

平成 21 年 5 月 21 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19360136

研究課題名(和文) 記録用磁性薄膜における巨大磁気異方性の発現機構の解明と制御法の確立

研究課題名(英文) Study on giant magnetic anisotropy of thin films for magnetic recording

研究代表者

北上 修 (KITAKAMI OSAMU)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：70250834

研究成果の概要: 磁気メモリの高密度化には、高い磁気異方性を示す材料が不可欠である。我々は Co 合金薄膜が巨大な磁気異方性を示すことを見出し、それが格子歪(軸比 c/a)と密接に関係することを理論・実験から明らかにした。この結果を踏まえて軸比の制御法を検討した。その結果、格子の大きい下地を介在させ磁性層を薄手化することにより軸比を効果的に低減し、磁気異方性を増強できることを明らかにした。磁気異方性が格子歪と単純な関係にあることを示し、その人為的制御を可能にしたことは、将来のメモリ開発にあたり重要な意義を持つ。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2008 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
年度			
年度			
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：1. Co 合金, 2. 磁気異方性, 3. 格子歪, 4. 磁気円二色性, 5. 第一原理計算

1. 研究開始当初の背景

磁気記録の高密度化に伴い、ビットサイズは nm レベルにまで微細化されつつある。こうしたビット情報の長期保存性能を支配するのが磁気異方性エネルギーであり、将来の超高密度のためには、如何に磁気異方性を高め、所望の値に制御できるかが鍵となる。最近、我々は次世代超高密度記録材料として最有力視される室温形成 CoPt-SiO₂ 垂直磁化膜において、同組成バルク単結晶の数倍以上にも達する巨大な一軸磁気異方性($K_1 \geq 10^6$ J/m³)を発見した。その値は代表的な永久磁石

材料である L1₀ FePt 規則合金や SmCo₅ のそれに匹敵する。こうした巨大磁気異方性の発生機構については、極薄領域における格子歪が深く関与していることを明らかにしつつある。しかし、格子歪だけでなく、いわゆる空間対称性の破れを反映した表面磁気異方性がどの程度関与しているのか、またフェルミ準位を支配する価電子数に対する依存性がどのようになるかなど巨大磁気異方性の基本的な部分については依然不明な点が多く残されている。こうした根本的な問題を解決することは、学術的側面だけでなく、将来磁気記録や磁気デバイスの分野において

要求される精密な異方性制御技術を確立していく上で非常に重要である。

2. 研究の目的

本研究では、実用記録材料である CoPt-SiO₂ 垂直磁化膜を主に取りあげ、その巨大磁気異方性の発現機構を実験・理論の両面から明らかにすることを第一の目的とする。第二の目的は、上述の知見を基に磁気異方性の広範な制御技術を確立し、将来超高密度記録材料に要求される磁気異方性の仕様にフレキシブルに対応できるデータベースを構築することである。

3. 研究の方法

CoPt-SiO₂ 垂直磁化膜の格子歪、価電子数を制御すべく、下地層材料及び成膜条件（膜厚、基板温度、雰囲気圧力、堆積速度等）、組成を種々に変化させた試料を作製し、磁気異方性と格子歪、価電子数との関係を詳細に調べた。また巨大磁気異方性の発現機構に関し、実験面からは X 線磁気円二色性(XMCD)測定、理論面からは第一原理計算を行い、電子状態との係わりについて調べた。以上の検討により、巨大磁気異方性の発現条件と背後にあるメカニズムを明らかにし、それらの知見を基に磁気異方性の制御方法を明らかにする。

