

(論文)

船舶用高強度 Al-Mg 系アルミニウム合金と耐食性

中井 学*・江間光弘*・江藤武比古(工博)*・高木康夫**・佐藤文博(工博)**

*アルミ・銅カンパニー・技術部 **アルミ・銅カンパニー・真岡製造所・アルミ板研究部

Corrosion Resistance of High Strength Al-Mg Alloys for Ship Application

Manabu Nakai・Mituhiko Ema・Dr. Takehiko Eto・Yasuo Takaki・Dr. Fumihiko Sato

The most common alloys currently used for high speed aluminum-intensive ships are 5083-O alloy plates and sheet. Recently stronger work hardened 5456-H116 and 5059-H321 and other similar alloys have been developed for practical application. In this paper, 5083-O and 5456-H116 alloys were investigated to clarify the strength and stress corrosion and exfoliation corrosion resistance in base and welded alloy sheets. Results showed that 5083-O alloys have a superior combination of strength and corrosion resistance to 5456-H116, which showed especially poor corrosion resistance in welded joints when compared to base alloys. This poor corrosion resistance was shown to be the result of the $\text{-Mg}_2\text{Al}_3$ preferential reversion caused by precipitation morphologies and electrochemical potential. Sensitized treatment and an impressed-current test should be used as a rapid evaluation test for corrosion resistance.

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、Al-Mg 系合金の 5083-O 材(軟質材, 耐力: 約 145MPa) が主として用いられている。強度は Mg 量を増加させると高くなるが、応力腐食割れ(SCC)性は図 1 に示すように、より敏感になる¹⁾。SCC は、室温域においては O 材では Mg 量が 5% を超えると、H12 の冷間加工硬化材では Mg 量が 3% を超えると生じ易くなる。従って、Mg 量 4.5% の 5083 合金において、軟質材より高強度な部材が必要な場合、冷間加工材に焼鈍を加え、SCC の原因となる相を一部析出させた加工硬化材が適用される。代表的な質別は、焼鈍温度約 150 の H32 材(耐力: 約 230MPa) である。しかしながら、5083-H32 板材は、実船での使用で、粒界腐食が生じることが報告されている²⁾。応力集中や腐食が生じ易い部位には使用出来ず、適用部位は限定されてきた。そこで、米国では質別 H116 があらたに開発され、加工硬化材の高強度高耐食性 5456-H116 板材(耐力: 約 255MPa) として実用化された³⁾。

最近、テクノスーパーライナーなど、国内外で、高速艇の就航が続いている⁴⁾⁵⁾。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開発への要望は強い。例えば加工硬化材 5059-H32 板材(耐力: 260MPa) が開発されている⁶⁾。このような素材に対し、造船メーカー各社の意見は、二つに分かれる。一つは、高強度板材を積極的に活用し、船体の軽量化を図って行こうとするグループで、もう一つは、長時間焼鈍からなる鋭敏化処理で (Al_2Mg_3) 相の析出を促進し、室温長時間経過後のミクロ組織を模擬した試験材を作製してでも耐食性を見極め、その上でなお、5083-O 板材を用いていこうとするグループである。素材メーカーも、同様である。

そこで本研究では、加工硬化材 5456-H116 及び軟質材 5083-O の材料特性を再評価し、船舶向け溶接構造部材用アルミニウム板材に望まれる以下の材料特性ならびに評価法を明らかにすることを目的とする。

- 1) 加工硬化材と軟質材の母材の強度及び耐食性
- 2) 加工硬化材と軟質材の継手材の強度及び耐食性

3) 実用使用環境を再現できる簡易かつ迅速な耐食性評価法。

1. 実験方法

1.1 供試材

供試材は、加工硬化材 5456-H116 及び軟質材 5083-O 工場板材(5mm) 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、5456-H116 及び 5083-O ミグ溶接継手材(溶加材: 5183, 入熱量: 約 7 500J/cm, 余盛: 有) を作製した。

