論文および報告

アルミニウム合金の疲れ強さにおよぼす雰囲気および
エポキシ樹脂被膜の影響*

益本 功** 江原 隆一郎***

Effect of Atmosphere and Epoxy Resin Coating on
Fatigue Strength of Aluminum Alloy*

by Isao Masumoto** and Ryuichiro Ebara***

Abstract

It was experimentally confirmed that the fatigue crack propagation rate of steels is promoted by oxygen and/or humidity in air. And the improvement of fatigue strength of welded joints by epoxy-resin coating was attributed to its protective effect against air and humidity. It was also reported in the previous experiment that fatigue strength of 18-8 stainless steel was not improved by the epoxy-resin coating, because fatigue strength of this steel was not affected by oxygen and/or humidity at room temperature. The effects of atmospheres and the various coatings on the fatigue strength of aluminum alloy is studied in this report. The results obtained are as follows.

- 1) Fatigue strength of Al-4.5% Mg alloy is affected by oxygen and/or humidity in air. Humidity affects more detrimental on the fatigue strength of aluminum alloy than oxygen.
- 2) The fatigue strength of Al-4.5% Mg alloy can also be improved by epoxy-resin coating. The larger the stress concentration factor and the thicker the coating, the more the coating is effective.

1. 緒 言

著者らは、種々の構造用鋼材の疲れ強さに大気中の酸素あるいは水蒸気の微量の存在がいちじるしい影響をおよぼし、溶接継手の余盛趾端部にエポキシ樹脂を被膜することによる疲れ強さ改善効果は、被膜が大気を遮断し、疲れき裂の進展を遅らせるためであることを示した^{1),2),3),4),5),6)}。しかし、オーステナイト・ステンレス鋼については、疲れ強さが大気に影響されることが少ないので、溶接継手のエポキシ樹脂被膜効果もほとんど認められないことを明らかにした⁷⁾。そこで本研究ではさらにアルミニウム合金について、疲れ強さにおよぼす雰囲気の影響とエポキシ樹脂被膜効果との関連について検討した。

アルミニウム合金 AlMg4 および AlMg5 の溶接継手については H. Schwarz⁸⁾, J. Weller および R.

Weißgerber⁹⁾ がエポキシ樹脂被膜効果を認めているが、H. Uetz と M. Schick¹⁰⁾ は AlCuMg1 合金の切欠試験片を用いて平板疲れ試験を行い、エポキシ樹脂の被膜効果が認められないことを報告している。また、T. Broom と A. Nicholson¹¹⁾ は Al-4%Cu 合金の疲れ強さは大気中の湿度にいちじるしく影響されるので、水の浸透し難いブチルゴムを被膜することにより疲れ寿命が改善されることを報告している。

本実験では、溶接構造用の Al-4.5% Mg 合金を供試材とし、疲れ強さにおよぼす大気中の酸素および水蒸気の影響を明らかにすると共に、上記 Schwarz と Uetz らとの実験結果の異なるエポキシ樹脂被膜効果についても検討した。

2. 実験方法

1) 実験装置

種々の雰囲気中での実験は、これまでと同様に雰囲気調整タンク内で共振型平板曲げ疲れ試験機を用いて行なった。エポキシ樹脂を被膜した丸棒試験片の疲れ実験には小野式回転曲げ疲れ試験機を使用した。

* 原稿受付 昭和46年7月30日(46年度秋季全国大会に発表)

** 正 員 名古屋大学工学部 Member, Faculty of Eng.
Nagoya University*** 正 員 九州工業大学 Member, Kyushu Institute
of Technology

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of tested Al-4.5% Mg alloy

Specimens	Chemical compositions (wt %)								Mechanical properties		
	Cu	Fe	Si	Mg	Mn	Zn	Cr	Ti	$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	ϵ , %
Plate	<0.01	0.16	0.07	4.36	0.69	<0.01	0.17	0.01	18.2	32.3	16.1
Bar	0.01	0.15	0.08	4.32	0.06	0.01	0.05	<0.01	28.5	32.6	15.5

2) 供試材および試験片

供試材としては, Table 1 に示す化学組成と機械的性質を有する Al-4.5% Mg アルミニウム合金を用いた. 平板試験片は同表の板厚 6.5 mm の板から, Fig. 1 a) に示すこれまで鋼材の疲れ試験に用いたものと全く同様の形状のものを用いた. 平行部の巾 30 mm, 長さ 130 mm の中心に丸穴切欠をつけ, 切欠部を 800 番エメリー紙で研磨した.

