

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340089

研究課題名(和文) 金属強磁性スピン関連の中性子散乱分光研究及び高輝度中性子モノクロメータの実用化

研究課題名(英文) Neutron scattering spectroscopic study on spin dynamics of metallic ferromagnets and a practical use of high-luminosity neutron monochromators

研究代表者

平賀 晴弘 (Hiraka, Haruhiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・特任准教授

研究者番号：90323097

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,900,000円、(間接経費) 2,070,000円

研究成果の概要(和文)：金属磁性体におけるスピンダイナミックスの全容をパルス中性子及び定常中性子を使って研究した。特に、金属反強磁性体(Mn,Fe)₃Siに対して、これまでにない広いエネルギー空間(1~100 meV)で磁気励起を見出すことに成功した。結果、局在スピンと遍歴電子スピンの動特性がエネルギー域により切り替わっていく様相を明らかにすることができた。

磁性研究と平行し、新しい中性子モノクロメータ結晶の開発を行った。具体的には、湾曲状に塑性変形させたGe半導体結晶を中性子集光モノクロメータ素子として活用できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：Spin dynamics of metallic magnets were studied by using pulsed neutrons and reactor-based neutrons. In particular, for a metallic antiferromagnet system (Mn,Fe)₃Si, we succeeded in observing magnetic excitations in a wide energy range of 1~100 meV. As a result, a switching of spin dynamics from localized-spin nature to itinerant-electron spin one was clarified.

At the same time, we developed a new type of neutron-monochromator crystals and revealed that Ge-semiconductor crystals, which were plastically deformed in a curved shape, were available for neutron-focusing-monochromator components.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：金属磁性 中性子散乱 結晶モノクロメータ

1. 研究開始当初の背景

中性子散乱関数 $S(\mathbf{q}, \omega)$ は、空間的・時間的な変動磁場に対する磁気応答、即ち動的帯磁率 $\chi(\mathbf{q}, \omega)$ の虚数部分に直結しているため、解析モデル無しで実験データから直接 $\chi''(\mathbf{q}, \omega)$ を決定できる。1970-1980年代に日本の中性子実験グループが精密測定した金属強磁性体 MnSi における長波長磁気励起 [Ishikawa, Phys. Rev. B (1977) & (1985)] は、遍歴電子系の典型的な $\chi''(\mathbf{q}, \omega)$ の実験的証拠として [Moriya, J. Phys. Soc. Jpn. (1973)]、金属磁性物理学における一つのマイルストーンと見なされている。一方、鉄やニッケルといった多くの金属強磁性体では、 d 電子が結晶中で適度に広がり、電子相関もほどほどの強さにある。このように局在スピンの系と遍歴電子系の間にある場合は理論的取り扱いが難しく [Moriya, J. Phys. Soc. Jpn. (1978)]、中間系の磁性現象に関してはいまだ定性的な議論に留まっていた。

幸いなことに、当該基盤研究を始める前年に大強度陽子加速器 J-PARC が丁度スタートし、 $S(\mathbf{q}, \omega)$ の測定エネルギーレンジは一気に sub-eV オーダーまで広がった。また、研究用原子炉 JRR-3 施設で代表者が装置責任者として積極的に取り組んでいた東北大金研・中性子散乱分光器 (AKANE) のアップグレード [Hiraka, J. Mag. Mag. Mater. (2007)] 及び中性子モノクロメータ結晶開発 [Miyake, J. Phys. Conf. Ser. (2011)] も大きく前進し、偏極中性子実験に特化していない AKANE でも、定常偏極中性子による非弾性散乱実験が可能になりつつあった。このように、本研究開始当初、金属強磁性に腰を据えて取り組むには絶好のタイミングにあった。

2. 研究の目的

目的は大きく二つ。(I) 非偏極中性子非弾性散乱による金属強磁性体・反強磁性体の低～高エネルギー磁気励起の解明、及び、(II) モザイク導入型湾曲結晶アナライザー用素子の製作と集光機構の設計。

