

鋼コンクリート・サンドイッチ構造による 6000m級海底ステーションの開発

正会員 一色 浩*
鍋島 昌生**

高満 洋徳**
竹岡 誠二**

R&D of 6000m-Class Deep Sea Station Using Steel-Concrete Sandwich Structure

by Hiroshi Isshiki, Member
Masao Nabeshima

Hironori Takamitsu
Seiji Takeoka

Key Words: Deep Sea Station, Steel-Concrete Sandwich Structure, Spherical Shell, Buckling

1. 緒言

2018年6月に大阪で開催された日本船舶海洋工学会において太平洋戦争中に日本で建造されたコンクリート船の講演があった¹⁾。その中に、日本海軍が建造した満載排水量2200トンの3隻の貨物船第1～3武智丸がある。第1武智丸と第2武智丸は第2次大戦を生きぬいた。就航成績は満足すべきもので鋼船と遜色はなく、或いはそれより幾分良好と認められた。両船は、台風のために大きな被害を受ける広島県呉市安浦漁港に船尾を接して沈設されて防波堤となった。2003年のコンクリート工学会年次大会で、今なお良好な状態を保っていることが報告され注目された。このことの今日的な意味は、鉄筋コンクリートが海洋構造物の素材としての可能性である。

深海底開発は鉱物資源開発など今後の日本経済と密接に結びついている。有力な海軍力とか巨大な石油企業を持たない我国は極めて不利な立場にある。我国が世界に伍して戦うためには、そのための我国独自の技術を開発することであろう。大きなコストダウンを可能とする新しい素材と構造の開発は、そのようなものひとつとなり得る極めて重要なものと考えて良いであろう²⁾。

2. コンクリート船¹⁾

コンクリート船の起源について、文献¹⁾に次のような記述がある。「1848年にフランスのJoseph-Louis Lambotが鉄の棒を編んで補強したコンクリートの手漕ぎボート(長さ3.6m)を製造し、1855年の第1回パリ万国博に出品した。これがコンクリート船の最初で、鉄筋コンクリート構造物の最初でもあると云われている。フランスのBrignoles博物館に提示されている³⁾。我国最初のコンクリート船は1910年(明治43)に建造された大阪築港の浚渫土運搬船(全長15.2m)とされる。」

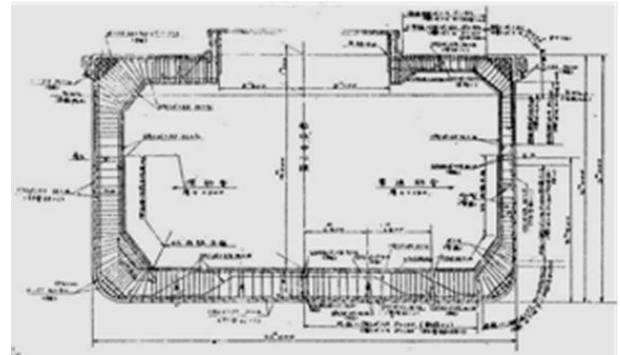


Fig. 1 Midship Section of "No.1 Takechi Maru".

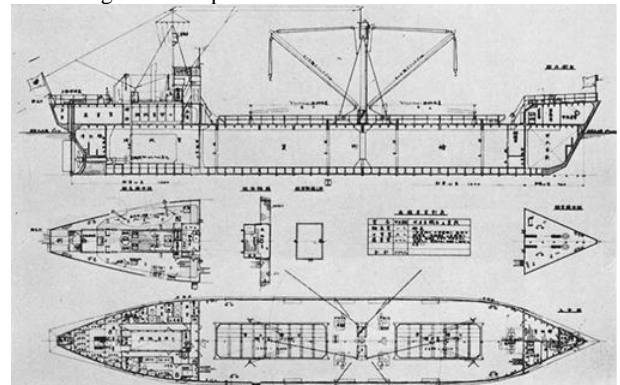


Fig. 2 General Arrangement of "No.1 Takechi Maru".

