

構造用アルミニウム合金の応力－ひずみ関係の定式化および
MIG 溶接と摩擦攪拌接合によって発生する残留応力の定式化

ALST 研究レポート 1

2007 年 3 月

大阪大学大学院工学研究科

大倉一郎，長尾隆史，石川敏之

日本軽金属(株)グループ技術センター

萩澤亘保

(株)住軽日軽エンジニアリング設計技術部

大隅心平

概 要

社会基盤構造物に使用される A6061-T6, A6N01-T5 および A5083-O の構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係および、これらのアルミニウム合金の MIG 溶接部と摩擦攪拌接合部の応力-ひずみ関係が定式化される。さらに MIG 溶接および摩擦攪拌接合によって発生する残留応力が定式化される。

構造用アルミニウム合金に対して引張試験が実施され、得られたデータに確率統計学的処理が施され、次が明らかにされる。

- ① ヤング係数とひずみ硬化パラメータは、それぞれ正規分布と対数正規分布で表される。
- ② ヤング係数の変動係数は非常に小さく、通常の構造設計で使用する 70GPa のヤング係数は、非超過確率(好ましくない側を超過しない確率)5%に対する値より低い。
- ③ A6061-T6 と A6N01-T5 のひずみ硬化パラメータの平均値は、A5083-O のその 5.4 倍大きい。
- ④ A6061-T6 と A6N01-T5 のひずみ硬化パラメータの変動係数は A5083-O のそれにほぼ等しいが、両者の変動係数はヤング係数の変動係数よりかなり大きい。

構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係が Ramberg-Osgood 形式によって定式化される。

構造用アルミニウム合金の MIG 溶接部と摩擦攪拌接合部に対して引張試験が実施され、MIG 溶接部と摩擦攪拌接合部の応力-ひずみ関係が Ramberg-Osgood 形式によって定式化される。さらに、MIG 溶接と摩擦攪拌接合によって発生する残留応力が矩形分布によって定式化される。

MIG 溶接によって製作されたアルミニウム桁に発生する残留応力と矩形分布の残留応力を比較することにより、実際の部材に生じる残留応力が、矩形分布の残留応力により安全側に評価されることが示される。

代表 大倉一郎

謝 辞

本研究は、科学技術振興調整費充当戦略的研究拠点「阪大フロンティア研究機構」の研究プロジェクト（プロジェクト名：アルミニウム合金構造物実現のための基礎研究，2003～2005）の下で行なわれた。

本研究に多大な御協力を賜った故山口進吾氏(㈱住軽日軽エンジニアリング元取締役)に深く感謝したい。

目 次

第 1 章 序論	・・・1
第 2 章 構造用アルミニウム合金の応力－ひずみ関係の定式化	・・・2
2.1 Ramberg-Osgood 式	・・・2
2.2 ヤング係数 E およびひずみ硬化パラメータ n の決定方法	・・・3
2.2.1 ヤング係数 E の決定方法	
2.2.2 ひずみ硬化パラメータ n の決定方法	
2.2.3 ヤング係数 E , 0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$, 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ および ひずみ硬化パラメータ n の値	
2.3 ヤング係数 E の特性	・・・6
2.4 ひずみ硬化パラメータ n の特性	・・・9
2.5 応力－ひずみ関係式と試験結果との比較	・・・12
第 3 章 構造用アルミニウム合金の溶接部および摩擦攪拌接合部の応力－ひずみ関係と残留応力	・・・17
3.1 MIG 溶接および摩擦攪拌接合による突合せ継手の製作と 各種試験片の採取位置	・・・17
3.2 接合部の熱影響範囲	・・・19
3.3 接合部の応力－ひずみ関係	・・・22
3.3.1 接合部の機械的特性	
3.3.2 接合部の応力－ひずみ関係の定式化	
3.4 突合せ継手に発生する残留応力	・・・26
3.4.1 残留応力分布	
3.4.2 残留応力分布の定式化	
第 4 章 溶接によって製作されたアルミニウム桁に発生する残留応力	・・・34
4.1 アルミニウム桁	・・・34
4.2 アルミニウム桁に発生する残留応力	・・・35
4.3 矩形分布の残留応力と試験結果との比較	・・・36
第 5 章 結論	・・・39
参考文献	・・・41
付図 A	・・・42
付図 B	・・・45
付図 C	・・・48
付図 D	・・・50

第 1 章 序論

アルミニウム合金はこれまで橋の高欄や道路のガードレールなど付属品的な用途以外に社会基盤構造物の主要部材として用いられることはほとんどなかった。しかし初期コストだけでなく、耐用年数を考慮に入れたライフサイクルコストを重視する近年の傾向から、維持管理コストが少なくすむアルミニウム合金を社会基盤構造物に積極的に生かそうという動きが出てきた。これにともなって、最近ではアルミニウム歩道橋^{1),2)}や歩道用アルミニウム床版^{3),4)}が建設されるようになってきた。

アルミニウム歩道橋や歩道用アルミニウム床版の設計は、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案⁵⁾に従ってなされる。この指針案の 3 章の板要素に対する幅厚比の規定および 6 章の桁構造に関する諸規定は道路橋示方書⁶⁾の規定に準拠している。すなわちアルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案の規定は、道路橋示方書の規定において、鋼のヤング率 200GPa をアルミニウム合金のヤング率 70GPa に置き換え、鋼の降伏応力をアルミニウム合金の 0.2%耐力に置き換えることによって得られたものである。

鋼の応力-ひずみ関係は降伏応力まで直線で、降伏応力で水平線になるが、アルミニウム合金の応力-ひずみ関係は非線形である。さらに構造用アルミニウム合金として使用される 5000 系アルミニウム合金(非熱処理)と 6000 系アルミニウム合金(熱処理)の応力-ひずみ関係の曲がり方の程度は両者で大きく異なる。したがって、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案の板要素に対する幅厚比の規定および桁構造に関する諸規定は、アルミニウム板要素および桁構造の実際の挙動を正しく反映したものとはなっていないと考えられる。

アルミニウム構造物の製作には MIG 溶接や摩擦攪拌接合が使用される。MIG 溶接や摩擦攪拌接合によって製作されるアルミニウム部材には残留応力が発生する。この残留応力は、圧縮荷重や曲げ荷重を受けるアルミニウム部材の耐荷力を低下させる。さらに熱処理アルミニウム合金である 6000 系は、MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部が軟化するため、これらの応力-ひずみ関係は母材のそれと異なる。

アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案の板要素に対する幅厚比の規定および桁構造に関する諸規定を有限要素解析で今後検証するためには、構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係および MIG 溶接部と摩擦攪拌接合部の応力-ひずみ関係が定式化され、さらに MIG 溶接および摩擦攪拌接合によって発生する残留応力が定式化されなければならない。

以上の研究背景より、本研究では、A6061-T6、A6N01-T5 および A5083-O の構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係および、これらの MIG 溶接部と摩擦攪拌接合部の応力-ひずみ関係を定式化すること、ならびに MIG 溶接および摩擦攪拌接合によって発生する残留応力を定式化することを研究目的とする。

第2章 構造用アルミニウム合金の応力－ひずみ関係の定式化

2.1 Ramberg-Osgood 式

アルミニウム構造物の構造解析または耐荷力研究に用いられる応力－ひずみ関係式は、一般に Ramberg-Osgood 式である⁷⁾。すなわち、

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (2.1)$$

ここに、 ε と σ ：それぞれひずみと応力

E ：ヤング係数

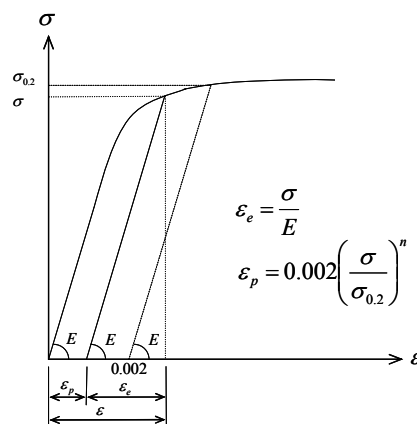
$\sigma_{0.2}$ ：0.2%耐力

n ：定数

図－2.1 に示すように、式(2.1)の第1項が弾性ひずみを表し、第2項が塑性ひずみを表す。ヤング係数 E は、応力－ひずみ関係の原点における接線の傾きである。 n は、非弾性領域のひずみ硬化を特徴付けるパラメータであり、本研究ではひずみ硬化パラメータと呼ぶ。

アルミニウム合金材のミルシートには、化学成分、引張強さ、0.2%耐力および伸びが記載されているが、ヤング係数 E とひずみ硬化パラメータ n の値は与えられていない。通常、ヤング係数 E に対して 70GPa が用いられることが多い。Mazzolani は、ひずみ硬化パラメータ n に対して、熱処理アルミニウム合金の n は 20～40 より大きく、非熱処理アルミニウム合金の n は 10～20 より小さいことを明らかにしている⁸⁾。

ヤング係数 E とひずみ硬化パラメータ n は、アルミニウム合金材によって不規則にばらつく不確定量である。したがってアルミニウム合金材の引張試験を実施し、得られたデータに確率統計学的処理を適用することにより、 E と n の特性を明らかにする。



図－2.1 応力－ひずみ関係

2.2 ヤング係数 E およびひずみ硬化パラメータ n の決定方法

2.2.1 ヤング係数 E の決定方法

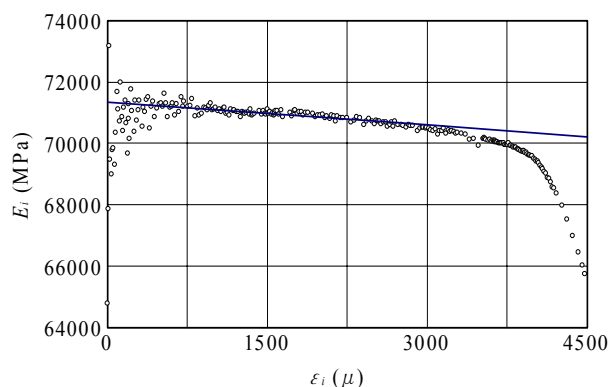
JIS 14B 号の引張試験片⁹⁾にひずみゲージを貼付し、ひずみゲージによりひずみを測定した。得られた応力－ひずみ関係の測定結果から次の値を計算する。

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \quad (2.2)$$

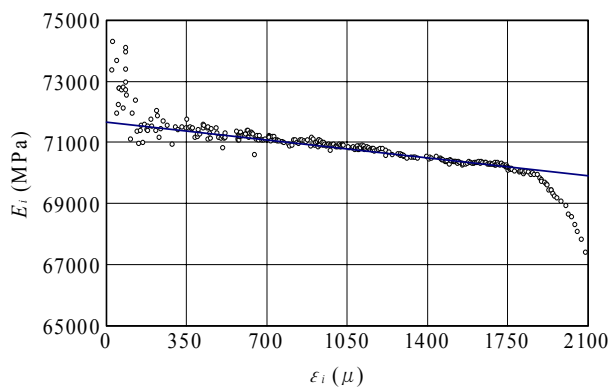
ここに、 E_i ：測定された i 番目の応力 σ_i とひずみ ε_i から決まるヤング係数の値

σ_i と ε_i ：それぞれ、測定された i 番目の応力とひずみ

E_i と ε_i の関係の一例を図－2.2に示す(全てのデータを付図-AとBに示す)。図－2.2(a)は、表－2.1(a)のロット1の試験片1に対する結果であり、図－2.2(b)は、表－2.1(b)のロット1の試験片1に対する結果である。 ε_i が小さい領域で、 E_i の値はばらつくが、 ε_i が大きくなるとこのばらつきは小さくなり、右下がりの直線になり、 ε_i が0.2%耐力に対応するひずみに近づくと、直線は曲がる。直線性が見られる範囲の E_i と ε_i の関係に最小二乗法を適用し、得られた直線の切片の値をヤング係数 E の値とする。



(a) A6061-T6 [ロット1の試験片1：表－2.1(a)]



(b) A5083-0 [ロット1の試験片1：表－2.1(b)]

図－2.2 $E_i - \varepsilon_i$ 関係

表－2.1 E , $\sigma_{0.1}$, $\sigma_{0.2}$, σ_B および n の値

(a) A6061-T6 と A6N01-T5

アルミニウム合金	ロット	試験片	E (GPa)	平均 E (GPa)	$\sigma_{0.1}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	n	平均 n
A6061-T6	1	1	71.3	71.2	303.8	308.2	329.2	48.2	51.1
		2	71.4		302.9	307.0	328.8	51.6	
		3	70.9		303.4	307.4	329.1	53.6	
	2	1	71.0	71.0	300.8	303.5	321.3	76.2	72.3
		2	70.9		300.9	303.9	322.0	71.0	
		3	71.1		299.6	302.6	321.2	69.6	
	3	1	71.0	70.9	310.6	313.4	328.1	77.2	92.1
		2	70.6		309.6	311.6	326.8	105.0	
		3	71.0		310.6	312.9	328.8	94.0	
	4	1	70.6	70.7	306.4	309.2	326.9	76.2	77.0
		2	70.9		305.9	308.7	326.8	76.1	
		3	70.6		305.9	308.6	326.0	78.9	
	5	1	71.8	71.3	320.1	326.2	345.0	36.7	37.1
		2	71.7		323.3	329.9	348.5	34.3	
		3	70.3		322.3	327.9	345.7	40.2	
	6	1	66.7	66.8	311.6	313.5	330.6	114.0	104.4
		2	67.5		315.2	317.2	334.7	109.6	
		3	66.2		315.3	317.7	326.8	89.5	
A6N01-T5	7	1	69.3	69.3	235.2	236.4	260.0	142.1	142.1
	8	1	70.7	70.7	245.4	248.8	268.3	49.6	49.6

(b) A5083-0

アルミニウム合金	ロット	試験片	E (GPa)	平均 E (GPa)	$\sigma_{0.1}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	n	平均 n
A5083-O	1	1	71.7	71.4	155.0	162.5	325.5	14.7	13.2
		2	71.0		154.0	162.6	321.2	12.9	
		3	71.6		153.6	162.8	324.4	11.9	
	2	1	72.2	71.0	169.1	177.0	336.5	15.2	15.2
		2	69.6		167.0	174.5	334.1	15.8	
		3	70.3		164.9	172.5	331.0	15.4	
		4	72.0		165.2	173.2	331.7	14.6	
	3	1	68.6	73.0	146.4	156.0	334.1	11.0	9.3
		2	75.4		144.2	155.2	335.5	9.4	
		3	74.9		136.3	149.2	331.3	7.6	
	4	1	73.9	73.2	141.0	141.9	307.8	∞	∞
		2	72.6		141.4	141.9	306.5	∞	
	5	1	71.4	71.4	151.5	152.5	316.1	∞	∞
		2	71.4		157.4	161.3	317.9	∞	
	6	1	72.6	72.2	154.0	154.3	304.0	∞	∞
		2	71.8		148.3	149.0	302.1	∞	
	7	1	72.1	72.5	168.0	174.8	332.3	17.5	16.7
		2	73.0		171.6	179.2	344.2	16.0	
	8	1	72.7	72.7	136.7	150.5	309.1	7.2	7.2
	9	1	71.7	71.7	148.9	149.3	309.1	∞	∞
	10	1	72.6	72.6	169.4	174.4	331.8	23.8	23.8

2.2.2 ひずみ硬化パラメータ n の決定方法

0.1%の塑性ひずみに対応する耐力，すなわち 0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$ が与えられると，

$$0.001 = 0.002 \left(\frac{\sigma_{0.1}}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (2.3)$$

より， n は次式から決定される。

$$n = \frac{\ln 2}{\ln \left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.1}} \right)} \quad (2.4)$$

0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$ と 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ は，2.2.1 項で決定されたヤング係数 E を傾きに持つ直線を，応力が 0 でひずみが 0.001 および 0.002 の点から引き，これらが応力－ひずみ関係に交差する点の応力として決定される。

2.2.3 ヤング係数 E ，0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$ ，0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ およびひずみ硬化パラメータ n の値

A6061-T6 および A6N01-T5 の 6000 系アルミニウム合金のヤング係数 E ，0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$ ，0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ およびひずみ硬化パラメータ n の各値を表－2.1 (a) に示す。さらに，A5083-O の各値を表－2.1 (b) に示す。これらの値は，2.2.1 項と 2.2.2 項で述べた方法に従って決められている。参考のために，表－2.1 には各試験片の引張強さ σ_B も示してある。A5083-O ではセレーションが発生したロットが存在する。セレーションとは，移動する転位と固溶原子であるマグネシウムの相互作用により発生すると言われており，応力－ひずみ関係が階段状になる現象である。セレーションが 0.2%耐力に達する前に発生すると 0.1%耐力が 0.2%耐力に等しくなるため，式(2.4)から分かるように， n は無限大になる。したがって，セレーションが 0.2%耐力に達する前に発生した場合， n の値を ∞ として表記してある。

一つのロットにおいて二つ以上の引張試験が行われた場合，そのロットのヤング係数 E およびひずみ硬化パラメータ n に対してそれぞれ平均値を採用する。

2.3 ヤング係数 E の特性

表－2.1 に示すように，ヤング係数 E はロット間で変化するので，これを確率変数として扱い，変数 E の確率分布を確率紙によって決定する。考慮する確率分布は正規分布と対数正規分布である。 E を小さい値から順に並べると，最も小さい値から j 番目の E の値の累積確率 p_j が次式で与えられる¹⁰⁾。

$$p_j = \frac{j}{j_{data} + 1} \quad (2.5)$$

ここに， j_{data} ：データの総数

ヤング係数 E の確率紙へのプロットを、6000 系アルミニウム合金および A5083-O についてそれぞれ図-2.3 と 2.4 に示す。ここで各図の縦軸の $\Phi^{-1}(p_j)$ は、次式で定義される標準正規分布の累積分布関数の逆関数である。

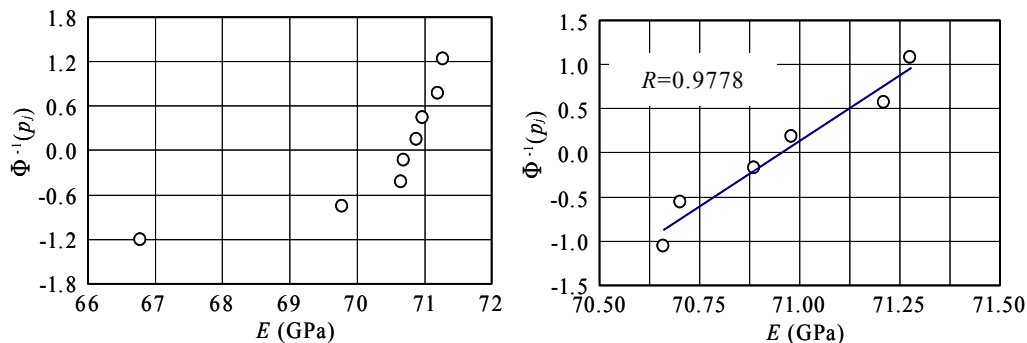
$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \quad (2.6)$$

ここに、 $\Phi(x)$ ：標準正規分布の累積分布関数
 x と y ：変数

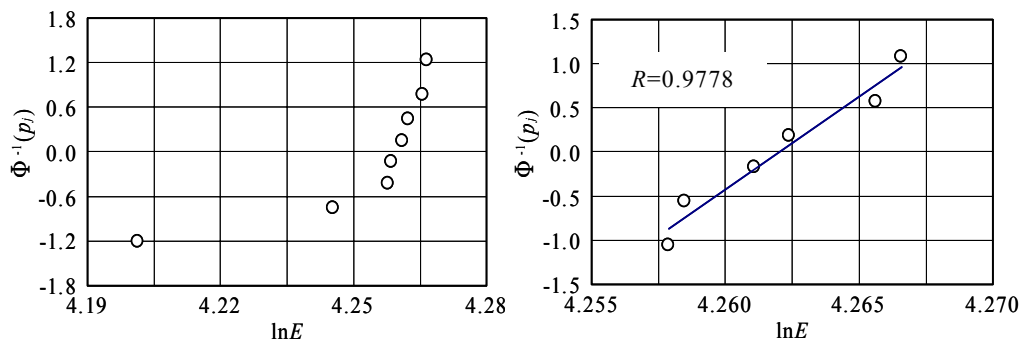
図-2.3(a) と (b) の左図において、左側の 2 点は直線性を示す右側のプロットの分布から外れている。したがって、これら 2 点を除いて、確率紙にプロットした結果が右図である。図-2.3(a) と (b) の右図および図-2.4 には、プロット点に対して回帰分析によって決められた回帰直線および相関係数が示してある。図-2.3 と 図-2.4 の各図において、正規確率紙上と対数正規確率紙上の相関係数がほぼ等しいので、6000 系アルミニウム合金および A5083-O のヤング係数 E の確率分布として正規分布を採用する。すなわち、 E は次の累積分布関数で表される。

$$F_E(E) = \Phi\left(\frac{E - \mu_E}{\mu_E \Omega_E}\right) \quad (2.7)$$

ここに、 $F_E(E)$ ：ヤング係数 E の累積分布関数
 μ_E と Ω_E ：それぞれ、 E の平均値と変動係数

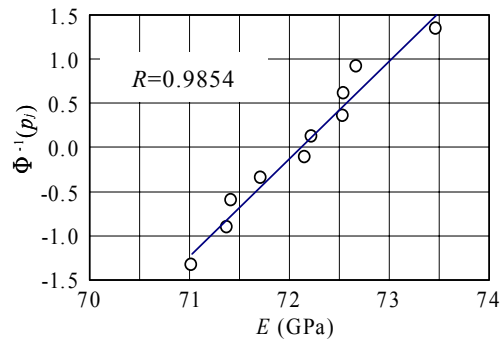


(a) 正規確率紙

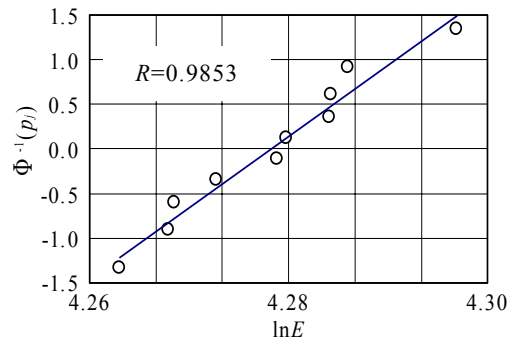


(b) 対数正規確率紙

図-2.3 6000 系アルミニウム合金のヤング係数 E の確率紙へのプロット



(a) 正規確率紙



(b) 対数正規確率紙

図－2.4 A5083－O のヤング係数 E の確率紙へのプロット

E の平均値 μ_E と変動係数 Ω_E の値は、次式において係数比較をすることによって与えられる。

$$\Phi^{-1}(p_j) = a_1 E + b_1 = \frac{E - \mu_E}{\mu_E \Omega_E} \quad (2.8)$$

ここに、 a_1 と b_1 ：それぞれ、正規確率紙上の回帰直線の傾きと切片
 μ_E と Ω_E の値を表－2.2 に示す。ヤング係数の平均値に関して、A5083-O の方が 6000 系アルミニウム合金より大きいことが分かる。ヤング係数の変動係数は両アルミニウム合金とも非常に小さい。

