

航空機用アルミニウム合金の高速破面の破面解析

河田 幸三・橋本 彰三・木 堂 明・黒河 邦彦*

摘 要

航空機用アルミニウム合金 2024-T3 板材の高速破面の巨視的及び電子顕微鏡による微視的破面解析を行ない、その特徴を明かにした。高速破面としては、静的引張りでのヘリングボーンの生じている脆性破面、10~50 m/s の高速引張り破面を用い、比較対象として、静的引張り、疲労の両破面をとった。高速破面は疲労破面と明確に識別し得る特徴を示すこと及び破面解析は航空機構造要素の破壊原因の究明、推定に有力な手段であることが結論される。

1. ま え が き

航空機などの構造要素の破壊原因の究明、推定に破面解析は有力な手段であると考えられる。近年特に電子顕微鏡による破面解析 [1] (electron microfractography) の研究が始められているが、現在緒につき始めたところというのが妥当で、今後さらに研究を進めるべき点が多い。

疲労破面に striation の現れることが多いことはよく知られているが、一方、疲労でなく、衝撃負荷で一度に破壊した場合および、静的負荷でも脆性破壊で破面が急速に通過した場合、すなわち高速破面の場合にはどのような特徴を示すのか、また、衝撃速度の変化によって、どのように変化するのかなどについては、十分明かにされていなかったため、高速破面の特徴を掴むことに重点をおいて研究を進めることとした。

以下、2024-T3 アルミニウム合金の高速破面の巨視的および電子顕微鏡による微視的観察を行なった結果の二、三 [2][3][4] について報告する。

2. 試験片と負荷

静的負荷で脆性破壊の場合、および衝撃負荷で急速に破断させる場合の両方を調べることとし、比較のため静的引張り破断と疲労破壊の場合も準備することとした。材料としては、航空機構造材料 2024-T3 を選んだ。