4. 研究成果

本研究では、 10^6 J/m^3 を越える CoPt-SiO₂ 垂直磁化膜の巨大磁気異方性の発生メカニズムを探るために、膜厚、下地層、組成等を幅広く変化させた試料を作製し、垂直磁気異方性と結晶構造の関係を系統的に調べた。その結果、磁気異方性と軸比 c/a の間には非常に強い相関があり、軸比の低下と共に磁気異方性が急増することが明らかになった。この関係は試料の詳細に依らずユニバーサルに成立していた。X 線磁気円二色性の測定によれば、軸比 c/a の減少に伴い垂直及び面内の軌道磁気モーメントの差が増し、このことから格子歪による 3d 軌道の異方的分布に起因して磁気異方性が増強されるものと推察した。一方、第一原理計算より軸比の低下と共に垂直/面内の軌道磁気モーメント差が増し、それに伴い磁気異方性が単調に増加することが確かめられた。以上のように、格子歪が巨大な磁気異方性の発生に関与していることが実験・理論の両面から確かめられた。さらに、磁気異方性の価電子数依存性に関しては、(Co_{1-x}M_x)₈₀Pt₂₀ (M = Cr, Mo, W, Re, Ru, Mn, Cu, Au, Sc, Ti, Ta, Nb, Pd, Hf) の組成に対する磁気異方性の変化を系統的に調べた。その結果、本研究で調べた組成範囲内では、磁気異方性は価電子数に依らず主に格子歪に強く

支配されていることが判った。これらの成果を踏まえて軸比の制御法を検討した。その結果、格子の大きい下地を介在させ磁性層を薄手化することにより軸比を効果的に低減し、磁気異方性を増強できることを明らかにした。磁気異方性という複雑な物理量が格子歪と単純な関係にあり、しかもその人為的制御を可能にしたことは、将来の磁気デバイスの材料開発において極めて重要な成果である。

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 27 件)

1. O. Kitakami, S. Okamoto 他 4 名、Magnetic behavior of single nano-structured magnet, *J. Phys.* (印刷中)、2009 年、査読有
2. J.-J. Wang 他 8 名、Magnetic anisotropy of epitaxially grown Co and its alloy thin films, *J. Phys.:Condens. Matt*, **21**, 185008/1-6、2009 年、査読有
3. H. Sato, T. Shimatsu 他 5 名、Fabrication of L1₁ type Co-Pt ordered alloy films by sputter deposition, *J. Appl. Phys.* 103, 07E114/1-3、2008 年、査読有
4. T. Shimatsu 他 9 名、Uniaxial magnetic anisotropy in Co and Co-Pt based perpendicular films in relation to lattice deformation, *J. Appl. Phys.* 103, 07F524/1-3、2008 年、査読有
5. N. Kikuchi 他 5 名、Magnetization reversal process and bistability of Co/Pt multilayer dot, *J. Appl. Phys.* 103, 07C510/1-3、2008 年、査読有
6. N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, The critical size between single domain and multidomain in L1₀-FePt particles, *J. Appl. Phys.* 103, 07D511/1-3、2008 年、査読有
7. S. Okamoto 他 5 名、Energy barrier and reversal mechanism in Co/Pt multilayer nanodot, *J. Appl. Phys.* 103, 07C501/1-3、2008 年、査読有
8. H. Orikasa 他 5 名、Template synthesis of water-dispersible and magnetically responsive carbon nano test tubes, *Chem. Commun*, 103, 2215-2217、2008 年、査読有
9. S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, Magnetization switching behavior with microwave assistance, *Appl. Phys. Lett*, 93, 102506/1-3、2008 年、査読有
10. S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, Frequency modulation effect on