表－2.2 μ_E と Ω_E の値

アルミニウム合金	μ_E	Ω_E
A6061-T6, A6N01-T5	70.95	4.752×10^{-3}
A5083-O	72.09	1.164×10^{-2}

E と非超過確率(好ましくない側を超過しない確率) α の関係が、 $F_E(E) = \alpha$ より、次式で与えられる。

$$E = \mu_E [\Omega_E \Phi^{-1}(\alpha) + 1] \quad (2.9)$$

この式が与える E と α の関係を図-2.5 に示す。社会基盤構造物の設計で用いられる限界状態設計法の強度の特性値に対して、一般に非超過確率 5% に対する値が採用される。この非超過確率に対するヤング係数は、6000 系アルミニウム合金で 70.40GPa であり、A5083-O で 70.71GPa である。通常、設計で用いられるヤング係数の値は 70GPa であり、この値は、非超過確率 5% に対するヤング係数より低い。したがって本研究では、応力-ひずみ関係式に用いるヤング係数として 70GPa を採用する。

6000 系アルミニウム合金の場合、図-2.3 (a) と (b) の左図において、左側の 2 点を除いて確率分布が決定された。しかもこれらの点のヤング係数の値は 70GPa 未満である。これに対する考察は 2.5 節で行なう。

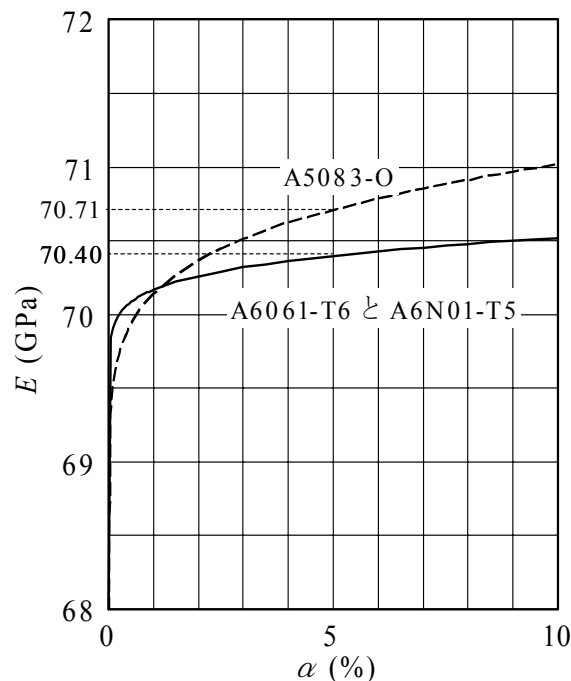
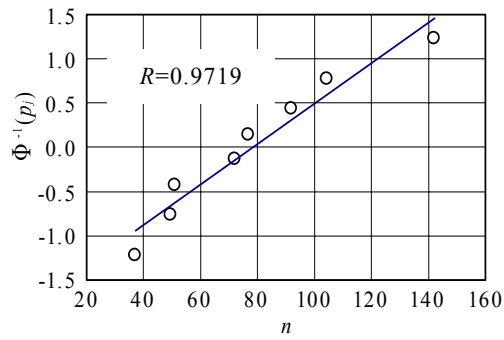


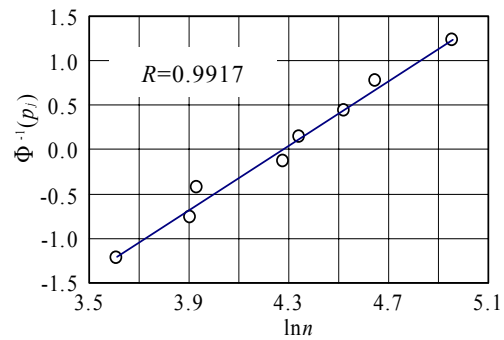
図-2.5 E と α の関係

2.4 ひずみ硬化パラメータ n の特性

表-2.1 に示すように、ヤング係数 E と同様に、ひずみ硬化パラメータ n もロット間で変化するので、これを確率変数として扱い、変数 n の確率分布を確率紙によって決定する。6000 系アルミニウム合金および A5083-O のひずみ硬化パラメータ n の確率紙へのプロットをそれぞれ図-2.6 と 2.7 に示す。A5083-O では、セレーションが発生したものはプロットされていない。各図には、プロット点に対して回帰分析によって決められた回帰直線および相関係数が示してある。

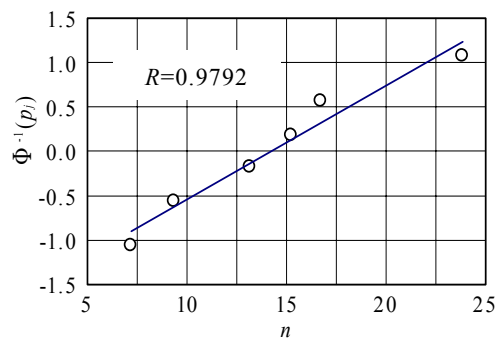


(a) 正規確率紙

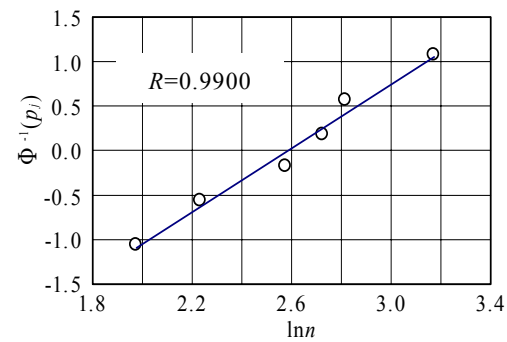


(b) 対数正規確率紙

図－2.6 6000 系アルミニウム合金のひずみ硬化パラメータ n の確率紙へのプロット



(a) 正規確率紙



(b) 対数正規確率紙

図－2.7 A5083-0 のひずみ硬化パラメータ n の確率紙へのプロット

6000 系アルミニウム合金および A5083-O とともに、対数正規確率紙上の回帰直線に対する相関係数が正規確率紙上のそれより高いので、ひずみ硬化パラメータ n の確率分布として対数正規分布を採用する。すなわち、 n は次の累積分布関数で表される。

$$F_n(n) = \Phi\left(\frac{\ln n - \lambda_n}{\xi_n}\right) \quad (2.10)$$

ここに、 $F_n(n)$ ：ひずみ硬化パラメータ n の累積分布関数

λ_n と ξ_n ：それぞれ定数

定数 λ_n と ξ_n の値は、次式において係数比較をすることによって与えられる。

$$\Phi^{-1}(p_j) = a_2 \ln n + b_2 = \frac{\ln n - \lambda_n}{\xi_n} \quad (2.11)$$

ここに、 a_2 と b_2 ：それぞれ、対数正規確率紙上の回帰直線の傾きと切片

定数 λ_n と ξ_n の値を表-2.3 に示す。ひずみ硬化パラメータ n の平均値 μ_n および変動係数 Ω_n は、 λ_n および ξ_n と次の関係を有する。

$$\mu_n = \exp\left(\lambda_n + \frac{\xi_n^2}{2}\right) \quad (2.12)$$

$$\Omega_n = \sqrt{\exp(\xi_n^2) - 1} \quad (2.13)$$

これらの関係を用いて計算される n の平均値 μ_n および変動係数 Ω_n の値も表-2.3 に示してある。ひずみ硬化パラメータの平均値に関して、6000 系アルミニウム合金の方が A5083-O より 5.4 倍大きい。両アルミニウム合金のひずみ硬化パラメータの変動係数はほぼ等しい。しかし、この変動係数はヤング係数の変動係数よりかなり大きい。すなわち、ひずみ硬化パラメータのばらつきはヤング係数のばらつきより大きい。

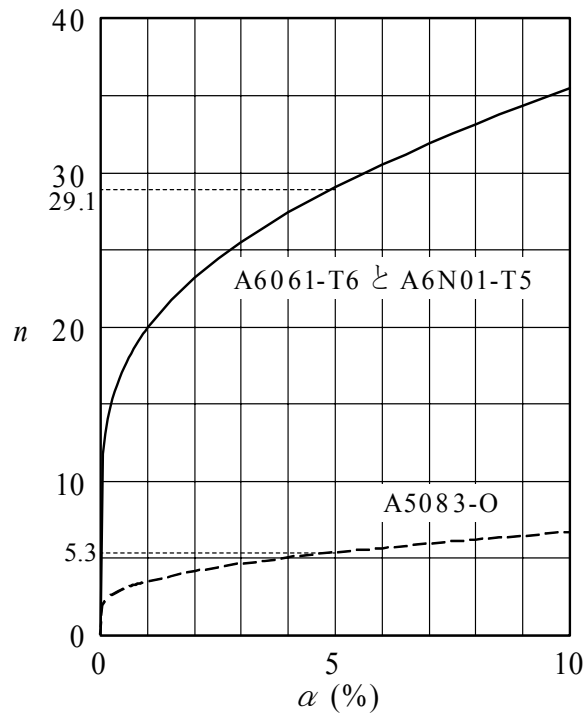
表-2.3 λ_n 、 ξ_n 、 μ_n および Ω_n の値

アルミニウム合金	λ_n	ξ_n	μ_n	Ω_n
A6061-T6, A6N01-T5	4.275	5.509×10^{-1}	83.66	5.955×10^{-1}
A5083-O	2.583	5.580×10^{-1}	15.47	6.044×10^{-1}

n と非超過確率(好ましくない側を超過しない確率) α の関係が、 $F_n(n) = \alpha$ より、次式で与えられる。

$$n = \exp[\xi_n \Phi^{-1}(\alpha) + \lambda_n] \quad (2.14)$$

この式が与える n と α の関係を図-2.8 に示す。非超過確率 5% に対するひずみ硬化パラメータは、6000 系アルミニウム合金で 29.1 であり、A5083-O で 5.3 である。したがって本研究では、応力-ひずみ関係式に用いるひずみ硬化パラメータとして、6000 系アルミニウム合金に対して 29.1、A5083-O に対して 5.3 を採用する。



図－2.8 n と α の関係

2.5 応力－ひずみ関係式と試験結果との比較

応力－ひずみ関係式として、式(2.1)で定義される Ramberg-Osgood 式を採用し、ヤング係数 E に 70GPa, ひずみ硬化パラメータ n に関して、6000 系アルミニウム合金に対して 29.1, A5083-O に対して 5.3 を採用する。すなわち構造用アルミニウム合金に対する応力－ひずみ関係式は次式である。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{70000} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (2.15)$$

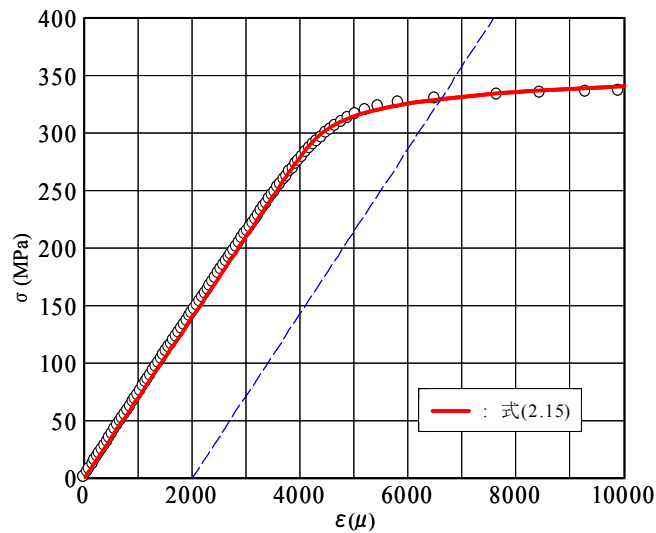
ここに、 n : 6000 系アルミニウム合金に対して 29.1, A5083-O に対して 5.3

σ と $\sigma_{0.2}$ の単位 : MPa

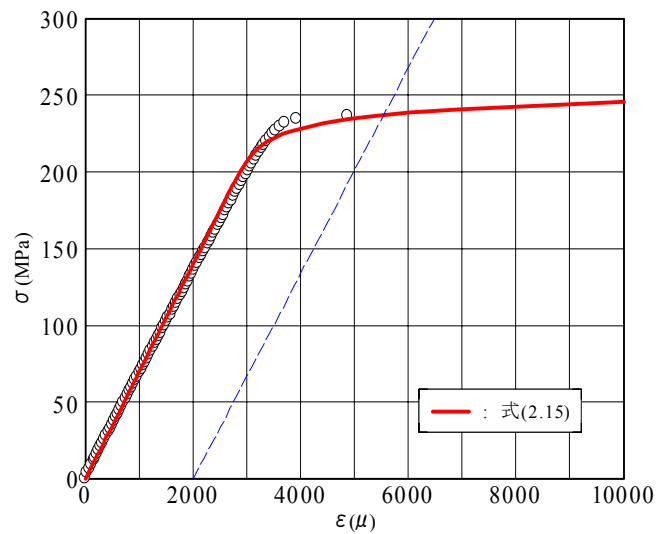
6000 系アルミニウム合金に対する式(2.15)と試験結果との比較を図－2.9 に示す。図－2.9(a)は、ひずみ硬化パラメータの値が 29.1 に最も近いロット 5 の試験片 2[表－2.1(a)参照]に対するものである。式(2.15)が与える応力－ひずみ関係が試験結果を全体的によく表している。図－2.9(b)は、ひずみ硬化パラメータの値が 29.1 から最も離れているロット 7[表－2.1(a)参照]に対するものである。式(2.15)が与える応力は、0.2%耐力の近くで試験値より幾分低くなる。

2.3 節で述べたように、表－2.1(a)のロット 6 とロット 7 は、ヤング係数が 70GPa 未満の 6000 系アルミニウム合金であった。ヤング係数が 66.7GPa のロット 6 の試験片 1[表－

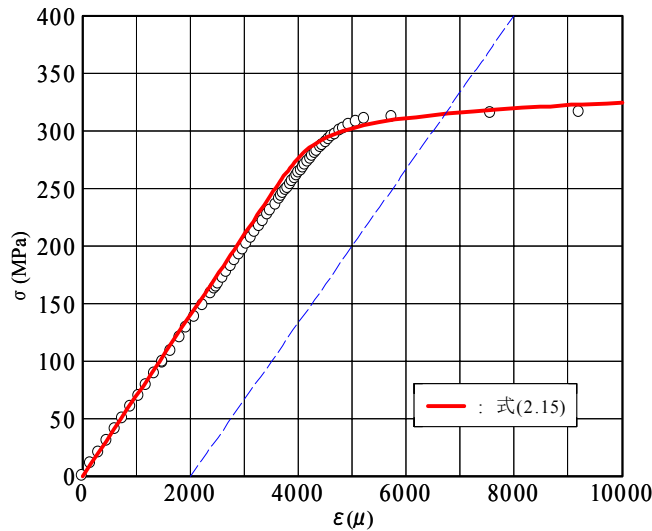
2.1(a)参照]の応力－ひずみ関係と式(2.15)との比較を図－2.9(c)に示す。0.2%耐力より低い範囲で、式(2.15)が与える応力が試験値より幾分高くなる領域が存在する。ただし、この差は小さく、この程度の差が板要素や桁構造の耐荷力にどの程度の影響を及ぼすかということは今後の検討課題である。



(a) ロット 5 の試験片 2 : 表－2.1(a)



(b) ロット 7 : 表－2.1(a)



(c) ロット 6 の試験片 1 : 表-2.1(a)

図-2.9 式(2.15)と 6000 系アルミニウム合金の試験結果との比較

A5083-O に対して、式(2.15)と試験結果との比較を図-2.10 に示す。図-2.10(a)は、ひずみ硬化パラメータの値が 5.3 に最も近いロット 8[表-2.1(b)参照]に対するものである。式(2.15)が与える応力-ひずみ関係は試験結果を全体的によく表している。図-2.10(b)は、ひずみ硬化パラメータの値が 5.3 から最も離れているロット 10[表-2.1(b)参照]に対するものである。式(2.15)が与える応力は、0.2%耐力より低い範囲で試験値よりかなり低くなるが、0.2%耐力より高い範囲では、試験値より高くなる。

2.2.3 項で述べたように、A5083-O ではセレーションが発生したロットが存在した。セレーションが発生したロット 4 の試験片 1 [表-2.1(b)参照]の応力-ひずみ関係と式(2.15)との比較を図-2.10(c)に示す。0.2%耐力より低い範囲で、式(2.15)が与える応力は試験値よりかなり低くなるが、0.2%耐力より高い範囲では、式(2.15)が与える応力は試験値より高くなる。

以上の考察より、6000 系アルミニウム合金の一部で 70GPa 未満のヤング係数を持つ材料が存在し、耐荷力の観点から今後検討を要する課題を残しているが、構造用アルミニウム合金に対する応力-ひずみ関係式として次式を提案する。

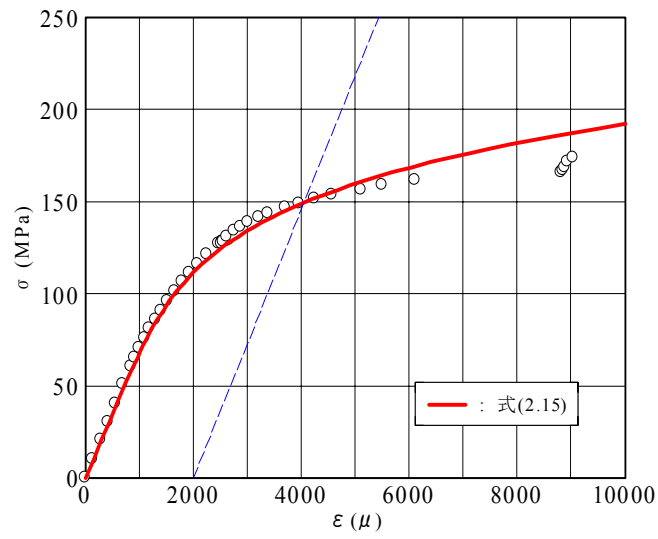
$$\sigma \leq \sigma_{0.2} \text{ に対して, } \varepsilon = \frac{\sigma}{70000} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (2.16)$$

$$\sigma > \sigma_{0.2} \text{ に対して, } \sigma = \sigma_{0.2} \quad (2.17)$$

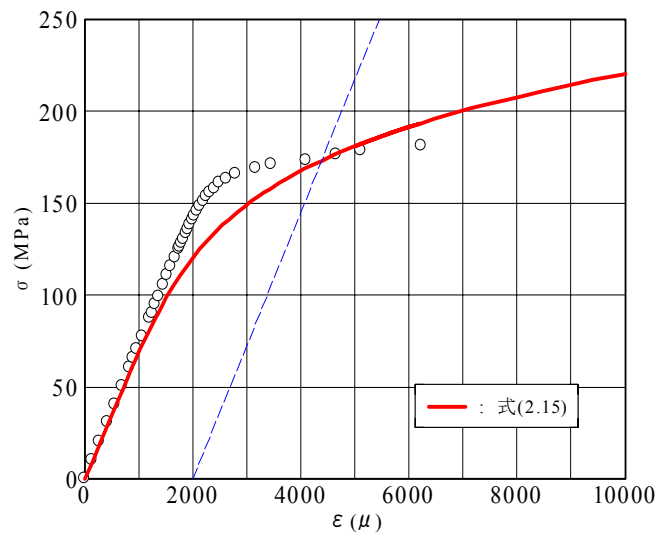
ここに、 n : 6000 系アルミニウム合金に対して 29.1, A5083-O に対して 5.3

σ と $\sigma_{0.2}$ の単位 : MPa

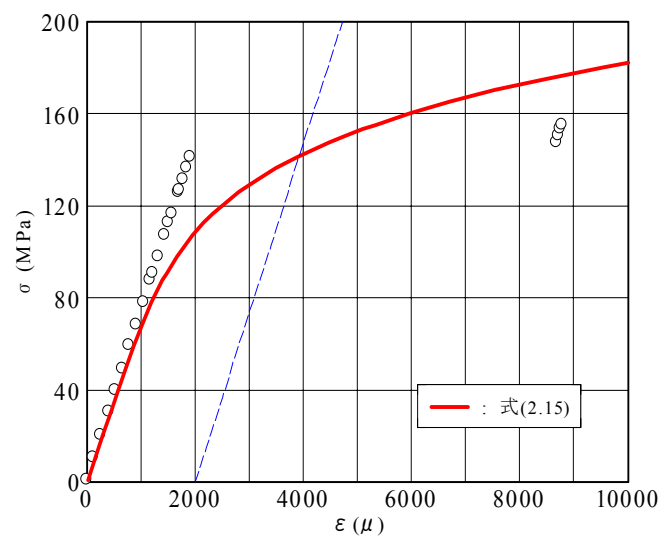
前述したように、式(2.15)は 0.2%耐力以下で試験値より低い応力を与えるが、0.2%耐力以上で試験値より高い応力を与える。したがって、 $\sigma > \sigma_{0.2}$ に対して $\sigma = \sigma_{0.2}$ としている。



(a) ロット 8 : 表-2.1 (b)



(b) ロット 10 : 表-2.1 (b)



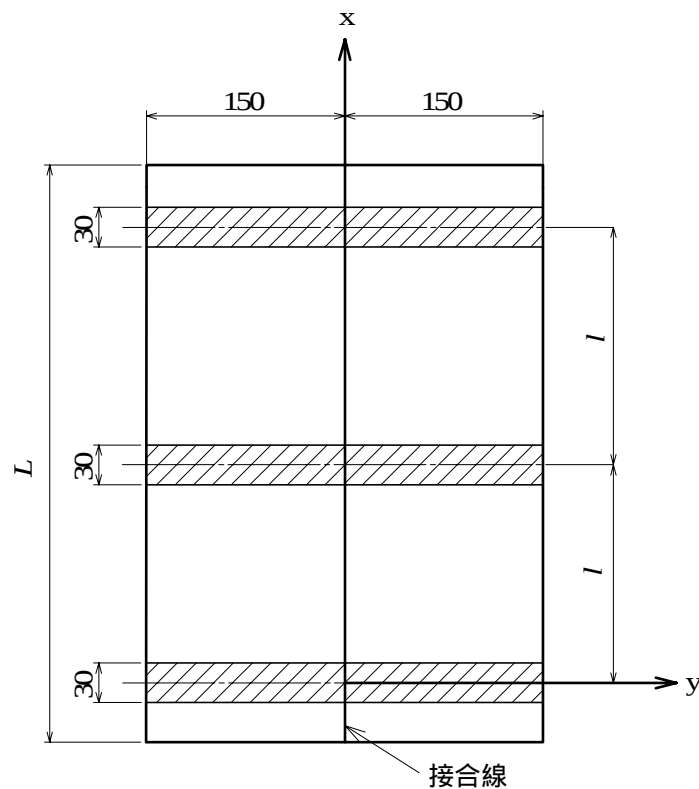
(c) ロット 4 の試験片 1 : 表-2.1 (b)

