

### 3. 潜水調査船用ショットバラスト装置の開発研究

坂倉 勝海\*<sup>1</sup> 徳永 三伍\*<sup>1</sup> 岡田 光豊\*<sup>1</sup>  
加藤 洋\*<sup>1</sup> 對馬 克己\*<sup>1</sup> 圓尾 喜昭\*<sup>2</sup>

2,000 m 潜水調査船が水中で重量を調整する手段として、海水ポンプを用いた可逆バラストシステムのほか、鋼球（ショット）によるバラスト装置が計画されている。

本研究は、そのショットバラスト装置を試作し、実船装備の場合の諸性能を把握するとともに、装置の信頼性をより向上させるため、実施したものである。

本装置は、実船と同一スケールの試作品であり、これによってショットの流動特性、電磁栓の放出、閉塞性能、ならびに残留磁気の影響等がわかり、今後、実施する実機システムの設計のみならず、これを実際に使用する場合のオペレーション上の貴重な資料も得ることができた。

#### Study of a Shot Ballast System for a 2,000 Deep Submergence Research Vehicle

Katsumi Sakakura\*<sup>3</sup>, Sango Tokunaga\*<sup>3</sup>, Mitsutoyo Okada\*<sup>3</sup>,  
Hiroshi Katoh\*<sup>3</sup>, Katsumi Tsushima\*<sup>3</sup>, Yoshiaki Maruo\*<sup>4</sup>

A shot ballast system using small steel pellets (shot) is designed for the 2,000 m deep submergence research vehicle (DSV-2K) in addition to the variable ballast system.

This study was carried out to determine the characteristics and performance of this system under operating conditions, and to improve the reliability of the equipment by utilization of a model which was made on the same scale as the DSV-2K.

As a result of this test, we observed not only the releasing performance, the influence of residual magnetism of shot, and the ON-OFF characteristics of an electro-magnetic stopper, but numerous data for the actual design and operation of this system.

---

\*<sup>1</sup> 深海開発技術部

\*<sup>2</sup> 三菱重工業株式会社神戸造船所造船設計部

\*<sup>3</sup> Deep Sea Technology Department

\*<sup>4</sup> Ship Designing Department, Kobe Shipyard & Engine Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.



## 1. ま え が き

2,000 m 潜水調査船 (DSV-2K) では、水中で重量を調整する方法として、海水ポンプで容量 350 ℓ の補助タンク内の海水を注排水する可逆バラストシステムと、総量 600 kg (水中重量) の鋼球 (ショット) を使ったショットバラスト装置が計画されている。

このショットの投棄による重量調整は、専ら潜水船の重量を軽くするという一方向のみの非可逆システムであるが、電磁栓への微小電流の ON-OFF によって放出量を調整するという、きわめて単純なメカニズムとわずかな電力消費という利点を有し、なおかつ電源喪失の場合は、自動的にショットを全量放出し、潜水船を上昇させるというフェイルセーフの思想にも合致したものである。

本開発研究は、ホッパ、電磁栓、ショットの組合せによって、設計した実機と同一スケールの装置を試作し、実船に装備された状態を模擬できる試験装置でショットの流動特性、電磁栓の放出、閉塞性能、ならびに残留磁気の影響等を把握し、実機の装置設計およびオペレーション上の資料を得るとともに、本船に装備されるショットバラスト装置の信頼性をより向上させるため、実施したものである。

なお、本開発研究の実施にあたり、“潜水調査船開発研究会” 委員各位からいただいた適切なご助言、ご指導に対して、深く謝意を表する次第である。

## 2. 試作品および試験装置

試作品の設計は諸資料に基づき、バラストホッパ、電磁栓、ショットの組合せとし、試験装置は写真 1 に示すように、試作品を最大 30° まで傾斜でき、放出されたショットバラストを計量器 (台秤または吊り秤) で直接計測できるものとした。

### 2.1 バラストホッパ

DSV-2K は、緊急事態発生時、爆破ボルトによってドロップウエイト、マニピュレータ等を船体から切離し、約 800 kg の浮力が得られる緊急投棄装置を持っている。

バラストホッパもそれ自体緊急投棄の対象物になっている。したがって、その形状、装備位置についてもその面から十分に検討を加える必要があり、全体形状を円筒形としようご部の円錐形が組合されたものにしていく。このじょう

ご部の絞り角度は、船体傾斜の最大角度 30° に対し、ホッパ内のショットを全量放出できる角度 45° を採用した。放出口口径  $d$  は、放出量  $W$  を 5 kg/s と設定し、6,000 m 深海潜水調査船の開発研究事業報告書<sup>1)</sup>を参考にして、次式を用いた。

$$W = 0.0033(d - 5.4dS)^2 (\tan \theta)^{0.3} \dots (1)$$

ただし、 $dS$ : ショット径 …… 2.4 mm,

$\theta$ : ホッパ絞り角 …… 45°

上式より、 $d = 5.19$  mm となり、これに近いステンレス鋼管 (非磁性材質) を選定した。

### 2.2 電磁栓

電磁栓はショットを電磁力で閉塞させるもので、放出口に機械的開閉装置を持たず、閉塞電流の ON-OFF で放出量の制御を行うものである。

形状は構造が簡単な中空円筒形とし、潜水船電源 28 V からコイルの巻数、電流値等を算出し、潜水船の最大潜航深度 2,000 m の水圧に耐えるモールド加工を施した。

