

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23550229

研究課題名(和文)バナジン酸塩ガラスの新規二次電池正極材料としての開発

研究課題名(英文)Development of vanadate glass as a new cathode material for secondary batteries

研究代表者

久富木 志郎(Kubuki, Shiro)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：90321489

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：高い二次電池特性を有する正極材料としてバナジン酸塩ガラスの組成開発と熱処理条件の探索を行った。すでに高い電気伝導度を示すことが分かっていた $20\text{BaO} \cdot 70\text{V}_2\text{O}_5 \cdot 10\text{Fe}_2\text{O}_3$ (BVF) ガラスの組成を中心に、これを化学的に修飾した組成について導電率と構造の相関を調査した。その結果、 500°C 100分熱処理した $15\text{Li}_2\text{O} \cdot 10\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{P}_2\text{O}_5 \cdot 70\text{V}_2\text{O}_5$ ガラスはBVFガラスと同様の高い導電率を有し、この試料を正極材するリチウムイオン電池は約 500mAh/g の高い電気容量を有し、これまでの電気容量の最大値 150mAh/g を超えることが判明した。

研究成果の概要(英文)：A relationship between local structure and electrical conductivity of new vanadate glasses was investigated by ^{57}Fe -Mossbauer spectroscopy, X-ray diffractometry(XRD), Fourier transformed infrared spectroscopy(FT-IR) and DC four- and two-probe method. It was revealed that a coin cell containing isothermally annealed $15\text{Li}_2\text{O}-10\text{Fe}_2\text{O}_3-5\text{P}_2\text{O}_5-70\text{V}_2\text{O}_5$ glass as a cathode active material showed high capacity of 500mAh/g . The higher electrical performance was observed at least 8 cycles. We could successfully develop a new vanadate glass exhibiting the higher electrical performance when it is applied as a cathode active material of secondary battery.

研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料化学・無機工業材料

キーワード：二次電池 正極材料 バナジン酸塩ガラス メスバウアー分光法

1. 研究開始当初の背景

1.1. リチウムイオン二次電池正極材料の開発動向

燃料電池車の動力源などの社会的ニーズから、高い電池容量を持つガラスセラミックスの開発が盛んに進められている。開発中の正極材料の電池容量は、金属リチウムを負極とした場合、スピネル系(LiMn₂O₄)で 400 Wh/kg、オリビン(LiFePO₄)系、ペロブスカイト(FeF₃)系でいずれも 600 Wh/kg とされている。酸化バナジウム系は 800~1000 Wh/kg と高い容量を有しており、二次電池の正極材料として期待されている。

1.2. 非晶質系正極材料の開発動向

前述のスピネル、オリビン、ペロブスカイトは、これを構成する原子が規則的に配列した長距離秩序をもつ結晶質固体と分類される。これに対し原子配列に長距離秩序をもたない非晶質(アモルファス)系固体は結晶質固体に比べて乱れた構造を持つことから、結晶質固体に比べて高いイオン伝導性を持つことが知られている。酸化ガラスでは例えば LiI-Li₂O-P₂O₅ 系ガラスが室温で 10⁻⁵ S cm⁻¹ 程度の導電率を持つことが報告されている。

非晶質系導電性材料の中でバナジウムイオンを主成分とするバナジン酸塩ガラスは V^{VI}-O-V^V 間を電子が移動する、いわゆるスモールポーラロンホッピングにより、10⁻⁷ S cm⁻¹ ~ 10⁻⁵ S cm⁻¹ の範囲の導電率を有することで知られている(出典: Mott, *Adv. Phys.*, 16 (No. 61), 49-144(1967))。

久富木らの研究により BaO-V₂O₅-Fe₂O₃ ガラスは熱処理で顕著に導電率が上昇し、常温でニクロム線並みの導電率(= 10⁻² ~ 10⁰ Scm⁻¹)を示すことが明らかになった(出典: Kubuki *et al.*, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 115 [11], 777-780 (2007))。さらに連携研究者の西田らの報告によると、Li₂O-V₂O₅-P₂O₅-Fe₂O₃ 系ガラスを熱処理すると、充放電容量の値が 50 mAh g⁻¹ から 150mAh g⁻¹ へ増大することや充放電の際には Fe³⁺ Fe²⁺ の酸化還元反応が可逆的に起こることを見出した(出典: Nishida *et al.*, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 275, No.2, 417-422(2008))。上述した点から、バナジン酸塩ガラスは高い導電率と充放電容量を持つ二次電池正極材料として大きな可能性を秘めている。

