

50. 海底地震計用耐圧容器

東京大学地震研究所 { 南 雲 昭三郎
小林 平八郎*
是 沢 定 之
開発工業 K. K. 武 山 孝 夫

(昭和45年3月24日発表—昭和45年7月20日受理)

1. 緒 言

日本海溝周辺において海底地震の観測を行うために、耐圧容器を新たに設計し製作した。1つは水深 6000 m に及ぶ太平洋海盆において用いるものであり、1つは日本海溝に沿う大陸斜面において連続観測に用うる1ヶ月記録用のものである。

この論文は、これらの設計と、実際の製作、使用結果について述べたものである。

従来海底の地震観測、或は、その他の観測について数多くの耐圧容器が設計、製作されて来ている。海底地震観測の初期には主に、鋼鉄製円筒が使用され (Ewing 1938, Kanai 1958)、現在もさかんに用いられている (Ewing 1961, Monakhov 1962, Thomson 1962, Nagumo 1965, Rykunov 1967)。USA では高張力アルミニウム球殻がカタログ製品として売り出されているので、近年はほとんど球殻容器が使用され、(Bradner 1964, Arnett 1965, Bradner 1965, Sutton 1965, Thanos 1966)、アルミ球殻は海底地震計のみならず、その他の地球物理学観測にも使用されている (Filloux 1967)。海底に設置される耐圧容器はこの外にも数多く用いられている。

現在の工学的技術から言えば海底における海底地震観測に用うる耐圧容器は、いかようなものも製作可能であろう。しかし、可能であるということと、実用に供し得るということは自ら別のことであり、今回製作された耐圧容器は製作技術の実際性、費用、取扱い操作の簡便性、等に主眼をおいて設計されたものである。

2. 深海用耐圧容器

耐圧容器の使用設置水深が深くなると、容器は全重量と戦ねばならぬ。耐圧容器の重量は取扱い操作に便利かつ安全であるよう軽いことが望ましい。高張力アルミニウム合金の使用は、この要求に対する1つの解答である。しかし、現在の我が国の市場では少量の高力アルミニウム合金 (外径 25 cm 以上の丸棒又は管) を手に入れることは實際上非常に難しい。従って今回は、現在我が国で入手が容易な強じん鋼 SNC2 (ニッケルクロム鋼)

* 現在 東海大学 海洋学部

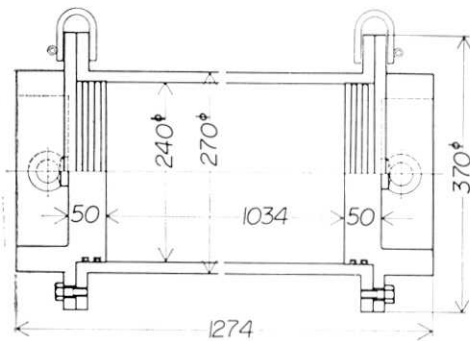


Fig. 1. The sectional view of the deep ocean-bottom type pressure vessel. The material used is the high-strength steel SNC2.

を使用することにした。

耐圧容器の内容積寸法は、内径 240φ 長さ 1 m とした、Fig. 1 に示す。この中に換震器 2 台（自動水準付上下動 1、水平動 1）、増巾器 3 台、テープレコーダー 1 台、水晶時計 1 台、蓄電池（39 Ah×12 V）等が収納され、FM 磁気録音方式で 133 時間の完全自動記録が行われる。

耐圧容器の使用水準として 6000 m あれば日本海溝の東側すなわち太平洋海盆のどこでも使用可能である、それで耐圧強度は 600 kg/cm² 以上とした。又重量は、取扱い操作の便利のように約 200 kg（空气中）

