

2. 技 術 解 説

ガラスの破面解析

技術専門主幹 岸 井 貫

1. 破面解析（フラクトグラフィ）

一昨年8月の日航機事故は、圧力隔壁が疲労によって破壊したのが直接原因であると結論され、それを裏付ける破壊起点面の顕微鏡寫真が公表された。このようにクラックの破面を観察、解析すると破壊の原因や破壊の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（破壊・破面形態学）と呼ばれ、金属を始めとする各種材料について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

ガラス製品が破壊したとする。破片が十分に回収されてその結果破壊起点が確定したならば、次のような検討をして破壊の直接原因を推定できる確率は非常に高い：

使用時に破壊起点に張力がかかっていたか？あるいは張力が加わるような事故、時期があったか？

同様なことが製造工程中にあったか？また流通工程において起きたか？ 等々。

このようにして直接原因が推測されたならば、直接原因を取り除くか、あるいは製品の強度を増して対策を実行できる。破壊の開始点になる部分だけを補強して十分有効な場合もあり得る。

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過程を直観的に推測できることが多い。

破壊した製品のクラックの形だけから破壊過程を知ろうとすると、誤った結論を出しやすい。破面の観察から破壊の起点を確認し、クラックの進行方向を決定した上で、これらをクラックの形と照らし合わせると、確実な結論が導かれる。

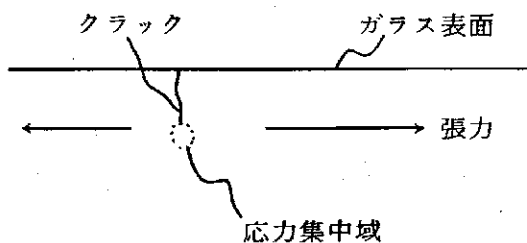
3. 破面の形

破面の状況を表現・記述する言葉には次のようなものがある：

鏡面（ミラー）	：模様のない鏡のように滑らかな面
リブ（肋骨）マーク	：肋骨のような弧形の模様
ハックル（羽状）マーク	：羽または羽の繊毛状の模様
曇り面：すりガラス状の面	：すりガラス状の面
ヘルツコーン（ヘルツの円錐）	：ガラスが球形のもので叩かれた時に生ずる円錐状の割目
ウォールナー線	：水面の波紋のような模様

4. クラック（き裂、割目）の進行

ガラスにクラックが存在し、その先端部に張力が働いている時を考える。クラックの先端近傍は応力が集中する（第1図）。クラックは張力を緩和するように、すなわち張力の方向に直角に進行する。従ってクラ



第1図

ックの進行方向を知れば、少なくとも進行時の応力場についての知識が得られる。特に破壊の開始点を観察すれば破壊の原因になった応力場について推測ができる。

クラックの進行は、ガラス中に蓄積された弾性変形の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って解放され消費して行く過程だという見方もできる。クラックの形と破面の模様はエネルギー消費の過程や環境を反映している。

解放される前の弾性エネルギーが大きいほど、クラックは速く進行する。しかし一方ではクラックの速度はガラス中の弾性波の速度 ($5,000 \sim 7,000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) に近づいたりこれを超えたりはできない。進行速度が上限 ($1,500 \sim 3,000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ とされる) に近づくと、クラックは枝分れすることでエネルギーの開放を速めようとする。従ってクラックの枝分れや破碎片の数は蓄積され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なわれる (JISR 3206)。

クラックが長いほど先端の応力集中は著しいが、ガラス全体の弾性変形エネルギーはあまり蓄積されない。これに対して破壊の直前、直後でクラックが短い時期にはその逆である。このような状況・環境の違いも破面の形に反映される。

