5083-O アルミニウム合金溶接継手の疲労特性*

蛭川 寿^{*1}, 松岡 三郎^{*1}
竹内 悦男^{*1}, 西島 敏^{*1}Fatigue Properties of Butt-Welded joints
for 5083-O Aluminium AlloyHisashi HIRUKAWA, Saburo MATSUOKA,
Etsuo TAKEUCHI and Satoshi NISHIJIMA

Fatigue properties were examined on base metals and butt-welded joints for 5- and 20-mm-thick 5083-O aluminium alloy plates with three heats for each thickness. The fatigue strength was independent of the heat and the thickness both for base metals and welded joints. However, it was much lower for butt-welded joints than for base metals because of the tensile residual stresses introduced in the butt-welded joints. The fatigue properties for 5083-O aluminium alloys were compared with those for SM50B and HT80 steels. The relation $\Delta\sigma/E$ versus N_f was found to be unique for those materials in the case of welded joints, but was dispersed in the case of base metals. Here, $\Delta\sigma$, E and N_f are stress range, Young's modulus and fatigue life, respectively.

Key Words: Fatigue of Metals, 5083-O Aluminium Alloy, Welded Joint, Residual Stresses, Young's Modulus

1. 緒言

1975年以来、金属材料技術研究所では鉄鋼材料の疲労特性に関する基準的データを提供する目的で疲労データシートを作成しているが、新たに疲労データシート計画の一環として溶接構造用アルミニウム合金を取り上げ、表1に示す計画のもとに疲労試験などを実施している。既に5083-Oアルミニウム合金の低サイクル及び溶接継手のデータシートNo. 61¹⁾とNo. 64²⁾を発行しており、鉄鋼材料も含めると疲労データシートは65巻に達している。

本報では、既刊の5083-Oアルミニウム合金の溶接継手の疲労データシートNo. 64の結果に加え、研究的に行った疲労き裂伝ば特性や溶接部の残留応力、余盛形状、硬度分布などの測定結果等を報告する。これらのアルミニウム合金の結果を溶接構造用高張力鋼HT80³⁾とSM50B⁴⁾⁵⁾で得た結果と比較することにより、両材料における疲労特性の相違点と類似点について検討する。

2. 実験方法

2-1. 供試材

供試材の化学成分を表2、機械的性質を表3に示す。

これらの表に示したように供試材は板厚5mm、6mmと20mmの5083-Oアルミニウム合金熱間圧延板である。表2の化学成分と表3の母材の機械的性質はともにJIS規格範囲内であり、化学成分と機械的性質は板厚及びチャージの異なる材料間ではほとんど差はない。溶接継手の引張試験は余盛付きのままで行っており、破断は母材部で起こった。母材と比べると、0.2%耐力と伸びは若干低くなった。

表1. 溶接構造用アルミニウム合金疲労データシートの全体計画

Material	Heat-treatment	Heats	Thickness	Specimens	Fatigue properties
5083	O (Hot rolled)	3	20mm	Round	LCF(R=1)
			5mm	Plate	HCF(R=0)
		1	20mm	Welded	
7N01	T5 (Extruded) T6 (Hot rolled)	2	10mm	Round	LCF(R=1)
				Plate	HCF(R=0)
		1		Welded	
6N01	T5 (Extruded)	2	3mm	Plate	HCF(R=0)
		1		Welded	

* See Fig. 1

** LCF : Low Cycle Fatigue, HCF : High Cycle Fatigue.
R : Minimum to Maximum Load Ratio.

* 平成3年11月1日 材料力学講演会において講演、原稿受付 平成3年10月28日。

*1 正員、科学技術庁金属材料技術研究所 (〒153 東京都目黒区中目黒2-3-12)。

2-2. 溶接施工並びに余盛形状と残留応力測定

表4に溶接条件を示す。溶接板の作成は5mm厚のチャージAと20mm厚のチャージFに対し、ともに直径 $\phi =$

表2. 5083-Oアルミニウム合金の化学成分

Thickness (mm)	Heat	Element (wt%)									
		Mg	Si	Mn	Zn	Cu	Cr	Ti	Fe	Al	
5	A	4.51	0.14	0.63	0.04	0.04	0.12	0.02	0.23	Bal	
6	B	4.37	0.11	0.58	0.03	0.05	0.10	0.02	0.23	Bal	
5	C	4.61	0.14	0.73	0.01	0.04	0.10	0.01	0.20	Bal	
20	D	4.71	0.15	0.65	0.01	0.05	0.10	0.01	0.22	Bal	
20	E	4.48	0.09	0.59	0.02	0.04	0.10	0.02	0.22	Bal	
20	F	4.59	0.15	0.70	0.01	0.02	0.10	0.01	0.21	Bal	

