

「しんかい 6500」耐圧殻の設計・製作

高川 真一*¹ 木内 大助*¹ 高橋 憲二*¹
山内 裕*² 井上 和也*² 西村 孝*³

潜水調査船の耐圧殻は、潜航時の水圧に対して乗員の安全を確保することから十分な信頼性と耐圧強度が要求されるとともに、潜水調査船の性能確保の面から最大限の重量軽減が要求され、大深度潜水調査船の耐圧殻の設計・製作にあたっては、信頼性の高い高強度材料の選択、これらの材料に適合した設計手法、使用材料及び高度な要求品質に対応できる工作技術の適応が不可欠となる。

6500m 潜水調査船「しんかい6500」の場合海洋科学技術センターでは国内での大型材料の製造技術、実物大規模の耐圧殻模型による製造技術の開発実績・圧壊強度を中心とする設計技術の開発状況を考慮し、最終的に縮尺模型による繰り返し加圧、圧壊試験によって総合的な確認を行った後、チタン合金 (Ti-6% Al-4% V ELD) 製耐圧殻の採用を決定した。

本論文ではチタン合金の採用から最終試験に至るまでの耐圧殻の開発について述べる。

キーワード：耐圧殻，チタン合金，3次元機械加工，電子ビーム溶接

Design and Construction of Spherical Pressure Hull of “SHINKAI 6500”

Shinichi TAKAGAWA*⁴ Daisuke KIUCHI*⁴
Kenji TAKAHASHI*⁴ Yutaka YAMAUCHI*⁵
Kazuya INOUE*⁵ Takashi NISHIMURA*⁶

*¹ 深海開発技術部

*² 三菱重工業(株)神戸造船所

*³ (株)神戸製鋼所

*⁴ Deep Sea Technology Department

*⁵ Mitsubishi Heavy Industries, Inc., Kobe Shipyard

*⁶ Kobe Steel Co, Ltd.

The pressure hull of a research submersible is required to have enough reliability and strength to insure the safety of the crew against the water pressure, and at the same time lightness in weight is also required for good performance of the submersible. It is therefore very important in the design and construction to select the reliable and high strength material, to apply an appropriate design method fit to these material and to apply a minute machining technologies for required qualities.

JAMSTEC has decided to use spherical pressure hull made of titanium alloy (Ti-6Al-4V ELI) for the "SHINKAI 6500" submersible after confirming the characteristics of the material by pressure test of scale models considering production capability of the material and the development of design and machining technologies.

This paper describes the development of the pressure hull from the selection of material to the final test.

Key word; Spherical Pressure Hull, Titanium Alloy, Three Dimensional Machining, Electron Beam Welding

1 はじめに

潜水調査船のように水中を自航する運動体では、船体をできる限り小型軽量にすることが非常に重要である。これは、保有できるエネルギーに限られていて調査地点まで自力で移動できないために支援母船に搭載されて運搬され、調査地点で着水あるいは揚収されるが、荒海の下でこのような着水・揚収を行うには、小型・軽量が必要不可欠な要素であることが第1の理由である。また海中・海底で効率的な調査を行うには機敏に動き回る必要があるが、大型ではこのような機敏さを与えることはできず、可能な限り小型にしなければならない。しかもこの小型化に際しては、何か単一の構成要素の設計を緩くして大型化を許すと関連するその支持部材や所要推進力を得るための推進器、エネルギー源である電池、そしてそれらの支持部材その他諸々のものが大きくなってしまいますので、すべてにおいて厳しく小型化を進めなければならない。

有人潜水調査船のいろいろな部品の中で最も大きく重いのは、人間が乗り込む耐圧殻であり、この小型・軽量化は潜水調査船全体の小型・軽量化に大きな影響を与える。そこで6500m潜水調査船「しんかい6500」の開発にあたっては、この耐圧殻をいかに小型・軽量に作り上げるかが非常に重要な鍵となってきた。

大深度潜水調査船の耐圧殻は乗員の安全を確保

し、かつ小型軽量を図るという面から、球形が最も適切であるが、人間が乗り込むためにむやみに小さくすることはできない。そこで実物大模型を用いた人間工学的研究から、「しんかい6500」の耐圧殻は内径が2mの球形とすることとした。そしてこのように大きさが決められたことから、問題はいかに軽量にするかということに絞られてきた。

これを実施するには、信頼性が高く、比強度(0.2%耐力÷比重)の高い材料を選択して用いること、贅肉が極力少なくなるようなこの材料に適合した設計手法ならびに工作技術の適用が不可欠となる。

そこで「しんかい6500」の耐圧殻の開発にあたり、海洋科学技術センターでは国内での大型材料の製造技術、実物大規模の耐圧殻模型による製造技術の開発実績、圧壊強度を中心とする設計技術の開発状況を考慮して、最終的に縮尺模型による繰り返し加圧、圧壊試験によって総合的な確認を行った後、チタン合金(Ti-6Al-4V ELI)製耐圧殻の採用を決定した。

以下に、耐圧殻の計画概要、使用材料の選定、設計、製造、試験の結果について報告する^{1)~7)}。

2 耐圧殻の概要

「しんかい6500」の耐圧殻は内直径2000mmの球形であり、天頂部に人間の出入り用の直径500mmの

ハッチ, 下側に内径120mmの覗き窓を3個有し, また上部後方に耐圧殻内外間で電力または電気信号をやりとりする電線貫通部をまとめた集合電線貫通部を2個有する。

覗き窓や集合電線貫通部は, 耐圧殻素材からそのまま削り出しで作るのではなく, 別途製作した窓枠(覗き窓コーミング)や集合電線貫通金物を嵌め込み溶接するものである。

耐圧殻の概要を図1に示す。

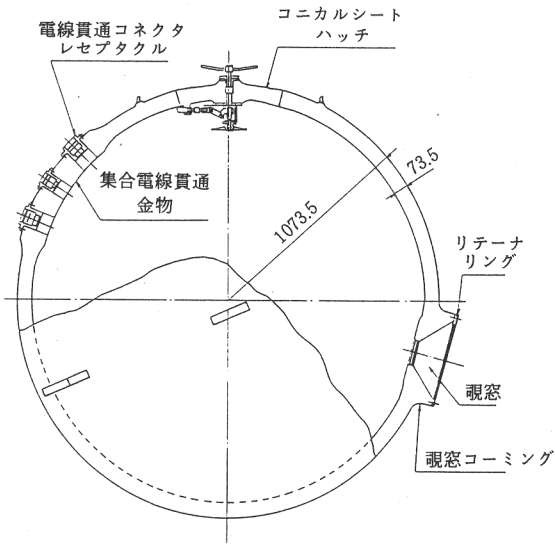


図1 耐圧殻概略形状図

Fig.1 Structure of Pressure Hull

3 使用材料

耐圧殻の使用材料はチタン合金を採用した。チタン合金は鋼材に比べて比重が小さく, 比強度(0.2%耐力÷比重)が大きくなるため, 耐圧殻に使用した場合, 重量を大幅に軽減できるメリットがある。また, チタン合金は鋼材と違って海水に侵されないという特徴があるため, 「しんかい2000」で設けていた厚さ1mmの腐食代を取っておく(強度設計上必要な板厚に腐食代1mm分を増厚する)必要がなく, その分軽量化ができるというメリットもある。

