

アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と  
摩擦攪拌接合部の設計 S-N 曲線

ALST 研究レポート 6

2009 年 1 月

大阪大学大学院工学研究科

大倉一郎, 牧山大祐

日本軽金属(株)グループ技術センター

萩澤亘保

## 概要

ALST 研究レポート 2「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」で、アルミニウム合金 A6005C-T5 (A6N01-T5 の新しい呼び名) の母材および摩擦攪拌接合部に対して設計 S-N 曲線が提案された。

本研究レポートでは、設計 S-N 曲線に関して、ALST 研究レポート 2 で残された課題を解決し、同研究レポートで提案されたアルミニウム合金 A6005C-T5 の母材および摩擦攪拌接合部の設計 S-N 曲線を完成させる。

## 目次

第1章 序論	… 1
第2章 母材	… 2
2.1 疲労限度	… 2
2.2 S-N 曲線	… 4
第3章 摩擦攪拌接合部	…10
3.1 疲労限度	…10
3.2 S-N 曲線	…12
第4章 設計疲労限度と設計 S-N 曲線	…17
4.1 基本諸量	…17
4.2 母材	…18
4.3 摩擦攪拌接合部	…19
4.4 疲労試験結果との比較	…20
4.5 まとめ	…23
第5章 結論	…28
参考文献	…29

## 第1章 序論

ALST 研究レポート 2「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」<sup>1)</sup>で、アルミニウム合金 A6005C-T5 (A6N01-T5 の新しい呼び名) の母材および摩擦攪拌接合部に対して設計 S-N 曲線が提案された。しかし、同研究レポートでは、次の課題が残されている。

- 1) 母材と摩擦攪拌接合部に対して提案された設計疲労限度は、いずれも Sonderberg 線に基づくものである。しかし母材の疲労限度は修正 Goodman 線が与える疲労限度より大きく、摩擦攪拌接合部の疲労強度は修正 Goodman 線が与える疲労限度より低いが、Sonderberg 線が与える疲労限度よりかなり大きい。したがって、提案された設計疲労限度は過度に安全側の疲労限度を与えるので、これを是正する必要がある。
- 2) 提案された設計 S-N 曲線に関して、応力比に対する適用範囲が-1.0 から 0.5 までであり、0.5 から 1.0 までの応力比に対しても適用できるようにする必要がある。

本研究レポートでは、上記 2 課題を解決し、ALST 研究レポート 2 で提案されたアルミニウム合金 A6005C-T5 の母材および摩擦攪拌接合部の設計 S-N 曲線を完成させる。

## 第2章 母材

### 2.1 疲労限度

ALST 研究レポート<sup>2)</sup>の p.16 の図 3.3(a)と(b)をそれぞれ図 1(a)と(b)に再掲する。これらは、それぞれ床版形材と平板形材の母材の疲労限度線図である。図には、それぞれ次式で与えられる Gerber 線, 修正 Goodman 線, Sonderberg 線が描いてある。

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

$$\sigma_a = \sigma_{w0} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_a = \sigma_{w0} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{0.2}} \right) \quad (3)$$

ここに,  $\sigma_a$  : 応力振幅

$\sigma_m$  : 平均応力

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

$\sigma_B$  : 母材の引張強さ

$\sigma_{0.2}$  : 母材の 0.2% 耐力

ALST 研究レポート<sup>2)</sup>で提案された疲労限度は, 式(3)で与えられる Sonderberg 線に基づいている。しかし図 1 において, 試験結果は修正 Goodman 線より十分上にプロットされているので, 疲労限度は Sonderberg 線より修正 Goodman 線に基づく方が適切である。

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

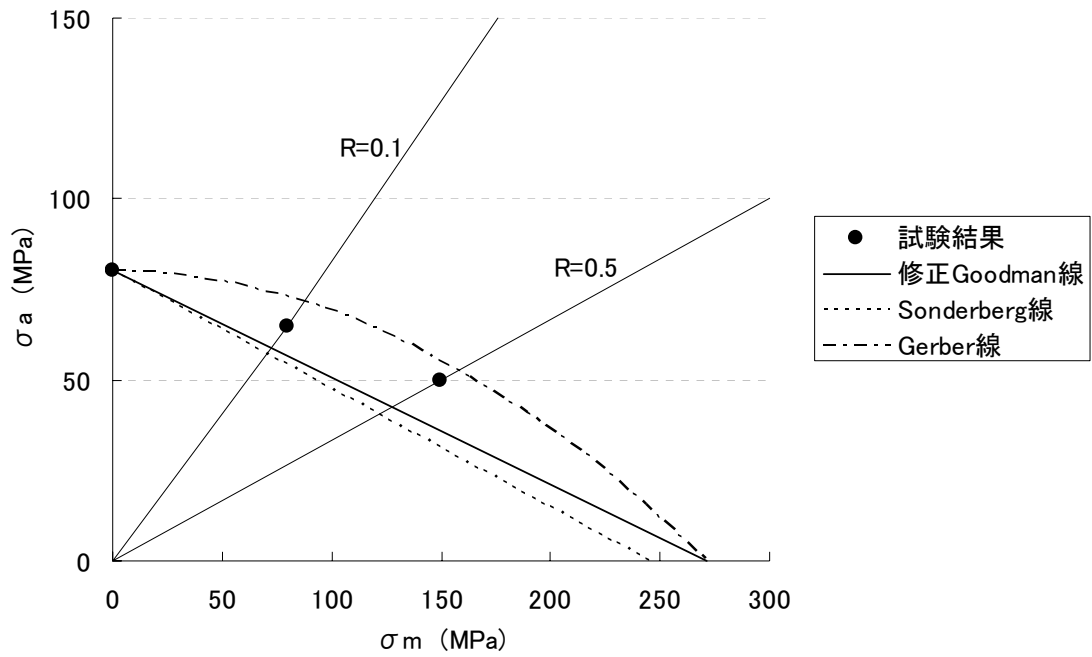
$$\sigma_a = \frac{1}{2} \Delta\sigma \quad (4)$$

$$\sigma_m = \frac{1+R}{2(1-R)} \Delta\sigma \quad (5)$$

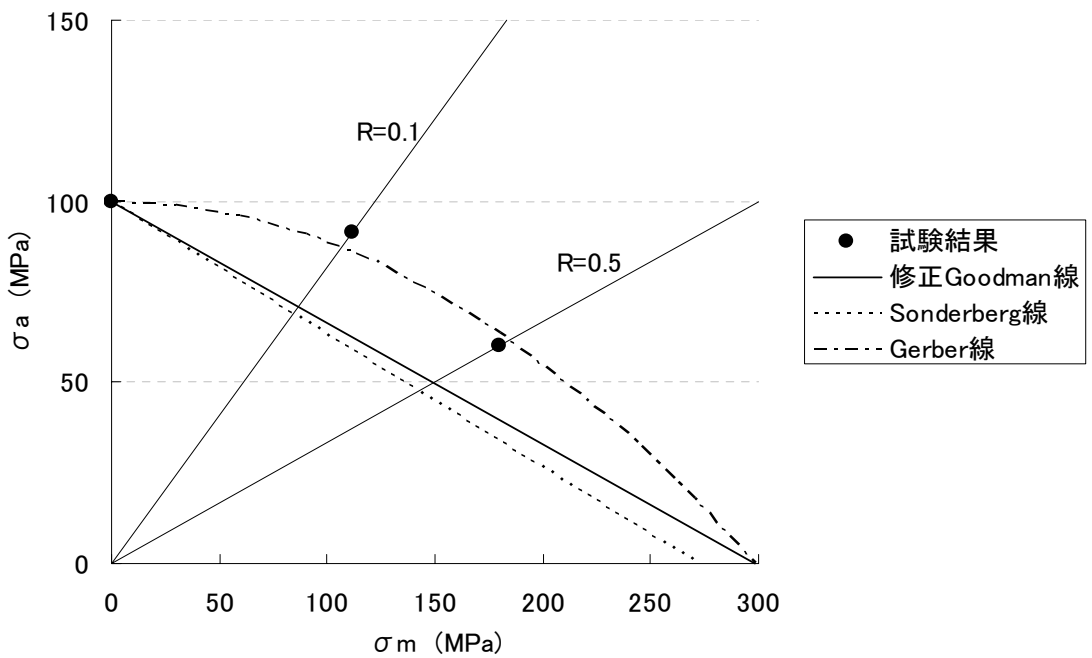
式(4)と(5)を式(2)に代入して, 応力範囲で表された疲労限度  $\Delta\sigma_{caf}$  と応力比  $R$  の関係が次式で与えられる。

$$\Delta\sigma_{caf} = \frac{(1-R)\Delta\sigma_{w0}}{1-R + \frac{1+R}{2} \frac{\Delta\sigma_{w0}}{\sigma_B}} \quad (6)$$

ここに,  $\Delta\sigma_{w0}$  :  $R = -1$  に対して応力範囲で表された, 母材の疲労限度 ( $= 2\sigma_{w0}$ )