表3. 5083-Oアルミニウム合金の機械的性質

Specimen	Thickness (mm)	Heat	0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
5083-O Al. Base metal	5/6	A	159	329	20
		B	148	315	26
		C	132	312	21
	20	D	159	317	26
		E	158	323	28
		F	160	316	24
5083-O Al. Butt welded joint	5	A	147	325	20
	20	F	148	312	17

* : JIS Z 2201(1980), No. 5 type specimen with 25mm width and 50mm gauge length.

表4. 5083-Oアルミニウム合金の溶接施工条件

Material	5083-O aluminium alloy	
Welding process	Gas metal arc welding	
Plate thickness (mm)	5	20
Heat	A	F
Edge preparation and gouging by machining (dimensions in mm)		
Weld length (mm)	1000	1000
Plate size (mm)	1000 x 200	1000 x 250
Welding consumable	$\phi 1.6\text{mm}$ A5356-WY wire ¹⁾ Ar. 25 l/min	$\phi 1.6\text{mm}$ A5356-WY wire ¹⁾ Ar. 50 l/min
Welding position	Flat	
Welding current (A)	210-240	450
Welding speed (cm/min)	65	40
Arc voltage (V)	24-26	27-29
Heat input ²⁾ (kJ/cm)	4.7-5.8	18.2-19.5
Interpass temperature	room temperature	

1) JIS Z 3232(1979), "Aluminium and aluminium alloy welding rods and electrode wires".

2) Values for the pass relating to the surface layer.

1.6mmのA5356-WYワイヤを用い、自動ガスメタルアーク溶接法で表裏各一層の突合せ溶接を行った。溶接板の大きさは5mm厚で1000×480mm、20mm厚で1000×500mmであり、溶接線の長さはともに1000mmである。

作成した溶接板から図1(b)に示す試験片を作成した後、余盛形状の測定を行った。測定法はX-Yステージに載せた試験片の表面上を先端半径約0.2mmの針を溶接線に対して直角に走査し、針の高さ変位をA/Dボードを介し、パーソナルコンピュータに集録した。このデータをもとに余盛形状を作図し、余盛高さ、フランク角、止端半径などを求めた⁶⁾。

溶接残留応力の測定は同じ図1(b)の試験片を用いて行った。その際、余盛部は削除し、表裏で止端部に相当する4本の線上に、15mm間隔で6枚ずつ合計24枚の2軸ひずみゲージを貼りつけた。その後、試験片の切断を最初に溶接部中央で板幅方向、次にゲージの間を縦方向、最後に試験片板厚中央を縦方向に沿って行った。これらの切断の各々の過程で、解放される残留ひずみを測定した。

2-3. 試験片形状

図1に示すように、3種類の疲労試験片を作成した。図1(a)の平板試験片は5と20mm厚のすべてのチャージについて作成し、表面は圧延のままとした。図1(b)の溶接継手試験片は溶接を行ったチャージ、すなわち、5mm厚ではチャージA、20mm厚ではチャージFについて作成し、余盛付きの状態で疲労試験に供した。図1(c)のコンパクト型(CT)試験片は20mm厚のチャージFから切り出し、表面は最終的に600番のエメリー紙で仕上げた。

図1. 試験片形状

2-3. 疲労試験

母材の疲労寿命試験は図1(a)の平滑試験片を用い、容量100kNの電磁共振型試験機により、周波数 $f=130\text{Hz}$ 、応力比 $R=0$ のもとで行った。溶接継手の疲労寿命試験は図1(b)の溶接継手試験片を用い、5mm厚の場合は容量150kN、20mm厚の場合は容量400kNの油圧サーボ試験機により、 $f=10\sim 30\text{Hz}$ 、 $R=0$ のもとで行った。疲労き裂伝ば試験は図1(c)のCT試験片を用い、容量10kNの油圧サーボ試験機により、 $f=30\text{Hz}$ のもとで行った。そ

図2. 5083-Oアルミニウム合金溶接継手の溶接形状

図3. 5083-Oアルミニウム合金溶接継手の硬さ分布

の際、き裂開口を避けるため、 $P_{\max}$ 一定 ΔK 減少法⁷⁾を採用し試験を行った。また、き裂長さは試験片背面に貼ったひずみゲージを利用した弾性コンプライアンス法で測定した。