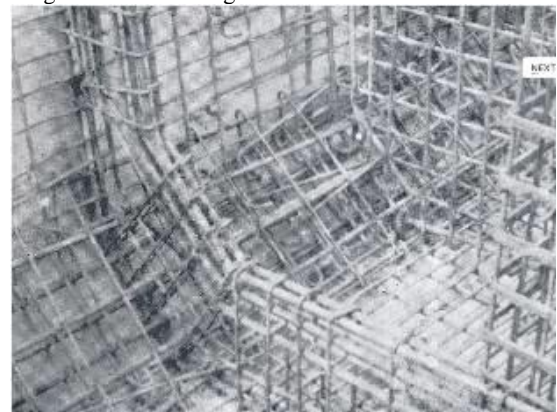


Fig. 3 Under Concrete Work of Takechi Maru.

一方、世界大戦のような大規模な戦争が起こると、真っ先に不足する鉄鋼資材を削減するために、各国ともにコンクリート船の建造を考える。第1次、第2次大戦においても大量のコンクリート船が建造されている。

我国においても第2次大戦時に、海軍、逓信省、陸軍がコンクリート船の建造を試みている。その中に、日本海軍が建造した満載排水量2200トンの3隻の貨物船第1～3

* (有)数理解析研究所

** 成光精密㈱

原稿受付 令和2年3月6日

公開日 令和2年5月18日

春季講演会講演論文として投稿

©日本船舶海洋工学会

武智丸がある。

Fig. 1-3に武智丸の中央断面図，一般配置図，鉄筋配置図を示す。戦時中という困難な状況にも係わらず入念な設計と建造が行われたことが伺われる。第1, 2, 3武智丸は，1941年6月から11月に掛けて，それぞれ111, 99, 81日間で建造されており，鋼材使用量も載貨重量1トン当たり，戦時標準線の改E型鋼船の0.22トンに対し0.14トンと36%減である。

武智丸の運用結果について，文献1)に以下の記述がある。「武智丸型3隻は就航後，主に瀬戸内海で若松，呉，大阪間の石炭，食糧輸送にあたったが，水密性，強度，振動，耐航性に問題はなかった。第2武智丸は関門海峡と神戸で米重爆撃機B-29が投下敷設した機雷に触雷3回，神戸で米戦闘機P-51による機銃掃射(弾痕32カ所)1回受けたが，その都度入渠することなく数日間の簡単な沖修理だけですませ，第1武智丸と第2武智丸は第2次大戦を生きぬいた。就航成績は満足すべきもので鋼船と遜色はなく，或いはそれより幾分良好と認められた。」

第1武智丸と第2武智丸は第2次大戦を生きぬいて，現在は，広島県呉市安浦漁港に船尾を接して沈設されて防波堤となった。

防波堤となった武智丸のコンクリートの品質に関しては，後に専門家により調査されて，今なお良好な状態を保っていることが報告され，このことに関しては，文献1)に以下のような記述があることに注目したい。「本船のコンクリート施工には陸上構造物と異なる特別の配慮や処置が必要である。建造現場では土木技術者である高西敬義工学博士が所長として指揮をとり，コンクリートの配合，打設，品質管理には当時の東大教授吉田徳治博士が直接指導を行った。」

武智丸の名前の由来であるが，武智丸型貨物船3隻は前述の武智造船所に発注されたものであり，文献1)に以下の記述があり興味深い。「この造船所は，大阪でコンクリートの杭打ちを行う土木工務会社浪速工務所を営んでいた武智正次郎が東條内閣にコンクリート船の建造を建白し，兵庫県曾根町(現高砂市)の廢塩田跡地に開設したものである。2本の素堀り船渠の中で各3隻を同時建造する計画であるが，起重機や船体および機関の艤装工事設備はない。」

