

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：17401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610118

研究課題名(和文)液体表面に現れる音波モードの特殊性:X線非弾性散乱による観測

研究課題名(英文)Characteristic features of phonon modes on the liquid surface: Observation by inelastic x-ray scattering

研究代表者

細川 伸也 (Hosokawa, Shinya)

熊本大学・大学院先端科学研究部(理)・教授

研究者番号：30183601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、液体金属表面の原子ダイナミクス、特に励起されるフォノンの物性の液体内部との相違について、大型放射光施設SPring-8でX線非弾性散乱によって詳しく探索する、世界で初めての試みに挑戦している。最大の難関は、 10^{-8} Pa程度の超高真空条件下で表面原子レベルで清浄な表面を作成することであった。まず第一に、真空容器を作成し、イオンポンプなどの真空排気装置を準備して超高真空状態を達成することで、これについては研究課題期間内に達成することができた。今後、ヒーターを用いた表面酸化物の除去装置の稼働テストなどを早急に行い、その後速やかに液体スズを試料とした本実験に結びつけたい。

研究成果の概要(英文)：In this project, we try to investigate the atomic dynamics on a surface of liquid metals, in particular, the differences of phonon excitations on the surface from the bulk liquid metal ones, which is the first trial all over the world. The difficult task of this project was to achieve clean surfaces with the atomic level under an ultrahigh vacuum conditions of about 10^{-8} Pa. The ultrahigh vacuum condition was accomplished using specially designed vacuum vessel and pumping system including an ion pump. Hereafter, we will quickly perform a preliminary test of a new cleaning system using a heating wire, and then carry out the experiment on liquid tin.

研究分野：実験物理学、非結晶物性、フォノン物性、放射光

キーワード：液体表面 フォノン X線非弾性散乱 超高真空

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまで、バルクの液体金属について、高エネルギー分解能 X 線非弾性散乱実験を行った結果、高校物理の教科書に書かれているように、液体には存在できないとされてきた横波音響音波モードを、液体 Ga、Sn、Fe、Cu など実験を行った全ての液体金属で観測することに成功してきた。この発見は、卓越した液体研究として、非弾性散乱国際会議など、数々の国際会議に招待を受け、また SPring-8 NEWS や IOP select に選ばれるなど、国内外を問わず高い評価を得てきた。研究代表者の次の研究の戦略として、液体中の音波が表面でどう変化するかに焦点を絞って、この研究をスタートさせた。

単純な液体金属であっても、表面付近では粒子密度が非常に緻密な状態にあり、バルク方向に向かうにしたがって疎密疎密を繰り返す層状構造を示すことが、X 線反射実験によって知られている。しかしながら、小角入射での回折実験は、液体表面のゆらぎや Crystal Truncation Rod (CTR) 散乱のため、必ずしも成功してはいない。表面の原子ダイナミクスに至っては、研究代表者の知る限り、研究計画すら立てられていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、単純な液体である液体金属の表面に、ナノメートルスケール、短寿命で現れる、縦波、横波、音響、光学などさまざまな音波モードを、X 線非弾性散乱によって観測し、原子の振動や拡散について表面特有の特殊な性質を明らかにしようとするものである。まず、清浄な液体金属表面を安定的に作成できる超高真空装置を開発し、その装置を用いて、液体金属内部においてその存在が実験的に明らかになった、固体的な「かご」状クラスターが、液体表面の原子密度が示す層状構造によって、どのように影響を受けるか、を明らかにする。

3. 研究の方法

この研究で最も大切なことは、液体の清浄表面を原子レベルで達成することであった。1990 年頃の光電子分光による研究により、それは可能であることはわかっているが、その後それを達成したグループはまだない。まず、光電子分光実験での清浄表面作製技術を忠実に再現することを目指し、また X 線非弾性散乱実験に適した超高真空容器を作製することを試みた。

図 1 は、研究開始前に想定した容器の略図である。X 線非弾性散乱実験用に X 線透過窓を備え、主としてイオンポンプを使って 10^{-8} Pa 台の超高真空を達成する。ヒーターを使って液化した液体金属の表面を、加熱したクリーニング・ワイヤーで掃引して、清浄表面の作製を試みることを想定した。赤が新たに購入を予定していた物品である。

