

(昭和 60 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

深海潜水調査船チタン合金耐圧殻の 工作法に関する研究 (第 2 報)

正員 遠 藤 倫 正* 正員 横 田 公 男*
 正員 笹 野 量 一 郎** 正員 豊 原 力*
 正員 高 野 元 太*** 安 井 健 一****
 西 村 孝****

Research on Fabrication Procedure of Spherical Pressure Hull Made
 from Titanium Alloy for Deep Submergence Research
 Vehicle (2nd Report)

by Michimasa Endo, *Member* Kimio Yokota, *Member*
 Ryoichiro Sasano, *Member* Tsutomu Toyohara, *Member*
 Genta Takano, *Member* Ken-ichi Yasui
 Takashi Nishimura

Summary

Following "Shinkai 2000", as Japanese deep research project, a 6000 m class deep submergence research vehicle is under planning. For the research vehicle of this class, from the maneuverability and operationability, of utmost importance is the reduction of weight. As for a pressure hull, which houses crew members, the authors have carried out a series of research for the application of titanium alloy (Ti-6 Al-4 V ELI) considering the strength-weight ratio, and anti-corrosion capability against sea water. In the 1st report, the authors have made a full scale model of the pressure hull of Ti-6 Al-4 V ELI for the 6000 m class submersible to establish the manufacturing procedure. In this report, by disassembling the model, the authors have investigated the material characteristics for the application of a deep submergence research vehicle. The research covered the fields of mechanical properties, fracture toughness, fatigue strength, stress corrosion cracking, hardness distribution, micro-structure, and residual stress. As a result, 6 Al-4 V titanium alloy was confirmed to be one of the most effective material for the pressure hull of a deep submergence research vehicle.

1 緒 言

“しんかい 2000”に続く我が国の深海潜水調査船プロジェクトとして計画中の 6,000 m 級潜水調査船の耐圧殻用材料として超高張力鋼 (10 Ni-8 Co 鋼) とチタン合金 (Ti-6 Al-4 V ELI) を対象に材料及び工作法の研究を実施してきた^{1)~6)}。チタン合金については、耐圧殻への採

用を考えた場合我が国で最大規模のものとなるので素材および加工の面からの調査が必要であり、著者らは実機の場合と同様の加工工程に沿って実物大模型を製作し工作法を確立しその結果を第 1 報に報告した。その結果、超厚板チタン合金板製造技術、チタン合金半球の熱間成形技術、チタン合金半球および全球の熱処理技術、半球 3 次元機械加工技術、超厚板チタン合金の電子ビーム溶接技術、チタン合金素材および溶接部の非破壊検査技術などの工作法を確立することができた⁷⁾。本報告では、この実物大模型を解体し各部の材料特性および残留応力を調査した。この結果、Ti-6 Al-4 V ELI チタン合金が耐圧球殻に十分使用可能な材料であるとの見通しを得た

* 三菱重工業(株) 神戸造船所
 ** 三菱重工業(株) 明石製作所
 *** 三菱重工業(株) 高砂研究所
 **** (株)神戸製鋼所 中央研究所
 ***** (株)神戸製鋼所 チタン本部

のでその結果について報告する。

2 実物大模型の製作⁷⁾

実物大模型の形状を Fig. 1 に示す。実物大模型は内径 2m, 仕上り板厚 70 mm の実機の耐圧殻を模擬したもので N 半球および赤道リングに 6 Al-4 VELI チタン合金を使用した。N 半球には耐圧殻に必要な視窓貫通金物 (直径 500 mm) 2 個, 電線貫通金物 (直径 800 mm) 1

個およびハッチ開口 (直径 800 mm) 1 個を取付けた。S 半球は, N 半球と溶接される赤道リングを除いて経済的見地から純チタン (JIS 3 種) を使用した。

N 半球素材は, 9 ton インゴットから圧延した板厚 115 mm の素材から熱間圧延, STOA 処理によって製作した。また赤道リングおよび貫通金物の素材は, 5 ton インゴットから鍛造後 STOA 処理を行って製作した。N 半球素材と貫通金物素材の溶接には電子ビーム溶接を行