### 2.3 ショットバラスト

ショットは、制御精度が良く、市場における入手が容易で、低価格でもある鑄造ショットの S240 (標準粒径 2.4 mm) を採用した。

前記試作品の要目および形状を表 1 および図 1 に示す。

## 3. 試験結果

試験は大気中および水中 (工業用水) で行い、電磁栓閉塞電流を 3.0 A, 3.2 A および 3.4 A, ホッパの姿勢を正常位置 (垂直) と傾斜位置 (30°) に変え、各々の条件下での放出性能を確認した。なお、投棄時間は 5s, 10s, 20s, 30s および 60s について実施し、表 2 に示す結果を得た。

表中の記載数値は数回計測したデータの平均値であり、水中での放出量は水中重量である (以下同様)。またショットの残留磁気による影響を確認するため、約 17 時間水中に電磁栓に通電した状態で浸漬したのち、水中の正常位置で放出試験を行ったデータも記載してある。

この計測結果をもとに、放出量と放出時間との関係の近似式を導くと、次式で示される。

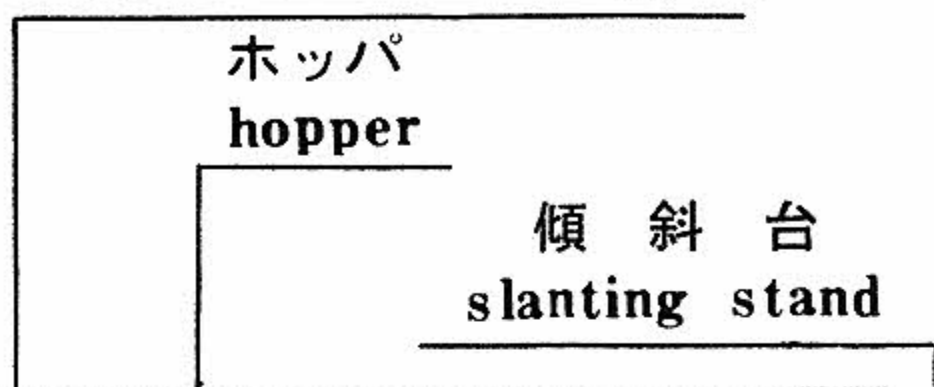
$$W = aT + b \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 $T$ : 放出時間 (s)

$W$ :  $T$  における放出量 (kg)



ホッパ支持台  
support stand of hopper



電磁栓  
electro magnetic stopper

計量器  
measure

写真1 試験装置  
Test equipment

表1 試作品要目  
Specification of trial production

項目 item	要目 spec.
ホッパ hopper	出口口径 outlet dia. $\phi 527^{\text{mm}}$ SUS 304 TP50A
	絞り角 conic angle $45^{\circ}$
	円筒部径 cylinder dia. $600^{\text{mm}}$
電磁栓 electro magnetic stopper	中空円筒ソレノイド型 solenoid type
	コイル巻数 turns of coil 1950回
	主材質 material SS41 rolled steel
ショットバラスト shot ballast	铸造ショット (JIS G 5903 S240) cast shot
	標準粒径 shot dia. $\phi 24^{\text{mm}}$
	容積比重 specific gravity in capacity $1.32\text{g/cm}^3$
比重 specific gravity $7.4\text{g/cm}^3$	

表2 放出性能試験データのまとめ  
Data of released performance

状態 condition	傾斜角 slant angle	放塞電流 (A) blockade current	救出量(kg) figures of released performance				
			5(s)	10(s)	20(s)	30(s)	60(s)
大気 中 in air	$0^{\circ}$	3.0	27.0	48.0	84.7	124.8	238.8
		3.2	24.3	44.3	81.8	120.7	237.2
		3.4	24.0	42.3	82.0	120.8	235.5
	$30^{\circ}$	3.0	19.8	38.5	75.0	110.8	220.3
		3.2	19.7	37.7	74.5	111.5	218.8
		3.4	19.7	37.8	74.0	110.7	219.5
常圧 水中 in water	$0^{\circ}$	3.0	26.2	49.7	97.0	141.0	270.7
		3.2	25.7	47.5	90.8	137.3	277.0
		3.4	24.7	47.3	93.7	139.3	277.7
	$30^{\circ}$	3.0	14.7	25.3	56.7	83.7	163.3
		3.2	15.0	29.3	56.7	83.3	164.7
		3.4	14.7	29.0	55.3	83.7	162.0
$0^{\circ}$	残留磁気による影響試験データ data of influenced by residual magnetism						
	3.2	24.5	47.3	89.8	136.0	269.0	

