

Q-36

応力腐食割れの現象とその対策は？

A-36

アルミニウム合金の中には、その表面に引張応力が存在すると、ある種の環境において、割れが粒界に沿って進行し、比較的速やかにこの部分で破断する現象を示すものがあり、これを応力腐食（stress corrosion）又は応力腐食割れと称しています。

一般に、応力腐食割れの発生には次の4条件のあることが知られています。

- ① 合金の組成
- ② 組織の状態
- ③ 表面近くに引張応力が存在する（その合金の耐力の50%以上に達している張力）
- ④ 侵食性環境

①②については材料の選択が、そして③については溶接施工条件が重要となります。

まずはアルミニウム合金の種類に関してですが、侵食に対して敏感な合金とそうでない合金があります。前者に属する合金は、Al-Cu系、Al-Zn-Mg系、Al-Zn-Mg-Cu系、Al-Mg系（約3%以上のMgを含む）及びSi量の多いAl-Mg-Si系があります。また、後者に属する合金には、純アルミニウム、Al-Mn系、Al-Si系、Al-Mg-Si系及び3%Mg以下のAl-Mg系合金があります。これらの系における合金の応力腐食割れ性を比較するとTable 1のようになります。成分的には、Cr, MnおよびZrは防止に効果があります。このような微量成分の添加は、熱間加工時における再結晶温度を上げる結果、熱延板や押出材の繊維組織の維持に寄与するためといわれます。また、組織的には、繊維状組織が再結晶組織より耐応力腐食性に優れているといわれます。

さて、Al-Mg系合金における応力腐食割れ感受性はMg含有量にて異なり、Fig. 1に示すように3%以上のMg含有量では調質によっては割れが生じることがあります。4.5%以上のMg含有量ではO調質にては割れる可能性があります。したがって、約65℃以上の環境で使用される溶接構造物には3%を超えるMgを含有する素材ならびに溶加材は使われません。なお、Mgを4.5%含む5083は中程度の強度を有する構造用合金として各種構造物に適用されていますので、室温で使用される場合でも、素材の調質や加工率には注意が必要です。Table 2に示すように、H1およびH3調質では加工率50%までは加工率増加にともない割れ寿命は短くなりますが、さらなる高加工率では寿命は長くなります。同強度レベルで比較すると、H2調質が応力腐食割れを起こし難く、次いでH3調質となりま

Table 1 アルミニウム合金の応力腐食割れ性比較

	合金系	合金	質別	応力腐食割れ速度
非熱処理型合金	純アルミニウム	1100, 1200	全質別	1
	Al-Mn	3003	"	1
	Al-Mg	5005, 5050, 5154	"	1
	Al-Mg	5056, 5356	加工硬化材	4
	Al-Mg-Mn	3004, 3005, 5454	全質別	1
	Al-Mg-Mn	5086	"	2
	Al-Mg-Mn	5083, 5456	安定化処理材	2
熱処理型合金	Al-Mg-Si	6063	全質別	1
	Al-Mg-Si-Cu	6061	T4	2
	Al-Mg-Si-Cu	"	T6	1
	Al-Cu	2219, 2017	T3, T4	3
	Al-Cu	2219	T6, T8	2
	Al-Cu-Si-Mn	2014	T3, T6	3
	Al-Cu-Mg-Mn	2024	T3	3
	Al-Cu-Mg-Mn	"	T8	2
	Al-Cu-Pb-Bi	2011	T3	4
	Al-Cu-Pb-Bi	"	T6, T8	2
	Al-Zn-Mg	7005	T53	3
	Al-Zn-Mg	7039	T6	3

注：実用上及び実験室的（3.5%食塩水中に溶液交互浸漬）にみて下記4段階に評価。

1. 実用上及び実験室的にみて何ら問題なし。
2. 実用上は問題ないが実験室的試験では板厚方向にいくらか問題あり。
3. 実用上板厚方向に引張応力が作用すると割れを生ずるおそれがあり、実験室的には塩方向に割れが起る。
4. 実用上からみても圧延方向、幅方向に割れが生じやすい。