5. 観察例

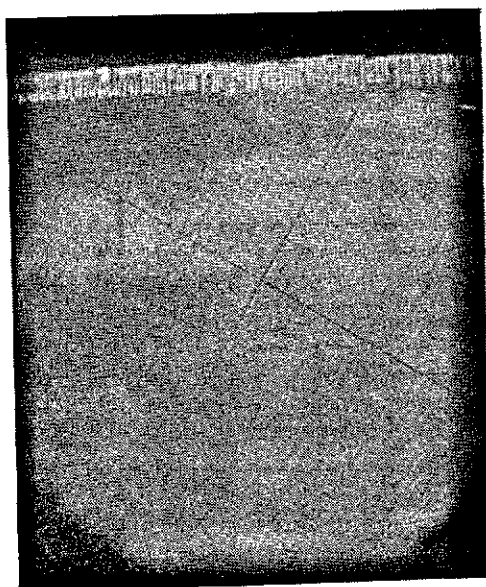
5.1 鏡面

滑らかな曲面でありそれ以外には何の模様もない。弾性変形エネルギーが小さい状況下で、破面がゆっくり進行した場合に現われる。

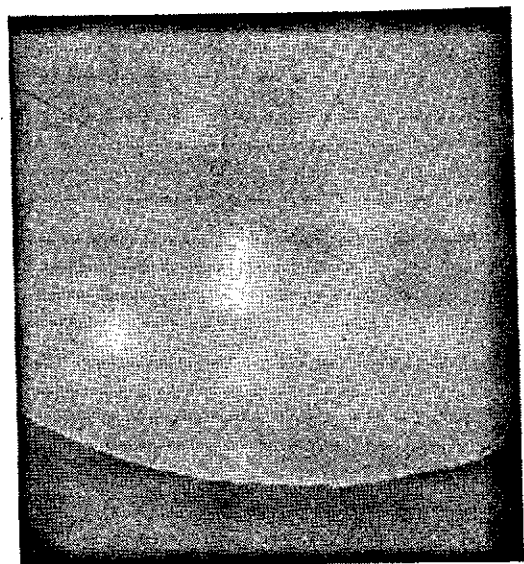
熱的ひずみによる破面は鏡面になることが多い。熱的ひずみは機械的衝撃に比べれば弾性変形も蓄積される弾性エネルギーも小さいからである。

第2図は厚板ガラスの切断面である。板の一面に傷をつけた後に張力を加え、傷を厚さ全体へ伸ばしたものであろう。鏡面が特に平坦であり、手際良く破断されたことを示している。

板でも棒でも、予め傷をつけておくと、傷をつけない場合に比べて弱い力で破断し、その結果破面が滑らかである。丸棒の場合に得られた鏡面を第3図に掲げる。下方に始点を表わす小さなマークが見える。



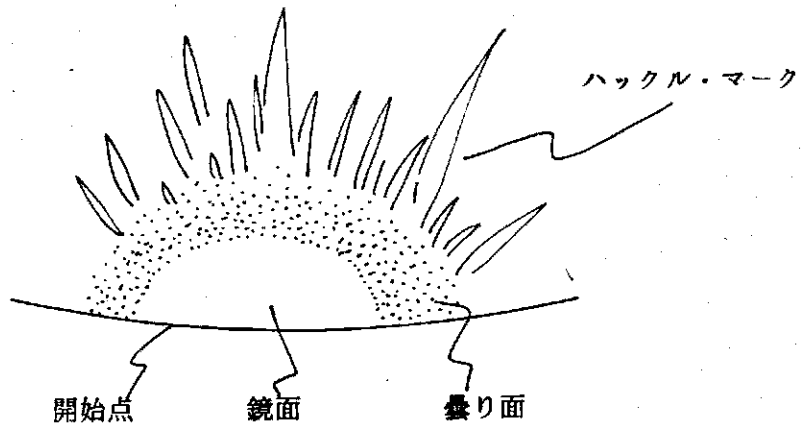
第2図



第3図

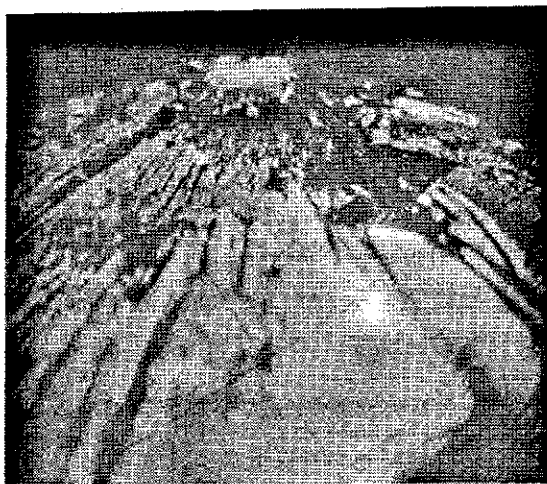
5. 2 激しい衝撃による破断面

激しい破壊ではクラックがゆっくり進行する時期は破壊開始直後の短期間だけである。従って鏡面は開始点の周囲の狭い面積だけに生じ、破面はそれから外方へ曇り面、ハックル・マーク面と移って行く（第4図）。

