

鉄ロジウム合金の高エネルギー イオンビームによる磁性改質

史 説*** 岩 瀬 彰 宏* 松 井 利 之** 堀

1. はじめに

組成比が1:1の近傍の鉄ロジウム合金は、常温で塩化セ シウム型結晶構造(B2構造)を示す金属間化合物である⁽¹⁾. この物質の磁性は、温度や組成比、圧力によって大きく変化 することが知られている⁽²⁾.相図(図1)が示すように,組成 比が1:1の合金 Fe-50 at% Rh では, 室温付近に低温相で ある反強磁性相から高温相である強磁性への磁性変態温度が 存在する.また,強磁性相は670K付近で常磁性へと変態 する. これらの磁性変態によって結晶構造変化は起こらない が、反強磁性から強磁性への変態に伴い体積は約1%増加す る. 組成比が1:1からずれて鉄原子数が多くなると低温に おいても強磁性相が安定となり、逆にロジウム原子が多くな ると強磁性---反強磁性転移温度は高温側にシフトする.静水 圧によっても強磁性相は反強磁性相に変化する⁽²⁾. さらに, 結晶構造の乱れもまた、強磁性を安定させることを示す結果 もいくつか報告されている.たとえば、構造の乱れた鉄ロジ ウム薄膜やボールミリングによって作成した鉄ロジウム合金 において、低温における強磁性状態が確認されている⁽³⁾⁽⁴⁾.

さて,筆者らは,長年にわたり,高エネルギーイオンや電 子ビームなどの放射線を無機材料に照射することによる結晶 構造や物性の変化に関して研究してきた(5). 無機材料では高 エネルギー放射線照射により,正規の位置からの原子のはじ き出しや高密度電子励起を起因とするエネルギー散逸によっ て,結晶に乱れが生ずる.放射線による結晶の乱れは,多く の場合、材料機能に悪影響を及ぼすため、使用環境で多量の 放射線を浴びる各種原子力関連材料や太陽電池などの宇宙材 料において,放射線による劣化(いわゆる放射線照射損傷, radiation damage)を評価し、それを防ぐための研究が盛ん に行われている.一方で,放射線照射による結晶構造の乱れ



FeRh 合金の相図と結晶構造.

や格子欠陥の導入が材料機能の改善や制御に役立つ場合もあ る. その一例として, 我々は, 最近, 鉄ロジウム金属間化合 物の結晶構造に高エネルギーイオン照射により乱れを与え、 その磁性を制御する研究を行っている.本稿では、これまで に得られた研究結果を紹介するとともに、今後の展望などに ついても述べる.

2. 高エネルギー重イオン照射によるバルク Fe-50 at%Rh 試料の磁性変化

本稿では, まずはじめに, 厚さ 0.2 mm の Fe-50 at% Rh バルク試料を用いた実験結果について紹介する.図2(a)は 200 MeVのXeイオンを照射した試料における外部磁場-磁化曲線を20KにおいてSQUID磁束計により測定した結 果を示す⁽⁶⁾. イオンビームは電荷を有するため,材料を構成 する原子核や電子とクーロン相互作用することにより、その エネルギーを急激に失う. その結果, イオンはエネルギーを

^{*} 大阪府立大学教授;大学院工学研究科マテリアル工学分野(〒599-8531 堺市中区学園町 1-1)

^{**} 大阪府立大学教授;21世紀科学研究機構 *** 大阪府立大学准教授;大学院工学研究科 Modification of Magnetic Properties of FeRh Intermetallic Compound by Using Energetic Icon Beam Irradiation; Akihiro Iwase, Toshiyuki Matsui and Fuminobu Hori (Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, Sakai) Keywords: FeRh intermetallic compound, energetic ion irradiation, modification of magnetic properties, synchrotron X-ray absorption spectroscopy, magnetic 2D magnetic patterning, X-ray magnetic circular dichroism 2011年1月30日受理



図2 (a) 200 MeV Xe イオン照射した Fe-50 at % Rh の外部磁場 - 磁化曲線.(b) 10 eV ヨウ素イオン 照射した Fe-50 at % Rh の外部磁場 - 磁化曲線. 測定温度はいずれも 20 K.

