

腐食疲労破面の3次元画像解析

論 文

駒井 謙治郎*・野口 昌利*²

Three-dimensional Image Analysis of Corrosion Fatigue Fracture Surface

Kenjiro KOMAI and Masatoshi NOGUCHI

Synopsis:

Computer image processing technology has been applied to fracture surface analysis, and the generalized software for 3-dimensional fractography image analysis has been developed. By this software, it became possible to obtain 3-dimensional fracture surface topography from a stereo-pair of SEM fractographs with sufficient precision. As for the identical position search algorithm to calculate the fracture surface height, the SSDA method was fitted to fatigue fracture surfaces in air and in vacuum. Whilst the correlation method must be applied to the corrosion fatigue fracture surface being adhered corrosion products or calcareous deposits on it, as well as to the inter- and transgranular mixed one. The crack closing simulation by means of the 3-dimensional fracture surface topography accounted for the wedge effects induced by the corrosion products or deposits as a first approximation. And the results was corresponded to the shape of load-strain hysteresis loops well. On the contrary, fracture surface roughness deduced from the 3-dimensional topography was not necessarily corresponded to the crack closing behavior.

1. 緒 言

破壊事故解析や材料の破壊機構の解明に対して電子顕微鏡による破面観察は今や欠かせない手段となつている。ステレオ写真観察は、一枚の写真からは把握できない立体形状など、破面の特徴を知るのに便利であるが、これが写真の目視観察にとどまる限り、破面形状を定量的に把握することは不可能である。一方、ステレオ写真から特定箇所の断面形状を手作業で数値化する努力がなされているが、多大の時間と労力を必要とし、これによつて破面全体の三次元形状の把握に至ることは事実上不可能である。

ステレオ写真からコンピューター画像処理によりその三次元形状を得ようとする試みには、小堀らによる腐食ピットの等深線図による解析¹⁾、酒井らによるマイコン援用 SEM 画像の立体構造解析²⁾、KOBAYASHI らによる高温水中腐食疲労破面の等高線図による解析³⁾などがあるが、必ずしも画像処理アルゴリズムが明記されておらず、また、その汎用性についても不明である。筆者らはさきに、三次元疲労破面画像解析のための汎用ソフトウェアの開発を行い、高張力鋼の空中、真空中疲労破面の三次元把握を試みた⁴⁾⁵⁾。しかし、腐食生成物や Ca・Mg

塩デポジットが付着したり、粒界割れを含むような、腐食疲労破面の解析では、必ずしも満足のいく結果が得られるとは限らなかつた。上述の腐食疲労破面の解析は、その後のソフトウェアの改良により、所定の目的を達成することができた。また、本ソフトウェアを用いて 80 kgf/mm² 級高張力鋼の人工海水中腐食疲労破面のマッチング部分の破面三次元形状を求め、き裂開閉口再現シミュレーションを行つた。

2. 画像入力方法ならびに解析手段

電界放射型高分解能走査型電子顕微鏡 (SEM) により撮影した破面画像フィルムを、京都大学大型計算機センターの画像処理システムを用いてデジタル画像に変換し、それを入力画像とした。Fig. 1 にそのシステムの概略を示す。SEM 画像は Fig. 1 に示すドラムスキャナー (オプトロニクス社, C4100-30) を用いて、濃淡レベル 8 ビット (256 階調) のデジタル画像に変換し、磁気テープ (MT) に出力した。これをメインコンピューターシステム付属のディスクに格納し、その後の処理を行つた。画像処理には主に FACOM VP-200 ベクトル計算機を用いた。これは、行列要素間演算のような繰返し計算を、パイプライン方式により並列的に処理して

昭和 61 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 1 月 10 日受付 (Received Jan. 10, 1986)

* 京都大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi Sakyo-ku Kyoto 606)

*² 京都大学大学院 (現: 三菱金属(株)) (Graduate School, Kyoto University, Now Mitsubishi Metal Corp.)

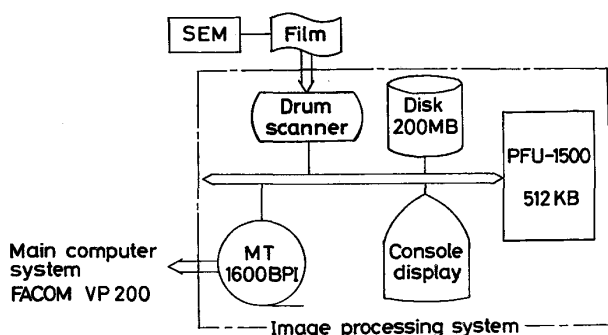


Fig. 1. Block diagram of SEM image input and processing system.