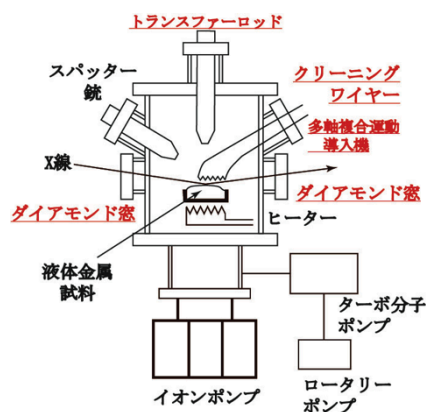


図 1：超高真空実験装置の研究開始前に想定した略図

液体金属としては、バルクの非弾性 X 線散乱測定を既に行ったものの中から、低融点・低蒸気圧の Sn を採用する。ベーキングにより超高真空を達成した真空容器に、固体金属試料を導入する。ヒーターにより昇温、液化した液体金属試料は、加熱したクリーニング・ワイヤーを外部より操作して、ていねいに不純物を除去して、鏡面状態とする。試料の量を調整し、表面張力でわずかに凸型の表面を安定に作る。

この装置を大型放射光施設 SPring-8 のビームライン BL-35XU に搬入し、X 線非弾性散乱実験を行う。実験では、5 日間程度のビームタイムの間に、試料表面の酸化などの劣化、また表面張力の変化による試料表面の変形が起こらないように、慎重に実験条件を決める。

4. 研究成果

研究開始の後、ダイヤモンド窓は、材質を安価なサファイアに変えても実験上問題がないことがわかり、変更を行った。またその結果、真空容器も新しく X 線非弾性散乱に適した特注品を準備できた。予算の都合上、高価なトランスファーロッドは購入を断念し、また、他研究室より貸与いただく予定であったスパッター銃は、故障のため使用できなかった。ただし、スパッターよりも原始的なワイヤー掃引が効果的であることが先行の光電子分光研究でわかっているため、それらを除いたコンパクトな超真空槽の作製を行った。

図 2 は、平成 27 年度に実際に準備した真空容器の写真である。容器の左下の窓及びその反対側の窓がサファイア製 X 線透過窓、右下が試料を観察するのぞき窓である。左上の青い握り手のついたものは、クリーニング・ワイヤーを動かす回転導入装置である。容器の下にヒーター用あるいは熱電対用の電極導入が設置されている。この真空容器を、容器の裏側に設置した既存のイオンポンプ、ターボ分子ポンプあるいはロータリー粗排気ポンプを使って、容器全体のベーキングを行

って 10^{-8} Pa 台の超高真空を達成することを
目指した。

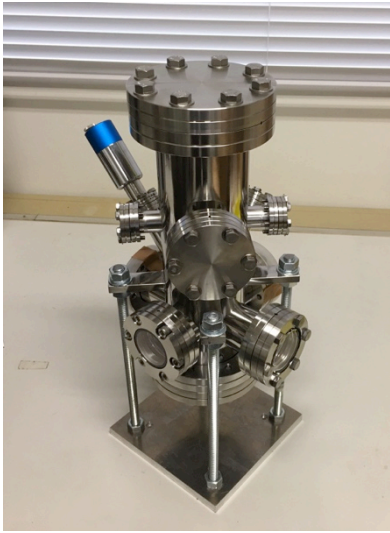


図 2 : 液体表面の X 線非弾性散乱用に準備し
た真空容器の写真

平成 28 年度初めには、超高真空が達成で
きる予定であったが、排気の基幹装置である
イオンポンプに不具合が生じたため、修理を
行った。修理が終了した平成 28 年度半ばに
は再び挑戦を行なったが、再び故障した。そ
の原因を精査した結果、既存のイオンポンプ
の排気容量がやや不足していることが原因
らしいことを突き止めた。平成 29 年度初め
になって、排気量のやや大きなイオンポンプ
を別予算で購入し、それを用いて超高真空条
件を達成できた。また、真空計その他の必要
器具の動作確認も順調に行うことができた。

