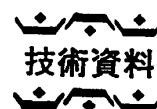


© 1987 ISIJ

## 材料破断面の解析の最近の動向



小寺沢 良 一\*

## Recent Development in Fractography

Ryoichi KOTERAZAWA

## 1. はじめに

材料破断面の解析 (フラクトグラフィ, Fractography) は, 破壊事故原因の調査および破壊機構の研究に欠かすことのできない重要な手法として広く活用されつつあり, 最近では, 従来から広く用いられている金属材料のみならず, 非金属材料にもセラミックスなどの新材料を中心として応用範囲が広がってきている。

筆者は, さきにフラクトグラフィの基礎的事項について本誌で解説したが<sup>1)</sup>, 金属材料を主な対象とし, 非金属材料に特有の事項については触れなかつたので, ここではそれらを中心として述べる。非金属材料のフラクトグラフィについては, それぞれの専門の方々による詳細な解説等<sup>2)~4)</sup>があるが, フラクトグラフィの実際問題への応用を目的とする場合には, やや専門的に過ぎる嫌いがあり, また分野により, あるいは人によつて, 同様の破面模様でも異なる名前と呼ばれていたりして, わかりにくい面があるように思われる。このような状況を考えて, 本稿では, 前稿で述べたフラクトグラフィの基礎知識をもとに非金属材料をも含めて取り扱う場合を想定し, できるだけ簡単にわかりやすくまとめてみたい。

## 2. 基本的破面模様

金属, 非金属をとわず, 一般に材料の破断面は, マクロ的に見た場合, 図1に模型的に示すように, 破壊の起点からき裂伝ば方向 (矢印) に沿つた放射状模様や, こ

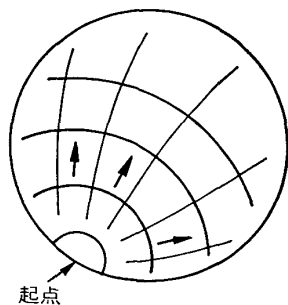
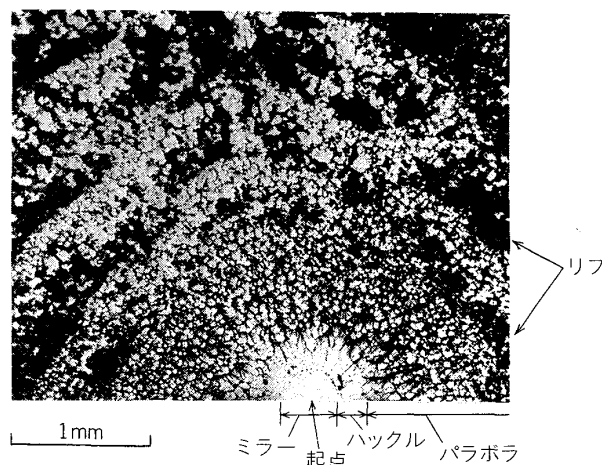
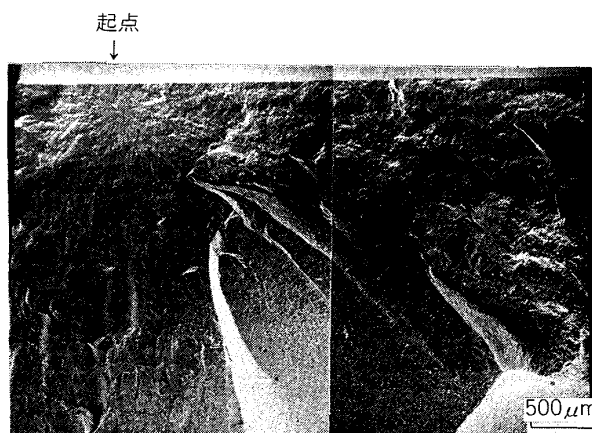


図1 マクロ破面模型図

れに直交する縞模様が観察され, これらにより破壊の起点および伝ば経路の判定ができる。これは破面解析の基礎となる重要事項である。

起点付近は, 一般に他の部分に比して平坦であるが, プラスチックス (ガラス状) やセラミックスの場合, 特に平坦で鏡面状を呈するので (写真1, 2), ミラー (Mirror) と呼ばれている<sup>2)3)</sup>。放射状模様は, き裂が同一平面上にないため, 段の部分がき裂伝ば方向に沿つた

写真1 プラスチックス (PMMA) の引張破面<sup>2)</sup>写真2 焼結窒化けい素曲げ破面<sup>5)</sup>

昭和61年4月25日受付 (Received Apr. 25, 1986) (依頼技術資料)

\* 筑波大学構造工学系教授 工博 (Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennōdai Sakura-mura Niihari-gun Ibaraki pref. 305)

線状模様を形成したもので (写真 1, 2), プラスチックス, セラミックスの場合, ハックル (Hackle) あるいは初期の細かいものはミスト (Mist) と呼ばれている<sup>2)3)</sup>. き裂が伝ばするにつれて, 破面模様は一般に粗くなつてゆく傾向にある.

