

世界シェア No. 1 の技術と生徒研究の連携

－ハイドロタルサイト技術の開発から－

拓殖大学工学部 教授 早川 信一
東京都立科学技術高等学校 主任教諭 森田 直之

1. はじめに

平成 28 年 8 月 26 日、中央教育審議会教育課程部会から「審議のまとめ」が示され、答申を経て学習指導要領等が改定された。答申では“学校教育を通じてよりよい社会を創る”という目標をかかげ、学校と社会が共有し、連携・協働しながら新しい時代に求められる資質・能力を子供たちに育む「社会に開かれた教育課程」の実現が提唱されている。学校ではこれまでも「学校と企業の連携」として、技術者による講義や企業・工場見学など、いろいろな形で結びつきを持つ努力をしてきたが必ずしも学校が求めている連携にはなっていないのが現状であろう。

ここでは、技術情報としてこれまで独自の研究開発から、私たちの身近な製品に関わる物質を生み出し、社会に役立つ製品を提供してきた協和化学工業株式会社（化学工業企業）の研究開発の技術、考え方について紹介する。協和化学工業（株）は、多くの製品に利用されているハイドロタルサイトの世界シェアトップの企業であり、とくに環境に配慮しながら研究開発を進め社会に多大な貢献をしている企業である。先に示した学習指導要領でも提唱されている企業との連携においては、研究成果が国際論文に掲載された実績を持つ、東京都立科学技術高等学校との連携事例を紹介する。

2. 協和化学工業株式会社の技術開発⁽¹⁾

協和化学工業（株）の開発の根本にあるのは、何と言っても独自技術の追求であるが、環境に優しいという開発姿勢も重要な基本理念としている。これまで、海水中に含まれているマグネシウム成分を主原料とした「人にも環境にも優しい安全で安心できる製品の開発」を実現している。扱っている製品には、非ハロゲン系樹脂用添加剤、工業用製品の難燃剤、医薬品原料・食品添加剤などがあり、その開発された製品等は国内だけでなく、世界各国で使用されている。現在の生産の拠点は日本を中心に世界 3ヶ所に置かれている。協和化学工業（株）の製品は、医薬用制酸剤、酸化マグネシウム、水酸化マグネシウム、合成ハイドロタルサイトをはじめ、無機化学工業薬品、医療用医薬品など幅広く製造・販売を行っている。また、先に記した独自の技術による独自の製品開発を信条としており、今回、都立科学技術高校と連携を進めたハイドロタルサイトの工業的合成に世界で初めて成功した企業である。その後も次々と新製品を開発し世界に提供している。ここでいくつかの製品とその開発技術の例を挙げる。

(1) ハイドロタルサイト

ハイドロタルサイト $[\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{16}\text{CO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ は、ロシアのウラル地方やノルウェー

のスナルムでわずかに産出される天然の鉱物である。

現在、地球的規模で、環境・エネルギー問題が深刻化しており、環境保全とともに資源の確保や安定供給が重要な課題となっている。このような中で、環境に負荷の少ない機能性材料を開発し、吸着法によって重金属を除去・回収する研究がなされ（陰イオン交換機能を有する層状複水酸化物であり、原料物質である金属イオン種やモル比などを変化させることで、いろいろなハイドロタルサイト合成によって、リンやヒ素の除去・回収などの研究も行っている。また、層間にキレート材を挿入して、重金属の除去・回収が研究されている。ハイドロタルサイトは、Mg/Al系層状化合物であり、層間にある炭酸基とのイオン交換によってCl⁻などの陰イオンが固定される）、ハイドロタルサイトを用いた吸着のメカニズムを解明し、実用化に向けた研究開発が行われてきた。ハイドロタルサイトの化学組成・反応機構を次に示す。

【化学組成】 Mg₆Al₂(OH)₁₆CO₃·mH₂O

【反応機構】 Mg₆Al₂(OH)₁₆CO₃·mH₂O + 2HCl
→ Mg₆Al₂(OH)₁₆Cl₂·mH₂O + H₂O + CO₂

合成ハイドロタルサイトは、当初、医薬品の制酸剤として開発され注目されていたものであり、現在では国内はもちろん海外でも多くの製薬メーカーによって製剤化されて、広く世界各国へ供給されている。その後、合成ハイドロタルサイトが有する結晶構造が、特殊な捕捉メカニズムによって酸のイオン交換をする機能（アニオン交換性があり炭酸基部分が置換される。この反応性は希薄濃度でも素早く進み、アニオン吸着剤として大変優れている）に着目する中で、ハイドロタルサイト類化合物として工業的用途でも開発されてきた。具体的な用途には、農業用フィルム（保温剤）、塩ビ安定剤、ポリプロピレン（触媒残差捕捉剤）など幅が広い。化学組成及び結晶構造を次に示す。

