

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249147

研究課題名(和文) ナノ、マイクロの多次元構造制御によるX、ガンマ線用透明多結晶シンチレータの創製

研究課題名(英文) Development of transparent scintillators via controlling nano- and micro-scale structure

研究代表者

柳田 健之 (Yanagida, Takayuki)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・教授

研究者番号：20517669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,300,000円

研究成果の概要(和文)：透明多結晶の利点は、単結晶では避けがたい欠陥の形成を低減できるためにナノスケールでのエネルギー輸送効率が高く、ミクロンスケールのグレイン制御を最適化することで、光に変換された後の光伝搬効率を高められることである。さらに私は、発光に寄与しない元素を微量添加することで、発光中心近傍の局所空間構造を制御して新たなエネルギー準位を形成し、発光量が大幅に向上可能であることを見出してきた。本研究ではこれらミクロン、ナノスケールの多次元空間構造制御により、高性能な透明多結晶シンチレータの創製を目指し、結果として研究期間を一年残し、70000 ph/MeV、80 ns、約 6% のエネルギー分解能を達成した。

研究成果の概要(英文)：The advantage of transparent ceramic scintillators are high energy transfer efficiency due to the suppression of nano-scale defect and high transfer efficiency of optical photons via controlling the micro-scale grain. In order to develop efficient scintillators, doping of some ions which do not possess electron levels for luminescence sometimes works well. In this study, we developed new scintillators by controlling these properties. As a result, we achieved the light yield of 70000 ph/MeV, scintillation decay time of 80 ns, and energy resolution of 6% at 662 keV one year before the end of this project.

研究分野：放射線計測

キーワード：シンチレータ ガンマ線 透明多結晶

## 1. 研究開始当初の背景

核医学、資源探査、高エネルギー物理、セキュリティなど広い応用を持つ放射線検出器は、一般にシンチレータと蛍光を受ける受光素子とから構成されており、最終製品の性能を決定する部位となっている。近年、医療やセキュリティ用に X 線用シンチレータの開発が盛んであり、X 線用では GE 社の多結晶シンチレータが、 $\gamma$  線用ではサンゴパン社の Ce:LSO 結晶シンチレータが、その他汎用品としては Tl:NaI 結晶シンチレータが利用されている。特に GE 社はこれまで透光性(透過率 1% 程度) GOS 多結晶を用いていたが、最近では透明多結晶ガーネットを利用するようになってきている。また  $\gamma$  線用途においても米国 RMD 社等が精力的に Ce:LSO を超える透明多結晶シンチレータを探索中である。

多結晶は単結晶に比べて透明性を高めることが難しいが、機械的強度、大型化、均一性、ニアネット製造による低コスト、単結晶では不可能な化学的新組成が試行可能等、優れた特徴を有している。透明多結晶シンチレータの研究は、1990 年代に欧米 (CERN、GE) を中心に行われ、透光体を得ることに成功した。2000 年代に入り、ファインセラミックスセンターの池末らはレーザー材料として透明 Nd:YAG 多結晶を得ることに世界で初めて成功し、その後、私は世界で初めて Ce:YAG 多結晶シンチレータと APD を組み合わせ、従来の単結晶 Ce:YAG+PMT よりもエネルギー分解能、応答時間共に凌駕する結果を得た。これに加え私は、多結晶 Ce:LuAG、Pr:LuAG、Ce:GAGG を開発し、同一組成の単結晶を発光量・エネルギー分解能の双方で上回ることを実験的に示し、複合ペロブスカイト系透明多結晶シンチレータを世界に先駆けて開発してきた。特に私の開発した多結晶 Ce:GAGG は、バルク酸化物シンチレータで最大の発光量を有している。このような状況の下、現在では従来の不透明体のみならず透明多結晶シンチレータの開発が盛んに行われている。

