アルミニウム合金 A6N01 押出形材溶接継手の 疲労強度とその改善法

正員 松 岡 一 祥* 正員 上 村 武**
鎌 田 敬 治**

Fatigue Strength of As Welded and Improved Joints of 6N01 Aluminium Alloy Extrusions

by Kazuyoshi Matsuoka, *Member* Takeshi Uemura, *Member*
Keiji Kamata

Summary

In this paper, the fatigue strength of welded joints of 6N01 aluminium alloy extrusions is studied. Less copper content ($Cu \leq 0.02\%$) alloys were chosen, taking corrosion resistance to sea water into consideration. Two series of specimens were prepared. One is non-load carrying transverse fillet welded cruciform joint (T-TYPE), and the other has two longitudinal stiffeners welded on both sides of the main plate (L-TYPE). For L-TYPE, three types of specimens, changed in details of end of longitudinal stiffeners from the conventional corner boxing, were arranged. For some specimens, weld toes were ground with a pencil grinder. Using the specimens, fatigue tests under axial tensile loading ($R=0$) were carried out.

In the fatigue test results, evident differences existed. The fatigue strength of ground T-TYPE specimen was highest, and that of as welded L-TYPE ones was lowest. The fatigue strength of as welded T-TYPE specimens was higher than that of ground L-TYPE ones. These SN data were consolidated and yielded to one SN curve, using the equivalent stress, taking the maximum stress into account. The equivalent stress S_{eq} was expressed as follows;

$$S_{eq} = S^m \cdot S_{\max}^{1-m} = K S_n \cdot \left(\frac{1}{1-R} + \frac{S_R}{K S_n} \right)^{1-m}$$

where $S_{\max}$ =maximum stress, R =stress ratio, m =constant, S =stress range, K =stress concentration factor, S_n =nominal stress range, and S_R =residual stress.

In the last part of the paper, some techniques for improving the fatigue strength of corner boxing welds are illustrated.

1. 緒 言

近年、大型の軽構造高速船の計画、建造が増加している。これらの船舶の構造材料にはアルミニウム合金が使用される場合が多い。

わが国で船舶の構造用材料として使用が認められているアルミニウム合金には、5052, 5083, 5086, 5456, 6061, 6N01 がある¹⁾、これらの中で 5083 が、板材 (O, H 32,

H 321) および形材 (H 112) として使用実績が多い。一方、押出性の良好な 6N01 も、船体の上部構造を中心に使用され始め、主要構造部材への適用も検討されている²⁻⁴⁾。

5083 は使用実績も多く、熟成した材料であり、疲労強度についての検討も多い⁵⁻⁹⁾。また、合金組成にあまり違いのない 5086 の結果¹⁰⁾も参照できる。しかし、6N01 の疲労強度に関しては、2, 3 の報告^{11,12)}が見られるだけであり、溶接継手特にすみ肉溶接継手の疲労強度に関する情報が求められている。

本報告は、A6N01S-T 5 材のすみ肉溶接継手の疲労強度およびその改善法を取り扱う。まず、アルミニウム合金溶接継手の疲労強度について 5083 を中心に概説する。6N01 については、試験方法、試験結果を示した後、応力集中と溶接残留応力を考慮した疲労強度の評価法を示す。ここで

* 運輸省船舶技術研究所

** 石川島播磨重工業(株)技術研究所

は、6N01の疲労強度に及ぼす残留応力の影響が、5083と相当に異なることが明かにされる。最後に、疲労強度の改善方法について2, 3の例を示す。

2. アルミニウム合金溶接継手の疲労強度

2.1 傾斜部と 10^7 回強度

アルミニウム合金に疲労限度は存在しない。そこで、 10^7 回強度を疲労限界に代えて用いる。また、 10^6 回以下の繰返し数では両対数のSN関係にほぼ直線の傾斜部があるが、それ以上ではSN線図の傾斜はゆるやかになる。

