

# 高速破壊力学と光計測

鈴木 新一

私は1980年4月に本学へ赴任して以降、破壊力学と光計測の研究をしてきました。破壊力学は「破壊力学（はかいりきがく）」と読みます。固体材料の破壊を力学（力や運動の学問）を使って研究します。時々、「破壊力学（はかいりよくがく）」と読む人がいますが、違います。

ここでは、前半に「破壊力学とはどのようなものか」を紹介し、後半で「なぜ破壊の研究をするようになったか？」という個人的な経緯を記します。

## 破壊力学とは？

### 破壊力学の目的

学問にはそれぞれ目的がありますが、破壊力学は社会基盤の安全を保障する目的で発展してきました。橋、堤防、高層ビル、タンカー、航空機などの巨大社会基盤が、災害や事故などにより一瞬のうちに破壊されることを防止するのが第一の目的です。

### 壊れるということ

紙テープの両端を持って引っ張ると、やがてテープが切れます（図1）。これは破壊の一例です。もし、テープに予め小さな切込みを入れておくと、テープはより小さな力で簡単に切れます。インスタントラーメンのスープが入っているビニール袋には、開けるための小さな切込みが入っています。この切込みから破れば袋は簡単に開けられますが、切込みが無ければ、指の力だけで開けるのは大変です。この様に切込みがあるとそこが一番壊れやすいので、テープや袋はそこから破断します。

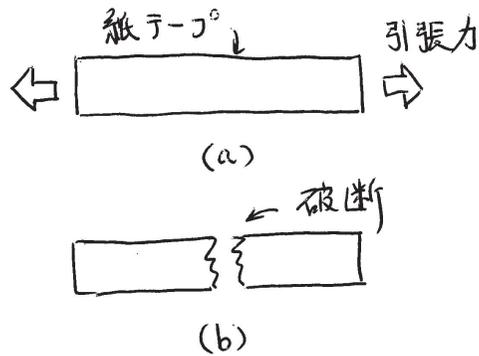


図1 紙テープの破断

切込が物の中にある場合も同じです。図2 (a) の様に、レポート用紙の真ん中にハサミで上下方向に切込を入れ、それを左右に引っ張ります。すると、切込の両端からき裂が発生し、上下に進んで行き(図2 (b))、やがて二つに破断します(図2 (c))。

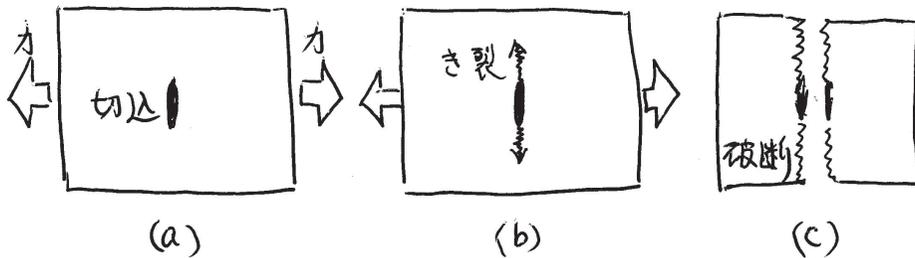


図2 (a) レポート用紙の中央にハサミで切込を入れる。(b) 切込に直角に引張ると、切込先端からき裂が現れる。(c) 最後はそのき裂で破断する。

今度は長さの異なる二つの切込みを入れて、同じことをやってみます(図3)。すると、長いほうの切込からき裂が発生し、破断します。しかも、より小さな力で破断します。

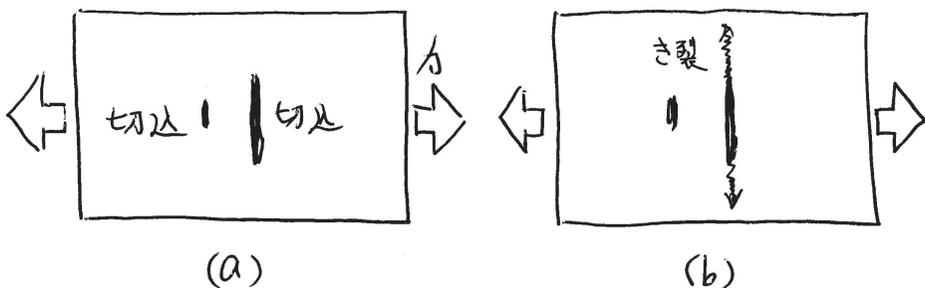


図3 (a) レポート用紙に長さの違う2つの切込みを入れる。(b) それを左右に引張ると、長い方の切込みからき裂が現れ、それによって破断する。

実際の破壊現象も全く同じです。全ての材料は、図4の様に内部に欠陥を持っています。この欠陥は、図3に示した切込と同じ様なものですが、材料の製造段階で自然に発生することから、欠陥と呼ばれています。この様な欠陥を持った材料を引っ張ると、一番大きな欠陥のところからき裂が発生し、それが進んで行って破断します。