## 2. 研究の目的

透明多結晶における利点は、単結晶では避けがたい欠陥の形成を低減できるためにナノスケールでのエネルギー輸送効率が高く、ミクロンスケールのグレイン制御を最適化することで、光に変換された後の光伝搬効率を高められることである。さらに私は、発光に寄与しない元素を微量添加することで、発光中心近傍の局所空間構造を制御して束縛励起子に伴うエネルギー準位を形成し、発光量が大幅に向上可能であることを見出してきた。本研究ではこれらミクロン、ナノスケールの多次元空間構造制御により、現在の世界記録である 70000 ph/MeV 以上の発光量、潮解性単結晶材料でしか得られていない 662 keV で 3% を超えるエネルギー分解能

を有し、蛍光時定数が 100 ns 以内の非潮解性の透明多結晶シンチレータを創製する。

## 3. 研究の方法

本研究の目的は 70000 ph/MeV 以上の発光量、潮解性単結晶材料でしか得られていない 662 keV で 3% を超えるエネルギー分解能を有し、蛍光時定数が 100 ns 以内の非潮解性の透明多結晶シンチレータを創製することである。多結晶の合成は主として放電プラズマ焼結炉を用い、一部従来の湿式合成と真空焼結の組み合わせ手法を用いて行う。サンプルが得られた後には、材料の XRD・SEM イメージ (BEI)・EPMA といったミクロな結晶性・組成評価を行い、作製過程へのフィードバックをかける。その後、透過率・反射率・屈折率評価装置および PL 装置を用い、光物性の評価を行う。光物性評価にて発光波長を把握した後は、PMT、Si-APD 等感度特性の相性が良い受光素子と組み合わせ、放射線応答の評価を行う。良い特性が得られたサンプルに関しては協力研究者に依頼し、製品グレードのサンプル合成を行う。

## 4. 研究成果

当該研究の目的は、70000 ph/MeV 以上の発光量を有し、662 keV で 3% 以内のエネルギー分解能、かつ 100 ns 以内の蛍光寿命を持つ透明多結晶シンチレータを開発することであったが、研究開発期間を一年残し、70000 ph/MeV、80 ns、約 6% のエネルギー分解能を達成している。ミクロンスケールのグレインの大きさ・均一性を制御することで、マクロなシンチレーション光の伝搬を効率化し、更に束縛励起子準位を形成することでエネルギー輸送効率を高める事に成功している。少し組成を変えた化合物においては、発光量が 50000 ph/MeV 程度まで減少するが、662 keV でのエネルギー分解能は 3% 台と、組成をファインチューニングする事で、概ね目標は達成可能というところまで達している。さらに副次的な成果として、662 keV で 2-3% のエネルギー分解能を示す、新規ハロゲン化物シンチレータも発見した。

これらの一連の研究において、私はある物質において、吸収した放射線エネルギーはシンチレーションのみならずキャリア捕獲にも利用されており、これらの間には反相関性がある事を見出した。そのため高特性なシンチレータを開発する為には、本質的に広く放射線誘起蛍光現象を俯瞰したモデルを構築し、蓄積型発光までも考慮する必要があるという着想に至った。こういった経過を踏まえ、研究期間を一年残し、研究計画最終年度前年度制度を利用し研究の再構築を行った。