3. 鋼コンクリート・サンドイッチ構造の海底ステーションの開発

昨年，DeSETという開発プロジェクトの助成金を頂いて，水深6000mの海底に設置する汎用海底ステーションを開発した。予備的な海中実験も実施した。DeSETとは，日本財団笹川陽平会長の「2030年までに全世界の海底地形図を造る」という公約を実現するために発足したリバネスの助成金研究である。これからはDeSET第1期の成果(AUV)と第2期の成果(海中ステーション)をもとにして次の開発を考える段階にある。

Fig. 4に昨年我々が開発した水深6,000mの海底に設置する汎用海底ステーションのイメージを示す。Fig. 5に通常の構造とサンドイッチ構造の比較を示す。通常の鋼の1層構造は，板厚が小さいので軽くできるのでピークルには向いているが，座屈し易い。高い加工精度が必要のため高価になる。鋼とコンクリートの3層構造のサンドイッチ構造は，鋼に比べて比強度が小さいので板厚が大きくなり重くなるので，ピークルには向いていないがステーションには向く。全板厚が増すことにより，座屈し難くなるために加工精度を大きく落とせるので，大きなコストダウンが実現可能になる。

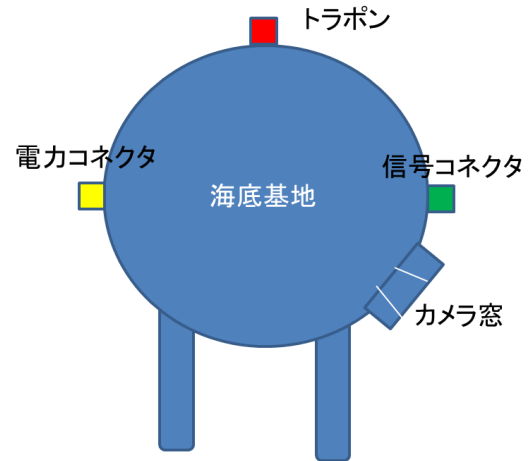


Fig. 4. Sea bottom station.

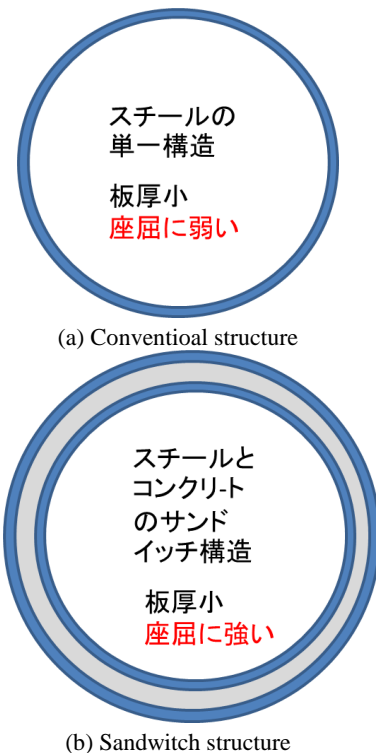


Fig. 5. Conventional and sandwich structures.

次の段階としては，海底でのAUVなどの活動支援を行う海中ステーションを中心とする海底インフラを開発することを考えている。海中ステーションを空の測位衛星に見立てて，GNSSに相当する海底の測位システム“海のGlobal Positioning System (GPS)”を作れるのではと考えている。

その際，最重要なのは海底でのエネルギーの確保である。海中・海底で人類が活躍する上で欠かせないものは，エネルギーである。原子力電池，燃料電池，リチウムイオン電池などいろいろあるが，この目的には不十分である。将来的に最も可能性のあるのは第4世代の原子力発電，中でも小型発電に向いているトリウム熔融塩炉ではなかろうか？原子力発電ならば，数十年にわたり燃料の補給を必要としない。

4. 耐圧水槽および海底ステーションの設計，製作および実験

4.1 耐圧水槽の設計と製作

実験をするためには，実海底と同じ高圧を発生できる

耐圧水槽が必要となる。実験に使う模型は小さくて良いので、水槽は小さいもので良い。胴部の内径と深さは、ともに 250mm である。

試行錯誤的な実験を可能にするには自前の耐圧水槽が必要になる。空気と違って水は高圧を掛けてもあまり圧縮しないので、爆発の危険性はないので、Fig. 6 に示される円筒形の胴部に平板の天板および底板からなるものを自作した。天板は開け閉め可能なように、胴部の上部にあるフランジとボルトで連結される。



Fig. 6 Pressure-resistant water tank.