計算を高速化するもので、後述するように、同一領域探索が処理の大部分を占める三次元形状解析にはとくに適している。また、プログラミング言語は Fortran 77 を用いた。

3. 三次元形状の定量化

三次元形状の定量化は、二枚の写真からなる一組のステレオ写真の同一点を見つける作業と、その結果より得られる相対的な位置のずれから高さを計算する作業とからなる。この両者をコンピューターで行った。

同一点の探索には SSDA (Sequential Similarity Detection Algorithm) 法と相互相関法を試みた。前者の SSDA 法は基準画像と傾斜画像の濃度の残差が最小となる位置を同一点と判定するものであるが、これは濃淡変化が大きい空中、真空中疲労破面の解析に適している⁴⁾⁵⁾。しかし、粒界割れや腐食生成物、デポジットなど濃淡変化が少ない模様を含む腐食疲労破面の解析では、しばしば同一点探索にあたってミスマッチを生じ、必ずしも良好な結果は得られなかった。

一方、相互相関法は、基準画像内の窓領域を、傾斜画像内の探索領域内の候補領域に重ね合わせ、各画素ごとの濃度値の積を求め、その領域全体の和から相関係数を算出するもので、相関係数は両領域が全く一致するときは、1.0 となる。ステレオ写真では試料を傾斜させるため、同一領域間の相関係数は必ずしも 1.0 とはならないが、1 に近い値 (0.8 以上) になる。また同一の領域からずれると相関係数は、極端に小さく (0.3 以下) になる。そこで、探索領域内で候補領域を順次ずらしてゆき、相関係数が最大となる領域を、窓領域と同一の領域とみなした。本研究では最大相関係数が 0.8 以上ならば、正確な探索がなされていると判断した。この場合、

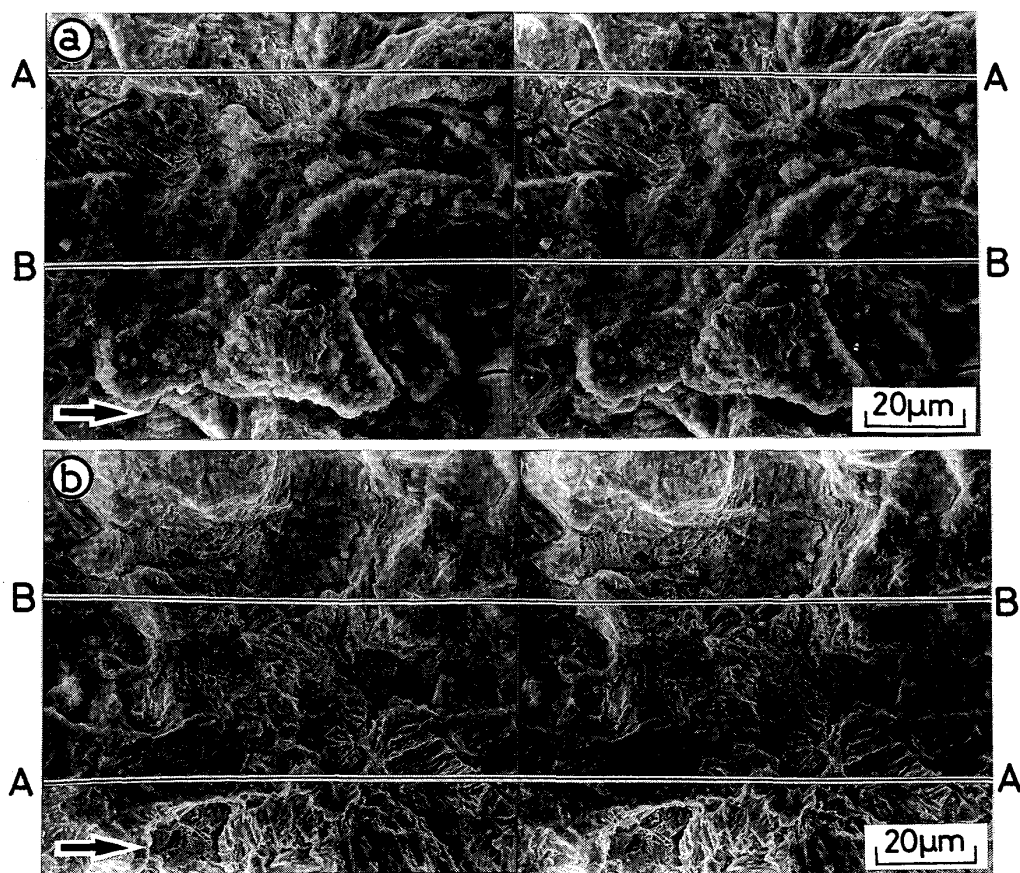


Photo. 1. SEM-stereomatching-photographs of fracture surface ($E = E_{corr}$, $\Delta K = 11.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Arrows indicate crack growth direction.

