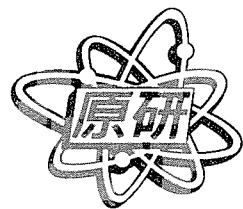


JAERI-Tech

2001-020



JP0150388



## 有用金属捕集材実海域試験海上装置の 製作と設置

2001年8月

長谷川 伸・瀬古 典明・田畠 幸吉\*・玉田 正男・片貝 秋雄  
笠井 昇・渡辺 勉・川端 幸哉\*・繩田 孝高・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。

入手の問合わせは、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）で複写による実費頒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, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

## 有用金属捕集材実海域試験海上装置の製作と設置

日本原子力研究所高崎研究所材料開発部

長谷川 伸・瀬古 典明・田畠 幸吉<sup>\*</sup>・玉田 正男・片貝 秋雄・笠井 昇・渡辺 勉  
川端 幸哉<sup>\*\*</sup>・繩田 孝高<sup>+</sup>・須郷 高信

(2001年2月5日受理)

高分子不織布を放射線で改質した捕集材の捕集性能を実海域評価し、実用化に向けた技術的課題の抽出を行うため、有用金属捕集材実海域試験海上装置を製作し、青森県むつ関根浜沖合に設置した。本装置は捕集材を30日間、年6回浸漬し、1年間で1kgのウランを海水から捕集可能な規模とした。捕集材は吸着床に充填し、生け簀（鋼管フレーム）から垂下する方式を採用した。装置の設計では、波高が大きくなると鋼管フレーム自体が没水するようにフロートの容量を小さくし、係留用のロープ（係留索）の張力を低減させ、安全性の向上を図った。鋼管フレームを係留するロープの安全性は、設置海域近傍の10年確率波である設計波4.3m、最大波高7.3mを用いて検討し、その設計に反映させた。設計波を用いたときのロープの安全率は、6.4、すべての最大外力が同時に作用した場合も安全率3.7以上であり、安全性に問題がないことを確認した。鋼管フレーム及び吸着床についても、係留に際して加わる力を計算し、充分な力学的強度を有する様に設計した。鋼管フレームを係留するための4個のアンカーの重量は40tとした。装置は係留索を結束したアンカーを設置後、鋼管フレームを固縛してその中心に吸着床を垂下し、設置した。特性試験として吸着床に捕集材を充填し20日間の係留を行った。その結果、試験中に鋼管フレーム、吸着床、各種ロープやその結束部に異常は生じなかった。

---

高崎研究所：〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町1233

+むつ事業所施設部

\*三井造船（株）

\*\*株式会社 芦原総合研究所

Construction and Installation of the Experimental Marine Equipment for Recovery of Rare Metals in  
Seawater

Shin HASEGAWA, Noriaki SEKO, Kokichi TABATA<sup>\*</sup>, Masao TAMADA, Akio KATAKAI,  
Noboru KASAI, Tsutomu WATANABE, Yukiya KAWABATA<sup>\*\*</sup>, Yoshitaka NAWATA<sup>+</sup> and  
Takanobu SUGO

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

(Received February 5, 2001)

An experimental marine equipment was designed and constructed to evaluate a fibrous polymer adsorbent prepared with radiation-processing and to extract the technical tasks in the step to the utilization of the rare metals recovery in seawater. The equipment was set in the offing of Mutsu-Sekine in Aomori prefecture. The scale of this equipment is capable of recovering 1 kg uranium in seawater by dipping the adsorbents by 6 times into the sea for 30 days per one dipping. The adsorbents, packed in metal wire cages, were hung down from a fish preserve-shaped float (floating steel frame). This float capacity was designed that the floating steel frame was sunk when wave height becomes high in order to reduce the tension of the ropes. The safety of the rope was evaluated by using design wave height 4.3 m and maximum wave height 7.3 m derived from 10 years' probability wave height. The safety factors obtained were 6.4 for the design wave height and 3.7 for the maximum wave height. The floating steel frame and the adsorbent cage were designed to maintain the mechanical strength under the maximum wave height. The weight of four anchor blocks are 40 tons enough to moor the floating steel frame. In the setting of the marine equipment, the floating steel frame connected with the anchor blocks by rope was put down on the bottom of the sea. The adsorbent cage was hung in the center of the floating steel frame. The characteristic test was carried out by packing adsorbents into adsorbent cage and dipping them for 20 days into the sea. There was no serious problem in the floating steel frame, the adsorbent cage, and the ropes and their knots.

Keywords: Radiation-processing, Seawater, Rare Metals, Uranium, Fibrous Polymer Adsorbent, Safety, Designed and Constructed.

---

+Department of Facilities, Mutsu Establishment

\* Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd.

\*\*Ebara Research Co., Ltd.

## 目次

1 緒言	1
1.1 基本計画	1
1.1.1 経緯	1
1.1.2 目的	1
1.1.3 期間	1
1.1.4 場所	1
1.1.5 体制	2
1.2 基本工程	2
1.3 試験設備	2
1.3.1 条件	2
1.3.2 規模	2
2 実海域試験装置の仕様	4
2.1 契約	4
2.2 全体スケジュール	4
2.3 装置設計	4
2.3.1 概要	4
2.3.2 条件	4
2.3.3 設計波の検討	5
2.3.4 仕様	9
2.3.5 安全性の検討	12
2.3.6 水槽試験	23
2.3.7 実験装置監視設備	30
2.4 製作・設置	32
2.4.1 製作	32
2.4.2 作業スケジュール	32
2.4.3 アンカーブロックの現地製作	32
2.4.4 設置作業	32
2.5 試験休止状態	35

3まとめ	36
3.1 設計仕様条件について	36
3.2 水槽試験について	36
3.3 製作・設置について	36
謝辞	37
参考文献	37

## Content

1. Basic Plan of Adsorbent for Recovery of Significant Metals from Seawater. . . . .	1
1.1 Experiment Plan . . . . .	1
1.1.1 Introduction . . . . .	1
1.1.2 Objects . . . . .	1
1.1.3 Period . . . . .	1
1.1.4 Place . . . . .	1
1.1.5 System . . . . .	2
1.2 Basic Process . . . . .	2
1.3 Scale of the Test Facility . . . . .	2
1.3.1 Condition for Determination . . . . .	2
1.3.2 Scale of the Test Facility . . . . .	2
2. Test Equipment in the Real Sea Area . . . . .	4
2.1 Contracts . . . . .	4
2.2 Whole Schedule . . . . .	4
2.3 Design . . . . .	4
2.3.1 Outline . . . . .	4
2.3.2 Condition for Design . . . . .	4
2.3.3 Examination of the Design Wave . . . . .	5
2.3.4 Equipment Specification . . . . .	9
2.3.5 Examination of the Safety . . . . .	12
2.3.6 Test in a Tank . . . . .	23
2.3.7 Monitoring Facility . . . . .	30
2.4 Production and Installation . . . . .	32
2.4.1 Production . . . . .	32
2.4.2 Work Schedule . . . . .	32
2.4.3 Site Built of the Anchor Blocks . . . . .	32
2.4.4 Installation Operation . . . . .	32
2.5 Resting State . . . . .	35
3 Conclusion . . . . .	36

3.1 Design . . . . .	36
3.2 Test in a Tank . . . . .	36
3.3 Production and Installation . . . . .	36
 Acknowledgements . . . . .	 37
 Reference . . . . .	 37

