

金属は語らない，でも我慢には限度がある

-耐圧容器製作に際しての材料試験-

松尾 成光

機器開発の仕事に携わってきた長い歴史の中には、非常に上手くいった仕事もあれば、本報告のように当初の目的に達せず、実用に至らなかった仕事もいくつかありました。この金属製耐圧容器の開発は、10年程前に取り組んだ実験項目で少し古い話題です。また、不本意な仕事となった一例でもあり、「技術室報告」の原稿として投稿すべきか戸惑いましたが、今後の、「モノ作り」をする上で何かの参考になればとの思いで記述しました。



筆者近景

1. はじめに

日本列島の周辺では、陸域と海域の境界で帯状に並んだ場所に数多くの巨大地震が起きている。海底の地殻構造や地震活動を明らかにする事は、地震予知の精度向上をはかる上で極めて重要な資料となる。しかし、陸上で今日行なわれているテレメータによる即時データ伝送は、自己浮上式海底地震計による観測では利用出来ない。また、海底地震計を一度海底に設置すると電源の供給およびパラメーターの変更は不可能である。周りが海水に包まれて電磁波を通さないこと、数百気圧に及ぶ水圧等の課題があり大変厳しい。一方、海底地震観測では、陸上観測網では検知できなかった海域における地震活動が観測可能であり、震源を取り囲む観測点配置により震源決定精度を高める等の多くの利点がある。

地震予知研究センターでは、1991年頃から海底地震計の開発・製作を行った。この地震計は自己浮上方式の海底地震計(京大IV型)で直径17インチ(約43cm)ガラス球を使用し、その中に2Hz地震計3成分、アンプ、16ビットA/D変換器、リチウム電池等をコンパクトに納めている。ガラス製耐圧容器の有利な点は、容器の肉厚が14mmで水深6700mの静水圧に耐えることができ、金属製容器に比べて価格が安価なことが挙げられる。さらには、透明であるためにシステムの中味を外部からチェックすることができる。一方、静水圧に対して強いガラス球殻には欠点もある。そのひとつが衝撃に対して脆く、そのために慎重に取り扱わなくてはならないことである。また、耐圧限界に近い水深で長期間の観測を行った場合、ガラス球殻の内部が弾けてガラス粉末を生じたり、半球の接合面でもガラスの剥離が起きたりする。

自己浮上式海底地震計は、船から海面まで降ろした後は自由落下で海底に着定させることにより設置する。したがって海底地形の平坦な場所を設置点に選ぶ。通常そのような場所は砂や泥が堆積しており、陸上での地震観測のように岩盤上に固定するという事は望めない。海底の岩盤上に地震計を固定するには、有人潜水艇で地震計を運び設置するとい

う方法が考えられる。しかしながら、ガラス球の耐圧容器は「しんかい2000」等の有人潜で取り扱うことができない。その理由は、ガラス球が万一破損した場合、爆縮の衝撃により潜水艇がダメージを受ける可能性があるからである。

そこで、我々はガラス球よりも強度のある金属製耐圧容器の開発を試みた。本稿ではその開発過程における、1) 材料強度を知る上で目安となる応力とひずみの測定。2) 圧縮強度が高く、浮力を持たせる軽い材料の選択。3) 球殻耐圧容器製作上の適正な要素設計。4) 耐圧容器の耐水圧試験結果等について報告する。

2. ひずみの測定

耐圧容器を製作するに際して、あらかじめ使用する材料の強度を知り、適性な設計をすることが必要不可欠である。特に、数千mの海底下で静水圧に耐えることができ、さらに、観測終了後の回収時には自ら浮上可能な十分な浮力がなくてはならない。かつ、海水中で用いるので耐腐食性の高い材料を選ばなければならない等の追求事項がある。特に強度的な面での安全性の確認を得ることは重要である。その意味で応力、ひずみの関係結果を定量的に調べ、球殻材料として適確に把握して設計・製作に役立てる事とした。応力 - ひずみの測定にはいろいろな方法がある。単位長さ当りの変形量を示すひずみ (L/L) は計測のできる直接的な量であり、材料の強度に関して最も基本的な概念である事はよく知られている。この実験では、万能試験機を使用し応力を生ずる荷重はロードセルで測定した。また、ひずみはひずみゲージにより直接測定した。