また, 丸棒試験片は直径 23 mm の丸棒から Fig. 1 b), c), d) に示す 3 つの形状のものを作製した.

Fig. 1 Fatigue test specimens

- plate specimen with round hole notch
- collared bar specimen, $R=0.3$ and 2.25 mm
- round notched bar specimen
- plain bar specimen

3) 被膜

突起付丸棒試験片に, 市販の各種のエポキシ樹脂, 合成ゴム, 塩化ビニルおよびアクリル・エマルジョンを被膜し実験に供した. 被膜の方法は, 鋼材の場合と同様に樹脂は鑄込み法により約36時間放置硬化し, 他は刷毛を用いて数回塗布後自然乾燥した.

3. 実験結果ならびに考察

1) 種々の雰囲気中での疲れ試験結果

Fig. 2 は種々の雰囲気中での疲れ試験結果である. 図中—▲—印は乾燥窒素中での実験結果であり, —○—印で示す大気中での実験結果に比べると, 顕著な疲れ強

Fig. 2 S-N curves of Al-4.5% Mg alloy plate specimen in various atmospheres

さの増加が認められる. 繰返し数 10^6 回における乾燥窒素中での時間強さは約 15.5 kg/mm^2 で, 大気中での時間強さ約 11.5 kg/mm^2 に比べ, 4 kg/mm^2 高くなっている.

図中●印は乾燥空気, △印は湿った窒素雰囲気中での実験結果である. 鋼の場合には, 乾燥空気中と湿った窒素中とで実験結果の著しい相違が認められなかったが, 本実験のアルミニウム合金の場合, 乾燥空気中では湿った窒素中よりも疲れ寿命のかかなりの増加が認められる.

鋼の場合には, 水蒸気を含む窒素中での疲れ強さは大気中での疲れ強さよりも大であったが, アルミニウム合金の場合は水蒸気の影響が顕著で空気中と同程度の疲れ強さになっている.

2) 疲れ寿命におよぼす相対湿度の影響

上述のごとく, Al-4.4% Mg 合金の疲れ強さに湿度が強く影響することを認めたので, 窒素雰囲気中で相対湿度を種々変え, 一定繰返し曲げ応力 16.7 kg/mm^2 で平板疲れ試験を行い, さらに湿度の影響について定量的な検討を加えた. その結果を Fig. 3 に示す.

同図には, 既報²⁾の鋼についての実験結果も図示してある. アルミニウム合金の場合には, 相対湿度20%で急激な寿命の増加が認められ, 鋼の場合と同様な傾向を示している.

J.A. Dunsby と W. Wiebe も 2024-T3 合金の疲れ寿命が大気中の湿度の影響を強く受けることを示し, 相対湿度90%における疲れ寿命は相対湿度12%における疲れ寿命の $\frac{1}{2}$ に減ずることを報告している¹²⁾. Fig. 3 の実

Fig. 3 Influence of relative humidity on fatigue life

Note: alternative bending stress 16.7 kg/mm² for aluminum alloy plate and 32 kg/mm² for high strength steel plate

Fig. 4 Influence of oxygen content on fatigue life

Note: alternative bending stress 16.7 kg/mm² for aluminum alloy plate and 32 kg/mm² for high strength steel plate

験結果では、相対湿度75%での疲れ寿命は相対湿度20%での疲れ寿命の1/2であり、ほぼ同様の結果を示している。

3) 疲れ寿命におよぼす酸素濃度の影響

Fig. 4 は雰囲気調整タンク内で乾燥酸素および乾燥酸素混合ガス雰囲気の酸素含量を種々変え、一定応力 16.7 kg/mm² で平板疲れ試験を行った結果である。

