

ブラッグの泡モデル実験：転位研究における役割

山口 まり

1. 序論

金属の強さや変形に関する金属の研究は、20 世紀に入るまで主に経験的な知識に基づいて、技術的視点から取り組まれてきた。それらの研究の主な担い手であった技術者や金属学者らは、彼らの知識や経験によってそれなりの成功を収めていたため、物理学者らの知識は必要としてこなかった¹。しかし 20 世紀に入ると、物理学者が、金属学者や技術者とは異なる視点から、つまり金属を原子の配列や原子の振舞いで金属の強さや変形を説明しようとする試みを本格的に開始した。それらは主に理論的な研究であって、技術者や金属学者が必要とするような金属加工に役に立つような実利的な知見とみなされるまでには時間がかかった。

金属結晶内の原子配列による乱れによって金属の塑性を説明する理論が、1934 年に発表された。この原子配列の乱れは「転位」とよばれる。転位という基本的な考えは、金属を研究する研究者の間で徐々に受け容れられていった²。その受容過程では、結晶構造を構成する原子そのものを直接観察することは不可能だった期間、数種の工夫された実験法によって、限定的にはあるが転位の理論が検証された。1956 年に電子顕微鏡によって転位とその振舞いが直接観察され、それ以後転位の研究は新たな展開を迎えることとなった。

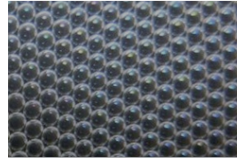
転位の理論の受容過程において実施された実験の一つに、泡を用いたモデル実験がある。この実験は、今も物理学の著名な教科書『ファイマン物理学』の「結晶の幾何学的構造」の章の最後で取り上げられている³。そこでは、「結晶の中で各原子がどうなっているのかを知ることはできない。(中略) 実際の結晶内で起こると信じられている多くの現象を大変うまく示すようなモデルを作

り上げた」と紹介し、図1に示した写真と同様の写真が多数含まれた、1947年のウィリアム・ローレンス・ブラッグ (William Lawrence Bragg, 1890–1971) らによる論文を再掲載している⁴。ブラッグらの泡モデル実験は、初学者の理解を助けるものとしてこの教科書に導入された。では、ブラッグらは本来どのように転位の研究に用いたのだろうか。

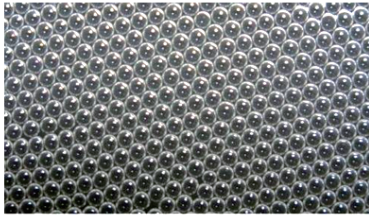
モデル(模型)は、科学研究において多く用いられている。モデルには、ある現象や性質を記述する数式モデル、実際の橋や建物などの構造物を縮小した縮尺モデル、分子や結晶構造を表現したボール・スティック・モデルなど様々なものがある。モデルは研究対象を直接操作できない、あるいは観察できないような場合に、自然現象を近似的に表現したり再現したりするために利用される。ボール・スティック・モデルは、化学者や結晶学者がしばしば利用してきたモデルである。そうしたモデルは、最初は分類や教育に用いられたが、化学者は次第に分子内の本当の原子配列を示していると解釈するようになり、モデルを作ること、すなわちモデル化することが研究の本質的な部分となった場合もあった⁵。泡モデルは、これらのモデルと同様に原子レベルの結晶構造を表現するモデルである。ではそれは、どのようにして生み出され、研究に利用されてきたのだろうか。

転位の歴史としては、ブラウンによる固体物理研究へとつながる転位論の歴史研究が挙げられる⁶。ブラウンの研究では、泡モデル実験の映画が物理学者に転位を信じさせるものであったとしている⁷。しかし、モデル実験としての泡モデル実験に対する転位研究における歴史的な位置づけは明確とはいえない。

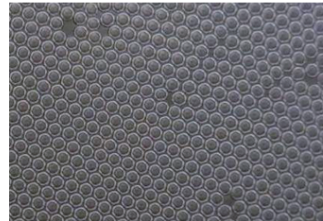
本研究が対象とするのは、1942年に最初に発表された泡モデル実験である。本稿では、泡モデル実験の考案者であるブラッグ(以下、ブラッグという場合は、ウィリアム・ローレンス・ブラッグを指す)の金属研究と泡モデル実験を中心とした転位研究の経緯をたどる。また、ブラッグらの実験に引き続いて行われた、主に日本の研究者による泡モデル実験研究について取り上げる。本稿では、このモデル実験が転位の研究に果たした役割を明らかにしたい。



(a) 最密充填状態の泡モデル



(b) 転位の泡モデル



(c) 粒界の泡モデル

図1 泡の写真。泡のサイズ：直径 1mm (著者作成)。

2. 初期の転位研究

2.1 「転位」概念の誕生

金属の構造の研究は、19世紀末に金属顕微鏡で金属試料を観察する金属組織学として生まれた⁸。1920年代に入ると、X線回折を使った結晶構造解析の手法が金属の研究にも用いられるようになった。金属の強さや塑性を扱う研究は、技術者や金属学者らを中心に現象論的に進められていたが、物理学者らは研究課題として主に理論的に取り組むようになった。たとえば、境界層理論で知られるプラントル (Ludwig Prandtl, 1875–1953) は、1928年に金属の変形が、結晶の不完全な部分の動きから起こるものだという説明を行っている⁹。デーリンガー (Ulrich Dehlinger, 1901–1983) は、再結晶の現象を結晶内の不完全な部分によって起こるものと理論的に説明した¹⁰。

テイラー (Geoffrey I. Taylor, 1886–1975)、ポラニー (Michael Polanyi, 1891–1976)、オロワン (Egon Orowan, 1902–1989) らは、金属の塑性を説明する理論を、

1934年にそれぞれ独立して発表した¹¹。テイラーは、金属結晶内の原子配列の乱れが金属のひずみやヒビあるいは再結晶を発生させると説明し、その理論に、再結晶のメカニズムを説明するためにデーリンガーが用いた「転位」という言葉をあてた。それ以降、この現象を指す場合に転位という語が使われるようになった。これら3人の転位の概念を基礎として、物理学者は金属の強度や塑性の理論的研究を進めていった。

2.2 ウィリアム・ローレンス・ブラッグによる初期の金属研究

ブラッグは、父ウィリアム・ヘンリー・ブラッグ (William Henry Bragg, 1862–1942) とともに X 線結晶構造解析の手法を確立し、その功績により 1915 年二人はノーベル物理学賞を受賞した。X 線回折を利用したこの研究手法は、金属結晶内の構造の研究にも用いられるようになり、顕微鏡とは異なる金属研究の手法の一つとなった。

ブラッグは、結晶学の一つのトピックとして金属の研究も行った。転位の理論が提出された同年の 1934 年から翌年にかけて、彼はウィリアムズ (E. J. Williams) とともに、「合金内の原子配列に及ぼす熱運動の効果 (The Effect of Thermal Agitation on Atomic Arrangement in Alloys)」の 3 報のシリーズ論文を発表した。当時、ある合金の結晶内では、低温では原子は規則的に配列しているが、高温になると原子配列が乱れ不規則になるという秩序無秩序転移とよばれる現象が起こることが知られていた。彼らは、鉄アルミ合金の観察結果を分析し、その現象の理論的説明を試みた¹²。それは、合金結晶内の原子が構成する秩序構造は、無秩序構造に比べて低いポテンシャルエネルギーを持ち、熱運動によって、秩序構造が無秩序になる。そして、ある臨界温度に達すると完全に不揃いな配列になる、というものであった。

ブラッグは、実験的研究の手法にも目を配っていた。1930 年代中ごろ、金属結晶の X 線による実験で、デバイ - シェラー法¹³を用いると表れる回折線の線幅が広くなることや個々の結晶粒からの X 線の反射は明瞭な点として