表1にチタン合金Ti-6Al-4V ELI及び超高張力鋼10Ni-8Co鋼を深海潜水調査船耐圧殻に使用した場合の重量試算例を比較して示すが, チタン合金を採用した場合は, 高張力鋼を使用した場合と比べ, 耐圧殻重量を20%程度軽減できることになる。

4 耐圧殻の設計

4.1 設計条件

耐圧殻の設計条件を以下に示す。

- (1) 最大潜航深度における圧力は, 6500m相当の深度圧とし, $680\text{kg}/\text{cm}^2$ とした。
- (2) 設計圧壊圧力は, 日本海事協会鋼船規則の規定に従い, 最大潜航深度 $\times 1.5 + 300\text{m}$ 相当の深度圧, すなわち $1058\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上とした。
- (3) 使用材料のチタン合金の0.2%耐力は, 準拠規格AMS4907の規定によって $81\text{kg}/\text{cm}^2$ とした。

表1 使用材料による耐圧殻重量の比較

Table 1 Estimation of Pressure Hull Weight for Material Composition

項目 材質	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (kgf/mm^2)	比重 γ (g/cm^3)	比強度 $\sigma_{0.2}/\gamma$	耐 圧 殻		
				板厚 注1) (mm)	重 量 (ton)	重量差 (ton)
Ti-6 AL-4 ELI チタン合金	81 以上	4.42	18.3	73.5	4.39	1.07
10 Ni-8 Co鋼	120 以上	7.85	15.3	注2) 52.5	5.46	

注1) 内径2m, 安全率1.55, 真球度1.00

注2) 腐れ代1mmを含む。

(4) 基準半径 R_0 と局部曲率半径 R_{10} の比である真球度は1.004とし、半径及び板厚の加工公差としてそれぞれ1mmおよび0.45mmを考慮した。なお、腐食代は3で述べたように特に考慮しなかった。

耐圧殻の耐圧強度は、後述の(1)式あるいは(2)式で与えられ、板厚と局部曲率半径の比で決まる。製作に際して、板厚は局部曲率半径に応じて変化させることはできず、所定の加工公差の範囲内で一定である。従って局部曲率半径に変動が大きいと、所定の耐圧強度の耐圧殻を製作するには、全球殻の板厚を最も大きい局部曲率半径に対応する板厚に合わせることになり、それより小さい局部曲率半径の部分では板厚は要求値より大きい、すなわち贅肉が付くことになる。

耐圧殻の軽量化にはこの贅肉の排除が極めて重要であるが、これを行うには局部曲率半径の変化を最小にすることが必要であり、この指標である基準半径と局部曲率半径の比、すなわち真球度を1に極力近づける必要がある。「しんかい2000」では真球度は1.07であったが、今回は機械加工制御技術の向上を鑑みて、これをさらに1桁以上小さい1.004と設定したものである。

4.2 圧壊強度計算式

耐圧殻の圧壊強度は米国David Taylor Research Center(DTRC)において、M. Krenzkeらによって開発された球殻の圧壊強度計算式を使用した。

強度計算式を以下に示す^{8)~10)}。

弾性圧壊式

$$P_3 = 1.4 E / \sqrt{3(1-\nu^2)} \cdot (h_a / R_{10})^2 \dots (1)$$

弾塑性圧壊式

$$P_E = 1.4 \sqrt{E_t, E_s / 3(1-\nu^2)} \cdot (h_a / R_{10})^2 \dots (2)$$

ここで、 R_{10} : 局部曲率半径

h_a : 局部板厚

E : ヤング率

ν : ポアソン比

E_t : 平均応力 σ_{avg} に対する Tangent Modulus

E_s : 平均応力 σ_{avg} に対する Secant Modulus

$$\sigma_{avg} = P_E R_{10}^2 / 2h_a(R_{10} - h_a/2)$$

$$P_k = k P_E$$

k : 加工法による圧壊強度修正係数

Krenzkeらの計算式は実験に基づくものであるため、その信頼性を確認するため、初期不正の大きさ、使用材料、開口部の影響などを考慮した一連の試験によって修正係数 k が求められた^{11)~16)}。

この試験結果から求められた設計曲線がKrenzkeらの式(3)に用いられた。設計曲線を図2に示す。なお、この設計曲線は「しんかい2000」耐圧殻に用いられたものと同様のものである。

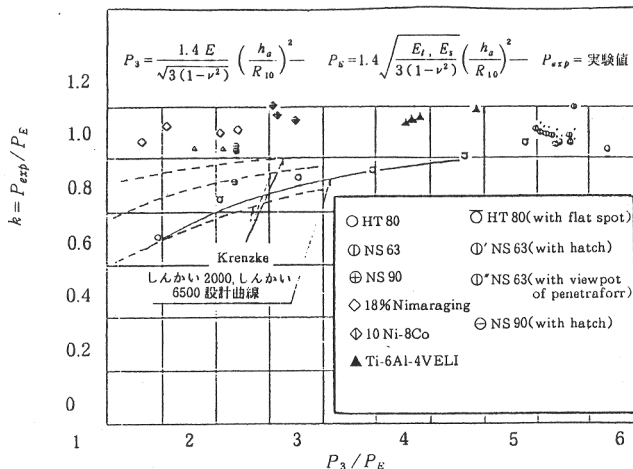


図2 球殻の圧壊強度比較

Fig.2 Compressive Strength for Spherical Pressure Hull

4.3 局部強度と許容応力

上記(1), (2)式は球殻一般部についての式であるが、耐圧殻は単純球体ではなく、ハッチや覗き窓の開口部や集合電線貫通金物といった一般部とは異なった部分があり、このような部分にはこれらの式は適用できない。そこでこれらの局部強度については許容応力が次の2条件を満たすように設計した。