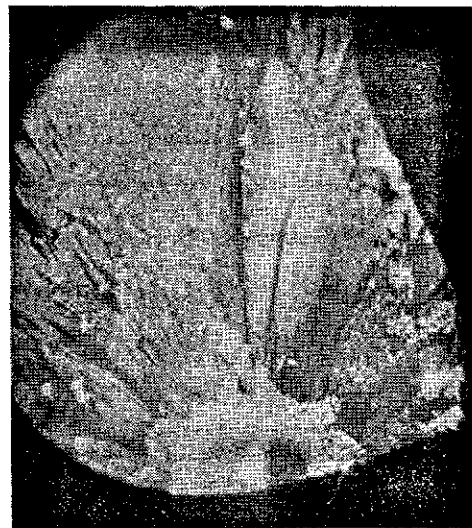


第4図

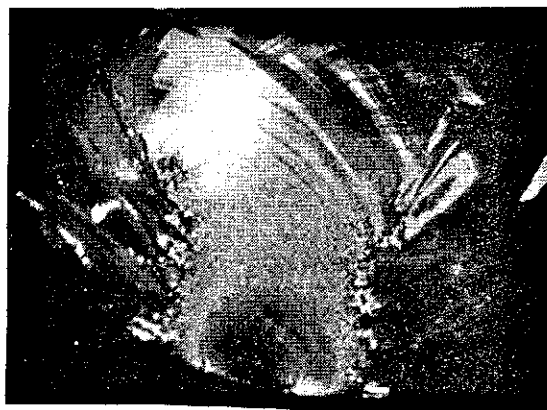
開始点を囲む鏡面の面積は、破壊を起した応力が大きいほど狭く、応力が小さいほど広い（第5図a～e）。第5図dでは曇り面が外方（破壊の進行方向）へ開いており、eでは一方の側にしか曇り面が生じていない。



