

「しんかい 6500」用浮力材の開発について

高川 真一^{*1} 前田 逸郎^{*2} 京橋 誠^{*3}

潜水調査船「しんかい6500」は、耐圧殻及び装備機器の浮量のみで全重量を支えることが不可能であり、その不足浮量を補償し、海中での重量、浮量の釣り合いを確保するために多量の浮力材を搭載している。そして、海中での運動性を良くするため、船体重量を極力軽減し小型化することが不可欠であり、浮力材の軽比重化は「しんかい6500」の開発、建造において重要な要素技術であった。

昭和56年度から57年度の研究では、大小のガラス微小中空球充填材を組み合わせるバイナリミクスチャ（二重混合）手法と高弾性率マトリクス樹脂を使用することにより、圧壊強度 $1200\text{kg}/\text{cm}^2$ 、比重 0.55 の小規模浮力材を得ており、「しんかい6500」に搭載された浮力材は、これを基に開発を進め、さらなる軽比重化の達成と実用サイズ品の成形、耐久性、評価、量産化への対応を行ったものである。

本報告では、この浮力材の特徴、製造法、性能等について述べる。

キーワード：ガラス微小中空球、バイナリミクスチャ、潜水調査船

On the Development of Buoyancy Material for “SHINKAI 6500”

Shinichi TAKAGAWA^{*4} Itsuro MAEDA^{*5}

Makoto KYOUBASHI^{*6}

Research submersible “SHINKAI 6500” has a large volume of buoyancy material in order to balance its weight and buoyancy in the sea water because its weight cannot be supported by the buoyancies of the pressure hull or other equipment only. The submersible should be as light and small as possible for vivid manoeuvring and hence the technology to manufacture the buoyancy material of small specific

*1 深海開発技術部

*2 三菱重工業(株)神戸造船所

*3 昭和高分子(株)東京研究所

*4 Deep Sea Technology Department

*5 Mitsubishi Heavy Industries, Inc.

*6 Showa High-Polymer, Co. Ltd.

gravity becomes very important for the development of "SHINKAI 6500".

Studies on the strong and light buoyancy material for the 6,000m class submersible carried out through 1981 to 1982 produced a small scale sample whose collapse pressure was 1,200kg/cm² and specific gravity was 0.55 using binary mixture method of glass microballoon and high elasticity matrix resin. Following these studies the lighter buoyancy material with realistic size for the fitting to the "SHINKAI 6500" and with massproductionability was developed and also its durability was evaluated.

This paper describes the characteristics, manufacturing process and the performance of this buoyancy material.

Key word: Buoyancy Material, Glass Microballoon, Binary Mixture, Research Submersible.

1 はじめに

潜水調査船の水中での行動様式は、基本的には飛行船と同じであって、自重と浮力が釣り合った状態（中正浮量）で、推進器により航走する。潜航深度が浅い潜水調査船であれば、耐压殻等の肉厚が薄くてよいために軽く作ることができ、構造物だけで十分な浮量を得ることができるが、潜航深度が深い潜水調査船においては耐压のために肉厚が厚くなって重くなり、構造物のみの浮力では全重量を支えることができず、多量の浮力材で支える必要が生ずる。そしてこの浮力材には、ガラス微小中空球充填材を樹脂マトリクス中に埋め込んだ、深度圧による体積変化の少ない軽量複合材料が使用される。

海洋科学技術センターが開発し、現在運用している潜水調査船「しんかい2000」には、比重0.54、圧壊強度650kg/cm²以上のこのような浮力材が用いられている。

一方、6000m級潜水調査船用浮力材としては、昭和44年度から同47年度にわたって（財）日本船用機器開発協会により、比重0.63、圧壊強度1200kg/cm²の浮力材がすでに開発されていた^{1,2)}が、海洋科学技術センターでは6000m級潜水調査船の開発、建造に向けて昭和56年度から同57年度に高強度軽比重浮力材の研究を行い、小規模ブロックの試作試験ながら、比重0.55、圧壊強度1200kg/cm²を達成し、高性能浮力材製造の技術的見通しを得た³⁾。

これらの実績を踏まえて、潜水調査船「しんかい6500」用浮力材として少なくとも「しんかい2000」と同程度の比重で6500mの水圧に耐え、十分な信頼性、耐久性を有する実用浮力材を開発し、さらに「しんかい6500」用としての要求仕様を満足する浮力材の生産及び性能確認の試験を行った上で「しんかい6500」に実装備した。

2 生産処法の確立

6500m潜水調査船用の高強度軽比重浮力材を生産するにあたっては、原材料であるガラス微小中空球や充填材としてのマトリクス樹脂をどのように選定するか、これらの原材料を用いて実用サイズの浮力材をどのように製作するかが問題であり、そしてできあがった浮力材が6500m潜水調査船用の浮力材として十分な性能を有しているかどうかの確認が必要である。

そこで以下に示すようにして、この生産処方を確立していった。

2.1 原材料

原材料であるガラス微小中空球と充填材であるマトリクス樹脂の選定は、高強度軽比重の浮力材を製作する上で最も支配的な要素となるものの1つである。そこで、十分な検討を経て、以下に示すように、高強度化についてはガラス微小中空球が均質で膜厚が厚く高強度のものを選ぶと共にマトリクス樹脂も高強度のものを選定した。また膜厚

が厚いということはガラス微小中空球の比重が大きいことを意味するので、軽比重化の観点から、大きいガラス微小中空球の隙間に小さいガラス微小中空球を入れるバイナリミックス手法を採用した。

(1) ガラス微小中空球

浮力材の主組成はガラス微小中空球とエポキシ樹脂であり、浮力材比重にはガラス微小中空球の比重とその体積充填率が、浮力材耐圧強度にはガラス微小中空球の強度及びエポキシ樹脂の圧縮強度、弾性率が主として寄与する。ガラス微小中空球の強度はそれほど強くないが、これを樹脂で固めることによって高い強度が得られるようになる。「しんかい2000」用浮力材では平均球径約80ミクロンで、その前後に正規的な球径分布を持つガラス微小中空球が使用されており、その最密充填による体積充填率は67%であった。

昭和56年度から昭和57年度に行った高強度軽比重浮力材の試作試験においては、ふるい分級(種々の大きさの網目によりふるい分けること)により採取した特定球径の小球大球を混合使用

(バイナリミックス)することにより体積充填率72%を達成している。これは丁度、パチンコ玉を並べた時にできる隙間にもっと小さな玉を詰める要領で、充填率の増大をねらったものである。

市販のガラス微小中空球はふるい分級した場合、小球が高比重、大球が低比重の傾向にあり、強度的にも小球が高強度、大球が低強度となる。理論的には同一比重の大球と小球は膜厚と直径の比が同じであるから同じ強度になると考えられ、バイナリミックス系においては小球と大球がほぼ同一比重(すなわちほぼ同一強度)であることが望ましい。そこで「しんかい6500」用浮力材では、バイナリミックス系のガラス微小中空球を採用することとして特定球径、特定比重の特注グレード品を入手評価した。

図1にガラス微小中空球の球径分布を、図2に強度の測定事例を示す。図1に見られるように「しんかい2000」用のガラス微小中空球は、種々の球径のものが混在しているが、「しんかい6500」用のガラス微小中空球は、小球が約40ミクロン、大球が約120ミクロンにそれぞれ極

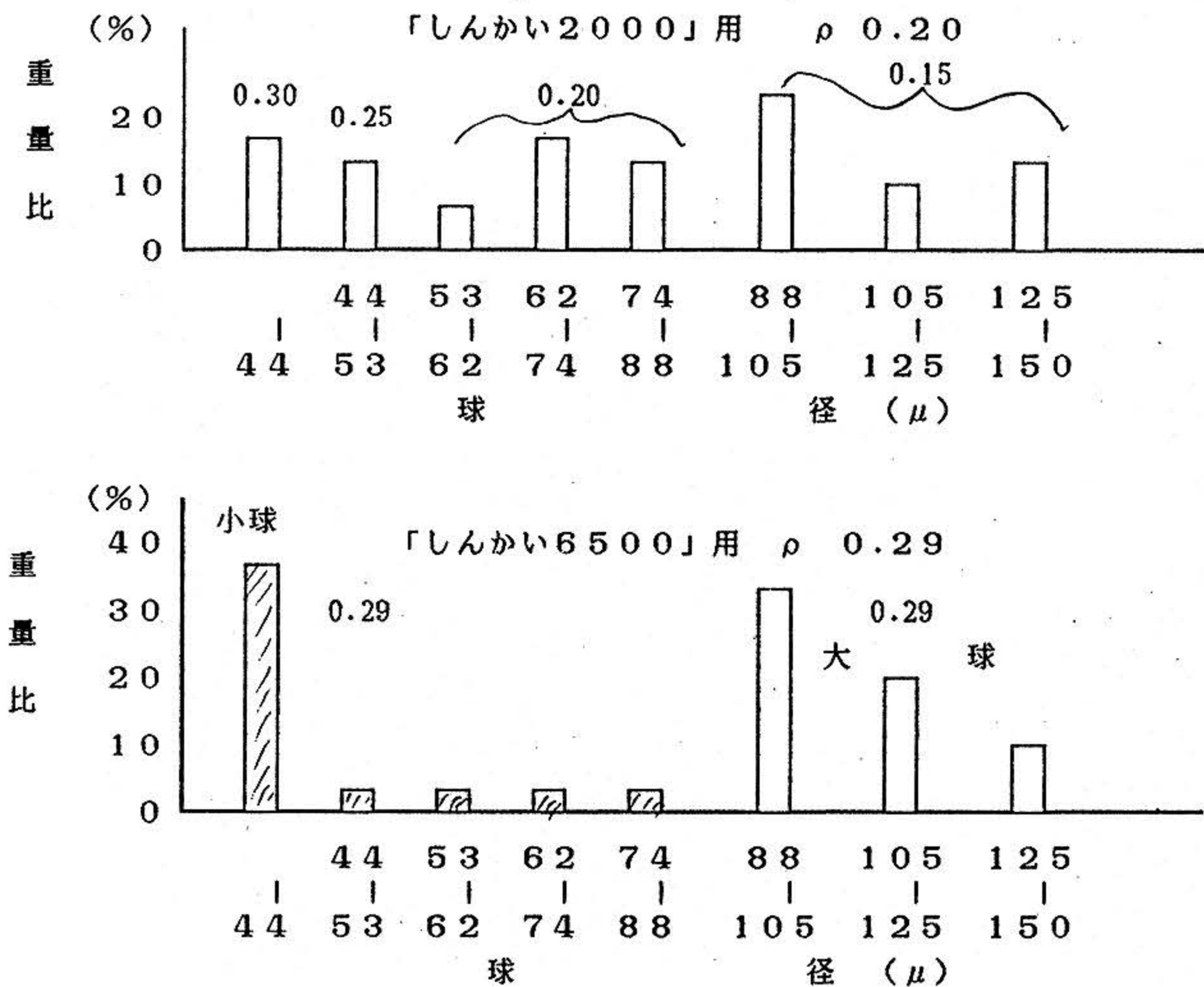


図1 ガラス微小中空球の球径分布測定例
Fig. 1 Diameter Distributions of Glass Microballoons

大がある分布であり、その球径比はおよそ 1 : 3 である。ガラス微小中空球の強度は図 2 に見られるように「しんかい 6500」用に適するように強度向上が図られている。

