

「第5回ミニ懇話会」開催報告

広報担当幹事：渡邊 敏正

第5回ミニ懇話会が会員の圓山裕先生を話題提供者（写真1）として

「鉄は硬いが役に立つ ―磁性物理と材料科学―」

なるタイトルで開催され、参加者は10名であった。会場の9名の聴取者の中には、広島大学マスターズ会員の高畠敏郎先生の姿があり、ミニ懇話会が少しでも西条と広島の両マスターズの今後の交流活性化に資することができれば、と期待している。



写真1：説明を開始される直前の圓山先生

話題のキーワードは「磁性」である。ただ、磁性に関連してある程度予備的なイメージを把握しておくことが内容を理解する助けになると考えて、最小限必要と思われる用語の解説を加えながら話題のあらすじを説明したいと思う。なお、説明する「イメージ」はあくまで我々門外漢に向けての大雑把なものであり、正確さより分かり易さを優先していることを了解していただきたい。

殆どの人は小学校で磁石に出会ったと思う。永久磁石は鉄の釘や砂鉄を引きつけるが、青銅製の十円玉は引き寄せない。磁石にはN極とS極があってN極同士あるいはS極同士は反発するがN極とS極は引き合う。少し学年が上がると、釘にエナメル線を巻いて電池をつなぐと電磁石になる、などの現象を経験したと思う。今回のお話からこれらのことを思い出すとともに、この磁石が示す性質はどこから来るのだろう、との疑問が湧いてきた。しかし、自分の中では答を見つけることができなかった。

ここではとりあえず、引き合う（引力）、反発する（斥力）という一つの磁石が示す性質を「磁性」、これらの力を「磁力」、磁力を持つ物質を「磁性体」なる用語で表現しておきます。ただし、引力と斥力は同じ大きさで方向性が異なるだけですので、以後は大きさと方向と合わせて「磁気モーメント」という用語も使います。通常、原子が格子状に集まって分子となって物質を構成しています。ここでは詳細は省略しますが、非常に大雑把な言い方をすれば、各原子は磁気モーメントを持ちます。つまり各原子がひとつの磁石の機能を備えています。構成する各原子の磁気モーメントの合力で分子の、さらに分子の磁気モーメントの合力で物質の磁気モーメントが決まります。大きさと方向がランダムな磁気モーメントを持つ原子が集まった場合、分子の磁気モーメントは見え難く（近似的にゼロに）なります。一方で磁気モーメントが同方向の原子が集まると分子は大きな磁気モーメントを持ちます。つまり、磁石の機能が現れます。

(注 1) 原子を原子核と周囲を回る何個かの電子で構成される、という古典的なモデルでイメージをもう少し追加説明しておきます。原子核も電子も自転しており、それにより各々磁気モーメントを持ちます。さらに電子が原子核の周囲を公転することによる軌道磁気モーメントも存在し、これらが合成されて原子の磁気モーメントになります。

予備的なイメージの説明はこれくらいにして、6項目からなる話題内容の概要説明に移る。ただし、各項目の理解に必要な事柄が出てきたときは、その都度簡単な説明を追加する。

ご自身のこれまでの研究について、PowerPoint を使いながら以下の項目 (1) ~ (6) に分けて、さらにいろいろな物質の標本や素子など実物を会場で回覧するなどの配慮をされて、我々門外漢にも分かりやすい丁寧な説明をされた (写真 2)。

- (1) はじめに (2) 磁性研究 (3) 磁性材料 (4) 放射光 X線による磁性研究
(5) 極端条件下の磁性研究 (6) おわりに

以下にそれぞれの概要について感想を交えながら記述する。



写真 2 : 会場で回覧されたいくつかの鉱物サンプル

(1) はじめに

話された内容をまとめると以下のようになると思う。

種々の原子は陽子、中性子、電子の組合せで構成されるが、これらは宇宙誕生のビッグバンで生じたもので、各種の元素は恒星の核融合や超新星爆発で生じるものである。言ってみれば、銀河も太陽も地球も私たちもすべて星屑からできている、と言っても過言ではない。