(a) 床版形材



(b) 平板形材

図1 母材の疲労限度線図

## 2.2 S-N 曲線

ALST 研究レポート 2<sup>1)</sup> において、床版形材と平板形材の母材に対する S-N 曲線が次式で与えられている。

$$\log N = \log c - m \log(\Delta\sigma) \quad (7)$$

ここに、 $N$  : 繰返し回数

$\Delta\sigma$  : 応力範囲

$c, m$  : 定数

さらに、 $m$  と  $R$  の関係が次式で与えられている。

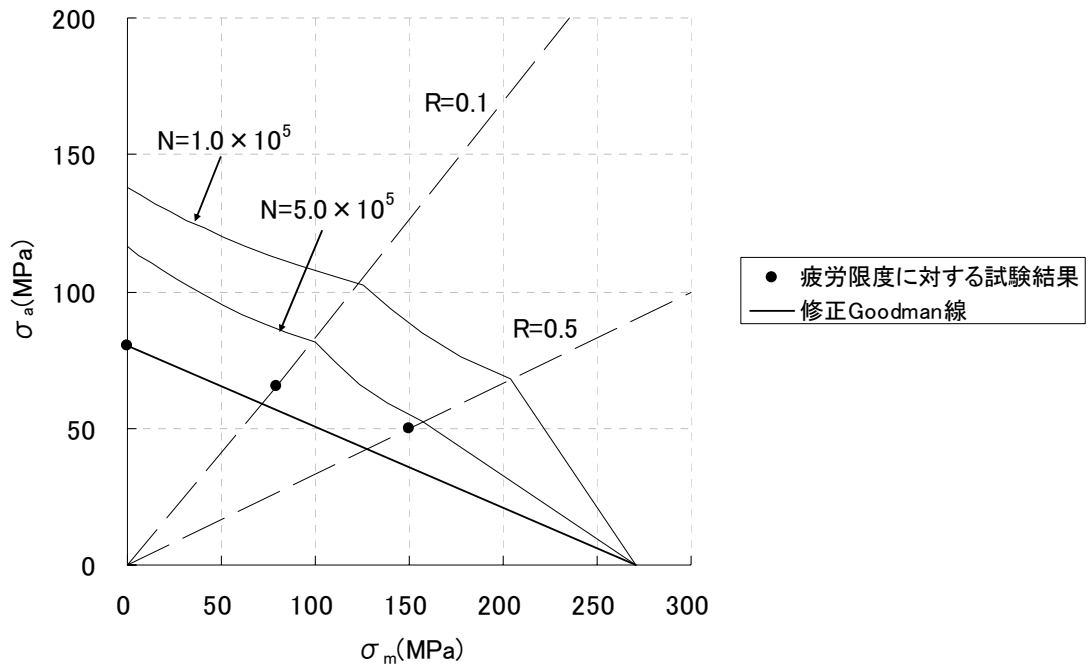
$$m = 7.25 - 2.16R \quad (8)$$

平均寿命を与える  $\log c$  と  $R$  の関係が表 1 (ALST 研究レポート 2<sup>1)</sup> の p.14 の表 3.2 参照) で与えられる。

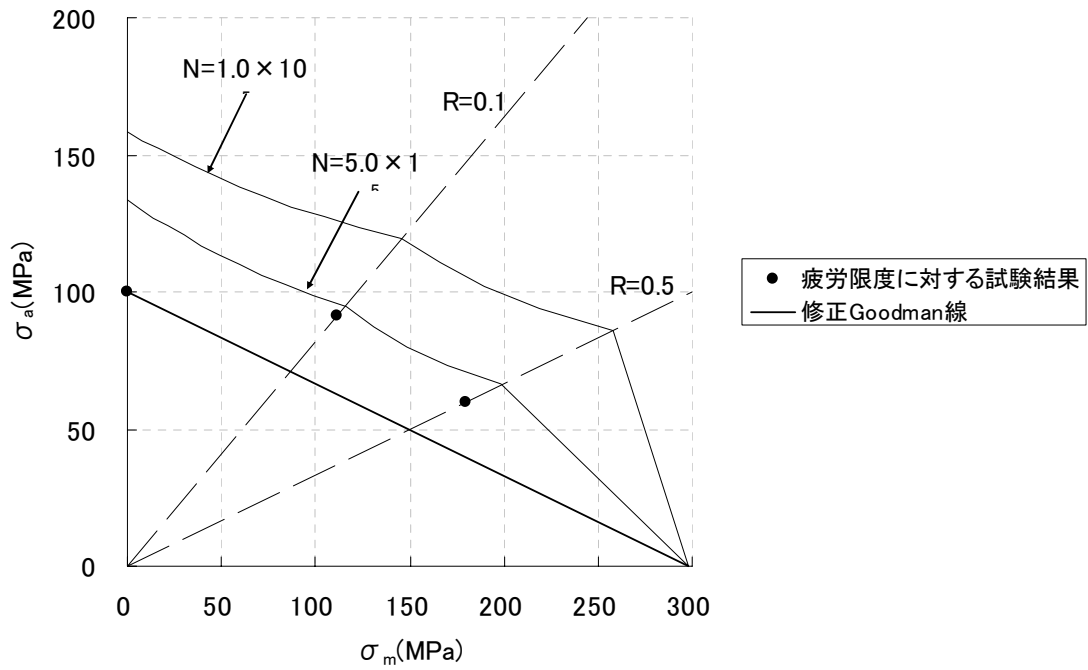
表 1 母材の  $\log c$  と  $R$  の関係

形材	$-1 \leq R \leq 0.1$	$0.1 < R \leq 0.5$
床版形材	$\log c = 21.874 - 6.09R$	$\log c = 22.043 - 7.77R$
平板形材	$\log c = 22.343 - 6.19R$	$\log c = 22.458 - 7.34R$

繰返し回数  $N = 1.0 \times 10^5, 5.0 \times 10^5$  に対する時間限度線図を図 2 に示す。ここで、各繰返し回数に対して式(7)が与える  $\Delta\sigma$  を、式(4)と(5)を用いて、それぞれ  $\sigma_a$  と  $\sigma_m$  に変換している。図 2 には、疲労限度に関する試験結果と、式(2)で与えられる修正 Goodman 線も描かれている。



(a)床版形材



(b)平板形材

図2 母材の時間限度線図



修正 Goodman 線では  $\sigma_a = 0$  のとき  $\sigma_m = \sigma_B$  である。したがって、 $0.5 < R \leq 1.0$  に対する時間限度として、 $R = 0.5$  の直線上の点と座標  $(\sigma_B, 0)$  を直線で結び、次式で与える。

$$\sigma_a = \frac{\sigma_B - \sigma_m}{2\sigma_B \left( \frac{N}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}} - 3} \quad (9)$$

ここに、 $c_{0.5}$  :  $R = 0.5$  に対する母材の  $c$  の値

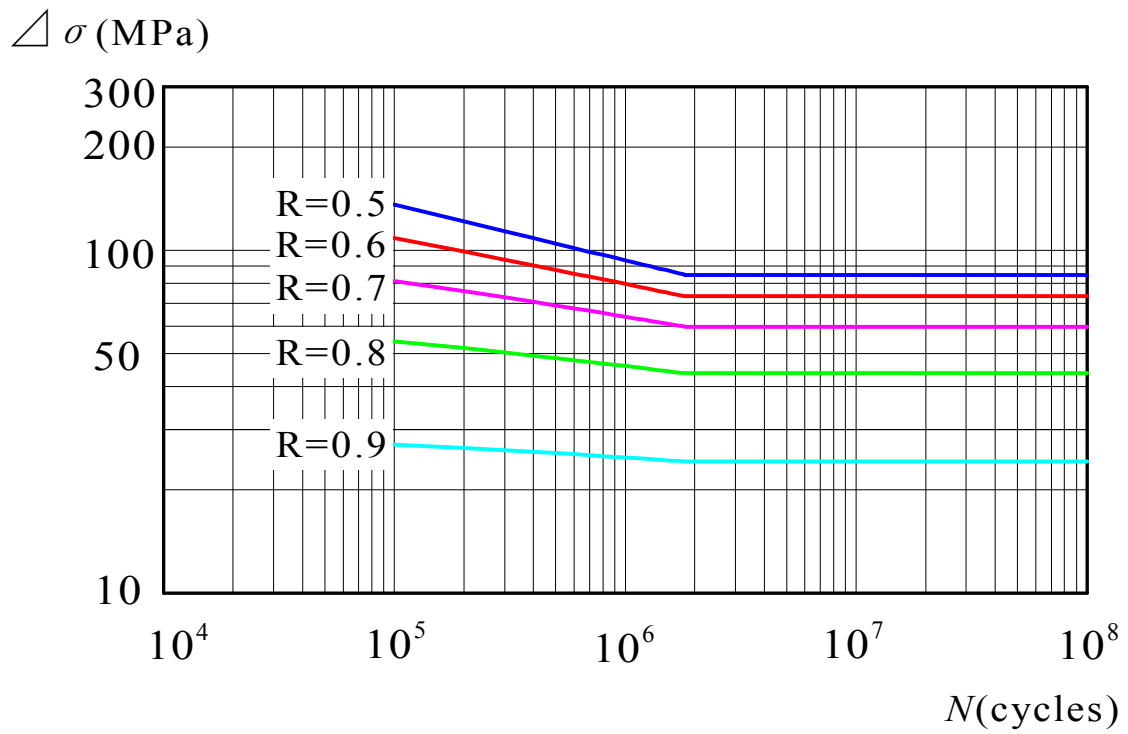
さらに、式(4)と(5)を式(9)に代入して、 $0.5 < R \leq 1.0$  に対する時間限度、すなわち S-N 曲線が次式で与えられる。

$$\Delta\sigma = \frac{(1-R)\sigma_B}{2R - 1 + (1-R)\sigma_B \left( \frac{N}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}}} \quad (10)$$

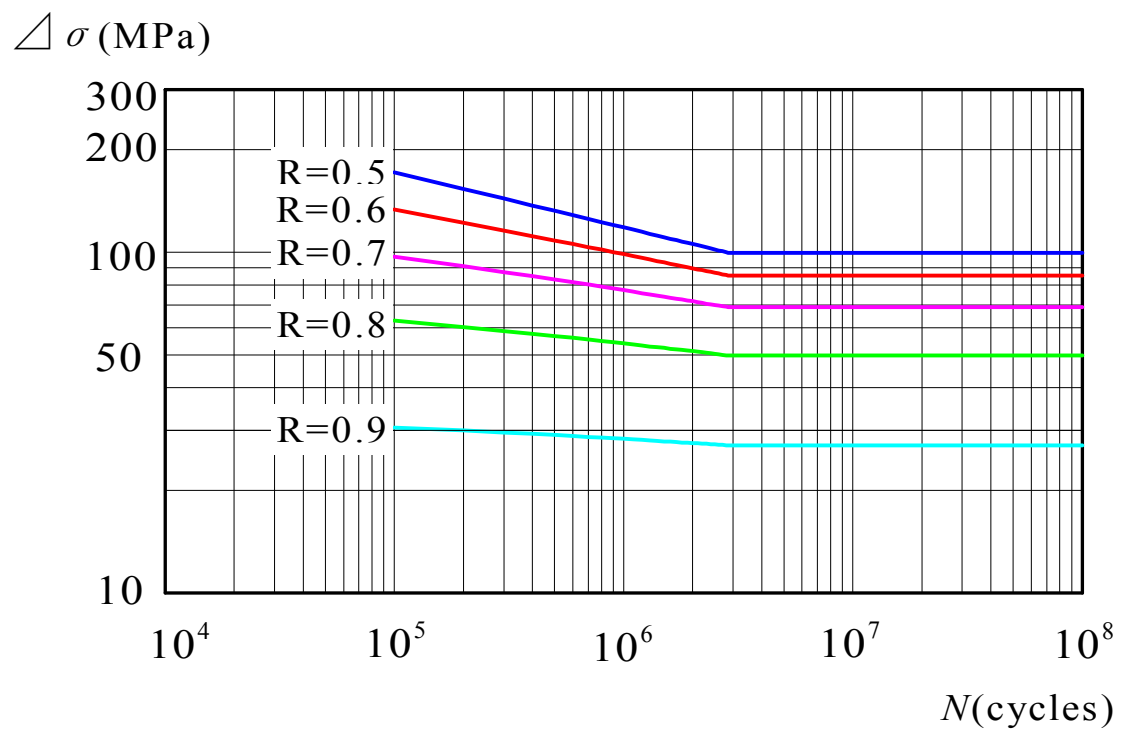
応力比  $R$  が 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 に対して、式(6)と(10)が与える疲労限度と S-N 曲線を図 3 に示す。式(6)と(10)に用いられた  $\sigma_B$ ,  $\Delta\sigma_{w0}$  ( $= 2\sigma_{w0}$ ),  $c_{0.5}$  の値を表 2 に示す。 $\sigma_B$  の値は ALST 研究レポート 2<sup>1)</sup> の p.5 の表 2.3,  $\Delta\sigma_{w0}$  の値は同レポートの p.17 の表 3.4 に基づき、 $c_{0.5}$  の値は本レポートの表 1 の式によって計算されている。

