

## 永久磁石の多様性



JABM 理事  
元・三菱製鋼(株)  
福田 方勝

2021 年度に当協会の理事に選任いただきました。微力ではありますが、私の経験が協会及び会員の皆様方に少しでもお役に立てれば幸いです。

私は昨年、三菱製鋼(株)を退職しました。私と磁性材料の関わりについて少し振り返ってみたいと思います。

私と磁性材料、特に永久磁石との出会いは学生時代に遡ります。大学の研究室で開発された Fe-Cr-Co 磁石と、当時、世界中でエネルギーの値を競っていた Sm-Co 磁石です。Fe-Cr-Co 磁石はスピノーダル分解という熱力学の理論に基づいて開発されました。スピノーダル分解というのは合金が 2 相分離する際のメカニズムの一つで、自由エネルギーの組成の 2 階微分が負の領域となります。熱力学は当時、専門授業で習っていましたが、冶金反応に使うものだと思っており、どちらかという苦手な科目でした。しかし、合金組織が自由エネルギーによって決まってくるというのは新鮮なことでした。さっそく、先輩方が実験で求めていた 2 相分離のデータから自由エネルギーを導いてスピノーダルを計算して、熱処理温度と合金組織、磁気特性との関係を確認しました。また、Sm-Co 磁石では、Zr を添加した Sm-Co-Cu-Fe 合金で多くの実験を行い、当時の一つの目標であった最大エネルギー積 30MGOe を達成することができました。

恩師の金子秀夫先生からは「材料というのは世の中で使われてこそ材料といえる」ということを常々云われておりました。そこで、三菱製鋼に入社し Fe-Cr-Co 磁石の工業化を進めました。三菱製鋼では、1931 年に三島徳七先生が発明した MK 磁石を製造していました。MK 磁石(アルニコ磁石)と Fe-Cr-Co 磁石はどちらも 2 相分離による析出硬化型磁石ではありましたが、工業生産としては製造方法に違いがあり、数々のノウハウの確立に大いに苦労しました。1970 年代後半、ザイール(現在のコンゴ民主共和国)での紛争によりコバルトの価格が暴騰しました。そこで、コバルト含有量の少ない Fe-Cr-Co 磁石の開発を進めました。当初はコバルトの含有量がアルニコ磁石と同程度の 20 ~ 25% でしたが、15%、10%とコバルト含有量を減らすことができました。そして、コバルト価格の高騰によりスピーカ用の磁気回路に使用されていたアルニコ磁石がフェライト磁石に置き換わるという動きを少しは押さえることができました。また、Fe-Cr-Co 磁石は塑性加工可能な磁石であり、圧延磁石という側面もありました。磁気ヒステリシス材としての製造方法を確立して、複写機やプリンタの紙送りに使われるトルクリミッタ用に大量に製造しました。希土類磁石としては Sm-Co 焼結磁石の量産を立ち上げ、さらに、ダイヤ・レアアース・マグネチックスという合併会社を設立してボンド磁石の量産を行いました。Sm-Co ボンド磁石では CD の光ピックアップに使用される磁石、Nd ボンド磁石では HDD のスピンドルモータ用磁石などを製造しました。防錆処理のための電着塗装で大いに苦労しました。その後、鑄造磁石の製造拠点をタイに移し、特に、ハイブリッド型ステッピングモータ用を中心として Fe-Cr-Co 磁石を生産してきました。

さて、現在、製造されている永久磁石はネオジム磁石とフェライト磁石が主流です。ネオジム磁石は中国を中心として世界で毎年約 15 万トン以上が生産されていると推定されます。そして、2050 年に向けてネオジム磁石の需要はますます増えることが予想されています。それらを牽引するのは電動自動車の駆動モータ、大型風力発電機、ロボット用モータです。特に、地球温暖化対策として自動車の電動化の傾向は益々加速しています。これらの需要に対応するためには、現在の生産量の数十倍が必要になると試算もあります。そうなればネオジム磁石の供給が不足することも起こりえます。ネオジム磁石のハイグレードのものは駆動モータ向けられるでしょうが、それ以外の製品に対してはローグレードのものが使われるでしょう。足りない分はほかの磁石ということになりますが、選択肢としてフェライト磁石しかないという状況にはならないようにするべきであると思います。形状自由度が非常に大きいボンド磁石や圧延磁石、温度安定性に優れた高い磁束密度が得られる鑄造磁石など用途に応じて使い分けていくこと、すなわち『永久磁石の多様性』が大事であると思います。