磁性研究の重要な元素である鉄は、恒星の核融合による最終生成物で、恒星の超新星爆発によって宇宙に拡散された。鉄は最も安定した原子核を持つ元素である。このため核融合および核分裂の行きつく先が鉄であり、鉄原子は宇宙そして地球上にたくさん存在する。

(2) 磁性研究

キーワード: (i) インバー合金 (ii) ネオマックス磁石 (iii) 希土類鉄ガーネット(RIG)

(i) インバー合金:

熱膨張(熱収縮)がゼロの鉄ニッケル合金は「インバー合金」と呼ばれている。温度の上昇(低下)に伴って金属は膨張(収縮)する。これに加えて、インバー合金では磁化が減少(増加)し、それに因る収縮(膨張)が生じる。その結果、これらが相殺されて熱膨張(熱収縮)が一見消失する。ここで、「磁化」は単位体積当たりの磁気モーメントのことである。この発明は 1920 年のノーベル賞受賞の業績だった。温度変化による変形が生じ難いという特徴から、LNG(液化天然ガス)の貯槽、レーザー発振器、各種固定棒等の材料として活用されている。

物資の中には、隣り合った原子の間に磁気モーメントを揃えようとする相互作用を持つも

のがあり、この物質を「強磁性体」といいます。鉄(Fe)、コバルト(Co)、ニッケル(Ni)等がそうです。強磁性体では構成する各原子の磁気モーメントが自発的に揃うので、磁場をかけなくても（つまり、磁石を近づけなくても）磁気モーメントが現れます（「自発磁化」が生じます）。ただし、これは「内部的に」磁化が生じるということです。磁気モーメントの向きが揃った部分を「磁区」といいます。分子はいくつかの磁区に分割されますが、隣り合った磁区同士は磁気モーメントを打ち消し合うので全体としては外部に磁力は生じません。鉄が通常は磁石ではないのはこのためです。ところが、外界の変化（磁場、圧力、温度などの変化）は磁性に影響を与えます。磁界の変化（つまり、磁石を近づけたこと）による強磁性体への影響として、強い磁力が近づくと磁区の磁気モーメントが同一方向に揃います。つまり、強磁性体は一時的に磁石に変化します。N極が近づけば強磁性体の近い部分がS極になり、磁石にくっつきます。ここで磁石を遠ざけたとき、磁区分布が元の状態に戻って磁力がなくなる場合と、磁区が揃ったまま磁力が存在し続ける場合があります。鉄は前者ですが、後者の場合は永久磁石となります。

大雑把に直感的な例え方をすれば、上を向いた磁気モーメントを持つ原子の数が下を向いた磁気モーメントを持つ原子の数より多いため、全体では磁化が残っている場合に「フェリ磁性体」、隣り合う原子の磁気モーメントが逆向きでお互いの磁気モーメントが打ち消し合って全体として自発磁化が消失している場合を「反強磁性体」と言います。この言い方に従えば、強磁性体では磁場がない環境でも原子の磁気モーメントが同じ方向に揃っています（写真3）。