失いながら材料中を進み,材料表面から数マイクロメートル 程度の深さ(これをイオンの飛程(レンジ)という)で止まって しまい,イオン照射による効果もバルク試料表面付近に局在 する.そこで図2(a)では,照射効果の現れる領域からのシ グナルのみを抽出してプロットした.イオン照射前の試料で は,磁化はほとんど0であった.これは,相図(図1)からわ かるように,Fe-50 at%Rhは20Kでは反強磁性であるこ とを示している.それに対し,イオン照射した試料では,強 磁性を示す外部磁場一磁化曲線が出現し,その飽和磁化は照 射量とともに増加する.磁化の大きさは5×10¹³/cm²の照射 量で最大を示し,その後減少に転ずる.10 MeV のヨウ素イ オン照射した場合の外部磁場一磁化曲線も同じような挙動を 示す(図2(b)).5×10¹²/cm²の照射量のとき飽和磁化は最 大値をとり,さらに大きな照射量(1×10¹³/cm²,5×10¹³/ cm²)では,照射量の増加とともに磁化は減少する.

イオン照射による低温での強磁性発現は,X線磁気円2 色性(XMCD)測定によっても確認されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾.XMCD は,円偏光X線に対する磁性体の吸収強度が偏光状態に依 存することを利用した測定法である。物質中の特定の原子の 吸収端近傍でのXMCDを測定することにより,特定の原子



図3 200 MeV Xe イオン照射した Fe-50 at % Rh の鉄 K 吸収端硬 X 線 MCD スペクトル. (a)未照射, 5×10¹²/cm², 1×10¹³/cm², 5×10¹³/cm²の照射 量に対するスペクトル. (b)5×10¹³/cm², 1× 10¹⁴/cm², 1×10¹⁵/cm²の照射量に対するスペク トル. 測定温度は 20 K.

の磁性状態を知ることができる. FeRh 金属間化合物の場 合,鉄原子が主に磁性を担っていると考えられるため,放射 光施設 SPring8・BL39XUにおいて,鉄K吸収端における 1s-4p双極子遷移に伴う硬X線MCD測定を行った.鉄原 子の磁性を定量的に評価するには,磁性を直接担う鉄3d状 態への遷移を起こす軟X線MCDがより適しているが,こ の場合,X線のエネルギーが低くなるため試料の表面付近 の磁性情報を得ることになる.しかし,ここでは,表面状態 に左右されずに材料内部の磁性を評価するため,深さ数ミク ロンまでの磁性を観察できる鉄K吸収端のX線エネルギー (7.11 keV)による硬X線MCDを用いた.

図3に200 MeVのXeイオン照射による20Kでの XMCDスペクトルの変化を示す.未照射試料では,20Kで の反強磁性状態を反映してXMCDシグナルは観測されない.イオン照射することにより強磁性を示す XMCD スペク



図4 純鉄のK吸収端XMCDスペクトルと200 MeV Xe イオンを1×10¹⁴/cm² 照射した Fe-50 at%Rh の鉄K吸収端XMCDスペクトルとの比較.測 定温度はいずれも20 K.

トルが現れ、その強度は照射量とともに増加し、その後減少 する.この結果はSQUID測定により得られたものと同一で ある.しかし SQUID 測定では磁化の大きさのみの評価であ ったが、XMCDでは、そのスペクトル形状から磁性の起源 に関する議論も展開できる.図4は,200 MeV Xe イオンを 1×10¹⁴/cm² 照射した Fe-50 at % Rh における XMCD スペ クトルを,純鉄のスペクトルと比較したものである⁽⁷⁾.放射 線照射で生成した格子欠陥の拡散に伴い、材料中に特定の原 子が偏析・析出することがある.この現象を照射誘起偏析あ るいは照射促進偏析とよぶ.本実験の場合,FeRh 中の鉄原 子集合体が照射誘起偏析により形成されて、それによる磁性 が出現した、という可能性が考えられたが、図4に示す実 験結果は、それを明確に否定するものである. FeRh バルク 材料に対する照射実験では、ここで紹介した 200 MeV Xe イオン,10 MeV ヨウ素イオンだけでなく150-200 MeV の Au, Kr, Ni イオンも用いたが、いずれも類似の結果を得て いる(6)(9).