表3 近似直線係数  
Factor of similarly curve

状態 condition	傾斜角 slant angle	閉塞電流(A) blockade current	a	b	備考* remark $\Delta W \text{ kg}$
大気 中 in air	$0^{\circ}$	3.0	3.84	8.63	1.8
		3.2	3.87	5.00	1.8
		3.4	3.85	4.58	1.6
	$30^{\circ}$	3.0	3.57	4.52	4.8
		3.2	3.62	1.88	2.5
		3.4	3.63	1.48	1.1
常圧 水中 in water	$0^{\circ}$	3.0	4.43	6.06	5.0
		3.2	4.58	1.16	3.6
		3.4	4.60	1.48	1.5
	$30^{\circ}$	3.0	2.72	0.63	2.0
		3.2	2.71	2.20	1.6
		3.4	2.68	2.06	2.9
$0^{\circ}$	残留磁気による影響試験データ data of influenced by residual magnetism				
	3.2	4.45	2.17	2.2	



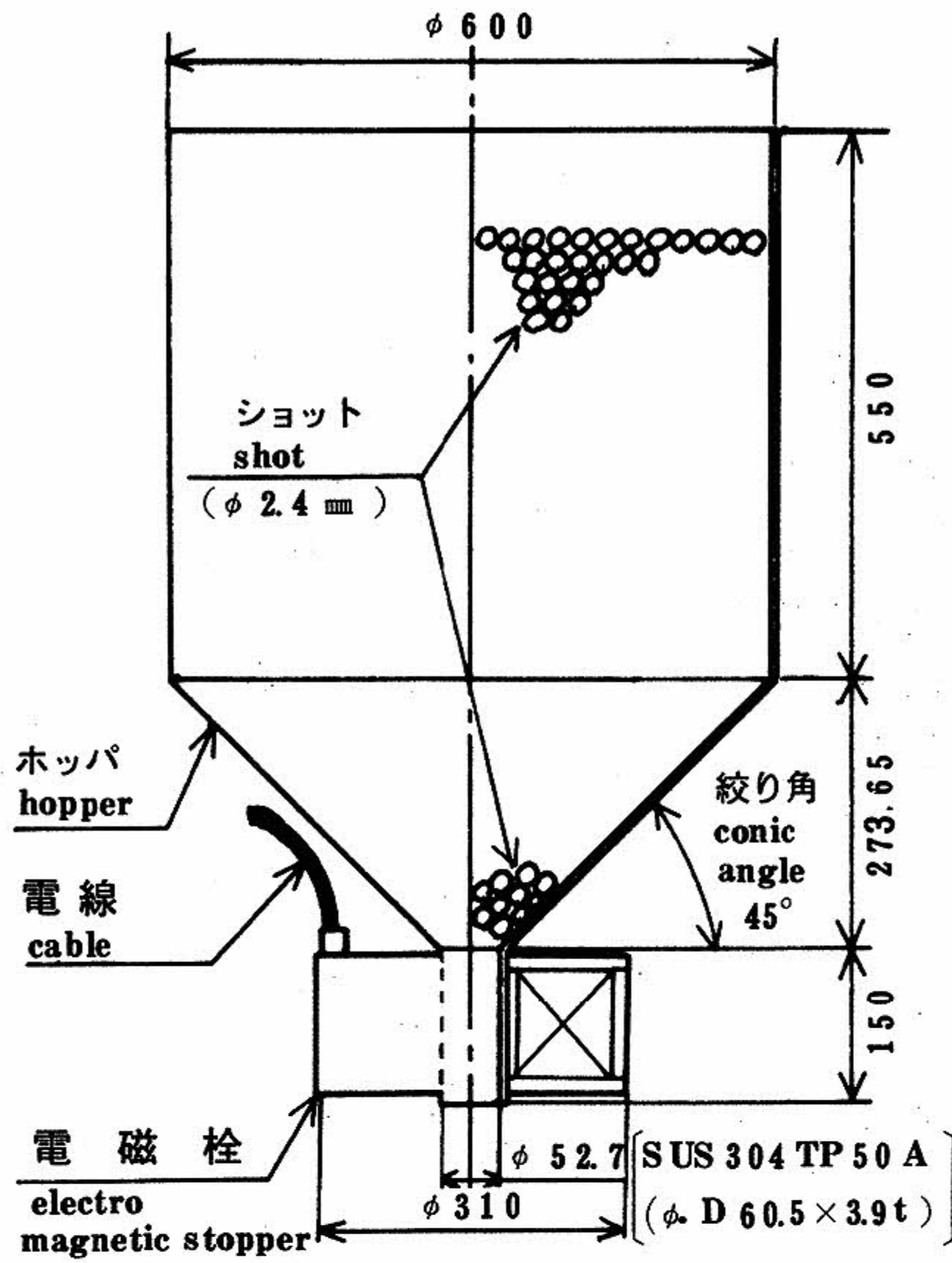


図1 試作品形状  
Dimension of trial production

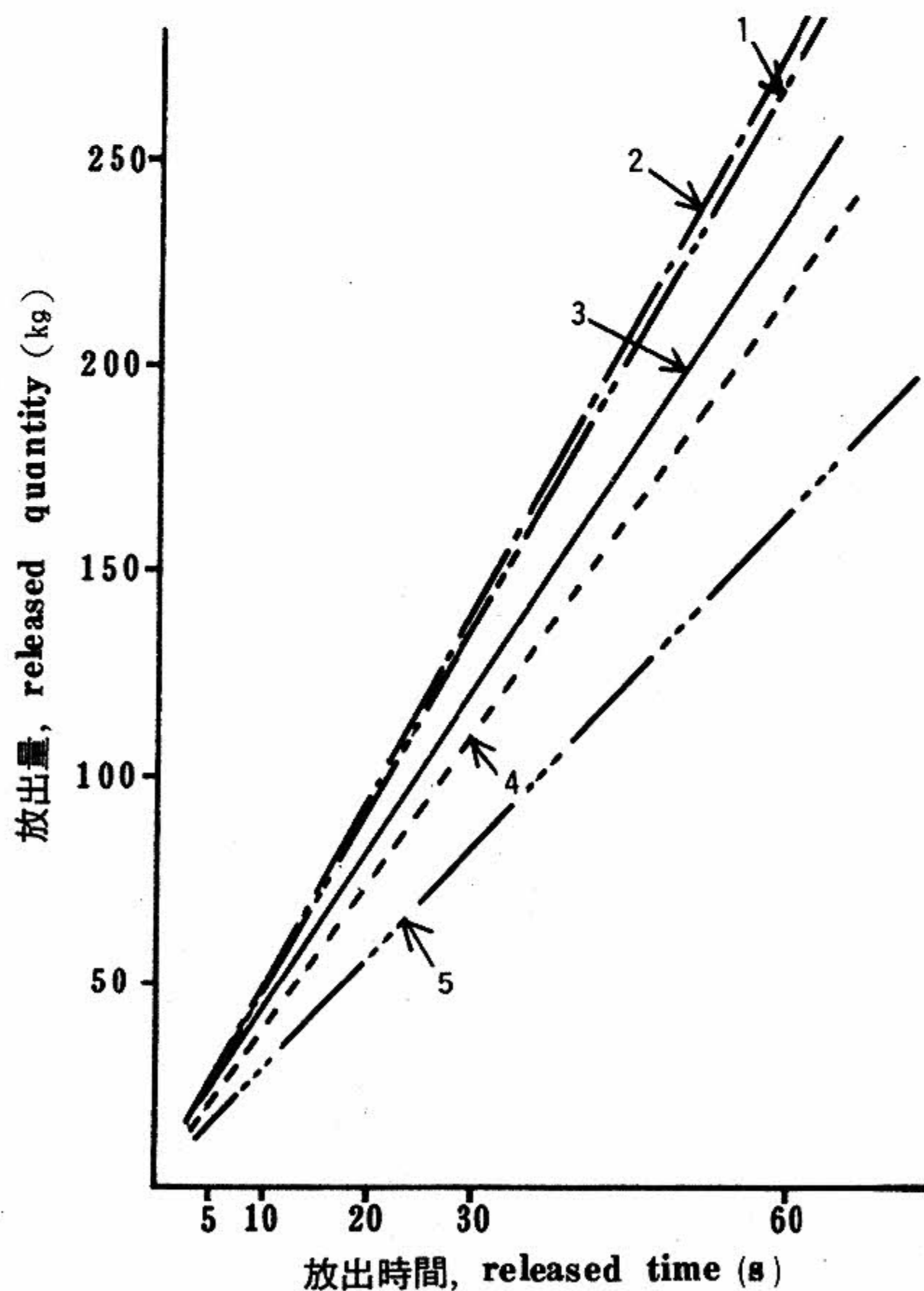


表2のデータを最小二乗法で解析し、上式のa, bを計算すると、各状態で表3に示す値が得られる。なお、計算値と計測データの差の最大値を参考として備考欄に記載した。

また表3の閉塞電流が3.2 Aの例をグラフ化したものを図2に示す。

表3から明らかのように、各状態（大気中、水中）および各傾斜角において、閉塞電流に関係なく、係数aはほぼ一定であり、バラツキが見られるのは係数bである。この原因は、電磁栓への通電をOFFとして放出を開始させたときの応答はきわめてよいが、再通電して電磁栓で閉塞しても若干放出が続く現象が試験観察で確認され、閉塞電流によって放出時間に差があることから説明できる。