## 1 緒言

### 1.1 基本計画

#### 1.1.1 経緯

高崎研究所材料開発部照射利用開発室では、海水中に極低濃度で溶けている有用希少金属を効率よく吸着捕集できる新しい機能材料（捕集材料）を開発し、ウランやバナジウム等の希少金属を高効率で捕集することに成功した。この素材の開発は、放射線の高分子への照射効果を化学反応に利用した新しい技術である。この合成法は、放射線グラフト重合と呼び、フェルト状のポリエチレン繊維（不織布）にガンマ線や電子線を照射して新たな官能基を導入する方法である。この技術の特徴は、グラフト重合により導入した官能基により金属イオンを選択的に捕集する機能を付与することで多種類のイオン混合液から目的の金属イオンを選択的に捕集することができる点である。そこで本捕集材の実海域での適応性を調査するため、青森県むつ関根浜 7km 沖合に直径 40cm の吸着容器を取り付けた係留型の小型試験装置を設置し、自然海流及び波力を利用した捕集試験を行った結果、ポンプ動力を使うこと無く、20 日間で捕集材 1kg 当たり 1g、60 日間で約 2g のウランを捕集した。捕集材中のウラン濃度は 0.1–0.2% となり、ウラン鉱石中の濃度と同程度になった。これを酸性液で処理し、吸着された希少金属を分離回収した。この分離回収液をさらに精製して、高純度の重ウラン酸アンモニウム（イエローケーキ）16g と酸化バナジウム粉末 20g を回収できた。このことから放射線グラフト重合技術を応用して合成した海水中用金属捕集材をステンレス製の籠に充填し、海洋に係留するだけで、ウランや希少資源を効率的に捕集できることが実証された。そこで平成 11 年度から 3 年計画で、捕集システムの技術的課題の抽出と実用化に必要なデータを蓄積するため、3 年間で 1kg 程度の有用金属を捕集できる規模の実海域試験装置の設計製作を行った。本報告は、実海域試験装置の設計仕様の検討及び設計・製作から設置に至るまでの記録をまとめたものである。

#### 1.1.2 目的

放射線グラフト重合技術を応用して合成した捕集材を小型試験装置を使用して海洋に係留した結果、自然海流及び波力を利用して海水中の希少金属を効率的に捕集することが実証された。この結果を受け、3 年間で 1kg 程度の有用金属を捕集できる規模で試験を行い、捕集システムの技術的課題を抽出し実用化の可能性を評価するため、実海域試験装置の設計と製作を行い、実海域に設置した。

#### 1.1.3 期間 Table 1.1 に平成 10 年度から平成 13 年度までの年度別試験計画を示す。

#### 1.1.4 場所

海上設備	: 原研むつ事業所* むつ関根浜沖約 7km (旧) 遠隔錨地に係留 (緯度 : N41° 24.4' , 経度 : E141° 18.0' )
------	--

---

\*〒035-0022 青森県むつ市関根北関根 400

陸上設備（分別溶離試験装置）

：むつ事業所 機材・排水管理棟に設置（管理区域外）

### 1.1.5 体制

試験主体：高崎研究所材料開発部

試験の実施：高崎研究所むつ駐在を設置し設備の建設及び試験を実施する。  
実施に際しては、むつ事業所の承認及び協力を得る。

## 1.2 基本工程

捕集材の合成から捕集金属精製までの基本プロセスを Scheme 1 に示す。

### 1.3 試験設備

設備は、捕集工程、分別溶離工程ともバッチ方式とし、規模は、1回の処理量がウラン 300g を超えないことを前提条件として決定した。最大規模の1回の捕集量は、ウラン 300g 以下とした。通常規模の1回の捕集量は、分別溶離工程内で捕集 2 回分が滞留する場合を考慮して、ウラン 150g 以下とした。

#### 1.3.1 条件

- (1) ウラン捕集量 約 1kg／年
- (2) 年間試験回数 30 日 × 6 回／年
- (3) ウラン吸着容量 1.25g-U/kg・捕集材（浸漬日数 30 日）(Fig. 1.1)  
捕集材目付重量 150g/m<sup>2</sup> の場合 0.19g-U/m<sup>2</sup>・捕集材

#### (4) 捕集材諸元

- |              |                                 |
|--------------|---------------------------------|
| 1) 捕集材寸法     | 290×160×1mm                     |
| 2) 面積        | 0.045m <sup>2</sup> ・枚・捕集材（片面）  |
| 3) 捕集材カセット寸法 | 290×295×160mm                   |
| 4) 捕集材枚数     | 2 枚 × 58 段（2 枚重ね）= 116 枚 / カセット |
| 5) 捕集材面積     | 5.22 m <sup>2</sup> / カセット      |
| 6) 捕集材重量     | 783g / カセット                     |

- (5) 1 カセット当たりのウラン吸着量 1.25g-U/kg・捕集材 × 783g / カセット = 0.98g / カセット（よって以後の計算は 1g / カセットを用いた。）

#### 1.3.2 規模

##### (1) 捕集工程

捕集材カセットを充填する吸着床は、4m 規模と 2m 規模を準備した。吸着床の形状は、捕集材カセットがほぼ正方形であることから、充填密度の高い角形（正方形）とした。各々の構成は、次の通り。（Table 1.2）

4m 規模：最大規模の試験に使用する。

吸着床（以下、大型吸着床）3床

内2床には捕集材カセットを充填した小型吸着床各4床を組み込む。

内1床には計測用機器を収納した小型吸着床を組み込む。

捕集材カセットは合計288個

2m 規模：通常規模の試験に使用する。

吸着床（以下、小型吸着床）5床

内4床には捕集材カセットを各 $6 \times 6 = 36$ 個、合計144個充填する。

内1床には計測用機器を収納する。

(2) 分別溶離工程

前処理

捕集材カセット144個を一度に受け入れ、処理した後、72個を1ユニット（溶離ユニットという専用容器に捕集材カセットを $3 \times 3 \times 8$ 段充填する。）として分別溶離工程に送る。

溶離及びアルカリ処理 1溶離ユニット毎にバッチ処理を行い、1回の捕集試験で2バッチ処理する。

有用金属固定

上記2バッチ分の溶離液中の有用金属を固定し、精製工場に送る。

上記の処理を、約10日／バッチ=約20日で行える設備規模とした。

## 2 実海域試験装置の仕様

### 2.1 契約

- ・発注先 株式会社三井造船昭島研究所
- ・契約年月日 平成 11 年 3 月 31 日
- ・納期 平成 11 年 9 月 30 日

### 2.2 全体スケジュール

実海域試験装置の設計・製作・設置に関する全体スケジュールを Table 2.1 に示す。

### 2.3 装置設計

#### 2.3.1 概要

本装置は、捕集材を充填した大型吸着床、小型吸着床を海水中につり下げる鋼管フレーム及びモニター用機器で構成される。

大型吸着床は 3 床で、各床は 4 個の小型吸着床から成り、各小型吸着床に 36 個の捕集材カセットが充填される。鋼管フレームは生け簀方式で、アンカー、係留索により実海域の定位置海面に係留される。

#### 2.3.2 条件

##### (1) 基本諸元

装置形態 :	生け簀方式
大型吸着床 :	4.5m × 4.5m × 0.57m
吸着床数 :	3

床装置イメージを Fig. 2.1 及び Fig. 2.2 に示す。

##### (2) 設計基準

###### (2.1) 海域条件

- ・設置海域 : むつ市根岸沖合約 7km (北緯 41°24.4'、東経 141°18.0')
- ・水深 : 基準水深約 50m
- ・海底土質 : 砂地、ほぼ平坦

###### (2.2) 気象、海象条件

- ・波浪 : 有義波高 4.3m

ここで有義波高とは、波 100 個のうち高い方 1/3 の波の高さの平均を言う。

- ・最大波高 7.3m
- ・波周期 12 秒

(決定根拠は 2.3.3 設計波の検討で述べる。)