現れることが知られていた。1938年にブラッグは、リップソン（Henry Lipson, 1910–1991）と共著で「金属の構造（Structure of Metals）」と題する論文を、*Nature* 誌に発表した¹⁴。その内容は、前年に *Nature* 誌に発表されたある X 線回折実験結果についての解析手法をめぐるものである¹⁵。それは、デバイ-シェラー法によって得られた写真の中の線や点を解析し、個々の結晶粒を調べるものであるが、この手法は精密で簡潔な方法であると高く評価している。しかしその一方で、解析法として適用するためには画像上の点の広がりについて詳しく説明する必要があるとしている。

ブラッグは、1937年、英国国立物理学研究所の所長に就任した。同年10月にキャベンディッシュ研究所の所長ラザフォード（Ernest Rutherford, 1871–1937）が亡くなり、後任にブラッグの名前があがった。キャベンディッシュ研究所は、ラザフォードによって原子核物理研究の中心的研究所となっていたが、ブラッグのような核物理学を専門としない結晶学者をラザフォードの後任に据えることには反対意見もあった¹⁶。しかし翌年、結局ブラッグがラザフォードの後任として所長に就任した。彼は結晶学研究を続けるため、オロワンや結晶学者のエヴァルト（Paul P. Ewald, 1888–1985）、後にヘモグロビンの結晶構造解析で活躍するペルツ（Max Perutz, 1914–2002）などを研究所に招いた。

しかし、オロワンが行っている金属の研究は、実学的、技術的傾向が強く、キャベンディッシュで研究所の多くの研究者は、オロワンの研究が本当の物理学かどうかを疑問視した。懐疑的意見があるにもかかわらずブラッグは、そうした研究の中に正当な物理学が芽生えつつあることを感じとり、その新しい知識が技術に有用であることが明らかになるかもしれないと期待していた¹⁷。

金属の塑性流動を議題とする会議が1938年5月に開催された。塑性流動とは、高温高压化で結晶が流れるように変形する現象である。この会議には、ブラッグの他、モット（Nevill F. Mott, 1905–1996）、オロワンなどの物理学者らが出席した。ブラッグは講演の中で、塑性流動の性質は理論によって説明されるべきで、それまで提案されてきた理論は明らかに不完全なものであると主張した¹⁸。金属では、金属イオンが共通の自由電子を介して結合しており、金属イ

オンの配列はおおよそ等距離で、最密充填が結合のための主な条件を満たしていると説明する。そこで、ある結晶面に沿うような方向へずれる現象、すなわちすべりについてのこれまでの理解は単純すぎるため、このすべりが起きたときの原子の動きについてより正確な情報が必要であるとしている。

またブラッグは、転位の理論は結晶内で起こる現象の説明であるという点では一致していることを認めたうえで、いくつかの疑問を提示して講演を締めくくった。たとえば、この転位の性質は何か、点を中心としたものなのか、あるいは列に沿ったものなのか、どのようにして結晶は物質としての固さをもつのか、そして観察された金属の力学的性質を説明するための定量的理論をつくることはできるのか、などであった¹⁹。ブラッグの発言からも明らかなように、当時の金属塑性の理論の中心概念である転位の理解は不完全なものにとどまっていたのである。

ブラッグは、1940年、「冷間加工された金属の構造 (The Structure of a Cold-worked Metal)」と題する論文を発表した²⁰。冷間加工とは、常温または材料が再結晶する温度未満で金属を加工することである。この加工工程は、金属を強く固くする重要な手法の一つである。彼は、結晶内のごく少数の異質な（外来）原子が加わることによる著しい影響を考慮すれば、金属の力学的性質と合金の自己焼きなまし²¹の速度について説明できると示唆した。さらに、1942年ブラッグは金属強度の理論を発表した²²。すべりによって解放されたエネルギー値がある値に達すると変形するとみなし、金属の弾性限界を計算した。

3. ブラッグの泡モデル

ブラッグらによって確立されたX線結晶構造解析法では、試料を通過したX線の回折像をフーリエ変換し、データと合致するように試行錯誤の上、最終的に結晶構造を提示する。モデル化することは、結晶構造を決定するための試行錯誤の過程で不可欠な作業であり、モデルは解析の結果である。結晶構造を表現したモデルは、ボール・スティック・モデルや球だけで構成されたボールモ

デルに限られない。たとえば、ブラッグは、電子密度を等高線に表し、地形図のように等高線を描いた薄い板を重ねて電子密度分布を三次元でとらえるようなミオグロビンのモデルを作っている²³。ブラッグにとって、モデル化することは結晶の構造を研究する上で一つの手段であり、モデルはその結果であった。ブラッグは、モデルによって不可視の世界をモデルという形式で表現することを得意としていた。

テイラーは、この転位の理論は、現実を記述したものではなく、抽象的概念にすぎないと強調していた²⁴。一方、結晶構造を理論と実験の両面から研究してきたブラッグは、結晶内の原子の配列と振舞いによって結晶の性質を説明できると考えており、転位を結晶内の原子の配置と振舞いによって実際に引き起こされる現象とみなしていたと思われる。X線結晶構造解析法に用いる試料に適した結晶は、なるべく不純物を含まない、あるいはひび割れがない結晶である。だが結晶内には原子が完全に秩序だった構造を持っているのはまれで、通常は異質な原子や原子配列の乱れが含まれており、これが転位の現象を説明する鍵となると考えていたのではないだろうか。そこでブラッグは、転位の研究のために、そうした不規則な結晶や完全な結晶を視覚的に表現する新たなモデルを作ろうとしたと考えられる。泡モデルの場合、図1のような原子にみたてた泡がどのように配列しているかを表現した構造図である。転位の研究を行うために、ブラッグはこの泡モデルをどのようにして作り上げたのだろうか。

当時すでに、金属学者は結晶内の構造を研究するために金属板やボールベアリングを用いていた。しかし、金属板を用いた場合、板同士の摩擦も大きく動きはぎこちなくあまり適切なモデルとはいえなかった。また、ボールベアリングの場合は、金属板よりも自然にボールが密集して最密充填構造をとることができ、有用なモデルではあるが、その規模を大きくするにはより多数のボールを用意する必要がある、そうすると重量が著しく増大するという欠点があった。

ブラッグは、すでに述べたような金属強度の理論的研究を行う一方、常に転位のモデル化について考えをめぐらしていたようである。そのことは彼がモデルを思いついた経緯から明らかである。ブラッグは最初、レンズ豆を水に浮か

べてモデルにしようとしたという²⁵。レンズ豆は、ヨーロッパでは日常的な食材でイギリスでもレンズ豆のスープがよく知られている。しかし、豆の大きさや形状は一樣ではなくこれをモデルとして利用することができなかったというのは想像に難くない。

ブラッグはある日、ブラッグは趣味の庭仕事をしているときに芝刈り機のオイルを混ぜていた。すると、オイルの液面に小さいサイズの泡が集まって最密充填構造を構成しているのを発見したという²⁶。そこでブラッグは、ラザフォード時代から研究所で助手として働いていたクロウ (George Crowe) に泡を作ってもらふことにし、1940 年と 42 年には長男もその作業を手伝った²⁷。またオロワンは、クロウに泡が出る管の先を曲げることをアドバイスし、ようやくサイズのそろった泡が塊にならずに液面にできるようになった²⁸。

ブラッグは、1942 年に石けん泡で作ったモデルを完成させた。この泡モデルについて記載された論文では、装置の簡単な紹介と泡モデル実験の有用性を述べている²⁹。この時の装置には、泡を整列するための 2 本のスプリングが取り付けられていた。このスプリングを液面に付けて 2 本のスプリングの間でできた泡を観察している。論文に掲載されている写真からは、あまり多くの泡ができていないが、いかだ状に集まった泡同士を近づけて原子配列の乱れを示すことには成功している。

