

(論文)

摩擦攪拌接合による高強度Al-Mg系アルミニウム合金 継手部の耐食性向上

Improvement of Corrosion Resistance of Al-Mg Alloy Plate Joints through Friction Stir Welding



中井 学*
Manabu Nakai



江口法孝*
Noritaka Eguchi

Both of stress corrosion and exfoliation corrosion resistance of high strength 5083-H32 alloy joints by FSW were vastly improved in addition to high strength, comparison with that of conventional MIG butt joints. These stemmed from prevention of resolution of homogeneously dispersed phases and remained subgrains due to lower temperature of FSW. Conventional MIG butt welding, in contrast, makes phases decompose and precipitate on the newly formed grain boundary to depreciate corrosion resistance because of higher temperature than phases solidus. FSW is expected to break fresh ground for 5083-H32 alloy plates for both passenger vessels and maritime structures.

まえがき = 船舶向け溶接構造部材用アルミニウム合金には、軟質材の5083-O材(耐力:約145MPa)が主として用いられている。また、軽量薄肉化が要求される部位には、冷間圧延材に安定化焼鈍を加えた加工硬化材H32材(耐力:約230MPa)が使われている。接合はMIG溶接である。加工硬化材の剥離腐食性、応力腐食割れ(SCC)性などの耐食性は、MIG溶接を施工すると大幅に低下する¹⁾。このため、加工硬化材の用途は限定される。一方、軟質材では、MIG溶接によっても耐食性はほとんど低下しない。

1991年に、英国TWIで、摩擦攪拌接合法(FSW、図1参照)が開発された²⁾⁻⁵⁾。FSWは固相溶接法で、到達温度は従来の溶融溶接法に対し低い⁶⁾。従って、FSWの適用で、加工硬化材の熱影響部での、相の再固溶ならびに再結晶に起因する耐食性の低下は、大幅に改善され

ることが期待される。テクノスーパーライナー、高速艇での船体構造部材の薄肉軽量化に対し、高強度アルミニウム合金への要望は強い⁷⁾⁸⁾。そこで、FSWには、高強度な加工硬化材の適用範囲は広がり、構造部材の薄肉軽量化へ寄与することが期待される。そこで本研究では、加工硬化材5083-H32板のFSW継手材の材料特性を従来からのMIG継手材と比較評価し、船舶用溶接構造部材としての特性、特に耐食性の改善効果を明確にすることを目的とした。

1. 実験方法

1.1 供試材

供試材は、板厚3mmの加工硬化材5083-H32および軟質材5083-Oである。供試材の化学成分を表1に示す。これらを母材とし、FSW継手材およびMIG継手材を作製した。FSWは、直径5mmのピンと直径12.5mmのシヨルダからなる工具を用い、前進角3°、溶接速度300mm/min、ツール回転速度1150rpmの条件で行った。また、MIG溶接条件は、溶加材:5183、入熱量:約7500J/cmで、継手の余盛は有とした。なお、FSW、MIG溶接ともに、溶接方向は板圧延方向と平行(L)とした。

1.2 試験方法

母材および継手材の相の観察は、LT-ST面(圧延材の直角断面)を40%りん酸溶液(35℃, 3分間)に浸漬後、光学顕微鏡で行った。また、相の観察は、板厚中

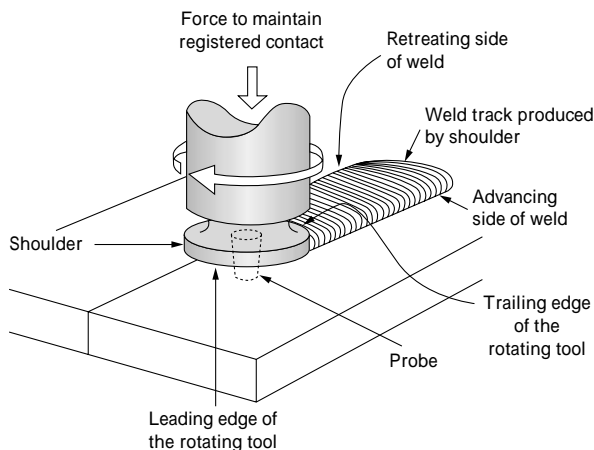


図1 FSWの接合過程模式図

Fig. 1 Schematic illustration of friction stir welding process

表1 供試材の化学組成

Table 1 Chemical composition (mass %)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
5083	0.10	0.25	0.06	0.53	4.20	0.12	0.03	0.02

