# アルミニウム合金 A6N01-T5 の母材および摩擦攪拌接合部の 疲労強度に応力比と腐食が与える影響

# ALST 研究レポート 2

# 2007年7月

日本軽金属(株)グループ技術センター

# 萩澤亘保

大阪大学大学院工学研究科

# 大倉一郎

#### 概要

アルミニウム合金 A6N01-T5 の母材および摩擦攪拌接合部の疲労強度に応力比と腐食が 与える影響が,疲労試験および大気暴露試験の実施によって明らかにされる。

応力比が大きくなると、母材および摩擦攪拌接合部とも S-N 曲線の負の傾きは大きくなる。

応力比が疲労限度に与える影響は、母材および摩擦攪拌接合部とも Sonderberg 線で考慮 される。

大気暴露による腐食に起因する,母材および摩擦攪拌接合部の疲労強度の低下は,大気 暴露期間1年以後止まる。母材の疲労強度は元から71.6%まで,摩擦攪拌接合部の疲労強 度は元から87.2%まで低下する。

本研究の成果に基づいて、アルミニウム合金 A6N01-T5 の母材および摩擦攪拌接合部の 設計 S-N曲線が与えられる。この設計 S-N曲線には、応力比と腐食の影響が考慮されてい る。

#### 謝辞

本研究は、科学技術振興調整費充当戦略的研究拠点「阪大フロンティア研究機構」の研 究プロジェクト(プロジェクト名:アルミニウム合金構造物実現のための基礎研究,2003 ~2005)の下で行なわれた。

沖縄への大気暴露試験片の設置,試験片回収後の腐食評価をしていただいた花崎昌幸氏 (研究当時日本軽金属株式会社 グループ技術センター,現在 SST サービス),疲労試験を 実施していただいた間宮志胖氏(日本軽金属株式会社 グループ技術センター)に深く感謝 致します。

# 目 次

第1章 序 論	••• 1
第2章 アルミニウム合金 A6N01-T5 の母材と摩擦攪拌接合部の	
疲労強度	••• 2
2.1 継手の製作および試験片の採取位置と寸法	••• 2
2.1.1 床版形材試験片	••• 2
2.1.2 平板形材試験片	••• 3
2.2 熱影響範囲	••• 3
2.3 機械的特性	••• 4
2.4 継手の残留応力	••• 5
2.5 疲労試験の結果	••• 6
2.6 S-N 曲線	9
第3章 応力比が疲労強度に与える影響	•••13
3.1 応力比が S-N 曲線に与える影響	•••13
3.1.1 mとRの関係	•••13
3.1.2 log c と R の関係	•••13
3.2 応力比が疲労限度に与える影響	•••14
3.3 S-N 曲線	•••17
第4章 腐食が疲労強度に与える影響	22
4.1 継手の製作および試験片の採取位置と寸法	•••22
4.2 熱影響範囲	•••22
4.3 機械的特性	•••23
4.4 大気暴露条件	•••23
4.5 腐食評価	•••24
4.5.1 腐食形態	•••24
4.5.2 腐食量の経年変化	•••25
4.5.3 粒界腐食の腐食面積と深さの経年変化	•••26
4.6 腐食が機械的特性に与える影響	•••28
4.7 腐食が疲労強度に与える影響	•••29
4.7.1 疲労強度の経年変化	•••29
4.7.2 疲労亀裂の発生点	•••38
第5章 アルミニウム合金 A6N01-T5 の母材と摩擦攪拌接合部の	
設計 S-N 曲線	• • • 40
第6章 結  論	• • • 45
参考文献	•••46

#### 第1章 序 論

代表的な社会基盤構造物である道路橋において,その橋脚と地盤への荷重の軽減および 耐震の面から,床版や桁など上部構造の軽量化が望まれている。この対策として,橋の上 部構造へのアルミニウム合金の適用が考えられる。

従来,アルミニウム合金構造物の接合には MIG 溶接が使用されてきた。しかし, MIG 溶接部の疲労強度は低いので, MIG 溶接による道路橋の設計は困難である<sup>1)</sup>。近年, 脚光 を浴びている摩擦攪拌接合(以下, FSW と略す)は,疲労強度が高いといわれている。FSW で製作されたアルミニウム床版の疲労特性に関する著者らの研究<sup>2)</sup>においても,疲労強度 が高いことが確認されている。したがって,アルミニウム道路橋の設計には, FSW が不可 欠であると考えられる。

MIG 溶接が施されたアルミニウム部材の疲労設計では, MIG 溶接部の疲労強度が低いの で、一般に、MIG 溶接部に対して疲労照査がなされ、母材に対して疲労照査が行われるこ とはない。しかし、FSW が施されたアルミニウム部材では、FSW 部の疲労強度が高いの で、FSW 部のみならず母材に対しても疲労照査が必要になる場合が生じる。

母材の疲労強度は応力比の影響を受ける。すなわち,母材の疲労強度は、応力比が大き くなると低下する。他方,著者等の既往の研究<sup>2),3)</sup>では、FSW 部の接合線方向の残留応力 は大きな引張応力であったが、FSW 部の接合線に直角な方向の残留応力は小さな圧縮応力 であった。FSW 部の接合線に対して直角な方向に発生・伝播する疲労亀裂は引張残留応力 の影響を受けるため、実寸大の構造物の疲労試験に基づいてその疲労強度が決められなけ ればならない<sup>4)</sup>。しかし、FSW 部の接合線に沿って発生する疲労亀裂は圧縮残留応力を受 けるので、引張試験片タイプの小型試験片の疲労試験に基づいてその疲労強度を安全側に 決めることができる。ただし、疲労強度に応力比の影響が考慮されなければならない。

アルミニウム橋においては、厚さ 60µm 程度のエポキシ塗装の上に、厚さ 30µm 程度 のポリウレタン塗装が、金属表面の美観を維持するために建設時に行なわれた後、再塗装 は一般には行われない。したがって橋が腐食環境に置かれて塗膜がはく離した場合、アル ミニウム合金の生地露出面は腐食する。

MIG 溶接が施されたアルミニウム合金材では、腐食しても、MIG 溶接部の疲労強度が低いので、疲労亀裂は MIG 溶接部に発生すると考えられる。しかし、FSW が施されたアル ミニウム合金材が腐食した場合、疲労亀裂が FSW 部に発生するのか、あるいは母材に発 生するか不明である。

本研究では、A6N01-T5の母材に発生する疲労亀裂およびこの FSW 部の接合線に沿って 発生する疲労亀裂に対して、応力比と腐食がその疲労強度に与える影響を明らかにする。

## 第2章 アルミニウム合金 A6N01-T5 の母材と摩擦攪拌接合部の疲労強度

#### 2.1 継手の製作および試験片の採取位置と寸法

#### 2.1.1 床版形材試験片

図-2.1 に示す床版形材の中空部の上フランジから,押出方向が試験片の軸方向になるように,母材の引張試験片と疲労試験片を採取した。図-2.2 に示すように,床版形材を平行に並べ,上下のフランジ同士をFSWで接合した断面を図-2.3 に示す。図-2.3 に示すように,接合された形材の上フランジから,FSW部の引張試験片と疲労試験片を採取した。これらの試験片の軸方向は,FSW接合線に直角である。母材とFSW部の引張試験片の形状は,図-2.4(a)に示すJIS 14B号である。母材とFSW部の疲労試験片の形状を図-2.4(b)に示す。FSW部の引張試験片と疲労試験片において,FSW接合線の位置と方向は,試験片の平行部の中央で,試験片の軸方向に直角な方向である。母材とFSW部の疲労試験片の 平行部の角のばりを削除するために,その部分を400番のエメリー紙で長手方向に磨いた。これらの試験片を床版形材試験片と呼ぶ。

床版形材の中空部の上フランジの板厚は 10mm, FSW 部の板厚は 12mm である。したがって,母材の引張試験片と疲労試験片の板厚は 10mm であり, FSW 部のそれらの試験片の 平行部の板厚は 12mm である。



図-2.1 床版形材

図-2.2 床版形材の FSW 接合



図-2.3 FSW 継手



#### 2.1.2 平板形材試験片

幅 150mm,厚さ 10mm の平板形材の母材と FSW 部の引張試験片および疲労試験片の採 取位置を図-2.5 に示す。母材の引張試験片と疲労試験片については,図-2.5(a)に示すよう に,平板形材の押出方向が試験片の軸方向になるように試験片を採取した。FSW 部の引張 試験片と疲労試験片については,平板形材を図-2.5(b)に示すように,突合せて FSW によ って接合し,それから試験片を採取した。母材の引張試験片と疲労試験片の軸方向は押出 方向,FSW 部のそれらの試験片の軸方向は FSW 接合線に直角な方向,すなわち押出方向 に直角な方向である。これらの試験片を平板形材試験片と呼ぶ。