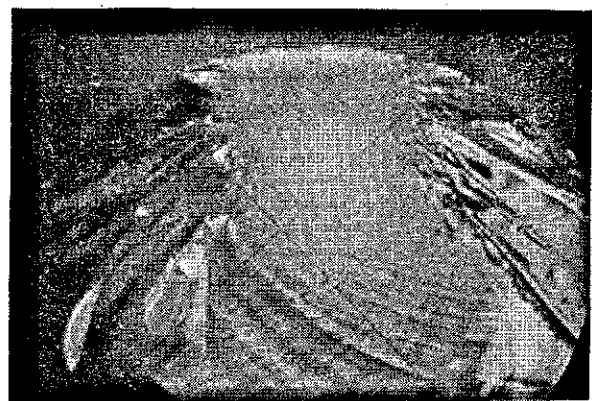
第5図 a



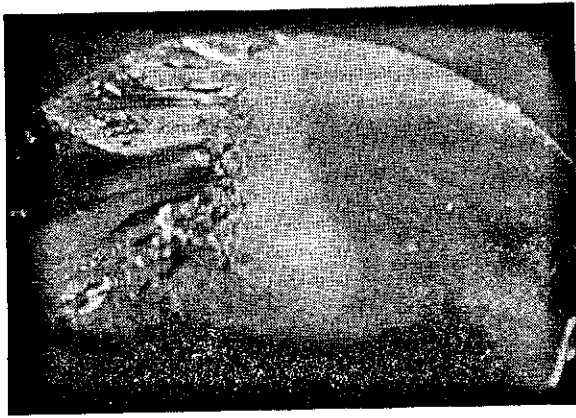
第5図 b



第5図 c



第5図 d



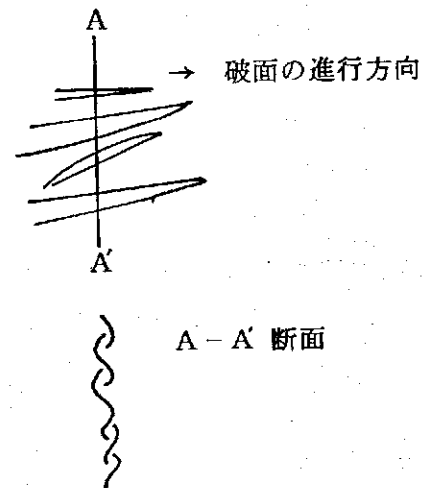
第5図 e

曇り面は電子顕微鏡的なハックル・マーク面だと考えられる(第7図)。走査電子顕微鏡で観察すると、鏡面を外方へかけてまず鏡面が微細な波をうち始め、つぎに短冊状の破片が集まった面になる。このような面の成因はハックル・マークのそれと同じであろう。

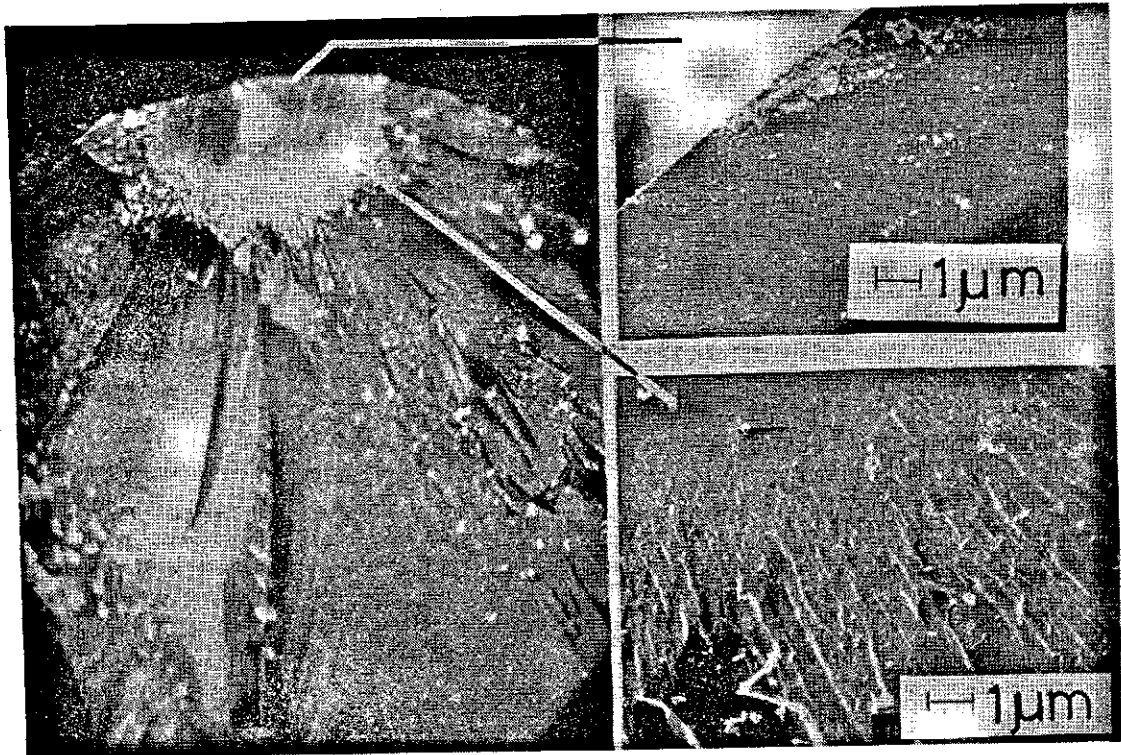
ハックル・マーク面の外側は、リブ模様やウォルナー線はあるが比較的滑らかな面へ移り変わる。

曇り面の外側はハックル・マークに移る。クラックの進行方向へ長く伸びた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。

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いう過程を繰り返して進むのに対して、激しい破壊ではこのような過程が間に合わず、複数の破面が発生し並行して進むのであり、破面と破面とに挟まれた破片が脱落してハックル・マークになる(第6図)。



