



入門講座

電磁力利用の材料プロセッシングと環境技術-5

磁気力を利用した分離技術の環境浄化への応用

Application of Magnetic Force Utilized Separation Technology to Preservation of the Global Environment

小原健司

Takeshi Ohara

岡田秀彦

Hidehiko Okada

金沢工業大学 工学部電気電子工学科
教授

独立行政法人 物質・材料研究機構
特別研究員

1 はじめに

液体や気体中の様々な混合物質の選別、分離あるいは浄化などに磁気力を利用することを磁気分離という。この技術を広い分野で応用すれば、地球環境保全と資源リサイクルに大きく貢献できる。なぜなら、簡単に消去可能な磁気力を利用するので、二次廃棄物が排出されないからである。被分離物への混入物質もないので、資源リサイクルにも都合がよい。これに対して、他の処理技術の——例えば紙、メンブレン、セラミック、活性炭などのフィルタや、イオン交換樹脂、活性汚泥などの使用済み廃材は二次廃棄物になる。そして、日本の産業廃棄物の約半分が使用済み汚泥であり、これが環境保全上の深刻な問題となっている。

ただし被分離物質の磁性が弱く、磁気分離しにくい場合には磁性を大きくする操作、いわゆる磁気種付けが必要な場合がある。しかし、上記の従来型処理法に比べると、二次廃棄物になる量はきわめて少ない。

磁気分離には各種の方式があるが、この中で特に高勾配磁気分離と呼ばれる方式は、磁気ろ過あるいは磁気フィルタとも呼ばれ、従来の篩（ふるい）やフィルタなどのろ過（標準閉塞ろ過）とは根本的に異なる。すなわち外部印加磁界の増減で分離力制御が可能であるという磁気分離技術に共通の特長を有し、これに加えて従来の約1,000倍という桁違いに強い磁気力を発生できる。したがって磁界印加装置に最近実現された操作性のよい超伝導マグネットを適用すれば、比較的小規模で高速・省エネルギー型の希薄懸濁微粒子の選別、分離あるいは浄化技術の本格的普及・実用化ができると期待される。

本稿ではまず、クーロン力的一种としての磁気力と電気磁気学との関係、磁気力発生と増強の原理などを説明する。次に研究開発の動向と実用化の現状を紹介し、磁気分離研究の重要性と必要性を説明したい。

2 磁気力と電気磁気学

この入門講座4回目¹⁾では、電界の中で電荷に発生する力を「クーロン力」と呼び、磁界の中で磁荷（あるいは磁極）に発生する力を「磁気力」と呼んで区別した。しかし、これは便宜的な区別にすぎず、実は、本質的には後者も同じクーロン力である。したがって磁気力を磁気クーロン力²⁾と呼ぶこともある。

なぜなら、クーロン自身が磁石に関する実験で、静磁界中の磁荷に働く力も、静電界中の電荷に働く力と同じ法則に従うことを見つけたからである。最近見直されている（この理由は後述）電気磁気学のE-H対応系によると、これらのクーロン力は、次式で統一的に記述できる。

$$F = \frac{qQ}{4\pi\epsilon r^2} \quad [\text{N}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 Q はその位置から r [m] 離れた場所に電界、あるいは磁界を発生する電荷または磁荷（以下これらを単極子と呼ぶ）の大きさであり、それぞれの単位はクーロン [C] と、ウェーバー [Wb] である。 q は上記の場所の電界あるいは磁界中に置かれた単極子の大きさで、それぞれ Q と同じ単位の量である。 ϵ は、電気の場合、媒質の誘電率 ϵ [F/m] であり、磁気の場合には媒質の透磁率 μ [H/m] である。さらにこれらの量と光の速度 c [m/s] との間には以下の関係がある。

$$\epsilon\mu = \frac{1}{c^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

なお、媒質が真空の場合の c 、 μ 、 ϵ をそれぞれ c_0 、 μ_0 、 ϵ_0 とすると、 $c_0 = 2.998 \times 10^8$ [m/s]、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]、 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ [F/m] である。

以上のことから、電気と磁気の現象はたいへんよく似ていることが、容易に想像できる。例えば、単極子 q の単位量、すなわち電荷の場合には1 [C]、磁荷の場合には1 [Wb] に働く力が、それぞれ電界 E [V/m]、磁界 H [A/m] である。

これらはまた、電荷 Q から発生する電気力線の面密度として前者（電界 E [V/m]）が、あるいは磁荷 Q から発生する磁力線の面密度として後者（磁界 H [A/m]）が、それぞれ定義できる。

さらに、上述の単極子 q の単位量のある距離だけ移動させるに必要な力学的エネルギー、すなわち位置エネルギーを、電気の場合には電位 (Electric potential) V [V]、磁気の場合には磁位 (Magnetic potential) ϕ [A] と呼ぶ。

