

JAERI-Tech

JP0150129

2000-072



## 海水中有用金属捕集試験用ロープの 疲労と評価

2000年12月

玉田 正男・笠井 昇・瀬古 典明・長谷川 伸・  
武田 隼人・片貝 秋雄・須郷 高信

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

## 海水中有用金属捕集試験用ロープの疲労と評価

日本原子力研究所高崎研究所材料開発部

玉田 正男・笠井 昇・瀬古 典明・長谷川 伸  
武田 隼人・片貝 秋雄・須郷 高信

(2000年9月22日受理)

放射線グラフト重合法によって合成した金属捕集材を評価するため、海水中に極低濃度で溶存するバナジウム、ウランなどの有用金属の捕集試験をむつ事業所沖合の実海域で実施している。100kg規模の捕集材を浸漬する海上施設（捕集試験装置）と、捕集材に吸着された有用金属を分別溶離する陸上施設（分別溶離試験装置）を1999年9月に設置した。設置7ヶ月経過後の2000年4月に実海域試験装置のクッションブイ取付ロープ（ポリエチレンロープ）が切断した。その原因を検討し、その評価を行なった。

クッションブイ取付ロープは、枠ロープの四方にあるクッションブイ用ロープに各2個のクッションブイを取り付けるためのロープであり、全8個のクッションブイそれぞれに2本づつ計16本ある。4ヶ所でロープの切断が発生し、それはいずれも枠ロープに対し外側に配置されたクッションブイで生じた。これらは、短い周期で水平方向の揺れや回転を起すと考えられ、取付ロープには角度は小さいが曲がりや捻りが生じ、設計上考慮していなかった曲げ疲労が切断の原因と考えられる。ロープの引張り疲労に加えて曲げ疲労を考慮して強度計算を行ったところ、切断が起こるという結論が得られた。

本ポリエチレンロープに換えて、より曲げ疲労に対し優れた強度特性をもつナイロンロープを使用することとした。計算によるとこのナイロンロープは引張りおよび曲げ疲労強度において、十分な強度を有し、2年間の試験期間中には切断が生じないことが評価された。

Bending Fatigue and its Evaluation of Ropes used in Equipment  
for Recovery of Rare Metals from Seawater

Masao TAMADA, Noboru KASAI, Noriaki SEKO, Shin HASEGAWA,  
Hayato TAKEDA, Akio KATAKAI and Takanobu SUGO

Department of Material Development  
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received September 22, 2000)

Recovery experiment of rare metals such as vanadium and uranium in seawater was carried out in the offing of Mutsu-works to evaluate the performance of the adsorbent which was synthesized by radiation induced graft-polymerization. In September 1999, we set equipment for dipping 100 kg adsorbents into seawater and instruments for selective elution of adsorbed metal.

The present report clarified the primary factor which cuts a cushion-buoy-mounting-rope (CBMR) of the equipment for the recovery of the significant metals from seawater after 7 months' experiment, and then described its countermeasure. The CBMR plays the role installing the cushion buoy onto the horizontal rope in the sea. There are two CBMRs for each buoy and totally 16. Four cases of the cutting occurred in the cushion buoys placed outside. These cushion buoys have been installed in September, 1999, and it already passed through 7 months until the rope-cutting accident. Horizontal swings and rotation motions with a short period were observed especially in the cushion buoy placed outside. Therefore, the CBMR was cut by the unexpected bending fatigue which was caused by these bending and twist with the small angle. Fatigue estimation was equivalent for the cutting level when strength was calculated by considering bending fatigue in addition to the tension fatigue of the CBMR. The present polyethylene CBMRs were replaced by the nylon ones having excellent characteristic against bending fatigue. It was calculated that tension and bending fatigue strength of the nylon CBMR were enough to maintain its strength during the test period for 2 years.

Keywords: Cushion Buoy Mounting Rope, Equipment for Recovery of Significant Metals from Seawater, Cutting Factor, Replacement Process, Bending Fatigue, Tension Fatigue, Polyethylene, Nylon, Section, Strength Calculation

## 目次

1. 有用金属捕集材実海域試験について .....	1
1.1 海水中の有用金属資源 .....	1
1.2 有用金属捕集材 .....	1
1.3 海上設備 .....	1
1.4 陸上設備 .....	2
2. クッションブイ取付ロープと切断箇所 .....	3
2.1 クッションブイ取付ロープ .....	3
2.2 切断箇所 .....	3
3. クッションブイ取付ロープ切断原因の解析 .....	5
3.1 切断面の観察 .....	5
3.2 切断原因の検討 .....	5
3.2.1 疲労強度の計算法 .....	5
3.2.2 波高と発生回数 .....	6
3.2.3 引張り疲労 .....	6
3.2.4 曲げ疲労 .....	7
4. クッションブイ取付ロープの新規仕様の検討 .....	8
4.1 引張り強度 .....	8
4.2 疲労強度 .....	8
5. クッションブイ取付ロープの取り換え作業 .....	10
5.1 取り換え作業日程 .....	10
5.2 取り換え作業手順 .....	10
6. まとめ .....	12
参考文献 .....	12
参考資料 .....	38

## Contents

1.	Experiment of adsorbent for recovery of significant metals from seawater .....	1
1.1	Resource of significant metals in seawater .....	1
1.2	Adsorbent for significant metals .....	1
1.3	Equipment for dipping adsorbents into seawater .....	1
1.4	Instruments for selective elution .....	2
2.	Cushion buoy mounting rope (CBMR) and its cutting accident .....	3
2.1	Cushion buoy mounting rope (CBMR) .....	3
2.2	Cutting points .....	3
3.	Analysis of primary factor for cutting of CBMR .....	5
3.1	Observation of section .....	5
3.2	Primary factor for cutting .....	5
3.2.1	Calculation of fatigue strength .....	5
3.2.2	Wave height and its motion frequency .....	6
3.2.3	tension fatigue .....	6
3.2.4	Bending fatigue .....	7
4.	New specification for CBMR .....	8
4.1	Tension strength .....	8
4.2	Fatigue strength .....	8
5.	Replacement of CBMR .....	10
5.1	Replacement date .....	10
5.2	Replacement process .....	10
6.	Conclusion .....	12
	References .....	12
	Appendix .....	38

## 1. 有用金属捕集材実海域試験について

### 1.1 海水中の有用金属資源

海水中にはナトリウムをはじめとして、地球上に存在する百余の元素のうち 77 元素が溶け込んでいるため、有用稀少金属資源の源として注目されている。ウランに注目するとその濃度は 3.3ppb と非常に低いが、資源としての観点において海中には  $4 \times 10^9$ t の膨大な量のウランが溶存し、利用可能な鉱石中の量の約 1000 倍の量に匹敵する。さらに、海底の岩盤表層には溶存量の 1000 倍以上のウランが含有されていることから、海水からウランを回収しても岩盤からの滲出により溶存濃度は一定に保持されると考えられ、資源量としては無尽蔵といえる。その中で日本近海に黒潮が運ぶ 1 年間のウラン総量は 520 万 t であり、この量は、陸ウランの総埋蔵量に匹敵するため、海水ウランの捕集技術の開発が期待されている。

### 1.2 有用金属捕集材

放射線グラフト重合法は既存の材料にその特質を損なうことなく、接ぎ木のように新しい機能を付与することが可能である。我々は、図 1 に示すように、オイルフェンスにも使用される高分子不織布に重金属イオン吸着能を有する官能基を導入する技術を検討し、放射線グラフト重合法により高効率の捕集材を合成する方法を確立した。この方法を用いることで、厳しい海象条件や自然環境において長期間にわたり強度を維持でき、さらに、ウラン捕集性能に優れた材料の開発が可能となった。海水からのウラン捕集の実用化の可能性を検討するため、100kg 規模の捕集材を浸漬可能な実海域捕集材試験装置を 1999 年 9 月に設置した。本装置は捕集用の海上設備と分離溶離用の陸上設備から構成される。捕集材はカセットに組み上げ、図 2 に示すように、実海域の海上設備に係留して海中に 20 日間浸漬し、有用金属の海洋捕集のち引き上げ、陸上の分別溶離設備に移送して、最初に、前処理として海洋生物などの付着物を除去する。次に分別溶離工程において塩酸溶液に接触させ、有用金属を溶離する。溶離後の捕集材はアルカリ処理を行うことにより、再利用することが可能である。溶離したウランはキレート樹脂に吸着固定させ、分離精製工場へ輸送する。

### 1.3 海上設備

海上設備は、図 3 に示すように、生け簀型の浮体の下方に捕集材を充填した吸着床を海水中につりさげることの出来る構造であり、青森県むつ関根浜沖合 7 km の海域に設置した。吸着床を深度 20m に係留するための浮体は、一辺が 8 m 角の生け簀型鋼管フレームである。これを所定海域に固定するため、4 本の係留索 (50mm φ ロープ) 及び緩衝波用のクッションブイを使用する。係留索は 40 トンアンカー 4 ケにより所定の位置に固定されている。鋼管フレームには簡易標識灯と GPS を搭載して、簡易標識灯は陸上から、GPS からの位置情報はむつ事業所及び高崎研究所からモニターできるようになっている。この鋼管フレームは、波高が 7.3m 以上では海面下に埋没するようになっており、通常の台風等の高波でも充分耐えられる設計である。吸着床に充填される捕集材は、捕集及び分離溶離の作業性を考慮してカセット状とした。捕集材カセットは 30 × 15cm の短冊状の捕集材を 120 ~ 140 枚積層したもので、海水との接触効率を上げる

ため捕集材 2 枚ごとにスペーサーネットを挟み込み、積層厚が約 30cm になるよう 6 本のボルトで固定されている。捕集材カセットは一边が 4 m、高さ（内寸）15 cm の吸着床の中に 144 個充填されている。

#### 1.4 陸上設備

陸上設備である分別溶離設備はむつ事業所施設内に設置した。図 4 に示すように分別溶離設備は溶離液槽、NaOH 液槽、KOH 液槽、溶離液貯槽、純水貯槽などから構成される。実海域で捕集試験後回収した捕集材カセットは、海洋生物などの付着物を洗浄除去し、別棟の純水浸漬槽に保管する。その後、72 ヶの捕集材カセットを溶離ユニット容器内に充填し、図 5 に示す 2 段階溶離処理工程で捕集した金属を溶離する。2 段溶離工程では、最初に 0.01 規定の塩酸溶液でアルカリ金属とアルカリ土類金属を溶離し、次に、0.5 規定の塩酸溶液でウラン等の有用金属を溶離する。溶離処理後の捕集材はアルカリ処理槽に移して、KOH 水溶液で処理し、再び実海域での捕集試験に使用する。2 段溶離液槽の有用金属を含む溶離液を、樹脂筒内に移送し充填されたキレート樹脂にウランなどの有用金属を吸着固定し、安定な状態で金属精錬企業に搬送し、精製処理をへて酸化ウランや酸化バナジウムを得る。

## 2. クッションブイ取付ロープと切断箇所

### 2.1 クッションブイ取付ロープ

有用金属捕集材実海域試験装置（試験休止時状態）の概略を図6に示す\*。本装置は平成11年9月28日に北緯 $41^{\circ}24.4'$ 、東経 $141^{\circ}18.0'$ の地点に設置された。試験休止時状態では、海底に沈めた4個の40tトンアンカーブロックから延びる係留索は端末アイ、クッションブイ用ロープ、交点リングを介して枠ロープに結束されている。クッションブイ用ロープにはそれぞれ2個のクッションブイが各2本の取付ロープにより取り付けられ、その浮力により、枠ロープが海面下2.5mの深さに保持されている。

