

中層フロートのバラストイング装置の構築・運用とその評価

伊澤 堅志*¹ 安藤健太郎*² 井上亜沙子*³ 平野 瑞恵*³
四竈 信行*⁴ 水野 恵介*⁵ 竹内 謙介*⁴

前報の「プロファイリングフロートの重量調整について(海洋科学技術センター試験研究報告書第44号)」ではARGO計画に使用されるフロートの特徴, 滞在深度での力の釣り合い, 高圧試験水槽を使用した重量調整について報告した。平成14年度よりむつ研究所に新しく整備された高圧試験水槽を用いて各年度の投入計画に合わせて多数のフロートの重量調整が行われることになり, 前に報告した技術を基本として実際の運用レベルに適したバラストイング装置を構築した。この中には安定した品質で効率良く重量調整を行うために品質計画も含まれ, 運用体制, 作業計画, 手順書類, データシート類が文書としてまとめられている。また, 平成14年度はこれらを用いて80台の重量調整が行われた。

本報告書ではバラストイング装置の構築と運用, および実際に投入された62台のフロートの初回浮上のテクニカルデータを用いて重量調整の精度を解析し評価した。

キーワード: Argo計画, 中層フロート, 重量調整, 高圧試験水槽

Construction of ballast system at Mutsu Institute and estimation of it's precision.

Kenji IZAWA *⁶ Kentaro ANDO *⁷ Asako INOUE *⁸ Mizue HIRANO *⁸
Nobuyuki SHIKAMA *⁹ Keisuke MIZUNO *¹⁰ Kensuke TAKEUCHI *⁹

In our previous report of "On the weight adjustment of profiling float", the characteristic of float, the statics of neutral buoyancy at park depth, and the basic method of ballasting was described. Using such technology, the operational works of float ballasting was started in the Mutsu institute of Oceanography, where the new high pressure tank was built mainly for the ballasting of float. Establishing the operational works, the quality management, which contains with staffing structure, operation plan and documents plan, was also established. The advantages of our practical methods of ballasting in our laboratory for better ballasting results were introduced. The accuracy of ballasting were also concluded from the technical message of first ascent of 62 flats in this report.

Keywords : Argo, profiling float, parking depth, ballasting, pressure tank

-
- *1 海洋科学技術センター 海洋観測研究部 (現在所属: (株) 鶴見精機)
 - *2 海洋科学技術センター 海洋観測研究部
 - *3 (株) マリン・ワーク・ジャパン
 - *4 地球観測フロンティア研究システム
 - *5 海洋科学技術センター 海洋観測研究部 (現在所属: 独立法人水産総合研究センター 遠洋水産研究所)
 - *6 Japan Marine Science and Technology Center (Present affiliation: The Tsurumi Seiki Co., Ltd.)
 - *7 Japan Marine Science and Technology Center
 - *8 Marine Works Japan Ltd.
 - *9 Frontier Observational Research System for Global Change
 - *10 Japan Marine Science and Technology Center (Present affiliation: National Research Institute of Far Seas Fisheries)

1. はじめに

アルゴ計画で利用される観測機器は中層フロートと呼ばれるもので通常水深2000mの滞在深度にて漂流し一定期間(10日から2週間)に一度海面に浮上して滞在深度から海面までの圧力、水温、塩分の値を観測し、衛星を経由してデータを伝送するという機能を持つ (<http://www.jamstec.go.jp/ARGO/J-ARGOj.html>)。この機能を最大限有効に利用するためにはフロートの重量調整(バラストイング)を行う必要がある。前報(海洋科学技術センター試験研究報告 第44号)ではその基礎的な技術の確立とそれによる試験的に実施したバラストイングの結果について述べた。

本報告では、この基本的な技術を利用して平成14年度以降の本格的な中層フロートの展開を行うための運用における中層フロートの重量調整とその結果について述べるものである。なお、運用全体の中ではこの重量調整に前後してセンサー検定についても行っているが本報告では触れない事とする。本報告の2章では、バラストイングを行う装置と手順、体制を含む品質管理について述べる。3章では、基本的な技術を改良し運用の上で精度を向上させるために行った工夫を紹介する。4章では、実際に投入され浮上してきたフロートの技術情報を解析しバラストイングの結果について評価を行っている。5章では、バラストイングの基本技術およびバラストイングの運用での問題点について整理し議論する。

2. バラストイング装置の構築・バラストイングの運用

2.1. 品質計画

多数のフロートの重量調整を同じ精度で行うためには品質計画が重要であり、そのため、まず品質計画を立案した。内容としては、むつ研究所での中心業務であるフロート調整の品質維持に重点を置き、付随する作業については横須賀本部とむつ研究所に分かれての運用に行き違いが生じないように所掌範囲を明確にした。ここでは、むつで運用にあたるグループをむつ運用班、横須賀本部で運用にあたるグループを本部運用班と呼ぶ。品質計画は図1.平成14年度品質計画のツリー構造であり、運用班体制表、作業計画書、内部文書計画表及び記録、データより構成されている。なお、ここでの体制はアルゴグループ内でプロジェクトの目標を達成するため、プロジェクト内部で定めたものである。また、用語の定義は次のとおりである。

・内部文書

作成・制定(改訂)がむつ運用班によって行われる文書である。

・外部文書

本部運用班及び上位組織、管理が及ばない外部組織によって制定(改正)されたもので、むつ運用班の業務において遵守または適用すべき文書である。

・記録

文書に規定された手順または基準にもとづいて行われた作業を記録したもので、そのときの事実関係を書き記したものである。履歴を記録する文書を除いて内容が改訂・変更されることはない。

(1) 運用班体制表(表1-1)

表1-1 運用班体制表に示すように、運用班の作業所掌範囲を本部運用班とむつ運用班に振り分けた。むつ研究所での作業はフロートの納品受取から調整、発送までを主とし、センサー校正試験、バラストイング試験に必要な基準器、手順書類の維持管理をこれに含めた。また、文書管理も整合させ、作業等の手順変更はむつ運用班の内部文書のみで行えるようにした。

(2) 内部文書計画表(表1-2)

内部文書は平成12年度および13年度に蓄積された手順書、データシート類を作業順にまとめ、これに14年度より本格的に行われる重量調整の手順書、管理シート等を追加したものである。表中に出てくる書類は本報告書を執筆している時点では改版、起案が行われ、さらに充実したものになっている。現状でフロートは機能向上の要求に対応が早く、納品毎にコマンドの内容が充実してくるため、データシートもそれに対応して改版を行っている。作業に必要なソフトウェアはすべて運用班の内作である。フロートの機能変更等には調整用ソフトウェア類の素早い対応も可能である。

(3) 作業計画書(表1-3)

これは運用班の作業を分析し、本部運用班とむつ運用班での所掌範囲を決めたものである。配置された人員の数、専門分野を考慮し横須賀本部とむつ研究所での作業が効率よく行われかつ負担が偏らないことを考慮した。文書関係は外部文書管理については本部運用班を主としむつ運用班を従とした、むつ運用班側は作業や調整に必要な文書の起案、維持管理を主とした。平成14年度はこの作業計画書に基づき運用班の作業が行われ、滞り無く機能を果たすことができた。

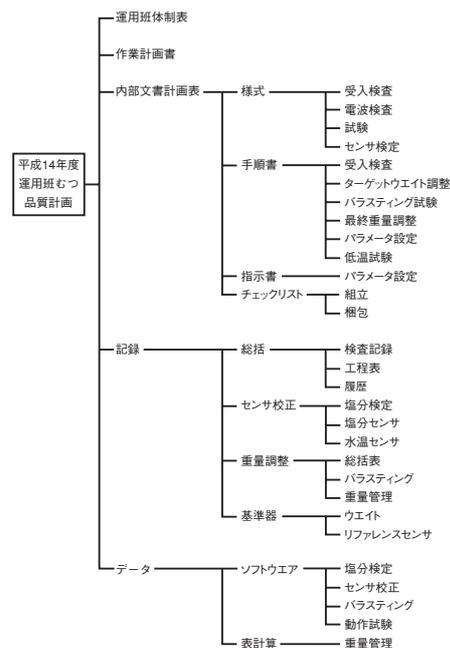


図1 平成14年度品質計画

Fig. 1 Quality management plan of 2002Fy.

表1-1 運用班体制表

Table 1-1 Staffing structure of operation group.

運用班体制表		様式番号	作成	運用班(むつ)	
研究部	安藤、伊藤、細田	承認	確認	作成	
人員構成	観測F 竹内、四電、岡、宮崎、楊				
	MWJ 井上、平野				
本部での作業		むつ研での作業(業務部等への移管をにらむ)			
責任者：四電		責任者：安藤 現場責任者：伊藤			
外部文書起案・管理 外部文書(マザー)管理	品質管理・安全管理 内部文書起案・管理 外部文書(コピー)管理				
物品管理(本部分)	設備・物品管理(むつ分)				
年間計画・投入計画	工程起案・管理				
投入方法の検討	治工具・測定器の開発改良				
回収方法の検討	調整用ソフトウェアの開発				
輸送方法の検討	教育訓練				
要求手続き	納品				
受入検査立ち会い	受入検査				
電波申請・受検	実通試験・電波検査受検				
パラメータ指定	パラメータ試験(全数)				
投入メモ作成	センサ校正試験(抜き取り)				
投入マニュアル作成	パラメータ設定				
XCTD等の準備	最終試験				
業者選定・発送指示	梱包・発送				
戸籍・履歴管理	報告・履歴管理				
改訂	記号	年月日	改訂内容(理由等)	承認	担当
	△	.	.		
	△	.	.		

表1-2 内部文書計画表

Table 1-2 Documents plan.

