

調査報告

生産技術研究所における破壊現象研究の現状と展望

Research Activities on Fracture in Institute of Industrial Science, University of Tokyo

増子 昇*・鈴木 敬愛**・渡辺 勝彦**

Noboru MASUKO, Takayoshi SUZUKI, Katsuhiko WATANABE

本所では多くの研究室が様々な立場から破壊現象に関係のある研究を行っている。ここでは、主として材料の強度と破壊に関係する本所の研究の現状を紹介し、材料科学の分野で本所が担うべき方向について若干の展望を試みる

1. はじめに

本所の全研究室のうちで、半数近い研究室がなんらかの形で破壊現象に関する研究を行っている。それは、構造物の強度に関する研究と、材料の強度に関する研究とに大別することができる。本所における構造物の強度に関する研究は「耐震構造学研究グループ(ERS)」を中心として多くの成果をあげてきた。一方、材料の強度に関しても、材料力学・破壊力学の分野において本所は大きな役割を果たしてきたが、金属学、機械工学等の分野においても材料破壊に関係のある多くの研究が行われている。

今日、材料科学の分野は目ざましい発展を遂げつつある。先端素材といわれるように多種多様な新しい材料が開発され、実用化されつつある。また、材料の用途は拡大し、使用される環境も多様化し、かつ荷重なものとなりつつある。このような状況において、材料強度の研究も既存の学問分野における研究ばかりではなく、それらの間の学際的研究の発展が必要となりつつある。理工学の総合的研究所としての本所が、材料科学の分野において果たすべく期待される役割もこの方向にあると考えられる。

このたび、本所に発足した「破壊現象研究グループ」(FFRC)には、材料力学、材料物性学、金属材料学、応用物理学等の分野から約25の研究室が参加している。この共同研究は、固体材料の破壊現象を上述のような立場から総合的に研究することを目標とし、破壊現象の力学的研究、物理的研究はもとより、セラミックスや非晶質等の様々な新素材の破壊機構の研究、破壊現象の計測手段の開発研究、材料の使用環境の多様化に対応する耐環境強度の研究、さらにコンクリートや砂礫のような材料

と構造物とを区別し難いものの強度の研究等、既存の学問分野にとらわれない学際的研究によって大きな成果が期待される多くの研究課題を含んでいる。

この調査報告は、「破壊現象研究グループ」の発足に際して行われたアンケート調査をもとにしてまとめたものであるが、構造物、とくに耐震構造学に関する研究は省かせていただいた。

2. 本所における破壊現象関連の研究分野

一口に「破壊の研究」といってもその中味は多様であり、対象とする現象、材料、さらにはアプローチの手法も様々で、その全容を図式的に示すことは容易ではないが、一応破壊に関する研究を「何々学」的研究といった側面より分類し、基礎から応用への観点を軸にその相互の関係を大ざっぱに示してみたものが図1である。生産技術研究所においては、図のほぼ全域にわたる研究が行われており、また現在直接には関係なくとも将来における破壊研究への結び付きが期待される研究分野も少なくない。ここでは便宜的ではあるが、図における「何年学」を軸にして、生産技術研究所における破壊関連研究分野について述べる。関連する研究室名を括弧内に示す。

破壊力学的研究 この立場からの研究は最近における破壊研究の一つの核の役割を果たしてきており、生産技術研究所においても北川英夫名誉教授¹⁾を中心として多くの成果をあげてきたが、現在もこの立場よりの研究はきわめて活発である。すなわち、破壊力学パラメータに関する基礎的な研究(川井、渡辺、結城)はもとより、その対象とする現象は脆性-延性破壊、疲労破壊、環境下における破壊等、およそき裂の関与する現象のほとんどすべてに及んでいる(渡辺、結城)。