そこで大気中傾斜角0°で、落下停止時間（電磁栓に通電してから落下が完全に停止する時間）を計測し、その結果を発生度数で示すと、図3のようになる。

#### 4. 考察

##### 4.1 放出流量

前述の試験結果に示すように、放出量は $W = aT + b$ で表わされる。この式の係数aは状態（大気中、水中）および傾斜角に左右され、bはすべてに影響されるがバラツキは主に閉塞電流に支配されている。

係数aは流出中の単位時間当りの放出量であり、放出口の口径およびじょうご部絞り角が同一であれば、閉塞電流およびショット充填高さ

1. 残留磁気による影響, 水中, 傾斜角0°,  
in water, slant angle 0° (influence of residual magnetism)
2. 水中, 傾斜角 0°  
in water, slant angle 0°
3. 大気中, 傾斜角 0°  
in air, slant angle 0°
4. 大気中, 傾斜角 30°  
in air, slant angle 30°
5. 水中, 傾斜角 30°  
in water, slant angle 30°

図2 閉塞電流 3.2 Aにおける放出性能

Released performance (blockade current 3.2A)



に関係なくほぼ一定である。これは、放出口部に自由落下アーチが形成されることによるものと考えられる。

この自由落下アーチとは、放出に際し、ショットがじょうごの最下端に集って放出口の出口へ流出しようとするとき、ショット同志が押し合って瞬間的にアーチを形成し、それによって上方のショット重量を支える状態となり、次の瞬間には、これが崩れるということが周期的に繰返され、ショットの放出がなされる現象をいう。

この場合には、ショットはアーチの下側を始点として重力によって自由落下する。このことは、ホッパの底部荷重（電磁栓の電源をOFFとし、ショットが放出口から押出される荷重を計測した）がショット充填高さに関係なく、ほぼ一定であることから裏付けされる。

したがってショットの放出速度は充填高さに関係なく一定であり、放出流量もホッパ形状が定めれば一定となる。このことは、放出量のコントロールという点からきわめて重要である。

なぜならば、ホッパ内のショット量に関係なく、放出量が一定となるので、あらかじめ装置の係数  $a$ （放出流量）を知っておけば、放出時間を計測することによって実際の放出量を知ることができ、放出量のコントロールも容易である。係数  $b$  は、閉塞電流通電後に落下する量であり、放出時間に関係なく、投棄操作1回ごとに発生し、閉塞電流値によって決定されるものである。

#### 4.2 閉塞電流

図3に示すように、電磁栓に通電後、落下が完全に停止するまでの時間な閉塞電流により影響される。

この図によると落下停止時間は3.0 Aでは2.0 s、3.2 Aでは1.2 s、3.4 Aでは1.2 sに集中している。

閉塞電流を強くすれば、停止時間は短くなるが、3.2 Aと3.4 Aでは電流の増加に比較して停止時間はさほど短くはならない。これによって閉塞電流は3.2 Aで十分であろうと考えられる。