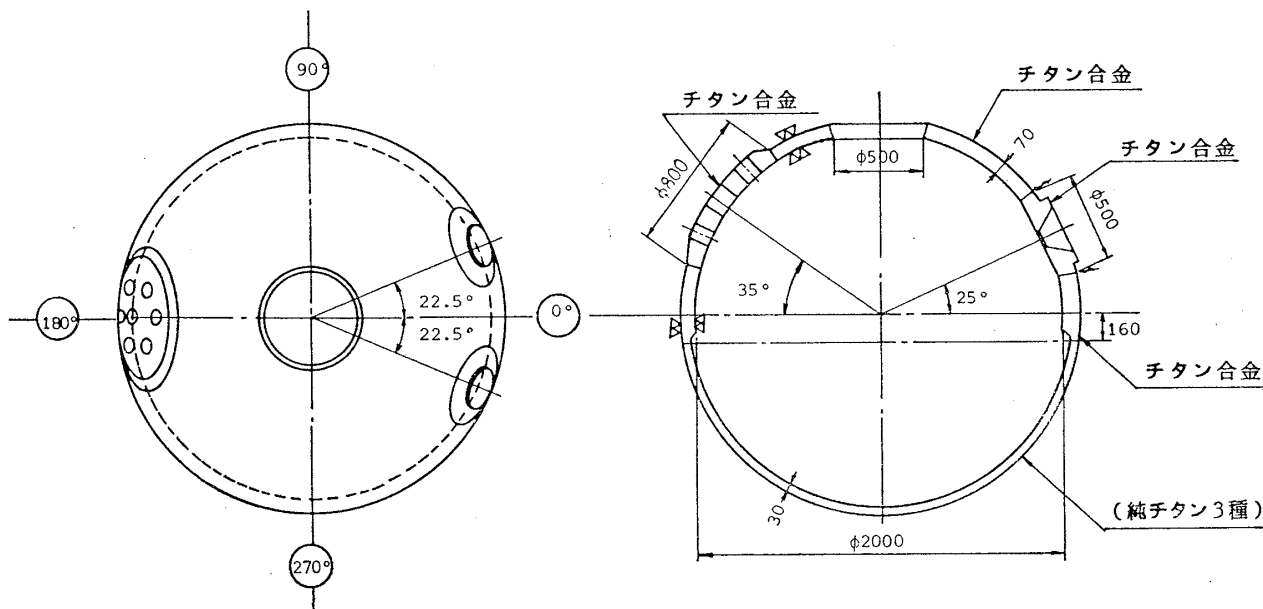


Fig. 1 Full Scale Model of Pressure Hull

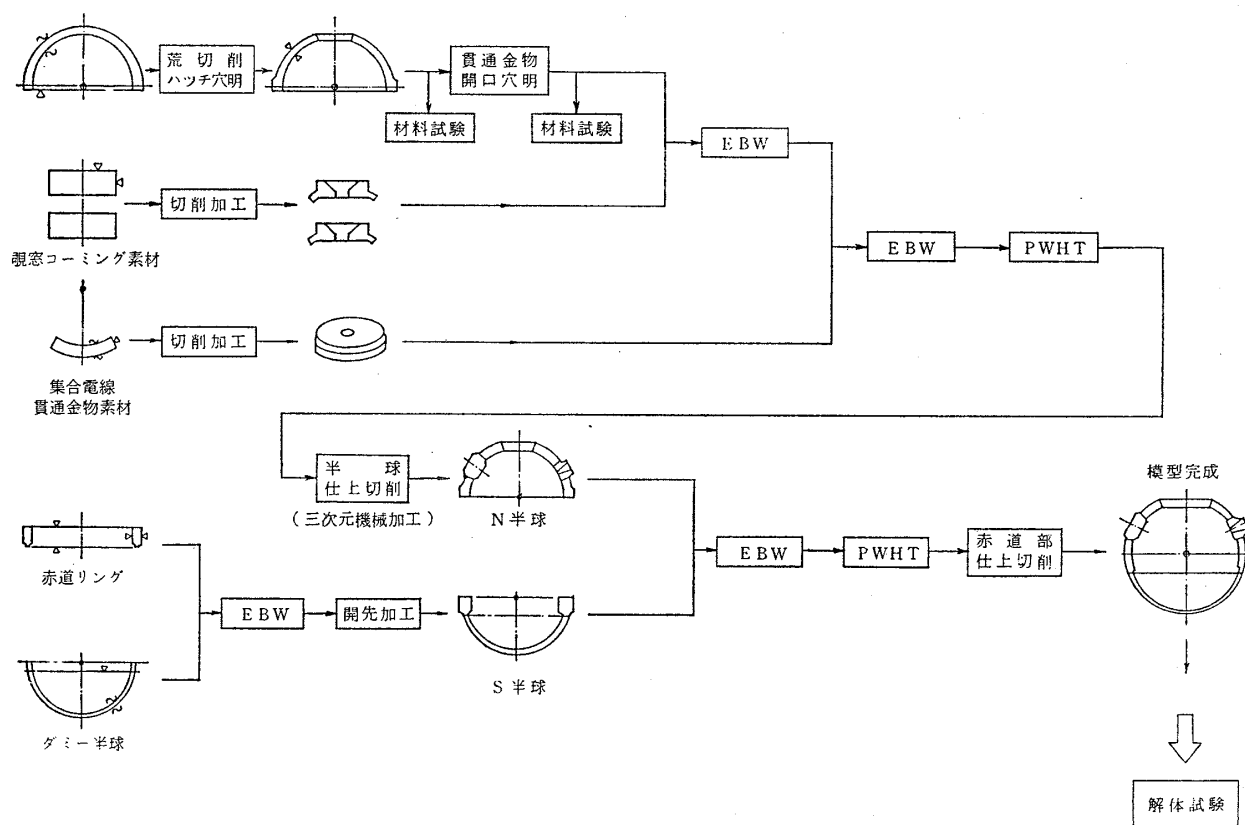


Fig. 2 Fabrication Process

Table 1 List of Evaluation Test

位 置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	母材引張試験	溶接金属引張試験	継手引張試験	曲げ試験	シャルピー衝撃試験	DT試験	破壊じん性試験	応力腐食割れ感受性試験	低サイクル疲労試験	高サイクル疲労試験	疲労き裂伝播試験	硬さ分布試験	マクロ組織試験	ミクロ組織試験	化学分析試験	残留応力計測
N半球母材	○	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○
集合電線金物	○	-	-	-	○	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-
赤道継手	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
はめ込継手	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○

い、応力除去焼鈍後3次元加工により精密機械加工を実施した。また、N半球と赤道リングの溶接も電子ビーム溶接を採用し、残留応力を除去するために PWHT を実施した後赤道部を完全な真球に仕上げた。以上の結果、真球度が1.003 とほぼ真球に近い球殻を製作することができた⁷⁾。これらの製作手順を Fig. 2 に示す。

3 チタン合金耐圧殻模型の解体試験要領

製作されたチタン合金耐圧殻模型の性能を評価するため、解体試験を実施した。解体試験はN半球母材、集合電線金物および溶接継手に対して行い、試験項目はTable 1 のように設定した。

母材引張試験片形状は ASTM E 8 号 ($\phi=8.75$ mm, G. L.=35 mm) とし、L および T 方向でそれぞれ表層部、1/4t 部および 1/2t 部より試験片を採取した。

溶接金属引張試験では、溶接金属の幅が狭いことを考慮して、試験片形状を JIS Z 2201 4 号 ($\phi=4$ mm, G. L.=14 mm) とした。また溶接定常部だけでなく、始末端部からも試験片を採取した。

継手引張試験片は主として ASTM E 8 号を使用した。JIS Z 3121 に規定される全厚継手についても試験を実施した。

曲げ試験は JIS Z 3122 3 号に規定される試験片を使用して $12 \text{ tR} \times 105^\circ$ (側曲げのみ $10 \text{ tR} \times 180^\circ$ まで実施) の条件で実施した。

シャルピー衝撃試験片は JIS Z 2202 4 号とし、室温から -196°C の範囲で試験を行った。

DT 試験片形状は ASTM E 604 に規定される 5/8 インチタイプとし、電子ビーム溶接によって脆化ビードを入れた。なお圧延板については1インチタイプの試験も行い、5/8インチタイプと1インチタイプの相関を調べた。また DT 試験は室温から -150°C の範囲で実施した。

破壊じん性試験は ASTM E 813 に基づく、サイドグループ付試験片を用いて、除荷コンプライアンス法によりき裂の進展量を測定して試験を行った。

応力腐食割れ感受性試験は ASTM E 399 に規定され

る 1TCT 試験片形状 (ノッチはシェブロンタイプ切欠きに疲労き裂を導入) とし、 30°C の 3.5% NaCl 人工海水中で試験を行った。なお試験は定荷重で実施した。

低サイクル疲労試験片形状は直径 8 mm の砂時計型とし、大気中および 3.5% NaCl 人工海水中 (30°C) の2種類の環境で試験を行った。なお繰返し速度は 5 cpm, 応力比は -1 とした。

高サイクル疲労試験片形状は直径 8 mm の平行部付とし、低サイクル疲労試験と同じく、大気中および 3.5% NaCl 人工海水中 (30°C) の2種類の環境で試験を行った。なお繰返し速度は 1,700 cpm, 応力比は -1 とした。

疲労き裂伝播試験は ASTM E 399 に基づく 2TCT タイプの試験片 (板厚のみ 25 mm) を使用し、繰返し速度 5 cpm, 応力比 0.05 の条件で大気中および 3.5% NaCl 人工海水中 (30°C) で試験を行った。

硬さについては赤道継手に対して H_V 10 kg で測定を行った。

母材と赤道継手を硝ふッ酸でエッチングし、マクロ組織およびミクロ組織を観察した。

化学分析は Al, V, Fe, C, O, H, N の各元素について溶接金属に対して行った。

耐圧殻模型完成後、内外面に2軸のストレインゲージ (G. L.=2 mm) を貼付し、切出し法により残留応力を測定した。

4 解体試験結果とその評価

4.1 引張特性

Table 2 にN半球母材および集合電線金物の引張試験結果を示す。L方向およびT方向、また表層、1/4t および 1/2t の採取方向と採取位置による差は少なく、いずれも1~3インチの板厚に対して規定される AMS 4907 C の値を満足した⁸⁾。

Table 3 には溶接金属引張試験結果を示す。溶接金属の方が母材よりも強度が高く、0.2% 耐力で $85\sim 91 \text{ kgf/mm}^2$, 引張強さで $95\sim 99 \text{ kgf/mm}^2$ であった。またこれらの値は定常部と始末端部で差がなく、表層、1/4t, 1/2t でも差がなかった。伸びは $9\sim 14\%$ と母材より若干低い値であるが、“しんかい 2000”の耐圧容器の溶接部の伸びの規定値5%を満足した。

継手引張試験結果を Table 4 に示す。溶接金属の方が母材よりも強度が高いために、全厚継手以外の試験片はいずれも母材破断であり、その引張強さも母材と同等であった。全厚継手試験片の引張強さは溶接金属の引張強さと同等であった。

以上のように母材および溶接継手共に良好な引張特性を有していた。

4.2 曲げ特性

赤道継手の曲げ試験結果を Table 5 に示す。チタン合金は強度が高く、伸びも小さいので、曲げ半径を大きくとる必要がある。ここでは“しんかい2000”の耐圧容器の溶接部に規定された $12\text{ tR} \times 105^\circ$ で試験した。その結果、側曲げ、表曲げ、裏曲げのいずれも良好であった。

Table 2 Result of Tensile Test

供試体	方向 位置	特 性		引張強さ (kgf/mm^2)	伸 び (%)	絞 り (%)
		0.2%耐力 (kgf/mm^2)	引張強さ (kgf/mm^2)			
N 半 球	L	表層	87.3 87.4	93.0 93.5	15.1A 15.7A	28.4 31.1
		1/4t	86.8 86.2	92.8 92.5	14.3A 14.0A	27.8 27.3
		1/2t	85.2 85.0	91.3 91.2	15.1A 16.9A	30.3 30.2
	T	表層	84.7 84.8	90.7 90.8	15.1A 16.6A	31.1 26.3
		1/4t	84.4 84.5	90.5 90.5	14.0A 15.1A	27.8 25.5
		1/2t	84.6 84.5	90.4 90.5	15.7A 15.7A	30.3 30.3
集 電 線 金 物	L	表層	85.2 84.4	91.5 91.1	16.9A 13.7A	27.6 25.7
		1/4t	85.2 84.9	91.2 91.3	15.7A 15.4A	34.5 31.7
		1/2t	84.5 84.6	90.9 90.8	15.4A 15.4A	33.9 34.5
	T	表層	85.1 84.9	91.8 91.6	14.9A 16.0A	26.9 27.0
		1/4t	84.7 84.5	90.8 91.1	18.3A 18.3A	32.8 36.7
		1/2t	85.9 85.8	92.4 92.5	17.1A 18.0A	39.5 38.5
	AMS 4907C (板厚 1~3インチ)		80.9 以上	87.9 以上	10 以上	—