プラスチックでは, 写真 1 に見られるように, 金属のディンプル (伸長形)<sup>1)</sup> に似た放物線形の微小模様 (くぼみ) の観察されることがあり, パラボラ (Parabola) と呼ばれている<sup>2)</sup>. その拡大写真を写真 3 に示す. 主き裂前方に微小空洞が形成され, これが主き裂と合体することによりできたもので, 形成機構も金属のディンプルと良く似ている. なお, 写真 1 中に見られるように, き裂伝ば方向に直交する縞状模様が観察されることもあり, リブ (Rib) と呼ばれている<sup>2)</sup>. き裂が一時停止したことを示している.

これらの模様の現れ方は, 破壊の速度と関係してい

き裂伝ば方向 →

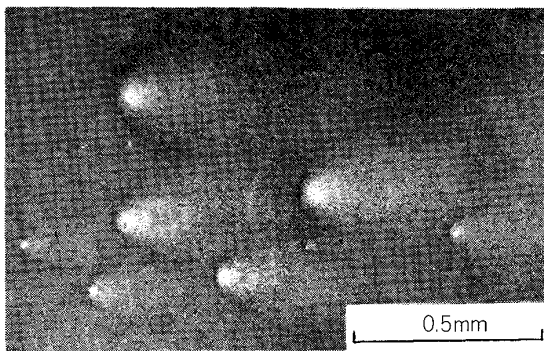


写真 3 プラスチックス (PMMA) 破面のパラボラ拡大写真<sup>2)</sup>

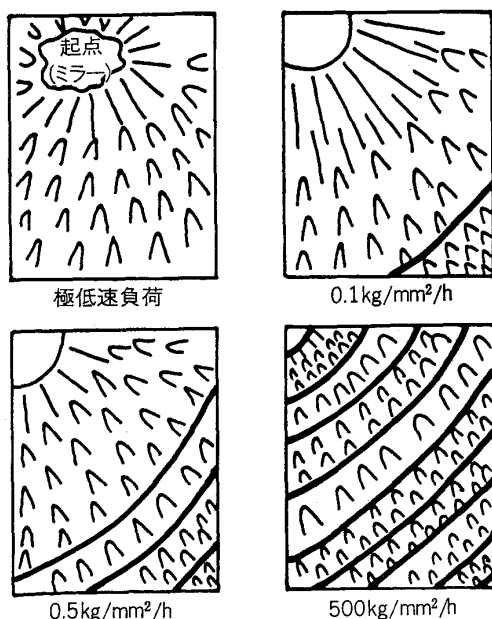


図 2 プラスチックス (PMMA) の破面様相に及ぼす負荷速度の影響<sup>2)</sup>

る<sup>2)</sup>. その概略を図 2 に模型的に示す. 起点付近のミラー部等が速度の増加につれて小さくなっている. また, プラスチックスは, 高温域では一般にゴム状になるが, この場合は写真 4 のような放射状模様を主とする破面で<sup>2)</sup>, テアラインパターン (Tear line pattern) などと呼ばれることがある<sup>6)</sup>. なお, 速度と温度の等価性<sup>†</sup> も示されている<sup>6)</sup>.

セラミックスは周知のように欠陥を含んでおり, 破壊の起点には写真 5 の例のように欠陥があることが多い<sup>8)</sup>.