泡はお互いに近づくと近づこうとする引力が働き、接触するとお互いを押し合う斥力が働く。こうした泡の振舞いは、自由電子を介した金属原子のイオン同士の振舞いに非常によく似ていることから、モデル実験に用いることができることがわかった。そして、ブラッグは、石けん泡を使う利点として、同じ大きさのものを多数個作ることができ、弾性があり、摩擦がなく、安定した状態を比較的長く保つできることを挙げている。彼は、論文の中でこれら泡のふるまいは非常に興味深いと述べている。実際の結晶が三次元に原子が配列している事実から、二次元で実験を行うことは結晶の研究として不十分であることはブラッグも十分承知していたが、それでもなおこのモデルの有用性を主張した。

4. ブラッグらの泡モデルによる実験

4.1 ナイの参加

ブラッグが、泡モデル実験を本格的に開始したのは、第二次大戦後であった。金属の研究は、戦時中に推進されるようになったのだが、それは金属を用いた工作物の不具合、たとえば飛行機のエンジンや船舶の船体に亀裂が入るなど、事故につながる問題を解決するためであった。特に連合国にとって、緊急に取り組むべき課題は、アメリカで大量に建造された輸送船リバティ船が多数沈没した原因の解明であった。従来、リバティ船のような7000トン規模の船の建造では、リベット打ちが用いられていたが、リバティ船では作業時間短縮のため、船体をいくつかのブロックに分け、それを電気溶接で連結し建造するブロック建造方式が取り入れられた。しかしリバティ船は、船体に大きな破損が生じるなどして多数沈没した。その原因は、溶接の問題なのかあるいは船体に用いた鋼板が不適切なのか、などさまざまな原因が考えられた。このような船体の破損問題の解決のため、関係する研究分野、物理学、金属学、結晶学者などの科学者や技術者などが動員された。その中に、戦後ブラッグとともに泡モデル実験を行った、ナイ（John F. Nye, 1923-）がいたのである。

ナイは、1944年オロワンの学生としてキャベンディッシュ研究所に加わった。彼がキャベンディッシュ研究所での初日にブラッグに会いに行くと、ブラッグはナイに金属の破砕現象について研究することを提案した³⁰。その頃キャベンディッシュ研究所では、金属の脆性破壊に関する政府からの委託研究を行っていた。この研究は、リバティ船の相次ぐ沈没の原因究明するためでもあった。最終報告書は1945年7月に提出され、同年10月に会議が開催された³¹。会議の内容の中には、次に示すように当時の金属研究の状況を垣間見ることができる。

会議では、参加者はそれぞれ異なる答えを携えてきていた。金属学者は鋼の中のモリブデンが問題だと確信し、オロワンは衝撃実験の観察結果から、もし鋼鉄の劈開強度が降伏応力の約三倍以下ならば、切欠き脆性を示すようになる

とした。造船技術者は亀裂が船体に開けられた窓などの穴から始まっているので良質な鋼材を使うべきだとし、造船業者はアメリカの鋼材が問題で、イギリスの鋼材ならそうした問題は起こらなとし、船員はもっと南寄りの温かい水温の海上航路をとるべきだったと主張した。これらの答えはそれぞれの立場からのもっともらしい結論だとナイは述べている³²。物理学者としてオロワンは、金属で発生する一般的な現象について言及しているのに対し、金属学者や造船技術者は材料そのものに言及している。この発言内容は、当時の技術者、金属学者そして物理学者では金属の強さの問題に対する着眼点が異なっていたことを端的に示している。

一方、ブラッグの泡モデルは、その着想から最初に発表されるまで少なくとも2年を要し、しかも最初の発表から約3年経過した時点でも、泡モデル実験に関する研究成果の発表はなかった。ブラッグは泡モデルを使った本格的な実験を実施することができていなかったようである。その理由として、泡モデルの実験手法としての困難と人員不足が考えられる。

泡モデルを使った実験に伴う困難は、当時、良質な石けん（高純度の脂肪酸ナトリウム）が入手できず、長時間の実験に耐えられる割れにくい石けん泡を作ることができなかったためと考えられる。最終的に、ブラッグは、王立研究所に電話をして石けん液の処方を教えてもらったという³³。王立研究所で毎年開催されるクリスマス講演の中で非常に評判となった講演の一つに、19世紀にボイズ（Charles V. Boys, 1855–1944）が行ったシャボン玉の色と膜形成に関するものがあつた。ボイズは、講演でシャボン玉を作りながら石けん膜の特性について講演した。このシャボン玉を使った実験は、20世紀以降もクリスマス講演で実演され、1923年のブラッグ父による王立研究所のクリスマス講演でもシャボン玉の実験が紹介されている³⁴。このことから、王立研究所にはデモンストレーションに使った石けん液の処方が保管されていたと考えられる。

人員不足に対して、ブラッグは、オロワンに泡モデル実験を手伝ってくれる学生を派遣するように依頼した。その結果、オロワンのもとで研究を始めたばかりの学生であったナイが、泡モデル実験に携わることになった。ナイは石け

ん液を処方通りに作り³⁵、ようやくブラッグは、モデル実験の本格的な実施に着手できたのである。

4.2 泡モデルを使った実験の最初の発表と映画上映

ブラッグは、泡モデル実験をしてくれるナイを迎え、モデルを使った金属結晶内転位の研究を開始した。ブラッグは午後によく実験の様子を見に来たという³⁶。彼は、所長として多忙な日々を過ごしていたが、泡モデル実験の進捗状況を非常に気にかけていた。

英国国立物理学研究所のX線解析グループの第3回年会がブラッグの主催で、1946年7月9日から3日間にわたり王立研究所で開催された。このX線解析グループの年会としては初めて海外14カ国75名程の参加者があった。この会議報告には、ブラッグの泡モデル実験の発表が泡モデルの写真1枚とともに掲載されている³⁷。この報告の中で泡モデルは、結晶構造内で転位が現れ、転位を中心としてできた線に沿ってずれが生じる様子を非常によく表したものとされている。ブラッグは、泡でおおわれた液面をかき回す前とかき回してからしばらくしたものを写真に撮り、冷間加工の過程と焼きなましの間で起こる再結晶の過程をモデルで示したものを発表した。その結論部分で、泡モデル実験の短い映画を上映した。

泡モデル実験の映画は、泡が集まって構成されたいかだ状の塊に力を加えたときの泡の動きを16ミリフィルムでとらえたものである。動画にすると、「結晶」内の結晶粒同士の境界（粒界）に沿って力を加えた場合、原子にみたてた泡が動いていく様子を時間を追って観察できる。金属の構造が変化する、もしくは脆性を示すなどの現象は、結晶の一部が一体となって隣接部に対してずれる、すなわちすべりが、線状の原子配列の乱れの移動によって広がった結果であると理論的に説明されていたが、この映画はまさにこうした転位の現象をモデルによって映像化したものであった。

ここで指摘しておきたいのは、泡モデル実験の映画の役割である。動画では、

写真ではとらえきれない運動やパターンの変化を見ることができる³⁸。泡モデルの映画は、転位は動きをとまなうものであって、転位がどこから始まってどのように動いていくのかという現象を、石けん泡の振舞いを通じて見せることに成功した。この映画は、当時まだ理論的な想定にすぎないと考えられていた転位が、実際にあり得そうな現象であると、それを見た研究者らに印象付ける役割を果たした。

ブラッグの泡モデルの映画は、またデモンストレーションとして非常に有効であった。1942年論文の中でブラッグは、簡単に用意できる実験なので「よい講演デモンストレーション」であると述べている³⁹。当時すでにブラッグは著名な科学者であったことから、この映画が上映される機会は一度や二度ではなかった⁴⁰。泡モデルの映画の場合、転位や再結晶などの多様な結晶構造を定性的に示す優れたデモンストレーションとして機能した。転位の研究は、1940年代はまだごく一部の研究者らの中で主に理論的に進められてきたが、泡モデルの映画は、転位に対して懐疑的だった物理学者にとっても説得的なものであった⁴¹。そして、より広い研究者らの関心を集め、転位という理論が金属の研究に有用であるという期待を研究者に持たせることにもなった。このことは、1950年代以降、転位の研究が発展し多くの転位に関する会議が開かれたことでも明らかである。