1.2 試験方法

母材及び継手材の相の観察は、LT-ST 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 4分の1の部位を TEM でも行った。引張試験は、ASTM-E8 に従い、LT 方向に歪み速度 $1.6 \times 10^{-3} \cdot \text{S}^{-1}$ で実施した。SCC 試験は、LT 方

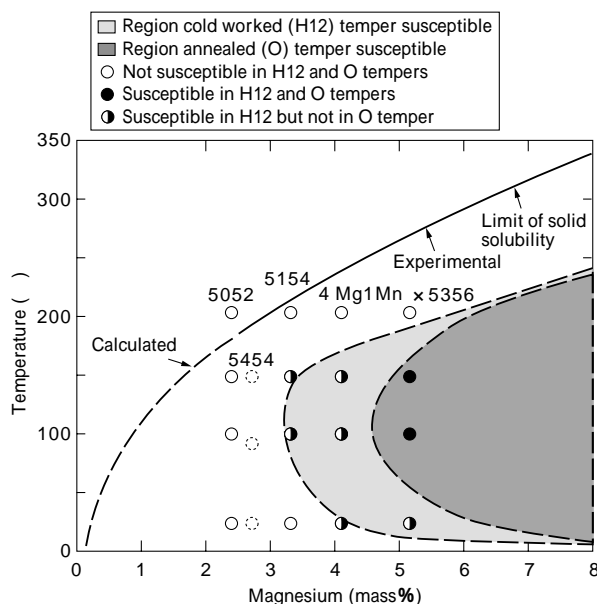


図 1 SCC 感受性に及ぼす Mg 量及び使用温度の影響
Fig. 1 Effect of Mg contents and aging temperature on SCC susceptibility

表 1 供試材の化学組成
Table 1 Chemical composition

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
5456	0.10	0.29	0.06	0.65	5.30	0.10	0.04	0.03
5083	0.10	0.25	0.06	0.53	4.20	0.12	0.03	0.02

(mass%)

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/cm²）で、試験時間1000分間まで行った⁷⁾。剥離腐食試験は、ASTM-G66（ASSET test）に従い、実施した。また、定電流電解後（0.5% NaCl 溶液、室温、1 μA、120分）の電位を測定し、継手材の局部的な腐食のし易さを評価した。母材ならびに継手材の耐食性試験は、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 × 7日からの鋭敏化処理（以下、S1処理）後、実施した。また、母材の耐食性試験は、30%冷間圧延 120 × 7日からの鋭敏化処理（以下、S2処理）で、相の析出をさらに促進させ、粒界腐食感受性をより高くした状態でも行った。この冷間圧延は、船体構造体形状への成形加工に対応する。圧延率は、SCC性が最も敏感となる30%を用いた⁸⁾。

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及び図3に示す。加工硬化材5456-H116は、結晶粒内に約3 μmの亜結晶粒組織が発達している。相（ Mg_2Al_3 ）は主として亜結晶粒の境界上に高密度に析出し、粒界上には不連続に析出する。一方、軟質材5083-Oの組織は約30 μmの結晶粒からなる。相は、結晶粒の粒界上に低密度にかつ不連続に析出する。

母材の鋭敏化処理後のミクロ組織を、図2に併せて示す。加工硬化材5456-H116では、S1処理前後で、相の析出状態はほとんど変化しない。S2処理で相は粒内のすべり線上に選択的に析出する。粒界上では、相は連続化しない。一方、軟質材5083-Oでは、S1処理で、相の粒界上への析出が促進されるが、連続した析出状態には到らない。S2処理で、結晶粒界上の相は連続析出状態となり、結晶粒界に沿った相のネットワークが形成される。

2.2 引張特性

母材及び継手材（余盛有）の引張特性を図4に示す。5456-H116の母材及び継手材の耐力は、それぞれ270MPa及び200MPaである。溶接により、耐力は70MPa低下する。一方、5083-Oの母材及び継手材の耐力は、それぞれ130MPa及び140MPaである。溶接の前後での耐力の差は小さい。従って、加工硬化材5456-H116は、軟質材5083-Oに対し、母材耐力で約100%、継手材耐力でも約40%も高い高強度材となる。