一般式 [M_{1-x}²⁺M_x³⁺(OH)₂]^{x+}[A_{xn}ⁿ⁻·mH₂O]^{x-}

【基本層】 【中間層】

M²⁺ : Mg²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺, Co²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺
などの2価金属

M³⁺ : Al³⁺, Fe³⁺, Cr³⁺, Co³⁺, In³⁺などの3価金属

Aⁿ⁻ : OH⁻, F⁻, Cl⁻, Br⁻, NO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Fe(CN)₆³⁻, CH₃COO⁻などのn価のアニオン。
xは、0 < x ≤ 0.33の範囲にある。不定比化合物であり、多くの2価、3価金属がhydrotalciteと同様の構造をとる(図1)。

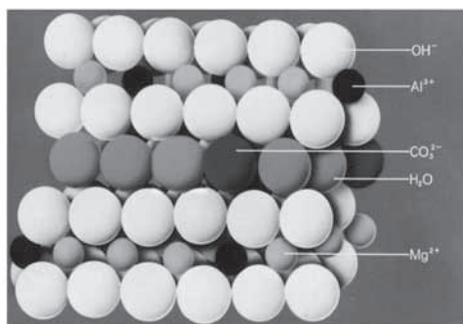
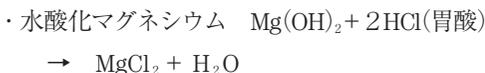
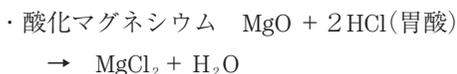


図1 Hydrotalcite類の結晶構造モデル

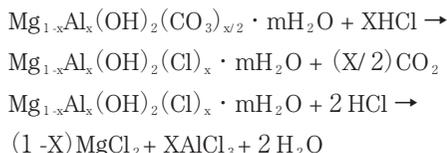
(2) マグネシウム系化合物：構成元素にマグネシウム(Mg)が含まれる化合物のことであり、代表的なマグネシウム化合物には、酸化マグネシウムや水酸化マグネシウム、塩化マグネシウム、硫酸マグネシウムなどがある。ここでは、酸化マグネシウム、水酸化マグネシウムを取り上げたい。酸化マグネシウムは主に、クロロブレンゴムをはじめとするゴムの加硫助剤や、プラスチック類に様々な用途を有している。それぞれの用途に適した特性を持たせるよう絶えず新用途のための品種開発にも努めている。この分野でも国内のシェアは70%以上を有しており、海外へも広く輸出している分野である。

具体的な製品には、自動車用（ワイパー、防しんゴム等）、セメダイン、ボンド、バスタブ、歯科材料、雨どい、電線など生活に密着した多くのものに活用されている。製品の機能を化学式で示す。

① 制酸剤（胃酸を中和する）



・合成ハイドロタルサイト



② ハロゲン含有合成ゴム用受酸剤・加硫助剤
（遊離してくるハロゲンイオンを捕捉）



水酸化マグネシウムは、医薬用等の比較的高純度を必要とする分野で利用されている。

その他、Mg、Al、Siを主成分とした合成吸着剤では、従来の活性白土や活性炭とは異なった脱炭酸、脱アルカリ等の独特の吸着性を持たせ、化学製品の製造工程でも広く利用されている。

また、協和化学工業は、製剤原料、賦形剤（医薬品の成形や服用を便利にするための添加剤）や食品添加物等として、ほとんどの国内製薬メーカーに使用されており、海外へも大量に輸出されている。

③ その他、熱伝導性フィラー（絶縁性が高く、熱伝導が良いセラミックス材料）の開発

近年、電気・電子部品の小型・高集積化が進んでおり、機器内部で発生した熱がプラスチック部品に蓄積され、外部に放熱できないために製品設計に制約が生じることがある。そのため回路から生じる熱を素早く除去する対策が極めて重要な課題となっており、半導体封止樹脂や放熱シートにおいて、絶縁性を有する熱伝導率の高いフィラーが求められてきた。絶縁性の熱伝導フィラーは、一般に酸化アルミニウム Al_2O_3 や酸化ケイ素 SiO_2 が使用され、さらに熱伝導率の高い酸化マグネシウム MgO 、窒化ホウ素 BN、窒化アルミニウム AlN 等も検討されてき

