

JAERI - M
90-191

試験研究炉用アルミニウム及びアルミニウム合金の
設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の案の策定

1990年11月

辻 宏和・掛札 和弘・中島 甫

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 (株)原子力資料サービス

試験研究炉用アルミニウム及びアルミニウム合金の
設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の案の策定

日本原子力研究所東海研究所燃料・材料工学部

辻 宏和・掛札 和弘⁺・中島 甫

(1990年10月9日受理)

科学技術庁では、試験研究用原子炉の技術基準の整備を進めており、「試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準」を告示化することを計画している。その技術基準では、アルミニウム及びアルミニウム合金の使用を認める方向で検討が進められている。しかしながら、現在のところ、アルミニウム及びアルミニウム合金を「解析による設計」に対して適用できるようにする上で必要となる設計降伏点 S_y 、設計引張強さ S_u 及び設計疲労線図を策定するに至っていない。

そこで、日本原子力研究所及び動力炉・核燃料開発事業団が中心となって、上記の設計降伏点 S_y 、設計引張強さ S_u 及び設計疲労線図を策定するために必要なデータの整備及びその材料データを基にした評価等の予備的検討を行った。このうち、設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u に関しては日本原子力研究所が、設計疲労線図に関しては動力炉・核燃料開発事業団が担当した。

本報は、日本原子力研究所が担当した「アルミニウム及びアルミニウム合金の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u 」の策定のための一連の引張試験の経緯、結果及び解析評価の過程をまとめると共に、その結果得られた「アルミニウム及びアルミニウム合金の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u 」の案を示したものである。

Generation of Draft of Design Yield Strength S_y and
Design Tensile Strength S_u on Aluminum and Aluminum Alloys
for Research Reactors

Hirokazu TSUJI, Kazuhiro KAKEFUDA⁺ and Hajime NAKAJIMA

Department of Fuels and Materials Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 9, 1990)

The Science and Technology Agency is planning to develop a design code for research reactors. In the code aluminum and aluminum alloys will be admitted as structural materials. Though the material strength standards such as the design yield strength S_y , the design tensile strength S_u and the design fatigue curve for those materials are needed in order to use them in "design by analysis", they have not been determined yet at the moment.

From such a background, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) and Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC) played the major roles in obtaining the necessary material data and in analyzing them statistically. JAERI and PNC shared the work as follows;

- Estimation of the design yield strength S_y and the design tensile strength S_u by JAERI, and
- Estimation of the design fatigue curve by PNC.

This report describes the tension test program, the experimental methods, the obtained data, the applied statistical data analyses and the proposed S_y/S_u .

+ Department of Research Reactor Operation

Keywords: Research Reactor, Aluminum, Aluminum Alloy, Material Strength Standards, Design Yield Strength, Design Tensile Strength, Design Fatigue Curve, Statistical Analysis

目 次

1. まえがき	1
2. 引張試験計画	2
2.1 供試材料	2
2.2 引張試験マトリクス	2
2.3 引張試験片	3
2.4 引張試験方法	3
2.5 設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法	4
3. 引張試験	14
3.1 供試材料	14
3.2 ひずみ速度の影響を調べるための予備試験	14
3.3 引張試験マトリクス	14
3.4 引張試験片	15
3.5 引張試験方法	15
4. 引張試験結果	23
4.1 純アルミニウム A1100 P-O	23
4.2 Al-Mg 合金 A5052 P-O, A5052 BE-O	23
4.3 Al-Mg-Si 合金 A6061 P-T6 (厚板の場合は T651), A6061 BE-T6	23
4.4 Al-Mg-Si 合金 A6063 BE-T6	24
5. 引張試験結果の解析評価	39
5.1 純アルミニウム A1100 P-O	39
5.2 Al-Mg 合金 A5052 P-O, A5052 BE-O	41
5.3 Al-Mg-Si 合金 A6061 P-T6 (厚板の場合は T651), A6061 BE-T6	45
5.4 Al-Mg-Si 合金 A6063 BE-T6	48
6. 設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u に関する検討	101
6.1 通商産業省告示第 501 号との整合性	101
6.2 ASME コードからの換算値との比較	101
7. まとめ	113
謝 辞	115
参考文献	115
付 録	116

Contents

1. Introduction	1
2. Tension test program	2
2.1 Materials	2
2.2 Test matrix	2
2.3 Specimens	3
2.4 Experimental methods	3
2.5 Estimation method of design yield strength S_y and design tensile strength S_u	4
3. Tension Tests	14
3.1 Materials	14
3.2 Preliminary tests on effects of strain rate	14
3.3 Test matrix	14
3.4 Specimens	15
3.5 Experimental methods	15
4. Results of tension tests	23
4.1 Pure aluminum A1100P-0	23
4.2 Al-Mg alloy A5052P-0 and A5052BE-0	23
4.3 Al-Mg-Si alloy A6061P-T6 (T651 for thick plate) and A6061BE-T6	23
4.4 Al-Mg-Si alloy A6063BE-T6	24
5. Analyses and evaluation	39
5.1 Pure aluminum A1100P-0	39
5.2 Al-Mg alloy A5052P-0 and A5052BE-0	41
5.3 Al-Mg-Si alloy A6061P-T6 (T651 for thick plate) and A6061BE-T6	45
5.4 Al-Mg-Si alloy A6063BE-T6	48
6. Examination of design yield strength S_y and design tensile strength S_u	101
6.1 Consistency with existing guideline (MITI ^{*1} 501)	101
6.2 Comparison with converted values from ASME ^{*2} Code	101
7. Summary	113
Acknowledgements	115
References	115
Appendix	116

*1 the Ministry of International Trade and Industry

*2 the American Society of Mechanical Engineers

1. ま え が き

科学技術庁では、試験研究用原子炉の技術基準の整備を進めており、「試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準」を告示化することを計画している。その技術基準では、近年における構造解析技術の進歩を踏まえて、試験研究用原子炉の特徴を考慮し、試験研究の目的に応じて、原理的に任意の形状の構造物への適用が可能な「解析による設計」を導入し、設計手法の選択幅の拡大を図ろうとしている。また、試験研究用原子炉施設では、軽量で耐食性及び中性子経済の点で優れているアルミニウム及びアルミニウム合金について、従来からの使用実績も豊富であることから、その使用を認める方向で検討が進められている。しかしながら、現在のところ、アルミニウム及びアルミニウム合金を「解析による設計」に対して適用できるようにする上で必要となる設計降伏点 S_y 、設計引張強さ S_u 及び設計疲労線図を策定するに至っていない。

そこで、日本原子力研究所及び動力炉・核燃料開発事業団が中心となって、上記の設計降伏点 S_y 、設計引張強さ S_u 及び設計疲労線図を策定するために必要な材料データの整備及びその材料データを基にした評価等の予備的検討を行うことになった。このうち、設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u に関しては日本原子力研究所が、設計疲労線図に関しては動力炉・核燃料開発事業団が担当することとした。

アルミニウム及びアルミニウム合金の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u を策定するに当たり、軽水炉での使用が少ないアルミニウム及びアルミニウム合金を試験研究用原子炉一般で第3種機器に利用できるとする技術基準を新たに定めるには、国の規制行政上ある程度の試験データによる実証的裏付けを得ておくことが望ましいと考えられることから、一連の引張試験を実施した。なお、一連の引張試験は日本原子力研究所が社団法人軽金属溶接構造協会へ委託し、同協会が、合金メーカー8社及びプラント製造メーカー4社の協力を得ながら実施した。

本報は、日本原子力研究所が担当した「アルミニウム及びアルミニウム合金の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u 」の策定のための一連の引張試験の経緯及び結果をまとめると共に、そのデータを解析評価した上で、「アルミニウム及びアルミニウム合金の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u 」の案を示したものである。

2. 引張試験計画

2.1 供試材料

原子炉材料には、中性子照射、使用雰囲気（主として水環境）、高温時効等の使用条件に対応した種々の材質劣化要因があり、これらに対する配慮が必要となる。このため、実際の適用に当たってはその実績がかなり重要視される。そこで、試験研究用原子炉におけるアルミニウム及びアルミニウム合金の使用実績を調べた。その結果を第 2.1 表に示す。材料の強度特性から判断すると、第 2.1 表に挙げられている合金以外で、鉄道車両等の構造で実績のある優れたアルミニウム合金を原子炉材料に起用することも考えられる。しかしながら、原子炉の修理に当たっては異材を避けることや、第 2.1 表に示した使用実績で重大なトラブルに直面したアルミニウム合金が存在しないことを考慮して、まず実績のある材料について必要とするデータを整備し、設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定に反映させることとした。

第 2.1 表に示した調査結果に対応して、供試材料は、純アルミニウム A1100P-O、Al-Mg 合金 A5052P-O、A5052BE-O、Al-Mg-Si 合金 A6061P-T6（厚板の場合は T651）、A6061BE-T6、A6063BE-T6 の 6 種類とした（第 2.2 表参照）。純アルミニウム（A1100P-O）は、基本となる材料であり、支持構造物として使用される可能性もあることから、基準値を整備する必要があると判断し、供試材料の中に含めた。また、A5052P-H34 は、その使用されている原子炉の建設時期がかなり以前であることや国内での合金製造実績がほとんど無いことから、今後試験研究用原子炉の構造材料として起用する可能性は極めて低いと判断し、供試材料から除外した。

供試材料の形状及び寸法については、試験研究用原子炉におけるアルミニウム及びアルミニウム合金の使用実績と合金メーカーの製造経験を踏まえた上で、引張試験片の採取も考慮に入れて第 2.3 表のように定めた。この表に示すように、板については製造経験の豊富な $t4\text{ mm}$ と厚肉材の特性がほぼ評価できる $t20\text{ mm}$ （もしくは $t30\text{ mm}$ ）及び $t50\text{ mm}$ 、押出棒については太径の特性がほぼ評価できる $\phi 20 \sim 35\text{ mm}$ とした。材料の製造工程は第 2.1 (1) 図及び第 2.1 (2) 図に従うこととした。

データ取得の目的から判断して、供試材料は JIS^(1,2) に定められている規格値を満足すべきことは当然であるが、標準品と比較して極端に強すぎる材料を供試材料とすることも好ましくない。そこで、製造された材料についてメーカー側で第 2.4 表⁽³⁾ に示す一連の確性試験を実施し、供試材料の基本的な特性を把握しておくこととした。

2.2 引張試験マトリクス

選定した供試材料に対して、引張試験マトリクスを第 2.5 表のように定めた。第 2.5 表に示すように、基本的には、1 材質当たり 8 ヒートの材料を準備し、引張試験を行うこととした。ここで、1 材質当たり 8 ヒートとしたのは、「発電用原子炉設備に関する構造等の技術基準」につい

での質疑応答「Sy 値, Su 値の求め方」⁽⁴⁾に準じたものである。A5052-O 及び A6061-T6 については、板と押出棒で JIS^(1,2)に定められている規格値がわずかに異なっているが、過去の経験から、板と押出棒の間に強度特性上の大きな差は無いと思われることから、各々に対して8ヒートずつの引張試験を行う必要はないと判断した。そこで、これらの合金に関しては、板と押出棒で JIS^(1,2)に定められている規格値が低い方の材料、すなわち A5052-O では板 (A5052P-O), A6061-T6 では押出棒 (A6061BE-T6) を基準とし、これらについては8ヒートずつの引張試験を行うこととした。また、A5052-O 押出棒 (A5052BE-O) 及び A6061-T6 (厚板の場合は T651) 板 (A6061P-T6, A6061P-T651) については比較のために2ヒートずつの引張試験を行うこととした。

試験温度については、アルミニウム及びアルミニウム合金の特性から判断して、上限温度を200℃とし、室温から200℃までの50℃毎に引張試験を行うことを標準とした。また、1材質当たり2ヒートについては、75、125及び175℃における引張試験も行うこととした。なお、第2.1表に示した調査結果では、その使用温度は100℃以下に限られている。

同一ヒート同一温度条件下における引張試験の繰り返し数は2とした。従って、第2.5表に示した引張試験マトリクスにおける全試験数は336となる。

2.3 引張試験片

引張試験片としては、原則として JIS Z 2201⁽⁵⁾に規定されている標準試験片のうちの比例試験片を採用することとした。すなわち、供試材料がt4mm板に対しては13B号試験片を、その他の供試材料に対しては14A号試験片を用いる(第2.2図参照)。

引張試験片の採取位置は、以下のように定めた。すなわち、供試材料が押出棒に対しては、試験片の軸が押出棒の中央部、供試材料がt20mm(もしくはt30mm)板に対しては、試験片の軸が板の2表面の中央部、供試材料がt50mm板に対しては、試験片の軸が板の表面とその中心との中央部となるように採取する。

供試材料が板の場合の引張試験片採取方向については、引張方向が圧延方向と一致するように試験片を採取することと定めた。

2.4 引張試験方法

引張試験は、原則として JIS G 0567⁽⁶⁾に規定されている標準試験方法に準じて行うこととした。JIS G 0567⁽⁶⁾は、鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法を規定した規格であり、アルミニウム及びアルミニウム合金を対象とはしていないが、この方法をアルミニウム及びアルミニウム合金の高温引張試験に適用する上で、不都合、不合理な点は無いと判断した。

JIS G 0567⁽⁶⁾に準じて引張試験を行う場合の手順は、概略以下に示すとおりである。

・加熱方法

試験片は試験温度に達してから試験開始まで約15分間試験温度に保持する。試験片温度の許容範囲は±3℃とする。規定の温度以上の加熱は避ける。試験片の温度は、標点間内の両

端部と中央部の3箇所測定する。

・負荷方法

0.2%耐力に達するまでは、試験片標点間のひずみ速度を原則として0.3%/minとする(0.1~0.5%/minの間の一定速度なら可)。0.2%耐力を超えた後破断に至るまでは、上下つかみ部間の相対移動速度を原則として試験片平行部の7.5%/minとする(5~10%/minの間の一定速度なら可)。

2.5 設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法

引張試験で得たデータを基に、設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u を策定する場合の手順は、社団法人日本溶接協会での検討結果⁽⁷⁾等を参考にして、概略以下に示す方法を採用することとした。

・設計降伏点 S_y の定め方

- (1) 同一ヒートで得られた0.2%耐力をすべて室温での値(繰り返し数2の平均値)で除し、室温での値が1.0となるように正規化する。
- (2) 前項のデータを材料毎にまとめ、温度を変数とした3次多項式により最小二乗法によるあてはめを行う。これを曲線Aと呼ぶ。
- (3) 曲線Aに室温での S_y 値を乗じる。これをMPV (Minimum Position Value) 曲線と称する。なお、室温での S_y 値は、JIS規格^(1,2)の最小値とする。
- (4) MPV曲線に沿い、かついかなる場合も高温での値が低温でのそれを上回らないように、かつ引張試験を行った各温度における1%降伏確率値を上回らないように曲線を引き、これを曲線Bと称する。
- (5) 曲線Bを各温度における S_y 値とする。

・設計引張強さ S_u の定め方

上記の S_y の定め方を踏襲する。すなわち、「0.2%耐力」を「引張強さ」に、「 S_y 値」を「 S_u 値」に、「降伏」を「破壊」に読みかえて、上記の(1)~(5)をそのまま適用する。

第 2.1 表 試験研究用原子炉におけるアルミニウム及びアルミニウム合金の使用状況調査結果

機関	施設	機器等の名称	材 質	寸 法 (mm)	温度 (°C)	備 考
日 本 原 子 力 研 究 所	J R R 2	プレナム	A5052P-H34 (USA材)	t33.3 t12.7	63.5	S32~S35 建設
		グリッド	A5052P-H34 (USA材) A6061BE-T6 (USA材)	t44.5 t12.7 t2.38 φ72.6	63.5	
		案内管集合体	A5052P-0 A6061TD-T6	t30 t13 t4.5 × φ120	63.5	S50 製作
	J R R 4	格子板	A2P4-T6 { 現記号 A6061P-T6 }	t140	(60)	S37~S40 建設
	N S R R	炉心支持構造体 { 上部格子板 下部格子板 炉心シュラウド 支持スカート 片口ノズル 制御棒用安全板 }	A6061-T6 A6061-T6 A6061-T6 A6061-T6 A6061-T6 A6061-T6 } (USA材)	t25.4	60	S48~S50 建設
				t50.8 t9.5 t9.5 t9.5 t25.4		
		Ⅲ型大気圧カプセル	A5052BE-0	φ200	100	S53 製作

第 2.1 表 試験研究用原子炉におけるアルミニウム及びアルミニウム合金の使用状況調査結果 (続き)

機関	施設	機器等の名称	材 質	寸 法 (mm)	温度 (°C)	備 考
日 本 原 子 力 研 究 所	J M T R	ループ照射施設 (O SF-1) の炉内管 ガススクリーン	A6061BE-T6	$\phi 54$ $\phi 39$	90	S63 製作
		照射筒	A5052BE-0	77□	100	S60~H2 改造
	J R	格子板A	A6061FH-T6	t120 × $\phi 594$		
	R	格子板B	A5052P-0	t80		
		格子板支持胴	A5052P-0	t10		
	3			t30		
		プレナム	A5052P-0	t20		
				t135		
			A5052BE-0	t150		
			$\phi 190$ 他			
	制御棒案内管	A6063TD-T6 A6063BE-T6	t5.4 × 77□			
			76.2 (八角形対辺距離)			
	反射体押え	A5052P-0	t5			
			t30			

第 2.1 表 試験研究用原子炉におけるアルミニウム及びアルミニウム合金の使用状況調査結果 (続き)

機関	施設	機器等の名称	材 質	寸 法 (mm)	温度 (°C)	備 考
動力炉・核燃料開発事業団	ふげん発電所	炉心タンク 防振板	A5052P			
	D C A	炉心タンク	A5052P-0	t10		
		炉心タンク 管	A5052 -0	t136.5		
		圧力管	A5052 -0	t116.8		
		上部中央グリッド板	A5052P-0	t60		
		上部グリッド板	A5052P-0	t45		
		下部グリッド板	A5052P-0	t45		
	ダンプ管	A5052 -0				

第 2.2 表 選定した供試材料

材料名	材 質	規 格
純アルミニウム	A1100P-0	JIS H 4000
Al-Mg 合金	A5052P-0	JIS H 4000
	A5052BE-0	JIS H 4040
Al-Mg-Si 合金	A6061P-T6(厚板の場合はT651)	JIS H 4000
	A6061BE-T6	JIS H 4040
	A6063BE-T6	

第2.3表 計画段階における供試材料の形状及び寸法

材 質	形状及び寸法
A1100P-0	板, 厚さ4mm
	板, 厚さ20mm
	板, 厚さ50mm
A5052P-0	板, 厚さ4mm
	板, 厚さ20mm
	板, 厚さ50mm
A5052BE-0	押出棒, 直径20~35mm
A6061P-T6	板, 厚さ4mm
A6061P-T651	板, 厚さ30mm
A6061BE-T6	押出棒, 直径20~35mm
A6063BE-T6	押出棒, 直径20~35mm

第2.4表 供試材料の確性試験項目

1. 製造方法

溶解からの製造履歴を記録

2. 化学成分分析

3. 組織観察

マクロ組織：圧延（押出）直角方向について

t4mm ; X 10程度

t20mm ; X 2程度

t50mm ; X 1

ミクロ組織：圧延（押出）直角方向について

表面近傍、中央部（t50mm板については板厚の1/4を含める）

X 100程度

必要に応じて偏光組織を調査

4. 硬さ

H_v、H_b（t20mm、t50mm板のみ）を表面及び断面について調査する。t50mm板については断面板厚方向に硬さ分布（H_v、5mm間隔、n=3の中央値）をとる。

5. 引張性質

試験片採取位置及び方向：板については、圧延方向（L）及び圧延直角方向（LT）
押出棒については、押出方向

測定記録項目：0.01%耐力、0.2%耐力、引張強さ、破断伸び、破断絞り、真破断応力、縦弾性係数 E（t4mm板については不要）

6. シャルピ衝撃値

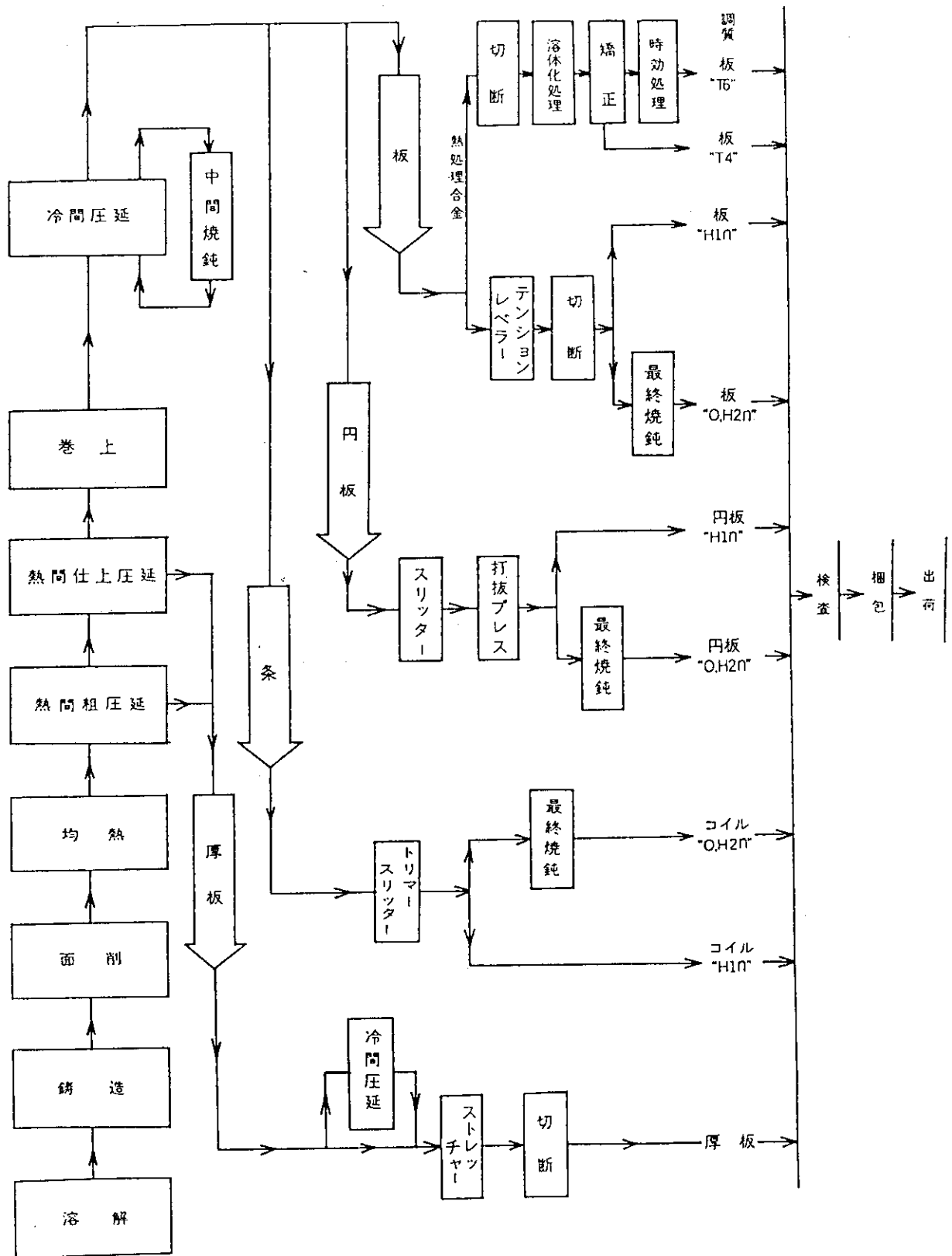
Uノッチ及びVノッチ（JIS 3号及び4号試験片⁽³⁾、L及びLT方向）

7. 表面粗さ

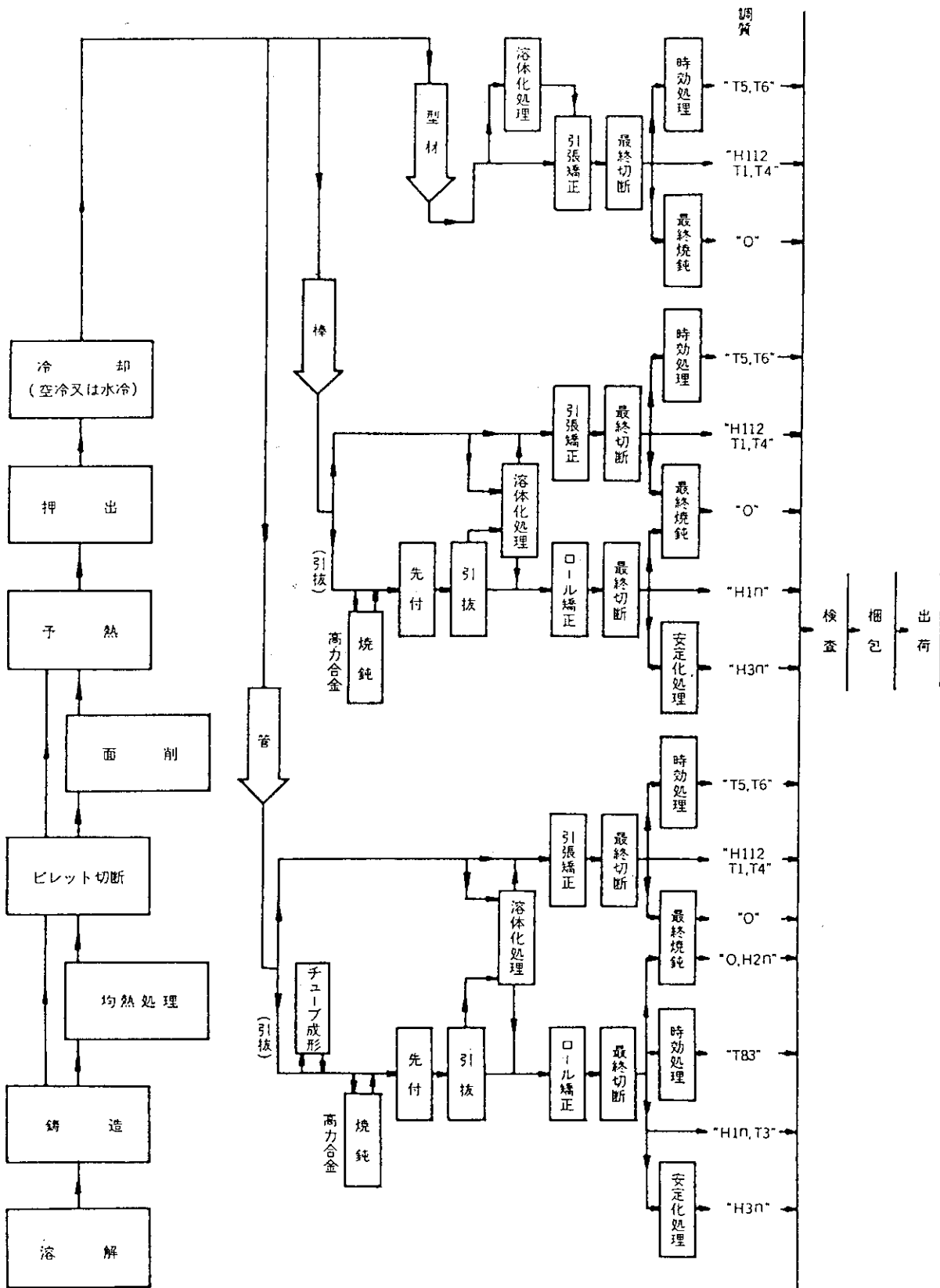
R_{max}、R_a：圧延直角方向について（t4mm板のみ）

第 2.5 表 計画した引張試験マトリクス (試験数 336)

材料	素材の形状及び寸法	ヒート数	試験温度	繰り返し数	試験数
A1100P-0	板, 厚さ 4mm	3	2 ヒートについては RT, 75°C, 100°C, 125°C, 150°C, 175°C, 200°C 1 ヒートについては RT, 100°C, 150°C, 200°C	各 2	76
	板, 厚さ 20mm	3	RT, 100°C, 150°C, 200°C		
	板, 厚さ 50mm	2			
A5052P-0	板, 厚さ 4mm	3	2 ヒートについては RT, 75°C, 100°C, 125°C, 150°C, 175°C, 200°C 1 ヒートについては RT, 100°C, 150°C, 200°C	各 2	92
	板, 厚さ 20mm	3	RT, 100°C, 150°C, 200°C		
	板, 厚さ 50mm	2			
A5052BE-0	押出棒 直径 20~35mm	2			
A6061P-T6	板, 厚さ 4mm	1	RT, 100°C, 150°C, 200°C	各 2	92
A6061P-T651	板, 厚さ 20mm	1			
A6061BE-T6	押出棒 直径 20~35mm	8	2 ヒートについては RT, 75°C, 100°C, 125°C, 150°C, 175°C, 200°C 6 ヒートについては RT, 100°C, 150°C, 200°C		
A6063BE-T6	押出棒 直径 20~35mm	8	2 ヒートについては RT, 75°C, 100°C, 125°C, 150°C, 175°C, 200°C 6 ヒートについては RT, 100°C, 150°C, 200°C	各 2	76

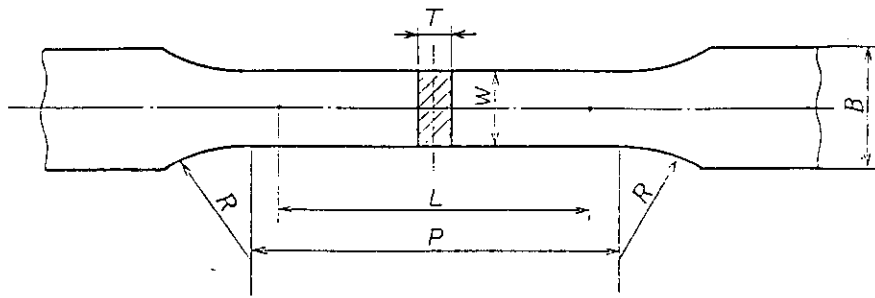


第 2.1 (1) 図 供試材料の製造工程 (板)



第 2.1 (2) 図 供試材料の製造工程 (押出棒)

(1) 13号試験片

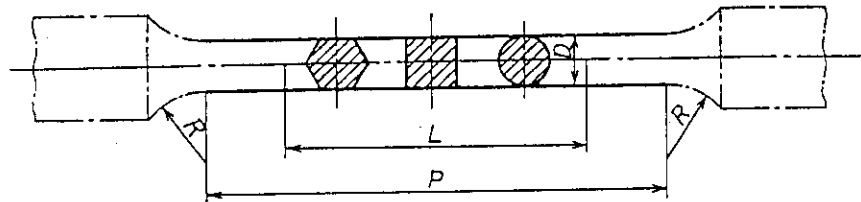


単位 mm

試験片の区別	幅 W	標点距離 L	平行部の長さ P	肩部の半径 R	厚さ T	つかみ部の幅 B
13 A	20	80	約 120	20 ~ 30	もとの厚さのまま	—
13 B	12.5	50	約 60	20 ~ 30	もとの厚さのまま	20 以上

(2) 14号試験片

(a) 14A号試験片



単位 mm

標点距離 L	平行部の長さ P	肩部の半径 R
$5.65\sqrt{A}$	$5.5D \sim 7D$	15 以上

A: 平行部の断面積

- 備考
1. 平行部が円形断面の場合は、 $L=5D$ 、角形断面の場合は $L=5.65D$ 、六角断面の場合は $L=5.26D$ としてよい。
 2. 平行部の長さは、なるべく $P=7D$ とする。
 3. この試験片のつかみ部の径は、平行部の径と同一寸法とすることができる。この場合、つかみの間隔 $P \geq 8D$ とする。

第 2.2 図 引張試験片の形状及び寸法⁽⁵⁾

3. 引張試験

3.1 供試材料

上記の引張試験計画に沿って準備された供試材料の形状及び寸法を第3.1表に、その化学組成を第3.2表にそれぞれ示す。第3.1表に示すように、供試材料の寸法は計画段階とは若干異なった部分もあるが、ここで実施した引張試験の目的から判断して不都合、不合理な点は無いといえる。また、第3.2表から分かるように、準備された供試材料の化学組成はいずれもJIS規格^(1,2)を満足している。これらの供試材料については、第2.4表⁽³⁾に示した一連の確性試験を実施し、その基本的な特性を把握しておくと共に、ここで実施した引張試験の目的から判断して不適当な材料ではないことを確認した。

3.2 ひずみ速度の影響を調べるための予備試験

上記の引張試験計画に沿って実験を行うに当たり、一部の試験実施機関では、JIS G 0567⁽⁶⁾に規定されている標準試験方法のうち、ひずみ速度に関する規定を満足できないことが判明した。すなわち、上に述べたように、JIS G 0567⁽⁶⁾では、「0.2%耐力に達するまでは、試験片標点間のひずみ速度を原則として0.3%/minとする(0.1~0.5%/minの間の一定速度なら可)」と規定されているのに対して、0.5%/minを超えるひずみ速度での試験(当該機関における試験実施可能最低ひずみ速度は0.8%/min)のみが実施可能であることが判明した。

そこで、供試材料として選定した材料のうち、Al-Mg-Si合金A6061BE-T6、A6063BE-T6の2材料について、0.2%耐力に及ぼすひずみ速度の影響を調べた。試験は、引張試験計画の最高温度である200℃で行った。その結果を第3.1図*に示す。いずれの材料も0.2%耐力は、ひずみ速度の上昇に伴い、わずかに高くなっているが、A6063BE-T6における方がその傾向が顕著である。この結果から、試験実施可能最低ひずみ速度が0.8%/minである機関の担当材料はA6061BE-T6と決めた。なお、当該材料については、JIS G 0567⁽⁶⁾に規定されている標準試験方法でも引張試験を行い、データの信頼性の向上に資することとした。

3.3 引張試験マトリクス

上記の引張試験計画では、引張試験マトリクスを第2.5表のように定めていたが、上に述べたような経緯からA6061BE-T6については、引張試験マトリクスを充実させた。また、一部の試験実施機関では予定数を上回る引張試験を実施したことから、第2.5表の計画引張試験マトリク

* 現行法令⁽⁸⁾では、MKS単位系が採用されている。また、科学技術庁で計画している「試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準」の告示化に際しても、当初はMKS単位系を採用することになる。従って、本報ではSI単位系ではなく、MKS単位系を採用した。

スとは若干異なる第3.3表が実際に実施された引張試験マトリクスである。この表に示すように、全試験数は430であった。

3.4 引張試験片

上に述べたように、引張試験片としては、原則としてJIS Z 2201⁽⁶⁾に規定されている標準試験片のうちの比例試験片を採用することとしたが、各試験実施機関毎に若干形状及び寸法が異なっていた。供試材料別に、用いた引張試験片の試験部の形状及び寸法を第3.4表に示す。

3.5 引張試験方法

上に述べたように、引張試験は、原則としてJIS G 0567⁽⁶⁾に規定されている標準試験方法に準じて行うこととしたが、各試験実施機関毎に若干ひずみ速度が異なっていた。各機関で試験を実施したひずみ速度及びひずみ速度の切り替え時点におけるひずみを、供試材料別に第3.5表に示す。この表から分かるように、A6061BE-T6の一部の試験を除いて、JIS G 0567⁽⁶⁾に規定されている標準試験方法に準じて試験は行われた。

第3.1表 試験に供した材料の形状及び寸法

材 質	材料番号	形状及び寸法
A1100P-0	1, 3	板, 厚さ 4 mm
	2	板, 厚さ 5 mm
	4, 5, 6	板, 厚さ 20mm
	7	板, 厚さ 50mm
	8	板, 厚さ 60mm
A5052P-0	9, 10, A	板, 厚さ 4 mm
	B, C, D	板, 厚さ 20mm
	E	板, 厚さ 50mm
	F	板, 厚さ 55mm
A5052BE-0	G	押出棒, 直径 35mm
	H	押出棒, 直径 20mm
A6061P-T6	I	板, 厚さ 4 mm
A6061P-T651	J	板, 厚さ 30mm
A6061BE-T6	K	押出棒, 直径 35mm
	L, M, N P, Q, R	押出棒, 直径 20mm
	O	押出棒, 直径 25mm
A6063BE-T6	S, T	押出棒, 直径 35mm
	U, V, W Y, Z	押出棒, 直径 20mm
	X	押出棒, 直径 25mm

第3.2表 供試材料の化学組成

種類・質別	材料 番号	化 学 組 成 (wt %)								
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
1100	規格値	Si + Fe 1.0 以下		0.05 ~ 0.20	0.05 以下	—	—	0.10 以下	—	99.00 以上
A1100P-O	1	0.11	0.61	0.14	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	99.11
	2	0.12	0.56	0.12	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	99.15
	3	0.14	0.56	0.12	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	99.15
	4	0.14	0.56	0.07	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	99.18
	5	0.11	0.56	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	99.20
	6	0.08	0.47	0.10	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	99.29
	7	0.14	0.58	0.07	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	99.17
	8	0.12	0.53	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	99.20
5052	規格値	0.25 以下	0.40 以下	0.10 以下	0.10 以下	2.2 ~ 2.8	0.15 ~ 0.35	0.10 以下	—	残部
A5052P-O	9	0.09	0.27	0.02	0.03	2.43	0.19	0.01	0.01	残部
	10	0.08	0.25	0.01	0.08	2.6	0.20	0.01	0.02	残部
	A	0.09	0.26	0.02	0.02	2.49	0.23	0.01	0.01	残部
	B	0.10	0.29	0.02	0.01	2.53	0.20	0.00	0.01	残部
	C	0.08	0.24	0.01	0.04	2.64	0.20	0.00	0.02	残部
	D	0.09	0.27	0.00	0.01	2.50	0.22	0.01	0.01	残部
	E	0.10	0.25	0.02	0.03	2.41	0.20	0.01	0.01	残部
	F	0.07	0.26	0.01	0.00	2.61	0.18	0.00	0.03	残部
A5052BE-O	G	0.08	0.16	0.02	0.04	2.36	0.17	0.02	0.02	残部
	H	0.09	0.25	0.08	0.01	2.45	0.21	0.00	0.02	残部

第3.2表 供試材料の化学組成（続き）

種類・質別	材料 番号	化 学 組 成 (wt %)								
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6061	規格値	0.40 ~0.8	0.7 以下	0.15 ~0.40	0.15 以下	0.8 ~1.2	0.04 ~0.35	0.25 以下	0.15 以下	残部
A6061P-T6	I	0.72	0.30	0.35	0.04	0.99	0.21	0.01	0.02	残部
A6061P-T651	J	0.52	0.35	0.19	0.10	1.02	0.20	0.13	0.03	残部
A6061BE-T6	K	0.67	0.33	0.25	0.04	0.95	0.08	0.12	0.04	残部
	L	0.59	0.16	0.19	0.03	0.99	0.08	0.11	0.02	残部
	M	0.58	0.14	0.19	0.01	0.95	0.08	0.02	0.02	残部
	N	0.7	0.21	0.22	0.05	1.0	0.06	0.02	0.01	残部
	O	0.63	0.2	0.34	0.01	1.0	0.08	0.01	0.01	残部
	P	0.63	0.14	0.19	0.05	1.08	0.05	0.01	0.01	残部
	Q	0.68	0.21	0.37	0.02	1.08	0.08	0.01	0.02	残部
	R	0.57	0.16	0.35	0.00	1.00	0.09	0.00	0.01	残部
6063	規格値	0.20 ~0.6	0.35 以下	0.10 以下	0.10 以下	0.45 ~0.9	0.10 以下	0.10 以下	0.10 以下	残部
A6063BE-T6	S	0.43	0.19	0.01	0.01	0.58	0.01	0.01	0.02	残部
	T	0.45	0.20	0.01	0.01	0.62	0.01	0.01	0.02	残部
	U	0.44	0.18	0.01	0.02	0.49	0.00	0.02	0.01	残部
	V	0.45	0.17	0.02	0.01	0.49	0.01	0.01	0.01	残部
	W	0.45	0.19	0.03	0.02	0.67	0.00	0.01	0.02	残部
	X	0.41	0.20	0.01	0.00	0.49	0.00	0.01	0.01	残部
	Y	0.40	0.17	0.01	0.01	0.51	0.00	0.00	0.01	残部
	Z	0.48	0.15	0.03	0.04	0.49	0.00	0.00	0.01	残部

第3.3表 実施した引張試験マトリクス (試験数430)

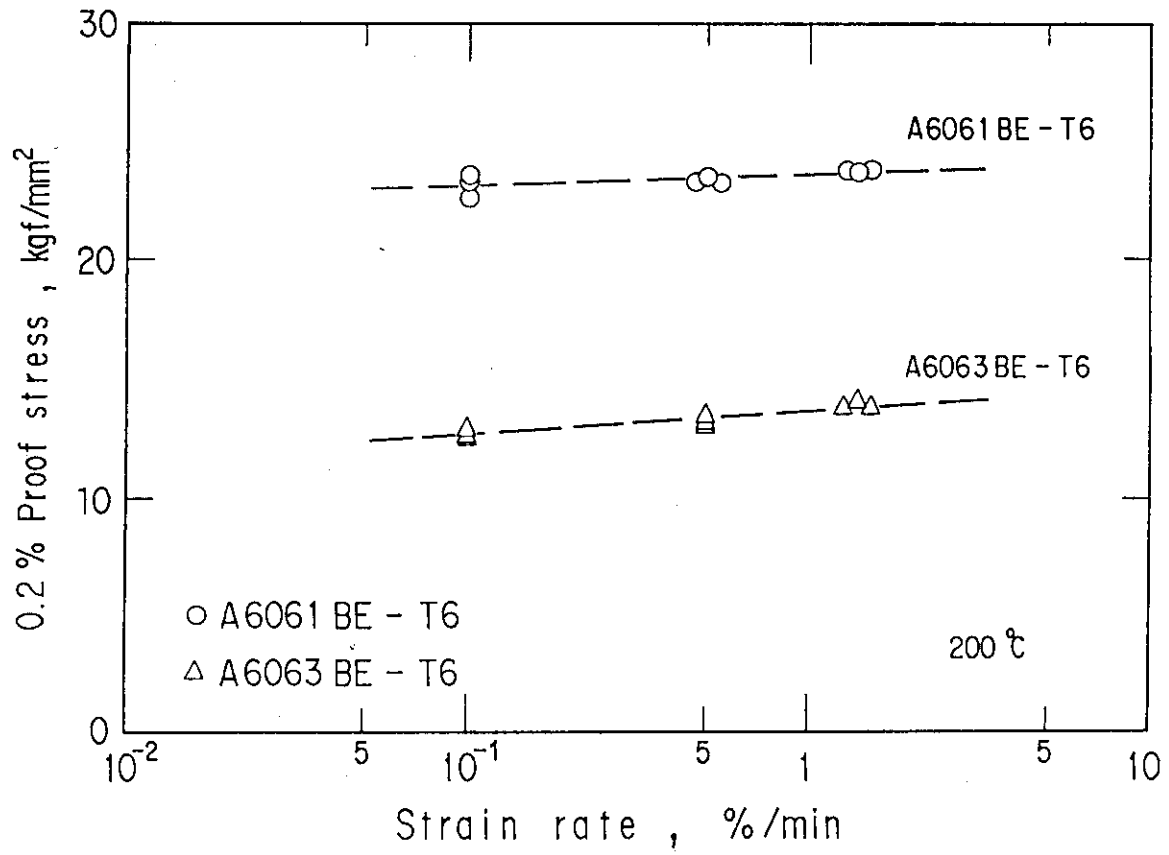
材 料	材料番号	素材の形状及び寸法	試験温度	繰り返し数	試験数	
A1100P-0	1	板, 厚さ 4mm	室温, 100°C, 150°C 75°C, 125°C, 175°C, 200°C	3 2	17	
	2	板, 厚さ 5mm	室温, 100°C, 150°C 75°C, 125°C, 175°C, 200°C	3 2	17	
	3	板, 厚さ 4mm	室温, 100°C, 150°C 200°C	3 2	11	
	4	板, 厚さ 20mm	室温, 100°C, 150°C 200°C	3 2	11	
	5		室温, 100°C 150°C, 200°C	2 3	10	
	6		室温, 100°C, 150°C, 200°C	3	12	
	7	板, 厚さ 50mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C	3	12	
	8	板, 厚さ 60mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C	3	12	
A5052P-0	9	板, 厚さ 4mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C	2	8	
	10		室温, 75°C, 100°C, 125°C, 150°C, 175°C, 200°C	2	14	
	A		室温, 100°C, 150°C, 200°C	2	14	
	B	板, 厚さ 20mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C	2	8	
	C		室温, 100°C, 150°C, 200°C	2	8	
	D		室温, 100°C, 150°C, 200°C	2	8	
	E		板, 厚さ 50mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C	2	8
F	板, 厚さ 55mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C	2	8		
A5052BE-0	G	押出棒, 直径 35mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C	2	8	
	H	押出棒, 直径 20mm		2	8	
A6061P-T6	I	板, 厚さ 4mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C	2	8	
A6061P-T651	J	板, 厚さ 30mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C	2	8	
A6061BE-T6	K	押出棒, 直径 35mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C	4	16	
	L	押出棒, 直径 20mm		4	16	
	M	押出棒, 直径 20mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C 75°C, 125°C, 175°C	4 2	22	
	N		室温, 100°C, 150°C, 200°C 75°C, 125°C, 175°C	5 2	26	
	O	押出棒, 直径 25mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C	5	20	
	P	押出棒, 直径 20mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C	5	20	
	Q		室温, 100°C, 150°C, 200°C	4	16	
	R		室温, 100°C, 150°C, 200°C	2	8	
A6063BE-T6	S	押出棒, 直径 35mm	室温, 100°C, 150°C, 200°C	2	8	
	T			2	8	
	U			2	8	
	V	押出棒, 直径 20mm		2	8	
	W			2	8	
	X	押出棒, 直径 25mm		2	8	
	Y	押出棒, 直径 20mm		室温, 75°C, 100°C, 125°C, 150°C, 175°C, 200°C	2	14
	Z			室温, 75°C, 100°C, 125°C, 150°C, 175°C, 200°C	2	14

第3.4表 試験片の形状及び寸法

材 料	材料番号	素材の形状及び寸法	試験片の形状及び寸法
A1100P-0	1, 3	板, 厚さ 4 mm	板状試験片 厚さ 素材厚さのまま 幅 12.5mm 標点間距離 50mm
	2	板, 厚さ 5 mm	
	4, 5, 6	板, 厚さ 20mm	丸棒試験片 直径 10mm 標点間距離 50mm
	7	板, 厚さ 50mm	
	8	板, 厚さ 60mm	
A5052P-0	9, 10, A	板, 厚さ 4 mm	板状試験片 厚さ 素材厚さのまま 幅 10mm 標点間距離 50mm
	B, C, D	板, 厚さ 20mm	丸棒試験片 直径 10mm 標点間距離 50mm
	E	板, 厚さ 50mm	
	F	板, 厚さ 55mm	
A5052BE-0	G	押出棒, 直径 35mm	
	H	押出棒, 直径 20mm	
A6061P-T6	I	板, 厚さ 4 mm	板状試験片 厚さ 素材厚さのまま 幅 10mm 標点間距離 50mm
A6061P-T651	J	板, 厚さ 30mm	丸棒試験片 直径 10mm 標点間距離 50mm
A6061BE-T6	K	押出棒, 直径 35mm	丸棒試験片 直径 10mm 標点間距離 35mm
	L, M, N P, Q, R	押出棒, 直径 20mm	直径 10mm 標点間距離 50mm
	O	押出棒, 直径 25mm	(材料 R の室温については 直径 14mm 標点間距離 50mm)
A6063BE-T6	S, T	押出棒, 直径 35mm	丸棒試験片 直径 10mm 標点間距離 50mm
	U, V, W Y, Z	押出棒, 直径 20mm	
	X	押出棒, 直径 25mm	

第3.5表 引張試験条件（ひずみ速度及びひずみ速度切り替え時点のひずみ）

材 料	材料番号	試験温度	ひずみ速度(%/min)		ひずみ速度切り替え 時点のひずみ(%)
			低速部	高速部	
A1100P-0	1 ~ 8	全試験温度	0.3	10	0.5
A5052P-0	9, 10, A	全試験温度	0.5	8.3	0.5
	B	室温	0.3	10	0.58
		室温, 100, 150, 200℃			0.44
	C	室温			0.78, 0.60
		100℃ 150, 200℃			0.38 0.44
	D	全試験温度			0.44
	E				0.48
F					
A5052BE-0	G	室温	0.44		
	H	100, 150, 200℃			
A6061P-T6	I	全試験温度	0.5	8.3	0.5
A6061P-T651	J	室温	0.3	10	0.68
		100, 150, 200℃			0.64
A6061BE-T6	K	全試験温度	0.8	10	0.5
			0.3	10	0.64
	L	全試験温度	0.8	10	0.5
	M	全試験温度	0.3	8.3	0.5
	N	全試験温度	0.8	10	0.5
			0.3	10	0.5
	Q	全試験温度	0.8	10	0.5
			0.3	10	0.5
		全試験温度	0.8	10	0.5
		室温	0.3	10	0.68
100℃		0.68, 0.70			
150℃ 200℃	0.70 0.68				
R	室温	4	60	0.5	
	100, 150℃	0.3	7.5	0.5	
	200℃	0.8	10	0.5	
A6063BE-T6	S ~ Z	全試験温度	0.3	7.5	0.5



第 3.1 図 A6061BE-T6 及び A6063BE-T6 の 0.2%耐力に及ぼすひずみ速度の影響

4. 引張試験結果

4.1 純アルミニウム A1100P-O

第3.3表に示す引張試験を行って得た結果を第4.1表*に示す。また、0.2%耐力、引張強さ、伸び及び絞りを温度の関数として第4.1図～第4.4図*に示す。

試験温度の上昇に伴い、0.2%耐力及び引張強さのいずれも低下しているが、引張強さの方がその低下の勾配が大きい。伸びは35%以上、絞りは70%以上の値を示しており、A1100P-Oは十分な延性を有した材料であることが分かる。伸び及び絞りの値はいずれも、試験温度の上昇に伴って、大きくなっている。試験温度の高い条件下では、伸びの値のばらつきが大きくなっているということも指摘できる。

4.2 Al-Mg合金 A5052P-O, A5052BE-O

第3.3表に示す引張試験を行って得た結果を第4.2表*及び第4.3表に示す。また、0.2%耐力、引張強さ、伸び及び絞りを温度の関数として第4.5図～第4.8図*に示す。

ここで試験を行った範囲内では、0.2%耐力は試験温度にほとんど依存せず、ほぼ一定の値を示している。引張強さも100℃までは試験温度にほとんど依存せず、ほぼ一定の値を示しているが、100℃を超えると試験温度の上昇に伴いわずかに低下している。伸び及び絞りの値はいずれも、125℃までは試験温度にほとんど依存していないが、125℃を超えると試験温度の上昇に伴って、わずかに大きくなっている。

A5052P-OとA5052BE-Oの間では、0.2%耐力、引張強さ及び伸びにはほとんど差は無いが、絞りの値はA5052BE-Oの方がやや大きいという傾向を示している。

4.3 Al-Mg-Si合金 A6061P-T6 (厚板の場合はT651), A6061BE-T6

第3.3表に示す引張試験を行って得た結果を第4.4表*及び第4.5表に示す。また、0.2%耐力、引張強さ、伸び及び絞りを温度の関数として第4.9図～第4.12図*に示す。

試験温度の上昇に伴い、0.2%耐力及び引張強さの値はいずれも緩やかに低下している。伸び及び絞りの値はいずれも、試験温度にほとんど依存していない。なお、材料Rの絞りの値が小さい。

A6061P-T6 (厚板の場合はT651)とA6061BE-T6の間では、0.2%耐力、引張強さ、伸び及

* 素材が薄板 (t4mmもしくはt5mm) の場合の絞りの値 (板状試験片で得た値) は、参考値にとどめるべきものであることから第4.1表、第4.2表及び第4.4表ではそれらの値に括弧を付した。第4.4図、第4.8図及び第4.12図では、それらの値もその他の値と区別せずに図示してある。A1100P-O及びA6061P-T6では、素材が薄板の場合の絞りの値は、その他の素材形状で得られた値と差は無いが、A5052P-Oでは、素材が薄板の場合の絞りの値は、その他の素材形状で得られた値よりもやや小さいという傾向が見られる。

び絞りのいずれにも有意な差は認められない。

4.4 Al-Mg-Si 合金 A6063BE-T6

第 3.3 表に示す引張試験を行って得た結果を第 4.6 表に示す。また、0.2 % 耐力、引張強さ、伸び及び絞りを温度の関数として第 4.13 図 ~ 第 4.16 図に示す。

試験温度の上昇に伴い、0.2 % 耐力及び引張強さの値はいずれも緩やかに低下している。伸び及び絞りの値はいずれも、試験温度にほとんど依存していない。

第4.1表 A1100P-Oの引張試験結果

材料 番号	温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	材料 番号	温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
1	室温	3.0	8.7	40	(84)	2	室温	3.0	8.8	41	(86)
		3.0	8.5	40	(84)			2.8	8.8	42	(86)
		2.9	8.7	41	(85)			2.9	8.8	42	(84)
	75	2.9	7.9	41	(78)		75	2.9	8.1	44	(79)
		2.9	8.0	39	(79)			2.9	8.1	46	(80)
	100	2.8	7.6	48	(81)		100	2.9	7.6	49	(81)
		2.7	7.4	44	(82)			2.9	7.6	51	(80)
		2.8	7.5	48	(81)			2.9	7.6	51	(80)
	125	2.7	6.8	52	(83)		125	2.6	6.9	68	(85)
		2.4	6.7	54	(82)			2.7	7.0	56	(83)
	150	2.5	5.9	64	(87)		150	2.5	6.1	71	(86)
		2.3	5.9	79	(87)			2.5	6.1	77	(85)
		2.6	5.9	78	(88)			2.7	6.1	84	(86)
	175	2.4	5.1	71	(89)		175	2.4	5.4	87	(92)
		2.2	5.0	89	(91)			2.4	5.3	82	(92)
	200	2.1	4.4	92	(95)		200	2.2	4.5	112	(95)
		2.2	4.4	107	(95)			2.1	4.6	109	(94)
	3	室温	2.8	8.6	42		(86)	4	室温	4.3	7.9
2.8			8.6	41	(85)	4.2	7.8			38	84
2.9			8.6	41	(85)	4.2	7.8			37	84
100		3.2	7.5	45	(79)	100	4.0		6.7	43	87
		2.9	7.4	49	(80)		4.0		6.7	42	88
		2.9	7.4	52	(80)		4.1		6.8	44	88
150		2.6	5.8	82	(88)	150	3.5		5.6	52	93
		2.6	5.8	65	(87)		3.6		5.5	50	93
		2.6	6.0	63	(85)		3.6		5.5	54	93
200	2.2	4.4	106	(96)	200	2.9	4.3	59	95		
	2.1	4.3	103	(94)		2.8	4.2	67	96		
5	室温	3.3	8.2	41	82	6	室温	3.5	7.6	41	87
		3.4	7.9	40	81			3.3	7.6	39	86
		3.4	7.6	39	85			3.4	7.6	39	85
	100	3.3	7.0	49	88		100	3.3	6.6	51	91
		3.3	6.8	53	87			3.2	6.7	48	89
		3.2	6.6	47	89			3.2	6.6	47	89
	150	2.9	5.5	66	92		150	2.9	5.4	62	92
		2.9	5.7	57	93			2.9	5.4	64	93
		2.9	5.5	63	93			2.8	5.2	53	93
	200	2.4	4.1	91	96		200	2.3	4.1	74	95
		2.4	4.1	80	96			2.3	4.1	63	95
		2.4	4.1	86	96			2.3	4.1	63	95
7	室温	4.3	9.2	40	76	8	室温	3.4	9.0	47	77
		4.1	9.4	43	78			3.3	9.1	46	77
		4.2	9.1	37	75			3.5	8.2	37	80
	100	4.2	7.9	46	80		100	3.3	7.8	57	82
		4.1	7.9	51	84			3.3	7.7	60	85
		4.1	7.9	42	82			3.5	7.2	44	85
	150	3.9	6.6	57	90		150	3.1	6.3	69	89
		3.9	6.5	53	89			3.0	6.2	71	90
		3.8	6.6	58	91			3.2	6.0	56	91
	200	3.4	5.1	56	93		200	2.5	4.8	80	95
		3.4	5.1	64	94			2.5	4.8	79	94
		3.4	5.1	66	94			2.5	4.8	66	95

括弧を付した値は板状試験片で得た絞りであることから参考値にとどめるべきものである。

第4.2表 A5052P-Oの引張試験結果

材料 番号	温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	材料 番号	温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	
9	室温	9.3	20.9	27	(61)	10	室温	8.6	22.0	24	(46)	
		9.3	20.8	26	(59)			8.6	21.9	25	(46)	
	100	9.0	20.7	26	(60)		75	8.8	21.8	25	(42)	
		9.0	20.6	26	(57)			8.7	21.7	26	(50)	
	150	8.9	17.6	34	(61)		100	9.0	21.8	29	(39)	
		8.8	17.2	33	(65)			8.9	21.8	25	(38)	
	200	7.9	13.7	39	(81)		125	8.9	20.1	28	(44)	
		7.8	13.5	39	(84)			8.9	20.1	28	(43)	
A	室温	9.3	21.2	28	(51)	B	室温	9.6	20.2	30	61	
		9.2	21.2	25	(47)			9.9	20.2	31	61	
	75	8.9	20.9	26	(45)		100	10.0	19.9	29	62	
		8.8	21.0	27	(40)			9.6	19.9	29	61	
	100	8.6	21.1	28	(47)		150	9.5	17.3	40	70	
		8.9	21.1	28	(46)			9.3	17.3	40	72	
	125	8.8	19.4	28	(47)		200	8.3	13.9	54	82	
		8.8	19.4	30	(46)			8.4	13.8	56	81	
	150	8.8	17.5	35	(56)		D	室温	7.5	19.6	33	69
		8.7	17.6	33	(56)				7.5	19.5	31	68
	175	8.2	15.2	35	(67)			100	8.0	19.2	28	65
		8.2	15.4	38	(72)				7.8	19.1	29	67
200	7.9	13.6	38	(79)	150	7.8		16.7	40	73		
	7.9	13.9	37	(75)		7.7		16.6	43	78		
C	室温	10.3	21.3	27	62	E		室温	8.5	19.5	29	57
		10.4	21.3	27	65				8.4	19.6	29	56
	100	10.6	20.8	25	53			100	8.6	19.1	28	53
		10.3	21.0	25	52				8.5	19.1	27	50
	150	10.1	18.5	37	72			150	8.6	17.0	38	64
		10.5	18.5	38	72				8.4	16.9	37	59
	200	10.1	15.0	47	82		200	8.4	13.8	50	80	
		10.0	15.1	48	82			8.4	13.7	48	79	
E	室温	8.5	19.5	29	57	F	室温	7.1	19.2	32	64	
		8.4	19.6	29	56			7.0	19.2	34	63	
	100	8.6	19.1	28	53		100	7.3	18.9	29	56	
		8.5	19.1	27	50			7.1	18.8	29	55	
	150	8.6	17.0	38	64		150	7.2	16.5	42	70	
		8.4	16.9	37	59			7.1	16.4	44	72	
	200	8.4	13.8	50	80		200	7.0	13.6	55	81	
		8.4	13.7	48	79			7.2	13.4	54	82	

括弧を付した値は板状試験片で得た絞りであることから参考値にとどめるべきものである。

第4.3表 A5052BE-Oの引張試験結果

材料 番号	温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	材料 番号	温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
G	室温	7.1	18.7	32	74	H	室温	8.2	19.8	29	74
		7.1	18.7	32	74			7.9	19.6	28	74
	100	7.2	18.4	31	70		100	8.4	19.8	28	71
		6.9	18.3	31	72			7.9	19.6	29	73
	150	7.1	16.1	42	79		150	7.9	17.8	36	78
		7.0	16.2	40	78			8.5	17.9	38	78
	200	6.9	13.1	53	86		200	8.3	14.7	41	84
		6.9	13.0	53	86			8.3	14.7	50	85

第4.4表 A6061P-T6 (厚板の場合はT651)の引張試験結果

材料 番号	温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	材料 番号	温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
I	室温	31.4	33.1	15	(49)	J	室温	28.0	30.3	16	50
		31.3	33.1	14	(39)			28.0	30.3	17	47
	100	29.5	30.6	14	(41)		100	26.5	28.0	17	48
		29.4	30.6	15	(50)			26.4	28.0	19	50
	150	27.1	28.4	13	(45)		150	24.4	25.7	19	57
		27.0	28.2	13	(51)			24.6	25.9	18	56
	200	23.5	25.2	10	(47)		200	21.7	23.2	17	61
		23.6	25.2	11	(57)			21.6	23.0	19	63