(2)マトリクス樹脂

マトリクス樹脂は、浮力材の強度を増大する上において可能な限り高強度高弾性率であることが望ましく、また海水が浸透して比重が増加しないよう吸水性の少ないこと、ならびに製造上ガラス微小中空球との接着性の良いことなど

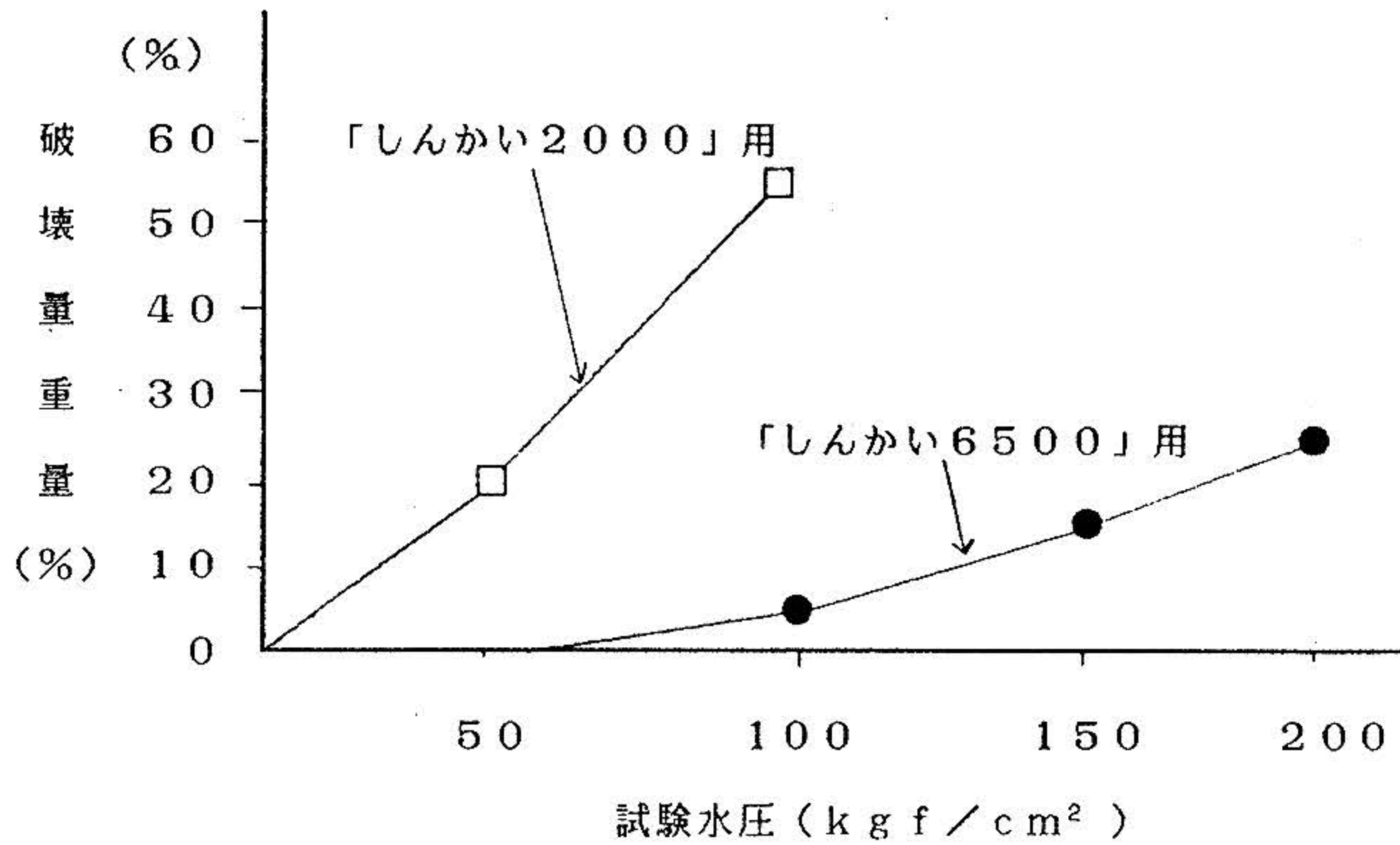


図 2 ガラス微小中空球の強度測定例

Fig. 2 Compressive Strength of Microballoons

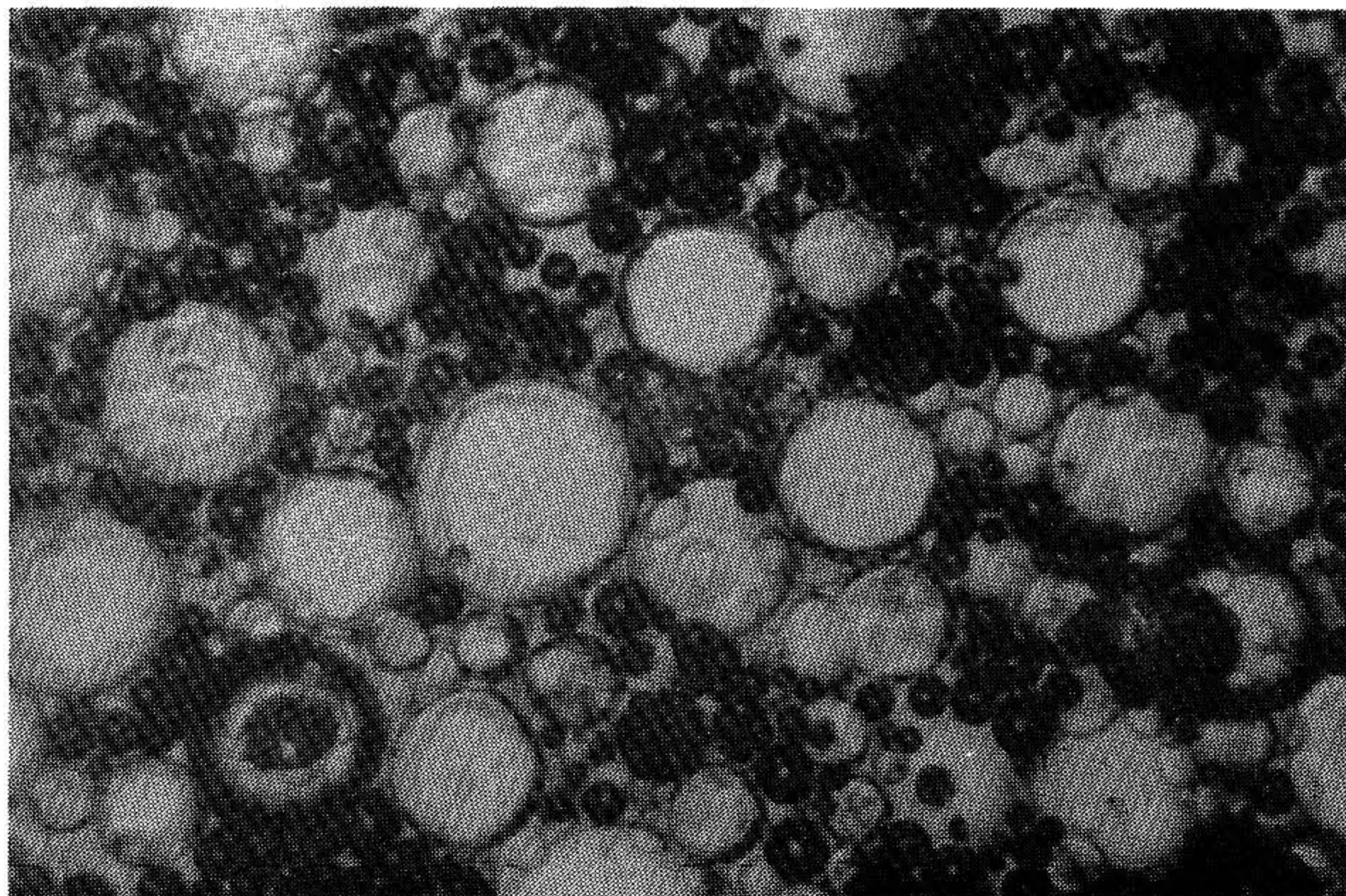


写真 1 バイナリー系ガラス微小中空球 (顕微鏡写真)

Photo 1 Microballoon Arrangement in Binary Mixture

の特性が必要である。

「しんかい6500」用浮力材のマトリクス樹脂候補として各種エポキシ樹脂の配合処法を検討し、樹脂硬化物の物性、樹脂粘度、硬化特性等の成形適性を総合評価した結果、脂環式エポキシ樹脂をベースとする配合処法を採用することとした。

