

セラミックスを用いた軽比重・高強度浮力材の研究

矢野 裕亮^{*1} 高川 真一^{*1}

エンジニアリングセラミックスは、その小さな比重や高い圧縮強度から、深海用耐圧容器の材料として古くから検討対象となっており、またガラスマイクロバルーンを用いるシンタクチックフォームの浮力材の内部にセラミックス製マクロ球を埋めることで浮力材としての軽比重・高強度化を図ろうとする計画もあった。しかしセラミックスは瀬戸物と同じで脆性材料であり、ちょっとした衝撃等で破損しやすく、多数用いられていると一つが破損した場合、一気に誘爆する恐れもあることから、なかなか実用化には踏み切れていない。

本研究では、エンジニアリングセラミックス製の深海用耐圧容器を志向する中で、まず第一歩として浮力材に適用することを目的とし、試験用サンプルとしての半球を製作し、誘爆防止の指標である信頼性を確保するための形状のいびつさ(不正球度:真球度ならびに板厚分布)を簡単な方法で計測した。そして約20年前の試作品と比較して不正球度が大きく改善されていることを見出した。

キーワード: 浮力材, エンジニアリングセラミックス, 真球度, 曲率半径, 圧縮強度

Study on buoyancy material by engineering ceramics

Yusuke YANO^{*2} Shinich TAKAGAWA^{*2}

Engineering Ceramics has been a candidate material for deep-sea pressure vessels because of its light density and large compressive strength. A plan had also been prepared to install ceramic macro-spheres in syntactic foam made of glass-microballoon in order to lessen its specific gravity and to enlarge its pressure capability. However, ceramic is a brittle material and may suffer from chain reaction of implosion by any failure.

The main purpose of this study is to establish the methodology of fabricating the deep-sea ceramic pressure vessels, and the first step of this study is to apply the ceramic pressure spherical vessel to deep-sea buoyancy module. So, hemispheres of test samples were fabricated and their shapes were minutely measured using simple dial-gauges in order to confirm their reliabilities to retard the chain reactions. The measured results showed that the spherical irregularities were very much improved compared with the samples of ab. 20 years ago.

Keywords : Buoyancy Material, Engineering ceramics, Sphericity, Radius of curvature, Compressive strength

* 1 海洋科学技術センター 海洋技術研究部

* 2 Japan Marine Science and Technology Center, Marine Technology Department

1. はじめに

1960年バチスカーフ型潜水船“トリエステ”がマリアナ海溝チャレンジャー海淵(10,911m)への潜航に成功して、世界各国の世界最深部への挑戦は終わったが、大きな水圧が作用する深海での調査活動は、今日でも様々な困難が伴う。

“トリエステ”は世界最深部への到達に開発の主眼を置いたため、運動性能は大きく制限され、実質的な調査活動を行うことは不可能であった。“トリエステ”の場合、搭乗人員の生命維持のための耐压殻、空調設備、蓄電池など潜航に必要な機器を搭載すると、海中で中性浮量を確保することはできず、比重0.75程度のカソリンを浮力材として搭載していた。しかし揮発性が高く発火/爆発の危険性を伴うことや、圧力による体積変化が大きいことなど、浮力材としての使用には問題が多いため、1964年に竣工した米国“ALVIN”以降の潜水調査船では微小中空ガラス球を樹脂で固化させたシタクチックフォームが主に用いられている。

深海用シタクチックフォームは、エポキシ樹脂とガラス微小中空球で組成されたものがほとんどであり、ガラス微小中空球の外形は20～150ミクロン、膜厚は1～2μm、比重は0.2～0.3程度で真球度の高い球体が選別され使用されている。軽比重化のため微小ガラス球の充填率の向上に関しても、粒径の異なるガラス球を組み合わせるなどの工夫(Binary Mixture)が行われてきたが、世界最深部で使用できる“かいこう”浮力材の場合、圧壊強度127.5MPa(1,300kgf/cm²)、比重は0.63程度であり、同形式を発展させることにより軽比重化を進めることは困難であると考えられる。また有人潜水船の場合、「初期不正等を考慮に入れた耐压殻等の圧壊強度が、実験及び解析により十分裏付けられているなら、耐压殻等は設計潜水深度の1.5倍に300mを加えた深度における相当する圧力に対して圧壊を生じない構造でなければならない」との規定がある。このため現行規則の上では、同強度の浮力材を稼働水深8,000m以上の有人潜水船へ適用することは、事実上不可能である。

