

# 液体水素浸漬後のAl合金強度

河田 幸三・黒河 邦彦\*・橋本 彰三

## Strength of Some Al Alloys after Immersion in Liquid Hydrogen

By

Kozo KAWATA, Kunihiko KUROKAWA and Shozo HASHIMOTO

**Abstract:** The possibility of strength degradation by immersion in liquid hydrogen is studied for Al alloys, 2014-T6 and 2219-T87. No evidence of strength degradation is found for these alloys and the welded joints after immersion in liquid hydrogen under approximate yield stress for 240 min.

### 概 要

液体水素エンジン用タンク材料としては、液体水素浸漬による強度劣化が起るか否か調べておく必要があるため、Al合金2014-T6、2219-T87とそのTIG溶接継手について、略降伏応力に当る応力下の液体水素浸漬後の強度が調べられ、240分までの浸漬では強度劣化のないことが知られた。

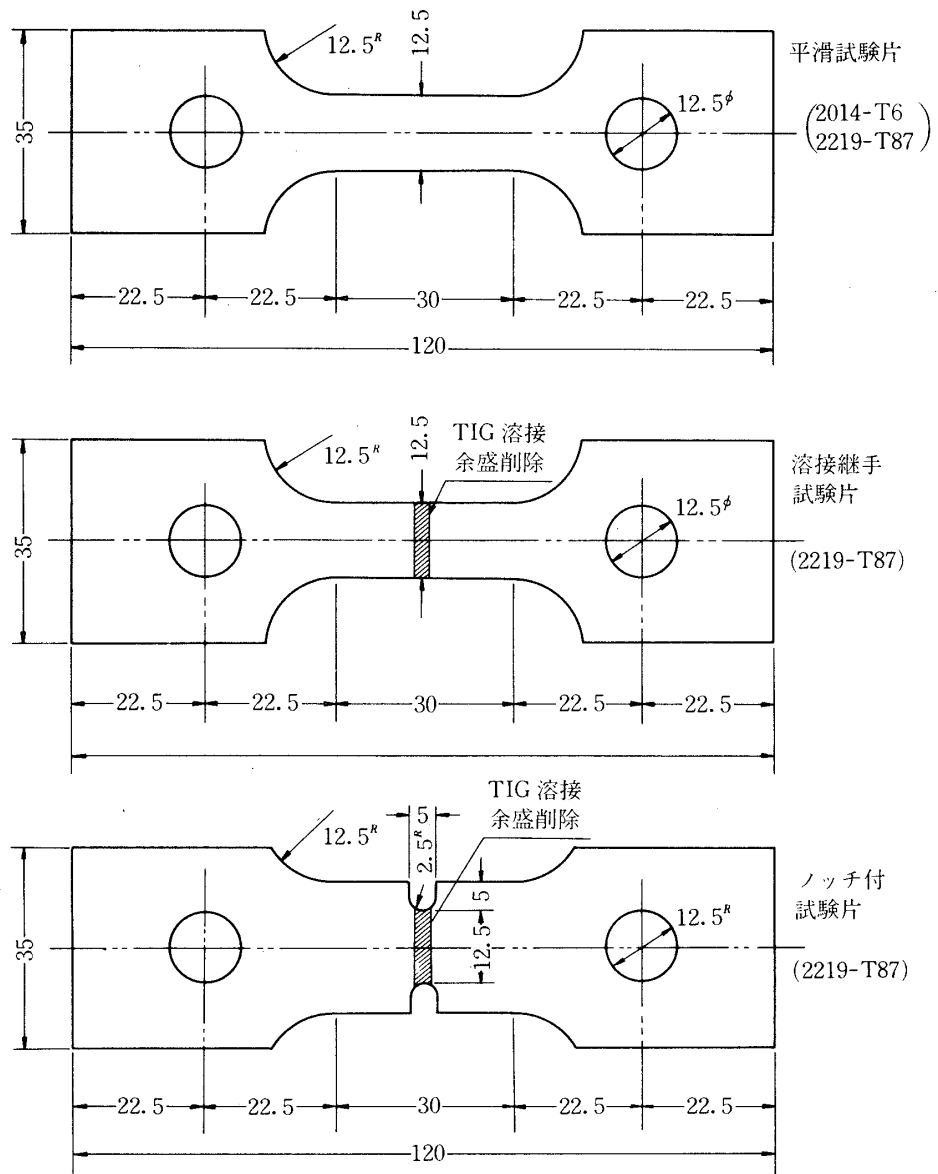
### 1. ま え が き

液体水素エンジン用タンクは、液体水素が低温(20°K)であること、又水素が極めて活性が強いため材料に種々の影響を与える可能性があるという点で特に注意が必要である。タンク材料の低温特性特にその強度特性については、我々は既にAlclad2219-T81、アルミ合金2014-T6、2219-T87について1.0~1.2mm板厚の母材と溶接継手(EBW溶接、TIG溶接)の引張り試験、又前記材料と板厚5.3mm~6.3mmの2014-T6、2219-T87のTIG溶接継手の破壊じん性試験を行って、各材料の室温、LN<sub>2</sub>、LHe中に於ける強度特性を明らかにしている[1, 2, 4]。これらは本来LH<sub>2</sub>中で行うのが順当であるが、爆発の危険のため低温特性のみをとり出して調べるためLN<sub>2</sub>、LHe中で行っているものである。しかし、LH<sub>2</sub>自体がこれらの材料に与える材質的影響についてはLH<sub>2</sub>そのものの中に浸漬して実験する必要がある。