表1に浮力材用エポキシ樹脂の比重及び圧縮特性を示す。「しんかい2000」用浮力材に使用した樹脂に比較すると強度で約40%、弾性率で約20%向上している。

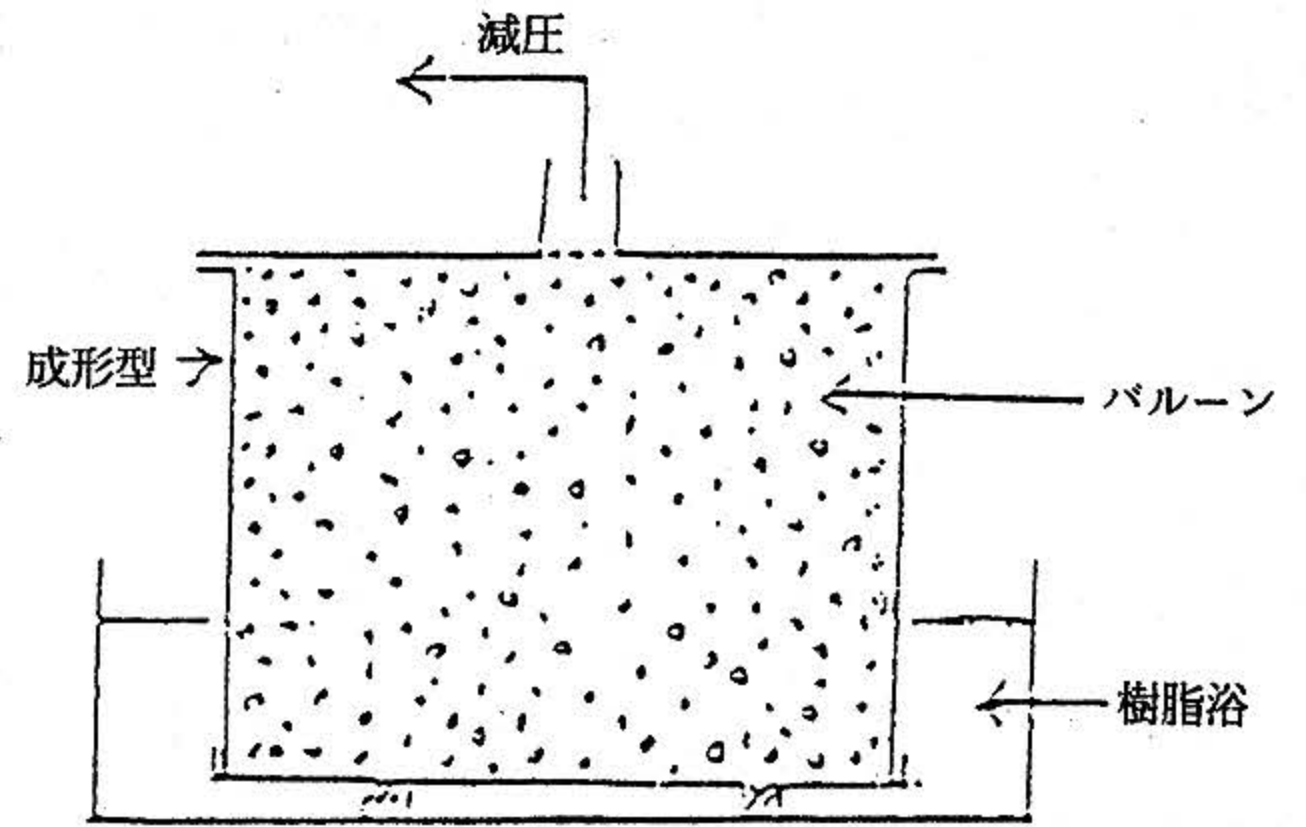


図3 減圧含成形法要領図

Fig. 3 Structure of DJecompression Impregnatio

表1 「しんかい6500」に使用したエポキシ樹脂の特性

Table 1 Strength Property of Epoxy Resins Used for "SHINKAI 6500"

マトリックス樹脂	比重	圧縮強度 (kgf/cm ²)	圧縮弾性率 (kgf/cm ²)
しんかい2000用	1.23	1480	39000
しんかい6500用	1.23	2070	46500

2.2 実用サイズ浮力材の試作成形

「しんかい6500」用としての実用浮力材は、樹脂の硬化発熱挙動、含浸特性、取扱い作業性、成形効率等を総合的に検討したうえ、標準成形ブロックのサイズを600×300×150mm (27ℓ)の直方体とした。

浮力材成形法は「しんかい2000」用と同じく減圧含浸成形法を用いた。

図3に減圧含浸成形法の要領図を示すと共に、その概略手順を下記に示す。

- ① ガラス微小中空球の小球と大球を所定の比率に混合する。
- ② 混合済みガラス微小中空球を成形型内に最密充填する。
- ③ エポキシ樹脂組成物を調合し、成形用樹脂浴に入れる。
- ④ 樹脂浴中に成形型下部を浸漬する。
- ⑤ 成形型内を減圧し、充填されているガラス微小中空球の隙間に樹脂を含浸導入する。
- ⑥ 樹脂浴より成形型を取り出し、ゲル化炉に移し型内の樹脂を加熱ゲル化させる。
- ⑦ 成形型より脱型し硬化炉へ移し、所定の加熱ス

ケジュールにて樹脂を完全硬化させ浮力材を得る。

実装用浮力材の成形に先立ち、バイナリミックス系のガラス微小中空球、高弾性率エポキシ樹脂により実用サイズの浮力材ブロックの試作成形を行い、ブロック内部の均質性、成形安定性等を確認の上、加熱条件等の最適成形条件を決定した。

2.3 試作品の性能評価

浮力材の性能評価法としては、現在一般に用いられている米軍の規格であるMIL規格を用いた。そして、成形された浮力材ブロックから、MIL規格に従って標準試験片を切り出して、試験に供した。

(1) MIL規格による試験

試作成形した実用ブロックサイズ浮力材に対して、標準試験として深海用浮力材のMIL規格のタイプII (試験圧力700kg/cm²)⁴⁾に準拠した性能評価を実施した。その結果を表2に、また使用した試験装置を写真2, 3に示す。

この表が示すように、引張強度だけはMIL規格値を満たしていない。これは、ガラス微小中空球の高充填により樹脂成分が少なくなって

表 2 浮力材試験項目及び試験結果

Table 2 Test Items results of Prototype Buoyancy Marterials ϕ

項目		浮力材	試作品	M I L規格 使用圧力700kgf/cm ²
初 期 状 態	比 重		0.529	0.7以下
	圧縮強度 (kgf/cm ²)		950	879以上
	0.2%オフセット 圧縮強度 (")		938	703 "
	圧縮弾性率 (")		31410	29900 "
	引張り強度 (")		236	281 "
	せん断強度 (")		323	281 "
	体積弾性率 (")		30530	24600 "
	圧壊強度 (")		1283	1160 "
700 kgf / cm ² 一週間 加圧後	吸 水 率 (%)		0.25	3以下
	圧縮強度 (kgf/cm ²)		919	844以上
	0.2%オフセット 圧縮強度 (")		872	668 "
	圧縮弾性率 (")		31380	28100 "
	圧壊強度 (")		1353	初期値の90% "

