

アルミニウム合金 A6005C-T5 の MIG 溶接部の
疲労強度に腐食が与える影響

ALST 研究レポート 32

2013 年 10 月

大阪大学大学院工学研究科

大倉一郎

京都大学大学院工学研究科

石川敏之

概要

本研究では、アルミニウム合金 A6005C-T5 の平板の押出形材を MIG 溶接で連結することにより製作された突合せ板から採取された試験片を沖縄で大気暴露し、曝露期間 1 年、2 年、3 年後に回収し、その疲労試験を行う。得られた試験結果より、大気暴露による腐食は、S-N 曲線には影響しないが、疲労限度を低下させることを示す。

謝辞

萩澤亘保氏 [日本軽金属 (株) グループ技術センター, 元職員] の素原稿に, 著者らが同氏から聞き取り調査をして得た知見を加えて本研究レポートを完成させた. 沖縄県嘉弥真島への大気暴露試験片の設置と回収は, 故 花崎昌幸氏 [日本軽金属 (株) グループ技術センター, 元職員] によってなされ, 疲労試験は, 間宮志胖氏 [日本軽金属 (株) グループ技術センター, 元職員] によって実施された. ここに記して, 諸氏に感謝の意を表します.

本研究の一部は, 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.

目次

第1章 序 論	1
第2章 試験片	2
2.1 材料	2
2.2 試験片の製作	2
2.3 熱影響範囲	3
第3章 試験片の大気曝露	5
第4章 試験結果	7
4.1 引張試験の結果	7
4.2 疲労試験の結果	7
第5章 結論	12
参考文献	13

第1章 序 論

わが国では、6000系アルミニウム合金土木構造物の母材および摩擦撹拌接合部の疲労設計ガイドライン¹⁾が日本アルミニウム協会から2010年に発行された。現在、アルミニウム合金土木構造物の設計・製作指針の作成が土木学会で進められている。同指針には、疲労設計に関する規定が設けられることになっており、疲労設計の対象には、母材と摩擦撹拌接合継手のみならず、溶接継手と高力ボルト摩擦接合継手も含まれる。

欧米のアルミニウム合金構造物の設計基準 Eurocode 9²⁾と AA³⁾には、摩擦撹拌接合継手を除いて、母材、溶接継手、高力ボルト摩擦接合継手に対して疲労設計に関する規定が設けられている。土木学会の疲労設計に関する規定の中で、溶接継手の疲労強度は、IIW 疲労設計指針⁴⁾の規定が準用されることになっている。

アルミニウム合金土木構造物においては、厚さ 60 μ m 程度のエポキシ塗装の上に、厚さ 30 μ m 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われた後、再塗装は一般には行われない⁵⁾。したがって、アルミニウム合金土木構造物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。Eurocode 9と AA の疲労設計に関する規定および IIW 疲労設計指針が採用している溶接継手の疲労強度は、腐食を受けない試験体の疲労試験結果によるものであり、腐食の影響は考慮されていない。

本研究は、アルミニウム合金が A6005C-T5 の平板の押出型材を MIG 溶接で連結して製作された突合せ板から採取された試験片を沖縄で大気暴露し、曝露期間1年、2年、3年後に回収し、その疲労試験を行う。得られた試験結果より、大気暴露が溶接部の疲労強度に与える影響を明らかにする。

第2章 試験片

2.1 材料

幅 150mm, 厚さ 10mm の平板の押出型材を試験片の製作に使用した. 押出型材のアルミニウム合金材は A6005C-T5 であり, その化学成分を JIS の規格値とともに表 2.1 に示す. JIS 14B 号試験片の引張試験による押出型材の機械的特性を表 2.2 に示す. 押出型材の長手方向を試験片の軸方向に採っている.

表 2.1 押出型材の化学成分

型材	化 学 成 分 (%)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
平板	0.82	0.16	0.01	0.16	0.68	0.07	0.01	0.090
JIS	0.4~0.9	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 2.2 押出型材の機械的特性 (JIS 14B 号試験片)

引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸 び (%)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
316	288	14.1	70.7	0.313

2.2 試験片の製作

図 2.1 に示すように, 長さ 2m の 2 本の押出型材の長辺を突合わせ, 表 2.3 に示す溶接条件に従って, 突合せ面を MIG 溶接で連結して突合せ板を製作した. 突合せ板の溶接線に対して直角な方向に, 図 2.2 に示す引張試験片と疲労試験片を採取した. 図 2.2(a) に示す引張試験片の形状は JIS14B 号試験片の寸法規定に従っている.