探索領域内で窓領域の重ね合わせ位置をずらすとき、1画素ずつではなく、3画素ずつ移動させ、まず粗探索をおこなった。続いて高い相関を示した位置の近傍で1画素ずつ移動させて、最も高い相関を与える位置を求めることにより、総計算回数を少なくした。

4. 解析 例

つぎに、実際に 80 kgf/mm^2 級高張力鋼の人工海水で腐食疲労 ($f=0.17 \text{ Hz}$) 破面⁶⁾ のステレオ写真から立体形状を求めたものを示す。Photo. 1~Photo. 3 は、おのおの腐食生成物が付着した破面、粒界割れを含む破面、カソード防食 (-1.0 V vs. SCE) 下で $\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 塩デポジットが全面に付着した破面のマッチング写真である。ステレオ写真撮影にあつての傾斜軸はき裂進展方向と直角であり、回転角は 8° である。3例とも x 方向 2000 画素、 y 方向 1600 画素の大きさでデジタル化した。

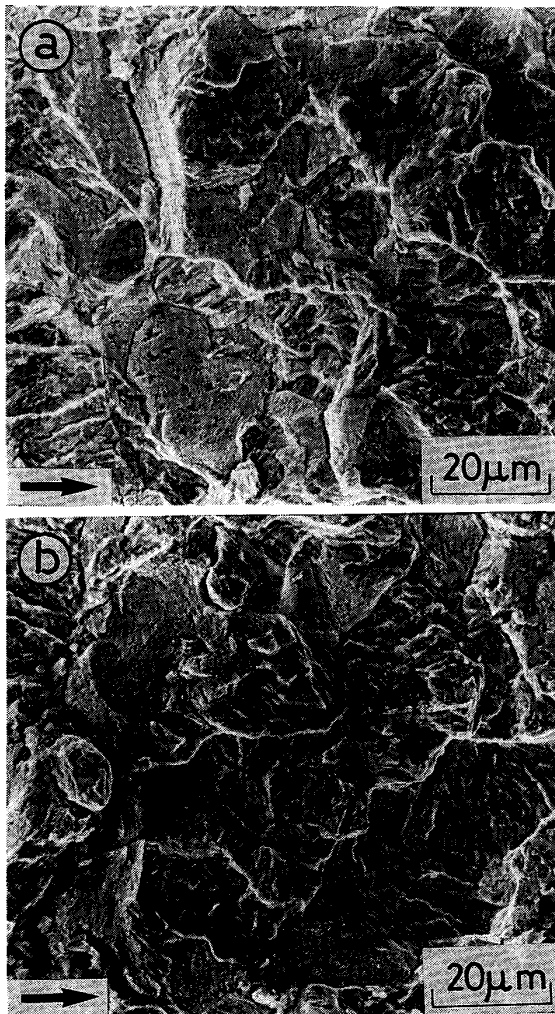


Photo. 2. SEM-matching-photographs of fracture surface ($E = E_{corr}$, $\Delta K = 19.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Arrows indicate crack growth direction.

自然腐食下の破面に対する高さの算出は、 80×15 画素の窓領域を x 方向に 86 個、 y 方向に 75 個、各方向とも 20画素ずつずらして設けて、おのおの 100×35 画素の探索領域で計算を行つた。位置合わせから、高さの算出までにかかつた CPU 時間は、75 s で、高さを求めた点数 (86×75 点) で平均すると、10 ms/点であつた。なお、真空中疲労破面に対して SSDA 法を適用した場合のベクトル計算機による CPU 時間は 32 s (窓領域 50×15 画素) であり、高さを求めた点数 (160×60 点) で平均すると、3.4 ms/点であつた⁴⁾。本研究で用いたプログラムでは、相互相関法は SSDA 法と比べて、処理時間が約 3 倍となつた。

カソード防食下の白色生成物付着面における同一点探索は、上記寸法の窓領域では機能しなかつたので、窓領域は 100×50 画素、探索領域は 140×70 画素とおのおの拡大し、逆に候補領域の移動量を 40 画素と粗くした。

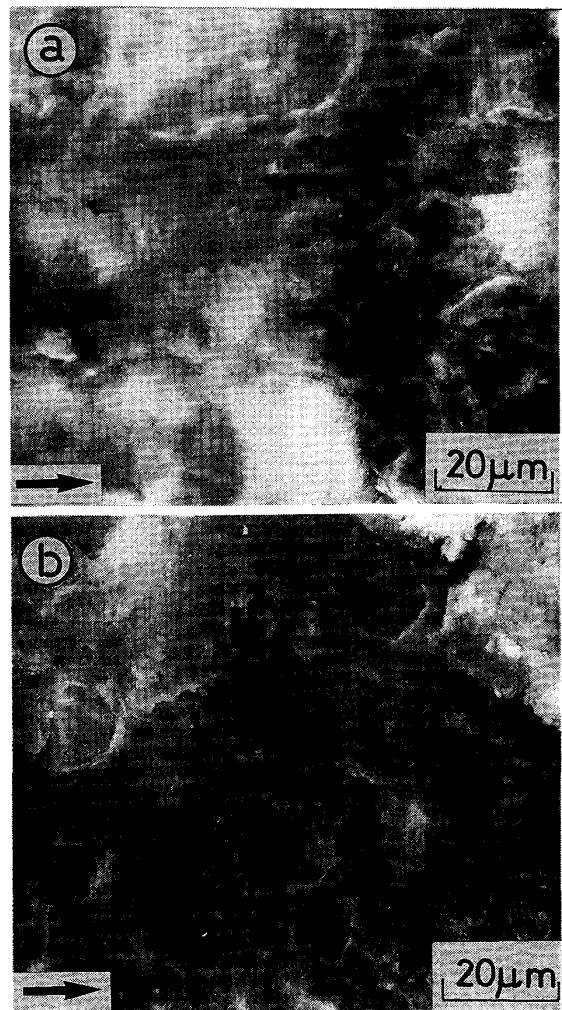


Photo. 3. SEM-matching-photographs of fracture surface ($E = -1.0 \text{ V vs. SCE}$, $\Delta K = 23.0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Arrows indicate crack growth direction.