(\*JAERI-memo 12-038 有用金属捕集材実海域試験装置の製作と設置)

クッションブイの仕様は次の通りである。

型式	:	C T - 4 5 K - 8 (UBE FLOAT製)
直径	:	4 5 0 mm
長さ	:	1,857 mm
浮力	:	2 3 2 kgf
重量	:	3 9 . 5 kgf

クッションブイ取付ロープの仕様は次の通りである。

材質	:	ポリエチレン3ST (ハイゼックス、三井東圧製) (S T : 三打ちロープ、3ストランドより構成されたロープ)
太さ	:	$\phi$ 3 2 mm (呼称)
比重	:	0.96
引張り強度	:	9.7 tf
本数	:	1個のクッションブイに対して2本

### 2.2 切断箇所

クッションブイ取付ロープの切断状況を図7に示す。すべての切断は、各係留索に対して2個あるクッションブイのうち、枠ロープから離れた位置に配置された外側のクッションブイ取付ロープの下方部で生じた。

ロープ切断の発見日と切断状況は次の通りである。

・2000 年 5 月 1 日

No. 2 係留索方向外側クッションブイの内側取付ロープ(完全に切断：図8)

No. 4 係留索方向外側クッションブイの外側取付ロープ(完全に切断)

・2000 年 5 月 25 日

No. 1 係留索方向外側クッションブイの外側取付ロープ(一部切断: 図 9)

No. 2 係留索方向外側クッションブイの外側取付ロープ(一部切断)

一部切断: ロープを構成する 3 ストランドのうち 1 ストランドのみ切断していた。

### 3. クッションブイ取付ロープ切断原因の解析

#### 3.1 切断面の観察

切断原因を推定するため、切断したクッションブイ取付ロープの先端部を顕微鏡で観察した結果を図10に示す。先端部は曲げ疲労による剪断及びねじりを受けたような形態であった。

同規格品を原糸強度以上の過負荷により切断した場合、図11に示すように、先端部は、わずかに絞れて切断したような形態をとる。したがって、クッションブイ取付ロープは予想を超えた過負荷によって切断したのではなく、予期しなかった曲げ疲労による切断と推定された。

#### 3.2 切断原因の検討

クッションブイ取付ロープの強度については、<参考資料（巻末）>に示すように、引張り強度についてのみ強度計算を行い、ロープの安全性を評価した。しかし、2つ並んだクッションブイのうち、桿ロープから遠い外側のクッションブイは、ほとんど海面下に沈んでいるため、内側のクッションブイと異なった動きをしていたことが判明した。内側のクッションブイは波の挙動に合わせて揺れるが、外側のクッションブイは短い周期で水平方向に揺れたり回転をする事が観察された。クッションブイが水平面内で動くことで、図12に示すようにクッションブイを保持している取付ロープの下部では、引張作用に加えて、角度は小さいながらも曲がりや捻りが生ずる。このため、曲げ応力がかかる頻度の増加によっても強度低下をきたすことが考えられる。

2つのクッションブイのうち桿ロープから遠い側に配置されたクッションブイの取付ロープについては、特にこれらの挙動を考慮する必要があるため、疲労による強度低下について検討を行い、引張りによる疲労強度および曲げによる疲労強度について考慮し、切断原因を推察した。

##### 3.2.1 疲労強度の計算法

取付ロープに周期的な荷重が作用すると、疲労が問題となる。現在の取付ロープと同じ材質のΦ12mmのポリエチレンロープを用いた引張り疲労試験で、下記の結果が得られている。

$$\begin{array}{ll} \text{試験荷重条件} & : \text{最大=引張強度/2} \\ & : \text{最小=引張強度/4} \end{array}$$

切断までの繰り返し数： 83,225回

実際ロープに作用する荷重は疲労試験で加えた荷重とは異なるので、任意の荷重に対する疲労寿命回数は、疲労試験結果に基づいて次式で算定した。

$$N_f = N_0 (F_0 / F)^m$$

ここで、 $N_f$ ： 寿命回数

$N_0$ ： 引張り試験での回数 (=83,225)

$F_0$ ： 引張り試験での最大荷重 (=4.85tf)

F : 作用荷重  
 m : 定数 (=3, 通常は3~5)

上式は、疲労によってロープが切断する繰り返し回数（寿命）は、疲労試験で作用させた荷重と実際に作用する荷重の比のm乗に比例することを示しており、作用荷重が小さいほど、寿命は長くなることになる。また、mが小さいほど切断に至る繰り返し回数（寿命）が少なくなり、設計上は安全側の評価となる。ここでは、安全側の評価を行うために、m=3を用いて以降の計算を行った。

### 3.2.2 波高と発生回数

取付ロープに作用する荷重は、波高によって変化するので、波高の発生頻度（波高とその波高の発生回数の関係）が必要となる。ここでは、原研および第2港湾建設局によって、約3年間計測されたデータ（偶数時刻前後の10分づつの20分間、観測12回／月のうち、最大波高の1/3を取り出した）を使用する。計測結果を、表1に示す。

これより、波高とその発生頻度が求められるが、この計測は24時間連続して計測されたものでないので、本装置が使用される3年間の試験期間の間に発生する波浪の総数が必要となる。一般に船舶などの海洋構造物においては、約20年の耐用期間に対して、 $10^8$ 回の回数を想定している。本装置の使用期間は、3年間であるので、試験期間中の繰り返し回数の総数は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{試験期間中の総繰り返し回数} &= 10^8 \text{回} * (3 \text{年} / 20 \text{年}) \\ &= 1.5 * 10^7 \text{回} \end{aligned}$$

この繰り返し回数と、波浪計測データの発生頻度より、試験期間中の各波高の発生回数が、表2のように求められる。なお、3.5m以上は、計測例が無いが、発生頻度を0.1%と安全側に仮定し全体が100%となるようにした。

### 3.2.3. 引張り疲労

波高が得られれば、<参考資料（巻末）>に示した方法で取付ロープに作用する荷重が計算できる。また、各波高の発生回数も得られたので、各波高に対する寿命回数も計算できる。

疲労度は、各波高に対する寿命回数に対する実際の作用回数の割合であり、疲労度の総計（累積疲労度）が1以下であれば、疲労による破断は生じないと考えてよい。

クッションブイは2本の取付ロープで支持されているが、必ずしも均等に2本の取付ロープで支持されているとは限らないので、安全のためにクッションブイに作用する外力（波力、潮流力、浮力）を1本の取付ロープで支持したとして、今回の切断までに至る期間（昨年10月から本年4月までの7ヶ月間）の引張り疲労度を計算すると、表3のようになる。

これより疲労度の総和である累積疲労度は、

$$0.2536 \leq 1$$

となり、1を超えないでの、引張り疲労のみでは切断は起こらないと考えられる。

### 3.2.4. 曲げ疲労

取付ロープの寿命は、引張りによる累積疲労度と水平面内の曲がり等の挙動による累積疲労度の和で表されると考えられるので、水平面内の挙動によって生じる曲げ疲労の効果を考慮する必要がある。一般の曲げ疲労試験では、ロープをZ状に曲げて行なわれており、同じ作用荷重であっても曲率半径が異なると疲労度は大きく異なり、今回の曲げ疲労の推定にそのまま使用することは出来ない。今回の取付ロープに見られるような曲げに相当する疲労は一般の曲げ疲労の1/200倍に相当するとして疲労度を計算すると、7ヶ月間における曲げ疲労の結果は表4のようになる。なお、計算に用いた曲げ疲労試験の結果は、次のようになる。

試験荷重	:	引張り強度 / 5
繰り返し数	:	2,545回

この場合の取付ロープの疲労度は、引張りによる疲労と曲げによる疲労の和で表されるので、表3と表4の結果より、

$$\begin{aligned} \text{取付ロープの累積疲労度} &= \text{引張りによる累積疲労度} + \text{曲げによる累積疲労度} \\ &= 0.2536 + 0.6461 \\ &= 0.8997 \end{aligned}$$

となり、累積疲労度は1に近くになることがわかった。これより今回の切断は、引張りによる疲労に加え、曲げによる疲労の作用が大きく影響して、切断に至ったと考えられる。

#### 4. クッションブイ取付ロープの新規仕様の検討

クッションブイ取付ロープの切断は、引張り疲労に加え曲げ疲労による作用が大きな原因となっていることが推定されたため、曲げ疲労強度の優れた種類のロープを使用し、さらに引張り応力や引張り疲労に対する強度を上げることとする。

ナイロンロープはこれらの条件を満足するロープであり、現在使用中のポリエチレンロープの代わりに、表5に示すナイロンロープを変更用として選定した。なお、現在使用中のロープの特性を括弧内に示す。

##### 4.1 引張り強度

安全のために1本の取付ロープにすべての外力3.2tfが作用する<参考資料(巻末)>として、取付ロープの安全率を求める。変更案の取付ロープの引張り強度は、22.8tfゆえ、ナイロンロープの安全率SFは、

$$\begin{aligned} \text{安全率, SF} &= 22.8 / 3.2 \\ &= 7.1 \end{aligned}$$

となり、引張り強度については、現状の取付ロープの2倍以上の安全率となる。

##### 4.2 疲労強度

変更案の取付ロープは、現在使用中のポリエチレン製に比べて、引張り疲労や曲げ疲労に対して強い特性を有するナイロン製であり、その疲労試験結果を次に示す。

- ・引張り疲労特性

試験荷重	: 最大=引張強度/2
	最小=引張強度/4
繰り返し数	: 100,000回 (残存強度=引張強度*85%)

- ・曲げ疲労特性

試験荷重	: 引張り強度/5
繰り返し数	: 380,657回 (切断せず)

なお、現在使用中のポリエチレンのロープの場合には、引張り疲労試験および曲げ疲労試験ともに最終的には切断したが、ナイロンロープについては引張りおよび曲げの上記試験においては切断には至っていない。

上記の疲労特性を用いて、変更案のナイロンロープの引張り疲労および曲げ疲労の計算を行った。計算では、安全のために、引張り強度の安全率計算の場合と同様、すべての外力が1本の取付ロープに作用するとした。曲げ疲労特性については、曲げ曲率半径の違いによる疲労効果が1/200と仮定して計算した。

変更案のナイロンロープについて、3年間における引張り疲労および曲げによる疲労を計算すると、それぞれ表6、7のようになる。これより、改良後の取付ロープの累積疲労度は、次のようになる。

$$\begin{aligned}\text{取付ロープの累積疲労度} &= \text{引張りによる累積疲労度} + \text{曲げによる累積疲労度} \\ &= 0.0834 + 0.0017 \\ &= 0.0841\end{aligned}$$