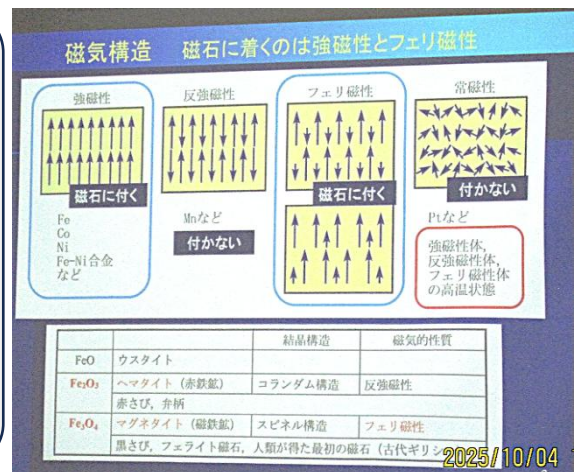


写真3：磁気構造を示すスライド

(ii) ネオマックス磁石：

いくつかの用語の説明を加えながら概要を述べる。強い磁力を持つ永久磁石を得るには、強い磁力を保持しかつそれが消滅しにくい分子構造の物質を見つけ出すか、または元素を組み合わせるような分子構造の物質を創る、ということになる。1982年に住友特殊金属の佐川真人氏が、希土類金属のネオジウム(Nd)、鉄、ホウ素(B)の合金として創った「ネオマックス磁石」は世界最強の永久磁石と言われ、情報端末(PC, 携帯機器), EV, 駆動装置, IoT (Internet of Things) 関連機器や省エネルギーに幅広く役立っていると紹介された(写真4)。

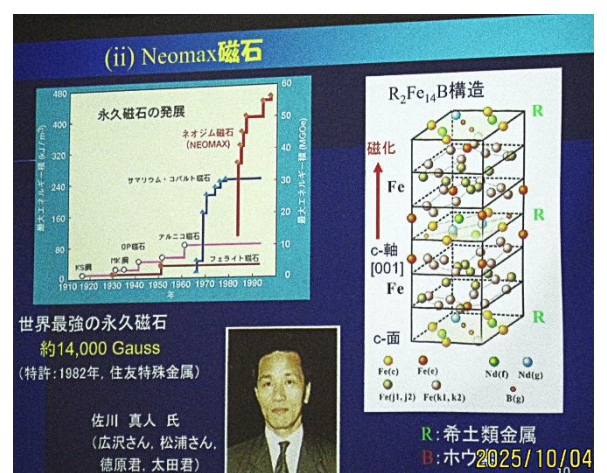


写真4：ネオマックス磁石の解説

(iii) 希土類鉄ガーネット(RIG)：

1950年代から、反強磁性体の赤鉄鉱と非磁性体の希土類酸化物の焼成（高温で溶かして固めること）で新磁性体を創る試みや希土類鉄ガーネットのフェリ磁性についての研究が盛んに続けられ、磁気構造の基本的な理解が飛躍的に進んだ。その成果は1970年 L. Néel の「フェリ磁性

の理論」によるノーベル賞受賞の土壌となったこと、1970年代になって希土類鉄ガーネットにビスマス(Bi)を添加した Bi-RIG が光通信素子としての応用につながったことなどの説明があった。

(3) 磁性材料

キーワード： (i) 磁気異方性 (ii) 磁気光学効果 (旋光性)

光は電磁波の一種であり磁界の影響を受けるので、磁性をうまく利用して光を制御することにより種々の有益な応用が生まれる (光と電磁波については後述する)。所望の光制御を得るために必要な磁性およびその磁性を備える磁性材料の研究がここでのポイントと思われる。

(i) 磁気異方性 (写真5)：

「磁気異方性」とは、磁性体の磁化に関する性質で、形状や結晶構造・原子配列に起因して、磁化が向きやすい方向「磁化容易方向」と、磁化が向き難い方向「磁化困難方向」が存在することである。鉄の体心立方格子、ニッケルの面心立方格子、コバルトの六方最密格子という結晶構造について、原子やイオンが密に分布する面に垂直な方向は磁気モーメントが揃いやすいこと (磁化容易方向)、および磁化容易方向の活用は強い磁力を持つ永久磁石や磁気記憶大容量化につながることを説明された。