磁力が強い磁石が最も重要であるのは言うまでもありません。強い磁石(高エネルギー積の磁石)、高い磁束密度の磁石、減磁しにくい磁石(高保磁力の磁石)が様々な製品として使われるのは当然のことです。ネオジム磁石はこれらの特性を十分に備えており、将来にわたって使用されていくものと思います。しかしながら永久磁石に対する要求はこれだけではありません。磁石特性に対しては、温度安定性の良いこと、熱に強いこと、放射線に強いことなども応用分野によっては必要です。これらの要求に対しては、一般的にはキュリー温度が高い磁石ということで、アルニコ磁石、Fe-Cr-Co 磁石、Sm-Co 磁石などが使われるでしょう。今後、原子力発電所の廃炉などで活躍するロボットなどに使用される磁石として重要かもしれません。

また、永久磁石は様々な形状で使われる場合があります。リング、パイプ、薄板、細線などの磁石です。これらの形状に加工できる必要があります。形状自由度のある磁石、すなわち圧延磁石です。以前はバイカロイという Fe-Co-V 合金が用いられていましたが、Fe-Cr-Co 圧延磁石に置き換えられました。同様に、形状自由度を有するボンド磁石も重要です。ボンド磁石は磁粉を樹脂で結合させるため磁気特性は高くはありませんが、様々な形状に成形が可能です。周囲の部品と一体成形することも可能です。また、フレキシブルな磁石(ゴム磁石)もあります。そして、ボンド磁石は特殊な着磁方向を実現するためのラジアル配向や極配向が可能であるという優れた特長を持っています。さらに、磁気特性以外に機械特性や耐食性が重視される用途もあります。これらの用途には金属系の磁石ということになるでしょう。そして、工業製品である以上、価格も重要です。フェライト磁石が最もコストパフォーマンスの優れた磁石であることは明らかでしょう。

一方、「弱い磁石」も必要であると思います。子供の頃、U 字形の磁石や棒磁石にクリップや砂鉄を吸引させて遊んだ経験があると思います。そして、磁石が鉄を引きつける不思議さに磁石に対する興味が湧いてきたのではないかと思います。現在、小学校では 3 年生で磁石の性質を学びます。磁石に引きつけられるものと引きつけられないものがあること、磁石の異なる極は引きつけ合い、同じ極は退け合うことを学習します。磁石の指向性や磁極の存在などについても実験します。これらの学習には、ほどほどの磁力のある磁石(ネオジム磁石に比べればはるかに弱い磁石)が適していると思います。最近ではカラフルな磁石を次々と組み合わせていくおもちゃもあります。これらの教材用や玩具用の磁石としては安全性が第一に求められますから、いわゆる「弱い磁石」が必要であると思います。円盤状のフェライト磁石や棒状の Fe-Cr-Co 磁石が適していると思います。

もちろん、ネオジム磁石のものすごい強さを体感することも必要だとは思いますが。

以上のように、永久磁石には磁力が強いだけでなく様々な特性や性質が求められます。そして、今、これらに対応できる様々な永久磁石が存在しています。『永久磁石の多様性』についての意識を持つ必要があると思います。

この原稿を書いている現在、オリンピック TOKYO2020 が開催されています。毎日いろいろな競技がテレビ中継され、私たちに感動を与えています。50にも及ぶ多くの競技が行われています。柔道、卓球、サッカーなど馴染みの競技もあれば、スケートボードや空手など私にとって今までに見たこともない競技もあります。まさに、スポーツの多様性の素晴らしさを感じています。日本が伝統的に強い競技の一つに体操があります。57年前の東京大会では個人総合で遠藤幸雄選手が金メダルを取りまし

たが、最後の種目のあん馬でミスがありヒヤヒヤしたのを覚えています。その後、幾人かの日本人選手が金メダルをとり、最近では内村航平選手がロンドン、リオで連覇し、そして今回、橋本大輝選手が最終種目の鉄棒で逆転し金メダルをとりました。まさに、日本の伝統の力が引き継がれた瞬間でした。希土類磁石の発展期、そして佐川真人さんが発明したネオジム磁石の登場をリアルに見てきた世代の人たちはそろそろ引退の時期を迎えています。本多光太郎先生、三島徳七先生に始まる永久磁石開発の歴史と伝統を受け継ぎ、次の世代の方々にバトンを渡していかなければならないと強く感じています。

