

潜水船球形耐压殻の耐压試験及び圧壊試験

開 発 部
技 術 研 究 所

1. ま え が き

海洋資源、海洋エネルギー等に関する海洋開発並びに深海域における学術調査等を行うため、ここ 10 数年来、アメリカ、フランスを初めとする海洋開発先進国においては、深海潜水調査船の開発・建造が進められており、わが国においても、2,000 m 潜水船で代表される本格的な深海調査船の建造が行われ、更に今後の開発計画も進められている。

当会においても、昭和 56 年版鋼船規則 T 編潜水船¹⁾を新たに設け、潜水船の建造入級に際して適用すべき必要な諸規定を定めた。同規定は、潜水船一般に対して定められたものであり、個々のケースについては、特殊な構造・設備・用途等の潜水船が計画・設計・建造されてゆくものと考えられるので、当会としてもこれらに対処するため、今後も引き続き種々の問題点についての調査・研究を進めてゆく必要がある。

このたび、三井造船（株）において開発中の高性能有人潜水船（潜水深度 500 m）の球形耐压殻について、実船と同一寸法の模型による耐压試験及び圧壊試験を、三井造船（株）と（財）日本海事協会の共同研究として実施した²⁾。一般球殻の耐压強度については既に多くの研究が行われているが例えば³⁾、本潜水船で採用しているハッチ及び大型の観察窓を装備した球殻の耐压強度に関しては十分な資料がまだ発表されていないので、強度試験による確認が必要であろうと考えられた。本研究では、コニカル・シート・ハッチ及びアクリル樹脂製観察窓を備えた球形耐压殻模型について、耐压試験及び圧壊試験を行い、耐压強度、圧壊圧力及び圧壊モード等から設計法の妥当性を確認することとした。本報告書は、球形耐压殻、試験方法及び試験結果等について、その概要をとりまとめたものである。

2. 球形耐压殻

深海潜水調査船の耐压殻としては、その重量に比べて耐压能力の高い（構造効率の高い）球形耐压殻が多く採用されており、本潜水船の場合もハッチ及び窓を有する

球形耐压殻としている。

球形耐压殻の耐压強度は、初期形状不正、材料の性質、加工法等に影響され、また本耐压殻のように、一般球殻と異なり両極部にハッチ及び観察窓を備えた球殻では、その圧壊強度は、球殻本体、ハッチ及び窓の比較的狭い範囲の局部的耐压強度に支配されるものと考えられる。そこで、今回の耐压試験及び圧壊試験用として、実船の耐压殻と同一の寸法、材料及び装備（コニカル・シート・ハッチ及びアクリル樹脂製観察窓）を持つ球形耐压殻模型を、実船の製造手順に従って製作した。なお、本実験に用いた模型の材料及び製造過程については、鋼船規則検査要領に準じた下記の試験を行った。

2.1 形状及び材料

耐压殻の形状は、Fig. 1 に示すように内径 1,810 mm、板厚 16 mm の球形で、上部に口径 500 mm のコニカル・シート・ハッチ、下部に口径 700 mm の球殻型アクリル樹脂製観察窓を備えている。

耐压殻本体、ハッチ枠及びハッチの材料には、压力容器用圧延鋼板 KPV 46 を使用し、観察窓枠には KSFC-M60-MODIFY 材を用いた。なお、素材については、加工前に全面超音波探傷を実施し、ラミネーション及び非金属介在物のないことが確認された。

2.2 製作方法

球形耐压殻の製作方法は、素材（KPV 46、板厚 32 mm）—セグメント切り出し—プレス加工—溶接・半球組立—熱処理（焼鈍）—半球機械加工（板厚 16 mm）—プライマ塗装—赤道部溶接—赤道部機械加工の手順とした。赤道溶接部の機械加工は、外面は機械切削、内面は手作業とした。溶接は、60 キロ・高張力鋼用溶接棒 LB 62 を用いてすべて下向きで施工された。製作後、全溶接線について放射線検査を実施したが、結果は良好であった。