図-2.10 式(2.15)と A5083-0 の試験結果との比較

第3章 構造用アルミニウム合金の溶接部および摩擦攪拌接合部の 応力 - ひずみ関係と残留応力

3.1 MIG 溶接および摩擦攪拌接合による突合せ継手の製作と各種試験片の採取位置

MIG 溶接または摩擦攪拌接合 (FSW) で製作された突合せ継手を図 - 3.1 に示す。板厚が 10mm で幅が 150mm の 2 枚の板が突合せで接合されている。考慮した構造用アルミニウム合金は A6061-T6, A6N01-T5 および A5083-O の 3 種類である。各アルミニウム合金について, MIG 溶接継手 1 体, 摩擦攪拌接合継手 1 体の合計 6 体の突合せ継手を製作した。MIG 溶接の溶接条件と摩擦攪拌接合の接合条件を表 - 3.1 に示す。MIG 溶接の溶接条件は, 考慮した 3 種類の構造用アルミニウム合金に対して全て同じである。摩擦攪拌接合の接合条件は, A6061-T6 および A5083-O の突合せ継手と A6N01-T5 の突合せ継手とで異なる。

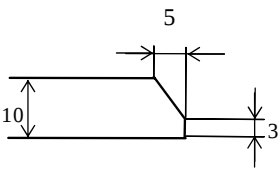
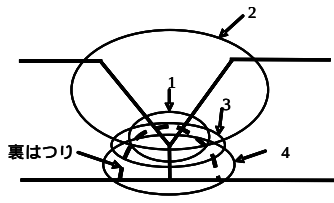


アルミニウム合金	L (mm)	L (mm)
A6061-T6, A5083-O	1200	450
A6N01-T5	1000	400

図 - 3.1 突合せ継手

表 - 3.1 接合条件

(a) MIG

溶加材	A5183WY ϕ 1.6mm			
ガス流量	28 ℓ /min			
開先形状				
パ ス	電 流 (A)	電 圧 (V)	速 度 (cm/min)	
	1 パス	250	29	13
	2 パス	240	30	7
	裏はつり	7 ~ 8mm		
	3 パス	250	28	10
	4 パス	240	30	7

(b) FSW

アルミニウム合金	ショルダー径 (mm)	ピン径 (mm)	ツール傾き 角度 (°)	ツール回転 速度 (rpm)	ツール移動速度 (mm/min)
A6061-T6 A5083-O				800	150
A6N01-T5	20	10	0	700	100

非公開

考慮した構造用アルミニウム合金の機械的特性を表 - 3.2 に示す。引張試験には JIS 14B 号の引張試験片⁹⁾にひずみゲージを貼付し、ひずみゲージによりひずみを測定した。表中の E , $\sigma_{0.1}$, $\sigma_{0.2}$, σ_B , n は、それぞれヤング係数、0.1%耐力、0.2%耐力、引張強さ、ひずみ硬化パラメータである。 E の値は 2.2.1 項、ひずみ硬化パラメータ n は 2.2.2 項で述べた方法によって決められている。A6061-T6 と A6N01-T5 の母材はそれぞれ表 - 2.1(a) のロット 6 およびロット 7、A5083-O の母材は表 - 2.1(b) のロット 4 と同一である。MIG 溶接部と摩擦攪拌接合部の E_i と ε_i の関係を付図 - C に示す。A5083-O の場合、0.2%耐力に達する前にセレーションが発生した場合、 n の値を ∞ として表記してある。A5083-O の FSW の試験片 1 では 0.1%耐力と 0.2%耐力は等しくなっていないが、0.1%耐力と 0.2%耐力の間でセレーションが発生した。

図 - 3.1 において斜線が施された部分は、MIG 溶接または摩擦攪拌接合の開始側、中央、終了側であり、この部分から残留応力を調べる試験片を切り出し、両端部分を除いた残りの部分から引張試験片とビッカース硬さを測定する試験片を採取した。

表 - 3.2 母材，MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の機械的特性

アルミニウム合金		試験片	E (GPa)	平均 E (GPa)	$\sigma_{0.1}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	n	平均 n
A6061-T6	母材	1	66.7	66.8	311.6	313.5	330.6	114.0	104.4
		2	67.5		315.2	317.2	334.7	109.6	
		3	66.2		315.3	317.7	326.8	89.5	
	MIG	1	74.3	72.8	115.8	124.3	211.6	9.7	8.3
		2	72.1		109.4	120.6	213.7	7.1	
		3	72.0		114.0	124.4	216.4	7.9	
	FSW	1	70.2	70.7	129.4	136.8	223.5	12.5	11.5
		2	71.0		128.6	137.2	226.2	10.8	
		3	70.9		130.7	138.9	226.4	11.4	
A6N01-T5	母材	1	69.3	69.3	235.2	236.4	260.0	142.1	142.1
	MIG	1	71.0	71.0	95.6	107.0	202.0	6.2	6.2
	FSW	1	73.7	73.7	100.1	105.5	187.0	13.2	13.2
A5083-O	母材	1	73.9	73.2	141.0	141.9	304.0	∞	∞
		2	72.6		141.4	141.9	302.1	∞	
	MIG	1	73.0	72.5	128.8	141.3	300.0	7.5	7.7
		2	72.3		127.8	139.7	295.6	7.8	
		3	72.0		130.5	142.4	299.6	7.9	
	FSW	1	70.4	70.7	153.8	158.6	301.3	∞	21.2
		2	70.7		155.5	160.5	300.3	21.9	
		3	70.9		155.9	161.3	296.3	20.5	

3.2 接合部の熱影響範囲

MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の熱影響範囲を知るために，接合部のビッカース硬さを測定した。接合線に直角な断面において，板の表裏面から 2mm 内側の位置と板厚中央の位置を 1mm 間隔で測定した。接合部のビッカース硬さの測定結果を図 - 3.2 に示す。硬さが低下している領域が熱影響範囲である。A6061-T6 と A6N01-T5 は熱処理アルミニウム合金であるため，接合部で硬さが低下しているが，A5083-O は非熱処理アルミニウム合金であるため接合部で硬さが低下していない。

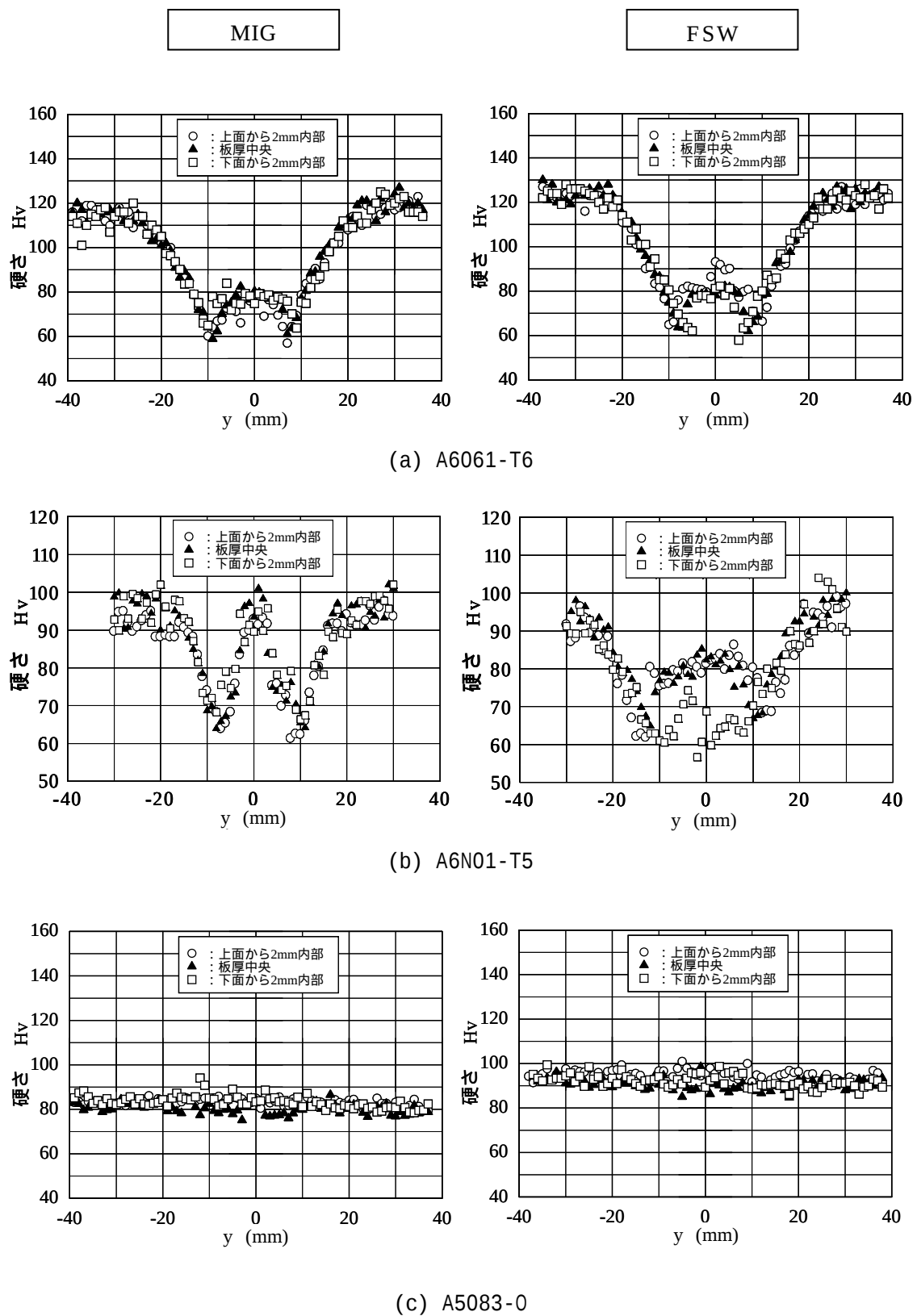


図 - 3.2 ビッカース硬さ

A6061-T6 と A6N01-T5 の接合部に関して、接合線を中心として左右それぞれに硬さが低下する距離を表 - 3.3 に示す。A6061-T6 では摩擦攪拌接合部の熱影響範囲が MIG 溶接部のそれより狭く、A6N01-T5 では MIG 溶接部の熱影響範囲が摩擦攪拌接合部のそれより狭い。熱処理アルミニウム合金の MIG 溶接部の熱影響範囲は 1 インチルールに従うといわれている¹¹⁾。すなわち、MIG 溶接部が強度低下を起こす範囲は、接合線を中心として左右それぞれ 25mm である。この 1 インチルールは、摩擦攪拌接合部が強度低下を起こす範囲としても適用できる。

表 - 3.3 熱影響範囲

アルミニウム合金	MIG	FSW
A6061-T6	25	20
A6N01-T5	20	25

単位：mm

3.3 接合部の応力 - ひずみ関係

3.3.1 接合部の機械的特性

突合せ継手の接合線に対して直角な方向に JIS 14B 号の引張試験片⁹⁾を採取した。したがって引張試験片の中央に、引張試験片の軸に対して直角な方向に接合部が位置する。MIG 溶接部の余盛および摩擦攪拌接合部のバリなどを除去して、平らにした表面にひずみゲージを貼付し、ひずみゲージによりひずみを測定した。接合部の機械的特性を表 - 3.2 に示す。

接合部のヤング係数の値は母材のそれと異なっている。しかし、MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部で、ヤング係数が 70GPa を下回るものはない。

アルミニウム合金材のミルシートには母材の 0.2% 耐力が記載されているが、MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の 0.2% 耐力は与えられていない。したがって MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の 0.2% 耐力は母材の 0.2% 耐力に関連付けられなければならない。そこで次式で定義される、母材の 0.2% 耐力に対する接合部の 0.2% 耐荷力の低下率を考える。

$$\eta = \frac{\sigma_{j0.2}}{\sigma_{0.2}} \quad (3.1)$$

ここに、 η ：母材の 0.2% 耐力に対する接合部の 0.2% 耐荷力の比

$\sigma_{j0.2}$ ：接合部の 0.2% 耐力

$\sigma_{0.2}$ ：母材の 0.2% 耐力

表 - 3.2 に示す，母材および接合部の 0.2% 耐力を式(3.1)に代入して得られる結果を表 - 3.4(a)に示す。引張試験片の本数が 2 本以上ある場合は η の平均値が示してある。表中の括弧の付いた数値は，アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案⁵⁾に規定される母材の 0.2% 耐力と MIG 溶接部の 0.2% 耐力に対して得られる η の値である。同指針案には摩擦攪拌接合部の 0.2% 耐力はまだ規定されていない。A6061-T6 と A6N01-T5 に対して，本研究で得られた MIG 溶接部の 0.2% 耐力の低下率は，アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案から得られる低下率より低い。A6061-T6 の場合，摩擦攪拌接合部の 0.2% 耐力の低下率は MIG 溶接部のそれより高いが，A6N01-T5 の場合，両者の低下率は同じである。

A5083-O の場合，MIG 溶接部の 0.2% 耐力の低下率は 0.99 で 1.0 に近いが，摩擦攪拌接合部の 0.2% 耐力は 1.13 であり，摩擦攪拌接合部の 0.2% 耐力が母材のそれより高くなっている。この要因として，摩擦攪拌接合によって結晶組織が細粒化することによる摩擦攪拌接合部の強度上昇が考えられる。MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の引張試験をさらに実施して，確率統計学的処理に基づいて接合部の 0.2% 耐力の低下率 η の値を決めるべきであるが，現在その様な引張試験データがないので，本研究の結果に基づいて， η に対して表 - 3.4(b)の値を提案する。A6061-T6 および A6N01-T5 の η の値は，本研究で得られた値を採用している。A5083-O に関しては，本研究で得られた摩擦攪拌接合部の η の値は 1.13 であったが，A5083-O の摩擦攪拌接合部の 0.2% 耐力が母材のそれより常に上昇するとい事実は現在存在しないので，摩擦攪拌接合部の η の値を 1.0 としている。

表 - 3.4 η の値

(a) 測定値

アルミニウム合金	MIG	FSW
A6061-T6	0.39 (0.45)	0.44
A6N01-T5	0.45 (0.57)	0.45
A5083-O	0.99 (1.00)	1.13

(b) 提案値

アルミニウム合金	MIG	FSW
A6061-T6	0.39	0.44
A6N01-T5	0.45	0.45
A5083-O	1.00	1.00

3.3.2 接合部の応力 - ひずみ関係の定式化

2 章において，構造用アルミニウム合金の母材の応力 - ひずみ関係式として，Ramberg-Osgood 式に基づいて式(2.16)および(2.17)を提案した。

MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の応力 - ひずみ関係に対しても Ramberg-Osgood 式を採用し，次式を与える。

$$\sigma \leq \sigma_{j0.2} \text{ に対して, } \varepsilon = \frac{\sigma}{70000} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{j0.2}} \right)^n \quad (3.2)$$

$$\sigma > \sigma_{j0.2} \text{ に対して, } \sigma = \sigma_{j0.2} \quad (3.3)$$

ここに， ε ：ひずみ

σ ：応力(MPa)

$\sigma_{j0.2}$ ：接合部の 0.2% 耐力(MPa)

式(3.2)の右辺第 1 項の分数の分母 70000 は，3.2.1 項で述べたように，接合部のヤング係数が 70GPa を下回るものがなかったことに基づいてこの値を採用している。

表 - 3.2 に示すように，MIG 溶接部のひずみ硬化パラメータ n の値は，A6061-T6，A6N01-T5，A5083-O に対してそれぞれ 8.3，6.2，7.7 である。MIG 溶接の溶加材はこれらのアルミニウム合金に対して，いずれも A5183[表 - 3.1(a)参照]である。溶加材が 5000 系アルミニウム合金であるので，MIG 溶接部のひずみ硬化パラメータ n に対して，2 章で提案した，A5083-O の母材のひずみ硬化パラメータの値 5.3 を採用する。5.3 は，前述の 8.3，6.2，7.7 より小さな値であり，安全側の応力 - ひずみ関係を与える。

他方，表 - 3.2 に示すように，A6061-T6 と A6N01-T5 の摩擦攪拌接合部のひずみ硬化パラメータ n の値はそれぞれ 11.5 と 13.2 である。これらのアルミニウム合金の母材の n の値は，2 章で提案したように 29.1 であり，A6061-T6 と A6N01-T5 の摩擦攪拌接合部の n の値は母材の値の約 1/3 まで低下する。本研究では，安全側の応力 - ひずみ関係を与えるために，11.5 および 13.2 より小さくして，10 を A6061-T6 と A6N01-T5 の摩擦攪拌接合部の n の値として採用する。

表 - 3.2 に示すように，A5083-O の摩擦攪拌接合部のひずみ硬化パラメータ n の値は 21.2 である。この値は，母材の n の値 5.3 より約 4 倍大きい。これは，前述したように，摩擦攪拌接合部の 0.2% 耐力が母材のそれより大きかったことに起因していると考えられる。しかし，A5083-O の摩擦攪拌接合部の 0.2% 耐力が母材のそれより常に上昇するという事実は現在存在しないので，A5083-O の摩擦攪拌接合部の n の値として，母材の値 5.3 を採用する。

接合部のひずみ硬化パラメータ n の値をまとめて表 - 3.5 に示す。

表 - 3.5 MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部のひずみ硬化パラメータ n の値

アルミニウム合金	MIG	FSW
A6061-T6	5.3	10
A6N01-T5	5.3	10
A5083-O	5.3	5.3

式(3.2)および(3.3)が与える接合部の応力 - ひずみ関係と試験結果との比較を図 - 3.3 に示す。式(3.2)の n に表 - 3.5 の値を用いている。さらに参考として、図 - 3.3 には、式(2.16)と(2.17)が与える母材の応力 - ひずみ関係および母材の試験結果も記載されている。試験結果はすべて試験片 1 に対するものである。式(3.2)と(3.3)が与える接合部の応力 - ひずみ関係は、試験結果に対して安全側の関係を与えていることがわかる。

実際の設計では MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の 0.2% 耐力は与えられないので、式(3.1)より、 $\sigma_{j0.2}$ は $\eta\sigma_{j0.2}$ で推定しなければならない。 η に対して表 - 3.4(b)に示す値を用いる。したがって、MIG 溶接部と摩擦攪拌接合部の応力 - ひずみ関係式は次式で推定される。

$$\sigma \leq \eta\sigma_{0.2} \text{ に対して, } \varepsilon = \frac{\sigma}{70000} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\eta\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (3.4)$$

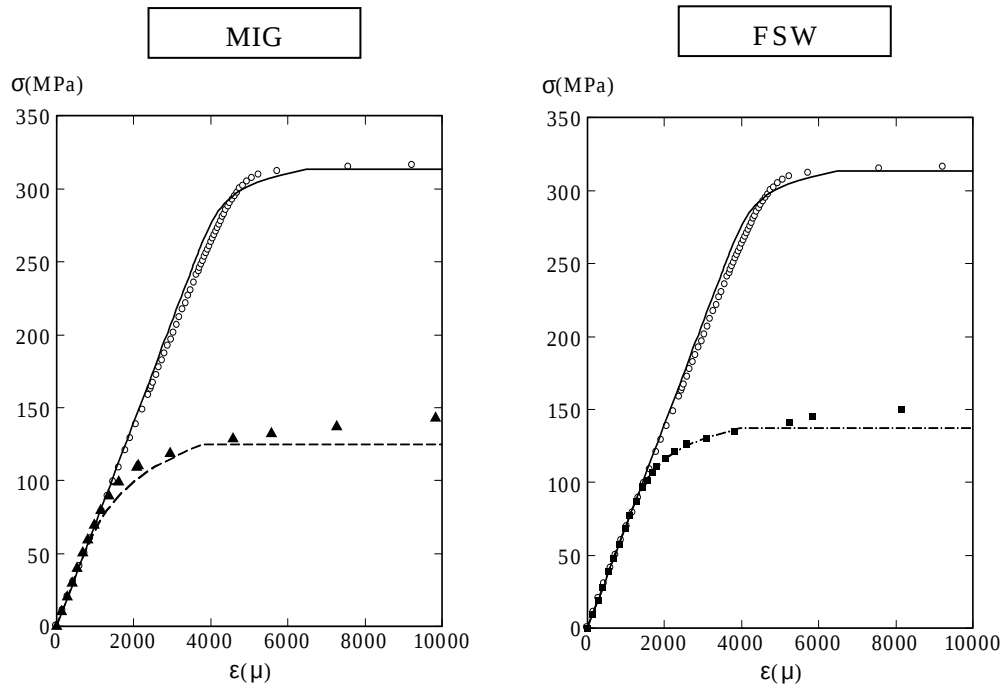
$$\sigma > \eta\sigma_{0.2} \text{ に対して, } \sigma = \eta\sigma_{0.2} \quad (3.5)$$

ここに、 ε : ひずみ

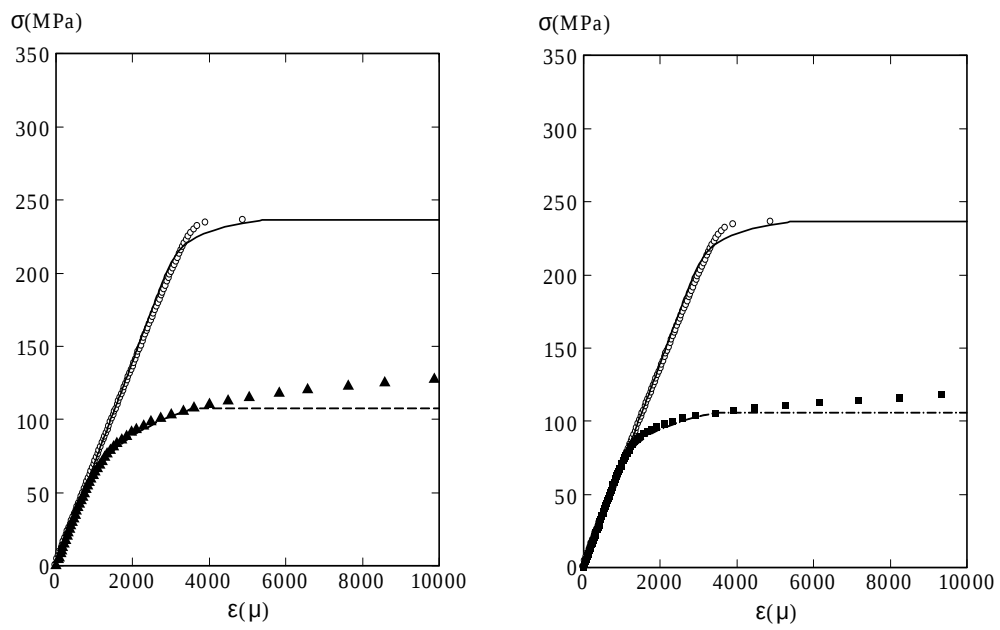
σ : 応力(MPa)

