

ガラスの波面解析(1)

千葉工業大学 付属研究所
教授 岸井 貫

ガラス製品の破損は、関係者にとっては重大な問題であり、その原因の探求と防止対策の確立が急がれることである。

破壊によって新しく生じた波面には破壊の過程 すなわち破壊の起点、破壊の進行方向、破壊が緩やかに進んだか、急速度で進んだか、などの要因が反映している。

この程度を知ることが、破壊の原因を知り、破壊防止対策を起るのに有効である。

筆者はガラスの破壊解析について、ザ・グラス誌no.9(1988年。日本硝子製品工業界発行)に解説を寄稿した。1994年には米国材料試験学会からASTM規格「C-1256-93 ガラス破面の解釈の標準実技」という規格が発行された。

本稿では、第一部にザ・グラス誌のものをほぼ転載する形で記し、第二部ではASTM規格を抄録して「参考」に供したい。

【第一部】

ガラス製品が破壊するのは、強い力が働いたからである。この力は、叩かれる、引っ張られる、押される、圧し潰される、など外から加わった「外力」である場合と、焼き鈍しが不十分であったとか、膨張率の違うガラスが融着されていたとか、内部に原図があつて外見上は「外力」が働いていない場合

とがある。

この場合の力は「内力」である。次に破壊するかどうかには「外力」・「内力」の大きさよりも、ガラス製品内での「単位面積当たり働く内力」、または外力によって内部に誘起された力の「単位面積当たりの力」が直接の要因である。

このよつな力は「応力」と呼ぶ習慣になつている。「応力」の元々の意味は、弾性体に外力が働いたときに弾性体が変形し、この変形に「応じて」発生した力である。

これとは意味が違うけれども、本稿ではガラス体内に単位面積当たりに働いている力の意味で「応力」を使つ。

破面解析

昭和八月の日航機事故は、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。

このよつに破面を観察・解析すると破損の原因や進行過程について多くのことを知りうる。このよつな質問はクラフトグラフィ、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。

破面解析の効果

破損したガラス管製品を考える。破壊起点が確定したら、次のよつ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？

張力が加わるよつな事故・時期があつたか？

製造工程ではどうであつたか？
流通工程では？
起点に外傷があるか？
衝撃を思わせるよつな傷があるか？
このよつにして原因が推察されたならば、対策が容易になるであらう。

辛い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。

破面の形

破面の状況を表示する言葉には次のよつなものがある。

鏡面(ミラー) 鏡のよつに滑らかな面。

リップ(肋骨 マーク 肋骨のよつな弧形の模様やその集まり)。

ハックル(羽状 マーク 羽、羽軸、繊維状の模様)。

曇り面(ミスト) 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)。

ウォルマー線 水面の波紋形の模様。

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つ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観察できる。

クラックの伸びに伴い、ガラス中に累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ゆく。クラックの形と破面の模様はこのよつ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、一方ではその速さはガラス中の弾性波の速度(5000~7000E・sec・⁻¹)に近づくが過ぎず、一五〇〇~三〇〇msec⁻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。従つて、枝分かれや破砕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(JIS R 3206)。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化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。このよつな状況のちがいが破面の形に反映される。

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下でクラックがゆつくり伸びた場合に現れる。熱的な一時歪による破面は鏡面のことが多い。この時は弾性変形も累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、傷を厚さ全体へ広げたのである。

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。

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りしている時期は破壊開始直後の短時間だけである。

図5 折られた丸棒の切放し面(激しい破壊の場合)