- ・潮流速 : 2 ノット (103cm/sec)
- ・風速 : 30m/sec

・潮位 : 1m

### (2.3) 運用基準

- ・捕集材回収／交換作業は静穏な海象時のみ行い、既存のクレーン船等により実施する。
- ・冬期及び最大級の台風等荒天が予想される時には、吸着床および鋼管フレームを回収し、運用を休止する。

#### 2.3.3 設計波の検討

設計波を検討するために波浪データより、任意の再現期間の波浪を算定した。

計算に用いたデータは、次の2種類である。

##### (1) 日本気象協会波浪推算データ<sup>1)</sup>

S26 - S55 (30年間), 49 ケース

推算位置：関根浜 10km 弱沖合

方向別：NE, NNE, N, NNW (4種類)

高波高順：all directions

##### (2) 新定係港準設記録計測データ<sup>2)</sup>

S61.4 - S62.3 (1年間), 20 データ

計測装置：西防波堤より北東方向的 500m の地点

all season (1月 - 12月)

summer (3月 - 10月)

確率波高的算定は、港湾施設の技術上の基準、同解説<sup>3)</sup>の方法に従って行った。算定方法を次に示す。

Gumbel 分布と Weibul 分布を仮定して統計処理し、相関関係に基づいて設計波を推定する。新定係港建設記録 計測データ (all season) のデータを用いて以下に具体的な手順を示す。

まず、各実測波高に対する未超過確率を次式で求める。

$$P(H \leq x_{m,n}) = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta}$$

$m$  : 順位

$N$  : 総データ数

$\alpha, \beta$  : 定数

$x_{m,n}$  : 大きいほうから  $m$  番目の波高

実測波高に対する未超過確率定数  $\alpha, \beta$  を Table 2.2 に示す。

ここで、Weibul 分布はパラメータの異なる 7 種のものを考える。

未超過確率  $P$  を次の変数  $r_v$  に変換する。

$$\text{Gumbel 分布} : r_v = -\ln[-\ln\{P(H \leq x)\}]$$

$$\text{Weibul 分布} : r_v = \sqrt[k]{-\ln\{1 - p(H \leq x)\}}$$

波高 ( $x$ ) と  $r_v$  は、次の直線関係となる。

$$x = ar_v + b$$

回帰直線係数  $a, b$  および相関係数  $r$  では次のように求められる。

$$\text{回帰直線係数} : a = \frac{Sr_v x_{m,n}}{Sr_v^2}$$

$$\text{回帰直線係数} : b = \frac{\sum x_{m,n}}{N} - a \frac{\sum r_v}{N}$$

$$\text{相関係数} : r = \frac{Sr_v x_{m,n}}{Sr_v \cdot Sx_{m,n}}$$

$$r_v \text{ の標準偏差} : Sr_v = \sqrt{\frac{\sum r_v^2}{N} - \left(\frac{\sum r_v}{N}\right)^2}$$

$$x_{m,n} \text{ の標準偏差} : Sx_{m,n} = \sqrt{\frac{\sum (x_{m,n})^2}{N} - \left(\frac{\sum x_{m,n}}{N}\right)^2}$$

$$r_v \text{ と } x_{m,n} \text{ の共分散} : Sr_v x_{m,n} = \frac{\sum r_v \cdot x_{m,n}}{N} - \frac{\sum r_v}{N} \cdot \frac{\sum x_{m,n}}{N}$$

各分布毎に求められた相関係数 ( $r$ ) が、最も 1 に近い分布が、原データを最も良く表していることになる。

したがって、 $r$  が最も 1 に近い分布を用いて、任意の再現期間に対する波高を算定する。

波高の再現期間を  $R_p$  として、未超過確率を次式で求める。その後、各分布に対する  $r_v$  を各分布毎に定義された式より求める。

$$P(H \leq x) = 1 - \frac{K}{NR_p}$$

N : 総データ数

K : 波浪資料の有効継続期間

以上のデータより再現期間  $R_p$  年の波高 (x) を推定することができる。

$$x = ar_v + b$$

次に周期を推定する。まず、波高 H と周期 T は日本気象協会波浪推算データ<sup>1)</sup>を用いて求めた結果、波高と周期の標準偏差および両者の共分散は、それぞれ次のように求められる。

$$S_H = \sqrt{\frac{\sum H^2}{N} - \left( \frac{\sum H}{N} \right)^2}$$

$$S_T = \sqrt{\frac{\sum T^2}{N} - \left( \frac{\sum T}{N} \right)^2}$$

$$S_{HT} = \frac{\sum HT}{N} - \frac{\sum H}{N} \cdot \frac{\sum T}{N}$$

$$A = \frac{S_{HT}}{S_H^2}$$

$$B = \frac{\sum T}{N} - a \frac{\sum H}{N}$$

したがって、再現期間  $R_p$  年の波高 (x) に対する周期は、次式より推定することができる。

$$T = Ax + B$$

以上の結果をまとめると、このデータの場合  $r$  の値が 1 に最も近い Table 2.2 中の  $k=0.75$  の Weibul 分布の推定値を用いることが好ましい。

上記の方法で求めた結果の内、各ケースにおいて最も相関の強い結果をまとめると Table 2.3 のようになり、Fig. 2.3 に図示する。これより、気象協会のデータでは NNE のケースが最も波高が高く、計測データに基づいた all season の結果も高い波高となっている。計測データから捕集試験を行わない冬期のデータ（11 月 - 3 月）を除いた場合（summer）が最も波高が低くなっている。

気象協会のデータは、関根浜の前面 10km 弱冲合の地点でのデータであるので、今回の試験地点に近く、水深変化による波高変形は考えなくても良いが、計測データは西防波堤の北東約 500m の水深 16m での計測値であるため、波高の補正が必要となる。試験地点の波高（冲合波高）と計測地点の波高との関係は、次のようになる。

$$\text{計測地点の波高} = \text{冲合波高} \times \text{屈折係数}$$

水深の変化に伴う屈折係数は、波方向によって変化する。新定係港の西防波堤建設時に用いられた屈折係数を Table 2.4 に示す。<sup>4)</sup>

20 個の計測データを方向別に分類し、各方向毎に上記の屈折係数を用いて、Table 2.5 に示すように屈折係数の平均値を求めると、次のようになる。

なお、ENE については、NE と同値とし、方向が不明のデータについては、屈折係数が、小さいほど冲合波高が高くなるので、安全側として、最も屈折係数の小さい 0.83 を使用した。

屈折係数を用いて補正した計測データ（All season）による波高と、最も波高の高かった気象協会の NNE のケースを合わせて、Table 2.6 および Fig. 2.4 に示す。これより、計測データを補正して求めた波高は気象協会のケースよりも高くなる場合がある。また、計測データより求めた 10 年確率波（4m）は、Table 2.7 に示した西防波堤施工時の設計波（4.3m）よりも小さくなっている。

今回の実験は、Table 2.3 にも示されたように、試験を行わない 11 - 3 月の期間の波高は、それほど大きくはなく、また試験期間も 3 力年と短いことより、設計波として 10 年程度の確率波を想定することが妥当と考えられる。ただし、安全を考えて、Table 2.6 の計測データから算定した 10 年確率波（4m）よりも大きい波高となる西防波堤施工時の設計波（4.3m）を適用することとする。