Table 3 Result of Tensile Test of Weld Metal

供試体	採取位置	特 性		引張強さ (kgf/mm^2)	伸 び (%)	絞 り (%)
		0.2%耐力 (kgf/mm^2)	引張強さ (kgf/mm^2)			
赤道継手の溶接 金 属	定常部 A	表 層	88.0	97.5	12.9A	20.7
		1/4t	89.3	99.4	11.4B	16.2
		1/2t	87.9	98.2	10.7A	16.7
	定常部 B	表 層	88.1	98.2	12.1B	23.3
		1/4t	88.6	98.4	11.4A	22.4
		1/2t	89.4	98.9	11.4A	21.2
	始末端	表 層	88.6	99.1	12.9A	24.6
		1/4t	88.8	98.7	14.3B	25.9
		1/2t	88.8	98.3	11.4A	23.3
はめ込み継手の (集合電線金物) 溶 接 金 属	定常部	表 層	87.5	97.4	12.9B	20.3
		1/4t	86.6	97.1	12.1A	20.7
		1/2t	85.2	94.9	11.4A	18.5
	始末端	表 層	90.8	99.2	10.7A	19.3
		1/4t	89.3	99.2	9.3A	15.3
		1/2t	89.4	98.8	10.7A	18.9

備考：試験片寸法 $\varnothing 4.0\text{ mm}$ G.L.=14mm

また、側曲げについてはさらに $10\text{ tR} \times 180^\circ$ まで曲げ試験を実施したが、いずれも良好であった。電子ビーム溶接ではビード幅が狭く、曲げ試験においてはビード幅の広い GTA 溶接よりも有利であると考えられる。

Table 4 Result of Tensile Test of Welded Joint

供 試 体	採取位置	特 性		引張強さ (kgf/mm^2)	破 断 位 置
		0.2%耐力 (kgf/mm^2)	引張強さ (kgf/mm^2)		
赤道継手部	定常部 A	表層	94.2	94.2	母 材
		1/4t	94.0	94.0	母 材
		1/2t	93.7	93.7	母 材
		全厚 (2分割)	99.0	99.0	母 材
			98.7	98.7	溶接部
	定常部 B	表層	94.3	94.3	母 材
		1/4t	94.0	94.0	母 材
		1/2t	92.1	92.1	母 材
	始末端	表層	94.3	94.3	母 材
		1/4t	93.7	93.7	母 材
		1/2t	92.6	92.6	母 材
はめ込み継手部	定常部	表層	92.8	92.8	母 材
		1/4t	91.8	91.8	母 材
		1/2t	92.3	92.3	母 材

Table 5 Result of Bend Test of Equator Joint

試験条件 採取位置		側曲げ試験		表曲げ	裏曲げ	
		12 tR×105°	10 tR×180°	12 tR×105°	12 tR×105°	
定常部	A	板厚 表面側	良 好	良 好	良 好	—
			良 好	良 好		
		板厚 中央部	良 好	良 好	—	—
			良 好	良 好		
		板厚 裏面側	良 好	良 好	—	良 好
			良 好	良 好		
	B	板厚 表面側	良 好	良 好	良 好	—
			良 好	良 好		
		板厚 中央部	良 好	良 好	—	—
			良 好	良 好		
		板厚 裏面側	良 好	良 好	—	良 好
			良 好	良 好		

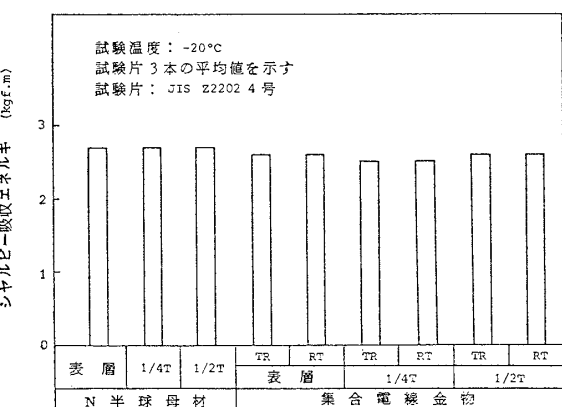
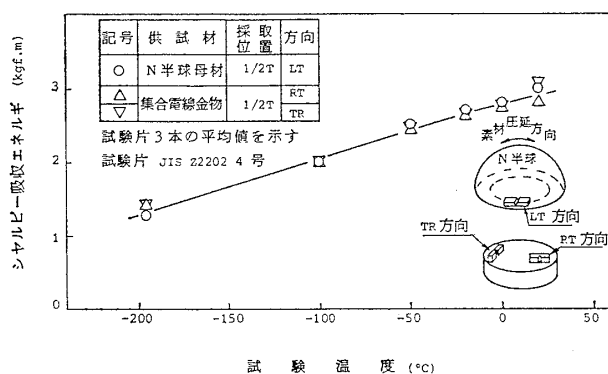


Fig. 3 Result of V notch Charpy Impact Test (Base Plate)

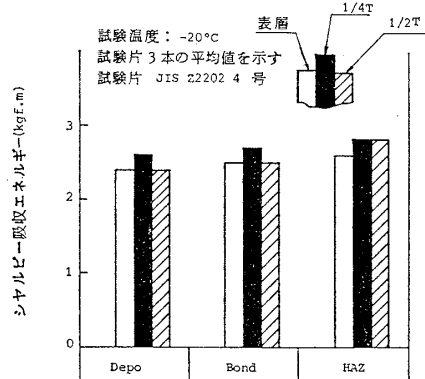
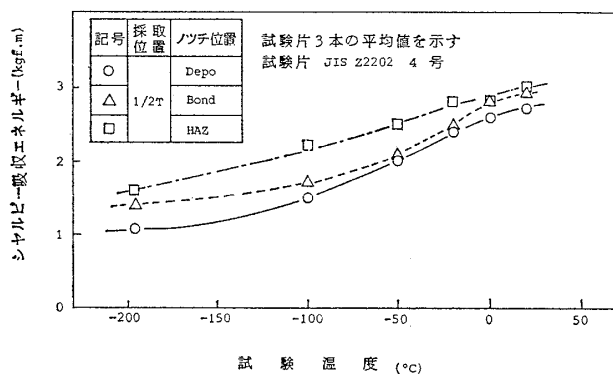


Fig. 4 Result of V notch Charpy Impact Test (Welded Joint)

4.3 じん性

4.3.1 シャルピー衝撃特性

Ti-6Al-4VELI 合金は、一般の鉄鋼材料のような低温域での遷移現象が認められないことから AMS 等の規格では特に規定されていないので参考として試験を実施した。その結果を Fig. 3 および Fig. 4 に示す。母材では表層, 1/4t, 1/2t の採取位置および採取方向による差は少ない。溶接部のシャルピー衝撃試験結果は HAZ, Bond, 溶接金属の順に僅かではあるがシャルピー吸収エネルギーが低下した。

4.3.2 DT 特性

DT 試験結果を Fig. 5 に示す。DT 吸収エネルギーは温度低下と共に漸減し、母材と溶接金属ではほぼ同じ

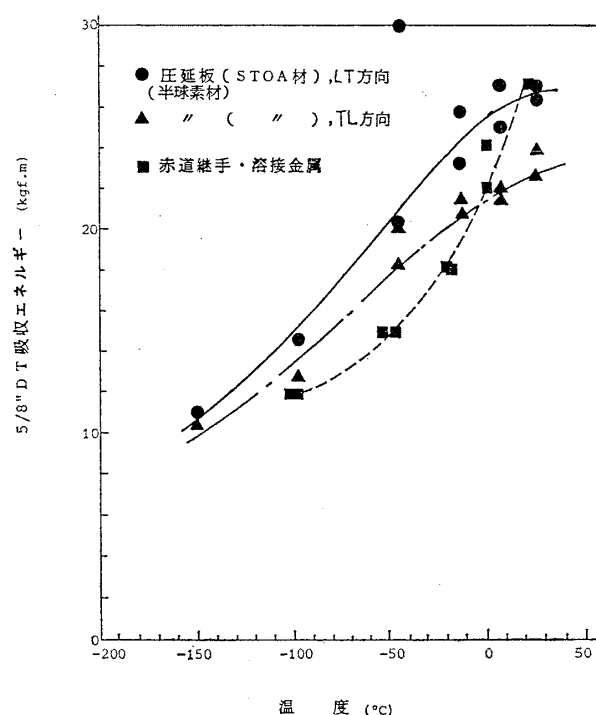


Fig. 5 Result of DT Test

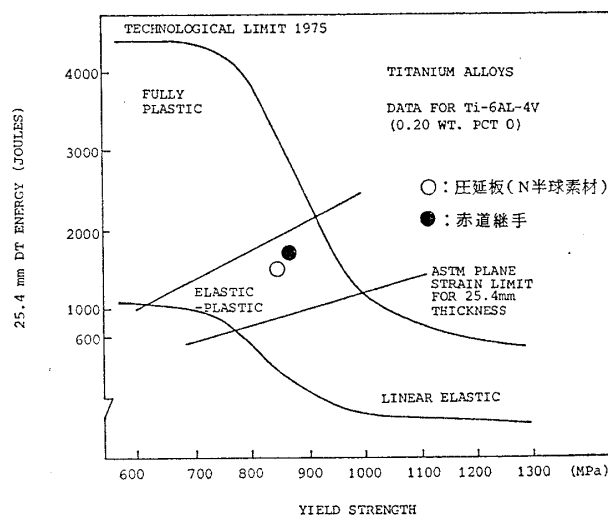


Fig. 6 RAD

値であった。チタン合金の圧延板 (T 方向, 1/2t) について, 5/8 インチと 1 インチタイプの 2 種類 DT 試験 (18°C) を実施したところ, それぞれ 23.5 kgf・m と 154.0 kgf・m (2 本の平均値) であった。このことより