2 - 1 . 万能試験機システム

一般に引張試験を行うことの出来る試験機で、試験片の取付位置を変えるか、または、試験片の取付金具の運動方向を逆方向にすることによって、試験片に圧縮荷重を加えることが出来る。さらに、圧縮試験が出来る場合には曲げ試験用の補助装置を併用する事によって曲げ試験を行うことができる。また、同一試験機でねじり試験にも利用できる。このように1台の試験機でふたつ以上の試験ができるものを万能試験機という(機械工学辞典より抜粋)。

今回、使用した万能試験機のシステム構成を図1に示す(油圧式荷重機・荷重計)。

2 - 2 . ロードセル

ロードセルは、荷重を加えるとその大きさに対応した電気信号を発生する変換器である。ロードセルの受感部の形状は、測定する荷重の大きさ、使用目的、精度などによってことなるが、荷重が加わったときに受感部の変形によって、荷重軸が偏心のないように対称な形状にしている。この測定には50トンまで測定可能な円柱型ロードセル(図1)を用いた。



図1 . 万能試験機システム

2 - 3 . ロードセルの校正

ロードセルを用いて測定する場合には、出力値と荷重との関係を知るために、ロードセルを校正しておくことが重要である。表 1・図 2 に示すように油圧式の荷重機で 1 トンから始めて荷重を徐々に増加し最終は 47.5 トンまで加圧した。その後、荷重を減圧して初期値に戻した。これによって、定格荷重出力の再現性および非直線性などの荷重計としての精度の値を知る事ができる。標準万能試験機の荷重計の（読み）値を入力して校正係数、 $50 / t$ を得た。

表 1 . 試験データ

荷重(トン)	加圧時出力(mV)	減圧時出力(mV)	荷重(トン)	加圧時出力(mV)	減圧時出力(mV)
1.0	57	48	22.5	1143	1116
2.0	106	99	25.0	1269	1238
3.0	156	145	27.5	1395	1362
4.0	206	196	30.0	1520	1484
5.0	255	245	32.5	1643	1616
7.5	382	364	35.0	1768	1741
10.0	510	491	37.5	1894	1865
12.5	634	616	40.0	2021	1992
15.0	762	744	42.5	2144	2115
17.5	890	868	45.0	2272	2244
20.0	1020	984	47.5	2370	2225