## 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 40 件)

1. T. Yanagida, G. Okada, T. Kato, D. Nakauchi, S. Yanagida, Fast and high light yield scintillation in Ga203 semiconductor material, Appl. Phys. Exp., 9 042601 (2016) <http://doi.org/10.7567/APEX.9.042601> (査読有)
2. K. Saeki, Y. Fujimoto, M. Koshimizu, T. Yanagida, K. Asai, Comparative study of scintillation properties of Cs2HfCl6 and Cs2ZrCl6, Appl. Phys. Exp., 9, 042602 (2016). DOI: 10.7567/APEX.9.042602 (査読有)
3. D. Nakauchi, G. Okada, M. Koshimizu, T. Yanagida, Evaluation of Ce:SrAl2O4 Crystal Scintillators, Nucl. Instrum. Methods Res. Phys. B, 15 89-93 (2016). 2016.6 10. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.04.017> (査読有)
4. D. Nakauchi, G. Okada, M. Koshimizu, T. Yanagida, Optical and Scintillation Properties Nd-doped SrAl2O4 Crystals, J. Rare Earths, 34 757-762 (2016). 2016.8 [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60090-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60090-X) (査読有)
5. D. Nakauchi, G. Okada, M. Koshimizu, T. Yanagida, Storage Luminescence and Scintillation Properties of Eu-doped SrAl2O4 Crystals, J. Lumin., 176 342-346 (2016). 2016.8 <http://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.04.008> (査読有)
6. G. Okada, S. Kasap, T. Yanagida, Optically- and thermally-stimulated luminescences of Ce-doped SiO2 glasses prepared by spark plasma sintering, Opt. Mater., 61 15-20 (2016). 2016.9 DOI: 10.1016/j.optmat.2016.08.020 (査読有)
7. G. Okada, Y. Fujimoto, H. Tanaka, S. Kasap, T. Yanagida, Sm-doped CsBr Crystal as a New Radio-photoluminescence (RPL) Material, J. Rare Earths, 34 769-773 (2016). 2016.8 [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60092-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60092-3) (査読有)
8. M. Koshimizu, K. Iwamatsu, M. Taguchi, S. Kurashima, A. Kimura, T. Yanagida, Y. Fujimoto, K. Watanabe, K. Asai, Influence of linear energy transfer on the scintillation decay behavior in a lithium glass scintillator, J. Lumin., 169 678-681 (2016). doi:10.1016/j.jlumin.2015.04.015 (査読有)
9. T. Yanagida, Ionizing radiation induced emission: scintillation and storage-type luminescence, J. Lumin., 169 544-548 (2016). doi:10.1016/j.jlumin.2015.01.006 (査読有)
10. Saeki, M. Koshimizu, Y. Fujimoto, T. Yanagida, G. Okada, T. Yahaba, H. Tanaka, K. Asai, Scintillation properties of Eu-doped CsCl and CsBr crystals, Opt. Mater., 61 125-128 (2016). 2016.8 <http://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.07.040>(査読有)
11. K. Saeki, Y. Wakai, Y. Fujimoto, M. Koshimizu, T. Yanagida, K. Asai, Luminescence and scintillation properties of Rb2HfCl6 crystals, Jpn. J. Appl. Phys., 55 110311 (2016). 2016.10 <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.110311> (査読有)
12. M. Koshimizu, T. Yanagida, Y. Fujimoto, K. Asai, Characterization of Luminescence Properties of Gd2Si2O7:Ce and Gd2Si2O7:La, Ce under vacuum ultraviolet irradiation J. Rare Earths, 34 782-785 (2016). 2016.8 DOI: 10.1016/S1002-0721(16)60094-7 (査読有)
13. M. Mori, J. Xu, G. Okada, T. Yanagida, J. Ueda, S. Tanabe, Comparative study of optical and scintillation properties of Ce:YAGG, Ce:GAGG and Ce:LuAGG transparent ceramics, J. Ceram. Soc. Jpn., 124 569-573 (2016). 2016.4 <http://doi.org/10.2109/jcersj2.15239> (査読有)
14. M. Mori, J. Xu, G. Okada, T. Yanagida, J. Ueda, S. Tanabe, Scintillation and optical properties of Ce-doped YAGG transparent ceramics, J. Rare Earths, 34 763-768 (2016). 2016.8 [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60091-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60091-1) (査読有)
15. T. Kato, G. Okada, T. Yanagida, Optical, Scintillation and Dosimeter Properties of MgO Translucent Ceramic Doped with Cr3+, Opt. Mater., 54 134-138 (2016). doi:10.1016/j.optmat.2016.02.030 (査読有)
16. T. Kato, G. Okada, T. Yanagida, Optical, Scintillation and Dosimeter Properties of MgO Transparent Ceramic and Single Crystal, Ceramics International, 42 5617-5622 (2016). doi:10.1016/j.ceramint.2015.12.070 (査読有)

