

液水エンジン・タンク材料の極低温力学物性

河 田 幸 三・黒 河 邦 彦*
橋 本 彰 三・本 堂 明

Low Temperature Mechanical Properties Testing of Liquid Hydrogen Engine Tank Materials

By

Kozo KAWATA, Kunihiko KUROKAWA, Shozo HASHIMOTO,
and Akira HONDO

Abstract: Tensile strength properties and fracture toughness of Al alloys, 2219-T87, 2014-T6, and Alclad 2219-T81, candidate materials for liquid hydrogen engine tank and of their welded joints in the low temperature range to liquid helium temperature are obtained. The characteristics of K_Q and K_{max} in WOL fracture toughness testing are also studied.

概 要

液水エンジン・タンク材料として実用性の高いと考えられる Al 合金 2219-T87, 2014-T6, Al-clad 2219-T81 の母材及び溶接継手について, LHe 温度 (4°K) までの極低温での引張り強度特性と破壊じん性が調べられ比較検討された。また, WOL 破壊じん性試験での K_Q , K_{max} の性格についても検討された。極低温クライオスタットの設計における試みについても述べられる。

1. 緒 言

液水エンジンのタンク用材料の選定にあたっては, それが使われる条件, 即ち, 液体水素 (LH₂, 20°K) 及び液体酸素 (LOX, 90°K) を考えると, その低温での性質や, 水素, 酸素とも活性が極めて強いため両液体, 気体との適合性について特に考慮が必要であり, 1) 20°K~室温での高い比強度, 2) 同じく適当なじん性, 3) 良溶接性, 加工性, 4) 入手可能で廉価, 5) 応力腐食割れ (特に溶接部) や高応力下での疲労に対する高抵抗性等の性質が要求される。

以上を考慮すると, タンク材料として低温で延性-脆性遷移を起こす bcc 金属は適当でなく, fcc 金属の高強度 Al 合金やオーステナイト系ステンレス鋼が適当であると考えられる。

* 石川島播磨重工業(株), 当時東京大学宇宙航空研究所

事実, 高強度アルミニウム合金 [1, 2, 3, 4, 5], オーステナイト系ステンレス鋼 [6, 7, 8, 9, 10], ニッケル合金 [11, 12] チタニウム合金 [13, 14, 15, 16], 及び繊維強化プラスチック [17, 18] について, その低温～室温における引張強度, 破壊じん性や, 疲労強度 [18, 19, 20], 又それら材料の溶接継手の特性などについて種々の研究が行われている. 実際のロケットではオーステナイト系ステンレス鋼や高強度アルミニウム合金が多く使われ(第 1 表), 最近ではアルミニウム合金 2014-T6, そして厚板の溶接性に特に優れているアルミニウム合金 2219-T87 が用いられるようになっている [20]. 構造上ステンレス鋼では板厚が薄くなり内圧が必要となるためアルミニウム合金製タンク材料が設計上望ましいと考えられるので, この傾向はうなずけるところである.

そこで液水エンジン・タンク材料として実用性が最も高いと考えられるアルミニウム合金 2219-T87 及び 2014-T6 を主として実用 Al 合金について基本データを得るため, 母材及び溶接継手について極低温までの引張り試験, 破壊じん性試験を行い, 更に液体水素に浸すことによる化学的な影響を調べるための浸液水試験をも行った.

引張り試験は, 板厚 1.0 ~ 1.2 mm の上記 3 材料について, 母材及び溶接継手 (EBW 溶接と TIG 溶接) について, 室温, 液体窒素及び液体ヘリウム中において行われ, 0.2% 耐力, 破断強度と破断時の一様伸びが求められた.

破壊じん性試験は, 溶接継手のみについて行われた. 試料としては, 引張り試験に用いた溶接継手のほかに, 板厚 5.3 mm の 2014-T6 と板厚 6.3 mm の 2219-T87 の各 TIG 溶接継手をとっており, 溶接継手の破壊じん性の温度依存性の他に, 板厚依存性も調べた.

以上の結果, それらが極低温においてもかなり良好な性質を示すことが明らかにされ, 極低温の TIG 溶接継手の性能の点から, 2219-T87 が特に望ましい性質を有する事が知られた. そこで特にこの材料について液体水素中浸漬による材料劣化の有無を調べるため,

第 1 表 今までに使用されている液体燃料タンク材料

型 名	製作年度	液体名	温度(°K)	使用合金	比強度($\times 10^6$ mm)
Redstone	1951	LOX	88	5052-H32	5.6
Jupiter	1955	LOX	88	5086-H34	8.9
Saturn V	1962				
S-IC stage		LOX	88	2219-T87	12.4
S-II stage		{ LOX LH ₂ }	{ 88 20 }	2014-T6	14.2
S-IV stage					
Atlas	1955	LOX	88	301-60%CR	17.5
Blue Streak	1955	LOX	88	F SMI-CR	8.4
Centaur	1960	{ LOX LH ₂ }	{ 88 20 }	301-60%CR	17.5

浸液水実験を行った。この実験では、一定時間液体水素中で負荷した材料を取り出し、室温及び液体ヘリウム中で強度試験を行い、液体水素に浸けなかった材料との強度比較を行った。この結果材料強度の劣化は認められず、逆に極低温での溶接継手では強化されるものもある事が判明した。

以下に各実験及び結果の詳細を述べる。唯、浸液水実験は実験装置、手法も異なるので、別報 [24] において報告する。

2. 引張り試験

引張り試験は、母材及び溶接継手について基本データを得るために、液体水素ロケット・タンクに適用が考えられる現在可能な3種類のAl合金(Alclad 2219-T81, 2014-T6, 2219-T87)を選び、板厚1~1.2mmの薄板について液体ヘリウム中、液体窒素中及び室温において行われ、強度特性の温度依存性が調べられた。溶接継手は、電子ビーム(FBW)溶接、及びTIG溶接により作製した。

第2表 試験材料の化学成分

合金名	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	その他	Al
Alclad 2219-T81 clad with 7072 (板厚 1.2 mm)	5.90	0.19	0.25	0.26	< 0.01	0.07	< 0.02	0.07	-	残部
2014-T6 (板厚 1.2 mm)	4.35	0.76	0.34	0.78	0.47	0.06	< 0.02	0.02	-	残部
2014-T6 (板厚 5.3 mm)	4.3	0.8	0.33	0.8	0.43	0.08	0.02	0.02	-	残部
2219-T87 (板厚 1.2 mm, 6.3 mm)	6.34	0.08	0.16	0.23	< 0.01	0.02	< 0.01	0.03	-	残部

第3表 熱処理条件

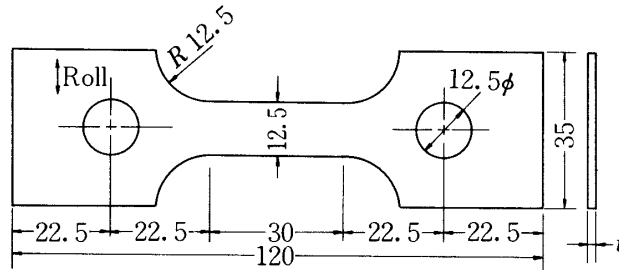
合金名	規格	溶体化処理	加工	時効硬化処理
Alclad 2219-T81	MIL H-6088 E 1972.6.9	529~540℃ 水冷 (空気炉 30~40分) (ソルトバス 20~30分)	T 31 冷間加工	171~182℃×18時間
2014-T6	JIS に準じる	495~505℃ 水冷 (空気炉 30~40分) (ソルトバス 20~30分)	T 3 -	170~180℃×8~12時間 代替法 (150~165℃×17~20時間)
2219-T87	MIL H-6088 E 1972.6.9	529~540℃ 水冷 (空気炉 30~40分) (ソルトバス 20~30分)	T 37 冷間加工 (*1) (8%加工)	171~182℃×18時間

*1 MIL-A-8920 A 1966.11.30

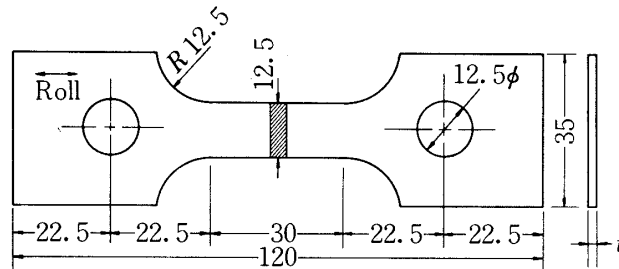
2.1 試験片形状及び材料

引張り試験は3種類のAl合金板, Alclad 2219-T81 (板厚1mm, クラッド材は7072, レイノルズ社製), Al合金2014-T6 (板厚1.2mm, 住友軽金属製), Al合金2219-T87 (レイノルズ社製, 板厚6.3mmから減厚加工) について行った. 試験材料の化学成分と熱処理条件を第2, 3表に示す.

試験片形状は, 第1図(母材引張り試験片)と, 第2図(溶接継手引張り試験片)に示す. 母材はロール方向と直角方向に, 溶接継手はロール方向に引張った. 溶接継手は電子ビーム溶接(EBW)及びTIG溶接により製作されており, 溶接条件は第4表に示すものである. 溶接後余盛削除, X線透過検査を行い欠陥の見当たらない所(JIS 1級以上)を試験片に用



第1図 母材引張り試験片



第2図 溶接継手引張り試験片

第4-1表 電子ビーム溶接の溶接条件

対象材料	溶 接 条 件								溶 接 前 処 理	溶 接 機
	加速 電 圧	ビーム 電 流	溶接速度	溶接入熱	ワーク ディス タ ンス	真空 度	フィラ メタル	開先形状		
Alclad 2219-T81 (板厚1.0mm)	130KV	5.0mA	2350 mm/min	166 Joul/cm	300mm	10 ⁻⁴ Torr	添加なし	ビードオ ン プレート	ワイヤ ブラッシ ング後 アセトン 洗浄	NEC ハミルト ンタイプ (150KV)
2014-T6 (板厚1.2mm)		5.5mA		182 Joul/cm						
2219-T87 (板厚1.2mm)										

第4-2表 TIG溶接の溶接条件

対象材料	用途	溶接条件				溶接機
		溶接法	電極特性	電流とパルス数	溶接速度	
Aldad 2219-T81 (板厚1.0mm)	引張り試験 破壊じん性 試験	パルス TIG溶接 (自動溶接)	直流	<p>2 Hz ピーク電流 50 A (2219-T81) 60 A (その他) 0.4 sec 0.1 sec ベース電流20 A</p>	溶接入熱 5470 Joul/cm	Heガス 30 l/min
					溶接入熱 6430 Joul/cm	
2014-T6 (板厚1.2 mm) 2219-T87 (板厚1.2 mm)	引張り試験 破壊じん性 試験	ハイパルス TIG溶接 (自動溶接)	正極 (DCSP)	<p>10 kHz ピーク電流 260 A ベース電流 60 A</p>	9 600 Joul/cm	Heガス 35 l/min
2219-T87 (板厚1.2 mm)	浸液水試験	高周波 パルスTIG 溶接 (自動溶接)		<p>点線 低周波パルス 平均30 A 平均80 A 実線高周波パルス 10 kHz 0.2 sec/cycle</p>	1320 Joul/cm	Heガス 35 l/min