同図に既報²⁾の高張力鋼による実験結果も点線で同時に示している。

Al-4.5%Mg アルミニウム合金の場合には、ばらつきが大であるが、酸素濃度1%以上で疲れ寿命の低下が認められ、高張力鋼の場合と同様の傾向を示すものと思われる。

4) 疲れ寿命におよぼす種々の被膜の影響

既報⁶⁾の鋼材の場合と同様に、突起付丸棒試験片に種

々の被膜を施し、一定繰返し曲げ応力 13.6 kg/mm² で回転曲げ疲れ試験を行った。その結果を Table 2 に総括して示す。同表には、既報¹⁾の軟鋼についての値も比較のために示してある。

鋼材の場合と同様に、Al-4.5%Mg 合金の場合もエポキシ樹脂Eセットの被膜により疲れ寿命は最も延び、ポリアミン系の硬化剤使用の樹脂および合成ゴムはほとんど効果なく、塩化ビニルおよびアクリル・エマルジョンはむしろ疲れ寿命を減少させている。

Fig. 5 は被膜しない試験片およびエポキシ樹脂Eセット被膜試験片のS-N曲線である。繰返し数10⁶回での時間強さの増加率は26%であり、既報⁶⁾の種々の鋼材の場合と同程度である。エポキシ樹脂被膜による疲れ寿命および繰返し数10⁶回における時間強さの増加の程度は Fig. 2 に示した平板試験片の乾燥窒素中の寿命およ

Table 2 Influence of various coatings on fatigue life of Al-4.5% Mg alloy (Rotating bending stress, 13.6 kg/mm²)

Kinds of coating	Number of cycles to fracture × 10 ⁵	Relative fatigue life	Relative fatigue life (mild steel, rotating bending stress, 20.65kg/mm ²)
No coating	0.943 } average 0.712 } 0.827	1.0	1.0
E ₅ *+Polyamine	1.220 } 2.083 } 1.651	2.0	1.5
E ₅ *+Polyamide	3.687 } 5.393 } 4.540	5.5	3.5
E set (E*+Polyamide)	4.854 } 6.318 } 5.586	6.7	8.0
Filler A*+Polyamine	4.778	5.8	2.1
Synthetic rubber	0.794 } 0.989 } 0.891	1.0	—
Vinyl chloride	0.333 } 0.350 } 0.341	0.4	—
Acrylic emulsion	0.512 } 0.920 } 0.716	0.8	—

Note, *: Each E₅, E and Filler A is a kind of epoxy resin in market. Filler A contains aluminum powder.

Fig. 5 Effect of epoxy resin coating on fatigue strength of Al-4.5% Mg alloy by rotating bending fatigue test ($R=0.3$ mm, stress concentration factor 2.6)

び 10^6 回時間強さの大気中に対する増加の傾向と良く一致している。したがって、アルミニウム合金のように、疲れ強さがいちじるしく雰囲気により影響される場合には、エポキシ樹脂による遮断効果により疲れ強さ改善効果が現われるものと思われる。しかしながら、疲れ限度 (10^7 回) の増加率は約10%であり、既報⁶⁾で述べた鋼材の場合に比べ、かなり小さい。

この実験結果に関連し、W. Engelmaier も 2024-T3 アルミニウム合金の超高真空 10^{-10} mmHg における疲れ限度が大気中での疲れ限度と全く変わらないことを示している¹³⁾。すなわち、アルミニウム合金の疲れ限度は雰囲気の影響を受けることが少なく、したがって、エポキシ樹脂による疲れ限向上率もわずかであったものと思われる。

5) 被膜条件の相違によるエポキシ樹脂被膜の効果

i) 試験片の形状係数の影響

既報⁶⁾の鋼材の場合と同様に、突起付丸棒試験片の R を変えて、形状係数の異なる試験片を用い、回転曲げ疲れ試験によりエポキシ樹脂被膜の効果を比較した。

Fig. 6 および Fig. 7 にそれぞれ、形状係数1.0および1.5の場合の結果を示す。既述の Fig. 5 の実験結果は形状係数2.6の場合である。軟鋼の場合と同様に、形状係数の大きいほど寿命の増加率は大きい。

ii) 試験片の粗さの影響

Fig. 1 c) に示すU切欠付試験片の切欠底を80番およ

Fig. 6 Effect of epoxy resin coating on fatigue strength of Al-4.5% Mg alloy by rotating bending fatigue test (plain bar specimen, stress concentration factor=1)

