

談 話 室

材料強さの未来像
—技術から科学へ—

武 内 朋 之*

材料強さを科学の問題としてとらえたのは、17世紀に書かれた、ガリレイの『新科学対話』(岩波文庫)に遡る。そこで扱われた主要な問題は、構造物の破壊に対する安全性であつた。その時から400年の間に、弾性論の数学的な展開、結晶構造に着目した固体の力学的な挙動、転位の移動として捉えた結晶塑性論、材料の微視組織と破壊の関連等、科学の個別的な分野では、さまざまな進歩がなされてきた。しかしながら、現在これらの成果を集積した科学の体系を基にして、現実の材料の破壊挙動をどのくらい定量的に予測することができるか、という視点から眺めてみると、材料強さの基礎を永年にわたって研究してきたものとしては、まことに残念ながら、ほとんど無力であつたと言わなければならない。

技術という観点から見た材料強さに関する知識の進歩は、科学とは違った流れをつくっている。すなわち、材料の破壊による大事故が、人為的なミスではなくて、我々の材料の性質に対する知識の不足によつて起こつたときには、その対策として大規模な工学的な研究がおこなわれ、これが技術の進歩に貢献してきた。このような事故としてよく引用される例としては、(1)鉄道が発展するときに多発した車軸の疲労破壊、(2)高压ボイラーのクリープ破壊、(3)溶接船の低温脆性による破壊、(4)成層圏旅客機コメットの機体の低サイクル疲労破壊、(5)原子力発電所の配管の応力腐食割れ、等がある。破壊現象に関連する要素過程には、外力の与えられかた、寸法と形状、各種の物性常数、温度、原子の拡散、化学的な環境など、さまざまなものがある。これらの中のどの要素が組み合わされて破壊に至つたか、そしてその中のどの要素が主要な働きをしたかに関する現象的な側面を明らかにすることにより、技術は進歩してきた。安全性を保証するための最も確かな知識は、現在でもなお過去の経験を集めたカルテの集積であると言われている。

材料強さを固体物理学の対象としてとらえるためには、現象の単純化、理想化、極限化、といった手続きをへて、個々の要素過程を明らかにすることから始めなければならない。そのための一つ方法としては、その力学過程を(1)塑性変形の開始(降伏)、(2)変形による内部組織の変化(加工硬化)、(3)き裂の発生とその進展(破壊)、の三つに分けることがおこなわれている。

これらの中で最も簡単な過程と考えられている降伏においても、個々の転位線の移動、それに関する温度、応力の影響、そして転位配置の結晶学的な問題など、さまざまな捉え方があり、究極的には結晶を構成する原子と、それを結び付けている電子の振舞いまで遡ることも必要になる。破壊の問題になると現象はまことに複雑であり、材料内部の微細組織のことだけでなく、結晶の表面と化学的な環境との相互作用のことまで加わってくる。そのため、破壊にかかわる要素過程の数は、降伏現象のときと比べて桁違いに多くなってくる。

このように、材料強さを固体物理の分析的な方法論で捉えようとする、細かい無数の問題の中に拡散していき、永遠の課題となつてしまう。これまでに要素過程として捉えられた膨大な知識を役立たせるためには、個々の要素過程の間の有機的な関係を基にして組み立てられた、全体として有用な働きができるようなシステムを構築しなければならない。現在知られている転位と格子欠陥に関する膨大な知識が、材料強さの科学的な理解のためにほとんど無力であるのは、このような体系的なシステムを構築するという総合的な方法論と、それにそつた研究がほとんど行われなかつたためである。

材料強さを総合的な視点からとらえる定量的なモデルの一例を次に示す。図1は結晶の塑性変形における転位の役割をフローチャートとして示したものである。試験条件として試験片に与えられた力学的な拘束は、試験片の内部に転位の流れを作り出す。これは塑性変形の転位論による表現である。図の矢印が示すように、転位の流れは、試験条件としての力学的な拘束、個々の転位の性質、そして結晶内の転位配列によつて決められている。与えられた転位の性質と転位配列のもとで転位が流れるときには、試験片は試験機に対して一定の反作用を及ぼす。この反作用を連続的に記録した結果が変形曲線である。図の点線の中は、各種の条件下での、鉄の単結晶の変形曲線を予測するという目的で、転位に関する分析的な理論及び実験結果を有機的に組み合わせたコンピュータープログラムをあらわしている。その中には、転位の性質、自己拡散、及び転位配列等をあらわす各種の関数

