

ガラス製品の破損事故解析

地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター 研究開発部材料グループ

上部 隆男

FAILURE ANALYSIS OF GLASS PRODUCTS

Takao Uwabe

Tokyo Metropolitan Industrial Technology Reserch Institute Department of Reserch and Development Materials Science Group

1. はじめに

寺田寅彦は、昭和6年11月、俳句雑誌「洪柿」に「曙町より」というタイトルで理化学研究所での実験の様子を紹介する短文を寄せている。「僕はこのごろ、ガラス板を、鋼鉄の球で衝撃して、割れ目をこしらえて、その割れ方を調べている。(中略)この調べが進めば、僕は、ひびを見ただけで、直径幾ミリの球が、いくらの速度で衝突したかを言いあてることのできるであろうと思う。」

壊れたガラス製品を調べることにより破損の原因を明らかにし、再発防止対策を考えることを破損事故解析という。その破損が製品の欠陥によるものか、使い方の誤りによるものかなど原因がわかれば、的確な防止対策をおこない、

未然に事故を防ぐことができるのである。事故という不名誉なことの後始末的な要素が強いで、あまりやりたくない仕事、あまり関わりたくない仕事と考える人もいるが、事故をきちんと調べて、その後の安全設計に反映させれば、安全で信頼性の高い製品をつくることのできる。その意味で、破損事故解析は「モノづくりの重要な役割の一端」を担っているといっても過言ではない。

2. ガラスはなぜ壊れやすいのか

いかなる材料も、その機械的強度以上の力が加われば変形したり破壊したりすることは誰もが経験していることである。その中でも、ガラスがとりわけ壊れやすいと思われているのはなぜだろうか。ガラスは理論的には高い強度を持ち、簡単には壊れない材料であると考えられている。ところが、実際にはガラス製品の破損事故はよく起こる。破損事故の原因を調べると、ガラスの特性やこれに付随する破壊の特徴を理解していないために、誤った扱い方をしている

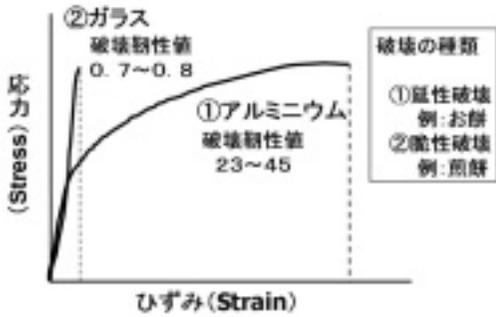


図1 アルミニウムとガラスのS-S曲線のイメージ図
引張強度はほぼ同じ値を示すが、破壊靱性値（それぞれのS-S曲線と破線および横軸に囲まれた面積）は大きく異なる。

場合が多く見受けられる。

ガラスが壊れやすい理由をアルミニウムと比較して考えてみよう。アルミニウムを選んだのはガラスと同じように身近な製品（コップ、ビールの容器など）に利用されているという理由のほか、比重や引張強度が同程度の数値であり、それぞれが典型的な延性破壊、脆性破壊の特徴を示すからである。

図1にアルミニウムとガラスのS-S曲線のイメージ図を示す。引張応力をかけると、アルミニウムは大きく変形し、それから千切れるように壊れる。アルミニウムにかけた引張応力はアルミニウムを変形するのに使われるため、直ぐには壊れないのである。

ところが、ガラスでは引張応力をかけると、ほとんど変形することなく、あるところで急に壊れる。ガラスにかけた引張応力は変形にはほとんど使われず、大部分がガラスを壊すのに使われるのである。これがガラスの壊れやすい理由のひとつである。

また、ものが衝突したような場合でも、ガラスはアルミニウムのように凹んだり変形したりしにくいので、衝突によりガラス全体が弾き飛ばされたり揺れたりすることを除けば、衝突のエネルギーはキズを発生することに使われる。このために、ガラスは傷つきやすいのである。キズがあると、そこに応力が集中してガラスは

壊れやすくなる。これがガラスの壊れやすいもう一つの理由である。

そもそもガラスの表面には衝突などに関係なく小さな無数のキズ（グリフスのキズ）があり、これがガラス製品の強度を理論強度の約1/100に低下させているのだといわれている。しかし、実際の破損事故では、グリフスのキズによる強度低下もさることながら、衝突による大きなキズや切断端面のキズによる強度低下が大きな問題となってくる。