以上の議論は、一種の平均波高を表す有義波高についてであったが、波群の中で最も大きな波高を表す最大波高とは、一般に次の関係がある。

$$\text{最大波高} = (1.6 \sim 2.0) \times \text{有義波高}$$

新定係港の西防波堤建設時には、施工時：1.7、完成時：1.75 の値が用いられた<sup>4)</sup>。安全のために完成時の値を用いて求めた最大波高を、Table 2.8、Fig. 2.4 に示す。これより、安全側となる完成時の大きな係数（1.75）を用いても、有義波高と同様、最大波高についてても、Table 2.8 に示した 10 年確率波（7.0m）よりも西防波堤施工時の設計最大波高（7.3m）の方が大きくなる。従って、有義波高と同様、最大波高についても西防波堤施工時の

設計最大波高を適用した方が安全側となる。

### 2.3.4 仕様

実海域試験装置は、約 8m 角の鋼管フレームを実海域に係留し、その直下に捕集材を充填した大型吸着床をロープで吊り下げる。Fig. 2.5, Fig. 2.6 及び Fig. 2.7 に装置の全体図を示す。

#### (1) 吸着床

##### (1.1) 捕集材

下記の条件にて製造し、捕集材カセットに組み込む。尚、捕集材及びカセットの製造は三井造船昭島研究所が荏原製作所に外注した。

原反素材：ポリプロピレン・ポリエチレン系不織布（寸法：幅 330mm、長さ 110m）

素材目付重量：約 50g/m<sup>2</sup>

照射線量：150 - 200kGy（窒素雰囲気）

反応様式：放射線グラフト重合法

反応液組成：AN/MAA/DMSO=75/15/10 wt%、

二次反応：アミドキシム化反応、77°C、30 分（7% ヒドロキシルアミン）

反応後目付：約 150g/m<sup>2</sup>

##### (1.2) 捕集材カセット

上記捕集材を下記の条件でカセット化する。Photo 1 にカセットの構成及びカセットの写真、Fig. 2.8 にカセットの組立模式図、Fig. 2.9 に組み立て詳細図を示す。

- ・捕集材寸法 : 160W × 290L × 1mmT/枚  
(=0.045m<sup>2</sup>、穴の面積は含まず重量約 6.8g/枚)
- ・積層枚数 : 2 枚重ね × 58 段 = 116 枚/1 カセット
- ・総膜面積 : 0.16m × 0.29m × 116 面 = 5.22m<sup>2</sup>/1 カセット
- ・重量約 : 0.8kg/ カセット
- ・カセット外寸 : 290W × 295L × 160mmT
- ・カセット重量 : 2.8kg (空中重量)、5.2kg (湿潤重量)
- ・個数 : 600 個

##### (1.3) 小型吸着床

小型吸着床は、カセットを充填し、大型吸着床に配置する。Fig. 2.10 に概略を Fig. 2.11 に詳細図を示す。

- ・寸法 : 1.9m × 1.9m × 0.23m (空中重量: 約 207kg、水中重量: 約 180kg)
- ・カセット充填数 : 36 個/1 小型吸着床
- ・製作個数 : 12 式

##### (1.4) 大型吸着床

垂下ロープ（合成繊維索）に固縛し、鋼管フレームから海中に吊下げる。Fig. 2.12 に概略を Fig. 2.13 に詳細図を示す。

- ・寸法 : 4.5m × 4.5m × 0.57m (空中重量: 約 870kg、水中重量: 約 758kg)  
内部には、小型吸着床が 4 セット配置できるものとし、各小型吸着床には、捕集材を充填したカセットを充填する。但し、小型吸着床のみを 5 個海中に吊り下げることも可能な構造とする。
- ・材質 : ステンレス製 (SUS316)
- ・製作個数 : 3 式

## (2) 鋼管フレーム

形式は、生け簾方式とし、海面上に浮遊する浮体（鋼管フレーム）と係留索およびアンカー等より構成される。なお、係留索は海面上に露出せず、係留索の設定水深は、水面下約 2.5m とし、小型船舶の接触が可能とする。Fig. 2.14 に概略を示す。

- ・鋼管フレーム：角型鋼管構造（ウレタン塗装）、ボルト接合  
長さ × 幅 × 深さ × 係留時吃水 = 8m × 8m × 1.3m × 0.6m

- ・フロート（大型吸着床を吊り下げた場合）

: CT-75K-400 ( $\phi 0.74\text{m} \times 1.2\text{m} \times 400\text{kg}$  型) × 16 個  
UBE-250 ( $\phi 0.6\text{m} \times 1.1\text{m} \times 250\text{kg}$  型) × 1 個

Fig. 2.15 に鋼管フレーム及びフロートの取り付け詳細図を示す。

- ・フロート（小型吸着床を吊り下げた場合）

: CT-75K-400 ( $\phi 0.74\text{m} \times 1.2\text{m} \times 400\text{kg}$  型) × 9 個  
UBE-250 ( $\phi 0.6\text{m} \times 1.1\text{m} \times 250\text{kg}$  型) × 3 個

Fig. 2.16 に鋼管フレーム及びフロートの取り付け詳細図を示す。

- ・クッションブイ : CT-45K-8B ( $\phi 0.45\text{m} \times 1.9\text{m} \times 232\text{kg}$  型) × 8 個

- ・係留索 : 50mm  $\phi$  マリンタフロープ（ポリプロピレン系）× 160m × 4 セット、引張り強さ 31.2ton、初期張力約 1ton

- ・アンカー : コンクリート製 40ton 型 × 4 基

Fig. 2.17 にアンカーブロック図を示す。

- ・標識灯

: 浮体に、簡易標識灯を設置する。

Fig. 2.18 に標識灯の外形図を示す。

## (3) 標識灯

## (3.1) 標識灯（捕集試験実施時）

捕集試験実施時は、下記仕様の標識灯を鋼管フレーム上に設置する。

- ・形式：E-10-85型 ((株)緑星社製)
- ・全長：1.58m
- ・全重量：14kg
- ・主要材料：耐食アルミニウム合金
- ・灯器部

レンズ	：φ85mm フレネルレンズ
光源	：12V 3W
灯質	：4秒1閃光
灯色	：黄
測定光度	：24cd
同上光達距離	：7.8km
告示光度	：10cd
同上光達距離	：2.5km
電源・電池	：パック式乾電池 (KAN-100) 2個
電池寿命	：約180日（周囲温度20°C1日12時間点灯の場合）

## (3.2) 標識灯（捕集試験休止時）

捕集試験休止時は、鋼管フレームを撤去した後に、枠ロープから下記仕様のフロート付き標識灯を係留・設置する。

形式	：20-P型 ((株)ゼニライトブイ製)
全長	：2.92m
灯高	：約2.0m
全重量	：25kg
全浮力	：約550N
浮体径	：0.5m
主要材料	：耐食アルミニウム合金

フロート部 : 硬質ポリエチレン、ポリウレタンフォーム充填

## 灯器部

レンズ	：φ85mm フレネルレンズ
光源	：6V 1.5W
灯質	：4秒1閃光
灯色	：黄
光度（測定光度）	：12cd

同上光達距離	: 6.0km
電源・電池	: 単一アルカリ乾電池 (LR-20) 4直列4並16個
電池寿命	: 約105日(周囲温度20°C1日12時間点灯の場合)

#### (4) モニター用機器

係留索、吸着床等海中部分の状態の確認及び各種の波浪データを的確に把握するため、下記の機器を設置する。

##### (4.1) 水中モニター装置

- ・使用深度：最大60m
  - ・空中重量：約9kg
  - ・速力：前進最大約2ノット、潜降最大約2ノット
  - ・VTR、モニターラック、ビーケル収納箱、電源装置収納箱、発電機付き
- Fig. 2.19 に装置構成図、Fig. 2.20 に水中モニター装置本体図を示す。