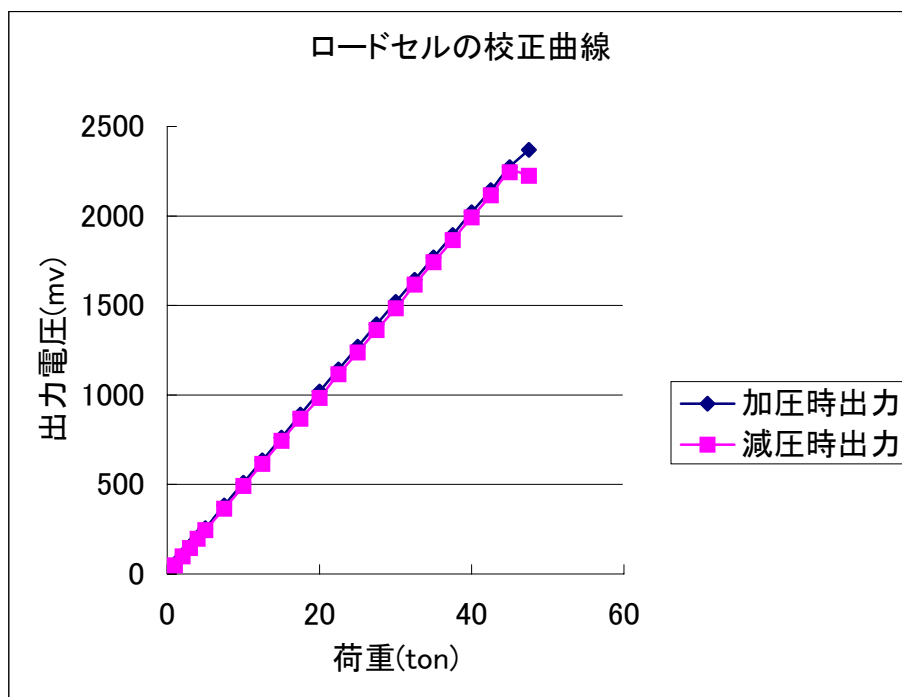


図 2 . 校正曲線

3 . 応力とひずみの関係

金属材料の変形や強さなどの力学的特性を把握することは、耐圧容器（球殻）設計の基本であった。実際に耐圧容器製作に用いた高力アルミ合金 A7075-T6-耐力 56（JIS 規格）材料の試料片を作り、ロゼットゲージによる応力解析をおこなった。ロゼットゲージによる応力解析とは、外力を受けてその表面にひずみを生じている場合で、その主ひずみ方向や大きさが不明の場合に、その表面の3方向のひずみを測ればその値から計算によって、主ひずみ及びその方向、最大せん断方向を知ることが出来るというものである。一般には計算を簡単にするために、図4に示すように、その3方向の相対角度が定められている⁵⁾。

図5に材料試験状態を示した。試験結果を、図6に応力 - ひずみ曲線図で示した。縦軸に鉛直方向の応力 (kg/cm^2) 横軸に鉛直方向のひずみ (%) を取ってプロットしてある。0からB点までは、応力とひずみの関係は直線で正比例の関係、これはフックの法則である。このB点の応力を比例限度と呼ぶ。比例限度をすぎると比例限度以下に比べて応力をかけている以上にひずみが増える (B - B)。

この段階で荷重を取り去ると0 - B に平行にC点に戻り、0 - C がB点での永久ひずみとして残る (0.2%)。また、荷重をA点まで加え続けると永久ひずみ (1.2%) が残る結果になった。

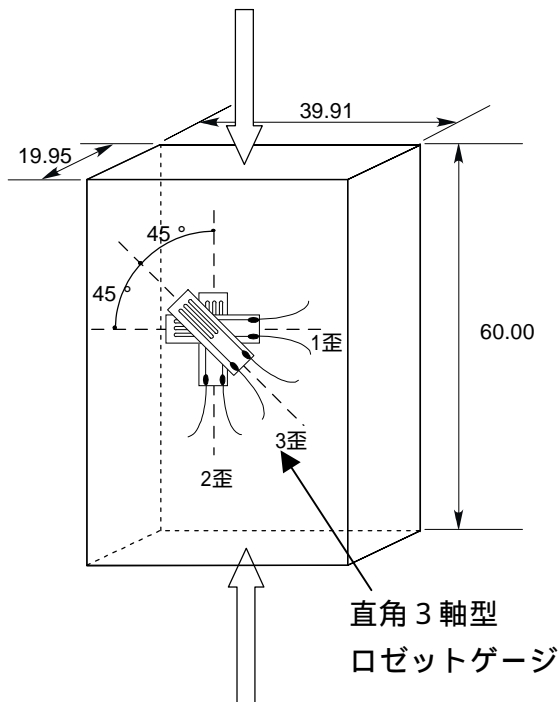


図4 . ゲージの相対角度



工場内部



図5 . 材料試験状態図

表 2 . 試験データ詳細 (一例)