母材と FSW 部の引張試験片の形状は図-2.4(a)と同じ JIS 14B 号である。母材と FSW 部 の疲労試験片の形状は図-2.4(b)と同じである。FSW 部の引張試験片と疲労試験片の FSW 接合線は,試験片の軸方向に直角で,平行部中央に位置する。母材と FSW 部の引張試験 片と疲労試験片の板厚は 10mm である。



図-2.5 試験片の採取位置

#### 2.2 熱影響範囲

床版形材試験片と平板形材試験片の FSW 条件を表-2.1 に示す。表-2.1 の用語の説明を 図-2.6 に示す。

試験片	ショルダー直径	プローブ直径	前進角	回転数	移動速度
	(mm)	(mm)	(度)	(rpm)	(mm/分)
床版形材	25	6	3	1200	350
平板形材	20	10	0	700	100

表-2.1 FSW 条件

図-2.7 と2.8 に,それぞれ,床版形材試験片 および平板形材試験片の FSW 部のビッカー ス硬さ分布を示す。図-2.7 は FSW が施こさ れた床版形材の上フランジの FSW 接合線に 直角な断面の,上下表面から 2mm 内部と板厚 中央の硬さ分布であり,図-2.8 は FSW が施 こされた平板形材の FSW 接合線に直角な断 面の,上下表面から 2mm 内部と板厚中央の硬 さ分布である。

図-2.7 から,床版形材試験片の,FSW による熱影響範囲は,接合線を中心として左右それぞれ 20mm である。図-2.8 から,平板形材試験片の,FSW による熱影響範囲は,接合線を中心として左右それぞれ 25mm である。



図-2.7 床版形材試験片の FSW 部の ビッカース硬さ



**2-2.6** FSW



図-2.8 平板形材試験片の FSW 部のビッカース硬さ

#### 2.3 機械的特性

床版形材と平板形材に使用された A6N01-T5 の化学成分を表-2.2,母材と FSW 部の引張 試験の結果を表-2.3 に示す。母材の機械的特性は押出方向,FSW 部の引張特性は,FSW 接合線に直角な方向に対する結果である。

母材に関しては,平板形材の引張強さおよび 0.2%耐力が,床版形材のそれらより高い。 しかし,FSW部に関しては,平板形材の引張強さが,床版形材のそれより低く,平板形材 の 0.2%耐力は床版形材のそれにほぼ等しい。

				13 65 64 6				
π/ ++			化	学 成	分 ()	質量%)		
<u> </u>	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
床版	0.5 ~ 0.53	0.16	$0.0 \sim 0.09$	0.1 ~ 0.15	0.69	0.01	0.01	0.0 ~ 0.03
平板	0.77	0.16	0.01 以下	0.17	0.71	0.07	0.01 以下	0.09
JIS	0.04 ~ 0.9	0.35 以下	0.35 以下	0.50 以下	0.40 ~ 0.8	0.30 以下	0.25 以下	0.10

表-2.2 床版形材および平板形材の化学成分

表-2.3 床版形材と平板形材の母材と FSW 部の機械的特性

立刀	合	5 試驗止	引張強さ	0.2%耐力	ヤング係数	ポマソンド	伸び
이미	리가 기보 급자형	□11 尚央 / T	(MPa)	(MPa)	(GPa)	小アンノル	(%)
E	**	床版形材	271	245	70.5	0.31	8.0
ট	(V	平板形材	298	272	71.6	0.31	15.3
EGW	立17	床版形材	217	111	69.3	0.33	-
r5w	리)	平板形材	198	110	70.0	0.33	-

#### 2.4 **継手の残留応**力

床版形材の継手について,FSW 部の接合線方向と接合線に直角な方向の,上フランジ外 側表面の残留応力の測定結果を図-2.9 に示す。床版形材の継手の長手中央の上フランジの 外側表面にひずみゲージを貼り,切断法により応力を開放して残留応力を測定した。FSW 部とその近傍の外側表面に生じた残留応力の最大値は,接合線方向が 72MPa の引張応力, 接合線に直角な方向が 37MPa の圧縮応力である。

平板形材の継手の残留応力については,本研究と同じ条件で,FSW で接合された継手に 対する残留応力の測定結果が報告されている<sup>3)</sup>。それによると,残留応力の最大値は,接 合線方向が 90MPa の引張応力,接合線に直角な方向が 20MPa の圧縮応力である。



図-2.9 上フランジの FSW 部の外側表面の残留応力

#### 2.5 疲労試験の結果

床版形材試験片の疲労試験の結果を表-2.4,平板形材試験片の疲労試験の結果を表-2.5 に示す。応力比 R は-1,0.1,0.5 の 3 水準である。両疲労試験ともに,FSW 試験片の破断 箇所はすべて熱影響範囲内であった。表-2.4 と 2.5 において,"KB"は,キッシングボン ドから疲労亀裂が発生した試験片であることを示す。キッシングボンドとは,接合部の裏 面に発生し,浸透探傷試験で浸透指示模様が検出されず,裏曲げ試験で割れが発生する強 度が低い部分である<sup>5)</sup>。

		( )			
	母 材			FSW 部	
応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無	応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無
300	7.54E+04		280	3.31E+04	
280	1.13E+05		240	6.53E+04	
260	3.03E+05		260	1.05E+05	
240	5.87E+05		240	1.39E+05	
220	7.13E+05		240	1.56E+05	
220	8.61E+05		220	3.41E+05	KB
200	1.65E+06		200	8.71E+05	
180	4.43E+06		180	1.63E+06	
180	3.92E+06		160	3.46E+06	
170	5.03E+06		160	3.48E+06	
170	6.68E+06		150	1.02E+07	未破断
160	1.09E+07	未破断	150	1.09E+07	未破断

表-2.4 床版形材の疲労試験の結果

(a) *R*=-1

	母 材			FSW 部	
応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無	応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無
220	6.75E+04		180	5.81E+04	
200	1.74E+05		160	7.72E+04	
160	1.85E+05		160	9.69E+04	
180	2.45E+05		150	1.87E+05	
170	5.24E+05		130	2.25E+05	
160	8.29E+05		140	2.50E+05	
140	1.33E+06		120	5.92E+05	
140	1.57E+06		110	1.66E+06	
140	1.88E+06		100	2.89E+06	
120	1.15E+07	未破断	100	1.27E+07	未破断
130	1.17E+07	未破断	90	1.27E+07	未破断
130	1.32E+07	未破断	90	1.30E+07	未破断

(b) *R*=0.1

(c) *R*=0.5

	母材			FSW 部	
応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無	応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無
135	5.20E+04		112.5	8.40E+04	
125	6.36E+04		112.5	1.02E+05	
130	1.43E+05		85	1.03E+05	
105	2.51E+05		90	1.37E+05	
110	3.10E+05		100	2.82E+05	KB
100	3.99E+05		90	2.87E+05	KB
120	4.23E+05		90	3.21E+05	KB
100	5.29E+05		110	4.06E+05	
105	1.02E+06		75	5.46E+05	KB
110	1.86E+06		80	3.25E+06	
100	1.34E+07	未破断	85	4.01E+06	
			80	6.71E+06	KB
			75	2.10E+06	KB
	-		70	1.12E+07	未破断
			70	1.29E+07	未破断

	母 材			FSW 部	
応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無	応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無
260	$5.52 \times 10^5$		210	$1.72 \times 10^5$	
200	$1.23 \times 10^{7}$	未破断	150	$1.04 \times 10^{7}$	未破断
230	$6.46 \times 10^5$		170	$4.99 \times 10^{6}$	
320	$9.54 \times 10^4$		200	$3.83 \times 10^5$	
290	$2.41 \times 10^5$		180	$1.24 \times 10^7$	未破断
250	$1.13 \times 10^{6}$		220	$1.79 \times 10^5$	
230	$2.44 \times 10^{6}$		190	$1.28 \times 10^{6}$	
220	$6.31 \times 10^{6}$		240	$7.97 \times 10^4$	
280	$4.69 \times 10^5$				
180	$1.41 \times 10^{7}$	未破断			
230	$2.04 \times 10^{6}$				
210	$6.90 \times 10^{6}$			-	
300	$1.30 \times 10^5$				
270	$2.95 \times 10^5$				
200	$7.11 \times 10^{6}$				