たが、いずれも利点・欠点を有し、用途、要求性能によって使い分けられてきた。そこで、協和化学工業は電子機器に使われる樹脂に添加し、熱伝導性を上げて部品の熱を逃すために使用される（絶縁放熱材料：insulated thermal conductive materials）熱伝導フィラー（Thermal conductivity filler）を開発した。

3. 高校と企業の連携

(1) 環境課題に取り組む科技校の研究活動

一般的に熱分解における触媒として水酸化ナトリウムが使用されることが多い。しかし、熱分解後の残渣にナトリウムが含まれることなど多くの文献などでも指摘されている。アルカリ触媒を熱分解する際に添加することは、様々な文献で報告されており、適当な触媒を添加することで高効率に熱分解が可能となる。また、熱分解は一般的に $600 \sim 800^\circ\text{C}$ で行われることが多いが、触媒を添加することにより、低温での熱分解を実施することができるため有用である。これまで、都立科学技術高校では、生徒の課題研究、部活動等で熱分解技術によるテーマとして、プラスチックの熱分解によるリサイクル技術の向上、食品廃棄物の熱分解によるガス化、林地残材の熱分解による可燃性ガスへの転換といったテーマに取り組んできている。当初は、アルカリ触媒の代替として、水溶液中で塩基性を示すモレキュラシーブスを添加剤として使用してきた。しかし、プラスチックのリサイクルの場面においては、特に家電製品、電気電子機器として使用されるプラスチックには臭素化合物（テトラプロモビスフェノール A）を主な原料とする難燃剤が添加されており、仮に熱分解後に生成油として回収することも、その生成油には臭素化合物が混入してしまい、リサイクル生成油としての利用を困難なものとしている。家電製品、電気電子機器に使用される ABS（アクリロ-ブタジエン-スチレン）樹脂は化学的にも物理的にも安定で、リサイク

ルは困難なものとしてされている。

EU 諸国では 2003 年 2 月に RoHS 指令とともに WEEE 指令 (Waste of Electrical and Electronic Equipment)⁽²⁾ が公布、施行された。このような背景から ABS に関してはすでに EU 諸国では使用制限もなされており、安全なリサイクル技術は急務である。熱分解によるプラスチックリサイクルはケミカルリサイクルにカテゴリーされるが、化成品を原料である油に戻すため、リサイクル生成油として再び化成品への転用やエネルギー転用が可能となる。しかし、含有する臭素系難燃剤はダイオキシンに変化してしまうため、リサイクルの場面では適切な処理が必要となる。

(2) 企業連携のスタート

これまで使用してきたモレキュラシーブスでは、生成油の収率を上昇させるものの、臭素を回収することはできなかった。そのような中で、触媒効果があり陰イオン吸着特性を持つハイドロタルサイトに注目した。含有する臭素化合物は熱分解中ではイオン化していることが予想されるためハイドロタルサイトの陰イオン吸着能に期待した。研究開始当初は商社を通じて研究用ハイドロタルサイトを入手して研究を行っていた。実験の概要として、ABS 樹脂でモールドされたタンタルコンデンサのリサイクル、ポリスチレンのバージン材にテトラブROMOビスフェノール A の試薬を添加して模擬臭素化プラスチックとした材料を用いた実験を行ってきた。合成ハイドロタルサイトを添加することで得られる生成油および生成するガスから臭素化合物は減少または検出なしという一定の成果を得ることができ、アルカリ触媒の代替として可能性を示唆することができた。しかし、生徒自身が学会や研究発表会などで「なぜハイドロタルサイトが陰イオンを吸着しているのか」、「温度による構造変化は起きていないのか」など議論の対象になり、そもそも用途と異なる使用を

していたために困惑した。そこで、生徒から製造元である協和化学工業に直接、意見を求めることは可能かと懇願され、協和化学工業のお客様相談室にメールをした。その際、本校の生徒の研究内容やテーマに関するポスターなどを添付した。数日後、研究内容に興味を示していただいたことから、実際に協和化学工業株式会社のある香川県坂出市を訪問した。初めて訪問したのは 2018 年 8 月で、その際は、ハイドロタルサイトの工場見学、研究所の見学を行い、研究開発部の皆さんと意見交換をさせていただいた。

4. 技術開発企業として

(1) 協和化学工業 (株) の技術開発について⁽³⁾

① 開発企業の方針として、近年の世界情勢から持続可能な社会を構築するための社会の仕組み及び技術の開発が必要である。常に環境に配慮した開発・製造を CSR 基本理念とし、研究開発部では商品の開発を通じ地球環境の改善および人々の生活の豊かさを追求している。

