研究論文

アルミニウム合金5083-O 切欠材における $P-N_f$ 線図とき裂の発生・伝ば

村松 克巳*

$P-N_f$ diagram and fatigue-crack initiation
and propagation of notched 5083-O aluminum alloy

Katsumi MURAMATSU*

Fatigue test was performed by using rotating-bending machines on the notched 5083-O extruded alloy to investigate the relation between the $P-N_f$ diagram and the fracture surface morphology in crack initiation and propagation. The relation between the length L_i (mm) of the crack initiation and the stress amplitude S (kgf/mm²) can be written in the form $L_i = 28.8/S^2$. When the length of the microcrack which propagates at the notch root surface ranges L_i and the crack front forms a semi-ellipse in which the long axis is L_i and the aspect ratio is about 0.3, the microcrack becomes crack. The fracture surface morphology in crack initiation is classified into three types, and is related to the $P-N_f$ diagram. When two or more main cracks originate at the notch root surface, the fatigue life is controlled by crack propagation. When only one main crack originates, or when the main crack originates in the subsurface region, the fatigue life is controlled by crack initiation.

Keywords: $P-N_f$ diagram, 5083-O alloy, fracture surface morphology, crack initiation, fatigue life

(Received August 17, 1988)

1. 緒 言

Al-Mg 系および Al-Zn-Mg 系合金は大型溶接構造物にかなり使用され、その疲れ強さが重要視されている。著者は5083-O 合金平滑材および切欠材の $P-N_f$ 線図 (P : 非破壊率, N_f : 破壊繰返し数) を検討し、 $P-N_f$ 線は対数正規確率紙上において、高応力水準では直線、 N_f が 10^7 に近い低応力水準では2本の直線 (折れ線) となり¹⁾、さらに、7003-T5 ティグ突合わせ溶接継手において、折れ線の交点を境として、き裂起点の発生位置が異なることを報告した²⁾。引続いて、5083-O 合金切欠材について、き裂の主起点の数および破面形態の遷移位置はそれぞれ $P-N_f$ 線の形状とほぼ対応することを報告してきた³⁾。本報では、同切欠材について、 $P-N_f$ 線とき裂の発生形態、発生形態と疲れ寿命の関係について検討した。

2. 供試材および実験方法

供試材は前報³⁾と同じもので、30%抽伸後410°C×1 hr 焼なましたφ17 mm の5083-O 棒である。その化学成分と機械的性質を Table 1 に示す。

疲れ試験は小野式回転曲げ疲れ試験機 (3,420 rpm) を用いて行った。試験片は外径12.5 mm, 切欠の深さ1.25 mm, 切欠底直径10 mm 切欠底の丸み半径0.30 mm の60°-V 型環状切欠 (形状係数 $\alpha=3.2$) である。実験は応力水準 S が12, 10, 8, 7, 6.5 および5.5 kgf/mm² でそれぞれ行い、所定の繰返し数で試験機を停止し、倍率80の実体顕微鏡で切欠底表面のき裂長さを測定した。破壊後の破面観察は、これらの試験片と前報³⁾の各試験片の両者について、SEM を用いて行った。

* 静岡大学工業短期大学部 (浜松市)。Junior College of Engineering, Shizuoka University (Hamamatsu-shi, Shizuoka)。

Table 1 Chemical composition of specimen

Chemical composition (wt%)								Mechanical properties		
Mg	Zn	Mn	Cu	Fe	Si	Cr	Ti	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
4.30	<0.01	0.74	0.01	0.17	0.09	0.19	<0.01	14.1	31.9	11

Fig. 1 Crack propagation curves of notched 5083-O alloy. The arrow at the curved line shows a coalescence of cracks.

3. 実験結果および考察

3.1 主き裂の伝ば曲線

Fig. 1 に切欠底表面における主き裂の伝ば曲線を示す。ただし、 $S=12 \text{ kgf/mm}^2$ の場合、き裂は繰返し数 $N \div 3 \times 10^3$ において切欠底表面全周に伝ばし、 $N_f = 2.40 \times 10^4$ にて破壊した³⁾。切欠底表面を注意深く観察しても、き裂が認められるのは切欠底表面全周に伝ばしてからであって、き裂長さの測定ができなかったため図示しなかった。