表-2.5 平板形材の疲労試験の結果

(a) *R*=-1

(b) *R*=0.1

	母 材		FSW 部			
応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無	応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無	
220	$1.67 \times 10^5$		140	$1.51 \times 10^5$		
160	$1.31 \times 10^{7}$	未破断	100	$7.54 \times 10^5$	KB	
190	$3.53 \times 10^5$		100	$7.50 \times 10^5$		
250	$5.79 \times 10^4$		80	$1.13 \times 10^{7}$	未破断	
190	$7.99 \times 10^5$		90	$1.23 \times 10^{7}$	未破断	
250	$6.64 \times 10^4$		120	$4.77 \times 10^5$		
210	$1.68 \times 10^5$		100	$9.76 \times 10^5$		
170	$1.19 \times 10^{7}$	未破断	160	$8.36 \times 10^4$		
183	$1.06 \times 10^7$	未破断	110	$1.05 \times 10^{6}$		
240	$1.34 \times 10^5$		160	$6.96 \times 10^4$		
200	$6.04 \times 10^5$					
190	$5.52 \times 10^5$			-		
220	$1.47 \times 10^5$					

	母 材			FSW 部	
応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無	応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無
130	$3.57 \times 10^5$		100	$1.80 \times 10^5$	
100	$1.46 \times 10^{7}$	未破断	80	$3.52 \times 10^5$	
140	$4.72 \times 10^5$		80	$1.31 \times 10^7$	未破断
145	$3.34 \times 10^5$		90	$2.82 \times 10^5$	
115	$1.26 \times 10^7$	未破断	85	$8.19 \times 10^5$	KB
140	$4.15 \times 10^5$		90	$2.09 \times 10^5$	
120	$1.33 \times 10^7$	未破断	85	$5.27 \times 10^5$	
130	$1.10 \times 10^{7}$	未破断	100	$3.00 \times 10^5$	
135	$1.35 \times 10^{6}$		80	$5.83 \times 10^5$	
145	$1.92 \times 10^5$		75	$2.20 \times 10^{6}$	
145	$1.88 \times 10^5$		70	$1.58 \times 10^{7}$	未破断
130	$3.83 \times 10^5$				
120	$6.07 \times 10^5$			-	
120	$1.21 \times 10^{6}$				

(c) *R*=0.5

#### 2.6 S-N 曲線

表-2.4 と 2.5 から得られる床版形材および平板形材の S-N 関係を,それぞれ図-2.10 と 2.11 に示す。キッシングボンドから疲労亀裂が発生した試験片の結果は,図-2.10 と 2.11 に記載されていない。S-N 曲線は次式で与えられる。

 $\log N = \log c - m \log(\Delta \sigma) \tag{2.1}$ 

ここに, N :繰返し回数

⊿σ :応力範囲

*c*,*m*:定数

図-2.10 と 2.11 に描かれた直線は, log ⊿σ を独立変数, log N を従属変数として,表-2.4 と 2.5 の試験結果において,キッシングボンドから疲労亀裂が発生した試験片の結果を除 いて,最小自乗法を適用することにより決定される平均寿命に対する S-N 曲線,すなわち 平均 S-N 曲線である。これらの S-N 曲線の *m* と log *c* の値を表-2.6 に示す。

さらに**表-2.6**には、次式で計算される、任意の $\log(\Delta\sigma)$ に対する $\log N$ の標準偏差 $\zeta_N$ が示されている。

$$\xi_{N} = \left\{ \frac{1}{k-2} \sum_{i=1}^{k} \left[ \log N_{i} - \log c + m \log(\Delta \sigma_{i}) \right]^{2} \right\}^{1/2}$$
(2.2)

ここに, $N_i \ge \Delta \sigma_i$ :それぞれ,一つの試験片の繰返し回数と応力範囲

k:試験片の総数

**表-2.6**には,疲労限度 $\Delta \sigma_{caf}$ も示されている。 $\Delta \sigma_{caf}$ は,破断したプロットの下限以下で,繰返し数が $10^7$ 以上で破断しなかった試験片の応力範囲の上限としている。







(b) FSW 部

図-2.10 床版形材の S-N 関係





(b) FSW 部

図-2.11 平板形材の S-N 関係

						5
形材	対象	R	т	log c	${\xi}_N$	$\Delta\sigma_{caf}$ (MPa)
		- 1	7.59	23.721	0.076	160
	母材	0.1	6.58	20.264	0.214	130
中版		0.5	7.31	20.494	0.366	100
		- 1	8.27	24.815	0.156	150
	FSW	0.1	6.84	20.073	0.133	100
		0.5	6.59	18.594	0.643	70
		- 1	9.73	29.302	0.204	200
	母材	0.1	7.71	23.321	0.150	183
ᅑᄨ		0.5	5.83	18.067	0.232	120
平权		- 1	12.41	34.284	0.172	150
	FSW	0.1	5.55	17.136	0.132	90
		0.5	5.99	17.230	0.225	70

表-2.6 床版形材と平板形材のm,  $\log c$ ,  $\xi_N$ の値および疲労限度  $\Delta \sigma_{caf}$ 

### 第3章 応力比が疲労強度に与える影響

#### 3.1 応力比が S-N 曲線に与える影響

#### 3.1.1 mとRの関係

**表-2.6**の *m* と *R* の関係を**図-3.1** に示す。母材お よび FSW 部ともに *R* が大きくなると *m* は低下する 傾向が見られる。プロットは,床版形材および平板 形材の母材および FSW 部に関係なくランダムに分 布している。したがって,*m* と *R* の関係に直線を仮 定し,プロット点全体に対して最小自乗法を適用し, *m* と *R* の関係に対して次式を得た。

$$m = 7.25 - 2.16R \tag{3.1}$$

3.1.2 log c と R の関係

式(3.1)が与える *m* の値を用いて,**表-2.4**と2.5の 疲労試験結果において,キッシングボンドから疲労 亀裂が発生した試験片の結果を除いて,最小自乗法 を適用して得られた log *c* と *ξ*<sub>N</sub>の値を**表-3.1**に示す。

式(2.1)に示す平均 S-N 曲線を,標準偏差  $\xi_N$ の2倍だけ負方向に移動させた安全側の寿命 を与える S-N 曲線,すなわち安全側 S-N 曲線が次式で与えられる。

$$\log N = \log c_a - m \log(\Delta \sigma) \tag{3.2}$$

 $\Box \Box \Box c_a = \log c - 2\xi_N$ 

(3.3)

 $\log c_a$ の値も**表-3.1** に示してある。**表-3.1** に示す  $\log c \ge R$ の関係および  $\log c_a \ge R$ の関係をそれぞれ**図-3.2**(a)と(b)に示す。

			log c		${\xi}_N$		$\log c_a$	
対象	R	т	床版 形材	平板 形材	床版 形材	平板 形材	床版 形材	平板 形材
	- 1	9.41	27.961	28.529	0.184	0.205	27.593	28.119
母材	0.1	7.03	21.265	21.724	0.217	0.154	20.831	21.416
	0.5	6.17	18.156	18.788	0.371	0.233	17.414	18.322
	-1	9.41	27.470	27.359	0.191	0.245	27.088	26.869
FSW 部	0.1	7.03	20.470	20.239	0.134	0.196	20.202	19.847
	0.5	6.17	17.760	17.579	0.644	0.225	16.472	17.129

**表-3.1** log *c* , *ζ*<sub>N</sub> および log *c*<sub>a</sub>の値





**図-3.2**  $\log c \ge R$ の関係および $\log c_a \ge R$ の関係

図-3.2 において各プロットを直線で結んで得られる, log c と R の関係および log c<sub>a</sub> と R の関係を表-3.2 に示す。

対象		lo	g <i>c</i>	$\log c_a$		
		$-1 \le R \le 0.1$	$0.1 < R \le 0.5$	$-1 \le R \le 0.1$	$0.1 < R \le 0.5$	
母	床版形材	$\log c = 21.874 - 6.09R$	$\log c = 22.043 - 7.77R$	$\log c_a = 21.447 - 6.15R$	$\log c_a = 21.685 - 8.54R$	
材	平板形材	$\log c = 22.343 - 6.19R$	$\log c = 22.458 - 7.34R$	$\log c_a = 22.025 - 6.09R$	$\log c_a = 22.189 - 7.73R$	
FSW	床版形材	$\log c = 21.107 - 6.36R$	$\log c = 21.148 - 6.78R$	$\log c_a = 20.828 - 6.26R$	$\log c_a = 21.135 - 9.33R$	
部	平板形材	$\log c = 20.886 - 6.47R$	$\log c = 20.904 - 6.65R$	$\log c_a = 20.486 - 6.38R$	$\log c_a = 20.528 - 6.80R$	