(1) 試験片-I 90° 切欠き板材、静的負荷、脆性破壊

板厚 $t=13.21$

板幅 $B=60$

長さ $L=200$

切欠き深さ $b=5.0$

V型切欠き, 90°, 先端 $R=0.065$

* 東京大学工学系大学院

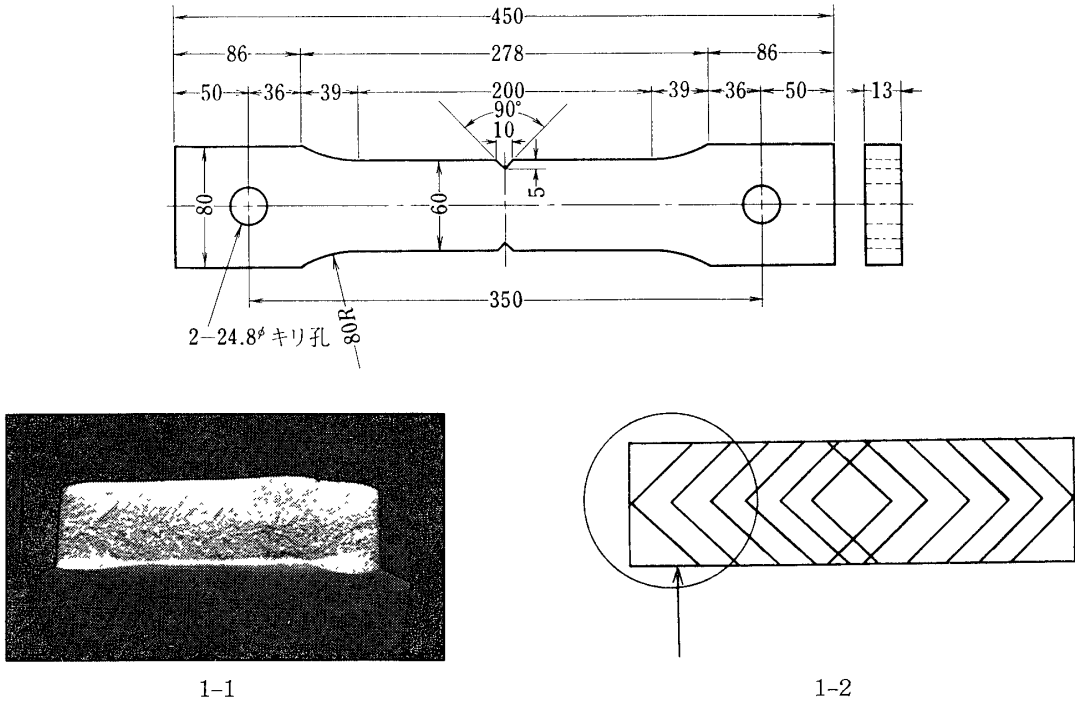


図 1 試験片 I

破断応力 $\sigma_b = 37.9 \text{ kg/mm}^2$

試験片形状および破断面のスケッチを図 1 に示す. 図 1-2 のように巨視的なヘリングボーン (herringbone) が観察される. 図 1-2 中の丸印は電顕用レプリカ採取位置で, 矢印はシャドウイングの方向を示す.

(2) 試験片-II 半円切欠き板材, 動的負荷, 衝撃破壊 ($V = 10 \text{ m/s}$)

板厚 $t = 2$
 板幅 $B = 15$
 長さ $L = 40$ (平行部)

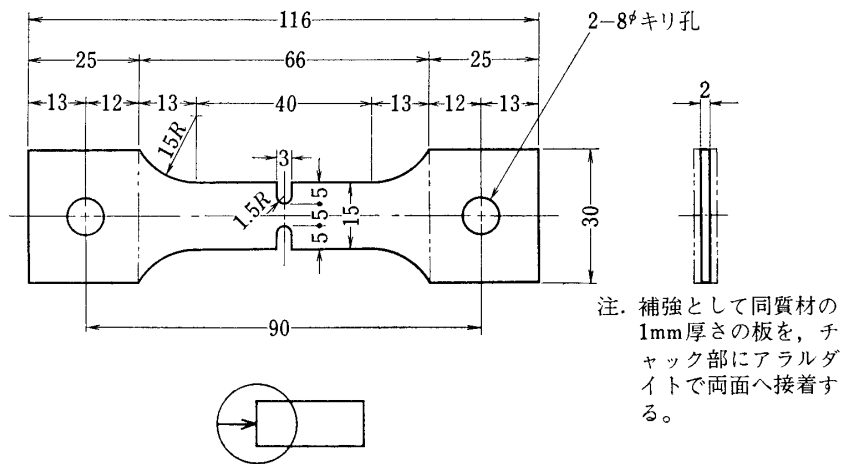


図 2 試験片 I, II, III

切欠き深さ $b=5$

半円型切欠き, $R=1.5$

引張り速度 $V=10$ m/s

試験片-II, III, IV の形状を図2に示す. $V=10$ m/s の高速引張りには, 図4の小型回転円板式高速負荷装置を用いた. 図2中, 試験片の下に示したのは, 破断面中のレプリカ採取位置とシャドウィング方向とである.

(3) 試験片-III 半円切欠き板材, 動的負荷, 衝撃破壊 ($V=50$ m/s)

試験片寸度は試験片-II に同じ.

(4) 試験片-IV 半円切欠き板材, 静的負荷 ($V\cong 0$ m/s)

(5) 試験片-V 疲労破壊

試験片形状は図3に示すもので, 疲労試験機は島津サーボ・パルサ EHF-10 [4] によった.

