

日本における X 線金属結晶組織学の あけぼの

1. 暗闇に光輝くラウエ映画を見た寺田寅彦

松尾宗次*

知られざる寺田寅彦の業績

「日本における X 線結晶組織学のあけぼの」を飾る人物は寺田寅彦(図 1)において他にはない。しかし多くの読者の方は、何故かと疑問を抱かれるであろう。寅彦は随筆家として良く知られてはいるが、日本における X 線結晶学発展の種をまいた功績を知る人は少ない。物理学者としての寺田には、小屋がけの趣味の物理学という半ば軽蔑の目はあっても、正統の物理学で挙げた彼の輝かしい業績にはほとんど目が向いていない。

最近話題のカオス、フラクタル、フジィそして複雑系などに関連して寺田寅彦の科学が再評価され、寺田は生まれるのが半世紀早過ぎたとも言われることもある。それとともに彼が物理学本流の研究においてノーベル賞級の業績をあげていることも、改めて知られていいのではないだろうか。さらに寺田に誘われて X 線回折の研究に導かれた西川正治は、独創的な手法によって結晶構造と物質組織解析への X 線回折法の応用の道を拓き、国内外に多くの研究者を育てた。アイザック・ニュートンの「巨人の肩の上」という言葉のように、多くの研究は先人たちの業績に負っている。今私たちが材料研究の重要な手法として活用する X 線結晶学の基礎と応用の成果は、寺田寅彦と西川正治によって種が播かれ育てられた大樹の枝に実っていることを改めて認識したい。

私たちが X 線回折を行う時の必須ガイドはブラッグの法則である。寺田寅彦の業績は、ほぼ同時期に全く独立にブラッグの法則と同等の発見をし、X 線回折で結晶を観ることを始めたことである。けれども今彼の仕事そしてその意義を



図 1 寺田寅彦の肖像切手。

知る人は少ない。一つには寺田が X 線回折の研究を二年足らずで止めさらにその後も自分の業績について触れていないことである。他の理由は、寺田の独特の実験方法と解釈に対して X 線回折の発見者であるラウエなど一部の人たちによる高い評価はあったとはいえ、国際的にも無視されていたことである。このような状況を指摘した一つの例を挙げておく。

広く結晶学の教科書として用いられた『結晶学概論』(岩波書店)は W. L. Bragg の名著“The Crystalline State: A General Survey”の訳書である。その訳者永宮健夫は訳者序文において、この本は「専門家といえども手離すことのできない類の本である」と高く評価しながらも、日本人研究者の扱いに不満を述べている。その序文はそのまま寺田寅彦を始祖とする日本での研究の歴史の簡潔な要約ともなっており、ここに一部を引用する。

「本書にはわが国の研究者の名が、当然現れるべきであるにもかかわらず、菊池正士博士以外には全く現れていない。日本の X 線結晶学者は古くから多くの先駆的研

* 株式会社日鉄技術情報センター参与(〒102-0083 東京都千代田区麹町1-6)

A History of X-ray Metallography in Japan—1. Torahiko Terada; Munetsugu Matsuo (Japan Technical Information Service, Tokyo)

Keywords: X-ray diffraction, X-ray reflection by crystals, diffraction core, fluorescent screen, Laue diagram, deformed crystal, structure analysis

1998年7月7日受理

究によってこの方面に寄与しているのであるから、この点について訳者は理解に苦しむ。日本の X 線結晶学の研究は Laue の発見につづいて故寺田寅彦博士によって始められ当時の不利な環境にもかかわらず、博士は Bragg の反射と同じものを同じ 1913 年に発見しておられる。つづいて故西川正治先生とその門下の研究者は多方面にわたる研究を開始し、1913-4 年には既に繊維状、層状および粒状構造の美しい X 線回折写真が得られ、1915 年には当時として最も複雑な構造であるスピネル構造の解析が、先生により始めての空間群の導入によって行われ、1920 年には西川-浅原により加工金属の研究がなされるなど、世界に先んじた多くの仕事がなされたのである……わが国が地理的にも歴史的にも欧米と離れていたことは、われわれの研究を欧米人から遠いものとしていただろう」。