近年の鉄系超伝導体の発見により、Cooper 対の生成と金属磁性、特に反強磁性磁気揺らぎとの関連を探る研究が活発になってきた。そこで、本研究では金属反強磁性体 Mn_3Si とその Fe 置換体を研究対象とし、その磁気励起の全体像の見極めを第一の目標とした。

代表者らが論文発表や特許申請するなど積極的に取り組んでいた中性子モノクロメータ単結晶の開発、特に、半導体ウェーハ単結晶の塑性変形を利用した新しい集光型モノクロメータ／アナライザーの実機製作を第二の目的とした。

3. 研究の方法

具体的には、次の四項目を遂行した。J-PARC/MLF 施設内の大強度パルス中性子分光器・四季を用い、パルス中性子による高エネルギー磁気励起の定量化。(2) ILL (フラ

ンス) の研究用原子炉にて、定常偏極中性子による磁気励起モードの解析。(3) Si あるいは Ge 半導体結晶の塑性変形を利用した「モザイク導入型湾曲結晶」モノクロメータの製作。(4) ブリッジマン法による $(Mn, Fe)_3Si$ 大型単結晶試料の追加合成。

4. 研究成果

(1) J-PARC/MLF のパルス中性子非弾性散乱により、1 meV 以下から 100 meV に及ぶ広いエネルギー領域をくまなく調査した。低エネルギー域のスピンの波とフェルミ面のネスティングに起因する磁気励起が、20 meV 以上の高エネルギー域でチムニー構造へと変遷する階層構造を明らかにした。反平行スピン相関をもった近接スピン間の小さい磁気ユニットモデルで説明できることから、エネルギーが高くなるに従って磁気ユニットサイズが小さくなる仮説を提案した。2012年10月に開催された第4回 MLF シンポジウムにてハイライト招待講演を行うに至った。

(2) 上記チムニー構造の特徴的な励起の起源を明らかにすべく、ILL の三軸型偏極中性子分光器 IN20 にて、中性子偏極度解析実験を行った。結果、20 meV 以上の励起が磁気起源であることを確認した。これにより、100 meV 以上まで延伸する磁気励起として Mn_3Si の磁性を議論できる段階に到達した。

(3) Si 及び Ge の半導体単結晶ウェーハの湾曲化と単色中性子ビームによる性能評価を進めた結果、Ge 結晶ウェーハの反射強度が Si のそれよりも 4~5 倍の強度に到達する結果を得た。この性能評価を基に、JRR-3 の中性子散乱装置用のモノクロメータは、Ge 結晶モノクロメータを中心に製作することとした。北海道大学のライナック中性子施設にて白色中性子を使った Ge 湾曲結晶の性能評価を行い、データ解析を進めた結果、設計通りの空間集光が実現していることを確認した。日本物理学会等で口頭発表すると共に、学術誌 NIM-A にて成果発表した。その後、Ge 単結晶ウェーハの簡便な塑性変形法を確立し、基礎データを得るに至った。

(4) $Mn_{3-x}Fe_xSi$ 系で、 $x = 0, 0.6, 1.0, 1.5$ の組成で直径 10 mm、長さ 40 mm の大型単結晶合成に成功した。ICP 化学的組成分析と格子定数や磁化率測定による物理的結晶評価の結果、組成のずれは、仕込み組成の 5% 程度の範囲内であった。得られた単結晶は、当該研究で実施する中性子非弾性散乱研究には十分な品質であった。

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 20 件)

[1] H. Hiraka, K. Ohkubo, M. Furusaka, Y. Kiyana, K. Yamada, K. Morishita, K.

