2017-T3 Al 合金および SUS 304 鋼における 疲労き裂成長に及ぼす負の応力比の影響†

萩 山 博 之* 白 石 哲 郎*
佃 等** 曾 山 義 朗*

Effect of Negative Stress Ratio on Fatigue Crack Growth in 2017-T3 Al Alloy and SUS 304 Steel

by

Hiroyuki OGIYAMA*, Tetsuro SHIRAISHI*, Hitoshi TSUKUDA**
and Yoshiro SOYAMA*

Fatigue crack growth behaviors such as the crack growth rate and closure in the range of intermediate crack growth rate were studied using 2017-T3 Al alloy and SUS 304 steel under various combinations of the negative stress ratio, R and the maximum stress relative to the yield strength, $\sigma_{\max}/\sigma_y$. The main results obtained are as follows;

(1) The fatigue crack growth rate, da/dN increased with a decrease of R and an increase of $\sigma_{\max}/\sigma_y$ for both 2017-T3 Al alloy and SUS 304 steel. In this case, it becomes clear quantitatively that the compression stress in the load cycle relative to the yield strength, S_c/σ_y is a very important factor which dominates the crack opening level and consequently da/dN in the both materials. The results are the same as those for S45C and SUS 329J1 which we reported previously.

(2) Martensitic transformation taking place as the fatigue crack propagates complicates the effect of R on da/dN for SUS 304 steel, that is, the crack opening stress intensity factor relative to the maximum stress intensity factor, $K_{op}/K_{\max}$ increased and consequently da/dN decelerated with $K_{\max}$ particularly under the condition that $\sigma_{\max}/\sigma_y$ is small. These results are very different from those of other materials and it becomes clear that these fatigue crack growth behaviors correspond to the state of the formation of martensite at the vicinity of fatigue crack surfaces.

Key words : Fatigue crack growth, 2017-T3 Al alloy, SUS 304 steel, Negative stress ratio, Compression stress, Stress induced martensite transformation

1 緒 言

繰返し負荷サイクルが完全に引張りである応力比 $R(\sigma_{\max}/\sigma_{\min})$ が正の場合の疲労き裂成長に及ぼす R の影響については、 R の増加に伴い疲労き裂成長速度 da/dN が増加することが知られており、応力拡大係数幅 ΔK あるいは最大応力拡大係数幅 $K_{\max}$ と R の値によって da/dN が定量的に整理されることが明らかにされている^{1)~3)}。一方、 $R < 0$ の場合、疲労き裂の中間成長速度領域におけるき裂成長に対しては、同一 $K_{\max}$ を基準にすると R の減少に伴って da/dN が増加する傾向が強いことが報告されており、このことについても $R > 0$ の場合と同様、き裂開閉口挙動から説明がなされている。そして、き裂開閉口比 U と R の関係あるいは ΔK と R を用いた疲労き裂成長速度式が提案^{7), 8)}されている。しかし、 $R < 0$ におけるき裂開閉口

には、 $R > 0$ の場合の支配因子である $K_{\max}$ あるいは ΔK と R のほかに負荷サイクル中に含まれる圧縮応力が重要な影響をもつことが指摘されており⁹⁾、この観点から、著者らは先に、S45C（中炭素鋼）および SUS329J1（二相ステンレス鋼）について、降伏応力に対する負荷サイクル中の圧縮応力の比 S_c/σ_y がき裂開閉口挙動を通して da/dN を支配する極めて重要な因子であることを定量的に明らかにした¹⁰⁾。

本研究では、前報に引き続き、さらに、2017-T3 Al 合金および SUS 304 鋼について、中間成長速度領域における疲労き裂成長挙動に及ぼす負の応力比の影響を種々の繰返し負荷条件下におけるき裂開閉口挙動の観測を通して検討した。

特に、SUS 304 鋼は塑性変形に伴う加工誘起マルテンサイト変態が起こることが知られており、疲労に

† 原稿受理 平成2年7月4日 Received July 4, 1990

* 正 会 員 愛媛大学工学部 松山市文京町, Faculty of Engineering, Ehime University, Bunkyo-cho, Matsuyama

** 愛媛大学工学部 松山市文京町, Faculty of Engineering, Ehime University, Bunkyo-cho, Matsuyama

においてもこれが影響をもたらし、最近ではこの変態によるき裂閉口が重要視されている^{11)~14)}。負の応力比の下でマルテンサイト変態が疲労き裂成長挙動にどのような影響を及ぼすかについては興味のもたれるところである。

