ステレオマッチングによるストレッチ・ゾーンの解明*

橘 内 良 雄**

Analysis of Stretched Zone by Means of Stereo Matching Method

by

Yoshio KITSUNAI

(Research Institute of Industrial Safety, Kiyose)

Stereo measurements of the stretched region in the fracture toughness specimens used for J-integral tests were carried out by examining the shape and the angle to the crack plane with a scanning electron microscope.

It was found that the shape of the stretched zone consisted of two portions, one of which forms a gradual slope and the other a steep slope to the plane of pre-crack. The scatter of the measured values of the angle of the stretched zone to the crack plane was very large, ranging from 10 to 48 degrees. However, in many cases the angle was about 33 degrees. As the result of stereo matching observations, unsymmetrical profiles of the stretched zone were often found even though the widths were equal in a pair of the fracture surfaces. As compared with the scanning and transmission electron fractographs taken from the same stretched zone, the same features in size were obtained from both fractographs.

(Received Nov. 19, 1979)

キー・ワード：ステレオマッチング，ステレオ解析，ストレッチ・ゾーン，安定破壊

1 緒 言

疲労き裂を有する試験片を静的に負荷したときに、き端先端の鈍化過程で作られるストレッチ・ゾーンの幅 (SZW) の最大値は、材料の破壊じん性値と良い相関があることが多くの材料によって得られており、その幅の測定にはフラクトグラフィが有効な手段として活用されている。また、ストレッチ・ゾーンはき裂の開きの結果作られることから、ストレッチ・ゾーンの高さ (SZH) の最大は、破壊が開始する際のき裂先端^{1)~13)}の開き変位 (CTOD) を与えることが示されている。

CTOD の測定には種々の方法が試みられているが、フラクトグラフィによる手法としては、予き裂面を電子線の照射方向と同方向に置くことにより SZH を直接観察する方法や、ステレオ解析による方法などがある。前記したように、SZW については多くのデータが集積されているので、もしも疲労予き裂面に対する SZW の傾斜角度 θ が定まれば、破壊開始時の $SZH = 1/2 CTOD$ が多くの材料について求まる可能性がある。すでに報告されている θ の値としては、アルミニウム合金の場合⁴⁾ 15° 以下、⁵⁾ 35° 、¹⁴⁾ 65° 、¹⁵⁾ 70° 、鋼では¹⁴⁾ $25^\circ \sim 45^\circ$ 等の結果が示されており、かなりの範囲変化している

が、これは材料特性と同時にき裂先端の力学条件に起因すると推察される。なお、材料によってはストレッチ領域の中央部以外からき裂が発生する場合¹²⁾もあり、このようなときには一對の破面で θ がかなり異なることも予想される。そこで本報では、フラクトグラフィの手法を用いて CTOD を求めるための手始めとして、一對のストレッチ・ゾーンについてステレオマッチング解析を行い、ストレッチ・ゾーンの形状および傾斜角 θ について若干の検討を試みたので、その結果について報告する。

2 材料および実験方法

供試材は、Table I に示す化学成分を有する SCM3 鋼であって、その熱処理条件および機械的性質は、Table II に示すとおりである。ここで Table II 中に示す step cool は、焼もどしぜい化を起こさせることを目的として、 650°C で焼もどし後、真空炉中で加熱温度と時間を段階的に変える以下の操作によった。

Table I. Chemical composition of the material used (wt. %).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.36	0.20	0.82	0.013	0.007	0.04	1.10	0.16	0.03

* 原稿受理 昭和54年11月19日

** 正会員 産業安全研究所 清瀬市梅園

Table II. Heat treatments and mechanical properties of the material used.

Heat treatments	Yield stress (kg/mm ²)	U T.S. (kg/mm ²)	Elongation (%)
Tempered at 650°C	81.0	89.4	24.0
Step cooled	75.9	85.5	19.1

Fig. 1. Configuration of the compact fracture toughness specimen.

650°C (1 h)→600°C (1 h)→550°C (15 h)→520°C (30 h)→490°C (48 h)→470°C (72 h)→真空炉冷。熱処理後、ASTM 規格に準じて Fig. 1 に示すコンパクト試験片を作成した。疲労予き裂は、電気油圧式疲労試験機を用い、荷重比 R を 0.05 として試験片幅 W に対するき裂長さ a が 0.6 になるようにき裂をそう入した。¹²⁾ 試験は、中村らの方法と同様な J_I 試験を行った。すなわち、はじめに所定の変位まで静的に負荷後、一旦負荷以前の変位まで除荷してから疲労によりき裂を伝ばさせた。この場合一部の試験については、2~3 mm 程度疲労き裂が成長した後、試験片を取りはずして板厚中心で切断し、一方は破面観察に、他方は縦断面観察に用いた。 J 値は、荷重-荷重点変位曲線で囲まれた面積 A を測定し、Rice の簡便式を用いて求めた。¹⁷⁾