イオン照射による Fe-50 at%Rh バルク試料の結 晶構造変化(放射光 EXAFS 測定による評価)

高エネルギーイオン照射により,Fe-50 at%Rh 試料の結 晶構造がどのように変化し,磁性との関連がどうなるかを調 べるのは大変興味深い.この章では,高エネルギー加速器研 究機構(KEK)の放射光施設(PF)を用いて行ったX線吸収微 細構造(EXAFS)測定の結果について記す⁽¹⁰⁾.物質を構成す るある特定の原子の吸収端よりX線エネルギーの高い領域 において,X線の吸収に振動が現れる.この振動は,その 原子の近傍に別の原子が存在するために生ずる.従って,こ の振動をフーリエ変換して解析することにより,特定原子の 周辺の原子の配置状態に関する情報(配位数,原子間距離, デバイワーラー因子)を得ることができる.



図 5 10 MeV I イオン照射した Fe-50 at % Rh の鉄 K 吸収端 EXAFS-FT スペクトル.測定温度は室温.

本実験では,鉄原子のK吸収端(7.11 keV)におけるEX-AFS スペクトルを室温で測定した.図5に,10 MeV のヨ ウ素イオンを照射した Fe-50 at% Rh バルク試料の EXAFS フーリエ変換スペクトル(FT スペクトル)を示す.まず,未 照射の試料に対する FT スペクトルに対して FEFF シミュ レーションコード⁽¹¹⁾を用いて解析した結果,Fe-50 at%Rh の本来の結晶構造である B2 構造のスペクトルと一致するこ とが確認された. 10 MeV ヨウ素イオン照射により, FT ス ペクトルは,照射量の増加に伴い系統的に変化していく.照 射量の少ないときは、B2構造のスペクトルを保ちながら、 FT スペクトルの各ピークの幅が照射量の増加とともに大き くなっていく.これは,主に,鉄原子周辺の原子配列の秩序 が低下し、デバイワーラー因子が増加したためと考えられ る. 照射により, B2 構造を保ちながら原子配列の秩序が低 下していく現象は、図2(b)において見られる磁化の増加と ちょうど対応している.このことは、Fe-50 at%Rhの結晶 構造に乱れが生じると強磁性が安定化することを示す.

さらに照射量を増やしていくと,FT スペクトルの形状が 大きく変化する.最も顕著な変化は,鉄原子からみた第一配 位原子に対応する一番左のピークが明確に2つに分離する ことである.これは,鉄原子の第一配位原子に,Rhだけで なくFeも含まれてくることを示唆する.FEFF コードを用 いた詳細な解析の結果,高照射量の場合のFT スペクトルは, Fe 原子とRh 原子がランダムに配列するFCC構造,いわゆ るA1構造に対応することがわかった.A1構造は,相図(図 1)では,1300℃以上で現れる高温相である.いくつかの金 属間化合物では,イオンビームや電子ビームを大量に照射す ると,高温での液体状態が凍結されたアモルファス構造にな ることが報告されている⁽¹²⁾.本実験の場合も同様に,大量 のイオン照射では,高温相であるA1構造が室温で凍結され た状態として出現したと考えられる.A1構造のFeRh 合金 は常磁性であることが知られている.従って,図2(b)の外 部磁場一磁化曲線で見られる,照射量が大きくなったときに 磁化が減少に転ずる現象は,照射によりA1相の割合が増加 することが原因であると説明できる.

イオン照射した Fe-50 at%Rh バルク試料中の格 子欠陥の陽電子消滅法による評価

イオン照射による Fe-50 at%Rh の低温強磁性発現には, 結晶構造の乱れ(格子欠陥)が重要な役割を演じていると考え られる. そこで、イオン照射によって導入される格子欠陥の 詳細を調べるために、低速陽電子ビームによるSパラメー タ測定を行った.材料中に打ち込まれた陽電子は,電子と相 互作用して対消滅する.その際,消滅位置での電子の運動量 と電子密度の情報を反映したガンマ線を放出する. 試料中で 陽電子は原子核の正電荷とのクーロン相互作用により、原子 のいない位置を選択的に感じ取りながら拡散してそこに局在 する.一般に,鉄などの金属ではおよそ100 at ppm 程度の 濃度の空孔が存在すると陽電子は100%空孔に局在するた め、それ以下の濃度では空孔の濃度を評価することが可能で ある.このように空孔型格子欠陥にトラップされた(局在)陽 電子は,運動量の小さい電子と相互作用する確率が大きい. そこで、放出ガンマ線のエネルギー分布から求めた低い運動 量領域での消滅割合をSパラメータと呼び,空孔型格子欠 陥量の評価に用いる.

