

随 想

私の転位論

武内 朋之*

1. はじめに

私がこれまで考えてきた転位論について、その背景や論文に書かれなかったことを思うままに書いてほしい、という依頼がきました。ちょうど定年をむかえたときでもあり、一つの区切りをつけるために、お引き受けしました。まず転位との付き合いの略歴から始めます。

大学を卒業した頃は、固体物理の理論に興味を感じていました。その翌年の1954年に名古屋工業技術試験所に就職し、金属材料の研究をすることになりました。その頃は転位論が流行し始めていたときでしたので、教養としていくつかの基礎的な文献を読みました。そして結晶の塑性変形は転位の移動によって引き起こされる、ということは良く分かりました。

その後、1959年に金属材料技術研究所に移りました。その頃から、結晶内の転位を直接観察する実験が盛んになり、はっきりした実験事実をもとにして結晶塑性を考えていけるようになりました。金材研にも、転位論を主題として鉄及び鉄合金の単結晶を用いた塑性変形と再結晶に関する総合的な研究を推進するグループができました。私もこのグループの一員として参加して、鉄単結晶の機械試験を分担しました。このグループでは、電子顕微鏡による転位の動的な挙動の直接観察も盛んに行われました。私自身は電顕観察の仕事はしませんでした。これらの転位に関する生の実験データに日常的に接することができて、変形応力と転位配列の関係がしだいに見えてくるようになりました。その頃は世界的に見ても、転位と結晶塑性に関する研究が非常に盛んで、基本的な実験事実が次々と明らかにされていきました。

私は1975年頃から延性破壊の研究に移りました。材料の破壊靱性は、き裂進展の始まるまでに試験片に与えられたエネルギー、あるいは開口変位に着目して、定量化されています。これをき裂先端付近に形成される応力分布に着目して捉えていくことができないか、というのが私の破壊力学の出発点でした。材料の延性破壊を理解するためには、まず現実の応力分布のもとで塑性変形がどのように起こり、それがき裂の発生や進展とどのように結びつくかを知りたいと思ったからです。そこで必要なものはマクロな応力分布です。これを計算で求めるた

めには、応力場の源としての転位を弾塑性論の中に持ち込むことが有効だろうと考えました。

以上のような転位との付き合いの結果、材料強度に係る転位にはいろいろな側面があることが分かりました。これを整理すると、次の三つになります。第一は弾性論における弾性場の源の一つとしての転位、第二は結晶の中に存在する格子欠陥の一つとしての転位、そして第三は材料の微細組織の構成要素の一つとしての転位です。材料強度を物理の立場で捉えていくためには、これらのすべての側面を、材料の性質とそれの置かれた状況に応じて、総合的に取り入れていかなければなりません。これが私の転位論の基本的な立場です。つぎにそれぞれの側面について、私の考えをまとめてみました。

2. 弾性場の源としての転位

転位は弾性体の中に分布する応力やひずみの源の一つです。固体内の応力やひずみは、電場や磁場と同じように、場として扱える対象です。電磁気学においては、場の源である電荷や電流は、電場や磁場に特定の微分操作を行った結果と結び付いて、数学的な美しい体系として記述されています。弾性論においても同じように記述できるのではないかと感じました。弾性論を少し勉強してみましたら、3次元問題は非常に複雑ですが、2次元問題は複素関数を使って非常にスマートに記述されていました。しかし、場の源としての外力と転位を、応力場とひずみ場の微分操作から導き出すという記述はどこにも見あたりませんでした。

10年くらい前、本屋で立ち読みしていたとき、物理でよく使われるDIRACのデルタ関数が、数学の超関数の分野で、解析関数の境界値として厳密な意味付けがされたということを知りました。さっそくそこに引用されていた本を買って読んでみました。数学者の考え方をたどることはできませんでしたが、次の意味を持つ記述が目にとまりました¹⁾。

「複素数を $z=x+iy$ とし、その共役複素数を $\bar{z}=x-iy$ とすると、 $1/z$ の \bar{z} による偏微分が複素数空間の中のデルタ関数 $\delta(z)=\delta(x)\delta(y)$ である。」

この公式を複素数表示の応力とひずみに当てはめてみましたら、体積内の一点に働く集中力 (F_x+iF_y) は、応力の微分として導かれるデルタ関数の係数であり、有限のバーガースベクトルをもつ刃状転位 (b_y+ib_x) は、ひずみの微分として導かれるデルタ関数の係数になることが分かりました。これにより複素関数表示による2次元弾性論は、AIRYの応力関数から場の源まで含めて、全体が完結した微分形式の公式群として表現できるようになり、物理的なイメージが非常にとらえやすくなりました²⁾。