$$J = 2A/Bb \quad (1)$$

ここで、 B は試験片の厚さ、 b はリガメント幅である。

破面観察は、傾斜角度が 45° まで可変できる走査電子顕微鏡を用いて主に板厚中央について行ったが、一部比較のために表面より 1 mm 内部の位置でも行った。また、同一のストレッチ・ゾーンについて、走査電顕像と透過電顕像（レプリカ）の比較を行った。ステレオ解析は、試料を 15° または 30° 傾斜させることにより次式を用いて目的とする SZH を算出した。¹⁸⁾¹⁹⁾

$$SZH = l_2 / \sin \alpha - l_1 / \tan \alpha \quad (2)$$

ここで、 l_1 、 l_2 は Fig. 2 に示すように、試料傾斜前後の投影長さ、 α は試料の傾斜角である。

このようなステレオ解析を行う場合、顕微鏡自身の倍率やひずみによって精度が問題となるために、本報ではあらかじめ 2000 および 3000 倍でマイクロピカースの圧痕についてステレオ解析を行い、誤差の程度を確認するとともに、以後の解析に補正係数として用いた。

Fig. 2. Principle of stereo measurement.

3 実験結果および考察

3・1 650°C 焼もどし材

Fig. 3 は、 SZW と J の関係を示したもので、 SZW は 76.4 μ 程度で飽和しており、飽和開始点に対応する J 値は 16.7 kg/mm となっている。この値は、有効な J_{Ic} 試験の判定基準として提案されている次式を満足しており、 J_{Ic} 値と判定される。¹³⁾

Fig. 3. Relationship between stretched zone width and J -value.

$$a, B, b \geq \beta \cdot J_{Ic} / \sigma_{flow} \quad (3)$$

ここで、 σ_{flow} は流動応力、 β は 25~50 とされている。なお、 SZW が飽和する以前における SZW と J との関係は、中村らの提案式 $SZW = 95J/E$ によってほぼ良く整理されるようである。¹²⁾

Fig. 4 は、 $J = 3.5$ kg/mm での板厚中央におけるストレッチ・ゾーンを示したもので、一対の形状はスケッチに示すように、A 側ではストレッチ部が複雑に変化しており、ストレッチ・ゾーンの発生点も明確ではない。ステレオ解析の結果、予き裂面の平均高さストレッチ・ゾーンの高さ (SZH) の差は約 5.8 μ であって、もしも A 側の点線付近からストレッチングが生じているのであれば $SZW = 8.3 \mu$ 程度、 θ は 34.9° となる。なお、ストレッチングが明らかな矢印間の長さは約 5 μ であって、 θ は 50° 程度となっている。一方、B 側では形状が比較的明らかなのであって、ストレッチ・ゾーンは予き裂面から高さがゆるやかに増加後、急角度の壁面を形成している。この場合の SZH は約 6.6 μ 程度であって、図中の点線から測定したときの

(a) Matching fractographs of stretched zone taken from Mid-thickness of the specimen tempered at 650°C. $J=3.5\text{kg/mm}$.

(b) Schematic illustration of the fracture surface contours.

Fig. 4. Matching fractographs and the profile of fracture surface.

(a) Matching fractographs of stretched zone taken from near surface of the specimen. $J=3.5\text{kg/mm}$.

(b) Schematic illustration of the fracture surface contours.

Fig. 5. Matching fractographs the profile of fracture surface.

SZW は約 10.1μ であり, θ は 33.2° 程度の値となる. また, ストレッチングが最も激しく起っているA部からの測定では, θ が 68.8° 程度となっている.

Fig.5 は, 板厚方向におけるストレッチ・ゾーンの差異について検討するために, 試験片表面より約 1 mm 内部に入った位置におけるマッチング写真とそのスケッチを示したものである. この場合, A側の予き裂面はかなり凹凸が激しく, ステレオ観察を行ってもSZWを求めることは困難である. しかし, B側は比較的平らであって, 帯状に強くストレッチングされた跡が観察され, さらに詳細に見ると, それ以後にも点線で示す位置付近からストレッチングしている状態がわずかに認められる. ストレッチ・ゾーンの形状は, 板厚中央と同様, 傾斜のゆるやかな部分と急な面とから構成されており, 緩斜面では蛇行すべりが電子線に対してほぼ垂直になるために粗に見えるのに対し, 急斜面では蛇行すべりが重なるような状態となるので密に見えると考えられる. このため, 分解能が不足するときには, 疲労予き裂部とストレッチ・ゾーンの開始点とが十分に識別できない可能性がある. なお, B側

でのSZWは 10.7μ , SZHは約 7.8μ であって, θ は 36.1° 程度になっている. また, ストレッチングが明りょうな急斜面の角度は約 70° となっている. 板厚中央と表面より 1 mm 内部におけるストレッチ・ゾーンを比較した場合, 両者に大きな差異は見られない. しかし, さらに表面側では中央に比べて, SZW およびSZHが減少する.