- microwave assisted magnetization switching, Appl. Phys. Lett, 93, 142501, 2008年、査読有
11. T. Shimatsu 他 8名、Thermal stability and switching field of hard/soft-stacked perpendicular media, J. Magn. Magn. Mater, 320, 3088-3091, 2008年、査読有
 12. S. Okamoto 他 8名、Magnetization behavior of nanomagnets for patterned media application, J. Magn. Magn. Mater, 320, 2874-2878, 2008年、査読有
 13. A. Ito, N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, Magnetization switching experiments on sub-micron Co/Pt multilayer dot using a pulse field generator with nanoseconds duration, IEEE Trans. Magn, 44, 3446-3448, 2008年、査読有
 14. K. Mitsuzuka 他 5名、Magnetic properties of Co-Pt/Co hard/soft stacked dot arrays, J. Appl. Phys, 103, 07C504/1-3, 2008年、査読有
 15. 北上修, 岡本聡, 菊池伸明, ナノ磁性体と高密度スピントロニクスデバイス、未来材料(解説)、8, 30-36, 2008年、査読無
 16. 島津武仁 他 5名、スパッタリング法によるL1₁型Co-Pt規則合金膜の作製とその磁気特性(解説)、日本磁気学会誌、3, 271-277, 2008年、査読有
 17. 島津武仁, 青井基, 北上修, 新しい積層構造を用いた超高密度垂直記録媒体(解説)、日本金属学会報までりあ、47, 249-255, 2008年、査読有
 18. 島津武仁 他 4名、大きな垂直磁気異方性を有する磁性薄膜の形成とビット・パターン媒体への応用、応用物理学会研究会資料「スピントロニクスの基礎と応用」、1-8, 2008年、査読無
 19. 岡本聡 他 4名、単一ナノ磁性体の磁化反転およびそのダイナミクス、電気学会マグネティクス研究会資料、MAG07-33, 1-5, 2008年、査読無
 20. Y. Inaba 他 7名、Magnetic properties of Hard/Soft stacked perpendicular media having very thin soft layers with a high saturation magnetization, J. Magn. Soc. Jpn, 31, 178-183, 2007年、査読有
 21. K. Mitsuzuka 他 6名、Switching field and thermal stability of CoPt/Ru dot arrays with various thicknesses, IEEE Trans. Magn, 43, 2160-2162, 2007年、査読有
 22. T. Shimatsu 他 7名、Recording resolution and writability for (Co-Pt)-SiO₂/Co-SiO₂ hard/soft-stacked granular perpendicular media, IEEE Trans. Magn, 43, 2103-2105, 2007年、査読有
 23. H. Sato 他 7名、Magnetic anisotropy of Co-M-Pt (M= Cr,Mo,Ru,W,Re) perpendicular films deposited on various seed layer materials, IEEE Trans. Magn, 43, 2106-2107, 2007年、査読有
 24. T. Shimatsu 他 7名、Large uniaxial magnetic anisotropy of Co-Pt perpendicular films induced by lattice deformation, IEEE Trans. Magn, 43, 2995-2999, 2007年、査読有
 25. S. Okamoto, O. Kitakami, Epitaxially grown L1₀-FePt/(C,SiO₂,andAl₂O₃) granular films, J. Magn. Magn. Mater, 310, 2367-2369, 2007年、査読有
 26. T. Shimatsu 他 7名、Large Uniaxial Magnetic Anisotropy of Co-Pt Perpendicular Films Induced by Lattice Deformation, IEEE Trans. Magn, 43, 2995-2997, 2007年、査読有
 27. 北上修, 岡本聡, 菊池伸明, パターン媒体用磁性材料 -パターン媒体による 5 Tbpsi実現可能性について、電子情報技術産業協会(JEITA) 『ストレージ技術調査研究報告書』、21-32, 2007年、査読有
- [学会発表] (計 57 件)
1. 北上修 他 6名、記録材料のナノサイズ領域における磁化挙動の検討、日本磁気学会第 165 回研究会「極限状態の磁気ストレージ」、2009年3月13日、東京
 2. O. Kitakami, S. Okamoto, N. Kikuchi, T. Shimatsu, K. Mitsuzuka, H. Aoi, Magnetic behavior of single nanostructured magnet [Invited], International Conference on Advanced Structural and Functional Materials Design 2008, 2008年11月10日、Osaka
 3. N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, Generation of nanoseconds magnetic pulse field for switching experiments on a single Co/Pt nanodot, 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2008) CP-10, 2008年11月10日、USA/Austin
 4. S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, Frequency modulation effect on microwave assisted magnetization switching, 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2008) EU-05, 2008年11月10日、USA/Austin
 5. H. Sato 他 4名、Fabrication of L1₁

