研究論文

5052-H34アルミニウム合金板の3%NaCl水溶液中における疲労き裂伝播特性に及ぼす表面欠陥の影響*

佐藤隆之介**・杜澤 達美***

加藤 一***・高山 善匡***

Effect of surface defect on fatigue crack propagation of 5052-H34 aluminum alloy sheets in 3 mass% NaCl aqueous solution*

Ryunosuke SATO**, Tatsumi TOZAWA***

Hajime KATO*** and Yoshimasa TAKAYAMA***

The fatigue crack propagation behavior has been investigated under tension-tension cyclic stress in air, distilled water and 3 mass% NaCl aqueous solution for 5052-H34 aluminum alloy sheet with a small blind hole as an artificial surface defect. The relationship between the maximum nominal stress $\sigma_{\max}$ and the number of cycle to failure (fatigue life) N_f is expressed as $\sigma_{\max}^n N_f = C$, where n is the stress exponent and C is constant. In 3% NaCl aqueous solution, the fatigue life and the stress exponent become lower than those in other environments and corrosion environment becomes dominant factor, as a result, fatigue cracks initiate and propagate irrespective of surface defects. The crack propagation rate in 3% NaCl aqueous solution is higher in the early stage of fatigue crack propagation than that in air, but in the later stage, the difference between the crack propagation rates in air and in 3% NaCl aqueous solution is not clear. In addition, the surface crack propagation rate is accelerated due to the corrosion effects in 3% NaCl aqueous solution, resulting in the flatter shape of crack front compared with those in air and distilled water.

Keywords: fatigue crack propagation behavior, 5052-H34 aluminum alloy sheet, artificial surface defect, 3% NaCl aqueous solution

(Received October 9, 1995)

1. 緒 言

優れた耐食性を有する Al-Mg 系合金は固溶体硬化および加工硬化で適度の強度を持ち、かつ成形加工性、溶接性などにも優れており、中でも中程度の Mg を含有する 5052 合金は、船舶、車両など広く一般に使用されている合金である¹⁾。しかし、腐食環境中で繰返し応力を受ける場合には、耐食性合金においてさえも疲労強度が著しく損なわれることが知られており²⁾、その疲労き裂伝播挙動の把握は重要な問題であるといえる。

近年、フェールセーフ設計の観点から、切欠きを有する試験片を用いた、破壊力学的手法によるき裂伝播挙動解析の有効性が指摘されており³⁾、種々の金属材料についての検討が活発に行われている。疲労き裂伝播挙動の検討は、一般に板厚を貫通するき裂に対して行われているが、通常、実際の構造物においては疲労き裂はまず表

面欠陥部を起点として発生、伝播するとされており⁴⁾、特に腐食環境中においてはその傾向が大きい。このような表面からの疲労き裂伝播挙動を検討するために、人工欠陥として小径ドリル穴^{5)~8)}などを有する試験片が採用されているが、それらの実験に用いられている材料の多くは鉄鋼材料が主であり、アルミニウム合金についての系統的な研究は比較的少ない。

そこで本研究では、供試材として 5052 合金の板材を用い、人工表面欠陥として小さな未貫通の穴を開けた試験片について、試験環境を大気中、蒸留水中および 3 mass% NaCl 水溶液中として、引張り-引張り型の疲労試験を行い、それぞれの試験環境において穴から発生する疲労き裂の伝播挙動について比較検討した。

2. 実験方法

供試材は 5052-H34 アルミニウム合金板材で、板厚は

* 軽金属学会第 87 回秋期大会 (平成 6 年 11 月) にて一部発表。

** 宇都宮大学大学院工学研究科 (宇都宮市)。Graduate School of Engineering, Utsunomiya University (Utsunomiya-shi, Tochigi)。

*** 宇都宮大学工学部 (宇都宮市)。Faculty of Engineering, Utsunomiya University (Utsunomiya-shi, Tochigi)。

Table 1 Mechanical properties of 5052-H34 aluminum alloy

0.2% off-set yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
199	258	10.5	76.8

Fig. 1 Shape and dimensions of specimen for fatigue test.

2 mm である。本合金の機械的性質および試験片形状を Table 1 および Fig. 1 に示す。試験片は、機械加工後、両面を粒径 $1\mu\text{m}$ のアルミナ粉末を用いてバフ研磨し鏡面に仕上げた。この試験片の平行部中央片面に直径が 0.5 mm で先端が半球状のボールエンドミルを用いて、深さ 0.6 mm の貫通穴を開け疲労試験に供した。なお、大気中を除く水溶液中での疲労試験片については、穴の周囲を引張り軸方向に 2 mm 、幅方向に 4 mm 程度残して、それ以外の部分は腐食を受けないように合成樹脂製の耐食塗料を用いてマスキングを施した。