たとえば、ある強度を持ったガラス製品に何らかの原因で大きなキズがついたとすると、この製品は想定した強度よりはるかに弱い力で壊れる。大きなキズがあれば、弱い力でも応力集中で何十倍、何百倍の大きな応力になるからである。また、この製品に製造時の残留歪があれば、この場合も壊れやすくなる。これは逆にいえば、ある製品が想定した強度よりはるかに弱い力で破損した場合、その製品には大きなキズがあったはずだとか、残留歪があったはずだと考えることができるわけである。事故原因を調べるときはこれがヒントとなることが多い。

3. ガラスの破面とクラックの見方

ガラスが破壊したときの破断面を「破面」といい、破面を観察することにより破壊方向や起点を特定し、破壊の種類や原因を調べることを「破面解析 (Fractography)」という。破損事故解析の中核となる技法である。ガラスの破面解析をおこなうにはガラスの破面の特徴を知る必要がある。ガラスの破壊では塑性変形の影響がほとんどないため、破面には破壊の始まりから終わりまでの全ての履歴が忠実に残されており、比較的簡単に破壊の全容を読み取ることができるのである。

(1) 激しい衝撃（機械的衝撃など）による破面
写真1に激しい衝撃（機械的衝撃など）による破面を示す。

起点Oは破壊の開始点で「オリジン」ともいう。通常、一つの破壊に一つの起点があり、

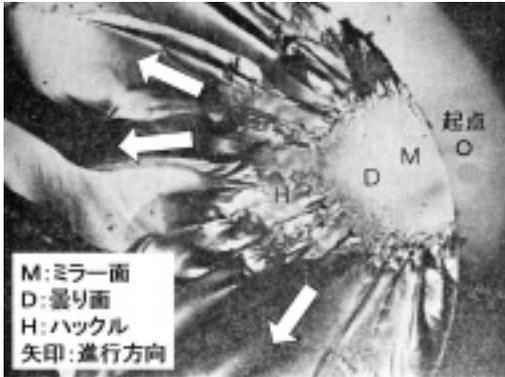
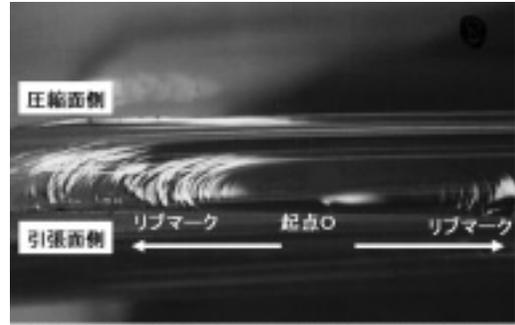


写真1 激しい衝撃（機械的衝撃など）による破面

この起点を見つけ出すことが破壊の原因を探るのに一番重要なポイントとなる。激しい衝撃による破壊でも、破壊開始直後はクラックの伸びが比較的ゆっくりしている領域があり、その破面は鏡のように滑らかで「ミラー面」という。ミラー面は衝撃が激しいほど小さく、穏やかなほど大きくなるので、ミラー面の大きさがわかれば衝撃時の破壊応力の大きさを知ることができる。破壊の進行は起点Oからミラー面M、曇り面Dを通してハックルHへと広がっていく。「ハックル」(hackle:切り刻むという意味の動詞)は進行方向に平行な筋状の模様で破面を切り刻んだような凹凸がある。激しい衝撃による破壊では、破壊が進むにつれて一枚の破面では破壊のエネルギーを解放できなくなり複数の破面をつくる。クラックは枝分かれをし、ミラー面、曇り面に続く破面はいくつもの小さな破面の集まりであるハックル模様を示す。このような模様はそれぞれの小さな破面を破壊が並行して進行したことによってできたものと考えられる。

(2) 穏やかな衝撃（熱的衝撃など）による破面

写真2に穏やかな衝撃（熱的衝撃など）による破面を示す。破壊は起点Oから始まって左右に進行している。左右に見える円弧状の波模様を「リブマーク」（肋骨マーク）といい、ある瞬間の破壊のフロント（前線）を示している。破壊はリブマークの円弧の内側（凹側）から外