*すべて、フィラメタルは使用せず、開先形状はI型開先、前処理として、ワイヤブラッシング後アセトン洗浄

いている。

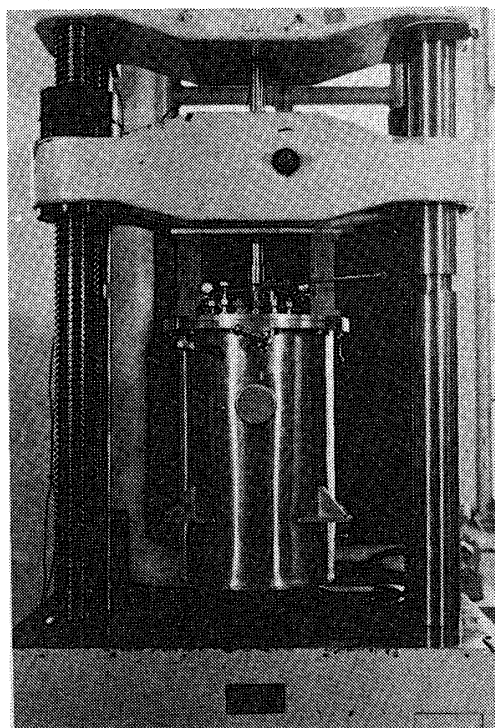
2.2 液体ヘリウム温度用試験装置

液体ヘリウム中での試験は、液体ヘリウム温度力学物性測定用クライオスタットを作製して行った。

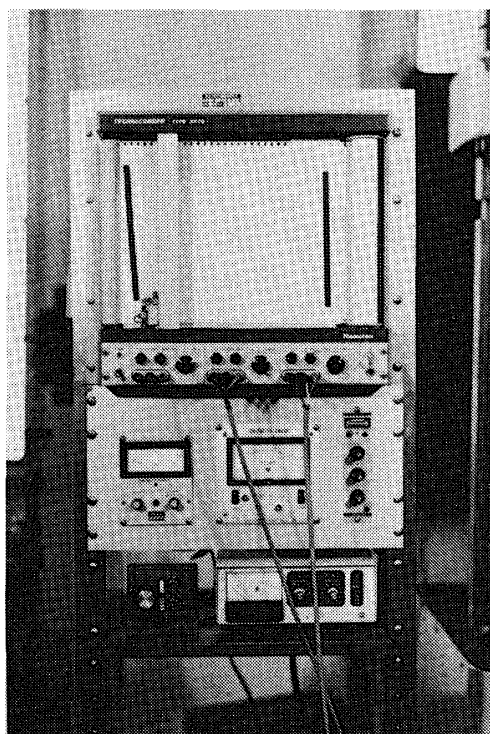
この装置は、液体ヘリウム温度(4.2 °K)から室温まで任意の温度下における引張り試験を行う装置であり、試験片交換用ターンテーブルを回転する事により、蓋を開けずに連続3個の試料を試験できる特徴をもたせた。引張り最大荷重は3 ton、許容変位は7 mmであり、本体(第3図)と付属装置である計測器架台(第4図)、真空排気装置とから構成される。クライオスタットは島津万能試験機 REH-100に取り付けて使用する。以下液体ヘリウム温度での試験を中心に更に詳述する。

2.2.1 液体ヘリウム温度力学物性測定用クライオスタット

本クライオスタット(SUS 304 縦型円筒)は、断面面(第5図)に示すように内外二重のデュワー容器(真空断熱)から構成されている。液体ヘリウム中に沈めて行う試験では、真空断熱槽を真空に引き、両デュワー容器の間に液体窒素を満たし、内側デュワー容器内の試料槽にLHeを貯めて試験を行う。この場合LN₂で予冷後LHeを注入するが1回当りのLHe使用量は40 l強である。試料槽中のLHe量は、LHe液面計で知ることが出来る。



第3図 クライオスタット本体

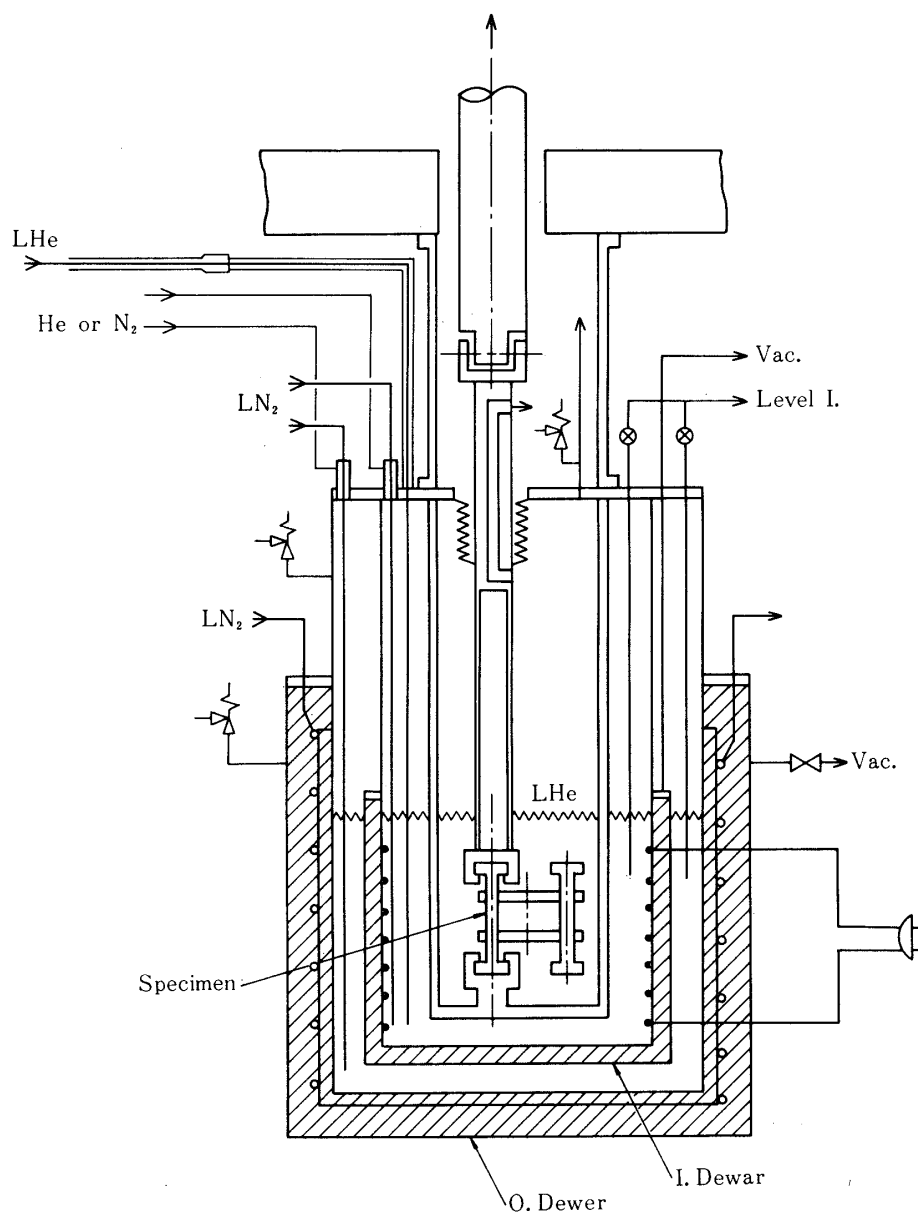


第4図 計測器架台

次に LHe 温度以上に温度を設定する場合を説明する。この場合は外側デュワー容器の真空槽内壁に廻って取り付けられている管に LN_2 を常時流しながら中間槽に LHe を貯める。試料槽の冷却は内側デュワー容器の真空度を適当に保ち ($\sim 10^{-5}$ Torr で後から GHe を流し込む) 中間槽の LHe から熱伝導によるもの及び適度に試料室の底から LHe を蒸発させることにより行う。一方、試料室内外周に取り付けられるヒーターにより温められるようになっているので両者を適当に調整することにより所定の温度を得る。

試験片は第6図に示すようにターンテーブルに装着する。実験は外からターンテーブルを廻して1バッチで3個の実験が可能である。試料のチャック部には添え板を付けてあり、引張り試験と破壊じん性試験では各々チャックを用意している。試験片寸度は引張りで長さ 120 mm, 幅 50 mm, WOL 試験で長さ 60 mm, 幅 $62.5 + 50$ mm を基準とした。

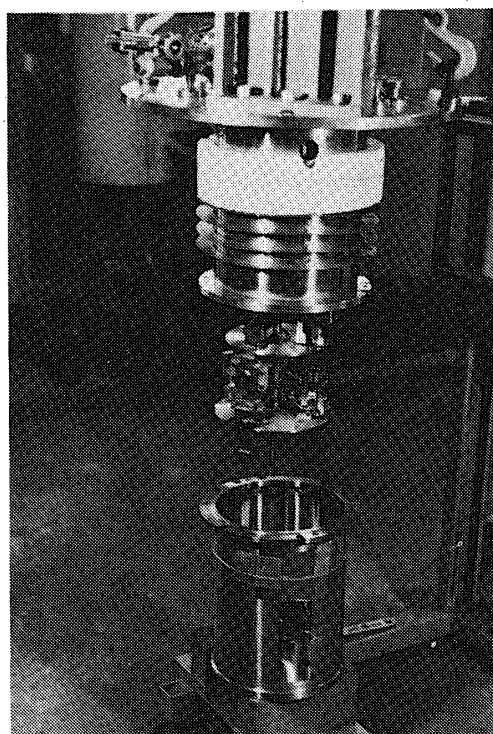
クライオスタット上方は、第7図に示す通りで、中央部分に引張り用ロッド、ターンテーブル回転つまみがあり、そのまわりに、内側から試料室及び中間槽の LHe 注入用移送管、LHe 液面計、 LN_2 注入用移送管円周上にセットされるようになっている。その他内部デュワー真空引口、試料室の排気口があり、リード線用ハウメチックシール3個(各8本)が用意されている。中間槽の排気口は裏面についている。クライオスタット真空度は断熱部 10^{-5} Torr, 試験真空度 10^{-5} Torr, 許容漏洩量 10^{-3} lusec である。



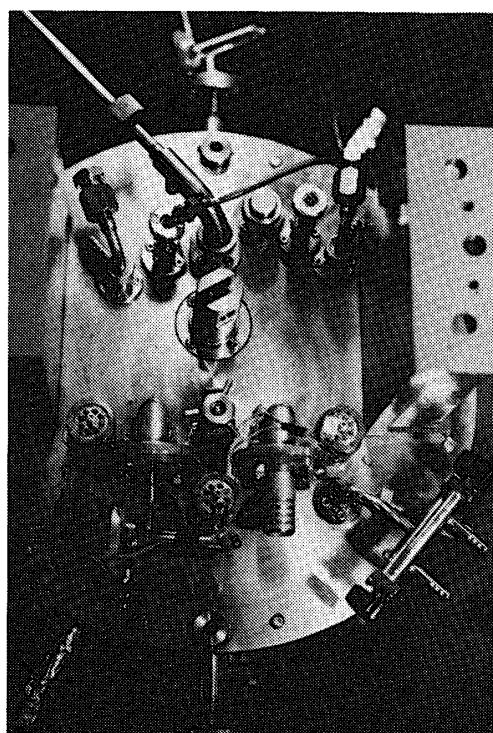
第 5 図 クライオスタット断面図

2.2.2 計測機器架台

計測機器架台は第 4 図に示すもので、X-Yレコーダー（横河電機製 TECHNICOR - DER TYPE 3078）、動歪計（新興通信工業製 MODEL 6001-F）、液体ヘリウム液面計（American Magnetic社製、Model KE-101 e）、及び真空計として、熱電対真空計（英 Edwards 社製 Thermocouple 1 D 351-01-000）とイオン真空計（大亜製 IT-L 20 P）が装備されている。熱電対真空計ゲージ・ヘッドは内部デュワー容器の真空引口についており、主に試料室温度コントロールを行う時に用いられる。



第6図 ターンテーブルに試験片を装着した状態



第7図 クライオスタット上面

2.2.3 真空排気装置

本装置はクライオスタット真空断熱部の真空を引くための装置で、ロータリーポンプ（大亜製，Model CRP-150）及び油拡散ポンプ（大亜製 Model DPF 3 Z）からなる。

2.3 引張り試験結果

引張り試験に当り，変形は試料に貼付した歪ゲージ及びクロスヘッドの変位から，荷重は試験機から直接取り出した。歪ゲージは，試験中寒剤中ではがれたものもあるので，0.2%耐力決定用のデータはクロスヘッドの変位から求めた。

計測項目は，0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ ，破断強さ σ_b ，標点間距離 25 mm の伸び歪 ϵ_b ，一様伸び及びヤング係数（参考値）である。

0.2%耐力は，試験機クロスヘッドの変位量を変位計（ダイヤルゲージ式変位変換器，共和電業 TD-20D）を用いて計測した伸び～荷重関係から標点間距離を 38 mm として算出した。この方法で計測した 0.2%耐力と試験片に歪ゲージを貼付して測定して得た 0.2%耐力ではほとんど差が認められない（第 5 表）ので工学的に問題のない測定方法と考えられ，これを用いて材料評価をする事は可能であると判定される。なお溶接継手の 0.2%耐力及び伸びも参考値として測定したので示す。