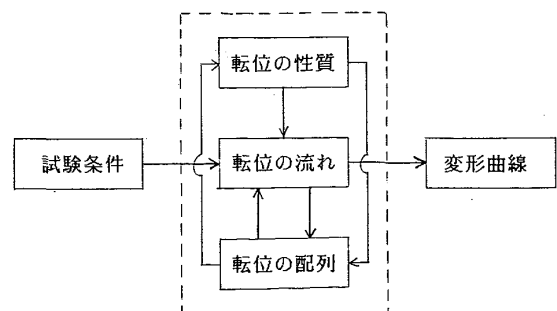


図1 結晶の塑性変形と転位の関係

* 金属材料技術研究所 機能材料研究部長

が組み込まれている。これに試験条件に関連する各常数を与えることにより、鉄単結晶の一軸引張試験の際の変形挙動を、広範な温度及び変形速度のもとにおける変形曲線群としてシミュレートすることができる¹⁾²⁾。コンピューター技術の進歩により、このような多数のパラメーターが互いに強く結び付けられている複雑なシステムの数値解を求めることは、極めて容易になつてきた。

技術においては図1の点線内はブラックボックスであってもよい。設計に必要な試験条件と変形曲線に関するデータがあれば十分である。これからの技術の対象はますます多様化し、しかもコストと効率の最適化が厳しく求められるようになるであろう。これに対し、これまでおこなわれていたような、技術としての対応だけで対処しようとするれば、設計に必要なデータを得るためのコストは限りなく増大するであろう。これを避ける道は、これまでに蓄積されてきた材料科学の知識を総合して、現実の構造材料に対する図1の点線内のコンピューターモデルを構築することである。今後の材料強さの科学の進むべき目標は、実機を構成する部材の実環境のもとでの変形及び破壊挙動を、精度よくシミュレートすることのできるシステムを作り出すことである。

最近のコンピューターの進歩は、スーパーコンピューターからパソコンに至るまで、それぞれのレベルにおいて、目ざましいものがある。これを背景にした情報革命というムードの下で、最近材料強さデータベースとか材料設計という言葉が聞かれるようになってきた。現在ではまだ有用なものではできてはいないが、数年後にはある程度は実用的なものになり、おそらく21世紀の材料技術の体系の中では、これらは重要な働きをするようになるであろう。このような未来像に立てば、材料強さデータベースというものの姿が、将来どのようなものであるべきかということを、ぼつぼつ組織的に考え始める時期にきているのではないかと考えている。

構造材料に求められているものは、それで作られた部材が、現実の環境(力学的、熱的、化学的)の下で示す振舞いと、それに必要とされる幾つかの性質の総合的なバランス、そしてそれらの経済性を含めた最適化である。データベースがこのような目的に役立つものであるためには、材料の性格すなわちキャラクター化と呼ばれるものが、その中に取り込まれていなければならない。それには、各種の物性値から強度特性値、微視組織、材料欠陥の構造、そしてそれらの形成過程である製造工程まで含まれていることが期待されている。このような多様なデータを取り扱うシステムは、『マルチメディアデータベースシステム』と呼ばれており、情報処理専門家の間でも、最近やつとこの方向への研究が動き始めた段階である。その中には、数値、文字、図形、画像そしてこれらを総合的に関係づけるための手続き的な『知識』までも含まれると考えられている。こうなるとまさに人

工知能(AI)システムである。

構造材料においては、材料内部の微細組織が、非常に重要な意味をもっている。材料の専門家であれば、合金の組成とその微視組織を見れば、強度特性はある程度推定することができる。新しい構造材料の設計ということは、材料のミクロ組織の設計と言い替えてもよいであろう。それには、コンピューターシステムが材料のミクロ組織を認識し、さらにその認識した内容を画像として再現する能力をもつことが前提となる。材料組織の画像をコンピューターに理解させるためには、それに必要な材料科学の知識をあらかじめ教えておく必要がある。現在鉄鋼協会の特定基礎共同研究会に設けられている『画像解析による材料評価部会』は、組織的な活動としては、この方向に動き始めた初めてのものである。この部会ではまだ、フェライト結晶粒度とか脆性破壊率といった極めて初歩的な段階で苦しんでいるが、経験を積み上げることによって、しだいに成長していくことが期待されている。

このような現状を踏まえて、材料強さの科学が技術の中で有用な働きをするようになるときの未来像を描くとすれば、その実現を進めるような努力をはじめるのは当然であろう。その第一は、材料評価あるいは材料設計に必要な知識をコンピューターの言葉に翻訳し、少しずつ覚えさせていきながら、しだいに大きな体系化されたシステムへと成長させていくことである。このようにして、図1で示したような働きを持つシステムとして、いろいろな材料の実環境の下における変形・破壊挙動をシミュレートすることができるようになれば、材料強さ専門家システムとしての存在価値は認められるであろう。第二は、上の知識ベースシステムと表裏一体の関係になる材料強さデータベースシステムの構築である。上の知識ベースを技術の中で有効に働かせるためには、どのようなデータが必要かに関する社会的なコンセンサスも必要になるであろう。これは材料強さの科学の体系にもつながることである。これに関連して現在の技術の現状に関して、少し批判的なことを述べさせていただきたい。