2.2 応力集中の影響

アルミニウム合金の溶接継手の疲労強度にも、鋼材の場合と同様に応力集中および残留応力の影響がある。疲労強度に及ぼす応力集中の影響を応力集中係数により下式で評価する場合がある。

$$S = K_s \cdot K_w \cdot S_n \quad (1)$$

ここに、 S はSN関係の応力範囲、 K_s は構造的応力集中係数、 K_w は溶接部の局所的応力集中係数、 S_n は公称応力範囲である。

鋼材、特に軟鋼の場合、 K_w による評価は成功したとはいえない。そこで、いわゆるホットスポット応力手法が用いられる。一方、アルミニウム合金の溶接継手では(1)式による評価が広範囲に適用可能である。酒井ら^{6,13)}は、A5083P-Oの母材及び溶接継手の疲労試験を行い、試験結果に応力集中係数を乗じて整理し、母材と溶接継手の疲労強度にはほとんど差がなく、A5083P-O材では母材と溶接部のSN曲線の傾斜部が統一的に取り扱えることを示した。これは、アルミニウム合金では一般的な傾向である。

傾斜部表現の適用範囲は、溶接部の方が長寿命側に広く、傾斜部を越える長寿命側の疲労強度は溶接部の方が小さくなる。すなわち、アルミニウム合金で母材と溶接部の応力集中と疲労強度を統一的に取り扱えるのは、SN線図の傾斜部であり、これを越える長寿命側では母材のSN線図から溶接部の疲労強度を推定することは危険である⁹⁾。

2.3 溶接残留応力の影響

疲労強度に及ぼす溶接残留応力の影響は平均応力の効果として説明されることが多い。疲労強度に及ぼす平均応力の影響を表すモデルとして、以下の3つがよく知られている。

- (a) 西原の疲労限界線図または真破断強度を用いた修正グッドマン線 (Fig. 1 参照)

$$S(S_m) = S_0 \cdot (1 - S_m/S_T) \quad (2)$$

- (b) 修正グッドマン線図 (Fig. 2 参照)

$$S(S_m) = S_0 \cdot (1 - S_m/S_B) \quad (3)$$

- (c) ゲルバー曲線 (Fig. 2 参照)

$$S(S_m) = S_0 \cdot [1 - (S_m/S_B)^2] \quad (4)$$

ここに、 $S(S_m)$ は平均応力 S_m での疲労強度、 S_0 は平均応力0での、すなわち両振りでの疲労強度、 S_T は真破断強度、

Fig. 1 Nishihara's fatigue limit diagram

Fig. 2 Constant lifetime diagram of aluminium alloys¹¹⁾

S_B は引張強度である。鋼材の疲労強度特に疲労限界については、ほとんどの結果が、引張強度を用いた修正グッドマン線とゲルバー曲線の間にはいる。そこで、最も安全な(b)を用いれば良いといわれている。しかし、アルミニウム合金の場合、Fig. 2に見られるようにばらつきが大きく、統一的に取り扱うことができない。Fig. 2のばらつきの原因としては、1) 合金組成の違い、2) 冷間加工度および耐力の違い、3) 傾斜部 (10^6 回)と長寿命域 (10^7 回)のデータの混在、などが考えられる。そこで材料毎に各時間強度 (溶接部に対しては特に傾斜部)での平均応力の影響を把握しておく必要がある。

以下に、平均応力あるいは残留応力の影響を表す2つの方法を紹介する。

(1) 最大応力効果

米国軍用規格 MIL-HDBK-5 D¹⁴⁾では、航空機用アルミニウム合金の各種応力比で得られた複数のSN曲線を、以下の等価応力(範囲)に換算して整理し、1本のSN曲線に縮約するものとしている。

$$S_{eq} = S_{max} \cdot (1 - R)^m \quad (5)$$

$$\log N = a + \beta \cdot \log S_{eq} \quad (6)$$

ここに、 S_{eq} は等価応力(範囲)、 S_{max} は最大応力、 R は応力比、 m は最適定数、 N は破断までの繰返し数である。

母材の疲労試験では、応力範囲 S は $(1 - R) \cdot S_{max}$ であるから、(5)式は以下のように書き直される。

$$S_{eq} = S^m \cdot S_{max}^{1-m} \quad (7)$$

すなわち、(6)式の等価応力範囲は応力範囲に最大応力の効果を考慮したものと考えられる。また、(6)式は、 $S = S_{\max}$ となる片振り試験 ($R=0$) の SN 曲線と一致する。