第6図



第7図

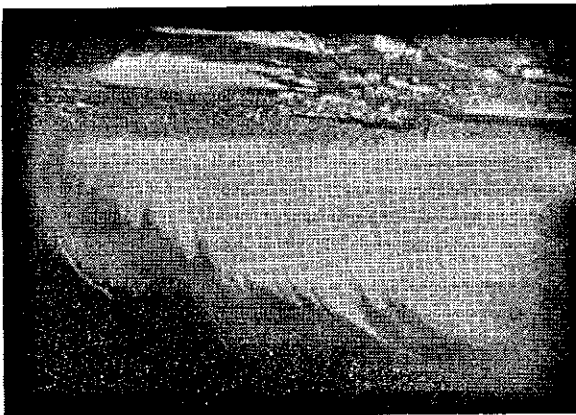
第5図に示したような破面は、普通は激しい破壊の開始点に1個しか生じない。このような面を見つけ、かつ念のため他の個所にはないことを確かめたならば、破壊の開始点が確定されたことになる。逆に破壊が穏やかであれば第5図のような破面は見出せない。

5.3 リブ・マークとハックル・マーク

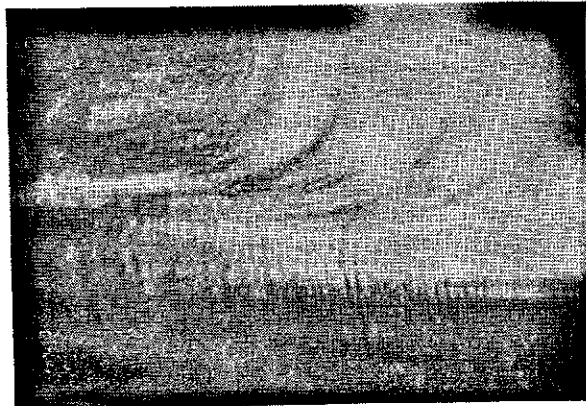
リブ・マークは比較的滑らかな破面に円弧状に高低を生じた結果見える模様である(第8図)。クラックが進行途中に一時停止した時のフロント(前線)に相当する。第8図aではクラックは左方へ進み、上側にハックル・マーク面や曇り面も共存している。bではクラックは右方へ進み、下側にはリブ・マークに直交した線状の模様がある。後者はハックル・マークと同じ原因で生じたものであり、第5図や第8図aのそれよりは穏やかな破壊条件に対応している。これもハックル・マークに分類する(第9図)。

クラックがリブ・マークを作りながら進む途中で一時的に応力集中が著しくなり、複数の、ただし相互の重なりは小さい破面を生じたと判断される(第10図)。

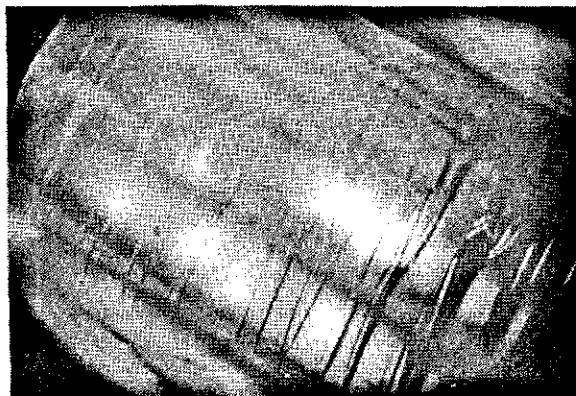
このような成因から、リブ・マークはクラック進行のフロントであり、ハックル・マークはクラック進行方向へ伸びる。従ってハックル・マークとリブ・マークとは直交する傾向がある(第11図)。



