

私の一冊

一般教育等 原田茂治 先生

中川鶴太郎・神戸博太郎著 『レオロジー』 (みすず書房)

昭和 44 年の夏、理学部高分子学科の 3 年目学生であった私は、夏休みに帰省しないで、その二ヶ月間を快適な札幌の地で過ごしたいと思っていた。

当時エアコン(冷房機能だけのものが多く、クーラーと呼んでいた)はまだ一般家庭には普及しておらず、もちろん実家にそれはなく、帰省すれば夏の暑さにただただ耐えるしかなかった。本当に夏痩せをしたものであった。片道 24 時間を要する列車と青函連絡船の旅は魅力的ではあるが、夏の暑さはもう沢山だ。それに夏の北海道はもっと魅力的に違いない。

その夏休みに「大(おお)ツル」を読破したいと思っていた。大ツルとはこの小文で紹介する「私の一冊」である。高分子物理化学講座(通称、二講座)の中川鶴太郎先生の「レオロジー」というタイトルの著書のうち、我々は、みすず書房から出版されている 763 ページにおよぶ大著を大ツル、岩波全書にあるハンディな同名の書を小(こ)ツルと愛称していた。

レオロジーとは、物質の変形と流動に関する学問である。中でもバイオレオロジーは生体および生体を構成する物質を対象としており、血液、血管、細胞、筋肉、生体粘液、生体高分子溶液、骨、関節、歯、そしてそれらの臨床上の問題とも深く関わるのであるが、その内容は、本学の学生が資格取得のために学ぶ範囲を超えるものであろう。この書を「私の一冊」として紹介することを、この点でまずお詫びしておかなくてはならない。

中川先生と神戸先生は、日本におけるレオロジーの黎明期に、それを紹介し、普及させ、研究した先達である。お二人は「レオロジーとは何か(みすず書房、1956)」を上梓して、レオロジーの基礎概念形成の歴史的背景と、レオロジーと実際問題との関連を述べ、レオロジーの問題がいたるところにあることを力説された。そのはしがきに『この本は、廣く一般のレオロジーを専門としない人々も含めた化学者技術者に對して、レオロジーの内容を解説し、これに對して興味と關心とを得ていただくために書かれたものである。従ってここでは數學的な記述はなるべく避けた。内容もレオロジーのすべてを含むものではない。ひきつづいて出版される“レオロジー概説”ではレオロジーの全分野に亙ってもっと數學的な取扱いがなされる豫定である』と記されている。この“レオロジー概説”にあたる書が、「レオロジー(みすず書房、1959)」である。

そしてその大ツルのまえがきには、以下のように記されている。

『近時レオロジーに関する多くの専門書や研究報告があらわれるが、本書はそれらを読みこなすための解説書である。したがって基礎的概念の説明にあたっては、自明のことを自明でないとして出発した。

学校を卒業して研究室や工場に入り、レオロジーを志しながら周囲に指導者をもたず、自分で考えつつ成長しなければならない人々、あるいはレオロジーの重要性を認識しながらも、方法論をもたないために実践へ入れないでいる人々のための入門書である。したがって執筆にあたっては著者自身の経験から出発した。

われわれがレオロジーの道に入って、最初に直面した問題はレオロジーにでてくる力学的概念の複雑さとこれを処理する数学的方法の難解なことであった。レオロジーの対象となる物性そのものの複雑さと、その研究方法の特殊性が多くの研究者の行く手をはばんでいることを常に痛感してきた。

この本ではその経験にもとづいて研究方法のすじ道を示してみた。“使える”レオロジーをかくというのがこの本を通じての念願であった。

そのために力学の説明を長々とつづけたり、振動論に道草をくったりしたが、これらをよく理解していないとレオロジーが使えるものにならないというのが、われわれの信条であったからである。

本書を一見された読者の多くは、その内容があまりにも“力学的”であって、“物理的”でない、あまりにも形式的であって物質的でないといわれるかもしれない。

その理由の半分はもちろん著者の浅学にある。しかしあとの半分はレオロジーの現場およびわれわれの意図そのものにあるといつてわるいであろうか。

人が工場で、あるいは研究室で、“流れ”と“変形”に関する問題にぶつかったとき、そして、その問題を科学的にとりあげ、科学的に分析し、科学的に解決しようとするとき、その口を異口同音について出る言葉、その耳にいつまでもきこえてくる声は、“方法を、なによりもまず方法を” —それが思索の方法であれ、測定の方法であれ— である。