2.3 形状計測

球殻の形状計測として、耐压殻の内外面に 15° 刻みで緯線及び経線をけ書き、球心からこれらの格子点までの距離を測定することとした。

内面形状の測定については、Fig. 2 に示すように、0°

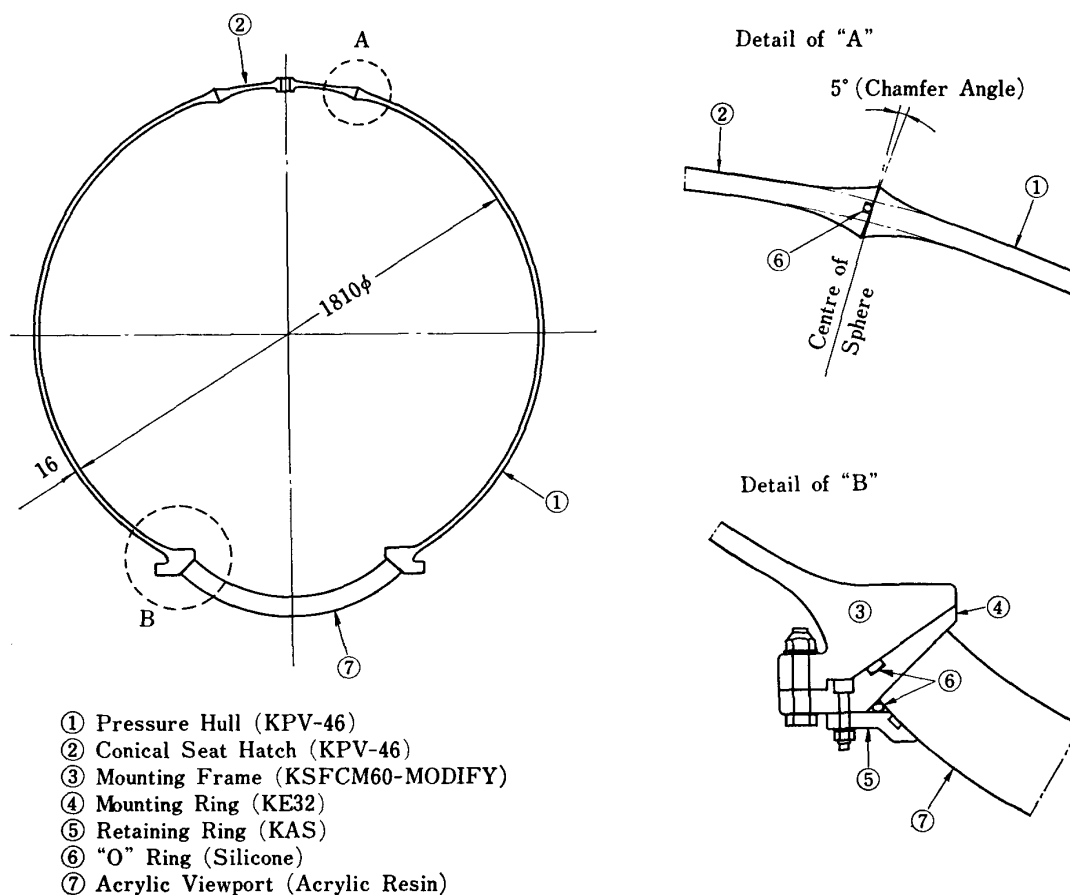


Fig. 1 Model of Spherical Pressure Hull

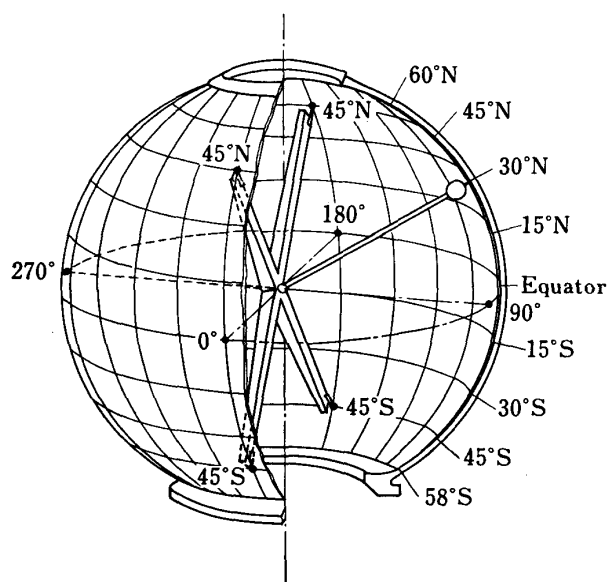


Fig. 2 Measuring Method of Inner Shell Form

及び 180° の経線面上の $45^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{S}$ 間の2直径及び赤道上 $90^\circ \sim 270^\circ$ 間の直径を求め、それぞれの直径の中点を含み直径に直交する各面の交点を球心と定めた。次に、先端にダイヤル・ゲージを装備した振子型計測治具

の回転中心を球心に合わせ、内面形状の計測を行った。また、外面形状の測定については、超音波厚み計により各格子点の板厚を計測し、その値に球心から内面までの距離（内面形状の計測値）を加えて外面形状とした。

形状計測結果から、本耐圧殻は極めて良好な真円度を有することが分かった。

2.4 材料試験

鋼材については製造時の材料試験のほか、耐圧殻の組み立て、溶接及び焼鈍完了後、本体付き試験片による確性試験を行った結果、母材、継手とも機械的性質の規格値を満たすことが確認された。

観察窓に使用されるアクリル材については、変位制御型インストロン試験機（モデル 1116）を用いて、圧縮試験及び曲げ試験を行った。圧縮試験法は ASTM D 695-69 に、曲げ試験法は ASTM D 790-71 にそれぞれ準拠して実施された。

2.5 圧壊強度の推定

本耐圧殻は一般球殻と異なり、球殻の両極部にコンカル・シート・ハッチ及び観察窓を備えている。観察窓はアクリル樹脂製であるため、鋼構造部と比べて高い安全

率をとっているが、コンカル・シート・ハッチは球殻の一部として設計されるため、その形状（曲率半径）及び板厚は耐圧殻本体と同一である。シート・ハッチ面では、構造的な不連続となり、また、ハッチのかみ込み現象を回避するため面取り角（Chamfer Angle）が設けられる。このため、ハッチ周縁部（補強部）の設計に関しては、ハッチと耐圧殻の力学的挙動の連続性を確保することが重要となり、圧壊強度については、ハッチ・シート部に一般球殻部と同程度の強度を持たせることが設計の目標となると考えられる^{4),5)}。なお、本耐圧殻では面取り角は 5° としている。

一般球殻の圧壊強度推定式としては、日本における研究実績が豊富であり、工作不整量を定量的に考慮できる D.T.M.B. (David Tailor Model Basin) の式⁶⁾を用いることとした。D.T.M.B. の式は、Krenzke らが実験を主とした研究を行い、球殻の局所的な幾何学的形状を球殻の圧壊強度と関係づけたものであり、その計算式は以下の通りである。

$$P_E = 1.4 \sqrt{\frac{E_t \cdot E_s}{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{h_a}{R_{10}} \right)^2 \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{P_E \cdot R_{10}^2}{2h_a(R_{10} - h_a/2)} \quad (2)$$

$$P_k = k P_E \quad (3)$$

ただし、

P_E ; 球殻の塑性座屈圧力

E_t ; 材料の tangent modulus

E_s ; 材料の secant modulus

ν ; 材料のポアソン比

h_a ; 限界パネル幅 (L_c) 内における局部平均板厚

R_{10} ; 限界パネル幅 (L_c) 内における局部曲率半径

σ ; 限界パネル幅 (L_c) 内における局部膜応力

P_k ; 球殻の圧壊圧力

k ; 球殻の加工法による実験係数

ここに、

$$L_c = \frac{2.2}{\left\{ \frac{3}{4}(1-\nu^2) \right\}^{1/4}} \sqrt{R_{10} h_a} \quad (4)$$

本球形耐圧殻について、2.3 の形状計測結果から、耐圧力が最も低い部分について、

$$h_a = 15.8 \text{ mm}, \quad R_{10} = 932 \text{ mm}$$

となった。更に、材料の応力—ひずみ線図を用いて、(1) 式及び (2) 式について繰り返し計算を行い、日本船用機器開発協会が求めた実験曲線⁷⁾から、圧壊圧力 P_k は 170 kg/cm^2 となった。