これより、変更案のナイロンロープを用いることにより、引張り疲労および曲げ疲労を考慮しても残りの試験期間中には切斷は起こらないと考えられる。

## 5. クッションブイ取付ロープの取り換え作業

### 5.1 取り換え作業日程

切断したクッションブイ取付ロープは

外側のクッションブイについては2000年6月7日に交換した。

また、内側クッションブイについても安全性を考慮し、同様に取付ロープを交換した。

内側のクッションブイについては2000年6月28日に交換した。

### 5.2 取り換え作業手順

図13に示すように新仕様の取付ロープを付けたにクッションブイを用意し、取付ロープとクッションブイの双方を交換した。クッションブイ用ロープとクッションブイ取付ロープの結束部は海中にあるため、クッションブイの交換はクレーン船を利用して、外側クッションブイについては図14に示す端末アイ部分を、内側クッションブイについては交点リングを海上に持ち上げて、作業船で交換作業を行なった。

交換作業の手順を以下に示す。

(1) 取付ロープ切断の生じたクッションブイ (北緯  $41^{\circ} 24.4'$ 、東経  $141^{\circ} 18.0'$ )  
.....図 15

(2) クッションブイ用ロープを海面上に引き上げるため、ダイバーが端末アイに  
フックをかける  
.....図 16

(3) クレーン船により、端末アイを海面上に引き上げる  
(外側クッションブイ取付ロープの場合) .....図 17

クレーン船により、交点リングを海面上に引き上げる  
(内側クッションブイ取付ロープの場合) .....図 18

(4) 作業船が近づき、クッションブイを引き寄せ、取付ロープを外し、ブイを引き上げる。  
.....図 19

(5) クッションブイ用ロープに付着した海藻などを取り除き、あらかじめ用意しておいた取付ロープ付きのクッションブイをクッションブイ用ロープに結びつける。

.....図20

(6) クッションブイを海に投入する。 .....図21

(7) 引き上げていたクッションブイ用ロープを元の状態に戻し、交換を完了する。

.....図22

(8) クッションブイと切断した取付ロープ .....図23

## 6. まとめ

クッションブイを含む有用金属捕集材実海域試験装置は1999年9月28日に設置されており、取付ロープ切断までに7ヶ月経過している。4箇所に生じたすべてのクッションブイ取付ロープの切断は枠ロープに対して外側に配置されたブイで生じた。

外側に配置されたクッションブイは、短い周期で、水平方向の揺れや回転を生じるため、考慮していなかった曲げ疲労が生じ、切断に至ったと思われる。したがって、クッションブイ取付ロープについては、ポリエチレンロープに換えて、曲げ疲労に対し優れた強度特性をもつナイロンロープを使用することとした。引張りおよび曲げ疲労度について計算した結果、2年間の試験期間中は切断の生じない十分な強度を有することが明らかになった。

切断したクッションブイ取付ロープは外側のクッションブイについては2000年6月7日に交換した。また、内側クッションブイについても安全性を考慮し、同様に取付ロープを交換した。内側のクッションブイについては2000年6月28日に交換作業を行なった。

## 参考文献

- (1) 相川泰彦. 合織ロープの概要. 東京、運輸省海技大学校、(1991).
- (2) 昭和57年度新定係港波浪推算調査報告書・波高別最高波高一覧表.
- (3) 運輸省. 第2港湾建設局青森工事事務所. 昭和63年. 新定係港建設記録.

表1 波高の発生頻度

有義波高 (m)	発生回数 (回)	発生頻度 (%)
1.01~1.50	281	74.3
1.51~2.00	79	20.9
2.01~2.50	10	2.6
2.51~3.00	6	1.6
3.01~3.50	2	0.5
計	378	99.9

表2 各波高の発生回数

有義波高 (m)	発生頻度 (%)	発生回数 (回)
1.01~1.50	74.3	11,145,000
1.51~2.00	20.9	3,135,000
2.01~2.50	2.6	390,000
2.51~3.00	1.6	240,000
3.01~3.50	0.5	75,000
3.51~4.00	0.1	15,000
計	100.0	1.50E+07

表3 ポリエチレンロープ1本の引張り疲労強度（7ヶ月間）

i	有義波高(m) Hw	荷重(tf) F	発生頻度 (%)	発生回数 $\Delta N$	寿命回数 Nf	総回数 2.92E+6 7ヶ月	疲労度 $\Delta N / N_f$
						74.3	
1	1.5	0.84	74.3	2,167,083	15,922,317	0.1361	
2	2.0	1.05	20.9	609,583	8,079,878	0.0754	
3	2.5	1.27	2.6	75,833	4,644,071	0.0163	
4	3.0	1.48	1.6	46,667	2,909,100	0.0160	
5	3.5	1.70	0.5	14,583	1,940,700	0.0075	
6	4.0	1.91	0.1	2,917	1,358,386	0.0021	
計			100	2.92E+06		0.2536	

表4 ポリエチレンロープ1本の曲げ疲労強度（7ヶ月間）

i	有義波高(m) H <sub>w</sub>	荷重(tf) F	発生頻度 (%)	発生回数 $\Delta N$	寿命回数 N <sub>f</sub>	疲労度
						$\Delta N / N_f$
1	1.5	0.84	74.3	2,167,083	6,249,222	0.3468
2	2.0	1.05	20.9	609,583	3,171,206	0.1922
3	2.5	1.27	2.6	75,833	1,822,714	0.0416
4	3.0	1.48	1.6	46,667	1,141,769	0.0409
5	3.5	1.70	0.5	14,583	761,690	0.0191
6	4.0	1.91	0.1	2,917	533,142	0.0055
計			100	2.92E+06		0.6461

表5 ナイロン取付ロープの仕様

種類	ナイロン3ST (ポリエチレン3ST)	
太さ(呼称)	$\phi 3.6\text{ mm}$ ( $\phi 3.2\text{ mm}$ )	
比重	1.14 (0.96)	
引張り強度	22.8tf (9.7tf)	
本数	1個のブイに対して2本	

表6 ナイロンロープ1本の引張り疲労強度（3年間）

i	有義波高(m) H <sub>w</sub>	荷重(tf) F	発生頻度 (%)	発生回数 $\Delta N$	寿命回数 N <sub>f</sub>	総回数 1.50E+07 36ヶ月
						$\Delta N/N_f$
1	1.5	0.84	74.3	11,145,000	249,125,118	0.0447
2	2.0	1.05	20.9	3,135,000	126,420,081	0.0248
3	2.5	1.27	2.6	390,000	72,662,466	0.0054
4	3.0	1.48	1.6	240,000	45,516,606	0.0053
5	3.5	1.70	0.5	75,000	30,364,741	0.0025
6	4.0	1.91	0.1	15,000	21,253,700	0.0007
計			100	1.50E+07		0.0834

表7 ナイロンロープ1本の曲げ疲労強度（3年間）

総回数 1.50E+07 36ヶ月

i	有義波高(m) Hw	荷重(tf) F	発生頻度 (%)	発生回数 $\Delta N$	寿命回数 Nf	疲労度 $\Delta N / Nf$
1	1.5	0.84	74.3	11,145,000	12,138,396,183	0.0009
2	2.0	1.05	20.9	3,135,000	6,159,704,169	0.0005
3	2.5	1.27	2.6	390,000	3,540,412,976	0.0001
4	3.0	1.48	1.6	240,000	2,217,755,489	0.0001
5	3.5	1.70	0.5	75,000	1,479,494,573	0.0001
6	4.0	1.91	0.1	15,000	1,035,567,318	0.0000
計			100	1.50E+07		0.0017

