

ガラスの破面解析

1. 破面解析

昭和60年8月の日航機事故は、圧力隔壁の疲労による破壊が原因だと結論され、これを裏付ける破壊起点の破面の顕微鏡写真が公表された。このように破面を観察・解析すると、破壊の原因や進行過程について多くのことを知りうる。このような学問はフラクトグラフィ（破面形態学）と呼ばれ、各種材料ごとにそれぞれ研究が進められている。ガラスについても同様である。

2. 破面解析の効果

破損したガラス製品を考える。破壊起点が確定したら、次のような検討をして破損の原因を推定することが多い：

- 使用時に起点に張力がかかっていたか？
 - 張力が加わるような事故・時期があったか？
 - 製造工程ではどうであったか？
 - 流通工程では？
 - 起点に外傷があるか？
 - 衝撃を思わせるような傷があるか？
- このようにして原因が推察されたならば、対策が容易になるであろう。

幸いにガラスの破面は簡単・明瞭であり、ルーペでの観察で破壊の原因・過程を直観的に推測できることが多い。

破損した製品のクラックの形だけから破壊

■東芝硝子株式会社 岸井 貫

過程を推測することは奨められない。破面の観察から起点を確認し、クラックの進行方向を決めた上で、クラックと形と照合すると確実な結論を得やすい。

3. 破面の形

破面の状況を表現する言葉には次のようなものがある：

鏡面（ミラー）：鏡のように滑らかな面
リップ（肋骨）マーク：肋骨のような弧形の模様やその集まり

ハックル（羽状）マーク：羽、羽軸、繊毛状の模様

曇り面：すりガラス状の面

ヘルツコーン（ヘルツの円錐）：表面を叩かれた時にできる富士山形の割目

ウォルナー線：水面の波紋形の模様

4. クラック（亀裂、割目）の進行

ガラスに張力が働き、同時にクラックもある時を考える。クラックの先端近くには応力が集中し（図1）、ここへクラックが伸びる。クラックは応力集中を緩和するように、張力の働く方向に直角に進む。クラックの形はそれらの各部分ができた時の応力場の効果の集積だとみなせる。特に破壊の出発点の観察からは、破壊の原因になった応力の方向を推察できる。

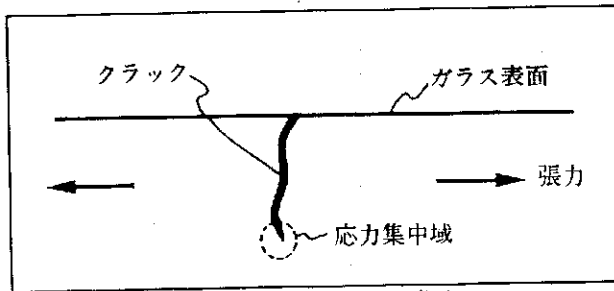


図1 クラック先端の応力集中

クラックの伸びに伴い、ガラス中に蓄積された弾性変形エネルギーが破面の表面エネルギーや破片の弾性振動エネルギーに変わり消耗していく。クラックの形と破面の模様はこのような過程を反映している。

解放前の弾性エネルギーが大きいほどクラックは速く伸びる。しかし一方ではその速度はガラス中の弾性波の速度(5000~7000m・sec⁻¹)に近づくことができず、1500~3000m・sec⁻¹が上限とされている。伸びの速度が上限に達すると、クラックは枝分かれすることでエネルギーの解放を速める。従って、枝分かれや破碎片の数は蓄積されていた弾性エネルギーの尺度になる。熱強化ガラスの強化度の試験はこの考えに基づいて行われる(JISR3206)。

クラックが長く伸びた時期には先端の応力集中が著しいが、ガラス全体の弾性変形エネルギーはあまり大きくならない。他方、破壊の直前や開始直後でクラックが短い時はその逆である。このような状況のちがいが破面の形に反映される。