- ① 膜応力と曲げ応力の合計は、使用材料の0.2%耐力規定値の75%以下とする。
- ② 局部応力は、使用材料の0.2%耐力規定値以下とする。

それと共に、各開口部及び増厚部については、以下に示す設計・検討を行った。

4.3.1 覗き窓コーミング

覗き窓は頂角90度の円錐台形状である。この覗き窓を装着する覗き窓コーミングは、剛性が耐圧殻と等しくなる形状とし、耐圧殻との接合点で曲げモーメントを可能な限り小さくなるよう考慮した。

覗き窓コーミングを有する球殻の有限要素法による応力計算結果を図3及び図4に示す。図3は

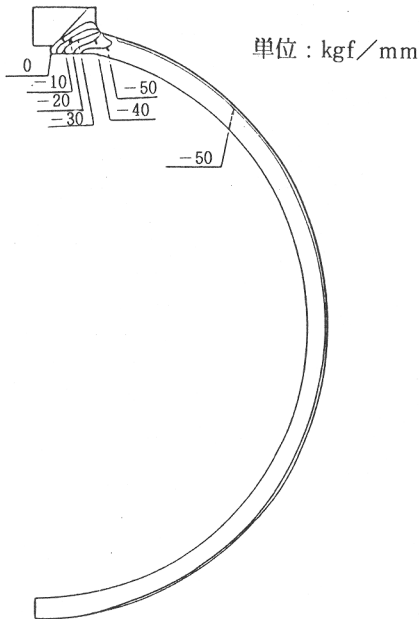


図3 経線方向応力等高線図 (外圧 680 kgf/cm²)
Fig.3 Stress Contour Along Longitude Section (680 kgf/cm²)

経線方向(北極と南極を結ぶ方向)の応力の等高線図を、図4は緯線方向(赤道に平行な方向)の応力の等高線図を示す。膜応力と曲げ応力の合計の最大値は、覗き窓コーミング付根部に生じその大きさは-60.4kg/mm²であり、一方局部応力の最大値は-77.4kg/mm²で、覗き窓コーミング開口内径部に発生し、応力はすべて許容応力を満足した。

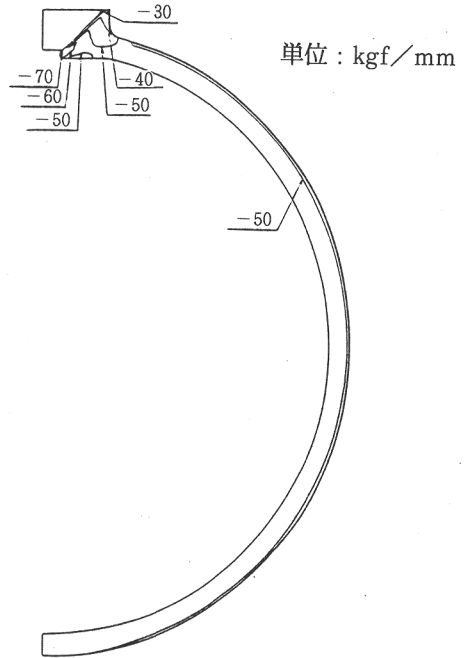


図4 緯線方向応力等高線図 (外圧 680 kgf/cm²)
Fig.4 Stress Contour Along Latitude Section (680 kgf/cm²)

4.3.2 集合電線貫通金物

集合電線貫通金物は、球殻面に沿った補強用のインサート板に電線貫通コネクタレセプタクル取付用開口部を配置した多孔板方式とし、インサート板は球殻一般部と剛性が等しくなる形状とし、曲げモーメントを可能な限り小さくなるよう考慮した。

集合電線貫通金物を有する球殻が外圧 680kg/cm²を受けた場合について、3次元厚肉シェル要素を使用した有限要素法による応力計算結果を図5に最大主応力の等高線図として示す。局部応力の最大値は外周側の開口部の外側に発生し、その値は-69.1kg/mm²であり、許容応力を満足した。

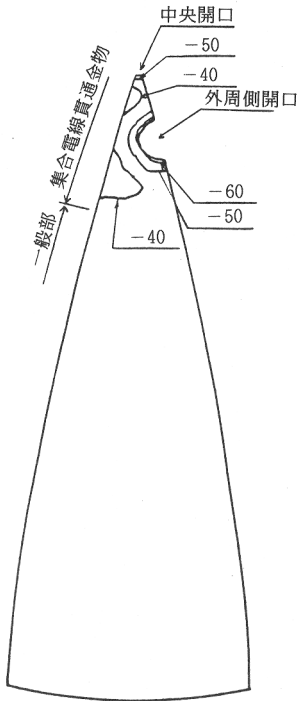


図5 最大主応力等高線図 (外圧 680 kgf/cm²)
 Fig.5 Contour of Maxium Main Stress
 (680 kgf/cm²)

4.3.3 ハッチ

ハッチは球殻の一部を切り取ったような円錐台形状のコンカルシートハッチとし、外圧を受けた状態では耐圧球殻本体との連続性を保持する構造とした。ハッチの強度確保のためには、外圧を受けたときにハッチにすべりが生じないことが重要で、シート面のチャムフェ角(Chamfer Angle:ハッチ外周と球の中心を結ぶ線と、円錐台母線がなす角度)の大きさによって挙動が影響されるので、チタン合金の摩擦挙動試験結果並びに後述(4.3.4)のコンカルシートハッチを有する球殻模型の繰り返し加圧及び圧壊試験結果に基づきチャムフェ角は3度とした。

またコンカルシートハッチを有する球殻の応力解析を有限要素法によって実施した。解析においては、コンカルシートハッチと耐圧殻本体のシート面にはギャップ摩擦要素を考慮したが、外圧を受けた状態でハッチにすべりは生じず、応力もすべて許容応力を満足した。

4.3.4 縮尺模型試験

上述の設計・計算に際しては、併せて縮尺模型試験も実施した。

この試験では、チタン合金製模型を3体(開口部無模型、覗き窓付模型、ハッチ付模型)を製作し、圧壊試験並びに解析によって、①従来の設計手法をもとにチタン合金製球殻の圧壊圧力を推定できること、②覗き窓、ハッチのような開口部についても従来の手法を用いることで圧壊挙動への影響を無視できること、③常温クリープが圧壊挙動へは影響しないことなどが確認された。