このように電気と磁気はよく似ているので、全く同じに考えてもいいのかという疑問が生じるであろう。答えはYESの場合も、NOの場合もあり得る。すなわち問題に依存する。実は、電気と磁気では大きく異なる現象が存在するので、これが問題に含まれる場合にはNOになる。

異なる現象とは、電気の単極子（これを真電荷、あるいは自由電荷と呼ぶ）が存在し、電気導体中を自由に動けることである。これを電流（あるいは真電流、自由電流）と呼ぶ。しかし磁気の場合には、単極子（磁荷）はもちろん*1、電流に対応する磁流も、電気導体に対応する磁気導体も発見されていない。したがって磁気の場合の(1)式の q は仮想的なものである。

上述の電気磁気学の文脈がE-H対応である。そこでは、電気と磁気で決定的に異なる現象である電流の存在と、磁気単極子が発見されていないという事実が、電気と磁気の相似関係の文脈を、上記のように途中で断ち切るのである。

相似関係に戻り、例えば均一電界中に誘電体が置かれたときに発生する電界ひずみを求める問題では、分極電荷が発生する電界と外部印加電界の和を考えればよい。この場合には電気の単極子（真電荷）が存在しないので、磁界中に磁性体の置かれた場合と同じ問題になる。したがって、電気と磁気は同一モデルで解くことができる。このような電気-磁気対応の説明は、初心者に分かりやすいと考えられたので、古い教科書³⁾のほとんどがこのE-H対応系で記述されていた。

しかし、電荷と磁荷という異質の物理量を持ち込んで、その上に電流が磁界を発生するという現象も説明しなければならない。したがって、初心者が全体像を理解するときの負担は大きい。

一方、歴史的には、古くはアンペアが、またその後には電磁方程式をまとめたマックスウェルが、磁荷の根源はループ電流であるとした⁴⁾。この考え方——すなわち電荷と電流を基本に置く考え方によれば、電気磁気現象をただ一つの物理量である電荷のみで説明できる。すなわち、電荷に加えて磁荷という“架空”の物理量を最初に持ち込む必要がない。さ

らに、磁界は真空の磁化を意味する*2ことになる。これはE-H対応とは異なる重要な物理イメージである。以上の文脈をE-B対応系と呼び、欧米などの諸外国では日本より相当早い時期から採用されてきた^{5,6)}。

日本の工学教育現場では長い議論⁷⁻¹⁵⁾の末に、最近になってE-B対応系の教科書も出現している。その磁気の章では、クーロンの法則の磁気力(1)式ではなく、磁界中に置かれた動く電荷（電流）が受ける力を出发点としている。したがって基本はビオ・サバールの法則である。詳細については文献^{2,16)}参照。

一方、E-H対応系の教科書は絶版になったかということ、さにあらず。こちらの方が初心者が入門しやすいという理由で、新しく出版されるもの¹⁷⁾もある。しかしこのことが学習者に混乱を与えるならば、たいへん困ったことである。約20年前のマサチューセッツ工科大学の教科書⁶⁾では、はじめにマックスウェルの電磁方程式を理解させ、問題に応じてこれを変形して使えるようにするものであった。これなら電気磁気現象の根本原理をそのまま学ぶことができるので、理想的であろう。しかし、事前にベクトル解析の基本をマスターしておくことが必要であり、教育コースの整備された環境でないと実現は難しい。

さて、本稿の読者は、電気磁気の単位系を大きく分けると、SI単位系とCGS単位系の2とおりにあることを知っているはずであるが、上述のように、それらはそれぞれにE-H対応系とE-B対応系に区別されることにも注意が必要である。

では再度、最初の問題にもどって、後者のE-B対応系では磁気力をクーロン力と呼んでもいいのであろうか。答えはYESである。なんら問題ない。すなわち、ループ電流が発生する磁束の発散が磁荷密度（厳密には“架空の磁荷”の密度）を表すので、これを用いて力を計算すると、派生的ではあるが、クーロンの法則が成立していることが判明するからである。

3 磁気力発生と増強の原理

本節では、磁気力利用の物質分離法である「磁気分離」の改良の経緯と、これが水浄化などの広い分野でスマートに実用されようとしていることを紹介する。

前節の磁気単極子が自然界に存在しても何ら奇妙なことはないと考えた理論物理学者はPaul A.M. Diracであった¹⁸⁾ので、これはディラックの単極子(Monopole)とも呼ばれる¹⁹⁾。過去に1度だけ観測されたという報告がある²⁰⁾が、しかし追