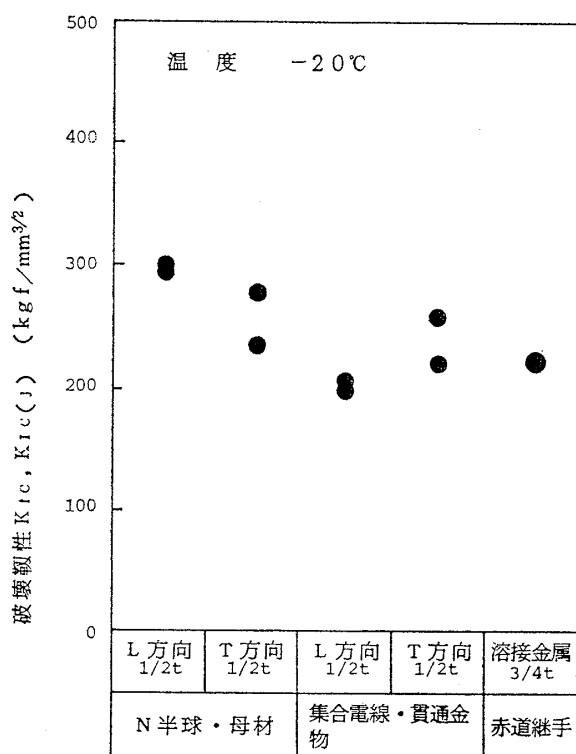


Fig.7 Result of K_{Ic} Test

Table 6 Critical Defect Size

作用応力 レベル	き裂長さ (2C) (a/2C=0.25)	備 考
σ_y	8.2mm	
1/3 σ_y	83.1mm	
1/10 σ_y	937mm	EB 溶接残留応力は SR により 約 3kgf/mm ² 以下

(引張応力場: OPENING MODE)

$$a_{cr} = \frac{Q}{1.21\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_a} \right)^2$$

a_{cr} : 限界欠陥深さ (mm)
 Q : 欠陥形状パラメータ
 σ_a : 作用応力 (kgf/mm²)

Table 7 Critical Defect Size of SCC

作用応力 レベル	き裂長さ (2C) (a/2C=0.25)	備 考
σ_y	4.7mm	
1/3 σ_y	46.7mm	
1/10 σ_y	529mm	EB 溶接残留応力は SR により 約 3kgf/mm ² 以下

(引張応力場: OPENING MODE)

$$a_{cr} = \frac{Q}{1.21\pi} \left(\frac{K_{Isc}}{\sigma_a} \right)^2$$

a_{cr} : 限界欠陥深さ (mm)
 Q : 欠陥形状パラメータ
 σ_a : 作用応力 (kgf/mm²)

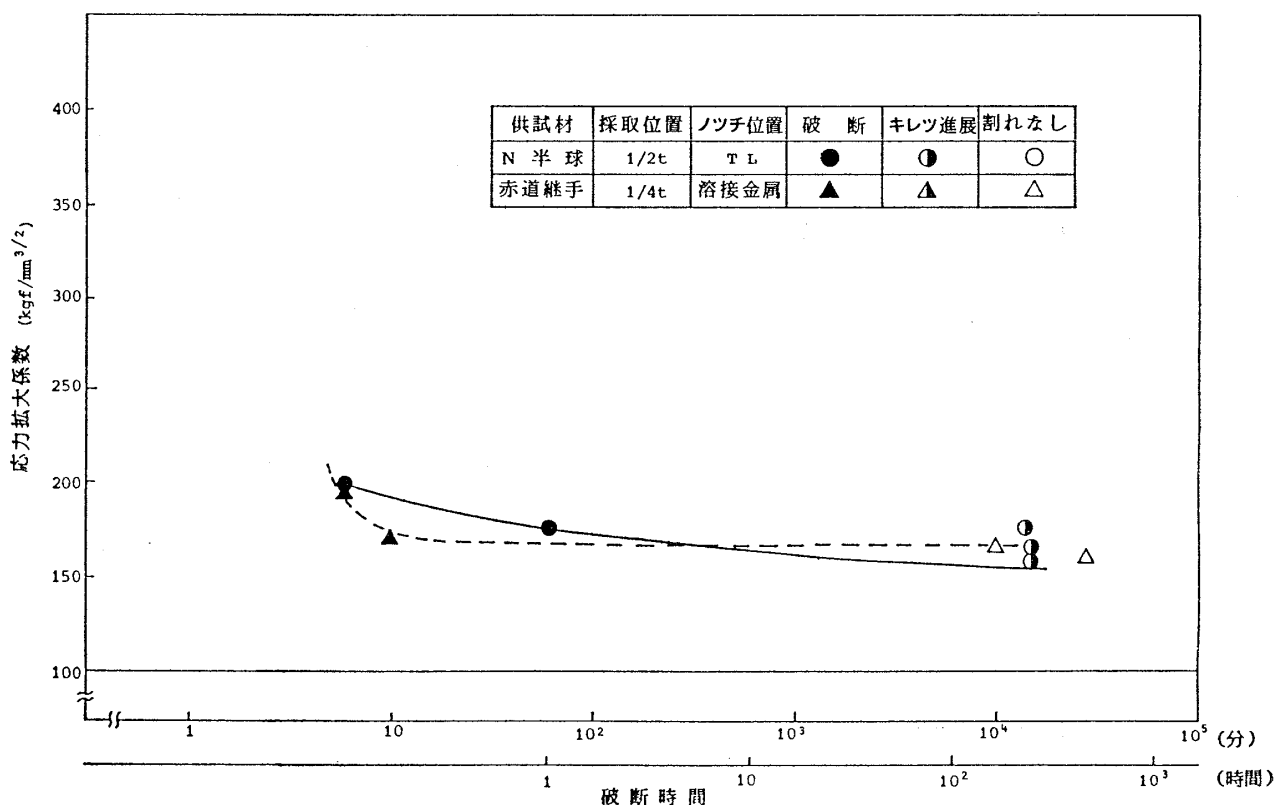


Fig.8 Result of SCC Test

今回得られた室温のDT吸収エネルギーを6.55倍してRAD線図上にプロットするとFig.6となる⁹⁾。今回のチタン合金母材および赤道継手のDT吸収エネルギーは弾塑性破壊の領域にあり、脆性破壊の領域にはないことが確認できた。

4.3.3 破壊じん性

静的破壊じん性試験結果をFig.7に示す。静的破壊じん性値はN半球母材および赤道継手共に -20°C で210

$\text{kgf/mm}^{3/2}$ 以上であった。いま K_{IC} を $200 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ として、限界欠陥寸法を求めるとTable6のごとくなる。チタン合金耐圧殻はPWHTを実施することから後述するように残留応力は溶接部でも 3 kgf/mm^2 以下に低下する。また水圧による応力は圧縮側であり、作用応力レベルとしては $1/10 \sigma_y$ をとれば十分と考えられる。この応力における許容き裂長さは940mmであり、非破壊試験によって十分検出可能な寸法である。