2.3 耐食性

母材の耐SCC寿命及び剥離腐食性を図5に示す。加工硬化材5456-H116の耐食性は極めて高い。S1処理後で、耐SCC寿命は1000min以上、剥離腐食性はN（腐食無し）である。また、S2処理後でも、耐SCC寿命は1000min以上、剥離腐食性は、N（腐食無し）~P（孔食）と実用に耐えうる良好な耐食性を示す。これは、相が鋭敏化処理前の段階で粒内に高密度に析出しているためである。S1及びS2処理を行っても粒界上へ析出する相は少なく、相は連続化しない。このため、粒界腐食感受性は高くない。従って、母材において加工硬化材5456-H116は、軟質材5083-Oに対し耐力値で約2倍の高強度高耐食性材となる。一方、軟質材の5083-Oの耐食性も、S1

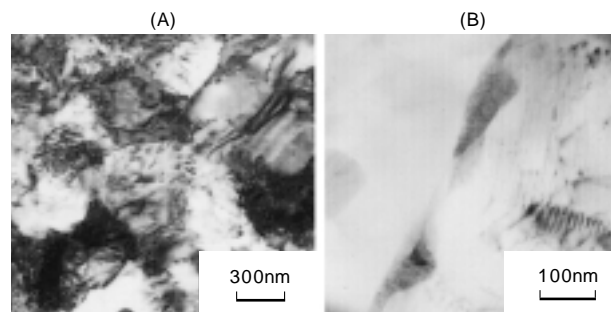
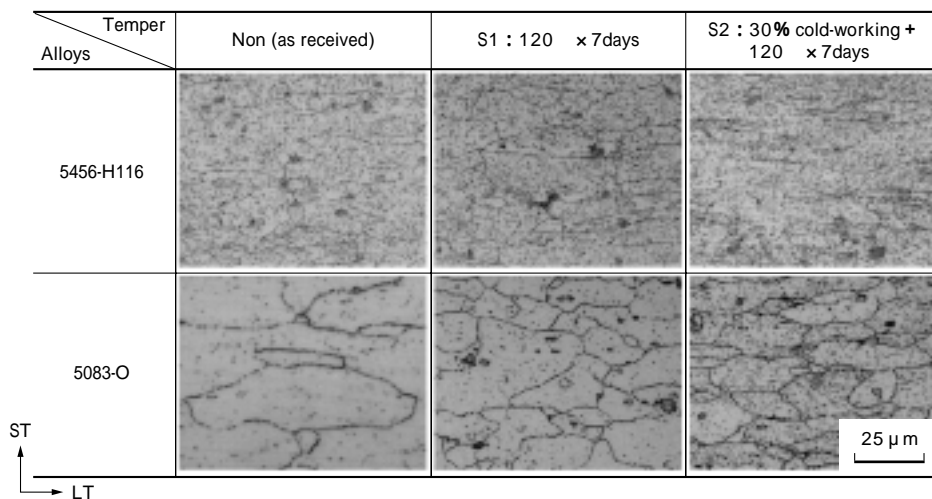


図3 5456-H116のTEMミクロ組織：(A) 亜結晶粒組織，(B) 亜結晶粒界上の Mg_2Al_3 相
Fig. 3 TEM of substructure (A) and Mg_2Al_3 phase on subgrain boundaries (B), in as received 5456-H116 sheets

図2 5456-H116及び5083-O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 5456-H116 and 5083-O sheets etched 40% phosphoric acid