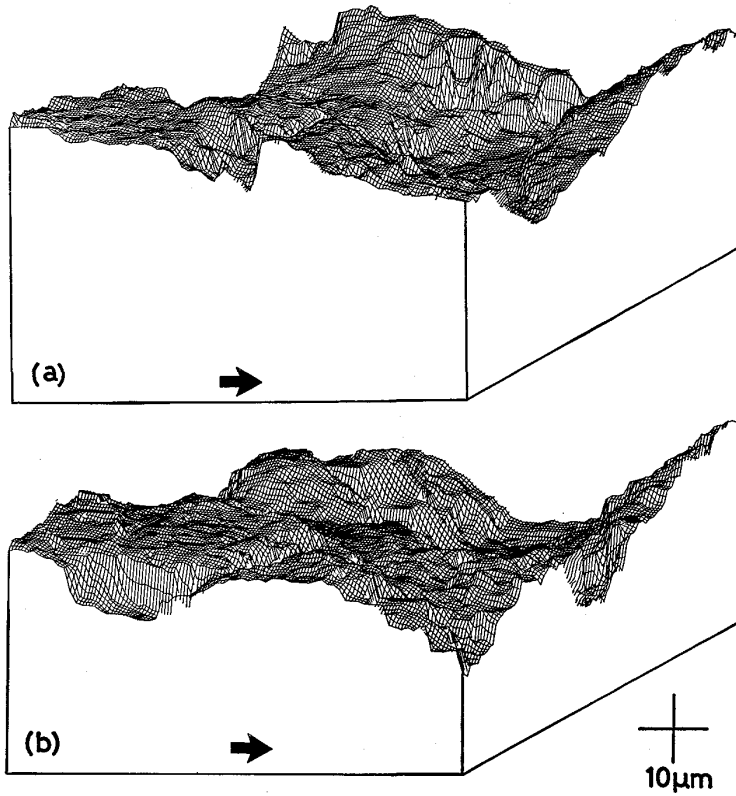


Fig. 2. Birds-eye view of Photo. 1. Arrows indicate crack growth direction.

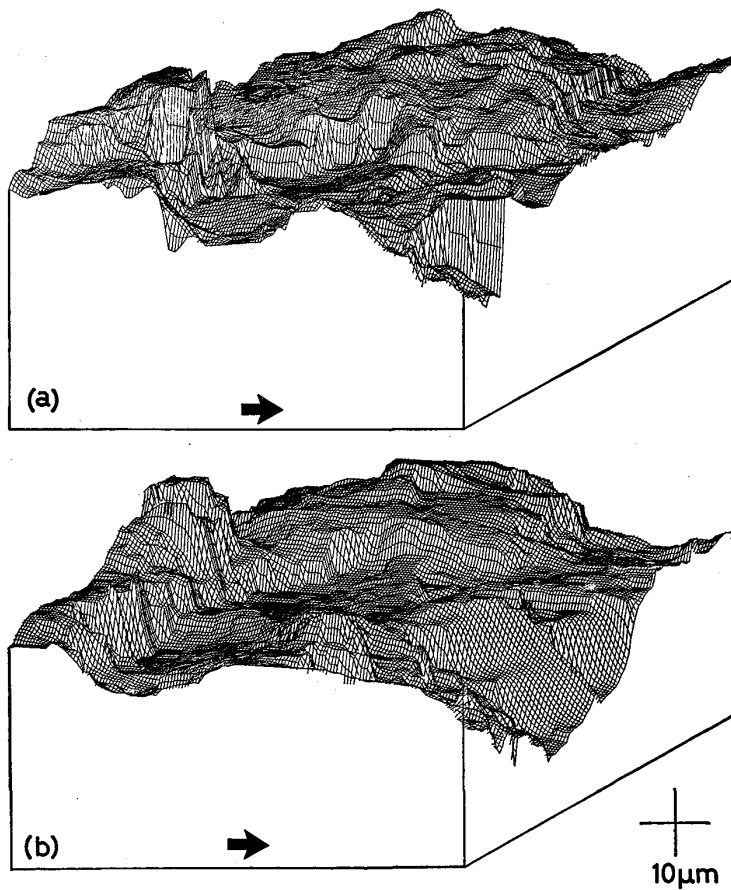


Fig. 3. Birds-eye view of Photo. 2. Arrows indicate crack growth direction.