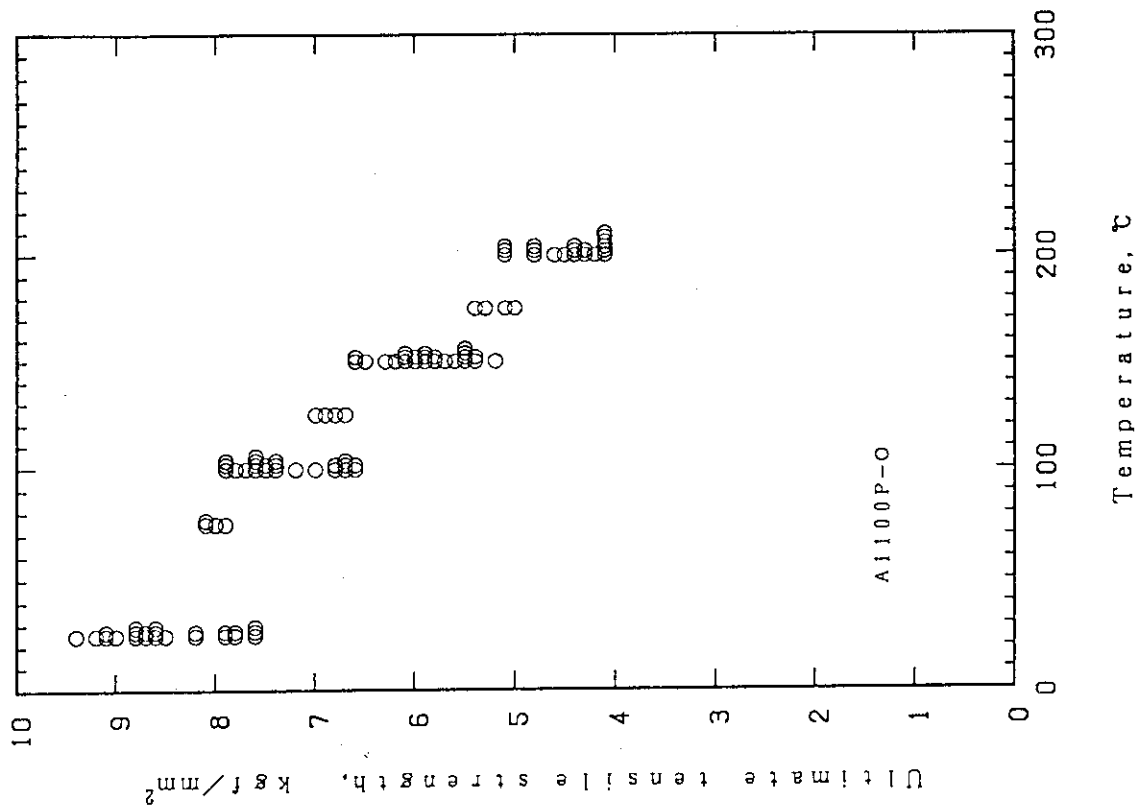
括弧を付した値は板状試験片で得た絞りであることから参考値にとどめるべきものである。

第4.5表 A6061BE-T6の引張試験結果(続き)

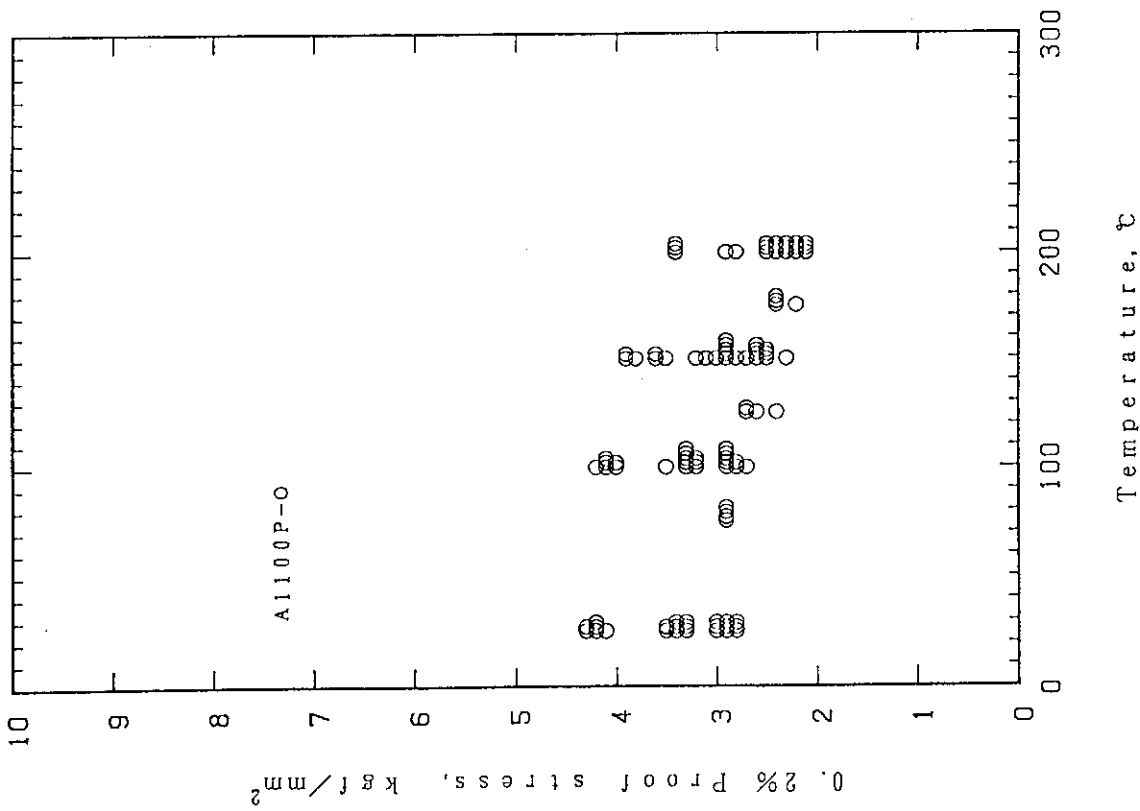
材料 番号	温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	材料 番号	温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	
O	室温	29.3	32.5	17	52	P	室温	27.4	29.3	21	67	
		28.8	32.6	18	48			27.2	29.4	21	63	
		28.4	32.0	17	51			27.5	29.7	17	66	
		28.2	32.1	16	49			27.5	29.8	17	65	
		28.5	32.3	16	48			29.2	31.0	17	66	
	100	27.1	29.6	17	56		100	25.9	27.3	18	69	
		27.1	29.7	10	50			25.8	27.0	17	68	
		28.0	31.0	18	57			26.1	27.8	16	68	
		27.1	30.1	17	55			27.8	29.0	16	66	
		27.0	30.1	17	53			27.6	28.9	16	65	
	150	25.2	26.9	17	54		150	24.6	25.5	17	69	
		25.7	26.7	17	57			25.2	26.3	16	67	
		26.3	28.7	19	58			24.7	25.9	16	70	
		25.1	27.8	20	61			26.2	27.3	17	67	
		25.4	28.0	19	58			26.0	26.9	18	68	
	200	22.7	23.9	14	60		200	23.5	24.4	14	61	
		21.6	24.1	17	60			22.9	23.8	13	59	
		21.7	22.8	16	65			21.7	22.8	16	65	
		21.8	22.9	19	69			21.8	22.9	19	69	
		23.0	24.0	17	64			23.0	24.0	17	64	
Q	室温	28.9	33.5	22	51	R	室温	31.8	34.9	17	27	
		29.0	33.2	22	51			31.1	34.9	22	51	
		29.4	33.4	18	53		100	30.3	32.4	17	51	
		29.3	33.3	17	53			30.6	32.5	20	70	
	100	26.8	30.0	18	59		150	28.8	29.8	21	74	
		27.3	30.2	19	53			27.2	29.1	15	23	
		26.8	30.2	18	57		200	25.2	26.7	13	30	
		27.0	30.3	19	56			25.3	26.5	13	44	
	150	26.1	27.9	18	65		Q	室温	28.9	33.5	22	51
		25.9	27.9	18	62				29.0	33.2	22	51
		25.3	27.9	20	63				29.4	33.4	18	53
		25.5	28.2	20	61				29.3	33.3	17	53
	200	24.1	25.1	15	64			100	26.8	30.0	18	59
		24.1	25.2	19	68				27.3	30.2	19	53
		23.6	25.5	20	63				26.8	30.2	18	57
		23.8	25.5	19	67				27.0	30.3	19	56

第4.6表 A6063BE-T6の引張試験結果

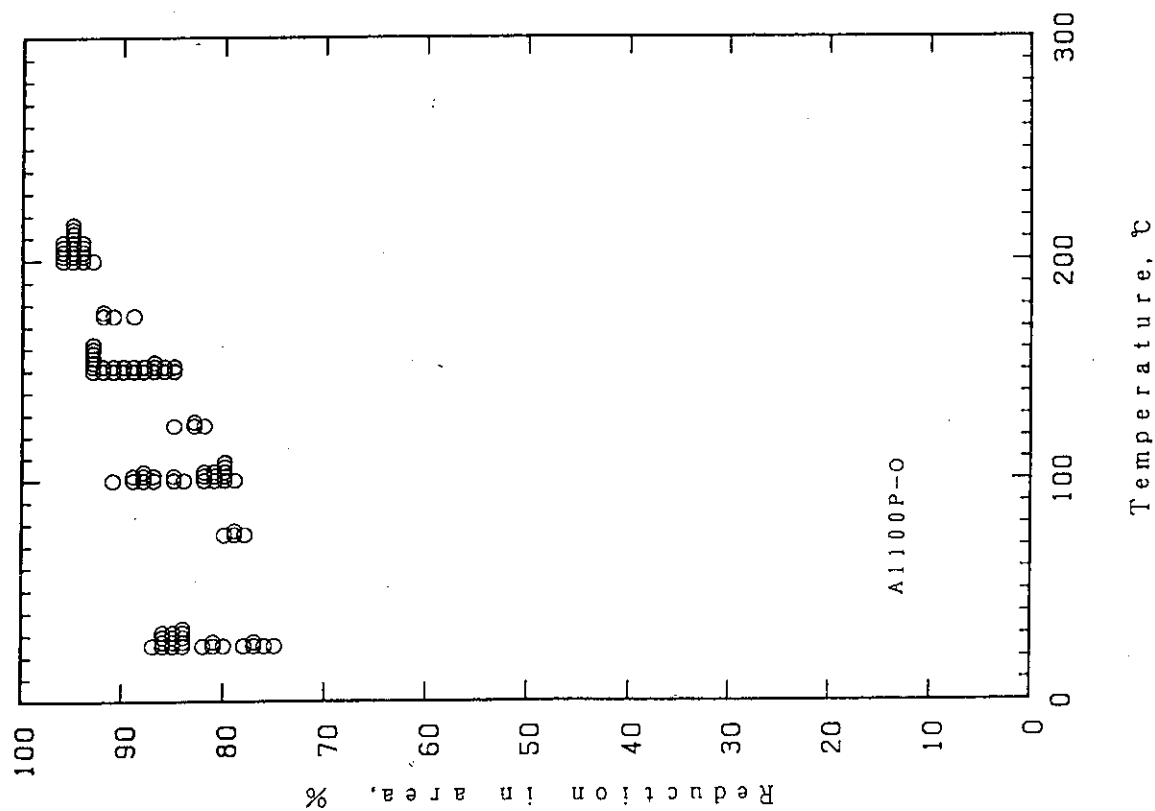
材料 番号	温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	材料 番号	温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)		
S	室温	23.4	25.3	17	65	T	室温	23.8	25.6	15	62		
		23.4	25.3	17	64			24.0	25.9	17	60		
	100	22.0	23.0	16	64		100	22.5	23.3	14	60		
		22.0	22.9	16	66			22.4	23.3	14	60		
	150	20.7	20.9	16	64		150	20.5	21.1	16	62		
		20.7	21.0	16	64			20.7	21.2	16	62		
	200	18.3	18.4	13	56		200	17.4	17.6	12	45		
		18.4	18.5	10	52			17.3	17.9	14	50		
	U	室温	18.9	21.0	19		86	V	室温	20.1	22.2	19	82
			19.8	21.9	18		84			20.3	22.4	19	81
100		18.0	19.2	18	86	100	18.6		19.7	18	84		
		18.2	19.3	18	86		19.3		20.3	18	81		
150		16.9	17.5	20	84	150	17.4		18.0	19	81		
		17.2	17.8	20	82		17.8		18.5	19	77		
200		15.2	15.6	17	71	200	14.5		15.1	17	68		
		15.1	15.5	16	72		14.6		15.1	18	69		
W		室温	23.5	26.1	18	65	X		室温	20.6	23.4	18	62
			23.4	26.0	18	65				19.7	23.1	19	63
	100	22.1	23.4	16	68	100		18.7	20.7	20	68		
		22.1	23.4	17	68			18.6	20.7	19	68		
	150	20.6	21.2	18	63	150		17.7	18.7	20	64		
		20.5	21.1	17	66			17.5	18.6	20	66		
	200	17.7	18.1	14	48	200		14.6	15.2	18	56		
		17.7	18.1	14	48			15.2	15.7	18	58		
	Y	室温	21.5	23.7	17	70		Z	室温	21.1	23.2	19	78
			21.5	23.7	18	73				21.2	23.2	18	77
75		20.8	22.2	17	73	75	20.7		22.2	19	80		
		20.8	22.2	17	73		20.4		21.8	20	81		
100		20.4	21.5	17	71	100	20.0		21.1	20	80		
		20.4	21.4	17	71		20.4		21.4	19	81		
125		19.7	20.5	18	71	125	19.4		20.1	19	82		
		19.7	20.5	18	71		19.7		20.5	19	81		
150		18.5	19.2	18	68	150	18.9		19.3	19	79		
		18.9	19.4	17	68		18.8		19.2	18	78		
175		17.7	18.1	16	63	175	17.9		18.1	20	81		
		17.4	17.8	16	63		18.0		18.2	19	80		
200		16.2	16.7	15	59	200	17.2		17.3	17	74		
		16.2	16.6	15	58		17.0		17.2	18	78		



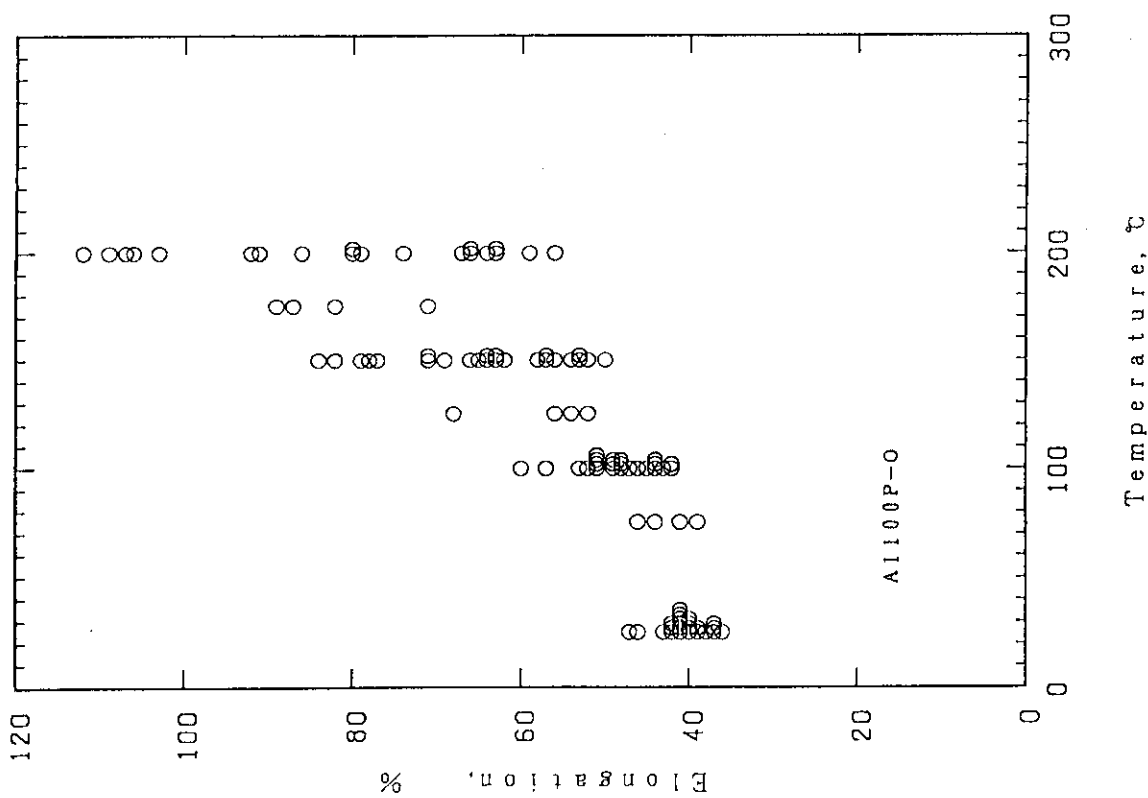
第4.2図 A1100P-Oの引張強さと試験温度の関係



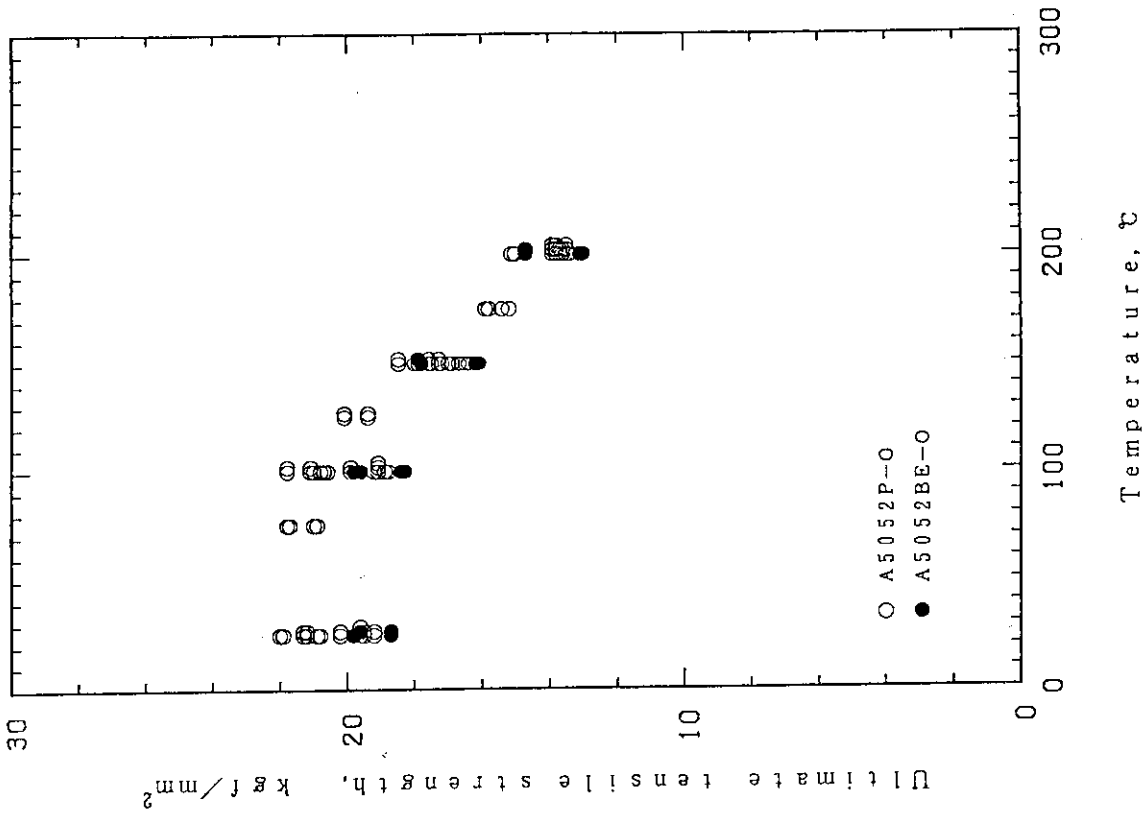
第4.1図 A1100P-Oの0.2%耐力と試験温度の関係



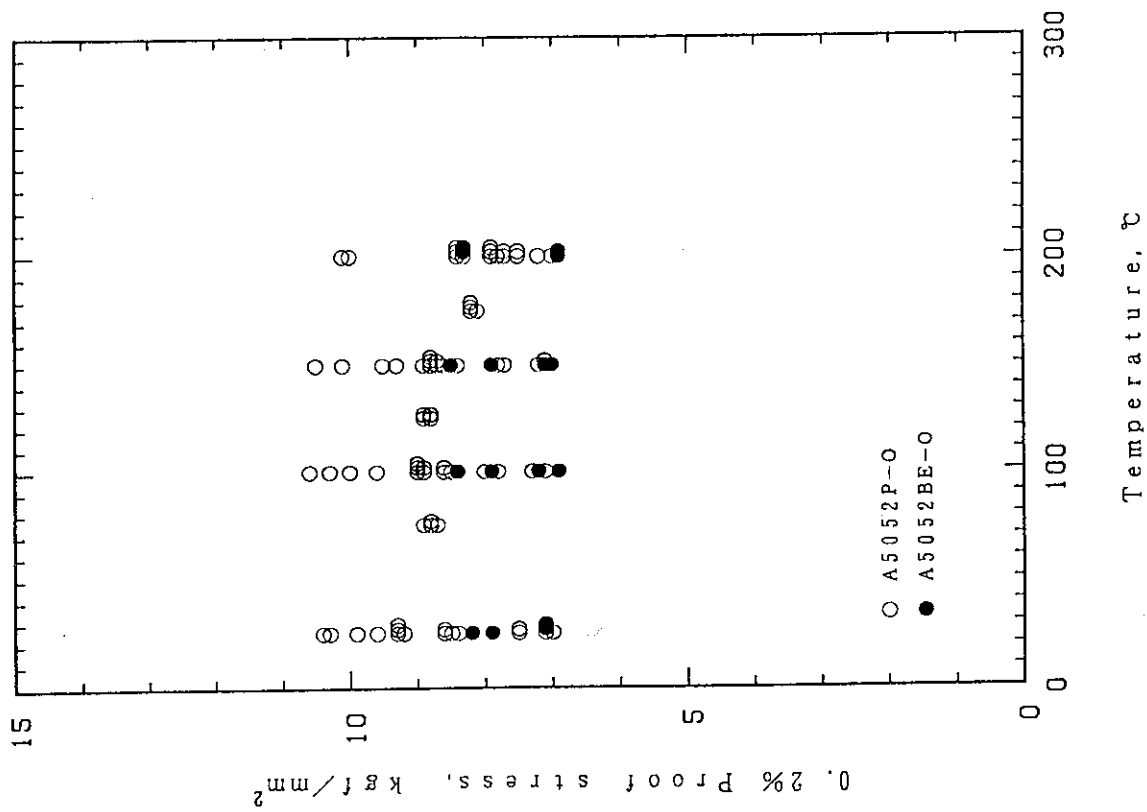
第4.4図 A1100P-Oの絞り試験温度との関係



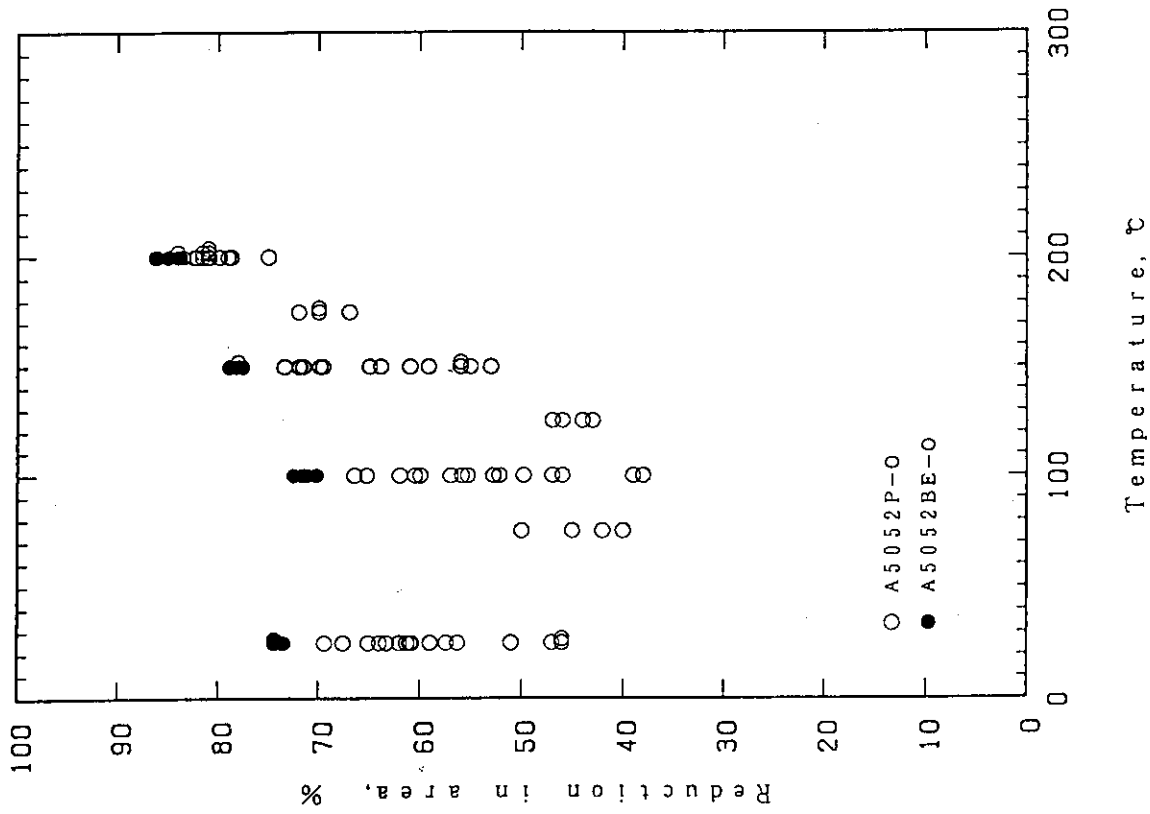
第4.3図 A1100P-Oの伸び試験温度との関係



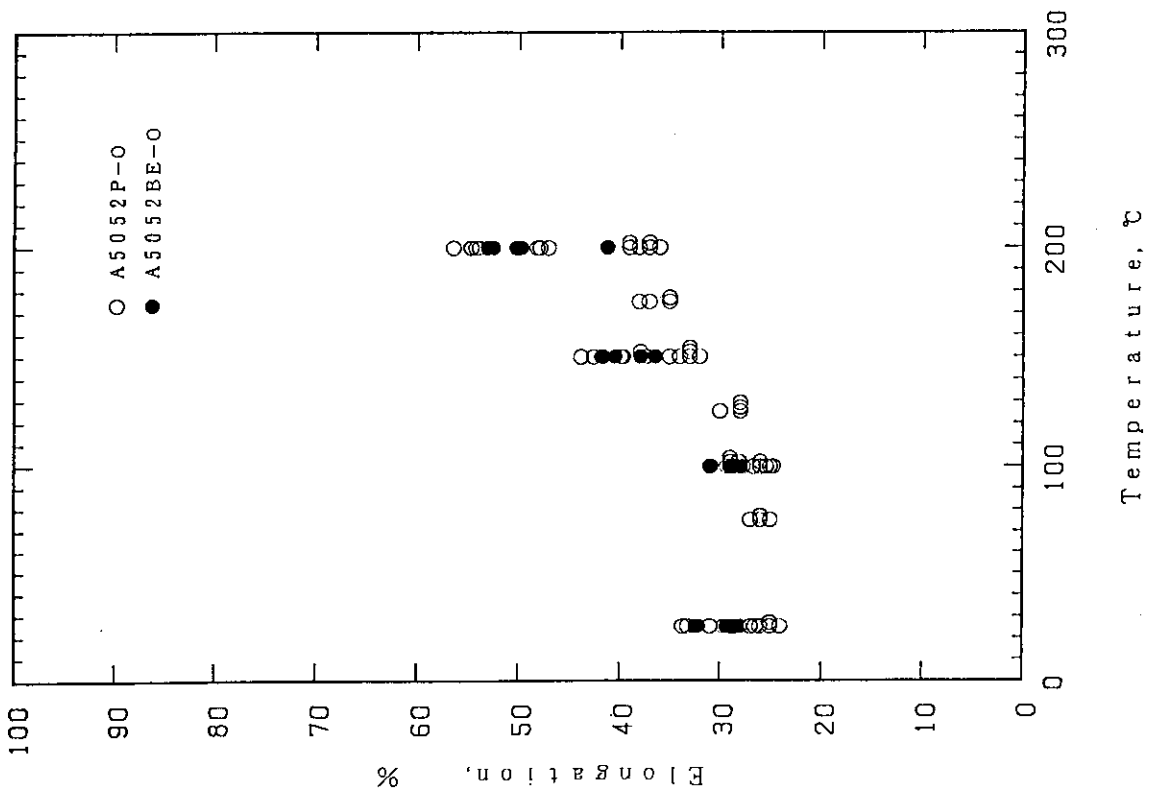
第4.6図 A5052P-O及びA5052BE-Oの引張強さと試験温度の関係



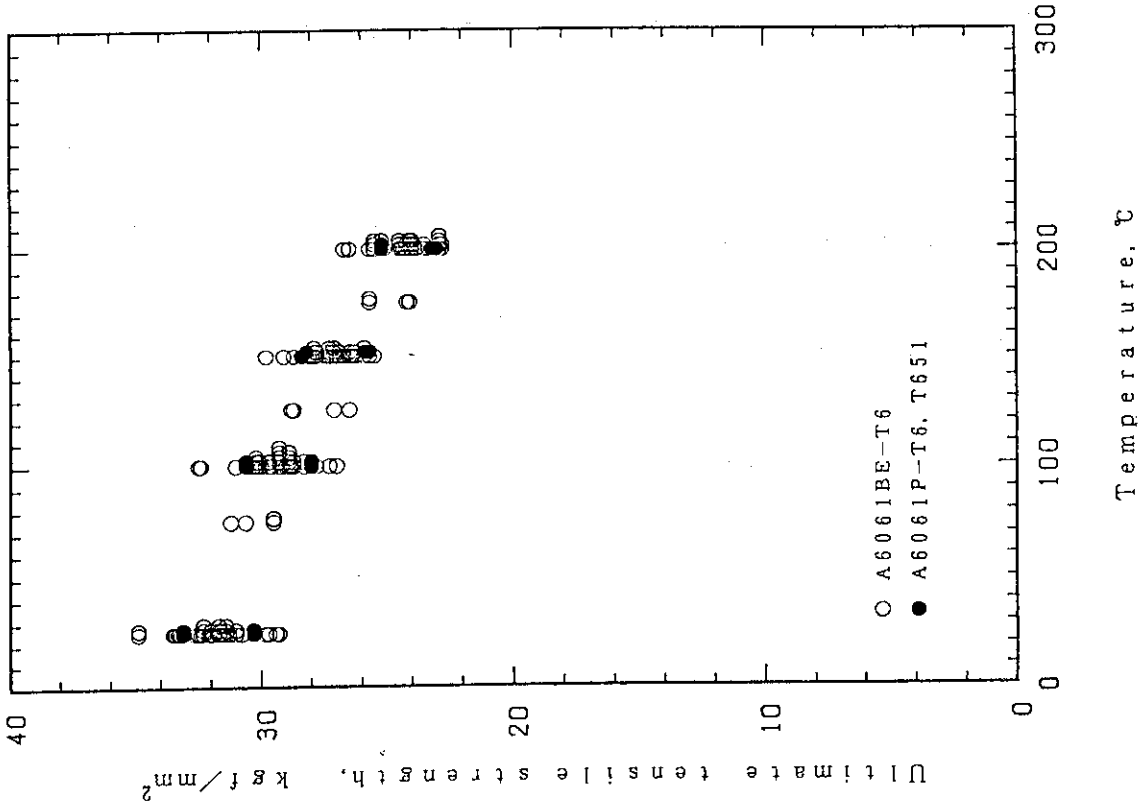
第4.5図 A5052P-O及びA5052BE-Oの0.2%耐力と試験温度の関係



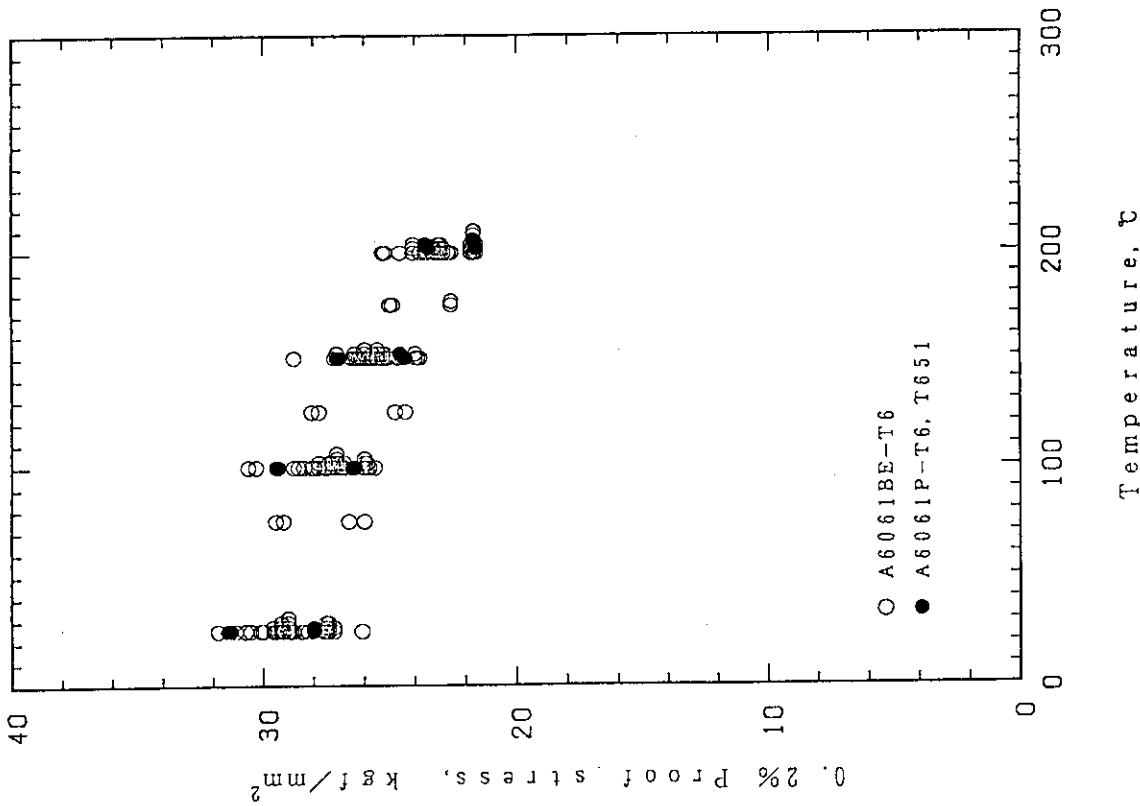
第4.8図 A5052P-O及びA5052BE-Oの絞り試験温度の関係



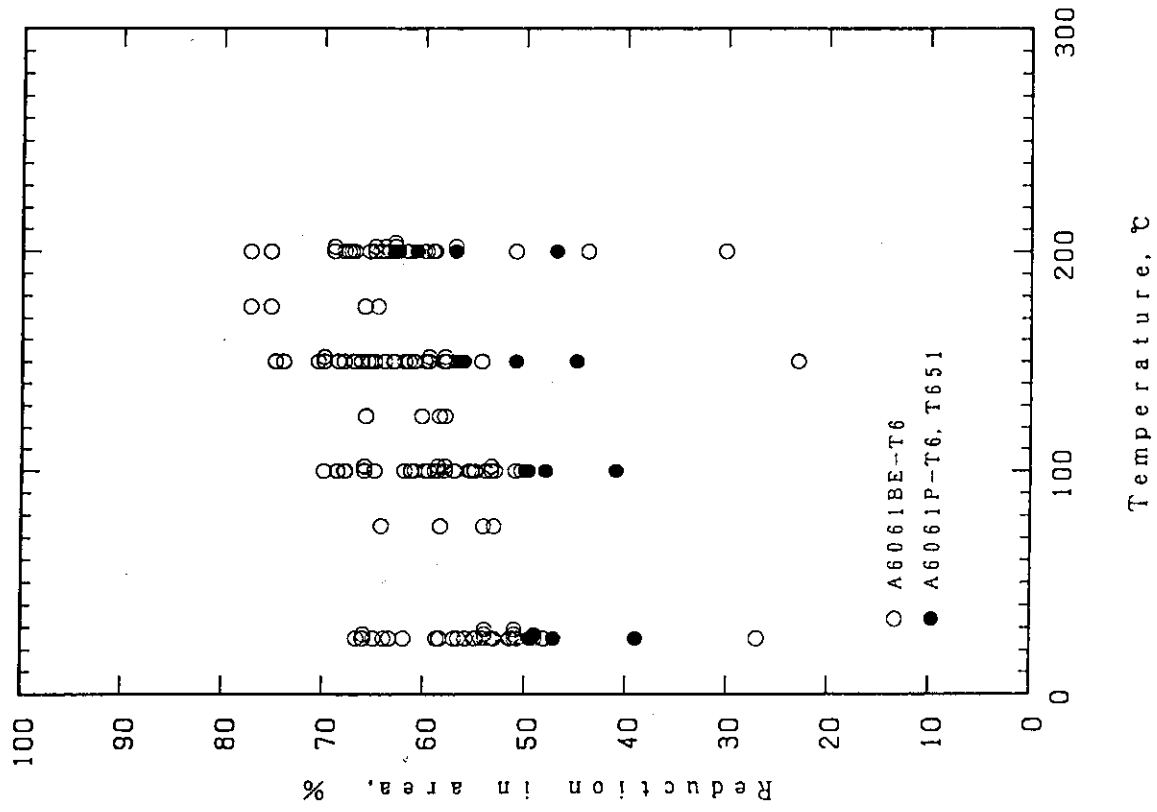
第4.7図 A5052P-O及びA5052BE-Oの伸び試験温度の関係



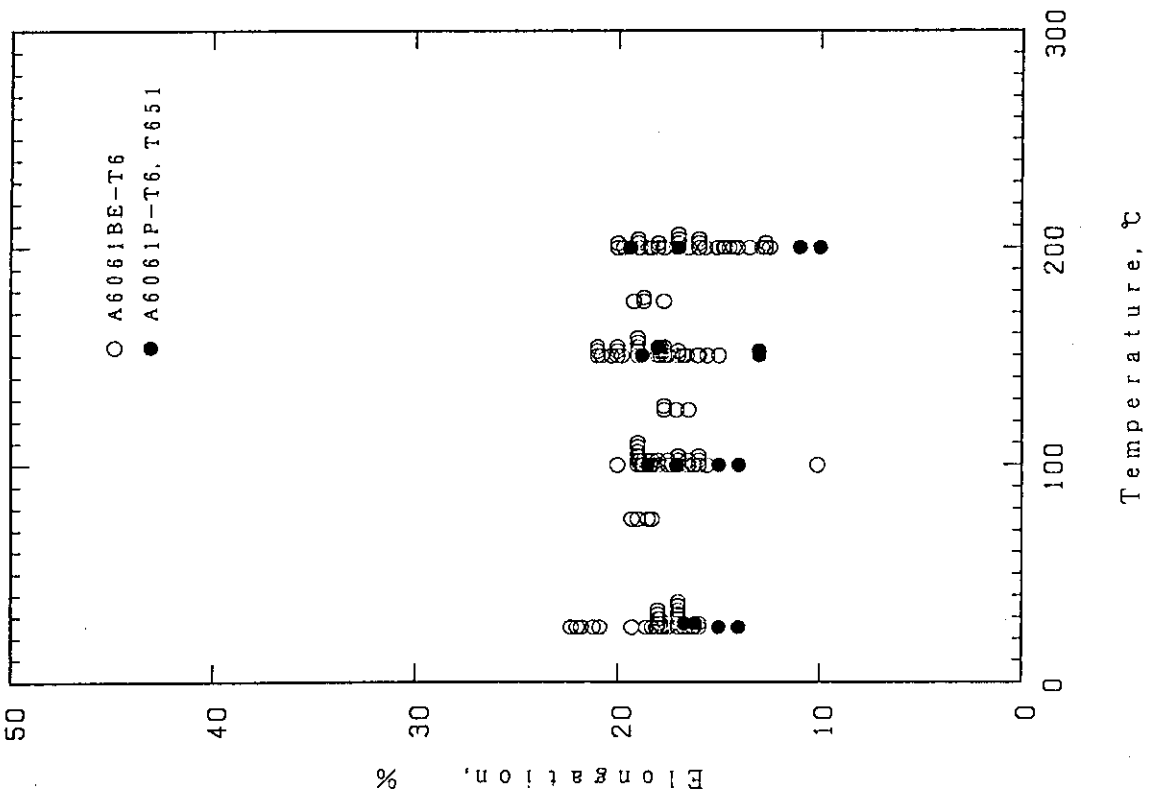
第4.10図 A6061P-T6, T651及びA6061BE-T6の引張強さと試験温度の関係



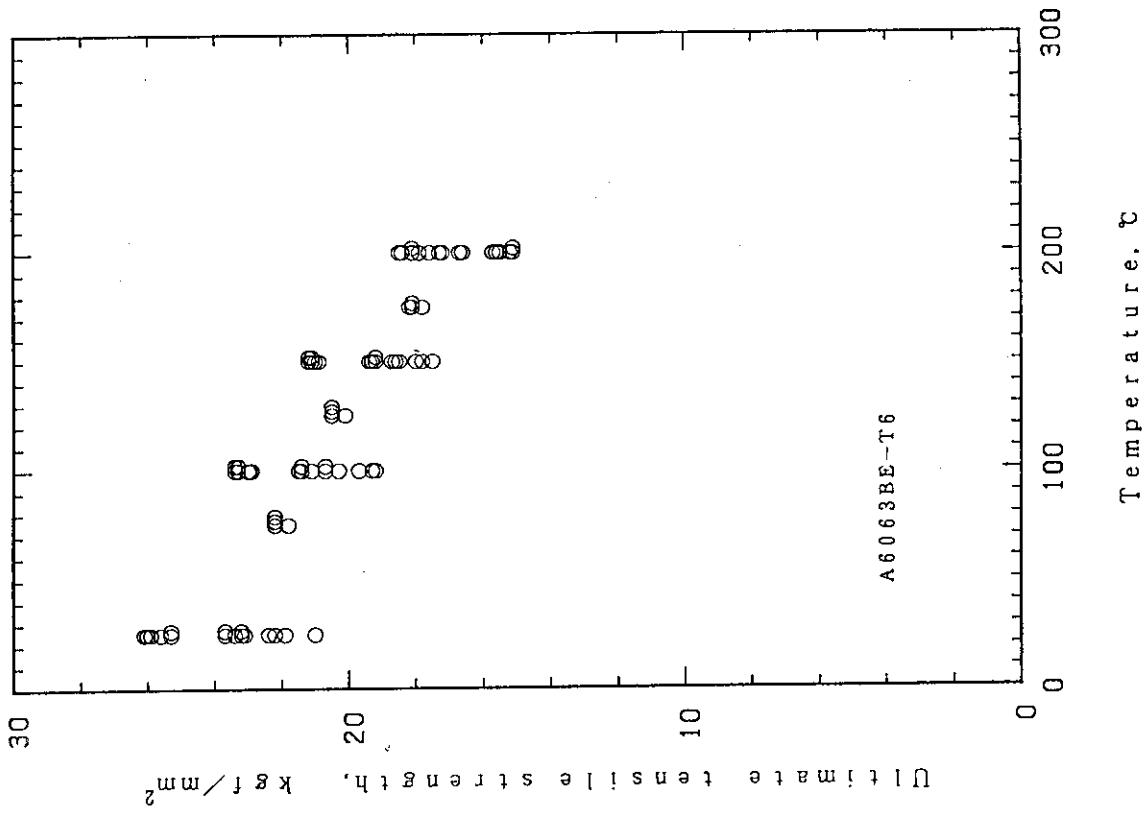
第4.9図 A6061P-T6, T651及びA6061BE-T6の0.2%耐力と試験温度の関係



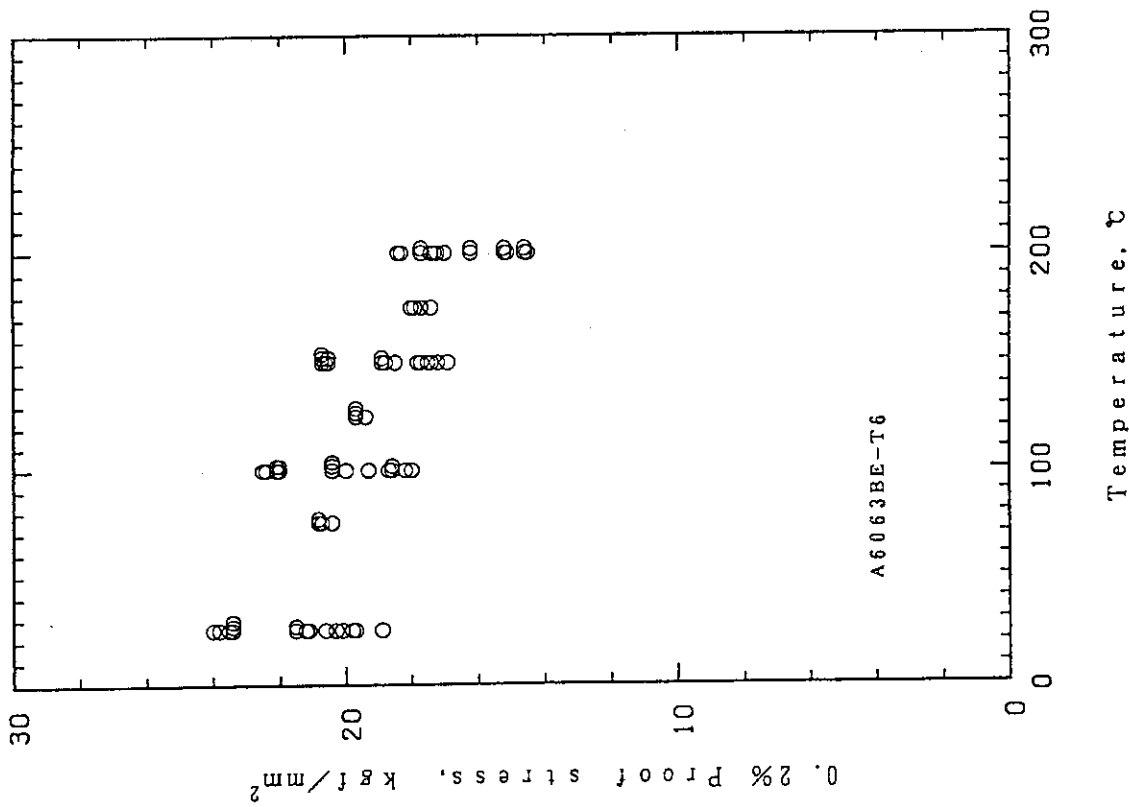
第4.12図 A6061P-T6, T651及びA6061BE-T6の絞り
と試験温度の関係



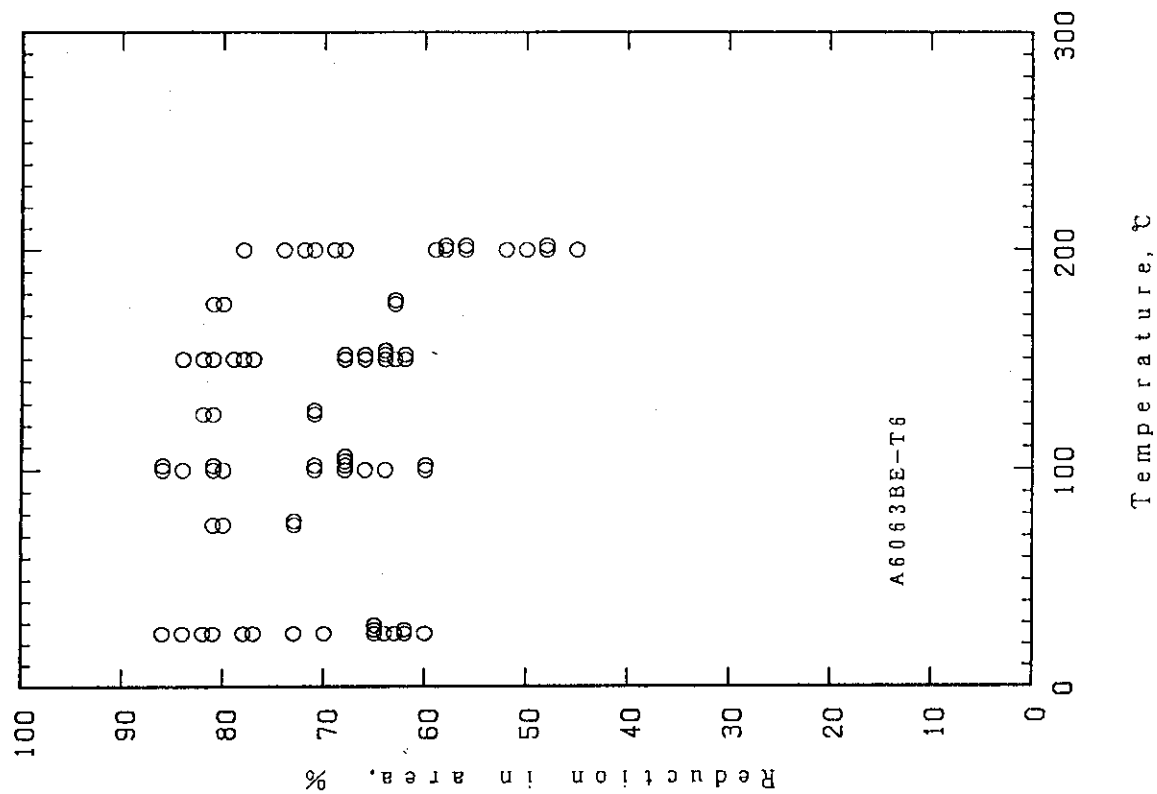
第4.11図 A6061P-T6, T651及びA6061BE-T6の伸び
と試験温度の関係



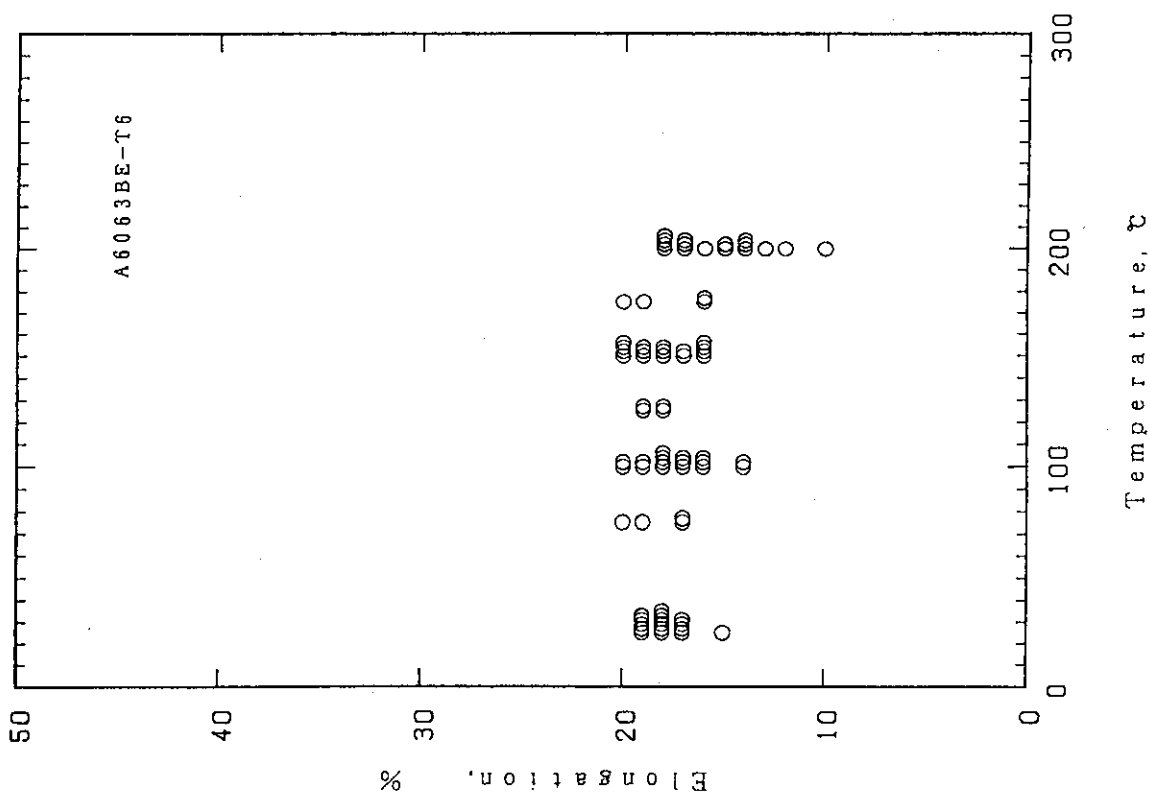
第4.14図 A6063BE-T6の引張強さと試験温度の関係



第4.13図 A6063BE-T6の0.2%耐力と試験温度の関係



第4.16図 A6063BE-T6の絞り試験温度との関係



第4.15図 A6063BE-T6の伸びと試験温度との関係

5. 引張試験結果の解析評価

5.1 純アルミニウム A1100P-O

(1) 素材厚さ及び試験片採取方向の影響

純アルミニウム A1100P-O の引張試験データの解析評価を行うに先立ち、供試材料確性試験の結果から素材厚さ及び試験片採取方向の影響について検討した。供試材料として準備した 8 ヒートの材料の室温における 0.2 % 耐力及び引張強さ（いずれも確性試験データ）を素材厚さの関数として第 5.1 図に示す。この図では、引張方向が圧延方向と一致するように試験片を採取した場合（L 方向：○印及び△印）と引張方向が圧延方向と直交するように試験片を採取した場合（LT 方向：●印及び▲印）の比較も行えるようにしてある。

この図から分かるように、素材厚さは 0.2 % 耐力及び引張強さのいずれにも顕著な影響を与えていない。また、試験片採取方向も 0.2 % 耐力及び引張強さのいずれにも顕著な影響を与えていない。

以上の検討結果を踏まえて、A1100P-O の引張試験データの解析評価を行うに当たっては、素材厚さにかかわらず全データを同等に扱うこととした。また、試験片採取方向の影響についても無視してよいと判断した。

(2) 正規確率紙へのプロット

第 4.1 表に示したデータを試験温度別に正規確率紙にプロットした結果を第 5.2 図～第 5.9 図に示す。なお、母集団の中で、大きさが i 番目のデータに対して、分布関数値 (%)

$$\frac{n+1-i}{n+1} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 n ：データ数

を割り当てた。図中には、データ点に対する最小二乗近似直線及びその直線から求めた 1 % 降伏確率値あるいは 1 % 破壊確率値も示した。第 5.1 表及び第 5.2 表に 1 % 降伏確率値及び 1 % 破壊確率値を解析評価に供した引張試験データの最小値と併せて示す。

第 5.2 図～第 5.9 図から、正規分布の成立を仮定しても大きな誤りではないと思われる*。

(3) 「設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法」の手順の適用

上記のデータに対して、引張試験計画に述べた「設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法」の手順を適用した。その結果、次式に示す MPV 曲線が得られた。

$$S_{ya} = 2.50041 \times (3.04033 \times 10^{-8} T^3 - 2.19494 \times 10^{-5} T^2 + 2.01248 \times 10^{-3} T + 0.962767) \quad (2)$$

$$S_{ua} = 7.50233 \times (6.78396 \times 10^{-8} T^3 - 3.06437 \times 10^{-5} T^2 + 1.1085 \times 10^{-3} T + 0.99007) \quad (3)$$

* データ数が少ないため、正規分布が成立しているか否かを χ^2 検定で判定することはできない。 χ^2 検定による判定には 26 以上のデータを必要とする⁽⁷⁾。

ここで、 S_{ya} : 0.2% 耐力の MPV (kgf/mm^2), S_{ua} : 引張強さの MPV (kgf/mm^2),
 T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

第(2)式及び第(3)式では、引張試験計画に述べた「設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法」の手順を適用していることから、室温（解析上は 25°C ）での S_y 値及び S_u 値を JIS 規格⁽¹⁾の最小値、すなわち $2.5 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ 及び $7.5 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ としている。第 5.1 表及び第 5.2 表に、第(2)式及び第(3)式で表された MPV を示す。第 5.1 表及び第 5.2 表から分かるように、室温での S_y 値及び S_u 値を JIS 規格⁽¹⁾の最小値とすると、MPV は 1% 降伏確率値あるいは 1% 破壊確率値を上回ってしまう。そこで、室温での S_y 値及び S_u 値をそれぞれ 1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値、すなわち $1.94 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ 及び $6.97 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ とした場合の MPV 曲線を求め、次式を得た。

$$S_{ya} = 1.93574 \times (3.04033 \times 10^{-8} T^3 - 2.19494 \times 10^{-5} T^2 + 2.01248 \times 10^{-3} T + 0.962767) \quad (4)$$

$$S_{ua} = 6.97333 \times (6.78396 \times 10^{-8} T^3 - 3.06437 \times 10^{-5} T^2 + 1.1085 \times 10^{-3} T + 0.99007) \quad (5)$$

第 5.1 表及び第 5.2 表には、第(4)式及び第(5)式で表された MPV も示してある。第 5.10 図及び第 5.11 図に、上の 2 種類の MPV 曲線を引張試験データと併せて示す。ここで得られている MPV では、高温での値が低温でのそれを上回る場合が生じている。そこで、MPV が 25°C における S_y 値あるいは S_u 値を上回っている温度領域及び 25°C 以下での S_y 値及び S_u 値は、 25°C における S_y 値及び S_u 値とするという方法で曲線 B を定め、次式を得た。

室温での S_y 値及び S_u 値を JIS 規格⁽¹⁾の最小値とした場合

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 79 \\ S_{yb} = 2.5 \\ T > 79 \\ S_{yb} = 2.50041 \times (3.04033 \times 10^{-8} T^3 - 2.19494 \times 10^{-5} T^2 + 2.01248 \times 10^{-3} T + 0.962767) \end{array} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ S_{ub} = 7.5 \\ T > 25 \\ S_{ub} = 7.50233 \times (6.78396 \times 10^{-8} T^3 - 3.06437 \times 10^{-5} T^2 + 1.1085 \times 10^{-3} T + 0.99007) \end{array} \right\} (7)$$

室温での S_y 値及び S_u 値をそれぞれ 1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値とした場合

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 79 \\ S_{yb} = 1.94 \\ T > 79 \\ S_{yb} = 1.93574 \times (3.04033 \times 10^{-8} T^3 - 2.19494 \times 10^{-5} T^2 + 2.01248 \times 10^{-3} T + 0.962767) \end{array} \right\} (8)$$

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ S_{ub} = 6.97 \\ T > 25 \\ S_{ub} = 6.97333 \times (6.78396 \times 10^{-8} T^3 - 3.06437 \times 10^{-5} T^2 + 1.1085 \times 10^{-3} T + 0.99007) \end{array} \right\} (9)$$

ここで、 S_y : 0.2 % 耐力の曲線 B の値 (kgf/mm^2), S_u : 引張強さの曲線 B の値 (kgf/mm^2), T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

第 5.1 表及び第 5.2 表には、第 (6) 式 ~ 第 (9) 式で表された曲線 B の値も示してある。第 5.12 図及び第 5.13 図に、第 (6) 式 ~ 第 (9) 式で表された曲線 B を引張試験データと併せて示す。

(4) 設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の原案

以上の解析結果から、純アルミニウム A1100P-O の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の原案を以下のように定める。

現行法令⁽⁸⁾との整合性を保つために、 $-30 \sim 40^{\circ}\text{C}$ における S_y 値及び S_u 値は JIS 規格⁽¹⁾の最小値と定める。 40°C を超える温度域での S_y 値及び S_u 値は、「室温での S_y 値及び S_u 値をそれぞれ 1 % 降伏確率値及び 1 % 破壊確率値とした場合の曲線 B」すなわち第 (8) 式及び第 (9) 式で表された曲線 B とする。ただし、第 (8) 式及び第 (9) 式の値が 1 % 降伏確率値もしくは 1 % 破壊確率値を上回る場合 (本材料では 200°C の場合) には、1 % 降伏確率値もしくは 1 % 破壊確率値をその温度における S_y 値もしくは S_u 値とする。

上のように定めた A1100P-O の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の原案を引張試験データと併せて第 5.14 図及び第 5.15 図に示す。

5.2 Al-Mg 合金 A5052P-O, A5052BE-O

(1) 素材厚さ及び試験片採取方向の影響

Al-Mg 合金 A5052P-O の引張試験結果を評価するに先立ち、供試材料の確性試験の結果から素材厚さ及び試験片採取方向の影響について検討した。供試材料として準備した 8 ヒートの材料の室温における 0.2 % 耐力及び引張強さ (いずれも確性試験データ) を素材厚さの関数として第 5.16 図に示す。この図では、引張方向が圧延方向と一致するように試験片を採取した場合 (L 方向: ○印及び △印) と引張方向が圧延方向と直交するように試験片を採取した場合 (LT 方向: ●印及び ▲印) の比較も行えるようにしてある。