図6に,200 MeVのXeイオンを照射したFe-50 at%Rh のSパラメータ値をイオン照射量の関数として示した⁽¹³⁾. 照射量の増加とともにSパラメータは増加し、高照射量域 では,陽電子がすべて空孔型欠陥にトラップされるため,S パラメータ値は飽和する.Sパラメータの照射量依存性を解 析することにより, イオン照射した試料に残存する空孔型欠 陥濃度が算出できる. 解析の結果, 1×10¹³/cm²の Xe イオ ン照射で約 50 at ppm 程度の空孔型欠陥が残存するという結 果を得た. これは、SRIM コードで計算した原子のはじき出 し数の値が1000 ppm 程度と比べて圧倒的に少ない.つま り、室温でイオン照射した FeRh 試料中に残存する空孔型欠 陥は極めて少なく,導入後直ちに空孔は移動回復しており, その際に Fe 原子と Rh 原子の位置が入れ替わったいわゆる 反構造欠陥(anti-site defects, ASDs)が生成されるなど, 金 属間化合物に特有の規則的原子配列に乱れを生じていると考 えられる.

この実験結果を参考にして金田らは, Fe-50 at%Rhのス ーパーセルを用いた第一原理計算を試み,格子の乱れを有し ない場合と反構造欠陥を内包する場合において,0度Kに おける反強磁性および強磁性状態のエネルギーを算出し た⁽¹⁴⁾.その結果,まず,格子の乱れを有しない場合は,確 かに反強磁性状態のエネルギーが強磁性状態のエネルギーよ り小さくなり,相図で示す通り低温で実現する磁性は反強磁 性であることが確認された.一方,反構造欠陥を内包させた 場合,強磁性相のエネルギーが反強磁性相よりも小さくなる ことが示された.他の種類の格子欠陥についてはまだ計算を 行っていないが,原子配列の乱れの一種である反構造欠陥を 導入することにより,低温において強磁性が発現する可能性



図 6 200 MeV Xe イオン照射した Fe-50 at % Rh の S パラメーターの照射量依存性.測定温度は室温.

を第一原理計算で示唆できたことは、重要な結果である.

5. イオン照射によって発現した磁性の熱的安定性

一般的に、放射線照射によって材料中に導入される格子欠 陥や結晶構造の乱れは、熱力学的には準安定な状態で存在す る.従って,放射線照射した材料を高温に保つことによって 格子欠陥や結晶構造の乱れは減少・消滅する. これを格子欠 陥等の回復現象とよぶ.そこで、イオン照射によりFe-50 at%Rh中に発現した磁性と結晶構造の乱れの熱的安定性を 調べるために、100℃から500℃までのアニール実験を行っ た⁽¹⁰⁾.アニール実験に用いた試料は,10 MeV のヨウ素イ オンを照射した Fe-50 at% Rh バルク試料のうち, 1×10¹³/ cm² および 5×10¹³/cm² の照射量に対する試料である. 照射 試料に対しては、まずアニール前に SQUID 磁束計による磁 化一磁場曲線と鉄K吸収端における EXAFS スペクトルの 測定を行っている. その後, 100℃~500℃の各温度でそれ ぞれ100分間の真空アニールを行い、各アニール後に再び SQUID 測定, EXAFS 測定を行った. 照射後, アニール前 の試料に対する外部磁場一磁化曲線は、すでに図2(b)に示 してある. 照射量が1×10¹³/cm²の場合に出現する飽和磁化 の値と比べて、5×10¹³/cm²のヨウ素イオンを照射した場合 は,試料の大部分が非磁性のA1構造になるため磁化は大き く減少している.

