

表-6 供試材の化学成分(並列型溶接継手試験片)

化 学 成 分 (%)					
C	Si	Mn	P	S	V
0.13	0.39	1.24	0.013	0.009	0.033

表-7 供試材の機械的性質 (並列型溶接継手試験片)

引 張 試 験		
σ_y (kg/mm ²)	σ_w (kg/mm ²)	伸 び
52.7	63.0	48

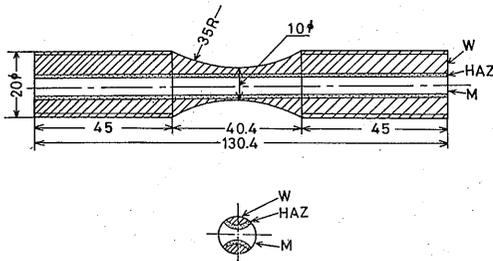


図-4 試験片形状 (並列型溶接継手試験片)
M; 母材, W; 溶接金属,
HAZ; 熱影響部

丸棒試験片を採取した。溶接に使用した心線は HT60 用心線と軟鋼用心線である。電気油圧 ON-OFF 制御 50 トン疲労試験機を用い、完全両振り荷重制御で、繰返し速度 5~20 Cpm として実験を行った。

実験の結果得られた S-N 線図を 図-5 に示す。ここで HN は HT60 用心線を用いた溶接継手から得られた試験片を、また HU は軟鋼用心線を用いた試験片を示す。破断寿命 N_f で整理すると溶接の違いによる疲労強度の差は出ていない。

4.2 破面観察結果

実験中の肉眼およびルーペ (×10) による観察によると HN, HU とも疲労亀裂発生は殆んどボンド部であり、溶接金属部からの場合もまれにはあったが、母材部からは発生しなかった。発生点は必ずしも一点ではなく、数例では二箇所以上から発生した。二箇所以上から発生した場合の亀裂の進展状況は実験中の試験片表面の観察や試験終了後の破面のマクロ的観察だけでは不充分と思われたので走査型電顕と透過型電顕を用いてミクロ的観察を行った。

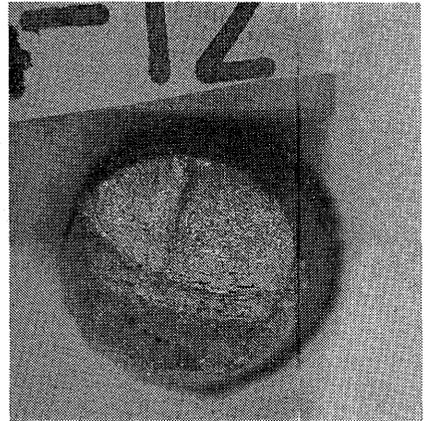


写真-27 並列型溶接継手試験片 HU-12 の破面写真

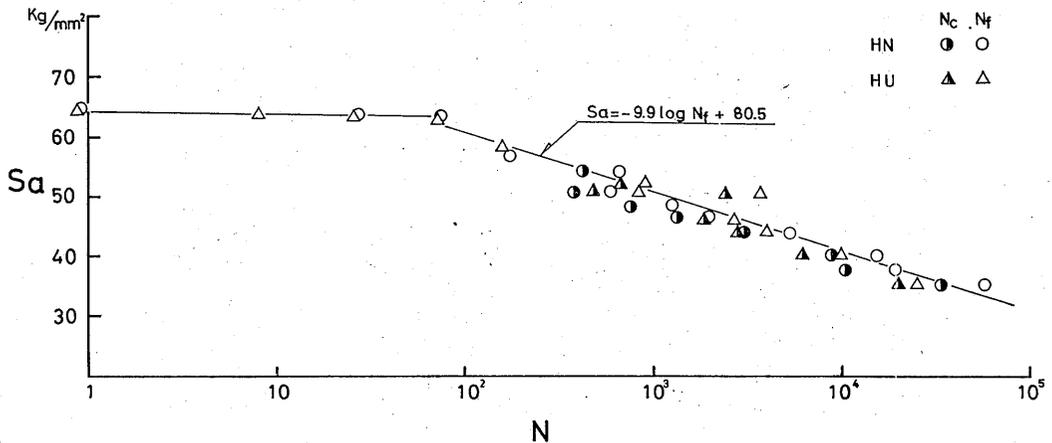


図-5 疲労試験結果 (並列型溶接継手試験片)

HU-12 の破面のマクロ写真を 写真-27 に示す。この試験片は公称応力振幅 S_a を 37.6 kg/mm^2 として試験し、亀裂発生寿命 N_0 は 10,625 サイクル、破断寿命 N_f は 19,365 サイクルであった。亀裂は最初ボン

ドより発生し、その数百回後に溶接金属部からの発生が認められた。マクロ的にみると破面は平坦でなく、亀裂発生位置の差から、表面付近では、破面にわずかに段がついている。この破面を走査型電顕で観察した。