SPring-8 での実験の準備も、分担研究者を
はじめとするビームライン担当者との打ち
合わせも終わり、実際の実験には支障はない
ものと思われる。今後は、すでに作成の終わ
っている超高真空下での昇温システムおよ
び液体金属表面の清浄下ツールの動作確認
を行った上で、実際に Sn や Ga などの低融
点金属を対象とした液体金属表面のダイナ
ミクスの実験研究の実現を目指したい。

バルク液体やガラスの X 線非弾性散乱実験
によるダイナミクスの研究結果については、
液体金属の Bi、Ca、Cd、Fe、Cu、Zn およ
び Hg、分子性液体の液体ベンゼンなどの成
果があり、いずれも論文発表を行ってきた。
また、結晶においても Mg LPSO 合金や
Ba₃CuSb₂O₉ の研究も主だった。これらの論
文はプレスリリースされたものもある。

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 11 件)

① K. Yoshida, N. Fukuyama, T.

Yamaguchi, S. Hosokawa, H. Uchiyama, S.
Tsutsui, and A. Q. R. Baron, Inelastic
X-ray scattering on liquid benzene
analyzed using a generalized Langevin
equation, Chemical Physics Letters 680,
1-5 (2017), 査読有, DOI: 10.1016/j.cplett.
2017.05.005

② M. Inui, Y. Kajihara, S. Munejiri, S.
Hosokawa, A. Chiba, K. Ohara, S. Tsutsui,
and A. Q. R. Baron, Asymmetrical bonding
in liquid Bi disentangled by inelastic X- ray
scattering, European Physical Journal:
Web of Conferences, 査読有

③ M. Inui, Y. Kajihara, K. Kimura, K.
Matsuda, T. Miyatake, A. Chiba, S.
Hosokawa, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron,
Dispersion relations of the acoustic modes
in divalent liquid metals, European
Physical Journal: Web of Conferences, 査
読有

④ S. Hosokawa, K. Kimura, M. Yamasaki,
Y. Kawamura, K. Yoshida, M. Inui, S.
Tsutsui, A. Q. R. Baron, Y. Kawakita, and
S. Itoh, Impurity effects in the microscopic
elastic properties of polycrystalline
Mg-Zn-Y alloys with a synchronized
long-period stacking ordered phase,
Journal of Alloys and Compounds 695,
426-432 (2017), 査読有, DOI: 10.1016
/j.jallcom.2016.10.266

⑤ Y. Wakabayashi, D. Nakajima, Y.
Ishiguro, K. Kimura, T. Kimura, S. Tsutsui,
A. Q. R. Baron, K. Hayashi, N. Happo, S.
Hosokawa, K. Ohwada, and S. Nakatsuji,
Chemical and orbital fluctuations in
Ba₃CuSb₂O₉, Physical Review B 93,
245117-1-13 (2016), 査読有, DOI: 10.1103
/PhysRevB.93.245117

⑥ S. Hosokawa, M. Inui, Y. Kajihara, T.
Ichitsubo, K. Matsuda, H. Kato, A. Chiba,
K. Kimura, K. Kamimura, S. Tsutsui, H.
Uchiyama, and A. Q. R. Baron, Phonon
excitations in Pd₄₀Ni₄₀P₂₀ bulk metallic
glass by inelastic x-ray scattering,
Materials Science Forum 879, 767-772
(2017), 査読有, DOI: 10.4028/www.
scientific.net/MSF.879.767

⑦ M. Inui, Y. Kajihara, K. Ohara, K.
Matsuda, D. Ishikawa, and S. Hosokawa,
Critical indices ν and γ experimentally
obtained at the liquid-vapor critical point
in fluid Hg, Journal of the Physical Society
of Japan 85, 035001-1-2 (2016), 査読有,
DOI: 10.7566/JPSJ.85.035001

⑧ M. Inui, Y. Kajihara, S. Munejiri, S. Hosokawa, A. Chiba, K. Ohara, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron, Anomalous dispersion of the acoustic mode in liquid Bi, *Physical Review B* 92, 054206-1-8 (2015), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.92.054206

⑨ S. Hosokawa, M. Inui, Y. Kajihara, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron, Transverse excitations in liquid Fe, Cu and Zn, *Journal of Physics: Condensed Matter* 27, 194104-1-7 (2015), 査読有, DOI: 10.1088/0953-8984/27/19/194104