なお、閉塞起磁力としては6240 AT（アンペアターン）（3.2 A × 1950 回巻）である。

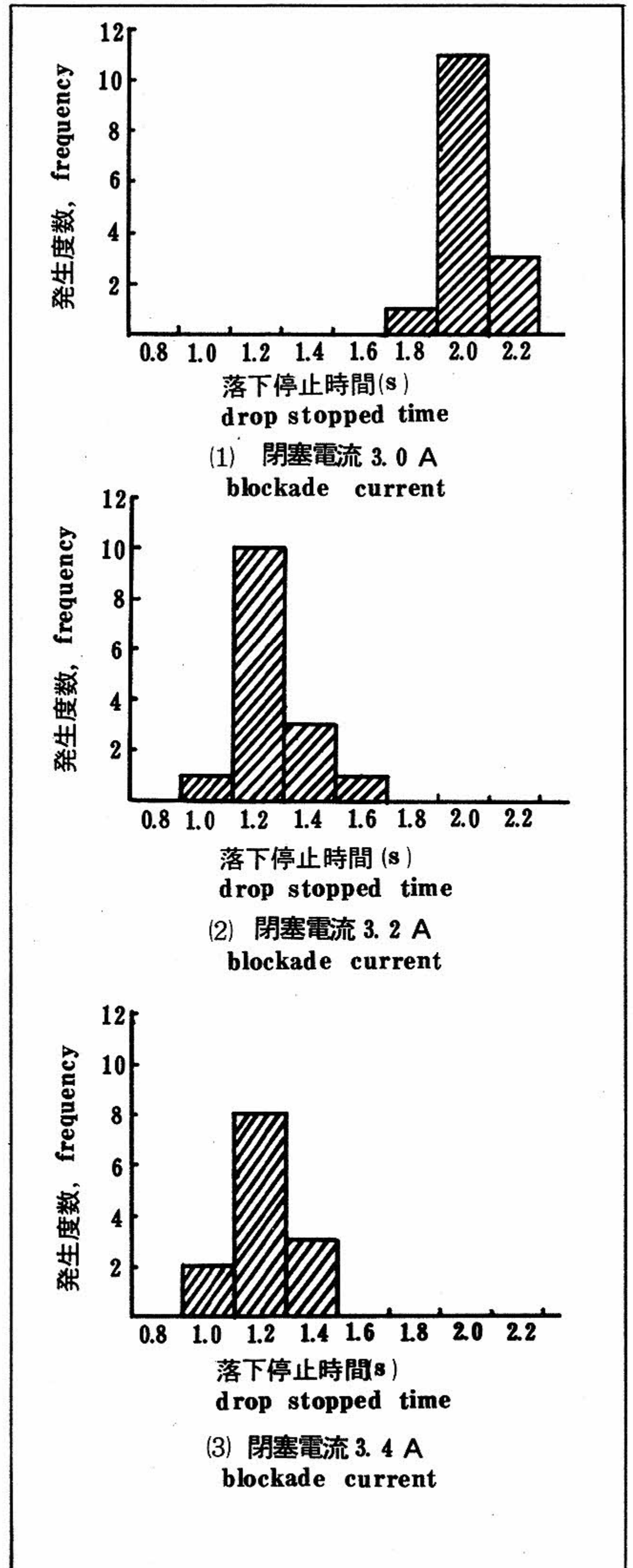


図3 落下停止時間分布表  
Distribution graph of drop stopped time



#### 4.3 残留磁気による影響

表3において、係数aは前述のように、状態および傾斜角に左右されていることがわかったが、約17hr通電後に計測した値によれば、そのときの係数aは4.45であり、これは水中の傾斜角0°の係数aの値4.43~4.60の間に収まっており、ほぼ通電前の性能試験の直線とも一致している。このことは、残留磁気による影響がほとんど無視できるものと判断される。

#### 4.4 誤差範囲

放出量は、4.1項で述べたように、放出時間を計測することによって表示できる。

図4の表示計処理部で投棄スイッチが“投棄”の位置にある時間を測定し、(2)式によって算出した値をデジタル(kg単位)表示計で指示する。

誤差は図4のA部の放出性能による誤差のほか、Bの表示計による誤差を合わせて考えねばならない。

図5は今回の試験の放出性能による誤差の発生度数分布を示す。

これは表3による各状態の係数aおよびbを(2)式にあてはめて算出した値と、計測データとの差の発生度数を0.5kgごとに調べたものである。この図では98%が±3kgの範囲内に集中し、(2)式によって算出した場合は、ほぼ、この中に収まっている。ただし、度数分布を滑らかな曲線で描いた場合は、±6kg程度まで誤差の発生があるものと考えられる。

また、表示計では、kg単位のデジタル表示を行うため、小数点以下を切上げており、さらに表示計自体の電氣的誤差がこれに加わるので、1回の放出に対して約2kgの誤差を生ずる。

したがってショットバラスト装置としては、前述のように図4のAおよびBの誤差を合わせて最大8kg程度を考えておけば十分である。

#### 4.5 保持電流

各状態(大気中、水中)および傾斜位置(垂直、30°)で、ショットの閉塞電流を徐々に下げ、保持できる最低電流を計測した。また保持電流を設定後、ホッパに振動を与えても保持できる電流を測定し、実船の保持起磁力を確認した。