*1 ディラックの単極子と呼ばれる。3節を参照

*2 物質内の磁化電流密度 $\mathbf{J}_m = \text{rot } \mathbf{M}$ [A/m²] によって発生する磁束密度を $\mathbf{B}$ [Wb/m²] とすると、 $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}$ と記述される。ここで $\mathbf{M}$ [A/m] は物質の磁化であるから、 $\mathbf{H}$ [A/m] は真空の磁化と読める。太字はベクトルであることを表す。

試験では未だに発見されていない。したがって、前節では“架空な磁荷”と表現したのである。ところが、実は、磁気分離技術の発展に重要な契機を与えたのが、この単極子の探索²¹⁾であった。

1960年代にマサチューセッツ工科大学フランシス・ビター磁石研究所を中心とする研究グループが、磁気単極子の探索の目的で強力な磁気力を発生させようとして工夫した末に、後述する高勾配磁気分離 (High Gradient Magnetic Separation) 技術を発明した。これが微粒子の捕獲性能を大きく向上させた。その結果、単極子を発見できたかというところではなかった。しかし、それまでにない有用な技術であったため、1970年代に製紙業用ジョージアカオリン粘土の精製に実用され、現在に至っている。

3.1 磁気力作用原理と分離技術の進歩との関係

磁石が鉄粉を引きつけることは誰でも知っている。しかし、この磁気力の大きさが以下の4物理量の積になることはあまり知られていないようである。(a) 粒子への印加磁界の大きさ、(b) その磁界の勾配、(c) 粒子の大きさ (体積)、(d) 粒子と分散媒との磁性差。

すなわち、不均一な磁界 H [A/m] 中にある磁化率 χ_f の懸濁媒の中に懸濁した体積 V_p [m³]、磁化率 χ_p の球形微粒子に働く力 $F_{m\zeta}$ [N] は、以下のように計算される²²⁻²⁶⁾。ただしSI単位E-B対応系を用い、 ζ は用いる直交座標の座標成分である。

$$F_{m\zeta} = V_p \cdot \mu_0 \cdot M^* \cdot \nabla_{\zeta} H \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$M^* = \frac{9(\chi_p - \chi_f)}{(3 + \chi_p)(3 + \chi_f)} H \quad \dots\dots\dots (4)$$

磁気力の作用に関する基礎研究が、その後の磁気分離技術発展の原動力となった。この詳細については解説記事²⁶⁻³⁸⁾や各々の発表論文^{22, 23, 35-54)}を参照されたい。基礎研究から導き出された要点を3つに分けると次のようである：

- (1) 磁気力は、磁界の大きさのみでなく、磁界の傾き (磁界勾配) にも大きく支配される。
- (2) 磁気力は、鉄、コバルト、ニッケル、ガドリニウムなどの強磁性物質だけに作用するのではない。その他の弱磁性物質にも、反磁性物質にも作用する。強力な磁気力の発生は、単に粒子の磁性と粒径が大きいときだけでなく、磁界勾配の増強によっても可能だからである。
- (3) 磁性が弱すぎる物質、例えばアオコなどの有機物では、磁界の大きさと磁界勾配を増強しても実用上十分な磁気

力を発生できない。この場合には、対象物質に磁性の大きな物質を結合させることにより、磁気分離を適用できる。この手法を磁気種付けと呼ぶ。

以下にこれらの具体例を簡単に紹介する。

3.2 磁界勾配の増強

前節 (1) は、磁界勾配を大きくすることで磁気力の増強ができることを意味する。この一例が、1960年代後期に米国マサチューセッツ工科大学 (以下、MIT) フランシス・ビター磁石研究所で発明された高勾配磁気分離 (High Gradient Magnetic Separation、以下HGMS) と呼ばれる手法^{28, 39)}である。極端に不均一な磁界を発生して、磁界勾配 (したがって磁気力) を従来型磁気分離^{*3}の約1,000倍以上に増強した。現在、この原理に基づく装置が、米国や英国とその他の国で製紙業用カオリン粘土の精製^{34, 40-43)}に、日本では製鉄排水^{44, 45)}や硝子研磨廃棄物⁴⁶⁾の再利用に実用されている。