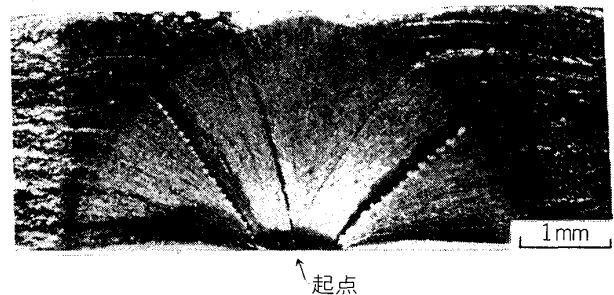


写真 4 塩化ビニルの引張破面<sup>2)</sup>

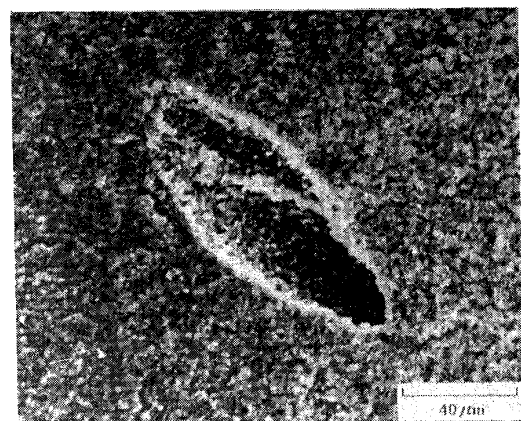


写真 5 焼結窒化けい素破壊起点の粗大気孔<sup>8)</sup>

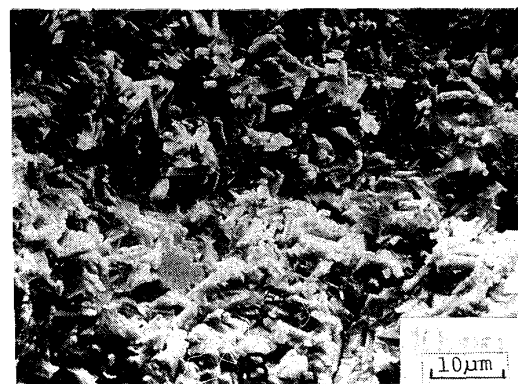


写真 6 焼結炭化けい素曲げ破面マイクロ様相<sup>9)</sup>

† プラスチックスの変形はある温度範囲で時間に依存し, また温度が上昇すると変形速度が大きくなる. 従つて, 負荷速度の減少 (すなわち負荷時間の増加) と温度の上昇は, 共に変形量を増加せしめ破壊を延性的ならしめる (破面模様も延性的にする) 効果をもつ. 云いかえれば, これらは等価な効果をもっている.

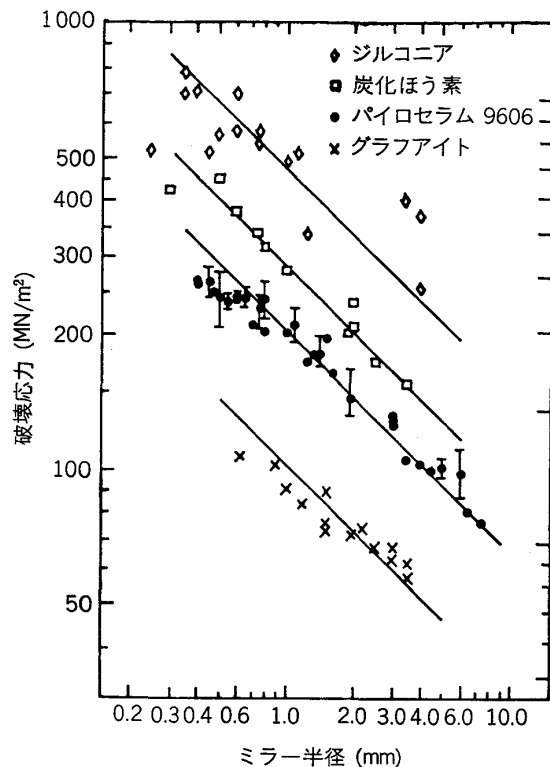


図 3 セラミックス破面のミラー半径と破壊応力の関係<sup>3)</sup>

また、通常の静的破面のミクロ様相は、普通、写真 6 のような粒内脆性破壊で、セラミックスを構成する微粒組織が破面上に観察される<sup>8)9)</sup>。なお、上記のように、ミラー部の大きさは破壊速度に関係しており、破壊応力とミラー半径の関係を測定した結果がかなり報告されている(図 3)<sup>3)</sup>。これを利用して、破面から破壊応力を推定することができる。

### 3. 疲労破面およびその静的破面との比較

プラスチックの繰返し応力による疲労破面には、一般に、金属材料の場合<sup>1)</sup>と同様に、ストライエーションあるいはストライエーション状模様が観察される(写真 7, 8)<sup>10)</sup>。ストライエーション間隔の定量解析も可能である<sup>12)</sup>。

セラミックスなど焼結材は、非常に硬く延性に乏しいため、疲労破面には上記のようなストライエーション等の疲労の特徴的模様が観察されず、静的破面(引張、曲げなど静的荷重による破面)と類似の脆性の破面で、疲労破面であるか静的破面であるかを区別することは一般に困難である。超硬合金(WC-Co 焼結合金)では、疲労破面の起点付近が繰返し応力のためつぶされた例<sup>11)</sup>や、静的破面の Co 部にディンプルが観察され疲労破面と区

<sup>12)</sup> ストライエーション間隔は 1 サイクルあたりのき裂伝ば速度を与え、これから、き裂先端がその位置にあつたときの応力拡大係数  $K$  の値がわかり、更にこれから破壊力学を用いて破壊を起さしめた荷重値を推定することができる<sup>11)</sup>。



