49. T. Mitsui, "Review of Solar- and Geo-neutrinos", The 4th symposium "Exploring New Science by Bridging Particle-Matter Hierarchy", 30 June 2006, Sendai, Japan.

50. I. Shimizu, "Neutrinos from the Sun", The 4th symposium "Exploring New Science by Bridging Particle-Matter Hierarchy", 30 June 2006, Sendai, Japan.
51. A. Suzuki, "Evidence for Neutrino Mass", The XIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, 13 June 2006, Santa Fe, USA.
52. T. Mitsui, "KamLAND results and future", The XIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, 13 June 2006, Santa Fe, USA.
53. 岐部佳朗、「KamLANDにおける太陽ニュートリノ観測・蒸留法による液体シンチレータの純化8」、日本物理学会、2006. 3. 30、愛媛大学
54. 中島恭平、「液体シンチレータ中のラドン検出器の開発2-シミュレーションによる検出器の最適化」、日本物理学会、2006. 3. 29、愛媛大学
55. 清水百合、「液体シンチレータ用ラドン検出器の開発1-テストベンチによる性能評価」、日本物理学会、2006. 3. 29、愛媛大学
56. 白井淳平、「カムランドが拓く地球の謎」、日本物理学会、2006. 3. 27、愛媛大学
57. T. Mitsui, "Geo-Neutrino Physics", The 3rd symposium "Exploring New Science by Bridging Particle-Matter Hierarchy", 18 February 2006, Sendai, Japan.
58. A. Suzuki, "KamLAND Future Prospects", Neutrino Oscillation in Venice 2006, 8 February 2006, Venice, Italy.
59. T. Mitsui, "Neutron Background and Possibility for Shallow Experiments", Neutrino Geophysics, 15 December 2005, Honolulu, USA.
60. A. Suzuki, "Physics in the Next Geoneutrino Detectors", Neutrino Geophysics, 15 December 2005, Honolulu, USA.
61. K. Inoue, "Results from KamLAND", Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2005, 9 November 2005, Tokyo, Japan.
62. I. Shimizu, "Observation of Geo-neutrinos in KamLAND and Future Prospects", 18th workshop on cosmic neutrinos, 11 October 2005, Kashiwa, Japan.
63. Y. Gando, "Results and Plans of the KamLAND Experiment", The 3rd International Conference on Flavor Physics, 4 October 2005, Chung-li, Taiwan.
64. I. Shimizu, "Geo-neutrino Detection in KamLAND", Second Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, 22 September 2005, Maui, USA.
65. F. Suekane, "KamLAND", Neutrinos in Cosmology, in Astroparticle and Nuclear Physics, 19 September 2005, Sicily, Italy.
66. 榎本三四郎、「KamLAND 実験における地球ニュートリノ観測の最初の結果」、日本物理学会、2005. 9. 14、大阪市立大学
67. 竹内慎、「KamLAND における太陽ニュートリノ観測・蒸留法による液体シンチレータの純化7」、日本物理学会、2005. 9. 13、大阪市立大学
68. 海老原高士、「KamLAND における太陽ニュートリノ観測・蒸留法による液体シンチレータの純化6」、日本物理学会、2005. 9. 13、大阪市立大学
69. 岐部佳朗、「KamLAND における太陽ニュートリノ観測・蒸留法による液体シンチレータの純化5」、日本物理学会、2005. 9. 13、大阪市立大学
70. 大和田憲太郎、「KamLAND 実験における Proton Quenching Factor の測定」、日本物理学会、2005. 9. 13、大阪市立大学
71. K. Inoue, "Reactor and geologically-produced anti-neutrinos", Topics in Astroparticle and Underground Physics 2005, 12 September 2005, Zaragoza, Spain.
72. J. Shirai, "Reactor Neutrinos and KamLAND", 12th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, 26 August 2005, Moscow, Russia.
73. A. Suzuki, "Neutrino Oscillations from KamLAND", XXV Physics in Collision, 6 July 2005, Prague, Czech.
74. 井上邦雄、「カムランド実験の最近の結果」、日本物理学会、2005. 3. 25、東京理科大学
75. K. Inoue, "Exploring the earth and the sun with neutrinos", International Symposium on "Exploring New Science by Bridging Particle-Matter Hierarchy", 4 March 2005, Sendai, Japan.

