

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04404

研究課題名(和文) μeV ～ neV 領域の超単色 X 線回折法の開発と物質ダイナミクス研究への応用

研究課題名(英文) Development of ultra-high resolution X-ray diffraction method in the range from micro eV to nano eV and its application to dynamics studies

研究代表者

三井 隆也 (Takaya, Mitsui)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 放射光科学研究センター・上席研究員

研究者番号：20354988

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,300,000 円

研究成果の概要(和文)：核モノクロメーターと核共鳴参照吸収体を利用して、 μeV ～ neV 領域の超高エネルギー分解能放射光 X 線回折法の開発に成功した。本手法により、試料で散乱された X 線の弾性および非弾性散乱成分の分離や μeV ～ neV 領域の超高エネルギー分解能の X 線非弾性散乱スペクトルの測定が可能になった。特筆すべき成果として、発散角が1秒角以下の平面波放射光超単色 X 線を用い、Si (111) ブラッグ反射における熱散漫散乱の動的効果の観測に初めて成功した。本現象の観測は、従来の放射光による X 線弾性散乱や放射性同位体を用いた X 線分光では全く不可能なものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

バンド幅可変核モノクロメーターによる放射光超単色 X 線の生成とその応用研究は、世界的に例がなく、本研究で開発した μeV ～ neV 領域の超高エネルギー分解能 X 線回折分光法は、液体、固体のスローダイナミクス研究の格段の進展につながる革新的量子ビーム利用技術である。今後、開発した計測法が、半導体、誘電体などの単結晶材料から高分子、生体物質のソフトマター物質の機能発現メカニズムの解明を目指した研究に利用展開されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：A synchrotron radiation based ultrahigh resolution spectrometer was developed by an variable bandwidth iron-57 synchrotron Mossbauer radiation and a nuclear resonant absorber. It is possible to separate elastic and inelastic scattering components from the scattered radiation, and also to measure the ultrahigh energy resolution inelastic X-ray scattering spectrum in the wide dynamic range. As a notable application, dynamical diffraction effects of thermal diffuse scattering on Si (111) Bragg reflection were observed for the first time using plane wave Mossbauer γ -rays, whose angular divergence was better than 1.0 arcsecond. The measurements are impossible with non-directed γ -rays from conventional radioactive isotopes. A variable bandwidth iron-57 synchrotron Mossbauer radiation will open up new possibilities of advanced dynamics studies with an ultra-high resolution in the range from μeV to neV .

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：放射光 核共鳴散乱 メスバウアー分光 X線非弾性散乱 X線回折

1. 研究開始当初の背景

SPring-8などの第三世代放射光の登場により、大強度の単色X線を利用したX線非弾性散乱の研究が進展しているが、そのエネルギー分解能は、Si単結晶の高次反射を用いた非対称反射や垂直入射反射を用いた場合でも、meV程度が限界で、これ以上は原理的に困難となる。一方、メスバウアー核である ^{57}Fe を富化した反強磁性体単結晶の電子散乱が禁制で、核共鳴散乱が許容の反射面を利用して放射光を単色化すれば、バンド幅がneV領域の超単色X線(14.4keV)を発生できる。これまでに我々は、反強磁性体結晶 $^{57}\text{FeBO}_3$ とドップラー振動装置で構成された核モノクロメーターを開発し、放射光から通常メスバウアーγ線源(100mCi相当の ^{57}Co 線源)と比較して10万倍以上も高輝度な ^{57}Fe 超単色X線を発生する機器開発に成功し、最近では、 $^{57}\text{FeBO}_3$ に外部から高周波磁場を印加して、結晶中の ^{57}Fe 原子の振動状態を制御することで、超単色X線のエネルギーバンド幅を $\mu\text{eV} \sim \text{neV}$ 領域で調節できる技術の開発に成功している。本装置で超単色X線のバンド幅をneVから μeV に変えると、ビーム強度は10倍以上も増加するので、放射光メスバウアー分光のみならず、超高分解能X線非弾性散乱測定にも応用できる。計測原理は単純で、超単色X線を試料に照射し、散乱X線のエネルギー変化を散乱角方向に置いた ^{57}Fe 核を含む核共鳴吸収体(エネルギーアナライザー)でメスバウアー吸収スペクトルで測定するだけでよい(図1(a))。また、線幅が約 10^{-8}eV の超単色X線を試料に照射して、それよりも広い線幅($\sim 10^{-7}\text{eV}$)を有する核共鳴吸収体の速度を零(共鳴条件)と 10mm/s (非共鳴条件)で振動させて測定した散乱強度を測定すれば、差分計算から、弾性散乱と非弾性散乱信号(強度)を分離測定できる(図1(b))。この超高分解能X線非弾性散乱に回折、全反射などの先端計測を組み合わせれば、全く新しい物質の局所ダイナミクス解析法の開発が可能になる。