##### (4.2) 電磁流速計

- ・メモリーパック式：最大記録可能期間約90日(1時間毎1分計測モード時)
- ・測定範囲 : 流速0~250cm/s (精度±2%)
- ・水温 : -5~40°C (精度却±0.05°C)
- ・耐圧 : 800m
- ・センサー : 流速 2軸電磁流速センサー  
水温 白金測温抵抗体
- ・電源 : リチウム電池

Fig. 2.21 に装置外形図、Photo 2 に据え付け写真を示す。

##### (4.3) 超音波式波高計

- ・直記式：観測日数約120日(2時間毎10分計測モード時)
- ・測定範囲：0~20m (精度±1%FS)
- ・設置範囲：2~50m
- ・センサー：超音波センサー
- ・電源：リチウム電池

Fig. 2.22 に装置外形図、Photo 3 に据え付け写真を示す。

#### 2.3.5 安全性の検討

##### (1) 検討概要

実海域試験装置の係留索、大型吸着床および小型吸着床を吊り下げる垂下ロープの強度やアンカーの重量お

および浮体や吸着床の強度について安全性の検討を行い、強度的に十分な余裕があることを確認した。また、設計条件に対する安全性の検討の他に、波高が 10m に対する場合についても行った。

浮遊式海洋構造物の係留装置の係留索あるいは係留鎖に対しては、通常安全率を 3 とする。本検討で係留索及び各種ロープに対しての水槽試験結果に基づく算定では、設計波に対し安全率が 6.4 以上であり、その上、すべての最大外力が同時に作用したかなり安全側の計算の場合も安全率が 3.7 以上であることから、十分に安全は確保されると考えられる。また、アンカーブロックの重量に対する検討結果においても、十分余裕があり、滑動することはないという結果が得られた。

鋼管フレーム及び吸着床本体は十分に強度を有しており、十分に安全であるとの結果が得られた。鋼管フレームの移動量についても、設計条件に対して、試験結果に基づいて算定した場合には、5.1m 以内となり、十分な安全率を見た計算の場合でも 9.8m 以内にはいるため、安全上の問題は生じないと考えられる。

## (2) 係留システムの検討

### (2.1) 係留索の張力

係留索の張力は、計算や水槽試験結果より算定した。

計算は静的考えに基づき、波、風、潮流によって装置に働く力の最大値が同時に作用するとした。実際には、波力が最大の時には、鋼管フレームは没水し、風圧力は働くないので、同時に作用するとして計算すると安全側の結果となる。また、実際の現象で起こる装置全体の動揺の動的影響は考慮せず、鋼管フレーム、フロートおよび吸着床に働くこれらの外力すべてを、係留索で支えるとしているので、計算値はかなり安全側の推定となるが、一つの目安として行った。

水槽試験結果から算定した場合には、風や潮流による外力の影響は含まれていないが、装置全体の動的影響が含まれているので、計算に比べて、実際の現象により近い結果が得られる。

#### (2.1.1) 計算による係留索の張力の算定

係留索の最大張力は、風、波、潮流による水平外力および上下外力の最大値が同時に作用したとして、これらの外力の総和を 1 本のロープで支えるとして計算した。

#### 水平外力

$$\text{風圧力} \quad F_w = \frac{\gamma}{2g} C_{DW} A_w V_w^2$$

$$\text{潮流力} \quad F_c = \frac{\gamma}{2g} C_D A V_c^2$$

$$\text{水平波力} \quad F_h = F_d + F_m$$

$$F_d = \frac{\gamma}{2g} C_d A u |u| \quad (\text{抗力})$$

$$F_m = \frac{\gamma}{g} C_m V \dot{u} \quad (\text{質量力})$$

上下外力

上下波力  $F_v = \text{装置全体の余剰浮力}$   
 (装置全体が全没した時に、余剰浮力が最大となる)

ここで、 $\gamma_A$  : 空気の比重 ( $=1.1 \times 10 \text{ton/m}^3$ )

$\gamma$	: 海水の比重 ( $=1.025 \text{ton/m}^3$ )
$C_{DW}$	: 風圧力に対する抗力係数
$C_D$	: 潮流力および波力に対する抗力係数
$A_W$	: 構造物の風速方向の投影面積
$A$	: 構造物の流れ方向の投影面積
$V_w$	: 設計最大風速 ( $=30 \text{m/sec}$ )
$V_c$	: 設計最大潮流速 ( $=2 \text{km}=1 \text{m/sec}$ )
$C_M$	: 質量力係数
$V$	: 構造物の体積
$u$	: 波の水平方向の水粒子速度
$\dot{u}$	: 波の水平方向の水粒子加速度

なお、抗力係数、質量力係数は、資料より定めた。<sup>5)</sup>

また、以上の外力の他に波漂流力があるが、フロートのサイズに比べて、波長が長く、フロートによる波の反射率はほとんど0であり、従って反射率に比例する波漂流力は無視し得る事を確認した。  
 波の水粒子速度および加速度の水平成分は次式で求めた。

$$u = \pi \frac{H}{T} \frac{\cosh\{2\pi(h-z)/L\}}{\sinh\{2\pi h/L\}}$$

$$\dot{u} = 2\pi^2 \frac{H}{T^2} \frac{\cosh\{2\pi(h-z)/L\}}{\sinh\{2\pi h/L\}}$$

ここで、

$H$	: 設計波の最大波高
$T$	: 設計波の周期 ( $=12 \text{秒}$ )
$L$	: 設計波の波長 ( $=204.7 \text{m}$ )
$h$	: 水深 ( $=50 \text{mm}$ )
$z$	: 構造物の水深 ( $=0 \text{m}$ (フロート)、 $20 \text{m}$ (吸着床))

大型吸着床を吊り下げる場合

上式により計算した大型吸着床を吊り下げる場合の風圧力、潮流力および水平波力を、Table 2.9, 2.10 に示す。上下方向の波力は、最大波高において装置全体が水没することより、水没による浮力増加重（余剰浮力）より求めた。余剰浮力は、鋼管フレーム、フロートおよび吸着床の全浮力と全重量の差に等しく、大型吸着床を吊り下げる場合は、鋼管フレームに大型吸着床を 3 個吊り下げるが、その内の 2 個には、それぞれ小型吸着床が 4 個ずつ搭載されるので、吸着床の総数は、大型吸着床×3 個+小型吸着床×8 個となる。従って、余剰浮力は、次のようになる。

フロートの全浮力	:	$400\text{kg} \times 16 \text{ 個} + 250\text{kg} \times 1 \text{ 個}$	=	6650 kg
フロートの重量	:	$32\text{kg} \times 16 \text{ 個} + 19\text{kg} \times 1 \text{ 個}$	=	▲531 kg
鋼管フレームの浮力	:			540kg
鋼管フレームの重量（標識灯含む）：				▲1590kg
大型吸着床の吊下げ重量	=	$758\text{kg} \times 3 \text{ 個} + 180\text{kg} \times 8 \text{ 個}$	=	▲3714kg
流速計重量	:			▲7kg
全体の余剰浮力	:			1348kg

上記より、余剰浮力、即ち上下波力は、1348kg となり、当初の目安とした 1200kg 以上を満足している二水平外力と上下外力を併せて、Table 2.11 に示す。

上下波力による張力は、張力の鉛直成分が上下波力に等しくなる関係より求めることができ、係留索 1 本当たりの平均張力増加量は、0.96ton にたる。しかしながら、各 4 本の係留索は水平外力を受けているため、波上側（波が来る方向）の係留緊張力は増加し、波下側（波上側と反対側）の係留緊張力は減少しており、4 本の係留索の張力は等しくなっていない。このような状態で、さらに上下外力が作用すると、上下方向の余剰浮力による張力増加量は、きつく張った波上側係留索では平均張力増加量よりも大きく、緩くなった波下側係留索では小さくなる。従って、波高によって変化する水平外力によって生じる張力の大きさに比例して、この張力増加量を按分すると、波上側係留索の張力増加量は、2.81ton (3.03ton for 波高 10m) となる。水平外力および上下外力を同時に受けた時の係留緊張力を、Table 2.12 に示す。なお、水平外力による張力は、張力の水平成分が水平外力と釣り合うことより求められる。