この図から分かるように、素材厚さは 0.2 % 耐力には大きな影響を与えていない。引張強さは、素材が厚くなるにつれてわずかに低くなる傾向が認められるもののその差は大きくない。なお、引張方向が圧延方向と直交するように試験片を採取した場合には、引張方向が圧延方向と一致するように試験片を採取した場合よりもわずかに 0.2 % 耐力及び引張強さが低くなる傾向にあるが、その差は極めてわずかなものであるといえる。

以上の検討結果を踏まえて、A5052P-O の引張試験データの解析評価を行うに当たっては、素材厚さにかかわらず全データを同等に扱うこととした。また、試験片採取方向の影響についても無視してよいと判断した。

(2) 正視確率紙へのプロット

第 4.2 表及び第 4.3 表に示したデータを試験温度別に正規確率紙にプロットした。その際、A5052P-O のみで母集団を構成した場合 (すなわち、8 ヒートの繰り返し数 2 で各温度 16 データ) と A5052P-O 及び A5052BE-O の両方で母集団を構成した場合 (すなわち、10 ヒートの繰り返し数 2 で各温度 20 データ) の各々に対して行った。その結果を第 5.17 図 ~ 第 5.32 図

に示す。なお、母集団の中で、大きさが i 番目のデータに対して、分布関数値 (%)

$$\frac{n+1-i}{n+1} \times 100 \quad (1)$$

を割り当てた。図中には、データ点に対する最小二乗近似直線及びその直線から求めた 1% 降伏確率値あるいは 1% 破壊確率値も示した。第 5.3 表～第 5.6 表に 1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値を解析評価に供した引張試験データの最小値と併せて示す。

第 5.17 図～第 5.32 図から、正規分布の成立を仮定しても大きな誤りではないと思われる*。

(3) 「設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法」の手順の適用

上記のデータに対して、引張試験計画に述べた「設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法」の手順を適用した。その際、A5052P-O のみで母集団を構成した場合と A5052P-O 及び A5052BE-O の両方で母集団を構成した場合の各々に対して行った。その結果、次式に示す MPV 曲線が得られた。

A5052P-O のみで母集団を構成した場合

$$S_{ya} = 6.5062 \times (-2.29233 \times 10^{-8} T^3 + 4.00495 \times 10^{-6} T^2 - 2.56308 \times 10^{-4} T + 1.00331) \quad (10)$$

$$S_{ua} = 18.0138 \times (7.16915 \times 10^{-8} T^3 - 3.89059 \times 10^{-5} T^2 + 3.66955 \times 10^{-3} T + 0.930693) \quad (11)$$

A5052P-O 及び A5052BE-O の両方で母集団を構成した場合

A5052P-O に対して

$$S_{ya} = 6.50504 \times (-1.72457 \times 10^{-8} T^3 + 2.85346 \times 10^{-6} T^2 - 1.67017 \times 10^{-4} T + 1.00189) \quad (12)$$

A5052BE-O に対して

$$S_{ya} = 7.00542 \times (-1.72457 \times 10^{-8} T^3 + 2.85346 \times 10^{-6} T^2 - 1.67017 \times 10^{-4} T + 1.00189) \quad (13)$$

A5052P-O 及び A5052BE-O の両方に対して

$$S_{ua} = 18.0113 \times (6.49808 \times 10^{-8} T^3 - 3.6524 \times 10^{-5} T^2 + 3.48846 \times 10^{-3} T + 0.933974) \quad (14)$$

第 (10) 式～第 (14) 式では、引張試験計画に述べた「設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法」の手順を適用していることから、室温 (解析上は 25°C) での S_y 値及び S_u 値を JIS 規格^(1,2) の最小値、すなわち 6.5 kgf/mm²、7.0 kgf/mm² 及び 18.0 kgf/mm² としている。第 5.3 表～第 5.6 表に、第 (10) 式～第 (14) 式で表された MPV を示す。第 5.3 表～第 5.6 表から分かるように、室温での S_y 値及び S_u 値を JIS 規格^(1,2) の最小値とすると、MPV は 1% 降伏確率値あるいは 1% 破壊確率値を上回ってしまう。そこで、室温での S_y 値及び S_u 値をそれぞれ 1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値、すなわち 5.86 kgf/mm² と 17.83 kgf/mm²、5.61 kgf/mm² と 17.47 kgf/mm² とした場合の MPV 曲線を求め、次式を得た。

* データ数が少ないため、正規分布が成立しているか否かを χ^2 検定で判定することはできない。 χ^2 検定による判定には 26 以上のデータを必要とする⁽⁷⁾。

A5052P-O のみで母集団を構成した場合

$$S_{ya} = 5.86389 \times (-2.29233 \times 10^{-8} T^3 + 4.00495 \times 10^{-6} T^2 - 2.56308 \times 10^{-4} T + 1.00331) \quad (15)$$

$$S_{ua} = 17.8462 \times (7.16915 \times 10^{-8} T^3 - 3.89059 \times 10^{-5} T^2 + 3.66955 \times 10^{-3} T + 0.930693) \quad (16)$$

A5052P-O 及び A5052BE-O の両方で母集団を構成した場合

$$S_{ya} = 5.61802 \times (-1.72457 \times 10^{-8} T^3 + 2.85346 \times 10^{-6} T^2 - 1.67017 \times 10^{-4} T + 1.00189) \quad (17)$$

$$S_{ua} = 17.4812 \times (6.49808 \times 10^{-8} T^3 - 3.6524 \times 10^{-5} T^2 + 3.48846 \times 10^{-3} T + 0.933974) \quad (18)$$

第 5.3 表～第 5.6 表には、第 (15) 式～第 (18) 式で表された MPV も示してある。第 5.33 図～第 5.36 図に、上に示した全ての MPV 曲線を示す。ここで得られている MPV では、高温での値が低温でのそれを上回る場合が生じている。そこで、MPV が 25℃ における Sy 値あるいは Su 値を上回っている温度領域及び 25℃ 以下での Sy 値及び Su 値は、25℃ における Sy 値及び Su 値とするという方法で曲線 B を定め、次式を得た。

A5052P-O のみで母集団を構成し、室温での Sy 値及び Su 値を JIS 規格⁽¹⁾の最小値とした場合

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ \text{Syb} = 6.5 \\ T > 25 \\ \text{Syb} = 6.5062 \times (-2.29233 \times 10^{-8} T^3 + 4.00495 \times 10^{-6} T^2 - 2.56308 \times 10^{-4} T + 1.00331) \end{array} \right\} (19)$$

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 89 \\ \text{Sub} = 18.0 \\ T > 89 \\ \text{Sub} = 18.0138 \times (7.16915 \times 10^{-8} T^3 - 3.89059 \times 10^{-5} T^2 + 3.66955 \times 10^{-3} T + 0.930693) \end{array} \right\} (20)$$

A5052P-O のみで母集団を構成し、室温での Sy 値及び Su 値をそれぞれ 1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値とした場合

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ \text{Syb} = 5.86 \\ T > 25 \\ \text{Syb} = 5.86389 \times (-2.29233 \times 10^{-8} T^3 + 4.00495 \times 10^{-6} T^2 - 2.56308 \times 10^{-4} T + 1.00331) \end{array} \right\} (21)$$

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 89 \\ \text{Sub} = 17.83 \\ T > 89 \\ \text{Sub} = 17.8462 \times (7.16915 \times 10^{-8} T^3 - 3.89059 \times 10^{-5} T^2 + 3.66955 \times 10^{-3} T + 0.930693) \end{array} \right\} (22)$$

A5052P-O 及び A5052BE-O の両方で母集団を構成し、室温での Sy 値及び Su 値を JIS 規格^(1,2)の最小値とした場合

A5052P-O に対して

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ \text{Syb} = 6.5 \\ T > 25 \\ \text{Syb} = 6.50504 \times (-1.72457 \times 10^{-8} T^3 + 2.85346 \times 10^{-6} T^2 - 1.67017 \times 10^{-4} T + 1.00189) \end{array} \right\} (23)$$

A5052BE-O に対して

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ \text{Syb} = 7.0 \\ T > 25 \\ \text{Syb} = 7.00542 \times (-1.72457 \times 10^{-8} T^3 + 2.85346 \times 10^{-6} T^2 - 1.67017 \times 10^{-4} T + 1.00189) \end{array} \right\} (24)$$

A5052P-O 及び A5052BE-O の両方に対して

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 90 \\ \text{Sub} = 18.0 \\ T > 90 \\ \text{Sub} = 18.0113 \times (6.49808 \times 10^{-8} T^3 - 3.6524 \times 10^{-5} T^2 + 3.48846 \times 10^{-3} T + 0.933974) \end{array} \right\} (25)$$

A5052P-O 及び A5052BE-O の両方で母集団を構成し、室温での Sy 値及び Su 値をそれぞれ 1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値とした場合

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ \text{Syb} = 5.61 \\ T > 25 \\ \text{Syb} = 5.61802 \times (-1.72457 \times 10^{-8} T^3 + 2.85346 \times 10^{-6} T^2 - 1.67017 \times 10^{-4} T + 1.00189) \end{array} \right\} (26)$$

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 90 \\ \text{Sub} = 17.47 \\ T > 90 \\ \text{Sub} = 17.4812 \times (6.49808 \times 10^{-8} T^3 - 3.6524 \times 10^{-5} T^2 + 3.48846 \times 10^{-3} T + 0.933974) \end{array} \right\} (27)$$

第 5.3 表～第 5.6 表には、第 (19) 式～第 (27) 式で表された曲線 B の値も示してある。第 5.37 図～第 5.40 図に、第 (19) 式～第 (27) 式で表された曲線 B を引張試験データと併せて示す。

(4) 設計降伏点 Sy 及び設計引張強さ Su の原案

第 5.3 表～第 5.6 表から分かるように、A5052P-O のみで母集団を構成した場合と A5052P-O 及び A5052BE-O の両方で母集団を構成した場合を比較すると、A5052P-O 及び A5052BE-O の両方で母集団を構成した場合の方が 1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値が小さい。そこで、A5052P-O 及び A5052BE-O の両方で母集団を構成した場合の解析結果を採用することと

し、これらの材料の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の原案を以下のように定める。

現行法令⁽⁸⁾との整合性を保つために、 $-30 \sim 40^\circ\text{C}$ における最小降伏点 S_y 及び最小引張強さ S_u は JIS 規格の最小値⁽¹⁾と定める。 40°C を超える温度域での S_y 値及び S_u 値は、「室温での S_y 値及び S_u 値をそれぞれ 1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値とした場合の曲線 B」すなわち第(26)式及び第(27)式で表された曲線 B とする。ただし、第(27)式の値が 1% 破壊確率値を上回る場合（本材料では 100°C の場合）には、1% 破壊確率値をその温度における S_u 値とする。

上のように定めた A5052P-O 及び A5052BE-O の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の原案を引張試験データと併せて第 5.41 図及び第 5.42 図に示す。

5.3 Al-Mg-Si 合金 A6061P-T6（厚板の場合は T651）、A6061BE-T6

(1) 素材厚さ及び試験片採取方向の影響

Al-Mg-Si 合金 A6061P-T6 の引張試験結果を評価するに先立ち、供試材料の確性試験の結果から素材厚さ及び試験片採取方向の影響について検討した。供試材料として準備した 2 ヒートの材料の室温における 0.2% 耐力及び引張強さ（いずれも確性試験データ）を素材厚さの関数として第 5.43 図に示す。この図では、引張方向が圧延方向と一致するように試験片を採取した場合（L 方向：○印及び△印）と引張方向が圧延方向と直交するように試験片を採取した場合（LT 方向：●印及び▲印）の比較も行えるようにしてある。

この図から分かるように、0.2% 耐力及び引張強さは、素材が厚くなるにつれてわずかに低くなる傾向が認められるもののその差は大きくない。なお、試験片採取方向は 0.2% 耐力及び引張強さのいずれにも顕著な影響を与えていない。

以上の検討結果を踏まえて、A6061P-T6 の引張試験データの解析評価を行うに当たっては、素材厚さにかかわらず全データを同等に扱うこととした。また、試験片採取方向の影響についても無視してよいと判断した。

(2) ひずみ速度の影響

Al-Mg-Si 合金 A6061BE-T6 の引張試験においては、既に述べたように、JIS G 0567⁽⁶⁾に規定されている標準試験方法のうち、ひずみ速度に関する規定を満足していないデータも得られていることから、この材料の 0.2% 耐力に及ぼすひずみ速度の影響を 200°C で検討した。その結果を第 5.44 図に示す。

この図から、ここでやっているひずみ速度の範囲内では、0.2% 耐力にほとんど差が無いといえる。従って、A6061BE-T6 の引張試験データの解析評価を行うに当たっては、ひずみ速度の差を考慮せず、全データを同等に扱うこととした。

(3) 正規確率紙へのプロット

第 4.4 表及び第 4.5 表に示したデータを試験温度別に正規確率紙にプロットした。その際、A6061BE-T6 のみで母集団を構成した場合（すなわち、8 ヒートのデータ）と A6061BE-T6 及び A6061P-T6（厚板の場合は T651）の両方で母集団を構成した場合（すなわち、10 ヒートのデータ）の各々に対して行った。その結果を第 5.45 図～第 5.60 図に示す。なお、母集

団の中で、大きさが i 番目のデータに対して、分布関数値 (%)

$$\frac{n+1-i}{n+1} \times 100 \quad (1)$$

を割り当てた。図中には、データ点に対する最小二乗近似直線及びその直線から求めた 1% 降伏確率値あるいは 1% 破壊確率値も示した。第 5.7 表 ~ 第 5.10 表に 1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値を解析評価に供した引張試験データの最小値と併せて示す。

第 5.45 図 ~ 第 5.60 図から、正規分布の成立を仮定しても大きな誤りではないと思われる*。

(4) 「設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法」の手順の適用

上記のデータに対して、引張試験計画に述べた「設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法」の手順を適用した。その際、A6061BE-T6 のみで母集団を構成した場合と A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の両方で母集団を構成した場合の各々に対して行った。その結果、次式に示す MPV 曲線が得られた。

A6061BE-T6 のみで母集団を構成した場合

$$S_{ya} = 25.0014 \times (-1.01608 \times 10^{-8} T^3 - 1.24028 \times 10^{-6} T^2 - 4.1848 \times 10^{-4} T + 1.01134) \quad (28)$$

$$S_{ua} = 26.9995 \times (4.70286 \times 10^{-10} T^3 - 3.75805 \times 10^{-6} T^2 - 5.47709 \times 10^{-4} T + 1.01605) \quad (29)$$

A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の両方で母集団を構成した場合

A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の両方に対して

$$S_{ya} = 25.0012 \times (-1.05169 \times 10^{-8} T^3 - 1.26524 \times 10^{-6} T^2 - 4.17504 \times 10^{-4} T + 1.01135) \quad (30)$$

A6061BE-T6 に対して

$$S_{ua} = 26.9997 \times (1.39266 \times 10^{-10} T^3 - 3.64296 \times 10^{-6} T^2 - 5.57309 \times 10^{-4} T + 1.01622) \quad (31)$$

A6061P-T6 (厚板の場合は T651) に対して

$$S_{ua} = 29.9997 \times (1.39266 \times 10^{-10} T^3 - 3.64296 \times 10^{-6} T^2 - 5.57309 \times 10^{-4} T + 1.01622) \quad (32)$$

第 (28) 式 ~ 第 (32) 式では、引張試験計画に述べた「設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法」の手順を適用していることから、室温 (解析上は 25 °C) での S_y 値及び S_u 値を JIS 規格^(1,2) の最小値、すなわち 25.0 kgf/mm²、27.0 kgf/mm² 及び 30.0 kgf/mm² としている。第 5.7 表 ~ 第 5.10 表に、第 (28) 式 ~ 第 (32) 式で表された MPV を示す。第 5.7 表 ~ 第 5.10 表から分かるように、A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の両方で母集団を構成した場合、室温での S_u 値を A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の JIS 規格⁽¹⁾ の最小値とすると、MPV は 1% 破壊確率値を上回ってしまう。そこで、室温での S_u 値を 1% 破壊確率値、すなわち 28.50 kgf/mm² とした場合の MPV 曲線を求め、次式を得た。

* A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の両方で母集団を構成した場合の χ^2 検定を行った。その結果を付録に示す。

$$S_{ua} = 28.5009 \times (1.39266 \times 10^{-10} T^3 - 3.64296 \times 10^{-6} T^2 - 5.57309 \times 10^{-4} T + 1.01622) \quad (33)$$

第 5.10 表には、第 (33) 式で表された MPV も示してある。第 5.61 図～第 5.64 図に、上に示した全ての MPV 曲線を示す。ここで得られている MPV では、高温での値が低温でのそれを上回る場合が生じている。そこで、MPV が 25 °C における Sy 値あるいは Su 値を上回っている温度領域での Sy 値及び Su 値は、25 °C における Sy 値及び Su 値とするという方法で曲線 B を定め、次式を得た。

A6061BE-T6 のみで母集団を構成した場合

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ \text{Syb} = 25.0 \\ T > 25 \\ \text{Syb} = 25.0014 \times (-1.01608 \times 10^{-8} T^3 - 1.24028 \times 10^{-6} T^2 - 4.1848 \times 10^{-4} T + 1.01134) \end{array} \right\} (34)$$

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ \text{Sub} = 27.0 \\ T > 25 \\ \text{Sub} = 26.9995 \times (4.70286 \times 10^{-10} T^3 - 3.75805 \times 10^{-6} T^2 - 5.47709 \times 10^{-4} T + 1.01605) \end{array} \right\} (35)$$

A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の両方で母集団を構成し、室温での Sy 値及び Su 値を JIS 規格^(1,2)の最小値とした場合

A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の両方に対して

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ \text{Syb} = 25.0 \\ T > 25 \\ \text{Syb} = 25.0012 \times (-1.05169 \times 10^{-8} T^3 - 1.26524 \times 10^{-6} T^2 - 4.17504 \times 10^{-4} T + 1.01135) \end{array} \right\} (36)$$

A6061BE-T6 に対して

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ \text{Sub} = 27.0 \\ T > 25 \\ \text{Sub} = 26.9997 \times (1.39266 \times 10^{-10} T^3 - 3.64296 \times 10^{-6} T^2 - 5.57309 \times 10^{-4} T + 1.01622) \end{array} \right\} (37)$$

A6061P-T6 (厚板の場合は T651) に対して

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ \text{Sub} = 30.0 \\ T > 25 \\ \text{Sub} = 29.9997 \times (1.39266 \times 10^{-10} T^3 - 3.64296 \times 10^{-6} T^2 - 5.57309 \times 10^{-4} T + 1.01622) \end{array} \right\} (38)$$

A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の両方で母集団を構成し、室温での

Su 値を 1% 破壊確率値とした場合

$$\left. \begin{aligned} T \leq 25 \\ \text{Sub} = 28.50 \\ T > 25 \\ \text{Sub} = 28.5009 \times (1.39266 \times 10^{-10} T^3 - 3.64296 \times 10^{-6} T^2 - 5.57309 \times 10^{-4} T + 1.01622) \end{aligned} \right\} (39)$$

第 5.7 表～第 5.10 表には、第 (34) 式～第 (39) 式で表された曲線 B の値も示してある。第 5.65 図～第 5.68 図に、第 (34) 式～第 (39) 式で表された曲線 B を引張試験データと併せて示す。

(5) 設計降伏点 Sy 及び設計引張強さ Su の原案

第 5.7 表～第 5.10 表から分かるように、A6061BE-T6 のみで母集団を構成した場合と A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の両方で母集団を構成した場合を比較すると、1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値にはほとんど差が無い。そこで、A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の両方で母集団を構成した場合の解析結果を採用することとし、これらの材料の設計降伏点 Sy 及び設計引張強さ Su の原案を以下のように定める。

現行法令⁽⁸⁾との整合性を保つために、-30～40℃における Sy 値及び Su 値は JIS 規格^(1,2)の最小値と定める。40℃を超える温度域での Sy 値は、第 (36) 式で表された曲線 B とする (A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の両方に対して)。40℃を超える温度域での A6061BE-T6 に対する Su 値は、「室温での Su 値を JIS 規格⁽²⁾の最小値とした場合の曲線 B」すなわち第 (37) 式で表された曲線 B とする。40℃を超える温度域での A6061P-T6 (厚板の場合は T651) に対する Su 値は、「室温での Su 値を 1% 破壊確率値とした場合の曲線 B」すなわち第 (39) 式で表された曲線 B とする。ただし、第 (39) 式の値が 1% 破壊確率値を上回る場合 (本材料では 200℃の場合) には、1% 破壊確率値をその温度における Su 値とする。

上のように定めた A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の設計降伏点 Sy 及び設計引張強さ Su の原案を引張試験データと併せて第 5.69 図～第 5.71 図に示す。

5.4 Al-Mg-Si 合金 A6063BE-T6

(1) 正規確率紙へのプロット

第 4.6 表に示したデータを試験温度別に正規確率紙にプロットした結果を第 5.72 図～第 5.79 図に示す。なお、母集団の中で、大きさが i 番目のデータに対して、分布関数値 (%)

$$\frac{n+1-i}{n+1} \times 100 \quad (1)$$

を割り当てた。図中には、データ点に対する最小二乗近似直線及びその直線から求めた 1% 降伏確率値あるいは 1% 破壊確率値も示した。第 5.11 表及び第 5.12 表に 1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値を解析評価に供した引張試験データの最小値と併せて示す。

第 5.72 図～第 5.79 図から、正規分布の成立を仮定しても大きな誤りではないと思われる*。

(2) 「設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法」の手順の適用

上記のデータに対して、引張試験計画に述べた「設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法」の手順を適用した。その結果、次式に示す MPV 曲線が得られた。

$$S_{ya} = 17.9962 \times (-3.63327 \times 10^{-8} T^3 + 5.70542 \times 10^{-6} T^2 - 1.00308 \times 10^{-3} T + 1.02229) \quad (40)$$

$$S_{ua} = 20.9969 \times (-1.83493 \times 10^{-8} T^3 + 1.86759 \times 10^{-6} T^2 - 1.2779 \times 10^{-3} T + 1.03122) \quad (41)$$

第(40)式及び第(41)式では、引張試験計画に述べた「設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の策定方法」の手順を適用していることから、室温（解析上は 25℃）での S_y 値及び S_u 値を JIS 規格⁽²⁾の最小値、すなわち 18.0 kgf/mm² 及び 21.0 kgf/mm² としている。第 5.11 表及び第 5.12 表に、第(40)式及び第(41)式で表された MPV を示す。第 5.11 表及び第 5.12 表から分かるように、室温での S_y 値及び S_u 値を JIS 規格⁽²⁾の最小値とすると、MPV は 1% 降伏確率値あるいは 1% 破壊確率値を上回ってしまう。そこで、室温での S_y 値及び S_u 値をそれぞれ 1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値、すなわち 16.94 kgf/mm² 及び 18.48 kgf/mm² とした場合の MPV 曲線を求め、次式を得た。

$$S_{yb} = 16.9384 \times (-3.63327 \times 10^{-8} T^3 + 5.70542 \times 10^{-6} T^2 - 1.00308 \times 10^{-3} T + 1.02229) \quad (42)$$

$$S_{ub} = 18.4814 \times (-1.83493 \times 10^{-8} T^3 + 1.86759 \times 10^{-6} T^2 - 1.2779 \times 10^{-3} T + 1.03122) \quad (43)$$

第 5.11 表及び第 5.12 表には、第(42)式及び第(43)式で表された MPV も示してある。第 5.80 図及び第 5.81 図に、上の 2 種類の MPV 曲線を引張試験データと併せて示す。ここで得られている MPV では、高温での値が低温でのそれを上回る場合が生じている。そこで、MPV が 25℃ における S_y 値あるいは S_u 値を上回っている温度領域での S_y 値及び S_u 値は、25℃ における S_y 値及び S_u 値とするという方法で曲線 B を定め、次式を得た。

室温での S_y 値及び S_u 値を JIS 規格⁽²⁾の最小値とした場合

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ S_{yb} = 18.0 \\ T > 25 \\ S_{yb} = 17.9962 \times (-3.63327 \times 10^{-8} T^3 + 5.70542 \times 10^{-6} T^2 - 1.00308 \times 10^{-3} T + 1.02229) \end{array} \right\} (44)$$

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ S_{ub} = 21.0 \\ T > 25 \\ S_{ub} = 20.9969 \times (-1.83493 \times 10^{-8} T^3 + 1.86759 \times 10^{-6} T^2 - 1.2779 \times 10^{-3} T + 1.03122) \end{array} \right\} (45)$$

* データ数が少ないため、正規分布が成立しているか否かを χ^2 検定で判定することはできない。 χ^2 検定による判定には 26 以上のデータを必要とする⁽⁷⁾。

室温での S_y 値及び S_u 値をそれぞれ 1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値とした場合

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ S_y = 16.94 \\ T > 25 \\ S_y = 16.9384 \times (-3.63327 \times 10^{-8} T^3 + 5.70542 \times 10^{-6} T^2 - 1.00308 \times 10^{-3} T + 1.02229) \end{array} \right\} (46)$$

$$\left. \begin{array}{l} T \leq 25 \\ S_u = 18.48 \\ T > 25 \\ S_u = 18.4814 \times (-1.83493 \times 10^{-8} T^3 + 1.86759 \times 10^{-6} T^2 - 1.2779 \times 10^{-3} T + 1.03122) \end{array} \right\} (47)$$

第 5.11 表及び第 5.12 表には、第 (44) 式～第 (47) 式で表された曲線 B の値も示してある。第 5.82 図及び第 5.83 図に、第 (44) 式～第 (47) 式で表された曲線 B を引張試験データと併せて示す。

(3) 設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の原案

以上の解析結果から、Al-Mg-Si 合金 A6063BE-T6 の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の原案を以下のように定める。

現行法令⁽⁸⁾との整合性を保つために、 $-30 \sim 40^\circ\text{C}$ における S_y 値及び S_u 値は JIS 規格⁽²⁾の最小値とする。 40°C を超える温度域での S_y 値及び S_u 値は、「室温での S_y 値及び S_u 値をそれぞれ 1% 降伏確率値及び 1% 破壊確率値とした場合の曲線 B」とする。すなわち第 (46) 式及び第 (47) 式で表された曲線 B とする。ただし、第 (46) 式及び第 (47) 式の値が 1% 降伏確率値を上回る場合（本材料では 200°C の場合）には、1% 降伏確率値をその温度における S_y 値とする。

上のように定めた A6063BE-T6 の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の原案を引張試験データと併せて第 5.84 図及び第 5.85 図に示す。

第5.1表 A1100P-Oの引張試験データ(0.2%耐力)の最小値, 1%降伏確率値,
MPV及び曲線Bの値

温度(°C)	25	50	75	100	125	150	175	200
引張試験データの最小値 (kgf/mm ²)	2.8	—	2.9	2.7	2.4	2.3	2.2	2.1
1%降伏確率値 (kgf/mm ²)	1.94	—	—	1.99	—	1.70	—	1.27
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを2.5kgf/mm ² とした場合)	2.50	2.53	2.51	2.44	2.33	2.18	2.01	1.83
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを2.5kgf/mm ² とした場合)	2.50	2.50	2.50	2.44	2.33	2.18	2.01	1.83
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを1.94kgf/mm ² とした場合)	1.94	1.96	1.94	1.89	1.80	1.69	1.56	1.41
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを1.94kgf/mm ² とした場合)	1.94	1.94	1.94	1.89	1.80	1.69	1.56	1.41

第5.2表 A1100P-Oの引張試験データ(引張強さ)の最小値, 1%破壊確率値,
MPV及び曲線Bの値

温度(°C)	25	50	75	100	125	150	175	200
引張試験データの最小値 (kgf/mm ²)	7.6	—	7.9	6.6	6.7	5.2	5.0	4.1
1%破壊確率値 (kgf/mm ²)	6.97	—	—	6.06	—	4.86	—	3.47
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを7.5kgf/mm ² とした場合)	7.50	7.33	6.97	6.47	5.87	5.22	4.57	3.97
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを7.5kgf/mm ² とした場合)	7.50	7.33	6.97	6.47	5.87	5.22	4.57	3.97
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを6.97kgf/mm ² とした場合)	6.97	6.82	6.48	6.02	5.46	4.85	4.25	3.69
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを6.97kgf/mm ² とした場合)	6.97	6.82	6.48	6.02	5.46	4.85	4.25	3.69

第5.3表 A5052P-Oの引張試験データ(0.2%耐力)の最小値, 1%降伏確率値,
MPV及び曲線Bの値
(A5052P-Oのみで母集団を構成した場合)

温度(°C)	25	50	75	100	125	150	175	200
引張試験データの最小値 (kgf/mm ²)	7.0	—	8.7	7.1	8.8	7.1	8.1	7.2
1%降伏確率値 (kgf/mm ²)	5.86	—	—	6.15	—	6.14	—	5.60
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを6.5kgf/mm ² とした場合)	6.50	6.49	6.49	6.47	6.44	6.36	6.23	6.04
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを6.5kgf/mm ² とした場合)	6.50	6.49	6.49	6.47	6.44	6.36	6.23	6.04
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを5.86kgf/mm ² とした場合)	5.86	5.85	5.85	5.83	5.80	5.73	5.62	5.45
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを5.86kgf/mm ² とした場合)	5.86	5.85	5.85	5.83	5.80	5.73	5.62	5.45

第5.4表 A5052P-Oの引張試験データ(引張強さ)の最小値, 1%破壊確率値,
MPV及び曲線Bの値
(A5052P-Oのみで母集団を構成した場合)

温度(°C)	25	50	75	100	125	150	175	200
引張試験データの最小値 (kgf/mm ²)	19.2	—	20.9	18.8	19.4	16.4	15.2	13.4
1%破壊確率値 (kgf/mm ²)	17.83	—	—	17.28	—	15.57	—	12.28
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを18.0kgf/mm ² とした場合)	18.00	18.48	18.33	17.66	16.60	15.27	13.79	12.28
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを18.0kgf/mm ² とした場合)	18.00	18.00	18.00	17.66	16.60	15.27	13.79	12.28
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを17.83kgf/mm ² とした場合)	17.83	18.31	18.16	17.49	16.45	15.13	13.66	12.17
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを17.83kgf/mm ² とした場合)	17.83	17.83	17.83	17.49	16.45	15.13	13.66	12.17

第 5.5 表 A5052-O の引張試験データ (0.2%耐力) の最小値, 1%降伏確率値,
MPV 及び曲線 B の値
(A5052P-O 及び A5052BE-O で母集団を構成した場合)

温度 (°C)	25	50	75	100	125	150	175	200
引張試験データの最小値 (kgf/mm ²)	7.0	—	8.7	6.9	8.8	7.0	8.1	6.9
1%降伏確率値 (kgf/mm ²)	5.61	—	—	5.81	—	5.87	—	5.60
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを6.5kgf/mm ² とした場合)	6.50	6.50	6.49	6.48	6.45	6.39	6.29	6.15
曲線 B の値 (kgf/mm ²) (25°Cを6.5kgf/mm ² とした場合)	6.50	6.50	6.49	6.48	6.45	6.39	6.29	6.15
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを7.0kgf/mm ² とした場合)	7.00	7.00	6.99	6.98	6.95	6.89	6.78	6.62
曲線 B の値 (kgf/mm ²) (25°Cを7.0kgf/mm ² とした場合)	7.00	7.00	6.99	6.98	6.95	6.89	6.78	6.62
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを5.61kgf/mm ² とした場合)	5.61	5.61	5.61	5.60	5.57	5.52	5.44	5.31
曲線 B の値 (kgf/mm ²) (25°Cを5.61kgf/mm ² とした場合)	5.61	5.61	5.61	5.60	5.57	5.52	5.44	5.31

第 5.6 表 A5052-O の引張試験データ (引張強さ) の最小値, 1%破壊確率値,
MPV 及び曲線 B の値
(A5052P-O 及び A5052BE-O で母集団を構成した場合)

温度 (°C)	25	50	75	100	125	150	175	200
引張試験データの最小値 (kgf/mm ²)	18.7	—	20.9	18.3	19.4	16.1	15.2	13.0
1%破壊確率値 (kgf/mm ²)	17.47	—	—	17.04	—	15.39	—	12.24
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを18.0kgf/mm ² とした場合)	18.00	18.47	18.33	17.70	16.68	15.40	13.94	12.44
曲線 B の値 (kgf/mm ²) (25°Cを18.0kgf/mm ² とした場合)	18.00	18.00	18.00	17.70	16.68	15.40	13.94	12.44
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを17.47kgf/mm ² とした場合)	17.47	17.92	17.79	17.18	16.19	14.94	13.53	12.07
曲線 B の値 (kgf/mm ²) (25°Cを17.47kgf/mm ² とした場合)	17.47	17.47	17.47	17.18	16.19	14.94	13.53	12.07

第5.7表 A6061BE-T6の引張試験データ(0.2%耐力)の最小値, 1%降伏確率値,
MPV及び曲線Bの値
(A6061BE-T6のみで母集団を構成した場合)

温度(°C)	25	50	75	100	125	150	175	200
引張試験データの最小値 (kgf/mm ²)	26.1	—	26.0	25.6	24.4	23.8	22.6	21.6
1%降伏確率値 (kgf/mm ²)	25.53	—	—	24.19	—	22.92	—	20.24
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを25.0kgf/mm ² とした場合)	25.00	24.65	24.22	23.67	23.00	22.16	21.14	19.92
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを25.0kgf/mm ² とした場合)	25.00	24.65	24.22	23.67	23.00	22.16	21.14	19.92

第5.8表 A6061BE-T6の引張試験データ(引張強さ)の最小値, 1%破壊確率値,
MPV及び曲線Bの値
(A6061BE-T6のみで母集団を構成した場合)

温度(°C)	25	50	75	100	125	150	175	200
引張試験データの最小値 (kgf/mm ²)	29.3	—	29.5	27.0	26.5	25.5	24.1	22.8
1%破壊確率値 (kgf/mm ²)	28.49	—	—	26.37	—	24.70	—	21.56
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを27.0kgf/mm ² とした場合)	27.00	26.44	25.76	24.95	24.02	22.97	21.81	20.52
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを27.0kgf/mm ² とした場合)	27.00	26.44	25.76	24.95	24.02	22.97	21.81	20.52

第5.9表 A6061-T6, T651の引張試験データ(0.2%耐力)の最小値, 1%降伏確率値,
MPV及び曲線Bの値
(A6061BE-T6及びA6061P-T6, T651で母集団を構成した場合)

温度(°C)	25	50	75	100	125	150	175	200
引張試験データの最小値 (kgf/mm ²)	26.1	—	26.0	25.6	24.4	23.8	22.6	21.6
1%降伏確率値 (kgf/mm ²)	25.54	—	—	24.17	—	22.91	—	20.22
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを25.0kgf/mm ² とした場合)	25.00	24.65	24.21	23.66	22.97	22.12	21.08	19.83
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを25.0kgf/mm ² とした場合)	25.00	24.65	24.21	23.66	22.97	22.12	21.08	19.83

第5.10表 A6061-T6, T651の引張試験データ(引張強さ)の最小値, 1%破壊確率値,
MPV及び曲線Bの値
(A6061BE-T6及びA6061P-T6, T651で母集団を構成した場合)

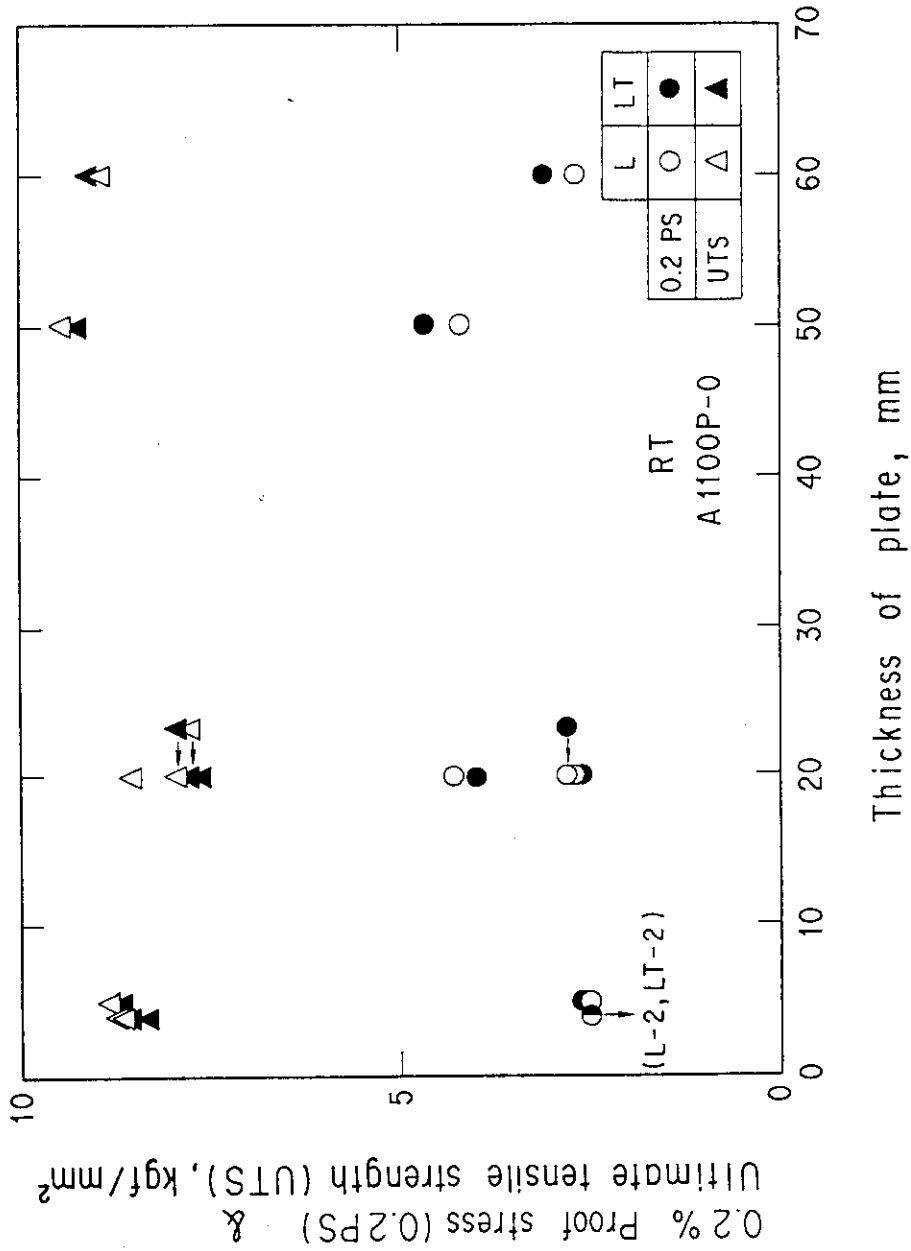
温度(°C)	25	50	75	100	125	150	175	200
引張試験データの最小値 (kgf/mm ²)	29.3	—	29.5	27.0	26.5	25.5	24.1	22.8
1%破壊確率値 (kgf/mm ²)	28.50	—	—	26.38	—	24.62	—	21.58
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを30.0kgf/mm ² とした場合)	30.00	29.38	28.62	27.73	26.70	25.53	24.24	22.80
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを30.0kgf/mm ² とした場合)	30.00	29.38	28.62	27.73	26.70	25.53	24.24	22.80
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを27.0kgf/mm ² とした場合)	27.00	26.44	25.76	24.95	24.03	22.98	21.81	20.52
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを27.0kgf/mm ² とした場合)	27.00	26.44	25.76	24.95	24.03	22.98	21.81	20.52
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを28.50kgf/mm ² とした場合)	28.50	27.91	27.19	26.34	25.36	24.26	23.03	21.67
曲線Bの値 (kgf/mm ²) (25°Cを28.50kgf/mm ² とした場合)	28.50	27.91	27.19	26.34	25.36	24.26	23.03	21.67

第 5.11 表 A6063BE-T6 の引張試験データ (0.2%耐力) の最小値, 1%降伏確率値, MPV 及び曲線 B の値

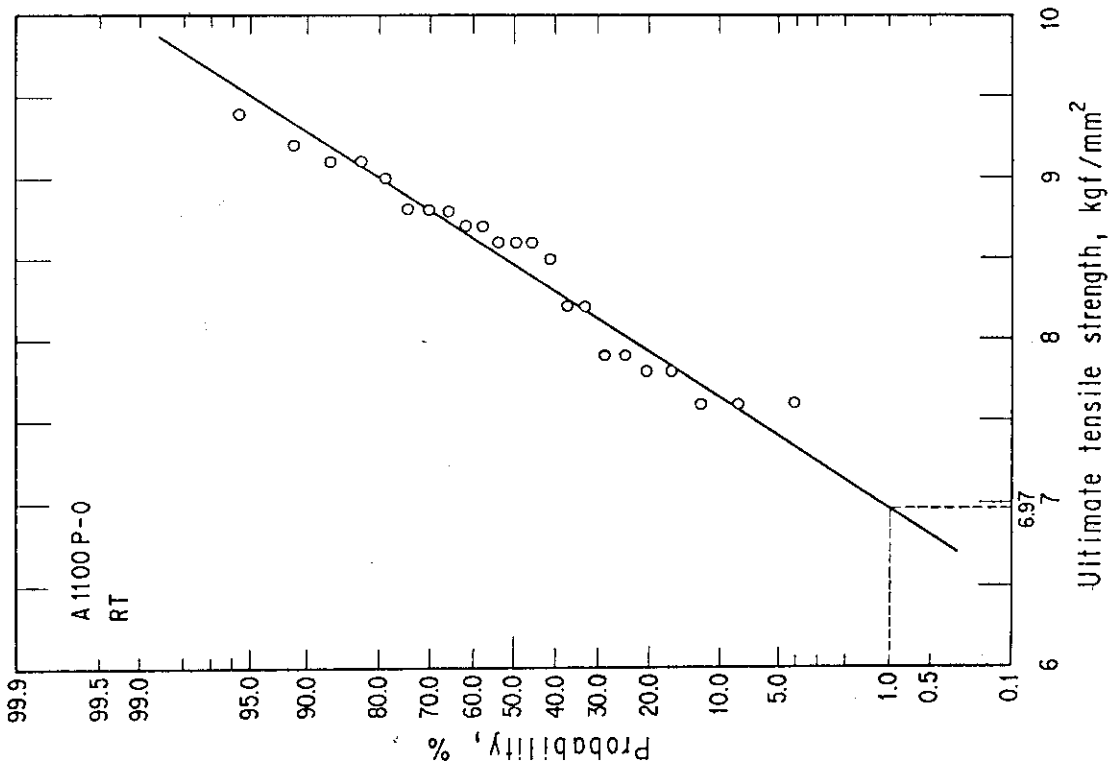
温度 (°C)	25	50	75	100	125	150	175	200
引張試験データの最小値 (kgf/mm ²)	18.9	—	20.4	18.0	19.4	16.9	17.4	14.5
1%降伏確率値 (kgf/mm ²)	16.94	—	—	15.79	—	14.88	—	12.62
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを18.0kgf/mm ² とした場合)	18.00	17.67	17.35	16.97	16.47	15.79	14.88	13.66
曲線 B の値 (kgf/mm ²) (25°Cを18.0kgf/mm ² とした場合)	18.00	17.67	17.35	16.97	16.47	15.79	14.88	13.66
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを16.94kgf/mm ² とした場合)	16.94	16.63	16.33	15.97	15.50	14.86	14.00	12.86
曲線 B の値 (kgf/mm ²) (25°Cを16.94kgf/mm ² とした場合)	16.94	16.63	16.33	15.97	15.50	14.86	14.00	12.86

第 5.12 表 A6063BE-T6 の引張試験データ (引張強さ) の最小値, 1%破壊確率値, MPV 及び曲線 B の値

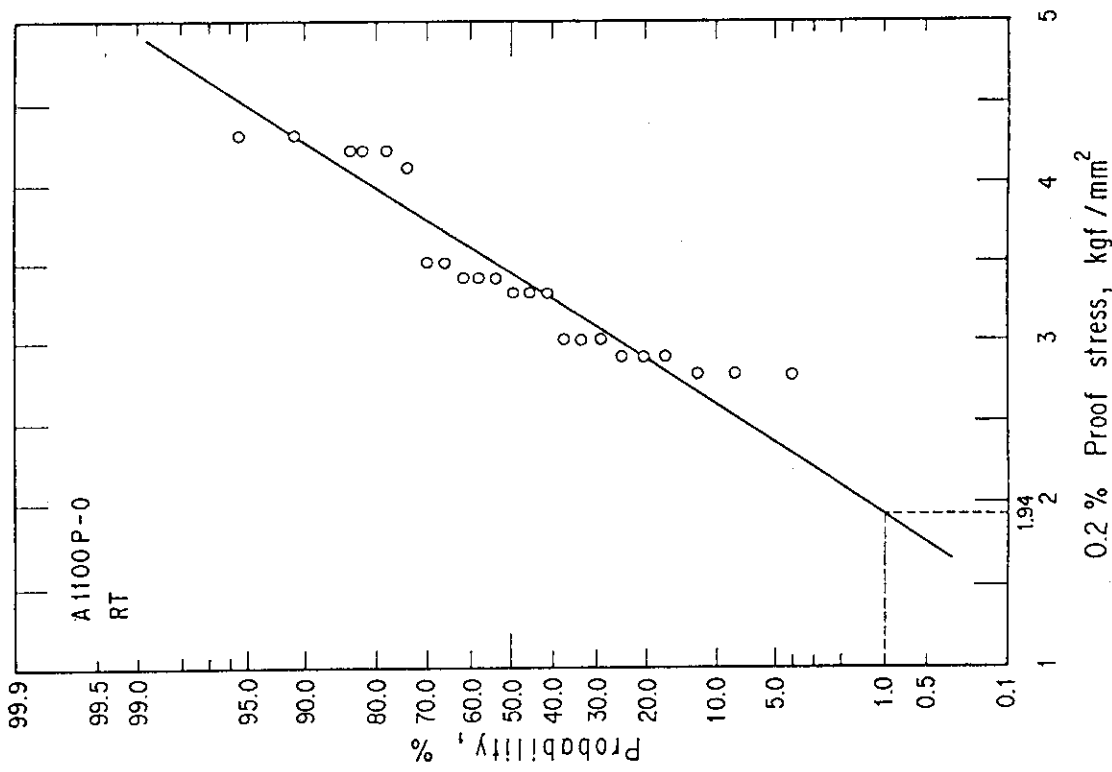
温度 (°C)	25	50	75	100	125	150	175	200
引張試験データの最小値 (kgf/mm ²)	21.0	—	21.8	19.2	20.1	17.5	17.8	15.1
1%破壊確率値 (kgf/mm ²)	18.48	—	—	17.38	—	15.81	—	13.32
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを21.0kgf/mm ² とした場合)	21.00	20.36	19.70	18.98	18.16	17.21	16.09	14.77
曲線 B の値 (kgf/mm ²) (25°Cを21.0kgf/mm ² とした場合)	21.00	20.36	19.70	18.98	18.16	17.21	16.09	14.77
MPV (kgf/mm ²) (25°Cを18.48kgf/mm ² とした場合)	18.48	17.92	17.34	16.70	15.98	15.15	14.16	13.00
曲線 B の値 (kgf/mm ²) (25°Cを18.48kgf/mm ² とした場合)	18.48	17.92	17.34	16.70	15.98	15.15	14.16	13.00



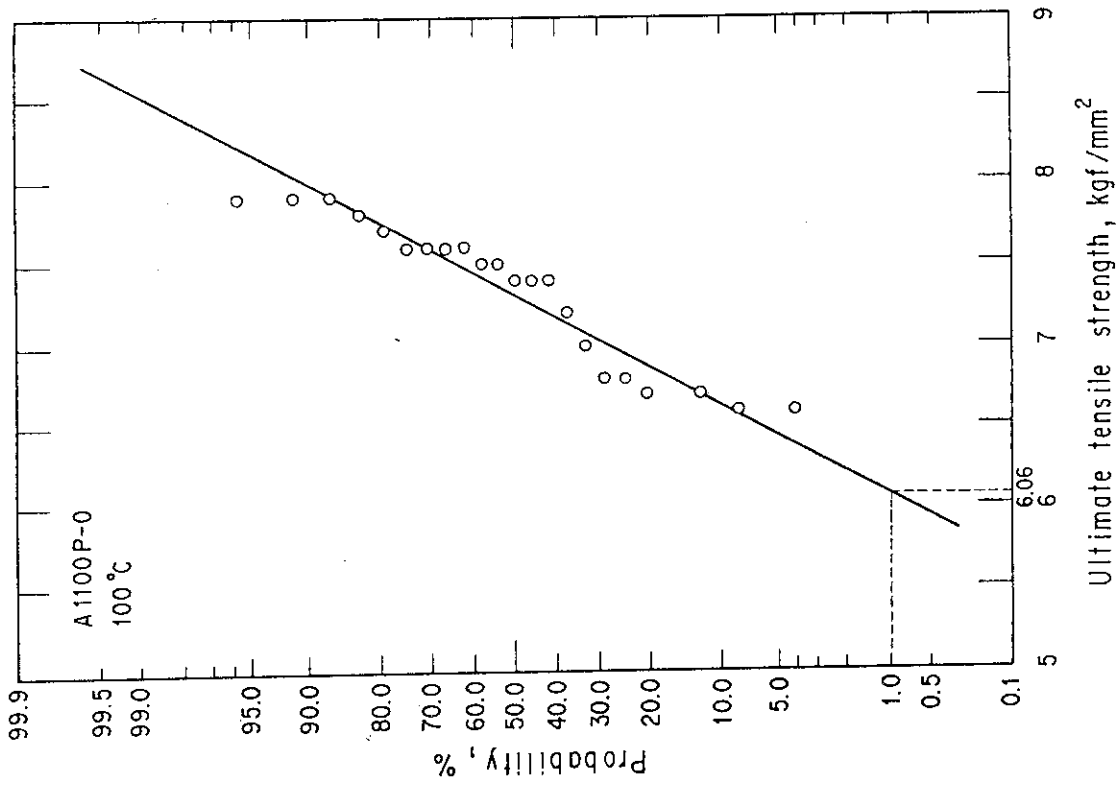
第5.1図 A1100P-0の0.2%耐力及び引張強さに及ぼす素材厚さ及び試験片採取方向の影響



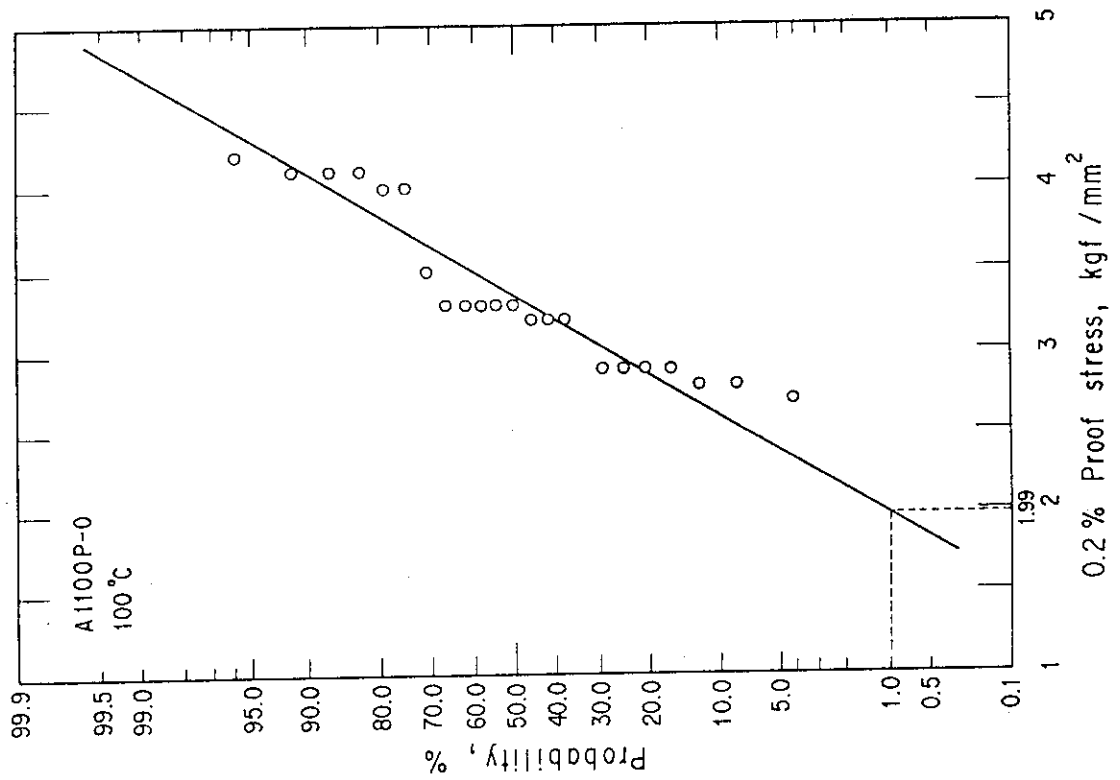
第5.3図 A1100P-Oの引張強さの正規確率紙へのプロット
(室温)



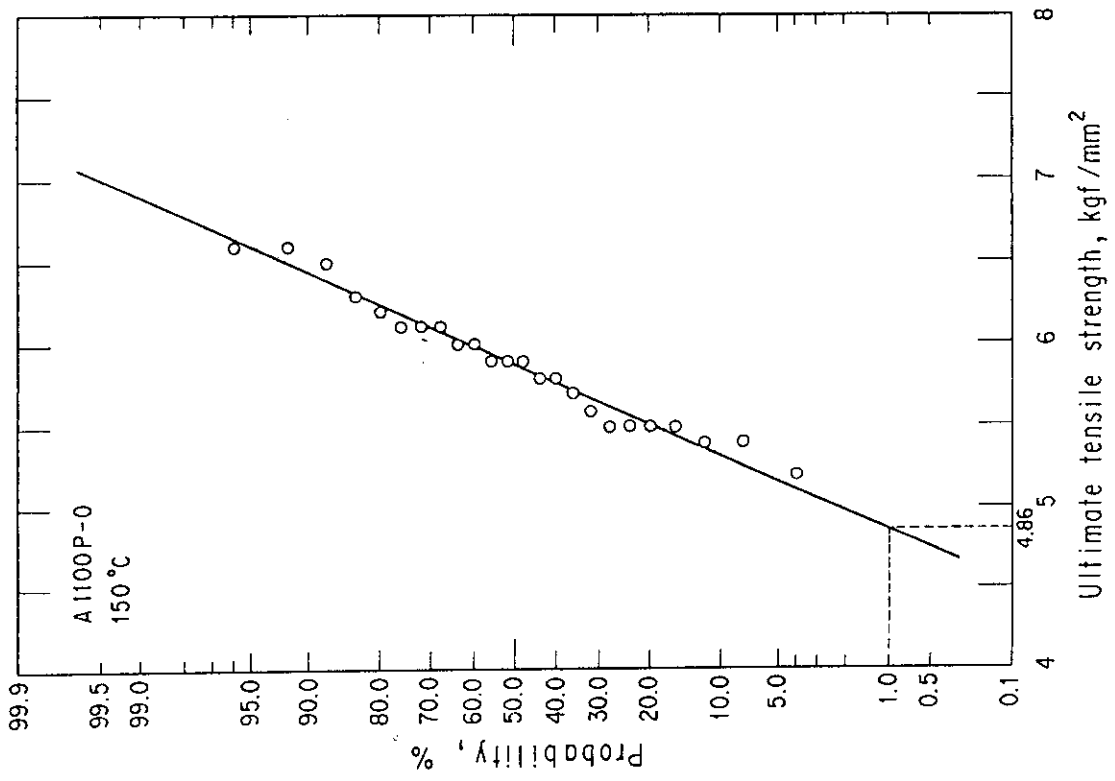
第5.2図 A1100P-Oの0.2%耐力の正規確率紙へのプロット
(室温)



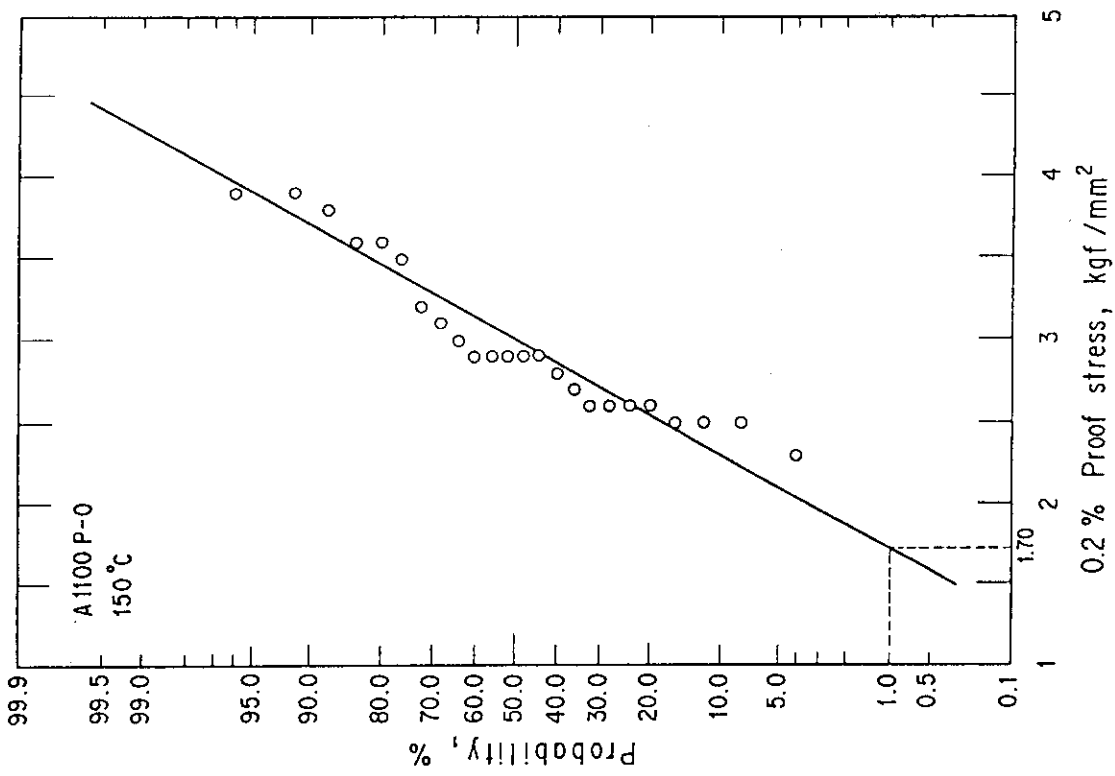
第 5.5 図 A1100P-O の引張強さの正規確率紙へのプロット
(100 °C)



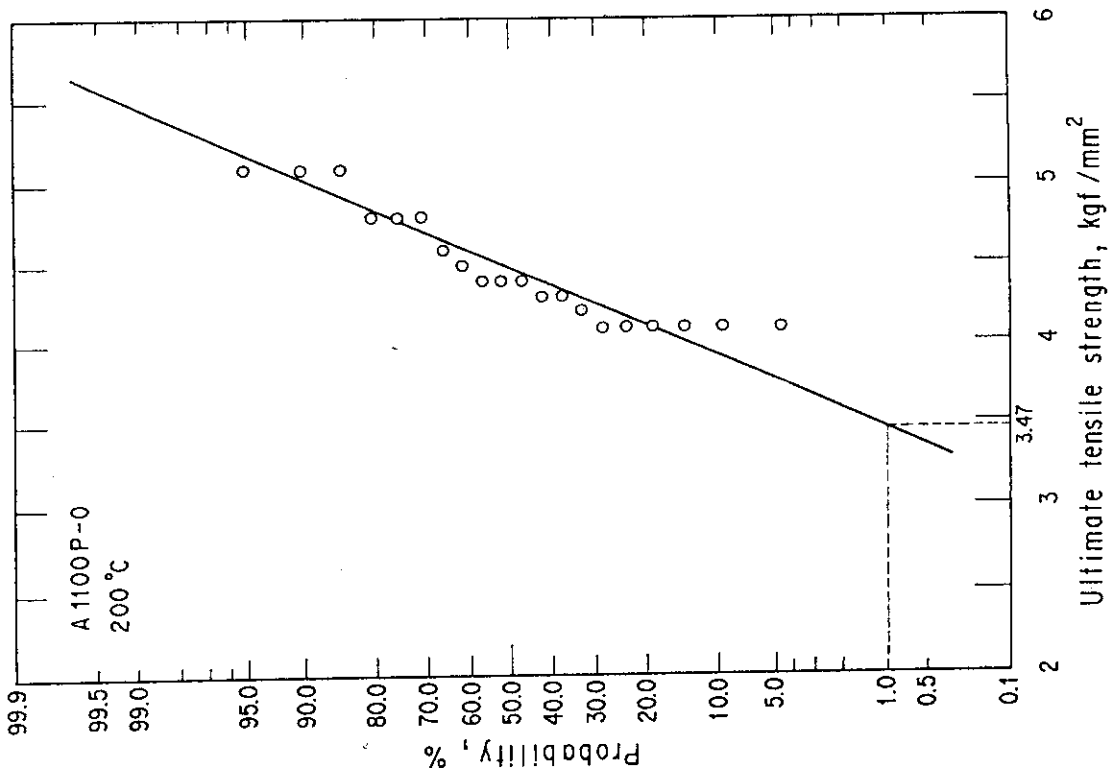
第 5.4 図 A1100P-O の 0.2% 耐力の正規確率紙へのプロット
(100 °C)