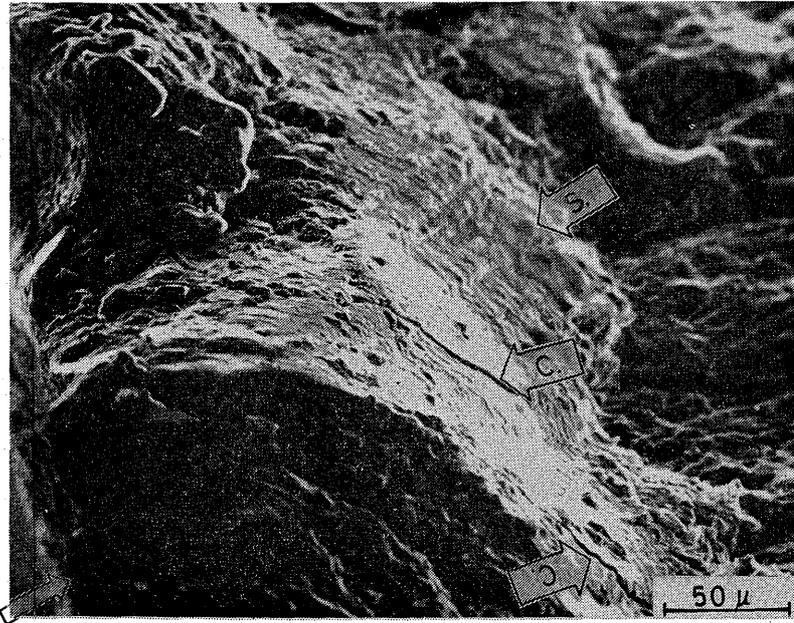


写真-28 HU-12 の疲労破壊部の低倍率写真 ($\times 200$, 走査型電顕)
矢印 亀裂発生点 C; 割れ S; ストライエーション

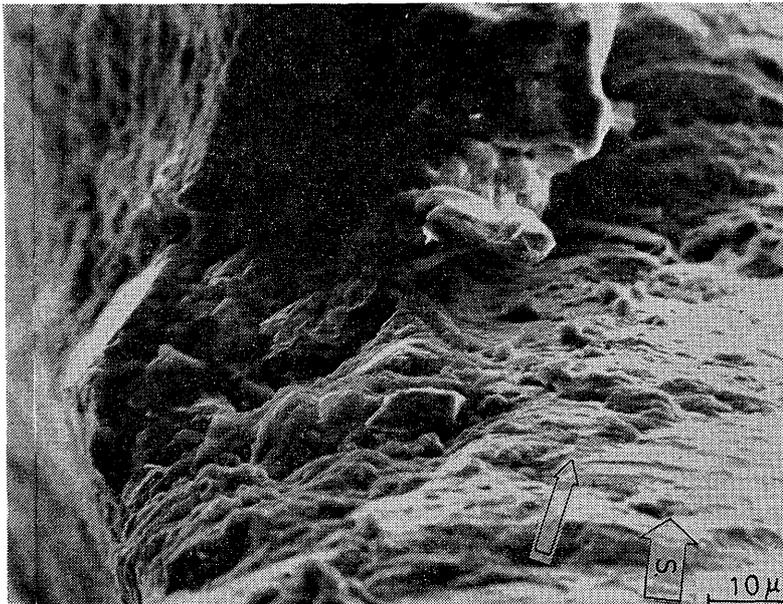


写真-29 HU-12 の疲労破壊部のマイクロ写真 (試験片端部 走査型電顕)
矢印 亀裂進展方向 S; ストライエーション

まず HU-12 の全面を低倍率で観察し、そのあと部分的に高倍率で観察した。最初に亀裂が発生したボンドには特徴ある模様はみられなかったが、あとから亀裂が発生した溶接金属部の端から内部へ 0.35mm の

間でストライエーションが観察された。その周辺の低倍率写真(×200)を写真-28 に示す。写真の左端が破面の端部であり、溶接金属部からの亀裂の発生点は写真左下すみの矢印で示す点である。拡大写真を写真-