$\sigma_{0.2}$: 母材の 0.2% 耐力(MPa)

η : 表 - 3.4(b)に示す値

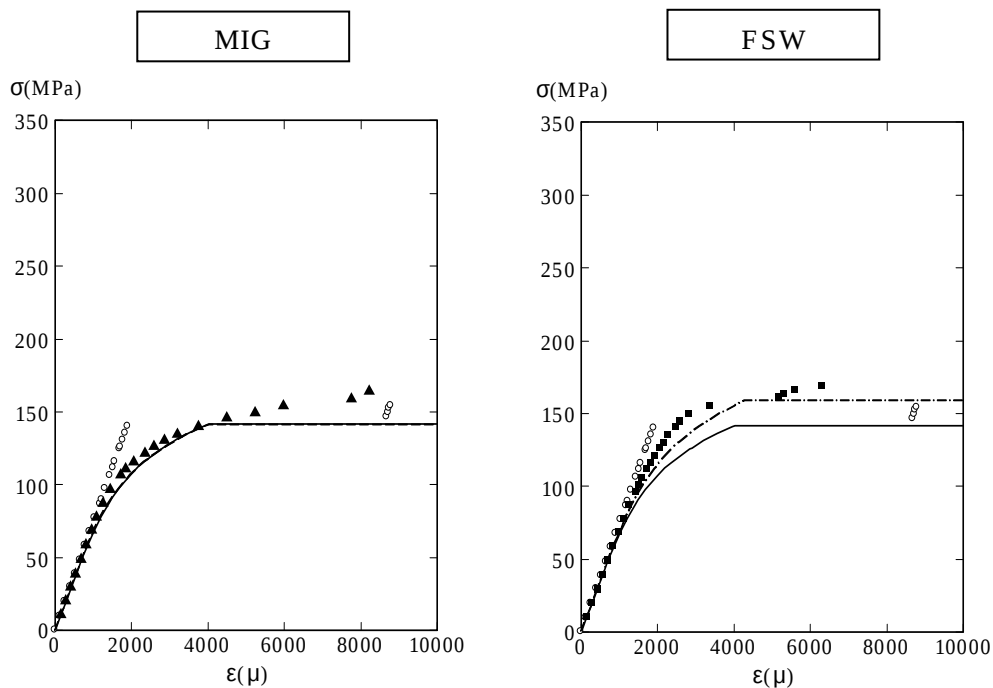


(a) A6061-T6



(b) A6N01-T5

	母材	MIG	FSW
試験結果	○	▲	■
式(3.2)と(3.3)	—	---	-·-·-



(c) A5083-0

	母材	MIG	FSW
試験結果	○	▲	■
式(3.2)と(3.3)	—	---	----

図 - 3.3 式(3.2)および(3.3)と試験結果との比較

3.4 突合せ継手に発生する残留応力

3.4.1 残留応力分布

図 - 3.1 の突合せ継手の開始側，中央，終了側の各位置において，図 - 3.4 に示すように，2 軸 5 連ゲージ(ゲージ長 1mm，ゲージピッチ 2mm)を 3 枚，さらに 2 軸ゲージ(ゲージ長 1mm)を 3 枚，板の表裏の同じ位置に貼付した。2 軸 5 連ゲージは，MIG 溶接部の余盛および摩擦攪拌接合のバリなどを除去して，平らな表面にした後貼付した。

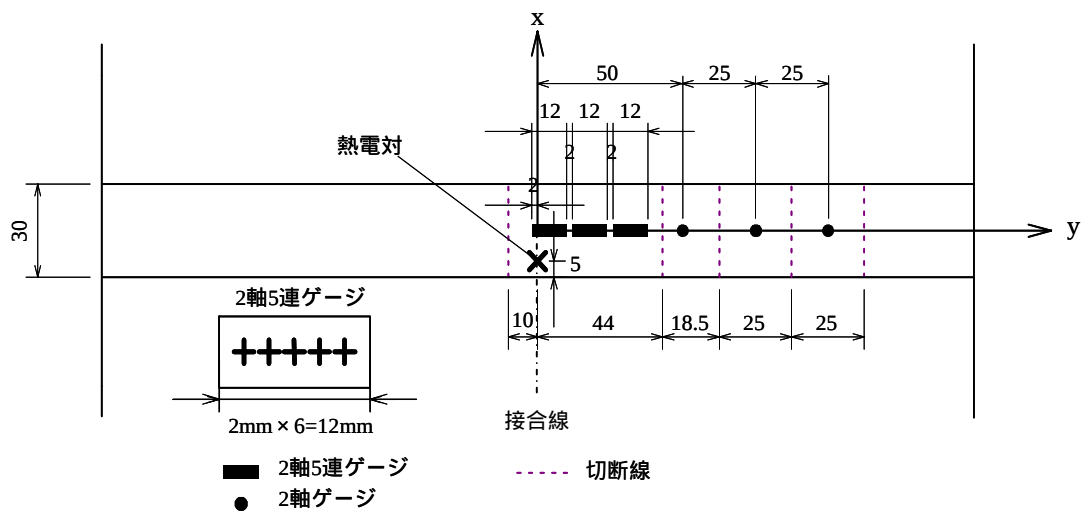


図 - 3.4 ひずみゲージの貼付位置と切断位置

残留ひずみは，板を切断することによって開放されるひずみをひずみゲージで測定することによって得た。最初に，図 - 3.1 の斜線が施された 30mm の幅を切断した。次に，図 - 3.4 に示すように，3 枚の 2 軸 5 連ゲージの前後および各 2 軸ゲージの前後を切断した。図 - 3.4 に示す位置に設置した熱電対により測定された，板の切断時における最高温度は 40 ～ 50 であった。

切断前後のひずみの変化量から次式によって残留応力を求めた。

$$\sigma_{xr} = -\frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y) \quad (3.6)$$

$$\sigma_{yr} = -\frac{E}{1-\mu^2}(\mu\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (3.7)$$

ここに，

σ_{xr} , σ_{yr} : それぞれ，接合線 (x 軸) に対して直角な断面および接合線 (x 軸) に平行な断面に生じる残留応力

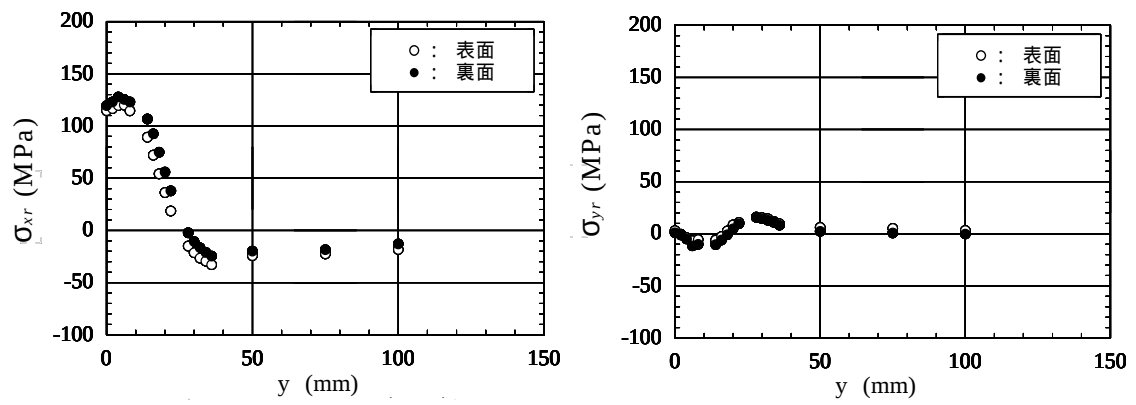
E : ヤング係数

μ : ポアソン比

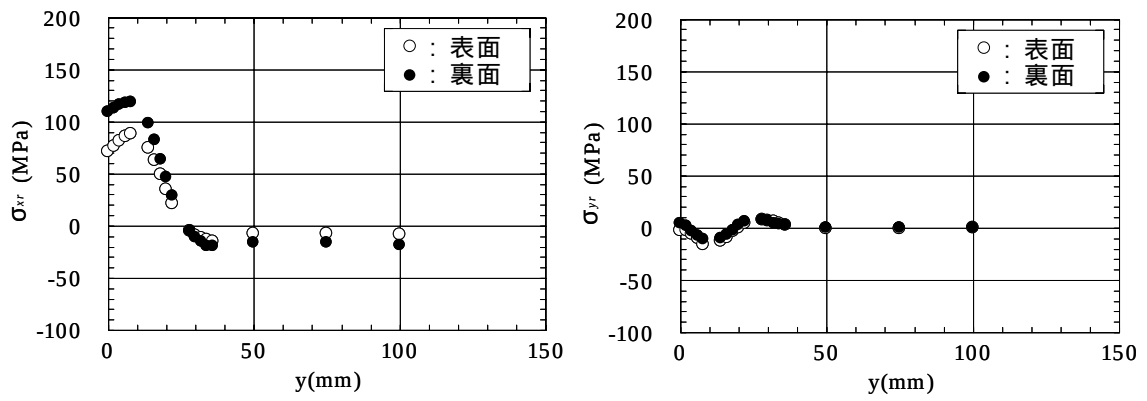
ε_x , ε_y : それぞれ，x 軸方向と y 軸方向の切断前後のひずみの変化量

ヤング係数 E とポアソン比 μ に対して母材の引張試験から得られた値を用いた。

突合せ継手の中央における残留応力分布を図 - 3.5 , 3.6 , 3.7 に示す (突合せ継手の開始側，中央，終了側の全データを付図 - D に示す)。 σ_{xr} は，接合中心から約 10mm まで大きな引張応力で，25mm ～ 30mm でゼロになり，これより離れたところでは一様な圧縮応力になる。 σ_{yr} は，接合線の近くで圧縮応力が生じているが，25mm ～ 30mm より離れた位置ではほぼゼロである。

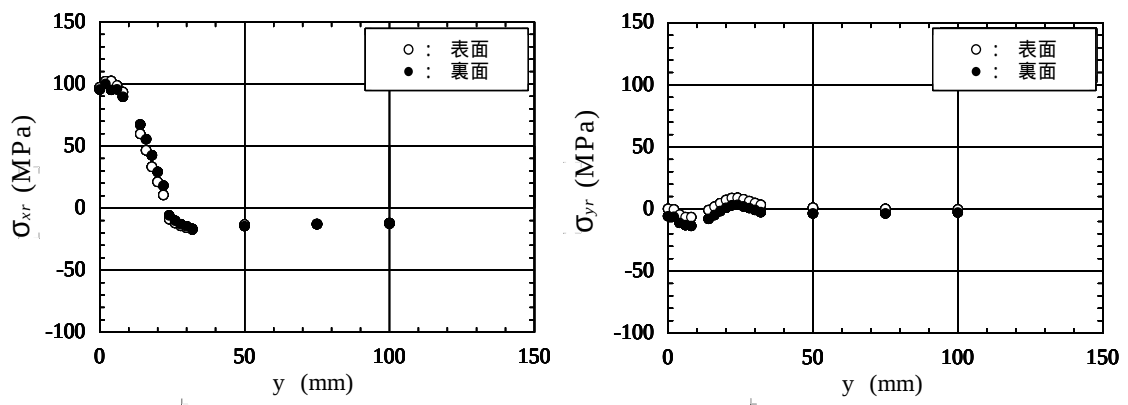


(a) MIG

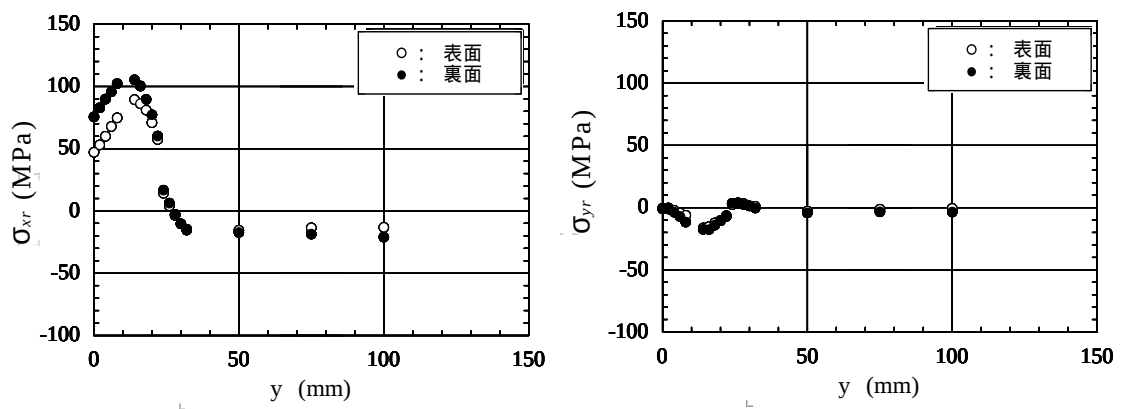


(b) FSW

図 - 3.5 A6061-T6 の残留応力分布

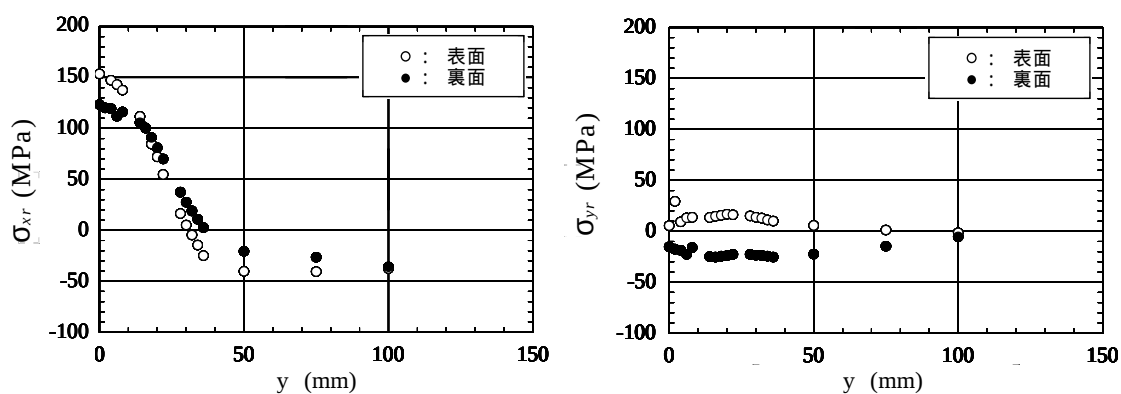


(a) MIG

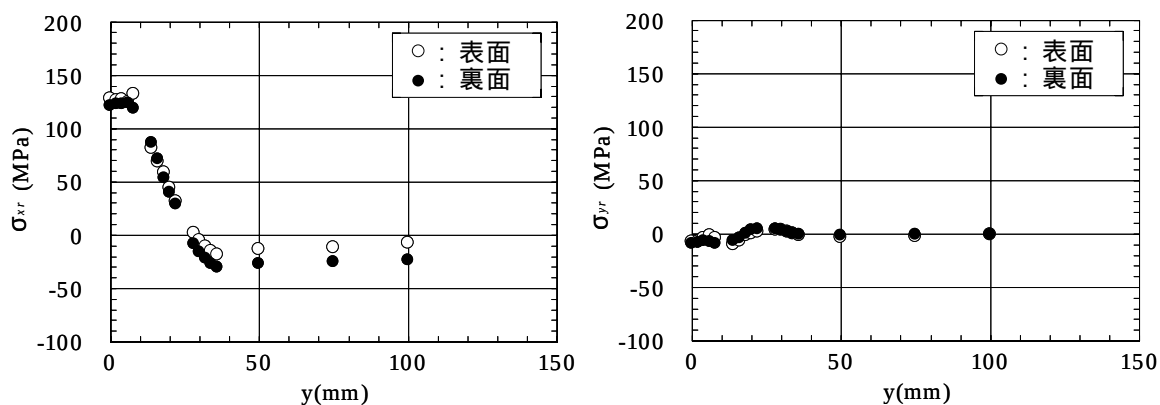


(b) FSW

図 - 3.6 A6N01-T5 の残留応力分布



(a) MIG



(b) FSW

図 - 3.7 A5083-O の残留応力分布

突合せ継手の開始側，中央，終了側の接合線近傍に生じる σ_{xr} の引張応力の最大値を表 - 3.6 に示す。表の値は，板の表裏面の残留応力の平均値である。同表には接合部の 0.2% 耐力 $\sigma_{j0.2}$ の値も記載されている。MIG 溶接においては，A6061-T6 と A5083-O に対して σ_{xr} が $\sigma_{j0.2}$ より高く，A6N01-T5 に対して σ_{xr} は $\sigma_{j0.2}$ にほぼ等しい。摩擦攪拌接合においては，各アルミニウム合金に対して σ_{xr} が $\sigma_{j0.2}$ より低い。

以上より，MIG 溶接においては溶接部の引張残留応力に対して，溶接部の 0.2% 耐力は安全側の値にならないが，摩擦攪拌接合においては接合部の引張残留応力に対して，接合部の 0.2% 耐力は安全側の値になる。

表 - 3.6 σ_{xr} の引張応力の最大値と接合部の 0.2% 耐力 $\sigma_{j0.2}$

アルミニウム 合金	MIG				FSW			
	σ_{xr} (MPa)			$\sigma_{j0.2}$ (MPa)	σ_{xr} (MPa)			$\sigma_{j0.2}$ (MPa)
	開始側	中央	終了側		開始側	中央	終了側	
A6061-T6	133.8	130.4	153.9	123.1	103.0	103.4	94.3	137.6
A6N01-T5	99.4	108.5	107.4	107.0	88.3	108.5	51.4	105.5
A5083-O	165.8	144.6	160.0	141.1	122.9	125.2	143.4	160.1

3.4.2 残留応力分布の定式化

アルミニウム部材の耐荷力を有限要素解析で予測するためには、MIG 溶接および摩擦攪拌接合によって発生する残留応力が定式化される必要がある。圧縮残留応力は耐荷力を低下させるので、圧縮残留応力に対して特に注意が必要である。

接合線に対して直角な断面に生じる残留応力 σ_{xr} は、3.4.1 項で述べたように、接合中心から約 10mm まで大きな引張応力で、25mm ~ 30mm でゼロになり、これより離れたところでは一様な圧縮応力になる。したがって、接合中心から 25mm までは一様な引張残留応力、25mm より離れたところで一様な圧縮残留応力を仮定する。そして一様な引張残留応力に対して接合部の 0.2% 耐力を用い、引張残留応力の合力と圧縮残留応力の合力が等しくなるという条件から、 σ_{xr} の分布に対して、次式で表される矩形分布を得る。

$$0 \leq y \leq 25\text{mm} \text{ に対して, } \sigma_{xr} = \sigma_{j0.2} \quad (3.8)$$

$$25\text{mm} \leq y \leq b \text{ に対して, } \sigma_{xr} = -\frac{25\sigma_{j0.2}}{b-25} \quad (3.9)$$

ここに、 $\sigma_{j0.2}$: 接合部の 0.2% 耐力

b : 接合中心から板の材縁までの距離(mm)

式(3.8)と(3.9)で表される矩形分布の残留応力と突合せ継手の開始側、中央、終了側の試験結果との比較を図 - 3.8 に示す。試験結果は、板の表裏面の平均値である。前述したように、圧縮残留応力が耐荷力を低下させるので、圧縮残留応力に対して適切な近似が必要である。図 - 3.8 から分かるように、A5083-O の MIG 溶接の中央を除き、矩形分布の圧縮残留応力が試験結果を安全側に近似している。したがって、本研究では式(3.8)と(3.9)の矩形分布の残留応力を提案する。

実際の設計では MIG 溶接部および摩擦攪拌接合の 0.2%耐力は与えられないので、式 (3.1)より、 $\sigma_{j0.2}$ は $\eta\sigma_{0.2}$ で推定しなければならない。 η に対して表 - 3.4(b)に示す値を用いる。したがって残留応力 σ_{xr} は次式で推定される。

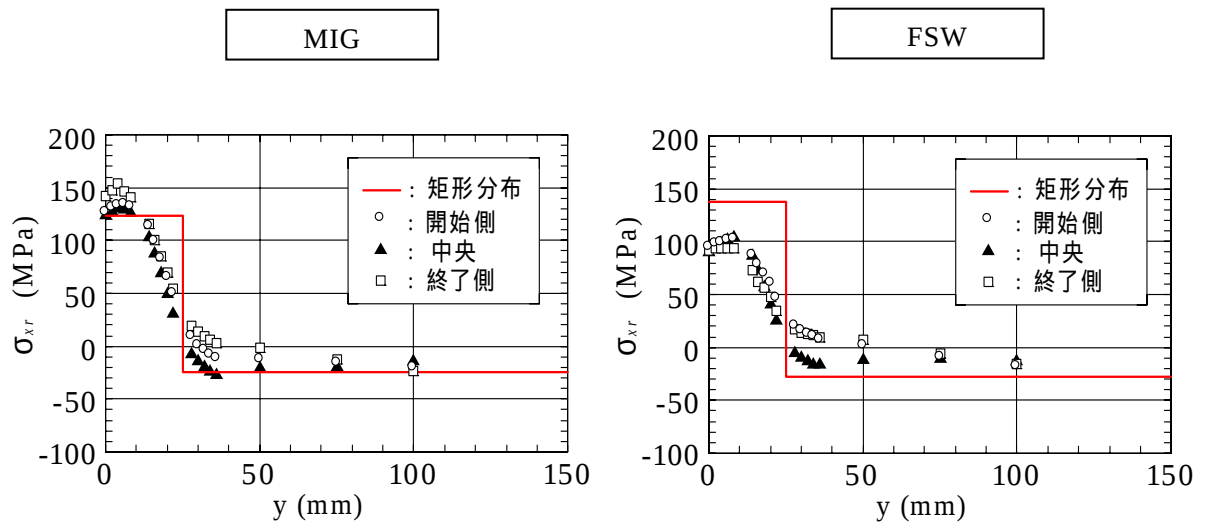
$$0 \leq y \leq 25\text{mm} \text{ に対して, } \sigma_{xr} = \eta\sigma_{0.2} \quad (3.10)$$

$$25\text{mm} \leq y \leq b \text{ に対して, } \sigma_{xr} = -\frac{25\eta\sigma_{0.2}}{b-25} \quad (3.11)$$