また、水槽壁に掛かるのは内圧であるから、座屈とは無縁であり設計は単純である。水槽胴部の壁の板厚は面内応力（膜応力）を求めて決めれば良い。天板および底板の板厚は周辺固定円板の軸対称曲げ理論で決められる。ただし、100Mpa 位の圧力が掛かるので、十分な安全率を見込んだ方がよい。天板および底板は曲げ変形を抑えるために、安全率は胴部よりも大きくとった方がよいが、なるべく軽くしないと天板の開け閉め時の負担が大きくなる。

天板は胴部フランジにボルトで連結されるが、水漏れを防ぐために O リングでシールされる。

水圧を発生させるためのポンプとしては、Fig. 7 に示されるような能力 90Mpa まで市販の手押しポンプ（株式会社キョーワ）を用いた。耐圧水槽の天板に設けられたノズルにポンプの高圧水が出入りして圧力が伝達される。耐圧水槽の天板には、空気抜きの弁も設けられねばならない。

4.2 海底ステーションの設計と製作

本研究では、ステーション形状は球殻の一種類である。海底ステーションには外部から高い圧力が掛かるので座屈の検討が重要になる。JAMSTEC の深海 6000 に関する設計、製造、試験に関する資料⁴⁻⁷⁾と座屈に関する資料⁸⁾を

参考にした。

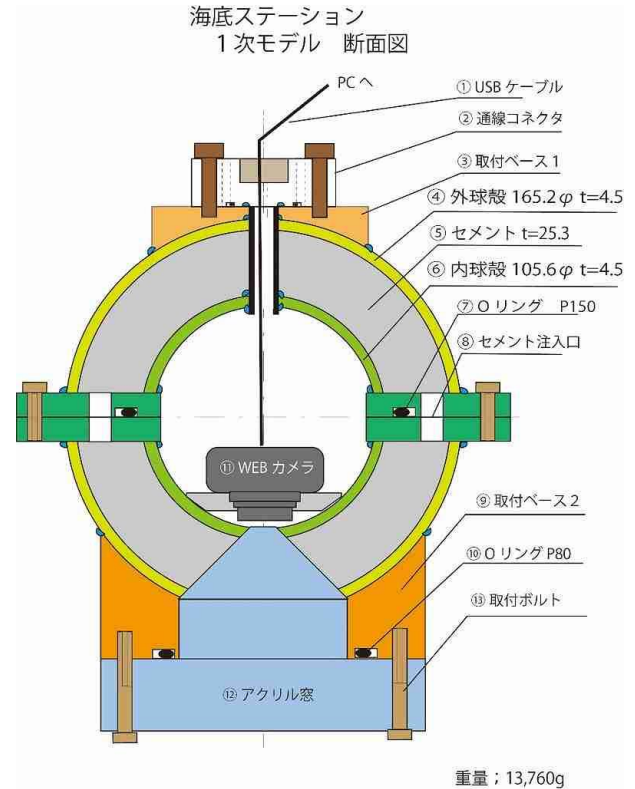


Fig. 7 Model.

設計の基本的な考え方は面内応力（膜応力）をまず計算し、弾性座屈および塑性座屈の発生可能性を検討するものである。ただし、鋼とコンクリートのサンドイッチという 3 層の複合構造であるのが、これまでの設計法との大きな違いである。