片振り 公称応力 24 kg/mm²

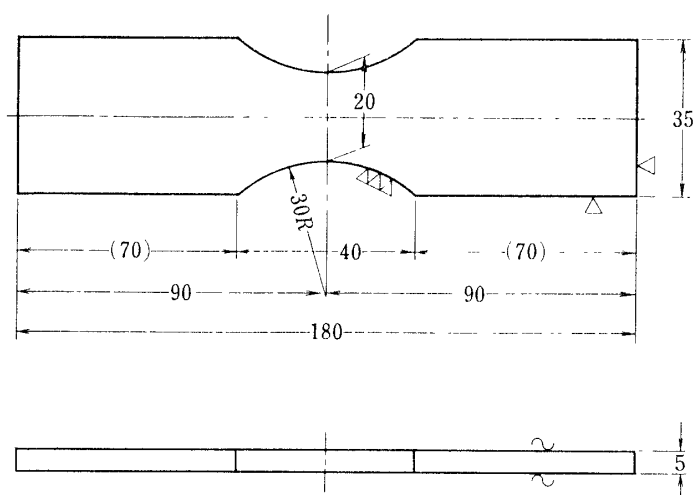


図3 疲労試験片

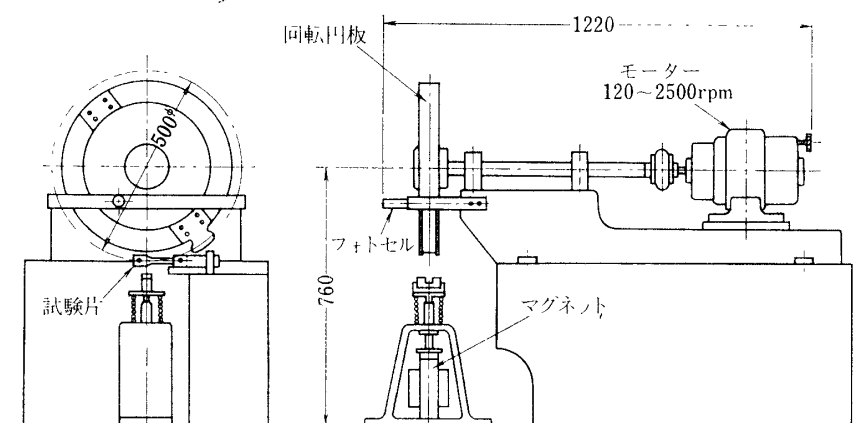


図4 回転円板式高速負荷装置

集中部応力 30 kg/mm^2

25 Hz

破断 $N=7.07 \times 10^4$

3. 電子顕微鏡による解析

2 段レプリカ法により電顕試料を作製した。アセチルセルローズ・フィルム，金属 Cr，カーボン蒸着（シャドウイング方向は図 1, 2 に示す。）を用いた。電子顕微鏡はスーパーコープ，撮影倍率はブラウン管面 2,000 倍，ネガ・フィルム面 1,000 倍，印画紙上倍率：