**表-3.2**  $\log c \geq R$ の関係および $\log c_a \geq R$ の関係

#### 3.2 応力比が疲労限度に与える影響

平滑材の疲労限度に平均応力が与える影響は,一般に,疲労限度線図(応力振幅で表し た疲労限度を縦軸,それに対応する平均応力を横軸にとった図)で評価される。母材は平 滑材である。FSW 部を平滑と見なせるかどうかは議論のあるところであるが,FSW 部の 疲労限度に平均応力が与える影響も疲労限度線図で評価することを試みる。

平均応力 $\sigma_m$ と応力範囲 $\Delta \sigma$ の関係および応力振幅 $\sigma_a$ と応力範囲 $\Delta \sigma$ がそれぞれ次式で与えられる。

$$\sigma_m = \frac{1+R}{2(1-R)} \, \Delta\sigma \tag{3.4}$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta \sigma}{2} \tag{3.5}$$

**表-2.6**において応力範囲で与えられた疲労限度を,式(3.4)と(3.5)の応力範囲に代入して 得られる結果を表-3.3に示す。

		床版	形材		平板形材				
R	日	材	FSV	v 部	母	材	FSW 部		
	$\sigma_m$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)							
- 1	0.0	80.0	0.0	75.0	0.0	100.0	0.0	75.0	
0.1	79.4	65.0	61.1	50.0	111.8	91.5	55.0	45.0	
0.5	150.0	50.0	105.0	35.0	180.0	60.0	105.0	35.0	

表-3.3 平均応力と応力振幅

**表-3.3** から得られる疲労限度線図を図-3.3 に示す。図-3.3 には,次式で定義される Gerber 線(実線),修正 Goodman 線(破線)および Sonderberg 線(一点長鎖線)が描いて ある。

$$\sigma_a = \sigma_{w0} \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^2 \right]$$
(3.6)

$$\sigma_a = \sigma_{w0} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \tag{3.7}$$

$$\sigma_a = \sigma_{w0} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{0.2}} \right) \tag{3.8}$$

ここに,  $\sigma_{w0}$  :  $\sigma_m = 0$ , すなわち R = -1 に対する, 振幅で表された疲労限度

 $\sigma_B$  : 引張強さ

σ<sub>0.2</sub> : 0.2%耐力

引張強さ *σ<sub>B</sub>* と 0.2%耐力 *σ*<sub>0.2</sub>に対して,**表-2.3**に示す値を用いている。

図-3.3 において,母材のプロットは修正 Goodman 線の上に分布し,FSW 部のプロット は修正 Goodman 線と Sonderberg 線の間に分布する。

母材に関して,**図-3.3**(a)と(b)に示すように,修正 Goodman 線は Sonderberg 線に近い。 さらに,アルミニウム構造の設計では 0.2%耐力が一般に用いられるので,母材に Sonderberg 線を採用する。FSW 部に関して,**図-3.3**(c)と(d)に示すように, $\sigma_m = 0$ の場合 を除いて,Sonderberg 線が安全側の疲労限度を与えるので,FSW 部に関しても Sonderberg 線を採用する。

式(3.4)と(3.5)を式(3.8)に代入して, Sonderberg 線と等価な,応力範囲で表された疲労限 度  $\Delta \sigma_{caf}$  と応力比 R の関係が次式で与えられる。

$$\Delta \sigma_{caf} = \frac{2(1-R)\sigma_{0.2} \sigma_{w0}}{(1-R)\sigma_{0.2} + (1+R)\sigma_{w0}}$$
(3.9)

 $\sigma_{w0}$ は、表-2.6のR = -1に対して応力範囲で表された疲労限度を2で除したものである。 2.6 節で述べた疲労限度の決め方は、疲労限度のばらつきに対して平均的な値を与えていると考えられる。そこで、R = -1の平均 S-N 曲線が与える疲労強度に対する、R = -1の安全側 S-N 曲線が与える疲労強度の比を $\sigma_{w0}$ に乗じた値を安全側の疲労限度 $\sigma_{w0a}$ とする。すなわち安全側の疲労限度 $\sigma_{w0a}$ は次式で与えられる。

$$\sigma_{w0a} = \left(\frac{c_a}{c}\right)^{\frac{1}{m}} \sigma_{w0} \tag{3.10}$$

ここに, *m*, *c*, *c<sub>a</sub>*:表-3.1に示される, *R*=-1に対応するそれぞれの値  $\sigma_{w0} \geq \sigma_{w0a}$ の値を表-3.4に示す。



図-3.3 疲労限度線図

	床版	形材		平板形材				
母	材	FSW	V 部	母	材	FSW 部		
$\sigma_{w0}$	$\sigma_{w0a}$	$\sigma_{w0}$	$\sigma_{w0a}$	$\sigma_{w0}$ $\sigma_{w0a}$		$\sigma_{w0}$	$\sigma_{w0a}$	
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	
80.0	73.1	75.0	68.3	100.0 90.5		75.0	66.5	

表-3.4  $\sigma_{w0} \geq \sigma_{w0a}$ の値

#### 3.3 S-N 曲線

S-N 曲線と疲労試験の結果との比較を**図-3.4~3.7**に示す。**図-3.4**と**3.5**は,式(2.1)で 与えられる平均 S-N 曲線が,それぞれ床版形材と平板形材に対して描いてある。式(2.1)の 中の*mとc*に対して,**表-3.1**の値を用いている。疲労限度は,**表-3.4**のσ<sub>ω0</sub>の値を式(3.9) に代入して求めている。

他方,**図-3.6**と**3.7**は,式(3.2)で与えられる安全側 S-N 曲線が,それぞれ床版形材と平板形材に対して描いてある。式(3.2)の中の*m*と*c*<sub>a</sub>に対して,**表-3.1**の値を用いている。疲労限度は,**表-3.4**の*σ*<sub>w0</sub>の値を式(3.9)の*σ*<sub>w0</sub>に用いて求めている。



**図-3.4** 床版形材の平均 S-N 曲線



図-3.5 平板形材の平均 S-N 曲線



図-3.6 床版形材の安全側 S-N 曲線



図-3.7 平板形材の安全側 S-N 曲線

## 第4章 腐食が疲労強度に与える影響

#### 4.1 継手の製作および試験片の採取位置と寸法

試験片の素材は, 図−4.1(a)に示す幅150mm, 厚さ10mmのA6N01-T5の押出形材である。 同図に示すように,押出形材の長手方向から母材の引張試験片と疲労試験片を採取した。 押出形材の表面は無処理で,押出しのままである。

図-4.1(a)の押出形材 2 本を突合せ,FSW で接合した。図-4.1(b)に示すように,接合線 が中央に位置するように,接合線に直角な方向から引張試験片と疲労試験片を採取した。 引張試験片は,平行部長さ114mm,平行部幅 20mm,板厚 10mmのJIS 14B 号試験片であ る。疲労試験片の寸法は,図-4.2 に示すように,平行部長さ50mm,平行部幅 20mm,板 厚 10mm である。疲労試験片の製作時に生じたばりを除くために,400 番のエメリー紙で 疲労試験片の平行部の角を長手方向に磨いた。

疲労試験片には識別番号が刻印してあり,刻印が施された面をおもて面,その反対側の 面をうら面と呼ぶ。FSW 部の疲労試験片のおもて面は,FSW 接合時に回転工具のプロー ブが挿入された面である。母材,FSW 部ともに,大気暴露前の引張試験片と疲労試験片の 本数は,それぞれ3本と6本であり,各暴露期間後の引張試験片と疲労試験片の本数は, それぞれ1本と5本である。



#### 4.2 熱影響範囲

FSW 条件を表-4.1 に示す。図-4.1(b)の,接合線に直角な断面の,上下表面から 2mm 内部と板厚中央のビッカース硬さの測定結果を図-4.3 に示す。中央から左右 15mm の範囲で硬さが低下しているので,熱影響範囲は,接合線を中心として左右 15mm である。中央で硬さが高くなっているのは,FSW が施された後の自然時効によるものである。

ショルダー直径	プローブ直径	前進角	回転数	移動速度
(mm)	(mm)	(度)	(rpm)	(mm/分)
20	10	3	890	200

表-4.1 FSW 条件

#### 4.3 機械的特性

試験片の化学成分を,JIS 規格値とともに **表−4.2**に示す。

大気暴露前の母材と FSW 部の機械的特性 を表-4.3 に示す。表の値は,母材と FSW 部 に関して,各3本の引張試験片の平均値で ある。母材に対しては JIS 規格値も記載して ある。引張試験片の破断箇所は,いずれの 試験片も図-4.3の熱影響範囲で最も硬さの 低い位置であった。FSW 部の引張強さと 0.2%耐力は母材のそれらより低い。これは,



図-4.3 FSW 部の硬さ分布

A6N01-T5 は熱処理アルミニウム合金であるため, 図-4.3の硬さ分布からも分かるように, FSW 時の発生熱により,熱影響範囲の部分がなまされるからである。