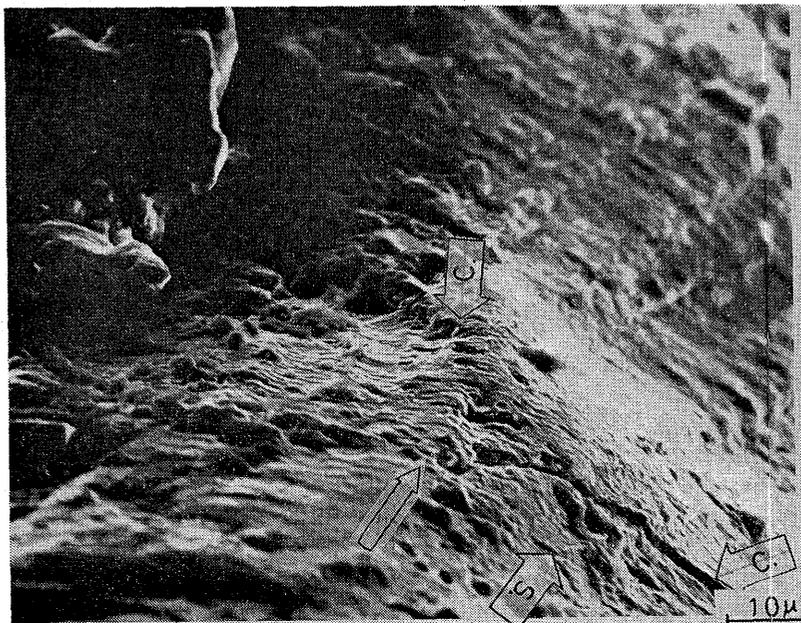


写真-30 HU-12 の疲労破壊部のマイクロ写真 (試験片端部から 0.25mm 内の位置, 走査型電顕) 矢印 亀裂進展方向 C; 割れ S; ストライエーション

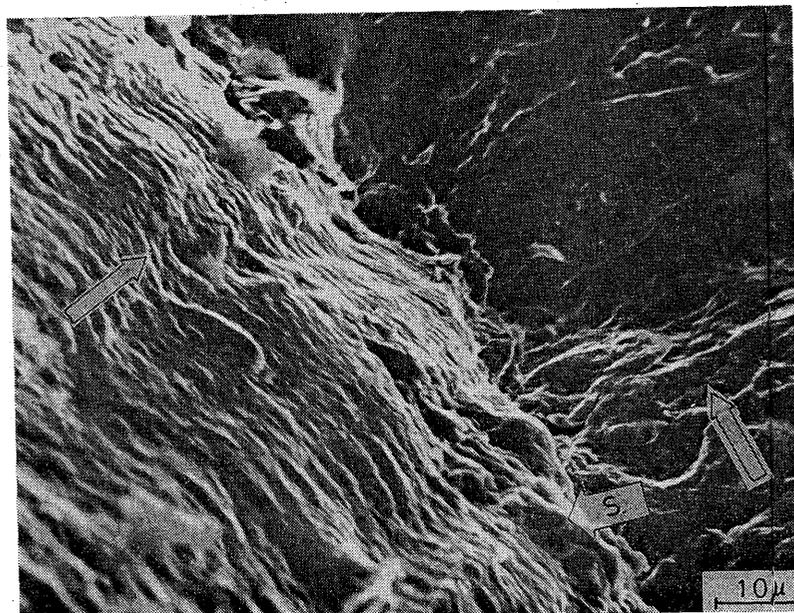


写真-31 HU-12 の疲労破壊部のマイクロ写真 (写真-27 よりさらに亀裂が進んだ位置, 走査型電顕) 矢印 亀裂進展方向 S; ストライエーション

29, 30 に示す。写真-29 は試験片端部（溶接金属部）のものであるが、試験片端部にほぼ直角に細く形成されているストライエーションが観察できる。ストライエーション間隔は約 $1 \times 10^{-3} \text{mm}$ である。なお、以下に示すストライエーション間隔は破面の傾斜の補正は行っていない。写真-30 は端部より内へ 0.25mm 入った場所から得られた。この写真からは写真中央やや右よりの中段より下にわたって破面が傾いているのが観察できる。少し傾斜して交わっている面の両面をストライエーションが形成されているが、交わった面で向きを急激に変えているのがわかる。亀裂がさらにすすむとストライエーション間隔はやや広くなる。写真-31 の左側（溶接金属部）では間隔は $3 \times 10^{-3} \text{mm}$ となる。さらに亀裂が進んだところでは、再び面が傾斜しているのが観察できる。（写真-31 の中央付近、熱影響部）写真-31 の右半分は他の亀裂（おそらく最初に発生した亀裂の進展したもの）であると考えられる。右半分ではストライエーションは観察できなかった。この亀裂面の傾きは、ボンドと溶接金属部の両方に発生した。軸方向に若干位置の異なる亀裂が進展するにつれ、接近した時に両破面が結合するように軸方向に角度を変えて近づいたためであると考えられる。

また写真-30 の中央部と右下にストライエーションに沿って割れ（C印）が観察された。この割れは亀裂前面に沿って観察されることから亀裂の枝分れ（bifurcation）であると思われる。