*アルミ・銅カンパニー 技術部

心部において、TEM でも行った。引張試験は、ASTM-E8 に従い、LT 方向にひずみ速度 $1.6 \times 10^{-3} \times S^{-1}$ で実施した。さらに、溶接部硬さ試験を、板厚中央部で、溶接方向と直角方向(LT 方向)に 0.5mm の間隔で行った。また、溶接部 SCC 試験は、LT 方向に押曲げ法で、U 字状(曲半径:板厚の 14 倍)に曲げ変形した後、アノード分極法(3.5%NaCl 溶液、電流密度: 6.20mA/cm^2)で、試験時間 1 000 分間まで行った⁹⁾。剥離腐食試験は、ASTM-G66 (ASSET Test) に従い実施し、剥離腐食の程度を、N (腐食無し) から P (孔食), EA ~ ED まで等級付けた。継手材のミクロ組織の観察、引張試験、硬さ試験ならびに耐食性試験は、室温時効の進行で 相が析出し、粒界腐食感受性が高くなった状態で行うため、 $120 \times 7 \text{d}$ の鋭敏化処理後実施した。また、母材の耐食性試験は、粒界腐食感受性をより高くした状態でも行うため、30%冷間圧延 $120 \times 7 \text{d}$ からなる鋭敏化処理で、相の析出をさらに促進させた状態でも行った。なお、冷間圧延は、船体構造体形状への成形加工に対応し、圧延率は、SCC 性が最も敏感になる 30%とした¹⁰⁾。

2. 試験結果と考察

2.1 ミクロ組織

母材のミクロ組織を図 2 および図 3 に示す。加工硬化材の 5083-H32 は、圧延方向に伸長した結晶粒内に、約 $5 \mu\text{m}$ の亜結晶粒組織が発達している。相 ($\text{-Mg}_2\text{Al}_3$) は、主に粒界に高密度に析出し、連続析出している。なお、亜境界への析出は不連続である。一方、軟質材の 5083-O では、約 $25 \mu\text{m}$ の等軸状の結晶粒からなる。相は、結晶粒の粒界上に不連続に析出する。

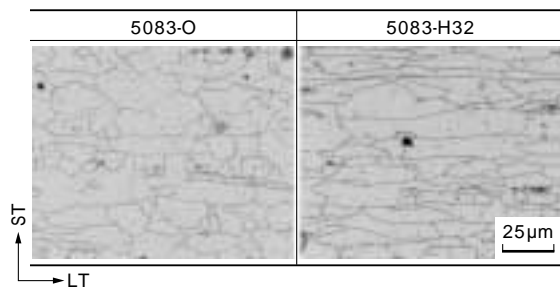


図 2 5083-O および 5083-H32 の (Mg_2Al_3) 相ミクロ組織 (エッチング液: 40%りん酸)
Fig. 2 (Mg_2Al_3) phase in 5083-O and 5083-H32 sheets etched 40% phosphoric acid

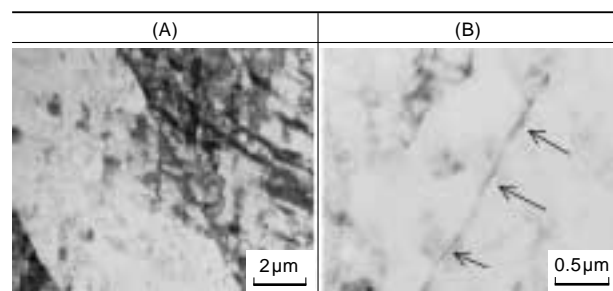


図 3 5083-H32 の TEM ミクロ組織: (A) 亜結晶粒組織, (B) 亜粒界上の (Mg_2Al_3) 相
Fig. 3 TEM of substructure (A) and (Mg_2Al_3) phase on subgrain boundaries (B) in as received 5083-H32 sheets