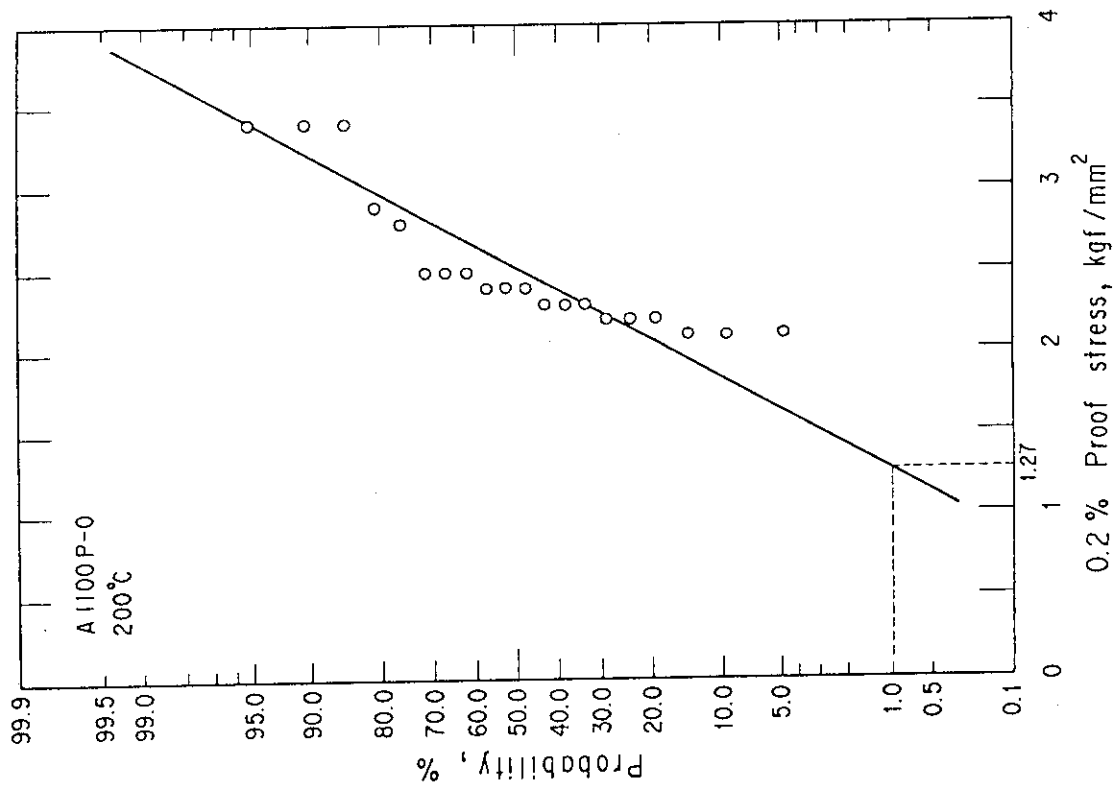
第5.7図 A1100P-Oの引張強さの正規確率紙へのプロット
(150 °C)



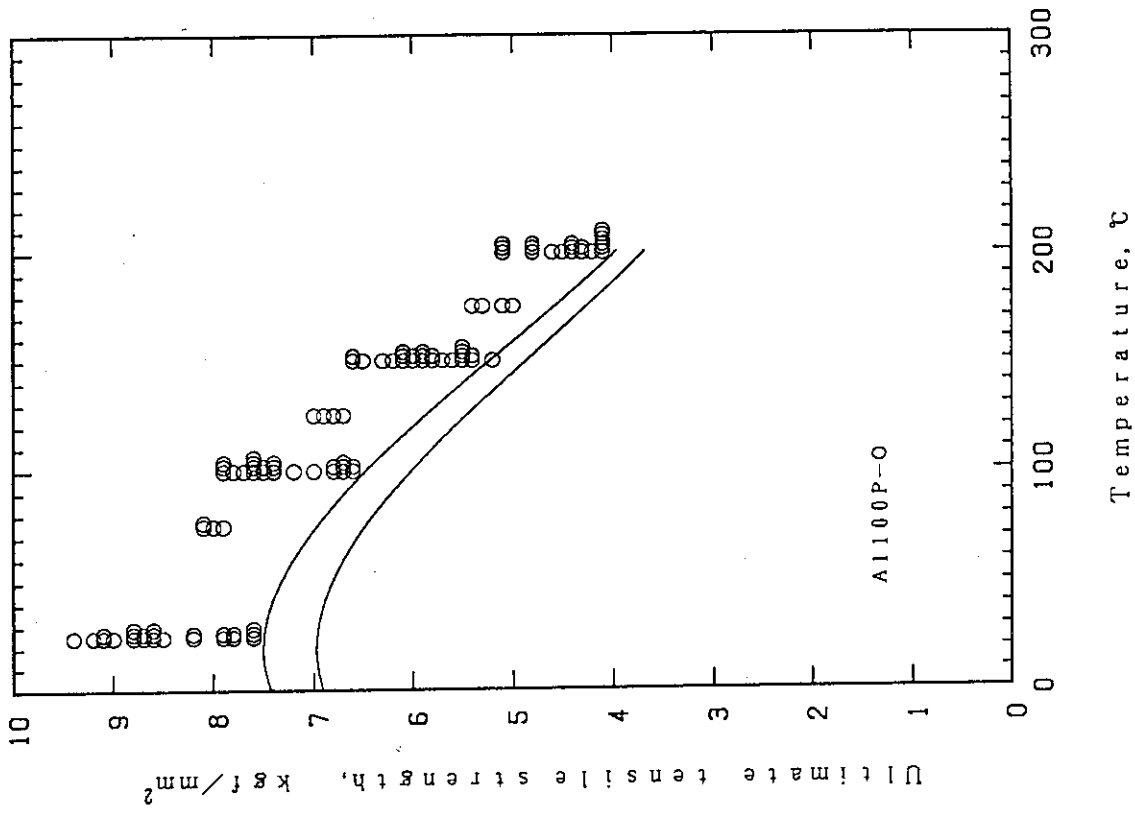
第5.6図 A1100P-Oの0.2%耐力の正規確率紙へのプロット
(150 °C)



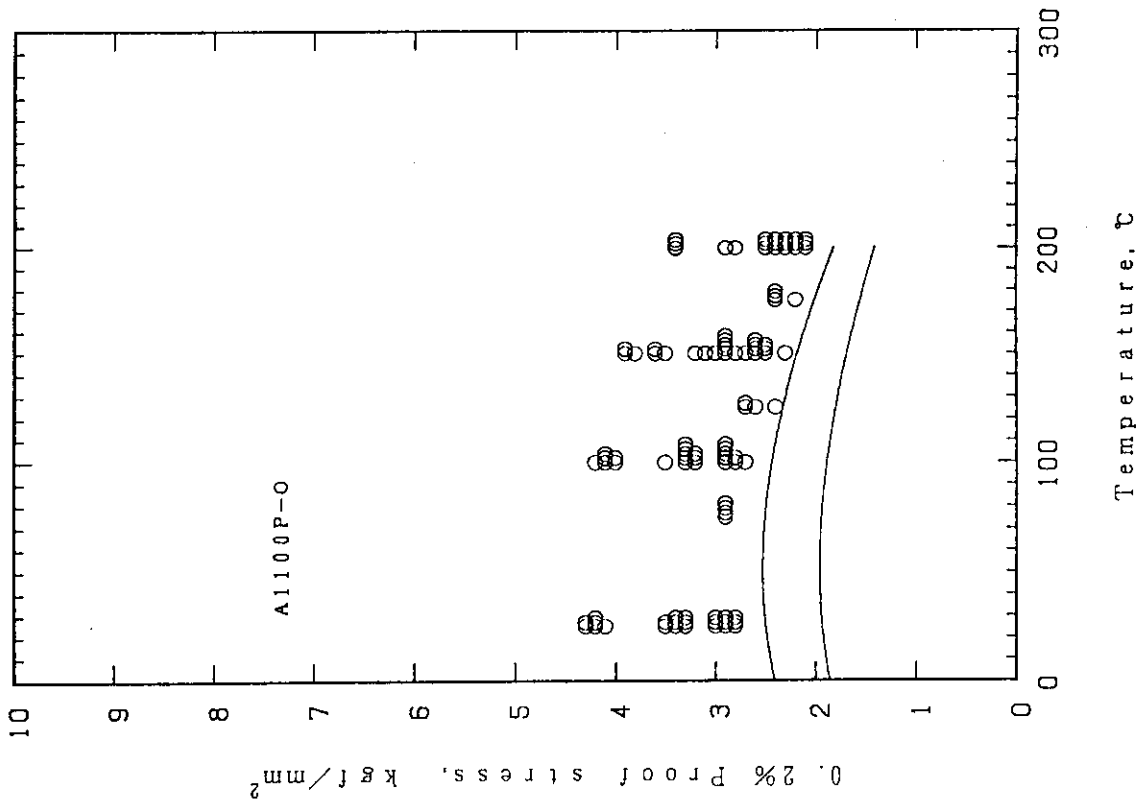
第 5.9 図 A1100P-O の引張強さの正規確率紙へのプロット
(200 °C)



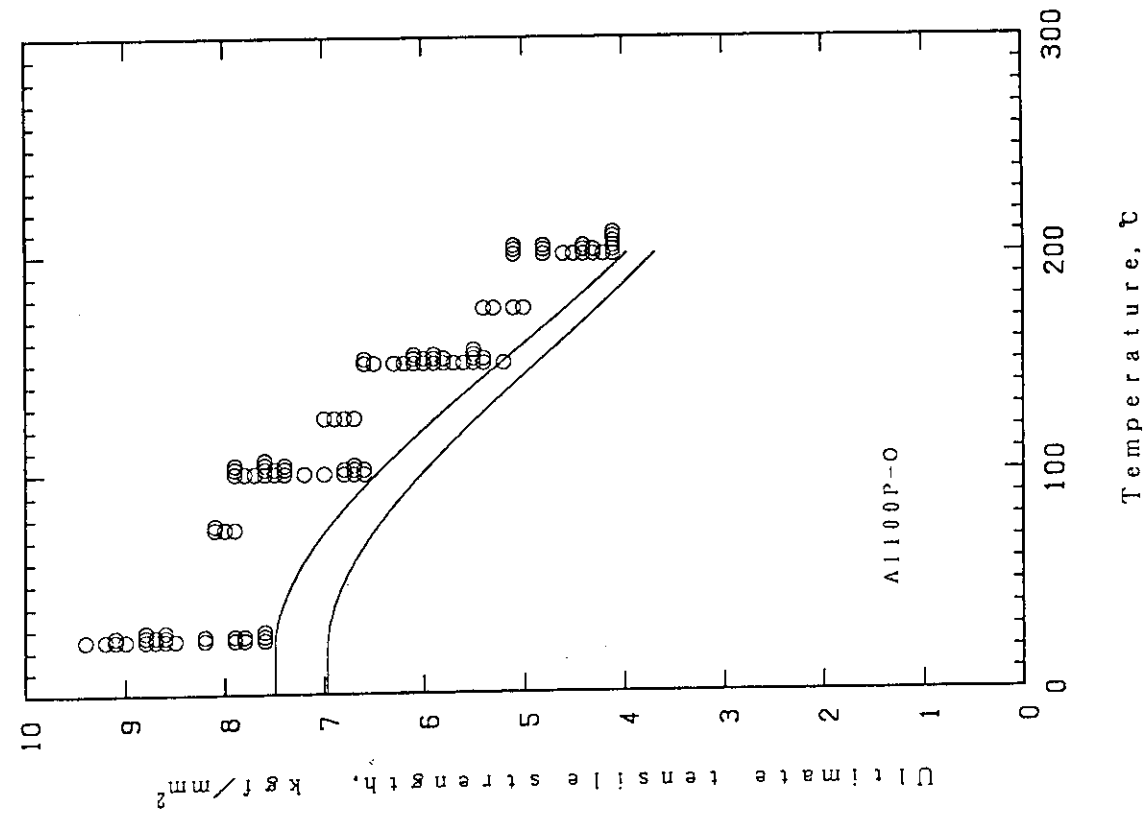
第 5.8 図 A1100P-O の 0.2% 耐力の正規確率紙へのプロット
(200 °C)



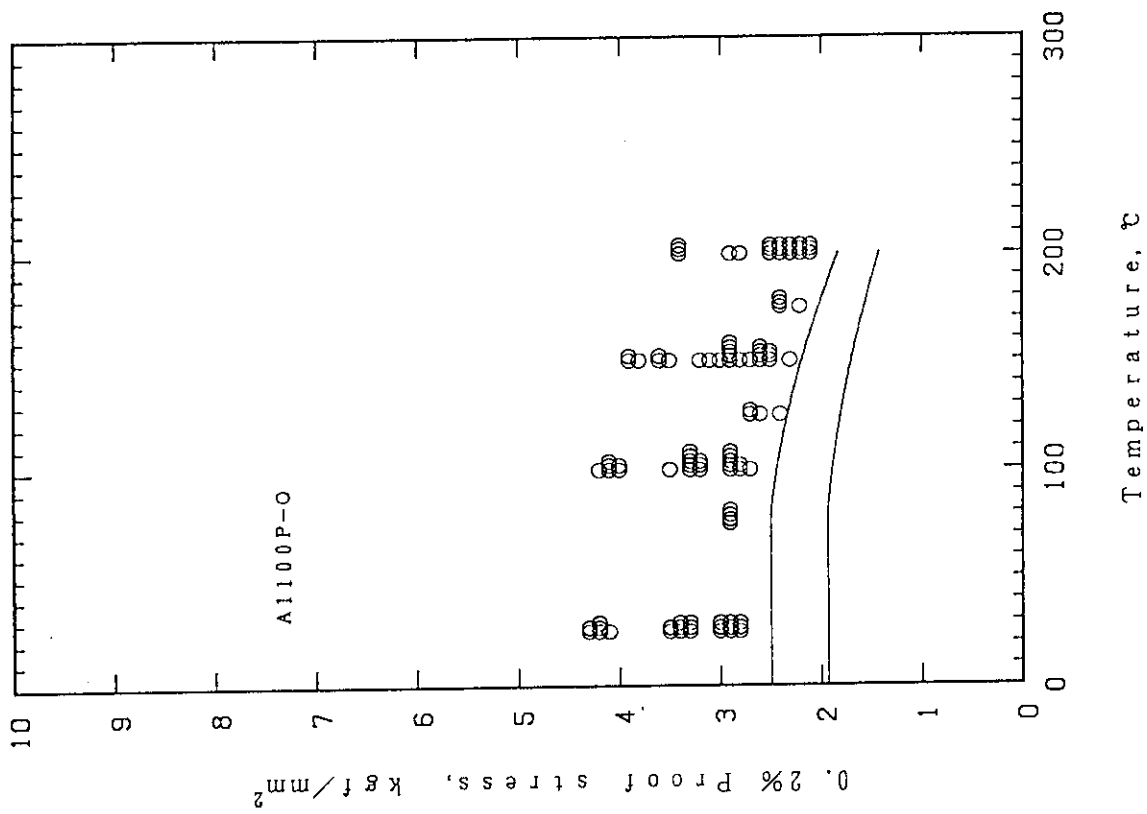
第5.11図 A1100P-Oの引張強さとMPV曲線



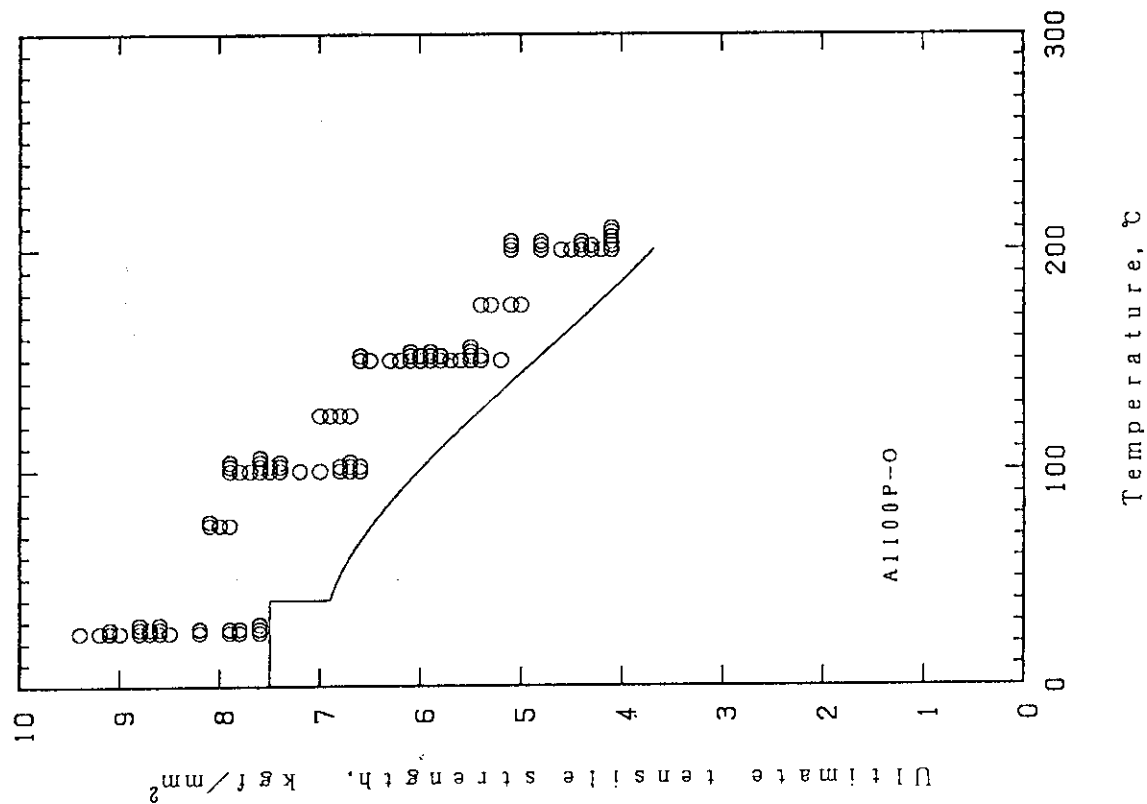
第5.10図 A1100P-Oの0.2%耐力とMPV曲線



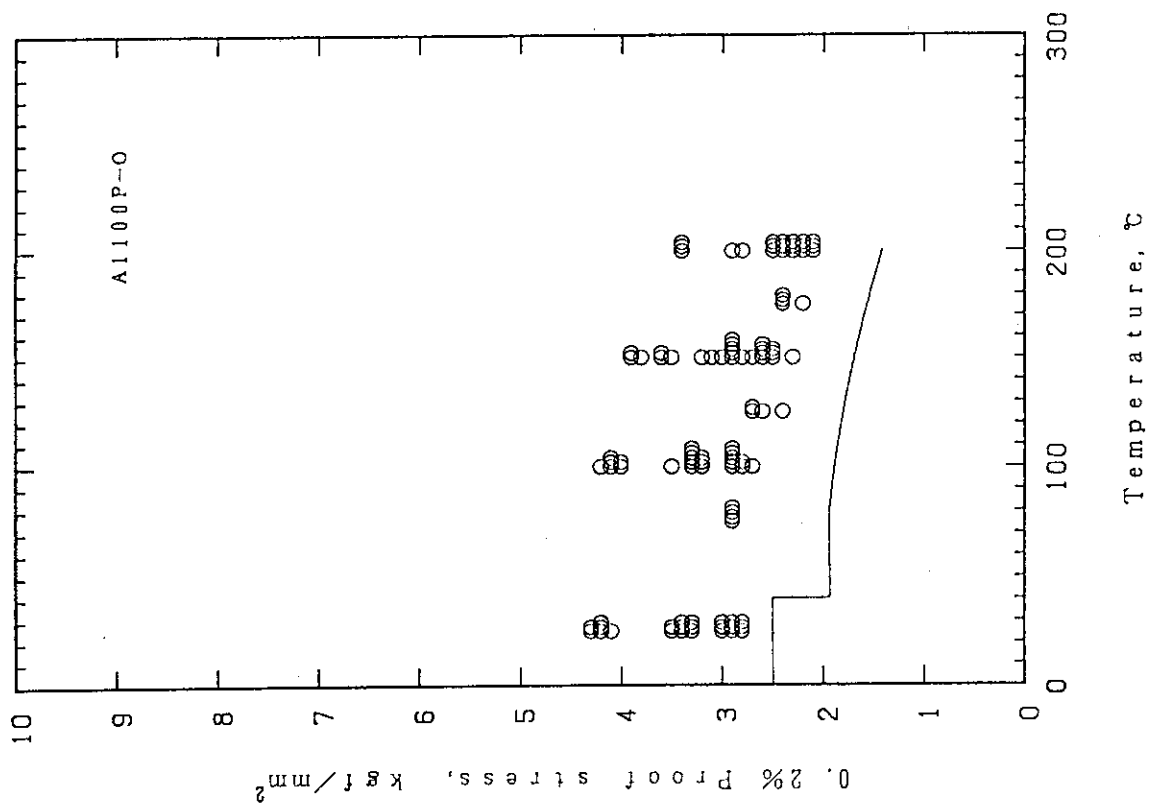
第 5.13 図 A1100P-O の引張強さと曲線 B



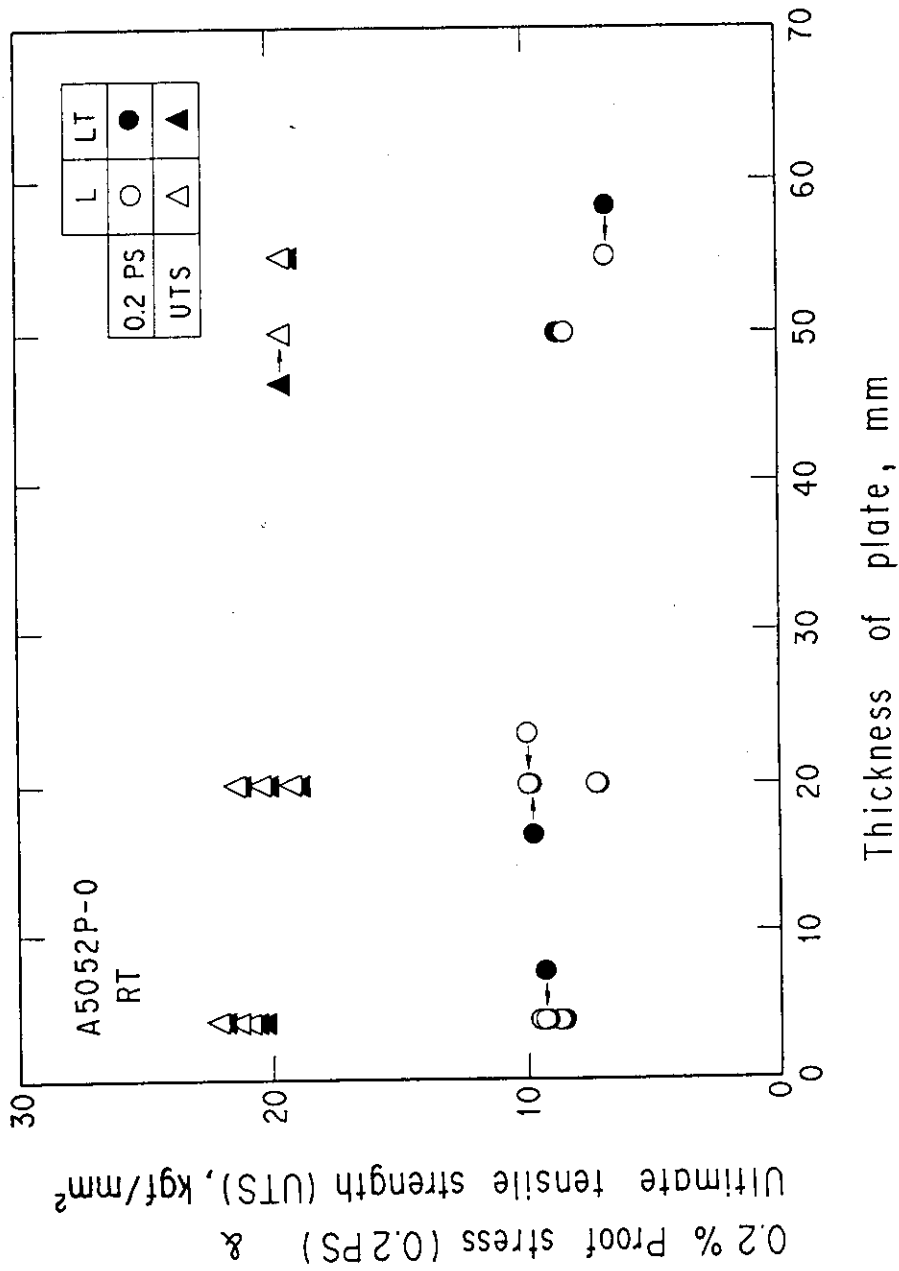
第 5.12 図 A1100P-O の 0.2% 耐力と曲線 B



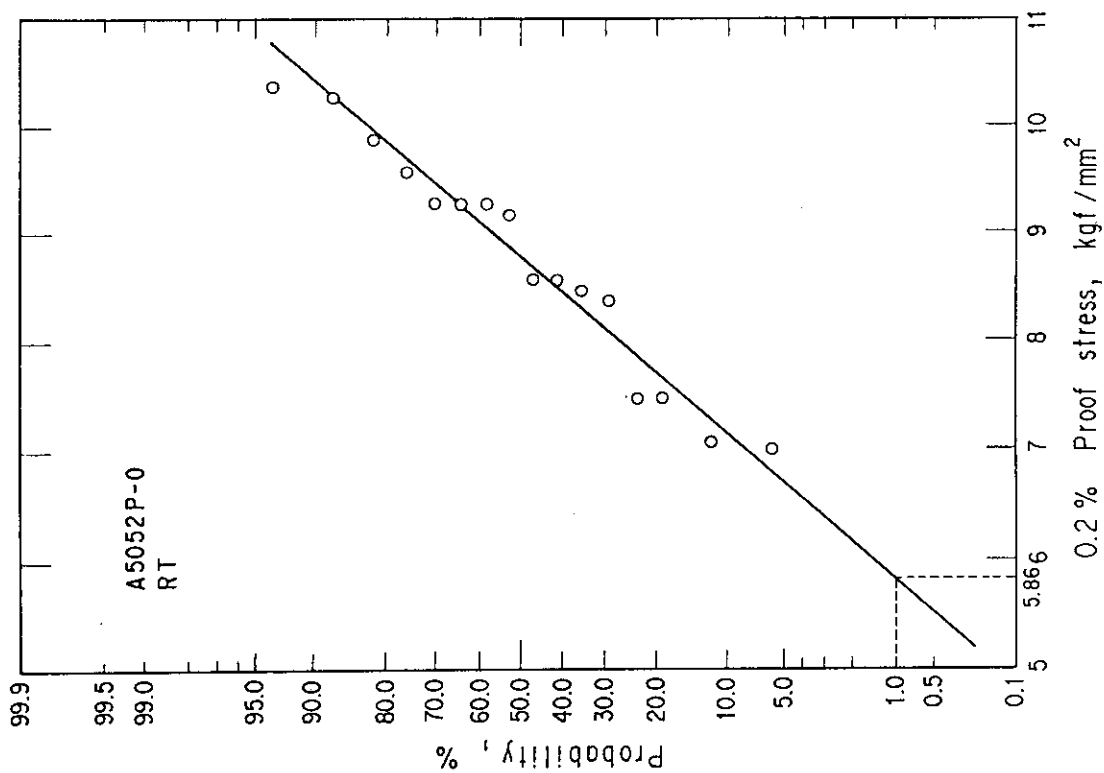
第5.15図 A1100P-Oの引張強さと設計引張強さSuの原案



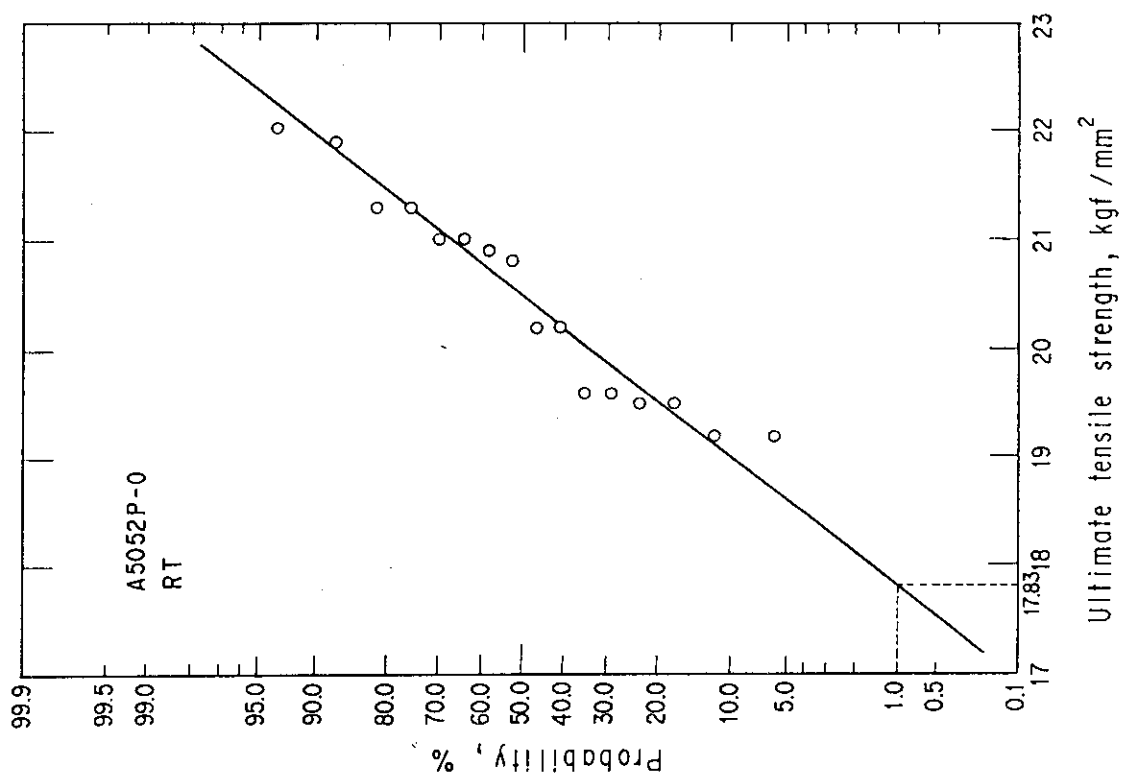
第5.14図 A1100P-Oの0.2%耐力と設計降伏点Syの原案



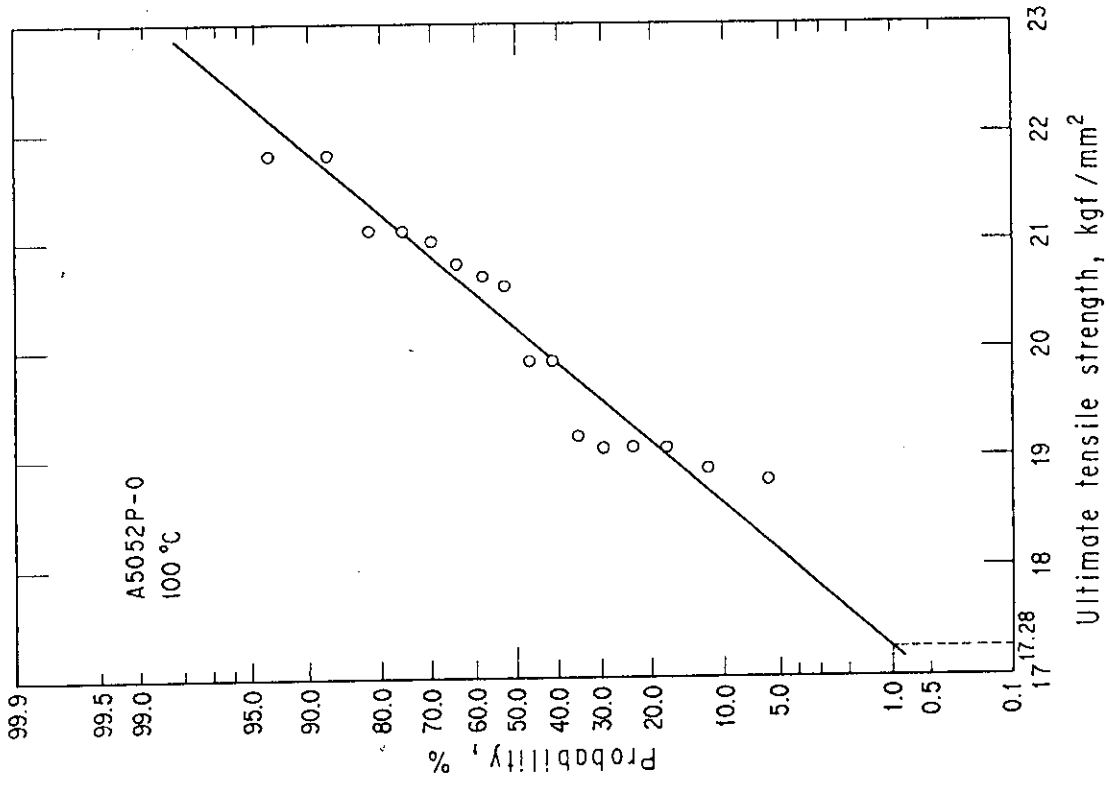
第 5.16 図 A5052P-0 の 0.2% 耐力及び引張強さに及ぼす素材厚さ及び試験片採取方向の影響



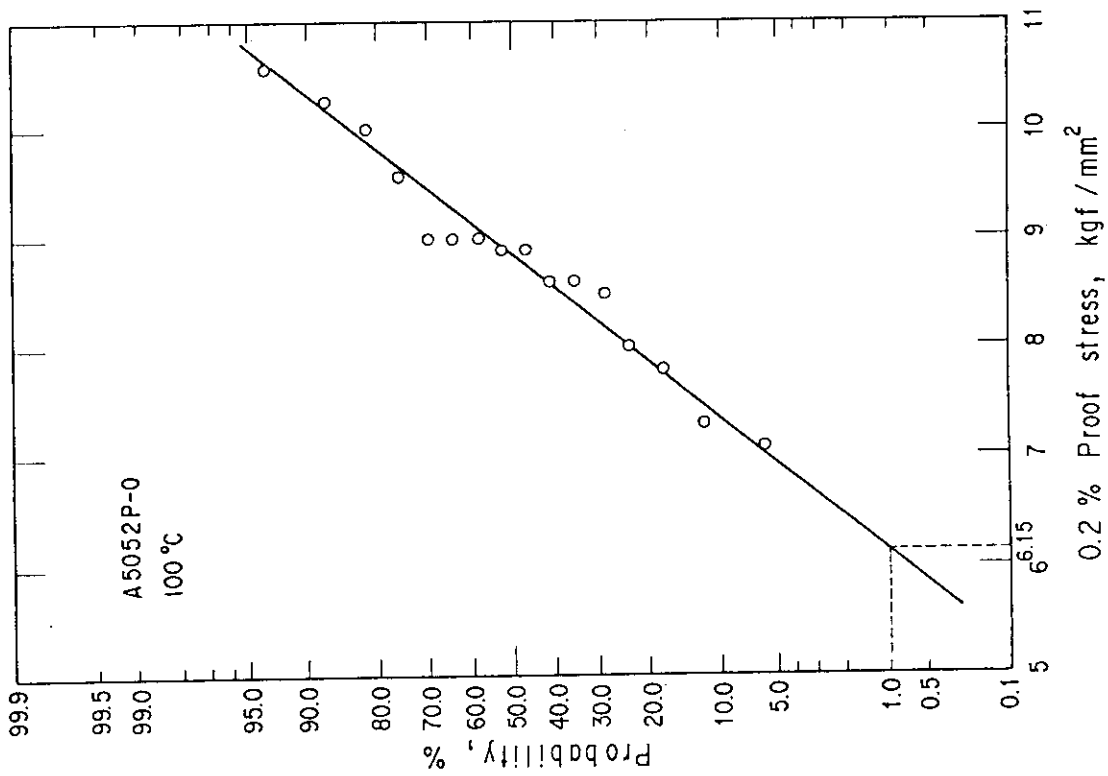
第5.17図 A5052P-Oの0.2%耐力の正規確率紙へのプロット
(室温)



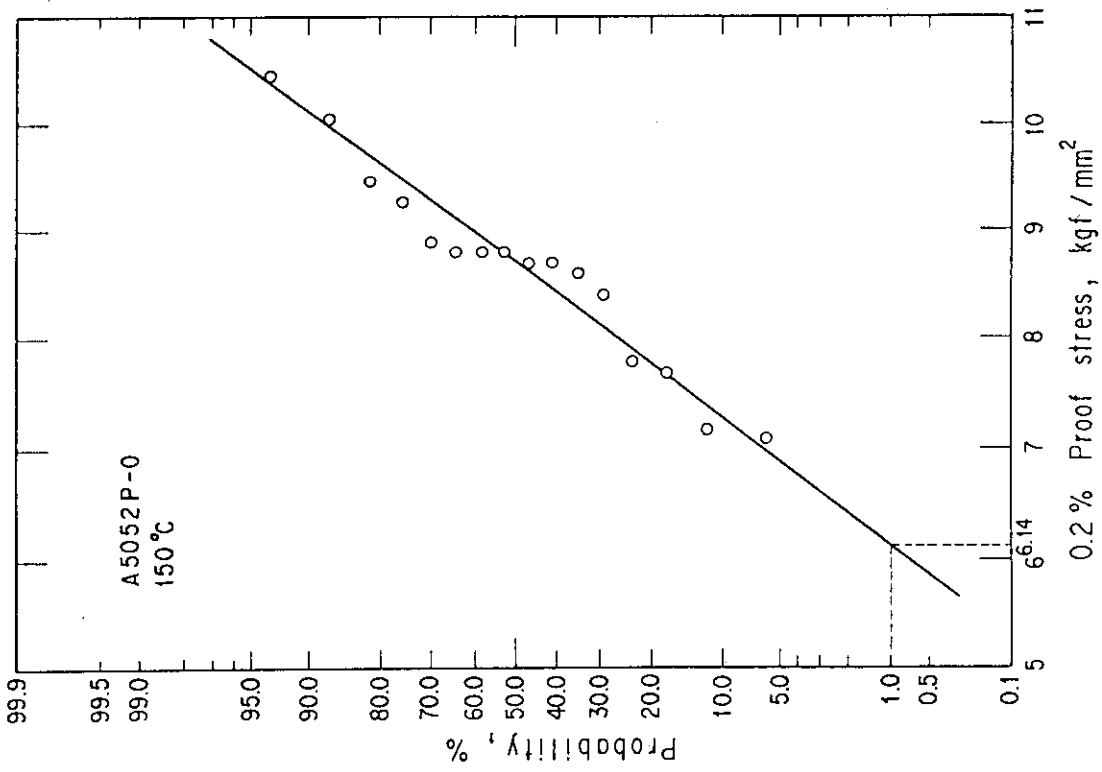
第5.18図 A5052P-Oの引張強さの正規確率紙へのプロット
(室温)



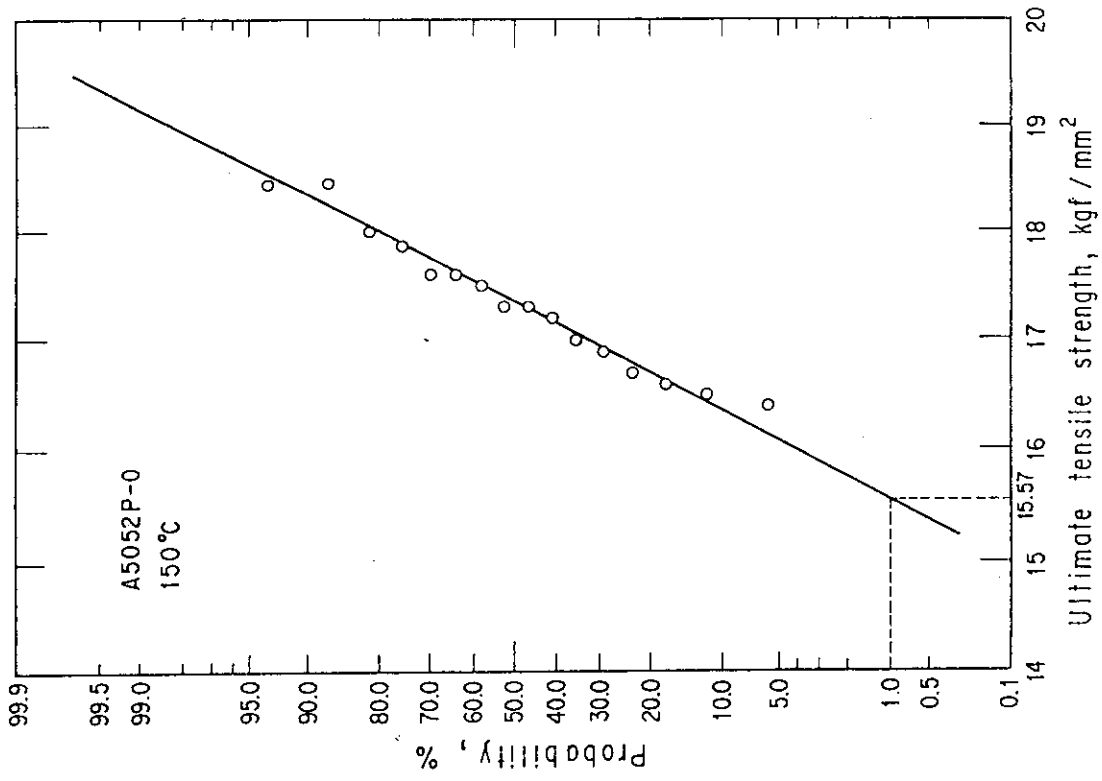
第 5.20 図 A 5052 P-O の引張強さの正規確率紙へのプロット
(100 °C)



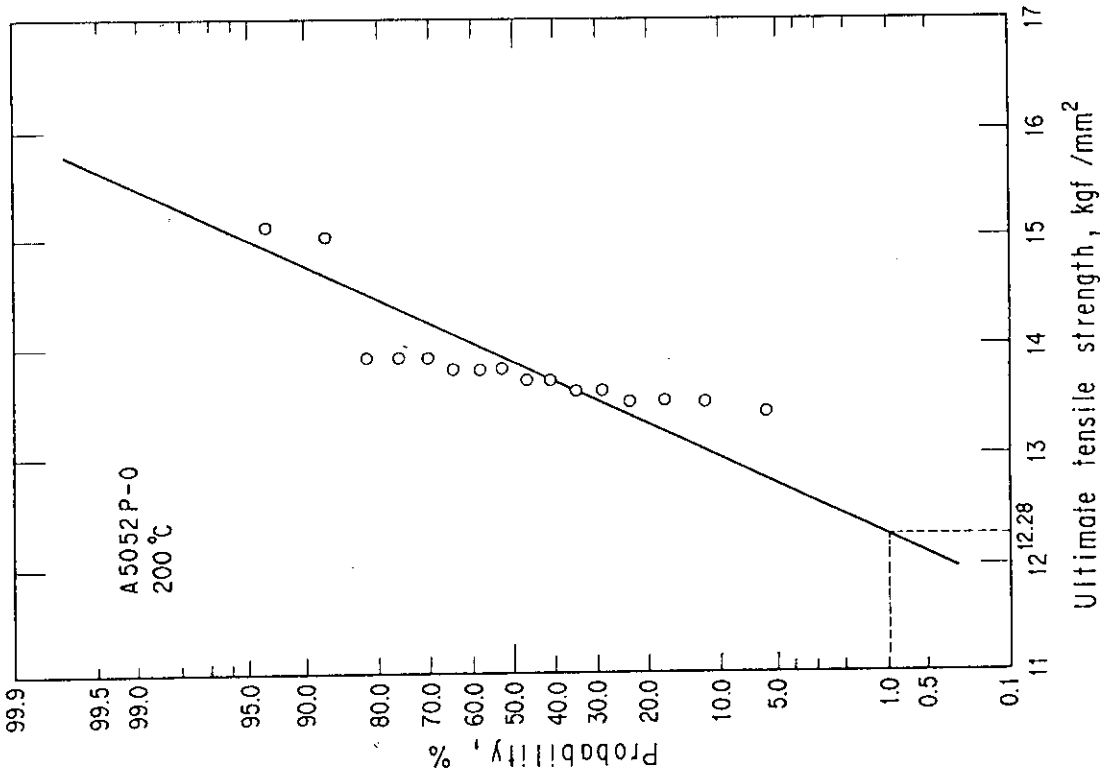
第 5.19 図 A 5052 P-O の 0.2% 耐力の正規確率紙へのプロット
(100 °C)



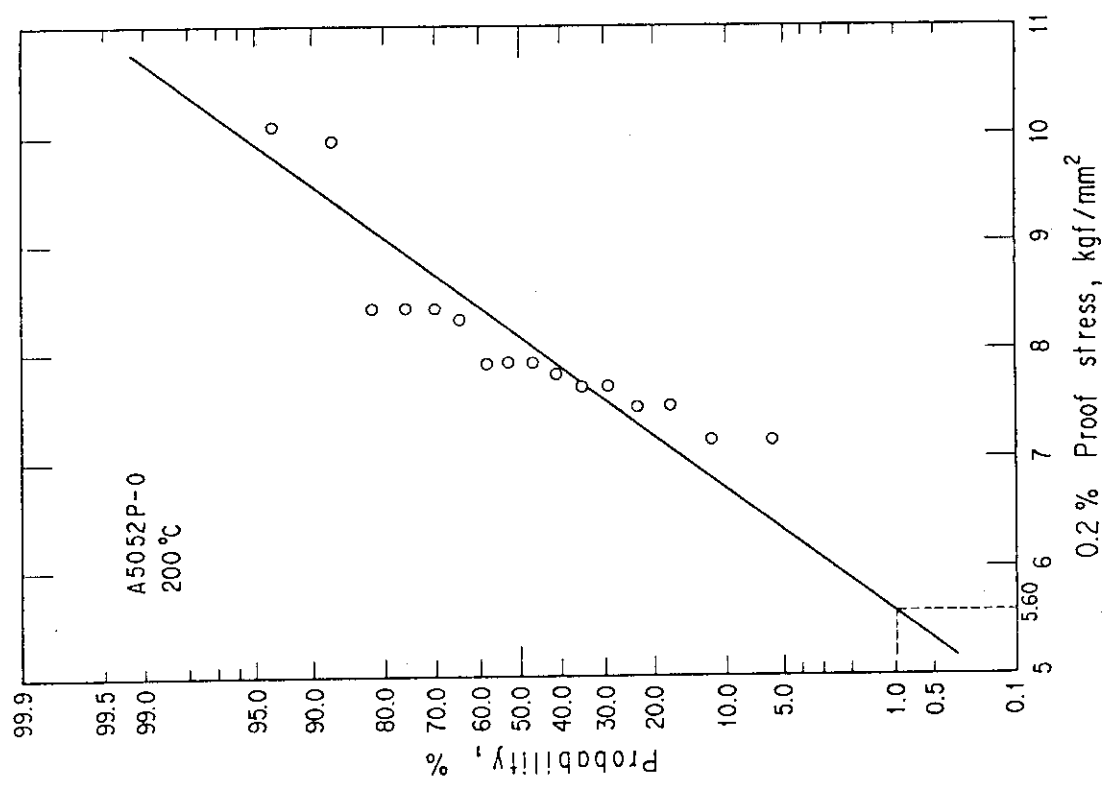
第5.21図 A5052 P-Oの0.2%耐力の正規確率紙へのプロット (150°C)



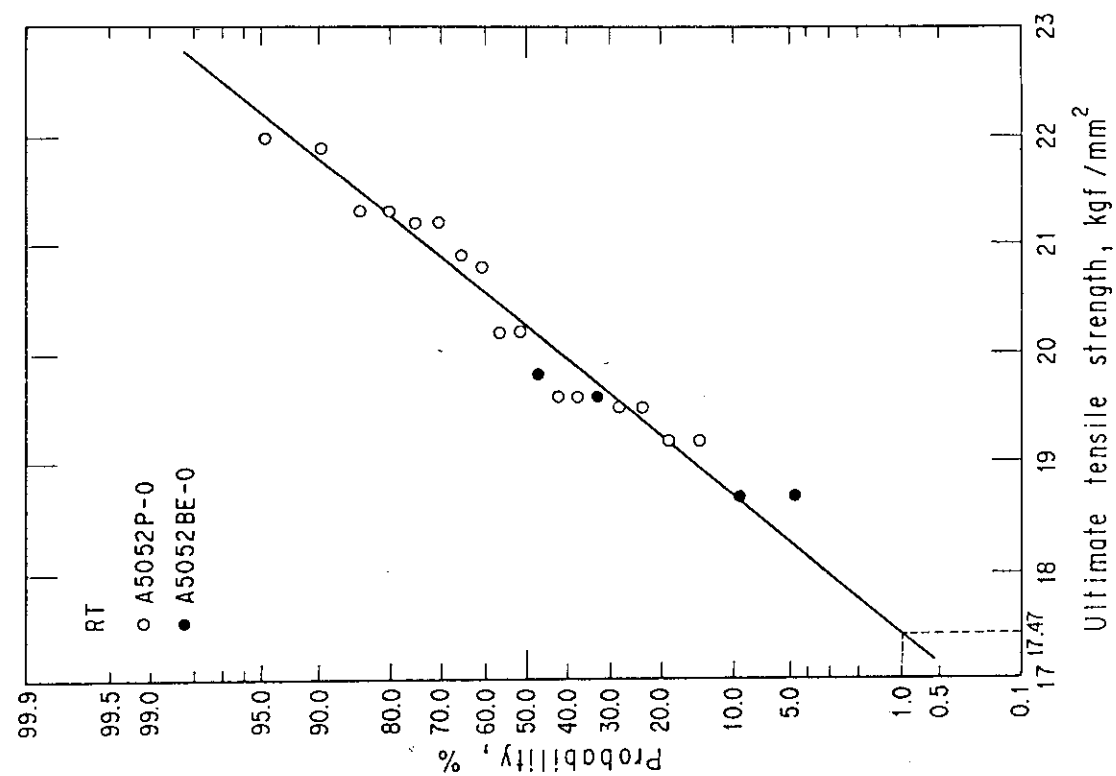
第5.22図 A5052 P-Oの引張強さの正規確率紙へのプロット (150°C)



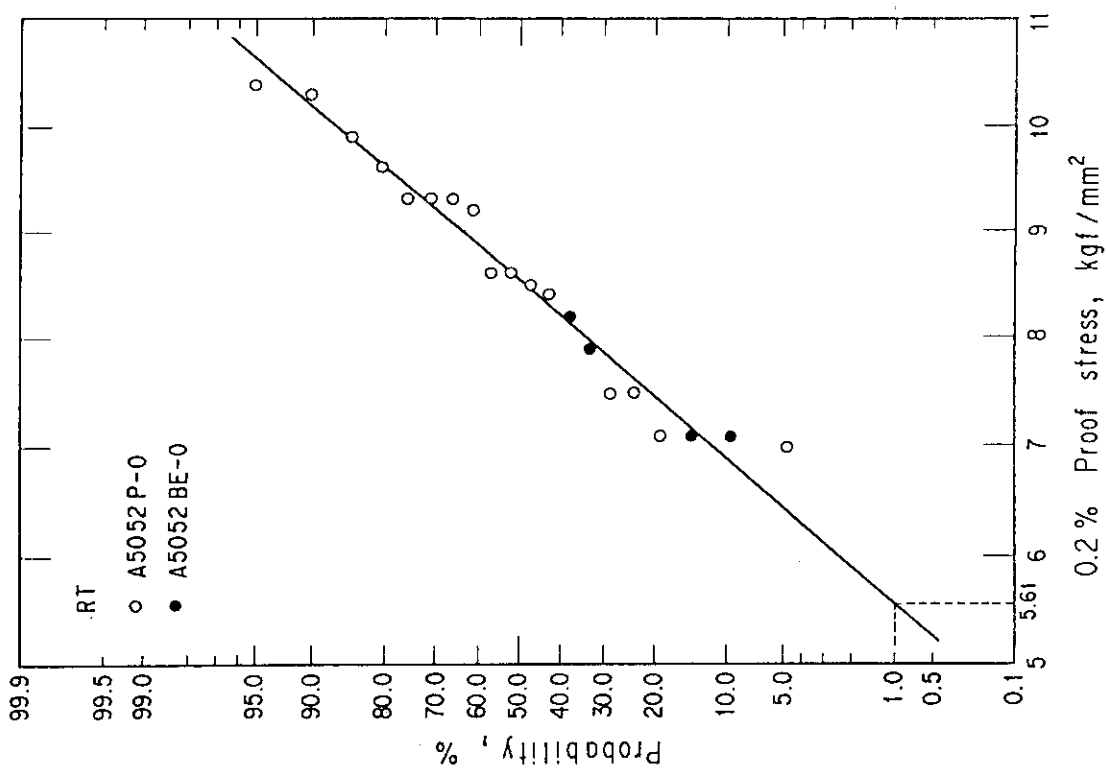
第 5.24 図 A5052P-O の引張強さの正規確率紙へのプロット (200°C)



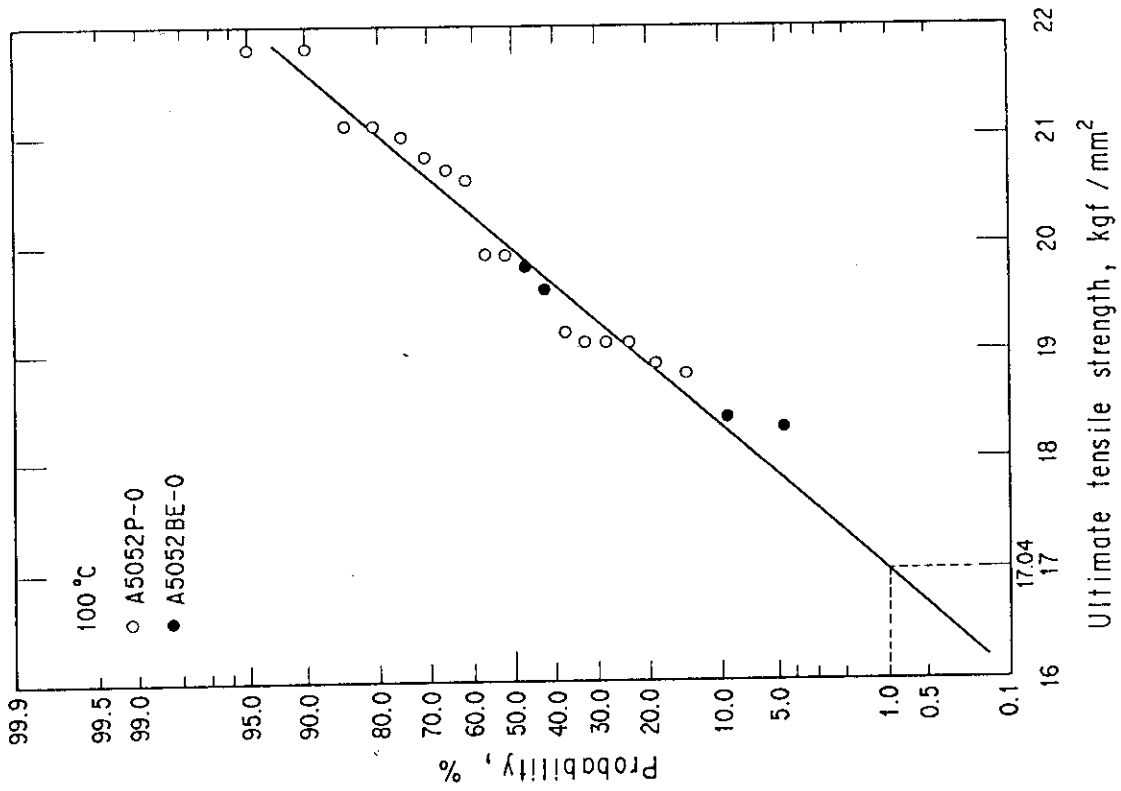
第 5.23 図 A5052P-O の 0.2% 耐力の正規確率紙へのプロット (200°C)



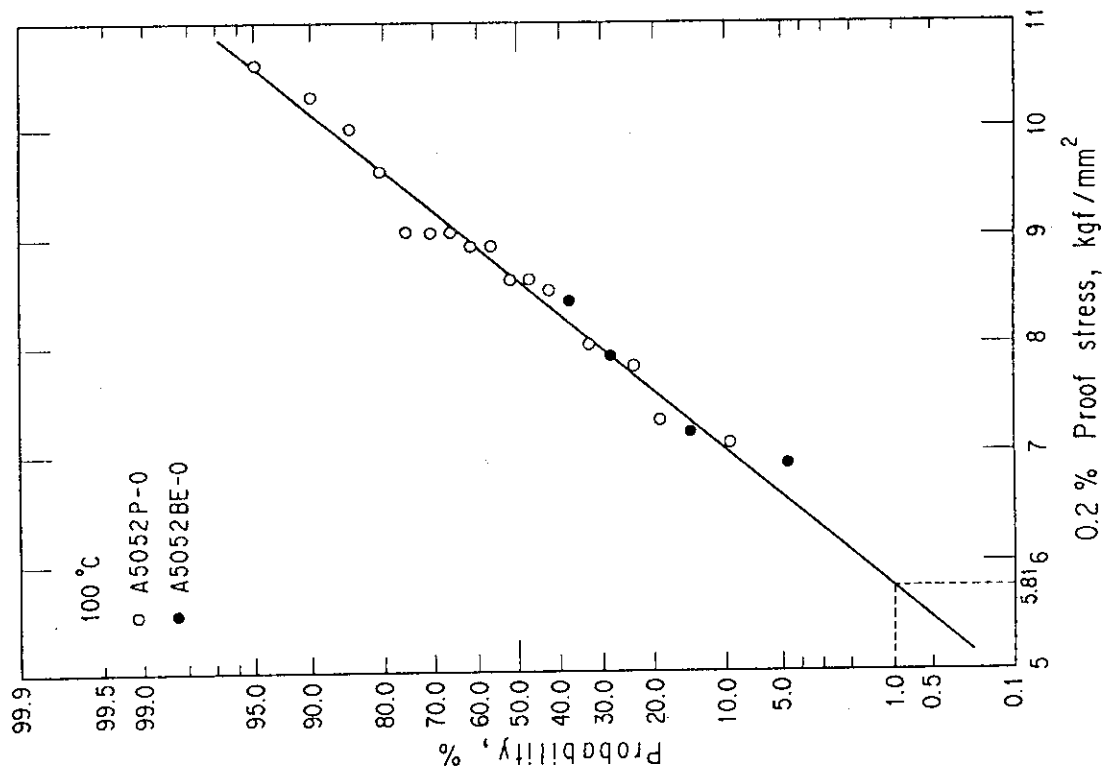
第 5.26 図 A5052P-O 及び A5052BE-O の引張強さの
 正規確率紙へのプロット
 (室温)



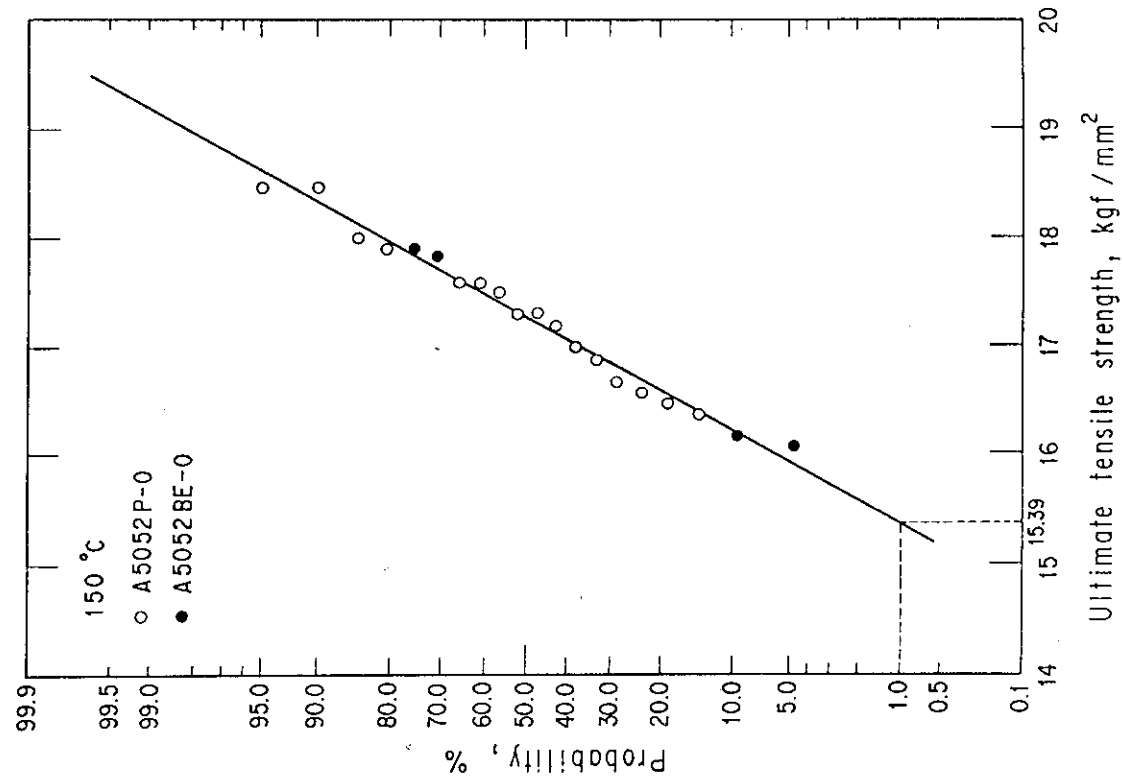
第 5.25 図 A5052P-O 及び A5052BE-O の 0.2% 耐力の
 正規確率紙へのプロット
 (室温)