⑩ S. Hosokawa, M. Yamasaki, Y. Kawamura, M. Inui, Y. Kajihara, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron, Microscopic elastic properties of polycrystalline $Mg_{85}Zn_6Y_9$ alloy with long-period stacking ordered 18R phase investigated by inelastic x-ray scattering, *Materials Transaction* 56, 914-916 (2015), 査読有, DOI: 10.2320/matertrans.MH201409

⑪ 乾雅祝、梶原行夫、宗尻修治、細川伸也、千葉文野、尾原幸治、筒井智嗣、アルフレッド・バロン、液体ビスマスの音響モードの奇妙な振舞い、*日本放射光学学会誌「放射光」* 29, 74-81 (2016), 査読有

[学会発表] (計 29 件)

① S. Hosokawa, J. R. Stellhorn, K. Kimura, K. Hayashi, K. Hagihara, H. Izuno, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Y. Mine, K. Takashima, H. Uchiyama, and S. Tsutsui (Oral presentation), Microscopic elastic properties of single crystal $Mg_{85}Zn_6Y_9$ alloy with long-period stacking ordered phase by inelastic x-ray scattering, 3rd International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials (4-7 December 2016, Kyoto)

② S. Hosokawa, M. Inui, Y. Kajihara, A. Chiba, T. Ichitsubo, H. Kato, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron (Oral presentation), Phonon excitations in $Pd_{42.5}Ni_{17.5}Cu_{30}P_{20}$ bulk metallic glass, 16th International Conference on Liquid and Amorphous Metals (4-9 September 2016, Bonn-Bad Godesberg)

③ M. Inui, Y. Kajihara, K. Kimura, K. Matsuda, T. Miyatake, A. Chiba, S. Hosokawa, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron (Poster presentation), The dispersion relation of the acoustic mode in liquid Ca and liquid Cd, 16th International Conference on Liquid and Amorphous Metals (4-9 September 2016, Bonn-Bad Godesberg)

④ S. Hosokawa, K. Kimura, M. Yamasaki, Y. Kawamura, K. Yoshida, M. Inui, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron (Oral presentation), Microscopic elastic properties of polycrystalline Mg-Zn-Y alloys with long-period stacking ordered 18R phase by inelastic x-ray scattering, International Conference on Processing and Manufacturing of Advances Materials - Processing, Fabrication, Properties, Applications - THERMEC'2016 (29 May -3 June 2016, Graz)

⑤ S. Hosokawa, K. Kimura, M. Inui, Y. Kajihara, T. Ichitsubo, H. Kato, K. Matsuda, S. Tsutsui, A. Q. R. Baron (**Invited talk**), Phonon excitations in $Pd_{42.5}Ni_{17.5}Cu_{30}P_{20}$ bulk metallic glass by inelastic x-ray scattering, International Conference on Processing and Manufacturing of Advances Materials - Processing, Fabrication, Properties, Applications - THERMEC'2016 (29 May -3 June 2016, Graz)

⑥ K. Kimura, S. Hosokawa, M. Yamasaki, Y. Kawamura, K. Yoshida, M. Inui, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron (Oral presentation), Microscopic elastic properties of polycrystalline Mg alloy with long-period stacking ordered 18R phase investigated by inelastic x-ray scattering, The 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (11-16 October 2015, Jeju)

⑦ S. Hosokawa, M. Inui, Y. Kajihara, T. Ichitsubo, H. Kato, K. Matsuda, K. Kimura, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron (Oral presentation) Phonon excitations in $Pd_{42.5}Ni_{17.5}Cu_{30}P_{20}$ bulk metallic glass, 14th International Conference on the Physics of Non-Crystalline Solids (20-25 September 2015, Niagara Falls)

⑧ S. Hosokawa, M. Inui, Y. Kajihara, T. Ichitsubo, H. Kato, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron (Oral presentation), Phonon excitations in $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ metallic glass, 22nd International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (13-17 July 2015, Paris)