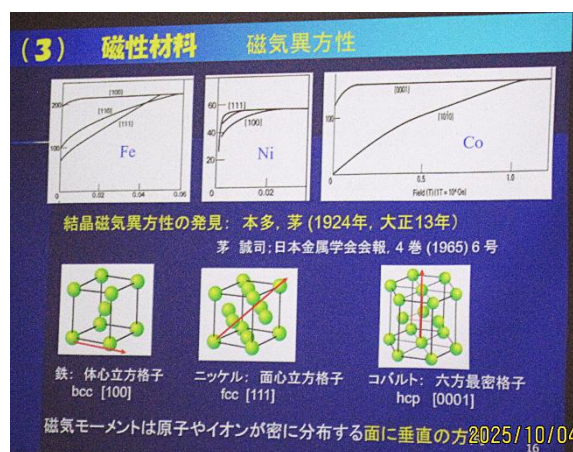


写真5：磁気異方性の説明スライド

特に、1924年に本多光太郎と茅誠司の2人の研究者によって発見された結晶磁気異方性は日本が世界に誇る成果のひとつである、と強調されていたことが印象に残る。研究分野の先達による素晴らしい成果を誇らしく思う気持ちは十分に理解できた。なお、磁気異方性は次の(ii)磁気光学効果でも重要な性質である。

(ii) 磁気光学効果 (旋光性)：

はじめに、光は電磁波の一種であるので、そのイメージを図1～図3を使ってできるだけ分かり易く説明する。図1と図2は、江馬一弘 (監修) 『ニュートン式超図解 最強に面白い!!光』 (株) ニュートンプレス (2021), のP97に掲載の図をスキャナーで読み取って作成・使用している。図3は、物理メモ「平面波と等位相面とは一波動方程式からsin波を導出する」<https://butsurimemo.com/> 掲載の図をスクリーンショットで切り取って使わせていただいた。

電磁波とは、空間を伝わる電場と磁場の「波」の総称です。例えば、ガンマ線、X線、紫外線、可視光、赤外線、マイクロ波、電波 (ラジオ・テレビなど) はすべて電磁波です。以下では、そのイメージをできるだけわかりやすく簡潔に説明したいと思います。

同符号の電荷 (電気を帯びた粒子) が反発し異符号の電荷が引き合う、電流 (荷電粒子の流れ)、電圧 (電流を流す圧力) などの電氣的性質がある空間を「電場」と言います。同様に磁性的性質がある空間を「磁場」と言います。いずれでも空間の場所それぞれに強さ (作用の強弱) があります。

図1の左端に示すように、電場の変化 (例えば、電流の変化) がX軸方向にあると、それに応じてX軸に垂直な面 (Y-Z平面) 上で閉路状に磁場変化 (磁力の変化) が発生します。図1では円で示していますが、円状とは限りませんし、複数の閉路の場合もあります。これらは閉路の形を維持しながら入れ子状に拡散しますが、この磁場変化により電場の変化が垂直方向 (X-Z平面) に閉路状に発生します。

さらに、その電場の変化で次の磁場の変化が Y-Z 平面に生じ、と連鎖的に電場と磁場の変化が続き、それが共に図 1 に示すように Z 軸方向に光速で進んでいきます。これが電磁波伝搬のイメージです。図 2 に正弦波のような馴染みのある波形でもう少し具体的に、X-Z 平面上の電場変化と Y-Z 平面上の磁場変化の伝搬イメージを、また図 3 に 3 次元的な伝搬状況をそれぞれ示します。

