

横浜市役所 正会員 高木勇一 森本組 柏原 竜一
 武蔵工業大学 正会員 西脇威夫 武蔵工業大学 正会員 増田 陣紀
 武蔵工業大学 正会員 皆川 勝

1. はじめに 近年、電子顕微鏡の発達により破面解析の応用範囲は拡大しつつある。しかし現段階では、破面を観察することによって定量的な知見を得ることを目的とした研究は、疲労、破壊靱性等の分野では行われているが、延性破壊した材料に関しては少ない。この分野では破面の特徴的模様を調べることによって破壊機構や破壊原因に関する情報を得る定性解析に属するものが多く、破面に生じている特徴的模様は定性的に分類されている。本研究は破面に生じている特徴的模様の定量的解析を行うものである。特徴的模様を示しているものは破面に生じている凹凸とその形状、更にはそれらの配列である。本研究ではそれらを確率変数と見做し、それらの分布状態を統計量として解析することを試みた。

2. 解析方法 破面の相対的な深さを測定することができたと仮定する。この時破面上に設定した線上での深さの分布状況が図1(a)のように得られる。これをフーリエ変換することにより得られるスペクトルより、破面の凹凸の分布を知ることができ、スペクトル相互の関係より破面凹凸の分布の方向による変化を求めることができる。凹凸の分布を知るために以下の諸量^[3]を求め、方向による変化を求めるために、スペクトルのコヒーレンスを求めた。

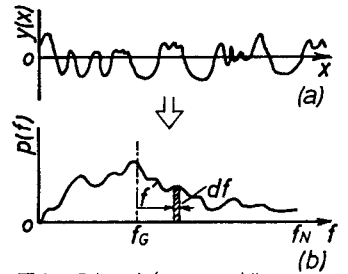


図1. 深さの分布とスペクトル.

$$s_g = \frac{\int_0^{f_N} f P(f) df}{\int_0^{f_N} P(f) df} \quad \text{----- (1)} \quad v = \sqrt{\mu_2} \quad \text{----- (2)}$$

$$\sqrt{\beta_1} = \mu_3 / \sqrt{\mu_2} \quad \text{----- (3)} \quad \beta_2 = \mu_4 / \mu_2^2 \quad \text{----- (4)}$$

ただし、式(2)~式(4)において、 $\mu_r = \int_0^{f_N} (f^r) P(f) df / \int_0^{f_N} P(f) df$, $f' = f - s_g$ である。

s_g および v は、それぞれスペクトルの分布の重心の周波数と偏差を示すものである。 $\sqrt{\beta_1}$ は対称分布からのひずみ度を表すもので、正の値のときは正の、負の値のときは負のひずみをもつ分布であることを示す。なお $\sqrt{\beta_1}$ の符号は μ_3 と一致させるものとする。また、 β_2 はスペクトルの分布の尖鋭度を表すもので、これが大なる程尖った分布となる。

3. 解析対象<非弾性域における負荷履歴を受けたSM41Aの破面解析> 解析の対象とした破面は、1) 単純引張試験(S-T-type)および表1に示す、2) 定荷重振幅面振引張圧縮破断試験(F-type), 3) 定荷重振幅面振引張圧縮の負荷履歴を受けた材料の単純引張試験(C-type)の3種によるものである。いずれの場合も、破面は巨視的には繊維状域とジャーリップ域からなり、微視的には前者は等軸型ディンプルが後者は伸張型ディンプルがその特徴的模様である。写真1はS-T-typeの写真2はF-typeの繊維状域におけるディンプルを示している。通常、ディンプルは塑性域での引張負荷の段階で生じるI型と破断直前にこれを結びつけるように生じるII型とに分類されるが^[2]、材料が塑性域において負荷と除荷の繰返しを受ける場合、応力が降伏点を越えた時点ですでにI型ディンプルが形成されることから、その後の負荷履歴によって写真2に見られるようにディンプルの形状がくずされて方向性をもつように思われる。また、材料の脆化とディンプルの深さとの関係するとも言われている。本解析例では、繊維状域のディンプルの形状、大きさを破面の深さとして主眼、これに2. で述べた解析方法を適用するものであるが、電子顕微鏡を用いて破面の深さを測定することには技術上種々の問題があることから、二

解析の対象とした破面は、1) 単純引張試験(S-T-type)および表1に示す、2) 定荷重振幅面振引張圧縮破断試験(F-type), 3) 定荷重振幅面振引張圧縮の負荷履歴を受けた材料の単純引張試験(C-type)の3種によるものである。いずれの場合も、破面は巨視的には繊維状域とジャーリップ域からなり、微視的には前者は等軸型ディンプルが後者は伸張型ディンプルがその特徴的模様である。写真1はS-T-typeの写真2はF-typeの繊維状域におけるディンプルを示している。