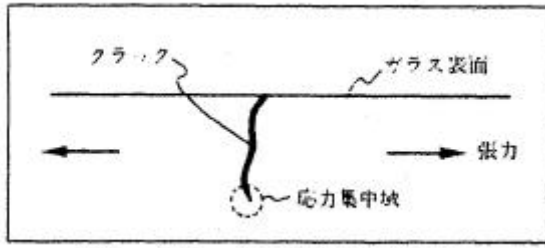


図1 クラック先端の応力集中

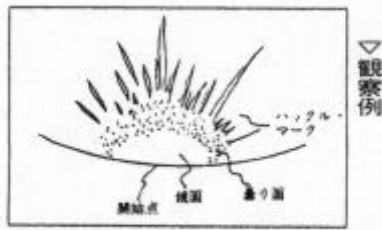


図4 破壊開始点の様子の説明図



図2 厚板ガラスの切放し面



図5-a



図5-d



図5-b



図5-e

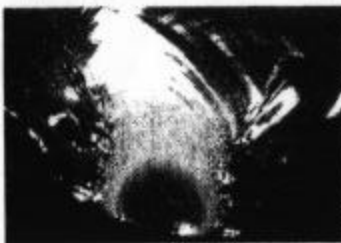


図5-c

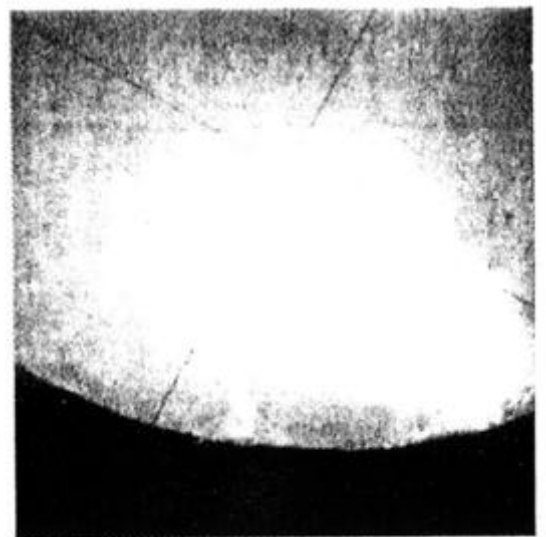


図3 折られた丸棒の切放し面

ガラスの波面解析(2)

千葉工業大学 付属研究所

教授 岸井貫

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5a)~(図5c)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様様の集まりであり、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面が脱落してハックル・マークになる。

曇り面は電子顕微鏡的なハックル・マ

図6 ハックル・マークの構造の説明図

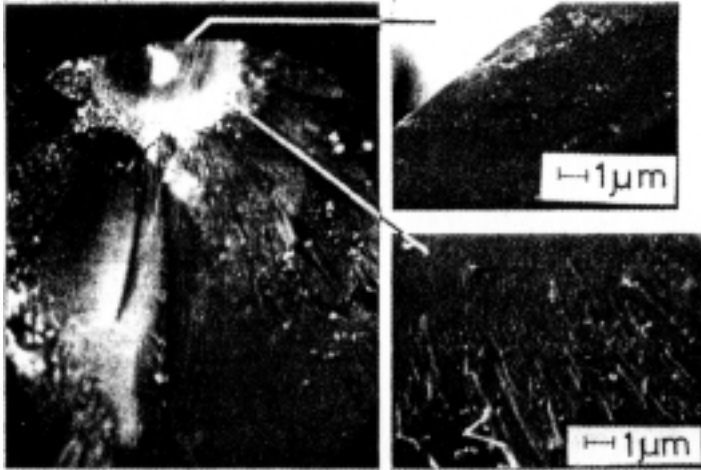
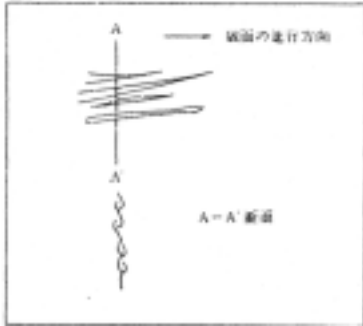


図7 曇り面のある破面の走査電子顕微鏡写真

ークの集合部である(図9)、鏡面から外周へ向けて、まず微細な波が打ち始め、次に短冊形小片が集まったような形になり、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一個しか生じない。従ってこれは破壊開始点を確認する辛がかりになる。

破壊が隠やかであれば図5のような破面は見いだせない。

リップ・マークとハックル・マーク

リップ・マークは滑らかな破面に円弧状に高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にフロント(前線)に相当する。図7a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

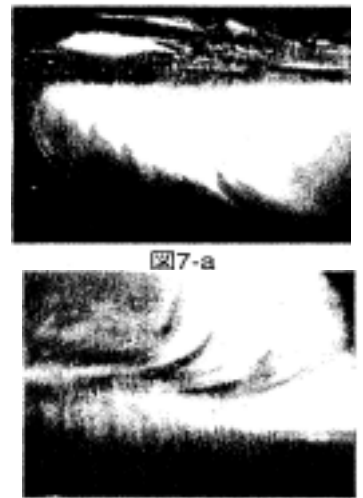


図7-a

図7-b



図8 ハックル・マーク

クラックは右方へ進み、下側にリップ・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7a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。クラックがリップ・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、局部的に複数の表面の破面を生じたと考えられる(図9)。