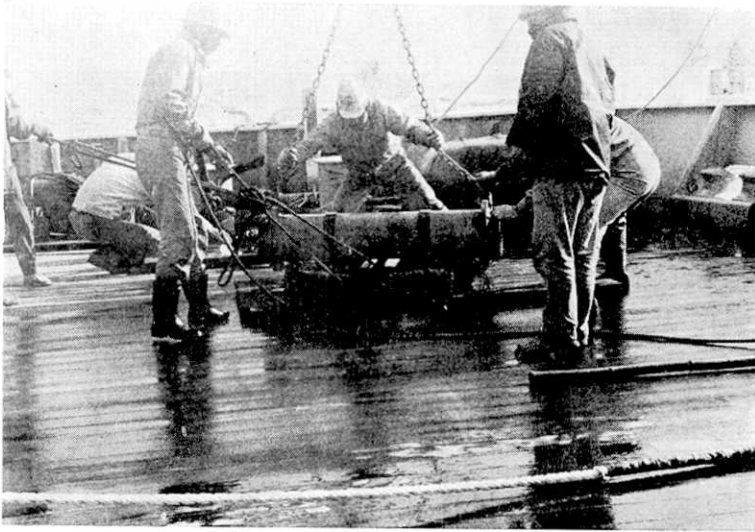


Fig. 2. The deep ocean-bottom type pressure vessel placed upon the deck.

以下とした。300 kg 以上になると、人力で持上げることは著しく困難となり、特別の操作道具が必要となる。

耐圧容器の設計には強度計算が必要である。使用予定材料 SNC2 の降伏値は便らんによれば 70 kg/mm² 以上、引張り強度 85 kg/mm²、比重 7.8 となっている。前に製作した 2000 m 用耐圧容器 (Nagumo, 1965) の材料は STP38 であり、強じん鋼 SNC2 の強度は STP38 の強度の 3 倍以上となっている。それで今回の 6000 m 用耐圧容器の寸法としては、前回製作した 2000 m 用耐圧容器と全くしくとることにした。すなわち、円筒体の肉厚は 15 mm、外径 270 mm、長さ 1274 mm である。次にこの容器の強度を吟味してみる。

1) 設計強度の吟味

耐圧容器は換震器、テープレコーダ等を装備する円筒体とその蓋とからなっている。それぞれについて強度を吟味する。

先づ円筒体については材料の圧縮に対する降伏値が必要である。製鋼所から納入された材料には引張試験による降伏値が示されているだけである。従って圧縮に対する降伏値を求めるために材料試験機で圧縮試験を行ってみた。^{*}

テストピースは耐圧容器の“削りしろ”から取出した。圧縮試験の結果は Fig. 3 に示すように降伏値 84 kg/mm² と求められた。

円筒体の強度計算式として、通常広く用いられているところの外圧を受ける厚肉円筒、薄肉円筒の最大応力と外圧との公式

$$\sigma_{\max} = \{(2k^2)/(k^2 - 1)\} P \quad (\text{厚肉})$$

$$\sigma_{\max} = (b/t)P \quad (\text{薄肉})$$

(ここで P は外圧 (kg/cm²)、 σ_{\max} は最大圧縮応力 (kg/cm²)、 $k = b/a$ 、 b は外径 (cm)、 a は内径 (cm)、 $t = (b - a)$ 肉厚 (cm)) を使用することとし、材料の降伏値として $\sigma_{\max} = 84 \text{ kg/mm}^2$ 、 $b = 13.5 \text{ cm}$ 、 $a = 12.0 \text{ cm}$ を代入すると、降伏が始まる外圧力として、夫々

$$P = 881 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{厚肉})$$

$$P = 933 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{薄肉})$$

を得る。海水比重を 1.03 としてこの外圧力を水深に換算すると、それぞれ 8.55 km、9.05 km となる。これらの値は便覧に出ている規格表による引張降伏値 70 kg/mm² を用いて計算した値の約 20% 増となっている。

次に蓋の強度を考へてみる。蓋の板厚は Oリングを二重に使用しているために厚くなっているので、強度的には円筒部分よりはるかに強くなっている。実際に計算を行ってみると次のようになる。

蓋の強度計算式として通常広く用いられている円周固定支持円板の最大応力と外圧との公式

$$\sigma_{\max} = (3/4)(a/t)^2 P$$

(ここで a は内径 (cm)、 t は板厚 (cm)、 σ_{\max} は最大引張り応力 (kg/cm²)、 P は外圧 (kg/cm²) を用い、 σ_{\max} として製鋼所の試験値 81 kg/mm²、円板の半径 $a = 12.0 \text{ cm}$ 、 $t =$

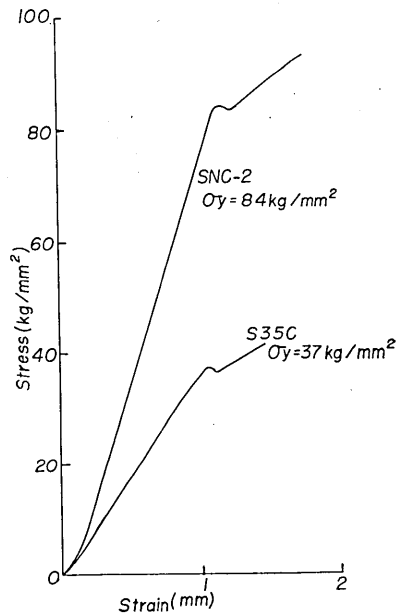


Fig. 3. The compression test curve of the high-strength steel SNC2 which was used for the deep ocean-bottom type pressure vessel.

