資源、粉体そしてシステムデザイン

井上 外志雄*

Toshio INOUE

東京大学工学部鉱山学科を卒業後、約37年の歳月のほとんどを東京大学工学部で過ごした。卒業研究の表題は「クラッシャの破壊機構について」であった。この研究では現場で使われているジャイレートリクラッシャなどの疲労破壊のメカニズムについて調べた。修士論文のテーマは「水中における鉱粒の超音波凝集の機構について」であった。この研究では真空管式の超音波発信器を自作し、超音波の定在波によって粒子の凝集が起こるというメカニズムを提起した。

博士課程では「浮選選鉱プロセスの速度論的研究」をテーマとした。この研究では鉱物粒子の粒度分布や片刃状態（2種以上の鉱物が一つの粒子を形成している状態）が反応速度定数が分布するという考え方を提唱し、この考え方に基づく浮選速度過程のモデル化とプロセス解析の方法は広く受け入れられるものとなった。それと同時に、浮選回路の分離特性などの概念を提示したが、分離過程を始めとする種々のプロセスの成績評価法に関する基本的な考え方は今も私の研究法の基本になっていると思う。

選鉱（mineral processing）* は元来、鉱山で採掘された鉱石を物理的手段によって精製するためのプロセスであるが、その一連の過程で最も費用がかかるのは粉碎と浮選である。そのため多くの研究はこの分野に集中する傾向にある。私自身もこの領域でいろいろと研究したが、他にも粒度分布測定装置、ろ過、沈降濃縮など、様々なプロセスや装置の研究を手掛けた。若いころ恩師の今泉常正先生からも同ったように、選鉱学というのは大変な雑学であり、数学、物理はもとより、化学、とくに界面化学、鉱物学などが基礎となっている。さらに機械、電気などの知識も要求される。うっかりするとこれらの基礎科学、基礎工学のつまみ食いをしているうちに、終わってしまう危険さえある。粉体は固体粒子の集まりであり、粉体プロセスはそれらの粒子の確率的なふ

るまいに基づいているので、確率論をしっかりと勉強し、その上に立って自分なりの選鉱学を作り上げたいと発起した時期もあった。研究の対象も、確率論が応用されそうなテーマを意識的に取り上げた中に、オンライン粒度測定や鉱石のランダム変動と均一化プロセスの研究がある。粉体プロセスの確率論というتماず頭に浮かぶのがふるい分けである。私も早速これに飛び付いたが、しばらく研究してわかったことは、ふるい分けというのが極めて非線形性の強いプロセスであるということであった。海外ではその後、私にも親しいイタリアの Gian Franco Ferrara 教授が行った研究が有名であるが、将来ふるい分けプロセスの本格的な研究にはミクロな視点が欠かせないと考えているところである。

こうした確率論だけに的を絞った時代もしか長くは続かなかった。理由は簡単で、確率論だけでは収まりきれない問題が次々と目の前に現れたからである。しかしこうした模索の中で、問題の整理法としてモデルの構築を研究の要に据えるという姿勢は私なりのモットーとしていつの間にか定着した。この考えは大学での講義にも反映され、学科編成の改革が行われ、資源開発工学科に資源システム工学と地球工学というふたつのコースが設けられたのを機に、新たなカリキュラムの中でシステム解析という講義を開設し、その中で決定論的モデルと確率論的モデルをベースに、問題の定式化を軸とすること

1994年5月12日受付

（〒184 東京都小金井市関野町1-4-9）

TEL. 0423-83-0747

*：石炭を対象とする選鉱は選炭（coal preparation）と呼ばれる。

図1 種々のモデルとそれらの対象との関係

とした。併せて、大学院の講義ではファジー理論も取り上げることとした。

何のためのモデリングか？

ここでモデリングは何のためか、ということについて立場を明らかにしておきたい。かつては理工学における研究の主な手段は研究室における実験であった。しかしコンピュータの発達と進歩に伴って、コンピュータが研究の補助ばかりでなく、実験そのものの手段としても大いに役立つことが徐々に認識されるようになった。また、社会科学や経済学などの分野においては元来、実験が困難であり、現象の統計解析などが重要な研究手段であったが、近年はその多くに代わって、シミュレーション実験の手法が広く使われるようになってきている。

理工学においても、実験には現実の問題を単純化することが常套手段となっており、無理な単純化が観察されるべき真の現象の解釈を歪める結果となっていることも珍しくない。そこで理工学の研究においても、現実のプロセスをモデル化し、そのシミュレーションによって対象プロセスの特性を調べることは従来の実験に代わる一つの有用な研究手法であるといえる。