一様伸びは 1 mm ピッチ標線間の伸びを測定し（1）式のプロットより a として求められた。標点としてはビッカース圧痕をつけた。

$$\epsilon_n = a + b \frac{\sqrt{A}}{l_n} \quad (1)$$

ϵ_n ：破断位置を中心とした標点間 n における伸び（%）

a ：一様伸び（%）

b ：局部伸び係数

A ：試験片断面積（ mm^2 ）

l_n ：破断位置を中心とした標点間 n の距離

母材のヤング係数は測定個数が多くないので，参考として付録において述べる。

第 5 表に母材の，そして第 6，7，8 表に各材料の溶接継手の引張り試験結果を示し，それらを第 8，9，10 図に示す。

溶接継手の破断位置は，2014-T6 の EBW 溶接継手では溶接金属と母材の境界が多いが，他はほとんど溶接金属部分で破断した。

第 8，9，10 図から明らかなように，母材及び溶接継手ともに，0.2%耐力，引張り強さは温度の低下と共に上昇する傾向にあり，測定値中 -269°C で最も高い値を示す。

伸びは，溶接継手では母材に比べずっと低下している。伸びの温度低下に伴う変化については，材料により差が見られる。即ち，2014-T6 の TIG 溶接と EBW 溶接，及び Alclad 2219-T81 の TIG 溶接では温度の低下と共に減少するが，一方 2219-T87 材では TIG 溶接では温度に対しほとんど不変，EBW 溶接では温度低下と共に増大する点は，他 2 者に比べ好ましい点として特に注目される。

溶接方法について比較すれば，各材料とも 0.2%耐力，破断荷重，伸び共に全温度領域に

第5表 母材引張り試験結果

Al合金 種類	試験 温度	試験片寸法		(1)	(2)	引張り強さ σ_b (kg/mm^2)	伸び ϵ_b , $GL=25$ (%) mm	一様伸び (%)
		板厚 t(mm)	幅 W(mm)	ヤング率 E (kg/mm^2)	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (kg/mm^2)			
Alclad 2219 -T81 (板厚 1.0mm)	室温 (10°C)	1.00	12.41	6849	30.4 (31.0)※	42.7	10.0	7.98
		1.01	12.42	6659	30.5	42.3	10.4	8.65
	-196 °C	1.01	12.38	6880	37.3	52.1	13.2	11.40
		1.00	12.38	6624	38.6	53.2	14.0	12.00
	-269 °C	1.00	12.38	7647	(37.2)※	59.8	12.7	12.4
2014 -T6 (板厚 1.2mm)	室温 (10°C)	1.19	12.41	6838	42.4 (42.0)※	49.2	8.8	7.67
		1.20	12.41	6940	40.4	48.4	12.0	8.97
	-196 °C	1.19	12.41	6816	47.4	57.7	11.6	9.34
		1.20	12.42	7092	47.7	58.0	16.0	14.90
	-269 °C	1.19	12.39	7520	>47	67.9	15.5	14.50
2219 -T87 (板厚6.35 mmから1.2 mmに減厚 加工)	室温 (10°C)	1.23	12.49	7324	35.7 (37.2)※	48.1	10.8	9.75
		1.23	12.49	7487	37.6 (38.0)※	48.2	10.4	7.52
	-196 °C	1.24	12.49	-	45.3	60.5	12.8	11.90
		1.28	12.50	-	43.8	60.0	12.0	9.91
	-269 °C	1.22	12.50	8087	47.2	66.2	11.6	11.50

注(1) ヤング率測定は、ひずみゲージを用いた。

(2) 0.2%永久伸びは、クロスヘッド変位量から求めた。

※ひずみゲージで測定した0.2%永久伸びより求めた値。

亘って EBW 溶接が TIG 溶接より優っている事がわかる。

次に各材料間の比較を行う。第11, 12図に母材と溶接継手の引張り強さ、及び溶接継手効率を図示する。図からわかるように三材料とも EBW 溶接が TIG 溶接より効率が良く、強度自体については母材、EBW 溶接、TIG 溶接の順で低下する。Alclad 2219-T81と2219-T87を比べると、母材の強さで2219-T87が高目に出ている他は全般にその性向は良く

第6表 溶接継手引張り試験結果 (Alclad 2219-T81)

Al合金 種類	溶接 方法	試験 温度	試験片寸法		(1) 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	引張り強さ σ_b (kg/mm ²)	伸 び ϵ_b GL=25 (%) mm	一様伸び (%)	(2) 破断位置	
			板 厚 t (mm)	幅 W (mm)						
Alclad 2219 -T81 (板厚 1.0 mm)	電子 ビーム 溶接	室温 (10°C)	0.92	12.42	25.2	30.5	2.4	0.35	B+W	
			0.93	12.50	24.8	30.0	2.0	0.67	W	
			0.92	12.46	26.8	31.0	4.0	0.37	W	
		-196 °C	0.98	12.52	30.4	41.5	4.0	1.21	W	
			0.96	12.51	32.1	42.7	4.0	1.08	W	
			0.93	12.38	32.6	42.7	4.0	1.49	B+W	
		-269 °C	0.90	12.50	39.4	56.4	4.4	4.38	W	
			0.95	12.50	41.2	53.9	4.8	4.50	W	
		TIG 溶接	室温 (10°C)	0.90	12.38	19.1	24.1	2.4	0.94	B+W
				0.96	12.40	18.9	24.3	2.4	0.78	B+W
	0.91			12.40	20.7	25.6	2.4	0.15	W	
	-196 °C		0.94	12.37	24.8	33.5	2.8	1.14	W	
			0.95	12.41	22.9	35.1	4.0	2.69	W	
			0.96	12.39	23.0	34.6	4.0	1.61	W	
-269 °C	0.95	12.35	21.3	37.1	2.0	0.78	W			
	0.94	12.40	25.1	34.5	1.4	0.60	W			

注(1) 0.2%永久伸びはクロスヘッド変位量から求めた。

注(2) 破断位置 W:溶接金属

B:境界

M:母材

B+W:境界+溶接金属

似ており、溶接継手では数値的にもほとんど差が無い。2014-T6と2219-T87を比べると母材の強度は両者あまり差が認められないが、EBW溶接では-269°Cでは2219-T87が-196°C以上では2014-T6がやや優れている。TIG溶接では全温度領域で2219-T87が優れている。溶接継手効率はAlclad 2219-T81で母材の強度が低い事もありそのEBW溶接が-269°Cで約92%となり今回の実験中では最大となっている。2219-T87と2014-T6のTIG溶接を比べると前者が約53~54%、後者が約41~42%となっていて継手効率でも2219-T87が優っている。

第7表 溶接継手引張り試験結果 (2014-T6)

Al合金種類	溶接方法	試験温度	試験片寸法		(1) 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	引張り強さ σ_b (kg/mm ²)	伸び ϵ_b GL=25 (%) ^{mm}	一様伸び (%)	(2) 破断位置	
			板厚 t (mm)	幅 W (mm)						
2014-T6 (板厚) (1.2mm)	電子 ビーム 溶接	室温 (10°C)	1.06	12.48	34.1	36.5	2.0	0.04	W	
			1.09	12.48	33.2	35.5	1.2	0.0	B	
			1.05	12.47	33.3	36.5	2.0	0.11	B	
		-196 °C	1.07	12.48	40.8	45.7	2.0	0.23	B	
			1.07	12.47	42.1	44.8	2.0	0.05	B	
			1.05	12.46	43.2	48.2	3.6	0.26	B	
		-269 °C	1.10	12.46	—	48.4	0.6	0.05	B	
			1.13	12.33	—	46.8	0.2	0.05	B	
		TIG 溶接	室温 (10°C)	1.13	12.42	—	18.0	0.4	0.00	W
				1.13	12.40	23.6	23.7	0.4	0.28	W
	-196 °C		1.09	12.41	—	19.2	0.8	0.06	W	
			1.07	12.44	—	29.0	0.4	0.00	W	
			1.13	12.42	—	23.7	—	—	W	
	-269 °C		1.13	12.40	28.0	28.3	0.4	0.00	W	
1.12		12.41	—	27.5	0.4	0.00	W			

注(1) 0.2%永久伸びはクロスヘッド変位量から求めた。

注(2) 破断位置 W:溶接金属

B:境界

3. 破壊じん性試験

溶接構造物では、溶接継手の引張り強度だけでなく、亀裂を持つ部材の破壊じん性も非常に重要である。そこで溶接継手の破壊じん性値を得るために、引張り試験に用いたのと同じ溶接継手について破壊じん性試験を行った。更に、TIG溶接継手については、板厚の影響をみるために、2014-T6の5.3mm、2219-T87の6.3mm板厚のものについても試験を行った。試験は液体ヘリウム中、液体窒素中、室温に於いて行われ、寒剤中の試験は引張り試験に用いたクライオスタットを用いて行われた。

3.1 試験片形状及び材料

溶接継手の破壊じん性を求める実験は、第13図に示すWOL破壊じん性試験片を用いて行った。アルミニウム溶接継手の薄板の破壊じん性値を求めるのに帯板の片側又は両側又は中央クラックの試験片や、表面クラックの試験片を用いる事は、板幅等の条件を満たすのが

第 8 表 溶接継手引張り試験結果 (2219-T87)

Al合金 種類	溶接 方法	試験 温度	試験片寸法		(1) 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	引張り強さ σ_b (kg/mm ²)	伸 び ε_b GL=25 (%)mm	一様伸び (%)	(2) 破断位置
			板 厚 t (mm)	幅 W(mm)					
2219 -T87	電子 ビーム 溶接	室温 (10°C)	1.10	12.45	25.6	29.9	3.2	0.34	W
			1.10	12.44	25.2	29.5	3.2	0.58	W
		-196 °C	1.08	13.45	31.2	41.7	4.0	1.19	W
			1.05	13.08	30.6	41.5	4.4	0.57	W
		-269 °C	1.21	12.50	39.7	55.5	5.6	1.82	W
			1.17	12.50	33.9	57.3	6.2	2.65	W
	TIG 溶接	室温 (10°C)	1.06	12.47	22.8	26.9	2.8	1.12	W
			0.98	12.45	23.0	26.3	2.4	0.73	W
		-196 °C	0.96	12.49	27.3	35.0	2.4	0.93	W
			0.95	12.47	28.2	36.6	2.4	1.03	W
-269 °C	1.19	12.50	35.1	38.7	1.8	0.63	W		
	1.15	12.50	33.4	36.4	3.2	1.98	W		

注(1) 0.2%永久伸びはクロスヘッド変位量から求めた。

注(2) 破断位置

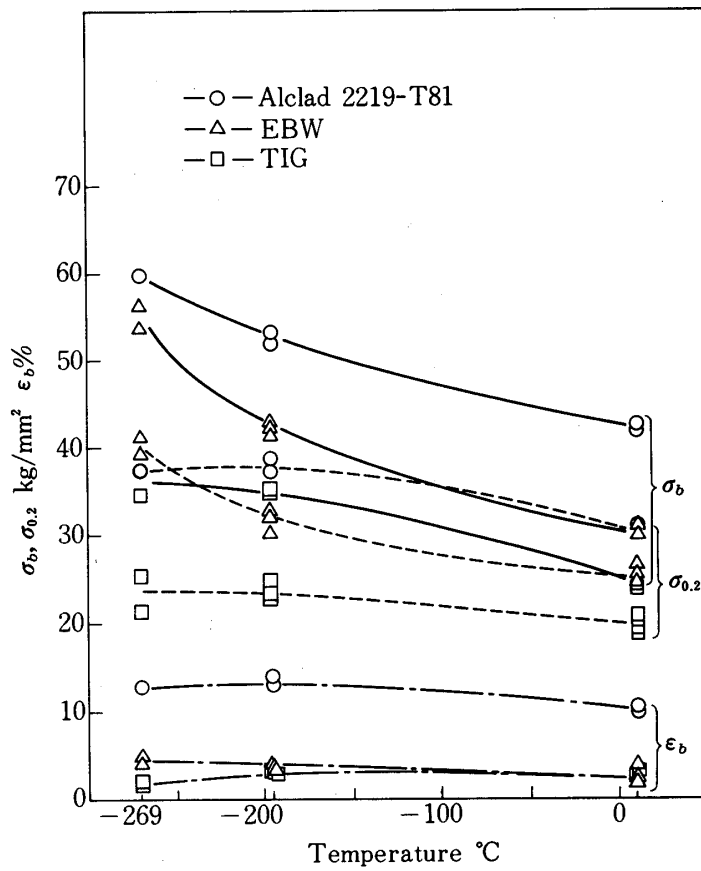
W:溶接金属

難しい [5] のでコンパクトテンション型のこの形状の試験片を用いた。試験方法及び試験片の疲労き製品工要領は ASTM E 399 規格に準じた。板厚及び溶接条件は、板厚 1mm の Alclad 2219-T81 及び板厚 1.2mm の 2014-T6 と 2219-T87 の EBW 溶接と TIG 溶接は引張り試験に用いたのと同材料で同溶接条件で行っているが、板厚 5.3mm の 2014-T6 では、材質、TIG 溶接条件とも引張り試験片と異なり、2219-T87 では、溶接条件が異っている。溶接条件は第 4 表に併記する。なお、疲労クラックは溶接部中央に入れてある。