引張試験片の本数は, 余盛ありと余盛削除の試験片が各 6 本である. 母材に傷をつけないようにエンドミルで余盛を切削し, 紙ヤスリで平坦にした後, 試験片の両表面, 両側面および角を 400 番のエメリー紙で試験片の軸方向に沿って磨くことにより, 余盛削除の試験片を製作した. 疲労試験片の本数は, 余盛ありと余盛削除の試験片が各 25 本である.

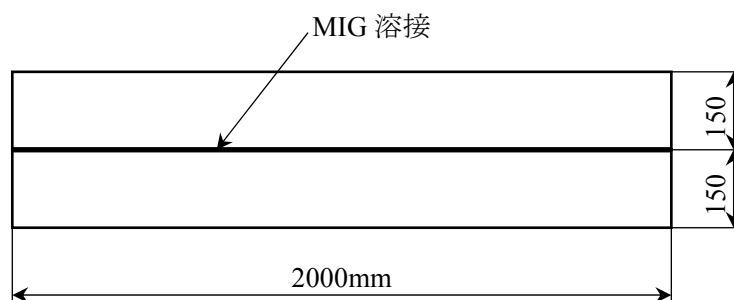
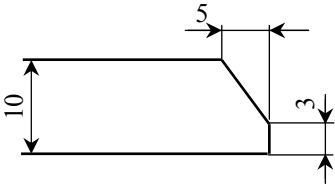
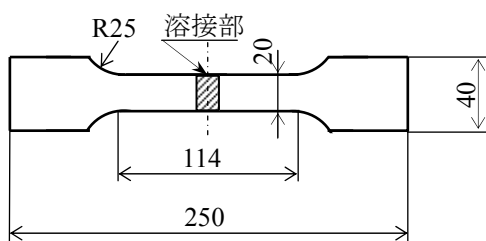
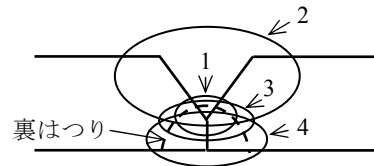


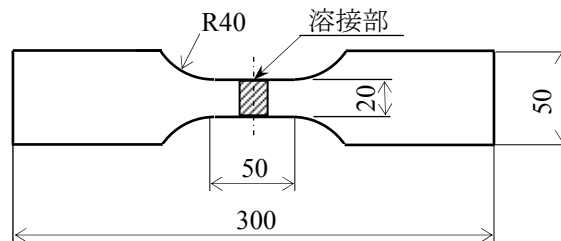
図 2.1 突合せ板

表 2.3 溶接条件 (MIG 溶接)

溶 加 材	A5183WY ϕ 1.6mm			
ガス流量	28 ℓ /min			
開先形状				
パ ス		電流(A)	電圧(V)	速度(cm/min)
	1 パス	250	29	13
	2 パス	240	30	7
	裏はつり		7~8 mm	
	3 パス	250	28	10
4 パス	240	30	7	



(a) 引張試験片



(b) 疲労試験片

図 2.2 試験片

2.3 熱影響範囲

図 2.1 に示す試験体の長手中央を溶接線に対して直角方向に切断し、図 2.3 に示すように、その断面の上下表面から 2mm 内側および板厚の中央の位置におけるビッカース硬さを測定した。硬さ分布を図 2.4 に示す。同図において溶接中心が原点である。溶接中心から左右各側 20mm の範囲の硬さが低下し、溶接中心では硬さが幾分高くなっている。これは、A6005C-T5 は熱処理アルミニウム合金であるため、熱影響部の硬さが低下するが、溶加材 A5183WY は非熱処理アルミニウム合金であるため、硬さが変化しないためである。溶接部の熱影響範囲は、溶接中心から左右各側 20mm、合計 40mm である。