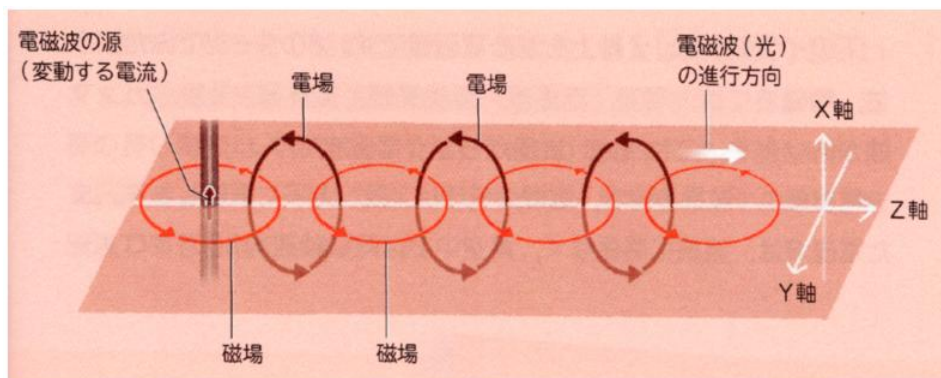


図 1：電場と磁場の連鎖的発生イメージ

波形の同じ値の箇所（等位相）を通る面（等位相面）を考えると、図 3 のように平面である場合を「平面波」、円になる場合を「球面波」と言います。球面波も微視的には平面波が円状に繋がっていると見ることができます。平面波は海岸に打ち寄せる波や船が通った後にできる波の、また球面波は池に石を投げ入れたときにできる波紋のイメージです。ここで注意すべきことは、電場変化と磁場変化がペアで（直交する形で）存在していることです。図 2 の磁場変化の波形に対しても、図 3 と同様な平面波、球面波という 3 次元的な伝搬状況があります。なお、図 2 では両者の波形の高さは同じように見えますが、実際には電場変化が磁場変化の 376 倍ほどの大きさです。

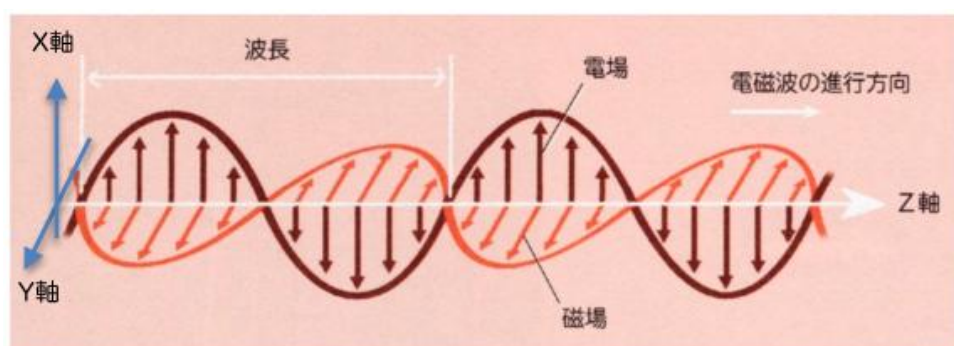


図 2：Z 軸上を進む電磁波のイメージ

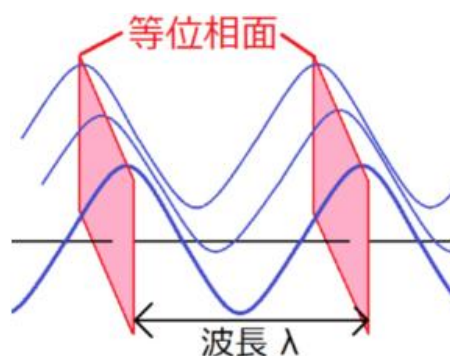


図 3：平面波のイメージ

次に、光と電磁波の関係を見ていきます。実は、我々が光と感じるのは電場の部分です。従って、以下の説明では特に断らない限り電場変化だけに着目しますが、常に磁場変化がペアで存在します。図2のX-Z平面を「振動面」と言い、「電場は振動面で振動する」などと表現します。

図2は一種類の光を表しますが、振動面が別方向の光もあります。自然光は振動面がさまざまな方向に一様に分布している光の集まりです。自然光から図2の光のように振動面がある特定方向の光のみを取り出したとき、この光を「偏光」と言います（このため、振動面を「偏光面」と呼ぶこともあります）。偏光を取り出す素子または物質を「偏光子」、「偏光板」または「偏光フィルター」と言います。偏光抽出では、偏光以外の光は偏光子にすべて吸収されて除去されます。図2では、Z軸方向から見ると振動面が直線になっているので、特に「直線偏光」と呼びます。振動面が少しずつ回転して、Z軸方向から見ると円を描くように見える場合もあり、これを「円偏光」と言います。円偏光には右回りと左回りがあります。図4に、振動面にのみ着目した自然光、直線偏光、円偏光のイメージを示します。この図は、村上洋一（編・著）『量子の世界を見る方法「スピン」とは何か』、ブルーバックス B-2217（2022）、（株）講談社、の P241 に掲載の図をスキャナーで読み取って使わせていただきました。偏光は磁場によって種々の扱い方が可能なため多様な応用があります。

