総 説

鉱物処理と機械的操作の間 (I)

—— プリンシプルに重点をおいて鉱物処理工学の研究を行ったところ ——

八 嶋 三 郎*
Saburo YASHIMA

1. 粉碎の研究を始めたころ

昭和39年7月1日付で私は東北大学工学部鉱山工学科助教授から山形大学工学部化学工学科教授に転出して機械的操作の講座を担当することになった。私のライフワークのようになってしまった単粒子破碎の研究はこの年にスタートしたので、いつの間にか20年の歳月が経過してしまったことになる。研究者にはそれぞれの流儀があって、新しい研究に先べんをつけて、すぐ外の研究に転進する人もいるし、一つの研究を長く続ける人もいるが、そういう意味では知らぬ間に深追いを続けたような経過になってしまった。しかしそれと意識してはいないのだが、私なりに単粒子破碎の研究も一応の結末に近づいたように思っているし、現在は単粒子破碎と集合粉碎とを結び付ける研究へと展開するために、いろいろな道具立てを行っているところである。

この単粒子破碎の研究を始めるに至った動機は何か？と聞かれることがあるが、私の山形大学への転勤は、前東北大学々長前田四郎先生のご指示によるものだったこともあって、転勤の時期が近づいたころ、当時化学工学科の教授でいらしゃった前田先生のお部屋に伺い、米沢に行ってから何を研究しようかということいろいろご相談申し上げているうちに、“粉碎という操作にはどうにもわからない点もあるので、ひとつ最も基本的なところから、一粒ずつつぶしてみてもどうだろうか”というお話がでて、それでは取り組んでみようかとなったのがきっかけである。いろいろ文献を調べているうちに、球形試験片を用いた研究としては、3年前の1961年に Allis-Chalmers の研究所の J. J. Gilvarry が *J. Appl. Phys.* Vol. 32, No. 11, pp. 391~9 (1961) にあの美しい論文、“Fracture of Brittle Solids. I. Dis-

tribution Function for Fragment Size in Single Fracture (Theoretical)”を発表しているのを知った。

この論文はガラスの球形試験片の中に潜在している破壊の根源となる Griffith クラックの分布がポアソン分布に従うものとの仮定から出発して理論を展開し、それまで経験則とされていた Rosin-Rammler 分布や Gaudin-Schuhmann 分布に理論的根拠を与えたものであった。

さていよいよ単粒子破碎の研究を開始しようと、少しずつ心の準備をしているうちにいろいろ気掛りな問題が出て来た。まず第一に理論的な面について早速問題となるのは玉を平行平板で圧縮したときの球内の応力分布である。この点については材料力学の教科書に出ている Hertz の接触応力の理論そして、それを基にした Timoshenko の解析結果があったし、また当時京都大学工学部資源工学科の平松良雄先生の研究室で球を圧縮したときの応力分布の解析をしておられるのを知って、手紙を差し上げたところ、まだご投稿前の手書きの原稿を青焼きして送って下さったのでこれを勉強したりした。このご研究は後に、平松良雄、岡行俊、木山英郎：非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験、日本鉱業会誌, Vol. 81, No. 932, pp. 1024~30 (1965) として掲載された。この種の研究としては後に名古屋工業技術試験所の山田康雄氏が有限要素法を用いて同様の解析を行ったがこれは、山田康雄：ガラスビーズの圧壊に関する一考察、粉体工学会誌, Vol. 20, No. 2, pp. 59~62 (1983) として掲載されている。つぎに破断面などの鉱物学的な考察に関しては母校の応用鉱物学講座にご相談しながら進めることができるだろうと思ったし、また肝心な材料試験機については、どこの大学でも工学部の機械系の学科にはあるはずだからこれを借していただければ何んとかやれるだろうと思った。しかし幸いなことに、山形大学には学長篠崎平馬先生のご発案で新任教官のための研究費が特別にプールされていたので、この研究費をいただいて赴任早々30 t の油圧式万能材料試験機

昭和59年6月18日受付

*東北大学選鉱製錬研究所(〒980 仙台市片平 2-1-1)