表1. 試験内容

type	σ_a / σ_{yo}	σ_a / σ_b	Nr
F-1	1.64	0.80	429
F-2	1.50	0.80	98
F-3	1.79	0.93	11

type	σ_a / σ_{yo}	σ_a / σ_b	N
C-1	1.50	0.80	25
C-2	1.42	0.80	50
C-3	1.53	0.80	75

σ_a : 応力振幅
 σ_{yo} : 降伏点
 σ_b : 引張強さ
 N: 繰返し数
 Nr: 破断繰返し数

では破面写真の明るさが深さに対応するものと見做して解析した。図2に示すように写真に縦横5本ずつの観測線を設け、各写真毎に明度を5段階に分類し、1μ(500倍写真上る0.5mm)間隔で目視によって明度を読み取った。図3に測定された明度変化の例を、図4に同一データのスペクトルを示す。更に、スペクトルの分布をより明確にするために離散化して示した例が図5である。同図はF-2の場合であるが、スペクトルの分布が観測線の方向により、特に高周波数域において異なる傾向を示すものがF-typeおよびC-typeに見られた。式(1)~式(4)で定義された諸量の各写真における同一観測線方向の平均値を求め、観測線方向による相異を見るための、 $(\overline{S_e})_A / (\overline{S_e})_B$, $(\overline{V})_A / (\overline{V})_B$, $(\overline{\sqrt{\beta_1}})_A / (\overline{\sqrt{\beta_1}})_B$ および $(\overline{\beta_2})_A / (\overline{\beta_2})_B$ (AおよびBは観測線方向を示す)を求めた。これらを表2に示す。表中の●印はST-typeにおける最大値である。また、 S_e および V については最大値(●印)を、 $\sqrt{\beta_1}$ および β_2 については最大値がST-typeの他の値に比べて特異な値と考えられることからこれを除いたものの平均値をST-typeの代表値として採用する。表中の○印はFおよびC-typeにおいてST-typeの代表値を越えるものを示している。これより、F-typeおよびC-typeではST-typeに比べて前記の諸量が観測線の方向によって異なる傾向が大きいと思われる。

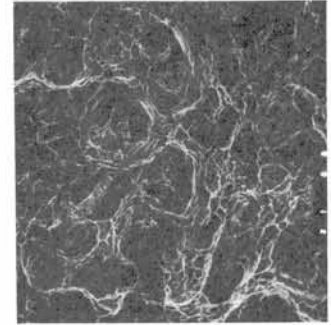


写真1. ST-typeのデシミアル 10μ

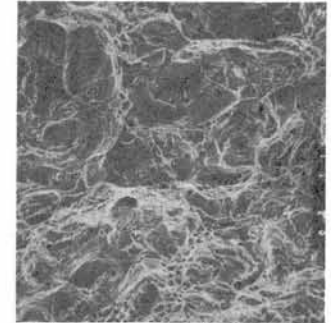


写真2. F-typeのデシミアル 10μ

4. おわりに ディコップルの相対的な深さの変化の波からスペクトルを求めることにより、延性破面を定量的に解析することを試みた。ここに示した解析例では、破面の深さとして破面写真の明度を用いたこと、各写真の相対的な明度が異なること、測定が目視によること、データ数が少ないことなどの種々の測定上の問題があるが、破面を充分定量的に表現するまでには至っていない。しかし、実際の破面の深さを正確にかつ連続的に測定することができれば、本研究で試みたのと同様の解析方法を用いることにより、延性破面に關する定量的な情報を得ることが出来るものと思われる。

〈参考文献〉 [1] 佐藤良一郎: 数理統計学, 培風館, 1955 [2] 小寺次良一編: フラクトグラフィとその応用, 日刊工業社, 1982.

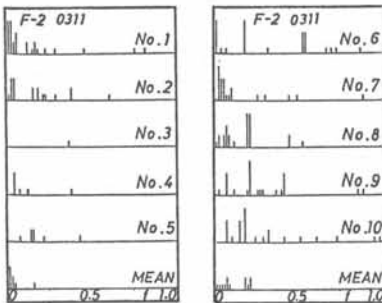


図5. 離散化したスペクトル.

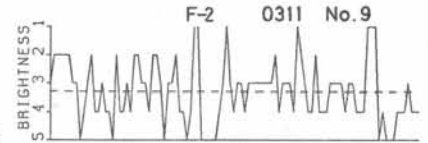


図3. 測定された明度変化の波.

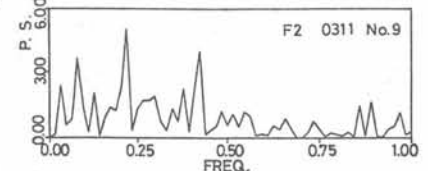


図4. 明度変化の波のスペクトル.

← 図2. 明度測定の際の観測線.

表2. $S_e, V, \sqrt{\beta_1}, \beta_2$ の観測線方向による相異.

type	写真番号	$(\overline{S_e})_A / (\overline{S_e})_B$	$(\overline{V})_A / (\overline{V})_B$	$(\overline{\sqrt{\beta_1}})_A / (\overline{\sqrt{\beta_1}})_B$	$(\overline{\beta_2})_A / (\overline{\beta_2})_B$
ST-1	3300	1.02	1.06	1.03	1.05
	3100	1.05	● 1.02	1.35	● 1.05
ST-2	1916	1.04	1.03	1.06	1.03
	2516	1.01	1.04	1.09	1.19
F-1	2215	1.05	1.01	1.13	○ 1.10
	2915	1.14	○ 1.05	1.14	○ 1.04
F-2	0314	1.02	1.03	1.01	1.04
	0414	1.07	○ 1.07	○ 1.09	○ 1.09
F-3	2712	1.02	1.09	○ 1.17	○ 1.20
	4312	1.04	1.04	1.05	1.01
C-1	5231	1.12	○ 1.01	1.86	○ 1.18
	5331	1.01	1.03	1.01	1.12
C-2	5431	1.07	○ 1.11	○ 1.05	1.21
	5531	1.03	1.00	1.25	○ 1.04
C-3	5731	1.12	○ 1.01	1.40	○ 1.03
	5831	1.31	○ 1.10	○ 1.84	○ 1.51