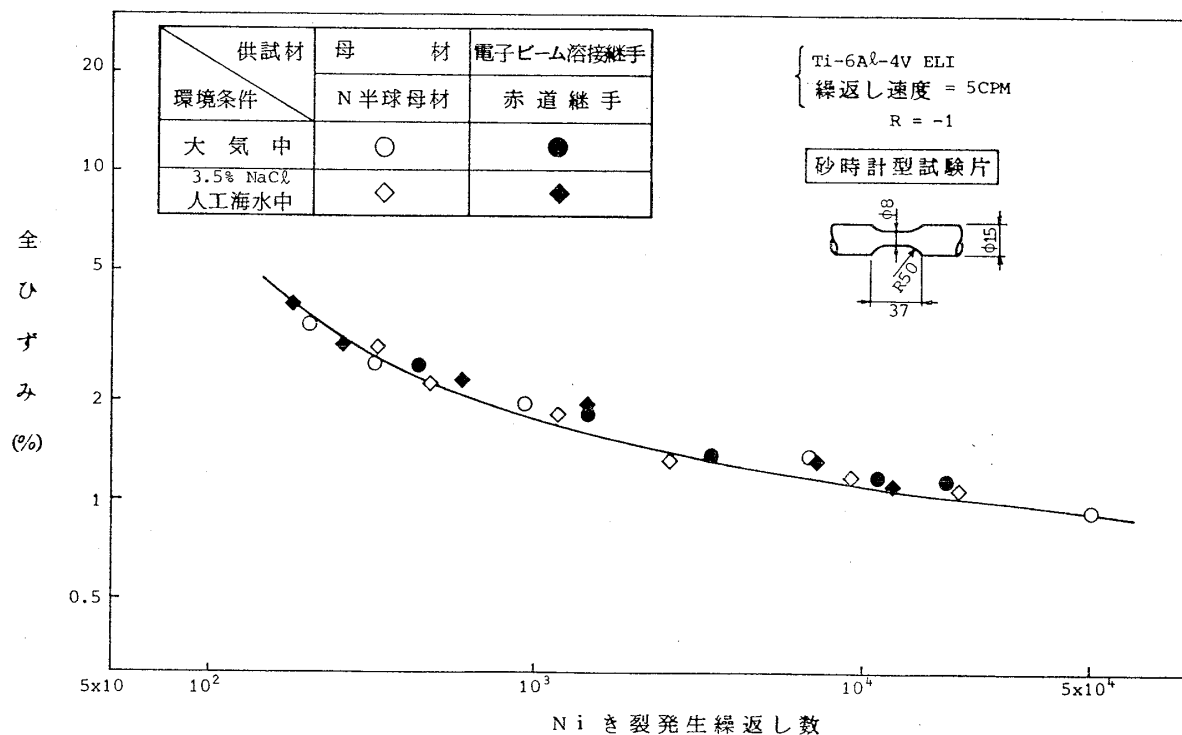


Fig.9 Result of Low Cycle Fatigue Test

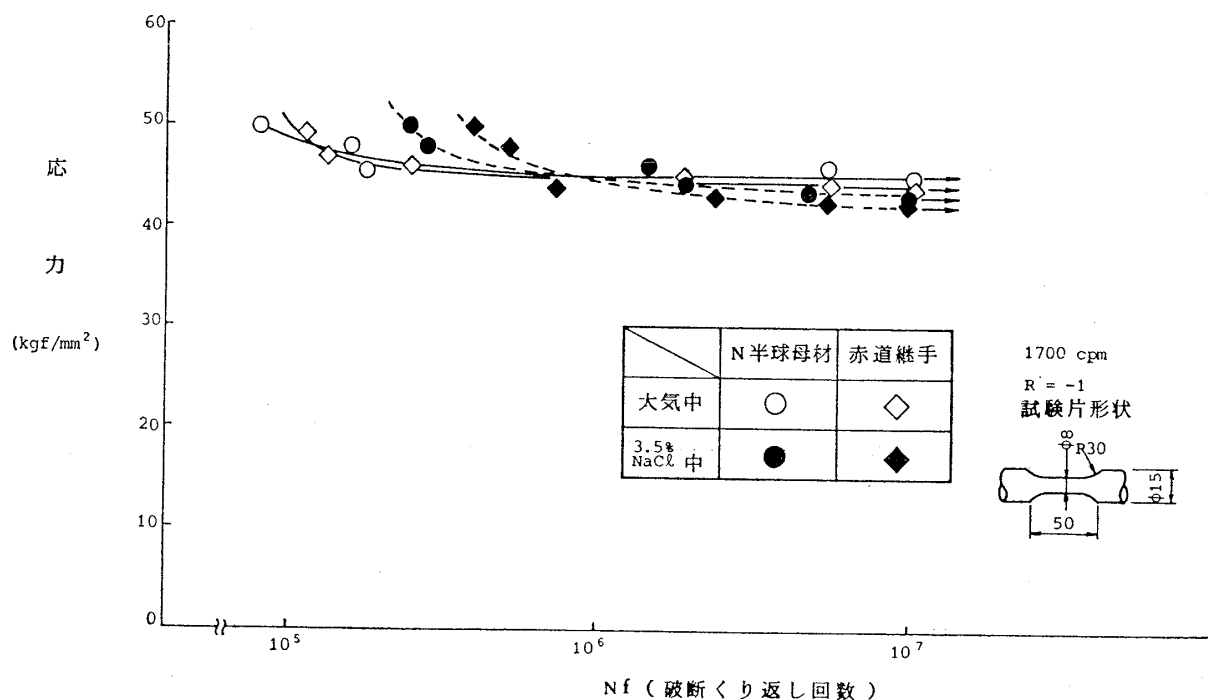


Fig.10 Result of High Cycle Fatigue Test

4.4 応力腐食割れ感受性

Fig. 8 に応力腐食割れ感受性試験結果を示す。チタン合金は非常に短時間で応力腐食割れ感受性を示すことが知られており¹⁰⁾、今回最長 480 時間までの試験を行った。その結果、3.5% NaCl 中の $K_{I SCC}$ 値はN半球母材で $160 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 、溶接金属で $165 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ となった。 $K_{I SCC}$ を $150 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ として限界欠陥寸法を求めると Table 7 のごとくなる。4.3.3 節で述べたように作用応力レベルを $1/10 \sigma_y$ とすると、許容き裂長さは 530 mm となり、非破壊検査によって十分検出できる寸法である。

4.5 疲労特性

4.5.1 低サイクル疲労特性

低サイクル疲労試験結果を Fig. 9 に示す。低サイクル

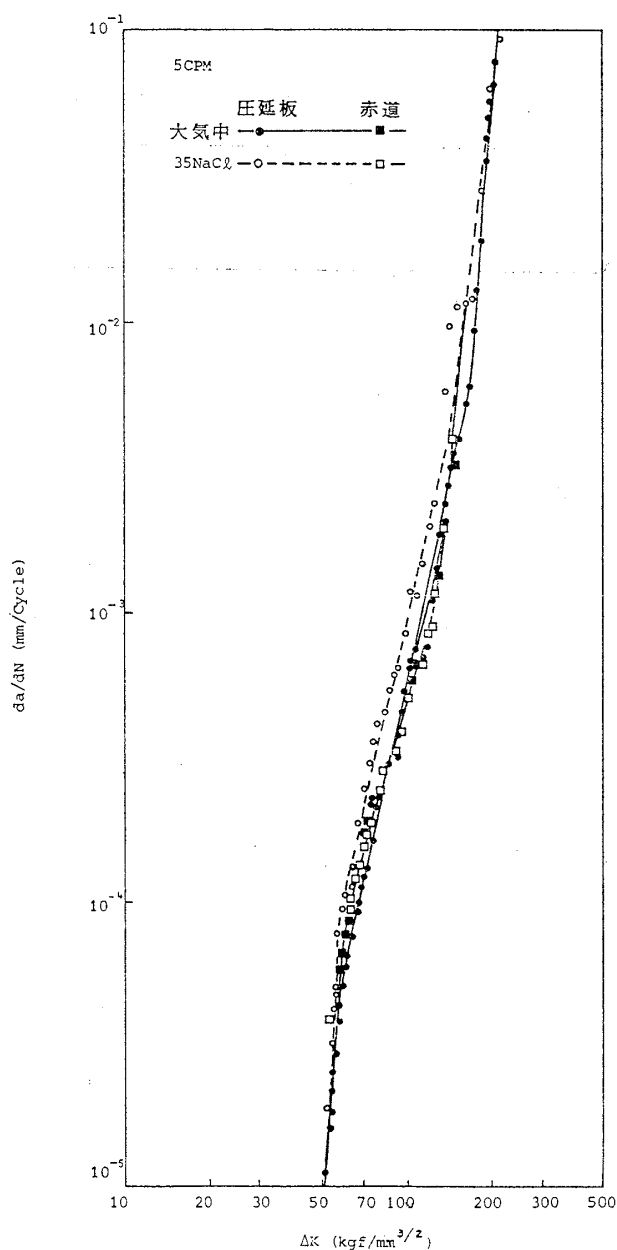


Fig. 11 Result of Fatigue Crack Propagation Test

疲労強度は大気中と 3.5% NaCl 中ではほとんど変わらず、また母材と赤道継手でもほとんど変わらなかった。しんかい 2000 の耐圧殻の設計では(膜応力+曲げ応力)の最大圧縮応力を $3/4 \sigma_y$ 、すなわち圧縮歪を 0.53% に、局部最大圧縮応力を σ_y 、すなわち圧縮歪を 0.70% としている。また潜水船の潜航回数を約 1000 回と仮定すると、Fig. 8 より 1000 回の繰返し数におけるき裂発生全歪範囲は 1.75%、5000 回のそれは 1.21% であり、設計値に対して安全側にあることがわかる。

