

客員所員を経験して

(公財)高輝度光科学研究センター 中村 哲也

2012 年度に松田巖先生の研究室で客員准教授としてお世話になりました。松田先生の研究室は極めてアクティビティが高く、SPring-8 の東大アウトステーション(BL07LSU)における先端研究に加え、XFEL の試験機として建設された FEL でも VUV 領域の磁気光学応答ダイナミクスに関する実験に取り組むなど、私にとっても刺激の多い一年となりました。松田研究室の皆様と共同研究をさせていただき、議論や情報交換をできたことに加え、放射光軟 X 線の将来をともしに切り拓いていく強力な仲間ができたことが個別の研究成果に勝る貴重な収穫だと感じています。このような機会を与えていただきました松田先生はじめ物性研の先生方に深く感謝いたします。物性研で共同研究させていただいた具体的な内容につきましては、一連の実験で努力された松田研究室院生の山本真吾さんが論文にまとめられましたので、まもなくその成果を皆様にも紹介いただけるものと思います。論文を投稿中という事情もありますので、本稿では物性研で行った磁気カー効果の研究と関わりの深い X 線磁気円二色性(XMCD)について四方山話を書かせて頂くことにいたします。本稿の大部分が、表題「客員所員を経験して」から掛け離れてしまいますことをご容赦ください。

【メスバウアーより XMCD?】

もう 20 年も前の回想になりますが、京都大学工学部の志賀正幸先生のご指導の下、私の卒業研究は、一次の強磁性-反強磁性相転移(Tcr.~340K)を示す FeRh 合金に対し、Al の Rh 置換効果をメスバウアー分光によって調べるという内容でした。この研究では、Al で Rh サイトを置換しようとする当初の目論見通りには進みませんでした。とにかく Al を添加した効果が Rh サイトの Fe 置換であることがメスバウアー分光実験によって分かり、強磁性が安定化して転移点が低温側にシフトする磁性の変化についても説明できました。この研究で活かされたようにメスバウアー分光で Fe だけの磁性を選択的に得られることは非常に強力です。しかし、Fe 以外の元素に対するメスバウアー分光については、(少なくとも当時の印象では)線源の入手が難しく、かなり特殊だと感じました。その後、修士・博士課程では当時の物性研と同じ六本木にあった東大生産研の七尾進先生にご指導いただくことになり、ここで放射光と出会い、七尾先生からは修論のテーマとして X 線磁気ブラッグ散乱を提案していただきました。最初の数ヶ月は X 線磁気ブラッグ散乱に関する理論の論文を眺めては理解に苦しみ、睡魔と戦う毎日を過ごしていましたが、やがて 7 月頃には岡山大(現在:広島大学)の圓山裕先生が KEK-AR で行う XMCD の実験に参加させていただける機会に恵まれました。XMCD はその 5 年前(1987 年)にドイツの G. Schütz 先生らが Fe の K 吸収端で初めて観測に成功しました。私たちが KEK-AR で実験する頃までには既に幾つかの例が報告されていましたが、KEK-AR での実験は当時の国内では十分に新しい試みでした。そしてこのとき、XMCD によって Fe だけでなく Co や Tb など他の多くの磁性元素に対して元素選択的な磁気情報が得られることを知り、「XMCD にはメスバウアーの線源を各元素揃える以上の将来がある。これを専門にすれば失業せず食っていける?」と打算したことが現在の研究につながっています。

【XMCD スペクトルは何を示すか】

圓山先生のご厚意で参加させていただいた前述の実験に続き、私達の研究室では光磁気記録媒体に関する興味から希土類遷移金属合金薄膜試料に対して XMCD 実験を行いました。しかし、実際に「食っていける」と確信できるほどの成果が得られるほど簡単ではありませんでした。3d 遷移金属の K 吸収端と希土類の L_{2,3} 吸収端の終状態は、双極子遷移に対して、それぞれ、4p 軌道と 5d 軌道になるため、XMCD によって得られる情報もこれらの終状態に対応し、伝導バンドの磁気分極を反映したものになります。伝導バンドの磁気情報を得るということは極めて画期的ですが、実験と比較できる理論計算も殆ど無かったため、スペクトル形状の起源が分からずに頭を抱えていました。その後、国内では五十嵐潤一先生や藤川高志先生によって 3d 遷移金属 K 吸収端、また、小谷章雄先生、原田勲先生、城健男先生らによって希土類