アニール実験の結果をそれぞれ図7,図8に示す.図7 は、飽和磁化のアニール温度依存性である.ヨウ素イオンの 照射量が1×10¹³/cm²の場合,200℃までのアニールでは、 わずかな飽和磁化の上昇は見られるが、その後の300-400℃ のアニールで飽和磁化は急激に減少し、500℃で照射前の磁 化ゼロの状態に戻る.また図8(a)に示すように、EXAFS のFT スペクトルは、アニール前にはピークの半値幅が大き く、鉄原子周辺の原子配列の乱れが生じていることを示して いるが、400℃-500℃のアニールによってFT ピークの半値 幅は減少する.このことは、イオン照射による原子配列の乱



図7 10 MeV I イオン照射した Fe-50 at % Rh の外部 磁場-磁化曲線から求めた飽和磁化のアニール温 度依存性.外部磁場-磁化曲線の測定温度は 20 K.



図8 10 MeV I イオン照射した Fe-50 at % Rh におけ る鉄 K 吸収端 EXAFS-FT スペクトルのアニー ル温度依存性. 照射量は(a) 1×10¹³/cm², (b) 5 ×10¹³/cm². EXAFS スペクトルの測定温度はい ずれも室温.

れによって生じた強磁性が、それの回復(消滅)によってもとの反強磁性状態に戻っていくことを意味する.

照射量1×10¹³/cm²の試料では,ほぼ一般的な回復現象を 示すのに対して,照射量5×10¹³/cm²の試料に対するアニー ル挙動は大変奇妙である.まず照射直後の飽和磁化は15 emu/g程度であり,1×10¹³/cm²の照射量で現れた磁化の値 と比べてずいぶん小さい.これは,前述したように,多量の イオン照射により結晶構造の大部分が非磁性のA1構造に変 化したためであろう.この状態の試料を200℃までアニール しても,図7,図8(b)に示すように,磁化やA1構造を示す EXAFS-FT スペクトルはほとんど変化しない.しかし, 300-400℃でのアニールにより,EXAFS-FT スペクトル は,結晶構造が,A1構造から乱れを含んだB2構造に変化 したことを示している.それに伴い,図7に示すように, 飽和磁化は照射により急増する.その後,500℃におけるア ニールでは,結晶構造は照射前の状態にほぼ回復し,反強磁 性を示す磁化ゼロの状態に戻る.

イオン照射によって付与されるエネルギーと磁性 変化

高エネルギーイオン照射による Fe-50 at% Rh 合金の磁性 変化,構造変化に関して述べてきた. ここでは,イオン照射 によるどのようなエネルギー付与過程がこれらの現象を支配 するかについて議論する. 高エネルギーイオンが物質中を通 過するときにエネルギーを失っていくプロセスは大きくわけ て2種類ある.1つは、物質中の原子核と直接衝突する過程 であり、「弾性的相互作用」と呼ぶ. もう1つは、物質中の 電子を励起することによりエネルギーを失っていく「電子励 起過程」である.かつては、電子励起過程によって付与され たエネルギーは, 金属や合金中では原子を移動させることは なく, もっぱら弾性的相互作用により格子欠陥が生成され る、と認識されていた.しかし、ここ20年余にわたる研究 から、イオンの質量やエネルギーの増加に伴って、イオンビ ームパスに沿った単位距離当たりの電子励起エネルギー、す なわち電子的阻止能が大きくなると, 金属系材料でも, 電子 励起エネルギーが原子移動を起こし,格子欠陥の生成など, 格子の半永久的な乱れを起こす現象が多く報告されてきてい る⁽¹⁵⁾.特に金属間化合物では、この効果が大きく、酸化物 での電子励起に伴う1次元損傷トラックと類似の構造が NiZr₂などで観測されている⁽¹⁶⁾.

