
〔書評〕

「地震波動論」

斎藤 正徳 著

(2009 年 7 月 27 日東京大学出版会発行; 全 539 ページ;
ISBN 978-4-13-060754-4)

三ヶ田 均*

斎藤正徳先生による、地震波動の理論をまとめた良書が出版され、はや 2 年が経過した。先生が半生を送られた大学の教員時代の内容がこれほどまでの内容であることを知るに至り、筆者には日頃の授業の大事さを思い知る絶好の機会となった。平成 23 年春期の第 124 回物理探査学会学術講演会では、本書を用いて境界積分法問題を解いた学生である岡本京祐君など拙研究室の学生一同を先生にご紹介ご挨拶をさせたところ、斎藤先生は非常に喜ばれ、「君たちは僕の孫弟子である」旨のご発言を学生に対し戴くことができた。先ず、筆者がとても著者の足下にも及ばぬことを重々理解していること、本書が学生の研究に役立っていること、そして極めて光栄に思われる有り難いご発言に筆者が感極まってしまったことを記載したい。

筆者が東京大学理学部地球物理学科および理学系研究科地球物理学課程（当時は専攻ではなく課程と呼ばれていた）に在籍していた約 30 年前、斎藤先生の講義をそれぞれ 1 学期ずつ合計 2 学期受講することができたと記憶している。学部・大学院を通じ好きだった授業に、有馬朗人先生の「物理数学」、久保亮五先生の「統計力学」があったが、それ以上に心酔したのが斎藤先生の授業であった。その学部時代、朝 8 時から始まる授業（東京大学理学部の授業は 1 コマ 2 時間であった）にあらうことが遅刻し、2 回立たせられた。その際に言い渡された言葉は「教える側が時間通り来ているのに、教わる側が遅れるとは何事か。暫く立っておれ。」というものであった。当時から素直であった筆者の性格もあり、過敏性大腸炎が理由ではあったが、本当に仰せの通りと感じ、1 回目は教室内で、2 回目は廊下に立つことになった。正確に記憶していないが、地球物理学特論といったタイトルの講義（学部と大学院で、大学院が 2 文字だけ多いタイトル）であったと記憶している。斎藤先生は、それ程真剣に講義を進められていたのである。本書の頁を進める間、本書にある数式が、当時黒板に書かれた斎藤先生の白い字として蘇ってくるようなノスタルジックな感情を抑え切れなかった。斎藤先生の授業は、地球物理学の現象と

その数学的な概念を丹念に説明される高い内容であり、当時斎藤先生がお話しされた注意点を聞き取って記載していた筆者のノートの書き込みと同一内容の文章が本書の随所に散見される。数学的内容も多く、実は大学の教養時代に「捨てた」筈の線形代数学、解析学がいかに物理学にとり重要であったかを感じさせる内容に他ならなかったことは、真に幸であった。廊下に立たせられた時間（小一時間）の講義を受けることができなかったのは今でも残念であるが、自分のせいであるし、その内容は幸いにも本書で補えることも確認できた。正に、大学・大学院の講義内容を反映した貴重な教科書である。斎藤先生の授業は、重要な部分が口頭で教授されることも多く、実は授業中聞き逃さないよう耳を傾けておく必要があった。この点、本書では大事な部分も全て活字となっており、非常に役立つことは間違いない。

さて、本書は弾性流体（S 波の存在しない弾性体）における波動方程式から始まり、走時曲線、弾性体の運動方程式、と第 1~3 章の導入部分が、過去のこの分野の教科書（佐藤, 1978）とは異なっている。即ち、ある程度波動論についての基礎をある程度修得済と仮定している佐藤泰夫先生の教科書に比較し、地震学の初歩である波動論から導入する体系的学習が可能となっている。第 3~5 章では、扱う基礎的な方程式は他の教科書と同一であるが、実は「ベクトルと行列」について、応力を用いたさりげない解説がなされている。また、弾性体の運動方程式に必要な、応力、歪、変位の関係を解くために、互いの関係が必要であることが記載されている。斎藤先生の教授の方法には、常に「なぜこれが必要か」という説明が加えられる（それも口頭で）ことが多く、理論の理解に非常に役立ったが、本書においてもこの手法が実現されているのである。第 4 章では、P 波と SV 波のカップリングから平面波の反射・屈折問題を導入し、第 6 章におけるレーリー波の議論に繋がる構成も特徴的である。これによりレーリー波が、P-SV 波であることが理解できるからである。表面波の位相速度や群速度の推定法についても、やはりその方法に関する記載があるなど、表面波に関する研究を行った人間でなければ気付かない部分の説明に注意が払われている。第 7 章から第 10 章にかけては、様々な形状の媒質中およびその表面に存在する波動と固有振動、2 次元問題である円筒波、ラムの問題、3 次元問題である球面波と議論が徐々に高度化する構成である。更に、ある周波数に関する単色解を揃えて逆フーリエ変換により厳密解を推定するのではなく、Aki and Richards (1980) にも解説のある Cagniard-de Hoop の方法を用い時間領域解を直接推定する解法についても解説している。第 11 章からは非斉次項を含む波動方程式を解くため斉次方程式への震源の導入が始まり、第 12 章では「弾性波動論」より詳しく水平成層構造に対するハスケルの方法、第 13 章では水平成層構造に関