このような成因から、リップ・マークはクラ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)。

ウォルナー線

図5c、dに見られる同心円状・破綻状

図9 リップ・マークとハックル・マークの関係(I)

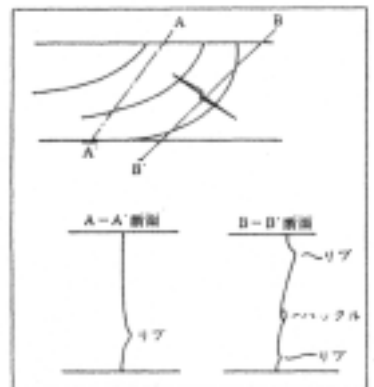
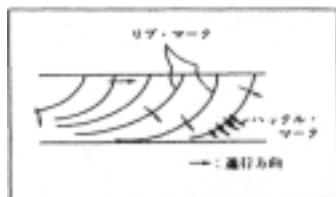


図10 リップ・マークとハックル・マークの関係(II)



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。

ヘルツ・コーン

ガラス表面に固い物体が激突したとすると(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

11a)。
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びる(ヘルツ・コーン、図11b)。
図12はヘルツ・コーンを上から見た状況である。

密ガラスに外側から小右がぶつかると、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。

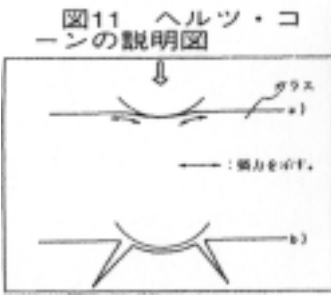
クラックの解析

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開始点から枝分かれにより数を増やしていく(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ない。破片を集めて検討すると、一方(図14でA、B)が先に伸び、その結果Cを起信点として二次的D、Eが発生したことが判明する。

むすび

ガラスの破面解析は少々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

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。

【第一部】

米固材料試験学会規格

ASTM C1256-93 Standard Practice for Interpreting Glass Fracture Surface Features (ガラス破面の特長の解釈の標準的実技)

抄録

一、破壊の起信点(Origin 図・1) 破壊の起信点はガラスの自由表面または他材料との接触面である。

鏡面(Mirror後記)の頂点にあり、鏡面に較べて小さい。起信点はそれ自身が応力を集中させる形であるが、または応力集中の原因を含んでくるのである。

二、曇り面(Mist 図・1) 五、一〇倍のルーペで観察できる。鏡面の先の方に生じ、起信点から遠ざかると繊維状になり、破壊の進行方向へ伸びた形の集まりになる。

破面が成長するとき、成長速度が速くなり、多くの面に分かれ、または丸まることとなる。

三、鏡面(Mirror 図・1) 起信点

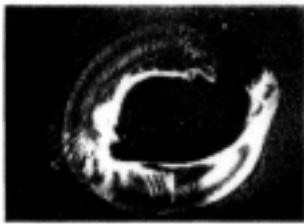


図12 ヘルツ・コーンを上方から見た状況

を囲む滑らかな面であり、普通は曇り面で囲まれる。もしも破面の進行に伴って破面先端での応力集中が解消するような条件で破壊したときには、鏡面はできない。

鏡面は破壊の起信点を見つけるのに役立つ。また曇り面との境は破面の進行速度が速まって限界速度に達したことを示す。

鏡面が破壊の起源となった張力が働いていた面だけに曇り面を持っていたら破壊の原因は曲げ変形にある。一様な引っ張りによる変形が原因ならば、鏡面は曇り面に囲まれる。鏡面の直径Rは応力の二乗に逆比例する。

四、ウォルナー線(Walner lines 図・2) リプルマーク(Ripple mark) 蓮形マークとも

第一部で述べたリプマークも含んでいるように感じられる。その代わりに、一次(primary)ウォルナー線・二次(secondary)ウォルナー線・二次(tertiary)ウォルナー線と区別している。静水に石を投じた時にできるのと同じ肋骨(rib)形の模様である。クラックの進行方向が弾性波・弾性パルスで一時的に揺らされたことが原因でできる。