Nakajima, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A **693**, 166-169 (2012); Plastically deformed Ge-crystal wafers as elements for neutron focusing monochromator. 査読有

[2] K. Ohoyama, K. Tsutsumi, T. Ino, H. Hiraka, Y. Yamaguchi, H. Kira, T. Oku, Y. Sakaguchi, Y. Arimoto, W. Zhang, H. Kimura, K. Iwasa, M. Takeda, J. Suzuki, K. Yamada, K. Kakurai, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A **680**, 75-81 (2012); Development of a non-adiabatic two-coil spin flipper for a polarised thermal neutron diffractometer with a ^3He spin filter. 査読有

[3] K. Ishii, K. Tsutsui, K. Ikeuchi, I. Jarrige, J. Mizuki, H. Hiraka, K. Yamada, T. Tohyama, S. Maekawa, Y. Endoh, H. Ishii, Y.Q. Cai, Phys. Rev. B, **85**, 104509 (2012), Electronic excitations around the substituted element by resonant inelastic x-ray scattering of $\text{La}_2\text{Cu}_{1-y}\text{Ni}_y\text{O}_4$. 査読有

[4] M. Fujita, H. Hiraka, M. Matsuda, M. Matsuura, J. M. Tranquada, S. Wakimoto, Guangyong Xu, K. Yamada, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 011007 1-19 (2012); Progress in Neutron Scattering Studies of Spin Excitations in High- T_c Cuprates. DOI: 10.1143/JPSJ.81.011007 査読有

[5] 岩佐和晃, 平賀晴弘, 大河原学, 大山研司 : 日本中性子科学会誌「波紋」vol.22, 250-254 (2012); JRR-3 に設置している東北大学中性子散乱装置の現状. 査読有

[5] 平賀晴弘 : 日本中性子科学会誌「波紋」vol.22, 61-62 (2012); ISIS での中性子非弾性散乱実験. 査読有

[7] M. Matsuura, H. Hiraka, K. Yamada, K. Hirota, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 104601 (2011); A New Growth Mechanism of Polar Nanoregions by Phonon-Relaxation Mode-Coupling in a Relaxor Ferroelectric. DOI: 10.1143/JPSJ.80.104601 査読有

[8] H. Hiraka, K. Fujiwara, K. Yamada, K. Morishita, K. Nakajima, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A **635**, 137-140 (2011); Plastically deformed Si-crystal wafers for neutron-monochromator elements. 査読有

[9] Y. Sakaguchi, H. Kira, T. Oku, T. Shinohara, J. Suzuki, K. Sakai, M. Nakamura, K. Suzuya, M. Arai, M. Takeda, S. Wakimoto, D. Yamazaki, S. Koizumi, Y. Endoh, K. Kakurai, Y. Arimoto, T. Ino, H.M. Shimizu, T. Kamiyama, K. Ohoyama,

H. Hiraka, K. Tsutsumi, K. Yamada, L.-J. Chang; Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A **634**, S122-125 (2011); Characterization of glasses for ^3He neutron spin filter cells. doi:10.1016/j.nima.2010.06.358 査読有

[10] H. Hiraka, Y. Miyake, S.-C. Che, N. Murakami, M. Ohkawara, K. Nemoto, K. Horigane, K. Ohoyama, Y. Yamaguchi, K. Yamada; J. Phys. Soc. Jpn. **80**, suppl. SB012 1-4 (2011); Application of Hot-Pressed Ge-Crystal Monochromators for Reactor-Based Neutron Beam Experiments. 査読有

[11] Ryoichi Kajimoto, Mitsutaka akamura, Yasuhiro Inamura, Fumio Mizuno, Kenji Nakajima, Seiko Ohira -Kawamura, Tetsuya Yokoo, Takeshi Nakatani, Ryuji Maruyama, Kazuhiko Soyama, Kaoru Shibata, Kentaro Suzuya, Setsuo Sato, Kazuya Aizawa, Masatoshi Arai, Shuichi Wakimoto, Motoyuki Ishikado, Shin-ichi Shamoto, Masaki Fujita, Haruhiro Hiraka, Kenji Ohoyama, Kazuyoshi Yamada, and Chul-Ho Lee; J. Phys. Soc. Jpn. **80**, suppl. SB025 1-6 (2011); The Fermi Chopper Spectrometer 4SEASONS at J-PARC. 査読有