$S=10 \text{ kgf/mm}^2$ では Fig. 1(a) に示すように、試験片 A では 5×10^3 で微視き裂が認められ、 $N=3 \times 10^4$ ではほぼ切欠底全周を伝ばし、 $N_f=8.48 \times 10^4$ で破壊した。図中に破壊繰返し数を矢印 N_{fa} で示した。

$S=8 \text{ kgf/mm}^2$ の場合は、き裂が切欠底表面全周を伝ばし終ると間もなく破壊した。たとえば、試験片 C の場合、 $N=4.30 \times 10^5$ でほとんど切欠底全周に伝ばし、 4.54×10^5 で破壊した。試験片 B, C, D の伝ば曲線群は末広がり型⁴⁾であり、疲れ寿命 N_f をき裂発生寿命 N_i とき裂伝ば寿命 N_p に分けると、この場合、 N_f は N_p に支配されている。図中の矢印は、切欠底でのき裂の主な合

体点を示す。一般に、き裂の合体が早い時期に起きるほど、また、合体数が多いほど、 N_p は短くなっている。

$S=7 \text{ kgf/mm}^2$ の場合には、き裂が切欠底表面全周を伝ばするとほとんど同時に破壊した。き裂伝ば曲線群は短寿命側ではやや末広がり型であるが、長寿命側では平行移動型⁴⁾に近い。なお、試験片 H は $N=1.82 \times 10^6$ で試験を中止し、内部き裂前縁の観察に供した。

$S=6.5 \text{ kgf/mm}^2$ の場合を Fig. 2 に示す。 $S=7 \text{ kgf/mm}^2$ の場合と同様、き裂が切欠底表面全周を伝ばするとほとんど同時に破壊し、き裂伝ば曲線群も末広がり型と平行移動型に区分される。

3.2 き裂の発生

き裂の発生とき裂伝ば曲線の対応について、代表例について述べる。Fig. 3 に $S=6.5 \text{ kgf/mm}^2$ で試験した場合の切欠底表面のき裂長さ L と繰返し数 N の関係を示す。この場合、主き裂は 1 個であった。応力拡大係数範囲 ΔK に相当するものとして

$$\Delta K = 2 S \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

$$\left(a : \text{表面き裂半長}, a = \frac{L}{2} \right)$$

を用いて、Fig. 3 から求めた da/dN と $2S\sqrt{\pi a}$ の関係を

Fig. 2 Crack propagation curves of notched 5083-O alloy. The arrow at the curved line shows a coalescence of cracks.

Fig. 3 Propagation curve of the crack at the notch root surface of the specimen.

Fig. 4 Fatigue-crack propagation rate versus $2S\sqrt{\pi a}$ of the specimen.

整理すると Fig. 4 のようになる。Fig. 5 はこの主き裂の起点部の破面を示す。Fig. 5(b) は前報³⁾と同じ手法により Fig. 5(a) のき裂前縁の状況を示したものである。主起点は Fig. 5(c) のごとく、表面層の金属間化合物となっている。これを起点とした主微視き裂は切欠底表面において、隣接部の微視き裂と合体しつつ伝ばしている。この間、内部き裂前縁はほぼ半円状を形成していき、そのアスペクト比 b/L (b : 試料軸に垂直方向のき裂の深さ) は約 0.3 であまり変わらないが、ある時点か

ら次第に小さくなる。すなわち、内部よりも表面における伝ばが優先する。このアスペクト比の変化は、越智ら³⁾による低炭素鋼における結果と類似している。アスペクト比が小さくなり始めるときの L は図中に示すごとく $680\mu\text{m}$ で、このき裂前縁の近くは Fig. 5(a) に見られるようにやや黒い帯状を呈していて、注意深く観察すると、この帯に沿ってすべり線と思われる直線状の細かい線が多く観察され、これらの線の交差部には Fig. 5(d) のごとくに、金属間化合物のクラスタを伴う粒界破面と思われるものが見られる。この黒い帯で囲まれた半円状の領域は周囲に比較してやや黒ずんでいて区別できる。

Fig. 5 SEM fractographs and schematic representation of main crack origin region of the same specimen as Fig. 3. (a) Main crack origin region. (b) Schematic representation of fatigue crack fronts on the same fracture surface as (a). (c) Higher-magnification view of the main crack origin in (a). (d) Higher-magnification view of the outlined area in (a).