TEL 0222-27-6200

を購入することができた。暑い夏の京都に足を運んだり、遠く米沢まで技術者の方に来ていただいたりして、加圧部分の構造などを島津製作所側と何度も打ち合せたのを思い出す。後に述べるように、昭和49年1月1日付で私は現在の東北大学選鉱製錬研究所に再び転勤したが、ここでもインストロン型で最大荷重100tフルスケール、最小目盛2gと幅広い容量を持ったボールネジ式万能材料試験機を特別設備費で購入していただくことができた。この材料試験機は日本では初めてで同型のものでは島津製作所製の第1号機であった。山形大学当時はこの外にも大きな落重試験機や顕微鏡下で小さな球形試験片を圧壊する極小型の材料試験機などを使ったが、これらは材料を集めて全部自作したものである。特に落重試験機は、化学工学科に試験工場があって広さにも高さにも十分に余裕があったので大型のものを作ることができた。設計は私が行い、製作は工学部の機械工学科の工場に依頼した。しかし組み立てや調整は全部卒業論文で講座に配属になった四年生や大学院修士課程の学生諸君が担当した。後に東北大学に転勤してからも落重試験機を設計して作り、現在もこれを使って実験しているが、米沢のときのものに比べると一回り小さく、少しくきゃしゃである。この装置を作るときは大きな寸法の鋼材を集めるのに大変苦心した。米沢にはそんな材料を使う工場はないので地元で調達することはできないし、それに厚さ数cmの厚板や直径が十数cmもある鋼材を定尺物で買うこともできない。結局年来の親友であった東京赤羽の金井工業㈱の社長金井昌利氏に相談したところ必要な鋼材を全部切断して急送してくれた。また重さ数百kgのアンビルは山形市の鋳物工場に頼んで吹いて要所を切削加工してもらった。一方顕微鏡下で球形試験片の圧壊実験を行う小型の材料試験機は長さ約1mの磁性測定用ソレノイドを持っていたので、これをもとにして設計し、荷重速度も一定に保てるような電磁装置を試作した。偏位計には当時時計会社で売り出していた電気マイクロメータ、それに荷重検出用には小型のロードセルと動ひずみ測定装置などを購入して組み合わせて準備した。この一連の工作などは大学院学生が担当してくれた。その外にも追い追いにいろいろな装置を試作したり計測用機材を準備していった。

一方岩石の球形試験片を作るのには多少のノウハウを持っていた。東北大学に勤務していた当時、前任の助手だった富地信夫氏（のち山形大学教育学部教授となり、先年退官された。）が岩石の反発係数を計るためにいろいろな岩石の球形試験片を作っておられた。これはまざダイヤモンドソウで岩石のさいころを削り出し、つ

いで順々に角を落し、グラインダで研いで大体丸くしてにおいて最後に多少大きめの鉄パイプを半割りにしたといの中に研磨材やスラリーを入れておいて、その中を転がして仕上げる方法である。圧縮強度を測定するときの円柱形試験片も最初のころは似た方法で作っていたが、最近ではボーリングマシンでコアを採取して作っている。しかし球だけはメーカーと相談したこともあったし、研究室に配属になって初めて球を作る若い人々はなんとか機械で作る方法はないものかと考えるようだが結局は手作業に落着いている。最近では高炉用コークスの引張強度を測定してみているが、やはりこの方法を用いて球形試験片多数準備し、その圧壊試験から引張強度を求めている。騒音を避けるために耳にせんをし、作業服に防じんマスクという出で立ちで球を作っているのを見て、誰だったか忘れてしまったが、初めのころは、卒業研究の学生にあんなことをやらせるなんて……。といていた人もいたようだったが、学生諸君は自分で球を作って自分で壊して測定するのだから一所懸命だったし、学生運動が険悪な雲行きになって来たころは、もし研究室が襲撃されたときは、この球だけは抱いて逃げるんだなどと真剣になっていていた。耳にせんをしてガーガーうるグラインダと集じん用ファンの騒音の中で仕事をしている学生さんが、単調な仕事の気をまぎらすためか、それに耳にせんをしているので自分では聞えないし、「逃げた女房に未練はなあいが……」と大きな声で歌いながら球を作っていた。しかしグラインダの音と歌声とは周波数が違うので隣の教授室にはとても上手に歌が聞えて来て時々ニヤニヤさせられていた。こんな毎日が続く研究室だったのをなつかしく思い出す。