写真 7 プラスチックス (PMMA) 疲労破面のストライエーション<sup>10)</sup>

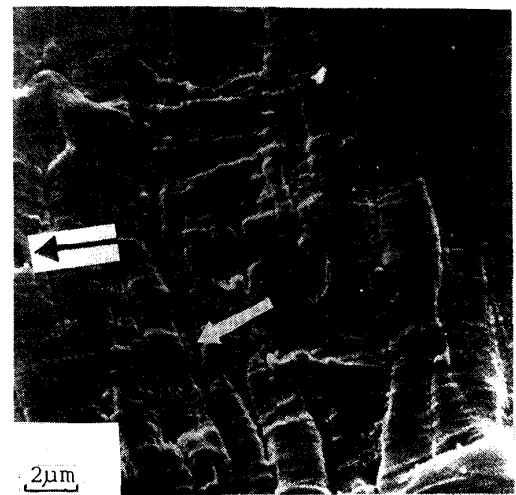
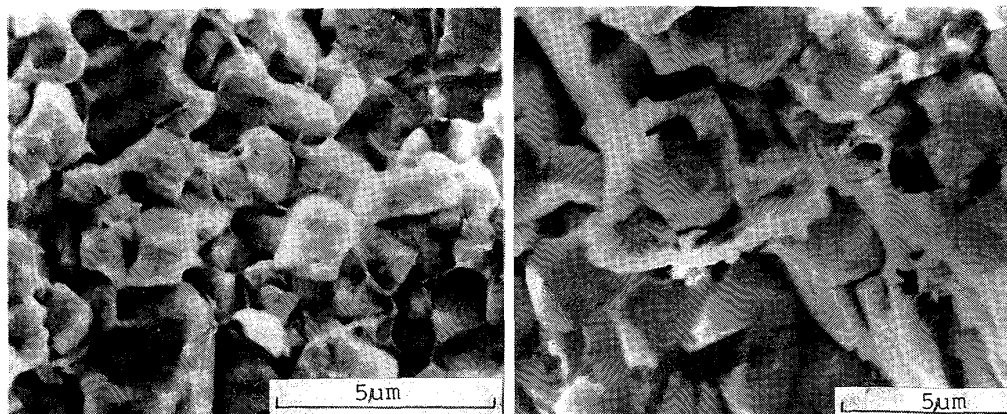


写真 8 プラスチックス (POM) 疲労破面のストライエーション状模様<sup>10)</sup>

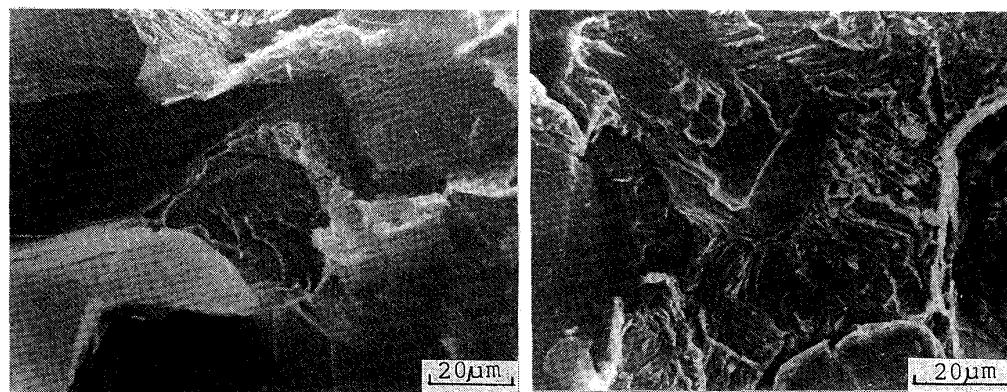
別できる例が報告されている(写真 9)<sup>12)</sup>。

疲労破面と静的破面の区別がつきにくい重要な例として鋳鉄がある。通常の片状黒鉛鋳鉄では、疲労破面にストライエーションが観察されず、区別は容易ではない。しかし、注意深く観察すれば、写真 10 の例<sup>13)</sup>のように、疲労破面には部分的にストライエーション状模様が見られ (b)、脆性的な静的破面 (a、リバーパターンがみられる) と区別することができる。また、破面上の黒鉛部の面積率が静的破面の方が大きく (静的 80~90%、疲労 60~65% 程度)、これにより区別し得ることが報告されている<sup>13)</sup>。なお、球状黒鉛鋳鉄等、延性のある鋳鉄では、鋼と同様ストライエーションが観察される。その間隔の定量解析も可能である<sup>14)</sup>。