その結果は、大気中では傾斜角0°で静止状態で保持しうる電流値は2.23A、激しく振動させても保持しうる電流値は2.6A(ただし、

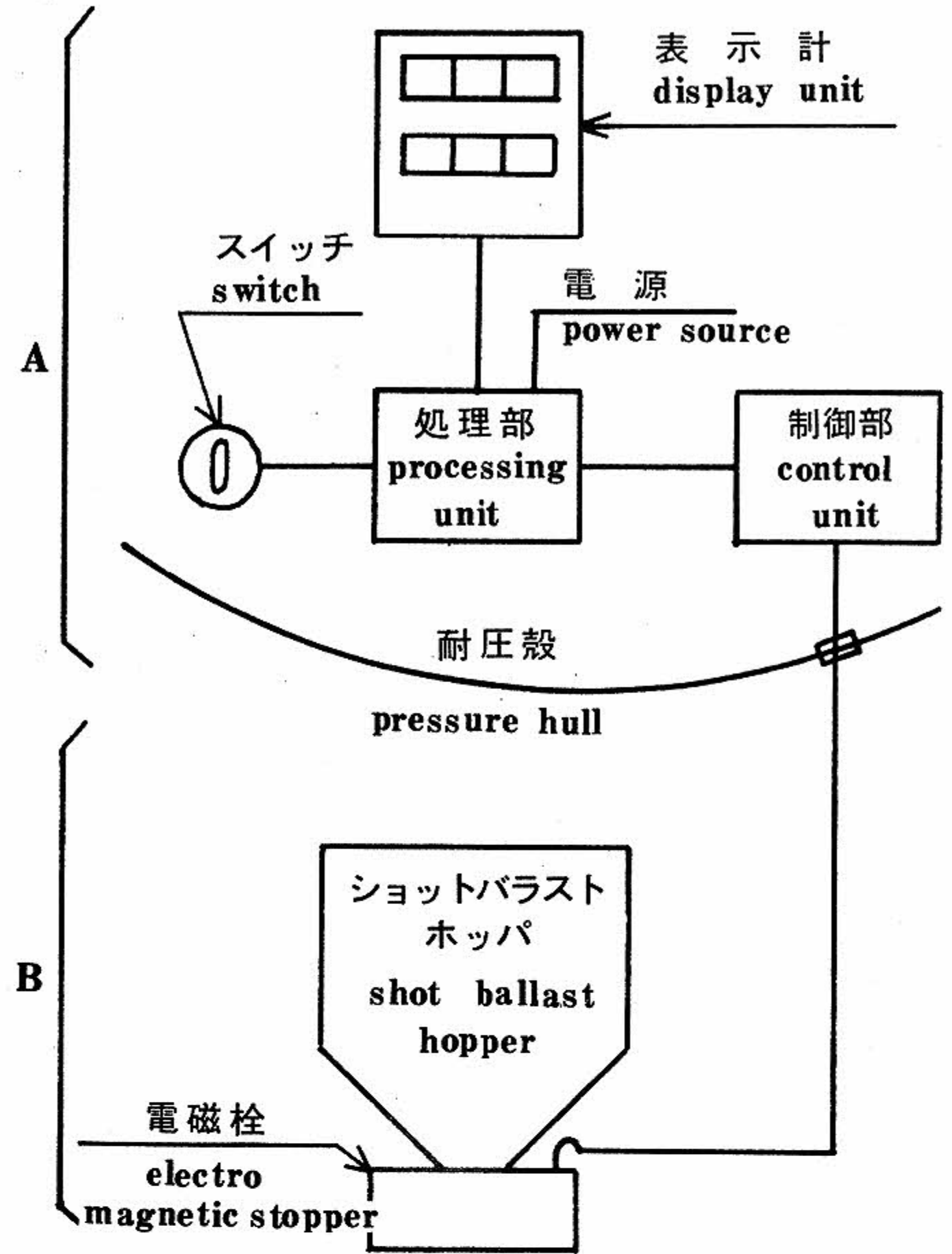


図4 ショットバラスト投棄装置ブロック図  
Shot ballast system

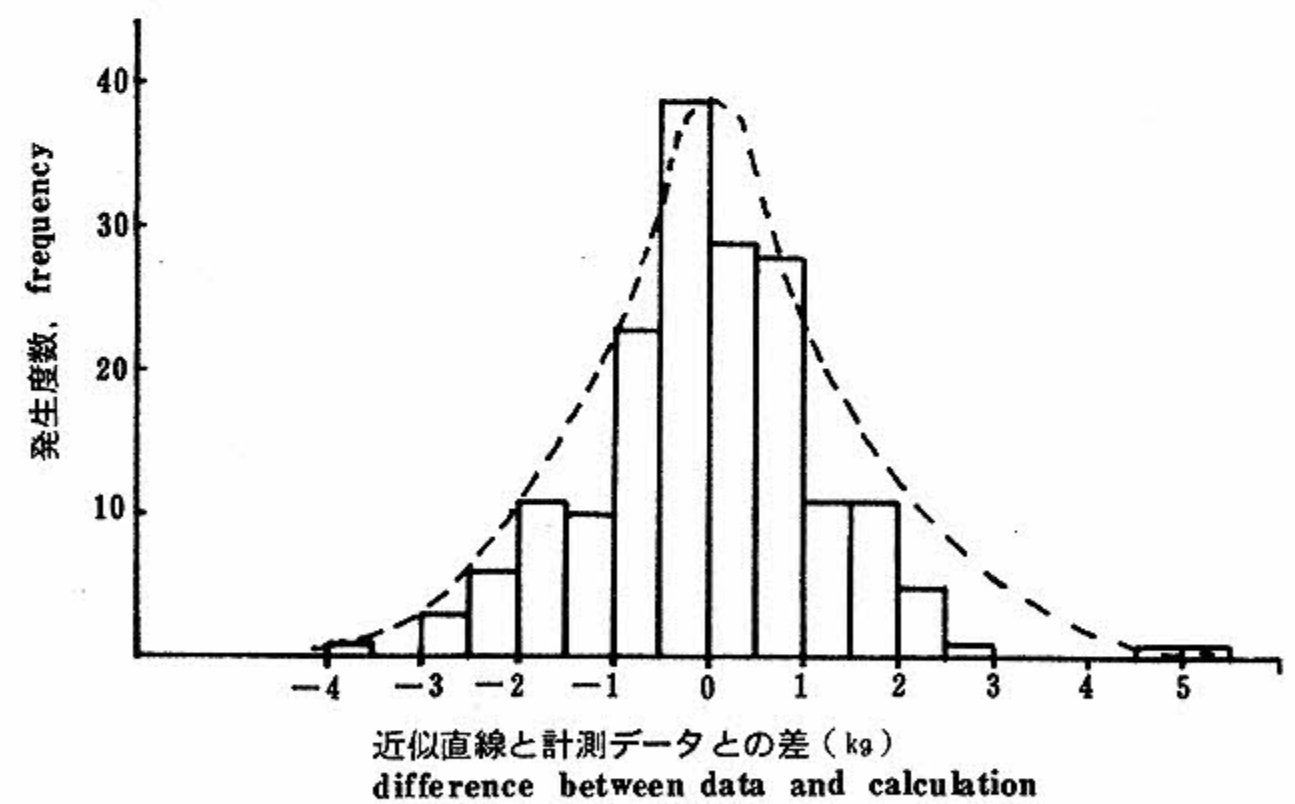


図5 近似直線と計測データとの差の分布表  
Distribution graph of difference between data and calculation



80g程度落下), 常圧水中では傾斜角 $0^{\circ}$ で静止状態で保持できる電流値は1.4 A, 激しく振動させても保持しうる電流値は2.0 A (ただし, 80g程度落下)である。ホッパを $30^{\circ}$ 傾斜させると, 大気中および常圧水中ともに, 保持電流は0.5 A程度減少し, 保持電流は傾斜角 $0^{\circ}$ で最大となる。したがって水中では2.0 A以上, 大気中では2.6 A以上の保持電流が必要である。

閉塞電流(3.2 A以上)と保持電流に差異があるため, 制御方法としては大別して次の二つの方法が考えられる。

- (1) 閉塞電流を通電し, 一定時間経過後, 保持電流に切換える
- (2) 閉塞電流で保持電流を兼用し, 閉塞電流だけで制御する

(1)の方式は省電力型であるが, 制御系が(2)の方式と比べて複雑となる。また(2)の方式ではショット保持に必要な電流よりも, 高い閉塞電流を常時通電することから不経済であるが, 制御系が簡単で信頼性も高まることから, 実機では(2)の方式を採用することにした。

#### 4.6 電磁栓耐水圧および加減圧性能試験

試作電磁栓を潜水船の最大潜航深度圧207kgf/cm<sup>2</sup>の1.5倍の311kgf/cm<sup>2</sup>まで加圧し, 耐水圧性能を試験するとともに, 0~207kgf/cm<sup>2</sup>の加減圧試験を行い, 加圧, 減圧による性能の変化を調べた。その結果, 電磁栓になんら異常は認められず, 実機として採用可能であることが確認できた。

#### 4.7 ショット発錆確認試験

ショットの母船における保存法を確立するため, ショットを下記条件下に置き, 発錆状態を調査した。