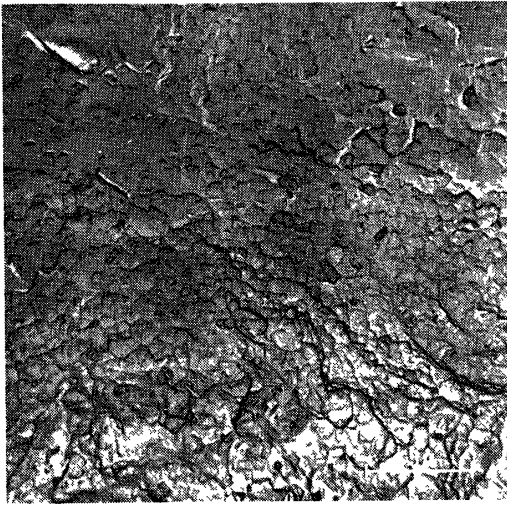


図 5-1 主として dimple よりなる部分，中央辺，丸い dimple が特徴

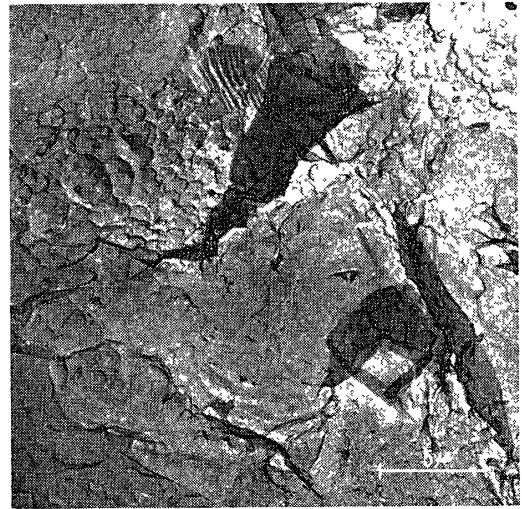


図 5-2 plastic slip の見られる例（写真としては一部レプリカの重り合いがある点は拙い）

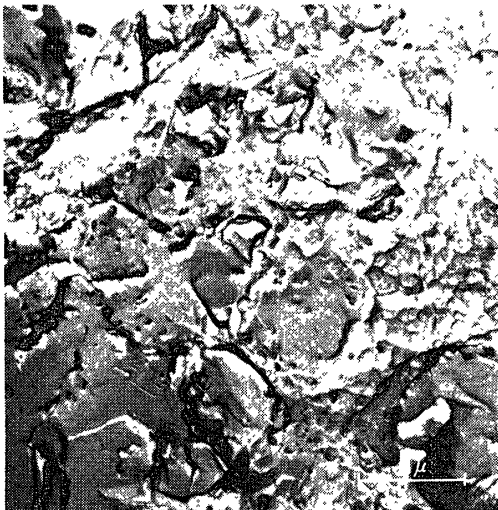


図 5-3 脆性破面と延性破面の混在例

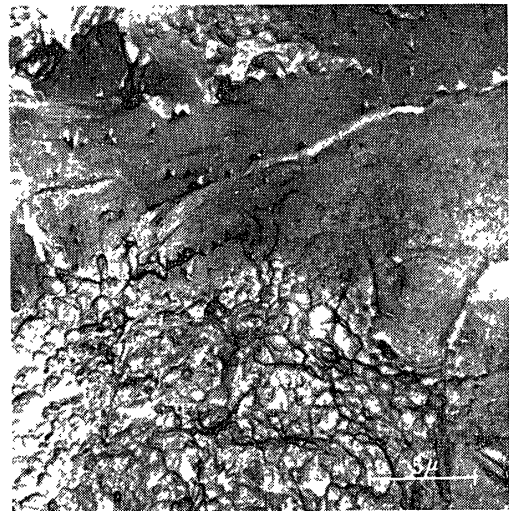


図 5-4 脆性（凝騎開）より舌状～dimple の移行の場所

図 5 試験片-I（静的負荷，脆性破面，ヘリングボーンあり）の電顕破面写真