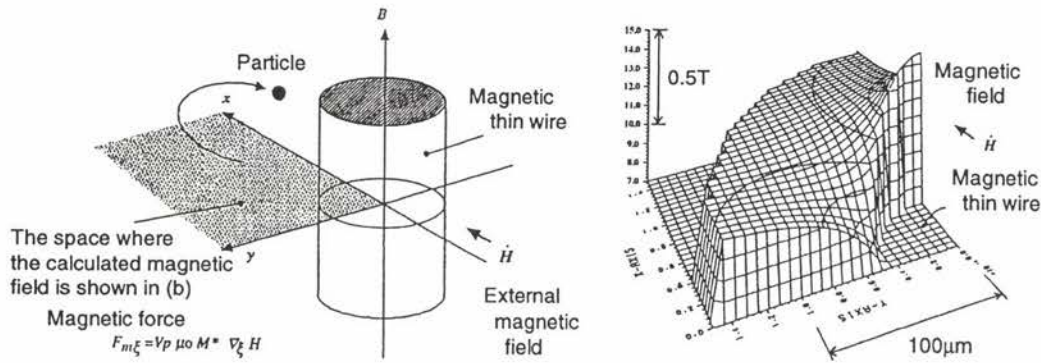
上記不均一磁界を高勾配磁界と呼ぶが、発生方法はたいへん簡単である。比較的細い、例えば直径数100ミクロン程度の強磁性ワイヤのメッシュを用い、これに外部から垂直に均一磁界を印加するだけである。これをFig. 1で説明しよう。同図 (a) の円柱は上下に張った1本の強磁性ワイヤである。これに垂直に、例えば図のようにx方向に磁界を印加すると、強磁性ワイヤの周囲に同図 (b) の磁界分布が発生する。

ここへ粒子を導入すると、粒子は磁界の坂に沿う力を受ける。すなわち、粒子の磁性が負 (反磁性) ならば磁界の坂を下る方向、正 (常磁性、強磁性) ならば図 (a) の矢印のように坂を上る方向への力である。その結果、最終的には磁性の正負には関係なく強磁性ワイヤ表面に吸着される。ただし、実際には粒子に流体からの粘性力や、重力、あるいは慣性力などが競合力として作用する。したがって粒子の運動軌跡はそれらのつりあいである。

このようなHGMSのメカニズム研究は1970～1980年代にIEEE Trans. Magnetics誌やJournal of Applied Physics誌に数多く発表された。そのさきがけがJ.H.P. Watsonの論文²²⁾であった。彼は、当時先行していた空気中の塵の吸着除去のための静電気の力の解析に倣った手法で、磁気力を計算し、流体中の粒子の軌跡を計算した。さらにこれを磁気フィルタと名づけて、実用装置の大きさを概算した。

この論文²²⁾が多くの研究者の興味を誘い、その後の研究に大きな影響を与えた。理由は、電気磁気学の解析手法によって、1本の細い強磁性ワイヤが発生する極端な磁界歪みが定量的に示されたことと、これが70年代の公害防止に役立つ技術として期待されたからである。この研究では、長さ方

*3 古くから主に鉱石の選別に使用されてきた磁気分離を従来型と呼ぶ。これは永久磁石や電磁石で発生した磁界勾配を利用するものであり、装置の形状からドラム形磁気分離装置と呼ばれるものが一般的である。



(a) 強磁性細線と外部印加磁界、粒子運動

(b) 磁界分布の計算値

印加磁界 1.1 T, 磁性線磁化 1.0 T

Fig.1 高勾配磁気分離 (HGMS) における粒子捕獲の概念

向が無限長で幅方向が強磁性ワイヤ直径程度である大きさの板状磁気双極子の発生する磁位を用いて、強磁性ワイヤの周囲に発生する磁界歪が計算された。もちろん、実際の現象では流体との複雑な相互作用を含むのであるが、初期にはこの単純化の目的で粗い近似のモデルが使われていた。しかし、後には多くの研究者による改良が続き、最近、精密な数値解析コードが開発されている⁴⁷⁻⁵⁰⁾。なお、このJ.H.P. Watsonの研究を発展させた研究者は、国籍や人種に関係なく「ワトソン学校の生徒たち」と呼ばれることを、最近筆者らが外国論文誌に投稿したときの査読者から教わった。

3.3 磁気分離の適用限界

3.2節(2)が明確にされた経緯は次のようである。前節のHGMSの基礎研究を行っていたMITのD.R. Kelland、フィンランド・ヘルシンキ大学のM.A. Kokkala、英国・サルフード大学のM.R. Parkerらはそれぞれに高勾配磁界に起因する磁気力がサブミクロンの微粒子に作用する可能性を見出した。1983年には米国・パーデュー大学のM. Takayasuが精密実験でこの事実を確認した⁵¹⁾。すなわち、磁界 8×10^5 [A/m]を線径100 [μm]のニッケル磁性線に印加して、磁性線近傍に発生する粒径70 [Å]のマグネタイト超微粒子の濃度分布を観察したのである。ビデオカメラと計算機による画像処理技術で解析した結果、微粒子の拡散と磁気力のつり合いだけを仮定した理論でこの濃度分布をよく説明できることを示した。