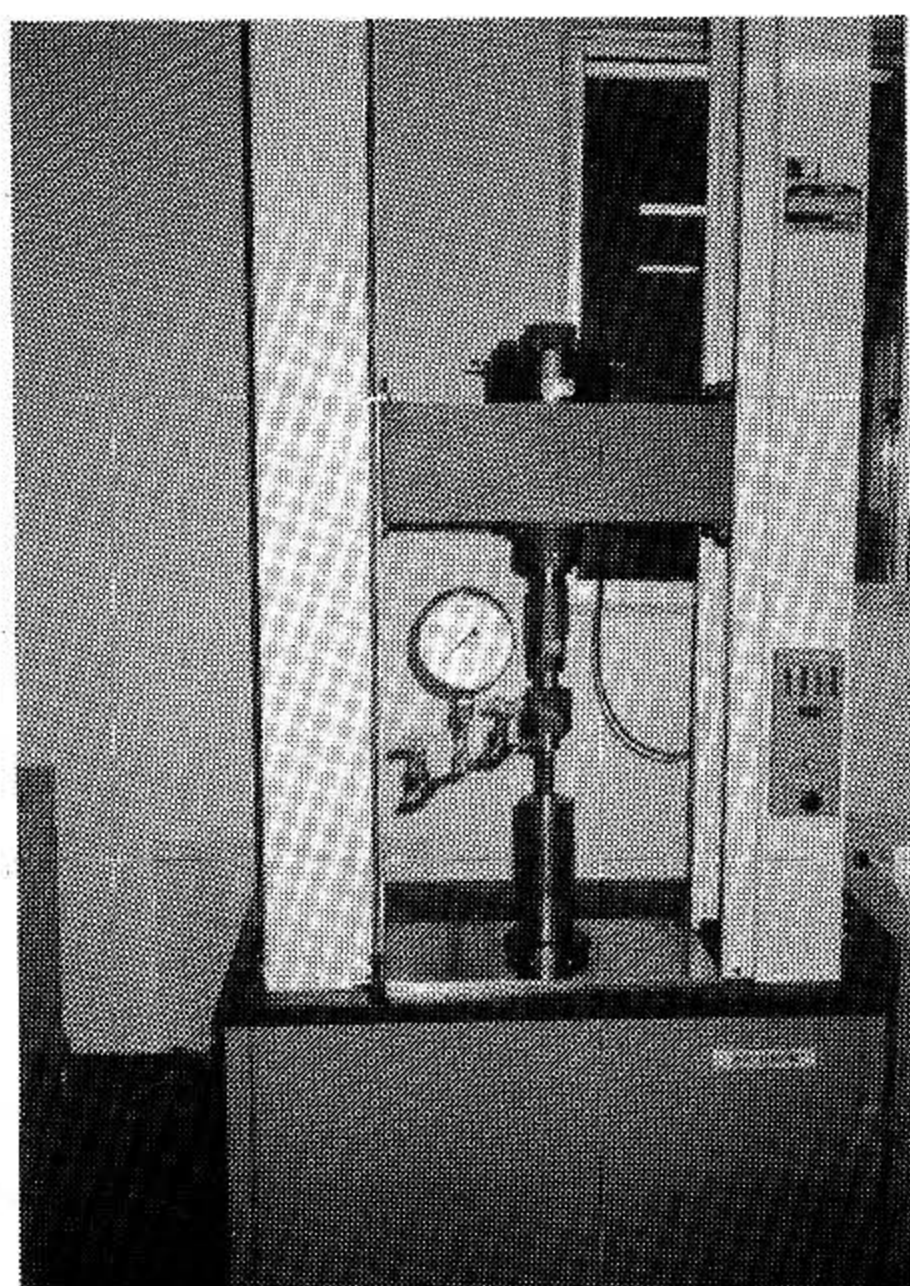


写真 2 圧壊試験

Photo 2 Equipments for Hydrostatic Compressive Strength test

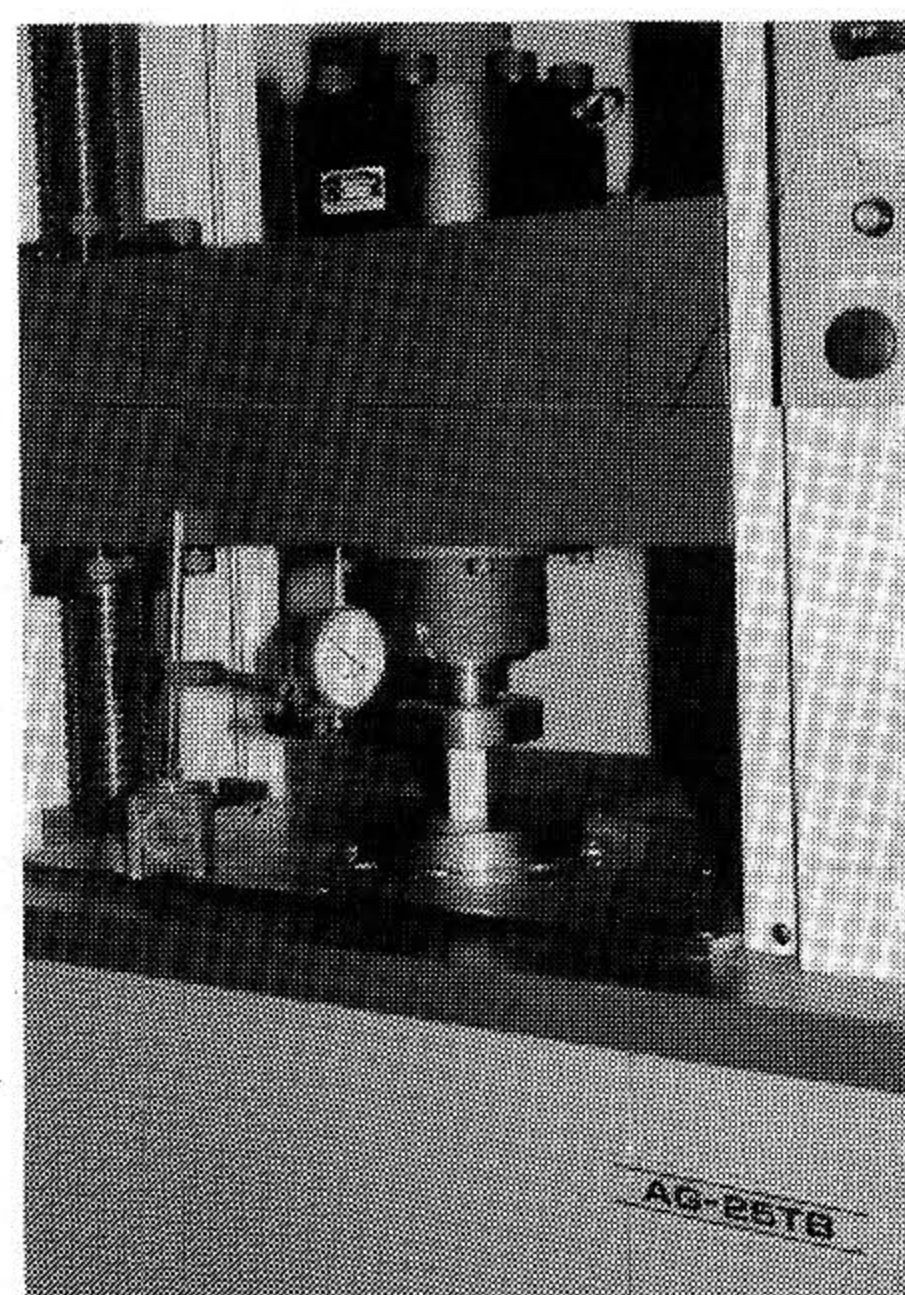


写真 3 圧縮試験

Photo 3 Equipments for Uniaxial Compressive Test

いること及び樹脂の高弾性率化による靱性の低下に起因するものであるが、本浮力材には圧縮のみが基本的にかかるものであり、引張強度は船体への取付等に際して考慮を払うことによりカバーし得るものである。このことは「しんかい2000」の実装実績からみて十分なものと考えられる。従って、引張強度以外のすべての項目についてM I L規格値を十分満たしていることから、本試作品は高強度でしかも軽比重の浮力材として実用可能である事を確認した。

なお、圧壊強度について初期値の方が1週間加圧後の値より小さいが、これはバラツキの範囲内の変動であって、1週間加圧後の方が強くなるという意味ではない。

(2) 耐久性評価試験

試作浮力材の耐久性、信頼性を評価確認するために、以下に挙げるいくつかの試験を実施した。

① 長期加圧試験

長期間加圧による吸水率変化を追跡した例を図4に示す。供試材寸法はM I L規格の標準試験片である直径1インチ、長さ2インチの円柱状試験片とし、試験圧力は6500m水深相当である680kg/cm²とした。

加圧期間と共に吸水率は徐々に増加するが10週間加圧後においても0.5%程度であった。また10週間加圧後の圧壊強度も初期値と変わらず、長期間加圧における信頼性が確認された。

② 加圧度と吸水率、圧壊強度

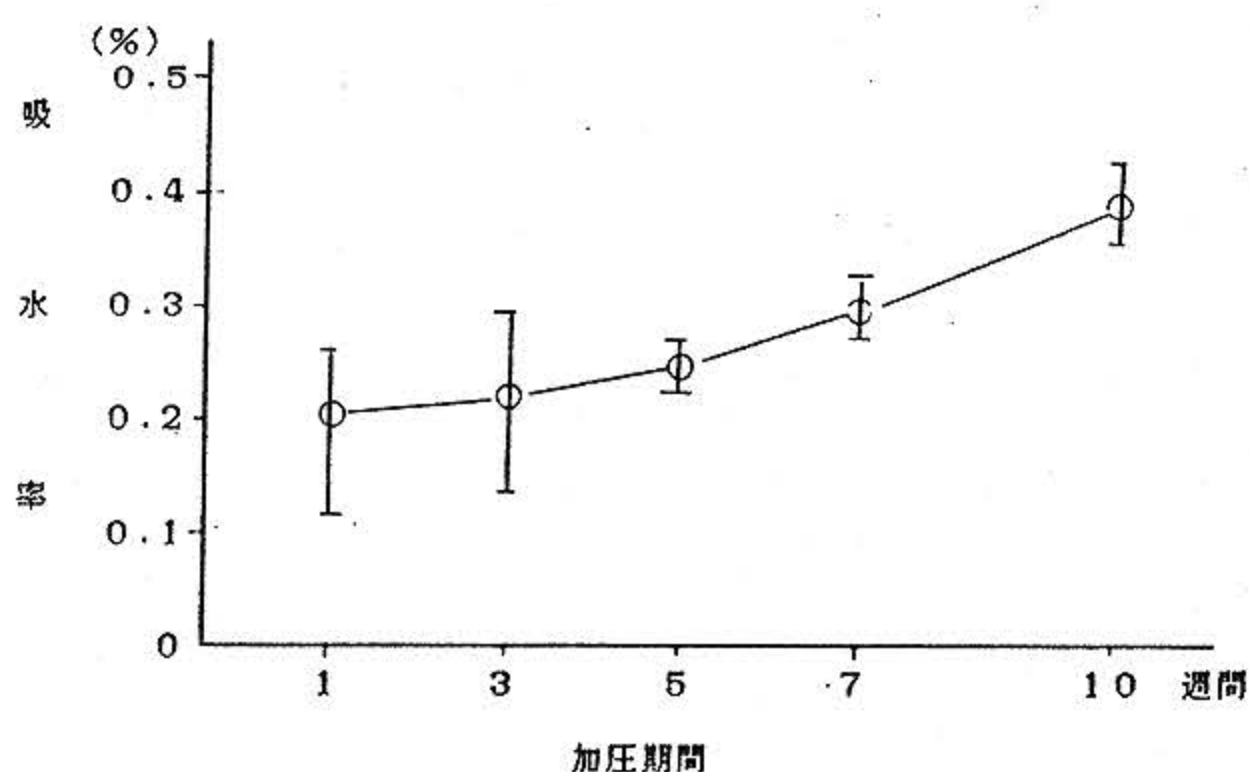


図4 680K g f / c m²水圧による長期加圧試験
Fig. 4 Compression Endurance Test by 680kgf/cm²

試験圧力の吸水率、圧壊強度への影響につき、M I L標準試験片による1週間加圧により調べた。試験圧力は供試体の初期圧壊強度に対して約50~80%の加圧レベルを加圧度として実施した。

$$\text{加圧度 (\%)} = (\text{試験圧力} \div \text{初期圧壊強度}) \times 100$$

図5に試験結果を示す。加圧度約75%までは加圧度を上げて吸水率の大幅の増加は無く、また加圧後の圧壊強度低下もほとんど見られず浮力材は健全であった。

しかしながら加圧度約85%においては試験片は加圧期間中に吸水率の急激に上昇する現象が見られないまま圧壊した。この理由は、弱い所から順番に微小圧壊が進んで全圧壊に至るのではなく、ガラス微小中空球強度の均質性が高いためにいきなり全圧壊にいたったものと考えられる。そして本試験結果から供試体の浮力材の使用圧力限界は初期強度の80%前後にあると推定される。

③ 浸漬及び屋外暴露試験

耐環境試験として海水中浸漬、機械油中浸漬及び屋外暴露試験を実施した。供試体は11サイズのブロックとし、所定期間経過後にブロックよりM I L標準試験片を切り出し、圧壊試験及び圧縮試験を行って評価した。

図6に試験結果を示す。外観的には、屋外暴露供試体ブロックに表面変色が見られたが、これはマトリクス樹脂の性状から紫外線による変色が生じたためである。

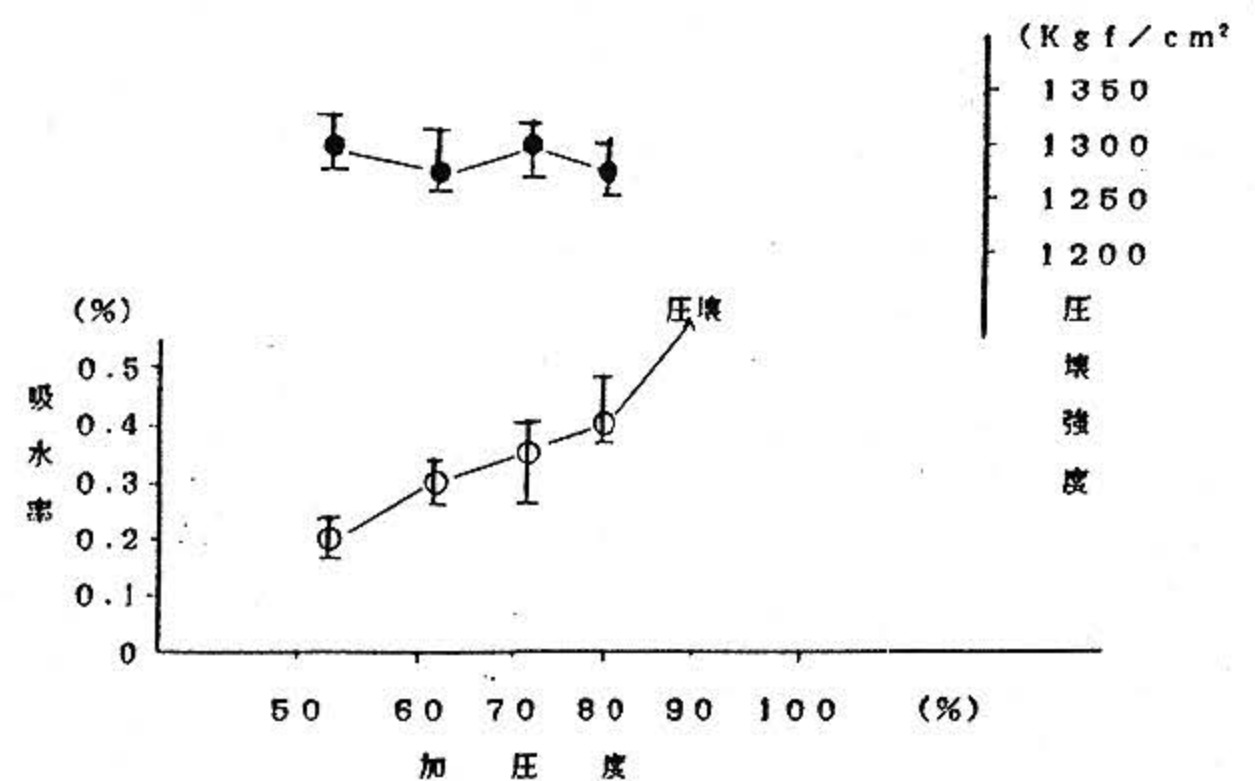


図5 加圧度と吸水率、圧壊強度
(1週間加圧試験)