1.3. バナジン酸塩ガラスの謎

しかしながら、バナジン酸塩ガラスについては、

- 1) 非晶質であるため構造決定が困難。
- 2) 最高の導電率、充放電容量を有する際の V^{VI} と V^V の割合は不明。
- 3) 熱処理で導電率が上昇する際には表面に変化が見られるが析出化合物は X 線回折等では特定できない。

などの理由での導電率、充放電容量と構造の相関については明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究では第一目的としてバナジン酸塩ガラスの熱処理による導電率上昇と構造変化の相関を ⁵⁷Fe メスバウアー分光法や小角 X 線散乱法(SAXS)、中性子線回折法を中心とする放射線を用いた手法により解明する。ガラスなど非晶質固体の短距離秩序の解明には困難が伴うが、メスバウアー分光法など波長の短い放射線を利用した分光技術を用いることで、バナジン酸塩ガラスが電気物性を大きく変える際のガラスを構成するイオンの配位数、酸化数の変化および各イオン間の距離の変化を明らかにする。さらに第一段階より得られたデータをもとに同ガラスの導電率をさらに向上させる化学組成と熱処理条件を開発することを第二の目的とする。

3. 研究の方法

本研究計画では ⁵⁷Fe メスバウアー分光法をはじめとする放射線を用いた手法によって、バナジン酸塩ガラスの構造と電気物性の相関を解明し、従来の二次電池の電池容量の最大値である 250 Wh/kg に匹敵する非晶質系の導電性ガラスを開発することを目的とする。申請者らはこれまでに BaO-V₂O₅-Fe₂O₃(BVF) 系と Li₂O-P₂O₅-V₂O₅-Fe₂O₃(LPVF)系が高い導電率と充放電容量を持っていることを明らかにしてきた。これらの研究成果を元に、平成 23 年度は BVF 系と LPVF 系を合わせたガラス系を新規に作成し、高い充放電容量と導電率を合わせ持つガラスの化学組成と熱処理条件の特定を行う。さらに、平成 24 年度以降は前年度の結果を踏まえて、さらに高い電気物性を有するバナジン酸塩ガラスの開発を目指しバナジウムイオンと同様に複数の酸化状態を持ち、電子ホッピングにより導電性を高める作用を持つとされる、酸化マンガ(MnO₂)や酸化タングステン(WO₃)を添加したガラスについての評価へと展開する。

4. 研究成果

上記、「3. 研究の方法」の方針に従い、高い二次電池特性をバナジン酸塩ガラスの構造と物性の相関解明および二次電池正極材料として高い特性をもつ組成開発、熱処理条件の探索を行った。まず、本申請前にすでに高い電気伝導度を示すことが分かっていた 20BaO・70V₂O₅・10Fe₂O₃(BVF)ガラスについてメスバウアー分光測定に加え XANES 測定を行い、熱処理前後でガラス中にどのような構造変化が起きるか調査した。その結果、熱処理後は熱処理前に観測された V^V や Fe^{III} に加え、これらのイオンを還元した V^{IV} や Fe^{II} が増加することが明らかになった(下記「5. 学会発表」No.9 で報告)。さらに熱処理によって鉄イオンはガラス中に偏析することが分かった。加えて、Ba²⁺ を Li⁺、Na⁺ および K⁺ で置換したガラスについて、500 °C より高い温度で熱処理を行うと FeVO₄ が析出し、この結晶相の低い導電性が原因となりガラスの電気伝導度が低下することが分かった(下記「5. 雑誌論文」No.8 等で報告)。その後