^{*} 圧縮試験は東京大学工学部機械工学科材料実験室三橋俊作氏により試験機 TOM-5000 D, テストピース寸法 9.8φ×20 mm で行われた。

5.0 cm を代入すると、降伏が始まる外圧は

$$P=1.87 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$$

という非常に大きな値を得る。すなわち蓋の強度は円筒体部の強度の約2倍になっている。

2) 機械加工

耐圧円筒を製作するには、SNC2 の外径 28 cm の丸棒を 12 呎旋盤に取りつけ、外径を 27 cm 迄削る。内側は 24 cm に削出した。材料の調質は切削加工前に行い、加工後焼入れも行いショア硬度 40~45 にした。

円筒の両端に蓋取付用のフランジを溶接した。円筒はフランジの溶接により歪むので、Oリング接触面の機械加工は溶接後切削加工を行った。

3. 1ヶ月観測用耐圧容器

海底における恒常的地震観測には少なくとも1ヶ月巻記録計が必要である。完全自動記録方式では記録時間が長くなると共に電源電池の容量も大きくなる。吾々の現在の記録計の1000時間観測の所要電源容量は約 200 AH×12 V である。これらの電池と記録計を収納するために耐圧容器は大きくなり又重くなる。Snodgrass (1968) は油漬け電池を、耐圧容器に入れずに使用する方式を考案し使用している。しかし、吾々はこの方式の経験がないので今の段階では電池を耐圧容器に入れる方式を採用した。耐圧容器の取扱い操作の上から考えると、通常の観測船の設備で取扱うためにはあまり大型、大重量のものは困る。電池と記録計をすべて一本の耐圧容器に収納すると、寸法・重量共に大きくなり過ぎるので、今回は電池を収納する容器と記録計を収納する容器と二つに分けることにした。

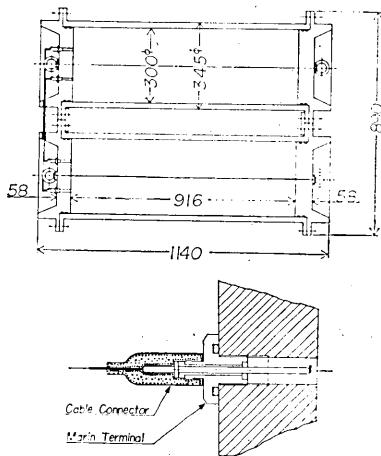


Fig. 4. The sectional view of the monthly recording type pressure vessel and the marine connector. The material used is steel STP38 for the tube and S35C for the cover.

このように二つの容器に分けると水中コネクタで電源も接続することが必要となり、種々の障碍の原因になりがちであるが、今回はこれを試みることにした。

耐圧容器の設計としては先づ重量をおさへて、それに基づいて寸法を決めるという考え方を採った。これは取扱い作業を主にして考へたからである。従って使用水深は 2000 m 以上出来るだけ深くとした。

先づ繫留、回収のロープシステムおよび敷設、揚収作業の便を考えると、水中重量として先端荷重約 500 kg 以下がのぞましい。次に所要容量をもつ電池として既製のものを使うとすると、耐圧容器の内径は 300φ となり有効内長 920 mm となる。それで、肉厚を 20 mm、外径を 340 mm、長さ 1000 mm として重量を計算すると円筒体のみで1本あたり 174 kg となる。材料を S 35C と