山形大学工学部の化学工学科に勤務していた当時はご多分に洩れず講座費は本当に少なかったが、前の大学の時代からのご縁で、いろいろな会社からの研究の委託もあり、今でいう奨学寄付金を持っていたので多少の余裕はあったし、それに前述のように昵懇にしていた会社の友人達がいろいろな面で助けてくれたので、割合に豊かな気持ちで過ごすことができ、学会の時などは大学院学生にも幾許かの旅費の手当てをすることもできた。卒業研究の学生や大学院生を含めて講座には常時20人くらいの人々がいて、この人達が本当に力になってくれた。米沢は地理的に可成り内陸部にあり、交通の便は決してよくはなく、それに夏は暑く、冬は豪雪に見舞われる辛い土地だったが、しかしそれだけに人々の情は厚くとても親切だった。学生諸君は気がよく純情で一所懸命やってくれるし、田舎なので空気は綺麗だし、それに大きな都会からは離れていて、粉碎の研究をしているとはいっても

まったくの駆け出しだったから何々委員会に出てこいというような呼び出しもないし、多少人見知で、肩で風を切って歩きまわれる柄でもないことはよく承知しているし、ましてや急いでデータを出せるような研究でもないで、まずはゆっくり腰を落着けて学生諸君を相手に少しずつ単粒子破碎の勉強を進めて行った。

2. 助走のとき

さて、ここで時計を大部戻して卒業直後から山形大学に転勤するまでの間どんな内容の研究に従事していたかを述べることにしよう。これは決して自己宣伝のためではなくて、妙な巡り合せて鉱山工学の選鉱学 (mineral dressing) —最近では鉱物処理工学(mineral processing) といっている—と化学工学の機械的操作の両方の講座に交互に在籍して教育と研究に携われることができたので、その相似点と相違点とを身を持って体験することができた一人だからそれを記録にとどめておきたいと考えたからである。

私は昭和21年、敗戦の翌年東北大学に入学し、昭和24年3月に卒業してすぐ母校の工学部鉱山工学科（現在の資源工学科）の助手に採用された。籍を置いたのは選鉱学の講座である。さて助手にはなったが母校は昭和19年戦時中の創設で、またそれに敗戦直後であったことも手伝って設備は乏しく、また指導して下さる先生もまだ赴任しておられなかったので、工学部の籍で、とりあえず今勤務している選鉱製錬研究所の選鉱学の研究室で勉強させていただくことになった。その時のテーマは重液選鉱法における分離性の検討である。この操作は原理的には古くからあったものだが、戦争中米国の A. C. C. で heavy media separation, 略して H. M. S. 法というのが開発されていた。これはサスペンションの懸濁質として磁性があって耐食性の大きなフェロシリコンの粉末を用いる方法で、これによって高い比重の擬重液を作り、この中に破碎して整粒した粗粒の鉱石を投入して、脈石だけの比重の小さい粒子を浮鉱として分離する。別名浮沈分離といわれる方法であり、磁性を利用し磁力によってフェロシリコンを回収し再使用するという方法であって、戦後わが国では足尾鉱山に真っ先に取り入れられた方法であった。またフェロシリコンの代りに東北大学の金属材料研究所で開発した磁性材料のセンダストを粉碎して用いることについても研究した。フェロシリコンやセンダストはとてもかたい金属なので、これを大ハンマーを振りかぶって叩き割ってからでないとサンプルグラインドで粉碎することができない。このような仕