すくなくともレオロジーの領域に関するかぎり、立ち入った議論をするまえにわれわれは、現象そのものを“よく定義された”量に還元して考え、よく定義された量で測定する方法を切実に求めているのである。本書の性格はレオロジーの現段階の反映であると小さい声でおそるおそるいうことは許されないであろうか。

読者の指摘をまつまでもなくわれわれが感じることは、この本にあるのは概念の説明、方法の説明ばかりで、具体的な事例がないではないかということである。始めの計画では第IV部において、そのような実例を多数集めるつもりであったが、紙数超過のため割愛せざるをえなかった。しかしこの割愛した部分こそ、ある人々にとってはレオロジーそのものあることは疑いのないことである。そこで本書で果たしえなかったことを果たすために、す

でに別の一書の準備がはじめられている。このようなわけで、そうとうに大部のものでありながら、記載が“レオロジー以前”の部分に偏っているという欠点があることは認める。しかしここでふたたび強調したいことは、われわれが本書で意図したことは、実用弾性率および粘性率をつかって、複雑な過程をかみくだいていくこと、ここにレオロジーの一つの重要な立場があるということである。

われわれが前に「レオロジーとは何か」を書いてから、早くも三年の年月が流れた。前の本の中でつづいて出版することを約束し、多くの人々から激励を受けながら、ようやく書き上げたのが本書である。三年たった今ふりかえってみると、世の中にはすでにレオロジーの本がたくさん現れている。わが国では小野木重治氏の「レオロジー要論」、井本立也氏の「レオロジー入門」、森芳郎氏の「レオロジー」(応用力学講座)などが、それぞれ特長のある記述でレオロジーを説いている。一方、外国では F. R. Eirich の編集した全 3 巻(多分 4 巻)の“Rheology”の刊行がはじまり、執筆者として全世界の第一級の研究者を動員して、その豊富な内容を誇っている。

このような情勢においても、われわれの手になるこの本がなお価値をもつと信ずるのは、上のような理由があるからである。

数年間にわたる共同作業はようやく終わった、われわれの間を支配したものは相互理解と寛容の精神であった。やさしく書くことを恥じる必要はないと互いに激励しあう深い友情であった。いまそれを回想することはむしろ一つの完動に近い。(後略)』

この書は、第 I 部 基礎理論、第 II 部 現象論、第 III 部 測定方法、第 IV 部 物質構造との関連 からなっており、どの部分も便覧的に使うこともできるが、通読して、レオロジーを学ぶための物理学や数学の基礎を、そしてレオロジーの基礎概念を一つずつ学び進めば、“使える”レオロジーを着実に身につけることができよう。

第 I 部は、第 1 章 序論、第 2 章 力学的基礎、第 3 章 振動と波動 からなる。第 1 章にはレオロジーの概念、レオロジー小史、レオロジーの対象と方法と目的が述べられている。第 2 章の力学的基礎は、変形の力学、弾性体の力学、流体の力学 からなる。ベクトルの解説から始まり、ついでニュートンの力学の法則、円運動、剛体の回転運動へと話は進む。そして変形の力学が懇切丁寧に解説されて、歪テンソル、応力テンソル、テンソルの主軸、モールの図示法、有限変形へと話は進む。流体の力学では、流体の運動方程式を導くところから話が始まる。決してナビエ-ストークスの方程式を与えられたものとはしないのである。その基礎の上に、ニュートン型層流、円筒型層流などが詳細に解説されている。第 3 章の振動では、複素数、微分方程式の取扱い、単振動から始まり、減衰振動、強制振動、共振へと続く。波動は高校物理の教科書に出てくる正弦波の式から始まり、干渉、波のエネルギー、粘弾性体内の波動へ続く。実にここまでで 261 頁を要しているのであって、そして驚くべきことに、これを基礎