当時のブラッグの映画上映について、DNAのらせん構造を解明したワトソン (James D. Watson, 1928-) は、彼の著書『二重らせん』の中で、若干皮肉交じりに触れている。彼は、ブラッグがDNAの構造より金属結晶構造のほうが重要に思っているに違いないとしたうえで、以下のように述べている。「泡がどんなふうにぶつかりあうかを示した独創的な映画を見せることが、今のブラッグ卿にとっては最大の楽しみだった」⁴²。ワトソンは辛らつであるが、それでも著書の中で当時のエピソードとして泡モデルの映画のことを記したのは、評判の映画であったことの証でもある⁴³。

4.3 ブラッグらによる泡モデル実験を用いた一連の研究

ブラッグは、1947年7月に開催された固体の強度をトピックとする会議に参加した⁴⁴。この会議での発表内容は、金属のすべりについての理論であった。彼は、この理論をテストすることはまだできないが、今後X線回折法か電子顕微鏡やその他の方法による実験的な検証が必要であるとしている。実は、キャベンディッシュ研究所の結晶学の部門では、ブラッグの考えで、X線マイクロビーム法の開発と電子顕微鏡による結晶構造の研究がすでに進められていた。ブラッグは、モデル実験だけに満足せず、試料を定量的に計測できる実験法の確立を目指していたのだった。

さて、イギリス金属学会主催で国立物理学研究所やファラデー協会、機械工学協会、鉄鋼協会、物理協会、そして王立航空協会が共催する会議が1947年10月15日と16日にロンドンで開催された⁴⁵。「金属と合金の内部応力に関するシンポジウム」と題されたこの会議には、物理学者、結晶学者、金属学者、技術者等様々な分野の人々が一堂に会した。

このシンポジウムでブラッグは、「微視的尺度における応力に関する効果 (Effects Associated with Stresses on a Microscopic Scale)」と題する発表を行った⁴⁶。ブラッグは、この発表で、弾性限界を定式化し、それを冷間加工された純金属にあてはめ、実際にX線回折実験で観察された弾性限界と同じ大きさを導き出した。結論部分で泡モデル実験について言及している。モデル実験では、いかだ状に集まった泡のひずみにかかる力がある値に達するとすべりの動きが転位の端として始まり、それが泡の列の一つに沿って動くと説明する。彼は、泡モデル実験から導き出された結果は不完全なものではあっても興味深いものとしている。その会議では、泡モデル実験の映画は夜の懇談会で上映された。

1947年にブラッグは、いくつかの手紙の中で三次元の泡モデルを作ること成功したことを報告している。彼は、1942年の論文で、実際の結晶が三次元であることから、泡モデル実験でも三次元のものを作成する必要があることを述べていた⁴⁷。たとえば、細いピペットを提供してくれたことに対する礼状

⁴⁸の中で、三次元構造ができるようになったばかりであると報告し、ラウエ(Max von Laue, 1879–1960)には、泡モデル実験研究の論文執筆中である旨を知らせ、その中でも最近三次元の泡モデルを作ること成功したことを伝えている⁴⁹。

しかし、後にブラッグも気づくことだが、原理的に三次元の泡モデルはモデル実験には不向きである。筆者は、三次元の泡モデルを作製したが、液面の泡が規則正しく並んでいることはわかるが、二層目以下の構造について詳しく知ることができないことが判明した⁵⁰。このことから実際の結晶が三次元としても、泡モデル実験で三次元の実験は科学的知見をもたらすには十分ではないのである。

ブラッグらは、泡モデル実験による金属の強度の一連の研究を「結晶構造の動的モデル (A Dynamical Model of a Crystal Structure)」というタイトルのシリーズ論文として1947年から4報発表した。彼らは、1947年から52年まで発表された一連の論文を通じて、泡モデル実験から、その定量的研究、実験と理論的研究、そして粒界の構造についての理論へと展開した。最初の論文は、ブラッグが一晩で書き上げたという⁵¹。このブラッグとナイの共著論文では泡モデルの実験結果が、1942年のブラッグの論文で提出した金属強度の理論をよく支持しているものと結論した⁵²。この論文には、泡モデル実験方法が述べられ、様々な転位を表した二次元と三次元の泡モデルを写した35枚もの写真が掲載されている。

泡モデルの泡の間に働く力を、ニコルソン(M. M. Nicolson)が計算した⁵³。計算によって明らかにされたのは、泡の大きさによってその振舞いが異なることであった。この計算は後のブラッグらのシリーズ論文でも引用され、モデル実験に用いるための泡の最適な大きさを導出するために用いられた。

シリーズの2番目の論文は、1949年のブラッグとロマーの共著論文である⁵⁴。ロマー(W. M. Lomer)は、オロワンの学生であったが、ナイの後任としてブラッグに一年間「貸し出された」のであった⁵⁵。この2番目の論文は、二次元泡モデル実験の力学的特性を定量的に研究した内容であった。ニコルソンの計算から、泡の直径が1.2mm程度の場合、理論的に計算された銅イオンの間

の力をよく表現するような振舞いをするのがわかった。この計算に基づいた泡の大きさ約 1.2mm の泡を使ったモデル実験を実施したところ、理論的に導き出された銅の強さとその実験から導き出された結果がよい一致をみた。彼らは、泡モデルは結晶格子の現実の動的振舞いを完全に表したものとみなすことはできないとしている。それでもなお、彼らが泡の振舞いを興味深いと考えるのは、泡モデル実験の結果と理論的に導き出された結果とが一致しているためであるとする。彼らは泡モデルの欠点を認めつつ、研究に利用できるモデルとしてその有用性を主張した。

シリーズ 3 番目となる論文は、ロマーが単著で発表した⁵⁶。そこではシリーズ 2 番目の論文で用いた計算の詳細が述べられている。また、ロマーは、独立に定量的に泡モデル実験を分析し、塑性変形の理論的研究を行った⁵⁷。シリーズ 4 番目の論文は、1952 年にロマーとナイの共著で発表された⁵⁸。彼らは、泡モデル実験結果を用いて、純金属内の結晶粒界について説明を試みた。小さい角度で接触する粒界からはっきりと分かれた転位ができあがり、大きな転位構造へと変化が起きると説明した。

原子配列を可視化した泡モデルは、単純なモデルでその要素を表現するブラッグの才能をよく示しているといえるだろう⁵⁹。泡モデルは、転位を示す静的性質だけではなく、結晶内の原子の振舞いに近い振舞いをする石けん泡によって示される動的性質も兼ね備えていた。後者は、転位が動くものであることを定性的に見せるだけではなく、ある条件における金属結晶内の転位をシミュレーションすることを可能にした。

続いてブラッグは、1949 年に「金属内のすべり (Slip in Metals)」について発表しているが、その中で泡モデル実験の限界をいくつも挙げている⁶⁰。三次元モデルがモデル実験として不向きであること、温度や振動などの影響についても調べることができないとしている。しかし、ブラッグは金属を理解する第一歩となると思うと述べている。泡モデル実験は限られた範囲でしか有用とは認められないが、科学研究が簡単な系から複雑な系へと取り組んでいくことが常に行われてきたことを考えれば、ブラッグが、泡モデル実験を金属研究の足