さらに、覗き窓及びハッチを有する、実際の耐圧殻の35%の縮尺としたチタン合金製模型を耐圧殻と同様の設計及び製造方法によって製作し、6500 m相当深度圧の繰り返し加圧を1500回実施した後、圧壊試験を行った。この試験によって①1500回の繰り返し加圧によって形状変化、割れ等の現象が生じないこと、②昇圧/降圧の繰り返しに対してハッチ及び覗き窓のシール性が十分確保されていること、③1500回の繰り返し加圧によって圧壊挙動への影響が生じないこと、④圧壊圧力は1397 kg/cm²であったことなどを確認した。

なお、④の圧壊圧力は設計圧壊圧力の1.32倍もあるが、調査の結果、使用した材料の耐力が(4.1.3)で示した81 kg/cm²よりも大きかったことが主原因であることが分かった。しかし素材耐力は製造ロットによって異なり、素材耐力をいちいち確認して設計を変えることは現実的ではないので、規格の保証値である81 kg/cm²を用いて実物の耐圧殻も設計することとした。

5 耐圧殻の製作

耐圧殻は、圧延板製造、熱間成形(炉で加熱し、熱いうちにプレス等の成形を行うこと)、熱処理、半球粗加工、貫通金物嵌込溶接、3次元機械加工、赤道溶接、赤道部機械加工、覗き窓・電線貫通コネクタレセプタクル・コンカルシートハッチ組み込み、耐圧漏洩試験、塗装の手順で製作した。その概略を図6に示し、上記の手順のうちの主な工程について以下に示す。

5.1 素材の製造

耐圧殻半球用素材は、まず真空溶解(原材料である多孔質チタンとアルミニウムやバナジウム等

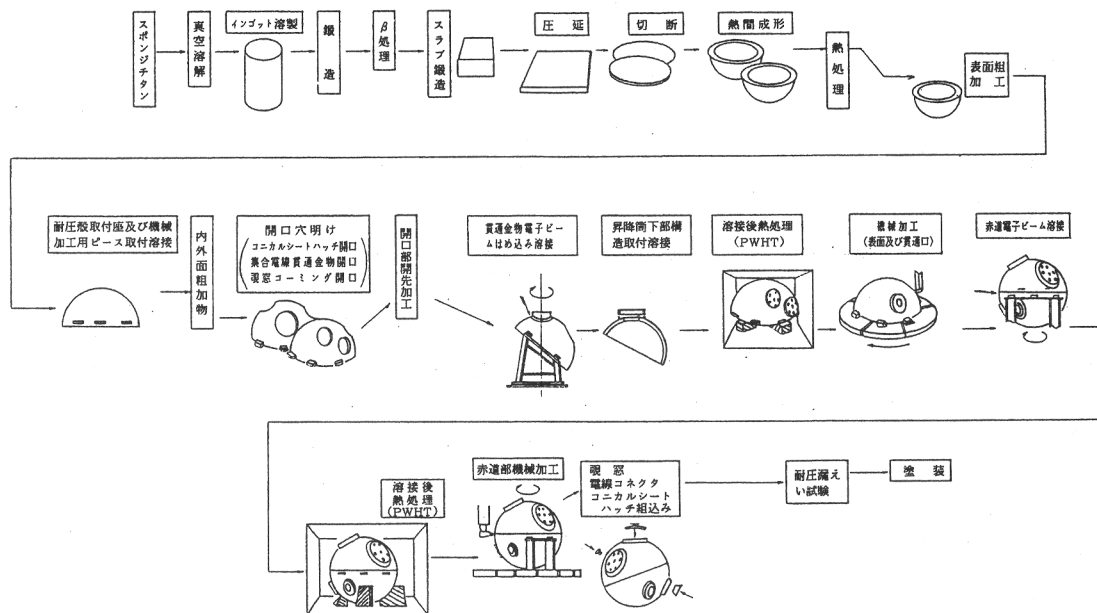


図6 耐圧殻製造手順

Fig.6 Production Procedure of Pressure Hull

の添加物を混ぜ、真空中で電気アークにより溶解してチタン合金を得る手法)によるインゴット(チタン合金の塊)から、鍛造、β処理(チタン合金の結晶粒を微細にするための高温加熱・急冷の熱処理)、圧延を行い、板厚125mmのチタン合金圧延板を製造した。圧延板から切り出した直径約3mの円板をプレスによって熱間成形を行い、半球素材を製造した。さらに熱間成形後に半球素材の溶体化過時効熱処理(Solution Treatment and Over Aging:STOA,チタン合金の強度と靱性を確保するための焼き入れ・焼き鈍しの熱処理)を実施した。熱間成形後の半球素材の外観を写真1に示す。

熱処理後の半球素材の余長部から試験片を採取し、品質確認のために引張試験を実施した。圧延板の分析試験結果を表2に、半球余長部の引張試験結果を表3にそれぞれ示すが、試験結果は満足し、良好な結果であった。

覗き窓コーミング、集合電線貫通金物及びコンカルシートハッチ素材は、真空溶解によるインゴットから、鍛造、β処理、ピレット鍛造によって製造したチタン合金鍛造材を使用した。集合電線貫通

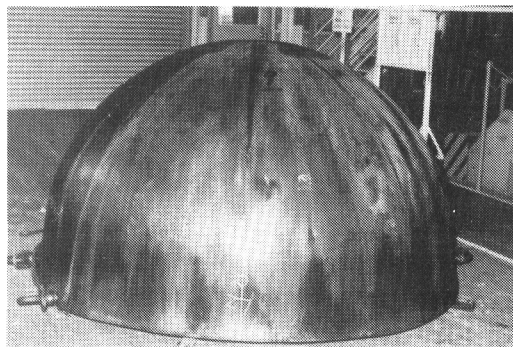


写真1 半球素材外観

Photo 1 Hemisphere Before Macching

金物素材は、鍛造材から成形鍛造、熱間成形、熱処理の手順で製造し、覗き窓コーミングおよびコンカルシートハッチ素材は、鍛造材から成形鍛造、熱処理の手順で製造した。いずれの素材についても、半球素材と同様に分析試験、引張試験を実施し良好な品質であることを確認した。