弾性論の目的は、現実の試験片あるいは部材に外力が

* 元 金属材料技術研究所

加えられたときの、その外形の変化と内部に現れる応力分布を計算することです。場を数学の問題として取り扱うときには、常に無限大の空間を考えています。弾性論で意味のある問題は有限物体です。これを場の問題として扱うとき、二次元の場合には、物体を無限大空間の中の一つの閉曲線で囲まれた領域として表現します。物体が変形するときには、その外部の空間と重なり合う領域と、すき間のできる領域があらわれます。このとき重なり合う領域を削り取り、すき間のできた領域に詰めものをすれば、無限大の空間の中に埋め込まれた物体の応力分布になります。この操作は境界上に刃状転位を分布させることと等価です。このようにすると、外力とつながっていない境界は自由表面の境界条件を満たし、外部の空間には応力分布は現れません。この境界上に分布する刃状転位が、数学でいう超関数の実体です。内部応力の源になる局在する塑性ひずみ等も、転位分布に置き換えることができます。

境界条件としての超関数は、解析的には積分方程式の解として得られるものですが、数値解は次のようにして求めることができます。まず連続関数として表された変位の食い違いを、階段関数として近似することにします。これは上に述べたデルタ関数として表された転位を、境界上に有限個配置することに相当します。物体の境界上に転位が存在しない状態から出発して、境界の応力状態が自由表面の境界条件に次第に近づいていくように、それぞれの点の転位の大きさと方向を変化させていきます。この手続きを取れなくなるまで繰り返して、得られた最終的な転位配列から、物体の中の応力分布と変位の数値解が得られます。一例としては、破壊試験に用いられるコンパクト試験片の応力分布と形状変化の計算が行われています³⁾。このような計算は、応力集中部の最大せん断応力の大きさを、せん断降伏応力に等しくなるようにする局在塑性域にも使うことができます。

この方法の特徴は、必要とする条件を満たす転位配列に取れんさせていく手続きです。現在のところこの部分には対象に応じた工夫が必要です。今後、汎用的な方法が見つければ、任意の形状の2次元物体に外力が加えられたときの応力分布が、光弾性の結果と同じようなパターンとして示すことができるようになります。

3. 格子欠陥としての転位

転位論が発展し始めた1950年代には、格子欠陥としての転位論は素晴らしい進歩をしました。その間に転位の基本的な性質はほとんど明らかにされ、その成果はさまざまな材料技術の進歩に大きな貢献をしました。

その頃、材料強度に関係する転位の挙動として多くの考えが提案されました。それらの中で、私が素直に受け入れることのできなかつた考えに、次の三つがありまし

た。(1)溶質原子による固着から転位が解放されることによる降伏、(2)転位の交差すべりによる加工硬化率の減少、(3)線張力と有効質量をもつ弦として近似された転位の振動、です。これらはその頃出版された結晶塑性の転位論の入門書の中に取り入れられ、材料強度はこの延長上で解決されるであろう、というようなムードが1950年代の終わりごろにはありました。しかし私は、材料強度を定量的に予測するためには、もっと別の考え方が必要だろうという感じを持ちました。

結晶の塑性変形は大量の転位の流れによって起こり、加工硬化は結晶内に形成される転位配列によって起こるということは、結晶塑性の転位論の源流といわれている、1934年のTAYLORの論文⁴⁾で指摘されています。転位に関する実験事実をもとにした応力-ひずみ曲線の計算の最初のもは、1962年のJOHNSTONの論文⁵⁾です。これは上降伏点現象を転位の動的な性質として説明しました。これを読んだとき、この考え方は結晶塑性の転位論の新しい方向を指し示すものと受け取りました。そして次の目標は、加工硬化曲線をシミュレートできる転位モデルを、これらの考え方の延長線上に構築することだと感じ、その道を捜し始めました。

4. 微細組織の構成要素としての転位

結晶内に形成される転位の集団的な配列は、微細組織の一種です。加工硬化はこの微細組織のひずみによる変化に対応します。これをモデル化するためには実験事実が必要です。そこで大量の鉄単結晶を使って、加工硬化特性に及ぼす結晶方位及び変形温度の影響と、結晶内に形成される転位配列との関係を調べました。その結果分かったことは、加工硬化した結晶内には転位密度の高い層状の領域が形成され、そのセル壁の密度が変形応力にほぼ比例することでした。セル壁は多くの場合、主すべり系のすべり面から数度傾いた面に沿って形成されることが分かりました。結晶内を流れる主すべり系の転位は、これらの層状領域に捉えられて刃状転位の双極子を形成し、セル壁の骨格になります。これに共役すべり系の刃状転位が止められます。このときに形成される転位配列の作り出す内部応力が、加工硬化の実体であると考えました。

このモデルによりますと加工硬化の大きさは、骨格をなす刃状転位双極子の最小間隔で決まります。間隔の小さな双極子は、刃状転位の中心を通る自己拡散によって転位ループに変わることが知られていました。これが変形後期の加工硬化率の減少の原因と考えました。