なお、アクリル樹脂製観察窓の強度については、AN-

SI/ASME PVHO の基準に従い、圧壊圧力を 309 kg/cm^2 として設計された。

3. 試験の概要

実船と同一に製作された球形耐圧殻模型について、下記の 3 項目を主な目的として、加圧タンクにより試験を行った。

- (1) 加圧時における耐圧殻各部の応力状態、特にコンカル・シート・ハッチ及び観察窓付近の応力分布を確認する。
- (2) 圧壊圧力及び圧壊モードを求める。
(D.T.M.B. の方法による鋼製球殻の圧壊圧力計算値…… 170.0 kg/cm^2)
(ASME PVHO によるアクリル樹脂製窓の圧壊圧力計算値…… 309.0 kg/cm^2)
- (3) 観察窓（アクリル樹脂製）及びコンカル・シート・ハッチのシール性能を確認する。
(目標耐圧力…… 77.5 kg/cm^2 、実船の計画最大深度圧力 51.5 kg/cm^2 の 1.5 倍)

3.1 試験装置

試験装置として三井造船（株）の 225 kg/cm^2 加圧タンクを用いて、Fig. 3 に示すように試験を行った。各装置の概要は以下の通りである。

- (1) 加圧タンク
試験圧力 225 kg/cm^2
内径 $3,115 \text{ mm}$ 、板厚 110 mm
- (2) 加圧装置
 700 kg/cm^2 水圧ポンプ（横型 3 連プランジャーポンプ）
- (3) 計測装置
 - ・多点デジタル静ひずみ測定器
 - ・ブリッジ・ボックス
 - ・ひずみゲージ式変位計（ストローク 10 mm ）
 - ・ビデオカメラ及びビデオレコーダ

3.2 ひずみ計測

主としてコンカル・シート・ハッチ及び観察窓開口近傍の応力分布を求めるため、Fig. 4 に示す位置にひずみゲージを貼付して計測を行った。ひずみ計測の概要は以下の通りである。

- (1) 計測点数
35 点
- (2) 使用ゲージ
KFW 5-D 16-11 (2 軸) 及び KFW 5-C 1-11 (1 軸)
ゲージ長さ 5 mm
- (3) ゲージ貼付法

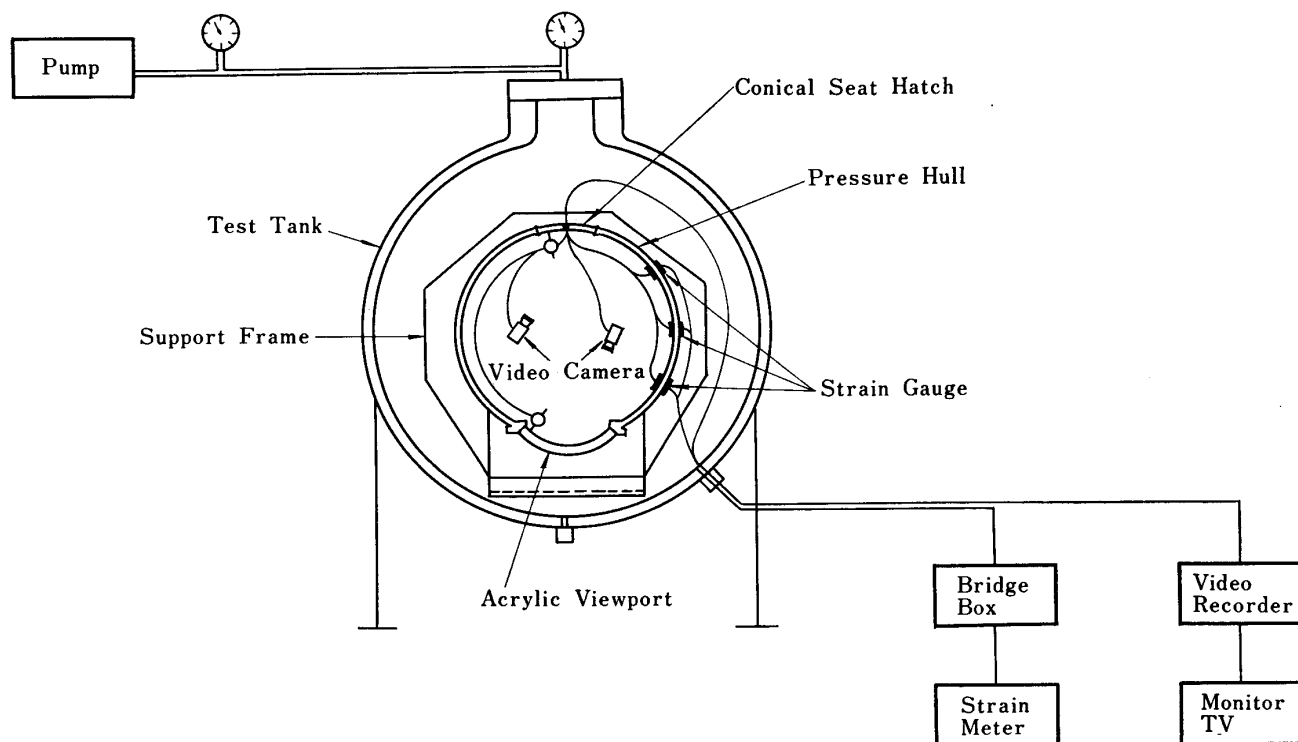


Fig. 3 Rough Arrangement of Experimental Apparatus

瞬間接着剤で貼付後、ハマタイトでコーティング

(4) 計測器

多点デジタルひずみ測定器

(各圧力ステップごとに圧力及びひずみを記録)

3.3 変位計測

コニカル・シート・ハッチ及び観察窓と耐圧殻間の相対変位(すべり量)を計測するために、耐圧殻にひずみ

ゲージ式変位計を設置した。計測箇所は、Fig. 4 に示すように、コニカル・シート・ハッチ及び観察窓について各3点とした。

なお、耐圧殻内部から外部への計測用リード線(ビデオカメラ用を含む)取り出しには、コニカル・シート・ハッチ中心にあるハンドル貫通孔を利用した。

3.4 モニター(ビデオカメラ)

試験時におけるコニカル・シート・ハッチ部及び観察窓部等球殻内部の状況を常時観察するために、Fig. 3 に示すように模型内に2台のビデオカメラを設置し、テレビによるモニター及びビデオテープへの記録を行った。また、加圧時のシール性能を確認するために、アクリル窓内面には和紙をはり付けて、漏えいが生じた場合にはテレビ画面から容易に検知できるようにした。なお、漏えい水と模型内のスウェットを識別するため、加圧水は墨汁の200倍液とした。