3.2 試験方法

試験は引張り試験と同じ装置を用いて行ったが、開口変位を試験片に取り付けたクリップゲージ (東京測器製 RA-2) を用いて測定し、荷重-開口変位曲線より P_Q を測定し (第 14 図) これと P_{max} から次式 (ASTM E 399 の式) にもとずいて K_Q 及び K_{max} を求めた。

$$\left. \begin{aligned} K_Q &= \frac{P_Q \sqrt{a}}{B \cdot W} F(a/W) \\ K_{max} &= \frac{P_{max} \sqrt{a}}{B \cdot W} F(a/W) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$



第8図 引張り試験結果 Alclad 2219-T81

ただし

$$F(a/W) = 29.6 - 185.5(a/W) + 655.7(a/W)^2 - 1017.0(a/W)^3 + 638.9(a/W)^4$$

a : き裂の長さ (mm)

B : 試験片の厚さ (mm)

W : 試験片の幅 (mm)

P_Q : ASTM E 399の規定より求まる荷重 (kg)

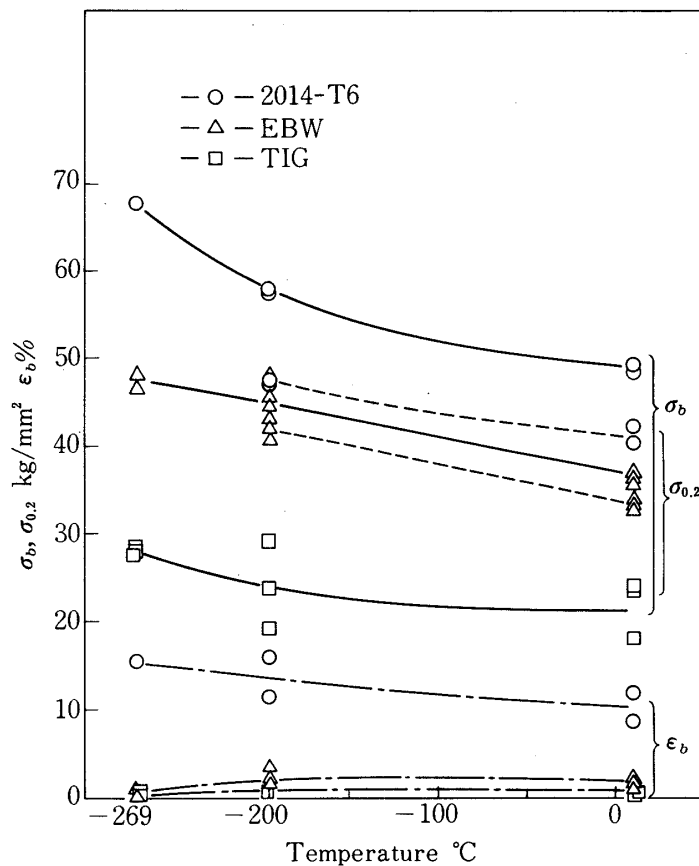
P_{max} : 最高荷重 (kg)

P_{max} は第14図から明らかなように、かなり塑性変形の後到達される。

3.3 破壊じん性試験結果

第9, 10, 11表に破壊じん性試験結果を示し, 第15, 16, 17, 18図に図示する。これらの図から Al 合金の溶接継手の破壊じん性は温度の低下と共に大勢において上昇することが認められ, 常温よりも極低温における低応力破壊 (不安定破壊) の危険は少ないといえる。

溶接方法の比較では三種の材料とも板厚 1.0 ~ 1.2 mm では EBW 溶接継手の方が TI



第9図 引張り試験結果 2014-T6

G 溶接継手より K_Q , K_{max} とも大きくなっており、破壊じん性の面からも EBW 溶接の方が優れた値を示すことがわかる。

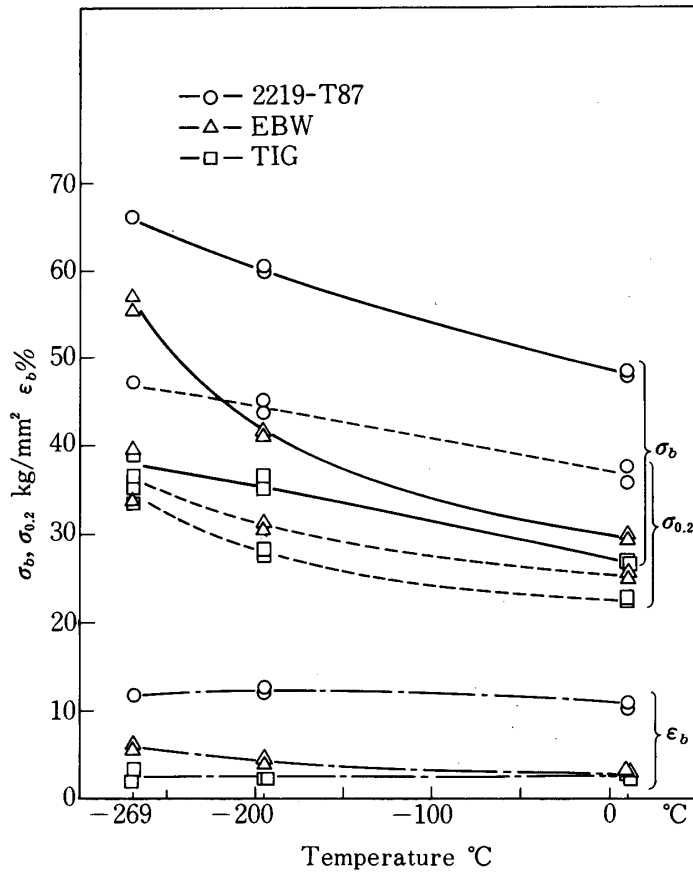
次に各材料について、溶接法、板厚による K_Q , K_{max} の違いを第12表にまとめ、第19、20図に図示する。

Al 合金の比較では、 K_Q はすべての場合、温度の低下と共に上昇している。1.0 ~ 1.2 mm 板厚の EBW 溶接では、2014-T6 が全温度領域にわたり最も優れている。一方、TIG 溶接継手について2014-T6 と 2219-T87 を比較すると、1.2 mm 板厚の場合も 5.6 ~ 6.3 mm 板厚の場合も、室温付近では2014-T6 が優れているが、-269°Cでは2219-T87の方が優れている。

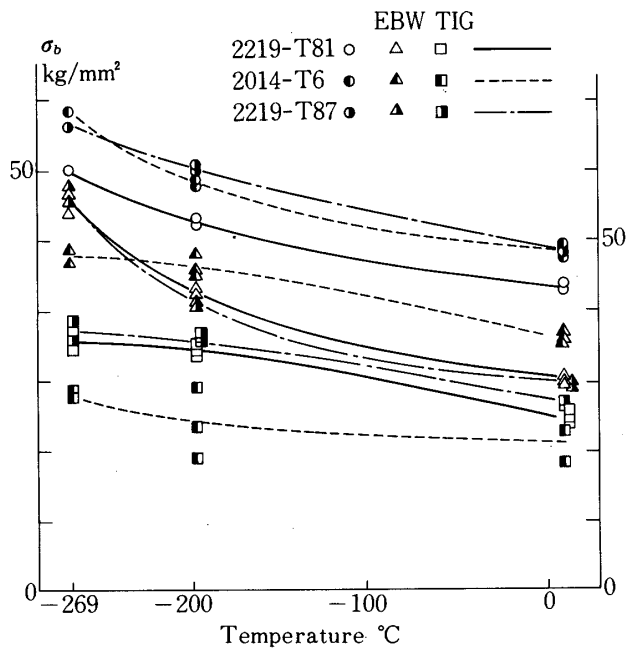
K_{max} は、2014-T6 の TIG 溶接と 2219-T87 1.2 mm 板厚の TIG 溶接継手では極低温(-269°C)で低下がみられるが、他の場合は一般に温度の低下とともに高くなっている。

TIG 溶接の破壊じん性の板厚依存性については、2014-T6, 2219-T87 とも全温度領域にわたり、板厚が厚くなると、 K_Q , K_{max} とも低下している。

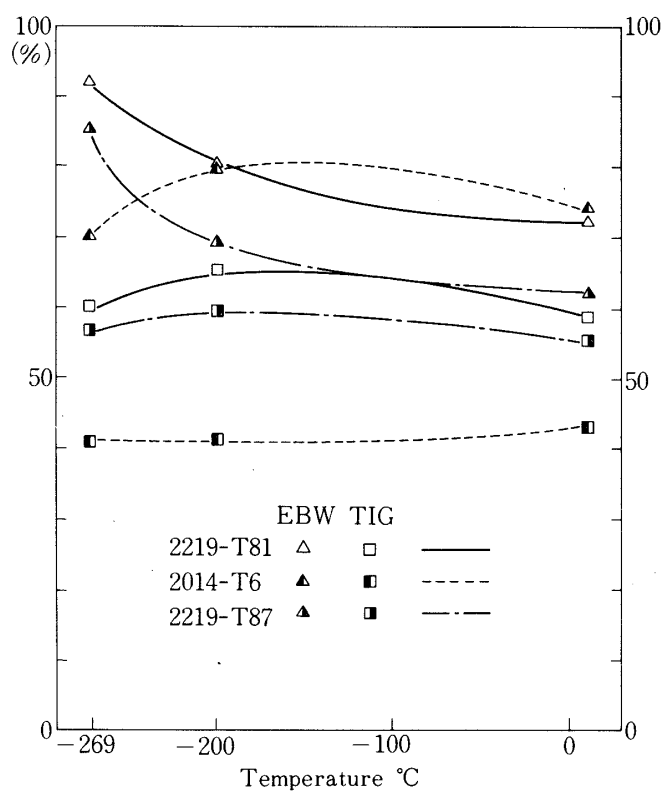
さて、 K_Q と K_{max} の差は K_{max} はもし材料が K_Q 以上の荷重を受けた時どこまで壊