4.5.2 高サイクル疲労特性

高サイクル疲労試験結果を Fig. 10 に示す。低サイクル疲労同様、高サイクル疲労強度も大気中と 3.5% NaCl 中ならびに母材と赤道継手でほとんど差がなかった。 10^7 回における疲労強度は 42 kgf/mm^2 以上で引張強さの規格値の 48% であった。チタン合金では 3.5% NaCl 中でも腐食が少ないために、高サイクル疲労強度は大気中と 3.5% NaCl 中で差がなかったものと考えられる。

4.5.3 疲労き裂伝播特性

疲労き裂伝播試験結果を Fig. 11 に示す。き裂伝播速度は母材と赤道継手で差がなく、また大気中と 3.5% NaCl 中とでも差がなかった。これらの疲労き裂伝播特性は以前に調査した値とほとんど差がなかった⁴⁾。

4.6 硬さ分布

赤道溶接継手の硬さ分布を Fig. 12 に、溶接金属内部の硬さ分布を Fig. 13 に示す。溶接継手の硬さは表層と板厚中央部で差がなく、溶接金属内部もほぼ一定の硬さであった。詳細には溶接金属が $H_V 330 \sim 360$ 、HAZ が $H_V 290 \sim 350$ 、母材が $H_V 290 \sim 325$ であり、特に著しい硬化や軟化はみられなかった。

4.7 マクロ組織およびミクロ組織

母材と溶接継手のマクロ組織およびミクロ組織を Fig. 14~Fig. 17 に示す。母材、溶接継手共にマクロ組織は欠陥のない健全な組織であった。母材のミクロ組織は等軸 α 粒と変態 β 粒との混合組織であり、溶接金属のミクロ組織は針状 α 組織であった。

4.8 化学分析

溶接金属の化学分析試験結果を、母材と比較して Table 8 に示す。溶接金属の化学組成は母材とほぼ同じであり、電子ビーム溶接による元素の飛散はなかった。

4.9 残留応力分布

N半球母材、赤道継手およびはめ込継手の残留応力分布(内外面の平均値)を Fig. 18~Fig. 20 に示す。 $650^\circ\text{C} \times 5 \text{ hr.}$ の PWHT を実施しているために溶接部も残留応力はほとんど認められず、 3 kgf/mm^2 以下であった。AsWeld で残留応力を測定した結果では、最大 65 kgf/mm^2 (溶接金属の溶接線方向) となっており、溶接金属は 97~99% の残留応力が除去された。この値は以前に