3.5 試験方法

耐圧殻を加圧タンクに封入後、加圧試験として、実船の潜水深度圧の1.5倍に相当する 77.5 kg/cm^2 までの耐圧試験及び耐圧殻が圧壊するまで加圧する圧壊試験を行った。

耐圧試験は、 77.5 kg/cm^2 まで段階的に加圧して、 77.5 kg/cm^2 で長時間保圧後、同様に段階的に減圧する方法とし、各水圧段階においてひずみ、変位等の計測を行っ

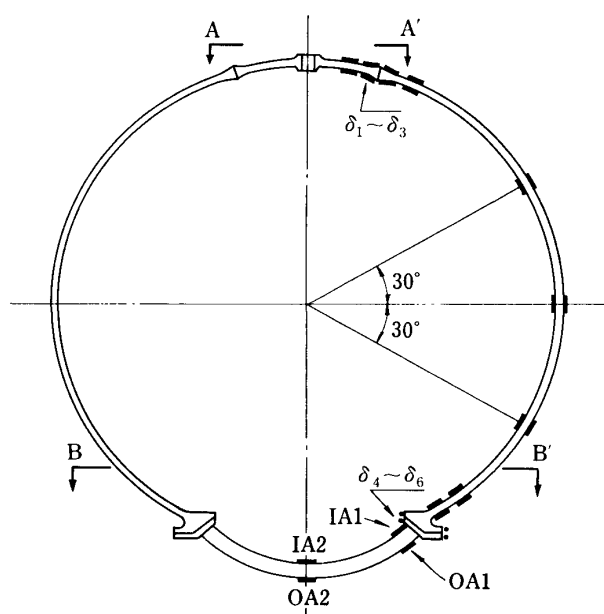


Fig. 4.1 Arrangement of Strain Gauges (1/2)

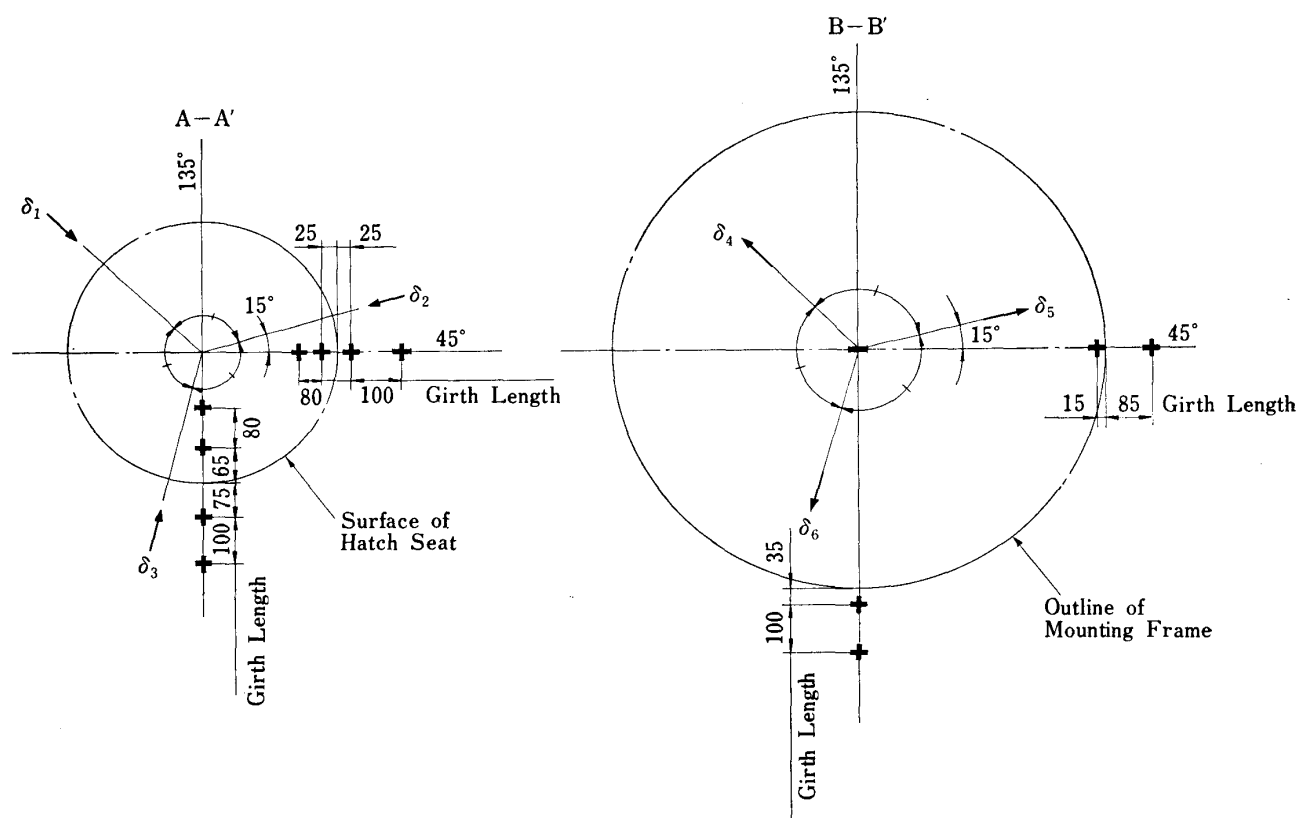


Fig. 4.2 Arrangement of Strain Gauges (2/2)

た。加減圧は、Fig. 5 に示すように $10 \text{ kg/cm}^2 \times 7 + 7.5 \text{ kg/cm}^2 \times 1$ の 8 ステップとした。なお、耐压試験終了後、耐压殻のハッチを開放して主としてシール状況についての目視による検査を行った。

圧壊試験は、圧壊圧力及び圧壊モードを求めるため、同様にひずみ、変位等の計測を行いながら、耐压殻が圧壊に至るまで段階的に加圧していった。加圧は、Fig. 6 に示すように 80 kg/cm^2 までは 20 kg/cm^2 間隔 (4 ステップ)、 $80 \sim 110 \text{ kg/cm}^2$ は 5 kg/cm^2 間隔 (6 ステップ)、 110 kg/cm^2 以上では 2.5 kg/cm^2 間隔とした (結果的には 21 ステップまでであった)。なお、圧壊試験に際して