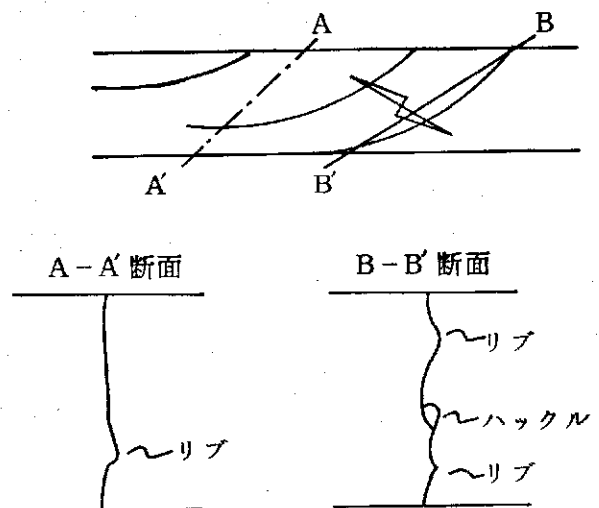
第8図 a



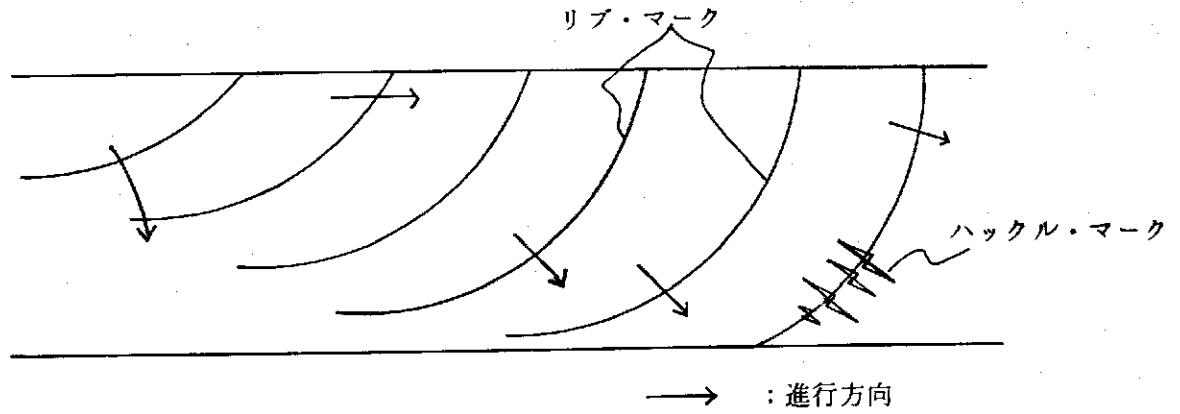
第8図 b



第9図



第10図



第11図

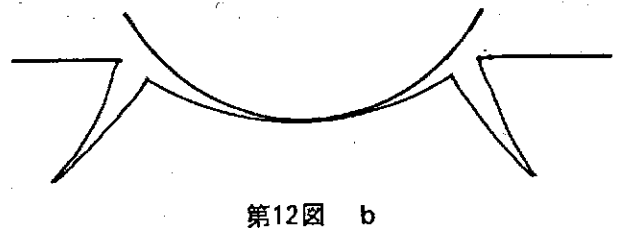
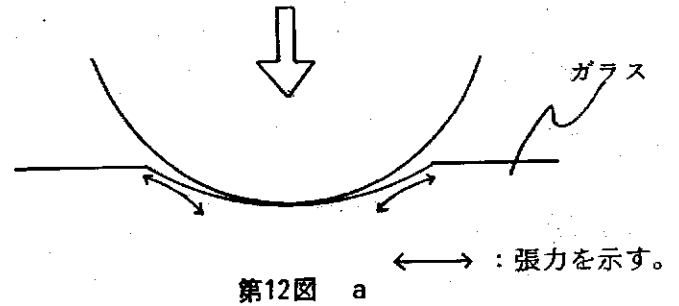
5. 4 ウォルナー線

第5図cおよびdに見られる同心円状・波紋状の模様である。クラックが進行中に弾性波（破壊音も弾性波の一種である。）と干渉して進行方向を僅か振らせたことで生ずる。同心円の中心方向が弾性波の発生源である。また逆にガラスに速度と周波数が既知の超音波を加えながら破面にウォルナー線を作ると、クラックの進行速度を実験的に計算できる。

5. 5 ヘルツ・コーン

ガラス表面に球体が激突した場合を考える（第12図）。衝突された面は弾性変形をして沈み、衝突点の周囲に半径方向の張力が生ずる（第12図a）。この張力が原因で富士山形へ内部へ伸びるクラック（ヘルツ・コーン）が生ずる（第11図b）。第13図はヘルツ・コーンを上方から見た状況である。