- type (Co-Ni)-Pt ordered alloy films by sputter deposition for bit-patterned media、53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2008) CC-13、2008年11月10日、USA/Austin
6. T.Shimatsu 他5名、Dot arrays of L_{11} type Co-Pt ordered alloy perpendicular films 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2008) CW-02、2008年11月10日、USA/Austin
 7. K. Mitsuzuka 他5名、Magnetic properties of thin Co-Pt dot arrays with a large uniaxial magnetic anisotropy、53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2008) CW-03、2008年11月10日、USA/Austin
 7. 島津武仁、佐藤英夫、青井基、岡本聡、北上修、大きな垂直磁気異方性を有する磁性薄膜の形成とビット・パターン媒体への応用、応用物理学研究会「スピントロニクスの基礎と応用」、2008年10月29日、東京
 8. 岡本聡、菊池伸明、北上修、マイクロ波アシスト記録における反転ダイナミクス[招待]、国際ディスクドライブ協会(IDEMA)セミナー、2008年10月14日、東京
 9. 佐藤英夫 他5名、 L_{11} Co-Pt 垂直磁化膜の磁気異方性と飽和磁化、第32回日本磁気学会学術講演会、2008年9月12日、仙台
 10. 島津武仁 他4名、スパッタ法で作製した L_{11} Co-Pt 垂直磁化膜の構造と磁気特性、第32回日本磁気学会学術講演会、2008年9月12日、仙台
 11. 三塚要 他5名、高 K_u を有する極薄 hcp Co-Pt パターン膜の磁気特性第32回日本磁気学会学術講演会、2008年9月12日、仙台
 12. 篠崎達也、菊池伸明、岡本聡、北上修、エピタキシャルCo/Fe多層膜の磁気異方性、第32回日本磁気学会学術講演会、2008年9月12日、仙台
 13. N. Kikuchi、K. Mitsuzuka、S. Okamoto、O. Kitakami、T. Shimatsu、H. Aoi、Magnetic behavior of nanostructured magnets for bit patterned media [Invited]、32nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2008) AC-03、2007年11月5日、USA/Tampa
 14. 橋本知彦、菊池伸明、岡本聡、北上修、Nano Indentationによる微小パターン形成の試み、第32回日本磁気学会学術講演会、2008年9月12日、仙台
 15. 小原佳、菊池伸明、岡本聡、北上修、NiFe 細線によるパルス磁場強度測定の試み、第32回日本磁気学会学術講演会、2008年9月12日、仙台
 16. 島津武仁 他6名、 L_{11} Co-Pt パターン膜のドットサイズと磁気特性、第32回日本磁気学会学術講演会、2008年9月12日、仙台
 17. 小原佳、菊池伸明、岡本聡、北上修、異常ホール効果による動的磁化反転過程の検出、第32回日本磁気学会学術講演会、2008年9月12日、仙台
 18. O. Kitakami、S. Okamoto、N. Kikuchi、T. Shimatsu、H. Aoi、Study on nanostructured magnets for bit patterned media [Invited]、International Disk Forum 2008、7月22日、Tokyo
 19. 岡本聡、菊池伸明、北上修、マイクロ波アシスト磁化反転の反転メカニズムとそのダイナミクス[招待] 電気学会、日本磁気学会合同研究会、2008年7月4日、那覇
 20. N. Kikuchi、A. Ito、S. Okamoto、O. Kitakami、Magnetization switching experiments on submicron Co/Pt multilayer dot with pulse field generator with nanosecond duration、International Magnetism Conference (INTERMAG 2008)、CU 05、2008年5月4日、Spain/Madrid
 21. S. Okamoto、N. Kikuchi、O. Kitakami、Microwave assisted magnetization reversal and its thermal activation、International Magnetism Conference (INTERMAG 2008)、HW03、2008年5月4日、Spain/Madrid
 22. 王建軍 他6名、Effects of RuCr buffer layer content on magnetic anisotropy of Co-W films、日本金属学会春季大会、2008年3月2日、岐阜
 23. S. Okamoto 他5名、Energy barrier and reversal mechanism in Co/Pt multilayer nanodot、52nd MMM Conference、AC-03、2007年11月5日、USA/Tampa
 24. K. Mitsuzuka 他5名、Magnetic properties of Co-Pt/Co Hard/Soft-stacked dot arrays、52nd MMM Conference、AC-12、2007年11月5日、USA/Tampa
 25. N. Kikuchi、T. Kato、S. Okamoto、O. Kitakami、Magnetization reversal process and single domain stability of Co/Pt multilayer dot、52nd MMM Conference、AR-18、2007年11月5日、USA/Tampa
 26. T. Shimatsu 他7名、Thermal stability and switching field of Hard/Soft stacked perpendicular media、52nd