は、圧壊時の衝撃を緩和するために、模型内に 75% まで注水を行った。

加圧試験の各ステップに要した時間は、昇圧あるいは降圧に約 2 分、圧力静定までに約 3 分、計測に約 2 分の

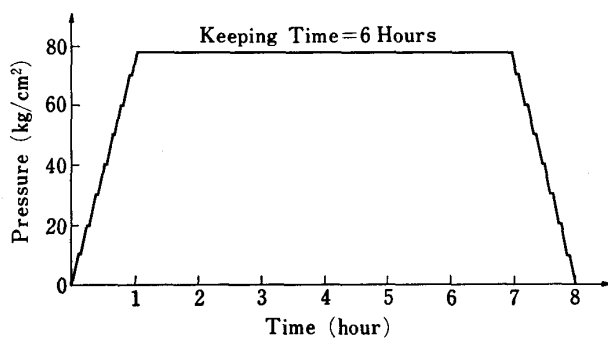


Fig. 5 Pressure Diagram for Pressure Test

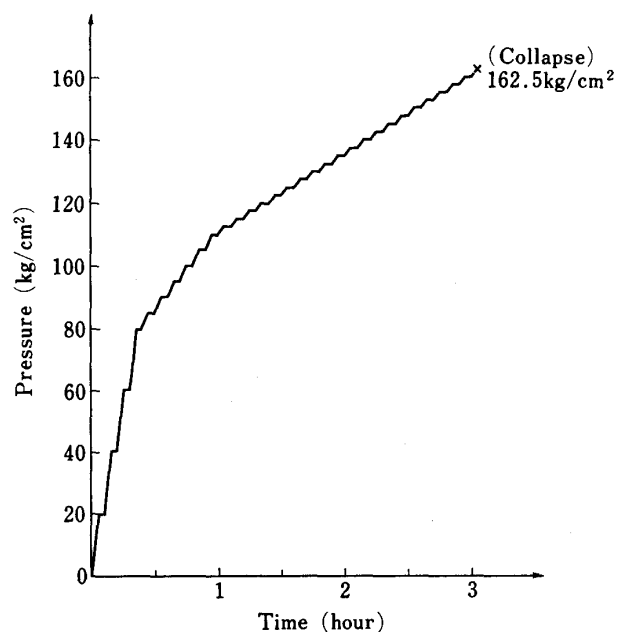


Fig. 6 Pressure Diagram for Collapse Test

合計約7分であった。

4. 試験結果及び計算値との比較

耐圧試験及び圧壊試験の結果から、コニカル・シート・ハッチ及び観察窓を含めた球形耐圧殻の耐圧強度及び圧壊強度、ハッチ及び窓と耐圧殻本体の相対変位（すべり量）等について、実験値と設計時に求められた計算値の比較・検討を行った。また、ハッチ部及び観察窓部のシール性能については、試験結果の概要をとりまとめた。

4.1 応力分布

耐圧試験時のひずみ計測結果から求められた、実船の潜水深度圧 51.5 kg/cm^2 における、コニカル・シート・ハッチ部及び観察窓近傍の鋼構造部の応力分布を **Fig. 7** 及び **Fig. 8** にそれぞれ示す。また、設計時の大型構造解析プログラム MISA (MITSUI STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAM) による応力解析の計算結果についても、比較のため同図に併せて示す。**Fig. 7** のコニカル・シート・ハッチ部の応力分布では、実験値と計算