5. 観察例

5-1 鏡面

滑らかな曲面であり、模様がない。弾性変形エネルギーが小さい状況でクラックがゆっくり伸びた場合に現れる。

熱的な一時ひずみによる破面は鏡面のことが多い。この時は弾性変形も蓄積される弾性変形エネルギーも、機械的衝撃に比べれば小

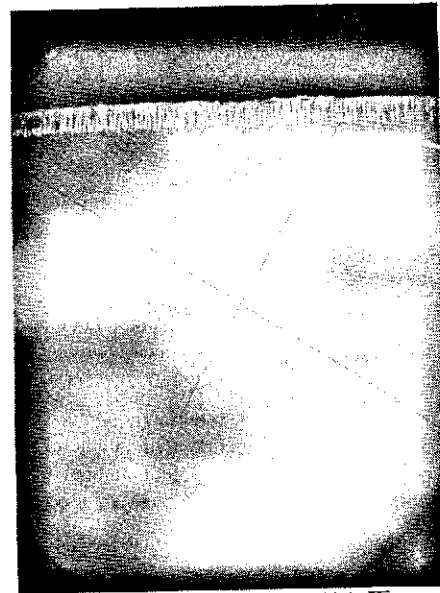


図2 厚板ガラスの切放し面

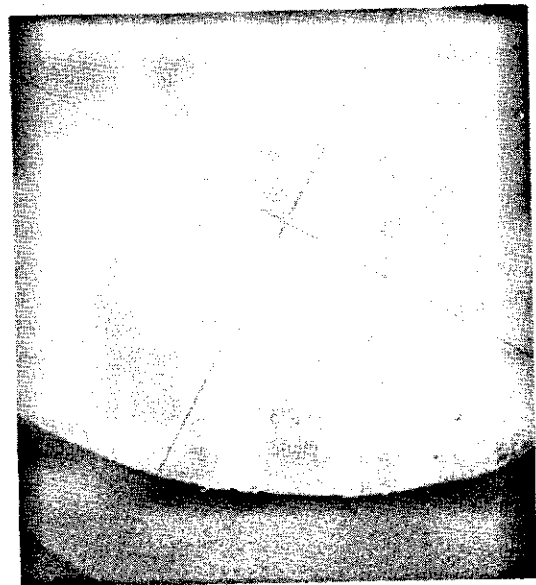


図3 折られた丸棒の切放し面

さいからである。

図2は厚板ガラスの破断面である。板の一方の面に傷をつけて張力を加え、傷を厚さ全体へ上げたのであろう。加傷部近くを除くと鏡面が特に平坦であり、手際良く切断されたことを示している。