HN-13 の破面のマクロ写真を写真-32 に示す。こ

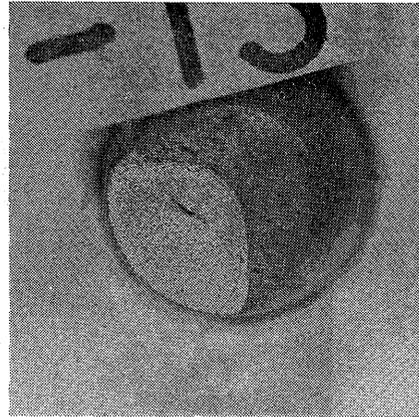


写真-32 並列型溶接継手試験片 HN-13 の破面写真

の試験片は実験中の観察では亀裂がボンドからのみ発生した例である。試験条件は S_a が 46.5 kg/mm^2 であり、 N_c が 1344 サイクル、 N_f が 1965 サイクルであった。マクロ的には疲労破面（写真で白くみえる部分）は全体的に平坦であり、破面中央付近のボンド部に割れが観察できる。また引張破面（黒くみえる部分）と疲労破面の境界に年輪のような輪が一本みえる。

溶接金属部の走査型電顕によるマイクロ写真を写真-33 に示す。破面が押しつぶされているため、ストライエーションらしいものがあるという程度にしか判断できない。また同写真にはディンプルも少し観察される。つぎにボンドに生じた割れより、母材部で起こっ

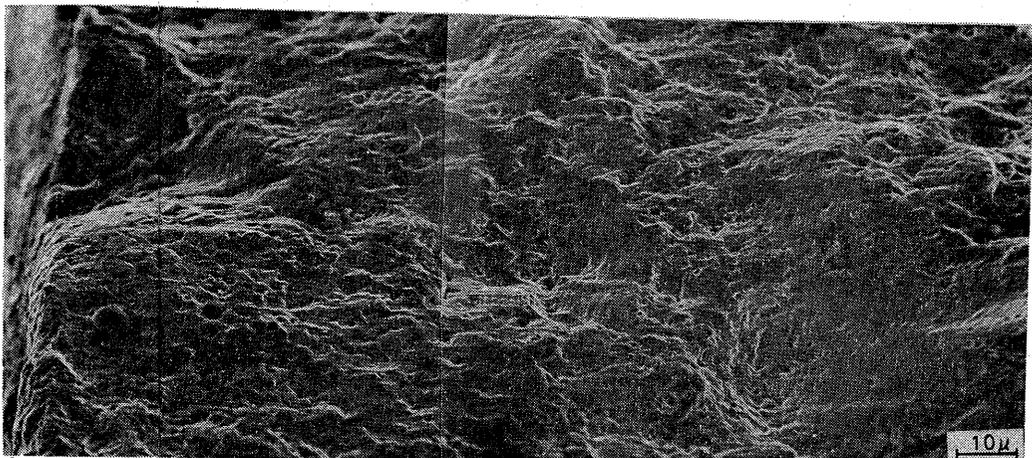


写真-33 HU-13 の疲労破壊部のマイクロ写真（走査型電顕） 矢印 試験片端部

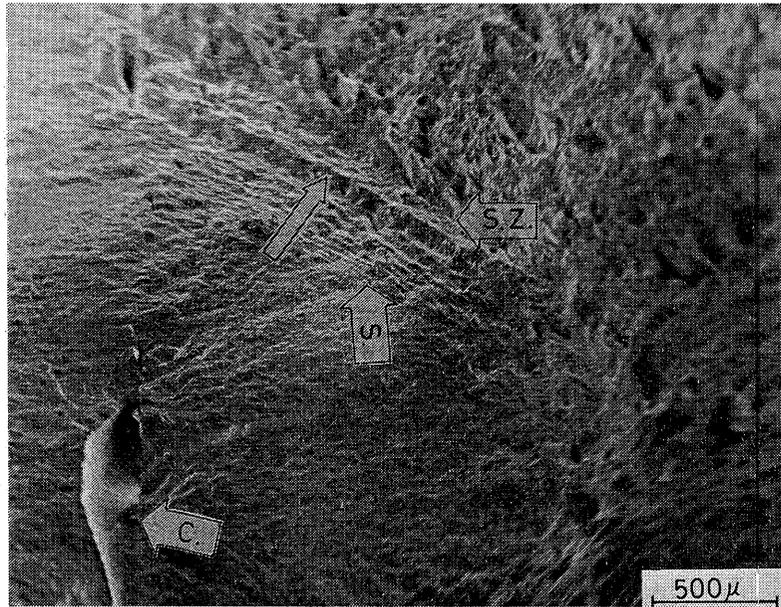


写真-34 HU-13 の疲労型から引張型への遷移領域の低倍率写真 (×30, 走査型電顕)
 矢印が遷移領域 C; 割れ S.Z.; 引き伸し帯 S; ストライエーション
 矢印 亀裂進展方向