弧状の模様の内側から外側へ向かってクラックが進んだことを示している。

一次ウォルナー線(図・2a、b) 破壊前に存在した(例 泡・包含物・表面傷)あるいは破壊中にできた不連続に関連する。ガラスの表面形が急変(例えば急角度での曲がり)していることも原因になる。

薄肉ガラス器では、クラックが裏面へ抜けるときにできる。ウォルナー線は

破壊の時の応力分布を示す。

二次ウォルナー線(図・2c)

釣り針型の線が密に連なる。クラック伝搬の前線が曇り面の領域を通過するとき、速度が限界値に近づいてくる。

鏡面・曇り面が小さくて探しにくい時に破壊の起信点を指し示す役目をする。

二次ウォルナー 肋骨形ではあるが釣り針形ではないマークの複雑な集まりである、一次ウォルナー線と違い、特定の弾性パルス源とは関連しない。クラックの前線が外部的ショックによる弾性波と干渉した時にできる。

図13 クラックの枝分かれ

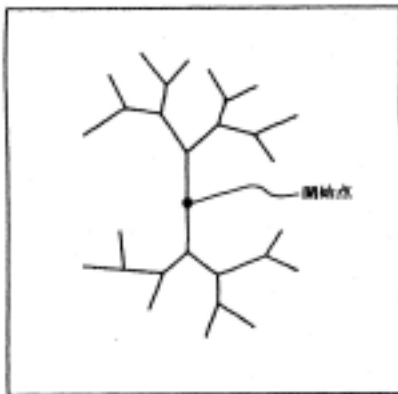
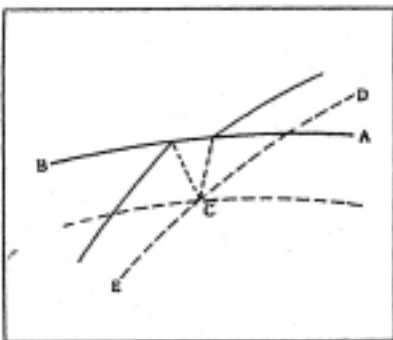


図14 交差したように見えるクラックの説明図



ガラスの波面解析 (3)

千葉工業大学 付属研究所
教授 岸井 貫

これは破壊が機械的ショックによるものであったことの証拠になる。弾性波はクラック伝搬部の外側(クラックが未だ到達していない部分)で作られた。

五、停留線(Dwell Mark)図

Arrest Mark (停止マーク)とも、がウォルナー線に較べて特に鮮明である。マークの前後で波面が違つ(交わる角度が一八〇度に近くない。トウイストハツクル模様(後述)を伴つ)。

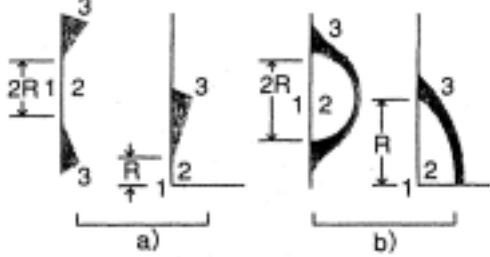
クラックの伝搬が一旦止まり、次に別の応力場のもとで再出発したものであり、二つの独立な破壊イベントがあったのかも知れない。

六、ハックル(Hackle羽軸状マーク)

図II-1

a) 曲げ破壊の場合の鏡面と曇り面の概念図、b) 一様な張力による破壊の場合の鏡面と曇り面の概念図

1: 破壊の起点、2: 鏡面、3: 曇り面



図II-2

ウォルナー線 a) 一次ウォルナー線、b) 泡または包含物によってできるウォルナー線、c) 二次ウォルナー線 (矢印はクラックの進行方向を示す。)



1: 表面傷、2: 泡または包含物、3: 鷗の翼(Gull-wing)形の一次ウォルナー線、4: 「航跡」型三次ウォルナー線

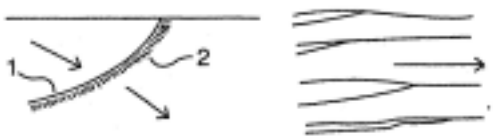
図II-3 (左)