2 供試材および実験方法

本実験に用いた材料は高力 Al 合金 (2017-T3) およびオーステナイトステンレス鋼 (SUS 304) で、それらの化学成分を Table I に示す。

両材の機械的性質を Table II に示す。

試験片は Fig. 1 に示す形状に加工後、エメリー紙、バフによる研磨を行い、疲労試験に供した。

Fig. 2 には両材の組織写真を示す。

疲労試験は電気油圧式引張圧縮試験機を用い、室温大気中において、繰返し速度が 15 Hz~20 Hz で、荷重一定条件で行った。

荷重条件は、 $R=0$ 、 -0.5 および -1 と降伏応力に対する最大応力の比 $\sigma_{\max}/\sigma_y$ が 0.14~0.4 の種々の組み合わせである。

き裂長さの測定は 0.01 mm まで読み取り可能な顕

Table 1. Chemical compositions of materials used (wt. %).

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
2017-T3	0.51	0.37	4.19	0.62	0.57	0.05	0.12	0.03
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	
SUS304	0.05	0.71	1.17	0.029	0.007	18.48	8.91	

Table II. Mechanical properties of materials used.

Material	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
2017-T3	349	452	18.6
SUS 304	271	659	75.8

Fig. 1. Shape and dimension of the test specimen.

(a) 2017-T3 Al alloy.

(b) SUS 304 steel.

Fig. 2. Microstructures of the specimens.

Table III. X-ray diffraction conditions.

X-ray apparatus		RIGAKU, RAX-10
Characteristic X-ray		CuK α (Monochro)
Tube voltage		35 kV
Tube current		25 mA
Diffract angle 2 θ		74.8° (γ), 82.3° (α)
Range		200 CPS
Step width		0.02°
Preset time		1.0 sec
Slit	DS/SS	1.0°
	RS	0.15 mm

微鏡を用いて行った。また、き裂の開閉口挙動はき裂近傍の自由表面に 5 連ひずみゲージを貼付し、引算回路を用いて測定した。測定時には繰返し速度を 0.5 Hz とした。

SUS 304 鋼における疲労き裂成長に伴って生じるマルテンサイト相は、リン酸-シュウ酸溶液を用いて電解腐食を行い光学顕微鏡観察により検出した。さら

に、マルテンサイト相を確認するために、疲労試験後の試験片破面上で X 線回折を行った。Table III に X 線回折条件を示す。なお、疲労破面上の X 線測定に際し、測定領域を大きく取るために一部の試験片については ΔK 一定試験を行った。

破面観察には走査型電子顕微鏡を使用した。

3 実験結果および考察

3・1 2017-T3 Al 合金について

Fig. 3 は、2017-T3 Al 合金について、降伏応力に対する最大応力の比 $\sigma_{\max}/\sigma_y$ がそれぞれ 0.14, 0.20 の

Fig. 3. Relationship between the fatigue crack growth rate, da/dN and the maximum stress intensity factor, K_{max} for 2017-T3 Al alloy.

条件下で R を変化した場合の疲労き裂成長速度 da/dN と最大応力拡大係数 K_{max} の関係を示したものである。 R の減少に伴い、また同一 R の場合は σ_{max}/σ_y の増加に伴いそれぞれ da/dN は上昇することが認められる。しかし、前報の S45C, SUS 329J1 (二相ステンレス鋼) および後述の SUS 304 鋼と比較すると、それらの da/dN に及ぼす影響は小さいことが示されている。

Fig. 4 は種々の R および σ_{max}/σ_y に対して、圧縮応力の大きさ S_c と降伏応力 σ_y の比 S_c/σ_y を基準に K_{op}/K_{max} (き裂開口応力拡大係数/最大応力拡大係数) を整理したものである。図中には前報の S45C 鋼、

Fig. 4. Relationship between K_{op}/K_{max} and S_c/σ_y (where K_{op} is the stress intensity factor at which crack opens, K_{max} is the maximum stress intensity factor, S_c is the compression stress in a cycle and σ_y is the yield strength, respectively).