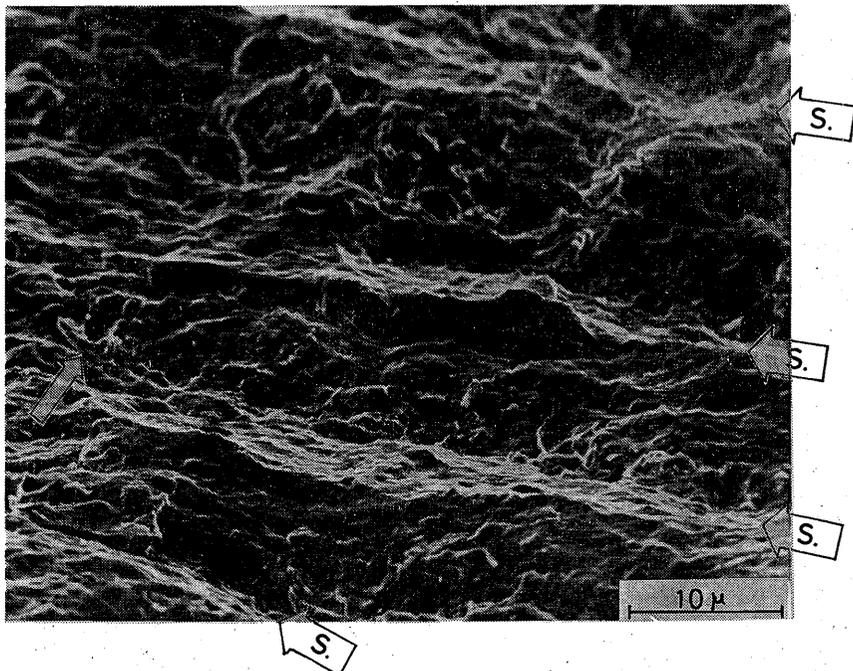


写真-35 HU-13 の疲労型から引張型への遷移領域のマイクロ写真 (走査型電顕)
 矢印 亀裂進展方向 S; ストライエーション

ている引張型破面までの領域（熱影響部から母材部）の走査型電顕による低倍率写真（ $\times 30$ ）を写真-34に示す。破壊様式が疲労型から引張型への遷移する領域