事を来る日も来る日も真っ黒になって夜おそくまで続け、ある時は徹夜実験をした。この方法は当時はまったく崭新なものだったので選研でシンポジウムが開かれるときはいつも重要なテーマとして取り上げられていたので、そんなことをしてデータを間に合わせたことが度々あった。この方法はその後いろいろな鉱山や炭鉱で使われた。選炭では目的とする石炭のほうが浮鉱であり、沈鉱がずりとして除かれる。最近では鉱山も炭鉱も閉山するところが多く、稼行しているところが少なくなったが、1982年の調査では金属鉱山2箇所、炭鉱8箇所でのこの方法が用いられている。この方法では高い比重の擬重液を作るのには限界があり、比重2.7の脈石を浮かすことはできたが、比重が3.8~4.1のザクロ石を浮鉱として除くことは困難であった。しかし最近磁性流体の出現を見るに至って、一挙に高い比重の銅、鉛、亜鉛、アルミニウムなども処理できるようになり、浮沈分離の適用範囲が著しく拡大された。

重液選鉱法の実験性の検討を始めた頃、私にとってはとても堪え難いできごとがあった。それは足尾鉱山の選鉱場から採取した沈鉱と浮鉱のサンプルから約100個ずつ任意に抽出した粒子を渡され、その比重を一個につき繰り返し二度ずつ精密測定させられたときのことである。特別の比重びんを準備し、粒子を蒸留水でよく洗浄して110°Cで一昼夜乾燥した後比重びんに入れ、蒸留水を注入した上、減圧して粒子に付着している気ほうを除いて、化学天びんで……、もちろん沈鉱も浮鉱も一個ずつ番号を書いた紙袋中に保存した。しかし最後に測定値を平均してみたところ沈鉱の比重が浮鉱の比重よりも小さくなり、結果として木の葉が沈んで……。のたえどおりになってしまった。今になって考えてみれば当りまえのことで、実際にはもっと別の状態で分離されているわけだから、それなりの測定方法をとらなければならぬのに、私がサンプルを取り違えたためだろうとされてしまった。紙袋に保存してある粒子を見せても信じてもらえない。沈鉱には明らかに金属鉱物の粒子が含まれていてキラキラ輝いているのに……。こんなことがあって私はいい知れぬざ折感を味わされるはめになってしまった。

この年の7月1日付で恩師大山正先生が着任され、母校の選鉱学の講座を担当された。先生は東北大学理学部のご出身で石英粒子の ζ 電位を可成り早い時期に測定され、優先浮遊選鉱新論という著書を書かれた泰斗であった（先生は昨年89歳の天寿を全うされて他界された）。選研にはこの年の11月末までごやっ介になり、12月1日から母校に戻ったが、すぐ母校に戻ってもそれまでお世

話になった研究室にご迷惑をかけてはいけないからというこで、一週間のうち3日間は選研に、3日間は母校にという勤務が翌年の3月末まで続いた。ただし母校には研究設備もないので、東北大学科学計測研究所の当時所長をしておられた岡村俊彦先生の研究室で勉強させていただくことになり、のろい市電に揺られながら仙台の南のはずれの選研と北の端にある科研とを往復する生活が始まった。岡村研究室では当時ざん新なフェライトの研究やマイクロウェーブの研究が熱っぽく行われていて活気に満ちており、私も日曜日を返上して導波管の設計をしてお手伝いしたのを思い出す。このように方々の研究室に居そうろうする生活が続いたがそのおかげで専門の違う多くの方々とお知り合いになることができた。

ここで大山先生から最初に与えられたテーマは光透過法による粒度分析法の開発だった。昭和24年といえまだまったくの戦後の混乱時代だったが、なんとか光電管を手に入れ、米軍放出の軍用乾電池をつないだり、平行光線を与えるため町のめがね屋で大きな拡大鏡を手に入れたりして、ボール紙に墨を塗った装置を組み立てた。ただし沈降容器は科研の工場で作ってもらったが、この工場には当時既に世界一流の工作機械が多数そろっており、見事な細工の容器を作っていた。全部黄銅製で薬品で黒く着色しており、光が通る面には、手に入るガラス板のうちで最も平滑な乾板ガラスの感光膜を酸洗いで除いたものを使った。光源には普通のタングステン電球を使った。その光の波長の分布は工学部の電気の実験室で測定させていただいた。液体中に懸濁させた粒子が沈降するのに伴って変化する電流の強さは検流計と尺度付望遠鏡で測定した。この方法は当時日立でも研究されており、数年後同社から製品となって世に出たのを覚えている。