Fig. 7 Effect of epoxy resin coating on fatigue strength of Al-4.5% Mg alloy by rotating bending fatigue test ($R=2.25$ mm, stress concentration factor=1.5)

Note: ⊗ fractured at a neck of specimen outside of coating

び800番のエメリー紙で研磨し、金属表面仕上程度によるエポキシ樹脂の密着性の相違と疲れ強さにおよぼす被膜効果との関連について調べた。その結果を Table 3 に示す。表面の粗い試験片に比べて、こまかい試験片における被膜効果が大きくなっている。この結果は、既報⁶⁾の軟鋼の場合と相反するので、金属表面の影響については今後さらに検討する必要がある。

iii) エポキシ樹脂被膜厚の影響

Fig. 1 b) に示す試験片にエポキシ樹脂を鋳込んで被膜した後、切削加工により種々の被膜厚さとし、一定繰返し曲げ応力 13.6 kg/mm² で回転曲げ疲れ試験を行なった。その結果を Fig. 8 に示す。被膜厚さの増加と共に相対寿命、すなわち、エポキシ樹脂を被膜した試験片の疲れ寿命に対する被膜しない試験片の疲れ寿命の比は

Table 3 Influence of surface roughness on relative fatigue life by epoxy resin coating (Rotating bending stress, 8.85 kg/mm²)

Surface roughness	a) No coating	b) Epoxy resin coating	b/a
Polished with No. 80 emery paper	1.303×10^5	21.14×10^5	16.2
Polished with No. 800 emery paper	0.901×10^5	27.91×10^5	31

Fig. 8 Influence of epoxy resin thickness on fatigue life of Al-4.5% Mg alloy at rotating bending stress, 13.6 kg/mm^2

Note: Relative fatigue life=fatigue life of epoxy resin coated specimen/fatigue life of uncoated specimen

大になっている。同図の点線は、既報⁹⁾の鋼材の場合の実験結果を示すものであるが、まったく同様の傾向を示

し、 $1 \sim 1.5 \text{ mm}$ 以下の被膜厚さではじゅう分な効果が期待できないことがわかる。

6) 破面観察

乾燥窒素および酸素濃度 1 % 以下の乾燥窒素および乾燥酸素混合雰囲気中での疲れ破面は、大気中、乾燥空気および湿った窒素中での破面に比べ、金属光沢が顕著であり、破面の変形量は大きであった。

走査型電子顕微鏡による観察でも、大気中での破面に比べ乾燥窒素中での破面にはこまかい凹凸が多く認められた。Photo. 1 にその一例を示す。

Photo. 2 はエポキシ樹脂を被膜した場合としない場合との切欠近傍の走査型電子顕微鏡によるフラクトグラフの比較である。被膜しない試験片に比べて被膜試験片の破面が非常にこまかいことが認められる。

a) in air cycles 4.7×10^4

b) in dry nitrogen cycles 5×10^5

Photo. 1 Scanning electron microfractographs of Al-4.5% Mg alloy plate fractured by bending fatigue test at bending stress 16.7 kg/mm^2 (Arrow shows the direction of crack propagation) $\times 600$

a) uncoated cycles 3.2×10^5

b) epoxy resin coated cycles 3×10^6

Photo. 2 Scanning electron microfractographs of uncoated and epoxy resin coated Al-4.5 % Mg alloy bar fractured by rotating bending fatigue test at bending stress 11.8 kg/mm^2 (Arrow shows the direction of crack propagation) $\times 60$

4. 結 言

Al-4.5%Mg 合金の疲れ強さにおよぼす雰囲気の影響および被膜効果について, 雰囲気調整タンク内での平板曲げ疲れ試験および小野式回転曲げ疲れ試験による実験結果から次のことが明らかになった。