むつ研作業 内部文書計画表		様式番号	作成	運用班(むつ)	
研究部	安藤、伊藤	承認	確認	作成	
人員構成	観測F				
	MWJ 井上、平野				
工程名	作業名	手順書名	様式	保管	
受入検査	外観検査	受入検査手順書	受入検査記録	3年	
	重量検査	受入検査手順書	重量計測記録	3	
	書類照会	受入検査手順書	識別記録(APEX)	3	
	動作試験*1	動作試験手順書(APEX)	動作試験記録(APEX)	3	
		動作試験手順書(Provor)	動作試験記録(Provor)	3	
実通試験	実通試験*1	実通試験手順書(APEX)	配信データ印刷	1	
		実通試験手順書(Provor)	配信データ印刷	1	
電波検査	電波検査	電波検査受検準備手順書			
	センサ校正試験	容器開放	パラメータ試験手順書	パラメータ試験記録	3
		センサ校正	SBE4+ Calibration System	CT Bath Operation Sheet 1/2	3
			センサ校正手順書	CT Bath Operation Sheet 2/2	3
			AutoSal取扱説明書	AutoSal塩分検定シート	3
			SBE塩分検定データ	3	
			SBE塩分データシート	3	
			SBE水温データシート	3	
パラメータ試験	減量・組立	パラメータ試験手順書	重量管理データシート	3	
	リークチェック		パラメータ試験記録	3	
	パラメータ試験		パラメータ試験記録	3	
最終組立	重量調整		重量管理データシート	3	
	組立		重量管理データシート	3	
	真空引き 電圧真空チェック		動作試験記録(APEX)	3	
保管		データ保管手順書	動作試験記録(APEX)	3	
パラメータ設定	パラメータ設定*1	パラメータ設定手順書(APEX)	パラメータ設定指示書(APEX)	1	
		パラメータ設定手順書(Provor)	パラメータ設定指示書(Provor)	1	
			通信記録(ハバ/ハターミナル)	1	
最終動作試験	動作試験*1	動作試験手順書(APEX)	動作試験記録(APEX)	3	
	セルテスト	動作試験手順書(Provor)	動作試験記録(Provor)	3	
梱包・発送	梱包・発送		梱包チェック記録(APEX)	1	
			梱包チェック記録(Provor)	1	
報告・履歴管理		データ保管手順書			
改訂	記号	年月日	改訂内容(理由等)	承認	担当
	△	.	.		
	△	.	.		

*1:試験終了後キャプチャしたファイルによりフローード(APEX)がスリープしていることを確認する。

表1-3 作業計画書

Table 1-3 Operation plan.

作業計画書 1/2		様式番号	作成	運用班(むつ)	
研究部	安藤、伊藤、細田	承認	確認	作成	
人員構成	観測F 竹内、四電、岡、宮崎、楊				
	MWJ 井上、平野				
本部	備考	むつ研	備考		
作業		作業			
運用班体制表の本部での作業		運用班体制表のむつ研での作業 実作業と品質管理			
年間計画・投入計画		工程管理			
・メーカーとの納期調整		・工程立案			
・投入船舶の行動予定把握		・調達調整			
設備充実		・作業指示・調整			
・本部で使用する物		・進捗状況の把握			
・むつ研で使用する物		・工程改善			
		・安全管理			
		・渉外窓口業務			
外部文書起案管理		品質管理	品管		
・起案・承認・管理		・フロー性能に関する品質維持			
仕様書		・備考欄の「品管」項目の維持管理			
電波申請		・内部文書の検認			
電波検査準備記録		教育訓練	品管		
投入計画		・年間目標			
投入依頼メモ		・OJT			
投入マニュアル		・資格取得(内・外部資格)			
その他外部に出てゆく文書		設備操作・管理・維持	品管		
・管理		・校正パス			
外部文書(マザー)管理		・高圧試験水槽			
メーカー取説		・電子天秤			
メーカー成績書		・水晶式圧力計			
電波免許		治工具・測定器の開発・改良			
その他外部より入って来る文書		調整用ソフトウェア開発			
物品管理		内部文書起案管理・維持	品管		
お出かけセット		・手順書			
(PC、レシーバ、キッチンタイマー、PCカード)		・各種データ様式			
デジカメ					
ビデオカメラ					
係留試験用機器類					
プロファイリング試験用機器類					
XCTD・XBT					
デジタルコンバータ					
改訂	No.	年月日	改訂内容(理由等)	承認	担当
	△	.	.		
	△	.	.		

作業計画書 2/2		様式番号	作成	運用班(むつ)	
研究部	水野、安藤、伊藤、細田	承認	確認	作成	
人員構成	観測F 竹内、四電、岡、宮崎、楊				
	MWJ 井上、平野				
本部	備考	むつ研	備考		
投入方法の検討		トレーサビリティ管理維持	品管		
		・校正パスリファレンスセンサ			
		・標準分銅(検定付きと検定無し)			
回収方法の検討		・気象庁検定書付き温度計			
		・水晶式圧力計(気圧チェック)			
		・標準海水バッチ番号			
輸送方法の検討		物品管理			
		・納入フロー・付属品・予備品			
		・治工具・測定器			
		・消耗品			
		外部文書(コピー)管理	品管		
		・メーカー成績書			
		・メーカー取扱説明書			
		・SBE校正デジタルファイル			
		渉外			
		・研究部・観F			
		・むつ研内部・むつMWJ			
		・地域：漁協・業者			
		・本部へ物品要求、改善提案			
		報告義務			
		・研究部・観F			
		・むつ研・むつMWJ			
		・朝会資料			
		・ホームページ管理			
改訂	No.	年月日	改訂内容(理由等)	承認	担当
	△	.	.		
	△	.	.		

2.2. バラストイングに必要な機器

バラストイングや他の試験に必要な機器が取り付けられるように高圧試験水槽(写真1)のハッチには4カ所の貫通金物、本体には5ポートのマニフォールドが取り付けられている。これらを使用して、バラストイング装置系統図(図2)に示すハードウェアを構築した。水槽内にはフロートの浮上を計測するビデオカメラ、水温計測及び水温の均一性を監視する三層の水温計を取り付けた。これらの信号は貫通金物に取り付けられた水中コネクタをとおり水槽の外部へ引き出される。また、マニフォールドには水晶式圧力計とニードルバルブを取り付けた。ニードルバルブはエア抜き、水槽内圧力の微少減圧、残留圧力解放等の多くの目的に使用される。水晶式圧力計及び水温計の測定値はノート型PCのシリアルポートより取り込まれ、フロートの浮上量はキーボードより入力される。測定が終了するとソフトウェアは圧力とフロート浮上量(浮力に換算)を直線回帰し相関、残差の標準偏差を計算する。また、投入予定深度の塩分水温より密度を計算しフロートの最終重量までの計算を行う。結果は表2-1に示すように、その場で出力される。操作が行いやすいように、スイッチボックス、PC、水晶式圧力計表示器、水温信号変換器、カメラコントローラ、ビデオモニターは机の上に仮設されバラストイング計測が行われる(図2)。これらの装置の主な仕様を表3にまとめた。



写真1 高圧試験水槽
Photo 1 High pressure tank.

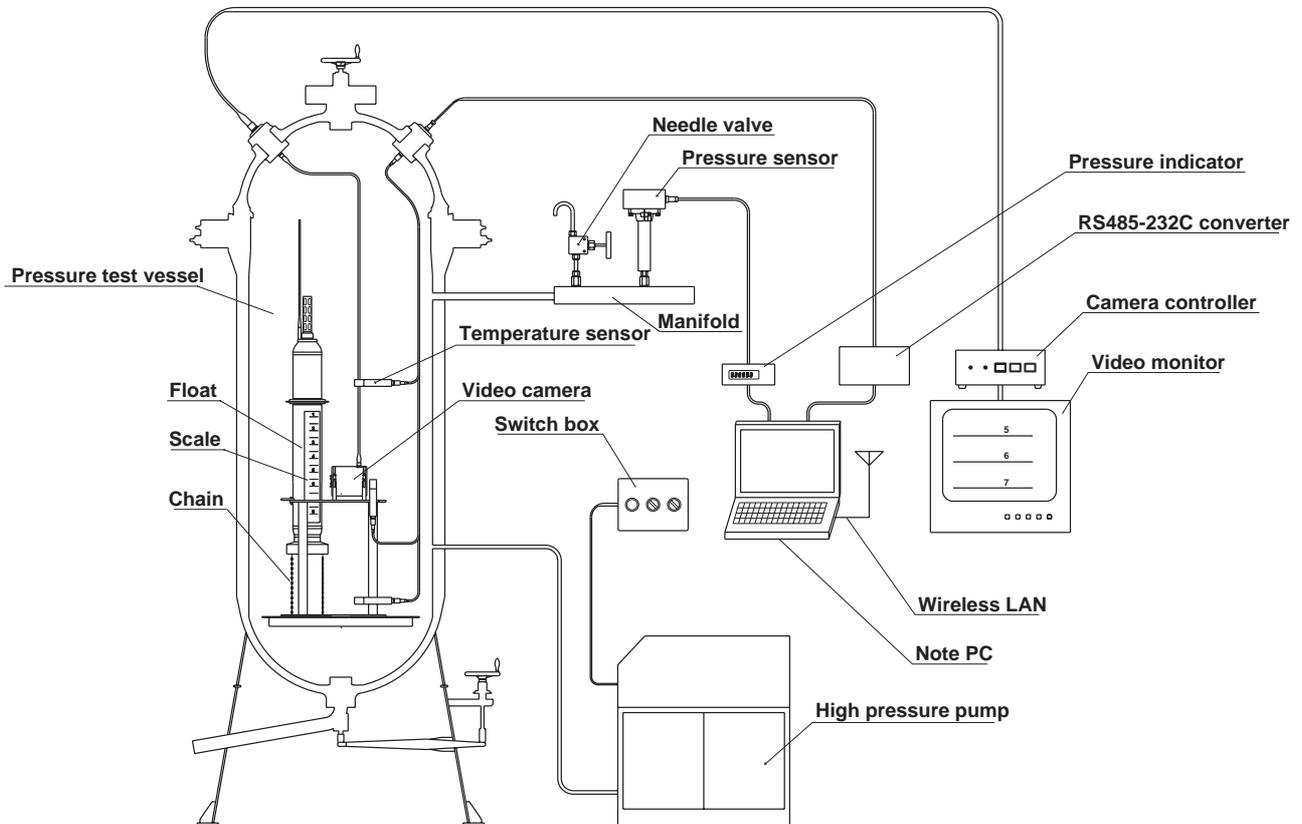


図2 バラストイング装置系統図
Fig. 2 Schematic diagram of ballasting equipment.

表2-1 バラストイング記録

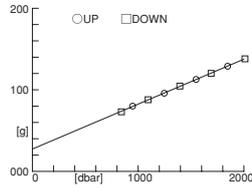
Table 2-1 Output of ballasting software.