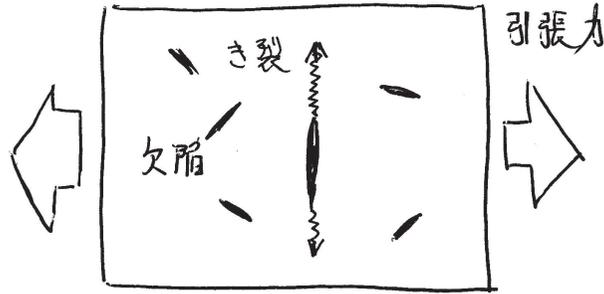


図4 実際の固体中の欠陥とそこから発生するき裂。

## 破壊力学と計測

したがって、材料の安全を保障するには、二つのことが大切になります。

1. 材料の中にどの程度の大きさの欠陥があるかを測定する。ガラスの様な透明材料でない限り材料の中は見えないので、X線（レントゲン）の様な方法が必要になります。物の中を見る計測技術です。
2. 見つかった欠陥が、安全か危険かを判断する。欠陥があっても全ての材料が危険な訳ではありません。欠陥が十分小さければ、使う事ができます。そして、その欠陥が安全か危険かを判断するのが、破壊力学です。

## 衝撃破壊（または高速破壊）

材料の破壊を調べるときには、壊すスピードが問題になります。図5 (a) はゆっくり破壊する様子を示しています。壊すための力を少しずつ強くしてゆくと、最後に材料が破壊します (図5 (c))。もうひとつは衝撃破壊です (図5 (b))。同じ材料をハンマーでたたいて、瞬間的に壊してしまいます。

ここで問題になるのは、壊すためのエネルギーです。「衝撃的に材料を壊す場合には、ゆっくり壊す時よりも多くのエネルギーが必要なのか、それとも、小さなエネルギーで破壊できるのか？」です。

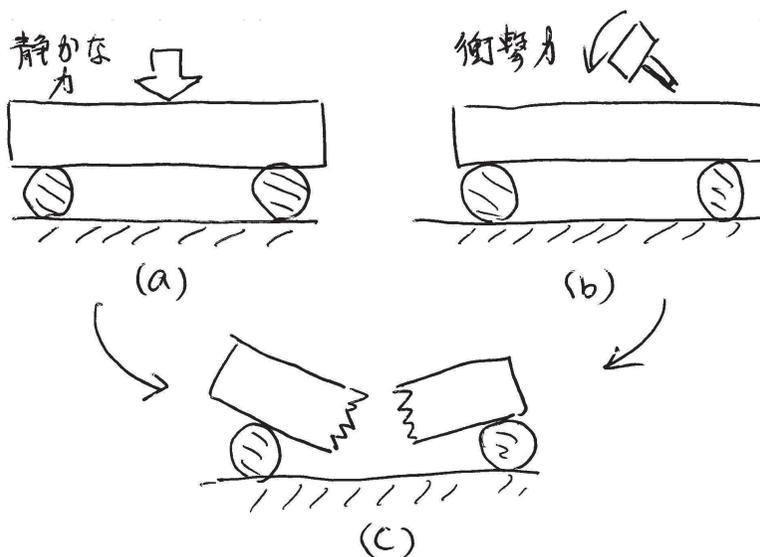


図5 (a) 力を静かに増加させることで、(c) 材料が破壊する。  
 (b) 材料に衝撃力を加えて破壊する。

これは安全保障上、極めて重要な問題です。もし、「衝撃的に壊す方が大きなエネルギーが必要」ならば、安全上はあまり問題にはなりません。普通のゆっくりした破壊試験を行えば、そのデータで物を作っても大丈夫です。しかし、「衝撃的に壊す方が、少ないエネルギーで壊れる」となると、極めて危険です。「ゆっくりした試験をもとにした巨大な橋を、子供がハンマーで叩いたら橋が崩落した」ということになりかねません(図6)。