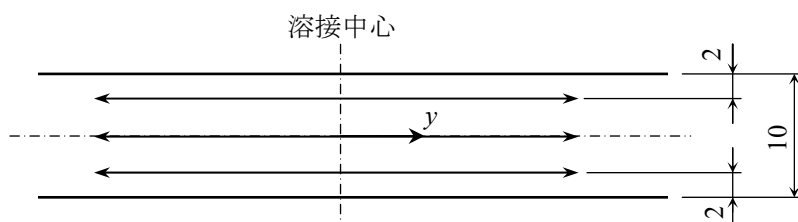


図 2.3 溶接部の硬さの測定位置

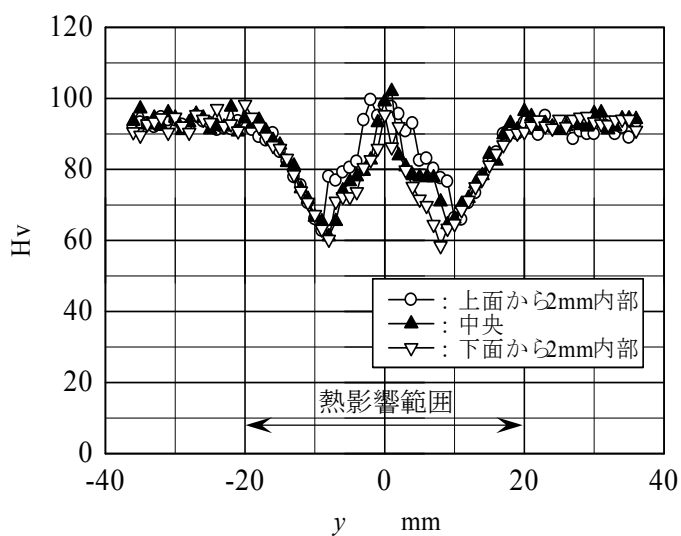


図 2.4 溶接部の硬さ分布

第3章 試験片の大気曝露

大気曝露用の引張試験片と疲労試験片を、沖縄県の西表島と石垣島の間にある嘉弥真島で大気曝露した。曝露場は、東経 124 度、北緯 24 度 20 分に位置し、海拔 2m で波打ち際から 15m の距離にある。試験片の大気曝露を 2005 年 5 月に開始した。

曝露場は、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、本曝露場は、金属にとって厳しい腐食環境である。試験片の大気曝露状況を図 3.1 に示す。JIS Z 2381 (屋外曝露試験方法通則)⁶⁾ 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曝露試験方法)⁷⁾ に従って、試験片の長手方向を南向き 30 度の曝露角度で設置した。大気曝露の仕方は文献 8) と同じである。



図 3.1 試験片の大気曝露状況

試験片の大気曝露期間は 1 年、2 年、3 年である。各大気曝露期間で使用した試験片の本数を表 3.1 に示す。同表で、大気曝露期間 0 年は大気曝露されていないことを示す。所定の大気曝露期間が経過した試験片を回収し、それらの引張試験および疲労試験を実施した。

曝露期間 1 年、2 年、3 年後の余盛ありの疲労試験片と余盛削除の疲労試験片の表裏の状態の一例を、それぞれ図 3.2、3.3 に示す。各疲労試験片の表裏面からそれぞれ 10 点の孔食を選定し、計測された孔食の深さと直径（長径と短径の平均値）について、疲労試験片 5 本の平均値を表 3.2 に示す。余盛ありの疲労試験片では、溶接ビードおよびその近傍に大きな孔食が生じていなかったため、疲労試験片の並行部と R 部の近傍に生じた、比較的大きな孔食の深さと直径を計測した。余盛ありと余盛削除の疲労試験片ともに、海塩粒子が雨で流される表面よりも、海塩粒子が流されずに蓄積する裏面の孔食の深さと直径が大きいがわかる。

表 3.1 各大気曝露期間に使用した試験片の本数

大気曝露期間 (年)	引張試験片の本数 (本)		疲労試験片の本数 (本)		大気曝露期間
	余盛あり	余盛削除	余盛あり	余盛削除	
0	3	3	10	10	—
1	1	1	5	5	2005年5月～2006年3月
2	1	1	5	5	2005年5月～2007年4月
3	1	1	5	5	2005年5月～2008年4月