⑨ S. Hosokawa, K. Kimura, M. Inui, Y. Kajihara, K. Matsuda, A. Q. R. Baron, M. Yamasaki and Y. Kawamura (Oral presentation), Microscopic elastic properties of $Mg_{85}Zn_6Y_9$ alloy with LPSO phase studied by inelastic x-ray scattering, The International Conference "Advanced Materials Week - 2015" (AMW 2015), (15-20 June 2015, Togliatti - St. Petersburg)

⑩ S. Hosokawa, M. Inui, Y. Kajihara, K. Matsuda, K. Kimura, H. Kato, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron (Poster presentation), Transverse

phonon excitations in a Pd-based metallic alloy in the liquid and supercooled liquid phases, International Workshop on Dynamics in Viscous Liquids (4-7 May 2015, Montpellier)

⑪ 細川伸也 (依頼講演)、液体金属中の横波研究の現状、不規則系物理学研究会 (2017年3月25-26日、京都大学理学部)

⑫ 細川伸也、乾雅祝、梶原行夫、千葉文野、筒井智嗣、Alfred Q. R. Baron (口頭発表)、X線非弾性散乱による液体 Hg の横波フォノン励起、日本物理学会第 72 回年次大会 (2017年3月17-20日、大阪大学豊中キャンパス)

⑬ 乾雅祝、梶原行夫、細川伸也、松田和博、土屋良海、内山裕士、筒井智嗣、アルフレッド・バロン (口頭発表)、非弾性 X 線散乱で観測した高温高压下の液体 $\text{Se}_{50}\text{Te}_{50}$ の音響モード、日本物理学会第 72 回年次大会 (2017年3月17-20日、大阪大学豊中キャンパス)

⑭ 細川伸也、木村耕治、Jens R. Stellan, 吉田亨次、萩原幸司、伊津野仁史、山崎倫昭、河村 能人、峯洋二、高島和希、内山裕士、筒井智嗣 (口頭発表)、X 線非弾性散乱による単結晶 $\text{Mg}_{85}\text{Zn}_6\text{Y}_9$ LPSO 合金のフォノン励起の研究 II、日本金属学会 2017 年春期講演大会 (2017年3月15-17日、首都大学東京南大沢キャンパス)

⑮ 細川伸也、乾雅祝、梶原行夫、千葉文野、筒井智嗣、Alfred Q. R. Baron (口頭発表)、X 線非弾性散乱による液体 Hg の横波フォノン励起、第 30 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム (2017年1月7-9日、神戸芸術センター)

⑯ 細川伸也 (依頼講演)、中性子非弾性散乱による Mg-Zn-Y 合金のフォノン励起-X 線との比較、HRC 研究会 (2016年11月14日、KEK 東海 1 号館)

⑰ 細川伸也、Jens R. Stellan, 木村耕治、林好一、吉田亨次、萩原幸司、伊津野仁史、山崎倫昭、河村 能人、内山裕士、筒井智嗣 (口頭発表)、X 線非弾性散乱による単結晶 $\text{Mg}_{85}\text{Zn}_6\text{Y}_9$ LPSO 合金のフォノン励起の研究、日本金属学会 2016 年秋期講演大会 (2016年9月21-23日、大阪大学豊中キャンパス)

⑱ 乾雅祝、梶原行夫、細川伸也、松田和博、筒井智嗣、アルフレッド・バロン (口頭発表)、非弾性 X 線散乱で観測した高温高压下の液体テルルの音響モード、日本物理学会 2016 年秋期大会 (2016年9月13-16日、金沢大学角間キャンパス)

⑲ 細川伸也 (口頭発表)、X 線非弾性散乱実験による LPSO 相のダイナミクス、新学術領

域「シンクロ型 LPSO 構造」平成 27 年度研究成果報告会 (2015年3月4-5日、軽井沢プリンスホテルウェスト)

⑳ 木村耕治、細川伸也、山崎倫昭、河村能人、吉田亨次、乾雅祝、筒井智嗣、Alfred Q. R. Baron (ポスター発表)、LPSO 相型 Mg 合金におけるフォノン励起:非弾性 X 線散乱による研究、第 29 回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム (2016年1月9-11日、柏の葉カンファレンスセンター)

㉑ 木村耕治、細川伸也 (口頭発表)、X 線非弾性散乱による LPSO 相型 Mg 合金のフォノン励起の研究、新学術領域「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学」平成 27 年度合宿研究会 (2015年9月28-29日、KKR 京都くに荘)

