

共鳴動力学的 X 線回折の出版について

深町 共榮

この度、Springer から、固体物理科学シリーズ 208 巻として、「共鳴動力学的 X 線回折」(英文、深町共榮、川村隆明共著)を、令和 7 年 9 月 1 日に出版した。

本書は、著者らが 50 年余り以前から、共同研究をして来た成果をまとめたものである。当時、深町は、東京大学物性研究所で技官をしており(1964 年から 1976 年)、川村は、早稲田大学大学院生であつた。二人共、物性研究所の三宅静雄教授から動力学的回折について多くの事柄を学んだ。X 線は、レントゲン(Röntgen、1901 年にノーベル賞)により 1895 年に発見され、その透過能が高く、人体内部が見られることから医学にいち早く利用された。しかし、その正体が不明なことから、X 線と呼ばれることになる。発見から 17 年を経た 1912 年、ラウエ(Laue)等の実験で X 線が結晶によって回折し、X 線は 0.1nm ほどの光よりもはるかに短い波長の電磁波であることが証明された(1914 年にノーベル賞)。ラウエの実験の翌年、ブラッグ(Bragg)親子も回折実験を行い、岩塩の結晶構造を決定し(1915 年にノーベル賞)、また寺田虎彦も追試に成功し論文発表した(ノーベル賞候補になったとも聞く)。西川正治は、寺田の研究を引き継ぎ、X 線及び電子線回折の研究で世界的に貢献をしている。ラウエ及びブラッグの回折理論は、格子面で X 線が 1 回散乱すると仮定した。実在の結晶の内部には多くの亀裂が入っており、微結晶に分かれているため、この仮定が良い近似となっている(運動学的回折理論)。しかし、この理論は、エネルギー保存則が成立せず、X 線光学としては不完全な理論である。しかし、格子欠陥が全くない結晶(完全結晶)においては、結晶格子面間での多重散乱がおこる。エバルド(Ewald)は 1913 年からこの問題に取り組み、見事な理論を発表した(これを動力学的回折理論と呼ぶ、エネルギー保存則を満足)。ところが、天然の結晶では、完全結晶と言えるほど完全性の高い結晶が見当たらず、エバルドが予測した現象が証明できず、30 年余り研究は停滞した。第 2 次大戦後、トランジスターの発明において、ゲルマニウムやシリコンのように人工的に高純度で完全性の高い結晶が得られるようになり、エバルドの予測した干渉縞が観測された。エバルド理論は、結晶の完全性の評価に役立ち、半導体産業の発展と相まって著しく発展して今日に至っている。

X 線は電子により散乱し(トムソン散乱)、その散乱因子は実数である。ところで原子に束縛された電子による散乱では共鳴散乱を伴い、その散乱因子は、異常散乱因子と呼ばれ、複素数となる。共鳴散乱を含むと、極性結晶の極性が決められる。このことに着目した西川らは、X 線回折で閃亜鉛結晶の極性を世界で先駆けて決定した(1928 年)。西川の教えを受けた三宅は、1970 年頃、退官目前であつたが、研究室の談話会で、西川らの研究を紹介し、現在、X 線共鳴散乱の基礎研究が停滞していることに危惧を示した。三宅の退官後、深町は、コンプトン散乱の研究に使用していた半導体 X 線検出器(SSD)付き X 線回折計[1]が、共鳴散乱の研究に活用できる事に気が付き、共鳴散乱の精密測定に成功し、アムステルダムで開催された第 10 回国際結晶連合の会議(1975 年)で発表し、また東大で学位を得た。アム