ガラス表面に傷をつけておくと弱い力でクラックが伸び、その結果破面が滑らかである。丸棒で得られた鏡面を図3に示す。下方に開始点を表す小さなマークが見える。

5-2 激しい衝撃による破断面

激しい破壊では、クラックの伸びがゆっく

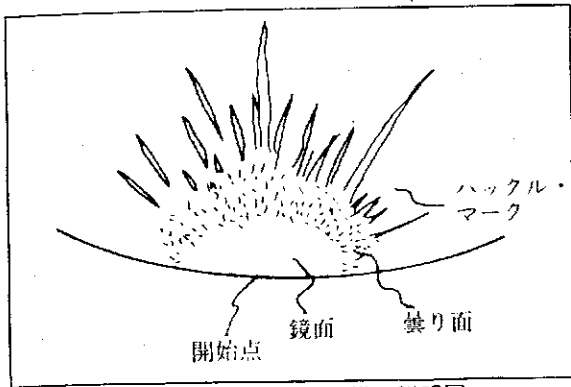


図4 破壊開始点の様子の説明図

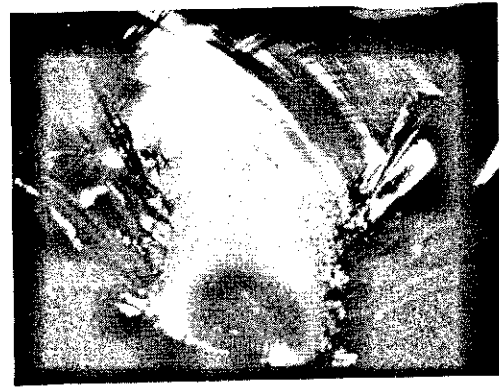


図5-c

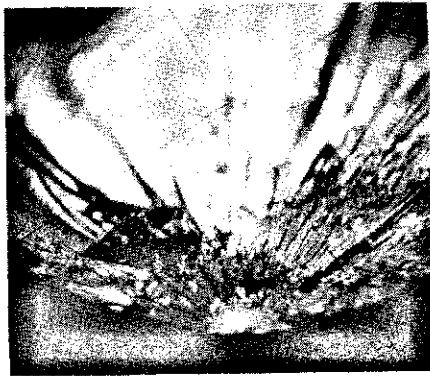


図5-a



図5-d



図5-b



図5-e

図5 折られた丸棒の切放し面（激しい破壊の場合）

りしている時期は破壊開始直後の短時間だけである。従って、鏡面は開始点の周囲の狭い領域にだけ生じ、破面はそれから外方へ曇り面、ハックル・マーク面へと移る（図4）。

開始点を囲む鏡面は、破壊の原因である応力が大きいほど狭い（図5 a～e）。図5-dでは曇り面が外方（クラックの伸びる方向）へ開いており、eでは一方の側にしか曇り面ができていない。

曇り面の外側はハックル・マークに移り変わる。これはクラックの伸びた方向に長い複雑な凹凸模様の集まりであり、いかにも激しい破壊を連想させるような形である。

穏やかな破壊が、クラック先端での応力集中とそれによるクラックの伸びとを繰り返すのに対して、激しい破壊ではこのような過程では間に合わず、複数の破面が発生し並行して進み、破面間に挟まれた碎片が脱落して

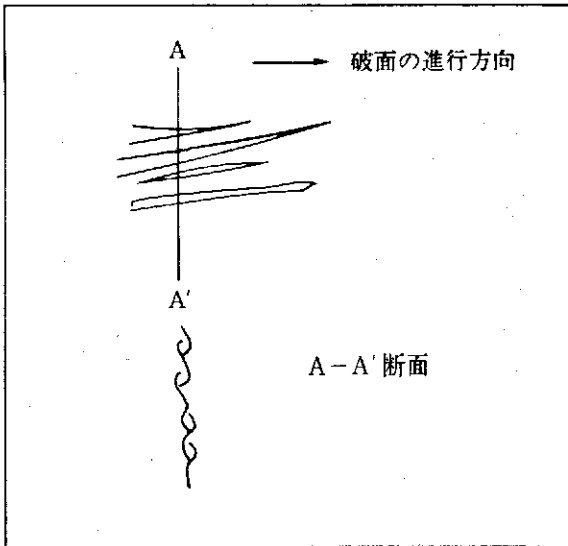


図6 ハックル・マークの構造の説明図

ハックル・マークになる。

曇り面は電子顕微鏡的なハックル・マークの集合部である(図6)。鏡面から外周へ向けて、まず微細な波がうち始め、次に短冊形小片が集まったような形の面になり、次にハックル・マークの集まりへ移る。

図5に示したような破面は激しい破壊の開始点に1個しか生じない。従ってこれは破壊開始点を確認する手がかりになる。破壊が穏やかであれば図5のような破面は見いだせない。