本研究では世界最深部でも使用可能な圧壊強度を持つ、浮力材及び耐压容器を開発することを目的とし、構造材料としてセラミックスを採用することを検討する。セラミックスはその材料特性上、内在する微小欠陥を完全に除去することは難しく、また焼成時の変形により高い精度の加工が

困難であるなど課題も多い。このため本格的なエンジニアリングセラミックスの研究が開始されて長い年月を経た今日でも、限られた用途を除き、構造材料としての活用は進んでいない。

本研究の初期段階では、エンジニアリングセラミックスの一種であるアルミナを用いたセラミックス球の製作や、小径球体に対する形状測定方法の検討を行った。また本試作球及び約20年前に製作した球体の形状測定を行い、製作精度や製造工程の改良点について検討した。

2. 研究の経緯

海洋科学技術センターが1985年に運用を開始した3,000m級無人探査機“ドルフィン3K”の開発段階においては、セラミックス球とシタクチックフォームを組み合わせたハイブリッド型浮力材の採用が検討された。しかし深海無人探査機にハイブリッド型浮力材を採用する場合、必要な容積を確保するために膨大な数のセラミックス球体を搭載することになる。球体形状は圧壊強度に大きく影響を与えるため、全ての球体は高い加工精度で製作される必要がある上、同型式の浮力材の場合、一つの球体が圧壊すると衝撃的な圧力変動により周辺の球体が連鎖的に圧壊するという“誘爆”の発生が懸念される。

上述のような脆性破壊の問題はあるが、エンジニアリングセラミックスの圧縮強度やヤング率は、金属材料に比べ格段に高く、かつ比重は小さい(表1参照)。脆性破壊材料であるため、構造材料として用いる場合、金属材料に比較して大きめの安全率を見込む必要があるが、要求される形状精度を確保することができれば、深海のような高圧環境下における構造材料として、優れた機械的特性を持つ。このためセラミックスを用いた浮力材の開発は、軽比重化を達成する有力な手法であり、実用化が望まれている。

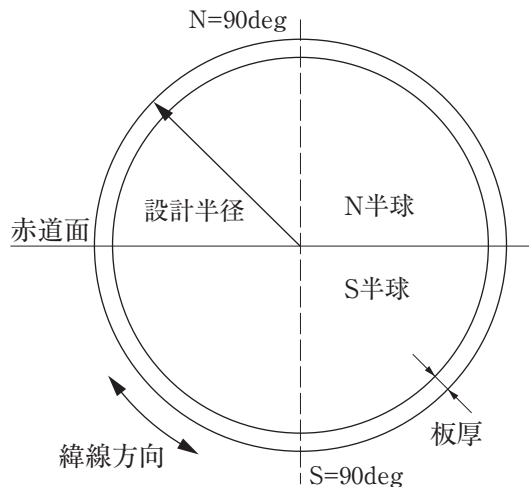
3. アルミナセラミックスによる球体の試作

耐压容器として最も強く、単位体積あたりの質量を最も小さくできるのは、球形である。そこで本研究ではまず耐压容器形状として球形を考え、その材料としてエンジニアリングセラミックスの一種であるアルミナを選定した。アルミナは、サファイアやルビーと同じ結晶(α -Al₂O₃)の焼結体で、

表1 アルミナ及びその他セラミックス材料物性値(参考値)

Table 1 Physical properties of alumina and other ceramics (Reference values)

	アルミナ (Al ₂ O ₃)	炭化珪素 (SiC)	窒化珪素 (Si ₃ N ₄)	ジルコニア (ZrO ₂)
密度 [g/cm ³]	3.8	3.16	3.2	6.0
3点曲げ強度 [MPa]	310	450	610	1000
圧縮強度 [MPa]	2160	---	3820	5690
ヤング率 [GPa]	360	440	290	200
ポアソン比	0.23	0.17	0.28	0.31
破壊靱性値 [MPam ^{1/2}]	3～4	2～3	5	4～5