2.2 引張特性

母材および継手材の引張特性を図 4 に示す。加工硬化材 5083-H32 の母材, MIG 継手材および FSW 継手材の耐力は、それぞれ 215MPa, 155MPa および 170MPa である。母材の耐力は、MIG 継手材で約 70%, FSW 継手材で約 80%まで低下する。一方、軟質材 5083-O では、それぞれ 155MPa, 140MPa および 153MPa である。軟質材では、溶接による耐力の低下は小さい。なお、加工硬化材および軟質材ともに、FSW 継手材の耐力は、MIG 継手材よりも高い。従って、加工硬化材 5083-H32 の FSW 継手材は、同材料の MIG 継手材に対し耐力で約 10%, また軟質材 5083-O の FSW 継手材においても耐力で約 10% 高く、高強度な継手である。

2.3 耐食性

母材の剥離腐食性および耐 SCC 寿命を図 5 に示す。 $120 \times 7 \text{d}$ の鋭敏化処理後において、加工硬化材 5083-H32 および軟質材 5083-O の剥離腐食性はともに高く、それぞれ P (孔食) および N (腐食無し) である。また、耐 SCC 性も高く、加工硬化材および軟質材の耐 SCC 寿命はそれぞれ 300min, 1 000min 以上である。なお加工硬化材は、軟質材に比べ、鋭敏化処理で、滑り線および転位に沿って Mg が拡散し易い。粒界での 相の析出間隔は小さく、剥離腐食性と耐 SCC 性は、軟質材に比べ低くなる。

一方、加工硬化材および軟質材の耐食性は、30%冷間圧延後の $120 \times 7 \text{d}$ の鋭敏化処理後で、剥離腐食性は EB, 耐 SCC 寿命はそれぞれ 50min および 30min へ低下する。冷間圧延で新たに導入された滑り線や転位により、粒界上への 相の析出が促進される。連なった 相がネットワークを形成し、耐食性は極端に低下する。母材において、加工硬化材 5083-H32 および軟質材 5083-O ともに、船体構造部を始めとした腐食環境下で使用される構造部材に適用する際には、曲げ加工などの成形時に導入される加工量を極力小さくなるように、設計施工上の注意が必要となる。

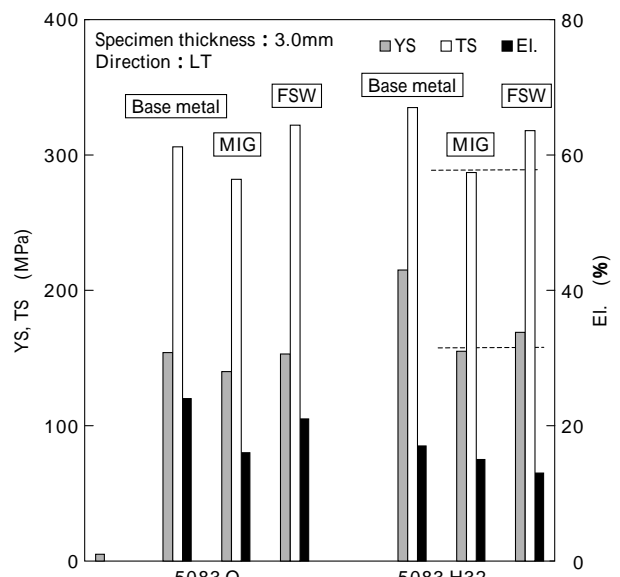


図 4 5083-O および 5083-H32 の引張特性
Fig. 4 Tensile properties of 5083-O and 5083-H32 sheets