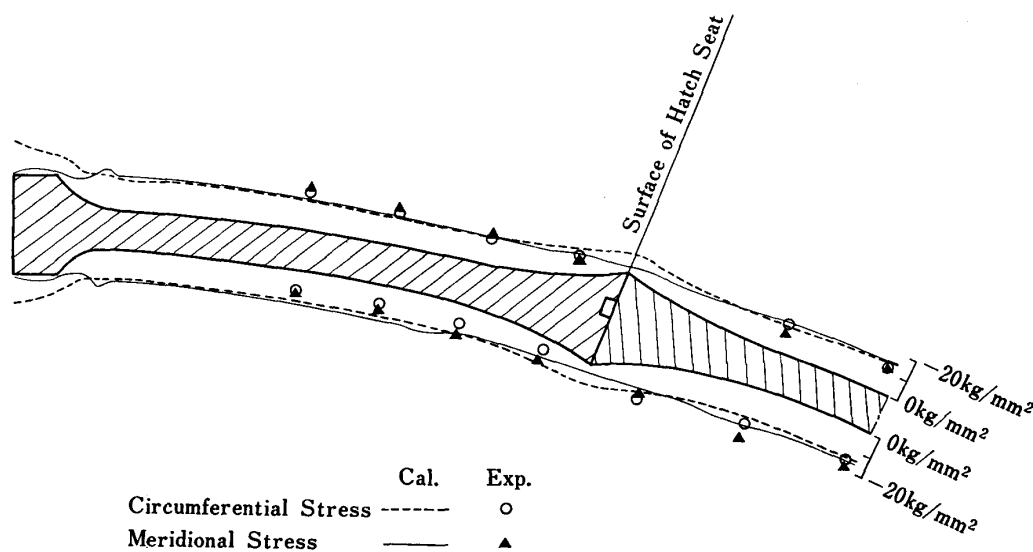


Fig. 7 Stress Distribution in Conical Seat Hatch Part

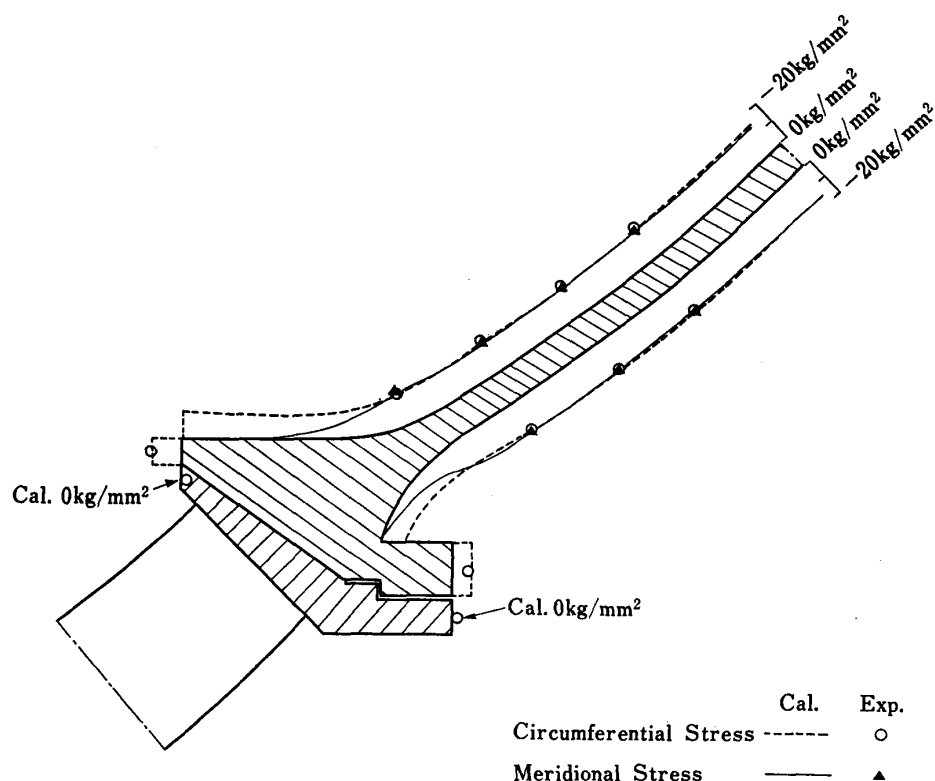


Fig. 8 Stress Distribution in Hemi-Viewport Part

値の間に若干の相違が認められる。この要因としては、前記応力解析においてはハッチ・シート面は連続であるとして計算されているが、一方、実験では若干シート面のなじみの影響を受けたことが考えられる。Fig. 8 の観察窓近傍の応力分布では、マウンティングリング部を除いて、実験値と計算値は良好な一致を示している。実験では、マウンティングリングに周方向応力が少し生じ、理論計算の仮定（周方向応力は 0）と若干異なる挙動がみられるが、応力値は低く強度上問題はないものと考えられる。

アクリル樹脂製観察窓の応力についても、実験値と計算値を比較して Table 1 に示しているが、両者の間にはほぼ良好な一致が認められる。

Table 1 Stress in Acrylic Viewport

		Calculation	Experiment
IA1	σ_θ	-2.07	-2.03
	σ_l	-2.07	-2.10
OA1	σ_θ	-1.87	-1.82
	σ_l	-1.87	-1.85
IA2	$\sigma_{\theta,l}$	-2.07	-2.09
OA2	$\sigma_{\theta,l}$	-1.87	-2.01

Unit: kg/mm²

σ_θ ; Circumferential Stress

σ_l ; Meridional Stress

また、一般球殻に相当する耐压殻の赤道部近傍の応力について、実験値は応力解析による計算値とほぼ一致した。

4.2 相対変位

耐压試験時において、コニカル・シート・ハッチと耐压殻間及び観察窓と耐压殻間の相対変位の計測を行ったが、コニカル・シート・ハッチと耐压殻間では有意の相対変位は認められず、ハッチと耐压殻間にはすべりが生じないことが確認された。

一方、アクリル樹脂製観察窓と耐压殻間では、ほぼ圧力に比例した相対変位（すべり量）が計測された。耐压試験時における、観察窓と耐压殻間の相対変位についての計測結果を Fig. 9 に示す。同図から、各計測点における相対変位がかなり異なっていること（一様にはすべっていないこと）が認められる。また、圧力 77.5 kg/cm² での保圧時における相対変位の時間的変化を Fig. 10 に示しているが、すべり量（相対変位）は保圧 3 時間位ま

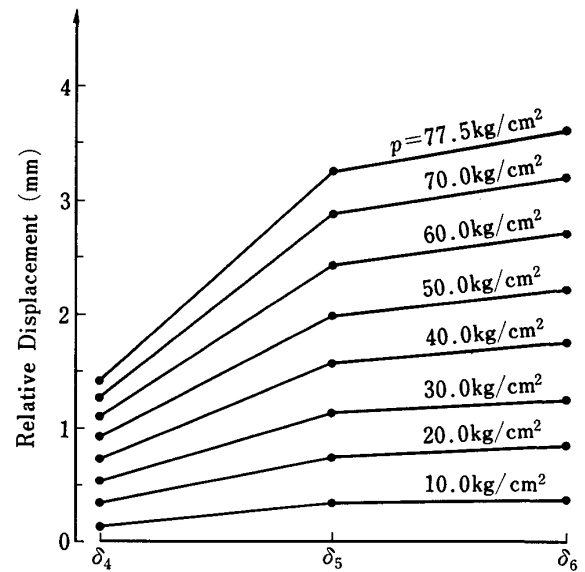


Fig. 9 Relative Displacement between Acrylic Viewport and Mounting Ring in Increasing Pressure

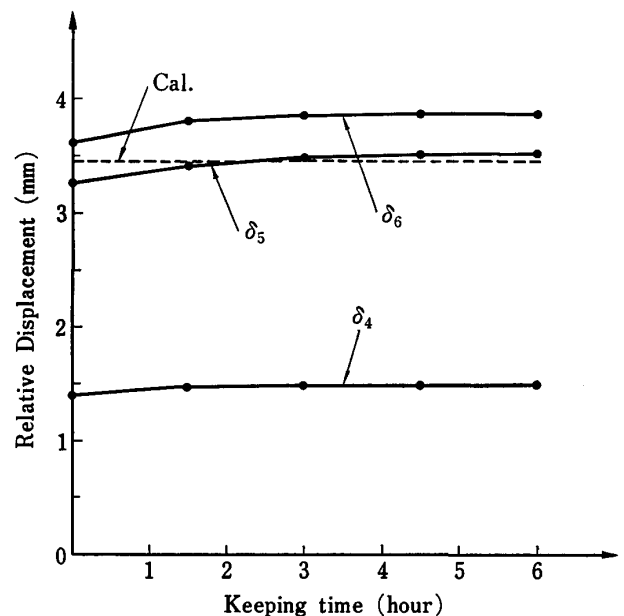


Fig. 10 Change of Relative Displacement between Acrylic Viewport and Mounting Ring at Pressure 77.5 kg/cm²

で若干漸増している。同図には、観察窓とマウンティングリング間には摩擦がないと仮定して求められたすべり量の計算値を併せて示しているが、実験値のうち δ_5 及び δ_6 はほぼ計算値に等しい値である。なお、減圧時におけるすべり量は増圧時とは若干異なる傾向を示し、圧力を常圧に減じてもその量は元に復さなかった。