※) 赤道面は研削加工の後、エポキシ接着剤で接合

図1 セラミックス浮力材の概念図

Fig. 1 Conception diagram of buoyancy material by ceramics

耐食性、耐摩耗性、高い強度などの特長を備えている。また他のエンジニアリングセラミックスに比べ加工が容易であるため、産業機械部品等に幅広く利用されている。

試作球の外径は100mmで、板厚1.5mmと板厚2.0mmの2種類を製作した。セラミックスを用いて一体成形の球体を製作することは、製造工程上不可能であるため、半球2個をエポキシ系接着剤で接合することで球体を形成している。このため接合面(赤道面)はできるだけ平滑にする必要があり、研削加工を施している。(図1参照)

3.1. 圧壊強度の推定と球体比重

セラミックスのような脆性材料は、荷重が増加する場合もほとんど変形することなく破壊に至る。このため弾性座屈設計の手法を用いて、各種セラミックス材料で中空体を製作した場合の圧壊強度及び必要膜厚の試算を行い、試作球の諸定数を決定した。

試作球の板厚は、アルミナセラミックスの許容応力(降伏応力)及び半径を設定することにより、(1)式を用いて計算することができる。

$$\sigma_f = \frac{P_0 r}{2t} \rightarrow t = \frac{P_0 r}{2\sigma_f} \quad (1)$$

ここで、

r	:	球の半径[m]
t	:	板厚[m]
P ₀	:	設計作用水圧 [MPa]
σ _f	:	膜応力 [MPa]

またこのときの弾性座屈圧力P_{cr}は、(2)式により計算することができる。上記計算により、P_{cr}がP₀よりも大きいことを確認して必要板厚を決定する。

$$P_{cr} = \left[\frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \right] \left(\frac{t}{r} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、

P _{cr}	:	弾性座屈圧力 [MPa]
E	:	ヤング率 [MPa]
ν	:	ポアソン比 [無次元数]

上記簡易計算式を用いて強度計算を行うと、板厚1.5mmのアルミナセラミックス球の場合、圧壊強度130MPa、球体比重0.332(計算値)、板厚2.0mmの球体の場合、設計圧壊強度170MPa、球体比重0.438(計算値)となる。

4. 不正球度が圧壊強度に及ぼす影響

設計通りの完全な球体であれば、水圧により生じる部材内部の応力は、同半径の地点で一様であるが、実際に製作された球体は製造工程に起因する歪みを有するため、均一な応力状態とはならない。このため実際の球殻の圧壊強度を考える場合、設計時の球の設計半径ではなく、製作後の球体の最大局部曲率半径と板厚が重要な要因となる。(図2参照)

この曲率半径の変動を定量的に評価するために、一般的に真球度計測が行われている。真球度は、球の平均半径を分母、最大局部曲率半径を分子として(3)式のように定義される。

$$\text{真球度} = \text{最大局部曲率半径} \div \text{平均半径} \quad (3)$$

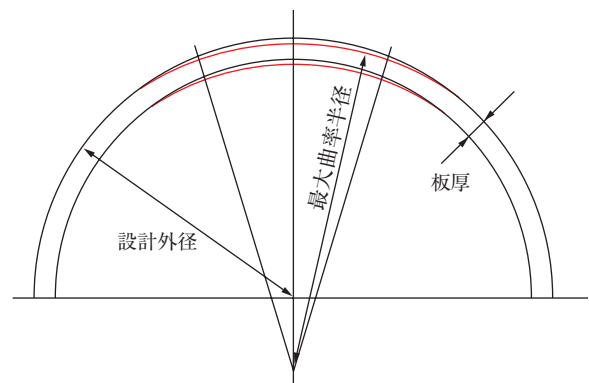


図2 球殻の局部曲率半径

Fig. 2 Local radius of curvature of hemisphere

真球度が1であれば、球体は完全な真球であることを意味する。ただし微小な範囲での局部曲率半径を議論しても、最終的な耐圧殻の強度には関係しないため、実際には球殻の圧壊に影響する範囲(限界円弧長: L_c)の弧の中での局部曲率半径r_cと、平均板厚t_aとを定め、これらの値を用いて圧壊強度を確認する。

$$Lc = \frac{2.2\sqrt{r_c t_a}}{\left\{\frac{3}{4}(1-\nu^2)\right\}^{1/4}} \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