米国・パーデュー大学の*4 R. Gerberらは、上記の検討をHGMS理論の一般化という観点から整理し、従来理論の粒径限界を議論した⁵²⁾。すなわち、磁気力が粒子運動に影響

を与え得るかどうかは、その粒子の粒径と磁性の大きさによって決まる。問題を簡単にして解説すると次のようである。流体も粒子も静止しているとし、かつ静電力と重力は無視できるほど小さいとした場合、磁気力と競合するのは粒子の拡散力のみである。粒径が小さいと拡散力が増大し、磁気分離は無力になる。

例えば、数テスラの磁界と直径100 ミクロンの強磁性ステンレス細線（これらによる磁界勾配は20,000T/m）を用いるとき、水中の粒子に有効な磁気力が働く限界の粒径を、その粒子の磁化率を横軸にとって示したものがFig. 2である。図中の各点をつらねた山形の曲線の上側の領域では磁気力が有効に働く。すなわち、強磁性粒子では約20 nm、弱磁性粒子では約500 nm以上の粒径で拡散力よりも磁気力が勝る^{25, 26)}。逆に言えば、これ以下の粒径（かつ、懸濁媒の磁化率の十倍以下で十分の一以上の磁化率）の粒子なら、磁気力を有効に作用させることができない。これが従来の吸着型磁気分離の限界である。話はちょっと横道に逸れるが、この磁界勾配を利用して新しいクロマトグラフィーの磁気クロマトグラフィー^{48, 49, 53, 54)}が実現されれば、この限界を突破できる可能性がある。すなわち同図のP₁とP₂の領域の粒子の分離の可能性が理論計算で示されている⁵³⁾。

3.4 磁気種付けによる適用範囲の拡大

3.1節(3)の磁気種付けには、熱処理、物理吸着、有機や無機の化学反応、電気化学反応、強磁界印加、生物学的処理など、用途に応じて様々な手法が試みられてきた。具体的には、鉱石選別における熱処理や酸洗い、あるいは研究廃水の重金属除去工程での水酸化鉄共沈法⁵⁵⁾、フェリ磁性体へ重

*4 R. Geberは英国・サルフード大学所属。彼はこのときサバティカル・イヤーをパーデュー大学で過ごしていた。

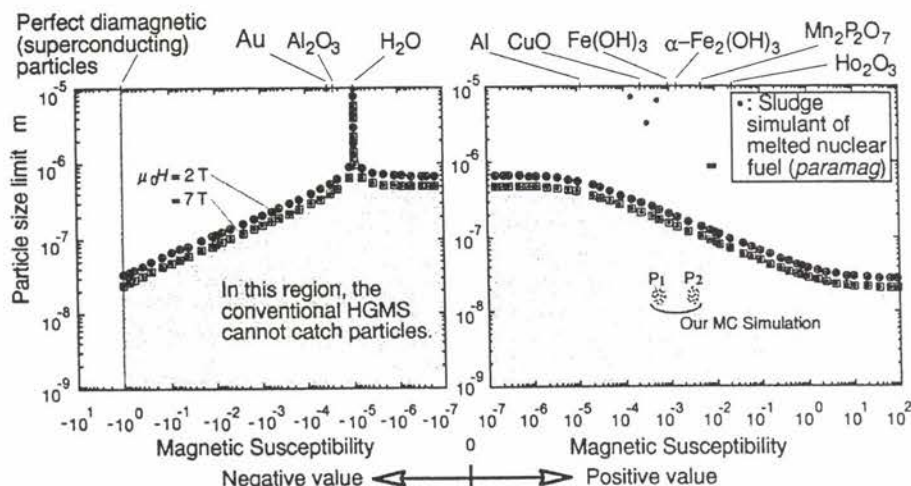


Fig.2 高勾配磁気分離の粒径限界

純水を分散媒とした場合の、種々の磁化率の粒子の拡散力と磁気力が競合する粒径の上限値計算の結果である。磁気力の計算には、直径100 μm で、磁化1.0 Tの磁性線の長さ方向に垂直に磁界を印加したモデルを想定。粒子が分散媒の水と同じ磁化率を持つとき、縦軸の粒径限界が無限大となっている。すなわちこのときにはどんなに大きな粒径であろうとも磁性線には捕獲できないことを意味している。2 Tと7 Tの2通りの印加磁界を比べると、ほとんど差がないことも分かる。MCは磁気クロマトグラフィーの略称である。