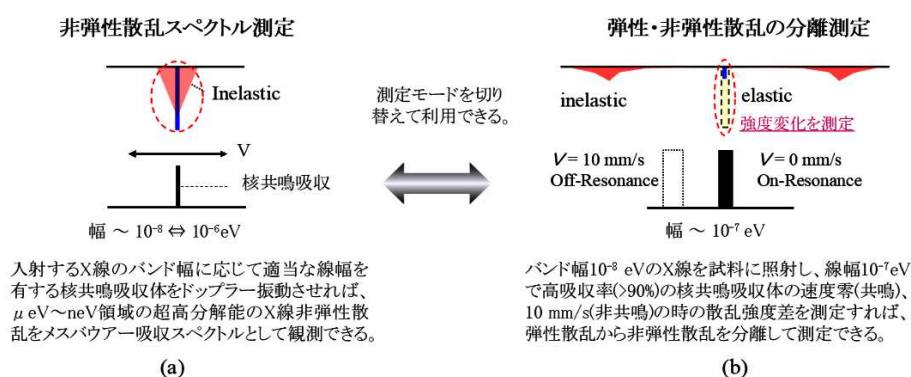


図1. バンド幅可変・核モノクロメーターによる超高分解能X線非弾性散乱の計測スキーム

本研究では、バンド幅可変超単色X線を高出力生成するのに最適化した前置高分解能分光器、平面波の超単色X線を生成できる光学系や低温、高温環境下で試料を測定する専用装置を開発し、それらを放射光メスバウアー分光装置と融合させることにより、革新的な物質の動的挙動解析技術を創出することを試みた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、バンド幅可変・核モノクロメーターで放射光から分光した $\mu\text{eV} \sim \text{neV}$ 領域の超単色X線を用いて物質のダイナミクス研究に資する超高エネルギー分解能X線分光を実用化させることである。本研究で開発した手法を半導体、誘電体の構造変化や高分子材料のガラス転移挙動の解析などに適用することで、新しい放射光利用分野を開拓する。本研究は、申請者が開発した $\mu\text{eV} \sim \text{neV}$ 領域の超単色X線発生装置を用いて初めて可能になるもので、世界的に例がなく、極めて独自性、創造性に富んだものである。

3. 研究の方法

初年度は、 ^{57}Fe 超単色X線のバンド幅を 10^{-8}eV から 10^{-6}eV 、核共鳴参照吸収体(エネルギーアナライザー)の吸収線幅を 10^{-8}eV から 10^{-7}eV に切り替えて利用できる

超高分解能X線非弾性散乱の計測システムを開発する。次年度以降は、開発手法の性能評価として、高分子材料のガラス転移点から融点を含む温度領域の準弾性散乱スペクトル測定を行い、開発装置が、高分子のガラス-液体相転移研究において重要となる広いダイナミックレンジに渡り変化する動的構造因子 $S(Q, \omega)$ の直接観測できることを実証する。また、集光した超単色X線による強誘電体ドメインダイナミクスの局所解析や平面波超単色X線によるSi結晶のブラッグ反射付近に生じる熱散漫散乱の動力学的回折現象の最初の観測に挑戦する。