(4)式において、 ν は材料のポアソン比を示す。

作用水圧、球体形状及び安全率を設定することにより、必要板厚を算出することができるが、必要以上の板厚増加は重量の増大を伴い、浮力材への適用ができなくなることを意味する。このため実機への適用を念頭に置く場合、製作される球体の不正球度を予測して、必要十分な板厚を設定することが必要となる。

4.1. 不正球度計測

球体の不正球度計測として、真球度計測ならびに板厚計測を行った。

(4)式を用いて試作球の限界円弧長を計算すると、板厚1.5mmの場合で20.806mm、また板厚2.0mmの場合で24.025mmとなる。そこでここでは限界円弧長として20mmを目安とした。

そして計測点を表2に示すように設定した。なお局部曲率半径の計測にあたっては、互いに直行する2方向での曲率半径を計測する必要があるが、2つの半球はまだ接合されていないため、接合線付近では子午線方向の曲率半径を計測することができない。そのため子午線と直角する方向の曲率半径のみを計測して比較した。

4.1.1. 真球度計測

有人潜水船の耐圧殻のような大径球体では、球殻内に設置した計測装置を用いて、球体内面の各点で半径を計測し、真球度を算出する方法が用いられる。しかし小径球体に対して同様の測定方法を用いた場合、球半径に対する相対的な測定誤差が大きくなるため、正確な真球度を算出することが困難となる。

このため本研究では、精密に機械加工を施した治具とダイヤルゲージ(分解能:1 μ m)を組み合わせた3点計測法で、球体の局部曲率半径を計測する方法を用いた。ここでは測定子間距離(=2a)を限界円弧長Lcの検討から20mmとした。(図3参照)なお、本研究で用いた真球度計測手法は非常に簡便ではあるが、後述するように焼成時の固定治具の痕跡と思われる球体表面の微小な曲率の変化を見つけてだすことができる極めて有効な手法である。

このようにすると、ピタゴラスの定理より、 $R^2 = (R-b)^2 + a^2$ が成り立ち、測定量bは(5)式のように表される。(図4参照)

$$b = R - (R^2 - a^2)^{1/2} \quad (5)$$

また逆に球体表面の局部曲率半径(R_{local})は、真球度測定装置で計測したスピンドルの移動距離bから、(6)式を用いて計算できる。

$$R_{\text{local}} = (a^2/b + b)/2 \quad (6)$$

各計測点における局部曲率半径は、真球度測定装置のダイヤルゲージ先端部を各計測点に一致させるように位置・角度を微調整した上で、両測定子との高さの差を読み取り、この値から(6)式を用いて算出した。球体表面の約240点で局部曲率半径を測定した後、(3)式を用いてセラ

表2 局部曲率半径及び板厚の計測点

Table 2 Gauging points of local radius of curvature and thickness

緯度方向		真球度測定 経度方向	板厚測定 経度方向
S	0度	----	10度ピッチ
	10度～60度	10度ピッチ	10度ピッチ
	70度	20度ピッチ	20度ピッチ
N	80度	90度ピッチ	90度ピッチ
	90度	1点	1点