金属イオンを取り込むフェライト化法⁵⁶⁻⁵⁸⁾などが従来の手法である。

HGMSでは、磁界勾配が強磁性ワイヤ近傍にしか発生しないので、閉鎖型勾配と呼べる。それに対して、永久磁石、電磁石、超電導磁石などの、それら自身が発生する磁界勾配は空間のどこまでも広がる。この利用が開放型勾配磁気分離 (Open Gradient Magnetic Separation) である。鉄酸化物などの強磁性粒子を磁気種付け物質として用いる場合には、粒径が数百ナノメートル以上であればこの磁界勾配で十分である。この考え方による装置と被分離物質の再利用システムが、上記のHGMS開発時期とちょうど同じ1970年代に京都大学とNEC公害防止研究所で開発された⁵⁶⁻⁵⁸⁾。これが上述のフェライト化法である。以来、日本の多くの国立大学で、重金属の混入した化学実験廃液の無害化に実用されている。

これに対して最近、フェライト化法が改良されるとともに、新しい手法⁵⁹⁾が研究されている。すなわち、鉄電極で懸濁液中へ直接鉄分を補給する電解反応法⁶⁰⁾、有機物分離に用いる官能基利用のコロイド化学的手法⁶¹⁾、強磁場利用によるフェリ磁性体の核形成速度増進法^{62, 63)}、環境汚染物質分解微生物の維持と管理を目指したマイクロカプセル法⁶⁴⁾、水中の希薄な環境ホルモンの浄化を可能にするマグネタイト修飾法⁶⁵⁾、鉄担磁の多孔質ハイドロキシアパタイトを用いる手法⁶⁶⁾などである。詳細については各々の論文を参照されたい。

今後これらの手法を駆使した新しい磁気分離技術が、従来とは比較できないほど広い分野で、かつ大規模に実用されることが期待される。

4 おわりに

入門講座なので、専門分野の異なる研究者に向けて、読めば分かるお話をしたいと考えた。そこで、専門家の間では当然と考えられていて、普段は真面目に議論されない基礎事項から説き始めた。その結果、新しい磁気分離研究が開始された約35年前の状況のあたりで足踏みし、10年前くらいから始まった第2期の新しい研究の紹介には十分に言及できなかった。しかし、他に優れた解説^{38, 59, 67)}があるので、この分野に興味をお持ちになった方はそちらも参照願いたい。

蛇足ではあるが、最後に筆者の一人がこの分野に入って苦労したことを紹介して本稿を終える。もう28年も前になるが、磁気分離の原理で一番重要なこと、すなわち、均一磁界中に置かれた強磁性体の周囲に発生する磁界ひずみを知りたいと思い、電磁気学の解析式をいろいろな教科書で調べた。そのときにがっかりしたことがある。たぶん、磁界のこのような応用はそれまでなかったのであろう。この問題の解は見当たらなかった。

あるとき、有名なランダウとリフシッツ著の電磁気学⁶⁸⁾を読んだときのことである。第4章定磁場には、本稿2節で述べた電気と磁気の相似性および誘電体と磁性体の相似性から、「第2章誘電体の静電気学を見よ」とある。そしてその章を一生懸命に読んだ末にたどり着いた楕円体の電界ひずみ計算箇所には、なんと、「興味の少ない楕円体の外部の公式をここに書き下すことはしない」とあった。しかも、およそ実用的とは思えない直交直線座標による複雑怪奇な計算式の羅列があり、これでは自分で計算しないと、どうしようもないと思い知らされたのである。

円柱の場合には3.2節の後半で紹介したようにJ.H.P. Watsonによりスマートな解が与えられている²²⁾が、一般的な楕円柱磁性体の場合の解は見つからなかった。そこで、必要に迫られて始めたのが以下の研究²⁴⁾である。そこでは、楕円柱磁性体の長さ方向に垂直な磁界が印加されているときの周囲に発生する磁界ひずみを、楕円柱直交座標で解く新しい手法を開発できた。さらにこの結果を用いて、非晶質磁性合金リボン周囲に導入された微粒子がその磁性体に吸着あるいは反発される力を求め、流体中での運動方程式を解き、このような磁気分離性能の理論値を求めた。最後に、当時たいへん希少であった超電導マグネットを使って実験を行った。そして、データを比較したところ、理論値とよく一致することに驚いたのである。

しかし当時、高価な液体ヘリウムの必要な超電導マグネットを利用する、このようなシステムが実用になると信じることのできる人はたいへん少なかった。しかも、超電導が安定性に欠け、使いにくいものであったことは、誰が見ても明らかであった。しかし、あれほどの国家予算をつぎ込んでいるのだから、そのうちに使いやすくなるはずだという直感に頼って仕事をしている。しかし耳に届くいろいろな周囲の雑音に、時にはくじけそうになる。個人差はあったかも知れないが、多かれ少なかれそのような研究環境の中で悪戦苦闘したのが、J.H.P. Watsonをはじめとする私たち世界中の超電導応用の磁気分離研究者たちであった。