そこで、続いて上記材料のうち最もタンク材料に適していると思われる、2219-T87を

\*石川島播磨重工業(株)、当時東京大学宇宙航空研究所

中心にその TIG 溶接継手を含め液体水素による材料劣化の有無を調べるために浸液水実験を行った[3]. この実験では, 作製した試験片を液水中で負荷保持し, 一定時間後取り出して, 室温及び LHe 中で引張り試験を行い, 液水浸漬をしないで直接引張り試験を行った試料と強度比較を行った. この実験は, 水素環境下における金属材料の脆化—水素環境脆性は, 金属表面に高純度水素が直接接触する事により, 特に塑性変形により金属表面の酸化層が破れた時に起こる事が知られているので, この点に注意して行われた. この結果, 通常の液水ロケットエンジンで経験する程度の液体水素中での負荷履歴により, Al 合金 2219-T 87 母材, TIG 溶接継手とも顕著な強度の劣化を起こさない事が確認されたので報告する.



第 1 図 試験片形状

## 2. 試験片形状及び材料

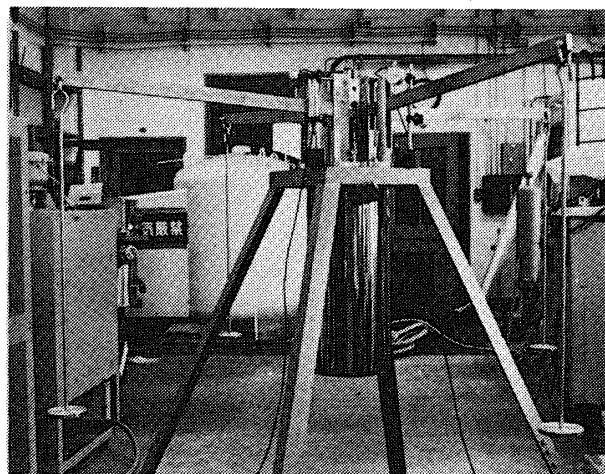
この試験は、先に引張り試験や、破壊じん性試験に用いたのと同じアルミ合金 2014-T6, 2219-T87 について行われた。2219-T87 については TIG 溶接継手についても行った。形状は引張り試験に用いた母材引張り試験片、溶接継手引張り試験片と、この実験のためにだけ用意したノッチ付溶接継手引張り試験片（第1図）であり、2014-T6 は母材引張り試験片のみである。2219-T87 の溶接継手は高周波パルス TIG 溶接により作製された。溶接条件は第1表に示す。

## 3. 試験装置及び方法

この浸液水試験は浸液水材料試験用クライオスタットを製作して、安全のため能代実験場の野外で遠隔操作により行われた。試験に用いた浸液水材料試験用クライオスタットの外観、内部、変位横出装置部分と断面図を図2～5に示す。このクライオスタットは二重の真空断熱でその間に液体窒素槽がある。液体水素は、上部中心からトランスファー・チューブを差し込んでヘリウムガスで内部を置換後送入する。水素液面はカーボン抵抗式液面計（3点計測）と、試料室内に貼った測温ゲージ（3点計測、共和電業製 KTB-7-50-A1）により、電圧計又は歪計を通して2系統で遠隔よりモニターした。