Fig. 5 Water Absorption Compressive Strength to Compressive Ratio

浸漬, 暴露いずれの試験条件においても1年間経過後の物性は初期値とほとんど変わらず, 浮力材の劣化は見られなかった。

④ ヒートサイクル試験

温度環境変化に対する浮力材の耐久性を調べるために, 実用時の環境温度を想定して低温を -10°C , 高温を $+70^{\circ}\text{C}$ とするヒートサイ

クル試験を実施した。

供試体及び評価試験は前項と同様である。図7にヒートサイクル条件と試験結果を示す。1000サイクルの試験後においても物性は初期値とほぼ同レベルでバラツキの範囲内にあると考えられる。

実用サイズブロックの試作成形及び評価試

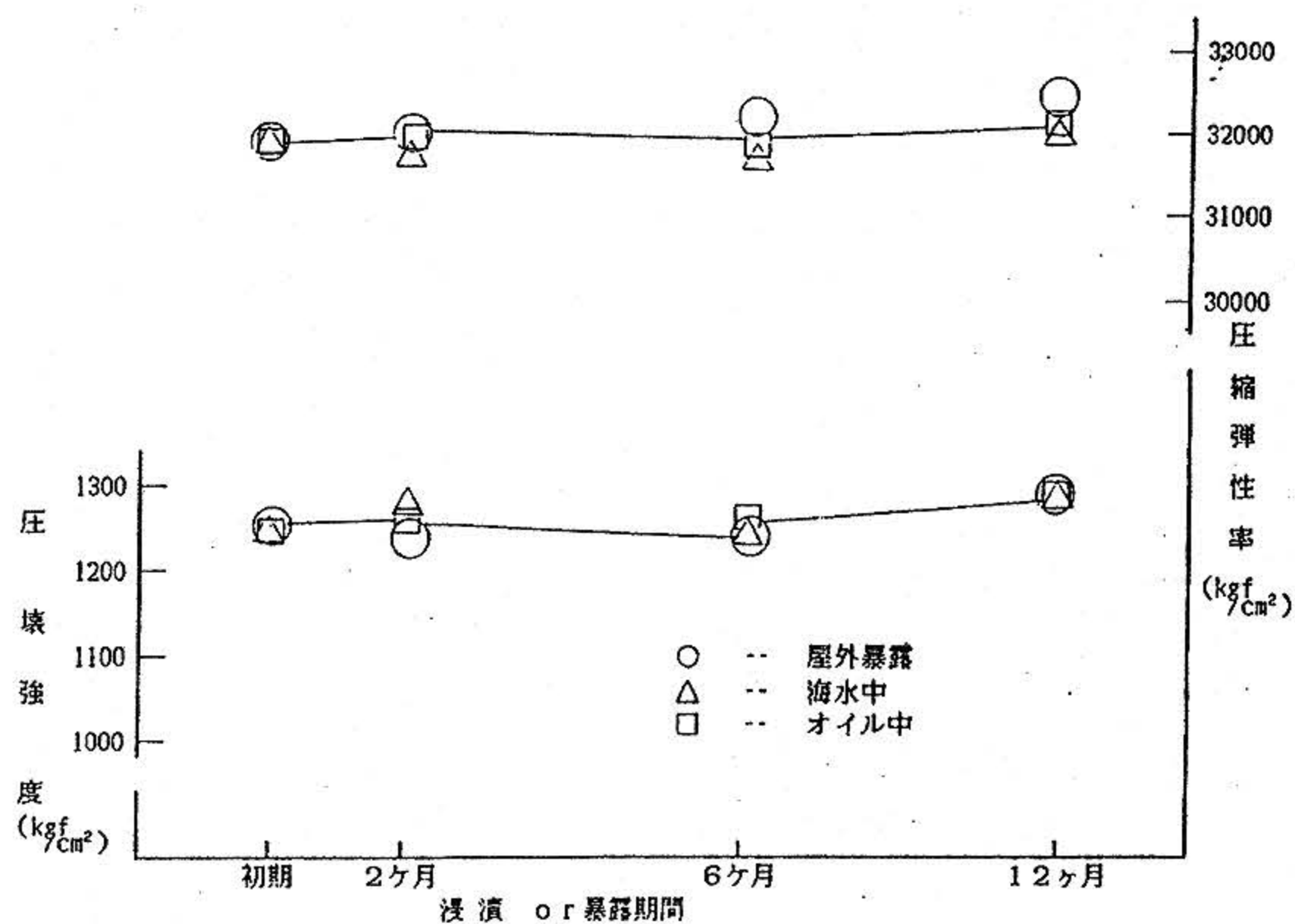


図6 浸漬、暴露試験

Fig. 6 Dipping Exposure Test

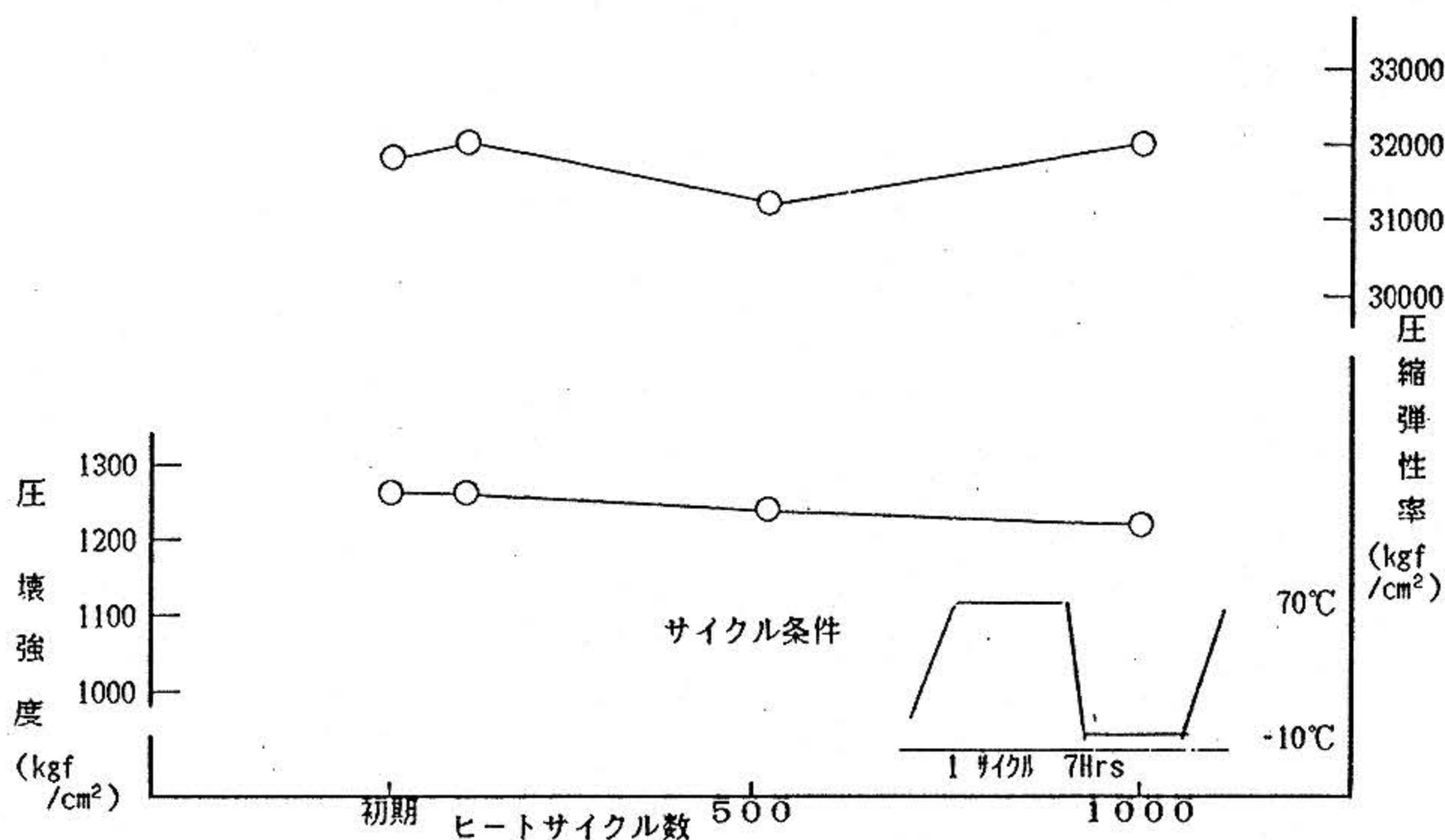


図7 ヒートサイクル試験

Fig. 7 Heat Cycle Test

験結果より、バイナリミクスチャ系ガラス微小中空球、高弾性率エポキシ樹脂処法による。

試作浮力材は、目標とする性能レベルを有し、耐久性、信頼性試験においても、ほとんど劣化は見られず「しんかい6500」用浮力材とし十分実用可能であるとの結果が得られた。

3 「しんかい6500」実装用浮力材の生産

前述の試作試験の結果から「しんかい6500」実装用浮力材は、標準ブロックサイズを600×300×150mm (27ℓ) として生産した(写真4参照)。製品は外観、寸法、比重及び超音波による内部欠陥の有無(図8参照)につき全数検査が行われた。

11ロットに分けて生産された浮力材ブロックの全平均比重は0.536であり、目標とした0.54以下を実装備用ブロックにおいても達成することができた。

浮力材製品についてはロット毎に1個のブロックを抜き取り、MIL規格に準拠した試験方法により物性試験を行った。表3に物性試験結果を示す。図9には代表的な物性検査項目につきロット毎の試験結果を示す。すべてのロットが要求仕様

を満たすととも安定した性能であることを示している。

さらに参考試験として製品ロット毎に1個のブロックを抜き取り、水圧680kg/cm²で1週間加圧するブロック加圧試験(写真5参照)を行い、加圧後の外観、重量変化を調べたがいずれのロット