がかりとなりうる、と期待していたと思われる。

ブラッグは、金属研究に関連して、この分野では物理学者と金属学者との協力が必要と考えていた。1948年に発表された金属と合金の内部応力を議題とするシンポジウムの予稿とコメント集に、彼のコメントが掲載されている⁶¹。彼は「物理学者を代表して」と一つのパラグラフの中で二度もことわった上で、金属学者が扱わなくてはならないかなり複雑な技術的問題に物理学者が着手できるようにするには、まだ遠いのだということを認識しているという。そして、物理学と金属学の間の境界には、素晴らしい研究分野があり、成功のためには両者の協力が不可欠だとしている。彼のコメントは、物理学者と金属学者が金属構造の研究分野で協力していくことは有益であると締めくくられている。ブラッグは、技術的に複雑な問題を扱うためには、それに携わる様々な分野の研究者との協力関係が非常に大切だと考えていた。

しかし当時は、金属の強さや塑性という共通の関心を持ちながら、物理学者と金属学者、技術者との間には大きなギャップがあった。物理学者は、原子レベルで金属結晶構造やその構造変化が起こるメカニズムの理論的解明をめざしていた。一方、技術者は、金属の製造工程や熱処理、そして金属の力学的特性について関心をもっており、理論には無関心であった。また金属学者は、金属固有の性能について関心をもっていたが、転位の理論についてはかなり懐疑的であった⁶²。彼らは物理学者の間では転位理論を発明することが流行していたとみなし、またそうした理論は、「現実味を欠き、単に数学者に楽しいおもちゃを提供した」と揶揄したりした⁶³。

5. 泡モデルの評価

ブラッグらの泡モデル実験を、他の研究者らはどのように受け止めたのだろうか。発表直後は、会議報告で写真とともに特に取り上げられた⁶⁴。また、1948年の*Applied Physics*誌に掲載された「1947年の物理」と題する1947年の主な物理学研究成果の概要をまとめた論文には、パウエル（Cecil F. Powell,

1903–1969) の μ 粒子の発見やラム (Willis E. Lamb, 1913–2008) とレザフォード (Robert C. Retherford, 1912–1981) によるラムシフトの発見とともに、ブラッグらの泡モデル実験が紹介されている⁶⁵。後にノーベル物理学賞を受賞した研究成果とともに泡モデルが取り上げられたことは、当時非常に注目された研究であったといえるだろう。

物理学者は、転位の運動を示した有用なモデル実験として位置づけ、金属結晶内の原子の振舞いのアナロジーとして大変有用だとした。ロマーは、泡モデル実験は、まさに転位を示したものであったという⁶⁶。そして、この泡モデルは、転位の理論を世に広めることとなった。特に、泡モデル映画の反響は大きく、転位の理論を研究者の間に広める結果となったのである。

その後、泡モデル実験は、原著論文や総説、または基調講演などでしばしば引き合いに出された。たとえば、モットは、結晶内のモザイク構造が、転位の列に分解できることをよく示しているものとして泡モデルの写真を掲載している⁶⁷。彼はまた、1953年に日本で開催された国際理論物理学会議の開会式に先立って行われた講演会「固体に於ける不完全性」と題する講演会でも泡モデルを紹介している。このモデルを「転位の生成や、それらが行列をして小角度の結晶粒界面を形成して行く様子をたいへん美事に示します」と評価している⁶⁸。そして、泡モデルの写真の他、当時撮影されたばかりのモザイク状に構成された結晶面や結晶成長の電子顕微鏡写真を示し、「今までお目にかけた圖が總ての轉位に關する概念をより圖視的にし、みなさんも轉位は單なる數學的概念ではなくて、藤や竹のように目にも見える具體的なものであると感じられたことと思います」と締めくくった⁶⁹。

転位理論を発展させたリード (W. Thornton Read) は、彼の著書『結晶の転位 (Dislocations in Crystals)』の中で泡モデルを取り上げている⁷⁰。この著書は、当時転位を研究する人々の必読書であった。同書で泡モデルは、転位の形に及ぼす原子構造の影響を説明する理論のわかりやすい例として紹介されている。また、フォーティ (A. J. Forty) による 1954 年に発表された総説「結晶内の転位の直接観察 (Direct Observations of Dislocations in Crystals)」の中でも、モデル

実験でありながら泡モデルは、非一数学的方法によって結晶内に余分な結晶格子が入り込んだ状態の転位の性質を表していることを理由に、特に取り上げられている⁷¹。泡モデルにおける泡の振舞いが金属結晶内の転位の理論から期待される現象に非常に近いという結果を導いており、しかもモデル実験によるほとんどの結果が、実際の結晶を使った実験で確認されている事実を興味深いものとしている。さらに、転位の結果を観察するだけではなく、転位自体の振舞いの観察のために泡モデル実験を利用することができるだろう、というモデル実験としての有用性を主張する評価もみられる⁷²。

6. 泡モデル実験の利用可能性の検討：福島と大川による粒界の研究

泡モデル実験に可能性を見出した研究者らもいた。ブラッグの1947年の泡モデル実験の発表の後、ダイソン (J. Dyson) は泡モデルを回折実験に用いた。当初は、泡モデルを透明なガラス板上に作成し、光を下から通して回折像を得ようとした。しかし、可視光線で回折像を美しく撮るためには非常に小さい泡を作製することが必要で、さらに光が通過する石けん液の影響や、個々の泡をレンズと考えた場合、その屈折が大きいので光が広く散乱してしまうなどの問題があった。結局、泡モデルを写真で撮影し、それを回折格子としてX線と電子線による回折実験を行い、不完全な結晶の観察に用いることを試みた⁷³。この手法は、回折像から結晶内の欠陥を知ることができるという利点があるとされたが、二次元であることの限界や三次元の泡モデル実験は非常に困難であること、そして結晶の不完全性を明確に把握することはほとんど不可能であるという結論に至り、実験手法としての限界が明らかとなった⁷⁴。それでもなお、当時はX線や電子線回折法による研究に期待が寄せられていたため、泡モデルとX線および電子線回折を組合せたこの研究は、野心的な取り組みであったといえるだろう。

一方、福島と大川は、ブラッグらの泡モデルを使った転位の研究を一步進めた。福島は、このモデル実験は、あくまでもモデルの域をでないとしても、「結

晶内の原子相互の関係を目で見ることができるということは、この方面の研究者にとって一つの着想を生む重要な機縁を与えてくれるもの」とその有用性を述べている⁷⁵。

実験に際して福島は、泡モデル実験のための石けん溶液を作るのに約半年間苦勞したことを記している。ブラッグらの論文には、石けん液の処方が記されているが、なぜここまで苦勞したのだろうか。著者は、泡モデル実験の文献調査を行う一方、泡モデル実験の再現を試みた⁷⁶。この試みによって再現実験の難しさの一端を説明することができる⁷⁷。

泡モデル実験の難しさは、数時間割れないような泡の作成とサイズのそろった泡を多数作ることにある。割れにくい泡の作成には適切な石けん溶液を用意することが重要である。福島もこの過程が難しいことを述べている⁷⁸。ブラッグらの論文では、「純粹に再蒸留した」とあるだけで、オレイン酸（不飽和 C18 脂肪酸）の純度が不明である。オレイン酸は、脂肪から得られる脂肪酸の一種であり、たとえばブタ脂肪中には全脂肪酸中にオレイン酸約 43%，ステアリン酸（飽和 C18 脂肪酸）約 16%，パルミチン酸（飽和 C16 脂肪酸）約 23%等が含まれるのに対し、オリーブ油中には全脂肪酸中のオレイン酸は約 69%，ステアリン酸が約 3%，パルミチン酸は約 13%等が含まれる⁷⁹。このような脂肪酸混合物を高度に分離精製することは、現代でもきわめて困難で、単にオレイン酸といっても実際に流通しているものには飽和度や鎖長の異なる種々の脂肪酸が混在しているのである。福島は結論として、「オレイン酸には最もよいものを使用しなければならない」と記しているが⁸⁰、「よいもの」というのは純度がより高いものという意味であると考えられる。