アルミニウム合金の疲労特性は大気中の水分量、すなわち湿度に依存すると言われていたので、前報⁸⁾において5083-Oアルミニウム合金の疲労特性を乾燥大気(0.0003%RH)と湿潤大気(80%RH)中において調べた。その結果、湿潤大気中のほうが疲労寿命は短くなり、疲労き裂伝ばは加速することがわかった。そこで、本報のデータシートに関する疲労試験はJIS規格で定める温度23℃、相対湿度50%の標準大気中で行うことにした。

3. 実験結果

3-1. 余盛形状

図2に溶接部のマクロ形状写真を示す。両板厚の場合ともに表裏各一層の溶接を行ったことが判別できる。また、余盛形状は滑らかで良好な溶接仕上がりであることがわかる。図3は溶接部の硬さ分布であり、横軸には溶接部中央からの距離をとってある。図3(a)の5mm厚の場合、硬さ測定は板厚中央、20mm厚の場合表裏から2mm内側で行った。両板厚ともに、溶接部中央付近で硬さは小さくなった。しかし、硬さ分布から溶接部、熱影響部、母材の区別は明確にできなかった。

図4には図1に示すような余盛形状を測定した結果を余盛高さ $H(\text{mm})$ 、フランク角 $\theta(\text{rad})$ 、止端半径 $\rho(\text{mm})$ について示す。測定は1本の試験片につき表裏で2.5mm間隔で行った。図4にはさらに次式を用いて止端部

図4. 20mm厚溶接継手試験片の余盛形状

の応力集中係数 α を計算した⁹⁾。

$$\alpha = 1 + \frac{1 - \exp(-0.9(T/H)^{1/2} \times \theta)}{1 - \exp(-0.9(T/H)^{1/2} \times \pi/2)} \times \left[\frac{1}{2.8T/t-2} \times \frac{H}{\rho} \right]^{0.65} \quad (1)$$

得られた α の平均値はほぼ1.3となった。同様な結果は5mm厚溶接継手試験片でも得られ、 α はほぼ1.2となった。

図5には同じ20mm厚溶接継手試験片で得た、角変形 v_θ (mm/m)、目違い量 δ (mm) の分布を示す。 v_θ と δ はともに小さい値となった。

図4及び図5と同様な結果は5mm厚溶接継手試験片においても得られ、疲労特性に影響を与える k_t 、 v_θ 、 δ の平均値はそれぞれ約1.2、約6.6、約0.26mmとなった。これらの結果と図1から4の結果から判断すると、5と20mm厚の場合ともに溶接の仕上がりは良好であったと結論できる。

3 2. 溶接残留応力

溶接残留応力は溶接継手の疲労特性に大きな影響を及ぼすことが知られている。図6には2軸ひずみゲージを用いて測定した20mm厚溶接継手試験片における残留応力分布を示す。横軸の距離は試験片板幅中央を原点としている。

図6(a)は試験片長手方向すなわち荷重軸方向の分布、図6(b)は試験片板幅方向の分布である。丸印は試験片を溶接部で半分に切断し、次にゲージ間を縦方向に切断した後の結果であるが、ともに板幅中央付近で最大の引張残留応力が存在しており、その値は約20MPaであった。さらに、試験片板厚中央を縦方向に切断した結果をひし形印で示すが、引張残留応力は荷重軸方向、板幅方向ともに約5MPa程度増加した。なお、この段階の測定は試験片板幅の半分について行った。同様な傾向は5mm厚溶接継手試験片でも得られた。

図5. 20mm厚溶接継手試験片の角変形と目違い量

3 3. 疲労特性

図7に平板と溶接継手試験片を用い、片振り荷重 ($R=0$) のもとで得た応力範囲 $\Delta\sigma$ と破断繰返し数 N_f の関係を示す。平板試験片すなわち母材については5と20mm厚ともに3チャージづつ試験を行っているが、チャージによる記号の区別は行っていない。しかし、母材の疲労特性はチャージと板厚に依存せず、ほぼ一定となることがわかる。溶接継手では5と20mm厚でそれぞれ1チャージづつしか試験を行っていないが、疲労特性は板厚に依存しなかった。しかし、母材の結果と比べると、溶接継手の結果は著しく低強度側となり、例えば 10^7 回疲労強度はほぼ1/3となった。