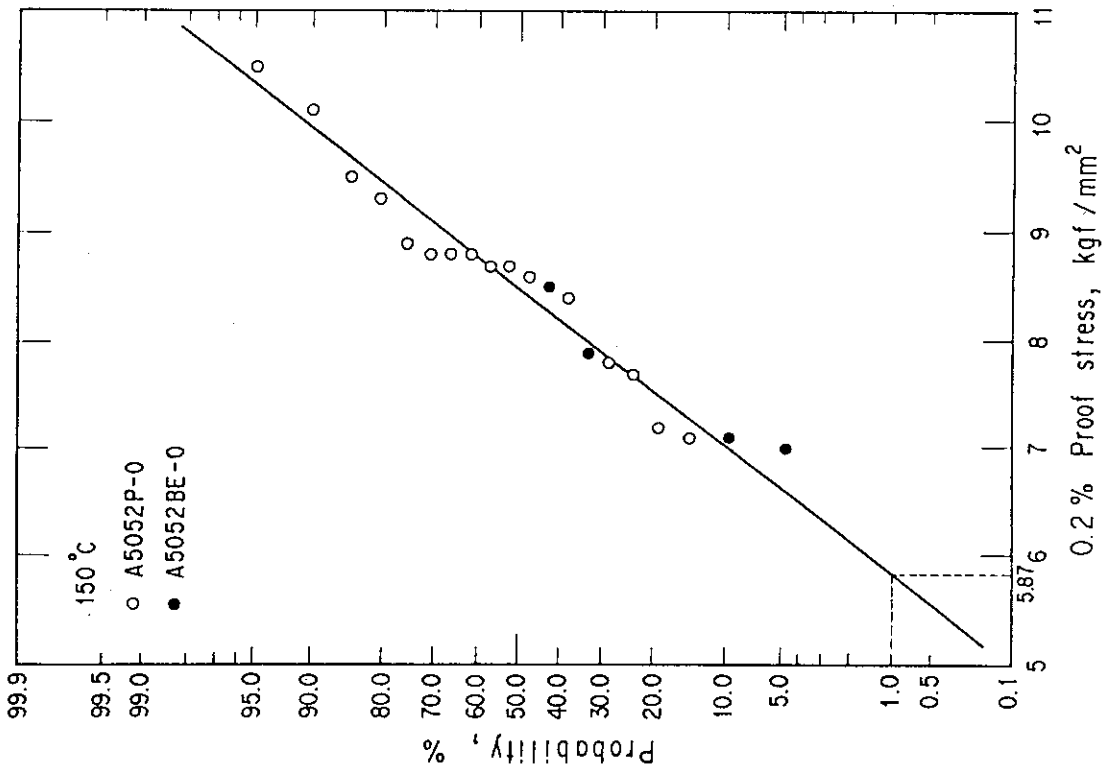
第 5.28 図 A5052P-O 及び A5052BE-O の引張強さの
 正規確率紙へのプロット
 (100 °C)



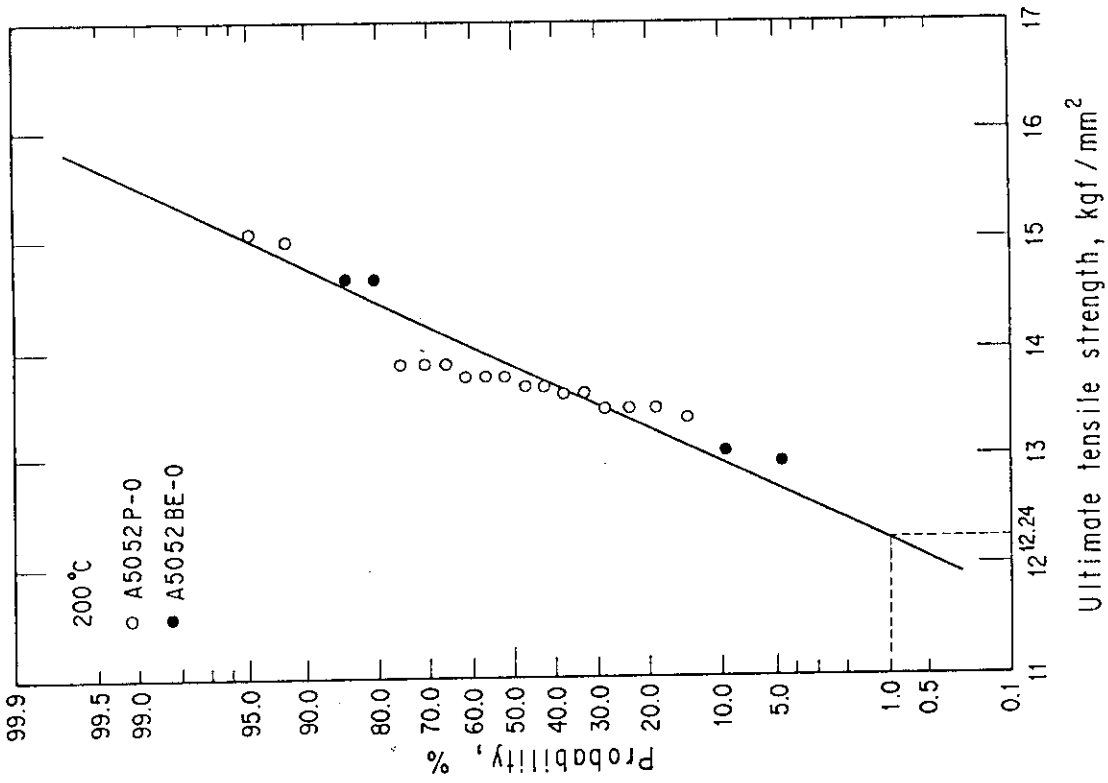
第 5.27 図 A5052P-O 及び A5052BE-O の 0.2% 耐力の
 正規確率紙へのプロット
 (100 °C)



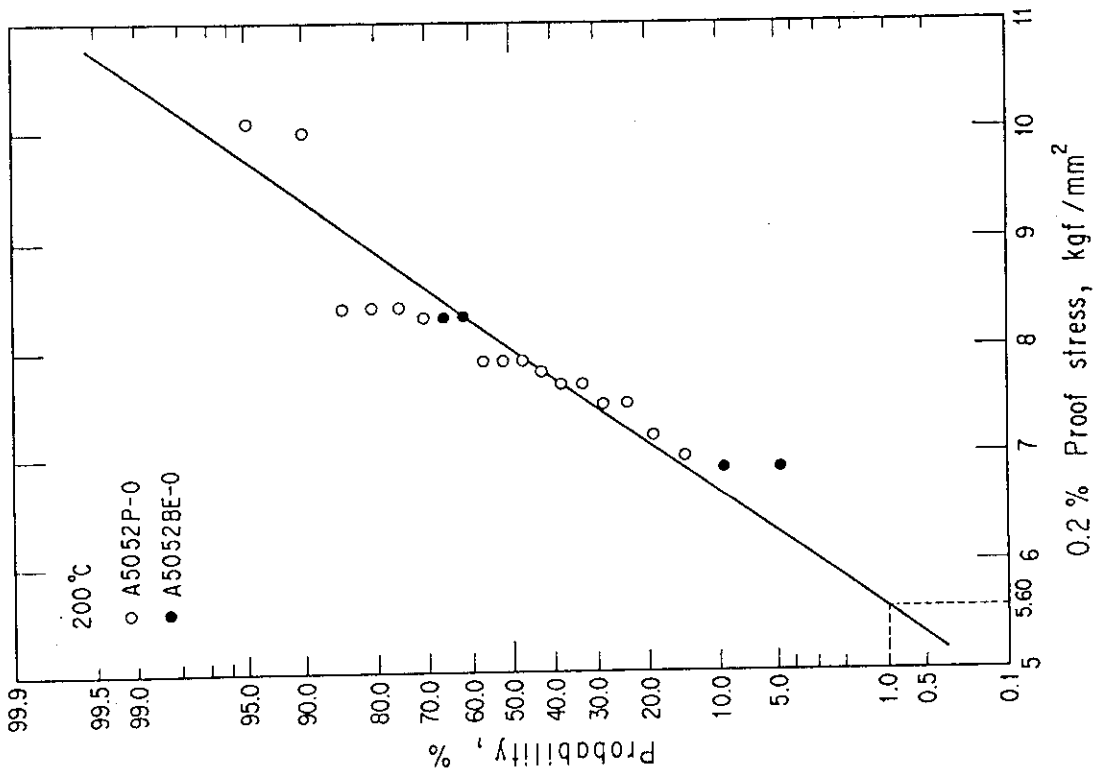
第 5.30 図 A5052P-O 及び A5052BE-O の引張強さの
 正規確率紙へのプロット
 (150 °C)



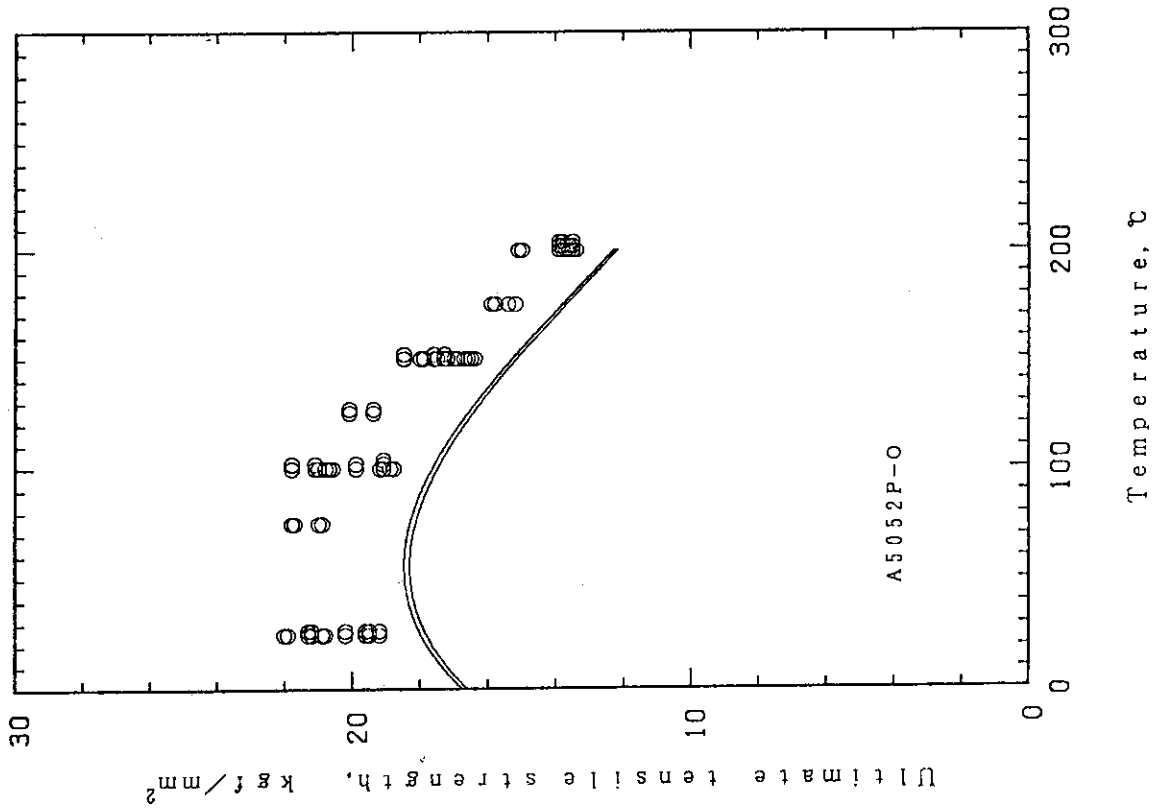
第 5.29 図 A5052P-O 及び A5052BE-O の 0.2% 耐力の
 正規確率紙へのプロット
 (150 °C)



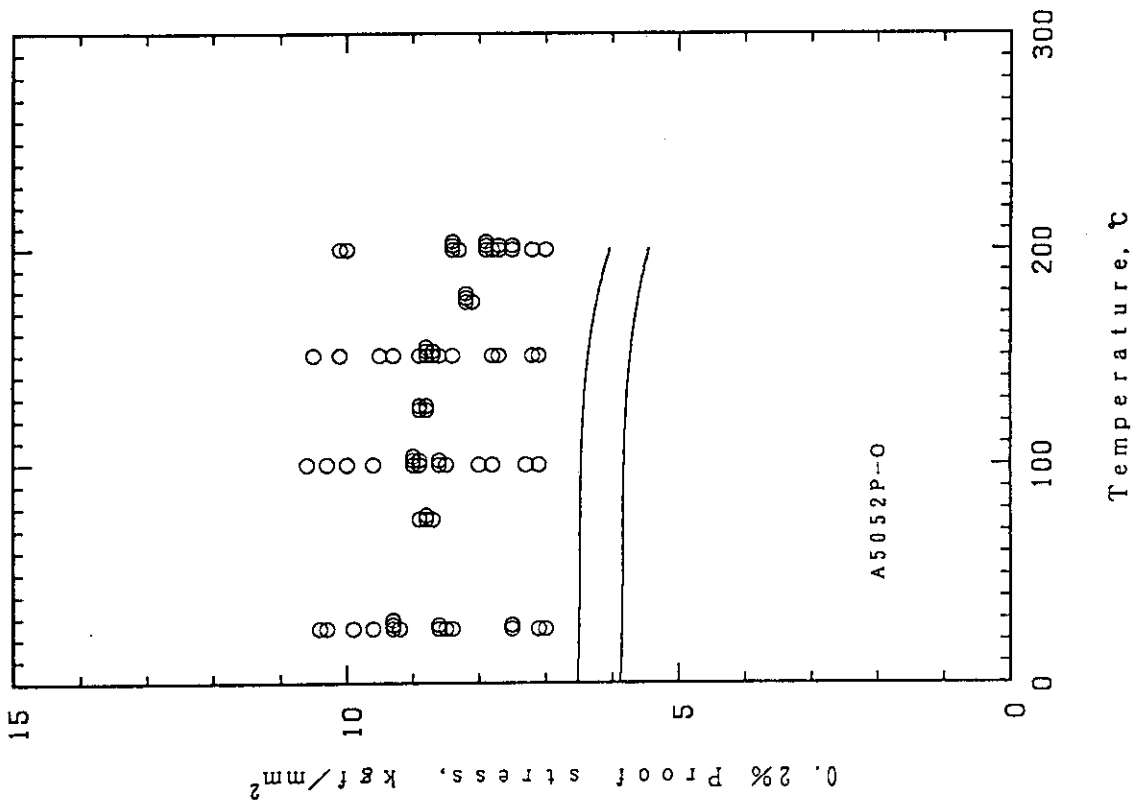
第 5.32 図 A 5052 P-O 及び A 5052 BE-O の引張強さの
正規確率紙へのプロット
(200°C)



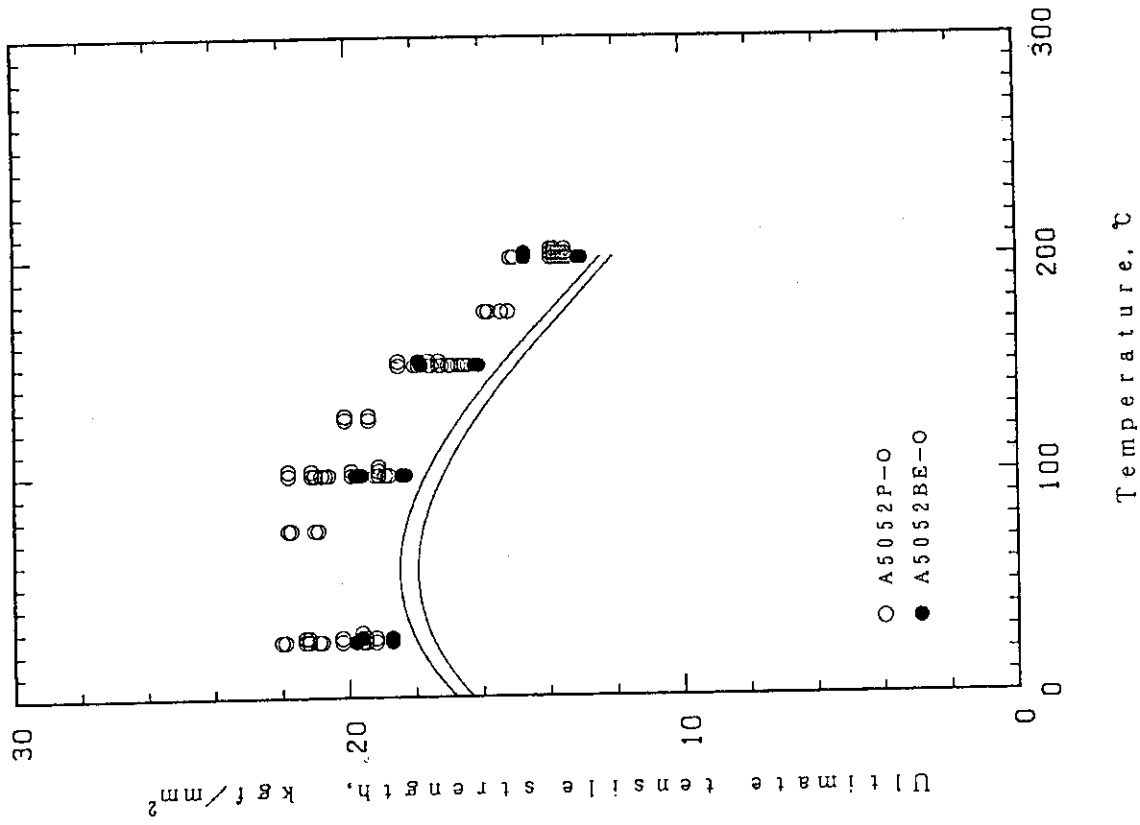
第 5.31 図 A 5052 P-O 及び A 5052 BE-O の 0.2% 耐力の
正規確率紙へのプロット
(200°C)



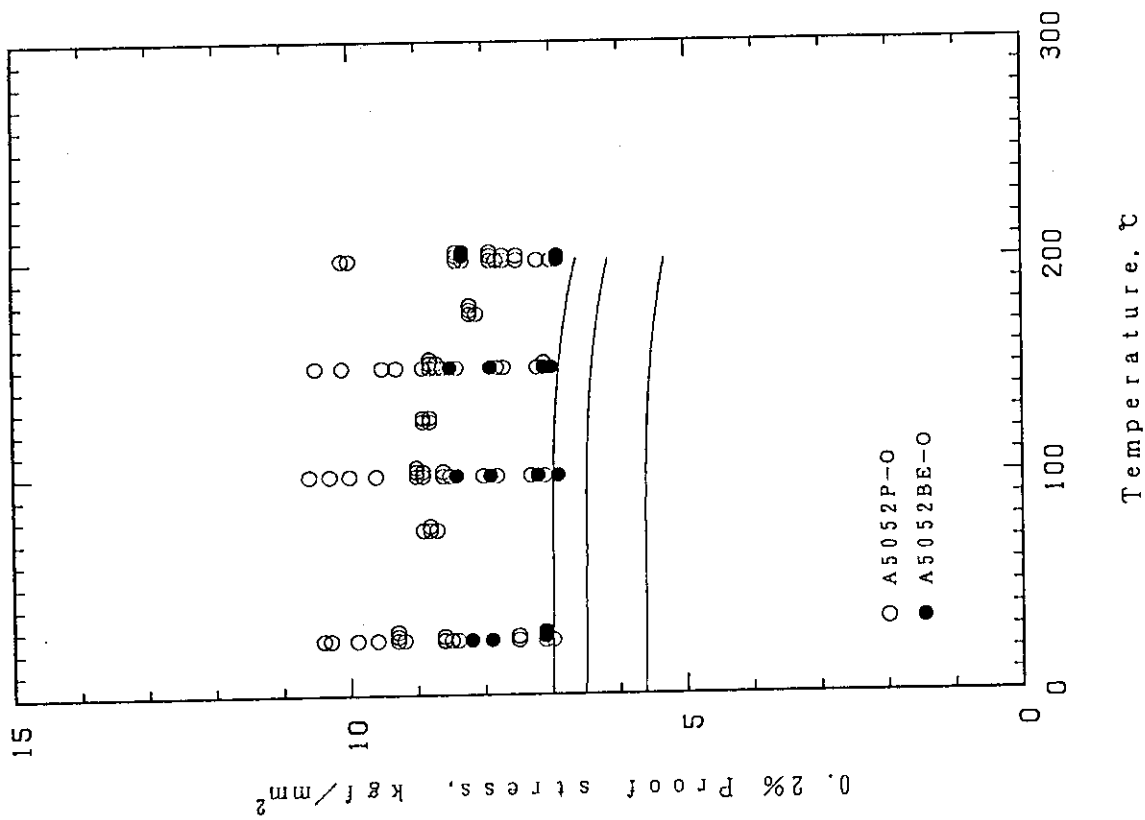
第 5.34 図 A5052P-O の引張強さと MPV 曲線



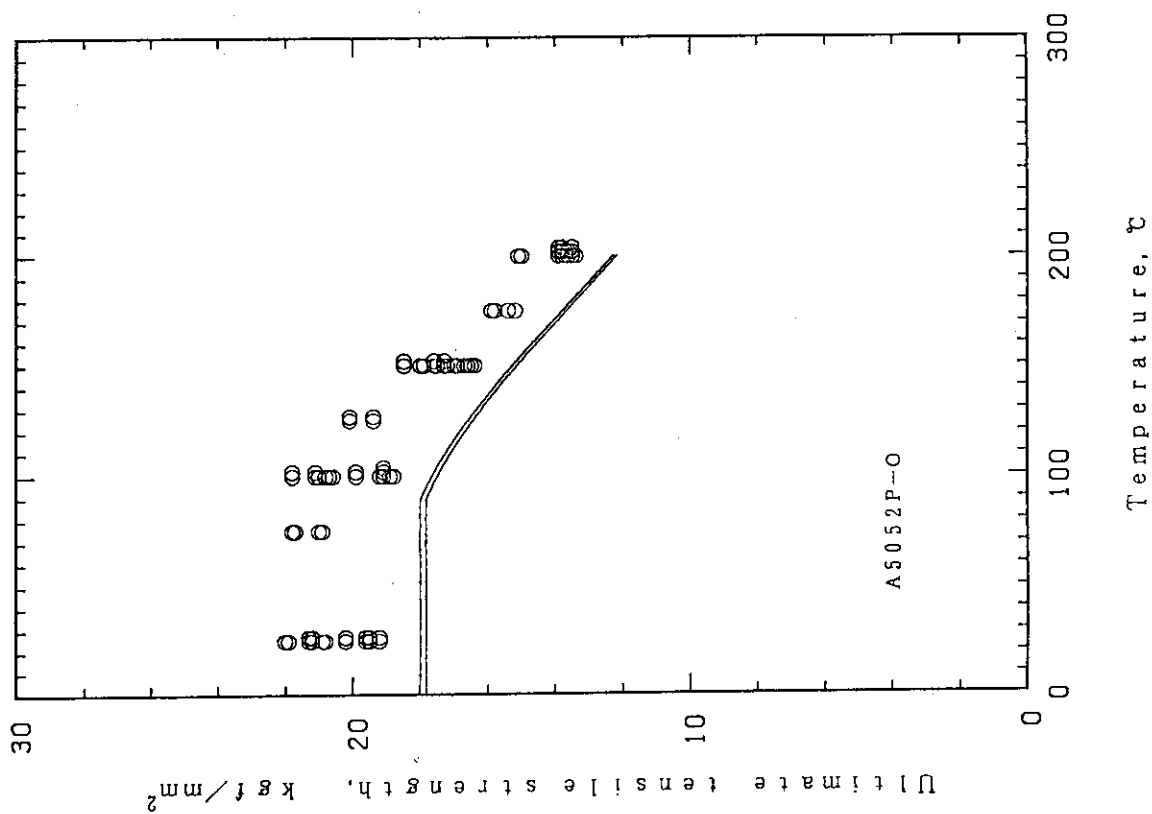
第 5.33 図 A5052P-O の 0.2% 耐力と MPV 曲線



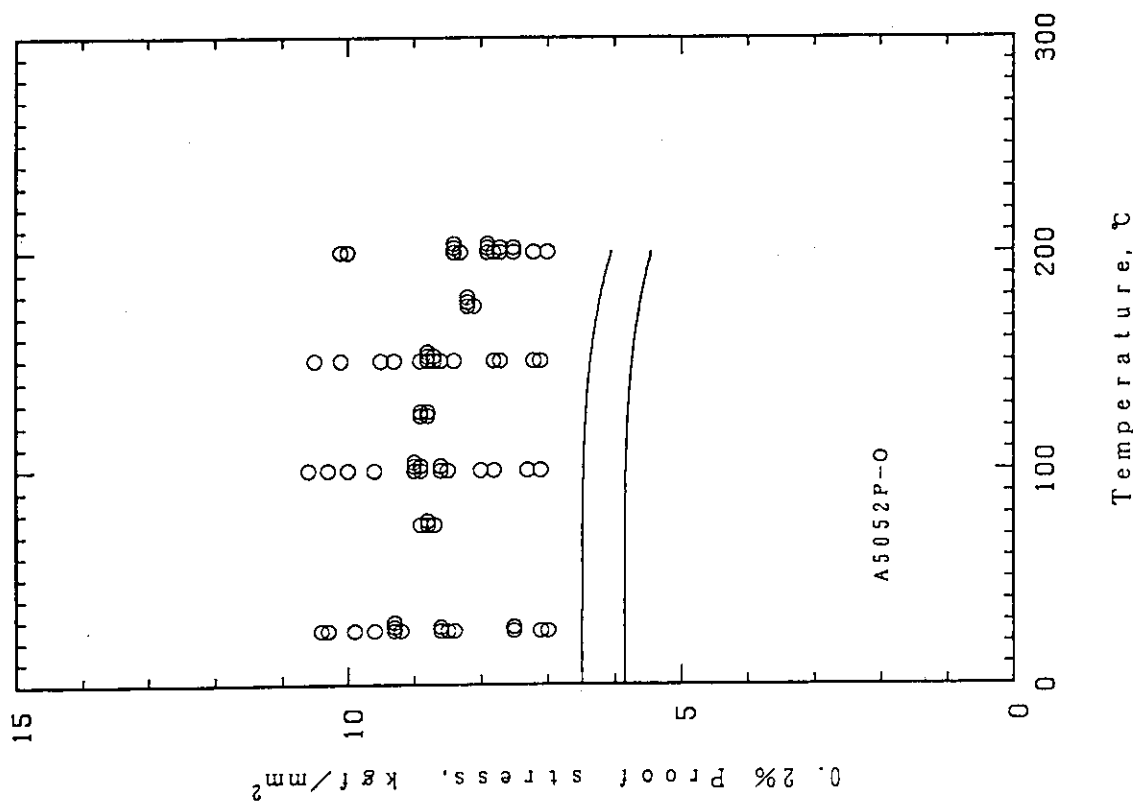
第 5.36 図 A5052P-O 及び A5052BE-O の引張強さと MPV 曲線



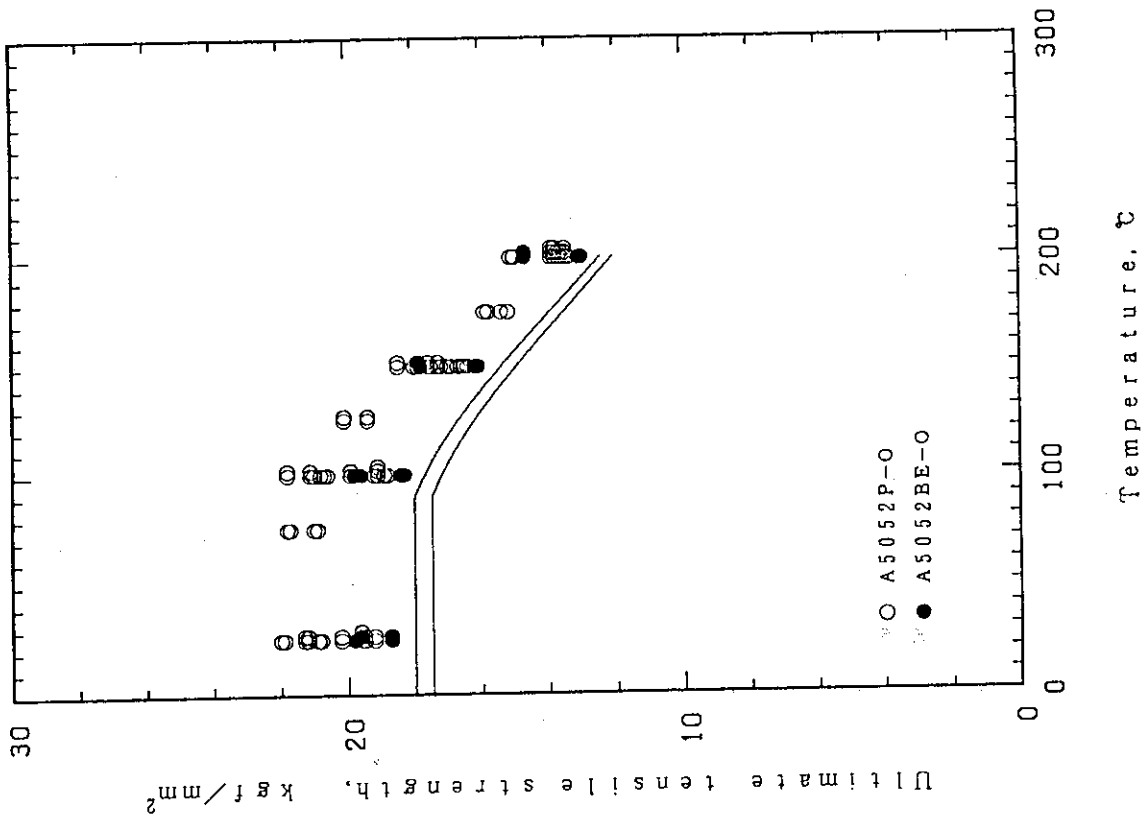
第 5.35 図 A5052P-O 及び A5052BE-O の 0.2% 耐力と MPV 曲線



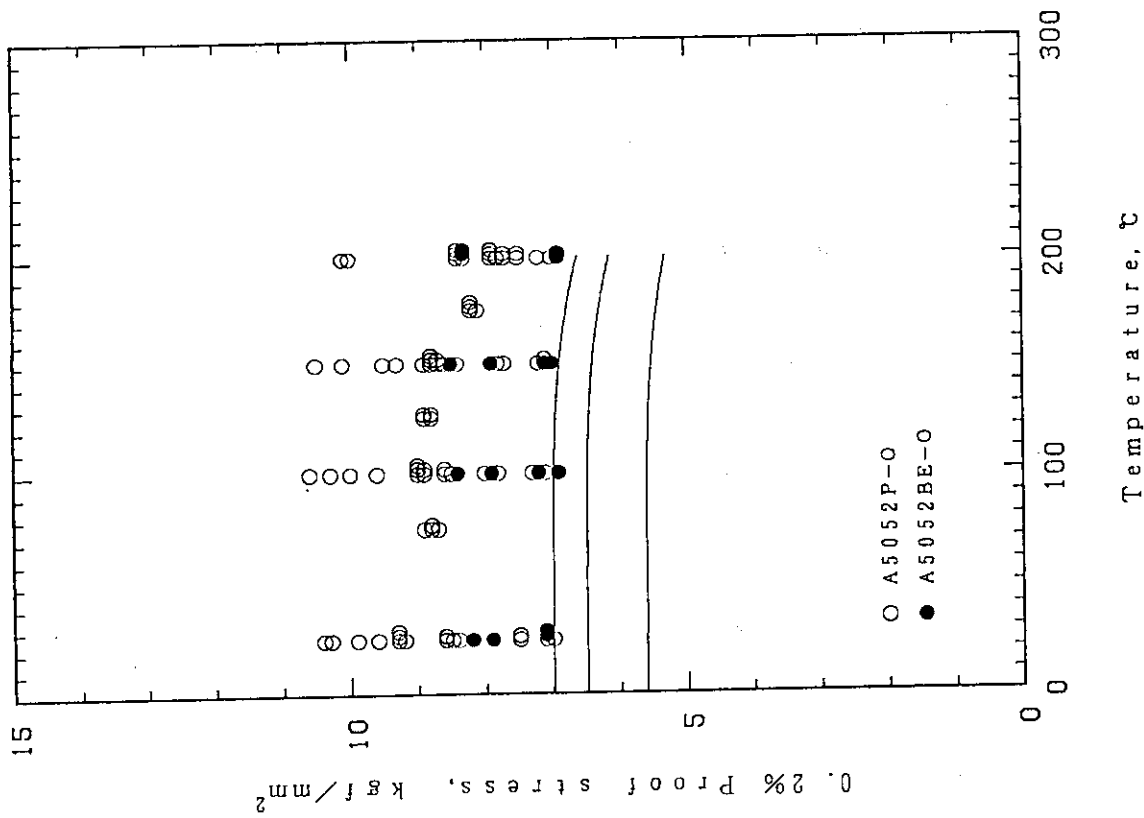
第 5.38 図 A5052P-O の引張強さと曲線 B



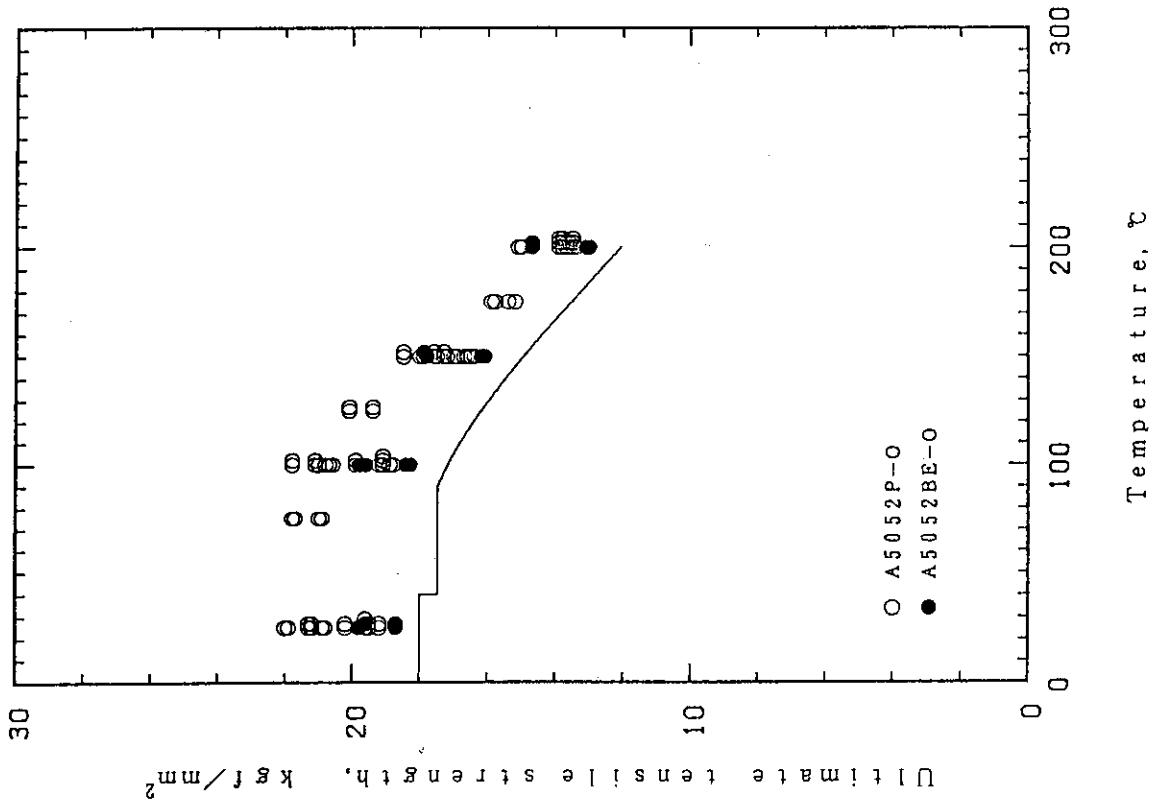
第 5.37 図 A5052P-O の 0.2% 耐力と曲線 B



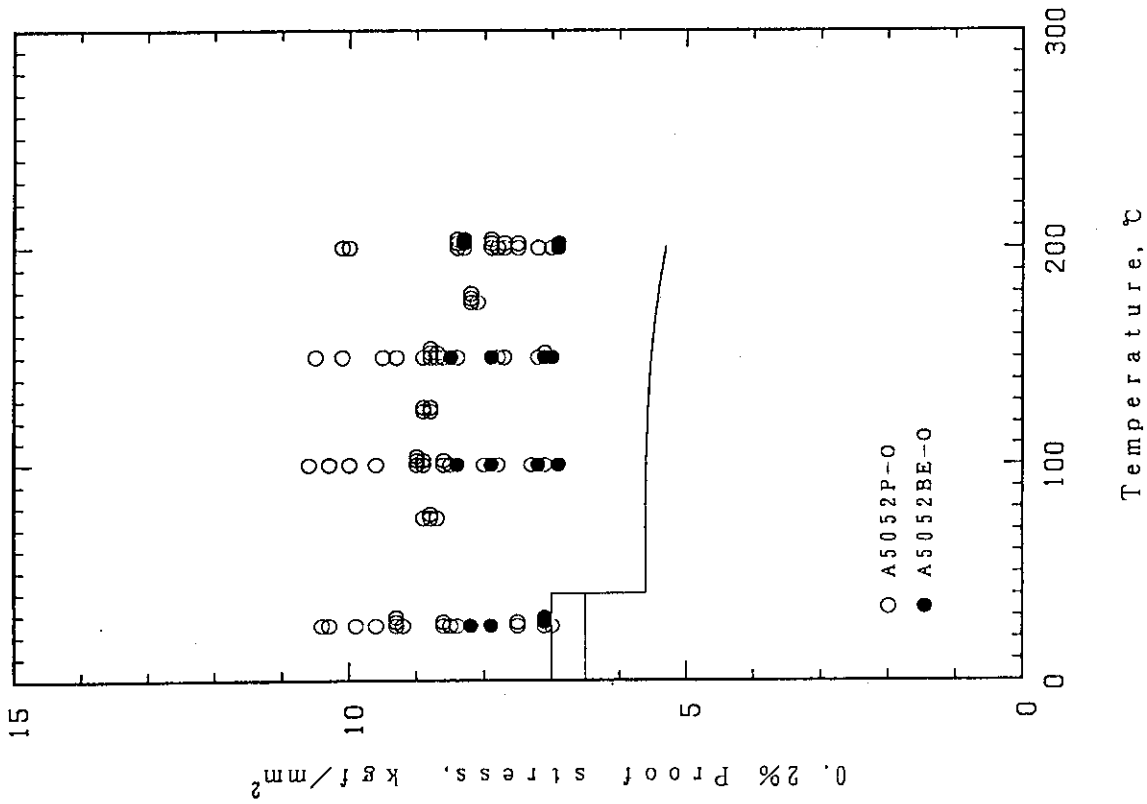
第 5.40 図 A5052P-O 及び A5052BE-O の引張強さと曲線 B



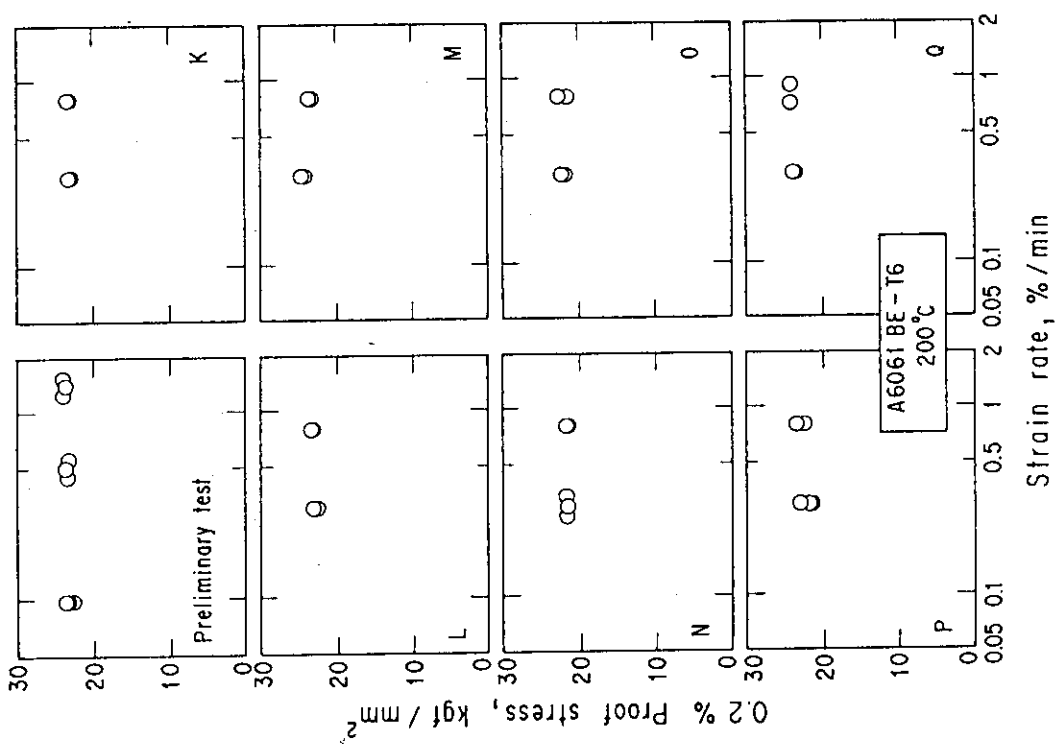
第 5.39 図 A5052P-O 及び A5052BE-O の 0.2% 耐力と曲線 B



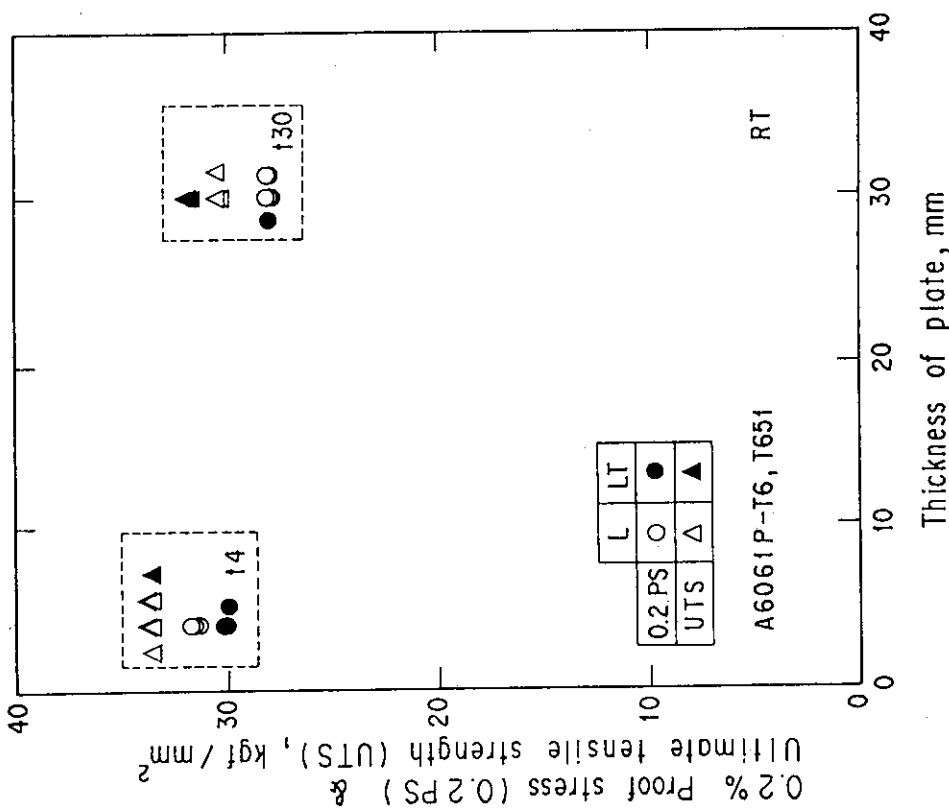
第5.42図 A5052P-O及びA5052BE-Oの引張強さと設計引張強さSuの原案



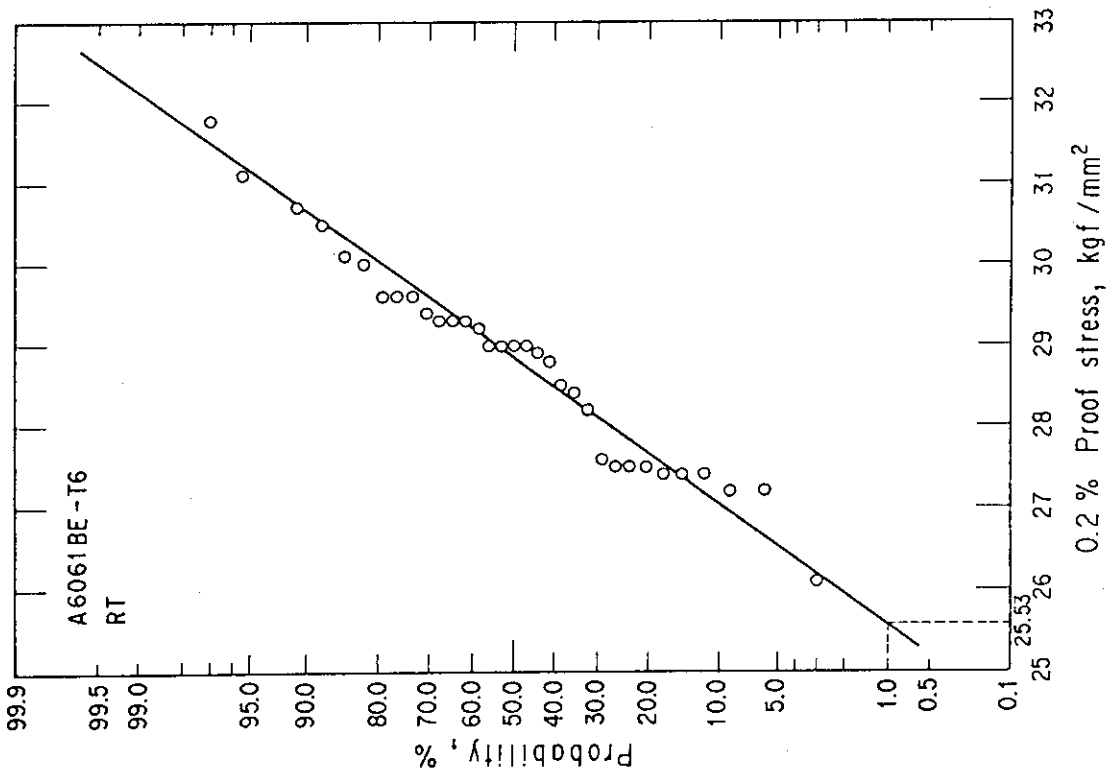
第5.41図 A5052P-O及びA5052BE-Oの0.2%耐力と設計降伏点Syの原案



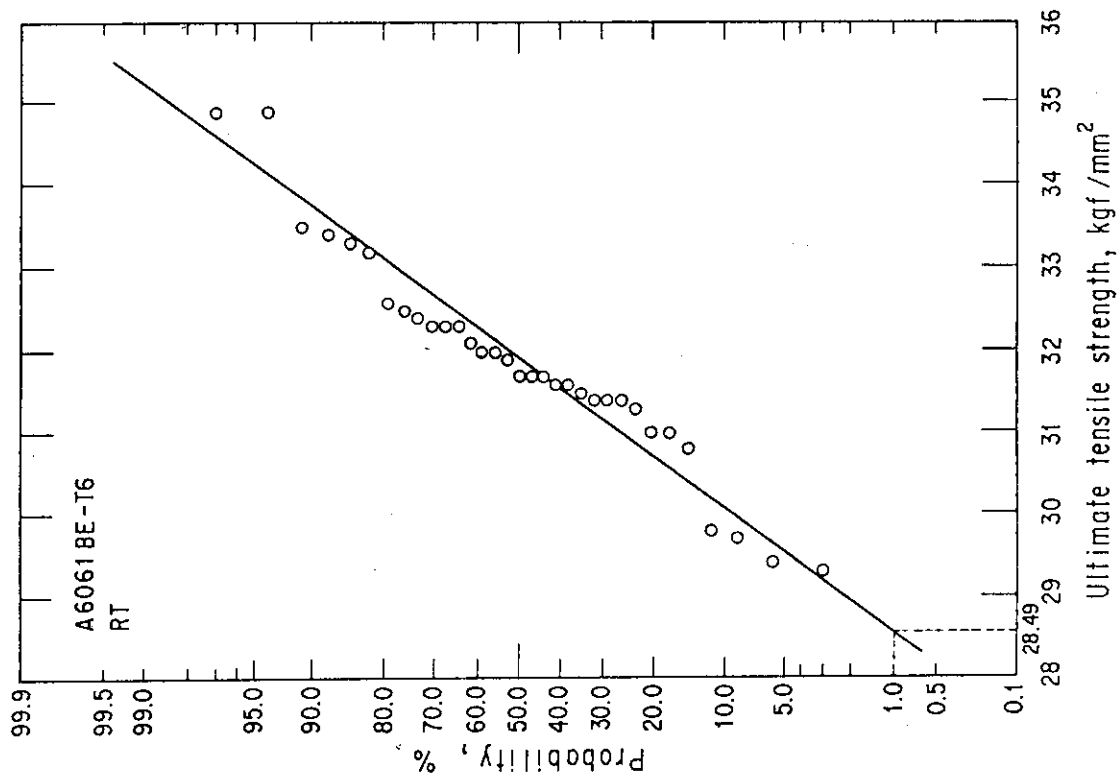
第 5.44 図 A 6061 BE-T6 の 0.2% 耐力に及ぼすひずみ速度の影響



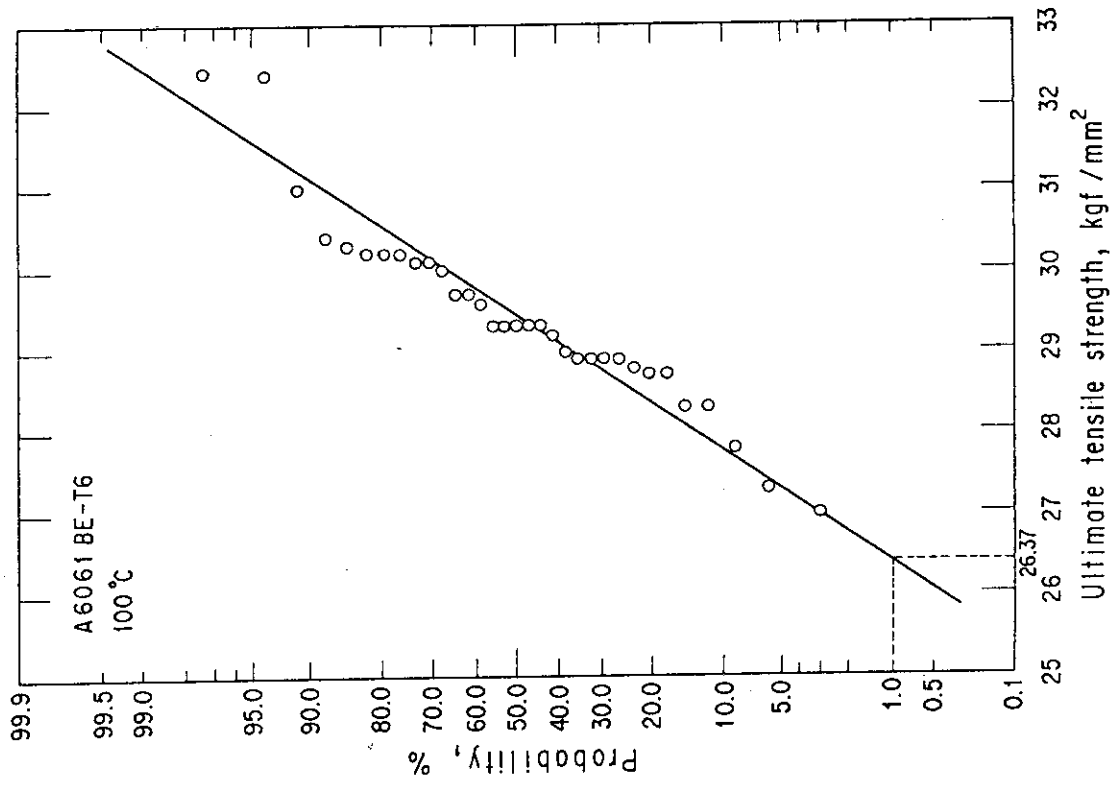
第 5.43 図 A 6061P-T6, T651 の 0.2% 耐力及び引張強さに及ぼす
素材厚さ及び試験片採取方向の影響



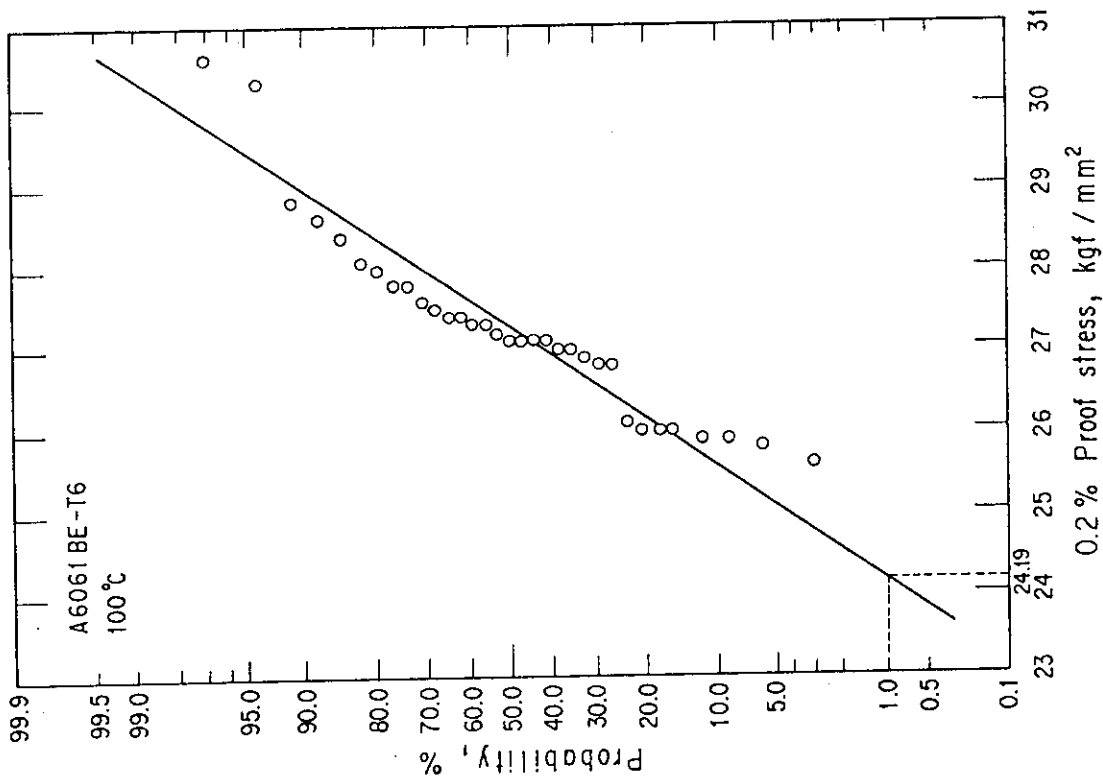
第5.45図 A6061BE-T6の0.2%耐力の正規確率紙へのプロット
(室温)



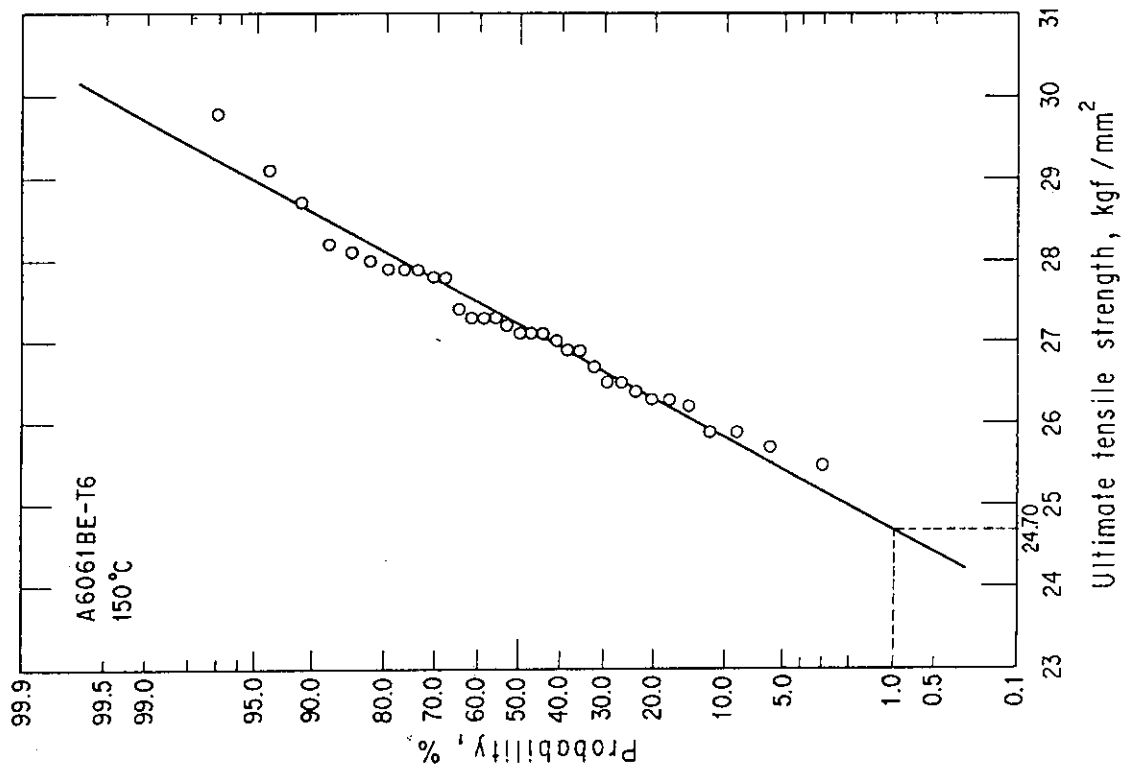
第5.46図 A6061BE-T6の引張強さの正規確率紙へのプロット
(室温)



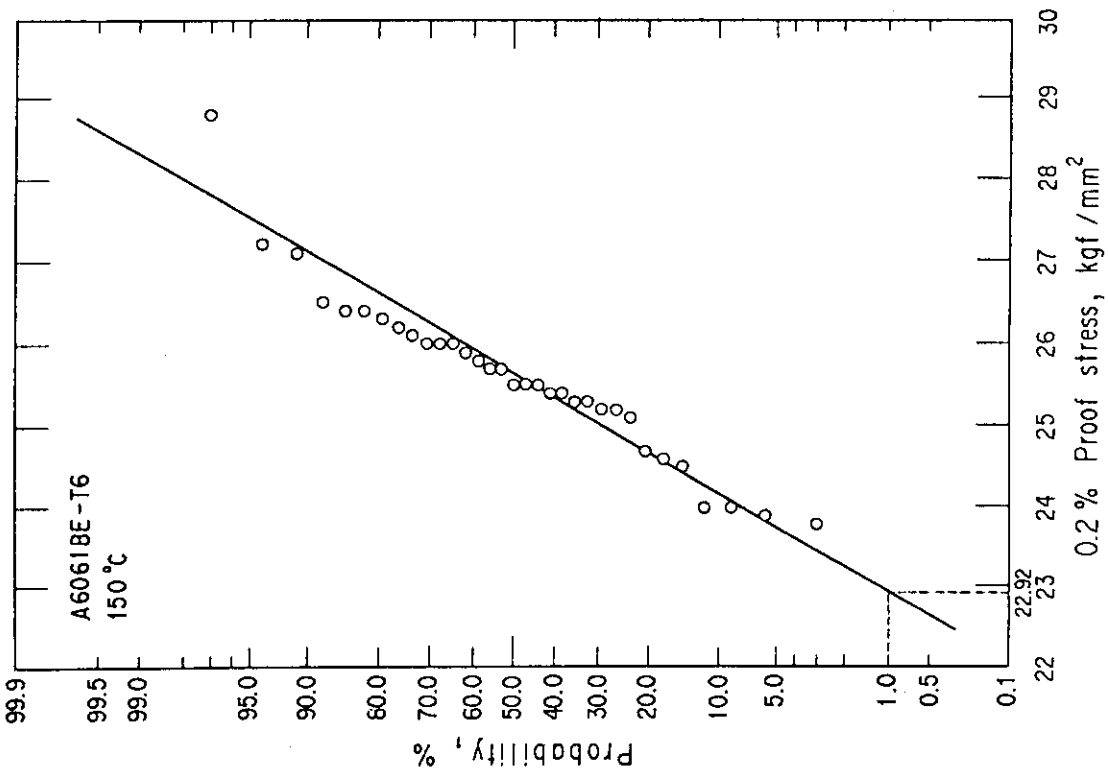
第 5.48 図 A6061BE-T6 の引張強さの正規確率紙へのプロット (100°C)