O:起点 矢印:破壊の進行方向。波模様をリブマークという。リブマークの形から引張面、圧縮面がわかる。

写真2 穏やかな衝撃（熱的衝撃など）による破面

側（凸側）に向って進行していく。穏やかな衝撃による破壊では、全体にクラックの伸びはゆっくりしており、破面は滑らかである。破面全体が激しい衝撃による破壊でできるミラー面のようなものだと考えることもできる。このような破面は滑らかで、ハックルのような凹凸のあるはっきりした模様は見つからないが、光の当て具合を工夫することで写真にあるようなリブマークを観察することができる。通常このような穏やかな破壊ではクラックは1本で枝分かれはしないことが多い。

このような形状の模様は、模様のでき方の違いにより、それぞれ「ウォルナー線」（クラックの進行方向が破壊の弾性波などにより僅かに揺れることで生じる模様）や「アレスト線」（破壊の進行が一時停止したときにつくられる模様。「ドウェルマーク」ともいう）と正確に呼ぶべきであるが、ここではこれらを区別せずに一律リブマークとして扱うこととする。

リブマークの形は引張面側の破壊が圧縮面側に較べてやや速く進行したことを示している。したがって、リブマークを見れば、破壊の引張応力がガラスのどちらの面に働いたかがわかり、起点を探すときの手がかりとなる。たとえば、写真2では、はじめに左右のリブマークが観察され、次にこのリブマークの形から起点を探すことができたのである。

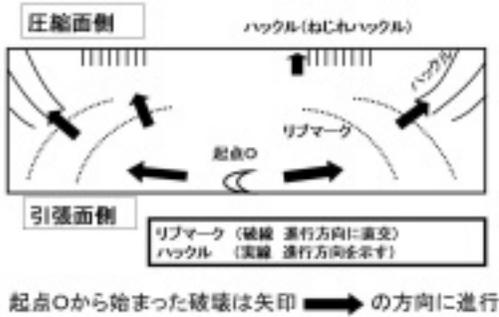


図2 破面の模式図

(3) 破面の模式図

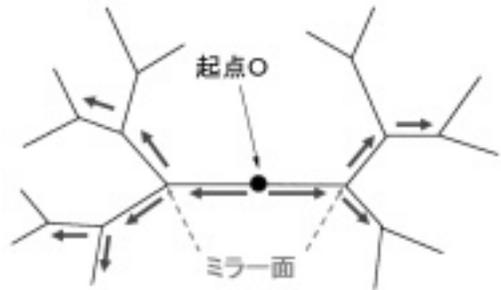
図2に破面の模様を単純化した模式図を示す。

実線は破壊の進行方向を示す模様でハックルに相当する。破線は進行方向に直交する模様でリブマークに相当する。これらの模様から破壊の進行方向を知ることができ、この進行方向を遡ることにより起点を探することができるのである。

圧縮面側にあるハックルは、「ねじれハックル」ともいう。ガラス製品の形状が原形を保ったままの初期の破壊ではこの部分は破壊されずに残っており、クラックがさらに進展して製品の形状を維持できなくなったとき、クラックの進行方向とは別に破片のねじれた方向にこの部分の破壊が起こり、この模様ができると考えられる。このハックルは表面近くにあり凹凸のはっきりした明瞭な模様なので見つけやすく、引張面、圧縮面を推定する有力な手がかりとなる。

(4) クラックの枝分れと破面

図3にクラックの枝分かれの模式図を示す。激しい衝撃による破壊では、ミラー面を過ぎればハックルとなり、破面は一枚では足りず複数になる。同様にクラックは枝分かれにより破面を増やしていく。衝撃が激しいほど枝分かれは多くなるので、枝分かれの数から衝撃の程度を知ることができることになる。写真3にクラックの枝分れと破面の関係を示す。クラックと破



