高力アルミニウム合金の食塩水中腐食疲労き裂進展挙動 に及ぼす電位と異方性の影響[†]

森 要* 大塚 昭夫**

Effects of Potential and Material Anisotropy on Fatigue Crack Growth Characteristics of 7075-T6 Aluminum Alloy in 3.5% Saltwater

by

Kaname MORI* and Akio OTSUKA**

Fatigue crack growth tests were made in air and in 3.5% saltwater on 7075-T6 aluminum alloy specimens extracted in LT and TL directions. The testing in saltwater was made under the application of anodic and cathodic potentials. The test results showed that the crack growth rate in saltwater was higher than that in air under all the conditions tested, regardless of the applied potential and the specimen orientation. Although an appreciable effect of the applied potential was observed in the lower ΔK_I range of the $da/dN-\Delta K_I$ relation for LT specimen, almost no effect of potential was observed in both the $da/dN-\Delta K_I$ relation for TL specimen and the $da/dN-\Delta K_{Ieff}$ relations for LT and TL specimens. Intergranular fracture and secondary cracking of intergranular type were observed quite often in the LT and TL specimens fatigued under free corrosion.

Key words : Fatigue, Corrosion fatigue, Crack growth, Potential, Saltwater, Aluminum alloy, Anisotropy

1 緒 言

食塩水などの腐食環境下では、多くのアルミニウム合金は疲労強度が空中に比べて大幅に低下し、き裂進展速度もかなり加速することが知られている^{1)~5)}。一方、同材料を用いた著者らの食塩水環境下におけるモードⅡ進展特性では、腐食環境の影響をほとんど受けない結果が得られている⁴⁾。すなわち、進展機構が異なるモードⅠとモードⅡ進展とでは環境の影響が異なるようである。また、このような環境効果は電位を印加することにより、より明瞭に出現することも予想される。

本研究では、まずモードⅡ進展との比較の基礎としても興味深いモードⅠ進展の場合について、7075-T6 アルミニウム合金圧延板を用い、3.5% 食塩水環境下で自然腐食電位および電位を卑側（カソード電位）と貴側（アノード電位）へ変化させ、疲労き裂進展に及ぼす電位の影響を調べた。また、き裂が圧延方向および圧延方向と直交する方向に進展した場合、圧延組織との関連でき裂先端における局所的な電気化学反応が異なることも考えられるので、き裂進展に及ぼす圧延による面内異方性の影響についても調べた。

なお、アルミニウム合金材のモードⅠ腐食疲労き裂進展挙動に及ぼす電位印加の影響や圧延材の異方性の

影響についての報告は鋼材の場合と比較すると極めて少ないが、幾つかの研究がなされている^{5)~7)}。

2 実験方法

材料は、市販の 7075-T6 アルミニウム合金で、その化学成分を Table I、機械的性質を Table II、組織写真を Fig. 1 に示す。圧延方向の 0.2% 耐力が 20MPa 程度大きい。引張強さと伸びにはほとんど採取方向による差は見られない。Fig. 1 の組織写真を

Table I. Chemical composition of 7075-T6 aluminum alloy, weight percent.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.130	0.353	1.163	0.075	2.253	0.222	5.446	0.037
Zr	Pb	Bi	Ni	Be	Zr+Ti	Fe/Si	
0.015	0.013	0.003	0.004	0.000	0.052	2.7	

Table II. Mechanical properties of 7075-T6 aluminum alloy.

Direction	0.2 % proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Longitudinal (Rolling direction)	541	589	10.5
Long transverse	522	600	11.4

[†] 原稿受理 昭和63年12月26日 Received Dec. 26, 1988

* 正会員 帝京大学理工学部 宇都宮市長岡町, Department of Science and Engineering, Nagaoka-cho, Utsunomiya

** 正会員 名古屋大学工学部 名古屋千種区不老町, Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

Fig. 1. Optical microstructure of the three dimensional grain structure.