Apex707

BALLASTING: @Ballasting 02/10/15 10:31:24
 DATE: 02/10/15 10H OPERATOR: Inoue Hirano
 AIR WT. INST: 24665.3 [g] INITIAL CHAIN: 6.90 [cm]
 A UNIT MASS (Water): 1.386 [g/cm]
 WEIGHT etc (Water): 70.16 [g]
 EMPIRICAL MASS (Air): 9.00 [g]
 PRES. OFFSET: 0.09981 [MPa]
 BALLAST NO: 9 Point

UID	P	L	CW	M	T
[dbar]	[cm]	[g]	[g]	[g]	[°C]
DOWN	2009.5	55.90	67.91	138.07	19.52
DOWN	1689.5	43.00	50.03	120.19	19.47
DOWN	1393.3	31.80	34.51	104.67	19.39
DOWN	1093.6	19.70	17.74	87.90	19.34
DOWN	840.4	9.00	2.91	73.07	19.30
UP	947.4	14.00	9.84	80.00	19.31
UP	1246.7	25.40	25.64	95.80	19.35
UP	1547.3	37.60	42.55	112.71	19.40
UP	1846.1	49.30	58.77	128.93	19.44

× No Use This Data



Ballasting Curve $M(P)[g]=0.055058 \cdot P[\text{dbar}] + 27.43$ Standard Deviation 0.37 [g]
 Error Value Slope $\pm 0.0009616 [g/\text{dbar}]$ Intercept $\pm 1.35 [g]$
 Target Pressure 2000.0 [dbar] Trim Mass 137.54 [g] Estimated Error for Trim Mass $\pm 0.68 [g]$

The following lines contain the endpoints of:

1. The ballast curve
2. The ballast curve + a positive perturbation
3. The ballast curve + a negative perturbation

	[dbar]	[g]	[dbar]	[g]	[dbar]	[g]
1.	0.0	27.43	2000.0	137.54	2000.0	137.54
2.	0.0	28.78	2000.0	136.97	2000.0	136.97
3.	0.0	26.08	2000.0	138.12	2000.0	138.12

4. Temperature of Ballast Water at Target Pressure = 19.392 [°C]
5. Salinity of Ballast Water = 0.000 [psu]
6. Density of Ballast Water at Target Pressure = 1.00732100 [g/ml]
7. Ocean Insitu Temperature at Target Pressure = 19.000 [°C]
8. Salinity = 34.5810 [psu]
9. Density = 1.03687100 [g/ml]
10. Compressibility = 4.3546E-06 [dbar]
11. Compressibility of The Float = 2.4897E-06 [dbar]
12. Specific Compressibility of Float = 0.572 [F/W]
13. Volume Thermal Expansion Coefficient of Float = 7.080E-05 [°C]
14. Float Volume in Ballast Water at Target Pressure = 24622.69 [ml]
15. Volume Change due to Thermal Expansion = -30.49 [ml]
16. Float Volume in Ocean Water at Target Pressure = 24592.10 [ml]
17. Trim Mass (Neutral Buoyancy in Ballast Water) = 137.54 [g]
18. Compensation Mass (Neutral Buoyancy in Ocean) = 695.99 [g]
19. Ballast to Place inside Float = 833.54 [g]
20. Initial Mass of Float = 24665.30 [g]
21. Mass Change due to Internal Ballast = 833.54 [g]
22. Final Mass of Float = 25498.84 [g]
23. Empirical Mass + Others = 9.40 [g]
24. Empirical Float Weight = 25489.44 [g]

※ About No.11 Compressibility of The Float
 The rate of compression of float has calculated by volume of float in case the pressure is 400db and 800db.

2.3. 作業の流れと作業内容

重量調整作業(図3)は、①ターゲットウエイト調整→②バラストイング試験→③最終重量調整の順に流れて行く。作業場所は①③は電子機器整備室、②は高圧試験水槽である。各作業の概略は次のようになっている。

(1) ターゲットウエイト調整

ターゲットウエイト調整とは、高圧試験水槽にフロートを浮かべたとき、50~150[g]程度の浮力を持つような重量をターゲットウエイトと呼び、この重量にフロートの重量を合わせる作業のことである。ターゲットウエイトはこれまでの試験結果を参考にして決定される。作業はフロートを分解し内器よりバッテリーパックを取り外し、代わりに1400[g]の錘を付ける。1400[g]の錘は1000[g]と400[g]に分かれフロートがタンク内で直立するように重量のバランスを取る位置に取り付けられる。細かい重量調整(精度0.1g)は散弾をプラスチック瓶に詰めて取り付けることにより行う。

ターゲットウエイト調整終了後、内圧を減圧しリークチェックのために数時間以上放置され、リークが無いことを確認した後バラストイング試験が行われる。リークが起これば、原因を調査し対策を行った後に再度リークチェックが行われる。

表3 高圧試験水槽と付加した装置の仕様

Table 3 Specifications of high pressure tank and attached instruments.

高圧試験水槽の仕様		バラストイング装置を構築するために付加した装置の仕様			
本体	最高使用圧力	25MPa	水晶式圧力計	測定範囲	0~41.4MPa
	耐圧試験圧力	31.3MPa		測定精度	再現性 ±0.01%FS
	有効内径	φ1000mm		ヒステリシス	±0.01%FS
	最大外径	φ1286mm		表示桁数	6桁
	最大高さ	5165mm		型番	46KR (センサ) Model1730 (表示器) (パロサイエンス)
	円筒部・球殻部材質	JIS G 3115圧力容器用 鋼板 SPV490			
加減圧装置	継ぎ手本体材質	JIS G 3204圧力容器用 調質合金鋼鍛鋼材 SNCM640	多層水温計	測定範囲	-5~35°C
	最高使用圧力	25MPa		測定精度	±0.001°C
電動クレーン	最大吐出量	6L/min	水中TVカメラ	測定層	3層
	保持圧力	0.15MPa/H以内		型番	SBE38
	定格荷重	19.6N (2tonf)			
ゲージ型 精密圧力計	レールスパン	9.4m	ビデオモニタ	解像度	570本
	クレーン移動距離	8.83m		撮影範囲	カメラ全面より80mm 離れた位置にて高さ 方向25m (水中)
白金水温計	揚程	10m	型番		
	測定範囲	0~35MPa		画像サイズ	14型
	最小目盛	0.05MPa	中心部解像度	1000本	
	精度	±0.15%FS	型番	PVM-146J (ソニー)	
ニードルバルブ	外径	φ350mm	使用圧力	400MPa	
	型番	GP-35 (長野計器)			型番
	測定範囲	90K~420°C	機能	手動によるエア抜き 微少減圧、残留圧力 開放その他に用いる	
	測定精度	0.01°C			
分解能	0.001°C	データ処理用PC	内作ソフトウェアにて次の機能を持つ。 多層水温計のデータのロギング バラストイングデータ処理、レポート作成 爆縮緩和装置の誤操作防止アラーム発生 無線LANにてネットワークに接続		
型番	CNA-2000N (チノ)				

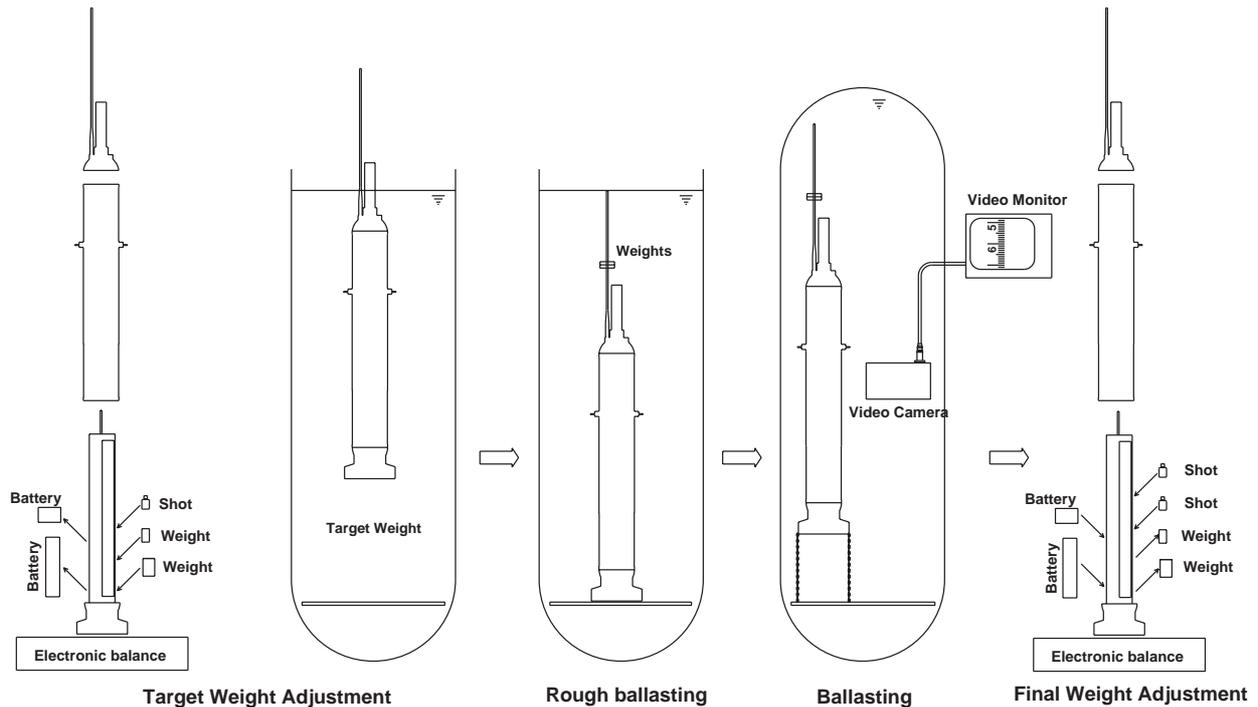


図3 重量調整の流れ
Fig. 3 The flow of weight adjustment.