疲労試験機は試作試験機で、クランク機構により圧縮ばねを変位させ、試験片に引張り-引張りの繰返し荷重を負荷する一定荷重試験機である。荷重制御はクランク偏心量を調節することにより行い、試験中の荷重の変化はほとんど確認されなかった。最小公称応力は 34 MPa 一定とし、最大公称応力は $165\sim 196\text{ MPa}$ の範囲で 4 種類（応力比： $0.17\sim 0.20$ ）変化させ、繰返し速度は 2.4 Hz 一定で試験を行った。試験環境は大気中、蒸留水中および蒸留水を溶媒とした $3\%\text{ NaCl}$ 水溶液中の 3 種類とし、蒸留水にはイオン交換した蒸留水を用いた。腐食疲労試験は約 1500 cm^3 の腐食液を満たした液槽中で行い、試験中の室温および液温は $25\pm 2^\circ\text{C}$ 一定とした。また、試験機には CCD カメラを取付けて、試験片表面のき裂伝播挙動をモニター画面上に表示し観察できるよう

Fig. 2 $S-N$ curves for specimens tested in air, distilled water and $3\%\text{ NaCl}$ solution on log-log graph paper.

にするとともに録画して、試験後に表面き裂全長 $2a$ をモニター画面上から測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 $S-N$ 曲線

大気中、蒸留水中および $3\%\text{ NaCl}$ 水溶液中における最大応力と破断までの繰返し数との関係を Fig. 2 に示す。図中には小穴を有しない平滑試験片の結果についても併記してある。まず、小穴を有する場合の結果をみると、蒸留水中における疲労寿命は大気中とほぼ変わらない結果を示しているが、 $3\%\text{ NaCl}$ 水溶液中においては、大気中に比べ疲労寿命が著しく低下している。 $3\%\text{ NaCl}$ 水溶液中での疲労寿命の低下の割合を大気中のものと比較して求めてみると、本実験の条件下において、応力が 196 MPa と高い側で約 $1/5$ 程度、 165 MPa と低い側で約 $1/20$ 以下程度となっており、応力が低くなるほどその低下の割合も大きくなっている。これは応力が低くなるにつれて疲労寿命が延び、試験片が腐食液にさらされる時間が長くなり腐食の影響をより多く受けた結果と考えられる。

次に、 $S-N$ 曲線がいずれの環境の場合も両対数軸上でほぼ直線とみなされることから、 $S-N$ 曲線を $\sigma_{\text{max}}^n N_f = C$ （ここで n は応力依存指数、 C は定数である）で近似し^{9),10)}、この直線の傾き $-1/n$ について考察する。直線の傾きは、小穴を有する試験片の大気中と蒸留水中の結果にはほとんど差異はみられず、応力依存指数は大気中で 15.8 、蒸留水中で 14.3 であった。一方、 $3\%\text{ NaCl}$ 水溶液中の場合には直線の傾きは前述の大気中、蒸留水中の結果に比べてかなり大きくなっている。 $3\%\text{ NaCl}$ 水溶液中の応力依存指数は 5.2 と $1/3$ 程度まで減少している。

Fig. 3 Electron micrographs of plane specimen surface tested in 3% NaCl solution. (a) and (b) are low and high magnification, respectively.

以上の結果より、3% NaCl 水溶液中における5052合金の腐食疲労においては、食塩水中の塩素イオンが疲労寿命低下の主要な支配因子となっており、水自体の影響は極めて小さいと考えることができる。

ここで、小穴を有しない平滑試験片の結果について考察する。大気中の場合には Fig. 2 の ■ 印で示すように、192 MPa と大きな荷重レベルで 2.5×10^6 回の繰返し応力を与えても、試験片表面にき裂は認められておらず、破断には至らなかった。これに対して、3% NaCl 水溶液中の場合には口印で示されているように、いずれの応力レベルにおいても破断しており、図に示すようにほぼ一つの直線で整理されている。また、Fig. 3 は3% NaCl 水溶液中における平滑試験片表面の電子顕微鏡写真である。試験片表面には多数のき裂が観察され、方位性孔食の溶解痕¹¹⁾と思われるモザイク状の凹凸とともにき裂先端には腐食ビットが見られる。

上述のような小穴を有する試験片および平滑試験片の結果は、大気中の場合には小穴による応力集中がき裂発生に重要な役割を果たしているのに対して、3% NaCl 水溶液中の場合には小穴の有無には関係なく、すなわち小穴での応力集中部に関係なく、腐食液にさらされている試料表面には比較的容易にき裂が発生することを示している。

3.2 き裂伝播速度

Fig. 4 は表面き裂全長の1/2である a と繰返し数 N と

Fig. 4 Relation between half crack length and number of cycles: (a) in air and (b) in 3% NaCl solution. Arrows indicate a very slowly propagating region.