Fig. 2. Schematic illustration of test method.

Fig. 3. Testing apparatus for four point pure bending method in 3.5 % saltwater.

見ると、LS、TS 面の結晶粒が著しく引延ばされている。

Fig. 2 は実験法の概略を示す模式図で、Fig. 3 は実際の実験状況を示している。試験片は四点純曲げ試験片で、幅 60 mm、厚さ 3.2 mm、中央の試験部分を除き、両側から試験片ホルダーで補強されている。圧延面内の異方性を調べるために、圧延方向および圧延方向と直交する方向にき裂を進展させるように試験片を採取した。疲労予き裂は応力比 $R=0.1$ の四点純曲げの繰返し負荷で、階段状に負荷を減少させる方法で約 3 mm 進展させた。試験機は電気油圧サーボ疲労試験機（島津製、荷重容量 49 kN）を用いて、応力比 0.1、周波数 1 Hz のサイン波の荷重条件で試験を行った。なお、進展速度が約 1×10^{-4} mm/cycle 以上のデータは、主に荷重を一定に制御した ΔK 増加試験により求めた。進展速度が約 1×10^{-4} mm/cycle 以下のデータは、初期の試験により電位を印加した場合荷重履歴の影響を受け易いことが判明したので、荷重を階段状に漸減させた ΔK 減少試験により求めた。その単位長さ (mm) 当りの ΔK 減少率、 $C_l = (dK/da)/K^2$ は -0.08 であった。腐食環境は、 298 ± 1 K の 3.5% 食塩水環境である。腐食環境の設定は、Fig. 2(a) の模式図に示すように 3.5% 食塩水をプラスチックポンプを用いて流量約 300 ml/min で循環

させている。Fig. 2 (b) の試験槽部分の模式図に示すように、食塩水は下から試験槽に入り、上の出口から下部の受け容器に流れ出るようになっている。試験片のき裂進展部分に透明な防食テープを貼り、試験中き裂長さが計測できるようにした。電位は、ポテンシostat (北斗電工製, HA303) を用いて Fig. 2 (b) に示すように、試料極, 白金対極, 参照電極 (Ag/AgCl) を配置して、参照電極に対する電位を -500 mV, -680 mV, 自然腐食 (E_{corr}), -1000 mV, -1300 mV の5条件に設定した。なお、自然腐食電位は実験中変動し試験開始時には約 -750 mV であるが、試験時間の経過に伴い増加し、試験終了時には約 -690 mV を示す。本研究ではその平均値を便宜的に取り、自然腐食電位として -720 mV と表示している。また、比較のために空中における試験も行った。き裂長さの測定は、試験機を停止し、ダイヤルゲージをセットした読み取り顕微鏡を用いて行った。進展速度は、隣り合う3点の繰返し数とき裂長さの関係から求めた。 K 値は、Brownらの式から求めた。

3 実験結果および考察

Fig. 4 は圧延方向と直交する方向にき裂を進展させた場合 (以下、LT 試験片と呼ぶ) の da/dN - ΔK_I 関係である。横軸に ΔK_I , 縦軸にき裂進展速度 da/dN を取り銀/塩化銀参照電極に対する設定電位をパラメータに取って整理している。まず、●印で示す空中の場合と比べると、食塩水中ではすべて加速しており、その加速の程度は著しく4~8倍である。電位の影響もある程度認められ、○印で示す自然腐食の場合と比

Fig. 4. da/dN - ΔK_I relation for LT specimens, in air and in 3.5 % saltwater under various potentials.

Fig. 5. da/dN - ΔK_I relation for TL specimens, in air and in 3.5 % saltwater under various potentials.