[12] Y. Arimoto, T. Ino, H.M. Shimizu, T. Kamiyama, H. Kira, T. Oku, Y. Sakaguchi, K. Kakurai, K. Sakai, J. Suzuki, S. Koizumi, M. Arai, Y. Endoh, M. Nakamura, T. Shinohara, M. Takeda, S. Wakimoto, D. Yamazaki, K. Ohoyama, H. Hiraka, K. Yamada, K. Tsutsumi, L.-J. Chang; Physica B **406**, 2439-2442 (2011); External cavity design of high-power diode laser for polarized helium-3 neutron spin filters based on spin-exchange optical pumping. doi:10.1016/j.physb.2010.11.089 査読有

[13] Y. Sakaguchi, H. Kira, T. Oku, T. Shinohara, J. Suzuki, K. Sakai, M. Nakamura, K. Suzuya, K. Aizawa, M. Arai, M. Takeda, S. Wakimoto, D. Yamazaki, S. Koizumi, Y. Endoh, L.J. Chang, Y. Arimoto, T. Ino, H.M. Shimizu, T. Kamiyama, K. Ohoyama, H. Hiraka, K. Tsutsumi, K. Yamada, K. Ohara, K. Kakurai; Physica B **406**, 2443-2447 (2011); Research on glass cells for ^3He neutron spin filters. doi:10.1016/j.physb.2010.12.020 査読有

[14] H. Kira, Y. Sakaguchi, T. Oku, J. Suzuki, M. Nakamura, M. Arai, K. Kakurai, Y. Endoh, Y. Arimoto, T. Ino, H.M. Shimizu, T. Kamiyama, K. Tsutsumi, K. Ohoyama, H. Hiraka, K. Yamada, L.-J.

Chang; Physica B **406**, 2433-2435 (2011); Development and test of SEOP neutron spin filter in Japan. doi:10.1016/j.physb.2010.12.019 査読有

[15] K. Segawa, M. Kofu, S.-H. Lee, I. Tsukada, H. Hiraka, M. Fujita, S. Chang, K. Yamada, Y. Ando; Nature Physics **6**, 579-583 (2010); Zero-doping state and electron-hole asymmetry in an ambipolar cuprate. 査読有

[16] S. Wakimoto, H. Hiraka, K. Kudo, D. Okamoto, T. Nishizaki, K. Kakurai, T. Hong, A. Zheludev, J. M. Tranquada, N. Kobayashi, K. Yamada; Phys. Rev. B **82**, 064507 1-7 (2010); Magnetic field effect on Fe-induced short-range magnetic correlation and electrical conductivity in $\text{Bi}_{1.75}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.90}\text{Cu}_{0.91}\text{Fe}_{0.09}\text{O}_{6+y}$. 査読有

[17] H. Hiraka, Y. Hayashi, S. Wakimoto, M. Takeda, K. Kakurai, T. Adachi, Y. Koike, I. Yamada, M. Miyazaki, M. Hiraishi, S. Takeshita, A. Kohda, R. Kadono, J.M. Tranquada, K. Yamada; Phys. Rev. B **81**, 144501 1-6 (2010); Incommensurate spin correlations induced by magnetic Fe ions substituted into overdoped $\text{Bi}_{1.75}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.90}\text{CuO}_{6+z}$. 査読有

[18] H. Hiraka, S. Wakimoto, M. Takeda, K. Kakurai, D. Matsumura, Y. Nishihata, J. Mizuki, K. Yamada; J. Phys. Conference Series **200**, 012059 1-4 (2010); Fe-doping effects on magnetism in hole-type superconductors of $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$. 査読有

[19] Y. Miyake, H. Hiraka, K. Ohoyama, Y. Yamaguchi, K. Yamada; J. Phys. Conference Series **200**, 112006 (2010); Hot pressing of Ge crystals toward a reflection-plane-selective neutron monochromator. 査読有

[20] 平賀晴弘, 岩佐和晃, 大山研司 : 日本中性子科学会誌「波紋」vol.21, 37-41 (2011); 中性子科学における学生教育. 査読有

[学会発表] (計 24 件)

[1] H. Hiraka and D. Matsumura: The 1st International Conference on Light and Particle Beams in Materials Science (Tsukuba, Japan), 2013 年 8 月 30 日, 口頭発表, “Relationship between the Ir-dimer

formation and electrical transport in $\text{CuIr}_2\text{S}_{3.8}\text{Se}_{0.2}$ ” .