㉒ 乾雅祝、梶原行夫、宗尻修治、細川伸也、千葉文野、尾原幸治、筒井智嗣、アルフレッド・バロン (ポスター発表)、液体ビスマスにおける剛体球的集団運動、日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015年9月16-19日、関西大学千里山キャンパス)

㉓ 細川伸也、乾雅祝、梶原行夫、市坪哲、加藤秀実、筒井智嗣、A. Q. R. Baron (口頭発表)、X 線非弾性散乱による $\text{Pd}_{42.5}\text{Ni}_{17.5}\text{Cu}_{30}\text{P}_{20}$ 金属ガラス、過冷却液体、液体のフォノン励起の研究、日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015年9月16-19日、関西大学千里山キャンパス)

㉔ 木村耕治、細川伸也、山崎倫昭、河村能人、乾雅祝、梶原行夫、吉田亨次、筒井智嗣、内山裕士、Alfred Q. R. Baron (口頭発表)、X 線非弾性散乱による Mg-LPSO 相のフォノン励起の研究、日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015年9月16-19日、関西大学千里山キャンパス)

㉕ 木村耕治、細川伸也、山崎倫昭、河村能人、吉田亨次、乾雅祝、筒井智嗣、Alfred Q. R. Baron (口頭発表)、非弾性 X 線散乱による Mg-Zn-Y 合金の原子ダイナミクスの研究、日本金属学会 2015 年秋期講演大会 (2015年9月16-18日、九州大学伊都キャンパス)

㉖ 乾雅祝、梶原行夫、細川伸也、千葉文野、木村耕治、松田和博、宮武至、筒井智嗣、アルフレッド・バロン (口頭発表)、液体カルシウムの非弾性 X 線散乱測定、日本物理学会第 70 回年次大会 (2015年3月21-24日、早稲田大学早稲田キャンパス)

㉗ 細川伸也、山崎倫昭、河村能人、乾雅祝、梶原行夫、Alfred Q. R. Baron (口頭発表)、X 線非弾性散乱による Mg-LPSO 相 18R のフォノン励起の研究、日本金属学会第 156 回春期講演大会 公募シンポジウム「シンクロ型

LPSO 構造の構造科学」(2015年3月18-20日、
東京大学駒場キャンパス)

㊸ 細川伸也、山崎倫昭、河村能人、乾雅祝、
梶原行夫、Alfred Q. R. Baron (口頭発表)、X
線非弾性散乱による LPSO18R 多結晶のミク
ロな弾性的性質の研究、新学術領域「シンク
ロ型 LPSO 構造」平成 26 年度研究成果報告会
(2015年3月6-7日、軽井沢プリンスホテル
ウエスト)

㊹ 乾雅祝、梶原行夫、細川伸也、千葉文野、
木村耕治、筒井智嗣、アルフレッド・バロン
(口頭発表)、非弾性 X 線散乱法による液体
GeTe のダイナミクス研究、第 28 回放射光学
学会年会放射光科学合同シンポジウム (2015年
1月10-12日、立命館大学びわこ・くさつキャ
ンパス)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

[http://crocus.sci.kumamoto-u.ac.jp/physics/SR/in
dex.html](http://crocus.sci.kumamoto-u.ac.jp/physics/SR/index.html)

6. 研究組織

(1)研究代表者

細川 伸也 (HOSOKAWA, Shinya)
熊本大学・大学院先端科学研究部 (理)・
教授
研究者番号：30183601

(2)研究分担者

石川 大介 (ISHIKAWA, Daisuke)
公益財団法人高輝度光科学研究センタ
ー・利用研究促進部門・研究員

研究者番号：00391855

下條 冬樹 (SHIMOJO, Fuyuki)
熊本大学・大学院先端科学研究部 (理)・
教授

研究者番号：60253027

(3)連携研究者

松田 和博 (MATSUDA, Kazuhiro)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：50362447

アルフレッド バロン (BARON Alfred Q.
R.)

独立行政法人理化学研究所・放射光科学研
究センター・准主任研究員

研究者番号：90442920

(4)研究協力者

()