そこで、同じく金属間化合物である Fe-50 at%Rh におい てイオン照射による磁性変化が、弾性的相互作用によるもの か、電子励起によるものかを確認する実験を行った.この実 験を行うには、試料中でイオンのエネルギーが大きく変化し ない条件を設定しなければならない.しかし、イオンのレン ジより厚いバルク試料では、イオンは試料中でエネルギーを 大きく変化させ停止するため、この条件を満たさない.そこ で、照射実験に用いるイオンのレンジよりはるかに厚さの小 さい薄膜(厚さ約 100 nm)を MgO 単結晶基板上にイオンス パッタ法で作製し、実験に臨んだ⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾.作製した試料の組 成は Fe₄₇Rh₅₃ であり、Rh が少し多いため、室温でもほぼ反 強磁性を示す.薄膜試料においても、バルク試料同様、各種 イオンで照射を行い、SQUID 磁束計による磁性評価、 XRD、EXAFS による結晶構造評価を行った.

図9,図10は,それぞれ,電子励起過程,および弾性的相 互作用による試料へのエネルギー付与密度に対して,1.7 MeV Au, 10 MeV I,1 MeV H照射によって発現する飽和磁 化の大きさをプロットしている.これらの図から,磁化の大 きさは電子励起過程とは相関を持たず,弾性的相互作用によ るエネルギー付与過程と大きな相関を持つことがわかる.こ の結果は,イオン照射による磁化の変化が電子励起過程に伴 うものではなく,弾性的相互作用による原子移動がもたらす 格子欠陥生成・格子の乱れに由来するものであることを示し ている.

電子励起過程がイオンの高エネルギー領域で支配的である のに対して,弾性的相互作用の断面積は低エネルギー領域で 大きな値をとる.このため,FeRh 合金の磁性を変化させる



電子励起による散逸エネルギー密度 [keV/µg]

図9 各種イオン照射によって FeRh 薄膜中に発現した 飽和磁化の電子励起過程によるエネルギー付与 密度依存性. 飽和磁化の測定温度は 20 K.



図10 イオン照射によって FeRh 薄膜中に発現した飽 和磁化の弾性的相互作用によるエネルギー付与 密度依存性. 飽和磁化の測定温度は 20 K.

には、10-100 MeV といった高エネルギーイオンである必要 はなく、弾性的付与エネルギー密度を図10に示された値程 度に与えることができれば、エネルギーの低いイオンでも十 分に磁性を変化させることができると考えられる.たとえ ば、電子顕微鏡試料などの微細加工に用いられる集束イオン ビーム装置(FIB)の 40 keV Ga イオンによる FeRh 薄膜の磁 性変化を我々は観測した⁽¹⁹⁾.また、KEKの放射光施設 BL16A において、真空チェンバー内に設置されたイオンガ ンによる照射と軟 X 線 MCD 測定を組み合わせることによ り、3 keV Ar イオン照射が FeRh 薄膜表面に強磁性を発現 させることを確認している.

マイクロイオンビームを用いた2次元磁性パター ニングの試み

最近のイオンビーム技術では、イオンビームの大きさをマ



図11 10 MeV I イオンマイクロビームによる 2 次元強 磁性パターン. (a) MFM 像, (b) AFM 像. 観 測温度はいずれも室温.

イクロメートル程度にまで絞ったうえで、走査させることが できる.マイクロイオンビームは、現在、宇宙半導体デバイ スの放射線照射特性評価や、細胞、DNA などの放射線影響 の調査、高分子材料からの MEMS 部品作成などに用いられ ているが、無機材料の改質に応用された例はほとんどない. そこで、10 MeV のヨウ素イオンを2マイクロ平方メートル の大きさにまで絞ったマイクロビームを描画スキャンさせて、 FeRh 薄膜に2次元磁性パターンの作製を試みた⁽²⁰⁾.

図11(a)に、磁気力顕微鏡(MFM)を用いて、マイクロイ オンビーム照射した FeRh 薄膜表面の磁性状態を観測した結 果を示す.マイクロビームが走査された箇所だけが強磁性に 変化し、その領域が5マイクロメートルごとに規則的に配 列するパターンが明瞭に観測された.一方、図11(b)に示す 同じ場所での AMF 像では、特に変化はみられない.AFM 像は表面の凹凸を示すものである.これらの結果から、 MFM 像で観察された2次元磁気パターンは、イオン照射に よって表面の凹凸が誘起されたことに伴うものではないこと がわかる.すなわち、イオンマイクロビームを用いることに より、FeRh 薄膜のマイクロメートルスケールでの2次元磁 性改質が可能であることが示された.