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	ひずみ1	ひずみ2	応力
0	-2	1	0	0	0	0	0.000%	0.000%	0
-53	79	-192	-52	91	-236	-78	0.019%	0.024%	133
-107	165	-401	-115	177	-443	-161	0.040%	0.044%	268
-82	122	-301	-88	137	-345	-129	0.030%	0.035%	205
-110	166	-412	-118	181	-456	-165	0.041%	0.046%	275
-154	234	-577	-165	244	-616	-222	0.058%	0.062%	385
-205	307	-772	-226	314	-801	-289	0.077%	0.080%	513
-256	379	-967	-285	379	-980	-351	0.097%	0.098%	640
-302	443	-1140	-339	438	-1143	-405	0.114%	0.114%	755
-357	514	-1342	-400	504	-1328	-466	0.134%	0.133%	893
-407	583	-1529	-451	567	-1504	-519	0.153%	0.150%	1018
-457	648	-1712	-505	627	-1675	-572	0.171%	0.168%	1143
-506	711	-1893	-558	686	-1844	-628	0.189%	0.184%	1265

データ: ロード・セル出力(mV)、 1面 - 1歪(μ)、 1面 - 2歪(μ)、 1面 - 3歪(μ)、
2面 - 1歪(μ)、 2面 - 2歪(μ)、 2面 - 3歪(μ)

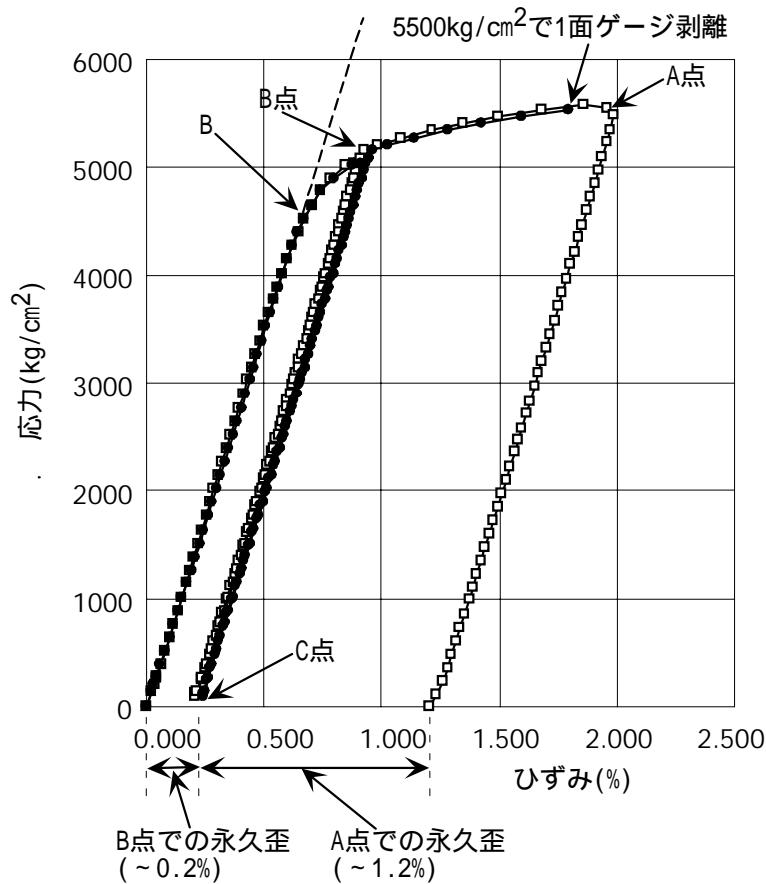


図 6 . 応力・ひずみ曲線図

4 . 材質と耐力

耐圧容器の外径を r_2 、内径を r_1 、半径方向の圧力を r 、接線方向の圧力を t とすると、距離 r における圧力は以下のように表される。(P は水圧)

$$\sigma_t = \frac{r_2^3(r_1^3 + 2r^3)}{2r^3(r_2^3 - r_1^3)} \cdot P_2 \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{r_2^3(r^3 - r_1^3)}{r^3(r_2^3 - r_1^3)} \cdot P_2 \quad (2)$$