(5)～(7)式が成立する場合、各種応力比の疲労試験結果の傾斜は β により一定となる。実際に、各種応力比の疲労試験結果の SN 曲線の傾斜が一致することはまれであることから、個々の応力比の SN 曲線の β は多少異なっても平均的な β を算出する手法¹⁵⁾と考えられる。

(2) 平均応力効果

上述の最大応力の効果を考慮した等価応力範囲は、SN 曲線の勾配が応力比により著しく変化する場合には適用できない。A5083P-O, A5083S-H 112 および A5086S-H 112 母材の疲労試験結果⁵⁻¹⁰⁾を整理すると、これらの疲労強度はほぼ等しく、 $R=-1$ で $\beta=-9$, $R=0$ で $\beta=-6$, 平均応力が 130 MPa あるいは最大応力が 0.2% 耐力 ($S_{0.2}$) 程度の場合には β は -3 であった⁹⁾。このような場合、平均的な β を用いる前述の等価応力範囲では誤差が大きくなり過ぎる。そこで、残留応力あるいは平均応力の影響は個々の寿命に関して平均応力と疲労強度の関係で表さざるを得ない。

Fig. 3 に A5083P-O 材の 10^6 回疲労強度 (母材でも傾斜部と考えられる) と平均応力の関係⁹⁾を 6N01¹¹⁾と比べて示した。6N01 ではほぼ修正グッドマン線に従う (平均応力が大きい場合には修正グッドマン線より若干平均応力効果が小さいと考えられる) のに対し、5083 では平均応力による疲労強度の低下が修正グッドマン線より著しいことがわかる。

3. A6N01S-T5 溶接継手の疲労試験

3.1 材料, 試験片, 試験項目

A6N01S-T5 の厚さ 12 mm, 幅 100 および 150 mm の帯板を押出しして用いた。板厚 12 mm は日本海事協会が設定している最大板厚である¹⁾。化学成分を Table 1 に示した。銅含有量は耐海水性の観点から 0.1% 以下⁹⁾で、できるだけ少なくしている。Table 2 に機械的性質を示した。

溶接には JIS Z 3232 A5356-WY の直径 1.6 mm のワイヤを用いた。化学成分を Table 3 に示した。溶着金属の引張強度は 282 MPa であった (規格値は 270 MPa 以上)。

Fig. 4 に試験片の形状を示した。T-TYPE は横りブ付き荷重非伝達すみ肉溶接継手, L-TYPE は縦りブ付き荷重非伝達すみ肉溶接継手である。L-TYPE では、角の溶接方法を変えた 4 種の試験片を用意した。Fig. 5 に L-TYPE の 4 種の角の形状を示した。図中の○は溶接の始点, ×は終点を表している。L0 は一般的な角回し溶接, LA は角を仮付けして塞いだ後両側の溶接を延ばしたもの, LB は角を塞がずに両側の溶接を延ばしたもの, LC は LA で延ばしたビードの始末端を研削したものである。L0 および T-TYPE 試験片については止端部を研削したものも用意した。

Fig. 3 Constant lifetime diagram of A5083 and A6N01 alloys (10^5 cycles)

Table 1 Chemical composition of A6N01 alloy (wt. %)

Note	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Regulated	0.04~0.9	≤0.35	≤0.35	≤0.50	0.40~0.8	≤0.30	≤0.25	≤0.1	Bal
Presented	0.75~1.77	0.18	≤0.02	0.20~0.22	0.50~0.54	<0.01	0.06~0.08	0.02	Bal

Table 2 Mechanical properties of A6N01 alloy

Note	Tensile Strength S_B (MPa)	0.2% Offset $S_{0.2}$ (MPa)	Elongation (%)
Regulated	245 ≤	206 ≤	8 ≤
Presented	281~296	266~281	15.6~19.0

Table 3 Chemical composition of weld wire (wt. %)

Note	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other	Al
Regulated	<0.25	<0.04	<0.10	0.05~0.20	4.5~5.5	0.05~0.25	<0.10	0.06~0.20	<0.05	Bal
Presented	0.06	0.11	0.01	0.12	5.0	0.09	0.01	0.09	<0.01	Bal