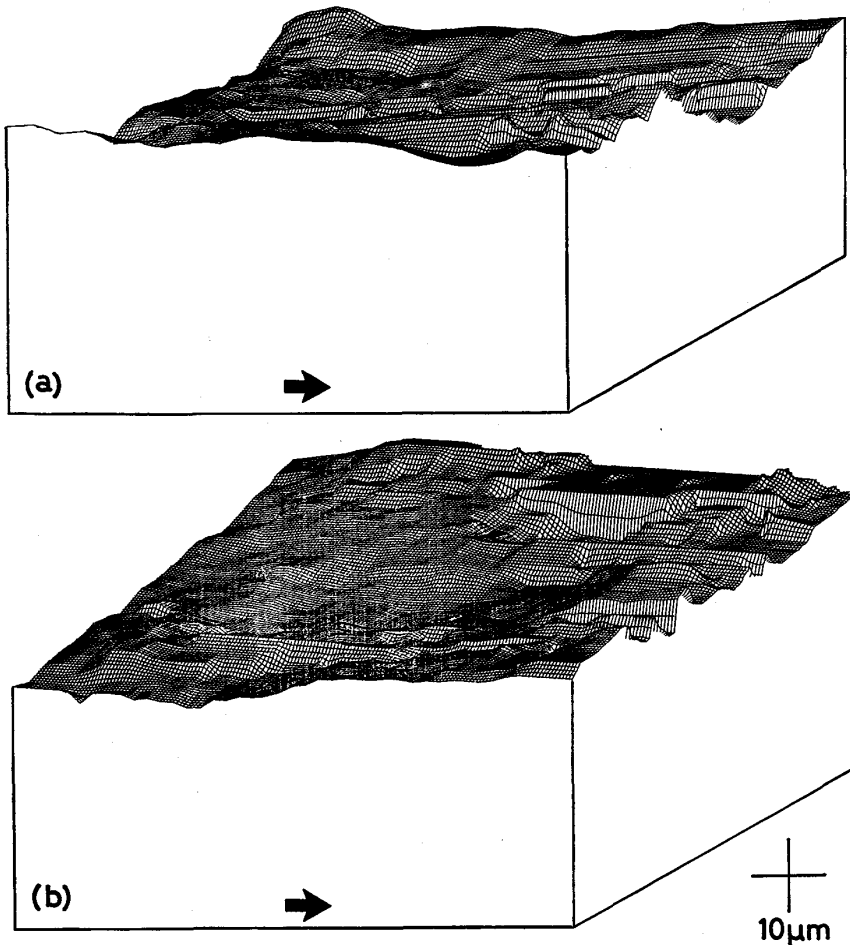


Fig. 4. Birds-eye view of Photo. 3. Arrows indicate crack growth direction.

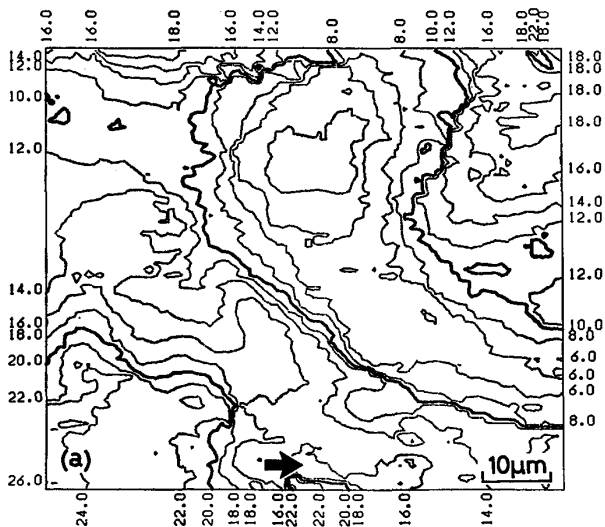


Fig. 5. Contour map of Photo. 1 (a). Arrows indicate crack growth direction.

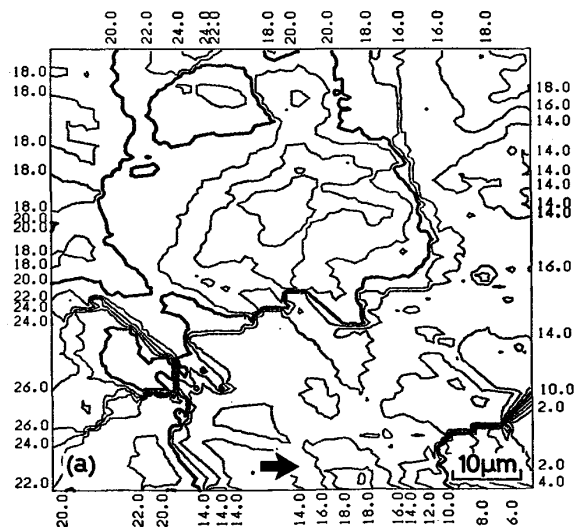


Fig. 6. Contour map of Photo. 2 (a). Arrows indicate crack growth direction.