SUS 329J1 鋼および後述の SUS 304 鋼のデータも合わせて示してあるが、 S_c/σ_y により K_{op}/K_{max} が良く整理できることが認められた。なお、ここで、 K_{op} は各材料ともにこれがほぼ一定値を示すき裂成長の定常域における値を採用した。ただし、後述のように、SUS 304 鋼は例外であり、負荷条件によっては K_{op} は一定値を示さないため、図中には範囲で示している。

これらのき裂開口挙動は da/dN とよく対応しており、本 Al 合金についても S45C 鋼および SUS 329J1 鋼と同様に、 S_c/σ_y がき裂開口挙動を通して da/dN を支配する重要な因子であることが示されたと言えよう。

この理由については、前報¹⁰⁾でも触れたように、次のように考えられる。ここで取り扱っている中間き裂成長速度領域ではき裂開口は主として塑性誘起開口によって支配されるから、き裂開口を誘起する最も大きな要因はき裂先端後方のき裂縁に生じた圧縮残留応力である。圧縮応力成分の存在する $R < 0$ の場合、この圧縮応力によりき裂先端近傍で逆降伏域が拡大される結果き裂縁の圧縮残留応力が緩和されるためにき裂開口応力が低下する傾向を示すものと考えられる。したがって、上述の S_c/σ_y 中の σ_y (降伏応力) が圧縮降伏応力に対応するものと考え、 S_c/σ_y の値が圧縮残留応力の緩和の程度を規定するためにこれによって K_{op}/K_{max} が支配され、したがって、 da/dN も支配されるものと理解される。

なお、本 Al 合金の da/dN の R や σ_{max}/σ_y 依存性および K_{op}/K_{max} の S_c/σ_y 依存性が他の材料に比較して小さいことについては、本合金における σ_{max}/σ_y が他の材料のそれに比較して小さい条件となっていることがその要因の一つであると考えられるが、これを大きくすると明確な中間成長速度領域が現われず、本研究の対象となるべき実験値が得られないので σ_{max} の大きい場合の実験は行わなかった。このことについては、今後、 σ_{max} を大きくする代わりにさらに R を減少させた実験を行うなど (たとえば $R = -2, -3$ の条件) なお検討の余地を残している。

3・2 SUS 304 鋼について

Fig. 5 に SUS 304 鋼の da/dN と K_{max} の関係を示す。本鋼が R の減少に伴って、また、同一 R に対しては σ_{max}/σ_y の増加に伴って (したがって、圧縮応力の増化に伴って)、 da/dN が増加する傾向は他の材料と同じである。すなわち、Fig. 4 に示したように、前述の各材料と同様、本鋼の場合にも基本的には S_c/σ_y によって K_{op} が、したがって、 da/dN が支配されるものと考えられる。

ところが、本鋼は負荷条件によって特異な da/dN と K_{max} の関係が示される。すなわち、Fig. 5 に見ら

Fig. 5. Relationship between the fatigue crack growth rate, da/dN and the maximum stress intensity factor, K_{max} for SUS 304 steel.

れるように, $\sigma_{max}/\sigma_y=0.29$ で, $R=-0.5$ と -1 の場合, K_{max} の増加に伴う da/dN の上昇割合に大きな変化が生じ, 特に, $R=-0.5$ における da/dN は, 低 K_{max} 時には $R=-1$ のそれに近い値から高 K_{max} 時には $R=0$ に相当するそれまで変化することが示される. このような傾向は $\sigma_{max}/\sigma_y=0.20$, $R=-1$ および $\sigma_{max}/\sigma_y=0.40$, $R=-0.5$ の場合にもわずかながら認められる. 各負荷条件における da/dN - K_{max} 関係の平均的な勾配を Table IV に示す. 本鋼のこの勾配は, $\sigma_{max}/\sigma_y=0.29$ で, $R=-0.5$ と -1 , 特に, 前者において小さい値を示す. これらの値は他の材料たとえば S45C と比較してもかなり低いことが認められる.

このように, SUS 304 鋼が他の材料では見られない特徴的なき裂成長挙動を示す理由として, 本鋼が加工誘起マルテンサイト変態を起こすことが関連しているものと考えられる. すなわち, Schuster^{(11), (12)} や Ritchie⁽¹³⁾ が指摘しているように, き裂先端近傍で生じるマルテンサイト変態による体積膨張がき裂先端近傍における圧縮残留応力を増大させるため, 塑性誘起閉口に加えて相変態誘起閉口効果が現われてくるものと考えられる.

Fig. 6 は K_{max} に対する K_{op}/K_{max} の変化を示したものである. 前述のように他の材料では K_{max} がほぼ一定値を示したのに対し, 本鋼では $R<0$ の場合, K_{max} の増加に伴い K_{op}/K_{max} が上昇する傾向を示し, 特に,

Table IV. Slope of da/dN - K_{max} relation for SUS 304 steel.