で縞模様が観察される。縞の数は13本ほど確認できる。これはストライエーションと思われる。この近辺の拡大写真の一例を写真-35に示す。亀裂の進展に伴

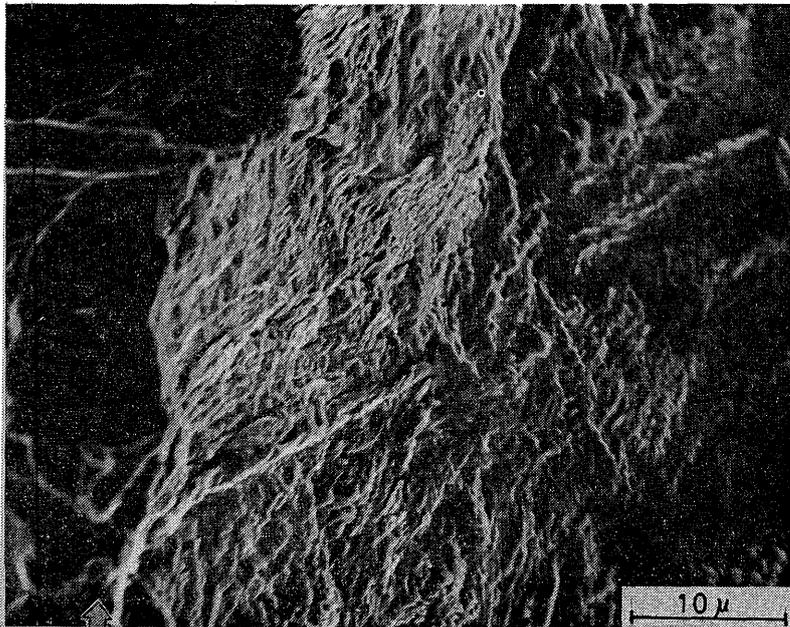


写真-36 HU-13 の疲労破壊部の割れ周辺のマイクロ写真（走査型電顕） 矢印 割れ

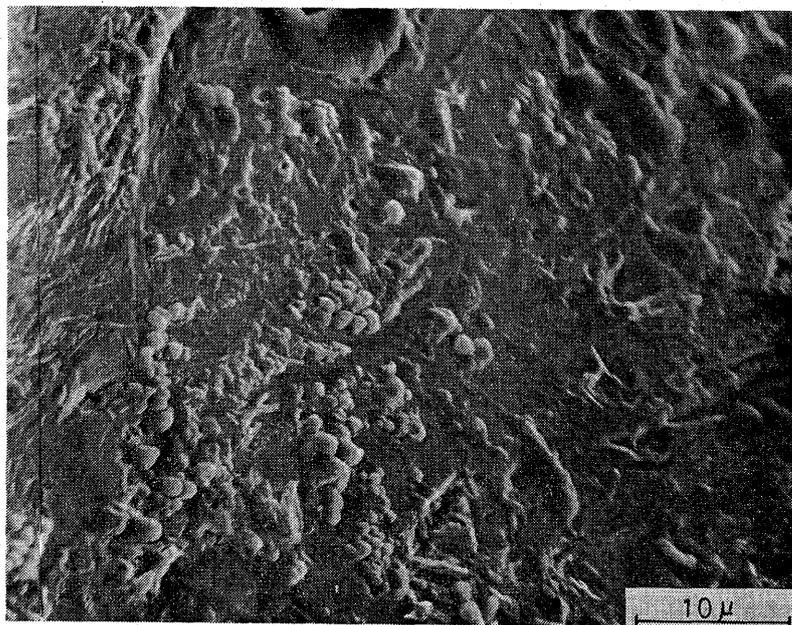


写真-37 HU-13 の疲労破壊部の割れの内部のマイクロ写真（走査型電顕）

い間隔が広がっていくのがわかる。はじめの方は0.01mm 程度の間隔であったが破断直前の一回では0.1mm と約10倍になっている。荷重一定の実験であるので、亀裂が進展するにつれ、未破断部分の断面積が減少し真応力が上昇するためストライエーション間

隔がしだいに広がっていったことを示している。写真-34 では破壊様式が疲労型から引張型へと遷移する際に形成される引き伸し帯 (S.Z. 印) も観察できる。

写真-34 からはボンドに生じた割れからも亀裂が進展しているように見えるが、拡大写真 (写真-36) で見

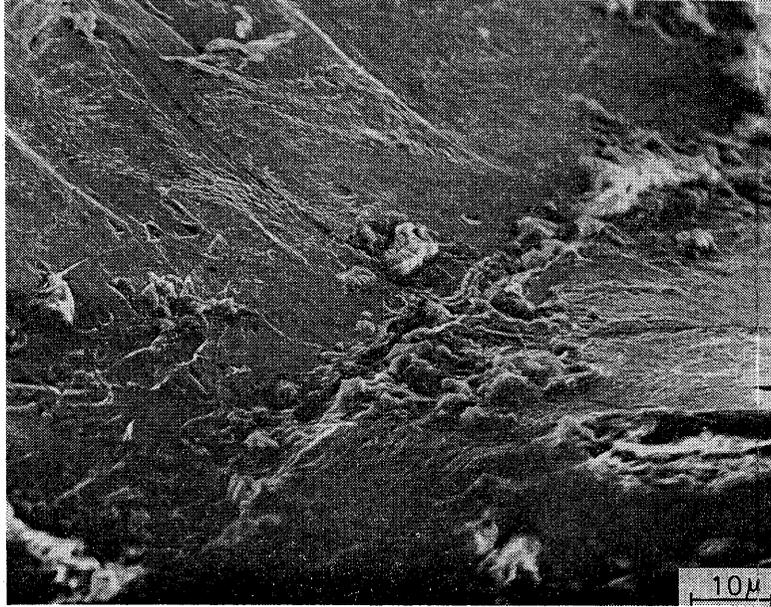


写真-38 HU-13 の疲労破壊部の割れの内部のマイクロ写真 (走査型電顕)

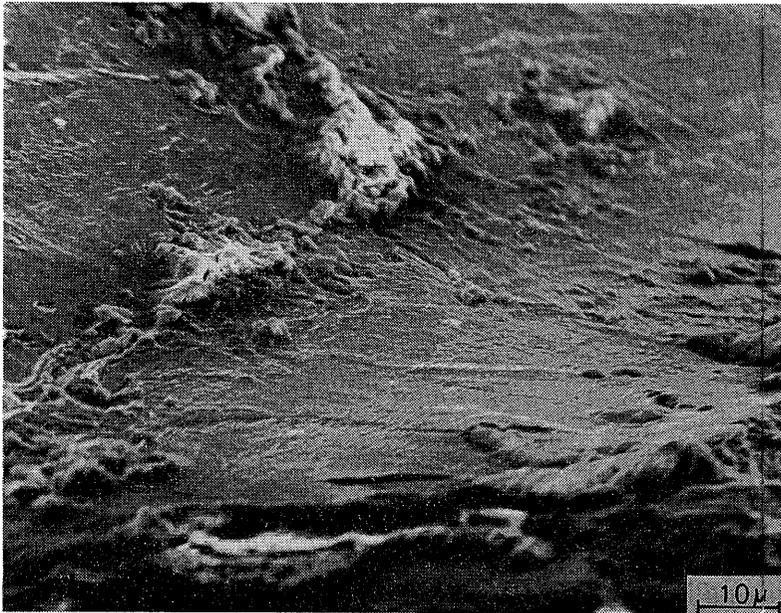


写真-39 HU-13 の疲労破壊部の割れの内部のマイクロ写真 (走査型電顕)