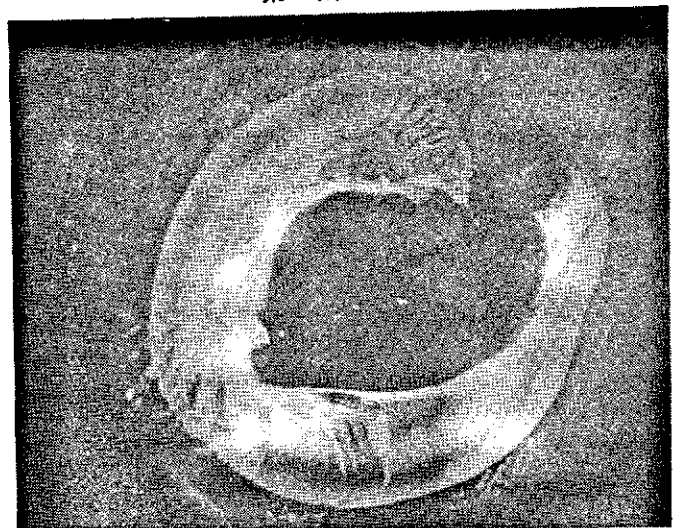
ガラス窓に外部から小石がぶつかる時、ヘルツ・コーンが室内方向へ脱落し、窓にその脱け殻の孔が残ることがある。

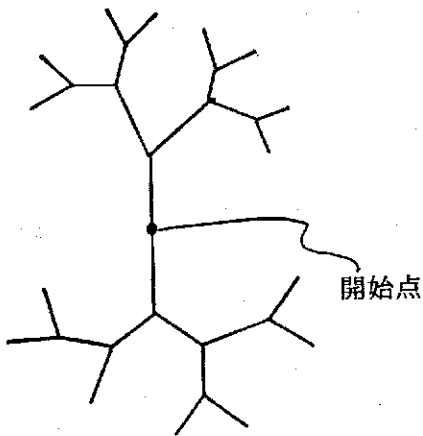


6. クラックの解析

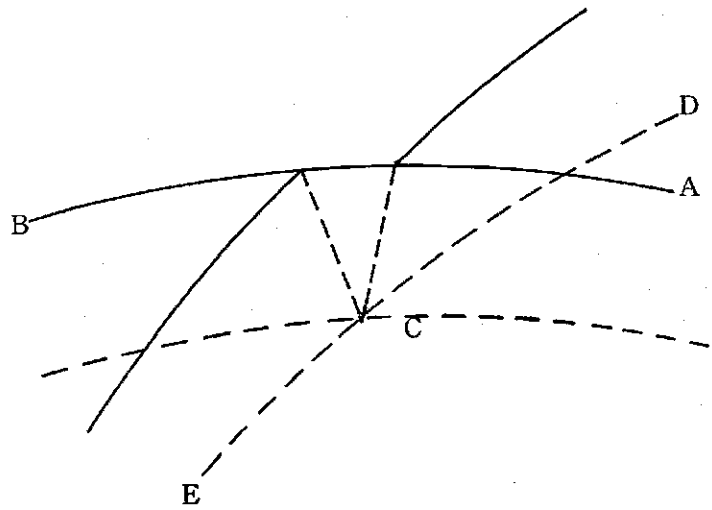
破片を収集してもとの形に近く並べ、各破面ごとにクラックの進行方向を決めてゆくと自然に破壊の過程が判明する。クラックは原則としては破壊開始点を含む面から枝分れにより数を増してゆく（第14図）。

応力分布が複雑な時にはたがいに交叉する（ように見える）二つのクラックが生ずる





第14図



第15図

ることがある(第15図)。しかしクラックが交叉することはあり得ない。破片を集めて検討すると、一方(第15図ではA-B)が先に伸び、その結果C点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、少数の知識さえあれば容易であり、特に破壊の直接原因の確定に有効である。東芝グループの中では以前から活用している事業部もあると聞いている。将来ますます役立って欲しい。

走査電子顕微鏡写真は解析センターが撮影した。