4. 研究成果

4-1: バンド幅可変核モノクロメーターを用いた超高分解能X線非弾性散乱法の開発研究

放射光から生成したバンド幅可変の超単色X線と吸収線幅が異なる核共鳴参照吸収体（エネルギーアナライザー）を併用した光学系を開発し、 $\mu\text{eV} \sim \text{neV}$ 領域の超高分解能で動的構造因子 $S(Q, \omega)$ を直接観測できるX線非弾性散乱法を世界に先駆けて成功させた。さらに、バンド幅が約 10^{-8}eV の超単色X線を試料に照射し、それより広い吸収線幅（ $\sim 10^{-7}\text{eV}$ ）を持つ核共鳴吸収体を速度零（共鳴）と振幅が 10mm/s （非共鳴）で正弦波振動させた状態でそれぞれの散乱強度を測定して、それらの差分から弾性散乱と非弾性散乱の強度を分離測定できる計測法の開発にも成功した。図2(a)に示すように、本手法では、Si(111)の二結晶分光器、Si(511) × Si(975)のチャンネルカット分光器およびバンド幅可変核モノクロメーターを用い、放射光から ^{57}Fe の核共鳴エネルギー（ 14.4keV ）の超単色X線を分光する。核モノクロメーターは、結晶温度と結晶に印加する高周波磁場の強度を調節して、狭いバンド幅（ $1.5 \times 10^{-8}\text{eV}$ ）と広いバンド幅（ $1.0 \times 10^{-6}\text{eV}$ ）の超単色X線を切り替えて分光できる。この時、光子束がそれぞれ毎秒約 2.0×10^4 と 1.6×10^5 の超単色X線を用いた実験が可能になる。最初のフィジビリティースタディーでは、過冷却グリセロール液体を試料に用いた実験を行った。この実験では、超単色X線を温度制御した試料（グリセロール）に照射し、散乱角（ $\sim 12^\circ$ ）方向に散乱されたX線をドップラー振動で核共鳴吸収エネルギーを制御した核共鳴参照吸収体を通過させ、下流の検出器で強度変化の速度依存性を測定した。

最初に超単色X線の無反跳レイリー散乱率 F の温度依存性を測定によるグリセリンのガラス転移過程のモニタリングを試みた。 F 値は、狭いバンド幅（ $1.5 \times 10^{-8}\text{eV}$ ）の超単色X線とそれよりも広い吸収線幅（ $1.0 \times 10^{-7}\text{eV}$ ）を有する核共鳴参照吸収体（マスクアブソーバー）を用いて、 2θ 方向と前方方向の弾性散乱と非弾性散乱の強度を分離計測し、それらの差分を参照吸収体の吸収効率で補正することで決定される。 F 値は、X線のデバイ-ワラー因子に比例するので、 F 値の温度変化を指標にして、ポリマー材料のガラス転移挙動の追跡が可能になる。図2(b)には、グリセリンの無反跳レイリー散乱率の対数値と F 値から計算で求めた原子の平均二乗変位 $\langle x^2 \rangle$ の温度依存性を示す。ここで、 F 値の対数値の温度依存性はガラス転移温度以下の領域（ $T < T_g$ ）においては、温度上昇と共に直線的な減少を示すが、 T_g を超えると非線形的に減少して、融点の直前では零になることがわかる。一方、 F 値から求めた平均二乗変位 $\langle x^2 \rangle$ の温度依存性は、 T_g 以下では殆ど変化しないが、過冷却液体状態の温度領域（ $T_g < T$ ）では、緩慢な増加を示しており、液体状態（ $T \sim T_m$ ）の温度領域では、急激に増加することが分かる。応用上の重要な利点として、 F 値の対数値の温度依存性が非線形的変化を示す温度からガラス転移温度（ T_g ）を見積もることができる。本実験で推定したグリセロールの T_g は、約 180K で、これまで報告されたグリセロールの T_g とよく一致することが確認された。次に T_g と T_m を含む $150 \sim 300\text{K}$ の温度範囲でグリセロールの準弾性散乱スペクトルを測定した。 $T \leq 280\text{K}$ の測定では、バンド幅が $1.5 \times 10^{-8}\text{eV}$ の超単色X線と吸収線幅が $2.3 \times 10^{-8}\text{eV}$ の核共鳴参照吸収体を使用し、ガラス状態のグリセリンの低速のダイナミクスが測定された。一方、 $T > 280\text{K}$ の測定では、バンド幅が $1.0 \times 10^{-6}\text{eV}$ の超単色X線と吸収線幅が $1.0 \times 10^{-7}\text{eV}$ の参照吸収体を使用し、液体状態のグリセリンの高速のダイナミクスが測定された。実験で観測した非弾性散乱スペクトルを図2(c)に示す。得られたスペクトルは、試料の温度上昇により大きな線幅の広がり観測され、その結果は、無反跳レイリー散乱率 F の温度依存性の結果と定性的によく一致した。試料がな