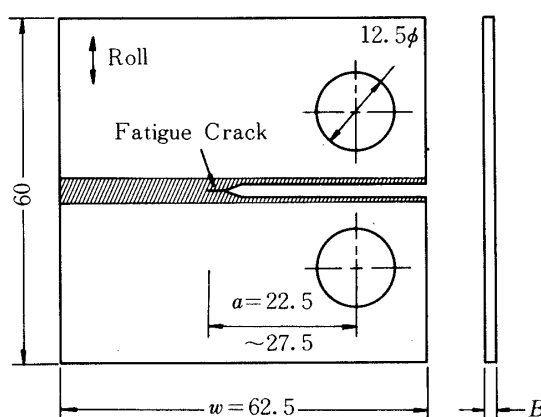
第10図 引張り試験結果 2219-T87



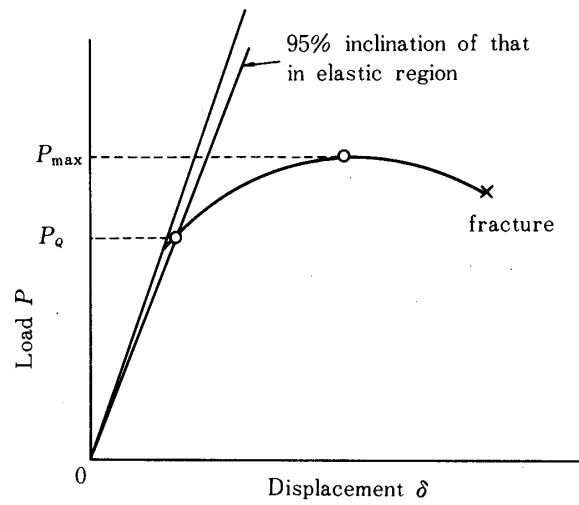
第11図 引張り強さの比較



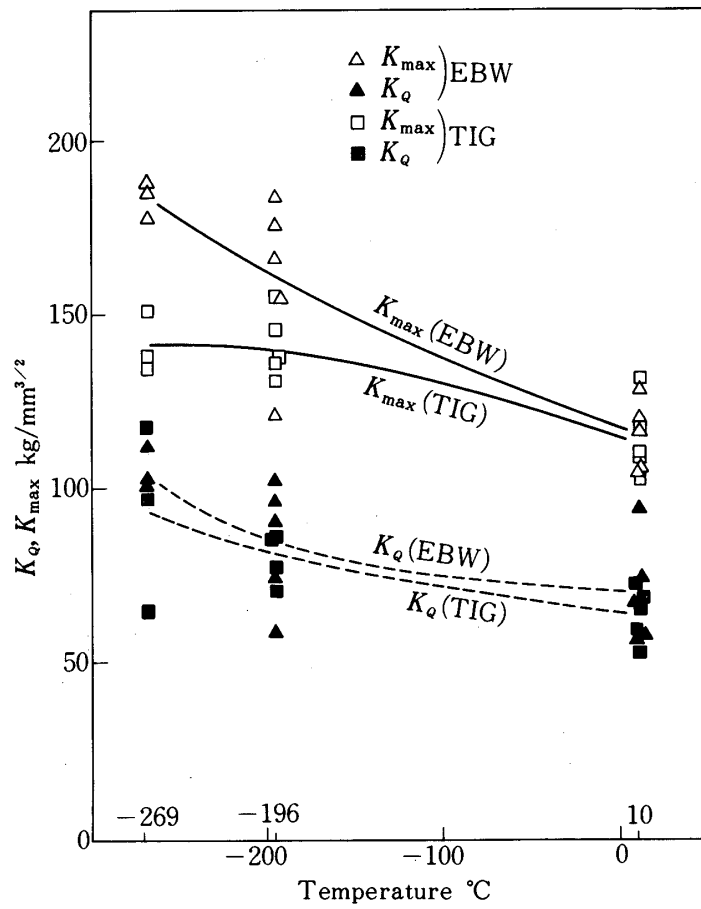
第12図 溶接継手効率の比較



第13図 WOL 破壊じん性試験片 (CT形サブサイズ)



第14図 破壊じん性試験による P_{max} , P_Q



第15図 破壊じん性試験結果 Alclad 2219-T81 (1.0mm 板厚)

第9表 溶接継手の破壊じん性試験結果 (Alclad 2219-T81)

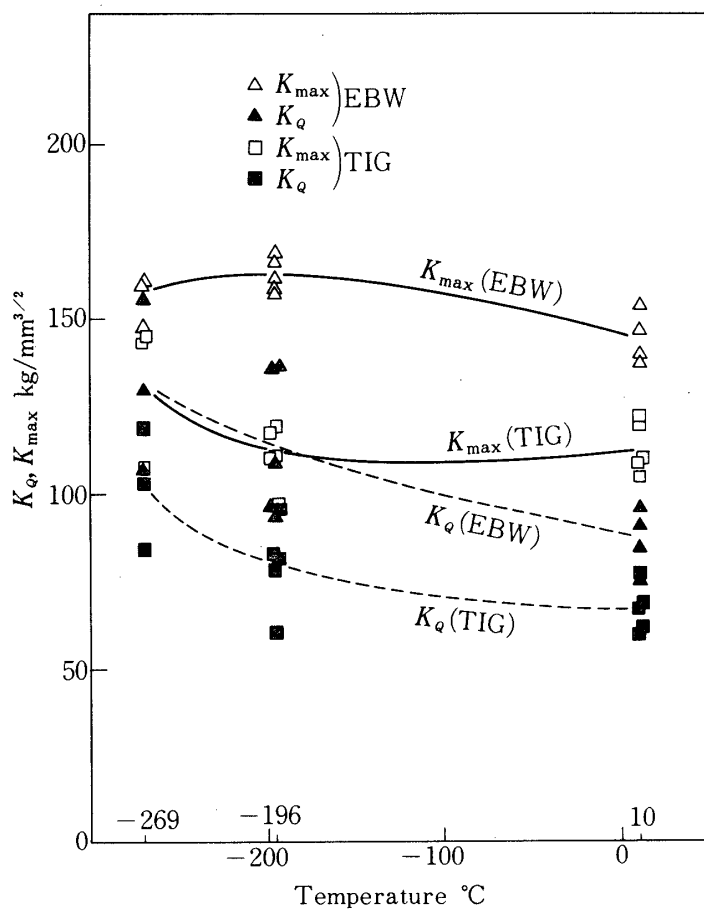
Al 合金 種類	溶接 方法	温度	き裂長さ a (mm)	試片厚さ B (mm)	試片幅 W (mm)	P_Q (kg)	P_{max} (kg)	K_Q (kg/mm ^{3/2})	K_{max} (kg/mm ^{3/2})
Al - clad 2219 -T81 (板厚 1.0mm)	電子 ビーム 溶接	室温 (10℃)	23.7	0.97	50.2	57.5	91.0	74.3	117
			23.5	0.99	49.2	45.0	84.0	56.8	106
			24.5	1.01	49.2	70.0	90.0	94.3	121
			25.8	1.00	49.9	47.5	90.0	68.1	129
			24.4	1.00	49.9	44.0	80.0	57.9	105
		-196 ℃	25.6	0.99	49.9	52.5	129.0	75.0	184
			25.1	1.00	49.9	65.0	128.0	103.0	176
			24.2	1.00	49.9	45.5	128.5	59.2	167
			25.2	1.00	49.9	70.0	112.5	96.6	155
			25.3	1.00	49.9	65.0	87.5	90.2	121
		-269 ℃	24.4	1.00	49.6	77.0	139.0	103.0	185
			24.8	1.01	49.6	75.0	132.0	101.0	178
			24.5	0.99	49.6	83.0	139.0	112.0	188
		TIG 溶接	室温 (10℃)	23.9	0.99	49.6	50.0	90.0	59.6
	23.7			1.01	49.6	57.5	86.0	68.4	109
	24.2			1.00	49.5	55.0	78.0	72.7	103
	24.6			1.03	49.4	50.0	92.5	65.9	122
	23.9			0.97	49.4	40.0	82.5	53.7	111
	-196 ℃		23.4	1.02	49.6	57.5	112.0	70.9	138
			23.5	1.02	49.6	62.5	124.0	77.5	154
			24.2	0.99	49.7	65.0	110.0	86.1	146
			25.1	0.99	49.4	61.0	92.5	86.3	131
			24.0	1.00	49.5	67.5	104.0	88.1	136
	-269 ℃		24.6	1.00	49.5	48.0	102.0	64.9	138
			24.9	1.03	49.5	73.0	113.0	97.6	151
			24.1	1.02	49.5	91.0	104.0	117	134

第10表 溶接継手の破壊じん性試験結果 (2014-T6)

Al 合金 種類	溶接 方法	温度	き裂長さ a (mm)	試片厚さ B (mm)	試片幅 W (mm)	P_Q (kg)	P_{max} (kg)	K_Q (kg/mm ^{3/2})	K_{max} (kg/mm ^{3/2})
2014 -T6 (板厚 1.2mm)	電子 ビーム 溶接	室温 (10℃)	23.8	1.14	49.2	66.0	122.0	75.6	140
			25.9	1.19	49.9	80.0	127.0	96.8	154
			24.8	1.15	49.9	72.5	117.5	84.9	138
			25.3	1.12	49.2	72.5	115.0	92.5	147
		-196 ℃	25.3	1.14	49.9	95.0	137.0	136	167
			25.5	1.17	49.9	77.5	141.1	93.1	169
			26.8	1.21	49.9	77.0	126.0	97.1	159
			24.9	1.19	49.9	120.0	139.0	137	158
		-269 ℃	28.3	1.16	49.9	75.0	111.0	109	162
			24.6	1.20	49.6	115.0	132.0	129	148
			25.2	1.18	49.6	90.0	136.0	107	161
			24.0	1.18	48.9	138.0	141.0	156	160
	TIG 溶接	室温 (10℃)	23.3	1.10	49.7	52.5	96.0	59.6	109
			25.3	1.12	49.8	55.0	98.0	68.4	122
			24.6	1.04	49.6	60.0	92.0	77.7	119
			24.0	1.12	49.5	57.5	90.0	67.8	105
			25.3	1.04	49.5	45.5	81.0	61.8	110
		-196 ℃	24.7	1.17	49.7	67.5	96.0	78.0	111
			25.3	1.19	49.8	51.0	84.0	59.7	98
			24.0	1.11	49.5	69.0	101.0	81.2	119
24.6			1.17	49.5	82.5	96.0	95.4	111	
24.6			1.19	49.5	73.0	102.5	83.0	117	
-269 ℃		24.3	1.13	49.6	72.0	92.0	84.3	108	
		24.2	1.09	49.5	85.0	118.0	103.0	143	
	24.3	1.06	49.6	95.0	116.0	119.0	145		

第10表 溶接継手の破壊じん性試験結果 (2014-T6) (続き)

Al合金種類	溶接方法	温度	き裂長さ a (mm)	試片厚さ B (mm)	試片幅 W (mm)	P_Q (kg)	P_{max} (kg)	K_Q (kg/mm ^{3/2})	K_{max} (kg/mm ^{3/2})
2014-T6 (板厚) (5.3mm)	TIG 溶接	室温 (10°C)	25.5	5.32	49.90	215	338	56.9	89.4
			25.0	5.29	49.95	242	391	62.2	100.5
			27.0	5.28	49.95	216	334	63.0	97.5
		-196°C	25.8	5.35	49.95	262	330	69.9	88.1
			25.5	5.45	49.90	258	332	66.4	85.4
			25.9	5.37	50.00	281	332	74.9	88.5
		-269°C	25.6	5.37	49.95	295	320	77.5	84.0
			26.5	5.39	50.0	266	277	73.5	76.5
			25.9	5.37	50.1	286	371	76.2	98.9

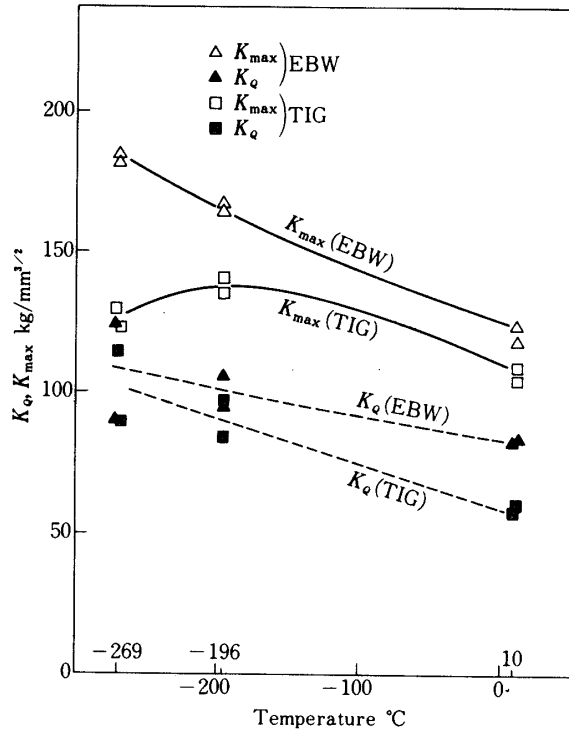


第16図 破壊じん性試験結果 2014-T6 (1.2mm板厚)