幾つかのモデル

選鉱や粉体プロセスのようなシステムあるいは装置の振舞いを表すモデルとしては従来、物質収支、エネルギー収支などに着目した状態の時間的変化を常微分方程式または偏微分方程式によって表す決定論的モデルがもっとも広く使われてきた。また、同じ現象を粒子の確率的な振舞いによって観察する確率論的モデルも有用であった。最近ではこれらにファジーモデルやカオスモデルも加わって、シミュレーション実験の手法はさらに充実の度を増している。

コンピュータによるモデル化の実現においては（少なくとも最終的には）数値化が必須である。コンピュータ技術の進歩、とくにハードウェアの高性能化によって、

プロセスの全体をマクロに捉えるモデルに代わって、一つ一つの粒子の振舞いに注目したマイクロモデルに基づく数値実験が現実可能となってきた。マイクロモデルに基づく数値シミュレーションにおいては、明確な物理的意味をもつモデルのコンピュータ上での構築とそのモデルの基礎となっている最小限の実験によって研究を推進することができるので、最小のコストで最大の成果を期待することができる。しかし言うまでもなく大事なことはモデルと素過程がそれぞれの確に捉えられ、両者が正しく組み合わせられていることである。

このような研究方法に対しては批判も少なくない、しばしば受ける質問は「で、実験結果との対比は行いましたか？」というものである。この種の質問はシミュレーションに対する不信に基づいている。確かに数値シミュレーションにおいては仮定の置きかた、基本式の形式、パラメーター値の大きさなどによって結果が如何様にも変化し、何が真実であるかに疑問を投げずにいられないような場合も少なくない。シミュレーションはコンピュータの進歩によって初めて現実のものとなった強力な道具であると同時にまた、極めて危険な武器でもある。繰り返すが、最も大切なのは説得力のある基本モデルと素過程の正確な評価であろう。

もし、シミュレーションの結果を信じることができず、逐一実験との対比を行わなければいけないというのであれば、シミュレーション実験の真の価値は失われ、単なる遊びになってしまう。私は上のような質問にたいして、次のように答えることにしている。「（シミュレーションの結果は）現実のプロセスで経験される現象に合致し、その振舞い、特性、意味をよく説明しています」と。小さな規模で単純化された条件で行われる実験の結果は、現実のプロセスと大きく遊離していることが決して少なくない。過去の歴史において、誤った理論や単純な「基礎」実験によって多くの間違った結論が導かれている。通常の（昔流の）実験かコンピュータシミュ

図2 プロセスの動力学に基づくマクロモデルとマイクロモデル

レーションかによらず、重要なのは対象システムを正しく理解するための洞察力とそれを歪みなく表現しうるモデルの構築であることに変わりはない。

これまでの研究の中から

東京大学でこれまで行ってきた研究としては粒度測定、浮選動力学モデル [1]、浮選回路や粉砕回路の制御、鉱石の品質変動と均一化、沈降分離、ろ過などがあるが、ここではそれらの中から、マクロモデルおよびマイクロモデルによる粉砕回路と粉砕機のシミュレーションならびに海水ウラン回収システムについて述べることにしたい。

1. 粉砕回路のマクロモデル

ボールミルなどの粉砕機に対する速度論モデルに初めて接したのは Broadbent-Callcott らの論文であった。それは大学の学部を卒業し、大学院に進学して間もない頃である。この論文をはじめ、その後も引き続いて海外の学会誌や国際会議などで発表されたこの分野における一連の論文には私の心を強く惹きつけるものがあった。この理論の意味、問題点などを私なりに分析しつつ、いつか私もこの流儀で粉砕プロセスを、そして粉砕回路を最適化し、制御することを考えるようになった。

湿式サイクロンを組み合わせたボールミル粉砕回路の動特性はどのようなものか、分級性能が変化すると全体の粉砕効率はどうに変化するのか、分級産物のフィードバックによって粉砕回路の安定性はどのように影響されるのか、循環荷重比はどの程度の大きさがよいのかなど [2]、さらにまたファジー制御あるいはニューラル

ネットワークなどの方法による粉砕回路の制御についても種々研究した。これらの一連の研究ではできるだけ現実の粉砕回路に近いモデルを構築することを常に心掛け、ミルの中の流動には拡散混合モデルを使い、また湿式粉砕の場合、ミルの中の固体濃度と分級機のフィードの固体濃度をモデル上である設定値に合わせるなどの配慮をした。このようなモデルで操作条件を変化させると、ミルの内部での碎料の粒度構成の動的変化に興味ある現象が見られることなどが分かった。