8. まとめ

FeRh 金属間化合物の磁性や結晶構造は、イオンビームに よる弾性的エネルギー付与によって系統的に変化すること、 イオン照射によって変化した磁性や構造は、照射後の熱処理 によってさらに変化することなどを示した. 照射による強磁 性発現は、結晶構造の乱れに起因することが明らかになった が、その発現機構は未だ明確ではない. 現在、その機構解明 のために、KEK-PFや SPring8 放射光施設を利用した磁気 コンプトン散乱実験や軟 X 線 MCD 測定、さらには、光電 子顕微鏡(PEEM)などを用いた実験を遂行中である. Spring8・BL08W における磁気コンプトン散乱実験では、イオ ン照射により発現した強磁性は主にスピン磁気モーメントに 由来し、軌道磁気モーメントの寄与は小さいことを示唆する 結果が得られている⁽²¹⁾.

また,本研究成果の応用として,マイクロイオンビーム技

術を利用した磁気パターンドメディアの作製があげられる. もちろん、現行の記録密度を考慮した実用化領域に達するに は、イオンビームをナノメートルスケールまで絞る技術の進 展を待たなければならない.しかしながら、ここで示した2 次元のパターニングにとどまらず、マイクロイオンビームの エネルギーを制御することにより深さ方向に依存した磁性発 現も可能であることから、3次元磁性パターニング技術の開 発など新たな技術領域への応用も期待できる. 今後について はこのような技術開発も視野に入れ、研究を展開していきた い.

本稿で紹介した研究の一部は、山陽放送学術文化財団およ び日本原子力研究開発機構・黎明研究の助成のもとで行われ ました.本研究に携わった歴代の大阪府立大学大学院生,福 住正文氏, 圖子善大氏, 藤田直樹氏, 小杉晋也氏, 愛甲一馬 氏に感謝します.本実験で用いた FeRh 試料は,田中貴金属 工業㈱のご厚意により貸与いただいたものです.ご尽力いた だいた浜田登喜夫氏に感謝します. また, 高エネルギーイオ ン照射実験、マイクロイオンビーム照射実験に協力いただい た日本原子力研究機構・石川法人氏、神谷富裕氏、斉藤勇一 氏,佐藤隆博氏,高野勝昌氏,江夏昌志氏に感謝します. MFM 観察では、大阪大学・関修平氏に協力いただきまし た. さらに,低速陽電子ビームによる S パラメータ測定で は日本原子力研究機構・河裾厚男氏に, KEK 放射光を用い た EXAFS 測定では、日本原子力研究開発機構・岡本芳浩 氏に, SPring8 を用いた硬 X 線 MCD 測定では, 高輝度光 科学研究センター(JASRI)・鈴木基寛氏にお世話になりまし た. また、本稿では詳しく触れませんでしたが、SPring8を 用いた磁気コンプトン散乱測定に関しては、JASRI・櫻井吉 晴氏,伊藤真義氏に,KEK-PF および Spring8 を用いた軟 X線MCD測定, PEEM測定では, KEK · 雨宮健太氏, JASRI·中村哲也氏,大河内拓雄氏,小嗣真人氏,木下豊彦 氏にお世話になりました.東京大学・金田保則氏には,第一 原理計算の実施、ならびに実験結果全般に関する議論をいた だきました. さらに,岡山大学(現,岡山理科大学)の小野文 久氏には,著者(岩瀬)が磁性体の照射効果の研究を開始した 当初から協力をいただいております. ここに感謝いたします.

文 献

- (1) J. S. Kouvel and C. C. Hartelius: J. Appl. Phys. Suppl., **33**(1962), 1343.
- (2) L. I. Vinokurova, A. V. Vlasov, N. I. Kulikov and M. Pardavi-Horvath: J. Mag. Magnetic Materials, 25 (1981), 201-206.
- (3) J. Cao, N. T. Nam, S. Inoue, H. Y. Y. Ko, N. N. Phuoc and T. Suzuki: J. Appl. Phys., 103(2008), 07F501.
- (4) E. Navarro, M. Multigner, A. R. Yavari and A. Hernando: Euro. Phys. Lett., **35**(1996), 307.
- (5) 筆者らが行ってきた無機材料への高エネルギーイオン照射効 果に関しては、たとえば、「まてりあ」の解説記事、45(2006)、 456-463, 41(2002), 20-27, 37(1998), 470-478を参照のこと.
- (6) S. Kosugi, Nao. Fujita, Y. Zushi, T. Matsui, N. Ishikawa,