表 2 母材の  $\sigma_B$ ,  $\Delta\sigma_{w0}$  ( $= 2\sigma_{w0}$ ),  $c_{0.5}$  の値

形材	$\sigma_B$ (MPa)	$\Delta\sigma_{w0}$ (MPa)	$c_{0.5}$
床版形材	271	160	$10^{18.158}$
平板形材	298	200	$10^{18.788}$



(a) 床版形材



(b) 平板形材

図3 母材の疲労限度と S-N 曲線

図3から分るように、各S-N曲線は図上でほぼ直線であるので、繰返し回数10万回に対応する点と、S-N曲線と疲労限度 $\Delta\sigma_{caf}$ が交差する点を、式(7)の形式で与えられる直線で近似する。

S-N曲線と疲労限度 $\Delta\sigma_{caf}$ が交差する繰返し回数は、式(6)と(10)を等しく置いて、繰返し回数 $N$ について解いて、次式で与えられる。

$$N_2 = c_{0.5} \left( \frac{1}{\Delta\sigma_{w0}} + \frac{3}{2\sigma_B} \right)^{6.17} \quad (11)$$

ここに、 $N_2$  : S-N曲線と疲労限度 $\Delta\sigma_{caf}$ が交差する繰返し回数

式(11)から分るように、S-N曲線と疲労限度 $\Delta\sigma_{caf}$ が交差する繰返し回数は応力比 $R$ に依存しない。

繰返し回数10万回と $N_2$ の間を式(7)の形式で近似した場合の $m$ と $c$ がそれぞれ次式で与えられる。

$$m = \frac{\log \frac{N_2}{10^5}}{\log \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_{caf}}} = \frac{\log \left\{ \frac{c_{0.5}}{10^5} \left( \frac{1}{\Delta\sigma_{w0}} + \frac{3}{2\sigma_B} \right)^{6.17} \right\}}{\log \frac{\frac{1+R}{2} + (1-R)\frac{\sigma_B}{\Delta\sigma_{w0}}}{2R-1 + (1-R)\sigma_B \left( \frac{10^5}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}}}} \quad (12)$$

$$c = 10^5 (\Delta\sigma_1)^m = 10^5 \left\{ \frac{(1-R)\sigma_B}{2R-1 + (1-R)\sigma_B \left( \frac{10^5}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}}} \right\}^m \quad (13)$$

ここに、 $\Delta\sigma_1$  : 繰返し回数 $10^5$ に対する応力範囲

以上より、母材の疲労限度とS-N曲線をまとめて表3に示す。

表3 母材の疲労限度と S-N 曲線

疲労限度	
$-1 \leq R \leq 1$	$\Delta\sigma_{caf} = \frac{(1-R)\Delta\sigma_{w0}}{1-R + \frac{1+R}{2} \frac{\Delta\sigma_{w0}}{\sigma_B}} \quad (A)$
S-N 曲線	
	$\Delta\sigma = \left(\frac{c}{N}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (B)$
$-1 \leq R \leq 0.5$	$m = 7.25 - 2.16R$ <p><math>c</math> : <math>R</math> の関数 (表1 参照)</p>
$0.5 < R < 1$	$m = \frac{\log\left\{\frac{c_{0.5}}{10^5} \left(\frac{1}{\Delta\sigma_{w0}} + \frac{3}{2\sigma_B}\right)^{6.17}\right\}}{\log\frac{\frac{1+R}{2} + (1-R)\frac{\sigma_B}{\Delta\sigma_{w0}}}{2R-1 + (1-R)\sigma_B \left(\frac{10^5}{c_{0.5}}\right)^{\frac{1}{6.17}}}} \quad (C)$ $c = 10^5 \left\{ \frac{(1-R)\sigma_B}{2R-1 + (1-R)\sigma_B \left(\frac{10^5}{c_{0.5}}\right)^{\frac{1}{6.17}}} \right\}^m \quad (D)$

### 第3章 摩擦攪拌接合部

#### 3.1 疲労限度

ALST 研究レポート<sup>2)</sup>の p.16 の図 3.3(c)と(d)をそれぞれ図 4(a)と(b)に再掲する。これらは、それぞれ床版形材と平板形材の摩擦攪拌接合部の疲労限度線図である。図には、それぞれ次式で与えられる Gerber 線, 修正 Goodman 線, Sonderberg 線も描いてある。

$$\sigma_a = \sigma_{w0} \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_{jB}} \right)^2 \right] \quad (14)$$

$$\sigma_a = \sigma_{w0} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{jB}} \right) \quad (15)$$

$$\sigma_a = \sigma_{w0} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{j0.2}} \right) \quad (16)$$

ここに,  $\sigma_{jB}$  : 摩擦攪拌接合部の引張強さ

$\sigma_{j0.2}$  : 摩擦攪拌接合部の 0.2%耐力

図 4(a)において, 試験結果は修正 Goodman 線の近くにプロットされている。図 4(b)において,  $R = 0.1$ に対する試験結果は Sonderberg 線に近く,  $R = 0.5$ に対する試験結果は修正 Goodman 線の上にある。これらを考慮して,  $-1 \leq R \leq 0.1$ に対する疲労限度として Sonderberg 線,  $0.1 < R \leq 1.0$ に対する疲労限度として, Sonderberg 線と  $R = 0.1$ の直線との交点と, 水平軸上の, 摩擦攪拌接合部の引張強さ  $\sigma_{jB}$  を結んだ直線を採用する。

$-1 \leq R \leq 0.1$ に対する疲労限度は, 式(4)と(5)を式(16)に代入して次式で与えられる。

$$\Delta\sigma_{caf} = \frac{(1-R)\Delta\sigma_{w0}}{1-R + \frac{1+R}{2} \frac{\Delta\sigma_{w0}}{\sigma_{j0.2}}} \quad (17)$$

ここに,  $\Delta\sigma_{w0}$  :  $R = -1$ に対して応力範囲で表された, 摩擦攪拌接合部の疲労限度 ( $= 2\sigma_{w0}$ )

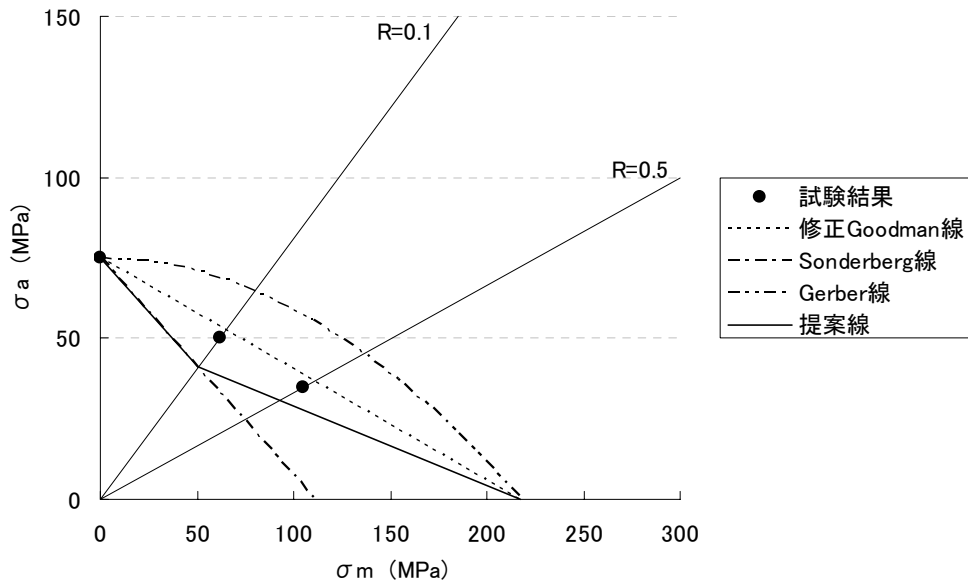
$0.1 < R \leq 1.0$ に対する疲労限度は次式で与えられる。

$$\sigma_a = \frac{9(\sigma_{jB} - \sigma_m)}{\frac{\sigma_{jB}}{\sigma_{j0.2}} \left( \frac{9\sigma_{j0.2}}{\sigma_{w0}} + 11 \right) - 11} \quad (18)$$