備考) N: N半球、S: S半球を示す

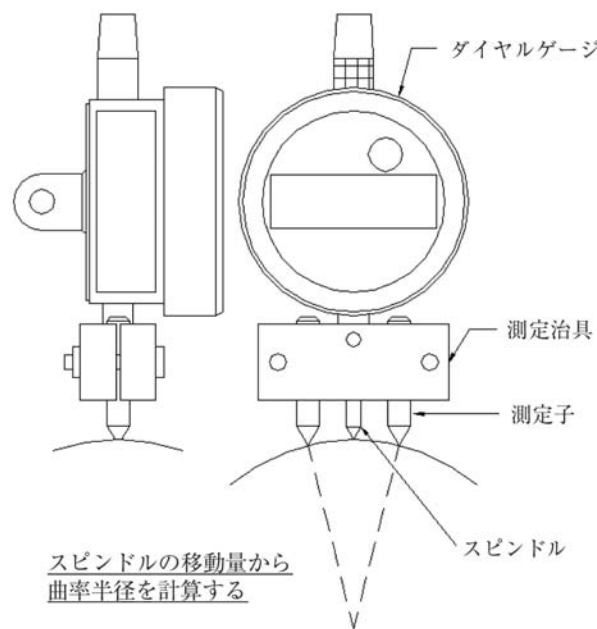


図3 真球度測定装置概略図

Fig. 3 Conception diagram of sphericity gauging equipment

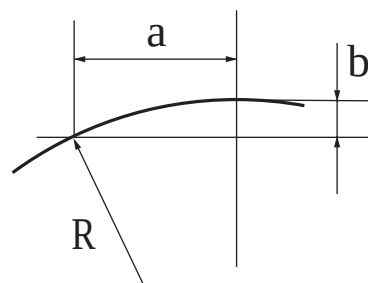


図4 球体表面の局部曲率半径

Fig. 4 Local radius of curvature on hemisphere

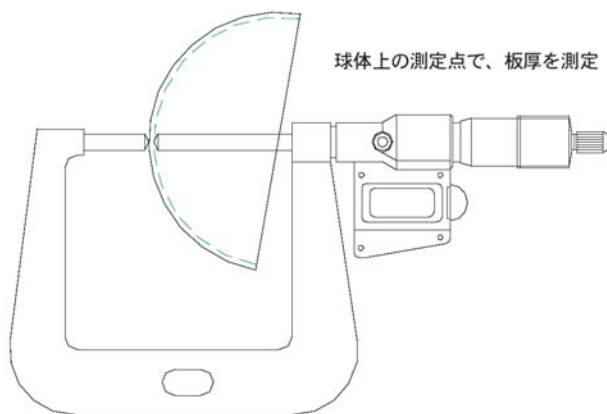


図5 板厚測定装置概略図

Fig. 5 Conception diagram of thickness gauging equipment

ミックス半球の真球度を求めた。

測定の開始時と終了時には、板厚1mmと2mmのジルコニア製ゲージブロックと平面度 $1\mu\text{m}$ 以下の平面測定台を組み合わせることで測定精度の検定を行い、本手法による測定誤差は最大で $4/1,000\text{mm}$ 程度であることを確認している。

4.1.2. 板厚計測

本研究で製作したセラミックス球体の直径や板厚は、潜水船耐圧殻と比較して小さいため、板厚はマイクロメータ（分解能： $1\mu\text{m}$ ）を用いて計測することとした。計測精度を一定に保つには、同一測定器具で半球全域の板厚を測定することが望ましいため、図5に示すようなフレーム形状のマイクロメータを製作した。このマイクロメータのスピンドル先端部は、球体球面加工（ $\phi=4\text{mm}$ ）を施しており、各計測点に一致させるように位置、角度を微調整した上で、板厚を計測した。

測定の開始時と終了時には、板厚1mmと2mmのジルコニア製ゲージブロックを用いて測定精度の検定を行い、本手法による測定誤差は最大で $2/1,000\text{mm}$ 程度であることを確認している。

4.2. 不正球度計測結果

本研究の初期段階で製作したアルミナセラミックス試作球（外径：100mm、板厚：1.5mmと2.0mm）及び“ドルフィン3K”開発時の試作球に対して、前述の真球度計測及び板厚計測を実施した。

4.2.1. 真球度計測結果と比較

上記測定手法により算出した、設計板厚1.5mmのセラミックス半球（N半球、S半球）の曲率半径比（＝局部曲率半径÷平均半径）の等高線を図6、図7に、また“ドルフィン3K”開発時の試作球（'85試作球）の曲率半径比等高線を図8に示す。等高線図は、N半球とS半球毎に、極（N90度、またはS90度）を中心として展開した球体表面を示している。また計測した局部曲率半径の統計解析結果を表3に示す。