図8はCT試験片を用いて得た20mm厚母材の疲労き裂伝ば特性である。図中に示す P_{max} -一定 ΔK 減少法を用いると、き裂進展につれて応力比 R は徐々に増加し、

(a) 荷重軸方向の残留応力分布

(b) 板幅方向の残留応力分布

図6. 20mm厚溶接継手試験片の残留応力分布

ΔK_{th} 近傍では $R=0.94$ のように非常に高くなるので、全 ΔK 領域においてき裂閉口を避けることができる。そこで横軸には有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を取っており、疲労下限界の有効成分 $\Delta K_{eff,th}$ はほぼ $1\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ となった。

4. 考察

ここでは、上述の5083-Oアルミニウム合金の結果にHT80鋼とSM50B鋼の結果を加え、両者を比較することにより、これらの材料の母材と溶接継手の疲労寿命特性とき裂伝ば特性に与える材料、溶接残留応力、ヤング率の影響について考察する。

まず、疲労き裂伝ば特性について検討する。図8には5083-Oアルミニウム合金の母材の $da/dN-\Delta K_{eff}$ 関係に加え、HT80とSM50B鋼の母材の結果を示す。すべての材料はともに P_{max} 一定 ΔK 減少試験を採用しているため、き裂閉口は生じていない。引張強さ σ_B は5083-Oアルミニウム合金で約320MPaであるのに対し、HT80鋼では約830MPa、SM50B鋼で約530MPaである。鋼の場合、 $\Delta K_{eff,th}$ を含めた $da/dN-\Delta K_{eff}$ 関係は σ_B に依存しなかったが、5083-Oアルミニウム合金の結果と比べると、約3倍高 ΔK 側となった。このような異種金属材料間の疲労き裂伝ば挙動は、 $da/dN-\Delta K_{eff}/E$ 関係で表すと、1本の曲線になることが知られている¹⁰⁾。ここで、 E はヤング率で、アルミニウム合金では70GPa、鋼では208GPaである。図9は図8の結果を $da/dN-\Delta K_{eff}/E$ 関係で表したものである。予想通り、この関係は材料と強度レベルに依存せず、次式で表すことができた。

$$da/dN = C_a \times \{ (\Delta K_{eff}/E)^m - (\Delta K_{eff,th}/E)^m \} \quad (2)$$

図7. 5083-Oアルミニウム合金溶接継手のS-N特性

ここで、 C_a と m は定数で、 ΔK を $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ で表したとき図9の結果ではそれぞれ 1.05×10^5 と3.0になった。また、 $\Delta K_{eff,th}/E$ は 1.2×10^{-5} であった。

図9または式(2)で表される疲労き裂伝ば特性は母材に対する結果であり、 P_{max} 一定試験を用い、き裂閉口が生じない条件のもとで求めている。一方、溶接継手の疲労き裂伝ば特性を中央き裂(CCT)試験片を用いて求めると、図6(a)の荷重軸方向の残留応力分布から、き裂先端にはいつも引張残留応力が導入されるため、き裂閉口が起きない。その結果、溶接継手のき裂伝ば特性は、 P_{max} 一定 ΔK 減少法のもとでCT試験片を用いて求めた母材のき裂伝ば特性と一致する⁷⁾。換言すると、図9または式(2)で表される母材の疲労き裂伝ば特性は、引張残留応力下の溶接継手の特性を表していることにもなる。

上述したように、疲労き裂伝ば特性は $da/dN-\Delta K_{eff}/E$ 関係で表すと、材料と強度レベルに依存しない。そこで、同様なことを疲労寿命特性についても調べてみる。図10は母材と溶接継手の5083-Oアルミニウム合金並びにHT80とSM50B鋼の疲労寿命特性において、縦軸の応力範囲 $\Delta\sigma$ をヤング率 E で無次元化して表している。図7に示すように、5083-Oアルミニウム合金では板厚は5と20mmであり、それぞれの板厚について3チャージずつの供試材を用いているが、図10では母材と溶接継手についてのみ記号分類を行っている。HT80とSM50B鋼についても板厚9と20mmの供試材を用いているが、母材と溶接継手に対してのみ、記号分類を行っている。