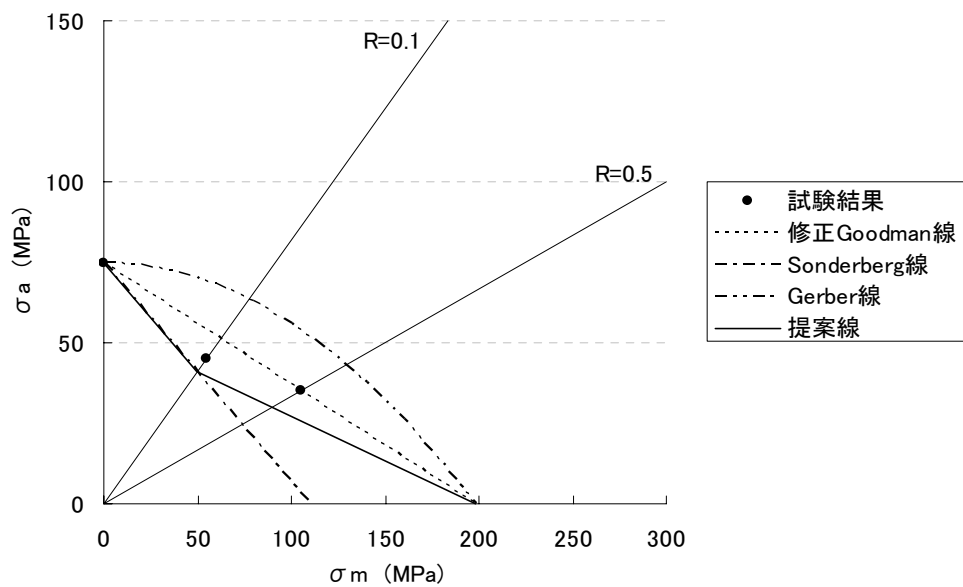
さらに, この式に式(4)と(5)を代入して, 応力範囲で表された疲労限度  $\Delta\sigma_{caf}$  と応力比  $R$  の関係として次式を得る。

$$\Delta\sigma_{caf} = \frac{2(1-R)A\sigma_{jB}}{1-R + (1+R)A} \quad (19)$$

ここに、
$$A = \frac{9}{\frac{\sigma_{jB}}{\sigma_{j0.2}} \left( \frac{18\sigma_{j0.2}}{\Delta\sigma_{w0}} + 11 \right) - 11} \quad (20)$$



(a) 床版形材



(b) 平板形材

図4 摩擦攪拌接合部の疲労限度線図

### 3.2 S-N 曲線

床版形材および平板形材の摩擦攪拌接合部に関して、 $-1 \leq R \leq 0.5$  に対する S-N 曲線は式(7)と(8)で表され、平均寿命を与える  $\log c$  と  $R$  の関係は表 4 (ALST 研究レポート 2<sup>1)</sup> の p.14 の表 3.2 参照) で与えられる。

表 4 摩擦攪拌接合部の  $\log c$  と  $R$  の関係

形材	$-1 \leq R \leq 0.1$	$0.1 < R \leq 0.5$
床版形材	$\log c = 21.107 - 6.36R$	$\log c = 21.148 - 6.78R$
平板形材	$\log c = 20.886 - 6.47R$	$\log c = 20.904 - 6.65R$

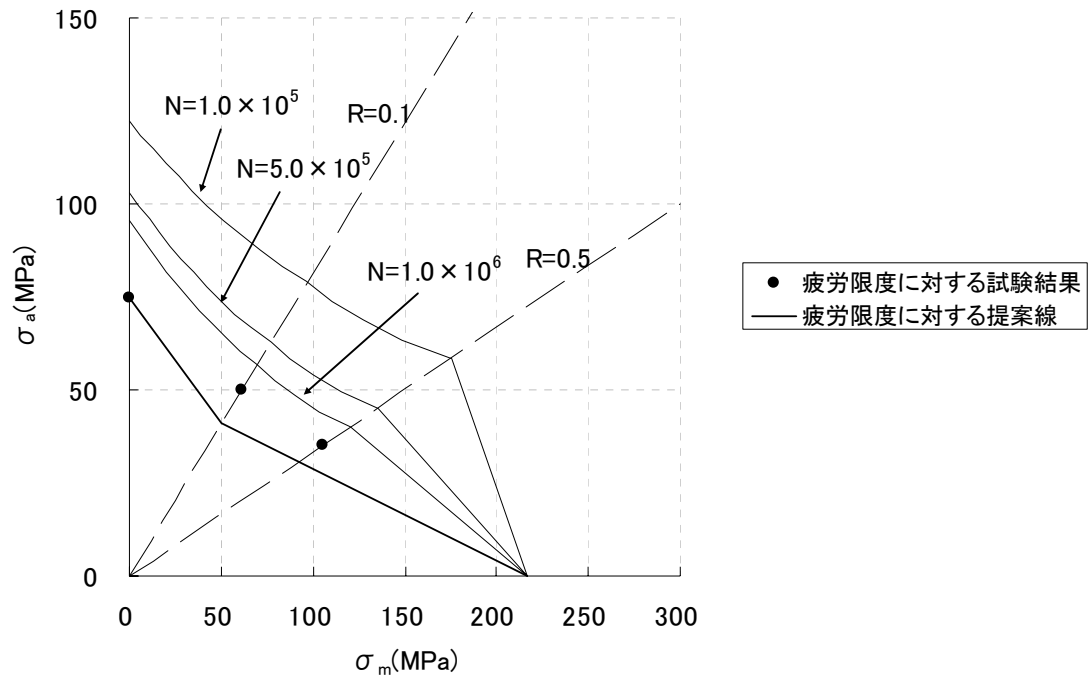
繰返し回数  $N = 1.0 \times 10^5$ ,  $5.0 \times 10^5$ ,  $1.0 \times 10^6$  に対する時間限度線図を図 5 に示す。ここで、各繰返し回数に対して式(7)が与える  $\Delta\sigma$  を、式(4)と(5)を用いて、それぞれ  $\sigma_a$  と  $\sigma_m$  に変換している。図 5 には、疲労限度に関する試験結果、ならびに疲労限度に関する提案線、すなわち  $-1 \leq R \leq 0.1$  に対して式(16),  $0.1 < R \leq 1.0$  に対して式(18)も描いてある。

疲労限度に関する提案線では、 $\sigma_a = 0$  のとき  $\sigma_m = \sigma_{jB}$  である。したがって、 $0.5 < R \leq 1.0$  の場合に対する時間限度として、 $R = 0.5$  の直線上の点と座標  $(\sigma_{jB}, 0)$  を直線で結び、次式で与える。

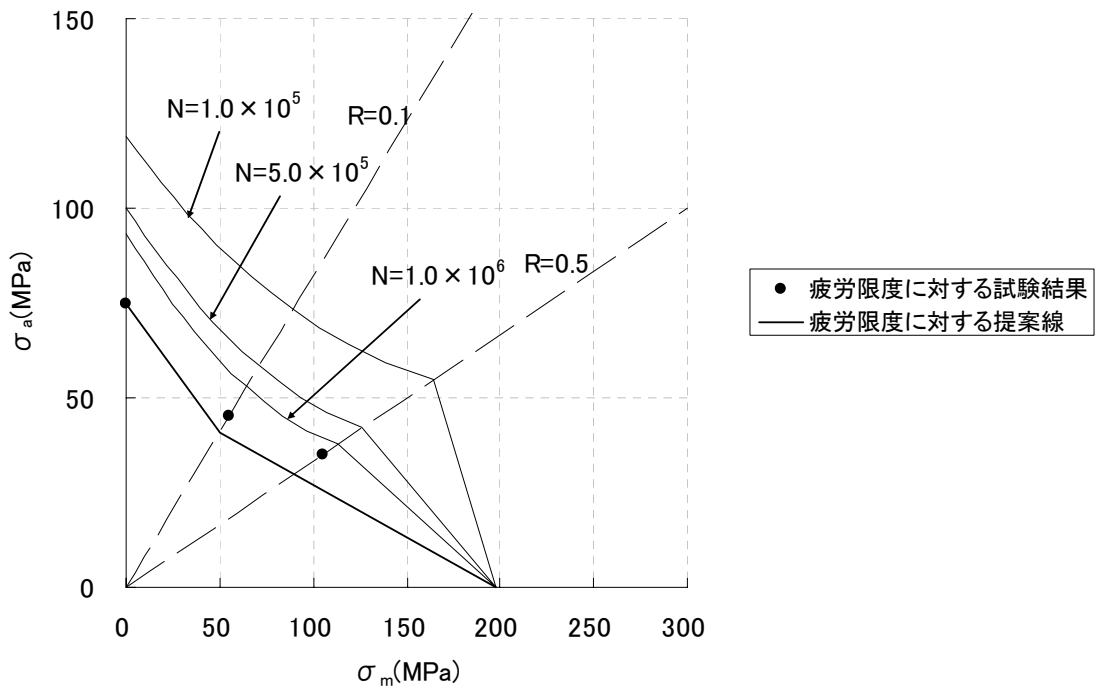
$$\Delta\sigma = \frac{(1-R)\sigma_{jB}}{2R-1 + (1-R)\sigma_{jB} \left( \frac{N}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}}} \quad (21)$$

ここに、 $c_{0.5}$  :  $R = 0.5$  に対する摩擦攪拌接合部の  $c$  の値

応力比  $R$  が 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 に対して、式(19)と(21)が与える疲労限度と S-N 曲線を図 6 に示す。式(19)と(21)に用いられた  $\sigma_{jB}$ ,  $\sigma_{j0.2}$ ,  $\Delta\sigma_{w0}$  ( $= 2\sigma_{w0}$ ),  $c_{0.5}$  の値を表 5 に示す。 $\sigma_{jB}$  と  $\sigma_{j0.2}$  の値は ALST 研究レポート 2<sup>1)</sup> の p.5 の表 2.3,  $\Delta\sigma_{w0}$  の値は同レポートの p.17 の表 3.4 に基づき、 $c_{0.5}$  の値は本レポートの表 4 の式によって計算されている。