の関係の一例で、(a)は大気中、(b)は3% NaCl 水溶液中での実験結果である。いずれの $a-N$ 曲線においても、き裂伝播の初期では比較的滑らかな進展を示している。しかし、繰返し数 N が増えるにつれてき裂が急激に進展する部分がみられ、その前段階には矢印で示されているようなき裂進展がほぼ停滞する領域も観察される。このき裂の急激な進展は大気中、蒸留水中で頻繁にみられ、3% NaCl 水溶液中では比較的少ない。これは大気中、蒸留水中に比べ3% NaCl 水溶液中では、Fig. 3(b) にみられるようなき裂先端の腐食ビットによる応力集中効果によりき裂が進展しやすい状態になったためと考えられる。

次に、各き裂長さにおけるき裂伝播速度 da/dN を増分多項式法¹²⁾により求めた結果が Fig. 5 である。なお、本実験では表面き裂長さに対応するき裂深さを測定し得なかったため、応力拡大係数の算出はできていない。よって、ここでは簡便さのために横軸に $\sigma_{\max} \sqrt{a}$ をとって整理した。また、これらのき裂伝播速度曲線は、前述したき裂の急激な進展のためかなりのばらつきを持ち、特に大気中について滑らかな変化を示さなかった。大気中と3% NaCl 水溶液中のき裂伝播速度は、本実験の条件下において、 $\sigma_{\max} \sqrt{a}$ が4.5より大きいき裂伝播後期には

Fig. 5 Relation between da/dN and $\sigma_{\max}\sqrt{a}$ for specimens tested in air and 3%NaCl solution.

Fig. 6 Relation between the ratio of the number of cycles to crack initiation to that to failure and maximum stress.

大きな相違はみられないが、 $\sigma_{\max}\sqrt{a}$ が4.5より小さいき裂伝播初期部分において相違がみられる。すなわち、3%NaCl水溶液中のき裂初期においては表面き裂伝播が助長されており約30倍程度速くなっている。しかし、その後は腐食生成物によるくさび効果¹³⁾によると考えられるき裂伝播速度の低下がみられ、 $\sigma_{\max}\sqrt{a}=4.5$ 付近でき裂伝播曲線は重なるようになる。これらの結果より、き裂伝播後期から破断に至るまでは腐食効果よりも応力が主要な支配因子となっているものと考えられる。

3.3 き裂発生比

Fig. 6はき裂発生比 N_i/N_f を最大応力 $\sigma_{\max}$ に対してプロットしたものである。ここで N_i はき裂長さ a が0.5 mmに達したときの繰返し数である。本実験の条件下における疲労寿命に対するき裂発生比は、大気中、蒸留水中では0.6~0.9、3%NaCl水溶液中では0.2~0.4となっており、3%NaCl水溶液中において1/3程度の小さな値

Fig. 7 Aspects of fatigue crack front shape ($\sigma_{\max}=175$ MPa): (a) in air, (b) in distilled water and (c) in 3%NaCl solution.

となることは明らかである。このことは3%NaCl水溶液中では疲労試験開始後、疲労寿命に対して早い時期にき裂が発生することを意味している。よって、前述のき裂伝播速度の挙動と考え合わせると、腐食環境の影響は疲労の初期に現れ、き裂の発生を早めるとともにき裂伝播速度を増加させるものと考えられる。特に早期でのき裂発生が疲労寿命を著しく低下させるものと推察される。

3.4 疲労破面

Fig. 7は疲労破面のき裂前縁形状を実体顕微鏡により観察したものである。それぞれの破面には疲労破壊特有の貝殻模様がみられ、この貝殻模様によりき裂伝播後期のき裂前縁形状の変化がうかがわれる。またこれら貝殻模様の中には(c)の例のように穴の底付近で乱れが生じ、W型になっているものも認められる。この原因としては、穴を開けるときに生じる加工硬化や、穴の両端エッジ部から進展してくるき裂が合体を完了するまでにかなりの期間を要する¹⁴⁾ためにき裂進展が遅れることなどが考えられる。

次に大気中および3%NaCl水溶液中の疲労破面の走査型電子顕微鏡写真をFig. 8に示す。大気中の場合、人工欠陥である穴の近傍(a)は起伏の激しい延性的な破

Fig. 8 Electron micrographs of fatigue fracture surface ($\sigma_{\max}=175$ MPa). The micrographs (a), (c), (e) and (b), (d), (f) show the features in air and 3%NaCl solution, respectively, and then (a), (b) in the early stage, (c), (d) in the steady stage and (e), (f) in the unstable stage.