また、破壊力学研究とは若干異なるが、独自の解析モデルあるいは理論を駆使しての材料力学的立場からの強度研究も盛んである。すなわち、剛体-バネ・モデルに

* 東京大学生産技術研究所 第4部

** 東京大学生産技術研究所 第1部

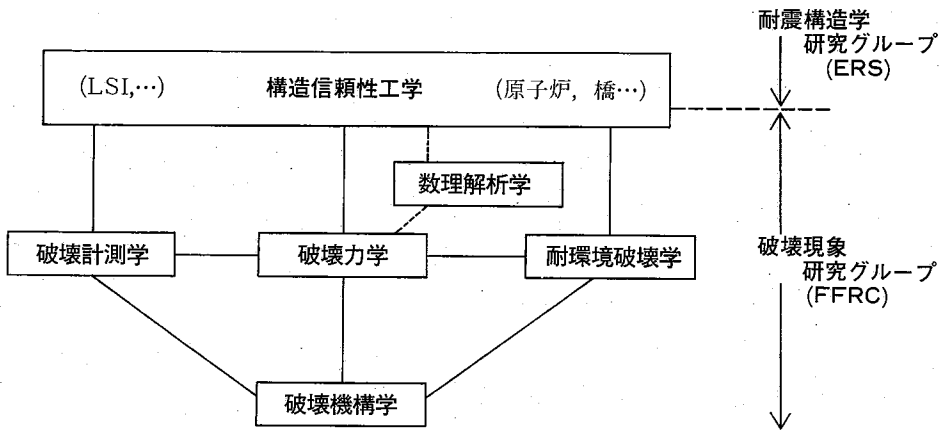


図1 破壊現象の研究分野。「破壊力学」以外の研究分野は「……学」として確立しているわけではない。

よる離散化解析モデル(川井)と、確立有限要素法(中桐)がそれであるが、これらの手法は材料強度の研究ばかりでなく構造物の力学的応答や信頼性の解析に適している。

破壊機構学的研究 固体材料において破壊の発生と進行の起こる原因や機構は、問題とする材料の種類とその使われ方によって様々である。本所における材料物性学、金属材料学、金属工学の分野では、いずれも研究対象とする材料の強度に関係して破壊の問題が扱われ、破壊の機構が調べられている。すなわち、イオン性結晶の破壊機構に関する結晶学的研究(鈴木(敬))、レーザーによる光学材料の破壊に関する研究(小倉)、金属中の粒界偏析による粒界われの研究(石田・森)、Si₃N₄系セラミックスの破壊強度と組織の関係(林)、各種セラミックス素材の強度と破壊(鈴木(敬)、安井)、ガラスの破壊(安井)、アモルファス合金の加工過程の解析(井野)、複合材料の強度(大蔵)等々、きわめて広い範囲の材料に及んでいる。これらの研究の多くは、材料開発を目的とするものであるが、必然的に強度評価の問題を伴うものである。また、コンクリートの強度に関する研究(小林(-)・魚本)、および土や砂の変形・強度試験に関する研究(龍岡)は従来材料学の立場では扱われていない分野であるが、材料学的アプローチの可能性と必要性を持つ研究領域と考えられる。さらに、将来破壊現象の原子過程の研究への応用が期待されるものとして、固体表面からの原子離脱過程の研究(辻・岡野)がある。

破壊計測学的研究 破壊現象の計測技術の開発は、破壊機構の研究の上でも、また破壊の原因となる材料内部の微小欠陥の非破壊検査の点からも重要なものである。特に、非破壊検査の方法としてのアコースティック・エミッション(A. E.)技術の開発は、本所において最も

大きな成果を上げた研究の一つである(尾上, 根岸, 山口)。一方、固体材料の破壊機構をミクロなスケールで観察、測定する手段として開発されつつある計測技術には、AE信号解析、超音波顕微鏡法等の各種の超音波技術(根岸, 高木(堅))やレーザー音響法(小倉・黒田)等があるが、これらについては後述する。

耐環境破壊学的研究 材料の使用条件、使用環境がもたらす破壊への影響は最も実際的な研究対象であるが、物理的にも化学的にも複雑な問題を多く含む研究領域であるから様々なアプローチの方法がある。本所におけるこの方面の研究としては、材料力学的立場から環境下における破壊の研究(結城・渡辺)、電気化学的立場からの金属の腐食・防食の研究(増子)、金属の表面酸化および酸化皮膜の変形と破壊の研究(本間)、コンクリート構造物の塩害に関する研究(小林(-)・魚本)等がある。