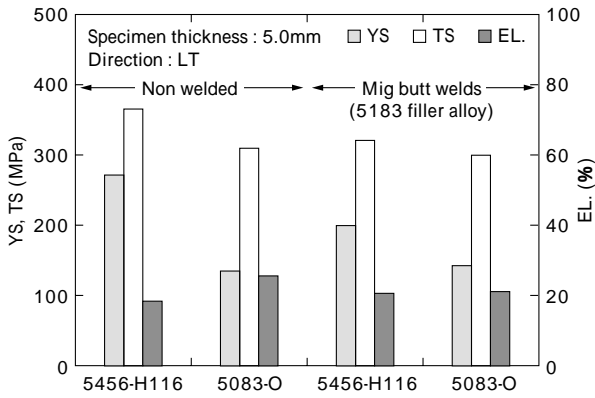


図4 5456-H116 及び 5083-O の引張特性
Fig. 4 Tensile properties of 5456-H116 and 5083-O sheets

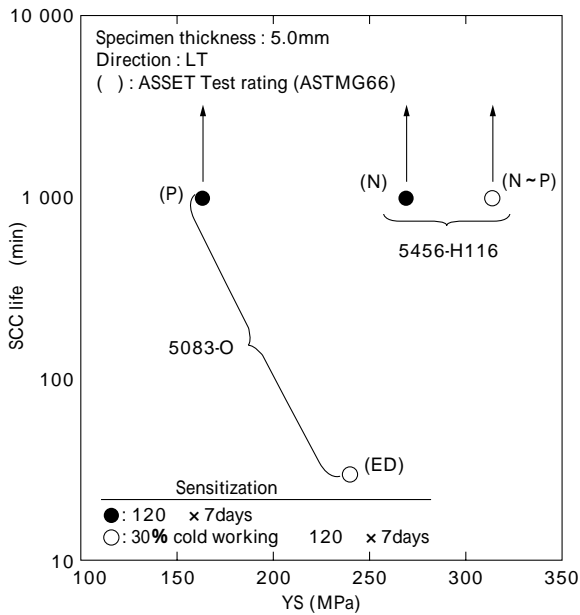


図5 5456-H116 及び 5083-O の耐 SCC 性と剥離腐食性
Fig. 5 SCC and exfoliation corrosion susceptibility for 5456-H116 and 5083-O sheets

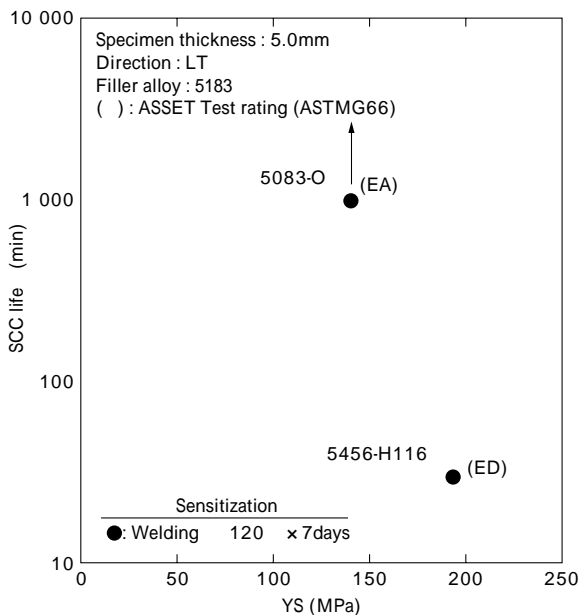


図6 5456-H116 及び 5083-O ミグ溶接継手材の耐 SCC 性と剥離腐食性
Fig. 6 SCC and exfoliation corrosion susceptibility for butt-welded 5456-H116 and 5083-O sheets

処理後では、粒界上の相は不連続なため極めて高い。ただし、S2 処理で、相の析出が促進され、粒界上に相のネットワークが形成されるため、耐食性は極端に低下する。耐 SCC 寿命は 30min、剥離腐食性は ED となる。軟質材 5083-O を船体構造部材に適用する際には、成形時に導入される加工量を、極力小さくなるような設計⁹⁾ ならびに施工上の注意が必要となる。