5-3 リブ・マークとハックル・マーク

リブ・マークは滑らかな破面に円弧状に高

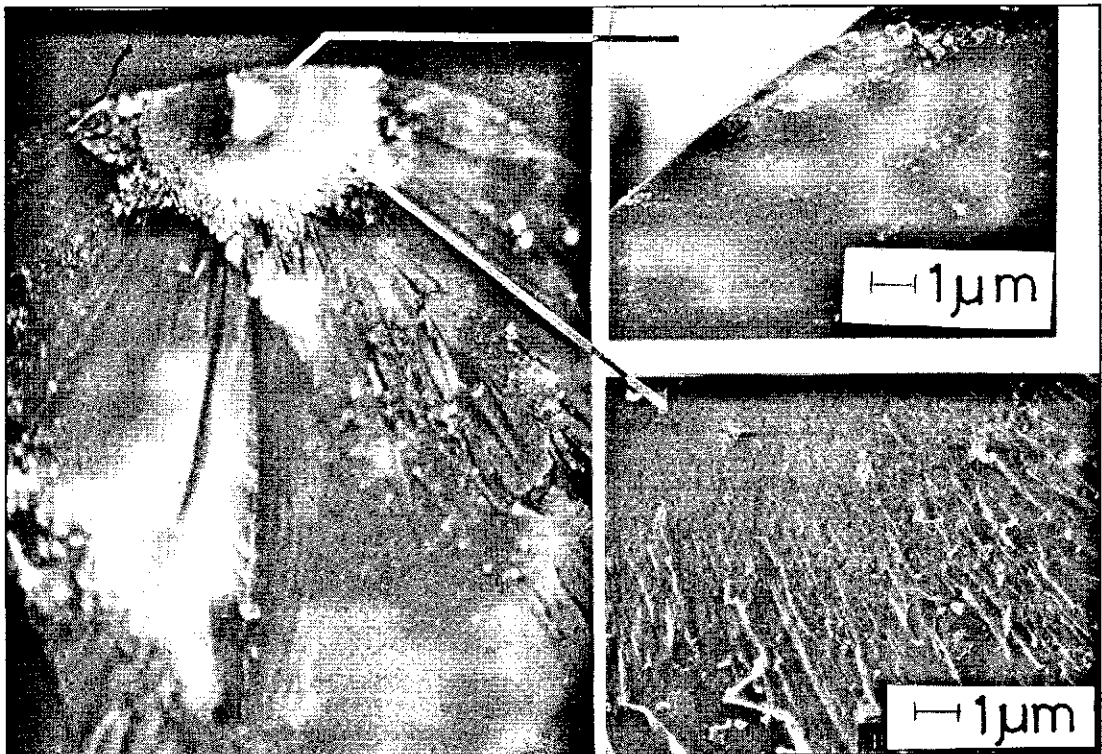


図7 曇り面のある破面の走査電子顕微鏡写真

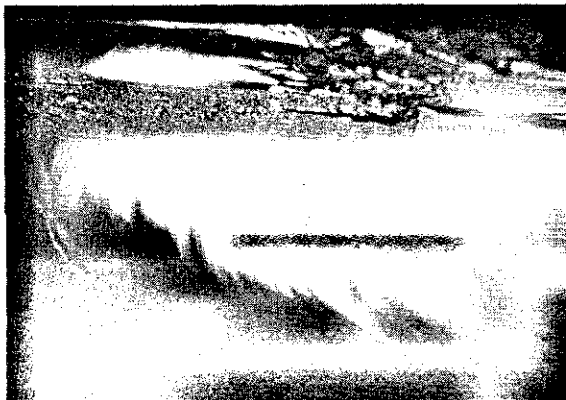


図7-a



図7-b

低が生じて作る模様である(図7)。クラックが伸長の途中に一時停止した時のフロント(前線)に相当する。図7-aではクラックは左方へ進み、上側には曇り面とハックル・マークもある。bではクラックは右方へ進み、下側にリブ・マークに直交した線状のハックル・マークがある。図8もハックル・マークである。図7, 8のハックル・マークは図5, 6のそれよりも穏やかなクラックの進行に対応する。クラックがリブ・マークを作りながら伸びる途中で一時的に応力集中が著しくなり、局部的に複数の破面を生じたと考えられる(図9)。