い状態の前方方向で測定した装置関数の線幅からの各スペクトルの線幅広がり、 $T < T_g$ (ガラス状態)では、殆ど変化しないが、 $T_g < T < T_m$ (過冷却液体状態)では、緩慢に増加し、 $T \sim T_m$ (液体状態)では、急激な増加を示した。 $T_g < T < T_m$ での漸増は、ガラスおよび過冷却液体状態で観察される非弾性散乱スペクトルに見られる典型的な現象で、平均二乗振動振幅 $\langle x^2 \rangle$ の温度依存性と強く相関している。一方、 $T > T_m$ での急激な増加は、グリセロールの液化に関連した分子振動の大幅な増加によるもので、室温の線幅広がり、約 $1.0 \mu\text{eV}$ に達しており、線幅から推定した緩和時間は、試料の温度上昇に伴い、 $10^{-7} \sim 10^{-10}$ 秒の広い範囲で変化することが分かった。本結果は、開発手法が、高分子材料のガラス-液体相転移の分子動力学研究に必要とされる緩和時間や平均二乗振動振幅スケールの全範囲をカバーできる事を実証しており、今後、様々な高分子ガラス転移の動的構造研究への応用が期待される。

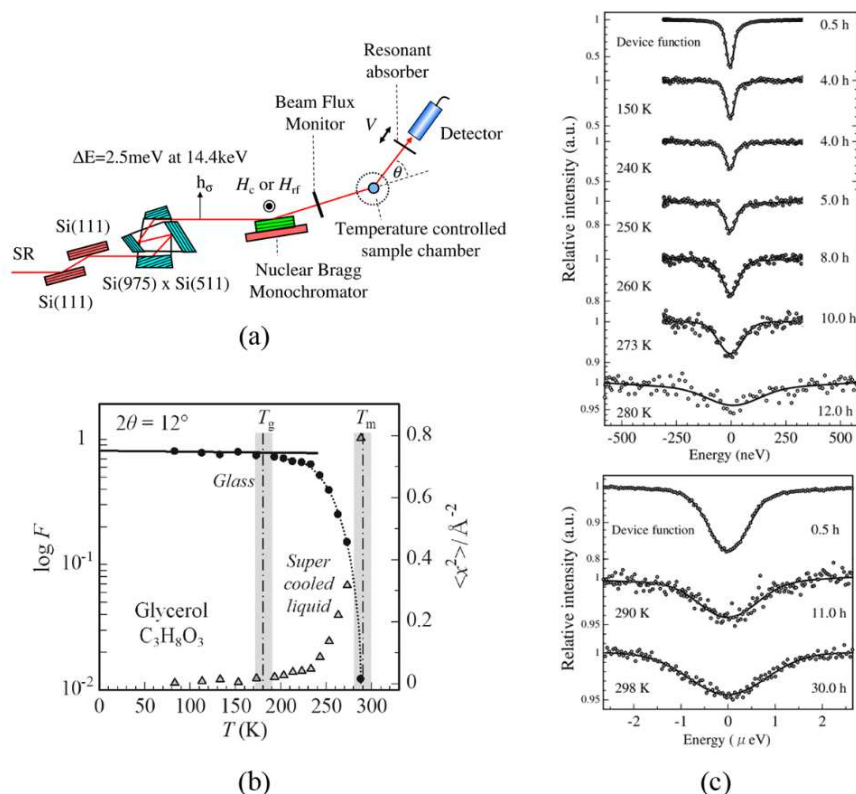


図2. バンド幅可変核モノクロメーターを用いた超高分解能X線非弾性散乱の実験結果 (a) 計測系の概念図。 H_c は定常磁場 1300e 、 H_{rf} は振幅 0.750e 、 8MHz 高周波磁場を表している。散乱角は約 12° (b) 弾性散乱と非弾性散乱強度の分離計測で求めた過冷却グリセリン液体の無反跳レイリー散乱率 (F 値) (●)と原子の平均二乗変位 $\langle x^2 \rangle$ (▽)の温度依存性。グラフ中の T_g と T_m は、実験で推定したガラス転移点と融点に対応する温度を表している。(c) バンド幅可変核モノクロメーターと核共鳴参照吸収体を用い、グリセリンのガラス転移点から融点までを含んだ広い温度領域で測定されたX線非弾性散乱スペクトル。