し、引張り降伏値 37 kg/cm^2 を用いて耐圧力を計算すると約 400 kg/cm^2 となるので、この肉厚 20 mm にて設計を進めることにした。

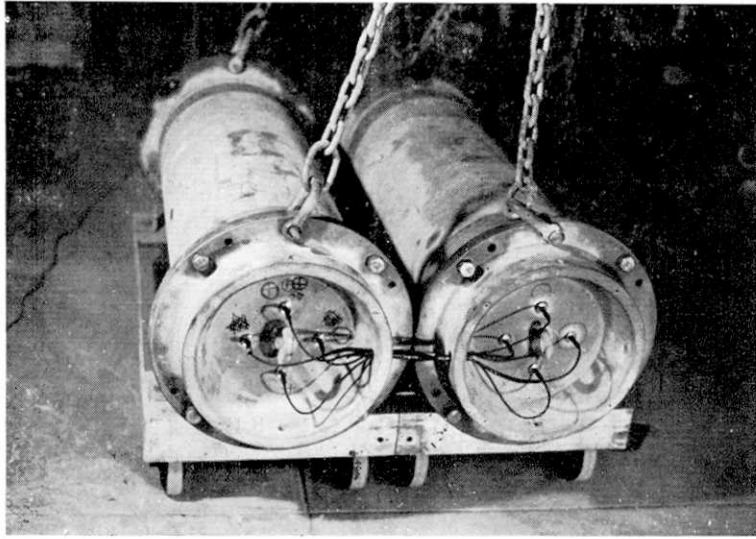


Fig. 5. The monthly type pressure vessels. One is for recording instruments and the other is for batteries. The electrical connection is made by the four marine cables.

今回製作した1ヶ月観測用耐圧容器のスケッチを Fig. 4 に示す。水中コネクタによる電源の接続を Fig. 5 に示す。

1) 円筒胴体部

電池（エアサウルトラパック 104CS×2）の大きさより決定した内径は、余裕を取って 30 cm 、内部長さ 91.6 cm にした。重量制限をしたため円筒肉厚は 20 mm とした。使用する金属材料として、S35C、SNC2、STP38、を予定し各々について検討した。

内径 30 cm 、外径 34 cm 、長さ 1 m の円筒を製作するには、始ず素材外径 35 cm 、内径 28 cm の引抜き鋼管を作り、それより所定の寸法迄切削加工を行う作業計画にした。

S35C、SNC2、の引抜き鋼管を作るには需要の割合が STP38 に比べ、非常に少ないので、値段がいちぢるしく高く（技術的には別に問題なし）なるので、STP38 を用いることにし、Fig. 4 の如く構造設計を行った。

この構造での耐圧強度は、厚肉円筒公式で計算すると 254 kg/cm^2 、水深に換算すると 2.46 km である。もし同一構造で材料に S35C を使用すると水深約 4 km 、SNC2 では水深約 9 km に設置可能の耐圧強度となる。

2) 蓋

耐圧円筒容器へ記録計、電池等を出し入れに用いられる。防水は二重Oリングシールを用いた。蓋の強度を計算してみると、板厚 58 mm 、材料 S35C の降伏値 40 kg/mm^2 によって、 948 kg/cm^2 という値となり、充分大きな値となっている。

蓋には電源接続用の端子を4ヶ設けた。水中コネクタは Fig. 4 の下部の詳細図に示されるように、2つの部分からなる。耐圧容器の蓋にマリンターミナルを取りつけ、それをケーブルコネクタで接続するようになっている。我々が用いた水中コネクタは水深 10000 m 迄充分使用出来るように作られてある。

この水中コネクタは電源の ON-OFF スイッチの役目も行ふ。

耐圧容器の海水及び推積物による腐蝕に対する防蝕対策として、亜鉛メタリコンを行った。深海用、1ヶ月観測用共、共通しているが O リング接触面のメタリコンは行えないのでシリコングリースを塗って使用した。今後は何らかの処置が必要であろう。

3) ガードリング

耐圧容器とガードリングの組立ては、ガードリングの上に耐圧容器を置き、バンドで固定する。6000 m 用深海用耐圧容器は、研究所より研究船への運搬、船の甲板上での移動については、さして不便ではなかった。しかし、1ヶ月観測用耐圧容器は、ガードリング上に2本一組に組立てた状態では、船への積込み、甲板上における移動において、非常に不便であった。それで改良を加えて、昭和44年8月～9月、東海大学丸II世での金華山沖における地震観測作業の時は、Fig. 6 に示すように、耐圧容器1本ずつ別々に、ローラー付ガードリングを取り付けた。このようにすることによって取扱い操作が非常に楽になった。