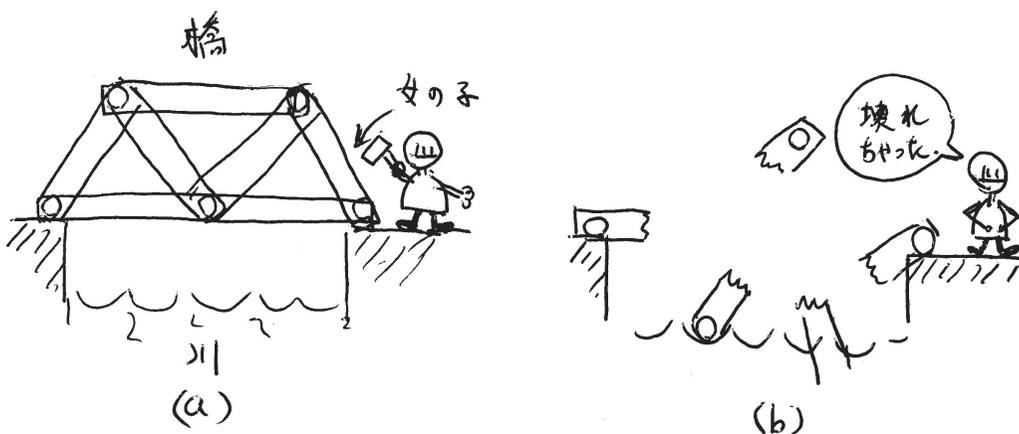


図6 衝撃的に壊す方が少ないエネルギーで壊れるならば、小さな女の子がハンマーで叩いただけで、橋が崩れるかもしれない。

したがって、構造物の安全を保障するには、どうしても衝撃破壊（高速破壊）の試験が必要になります。しかし、これは簡単なことではありません。衝撃破壊においては、き裂は1秒間に500m以上進むことがあります。時速に直せば時速1800km以上です。これはジェット旅客機の2倍のスピードであり、このような高速で走るき裂の先端を測定する方法と装置を作らなければなりません。また、巨大な衝撃力を発生させる装置も必要になります。

## 光計測

この様に衝撃破壊の研究には高度な技術と資金が必要になります。そして私は、この分野で35年間研究してきました。

図7は、私たちが開発した高速度ホログラフィ顕微鏡法で撮影した高速き裂先端の顕微鏡写真です。き裂速度は秒速700m/s（時速2500km/h）です。き裂先端の周辺に多数の縞が現れています。これは光の干渉縞と呼ばれるものであり、シャボン玉に現れる虹色の縞と同じものです。この干渉縞は、材料にかかっている引張力の等高線になっており、縞に沿って引張力が一定になっています。き裂先端に向かって、引張力がどんどん強くなっています。

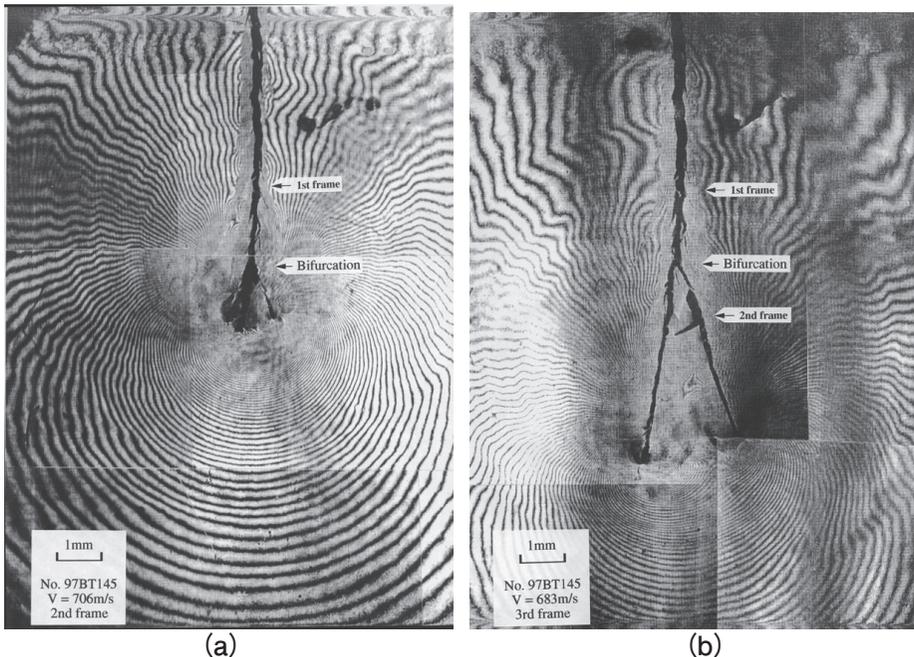


図7 (a) 秒速706m/s（時速約2540km）の高速で進むき裂（中央の黒い縦の線）。先端が少し二つに分岐している。(b)は(a)の写真の100万分の5秒後。き裂が完全に二つに分岐している。