これと類似と思われる破面の様相が、低炭素鋼において戸梶ら⁶⁾により報告されている。 L がこの680 μm になるのはFig. 3における伝ば曲線の立ち上がり時点(矢印Ti)で、Fig. 4の $da/dN \sim 2S\sqrt{\pi a}$ 曲線のTi点に対応し、そのときの $2S\sqrt{\pi a}$ の値は下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} ⁷⁾に近い。Fig. 3およびFig. 4中には、き裂伝ばの遷移点 $T_{a \rightarrow b}$ ³⁾も併記した。

上記の特徴を示す切欠底表面のき裂長さを L_i として、同様に S が12, 10, 8, 7, 6.5および5.5 kgf/mm²の各応力水準について測定した結果をFig. 6に示す。これらの測定点は

$$L_i = 28.8/S^2 \quad (2)$$

の曲線上にのる。式(1)と(2)より $L=L_i$ の場合の ΔK を算出すると、 $\Delta K \approx 13.5 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ をうる。これは5083-O合金の応力比 $R=-1$ における ΔK_{th} ⁷⁾にほぼ等しい。現状では、き裂発生定義は明確であるとはいえないが、本報では上述の結果から L_i をき裂発生長さ、 L_i を長軸としアスペクト比が約0.3の半円状の領域をき裂発生域と呼ぶことにする。

3.3 P-N線図

応力水準8, 7, 6.5および5.5 kgf/mm²における破壊寿命をそれぞれ対数正規確率紙上にプロットした $P-N_f$ 線

Fig. 6 Relation between stress amplitude and crack initiation length.

Fig. 7 $P-N_f$ diagrams of the notched 5083-O alloy at constant stress amplitude.

図をFig. 7に示す。8および7 kgf/mm²の場合は前報³⁾で述べたので説明を省略する。

6.5 kgf/mm²の $P-N_f$ 線は7 kgf/mm²の場合³⁾と同様、折れ線で表示でき、き裂の主起点は短寿命側では切欠底表面層の金属間化合物、長寿命側では切欠底表面下の金属間化合物であった。これに対し、5.5 kgf/mm²の $P-N_f$ 線は同様に2本の直線で表示できるが逆の凸型であり、長寿命側の傾斜が大きい。しかも、き裂の主起点はすべて切欠底表面下の金属間化合物であった。

各応力水準におけるき裂発生寿命 N_i は L_i を用いることによってFig. 1およびFig. 2のき裂伝ば曲線から求められる。6.5 kgf/mm²の場合、 $L_i=0.68 \text{ mm}$ に対する繰返し数 N_i をFig. 2から求め、 $P-N$ 線をえがくとFig. 8のようになる。 N_i も同図に併記した N_f と同様に、対数正規確率紙上で折れ線で表示できる。

3.4 き裂の発生寿命 N_i と破壊寿命 N_f

各応力水準における N_f と N_i/N_f の関係をFig. 9に示

Fig. 8 P - N diagrams of the notched 5083-O alloy at constant stress amplitude.

す。測定した主起点数 n も併記した。応力水準が10および8 kgf/mm²の場合、 n は2以上で N_i/N_f は30%以下となっており、 N_f は N_p に支配されている。6.5 kgf/mm²の場合、Fig. 8の P - N 線で短寿命側の直線に属する試験片I, J, K, Mのうち最も寿命の短い試験片Iでは n が2で、 N_i/N_f は50%以下で、 N_f は N_p に支配されているとみることができる。他の試験片では n は1で N_i/N_f は50%を越えており、 N_f は N_i に支配されているとみなすことができる。さらに、長寿命側の試験片R, Qでは、 N_i/N_f は100%近くで N_f は N_i に支配されている。7 kgf/mm²の場合、試験片E, F, Gはいずれも n が2以上で N_i/N_f は50%以下で、これらはFig. 7の P - N_f 線の短寿命側の直線に属している。き裂伝ばの途中で試験を打ち切った試験片Hは、 P - N_f 線の長寿命側の直線に属するものに相当し、 n は1で、起点は切欠底表面下になっていた。これらの傾向は、6.5 kgf/mm²の場合に類似している。