として、第Ⅱ部、第Ⅲ部で現れるすべての式が他書を参照せずに導かれるのである。一例を挙げると、クエット型粘度計の測定値から液体の粘度を求める式(11・3・11, p. 591)は、同心円筒回転運動の項(p. 317 ~ 320)で導出されており(式(4・3・31)-(4・3・35)), その導出に必要な考え方はそれよりも前の頁ですべて与えられている, といった具合である。

興味のある読者のために、第Ⅱ部以降の目次を略記しておこう。

第Ⅱ部 現象論

第4章 弾性と流動性 §4・1 変形と流動の諸形式 §4・2 弾性変形 §4・3 粘性流動 §4・4 非ニュートン流動 §4・5 塑性

第5章 静的粘弾性 §5・1 粘弾性現象 §5・2 固体的粘弾性, フォークト粘弾性 §5・3 液体的粘弾性, マックスウェル粘弾性 §5・4 記憶現象 §5・5 ワイセンベルグ効果

第6章 模型的考察 §6・1 力学的模型 §6・2 複雑な模型 §6・3 緩和時間および遅延時間の分布

第7章 動的粘弾性 §7・1 動的特性 §7・2 動的粘弾性 §7・3 一般の模型の動的特性 §7・4 四要素模型の動的特性 §7・5 模型の選択 §7・6 力学的分散 §7・7 換算変数法

第8章 レオロジーと電気回路理論との相似 §8・1 相似性 §8・2 交流理論の基礎 §8・3 電気系と力学系の相似 §8・4 電気系を力学系になおすこと §8・5 回転力学系の場合 §8・6 力学的振動系の定常解 §8・7 二端子回路と四端子回路 §8・8 二, 三の注意

第9章 軟化と硬化 §9・1 内部破壊と復元 §9・2 軟化 §9・3 硬化

第10章 破壊と強度 §10・1 破壊 §10・2 疲労 §10・3 硬度と粘稠度

第Ⅲ部 測定方法

第11章 静的測定法 §11・1 静的方法 §11・2 弾性率 §11・3 粘性率 §11・4 異常粘性 §11・5 塑性 §11・6 静的粘弾性

第12章 動的測定方法 §12・1 総論 §12・2 低周波領域における動的的方法 §12・3 可聴周波領域における動的的方法 §12・4 超音波領域における粘弾性の測定法

第Ⅳ部 物質構造との関連

第13章 気体 §13・1 気体 §13・2 気体の粘性 §13・3 気体の体積弾性率と圧縮率 §13・4 音波と超音波の速度と吸収

第14章 液体 §14・1 液体の粘性 §14・2 気体の粘性と液体の粘性 §14・3 液体の粘性の圧力による変化 §14・4 液体の体積弾性率, および体積粘性率 §14・5 液体混合物の粘度 §14・6 低分子溶液の粘度

第 15 章 コロイド溶液と高分子溶液 § 15·1 サスペンションの粘度 § 15·2 高分子溶液の粘度 § 15·3 異常粘性 § 15·4 粘弾性

第 16 章 固体 § 16·1 固体の弾性および粘弾性 § 16·2 ゴム弾性 § 16·3 二次転移 § 16·4 ゲル § 16·5 固体の体積弾性 § 16·6 強度および破壊

第 17 章 表面レオロジー § 17·1 液面上の薄膜のレオロジー § 17·2 固体面上の薄膜のレオロジー

「ベクトルの合成, スカラー積」, 「速度, 加速度の定義, 運動方程式」, 「複素数の取扱い」, 「常微分方程式の解法, 単振動」の解説から始まるのであるから, 高校程度の数学と物理の知識があれば, レオロジーを学ぶ土台から学び始めることができる。もちろん大学教養程度の物理学と数学を学んでいれば, それに越したことはない。基礎概念を一つずつ学び進み, 数式の誘導も行って, 第Ⅲ部に記載されている「測定結果を弾性率や粘性率に結びつける公式」を導き出すことができたときには, 本当に嬉しかった。努力と忍耐は必要であったが, 私のような凡人にも読み通すことが可能であった。ただし当初目論んでいた「夏休み 2 ヶ月間での読破」は無理で, 春休みにまでずれ込んだような記憶がある。非常に残念なことに, 数式の導出を記したノートは行方不明になってしまっている。