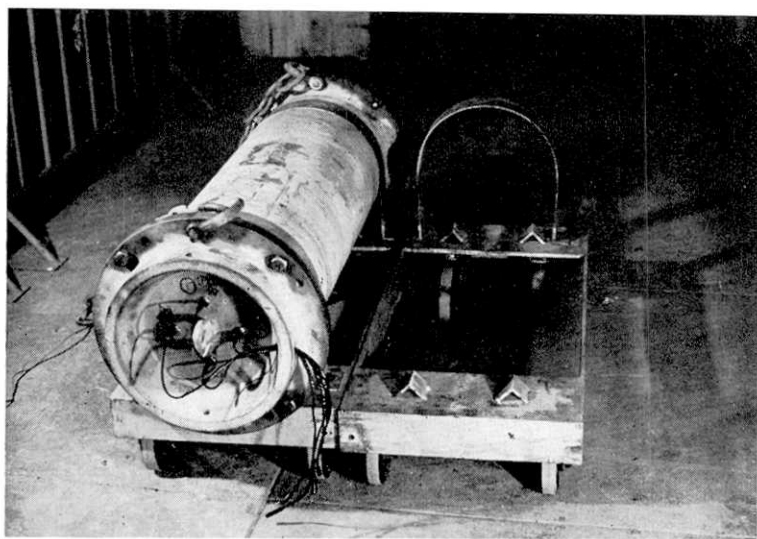


Fig. 6. The roller upon which the monthly recording type pressure vessels are mounted.

4. 試験及び使用結果

1) 模型容器による耐圧強度試験

我々は耐圧容器の設計製作するに当り、模型容器に依る、円筒体及び蓋の圧縮による強度試験を行った。

模型の材料は S 35C, 降伏値 37 kg/mm^2 を用いた. Fig. 7 に示す寸法の円筒体蓋の模型を作り, 耐圧試験を行った.* 加圧試験装置の概略図を Fig. 8 に示す.

円筒体テストを行う時, Fig. 7 に示すように, 蓋の強さを円筒の持った強度より強く, 蓋のテストを行う時は逆に, 円筒の強さを蓋の強度より大きくした. 円筒内面にはストレンゲージを直角に 3ヶ所取りつけた. 蓋の内側にはストレンゲージを 2本 90° づらして取りつけた.

試験は加圧ポンプにより圧力を加え, 容器の変形状態をストレンゲージにより検出し, ストレンメータでその状態を記録させた. 加圧試験は 1 サイクル約 6 分の割合で加圧, 減圧を繰返し, 最高応力を順次増加させた. 試験結果を Fig. 9, 10 に示した. 残留歪を夫々のサイクル

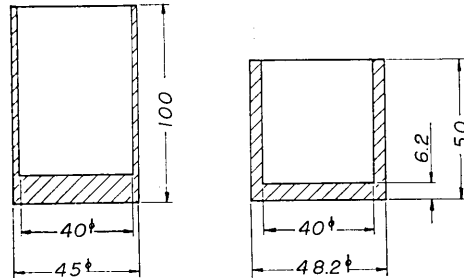


Fig. 7. The dimensions of the models for testing the pressure vessel. On the left is the model for testing the thickness of the tube, and on the right is the model for testing the thickness of the cover. The material is steel S35C, for which the compression yield point is 37 kg/mm^2 .

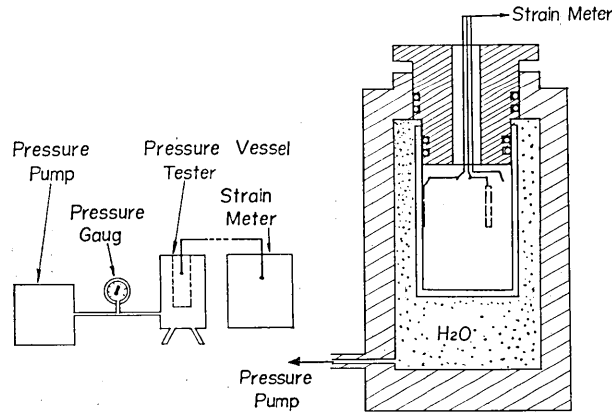


Fig. 8. On the left is the block diagram of the test apparatus and on the right is the sectional view of the pressure vessel which is made for the model test.

の終りの部分に図示し, そのスケールを右の縦軸に示してある. 或る圧力の所から急激に残留歪が発生する. この応力を降伏値と判定した. 容器の潰れの発生は加圧力の急激な減少によって判定した. 厚肉公式による計算値と実験値との比較を Table 1 に示す. 潰れを起した模型容器の写真を Fig. 11 に示す.