また、先に触れた鉱石の変動モデルも粉砕その他のプロセスモデルに組み合わせることによって、現実のプロセスがどのような振舞いを示すかを観察した。

2. 粉砕機のマイクロモデル

このテーマは私にとって東京大学での研究の最後的一幕となったものである。1993年5月、オーストラリアでの国際選鉱会議と私がアジア地区代表を務める国際粉砕研究連合の第3回ワークショップで、ユタ大学の Raj Rajamani 教授がボールミルの中のボールの動きを離散要素法 (DEM) のモデルで再現し、ボールの衝撃エネルギー分布を提示するなど、その研究成果を発表した。離散要素法は、最近我が国の粉体工学でも人気が高く、注目はしていたが、Rajamani の研究発表と彼の好意で頂いた彼らの一連の研究論文には特に興味深いものがあった。そこで帰国後、以前より興味を持っていた遠心ミルについてこの手法を適用してみたいと考え、直ちに行動を開始した。なお、この研究で極めて短期間に予想外ともいえる成果を得ることができたのは、同僚の岡屋君の馬力もさることながら、開発言語 FORTH 処理系

図3 私に関った主なプロセスモデル

の我らが研究室での長年の蓄積によるところも少なくない。

遠心ミルのDEMシミュレーションについては5月の第8回ヨーロッパ粉砕シンポジウムでも発表の予定であるが、このDEMプログラムは遠心ミルだけでなく、さらにボールミル、振動ミル、遊星ミルの振舞いも調べられるように拡張された。これは至極容易なことであった。その結果これらのミルは一つの視点から比較検討されることとなる。上記のシンポジウムに引き続いて、ストックホルム・ヘルシンキ間のフェリーボートの中で第4回国際粉砕連合ワークショップが行われることになっているので、ここにもコンピュータを持ち込み、われわれのDEMモデルのデモンストレーションを参加者に見て戴く予定である[3]。

なお、誤解のないように付け加えるならば、現在のこのDEMモデルは粉体粒子一つ一つの振舞い（粉砕現象）を観察するところまでには至っていない。しかしコンピュータの発達は予想を上回る速度で進みつつあり、いずれはもっとミクロな現象がモデル上に展開される時が来るに相違ない。

3. 海水ウラン回収システム

昭和50年から10年余りの歳月をかけて資源エネルギー庁の委託により、金属鉱業事業団は海水ウラン回収の研究を行った[4]。この研究には大学・官庁の研究所をはじめ、大成建設、三菱金属（現在の三菱マテリアル）、徳山ソーダ、旭化成、三菱化成、東洋エンジニアリングなどの企業が参加した。私はこの研究に企画段階より参加し、とくにシステム評価の部分に深くかかわった。

海水中には3.3ppbという微量のウランが含まれており、その資源量はほとんど無尽蔵に近い。研究はこのウランを我が国の電力需要の約13%を満たすことを目標とするもので、それだけのウランを採取するには毎秒数万吨の海水を必要とする計算である。このための設備、とくに吸着施設は従来の装置産業に類例のない巨大なものとなり、ウラン採取コストを最低にするシステムの概念設計が最大の問題となった。システム評価研究の目的は、ウランの生産コストが最少となるようなシステムの選択、条件設定、研究努力項目の順位付けおよび研究の進展にともなう効果の推定などであった。

ウラン回収システムの形式としては、海岸に海水を取り組むプラントを設け、海水をポンプで汲み込んでウランを選択的に吸着するための吸着剤を充填したベッド（固定床、流動床または移動床）に海水を通過させてウ

ランの一次採取を行う方式（ポンプカラム方式）、ポンプの代わりに潮流を利用する方式、波力を利用する方式、黒潮などの海流を利用する方式などが検討されたが、結局、最も実現しやすい方式としてポンプカラム方式が、また将来の実用プラントとして経済性が期待される方式として海流利用方式が採択された。これらのいずれの方式においても、チタン酸あるいはアミドキシム樹脂などの細かな粒状吸着剤を充填した吸着床に海水を通過させる方法を中心として研究が進められた。