4.3 圧壊圧力及び圧壊モード

圧壊試験は、計測を行いながら段階的に圧力を上げていったが、耐压殻は 162.5 kg/cm² から 165 kg/cm² への

昇圧段階で瞬時の爆発音とともに圧壊した。同時に加圧タンクの圧力は常圧となった。この圧壊圧力値は、設計時に求められた一般球殻部についての D.T.M.B. の方法による計算値（予測値） 170 kg/cm^2 とほぼ一致している。

圧壊試験時における、圧力増加に伴うコンカル・シート・ハッチ近傍のひずみ分布の変化について、子午線方向ひずみ分布を Fig. 11 に、周方向ひずみ分布を Fig. 12 にそれぞれ示す。両図から、圧力の増加につれてコンカル・シート・ハッチではその中央部が押し込まれる

形で大変形（塑性変形）が進行し、また、耐圧殻の補強部でもハッチからの曲げモーメントにより塑性ひずみが増加していることが認められる。なお、その他の計測点ではひずみ計測値について特に異常はなかった。

試験終了後、圧壊の状況について観察を行ったが、コンカル・シート・ハッチはその曲率が反転するまで変形した状態で耐圧殻内へ飛びぬけていた。また、耐圧殻のハッチ周辺の補強部では若干の永久変形が認められた。一方、アクリル製観察窓本体は 20 数片に分離・飛散していたが、観察窓枠周辺には、異常は認められなかった。

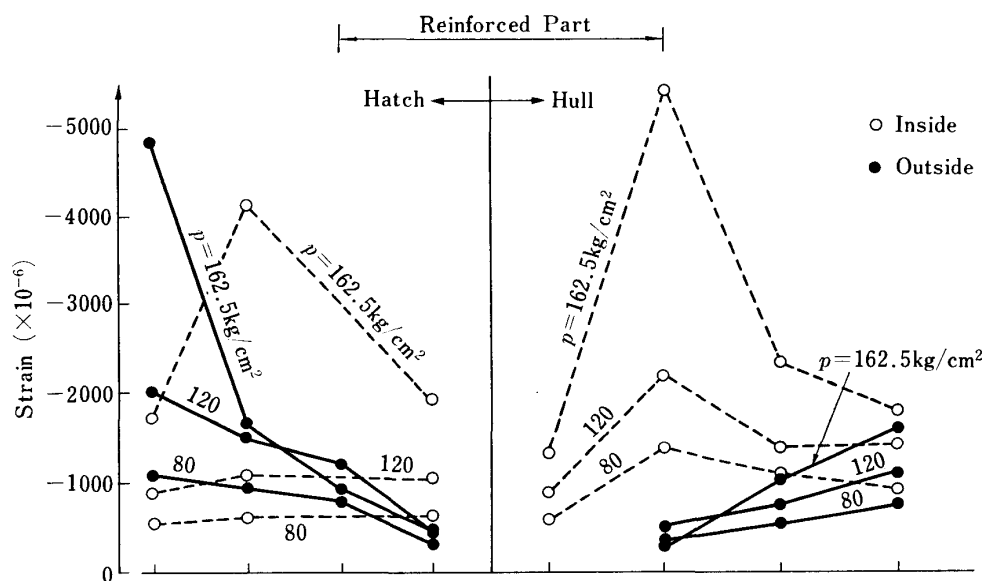


Fig. 11 Meridional Strain Distribution in Conical Seat Hatch Part

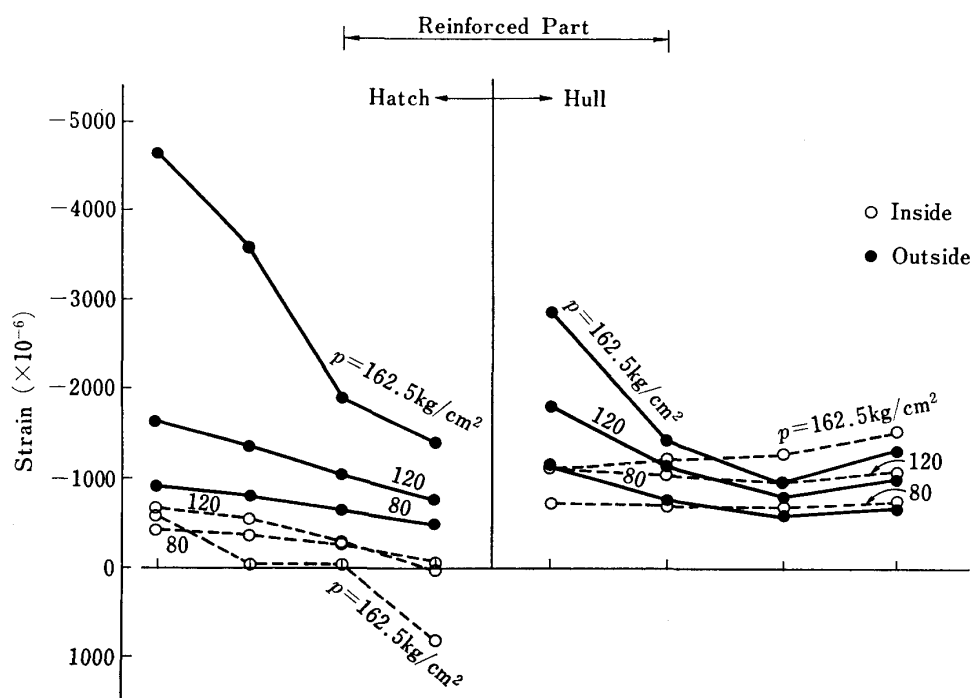


Fig. 12 Circumferential Strain Distribution in Conical Seat Hatch Part

また、耐压殻の一般球殻部においても異常はなかった。以上の状況から、圧壊はコンカル・シート・ハッチが耐压殻内へ押し込まれる形で生じ、その衝撃力によって観察窓が壊れたものと推察される。

なお、試験時に、圧壊圧力に近づくにつれてコンカル・シート・ハッチの変形が進行する状況は、ビデオカメラによるモニターテレビからも観察された。

4.4 シール性能

コンカル・シート・ハッチ部及び観察窓部のシール性能を確認するために、耐压試験時にビデオカメラによる観察及び試験終了後ハッチ開放時の目視による検査を行った。

コンカル・シート・ハッチ部では、耐压試験で漏水は発生せず、十分なシール性能を有することが確認された。

一方、観察窓部では加圧段階でごく微量の漏れがビデオカメラによるモニターテレビから観察され、圧力を 77.5 kg/cm^2 に保持して約 12 分後に再びごく微量の漏水が生じ、その後も時たまごくわずかの漏れが発生した (Photo. 1 参照)。漏水量については、ピペットを用いてキャリブレーションを行ったが、圧力 77.5 kg/cm^2 で 2 時間保圧後の漏水量 (推定値) は約 5 cc であった。