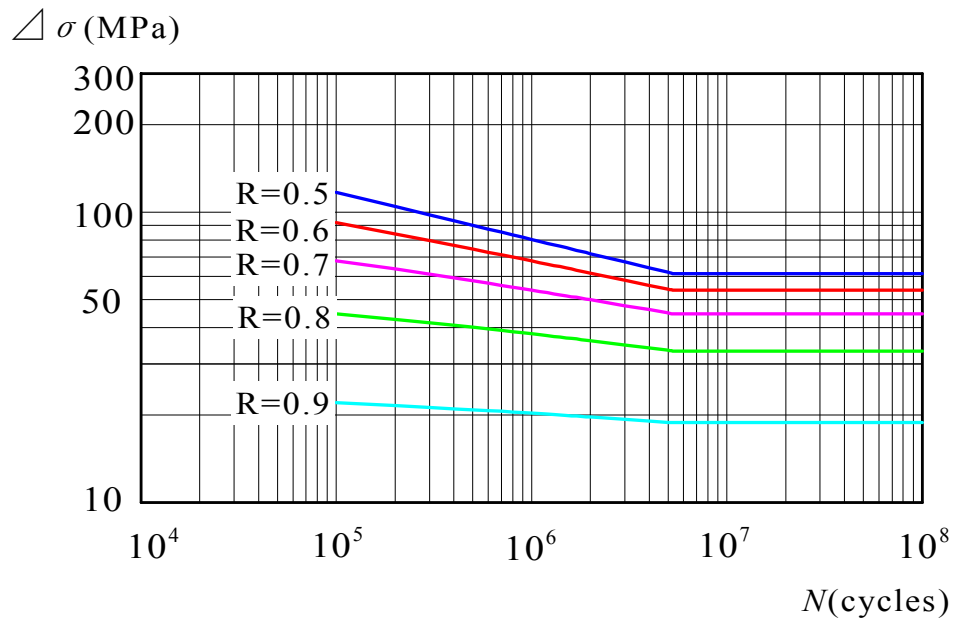
(a)床版形材



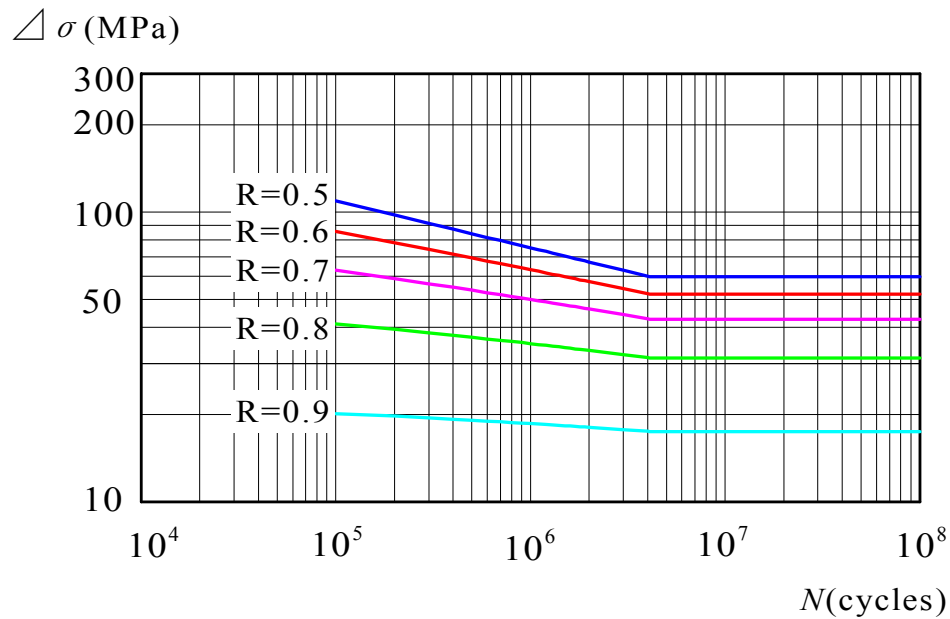
(b)平板形材

図5 摩擦攪拌接合部の時間限度線図





(a) 床版形材



(b) 平板形材

図6 摩擦攪拌接合部の疲労限度とS-N曲線

表5 摩擦攪拌接合部の $\sigma_{jB}$ ,  $\sigma_{j0.2}$ ,  $\Delta\sigma_{w0}$  ( $= 2\sigma_{w0}$ ),  $c_{0.5}$ の値

形材	$\sigma_{jB}$ (MPa)	$\sigma_{j0.2}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{w0}$ (MPa)	$c_{0.5}$
床版形材	217	111	150	$10^{17.758}$
平板形材	198	110	150	$10^{17.579}$

図 6 から分るように、各 S-N 曲線は図上でほぼ直線であるので、繰返し回数 10 万回に対応する点と、S-N 曲線と疲労限度  $\Delta\sigma_{caf}$  が交差する点を、式(7)の形式で与えられる直線で近似する。

S-N 曲線と疲労限度  $\Delta\sigma_{caf}$  が交差する繰返し回数は、式(19)と(21)を等しく置いて、繰返し回数  $N$  について解いて、次式で与えられる。

$$N_2 = c_{0.5} \left( \frac{1+3A}{2A\sigma_{jB}} \right)^{6.17} \quad (22)$$

ここに、 $N_2$  : S-N 曲線と疲労限度  $\Delta\sigma_{caf}$  が交差する繰返し回数

式(22)から分るように、S-N 曲線と疲労限度  $\Delta\sigma_{caf}$  が交差する繰返し回数は応力比  $R$  に依存しない。

繰返し回数 10 万回と  $N_2$  の間を式(7)の形式で近似した場合の  $m$  と  $c$  がそれぞれ次式で与えられる。

$$m = \frac{\log \frac{N_2}{10^5}}{\log \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_{caf}}} = \frac{\log \left\{ \frac{c_{0.5}}{10^5} \left( \frac{1+3A}{2A\sigma_{jB}} \right)^{6.17} \right\}}{\log \frac{1-R+(1+R)A}{2A \left\{ 2R-1+(1-R)\sigma_{jB} \left( \frac{10^5}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}} \right\}}} \quad (23)$$

$$c = 10^5 (\Delta\sigma_1)^m = 10^5 \left\{ \frac{(1-R)\sigma_{jB}}{2R-1+(1-R)\sigma_{jB} \left( \frac{10^5}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}}} \right\}^m \quad (24)$$

ここに、 $\Delta\sigma_1$  : 繰返し回数  $10^5$  に対する応力範囲

以上より、摩擦攪拌接合部の疲労限度と S-N 曲線をまとめて表 6 に示す。

表 6 摩擦攪拌接合部の疲労限度と S-N 曲線

疲労限度	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma_{caf} = \frac{(1-R)\Delta\sigma_{w0}}{1-R + \frac{1+R}{2} \frac{\Delta\sigma_{w0}}{\sigma_{j0.2}}} \quad (A)$
$0.1 < R \leq 1$	$\Delta\sigma_{caf} = \frac{2(1-R)A\sigma_{jB}}{1-R + (1+R)A}, \quad A = \frac{9}{\frac{\sigma_{jB}}{\sigma_{j0.2}} \left( \frac{18\sigma_{j0.2}}{\Delta\sigma_{w0}} + 11 \right) - 11} \quad (B)$
S-N 曲線	
	$\Delta\sigma = \left( \frac{c}{N} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (C)$
$-1 \leq R \leq 0.5$	$m = 7.25 - 2.16R$ <p style="text-align: center;"><math>c : R</math> の関数 (表 4 参照)</p>
$0.5 < R < 1$	$m = \frac{\log \left\{ \frac{c_{0.5}}{10^5} \left( \frac{1+3A}{2A\sigma_{jB}} \right)^{6.17} \right\}}{\log \left\{ \frac{1-R + (1+R)A}{2A \left[ 2R - 1 + (1-R)\sigma_{jB} \left( \frac{10^5}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}} \right]} \right\}}, \quad A = \frac{9}{\frac{\sigma_{jB}}{\sigma_{j0.2}} \left( \frac{18\sigma_{j0.2}}{\Delta\sigma_{w0}} + 11 \right) - 11} \quad (D)$
	$c = 10^5 \left\{ \frac{(1-R)\sigma_{jB}}{2R - 1 + (1-R)\sigma_{jB} \left( \frac{10^5}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}}} \right\}^m \quad (E)$

## 第4章 設計疲労限度と設計 S-N 曲線

### 4.1 基本諸量

設計 S-N 曲線は，平均寿命を与える S-N 曲線を， $\log N$  に関する標準偏差  $\xi_N$  の 2 倍だけ負方向に移動させた曲線で，次式で与えられる．

$$\log N = \log c_a - m \log(\Delta\sigma) \quad (25)$$

$$\text{ここに，} \log c_a = \log c - 2\xi_N \quad (26)$$

母材と摩擦攪拌接合部の  $\log c_a$  と  $R$  の関係を図 7 (ALST 研究レポート 2<sup>1)</sup> の p.41 の図 5.1 と同じ) に示す．母材と摩擦攪拌接合部の各場合について， $R = -1, 0.1, 0.5$  の各応力比に対する最小値を結ぶ線を  $\log c_a$  と  $R$  の関係に採用する．母材と摩擦攪拌接合部の  $\log c_a$  と  $R$  の関係を表 7 (ALST 研究レポート 2<sup>1)</sup> の p.41 の表 5.1 と同じ) に示す．

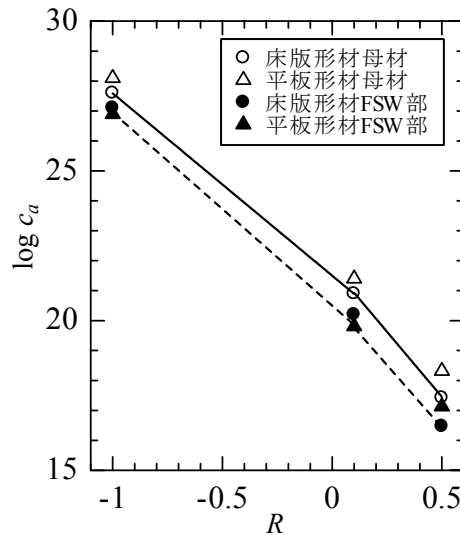


図 7  $\log c_a$  と  $R$  の関係

表 7  $\log c_a$  と  $R$  の関係

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

$R = -1$  に対する設計疲労限度  $\Delta\sigma_{w0a}$  は， $R = -1$  の平均寿命の S-N 曲線が与える疲労強度に対する， $R = -1$  の設計 S-N 曲線が与える疲労強度の比に  $\Delta\sigma_{w0}$  を乗じて次式で与えられる．

$$\Delta\sigma_{w0a} = \left(\frac{c_a}{c}\right)^{\frac{1}{m}} \Delta\sigma_{w0} \quad (27)$$

ここに、 $m$ 、 $c$ 、 $c_a$  :  $R=-1$ に対するそれぞれの値 (ALST 研究レポート 2<sup>1)</sup> の p.13 の **表 3.1** に記載の値)

母材と摩擦攪拌接合部の  $\Delta\sigma_{w0a}$  の値を **表 8** (ALST 研究レポート 2<sup>1)</sup> の p.17 の **表 3.4** に基づく) に示す. 母材と摩擦攪拌接合部の各場合について, 床版形材と平板形材のうち小さい方の値を  $\Delta\sigma_{w0a}$  に採用する. すなわち, 母材の  $\Delta\sigma_{w0a}$  は 146MPa, 摩擦攪拌接合部の  $\Delta\sigma_{w0a}$  は 133MPa である.