17. M. Mori, G. Okada, N. Kawaguchi, T. Yanagida, Optical, scintillation and thermally stimulated luminescence properties of Ce-doped yttrium-aluminum-indium-garnet Jpn. J. Appl. Phys., 56 012603 (2016). 2016.12 <https://doi.org/10.7567/JJAP.56.012603> ( 査読有)
18. T. Kato, G. Okada, T. Yanagida, Dosimeter Properties of MgO Transparent Ceramic Doped with C, Rad. Meas., 92 93-98 (2016). 2016.7 <http://doi.org/10.1016/j.radmeas.2016.07.004> ( 査読有)
19. T. Kato, G. Okada, T. Yanagida, Optical, Scintillation and Dosimeter Properties of MgO Transparent Ceramic Doped with Mn<sup>2+</sup>, J. Ceram. Soc. Jpn., 124 559-563 (2016). 2016.4 <http://dx.doi.org/10.2109/jcersj2.15229> ( 査読有)
20. T. Yanagida, G. Okada, Characterizations of Optical Properties and Radiation Induced Luminescence of Bi-doped La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> Transparent Ceramics, J. Ceram. Soc. Jpn., 124 564-568 (2016). 2016.4 <http://doi.org/10.2109/jcersj2.15237> ( 査読有)
21. T. Yanagida, M. Koshimizu, G. Okada, T. Kojima, J. Osada, N. Kawaguchi, Comparative study of nondoped and Eu-doped SrI<sub>2</sub> scintillator, Opt. Mater., 61 119-124 (2016). 2016.5 <http://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.05.030> ( 査読有)
22. T. Yanagida, Recent Progress of Transparent Ceramic Scintillators, Advances in Science and Technology, 98, 44-53 (2016). 2016.10 10.4028 <http://www.scientific.net/AST.98.44> ( 査読有)
23. Y. Fujimoto, M. Koshimizu, T. Yanagida, G. Okada, K. Saeki, K. Asai, Thallium magnesium chloride: A high light yield, large effective atomic number, non-hygroscopic crystalline scintillator for X-ray and gamma-ray detection, Jpn. J. Appl. Phys., 55 090301 (2016). 2016.8 <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.090301> ( 査読有)
24. T. Yanagida, Y. Fujimoto, Y. Futami, Comparative study of optical and scintillation responses of SNGS and LTGA crystals, Sensors and Materials, 27 (3)247-253 (2015) DOI: 10.18494/SAM.2015.1062 ( 査読有)
25. H. Masai, Y. Hino, T. Yanagida, Y. Fujimoto, Y. Tokuda, High energy-transfer rate from Sn<sup>2+</sup> to Mn<sup>2+</sup> in phosphate glasses, Optical Materials Express, 5 617-622 (2015). DOI:10.1364/OME.5.000617 ( 査読有)
26. H. Masai, T. Yanagida, T. Mizoguchi, N. Kawaguchi, K. Fukuda, Direct Observation of Atomic Distribution of Eu-cation in 80LiF-20CaF<sub>2</sub> Eutectic for Neutron Detector Applications, Scientific Reports 5 13332 (2015). DOI: 10.1038/srep13332 ( 査読有)
27. K. Tanaka, T. Yanagida, H. Yamane, A. Hirose, R. Yoshii, Y. Chujo, Liquid Scintillators with Near Infrared Emission Based on Organoboron Conjugated Polymers, Bioorg. Med. Chem. Lett., 25 5331-5334 (2015). doi:10.1016/j.bmcl.2015.09.037 ( 査読有)
28. H. Masai, H. Miyata, Y. Yamada, S. Okumura, T. Yanagida, Y. Kanemitsu, Tin-Doped Inorganic Amorphous Films for use as Transparent Monolithic Phosphors, Scientific Reports 5 11224 (2015) doi:10.1038/srep11224 ( 査読有)
29. Y. Fujimoto, T. Yanagida, M. Koshimizu, K. Asai, Photo-stimulated luminescence and thermoluminescence properties of CaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> crystals activated with Ce<sup>3+</sup>, Opt. Mater., 41 49-52 (2015). doi:10.1016/j.optmat.2014.11.049 ( 査読有)
30. Y. Fujimoto, T. Yanagida, M. Koshimizu, K. Asai, Photoluminescence and Scintillation Properties of SiO<sub>2</sub> Glass Activated with Eu<sup>2+</sup>, Sensors and Materials, 27 (3) 263-268 (2015) DOI: 10.18494/SAM.2015.1064 ( 査読有)
31. G. Okada, A. Edgar, S. Kasap, T. Yanagida, Radioluminescence properties of Sm-doped fluorochlorozirconate (FCZ) glasses and glass-ceramics, Jpn. J. Appl. Phys., 55 02BC07 (2015). <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.55.02BC07> ( 査読有)
32. K. Yamanoi, T. Murata, T. Yanagida, Y. Fujimoto, M. J. F. Empizo, Y. Arikawa, N. Sarukura, T. Norimatsu, H. Azechi, S. Fujino, H. Yoshida, N. Satoh, H. Kan, Scintillation and Optical Properties of Ce-doped Fluoride glass, Sensors and Materials, 27 (3) 229-235 (2015) 10.1364/OME.5.000720 ( 査読有)
33. K. Tanaka, T. Yanagida, A. Hirose, H. Yamane, R. Yoshii, Y. Chujo, Synthesis and Color Tuning of Boron Diiminate Conjugated Polymers with Aggregation-Induced Scintillation