$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_y}$	R		
	$R=0$	$R=-0.5$	$R=-1$
0.20	—	—	2.36
0.29	2.38	1.89	2.00
0.40	2.33	2.23	2.36

Fig. 6. Relationship between K_{op}/K_{max} and K_{max} (where K_{op} is the stress intensity factor at which crack opens and K_{max} is the maximum stress intensity factor).

$R=-0.5$, $\sigma_{max}/\sigma_y=0.29$ においてこれが顕著であり, 他の材料とはき裂開口挙動が大きく異なる条件が存在することが認められた.

Fig. 7 に一例を示すように, 試験片のき裂縁にはマルテンサイト相と思われる相の生成が観察され, また X 線回折の結果, これがマルテンサイト相であることを確認した (Fig. 8). さらに, Fig. 7(a), (b) からも

(a) $R=-0.5$, $\sigma_{max}/\sigma_y=0.29$, $K_{max}=13.1\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

(b) $R=-0.5$, $\sigma_{max}/\sigma_y=0.29$, $K_{max}=20.4\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Fig. 7. Martensite phase formed at the vicinity of the crack surface for SUS 304 steel.

Fig. 8. The X-ray diffraction patterns at the fracture surface of SUS 304 steel.

明らかなように、 $K_{\max}$ の増加に伴ってマルテンサイト相の生成量が増加することも認められた。したがって、Fig. 6 に示された $K_{\max}$ の増加に伴う $K_{\text{op}}/K_{\max}$ の上昇はマルテンサイト変態誘起き裂閉口によってもたらされる現象であると理解される。

$R = -0.5$, $\sigma_{\max}/\sigma_y = 0.40$, $R = -1$, $\sigma_{\max}/\sigma_y = 0.29$ および $R = -1$, $\sigma_{\max}/\sigma_y = 0.40$ の各条件下においても多量のマルテンサイト相の生成が観察された。しかし、これらの条件下における $K_{\text{op}}/K_{\max}$ は $R = -0.5$, $\sigma_{\max}/\sigma_y = 0.29$ の場合に見られたほどの上昇が示されない。特に、 $R = -1$, $\sigma_{\max}/\sigma_y = 0.40$ においては圧縮応力が最も大きいことにより、Fig. 9 に示すように、破面が著しく押しつぶされるためき裂閉口（塑性誘起による）が起り難くなり、したがって、 $K_{\max}$ にかかわらず、 $K_{\text{op}}/K_{\max}$ が低い一定値を示すものと理解される。

以上のき裂開口挙動は da/dN の変化と良く対応しており、さらに、Fig. 10 に示すように有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} を基準に整理すると、負荷条件にかかわらず da/dN が良く整理されたことから、本鋼のき裂成長過程におけるマルテンサイト変態はき裂開口挙動を通して da/dN に複雑な影響を及ぼしていること

Fig. 9. The appearance of the fracture surface for SUS 304 steel. $R = -1$, $\sigma_{\max}/\sigma_y = 0.4$, $K_{\max} = 19.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Fig. 10. Relationship between the fatigue crack growth rate, da/dN and the effective stress intensity factor range, ΔK_{eff} .

Fig. 11. Relationship between the fatigue crack growth rate, da/dN and stress intensity factor range, ΔK .

が認められた。

つぎに、Fig. 11 は Fig. 5 の da/dN を ΔK で再整理したものである。前述の da/dN と $K_{\max}$ の間に特異な関係が見られた負荷条件のいずれも $\Delta K \sim 30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 付近から da/dN - ΔK 関係が定常状態になっている。また、同一 $\sigma_{\max}/\sigma_y$ でも ΔK が大きいほどマルテンサイト相の生成量が多い傾向も示されたことから、マルテンサイト変態あるいはこれの da/dN に対する寄与の仕方が ΔK と密接に関係しているものと思われる、興味の持たれる問題であるが、この点については今後の検討課題と考えている。