面を呈しているが、3%NaCl水溶液中の人工欠陥近傍(b)は試験片表面と同様のモザイク状の凹凸がみられ、また人工欠陥内部にも腐食の影響がみられる。 $a=0.8$ mm程度のき裂伝播中期(c), (d)では、大気中においてはそれほど変化はみられないが、3%NaCl水溶液中においては腐食生成物の圧着などがみられる。この腐食生成物のくさび効果によりFig. 5で示したき裂伝播速度の低下が生じたものと推察される。破断近傍部分(e), (f)では、3%NaCl水溶液中の場合にはわずかに腐食ピットがみられるが、いずれの環境においても延性的な破面で明確な相違はみられない。

さらに疲労破面のき裂前縁形状 (Fig. 7) から表面き裂長さ a とき裂深さ b を測定し、アスペクト比 b/a を求

めて最大応力 $\sigma_{\max}$ に対してプロットした結果がFig. 9である。この値は板厚によって変化することが推察されるが、本実験においては大気中と蒸留水中では明確な相違はみられず0.75~0.95程度であり、3%NaCl水溶液中では0.55~0.75程度と、3%NaCl水溶液中では大気中に比べて最大40%程度低い値を示している。これは表面き裂長さ a がき裂深さ b に対して相対的に長くなっていること、すなわちき裂がより扁平になっていることを示している。この原因としては、表面き裂伝播速度の相違、特にき裂伝播初期における表面き裂伝播速度の大気中との差が大きいことが考えられる。北川ら⁹⁾は、高張力鋼板材の表面に人工ピットとして直径約0.52 mm、深さ約0.27 mmのドリル穴を開けた試験片を用いて引張り-引

Fig. 9 Relation between the aspect ratio of crack front shape and maximum stress for specimens tested in air, distilled water and 3%NaCl solution.

張りの腐食疲労について研究し、大気中と3%NaCl水溶液中では表面き裂の伝播には差はみられないと報告している。しかし、本研究での5052合金において差がみられるのは、Fig. 3 (b)にみられるように、繰返し応力下において試験片表面が著しく腐食されることにより生じたビットが、疲労初期のき裂伝播を助長することによるものと考えられる。

現在、き裂の深さ方向への進展に関する考察には不十分な点が多く含まれている。今後はさらに詳細な検討が必要であり、そのためにはき裂の深さ方向の変化の連続的な測定方法の確立が望まれるところである。

4. 結 言

本研究では、5052-H34アルミニウム合金板材に人工表面欠陥として小穴を開け、大気中、蒸留水中および3%NaCl水溶液中において引張り-引張りの疲労試験を行った。その結果、小穴から発生するき裂の伝播挙動に及ぼす腐食環境の影響について検討し、以下のことが知られた。

(1) 3%NaCl水溶液中で同時に繰返し応力を受ける場合、疲労寿命が著しく低下することが確認され、この疲労寿命の低下は主に早い段階でのき裂の発生に起因するものである。さらに、腐食疲労においては腐食環境が主要な支配因子となり、その効果は小穴の存在が無関係になるほど大きなものであった。

(2) 3%NaCl水溶液中においては疲労試験の開始まもなくき裂が発生し、本実験の条件下において、初期のき裂伝播速度は大気中に比べて最大30倍程度大きくなり、安定成長段階になると明瞭な相違はみられなくなった。

(3) 腐食により生じたビットの影響により、特に疲労初期の表面き裂伝播が助長されるため、大気中、蒸留水中に比べ、3%NaCl水溶液中ではき裂前縁形状がより偏平となる。

参 考 文 献

- 軽金属学会編：アルミニウムの組織と性質，軽金属学会，(1991)，256.
- 遠藤吉郎，駒井謙治郎：金属の腐食疲労と強度設計，養賢堂，(1982)，(i).
- P. C. Paris and F. Erdogan: Trans. ASME J. Basic Eng., **85** (1963), 528.
- 岡村弘之，城野政弘，片桐一宗，田中啓介，北川英夫，西谷弘信，酒井信介：総合材料強度学講座6 疲労強度学，オーム社，(1985)，13.
- 中島正貴，古橋和典，戸梶恵郎：材料，**43** (1994)，1328.
- 遠藤正浩，王 习兵：材料，**43** (1994)，1245.
- 後藤真宏，福島 茂，西谷弘信，皮籠石紀雄，宮川浩臣：材料，**43** (1994)，1334.
- 北川英夫，中曽根祐司，下平益夫：日本機械学会論文集 (A 編)，**51** (1985)，1026.
- 加藤 一，栗原健助，杜澤達美：軽金属，**31** (1981)，97.
- 加藤 一，杜澤達美：軽金属，**32** (1982)，473.
- 後藤健次郎，伊藤伍郎，清水義彦：軽金属学会第45回秋期大会講演概要，(1973. 11)，75.
- ASTM: ASTM Standard E647-93, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", (1993), 679.
- 遠藤吉郎，駒井謙治郎：金属の腐食疲労と強度設計，養賢堂，(1982)，28.
- P. R. Frise and R. Bell: Int. J. Fatigue, **14** (1992)，51.