3.5 P - N_f 線とき裂発生形態

主起点部近傍破面の観察結果から、き裂発生形態は、 P - N_f 線図との関連において、三つのタイプに大別することができる。

タイプIは P - N_f 線が1本の直線で示される12, 10, 8 kgf/mm²ならびに2本の直線で示される7および6.5 kgf/mm²の短寿命側の直線に属するものの発生形態、タイプIIは7および6.5 kgf/mm²の長寿命側および5.5 kgf/mm²の短寿命側の直線に属するものの発生形態、タイプIIIは5.5 kgf/mm²の長寿命側の直線に属するものの発生形態である。

Fig. 10(a), (b), (c)はそれぞれタイプI, II, IIIの発生形態を示す破面の写真で、Fig. 11(a), (b), (c)はそれぞれFig. 10(a), (b), (c)の写真にもとづきえがいたき裂前縁などの模式図である。発生形態の詳細は次のようである。

(1) タイプI : Fig. 10(a), Fig. 11(a)に示すように、

Fig. 9 Relation between N_i/N_f and N_f . The arrows show the specimens belonged to the shorter line of a P - N_f diagram composed by two lines in Fig. 7.

Fig. 10 SEM fractographs of the main crack origin region. (a) S : 6.5 kgf/mm², N : 1.50×10^6 cycles. (b) S : 6.5 kgf/mm², N : 1.02×10^7 cycles. (c) S : 5.5 kgf/mm², N_f : 8.39×10^7 cycles.

表面層から生成した主微視き裂が隣接部の表面層微視き裂と合体し、次にき裂前縁が安定な半円状となるように内部に進展する。この間、表面層での微視き裂との合体は停滞する。これを繰返して、切欠底表面層の微視き裂長さが L_i に達し、アスペクト比約0.3の内部き裂前縁が形成されると、き裂として加速的に表面層を伝ば、また内部にも進展していく。

図示した例では、この時点でのき裂発生長さは700 μ mで前記の L_i の値680 μ mよりやや長い。これは、表

Fig. 11 Schematic representation of fatigue crack fronts on the same fracture surface as Fig. 10. (a) Type I: Main crack initiates at the notch root surface of the specimen. (b) Type II: At first, micro-cracks propagate from sub-surface defects p, q etc. to the surface (black arrows), and then, propagate into the specimen (white arrows). The total length of the micro-cracks from sub-surface is shorter than L_i . (c) Type III: The micro-cracks propagate from sub-surface by the same mechanism as type II, but the total length of the micro-cracks from sub-surface is L_i .

面層の微視き裂と合体しつつ成長していく主微視き裂の長さが L_i に近付いたとき、隣接部表面層に比較的大きな微視き裂が存在し、これと合体したためと考えられる。なお、このき裂発形態を示す場合は、 L_i が大きいと一般に破壊寿命が短い。

(2) タイプⅡ：Fig. 12(a)にFig. 10(b)中で○印で示したP部を拡大して示す。Fig. 10(b), Fig. 11(b), Fig. 12(a)に示すように、試験片内部の金属間化合物のクラスタなどの存在するP, q部を頂点としたくさび状の領域内に、切欠底表面に向かって成長したと思われる微細な破面が分布している。これらの破面は、Fig. 11(b)中では細い黒矢印で示した。これらくさび状領域の重複部ではFig. 12(b)に示したように、金属間化合物、空隙、粒界破面、すべり帯などが多く見受けられ、強く損傷を受けている。損傷は表面に近いほど著しく、表面近くでは三角形の微視き裂となって表面に現われている。この三角形の微視き裂はFig. 13のようで、その起点部には矢印で示したように金属間化合物が認められる。

これらの重複部での三角形の微視き裂はこのあと、合体して半だ円状の内部き裂前縁を形成し、隣接部の切欠底表面層で生成した微視き裂と合体して切欠底表面を伝ばし、内部にも進展していく。このようにして、切欠底表面層の微視き裂長さが L_i に達し、アスペクト比約0.3の半だ円状の内部き裂前縁が形成されるとき裂となり、その後は表面層での伝ばと内部への進展がおこる。

タイプⅡのき裂発形態を示す場合は、同じ応力水準では寿命の短いものほど損傷域はせまく、内部から切欠底表面に現れる三角形の微視き裂の深さも浅く、かつ

Fig. 13 Higher-magnification view of the main crack origin O in Fig. 10(b).

Fig. 12 Higher-magnification view of the outlined area in fractograph Fig. 10(b), showing intergranular fracture surface (IG), intermetallic compound (MC), slip band (SB), void (V). (a): Outlined area by the circle P. (b): Outlined area by the rectangle.