2) 白鳳丸及び東海大学丸 II 世による観測及び耐圧テスト

東京大学海洋研究所 KH 68-4 次テスト航海, KH 69-1 次テスト航海で, 実物の耐圧容

* 加圧試験装置及び模型容器を持って, 帝国石油技術研究所, 都立工業奨励館で行った.

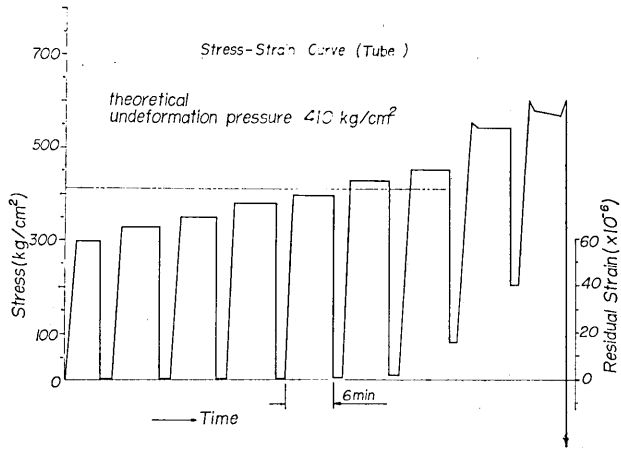


Fig. 9. The stress~residual strain diagram of the model tube. The stress is applied repeatedly by increasing the maximum stress in steps. The abscissa is the operation time. The value of the residual strain which corresponds to the maximum stress of each cycle of loading is shown on the ordinate.

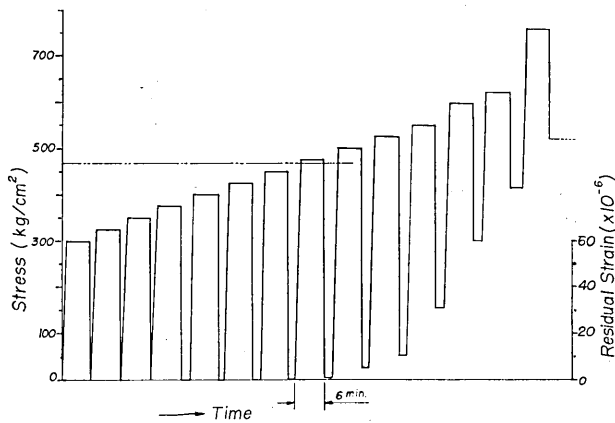


Fig. 10. The stress~residual strain diagram of the model cover. The test procedure is the same as in the Fig. 9.

Table 1. Comparison of the theoretical value and the model test value for the yielding and failure of the pressure vessel. The model test was performed for the tube and the cover respectively.

	Yield		Failure	
	Theory	Model test	Theory	Model test
Tube	410 kg/cm ²	440 kg/cm ² 425	630 kg/cm ²	610 kg/cm ²
Cover	470	530 500	720	780

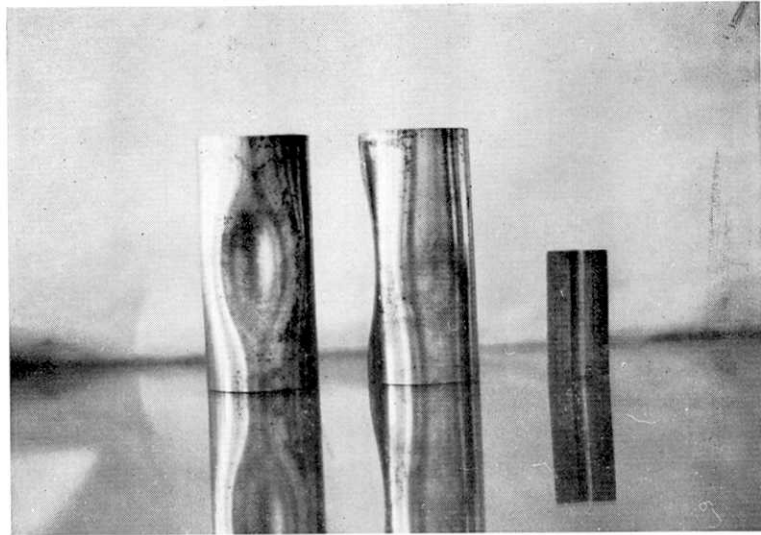


Fig. 11. The mode of failure of the model tube.