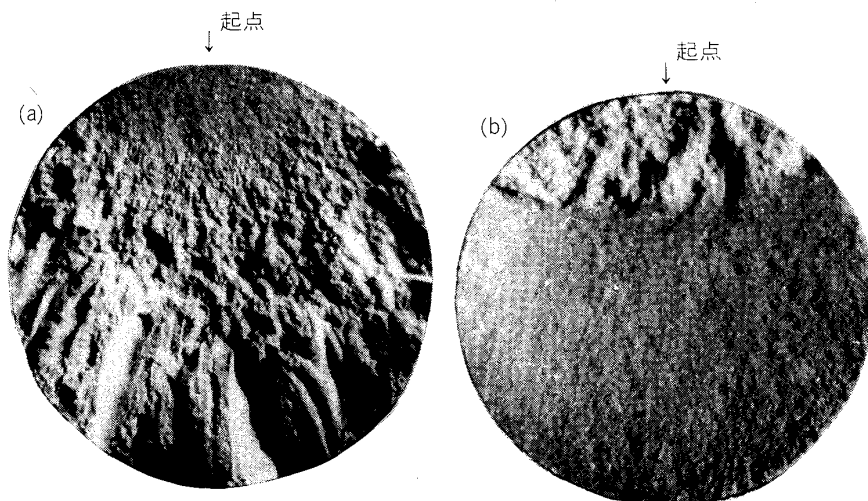
破面模様には、上記ストライエーションやディンプルのように、材料の塑性変形により形成されるものが多いため、上述のセラミックスや片状黒鉛鋳鉄のように、硬くて脆い材料の破面は、一般に特徴の少ない脆性の破面で、破面から得られる情報が比較的少ない。



(a) 静的破面 (たとえば、右下部にディンプルが見える) (b) 疲労破面  
写真 9 超硬合金 (WC-12%Co) の静的破面と疲労破面<sup>12)</sup>



(a) 静的破面 (b) 疲労破面  
写真 10 片状黒鉛鑄鉄の静的破面と疲労破面 (西田<sup>13)</sup>)



(a) 高速負荷 ( $\sim 1 \text{ kg/mm}^2 \text{ s}$ )

(b) 低速負荷 ( $\sim 10^{-2} \text{ kg/mm}^2 \text{ s}$ )

写真 11 焼結窒化けい素の高温引張破面 ( $1200^\circ\text{C}$ <sup>8)</sup>)

#### 4. セラミックスの高温破面<sup>8)</sup>

セラミックスは、高温特性のすぐれていることが知られている。高温における破面の例を写真 11 に示す。負荷速度が大きいとき (a) は、常温の破面と同様で、起

点付近のミラーから放射状模様 (ハックル) へ移行している。負荷速度が小さいとき (b) は、起点付近で凹凸が著しく、き裂が伝ばすると平坦な破面へ移行している。起点部の凹凸が著しい部分は、写真 12 のようにミクロ様相は粒界脆性破面で、平坦な部分は粒内脆性破面

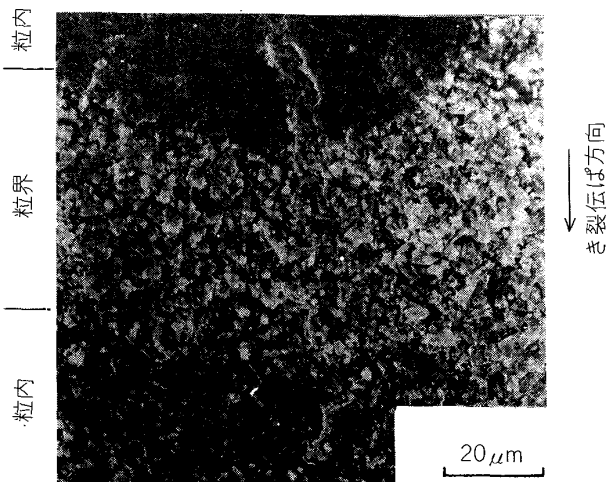


写真 12 焼結窒化けい素高温破面のミクロ様相  
1200°C, 曲げ破面, 上部はヌープ圧子による予  
き裂部<sup>8)</sup>

である。クリープ破面も上の低速の場合と同様であつて、この種の粒界破面は、金属材料の高温におけるクリープ破面が粒界破面であるのと軌を一にしている。

## 5. 複 合 材 料

複合材料では繊維などの強化材と基地(マトリックス)の材料との間の界面の強度が重要で、破壊様式と密接な関係がある。写真 13 に界面強度が大きい場合と小さい場合の繊維強化材の破面例<sup>15)</sup>を示す。写真 (a) は界面強度が小さい場合で繊維の引き抜けが著しい。写真 (b) は界面強度が大きい場合で引き抜けは見られない。

基地の材料の延性が大きい場合には、写真 14 の例<sup>16)</sup>のように、まず繊維部が破断し、その後、繊維の周囲の基地が延性破壊(ネッキング)するため、ディンプルを形成することがある。