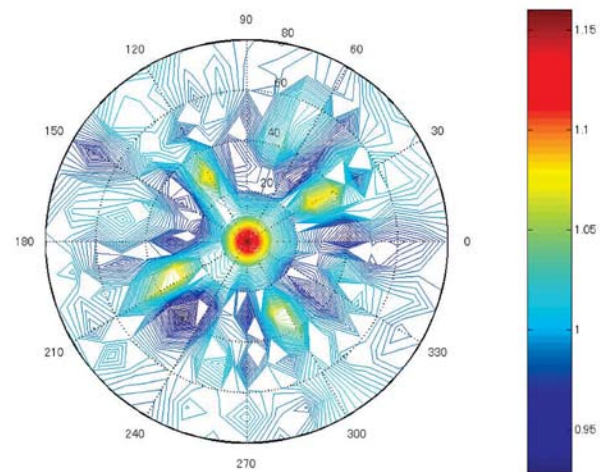


図6 '03試作球（1.5mm-N）の曲率半径比等高線

Fig. 6 Contour line of sphericity of Prototype Hemisphere '03 (1.5mm-N)

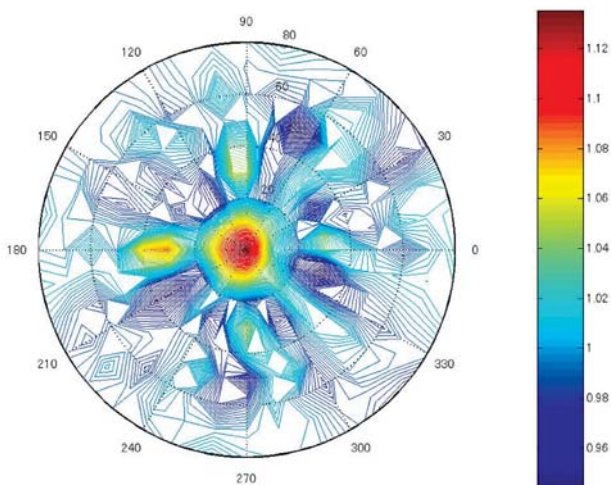


図7 '03試作球（1.5mm-S）の曲率半径比等高線

Fig. 7 Contour line of sphericity of Prototype Hemisphere '03 (1.5mm-S)

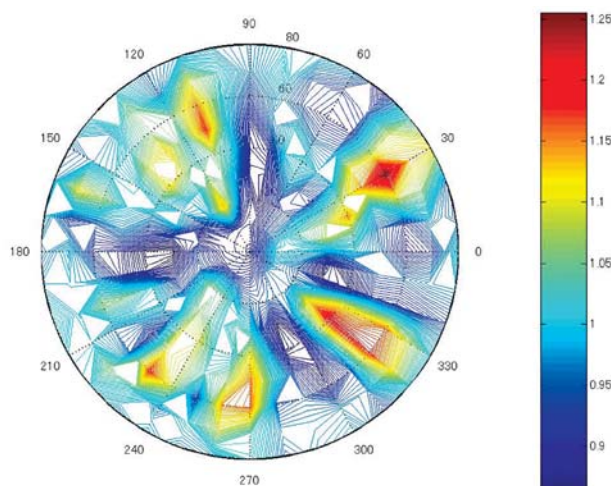


図8 '85試作球の曲率半径比等高線

Fig. 8 Contour line of sphericity of Prototype Hemisphere '85

表3 セラミックス球の真球度計測結果
Table 3 Gauged sphericity of ceramic hemispheres

	‘85試作球	‘03試作球 (1.5mm-N)	‘03試作球 (1.5mm-S)	‘03試作球 (2.0mm-N)	‘03試作球 (2.0mm-S)
平均半径[mm]	46.344	49.867	49.631	49.135	49.835
真球度	1.258	1.173	1.152	1.138	1.120
範 囲	0.400	0.247	0.210	0.201	0.178
分 散	1.04×10^{-2}	7.69×10^{-4}	5.82×10^{-4}	5.79×10^{-4}	5.81×10^{-4}
標準偏差	0.102	0.028	0.024	0.024	0.024

“ドルフィン3K”開発当時のアルミナ製の球体(‘85試作球)と比較して、本研究で新たに製作した球体(‘03試作球)はいずれも真球に近く、また局部曲率半径のばらつきも小さくなっている。これは約20年前と比較して、セラミックスの加工技術や工作機械の精度が向上したことに関係しており、セラミックスを構造用材料として用いた場合の信頼性が、飛躍的に向上していることを示している。しかし、焼成時の固定方法に起因すると思われる天頂部極部の曲率半径の増大や、経度方向の90度毎に治具の痕跡なども見られ、今後のセラミックス球体の焼成工程においては改良が必要である。