の、二次電池正極材料としての応用を目指した新規ガラス組成の探索研究においては、まずはじめに MnO₂ 置換系、WO₃ 置換系を評価したがいずれも 10mol %程度置換すると、熱処理による導電性の上昇は観測されなくなった(「5. 学術雑誌」No. 1, No.7 でそれぞれ発表)。しかしながら WO₃ を 10mol %まで置換したバナジウム酸塩ガラスについては BVF ガラスと同程度で導電性を持ち、化学的耐久性も向上したことから、この件については特許出願を行った(「5. 産業財産権」No.1)。その他、500 °C 100 分熱処理した 15Li₂O•10Fe₂O₃•5P₂O₅•V₂O₅ ガラスは BVF ガラスと同様の高い導電率を有し、この試料を正極材として用いたリチウムイオン電池は 500 mAh/g 程度の高い容量を持つことが分かった(「5. 学術雑誌」No. 10, No.14 等で発表)。この値は既存のバナジウム酸塩ガラスを用いた二次電池の電気容量 150 mAh/g を大きく超えるものであった。その他ヨウ化銀置換系をはじめ、いくつかの化学修飾したバナジウム酸塩ガラスについても高い導電性を有することが分かった。今後これらの二次電池正極材としての評価を継続して行う予定である。

このように、バナジウム酸塩ガラスの導電性と構造の関係について重要な知見が得られるとともに、従来の二次電池正極材として用いたときの電気容量である 150mAh/g を大きく超えるガラス組成を見出した。この期間中に得られた知見を基にさらに高い電気特性を有するガラス組成を発見しその構造との相関解明研究へと展開していきたい。

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 14 件)

(査読有)

1. S. Kubuki, H. Masuda, K. Akiyama, I. Furumoto and T. Nishida, Electrical Conductivity and Local Structure of Barium Manganese Iron Vanadate Glass. *Hyperfine Interact.*, 207, 61-65, DOI: 10.1007/s10751-011-0433-2 (2011).
2. M. Y. Hassaan, M. M. El-Desoky, H. Masuda, S. Kubuki and T. Nishida, Effect of Nanocrystallization on the Electrical Conduction of Silver Lithium Phosphate Glasses Containing Iron and Vanadium. *Hyperfine Interact.*, 205, 91-95, DOI:10.1007/s10751-011-0478-2 (2011).
3. I. Furumoto, S. Kubuki and T. Nishida, Mössbauer Study of Water-Resistive Conductive Vanadate Glass. *Radioisotopes*, 9, 463-468 (2012).
4. S. Kubuki, H. Masuda and T. Nishida, ⁵⁷Fe-Mössbauer Study of Conductive Vanadate glass with High Chemical

Durability. *American Institute of Physics Conference Proceeding Series*, 1489, 34-40, DOI: 10.1063/1.4759471 (2012).

5. S. Kubuki, H. Masuda, K. Akiyama, Z. Homonnay, E. Kuzmann, E. and T. Nishida, Electrical Conductivity and Local Structure of Lithium Tin Iron Vanadate Glass. *Hyperfine Interact.*, 219, 141-145, DOI: 10.1007/s10751-012-0657-9 (2013).
 6. S. Kubuki, H. Masuda and T. Nishida, Characterization of Electrically Conductive Vanadate Glass Containing Tungsten Oxide. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 295, 1123-1128, DOI: 10.1007/s10967-012-1887-7 (2013).
 7. S. Kubuki, K. Matsuda, K. Akiyama, Z. Homonnay, K. Sinkó, E. Kuzmann, and T. Nishida, Enhancement of Electrical Conductivity and Chemical Durability of 20R₂O•10Fe₂O₃•xWO₃•(70 - x)V₂O₅ glass (R= Na, K) Caused by Structural Relaxation. *J. Non-Cryst. Solids*, 378, 227-233, [dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.07.012](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.07.012) (2013).
 8. S. Kubuki, Matsuda, K. Akiyama and T. Nishida, ⁵⁷Fe-Mössbauer Study of Electrically Conductive Alkaline Iron Vanadate Glasses. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, DOI: 10.1007/s10967-013-2748-8 (2013).
 9. K. Matsuda, S. Kubuki, K. Akiyama, Z. Homonnay, E. Kuzmann and T. Nishida, Electrical Conductivity and Local Structure of Lithium Iron Tungsten Vanadate Glass. *Hyperfine Interact.*, DOI: 10.1007/s10751-013-0920-8 (2013).
 10. S. Kubuki, H. Masuda, K. Matsuda, K. Akiyama, A. Kitajo, S. Okada, P. Zsabka, Z. Homonnay, E. Kuzmann and T. Nishida, Mössbauer Study of New Vanadate Glass with Large Charge-Discharge Capacity. *Hyperfine Interact.*, DOI: 10.1007/s10751-013-0931-5 (2013).
 11. M. Y. Hassaan, S. M. Salem, M. G. Moustafa, S. Kubuki, K. Matsuda and T. Nishida, Controlled Crystallization and Ionic Conductivity of a Nanostructured LiNbFePO₄ Glass-Ceramic. *Hyperfine Interact.*, DOI: 10.1007/s10751-013-0926-2 (2013).
- (査読無)
12. T. Nishida, I. Furumoto, H. Masuda and S. Kubuki, ⁵⁷Fe-Mössbauer Study of Conductive Vanadate Glass With High