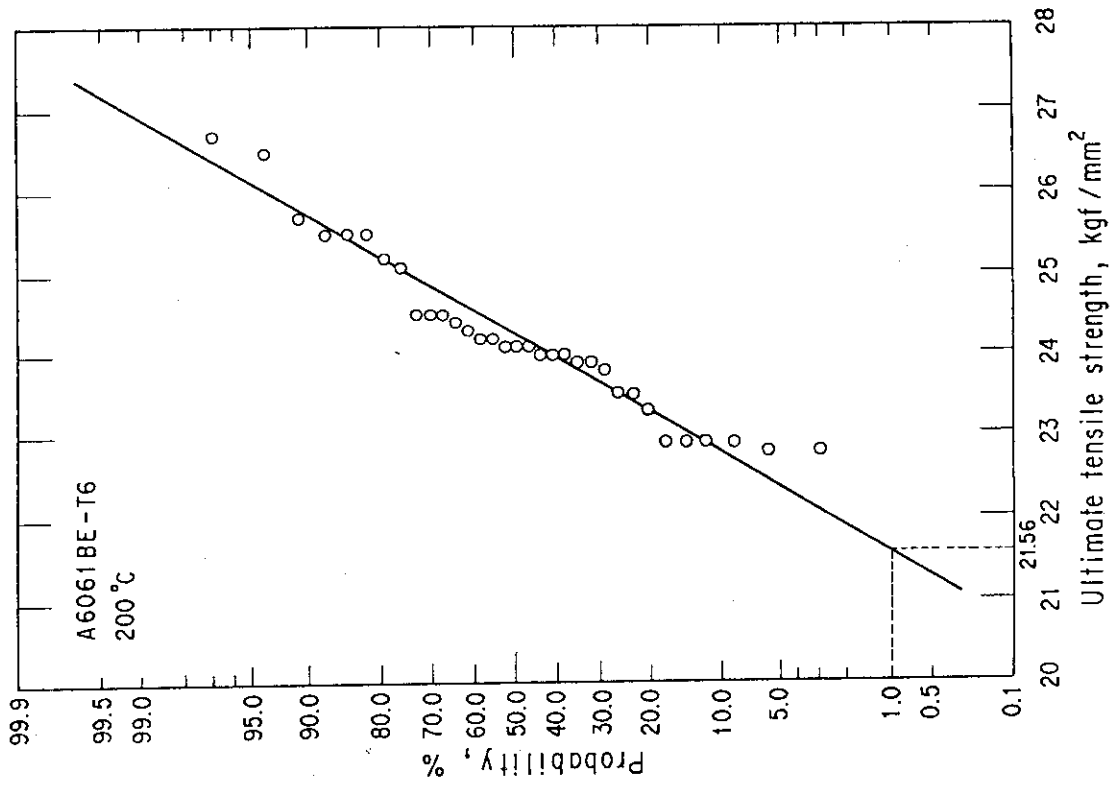
第 5.47 図 A6061BE-T6 の 0.2% 耐力の正規確率紙へのプロット (100°C)



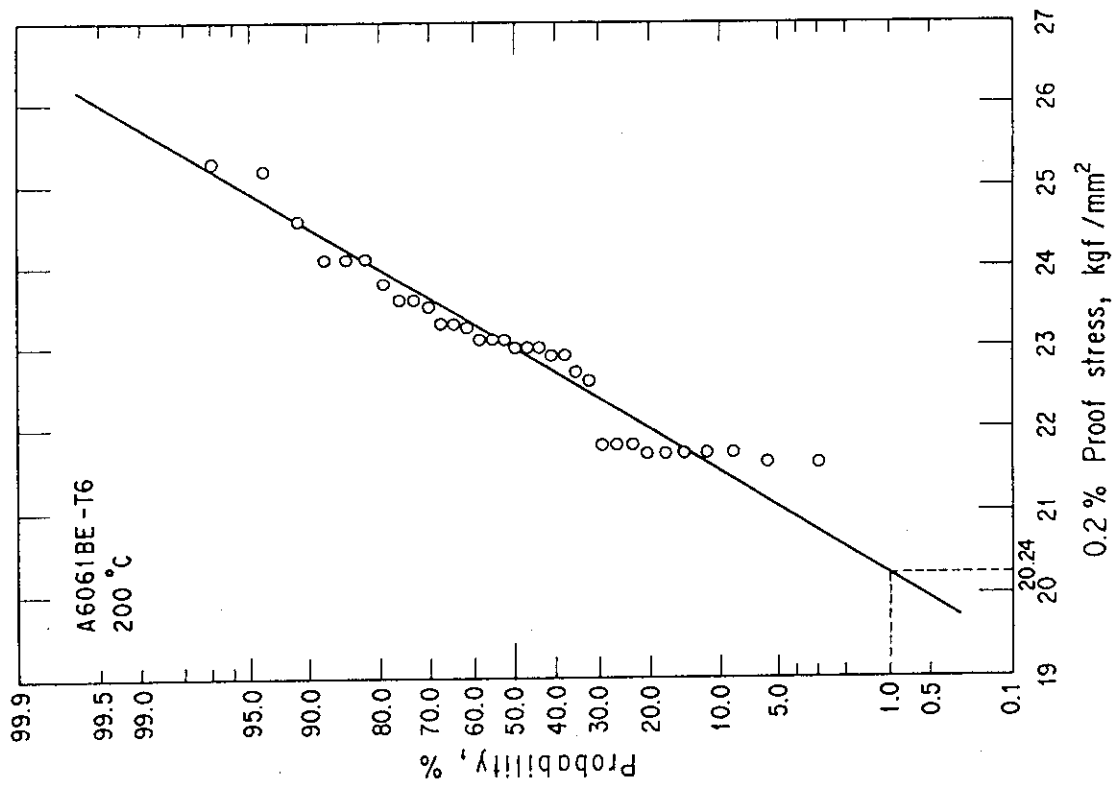
第 5.50 図 A6061BE-T6 の引張強さの正規確率紙へのプロット (150°C)



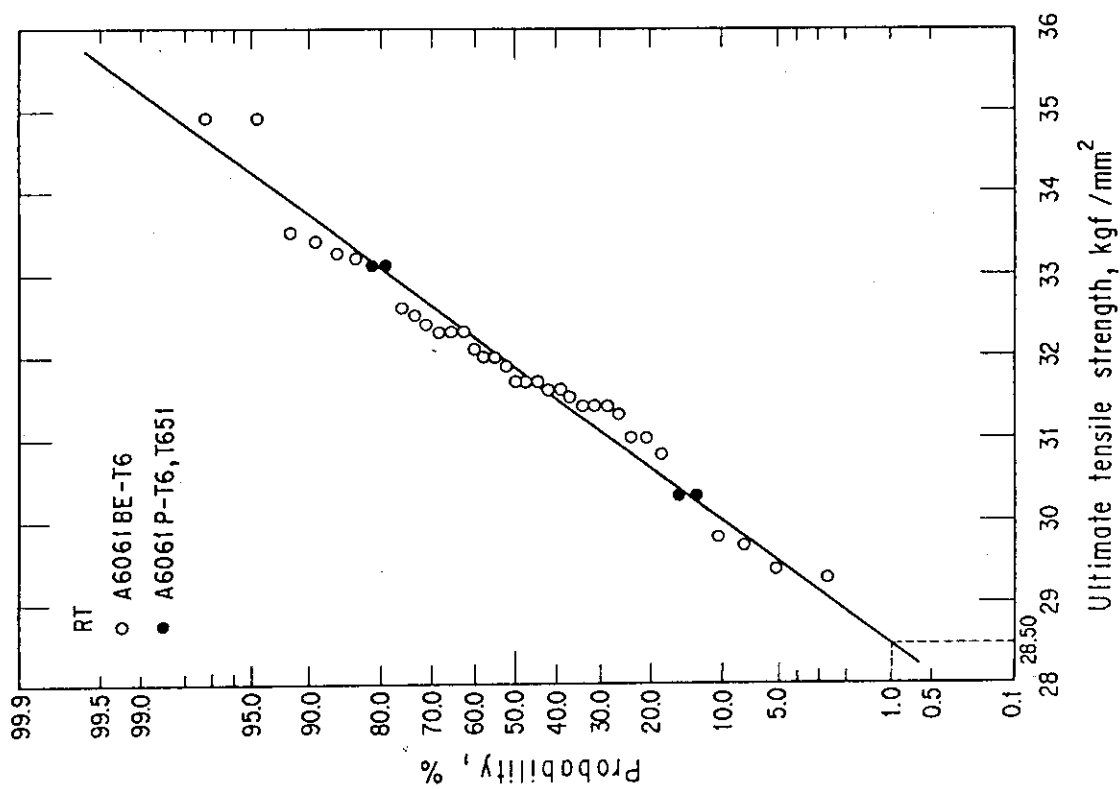
第 5.49 図 A6061BE-T6 の 0.2% 耐力の正規確率紙へのプロット (150°C)



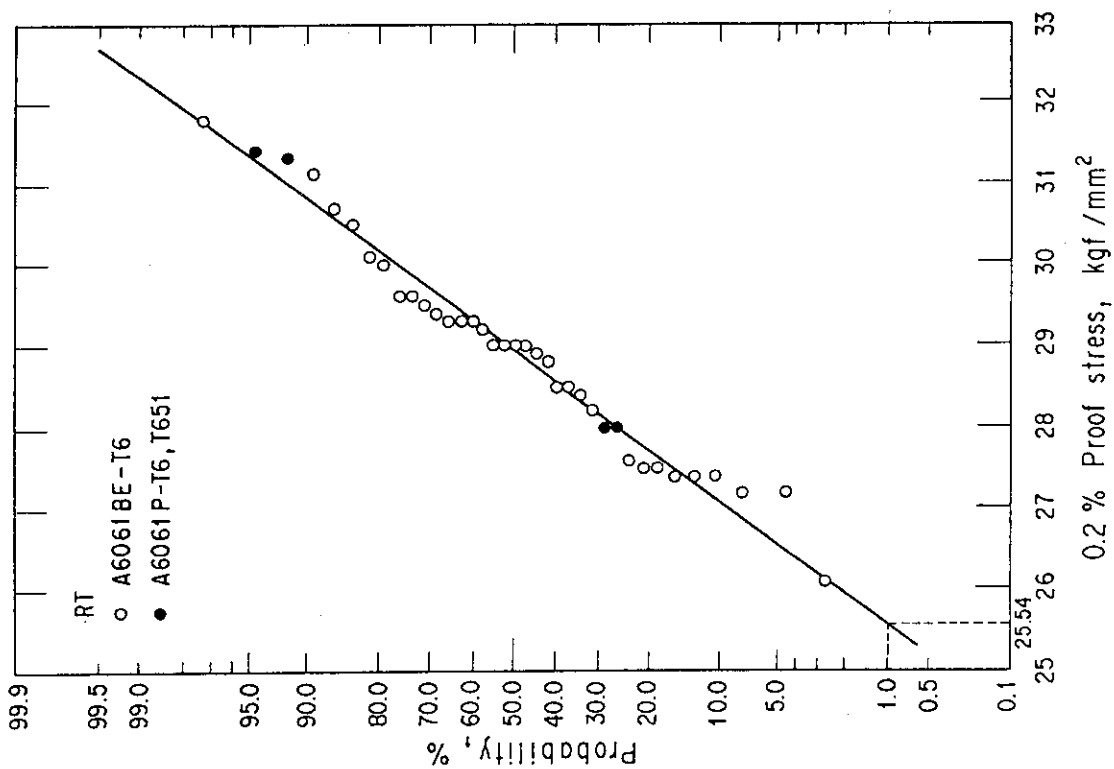
第 5.52 図 A6061BE-T6 の引張強さの正規確率紙へのプロット
(200 °C)



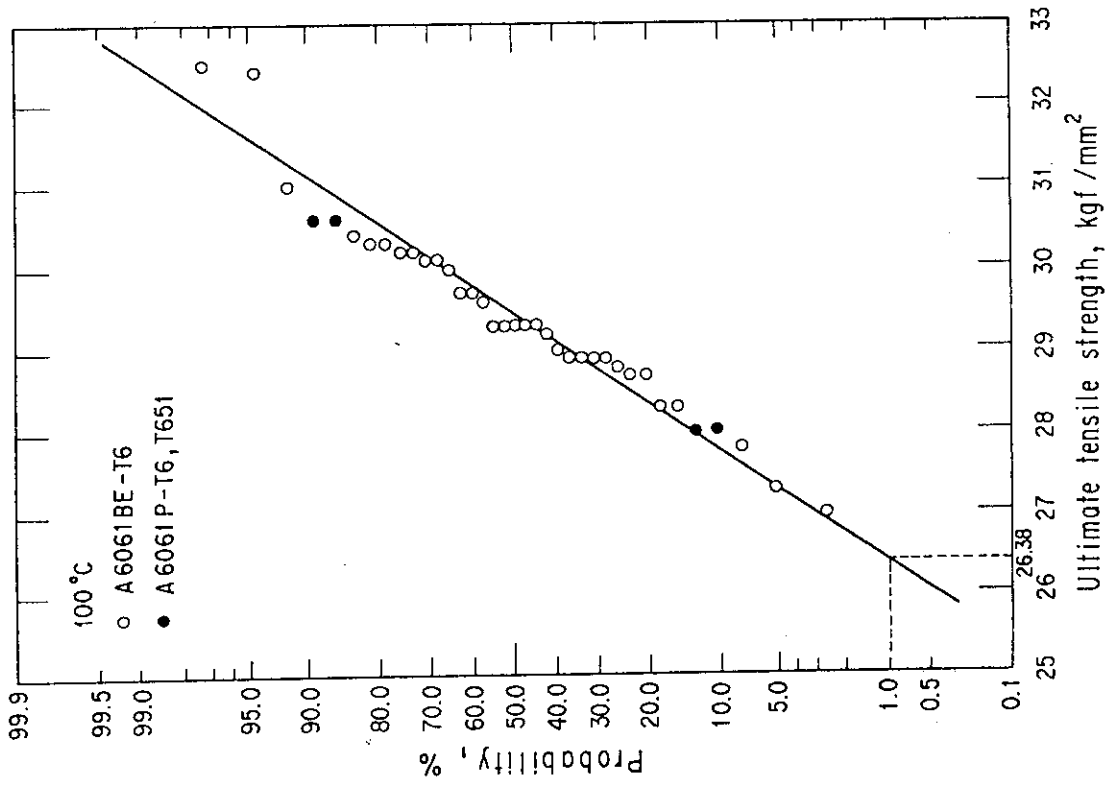
第 5.51 図 A6061BE-T6 の 0.2% 耐力の正規確率紙へのプロット
(200 °C)



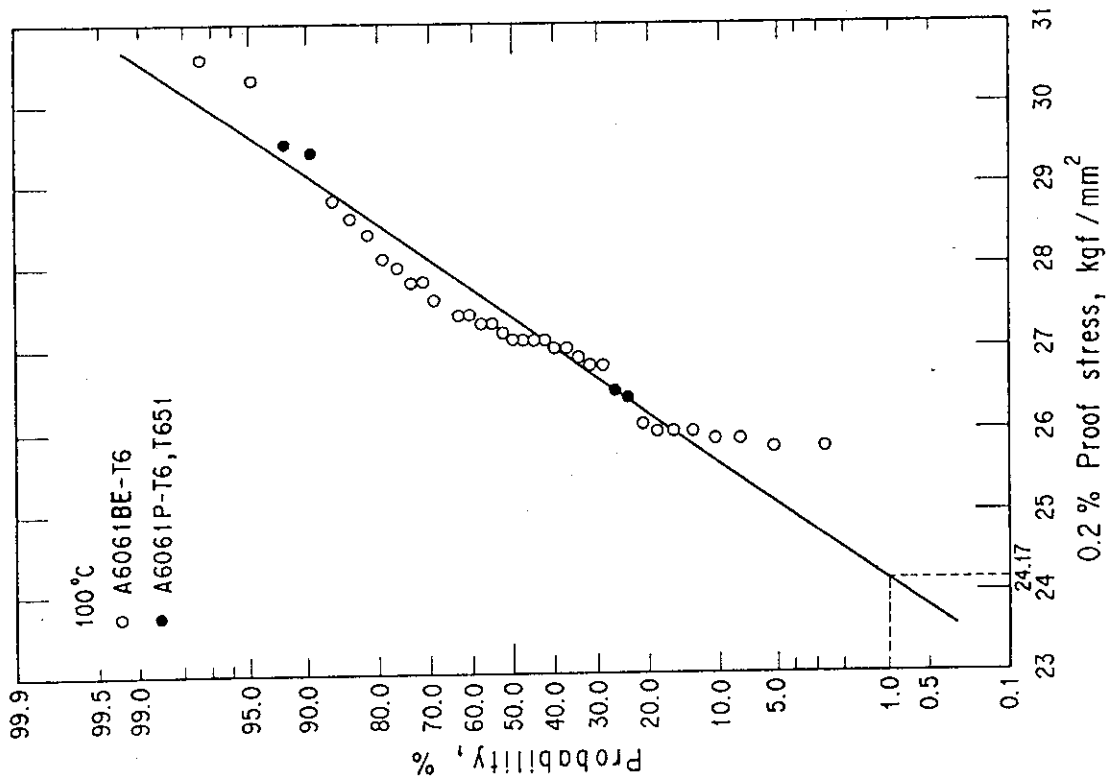
第 5.54 図 A6061P-T6, T651 及び A6061BE-T6 の引張強さの正規確率紙へのプロット (室温)



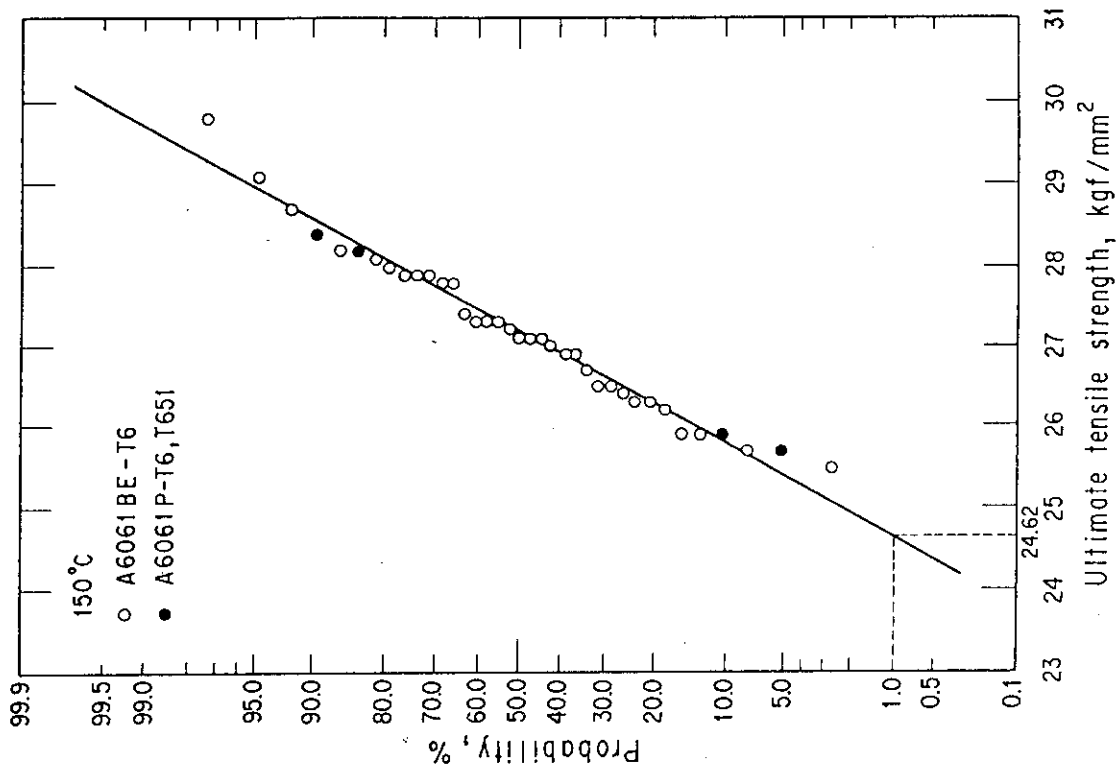
第 5.53 図 A6061P-T6, T651 及び A6061BE-T6 の 0.2% 耐力の正規確率紙へのプロット (室温)



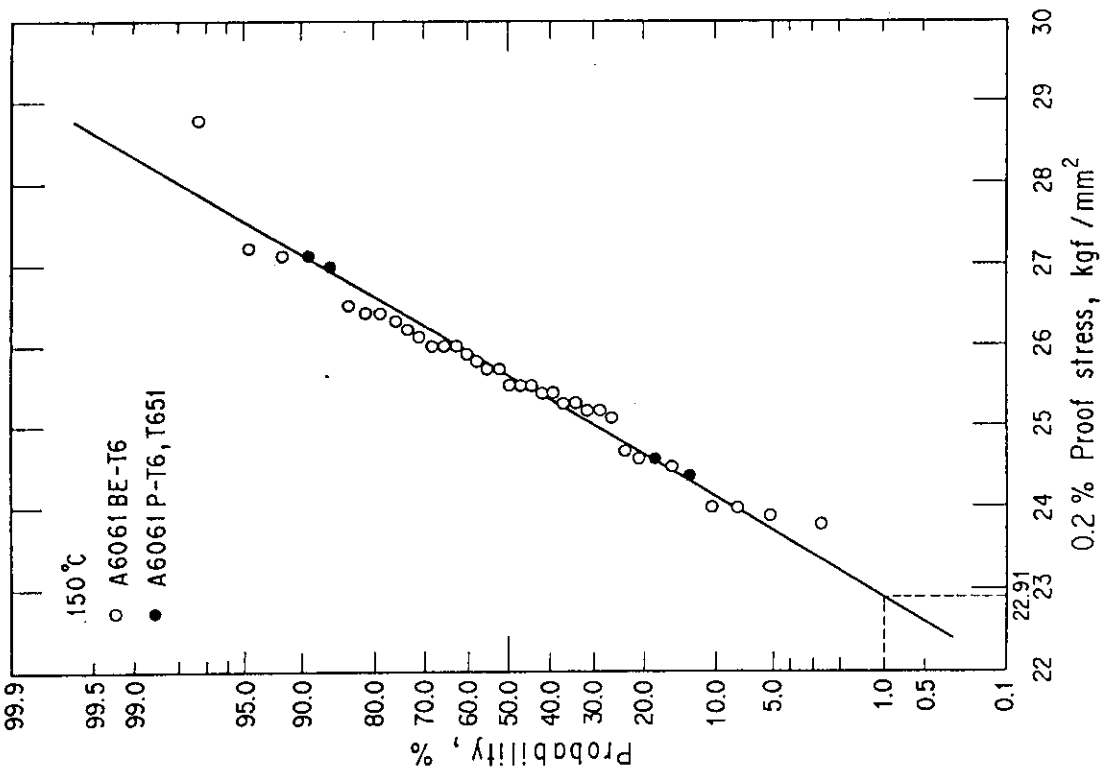
第 5.56 図 A 6061P-T6, T651 及び A 6061BE-T6 の引張強さの正規確率紙へのプロット (100 °C)



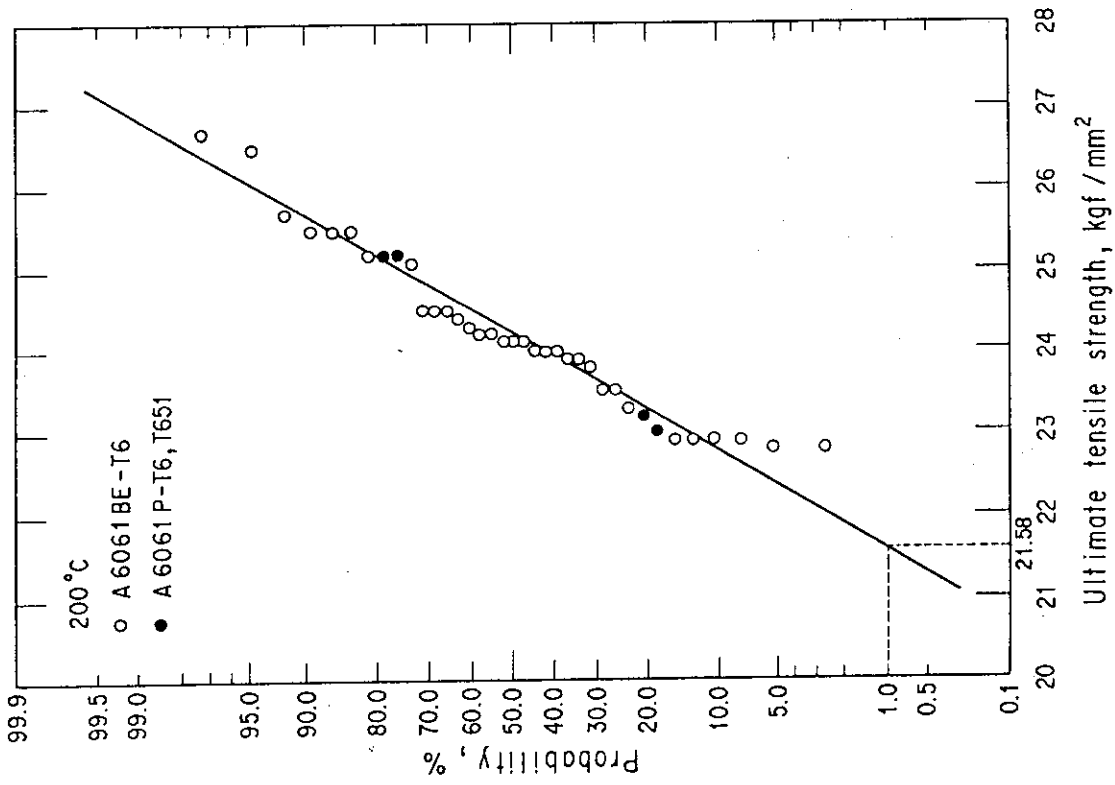
第 5.55 図 A 6061P-T6, T651 及び A 6061BE-T6 の 0.2% 耐力の正規確率紙へのプロット (100 °C)



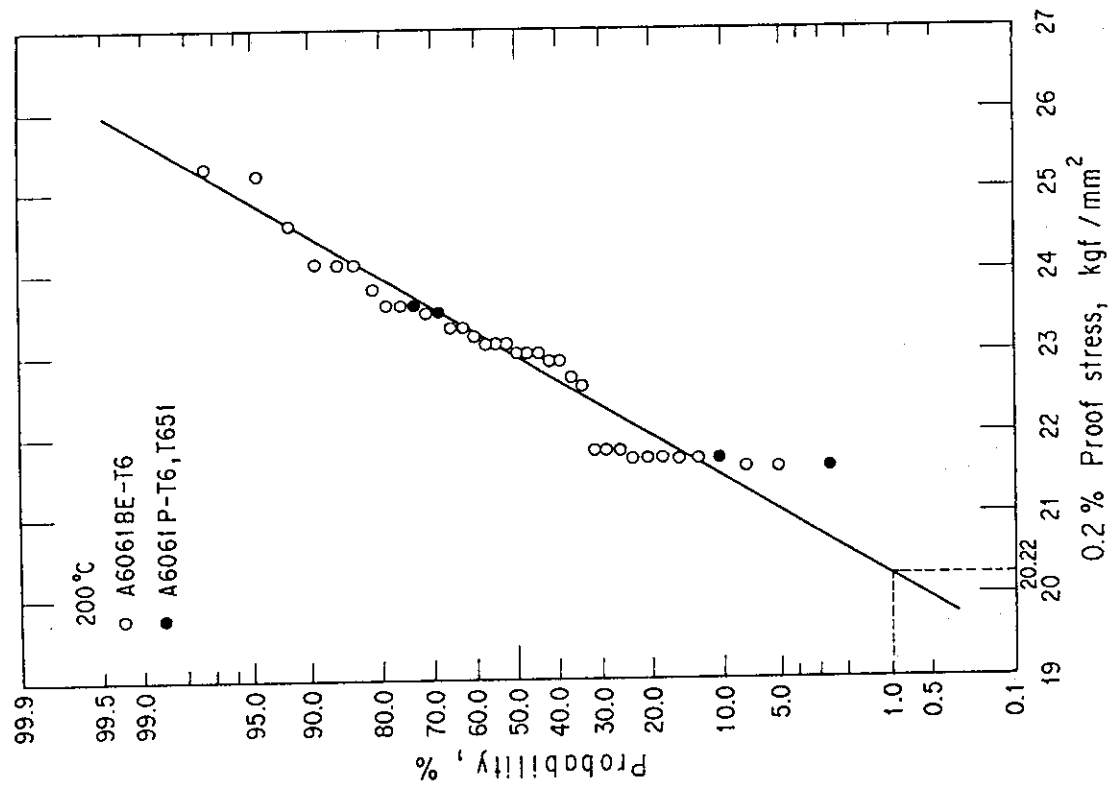
第5.58図 A6061P-T6, T651及びA6061BE-T6の引張強さの正規確率紙へのプロット (150 °C)



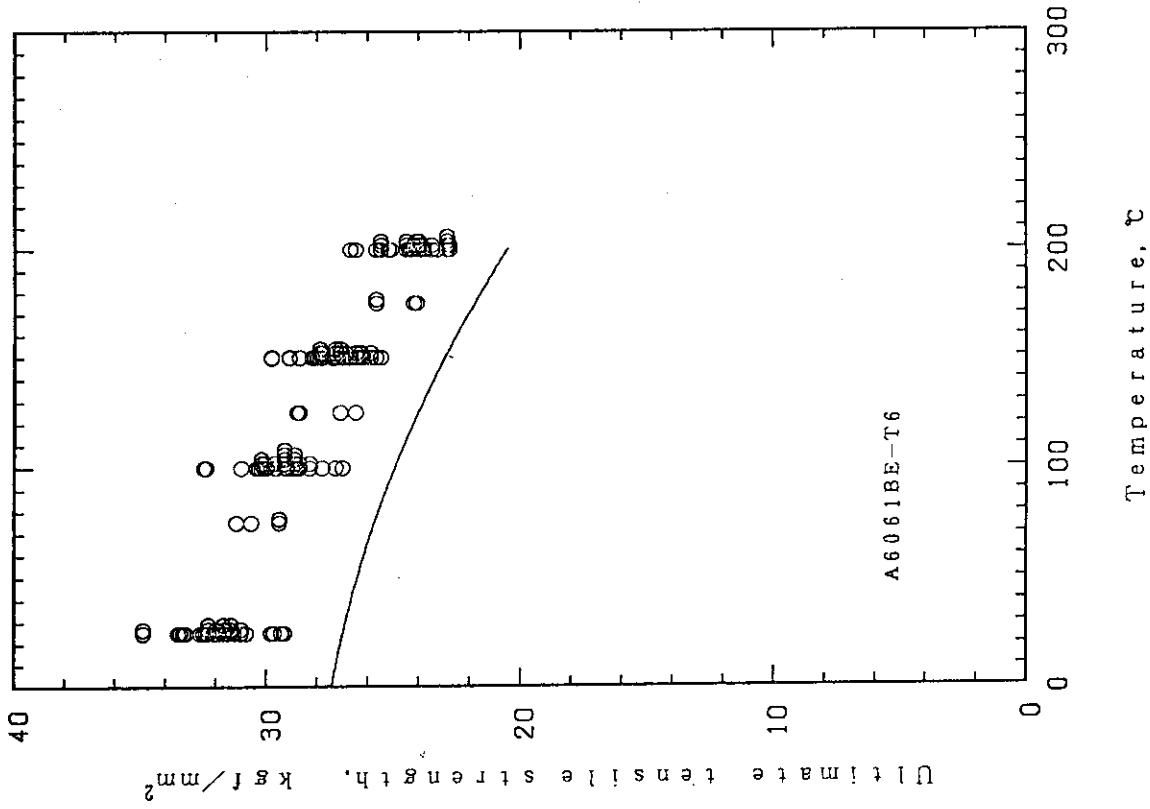
第5.57図 A6061P-T6, T651及びA6061BE-T6の0.2%耐力の正規確率紙へのプロット (150 °C)



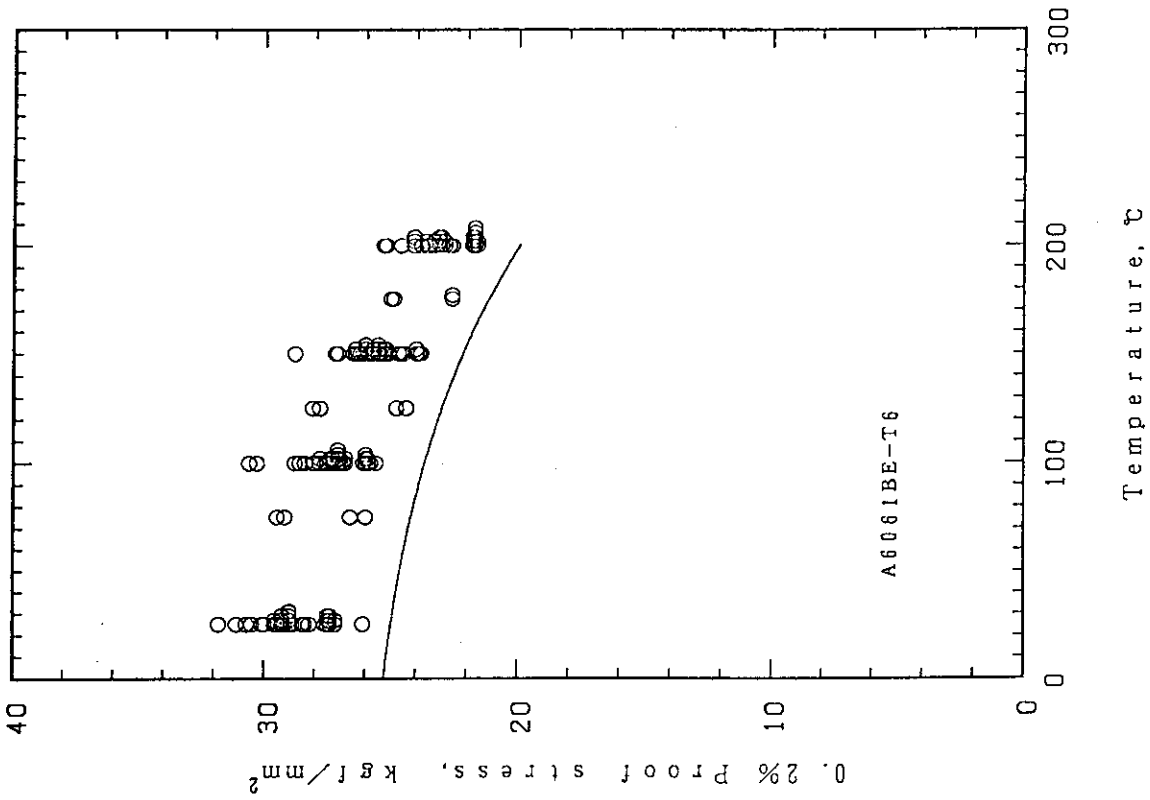
第5.59図 A6061P-T6, T651及びA6061BE-T6の
0.2%耐力の正規確率紙へのプロット
(200°C)



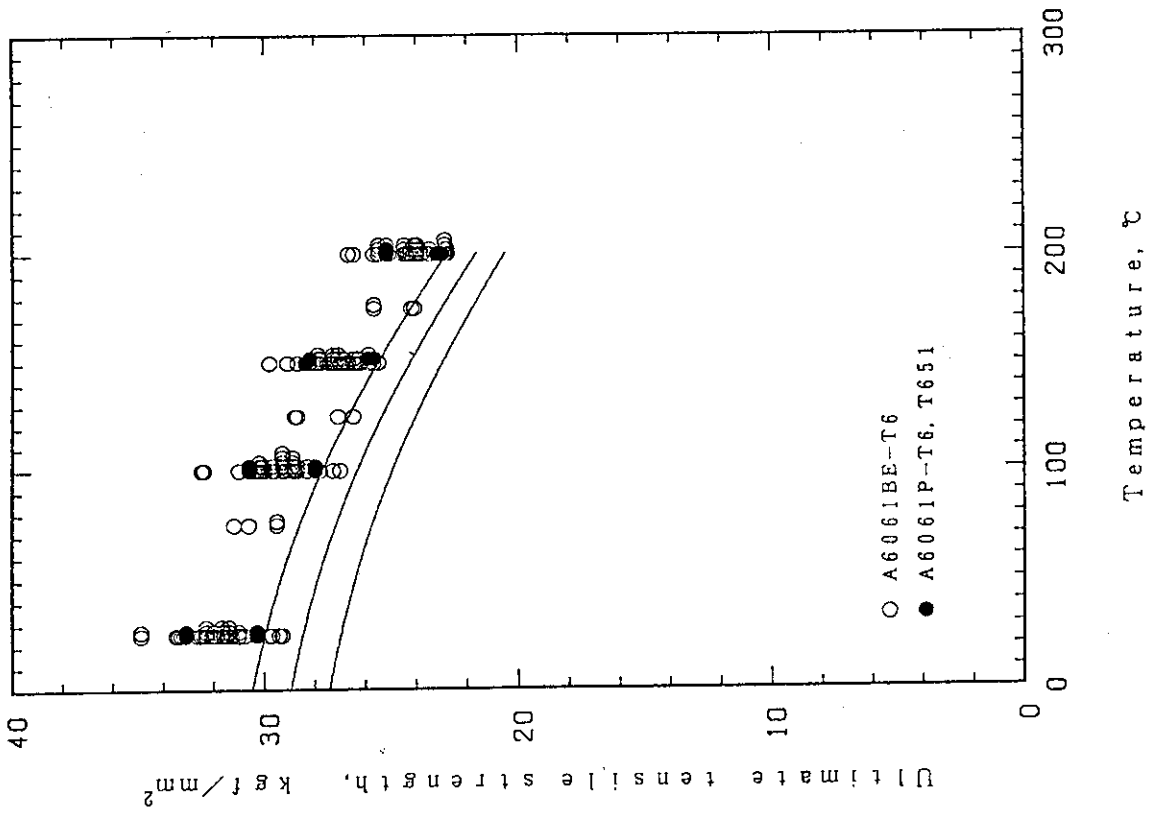
第5.60図 A6061P-T6, T651及びA6061BE-T6の
引張強さの正規確率紙へのプロット
(200°C)



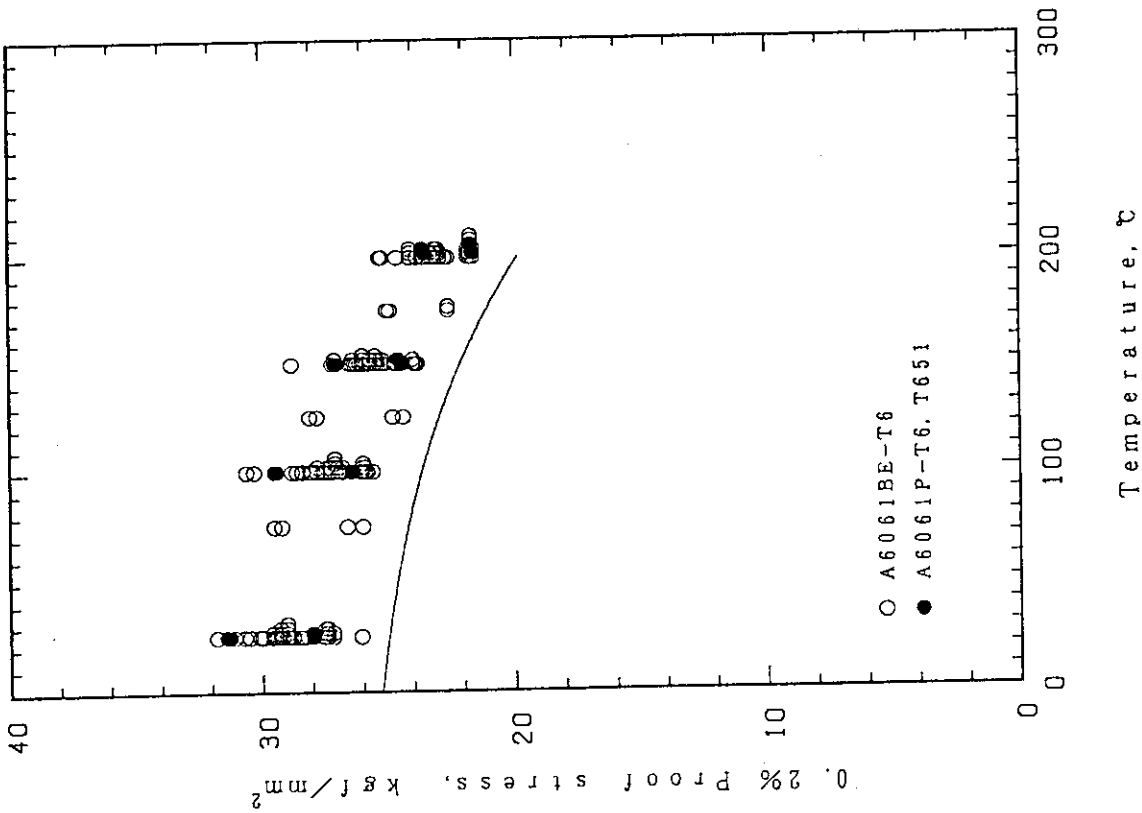
第 5.62 図 A 6061 BE-T6 の引張強さと MPV 曲線



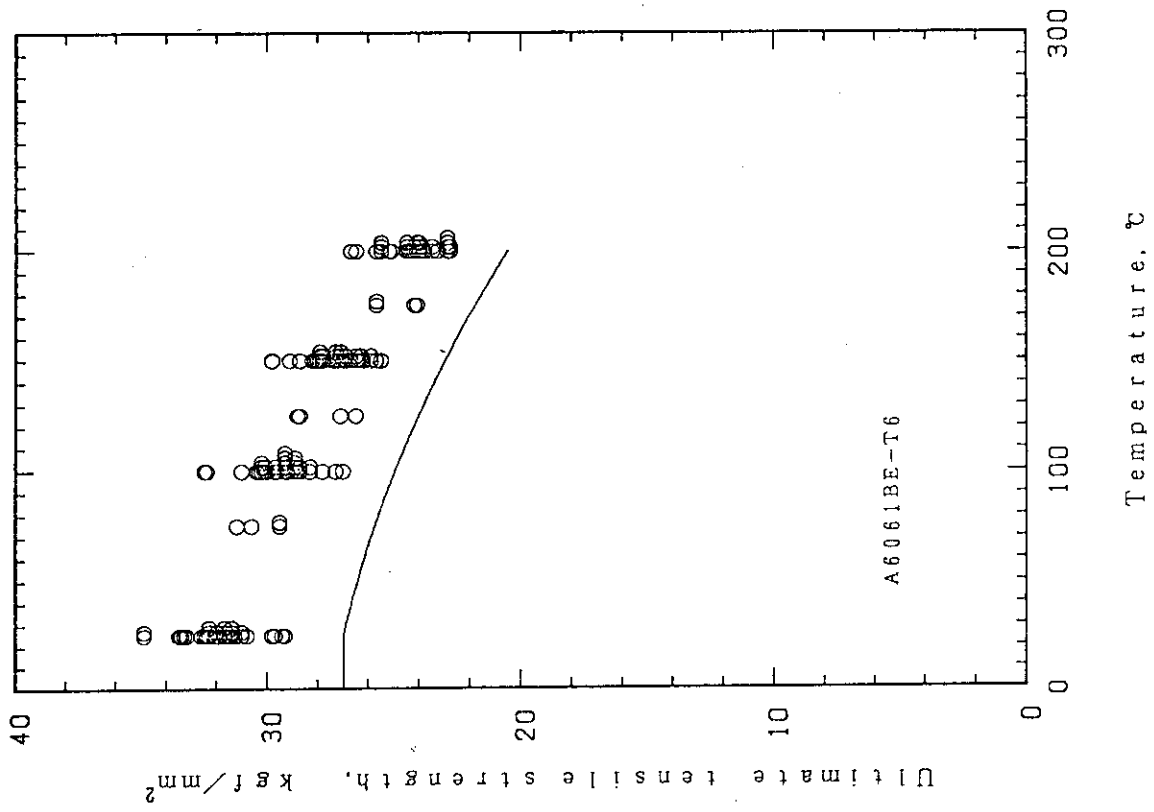
第 5.61 図 A 6061 BE-T6 の 0.2% 耐力と MPV 曲線



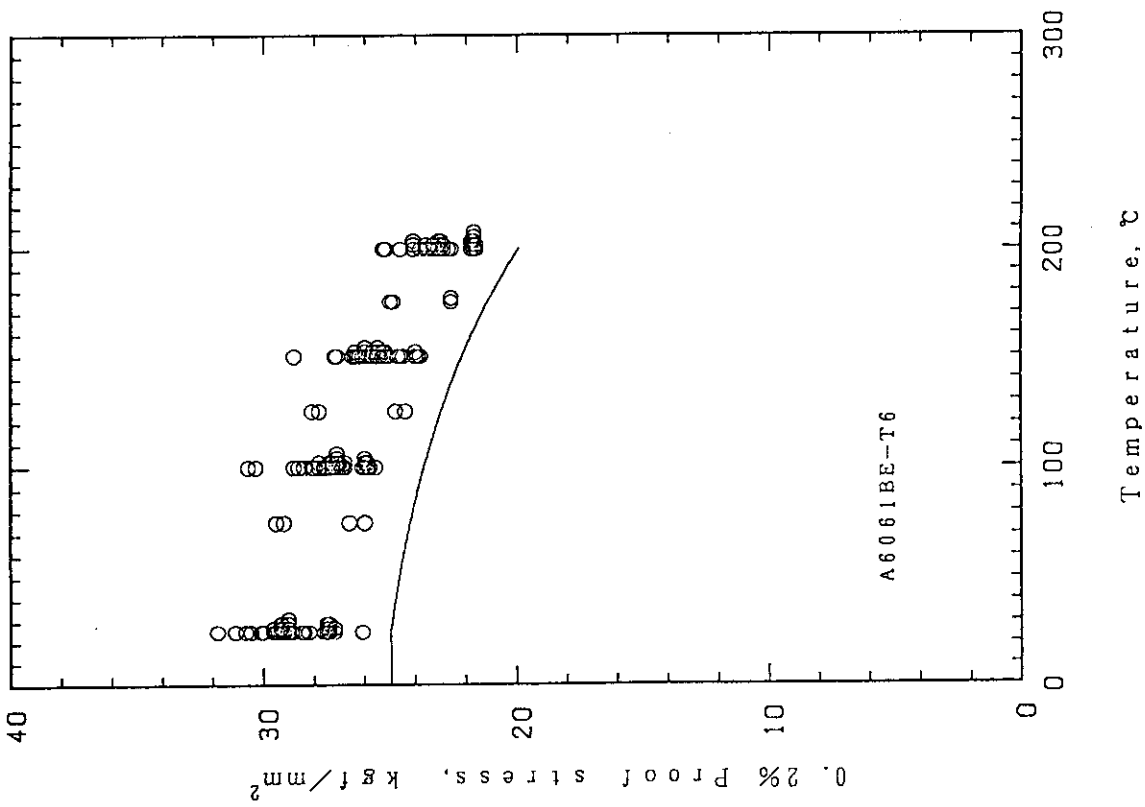
第5.64図 A6061P-T6, T651及びA6061BE-T6の引張強さとMPV曲線



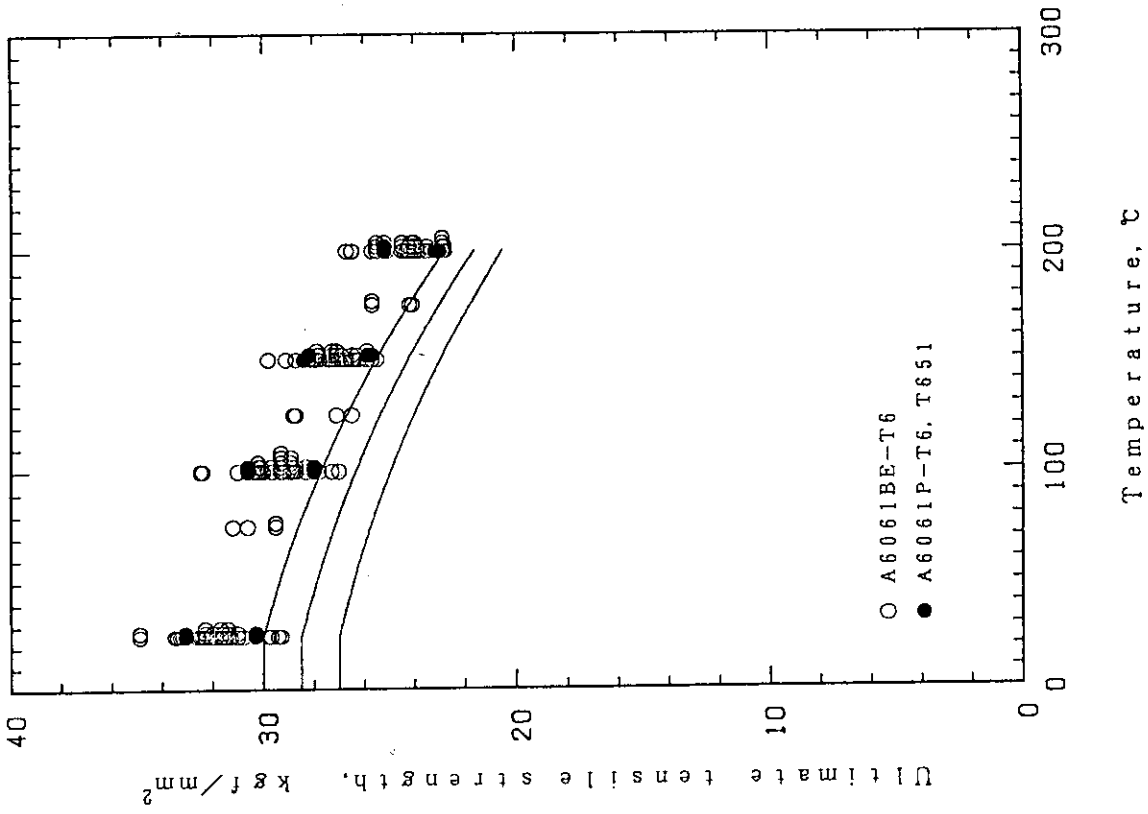
第5.63図 A6061P-T6, T651及びA6061BE-T6の0.2%耐力とMPV曲線



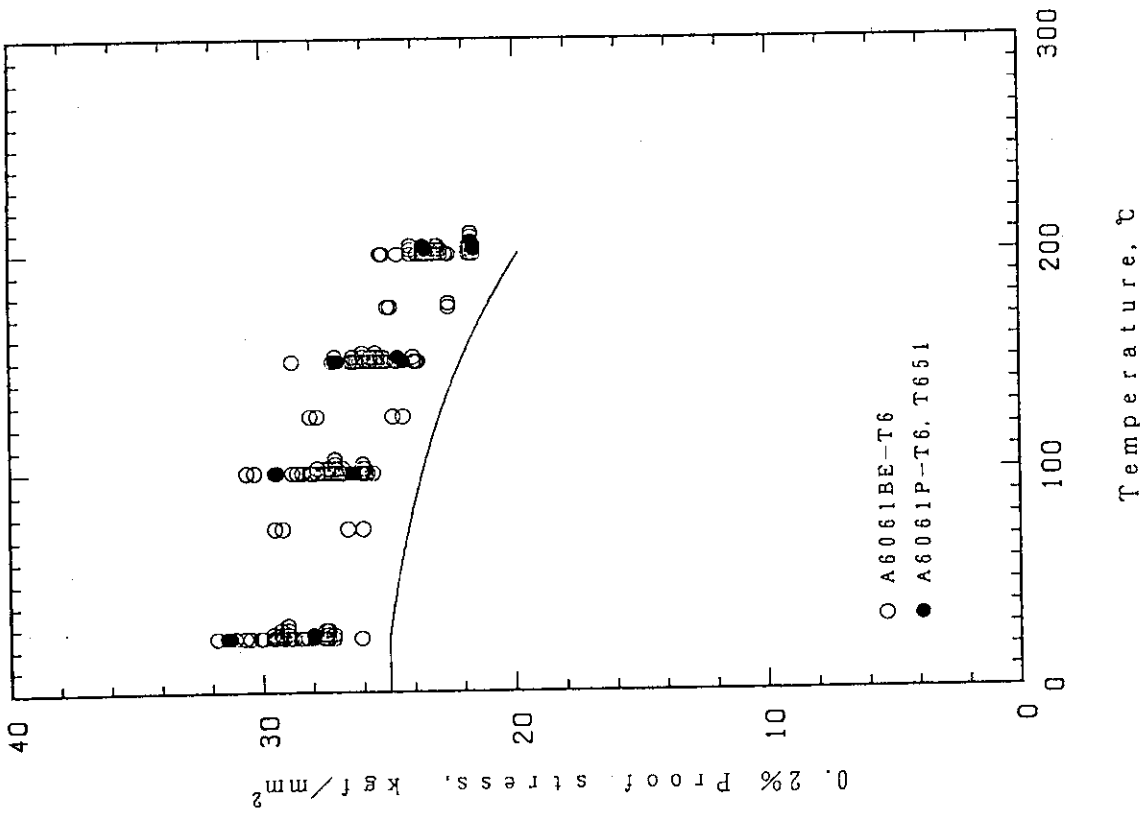
第5.66図 A6061BE-T6の引張強さと曲線B



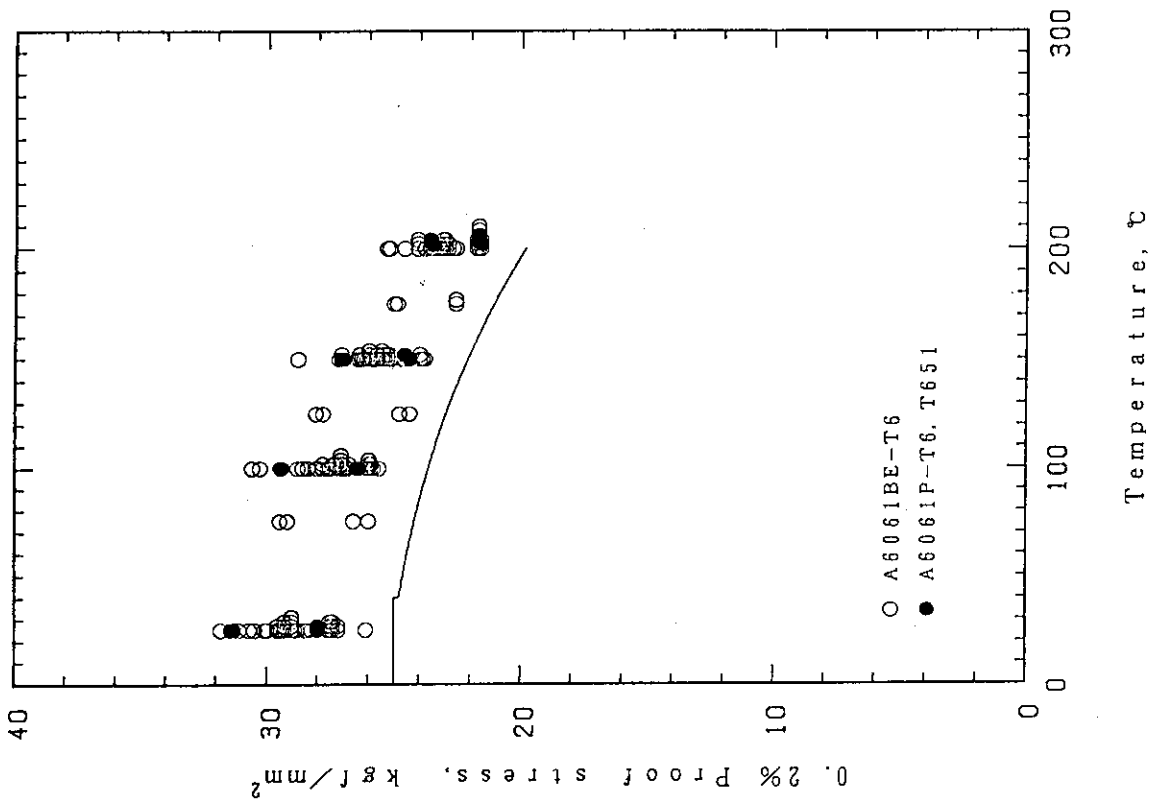
第5.65図 A6061BE-T6の0.2%耐力と曲線B



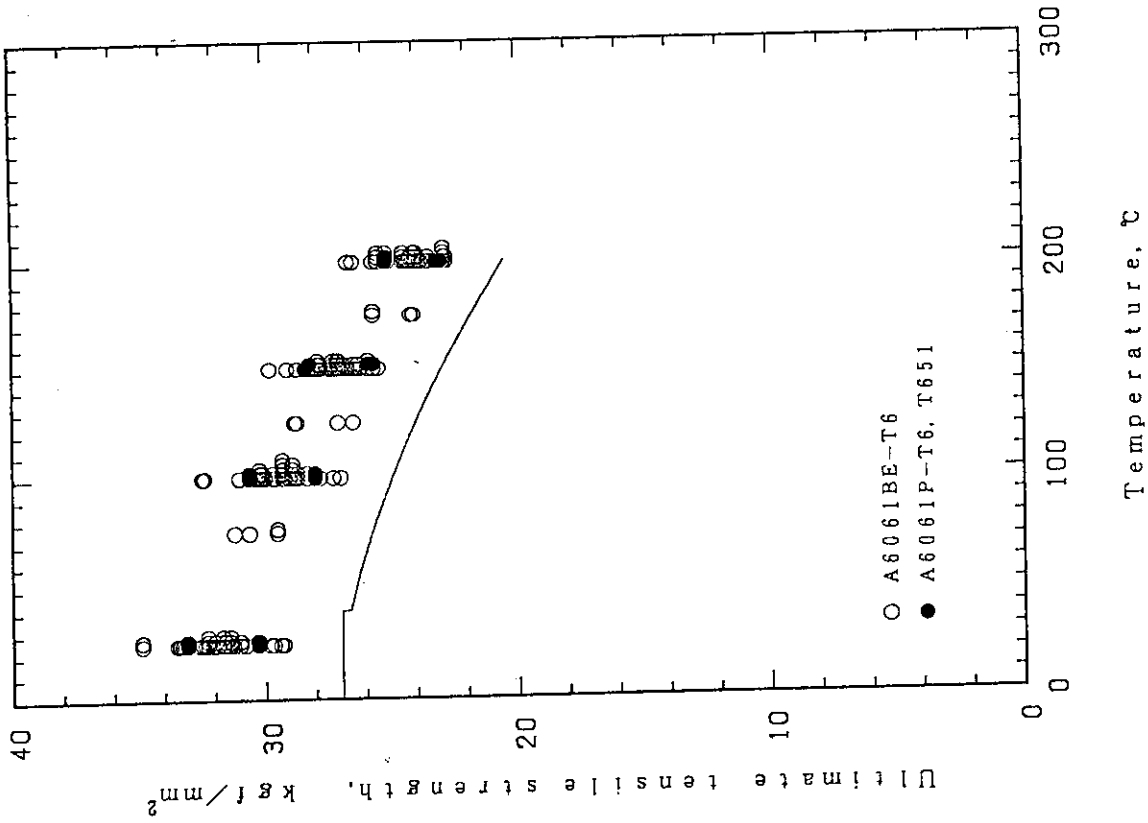
第 5.68 図 A6061P-T6, T651 及び A6061BE-T6 の引張強さと曲線 B