- MMM Conference, FQ-09、2007年11月5日、USA/Tampa
27. T.Shimatsu 他6名、Magnetic properties of Hard/Soft stacked perpendicular media with various soft layer thickness、52nd MMM Conference, FQ-10、2007年11月5日、USA/Tampa
 28. T.Shimatsu他9名、Uniaxial magnetic anisotropy in Co and Co-Pt based perpendicular films in relation to lattice deformation、52nd MMM Conference, FQ-11、2007年11月5日、USA/Tampa
 29. N.Kikuchi、S.Okamoto、O.Kitakami、The boundary between single- and multi-domain for L1₀-FePt nanoparticles、52nd MMM Conference, HS-09、2007年11月5日、USA/Tampa
 30. H.Sato 他6名、Fabrication of L1₁ type Co-Pt ordered alloy films by sputter deposition、52nd MMM Conference, HU-01、2007年11月5日、USA/Tampa
 31. S.Okamoto、N.Kikuchi、O.Kitakami、T.Shimatsu、Magnetization behavior of nanomagnets for patterned media application [Invited]、8th Perpendicular Magnetic Recording Conference, 16pA-03、2007年10月15日、USA/Tampa
 32. Y.Okazaki 他9名、Uniaxial magnetic anisotropy and lattice deformation in Co and Co-Pt based perpendicular films、8th Perpendicular Magnetic Recording Conference, 15pD-29、2007年10月15日、Tokyo
 33. H.Sato 他6名、Fabrication of Co-Pt ordered alloy films with a large uniaxial anisotropy by sputter deposition、8th Perpendicular Magnetic Recording Conference, 16pB-15、2007年10月15日、Tokyo
 34. K. Kudo 他7名、8th Perpendicular Magnetic Recording Conference, 16pB-20、2007年10月15日、Tokyo
 35. A.Sato 他7名、Magnetic properties of Hard/Soft-stacked granular perpendicular media with various soft layer thickness、8th Perpendicular Magnetic Recording Conference, 16pB-21、2007年10月15日、Tokyo
 36. S.Okamoto、A.Ito、N.Kikuchi、O.Kitakami、Magnetization reversal of Co/Pt nanodot by applying pulse field、8th Perpendicular Magnetic Recording Conference, 16pC-06、2007年10月15日、Tokyo
 37. N.Kikuchi、S.Okamoto、T.Kato、O.Kitakami、Magnetization behavior and reversal process of Co/Pt multilayer nanodot、8th Perpendicular Magnetic Recording Conference, 16pC-07、2007年10月15日、Tokyo
 38. K. Mitsuzuka 他5名、Magnetization reversal of Co-Pt/Co Hard/Soft-stacked dot arrays、8th Perpendicular Magnetic Recording Conference, 16pC-08、2007年10月15日、Tokyo
 39. 王建军 他6名、Effects of Film Thickness and W Content on Structure and Magnetic Anisotropy of Co-W Films、日本金属学会秋季大会、2007年9月23日、東京
 40. 伊藤淳郎、菊池伸明、岡本聡、北上修、島田寛、パルス磁場による単一Co/Ptドットの磁化反転、第31回日本応用磁気学会学術講演会、11aD-10、2007年9月11日、東京
 41. 菊池伸明、岡本聡、北上修、L1₀-FePt微粒子の単磁区/多磁区境界、第31回日本応用磁気学会学術講演会、11aD-12、2007年9月11日、東京
 42. 三塚要、菊池伸明、島津武仁、北上修、村岡裕明、青井基、Hard/Softスタック型CoPt/Coパターン膜の磁化機構、第31回日本応用磁気学会学術講演会、11pE-5、2007年9月11日、東京
 43. 朝倉紀之 他6名、Hard/Softスタック垂直媒体のソフト層の厚みと磁化過程、第31回日本応用磁気学会学術講演会、13aE-7、2007年9月11日、東京
 44. 島津武仁 他7名、Hard/Softスタック垂直媒体の熱安定性と残留保磁力、第31回日本応用磁気学会学術講演会、13aE-8、2007年9月11日、東京
 45. 佐藤英夫 他6名、スパッタリング法による高磁気異方性Co-Pt規則合金膜の作成、第31回日本応用磁気学会学術講演会、13pE-11、2007年9月11日、東京
 46. 岡崎祐子 他9名、Co-Pt系垂直磁化膜の一軸磁気異方性と結晶格子の歪み、第31回日本応用磁気学会学術講演会、13pE-12、2007年9月11日、東京
 47. 小原佳 他4名、ナノドットの磁化反転計測用のパルス磁場発生第31回日本応用磁気学会学術講演会、14aE-7、2007年9月11日、東京
 48. 篠崎達也 他4名、Si(100)基板上のAgバッファ層のエピタキシャル成長、第31回日本応用磁気学会学術講演会、14aF-1、2007年9月11日、東京
 49. 王建军 他6名、MgO基板上に成長したエピタキシャルCoW薄膜の磁気異方性、第31回日本応用磁気学会学術講演会、14aF-6、2007年9月11日、東京