- Properties, RSC Advances, 5 96653-96659 (2015). DOI: 10.1039/C5RA20459C (査読有)
34. T. Yanagida, K. Watanabe, Y. Fujimoto, A. Uritani, H. Yagi, T. Yanagitani "Scintillation properties of composite ceramic YAG and its capability on pulse shape discrimination" J. Ceram. Soc. Jpn., 122 1016-1019 (2014) DOI: 10.2109/jcersj2.122.1016 (査読有)
  35. M. Sugiyama, T. Yanagida, Y. Fujimoto, "Comparative study of Tm-doped and Tm-Sc co-doped Lu3Al5O12 scintillator" Rad. Meas., 71 153-157 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2014.05.033> (査読有)
  36. Y. Fujimoto, T. Yanagida, H. Yagi, T. Yanagitani, V. Chani, "Comparative study of intrinsic luminescence in undoped transparent ceramic and single crystal garnet scintillators" Opt. Mater., 36 1926-1929 (2014) DOI: 10.1016/j.optmat.2014.06 (査読有)
  37. Y. Taira, R. Kuroda, M. Tanaka, N. Oshima, B. E. O'Rourke, R. Suzuki, H. Toyokawa, K. Watanabe, T. Yanagida, H. Yagi, T. Yanagitani, "Development of a compact and fast response detector using an Yb:Lu2O3 scintillator for lifetime sensitive positron emission tomography" JINST 9 C05036 (2014) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/05/C05036> (査読有)
  38. T. Yanagida, Y. Fujimoto, H. Yagi, T. Yanagitani "Optical and scintillation properties of transparent ceramic Yb:Lu2O3 with different Yb concentrations" Opt. Mater., 36 1044-1048 (2014) DOI: 10.1016/j.optmat.2014.01.022 (査読有)
  39. T. Yanagida, Y. Fujimoto, M. Koshimizu, K. Watanabe, H. Sato, H. Yagi, T. Yanagitani "Positive hysteresis of Ce-doped GAGG scintillator" Opt. Mater., 36 2016-2019 (2014) DOI: 10.1016/j.optmat.2013.12.043 (査読有)
  40. T. Yanagida, Y. Fujimoto, T. Ito, K. Uchiyama, K. Mori "Development of X-ray induced afterglow characterization system" Appl. Phys. Exp., 7 062401 (2014) DOI: 10.7567/APEX.7.062401 (査読有)
- [学会発表](計 86 件)
1. (招待講演) 柳田健之 ガラスやセラミックスの現状と展望ニューガラスフォーラム 2017.3.23
  2. (Invited) T. Yanagida, The complementary relationship of scintillation and storage luminescence of inorganic crystalline materials, 41th ICACC Daytona beach, 22-28 Jan. (2017).
  3. (招待講演) 柳田健之 無機シンチレータ開発の現状 日本学術振興会第 125 委員会 233 回研究会 金沢工業大学大学院 虎ノ門キャンパス 2016/10/25
  4. (招待講演) 柳田健之 量子エネルギー変換材料の開発とそのセンサー応用平成 28 年度ものづくり基盤技術セミナー 7/29 京都府産業支援センター (2016).
  5. (招待講演) 柳田健之 ドシメータ、シンチレータ用の蛍光体開発, 第 59 期大洗研究所研究報告会 6/24 千代田テクノロ (2016)
  6. G. Okada, N. Kawaguchi, T. Yanagida, UV-Blue Emitting SiO2 Sintered Glass for Radiation Dosimetry, Prime2016, Honolulu Oct.2-7 (2016).
  7. T. Yanagida, M. Koshimizu, Y. Fujimoto, G. Okada, Evaluations of LiAlSi2O6 and LiAlSi4O10 crystal on scintillation and dosimeter properties, 18th International Conference on Solid State Dosimetry, Munich, Germany July 3 - July 8 (2016)
  8. T. Yanagida, G. Okada, K. Fukuda, K. Watanabe, Optically and thermally stimulated luminescence of Ce-doped and Eu-doped LiSrAlF6 crystals, 18th International Conference on Solid State Dosimetry, Munich, Germany July 3 - July 8 (2016)
  9. (Invited) T. Yanagida, Development of scintillator materials and scintillation detectors, ICOOPMA 2016, 6/12-17, Motreal, Canada (2016).
  10. (Invited) T. Yanagida Recent progress of transparent ceramic scintillators, CIMTEC congress 2016, 6/5-9, Perugia, Italy (2016).
  11. (招待講演) 柳田健之 シンチレータおよびシンチレーション検出器開発 線ナノ集光技術研究会 2015 10/31 東大 (2015).
  12. (Invited) T. Yanagida, K. Fukuda, G. Okada, K. Watanabe, Optically and thermally stimulated luminescence of Mn-doped LiCa(Al,Ga)F6 The 3rd International Workshop on Persistent and Photostimulable Phosphors DFW 2015, 9-13 Nov., Texas, US (2015).
  13. (invited) 柳田健之 放射線計測におけるガラス ニューガラスフォーラム H27.3.6
  14. (invited) 柳田健之 ガンマ線、中性子計測用の結晶シンチレータ実用化研究 電気学会 光・量子デバイス研究会 H26.10.7
  15. (invited) T. Yanagida, " Ionizing