以下にもう少し詳しく述べる。まず、面内応力（膜応力）を求める。以下の議論で用いる記号を列挙する。

- d : 水深
- p : 圧力
- p_0 : 大気圧
- ρ : 海水の密度
- g : 重力加速度
- R : 球殻の内半径
- $t = t_c + 2t_s$: 球殻の板厚
- t_c : コンクリート部の厚さ
- t_s : スチール外殻および内殻の厚さ
- E_c : コンクリートのヤング率
- E_s : スチールのヤング率
- E : 合成部材の等価ヤング率
- σ_c : コンクリート部の応力
- σ_s : スチール部の応力
- σ : 合成部材の等価応力
- ε_c : コンクリート部の歪み
- ε_s : スチール部の歪み
- ε : 合成部材の等価歪み
- σ_{CB} : コンクリートの圧縮強さ
- σ_{SB} : スチールの圧縮強さ

水深 d の位置における海水から受ける圧力 p は

$$p = p_0 + \rho g d \quad (1)$$

で与えられる。スチール部の応力 σ_s は

$$\sigma_s = E_s \varepsilon \quad (2)$$

コンクリート部の応力 σ_c は

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon & \text{when } \varepsilon \leq \sigma_{CB}/E_c \\ \sigma_{CB} & \text{when } \varepsilon > \sigma_{CB}/E_c \end{cases} \quad (3)$$

とする。

力の釣り合いより

$$\begin{aligned} 2\sigma_s t_s + \sigma_c t_c &= \frac{\pi(R+t)^2}{2\pi(R+0.5t)} (p_0 + \rho g d) \\ &= \frac{(R+t)^2}{2(R+0.5t)} (p_0 + \rho g d) \end{aligned} \quad (4)$$

が求まる。(2)式と(3)式を(4)式に代入すると

$$\begin{aligned} 2 \times E_s \varepsilon t_s + \begin{cases} E_c \varepsilon \\ \sigma_{CB} \end{cases} t_c &= \frac{(R+t)^2}{2(R+0.5t)} (p_0 + \rho g d) \\ \text{when } \begin{cases} \varepsilon \leq \sigma_{CB}/E_c \\ \varepsilon > \sigma_{CB}/E_c \end{cases} & \quad (5) \end{aligned}$$

となる。これより、歪み ε は

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\frac{(R+t)^2}{2(R+0.5t)} (p_0 + \rho g d)}{(2 \times E_s t_s + E_c t_c)} \\ \varepsilon &= \frac{\frac{(R+t)^2}{2(R+0.5t)} (p_0 + \rho g d) - \sigma_{CB} t_c}{2 \times E_s t_s} \\ \text{when } \begin{cases} \varepsilon \leq \sigma_{CB}/E_c \\ \varepsilon > \sigma_{CB}/E_c \end{cases} & \quad (6) \end{aligned}$$

と求まる。応力は(2)式および(3)式で与えられる。

座屈の評価は文献8)に従った。すなわち、弾性座屈に関しては、Zollyの古典理論 P_{cla} :

$$P_{cla} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{2Et^2}{R_{ext}^2} \quad (9)$$

の1/4を座屈限界圧力とした。この計算で必要となる t は上述の定義のままであるが、半径は外半径 R_{ext} を取る。合成部材の等価ヤング率 \bar{E} は、設計上の応力の限界値 $0.75\sigma_{SB}$ を想定して、以下の計算で求めた。まず

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= \frac{0.75\sigma_{SB}}{E_s} \\ \bar{\sigma} &= \frac{(R+t)^2 p}{2(R+0.5t)t} \end{aligned} \quad (10)$$

とすると、平均のヤング率 \bar{E} は

$$\bar{E} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}} = \frac{(R+t)^2 p}{2(R+0.5t)t} \frac{E_s}{0.75\sigma_{SB}} \quad (11)$$

により計算できる。

塑性座屈の評価式は、文献8)に従い弾性座屈に関するZollyの古典理論の古典理論で求まる圧力 P_{cla} と、座屈時のひずみ ε を

$$\varepsilon = \frac{P_{cla} R}{8Et} \quad (12)$$

で求め、文献8)中の図5を用いて

$$p = \frac{2t}{R} \sigma \quad (13)$$

評価した。

鋼コンクリート・サンドイッチ球殻を作る上で、思いがけず苦労したのはコンクリートの注入であった。コンクリートに流動性を与えるためには、混和剤が必要であることが解り、混和剤メーカーの専門家に技術指導を頂いた。

4.3 実験

(1) 耐圧水槽そのものの実験

Fig. 8に耐圧水槽と手押しポンプを示す。高圧時における胴部と天板との連結部、加圧水流出入部、空気抜き部、コネクター取り付け部からの漏水に苦心したが、簡単な装置にも係わらず、十分に目的を果たした。水槽内の圧力は手押しポンプの水圧計で知ることができる。



Fig. 8 Pressure-resistant water tank.