(2) バラスト調整試験

バラスト調整試験とは、フロートの圧力と浮力の関係(バラスト調整カーブ)を求める試験である。バラスト調整装置系統図(図2)に示すようにフロートにスケール板を取り付け、底にはチェーンを取り付けて水槽内に入れる。フロートはターゲットウエイト調整であらかじめ浮力を持つように重量を調整されているが、500[dbar]を越えた圧力から浮上開始をする(すなわち、水中重量が約-25[g]になる)ように、ワッシャ状の錘を付けて浮力を調整される。フロートが吊り上げているチェーンの長さが水中TVカメラよりモニターできるのでその時点の浮力がわかり、大中小のワッシャを組み合わせることで浮力約-25[g]を実現させることができる。この作業を予備重量調整(ラフバラスト調整)と呼んでいる。

予備重量調整が終了すると高圧試験水槽のハッチが開められ、加圧が開始される。圧力サイクルのパターン(図4)は、横軸を時間とした加減圧パターンとして「M」字型を行い、最初は2000[dbar]以下でチェーンをできるだけ吊り上げる圧力まで加圧される。この最初の加圧では浮上開始圧力と計測のための最大圧力が確認される。またチェーンをできるだけ吊り上げるのはチェーンの離底時の摩擦を予め減らし、再着底時の姿を整えるためでもある。

浮上距離の計測は、この最大圧力から浮上開始圧力の間でフロートが着底しない範囲で計測される。また、計測は最大圧力からの減圧側から開始され、次に加圧側の浮上距離が計測される。バラスト調整装置系統図(図2)のPCにより圧力データ、水温データは自動的に取り込まれ、浮

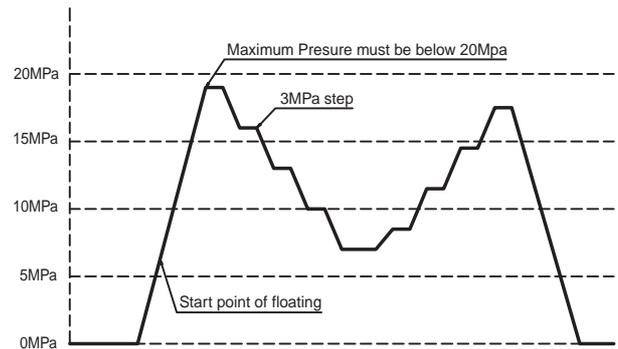


図4 加圧パターン
Fig. 4 Pressure pattern of ballasting.

上距離はキーボードより打ち込まれる。また、表2-3に示すバラスト調整データシートにも記入される。PC上ではバラスト調整が終了された時点で、指定された滞在深度の圧力・水温・塩分より密度を計算しバラスト調整記録(表2-1)として最終重量を計算し終わっている。

(3) 最終重量調整

フロートはバラスト調整試験が終了すると、再度分解され各部に付いた水がふき取られる。特に内器は重量調整の基準となるため、ブラダケースを解放しケース内部、ブラダ、Oリング溝にたまった水を完全に拭き取られる。バラスト調整の結果は現在の内器の重量に何グラム重量を追加するという答えである。このため内器の重量をバラスト調整を行う前の重量に復元させるため、水を良く拭き取るこ

表2-2 重量管理データ入力シート

Table 2-2 Spread sheet of weight adjustment.

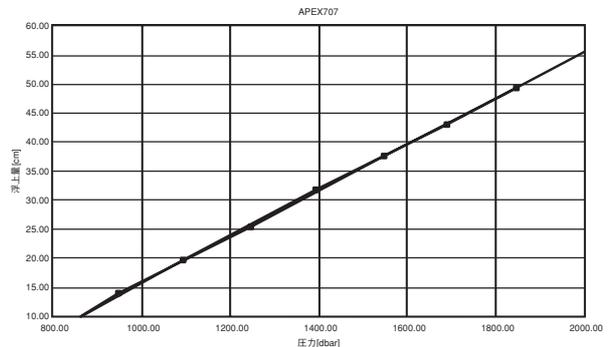
フロート番号	重量管理データ入力シート	備考	目付/担当
APLEX707	ARGOS ID 15467 (D), F1AFD (H)		
納品時重量			H14/10/11 izawa
(1) フロート全体	25073.0	注(1)+注(2)	
(2) 納品時センサ部	2307.9	注(1)+注(3)	
ターゲットウエイト設定		ターゲットウエイト表より設定	
(3) 設定値	24665.0	水温	
ターゲットウエイト調整			
(4) 耐圧容器	11868.8	ダンピングディスク付	
(5) 試験後センサ部	2307.9	注(1)+注(3)	
(6) 内器ターゲットウエイト仮組	10061.0	注(4)	
(7) 追加重量(計算値)	427.3	(3)-(2)-(4)-(6)	
(8) 追加重量(実測値)	427.3		
(9) 内器重量(計算値)	10488.3	(6)+(8)	
(10) 内器重量(実測値)	10488.6		
バラストリング組立重量			
(11) 理想重量(計算値)	24665.3	(2)+(4)+(10), 注(5)	
(12) ターゲットウエイト設定値	24665.0	(3)	
(13) 全体重量(計算値)	24665.3	(4)+(5)+(10), 注(6)	真空引き後
(13) 全体重量(実測値)	24665.0		
内器最終重量計算			h14/10/15 hirano inoue
(10) 内器重量(実測値)	10488.6	(10)	
(14) 追加重量(計算値)	833.3	バラストリング試験より	
(15) ゴムプッシュ小 補正	-9.4		
(16) Empirical 補正	-9.0		
(17) 最終重量(計算値)	11312.5	(10)+(14)+(15)+(16)	
追加部品重量記録			
(18) 筒型バッテリー大	1475.3	記録のみ	
(19) 筒型バッテリー小	740.4	〃	
(20) 乾燥剤 3ヶ	40.2	〃	
最終組立			
(21) 内器本組重量(実測)	10909.5	プラボルト 2ヶを除く	
(22) 追加重量(計算)	403.0	(17)-(21)	
(23) 追加重量(実測)	403.1		
(24) 内器最終重量(計算)	11312.6	(21)+(23)	
(25) 内器最終重量(実測)	11312.9		
最終重量計測			
(26) フロート全体(計算)	25489.3	(2)+(4)+(24)	
(27) フロート全体(実測)	25492.0		
(28) (計算)-(実測)	-2.7	(26)-(27)	
真空引き後			
(29) フロート全体(実測)	24588	[g]	
(30) 電圧	15.6	[V]	
(31) 内圧	99	[count]: スリプ確認	

注(1): センサカバー、耳栓を外す、センサ内の水をよく切る事
 注(2): プラダケースにゴムプッシュ大1ヶが付いていること、小4ヶが付いていないこと
 注(3): Oリング、アンテナ、防触ピース、バキュームボート用メクラ蓋を含む
 注(4): バッテリー台形2ヶ、カウンタウエイト2種、Oリングを含む
 バッテリー筒形大小2ヶ、プラボルト2ヶ取り去る
 注(5): バラストリング計算に用いる
 注(6): 全体重量(実測)と比較のために用いる

表2-3 バラストリングデータシート

Table 2-3 Spread sheet of ballasting.

APEX707.XLS		バラストリングデータ	
フロート番号	APEX707	理想本体	24665.3 [g]
重量	外付けウエイト	57.66 [g]	
	外付けウエイト		
	外付けウエイト		
スケール	零点	4.9 [cm]	
	オフセット	2 [cm]	
攪拌後	白金水温	19.229 [°C]	
	白金水温	19.4 [°C]	
開始前	稀釈水温	0.09381 [Mpa]	
	圧力零点	19.227 [°C]	
終了時	白金水温	19.4 [°C]	
	稀釈水温	0.08843 [Mpa]	
処理時	タンク水温	19.4 [°C]	
	タンク密度	1.007318627 [g/cm³]	
ターゲット	水温	1.9 [°C]	
デプス	塩分	34.581 [psu]	
	圧力	2000 [dbar]	
	密度	1.036871122 [g/cm³]	
本体重量	24665.3 [g]	圧力 [dbar]	浮上量 [cm]
外付け重量(水中重量)		2009.62	55.90
フッシャ	57.66 [g]	1689.54	43.00
フッシャ	0 [g]	1393.27	31.80
フッシャ	0 [g]	1093.57	19.70
フッシャ	0 [g]	840.39	9.00
耳栓	0.5 [g]	947.48	14.00
スケール他	12 [g]	1246.69	25.40
計	70.16 [g]	1547.34	37.60
チェーン単位水中重量	1.386 [g/cm]	1846.13	49.30
スケールオフセット	6.9 [cm]	-9.38	0.00
タンク	19.4 [°C]	-9.38	0.00
水温	1.007318627 [g/cm³]	0.039723418	-23.93022149
密度(ターゲット)		標準数	9
ターゲットデプス	1.9 [°C]	R 自乗	0.999728816
水温	1.036871122 [g/cm³]	本体重量	24665.3 [g]
密度	2000 [dbar]	外付け重量	70.16 [g]
アルミ温度係数	0.0000708	切片重量	-42.73068698 [g]
		傾斜重量	110.1133156 [g]
		補正小計	24802.84263 [g]
		温度補正	-31.86379821 [g]
		密度補正	727.6603885 [g]
		調整重量	833.3392189 [g]



とが重要である。水を拭き取った後、電池の正規個数取り付け、乾燥剤の取り付け、配線の固定を行う、これらの作業を手順書に従い、重量管理データ入力シート(表2-2)にデータを入力しながら行って行くと、バラストリング試験で計算された最終重量になる散弾の重量が計算される。

電子天秤で散弾の重量を封入したプラスチック瓶とともに計測し、最終重量に合わせ込んでゆく。そしてチェックリストに従い不足部品、固定場所のチェックを済ませ最終組立が行われる。

(4) 理想重量

最後に重量管理の運用に際して定義した「理想重量」について述べる。通常、バラストリング試験の前後ではフロート重量に差が出てしまう。これは、加圧することによってOリングの溝やボルトの穴へ浸水があるからである。このため加圧後の重量をどこまで加圧前の重量に復元できるか、またこれをどのように管理するかが重要である。フロートが完全に乾燥した状態で重量を計測できればよいのであるが、納品される状態は完全に乾燥された状態でなく、メーカーの耐圧試験後に納入されており、各所に水が浸みこんでいる状態である。我々は「理想重量」という状態を次のように定め、バラストリング計算時のフロート重量としている。「チェーン吊り下げ法によるバラストリングの

特徴」の項で述べるように、ターゲット深度で滞在させるための重量調整の管理にはこの考え方で十分であるため、「理想重量」はバラストリング試験時のPCでの自動計算、重量管理データシートでの計算の両者において同一値が使用されている。

以下により具体的に記述する。

重量を管理する上で作業性も考慮しフロートの重量をセンサ部(アンテナ含む)、チャンバー、内器に分けて次のような考え方で管理を行ってきた。(図3参照)