L_{2,3} 吸収端の XMCD の理論研究が進み、これらの吸収端における XMCD の素性について、私のような実験屋でも何とかイメージできるものとなりました。特に興味深いのは、Fe や Co といった 3d 遷移金属の K 吸収端で測定した XMCD スペクトルには、吸収原子自身の磁気分極よりも、むしろ、隣接原子の磁気分極の影響が強く表れる、という指摘です。内殻状態には明らかな元素選択性がありながら、XMCD スペクトルには隣接する異元素の磁気情報も含まれることを意味するものですから、捉えようによっては「元素選択」の特徴が崩れてしまうわけです。メスbauer分光のように元素選択的な情報が得られることを期待した経緯からすれば非常に困ったことですが、X 線磁気分光としては興味深いものと思います。一方、このようにスペクトルの解釈が難しい硬 X 線領域の XMCD についても、Pt や Au の L_{2,3} 吸収端で注目すべき結果が得られています。たとえば、Pt L_{2,3} 吸収端では磁性を担う 5d 軌道を直接観察しており、磁気光学総和則によって磁気モーメントの定量評価も可能になります。特に、鈴木基寛氏らが SPring-8 において移相子を用いた高速円偏光反転によるロックイン法の XMCD 測定技術を確立したことで、測定精度が一気に数桁も向上しました。その結果、Au のナノ粒子の磁性など、非常に微弱な磁性まで捉えることができるようになりました。さらに最近では、光束径 100nm を切る集光ビーム(ナノビーム)によって、磁気イメージングでの XMCD 実験技術も進んでいます。

【軟 X 線領域の XMCD への鞍替え】

一方、私達が硬 X 線領域の XMCD の扱いに混乱していた時期と並行し、軟 X 線領域の XMCD では、おおむね 1995 年以降、磁気光学総和則による磁気モーメントの定量評価が盛んになっていきました。軟 X 線領域では、遷移金属の 3d 軌道や希土類の 4f 軌道など、磁性の主な担い手となる電子軌道の磁気分極を直接的に観測できる利点があります。そこで、2000 年度後期の SPring-8 課題募集で BL25SU に課題を申請し、幸いそれを採択していただきました。そして、この実験をきっかけとして「軟 X 線 MCD を用いて元素別の磁気ヒステリシスを描きたい」という当面の目標ができました。そこで、2002 年度の半ばになって高輝度光科学研究センターに移り、多くの方の協力を得て新たに電磁石式の XMCD 測定装置を整備し、元素選択磁気ヒステリシス測定が実現しました。その後、この元素選択磁気ヒステリシス測定は、交換バイアス薄膜をはじめとした界面強磁性の理解に大いに役だっています。

【軟 X 線 MCD の今後】

軟 X 線 MCD は、元素を区別した磁化測定法という観点で測定される場合が多いことから、低温(高温)や強磁場など、磁化測定と同様の試料環境が求められてきました。たとえば、SPring-8 の BL25SU では、東北大金研の鳴海康雄先生、野尻浩之先生、さらに、物性研の金道浩一先生らとの共同研究で、最大 40 テスラまでのパルス磁場下での測定が可能になっています。今後は、試料温度の低温化や、超伝導磁石による定常強磁場の導入がターゲットになるでしょう。一方、SPring-8 では、今年度末の完成予定で BL25SU を改造し、その後、光束径 100 nm をきる軟 X 線ナノビームによる XMCD 測定を整備します。軟 X 線ナノビームによる XMCD では、メソスケールで物性に空間分布や揺らぎのあるような系で局所的な物性をダイナミクスまで含めて観測するといった実験に興味を持たれます。また将来、X 線自由電子レーザー施設 SACLA 等において軟 X 線 FEL が利用できるようになれば、特に、松田巖先生が中心となって進めておられる磁気カー効果を利用した磁気ダイナミクスの研究などが発展するものと期待されます。