4 結 言

2017-T3 Al 合金および SUS 304 鋼について、中間成長速度域における疲労き裂成長に及ぼす負の応力比の影響を検討し、つぎのような結果が得られた。

(1) 両材ともに、S45C 鋼や SUS 329J1 鋼においても認められたように、降伏応力に対する負荷サイク

ル中の圧縮応力の比 S_c/σ_y が疲労き裂開口挙動を介して da/dN を支配する重要な因子となることを定量的に明らかにした。

(2) SUS 304 鋼の場合には疲労き裂成長に伴って生じるマルテンサイト変態が da/dN に及ぼす負の R の影響を複雑にし、特に、 $\sigma_{\max}/\sigma_y$ の小さい条件下では $K_{\max}$ の増加とともに $K_{Op}/K_{\max}$ が上昇し、また、これに伴って da/dN が減速し、他の材料とは異なった疲労き裂成長挙動が示される。このき裂成長挙動はマルテンサイト相の生成状況と良く対応することが認められた。

(平成元年5月23日 日本材料学会第38期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) R. G. Forman, V. E. Kearne and R. M. Engle, Trans. ASME, Ser. D, **89**, 459 (1967).
- 2) R. J. Cook, P. E. Irving, G. S. Booth and C. J. Beevers, Eng. Fract. Mech., **7**, 69 (1975).
- 3) C. J. Beevers, R. J. Cook, J. F. Knott and R. O. Ritchie, Met. Sci., **9**, 119 (1975).
- 4) T. W. Crooker, Trans. ASME, J. Eng. Ind., **93**, 893 (1971).
- 5) A. M. Sullivan and T. W. Crooker, Trans. ASME, J. Pressure Vessel Tech., **98**, 179 (1976).
- 6) 岡 有司, 福島 明, 三沢啓志, 児玉昭太郎, 材料, **34**, 1167 (1985).
- 7) 加藤昭彦, 栗原正好, 川原正言, 日本造船学会論文集, **153**, 336 (1982).
- 8) 太田昭彦, 佐々木悦男, 小菅通夫, 日本機械学会論文集, **43**, 3179 (1977).
- 9) R. Marissen, K. H. Trautmann and H. Nowack, Eng. Fract. Mech., **19**, 863 (1984).
- 10) 荻山博之, 佃 等, 曾山義朗, 材料, **39**, 408 (1990).
- 11) G. Scuster and C. Altstetter, Met. Trans., **14A**, 2077 (1983).
- 12) G. Scuster and C. Altstetter, ASTM STP 811, 445 (1983).
- 13) R. O. Ritchie, Proc. ICF6 New Dely, p. 235 (1984).
- 14) 村上理一, 楠川量啓, 秋園幸一, 日本機械学会論文集, A-53, 2004 (1987).
- 15) 小林英男, 日本機械学会論文集, A-49, 771 (1983).

書 評

“セラミックス系複合材料を知る事典”

日本複合材料学会 (編)

(1990年, (株)アグネ承風社発行, B6判, 336ページ, 2700円)

複合材料は21世紀における先進材料として期待されている。しかし、熱的な使用条件が苛酷になるに連れて、その期待はプラスチック系マトリックスの複合材料から金属系のマトリックス、さらにはセラミックスマトリックス系の複合材料へとシフトしている。本書は日本複合材料学会が次世代を担う複合材料をより多くの人々に知らせ、理解してもらうために、これまで編集発刊してきた「複合材料を知る事典」(昭和57年)、「金属基複合材料を知る事典」(昭和59年)、「プラスチック基複合材料を知る事典」(昭和61年)、「エラストマー系複合材料を知る事典」(昭和63年)に続く第5冊目である。

セラミックス系複合材料(以下 CMC と略す)について初心者向けあるいは一般人向けに分かりやすく書かれた読み物である。そして、興味を持続させるように各章節のタイトルも凝っており、斬新である。例えば、1/総論「傷ついてもバラバラになりません——構造用セラミックス——」、4/セメント・マトリックス「複合の本家ほんもと」、などである。また、所々にある豆知識、例えば「炭化珪素の略号」、「CVI」なども面白く、読む気にさせる。

セメントをマトリックスにする複合材料、PC コンクリートの緊張材として FRP が用いられているが、この関係分野にはかなりのスペースが割かれている。このような有機マトリックス複合材料とセラミックス複合材料が相互乗り入れ(複合ハイブリット)して、「異業種交流」が始まっている。

最後の方に一種の広告であるが、「わが社の自慢」がある。単なる広告でなく、特性データも載せてあり、これも知識を増やすうえで有益である。

B6判の場所を取らない本である。文庫本にしては値段が少々高いが、電車に乗るとき、旅行の時などにちょっと鞆に入れておき、取り出して読むのもよからう。

CMC がそのじん性が向上し、耐熱高強度の構造材料として、21世紀に向けて成長することを期待する。

(大阪工業技術試験所 中西洋一郎)