① チャンバー

バラストリングの後に水を拭き取ることにより乾燥状態の重量に再現することが容易である。

② 内器

プラダケースを外すことによりケース内側とプラダに付い

た水を拭き取ることができる。またブラダケース固定用ネジ穴やOリング溝に入った水も拭き取ることができ乾燥状態の重量に再現することが容易である。

③ センサ部

センサ部は納品時より中に水が入っている。また構造的に内部の細かいところまで水を拭き取ることができない。もとより乾燥状態の重量再現が難しいため、納品時が最もセンサの内部まで水が入っていない状態と考えることが合理的である。

これらより「理想重量」はフロートを分解した状態で次のように計測を行っている。

- ① センサ重量：納品時のセンサ重量とし、計測はセンサ内の水を良く切った状態で行う。
- ② 耐圧容器重量：表面を清掃，Oリング面に薄くシリコングリスを塗布した状態で計測
- ③ 内器：ブラダカバー内側，ブラダ，ボルト穴を清掃後，ターゲットウエイトに合わせるためカウンターウエイトや散弾で調整した重量。

そして上記の条件で「理想重量」を，センサ重量と耐圧容器重量と内器重量の合計(表2-2参照)として定義した。なお，センサーはターゲットウエイト調整の時点ですでにセンサー校正試験が行われた後で，各部に水が入り込んでいることが考えられ納品時のセンサー重量を再現していない。

3. チェーン吊り下げ法によるバラストイングの特徴

この章では，重量調整の理論について述べた後，我々が採用したチェーン吊り下げ法の特徴について述べ，その誤差について考察する。

(1) 重量調整の理論

所定の滞在深度でフロートが中立になるためには，フロートにはたらく重力と浮力が釣り合わなければならない。これは以下の式で表すことができる。

$$M_n g = \rho(s, t, p) V(t, p) g \quad \dots\dots\dots (1)$$

左辺が重力，右辺は浮力を示している。ここで， M_n は中立となるフロートの質量， g は重力加速度， s, t, p はそれぞれ塩分，水温，圧力で ρ は滞在深度における海水の現場密度である。また， V は滞在深度におけるフロートの体積で温度と圧力により変化する。 M_n はフロートの内部におもり(バラスト)を入れて自由に制御できる。所定の深度で中立になるようにフロートの重さを調整する作業がフロートの重量調整(ballasting)である。また滞在深度におけるフロートの体積 $V(t, p)$ は次式で表すことができる。

$$V(t, p) = V_0 [1 - \gamma p + \alpha(t - t_0)] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで， α はフロートの温度による体積膨張率， γ はフロートの圧縮率である。高圧試験水槽内のある圧力 p の下で，フロートがチェーンを長さ h だけ吊り上げて静止したとする

と，フロートにはたらく力の釣り合いは以下のとおりである(重力加速度は省略)

$$M_f + m_c h(t, p) + m_w = \rho(0, t, p) V_0 [1 - \gamma p + \alpha(t - t_0)] \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで， m_c はチェーンの単位長あたりの水中重量， m_w は予備重量調整でフロートに取り付けたウエイト及び治具の水中重量を合計したものである。(3)式で M_f, m_c, m_w, α は既知の定数で， t は計測し，実験で p を与えて h が得られる。また， ρ は p と t から計算できる。よって，(3)式の未知数は V_0 と γ の2つの定数のみである。 t は実質的に一定とみてよく， $m_c h$ は圧力のみ関数となるから，左辺第2項と3項の和($m_c h(t, p) + m_w$)をもって， $M(p)$ と書ける。水槽内の温度を基準の水温 ($t = t_0$) にとれば，(3)式は

$$M(p) = \rho(p) V_0 (1 - \gamma p) - M_f \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。この関数は水の圧縮率(体積弾性率の逆数)を $\kappa(p)$ とすると，

$$M(p) = \rho(0) V_0 (\kappa(p) - \gamma) p + (\rho(0) V_0 - M_f) \quad \dots\dots\dots (5)$$

という式で近似でき，圧力に関してほとんど直線的に増加するグラフとなる。

(2) チェーン吊り下げ法の特徴

前報では上記のように報告し，式に従い滞在深度におけるフロートの体積 $V(t, p)$ を求める方法で重量調整方法の開発を行ってきた。平成14年度より，本格的にフロートの重量調整が行われることになり，実用的な重量調整方法，管理方法，治具類の考案を行うに際し，フロートメーカーと議論しつつ高圧試験水槽で運用試験を続けた。この議論の成果として，高圧タンクを利用するチェーン吊り下げ法によるバラストイングの3つの特徴を利用した方法を実際の作業に取り込んだ。後述するが，この方法は重量管理を容易にし，結果としてフロートの重量計測エラーの影響を軽減させることとなった。当然の事であるが，この実用的な方法は，試験研究報告書第44号で報告した計算結果と数字上では同じになるが，実作業において重量管理が容易になっている。

(3) 特徴その1：フロートの重量が未知でも $M(p)$ 分重量を増加すればフロートは同じ条件下で静止する。

バラストイング試験の際に計測を行う項目は水温，圧力，フロートの浮上量である。水温は既述のようにバラストイング試験中は変化しないものとしている。計測中の圧力 p においてフロートが $M(p)$ を吊り上げて静止したとする。圧力 p は装置に取り付けられた圧力計で既知の値であり， $M(p)$ はすでに水中重量が計測されているから既知である，このときフロートの重量 M_f や， $\rho(p) V_0 (1 - \gamma p)$ が未知でもフ

ロートが静止するのは事実である。また(4)式は(6)式のようにフロート重量未知の M_f の内部に $M(p)$ 分の重量を加えれば

$$M_f + M(p) = \rho(p)V_0(1 - \gamma p) \dots\dots\dots (6)$$

となり、圧力と水温が同じ状態であれば $\rho(p)V_0(1 - \gamma p)$ は同一値をとり、 M_f が未知でも $M(p)$ がわかりこの重量分だけフロートの重量を増やせば同一条件下でフロートは静止する事になる。ここでは $M(p)$ の管理が重要である。重量調整の特徴その1は「フロートの重量が未知でも $M(p)$ 分重量を増加すればフロートは同じ条件下で静止する。」ということである。またここで実際にフロートに圧力を掛けて体積を V_0 から V_p に圧縮させており、最終的に必要な体積 $V(t, p)$ を求めるための V_0 の必要性は無くなってきている。

(2)特徴その2: 真の質量がわからなくても、誤差が数十グラム程度なら、温度補償値・密度補償値への影響は十分小さい

温度補償は同じ圧力下で温度が変わったときのフロートの体積変化による浮力変化分を計算により補償する。ここで初めてフロートの圧力下での体積を知るために M_f の値、タンク水温、圧力が計算に必要となってくる。フロートの体積熱膨張量を ΔV_t とすると(3)式、(5)式より

$$\Delta V_t = V_p \alpha(t - t_0) \dots\dots\dots (7)$$

また

$$V_p = (M_f + M(p)) / \rho(t_0, p) \dots\dots\dots (8)$$

である。ここで M_f に重量計測エラー M_{f_error} が含まれていたとする。温度差による体積の変化量を ΔV_t としこれによる浮力の変化を ΔF_t とすると

$$\begin{aligned} \Delta F_t &= \rho(t, p) \cdot \Delta V_t = \rho(t, p) V_p \alpha(t - t_0) \\ &= \rho(t, p) \alpha(t - t_0) (M_f + M_{f_error} + M(p)) / \rho(t_0, p) \end{aligned} \dots\dots\dots (9)$$

である。

この浮力の変化量と同じ重量の錘 $M(\Delta F_t)$ をフロートの内部に追加すればフロートは圧力 p 水温 t の条件で静止する事になる。

このときのフロートの重量は $M_f + M_{f_error} + M(p) + M(\Delta F_t)$ である。ここで、 M_f の重量計測エラーが浮力に与える影響について考えてみると、計測エラーにより生じる浮力のエラーを F_{t_error} とし、

$$\rho(t, p) / \rho(t_0, p) \doteq 1$$

とすると

$$F_{t_error} \doteq \alpha(t - t_0) M_{f_error}$$

である。アルミの線膨張率の3倍をフロートの熱膨張率とし $6.9 \times 10^{-5} [1/^\circ\text{C}]$ とし、温度差を $20 [^\circ\text{C}]$ とすると、

$$\begin{aligned} F_{t_error} &\doteq 6.9 \times 10^{-5} [1/^\circ\text{C}] \cdot 20 [^\circ\text{C}] \cdot M_{f_error} \\ &= 1.38 \times 10^{-3} \cdot M_{f_error} \end{aligned}$$

となり、 F_{t_error} が $1 [\text{g}]$ に相当する計測エラーの大きさは約 $725 [\text{g}]$ である。

通常の温度変化分の追加重量はタンク水温と滞在深度での温度差を 20°C 、フロートの容積を約 $25000 [\text{cc}]$ とすると約 $-35 [\text{g}]$ である。二つ目の特徴の一つは本体の重量計測エラーの影響は温度補償計算で十分小さくなることである。フロート本体の重量計測には空気の浮力の影響があり真の重量に対して約 $30 [\text{g}]$ 軽く計測される。しかし F_{t_error} の計算では追加重量への影響は約 $0.04 [\text{g}]$ であり、十分小さい。

この計算まででフロートは滞在深度の条件に合うように圧力により圧縮され、温度差による膨張を済ませた。これでフロートの姿は滞在深度での最終的な形状 $V(t, p)$ に変形されたことになる。次に同じように密度補償について考えてみると、密度補償は同じ圧力、同じ温度で塩分が変化し密度が変わったときのフロートの浮力変化分を計算により補償する。密度差による浮力の差を ΔF_ρ とすると、

$$\Delta F_\rho = V(t, p)(\rho(s, t, p) - \rho(s_0, t, p)) \dots\dots\dots (10)$$

である。

$$V(t, p) = (M_f + M_{f_error} + M(p) + M(\Delta F_t)) / \rho(s_0, t, p)$$

であるから温度補償と同じようにフロートの重量計測エラー M_{f_error} の影響について調べてみる。 $M(\Delta F_t)$ にも M_{f_error} の影響があるが、この影響は温度補償で述べたように M_{f_error} の $1/1000$ 程度であるのでここでは無視する。この時点での M_{f_error} によるフロート体積の誤差を $V_{error}(t, p)$ とすると

$$V_{error}(t, p) = M_{f_error} / \rho(s_0, t, p)$$

であるから

$$\begin{aligned} \Delta F_{\rho_error} &= V_{error}(t, p)(\rho(s, t, p) - \rho(s_0, t, p)) \\ &= M_{f_error} (\rho(s, t, p) / \rho(s_0, t, p) - 1) \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