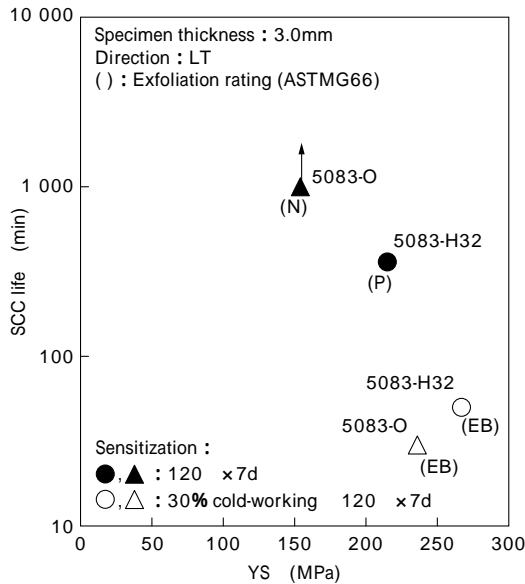


図5 5083-O および5083-H32 の耐 SCC 性と剥離腐食性
Fig. 5 SCC and exfoliation corrosion susceptibility for 5083-O and 5083-H32 sheets

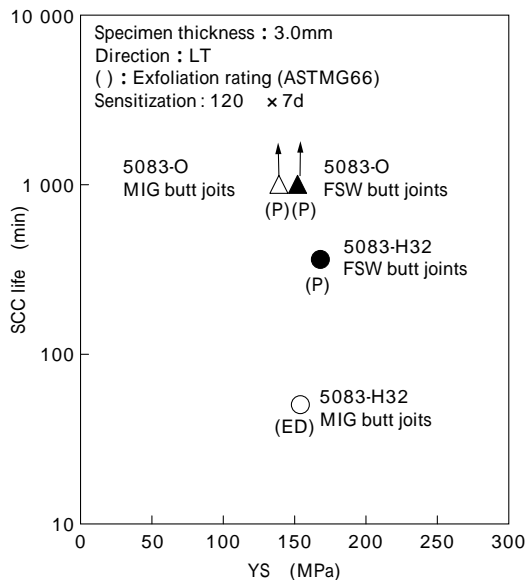


図6 5083-O, 5083-H32 の FSW および MIG 溶接継手材の耐 SCC 性と剥離腐食性
Fig. 6 SCC and exfoliation corrosion susceptibility of FSW and MIG butt joints in 5083-O and 5083-H32 sheets

継手材の剥離腐食性および耐 SCC 寿命を図6に示す。FSW 継手材, MIG 継手材ともに, 溶接後に 120 x 7d の鋭敏化処理を行った。軟質材 5083-O 継手材の耐食性は, MIG および FSW とともに高く, 剥離腐食性は P (孔食), 耐 SCC 寿命は 1000min 以上である。一方, 加工硬化材 5083-H32 の継手材の耐食性は, 従来から適用されてきた MIG では低く, 剥離腐食性は ED, 耐 SCC 寿命は 50min である。ところが, 接合法に FSW を用いることにより, 加工硬化材であっても, 剥離腐食性は P (孔食), 耐 SCC 寿命は 360min までも向上する。

図7に, 5083-H32 の FSW 継手材と MIG 継手材の剥離腐食試験後の試験片外観写真を示す。FSW 継手材では, 孔食程度の軽微な腐食しか発生しない。これに対し MIG 継手材では, 熱影響部と非熱影響部との境界部で, 板を貫通するほどの激しい剥離腐食が発生する。これら