5.2 貫通金物嵌め込み溶接

半球素材は、まず粗加工によって内外面に加工代を残した状態に切削し、その後覗き窓コーミン

表2 チタン合金 分析試験

Table 2 Composition Analysis for Titanium Alloy

区	分	Al	V	Fe	O	C	N	H	Y	その他の		Ti
										個々	合計	
耐圧殻 半球 素材	N半球 圧延板	Top	4.20	0.219	0.094	0.011	0.0038	0.0042	<0.0010	<0.10	<0.30	残
		Bottom	4.15	0.189	0.097	0.011	0.0035	0.0033	<0.0010	<0.10	<0.30	残
	S半球 圧延板	Top	4.25	0.215	0.094	0.013	0.0046	0.0023	<0.0010	<0.10	<0.30	残
		Bottom	4.12	0.213	0.092	0.012	0.0058	0.0029	<0.0010	<0.10	<0.30	残
規定値		5.50~	3.50~	0.25	0.13	0.08	0.05	0.0125	0.005	0.10	0.30	残
		6.50	4.50	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下

表3 チタン合金耐圧殻半球素材引張試験結果

Table 3 Tensile Strength of Titanium Alloy of Hemispheres

区 分		採取位置	採取方向	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
耐圧殻 半球 素材	N半球 素材	1/2 t	L	85.7	91.7	11	26
				84.5	90.2	14	24
			T	85.5	91.5	12	26
				84.4	90.7	14	26
	S半球 素材	1/2 t	L	86.7	93.0	15	25
				85.7	90.7	15	19
			T	84.5	90.4	16	23
				84.7	90.7	16	12
規 定 値				81以上	88以上	10以上	報告のみ

グ及び集合電線貫通金物の貫通金物用開口穴明け並びにコニカルシートハッチ開口の穴明けを行った。一方、貫通金物についても、内外面に加工代を残した状態に切削し、半球開口部及び貫通金物ともに機械加工によって開先加工を行った。

貫通金物嵌め込み溶接は、電子ビーム溶接によって実施し、ビームが突き抜けないよう裏当金を設けた。貫通金物嵌め込み溶接の状況を写真2に示す。溶接終了後、残留応力の除去を主目的として溶接後熱処理を実施した。

嵌め込み溶接と溶接後熱処理終了後に、溶接部の健全性を確かめるために染色浸透探傷試験、超

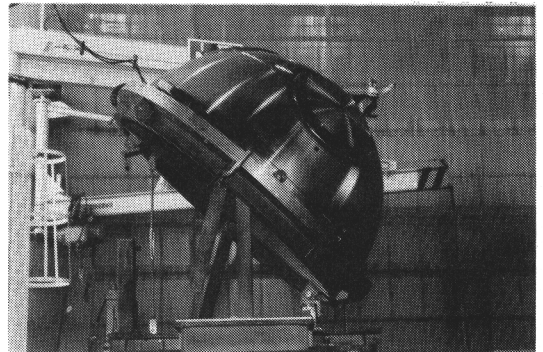


写真2 貫通金物はめ込み溶接状況

Photo 2 EBW Welding of Penetration Piece to Hull

音波探傷試験及び放射線透過試験を実施し、表面及び内部共に健全であることを確認した。

5.3 3次元機械加工

貫通金物嵌め込み溶接後、半球内外面の3次元機械加工を行った。これは切削装置の刃先の位置をコンピュータによって3次的に精密に制御して覗き窓コーミングや貫通金物等の増厚部を有する球殻を高精度で切削加工し、削り上がった耐圧殻にできるだけ贅肉が残らないようにするものである。機械加工状況を写真3に示す。

「しんかい2000」の耐圧殻製作では、半球を最終仕上寸法まで機械加工によって仕上げた後、貫通金物の嵌め込み溶接をTIG溶接にて行ったために耐圧殻完成状態で溶接による変形がそのまま残っていた。そこで本耐圧殻の製作では、半球に加工代を付した粗加工の状態で、貫通金物の嵌め込み溶接を電子ビーム溶接にて行い、その後貫通金物増厚部も含めて半球内外面を3次元機械加工によって最終仕上寸法まで切削することとした。このため、耐圧殻完成状態ではほぼ真球とすることが可能となった。

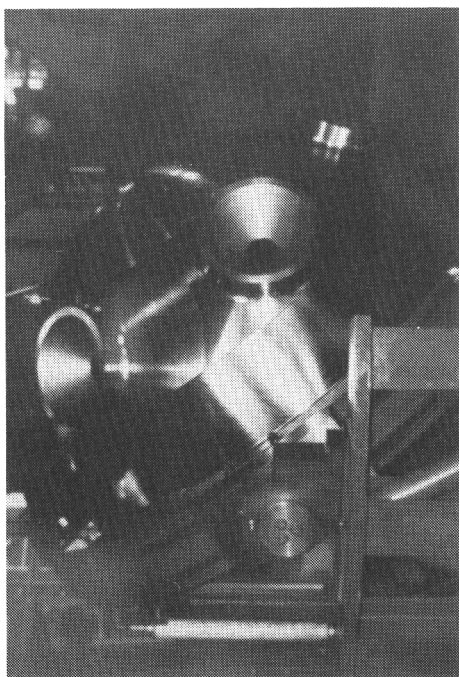


写真3 機械加工状況
Photo 3 Machining of Hull

なお、半球の機械加工においては、赤道継手近傍外面は加工代を残した状態で切削し、赤道溶接終了後に機械加工によって仕上げることにした。

5.4 赤道溶接と赤道部機械加工

半球の機械加工完了後に、北半球及び南半球を赤道溶接によって結合した。赤道溶接には、貫通金物嵌め込み溶接と同様に電子ビーム溶接を使用した。赤道溶接の状況を写真4に示す。

溶接終了後、残留応力除去のため、全球に対して溶接後熱処理を実施した。実施要領は、前述の5.2と同様とした。溶接後熱処理終了後に非破壊試験を実施し、溶接部の表面及び内部共に健全であることを確認した。

そしてその後に、赤道継手部近傍外面の加工代を機械加工によって切削し、計画寸法に仕上げた。

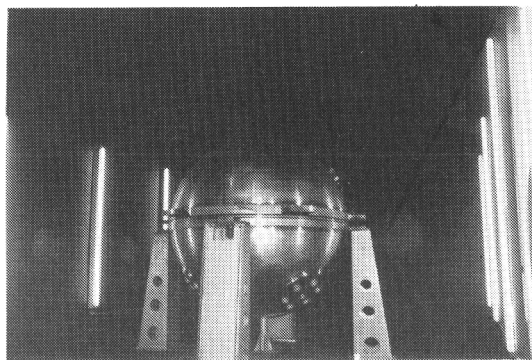


写真4 赤道溶接状況
Photo 4 EBW Hemisphere Welding in Equator

5.5 溶接施工試験

実物の耐圧殻の溶接部の機械的性質を直接調べることはできない。そこで、試験板を用いて実際と同様の溶接ならびに溶接後熱処理を実施した後に試験片を採取して機械的性質を調べる、溶接施工試験を実施した。