- 1) Al-4.5%Mg 合金の疲れ強さには, 大気中の酸素および湿度の影響が同程度に顕著である。
- 2) Al-4.5%Mg 合金の疲れ強さは, エポキシ樹脂の被膜によって改善でき, この改善効果は試験片の形状係数が大なる程, また被膜厚さが厚い程大である。

最後に, 本研究を行なうにあたり, 材料を提供していただいた住友軽金属株式会社, 試験片の加工に御協力いただいた興和工業株式会社および走査型電子顕微鏡の使用を許可された日本電装株式会社に深甚の謝意を表したい。また, 学部学生伊藤和俊君の熱心な協力にも感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 益本 功, 上田勝彦, 江原隆一郎: “軟鋼の疲れ強さにおよぼす雰囲気の影響”, 溶接学会誌, 39 (1970), 8, 61~68
- 2) 益本 功, 江原隆一郎, 上田勝彦: “高張力鋼の疲れ強さにおよぼす雰囲気の影響”, 溶接学会誌, 39 (1970), 9, 74~80

- 3) 益本 功, 江原隆一郎: “種々の雰囲気における鋼材の疲れき裂に関する二, 三の観察”, 溶接学会誌, 40 (1971), 2, 74~82
- 4) I. Masumoto, R. Ebara and K. Ueda: “Effect of atmosphere on the fatigue strength of steels”, Metal Construction and British Welding Journal 2 (1970), 10, 423~426
- 5) 益本 功, 江原隆一郎: “金属材料の疲れ強さにおよぼす被膜および雰囲気の影響に関する研究の概観”, 溶接学会誌, 40 (1971), 4, 6~19
- 6) 益本 功, 江原隆一郎: “合成樹脂による鋼材の疲れ強さ改善の原因について”, 溶接学会投稿中
- 7) 益本 功, 江原隆一郎: “オーステナイト・ステンレス鋼の疲れ強さにおよぼす雰囲気およびエポキシ樹脂被膜の影響”, 溶接学会投稿中
- 8) H. Schwarz: “Erhöhung der Dauerfestigkeit von Schweisskonstruktionen durch Plastüberzüge”, Schweißtechnik 17 (1963) 5, 61~66
- 9) J. Weller und R. Weißgerber: “Über den Einfluß von Kunstharz-Überzügen auf die Dauerfestigkeit von AlMg-Legierungen”, Aluminum 40 (1964) 12, 760~762
- 10) H. Uetz und M. Schick: “Einfluß einer Abdeckung der Probenoberfläche auf die Dauerschwingfestigkeit metallischer Werkstoffe”, Schweissen und Schneiden 19 (1967) 11, 517~521
- 11) T. Broom and A. Nicholson: “Atmospheric Corrosion-Fatigue of Age-Hardened Aluminum”, Journal of the Institute of Metals, 89 (1960-61), 183~190
- 12) J.A. Dunsby and W. Wiebe: “Effect of Atmospheric Humidity on Aircraft Structural Alloy Fatigue Life”, Materials Research and Standards 9 (1969), 2, 15~22
- 13) W. Engelmaier: “Fatigue Behavior and Crack Propagation in 2024-T3 Aluminum Alloy in Ultrahigh Vacuum and Air”, Transactions of the Metallurgical Society of AIME 242 (1968), 8, 1713~1718

IIW (国際溶接学会)

1971年度文献リストの頒布

IIW には16の委員会と1つの研究班があり, 各国より種々の論文, 報告等が発表され, 討議されておりますが, IIW 本部には, これらの資料を年度ごとにまとめた文献リストを作製しております。

1971年度の文献リストが到着しましたので, 下記の領にて頒布いたします。要

体裁 A 4版, 青焼, 表紙なし, 55ページ

内容 英文。資料の題目, 著者名, 国名, 文献番号,

使用言語を委員会毎に配列。

頒価 ¥1000 (送料を含む)

申込み方法

「1971年度 I I W 文献リスト」と明記の上,
①申し込み者名 ②送付先住所 ③電話番号
を書き添えて, 本会宛, 申し込んで下さい。
文献リストに記載されている資料は, 本会に
保存してありますので, 御希望の方には複写
サービスを致します。

註