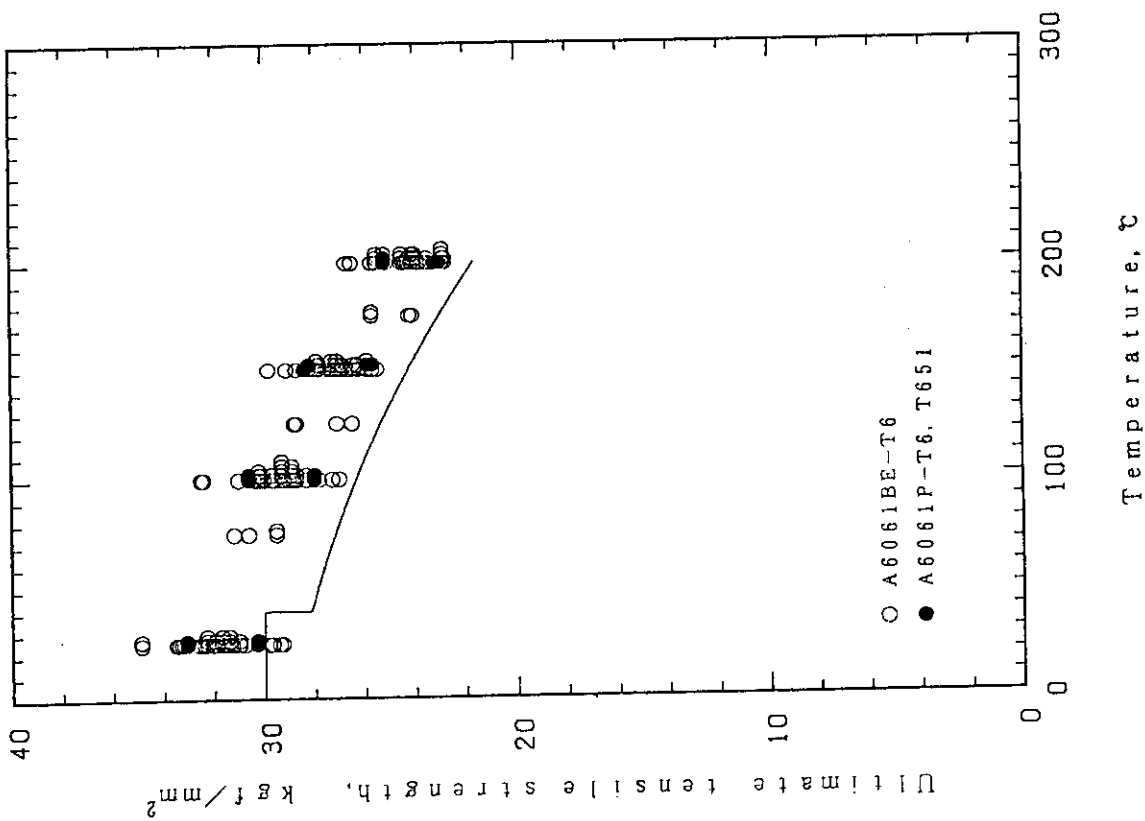
第 5.67 図 A6061P-T6, T651 及び A6061BE-T6 の 0.2% 耐力と曲線 B



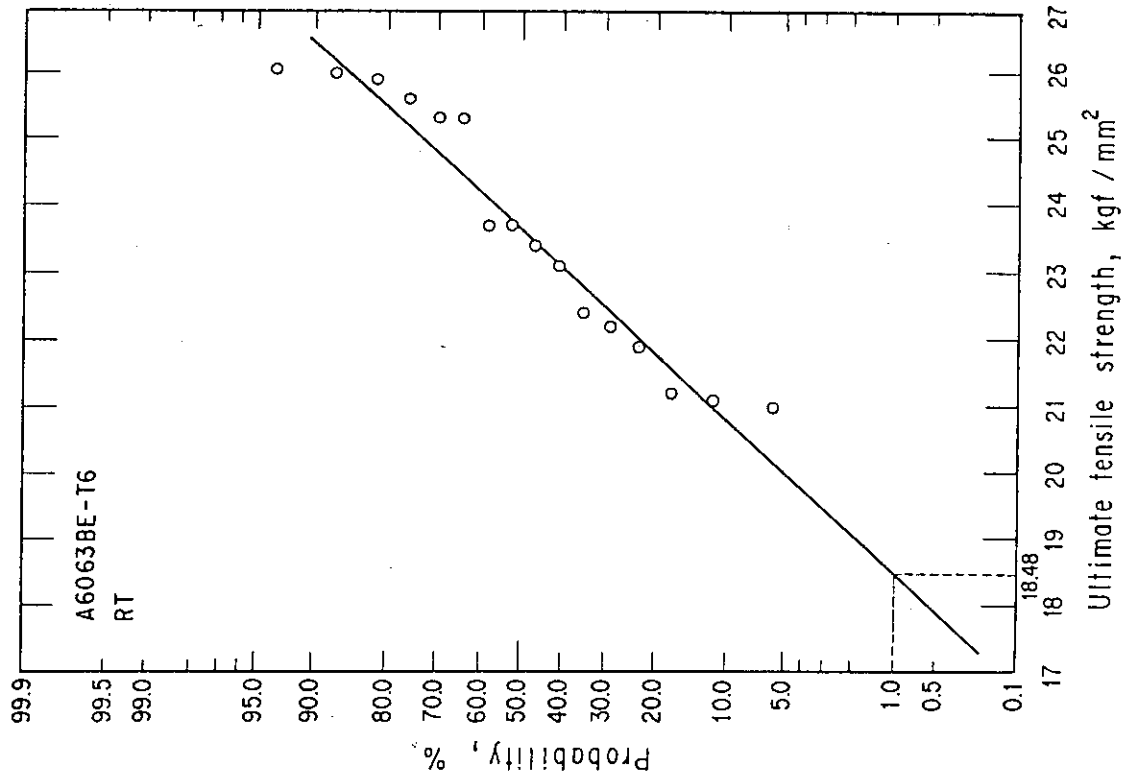
第 5.69 図 A6061P-T6, T651 及び A6061BE-T6 の 0.2% 耐力と設計降伏点 S_y の原案



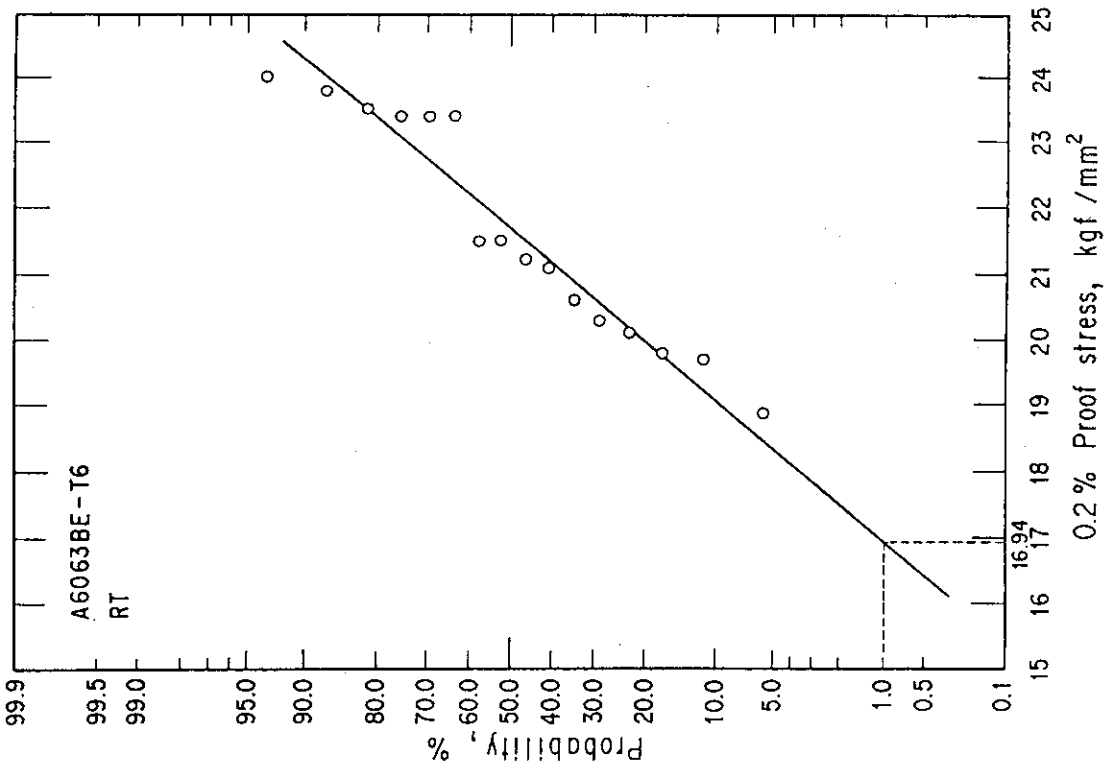
第5.71図 A6061P-T6, T651及びA6061BE-T6の引張強さと
A6061BE-T6の設計引張強さSuの原案



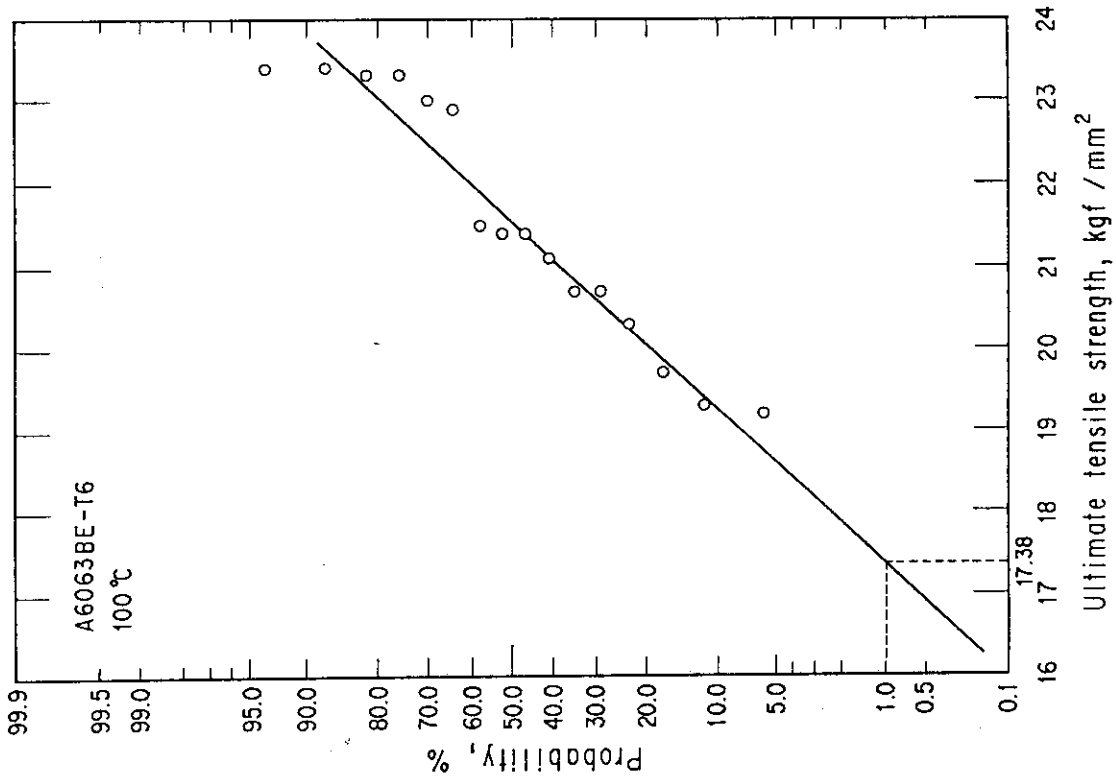
第5.70図 A6061P-T6, T651及びA6061BE-T6の引張強さと
A6061P-T6, T651の設計引張強さSuの原案



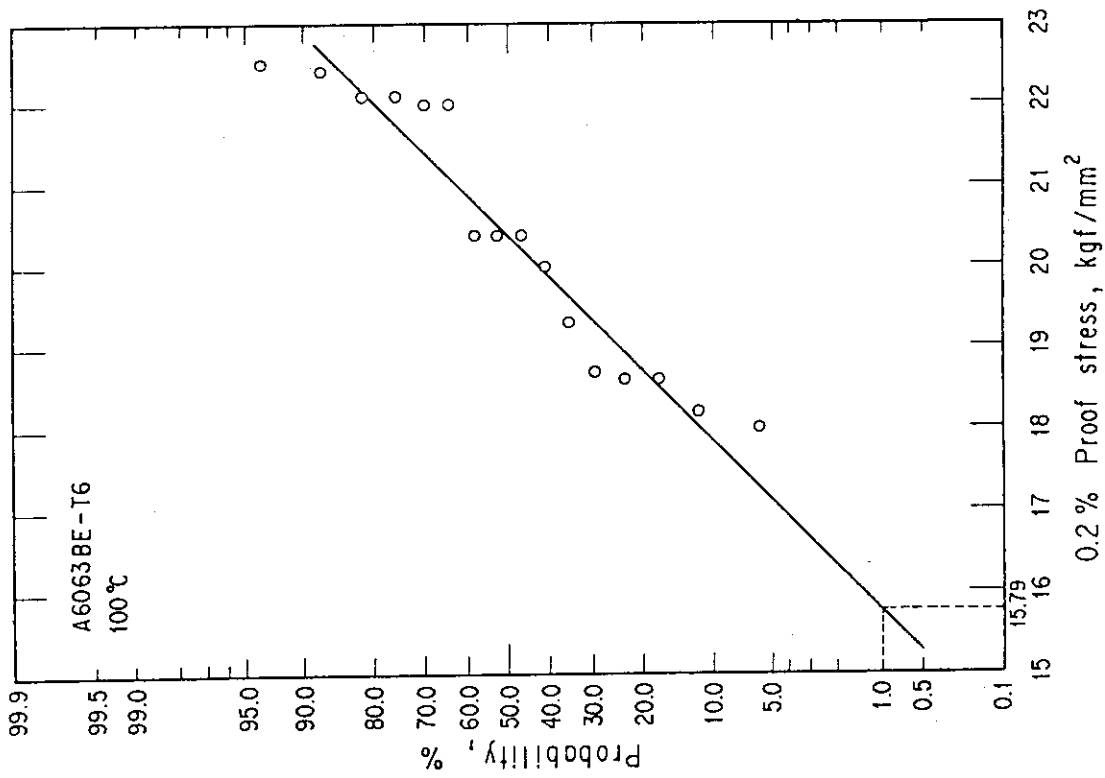
第 5.73 図 A 6063BE-T 6 の引張強さの正規確率紙へのプロット
(室温)



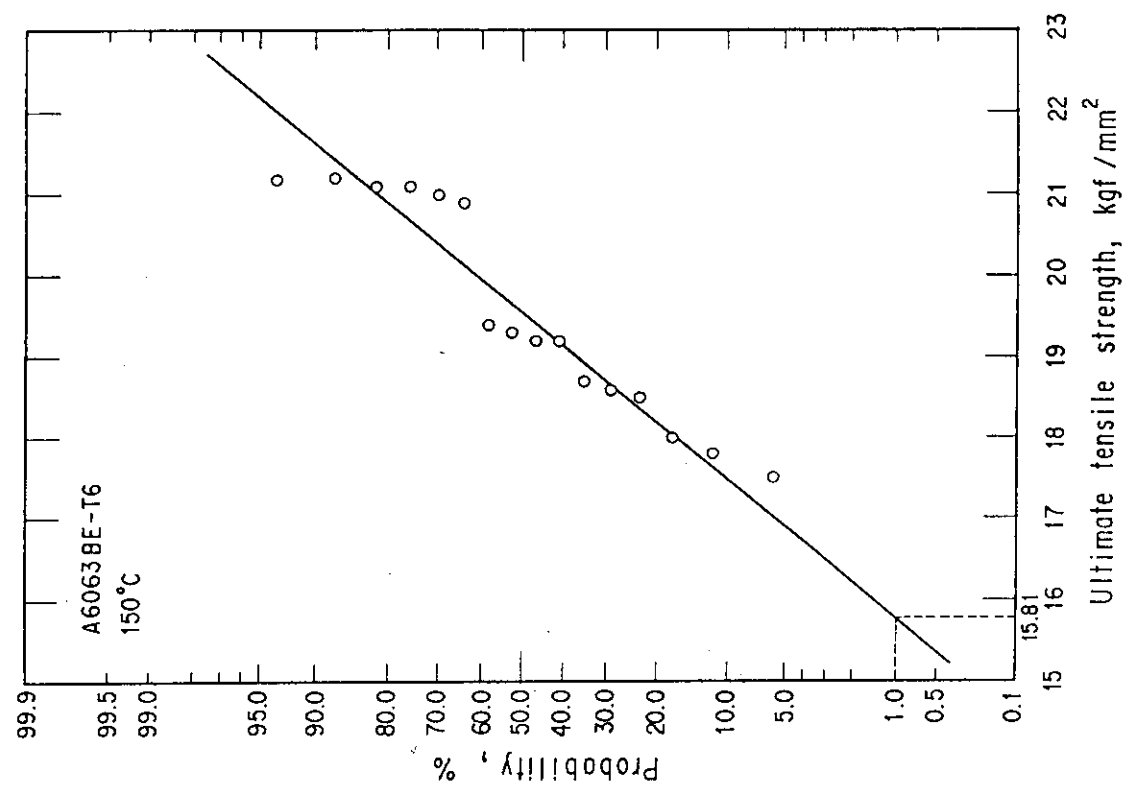
第 5.72 図 A 6063BE-T 6 の 0.2% 耐力の正規確率紙へのプロット
(室温)



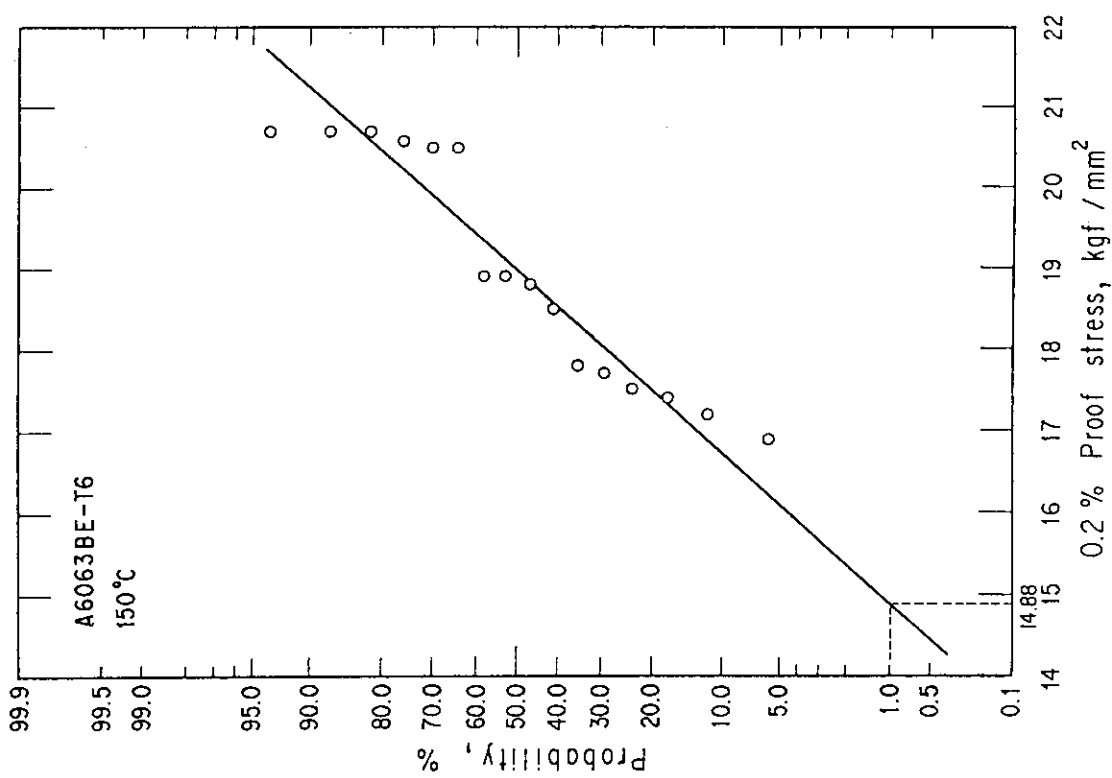
第 5.75 図 A 6063BE-T6 の引張強さの正規確率紙へのプロット (100 °C)



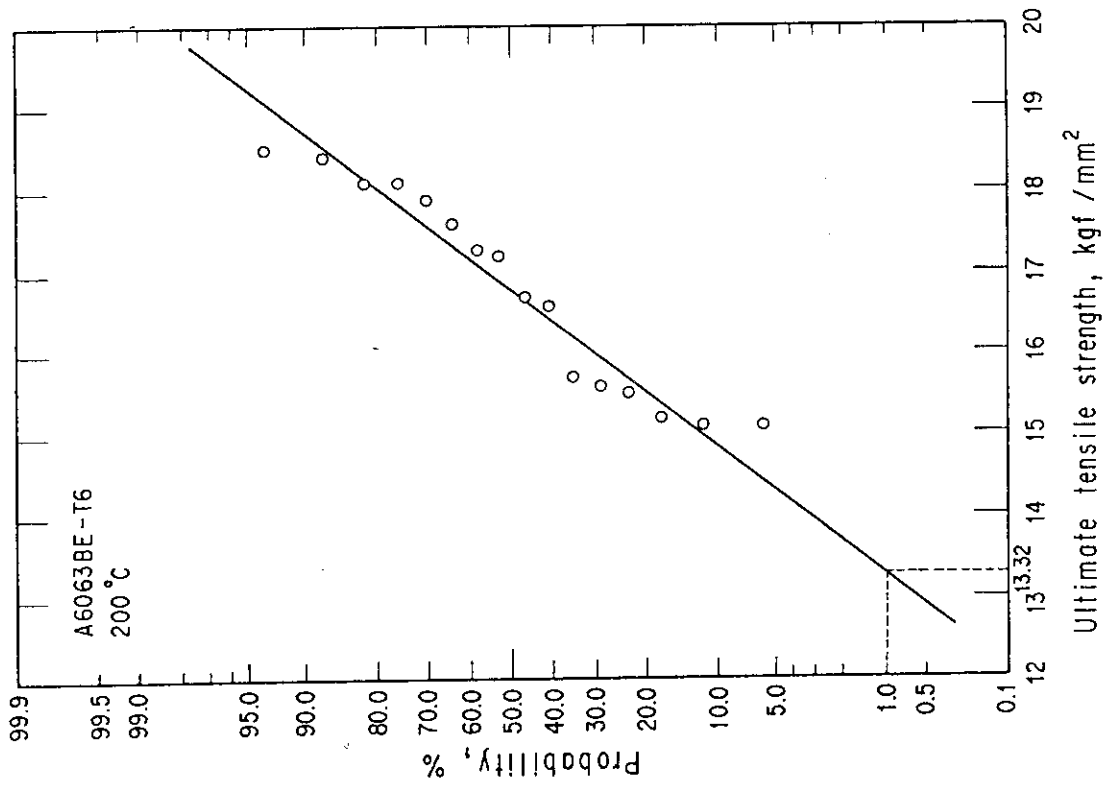
第 5.74 図 A 6063BE-T6 の 0.2% 耐力の正規確率紙へのプロット (100 °C)



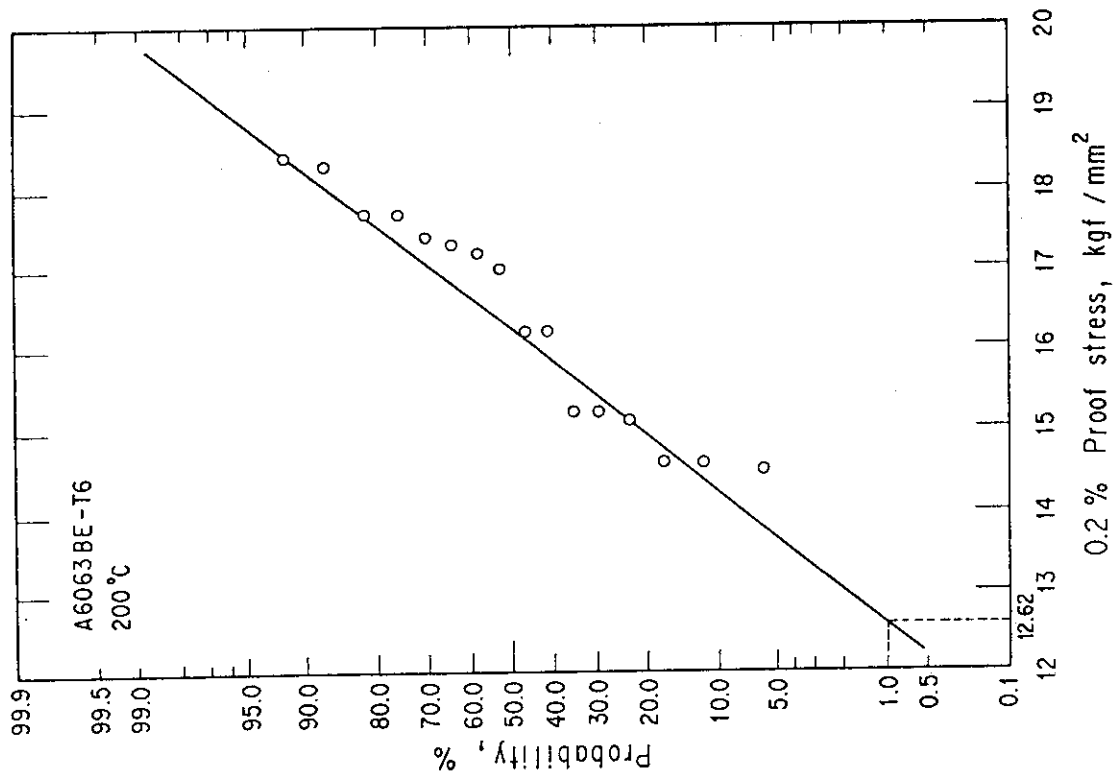
第 5.77 図 A 6063 BE-T 6 の引張強さの正規確率紙へのプロット (150°C)



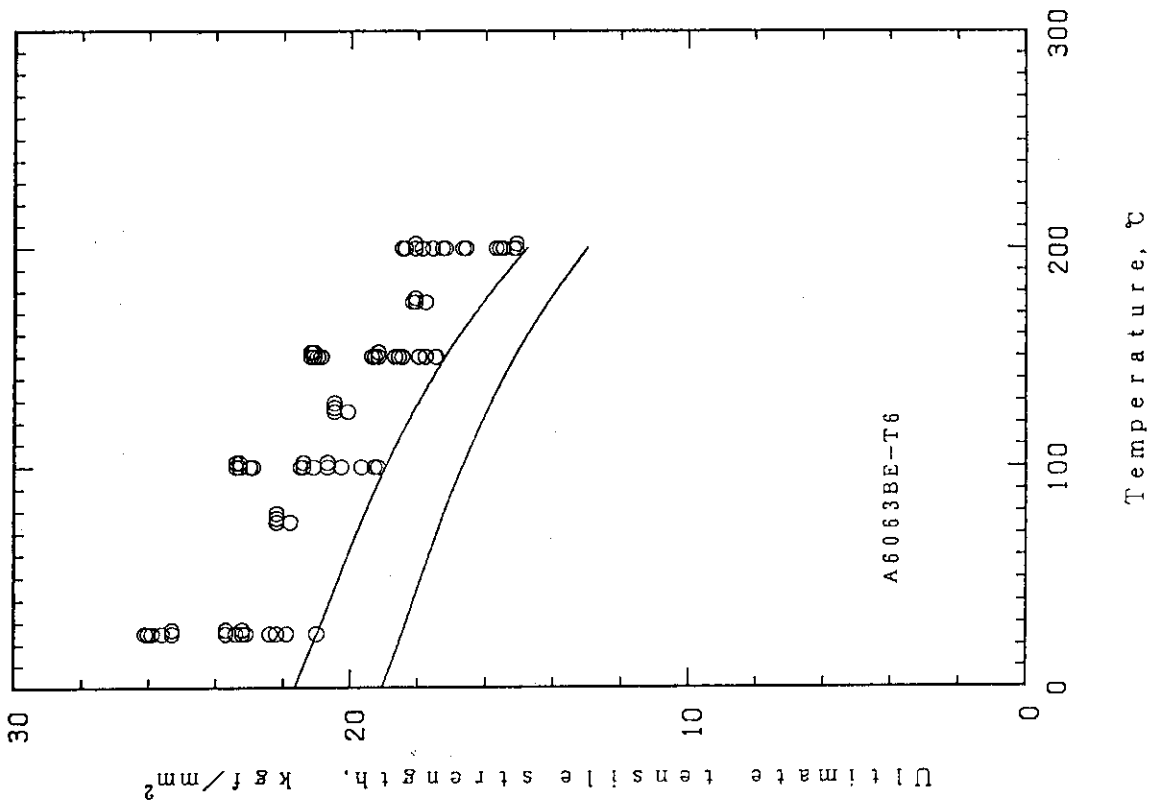
第 5.76 図 A 6063 BE-T 6 の 0.2% 耐力の正規確率紙へのプロット (150°C)



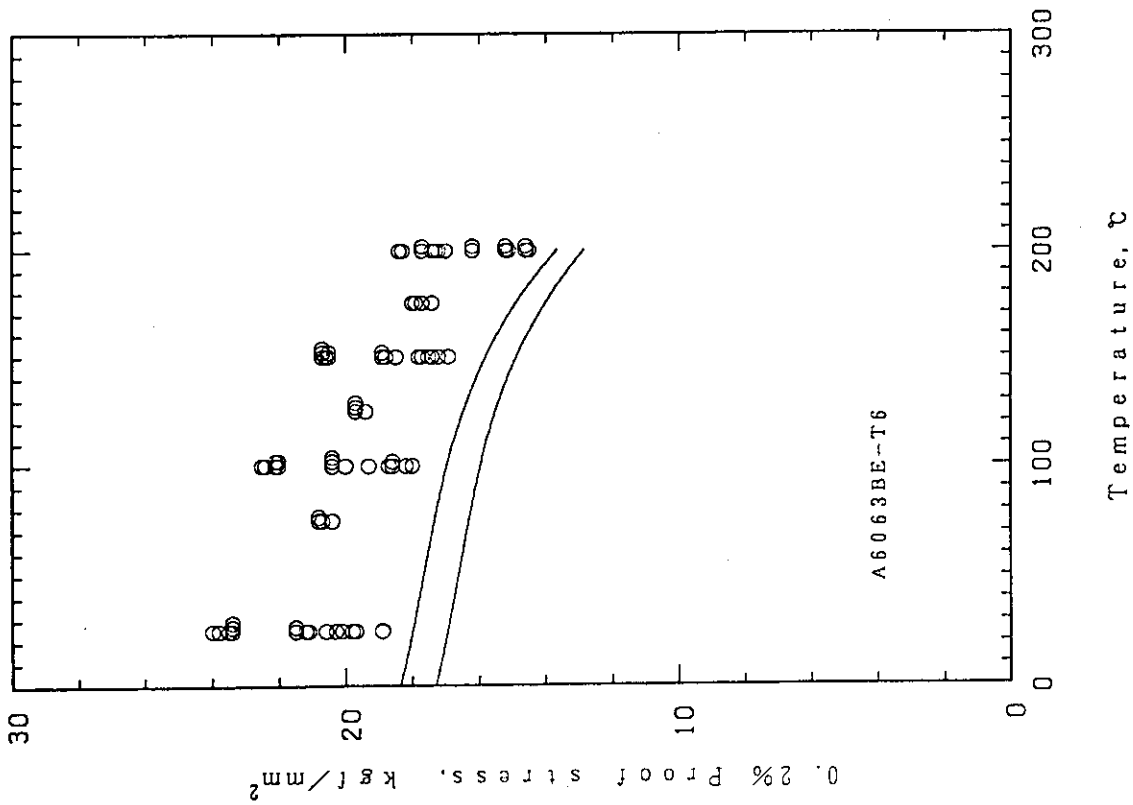
第 5.79 図 A6063BE-T6 の引張強さの正規確率紙へのプロット (200 °C)



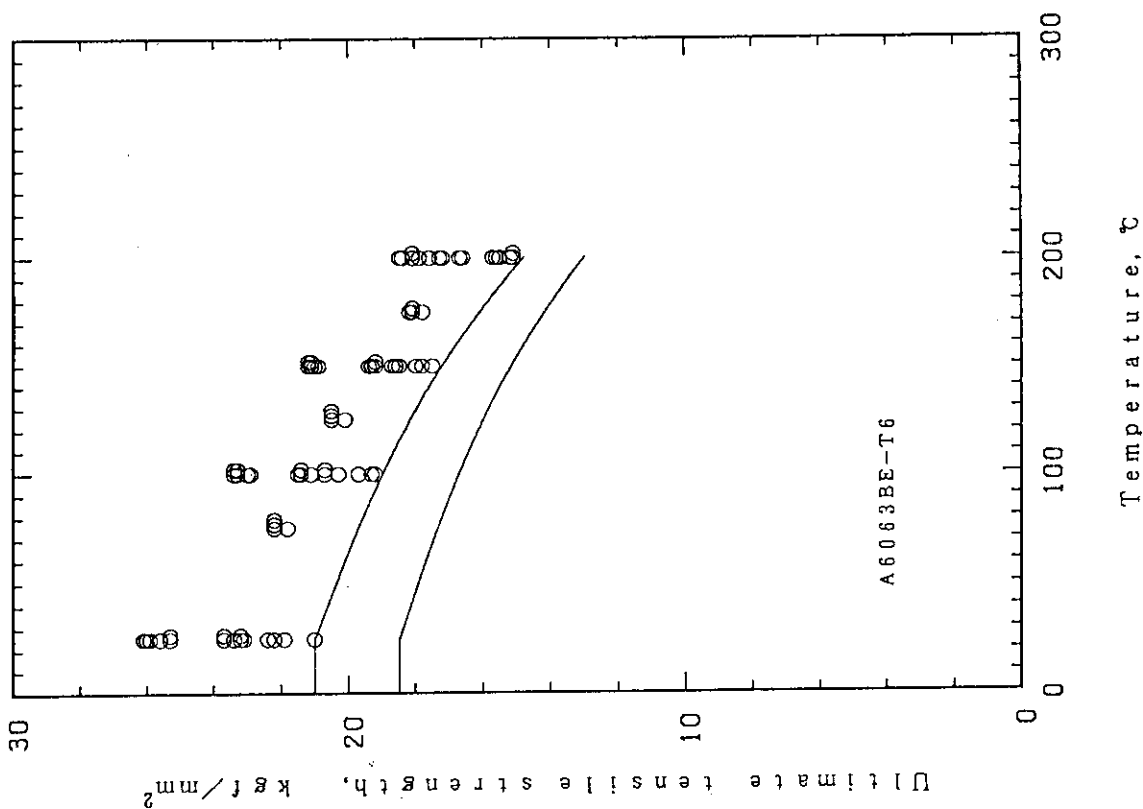
第 5.78 図 A6063BE-T6 の 0.2% 耐力の正規確率紙へのプロット (200 °C)



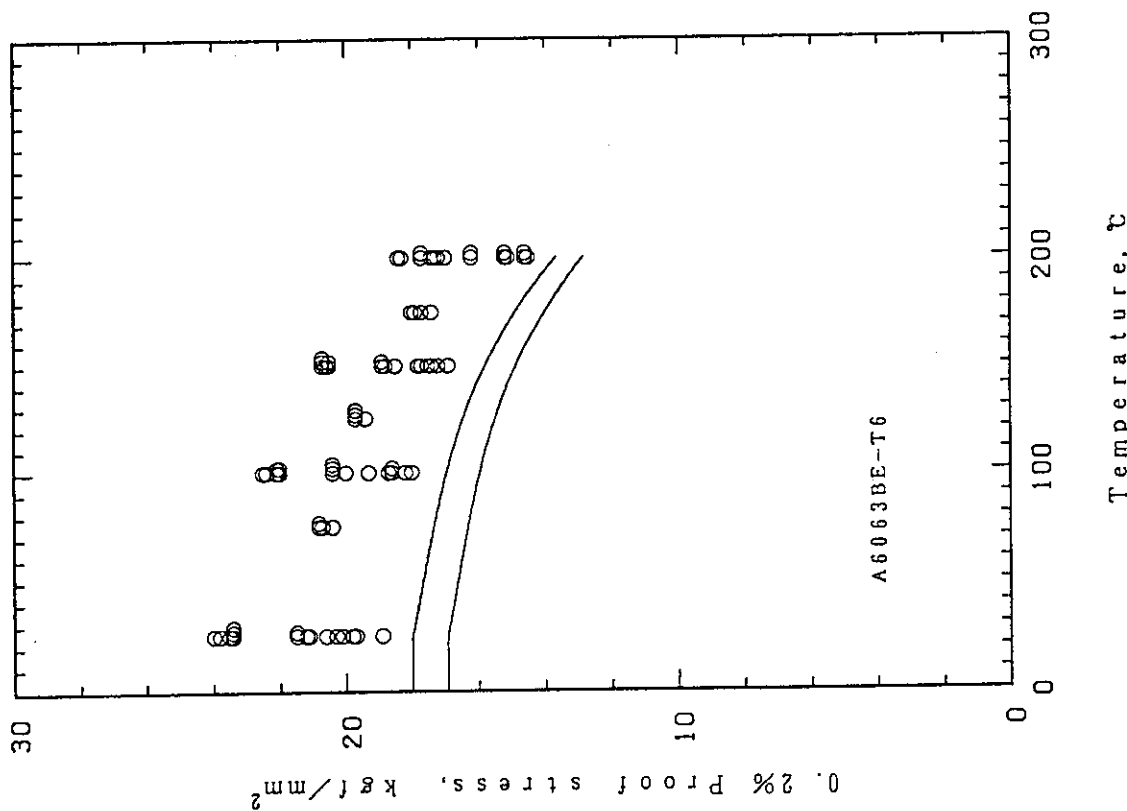
第5.81図 A6063BE-T6の引張強さとMPV曲線



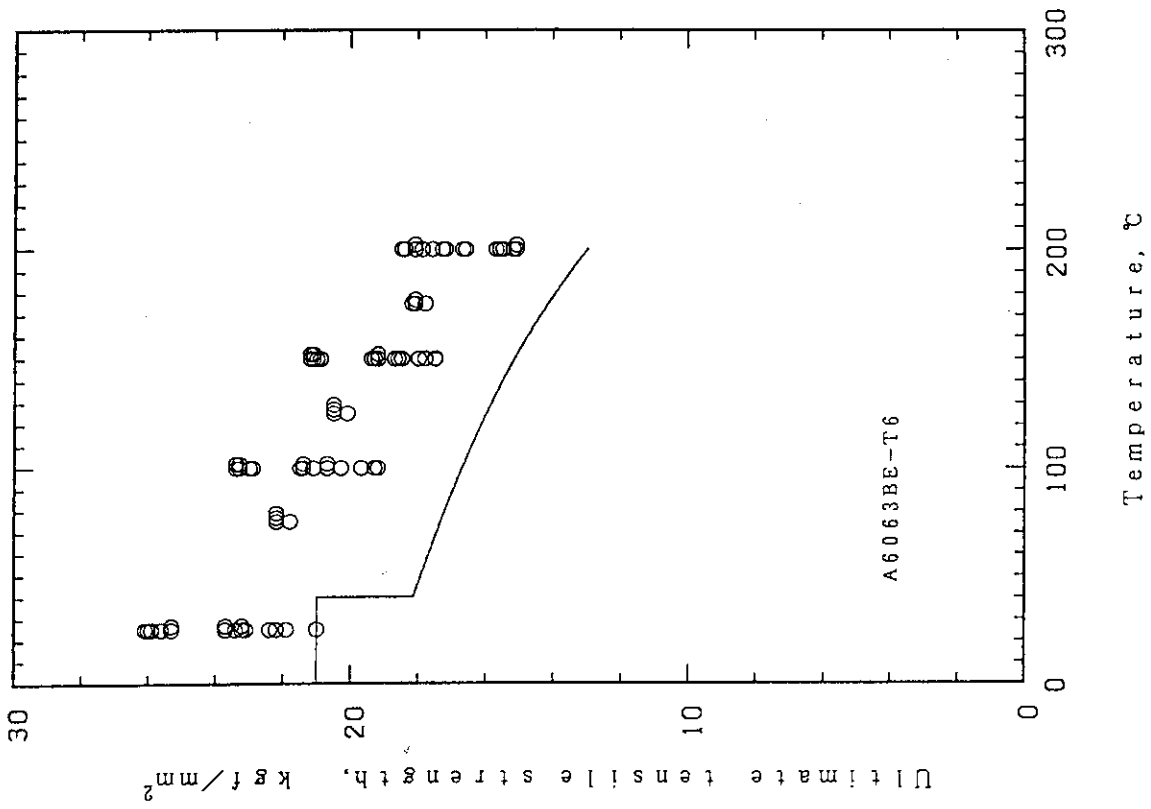
第5.80図 A6063BE-T6の0.2%耐力とMPV曲線



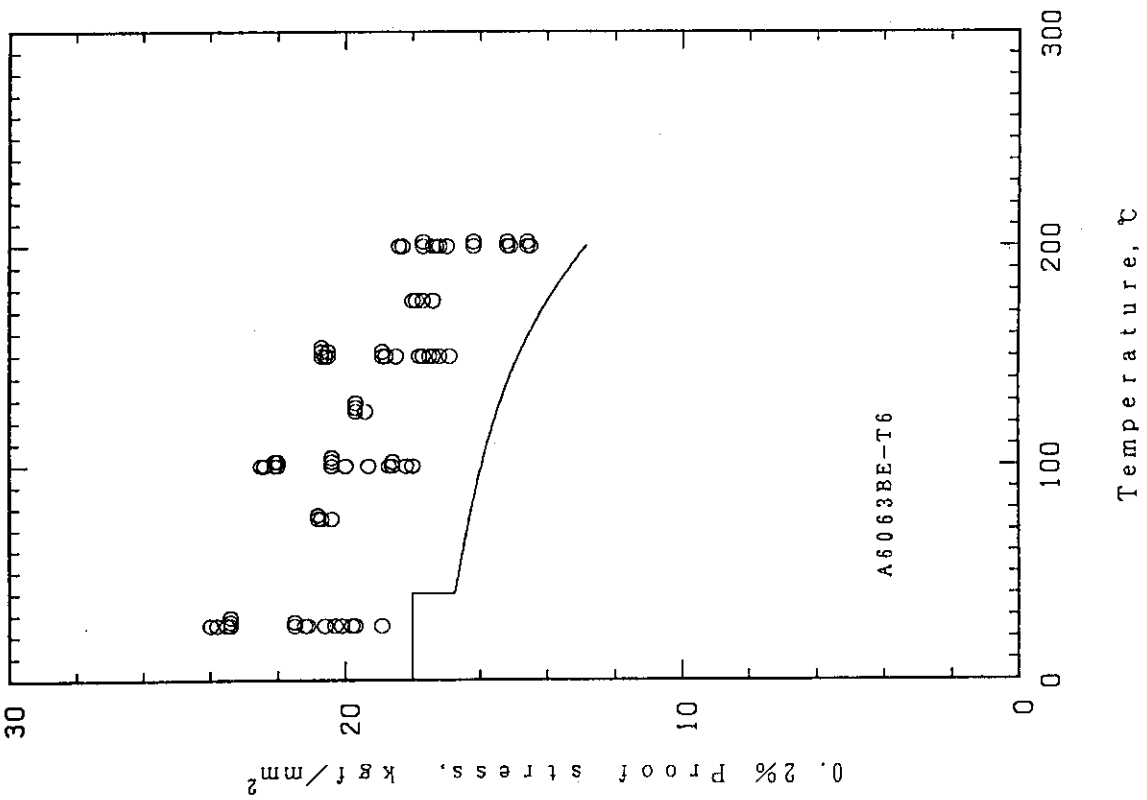
第 5.83 図 A6063BE-T6 の引張強さと曲線 B



第 5.82 図 A6063BE-T6 の 0.2% 耐力と曲線 B



第 5.85 図 A 6063 BE-T6 の引張強さと設計引張強さ S_u の原案



第 5.84 図 A 6063 BE-T6 の 0.2% 耐力と設計降伏点 S_y の原案

6. 設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u に関する検討

上記のように定めた設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の原案を第 6.1 表に示す。この原案に関して、現行法令⁽⁸⁾との整合性及び ASME コード^(9,10)との比較という観点から検討を加えた。

6.1 通商産業省告示第 501 号⁽⁸⁾との整合性

通商産業省告示第 501 号⁽⁸⁾別表第 7 には、本研究の対象材料のうち、A1100P-O、A5052P-O 及び A6061BE-T6 の許容引張応力 S が示されていることから、それらの値と第 6.1 表の値 (S_y には 0.99 を、 S_u には 0.275 をそれぞれ乗じた値) を比較した。その結果を第 6.2 表に示す。この表から分かるように、100 及び 125 °C で A1100P-O の $S_u \times 0.275$ が S 値よりも小さくなっているという例外的な場合を除いて、第 6.1 表の値 (S_y には 0.99 を、 S_u には 0.275 をそれぞれ乗じた値) は、 S 値を上回っている。A1100P-O の 100 及び 125 °C の値についても、 $S_u \times 0.275$ と S 値との差は極めてわずかであり、技術的になんら問題は無いといえる。

本研究の対象材料のうち、A6063BE-T6 の許容引張応力 S は通商産業省告示第 501 号⁽⁸⁾別表第 7 に示されていない。ただし、A6063TE、TES、TD、TDS-T6 の S 値は通商産業省告示第 501 号⁽⁸⁾別表第 7 に示されている。その値と第 6.1 表の値 (S_y には 0.99 を、 S_u には 0.275 をそれぞれ乗じた値) を比較した結果を第 6.3 表に示す。この表から分かるように、125 °C 以下で A6063BE-T6 の $S_u \times 0.275$ が A6063TE、TES、TD、TDS-T6 の S 値よりも小さくなっている。過去の経験から、押出棒と押出管の間に強度特性上の大きな差は無いと思われることから、A6063BE-T6 の S 値についても A6063TE、TES、TD、TDS-T6 の S 値を準用できると考えられる。その場合、 $S_u \times 0.275$ が S 値よりも小さくなっていることには十分な注意を払う必要がある*。しかしながら、通商産業省告示第 501 号⁽⁸⁾別表第 7 は十分な実績を有していることから、 S 値としては同表に示されている値を用いることで技術的な問題が生じることはないといえる。第 6.1 表の 125 °C 以下における A6063BE-T6 の S_u 値は現行法令⁽⁸⁾よりもやや保守的な値ということになる。将来的には、この材料のクリープ特性を実験的に調べた上で、 S 値に関する詳細な検討を加えることも必要と思われる。

6.2 ASME コード^(9,10)からの換算値との比較

ASME コード Sec. III⁽⁹⁾ 及び Sec. VIII⁽¹⁰⁾ で規定されているアルミニウム及びアルミニウム合金の設計降伏点 S_y 、許容引張応力 S 及び設計応力強さ S_m から設計降伏点 S_y 及び設計引張強

* 我が国では、A6063BE を製造する際、強度よりも押出性を重視する傾向がある。本研究における材料も第 3.2 表から分かるように、強度を上げる効果のある Mg の含有量はいずれも JIS 規格値⁽²⁾ の下限近傍となっている。こうした影響がこの結果に結びついているものと考えられる。

さ Su を換算して求めた。

A1100P-O については、ASME コード Sec. VIII⁽⁹⁾ に Sy 値及び Sm 値の規定が無い。また、ASME コード Sec. III⁽⁹⁾ の S 値は引張強さで定まったものではないので、この材料の Sy 値及び Su 値を ASME コード^(9,10) からの換算で求めることはできない。

A5052P-O については、Sy 値及び Su 値を ASME コード^(9,10) からの換算で求めることができる。第 6.1 表に示した設計降伏点 Sy 及び設計引張強さ Su の原案と ASME コード^(9,10) からの換算値との比較を第 6.1 図及び第 6.2 図に示す。これらの図から分かるように、Sy 値の原案は ASME コード⁽¹⁰⁾ からの換算値よりもやや小さいが、Su 値の原案は ASME コード^(9,10) からの換算値よりもやや大きい。

A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) については、Sy 値及び Su 値を ASME コード^(9,10) からの換算で求めることができる。第 6.1 表に示した設計降伏点 Sy 及び設計引張強さ Su の原案と ASME コード^(9,10) からの換算値との比較を第 6.3 図～第 6.5 図に示す。これらの図から分かるように、室温から 125℃ 付近までは、Sy 値及び Su 値の原案と ASME コード^(9,10) からの換算値とは非常によく一致している。150℃ 以上では、Sy 値及び Su 値の原案は ASME コード^(9,10) からの換算値よりもかなり大きい。

A6063BE-T6 については、Sy 値及び Su 値を ASME コード^(9,10) からの換算で求めることができる。第 6.1 表に示した設計降伏点 Sy 及び設計引張強さ Su の原案と ASME コード^(9,10) からの換算値との比較を第 6.6 図及び第 6.7 図に示す。これらの図から分かるように、室温から 125℃ 付近までは、Sy 値の原案と ASME コード⁽¹⁰⁾ からの換算値とは非常によく一致している。150℃ 以上では、Sy 値の原案は ASME コード⁽¹⁰⁾ からの換算値よりもかなり大きい。Su 値の原案は、室温から 125℃ 付近までは、ASME コード^(9,10) からの換算値よりも小さい*。150℃ では、Su 値の原案は、ASME コード^(9,10) から換算した Su 値よりもかなり大きい。

熱処理型の合金 A6061-T6 及び A6063-T6 において、150℃ 以上での差が生じた主要な原因は、試験温度での保持時間の効果によるものと考えられる。本研究では、2.4 に述べたように試験温度での保持時間を 15 分としたが、これらの材料では、第 6.8 図及び第 6.9 図に示すように、最終熱処理温度に近い約 150℃ 以上では、0.2% 耐力及び引張強さは試験温度での保持時間の影響を受けることが報告されている^(11,12)。そこで、「150 及び 200℃ における 10⁵ 時間保持後の強度/15 分保持後の強度を推定し、これを低下係数と定めて Sy 値及び Su 値を補正する。」という方法を検討した。この方法で補正した Sy 値及び Su 値を第 6.10 図～第 6.14 図にそれぞれ示す。これらの図から分かるように、この方法で補正した Sy 値及び Su 値は ASME コード^(9,10) からの換算値よりもかなり小さくなっている。

このように、試験温度での長時間保持効果を考慮して補正しようと試みても ASME コード^(9,10) からの換算値とは必ずしも一致しない。また、たとえ補正した Sy 値及び Su 値が ASME コード^(9,10) からの換算値と一致したとしても、第 6.8 図及び第 6.9 図に示したデータだけでは、低下係数算出の根拠として国の規制行政に用いるには不十分であると考えられる。さらに、現実

* 我が国では、A6063BE を製造する際、強度よりも押出性を重視する傾向がある。本研究における材料も第 3.2 表から分かるように、強度を上げる効果のある Mg の含有量はいずれも JIS 規格値⁽²⁾ の下限近傍となっている。こうした影響がこの結果に結びついているものと考えられる。

の試験研究炉では、定格運転時にそのような高温で使用されているわけではなく、異常な過渡変化時等にそのような高温を経験する例があるにすぎないことから、試験温度での長時間保持によってもたらされる材料強度への影響は、個々のプラント毎にその材料の使用条件を考慮して設計に反映されるべきものであるといえる。

以上の点を総合的に判断すると、第6.1表に示した設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の原案のうち、A6061-T6 及び A6063-T6 の 150℃ 以上における値については、何らかの補正を試みるという方向よりも、ここで得られた値を参考値として掲げておくのが妥当であると思われる。

第 6.1 表 設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の原案

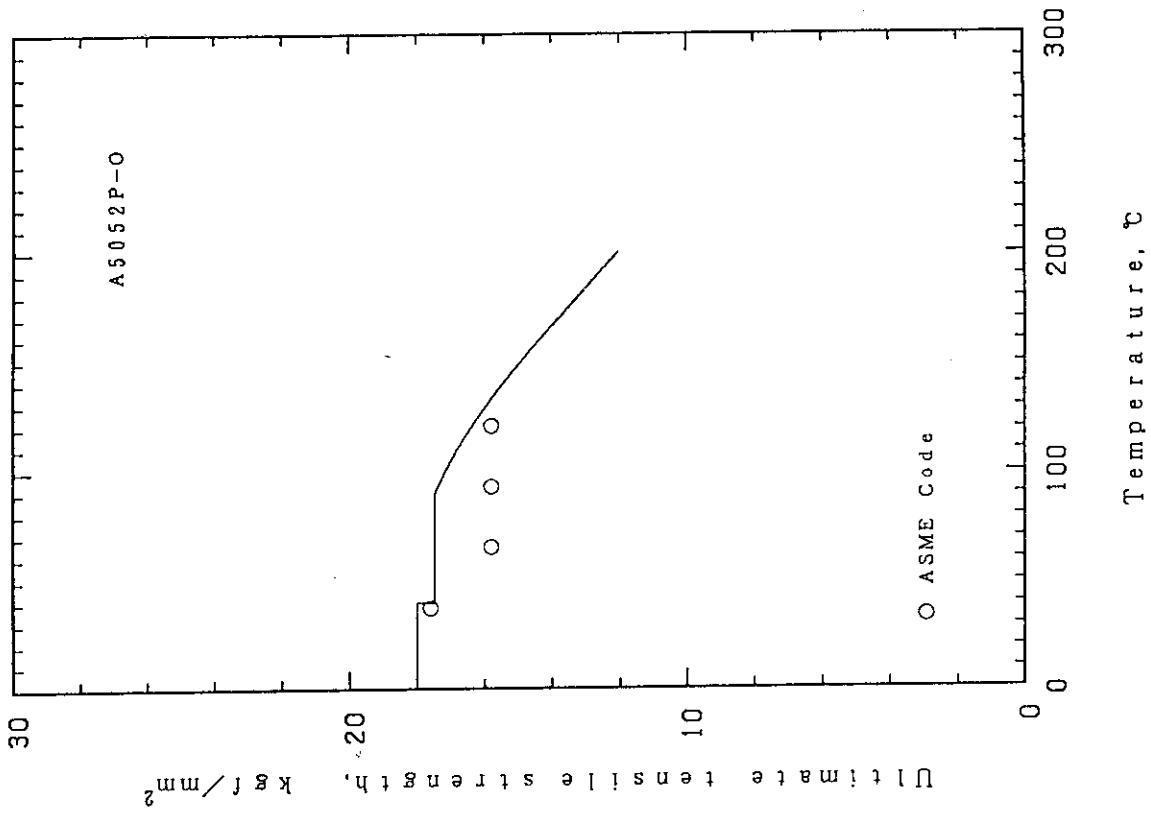
材料名		-30~40℃	75℃	100℃	125℃	150℃	175℃	200℃
A1100P-0	Sy値 (kgf/mm ²)	2.5	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.2
	Su値 (kgf/mm ²)	7.5	6.5	6.0	5.5	4.8	4.3	3.4
A5052P-0	Sy値 (kgf/mm ²)	6.5	5.6	5.6	5.6	5.5	5.4	5.3
	Su値 (kgf/mm ²)	18.0	17.5	17.0	16.2	14.9	13.5	12.1
A5052BE-0	Sy値 (kgf/mm ²)	7.0	5.6	5.6	5.6	5.5	5.4	5.3
	Su値 (kgf/mm ²)	18.0	17.5	17.0	16.2	14.9	13.5	12.1
A6061BE-T6	Sy値 (kgf/mm ²)	25.0	24.2	23.7	23.0	22.1	21.1	19.8
	Su値 (kgf/mm ²)	27.0	25.8	25.0	24.0	23.0	21.8	20.5
A6061P-T6, T651	Sy値 (kgf/mm ²)	25.0	24.2	23.7	23.0	22.1	21.1	19.8
	Su値 (kgf/mm ²)	30.0	27.2	26.3	25.4	24.3	23.0	21.5
A6063BE-T6	Sy値 (kgf/mm ²)	18.0	16.3	15.7	15.5	14.8	14.0	12.6
	Su値 (kgf/mm ²)	21.0	17.3	16.7	16.0	15.2	14.2	13.0

第 6.2 表 A1100P-0, A5052P-0及びA6061BE-T6の第 6.1 表の値と S 値の比較

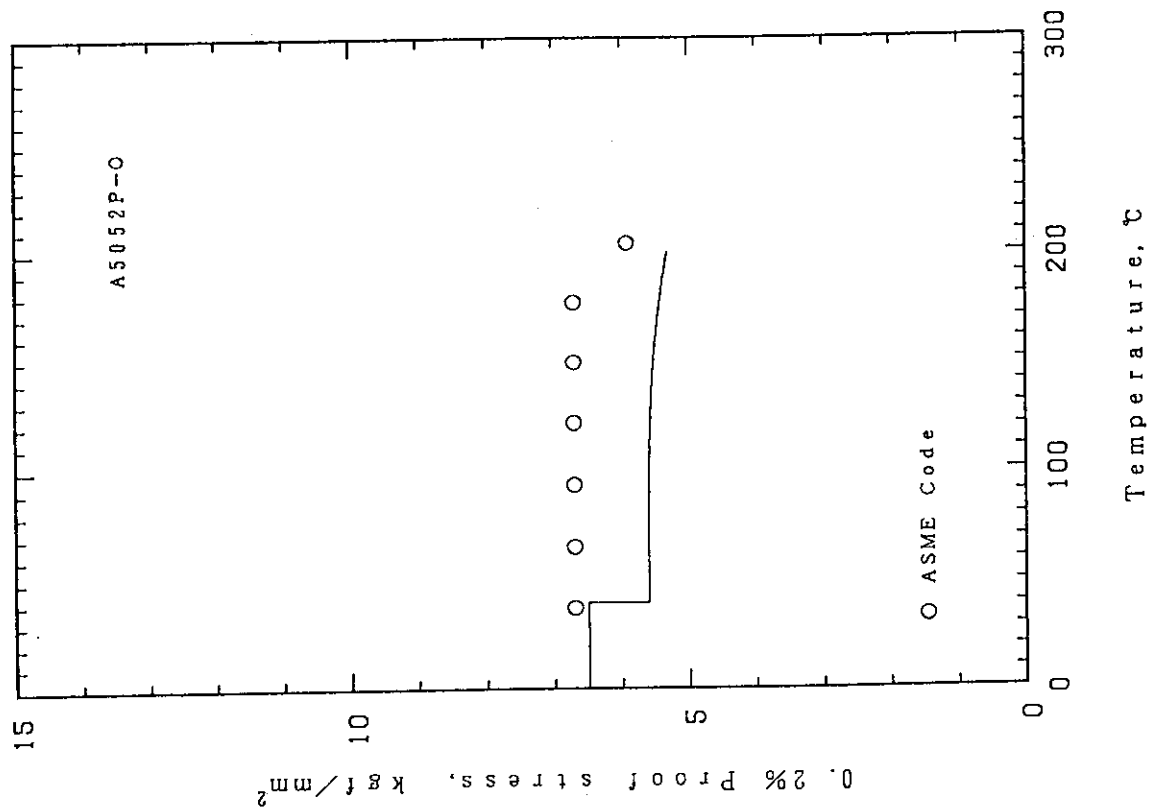
		75℃	100℃	125℃	150℃	175℃	200℃
A1100P-0	Sy X 0.99 (kgf/mm ²)	1.881	1.881	1.782	1.683	1.584	1.188
	Su X 0.275 (kgf/mm ²)	1.7875	1.65	1.5125	1.32	1.1825	0.935
	S (kgf/mm ²)	1.7	1.7	1.6	1.2	0.9	0.7
A5052P-0	Sy X 0.99 (kgf/mm ²)	5.544	5.544	5.544	5.445	5.346	5.247
	Su X 0.275 (kgf/mm ²)	4.8125	4.675	4.455	4.0975	3.7125	3.3275
	S (kgf/mm ²)	4.3	4.3	4.2	3.8	2.9	1.6
A6061BE-T6	Sy X 0.99 (kgf/mm ²)	23.958	23.463	22.77	21.879	20.889	19.602
	Su X 0.275 (kgf/mm ²)	7.095	6.875	6.6	6.325	5.995	5.6375
	S (kgf/mm ²)	6.6	6.4	6.0	5.2	4.0	3.0