た。白色生成物の場合は高さ変化が小さいので、窓領域の画素数を約4倍に増加したものである。この場合のCPU時間は360sで、高さを求めた点数(43×36点)で平均すると、230ms/点であった。Fig. 2~Fig. 4は、このようにして求めた三次元破面形状を鳥瞰図とし

て表したもので、おのおのPhoto. 1~Photo. 3に対応する。なおここで、マッチング破面の一方の鳥瞰図(a)の凹凸出力は、比較しやすいように、他方の鳥瞰図(b)と同方向にとつてある。

三次元高さの数値から等高線図が描けるが、その例

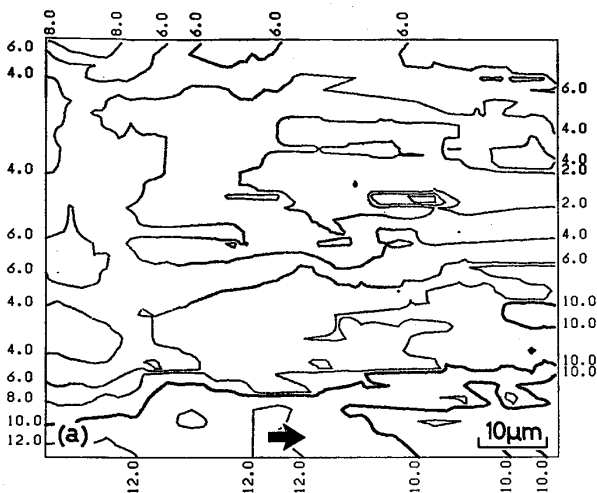


Fig. 7. Contour map of Photo. 3 (a). Arrows indicate crack growth direction.

を, Fig. 5~Fig. 7 に示す. ここでは紙面の節約のため, おのおの Photo. 1(a)~Photo. 3 (a) に対応する等高線図について示してある. 破面上の最低点の高さを $0.0 \mu\text{m}$ とし, $2.0 \mu\text{m}$ の高さ間隔で描いたもので, 枠外の数字が, その部分の高さを示している. この場合も等高線の出力法は, 鳥瞰図に合わせてある.

5. き裂開閉口再現シミュレーション

4 節で求めた三次元破面の高さデータを用いて, き裂開閉口再現シミュレーションを行った. まず, マッチング上下破面の位置合わせは, 高さデータを用いた SSDA 法により行った. 引き続き, 両破面の平行度を出した

め, 両者から対応している断面高さ曲線を取り出し, 最小二乗法でそれぞれの傾きを求めて, 傾きの差を算出した. これを x, y 方向でおのおの 10 箇所ずつ行って平均値を求め, 一方のマッチング破面の傾きを補正した.

このようにして位置合わせ, 傾き補正を施した破面を平行に近づけていき, ある一点で接触したときを $D = 0.0 \mu\text{m}$ として, その後さらに $1.0 \mu\text{m}$ ずつ破面を近づけていったときの破面接合率曲線をおのおの, Photo. 1~Photo. 3, Fig. 2~Fig. 4, Fig. 5~Fig. 7 に対応して, Fig. 8(a)~Fig. 10(a) に示す. Fig. 11(a) は同様の手順で求めた粒内割れ面 ($E = E_{corr}$, $\Delta K = 29.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) の破面接合率曲線である. ここで, 破面接合率は, 両破面を近づけていったときの, 接触点および食い込み点数の全データ点数 (画素数) に対する割合として定義した. なおここで, 実際の破面は平行に開閉口するわけではないが, 今回のシミュレーションは微小部分に注目しているため, ほぼ平行とみなした.

Fig. 8~Fig. 11 の説明文には併せて, き裂進展方向とこれと直交方向, おのおの 10 箇所の断面曲線から得られる破面の最大あらさ R_{max} と, 二乗平均あらさ R_{rms} の平均値を併記してある. 破面あらさは, 腐食生成物付着面, 粒界・粒内割れ混合面が最大であり, 粒内割れ面, デポジット付着面の順に滑らかになっている. Fig. 10 は Photo. 3 のカソード防食下の破面に対応し, R_{max} , R_{rms} ともに最小となつているが, これは粒界・粒内混合面上に $\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 塩が析出して破面が平坦化されたものである. さらに, 腐食疲労試験中に測定された,