#### 小型吸着床を吊り下げる場合

大型吸着床の場合と同様の計算式により、小型吸着床を吊り下げる時の風圧力、潮流力および水平波力を、Table 2.13, 2.14 に示す。

上下方向の余剰浮力は、大型吸着床の場合に比べて、吊り下げる吸着床の重量が減少するので、フロートの取り付け個数を、400kg 型×9 個、250kg 型×3 個に換える。吸着床は、小型×5 個であるから、この場合の余剰浮力は次になる。

フロートの全浮力	:	$400\text{kg} \times 9 \text{ 個} + 250\text{kg} \times 3 \text{ 個}$	=	4350kg
フロートの重量	:	$32\text{kg} \times 9 \text{ 個} + 19\text{kg} \times 3 \text{ 個}$	=	▲345kg

鋼管フレームの浮力	:	540kg
鋼管フレームの重量 (標識灯含む)	:	▲1590kg
小型吸着床の吊下げ重量 (重錐含む)	: $180\text{kg} \times 5 + 437\text{kg} =$	▲1337kg
流速計重量	:	▲ 7kg
全体の余剰浮力	:	1617kg

これより、余剰浮力は、1617kg となり、当初目安とした 1200kg 以上を満足している。水平外力と併せて、上下外力を、Table 2.15 に示す。

大型吸着床の場合と同様の方法で、係留索張力を求めると、係留索 1 本当たりの平均張力増加量は、1.15ton となり、さらに張力が最も大きくなる波上側係留索の張力増加量は、3.05ton (3.34ton for 波高 10m) となる。水平外力および上下外力を同時に受けた時の係留索張力を、大型吸着床の場合と同様に Table 2.16 に示す。

### (2.1.2) 水槽試験結果に基づく係留索の張力の算定

計算に比べて、より実現象に近い水槽試験の結果 (Fig. 2.23 参照) を用いて、係留索の張力を算定した。水槽試験では、小型吸着床を用いて係留索の張力を計測したが、試験状態が最終仕様とは少し異なっているので、水槽試験の計測値から小型吸着床の最終仕様に対する張力を算定した。大型吸着床の場合には、小型吸着床についての計算値と水槽試験結果から算定した結果との関係を用いて、大型吸着床に対する試験結果に対応する算定を行った。以上の手順を Fig. 2.24 に示す。

#### 大型吸着床を吊り下げた場合

後述する小型吸着床を吊り下げた場合の張力の検討より、波力による張力は、設計値として妥当な水槽試験結果からの算定値に比べて、計算値は 2.2~2.3 倍となった。従って、この関係を用いて大型吸着床に対する試験結果に基づく算定値を、Table 2.12 の計算値より算定し、算定結果を計算値と共に Table 2.17 に併せて示す。

#### 小型吸着床を吊り下げた場合

水槽試験は、小型吸着床を用いて行ったが、係留索の立ち上がり角が最終仕様とは少し異なっているので、水槽試験結果から立ち上がり角の補正を行い、最終仕様に対する設計波浪での張力を求めた。水槽試験結果では、Fig. 2.23 に示すように、係留索の本数によって、張力が変化したが、ここでは安全側の値をとって、試験結果の中で最も大きかった値をとると、波周期 12 秒時係留索の変動張力の振幅は、Fig. 2.23 より次のようになる。

$$T_A / H_w = 0.22$$

ここで、 $T_A$  : 水槽試験より得られた係留緊張力 (ton)  $H_w$  : 波高 (m)

従って波高 7.3m の時の張力は、

$$T_A = 0.22 \times 7.3 = 1.6\text{ton} \quad (2.2\text{ton for 波高}=10\text{m})$$

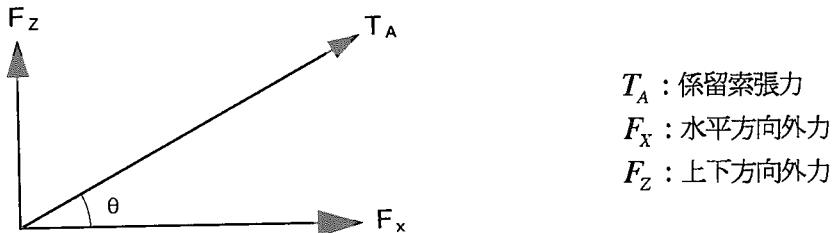
となる。

次に、係留索の立ち上がり角が、水槽試験状態は、最終仕様と異なっていたので、下記の方法により、上記の張力から最終仕様に対する張力を算定した。

係留索の張力は、下図に示すように、装置に作用する水平および上下方向の外力より計算される。

$$\text{水平外力によって生じる張力 : } T_A = F_x / \cos \theta$$

$$\text{上下外力によって生じる張力 : } T_A = F_z / \sin \theta$$



係留索の海底からの立ち上がり角は、下記の通り。

試験状態 : 26deg

最終仕様 : 18deg

従って、立ち上がり角が変化すると、係留索張力も変わることになる。各状態の張り角とその方向成分をまとめると、Table 2.18 のようになる。

これにより、水平方向成分による張力は、減少するが僅かである。ここでは、安全側の値を取るために、上下方向成分の増加量を用いて、設計波に対するロープ張力の補正を行った。

$$T_A = 1.6 \times 1.422 = 2.28 \text{ ton} \quad (3.13 \text{ ton for 波高=10m})$$

従って、最終仕様に対する係留索張力は、次のようになる。

波浪中での張力 (変動値) = 2.28 ton for 波高=7.3m

(3.13 ton for 波高=10m)

風、潮流による張力については、前項で求めた風、潮流による計算値から求め足下記の値を使用した。

風圧力 (0.22 ton) により生じる張力 = 0.23 ton

潮流力 (0.47 ton) により生じる張力 = 0.49 ton

合計 : 0.72 ton

これらの張力の和が、波、風、潮流中での小型吸着床を吊り下げた場合の張力となる。結果を Table 2.19 に示す。

### (2.1.3) 計算と水槽試験より算定した張力

Table 2.19 より、計算より求めた波力による係留索の張力は、水槽試験結果より算定した張力の値の 2.2~2.3 倍になっていることがわかる。この原因としては、以下のことが考えられる。

- ・計算では、前述したように、動的影響が含まれていない。
- ・計算では、風、潮流および波による水平外力を 1 本の係留索で受け持つとしている。
- ・水槽試験の結果より、係留本数を 4 本から 1 本に変えて、張力は増加しない  
ことが確認されている。

この原因としては、係留索の本数が 4 本の場合には、係留索が装置全体の動搖を拘束するため、装置全体に働く外力が係留索に伝わり、係留索に張力が生じることになる。一方、係留索が 1 本になると、装置全体の動搖の拘束が弱くなり、1 本の係留索に生じる張力も殆ど増えないと考えられる。

以上のことより、静的な考えに基づく計算値は、張力を過剰に算定しており、水槽試験に基づく算定値が妥当と考えられる。

上記の小型吸着床を吊り下げた場合の張力の検討より、波力による張力は、設計値として妥当な水槽試験結果に基づく算定値に比べて、計算値は 2.2~2.3 倍となった。この比率を大型吸着床の場合にも適用して、大型吸着床の計算値から、試験結果に基づく算定値を求めた。