**表 8**  $\Delta\sigma_{w0a}$  の値

対象	床版形材 (MPa)	平板形材 (MPa)
母材	146.2	181.0
摩擦攪拌接合部	136.6	133.0

設計疲労限度と設計 S-N 曲線で用いる引張強さ  $\sigma_B$  と  $\sigma_{jB}$ , 0.2%耐力  $\sigma_{j0.2}$ ,  $R=-1$  に対する設計疲労限度  $\Delta\sigma_{w0a}$  および  $R=0.5$  に対する  $c_a$  の値  $c_{0.5a}$  を **表 9** に示す.  $\sigma_B$  は A6005C-T5 の JIS 規格値<sup>2)</sup>,  $\sigma_{jB}$  と  $\sigma_{j0.2}$  は, 「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)」(日本アルミニウム協会, 1998)<sup>3)</sup>に規定される値,  $c_{0.5a}$  は, **表 7** の式によって計算される値である.

**表 9**  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{jB}$ ,  $\sigma_{j0.2}$ ,  $\Delta\sigma_{w0a}$ ,  $c_{0.5a}$  の値

(a) 母材

$\sigma_B$ (MPa)	$\Delta\sigma_{w0a}$ (MPa)	$c_{0.5a}$
225	146	$10^{17.415}$

(b) 摩擦攪拌接合部

$\sigma_{jB}$ (MPa)	$\sigma_{j0.2}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{w0a}$ (MPa)	$c_{0.5a}$
167	98	133	$10^{16.472}$

#### 4.2 母材

**表 3** の式(A)の  $\sigma_B$  と  $\Delta\sigma_{w0}$  にそれぞれ 225MPa と  $\Delta\sigma_{w0a}$  (=146MPa) を代入して, 母材の設計疲労限度が次式で与えられる.

$$\Delta\sigma_{caf} = \frac{146(1-R)}{1.3244 - 0.6756R} \quad (28)$$

**表 3** の式(B)の  $c$  に **表 7** の母材の  $c_a$  を代入して,  $-1 \leq R \leq 0.5$  に対する母材の設計 S-N 曲線が次式で与えられる.

$-1 \leq R \leq 0.1$  に対して,

$$\Delta\sigma = \left( \frac{10^{21.447-6.15R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}} \quad (29)$$

0.1 < R ≤ 0.5 に対して,

$$\Delta\sigma = \left( \frac{10^{21.685-8.54R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}} \quad (30)$$

**表 3** の式(C)と(D)の  $\sigma_B$ ,  $\Delta\sigma_{w0}$ ,  $c_{0.5}$  にそれぞれ 225MPa,  $\Delta\sigma_{w0a}$  (=146MPa),  $c_{0.5a}$  (=10<sup>17.415</sup>) を代入して, 0.5 ≤ R < 1 に対する  $m$  と  $c_a$  がそれぞれ次式で与えられる.

$$m = \frac{0.8823}{\log \frac{4.0822 - 2.0822R}{2.3758 - 0.3758R}} \quad (31)$$

$$c_a = 10^5 \left\{ \frac{225(1-R)}{1.1879 - 0.1879R} \right\}^m \quad (32)$$

#### 4.3 摩擦攪拌接合部

**表 6** の式(A)の  $\sigma_{j0.2}$  と  $\Delta\sigma_{w0}$  にそれぞれ 98MPa と  $\Delta\sigma_{w0a}$  (=133MPa) を代入して, -1 ≤ R ≤ 0.1 に対する設計疲労限度が次式で与えられる.

$$\Delta\sigma_{caf} = \frac{133(1-R)}{1.6786 - 0.3214R} \quad (33)$$

**表 6** の式(B)の  $\sigma_{jB}$ ,  $\sigma_{j0.2}$ ,  $\Delta\sigma_{w0}$  にそれぞれ 167MPa, 98MPa,  $\Delta\sigma_{w0a}$  (=133MPa) を代入して, 0.1 ≤ R ≤ 1 に対する設計疲労限度が次式で与えられる.

$$\Delta\sigma_{caf} = \frac{99.0(1-R)}{1.2966 - 0.7034R} \quad (34)$$

**表 6** の式(C)の  $c$  に **表 7** の摩擦攪拌接合部の  $c_a$  を代入して, -1 ≤ R ≤ 0.5 に対する摩擦攪拌接合部の設計 S-N 曲線が次式で与えられる.

-1 ≤ R ≤ 0.1 に対して,

$$\Delta\sigma = \left( \frac{10^{20.486-6.38R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}} \quad (35)$$

0.1 < R ≤ 0.5 に対して,

$$\Delta\sigma = \left( \frac{10^{20.692-8.44R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}} \quad (36)$$

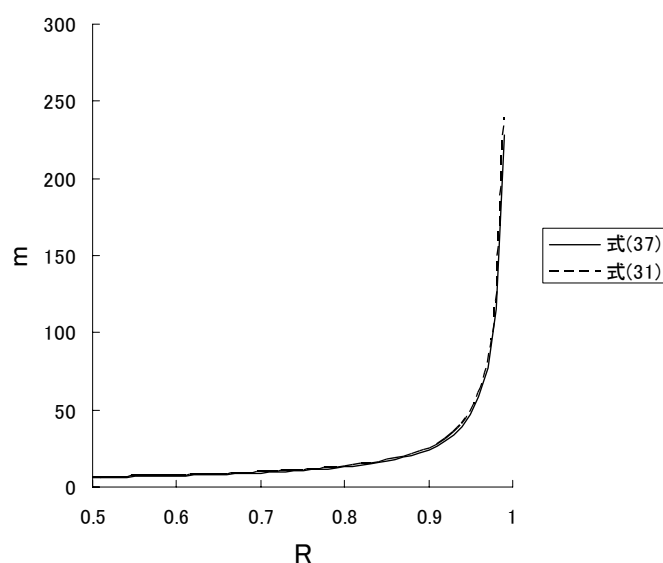
**表 6** の式(D)と(E)の  $\sigma_{jB}$ ,  $\sigma_{j0.2}$ ,  $\Delta\sigma_{w0}$ ,  $c_{0.5}$  にそれぞれ 167MPa, 98MPa,  $\Delta\sigma_{w0a}$  (=133MPa),  $c_{0.5a}$  (=10<sup>16.472</sup>) を代入して, 0.5 ≤ R < 1 に対する  $m$  と  $c$  がそれぞれ次式で与

えられる。

$$m = \frac{0.8628}{\log \frac{2.1859 - 1.1859R}{1.3089 - 0.3089R}} \quad (37)$$

$$c = 10^5 \left\{ \frac{167(1-R)}{1.3089 - 0.3089R} \right\}^m \quad (38)$$

式(37)が与える  $m$  と  $R$  の関係と式(31)が与える  $m$  と  $R$  の関係の比較を **図 8** に示す。両者の関係はほぼ等しい。したがって、式(37)の代わりに式(31)を用いる。

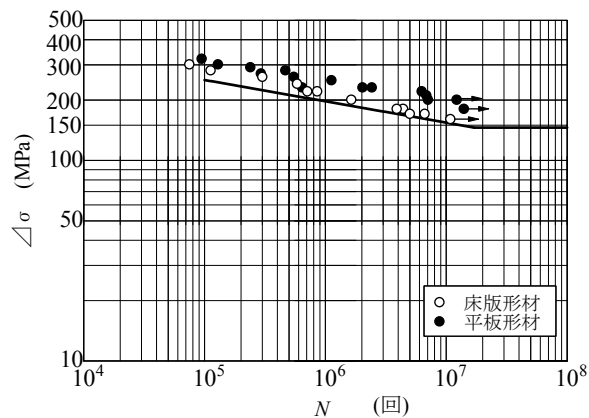


**図 8**  $m$  と  $R$  の関係

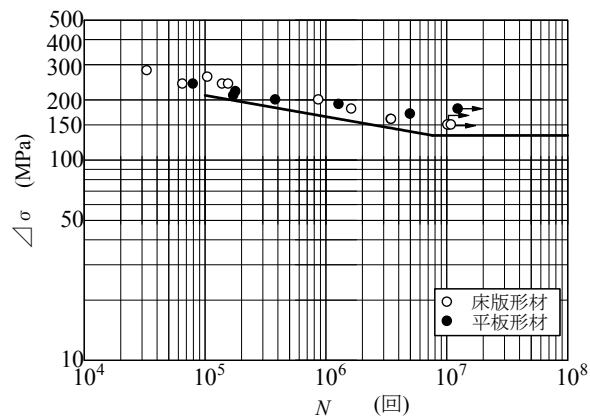
#### 4.4 試験結果との比較

腐食の影響を受けない場合に対する設計 S-N 曲線と疲労試験結果との比較を **図 9** に示す。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。

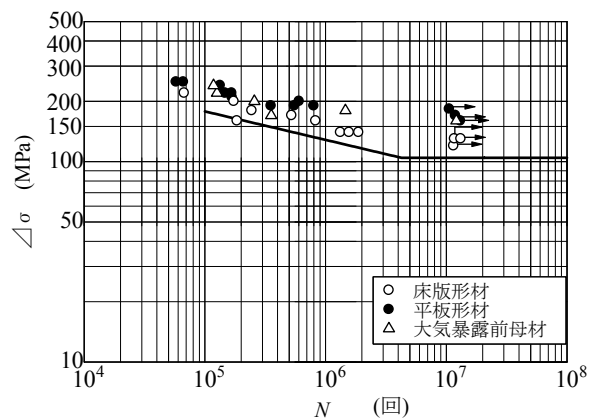
腐食の影響を受けた場合に対する設計 S-N 曲線と試験結果との比較を **図 10** に示す。腐食の影響を受けた場合に対する設計 S-N 曲線は、腐食の影響を受けない場合に対する設計 S-N 曲線が与える応力範囲を、母材に対して 0.716 倍、摩擦攪拌接合部に対して 0.872 倍している。これらの数値は、ALST 研究レポート 2<sup>1)</sup> の p.40 の項目 (4) で提案された数値である。**図 10 (a)**の母材においては、設計 S-N 曲線が試験結果の下限付近を通過していることが分る。しかし、**図 10 (b)**の摩擦攪拌接合部においては、設計 S-N 曲線が試験結果からかなり離れた位置を通過している。これは、**図 9 (e)**に示すように、大気暴露前の摩擦攪拌接合部の試験結果が、腐食の影響を受けない場合に対する設計 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。