- |                  |     |
|------------------|-----|
| (1) 乾燥材封入        | 3箇月 |
| (2) 洗油に浸漬        | 1箇月 |
| (3) 洗油浸漬後, 大気中放置 | 3箇月 |
| (4) 大気中放置(室内)    | 6箇月 |
| (5) 潮風の当たる大気中放置  | 3箇月 |

- (6) 風雨にさらし, 放置 3箇月

この結果, (1)は新品同様であり, (2), (3), (4), および(5)は新品時のつやはなくなっているが, 発錆は見られず, (6)のみ赤く発錆し, 一部だんご状にかたまっていた。

したがって風雨にさらして放置しなければ, 発錆もなく, 使用上なんら問題ないと思われる。なお, 赤く発錆したショットの放出性能は, 係数aは減少, 係数bは増加の傾向を示し, バラツキも大きくなっている。

ショットは水分を与えない限り, 発錆は見られず, 使用上, 問題とならないが, 一度水を通すと発錆し, 固まるので, 母船上での取扱いには, ショットを袋のまま湿気の少ない場所に保管し, 袋から取出し水をかぶったショットは再使用しないことを使用標準とすれば, 正常な放出量カーブが得られるものと判断される。

#### 5. あとがき

本開発研究で実施された諸試験によって, 放出性能および閉塞, 保持電流(起磁力)について, 実機操作上ならびにオペレーション上の貴重なデータを収集することができ, DSV-2K用のショットバラスト装置として, 原則的に現計画を推し進めて差支えないとの確信を得た。

ただし, ショットバラストホッパの形状は, 試作品と同じもので進めることとするが, ショットが計画比重と多少異なるため, 円筒部の寸法を若干変更する必要がある。また電磁栓は起磁力6240 ATは現計画どおりとするが, 極力小型軽量化に努力する所存である。

なお, 放出量の算式 $W = aT + b$ の係数aおよびbについては, 実機で今回と同様の試験を行い, その値を決定する予定である。

#### 文 献

- (1) (財)日本船用機器開発協会編, "6,000m 深海潜水調査船の開発研究事業報告書" (1974), p. 533-596