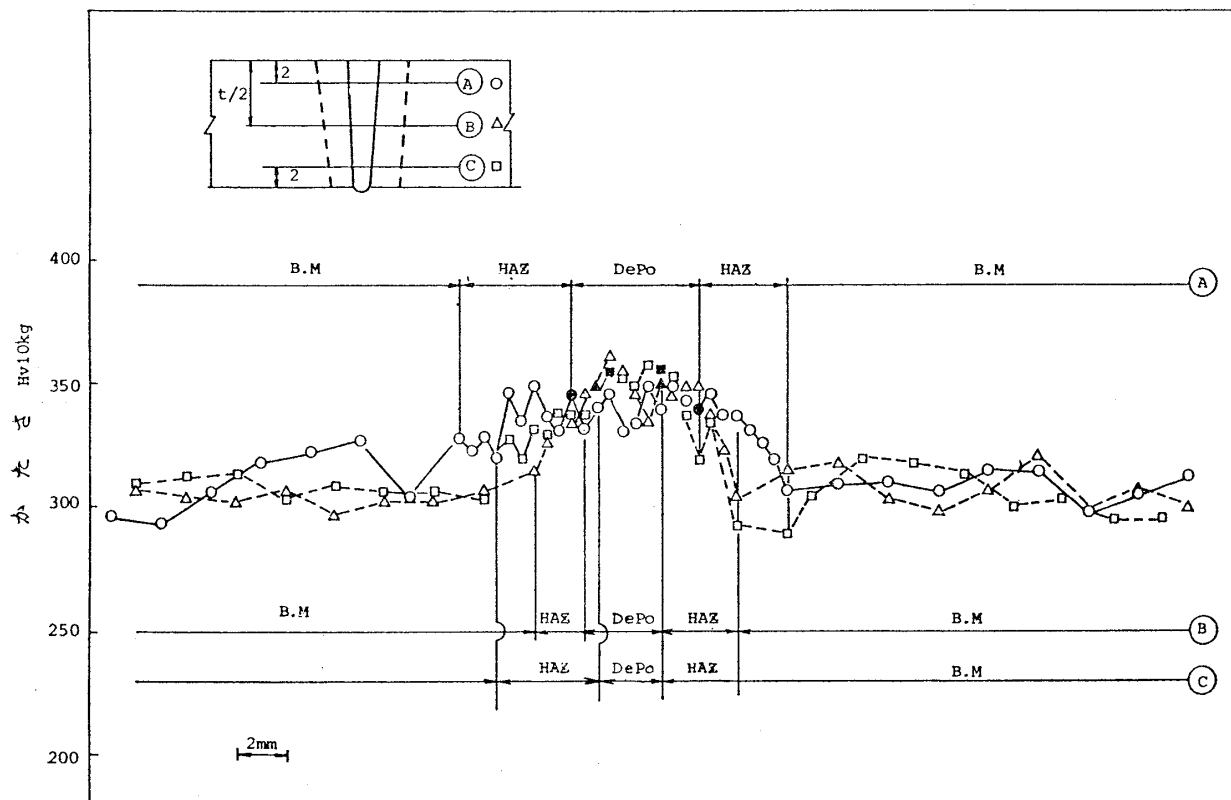


Fig. 12 Hardness Distribution of Welded Joint

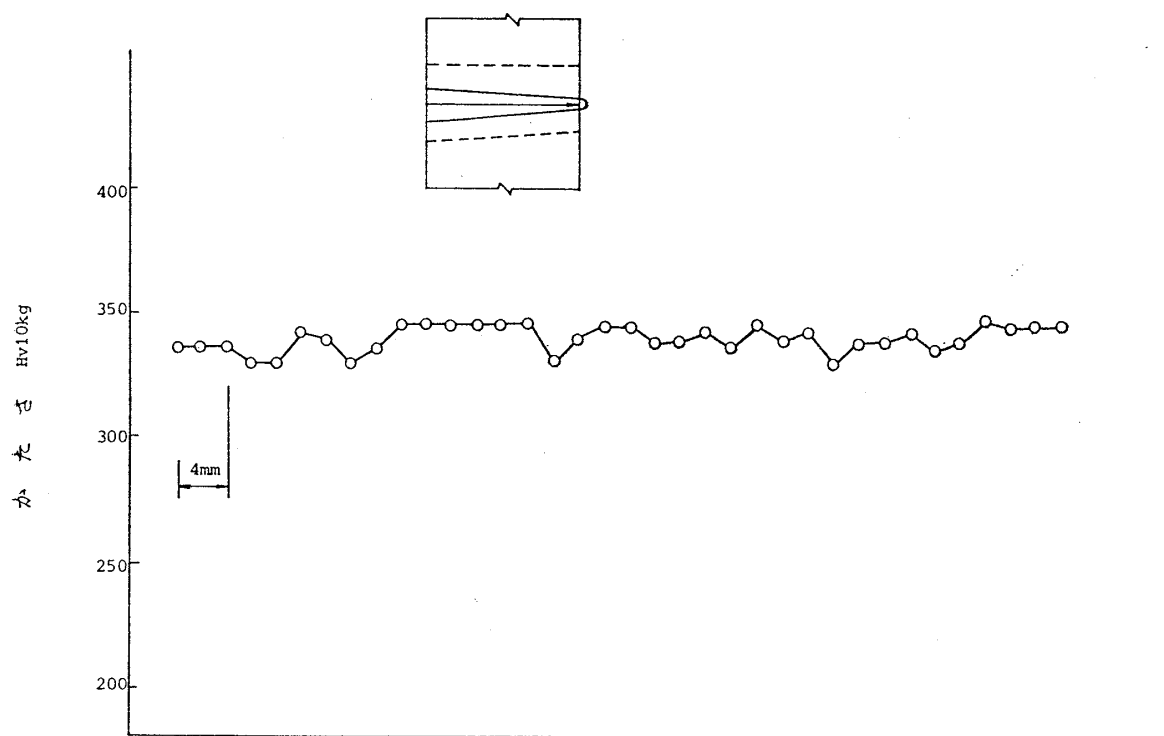
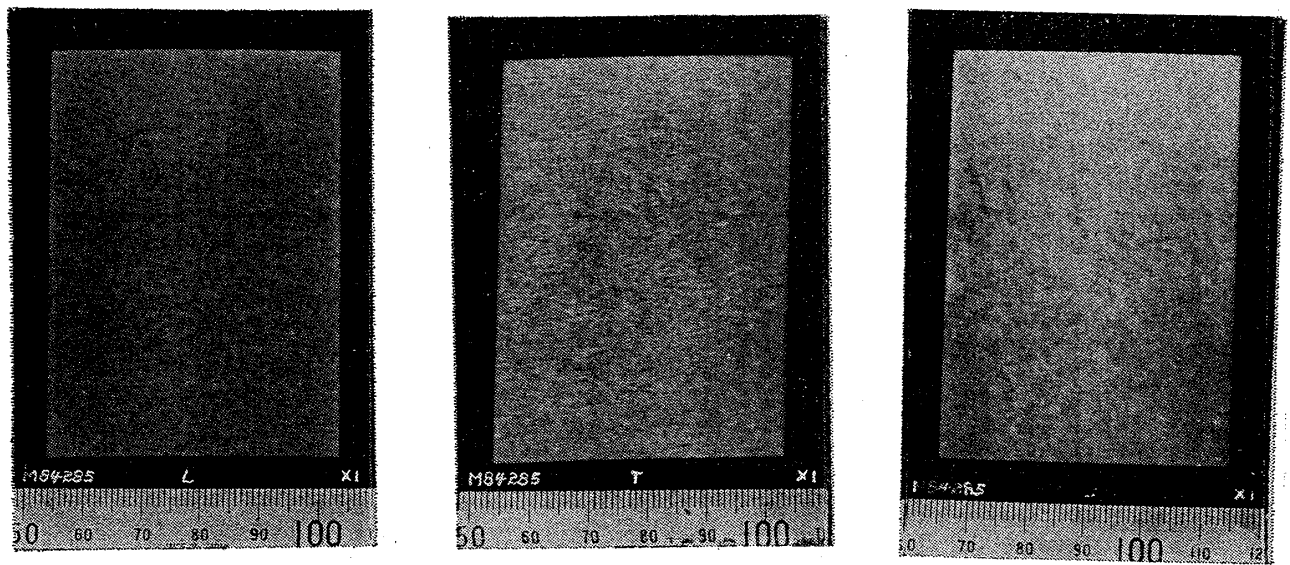


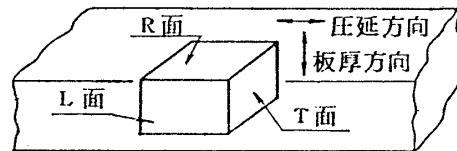
Fig. 13 Hardness Distribution of Weld Metal



(L 面)

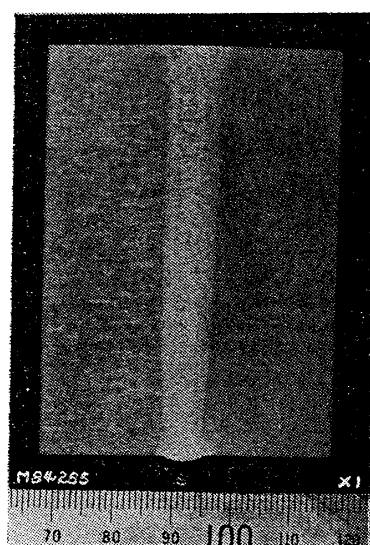
(T 面)

(R 面)

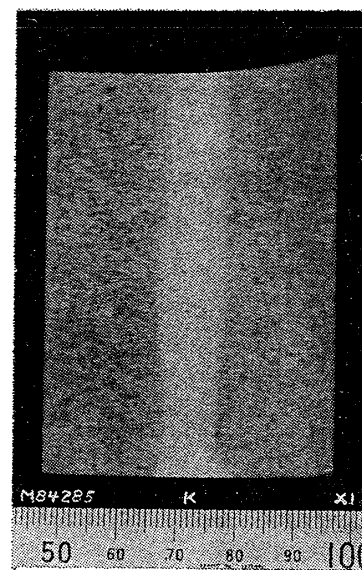


*) エッチング液
(硝酸)

Fig.14 Macro Structure (Base Plate)



(赤道継手)



(はめ込み継手)

集合電線金物

Fig.15 Macro Structure (Welded Joint)

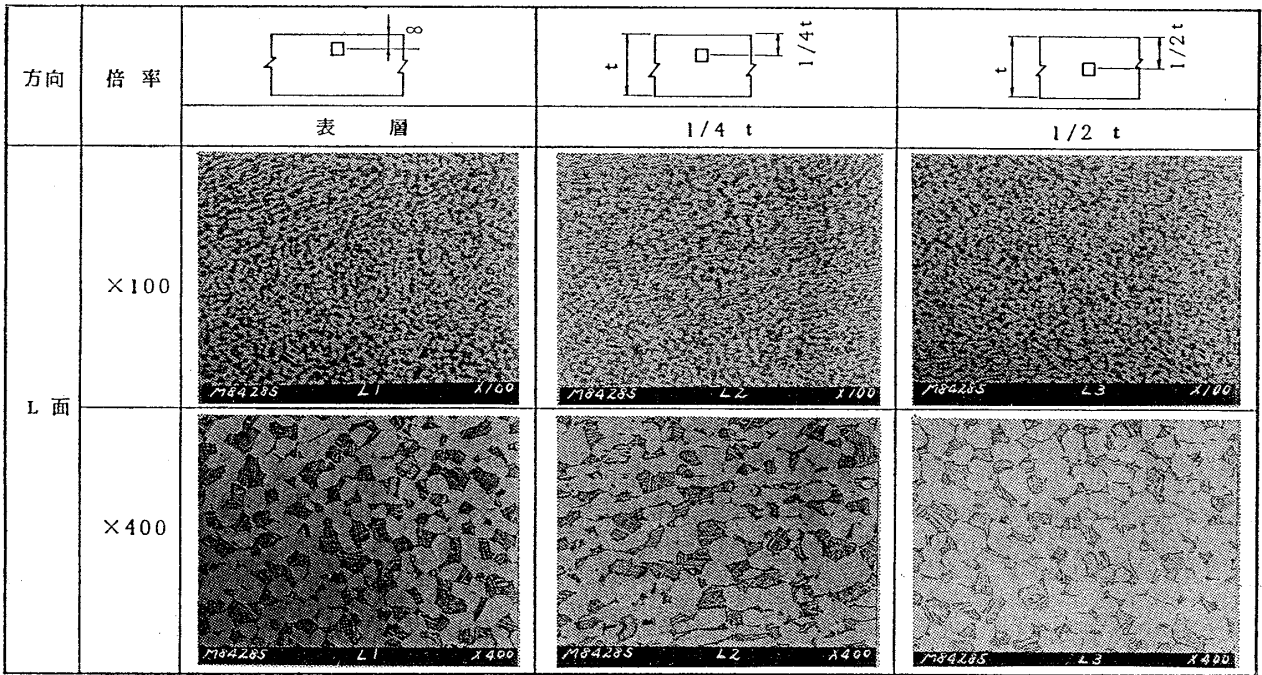


Fig.16 Micro Structure (Base Plate)

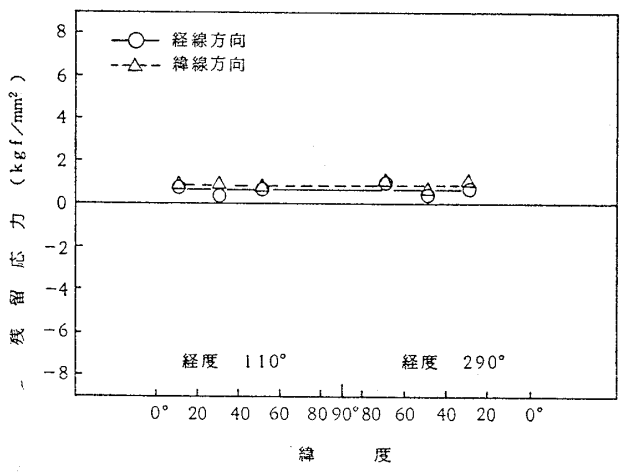


Fig.18 Distribution of Residual Stress (N-hemisphere)