このような事情のために、1970年代に集まったたくさんの研究者がその後この分野から他へ転向を余儀なくされた。さらに、非常に残念だったのは、1986年からの酸化物超電導フィーバーや、その後の研究開発によって1995年に実現された使い勝手の良い(私たちから見ると夢のような)冷凍機冷却型超電導マグネットを見ることもなく早く他界された方々である。

しかし、1980年代末から90年代の初期に米国で、古いタイプ(液体ヘリウム使用)の実用機がカオリン粘土精製産業で稼動をはじめた。さらに、日本では1995年頃から磁気分離研究が「分野融合的な総合技術の研究」として認知され、予算と研究者が爆発的に増えた。環境保全分野での実用化への動きが今度こそ期待できる、日本初の実用機実現の日はそう遠くないと感じている私たちは、この夢に向かう新しい仲間と一緒に、今後も引き続き磁気分離の科学と技術の発展に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 谷口尚司：ふえらむ，10 (2005) 2，88.
- 2) 山田直平，桂井誠：電気磁気学 [3版改訂]，電気学会大学講座，(2003)
- 3) 例えば，P. Hammond：Electromagnetism，Pergamon Press，(1971)，18. /高橋秀俊：電磁気学，物理学選書3，裳華房，(1971)，155. /太田恵造：磁気工学の基礎Ⅰ，共立全書200，共立出版，(1983)，17，など
- 4) J.C. Maxwell：A Treatise on Electricity and Magnetism Vol.2，Dover Publications Inc.，(1954)，275. (ただし、1891年にClarendon Pressから出版された同じ著書の復刻版)
- 5) J.A. Stratton：Electromagnetic Theory，McGraw-Hill，(1941)，225.
- 6) L.C. Shen and J.A. Kong：Applied Electromagnetism，PWS publishers，(1983)，372.
- 7) 座談会，日本物理学会誌，29 (1974)，989.
- 8) 宮川信一：日本物理学会誌，34 (1979)，目次裏.
- 9) 近角聰信：日本物理学会誌，34 (1979)，1000.
- 10) 小林稔：日本物理学会誌，34 (1979)，1001.
- 11) 飯田修一：日本物理学会誌，34 (1980)，739.
- 12) 桂井誠：電気学会雑誌，101 (1981)，221.
- 13) 細野敏夫：電気学会雑誌，102 (1982)，139.
- 14) 桂井誠：電気学会雑誌，102 (1982)，218.
- 15) 細野敏夫：電気学会雑誌，103 (1983)，348.
- 16) 例えば，斉藤幸喜，宮代彰一，高橋清：電磁気学の基礎，森北出版，(2003)，95.
- 17) 例えば，後藤尚久：電磁気学，電子情報通信学会編，コロナ社，(2003)，62. /近角聰信：基礎電磁気学，培風館，(2003)，66. /石井良博：電気磁気学，コロナ社，(2001)，97. など
- 18) P.A.M. Dirac：Physical Review，74 (1948) 7，817.
- 19) 中村健蔵：NEW COSMOS SERIES 8ニュートリノで探る宇宙，培風館，(1994)
- 20) B. Cabrera：Physical Review Letters，48 (1982)，1378.
- 21) E. Goto，H.H. Kolm and K.W. Ford：Physical Review，132 (1963) 1，387.
- 22) J.H.P. Watson：J. Applied Physics，44 (1973)，4209.
- 23) T. Ohara：IEEE Trans. Magnetics，MAG-20 (1984)，436.
- 24) 小原健司：電子技術総合研究所研究報告，858，(1985)，21.
- 25) 小原健司：電気学会第3回超電導磁気分離技術調査専門委員会資料3-5，(1994)
- 26) 小原健司：第1回新磁気科学シンポジウム講演論文集，(1997)，1.
- 27) J.A. Oberteuffer：IEEE Trans. Magnetics，MAG-10