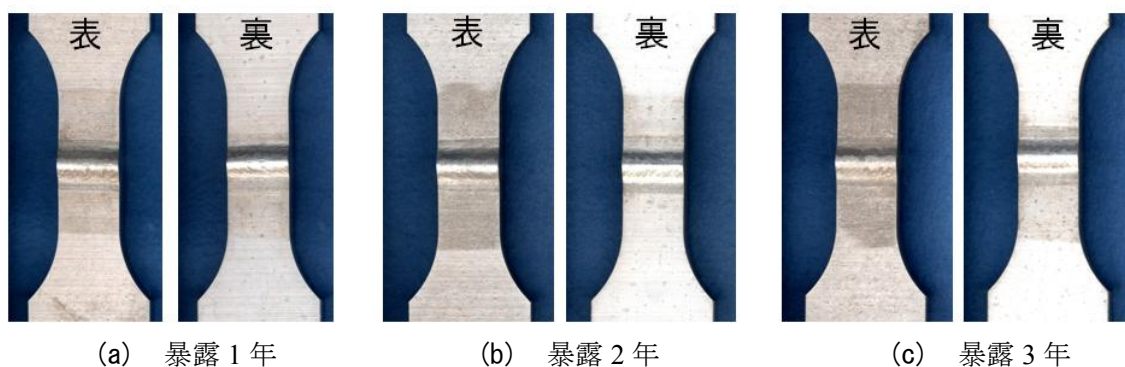


図 3.2 大気曝露後の余盛ありの疲労試験片の表裏の状態

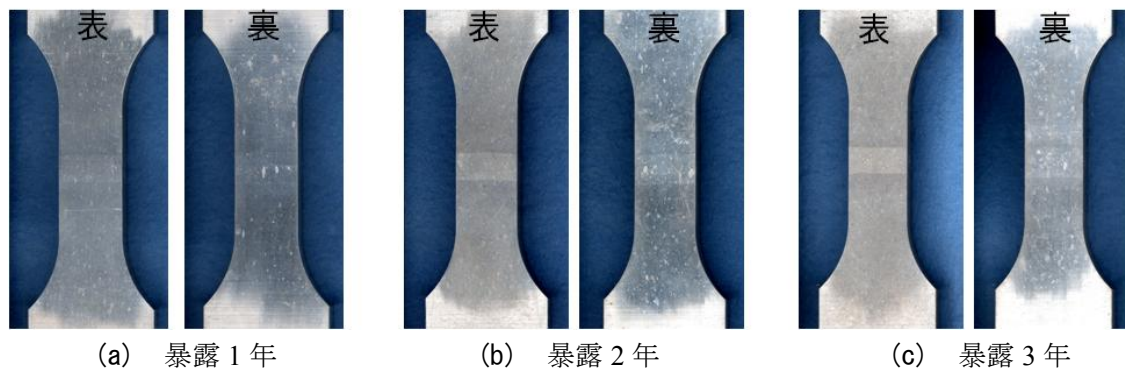


図 3.3 大気曝露後の余盛削除の疲労試験片の表裏の状態

表 3.2 大気曝露後に疲労試験片に生じた孔食の深さと直径

大気曝露期間 (年)	余盛あり				余盛削除			
	表面(μm)		裏面(μm)		表面(μm)		裏面(μm)	
	深さ	直径	深さ	直径	深さ	直径	深さ	直径
1	29.5	70.6	39.7	107.9	21.3	45.9	30.9	63.0
2	27.3	88.4	37.8	110.0	22.7	65.5	31.0	78.3
3	30.4	106.7	40.3	109.0	22.4	92.6	36.4	94.8

第4章 試験結果

4.1 引張試験の結果

引張試験の結果を表 4.1 に示す。余盛あり試験片の応力は、余盛を含めない、母材の断面積に対する応力である。試験片の破断伸びを測定する標点距離は 80mm である。同表に示す伸びの値は、熱影響範囲 40mm だけでなく母材も標点距離に含む値ので、熱影響範囲の伸びを示すものではないことに注意されたい。

大気暴露期間 0 年、すなわち大気暴露されていない試験片の試験結果に関して、余盛あり試験片の 0.2%耐力が、余盛削除試験片のその 1.21 倍大きい。これは、伸び計で計測された伸びに基づいてひずみが算出されているためである。余盛あり試験片で計測された伸びは、余盛の存在で一部断面積が増加したことにより、余盛削除試験片の伸びより小さくなる。一般に、試験片は、熱影響部（図 2.4 において、硬さが低下している部分）で破断する。この部分の断面積は、余盛あり試験片と余盛削除試験片で大きく変わらないので、両者の引張強さは大きく異なる。

大気暴露期間 0, 1, 2, 3 年の試験片の引張強さ、0.2%耐力、伸びに変化が見られないので、A6005C-T5 のアルミニウム合金材に関して、大気暴露による腐食は、溶接部の機械的特性に影響しない。