る限り、割れから亀裂が新たに進展した形跡はなかった。写真-36 の左側が割れであり右側が主亀裂面である。割れの内部のマイクロ写真を写真-37~39 に示す。写真-37 では気泡状の様相が観察できる。走査型電顕の場合、酸化膜が存在すると二次電子が散乱してハレーションを起こし、観察できないので、この場合の気泡状のものは写真-9; 10 でみられたような酸化物ではないと思われるが、この写真だけではどのようなものであるかは判断できない。写真-38, 39 はスラグがとれたような感じであり、面が互いにこすられた様子もみられないのでおそらくスラグ巻き込み等の溶接欠陥のあとであろうと考えられる。

HN-9 の破面のマクロ写真を写真-40 に示す。この試験片は亀裂が溶接金属部一箇所からのみ発生した例である。試験条件は S_a が 48.3 kg/mm^2 であり、 N_0 は 772 サイクル、 N_f は 1280 サイクルであった。写真-40 の右斜め下の矢印の付近（溶接金属部）から亀裂が発生し、円弧状に進展し、マクロ的に平坦にみえる破面を形成し、さらに進展して局部的に凹凸の激しい破面（この部分は熱影響部と母材）へ移り、やがて最終破断している（最終破断部は母材部）。

透過型電子顕微鏡によるマイクロ写真を写真-41~44 に示す。写真-41, 42 は亀裂進展初期のものであり、マクロ的には平坦にみえる場所（溶接金属部）から得られたものである。この位置から得られたマイクロ写真の大部分は写真-41 のようなものであり、明瞭なタイヤトラックおよびラブマークが特徴である。また、この領域でわずかではあるが写真-42 のようなストライエーションが観察された。この写真にもタイヤトラック

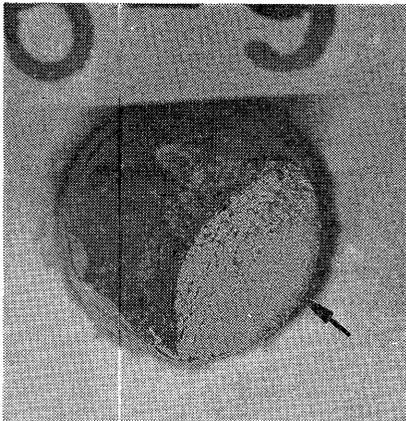


写真-40 並列型溶接継手試験片 HN-9 の破面写真 矢印 亀裂発生地点

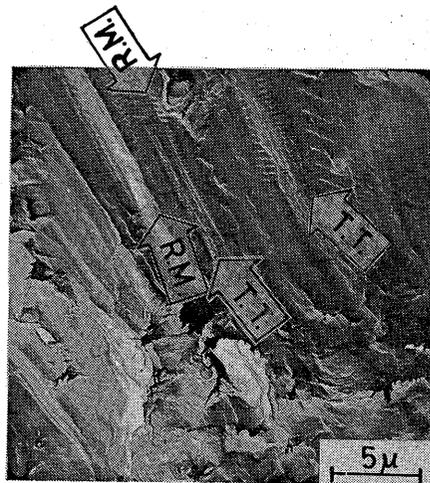


写真-41 HN-9 の疲労破面部のマイクロ写真（亀裂進展初期、透過型電顕）
R.B.; ラブマーク T.T.; タイヤトラック

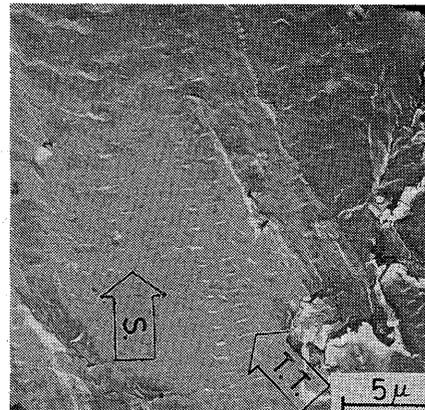


写真-42 HN-9 の疲労破面部のマイクロ写真（亀裂進展初期、透過型電顕）
S; ストライエーション T.T.; タイヤトラック

がみられる。つぎに写真-43, 44 は亀裂進展後期（熱影響部または母材部）のマイクロ写真である。この部分はマクロ的に起伏のとんだ箇所である。写真-43 ではストライエーションらしきものがみえ、写真-44 ではディンプル模様が観察されるが、全体的にはこの領域ではディンプルが優勢である。タイヤトラックはここでは殆んど観察されていない。

以上の微視的観察とマクロ的観察により HN-9 の亀裂伝播挙動は以下のように考えられる。まず溶接金属より亀裂が発生しストライエーションを形成しながら進むが、進展するにつれ破面間のこすり合いでス