このような成因から、リブ・マークはクラ

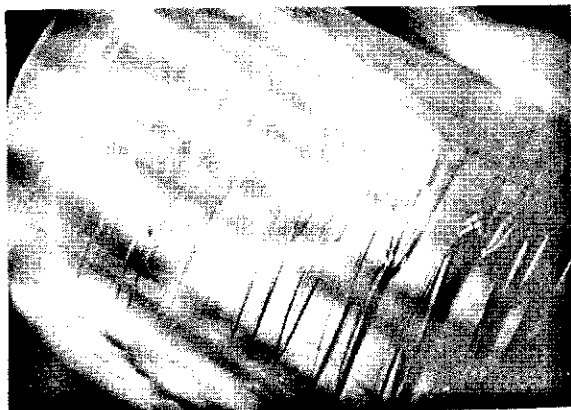


図8 ハックル・マーク

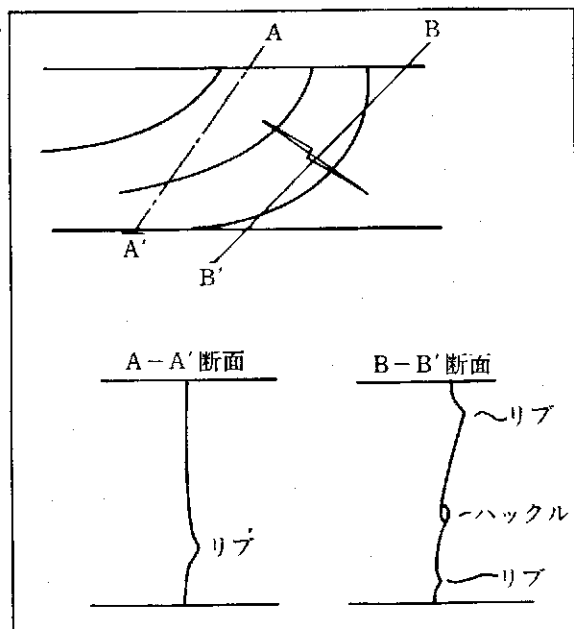


図9 リブ・マークとハックル・マークの関係(I)

ック進行のフロントを、ハックル・マークは進行方向を表現し、従って両者は互いに直交する傾向がある(図10)。

5-4 ウォルナー線

図5 c, dに見られる同心円状・波紋状の模様である。クラックが伸びる間にガラス中の弾性波(破壊音も弾性波の一種である)により進行方向が僅かゆれることで生ずる。同心円の中心方向が弾性波の発生源である。

人工的にガラスに速度と周波数とが既知の超音波を励振しながら破壊すると、破面にウォルナー線ができ、これを解析してクラックの伸長速度を実験的に決定できる。

5-5 ヘルツ・コーン

ガラス表面に固い物体が激突したとする(図11)。衝突された部分は弾性変形により沈み、その周囲に半径方向の張力が生ずる(図11 a)。この張力と直交するように丸いクラックが生じ、ガラス内部へ向けて富士山形に伸

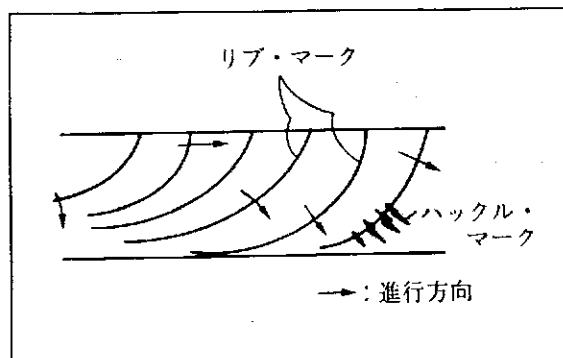


図10 リブ・マークとハックル・マークの関係(II)