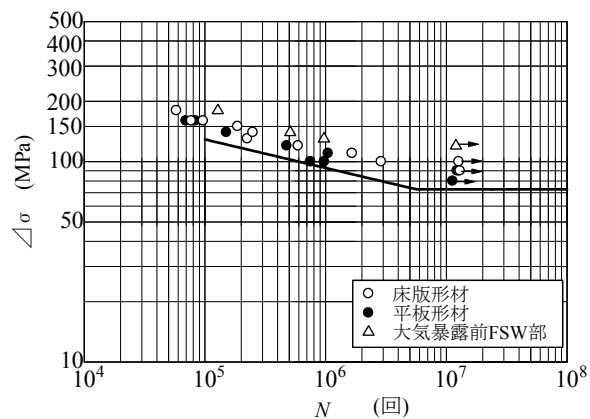
(a) 母材 (R=-1)



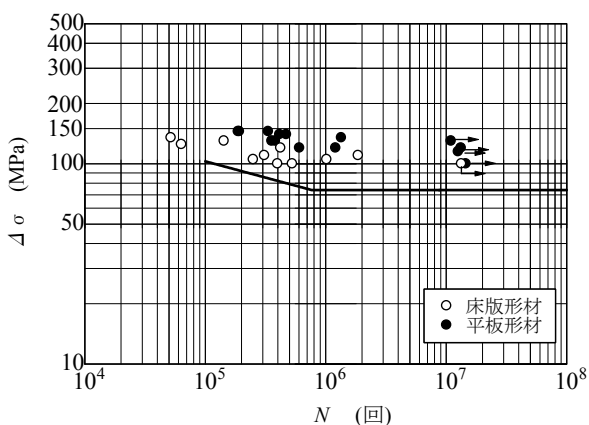
(d) 摩擦撈拌接合部 (R=-1)



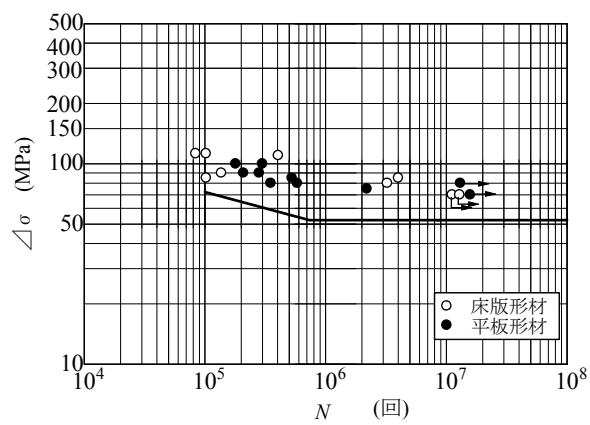
(b) 母材 (R=0.1)



(e) 摩擦撈拌接合部 (R=0.1)



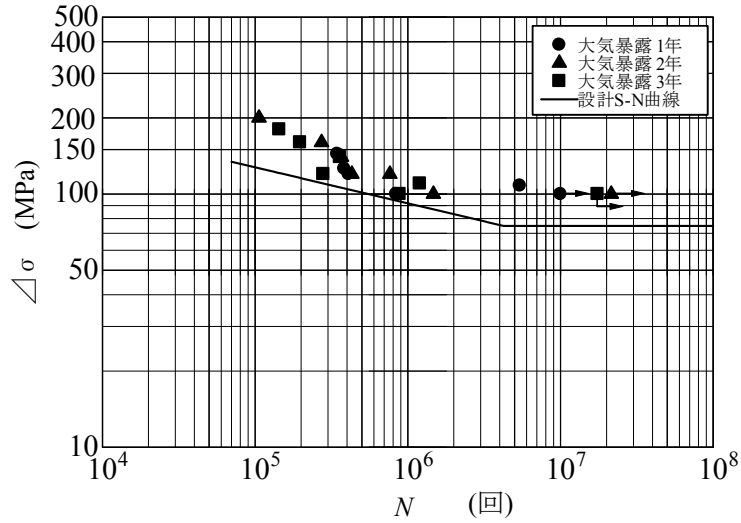
(c) 母材 (R=0.5)



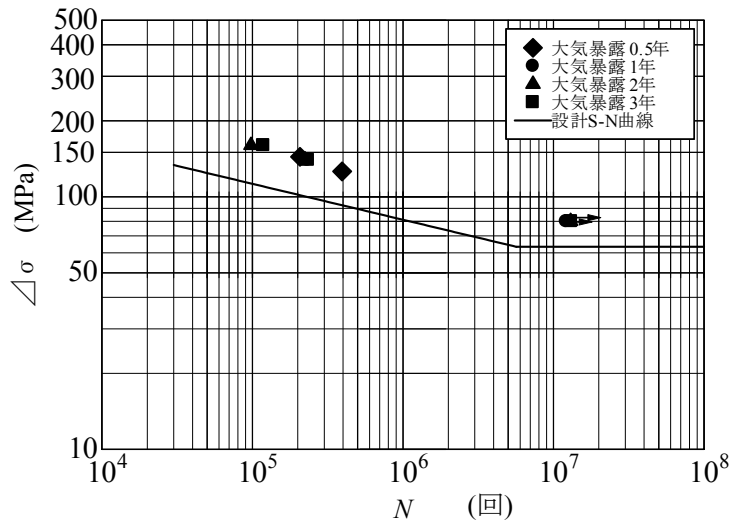
(f) 摩擦撈拌接合部 (R=0.5)

図9 腐食の影響を受けない場合に対する設計S-N曲線と疲労試験結果との比較





(a) 母材



(b) 摩擦攪拌接合部

図10 腐食の影響を受けた場合に対する設計 S-N 曲線と試験結果との比較 ( $R=0.1$ )

#### 4.5 まとめ

アルミニウム合金 A6005C-T5 の設計疲労限度と設計 S-N 曲線を表 10 にまとめる。表 10 の諸式が与える関係を図 11 および 12 に示す。図 11 は腐食の影響を受けない場合に対する設計 S-N 曲線であり、図 12 は、腐食の影響を受ける場合に対する設計 S-N 曲線である。さらに、 $m$  と  $R$  の関係を図 13 に示し、 $\log c_a$  と  $R$  の関係を図 14 に示す。

表 10 設計疲労限度と設計 S-N 曲線

(a) 母材

設計疲労限度	
$-1 \leq R \leq 1$	$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{146(1-R)}{1.3244 - 0.6756R} \quad (A)$
設計 S-N 曲線	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma = \alpha \left( \frac{10^{21.447-6.15R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}} \quad (B)$
$0.1 < R \leq 0.5$	$\Delta\sigma = \alpha \left( \frac{10^{21.685-8.54R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}} \quad (C)$
$0.5 < R < 1$	$\Delta\sigma = \alpha \left\{ \frac{225(1-R)}{1.1879 - 0.1879R} \right\} \left( \frac{10^5}{N} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (E)$
	$m = \frac{0.8823}{\log \frac{4.0822 - 2.0822R}{2.3758 - 0.3758R}} \quad (F)$

$\alpha$  : 腐食の影響を受けない場合 1, 腐食の影響を受ける場合 0.716

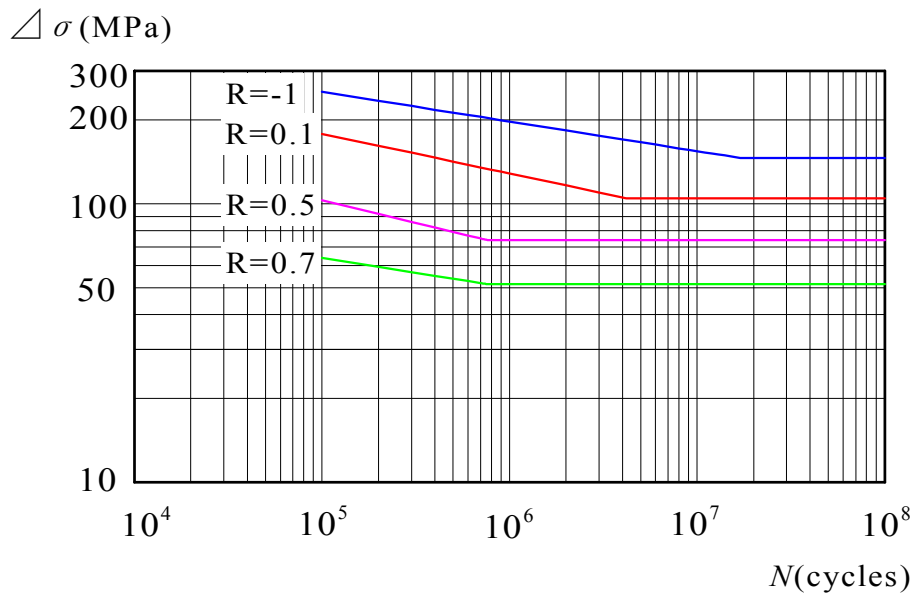
$\Delta\sigma_{caf}$  と  $\Delta\sigma$  の単位 : MPa