② 企業の研究開発は商品として使用して頂くことが目的。ピーカースケールでは容易でも工場では困難なことに苦勞する。

③ 研究の本質は、理論からの仮説が実験により実証される。実験を繰り返し実証し、試行錯誤を繰り返して工業化された時に研究の楽しさや大きな達成感が得られる。

④ 研究した物質が各用途にマッチするかの検証に膨大な労力が必要になる。いかに自社でデータを取るか、他社と協業をするかを見極めることが研究の面白みと難しさである。

(2) 科学技術高校との連携について

① 高校 (生) との連携の難しさ：一つのテーマや実験に対する議論は十分に行えるが、企業側は利益や権利取得を前提とした活動であり、win-win となるような関係が築きにくい。

② 連携の楽しさ：理数系と言われる教科を実際に仕事として扱う姿を見せることができる。学校での学習は、生涯にわたって必要な知識と

なることを伝えることができる。

③ 連携の課題：損得の在り方。近年、大学は研究費用の獲得のため、研究内容が企業に寄り添った開発型であり、純粋な基礎研究は行いづらい。高校-企業間にも影響することは避けたい。昨今のSDGsなど将来を見据えた大きな取組に、企業側がサポートする形が望ましいが、損得を考慮すると難しい。

④ 高校（生）に思うこと：身近に情報とツールがあふれる環境は羨ましいとさえ思うが、情報を選択することが難しい時代となっている。デジタルネイティブやZ世代と呼ばれ、世代間ギャップという言葉をよく耳にする。どの世代であっても言われることなので気にせず自己を研鑽し、今を楽しんでほしい。

⑤ 連携で率直に思うこと：テーマの選定、取組、結果、発表すべてにおいて素晴らしいと思う。考察、議論のために頼っていただけたことをうれしく思う。

⑥ 企業として、刺激を受けたこと：商業ベースでは改良の余地あり。製品として開発するには更なる追及が必要、研究として必要のない項目もあるため、実用化には時間がかかるだろう。しかし、研究テーマとしては素晴らしく、担当している生徒・先生の姿勢には感服した。

⑦ 協和化学工業（企業として）のメリットや成果：ハイドロタルサイト＝協和化学であるということのアピール。大きな学会で興味を持った他社や学校との今後の関係への期待。

5. まとめ

都立科学技術高校の研究活動は開校当初から高い評価を得ており、平成19年度よりスーパーサイエンスハイスクール（以下、SSH）に指定された。そして、令和3年度から、再度、SSH校として5年間の指定を受けることができた。

今後、学校として新しい教育課程を考えていく中で、他校にはない取組として、企業・産業界との連携は重要な研究テーマの一つになって

いくと考えている。協和化学工業（株）のように、世界で活躍する企業の技術開発、第一線で活躍する研究者との連携は、文科省の言う「社会に開かれた教育課程の実現」の一つの手本になる活動であり、講師派遣、体験活動、職場体験などの従来型ではない新しいスタイルとして参考になるだろう。「企業と連携した学校教育の取組」は、これからの時代に求められる教育の実現には、ますます重要になってくる教育活動である。

協和化学工業（株）は、グローバルな視点を持って活躍している企業でもあることから、今後はグローバルな立場からの連携についても学びを広め、新しい企業との連携の形をさらに見出していくことに期待したい。今回、技術情報として高校との連携を取り上げたが、協和化学工業（株）のように、各企業が教育について当事者意識を持って取り組むことは大変重要である。企業自らも教育の在り方に関心を持ち、次の世代を育てるということを企業の社会的責任の一つとして位置付けていただくことは、教育の充実に重要なことである。

総合的な探究の時間やキャリア教育の導入など、これまで以上に企業の人材やノウハウを学校教育に積極的に活かす機会は増していく。次世代を担う人材の育成に、多くの企業に積極的に協力いただければ幸いである。

参考資料

- (1) 「Hydrotalcite 類の物性と吸着特性」宮田茂男, 石工と石炭, NO. 187, p 47 - 53 (1983) 別冊。「アルカマック(合成ハイドロタルサイト)」文献集, 協和化学工業(株) 報文, 日本薬剤学会第89年回発表, (1964. 4)。「MgO(製品)の開発経緯から多品種開発にいたる話」研究開発部, 廣瀬徹, Filler, Vol. 13, No. 15, PP 41 - 48, May, 2009.
- (2) 「RoHS 指令」: 特定有害物質の使用制限に関する法律。「WEEE」指令: 電気・電子機器の再利用, 廃棄物の削減を目的にしたEU法。
- (3) 協和化学工業(株) 担当者(工藤氏)のお話から抜粋。