つぎに大山先生が与えられたテーマはまたまた重液選鉱に関するものであったが、これは可成り飛躍した着想で、それまでの重液選鉱法では逆円すい型の槽の中に懸濁液を満たし、固体粒子が沈降しないように棒型のレーキをゆっくり回転させてかきまぜていたのだが、これを回転磁界 (revolving magnetic field) を用いて外側からかくはんし、レーキを除いて使いやすい状態で分離しようというものだった。この回転磁界は誘導電動機の固定子が発生する磁界そのもので別名移動磁界 (movingあるいは travelling magnetic field) ともいわれ、今はやりのリニアモーターそのものである。

一所懸命取り組んだが、磁界のこう配がきついこと、水の粘性が邪魔することなどでこのアイデアを実現することはできなかった。しかしこの磁界が磁気分離には

とてもすぐれた性質を持っていることから交流移動磁界型磁気分離機を開発しようということに目標を変えて研究を続けた。同じような研究を外国では米国の Eketorpe が行っていたが、調べてみると研究報告よりは特許のほうにおもしろい内容のものが数多く見られた。数年間この研究と取り組み、いろいろな型の分離機を開発した。大山先生はよく特許を申請しておられたが、この方面でも幾つかの特許を取得された。代表的なものに振動板式交流移動磁界型磁気分離機、テーブル式交流移動磁界型磁気分離機、スパイラル式交流移動磁界型磁気分離機がある。振動板式は大山先生が神鋼電機㈱と共に工業化されたもの、テーブル式は比重選鉱用として用いられている揺動テーブルに移動磁界装置を組み込んだもので、砂鉄の磁選廃砂から含チタン鉱物粒子を採取するのによい成績を収め、工業化にも一応成功した。スパイラル式はまったく独得のアイディアで回転磁界の中にスパイラルをそう入した乾式の分離機であって、これは私が今まで手掛けた磁気分離機のうちで最高の分離性を具えたものであり、その記録は現在も破られてはいない。おそらく世界でも最もすぐれた分離性を持っているものと思う。残念ながら非磁性、非電導性の材料で精密なスパイラルを作ることができないのでいまだに工業化することができずにいる。

交流磁界を用いたものとしては日本磁力選鉱㈱のものもあった。これは移動磁界ではなく振動磁界を利用したものである。この移動磁界型磁気分離機はすぐれた分離性を持つてはいるが残念ながら処理容量が少ないので広く工業用として使用されるには至っていない。この欠点は将来もなかなか克服することはできないだろうと思う。しかし、とはいうものの希望は常に持ち続けなければいけない、というのは最近この移動磁界を用いて非磁性の金属類を分離する誘導うず電流式分離装置が富士電機㈱によって開発され廃棄金属類中のアルミニウムなどの分離に用いられようとしている。この例に見られるように長い年月の間にはいったん見放されたようなものも時代の変遷と共に再び脚光を浴びることがある。

わが国では第二次大戦中砂鉄が重要な鉄資源として採掘された。戦後もこの砂鉄は盛んに採掘、選鉱され、電気炉で製鉄され、いわゆる電気鉄が生産された。電気鉄はSやCuの含有が少なく処女性に富む鉄として重要視され、群馬県の大間々には12,000 KVAの大型電気炉が建設されていた。この砂鉄は昭和30年代の中ばまで採掘されたが、その後次第に衰退し、今はまったくといってよいほど採掘されていない。それは有望な鉱床がほとんど採掘され尽くしたこともあり、また外国から、わが