試料は一度に4本装着でき（第6図）荷重は負荷棒を通し外部から、てこの原理（アーム比 1:19）により、デッド・ロードをかけられる。（容量は各1 ton）（第7図）。各負荷棒には、ダイヤルゲージ型の歪ゲージ式変位変換器（共和電業製、DT-10D）が取り付けられてあって試験中に試験片が破断した場合には検出できるようになっており、これらと測温ゲージからの出力は記録計に記録した。

次にこの装置を用いて液体水素に浸ける実験を行う場合の手順を示す。爆発の危険のない

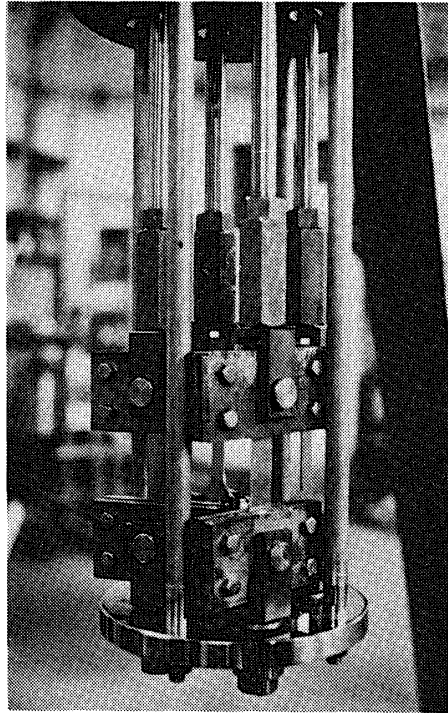


第2図 浸液水材料試験用クライオスタット外観

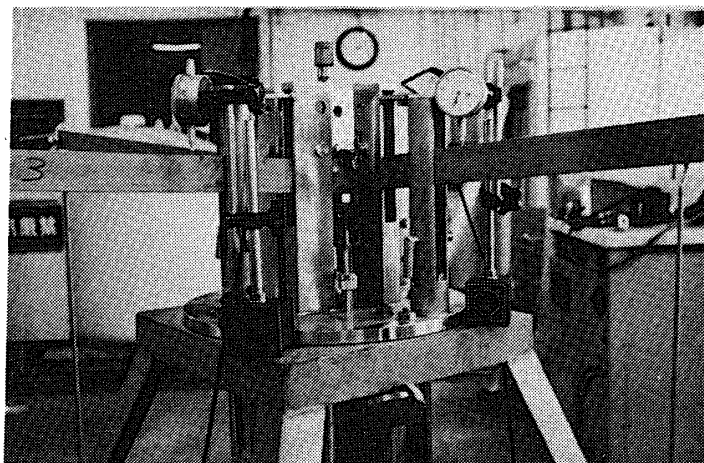
第1表 TIG溶接の溶接条件

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		
Alclad 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>	100 mm/sec	Heガス 30 l/min	大阪 変圧器 社製
2014-T6 (板厚1.2mm) 2219-T87 (板厚1.2mm)	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 1:1</p>		Heガス 35 l/min	三菱電機 社製
2219-T87 (板厚1.2mm)	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 低周波パルス同期 0.2 sec/cycle</p>	200 mm/sec	Heガス 35 l/min	