### (2.2) 係留索の強度

計算と水槽試験結果から算定した係留ロープの張力に初期張力を加えることにより、係留索の最大張力が決まる。その結果を Table 2.20 に示す。

係留索強度の余裕は、引張り強さに対する最大張力の比で表される安全率で判定することが出来、通常は 3 程度が取られている。係留索（マリンタフ  $\phi 50\text{mm}$ ）の引張り強さは、31.2 ton であるので、安全率は Table 2.20 に示す通りである。これより、実際の値に近いと考えられる試験結果から算定した張力は、設計波においては、6.4 倍の安全率を有している。また、十分に安全側の算定となる計算値においても、設計波に対しては 3.7 倍の安全率があり、係留索は十分な強度を有している。

### (2.3) 係留用アンカーブロックの検討

係留索用の重力式アンカーとして、一般に用いられているコンクリートブロックを使用する。アンカーブロックの必要重量の算定に際しては、資料に基づいて行った。<sup>6), 7)</sup>

アンカーブロックの必要重量は、上記資料より次式から求められる。本式より明らかなように係留索の張力より、アンカーブロックの重量が計算できる。

$$W \geq \frac{T_M(S_F \sin \theta + \mu \cos \theta)}{\mu(1 - \gamma/\sigma)}$$

ここで、

$W$  : アンカーブロックの空中重量

- $T_M$  : 係留索最大張力  
 $S_F$  : 滑動に対する安全率 (=1.2)  
 $\theta$  : 係留索の鉛直とのなす角 (=72deg)  
 $\mu$  : アンカーと海底との摩擦係数 (=0.6、砂質)  
 $\gamma$  : 海水の比重 (1.025ton/m<sup>3</sup>)  
 $\sigma$  : アンカーブロックの比重 (=2.3ton/m<sup>3</sup>)

なお、試験海域の海底質については、海図（第 1291 号）、海底地形図（第 6372 号）共に砂質とされており、また資料<sup>8)</sup>においても、ROV による試験海域海底の水中カラー TV の観測結果によって、海底質は砂質と示されており、これらの資料結果より砂質とした。<sup>8)</sup>

Table 2.20 の張力より、上式により計算したアンカーブロックの重量を Table 2.21 に示す。本表より、より実際の値に近いと考えられる水槽試験結果の算定値より求めたアンカーブロック重量は、次のようになる。

- 大型吸着床を吊り下げた場合 : 20ton (24ton (波高=10m))  
 小型吸着床を吊り下げた場合 : 16ton (19ton (波高=10m))

これより、設計波に対するアンカーブロック重量は、20 ton になり、安全側の結果となる計算値では設計波に対して最大34ton となる。従って、水槽試験の計測精度、実海域における不確定要素の影響などを勘案しても、アンカーブロック重量 40ton は、設計値として妥当な 20ton の 2 倍であり、十分安全である。

### (3) 垂下ロープの検討

生け簀から吸着床を吊り下げるための垂下ロープの張力は、吸着床に作用する外力から計算できる。

#### (3.1) 計算による垂下ロープの張力の算定

吸着床に作用する水平方向の外力は、潮流と波によって生じ、2) 係留システムの検討で求めた。大型吸着床を吊り下げた場合は、Table 2.9, 2.10 に、小型吸着床を吊り下げた場合は Table 2.13, 2.14 に示されている。

吸着床に作用する上下方向の外力は、波によって生じる。一つの吸着床に作用する上下方向の波力は、吸着床の上下方向の運動を考慮して、吸着床と波の相対運動より、次式により求めた。

$$F_V = F_D + F_M$$

$$F_D = \frac{\gamma}{2g} C_D A (u_w - u_M) |u_w - u_M|$$

$$F_M = \frac{\gamma}{g} C_M V (\dot{u}_w - \dot{u}_M)$$

ここで、 $F_V$	: 吸着床に作用する上下方向の波力
$F_D$	: 吸着床に作用する上下方向の抗力
$F_M$	: 吸着床に作用する上下方向の質量力
$\gamma$	: 海水の比重 ( : 1.025ton/m <sup>3</sup> )
$C_D$	: 抗力係数
$C_M$	: 質量力係数
$A$	: 構造物の上下方向の投影面積
$V$	: 構造物の体積
$u_w$	: 波の上下方向の水粒子速度
$u_M$	: 吸着床の上下方向の運動速度
$\cdot u_w$	: 波の上下方向の水粒子加速度
$\cdot u_M$	: 吸着床の上下方向の運動加速度

実際には波と吸着床の速度および加速度は、ある位相差を持っているため、上式のように加算した相対速度や相対加速度よりも小さくなるが、ここでは安全側の計算を行うために、波と吸着床が逆方向の運動をしているとして計算を行った。なお、生け簀は最大波高では水没するので、吸着床の上下方向の運動も、最大波高よりも小さくなる。ここでは、吸着床の運動は、上下方向に、±3.5mとした。

上式より求めた 1 床当たりの上下波力から、複数枚の吸着床の遮蔽効果を考慮して、吸着床全体に作用する上下波力を求めた。(2) で求めた吸着床に作用する潮流力と波力を併せて結果を Table 2.22 に示す。

Table 2.22 の水平および上下外力の合成値より、ロープ張力を求めることが出来る。張力の計算においては、垂下ロープの本数は 4 本であるが、すべての外力が 1 本あるいは 2 本のロープに作用した場合には、吸着床は拘束されずに変位するので、(2) で述べたように、外力は計算値よりも減少する。また、4 本で支える場合には、その内の 1 本が緩んでいても、吸着床は拘束されているので、吸着床に作用する外力は計算値と同じになる。従って、吸着床に作用する外力は、3 本の垂下ロープで支えるとして垂下ロープの張力を求めた。結果を Table 2.23 に示す。

### (3.2) 水槽試験結果による垂下ロープの張力の算定

小型吸着床を用いて行った潮流中および規則波中の水槽試験より得られた垂下ロープの張力より、設計条件に対する張力を、次のようにして求めた。

#### ・潮流による張力

試験時の流速は、1.9kn であり、この時の張力は、0.1ton であった。潮流による張力は、流速の 2 乗および吸着床の面積に比例するので、設計流速 2kn における張力は次のようになる。

$$0.1 \times (2/1.9)^2 = 0.11\text{ton}$$

#### ・波浪による張力

係留の状態や波高によって張力の試験結果は変化したが、ここでは安全側の推定を行うために、試験で最も張力が大きくなった状態の結果を用いて、設計波高に対する張力を外挿した。

試験時の波条件は、波周期=12sec、波高=4.4mであり、この時の張力は

$$\text{張力}/\text{波高} = 0.59 / 4.4 = 0.14 \text{ton}/\text{m}$$

であった。張力／波高は、波高が増加するほど小さくなることが試験結果より確認されているので、上記の値より、設計波高(7.3m)の張力を外挿して、安全側の値をとる。

$$0.14 \times 7.3 = 1.02 \text{ton} \quad (1.40 \text{ton} (\text{波高}=10\text{m}))$$

また、大型吸着床を吊り下げた場合については、小型吸着床を吊り下げた時の張力の計算値と試験結果との関係を用いて算定した。結果をTable 2.24に示す。

#### (3.3) 垂下ロープの強度

前述までに示した計算と水槽試験結果より算定した垂下ロープの張力に初期張力を加えることにより、最大張力が決まる。結果をTable 2.25に示す。垂下ロープの引張り強さは、22.3tonであるので、最大張力より計算した安全率も併せて示す。なお、初期張力は、吊り下げた吸着床の重量より、ロープ1本当たりについて下記のように求めた。

$$\begin{aligned} \text{初期張力} &= (180 \times 8 + 530 \times 3) / 4 \\ &= 0.76 \text{ton} \quad (0.33 \text{ton} (\text{小型吸着床})) \end{aligned}$$