器の耐圧力及び洩水試験を行い、又、白鳳丸 KH 69-2 次航海、東海大学丸 II 世 8 月航海で、今回製作した耐圧容器を用いて、地震観測を行った。

耐圧容器の防水試験および実際の観測に使用した地点、深度、期間等を Table 2 に示す。

STP 38 を用いた 2000 m 用耐圧容器 (ERIK-4) の厚肉円筒公式による降伏の始まる外圧は 240 kg/cm^2 であるのに対して、試験結果では水深 3600 m 迄異常が認められなかった。このことは驚くべきことである。

Table 2. The location and depth of the test of the pressure vessels for the ocean-bottom seismograph, and the location and the period of the ocean-bottom seismographic observation where the pressure vessels were practically used.

	Type of Pressure Vessel	ERIK-4	Monthly Recording	Deep Ocean bottom
Test	location	off Nozima-zaki	off Nozima-zaki	off Nozima-zaki
	depth	3600 m	2000 m	4000 m
	test time	2 hrs	1 hr	30 min
	date	1968 Oct. 10	1968 Apr. 14	1969 Apr. 14
Observation	location	off Sanriku Sagami Bay	off Sanriku	off Japan Trench
	depth	500~1500 m	1050 m	5610 m
	mooring period	4~15 days	43 days	2 days
	date	1965~1968	1969 May~June	1969 May

Table 3. The main specifications of several types of the pressure vessels for the ocean-bottom seismographic observations.

Type		ERIK-4	Deep Ocean-bottom	Monthly Recording
Material	Tube	STP 38	SNC 2	STP 38
	Cover	S 35 C	SNC 2	S 35 C
Inside diameter		240 φ	240 φ	300 φ
Outside diameter		270 φ	270 φ	340 φ
Tube thickness		15 mm	15 mm	20 mm
Inside length		1034 mm	1034 mm	916 mm
Weight (in the air)		230 kg	230 kg	685 kg
Operating depth		2000 m	6000 m	2000 m
Limiting depth		2400 m	8800 m	2400 m

Fig. 3 に今回製作した海底地震計用耐圧容器 6000 m 深海用および1ヶ月観測用, および前回製作した 2000 m 用耐圧容器の一般的仕様をまとめて示した.

5. 要約および結論

日本海溝周辺において海底地震観測を行うために, 耐圧容器を新たに設計, 製作した. 1つは水深 6000 m 級の深海用のものであり, 1つは水深 2000 M 級の1ヶ月観測用のものである.

深海用耐圧容器には材料として強じん鋼 SNC 2 を使用し重量の軽減をはかった. 寸法は内径 240φ, 外径 270φ, 内長 1000 mm, 空气中重量約 230 kg である. 計算による最深使用深度は約 8.5 km である.

1ヶ月観測用耐圧容器は, 取扱い操作の便から電池用容器と記録計用容器と2本1組とし, 水中コネクタで電源を接続する方式を採用した. 寸法は内径 300φ, 外径 340φ, 内長 920 mm, 空气中重量2本にて 685 kg である. 計算による最深使用深度は約 2.5 km である.

これらの耐圧容器は東京大学海洋研究所研究船白鳳丸の航海 (1969年4月~6月) および東海大学東海大学丸 II 世の航海 (1969年8~9月) において試験および海底地震観測に使用し, 良好な結果を得た.

謝 辞

終りに, 海底地震計用耐圧容器の耐圧防水試験および地震観測にあたっては, 東京大学海洋研究所研究船白鳳丸白沢船長はじめ乗組員の方々, 耐圧容器用金属材料の降伏値の測定に当っては東京大学工学部三橋俊作氏, 模型容器の変形試験に際しては帝国石油技術研究所石塚英四郎氏, 土方豊氏に御協力を賜った. ここに深く感謝の意を表します.

この研究費の一部は文部省科学研究費によった.