である。ここで、 $\rho(s, t, p)$ を 1.03 、 $\rho(s_0, t, p)$ を 1.00 として M_{f_error} を先ほどの空気の浮力による計測エラーとして $30 [\text{g}]$ とすると、 ΔF_{ρ_error} は $0.9 [\text{g}]$ となる。通常の密度補償量は約 $750 [\text{g}]$ である。ここでもフロート本体の重量測定誤差の影響は十分小さいことがわかる。

(4)特徴その3: 実作業では追加重量の管理をフロートの総重量で行わず、追加する重量の管理で行う。

最初の特徴としては、圧力下で実際にフロートを圧縮させ、水中で中立するのに必要な追加重量を実際にチェーンを吊り上げフロートを静止させることによって求めているので、同じ圧力、同じ水温でフロートを静止させるには吊り上げたチェーンや外付けの錘の水中重量をフロートの中に入れては良く、水の密度、フロートの重量、体積は未知のままでも可能であるということである。

2番目の特徴としては、同じく圧力を掛けた状態で温度と密度を変化させ計算で浮力の差を求めていて、この計算の過程において初めてフロートの重量が必要となったが、フロート重量の計測にエラーが含まれていても追加重量を計算することで十分小さくできるということである。

3番目の特徴としては、実作業での重量管理の手段を意味し、重量管理データ入力シート(表2-2)へ作業中の中間データを入力するときに実現している。それは、実作業ではターゲットウエイト調整後の重量管理をフロートの総重量で行わず、内器に追加する重量の管理で行うという点である。これは最初の2つの特徴で得られる結果(追加重量)がそのときのフロートの重量に加減する重量だからである。バラスティング以降はセンサ部、耐圧容器の重量は理想重量の値を用い、基準を内器が水で濡れていない時の重量におく。内器は約11000[g]であり、電子天秤にて0.1[g]の分解能で計測が可能であり、またバラスティングが終了した後に水を拭き取ることにより重量の再現が精度良くできる。これを最終的な形になるように組み上げ、計算で得られた重量になるように散弾の重量を調整し合わせる。

フロートは約25kgあり、全重量として重量計測を精度良く行うためには計測環境の影響を受け難い。しかし、追加される重量のみの管理では通常800[g]程度であり精度良い重量管理が可能である。実用的な重量調整がフロート全体の重量を管理するのではなく追加重量を管理することによって行われており、それにより重量管理がより精度良く出来ることを示している。これに加え、 $M(p)$ の計測に用いられる外付けウエイト及びチェーンの水中重量は電子天秤を天秤台において風防で囲い安定した状態を作り計測を行い、履歴も管理されている。また、フロートに追加する散弾の重量管理もこれと同じ電子天秤を用いている。

4. フロート初回浮上テクニカルデータによるバラスティング精度評価

フロートより送信されるデータの一部にテクニカルに関する情報が入っておりフロートの実滞在深度でのピストン位置、浮上直前の滞在深度の水温、塩分、圧力が報告される。

これらを解析することにより、重量調整の精度について評価を行った。

(1) 重量調整精度の評価方法

フロートの浮力を発生するピストンはリニアポテンシオメータにより位置を検出され制御が行われる。(図5)ポテンシオメータの位置は8ビットのA/Dを用いて変換されるため分解能は1/256であり、素子の個体差よりピストンの移動する範囲は12~約250までとなっている。ピストン位置12は機構的に最も引き込んだ位置として固定値であり、最も押し出した状態はポテンシオメータの個体差により246~255である。

フロートはピストン位置22で滞在深度に静止するように重量を調整されるが、最初の沈降ではピストン位置を30にして沈降し一端調整深度より浅く停止する。次にそこより少しずつピストンを引き込みながら調整滞在深度になるようにピストン位置を制御する。

滞在深度のピストン位置は学習され、二回目の沈降よりフロートはこの位置までピストンを一気に引き込んで沈降する。重量調整に含まれるエラーや調整滞在深度と実滞在深度の条件の差は必然的に発生するがフロートは深度センサのデータをもとに調整滞在深度になるようにピストン位置を制御しこれらを吸収して静止する。フロートより送られてきた実滞在深度のピストン位置、圧力、水温、塩分と調整滞在深度の条件、重量調整時のデータより重量調整エラーを計算し、重量調整の精度とした。

(2) 計算方法

調整滞在深度の密度は気候値より決定し $\rho(s_c, t_c, p_d)$ である、ここで s_c, t_c はそれぞれ気候値による塩分、水温、 p_d は調整滞在深度の圧力である。また、このときのフロートの体積は $V(t_c, p_d, C_d)$ である。 C_d はフロートが静止するピストン位置でバラスティング及び重量調整は22で行われている。重量調整ではフロート重量を M_b とするとフロートの体積 $V(t_c, p_d, C_d)$ 、海水の密度 $\rho(s_c, t_c, p_d)$ より

$$M_b = V(t_c, p_d, C_d) \rho(s_c, t_c, p_d) \dots\dots\dots (12)$$

になるように M_b を調整する。しかし、実際の海域においてはこのフロートが静止する実滞在深度を p_i とすると M_b は

$$M_b = V(t_i, p_i, C_i) \rho(s_i, t_i, p_i) \dots\dots\dots (13)$$

である。ここで(12)と(13)の体積の差を $\Delta V(\Delta t, \Delta p, \Delta C)$ とすると。

$$\Delta V(\Delta t, \Delta p, \Delta C) = V(t_i, p_i, C_i) - V(t_c, p_d, C_d) \dots (14)$$

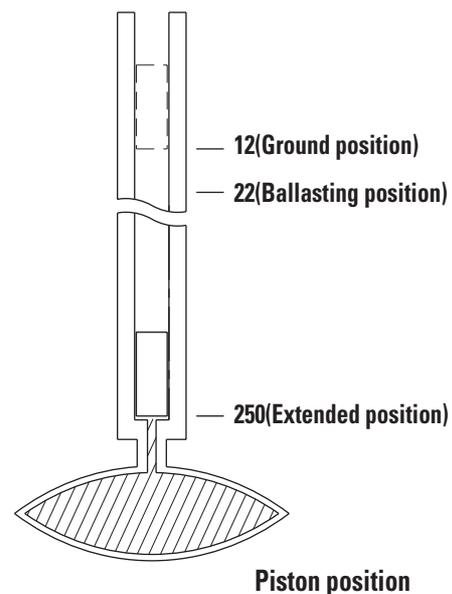


図5 ピストンポジション
Fig. 5 Schetch of piston position.

Δt : 調整滞在深度と実滞在深度の温度差
 Δp : 調整滞在深度と実滞在深度の圧力差
 ΔC : 調整滞在深度でのピストン位置と実滞在深度でのピストン位置の差

である。そして、実滞在深度でのピストン位置は重量調整のエラーや調整滞在深度との差をキャンセルするように回路により制御されるから。

Be : 重量調整エラー

$dF(\Delta C)$: ピストンの移動により発生する浮力

$dF(\Delta p)$: 実滞在深度と調整滞在深度の圧力差によるフロートの浮力

$dF(\Delta t)$: 実滞在深度と調整滞在深度の温度差によるフロートの膨張による浮力

$dF(\Delta \rho)$: 実滞在深度と調整滞在深度の密度差による浮力とすると、実滞在深度でフロートが静止している状態は

$$dF(\Delta C) = Be + dF(\Delta p) - dF(\Delta t) - dF(\Delta \rho) \quad \dots\dots\dots (15)$$

である。重量調整エラー Be を求めるためにこれらを個別に計算する。

$dF(\Delta C)$ (ピストンの制御による浮力の変化)はピストン移動量1についての体積変化は1.06[cc]であり、図5のように位置が+側に変化すると浮力も+側に変化する。したがって、 $dF(\Delta C)$ により変化する浮力は

$$dF(\Delta C) = 1.06\rho(s_i, t_i, p_i)(C_i - 22) \quad \dots\dots\dots (16)$$

である。

$dF(\Delta p)$ (圧力差による浮力)は、

$$dF(\Delta p) = A_r(p_i - p_d) \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 A_r は圧力感度[g/dbar]と呼ぶ。これはバラスティングカーブ $M(p) = Ap + B$ よりもとめられる。(5)式より

$$A = V(t_0, 0)\rho(s_0, t_0, 0)(k(s_0, t_0, p) - \gamma) \quad \dots\dots\dots (18)$$

であるから実滞在深度における圧力感度 A_r は

$$A_r = V(t_i, 0)\rho(s_i, t_i, 0)(k(s_i, t_i, p_i) - \gamma) \quad \dots\dots\dots (19)$$

である。フロートの圧縮率 γ は変わらないので実滞在深度での圧力感度がわかり指定滞在深度との圧力差を浮力の差に変換する事ができる。深度が深くなるとピストンは浮力を増すため+側に制御される。

$dF(\Delta t)$ (滞在深度の水温差(熱膨張)による浮力)は、

$$dF(\Delta t) = \rho(s_i, t_i, p_i)V(t_c, p_d, C_d)(\alpha(t_i - t_c)) \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで α はフロートの熱膨張率である。温度が+方向に変化して熱膨張が起こるとピストンはこれをキャンセルするため-方向に制御される。

$dF(\Delta \rho)$ (密度差による浮力の差)は、(12)式及び(13)式より

$$dF(\Delta \rho) = M_b(1 - \rho(s_c, t_c, p_d)/\rho(s_i, t_i, p_i)) \quad \dots\dots\dots (21)$$

となり密度が+方向に変化するとピストンはこれをキャンセルするため-方向に動く。

重量調整エラー Be は(15)式より

$$Be = dF(\Delta C) - dF(\Delta p) + dF(\Delta t) + dF(\Delta \rho) \quad \dots\dots\dots (21)$$

となり計算が可能である。

(3) 重量調整の精度評価

表4は投入されたうち62台のフロートの調整滞在深度、実滞在深度の塩分、水温、圧力、ピストン位置より上記の方法により重量調整の精度を評価したものである。結果として、重量調整エラーの平均は-0.3[g] (12[ppm])、標準偏差は1.44[g] (57[ppm])となった。重量調整エラーの頻度は図6に、実滞在深度におけるピストンの位置のみの頻度分布は図7に示す。