先に記したように, 本学(短大部)の学生諸君にこの書を読むことをお勧めするのには無理があるが, 食品栄養科学部あたりで食品の力学物性の方法論に悩む学生や研究者がいるとすれば, またとない好著であると申し上げておきたい。しかしもう入手が困難な書であろう。復刻を望む次第である。

ここで「大ツルを読破した君は確固たるレオロジーの方法論を身につけたか」と問われると, 実は返答に窮する。私は中川先生の許で学んだにも関わらず, 正真正銘, レオロジーの研究を経験したことがないからである。4 年生に進級して講座配属になった 9 期生 6 名に, 先生は複数の卒業研究テーマをお示しになった。引張圧縮試験器のストレイン・ゲージを利用する「応力緩和測定によるポリ塩化ビニルの熱分解機構の研究」, サンドイッチ型のずりクリープ装置(Williams の装置)による「可塑化ポリ塩化ビニルの力学的性質」, 同軸円筒型のずりの変形から剛性率を求める「ポリビニルアルコール-コンゴレッド水系ゲルの力学的性質」, この 3 つのテーマがまさにレオロジーであった。他には, ゲルの膨潤度を測る「ポリヒドロキシエチルアクリレート-水膨潤ゲルに対する添加塩の影響」, 粘度測定による「ポリメタクリル酸水溶液における添加塩類の効果」および「ポリスチレンスルホン酸水溶液の粘度に及ぼす塩基性染料の影響」であった。当時私は高分子電解質に興味をもっていたので, 最後のテーマを選んだ。毛細管粘度計を使って溶液の流下時間を計る実験であったので, レオロジー測定といえるほどのものではなかった。その後, 水溶性高分子と界面活性剤の相互作用, やがては界面活性剤(両親媒性物質)溶液そのものを, 密度や音速や熱の測定によって研究したので, レオロジ

一についてはその研究結果を講座の談話会などで耳学問するだけであった。研究を実際に行わない者に確固たる方法論が身に付くわけがない、とでもいっておこう。

研究室では一人一人が自分のテーマをもって研究を進めていた。もちろんレオロジーは主流であったが、量子化学的テーマあり、熱力学的テーマありであった。研究室にある装置は、その多くが手造りのものであった。最初にガラス毛细管粘度計を 2 本いただいた記憶がある。のちには流下時間やタイプの異なる粘度計を理学部のガラス工場で作って貰って使用した。大昔のバッテリーの容器であった質の悪いガラス水槽を粘度測定用の恒温槽に仕立てた。細い真鍮の棒の先にネジを切り、その寸法に合わせたナットを 2 個、旋盤を使って作った。攪拌用のプロペラを作って、ナット 2 個の間に挟んで攪拌棒にした。あとはモーターとプーリーを取り付けて攪拌装置は完成した。ガラス蛇管にトルエンと水銀を詰めて白金線を取り付けて、水銀ローリー(レギュレータ)を作った。これと管球を、先輩が作った三極真空管を使ったリレー装置に繋いで恒温槽の温度制御を行った。これが卒業研究の始まりであった。それ以降、二講座にお世話になった 9 年半の間、いやそれ以降も、先生は学問の師であり、人としての師でもあった。本当に多くのことを学び、暖かく接していただいたが、研究テーマに関して先生は指示をなさらなかった。あるときは「指導をしないことが一番の指導である」とも仰った。しかし先生は相当な範囲に広がっている皆の研究テーマについて、いつでも深い内容をもって議論して下さった。先生の教育方針は、自分で研究テーマをたてて、それを自分で実行して、自分で成果をまとめて発表する、そういう研究者の育成だったように思う。大ツルは、大学生にとってはほとんど自明の素養の上に、物理学と数学の基礎力を積み重ねさせ、物質の学の手ほどきをしながら、レオロジーの方法論を学ばせる。「指導をしないことが一番の指導である」と仰いながらも、ことレオロジーに関してはその指導書をお書きになったのだと思う。

この教育方針は、おそらく先生の学風の反映でもあったのではないかと思われる。自分を自分で(もちろん周りの力を借りながら)作ることはということとはとても魅力的であるが、私のような不出来な者には、時間がかかるという難点もある。博士課程は 3 年で単位取得退学したが、学位をいただくまでには、さらに日本学術振興会の奨励研究員 1 年 + 研究生 2 年の 3 年を要した。敬愛する先輩が高精度の密度と音速を測定する装置を完成させて下さらなければ、もっと時間がかかったに違いない。