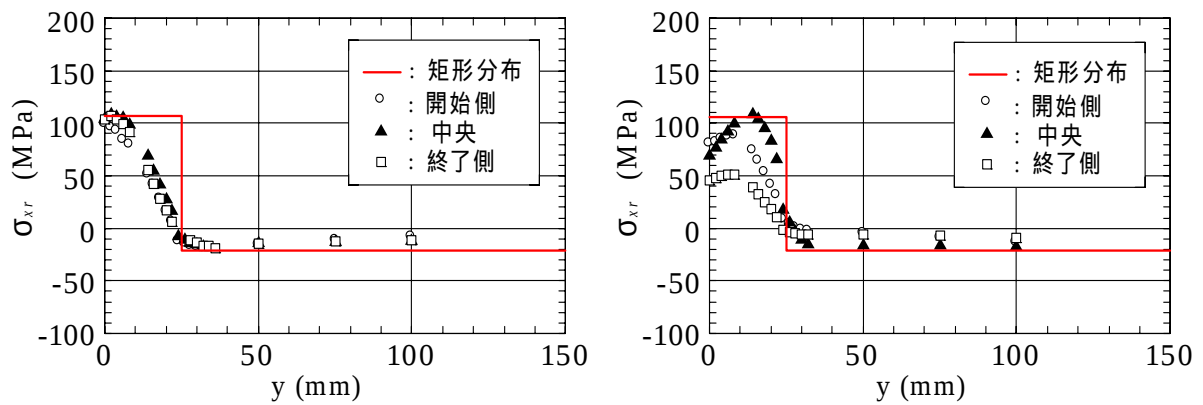
ここに、 $\sigma_{0.2}$ ：母材の 0.2%耐力

η ：表 - 3.4(b)に示す値

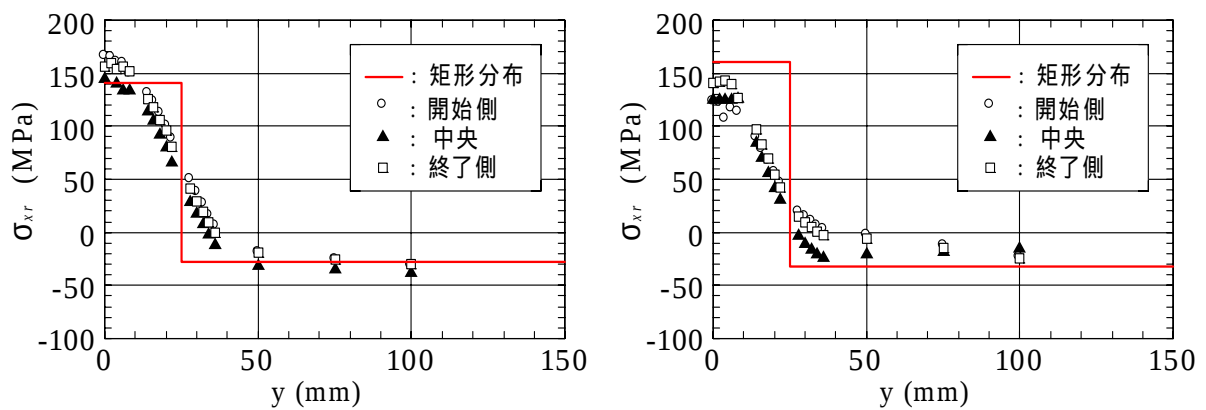
接合線に平行な断面に生じる残留応力 σ_{yr} は、前節で述べたように、接合線の近くで圧縮応力が生じているが、25mm～30mm より離れた位置ではほぼゼロになる。したがって、 σ_{yr} がアルミニウム部材の耐荷力に影響することは無いと考えられるので、 σ_{yr} はゼロとする。



(a) A6061-T6



(b) A6N01-T5



(c) A5083-0

図 - 3.8 矩形分布の残留応力と試験結果との比較

第4章 溶接によって製作されたアルミニウム桁に発生する残留応力

3章で提案された矩形分布の残留応力は、2枚の板が突合せ接合された継手に発生する残留応力の測定結果に基づくものであった。したがって、実際の部材に生じる残留応力をこの矩形分布の残留応力でどの程度近似できているかを明らかにしておかなければならない。本章では、MIG溶接によって製作されたアルミニウム桁に発生する残留応力と矩形分布の残留応力との比較を行なう。

4.1 アルミニウム桁

MIG溶接によって製作されたアルミニウム桁を図-4.1に示す。使用されたアルミニウム合金はA5083-Oであり、フランジは表-2.1(b)のロット2、ウェブは表-2.1(b)のロット3である。これらの機械的特性を表-4.1に示す。表中の e は伸びである。フランジとウェブおよびウェブと水平リブは、脚長が7~9mmの隅肉溶接で溶接されている。

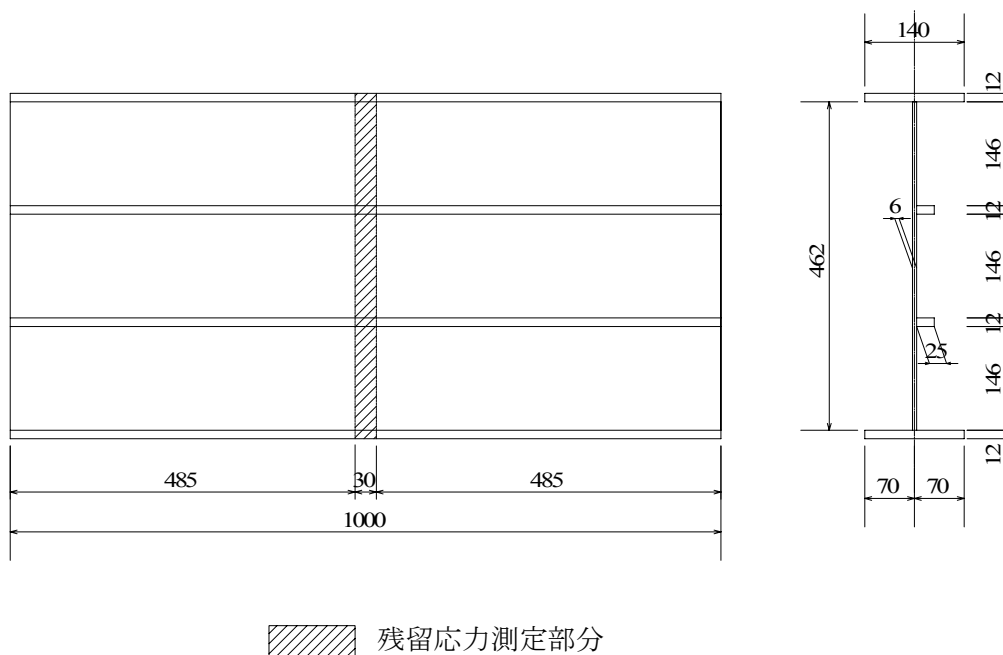


図-4.1 アルミニウム桁

表—4.1 機械的特性

要素	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	e (%)	μ
フランジ	71.0	174.3	333.3	16.6	0.315
ウェブ	73.0	153.5	333.6	20.2	0.326

4.2 アルミニウム桁に発生する残留応力

残留応力は、板を切断することによって開放されるひずみをひずみゲージで測定することによって得られた。図-4.1 に示すアルミニウム桁の中央に斜線が施された部分に、図-4.2 に示す位置にひずみゲージを貼付した。使用したひずみゲージは、ゲージ長が 1mm の 2 軸ゲージである。最初に図-4.1 に示すように、幅 30mm の部分を鉛直に切断し、次にひずみゲージとひずみゲージとの間を水平に切断した。測定された残留ひずみを式(3.6)と(3.7)に代入して残留応力を求めた。式(3.6)と(3.7)のヤング係数およびポアソン比に対して表-4.1 に示す値を用いた。

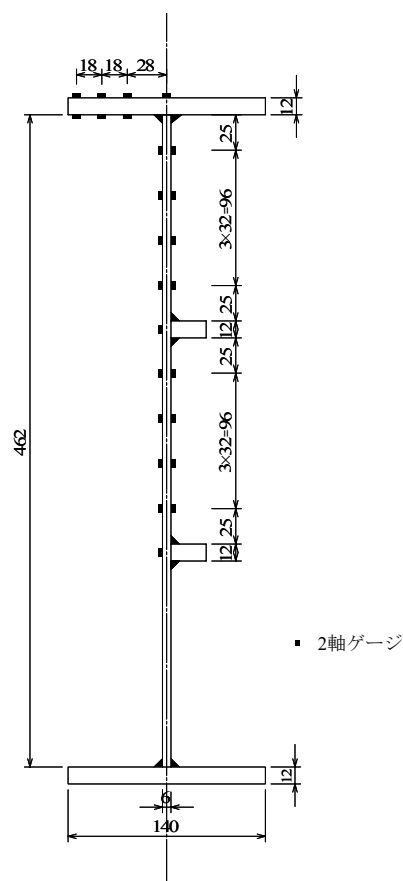


図-4.2 ひずみゲージの貼付位置

アルミニウム桁に発生する残留応力を図－4.3 に示す。図－4.3(a)に示すように、フランジの接合線方向に対して、中央で 101MPa の引張残留応力が発生し、隅肉溶接から離れた位置で 68～77MPa の圧縮残留応力が発生している。他方、フランジの接合線直角方向に対して、中央で 16MPa の引張残留応力が発生しているが、隅肉溶接から離れた位置ではほとんど残留応力が発生していない。

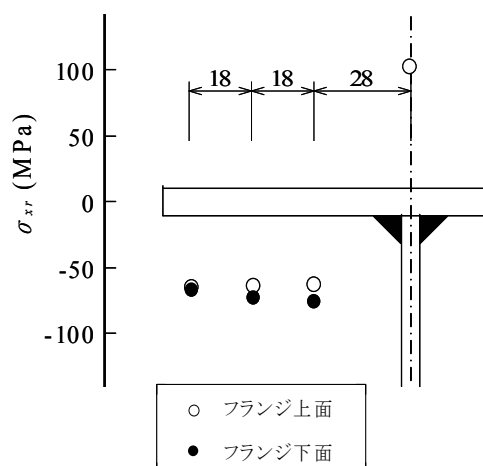
図－4.3(b)に示すように、ウェブの接合線方向に対して、水平リブの位置で 154MPa の引張残留応力が発生している。そして、フランジ側のウェブパネルに 100MPa の圧縮残留応力が発生し、中央のウェブパネルに 23MPa の小さな圧縮残留応力が発生している。他方、ウェブの接合線直角方向に対して、中央のウェブパネルで 50MPa 程度の引張残留応力が発生している。

4.3 矩形分布の残留応力と試験結果との比較

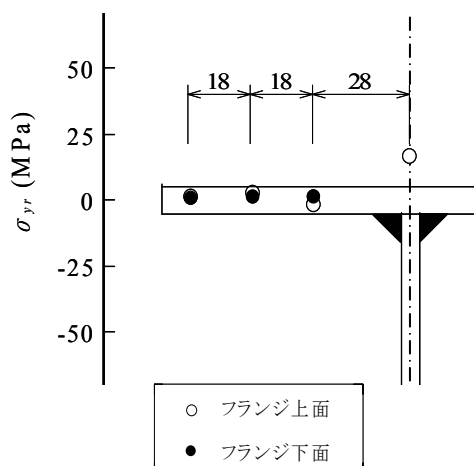
式(3.10)と(3.11)が与える矩形分布の残留応力と試験結果との比較を図－4.4 に示す。式(3.10)と(3.11)の η に対して、アルミニウム桁の材料が A5083-O であるので、表－3.4(b)に示す 1.0 を用い、母材の 0.2% 耐力に対して表－4.1 に示す値を用いた。他方、試験値は表裏面の残留応力の平均値である。

図－4.4 から分かるように、接合線方向の残留応力に関して、フランジでは矩形分布の残留応力が試験結果よりかなり大きく、ウェブでは矩形分布の残留応力が全体的に試験値より大きい。したがって 3 章で提案された矩形分布の残留応力は、実際の部材に生じる残留応力を安全側に評価しているといえる。

接合線直角方向の残留応力に関して、中央のウェブパネルで約 25MPa の引張残留応力が発生している。接合線直角方向のこの引張残留応力が部材の耐荷力に与える影響は今後の検討課題である。

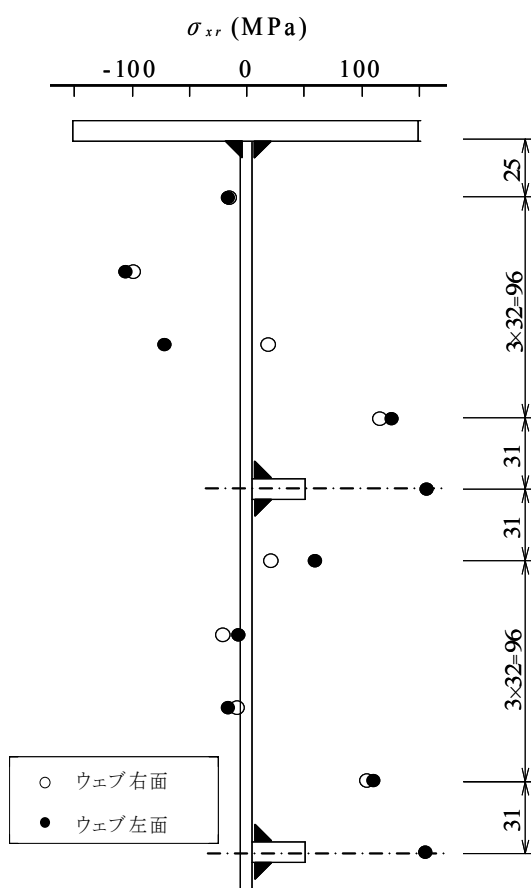


接合線方向

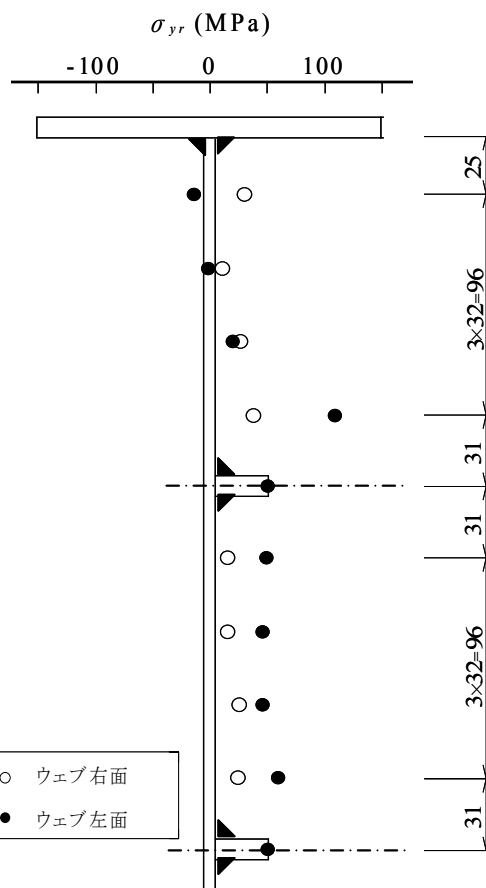


接合線直角方向

(a) フランジ



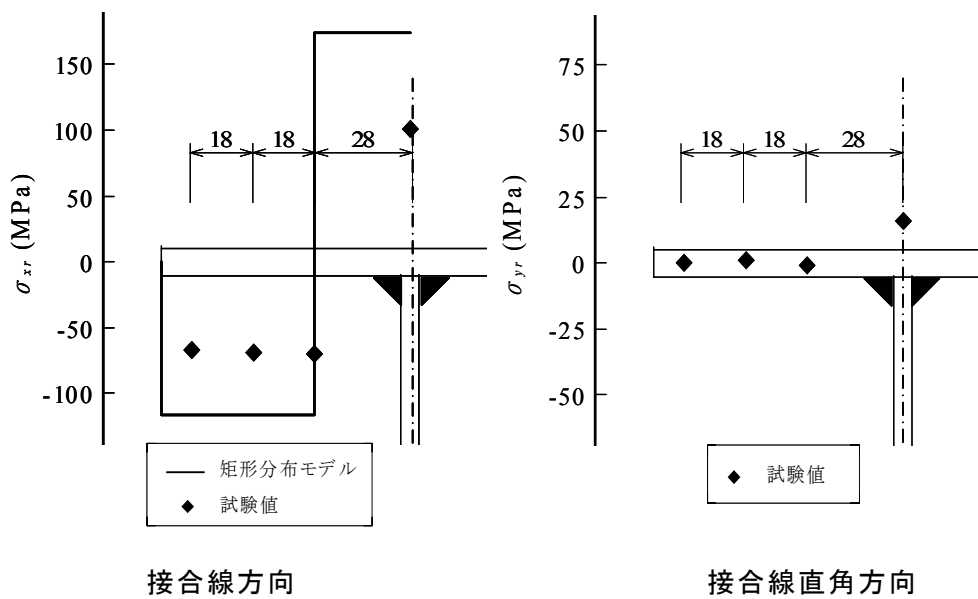
接合線方向



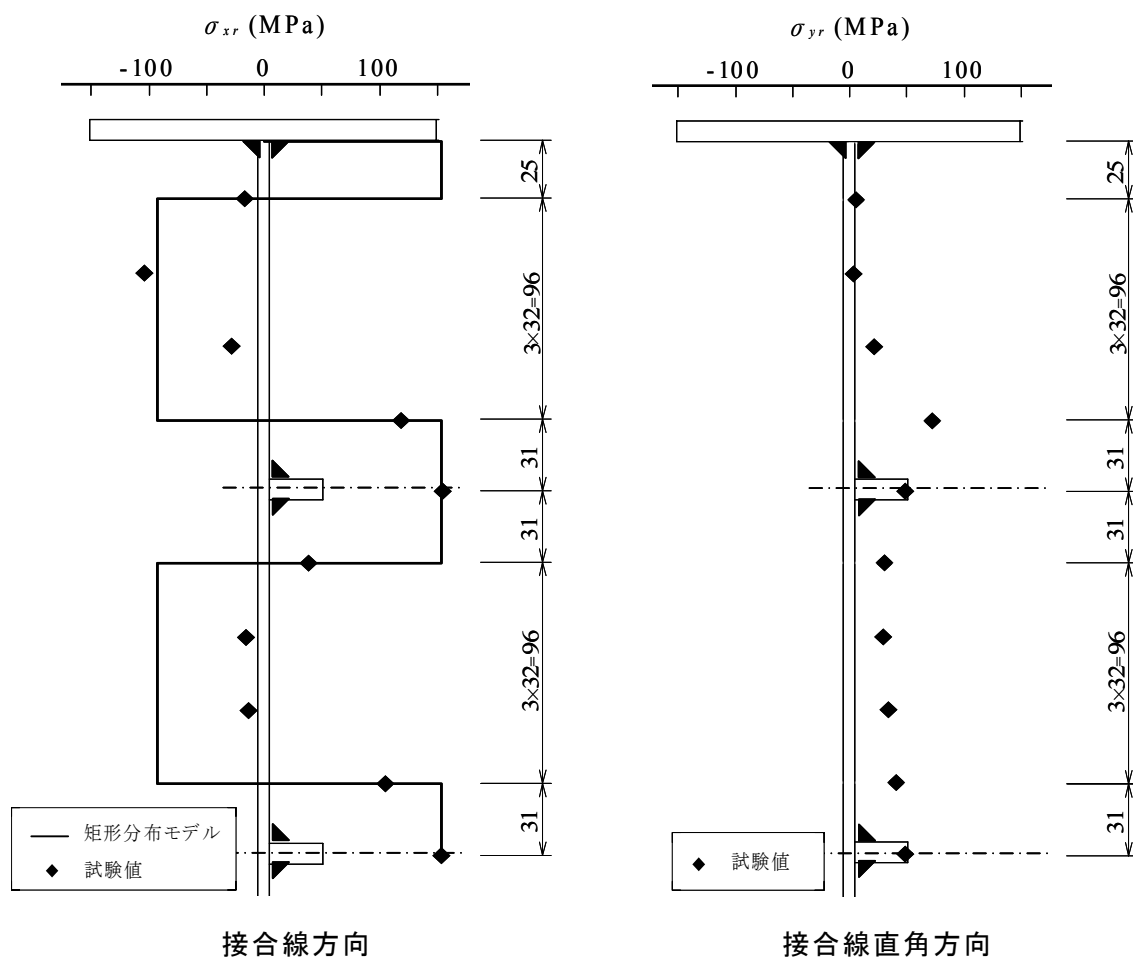
接合線直角方向

(b) ウェブ

図-4.3 残留応力分布



(a) フランジ



(b) ウェブ

図-4.4 矩形分布の残留応力と試験結果との比較

第 5 章 結論

本研究では，社会基盤構造物に使用される A6061-T6，A6N01-T5 および A5083-O の構造用アルミニウム合金の応力－ひずみ関係および，これらの MIG 溶接部と摩擦攪拌接合部の応力－ひずみ関係を定式化し，さらに MIG 溶接および摩擦攪拌接合によって発生する残留応力を定式化した。本研究で得られた主な結論を次に示す。

- (1) 構造用アルミニウム合金のヤング係数は正規分布で表される。ヤング係数の平均値に関して，A5083-O の方が A6061-T6 と A6N01-T5 の 6000 系アルミニウム合金より大きい。ヤング係数の変動係数は A5083-O と 6000 系アルミニウム合金とも非常に小さい。非超過確率(好ましくない側を超過しない確率)5%に対するヤング係数は，6000 系アルミニウム合金で 70.40GPa であり，A5083-O で 70.71GPa である。通常，設計で用いられるヤング係数は 70GPa であり，この値は，非超過確率 5%に対するヤング係数より低い。
- (2) 構造用アルミニウム合金のひずみ硬化パラメータは対数正規分布で表される。ひずみ硬化パラメータの平均値に関して，A6061-T6 と A6N01-T5 の 6000 系アルミニウム合金の方が A5083-O より 5.4 倍大きい。6000 系アルミニウム合金と A5083-O のひずみ硬化パラメータの変動係数はほぼ等しいが，ヤング係数の変動係数よりかなり大きい。非超過確率 5%に対するひずみ硬化パラメータは，6000 系アルミニウム合金で 29.1 であり，A5083-O で 5.3 である。
- (3) 構造用アルミニウム合金の応力－ひずみ関係式として次式を提案した。

$$\sigma \leq \sigma_{0.2} \text{ に対して, } \varepsilon = \frac{\sigma}{70000} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n$$

$$\sigma > \sigma_{0.2} \text{ に対して, } \sigma = \sigma_{0.2}$$

ここに， ε ：ひずみ

σ ：応力(MPa)