表-4.2 押出形材の化学成分

(質量%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
測定値	0.81	0.15	0.01以下	0.15	0.73	0.07	0.01 以下	0.08
JIS 規格値	0.40~0.9	0.35以下	0.35 以下	0.50以下	0.40~0.8	0.30以下	0.25 以下	0.10以下

**表−4.3** 母材と FSW 部の機械的特性

立四	- 1 <del>4</del>	引張強さ	0.2%耐力	伸び	ヤング係数	ポアリンド	
Ē	) <u>117</u> .	(MPa)	(MPa)	(MPa) (%)		~~ / / / L	
母 材	測定値	311	283	14.3	71.5	0.310	
	JIS 規格值	225 以上	175 以上	8 以上	—	—	
FSW 部の測定値		210	121	—	70.5	0.330	

#### 4.4 大気暴露条件

沖縄県の西表島と石垣島の中間にある嘉弥真島で試験片を大気暴露した。暴露場は,東 経 124 度,北緯 24 度 20 分に位置し,海抜 2m で波打ち際から 15m の距離にある。暴露場 は,珊瑚礁の中にあるため台風時でも直接海水を浴びることはない。しかし,海塩粒子の 供給量が比較的多く,高温・多湿で表面濡れ時間が長いので,本暴露場は,金属にとって 厳しい腐食環境である。

2001年4月から母材試験片の大気暴露を開始し、半年遅れの同年10月からFSW 試験片の大気暴露を開始した。試験片の大気暴露期間は0.5年、1年、2年および3年である。

大気暴露試験を実施した期間における暴露試験場の海塩粒子付着量の観測データを表 -4.4に示す。暴露試験場におけるウェットキャンドル法<sup>6)</sup>により求めた、大気暴露期間に おける平均の海塩粒子付着量は1.011 mg/dm<sup>2</sup>/日である。

JIS Z 2381 (屋外暴露試験方法通則)<sup>6)</sup> および JIS H 0521 (アルミニウム及びアルミニ ウム合金の大気暴露試験方法)<sup>7)</sup> に準拠し,南向き 30 度の暴露角度に,試験片の刻印を上 にして設置した。

		游县(A)	Cl⁻	Cl⁻	Cl⁻	NaCl 換算
年 月	期间 (日)		$(mg/\ell)$	(mg/dm <sup>2</sup> )	$(mg/dm^2/\exists)$	$(mg/dm^2/\exists)$
2001年4月~6月	91	0.41	34.7	14.2	0.156	0.258
7月~9月	91	0.41	32.0	13.1	0.144	0.238
10 月~12 月	112	0.43	182.0	78.3	0.699	1.152
2002年1月~3月	87	0.40	16.1	6.4	0.074	0.122
4月~6月	94	0.38	72.4	27.5	0.293	0.483
7月~9月	77	0.47	192.0	90.2	1.172	1.933
10 月~12 月	107	0.71	66.6	47.3	0.442	0.729
2003年1月~3月	88	0.98	24.3	23.8	0.271	0.446
4月~9月	169	1.17	316	370	2.188	3.608
10月~ 2004年3月	186	0.39	60.0	23.4	0.126	0.207
2004年4月~7月	123	0.42	94.2	39.5	0.321	0.529
8月~11月	120	0.39	453	177	1.472	2.428
				亚	均	1 011

表-4.4 暴露場の海塩粒子付着量の観測データ

#### 4.5 腐食評価

#### 4.5.1 腐食形態

腐食評価は,母材疲労試験片および FSW 疲労試験片について行った。所定の大気暴露期間が経過した疲労試験片を,リン酸 50mℓと 20g 無水クロム酸を 1ℓの蒸留水に溶解した沸騰混液に 10 分間浸せきすることによって腐食生成物を除去した<sup>7)</sup>。腐食成生物を除去した母材試験片には,おもて面とうら面に点状の局部腐食が見られた。FSW 試験片には,FSWの回転工具のショルダーがアルミニウム合金と接触するおもて面(ショルダーの直径 20mm の幅)を除いて,おもて面とうら面に点状の局部腐食が見られた。ショルダー直下

の表面では、ショルダーとの摩擦による温度上昇で熱酸化皮膜が厚くなるので、腐食が生 じにくいと考えられる。

大気暴露された母材引張試験片の平行部中央付近のうら面の局部腐食の拡大写真を図 -4.4 に示す。母材引張試験片および FSW 引張試験片のチャック部の,試験片の長手方向 に平行な局部腐食断面の拡大写真を図-4.5 に示す。局部腐食の形態は粒界腐食である。い ずれも,50~70µm内部まで粒界に沿って腐食し,その後は表面に平行な方向に進行して いる。



**図-4.4** 局部腐食の表面 [大気暴露期間2年]



```
(a) 母材試験片
```

(b) FSW 試験片

```
図-4.5 局部腐食の断面 [大気暴露期間3年]
```

#### 4.5.2 腐食量の経年変化

腐食量を次式で定義する。

$$\eta = \frac{M_0 - M}{A} \tag{4.1}$$

ここに,  $\eta$  : 腐食量(g/m<sup>2</sup>)

*M*<sub>0</sub> : 大気暴露前の試験片の質量(g)

M : 腐食生成物除去後の試験片の質量(g)

A :疲労試験片の全表面積(=0.0288 m<sup>2</sup>)

大気暴露による腐食量の経年変化を図-4.6に示す。図には、それぞれの大気暴露期間の 全試験片の平均値をプロットで示し、最大値と最小値の範囲も示してある。

大気暴露期間が長くなるとともに腐食量は増加するが、期間が長くなるに従って、その 増加の割合は小さくなる。大気暴露後3年間の腐食量は、母材試験片よりFSW 試験片の 方が多い。FSW 試験片の腐食量は、最初の半年で急激に増加する。この理由は次のように 考えられる。 押出形材の表面には,押出時にすじ状のダ イラインが押出方向に生じる。図-4.1 に示 すように,母材試験片の長手方向は押出方 向,FSW 試験片の長手方向は押出方向に直 角な方向である。したがって,ダイライン は,母材試験片では長手方向,FSW 試験片 では長手方向に直角な方向に向く。

試験片は,長手方向を30度傾けて暴露された。母材試験片ではダイラインに沿って 塵埃が雨水で洗い流されるが,FSW 試験片ではダイラインに塵埃や雨水が溜まりやすい。塵埃や雨水に飛来塩分が付着し,これ



が腐食を促進させる。したがって、大気暴露の初期では、母材試験片より FSW 試験片の 腐食量が多くなる。

腐食が発生すると、腐食生成物である水酸化アルミニウムが生成される。大気暴露期間 が長くなると、腐食生成物が多く生成された FSW 試験片の表面が腐食生成物で保護され、 腐食が抑制されるので、FSW 試験片の腐食量の増加割合いが減少すると考えられる。

#### 4.5.3 粒界腐食の腐食面積と深さの経年変化

**図-4.4**と4.5に示す粒界腐食の形状を図-4.7に示す楕円柱で近似し,腐食面積を次式から計算する。

		$A_{\rm c} = \pi a b$
ここに,	$A_{\rm c}$	: 粒界腐食の腐食面積
	а	: 粒界腐食の長半径
	b	: 粒界腐食の短半径

疲労試験片のチャック部分を除いて,おもて面と うら面の各面について,腐食面積の大きいもの上位 5 個を選び,これら 5 個の長径,短径および深さを 測定した。大気暴露期間 1 年の FSW 試験片に関して は,暴露場で試験片を 1 本紛失したので,4 本の疲 労試験片について測定した。深さは,レザー顕微鏡 を用いて,表面と腐食の底の焦点距離の差から求め た。使用したレーザー顕微鏡の分解能は 0.3 μ m であ る。



(4.2)

図-4.7 粒界腐食の形状の定義

粒界腐食の腐食面積 A<sub>c</sub>と深さ dの測定結果をそれぞれ図-4.8 と 4.9 に示す。両図では, 値を大きいほうから降順に示し,おもて面をハッチ,うら面を黒で示してある。図中の矢 印は,疲労亀裂が発生した粒界腐食を表す。











図-4.8の各大気暴露期間のおもて面とうら面の各面において、粒界腐食の腐食面積の上位5個の測定平均値 Ā<sub>c</sub>の経年変化を図-4.10 に示す。同様に、図-4.9の各大気暴露期間のおもて面とうら面の各面において、粒界腐食の深さの5個の測定平均値 ā の経年変化を図-4.11 に示す。