金属材料の引張試験法は、1920年頃アメリカで規格化された。これは金属材料の静的な強さに着目し、試験片への負荷速度を一定にして試験することを基本としている。その後アメリカでは1930年代に、板材の加工性からんで、変形応力の引張速度依存性に関する研究がおこなわれたが、この事実が試験規格の中に取り入れられることなく、現在に至っているようである。他方1950年頃から広く普及した変位速度を一定に制御できる試験機は、その後、材料強さに関する基礎的研究分野では広く用いられてきた。またこの試験法は、構造材料として用いられるプラスチック及び関連する複合材料の分野では、引張試験規格として採用されている。

材料強さを科学の問題として捉えて、材料の変形挙動

をシミュレートしようとするときには、材料の示す変形応力の歪み速度依存性は、無くてはならない量である。また延性のある材料の引張試験において、最大荷重点を過ぎた後のしほり過程と、最終的に破断するときの真応力は、靱性を考えるときに必要な最も重要な性質であるにもかかわらず、現行の試験規格では全く無視されている。ここで、この二つの量の有用性を理解していただくために、簡単な説明をさせていただく。オーステナイトステンレス鋼におけるき裂の進展条件は、丸棒試験片で得られる比例限度力と破断真応力の比によつて定式化できることが提案されている。そしてこの比を用いて靱性のデータを整理してみると、その値が2あたりでは平面ひずみ型のき裂の進展がみられ、3-4を越えると平面応力型のき裂の進展に変わり、靱性値が非常に大きくなることが示されている³⁾。低温脆性においては、鋼の降伏応力が室温以下で温度の低下と共に上昇し、しかも歪み速度依存性も大きくなることが重要である。この性質により、き裂進展条件としての降伏応力と破断真応力の比が、低温で急速に小さくなると考えれば、低温脆性の一般的な傾向は理解することができる。いずれの場合でも靱性を高めるために最も大事なことは、材料常数としての破断真応力を高めるように材料のミクロ組織を改良することである、という結論になる。

鉄鋼材料の材料強さの技術に関する国内の現状の一端は、最近の日本鉄鋼協会材料研究委員会報告に示されている⁴⁾。この中で靱性という量に関係する実験データとしては、シャルピー衝撃値、遷移温度、から始まつて、 COD , J_{IC} , K_{IC} 等、さまざまな測定値が用いられている。破壊現象に影響のあるパラメーターとしては、温度、変形速度、化学的環境だけでなく、形状、寸法の効果が本質的である。この複雑さの奥で、靱性を支配している最

も重要な量は、破断真応力であり、これは温度や引張速度にはほとんど依存しない材料常数である。このことに着目すると、靱性の問題は非常に分かりやすい形に整理することができる。分析的な科学という見方からすれば、き裂の発生と進展は、局所的な現象として捉えることができる。このような破壊の素過程は、丸棒かコンパクト試験片かあるいは実機の部材か、ということにはよらない。変化するのは、形状や寸法の効果として現れるひずみの局在性や三軸応力などであり、これらは連続体の力学として数値解を求めることができる現象である。このようなものも含めて、材料強さの科学的な知識を図1のようなコンピューターモデルとして構築することができれば、例えば、材料の一軸引張試験から得られる、応力-歪み特性とそれの打ち切りの起こる破断真応力を材料パラメーターとして用いることにより、上に述べたさまざまな靱性パラメーターで象徴される各種の試験片の破壊挙動を、定量的にシミュレートすることができるようになるであろう。

材料強さの技術の中に科学を持ち込むための第一歩は、引張試験のデータから得られる変形応力の歪み速度依存性と破断真応力を、材料常数として認知することである。昨年の5月に、協会の共同研究課題として『金属材料の定変位速度引張試験法の標準化』を提案した考え方の背景は、以上のとおりである。

文 献

- 1) T. TAKEUCHI: J. Phys. Soc. Japan, **32** (1972), p. 677
- 2) T. TAKEUCHI: J. Phys. Soc. Japan, **35** (1973), p. 1149
- 3) 武内朋之, 安中 高, 西島 敏: 日本機械学会論文集 (A編), **51** (1985), p. 1385
- 4) 大橋延夫: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 747