4-2. Si(111) ブラッグ反射における熱散漫散乱の動力的X線回折効果の観測

核モノクロメーターと結晶コリメーターを用いて、発散角が1秒角以下、エネルギー分解能が $1.5 \times 10^{-8}\text{eV}$ の平面波の超単色X線を生成し、それをプローブ光に利用して、Si(111)ブラッグ反射における熱散漫散乱の動力的X線回折現象の観測に挑戦した。本現象の観測には、Si(111)の回折強度曲線の半値幅($\sim 3.6''$)に比べて角度発散の小さな平面波X線を用い、ブラッグ反射下で回折方向に生じる莫大な弾性散乱から熱散漫散乱(熱散漫散乱)のみを分離測定しなくてはならず、通常のX線回折法では測定自体が不可能である。

実験光学系を図3(a)に示す。この測定では、核モノクロメーターで発生したバンド幅が($1.5 \times 10^{-8}\text{eV}$)の超単色X線の角度発散をSi(311)非対称反射を用いて $0.6''$ にまで平行化する。この平面波超単色X線をSi結晶の(111)で対称反射させ、広い吸収線幅($1.0 \times 10^{-7}\text{eV}$)を有する参照吸収体(マスクアブソーバー)を利用してブラッグ反射したX線の弾性散乱(I_{e1})と非弾性散乱(I_{in} :熱散漫散乱)を分離して強度の入射角

依存性を調べた。実験で得られた弾性散乱と熱散漫散乱の回折強度曲線を図3 (b) に示す。

弾性散乱の回折強度曲線は、角度幅約4秒の全反射領域を有するシルクハット型形状を示しており、Si (111) 反射の計算結果ともよく一致することが確認された。プロファイルの非対称性は、動力的回折効果により生じており、全反射角度領域の低角側では、Si 結晶中に発生したX線波動場が原子面で節 (node) を持つため、原子面のX線吸収が小さく、全反射角度領域の高角側では、X線波動場が原子面で腹 (Antinode) を持つため、原子面のX線吸収が大きくなることを反映したものである。一方、熱散漫散乱の回折強度曲線は、弾性散乱の回折強度曲線の角度依存性とは大きく異なる強度異常を示していた。

一般に熱散漫散乱の回折強度はブラッグ角付近で増加することが知られているが、本実験においても、X線の回折強度曲線の全反射領域 (中心からのずれ角 $|\Delta\theta| < 1.8''$) において、熱散漫散乱の強度が顕著な増加を示している。一方、X線の消衰距離が最小となる $\Delta\theta = 0$ においては、熱散漫散乱の強度が急激な低下を示している。これは、 $\Delta\theta = 0$ では、入射X線の侵入長が最小化となり、熱散漫散乱に寄与する結晶の有効体積が減少することに起因した現象 (熱散漫散乱の体積効果) として理解できる。注目すべき現象として、X線 (弾性散乱) の回折強度曲線の高角側の肩の位置 ($\Delta\theta = 1.8''$) で生じた熱散漫散乱強度が、殆ど同じX線の消衰距離を示す低角側の肩の位置 ($\Delta\theta = -1.8''$) で生じた熱散漫散乱強度より大きいことが分かった。本結果は、動力的回折効果により、Si 結晶中に発生したX線波動場が原子面で腹を持つ方が、原子面で節を持つ場合に比べて、熱散漫散乱の断面積が大きいことを示唆している。この振る舞いは、試料の 4π 方向に散乱されるコンプトン散乱の動力的回折現象と正反対である。この相違は、コンプトン散乱が結晶を構成する原子の外部電子により生成されるのに対し、熱散漫散乱は原子内の全電子により生成されるという散乱過程の相違に起因するものと考えられる。また、ブラッグピークから離れた角度領域では、低角側 ($\Delta\theta < -4''$) の熱散漫散乱の強度が高角側 ($\Delta\theta > 4''$) の熱散漫散乱の強度よりも大きいことが分かった。本現象の起源については、理論計算したSi (111) 反射におけるX線の消衰距離の低角側 ($\Delta\theta < -4''$) の値が、高角側 ($\Delta\theta > 4''$) の値と比べてかなり大きいことから、単純な熱散漫散乱の体積効果として説明された。