実構造上重要となる継手材の耐 SCC 寿命および剥離腐食性を図 6 に示す。継手材には S1 処理を行った。母材で高い耐食性を示す加工硬化材 5456-H116 の継手材での耐食性は極めて低い。耐 SCC 寿命 30min、剥離腐食性は ED (目に見える表面持ち上がりが極めて激しく生じる) である。図 7 に、剥離腐食試験後の試験片外観写真を示す。剥離腐食は、熱影響部と非熱影響部との境界部位に沿って、板厚を貫通するまで激しく生じる。図 8 に示すように、この部位では、相は連続的に析出する。溶接時の加熱で、回復及び相の再固溶が生じ、S1 処理で粒界上に相が連続的に析出したこととなる。一方、軟質材 5083-O の継手材の耐食性は高い。耐 SCC 寿命は 1000min 以上、剥離腐食性は EA で、母材の耐食性のレベルとほぼ同程度である。熱影響部と非熱影響部との境界部位の相は、粒界上に不連続に析出するため、加工

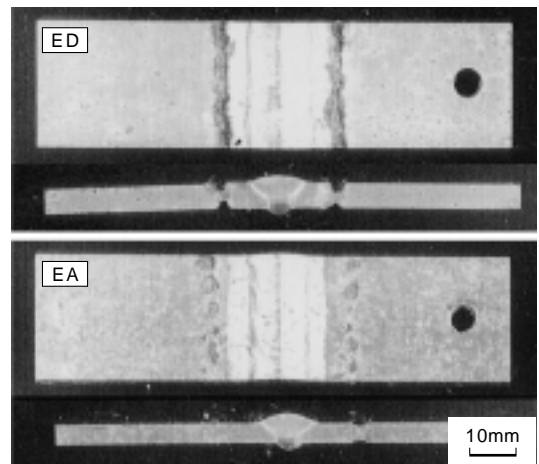


図7 5456-H116 及び 5083-O ミグ溶接継手材の剥離腐食 (鋭敏化処理: 120 x 7 days)
Fig. 7 Exfoliation corrosion of butt-welded 5456-H116 and 5083-O sheets sensitized at 120 for 7 days

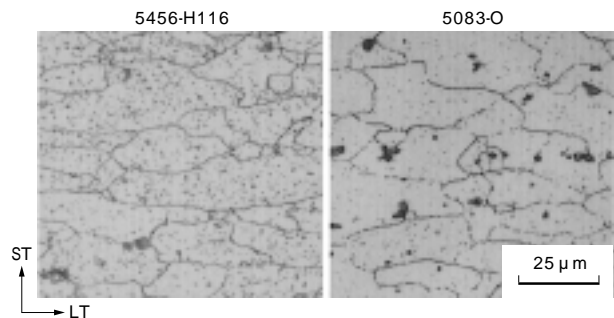


図8 5456-H116 及び 5083-O ミグ溶接継手材の熱影響部と非熱影響部との境界部マイクロ組織 (鋭敏化処理: 120 x 7 days, エッチング液: 40%りん酸)
Fig. 8 Interface (unaffected metal / solid solution) microstructure in butt-welded 5456-H116 and 5083-O sensitized at 120 for 7 days sheets etched 40% phosphoric acid