T および L0-TYPE の試験片については切り出し法による残留応力の計測および応力集中部のひずみ測定を行った。

止端部をグラインダ研削し、止端部 R 底に 3 番目のゲージが当たるように 5 素子応力集中ゲージを貼付した。さらに、止端部から、10, 20, 70 mm の位置の測定も行った。止端部の残留応力としては、止端部 R 底の値を採用した。応力集中ゲージによる最大計測値から応力集中率を求め、止端研削したものの応力集中係数とした。

溶接まま継手では止端部のひずみ測定が困難であるため、止端部の型取りを行い FEM で応力集中係数を計算した。T-TYPE については 2 次元平面ひずみ, L0-TYPE については 3 次元解析を行った。解析精度を一定にするため、止端部付近の要素分割は同じであり、最少要素寸法は 0.5 mm である。

応力比 0 の引張で疲労試験を実施した。

3.2 試験結果

Table 4 に止端部の溶接残留応力および応力集中係数を整理して示した。なお、応力集中係数は (1) 式の $K_s \cdot K_w$ である。T-TYPE には K_s の影響はない。

T および L0-TYPE の疲労試験結果を Fig. 6 に示し

Fig. 4 Test specimens (unit: mm)

Fig. 5 Details of ends of longitudinal stiffeners

Table 4 Residual stresses and stress concentration factors

	T-TYPE		L0-TYPE	
	As Welded	Ground	As Welded	Ground
Stress Concent. Factor	1.95	1.55	2.80	2.10
Residual Stress(MPa)	70		150	

た。止端研削した T-TYPE が最も強く、溶接ままの L0-TYPE が最も弱い。Table 4 の残留応力および応力集中係

Fig. 6 Fatigue test results of T- and L0-TYPE specimens

Fig. 7 Fatigue test results of LA-, LB- and LC-TYPE specimens

Fig. 8 Crack initiation points

数の値から Fig. 6 は妥当な結果と考えられる。

LA, LB および LC-TYPE の疲労試験結果を Fig. 7 に示した。それぞれの破断箇所を Fig. 8 に矢印で示した。LA-TYPE では、延ばした両側のビードの始終端に疲労き裂が生じた (Fig. 5, 8 参照)。LB-TYPE では、塞がなかった縦リブの角にき裂が生じ、疲労強度が最も低かった。LC-TYPE では、延ばしたビードの始終端を研削しているため (Fig. 5 参照)、き裂発生箇所は仮付で塞いだ縦リブの角に誘導されるが、この疲労強度が最も大きい。Fig. 7 には、溶接ままおよび止端研削した L0-TYPE の SN 曲線が併記されている (図中 AW および GROUND)。LA-TYPE は、 2×10^6 回以下の短寿命側では、溶接ままの L0-TYPE より疲労強度が大きい。LB-TYPE は溶接ままの L0-TYPE と同程度の疲労強度だが、傾きに差がある。LC-TYPE の

疲労強度は止端研削した L0-TYPE のそれとほぼ等しい。

4. A6N01S-T5 溶接継手の疲労強度

4.1 A6N01S-T5 母材の最大応力効果

A6N01S-T5 母材の SN 曲線の勾配 β は応力比の影響をあまり受けない ($R=-1$ で $\beta=-6.99$, $R=0$ で $\beta=-6.18$)¹¹⁾。そこで、(5)~(7)式による等価応力範囲による整理が有効と考えられる。竹内¹⁵⁾ は応力比 -1 から 0 の 128 の疲労試験結果を整理して m, α および β の値を Table 5 のように定めた。なお、表中の α の値は応力単位 kgf/mm^2 に対するものである。A6N01S-T5 は押出空冷時効硬化材であるが、合金組成などにより表面に再結晶組織ができる場合がある。非再結晶と再結晶組織では(6)式の係数 α および β が異なる。しかし、等価応力範囲に換算するための定数 m は、ほぼ 0.53 として良いと考えられる。