国よりも低コストの電気鉄が輸入されるようになったことにもよる。この砂鉄は北海道地方の噴火湾一帯、東北地方の太平洋岸、関東地方の銚子付近、中国地方の島根付近、九州地方の有明湾などで採掘されていた。当時磁気分離の研究を行っていた関係で砂鉄の分離についても精力的に取り組んだ。砂鉄の精鉱品位をできるだけ高めること、これはそれまでの分離技術を駆使すれば十分に実現可能であった。しかし一連の研究で最も苦心したのは磁着品位が5%程度の低品位鉄鉱を大量に処理する磁気分離機を開発することと、磁選廃砂中に含まれている含チタン鉄物粒子を効率よく採取することであった。前者についてはいろいろ苦心して研究を重ねた結果、上部給鉱式ドラム型磁選機によって完全に解決することができた。これは八嶋三郎、俣川恭輔、栗野修：低品位鉄鉱石の粗選用磁選機に関する中間工業試験，日本鉱業会誌，Vol. 85, No. 979, pp. 923~8 (1969)として掲載してある。一方含チタン粒子のほうはこれと比重の高い脈石である紫蘇輝石との分離が通常の比重選鉱ではまず不可能であることに最大の問題点があったが、これも前述のテーブル式交流移動磁界型磁気分離機で解決することができた。これは T. Ōyama & S. Yashima: Study on the Characteristics of Table-Type A. C. Magnetic Separator and Its Applications, The Technology Reports of Tohoku University, Vol. XXI, No. 2, pp. 185~96 (1957)として掲載してある。

このようにして実施して来た一連の研究のうちおもに交流磁気分離機の研究結果と、その後研究した振動パンナー（大山先生が岩手大学工学部に転勤された後に重点的に研究されたものであった。）の成果をまとめて、後に大山先生は工学博士の学位を取得された。先生は理学博士の学位も既に持っておられたのでこれで二つの学位を持たれたことになる。

3. 学位論文のころ

話は前後したが、このような研究に従事しているところに日鉄鉱業㈱の釜石鉱業所からつぎのような問題が持ち込まれた。それは磁選法を主体として磁鉄鉱を選鉱している同鉱山ではどうも磁鉄鉱が微粒となるとその回収率が低下するが、それはなぜだろう、またその対策はどのようにしたらよいだろうかということだった。最近では鉱物処理工学関係でもあるいは粉体工学関係でも微粒粒子が特に問題となっているが、振り返ってみると、これは微粒粒子の問題の走りであったように思われる。この問題と取り組むために、従来からの交流移動磁界による磁気分離法に加えて直流電磁石あるいは永久磁石を用いるい

わゆる静磁界による磁気分離法へと必然的に研究の重点が移行して行った。

強磁性体は微粒となって、その粒子サイズが単磁区のサイズに近づくとも磁化は磁区の回転によるのではなく、磁壁の移動によらざるをえなくなることからきわめて磁化しにくくなる。さらに細かい粒子となるとスーパーパラマグネチックとなってまた異なった現象があらわれるが、とにかくまず釜石鉄山産磁鉄鉱ではこの傾向がどのようにあらわれるかを検討するために、鉄鉱を微粉碎し、分級していろいろな粒径を持った磁鉄鉱試料を準備し、成分を分析するとともに粉末法で磁性測定を行った。その結果磁鉄鉱の粒径が次第に小さくなると、単体分離が進行するので磁鉄鉱としての純度が向上し、それに伴って磁化の強さも次第に強くなるが、やがて前述の磁性の粒度依存性が顕著となって磁化の強さが弱くなり、次第に磁化しにくくなる傾向にあることを確かめて、その限界の粒径が70 μm 付近に存在することを明らかにした。このころに永田武先生の“Rock Magnetism”が出版され、その中に含チタン鉄物なども含めて強磁性鉄物の粒度依存性が幾つか紹介されていたが、われわれの測定結果も従来の研究結果と同様の傾向を示すものであった。この測定結果は、八嶋三郎、栗野修：低品位鉄鉱石の粗選用磁選機に関する基礎的研究，日本鉱業会誌，Vol. 85, No. 978, pp. 869~74 (1969)として掲載されている。これで磁鉄鉱が微粒となるほど磁選による回収が困難となることの磁性という面から見た理由がはっきりしたが、その対策はどうしたらよいかということになった。ちょうどそのころ、これと平行して前述の低品位鉄鉱石の粗選用磁選機の開発に関する研究を進めていたので、この磁選機で処理してみたところ微粒磁鉄鉱も充分処理が可能であることがわかり一挙に問題を解決することができた。