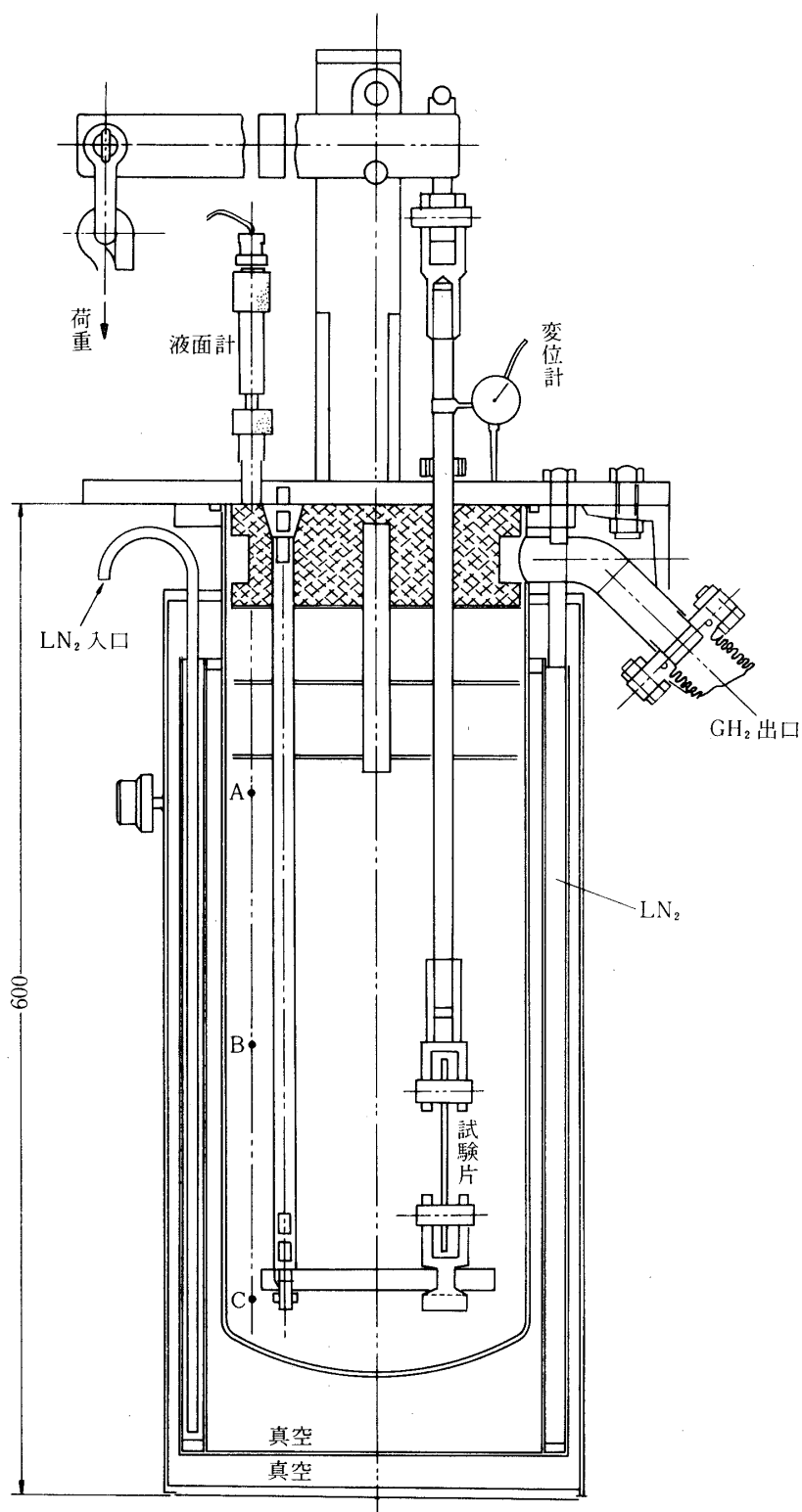
\*すべて、ワイラメタルは使用せず、開先形状はI型開先、前処理として、ワイヤブラッシング後アセトン洗浄