Chemical Durability. *Proc. Spec. Res. Meet. "Science and Engineering of Unstable Nuclei and Their Uses on Condensed Matter Physics"* (KURRI-KR-168(京都大学原子炉実験所専門研究会報告)), 17 (2012).

13. H. Masuda, S. Kubuki, K. Akiyama and T. Nishida, Electrical Conductivity and Local Structure of Manganese-Substituted Vanadate Glass. *Proc. Spec. Res. Meet. "Science and Engineering of Unstable Nuclei and Their Uses on Condensed Matter Physics"* (KURRI-KR-168(京都大学原子炉実験所専門研究会報告)), 78 - 81 (2012).
 14. H. Masuda, S. Kubuki, K. Akiyama, P. Zsabka, Z. Homonnay, E. Kuzmann and T. Nishida, ⁵⁷Fe- and ¹¹⁹Sn-Mössbauer Studies of Electrically Conductive New Vanadate Glass. *Proc. Spec. Res. Meet. "Science and Engineering of Unstable Nuclei and Their Uses on Condensed Matter Physics"* (KURRI-177(京都大学原子炉実験所専門研究会報告)), 25-29 (2013).
- (総説)
15. 久富木志郎・西田哲明, 連載講座 メスバウアー分光法を用いた新規導電ガラスの局所構造解析. *Radioisotopes*, 63(No.1), 69-77 (2014).

[学会発表](計30件)

(国際学会口頭発表)

1. T. Nishida, I. Furumoto and S. Kubuki, Structural Relaxation of Electrically Conductive Vanadate Glass. *7th Seeheim Workshop on Mössbauer Spectroscopy*, Frankfurt(Germany) (2011).
2. S. Kubuki, H. Masuda, K. Akiyama, I. Furumoto and T. Nishida, Electrical Conductivity and Local Structure of Barium Manganese Iron Vanadate Glass. *International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect(ICAME2011)*, Kobe(Japan) (2011).
3. S. Kubuki, H. Masuda, I. Furumoto and T. Nishida, ⁵⁷Fe-Mössbauer Study of Conductive Vanadate Glass With High Chemical Durability. *Mössbauer Spectroscopy in Material Sciences 2012 (MSMS2012)*, Olomouc(Czech Republic) (2012).
4. T. Nishida, I. Furumoto, H. Masuda and S. Kubuki, New Conductive Vanadate Glass with High Chemical Durability. *International Symposium on the Industrial*

Application of the Mössbauer Effect 2012 (ISIAME2012), Dalian(China) (2012).

5. S. Kubuki, K. Matsuda, K. Akiyama and T. Nishida, ⁵⁷Fe-Mössbauer Study of Electrically Conductive Alkaline Iron Vanadate Glasses. *XXXVIII Colloquium Spectroscopicum Internationale*, Tromsø(Norway) (2013).