4.2 最大応力効果の溶接継手への適用

溶接継手の応力集中係数が $K(=K_s \cdot K_w)$ で溶接残留応力が S_R の個所に疲労き裂が生じるものとする。応力比 R , 公称応力範囲 S_n , 破断までの繰返し数を N とする。この時、(1)式により、応力範囲は

$$S = KS_n$$

残留応力を考慮した最大応力は

$$S_{\max} = \frac{KS_n}{1-R} + S_R$$

となる。そこで、(7)式により等価応力範囲 S_{eq} は

$$S_{eq} = KS_n \cdot \left(\frac{1}{1-R} + \frac{S_R}{KS_n} \right)^{1-m} \quad (8)$$

と表される。

Table 4 の残留応力、応力集中係数および $m=0.53$ として(8)式により等価応力範囲を求め、T および L0-TYPE の疲労試験結果を整理し、Fig. 9 を得た。図中の線は

$$\mu(\ln S_{eq}) = 7.354 - \ln N / 6.419$$

$$\sigma(\ln S_{eq}) = 0.0753 \quad (9)$$

による μ および $\mu \pm 2\sigma$ である。ここに、 $\mu(\cdot)$ は平均を、 $\sigma(\cdot)$ は標準偏差を表している。図を見ると、止端研削した T-TYPE のばらつきが大きいことを除けば、等価応力範囲により A6N01S-T5 溶接継手の疲労強度が統一的に表されることがわかる。T-TYPE では止端研削範囲が広いので、形状にばらつきが生じ応力集中係数のばらつきが大きかったものと考えられる。

(9)式は $\beta = -6.419$ であることを示しているが、この値

Table 5 Equivalent stress parameters of A6N01 alloy¹⁵⁾

	Number of Tests	m	α	β
Base Metal (Total)	128	0.53	12.51	-5.69
Recrystallized	56	0.52	12.31	-5.51
Non-recrystallized	72	0.54	15.32	-7.70

は Table 5 の再結晶および非再結晶組織の値の範囲に含まれ妥当なものである。

4.3 A6N01 の特徴 (5083 との比較)

前節 4.2 に示したように、A6N01S-T5 溶接継手の疲労強度に及ぼす応力集中および溶接残留応力の影響は、等価応力範囲により統一的に取り扱える。また、(7), (9)式の等価応力範囲による表現は、2次元レインフローカウンによる累積疲労損傷の計算に便利である。累積疲労損傷に対する信頼性解析も容易である。

船体構造によく用いられる A5083 の溶接継手について、2次元レインフローカウンによる累積疲労損傷の計算を行う場合、溶接残留応力の影響は各々の寿命について Fig. 3 のような、平均応力応力範囲関係を作っておき、各平均応力と応力範囲の組に対応する寿命を推定する必要がある。この計算は相当複雑なものとなる。むしろ、軟鋼の溶接継手の場合と同様に、0.2%耐力 (降伏応力) 程度の残留応力が存在するものの方が取扱が簡単である。

5. 角回し溶接部の疲労強度の改善法

LA, LB および LC-TYPE は Fig. 8 に示した個所に疲労き裂発生を誘導し、角回し溶接部の疲労強度に比べようとしたものである。これらの継手の中で、LB および LC-TYPE は疲労き裂発生個所が溶接金属 (A5356) であり、6N01 としての評価はできない。

以上の3種の中で LC-TYPE だけが L0-TYPE の止端研削と同程度の改善効果があった (Fig. 7 参照)。そこで、縦方向付加物の角の疲労強度改善法としては、

- (1) 角回し溶接を行い、止端部を研削する。
- (2) 角を塞ぎ両側のビードの始末端を延ばす。この時、始末端に疲労き裂が生じないようにする。

の2つが同程度の効果があると判断される。

縦骨の面材あるいはパルプ上のスティフナについて(2)の方法を取る場合、(1)と同様にビード始末端を研削する必要がある。研削箇所とスティフナとの位置関係による作業性により、どちらが有利かが決まる。

横桁のスロット穴の角から外板に疲労き裂が生じること

Fig. 9 Consolidated fatigue data of T- and L0-TYPE specimens, using equivalent stress parameter, $m=0.53$