## 6. その他の破面

### 6-1 アモルファス金属の破面

アモルファス(非晶質)金属の破面は、起点部は前記プラスチックやセラミックスの場合と同様、平坦であるが、破壊後期には写真 15 のような脈状模様(Vein pattern)が観察される<sup>16)~18)</sup>。これは、局所的な塑性変形(ネッキング)により形成されたテアリッジが網状もしくはリバー状になったものである。この種の合金は一般に非常に硬く、ウォルナーライン(Wallner's line)<sup>19)</sup>を観察した例もある<sup>18)</sup>。

### 6-2 六方晶金属の破面

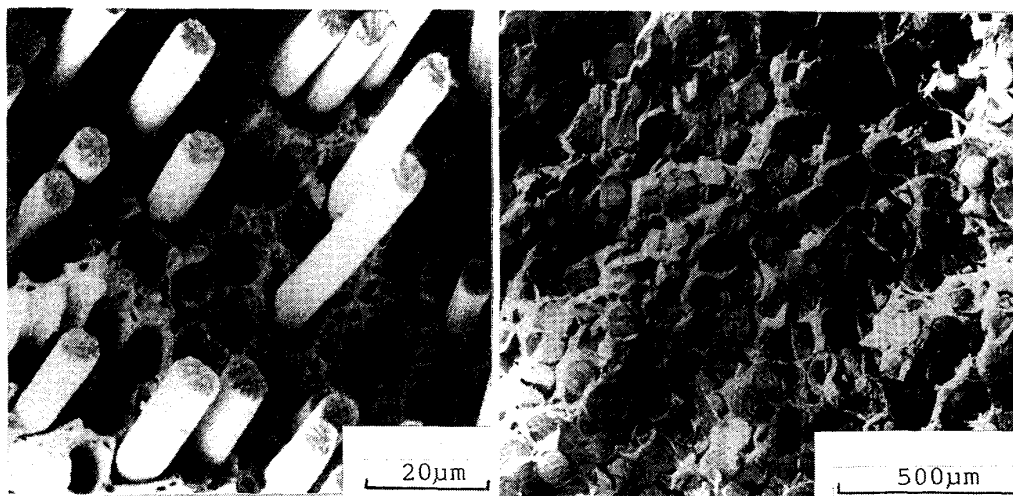
チタン、ジルカロイなど、稠密六方金属の水素割れなどの破面に、写真 16 の例のように特徴的なリバー状模様の観察されることがあり<sup>19)</sup>、最近ではフルーティング(fluting)と呼ばれることもある。これは上記脈状模様と同様のテアリッジで、鉄の水素割れ破面のリバー状模様と同種のものである。この場合は、六方晶の柱面におけるすべりに関係してできたものとされている<sup>20)</sup>。

## 7. む す び

前稿、「フラクトグラフィとその応用」<sup>1)</sup>で触れなかつた破面の特徴的模様を補足し、簡単にまとめてみた。フラクトグラフィの実際問題への応用に少しでもお役に立てば幸いである。詳細については、最初に述べたような趣旨で省略したので、文献を御参照いただければ幸いである。

なお、本稿の主題からははずれるが、フラクトグラフィ一般に関する最近の話題として、画像解析技術の応用がある。まだ一部で試みられている段階であるが、疲労

<sup>19)</sup> 非常に硬い材料の破面に現われる縞状もしくは網状の模様。伝ばするき裂先端と弾性衝撃波の干渉によってできるとされている<sup>21)</sup>。



(a) 界面強度が小さい場合  
(炭素繊維-銅基複合材料)

(b) 界面強度が大きい場合  
(タングステン-銅クロム合金複合材料)

写真 13 複合材料の破面<sup>15)</sup>

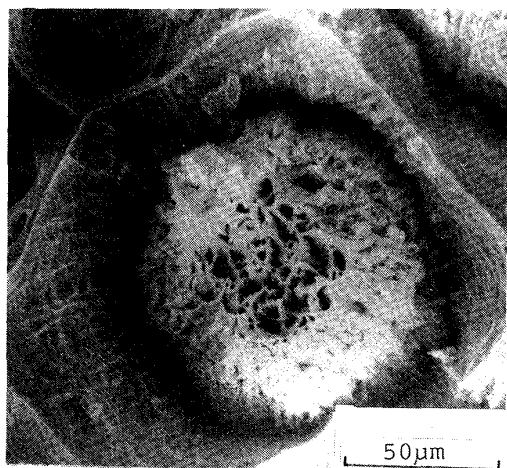


写真 14 複合材料の破面-繊維の破壊後その周囲の基地のネッキングにより形成されたディンプル状破面 (モリブデン-銅・クロム複合材料<sup>15)</sup>)