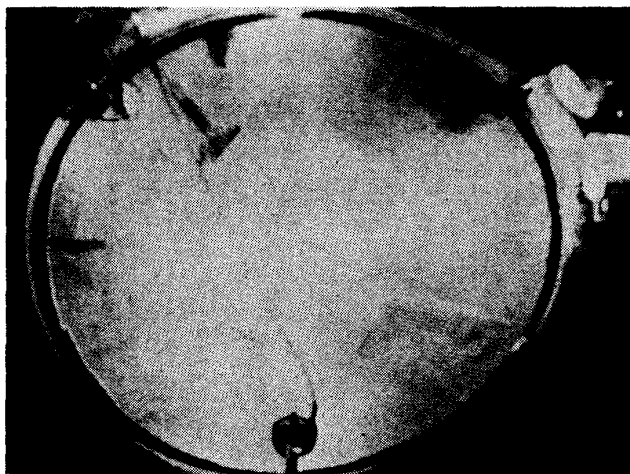


Photo. 1 Observation of Leakage at Hemi-View-port during Hydraulic Test

5. 考 察

試験結果及び設計時の計算結果等について総合的な検討を行い、球形耐压殻の耐压強度、圧壊強度及びシール性能に関して、以下に若干の考察を加えた。

5.1 耐压強度

耐压試験におけるひずみ、変位等の計測結果から、ハッチ及び観察窓を含めた耐压殻の応力の実験値は、設計時における F.E.M. による応力解析の計算値とほぼ良好

な一致を示し、ハッチ部及び観察窓部の補強部に局部的な曲げあるいは応力集中は生じないことが分かった。したがって、耐压殻本体とハッチ及び観察窓は、強度上ほぼ一体と見なされる挙動をするものと考えられる。また、コンカル・シート・ハッチと耐压殻間では有意の相対変位 (すべり量) は計測されず、ハッチの面取り角 (5°) の選定は適切なものであったと考えられる。以上のことから、本潜水船の球形耐压殻は十分な耐压強度を有しており、その設計法は妥当なものであると考えられる。

5.2 圧壊強度

耐压殻の圧壊は、圧力 162.5 kg/cm^2 において、コンカル・シート・ハッチが曲率が反転するまで変形して耐压殻内へ押し込まれる形で生じたが、この圧壊圧力値は、設計時に D.T.M.B. 方式に従って求められた一般球殻部に対する圧壊圧力の計算値 (予想値) 170 kg/cm^2 とほぼ一致している。コンカル・シート・ハッチ部の塑性変形が進行する状況は、ひずみ計測及びモニター用のビデオカメラからも確認され、耐压殻全体から考えると、ハッチ部における塑性座屈という様式で圧壊が生じた。コンカル・シート・ハッチ部については、設計時の目標である一般球殻部と同程度の強度を持つことが確認され、したがって、同耐压殻は十分な圧壊強度を有するものと考えられる。

5.3 シール性能

試験の結果、アクリル樹脂製観察窓部においてごく微量の漏えいが認められたため、この原因を探求する目的で数回の試験を実施して、漏えいの状況について繰り返し調査・観察を行ったが、その結果は耐压試験時とほぼ同じ傾向であった。ごく微量の漏れは、加圧時、保圧及び減圧時の区別なく時たま発生し、圧力の増加に比例した漏れの進行は全く認められないことが分かった。これらの事実から判断して、この漏えいは耐压殻及びマウンティングリングの変形による影響を受けたものではなく、観察窓とマウンティングリングの擦り合わせという局部的な問題に帰結されるものと考えられる。この問題については、更に原因を究明して対策をたてて、シール性能の改良を行うことが必要であろうと考えられる。

6. む す び

三井造船 (株) において開発中の高性能有人潜水船の球形耐压殻について、実船と同一寸法の耐压殻模型を製作し、耐压試験及び圧壊試験を行った結果、概略以下のようなことが分かった。

(1) 耐压試験において、ハッチ及び観察窓を含む耐压殻

の応力（実験値）は，設計時の応力解析による計算値とほぼ良好な一致を示し，局所的な曲げあるいは応力集中は生じなかった。

- (2) コニカル・シート・ハッチと耐圧殻間では，有意の相対変位（すべり量）は計測されず，ハッチの面取り角（5°）の選定は適切であったと考えられる。
- (3) 耐圧殻の圧壊は，圧力 162.5 kg/cm² で生じ，コニカル・シート・ハッチが耐圧殻内へ押し込まれた形であった。この圧壊圧力値は，設計時の D.T.M.B. 方式による一般球殻部に対する圧壊予想値 170 kg/cm² とほぼ一致している。
- (4) 以上の結果から，本潜水船の球形耐圧殻は十分な耐圧強度及び圧壊強度を有しており，その設計法は妥当なものであると考えられる。

本研究は，三井造船（株）と（財）日本海事協会の共同研究として行われたものであり，三井造船（株）船舶・

海洋プロジェクト事業本部，同玉野造船工場，同玉野研究所ほか関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本海事協会；鋼船規則集（昭和 56 年版）（1981）
- 2) 三井造船（株）船舶・海洋プロジェクト事業本部；潜水船球形耐圧殻の設計および製作，三井造船技報，第 115 号（1982）
- 3) 金井一彦ほか；球殻の耐圧強度に関する実験研究，日本造船学会論文集，第 132 号（1972）
- 4) 遠藤倫正ほか；深海潜水調査船の耐圧殻の設計および製作，日本造船学会論文集，第 148 号（1980）
- 5) 遠藤倫正ほか；2000 m 潜水調査船のコニカルシートハッチふたについて，関西造船協会誌，第 178 号（1980）
- 6) M. A. Krenzke, J. G. Pulos; Recent Developments in Pressure Hull Structures and Materials for Hydrospace Vehicles, D.T.M.B. Report 2137 (1965)
- 7) 6000 m 深海潜水調査船の開発研究・事業報告書，日本船用機器開発協会（1970）