石けん液の処方に時間がかかるが、サイズのそろった泡を多数作成するためには、拡大鏡で大きさを確認し適宜泡を取り除きサイズをそろえる作業が必要である。福島らも同じ作業を行った⁸¹。準備に非常に手間がかかる実験であるが、比較的費用が少なくてすむ利点がある⁸²。

福島と大川は、1953 年に泡モデル実験による結晶粒界の研究を発表した。彼らは、泡で構成されたいかだ 2 つを設定した角度で接触させ、粒界の静的特

性を研究した。その接触角度によって、3つの型に分類し当時の転位モデルにあてはめた⁸³。当時、結晶の境界の挙動を説明するために転位を使った理論が多数提出されていたが、それらは限られた現象のみに当てはまるように都合よく作られたものであった。泡モデル実験は、こうした混乱した状況を解決する糸口となりつつあった。

次に、福島と大川は、分類した3つの型、A： $\theta < 15^\circ$ （すべて平行なすべり面上にある転位の配列構造）、B： $20^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$ （空孔子点を含む原子の無秩序な集団構造）、C： $\theta \approx 50^\circ$ （並行ではないすべり面上にある2種の転位を持つ配列構造）について、それぞれの境界の動的挙動を研究分析した。AとBは、ロマーとナイが泡モデル実験によってその挙動を明らかにしたものと同様の結果が得られた。特にAについては、リードとショックレー（William Shockley, 1910–1989）が理論的に予想していたが⁸⁴、理論的に導き出された転位の挙動とモデル実験の結果が一致した⁸⁵。福島と大川は、ロマーとナイが観察を行っていないCの非対称に接した粒界の振舞いを研究した。この境界は、モットが提出した島モデルと呼ばれた転位モデルの一つに対応する構造を持っている⁸⁶。島モデルでは、境界面にある左右の粒界の接続が、局部的に連続的な領域と不連続な領域から構成されると説明する。つまり、この構造は境界の構造が明瞭ではないというものである。このモデルによると、境界面での接続がよい領域が協同的に融解するとされていたが、泡モデルによる観察によると一時的に転位が通過して境界の流動がおきていることが明らかとなった⁸⁷。ここでの泡モデル実験は、転位の理論の検証に用いられている。

さらに彼らは、泡モデルに振動を与えた実験を行い、高温での結晶の挙動をモデルで再現した⁸⁸。これは、ブラッグが1949年に泡モデル実験では不可能とした実験条件である。結晶内原子の熱振動をモデル実験で観察することは、1953年に開催された金属塑性と転位のシンポジウムの参加者から特に関心が高い問題として提起されていたものであった⁸⁹。福島と大川は、電磁石を使って泡モデルに90Hzの機械的な振動を与えたところ、実際の結晶の熱膨張に相当する特徴的な泡いかだの膨張が観察された⁹⁰。このモデル実験では、Bの境

界構造は高温状態では A または C の構造に変化することが明らかとなった⁹¹。このように泡モデル実験は、粒界の研究には限られているものの、転位の直接観察が不可能であったときに、モデル実験として機能していたといえるだろう。

1950 年代中ごろになると、金属の構造についての力学的特性を理論的に理解できるようになった。そして、圧力や処理などによる特定の変化から予想される効果がどのようなものであるかを、まだやや定性的ではあるが予測できるようになり、物理学者の知見が技術的にも有用であるとの認識をもたらした⁹²。金属学者および技術者の間では、転位について 1950 年代に入ってから言及されるようになっており、その中で泡モデルが紹介されている。たとえば、1952 年のイギリスの電気技術者協会のケルヴィン・レクチャーでは、「電気技師のための鉄原子 (Iron Atoms in the Service of the Electrical Engineer)」と題する講演では、金属の強さについての説明に転位の考えを導入し、その説明のために泡モデルを用いている⁹³。

7. 結論

ブラッグは、金属塑性の研究の第一歩を X 線による金属結晶の研究からはじめ、理論的な研究を行う一方で、転位の研究のために泡モデルを作り上げた。まだ、直接観察することのできない個々の原子の配列や振舞いを、泡を用いて表現することに成功した。

ブラッグが考案した泡モデル実験は、ブラッグらが執拗に繰り返したように、実際の金属結晶を忠実に表現したものではないが、単純な二次元の系として転位の理論を理解する第一歩として有用であった。物理学者らが、一般講演や総説などで転位の説明をする場合に泡モデルをしばしば用いたことから、モデルとしての有用性が認められる。

泡モデルは、転位が起こる様子を定性的に見せただけではなく、実験的に定量的に扱うことが可能であり、二次元粒界の研究を前進させた。また、福島・大川のように泡モデル実験に研究手法としての可能性を見出した人々もいた。

しかし、泡モデル実験は、モデル実験としての科学研究手法としての限界と、まもなく電子顕微鏡による転位の観察が可能になったことから実験手法としては短命に終わった。

物理学者による転位の研究は、理論の発展だけではなく、理論の実験的検証も進められた結果、1950年代に急速に発展したが、泡モデル実験もこれに貢献したといえるだろう。実験的検証によって転位に関する知見は、技術者や金属学者にも有用な知識として受け容れられるようになった。転位を研究しようとする技術者の間でも、泡モデルは理解のために導入として用いられた。

泡モデルは、状態を表現する静的なモデルというだけではなく、動きを表現する動的なモデルでもあった。泡モデル実験の映画は、転位のさまざまな形態やその動きを見せ、説得的で非常に有効なデモンストレーションであった⁹⁴。現在、インターネットの動画サイトで様々な人々による泡モデル実験の動画を視聴することができ、材料研究の初学者向けの転位の説明の導入に用いられることもある。

泡モデル実験は、転位の理論の受容過程において、転位の理論を金属研究者らの間に広めることに貢献し、限定的ではあったがモデル実験として機能した。転位の直接観察が可能となりモデル実験としての機能は失われたが、現在でも初学者の転位の理解を助けるモデルとして十分機能しているのである。

謝辞

ブラッグの手紙のコピー取り寄せに関連して大変お世話になりました、王立研究所資料管理部門のジェーン・ハリソン女史にお礼申しあげます。また、泡モデル実験再現に際してアドバイスをいただきました、東京大学大学院総合文化研究科真船文隆教授および家人である山口真主博士に感謝いたします。

註

- 1 Ernest Braun, “Mechanical Properties of Solids,” in Lillian Hoddeson et al., eds., *Out of the Crystal Maze: Chapters from the History of Solid-State Physics* (New York: Oxford University Press, 1992), pp. 317–358, on p. 319.
- 2 Ibid., p. 333.
- 3 Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, and Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, vol. 2, (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1964), p. 30–9. (同書のページ番号は各章と章内ページによって表され、30–9は第30章の第9ページを表している。) 同書では結晶成長について1956年の研究成果を写真で紹介しているが、同年に発表されたハーシュ(Peter B. Hirsch, 1925–)らの電子顕微鏡による転位の直接観察は掲載していない。あえてブラッグの泡モデル実験を写真つきで掲載している点が興味深い。おそらく結晶を構成する原子一つ一つの配列を当時の電子顕微鏡で観察することが不可能であったため、直観的に原子配列のみだれを理解することができる泡モデルの実験を示すことによって、結晶の幾何学的構造について理解させようとする意図があったのだろう。科学哲学ではハーシュによる転位の直接観察について、実験と理論の一致の事例として取り上げられている。Alan Chalmers, “The Theory-Dependence of the Use of Instruments in Science,” *Philosophy of Science*, 70 (2003): 493–509; A.F. Chalmers, *What is This Thing Called Science?*, 3rd ed. (Buckingham: Open University Press, 1999), 210–212. (邦訳：A.F. チャルマーズ(高田紀代志・佐野正博訳)『改訂新版 科学論の展開：科学と呼ばれているものは何なのか?』(恒星社厚生閣, 2013年), 293–294ページ。
- 4 ファインマン, レイトン, サンズ(戸田盛和訳)『ファインマン物理学Ⅳ』(岩波書店, 1971年), 133ページ。
- 5 Christoph Meinel, “Molecules and Croquet Balls,” in Soraya de Chandarevian and Nick Hopwood, eds., *Models: The Third Dimension of Science* (Stanford, California: Stanford University Press, 2004), pp. 242–275.
- 6 Braun, “Mechanical Properties of Solids,” op. cit. (注1), pp. 317–358.
- 7 Ibid., p. 336.