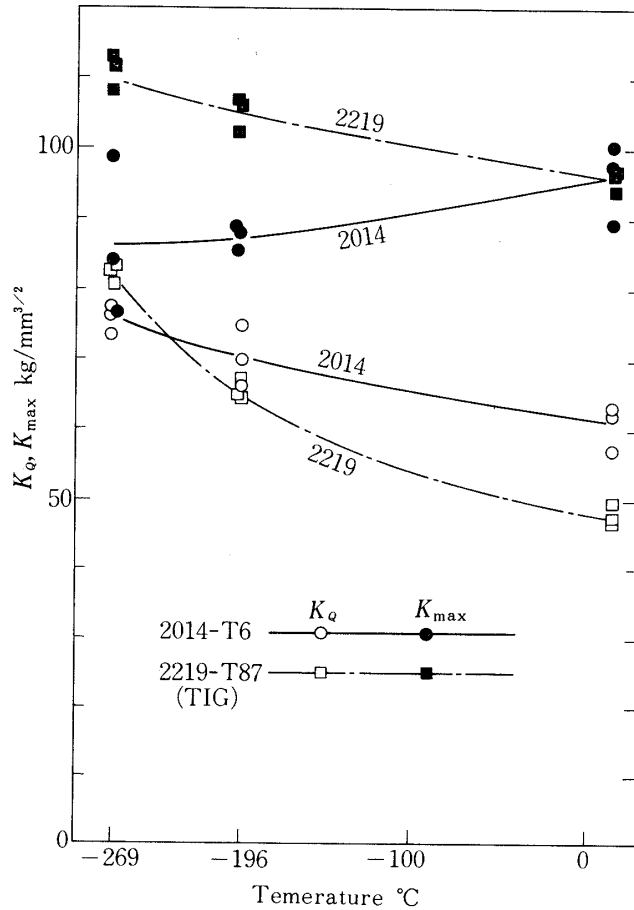
第11表 溶接継手の破壊じん性試験結果 (2219-T87)

Al 合金 種類	溶接 方法	温度	き裂長さ a (mm)	試片厚さ B (mm)	試片幅 W (mm)	P_Q (kg)	P_{max} (kg)	K_Q (kg/mm ^{3/2})	K_{max} (kg/mm ^{3/2})
2219 -T87 (板厚 6.35 mm から 1.2mm に 減厚)	電子 ビーム 溶接	室温 (10°C)	25.3	1.35	49.8	80.5	120.8	83.1	125
			24.5	1.33	49.8	82.5	120.0	82.4	120
		-196 °C	25.5	1.30	49.8	87.5	151.7	95.0	165
			24.7	1.30	49.8	102.5	161.0	106.0	167
		-269 °C	23.9	1.41	49.7	99.0	202.0	90.5	185
			24.4	1.41	49.8	132.0	194.0	124.0	182
	TIG 溶接	室温 (10°C)	24.5	1.27	49.8	57.5	105.0	60.2	110
			23.2	1.23	49.8	57.5	105.3	57.7	106
		-196 °C	24.4	1.34	49.8	97.5	142.0	96.1	140
			23.8	1.45	49.8	87.5	143.8	82.7	136
		-269 °C	24.7	1.32	49.8	88.0	123.0	89.6	125
			24.4	1.30	49.8	114.0	129.0	116.0	131
2219 -T87 (板厚 6.2mm)	TIG 溶接	室温 (10°C)	25.3	6.09	49.80	200	410	46.1	94.5
			26.0	6.06	49.90	208	409	49.1	96.5
			25.5	6.19	49.85	208	428	47.2	97.1
		-196 °C	25.4	6.15	49.90	297	471	67.4	106.9
			25.4	6.15	49.95	285	452	64.6	102.4
			26.5	6.15	49.85	266	438	64.7	106.6
		-269 °C	25.4	6.16	49.90	367	499	83.2	113.2
			25.6	6.27	49.80	356	477	80.7	108.1
			25.4	6.14	49.85	361	490	82.3	111.6

れないでいられるかという目安となるもので、実際の材料挙動を知るうえでは、 K_Q 、 K_{max} の関係や、応力拡大係数と開口変位の関係全体を把握することが重要である。板厚 5.3 mm の 2014-T6 と 6.3 mm の 2219-T87 について $K \sim \delta$ 関係の概略図を描くと第21図のようになる。両材料とも温度低下に従い K_Q 、 K_{max} とも大きくなっているが、2014-T6 は 2219-T87 に比べ、不安定き裂が伝播し始める開口変位が小さく、特に -269°C では最大荷重から不安定破壊、即ち脆い破壊を起こしている。これは 2014-T6 の板厚 1.2 mm の TIG 溶接継手の引張り試験で -269°C での破断時の伸びが低下していることから予想されることであり、2014-T6 の TIG 溶接継手の使用にあたっては、低温で 2219-T87 よ



第17図 破壊じん性試験結果 2219-T87 (1.2 mm 板厚)



第18図 破壊じん性試験結果 2014-T6 (5.3mm 板厚), 2219-T87 (6.3mm 板厚)

第12表 K_Q , K_{max} の溶接法, 板厚, 温度依存性

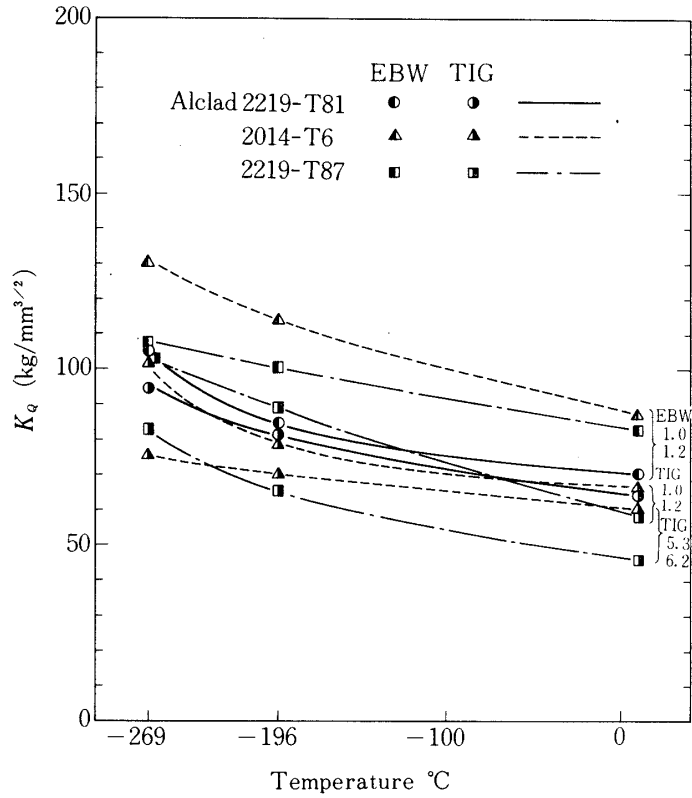
Al 合金名	溶接方法	板厚 (mm)	温度	K_Q (kg/mm ^{3/2})	K_{max} (kg/mm ^{3/2})
Alclad 2219-T81	E B W 溶接	1.0	室温 (10°C)	70.3	115.6
			- 196°C	84.8	161.0
			- 269°C	105.3	183.7
	T I G 溶接		室温 (10°C)	64.1	112.6
			- 196°C	81.8	141.0
			- 269°C	93.2	141.0
Al 2014-T6	E B W 溶接	1.2	室温 (10°C)	87.5	144.8
			- 196°C	114.4	163.0
			- 269°C	130.7	156.3
	T I G 溶接		室温 (10°C)	66.9	113.0
			- 196°C	79.5	111.2
			- 269°C	102.1	132.0
Al 2219-T87	E B W 溶接	1.2	室温 (10°C)	60.7	95.9
			- 196°C	70.4	87.3
			- 269°C	75.7	86.5
	T I G 溶接		室温 (10°C)	82.8	122.5
			- 196°C	100.5	166.0
			- 269°C	107.3	183.5
Al 2219-T87	T I G 溶接	6.2	室温 (10°C)	59.0	108.0
			- 196°C	89.4	138.0
			- 269°C	102.8	128.0
	E B W 溶接		室温 (10°C)	47.5	96.0
			- 196°C	65.6	105.3
			- 269°C	82.1	111.0

り脆い破壊を起こす可能性がある。一方, 2219-T87 では -269°C において鋸歯状のパターンを描くが, これは不安定破壊が進行し始めては停止することを繰り返していると思われる。

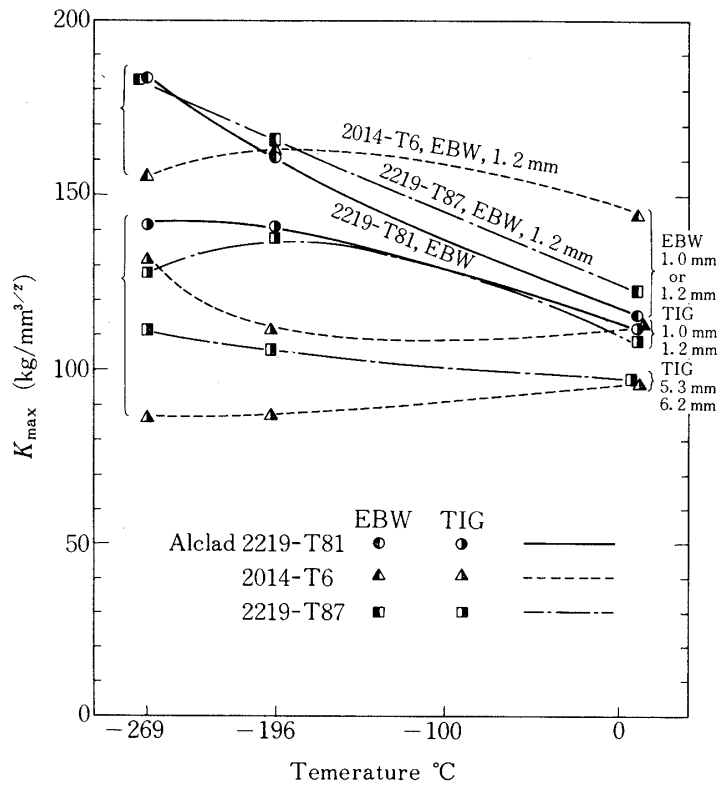
5. 結 論

液水エンジン・タンク材料として有力なアルミニウム合金 2219-T87, 2014-T6 及び, Alclad 2219-T81 について, 室温~極低温での強度について基礎データを得るため, 引張り試験, 破壊じん性試験及び浸液水実験を行った。以下に明らかになった点を示す。

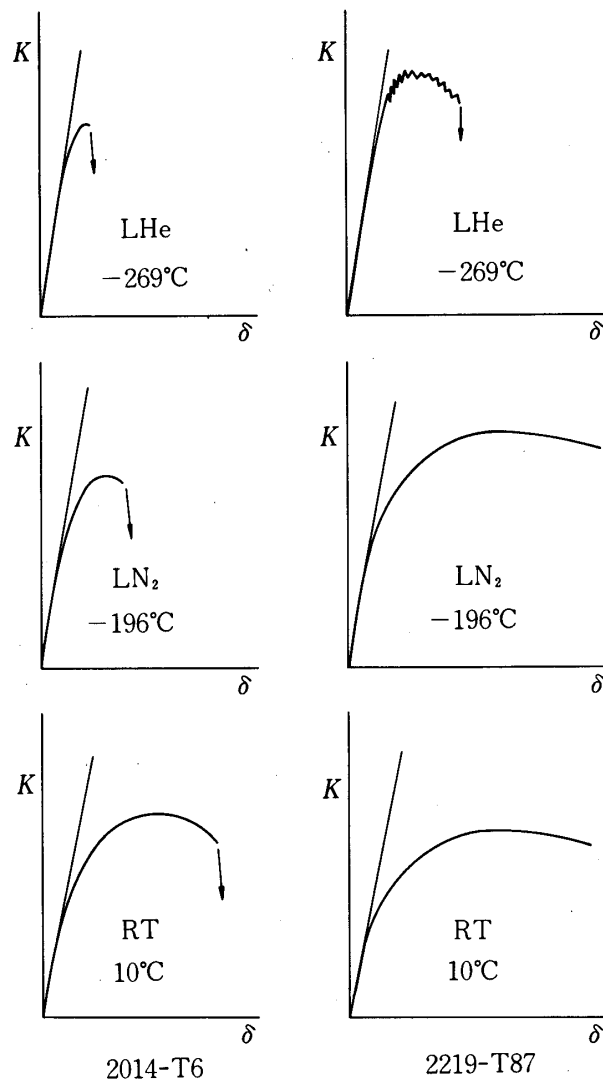
引張り試験は, 板厚 1mm の Alclad 2219-T81, 板厚 1.2mm のアルミ合金 2014-T6 と 2219-T87 について, 母材と EBW 及び TIG 溶接継手について, 室温, LN₂ 中, 及び