$\sigma_{0.2}$ ：0.2%耐力(MPa)

n ：ひずみ硬化パラメータであり，下表参照

アルミニウム合金	n
A6061-T6	29.1
A6N01-T5	29.1
A5083-O	5.3

- (4) 熱処理アルミニウム合金 A6061-T6 および A6N01-T5 の MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の熱影響範囲は，接合線を中心として両側にそれぞれ 25mm 以下である。したがって接合線を中心として両側にそれぞれ 25mm の範囲に，(5)で提案される接合部の応力－ひずみ関係を使用しなければならない。
- (5) MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の応力－ひずみ関係式として次式を提案した。

$$\sigma \leq \eta\sigma_{0.2} \text{ に対して, } \varepsilon = \frac{\sigma}{70000} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\eta\sigma_{0.2}} \right)^n$$

$$\sigma > \eta\sigma_{0.2} \text{ に対して, } \sigma = \eta\sigma_{0.2}$$

ここに, ε : ひずみ

σ : 応力(MPa)

$\sigma_{0.2}$: 母材の 0.2%耐力(MPa)

η : 母材の 0.2%耐力に対する接合部の 0.2%耐力の比であり, 下表参照

n : ひずみ硬化パラメータであり, 下表参照

アルミニウム合金	MIG		FSW	
	η	n	η	n
A6061-T6	0.39	5.3	0.44	10
A6N01-T5	0.45	5.3	0.45	10
A5083-O	1.00	5.3	1.00	5.3

(6) MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の, 接合線に対して直角な断面に生じる残留応力 σ_{xr} に対して, 次式で表される矩形分布の残留応力を提案した。

$$0 \leq y \leq 25\text{mm} \text{ に対して, } \sigma_{rx} = \eta\sigma_{0.2}$$

$$25\text{mm} \leq y \leq b \text{ に対して, } \sigma_{rx} = -\frac{25\eta\sigma_{0.2}}{b-25}$$

ここに, b : 接合中心から板の材縁までの距離(mm)

$\sigma_{0.2}$: 母材の 0.2%耐力(MPa)

η : 母材の 0.2%耐力に対する接合部の 0.2%耐力の比であり, (5)の表参照

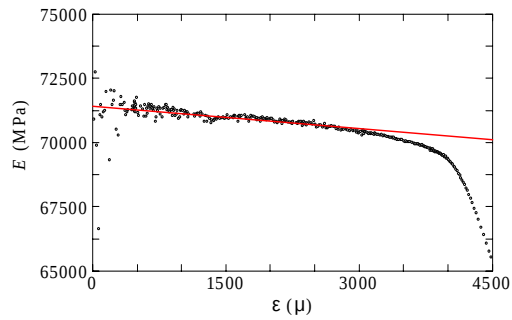
(7) MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の, 接合線に平行な断面に生じる残留応力 σ_{yr} は小さいので, $\sigma_{yr} = 0$ とする。

(8) (6)で提案された矩形分布の残留応力 σ_{xr} は, 実際の部材に生じる残留応力を安全側に評価する。

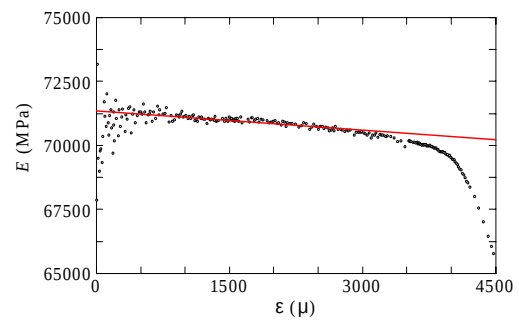
参考文献

- 1) 大倉一郎，萩澤亘保，岩田節雄，北村幸嗣：アルミニウム橋実現のための技術開発，軽金属，第 54 巻，第 9 号，pp.380-387，2004.
- 2) 塚本健三，末廣本治，中林章，大隅心平：アルミニウム合金製橋梁－JR 川棚駅前広場自由通路橋，橋梁&都市 PROJECT，第 38 巻，第 6 号，pp.4-8，2002.
- 3) 島貫繁吉，山口進吾：資源循環型床版の施工－リサイクル材を利用したアルミニウム合金製床版，橋梁&都市 PROJECT，第 37 巻，第 11 号，pp.5-11，2001.
- 4) 山田雅義，武本頼和：アルミ床板による新加古川大橋拡幅について，大阪大学，阪大フロンティア研究機構，第 1 回アルミニウム合金構造物実現のためのシンポジウム，pp.26-27，2004.
- 5) 日本アルミニウム協会(旧軽金属協会)：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.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，丸善，2002.
- 7) T. Hoglund and B. Norlin: Static design of aluminium structures, Structural Engineering International, IABSE, Vol.16, No.4, pp.301-304, 2006.
- 8) F.M. Mazzolani: Aluminium Alloy Structures, Second edition, E & FN SPON, pp.59-64, 1995.
- 9) JIS Z 2201：金属材料引張試験片，1998.
- 10) A. H-S. Ang and W. H. Tang：Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol.1, John Wiley & Sons, pp.261-281, 1988.
- 11) M.L. Sharp: Behavior and Design of Aluminum Structures, McGraw-Hill, Inc., pp.65-67, 1993.

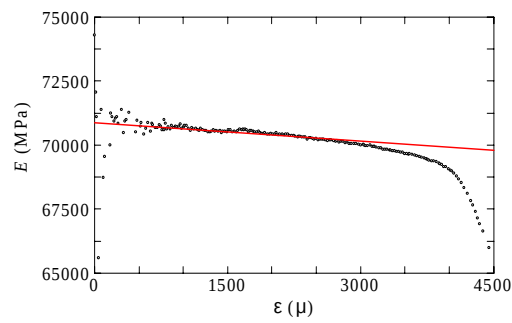
付図 - A A6061-T6 と A6N01-T5 の E_i - ε_i 関係[表 - 2.1(a)参照]



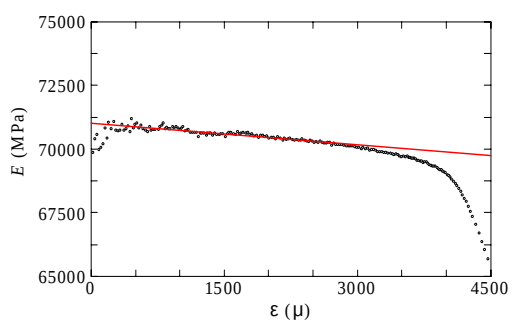
ロット 1 - 試験片 1



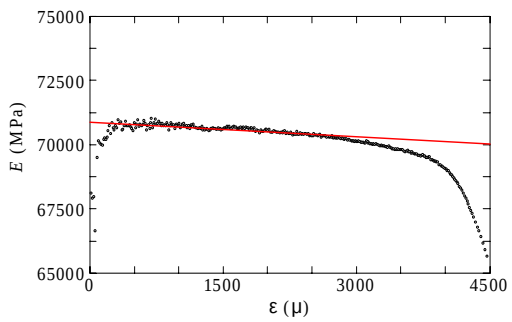
ロット 1 - 試験片 2



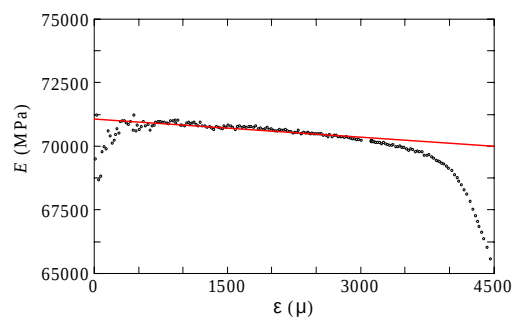
ロット 1 - 試験片 3



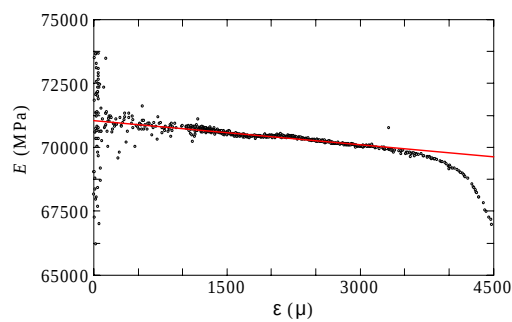
ロット 2 - 試験片 1



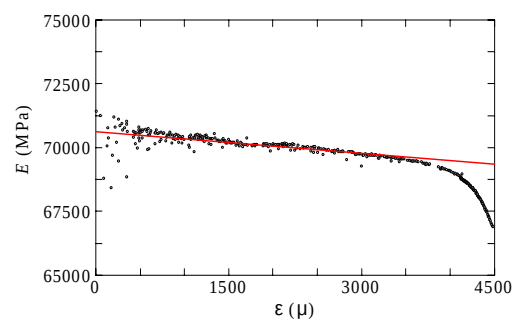
ロット 2 - 試験片 2



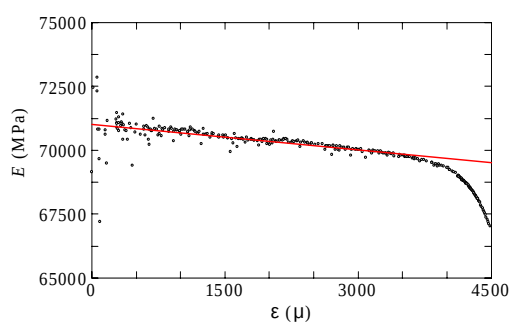
ロット 2 - 試験片 3



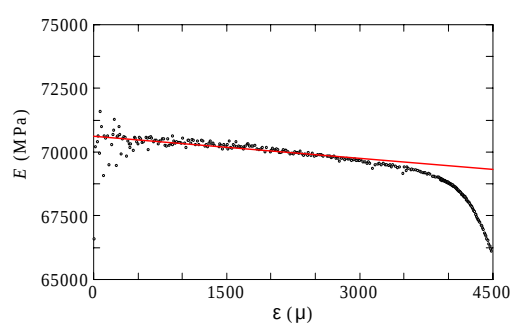
ロット 3 - 試験片 1



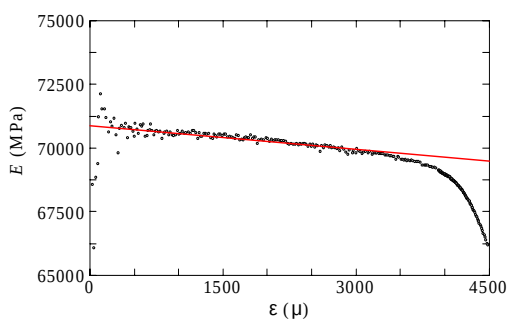
ロット 3 - 試験片 2



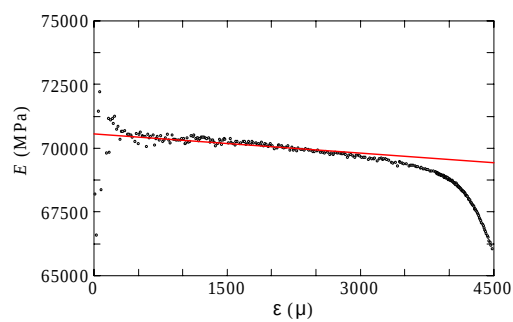
ロット 3 - 試験片 3



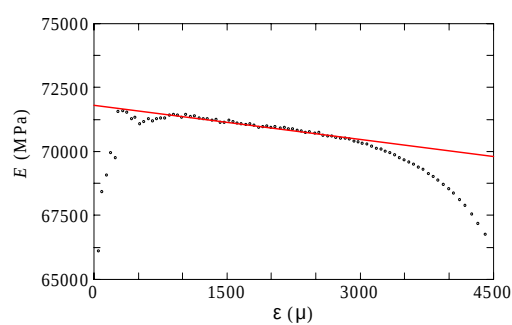
ロット 4 - 試験片 1



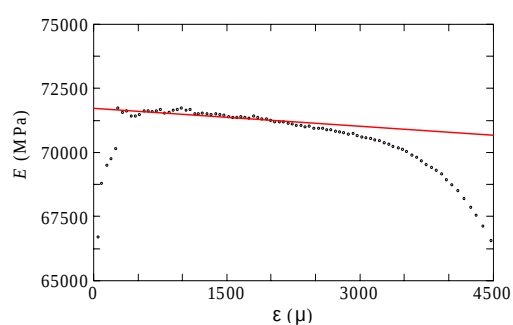
ロット 4 - 試験片 2



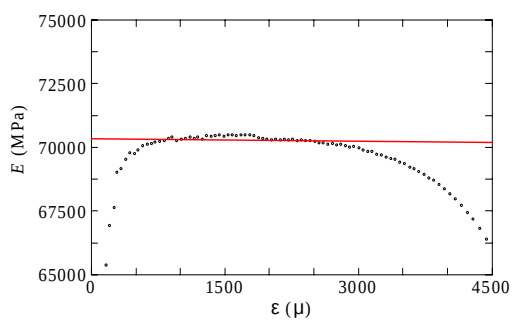
ロット 4 - 試験片 3



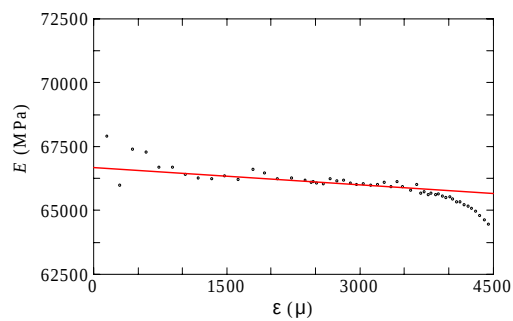
ロット 5 - 試験片 1



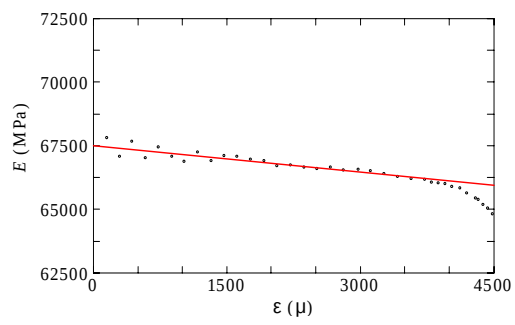
ロット 5 - 試験片 2



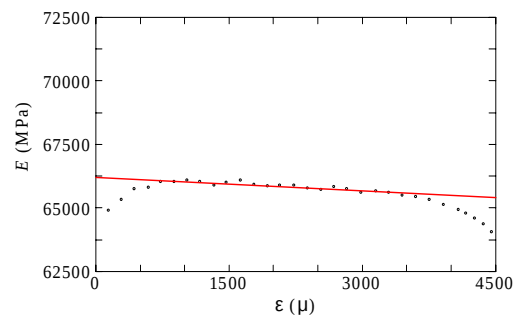
ロット 5 - 試験片 3



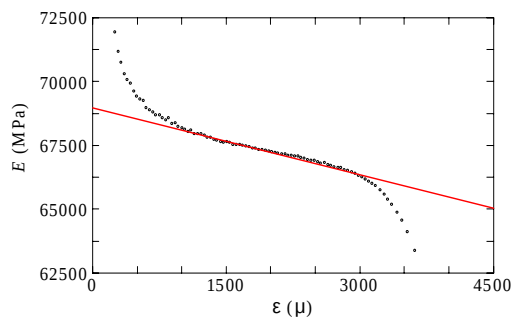
ロット 6 - 試験片 1



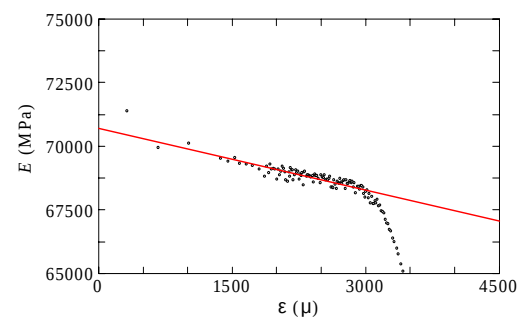
ロット 6 - 試験片 2



ロット 6 - 試験片 3

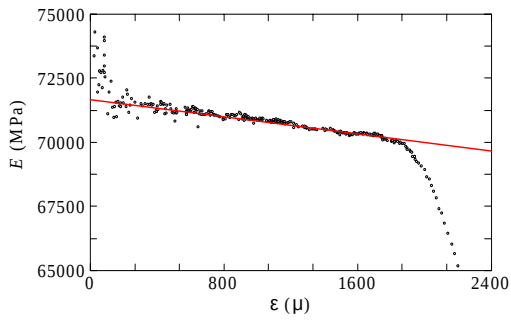


ロット 7 - 試験片 1

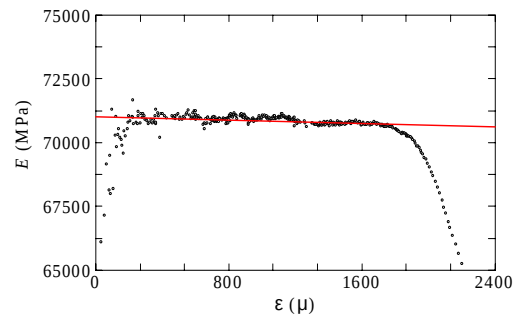


ロット 8 - 試験片 1

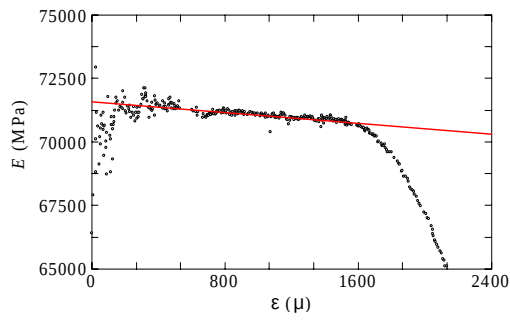
付図 - B A5083-0 の E_t - ε_t 関係[表 - 2.1(b)参照]