- (1974), 223.
- 28) H. Kolm, J. Oberteuffer and D. Kelland : Scientific American, November (1975), 46.
 - 29) R. Geber : IEEE Trans. Magnetism, MAG-20 (1984), 1159.
 - 30) 岡本祥一, 関沢尚 : 応用物理, 43 (1974) 2, 183.
 - 31) 内山晋 : 応用物理, 45 (1976) 2, 152.
 - 32) 電気学会技術報告, II 部, 114 号, (1981)
 - 33) 小原健司 : 日本の科学と技術, 23 (1982) 216, 57.
 - 34) J. Boehm: IEEE Trans. Applied Superconductivity, 10 (2000), 710.
 - 35) T. Ohara, H. Kumakura and H. Wada : Physica C, (2001) 357-360, 1372.
 - 36) 小原健司 : 低温工学, 37 (2002) 7, 303.
 - 37) 小原健司, 渡辺恒雄, 西嶋茂宏, 岡田秀彦, 佐保典英 : 応用物理, 71 (2002) 1, 57.
 - 38) 電気学会技術報告「最新の磁気分離技術」, (2003), 932.
 - 39) J.A. Oberteuffer : IEEE Trans. Magnetism, MAG-9 (1973), 303.
 - 40) J. Iannicelli : IEEE Trans. Magnetism, MAG-12 (1976), 436.
 - 41) J.R. Hartland, J.A. Oberteuffer and D.J. Goldstein : Chemical Engineering Progress, 72 (1976), 79.
 - 42) A.J. Winters and J.A. Selvaggi : Chemical Engineering Progress, 86 (1990), 36.
 - 43) J. Iannicelli, J. Pechin, M. Ueyama, K. Ohkura, K. Hayashi, K. Sato, A. Lauder and C. Rey : IEEE Trans. Applied Superconductivity, 7 (1997), 1061.
 - 44) 滝野和彦, 松野正一, 藤田博志, 加藤洋一 : 工業用水, (1977) 227, 54.
 - 45) 菅原富男, 市川修一, 矢野純一 : 化学工学, 45 (1981), 235.
 - 46) Y. Kenmoku and S. Sakata : IEEE Trans. Magnetism, MAG-20 (1984), 1198.
 - 47) H. Okada, K. Fukushima, T. Ohara and H. Wada : Proceedings of International Workshop on Chemical, Physical, and Biological Processes under High Magnetic Field, (1999), 598.
 - 48) 王晓丹, 小原健司, E.R. Whitby, K.C. Karki and C. Winstead : 電気学会論文誌, 117-B (1997), 1466.
 - 49) 小原健司, 王晓丹, 和田仁, E.R. Whitby : 電気学会論文誌, 120-A (2000), 62.
 - 50) K.C. Karki, E.R. Whitby, S.V. Patankar, C. Winstead, T. Ohara and X. Wang : Applied Mathematical Modeling, 25 (2001) 5, 355.
 - 51) M. Takayasu, R. Geber and F.J. Friedlaender : IEEE Trans. Magnetism, MAG-19 (1983), 2112.
 - 52) R. Geber, M. Takayasu and F.J. Friedlaender : IEEE Trans. Magnetism, MAG-19 (1983), 2115.
 - 53) T. Ohara, S. Mori, Y. Oda, Y. Wada and O. Tsukamoto : 電気学会論文誌, 116-B (1996), 979.
 - 54) K. Mitsuhashi, R. Yoshizaki, T. Ohara, F. Matsumoto, H. Nagai and H. Wada : Separation Science & Technology, 37 (2002) 16, 3635.
 - 55) 岡本祥一 : セラミックス, 11 (1976), 234.
 - 56) 辻俊郎 : 電子材料, 12 (1973) 9, 70.
 - 57) T. Takada and M. Kiyama : Proceeding of Int. Conf. Ferrites, (1970), 69.
 - 58) 桂敬, 玉浦裕, 寺田博 : 工業用水, (1977) 223, 16.
 - 59) 武田真一 : 低温工学, 37 (2002) 7, 315.
 - 60) 渡辺恒雄 : 低温工学, 37 (2002) 7, 328.
 - 61) 武田真一, 古吉敏之, 田里伊佐雄, 中平敦, 笈芳治, 日下忠興, 小川倉一, 形山順二, 因野要一, 西嶋茂宏, 藤野剛三, 大松一也 : 日本化学会誌, (2000) 9, 661.
 - 62) N. Gokon, A. Shimada, H. Kaneko, Y. Tamaura, K. Ito and T. Ohara : J. Magnetism and Magnetic Materials, (2002) 238, 47.
 - 63) 郷右近展之, 島田綾乃, 松岡孝仁, 金子宏, 玉浦裕, 小原健司 : 水環境学会誌, 25 (2002) 1, 33.
 - 64) H. Ozaki, Z. Liu and Y. Terashima : Water Science and Technology, 23 (1991), 1125.
 - 65) 三橋和成, 吉崎亮造, 岡田秀彦, 小原健司, 和田仁 : 分析化学, 52 (2002) 2, 121.
 - 66) 中平敦, 柄谷周子, 小西伸次, 西村文秀, 武田真一, 西嶋茂宏, 渡辺恒雄 : 材料, 52 (2003) 6, 566.
 - 67) 福井聡 : 低温工学, 37 (2002) 7, 321.
 - 68) ランダウ, リフシッツ : 電磁気学1, 東京図書, (1970), 57. (本書は英訳版 L.D. Landau and E.M. Lifshitz : Electrodynamics of Continuous Media” の日本語訳。原著はロシア語。)

(2005年2月15日受付)