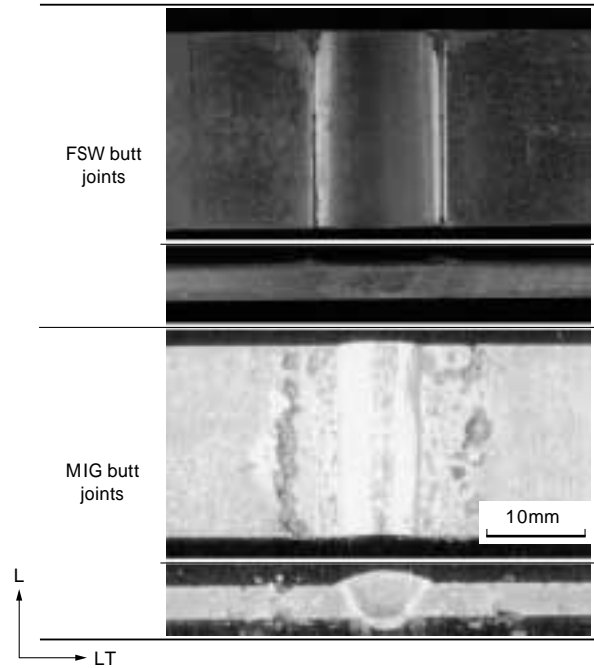


図7 5083-H32 FSW 溶接継手材とMIG溶接継手材の剥離腐食 (鋭敏化処理: 120 x 7d)
Fig. 7 Exfoliation corrosion of FSW and MIG butt joints in 5083-H32 sensitized at 120 for 7d sheets

の領域では, MIG 溶接時の温度上昇に伴い, 相の再固溶, 回復再結晶が生じる。その後の冷却ならびに 120 x 7d の鋭敏化処理で, 粒界に沿って 相が連続的に析出するため, 剥離腐食性は低くなる。一方, FSW 継手材では図8に示すように, 熱影響部と非熱影響部との境界部においても, 結晶粒内にも 相が形成される。これより, FSW では, これら領域での溶接時到達温度は低く, 相の再固溶のみが生じ, 亜境界は残存する。その後の冷却ならびに鋭敏化処理では, 相は主として結晶粒内の亜境界に沿って不連続に形成される。このため, 溶接による耐食性の低下は, ほとんど生じないと推定される。

なお, FSW 継手材の SCC は, 塑性流動部で発生した。図9に示すように, 熱流動部は約 10 μm の亜結晶粒で形成され, 相は亜境界に沿って不連続に生じる。SCC のき裂は, 亜境界に沿って進展し破壊に至る。FSW 継手材の耐 SCC 性の向上には, 塑性流動部のマイクロ組織のファイバも必要である。

むすび= 船舶用溶接構造部材として用いられてきたアルミニウム合金軟質材 5083-O および加工硬化材 5083-H32 を用い, 新しい溶接法 FSW を適用し, 従来からの MIG 溶接法との材料特性を比較し, 以下の結論を得た。

(1) 母材において, 軟質材 5083-O および加工硬化材 5083-H32 の耐食性は高い。特に, 軟質材は耐 SCC 性も高く, SCC は発生しないレベルである。ただし, 軟質材および加工硬化材ともに, 冷間加工後鋭敏化処理すると, 耐食性は低下する。曲げ加工などの成形時の加工量を極力小さくするように, 設計施工上の注意が必要となる。