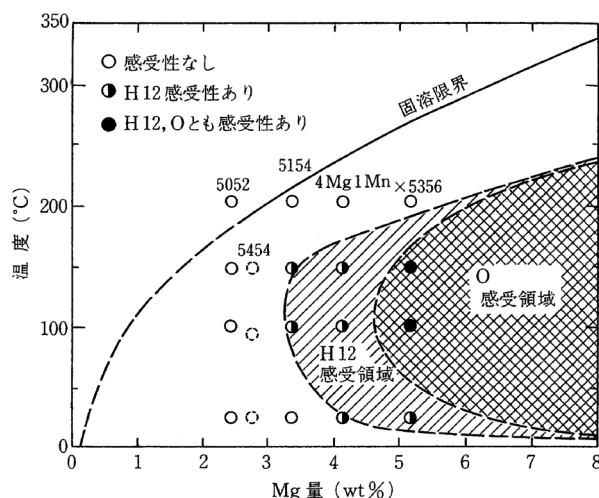


Fig. 1 Al-Mg系合金の各調質における応力腐食割れ感受性（3.5%NaCl）

Table 2 5083各調質条件の機械的性質，層状腐食結果および応力腐食におよぼす影響（鋭敏化処理をおこなったもの）

調質	加工率 (%)	加熱 (°C)	σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	δ (%)	層状腐食試験結果※1		応力腐食試験結果※2	
H1	0	—	30.1	15.6	21.8	○	○	○900	○900
	10		31.6	19.8	16.8	○	○	×480	×480
	17		32.9	22.9	14.2	○	◐	×60	×90
	35		35.4	26.6	10.8	◑	◒	×45	×60
	55		37.0	28.8	9.7	●	●	×120	×120
	76		39.9	32.7	7.8	◉	◊	○900	○900
H2	76	100	40.6	33.6	7.7	◉	◊	○900	
		150	40.3	33.3	7.1	●	◊	○900	○900
		200	39.8	32.3	8.0	◑	●	○900	○900
		230	36.2	29.0	11.9	◒	◑	○900	○900
		245	34.7	25.8	12.6	○	○	○900	○900
		275	29.9	16.2	19.5	○	○	○900	○900
		300	30.0	16.3	21.2	○	○	○900	○900
		325	29.9	16.1	20.7	○	○	○900	○900
		350	29.9	16.1	20.4	○	○	○900	○900
		400	29.7	15.2	20.8	○	○	○900	○900
H3	17	175	31.8	21.5	15.5	○	◑	○900	○900
	30	175	33.9	25.1	10.7	○	○	×240	×240
	50	175	35.6	28.6	10.1	◑	◒	×240	×480
	65	175	37.6	30.1	9.1	◒	●	○900	
	76	175	38.8	31.9	8.5	◑	◒	○900	○900

※1. (腐食小) ○>◐>◑>◒>◓>●>◉ (腐食大)
 ※2. ○ α : α 分で割れ発生せず

す。5083を各種熱処理温度にて応力腐食割れ寿命をみたものが **Fig. 2** ですが，180°Cで割れ寿命は最短となります。これは β 相の粒界析出に起因しているためですが，Mn, Crの添加により粒界析出を抑制すれば改善されます。

また，7075-T6材は，焼入後約130°C以下で人工時効を行って最高強度 (σ_B : 550 N/mm²以上) を与えています。この材料は応力腐食割れを発生しやすい。そこでこれを防止するため，過時効処理 (T7) が行なわれます。その方法は，130°C以下の低温でG.P.ゾーンを作り，その後引続いて150°C以上で時効を行い，準安定相 (η' 相) を析出させるという二段時効 (T73) 処理です。 **Fig. 3** に両質別の応力腐食割れ試験結果を示します。

このような過時効処理を行うと，結晶粒界での析出状態

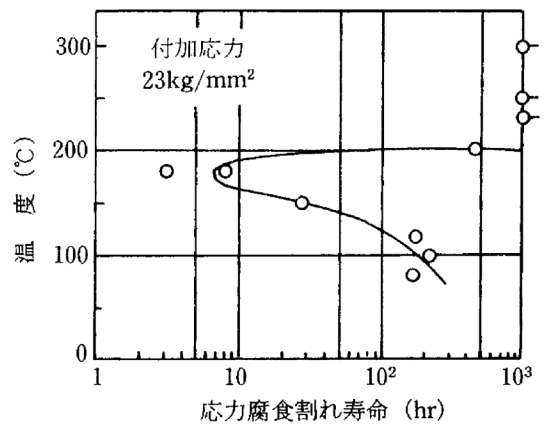


Fig. 2 各温度で加熱された5083の応力腐食割れ (3%NaCl+0.5%HCl)