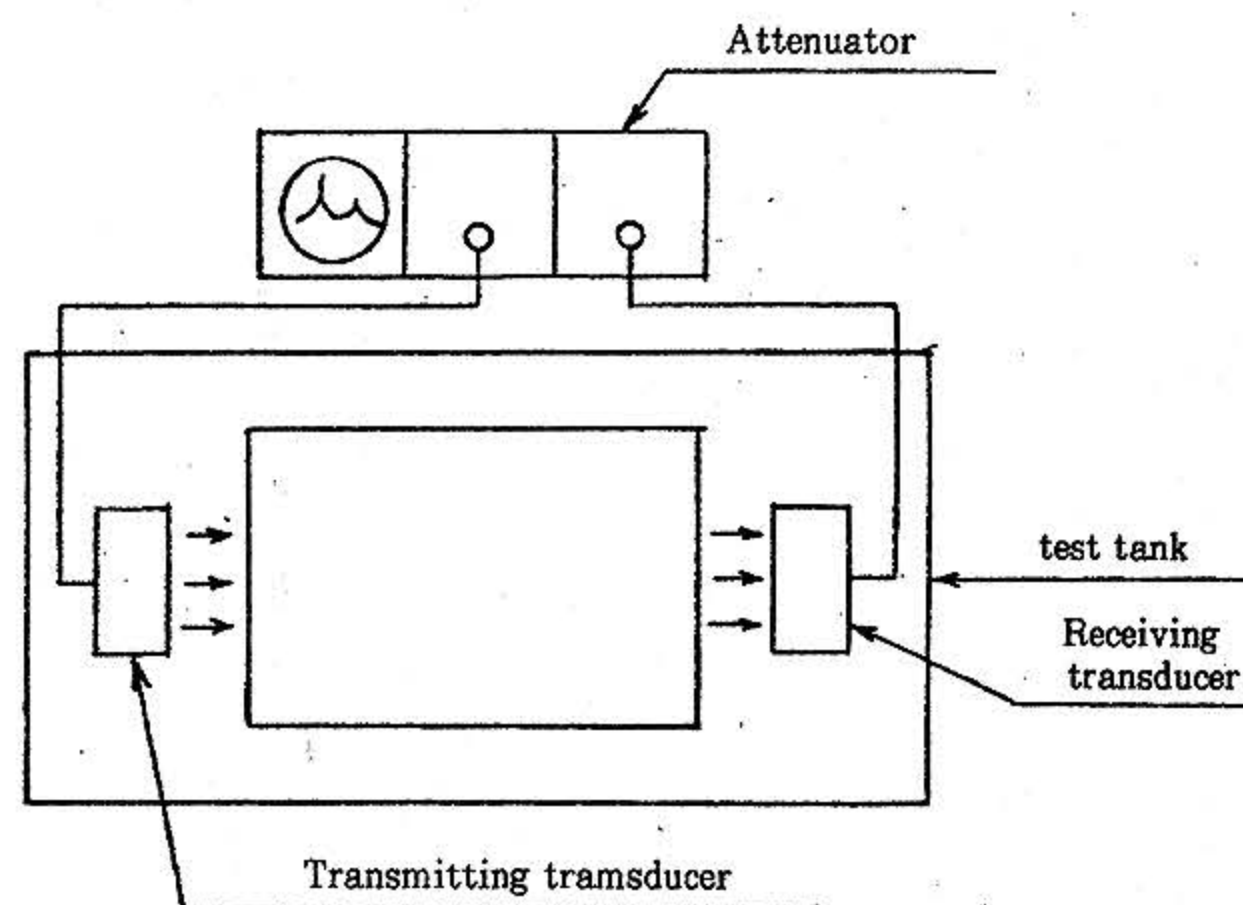


図8 超音波探傷試験装置

Fig. 8 Ultrasonic Defects Detector



写真4 「しんかい6500」用浮力材製品

Photo 4 Buoyancy Material Products for "SHINKAI6500"

表 3 浮力材試験項目及び試験結果

Table 3 Test Items results of Buoyancy Material Products

項目	浮力材	生産ブロック 全 甚 均 値	しんかい 6500 用 浮力材要求仕様
初期 状態	比 重	0.536	0.54±0.02
	圧縮強度 (kgf/cm ²)	935	780 以上
	0.2 % オフセット 圧縮強度 (")	915	700 "
	圧縮弾性率 (")	31400	29800 "
	引張り強度 (")	256	100 "
	せん断強度 (")	324	200 "
	体積強性率 (")	31050	24600 "
	圧壊強度 (")	1270	1200 " (平均値) 1080 " (最小値)
680 kgf / cm ² 一週間 加圧後	吸水率 (")	0.25	2 以下
	圧縮強度 (kgf/cm ²)	917	740 以上
	0.2 % オフセット 圧縮強度 (")	896	670 "
	圧縮弾性率 (")	31280	28100 "
	圧壊強度 (")	1266	1080 "
680 kgf / cm ² 1000 ∞ 加圧 後	吸水率 (")	1.94	3 以下
	圧縮強度 (kgf/cm ²)	841	700 以上
	0.2 % オフセット 圧縮強度 (")	807	630 "
	圧縮弾性率 (")	30090	28100 "
	圧壊強度 (")	1234	1080 "

共に外観上の変化はなく、重量変化もすべて秤量器の感量 (50 g) 以下であった。

ちなみに浮力材の吸水量はほぼ表面積に比例するので、MIL 標準試験片の吸水率を 0.5% とした場合表面積当たりの吸水量は約 14g/m² である。この値よりブロック加圧試験による吸水量は 9 g、吸水率としては 0.06% 程度であると推測され、加

圧吸水による浮力への影響はほとんど無視し得る範囲内にあると考えられる。

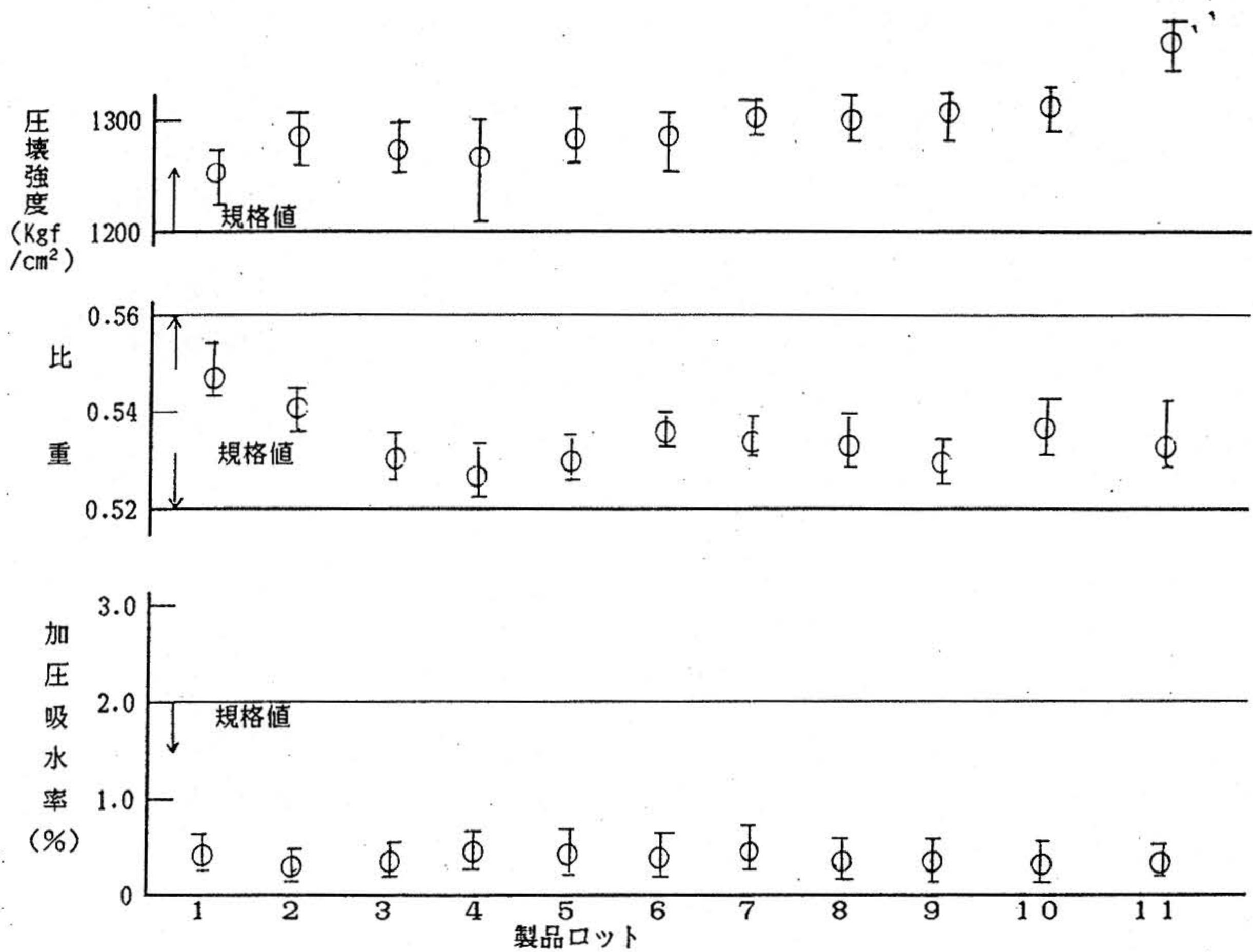


図 9 浮力材物性検査結果

Fig. 9 Physical Properties of Buoyancy Materials

4 ブロック状態における圧壊試験

本浮力材の性能評価としては、2.3.(1)に示したようにMIL規格のタイプIIを準用した。しかしこの規格における試験片は直径が1インチで長さが2インチの小さな円柱形であり、実用サイズのブロックとは大きさがかなり違う。そこで参考試験として、実用サイズのブロックの圧壊圧力がMIL試験片の圧壊圧力とどの程度異なるかを調べてみた。これは、ブロック成形時に温度分布等にムラがあって弾性率等に局所的な変動がある場合、切り出された小さな試験片ではこの局所的変動が単なるバラツキとして見過ごされ、大きなブロックとした時にその部分に応力集中が生じて部分圧壊を起こす可能性があるかもしれないためである。しかしこのような大型のブロックに対する圧壊試験の要領についてはMILにも規格がないので、参考試験として適宜実施してみた。

