

高等学校の材料科学教育

木浪 信之*

1. はじめに

私は神奈川県立鎌倉高等学校に勤務する教諭ですが、横浜国立大学大学院博士課程後期に在籍し、希土類金属間化合物の磁気物性の研究に取り組んでいます。教育を指導する立場であると同時に、教育を受ける立場でもあります。大学を卒業して30年以上も過ぎてしまいましたので、学校で教育を受ける感覚を忘れていました。しかし、両者の立場を同時に体験することで、改めて高校の理系教育のありかたについて考えようになりました。そこで、勤務する高校で実践している材料科学教育と理系教育、さらに、社会人ドクターとしての立場から、大学の理工学部に進学した学生の教育状況についてお話しさせていただきたいと思います。

私は10年前に鎌倉高校に着任しました。当時、本校は国際理解教育を特色として教育活動を展開しており、海外の学校と語学を通して交流を続けている学校でした。しかし、数学や物理、科学などに興味を持って細々と活動をしている生徒も少数ながらいることがわかりましたので、着任早々、理系教育を開始したのです。この理系教育が前回お話しさせていただいた融合型学習活動⁽¹⁾です。この学習活動は科学技術振興機構(以下 JST)の支援を受けて始めたサイエンス・パートナーシップ・プロジェクト(以下 SPP)ですが、SPP 活動によって、生徒の進路意識は向上し、進路実現についても非常に大きな成果を得ることができました。

SPP 活動では幅広い研究テーマに取り組み、得られた結果を研究発表会や科学コンテストなどで発表してきましたが、その中でも特に、金属管の中を落下するネオジウム磁石の運動に関する研究は本校の理系教育の方向性を大きく左右することになりました。

生徒の行ったネオジウム磁石の落下実験の概要は次の通りです。磁力の強いネオジウム磁石は銅管などの金属管の中ではゆっくり落下することが観察できますが、金属管の材質によって磁石の落下速度は異なります。そこで、外径や内径、長さなど、同一形状で材質が銅、アルミニウム、真鍮の3種類の金属管を用意し、その中を落下するネオジウム磁石の運動に

ついて比較実験を行いました。最初に落下の違いを見た生徒の考えは、落下中の磁石が金属管から受ける力は金属管の材質によって異なるために、ネオジウム磁石の落下速度に違いが生じるというものでした。しかし、その後の実験で、金属管内のネオジウム磁石は等速度で落下していることがわかり、金属管の種類に関わりなくネオジウム磁石は重力と同じ力を金属管から受けていると考えなければ説明がつかなくなりました。磁石の受ける力が金属管によって違うとすれば、磁石は加速度運動をすることになるからです。詳しく調べてみると、金属管内に落下した直後は金属管から受ける力の大きさは異なりますが、すぐに、磁石の重力と同じ大きさになるため、等速度運動で落下するのです。さらに、磁石にはたらく力と落下速度の関係を線形に表すとともに、数式化することもできました。この研究は科学コンテストで賞を受賞し、これまでこのような経験のなかった生徒たちにとって、大きな喜びと達成感を得ることができました。これらの研究結果を出すまでは決して簡単ではありませんでした。金属管内を落下中の磁石にはたらく力をどのように測定するのか考えたり、金属管内で磁石が等速度で落下する位置を見つけて落下速度を測定したこと、さらに、磁石がスムーズに落下するような工夫をしなければならなかったのです。もちろんデータ処理も行わなければなりません。私は、失敗を繰り返しても投げ出さず、前向きに実験に取り組む生徒の姿勢に感心するとともに、生徒を一生懸命にさせているものは何だろうと考えたりしました。この答えが新たな視点に立った材料教育の出発点になったのです。(図1)