破面のストライエーション間隔測定、粒界破面率等の破面面積率の測定、破面の立体解析、その他、従来の方法では手数がかかる定量解析にその特長の生かされることが示されつつある<sup>22)23)</sup>。鉄鋼協会にはこれに関する基礎研究会も発足している。今後の発展が期待される。

終わりに、貴重な写真を引用させていただいた各位に深甚の謝意を表する。

#### フラクトグラフィ用語一覧表

##### (本稿で取り上げた破面模様の主なもの)

ミラー (Mirror) : プラスチックス (ガラス状), セラミックスなどの破壊起点付近の平坦で鏡面状を呈する部分。その大きさは破壊速度に関係しており, 破壊応力とミラー半径の関係を測定した結果がある。これを利用して, 破面から破壊応力を推定できる。(写真 1, 2; 図 2, 3)

ハックル (Hackle) : ミラー (上記) に続いて現れるき裂伝ば方向に沿った放射状模様。き裂が同一平面上にないため, 段の部分がき裂伝ば方向に沿って線状に伸びたものである。金属材料の破面で放射状模様 (Radial marking) あるいは放射状破面 (Radial fracture) と呼

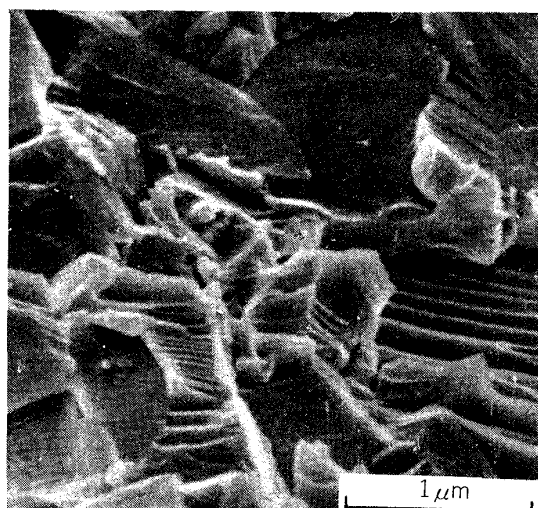


写真 16 ジルカロイ応力腐食割れ破面のフルーティング (矢印部<sup>19)</sup>)

ばれているものと同種の破面模様である。(写真 1, 2)。

ミスト (Mist) : ハックル (上記) の初期の細かい模様の部分。

パラボラ (Parabola) : プラスチックス (ガラス状) の破面では, ハックル (上記) に続いて放物線形の微小模様の観察されることがある。主き裂前方に微小空洞が形成され, これが主き裂と合体することにより形成される。(写真 1, 3)

リブ (Rib) : プラスチックスの破壊の後期に現れる, き裂伝ば方向に直角な縞状模様。き裂が一時停止したことを示す。(写真 1)

テアラインパターン (Tear line pattern) : き裂伝ば方向に沿った放射状模様を, 時によつてこの名で呼ばれることがある。(写真 4)

ディンプル (Dimple) : 金属材料の延性破面の最も普通の特徴的模様で, 微小空洞が合体して破壊するために生ずるくぼみである。縦横の長さがほぼ等しい丸形の等軸ディンプル (Equiaxed dimple) と一方向に引き伸ばさ

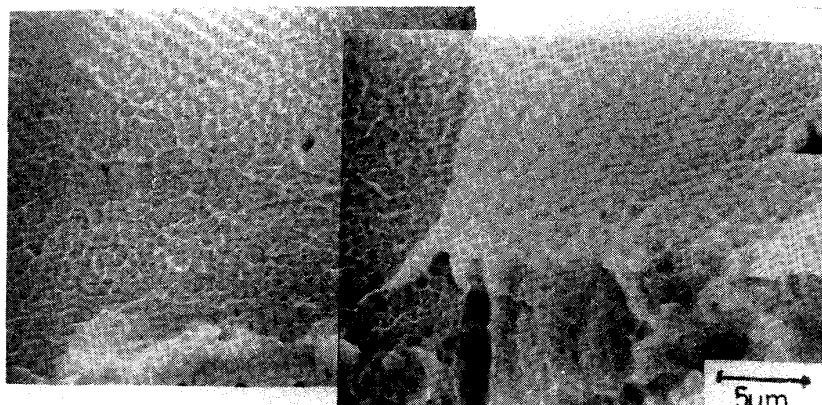


写真 15 アモルファス金属破面の脈状模様 (無電解ニッケルめつき合金<sup>16)</sup>)

れた放物線状の伸長形ディンプル (Elongated dimple) とがある。(写真 9, 14)

リバーパターン (River pattern): 金属材料が特定の結晶面 (へき開面) に沿って脆性破壊した破面 (へき開破面) に現れる川状模様。破面の段がき裂伝ば方向に合流したものである。(写真 10(a))