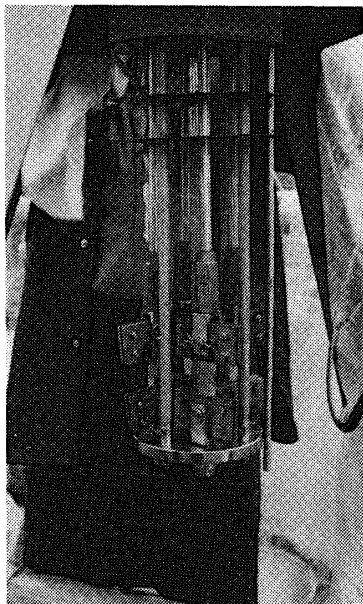
第3図 クライオスタット内部



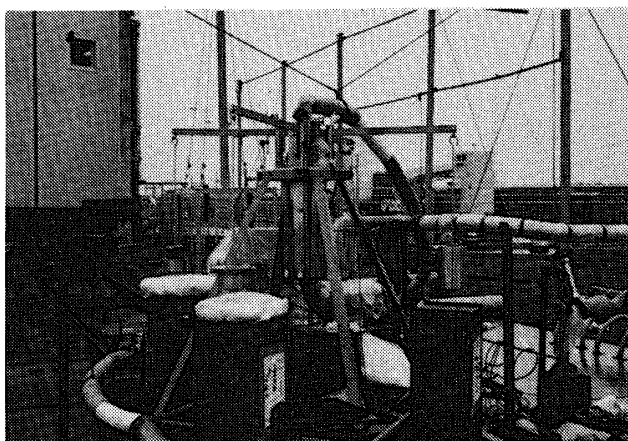
第4図 変位検出装置部分



第5図 クライオスタット断面概略



第6図 試片装着状況



第7図 能代実験場（野外）にて負荷を終り、液水注入に入る直前の模様

よう注意の払われた手順をとっている。

- 1) クライオスタットに試験片を装着し組立てる。
- 2) (試験槽を  $\text{LN}_2$  で予冷)。
- 3) 中間槽に  $\text{LN}_2$  注入。
- 4) 試験槽を GHe 置換。
- 5) 負荷，変位計のセット後，人が退避。負荷は試片の塑性変形の開始される荷重をとった。
- 6) 試験槽に  $\text{LH}_2$  注入，自然蒸発を待つ。この間液面計により液面モニター，変位計により材料に異常の有無を調べる。
- 7) 水素の自然蒸発，又は所定の時間経過後  $\text{LH}_2$  をパーズ。
- 8) 人が近づいて除荷。試料をとり出す（以上，能代実験場）。
- 9) 液水浸漬負荷の終わった試片の室温又は LHe 中での破断試験（駒場キャンパス）

#### 4. 浸液水材料試験結果

試験は，受け入れたままの試片，及び上記の方法で液水中で負荷保持後除荷した試片の両者について，室温及び液体ヘリウム中（前論文[4]で述べたクライオスタットを用いて）で引張り試験を行った。即ち，各試料の履歴と破断条件は，

A：試験片作製→室温で引張り試験

第2表 浸液水材料試験結果

試料	板幅 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	浸液水条件			破断時			
				負荷 (kg)	応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	保持時間 (分)	温度	荷重 (kg)	応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	
2014-T6 母材引張試験片	A	12.5	1.20	15.0				室温	740	49.3
	B	12.5	1.20	15.0	643	42.9	20+190	室温	744	49.6
2219-T87 母材引張試験片	A	12.5	1.20	15.0				室温	724	48.3
	B	12.5	1.205	15.06	600	39.8	20+190	室温	728	48.3
	C	12.5	1.207	15.09				LHe	1058	70.1
	D	12.5	1.205	15.06	600	39.8	240	LHe	1050	69.7
2219-T87 溶接継手	A	12.5	1.20	15.0				室温	440	29.3
	B	12.5	1.20	15.0	330	22.0	20+190	室温	447	29.8
	C	12.5	1.20	15.0				LHe	695	46.3
	D	12.5	1.205	15.06	330	21.9	240	LHe	782	51.9
2219-T87 ノッチ付溶接 継手	A	12.5	1.15	14.5				室温	411	28.3
	B	12.5	1.20	15.0	308	20.5	20+190	室温	430	28.7
	C	12.5	1.21	15.1				LHe	613	40.5
	D	12.5	1.190	14.9	308	20.7	240	LHe	689	46.3

降伏応力：2014-T6 42.7 kg/mm<sup>2</sup>2219-T87 38.6 kg/mm<sup>2</sup>B：試験片作製→LH<sub>2</sub> 中負荷保持（210分）→室温で引張り試験

C：試験片作製→LHe 中で引張り試験

D：試験片作製→LH<sub>2</sub> 中負荷保持（240分）→LHe 中で引張り試験ここでLH<sub>2</sub> 中の負荷は、試料にはほぼ降伏を起こす程度の値である。