Fig.6 は, J 値が増加した場合の結果を拡大写真とともに示したもので, ストレッチ・ゾーンに隣接してディンプルが形成されている. これらのディンプルのうち, 大きなものは拡大写真に見られるようにほぼ等軸ディンプルとなっているのに対し, 微小なディンプルでは引き裂き型となっている場合が多く認められる. なお, 大きなディンプルの側壁には, 負荷時に生じたと思われる明りょうなストレッチングの跡が残されていることから, この種のディンプルは, き裂先端の塑性域中に存在する介在物が負荷過程で母材からはく離し, その後新生面を作りながら成長したものと推察される. Fig.7 は, 前記のディンプル成長の状態をモデル的に示したものである. 佐藤らは, アルミニウム合

(a) Low magnification.

(b) Enlarged view of a part in Fig. 6a. $J=12.6\text{ kg/mm}$.Fig. 6. Matching fractographs of stretched zone taken from the specimen loaded to high J -value.

Fig. 7. Schematic illustration of void growth at crack tip.

金を用いて安定破壊を伴う場合の破壊じん性値に及ぼす介在物間隔を三つのモデルを示して説明しているが、Fig. 7の結果は、彼らのモデルのbタイプに相当する。つぎに、安定破壊領域を除いた場合のストレッチ・ゾーンの形状寸法について検討した結果、A側では $SZW=110\mu$ 、 $SZH=61.7\mu$ であり、 θ は 29.3° 程度となっている。一方、B側では $SZW=112.4\mu$ 、 $SZH=21.6\mu$ であり、 θ は約 10.9° であって、一対で θ がかなり異っている。なお、 θ は J の増加によって減小する場合が多いようである。

昭和55年 6月

3・2 ストレッチ・ゾーンの走査電顕像と透過電顕像の比較

Fig. 4および5において、ストレッチ・ゾーンの発生点がやや不明な場合が見られたが、走査電顕では分解能の点から疲労破面の特徴的様相が明確に捕えられず、したがって発生点を正確に求められない可能性が考えられる。そこで、Fig. 3を得た破面からレプリカを採取し、同一のストレッチ・ゾーンについて透過電顕と走査電顕像の比較を行った。Fig. 8は、その一例を示したもので、透過電顕では予き裂面の特徴的形態であるストライエーション状模様とストレッチングの特徴である蛇行すべりの跡が比較的明りょうであって、

(a) TEM fractograph.

(b) SEM fractograph.

Fig. 8. Comparison between TEM and SEM fractographs obtained from the same area of the stretched zone.

Fig. 9. Matching fractographs and the profile of fracture surface.

ストレッチ・ゾーンの発起点を容易に区別できるので、走査電顕では1枚の写真からそれらの特徴を見つけることはかなり困難である。なお、両写真について個々の形状寸法を比較した場合、それらはほぼ等しく、分解能の点を除けば両者で本質的な差異はないようである。ストレッチ・ゾーン法により J_{Ic} 値を求める場合、SZW が透過と走査電顕とでは若干異なるという結果も見られるが、これは前述したように、走査電顕では分解能不足からやや小さめに SZW を測定しているためではないかと推察される。以上は、安定破壊が介在しない場合の結果であって、ディンプルなどが存在する場合でも、透過と走査電顕で同一寸法の像が得られるかどうかは今後の検討を要する。

3.3 Step Cool 材

Fig. 9 は、step cool を行った試験片の結果を示したもので、650℃焼もどし材の場合と同様、ストレッチ・ゾーンは緩斜面と蛇行すべりが明りょうな急斜面とから成っている。なお、ストレッチ・ゾーンに隣接して微小なディンプルが作られているが、これらは引き裂き型よりもむしろ等軸に近い。一対を比較すると、SZW はほぼ等しいが、A側では明りょうな蛇行すべりが広範囲に見られるのに対し、B側では顕著でない。ステレオ観察の結果はスケッチに示すように、A側の明りょうな蛇行すべり面は一部が大きく突き出しているのに対し、B側ではゆるやかな傾斜面となっている。ステレオ解析の結果、A側の SZW は 36.4μ 、SZH が約 28μ 、 θ が 37.6° 程度であるのに対し、B側は SZW が 35.6μ 、SZH が 10.4μ 程度、 θ は約 16.3° となっており、一対で SZW がほぼ同じであっても、SZH が異なるために、 θ にもかなりの差異が生じている。

ストレッチ・ゾーンについて約20組のマッチングを行いそのうちの数列を示したが、いずれの場合にもその形状は Fig. 10 に示すように、緩斜面と急斜面とからなっている。ストレッチ・ゾーンの傾斜角 θ は、 $10 \sim 48^\circ$ 程度までのかなりのばらつきがあるために、 θ

Fig. 10. Schematic profile of the stretched zone.