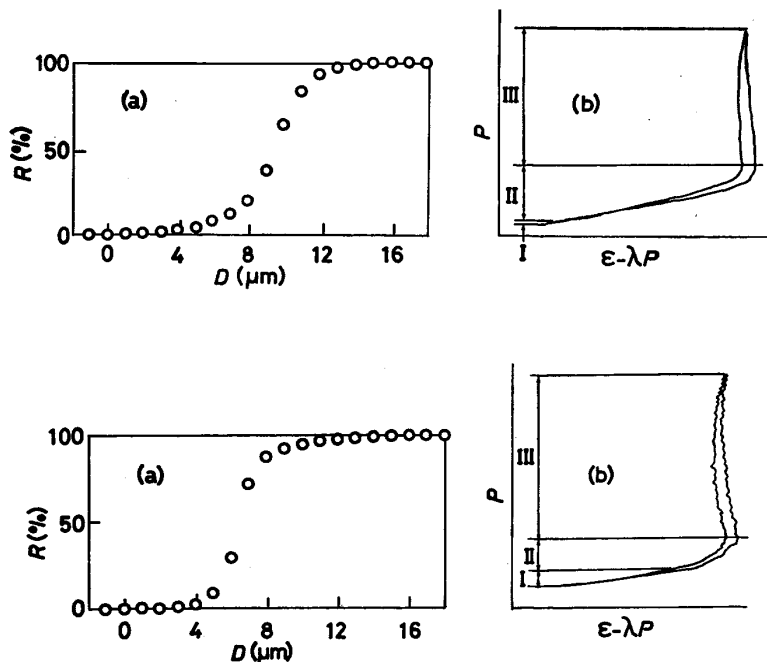


Fig. 8. (a) Relation between conformity ratio of fracture surface R and access distance D obtained from Photo. 1, and (b) actual hysteresis loop corresponding to (a) ($R_{max} = 9.0 \mu\text{m}$, $R_{rms} = 2.5 \mu\text{m}$).

Fig. 9. (a) Relation between conformity ratio of fracture surface R and access distance D obtained from Photo. 2, and (b) actual hysteresis loop corresponding to (a) ($R_{max} = 9.0 \mu\text{m}$, $R_{rms} = 2.5 \mu\text{m}$).

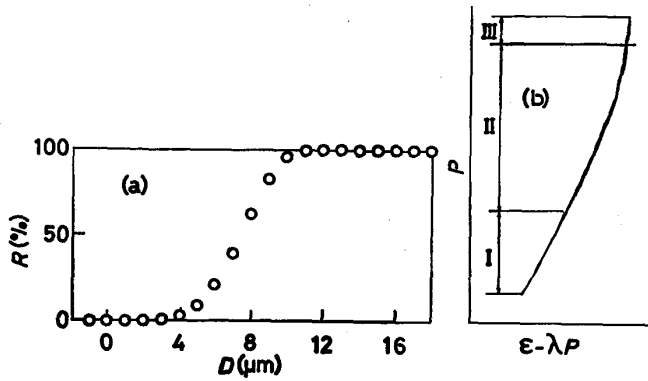


Fig. 10. (a) Relation between conformity ratio of fracture surface R and access distance D obtained from Photo. 3, and (b) actual hysteresis loop corresponding to (a) ($R_{max}=5.0 \mu\text{m}$, $R_{rms}=1.3 \mu\text{m}$).

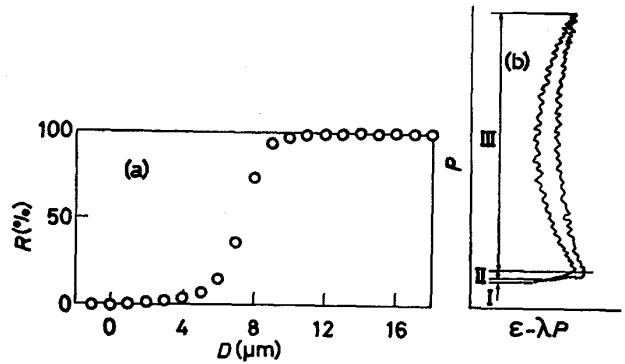


Fig. 11. (a) Relation between conformity ratio of fracture surface R and access distance D obtained from transgranular fracture surface, and (b) actual hysteresis loop corresponding to (a) ($R_{max}=7.0 \mu\text{m}$, $R_{rms}=1.8 \mu\text{m}$).

該当部分における除荷弾性コンプライアンス法による、荷重-ひずみヒステリシスループを Fig. 8(b)~Fig. 11 (b) に示す。図中横軸は $\epsilon-\lambda P$ であり、 ϵ はひずみゲージよりのひずみ信号、 λ はき裂完全開口時の弾性コンプライアンス、 P は荷重である。

荷重-ひずみヒステリシスループは、すでに報告したように⁷⁾、き裂が完全に閉口している領域 I、き裂が完全に開口している領域 III、ならびに領域 I、III 間の遷移領域である領域 II に分割できる。この場合、腐食生成物やカソード防食に伴うデポジットによるくさび効果が著しくなると、領域 II の拡大が生じ、き裂完全開口応力拡大係数 K_{op} が極めて高くなる。Fig. 8~Fig. 11 において、ヒステリシスループにおける領域 II の大きさと、破面接合率曲線を比較すると、領域 II が大きい腐食生成物付着面 (Fig. 8) とデポジット付着面 (Fig. 10) において、破面接合率曲線の立ち上がりが緩慢であり、破面初接触から破面完全閉口までの接近量が $7\sim 9 \mu\text{m}$ と大きい。これに対して、粒界-粒内割れ混合面 (Fig. 9) や粒内割れ面 (Fig. 11) では、塑性誘起き裂閉口のみを生じるので、ヒステリシスループにおける領域 II は小さく、これと対応して、破面接合率曲線の立ち上がりは急激であり、破面初接触から破面完全閉口までの接近量も約 $6 \mu\text{m}$ と比較的小さい。また破面接合率曲線形状ならびに領域 II の大小と、破面あらかさは必ずしも対応せず、破面あらかさの大きい粒界-粒内割れ混合面は破面接合率が良く領域 II が小さいのに対して、破面あらかさの小さいデポジット付着面は逆に破面接合率が低く、領域 II が大きくなっている。後者においては破面形成後、破面上にデポジットが生じたためと考えられる。