表 4.1 引張試験の結果

試験片		余盛あり			余盛削除		
		引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)
大気暴露 期間 0 年	No.1	228	163	6.3	215	138	5.4
	No.2	230	163	6.2	220	136	6.2
	No.3	238	171	6.6	219	138	7.0
	平均値	232	166	6.4	218	137	6.2
大気暴露期間 1 年		239	171	6.7	219	135	6.8
大気暴露期間 2 年		245	188	5.3	221	143	7.1
大気暴露期間 3 年		241	175	6.1	220	142	7.5

4.2 疲労試験の結果

疲労試験の結果を表 4.2 に示す。余盛あり試験片の応力は、余盛を含めない、母材の断面積に対する応力である。応力比は 0.1 である。同表の下に、破断箇所を示す図を示す。平行部端とは平行部の端で R 部が始まる部分である。

表 4.2 疲労試験の結果

試験片	余盛あり			余盛削除			
	応力範囲 $\Delta\sigma$ (MPa)	繰返し数 $N(\times 10^4$ 回)	破断箇所	応力範囲 $\Delta\sigma$ (MPa)	繰返し数 $N(\times 10^4$ 回)	破断箇所	
大気暴 露期間 0年	1	100	44.0	溶接止端	140	35.8	熱影響範囲
	2	140	7.7	溶接止端	160	1.9	R部
	3	80	1284.0	未破断	120	23.6	熱影響範囲
	4	90	34.6	平行部端	90	22.7	R部
	5	70	1677.0	未破断	140	21.4	熱影響範囲
	6	90	55.3	溶接止端	100	78.3	熱影響範囲
	7	120	16.6	溶接止端	80	1290.0	未破断
	8	140	7.7	溶接止端	140	30.6	熱影響範囲
	9	80	270.0	溶接止端	160	7.5	熱影響範囲
	10	60	1165.0	未破断	120	47.3	熱影響範囲
大気暴 露期間 1年	1	100	53.5	平行部端	100	81.3	R部
	2	80	134.9	溶接止端	80	1390.0	未破断
	3	60	1313.0	未破断	140	23.1	熱影響範囲
	4	120	15.8	溶接止端	120	35.7	平行部端
	5	140	6.0	溶接止端	90	127.6	平行部端
大気暴 露期間 2年	1	80	117.0	平行部端	100	134.5	平行部端
	2	60	1178.0	未破断	80	1212.0	未破断
	3	120	12.5	溶接止端	140	19.5	平行部端
	4	100	27.8	溶接止端	160	13.1	熱影響範囲
	5	140	6.1	溶接止端	—	—	—
大気暴 露期間 3年	1	100	45.9	溶接止端	120	32.7	熱影響範囲
	2	80	77.4	溶接止端	100	59.7	熱影響範囲
	3	60	1079.0	未破断	80	121.0	熱影響範囲
	4	70	88.7	平行部端	60	1044.0	未破断
	5	120	18.6	溶接止端	70	219.0	熱影響範囲

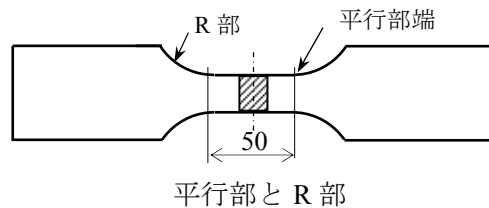
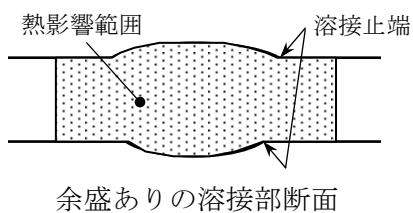


表 4.2 の結果を S-N 関係として図 4.1 に示す。表 4.2 の網掛が施されたデータは溶接部に疲労亀裂が発生しなかったため図 4.1 にプロットされていない。余盛ありと余盛削除の各場合において、大気曝露に関わらず、プロット点は一つの分布を示している。すなわち、大気曝露による腐食は、溶接部の S-N 関係に影響しない。