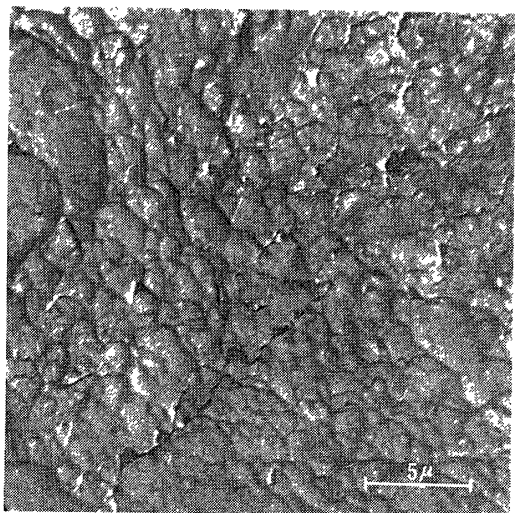


図 6-1 浅い shear dimple

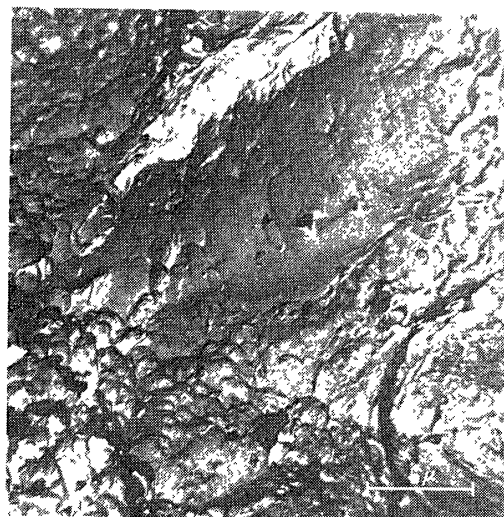


図 6-2 浅い dimple, 線条痕の場所

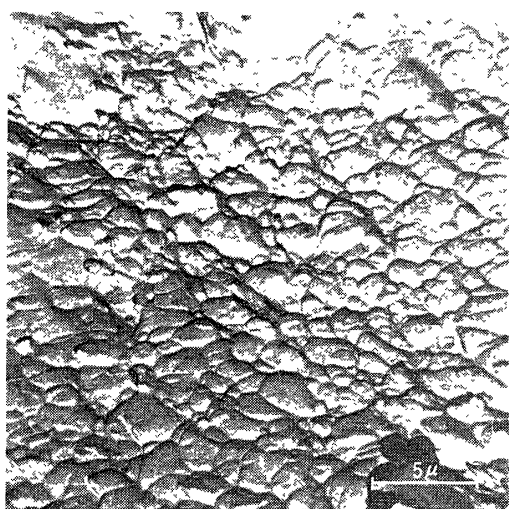


図 6-3 浅い shear dimple

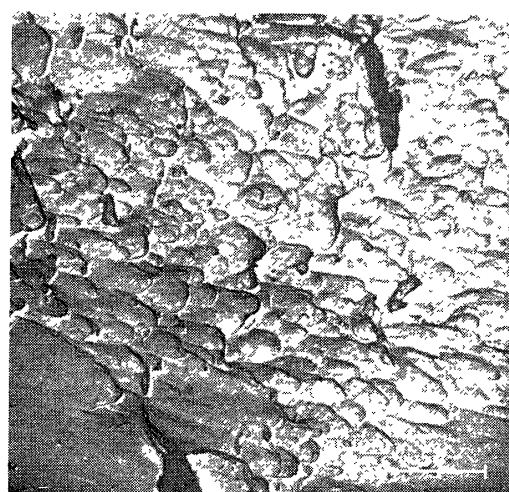


図 6-4 浅い shear dimple

図 6 試験片 II (衝撃負荷, $V=10$ m/s) の電顕破面写真

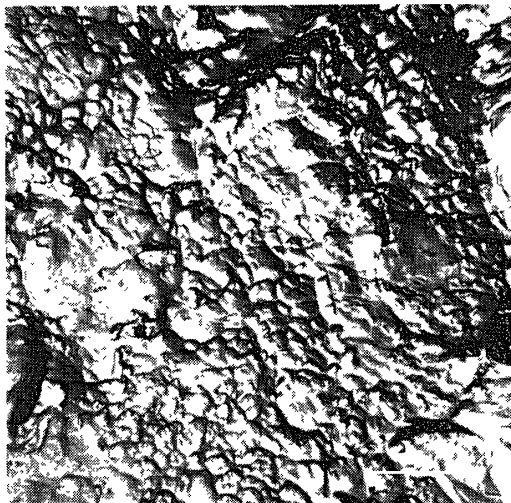