(2) 模型球殻の実験

外径 200mm の鋼製模型球殻で行った座屈テスト結果ほかを Fig. 9 に示す。透明なアクリル模型を作って、セメントモルタル注入テストを行い、最終的にフランジに開けた穴から注入した。模型球殻の座屈発生は、圧壊時の破裂音と、圧力計の針が急に下がることで確認できる。



(a) Model used for experiment



(b) Model used for experiment



(c) Model collapsed by buckling



(d) Model corresponding to Fig. 7
Fig. 9 Models used for experiments.

(3) 海中への投入実験

内径 1000mm の鋼コンクリート・サンドイッチ構造の海底ステーション（目標水深 2000m）を制作した。2019 年 11 月と 12 月に大阪港と神戸港において、クレーンで海底ステーションを吊り下げて、海中投入を行った。水深は僅か 10m に過ぎなかったが、実機の製作、実験実施手順の作成、安全対策の作成、監督官庁の許可取得など一連の作業を経験できた。Fig. 10 に会場テストで用いられた海底ステーションの製作状況を示す。Fig. 11 に実験の状況を示す。



Fig. 10 Inside view of model used for sea test.



Fig. 11 Submersion test at Kobe port.

6. 結 言

海中の構造物は海底も含めてそのほとんどが鉄鋼で作られている。一方、陸上の構造物の多くはコンクリートで作られる。コンクリートは比強度が小さいので、軽さを求められる動く構造物には向かないが、保温性や遮音性や耐久性に優れており、人間との親和性が高い。最大の特長は低価格であることと、どこでも手に入ることである。

海中は高圧力の世界であるので、引き張りには弱いですが圧縮には強いコンクリートの使用に向けた環境である。一方、鋼構造物はその強度故に薄肉構造になるが、高圧力化ではこれが災いして座屈し易くなってしまふ。鋼とコンクリートの両方の利点を生かしているのが鉄筋コンクリートの柱であろう。鋼により曲げ変形に耐え、コンクリートにより座屈による圧壊を防いでいる。

本論で提案している鋼とコンクリートによるサンドイッチ構造は、鋼の単一構造で発生し易い座屈による圧壊をコンクリートとの複合構造とすることにより防ぐことを狙った構造である。

鋼の単一構造の場合には座屈防止のために高度な加工精度が求められるが、鋼コンクリート・サンドイッチ構造の場合には、座屈破壊の恐れが無くなるので加工精度を大幅に下げられる。そのため、コストを大きく下げることが可能である。