これらのフロートは、指定滞在深度でのピストン位置の理想値を22として重量調整を行っている。実滞在深度のばらつき(図7)からわかるようにピストンポジションは理想値を中心にして分布している。また既述のように回路が制御するピストン位置は12~30であり理想値22はこれに対して軽い方向へは10ステップ、重い方向へは8ステップ制御に余裕を持っている。この図7から、今回の重量調整では軽い方向に7ステップ、重い方向に4ステップの余裕が確認され、フロートの持つピストン制御能力の半分以下のばらつきで重量調整が行われたことが確認された。またピストン位置1はほぼ1[g]に相当するためエラーの平均-0.3[g] (12[ppm])、標準偏差1.44[g] (57[ppm])は十分にピストンの制御範囲に入っている。

これらの中で、特例としてはフロート番号722があげられる(表4)。これは海鷹丸より投入予定海域よりはるかに離れた63-50.11S, 130-30.73Eへ2003年2月1日に投入されたものである。実滞在深度でのピストンポジションは19で図7の最も左に外れたものであるが、重量調整エラーは-1.3[g]であり図6では最も頻度の高い区間の左隣に属している。このフロートの調整滞在深度は2000[dbar], 2.20[°C], 1.0369[g/cm³], 実滞在深度は1999.2[dbar], 0.316[°C], 1.0371[g/cm³]であった。 $dF(\Delta C)$ は-3.3[g]とピストンの調整浮力が大きい、 $dF(\Delta t) = -3.4$ [g], $dF(\Delta \rho) = 5.4$ [g]と滞在深度の条件が調整と実際とで変わった部分をキャンセルする成分が大きいためこれらを差し引きすると重量調整エラーは-1.3[g]と小さい値であった。

表4 重量調整の精度評価
Table 4 Precision of weight adjustment.

フロート 番号	調整済深度				実滞深度(初回浮上データより)				圧力感度		調整済深度との浮力差				重量調整			
	深度 [dbar]	水温 [°C]	塩分 [PSU]	密度 [g/cm ³]	ピストン 位置	圧力 [dbar]	水温 [°C]	塩分 [PSU]	密度 [g/cm ³]	重量調整時 タンク水温 [°C]	計測値 A [g/dbar]	実滞深度 計測値 Ar [g/dbar]	ボジション dF(ΔC) [g]	圧力 dF(Δp) [g]	温度 dF(Δt) [g]	密度 dF(Δρ) [g]	エラー Be [g]	[ppm]
																	平均	標準偏差
666	2000	2.00	34.750	1.0369909	23	2000.3	1.973	34.593	1.0368724	22.0	0.053769	0.055817	1.1	0.0	0.0	-2.9	-1.9	-75
685	2000	2.00	34.750	1.0369909	26	2004.0	1.984	34.600	1.0368932	22.6	0.053754	0.055985	4.4	0.2	0.0	-2.4	1.7	67
686	2000	2.00	34.750	1.0369909	24	2001.0	1.888	34.616	1.0369047	23.1	0.053852	0.056302	2.2	0.1	-0.2	-2.1	-0.2	-8
687	2000	2.00	34.750	1.0369909	23	1996.2	2.002	34.614	1.0368666	22.9	0.054241	0.056579	1.1	-0.2	0.0	-3.1	-1.7	-67
688	2000	2.00	34.750	1.0369909	24	2001.0	2.084	34.635	1.0368940	21.9	0.054645	0.056607	2.2	0.1	0.2	-2.4	-0.1	-4
690	1500	3.00	34.690	1.0345518	21	1494.1	2.910	34.579	1.0344492	22.8	0.053913	0.055688	-1.1	-0.3	-0.2	-2.5	-3.5	-137
691	1500	3.00	34.690	1.0345518	21	1500.9	2.837	34.593	1.0345004	22.0	0.054179	0.055729	-1.1	0.1	-0.3	-1.3	-2.7	-106
692	2000	2.20	34.630	1.0368703	23	1995.6	2.151	34.621	1.0368498	20.5	0.054836	0.056293	1.1	-0.2	-0.1	-0.5	0.8	31
698	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1481.8	2.976	34.597	1.0343991	10.2	0.060129	0.056498	0.0	-1.0	-0.1	-1.8	-1.0	-39
699	1500	3.05	34.600	1.0344745	21	1478.6	3.102	34.590	1.0343628	10.2	0.059603	0.055866	-1.1	-1.2	0.1	-2.8	-2.6	-102
700	2000	1.90	34.581	1.0368711	23	1993.0	2.127	34.625	1.0368444	19.2	0.056009	0.057037	1.1	-0.4	0.4	-0.7	1.3	51
701	2000	1.90	34.581	1.0368711	21	1996.4	1.995	34.614	1.0368685	19.2	0.055471	0.056565	-1.1	-0.2	0.2	-0.1	-0.8	-31
702	2000	1.90	34.581	1.0368711	23	2001.6	1.970	34.606	1.0368889	19.5	0.054748	0.055942	1.1	0.1	0.1	0.4	1.6	63
703	2000	1.90	34.581	1.0368711	21	1993.3	1.926	34.608	1.0368587	18.9	0.055695	0.056728	-1.1	-0.4	0.0	-0.3	-1.0	-39
704	2000	1.90	34.581	1.0368711	24	1999.1	1.993	34.584	1.0368573	19.1	0.056585	0.057675	2.2	-0.1	0.2	-0.3	-2.1	82
705	2000	1.90	34.581	1.0368711	22	1995.8	2.060	34.568	1.0368211	19.3	0.055159	0.056252	0.0	-0.2	0.3	-1.2	-0.7	-27
706	2000	1.90	34.581	1.0368711	22	1998.2	1.966	34.599	1.0368686	19.4	0.055698	0.056891	0.0	-0.1	0.1	-0.1	0.2	8
707	2000	1.90	34.581	1.0368711	23	1996.5	1.916	34.601	1.0368690	19.4	0.055057	0.056265	1.1	-0.2	0.0	-0.1	1.3	51
708	2000	1.90	34.581	1.0368711	25	1993.8	1.912	34.601	1.0368573	19.5	0.054578	0.055817	3.3	-0.3	0.0	-0.3	3.3	129
709	2000	1.90	34.581	1.0368711	22	2000.7	1.893	34.594	1.0368854	19.6	0.055527	0.056832	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	12
710	2000	1.90	34.581	1.0368711	22	1988.1	2.036	34.572	1.0367926	19.4	0.054924	0.056076	0.0	-0.7	0.2	-1.9	-1.0	-39
711	2000	1.90	34.581	1.0368711	22	1999.9	2.087	34.562	1.0368313	19.5	0.054637	0.055769	0.0	0.0	0.3	-1.0	-0.6	-24
712	2000	1.90	34.581	1.0368711	26	1996.5	2.062	34.578	1.0368319	19.3	0.055818	0.056925	4.4	-0.2	0.3	-1.0	3.9	153
713	2000	1.90	34.581	1.0368711	23	2000.9	1.920	34.592	1.0368812	19.2	0.055265	0.056396	1.1	0.1	0.0	0.2	1.3	51
714	2000	1.90	34.581	1.0368711	24	1994.3	1.958	34.583	1.0368394	19.5	0.053524	0.054710	2.2	-0.3	0.1	-0.8	1.8	71
715	2000	1.90	34.581	1.0368711	23	2002.2	1.990	34.588	1.0368749	19.1	0.055718	0.056780	1.1	0.1	0.2	0.1	1.2	47
717	2000	2.20	34.693	1.0369197	22	1996.9	1.346	34.735	1.0370484	19.3	0.055344	0.056847	0.0	-0.2	-1.5	3.2	1.8	71
719	2000	2.20	34.693	1.0369197	21	1999.8	2.089	34.746	1.0369751	17.2	0.055443	0.055646	-1.1	0.0	-0.2	1.4	0.1	4
720	2000	2.20	34.693	1.0369197	24	1998.0	2.573	34.639	1.0368180	17.3	0.055568	0.055547	2.2	-0.1	0.7	-2.5	0.5	20
721	2000	2.20	34.693	1.0369197	23	2000.3	2.402	34.699	1.0368987	16.7	0.056233	0.056067	1.1	0.0	0.4	-0.5	0.9	35
722	2000	2.20	34.693	1.0369197	19	1999.2	0.316	34.681	1.0371380	16.7	0.055489	0.056628	-3.3	0.0	-3.4	5.4	-1.3	-51
723	1500	3.05	34.600	1.0344745	21	1491.4	3.147	34.591	1.0344158	16.7	0.055510	0.054908	-1.1	-0.5	0.2	-1.4	-1.9	-75
724	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1492.9	3.129	34.592	1.0344257	16.1	0.056183	0.055343	0.0	-0.4	0.1	-1.2	-0.7	-28
725	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1491.2	2.920	34.598	1.0344497	16.1	0.055655	0.054929	0.0	-0.5	-0.2	-0.6	-0.4	-16
726	1500	3.05	34.600	1.0344745	21	1494.7	2.926	34.600	1.0344664	16.2	0.055036	0.054325	-1.1	-0.3	-0.2	-0.2	-1.2	-47
727	1500	3.05	34.600	1.0344745	21	1505.8	3.115	34.593	1.0344868	15.8	0.056521	0.055544	-1.1	0.3	0.1	0.3	-1.0	-39
729	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1502.2	3.081	34.592	1.0344741	16.4	0.056988	0.056315	0.0	0.1	0.1	0.0	-0.1	-4
731	1500	3.05	34.600	1.0344745	23	1497.7	3.022	34.598	1.0344661	16.0	0.057495	0.056698	1.1	-0.1	-0.1	-0.2	1.0	39
732	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1502.9	2.965	34.598	1.0344970	16.0	0.056623	0.055826	0.0	0.2	-0.2	0.6	0.2	8
733	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1498.7	2.966	34.600	1.0344794	16.1	0.055812	0.055047	0.0	-0.1	-0.2	0.1	0.0	0
734	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1493.7	3.017	34.600	1.0344502	14.9	0.057478	0.056183	0.0	-0.4	-0.1	-0.6	-0.3	-12
735	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1499.9	3.130	34.597	1.0344612	15.0	0.056428	0.055075	0.0	0.0	0.1	-0.3	-0.2	-8
736	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1498.8	3.032	34.602	1.0344729	15.2	0.055927	0.054714	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0
737	1500	3.05	34.600	1.0344745	23	1496.5	3.091	34.598	1.0344517	14.8	0.056823	0.055418	1.1	-0.2	0.1	-0.6	0.8	31
738	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1503.4	3.076	34.601	1.0344873	14.9	0.056818	0.055454	0.0	0.2	0.0	0.3	0.2	8
740	1500	3.05	34.600	1.0344745	20	1499.2	3.083	34.596	1.0344634	14.4	0.057615	0.056044	-2.2	0.0	0.1	-0.3	-2.4	-94
742	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1494.2	2.991	34.600	1.0344558	10.5	0.061428	0.057936	0.0	-0.3	-0.1	-0.5	-0.2	-8
743	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1479.5	3.087	34.595	1.0343728	10.6	0.061394	0.057917	0.0	-1.2	0.1	-2.5	-1.3	-51
744	1500	3.05	34.600	1.0344745	21	1496.7	2.993	34.601	1.0344677	11.1	0.060065	0.056872	-1.1	-0.2	-0.1	-0.2	-1.2	-47
771	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1492.8	2.968	34.599	1.0344516	10.8	0.059833	0.056517	0.0	-0.4	-0.1	-0.6	-0.3	-12
772	2000	2.20	34.630	1.0368703	22	1995.9	1.972	34.597	1.0368558	10.8	0.059008	0.056315	0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.5	-20
773	2000	2.20	34.630	1.0368703	21	2004.1	1.903	34.617	1.0369175	11.0	0.059244	0.056693	-1.1	0.2	-0.5	1.2	-0.7	-27
774	2000	2.20	34.630	1.0368703	21	1997.3	1.963	34.612	1.0368751	11.2	0.058889	0.056411	-1.1	-0.2	-0.4	0.1	-1.3	-51
775	2000	2.20	34.630	1.0368703	22	1998.2	2.007	34.621	1.0368905	11.3	0.059051	0.056606	0.0	-0.1	-0.3	0.3	0.0	0
776	2000	2.20	34.630	1.0368703	20	2005.3	2.055	34.630	1.0369133	11.4	0.058431	0.055981	-2.2	0.3	-0.3	1.1	-1.7	-67
777	2000	2.20	34.630	1.0368703	22	1992.9	2.097	34.620	1.0368440	11.5	0.058857	0.056464	0.0	-0.4	-0.2	-0.6	-0.4	-16
778	2000	2.20	34.630	1.0368703	21	2001.8	2.140	34.626	1.0368832	11.1	0.060349	0.057735	-1.1	0.1	-0.1	0.3	-1.0	-39
779	2000	2.20	34.630	1.0368703	21	1999.4	2.184	34.635	1.0368736	11.0	0.060395	0.057704	-1.1	0.0	0.0	0.1	-1.0	-39
781	1500	3.05	34.600	1.0344745	22	1475.1	2.926	34.599	1.0343766	11.2	0.059833	0.056787	0.0	-1.4	-0.2	-2.4	-1.2	-47
785	1500	3.05	34.600	1.0344745	20	1496.0	2.981	34.603	1.0344676	10.9	0.059151	0.055862	-2.2	-0.2	-0.1	-0.2	-2.3	-91
786	1500	3.05	34.600	1.0344745	21	1496.1	3.012	34.604	1.0344648	10.8	0.059417	0.056045	-1.1	-0.2	-0.1	-0.2	-1.2	-47
787	1500	3.05	34.600	1.0344745	20	1485.4	3.160	34.596	1.0343908	10.8	0.059401	0.055964	-2.2	-0.8	0.2	-2.1	-3.2	-126
																平均	-0.3	-11.7