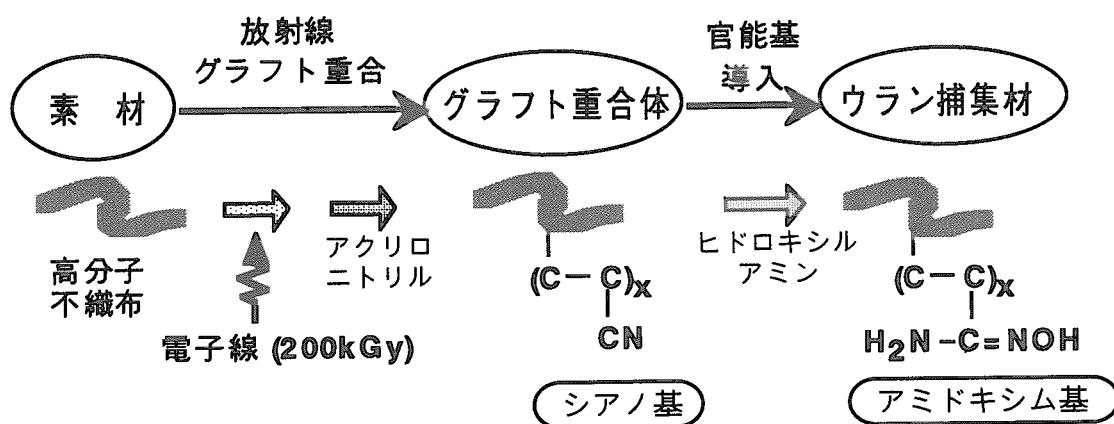


Fig. 1 放射線グラフト重合技術を応用した纖維状アミドキシム樹脂の合成工程

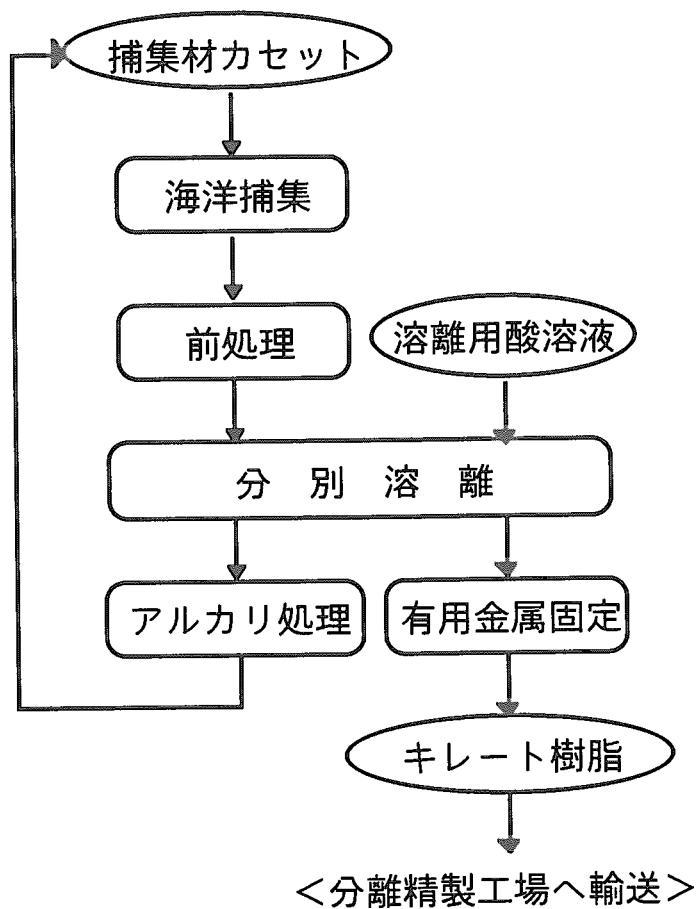


Fig. 2 実海域捕集材試験工程

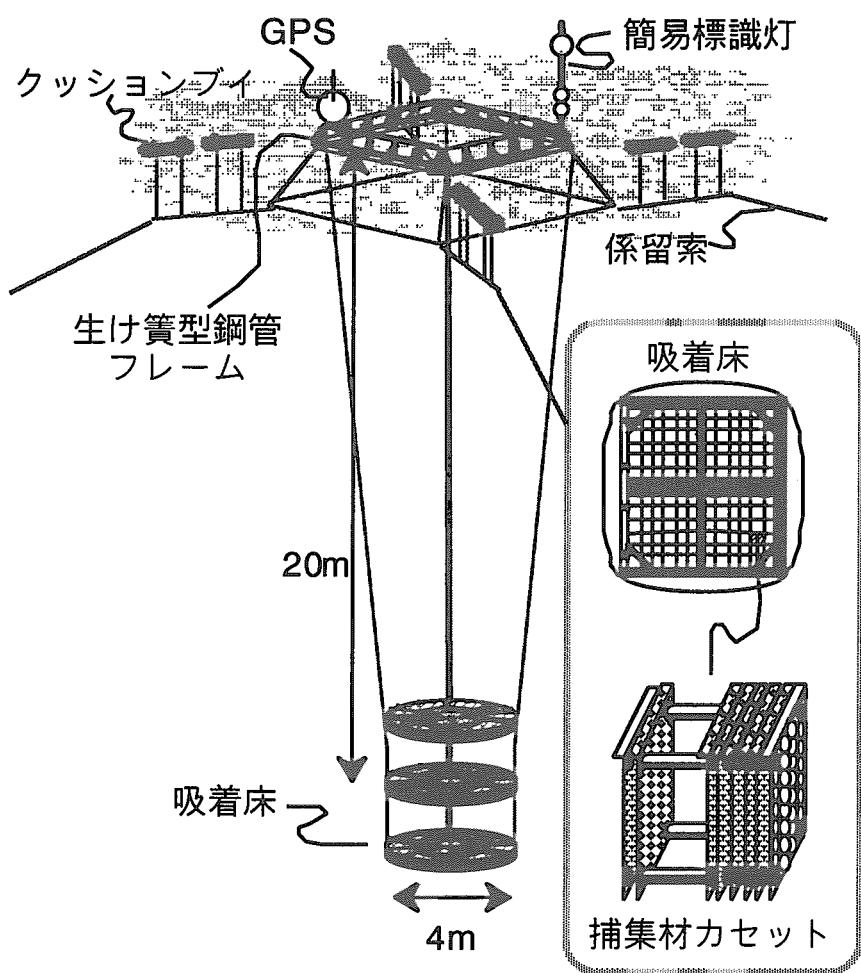


Fig. 3 実海域捕集材試験装置（海上設備）

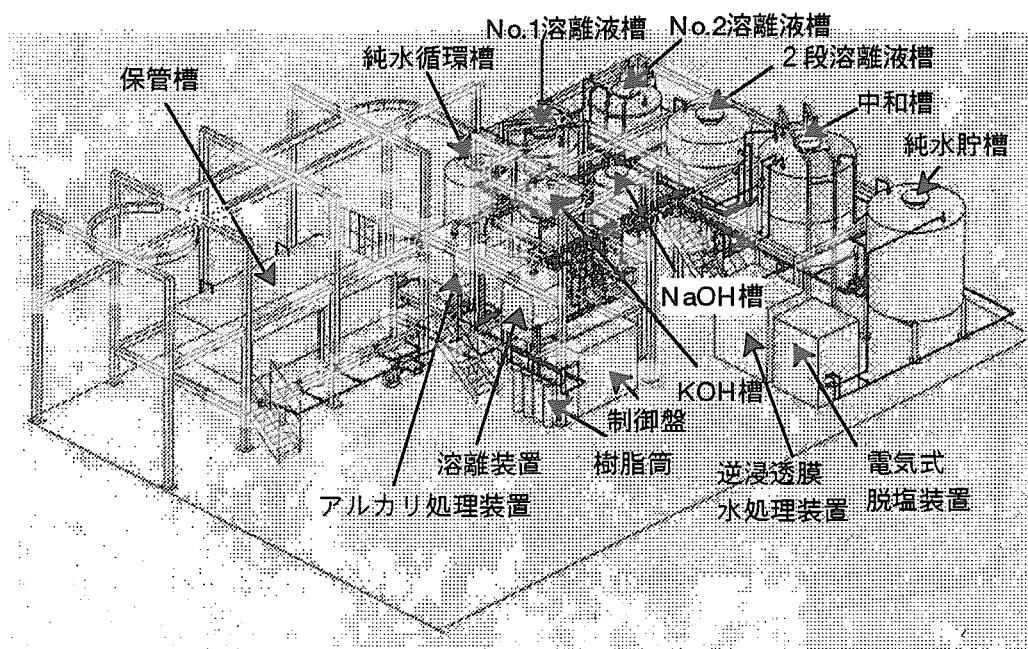


Fig. 4 分別溶離設備の配置（陸上設備）

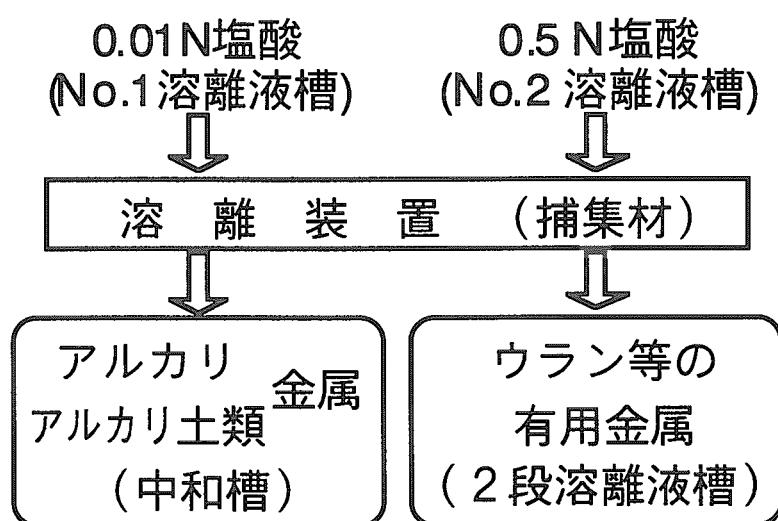


Fig. 5 2段階溶離処理工程

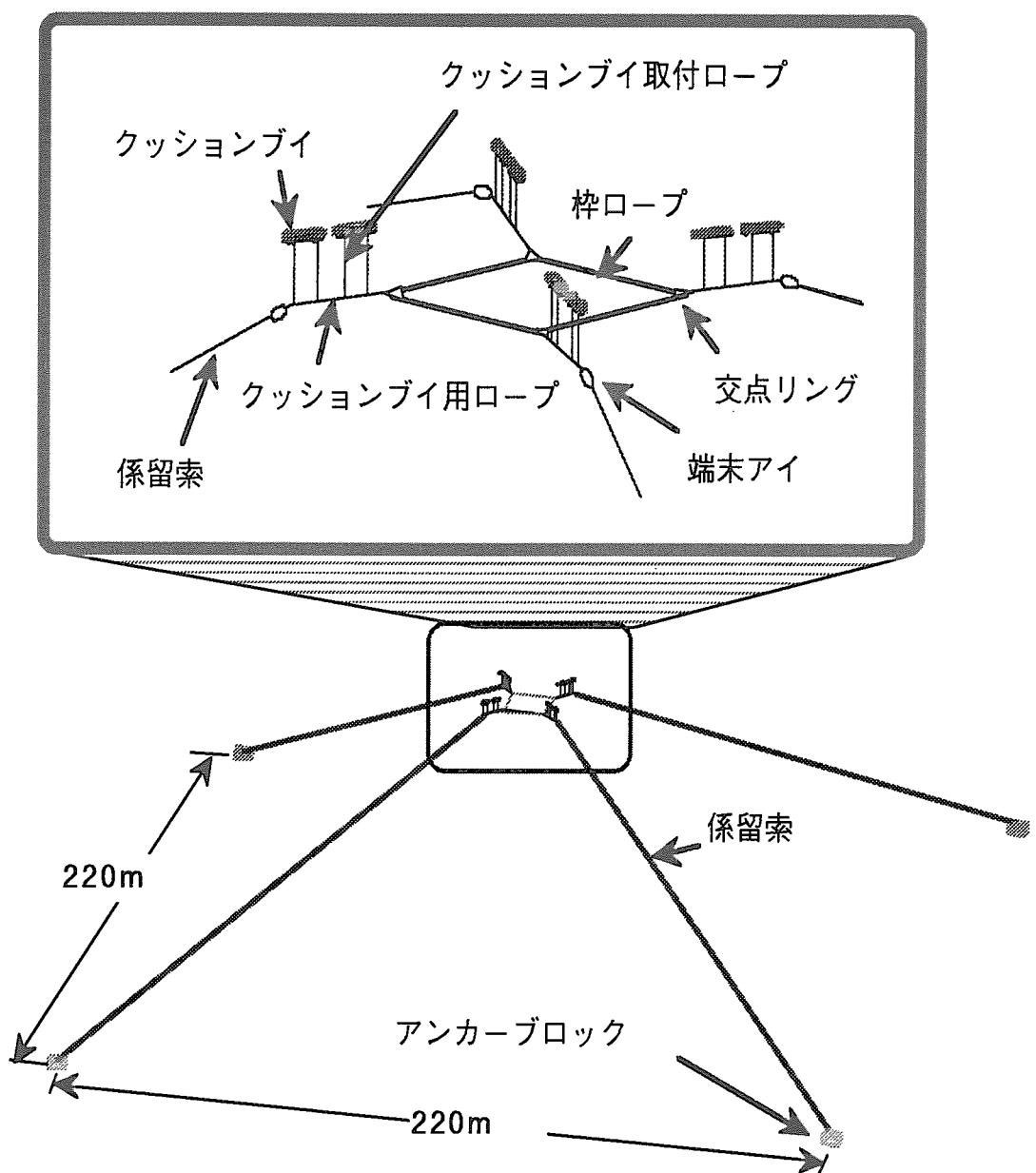


Fig. 6 有用金属捕集材実海域試験装置（試験休止状態）の概要