図 7-1 極めて浅い dimple

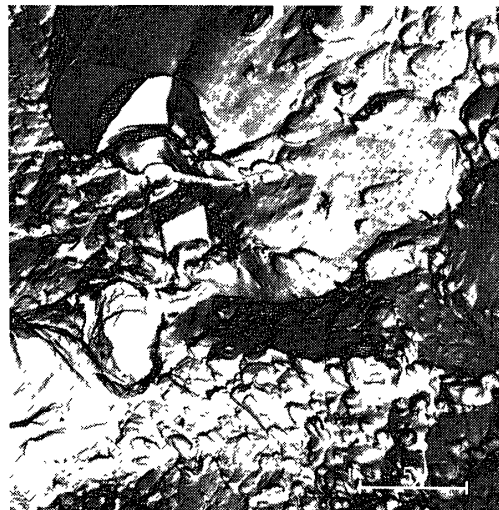


図 7-2 極めて浅い dimple と粒間破壊

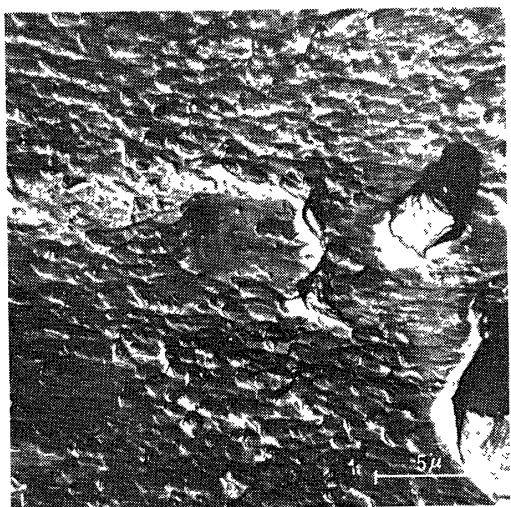


図 7-3 極めて浅い shear dimple と舌

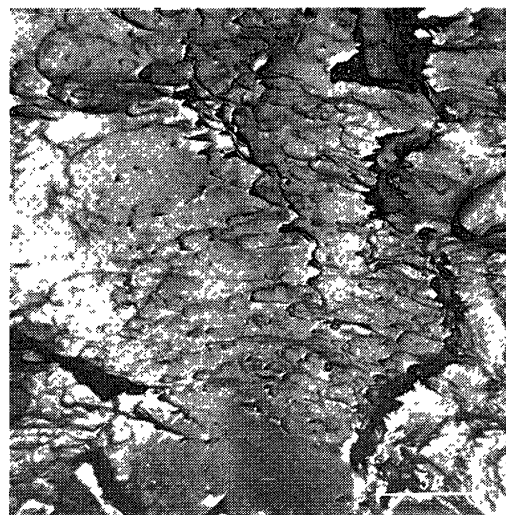


図 7-4 極めて浅い shear dimple と舌状への移行の個所か

図 7 試験片-III (衝撃引張り破壊, $V=50$ m/s) の電顕破面写真

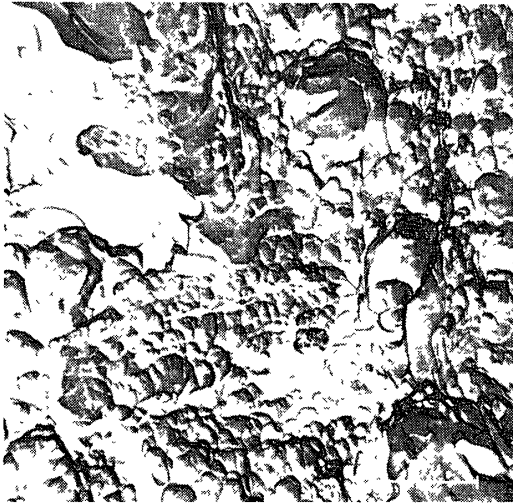


図 8-1 dimple と脆性破面の混在.