する正規モード解についての議論となる。第14章では、直接非斉次スカラー波動方程式を解くためのグリーン関数法が導入される。第15章ではグリーン関数を用いて弾性体に対する点転位からの波動の発生を、第16章では複素積分の留数に注目するWKB法を用いて扱い、第17章で更に分岐線沿いの積分を実体波まで厳密に扱う一般化および反射率法を導入した後、第18章で地球のような球対称構造での波動伝播、そして第19章で地球の自由振動、第20章で重力および自転の存在下での自由振動を扱っている。昔の筆者のノートには、「自転により縮退が解ける」という記載があり、第20章531頁に同一の記載があることを発見した時は、ノスタルジーの極を迎えるに至ったことは言うまでもない。この頁に至る展開には、地球が自由振動するまでを扱う弾性論の展開として論理性が途切れない。Chapmanが、その教科書(Chapman, 2004)の中で漸近波線理論、WKB法を経由し一般化された波線理論をほぼゴールとして書き著しているのに対し、本書は更に先の地球自由振動をゴールとしているところが、Chapmanの教科書と大きく異なる点である。

斎藤正徳先生の物理探査に関する論文としては、漸近式デジタル・フィルター(斎藤, 1978)、最小二乗法(斎藤, 1983a, 1983b)、そしてHilbert変換(Saito, 1974)などがあり、当時筆者も貪り読んだことが記憶に新しい。特に漸近式デジタル・フィルター、最小二乗法に関する論文にはFORTRAN(当時のFORTRAN-IV 東京大学大型計算機センター拡張)のプログラムが印刷されており、OCRが郵政省の郵便番号読み取り機程度しか存在しなかった当時、筆者の周囲の至るところで、斎藤先生の論文に印刷されたプログラムを穿孔機やTSS端末といったクラシックな機械を使った打ち込みや、打ち込みミスなどのバグ出しが盛んに行われていた。当時の斎藤先生の授業では、本書に記載された内容の一部に加え、当時の最先端の研究であった海外の物理探査の教科書(Claerbout, 1976)の内容迄が網羅されていたのである。更に時間を遡ると、竹内均先生、藤井直之先生、本書の著者である斎藤正徳先生、浜野洋三先生、リアルタイム地震学の菊地正幸先生、地震予知連絡会長の島崎邦彦先生、竹内治男先生、松井孝典先生、横倉隆伸先生、石戸恒雄先生などの東京大学理学部地球物理学科地球内部物理学研究室(略称竹内研)チームと石油資源開発株式会社物理探査チームで、物理探査技術の勉強会が開催されていたことがあった。石油資源開発株式会社側のチームからは、その後石井吉徳先生(東京大学工学部)、芦田譲先生(京都大学工学部)など大学に異動された方だけでなく、杉山昭之助氏、黒岩敦氏、山崎喬氏、佐野正春氏、朝倉夏雄氏、井川猛氏、中原敏明氏、橋田功氏、岩城剛雄氏、中島勝一氏、高橋整一氏、青木豊氏、内田真人氏、熊井基氏、太田陽一氏など我が国の物理探査を支え