その結果を表4に示すが、いずれも規定値を満足しており、良好な結果であった。

5.6 形状計測

耐圧殻完成状態で、耐圧殻の板厚及び形状計測を実施した。耐圧殻完成状態の外観を写真5に示す。

板厚は、赤道部を除く球殻一般部について、北半

表4 耐圧殻溶接施工試験機械試験結果

Table 4 Welding Procedure Test Results for Pressure Hull

区 分		判 定 基 準	耐 圧 殻 の 赤 道 継 手	耐 圧 殻 と 貫 通 金 物 の 継 手
溶接金属 引張試験	0.2% 耐力 (kgf/mm ²)	81 以上	93.5	87.2
	引張強さ (kgf/mm ²)	88 以上	104.4	97.5
	伸 び (%)	5 以上	8.1	6.2
	伸 び (%)	報告のみ	21.6	14.8
溶接継手引張試験		引張強さが母材の規格値 (88 kgf/mm ²) 以上	引張強さ 100.4 kgf/mm ²	引張強さ 100.8 kgf/mm ²
側 曲 げ 試 験		曲げ内半径R=12tで 105度曲げた後、曲げ表 面に3mm以上のき裂が ないこと。	合 格 (割れなし)	合 格 (割れなし)

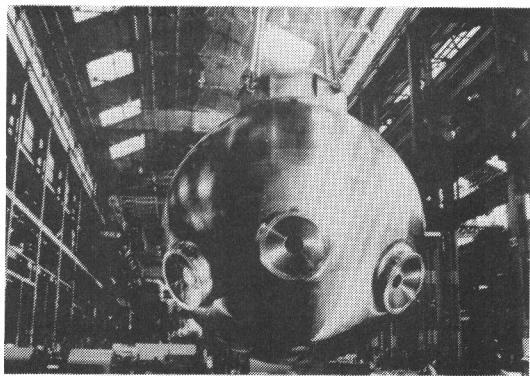


写真5 耐圧殻完成状態外観

Photo 5 Pressure Hull Completely Assembled

球で73.24~73.93mm, 南半球で73.40~73.95mmであり, 仕様の±0.45mmを満足した。

また, 形状計測結果に基づく耐圧殻の等高線図を, 北半球及び南半球についてそれぞれ図7及び図8に示す。真球度(局部曲率半径÷基準半径)は1.004であり, 仕様を満足した。耐圧殻形状計測結果をまとめて表5に示す。

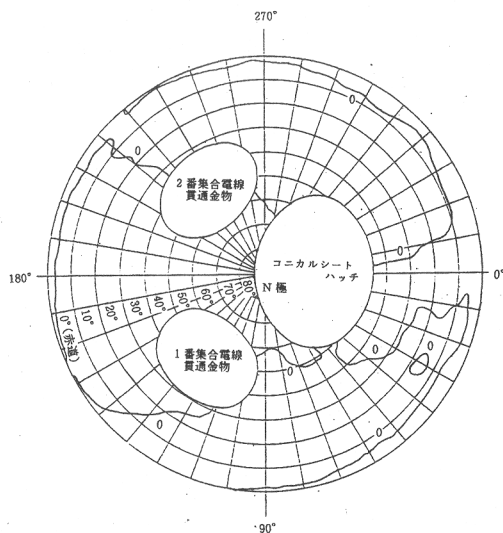


図7 耐圧殻N半球の真球からの半径偏差分布
Fig.7 Sphericity Deviation (Radius) Distribution of N-Hemisphere

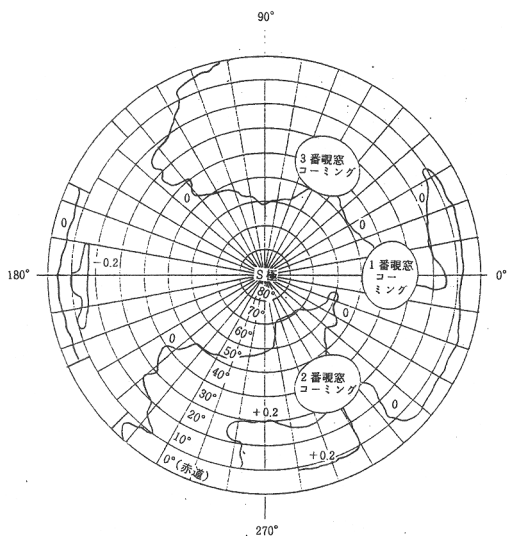


図8 耐圧殻S半球の真球からの半径偏差分布
Fig.8 Sphericity Deviation (Radius)
Disribution of S-Hemisphere

表5 形状計測結果

Table 5 Result of Sphericity Measurement

項目	仕様	計測結果	
		N半球	S半球
外半径 (mm)	1073.5±1	最大値 1074.03	最大値 1074.06
		最小値 1073.51	最小値 1073.49
一般部板厚 (mm)	73.5±0.45	最大値 73.93	最大値 73.95
		最小値 73.24	最小値 73.40
真球度	1.004以下	1.004	

6 耐圧漏洩試験

耐圧殻は、わが国の「潜水船特殊基準」により耐圧試験と漏洩試験を施すことが求められている。耐圧試験とは、最大潜航深度における圧力の1.1倍の圧力下で耐圧殻に異常が無いことを確認するものであり、漏洩試験とは同じ圧力下で耐圧殻内に水が漏洩してこないことを確認するものである。

しかしわが国にはこのような大きさの耐圧殻を入れて試験できる設備がないため、完成後に耐圧殻を米国に輸送し、米国DTRCの設備を借りて実施した。

6.1 耐圧漏洩試験要領

耐圧漏洩試験の構成、最高圧力及び保持時間を

表6に、また昇圧・降圧要領を図9に示す。

最高圧力は、最大潜航深度における圧力の1.1倍(748kg/cm²)とし、保持時間は15分とした。また図9に示した各ステップで圧力を保持し、歪みを計測した。

耐圧試験の加圧媒体は、絶縁油を使用し、歪みゲージによって耐圧殻各部の歪みを計測した。漏洩試験の加圧媒体は真水を使用し、耐圧殻の水密性能を確認した。なお、漏洩試験においても挙動確認のため、耐圧殻一般部外面の4点についてのみ歪み計測を行った。