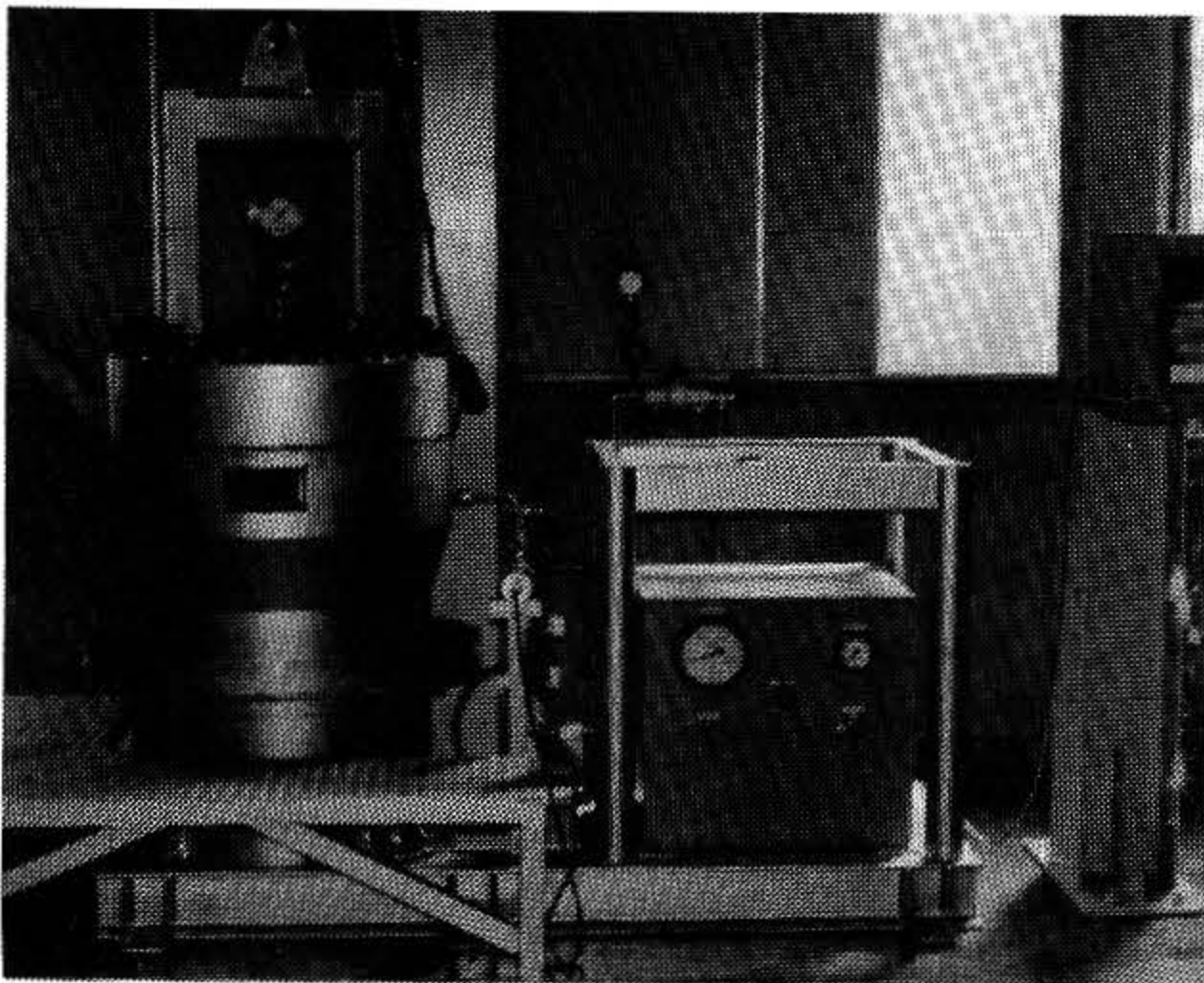


写真 5 加圧タンク

Photo 5 Hydrostatic Pressure Tank

試験には成形ブロックである600mm×300mm×150mmのもの1個と、これを1/4に切った300mm×150mm×150mmのもの1個の計2個を用いた。それぞれの昇圧曲線と圧壊圧力を図10と図11に示す。この図が示すように、成形ブロックで圧壊圧力は1215kg/cm²、1/4ブロックで同1195kg/cm²であって、大きくなったことによる寸法影響は多少うかがえるものの、ほぼMIL試験片と同程度の圧力で圧壊していると見なすことができる。また圧壊直後に取り出して観察したところ、全圧壊ではなく、厚さに相当する150mm角程度の部分のみが圧壊した

部分圧壊であった。そしてこの圧壊したブロックをさらに加圧したところ、同じ程度の圧力で再び部分圧壊が生じて圧力が少し下がり、そのまま昇圧すると再び部分圧壊するという過程を繰り返した。このようにして何度も部分圧壊した成形ブロックの浮力材を写真6に示す。

このことから、供試品数が少ないために一般化はできないが、部分圧壊の誘爆による浮力材の全損は考えにくいこと、ならびに部分圧壊自体も寸法影響は多少見受けられるもののMIL試験片と同じレベルの非常に高い圧力下で発生することか

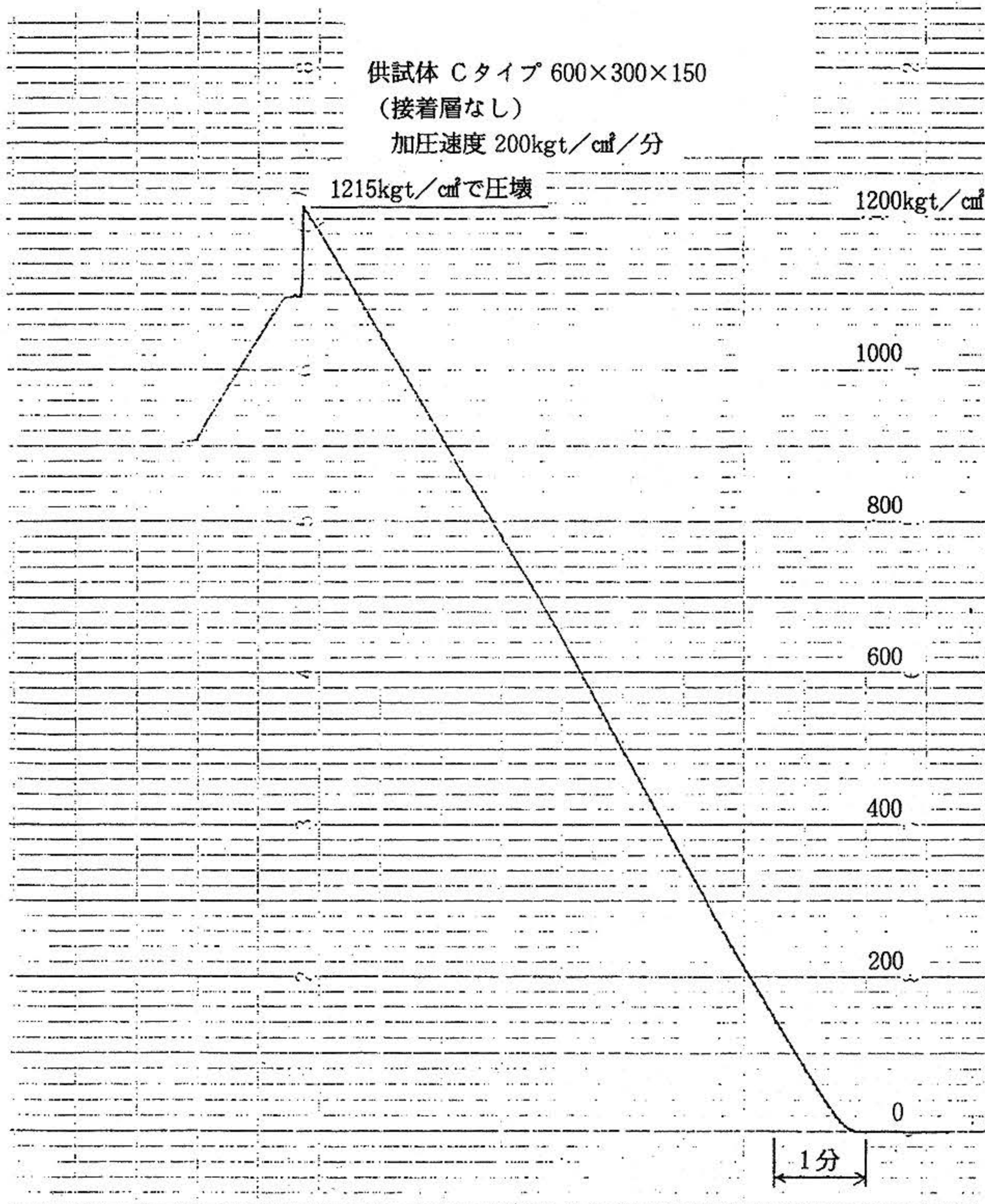


図 10 2/17 第3回圧壊試験 (立会)

Fig.10 No.3 Compressive Strength Test of Full Size Block

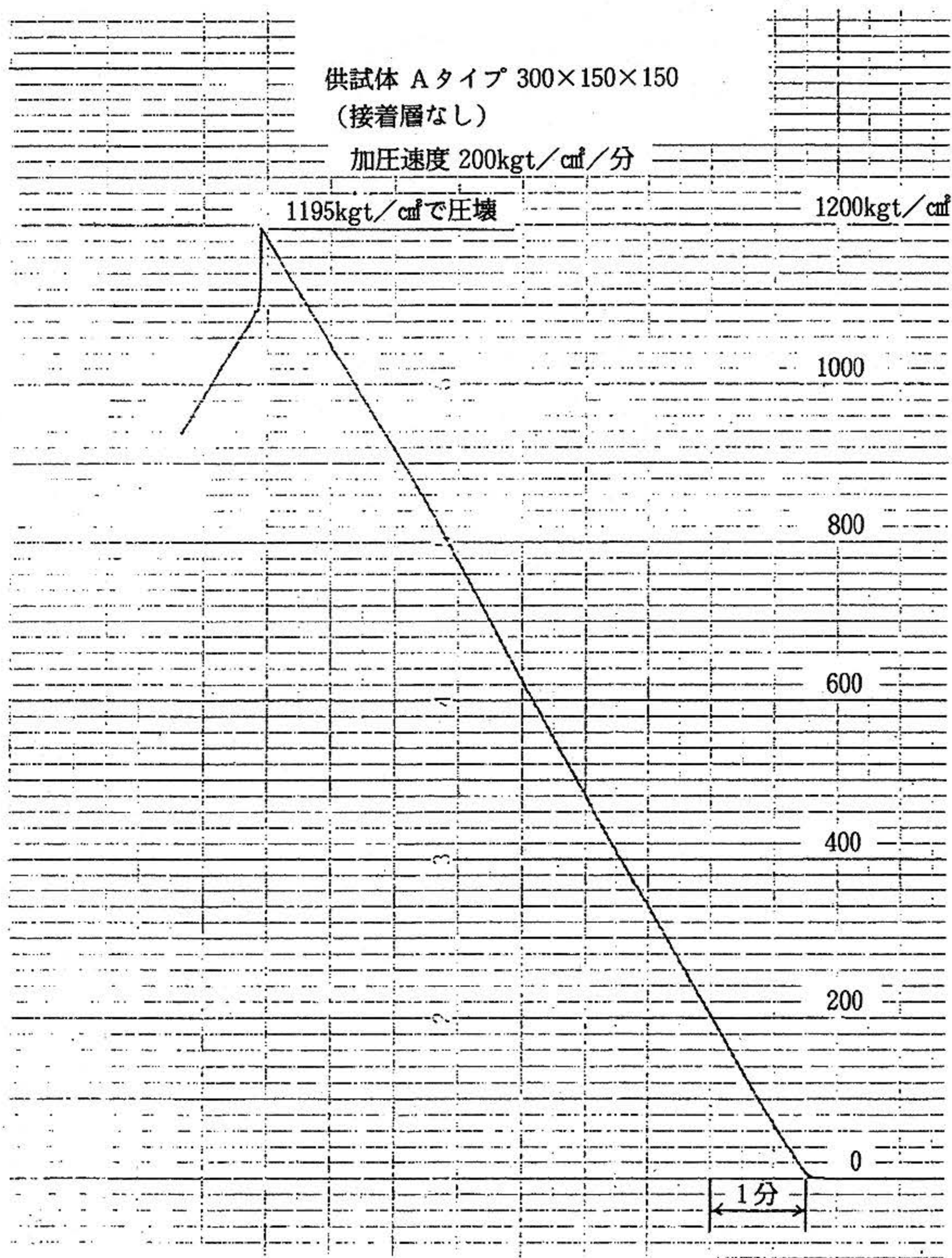


図 11 2/17 第2回圧壊試験 (立会)