ステルダムで私の研究を知ったスタンフォード大学の研究者から、スタンフォード大学にある線形加速器研究所 (SLAC) 所属の放射光施設 (SSRL) からの X 線を用いて実験をするように手紙が届いた。放射光からの X 線の強度は、X 線管球と比較し数万倍もあり、この当時、放射光が利用できる施設は、スタンフォード大学にほぼ限られていた。著者らは、1976 年夏、私費で SSRL へ向かい、共鳴散乱を伴う動力的回折の実験を行った[2]。日本の放射光施設も 1980 年代から利用できるようになったが、我々が共鳴散乱を伴う動力的回折の精密実験ができるようになったのは、2000 年代になってからである。また、著者らによる共鳴動力的回折の理論的研究は 1990 年代になって体制が整い、実験のほとんどは、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の放射光施設 (フォトンファクトリ、略して PF) で行った。

従来の動力的回折理論は、トムソン散乱が主体で、共鳴散乱は小さいものとし、補正項として扱われていた。しかし放射光は、連続スペクトルをもつことから、束縛電子の共鳴点 (吸収端) に同調でき、トムソン散乱と共鳴散乱がほぼ同程度となり、かつまた共鳴散乱のみの回折も取り出せる。よって、従来の理論の適用外であった新しい現象が期待できる。本書は、これら新しい現象を理論的に導き、実験で検証した結果を述べている。

本書 (Resonant Dynamical X-ray Diffraction) の構成は、

- 第1章 序論
- 第2章 微結晶からの X 線回折
- 第3章 X 線共鳴散乱
- 第4章 X 線の光学的特性
- 第5章 X 線動力的回折における基礎方程式
- 第6章 非吸収性結晶の動力的回折理論
- 第7章 共鳴散乱と動力的回折理論
- 第8章 有限スペクトル幅をもつ X 線波束による動力的回折理論
- 第9章 僅かに歪んだ結晶における動力的回折

となっている (315 頁)。

動力的回折については、三宅による「X 線回折」(朝倉書店、1969 年) や「動力的回折理論」(アグネ技術センター、固体物理の初等固体物理講座、1973 年から 74 年) において丁寧に述べられているが、いずれも日本語のため、知名度は国内に限られる。著者らは、1990 年代、表題のモノグラフ (専門書) を出版する機会が得られるならば英文でと決め、今日それが実現できた。また、Springer の固体物理科学シリーズに加えられたことで、すでに当シリーズを揃えている世界中の図書館や研究所などに配布されることとなり、その任の重さを痛感している。幸い、図がカラーとなり、読みやすく、読者の負担が減り、理解が深まるものと思っている。

本書は、共鳴動力的 X 線回折の入門書であり、今後、この研究分野は、さらに発展するものと期待される

文献

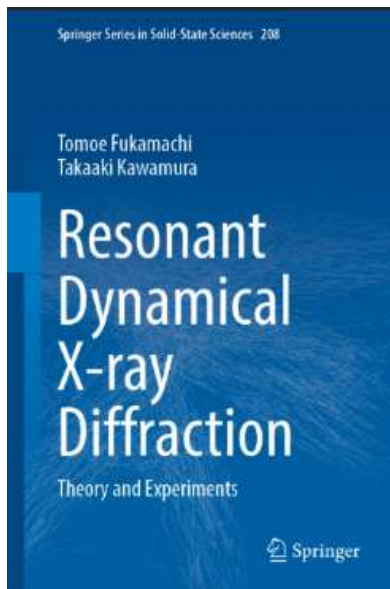
- [1] 深町共榮：「エネルギー分散型 X 線分析、半導体検出器の使い方」（合志陽一、佐藤公隆編）、学会出版セッター、日本分光学会測定法シリーズ 18、（1989 年）P163～207。
- [2] 深町共榮、川村隆明：「Stanford 大学のシンクロトロン放射光による X 線回折実験の経験」、日本物理学会誌 32 巻（1977 年）P444～447。
- （三宅教授については、津村節子著「茜色の戦記」の三島博士のモデルになっている）

Springer Series in Solid-State Science Vol. 208

Resonant Dynamical X-ray Diffraction

Theory and Experiments

T. Fukamachi & T. Kawamura



線型加速器と放射光リング（スタンフォード大学、1970年代）線型加速器は約 3 Km（8GeV まで加速）