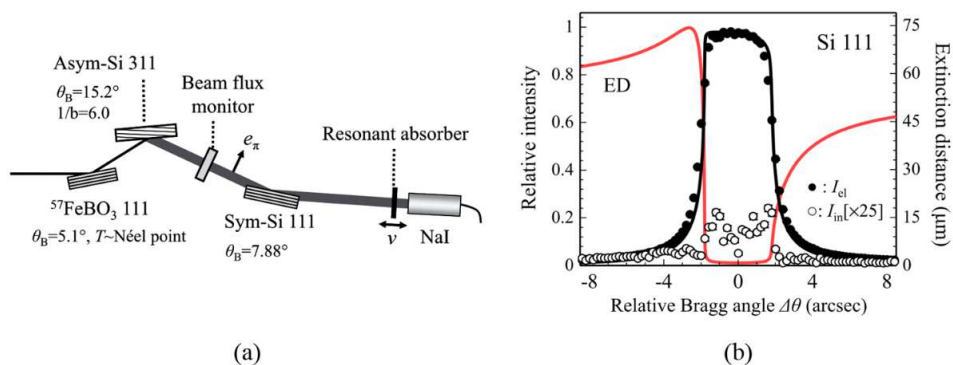


図3. Si (111) ブラッグ反射における熱散漫散乱の動力的回折効果の観測実験 (a) 光学系。 e_π は、入射線の電場成分の向きを表している。(b) Si (111) ブラッグ反射の弾性 (●) および非弾性 (○) 成分の入射角依存性。黒と赤の実線は、それぞれ、計算した弾性散乱 (14.4 keV の X 線) の回折強度と X 線の減衰距離 (結晶表面から侵入できる距離) の角度依存性を表している。