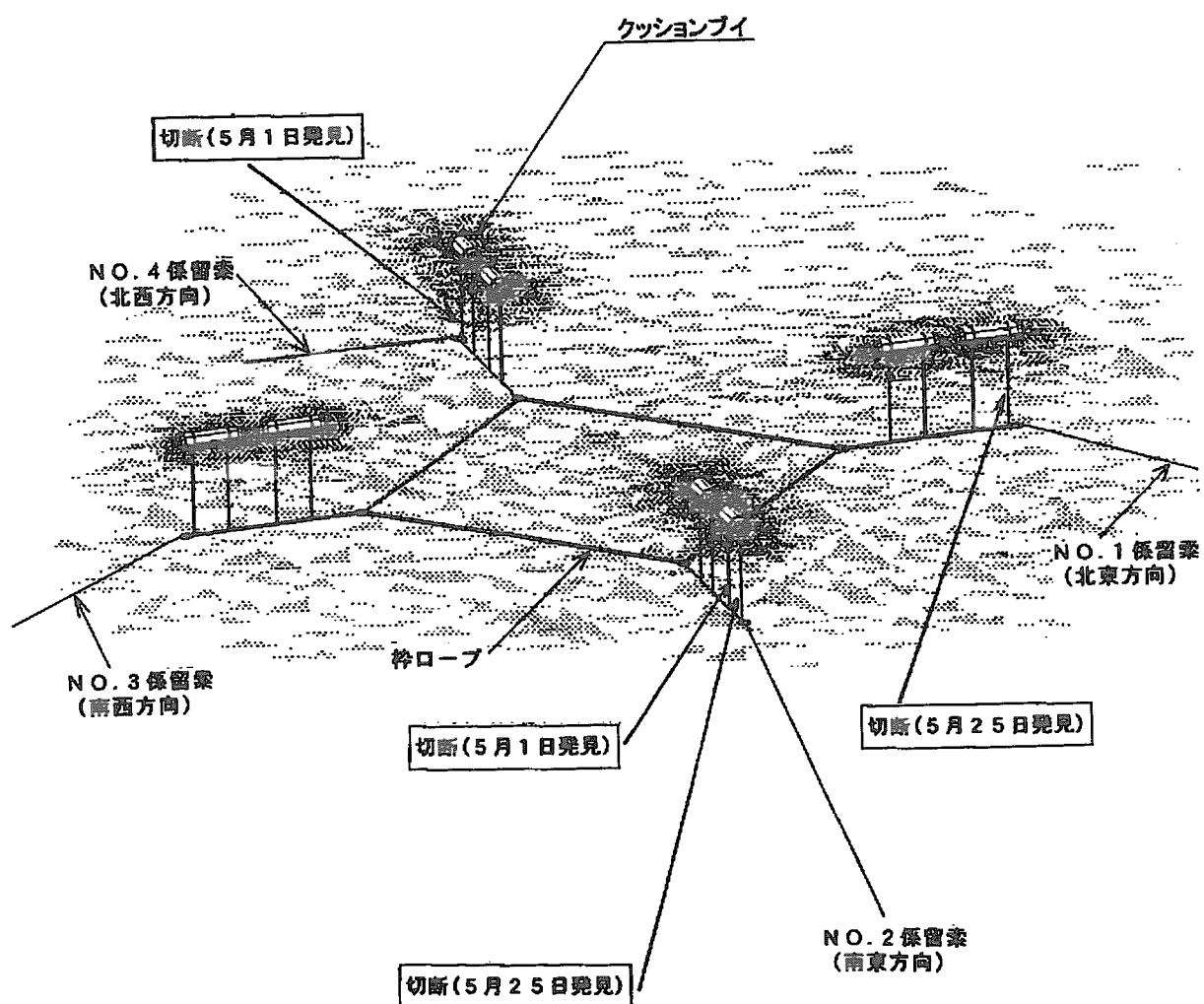


Fig. 7 クションブイ取付ロープの切断状況

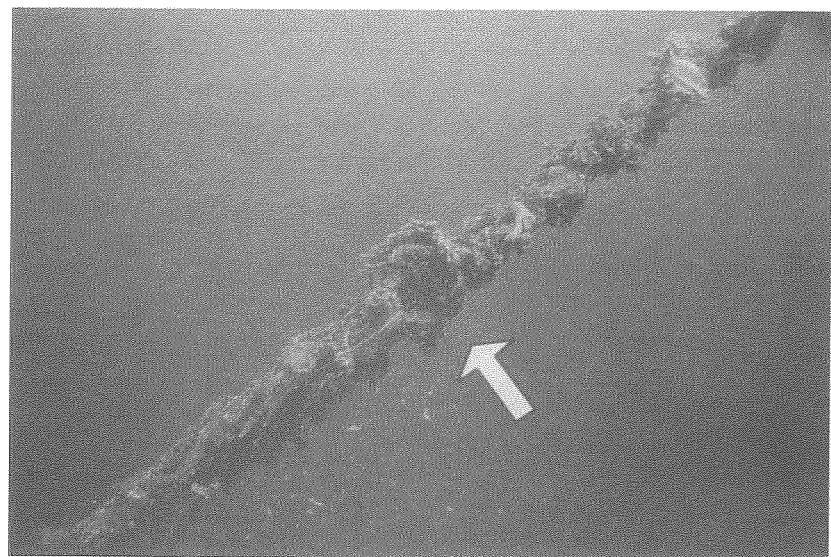
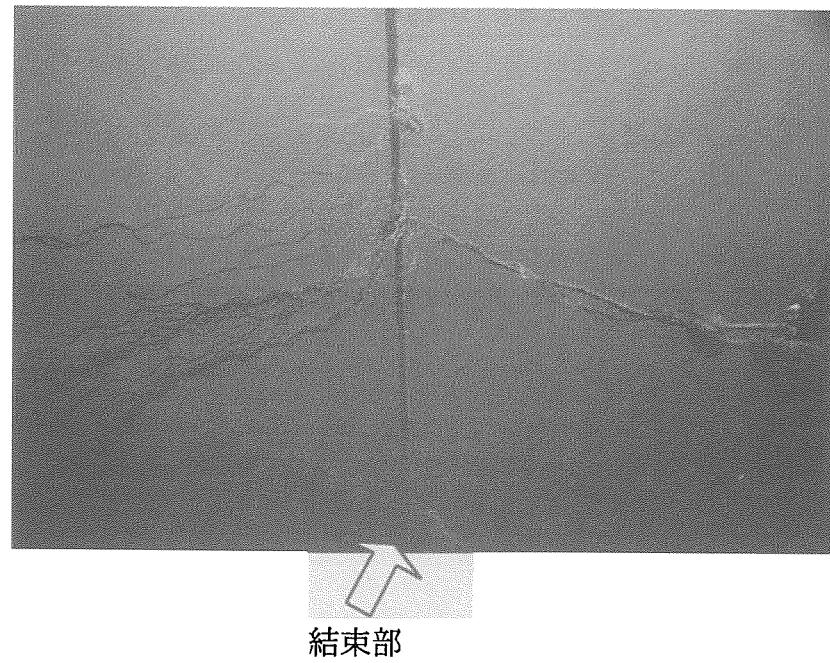


Fig. 8 クションブイ用ロープに残った取付ロープの結束部



結束部

Fig. 9 1ストランドの切断したクッションブイ取付ロープ  
クションブイ取付ロープの切断状況

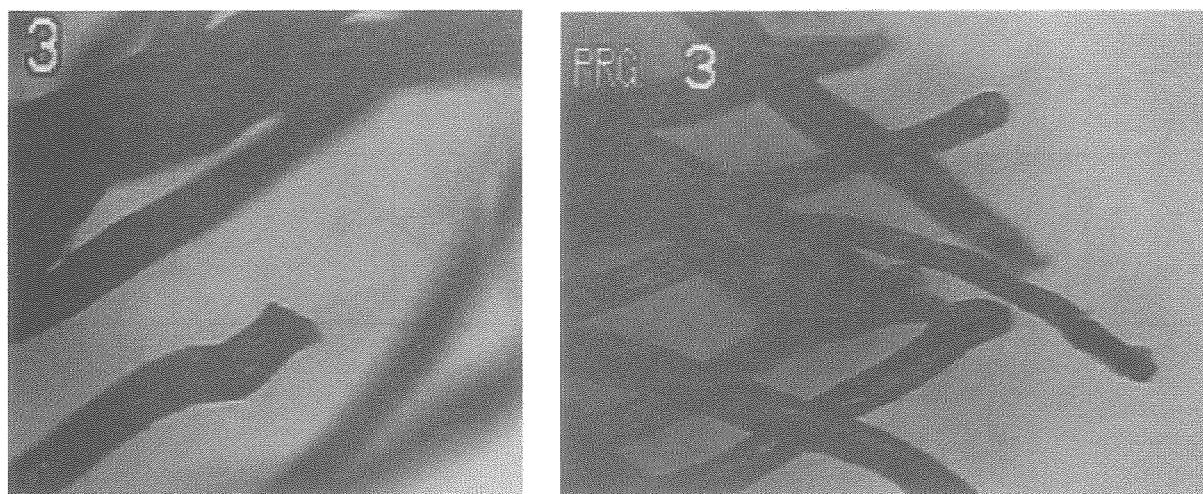


Fig. 10 切断したクッションブイ取付ロープの先端部  
(ポリエチレン単糸系 : 0.24 mm)

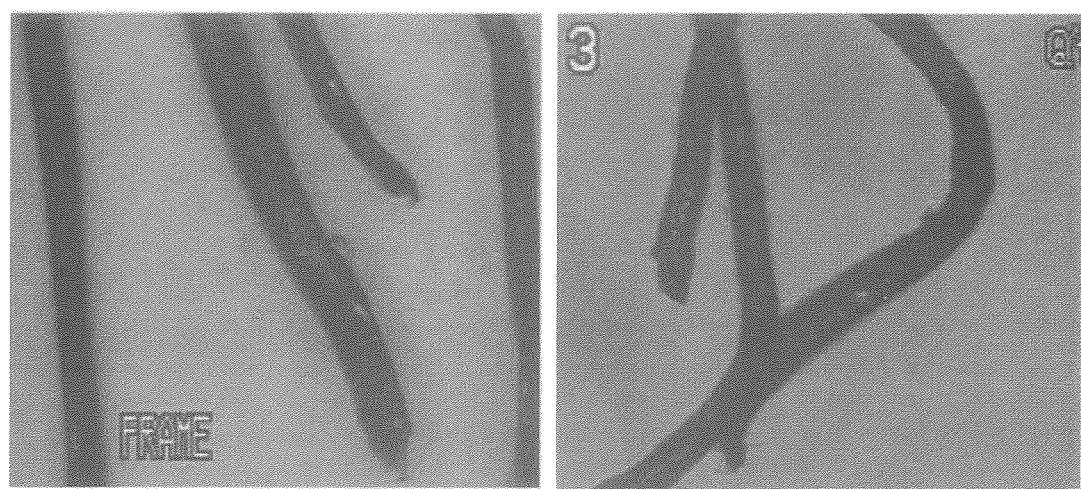


Fig. 11 クッションブイ取付ロープ同規格品の過負荷による切  
断時の先端部 (ポリエチレン単糸系 : 0.24 mm)