実線矢印は破壊の進行方向を示す。中央部の直線部分がミラー面に相当し、この直線の真ん中に起点Oがある。

図3 クラックの枝分かれの模式図

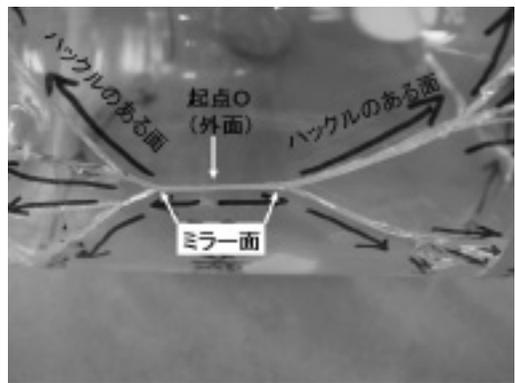


写真3 クラックと破面の枝分かれの関係

面の関係を三次元的に理解していただければと思う。

(5) クラックの見方

図4にクラックの見方を示す。①一般にクラックは枝分かれしながら進展するので、枝分かれを逆に辿れば起点を探しやすい。②一般に起点では直角にクラックが入り、終点では斜めに抜ける傾向がある。③後行のクラックは先行のクラックを横切ることはできない。いずれも経験的なものであるが、意外と役に立つことがある。

4. 破損事故解析の進め方

「大きな衝撃を加えてもいないのにガラスが突然破損した。どうしてこのような破損が起き

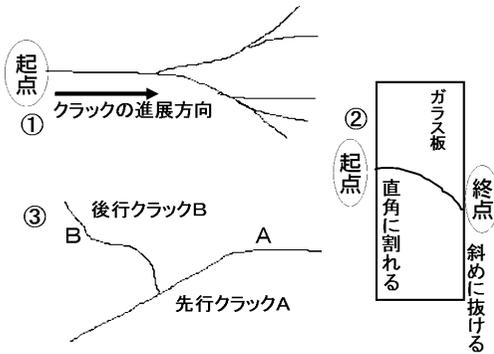


図4 クラックの見方

たのか調べて欲しい」と電話が入る。破損の経緯や状況を聞くと、硬いものがぶつかったなど単純な破損事故ではないようである。

早速、破損事故解析をやってみることにする。道具はセロハンテープ、油性マーカー、ルーペ（実体顕微鏡、ビデオマイクロスコープ）だけでも十分であるが、ほかに歪計、熱膨張計、SEMなどがあればさらによい。

(1) 破損状況の調査

ガラスの破損状況を把握するため、電話でいくつかのことを確認する。特段にむずかしいことを聞くわけではないが、これでおおよそのことがわかり、解析の方針が立つ。

破損品はどのようなものか知るために、①名称、②用途、③形状（大きさ、肉厚、重量など）、④ガラスの種類（材質、熱膨張係数、強化の有無、端面の処理など）、⑤設置場所（屋外か屋内か、雨、直射日光、温度、湿度など）、⑥使用状況、などを聞く。また、破損の状況を知るために、①クラックの本数、クラックは直線的かぐねぐね曲がっているか、②破片の数、大きさ、③破面は滑らかでつるつるしているか、凹凸が激しいか、④事故の頻度（初めての事故か、過去にも似たような事故があったか）などを聞く。

破片の数で大体の応力が推定できる。熱強化ガラスは別として、破片の数が多ければ、ガラス自体はかなりの応力に耐えて、それ以上の突

発的な大きな応力により破壊したと推定される。この場合は、製品の強度を心配するよりは、なぜそのような大きな応力がかかったかを調べればよいのである。

一方、破片の数が2つ、3つと少ない場合は、製品の強度に問題があると思われる。クラックが直線的であれば、大きなキズがあり、そこに機械的な応力が集中したと推定される。また、クラックがぐねぐね曲がっていれば残留歪があったのではないかと推定される。

ともあれ、このようなやり取りをしながら、できるだけ事故品の情報を集めるとよい。事故品の情報が多ければ、その分だけ、解析はしやすくなる。ただし、これらの情報は必ずしも鵜呑みにできないこともある。相手にもよるが、真実七分くらいの感じで情報を受け止め、残りは全て事故品から情報を引き出す気構えが必要である。

(2) 破片の回収

割れたガラスの破片は全て回収する。破片がばらばらに飛び散っているような破壊では、最初の破壊のあと落下などによる二次的破壊があったかどうかなどに留意する。また、クラックはあるものの、破片は脱落せずに製品の形状が元のままに保たれているような場合は、そのままセロハンテープなどで破片を固定して回収する。いずれの場合も破面を保存するため、破面どうしをこすらないことが大切である。