べて、 -500 mV の場合 (▽印) も -1300 mV の場合 (◇印) も約2, 3倍加速している。その加速の程度は -500 mV の場合が最も著しい。また、高 ΔK_I 側より低 ΔK_I 側の方が電位の影響が大きい。

Fig. 5 は圧延方向にき裂を進展させた場合 (以下、TL 試験片と呼ぶ) で、Fig. 4 と同様に整理した da/dN - ΔK_I 関係である。この場合も Fig. 4 の LT 試験片の場合と同様に、食塩水中ではすべて空中の結果より加速しており、その加速の程度は2~4倍で、

Fig. 6. Influence of anisotropy of 7075-T6 rolled plate on the da/dN - ΔK_I relation in air and in 3.5 % saltwater under various potentials.

Fig. 7. Influence of anisotropy of 7075-T6 rolled plate on the da/dN - ΔK_{Ieff} relation in air and in 3.5 % saltwater under various potentials.

Fig. 4 の LT 試験片の場合より小さい。電位の影響はほとんど認められないが、低 ΔK 側で -500 mV 電位の結果が少し加速している。

Fig. 6 は、面内異方性の影響を見るために、空中と自然腐食、-1300 mV および -500 mV の場合について、Fig. 4, 5 の結果を曲線近似し比較している。全体的に見ると圧延異方性の影響は少ない。詳細に比べると、空中と自然腐食の場合は、細線で示す TL 試験片の方が実験した ΔK の中間領域で加速しており、駒井らの静、動 SCC き裂進展特性に及ぼす異方性の影響を調べた結果と一致している。しかし、電位を印加した -1300 mV と -500 mV の場合は、逆に太線で示す LT 試験片の方が加速し、低 ΔK 側でその加速の程度が大きい。

Fig. 7 は、面内異方性の影響を da/dN - ΔK_{Ieff} 関係で調べたもので、-500 mV、自然腐食、-1300 mV の結果を示している。なお、き裂の閉口点は背面部にひずみゲージを貼り、その出力と荷重との関係より引算回路を使用して求めた。データが少なく明確なことは言えないが、 da/dN - ΔK_{Ieff} 関係の低 ΔK 側で、TL、LT 両試験とも -1300 mV、自然腐食、-500 mV の順に加速している。また、低 ΔK 側で、TL 試験片の方が LT 試験片よりいずれの電位も少し加速しており、Fig. 6 の da/dN - ΔK_I の結果とは異方性の現れ方が逆になっている。すなわち、 da/dN - ΔK_{Ieff} 関係では、腐食環境中の異方性の現れ方が空中の異方性の現れ方と一致している。

Fig. 8. Polarization curves of TS and LS planes of 7075-T6 rolled plate in 3.5 % saltwater.

Fig. 8 は、参考までに沖合いの環境ではあるが、両試験片の進展面に対応する LS、TS 面の分極曲線を調べた結果である。自然電位からカソード側へ -1300 mV、アノード側へ -500 mV まで、走査速度 20 mV/min で分極曲線を測定した。LS と TS 面で分極曲線に少し差が認められ、LS 面の電気化学的な反応が TS 面より生じ易い結果に成っている。これは TL 試験片の腐食による加速を示唆しており、Fig. 7 の低 ΔK 側で見られる TL 試験片の加速傾向とも一致している。

Fig. 9 は、LT 試験片の進展破面形態で、破面形態に及ぼす電位の影響を比較している。破面は、いずれも腐食生成物または食塩水で汚されており、そのままでは破面観察が出来なかった。したがって、数 % 濃度の合成洗剤液とアセトンを用いて超音波洗浄を行ってから走査電子顕微鏡観察を行った。(c)、(d) に示す自然腐食の場合には、粒界が優先的に溶解したと考えられる形態およびその二次き裂が特徴的に見られる。(e)、(f) に示す -500 mV の場合かなり溶解しているのに対し、(a)、(b) に示す -1300 mV の場合は溶解している部分もあるが、相対的にはぜい性的な形態が多い。いずれも自然腐食の場合に観察された二次き裂はほとんど見られない。

Fig. 10 は、TL 試験片の進展破面形態で、Fig. 9 と同様に整理、比較している。この場合も (c)、(d) に示す自然腐食の場合には、粒界が優先的に溶解したと考えられる形態およびその二次き裂が特徴的に見られ、

Fig. 9. Fractographs for LT specimens in 3.5 % saltwater under various potentials. (b), (d), (f) are higher magnification views of the central area in (a), (c), (e), respectively.