日本学士院恩賜賞のラウエ映画

寺田寅彦は「ラウエ映画の実験方法及其説明に関する方法」の功績により 1917 年日本学士院恩賜賞を授けられた。受賞理由に寺田の業績が簡潔に述べられている。

「レントゲン」線の発見ありてより其本性に関する議論は、区々にして帰着するところなかりしが遂に 1912 年 6 月及 7 月ラウエ氏がミュンヘン学士院に提供したる短編の論文に於いて「レントゲン」は普通光線に均しきも只其波長が可視光線の約 5000 分に一程度のものなることを確定したり。而して此発見は遂に結晶体に於ける原子の配置が、ブラヴェイの論ぜし空間格子に従って排列せることを明らかにして、従来率ね不可能なるべしとの予想を以て迎へられし、分子内に於ける原子配置を精査し得る方法を暗示し、茲に物理学結晶学等に於いて新なる研究の閥門を開き此等の学問に一時期を画するに至れり。

ラウエ氏の論文が本邦に到着せしは大正元年 10 月下旬にして、寺田君は其重要なることを認め、直に其攷究に取懸らんとせしも、適当なる「レントゲン」管なく、又之を照す発電装置も亦欠乏せしが、百方奔走して、不完全ながらも発電機を利用して結晶体の「ラウエ」映画を得るに至れり。

当初結晶軸を標線として撮影ありしが、数時間の露出を経たる後はじめて映画を得るにより、適応する位置を見出すに消費する時間頗る多かりき。しかるに寺田君は、Laue 氏およびその弟子が使用せし如き細孔を用いずして、相当なる大きさに孔を穿つときは、ラウエ映画を蛍光板上にうけて肉眼をもって容易に結晶体の位置を規準し得べきことを発明し、この試験をして意外に簡約ならしめたり。

是れ独り試験を容易ならしめたるのみならず、又 Laue 氏が報告するところによれば、氏が想像せし一定波長の輻射に限られず、また連続的波長の輻射あることを示したるものなり。

ラウエ氏が最初論ぜしは、結晶体内の原子排列が「レントゲン線」に対し廻折格子の代用をなすべきにありて、その議論は適中せりと雖も、回折現象は甚だ複雑にして之を解析すること難渋なるに依り、寺田君は試験の結果、原子排列面

の幾何学的関係を詳細に論ずるには、必ずしも此根本主義に帰着するを要せず、結晶体内に存在する幾多の特有なる線に相交わる諸平面に於ける反射を以て、簡単にラウエ映画は構成されるものと考え得ることを、種々の物質につき試験推論し、或いはラウエ氏が回折により、解析的迂遠なる経路を辿り、原子の排列を詳にしたる方法を一新して、幾何学的に空間格子の状況を詳にするを得たり。この方法は英国にてブラッグ氏が想到したるものと暗合し、ほとんど同時に本邦においても亦寺田君が同一なる結果に到達したるは偶然なるというべし。

ラウエ氏の大発見ありてより、各国の物理学者は斯の方面に従事したるも、其実験方法並に説明方法に於いてはラウエ氏の示したるものを踏襲したるに係はらず、寺田君は率先して此研究を本邦に於いて創施し、其試験方法に於いて又其説明方法に於いても独創的方法を考案して、欧州に於けると駢行し得べき成果を得たるは、大に称揚すべきものにして功績の顯著なるを認む」。

ここで映画とは現在のムービーとは異なり、ラウエ斑点の映像を表す。だがその言葉は寺田の実験方法の真骨頂を示す。結晶を動かしながら回折斑点の動きを蛍光板上で直接に目で観察するまさに映画と呼ばれるにふさわしい手法であった。寺田の実験内容に立ち入る前に、X 線の発見からの経緯を見ておきたい。

X 線とその回折現象の発見

寺田寅彦はレントゲンによる X 線の発見に大きな興味を示した。当時高知県立尋常中学校五年生であった彼は雑誌『東洋学藝雑誌』で読み、その感激を 1896 (明治 29) 年 4 月 5 日の日記に次のように綴っている。

四月五日 日 雨 午後……帰宅センニ東洋学藝雑誌百七拾四號及中外英字新聞研究録来り居り即チ先ツ学藝雑誌ヲ見ルニ卷首第一ニ人目ヲ驚カスニ足ルハ今回獨逸ナル Röntgen 氏ノ發明ニカカル X 放射線ヲ応用シテ氏ガ自カラノ手ノ骨肉ヲ分明ニ撮寫セルモノノ縮寫寫真板ナリ此ノ發明ニカカル詳細ノ事ハ同誌ヲ讀ンデ知ルベシ。