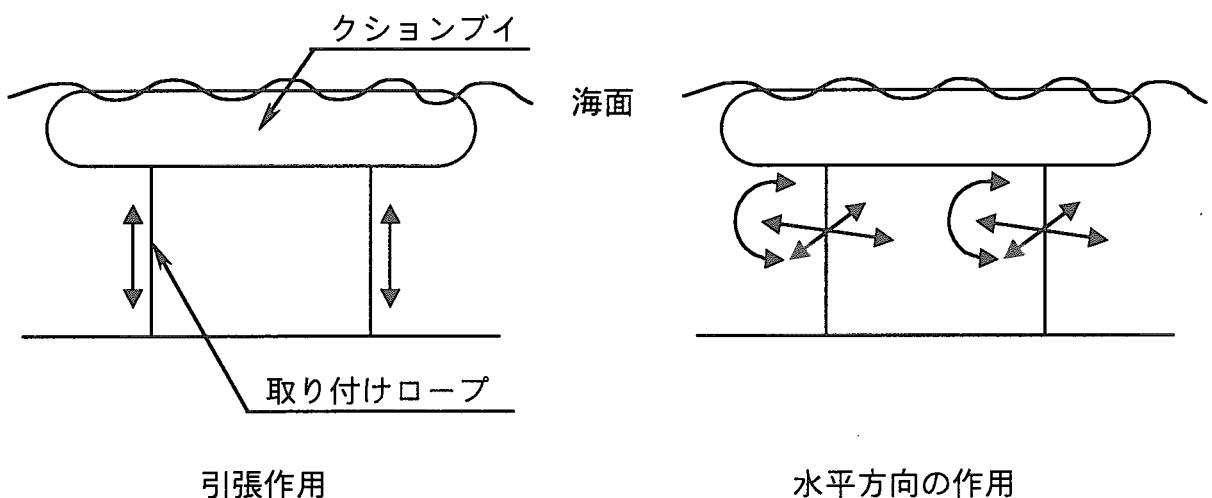


Fig. 12 クッションブイの動き

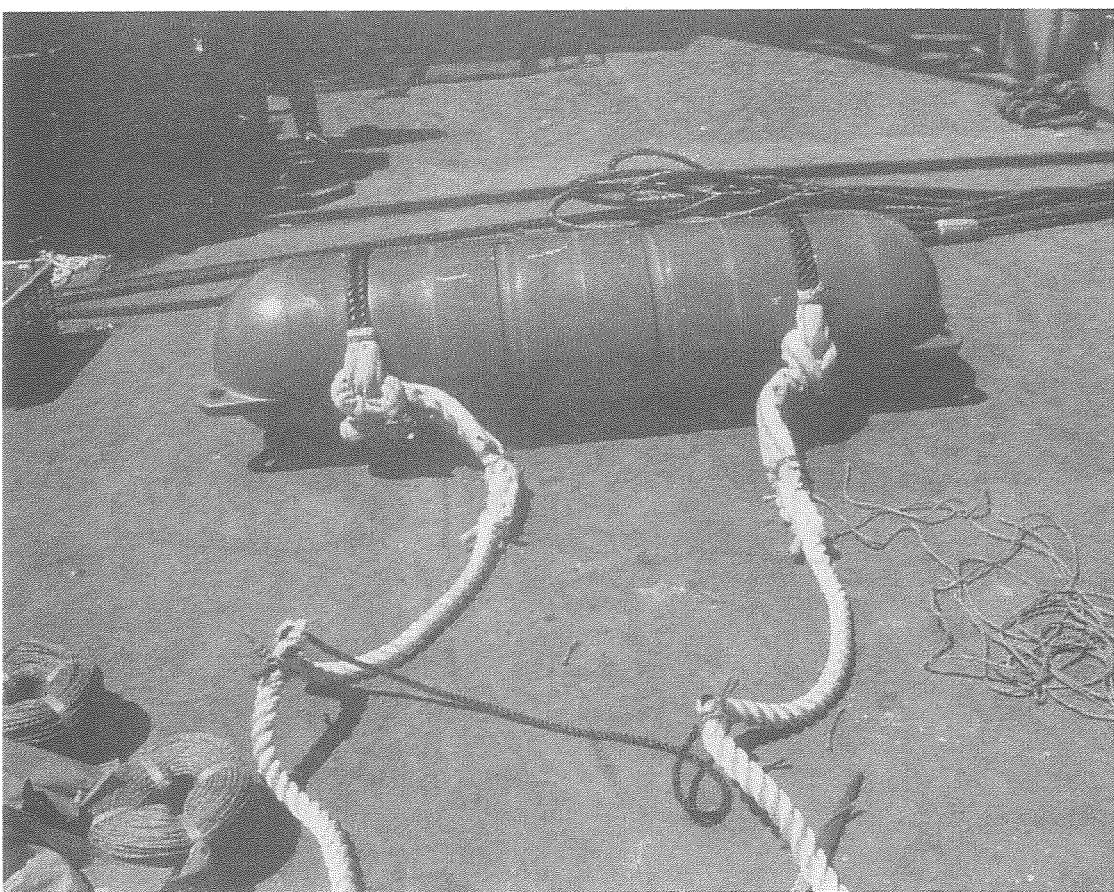


Fig. 13 ナイロンロープを結び付けた交換用クッションブイ

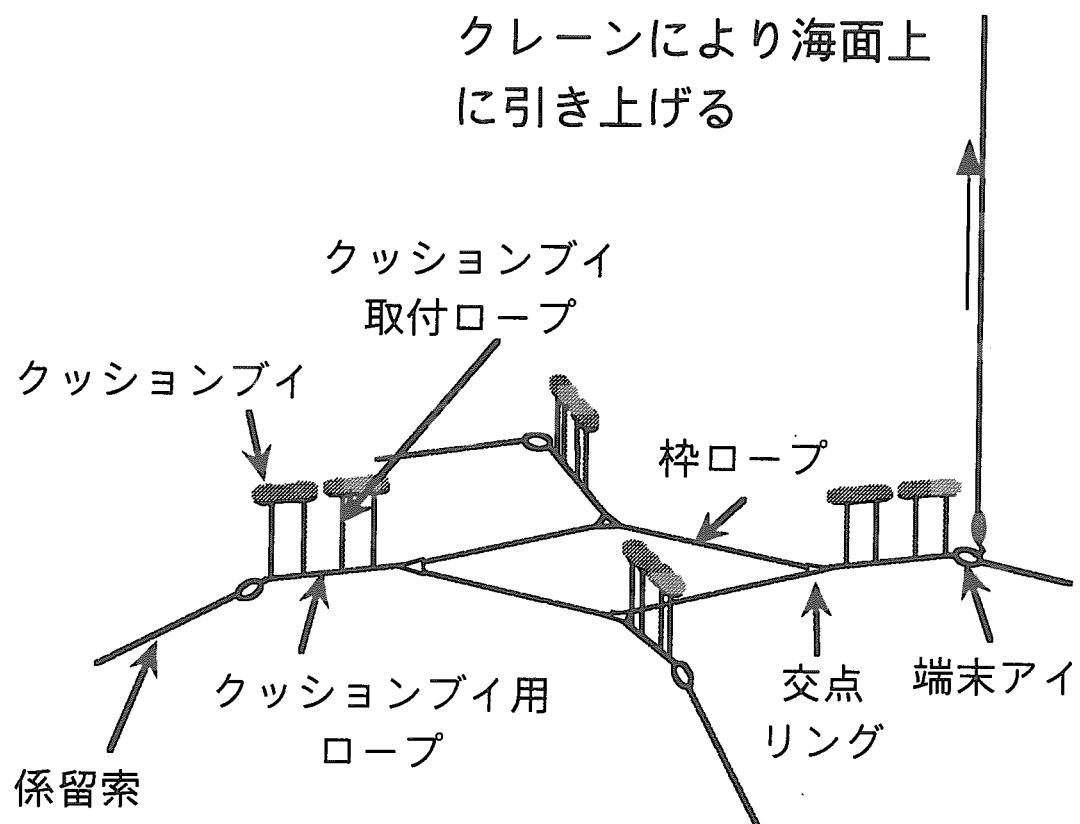


Fig. 14 クッションブイ取付ロープ交換方法



Fig. 15 有用金属捕集材実海域試験装置のクッションブイ