第19図 K_Q の溶接法, 板厚, 温度依存性



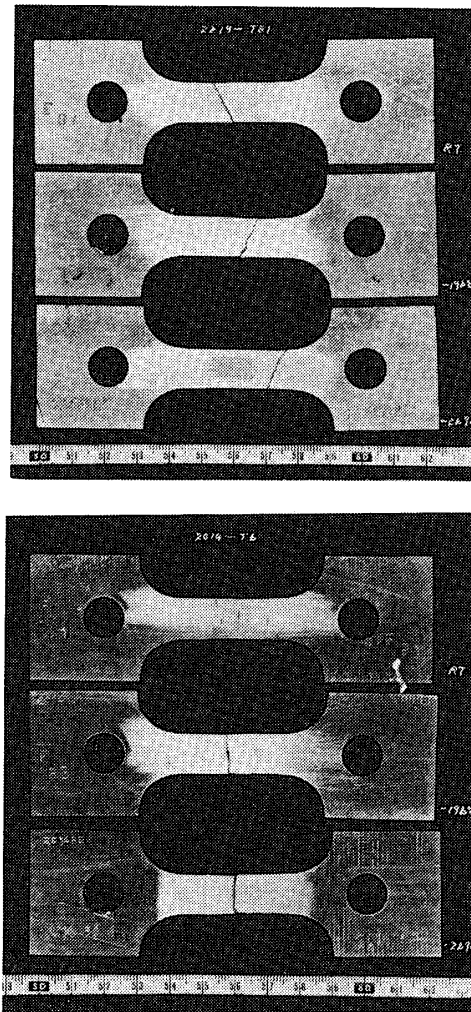
第20図 K_{max} の溶接法, 板厚, 温度依存性



第21図 2014-T6 (5.3mm板厚), 2219-T87 (6.3mm板厚) の代表的 $K \sim \delta$ 関係

LHe 中において行われ、次の様な結論を得た。

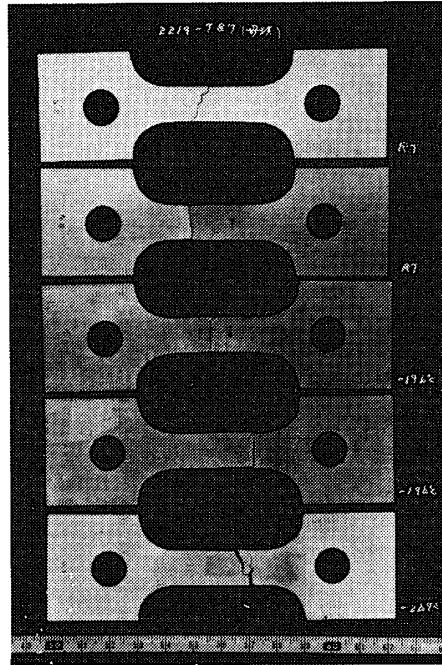
1. 母材の 0.2% 耐力, 引張り強度共に温度の低下に伴い大きくなり, LHe 温度での強度が最大となる。又破断伸びは, 2014-T6 では温度の低下と共に僅かの増加が認められるが他の材料ではほぼ変化がない。
2. 溶接継手の引張り破断位置は, 2014-T6 の EBW 溶接で溶接金属と母材の境界が多いが, 他は溶接金属部である。
3. 溶接継手の引張り強度も温度の低下と共に大きくなる。そして EBW 溶接が TIG 溶接より優り, 全温度領域に於て, すべての材料とも母材, EBW 溶接継手, TIG 溶接継手の順で強度が低下する。



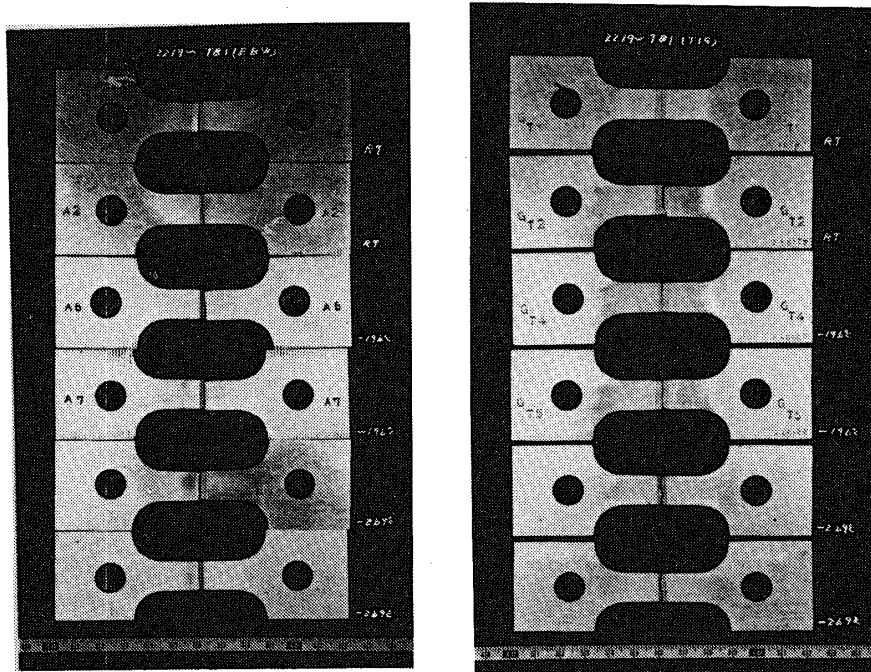
第22図 母体引張り試験片 Alclad 2219-T 81, 2014-T 6 の破断状況 (その1)

4. 伸びは、溶接継手では全温度領域にわたり母材に比べずっと減少している。特に、2014-T6 の TIG 及び EBW 溶接と、Alclad 2219-T81 の TIG 溶接では温度の低下によっても減少している。一方、2219-T87 材では、TIG 溶接では温度に対しほとんど不変、EBW 溶接では温度低下に伴い上昇すらしている事は特に注目される。
5. 2014-T6 と 2219-T87 について比べると、母材強度では両者に著しい違いは無い。溶接継手の引張り強度については、 -196°C 以上の EBW 溶接で 2014-T6 が優るが、 -269°C の EBW 溶接及び全温度領域における TIG 溶接で 2219-T87 が優り、2219-T87 の溶接性の良さが知られる。

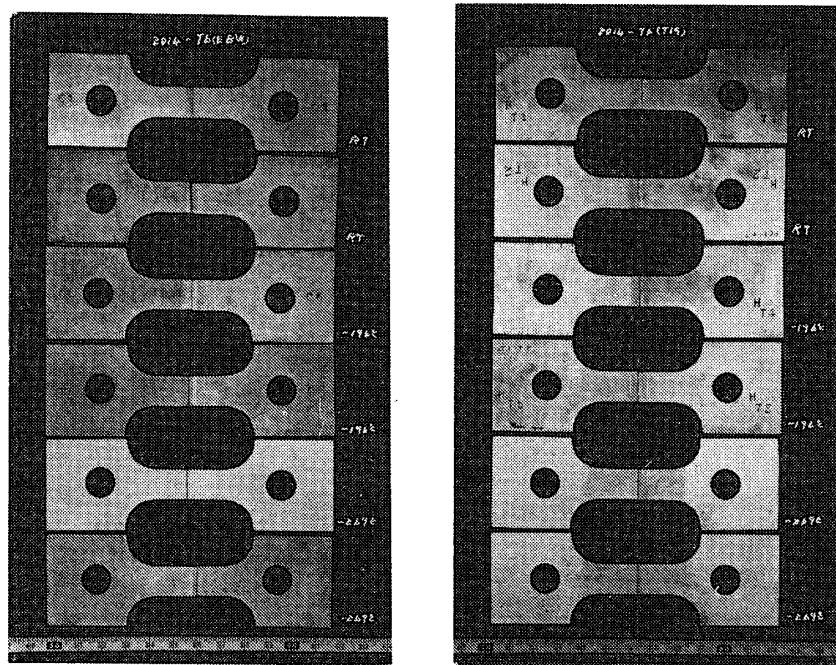
破壊じん性試験は、コンパクトテンション型破壊じん性試験片を用いて溶接継手（溶接部中央に疲労クラック）について行った。試料は、引張り試験を行った試料（母材を除く）のほかに、特に最も実用性の高いと思われる TIG 溶接継手の板厚の影響も調べるために、板



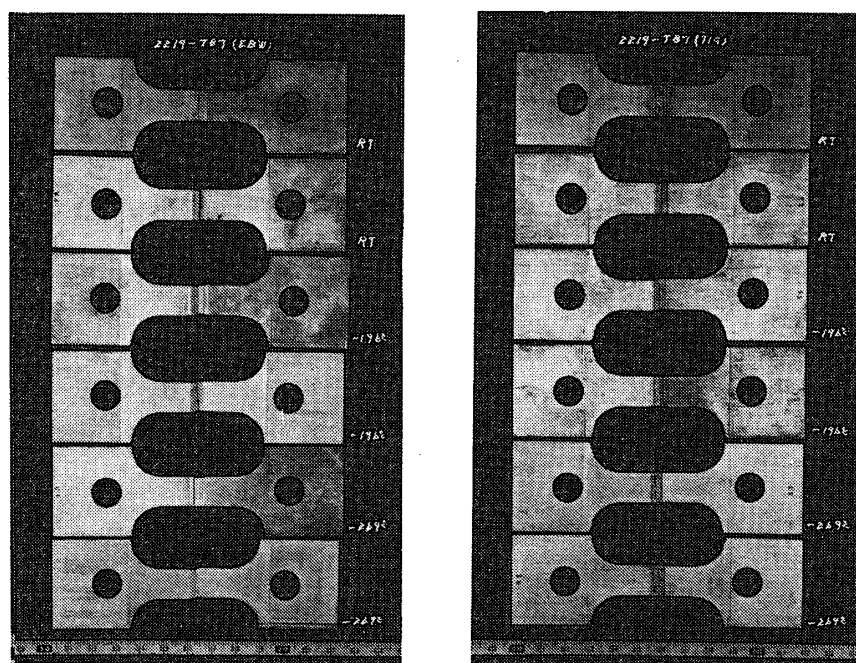
第23図 母体引張り試験片 (2219-T 87) の破断状況 (その2)