(国際学会ポスター発表)

6. M. Y. Hassaan, M. M. El-Desoky, H. Masuda, S. Kubuki, and T. Nishida, Effect of Nanocrystallization on the Electrical Conduction of Silver Lithium Phosphate Glasses Containing Iron and Vanadium. *International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect(ICAME2011)*, Kobe (Japan) (2011).
7. S. Kubuki, H. Masuda, K. Akiyama, Z. Homonnay, E. Kuzmann and T. Nishida, Electrical Conductivity and Local Structure of Lithium Iron Tin Vanadate Glass. *International Symposium on the Industrial Application of the Mössbauer Effect 2012 (ISIAME2012)*, Dalian(China) (2012).
8. K. Matsuda, K. Akiyama and S. Kubuki, Physical property and local structure of alkaline iron tungsten vanadate glass. *International Exchange Program in Tokyo Metropolitan University -The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry-*, Hachi-Oji, Tokyo(Japan) (2013).
9. S. Yoshioka, S. Kubuki, H. Masuda, K. Akiyama, H. Kazuhiro and T. Nishida, ⁵⁷Fe-Mössbauer, XANES and HR-TEM Studies of Electrically Conductive BaO-Fe₂O₃-V₂O₅ Glasses. *XXXVIII Colloquium Spectroscopicum Internationale*, Tromsø (Norway) (2013).
10. S. Kubuki, H. Masuda, K. Akiyama, P. Zsabka, Z. Homonnay, E. Kuzmann, A. Kitajo, S. Okada and T. Nishida, Mössbauer Study of New Vanadate Glass with Large Charge-Discharge Capacity. *International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect(ICAME2013)*, Opatija(Croatia) (2013).
11. S. Kubuki, K. Matsuda, K. Akiyama, Z. Homonnay, E. Kuzmann and T. Nishida, Electrical Conductivity and Local Structure of Lithium Iron Tungsten Vanadate Glass. *International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect(ICAME2013)*,

Opatija(Croatia) (2013).

12. M. Y. Hassaan, S. M. Salem, M. G. Moustafa, S. Kubuki, K. Matsuda and T. Nishida, Controlled Crystallization an Ionic Conductivity of a Nanostructured LiNbFePO₄ Glass-Ceramics. *International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect (ICAME2013)*, Opatija (Croatia) (2013).
13. K. Matsuda, S. Kubuki, K. Akiyama, K. Sinkó, Z. Homonnay, E. Kuzmann, M. Ristić and T. Nishida, Electrical Conductivity and Local Structure of Lithium Iron Tungsten Vanadate Glass. *International Exchange Program in Tokyo Metropolitan University -The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry-*, Hachi-Oji, Tokyo(Japan) (2014).

(国内学会口頭発表)

14. 松富大記・久富木志郎・福地賢治, バナジン酸塩ガラスの構造緩和と導電率上昇の相関. 第 13 回化学工学会学生発表会(神戸大会)(西日本地区), 神戸大学(神戸市) (2011).
15. 増田一瞳・久富木志郎・秋山和彦・西田哲明, マンガンイオンを含むバナジン酸塩ガラスの物性と構造の相関. 第 48 回アイソトープ・放射線研究発表会, 日本科学未来館(東京都江東区) (2011).
16. 古本功・久富木志郎・西田哲明, 耐水性に優れた導電ガラスのメスパウアーспекトル. 第 48 回アイソトープ・放射線研究発表会, 日本科学未来館(東京都江東区) (2011).
17. 古本功・久富木志郎・西田哲明, 耐水性に優れた導電ガラスの開発. 第 48 回化学関連支部合同九州大会, 北九州国際会議場(北九州市) (2011).
18. 久富木志郎, 鉄メスパウアー分光法を用いた新素材開発 ~ 陶磁器から環境浄化材まで ~. 第 55 回放射化学討論会 原子核プローブ分科会, 若里市民文化センター(長野市) (2011).
19. 増田一瞳・久富木志郎・秋山和彦, 化学修飾したバナジン酸バリウム鉄ガラスの導電性と構造の相関. 第 55 回放射化学討論会, 若里市民文化センター(長野市) (2011).
20. 増田一瞳・久富木志郎・秋山和彦・西田哲明, マンガンイオンで置換したバナジン酸塩ガラスの導電性と構造の相関. 平成 23 年度 KUR 専門研究会「不安定原子核の理工学と物性応用研究」, 京都大学原子炉実

験所(大阪府泉南郡) (2011).