本研究では、約 10^{-8} eV のエネルギー分解能と約 10^{-6} rad の角度分解能を有する超高分解能 X 線回折法を用いて、Si (111) ブラッグ反射における熱散漫散乱の動力的 X 線回折現象の最初の観測に成功するとともに、核モノクロメーターを用いた非メスバウアー研究の高いポテンシャルを実証できた。その他の応用研究として、強誘電体ドメインダイナミクスの局所解析や半導体単結晶のブラッグ反射付近に生じる熱散漫散乱の高温下での非調和熱振動効果の検証実験なども行われており、現在、実験データの解析および追試が進められている。今後、我々の開発した手法が、基礎研究から工業材料に渡る広い材料分野のダイナミクス研究に利用されることを期待したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakamura Shin, Mitsui Takaya, Kobayashi Yasuhiro, Kurokuzu Masayuki, Shimomura Susumu	4. 巻 89
2. 論文標題 Synchrotron Mossbauer Diffraction of Natural Iron Fe3B06	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 125001-1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.125001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Mitsui, S. Sakai, S. Li, T. Ueno, T. Watanuk, Y. Kobayashi, R. Masuda, M. Seto M, H. Akai	4. 巻 125
2. 論文標題 Magnetic Friedel Oscillation at the Fe(001) Surface: Direct Observation by Atomic-Layer-Resolved Synchrotron Radiation Fe57 Mossbauer Spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 236806-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.236806	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takaya Mitsui, Ko Mibu, Masaaki Tanaka, Shinji Kitao, Yasuhiro Kobayashi, Ryo Masuda, Makoto Seto	4. 巻 89
2. 論文標題 Simultaneous Measurement of γ -ray and Conversion Electron Mossbauer Spectra of Fe Films under Total Reflection Conditions Using Synchrotron Mossbauer Source	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054707-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.054707	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shin Nakamura, Takaya Mitsui, Yasuhiro Kobayashi, Susumu Shimomura	4. 巻 88
2. 論文標題 The First Observation of Pure Nuclear Bragg Reflection from Natural Iron ^{57}Fe by Synchrotron Mossbauer Diffraction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 103702-1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.103702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mitsui Takaya, Masuda Ryo, Kitao Shinji, Kobayashi Yasuhiro, Seto Makoto	4. 巻 91
2. 論文標題 Rayleigh Scattering of Synchrotron Mossbauer Radiation Using a Variable Bandwidth Nuclear Bragg Monochromator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 064001-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.064001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mitsui Takaya, Fujiwara Kosuke, Imai Yasuhiko, Yoda Yoshitaka	4. 巻 91
2. 論文標題 Dynamical Effects on Thermal Diffuse Scattering in Si 111 Bragg Reflection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 035002-1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.035002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mitsui Takaya, Sakai Seiji, Li Songtian, Ueno Tetsuro, Watanuki Tetsu, Kobayashi Yasuhiro, Masuda Ryo, Seto Makoto, Akai Hisazumi	4. 巻 242
2. 論文標題 Direct observation of magnetic Friedel oscillation at Fe(001) surface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hyperfine Interactions	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10751-021-01772-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujiwara Kosuke, Mitsui Takaya, Aoyagi Yumito, Yoda Yoshitaka, Ikeda Naoshi	4. 巻 90
2. 論文標題 Quantum Interference of Totally Reflected Mossbauer γ -Rays from a ^{57}Fe Monolayer Embedded in a Thin Film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 084705-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.084705	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Shin、Mitsui Takaya、Kurokuzu Masayuki、Shimomura Susumu	4. 巻 90
2. 論文標題 Pure Nuclear Bragg Reflection due to Combined Magnetic and Quadrupole Interaction in Fe304	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 104713-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.104713	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Takaya Mitsui
2. 発表標題 Investigations on local magnetic properties of magnetic thin films using synchrotron-radiation Mossbauer spectroscopy
3. 学会等名 4th QST International Symposium -Innovation from Quantum Materials Science- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takaya Mitsui
2. 発表標題 BL11 SMS Setup and Applications
3. 学会等名 Expert workshop on Nuclear Resonant Scattering of Synchrotron Radiation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三井隆也
2. 発表標題 高輝度メスパワー分光法による機能材料の局所構造解析
3. 学会等名 水素機能解析技術第190委員会 第2回総会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三井隆也
2. 発表標題 「鉄の磁石の「表面の謎」を解明！ 表面を一原子層単位の深さ精度で磁性探査できる新技術を開発
3. 学会等名 第235回研究会 / 第82回スピントロニクス専門研究会「磁性材料の分析評価技術の進展」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Mitsui, S. Sakai, S. Li, T. Ueno, T. Watanuki, Y. Kobayashi, R. Masuda, M. Seto, H. Akai
2. 発表標題 Atomic-Layer Resolved Magnetic Structure Analysis of Fe (001) Surface by In situ Synchrotron Mossbauer Spectroscopy
3. 学会等名 Material Research Meeting 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Mitsui, S. Sakai, S. Li, T. Ueno, T. Watanuki, Y. Kobayashi, R. Masuda, M. Seto, H. Akai
2. 発表標題 DIRECT OBSERVATION OF MAGNETIC FRIEDEL OSCILLATION AT THE IRON (001) SURFACE
3. 学会等名 International conference on the application of the Mossbauer effect (ICAME 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三井隆也
2. 発表標題 表面を一原子層単位の深さ精度で磁性探査できる新技術を開発 鉄の磁石の「表面の謎」を解明！
3. 学会等名 第82回ONSA 先端科学研究会. 第73回放射線科学研究会、ONSA 賞受賞講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

BL11XU 放射光メスパワー分光装置
http://www.spring8.or.jp/wkg/BL11XU/instrument/lang/INS-0000001401/instrument_view
放射光科学研究 | 磁性科学研究G
https://www.qst.go.jp/site/kansai-sr/20507.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大和田 謙二 (Ohwada Kenji) (60343935)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究 所 放射光科学研究センター・グループリーダー (82502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------