から一義的に CTOD を求めることは困難と思われる。なお、統計的には扱っていないが、 θ は 33° 程度の値を取る場合が多いようである。また、ストレッチングが顕著に起る角斜面の角度 θ_I は、比較的ばらつきが少く、 $60 \sim 70^\circ$ 程度の範囲にある。

4 結 論

SCM 3 鋼を用いて破壊じん性試験を行い、ステレオマッチングの手法を用いてストレッチ・ゾーンの形状および傾斜角 θ について検討した結果を要約すれば、以下のとおりである。

- (1) ストレッチ・ゾーンの形状は、緩斜面と急斜面の両面から構成されている。
- (2) ストレッチ・ゾーンの傾斜角 θ は一定値をもたず、 $10 \sim 48^\circ$ 程度の広範囲に渡って変化する。このうち、 33° 程度の値を有する場合が多いようである。
- (3) 蛇行すべりが顕著な急斜面の角度 θ_I は $60 \sim 70^\circ$ 程度であって、比較的ばらつきが少い。
- (4) 両破面の SZW が同じであっても、SZH は一対で等しいとは限らない。
- (5) 同一のストレッチ・ゾーンについて走査電顕と透過電顕像の比較を行った結果、両者でその形状寸法はほぼ等しく、分解能の点を除けば観察方法による本質的な差異は生じない。

おわりに、本報の使用材は材料学会フラクトグラフィ部門委員会・組織と破壊小委員会の共同試験材であって、材料を提供された山陽特殊鋼の坪田一一氏、熱

処理を担当された川崎重工の喜多清氏，富永昌武氏に感謝の意を表します。

(昭和54年10月12日 第2回フラクトグラフィシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Spitzig, W. A., Trans. ASM, **61**, 344 (1968).
- 2) Bates, R. C., and W. G. Clark, Jr., Trans. ASM, **62**, 380 (1969).
- 3) Brothers, A. J., M. Hill, M. T. Parker, W. A. Spitzig, W. Wiebe, and U. E. Wolff, ASTM STP 493, 3 (1971).
- 4) Wolff, U. E., ASTM STP 493, 20 (1971).
- 5) Broek, D., Engng. Fract. Mech., **6**, 173 (1974).
- 6) 大塚昭夫, 宮田隆司, 西村誠二, 柏本陽一郎, 笠井 登, 造船学会論文集, **136**, 249 (1974).
- 7) 平野一美, 小林英男, 中村春夫, 中沢 一, 日本機械学会講演論文集, **760-9**, 151 (1976).
- 8) Kobayashi, H., K. Hirano, H. Nakamura, and H. Nakazawa, Proc. 4th Inter. Conf. on Fracture, **3**, 583 (1977).
- 9) 大塚尚武, 上山秀雄, 中野正章, 日本機械学会講演論文集, **780-9**, 29 (1978).
- 10) 大路清嗣, 小倉敬二, 内田秀紀, 藤本隆史, 日本機械学会講演論文集, **780-12**, 196 (1978).
- 11) 小林英男, 材料, **27**, 711 (1978).
- 12) 中村春夫, 小林英男, 中沢 一, 日本機械学会論文集, **45 (A)**, 336 (1979).
- 13) Landes, J. D., and J. A. Begley, ASTM STP 560, 170 (1974).
- 14) 大塚尚武, 日本機械学会 S 781 分科会資料, No. 64 (1979).
- 15) Schwalbe, K., Engng. Fract. Mech., **6**, 415 (1974).
- 16) 佐藤邦彦, 豊田政男, 武藤睦治, 西川修史, 造船学会論文集, **144**, 303 (1978).
- 17) Rice, J. R., P. C. Paris, and J. G. Merkle, ASTM STP 536, 231 (1973).
- 18) 西村秀雄, 高村仁一, 水曜会誌, **12**, 118 (1952).
- 19) 紀本静雄, 菅沼忠雄, 大島太市, 写真測量, **8**, 8 (1969).
- 20) 佐藤 学, 小林英男, 中村春夫, 中沢 一, 日本機械学会講演論文集, **790-12**, 238 (1979).