この様な写真は、窓のない真っ暗な実験室で撮影されます。衝撃破壊では、破壊が始まってから終わるまでの時間が十万分の一秒程度であるため、基本的にはストロボ写真撮影を行って測定します。ストロボ写真撮影では外の光が邪魔になるため、実験室には窓がなく、入口の扉も二重になっています。そのためこの実験室は、「もやし部屋」と呼ばれていたことがあります。

この様な撮影に使われるカメラは、大きさが6 m四方以上あり、普通のカメラから想像されるものとはかなり違います。実際には、カメラの中で実験しているような状態です。また、装置が高額になるため、「写真一駒 1000 万円」などと揶揄されることがあります。しかし、衝撃破壊の研究の向こう側には社会基盤と人命の安全保障があるため、常に新しい方法を開発して解明を進める必要があります。

## 高速破壊力学と地震

東日本大震災の時には、太平洋沖で岩盤の破壊（ずれ）が起こり 1000 年に一度の大地震になりました。その時には、秒速数 km の速さのき裂が、海底を数百 km にわたって進みました。巨大な高速破壊です。科学の最終目標は未来予測ですが、巨大地震の予測と制御方法の発見は、高速破壊の研究のひとつの目標でもあります。

### なぜ破壊の研究を始めたか？

#### 学生時代

私は学生時代に航空宇宙工学を専攻しました。専門は空気力学であり、飛行機やロケットの周りの空気の流れを解明することが専門でした。特に、スピードの速い高速気体力学を研究分野にしており、博士課程の時にはその実験を行っていました。実験では、光を使った測定を行っていました。高速気流の中に電子線を打ち込むと気体がオーロラ色に光り、美しい実験でした。

#### 「同じことはするな」

私の指導教官は、東京大学宇宙航空研究所の小口伯郎教授でした。私が学位を取り、豊橋に赴任するとき、小口先生は私に「ここと同じことはするな」と言われました。

小口先生はオリジナリティを重要視される方でした。そのため、実験装置などにしても、それがたとえどんなに高価なものであっても、既製品には興味を示しませんでした。主要な実験装置は全て、独自に設計し制作していました。「ここと同じことはするな」という言葉は、そのオリジナリティ重視の姿勢から出てきたものだったのでしょう。しかし、学位を取ったばかりの研究者にとってはなかなか厳しい言葉です。



図8 左から、安部隆士先生（JAXA 宇宙科学研究所）、丸山祐一先生（岡山理科大学）、小口伯郎先生（東大宇宙航空研究所）、筆者（「同じことはするな」と言われて困っていたころ）、前野一夫先生（千葉大学）。（東京大学宇宙航空研究所高速飛翔体実験室・1980年）

作家の村上龍が言っていたことですが、「小説は、1作目は誰でも書ける。自分のことを書けば良い。2作目は1作目で書き残したことを書けば良い。問題は3作目だ。3作目を書けるかどうかで、作家になれるかが決まる」のだそうです。この言葉を借りれば、私は、1作目を書いた後、2作目を飛ばして3作目を書けと言われたようなものです。困りました。

## 破壊の研究の始まり

豊橋に赴任して2年目の時、本学の本間寛臣先生から高速破壊の話を知りました。当時は複数のテーマを同時に研究していましたが、4、5年で徐々にこの破壊の研究に絞られていきました。理由は、図7の様な写真を撮る光計測技術の開発に成功したことです。高速で進むき裂先端を、この様に鮮明に撮影する技術がそれまでなかったのです。そのため新しい事実が幾つか発見され、破壊の研究に集中することになりました。

この様に書くと順調に研究を進めて行ったような印象を与えますが、実際は全く違います。撮影技術を開発するまでの3、4年間は全く研究成果が出ず、成功した後は新技術に引きずられて見ず知らずの分野に引きずり込まれて行ったようなものです。そして学位を取った空気力学に後ろ髪を引かれながら、知らないことばかりの破壊力学での研究が始まりました。