図 4.1 には、次式で与えられる S-N 曲線も描いてある。

$$\log N = \log c - m \log(\Delta\sigma) \quad (4.1)$$

ここに、 N : 繰返し回数

$\Delta\sigma$: 応力範囲

c と m : 定数

$\log c$ と m の値は、 $\log(\Delta\sigma)$ を独立変数、 $\log N$ を従属変数として、最小二乗法を適用することにより決定される。さらに、任意の $\log(\Delta\sigma)$ に対する $\log N$ の標準偏差 ξ_N が次式から計算される。

$$\xi_N = \left\{ \frac{1}{k-2} \sum_{i=1}^k [\log N_i - \log c + m \log(\Delta\sigma_i)]^2 \right\}^{1/2} \quad (4.2)$$

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

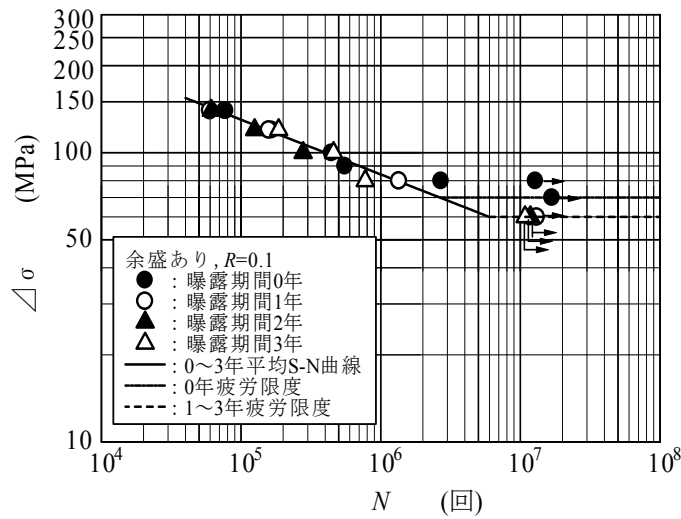
k : 疲労破断した試験片の総数

余盛ありと余盛削除の各場合において、大気曝露に関わらず、疲労破断したプロット点に最小二乗法を適用して得られる $\log c$, m , ξ_N の値を表 4.3 に示す。余盛あり試験片の m の値が余盛削除試験片のそれよりも大きい。一般に、S-N 曲線の m の値は、応力集中が高い方が低い方より小さくなる。余盛あり試験片の応力集中が余盛削除試験片のそれより高いので、余盛あり試験片の m の値が余盛削除試験片のそれよりも大きくなった原因は不明であり、今後の検討課題である。

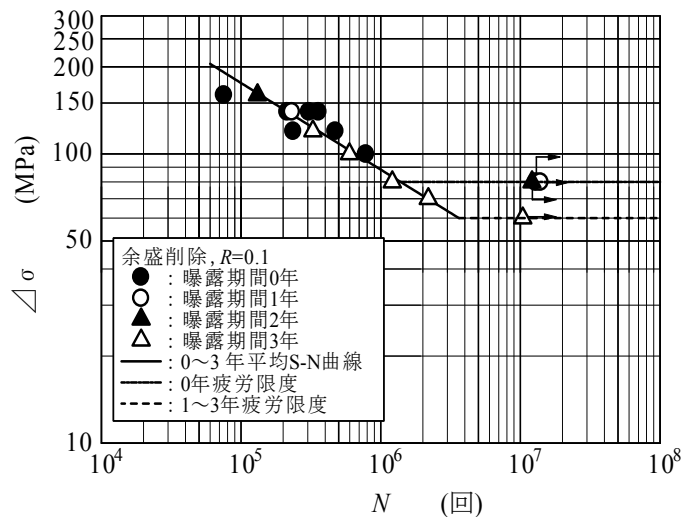
表 4.3 m , $\log c$, ξ_N , $\Delta\sigma_{caf}$ の値

試験片	大気曝露	m	$\log c$	ξ_N	$\Delta\sigma_{caf}$ (MPa)
余盛あり	なし	5.29	16.184	0.1300	70
	あり				60
余盛削除	なし	3.34	12.499	0.1359	80
	あり				60

疲労限度 $\Delta\sigma_{caf}$ を表 4.3 に示す。疲労限度 $\Delta\sigma_{caf}$ は、疲労破断したプロットの下限未満で、繰返し回数が 10^7 回以上で破断しなかった応力範囲の上限としている。大気曝露を受けた試験片の疲労限度は、余盛がある場合、大気曝露なしの疲労限度の 0.857 倍まで低下する。余盛削除の場合、大気曝露を受けた試験片の疲労限度は、大気曝露なしの疲労限度の 0.75 倍まで低下する。この様に、大気曝露による腐食は疲労限度に影響する。