ストライエーション (Striation): 疲労破面に 応力サイクルに対応して現れる縞模様。繰返し 応力下において、き裂先端の塑性変形による開閉に伴って、1 サイクルごとに形成される。その方向はき裂伝ば方向にほぼ直角で、その間隔は 1 サイクルあたりのき裂伝ば速度を与える。これから、応力拡大係数  $K$  の値がわかり、破壊力学により破壊をひき起こした荷重値が推定できる。(写真 7)

ストライエーション状模様 (Striation-like pattern): 疲労破面には、ストライエーションに似ており、き裂伝ば方向にほぼ直角であるが、ストライエーションより一般に不規則で応力サイクルには対応しない縞模様が、しばしば観察される。繰返し 応力によるき裂先端部の塑性変形に関係して形成されたものと推測される。その間隔はき裂伝ば速度を与えないから、ストライエーション間隔の定量解析に際しては、その区別に注意しなければならない。(写真 8, 10(b))

脈状模様 (Vein pattern): アモルファス金属の破壊の後期に現れる。局所的な塑性変形 (ネッキング) により形成されたテアリッジ (山脈状の模様) が網状もしくはリバー状になったものである。(写真 15)

フルーティング (Fluting): 稠密六方金属 (チタン、ジルカロイなど) の水素割れ破面などに現れるリバー状模様。へき開破面のリバーパターンのような破面の段ではなく、脈状模様 (上記) と同じく局所的な塑性変形によるテアリッジである。リバーが平行で、管状の空洞が合体することにより形成されるところから、この名がある。(写真 16)

テアリッジ (Tear ridge): き裂が合体するとき塑性変形 (ネッキング) を生ずるためにできる山脈状の模様

ウォルナーライン (Wallner's line): 非常に硬い材料

の破面に現れる、縞状もしくは網状の模様。伝ばするき裂先端と弾性衝撃波の干渉によつてできる。

## 文 献

- 1) 小寺沢良一: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 803
- 2) I. WOLOCK and S. B. NEWMAN: Fracture Process in Polymeric Solids (1964), p. 235 [Wiley]
- 3) R. W. RICE: ASTM STP 827 (1984), p. 5
- 4) 金属破断面写真集 (含非金属, 複合材料) (小寺沢良一編 (1985) [テクノアイ])
- 5) 星出敏彦: 文献 4), p. 345
- 6) 上田芳伸, 清水真佐男, 国尾 武: 日本機械学会論文集, 44 (1978), p. 442
- 7) 内本徹雄: 文献 4), p. 274
- 8) 川合 実, 阿部 弘: 文献 4), p. 340, 日本材料学会フラクトグラフィ部門委員会資料 No. 205 (1983)
- 9) 中村義一: 文献 4), p. 342
- 10) 古橋善男: 文献 4), p. 320, 古橋善男, 堀 幸夫, 日本機械学会論文集 A 編, 46 (1980), p. 1031
- 11) 原 昭夫, 矢津修示: 日本機械学会フラクトグラフィ分科会成果報告書 (抄録) (1973), p. 139
- 12) 大塚昭夫, 東郷敬一郎, 菅原宏人, 植田文洋: 日本材料学会フラクトグラフィ部門委員会資料 No. 260 (1986), 日本材料学会第 5 回フラクトグラフィシンポジウム前刷集 (1981), p. 36
- 13) 西田新一, 浦島親行, 米倉隆行: 材料, 31 (1982) p. 922, 文献 4), p. 260
- 14) 砂田久吉: 材料, 22 (1973), p. 348
- 15) 落合庄治郎, 長村光造, 村上陽太郎: 文献 4), p. 334, 落合庄治郎, 水原 誠, 村上陽太郎: 日本金属学会誌, 41 (1977), p. 625
- 16) 砂田久吉: 文献 4), p. 534
- 17) H. J. LEAMY, H. S. CHEN and T. T. WANG: Metall. Trans., 3 (1972), p. 699
- 18) A. KAWASHIMA, K. HASHIMOTO and T. MASUMOTO: Corrosion, 36 (1980), p. 577
- 19) B. COX: Corrosion, 30 (1974), p. 191
- 20) R. J. H. WANHILL: Corrosion, 29 (1973), p. 435
- 21) C. D. BEACHEM and R. M. N. PELLOUX: ASTM STP 381 (1965), p. 210, 小寺沢良一: フラクトグラフィとその応用 (1981), p. 38 [日刊工業新聞社]
- 22) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 菊地 純, 西出 裕: 材料, 33 (1984), p. 1431
- 23) 駒井謙治郎, 菊地 純: 材料, 34 (1985), p. 648