ネオジウム磁石の実験によって、生徒だけではなく私たち誰もが材料に大きな関心があるということに改めて気づかされました。ネオジウムという希土類金属元素を使用することで、非常に強力な磁力を持った磁石の引き起こす現象が生徒の興味を引き付けたのです。ネオジウム磁石自体がそうであるように、人類は古くから新しい材料の発見や新規物質の開発に非常に高い関心を持っています。材料研究は、いまあるモノよりもさらに優れた性能を発現するモノや、新規材料を作り出す学問です。生徒たちが夢中になっていたのは、このような追い求める気持ちだったのかもしれない。

* 神奈川県立鎌倉高等学校; 教諭(〒248-0026 鎌倉市七里ヶ浜 2-21-1)
Materials Science Education of the High School; Kinami Nobuyuki(Kanagawa Prefectural Kamakura High School, Kamakura)
Keywords: educational cooperation, materials science education, curriculum, uncontinuity of education, Tatara iron manufacture
2014年11月25日受理[doi:10.2320/materia.54.161]



図1 金属管内を落下するネオジウム磁石の速さの比較.
金属管に磁気テープを貼り、磁石の位置を確認する。

この頃、ネオジウムなどの希土類金属はテレビや新聞などで頻繁に取り上げられて話題になっていました。希土類金属元素は現代の最先端科学技術に欠かせない重要な物質になったのです。このような背景もあり、生徒は希土類金属について大きな関心を持つようになりました。そこで、身の回りにどのような希土類金属があり、どのように活用されているか調べる実習の計画を立てました。具体的には、携帯電話を分解してその中にある様々な部品を樹脂固定した後、エネルギー分散型 X 線分析装置 EDX を使って、各部品に含まれる希土類金属元素を調べるといふ、高校生にとっては大掛かりな実習です。この実習は京都大学の実験室で実施していただいたのですが、この実習を機会に本校の材料科学教育は加速することになりました。そして、翌年の夏は京都大学でたたら製鉄の実習を行うことになったのです。

2. 高校教育と不連続な大学教育

私たちが何かを学ぶ場合、そこで行われる教育は学習者の到達度に合わせて連続的に進みます。このことは、学校の授業だけではなく、何事においても同様であり、大人も子供も変わりはありません。学校の教育活動に関しては、高校までの学習内容は教育課程に沿って無理のないように学習内容が深化していくように計画されています。それでも、数学で習っていない関数を物理の授業で使用するということはありませんが、度が過ぎるようなことはありません。教育課程が存在する高校までの学習は、教科の枠を超えても連続的に学習ができるようにつくられているのです。ところが、大学には授業計画(シラバス)はありますが教育課程はありません。乱暴な言い方をすれば、それまでの教育内容とギャップがある授業内容であっても展開することができるのです。つまり、大学教育は高校教育と不連続につながっていると言っても過言ではありません。誤解のないようにしていただきたいのですが、このことは、大学教育のあり方を否定しているのでもなければ、高校教育を批判しているのでもありません。大学教育が高校教育と不連続になっている理由は教育課程が存在していないことによるのです。だからこそ、大学は自由に研究や教育を進めることができる研究機関としての存

在意義があるのです。

高校と大学教育の不連続性が最も顕著に感じられることをお話ししたいのですが、大学の理工系学部に進学した人であれば心当たりがあるのではないのでしょうか。学部や学科によっても多少の違いはあると思いますが、私は大学の数学(数式の扱い)と高校の数学の間に最も大きなギャップがあると思っています。大学で最初に学ぶ、数学の考え方の違い、数式の扱い方に驚いた経験はないのでしょうか。それでは、なぜこのような違いが起こるのでしょうか。