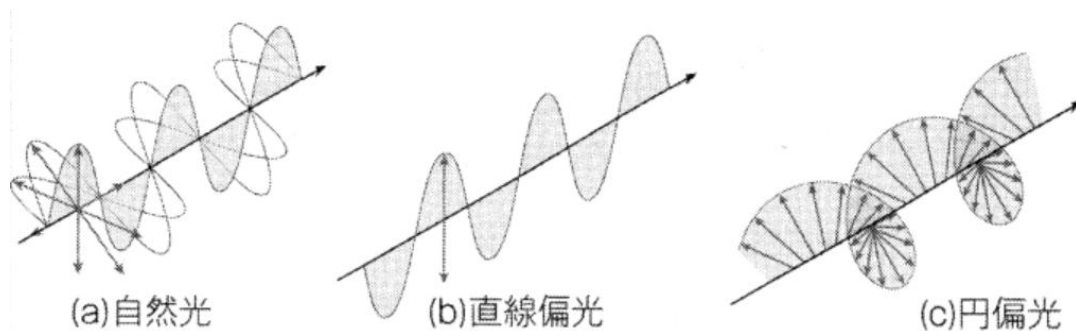


図4：振動面で示した自然光，直線偏光，円偏光のイメージ

「磁気光学効果」とは、物質に外部から磁場を印加する（作用させる）か、あるいは物質が磁化している場合に、光が透過・反射するときに光の偏光状態が変化する現象のことです（写真6）。重要な効果のひとつに「ファラデー効果」があり、光通信デバイスや磁気記録再生技術、磁性体の物性評価などに広く応用されています。ファラデー効果あるいは「磁気旋光」とは、磁気異方性を持つ物質あるいは異方性結晶の物質に対して、直線偏光を磁場に平行な進行方向に透過させたとき偏光面の角度が変わる現象のことで、磁場の強さや透過距離に応じて回転角が変化します。

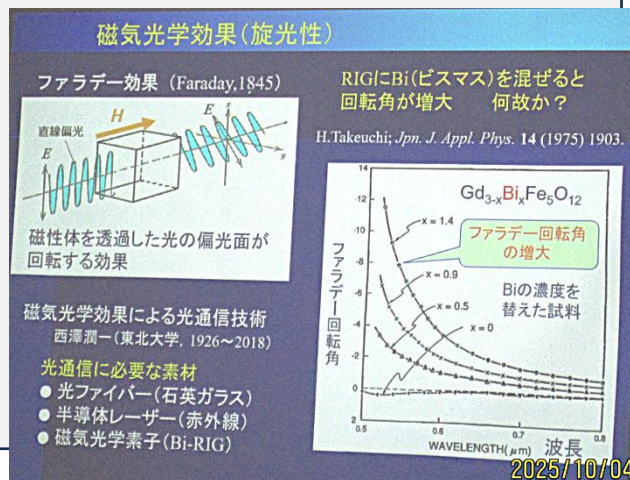


写真6：磁気光学効果の説明スライド

光通信は、高速・大容量・遠距離の通信，多重通信（多波長），偏波（垂直，水平）多重通信，電気ノイズに強い，軽量化などの利点を有しており，磁気光学効果の応用によって光通信技術が飛躍的に進展してきた。光通信の基本構成は光学素子（光アイソレータ，光サーキュレータ）などであり，これらは必要な素材として光ファイバー（石英ガラス），半導体レーザー（赤外線），磁気光学素子（ビスマス希土類鉄ガーネット Bi-RIG）の3点が揃って初めて実現する。

光源から出た光が対象物に当たって反射して光源に戻ってくる「戻り光」は，レーザーを不安定にしたり破損させたりする原因になります。ファラデー効果を利用して偏光面を45°回転させる機器と偏光板を組み合わせることで，この戻り光をブロックするのが「光アイソレータ」です。「光サーキュレータ」は通常3ポートまたは4ポートの入出力を持ち，同様の仕組みに反射プリズムを追加して順方向に進む光と逆方向に進む光の伝搬方向を分離する機能を持たせたもので，単一ファイバーでの双方向通信を可能にします。