- 8 金属組織学の歴史を扱ったものとして, Cyril Stanley Smith, *A History of Metallography: The Development of Ideas on the Structure of Metals before 1890* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1988) がある.
- 9 Ludwig Prandtl, “Ein Gedankenmodell zur kinetischen Theorie der festen Körper,” *Zeitschrift für Physik*, 8 (1934): 85–106.
- 10 Ulrich Dehlinger, “Zur Theorie der Rekristallisation reiner Metalle,” *Annalen der Physik*, 2 (1929): 749–793.
- 11 Geoffrey I. Taylor, “The Mechanism of Plastic Deformation of Crystals. Part I. Theoretical,” *Proceedings of the Royal Society, A*, 145 (1934): 362–387.; Michael Polanyi, “Über eine Art Gitterstörung, die einen Kristall plastisch machen könnte,” *Zeitschrift für Physik*, 89 (1934): 660–664.; Egon Orowan, “Zur Kristallplastizität. I Tieftemperaturplastizität und Beckersche Formel,” *Zeitschrift für Physik*, 89 (1934): 605–659.
- 12 William L. Bragg and E. J. Williams, “The Effect of Thermal Agitation on Atomic Arrangement in Alloys,” *Proceedings of the Royal Society, A*, 145 (1934): 699–730, 151 (1935): 540–566, 152 (1935): 231–252. 現在この理論は, ブラッグ - ウィリアムズ近似として相転移の問題を扱う統計力学の簡単な近似法として知られている.
- 13 写真を使用する X 線結晶回折の一手法. 結晶のそれぞれの格子面に対応して環状の回折像が現れ, 環の角度分布は物質に固有のものである.
- 14 William L. Bragg and H. Lipson, “Structure of Metals,” *Nature*, 141 (1938): 367–368.
- 15 A. J. Bradley and A. Taylor, “An X-ray Investigation of the Cause of High Coercivity in Iron-Nickel-Aluminium Alloys,” *Nature*, 140 (1937): 1012–1013.
- 16 John Jenkin, *William and Lawrence Bragg, Father and Son: The Most Extraordinary Collaboration in Science* (Oxford: Oxford University Press, 2008), p. 432.
- 17 Braun, “Mechanical Properties of Solids,” op. cit. (注 1), p. 337.
- 18 William L. Bragg et al., “A Discussion on Plastic Flow in Metals,” *Proceedings of the Royal Society, A*, 168 (1938): 302–317, on pp. 302–303.
- 19 Ibid.
- 20 William L. Bragg, “The Structure of a Cold-worked Metal,” *Proceedings of the Physical Soci-*

ety, 52 (1940): 105–109.

21 金属を高温にした後、大気中でそのまま徐々に冷却して再結晶化する処理方法.

22 William L. Bragg, “A Theory of the Strength of Metals,” *Nature*, 149 (1942): 511–513.

23 Soraya de Chadarevian, “Model and the Making of Molecular Biology,” in Chadarevian and Hopwood, eds., *Models*, op. cit. (注 5), pp. 339–368, on p. 343.

24 Nevill F. Mott, “Memories of Early Days in Solid State Physics,” *Proceedings of the Royal Society, A*, 371 (1980): 56–66, on p. 65.

25 Anthony Kelly, “Lawrence Bragg’s Interest in the Deformation of Metals and 1950–1953 in the Cavendish - A Worm’s-eye View,” *Acta Crystallographica, A*, 69 (2013): 16–24, on p. 21.

26 Ibid.

27 Kelly, “Lawrence Bragg’s Interest,” op. cit. (注 25).

28 John F. Nye, interview by Paul Merchant, June 4, 2010, National Life Stories: An Oral History of British Science, C1379/22, Oral History, British Library, <<http://sounds.bl.uk>> (accessed July 4, 2013), p. 72. オロワンはこれはブラッグのアイデアだったという. Egon Orowan, interview by S. T. Keith, October 4, 1981, Niels Bohr Library and Archives, American Institute of Physics, <<http://www.aip.org/history/ohilist/31787.html>> (accessed July 4, 2013).

29 William L. Bragg, “A Model Illustrating Intercrystalline Boundaries and Plastic Flow in Metals,” *Journal of Scientific Instruments*, 19 (1942): 148–150.

30 Nye interview, op. cit. (注 28), p. 52.

31 Francis R. Nabarro and A. S. Argon, “Egon Orowan. 2 August 1902 – 3 August 1989,” *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, 41 (1995): 316–340, on p. 327.

32 Ibid.

33 Nye interview, op. cit. (注 28), p. 75.

34 William Henry Bragg, *Concerning the Nature of Things* (London: G. Bell & Sons, 1925), pp. 99–102.

35 Nye interview, op. cit. (注 28), p. 75.

36 Nye interview, op. cit. (注 28), p. 78.

37 Summarized Proceedings of Conference on X-ray Analysis-London 1946, *Journal of Scien-*

tific Instruments, 24 (1947): 1–21.

38 橋本毅彦「金庫から現れた歴史的フィルム」『学鑑』第100巻, 第6号(2003年), 12–15 ページ.

39 Bragg, “A Model Illustrating Intercrystalline Boundaries and Plastic Flow in Metals,” op. cit. (注 29), p. 149.

40 Braun, “Mechanical Properties of Solids,” op. cit. (注 1), p. 336.

41 Ibid.

42 J・D・ワトソン(江上不二夫・中村桂子訳)『二重らせん：DNAの構造を発見した科学者の記録』(講談社, 2012年), 103 ページ.

43 ブラッグらは, 1954年に泡モデル実験の映画を再製作した.

44 William L. Bragg, “The Yield Point of a Metal,” in *Report of a Conference on Strength of Solids* (London: Physical Society, 1948), pp. 26–29. この会議でも泡モデル映画が上映された.

45 Institute of Metals, ed., *Symposium on Internal Stresses in Metals and Alloys* (London: Institute of Metals, 1948).

46 Ibid., pp. 221–226.

47 Bragg, “A Model Illustrating Intercrystalline Boundaries,” op. cit. (注 29), p. 149.

48 William L. Bragg to C. E. Harrold, July 20, 1946, Papers of Sir Lawrence Bragg 1890–1971, 78B/460, the Royal Institution.

49 William L. Bragg to Max von Laue, October 30, 1946, Papers of Sir Lawrence Bragg 1890–1971, 78B/477, the Royal Institution.

50 再現実験の試みについては, 6章で述べる.

51 Nye interview, op. cit. (注 28), p. 78.

52 William L. Bragg and John F. Nye, “A Dynamical Model of a Crystal Structure I,” *Proceedings of the Royal Society, A*, 190 (1947): 474–481.

53 M. M. Nicolson, “The Interaction between Floating Particles,” *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 45 (1949): 288–295.

54 William L. Bragg and W. M. Lomer, “A Dynamical Model of a Crystal Structure II,” *Proceedings of the Royal Society, A*, 196 (1949): 171–181.