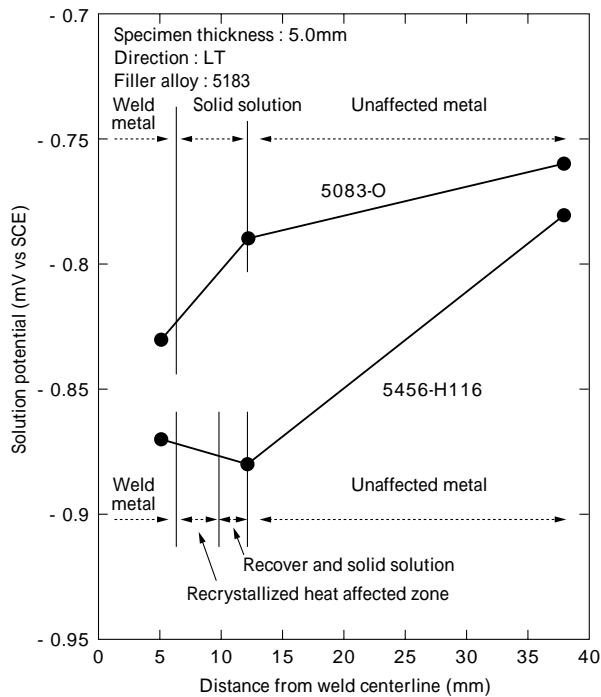


図9 5456-H116 及び 5083-O ミグ溶接継手材の電流電解後の電位分布 (鋭敏化処理 : 120 × 7 days)
 Fig. 9 Solution potential change in butt welded 5083-O and 5456-H116 sheets sensitized at 120 for 7 days

硬化材のような激しい剥離腐食は生じない。この理由を電気化学的な観点から考察した。図9に、継手材の溶接中心から非熱影響部までの定電流電解後の電位を示す。加工硬化材 5456-H116 の電位は、軟質材 5083-O に対し低く、腐食し易いことを示す。特に、熱影響部と非熱影響部との境界部の電位は低い。これらの電位の値は、剥離腐食試験の結果及びマイクロ組織で観察された相の分布とも良く対応する。

むすび = 船舶向け溶接構造部材用アルミニウム合金として主として用いられてきた軟質材 5083-O と、船体の薄肉軽量化に対して強い要望のある高強度な加工硬化材 5456-H116 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 及び加工硬化材 5456-H116 の耐食性は極めて高く、実用上 SCC ならびに剥離腐食は発生しない。ただし、軟質材 5083-O は、冷間加工

後鋭敏化処理すると、耐食性は低下する。成形時の加工量を、極力小さくなるような設計ならびに施工の注意が必要となる。

2) 継手材において、軟質材 5083-O の耐食性は高く、実用上 SCC は発生しない。また、剥離腐食の程度も軽微である。ところが、加工硬化材 5456-H116 の耐食性は極めて低く、適用時は慎重な配慮が必要である。

3) 溶接構造部材用 Al-Mg 系アルミニウム合金の耐食性を評価する際は、先ず SCC ならびに剥離腐食の原因となる相の析出を促進し、粒界腐食感受性を十分高くした状態とする「鋭敏化処理」は必須である。また、耐 SCC 性ならびに剥離腐食性の簡易評価法としては、それぞれアノード分極法ならびに ASSET test 法が有効である。また、定電流電解後の電位測定も、マイクロ組織に対応した定量値が得られ、有力な手段となる。

以上より、船舶向け溶接構造部材用アルミニウム合金には、高強度材ではなく、母材ならびに継手材で共に高い耐食性を示す軟質材 5083-O が推奨される。

その一方で、高強度・高耐食性材もマイクロ組織制御により、開発を手がけたい。ただし、溶接継手構造体には、あくまで軟質材が主な材料となるものとする。

参考文献

- 1) E. H. Dix, Jr. et al. : Corrosion, 15 (1959) p.55.
- 2) 日本アルミニウム連盟編 : 大型輸送構造物の耐久性調査研究報告書, (1966)
- 3) C. L. Brooks : Naval Engineers Journal, August (1970) p.29.
- 4) 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)
- 5) A. J. "Bill" Bryant et al. : LIGHT METAL AGE, APRIL (2001) p.48.
- 6) D. Sampath, et al : Proceedings of ICAA-6, (1988) p.2009.
- 7) F. F. Booth and H. P. Godard : An Anodic Stress Corrosion Test for Aluminum Magnesium Alloys, First International Congress on Metallic Corrosion, Butterworths, (1962) p.703.
- 8) 宮木美光ほか : R&D 神戸製鋼技報, Vol.34, No.2 (1984) p.43.
- 9) 筑田昌宏ほか : 軽金属学会第46回春期大会講演概要集 (1974) p.39.