て来られた方々のお名前が窺える。1967~71年は「地震探鉱記録デジタル処理の基礎的研究」、1972~77年は「物理探鉱データ処理の基礎的研究」と名付けられたこの勉強会における議論から上述の斎藤先生の論文が産み出されたのであろうと考えることができるだけでなく、勉強会がいかに有意義な会であったかが理解できる。産学連携が謳われて久しいが、この勉強会のように産学で物理探査を議論した結果、論文が産み出され、人材の流動化の象徴のように産から学へ人材を供給する結果となったことは、この産学連携がいかに成功裏に進められたかを物語っている。また、地球の自由振動を研究されていた斎藤先生へも、物理探査の理論や技術に関する造詣を深められることに繋がったのではないかと、また、こうした物理探査関係者との交流で培われた知識が本書には反映されているのではないかと感じられてならない。

物理探査の世界では、時々、産学間で能力の高い人材の異動がある。例えば、静補正に最小二乗法問題(Wiggins, *et al.*, 1976)を導入したRalph Wiggins氏、著名な地震学者であり理論地震学の教科書(Chapman, 2004)を著したChris Chapman氏、最近では地震波干渉法で有名なAndrey V. Bakulin氏およびGerard T. Schuster氏が石油系企業や石油企業関連の大学・研究所に移籍している。昔話であるが、斎藤先生は石油系企業からの異動を打診された事実も、先生の国際的な評価の高さを裏付ける話の一つである。1990年に物理探査の世界を去ったRalph Wiggins氏や台湾の近代地震学の祖というべき国立中央大学Yibin Zhai先生など、斎藤正徳先生のマサチューセッツ工科大学での在外研究員時代のご友人から直接、著者への賛辞をお聞きしたこともあった。斎藤先生は「大学という自由な環境で教育研究に携わりたい」旨のご発言をされており、本書は教育研究に身を投じられた国際的評価の高い教育者・研究者の手により著された貴重な教科書であると考えることができる。地下を知ることは、実は大学教養以降の数学を駆使することになるため、上述の当研究室学生のように、理論構築などに困った際にも役立つことも明らかである。これは、本書が体系立った理論の構築過程を扱っているからである。その昔、有馬先生は授業において「数学公式集I, II, III」(森口ほか, 1956, 1957, 1960)を座右の銘とすることを奨められた。本稿は授業でもなく、筆者の能力から考え相当な不遜(恩師の本の書評を書くことも実は不遜)ではあるが、興味のある読者に座右の銘としては是非お奨めしたい。また、最後ではあるが、学部4年生で授業中に立たされた経験は貴重であると自負していることをお伝えしたい。但し出版後2年も経過してから寄せるこの書評には、「書評に2年もかかるとは何事か。暫く立っておれ」とお叱りを頂戴しそうであるが、勿論30年前と同様に甘んじてお受けしたい。

謝 辞

環境エネルギー・農林業ネットワークの芦田譲理事長には、石油資源開発株式会社と東京大学の間の勉強会についての報告書の情報を戴いた。京都大学工学研究科亀井志織氏には、原稿の不備につきご指摘戴いた。物理探査学会の匿名査読者には、ご丁寧な原稿のご査読を戴いた。以上の皆さまに、厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- Aki, K. and Richards, P.G. (1980): *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, W.H. Freeman and Co., 932pp.
- Chapman, C.H. (2004): *Fundamentals of Seismic Wave Propagation*, Cambridge University Press, 608pp.
- Claerbout, J.F. (1976): *Fundamentals of Geophysical Data Processing with applications to petroleum prospecting*, McGraw-Hill, Inc., 274pp (絶版).
- 森口繁・宇田川銑久・一松信 (1956): 数学公式集 I—微分積分・平面曲線—, 岩波書店, 318 pp.
- ・—・— (1957): 数学公式集 II—級数・フーリエ解析—, 岩波書店, 340 pp.
- ・—・— (1960): 数学公式集 III—特殊関数—, 岩波書店, 319 pp.
- Saito, M. (1974): Hilbert transforms for sampled data, *J. Phys. Earth*, **22**, 313-324.
- 斎藤正徳 (1978): 漸化式デジタル・フィルターの自動設計, 物理探査, **32**, 240-263.
- 斎藤正徳 (1983a): 最小二乗法の計算法, 物理探査, **36** (2), 24-38.
- 斎藤正徳 (1983b): 特異値分解と最小二乗法, 物理探査, **36** (3), 146-158.
- 佐藤泰夫 (1978): 弾性波動論, 岩波書店, 454pp.
- Wiggins, R. A., Lerner, K. L., Wisecup, R. D. (1976): Residual Statics Analysis as a General Linear Inverse Problem, *Geophysics*, **41** (5), 922-938.

2011年12月2日原稿受付; 2011年12月9日受理
 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂4