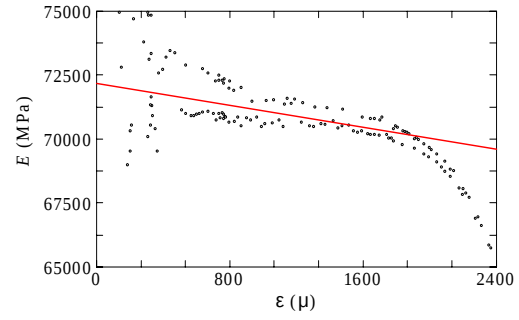
ロット 1 - 試験片 1



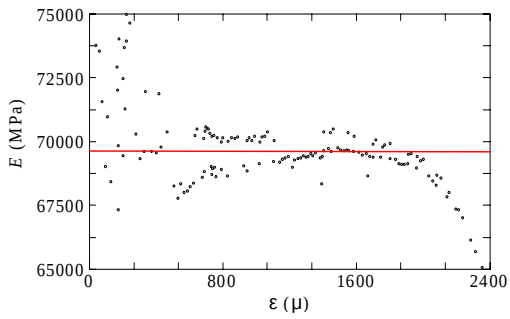
ロット 1 - 試験片 2



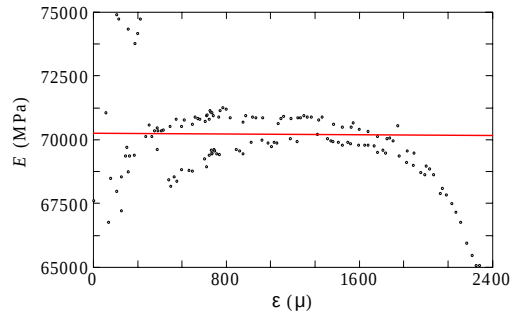
ロット 1 - 試験片 3



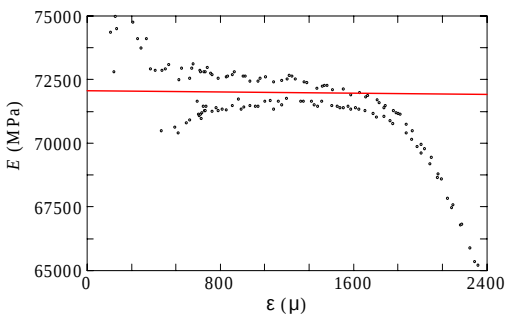
ロット 2 - 試験片 1



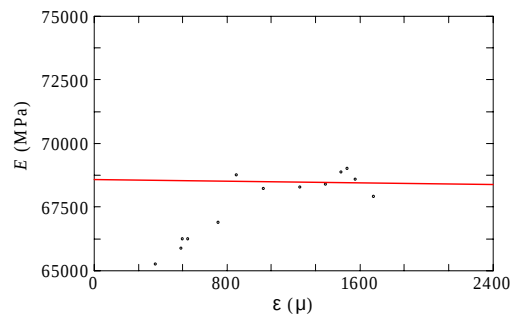
ロット 2 - 試験片 2



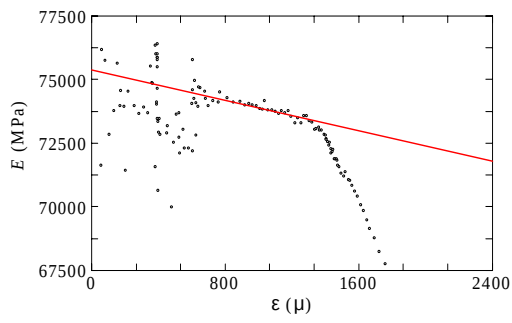
ロット 2 - 試験片 3



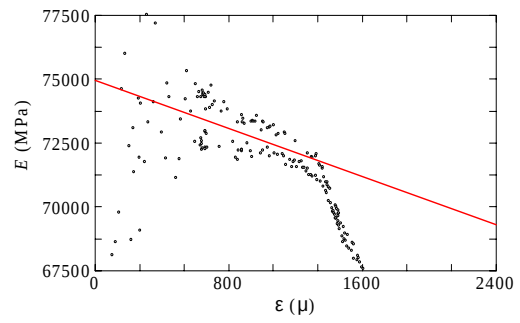
ロット 2 - 試験片 4



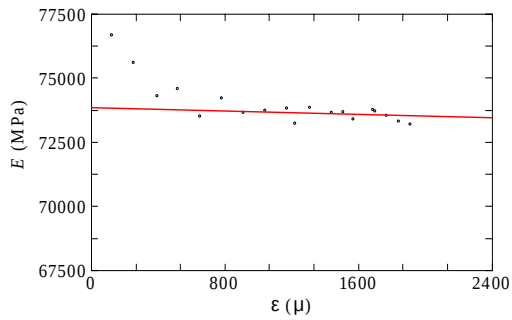
ロット 3 - 試験片 1



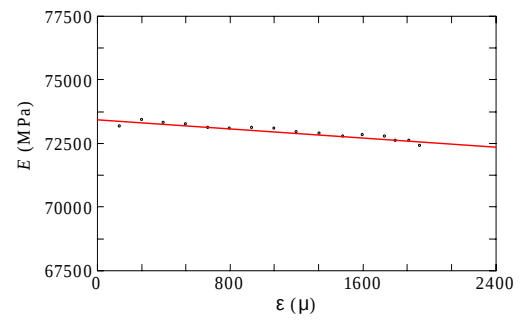
ロット 3 - 試験片 2



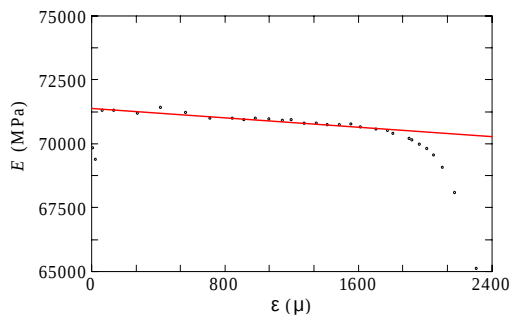
ロット 3 - 試験片 3



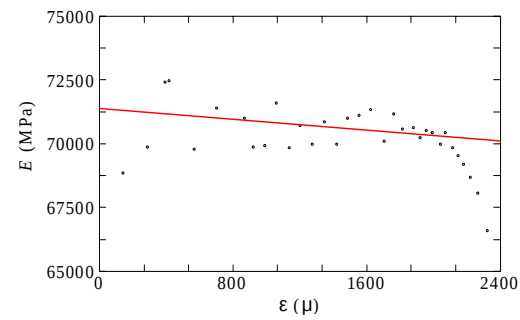
ロット 4 - 試験片 1



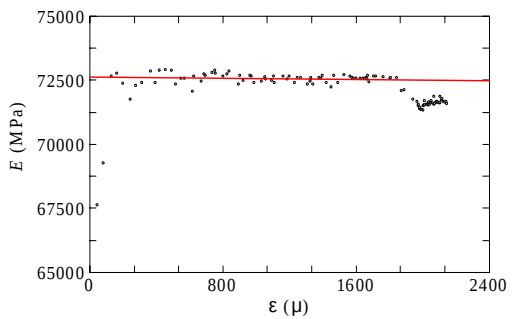
ロット 4 - 試験片 2



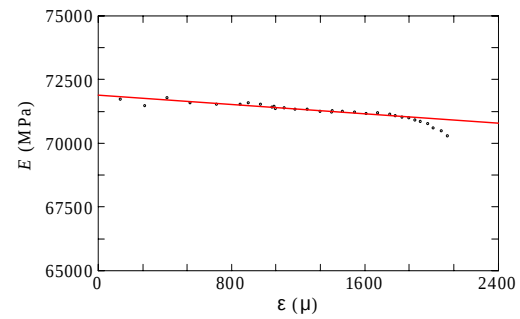
ロット 5 - 試験片 1



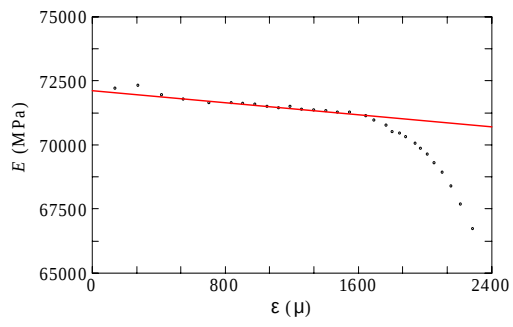
ロット 5 - 試験片 2



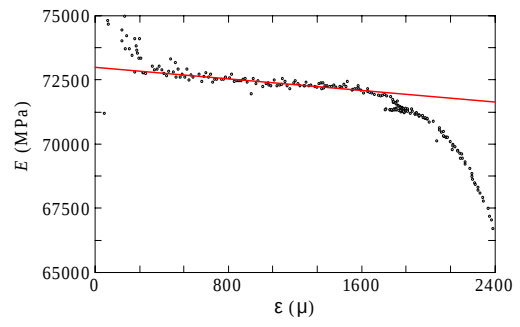
ロット 6 - 試験片 1



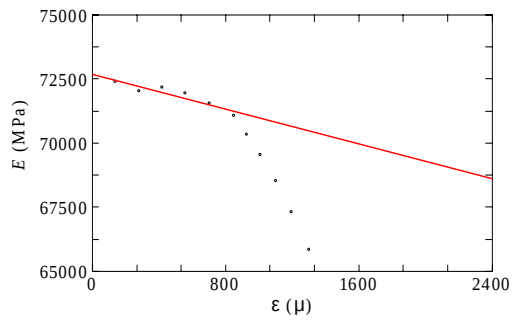
ロット 6 - 試験片 2



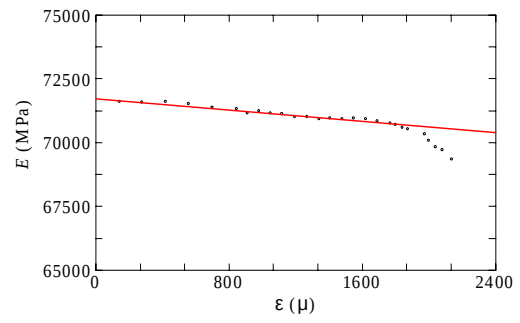
ロット 7 - 試験片 1



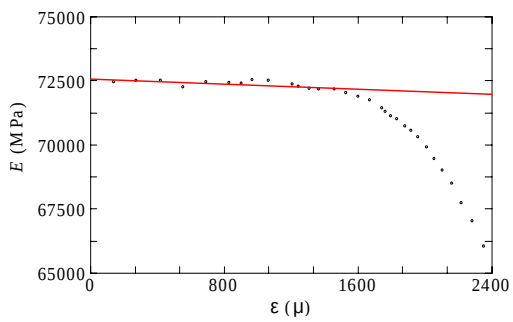
ロット 7 - 試験片 2



ロット 8 - 試験片 1

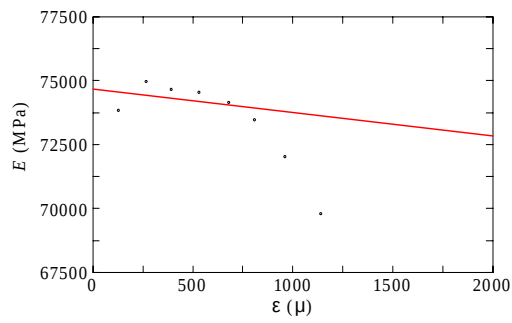


ロット 9 - 試験片 1

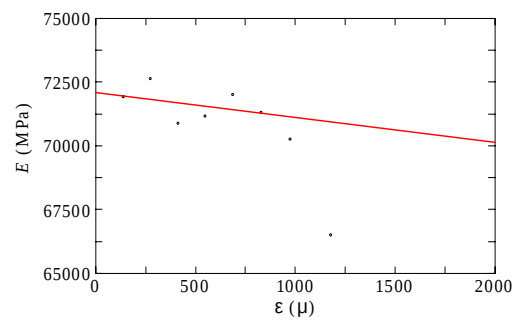


ロット 10 - 試験片 1

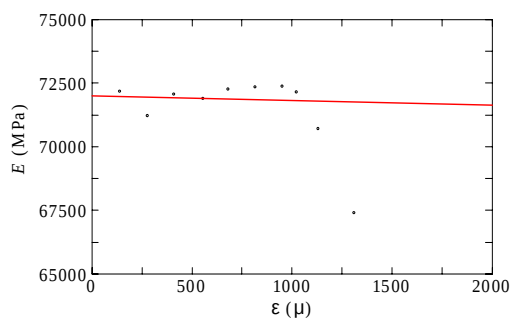
付図 - C MIG 溶接部と摩擦攪拌接合部の E_i - ε_i 関係(表 - 3.2 参照)



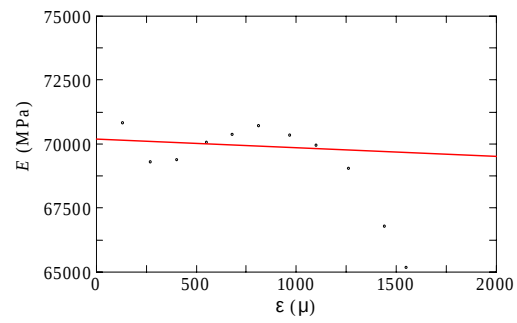
A6061-T6 MIG - 試験片 1



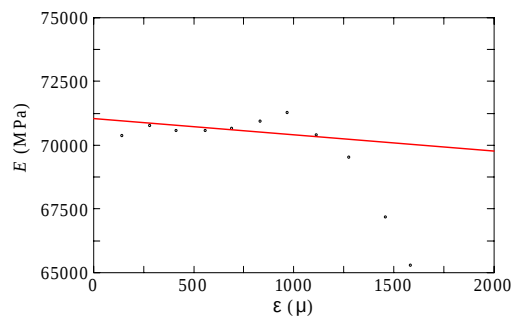
A6061-T6 MIG - 試験片 2



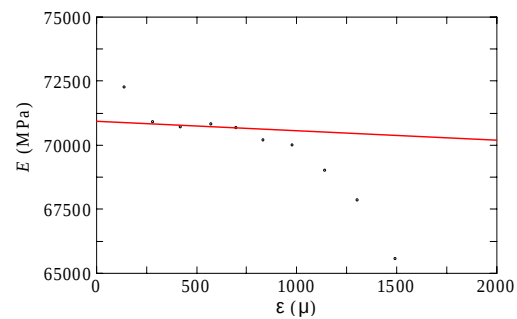
A6061-T6 MIG - 試験片 3



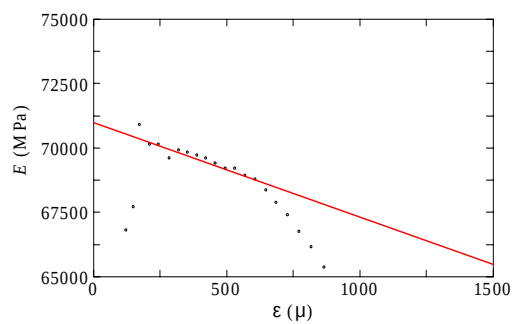
A6061-T6 FSW - 試験片 1



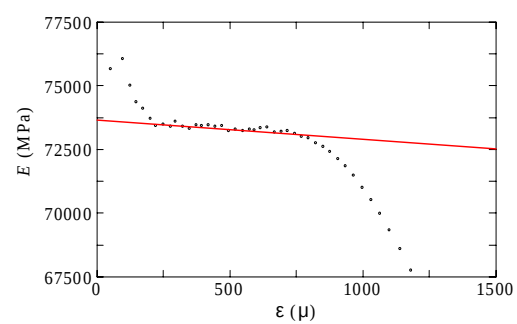
A6061-T6 FSW - 試験片 2



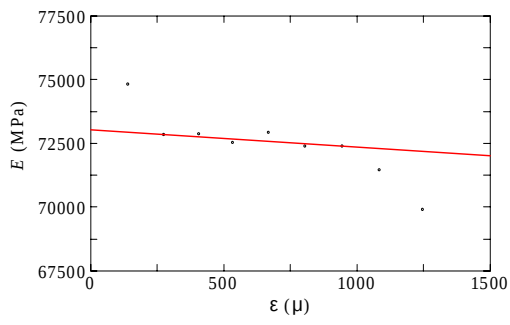
A6061-T6 FSW - 試験片 3



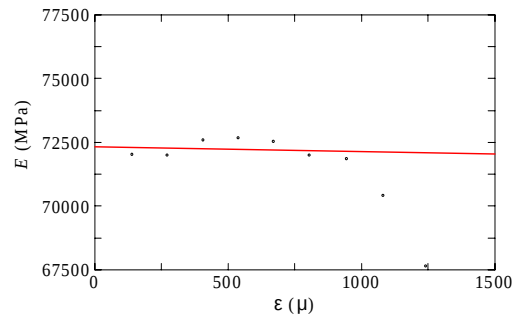
A6N01-T5 MIG - 試験片 1



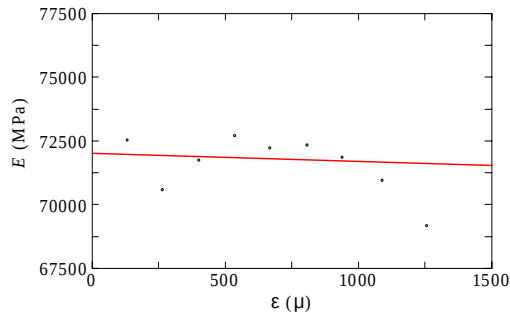
A6N01-T5 FSW - 試験片 1



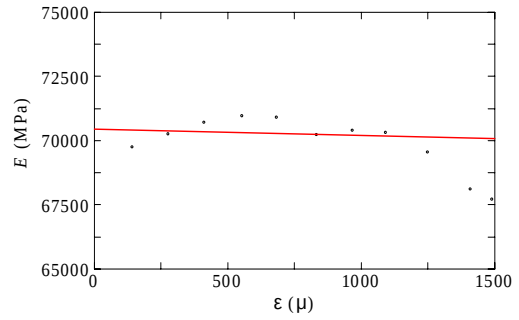
A5083-0 MIG - 試験片 1



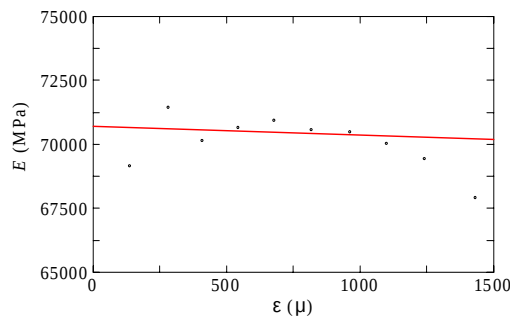
A5083-0 MIG - 試験片 2



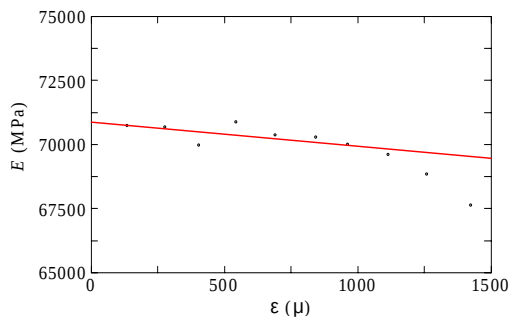
A5083-0 MIG - 試験片 3



A5083-0 FSW - 試験片 1

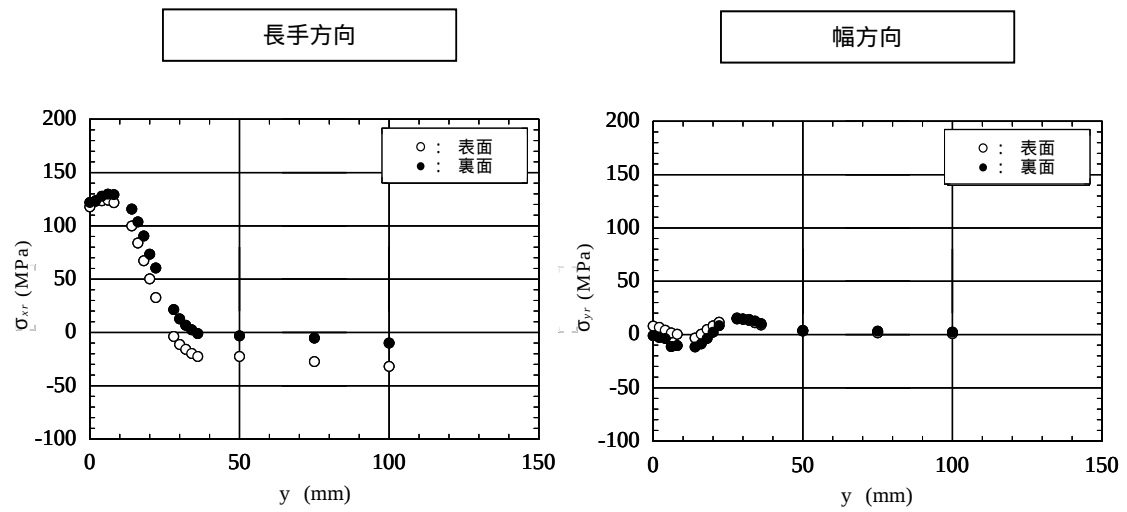


A5083-0 FSW - 試験片 2

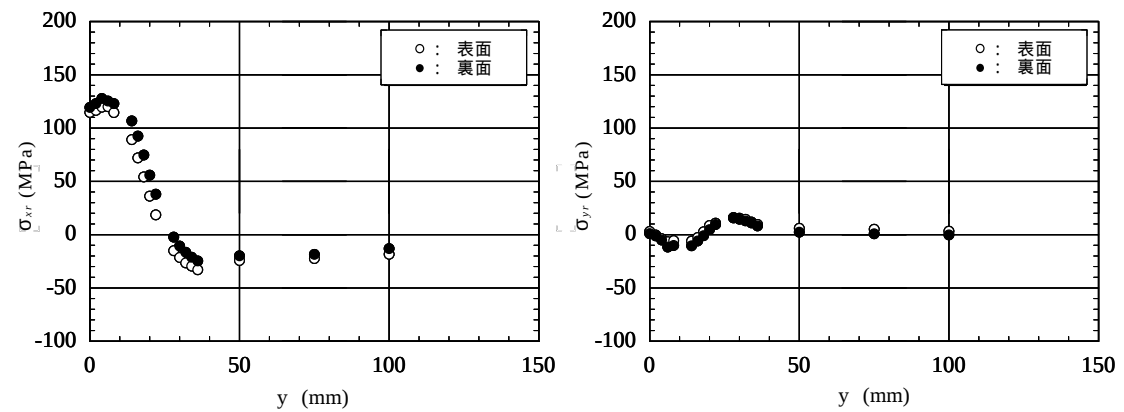


A5083-0 FSW - 試験片 3

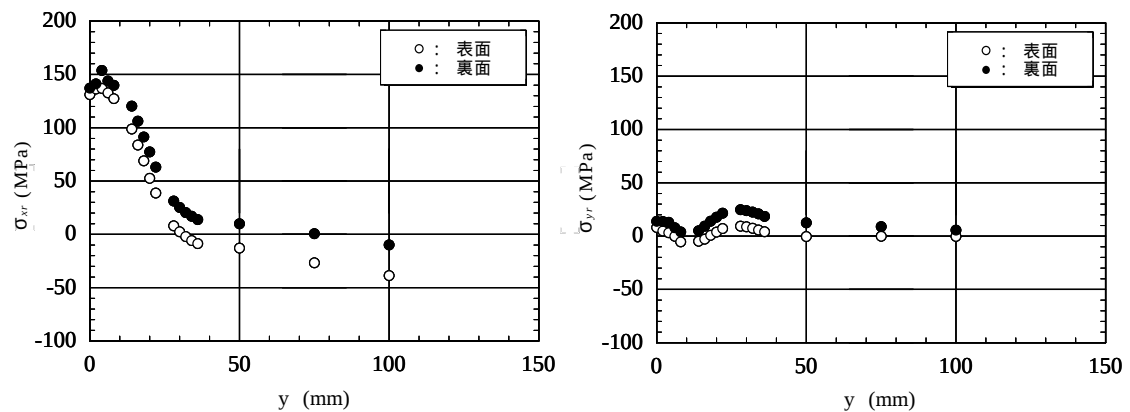
付図 - D(a) 残留応力分布(A6061-T6 の MIG)



(a) 開始側

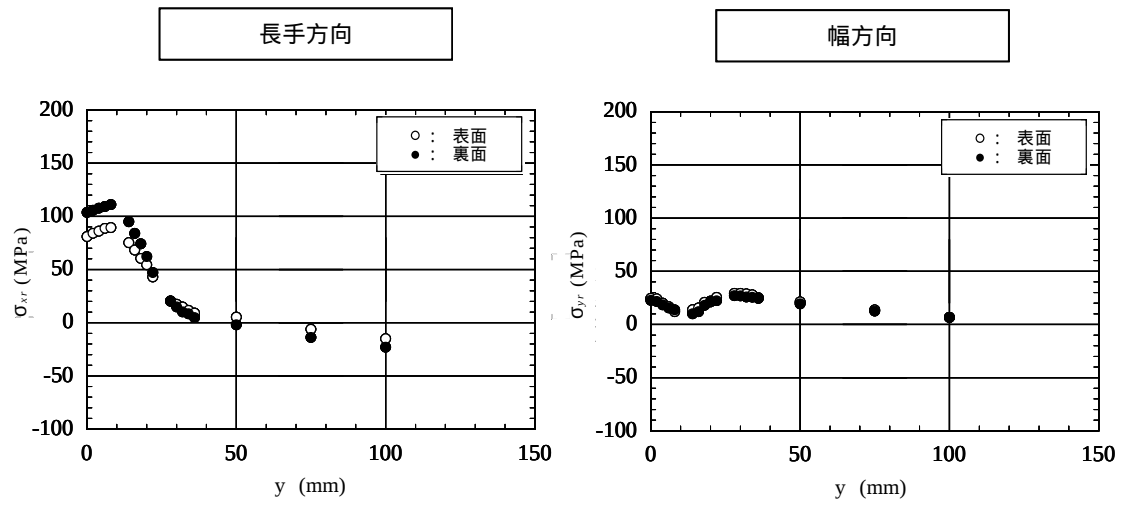


(b) 中央

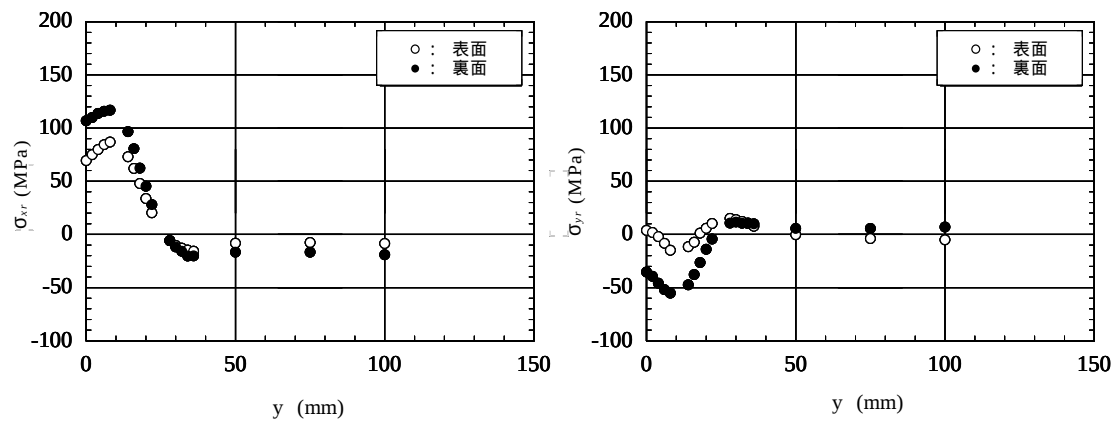


(c) 終了側

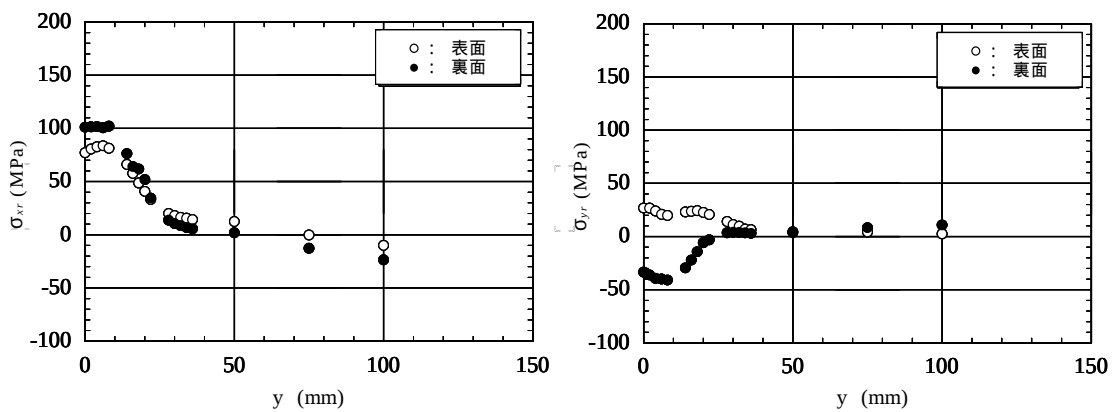
付図 - D(b) 残留応力分布(A6061-T6 のFSW)