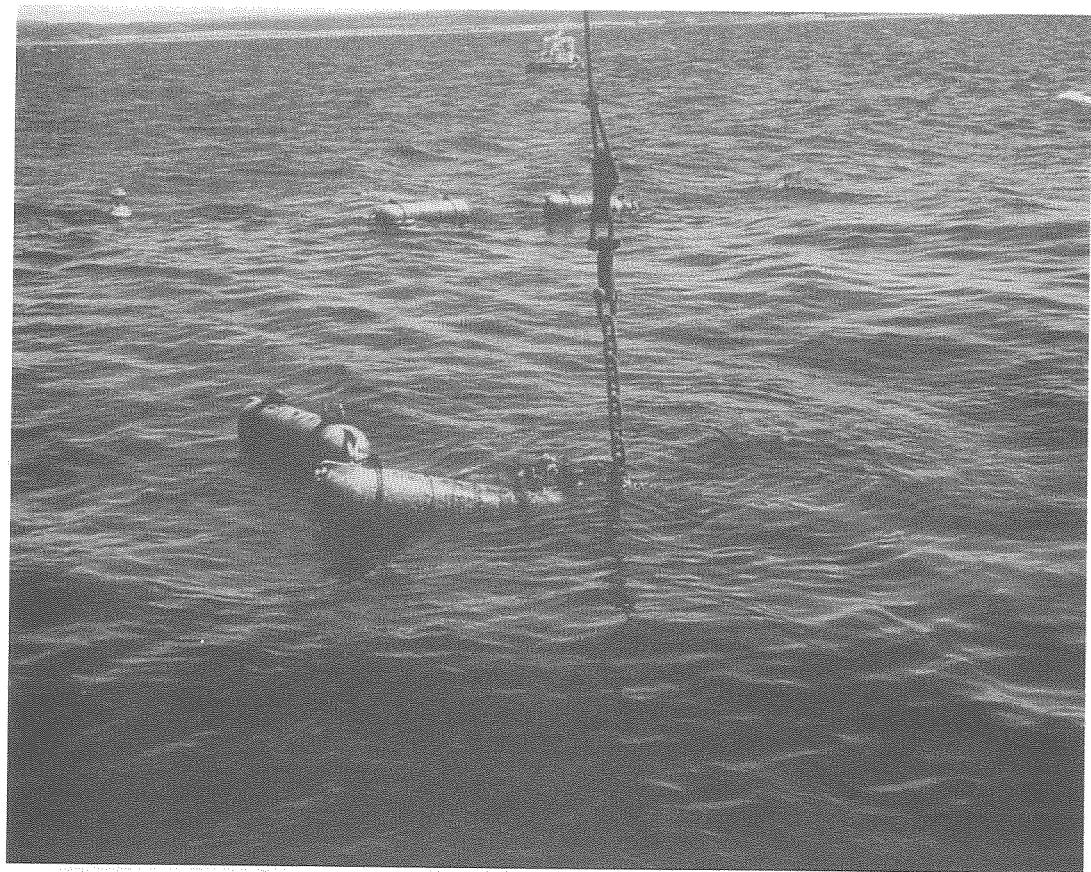


Fig. 16 端末アイへのフック掛け

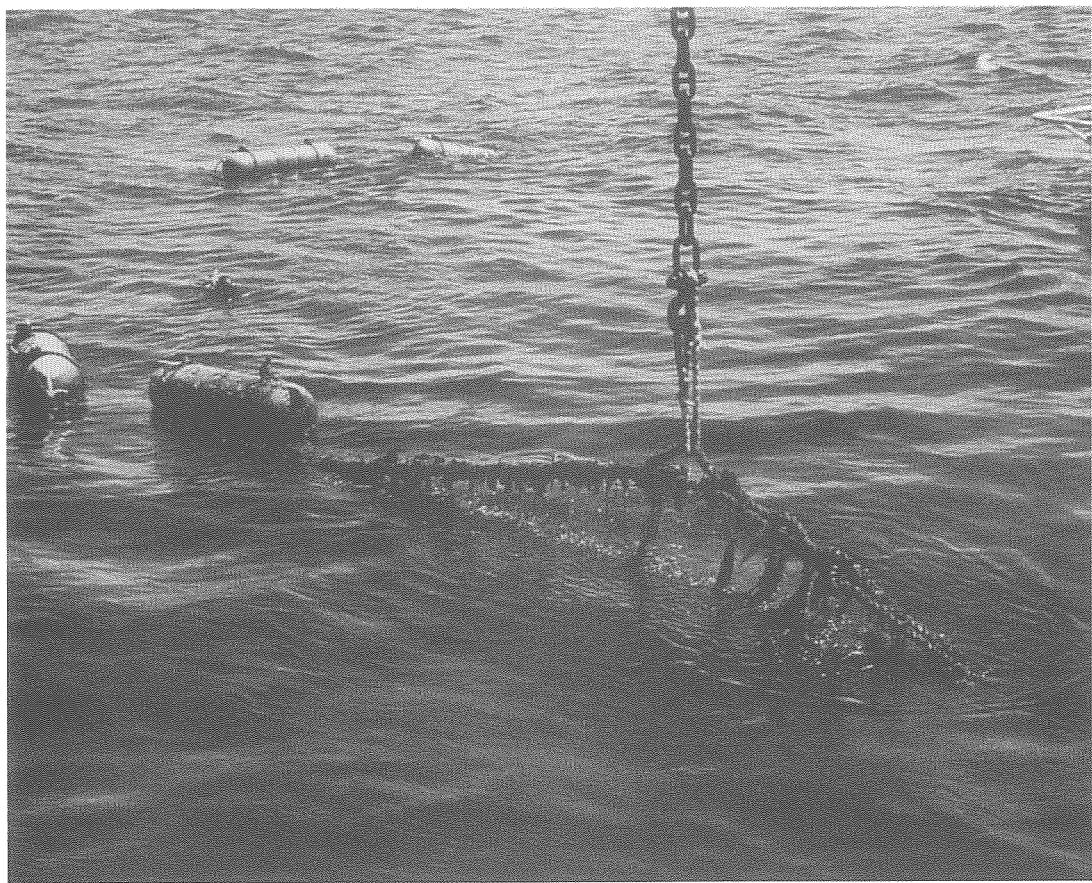


Fig. 17 端末アイ部で引き上げたクッションブイ用ロープの引き上げ（外側クッションブイ取付ロープ交換の場合）

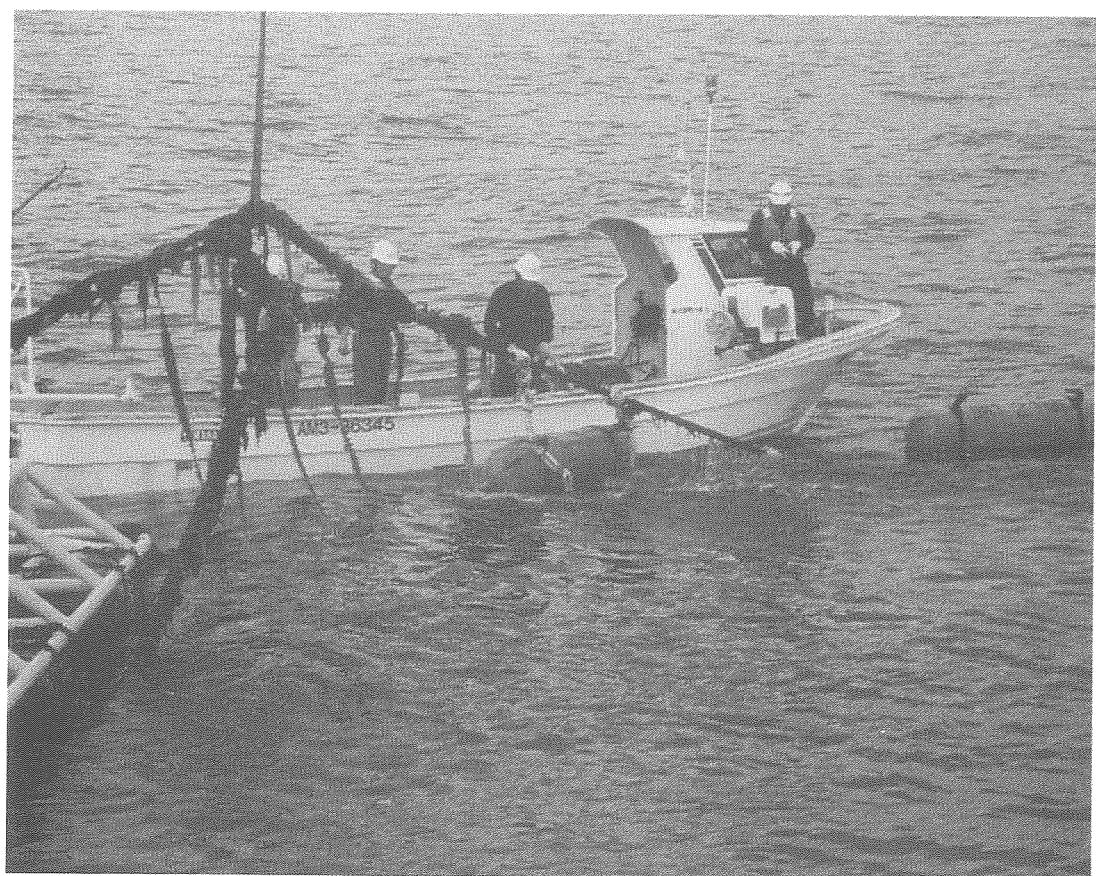


Fig. 18 交点リング部で引き上げたクッションブイ用ロープの引き上げ(内側クッションブイ取付ロープ交換の場合)