4.2.2. 板厚計測結果と比較

上記測定手法により算出した設計板厚1.5mmのセラミックス半球(N半球, S半球)の板厚等高線を図9, 図10に、また“ドルフィン3K”開発時の試作球の板厚等高線を図11に示す。等高線図は、N半球とS半球毎に、極(N90度、またはS90度)を中心として展開した球体表面を示している。また板厚計測値の統計解析結果を表4に示す。

本研究で製作したアルミナ球の板厚は、全般的に設計値に近い値であるが、天頂部が若干薄くなっている。また“ドルフィン3K”開発時の球体(‘85試作球)は板厚のばらつきが大きく、最大値と最小値の差は0.7mm程度である。また天頂部付近では板厚が厚く、緯度30度近辺では、円環状に板厚が薄くなっていることが分かる。また経度0度近辺では板厚が薄くなっているが、180度付近では厚くなっていることが分かる。

“ドルフィン3K”開発当時の球体(‘85試作球)と比較して、本研究で新たに製作した球体(‘03試作球)の板厚のばらつきは、全般的に小さくなっている。これは約20年前と比較して、セラミックスの加工技術や工作機械の精度が向上したことに関係しており、セラミックスを構造用材料として用いた場合の信頼性が飛躍的に向上していることを示している。

5. まとめと今後の展望

本試験研究報告では、浮力材としての活用を目的にしたセラミックス半球の形状計測手法、およびその計測結果を記述した。形状計測の結果、“ドルフィン3K”開発時に比較して、セラミックス球の製作精度の向上が確認できたが、有

表4 セラミックス球の板厚計測結果
Table 4 Gauged thickness of ceramic hemispheres

	‘85試作球	‘03試作球 (1.5mm-N)	‘03試作球 (1.5mm-S)
平均半径 [mm]	46.344	49.867	49.631
平均板厚 [mm]	1.398	1.575	1.568
最大板厚 [mm]	1.876	1.660	1.680
最小板厚 [mm]	1.130	1.455	1.432
範 囲 [mm]	0.746	0.205	0.248
分 散	2.90×10^{-2}	1.10×10^{-3}	1.37×10^{-3}
標準偏差	0.170	0.033	0.037

人潜水船耐圧殻(1981年竣工の有人潜水船“しんかい2000”の耐圧殻真球度は、1.07で、1990年竣工の“しんかい6500”では1.004に向上)に比較して、大きな局所的な形状歪みが確認された。この局部曲率半径や板厚のばらつきは、成形・焼成などセラミックス製造工程に起因して生じており、本試作球の測定結果を基に、製造過程を再検討することで、ある程度改良できるものと考えられる。

局部曲率半径については、半球同士の接合をまだ行っていないために、子午線に直交する方向のみの曲率半径分布が得られただけである。したがって、半球同士を接合した上で子午線方向の曲率半径も計測し、耐圧強度分布を求めておくことが必要である。そこで今後はこれを実施した上で、高圧実験水槽で試作球の圧壊試験を行い、形状歪みと圧壊圧力の関係について更に検討を進める予定である。これによりセラミックスのような脆性破壊材料の初期不正と圧壊強度の関連を明確にし、炭化珪素など更に圧縮強度の高い材料の適用可能性について検討することを予定している。

本研究で製作したような小径球体を、有人潜水船や無人探査機用の浮力材として搭載する場合、必要となる球体は数百から数千個と膨大な数量となることが考えられる。現段階では、セラミックスに内在する微小欠陥を完全に取り除くことは極めて困難であり、個体数が増えた場合、破壊の

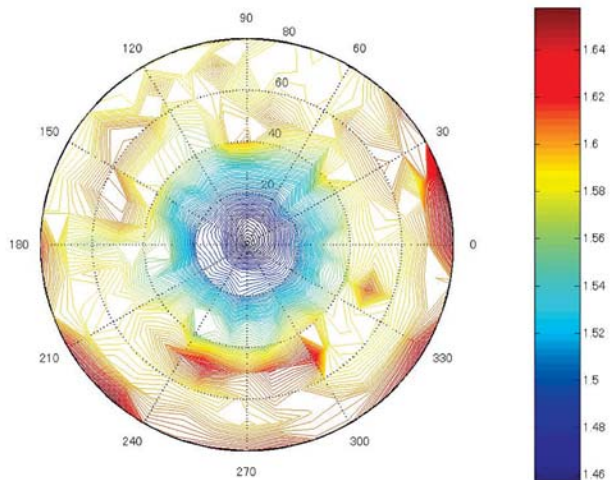


図9 '03試作球 (1.5mm-N) の板厚等高線

Fig. 9 Contour line of thickness of Prototype Hemisphere '03 (1.5mm-N)