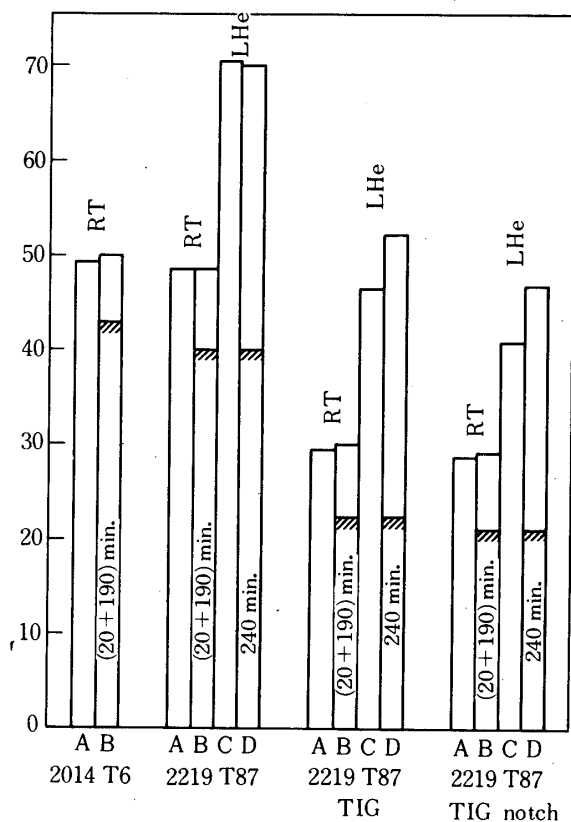
第2表、第8図に結果を示す。

各材料ともLHe 中では室温での強度より上がっていることは、前の実験結果と同じであり、数値的にもあまり差は出ていない。さて、一度液体水素中で負荷保持したことによる影響をみると、室温中での強度では変わらないが溶接継手のLHe 中での強度は1割程度上昇している。これは、少なくともこの材料については液体水素に材料及び溶接継手に悪影響を与えない事を示している。それどころか溶接継手については、負荷による加工硬化、低温、低温での負荷、或いは水素の何れによるものかこの実験からだけでは判明しないが、強度の上昇さえもみられた。

## 5. 結 言

液水タンク材料の候補 Al 合金 2014-T6 母材及び 2219-T87 母材及び TIG 溶接継手が、液体水素中で 240 分までの時間、略降伏点応力を負荷された後の強度を調べるため、浸液水実験が成功裡に行われた。この結果、液体水素中での負荷による当材料の強度上の劣





- A : 液水に浸漬せず，直接室温で引張り試験。  
 B : LH<sub>2</sub> 中負荷保持 (210 分) 後除荷，取出し，室温で引張り試験。  
 C : 液水に浸漬せず，直接 LHe 中で引張り試験。  
 D : LH<sub>2</sub> 中負荷保持 (240 分) 後除荷，取出し，LHe 中で引張り試験。  
 $\sigma_b$  : 引張り強度，RT : 室温，LHe : LHe 温度，斜線 : 液中負荷時応力。

第 8 図 浸液水実験結果

化は，少くともこの程度の浸漬時間では室温，LHe 温度の両者について認められない事が知られた。

### 謝 辞

この浸液水実験は，東京大学宇宙航空研究所能代実験場で行われた。研究計画に当りご援助頂いた森教授，実験遂行に当りご援助頂いた倉谷教授始め，秋葉，長友研究室の関係者，液水供給班の諸氏及びその他この実験にご協力頂いた実験班員諸氏に厚く御礼申上げる。また，試料作製及び実験遂行にあたり三菱重工業 (株) 高砂研究所の関係諸氏；クライオスタット作製に当り，日本酸素，東理社の関係諸氏のご協力を頂いたことを記し，併せて御礼申上げる。

1980年1月21日 材料部

## 文 献

- [1] 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.
- [2] 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回宇宙航空シンポジウム, (東大宇航研, 1978/1), 8~12.
- [3] 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).
- [4] 河田幸三, 黒河邦彦, 橋本彰三, 本堂明; 液水エンジン・タンク材料の極低温力学物性, 東大宇航研報告, 16, 1 (C) (1980/3), 721~756.