この一連の研究を進めているうちに片刃粒子の磁性が問題となった。片刃粒子とはたとえば反磁性の石英の中に細かい磁鉄鉱の粒子が分散しているような粒子のことである。この片刃粒子の示す見かけの磁性が、その中に含まれている磁鉄鉱の含有率とその磁性、そして石英の含有率とその磁性とどのような関係であらわされるかという問題である。これを理論的に解いたところつぎの関係が導かれた。

$$\chi_a' = \left[\left(\frac{w}{100} \chi \right) \right] / \left\{ 1 + \chi N \left(\rho - \frac{w}{100} \rho_a \right) \right\} + \left(1 - \frac{w}{100} \right) \chi_1$$

ここに χ_a は片刃粒子の見かけの比磁化率、 χ は与えられた磁界における磁鉄鉱の比磁化率、 χ_1 は非磁性部分の比磁化率、 w は磁鉄鉱粒子の含有パーセント、 ρ_a は

Classification of magnetic separators

片刃粒子の見かけ密度、 N は片刃粒子中の強磁性粒子の減磁率である。ただしこの式では片刃粒子の形状に基づく減磁率を無視した片刃粒子中に含まれる強磁性粒子を囲む空洞の減磁率とその中に入っている強磁性粒子の減磁率が等しい値を示すものと仮定している。

たとえば常磁性のザクロ石の中に微粒磁鉄鉱が分散しているような片刃粒子の場合はザクロ石は磁鉄鉱粒子と共に磁極に吸引されようとするが、前述のような反磁性の石英の中に微粒磁鉄鉱が分散しているような片刃粒子の場合には上式の χ_1 は負の値をとり、石英は磁極から反発されようとするし、一方磁鉄鉱は磁極に吸引されようとするから磁鉄鉱の含有率によっては両者が相殺して片刃粒子の見かけの磁性がゼロとなるところがある。片刃粒子が置かれている磁界の強さによっても異なるがおおよそ磁鉄鉱の含有率が 0.1~0.01% 付近にその境目が存在する。この研究結果は、S. Yashima: Theoretical Studies on Magnetic Separation. I. Magnetic Forces of Mineral Particles and the Sensitivity of Magnetic Separation, The Technology Reports of Tohoku University, Vol. XX, No. 1, pp. 143~64 (1955) として掲載してある。

このような一連の研究を進めているころ、師匠の大山先生はご停年が近づいたこともあってか、私に学位論文をまとめるようにと指示された。どのようにしようかといろいろ考えたが、結局ここに記した微粉磁鉄鉱の問題

あるいは片刃粒子の磁性の問題などの静磁界を用いる磁気分離の基礎となる鉱物の磁気特性に関する研究をまとめて提出した。昭和31年の初夏のころだった。審査して下さったのは主査が大山先生、それに数学の野邑雄吉先生、物理の枝本勇雄先生、鉱物の鈴木廉三九先生、選鉱の和田正美先生で野邑先生はあの有名な本多光太郎先生の物理学通論を執筆された方である。当時の工学部長は後に静岡大学の学長になられた電気工学科の渡辺寧先生で、投票は翌昭和32年の2月、学位記は4月17日に授与された。今の学位記の日付は研究科委員会を通った日になっているが当時の学位記の日付はそれを授与された日になっている。その頃大学の門の近くを歩いていたら渡辺先生が近寄って来られて私の肩をたたいて“八嶋君おめでとう、よかったね、しっかり勉強するんだよ”と言って下さった。私は工学部の一介の助手を先生が覚えて下さって温かく励まして下さったことにいい知れぬ感激が心の底から吹き上げて来るのを禁じえなかった。今も肩に感じた先生のたなごころのぬくもりをはっきり覚えている。私の学位については東北大学工学部機械工学科の内力弾性学の教授をしておられた樋口誠一先生にも大変お世話になった。先生も本多光太郎先生の薫陶を受けた方である。私の父は軍人で長く戦地にあった関係もあり、先生には小さいころから面倒を見ていただいた。先生は後に工学部長、そして岩手大学の学長になられ先年他界された。東京大学の憲法の教授の樋口陽一氏