Fig. 19 作業船でのクッションブイ取付ロープの取り外しと  
ブイの回収



Fig. 20 クションブイ取付ロープの取り付け

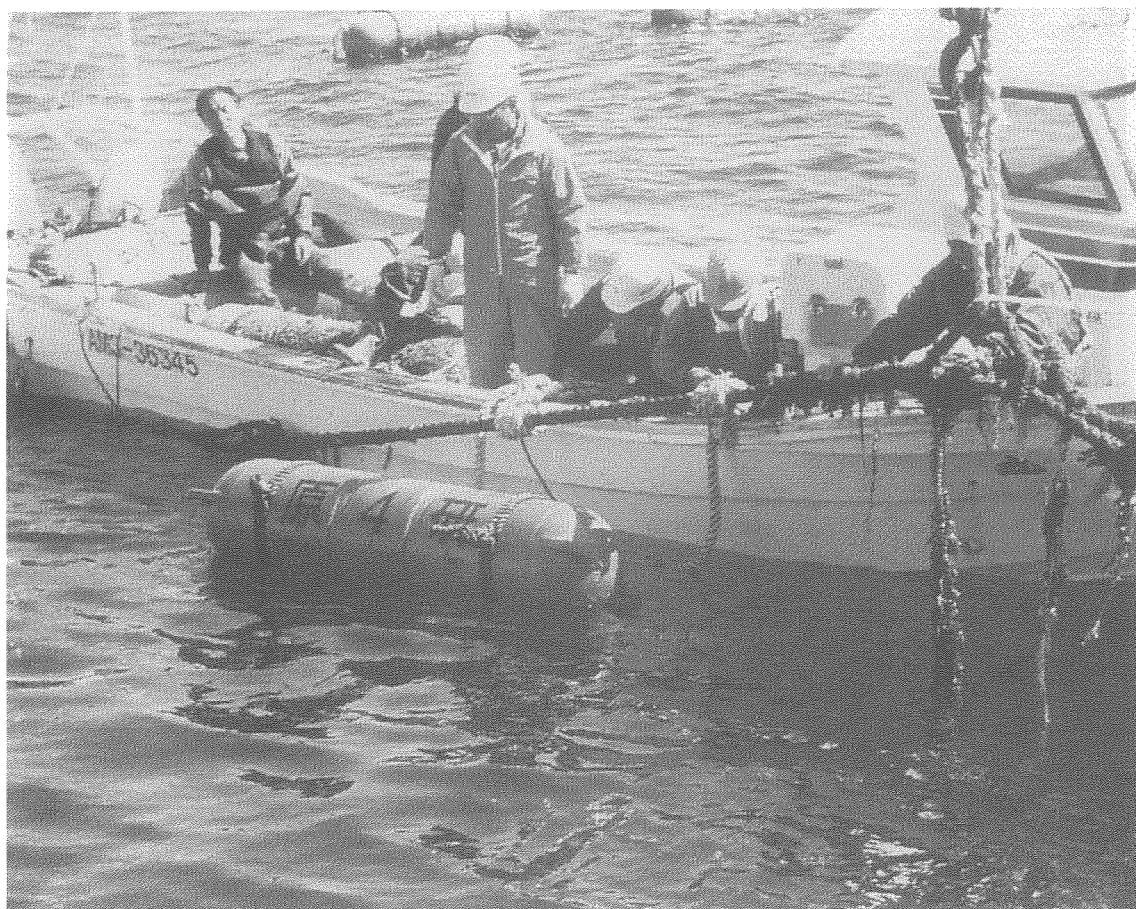


Fig. 21 クッションブイの投入

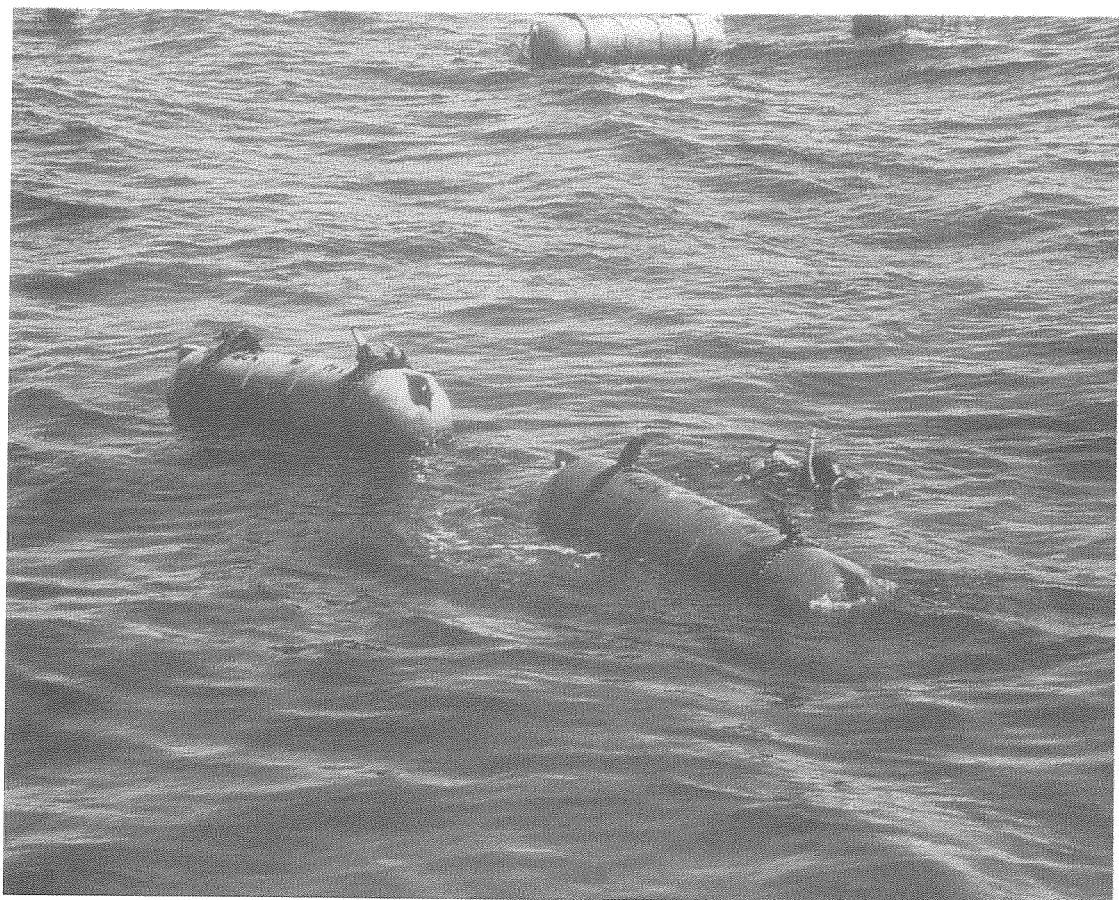


Fig. 22 取付ロープを交換したクッションブイ

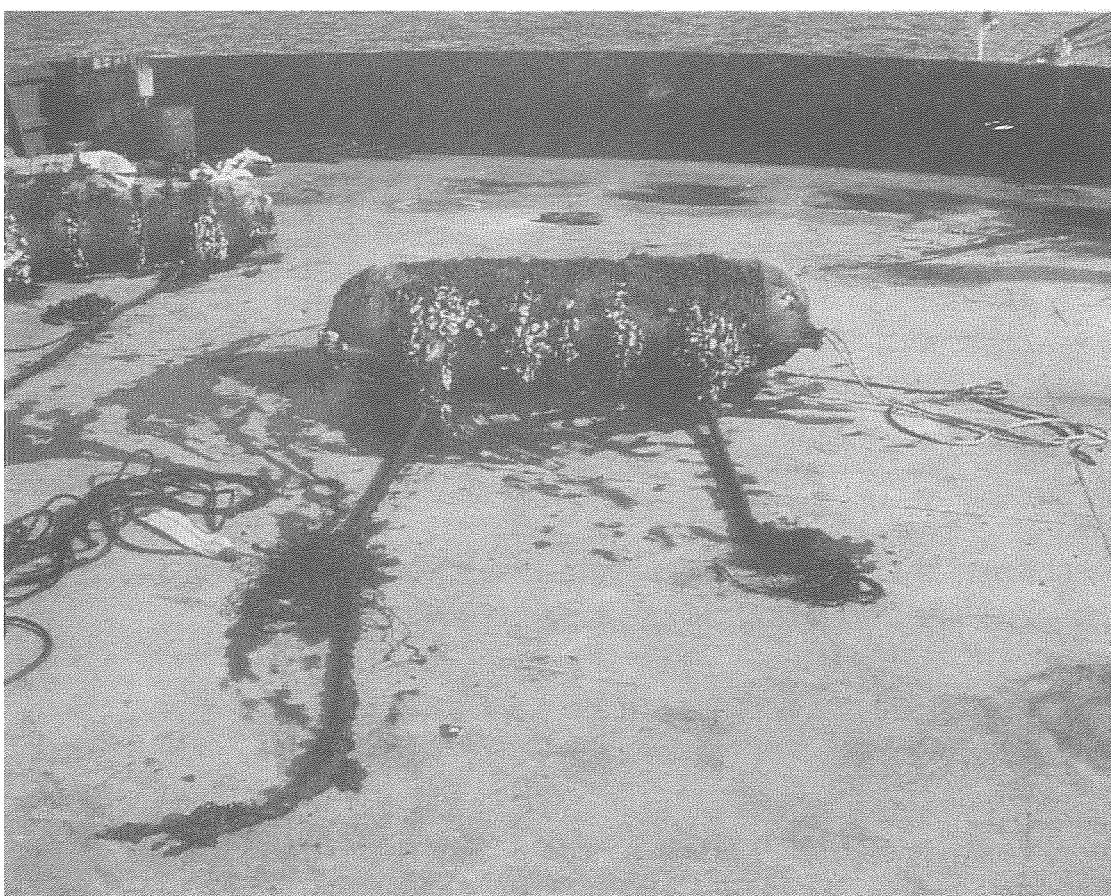
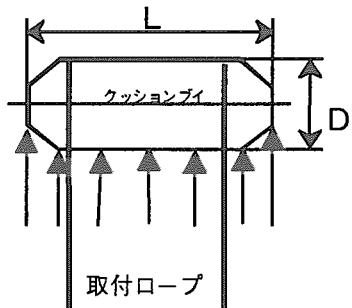


Fig. 23 クッションブイと切断した取付ロープ<sup>°</sup>

## &lt;参考資料&gt;

クッションブイ取付ロープへの引張作用の評価

クッションブイ取付ロープは、海面上のクッションブイ（以下ブイと称す）を水中から支持しているので、取付ロープに生じる荷重を求めるためには、図に示すようにブイに働く外力を求める必要がある。ブイに働く外力として、ブイ自身の浮力による力と、波によってブイに作用する波力および潮流による潮流力がある。



## 1 浮力

ブイの浮力は、ブイが完全に水中に没した時に最大となるが、ブイの自重があるので、1本の取付ロープに作用する最大荷重は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{取付ロープに作用する最大荷重} &= (232 - 39.5) / 2 \\ &= 96 \text{ kgf} \end{aligned}$$

したがって、取付ロープの引張り強度は、9.7 tf ゆえ、取付ロープの安全率 S F は、

$$\begin{aligned} \text{取付ロープの安全率, } S F &= 9.7 / 0.096 \\ &= 101 \end{aligned}$$

となり、ブイ浮力に対しては、十分に余裕のある強度を有している。

## 2 外力

## (1) 波力

ブイに作用する上下方向の波力は、波による圧力がブイの上下方向の投影面積全体に作用することで、次式で求めることが出来る。

$$F_v = \gamma H_w * D * L / 2$$

ここで、 $\gamma$  : 海水の比重 ( $=1.025 \text{ tf/m}^3$ )

$H_w$  : 設計波高 ( $=7.3 \text{ m}$ )

D : ブイの直径 ( $=0.45 \text{ m}$ )

L : ブイの長さ ( $=1.86 \text{ m}$ )

これより、設計波高が来た時にブイに作用する上下方向の波力は、

$$F_v = 3.1 \text{ tf}$$

となる。

一方、水平方向の波力は、次式で求められる。

$$F_H = \rho * C_M (\pi / 4) * D^2 * (H_w / 2) * (2\pi / T_w)^2 * L$$

ここで、 $\rho$ ：海水密度 ( $=0.1045 \text{ tf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ )

$C_M$ ：質量力係数 ( $=2$ )

$T_w$ ：設計周期 ( $=12\text{秒}$ )

より、

$$F_H = 0.062 \text{ tf}$$

となる。

## (2) 潮流力

ブイに作用する潮流力は、水平方向の投影面積全体に作用するとして、次式で求めることができます。

$$F_c = 0.5 \rho * D * L * C_d * V^2$$

ここで、 $C_d$ ：抵抗係数 ( $=0.74$ )

$V$ ：潮流速度 ( $=1.03\text{m/s}$ )

これより、ブイに作用する潮流力は、

$$F_c = 0.034 \text{ tf}$$

となる。

## (3) 取付ロープに作用する荷重

取付ロープに作用する荷重は、水平方向の外力と上下方向の外力のベクトル和で表されるので下式より求められる。

$$\text{取付ロープに作用する荷重} = \{ (\text{浮力} + \text{上下波力})^2 + (\text{潮流力} + \text{水平波力})^2 \}^{1/2}$$

ブイは2本の取付ロープで支持されているので、1本の取付ロープに働く荷重は、上記荷重の1/2となる。最終的に取付ロープに作用する最大荷重は、

取付ロープに作用する最大荷重

$$\begin{aligned} &= 1/2 \{(192.5 / 1000 + 3.1)^2 + (0.034 + 0.062)^2\}^{1/2} \\ &= 1.6 \text{tf} \end{aligned}$$

となる。したがって、現状の取付ロープの引張り強度は、9.7 tf<sup>ψ</sup>え、取付ロープの安全率SFは、

$$\begin{aligned} \text{安全率、SF} &= 9.7 / 1.6 \\ &= 6.1 \end{aligned}$$

となり、引張り方向については十分な強度を有している。

上記では、2本の取付ロープで、ブイに作用する外力を負担するとしたが、1本の取付ロープにすべての外力が作用すると考えると、取付ロープの荷重が2倍となるので、安全率は1/2となり、3.0となるが、1本の取付ロープでブイを支持した場合には、ブイは水平状態を保つことが出来ず、一端が上方に上がる事になり、波圧を受ける上下方向の投影面積が減少し、波力が小さくなる。最も投影面積が小さくなるのは、ブイが直立状態となった場合で、この時のブイの上下方向の投影面積は、ブイの断面積に等しくなるので、上下波力は次のようになる。

$$\begin{aligned} F &= \gamma H w * (\pi D^2 / 4) / 2 \\ &= 0.6 \text{tf} \end{aligned}$$

この場合には、ブイの全浮力と潮流力も1本の取付ロープに加算されるので、最終的に取付ロープに作用する荷重は、

$$\begin{aligned} \text{取付ロープに作用する最大荷重} &= \{(0.19 + 0.6)^2 + (0.034 + 0.062)^2\}^{1/2} \\ &= 0.8 \text{tf} \end{aligned}$$

となり、前述の場合の1/2以下の荷重となり、強度的には問題のない荷重となる。

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	$N/m^2$
工率、放射束	ジュール	J	$N \cdot m$
電気量、電荷	ワット	W	$J/s$
電位、電圧、起電力	クーロン	C	$A \cdot s$
静電容量	ボルト	V	$W/A$
電気抵抗	アーム	$\Omega$	$V/A$
コンダクタンス	ジーメンス	S	$A/V$
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリー	H	$Wb/A$
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	$lm/m^2$
放射能	ベクレル	Bq	$s^{-1}$
吸収線量	グレイ	Gy	$J/kg$
線量当量	シーベルト	Sv	$J/kg$

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、度量衡局1985年刊行による。ただし、および1uの値はCODATAの1986年値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘルも含まれているが日常の単位なこでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わしに限り表2のカテゴリーに分類される。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	$N (=10^5 \text{ dyn})$	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa ( $= 10 \text{ bar}$ )	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	$J (=10^7 \text{ erg})$	$\text{kgf} \cdot \text{m}$	$\text{kW} \cdot \text{h}$	cal (計量法)	Btu	$\text{ft} \cdot \text{lbf}$	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)	
								$= 4.1855 \text{ J}$ (15 °C)	$= 4.1868 \text{ J}$ (国際蒸発)
	1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{-18}$		
	9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{-19}$		
	$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$		
	4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{-19}$	仕事率 1 PS (仏馬力)	
	1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$	
	1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$	$= 735.499 \text{ W}$	
	$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1		

放射能	Bq	Ci	Gy	rad	照 射 線 量	
					1	$2.58 \times 10^{-4}$
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$	100	1		1
	$3.7 \times 10^{10}$	1	0.01	1		

吸 收 線 量	Gy	rad	照 射 線 量	C/kg	R	線 量 當 量	
						1	100
	1	1	1	$2.58 \times 10^{-4}$	1		

(86年12月26日現在)