文 献

- 1) ARNETT, R. A., and T. W. NEWHOUSE, 1965, *Ocean-Bottom Seismograph*, *Proc. IEEE*, **53**, 1899-1905.
- 2) BRADNER, H., 1964, *Seismic Measurements on the Ocean-Bottom*, *Science*, **146**, 208-216.
- 3) BRADNER, H., J. DODDS, and R. FOULKS, 1965, *Coherence Measurements with Time Sampling Ocean-Bottom Seismograph* *IEEE*, **53**, 1906-1908.
- 4) EWING M., and A. VINE, 1938, *Deep-Sea Measurement Without Wire or Cable*, *Trans. Am. Geophys. Union*, Part 1, 248-251.
- 5) EWING J., and M. EWING, 1961, *A Telemetering Ocean-Bottom Seismograph*, *J. of Geophys. Res.*, **66**, 3863-3878.
- 6) FILLOUX J. H., 1967, *An Ocean-Bottom, D Component Magnetometer*, *Geophysics*, **32**, 978-987.
- 7) KANAI, K., and T. TANAKA, 1958, *Self Levelling Vibrograph*, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **36**, 359-368.
- 8) MONAKHOV, F. I., 1962, *Microseisms at the Bottom of the Baltic Sea and in the Northern Part of the Atlantic Ocean*, *IZV. Geophys. Ser.*, (in English) 573-580.
- 9) NAGUMO, S., H. KOBAYASHI, and S. KORESAWA, 1965, *Construction of Ocean-Bottom Seismograph*, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **43**, 671-683.
- 10) NAGUMO, S., H. KOBAYASHI, and S. KORESAWA, 1968, *Improvements of Ocean-Bottom Seismograph- Construction of a Long-Life Magnetic Tape Recorder*, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **46**, 861-875.
- 11) RYKUNOV, L. N., and V. V. SEDOV, 1967, *An Ocean-Bottom Seismograph*, *IZV. Physics of the Solid Earth No. 8*, (English Edition) 537-541.
- 12) SNODGRASS, F. E., 1968, *Deep Sea Instrument Capsule*, *Science*, **162**, 78-87.
- 13) SUTTON, G. H., W. G. MCDONALD, D. D. PRENTISS, and S. N. THANOS, 1965, *Ocean-Bottom Seismic Observatories*, *Proc. IEEE*, **53**, 1909-1921.
- 14) THANOS, S. N., and A. C. HUBBARD, 1966, *Tow-Way Hydroacoustic Communications Link For an Ocean-Bottom Seismograph*, *IEEE Trans. Geo. Elect.*, **GE-4**, 17-24.
- 15) THOMSON, J. T., and W. SCHNEIDER, 1962, *An Automatic Marine Seismic Monitoring and Recording Device*, *Proc. IRE*, **50**, 2209-2216.

50. *Pressure Vessels for Ocean-Bottom Seismograph.*

By Shozaburo NAGUMO, Heihachiro KOBAYASHI,

Sadayuki KORESAWA,

Earthquake Research Institute

and

Takao TAKEYAMA,

Kaihatsu-Kogyo K. K.

In order to perform ocean-bottom seismographic observations around the Japan trench, new pressure vessels were designed, constructed and tested. One type is for deep ocean-bottom operations at depths in excess of 6000m. The other type is for a monthly operation on the shallow sea-bottom at depths of about 2000m.

The deep ocean-bottom pressure vessel is made of high-strength steel, SNC2. The specifications of the deep ocean-bottom pressure vessels are: inside diameter 240 ϕ , outside diameter 270 ϕ , inside length 1034 mm, and total weight in the air about 230 kg. The calculated maximum operating depth is about 8.5 km.

In order to obtain safety and efficient operation in deploying and recovering of the ocean-bottom seismograph, the monthly recording type pressure vessel is composed of two vessels. One of them serves for housing the necessary batteries (12 V \sim 208 AH) for 1000 hrs recording, the other one is for housing the tape-recorder, crystal-clock, geophones and amplifiers.

The specifications of the monthly recording type pressure vessel are: inside diameter 300 ϕ , outside diameter 340 ϕ , inside length 920 mm and total weight of the two vessels in the air about 685 kg. The material used is steel STP 38 for the cylinder and steel S35C for the cover. The calculated maximum operating depth is about 2.5 km.

The pressure vessels were tested and used for the ocean-bottom seismographic observation in April \sim June of 1969 around the Japan trench during the cruise of the M/S "Hakuhō-Marū" of the Ocean Research Institute, the University of Tokyo, and in August \sim September of 1969 off Sanriku during the cruise of the M/S "Tokai-Daigaku-Marū II" of the Tokai University. The results were excellent.