6.2 耐圧漏洩試験設備

耐圧殻の耐圧漏洩試験は、DTRCの構造部門の深海シミュレーション実験棟内の直径10ftの球形試験タンクを使用して実施した。本試験タンクは、上下2分割の積層構造球形タンクである。

耐圧漏洩試験においては、耐圧殻を試験タンク用治具に装着し、試験タンク内に設置した。概略配置を図10に示す。覗き窓及び電線貫通コネクタレセプタクルは実装品と同様のものを使用した。

6.3 耐圧漏洩試験結果

耐圧漏洩試験の状況を写真6に示す。耐圧漏洩試験において、歪みゲージによって計測した歪みと圧力の関係を図11及び図12に示す。圧力と歪みの関係は線形性を明確に示しており、また残留歪みも認められず良好な結果であった。

歪み計測結果と計算結果の比較を、覗き窓コーミング近傍及び集合電線貫通金物近傍について図13及び図14に示す。計測結果には一部に若干のば

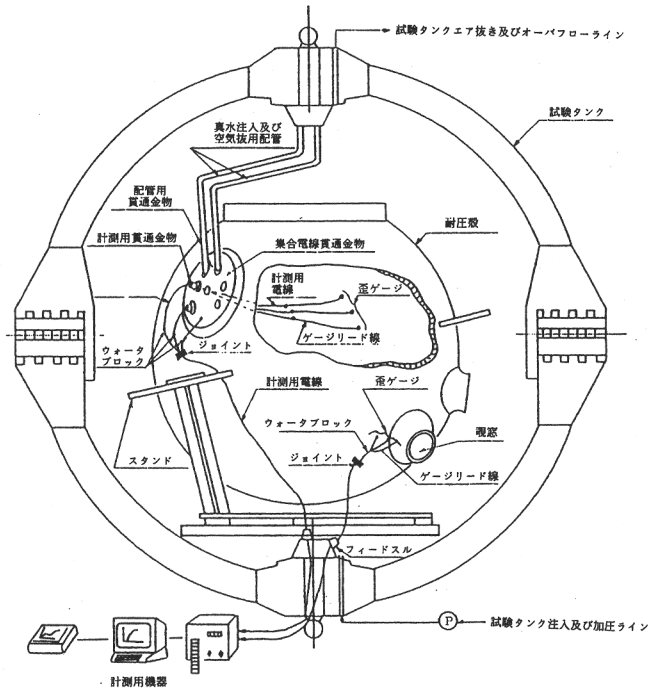


図9 耐圧試験における耐圧殻設置状況
Fig.9 Arrangement of Pressure Test in DTRC

表6 耐圧漏えい試験の構成

Table 6 Condition of Compressive Strength & Leakage Test

区分		最高圧力 (kgf/cm ²)	保持時間 (分)
耐圧試験	注1) 予備加圧試験	748	15
	耐圧試験	748	15
漏えい試験		748	15

注1) 予備加圧試験においては耐圧殻内へ真水を充てんした。(DTRCの試験要領標準に基づく)

らつきが認められるものの、計算結果と良い一致を示した。また、歪み計測結果に基づく応力は、すべて許容応力を満足した。漏洩試験において耐圧殻一般部外面で参考までに歪みを計測したが、計測結果は耐圧試験とほぼ一致しており、良好な再

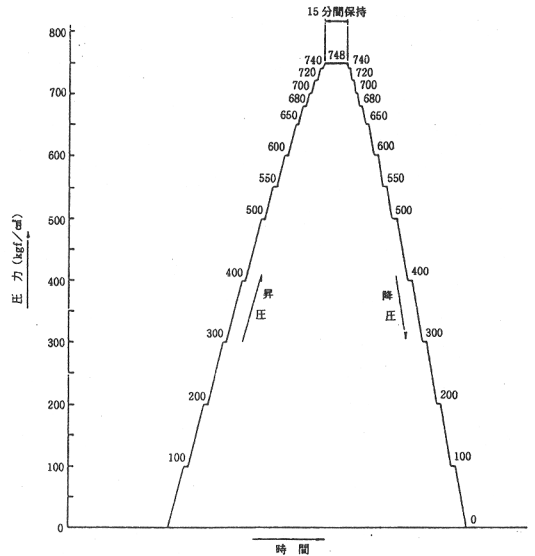


図10 昇圧及び降圧要領
Fig.10 Procedure of Compression & Decompression

現性を示した。

耐圧漏洩試験の最高圧力保持中において、著し

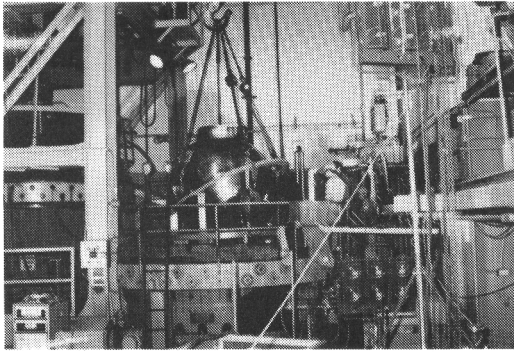


写真6 耐圧漏えい試験状況
Photo 6 Hydrostatic Compressive Strength and Leakage Test

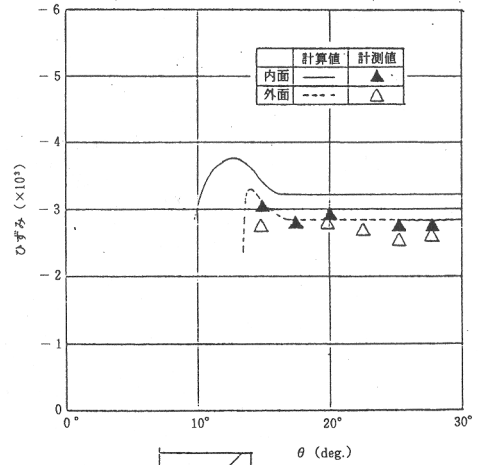


図13 視窓コーミング近傍経線方向ひずみ分布 (外圧 680 kgf/cm²)

Fig.13 Longitudinal Strain Distribution Around Viewport Coaming

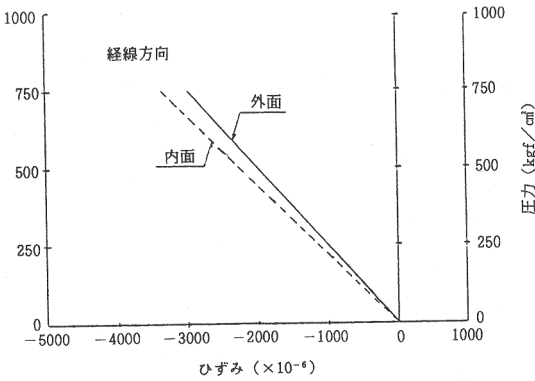


図11 圧力～ひずみ線図 (耐圧殻一般部)
Fig.11 Stress-Strain Transition (General Part of Hull)