Y. Saitoh and A. Iwase: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 267(2009), 1612-1615.

- (7) M. Fukuzumi, Y. Chimi, N. Ishikawa, M. Suzuki, M. Takagaki, J. Mizuki, F. Ono, R. Neumann and A. Iwase: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 245 (2006), 161-165.
- (8) A. Iwase, M. Fukuzumi, Y. Zushi, M. Suzuki, M. Takagaki, N. Kawamura, Y. Chimi, N. Ishikawa, J. Mizuki and F. Ono: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 256 (2007), 429-433.
- (9) Y. Zushi, M. Fukuzumi, Y. Chimi, N. Ishikawa, F. Ono and A. Iwase: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 256 (2007), 434-437.
- (10) S. Kosugi, Nao. Fujita, T. Matsui, F. Hori, Y. Saitoh, N. Ishikawa, Y. Okamoto and A. Iwase: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 269 (2011), 869-872.
- (11) http://leonardo.phys.washington.edu/feff/
- (12) J. Koike, P. R. Okamoto and M. Meshii: J. Non-Crystalline Solids, 106 (1988), 230-235.
- (13) F. Hori, M. Fukuzumi, A. Kawasuso, Y. Zushi, Y. Chimi, N. Ishikawa and A. Iwase: phys. stat. sol. (c), 4(2007), 3530-3533
- (14) Y. Kaneta, A. Iwase and S. Iwata: 10th International Conference on Computer Simulations of Radiation Effects in Solids. Krakow, Poland, July (2010).
- (15) 高エネルギー重イオンによる高密度電子励起が物質に与える 効果については、その多くが、物質内の高速重イオン国際シ ンポジウム(International Symposium on Swift Heavy Ions in Matter, SHIM)および, 固体内原子衝突国際会議(International Conference on Atomic Collisions in Solids, ICACS)にお いて発表されている. 両会議の最近の proceedings は, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 230 (2005), B, 245 (2006), B, 256 (2007), B, 267(2009)に掲載されている.
- (16) A. Dunlop, H. Dammak and D. Lesueur: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 112(1996), 23-25.
- (17) Nao. Fujita, S. Kosugi, Y. Zushi, T. Matsui, Y. Saitoh and A. Iwase: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 267 (2009), 921-924.
- (18) Nao. Fujita, S. Kosugi, Y. Saitoh, Y. Kaneta, K. Kume, T. Batchuluun, N. Ishikawa, T. Matsui and A. Iwase: J. Appl. Phys., 107 (2010), 09E302,
- (19) K. Aikoh, S. Kosugi, A. Iwase and T. Matsui: J. Appl. Phys., **109**(2011), 07E311.
- (20) Nao. Fujita, T. Matsui, S. Kosugi, T. Satoh, Y. Saitoh, K. Takano, M. Koka, T. Kamiya, S. Seki and A. Iwase: Jpn. J. Appl. Phys., 49(2010), 060211.
- (21) S. Kosugi, T. Matsui, N. Ishikawa, M. Itou, Y. Sakurai, K. Aikoh, K. Shimizu, Y. Tahara, F. Hori and A. Iwase: J. Appl. Phys., 109 (2011), 07B737.

***** 岩瀬彰宏 東京大学大学院工学系研究科(物理工学専攻)博士課程中途退学 1978年3月

1978年4月 特殊法人 日本原子力研究所 入所 (1993年-1994年 米国アルゴンヌ国立研究所研究員) 2003年3月 日本原子力研究所 退所 2003年4月 大阪府立大学先端科学研究所 教授 2005年4月 現職 専門分野:放射線物性,格子欠陥学 ◎放射線と物質の相互作用,各種ビーム(電子,イオン,ガンマ線,X線)を 用いた材料改質,材料評価などの研究に従事. *****

松井利之





堀 史説