構造信頼性工学的研究 構造物の強度の研究は、「耐震構造学研究グループ」(ERS)が長年にわたり本所の大型共同研究プロジェクトとして活動してきた。その研究の現状については、たとえば文献2)を参照願いたい。

3. 破壊現象研究上の諸問題と展望

生産工学の領域において、破壊現象研究の窮極の目標は、破壊の防止、破壊に至るまでの寿命の予測、さらには寿命も含めた材料設計を可能にすることである。破壊と安全の谷間¹⁾にあって、この目標へ向けて破壊の研究を進めようとする時、越えなければならない峠(困難)は、(1) 破壊の物理(Fracture Physics)の確立、およびその破壊力学(Fracture Mechanics)との融合、(2) 破壊の計測技術、測定手段の開発である。

一方、技術革新、先端素材、機能材料等々、時代の流れの中にあつて実際的な要求として、破壊研究は

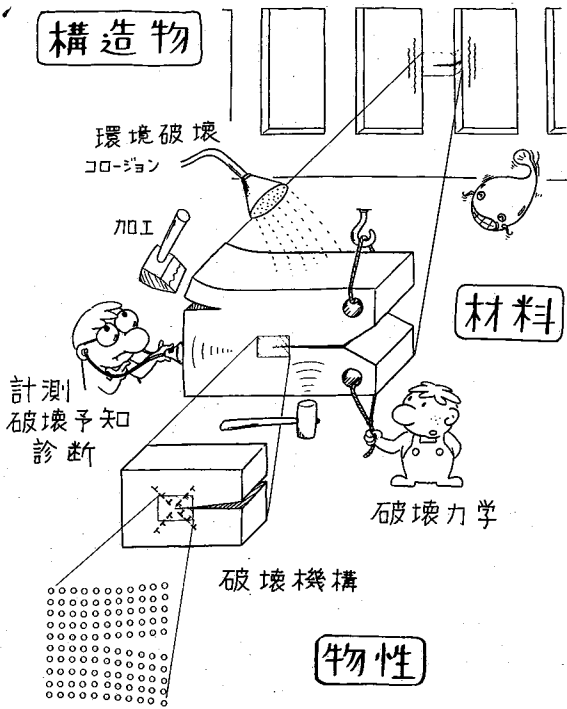


図2 破壊の研究——結晶構造をもつ固体材料(金属, 半導体, イオン結晶など)の破壊のマイクロからマクロに至る様々な立場の研究を模式的に描いた。(イラスト: 高木堅志郎)

(3) 多様化する材料の種類とその利用環境に対応しなければならない。

本所における研究の現状をもとにして、これらの問題についての説明と展望を試みる。

3-1. 破壊の力学と破壊の物理

いわゆる「破壊力学」は、材料が様な連続弾性体であることを前提として、鉄や鋼のような材料に適用する形で発達してきた。実際、連続弾性体近似が成り立つ限りにおいて、破壊力学はき裂の挙動を有効に評価する現実的な手段である。しかし、破壊力学の適用限界もしだいに明らかになっている。それは、一様性が成り立たない場合と、き裂先端で非線形挙動がはなはだしくなる場合である。

破壊力学の拡張という立場から、非線形挙動が支配的となるき裂の問題を扱う努力がいろいろなされているが、渡辺研究室では、主として理論的観点から非弾性き裂力学の展開を行っており、その脆性-延性破壊、疲労破壊、クリープ破壊への応用も進められている。また、結城研究室では、主として実験的立場からの研究を進め、特に高性能二軸荷重疲労試験機を開発し、それを駆使して疲労き裂の成長に関する実験データを蓄積しつつある。これらの研究は、将来高温破壊力学へ発展すること