## オリジナリティ

この研究をある国際会議で発表した時、東京大学宇宙航空研究所の河田幸三先生が出席されておりました。河田先生は材料系の先生で高速破壊の実験をされていたの

ですが、私が小口伯郎先生の下で空気力学を研究していたことをご存じでした。そして、私の発表を聞いた後、「君は空気力学の方法を使って破壊の実験をしている」と言われました。「三つ子の魂百まで」とは、こういう事なのかもしれません。私自身は意識していませんでしたが、研究分野が変わっても同じような方法と同じような発想で研究していたのでしょう。それがたまたま、破壊分野におけるオリジナリティに繋がったのだと思います。



図9 左から、河田幸三先生（東京大学）、Henry Fessler先生（ノッティンガム大学）、五十君清司先生（三重大学）、筆者。Fessler先生の退官記念国際会議（ノッティンガム大学、英国、1990年）

## お手本

図7の様な写真を撮影した最初の方法には「パルスホログラフィ顕微鏡法」と名前を付けました。それを開発している時は暗中模索の状態でしたが、研究の進め方のお手本としたのが、E.P. Muntz先生の研究です。私が博士課程の学生だった時、電子線を使って気体の流れをオーロラのように発光させる実験を行っていました。この電子線蛍光法を開発したのがMuntz先生であり、その研究の発展過程を論文を通して知っていました。

Muntz先生は最初に電子線蛍光法を開発し、それを気体の流れの最も単純な問題に適用してその有用性を示しました。次にそれを気体力学の未解決問題に適用し、それらを実験的に明らかにしていきました。私の頭の中にはこのMuntz先生の研究過程があったため、暗中模索ながらも「パルスホログラフィ顕微鏡法さえ確立できれば、あとは何とかなるかもしれない」と思っていました。電子線蛍光法の成功というお手本がなければ、パルスホログラフィ顕微鏡法の成功はもっと難しくなっていたらと思います。

パルスホログラフィ顕微鏡法は、その後、高速度ホログラフィ顕微鏡法に発展し、図7の様な高速分岐き裂の撮影に繋がりました。

### デジタル化は可能か？

2000年以降カメラのデジタル化が急速に進み、今では昔のフィルムカメラを知らない人たちも大勢います。このデジタル化の波は高速度撮影の世界でも進行し、デジタルの高速度ビデオカメラは旧来の高速度フィルムカメラにとって代わっています。デジタルカメラでは手間のかかる現像処理が不要なことから、その場で何度でも撮り直すことが出来る利便性があるためです。

先週(2016年11月7日～10日)大阪で高速度撮影に関する国際会議が開催され、ホログラフィ撮影のデジタル化が議論されました。私たちの高速度ホログラフィ顕微鏡法は伝統的なフィルム(正確には乾板)技術であるため、そのデジタル化も議論しました。しかし、「現在又は近い将来のデジタル技術では、図7の様な鮮明な写真を撮影することは不可能である」との結論に達しました。

高速度ホログラフィ顕微鏡法は伝統的なフィルム(乾板)技術を使用しており、1985年頃にその原型が開発されました。その時から既に30年以上経過していますが、高速き裂先端を図7の様に鮮明に撮影できる方法は、まだ他には存在しません。少なくとも今後20年ぐらいいは、この技術が生き続けると思われれます。

### 破壊力学の最終目標

最初に記したように、破壊力学は社会基盤の安全保障を目的に発展してきました。しかしその発展過程において、純粹に学術的な目標も現れてきました。

科学の最大の特徴は未来予測を可能にする点にあります。最初の近代科学であるニュートン力学は、惑星の運動を解明し、何年の何月何日の何時何分に日食が起こるかを正確に予測できます。これは正に科学の力です。

破壊力学は、このニュートン力学を基礎として築かれています。したがって原理的には、破壊を予測できる可能性を秘めています。「秒速数百mの高速で進むき裂が、何時何分に、何処を、どの方向に向かって、どの程度の速度で走っているのかを、巨大構造物の設計段階で予測できるようになるだろう」と、私たちは考えています。そしてそのことが、東日本大震災の様な巨大地震の解明、予測、制御への手掛かりになることを期待しています。

破壊現象の予測には、「複雑さの困難」が立ちはだかっていますが、それに立ち向うための新しい技術も開発されてきています。これからも、「我こそは」と思う若い研究者が挑戦することを願っています。