は先生のご長男で、お隣同志でもあり夏休みには一緒に海水浴に行ったりした。二番目のご子息樋口龍雄氏は東北大学工学部電子工学科の教授である。

この年の4月大山先生は東北大学ご退官を前にして請われて岩手大学に転出され、同月1日付で私は東北大学助教授となった。

このようなことから磁気分離の研究も私にとってのライフワークのひとつとなってしまう。昨年秋に日本鉱業会と Australasian Institute of Mining and Metallurgy のジョイントシンポジウムが仙台市で開催されたが、その時に鉱物処理のセッションでわが国における磁気選別の歴史をまとめて講演した。前のページの表はそのとき紹介した磁気分離機の種類である。私は昭和40年に朝倉書店から刊行された“粉体工学ハンドブック”にも粉体の磁気的性質と磁気分離の2章を分担執筆したが、その中にも磁気分離機の種類を表として掲げている。あれから20年近い歳月が経過したが、その間における磁気分離機の変遷を見るとまことに今昔の感に堪えないものがある。表の中の具体的な分離機の名称でかくてくったものは20年の歳月のうちに磁気分離の第一線あるいは主流の座から消えて行ったものである。弱磁界型では今はドラム型が主流であるが、これは歴史的には

1902年にスウェーデンの Gustaf Gröndal によって初めて作られたものでわが国にはそれから34年後の1936年に当時の日鉄鉱業株釜石鉱業所の選鉱場に導入されている。今は主流の座を去ったが以前はよく使われていたベルト型の Crockett 湿式磁選機は1933年に米国の Dings 社によって開発され、1936年に当時の朝鮮北東部の満洲との国境付近にあった茂山鉱山に導入された。その当時は電磁石型だったものを三菱電機の協力で OP マグネットを使った永久磁石型に改造したものが1944年にやはり釜石鉱山選鉱場に導入されている。表に見られるように、最近では強磁界型あるいは高こう配型が重点的に開発され、いろいろ新しい分離機も開発されて、磁気分離の応用範囲も急速に広まっているが、実際に最も多くの原料を処理しているのは依然として弱磁界型であろう。最近の高こう配型もその考えは昔からあったもので、私も磁選の研究の初期に実験したことがあるが、当時はマトリックスに向いたよい磁性材料がなく期待するような結果はえられなかった。

こんな研究を続けているうちに、鉱物処理関係のプロセスデザインに興味を持つようになり、研究の重点が次第にその方向に移って行った。このことについては次回に述べよう。

PNEUMATIC 2

^ 空気輸送技術に関する第2回国際会議が下記の要領で開催されます。

日時：1984年9月4日～6日

場所：University of Kent at Canterbury, UK.

主催：POWDER ADVISORY CENTRE

P. O. Box 78, London NW 110 PG, England

Telephone: 01—455 0011

Telex: 8954242 (POWDER G)

Powder & Bulk Solids 10th Anniversary

日時：1985年5月7日～9日

場所：O'Hare Exposition Center

Rosemont, Illinois

講演希望者は要旨を英文で100～200語にまとめ早急に（締切は1984年10月15日）下記宛提出のこと。

William D. Ashman

Cahners Exposition Group

Cahners Plaza

1350 E. Touhy Ave., P. O. Box 5060

Des Plaines, IL 60018

(312)299—9311

プログラム申込先は

Abraham S. Goldberg, Powder Advisory
Centre, London, England