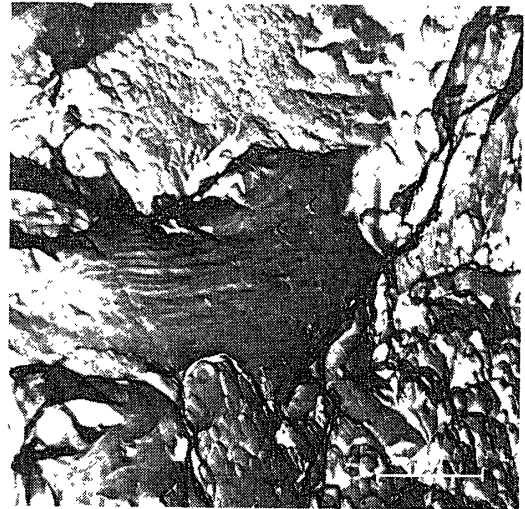


図 8-2 shear dimple と plastic slip

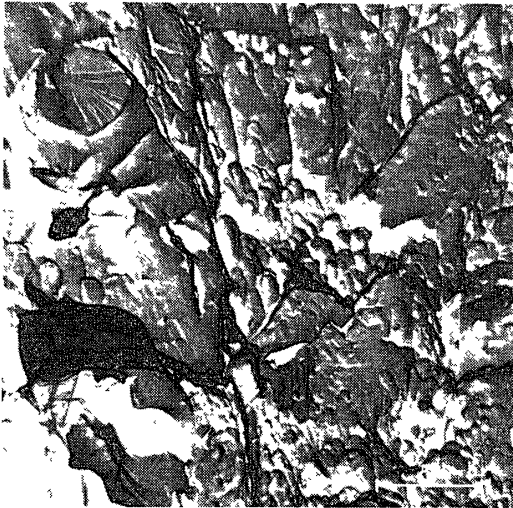


図 8-3 脆性破面と shear dimple

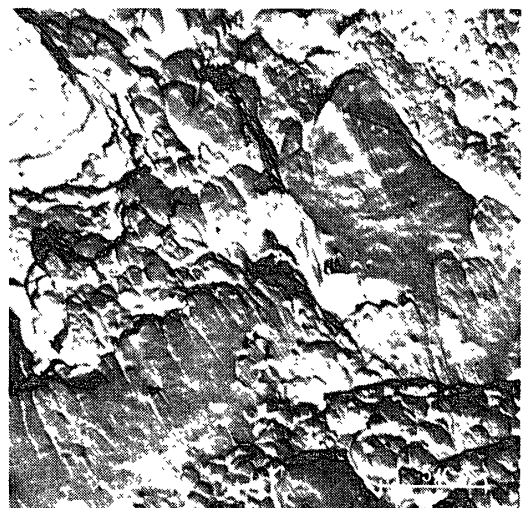


図 8-4 脆性破面と dimple

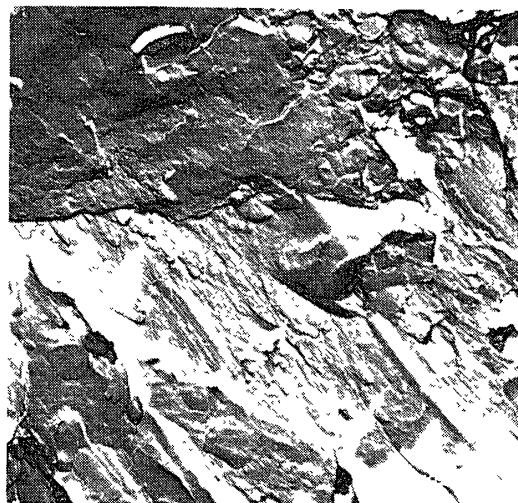


図 8-5 主として脆性破面

図 8 試験片-IV (試験片 II, III と同じ両側半円切欠き試験片, 静的引張り破壊)

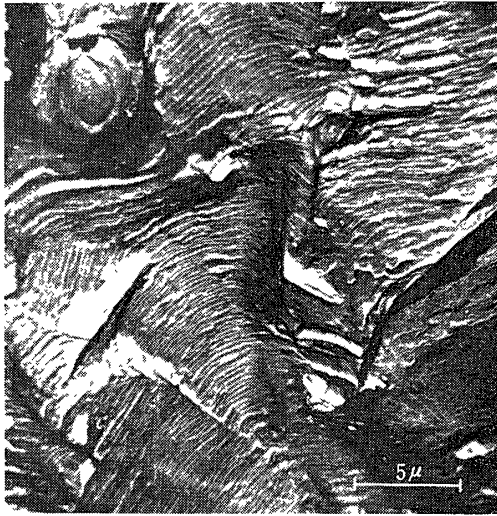


図 9-1 密な striation

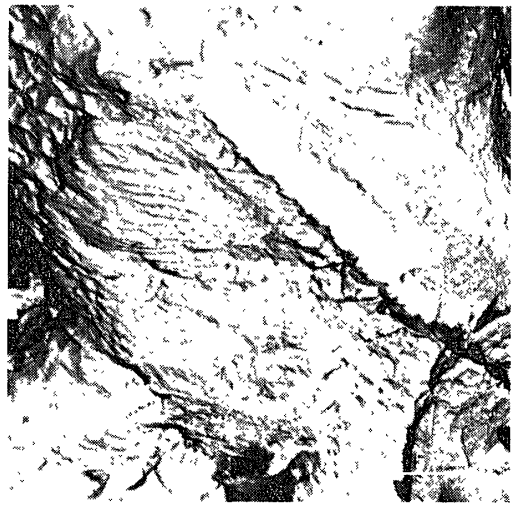


図 9-2 中位の striation と dimple



図 9-3 稍粗い striation と粒間破壊

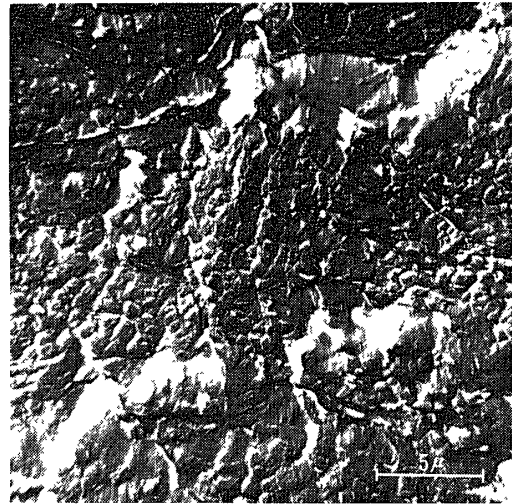


図 9-4 dimple と一部 striation の混在

図 9 試験片-V (疲労破壊)

試験片-I~V にわたり、4,800 倍である。

得られたフラクトグラフの代表例を図 5~9 に示す。

4. 観 察 結 果

電顕（および巨視的）破面写真について、得られた観察結果を要約する。

A) 試験片-I (静的負荷, 脆性破壊)