本研究により、鋼コンクリート・サンドイッチ構造により座屈に強い構造を低コストで実現するという目標が、実証できたと考えられよう。

鋼によりコンクリートを被覆しているので、最近指摘されている深海でのコンクリートの劣化防止⁹⁻¹¹⁾にも有効であろう。

謝 辞

研究開発助成金を頂いた(公財)日本財団、(一社)JASTO、(株)リバネスに感謝申し上げます。大阪市港区の筋原章博区長初め大阪市港区役所の皆様には、終始変わらぬご支援を頂きました。感謝申し上げます。東京大学の長井宏平准教授にはコンクリートのご指導を頂きました。感謝申し上げます。花王(株)の元役員の沼田敏晴氏と技術研究所の小柳幸司氏にはコンクリートの流動性確保について大変お世話になりました。感謝申し上げます。深田サルベージ建設(株)、テクノ遊の三宅成司郎代表、アルパトロステクノロジーの秋元博道代表、間口ゼネラルサービス(株)の上山良彦には、海中投下実験で大変お世話になりました。感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 碓崎貞夫, 新開明二, コンクリート貨物船武智丸, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第26号, 2018.
- 2) 森弥広他: 鉄筋コンクリート貨物船「武智丸」に関する調査、コンクリート工学会機関誌コンクリート工学 Vol.25, No.2 所収, pp1939~44、2003
- 3) 村松真次郎: 鉄筋コンクリート構造の歴史(第2回)、コンクリート・ジャーナル、Vol.6, No.11, pp39, 1968.
- 4) 高川真一ほか, 「しんかい6500」耐圧殻の設計・製作, 海洋科学技術センター試験研究報告 JAMSTEC R 23, 1990.
- 5) 横田公男ほか, 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. コネクタの開発

我国における海底開発が活発になるためには、必要な機材の入手に安全保障上および寡占に起因する商業上の制約があることと、価格が極端に高いという状況が是正されねばならない。コネクタは海底開発に欠くことのできないものであるにも係わらず、簡単に入手できない。このような状況を鑑みて、コネクタの自作に挑戦した。

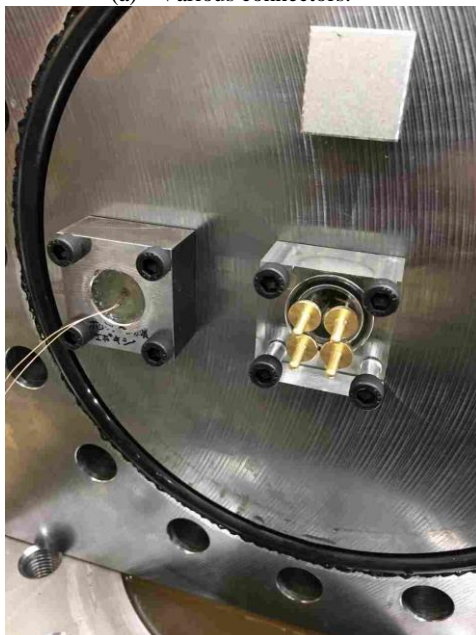
自作のポイントの一つはOリングを外圧側に取り付けることである。自作したコネクタは2種類で、一つはアクリル樹脂の小さなブロックに開けた穴に裸の銅線(より線でない単一線)を通して、接着剤で封入するものである。単一銅線の代わりにより線や被覆線を用いると高圧力下では僅かな隙間を通して漏水してしまう。

もう一つはアクリル樹脂の小さなブロックに開けた穴に、真鍮の小径の丸棒を焼きハメするものである。当然ながら、穴の径は棒の径よりも僅かに小さい。焼きハメ時の温度は140°Cである。140°Cの加熱は140°Cに加熱した天ぷら油の中にアクリルの小板を浸すことにより実現した。

加熱したエポキシのブロックに真鍮の棒を金づちで叩き込んだ。注意点は加熱によりエポキシのブロックは熱で柔らかくなっているので変形しないように工夫することである。Fig. 12に試作したコネクタを示す。



(a) Various connectors.



(b) Left: One sealed with adhesive; Right: The other using shrink fit

Fig. 12 Handmade connectors.

- 6) 篠原保ほか, 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.
- 7) 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, Vol. 132, 1972.
- 8) 山本善之, 外圧をうける圧力容器の座屈強度, 高圧力, Vol. 2 No. 5 1964.
- 9) 堀 尚, 千々岩伸浩, 岩波光保 (東工大土木), 高水圧作用下におけるコンクリートの破壊挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 71, No. 2, 179-I_184, 2015.
- 10) 小林真理, 高橋恵輔, 山中寿朗, 牧田寛子, 深海底に長期間暴露したセメントモルタルの力学特性と水和物の変化, 第 72 回セメント技術大会講演要旨, 2018.
- 11) 小林真理, 高橋恵輔, 深海の高水圧環境がセメントの水和物組成に与える影響, 第 73 回セメント技術大会講演要旨, 2019.