が期待されている。

き裂先端の塑性変形を結晶転位論にもとづいて扱うことによってき裂の進展機構を理解しようとする研究は、近年米国で盛んになってきたが、我国では遅れている。鈴木(敬)研究室のイオン性結晶のき裂進展機構の研究は、このような方向で破壊力学と材料物性学の谷間を埋めようとするものである。

さて、破壊力学では、材料の物性的特徴や破壊の発生する原因は全て破壊力学パラメーターとして理論形式の中に組み込まれている。したがって、材料個々の性質や破壊の発生機構は、材料物性学の領域で研究され理解されなければならない。「破壊機構学」と名付けた研究分野がそれである。一例として、石田・森研究室における鉄中の燐の粒界偏析による粒界われの計算機シミュレーションをあげる。このような、原子レベルでのき裂進展過程の研究は、今後一層重要性を増すにちがいない。

電子計算機を使う材料力学的解析手法として、川井研究室で開発された剛体-バネ-モデルによる離散化解析モデルが種々の材料や構造体の破壊の解析にも応用されている。この手法は、砂礫のような粒状体の破壊の解析に力を発揮するのであろう。また、材料の物性値や塑性変形挙動をある程度正確に取り入れることができれば、マイクロとマクロの間を埋める実際的な解析手法として有効となるであろう。

再びマイクロな観点に立てば、破壊は原子面の間の解離であるから、状況によっては、破壊に伴って原子が放出される(実際に測定例がある)。辻・岡野研究室で行われている固体表面からの原子の離脱過程の研究は、破壊現象の研究に役立つものと期待される。

3-2. 破壊の計測と観察

破壊現象研究の進歩が遅い理由の一つは、実験手段の乏しさにある。破壊に関係して発達を必要とする測定技術には二つの面がある。一つは、材料または構造物中の欠陥の非破壊検査法としての計測技術である。この分野では、尾上、山口研究室がアコースティック・エミッション(A. E.)技術の開発によって多大の成果を上げてきた。A. E.に限らず、超音波技術は非破壊検査の面では今後も大いに発展すると予想される。

破壊計測技術のもう一つの面は、材料の破壊機構の研究手段としての測定技術である。従来、破壊の研究は力学的測定と顕微鏡観察以外に有力な測定手段をほとんど持たなかった。しかし、超音波技術やレーザー技術の進歩しつつある現在、より強力な測定手段が開発され得る時代である。以下に、本所において進行中ないし計画中の破壊関係計測技術の開発研究をいくつか紹介する。それらは、非破壊検査法としても、また破壊機構の研究手段としても役立つものである。

A. E. は非破壊検査の手段としてだけでなく、破壊機

構の研究にも役立つようになりつつある。根岸研究室では、金属・コンクリート・複合材料等の A. E. 特性の測定を行い、超音波探傷の手法と合わせて、微小き裂による A. E. 発生機構の研究を行っているが、固体中の弾性波の伝播に関する研究は、A. E. 信号の解析、き裂進展の測定、超音波フラクトグラフィ等に役立つであろう。高木（堅）研究室では、高周波超音波の技術を開発しているが、これを使って高分解能超音波顕微鏡を開発し、結晶、アモルファス、セラミック、高分子材料等の内部のミクロな破壊を計測することを計画中である。また、小倉・黒田研究室では、レーザー音響法による固体材料の非破壊検査技術の開発を計画中である。レーザー音響法は、強度変調したレーザー光を試料に照射することによって発生する音響波の伝播特性を測定し、その変化から内部構造（欠陥）を検出する技術で、非接触かつ測定面積に制限がないために、従来非破壊検査の困難であったプラスチックやセラミックスの内部欠陥、不均一性が高速かつ高感度に検出できるはずである。

前述の破壊に伴う原子の離脱過程の研究は、最も新しいタイプの破壊現象測定手段となり得るが、直接観察の手段としては、高分解能電子顕微鏡やトンネル効果スキャニング顕微鏡が、き裂先端部あるいは破壊面の原子構造の観察手段として間もなく登場するであろう。