第 6.3 表 A6063-T6の第 6.1 表の値と S 値の比較

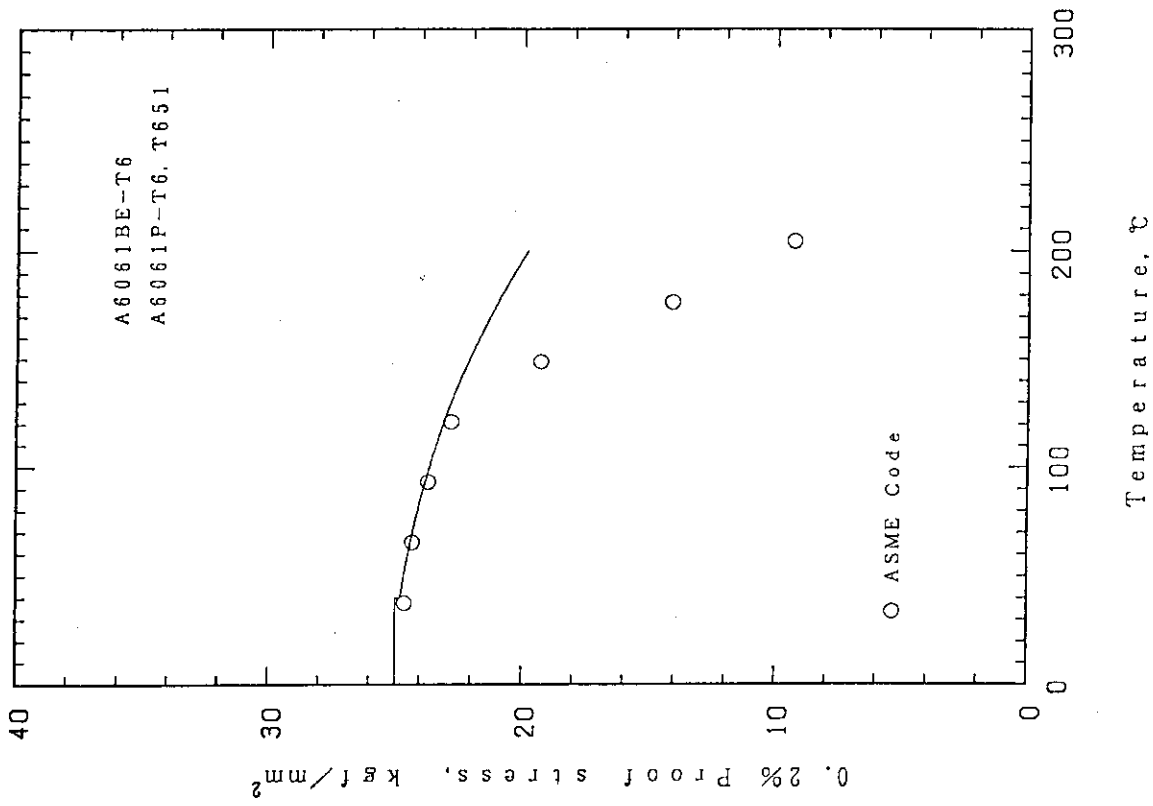
		75℃	100℃	125℃	150℃	175℃	200℃
A6063BE-T6	Sy X 0.99 (kgf/mm ²)	16.137	15.543	15.345	14.652	13.86	12.474
	Su X 0.275 (kgf/mm ²)	4.7575	4.5925	4.4	4.18	3.905	3.575
A6063TE, TES, TD, TDS-T6	S (kgf/mm ²)	5.2	5.1	4.5	3.4	2.5	1.6



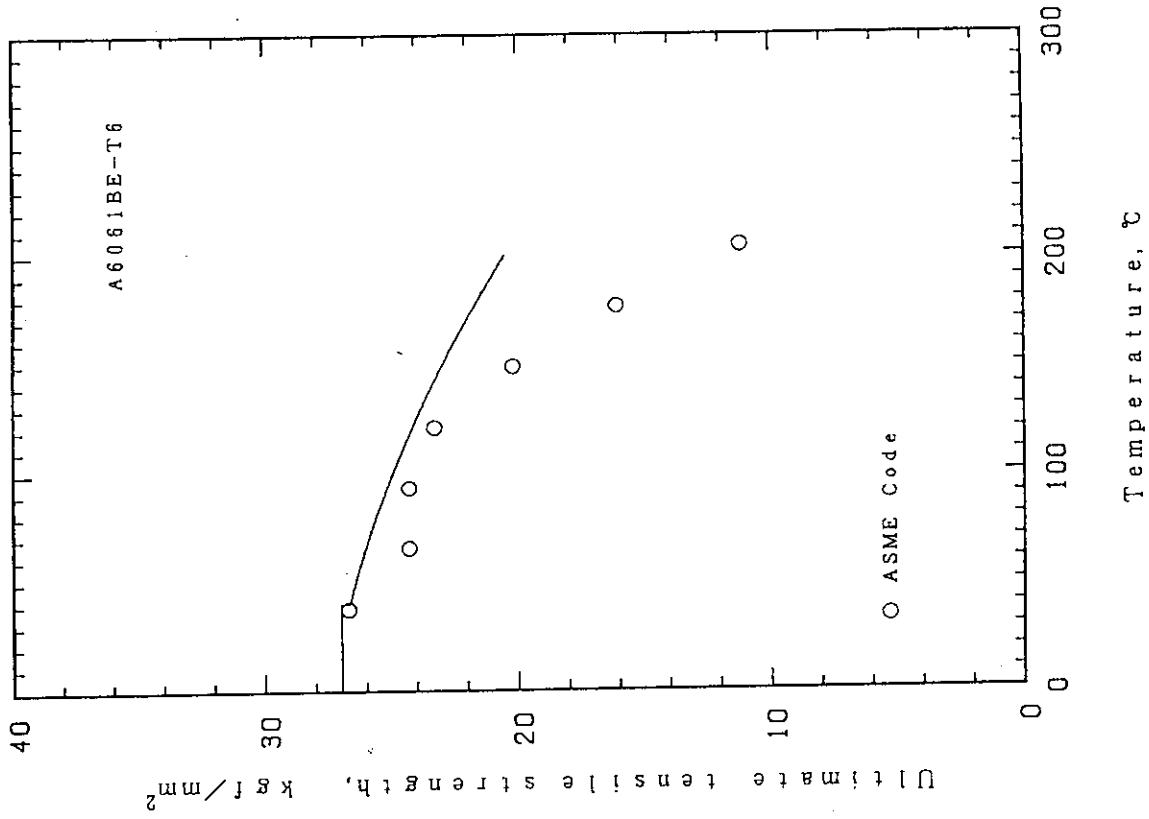
第6.2図 A5052P-Oの設計引張強さSuの原案と
ASMEコードからの換算値との比較



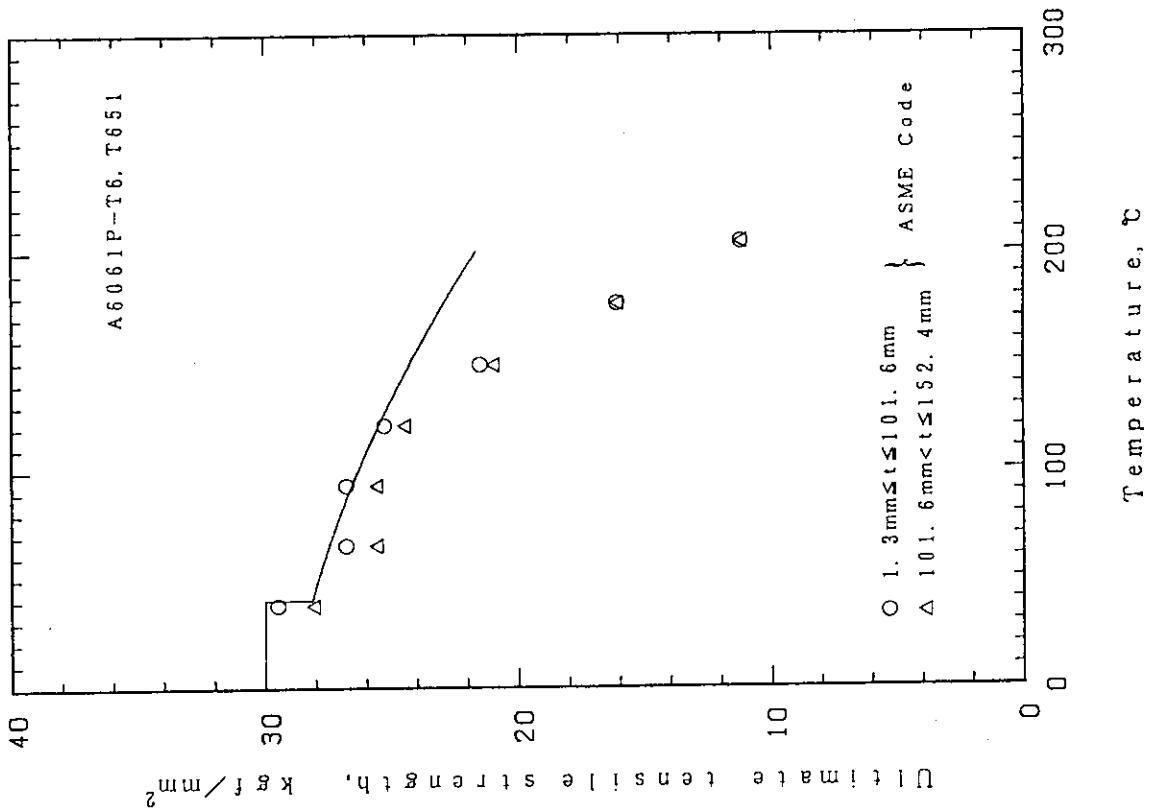
第6.1図 A5052P-Oの設計降伏点Syの原案と
ASMEコードからの換算値との比較



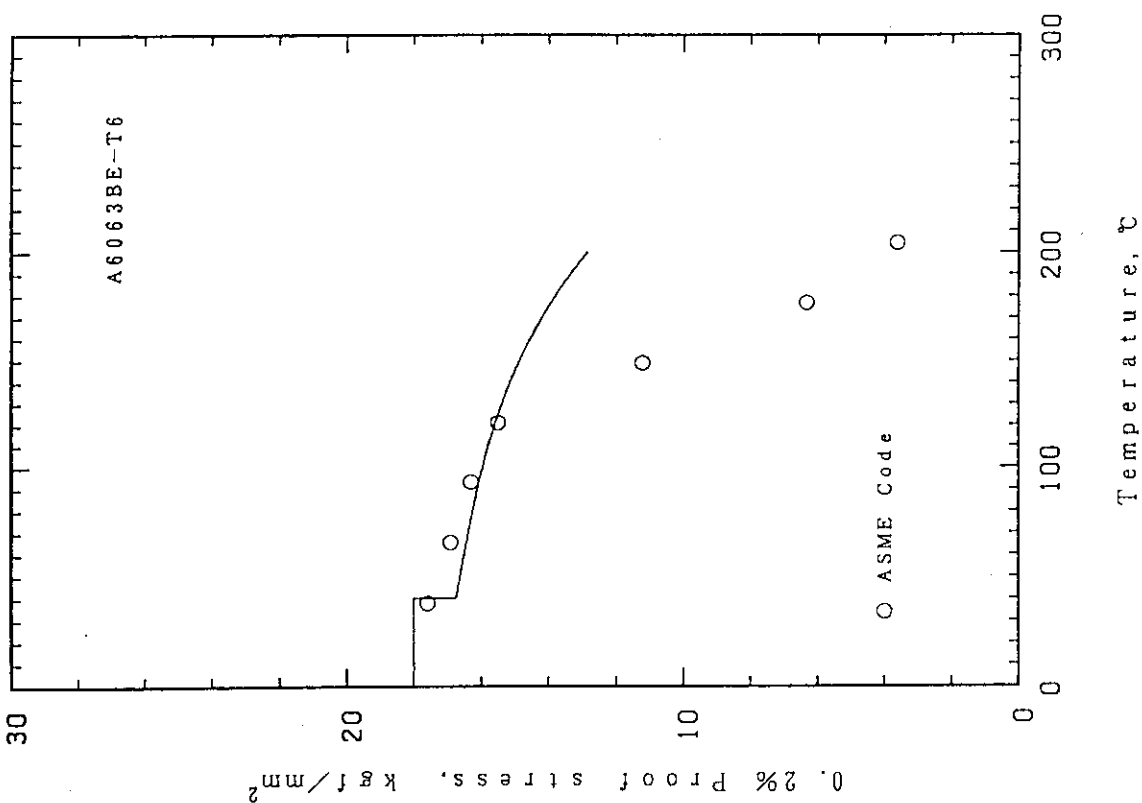
第 6.3 図 A 6061P-T6, T651 及び A 6061BE-T6 の設計降伏点 S_y の
 原案と ASME コードからの換算値との比較



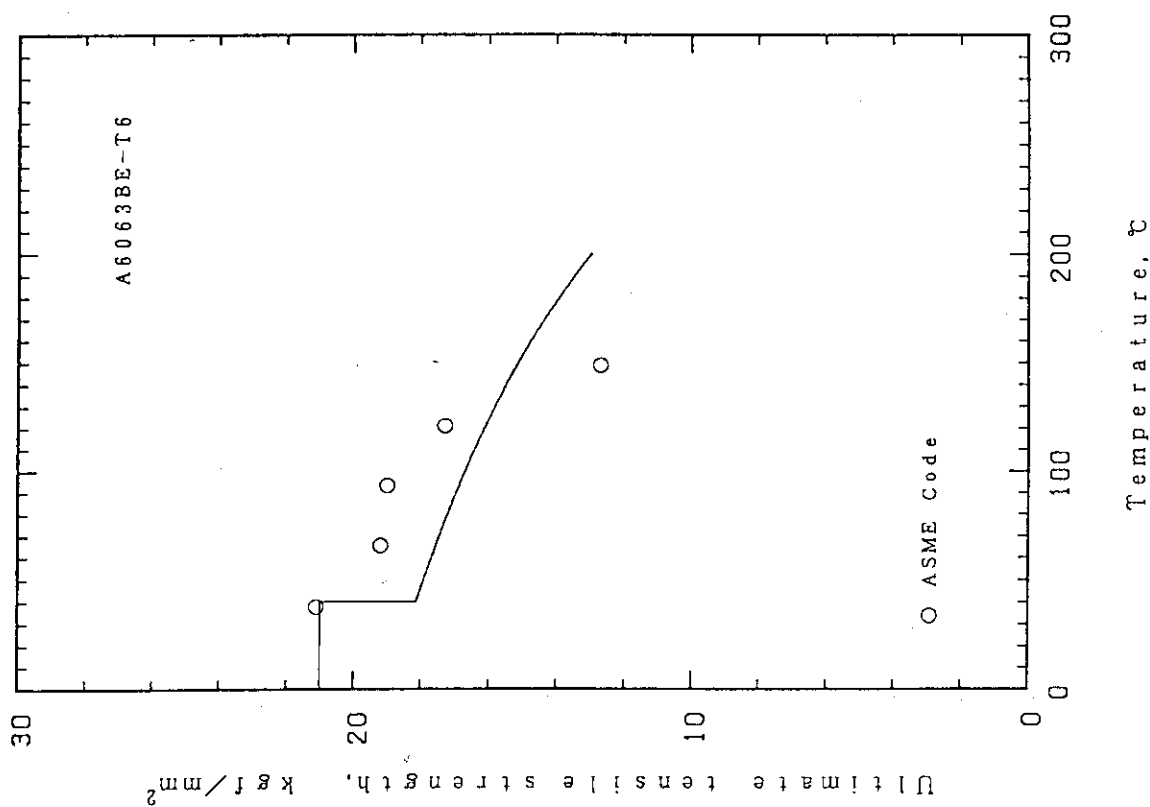
第6.5図 A6061BE-T6の設計引張強さSuの原案とASMEコードからの換算値との比較



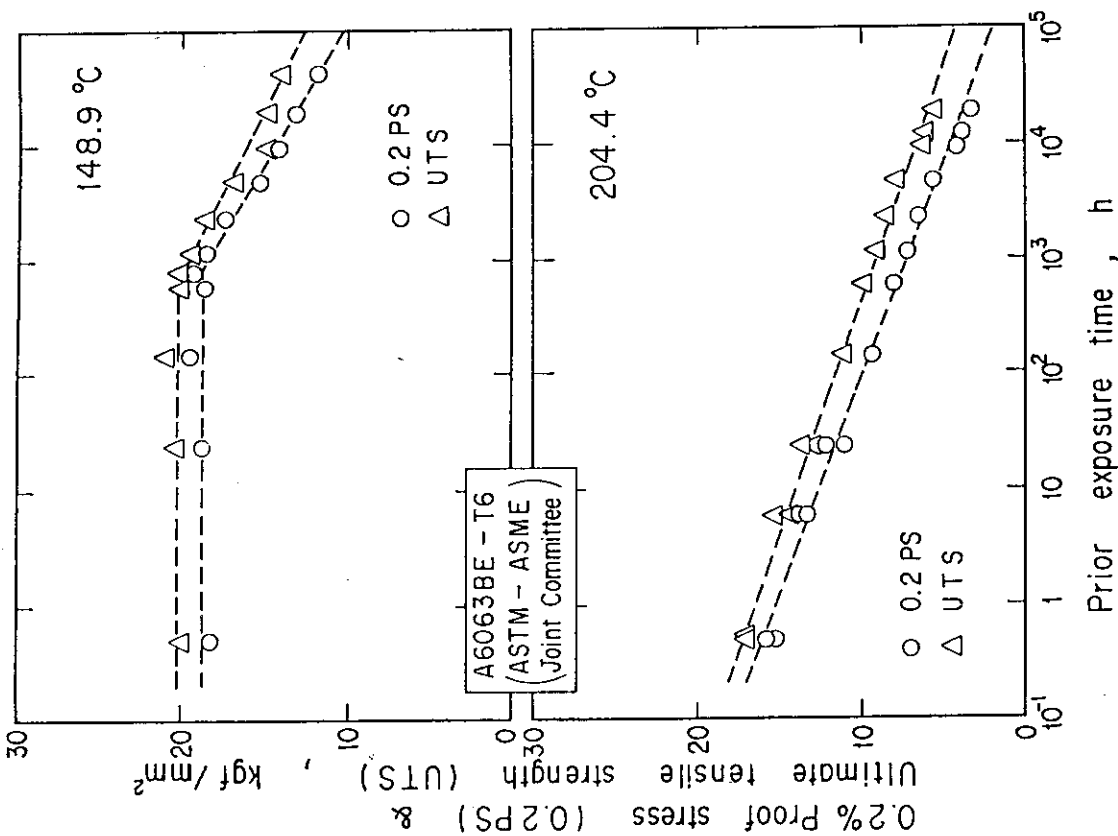
第6.4図 A6061P-T6, T651の設計引張強さSuの原案とASMEコードからの換算値との比較



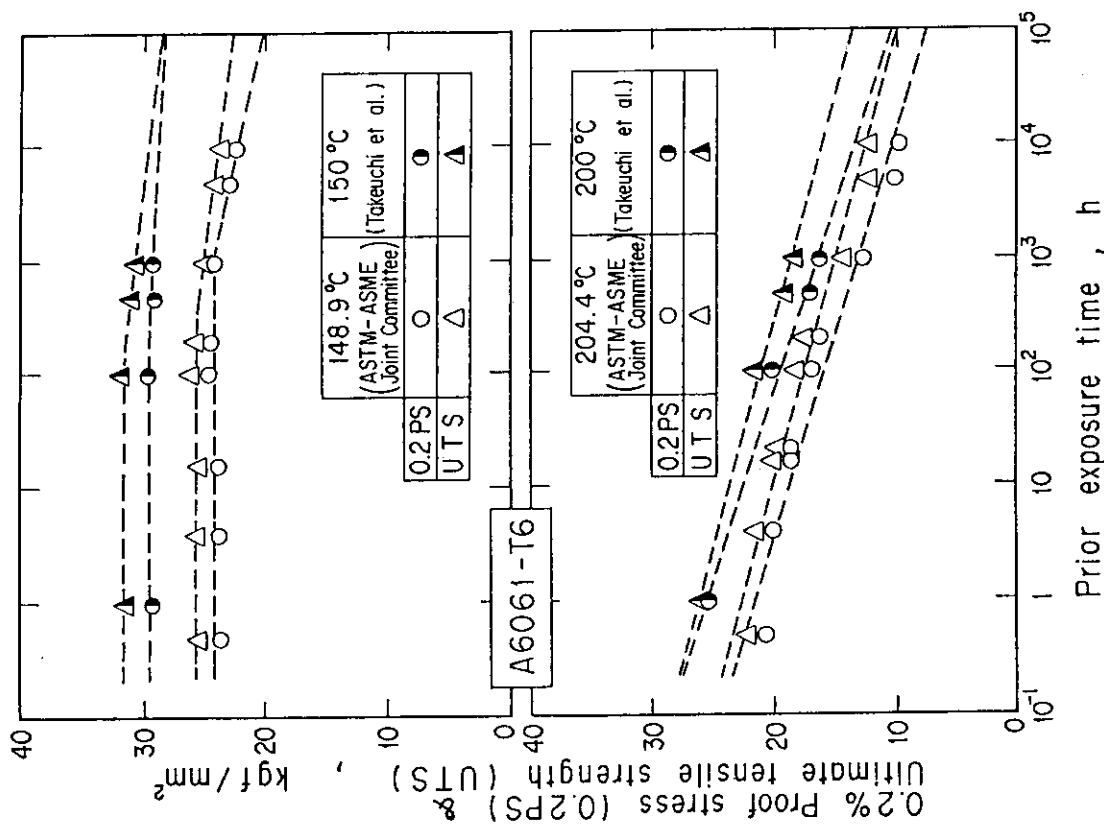
第 6.6 図 A6063BE-T6 の設計降伏点 S_y の原案と ASMEコードからの換算値との比較



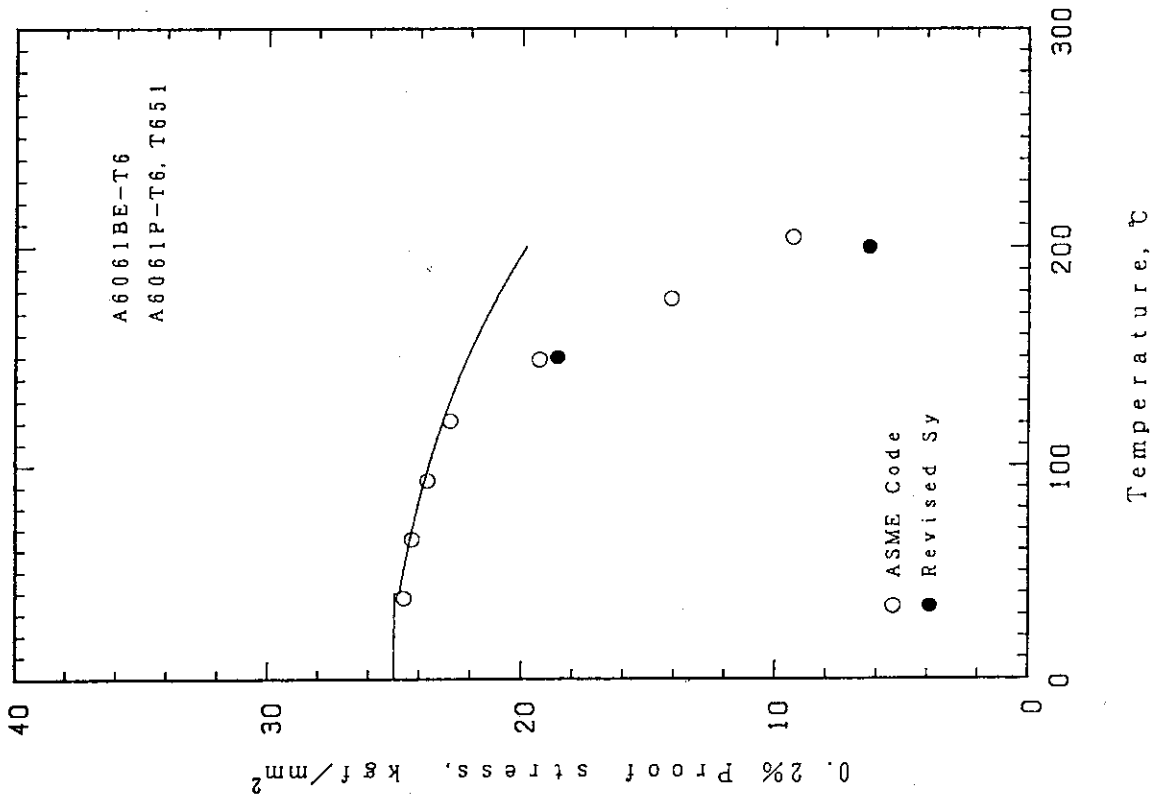
第 6.7 図 A6063BE-T6 の設計引張強さ S_u の原案と ASMEコードからの換算値との比較



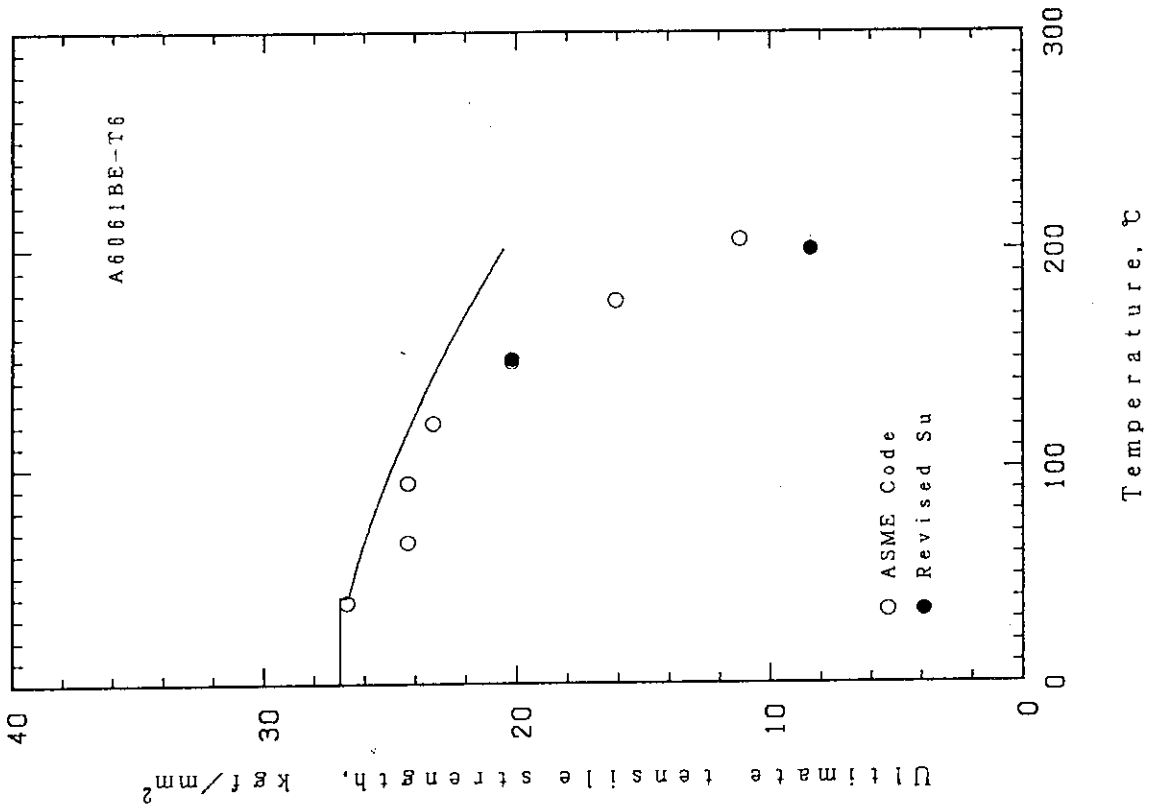
第 6.9 図 A 6063-T6 の 0.2% 耐力及び引張強さに及ぼす試験温度における保持時間の影響⁽¹⁾



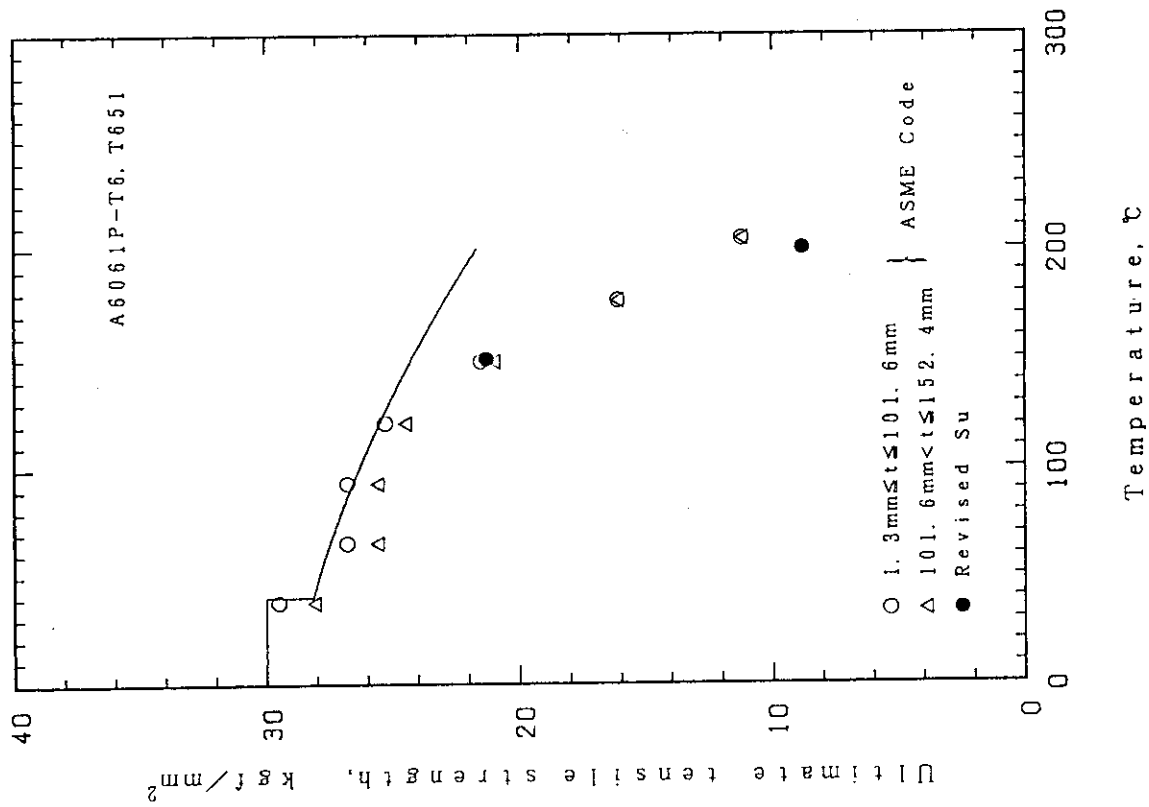
第 6.8 図 A 6061-T6 の 0.2% 耐力及び引張強さに及ぼす試験温度における保持時間の影響^{(1), (2)}



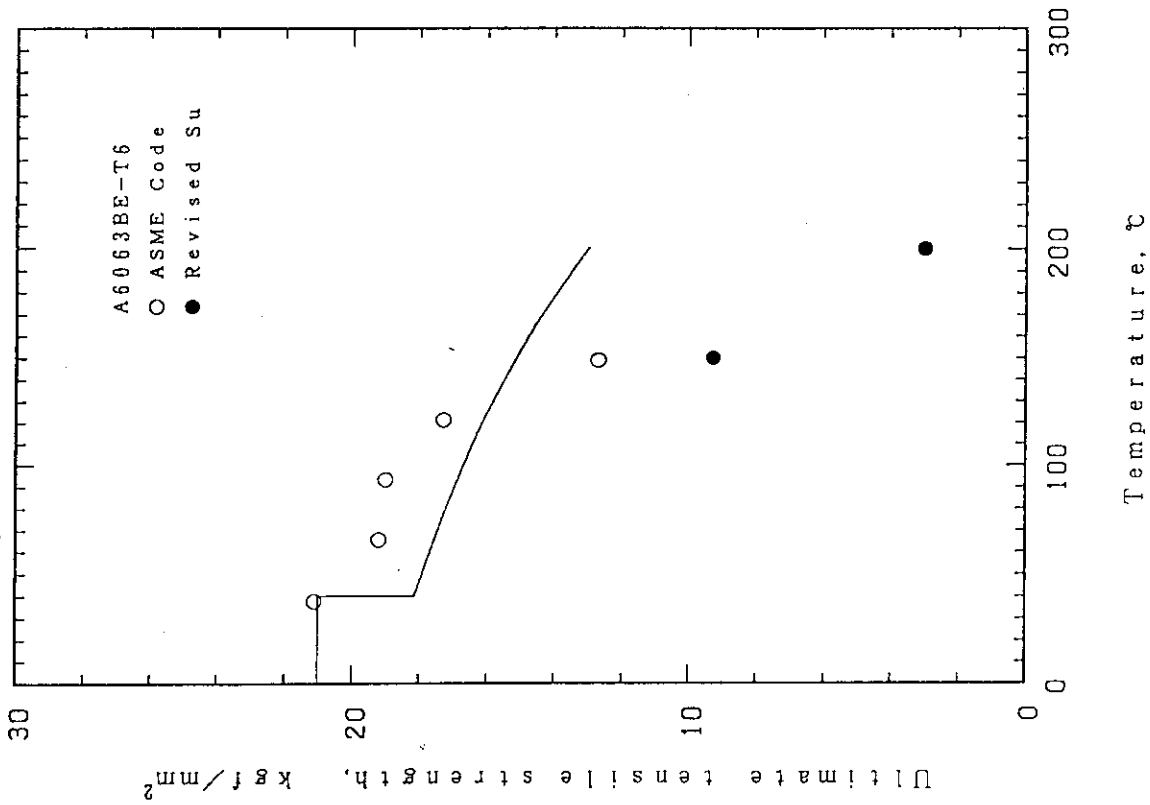
第6.10図 A6061P-T6, T651及びA6061BE-T6のSy値とASMEコードからの換算値との比較 (150°C以上で補正したSy値)



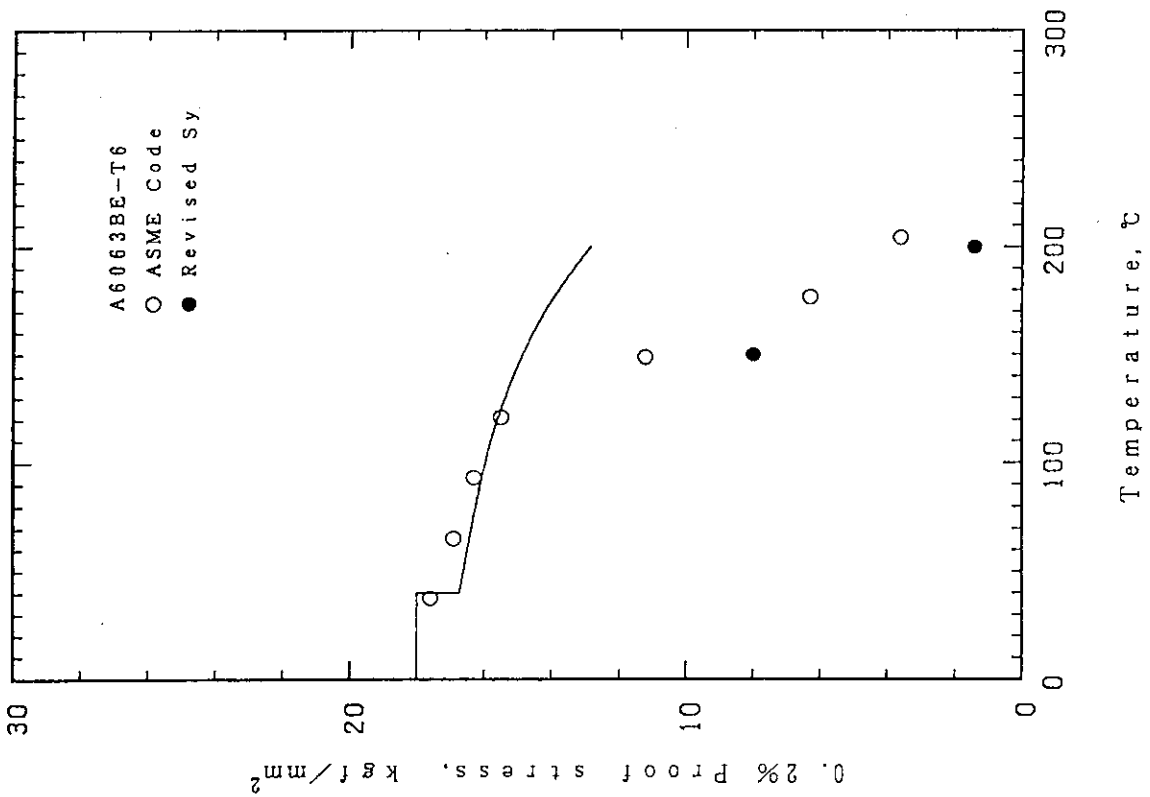
第6.12図 A6061BE-T6のSu値とASMEコードからの換算値との比較 (150°C以上で補正したSu値)



第6.11図 A6061P-T6, T651のSu値とASMEコードからの換算値との比較 (150°C以上で補正したSu値)



第6.14図 A6063BE-T6のSu値とASMEコードからの換算値との比較 (150°C以上で補正したSu値)



第6.13図 A6063BE-T6のSy値とASMEコードからの換算値との比較 (150°C以上で補正したSy値)

7. ま と め

原子炉用構造材料の中で、非鉄金属の代表であり、試験研究用原子炉等で実績のあるアルミニウム及びアルミニウム合金の引張特性に関する試験研究を以下に示す方法で実施し、必要なデータベースの整備を図ると共に、設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の基準原案を策定した。

- (1) 試験研究用原子炉におけるアルミニウム及びアルミニウム合金の使用実績並びに国内における製造実績を考慮して、供試材料は、純アルミニウム A1100P-O, Al-Mg 合金 A5052P-O, A5052BE-O, Al-Mg-Si 合金 A6061P-T6 (厚板の場合は T651), A6061BE-T6, A6063BE-T6 の 6 種類とした。
- (2) 1 材質当たり 8 ヒートを基本とし、室温から 200 °C までの 50 °C 毎に引張試験を行うことを標準とした。
- (3) 引張試験片としては、原則として JIS Z 2201⁽⁵⁾ に規定されている 13B 号試験片もしくは 14A 号試験片を、供試材料の形状に応じて採用した。
- (4) 引張試験は、原則として JIS G 0567⁽⁶⁾ に規定されている標準試験方法に準じて行った。
- (5) 引張試験で得たデータを基に、温度トレンド法を基本的な考え方としたデータ処理を行い、アルミニウム及びアルミニウム合金の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の原案を策定した。

上記の原案を現行法令⁽⁸⁾及び ASME コード^(9,10)からの換算値と比較検討すると共に、既存データの傾向を調査した。その結果、熱処理型合金である A6061-T6 及び A6063-T6 の 150 °C 以上では試験温度における保持時間効果が現れるため、これらの材料の 150 °C 以上の値は参考値にとどめておくべきものであるが、基本的にはこの原案は材料強度基準として適用できることが分かった。以上の検討結果を踏まえて、各材料の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の基準原案として第 7.1 表を提案する。

第7.1表 各材料の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u の提案値

材料名		-30~40℃	75℃	100℃	125℃	150℃	175℃	200℃
A1100P-0	Sy値 (kgf/mm ²)	2.5	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.2
	Su値 (kgf/mm ²)	7.5	6.5	6.0	5.5	4.8	4.3	3.4
A5052P-0	Sy値 (kgf/mm ²)	6.5	5.6	5.6	5.6	5.5	5.4	5.3
	Su値 (kgf/mm ²)	18.0	17.5	17.0	16.2	14.9	13.5	12.1
A5052BE-0	Sy値 (kgf/mm ²)	7.0	5.6	5.6	5.6	5.5	5.4	5.3
	Su値 (kgf/mm ²)	18.0	17.5	17.0	16.2	14.9	13.5	12.1
A6061BE-T6	Sy値 (kgf/mm ²)	25.0	24.2	23.7	23.0	(22.1)	(21.1)	(19.8)
	Su値 (kgf/mm ²)	27.0	25.8	25.0	24.0	(23.0)	(21.8)	(20.5)
A6061P-T6, T651	Sy値 (kgf/mm ²)	25.0	24.2	23.7	23.0	(22.1)	(21.1)	(19.8)
	Su値 (kgf/mm ²)	30.0	27.2	26.3	25.4	(24.3)	(23.0)	(21.5)
A6063BE-T6	Sy値 (kgf/mm ²)	18.0	16.3	15.7	15.5	(14.8)	(14.0)	(12.6)
	Su値 (kgf/mm ²)	21.0	17.3	16.7	16.0	(15.2)	(14.2)	(13.0)

謝 辞

試験研究用原子炉材料アルミニウム及びアルミニウム合金の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u 策定のための一連の引張試験を実施するに当たり、社団法人軽金属溶接構造協会試験研究用原子炉材料調査研究委員会（委員長：宮 健三東京大学教授）の委員各位には多大なご協力を頂いた。また、日本原子力研究所燃料・材料工学部材料応用工学研究室の横山憲夫氏には、図の準備等に多大なご協力を頂いた。ここに、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 日本工業規格 JIS H 4000「アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条」(1990)
- (2) 日本工業規格 JIS H 4040「アルミニウム及びアルミニウム合金の棒及び線」(1990)
- (3) 日本工業規格 JIS Z 2202「金属材料衝撃試験片」(1980)
- (4) 社団法人火力原子力発電技術協会, 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準質疑応答集(63年改訂版), p. 212 (1988)
- (5) 日本工業規格 JIS Z 2201「金属材料引張試験片」(1980)
- (6) 日本工業規格 JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」(1978)
- (7) 社団法人日本溶接協会原子力研究委員会 P・FCI 小委員会, 高速炉構造材料の設計許容応力の評価検討成果報告書, JWES-AE-7809 (1978)
- (8) 通商産業省告示第 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」(1980)
- (9) ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1 (1989)
- (10) ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2 (1989)
- (11) ASME, Report on the Elevated-Temperature Properties of Aluminum and Magnesium Alloys, Library of Congress Catalog No. 60-53501 (1960)
- (12) 竹内勝治, 田中英司, 住友軽金属技報 Vol. 7, No. 3, p. 8 (July, 1966)

謝 辞

試験研究用原子炉材料アルミニウム及びアルミニウム合金の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u 策定のための一連の引張試験を実施するに当たり、社団法人軽金属溶接構造協会試験研究用原子炉材料調査研究委員会（委員長：宮 健三東京大学教授）の委員各位には多大なご協力を頂いた。また、日本原子力研究所燃料・材料工学部材料応用工学研究室の横山憲夫氏には、図の準備等に多大なご協力を頂いた。ここに、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 日本工業規格 JIS H 4000「アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条」(1990)
- (2) 日本工業規格 JIS H 4040「アルミニウム及びアルミニウム合金の棒及び線」(1990)
- (3) 日本工業規格 JIS Z 2202「金属材料衝撃試験片」(1980)
- (4) 社団法人火力原子力発電技術協会, 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準質疑応答集(63年改訂版), p. 212 (1988)
- (5) 日本工業規格 JIS Z 2201「金属材料引張試験片」(1980)
- (6) 日本工業規格 JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」(1978)
- (7) 社団法人日本溶接協会原子力研究委員会 P・FCI 小委員会, 高速炉構造材料の設計許容応力の評価検討成果報告書, JWES-AE-7809 (1978)
- (8) 通商産業省告示第 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」(1980)
- (9) ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1 (1989)
- (10) ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2 (1989)
- (11) ASME, Report on the Elevated-Temperature Properties of Aluminum and Magnesium Alloys, Library of Congress Catalog No. 60-53501 (1960)
- (12) 竹内勝治, 田中英司, 住友軽金属技報 Vol. 7, No. 3, p. 8 (July, 1966)

付 録

A6061BE-T6 及び A6061P-T6 (厚板の場合は T651) の両方で母集団を構成した場合の母集団分布が正規分布であるとみなせるか否かを χ^2 検定によって検討した。

(1) 室温における 0.2% 耐力のデータ

得られたデータの標本平均は $\bar{x} = 28.9378$, 標本標準偏差は $s = 1.3388$ である。第 A.1 表に、各階級に入る標本の期待度数を求める過程を示す。この表から χ^2 の実現値は

$$\chi^2 = \sum_k \frac{(x_k - n\Delta p_k)^2}{n\Delta p_k} = 1.9032 \quad (\text{A.1})$$

である。 χ^2 は自由度 2 の χ^2 - 分布に従い、 χ^2 - 分布表から $\chi_{2, 0.05}^2 = 5.991$ である。 $5.991 > 1.9032$ であることから、室温における 0.2% 耐力のデータの母集団分布が正規分布であるという仮説は有意水準 5% で棄却されない^(A.1)。

(2) 室温における引張強さのデータ

得られたデータの標本平均は $\bar{x} = 31.8568$, 標本標準偏差は $s = 1.3196$ である。第 A.2 表に、各階級に入る標本の期待度数を求める過程を示す。この表から χ^2 の実現値は

$$\chi^2 = \sum_k \frac{(x_k - n\Delta p_k)^2}{n\Delta p_k} = 1.8868 \quad (\text{A.2})$$

である。 χ^2 は自由度 2 の χ^2 - 分布に従い、 χ^2 - 分布表から $\chi_{2, 0.05}^2 = 5.991$ である。 $5.991 > 1.8868$ であることから、室温における引張強さのデータの母集団分布が正規分布であるという仮説は有意水準 5% で棄却されない^(A.1)。

(3) 100°C における 0.2% 耐力のデータ

得られたデータの標本平均は $\bar{x} = 27.3541$, 標本標準偏差は $s = 1.2247$ である。第 A.3 表に、各階級に入る標本の期待度数を求める過程を示す。この表から χ^2 の実現値は

$$\chi^2 = \sum_k \frac{(x_k - n\Delta p_k)^2}{n\Delta p_k} = 6.9223 \quad (\text{A.3})$$

である。 χ^2 は自由度 3 の χ^2 - 分布に従い、 χ^2 - 分布表から $\chi_{3, 0.05}^2 = 7.815$ である。 $7.815 > 6.9223$ であることから、100°C における 0.2% 耐力のデータの母集団分布が正規分布であるという仮説は有意水準 5% で棄却されない^(A.1)。

(4) 100°C における引張強さのデータ

得られたデータの標本平均は $\bar{x} = 29.4297$, 標本標準偏差は $s = 1.1918$ である。第 A.4 表に、各階級に入る標本の期待度数を求める過程を示す。この表から χ^2 の実現値は

$$\chi^2 = \sum_k \frac{(x_k - n\Delta p_k)^2}{n\Delta p_k} = 2.7417 \quad (\text{A.4})$$

である。 χ^2 は自由度3の χ^2 -分布に従い、 χ^2 -分布表から $\chi_{3,2}^2(0.05) = 7.815$ である。 $7.815 > 2.7417$ であることから、100℃における引張強さのデータの母集団分布が正規分布であるという仮説は有意水準5%で棄却されない^(A.1)。

(5) 150℃における0.2%耐力のデータ

得られたデータの標本平均は $\bar{x} = 25.6243$ 、標本標準偏差は $s = 1.0623$ である。第A.5表に、各階級に入る標本の期待度数を求める過程を示す。この表から χ^2 の実現値は

$$\chi^2 = \sum_k \frac{(x_k - n\Delta p_k)^2}{n\Delta p_k} = 0.9806 \quad (\text{A.5})$$

である。 χ^2 は自由度3の χ^2 -分布に従い、 χ^2 -分布表から $\chi_{3,2}^2(0.05) = 7.815$ である。 $7.815 > 0.9806$ であることから、150℃における0.2%耐力のデータの母集団分布が正規分布であるという仮説は有意水準5%で棄却されない^(A.1)。

(6) 150℃における引張強さのデータ

得られたデータの標本平均は $\bar{x} = 27.1865$ 、標本標準偏差は $s = 1.0133$ である。第A.6表に、各階級に入る標本の期待度数を求める過程を示す。この表から χ^2 の実現値は

$$\chi^2 = \sum_k \frac{(x_k - n\Delta p_k)^2}{n\Delta p_k} = 0.9839 \quad (\text{A.6})$$

である。 χ^2 は自由度2の χ^2 -分布に従い、 χ^2 -分布表から $\chi_{2,2}^2(0.05) = 5.991$ である。 $5.991 > 0.9839$ であることから、150℃における引張強さのデータの母集団分布が正規分布であるという仮説は有意水準5%で棄却されない^(A.1)。

(7) 200℃における0.2%耐力のデータ

得られたデータの標本平均は $\bar{x} = 22.9351$ 、標本標準偏差は $s = 1.0441$ である。第A.7表に、各階級に入る標本の期待度数を求める過程を示す。この表から χ^2 の実現値は

$$\chi^2 = \sum_k \frac{(x_k - n\Delta p_k)^2}{n\Delta p_k} = 11.8620 \quad (\text{A.7})$$

である。 χ^2 は自由度2の χ^2 -分布に従い、 χ^2 -分布表から $\chi_{2,2}^2(0.05) = 5.991$ である。 $5.991 < 11.8620$ であることから、200℃における0.2%耐力のデータの母集団分布が正規分布であるという仮説は有意水準5%で棄却される^(A.1)。

(8) 200℃における引張強さのデータ

得られたデータの標本平均は $\bar{x} = 24.2243$ 、標本標準偏差は $s = 1.0324$ である。第A.8表に、

各階級に入る標本の期待度数を求める過程を示す。この表から χ^2 の実現値は

$$\chi^2 = \sum_k \frac{(x_k - n\Delta p_k)^2}{n\Delta p_k} = 1.7539 \quad (\text{A.8})$$

である。 χ^2 は自由度 2 の χ^2 - 分布に従い、 χ^2 - 分布表から $\chi_{0.05}^2(2) = 5.991$ である。 $5.991 > 1.7539$ であることから、200 °C における引張強さのデータの母集団分布が正規分布であるという仮説は有意水準 5 % で棄却されない^(A.1)。

上に示したように、ここで検討を行った 8 ケースのうち、200 °C における 0.2 % 耐力のデータを除く 7 ケースについて、「データの母集団分布が正規分布であるという仮説」は有意水準 5 % で棄却されなかったことになる。

参考文献

- (A.1) 和田 秀三, 御園生善尚, 鈴木 義也, 岡安 隆照, 吾妻 一興, 「統計学大要」養賢堂 (1983)

第A.1表 χ^2 検定の過程 (室温, 0.2%耐力)

階級 (kgf/mm ²) $a_k - j - a_k$	度数 X_k	$a_k - \bar{x}$	$t_k = \frac{a_k - \bar{x}}{S}$	$p_k = \Phi(t_k)$	$\Delta p_k = p_k - p_{k-1}$	$m_k = n \Delta p_k$	$X_k - m_k$	$(X_k - m_k)^2$	$\frac{(X_k - m_k)^2}{m_k}$							
26.1 - 26.5	1	-1.4378	-1.0739	0.1414	0.1414	5.2318	2.7682	7.6629	1.4647							
26.6 - 27.0	0															
27.1 - 27.5	7															
27.6 - 28.0	3															
28.1 - 28.5	4															
28.6 - 29.0	6															
29.1 - 29.5	6															
29.6 - 30.0	3															
30.1 - 30.4	1	0.9865	2.2126	0.9865	7.4111	0.4111	0.1690	0.0228								
30.5 - 30.9	2															
31.0 - 31.4	3															
31.5 - 31.9	1															
計	n = 37															1.9032

第A.2表 χ^2 検定の過程 (室温, 引張強さ)

階級 (kgf/mm ²) $a_{k-1} - a_k$	度数 x_k	$a_k - \bar{x}$	$t_k = \frac{a_k - \bar{x}}{s}$	$p_k = \Phi(t_k)$	$\Delta p_k = p_k - p_{k-1}$	$m_k = n \Delta p_k$	$x_k - m_k$	$(x_k - m_k)^2$	$\frac{(x_k - m_k)^2}{m_k}$
29.2 - 29.6	2	-0.7568	-0.5735	0.2831	0.2831	10.4747	-1.4747	2.1747	0.2076
29.7 - 30.1	2								
30.2 - 30.6	2								
30.7 - 31.1	3	-0.2568	-0.1946	0.4229	0.1398	5.1726	1.8274	3.3394	0.6456
31.2 - 31.6	7								
31.7 - 32.1	7								
32.2 - 32.6	6								
32.7 - 33.1	2	0.7432	0.5632	0.7134	0.1403	5.1911	0.8089	0.6543	0.1260
33.2 - 33.6	4								
33.7 - 34.1	0								
34.2 - 34.6	0								
34.7 - 35.1	2								
計	n = 37	3.2432	2.4577	0.9931	0.2797	10.3489	-2.3489	5.5173	0.5331
									1.8868

第A.3表 χ^2 検定の過程 (100°C, 0.2%耐力)

階級 (kgf/mm ²) $a_k - i - a_k$	度数 x_k	$a_k - \bar{x}$	$t_k = \frac{a_k - \bar{x}}{s}$	$p_k = \Phi(t_k)$	$\Delta p_k = p_k - p_{k-1}$	$m_k = n \Delta p_k$	$x_k - m_k$	$(x_k - m_k)^2$	$\frac{(x_k - m_k)^2}{m_k}$
25.5 - 25.7	1	-1.3541	-1.1057	0.1344	0.1344	4.9728	2.0272	4.1095	0.8264
25.8 - 26.0	6								
26.1 - 26.3	1	-0.4541	-0.3709	0.3554	0.2210	8.1770	-2.1770	4.7393	0.5796
26.4 - 26.6	2								
26.7 - 26.9	3								
27.0 - 27.2	7	-0.1541	-0.1258	0.4499	0.0945	3.4965	3.5035	12.2745	3.5105
27.3 - 27.5	5								
27.6 - 27.8	3	1.0459	0.8540	0.8034	0.2560	9.4720	-3.4720	12.0548	1.2727
27.9 - 28.1	2								
28.2 - 28.4	1								
28.5 - 28.7	1	3.4459	2.8137	0.9976	0.1942	7.1854	-1.1854	1.4052	0.1956
28.8 - 29.0	1								
29.1 - 29.3	0								
29.4 - 29.6	2								
29.7 - 29.9	0								
30.0 - 30.2	0								
30.3 - 30.5	1								
30.6 - 30.8	1								
計	n=37								6.9223

第A.4表 χ^2 検定の過程 (100 °C, 引張強さ)

階級 (kgf/mm ²) $a_{k-1} - a_k$	度数 X_k	$a_k - \bar{x}$	$t_k = \frac{a_k - \bar{x}}{s}$	$p_k = \Phi(t_k)$	$\Delta p_k = p_k - p_{k-1}$	$m_k = n \Delta p_k$	$X_k - m_k$	$(X_k - m_k)^2$	$\frac{(X_k - m_k)^2}{m_k}$								
26.9 - 27.1	1	-1.4297	-1.1996	0.1152	0.1152	4.2624	0.7376	0.5441	0.1276								
27.2 - 27.4	1																
27.5 - 27.7	0																
27.8 - 28.0	3																
28.1 - 28.3	2																
28.4 - 28.6	0	-0.5297	-0.4444	0.3284	0.2132	7.8884	1.1116	1.2357	0.1566								
28.7 - 28.9	7																
29.0 - 29.2	2																
29.3 - 29.5	5																
29.6 - 29.8	3																
29.9 - 30.1	3																
30.2 - 30.4	5																
30.5 - 30.7	2	0.9703	0.8141	0.7922	0.0791	2.9267	2.0733	4.2986	1.4687								
30.8 - 31.0	1																
31.1 - 31.3	0																
31.4 - 31.6	0																
31.7 - 31.9	0																
32.0 - 32.2	0																
32.3 - 32.5	2																
計	n = 37																

第A.5表 χ^2 検定の過程 (150°C, 0.2%耐力)

階級 (kgf/mm ²) $a_k - a_k$	度数 x_k	$a_k - \bar{x}$	$t_k = \frac{a_k - \bar{x}}{s}$	$p_k = \Phi(t_k)$	$\Delta p_k = p_k - p_{k-1}$	$m_k = n \Delta p_k$	$x_k - m_k$	$(x_k - m_k)^2$	$\frac{(x_k - m_k)^2}{m_k}$
23.7 - 23.9	2	-0.8243	-0.7759	0.2189	0.2189	8.0993	0.9007	0.8113	0.1002
24.0 - 24.2	2								
24.3 - 24.5	2								
24.6 - 24.8	3	-0.2243	-0.2111	0.4164	0.1975	7.3075	-0.3075	0.0946	0.0129
24.9 - 25.1	1								
25.2 - 25.4	6	0.0757	0.0713	0.5284	0.1120	4.1440	0.8560	0.7327	0.1768
25.5 - 25.7	5	0.3757	0.3537	0.6382	0.1098	4.0626	0.9374	0.8787	0.2163
25.8 - 26.0	5	0.9757	0.9184	0.8208	0.1826	6.7562	-0.7562	0.5718	0.0846
26.1 - 26.3	3								
26.4 - 26.6	3	3.3757	3.1776	0.9993	0.1785	6.6045	-1.6045	2.5744	0.3898
26.7 - 26.9	0								
27.0 - 27.2	4								
27.3 - 27.5	0								
27.6 - 27.8	0	5	3.1776	0.9993	0.1785	6.6045	-1.6045	2.5744	0.3898
27.9 - 28.1	0								
28.2 - 28.4	0								
28.5 - 28.7	0	1	3.1776	0.9993	0.1785	6.6045	-1.6045	2.5744	0.3898
28.8 - 29.0	1								
計	n=37								0.9806

第A.6表 χ^2 検定の過程 (150°C, 引張強さ)

階級 (kgf/mm ²) $a_{k-1} - a_k$	度数 X_k	$a_k - \bar{a}$	$t_k = \frac{a_k - \bar{a}}{S}$	$p_k = \Phi(t_k)$	$\Delta p_k = p_k - p_{k-1}$	$m_k = n \Delta p_k$	$X_k - m_k$	$(X_k - m_k)^2$	$\frac{(X_k - m_k)^2}{m_k}$								
25.3 - 25.5	1	-1.0865	-1.0722	0.1418	-0.1418	5.2466	0.7534	0.5676	0.1082								
25.6 - 25.8	2																
25.9 - 26.1	3																
26.2 - 26.4	4	-0.4865	-0.4801	0.3156	0.1738	6.4306	0.5694	0.3242	0.0504								
26.5 - 26.7	3																
26.8 - 27.0	3	0.1135	0.1120	0.5446	0.2290	8.4730	1.5270	2.3317	0.2752								
27.1 - 27.3	7																
27.4 - 27.6	1																
27.7 - 27.9	5	0.7135	0.7041	0.7593	0.2147	7.9439	-1.9439	3.7787	0.4757								
28.0 - 28.2	4																
28.3 - 28.5	1	2.8135	2.7766	0.9974	0.2381	8.8097	-0.8097	0.6556	0.0744								
28.6 - 28.8	1																
28.9 - 29.1	1																
29.2 - 29.4	0																
29.5 - 29.7	0																
29.8 - 30.0	1																
計	n = 37																0.9839

第A.7表 χ^2 検定の過程 (200°C, 0.2%耐力)

階級 (kgf/mm ²) $a_k - i - a_k$	度数 x_k	$a_k - \bar{x}$	$t_k = \frac{a_k - \bar{x}}{s}$	$p_k = \Phi(t_k)$	$\Delta p_k = p_k - p_{k-1}$	$m_k = n \Delta p_k$	$x_k - m_k$	$(x_k - m_k)^2$	$\frac{(x_k - m_k)^2}{m_k}$
21.6 - 21.7	9	-1.2351	-1.1829	0.1184	0.1184	4.3808	4.6192	21.3370	4.8706
21.8 - 21.9	3								
22.0 - 22.1	0								
22.2 - 22.3	0								
22.4 - 22.5	0	-0.0351	-0.0336	0.4866	0.3682	13.6234	-6.6234	43.8694	3.2202
22.6 - 22.7	2								
22.8 - 22.9	2								
23.0 - 23.1	6	0.1649	0.1579	0.5628	0.0762	2.8194	3.1806	10.1162	3.5881
23.2 - 23.3	3								
23.4 - 23.5	2	0.7649	0.7326	0.7681	0.2053	7.5961	0.4039	0.1631	0.0215
23.6 - 23.7	3								
23.8 - 23.9	1								
24.0 - 24.1	3								
24.2 - 24.3	0								
24.4 - 24.5	0								
24.6 - 24.7	1	2.3649	2.2650	0.9883	0.2202	8.1474	-1.1474	1.3165	0.1616
24.8 - 24.9	0								
25.0 - 25.1	0								
25.2 - 25.3	2								
計	n=37								11.8620

第A.8表 χ^2 検定の過程 (200°C, 引張強さ)

階級 (kgf/mm ²) $a_{k-1} - a_k$	度数 x_k	$a_k - \bar{x}$	$t_k = \frac{a_k - \bar{x}}{s}$	$p_k = \Phi(t_k)$	$\Delta p_k = p_k - p_{k-1}$	$m_k = n \Delta p_k$	$x_k - m_k$	$(x_k - m_k)^2$	$\frac{(x_k - m_k)^2}{m_k}$
22.6 - 22.8	2	-0.8243	-0.7985	0.2123	0.2123	7.8551	1.1449	1.3108	0.1669
22.9 - 23.1	5								
23.2 - 23.4	2								
23.5 - 23.7	2	-0.2243	-0.2173	0.4140	0.2017	7.4629	0.5371	0.2885	0.0387
23.8 - 24.0	6								
24.1 - 24.3	6								
24.4 - 24.6	4	0.0757	0.0733	0.5292	0.1152	4.2624	1.7376	3.0193	0.7083
24.7 - 24.9	0								
25.0 - 25.2	4								
25.3 - 25.5	3	0.9757	0.9451	0.8277	0.2985	11.0445	-3.0445	9.2690	0.8392
25.6 - 25.8	1								
25.9 - 26.1	0								
26.2 - 26.4	0	2.4757	2.3981	0.9918	0.1641	6.0717	-0.0717	0.0051	0.0008
26.5 - 26.7	2								
計	n=37								1.7539