ひとことで表現することは難しいのですが、高校までの数学は解析学や代数学、幾何学などをすべて含んでいて、計算をしたり、問題を解くということに重きを置いているように感じられます。その結果、数学のための数学になっていて、物理の授業では数学で学んだ知識を活かすことができないというような生徒が少なくありません。つまり、三角関数や対数、指数関数は数学ではできるのに、物理計算になると扱えなくなってしまうということです。物理という科目に限定しても、同じようなことが言えて、力学で学んだ知識を電磁気学で活用することができないこともあります。電気の単元で扱う電力の単位 W(ワット)は電気の世界で使用する単位であり、力学で学ぶ仕事率と等価な量だと理解できないのです。このようなことはすべて、数学や物理といった教科や科目を横断的に学習する機会がないことや、物理で扱う量をそれぞれ記号で分けて、公式として記述することによってその物理量の関連性を見失ってしまった結果だと考えています。極端な言い方をすれば、運動方程式は $F=ma$ 、速度と変位の関係は $x=vt$ というように、物理量を記号で記述するだけで、答えはパズルのように公式を使って組み合わせて求める作業が物理になってしまっているため、背景が見えていないのです。なかには、アルファベットの T を円で囲み、できた 3 つのスペースに物理量の一文字を入れた公式を使って問題を解くような学習方法もあるようです。これでは、量の概念を理解できるはずがありません。高校までの勉強は少なからずこのような側面を持っているのです。それに対して、運動方程式を $F=m(d^2x/dt^2)$ というように記述するような大学の物理では、力自体が数式として表記されており、変位や時間との関係がわかるのです。これが、高校教育と大学教育の違いだと考えています。つまり、扱う量の眺め方がまったく異なっているのです。

3. 高校で学ばない材料科学

普通高校を卒業するまでの間、材料科学をはじめ、工学に関する学習をすることはほとんどありません。それは、すでにお話ししたように、普通高校の教育課程には工学に関する教科・科目がないので、材料科学や材料工学を普通高校の授業で実施できないのです。ただし、その学校の特色や生徒の教育状況などを考えて、教育課程に定められていない教科・科目を設置することは認められています。このような学校独自で設定する科目を学校設定科目⁽²⁾といいます。この場合、

設置の理由や授業内容、実施計画などを詳細に教育委員会に申請して、許可を受ける必要があります。工学の設備がない普通高校で工業に関する教科・科目を教室の授業だけ行っただとしても、期待するほどの教育効果は得られないでしょう。教科書の中に工学に関連がある分野もないわけではありませんが、まだまだ少なく、実験実習を行うためには装置の数や授業時間が十分ではないということも工学に関する授業の実施を難しくしている要因かもしれません。しかし、授業ではない特別教育活動であれば実施可能です。このようにして始めたものが、冒頭で述べた JST の支援する SPP と科学部支援事業なのですが、特に、科学部支援事業は少人数での実施が可能なので、小回りが利き、意義のある実験実習を行うことができました。

4. 高校で材料教育を実践する

私たちは材料科学に夢を抱き、この夢の実現が新しい材料開発や革新的な技術開発の原動力になっていると思います。ブレークスルーは材料開発から始まるのです。

さて、ネオジム磁石の実験に話を戻しますが、この実験は多く行われており、電気抵抗の小さい金属管ほど磁石の落下速度が小さくなることはよく知られていることです。しかし、このことを生徒は知りませんから、科学者になった気になって実験結果を次のように報告しました。落下速度の大きさは真鍮管、アルミニウム管、銅管の順に小さくなり、この順序は金属管の材質金属の抵抗率の順になっているというものです。生徒がこの結果を実験だけではなく、数式で導き出したことは大きな意義があります。この実験報告で面白かったのは、真鍮について調べてきたことでした。ご存知のように、真鍮は銅と亜鉛の合金で、その成分割合によって色や硬度などの物性が変化します。つまり、成分割合によって電気抵抗率も異なることが考えられ、その結果、同じ真鍮でも成分割合によって落下速度が変わるはずですが、それならば、ネオジム磁石の落下速度から真鍮の合金比を求められるのではないか、ということを生徒は言い出したのです。面白いことを考えるものだなと私は驚きました。銅と亜鉛の成分割合を変えて、外径や内径などの寸法をそろえた真鍮管を用意できなかったため、この実験は検証できていませんが、機会があったら再開してみたいと考えています。