図-4.10と4.11から次のことがいえる。

- 粒界腐食の平均腐食面積と平均深さは、おもて面とうら面の各面において、母材試験片よりFSW試験片の方が大きい。これは、前述したように、母材試験片とFSW試験片の、 押出時に生じたダイラインの方向が異なることによると考えられる。
- 2) 母材試験片と FSW 試験片の各試験片において、粒界腐食の平均腐食面積と平均深さの 値は、おもて面よりうら面の方が大きい。これは、おもて面は、付着した電解質が雨に よって洗い流され、太陽光によって早く乾燥させられるが、うら面は、付着した電解質 が洗い流されにくく、濡れ時間が長いためであると考えられる。
- 3) 粒界腐食の平均腐食面積と平均深さは、1年以降増減が少ない。これは、腐食孔に堆積 した腐食成生物である水酸化アルミニウムによって、腐食孔内部に水や電解質が供給さ れにくくなると同時に、腐食孔内部の局部電池の回路抵抗が大きくなり、腐食電流が流 れにくくなるためであると考えられる。

3)で述べたように、個々の粒界腐食の平均腐食面積と平均深さは、大気暴露期間1年以降の増減が少ない。しかし図-4.6に示すように、腐食量は、1年以後も増加している。これは、新たな粒界腐食が発生するからである。

粒界腐食の深さと腐食面積の関係を図-4.12 に示す。これは、大気暴露期間が3年の試験片の結果である。図には回帰直線と相関係数も示してある。粒界腐食の深さと腐食面積の相関は低いことが分かる。他の暴露期間の試験片についても同様な結果が得られた。

#### 4.6 腐食が機械的特性に与える影響

大気暴露された引張試験片の引張試験の結果を表-4.5に示す。大気暴露3年の母材の機 械強度が低い。しかし、この機械強度に近い機械強度を有する、母材の引張試験の結果が 大気暴露0年にみられる。他方母材の伸びは、大気暴露期間によってほとんど変化しない。 したがって引張試験片の機械的特性は大気暴露によって変化していないと考えられる。



図-4.12 粒界腐食の腐食面積と深さの関係 [3年大気暴露]

#### 4.7 腐食が疲労強度に与える影響

#### 4.7.1 疲労強度の経年変化

大気暴露期間0年,0.5年,1年,2年お よび3年の母材試験片とFSW 試験片の疲労 試験の結果を表-4.6および図-4.13に示す。 応力比Rは0.1である。表-4.6で,丸で囲 まれたFSW疲労試験片の番号は,熱影響範 囲(接合中心から左右15mm以内)以外の母 材で破断した試験片であるため,この結果 は,図-4.13(a)の母材の方にプロットしてあ る。丸で囲まれていないFSW疲労試験片で は,第2章で述べた,キッシングボンドか ら疲労亀裂が発生した試験片は無かった。

図-4.13(a)の母材の S-N 関係は,線で囲まれた1~3年のプロットが同じ領域に分布

表-4.5 大気暴露された引張試験片の

引張試験の結果

	暴露期間	引張強さ	0.2%耐力	伸び	
	(年)	(MPa)	(MPa)	(%)	
		322	294	13.5	
	0	290	261	15.3	
母		321	295	14.1	
	0.5	321	296	15.5	
材	1	313	286	14.1	
	2	315	291	15.5	
	3	289	261	15.0	
F	0	210	121	—	
F	0.5	212	121	_	
S W	1	217	127	l –	
vv 立r	2	226	143	_	
ر <del>ا</del> تا راتا	3	223	149	_	

している。同様に, 図-4.13(b)の FSW 部の S-N 関係は,線で囲んだ 0.5~3 年のプロット が同じ領域に分布している。したがって,これらをそれぞれ同一の分布と見なせる。

**表-4.6**に示す疲労試験結果に最小自乗法を適用することによって得られた,母材とFSW 部の各大気暴露期間に対する S-N 曲線の*m*, log*c*および*ξ*<sub>N</sub>の値を**表-4.7**に示す。**表-4.7** から分かるように, *m*の値は, 大気暴露期間によって変化する。*m*の値が, 大気暴露期間 によって変化することが本質であるかどうかは今後議論されなければならない。しかし,疲労設計を煩雑にしないためには, 大気暴露期間に関わらず, *m*に対して一定値を使用することが望まれる。

そこで、表-4.7の大気暴露期間0年の母材とFSW部のmの値を、それぞれ、母材に対して0.5年および1~3年、FSW部に対して0.5~3年に用い、表-4.6の疲労試験の結果に 最小自乗法を適用して得られるlogcとξ<sub>N</sub>の値を表-4.8 に示す。同表にはlogc<sub>a</sub> (=logc-2ξ<sub>N</sub>)の値も示してある。表-4.8の、各大気暴露期間に対するξ<sub>N</sub>の値は、表-4.7 のそれに近いことが分かる。

表-4.8 に示す*m*, log*c*および log*c*<sub>a</sub>の値を用いて,図-4.14 と4.15 に示す S-N 曲線を得る。図-4.14 は平均 S-N 曲線(式(2.1)参照),図-4.15 は安全側 S-N 曲線(式(3.2)参照)である。

図-4.14 と 4.15 の S-N 曲線が与える,母材と FSW 部の,繰返し回数 2×10<sup>6</sup> に対する疲労強度の経年変化を表-4.9 および図-4.16 に示す。図-4.16 (a) から分かるように,平均 S-N 曲線では,大気暴露前も後も,母材の疲労強度が FSW 部の疲労強度より高い。しかし図-4.16 (b) から分かるように,安全側 S-N 曲線では,大気暴露前 (大気暴露期間 0年) は母材の疲労強度が FSW 部のそれより高いが,大気暴露期間 0.5 年以後は逆転する。すなわち安全側 S-N 曲線においては,大気暴露により,母材の疲労強度が FSW 部の疲労強度より低くなる。この理由は,母材に比べて FSW 部の疲労試験結果のばらつきが小さいためである。FSW 部の疲労試験結果のばらつきが小さくなることは,他の研究者の論文でも見られる<sup>8),9)</sup>。

図-4.14 と 4.15 の S-N 曲線が与える,母材と FSW 部の,繰返し回数 2×10<sup>6</sup>における, 大気暴露前に対する大気暴露後の疲労強度の低下率αの経年変化を表-4.9 および図-4.17 に示す。図-4.17(a)から分かるように,平均 S-N 曲線では,母材のαは,大気暴露期間 1 年で 70.4%まで低下する。そして FSW 部のαは,大気暴露 0.5 年で 86%まで低下する。図 -4.17(b)から分かるように,安全側 S-N 曲線では,母材のαは,大気暴露期間 1 年で 71.6% まで低下する。そして FSW 部のαは,大気暴露期間 0.5 年で 87.2%まで低下する。このよ うに,平均 S-N 曲線と安全側 S-N 曲線が与えるαは,母材と FSW 部のそれぞれにおいて ほぼ同じである。

