



アラカルト

本との出会い-6

工学基礎としての輸送現象論

Transport Phenomena as Engineering Science

佐野正道

名古屋大学 名誉教授

Masamichi Sano

輸送現象論（あるいは移動現象論、移動速度論）は工学基礎（Engineering Science）のひとつで、種々の工学分野の共通の基礎であり、工学部の多くの学科において、主要な科目となっている。また、工学的研究を進める上でも、輸送現象論の知識は欠くことができないことも共通の認識になっている。

R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfootの共著“Transport Phenomena” John Wiley & Sons, Inc., (1960) に筆者が初めて出会ったのは1962年で、早稲田大学応用化学科の4年生のときでした。“Transport Phenomena”が出版されてから2年後です。そのまえがきには、ウィスコンシン大学の化学工学科では、輸送現象論の講義を開始することを1957年に決定し、1958年にはテキストとして“Notes on Transport Phenomena”が作られたこと、さらに“Transport Phenomena”はその完全な改訂版であることが書かれている。この“Transport Phenomena”は時代を画する名著であり、これ程内容が豊富で、例題、問題が多く取り上げられている参考書は現在まで現れていない。また、機械工学の分野では、W.M. Rohsenow, H.Y. Choeの共著“Heat, Mass and Momentum Transfer” Prentice-Hall, (1961) が翌年出版された。以後、非常に多くの類書が出版されている。

輸送現象論は、周知のように、運動量移動、熱移動、物質移動から成り立っており、運動量、熱、物質の保存則と流束を用いて基礎方程式を導出する。また、熱移動と物質移動は、いずれも運動量移動の影響を強く受け、多くの場合その間には相似性が成り立つ。運動量、熱、物質の各流束 J は、一般式、 $J = -\alpha (\partial X / \partial y)$ で表される。ここで、 X は単位体積あたりの各物理量、 α は輸送係数、 y は移動方向距離である。なお、 α は（距離の2乗／時間）の単位を持っている。

これより、運動量移動、熱移動、物質移動を、個別的ではなく、統一的に扱うほうがより合理的であるという考えのもとに、輸送現象論が生まれた。化学装置内では運動量、熱、

物質の移動が常に起こっているため、その操作条件の最適化、装置の改良、スケールアップ、新プロセスの開発、設計には、装置内での輸送現象の理解が不可欠であり、化学工学科では輸送現象論は必須の科目となった。

鉄鋼製錬の分野でも、1960年代から、化学工学的手法を取り入れた研究を行わなければならないという機運が生まれた。この化学工学的手法は、鉄鋼製錬の場合、化学熱力学の他に、輸送現象論、反応速度論などを使って、製錬装置内で起こっている諸現象について工学的解析を行い、数学的に記述することを目的としている。製錬装置は反応装置であり、その後の製錬装置の大型化、効率化、省力化、コンピュータ制御などの進展を考えると、化学工学的手法の導入は、時機を得た、当然の成り行きであったといえる。

名古屋大学においては、1962年に従来の金属系学科にはない新しい構想の下に鉄鋼工学科が創設され、既設の金属学科も含めて、5講座が何らかの形で鉄鋼製錬の研究を行っていた。とくに、高炉の鞭モデルで有名な鞭 巖教授は、多くの製錬装置の数学的モデル化を展開され、森 一美教授は、主に製鋼反応の速度論について、物質移動の観点からの研究を開始されていた。これらの研究においても、輸送現象論が理論的基礎として重要な役割を果たしていたことは言を俟たない。

筆者は、このように活気溢れる金属・鉄鋼工学科の溶融体精錬工学講座（鉄鋼工学科第二講座：森 一美教授）の助手として1968年4月に着任しましたが、化学工学研究室（城塚正教授）出身のため、当時鉄鋼製錬については全くの門外漢で、唯一の繋がりには輸送現象論でした。私事で恐縮ですが、筆者の博士論文は“化学反応を伴う移動現象に関する研究”で、大学院時代の5年間を通じて輸送現象論で明け暮れていました。また、“Transport Phenomena”から6年後には、城塚 正、平田 彰、村上昭彦共著“化学技術者のための移動速度論”オーム社、(1966) が出版されたが、筆者はその内

の1章を担当しました。

森先生は、当時学部では物理化学と速度論を基礎とした“冶金反応速度論”と“溶融体精錬工学”を講義され、大学院の“溶融体精錬工学特論”では“Transport Phenomena”がテキストとして使用されていた。また、森研究室の修士課程の学生が溶鉄の脱炭反応を境界層理論を用いて解析していたが、この研究は早稲田大学での筆者の研究に非常に近いものでした。森先生からいただいた研究テーマは、吹込み気泡界面を通しての酸素—溶融銀間反応でした。この反応系は熱力学的には単純な系で、通常の液体中へのガス吸収とみなすことができ、反応モデルは簡単に組み立てることができました。また、物質移動係数、気泡上昇速度は“Transport Phenomena”にも記載されており、拡散係数も測定値がありました。問題は、気泡界面積でしたが、これもノズルからの生成気泡の大きさに関する相関式より求めました。実験とモデル計算の結果を比較検討し、反応モデルの妥当性を確認することができました。これより、高温の精錬プロセスにも化学工学的手法が適用できることを実感しました。また、この研究は、その後の30年を超える吹込み精錬プロセスの一連の研究の最初のものでした。

以上のように、金属・材料工学の分野でも、輸送現象論が非常に重要であると認識され、名古屋大学金属・鉄鋼工学科においても、鞭先生のご提案により20数年前から“移動速

度論”が必修科目となり、学科改組、大学院重点化、国立大学法人化後の現在も続いている。金属・材料工学分野において、比較的初期に出版された輸送現象論に関するテキスト、参考書にはJ. Szekely, N.J. Themelisの共著“Rate Phenomena in Process Metallurgy” Wiley-Interscience, a Division of John Wiley & Sons, Inc., (1971)、G.H.Geiger, D.R. Poirierの共著“Transport Phenomena in Metallurgy” Addison-Wesley, (1973) (改訂版“Transport Phenomena in Materials Processing, TMS, (1994))があり、これらも名古屋大学大学院の特論のテキストとして使用された。和書としては、松下幸雄らの“冶金物理化学”，丸善，(1970)において輸送現象が解説されている。また、製錬プロセスの工学的解析とモデル化に対する化学工学的手法を体系化した成書には、鞭 巖らの“冶金反応工学”養賢堂，(1972)、“製錬化学工学演習”養賢堂，(1974)がある。

筆者は、1968年以後、名古屋大学に来て専門分野が変わり、鉄鋼精錬の教育・研究に携わってきましたが、輸送現象論との繋がりは全く切れず、逆に強くなったように思います。矢張り、輸送現象論は工学基礎のひとつであるとの認識を新たにしている次第です。

(2004年6月21日受付)