図8. 5083-Oアルミニウム合金母材とSM50B, HT80鋼母材の疲労き裂伝ば特性

母材の場合、 $\Delta\sigma$ - N_f 関係では5083-Oアルミニウム合金、SM50B鋼、HT80鋼の順序で高強度側となり、例えば 10^7 回疲労強度はそれぞれ約320、600、700MPaである。図10(a)に示すように、これらの結果を $\Delta\sigma/E$ - N_f 関係で表しても、図9のき裂伝ばの場合とは異なり、材料の依存性はなくなり、5083-Oアルミニウム合金の結果が最も高強度側となった。溶接継手の場合も、 $\Delta\sigma$ - N_f 関係においては 10^7 回疲労強度が5083-Oアルミニウム合金で約60MPa、SM50B鋼とHT80鋼で約300MPaとなり、鋼の方が高強度となる。しかし、図10(b)に示すように、 $\Delta\sigma/E$ - N_f 関係で表すと、 10^7 回付近で多少の差が生じるが、 10^7 回以下の低寿命領域においては、3材料の結果はよく一致した。

このように、母材と溶接継手の $\Delta\sigma/E$ - N_f 関係は異なったが、これは次のような原因が考えられる。まず有限寿命領域においては、母材の場合は、平滑試験片を用いているため、破断寿命に占めるき裂発生寿命の割合はき裂伝ば寿命の割合よりも大きい。き裂伝ば過程においても、片振荷重($R=0$)であるために、き裂閉口が起り、き裂伝ば寿命に影響を及ぼす。これに対し、溶接継手の場合は溶接止端部、特にアンダーカット部において応力が集中するため、疲労き裂は繰返し初期で発生すると考えられる。図10(b)には応力集中係数 $\alpha=4.5$ を有する切欠き試験片を用いた5083-Oアルミニウム合金の母材の疲労特性を◇で示してあるが、この結果は溶接継手と一致した。このことは、溶接継手の疲労寿命特性においては、き裂発生寿命が著しく小さく、き裂伝ばが支配因子となることを示している。さらに、き裂の伝ば過程においては、図6で示したよ

うな溶接引張残留応力のため、き裂先端にはいつも引張残留応力が導入され、き裂閉口が起こらないと考えられる。このような理由により、母材の $\Delta\sigma/E$ - N_f 関係は材料と強度レベルに依存するが、溶接継手の $\Delta\sigma/E$ - N_f 関係は、図9の da/dN - $\Delta K_{err}/E$ 関係と同様に、ほぼ1本の曲線で表すことができると思われる。

溶接継手においては疲労寿命特性はき裂閉口が起こらない条件下でのき裂伝ば寿命とほぼ一致するが、それは式(2)のき裂伝ば式を積分することにより求めることができる。積分に際して、式(2)中の ΔK_{err} は次式で与えた¹¹⁾。

$$\Delta K_{err} = 1.12 \times (2/\pi) \times \alpha \times \Delta\sigma \times (\pi a)^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 1.12 と $2/\pi$ はそれぞれき裂が表面にあること及び半円き裂を仮定したことによる補正係数である。 α は溶接止端部の応力集中係数で、き裂が止端部に発生したことを考慮している。き裂はアンダーカット部

図9. 5083-Oアルミニウム合金母材とHT80, SM50B鋼母材の da/dN - $\Delta K_{err}/E$ 関係

(a)母材

(b)溶接継手

図10. 5083-Oアルミニウム合金とHT80, SM50B鋼の $\Delta\sigma/E$ - N_f 関係

に発生する可能性が大きい、応力拡大係数に与える影響は止端部の全体の応力集中の方が大きいと考えられるので、図4に示す5083-Oアルミニウム合金の溶接継手で得られた $\alpha=1.3$ を用いた。また、溶接残留応力のため、き裂閉口は起こらないので、全応力範囲 $\Delta\sigma$ を用いた。式(3)を式(2)に代入し、積分するためには、初期き裂長さ a_i と最終き裂長さ a_f が必要である。ここでは、 a_f は5mm厚溶接継手の板厚の半分である2.5mmとし、 a_i については50と150 μm の2例を計算した。 $a_i=50$ と150 μm はアルミニウム合金や鋼の結晶粒径の1~3倍に相当する。これらの a_i に比べ、 $a_f=2.5\text{mm}$ は充分大きく、また式(2)で $m=3$ であるので、 a_f を2.5mm以上に大きくしても N_f に与える a_f の影響は小さい。

図10(b)に式(2)と(3)による数値計算結果を実線で示す。 $a_i=50\mu\text{m}$ の計算結果はほぼ実験結果の上限、 $a_i=150\mu\text{m}$ の計算結果はほぼ下限を与えており、溶接継手の疲労寿命は溶接引張残留応力のためにき裂閉口を伴わないき裂伝ばに支配され、かつ異種材料間ではヤング率が重要な役割を果たしていることがわかる。