この時寺田が読んだのは、ベルリン留学中の長岡半太郎が Röntgen の X 線発見を報じた記事である。この X 線の発見からその干渉現象発見に至る十数年の間、X 線の本性に関して波動説と粒子説の論争が続いた。ブラッグ法則として名を残す Bragg 父子の父の方 William Henry Bragg は X 線粒子説の主導者の一人であった。

Max von Laue は 1909 年から X 線発見者 Röntgen と同じドイツミュンヘン大学で講師を務めていた。当時、結晶体が原子の三次元立体空間格子である事実は、Laue を含め物理学者の間で常識ではなくて仮説に過ぎなかった。結晶内の原子の三次元格子構造の概念は、Laue 自身が語っているように、P. P. Ewald から教えられた。後にエワルト球を提唱し世界の X 線結晶学をリードする Ewald は、電磁波との相互作用から結晶の光学的性質を導き出す課題の学位請求論文完成のために Laue に助言を求めた。二人の話し合いは Laue

に幸いた。彼は結晶が確かに三次元立体格子らしいことを知った。さらに格子間隔が当時予想されていた X 線の波長に近いこともわかった。Laue は回折現象の起こる可能性を直観し、Röntgen の教室にいた大学院学生 Knipping の手を借りて試してみるようになった。硫酸銅の結晶から期待された回折斑点が得られた。

この実験事実と合わせて Laue は三次元格子による波動の回折理論を1912年6月8日にドイツ物理学会に報告した。その Laue らの論文を寺田寅彦が目にしたのは1912年10月頃と考えられている。中学時代に X 線発見を知った時の感激が、直ちに Laue の結果追試へと敏感に反応させたのであろう。当時東京大学理学部助教授であった彼は早速自分一人で実験を始めた。物理学教室にあった実験装置を使ったが、一週間露出しても乾板には斑点が現れない。そこで医学部から診察用 X 線装置を借りて装置を組み上げた。その装置で寺田は大胆にもラウエ斑点を直接目で見ることを試みた。その独特な方法がラウエ回折図形の本質を浮かび上げさせ、新しい解釈を可能にした。

寺田の X 線回折実験と解釈

X 線ビームを太くすると数分程度でラウエ写真が撮れるようになり、さらに 1 cm 径程にすると回折像が蛍光板上で直接観察できた。この観察から、彼はラウエ斑点がいくつもの楕円に沿って配列していることに気付いた。それら楕円は入射線に相当する斑点を含む。さらに興味深いのは結晶を回転させるにつれてラウエ斑点群が規則的に変化して楕円が入射線斑点から湧き出したり吸い込まれ、楕円の形が伸び縮みする。この動きはあたかも結晶内に固定された鏡があり、それによって反射された光が描く模様と一致すると直感したと思われる。言い換えれば楕円上の一連の斑点は一つの晶帯に属する結晶格子面つまり「原子の網平面からの反射」によってつくられると考えた。寺田寅彦独特の簡単な方法を工夫して自分自身の目で確かめるやり方が生んだ見事な成果である。

この観察について寺田は Nature 誌に二つの速報を提出した。投稿日付は1913年3月18日と4月6日、掲載号は4月10日(図2)と5月1日号であった。この二つの記事をまとめた論文“On Transmission of X-rays through Crystals”は1913年5月3日に数学物理学会で口頭発表され、同学会の Proc. Tokyo Math.-Phys. Soc. に間もなく掲載された。

寺田が観察した結晶体は岩塩、螢石、石英、雲母、石膏、ホウ砂、電気石、緑簾石、緑泥石、蔗糖などであった。ただ単に観察だけでなく、ブンゼン炎で加熱も試みている。さらに結晶毎の斑点の特徴また同一結晶についても個々のラウエ斑点の形状の差違に注意している。これらの観察結果から、ラウエ図形は原子網平面による X 線の反射という考えに至ったことを説明し、その例として寺田は Laue らの論文に掲載されていた閃亜鉛鉱(ZnS)の回折写真を反射という観点にもとづいて図3のように解析してみせた。ラウエの実験は結晶内の原子配列を求める意図はなく、X 線の性質を明らかにするためになされた。この解析で初めて回折像と結晶内部

X-Rays and Crystals.

ON repeating the experiments of Laue, Friedrichs, and Knipping on the transmission of X-rays through crystals, I have found that the transmitted rays may easily be made visible by means of an ordinary fluorescent screen, if we use a sufficiently large pencil of rays, and the crystals are sufficiently transparent to the incident ray.