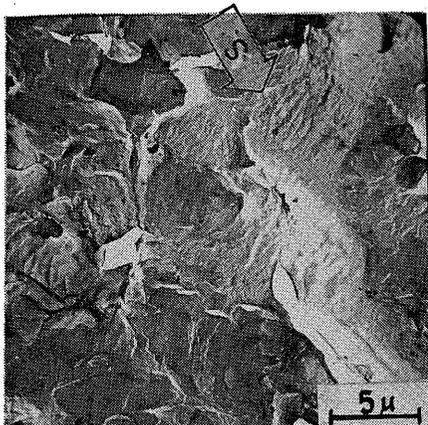


写真-43 HN-9の疲労破面部のマイクロ写真（亀裂進展後期，透過型電顕）
S；ストライエーション

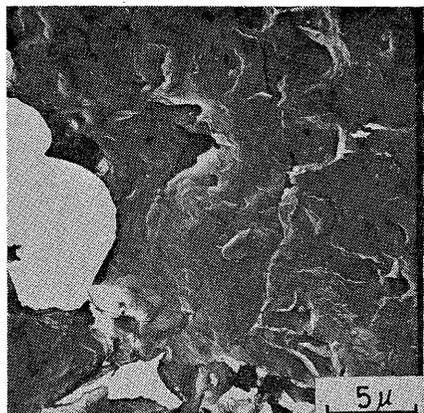


写真-44 HN-9の疲労破面部のマイクロ写真（亀裂進展後期，透過型電顕）
全面的に第二段階のディンプルが観察される

ストライエーション模様が無特徴な平坦な様相に変わり、同時に固い粒子等の存在からタイヤトラックを形成する。この領域はマクロ的に平坦に見える。さらに亀裂が進展するにつれ応力状態等の関係でマイクロボイドの合体による破面形成（ディンプル）がストライエーションより優勢になり、そのうえ破面間の押し合いが少なくなりマクロ的には局部的に凹凸の激しい破面ができあがると思われる。

以上、亀裂発生源の異なる溶接継手試験片破面のミクロ的観察例についてのべたが、母材、溶接金属、熱影響部のそれぞれに特有のミクロ形状はみあたらなかった。

5. あとがき

各種の試験条件に対する破面の微視的様相の情報の収集を目的として、過去の疲労実験で得られた破面の一部を電子顕微鏡で観察した。これらの実験の本来の目的が微視的破面解析でなかったのと実験終了後長時間経過しており、破面解析上非常に重要な破面の管理に適切でない点があったので、電顕観察を行う上で不適当な点多かった。特に実験の荷重条件が引張—圧縮であり、圧縮荷重の影響で破面形成後の破面間のこすり合いが生じ、破面形成時の様相がかなり無特徴なものに変化してしまい定量的に扱うことが困難であった。定性的な観察の結果、母材、溶接金属部あるいは熱影響部の材質の違いによる特有の微視的形状はないことがわかった。また、着色の原因に対する若干の考察を可能にし、亀裂の進展状況ならびに圧縮応力による破面の変化等ある程度の情報を得ることができた。

以上のように本報告では定性的観察例をいくつか紹介したが、今後さらに多くの破面解析を定性的および定量的に実施し、破壊現象の研究を行っていきたいと思っている。

謝 辞

本報告作成にあたり、船体構造部井上肇室長には終始懇切なるご指導を賜った。ここに深くお礼申し上げます。また写真作成に際し多大の援助を賜りました日本電子株式会社ならびに日製産業株式会社の皆様に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 飯田；“フラクトグラフィ技術概論”フラクトグラフィと事故解析に関するシンポジウム（1974）1-1/1-14
- 2) 小林；“ストライエーション（その1）”圧力技術12（1974）247/254
- 3) C.D. Beachem；“An Electron Fractographic Study of the Influence of Plastic Strain Conditions upon Ductile Rupture Process in Metals” Trans. ASM 56（1963）318/326
- 4) 森；“ディンプル”圧力技術12（1974）232/235
- 5) C.D. Beachem；“Microscopic Fatigue Fracture Surface Fracture in 2024-T3 Aluminum and the Influence of Crack Propagation Angle upon their Formation” Trans. ASM 60（1967）324/343
- 6) 小寺沢，志茂；“低繰返し数疲れのフラクトグラフィによる研究”機械学会論文集36（1970）904/914

- 7) G.S. Ansell, H.S. Kim, H.C. Rogers; "Effect of Dissolved Hydrogen on the Fatigue Behavior of an Al-Al₂O₃ SAP-Type Alloy" Trans. ASM 59 (1966) 630/643
- 8) 飯田, 高; "Stretched Zone (引き伸び帯) に関する最近の研究について" 圧力技術 12 (1971) 241/246
- 9) 藤井, 林, 長谷川; "WOL 試験による脆性破壊発生特性に関する研究" 船研講演集 第13回 (1969) 204/208
- 10) 藤井, 林; "低サイクル疲労における切欠効果" 船研講演集第23回 (1974) 25/28

.....