76. K. Inoue, “Status and Prospects of KamLAND”, Windows to new paradigm in particle physics, 15 February 2005, Sendai, Japan.
77. T. Mitsui, “Neutron Backgrounds:  $^{13}\text{C}(\alpha, n)$  etc.”, Low Radioactivity Techniques 2004, 13 December 2004, Sudbury, Canada.
78. K. Inoue, “KamLAND screening and measurement facilities”, Low Radioactivity Techniques 2004, 12 December 2004, Sudbury, Canada.
79. Y. Kishimoto, “Liquid Scintillator Purification”, Low Radioactivity Techniques 2004, 12 December 2004, Sudbury, Canada.
80. 井上邦雄, 「カムランドが解き明かす太陽ニュートリノ問題」、日本物理学会公開講座、2004. 10. 6、中央大学
81. 竹内慎, 「KamLANDにおける太陽ニュートリノ観測に向けての研究・蒸留法による液体シンチレータの純化4」、日本物理学会、2004. 9. 29、高知大学
82. 小川桃世, 「KamLANDにおける太陽ニュートリノ観測に向けての研究・蒸留法による液体シンチレータの純化3」、日本物理学会、2004. 9. 29、高知大学
83. 津田祐輔, 「KamLAND 太陽ニュートリノ観測に向けての研究：Rn 濃度計測」、日本物理学会、2004. 9. 27、高知大学
84. 榎本三四郎, 「KamLAND 実験における地球内部起源反ニュートリノの観測」、日本物理学会、2004. 9. 27、高知大学
85. 池田晴雄, 「KamLAND 実験における原子炉反ニュートリノの解析3」、日本物理学会、2004. 9. 27、高知大学
86. 中島享, 「KamLAND 実験における原子炉反ニュートリノの解析3」、日本物理学会、2004. 9. 27、高知大学
87. 市村晃一, 「KamLAND 実験における原子炉反ニュートリノの解析1」、日本物理学会、2004. 9. 27、高知大学
88. J. Shirai, “Neutrino Experiments: Review of Recent Results”, 8th International Workshop on Tau Lepton Physics, 16 September 2004, Nara, Japan.
89. K. Inoue, “KamLAND: updated results”, Neutrino Oscillation Workshop 2004, 12 September 2004, Otranto, Italy.
90. I. Shimizu, “Latest Status of KamLAND Oscillation Analysis and Future Prospect”, 32nd international conference on High Energy Physics, 18 August 2004, Beijing, China.
91. A. Suzuki, “Results from KamLAND Reactor Neutrino Detection”, Nobel Symposium 129 (Neutrino Physics), August 2004, Hagg Slott, Enköping, Sweden.
92. T. Mitsui, “Solar Neutrino Results”, 6th International Workshop on Neutrino Factories & Superbeams, 26 July 2004, Osaka, Japan.
93. T. Mitsui, “Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND”, 15th workshop on Cosmic Neutrinos, 24 June 2004, Kashiwa, Japan.
94. K. Inoue, “KamLAND: Neutrino view from underground”, “Science in Japan” Forum at the Cosmos Club, 11 June 2004, Washington DC, USA.
95. A. Suzuki, “Present and Near Future in KamLAND”, 13th International Seminar on High Energy Physics, May 2004, Pushkinskie Gory, Russia.
96. J. Shirai, “KamLAND: Reactor Neutrinos and Recent Results”, Carolina Neutrino Workshop, 17 April 2004, Columbia, USA.

[その他]

ホームページ等

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/RCNS/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 厚人 (SUZUKI ATSUTO)

東北大学・大学院理学研究科・名誉教授  
研究者番号：00100818

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

井上 邦雄 (INOUE KUNIO)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10242166

白井 淳平 (SHIRAI JUNPEI)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：90171032

古賀 真之 (KOGA MASAYUKI)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：90343029

三井 唯夫 (MITSUI TADAO)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：20283864

岸本 康宏 (KISHIMOTO YASUHIRO)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：30374911