光ファイバー通信で使用する中継器は，ファイバーの中を通る光を電気信号に変換する受光器，電気信号の増幅器，乱れた信号波形を整える再生器，再び光の信号として送り出すレーザーなどで構成される。その通信回路にはアイソレータ，サーキュレータなども含まれていること，太平洋の深い海底に横たわる光ケーブルにもこのような中継機が多数設置されて光通信の高信頼性と様々な利点を支えていること，などの説明があった。

Bi-RIG は実用の光通信素子には不可欠で，海底ケーブル，Ethernet ケーブル，動力・機械（EV，飛行機）の制御系，医療機器（内視鏡など）等，実用面で多用されている。Bi-RIG に関しては，RIG に Bi を混ぜると偏向面の回転角が増大するのは何故か，優れた性能を持つ Bi-RIG 単結晶薄膜の作製を知人が成功させた，など具体的な事例にも言及された。

ここまで拝聴した内容から，性能の良い磁気異方性を持った物質あるいは異方性結晶が応用上必要とされ，その獲得には磁性材料を構成するいくつかのキーとなる元素の選択と配位がポイントであること，そのため物質の結晶構造および原子の電子状態や磁気状態などを把握することが重要になることが理解できた。圓山先生の研究スタンスを垣間見た気がした。

(4) 放射光 X 線による磁性研究

キーワード：(i) X 線磁気円二色性 (XMCD) (ii) XMCD による鉄の磁気状態の分析
(iii) SPring-8 での研究

(i) X 線磁気円二色性 (XMCD)：

磁性体を X 線で分析する際に，左回り円偏光を照射する場合と右回り円偏光を照射する場合で X 線吸収係数（試料が吸収した X 線の強度）が異なる現象で，この吸収係数の差が「XMCD スペクトル」である。光の波長（図2，図3参照），即ちエネルギーを変えながらその XMCD スペクトルを計測・分析することで，元素ごとの磁気状態，特に原子のスピンや軌道磁気モーメントといった磁気的特性を調べることができる（写真7）。

(ii) XMCD による鉄の磁気状態の分析 および (iii) SPring-8 での研究：

磁性原子の磁気状態を調べるための強力な分析手法 XMCD が確立して，鉄，コバルト，ニッケルなどの遷移金属元素や希土類元素について，元素ごとの磁気状態の分析が可能になった。兵庫県にある大型放射光施設の高輝度光科学研究センター（SPring-8）でも XMCD を用いて，鉄の磁気状態に関して，鉄原子の状態の観察，磁気分極（磁石に付く状態），結晶構造と電子状

態などについて動的でミクロの視点から研究を実施された。

(5) 極端条件下の磁性研究

SPring-8 のビームライン BL39XU が建設されて、磁性体の極端条件（低温，高磁場，高压）下での磁性研究のプロジェクトを立ち上げられた。系統的研究として，強磁性遷移金属である鉄，コバルト，ニッケルの構造と磁性の変化について実験された。例えば，高压下の XMCD 測定を実施することで，鉄は何 GPa まで強磁性を保てるのか，何 GPa でニッケルが強磁性を失うのか，その時の結晶構造はどうか，鉄の温度・圧力相図など当時取り組まれた課題とその成果について具体的に話された。なお，1 GPa は 1 万気圧のことである。