耐圧容器が殻構造(薄肉厚)であり、強度として圧縮破壊強度 r のみを考えるとすれば、
 $t = r_2 - r_1 \ll r_2, r_1$ であるから、(1)式より

$$\sigma_t = -\frac{rP_2}{2t}$$

となる。したがって、

$$t < r$$

であれば、耐圧容器は静水圧に耐えられる。

材料力学では耐力(単位: kg/cm^2)といわれる強度表示法がある。今回、使用した高力アルミ A7075-T6 耐力 56 について、試験を行った。深さなどを以下のように考えると、
水圧 $P_2 = 600$ 気圧 (6000m) $600\text{kg}/\text{cm}^2$, 球殻の半径 $r = 240$ mm , 肉厚 $t = 14$ mm の場合、(3)式より

$$\begin{aligned} \text{耐力 } \sigma_t &= 240 \cdot 600 / (2 \cdot 14) \\ &= 5142.8 \text{ kg}/\text{cm}^2 \text{ となる。} \end{aligned}$$

耐力とは応力を途中で除荷した時に 0.2%の永久ひずみが残る応力を示す。つまり、この応力以下では、永久ひずみは 0.2%以下に収まり、材質としての強度面は破壊には至らないと考える。(つまり安全である)

A7075-T6 が耐力 56 ($5600 \text{ kg}/\text{cm}^2$) であるから、安全率を考えると 6000 m の深さは耐力を超えた圧力である。しかしながら、1000 ~ 4000m では十分に使用可能な深さと思われる。上記の仕様で作成した設計図を図 7 に示し、図 8 にこの実験材料で製作した耐圧容器(球殻)を示す。

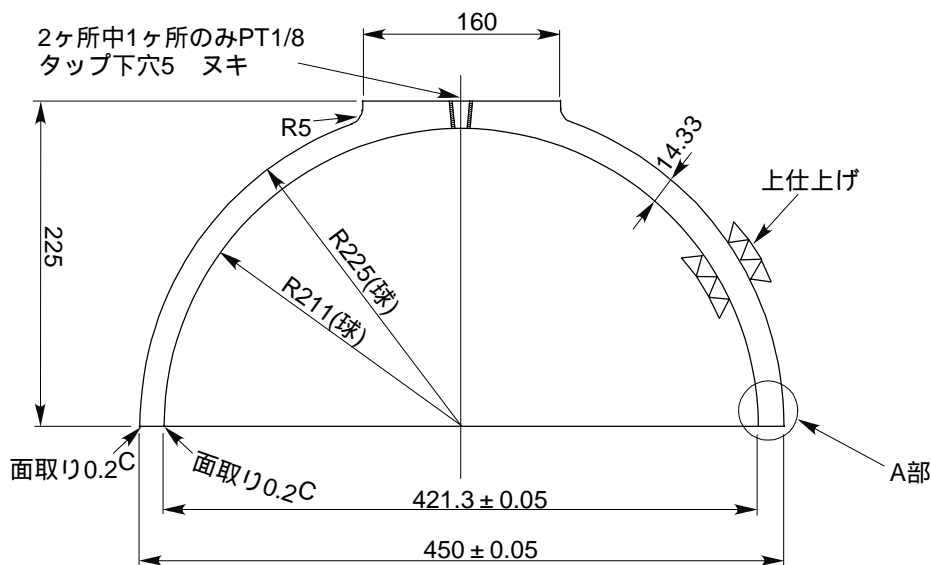


図 7 . 耐圧容器 (球殻)



図 8 . 耐圧容器 (球殻)

浮力

$$\begin{aligned} \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho &= \frac{4}{3} \times 3.14 \times 22.5^3 \times \rho \\ &= 47.688 \text{ kg } (\rho = 1.0) \\ &\Rightarrow 50.073 \text{ kg } (\rho = 1.05) \end{aligned}$$