(1) 巨視的ヘリングボーンが明瞭に出る。静荷重でも脆性破壊の時には、このパターンの現れることが明瞭に示されている。

(2) 脆性破壊を示すと思われる個所（凝劈開, 舌 (tongue) 状）が見られる。

(3) 延性の dimple も混在する。この dimple はかなり丸味を帯びている。

- (4) plastic slip が見られる。疲労の striation と見えない注意がいる。
 - (5) striation は出していない（当然と考えられるが！）
- B) 試験片-II (衝撃引張り破壊, $V=10$ m/s)
- (1) やはり shear dimple と脆性破面の混在が見られる。
 - (2) dimple は高速引張りでは、深く成長しない傾向を示すと思われる。これを浅い dimple (shallow dimple) と呼ぶこととしよう。(少数例で確言するに至らぬと思われるが、ここでは上記の傾向がうかがわれるので、今後さらに例数を補足し、より明確にしたい。)
 - (3) 図 6-2 のように、plastic slip か shallow dimple か判然し難いが、線条痕を生じる場合がある。疲労の striation と見えない注意がいる。
 - (4) striation はない。
- C) 試験片-III (衝撃引張り破壊, $V=50$ m/s)
- (1) dimple の深さが十分成長し切れないで、極めて浅い dimple を示す。
 - (2) 粒間破壊もある。
 - (3) dimple と脆性破面(凝劈開)の移行の個所と思われる個所が見られる。
 - (4) 舌状の個所も見られる。
 - (5) striation はない。
- D) 試験片-IV (静的引張り破壊)
- (1) 脆性を示す破面(凝劈開, 舌状)と延性の dimple が混在。
 - (2) plastic slip が見られる。
 - (3) striation はない。
- E) 試験片-V (疲労破壊)
- (1) 明瞭な striation を示す個所が多い。
 - (2) striation と dimple の混在する個所もある。

以上をまとめてみると、高速破面の特徴は次のようになり、疲労破面と明瞭に識別するに足りる諸特徴を示す。

- (1) 静荷重でも、脆性破壊の時には巨視的ヘリングボーンが出る。
- (2) dimple と脆性の破面(凝劈開, 舌状)が混在する。
- (3) plastic slip も出る。これは一見 striation と紛らわしい場合があるので注意して見分ける必要がある。
- (4) striation は出ない。
- (5) $V=10\sim 50$ m/s では、shallow dimple になる傾向を示す。
- (6) dimple と劈開の移行の個所と思われる個所がある。

5. 結 論

- (1) 2024-T3 アルミニウム合金板材試験片の高速破面および疲労破面の巨視および電顕破面解析を行なった。
- (2) 高速破面は、疲労破面と明瞭に識別するに足りる諸特徴を示すことが明かになっ

た. その特徴は以下のようなものである.

- 2-1 静荷重でも脆性破壊の時には, 巨視的ヘリングボーンが出る.
 - 2-2 dimple と脆性破面 (凝劈開, 舌状) が混在する.
 - 2-3 plastic slip も出る. これは疲労の striation と見違えぬ注意がいる.
 - 2-4 striation は出ない.
 - 2-5 $V=10\sim 50$ m/s では shallow dimple になる傾向を示す.
 - 2-6 dimple と凝劈開の移行の個所と思われる個所がある.
- (3) 引張り速度と電顕破面像との関係については, 今後さらに詳細に調べる予定である.

末筆ながら, 電顕技術についてご教示頂き, かつ電子顕微鏡および真空蒸着装置などの使用につき便宜を計って頂いた仁木教授, 小原助教授はじめ同研究室の諸氏, 特に助手田尻雅一氏に厚くおん礼申上げる.

1973 年 5 月 8 日 材料部

参 考 文 献

- [1] 例えば, C.D. Beachem: Electron Microscope Fractograph, Fracture edited by H. Liebowitz, Vol. 1 (1968), 244, 参照.
- [2] 河田幸三, 本堂 明, 橋本彰三, 黒河邦彦. 2024-T 3 Al 合金の高速破面の破面解析, 第 3 回宇宙航空材料シンポジウム報告集 (1973/3), 59.
- [3] 河田幸三. 航空宇宙材料力学の最近の諸問題, 日本航空宇宙学会第 4 回年会講演会講演集 (1973/4), 25.
- [4] 河田研究室. 2024 T 3 Al 合金の脆性破面のマイクロフラクトグラフ, 日本航空宇宙学会誌, 20 巻 222 号 (1972/7), 399. (著紙複製)
- [5] 河田幸三, 橋本彰三, 本堂 明. 航空材料の疲れによる力学的劣化とその検出(第 1 報), 東大宇研報告, 6 巻 3 号(B) (1970/9), 716.