3-3. 材料の多様化と耐環境破壊

主として鉄や鋼を対象としてきた破壊力学が、セラミックやアモルファス、その他様々な新素材にどこまで適用できるかは明らかでない。また、応力腐食われの問題は破壊力学的手法で扱われてはきたものの、それはき裂の挙動の解析手法としてであって、き裂進展の機構や対策について破壊力学はほとんど何も教えない。

いうまでもなく、材料開発はその評価の問題をつねに伴っている。材料の機能が、たとえば電磁氣的、化学的な性質であっても、その強度特性、破壊機構や利用環境の影響を無視することは実用上あり得ない。このような観点から「破壊現象研究グループ」には多くの材料開発関係の研究室が参加している。それぞれの研究室でどのような材料が研究されているかは、前節で紹介したので、ここでは繰り返さない。

現状では、それら様々な材料の強度に関する研究は、それぞれの材料に側した研究方法によらざるを得ない面が強い。しかし、次のような示唆的な現象もある。非晶質の破壊は shear band の発生によって起こることが知られているが、砂・礫のような粒状体の破壊も同様にせん断変形の集中する層 (shear band) の形成によって起こるといふ。普通の金属材料でも、鋼やアルミ合金の多結晶では、リュウダース帯と呼ばれる局所的な変形帯が発生し、破断はこれに沿う形で起こる。様々な材料を扱う研究者がそれぞれのテーマ、問題点を持ち寄り議論する

表1 破壊現象研究グループ (FFRC) の主な研究課題

1. 非弾性き裂力学の確立と高温破壊問題への適用
2. 高温疲労・クリープ破壊挙動に関する研究
3. 塑性変形を伴う破壊の進展機構の研究
4. 粒界破壊の原子機構の研究
5. 破壊現象に伴う原子離脱過程の研究
6. 剛体-バネ・モデルによる3次元き裂の弾塑性解析
7. レーザによる光学材料の破壊
8. アモルファス材料の破壊プロセス
9. セラミックス素材の強度と破壊
10. Si₃N₄系セラミックスの破壊
11. ガラスの破壊に関する研究
12. 粒状体の変形と破壊のマクロ的・ミクロ的研究
13. 粒状体力学の体系化
14. 複合材料の AE 特性とその発生機構に関する研究
15. 固体中の弾性波の伝播とき裂進展に関する研究
16. 高分解能超音波顕微鏡の開発とミクロな破壊の計測
17. レーザー音響法による材料内微小欠陥の非破壊検査
18. 酸化スケールの高温における機械的性質の動的観察
19. コンクリート構造物の劣化過程と破壊

ことによって、より広い視野に立った研究を可能とすることは、本所の研究体制の一つの特質であり、「破壊現象研究グループ」を結成した目的の一つである。

4. おわりに

材料科学の分野は開発競争の時代である。新しい素材、新しい機能、新しい用途を求めてしのぎを削っている時代である。いうまでもなく、破壊は社会にとって negative な現象である。破壊の研究はマイナスを減らすことによって社会にプラスの寄与をもたらそうとする。破壊によって社会が被る損失の大きさを正確に見積ることは困難であるが、新しい材料、新しい技術の開発は、同時に破壊による損失の増大を影法師のように伴っている。たとえば、半導体素子の生産工程における破損は、やがて化合物半導体の需要拡大とともに重大な問題となるであろう。次つぎと登場する新素材は、その寿命に関する予測なしに用途の拡大は困難である。材料科学の健全な発達には、開発研究と破壊（ないしは寿命）に関する研究が跋行することなく進むことに外ならない。この材料開発の時代にあたって、本所に「破壊現象研究グループ」(FFRC) が発足したことの意義もここにある。

最後に、この報告をまとめるにあたってご協力くださった方々に感謝いたします。(1984年5月25日受理)

参考文献

- 1) 北川英夫教授退官記念講演：生産研究, 36 (1984) 131
- 2) 田村重四郎ほか：生産研究, 35 (1983) No. 9, 小特集：地盤・構造物系の地震応答および破壊機構