140		Ę	1. 材疲労試験	片				F	SW 疲労試懸	食片		
期 間 (年)	番	繰返し数	応力範囲	亀裂 座標	発生位 (	置の (mm)	番	繰返し数	応力範囲	<b>亀裂</b> 座	発生位 標(mm	<u>置</u> の
(平)	号	(回)	(MPa)	x	у	z	号	(回)	(MPa)	x	у	z
	1-1	$1.26 \times 10^{5}$	220	4	-8	5	1-1	$5.09 \times 10^{5}$	140	-12	-7	-5
	1-2	$1.46 \times 10^{6}$	180	10	0	-5	1-2	$1.28 \times 10^{5}$	180	-10	6	5
0	1-3	$1.20 \times 10^{7}$	160	ŧ	ミ 破 🛚	釿	1-3		—		_	
0	1-4	$2.57 \times 10^{5}$	200	-27	9	5	1-4	$1.20 \times 10^{7}$	120		未破断	
	1-5	$1.18 \times 10^{5}$	240	-6	1	5	1-5	$9.68 \times 10^{5}$	130	10	-5	5
	1-6	$3.55 \times 10^{5}$	170	-25	-7	5	1-6	_	—		—	
	2-1	$1.51 \times 10^{7}$	100	ŧ	ミ 破 🛚	釿	2-1	_	—		_	
	2-2	$1.50 \times 10^{5}$	200	18	-6	-5	2-2	$2.07 \times 10^{5}$	144	-13	-9	5
0.5	2-3	$3.83 \times 10^{5}$	160	14	0	-5	2-3	$3.94 \times 10^{5}$	126	-13	-5	5
	2-4	$3.77 \times 10^{6}$	120	11	0	5	2-4	$4.07 \times 10^{6}$	120	27	-10	5
	2-5	$8.52 \times 10^{5}$	140	27	-8	-5	2-5	$2.89 \times 10^{5}$	130	-20	-8	-5
	3-1	_	_		_		3-1	$2.32 \times 10^{5}$	140	-8	0	-5
	3-2	$3.84 \times 10^{5}$	126	27	-4	5	3-2	$4.09 \times 10^{5}$	120	25	9	-5
1	3-3	$3.45 \times 10^{5}$	144	9	-9	-5	3-3	$8.38 \times 10^{5}$	100	24	9	-5
	3-4	$5.41 \times 10^{6}$	108	-19	9	-5	3-4	$1.21 \times 10^{7}$	80		未破断	
	3-5	$1.00 \times 10^{7}$	100	ŧ	€ 破 ፟	釿	3-5		—		_	
	4-1	$2.72 \times 10^{5}$	160	25	-7	-5	4-1	$2.24 \times 10^{5}$	140	-4	-10	2
	4-2	$7.63 \times 10^{5}$	120	-1	8	-5	4-2	$9.78  imes 10^4$	160	1	-10	3
2	4-3	$3.68 \times 10^{5}$	140	1	1	5	4-3	$1.30 \times 10^{7}$	80		未破断	
	4-4	$2.15 \times 10^{7}$	100	ŧ	∈ 破 ២	釿	4-4	$1.47 \times 10^{6}$	100	18	-9	-5
	4-5	$1.06 \times 10^{5}$	200	-27	9	5	4-5	$4.30 \times 10^{5}$	120	-25	-7	-5
	5-1	$1.44 \times 10^{5}$	180	27	-4	-5	(5-1)	$2.80 \times 10^{5}$	120	-27	-9	-5
	5-2	$1.75 \times 10^{7}$	100	ŧ	∈ 破 ២	釿	5-2	$1.31 \times 10^{7}$	80	÷	未破断	
3	5-3	$3.59 \times 10^5$	140	-25	9	5	(5-3)	$8.83 \times 10^5$	100	-22	-9	5
	5-4	$1.97 \times 10^5$	160	-25	6	5	5-4	$2.34 \times 10^5$	140	6	-6	5
	5-5	$1.20 \times 10^{6}$	110	10	0	-5	5-5	$1.18 \times 10^{5}$	160	14	4	5

表-4.6 疲労試験の結果

注1) 丸で囲んだ番号は、熱影響範囲以外の母材で破断したことを表わす。





**図-4.13** 大気暴露前後の S-N 関係

		-	11	
対 象	期間(年)	т	log c	${\cal E}_N$
母材	0	5.59	18.33	0.325
	0.5	5.64	18.04	0.388
	1~3	3.73	13.55	0.243
FSW 部	0	6.03	18.70	0.0618
	0.5~3	5.50	17.17	0.0301

表-4.7 m,  $\log c$ および $\xi_N$ の値

対 象	期間(年)	т	log c	$\xi_N$	$\log c_a$
	0		18.33	0.325	17.68
母材	0.5 1~3	5.59	17.93	0.388	17.15
			17.49	0.299	16.89
ESW 🖄	0	6.02	18.70	0.0618	18.58
FSW 部	0.5~3	0.03	18.30	0.0367	18.23

表-4.8 m,  $\log c$ ,  $\xi_N$ および $\log c_a$ の値

図-4.16と4.17に示した×のプロットは,鉄道車両を対象とした板厚が3mmのA6N01-T5 の押出形材の母材の,大気暴露前後の疲労試験結果である<sup>10)</sup>。暴露の場所は,小山市,名 古屋市および下関市で,暴露期間は0,0.5および1年であり,応力比は0である。板厚が 3mm である鉄道車両材の母材の大気暴露による疲労強度の低下は,本研究で対象とした板 厚が10mmの押出形材の母材とほぼ同じである。









(d) FSW 部

図-4.14 大気暴露前後の平均 S-N 曲線









(d) FSW 部

図-4.15 大気暴露前後の安全側 S-N 曲線

		平均 S-N 曲線		安全側 S-N 曲線	
対 象	暴露期間(年)	疲労強度	低下率 α	疲労強度	低下率 α
		(MPa)	(%)	(MPa)	(%)
母材	0	142	100	109	100
	0.5	120	84.5	87	79.8
	1~3	100	70.4	78	71.6
FSW 部	0	114	100	109	100
	0.5~3	98	86.0	95	87.2

表-4.9 繰返し数 2×10<sup>6</sup>に対する疲労強度と低下率



図-4.16 繰返し回数 2×10<sup>6</sup>に対する疲労強度の経年変化



(b) 安全側 S-N 曲線

図-4.17 繰返し数 2×10<sup>6</sup>に対する疲労強度の低下率の経年変化

#### 4.7.2 疲労亀裂の発生点

表-4.6の大気暴露期間1年の母材試験片3-3の疲労亀裂発生点の走査電子顕微鏡(SEM) による写真を図-4.18に示す。これは、30度斜め上方から撮影した倍率300倍の写真であ る。写真の下半分は亀裂断面、上半分はうら面である。疲労亀裂は粒界腐食から発生して いる。図-18(a)は撮影された写真で、図-18(b)は写真を説明するイメージ図である。

疲労亀裂が発生した粒界腐食が,腐食面積に対して図-4.8,深さに対して図-4.9に示してある。図-4.8と4.9に示されていない亀裂は,測定した以外の粒界腐食で発生している。 したがって,疲労亀裂は,腐食面積の大きな粒界腐食,あるいは深さが深い粒界腐食から 必ずしも発生してはいない。 本研究が扱った A6N01S-T5 材の,大気暴露による腐食は粒界腐食であり,図-4.5 と 4.18 に示すように,腐食の底がギザギザしている。このギザギザした形状が新たな応力集中を 生む。したがって,疲労亀裂の発生は,腐食面積または深さより,腐食の底のギザギザに よる影響が大きいと考えられる。図-4.13(a)の母材の S-N 関係は,線で囲んだ 1~3 年の プロットが同じ領域に分布している。同様に,図-4.13(b)の FSW 部の S-N 関係は,線で囲 んだ 0.5~3 年のプロットが同じ領域に分布している。これらは,図-4.10 と 4.11 に示す ように,母材および FSW 部の粒界腐食の平均腐食面積と平均深さが,1年以降増減が少な くなることに起因するというより,暴露期間1年以降,腐食の底のギザギザの形状の変化 が止まることによるものと考える。



(a) 写真

(b) イメージ図

図-4.18 疲労亀裂発生点の SEM 観察 [母材試験片 3-3]

# 第5章 アルミニウム合金 A6N01-T5 の 母材と摩擦攪拌接合部の設計 S-N 曲線

アルミニウム合金 A6N01-T5 の母材および摩擦撹拌接合部の設計 S-N 曲線を設定する際の仮定を次に示す。

(1) 設計 S-N 曲線は次式で与えられる。

$$\log N = \log(\alpha^m c_a) - m \log(\Delta \sigma)$$
(5.1)

ここに, N :繰返し回数

⊿σ :応力範囲

 $\alpha$ , *m*, *c*<sub>a</sub>: それぞれ定数

*c*<sub>a</sub>は次式で与えられる。

 $\log c_a = \log c - 2\xi_N \tag{5.2}$ 

*c*は,式(5.5)が与える*m*の値を次式に用いて,**第2章**の,大気暴露を受けない疲労試 験の結果に最小自乗法を適用して得られる値である。

$$\log N = \log c - m \log(\Delta \sigma) \tag{5.3}$$

 $\xi_N$ は,任意の $\log(\varDelta\sigma)$ に対する $\log N$ の標準偏差であり,次式で与えられる。

$$\xi_{N} = \left\{ \frac{1}{k-2} \sum_{i=1}^{k} \left[ \log N_{i} - \log c + m \log(\Delta \sigma_{i}) \right]^{2} \right\}^{1/2}$$
(5.4)

ここに, N<sub>i</sub>と Δσ<sub>i</sub>: それぞれ, 一つの試験片の繰返し回数と応力範囲

#### *k* :試験片の総数

α=1のとき,式(5.1)で与えられる設計 S-N 曲線は,式(3.2)で与えられる安全側 S-N 曲線と同じである。

mとRの関係は次式で与えられる。

$$m = 7.25 - 2.16R \tag{5.5}$$

ここに , *R* : 応力比

式(5.5)は式(3.1)と同じである。

- (3) 設計 S-N 曲線の log c<sub>a</sub> と R の関係は, 図-3.2(b)において, 床版形材と平板形材の母材の最小値,ならびに FSW 部の最小値を結ぶ線で与えられる。すなわち図-5.1 に示すように,母材の log c<sub>a</sub> と R の関係は実線で与えられ, FSW 部の log c<sub>a</sub> と R の関係は 破線で与えられる。両者の log c<sub>a</sub> と R の関係を表-5.1 に示す。
- (4) αは,大気暴露による腐食が疲労強度に与える影響を考慮するための係数である。
   母材またはFSW部が大気暴露による腐食の影響を受けない場合,α=1である。
   母材またはFSW部が大気暴露による腐食の影響を受ける場合,母材に対して,大気
   暴露1年以後α=0.716,FSW部に対して,大気暴露0.5年以後α=0.872である。これ
   らの値は,第4章で述べたように,沖縄県で大気暴露を受けた試験片の,R=0.1に