その数も少ない。 $P-N_f$ 線の傾きがタイプⅠの場合にくらべて小さいのは、これらのことと関係するものと考えられる。

(3) タイプⅢ：Fig. 10(c), Fig. 11(c)に示すように、内部の金属間化合物のクラスタなどの存在する r, s および t 部を頂点としたくさび状領域内に、タイプⅡの場合と同様に、切欠底表面に向かって成長したと思われる微細な破面が分布しており、き裂発生域のほぼ全域にわたって強く損傷を受けている。くさび状領域が重複する部分では特に強く損傷を受けている。タイプⅡと同様にして、内部の金属間化合物を起点として表面に現われる三角形の微視き裂はいずれも損傷域の切欠底表面層で隣接しており、これらの微視き裂長さの合計は L_i に達している。

重複部での三角形の微視き裂は大きく、これが隣接する微視き裂と合体し、き裂前縁が内部に進展する。これを繰返して、損傷域内で長軸の長さが L_i 、アスペクト比約0.3の半だ円状の内部き裂前縁が形成されるときき裂となる。

このき裂発生形態を示す場合は、破壊寿命 N_f が長い。これは、損傷域が広く、損傷に時間を要するためであろう。次に、 $P-N_f$ 線の傾きがタイプⅡの場合に比較して大きくなっているが、これは損傷域の広さがほぼ同じであるので、き裂発生にいたるまで、すなわち、 L_i に達するまでの時間に大きな差がないためと考えられる。

4. 結 言

5083-O合金切欠材について、応力水準を12~5.5 kgf/mm²の範囲内で変え、 $P-N_f$ 線とき裂発生形態、発生形態と疲れ寿命との関係を検討して、次の結果をえた。

(1) き裂発生長さ L_i (mm)は応力水準 S (kgf/mm²)によって変化し、 $L_i=28.8/S^2$ で示される。

(2) 切欠底表面層に生成した微視き裂は合体、成長して、長さ L_i の切欠底表面微視き裂を長軸とし、アスペクト比約0.3の半だ円状のき裂前縁を形成すると、き裂となる。

(3) き裂発生形態は、 $P-N_f$ 線との関連において、三つのタイプに分類することができる。

タイプⅠ： $P-N_f$ 線が1本の直線で示される12, 10, 8 kgf/mm²ならびに2本の直線で示される7および6.5 kgf/mm²の短寿命側の直線に属するものの形態である。微視き裂が表面層の金属間化合物を起点として発生し、これが隣接部の表面層微視き裂と合体して成長し、その長さがき裂発生長さに達する。

タイプⅡ： $P-N_f$ 線において、応力水準が7および6.5 kgf/mm²の長寿命側および5.5 kgf/mm²の短寿命側の直線に属するものの形態である。内部の金属間化合物を起点として、切欠底表面に現われる微視き裂の長さがき裂発生長さに達しないで、表面に現われてから切欠底表面を伝ばしてき裂発生長さに達する。

タイプⅢ： $P-N_f$ 線において、応力水準が5.5 kgf/mm²の長寿命側の直線に属するものの形態である。内部の金属間化合物を起点として、切欠底表面に現われる微視き裂が隣接し、これらが合体し成長してき裂発生長さに達する。

(4) 疲れ寿命は、微視き裂が試験片表面層から発生し、かつ主起点が複数個の場合は、き裂伝ば寿命に支配される。しかし、主起点が1個の場合、あるいは微視き裂が内部から発生する場合は、き裂発生寿命に支配される。

なお、本研究に関しては住友軽金属工業㈱技術研究所竹内勝治博士のご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 村松克巳, 田中英司, 竹内勝治：軽金属, **23** (1973), 317.
- 2) 村松克巳：軽金属, **37** (1987), 61.
- 3) 村松克巳：軽金属, **37** (1987), 453.
- 4) 田中 栄, 秋田 敏：日本材料学会第29期講演会前刷 (1980), 176.
- 5) 越智保雄, 佐々木茂美, 平沢泰治：材料, **31** (1982), 559.
- 6) 戸梶恵郎, 小川武史, 原田行雄：材料, **35** (1986), 394.
- 7) たとえば, 日本材料学会編：金属材料疲労き裂進展抵抗データ集, **2** (1983), 797.