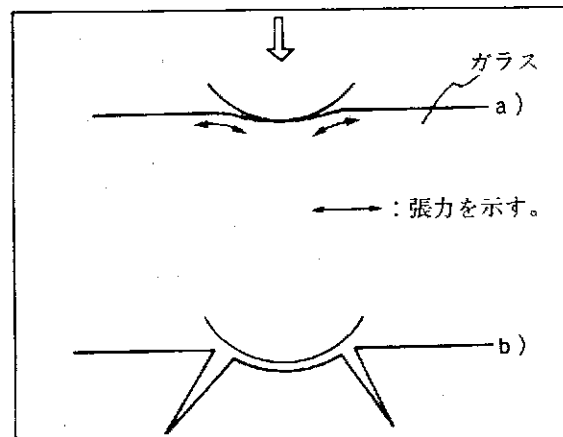


図11 ヘルツ・コーンの説明図

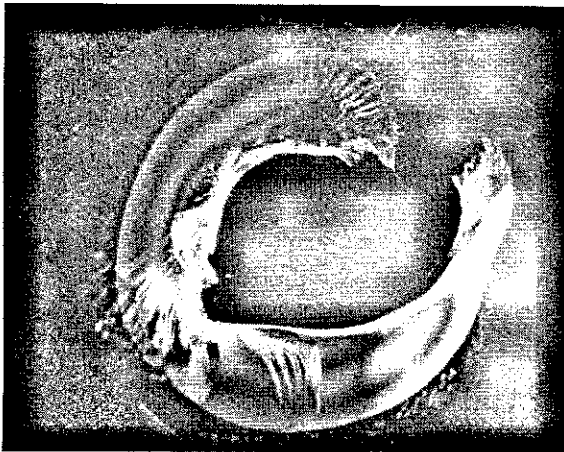


図12 ヘルツ・コーンを上方から見た状況

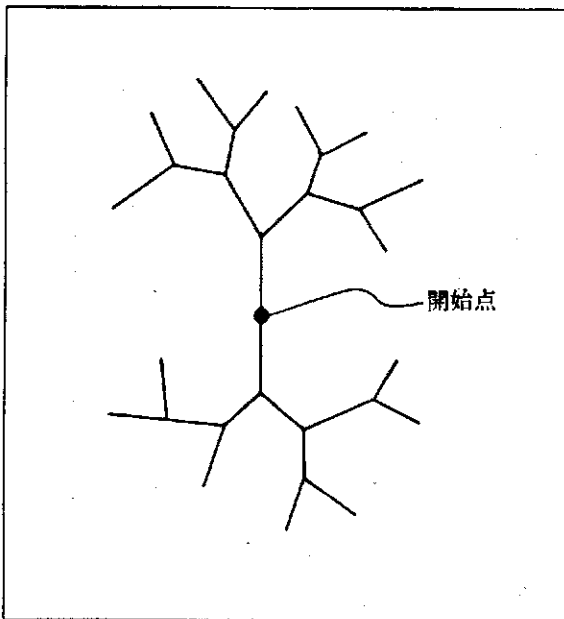


図13 クラックの枝分かれ

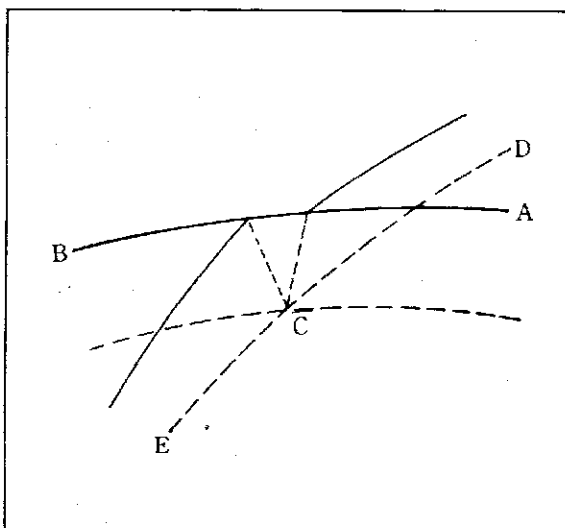


図14 交差したように見えるクラックの説明図

びる(ヘルツ・コーン, 図11b). 図12はヘルツ・コーンを上方から見た状況である。

窓ガラスに外側から小石がぶつかると, 破片が室内へ脱落し, ガラスにヘルツ・コーンの脱け殻が残ることがある。

6. クラックの解析

破片を集めてもとの形に並べ, 各破面ごとにクラックの進行方向を決めていくと, 自然に破壊の過程が判明するし, 開始点が決まることも多い。

クラックは原則としては開始点から枝分かれにより数を増していく(図13). 時には互いに交差する(ように見える)二つのクラックが生ずる(図14)が, クラックが交差することはあり得ない. 破片を集めて検討すると, 一方(図14ではA-B)が先に伸び, その結果Cを起点として二次的にC-D, C-Eが発生したことが判明する。

7. むすび

ガラスの破面解析は少数の知識があれば容易であり, 破壊の直接原因の確定に有効である. しかし逆に金属やプラスチックと違い, 疲労現象の効果を読み取りにくいという事実もある. これらのことを考慮しながら利用すれば, ガラス製品の破壊原因の絞り込み・確定・対策樹立に大変役立つ技術である。

〔著者紹介〕



岸井 賢(きしいとおる)

昭和25年3月東京大学理学部物理学科卒業, 同年4月東芝入社, 硝子技術部(現東芝硝子), 昭和38年8月東芝中央研究所. 同総合研究所を経て計測器の販売と開発に従事. 昭和58年10月東芝硝子物入社. 昭和46年~47年カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員, 工学博士(東京工業大学)