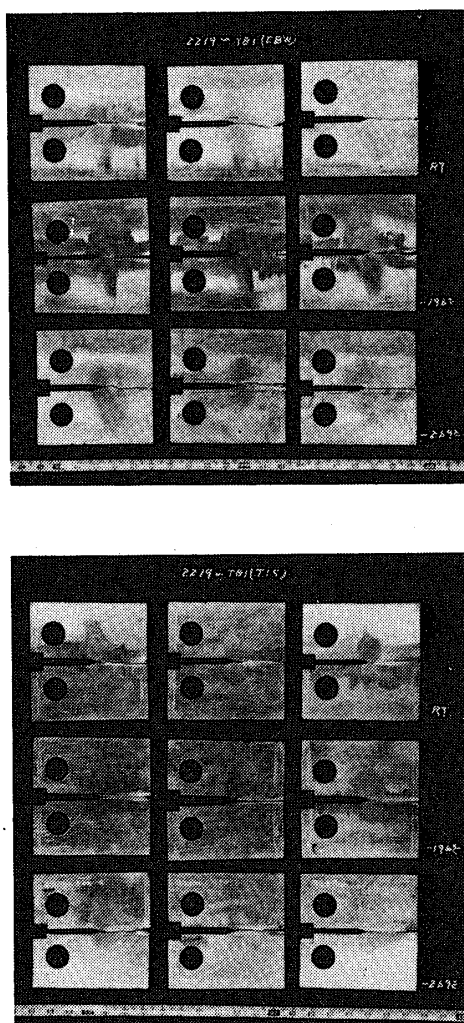
第24図 Alclad 2219-T81 溶接試験片の破断状況



第25図 2014-T6 溶接継手試験片の破断状況



第26図 2219-T87 溶接継手試験片の破断状況

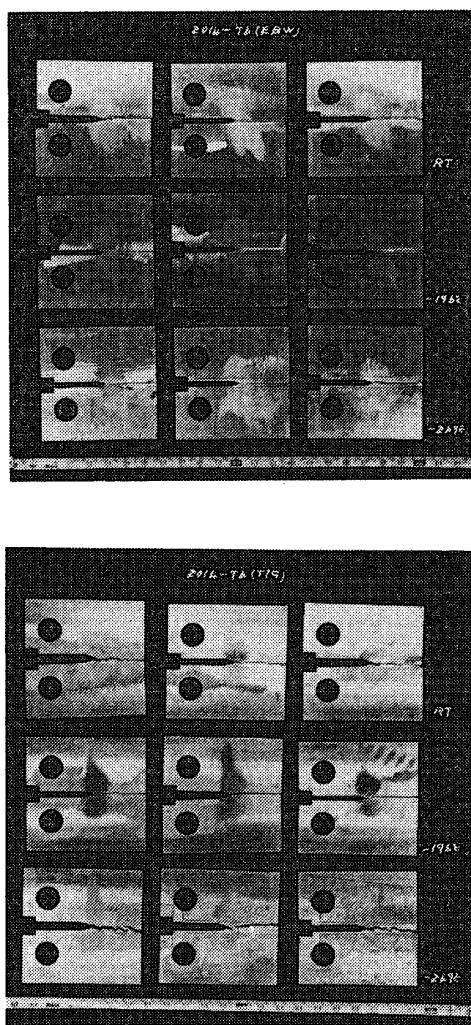


第27図 Alclad 2219-T81溶接継手のWOL試験片破断状況例

厚5.3mmの2014-T6及び板厚6.3mmの2219-T87板材についても取った。これらによる破壊じん性試験の結果、次の結論を得た。

1. 溶接継手の K_Q は、温度の低下と共に大きくなる。全溶接継手のうちでは2014-T6のEBW溶接継手が最も優れている。
2. TIG溶接継手の破壊じん性は板厚が厚くなると低下する。
3. 2014-T6と2219-T87のTIG溶接継手の破壊じん性値 K_Q は、1.2mm板厚では両者とも大差ないが、5.3～6.3mm板厚では、 -269°C で2219-T87が、 -169°C 以上で2014-T6がやや優るが、2014-T6のTIG溶接継手は低温で破壊挙動が比較的脆性的となる可能性が認められる。

以上、引張り試験と破壊じん性試験の結果を総合すると、ここで行われた溶接条件下という制約があるが、特に極低温におけるTIG溶接継手性能の点から2219-T87は、2014-



第28図 2014-T6 溶接継手の WOL 試験片破断状況例

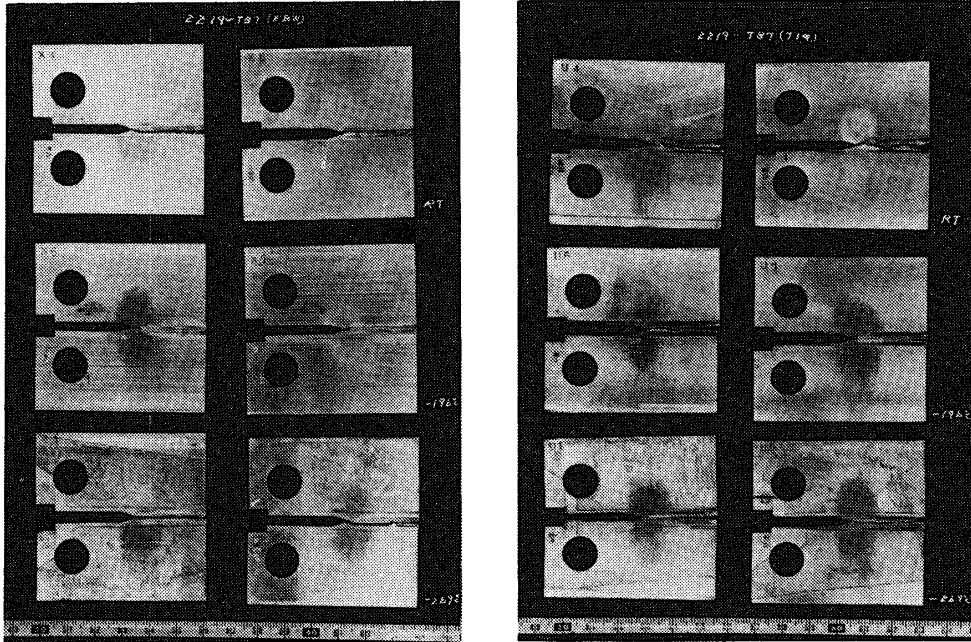
T6 に比べやや優れている。

これらの結果から、特に 2219-T87 について液体水素に浸されることによる材料の劣化の有無を調べるために、液体水素中で負荷保持後取り出した材料について引張り試験を行った。この結果については、次報 [24] で詳述するが、液体水素中に 240 分まで略降伏応力下保持の履歴は、認められる強度劣化を与えない。

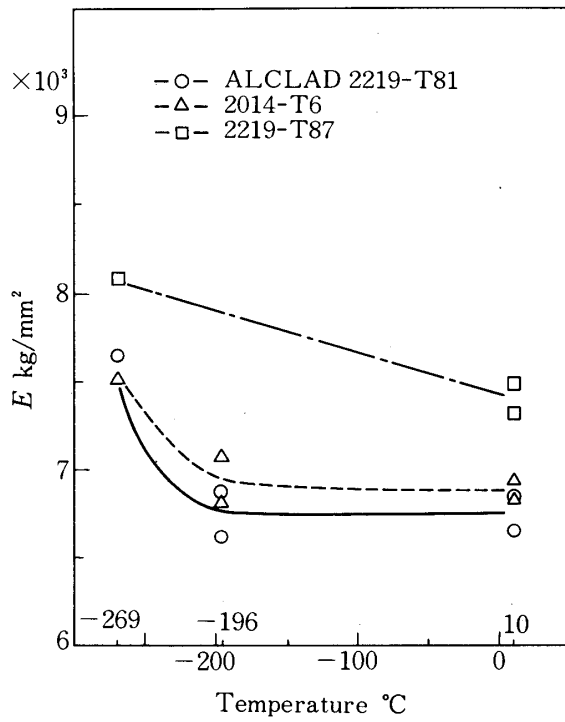
謝 辞

関心をよせて下さり研究計画に当り援助を惜しまれなかった森教授、小林助教授に感謝の意を表す。

又、本実験全般の試料作製及び実験遂行にあたり助力された三菱重工(株)高砂研究所の諸氏と、クライオスタット作製その他で助力された東理社、日本酸素(株)の諸氏に感謝の意



第29図 2219-T87 溶接継手のWOL試験片破断状況例



第30図 母材のヤング係数 (参考値)

を表する。

1980年1月21日 材料部

付 録

- 1) 極低温に至る各試片の破断状況を第22-29図に示す。
- 2) 母材のヤング係数は試片に接着した歪ゲージにより測定された歪から求めた。歪ゲージは次の通り；

室温 (10°C) 試験

ゲージ：FLA-6 (GL = 6mm, 東京測器製)

接着剤：CC-15A (常温速硬化型シアノアクリレート)

LN₂ (-196°C) 試験

ゲージ：KFL-5-CI-16 (GL = 5mm, 共和電業製)

接着剤：CC-15A (常温速硬化型シアノアクリレート)

LHe (-269°C) 試験

ゲージ：FSM 12-35 S 9 (GL = 3mm, 新興通信製)

接着剤：EPY-600 (加熱硬化型エポキシ, 新興通信製)

測定数が少ないので参考値として示す。

文 献

- [1] T.W. Orange, "Fracture Toughness of Wide 2014-T6 Aluminum Sheet at -320°F", NASA TN D-4017 (1967).
- [2] W.S. Pierce, "Crack Growth in 2014-T6 Aluminum Tensile and Tank Specimens Cyclically Loaded at Cryogenic Temperatures", NASA TN D-4541 (1968).
- [3] W.S. Pierce, & T.L. Sullivan, "Factors Influencing Low-Cycle Crack Growth in 2014-T6 Aluminum Sheet at -320°F (77K)", NASA TN D-5140 (1969).
- [4] R.G. Forman, S.V. Glorioso, & J.D. Medlock, "Flaw Growth Behavior in Thick Welded Plates of 2219-T87 Aluminum at Room and Cryogenic Temperatures", NASA TN D-7377 (1973).
- [5] W.L. Engstrom, "Determination of Design Allowable Properties. Fracture of 2219-T87 Aluminum Alloy", NASA CR-115388 (1972).
- [6] M.P. Hanson, "Smooth and Sharp-Notch Tensile Properties of Cold-Reduced AISI 301 and 304L Stainless-Steel Sheet at 75°, -320°, and -423°F", NASA TN D-592 (1961).
- [7] T.W. Orange, "Tensile Coupon Tests of Cryoformed AISI 301 Stainless-Steel Pressure Vessels at Cryogenic Temperatures", NASA TN D-2202 (1964).
- [8] W.S. Pierce, "Strength Comparison of Flawed Single-Layer and Multilayer AISI 801 Stainless-Steel Pressure Vessels at Cryogenic Temperatures", NASA TN D-2949.

- [9] T.W. Orange, "Evaluation of Special 301-Type Stainless Steel for Improved Low-Temperature Notch Toughness of Cryoformed Pressure Vessels", NASA TN D-3445 (1966).
- [10] F.D. Calfo, "Cryogenic Fracture Properties of Thin AISI 301 60-Percent Cold-Reduced Sheet at Various Angles to the Rolling Direction", NASA TN D-5413.
- [11] T.W. Orange, "Effect of Cold Reduction and Thermal Treatment on Tensile Properties of a Nickel-2 Percent Beryllium Alloy at Cryogenic Temperatures", NASA TN D-3196 (1966).
- [12] R.G. Forman, "Crack-Growth Behavior in Thick Welded Plates of Inconel 718 at Room and Cryogenic Temperatures", NASA TN D-7665 (1974).
- [13] M.P. Hanson, & H.T. Richards, "Smooth and Sharp-Notch Property Variations for Several Heats of Ti-6Al-4V Sheet at Room and Cryogenic Temperatures", NASA TN D-1282 (1962).
- [14] T.L. Sullivan, "Uniaxial and Biaxial Fracture Toughness of Extra-Low-Interstitial 5Al-2.5Sn Titanium Alloy Sheet at 20K", NASA TN D-4016 (1967).
- [15] T.L. Sullivan, "Texture Strengthening and Fracture Toughness of Titanium Alloy Sheet at Room and Cryogenic Temperatures", NASA TN D-4444 (1968).
- [16] T.L. Sullivan, "Behavior of Ti-5Al-2.5Sn ELI Titanium Alloy Sheet Parent and Weld Metal in the Presence of Cracks at 20K", NASA TN D-6544 (1971).
- [17] M.P. Hanson, H.T. Richards, & R.O. Hickel, "Preliminary Investigation of Filament-Wound Glass-Reinforced Plastics and Liners for Cryogenic Pressure Vessels", NASA TN D-2741 (1965).
- [18] M.P. Hanson, "Static and Dynamic Fatigue Behavior of Glass Filament-Wound Pressure Vessels at Ambient and Cryogenic Temperatures", NASA TN D-5807 (1970).
- [19] A.J. Nachtigall, S.J. Klima, & J.C. Freche, "Fatigue of Liquid Rocket Engine Metals at Cryogenic Temperatures to -452°F (4K)", NASA TN D-4274 (1967).
- [20] A.J. Nachtigall, "Strain-Cycling Fatigue Behavior of Ten Structural Metals Tested in Liquid Helium (4K), in Liquid Nitrogen (78K), and in Ambient Air (300K)", NASA TN D-7532 (1974).
- [21] 河田幸三, 黒河邦彦, 橋本彰三, 本堂明, 小林昭, 森大吉郎; 液水エンジン・タンク材料の極低温力学物性測定, 第19回構造強度に関する講演会(札幌, 1977), 62~65.
- [22] 河田幸三, 黒河邦彦, 橋本彰三, 本堂明, 小林昭, 森大吉郎; 液水エンジン・タンク材料の極低温力学物性測定について, 第8回宇宙航空材料シンポジウム(東大宇航研, 1978.1), 8-12.
- [23] 河田幸三, 黒河邦彦, 橋本彰三; 液体水素浸漬後のAl合金強度, 昭和53年度推進系シンポジウム, 東大宇航研(1978.12),
- [24] 河田幸三, 黒河邦彦, 橋本彰三; 液体水素浸漬後のAl合金強度, 東大宇航研報告, 16,1(C) (1980/3), 757~766.