(a) 開始側

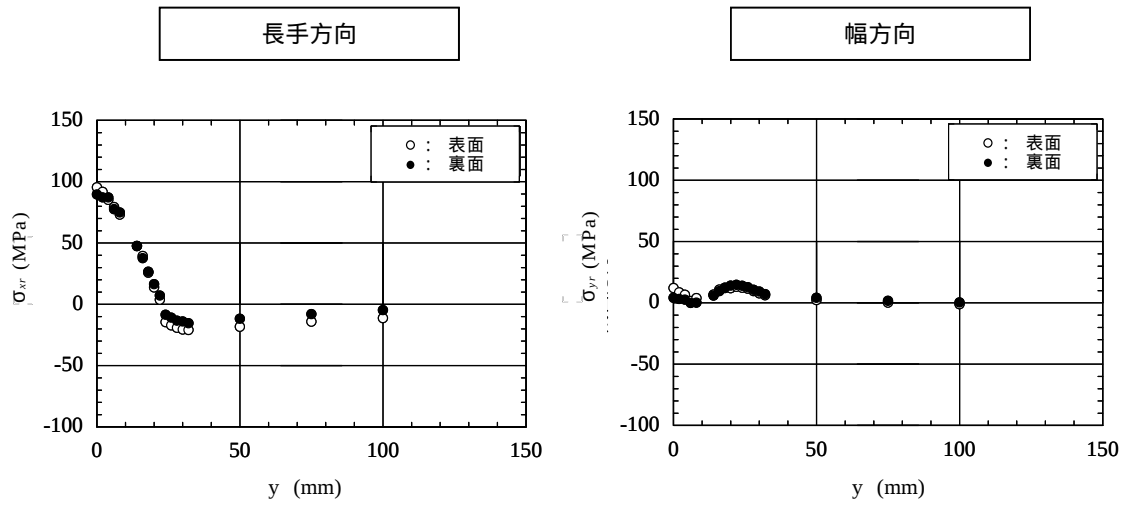


(b) 中央

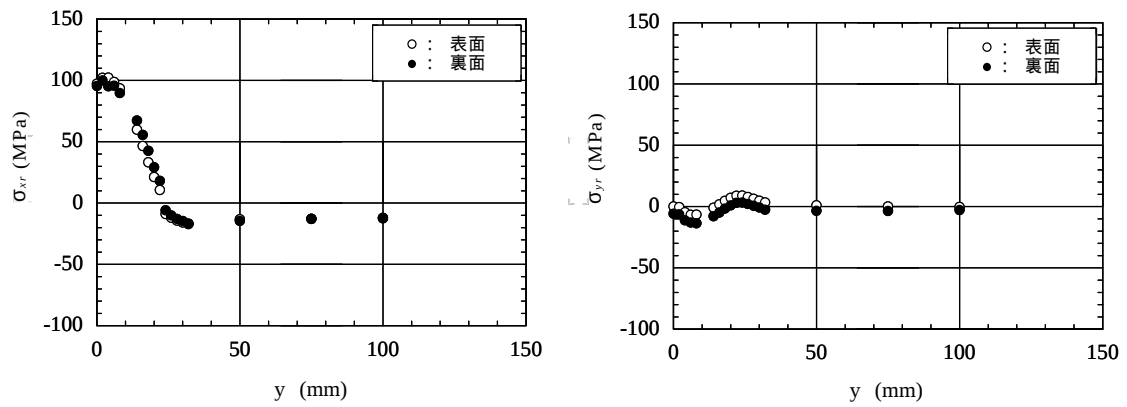


(c) 終了側

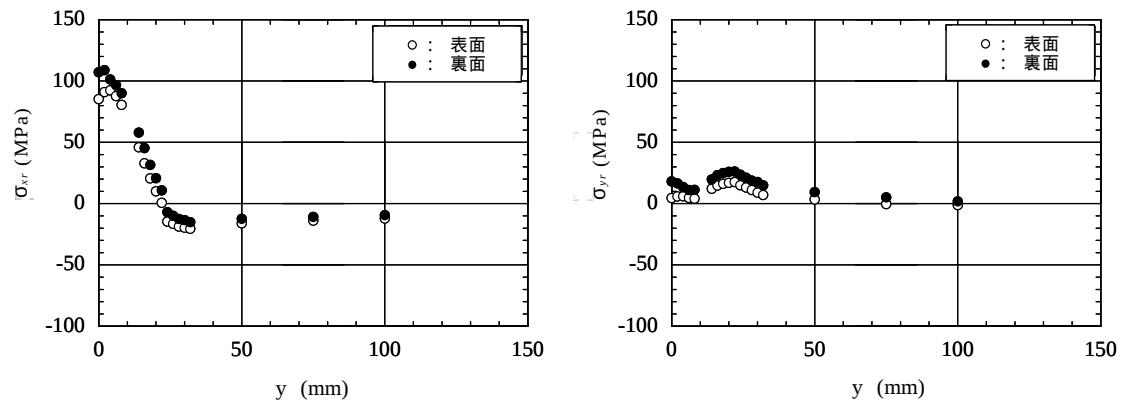
付図 - D(c) 残留応力分布(A6N01-T5 の MIG)



(a) 開始側

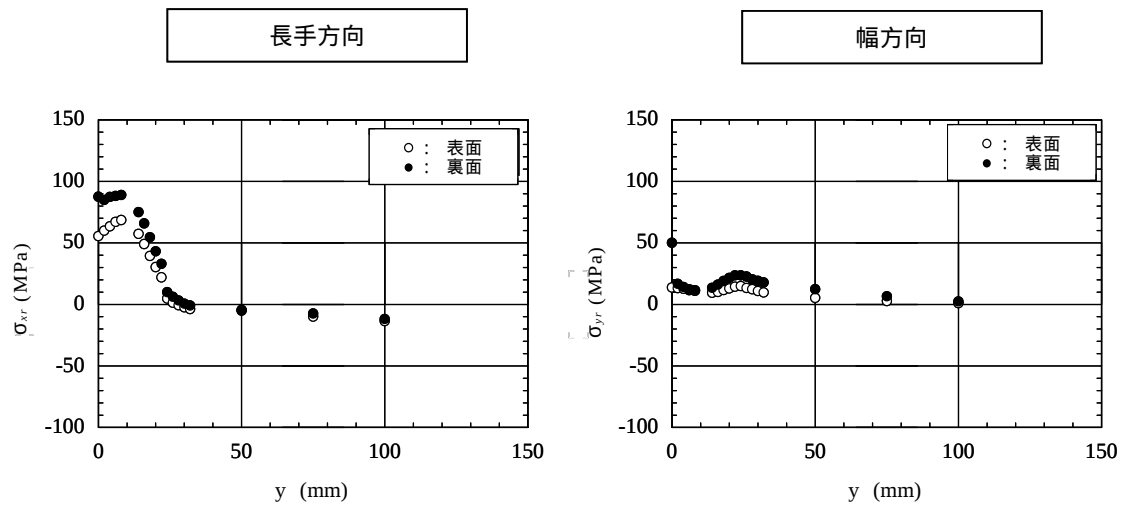


(b) 中央

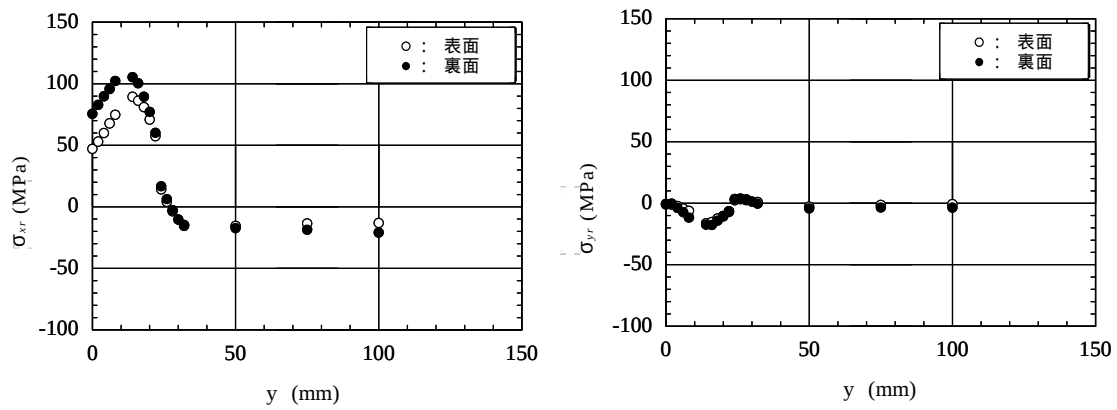


(c) 終了側

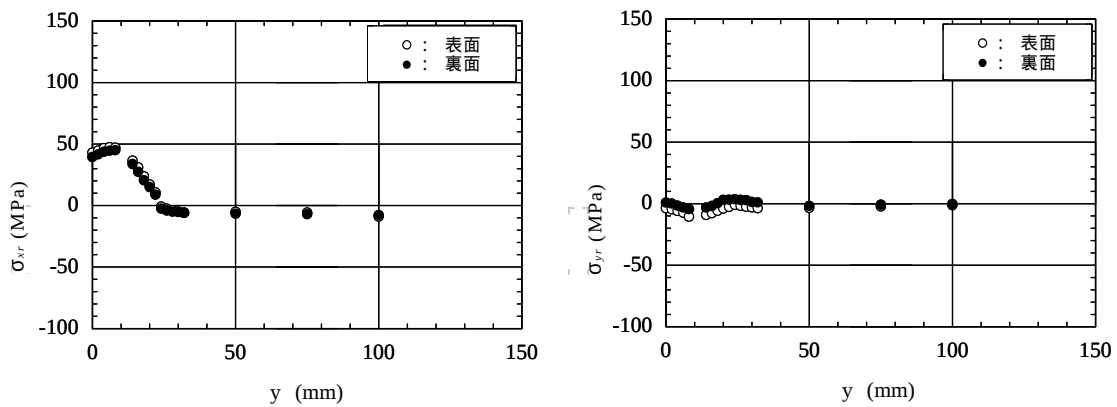
付図 - D(d) 残留応力分布 (A6N01-T5 の FSW)



(a) 開始側

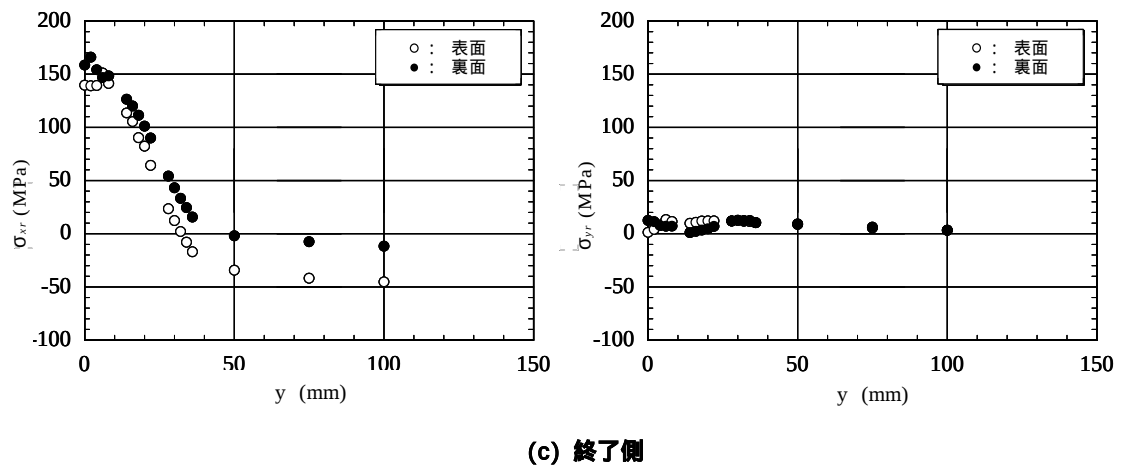
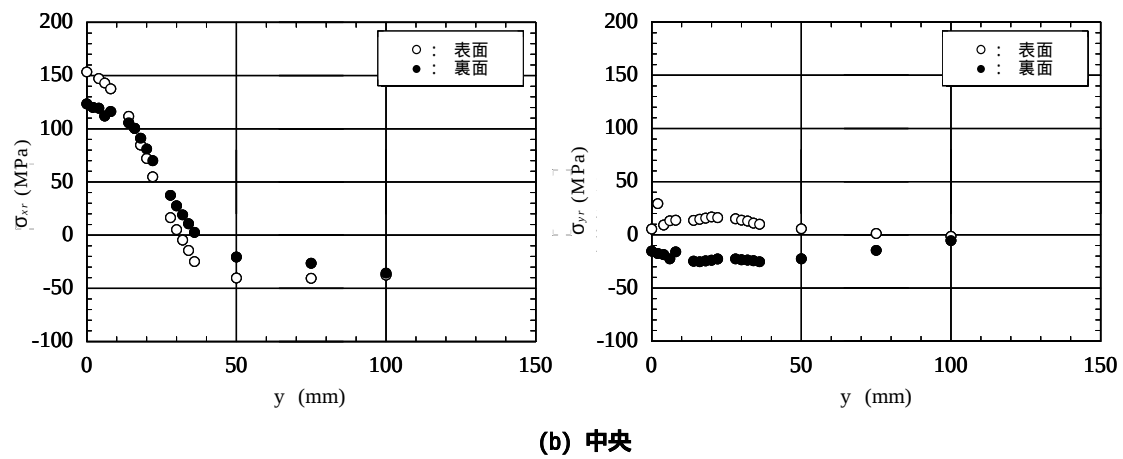
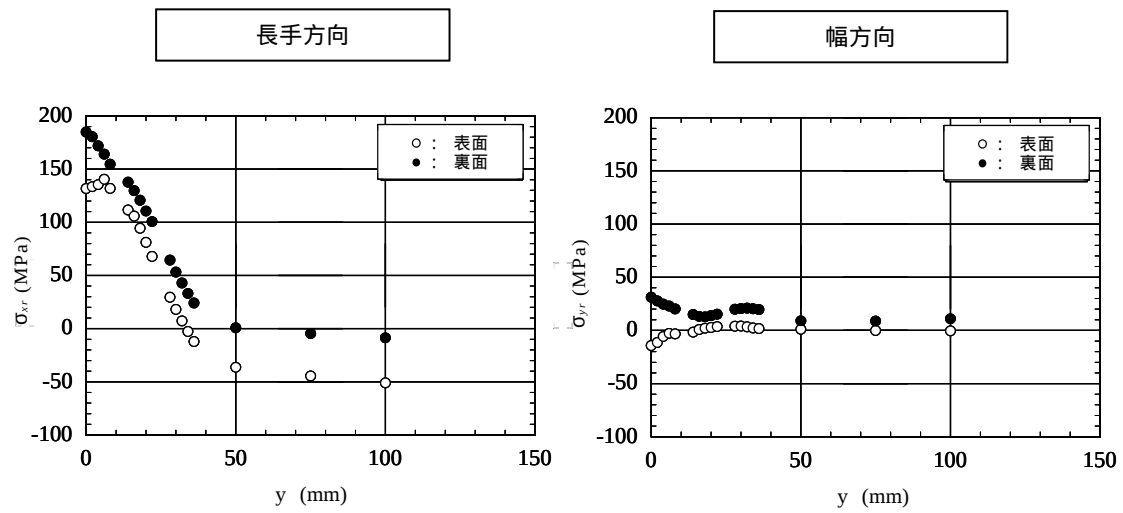


(b) 中央

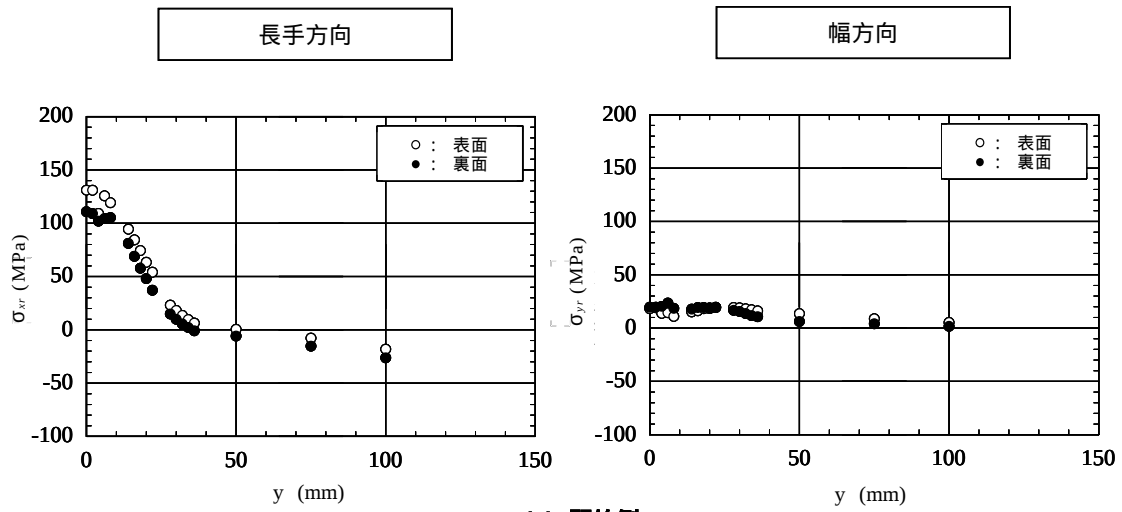


(c) 終了側

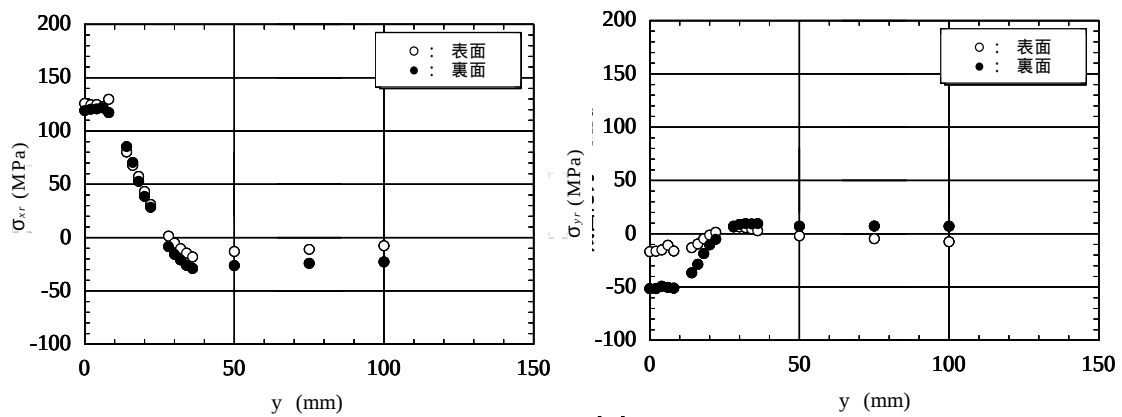
付図 - D(e) 残留応力分布(A5083-0 の MIG)



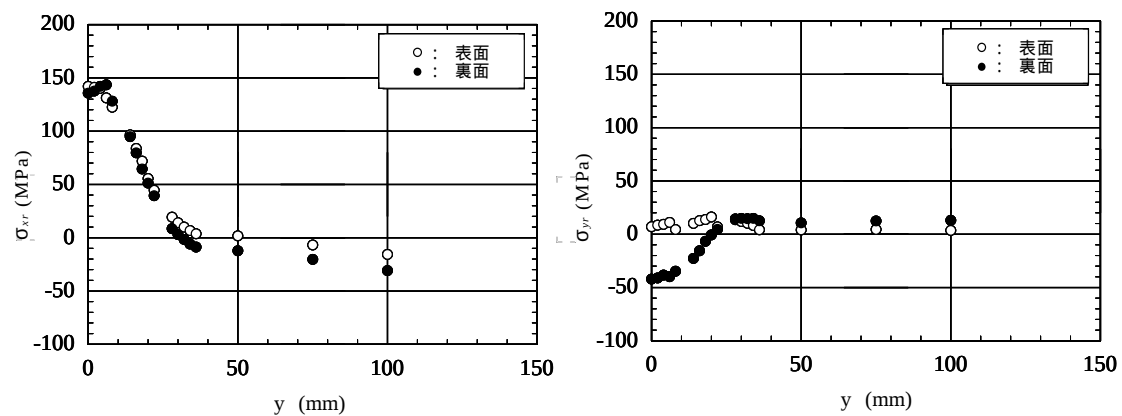
付図 - D(f) 残留応力分布(A5083-0 のFSW)



(a) 開始側



(b) 中央



(c) 終了側