昭和 54 年の夏、本学の前身である静岡女子短期大学への着任が決まったとき、先生は「電気とガスと水道がきていれば行って頑張りなさい」と仰った。君はそこで独り立ちして歩き始めなさい、という励みしだったと思う。着任先には電気ガス水道はもちろんきていたし、ドラフトのついた学生実験室と研究室があり、基本的な実験装置(化学天秤、蒸留水や脱イオン水の製造装置、電気定温乾燥機、電気炉、真空乾燥器と真空ポンプ、学生実験用の pH 計など)や一通りの実験器具も揃えられていた。大学教養課程の化学実験を行うのに足りないものはいえ、紫外可視分光器くらいであった。これらの装置・器具は、学生実験に使用すること

はもちろんであるが、研究実験のベースになるものでもあった。そして最大の幸運は、化学を担当するもう一人の教員の存在と彼女との協働であった。

研究用の機器はなかった。金魚用の水槽を買ってきて、 0.01°C の温度制御ができる恒温槽を組んだ。これでガラス毛细管粘度計を使うことができるようになった。そしてその恒温水を二重ガラス管容器に循環させて電位差滴定を行った。ここからわが短大における私の研究が始まった。まさに二講座で研究を始めたときと同じではないか。自分がそのように育てられていたことに感謝した。私が大学人として歩むことができたのは、北海道大学、静岡女子短期大学、静岡県立大学短期大学部の存在はもちろんのことであるが、先生と諸先輩、そして30年を超えて協働してくれた教員のお蔭である。私はレオロジーを専門としなかったが、大ツルの学風は私の40余年にわたる大学生活における底流を形成しているに違いない。

大ツルのまえがきに『そこで本書で果たしえなかったことを果たすために、すでに別の一書の準備がはじめられている』とあるその書は、小ツル＝岩波全書のレオロジー(初版1960, 第2版1978)である。初版のまえがきには、『本書では、諸物質のレオロジーに重点をおいた。レオロジーの初学者およびレオロジーに興味をもつ一般技術者にたいしては、本書は簡便な教科書、解説書である。必要な諸概念をまんべんなく説明すると同時にレオロジーにたいする素朴な興味をよびおこすように努めた。レオロジーの専門家、研究者にたいしては、必要な事項や表式の備忘録であると同時に愉快的読み物となるように努めた。』とある。「生物レオロジー」と「乱流と乱流抑制」の二章が加えられた第2版を、中川先生の独特な字体のサイン入りで頂戴したのは少し前のことのように思われるが、それから三十余年が経過しているのだ。先生はその前書きに『今度こそこの第2版が私の小さな、小さな墓標となりそうである』と書かれたが、その後、「私の科学方法序説(蒼樹書房, 1978)」、「氷・水・水じょう気(岩波書店 算数と理科の本, 1980)」、「流れる固体(岩波書店 岩波科学の本, 1981)」、「ゴム物語(大月書店 科学全書, 1984)」、「ラヴオアジェ(清水書院 Century books, 1991)」を上梓された。このうち、「流れる固体」は『中学生、高校生を主要な読者として書かれている』レオロジーの素晴らしい入門書、一般書であると同時に、レオロジーの写真集でもある。ハードカバーには、加熱処理した亜麻仁油が回転するガラス管の内外で上に押し上げられているワイセンベルク効果のカラー写真、口絵にはダイラタンシーや、はさみで切られて縮む液体や、絹糸を出しているカイコの写真が掲載され、本文中の至るところにレオロジーの実験写真と図や挿絵がちりばめられている。専門家をも満足させる写真集であろう。これは本学の学生に読んで貰いたい一冊である。書庫に一冊所蔵されているので(423.8 N32)、是非手にとってご覧頂きたい。かつて静岡女子短期大学の文学科だったか本学の文化教養学科だったか、その化学の講義で輪読書としたことがある。そのときすでに岩波書店では品切れ状態に近く10冊ほどの注文に応じきれず、やむなく中川先生の書齋にあった数冊をご都合して頂いたことがある。「私のもう一冊」としてお薦め申し上げる。