## (b) 摩擦攪拌接合部

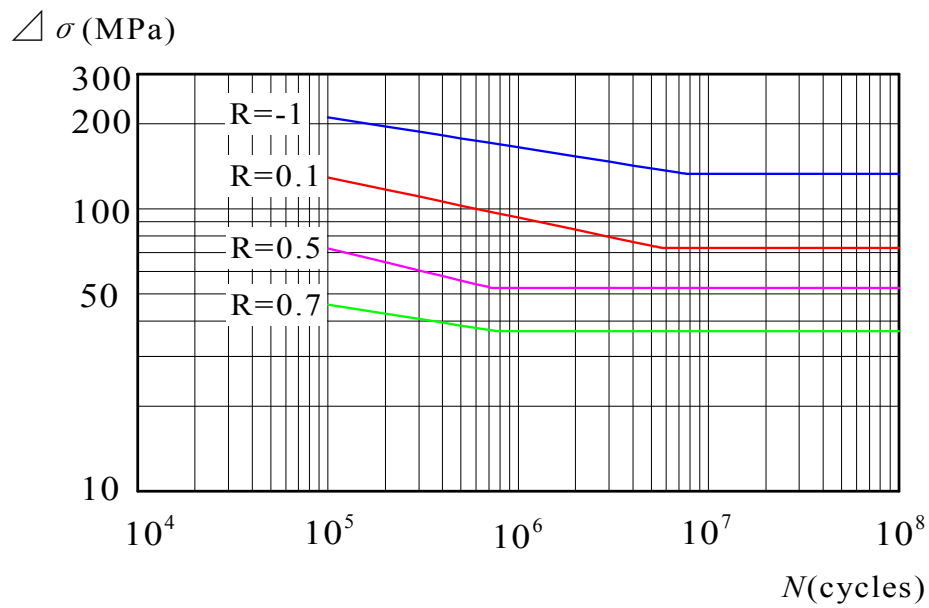
設計疲労限度	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{133(1-R)}{1.6786 - 0.3214R} \quad (\text{A})$
$0.1 < R \leq 1$	$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{99.0(1-R)}{1.2966 - 0.7034R} \quad (\text{B})$
設計 S-N 曲線	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma = \alpha \left( \frac{10^{20.486-6.38R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}} \quad (\text{C})$
$0.1 < R \leq 0.5$	$\Delta\sigma = \alpha \left( \frac{10^{20.692-8.44R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}} \quad (\text{D})$
$0.5 < R < 1$	$\Delta\sigma = \alpha \left\{ \frac{167(1-R)}{1.3089 - 0.3089R} \right\} \left( \frac{10^5}{N} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (\text{E})$
	$m = \frac{0.8823}{\log \frac{4.0822 - 2.0822R}{2.3758 - 0.3758R}} \quad (\text{F})$

$\alpha$  : 腐食の影響を受けない場合 1, 腐食の影響を受ける場合 0.872

$\Delta\sigma_{caf}$  と  $\Delta\sigma$  の単位 : MPa

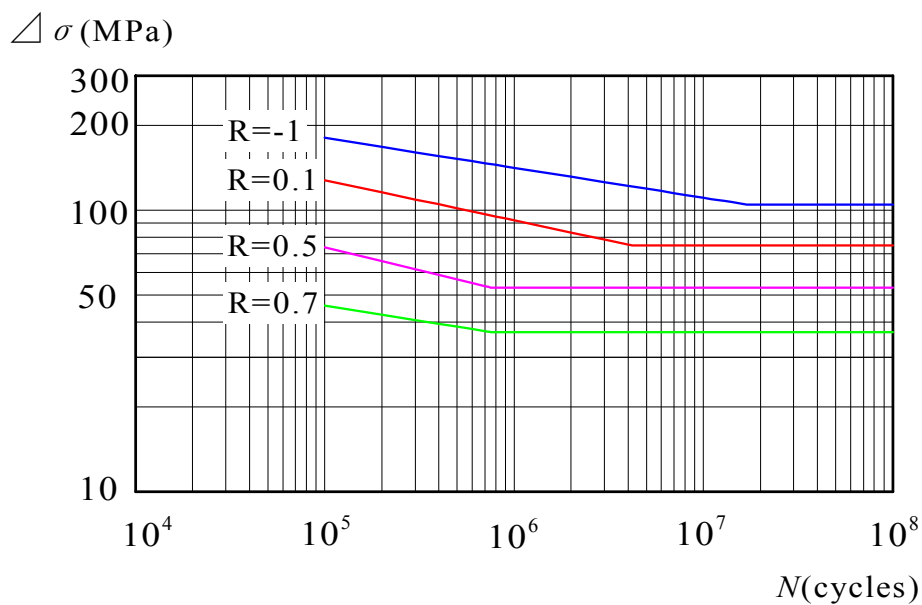


(a)母材

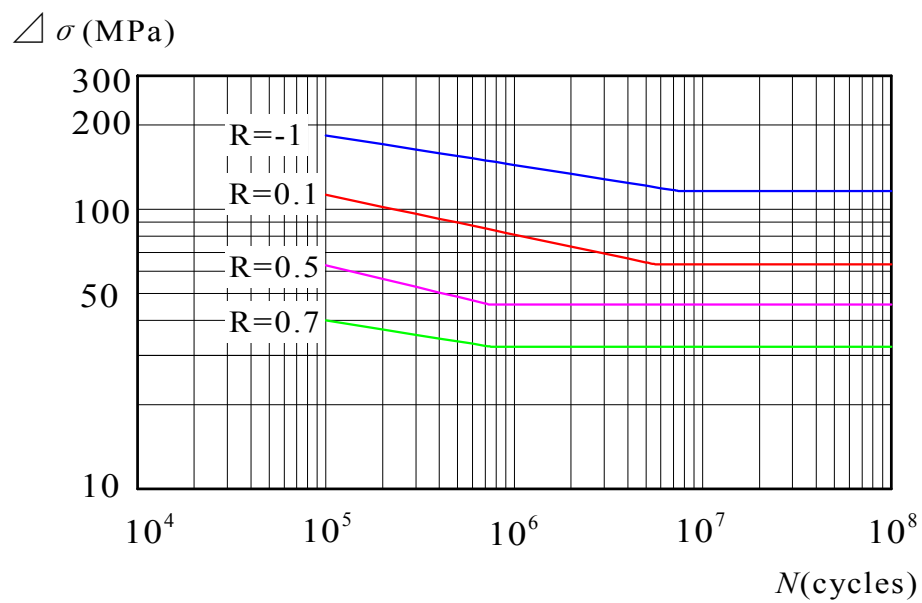


(b) 摩擦攪拌接合部

図 11 腐食の影響を受けない場合に対する設計 S-N 曲線



(a) 母材



(b) 摩擦攪拌接合部

図 12 腐食の影響を受ける場合に対する設計 S-N 曲線

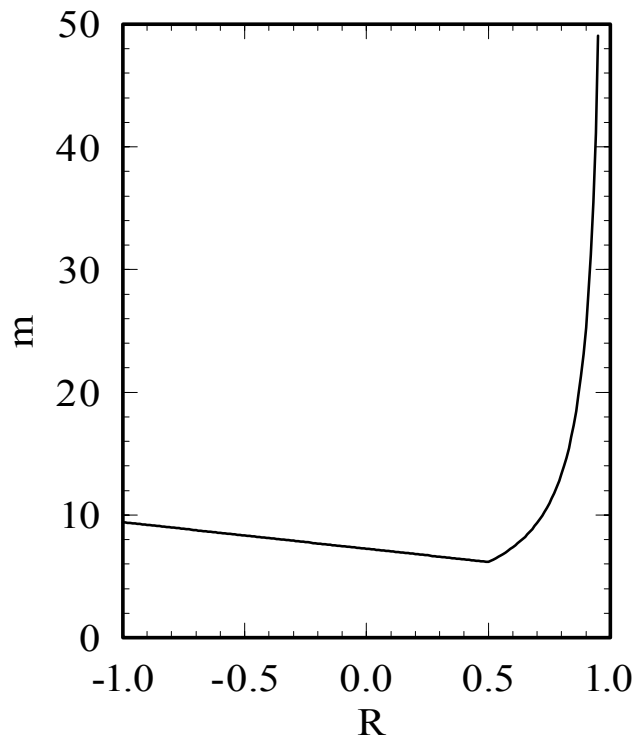


図13  $m$  と  $R$  の関係

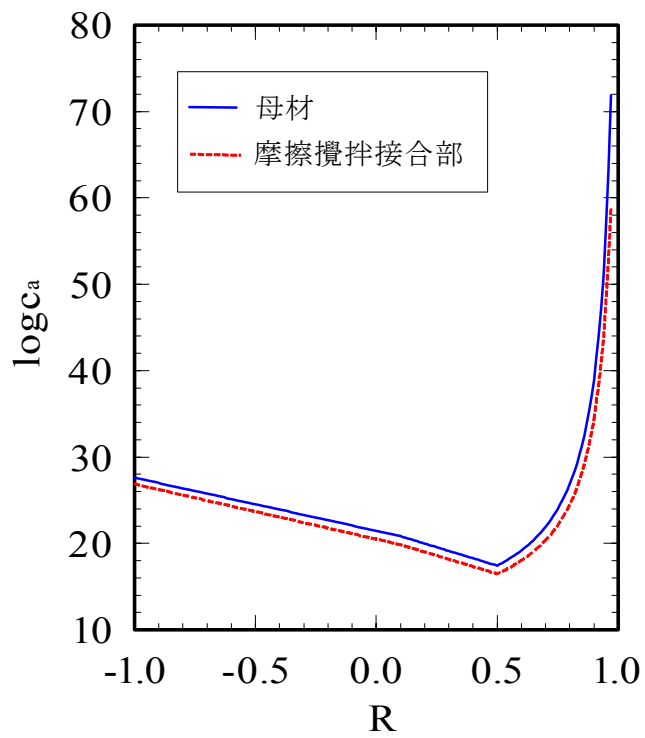


図14  $\log c_a$  と  $R$  の関係

## 第5章 結論

本研究レポートでは，設計 S-N 曲線に関して，ALST 研究レポート 2<sup>1)</sup> で残された課題を解決し，同研究レポートで提案されたアルミニウム合金 A6005C-T5 の母材および摩擦攪拌接合部の設計 S-N 曲線を完成させた．提案された設計疲労限度と設計 S-N 曲線を表 10 にまとめ，同表の諸式が与える関係を図 11 と 12 に示した．

## 参考文献

- 1) 萩澤亘保, 大倉一郎: 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.
- 2) JIS H 4100: アルミニウム及びアルミニウム合金の押出形材, 2006.
- 3) 日本アルミニウム協会: 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.