加工硬化した結晶内に現れる内部応力を直観的な言葉で言い換えると、結晶内部には変形中の複合材料と同じような内部応力が分布しているということです。このような構造の中での転位の流れ方と止められ方、そしてそ

の結果として起こる転位配列の変化を、数学的なモデルとして組み立てることにより、鉄の[110]単結晶の変形曲線のコンピューターシミュレーションができるようになりました。このモデルの中には、格子欠陥としての転位論のなかで明らかにされた、個々の転位の性質に関する多くの成果が取り入れられています⁶⁾。最近、このモデルを発展させて、実用材料としては最も単純な内部組織を持つオーステナイト・ステンレス鋼のクリープ曲線及び破断寿命を、材料定数及び転位とその配列に関するいくつかのパラメーターから予測することができるようになりました⁷⁾。

実用材料の強度特性を決めているものは、その中の微細組織です。それには加工硬化によって形成される絡み合った転位やセル組織のほか、結晶粒界、析出物、変態組織等があります。材料の変形挙動の定量的な予測のためには、これらの微細組織の空間的な配置と、その中を流れる転位と微細組織との相互作用、そしてそれによって変化していく転位配列を表すモデルが必要です。最近材料のマイクロ組織をコンピューターに乗せる研究が進んでいます⁸⁾。この成果をモデルの中に取り入れていけば、複雑なマイクロ組織を持つ材料の塑性変形挙動のシミュレーションを実現するプログラムを作ることは可能でしょう。そのために必要なことは、実現可能な問題の設定と、それをやり遂げる根気です。このようなことを一

つずつ積み上げて、モデルを育てていけば、取り扱える実用材料の範囲はしだいに広がっていきます。

5. む す び

実機の部材の破壊挙動を予測するためには、材料の微細組織、与えられる外力、温度、そして化学的な環境を指定する多くのパラメーターと、それぞれの状況に応答する多くの要素的な転位モデルから組み立てられたシステムが必要です。転位論を基礎にした材料強度学を、材料の寿命予測に役立てるということは、このようなシステムを育てていくことです。これは、材料科学をコンピューターに教えることでもあります。

文 献

- 1) 柏原正樹, 河合隆祐, 木村達雄: 代数解析学の基礎 紀ノ国屋数学叢書, 18 (1980), p. 104
- 2) T. TAKEUCHI: Theoretical and Applied Mechanics, 32 (1982), p. 301 [Univ. Tokyo Press]
- 3) 武内朋之: 日本機械学会論文集 A, 47 (1983), p. 1135
- 4) G. I. TAYLOR: Proc. R. Soc. (London), A145 (1934), p. 362
- 5) W. G. JOHNSTON: J. Appl. Phys., 33 (1962), p. 2716
- 6) T. TAKEUCHI: J. Phys. Soc. Jpn., 32 (1972), p. 677
- 7) 武内朋之, 門馬義雄, 坂本正雄: 材料とプロセス, 3 (1990), p. 841, 鉄と鋼, 投稿中
- 8) 矢田浩, 瀬沼武秀: 日本金属学会会報, 29(1990), p. 430

書 評

金属腐食の現地試験と評価

日本材料学会腐食防食部門委員会 編

本書は国民総生産の4~5%にも達するとされる設備や機器の腐食被害に対して、どのように対処すべきかを具体的にまとめたものである。腐食はすべての産業活動にとって最も困惑する問題の一つであり、損傷の実状を十分に把握すると共に、対応策を立案し、速やかな実行が要求される。

実環境、条件および腐食現象を再現するには慎重かつ適切な現地調査と記録、整理が重要であるが、それには相当の経験と熟練を要する。対象となる装置やプロセスによって異なるので、それぞれに適した調査項目が必要となる。また、腐食は材料と環境、条件が相互に関わりあって起こる現象であるから、材料自体の特性やその加工履歴および構造体としての稼働実績の把握も重要であ

る。

以上のような点に関して、本書には現地調査の便宜を考えて、これらの調査項目を記入できる調査票が載せられている。この調査票はチェックリストとしても利用できる。

さらに本書では調査項目における腐食諸因子の影響度と実験室的再現試験結果との関連および腐食速度の算定とその問題点についても種々のケースについて述べられている。

本書の各章は試験装置、評価法、基礎データ、写真等が適切にまとめられている。また、参考文献も多く記載されており、金属腐食トラブル対応あるいは防食設計、管理に有用であろう。本書の構成は次のとおりである。

1. 緒論, 2. 現地調査, 3. 金属材料の熱処理と腐食挙動, 4. 試験方法とその選択, 5. 実験室試験の基礎と解析, 6. 金属材料の耐食性評価法, 7. 有機被覆鋼材の耐食性評価, 8. 環境の腐食性評価法, 9. 現地試験, 10. 実績と試験の比較例 (川鉄鋼板(株) 木村 肇)

A 5判 280 ページ 定価 7500 円

1990年5月 さんえい出版発行