(a) 余盛あり



(b) 余盛削除

図 4.1 S-N 関係

余盛あり試験片と余盛削除試験片の S-N 関係の比較を図 4.2 に示す。各試験片において、大気暴露の期間に関わらず、一つの記号で表している。応力範囲 $\Delta\sigma$ が 60 MPa から 80 MPa の間で、余盛削除の S-N 曲線が余盛ありのそれより低い。これは、試験データに対する最小二乗法による近似の問題であり、応力範囲 $\Delta\sigma$ が 60 MPa から 80 MPa の間では、余盛削除と余盛ありの S-N 曲線はほぼ等しいと解釈すべきであろう。図 4.2 から分かるように、大気暴露を受けると、余盛削除の有無にかかわらず、疲労限度は同じになり、疲労限度以上で、余盛を削除することにより疲労強度が高くなる。

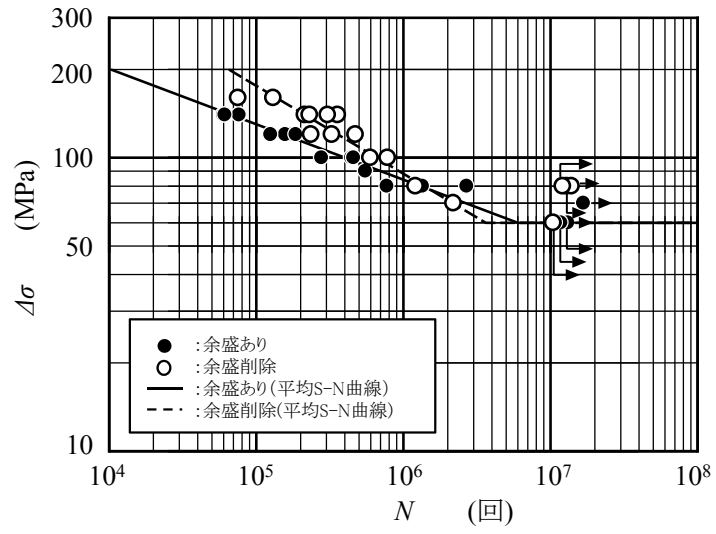


図 4.2 余盛あり試験片と削除試験片の S-N 関係の比較

第5章 結論

本研究は、アルミニウム合金 A6005C-T5 の平板の押出型材を MIG 溶接で連結して製作された突合せ板から採取された試験片を沖縄で大気暴露し、曝露期間 1 年、2 年、3 年後に回収し、その疲労試験を行った。得られた試験結果より、大気暴露が溶接部の疲労強度に与える影響を明らかにした。主な研究成果を次に示す。

- (1) 大気暴露による腐食は、溶接部の機械的性質に影響しない。
- (2) 大気暴露による腐食は、溶接部の S-N 関係に影響しない。
- (3) 大気暴露による腐食は疲労限度に影響する。大気暴露を受けた試験片の疲労限度は、余盛がある場合、大気暴露を受けない試験片の疲労限度の 0.857 倍まで低下する。余盛削除の場合、大気暴露を受けた試験片の疲労限度は、大気暴露を受けない試験片の疲労限度の 0.75 倍まで低下する。
- (4) 大気暴露を受けると、余盛削除の有無にかかわらず、疲労限度は同じになる。

参考文献

- 1) 日本アルミニウム協会 土木構造物委員会：6000系アルミニウム合金土木構造物の母材および摩擦撹拌接合部の疲労設計ガイドライン，2010.
http://www.aluminum.or.jp/doboku/files/guideline100912_03.pdf
- 2) Eurocode 9：Design of aluminum structures - Part 2: Structures susceptible to fatigue, 1997.
- 3) Aluminum Association：Aluminum Design Manual, PART I, Specifications for Aluminum Structures, 2010.
- 4) IIW: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, IIW document IIW-1823-07 ex XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07, 2009.
- 5) 大倉一郎，萩澤亘保，花崎昌幸：アルミニウム構造学入門，東洋書店，2006.
- 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.
- 8) 萩澤亘保，大倉一郎，花崎昌幸，大西弘志，佐藤正典：アルミニウム合金材の母材と擦撹拌接合部の疲労強度に腐食が与える影響，土木学会論文集 A，Vol.62，No.3，pp.478-488，2006.