Fig.11 NO.2 Compressive Strength Test of Quater-size Block

ら、本製造法による浮力材の均質性が実証され、6500m潜水調査船用の浮力材として十分安全に用いることができることが分かった。

5 まとめ

バイナリミックス系のガラス微小中空球、高弾性率マトリクス樹脂を用いて新規処法により開発された高強度・軽比重浮力材はMIL規格による標準試験及び耐久性、信頼性を評価するための各種の試験において、6500m潜水調査船用浮力材は「しんかい2000」なみの比重を得ることができる

と共に、実用上十分な耐圧性能を有するものであることが確かめられた。

本開発処法による高性能浮力材は、これからの深海開発機器用としても十分使用できるものと考えられる。

「しんかい6500」には浮力材ブロックを接合して形状加工した形あるいは標準ブロックそのままの形で艀装搭載された。そしてすでに「しんかい6500」は実海域試運転において最大潜航深度6527mの記録を達成している。今後の活躍を期待する。

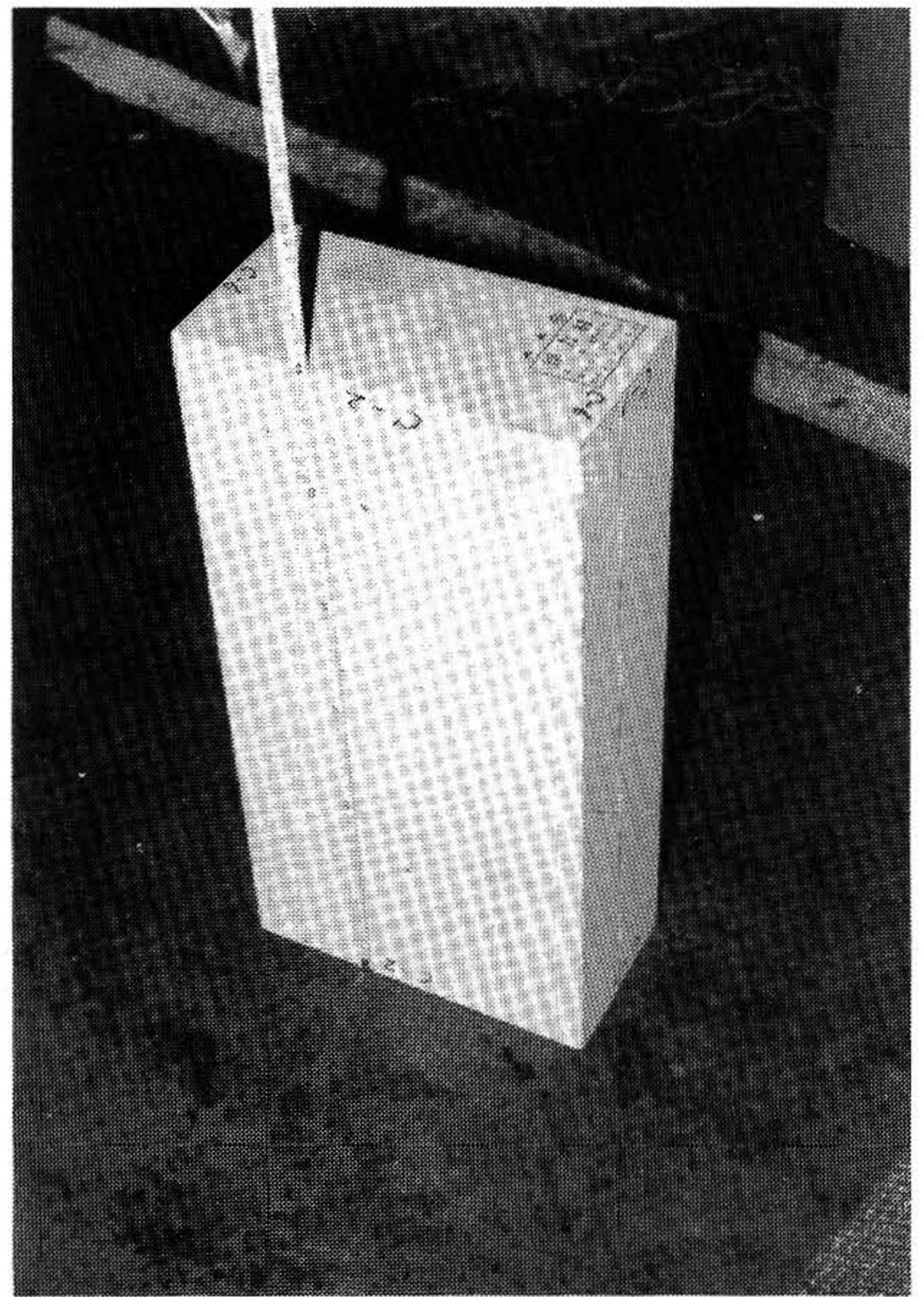
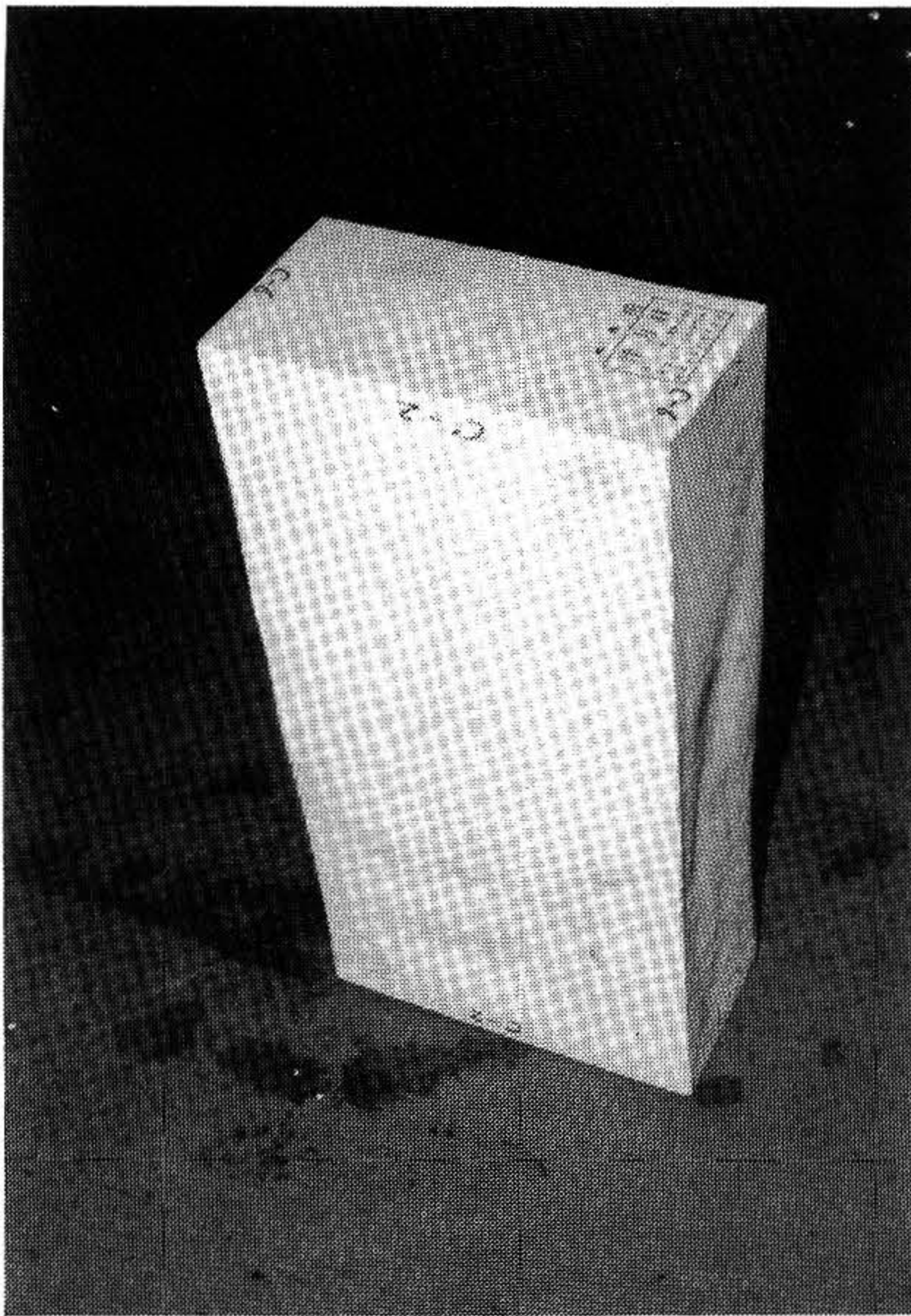


写真 6 成形ブロック供試体(600×300×150 mm)

(左：圧壊後)，(右：圧壊前)

Photo 6 Full-size Test Block Partially Collapsed(600×300×150 mm)

参考文献

- 1) 日本船用機器開発協会「6000m深海潜水調査船の開発研究事業報告書」, 東京, 1979-1972
- 2) 遠藤倫正, 石川隆之他「深海潜水調査船用浮力材(第1報, 第2報, 第3報, 完結)」関西造船協会誌140号-昭和46年6月, 同143号-昭和47年3月, 同144号-昭和47年6月, 同153号-昭和49年6月
- 3) 藤田俊助他「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JAMSTECTR 12, (1984)
- 4) MIL-S-24154A(SHIPS) Syntactic Buoyancy Material for Hydrostatic Pressures

(原稿受理: 1989年12月6日)