がある⁹⁾。このような場合には、ビードをスロット穴の反対側まで延ばせば、始終端を研削する必要がないため、(2)の方法が有利である。

6. 結 言

A6N01S-T5 によるすみ肉溶接継手の疲労試験を行い、応力集中と溶接残留応力の影響について、船体に使用実績の多い A5083 合金と比較、検討した。また、縦方向付加物の角回し溶接部の疲労強度改善法についても検討した。以上により以下の結論を得た。

- (1) A6N01 合金の疲労強度に及ぼす応力集中および溶接残留応力の影響は、最大応力効果を考慮した等価応力範囲 ((5)(7)(8)式参照) により統一的に評価できる ((9)式, Fig. 9 参照)。
- (2) 一方, A5083 合金では、平均応力の影響が大きく、等価応力範囲では評価できない。溶接継手については、0.2%耐力程度の残留応力が存在するものとして取り扱うのが簡単である。
- (3) 縦方向付加物の角回し溶接部の有効な疲労強度改善法は、1) 止端研削、および、2) 角を塞いだ後両側のビードを延ばし、疲労き裂発生箇所を塞いだ角に誘導したものである。1)と2)は同程度の疲労強度である (Fig. 7 参照)。2)は特にスロット穴の角に有効である。

終わりに当たり、本論文で取り扱った実験は、(財)シップ・アンド・オーシャン財団の補助事業「船舶の軽量化に関する調査研究」において行われたものであり、同財団の御援助に心からの謝意を表します。また、同調査研究委員会 宝田直之助委員長、同船殻部会 青木元也部会長、(社)軽金属溶接構造協会および同協会の堀田東男、竊田和之両氏、同協会「アルミニウム合金船構造の軽量化委員会」富田康光委員長および A6N01 についての貴重な情報の御提供を頂いた住軽商事(株)竹内勝治氏にも心からの謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本海事協会：鋼船規則 K 編及び同検査要領一部改正案 (材料関係) (1993)。
- 2) シップ・アンド・オーシャン財団：船舶の軽量化に関する調査研究事業報告書 (平成5年度) (1994)。
- 3) 田中 他：アルミ合金押出材構造の強度，船舶技術研究所発表会講演集，No. 63, pp. 147-152 (1994)。
- 4) 千秋，松岡：アルミ合金 A6N01 の耐海水性，船舶技術研究所研究発表会講演集，No. 63, pp. 159-164 (1994)。
- 5) 竹内 他：アルミニウム合金 A5083P-O およびその溶接継手の軸方向荷重疲れ強さについて，住友軽金属技報，Vol. 13, No. 4, pp. 218-224 (1972)。
- 6) 酒井 他：アルミニウム合金 A5083-O 板骨溶接構造の疲労設計法の検討，日本造船学会論文集，No. 153, pp. 268-280 (1983)。
- 7) 金属材料技術研究所：アルミニウム合金 A 5083 P-O (A 1-4.5 Mg-0.6 Mn) 突合せ溶接継手の疲労特性データシート，金属材料技術研究所疲労データシート，No. 64 (1990)。
- 8) Ohta, A. and Mawari, T.: Fatigue Strength of Butt Welded Al-Mg Aluminium Alloy: Tests With Maximum Stress at Yield Strength, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 13, No. 1, pp. 53-58 (1990)。
- 9) 松岡 他：アルミ製船体の疲労損傷，船舶技術研究所研究発表会講演集，No. 63, pp. 153-158 (1994)。
- 10) 軽金属車両委員会：鉄道車両用アルミニウム合金 5086-H 112 の疲れ強さ，5086-H 112 疲れ試験分科会報告書 (1990)。
- 11) 軽金属車両委員会：大型薄肉材用アルミニウム合金 6N01-T5 の疲れ強さ，6N01-T5 疲れ試験分科会報告書 (1988)。
- 12) 松岡 他：6 N 01 押出材形溶接部の疲労強度，軽金属溶接，Vol. 32, No. 5, pp. 195-202 (1994)。
- 13) 後川，中山：溶接継手部の応力集中係数，石川島播磨技報，Vol. 23, No. 4, pp. 351-355 (1983)。
- 14) US Military Standard, MIL-HDBK-5 D, 1-16~18 (1983)。
- 15) 竹内：私信 (1994)。