ばらばらになった破片を回収しながら、ひとつずつ破片の観察をする。破片の大きさ（寸法、肉厚、重量など）や破片の数などは重要な情報である。破片全部の重量を測れば、正常品の重量との比較で回収率が見積もれる。破片の回収ができたのか、できなかったのか気になる事故（たとえば、食品にガラスが混じっていないか、ラインの途中にガラスが残っていないかなど）では極めて有効な方法である。一方、破片を全部回収できたにもかかわらず、正常品より軽ければ肉厚が薄かったとも考えられる。

(3) 破片の観察, 復元

回収された破片は最終的には元の製品の形に復元するつもりで観察する。破面から破壊の程度や進行方向がわかる。進行方向が明確な場合は油性マーカーで矢印(→)を付けておく。破面の形状から、起点の位置がガラス製品の表面側か裏面側かわかることがある。これらのことがわかるだけで復元はかなり簡単になる。大きい破片から観察、復元していくと、破壊の全体像が早くわかり、作業がやりやすい。

破片の数が少ない場合は簡単に復元できる。破片の数が多い場合は復元に手間がかかるし、あまり多すぎる場合は不可能に近い。あまり手間がかかりそうなときは、破壊の起点と思われる部分を中心に復元するとよい。そこだけでも破壊の原因解明のヒントがあるからである。ともかく、あきらめずに根気よく観察することが大切である。

10個程度の破片であれば容易に復元できる。一見むずかしそうに見えても、やってみれば意外とやさしく、ジグソーパズルのつもりでやるとよい。破片の矢印(→)を見ながらおこなえば、絵柄のあるジグソーパズルと同じで、無柄のものよりずっとやりやすくなる。復元した破片はセロハンテープで止める。その際、復元した破片を再度観察することもあるので、粘着力が強すぎず、弱すぎず適当な粘着力のセロハンテープを選ぶとよい。一般には普通のセロハンテープで十分である。粘着力が強すぎるときは、机の上で何度かテープを空ら張りすると、好みの粘着力に調整できる。

(4) クラックの観察, 起点の確認

復元したガラスのクラックを観察する。クラックは起点から枝分かれをしながら増えていくので、これを逆に辿って起点を探す。起点周辺の破片は、特に丁寧に観察する。こうして、クラックの形からも破面の模様からも破壊の起点がここだと特定できるようになる。ひとつの破面から起点が見つかった場合、この破面と対になる破面で同じように起点を確認すると確実に

ある。これを「マッチング」という。破面解析の間違いを避けるための重要な手法である。

(5) 破壊の全容および原因の究明

全体が復元できたら破壊の原因を究明する。起点およびクラックの枝分かれの具合から破壊の概要がわかる。枝分かれが多くてクラックが直線的であれば、機械的衝撃によるものと推定できる。起点はガラス製品の表面、裏面のどちらにあるのか?ミラー面はあるのか?そのミラー面の大きさはどのくらいか?それに対応する衝撃は考えられるのか?などと順次検討していく。

枝分かれがないか、枝分かれがあっても少なければ、弱い力で破壊したと考えられる。熱的衝撃による破壊、あるいは表面に大きなキズや残留歪が原因の破壊と推定される。そのような視点でクラックの数、枝分かれの形、起点と思われる部位を観察する。起点の位置、破壊の特徴、クラックの数などから機械的衝撃による破壊か、熱的衝撃による破壊かがわかるのである。

このような観察とともに、ガラス製品の製造工程、使用環境、日頃の使い方などを加味して原因を究明し、防止対策を考えることが重要である。防止対策は、関連する多くの人々を巻き込むので一筋縄でいかないことも多いが、粘り強く説得して協力してもらうほかはない。その際、破損事故解析の結果を説得力のある報告書にまとめておくことが、周囲の協力を得られる一番の近道となる。

参考文献

- 1) 岸井貫,「ガラスの破面解析」,the glass,9,17-22 (1988)
- 2) V.D.Fr chet著,吉田亨訳,「脆性材料破面解析マニュアル」,新技術開発センター (1997)
- 3) 上部隆男,「ガラス破面のやさしい調べ方(1)~(6)」,金属,68,733-736ほか (1998)
- 4) 小野俊彦,「液晶用ガラス基板の割れ」,NEW GLASS,15,30-34 (2000)
- 5) ASTM規格「C1256-93 Standard Practice for Interpreting Glass Fracture Surface Features (2003)」