The X-ray tube used was a Müller-tube of 20 cm. diameter, with water-cooling; the current was supplied by a Toepler influence machine with sixty plates. The diameter of the pencil of rays was 0.5-1.0 cm. The crystals examined were borax, alum, mica, fluor-spar, rock-salt, rock-crystal, cane-sugar, &c., the thickness varying from 4 mm. to 1 cm. The transmitted rays show numerous detached fluorescent spots of elongated shape. If we rotate the crystal about an axis perpendicular to the incident ray, the spots move generally across the central spot caused by the incident ray, but we may choose the axis of rotation such that some of these spots remain stationary while the crystal is rotated.

Groups of detached pencils are arranged, as it were, on circular cones, which always touch the incident pencil, and the aperture of which varies continuously with the inclination of the crystal. With a plate of mica, a spot was observed which is situated as if it were the reflected image of the incident ray; but it is doubtful whether we may call it "reflected," because other spots are also seen on the same side of the plate, deviating considerably from the "image." Further experiments in this direction are in progress.

T. TERADA.

Physical Institute, Imperial University, Tokyo,

March 18.

図2 寺田寅彦の X 線反射に関する最初の報告。
Nature, XCI, pp. 135-136, 1913年4月10日号。

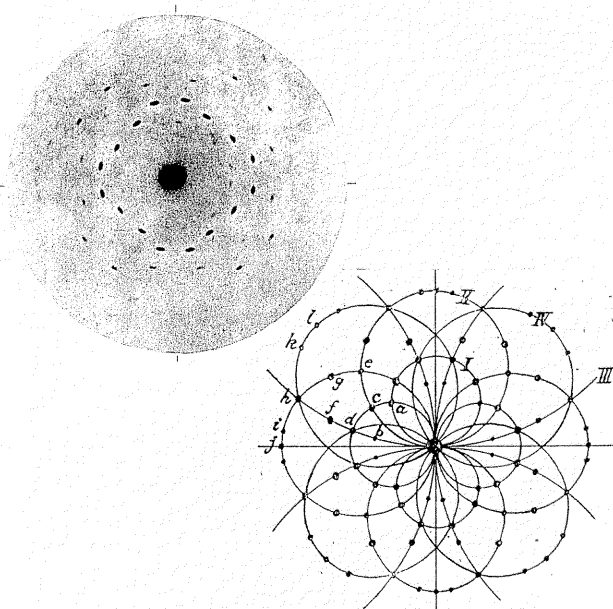


図3 Laue らの論文中の回折写真(上)と寺田寅彦の解析(下)。

原子配列との関係付けが得られたことになる。

寺田論文の評価

この寺田寅彦の論文は、X 線回折初期の記念碑的論文を

収録した国際結晶連合で発刊した書籍“Early Papers on Diffraction of X-rays by Crystals”におけるラウエ像の網面反射による幾何学的解釈の項に、ブラッグの法則を発表した W. L. Bragg の論文と並んで掲載されている。多くの無視の例はあっても寺田論文の独創性と重要性は明確に認定されている。寺田は「ラウエが発表した理論は不幸にして余り正確でなく、また取り扱いに便利でもなかった」として独自の理論を打ち立てたのである。

回折現象の理論を考えた Laue は寺田の論文を評価して論文刊行直後から「回折斑点が反射則にしたがう事実は、寺田の方法によって容易に理解できる」としてしばしば引用している。一方 Laue の理論を実験的に立証した Friedrich たちも寺田の論文を読んで感心し、早速自分たちも試してラウエ斑点が無い輝く様子に興奮していた、と Laue に発見のヒントを与えた Ewald が語っている。

寺田の論文を評価する上でいくつか注意することがある。先ず「反射」という言葉であり、論文中で厳格に幾何学的意味に限られることが注意されている。もう一点は論文に「全面的に排除する結晶構造について適当な仮定をすれば、粒子説の可能性もある」と書かれて粒子説による解釈の可能性を残していることである。この言葉が彼の論文の大きな難点であると指摘がある。

X 線の発見以来、それが波動であるか粒子であるかの論争は絶えなかった。その時に発表された Laue の X 線干渉現象の発見は波動説の有力な証拠とは見なされながらも直ちに粒子説の破綻とはならなかった。例えば前記のように W. H. Bragg は直ちに粒子説による解釈を完全に放棄したわけでは無い。彼は結晶格子の間に X 線粒子の通り易い通路があるという解釈を試みている。現在のチャネリングに相当する考え方である。一方では Einstein の光量子理論も既に提案されていた。夏目漱石の小説の中でモデルとして登場する寺田寅彦は光量子理論もよく理解していた。やがて1922年にはコンプトン散乱の発見がなされている。常に物事を単純に断定せずに多様な解釈の可能性の余地を考慮した複眼的な思考をした寺田の学問的態度の表れとすべきであろう。