これまでの SPP 活動では幅広い分野の実験実習を行ってきましたが、材料科学に関心を持つようになった生徒の様子を知り、金属材料の性質を調べる研究に絞って取り組むことにしました。そこで、高校の実験室でできそうな材料科学に関する実験を探していると、教科書にも載っている金属の電気抵抗の温度依存性が目に留まりました。単純な実験ですが、高校の実験室できちんとやろうとすると、それなりに工夫が必要だからです。温度が下がっていくにしたがって金属の電気抵抗も小さくなることは生徒全員が知っていました。それにもかかわらず、実験したことのある生徒は一人もいませんでした。それならば、液体窒素を使って 77 K から水の



図2 断熱性の優れた容器の試作。

沸点の 373 K まで連続的に測定できるように装置も組み立ててみようということになり、生徒は手作り実験装置の製作を開始しました。実験キットを使用すれば簡単ですが、実験装置の手作りは時間も手間もかかる上、すぐによいデータが得られず、何度も実験をしなければならないかもしれません。しかし、本質を理解するために手作りはとても良い方法です。意義のある研究は満足できるデータを獲得するためにいろいろなところを工夫して少しずつ良いデータを獲得していくものです。さらに、やってみて初めて困難に気づくことがあるはずですが、このようなことを高校時代に学ぶことはとても重要だと思い生徒に任せることにしました。(図2)

最初の困難は試料の電気抵抗と温度をリンクさせて測定することでした。大学などの研究機関では LabView のようなアプリケーションを冷却装置や試料に取り付けた半導体温度計などと組み合わせ、温度調節装置を使って、指定した温度の電気抵抗をコンピュータで自動測定することでしょう。しかし、本校には LabView のようなものはないので、温度を測定する機器の値に合わせて電気抵抗を同時に読み取らなければなりません。しかも、温度調整装置もないため、液体窒素を使用すると急激に温度が下降するので、温度が読み取れないばかりではなく、電気抵抗でさえ読み取れないという状況になってしまいました。試料の温度を下げながら、電気抵抗を測定すればいい…言葉で言うのは簡単ですが、やってみるとそんなにうまくいかないのです。それならば、室温よりも低温側の測定はゆっくり温度を上昇させる方法、室温よりも高温側の測定は 373 K からゆっくり温度を下げていく方法にして温度を測定すればよいということになりました。断熱効果の優れた容器に寒剤を入れてゆっくりと温度を上昇させれば、試料の温度と電気抵抗をリンクさせることができ、読み取ることもできます。寒剤を使えば急激な温度変化も緩衝できるはずですが、冷却材は沸点が 77 K の液体窒素と昇華点 194 K のドライアイス、寒剤は融点が 159 K のエタノールを選びました。このように、実験を始めると問題点が次々に浮かび上がるということの繰り返しだったので、準備ができたのは数週間後、測定実験は長時間を覚悟して休日の朝 7 時に開始することにしました。そして、終了したのは学校の警備が開始する直前の夜 7 時までの 12 時間の連

続測定になったのです。得られた電気抵抗率の値も文献値と一致しており、実験装置の見栄えは良くありませんでしたが、手作り実験装置でも十分測定できたということは大きな自信になったのです。生徒が頼もしく感じられるようになったのもこの頃でした。(図3)

電気抵抗測定実験に取り組んでいた頃、横浜国立大学が主宰する早期工学人材育成事業⁽³⁾に参加させていただき、工学部の研究室や企業研究所で行う実習を体験する機会を得ることができました。本校は金属材料の研究というテーマに取り組んでいたため、関連のある材料系の研究室とJFEスチール株式会社の講座を希望しました。この連携事業のインパクトは大きく、大学の研究室では破壊強度のために引張破断試験を行い、その後、破壊面を走査型電子顕微鏡SEMで結晶構造の変化を観察しました。また、JFEでは見た目は変化のない2枚の鉄の板が渡され、一方は簡単に曲げることのできるやわらかい鉄だったのですが、もう一方は手で曲げることのできない硬い鉄だったのです。この驚きの体験によって、生徒は結晶構造の違いによって材料がどのように変化するのか十分理解できたと思います。さらに、高炉や転炉とともに、厚板ができあがっていくまでの過程を見学し、非常に意義のある実習になりました。(図4)