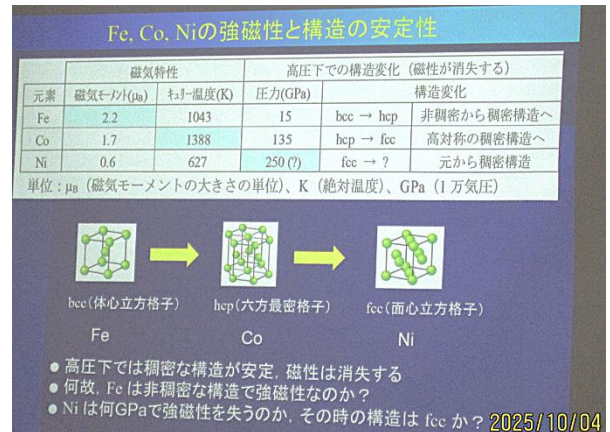


写真 7: XMCD に基づく結果の解説

(6) おわりに

地球や惑星を視野に入れた今後の研究展開がキーワードと思われる。

地球の内部は，外側から地殻（岩石），マントル（かんらん岩），核（金属）の3つの主要な層に分かれており，核はさらに外核と内核に細分される。外核はドロドロに溶けた液体状態で，その対流が地球磁場の発生源だと考えられている。一方，内核は鉄とニッケルが主成分で，超高温・超高压下にある固体の Fe-Ni 合金だと分かっている。中心部の温度は 6000°C 以上で圧力は約 370 GPa と言われている（写真 8）。

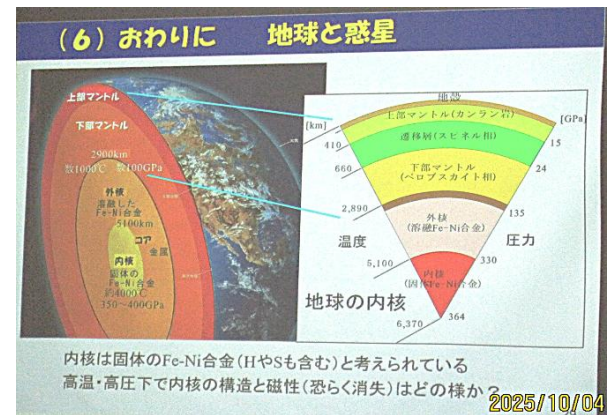


写真 8: 地球内部構造を示すスライド

固体の Fe-Ni 合金と考えられている地球内核については，その構造や磁性に関する研究は極端条件下での物性研究にとって重要な研究テーマであり，SPring-8 での極端条件下での磁性研究と密接に関係していると話された。一方，視点を地球内部から地球の外に，具体的には隕石や隕鉄，太陽系惑星さらには太陽系の外惑星の衛星へと拡げてみれば，ほぼ同様の研究課題が存在していると話され，土星の衛星エンセラダスでの水の存在性，木星の衛星イオでの火山活動などにも言及された。

最後に，鉄は不思議な金属で，取り組むべき研究テーマが多数あり，実験は難しくなっているが挑戦する価値は十分にある，と強調された。さらに，我々は日常生活においてさまざまな磁性材料の恩恵を受けているが，磁石に対する素朴な興味は尽きないと話されて説明を終了された。

今回の話題を拝聴して，磁性について（我々に馴染みのある言葉で言えば磁石について），なぜ鉄を引き寄せるとか，その引き寄せる力はなぜあるのか，どこから来たのか，などの疑問に答えを出せない自分に気づき，説明された偏光フィルターと偏光の関係は理解できたが，ハードディスクや光通信の原理などいわば「磁石の魔力」の説明には理解が追いつかず，回覧される資料や素子などを手にとって感心することの繰り返しであった。しかし，この報告書をまとめるにあたって，色々と関係する用語の意味を調べて何冊かの本を読み，おおまかな内容が理解で

きる状態にやっと辿り着いたところである。改めて話題の内容を見返してみると、「磁性」を核にして、磁性と物質の原子構造や結晶構造との関係、磁性の光に対するさまざまな効果とそれを実現する素子、磁性の実用面への応用、など磁性の本質から実用的応用まで、深さと幅広さの両面を意識して研究に取り組んでこられたことがよくわかった。同時に、私自身にとっては磁性に関して多くの有益な知識を獲得する機会となった。様々な資料や素子など話題に関連する実物を会場で回覧させながら、丁寧な解説をしてくださったことに深く感謝している。