Fig. 10. Fractographs for TL specimens in 3.5 % saltwater under various potentials. (b), (d), (f) are higher magnification views of the central area in (a), (c), (e), respectively.

その傾向は LT 試験片の場合より著しい。(e), (f) に示す -500mV の場合、やはりかなり溶解しているのに対し、(a), (b) に示す -1300mV の場合は部分的には (b) に示すトンネル腐食状の形態も見られるが、全体的にはぜい性的な形態を示している。いずれも自然腐食の場合に観察された二次き裂はほとんど見られな

い。

4 結 論

7075-T6 アルミニウム合金の 3.5% 食塩水中における腐食疲労き裂進展挙動が、電位および圧延面内におけるき裂の進展方位によっていかに影響を受けるかについて調べ、次のような結論を得た。

(1) 空中の場合と比べると、食塩水中では電位印加の有無、電位の大きさおよび貴側、卑側の設定に関係なく、すべて加速している。その加速の程度は圧延方向にき裂を進展させた場合4～8倍で、圧延方向と直交する方向にき裂を進展させた場合2～4倍である。

(2) $da/dN-\Delta K_I$ 関係における電位の影響は、圧延方向と直交する方向にき裂が進展する場合に少し認められ、自然腐食の場合と比べて、銀塩化銀参照電極に対する電位が貴側の -500 mV の場合も卑側の -1300 mV の場合も少し加速している。その加速の程度は -500 mV の場合が大きい。また、高 ΔK 側より低 ΔK 側の方が電位の影響が大きい。圧延方向にき裂が進展する場合には電位の影響は少ないが、 -500 mV の場合が少し加速している。

(3) 進展破面形態に及ぼす電位の影響は少し認められ、自然腐食の場合には、粒界面に沿って優先的に溶解したと考えられる形態および同じ形態の二次き裂が特徴的に見られる。電位を印加した場合、貴側の -500 mV では溶解の形態が特徴的であるのに対し、卑側の -1300 mV ではぜい性的な形態が多い。いずれも自然腐食の場合に観察された二次き裂はほとんど見られない。

最後に、卒業研究として実験に協力された当時名古屋大学工学部学生伊藤英雄君に謝意を表する。また、本研究は文部省昭和 62, 63 年度科学研究費、一般研

究 C の補助により行われたもので、ここに記して感謝の意を表します。

(昭和63年11月10日 第19回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 渡瀬善教, 材料, **24**, 1140 (1975).
- 2) C. E. Jaske, J. H. Payer and V. S. Balint, "Corrosion Fatigue of Metals in Marine Environments" (1981) Battelle Press.
- 3) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, "金属の腐食疲労と強度設計" (1982) 養賢堂.
- 4) 大塚昭夫, 森 要, 吉田貴司, 材料, **36**, 1110 (1987).
- 5) 大西忠一, 吉村公一, 軽金属, **37**, 277 (1987).
- 6) R. E. Stoltz and R. M. Pelloux, Metall. Trans., **3**, 2433 (1972).
- 7) F. P. Ford, Corrosion, **35**, 281 (1979).
- 8) ASTM Committee E24, ASTM STP 738, 340 (1981).
- 9) W. F. Brown Jr and J. E. Strawley, ASTM STP 410, 13 (1969).
- 10) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 近藤昌樹, 安村充弘, 材料, **35**, 642 (1986).
- 11) 小若正倫, "金属の腐食損傷と防食技術", p. 363 (1983) アグネ.