一方、詳細にみると、 $N_f=10^7$ 回付近ではHT80とSM50B鋼の実験結果は実線の範囲から外れている結果もある。最近、太田らは最大応力を降伏応力に一定に保つ疲労試験法^{12)~14)}を開発している。この試験法では、残留応力は降伏応力以上にはならないという考え方に基いており、残留応力を最大に評価したことになる。最大応力を降伏応力にすると、5083-Oアルミニウム合金¹²⁾並びにSM50B鋼¹³⁾とSPV50鋼¹⁴⁾ではともに 10^7 回付近の強度はさらに低下する。このことは、図3に示す幅100mm程度の溶接継手試験片では、溶接残留応力が一部解放されるため、図7や図10(b)の $R=0$ の溶接継手の疲労特性ではき裂閉口がまだ生じていると考えられ、今後この点を明らかにする必要がある。

5. 結言

溶接構造用アルミニウム合金5083-Oの母材と突合せ溶接継手の疲労寿命特性及びき裂伝ば特性を調べ、それらの結果を溶接構造用高張力鋼HT80とSM50Bの結果と比較し、検討したところ以下の結論が得られた。

- (1)5083-Oアルミニウム合金の母材の疲労寿命特性は板厚5と20mm、各板厚3チャージづつについて求めたが、この範囲では板厚とチャージ間の依存性はみられなかった。
- (2)5083-Oアルミニウム合金の溶接継手の疲労寿命特性は板厚5と20mmの1チャージづつについて求めたが、両者の結果はほぼ一致し、母材に比べて強度は約1/3に低下した。

(3)5083-Oアルミニウム合金の母材の疲労き裂伝ば特性を板厚20mmの1チャージについてき裂閉口を避けることのできる $P_{\max}$ 一定 ΔK 減少法のもとで求めた。この結果にHT80とSM50B鋼の結果を加え、 $da/dN-\Delta K_{\text{err}}/E$ 関係で表したところ、材料と強度レベルに依存せず、3つの材料の結果は一致した。ここで、 da/dN はき裂伝ば速度、 ΔK_{err} は有効応力拡大係数範囲、 E はヤング率である。

(4)5083-Oアルミニウム合金並びにHT80とSM50B鋼の母材と溶接継手の疲労寿命特性を $\Delta\sigma/E-N_f$ 関係で表すと、母材では材料と強度レベルに依存したが、溶接継手では3つの材料の結果は一致した。ここで、 $\Delta\sigma$ は応力範囲、 N_f は破断寿命である。溶接継手の疲労寿命特性は上述のき裂閉口を伴わないき裂伝ば特性を積分して求めたき裂伝ば寿命と一致した。これらのことから、溶接継手の疲労寿命が材料によらずき裂伝ばに支配され、かつ溶接残留応力によりき裂閉口が起こらないことが重要な役割を果たすと結論できる。

7. 参考文献

- (1)NRI Fatigue data sheet, No.61(1989).
- (2)NRI Fatigue data sheet, No.64(1990).
- (3)NRI Fatigue data sheet, No.12(1979).
- (4)NRI Fatigue data sheet, No.5(1978).
- (5)松岡, 下平, 升田, 竹内, 西島, 鉄と鋼, 73-6(1987), P.707.
- (6)Matsuoka, S., Hirukawa, H. and Nishijima, S., Proc. 4th Int. Conf. Aluminium Weldments, (1988), 3-15.
- (7)Matsuoka, S., Takeuchi, E., Kosuge, M., Shimodaira, M., Ohta, A. and Nishijima, S., J. Test Eval., 14-6(1986), 312.
- (8)松岡, 蛭川, 竹内, 西島, 材力講演会概要集, (昭63.11), 151.
- (9)西田正孝, 応力集中, (昭42), 森北出版, 52.
- (10)Peterson, S., Nature, 211(1966), 1077.
- (11)石田誠, き裂の弾性解析と応力拡大係数, (昭51), 培風館, 130.
- (12)Ohta, A. and Mawari, T., Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 13-1(1990), 53.
- (13)Ohta, A., Mawari, T. and Suzuki, N., Engineering Fracture Mechanics, 37-5(1990), 987.
- (14)Ohta, A., Maeda, Y., Mawari, T., Nishijima, S. and Nakamura, H., Int. J. Fatigue, 8-3(1986), 147.