重量

$$\begin{aligned} 4\pi r_1^2 \rho \cdot \Delta r \\ &= 4 \times 3.14 \times 21.8^2 \times 2.82 \times 1.4 \\ &= 23.565 \text{ kg} \end{aligned}$$

5 . 耐水圧試験

製作を完了した耐圧容器が数千mの海底下の静水圧に十分耐えるか否かを知ることを目的に、耐水圧試験を日油技研工業（埼玉県川越市）で1995年7月28日に行った。図9に高圧実験水槽を示す。この水槽の有効寸法 500×1200cmで最大1200kgfまで静圧加圧が可能である。加圧媒体は水を使用している。

既に応力とひずみの実験により、実験上さしつかえない耐力があることが確かめられているので、耐水圧試験では、残留ひずみが生じない弾性限界内の試験を行う事にした。

実験に先駆けて、球殻を閉めなくてはならない。図10のように、半球どうしをズレがないように合わせ、テープで接合面を保護した後、ステンレスバンドを十文字にかけて固定した。

一回目の測定では0～100kgf/cm²まで加圧した。加圧状態で3分間保持した後、圧を戻し水槽から引き上げて、ハイトゲージとノギスを用いて直接球殻の変形を測定した。この結果は加圧前に計測した計測値と加圧後の計測値との差は耐力内におさまり問題はなかった。また、同時に試験体の表面性状について、特に形状とキズの有無を肉眼で観察したが異常箇所は見出せなかった。

二回目の測定では0～150kgf/cm²と加圧した。



図 9 . 高圧実験装置



図 10 . 耐圧容器 (球殻)



図 11 . 破壊した球殻

前回同様に加圧状態で3分間保持した後、圧を戻し水槽から引き上げた。図11に示すように半球の重ね合わせ面の部分が約3cm口を開き、加圧媒体の水が浸入してほぼ満タンになっていた。

設計上の耐力以下の水圧で予期しなかった破壊に至った要因のひとつとして、1)半球の重ね合わせ面のキズもしくはズレにより水が浸入した。2)球殻が非対称形に変形して、応力集中した等が考えられる。球殻の変形がはなばなしなので、これ以上の実験を読けることは不可能であった。結果的には金属性耐圧容器の開発はこの時点で取りやめになった。

謝辞

この実験課題を進めるにあたって、防災研究所岩井哲博士（現在広島工業大学）には、終始ご指導および多くの貴重な助言を賜りますとともに、万能試験機の使用に便宜をはかっていただき深く感謝の意を表します。また、実験の指針を常に啓示し多くの助言を頂いた安藤雅孝教授（現在名古屋大学）並びに片尾浩博士に深謝します。

さらに、測定結果を左右するとも云われるひずみゲージの接着法について適切にご指導を頂いた行竹英雄博士（故人）には大変お世話になりました。この実験で技術室浅田照行技官同じく技術室の細善信技官にご協力をいただきました。お礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Koichiro OBANA , Hiroshi KATAO , Shigemitsu MATUO and Masataka ANDO
Bull. Disas. Prev. Res. Inst. , Kyoto Univ. , Vol. 44 , Part 4 No 386 , Dec ,
1994 , Development of A New Ocean Botom Seismometer
(Model of Kyoto University)
- 2) (社)日本非破壊検査協会編：日刊工業新聞社
新 非破壊検査便覧, PP. 635-640 応力、ひずみ測定
- 3) 高橋 賞 . 河井正安著：大成社
ひずみ測定入門 - これから使う人のために -
- 4) 松尾成光：1998, 京都大学総合技術部, 技術(研究)発表報告集
- 超音波を利用した海中精密測距装置 -
- 5) 和泉正哲著： 培風館 建築構造力学 2, 1989, PP. 39-40