50. 桜井伴明 他 4 名、Ru 下地上における CoPd 薄膜の磁気特性と構造、第 31 回日本応用磁気学会学術講演会、14aF-7、2007 年 9 月 11 日、東京
51. O. Kitakami 他 4 名、Possibility of 1 Tbps recording by H/S stacked media [Invited]、第 31 回日本応用磁気学会学術講演会、14pE-1、2007 年 9 月 11 日、東京
52. 菊池伸明、岡本聡、北上修、パターンド磁性体の作製とその磁気特性評価第、104 回スピニクス研究会、2007 年 6 月 7 日、仙台
53. 菊池伸明 他 7 名、微細加工した微小磁性体の磁化過程 [Invited]、日本金属学会春季大会、2007 年 3 月 27 日、千葉
54. K. Mitsuzuka 他 6 名、Thickness dependence of the switching field and thermal stability of CoPt/Ru dot arrays、10th Joint MMM/Intermag Conference, EV 14、2007 年 1 月 7 日、USA/Baltimore
55. T. Shimatsu 他 7 名、Large uniaxial magnetic anisotropy of Co-Pt perpendicular films induced by lattice deformation、10th Joint MMM/Intermag Conference, EV 08、2007 年 1 月 7 日、USA/Baltimore
56. H. Sato 他 7 名、Magnetic anisotropy of Co-M-Pt (M=Cr,Mo,Ru,W,Re) perpendicular films epitaxially deposited on various seed layers materials、10th Joint MMM/Intermag Conference, FX 03、2007 年 1 月 7 日、USA/Baltimore
57. T. Shimatsu 他 7 名、Interfacial exchange coupling and magnetization reversal for Co-SiO₂/(Co-Pt)-SiO₂ hard/soft-stacked perpendicular media、10th Joint MMM/Intermag Conference, FX 02、2007 年 1 月 7 日、USA/Baltimore

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称：磁性薄膜とその作製方法および同薄膜を用いたデバイス

発明者：島津武仁、北上修、岡本聡、青井基

権利者：東北大学、富士電機

種類：特許

番号：特願 2008-310965

出願年月日：2008 年 12 月 5 日

国内外の別：国内

名称：磁性薄膜とその作製方法および同薄膜を用いたデバイス

発明者：島津武仁、北上修、岡本聡、青井基

権利者：東北大学、富士電機

種類：特許

番号：特願 2008-193156

出願年月日：2008 年 7 月 28 日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ

<http://nanomagnet.tagen.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北上 修 (KITAKAMI OSAMU)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：70250834

(2) 研究分担者

岡本 聡 (OKAMOTO SATOSHI)

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：10292278

菊池 伸明 (KIKUCHI NOBUAKI)

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号：80436170

島津 武仁 (SHIMATSU TAKEHITO)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：50206182

柳原 美廣 (YANAGIHARA MIHIRO)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：40174552

(3) 連携研究者

なし