図3 電気抵抗実験。装置の表示をビデオで撮影し、温度と電気抵抗をリンクさせるとともに、読み取りの間違いを防いだ。



図4 やわらかく簡単に曲がる鉄と硬くて曲がらない鉄の体験(JFE)。

5. 材料科学者を育てる

材料科学、特に金属材料に関する実験、実習を中心に実施してきましたが、2011年からは毎年、京都大学でたたら製鉄実習を行っています。これは、現在も継続中の実習であり、材料科学教育だけではなく、ものづくりの観点からも材料分析の観点からも非常に有意義な実習です。私たちにとっては、鎌倉の郷土史を学ぶ上でも面白い実習です。

たたら製鉄は日本古来の製鉄法であり、材料に砂鉄と木炭を用いて、鉄の融点よりも低い温度で砂鉄を還元して鋼を得る製鉄法です。最初の年は、自分たちで用意できた砂鉄は5 kg程度だったので、京都大学で島根砂鉄を用意いただき、合計30 kgの砂鉄から約5.5 kgのケラ(鉄の塊)を得ることができました。翌年は本校前の海岸で早めに砂鉄の採集をはじめたので砂鉄を集めることはできましたが、この採取した砂鉄を使用して昨年と同じ条件で操業したのに、まったく鉄が得られませんでした。昨年の島根砂鉄と比較してみると、本校前の海岸砂鉄は鉄の含有量が少なく、ケイ素が多く含まれていることがわかりました。砂鉄をうまく選鉱できなかったことが失敗の原因ですが、私たちは砂鉄を採集する際、鉄の含有量のことなどまったく考えていませんでした。砂鉄に含まれる鉄の含有量が原因で、鉄が得られなかったとすれば、砂鉄を還元するときに、砂鉄に鉄がどの程度含まれていなければ還元反応が起こらないのか、テルミット反応で調べることにしました。テルミット反応で調べる理由は、短時間で簡単にできるからです。選鉱を繰り返して、様々な密度に選鉱した砂鉄を密度の順に並べ、それぞれについてテルミット反応を行うと、砂鉄密度が4.0 g/cm³程度に達していない砂鉄は鉄がまとまらないこと、さらに、砂鉄密度が4.5 g/cm³を超えると大きな球状の鉄が得られることがわかりました。また、より良い砂鉄を得るために、本校前の海岸ではなく良質の砂鉄の産地として有名な稲村ヶ崎海岸で砂鉄を採集しました。テルミット反応の実験結果を参考にしながら、京都大学で使用した島根砂鉄(4.4 g/cm³)の密度を超えるために2回の選鉱を行った砂鉄の密度は4.5 g/cm³となりました。この砂鉄を使って再度たたら製鉄を行いました。できたケラはゴルフボール程度の大きさに砕けてしまい、それを切断して断面を観察すると、鉄はできていたものの、筋状の層になってまとまった鉄になっていませんでした。同じ炉で島根砂鉄を使った場合は大きなケラができたことから、稲村砂鉄と島根砂鉄には違いがあるのではないかと考え、それぞれ蛍光X線分析装置XRFを使って含まれる元素の比較をしました。すると、島根砂鉄に含まれるチタンは1.5%程度なのに対して、稲村砂鉄には8%以上のチタンが含まれていることがわかりました。さらに、稲村砂鉄のノロ(鉄滓)とケラの元素成分はほとんど変化がないことから、稲村砂鉄は炉の中で完全に熔融状態になり、ノロ出しの際、そのまま炉外に流れ出ていたため、炉内成分と炉外成分に差がなかったと考えたのです。一方、島根砂鉄では得られたケラの99%以上