Table 8 Chemical Compositions

		WC (%)						
		Al	V	Fe	C	O	H	N
仕様値		5.50 6.50	3.50 4.50	0.25 以下	0.08 以下	0.13 以下	0.0125 以下	0.05 以下
母材	N 半球	6.42	4.19	0.198	0.011	0.101	0.0052	0.0032
	貫通金物	6.33	4.16	0.210	0.010	0.092	0.0023	0.0033
溶接金属	赤道継手	6.37	4.16	0.198	0.014	0.093	0.0047	0.0031
	はめ込み継手	6.25	4.22	0.209	0.012	0.094	0.0018	0.0034

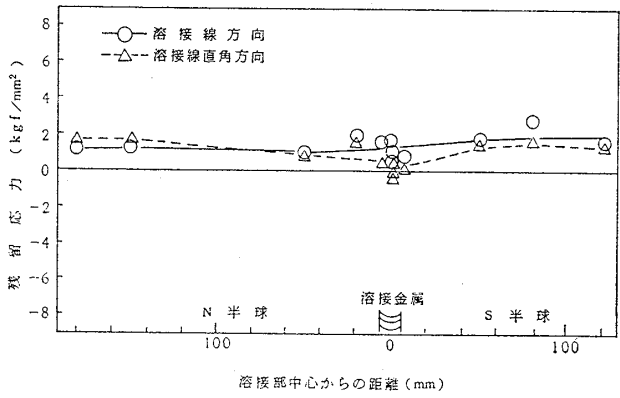


Fig.19 Distribution of Residual Stress (Equator Joint)

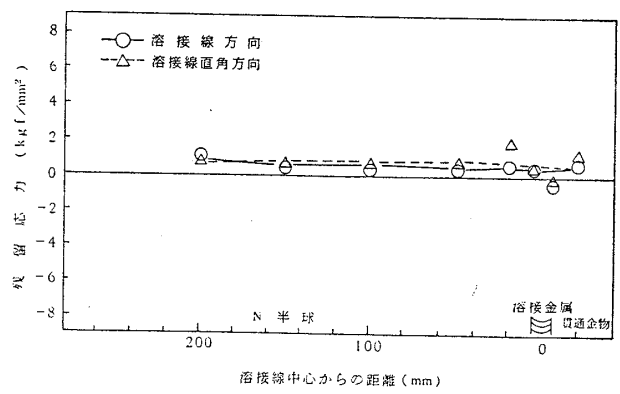


Fig.20 Distribution of Residual Stress (Insert Joint)

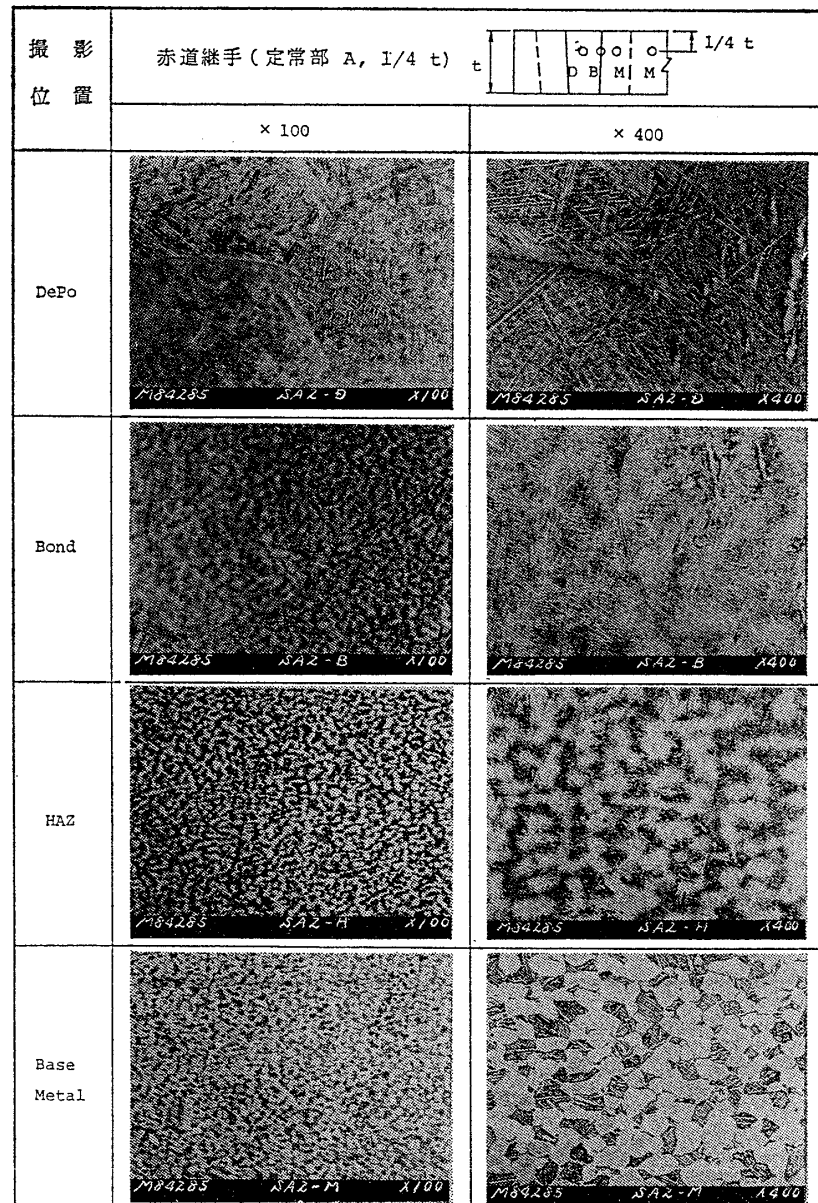


Fig.17 Micro Structure (Equator Joint)

実施した Relaxation 試験結果と良く一致した⁶⁾。

以上により今回の実物大模型では PWHT を実施することにより、球殻全体の残留応力をほぼ完全に除去できたことが明らかになった。

5. 結 言

著者らは“しんかい 2000”に続く、さらに大深度潜水調査船の計画に対して、チタン合金を用いた耐圧殻に関する研究を進めてきた。今回これらの要素技術を総合的に確認するために実物大耐圧殻模型の製作とその解体試験を実施した。得られた結果をまとめると次の通りである。

(1) 超厚板チタン合金板の製造技術、チタン合金半球殻の熱間成形加工技術、耐圧殻の熱処理技術、半球殻の3次元機械加工技術、電子ビーム溶接技術および非破

壊検査技術を確立し、真球度 1.003 のほぼ真球に近い 6 Al-4 VELI チタン合金製実物大耐圧殻模型を製作することができた。

(2) 耐圧殻模型の母材部および溶接部を解体して、引張特性、曲げ特性、じん性、応力腐食割れ感受性、疲労特性、残留応力分布などについて調査した結果、いずれも良好な値であり深海潜水調査船の耐圧殻として所要の性能を満足していることを確認した。

以上の結果、大深度潜水調査船耐圧殻へのチタン合金の適用が可能になったものと考えられる。

この研究の実施にあたり御指導を賜った、山本善之東京大学名誉教授・横浜国立大学教授、佐藤邦彦大阪大学教授、木村啓造工学院大学教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 下山仁一, 他: 深海潜水調査船耐圧殻の溶接工作法に関する研究, 三菱重工技報, Vol.13, No. 4 (1976).
- 2) 遠藤倫正, 他: 電子ビーム溶接の深海潜水船耐圧殻への適用の研究, 日本造船学会論文集, 第 149 号 (1981).
- 3) 遠藤倫正, 他: 深海潜水船耐圧球殻の実物大規模による熱処理法に関する実験的研究, 日本造船学会論文集, 第 152 号 (1982).
- 4) 森鼻英征, 他: 深海潜水調査船用チタン合金の強度特性とその評価, 三菱重工技報, Vol.15, No. 6 (1978).
- 5) 遠藤倫正, 他: 深海潜水調査船用チタン合金製耐圧容器, 三菱重工技報, Vol.17, No. 5 (1980).
- 6) 笹野量一郎, 他: 厚板 Ti-6 Al-4 V 合金の電子ビーム溶接に関する基礎研究, 三菱重工技報, Vol. 20, No. 2 (1983).
- 7) 遠藤倫正, 他: 深海潜水調査船チタン合金耐圧殻の工作法に関する研究 (第 1 報), 日本造船学会論文集, 第 156 号 (1984).
- 8) Aerospace Material Specification 4907 C : Titanium Alloy Sheet, Strip, and Plate 6 Al-4 V, Extra Low Interstitial Annealed.
- 9) T. W. Crooker : Engineering Fracture Mechanics, Vol.5 (1973) p. 35.
- 10) B. F. Brown : Stress-Corrosion Cracking in High Strength Steels and in Titanium and Aluminum Alloys, NRL (1972).