停留線の概念図 (矢印は進行方向を示す。)

1: 停留線、2: 微小なハックルの群

図II-4 (右)

捻れハックルの概念図 (矢印は進行方向を示す。)



図II-5 (左)

剪断ハックルの概念図 (矢印は進行方向を示す。)

図II-6 (右)

山脈型スカープの概念図



図II-7 カンチレバー・カールの概念図



い平面に沿って進む二つのクラックが横方向で互いに切り合いながら進んでくる。

ハックルの伸びる方向がクラックの進行方向であり、鏡面の形・半径Rを決めるのに便利である。

捻れハックル (Twist Hackle) 図

階段を上からみたような形であり、蹴込み板に当たる部分が線状に見える。また多くの支流が集まって下流で大河になるのと同じ配列をする。

応力場の横方向の捻れがクラックの分裂により変えられ、平行ではあるが同一平面にはないような複数の切片となり、次にこれらが連結するような横方向の破壊があつて、切片間に線や階段状の破面を作る。

同所的なクラックの進行方向を知るのに役立つ。

剪断ハックル (Shear Hackle) 図

5 「航跡」型の三次ウォルナー線 (Woodworth's)

「leathers」とも、捻れハックルであるが、扇形に配列する。破断面の中心から起点に対して) 反対側へ進む。破壊の原因となつた主張力に剪断力が加わつていた証拠となる。

「航跡」形ハックル

(Wake Hackle) 図 (2b) クラックが進行して包含物に当たり、共面的ではない二つの破面に分かれ、通過後にまた合体する。この合体した部分が船の航跡のような形の図形を作る。包含物の存在を気付かせる。

七、「空洞型」のスカープ (Sierra scarp) 図 6c

破面に現れる単一の線であり、前述のもの(ウォルナー線、ハックル・リブなどを指す)には含まれないものを呼ぶ。

違うレベルでの二つのクラックが進行していたのが合流した時にできる。二つのクラックの間で水蒸気のプロントへの拡散速度が違つたなどの原因で進行速度に

差があつたためである。

八、カンチレバー・カール(片持ち梁の梃子作用による琴曲面 図 7c) 板の曲げ変形によつて起きた。破壊が始まつた側では面に垂直で表面が滑らかであるが、他面に近づくと強く傾斜した面になる。

クラックが進行するに伴つて、破面に直角方向の力が小さくなる(破面に平行な方向の引っ張りの力が発生する)から破面が曲がる。

最後に参考文献九編を挙げています。筆者の体験の不足であるが、文章だけでは解りにくいと感したし、この抄録には誤解を記したかも知れない。経験とともに、必要に応じて原文や参考文献に当たつてみるのが役に立つと思つた。図1ないし図7は原文の図を筆者が手書きで写したものである。正確には原文のもの(写真のコピーを参照して欲しい)。

J・J・Mechol Sky也

エリニックスの破面解析・破壊解析
の液面形態学（米国材料試験学会
STP-NO.645 P363 1978年）。

M・J・Kemper^他

ガラスの破壊強度と破面の形との関
係（米国材料試験学会フロンティア
43巻9号 P622 1964年）。

J・I・MezBOISKY^他

鏡面の手法からの破壊エネルギーと
破壊出発点となった傷の大きさの推算
（米国エリニックス協会誌 57巻10号
P440 1974年）

T・M・Michalske 破面の定

量的解析（Engineer's Materials Hand
book ASMインターナショナル発行
4巻 P652 1991年）。

T・A・Michalske^他 破壊的な

破壊へと導くクラック成長への液体の
運動学的効果（米国エリニックス協会
誌 63巻11～12号 P603 1980年）。

V・D・Freshette 水の存在

下のガラスの破壊（エリニックス技
術協会雑誌 58巻 P125 1985年）。

V・D・Freshette 脆く材料

の破壊解析 エリニックスの進歩（米
国エリニックス協会発行 28巻
1990年）。

J・R・Varner 臨界的破面形態

学（Engineer's Materials Hand book
ASMインターナショナル発行 4巻
P635 1991年）。

R・W・Rice^他 エリニックスの

破壊特性 観察メカニズムおよび適用
エリニックスと金属の破壊の破面形態
学（米国材料試験学会STP・No.827