寺田はこの記事の末尾に次のような主旨の脚注を付している。「この論文を口頭発表した後で、W. L. Bragg 氏の1912年11月に講演し1913年1月に印刷された論文「短い電磁波の結晶による回折」を受け取った。そしてラウエ像を再構成し斑点形状を説明する私の方法はエッセンシャルには新しい」。さらに文中においても、研究の途上で G. Wulff の論文に気付く、そこで彼の言う零極大は事実上反射に相当すると脚注を付して、そのオリジナリティを認めている。このように三つの考え方がほぼ同時にそして全く独立に提示されている。いずれも異なる方法で到達した結果であり、それぞれの独創性は高い評価に値すると考える。ラウエの発見は結晶構造解析の手段としての X 線回折とは直接には結びつかない。結晶内の原子配列決定への応用の道を拓いたのは

Bragg 父子と寺田の研究である。

X 線回折応用への展開

その後寺田は、結晶構造の解析を西川正治に委ね、自らが残した研究は二件のみである。しかもそれは尋常な物質ではなく、歪んだ岩塩の結晶や複雑なミョウバン結晶の解析であった。完全な理想結晶でなく塑性変形や加熱を施した結晶や彼の終生の興味の対象であった火山の産物であり実用材料でもある複雑な構造のミョウバンに挑んだことは寺田の真骨頂と言えよう。また1916年に開催された水産博覧会で審査官として天然真珠と養殖真珠を X 線を用いて鑑別してみせたこともある。役に立つ学問を志し他人の真似を嫌うこの姿勢は後継者たちに受け継がれ、日本の X 線結晶組織学の特徴となっている。

寺田寅彦が何故わずか二年足らずで X 線結晶学から手を引いたか、その心情について以前筆者は思いを馳せたことがある。彼は X 線そして結晶学に大きな愛着をもっていたと感じられる。寺田寅彦の最後の随筆集の題は『蛍光板』、その中の最後の文章の題は『三斜晶系』である。この X 線結晶学に関わる二つの言葉には、寺田が若い日に暗闇でもつ蛍光板の上で光輝き舞い動くラウエ映画模様を目にした感動を生涯持ち続けたであろうことをうかがわせる。

参 考 資 料

X 線回折に関する寺田寅彦の論文と解説

- (1) “X-rays and Crystals”; Nature, **XCI**(1913), 135.
- (2) “X-rays and Crystals”; Nature, **XCI**(1913), 213.
- (3) “On the Transmission of X-rays through Crystals”; Proc. Tokyo Math-Phys. Soc., **VII**(1913), 60.
- (4) “Deformation of Rock Salt Crystal”; Proc. Tokyo Math-Phys. Soc., **VII**(1914), 258.
- (5) “On the Molecular Structure of Common Alum”; Proc. Tokyo Math-Phys. Soc., **VII**(1914), 292.
- (6) 現代之科学, 1914年1月号, 1.

X 線回折の歴史に関する書籍

- (7) *Fifty Years of X-ray Diffraction*, ed. P. P. Ewald, International Union of Crystallography, (1962), Utrecht.
- (8) “Early Papers on Diffraction of X-rays by Crystals”, eds. J. M. Bijvoet, W. G. Burgers and G. Hägg, International Union of Crystallography, (1969), Utrecht.
- (9) 日本の結晶学—その歴史的展望—, 日本結晶学会, (1989).

寺田寅彦の X 線結晶学への貢献に関する記事

- (10) 西川正治: 思想, No. 106(1936), 103.
- (11) 理学博士寺田寅彦君に対する授賞審査要旨, 日本学士院八十年史, 日本学士院, (1963).
- (12) 岡 邦雄: 科学史研究, No. 57(1961), 29.
- (13) 松尾宗次: バウンダリー, 8(1992), No.10, 50 および No. 11, 48.

日本の初期の X 線結晶学に関する主要記事

- (14) 仁田 勇: 日本結晶学会誌, **15**(1973), 8.
- (15) 三宅静雄: 日本物理学会誌, **50**(1995), 812.