システム評価研究はこのような吸着システムの形態を想定して行われ、吸着モデルと実験によって定められた速度パラメタに基づいて吸着床の最適厚さ、最適海水流速、吸着剤の最適粒径、一回の吸着日数の最適値などが評価された。吸着剤の性能、とくに最大ウラン吸着量が重要と考えられがちであったが、システム評価モデルによる評価結果では、それはウランの生産コストにさほど大きな影響を持たないことも解った。また、ウランコストに最も大きな影響を及ぼす因子は巨大な吸着施設の建設費であること、巨大な吸着槽に大量の海水を送り込むための水路で失われるエネルギーが、吸着槽自体のエネルギー損失よりもはるかに大きくなる可能性が高いことなども次々と明らかとなった。また、海流利用は他の自然エネルギー利用方式に比べて最も有利と思われたが、それでも吸着設備の規模がポンプカラム方式に比して大きくなるため、ウランコストを下げることはかなり困難であることも分かってきた。

この研究プロジェクトではかつて経験されたことがない巨大システムの設計に対して、最適化モデルによるシステム評価が極めて有用であることを体験することができた。

これからの工学研究

近年工学と理学の境界が次第に薄れつつある傾向にある。事実、理学研究の成果が直接的に工業におけるブレークスルーに結び付くことも珍しくない。しかし理学の目標は真理の追究であり、その実用的成果は副産物にすぎないはずである。一方、工学の目的は工業の進歩を促すことによってわれわれの生活をより快適なものにすることにあると思う。工学研究の楽しみはその成果が人々の生活に結び付くということではないだろうか。工学の研究が「基礎的」研究の美名のもとに工学生来の目的を見失い、真理の追究はおろか、何の役にも立たない「研究のための研究」に終わってしまうことを私は強く警戒する。

コンピュータ内蔵の器機が増え、実験データがコンピ

図4 私が描く将来の研究環境

ュータ処理を経て目の前に現れるようになってきた。ブラックボックスの中で何が行われ、我々は何を見ているのかに無関心であってはならない。得られたデータが研究の目的に照らして正しいものであるかどうかを常に問い直す必要がある。

コンピュータモデリングは新しい工学研究の方法として位置付けられる。しかしそれは極めて強力であると同時に、現実世界から遊離するや否や、無意味であるばかりか危険極まりない遊戯になってしまう。研究データを経験と常識に照らしてチェックすること、現場経験に学び、実世界に対する鋭い観察眼を失わないことが最も重要であると思う。

過去30数年の私の研究生活において、コンピュータは私にとって最も大切な道具であったといえる。これからの30年はコンピュータが光ケーブルや人工衛星によって結ばれ、研究生活にも大きな変化をもたらすこととなる。この中で研究情報交換の手段、学会のありかたなどにも大きな変化が予想される。情報の漏洩が社会主義国家体制の崩壊を進行させるなど、世界の枠組みも急速に変わりつつあるが、コンピュータと情報化の時代が地域、民族、国家のそして個人の格差を拡大することなく、平等化、民主化への推進力となるよう、見守って行く必要がある。

むすび

本稿は2月16日に東京大学の工学部11号館講堂で行った最終講義に基づくが、内容の一部を粉体工学会の会員向けに変更し、加筆したものである。16日の講義では私

の研究で大きな部分を占めている浮選速度論についてある程度の時間を割いたが、本稿では省いた。また、若い頃に行った実験やコンピュータ関係の話も省略した。その代りに講義では時間の関係で省略せざるを得なかった海水ウランの話題を付け加えた。それぞれのテーマの詳細に触れることは不可能であるが、16日の講義と本稿の両者を合わせると何とかこれまでの研究の大雑把な纏めになっているのではないかと思う。

最後に東京大学での研究に苦楽を共にした学生・スタッフの諸君および学外からご支援頂いた多くの方々に厚く御礼申し上げたい。

参考文献

1. たとえば、T. Imaizumi and T. Inoue "Kinetic Consideration of Froth Flotation, Proceedings," 6th Int. Mineral Processing Cong., Cannes (1963), T. Inoue: "Flotation Process Modeling, in Principles of Mineral Flotation," Ed. M. H. Jones and J. T. Woodcock, Aus. IMM (1984)
2. たとえば、T. Inoue and K. Okaya: "Modelling of Grinding Circuits for Simulation Studies," 4th Asian Symp. on Mineral Processing, Manila (1994).
3. たとえば、T. Inoue and K. Okaya: "Grinding Mechanism of Centrifugal Mills," 8th European Symp. on Comminution, May 1994, Stockholm.
4. たとえば、金属鉱業事業団講演資料: 海水ウラン回収システム技術確証調査研究成果発表会「海洋溶存資源とその未来」1988年11月30日