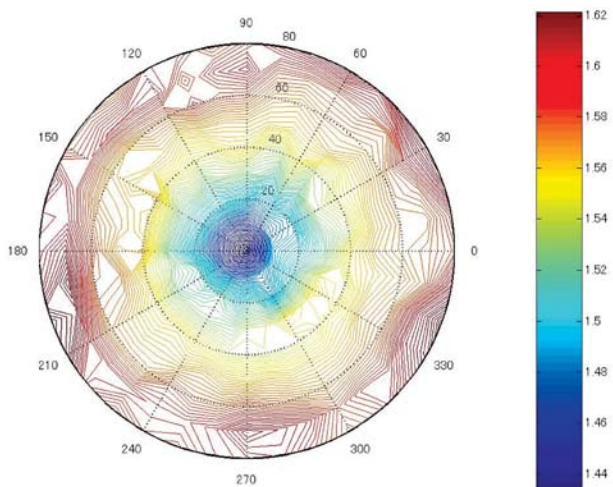


図10 '03試作球 (1.5mm-S) の板厚等高線

Fig. 10 Contour line of thickness of Prototype Hemisphere '03 (1.5mm-S)

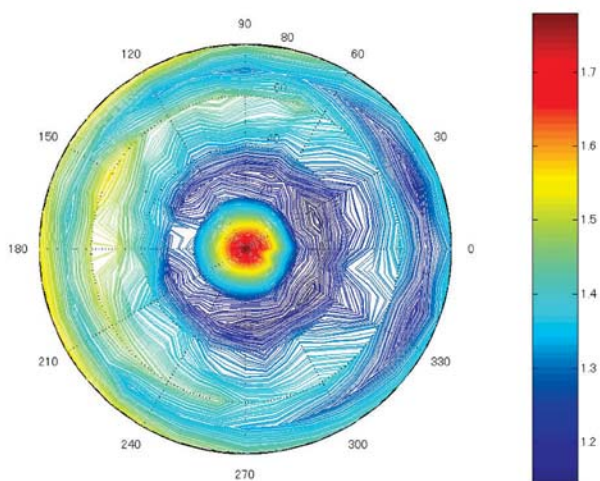


図11 '85試作球の板厚等高線

Fig. 11 Contour line of thickness of Prototype Hemisphere '85

危険性が増大することとなる。このため実機への搭載を達成するためには、上述のような構造強度上の検討に加え、一定以上の品質を保つための統計学的手法を取り入れた設計・検査方法を確立することが課題となる。

6. 参考文献

- 1) J. D. Stachiw "Exploratory Evaluation of Alumina Ceramic Housings for Deep Submergence Service Fourth Generation Housings" Naval Ocean Systems Center Technical Report 1355 (1990)
- 2) J. D. Stachiw "Pressure resistant ceramic housings for deep-submergence unmanned vehicles" Marine Technology Society Journal Vol.24, No.2 pp 59-62 (1990)
- 3) Graham S. Howkes, Philip J. Ballou "The ocean evelest concept: A versatile manned submersible for full ocean depth" Marine Technology Society Journal Vol.24, No.2 pp 79-86 (1990)
- 4) 浦環, 高川真一 "海中ロボット" 成山堂書店 (1997)
- 5) 藤田俊助, 高川真一, 浜巖, 石川隆之, 亀井明弘 "6000m級潜水調査船用高強度軽比重浮力材の試作試験" 海洋科学技術センター試験研究報告12 pp 21-26 (1984)
- 6) 社団法人 日本深海技術協会 "フルデプス有人潜水船システムの調査研究報告書" (1996)
- 7) 日本海事協会 "鋼船規則" (T編; 潜水船)

(原稿受理: 平成15年12月16日)