radiation induced emission:  
scintillation and storage-type  
luminescence ” , The 17th  
International Conference on  
Luminescence and Optical Spectroscopy  
of Condensed Matter (ICL2014) H26.7.14

16. T. Yanagida, Y. Fujimoto, T. Ito, K. Uchiyama, K. Mori "Evaluation of Afterglow of Inorganic Scintillators by Pulse X-Ray Irradiation" IEEE NSS MIC 2014, 8-15 Nov. Seattle (2014).
17. T. Yanagida, K. Watanabe, H. Yagi, T. Yanagitani "Evaluation of Composite Transparent Ceramic Ce:YAG/nondoped YAG for Scintillator Use" IEEE NSS MIC 2014, 8-15 Nov. Seattle (2014).
18. T. Yanagida, K. Watanabe, A. Uritani, Y. Fujimoto, H. Yagi, T. Yanagitani Scintillation properties of composite ceramic YAG and its capability on pulse shape discrimination" 2014 Symposium of Radiation Measurements and Applications (SORMA XV), June 9-12, Michigan, US (2014).

ほか 68 件。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 5 件)

名称：蛍光素子  
発明者：柳田健之、金近幸博、福田健太郎  
権利者：九州工業大学、トクヤマ  
種類：特許  
番号：特願 2014-216649  
出願年月日：2014.10.23  
国内外の別：国内

ほか 4 件

取得状況(計 1 件)

名称：シンチレーター  
発明者：戸塚大輔、松本進、柳田健之、吉川彰  
権利者：日本結晶光学  
種類：特許  
番号：5594799  
取得年月日：2014.8.15  
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://mswebs.naist.jp/LABs/yanagida/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

柳田 健之 (Takayuki Yanagida)  
奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学  
研究科・教授  
研究者番号：20517669

(2)研究分担者

( )

研究者番号：

(3)連携研究者

藤本 裕 (Yutaka Fujimoto)  
東北大学・工学研究科・助教  
研究者番号：60639582

越水 正典 (Masanori Koshimizu)  
東北大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：40374962

渡辺 賢一 (Kenichi Watanabe)  
名古屋大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：30324461

(4)研究協力者

( )