対する疲労試験の結果に基づいている。式(5.1)が示すように, *R*=0.1 に対する α の値が,他の *R*の値に対しても適用できることを仮定している。



表-5.1	log <i>c</i> "	٢	R	の間	<b>冒係</b>
	10500	-	11	~ / / /	21 IVJ

対象	$-1 \le R \le 0.1$	$0.1 < R \le 0.5$
母 材	$\log c_a = 21.447 - 6.15R$	$\log c_a = 21.685 - 8.54R$
FSW 部	$\log c_a = 20.486 - 6.38R$	$\log c_a = 20.692 - 8.44R$

**図-5.1** log c<sub>a</sub> と R の関係

(5) 設計疲労限度  $\Delta \sigma_{caf}$  は次式で与えられる。

$$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{(1-R)\sigma_{0.2} \Delta\sigma_{w0a}}{(1-R)\sigma_{0.2} + \frac{1+R}{2}\Delta\sigma_{w0a}}$$

$$(5.6)$$

$$(-1 \le R \le 1)$$

ここに ,  $\Delta \sigma_{w0a}$  : R = -1 に対して応力範囲で表された疲労限度

σ<sub>0.2</sub> : 0.2%耐力

 $\Delta \sigma_{w0a}$ の値を**表**-5.2 に示す。この値は,**表**-3.4 で,母材および FSW 部の各場合にお いて, $\sigma_{w0a}$ の最小値を2倍したものである。 $\sigma_{0.2}$ の値も**表**-5.2 に示す。母材の $\sigma_{0.2}$ は, A6N01-T5 の JIS 規格値であり,FSW 部の $\sigma_{0.2}$ は MIG 溶接部の 0.2%耐力<sup>11)</sup>を採用し ている。式(5.6)が与える設計疲労限度を**表**-5.3 に示す。式(5.6)が示すように,(4)で 述べた $\alpha$ が,大気暴露による腐食による疲労限度の低下にも適用できることを仮定 している。

対 象	$\Delta\sigma_{w0a}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)		
母材	146	175		
FSW 部	133	98		

表-5.2  $\Delta \sigma_{w0a} \geq \sigma_{0.2}$ の値

			5	
D	母	材	FSV	V 部
К	$\alpha = 1$	$\alpha = 0.716$	$\alpha = 1$	$\alpha = 0.872$
- 1	145	104	133	116
0.1	96	69	73	64
0.5	65	47	44	38

**表-5.3** 設計疲労限度  $\Delta \sigma_{caf}$ 

(MPa)

大気暴露による腐食の影響を受けない場合,すなわち α=1の場合の設計 S-N 曲線と疲労 試験結果との比較を図-5.2 に示す。床版形材および平板形材の疲労試験の結果,ならびに R=0.1 に対して,大気暴露前の母材と FSW 部の疲労試験の結果を図に載せている。設計 S-N 曲線が疲労試験結果の下限付近を通過していることが分かる。

R=0.1 に対して,大気暴露による腐食の影響を受けた場合の設計 S-N 曲線と疲労試験の 結果との比較を図-5.3 に示す。母材に対して大気暴露 1 年以降,FSW 部に対して大気暴 露 0.5 年以降の疲労試験結果を図に載せている。図-5.3(a)の母材においては,設計 S-N 曲 線が疲労試験の結果の下限付近を通過していることが分かる。しかし図-5.3(b)の FSW 部 においては,設計 S-N 曲線が疲労試験の結果からかなり離れた位置を通過している。これ は,図-5.2(e)に示すように,大気暴露前の FSW 部の疲労強度が,大気暴露前の設計 S-N 曲線よりかなり高い位置に分布しているからである。



図-5.2 大気暴露による腐食の影響を受けない場合の設計 S-N 曲線と 疲労試験結果との比較





(b) FSW 部

**図-5.3** 大気暴露による腐食の影響を受けた場合の設計 S-N 曲線と 疲労試験の結果との比較(*R*=0.1)

### 第6章 結 論

本研究では,疲労試験および大気暴露試験の実施により,アルミニウム合金 A6N01-T5 の母材と摩擦攪拌接合部の疲労強度に応力比と腐食が与える影響を明らかにした。さらに 両者の影響を考慮した設計 S-N 曲線を与えた。主な結論は次のとおりである。

- (1) 応力比が大きくなると,母材および摩擦攪拌接合部とも S-N 曲線の負の傾きは大きくなる。
- (2) 応力比が疲労限度に与える影響は,母材および摩擦攪拌接合部とも Sonderberg 線で考慮される。
- (3) 大気暴露による腐食に起因する,母材および摩擦攪拌接合部の疲労強度の低下は,大 気暴露期間1年以後止まる。母材の疲労強度は元から71.6%まで,摩擦攪拌接合部の 疲労強度は元から87.2%まで低下する。
- (4) アルミニウム合金 A6N01-T5 の母材および摩擦攪拌接合部の設計 S-N 曲線は次式で与えられる。

$$\log N = \log(\alpha^m c_a) - m \log(\Delta \sigma)$$

 $\Box \Box [\Box, m = 7.25 - 2.16R]$ 

*c<sub>a</sub>*:下表参照

対象	$-1 \le R \le 0.1$	$0.1 < R \le 0.5$
母材	$\log c_a = 21.447 - 6.15R$	$\log c_a = 21.685 - 8.54R$
摩擦攪拌接合部	$\log c_a = 20.486 - 6.38R$	$\log c_a = 20.692 - 8.44R$

R:応力比

- α:腐食による疲労強度の低下率であり,母材に対して 0.716,FSW 部に対して 0.872
- (5) 設計疲労限度は, Sonderberg 線に基づいて次式で与えられる。

$$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{(1-R)\sigma_{0.2} \Delta\sigma_{w0a}}{(1-R)\sigma_{0.2} + \frac{1+R}{2}\Delta\sigma_{w0a}}$$
$$(-1 \le R \le 1)$$

ここに , ⊿σ<sub>w0a</sub> : R = -1 に対する疲労限度(下表参照)

*σ*<sub>0.2</sub>:0.2%耐力(下表参照)

対象	$\Delta\sigma_{w0a}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)
母材	146	175
摩擦攪拌接合部	133	98

#### 参考文献

- 大倉一郎,萩澤亘保,岩田節雄,北村幸嗣:アルミニウム橋実現のための技術開発, 軽金属,54巻9号,pp.380-387,2004.
- 2) 大倉一郎,萩澤亘保,鳴尾亮,戸田均:摩擦攪拌接合で製作されたアルミニウム床版の 疲労特性,土木学会論文集,No.703/ -59,pp.255-266,2002.
- 3) 大倉一郎,長尾隆史,石川敏之,萩澤亘保,大隅心平:構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係の定式化および MIG 溶接と摩擦攪拌接合によって発生する残留応力の 定式化,ALST研究レポート1,2007.
- 4) 大倉一郎:鋼構造設計学の基礎,東洋書店, pp.99-103, 2004.
- 5) 日本アルミニウム協会, 土木構造物委員会:アルミニウム合金の摩擦攪拌接合部の品 質検査指針(案), 2004.
- 6) JIS Z 2381: 屋外暴露試験方法通則, 2001.
- 7) JIS H 0521: アルミニウム及びアルミニウム合金の大気暴露試験方法, 1996.
- Haagensen, P.J.: Fatigue Performance of Friction Stir Butt Welds in a 6000 Series Aluminum Alloy, Computer Methods and Experimental Measurement for Surface Treatment Effects, pp.7-9, 1995.
- Ranes, M., Kluken, A.O. and Midling, O.T.: Fatigue Properties of As-Welded AA6005 and AA6082 Aluminum Alloys in T1 and T5 Temper Condition, *Trends in Welding Research of 4<sup>th</sup> International Conference*, pp.5-8, 1995.
- 10) 軽金属車両委員会:大型薄肉形材用アルミニウム合金 6N01-T5 の疲れ強さ,日本鉄道 車輌工業会,軽金属協会,pp.58-77,1988.
- 11) 日本アルミニウム協会(旧軽金属協会): アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案
   (第1次改訂試案), 1998.