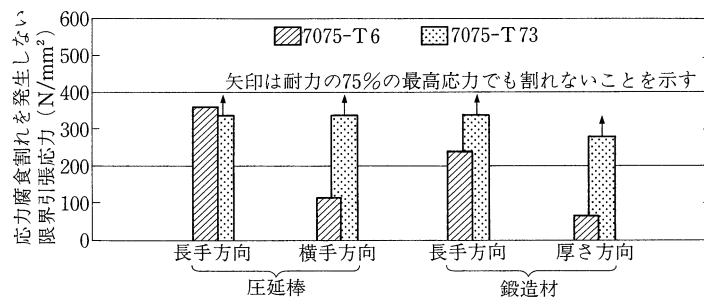


Fig. 3 7075-T6 と7075-T75の応力腐食割れ試験—3.5%NaCl溶液による12週間の乾湿試験—割れを発生しないで持続した最高引張応力

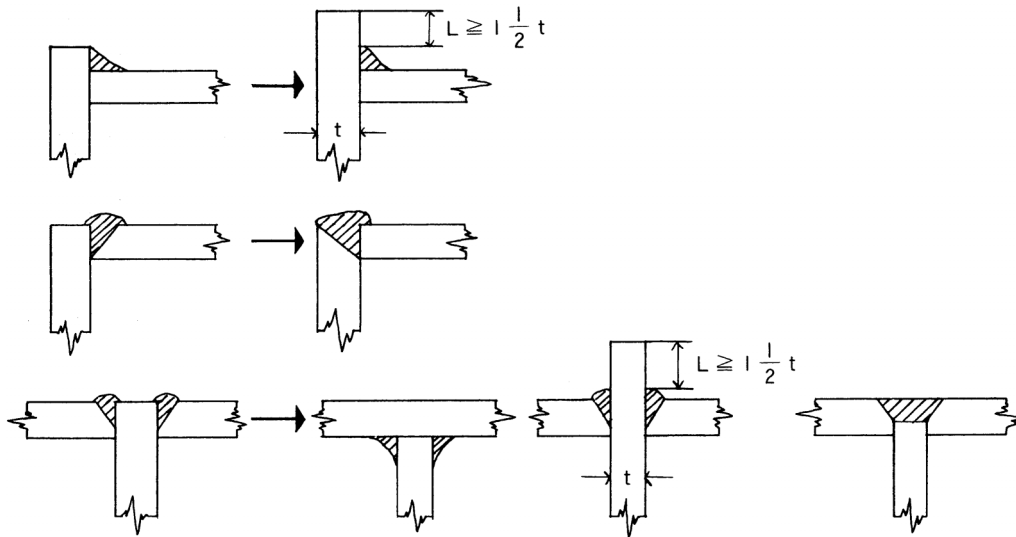


Fig. 5 板端面の応力腐食割れ抑制のための継手形状の変更案

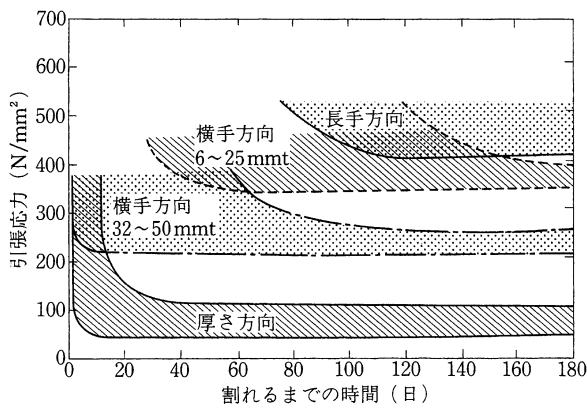


Fig. 4 応力方向に左右される耐力力腐食割れ性—7075-T6 押出材

が変化し、粒内と粒界の電位が等しくなり、また内部応力が緩和されるからと考えられています。しかし、T73処理が応力腐食割れに対し有効とはいえ、T6処理に比べて強度の低下(約10~15%)は避けられません。最近では、T6調質と同等の強度特性を有し且つ、T73調質と同等の耐力力腐食割れ性を両立させるRRA処理(復元再時効)が開発され、T77調質として実用化もされています。つまり、過時効状態の粒界状態にするための熱処理の前に、強度上不可欠なGPゾーンを復元処理により一旦分解し、その後の再時効処理においてGPゾーンを析出させるという方法です。調質の影響をまとめますと、T4調質が応力腐食割れが最も発生しやすく、次いでT6、そしてT7調質が最も優れた特性を示します。なお、Al-Zn-Mg系合金に対しては、Mn, Cr, Zr, Cu, Agの添加が有効ですが、これは上記再結晶粒の微細化、繊維組織の形成上有効である

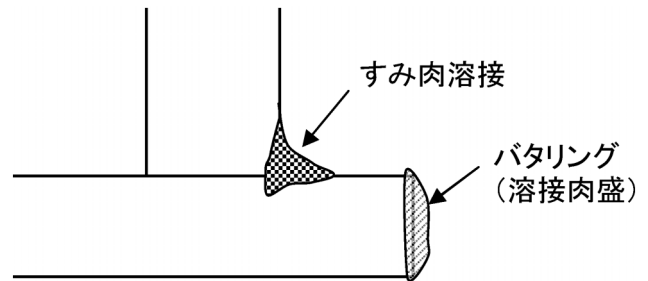


Fig. 6 端面のバタリング

と同時に、その他不溶性化合物の析出による粒界周辺の電位差の緩和や粒界への応力集中の抑制に効果があるためです。

展伸材では、結晶粒の組織に方向性があります。種々の方向から機械加工によって試験片をとって応力腐食試験を行った結果はFig. 4となります。この図で明らかなように、加工長手方向及び横手方向に比べて、板厚方向がもっとも耐力力腐食割れ性に劣ることがわかります。このような方向性による応力腐食割れは、構造物において材料の板の端面が腐食環境にさらされる場合において問題になることがあります。よって、溶接による引張の残留応力がこのような割れ感受性の高い部位に発生しないように、たとえばFig. 5のような継手に変更する必要があります。また、それが困難な場合は、端面をハンマリングあるいはFig. 6のようにバタリングする必要があります。

参考文献

アルミニウム合金構造物の溶接施工管理テキスト(第4版) 材料編, (財)軽金属溶接構造協会発行, 平成21年