(2) 加工硬化材 5083-H32 の FSW 継手材は, MIG 継手

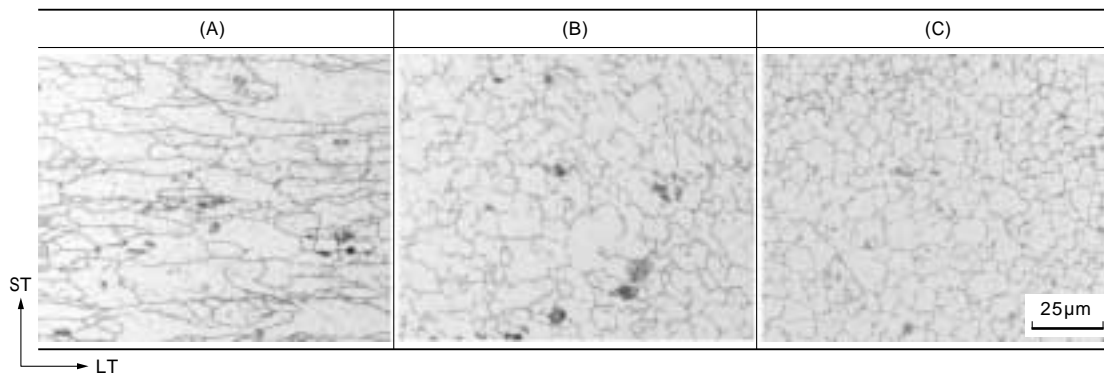


図8 5083-H32 FSW 溶接継手材の非熱影響部 / 熱影響部、熱影響部 / 塑性流動部および塑性流動部のミクロ組織 (鋭敏化処理: 120 °C × 7d, エッチング液: 40%りん酸)

Fig. 8 Microstructure of non-HAZ/HAZ (A), HAZ/Stir Zone (B), and Stir Zone (C) in 5083-H32 FSW butt joints sensitized at 120 °C for 7days etched 40% phosphoric acid sheets

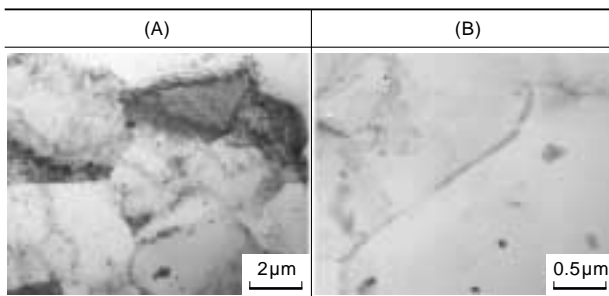


図9 5083-H32 FSW 溶接継手材の継手部 TEM ミクロ組織:

(A) 亜結晶粒組織, (B) 亜粒界上の (Mg_2Al_3) 相

Fig. 9 TEM of substructure (A), and (Mg_2Al_3) phase on subgrain boundaries (B) in weld zone of 5083-H32 FSW butt joints

材よりも耐力で約 10% 高く, また軟質材 5083-O の FSW 継手材においても耐力で約 10% 高く, 高強度な継手である。また, 耐食性も高く, 実用上問題のない 5083-H32 母材と同等レベルである。一方, MIG 継手材の耐食性は低く, 適用時には犠牲陽極材設置などの慎重な配慮が必要である。

(3) 軟質材 5083-O 継手材の耐食性は, FSW 継手材, MIG 継手材ともに極めて高く, 母材と同等レベルである。

以上より, 船舶向け溶接構造部材用アルミニウム合金において, 高強度な加工硬化材 5083-H32 の適用範囲は,

新しい溶接法 FSW を用いることにより広くなり, 溶接構造物体の薄肉軽量化が可能となる。なお, FSW 継手材の高強度高耐食性化には, 母材ならびに溶接条件の組成・工程の最適化が今後も必要と考える。

参考文献

- 1) 中井学ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.1 (2002) p.16.
- 2) W. M. Thomas et al. "Improvements relating to friction welding", International Application Published Under The Patent Cooperation Treaty, International Publication No.WO93/10935 (1993).
- 3) 古賀信次ほか: 川崎重工技報, 154号 (2004) p.52.
- 4) 岡村久宣ほか: 軽金属, 50 (2000) p.166.
- 5) 榎本正敏: アルミニウム, 29 (1999) p.63.
- 6) 山村興司ほか: 日本機械学会第9回機械材料・材料加工技術講演会論文集 (2001) p.85.
- 7) TSL 技術研究組合: テクノスーパーライナーの研究開発状況, 日本造船学会誌 785号 (1994).
- 8) A. J. "Bill" Bryant et al.: LIGHT METAL AGE, APRIL (2001) p.48.
- 9) F. Booth et al.: An Anodic Stress Corrosion Test for Aluminum Magnesium Alloys, First International Congress on Metallic Corrosion, Butterworths, (1962) p.703.
- 10) 宮木美光ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.34, No.2 (1984) p.43.