実滞在深度におけるピストン位置

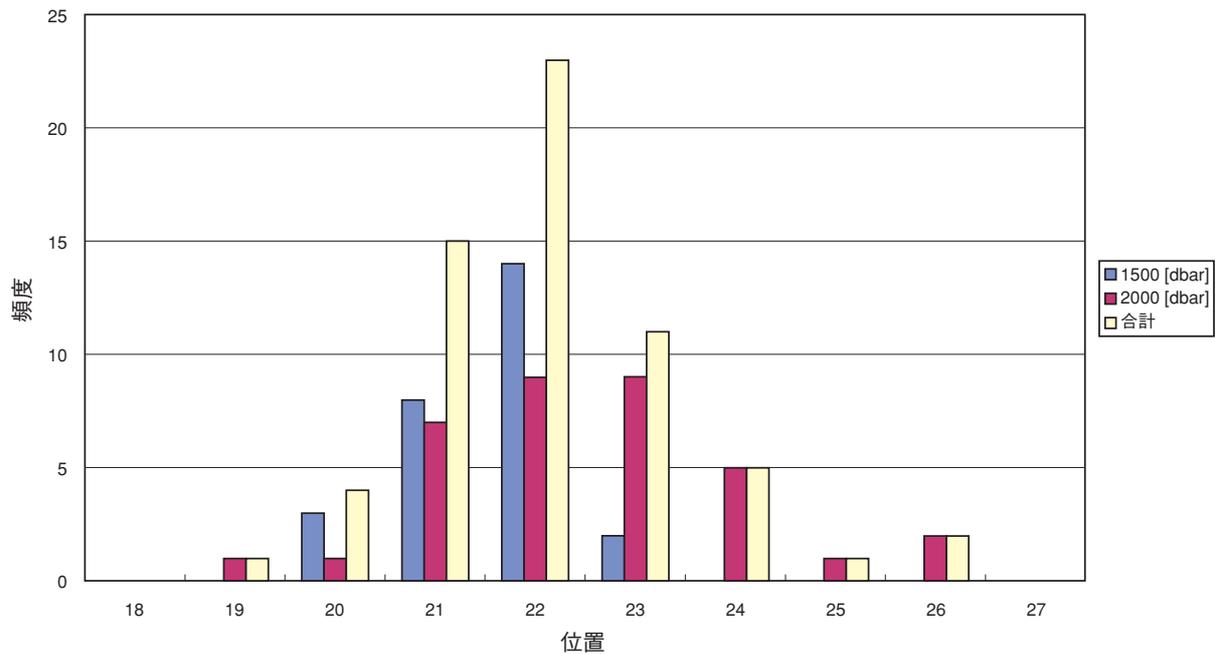


図7 ピストンポジション頻度分布

Fig. 7 Histogram of bottom piston position.

(図7)の頻度分布は正規分布しており重量調整エラーの標準偏差1.44[g](57[ppm]) (表4)からも、品質計画が十分に機能したと考えられる。

・経験的オフセット重量

経験的オフセット重量とは、フロートがある装置(治具類等すべてを含めた状態)を使用して重量調整を理論通りに行い実海域に投入した場合、定常的に発生する理論と実際との差をキャンセルする重量のことをいう。たとえばこの報告に使用した62台のフロートがある装置を用いて重量調整を行い、実海域での重量調整エラー(図7参照)が10[g]を中心に分布していた場合、ある装置は10[g]のオフセット重量を発生させている。そしてある装置全体のオフセット重量がわかれば、これをキャンセルするように重量調整を行えばよいことになる。すなわちこの場合は-10[g]が経験的オフセット重量である。またフロートが滞在深度で静止するピストン位置の理想値22に対し1[g]はピストン位置約1で直接関与し、ピストンの制御範囲12~30は浮力に換算すると理想値に対し約-10[g]~+8[g]に相当するから重量調整を行う上で非常に重要なファクターでもある。経験的オフセット重量発生メカニズムの究明はこれからの研究テーマであるがキャンセル方法は統計データより経験的に行うことが可能である。むつ研究所に構築したバラストイング装置による最初の重量調整ではこの経験的オフセット重量がまだわかっておらず、むつ運用班は本格的な重量調整が行われる前にメーカーで重量調整を行ったフロートを用いバラストイング試験を繰り返し、メーカーのバラストイングデータと整合させるためのオフセット値の計測を試みた。当然のことではあるがバラストイング(図2参照)に用いるチェーン、スケール等の治具類は実

際に使用されるものを使用した。またこれらの治具類にはポリプロピレン材やポリカーボネイト材が含まれるため圧力による変形を考慮し事前に数回加圧し材質へ加圧圧を与えた。試験は同時にフロートの水中姿勢やビデオカメラの視野とスケールシートの幅についての調整も兼ねて行われ、用意した幅の異なる2種類のスケールシートにより経験的オフセット重量が異なるという傾向も計測された。これらの試験よりバラストイングで使用するスケールシート、チェーン等の治具類すべてを指定し経験的オフセット重量を-9[g]と見積もった。運用に入り全てのフロートはこの治具類及び経験的オフセット重量を用いて重量調整が行われている。そして実海域に投入されたフロートより送られてきたテクニカルデータからは重量調整エラーの平均-0.3[g]、またエラーの頻度分布(中央値-1[g]) (図6)が得られた。これらより現在の経験的オフセット重量は少々マイナス側に過補償の傾向があることがわかったが、前述のようにピストンの制御範囲と比較すると十分に整合のとれた値でありバラストイング用治具類等全てを含めた装置としての経験的オフセット重量の見積もりが適正であったと判断できた。経験的オフセット重量発生メカニズムの究明はこれからも続けられる予定である。

謝辞

バラストイング方法についてはワシントン大学ライザー博士、スウィフト博士から多くの有益な情報を得た。また米国 Webb社のDan Webb氏からはフロートの諸特性データの提供があった。これに関して同社日本総代理店エス・イー・エイ社の協力を得た、これらの方々に厚くお礼を申し上げる。また、高圧試験水槽の使用ではむつ研究所施設設備課の協力があつた。

参考文献

Swift, D. and S. Riser, "RAFOS Floats: Defining and Targeting Surfaces of Neutral Buoyancy", Journal of atmospheric and Oceanic technology, 11(4), 1079-1092, (1994)
Webb Research Corporation, (Users Manual- APEX-SBE Profiler), 16(2002)
Webb Research Corporation, (Technical Manual- APEX-SBE Profiler), 11(2002)

Webb Research Corporation, (APEX Final Test Procedure), 7(2001)

伊澤堅志, 水野恵介, 宮崎基, 井上亜沙子, 安藤健太郎, 高槻靖, 小林大洋, 竹内謙介, "プロファイリングフロートの重量調整について", 海洋科学技術センター試験研究報告, 44, 181-196

(原稿受理: 2003年7月9日)