[2] H. Hiraka and D. Matsumura: The 1st International Conference on Light and Particle Beams in Materials Science (Tsukuba, Japan), 2013 年 8 月 29 日, ポスター発表, “Restoration of XAFS oscillation by Fe doping in magnetic metal Mn_3Si ” .

[3] 平賀晴弘, 伊藤晋一, 池内和彦, 福田竜生, 遠藤康夫, 川名大地, 横尾哲也, 山田和芳 : 第 1 回 物構研サイエンスフェスタ (つくば国際会議場)、2013 年 3 月、ポスター発表「HRC による遍歴電子反強磁性体 Cr の高エネルギー磁気励起研究」

[4] 平賀晴弘, 大山研司, 奈良壮, 山口泰男, E. Wheeler, 山田和芳 : 日本物理学会 2013 年年会 (広島大)、2013 年 3 月、口頭発表「遍歴電子反強磁性体 Mn_3Si の磁気励起に対する偏極中性子非弾性散乱実験」

[5] H. Hiraka, Y. Yamaguchi, S. Tozawa, T. Shishido, K. Yubuta, T. Komatsubara, N. Murakami, M. Matsuura, K. Ohoyama, K. Fujiwara, Y. Miyake, M. Onodera, K. Morishita, K. Nakajima, and K. Yamada: Summit of Materials Science 2012 (Tohoku University), 2012 年 11 月, 口頭発表, “Renovation of Neutron Monochromator Crystals at IMR”.

[6] H. Hiraka and D. Matsumura: Summit of Materials Science 2012 (Tohoku University), 2012 年 11 月, ポスター発表, “XAFS study on Ir-dimer formation across the metal-insulator transition in Ir sulfides”.

[7] 平賀晴弘 : 第 4 回 J-PARC/MLF シンポジウム・茨城県ビームライン平成 23 年度成果

報告会（日本科学未来館）、2012年10月、
ハイライト講演（招待講演）「チムニー型磁
気励起の理解に向けて～四季でのパルス中
性子非弾性散乱実験～」

[8] 平賀晴弘, 山口泰男, 戸澤慎一郎, 宍戸
統悦, 湯蓋邦夫, 小松原武美, 小野寺貢, 三
宅悠子, 村上直樹, 大山研司, C.H. Lee, 萩
原雅人, 益田隆嗣, 大久保一馬, 古坂道弘,
鬼柳善明, 森下浩平, 中嶋一雄, 山田和芳:
日本物理学会 2012 年秋季大会(横浜国立大)、
2012 年 9 月、口頭発表「東北大・金研におけ
る中性子モノクロメータ結晶開発の現状」

[9] 平賀晴弘, 奈良壮, 山口泰男, 崔純彰,
大山研司, 池内和彦, Sungdae Ji, 梶本亮一,
中村充孝, 稲村泰弘, 新井正敏, 山田和
芳: 日本物理学会 2012 年秋季大会(横浜国
立大)、2012 年 9 月、口頭発表「反強磁性金
属 Mn₃Si における磁気励起の研究～四季での
パルス中性子非弾性散乱実験～」

[10] 奈良壮, 崔純彰, 平賀晴弘, 大山研司,
山口泰男, 堀金和正, 山田和芳: 日本物理学
会第 67 回年次大会(関西学院)、2012 年 3 月、
「反強磁性金属 (Mn, Fe)₃Si における単結晶作
製とその試料評価」

[11] 平賀晴弘, 崔純彰, 奈良壮, 三木寛之,
堀金和正, 大山研司, 山口泰男, 山田和芳:
日本物理学会第 67 回年次大会(関西学院)、
2012 年 3 月、「反強磁性体金属 (Mn, Fe)₃Si に
おける磁気励起」

[12] H. Hiraka: The 2nd ASRC International
Workshop on Magnetic Materials and
Nanostructures (Tokai), 2012 年 1 月, ポス
ター発表, "Dynamical switch of two types
of magnetic fluctuations in
antiferromagnetic metal (Mn, Fe)₃Si".