腐食生成物によるき裂閉口を断面形状の接触から眺

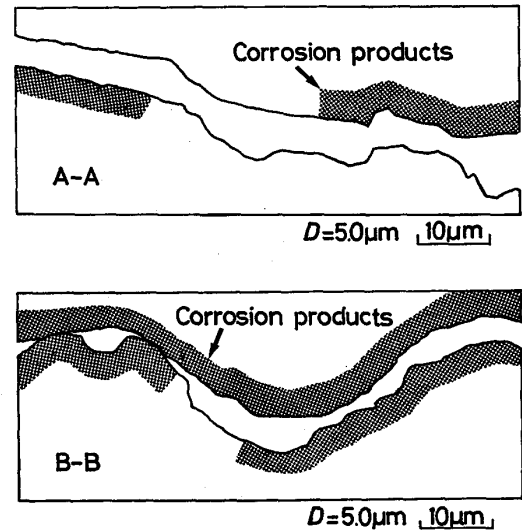


Fig. 12. Access simulation of fracture surface along A-A and B-B cross section in Photo. 1. Shaded portion shows corrosion products.

めると Fig. 12 のようである。Photo. 1 において、腐食生成物の付着がほとんど見られない A-A 断面と、腐食生成物の付着が顕著に見られる B-B 断面において、上下破面が破面初接触から $D=5 \mu\text{m}$ 接近したときの破面接触の状況を示したもので、腐食生成物付着部 (Fig. 12 B-B 断面) において、破面接触、すなわちき裂閉口が生じていることが明らかである。

このように、破面三次元トポグラフィによるき裂閉口再現シミュレーションは、第一近似的に、腐食生成物やデポジットによるくさび効果を良く説明し、荷重-ひずみヒステリシスループ形状とも良く対応するようである。しかし、ここで用いた破面三次元トポグラフィは破面のごく一部分を表現したものであり、より低倍写真によ

るき裂開閉口シミュレーションや、き裂先端開口変位を考慮に入れた検討が必要である。

6. 結 言

(1) コンピューター画像処理技術を三次元疲労破面画像解析に応用し、ステレオ写真から破面の三次元形状を十分な精度をもつて求めることを可能にした。

(2) 破面高さを求めるにあたって、最も基本となる同一点探索アルゴリズムは、空中、真空中疲労破面においては、SSDA法が適当であるが、腐食生成物やCa・Mg塩デポジットが付着した破面、粒界-粒内割れ混合破面が現れる腐食疲労破面においては、相互相関法による必要がある。なお、相互相関法を用いた同一点探索にあたっては、とくに情報量の少ない破面(たとえば、デポジット付着面)では、窓領域寸法を大きくして探索することにより良好な結果が得られた。

(3) 破面三次元トポグラフによるき裂開閉口再現シミュレーションは、第一近似的に、腐食生成物やデポジットによるくさび効果を良く説明し、荷重-ひずみヒステリシスループ形状とも良く対応した。これに対して、破面あらさは必ずしもき裂開閉口挙動と対応しなかつた。

なお、本研究は科学技術庁昭和60年度科学技術振興調整費による「構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究」の一環をなすものである。また、80 kgf/mm²級高張力鋼の人工海水中腐食疲労試験は、鉄鋼基礎共同研究会「鉄鋼の環境強度部会」共通試験の一部として行われたものである。付記して謝意を表す。

文 献

- 1) 小堀哲雄, 河野隆之, 篠崎志郎, 清水義彦: 第26回腐食防食討論会予稿集(1979), p. 90
- 2) 酒井信介, 萩原 聡, 岡村弘之, 高野太刀雄: 圧力技術, 21(1983) 6, p. 282
- 3) T. KOBAYASHI and D. A. SHOCKEY: Fracture, Interactions of Microstructure, Mechanisms and Mechanics, ed. by J. M. WELLS and J. D. LANDES, Metall. Soc. AIME (1984), p. 447
- 4) 駒井謙治郎, 菊地 純: 材料, 34(1985) 381, p. 648
- 5) 駒井謙治郎, 菊地 純: 日本機械学会講演論文集(1985) 854-1, p. 122
- 6) 駒井謙治郎, 野口昌利: 日本機械学会論文集, 52(1985) 480A, p. 1770
- 7) 駒井謙治郎, 金崎 宏: 日本機械学会論文集, 50(1984) 454A, p. 1143
- 8) 駒井謙治郎, 長野 整: 日本機械学会論文集, 52(1986) 476A, p. 867