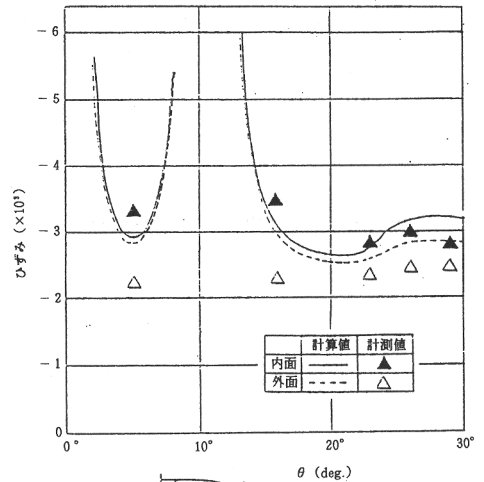


図14 集合電線貫通金物近傍緯線方向ひずみ分布 (外圧 680 kgf/cm²)

Fig.14 Latitudinal Strain Distribution Around Viewport Coaming

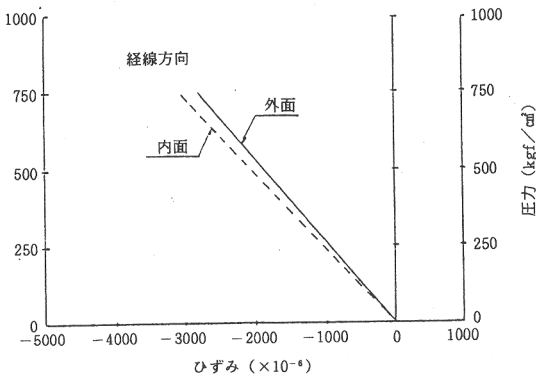


図12 圧力～ひずみ線図 (視窓コーミング付根部)
Fig.12 Stress-Strain Transition (Bottom of Viewport Coaming)

い圧力降下、圧力変動等の異常はまったく認められず、また降圧後に耐圧殻内への漏洩の有無を調査したが、漏洩はまったく認められず、非常に良好な結果であった。

この耐圧漏洩試験の結果、耐圧殻は、十分な耐圧強度並びに水密性を有することが確認された。なお、耐圧漏洩試験終了後に耐圧殻の主要溶接継手に対して浸透探傷試験を行い、溶接部の健全性が損なわれていないことを確認した。

7 まとめ

本論文では6500m潜水調査船「しんかい6500」耐圧殻の設計、製作及び試験についてまとめて報告した。内容を要約すると次のようになる。

- (1) 国内で最初にチタン合金 (Ti-6Al-4V ELI) を採用した大型厚肉構造物である「しんかい6500」の耐圧球殻を製作し、材質、形状精度ともに極めて良好な品質を確保した。
- (2) チタン合金の母材特性について、球殻一般部、開口増厚部ともにその材料特性は組織及び機械試験の結果、良好な結果であり要求性能を十分満足した。
- (3) 溶接については、電子ビーム溶接を適用したが、内部及び表面共に健全であり、また、継手の強度特性も十分要求値を満足した。
- (4) 形状精度については、開口補強増厚部を半球に電子ビーム溶接した後に半球全体を3次元機械加工する方法を採用したことにより、耐圧殻の真球度は1.004となり、ほぼ真球に近い精度を確保した。
- (5) 最大仕様圧力の1.1倍の圧力で耐圧漏洩試験を実施したが、耐圧殻は十分な耐圧強度、水密性を有し、要求性能を満足することが確認された。

参考文献

- 1) 笹野量一郎, 豊原 力, 淵上勝人, 高野元太: 厚板Ti-6Al-4V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)
- 2) 遠藤倫正, 横田公男, 笹野量一郎, 豊原 力, 高野元太, 西村 孝, 安井健一: 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, Vol.156, (1984)
- 3) 遠藤倫正, 横田公男, 笹野量一郎, 豊原 力, 高

野元太, 西村 孝, 安井健一: 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), 日本造船学会論文集, Vol.157, (1985)

- 4) 横田公男, 森鼻英征, 浦上紘一, 山内 裕: チタン合金球殻模型の圧壊強度研究, 関西造船協会誌, Vol.198, (1985)
- 5) 篠原 保, 高川真一, 横田公男, 森鼻英征, 浦上紘一, 山内 裕: チタン合金球殻模型の圧壊強度研究(第2報), 関西造船協会誌, Vol.207, (1987)
- 6) 佐藤正信, 山内崇賢, 高野元太, 森鼻英征, 淵上勝人, 宮本勝治: 深海潜水船用チタン合金の特性とその評価, 三菱重工技報, Vol.15, No.6, (1978)
- 7) 遠藤倫正, 森鼻英征, 淵上勝人, 山内 裕, 豊原力, 平石敏彦: 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)
- 8) M. A. Krenzke: The Elastic Buckling Strength of Near-Perfect Deep Spherical Shells with Ideal Boundaries, DTMB Report 1713, (1963)
- 9) M. A. Krenzke and T. J. Kiernan: Test of Stiffened and Un-Stiffened Machined Spherical Shells under External Hydrostatic Pressure, DTMB Report 1741, (1963)
- 10) M. A. Krenzke and T. J. Kiernan: The Effect of Initial Imperfections on the Collapse Strength of Deep Spherical Shells, DTMB Report 1757, (1965)
- 11) 財団法人日本船用機器開発協会: 6000m深海潜水調査船の開発研究事業報告書, (1971)
- 12) 財団法人日本船用機器開発協会: 6000m深海潜水調査船の開発研究事業報告書, (1972)
- 13) 財団法人日本船用機器開発協会: 6000m深海潜水調査船の開発研究事業報告書, (1973)
- 14) 財団法人日本船用機器開発協会: 6000m深海潜水調査船の開発研究事業報告書, (1974)
- 15) 財団法人日本船用機器開発協会: 6000m深海潜水調査船の開発研究事業報告書, (1975)
- 16) 金井一彦, 森鼻英征, 山崎敏樹, 寺田邦夫: 球殻の耐圧強度に関する実験研究, 日本造船学会論文集, Vol.132, (1972)

(原稿受理: 1989年12月6日)