[13] H. Hiraka: Institute of Materials
Structure Science Symposium 2011
(Tsukuba), 2011 年 12 月, ポスター発表,
"Magnetic excitations in metallic
antiferromagnet (Mn, Fe)₃Si".

[14] S.-C. Che, H. Hiraka, K. Horigane, S.
Nara, K. Ohoyama, H. Miki, Y. Yamaguchi,
and K. Yamada: 1st Asia-Oceania Conference
on Neutron Scattering (Tsukuba), 2011 年
11 月, ポスター発表, "Anomalous spin
susceptibility in antiferromagnetic metal
(Mn, Fe)₃Si".

[15] H. Hiraka, S. Tozawa, T. Shishido, Y.
Yamaguchi, Y. Miyake, N. Murakami, M.
Matsuura, K. Yubuta, K. Ohoyama, K.
Morishita, K. Nakajima, and K. Yamada: 1st
Asia-Oceania Conference on Neutron
Scattering (Tsukuba), 2011 年 11 月, ポス
ター発表, "Neutron Monochromator
Development at IMR Tohoku University".

[16] H. Hiraka: 1st Asia-Oceania
Conference on Neutron Scattering
(Tsukuba), 2011 年 11 月, キーノート発表
(招待講演), "Complementary use of neutron
and X-ray for study on Mott physics".

[17] 崔純彰, 平賀晴弘, 堀金和正, 三木寛
之, 大山研司, 山口泰男, 山田和芳: 日本物
理学会 2011 年秋季大会(富山大)、2011 年 9
月、ポスター発表「反強磁性金属 (Mn, Fe)₃Si
における磁気励起」

[18] 平賀晴弘, 山田和芳, 大久保一馬, 古
坂道弘, 鬼柳善明, 森下浩平, 中嶋一雄: 日
本物理学会 2011 年秋季大会(富山大)、2011
年 9 月、口頭発表「塑性変形した Ge 半導体

結晶ウェーハの中性子反射率 II]

[19] 平賀晴弘、山田和芳、森下浩平、中嶋一雄：日本物理学会第 66 回年次大会（新潟大）、2011 年 3 月、口頭発表「塑性変形した Ge 半導体結晶ウェーハの中性子反射率」

[20] 平賀晴弘、脇本秀一、武田全康、加倉井和久：JRR-3 改造 20 周年記念シンポジウム（日本科学未来館）、2011 年 2 月、ポスター発表「金属強磁性体 CoS_2 における常磁性磁気相関の偏極中性子散乱研究」

[21] H. Hiraka, Y. Miyake, N. Murakami, K. Ohoyama, Y. Yamaguchi, K. Yamada: The International Workshop on Neutron Applications on Strongly Correlated Electron Systems 2011, (Ibaraki Quantum Beam Research Center), 2011 年 2 月, ポスター発表, "Application of Hot-pressed Ge-crystal Monochromators for Reactor-Based Neutron-Beam Experiments".

[22] 戸澤慎一郎、宍戸統悦、平賀晴弘、大山研司、山口泰男、山田和芳：第 5 回日本フラックス成長研究発表会（信州大学工学部）、2010 年 12 月、「中性子単色化用 Cu 単結晶の結晶性向上に関する研究」

[23] 平賀晴弘、大山研司、大河原学、村上直樹、山口泰男、山田和芳：日本中性子科学会 第 10 回年会（東北大学片平キャンパス）、2010 年 12 月、口頭発表「金研中性子散乱装置 AKANE と HERMES の装置高度化」

[24] 平賀晴弘、大山研司、山口泰男、山田和芳：日本物理学会 2010 年秋季大会（大阪府立大）、2010 年 9 月、口頭発表「AKANE と HERMES における装置改修計画と現状」

[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]
第一回 MLF シンポジウム、招待講演

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平賀 晴弘 (Hiraka Haruhiro)
東北大学・金属材料研究所・助教
研究者番号：90323097

(2) 研究分担者

遠藤 康夫 (Endoh Yasuo)
東北大学・金属材料研究所・名誉教授
研究者番号：00013483

(3) 連携研究者

()

研究者番号：