- 55 W. M. Lomer, "Blowing Bubbles with Bragg," in John M. Thomas and David Phillips, eds., *Selections and Reflections: The Legacy of Sir Lawrence Bragg* (Northwood, Middlesex: Science Reviews, 1990), pp. 115–118, on p. 115. ロマーが何年からブラッグの下に派遣されたかは定かではない。前掲注にあげた論文の受領日が 1948 年 8 月 27 日付になっていることから、少なくとも 1948 年 8 月にはすでにブラッグに協力していたと考えられる。
- 56 W. M. Lomer, "A Dynamical Model of a Crystal Structure III," *Proceedings of the Royal Society, A*, 196 (1949): 182–194.
- 57 W. M. Lomer, "The Forces between Floating Bubbles and a Quantitative Study of the Bragg 'Bubble Model' of a Crystal," *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 45 (1949): 660–673.
- 58 W. M. Lomer and John F. Nye, "A Dynamical Model of a Crystal Structure IV : Grain Boundaries," *Proceedings of the Royal Society, A*, 212 (1952): 576–584.
- 59 David Phillips, "William Laurence Bragg," in Thomas and Phillips, eds., op. cit. (注 55), pp. 1–69, on p. 39.
- 60 William L. Bragg, "Slip in Metals," *Physica*, 15 (1949): 83–91.
- 61 "Discussion. Session III- Effects Associated with Internal Stresses: Effects on a Microscopic and Sub-microscopic Scale," in the Institute of Metals, ed., *Symposium on Internal Stresses in Metals and Alloys* (London: the Institute of Metals, 1948): 432–462, on pp. 437–438.
- 62 Bruce Chalmers, *The Structure and Mechanical Properties of Metals* (New York: John Wiley & Sons, 1951), p. v.
- 63 W. Thornton Read, *Dislocations in Crystals* (New York : McGraw-Hill, 1953), p. ix.; Morris Cohen, preface, in J.S. Koehler et. al., *Dislocations in Metals* (New York: American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1954), p. v.
- 64 Summarized Proceedings of Conference on X-ray Analysis-London 1946, op. cit. (注 37).
- 65 Phillip Morrison, "Physics in 1947," *Applied Physics*, 19 (1948): 311–331.
- 66 Lomer, "Blowing Bubbles with Bragg," op. cit. (注 55).
- 67 Nevill F. Mott, "Dislocations and the Theory of Solids," *Nature*, 171 (1953): 234–237.
- 68 Nevill F. Mott (平田森三訳)「固體に於ける不完全性」『日本物理学会誌』第 9 巻,

第1号(1954年), 23–30 ページ, 引用箇所は 25 ページ。

69 Ibid.

70 Read, *Dislocations in Crystals*, op. cit.(注 63), pp. 26–28.

71 A. J. Forty, “Direct Observations of Dislocations in Crystals,” *Advances in Physics*, 3 (1954): 1–25.

72 B. A. Bilby, review of *Les Dislocations*, by J. Friedel, *Acta Crystallographica*, 10 (1957): 488.

73 J. Dyson, “An Optical Analogue of X-ray and Electron Diffraction Patterns,” *Nature*, 162 (1948): 140–141.

74 J. Dyson, “Optical Diffraction Patterns Produced by Bubble Rafts,” *Proceedings of the Royal Society, A*, 199 (1949): 130–139.

75 福島栄之助「泡模型による結晶構造」『応用物理』第 22 巻, 第 7–8 号 (1953 年), 251–258 ページ, 引用箇所は 251 ページ。

76 歴史的実験の再現については, チャンが分類を行いその目的を述べている。

Hasok Chang, “How Historical Experiments Can Improve Scientific Knowledge and Science Education: The Case of Boiling Water and Electrochemistry,” *Science and Education*, 20 (2011): 317–341. 著者の再現実験はチャンの分類によれば, 現象を再現することを主たる目的とする物理的再現 (physical replication) にあたり, 過去をよく理解するための歴史的再現 (historical replication) とは異なり, 材料や器具などを当時のままを再現するものではない。

77 1940–50 年代のオレイン酸と同じ純度のものを入手することは不可能である。時代とともに天然資源の精製技術が向上している。現在は, 不純物の少ない石けん溶液を日用品として容易に入手でき, 泡を安定化するポリオキシエチレンアルキルエーテルが汎用されている。そこで著者は, 泡の振舞いと泡が表す結晶構造を観察するという目的を最優先し, ブラッグらが用いた処方を使用せず, 市販の液体洗剤にグリセリンと水をまぜて泡モデル実験を行うことにした。最終的に使用した石けん溶液の処方では以下の通りである。ミヨシ石鹸社製「無添加添加食器洗い石けん」50mL (成分: 純石けん分 28% 脂肪酸カリウム), プロクター・アンド・ギャンブル・ジャパン社製「さらさ」50mL (成分: 界面活性剤 24% : ポリオキシエチレンアルキルエーテル,

リニア・アルキルベンゼン・スルホン酸塩、脂肪酸ナトリウム、安定化剤、分散剤、アルカリ剤、水軟化剤（クエン酸）、天然樹木エッセンス、酵素）、健栄製薬社製「グリセリン」50mL（純分 84–87% 含有）、水 12.5mL。サイズのそろった直径 1mm の泡を作ることができるようになるまでに著者の場合約 6 日間かかった。また、サイズの異なる泡があると、転位を表すような泡の配置が現れた。図 1(a)–(c) はこのようにして作成した泡の写真である。

78 前掲、福島「泡模型による結晶構造」（注 75），251 ページ。

79 日本油化学会編『第 4 版 油化学便覧—脂質・界面活性剤』（丸善，2001 年），604 ページ。

80 前掲、福島「泡模型による結晶構造」（注 75），251 ページ。

81 前掲、福島「泡模型による結晶構造」（注 75），251 ページ。

82 伏見康治は、1950 年代当時、アメリカなどに比べて貧しい日本でも 1–2 万円あれば泡モデル実験ができると指摘している。「座談会 物性論の進歩とその社会的背景」『科学』第 23 号，第 10 号（1953 年），516 ページ。

83 Einosuke Fukushima and Akiya Ookawa, “Observation of the Grain Boundary in Soap Bubble Raft-Part I, Static Feature of the Grain Boundary,” *Journal of the Physical Society of Japan*, 8 (1953): 609–614.

84 W. Thornton Read and William Shockley, “Dislocation Models of Crystal Grain Boundaries,” *Physical Review*, 78 (1950): 275–289.

85 Einosuke Fukushima and Akiya Ookawa, “Observation of the Grain Boundary in Soap Bubble Raft Part II. Dynamical Behaviour of the Grain Boundary,” *Journal of Physical Society of Japan*, 9 (1954): 44–51.

86 Nevill F. Mott, “Slip at Grain Boundaries and Grain Growth in Metals,” *Proceedings of the Physical Society*, 60 (1948): 391–394.

87 Fukushima and Ookawa, “Observation of the Grain Boundary Part II,” op. cit. (注 85).

88 Einosuke Fukushima and Akiya Ookawa, “Some Characters of the Soap Bubble Raft in a Vibrating State,” *Journal of Physical Society of Japan*, 10 (1955): 970–981.

89 1953 年の国際理論物理学会議の本会議に先立って日光で開催された。このシン

ボジウムは、当時国際物理学連合会長であったモットの強い勧めにより開催された。鈴木秀次「Mott と Frank」『日本物理学会誌』第 32 巻, 第 10 号 (1977 年), 766 ページ。

90 福島は東京都立大学, 大川は学習院大学の所属であった。商用電源は東日本は 50Hz なので, 90Hz は電源との倍音が抑えられる値である。

91 Fukushima and Ookawa, “Some Characters of the Soap Bubble Raft,” op. cit. (注 88).

92 Chalmers, *The Structure and Mechanical Properties of Metals*, op. cit. (注 62).

93 Charles Goodeve, “Iron Atoms in the Service of the Electrical Engineer,” *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 99 (1952): 225–232.

94 現在では, 原著論文の補足情報としての転位の動画が, PDF ファイルのリンクを通じて出版社のウェブサイトで見聴できるようになっている。たとえば, Sang Ho et al., “*In situ* Observation of Dislocation Nucleation and Escape in a Submicrometre Aluminium Single Crystal,” *Nature Materials*, 8 (2009): 95–100.