21. 津留啓吾・吉岡 聡・原一広・西田哲明・久富木志郎, バナジン酸塩ガラス中のバナジウムイオンの局所構造. 第 25 回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム. 鳥栖市民文化会館・中央公民館(鳥栖市) (2012).
22. 増田一瞳・久富木志郎・西田哲明, 導電性バナジン酸塩ガラスのキャラクタリゼーション. 第 13 回メスパウアー分光研究会. 東京大学工学部(東京都文京区) (2012).
23. 増田一瞳・久富木志郎・秋山和彦・Homonnay Zoltán・Kuzmann Ernő・西田哲明, バナジン酸リチウムスズ鉄ガラスの電気伝導性とメスパウアーспекトル. 第 49 回アイソトープ・放射線研究発表会, 東京大学農学部(東京都文京区) (2012).
24. 西田哲明・久富木志郎・古本功, 導電性と耐水性に優れた新規酸化物ガラス. 北九州学術研究都市産学連携フェア新技術説明会, 北九州学術研究都市技術開発交流センター(福岡県北九州市) (2012).
25. 久富木志郎・増田一瞳・西田哲明, メスパウアー分光法による導電性バナジン酸塩ガラスのキャラクタリゼーション. 平成 24 年度 KUR 専門研究会「不安定原子核の理工学と物性応用研究 II」, 京都大学原子炉実験所(大阪府泉南郡) (2012).
26. 西田哲明・古本功・久富木志郎, 導電性バナジン酸塩ガラスの局所構造と物性. 第 50 回アイソトープ・放射線研究発表会. 東京大学農学部(東京都文京区) (2013).
27. 松田弘賢・久富木志郎・秋山和彦・西田哲明, タングステンを置換したバナジン酸塩ガラスの局所構造と物性. 第 50 回アイソトープ・放射線研究発表会. 東京大学農学部(東京都文京区) (2013).
28. 岩本 恭平・山本 知一・吉岡 聡・安田 和弘・松村 晶・原 一広・久富木 志郎, 熱処理したバナジン酸塩ガラスの微細構造と電気伝導. 平成 25 年度応用物理学会九州支部学術講演会. 長崎大学工学部 (長崎市文教町) (2013).
29. 松田弘賢・久富木志郎・喜多條鮎子・岡田重人・西田哲明・エルノークズマン・ホモナイゾルタン, メスパウアー分光法による導電性バナジン酸塩ガラスのキャラクタリゼーション. 平成 25 年度 KUR 専門研究会「不安定原子核の理工学と物性応用研究 III」, 京都大学原子炉実験所(大阪府泉南郡) (2013).

30. 吉岡 聡・岩本 恭平・山本 知一・安田 和弘・原 一広・松村 晶・久富木志郎, 日本金属学会 2014 年 春季講演大会, 東京工業大学 大岡山キャンパス (東京都目黒区) (2014).

〔図書〕(計 1 件)

1. T. Nishida and S. Kubuki, Mössbauer Study of New Electrically Conductive Oxide Glass (Ch. 27) in Mössbauer Spectroscopy: Applications in Chemistry, Biology, Nanotechnology, Industry, and Environment, ed. Sharma, V. K. Klingelhofer, G. and Nishida, T. Wiley STM (NJ, U.S.A.), pp. 542-551 (2013).

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：耐水性及び化学的耐久性に優れたバナジン酸塩-タンゲステン酸塩ガラス
発明者：西田哲明・古本功・久富木志郎
権利者：西田哲明
番号：特願 2011-149606, 特開 2013-14482
出願年月日：平成 23 年 7 月 5 日
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久富木志郎 (KUBUKI, Shiro)
首都大学東京・大学院理工学研究科・
准教授
研究者番号：9 0 3 2 1 4 8 9

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

西田哲明 (NISHIDA, Tetsuaki)
近畿大学・工学部・教授
研究者番号：1 0 1 1 2 2 8 6