Table 2.25より、小型吸着床よりも大型吸着床を吊り下げた場合の方が、張力が大きくなるが、十分に安全側の算定となる計算値においても、設計波に対して4.8倍の安全率があり、また、より実際の値に近いと考えられる試験結果に基づいて算定した張力では安全率は7.6倍であり、垂下ロープは十分な強度を有している。

#### (4) 鋼管フレーム取り付けロープの検討

鋼管フレームと水面下の枠ロープを接続している鋼管フレーム取り付けロープに作用する張力は、鋼管フレーム、フロートおよび吸着床に作用する外力の合計より求める。外力は、(2) 係留システムの検討で求められている。外力は、小型吸着床よりも大型吸着床を取り付けている場合の方が大きいので、大型吸着床を取り付けている場合の外力の計算値より、使用ロープは、マリンタフ、3ST、40φ、 $\gamma=0.91$ 、W=157kg、200m、引張り強さ=20.5tonを考慮して張力と安全率を計算した。結果をTable 2.26に示す。

Table 2.26の結果は、外力の計算値を用いた結果であり、(2) 係留システムの検討でも検討したように、動的効果の影響などで、波力による実際の張力は、計算値の1/2程度になることを考慮すれば、鋼管フレーム取り付

けロープは十分な強度を有している。

#### (5) 鋼管フレームの検討

波浪中における鋼管フレームに働く荷重を、梁理論により求めた。波浪によって鋼管フレームに作用する外力は、フロートに波による圧力の最大値が同時に作用するとして求めた。曲げモーメントなどの波浪荷重は、鋼管フレームの両端が単純支持されているとして、梁理論で計算した。計算に用いた強度部材は、鋼管フレームを構成している SGP80A の鋼管の内、4 辺に配置されている水平方向の 3 本の鋼管である。曲げモーメント、曲げ応力および歪みの計算結果を Table 2.27 に示す。取り付け位置を Fig. 2.24 に示す。

Table 2.27 より、設計波に対する歪量は、非常に小さく、また曲げ応力も、鋼管フレームの引張り強さに比べて十分小さく、十分な強度を有している。

#### (6) 吸着床の検討

吸着床に作用する上下波力を算定し、吸着床フレームの変形、曲げモーメントおよび曲げ応力を FEM (有限要素法) PGM により計算した。計算を行った吸着床は Table 2.28 に示す 2 種類である。

(3) で示した方法で求めた吸着床に作用する上下方向の波力を用いて、FEM より求めた吸着床の曲げモーメント、歪および曲げ応力等の荷重を Table 2.29 に示す。なお、曲げ応力と型鋼の降伏点との比も併せて示す。Fig. 2.25 に大型吸着床の FEM モデルと荷重負荷後の形状を示す。なお、Fig. 2.25 では視覚上変形量を拡大して表示している。

Table 2.29 より、降伏点に対する曲げ応力の割合は、設計波に対して、小型吸着床で 29%、大型吸着床では、26% となった。一般的には、通常の許容荷重は降伏点の約 60%以下とされているので、両者ともに、設計波に対して必要な強度を有している。

#### (7) 鋼管フレームの移動量と係留索張力

鋼管フレームの移動量は、係留索の最大張力を求めた場合と同様に、鋼管フレームの対角線方向から、波、風、潮流を受けた場合について算定した。

係留索には、2 個のクッションブイが付けられているので、鋼管フレームが移動するにつれて、ロープ張力が増加し、それにつれてこれらのクッションブイが順次、海水中に引き込まれることになる。クッションブイが水面にある間は、クッションブイの浮力も増加するが、クッションブイが水没すると、クッションブイによる上向き力は一定となる。計算では、これらのクッションブイの余剰浮力を考慮して、移動量と係留索張力の関係を求めた。生け簍が水平方向に移動した時の係留索の幾何形状は、Fig. 2.26 のようになる。

Fig. 2.26において係留索の上端が、水平および上下方向に移動した場合の力の釣り合いより、鋼管フレームの移動量と係留索張力の関係を求めた。係留索張力は、小型吸着床よりも大型吸着床が取り付けられている場合の方が大きく、従って鋼管フレームの移動量も大きくなるので、大型吸着床を取り付けている場合について、移動量を求めた。結果を Table 2.30 に示す。これより、設計波における鋼管フレームの移動量は、実際の値に近いと考えられる試験結果に基づいて算定した場合には、5.1m となり、十分安全側の方法で求めた計算値では、9.8m となる。

Table 2.30 の関係を図示したものを、Fig. 2.27 に示す。また、移動量が 1m 以内の部分を拡大した図を、Fig. 2.28 に示す。Fig. 2.28 において、移動量が 0.3m と 0.5m で張力の変化率が僅かに変わっているが、これは 2 個のクッ

ションブイがそれぞれ水没することによって、張力の変化量が変わるためにある。

また、実際の値に近いと考えられる試験結果に基づいて算定した場合の設計波における鋼管フレームの移動量を平面的に表すと、Fig. 2.29 のようになる。なお、Fig. 2.29 に示す値は、設計波の最大波高 7.3m に対する結果であり、( ) 内には、波高 10m に対する値を示す。

#### (8) 結論

海水中有用金属捕集材実海域試験の実海域試験装置の安全性について、各項目に対して検討を行ったが、係留索及び各種ロープに対しては安全率の形でまとめて Table 2.31 に示す。アンカーブロックの重量に対しては、算定結果が、40 トンに対してどれだけ余裕があるかを Table 2.32 にまとめて示す。また、鋼管フレーム及び吸着床に対しては、曲げ応力の算定値が降伏点の何%になっているかを Table 2.33 に示す。

以上の結果をまとめると、次のようになる。

- ・浮遊式海洋構造物の係留装置の係留索あるいは係留鎖に対しては、経験的に安全率を 3 とするのが通常である。本設計では係留索及び各種ロープに対しての水槽試験結果に基づく算定では、設計波に対して、安全率が、6.4 以上であり、また、すべての最大外力が同時に作用したかなり安全側の計算の場合でさえ、安全率が 3.7 以上であることから、安全は十分に確保されると思われる。
- ・アンカーブロックの重量に対しても十分余裕があり、滑動することはないと思われる。
- ・鋼管フレーム及び吸着床に対しては十分に強度を有しており、十分に安全である。
- ・鋼管フレームの移動量についても、設計波に対して、試験結果に基づいて算定した場合には、5.1m 以内となり、かなり安全側の計算の場合でも 9.8m 以内にはいるため、安全上の問題は生じないと考えられる。

### 2.3.6 水槽試験

#### (1) 第 1 回試験

##### (1.1) 目的

有用金属捕集材実海域試験で用いる浮体は、鋼管フレームにより構成された生け簀方式を採用した。生け簀の使用実績は十分あるが、今回のように外海の厳しい波浪条件の下で使用された例は非常に少ない。従って、本水槽試験では、試験水槽において、設計条件（潮流／波浪中）下における浮体の挙動を再現し、索のからまりなどの現象が発生しないかを確認すると共に、係留索にかかる張力を計測し、安全性能上、また強度的にも問題がないことを調べることを目的とした。試験には、約 1/20 の縮尺模型を用いた。

##### (1.2) 供試模型

- |                            |               |
|----------------------------|---------------|
| ・縮尺                        | : 約 1/20      |
| ・浮体 (7.55m 角)              | : 1 体         |
| ・吸着床 (サブユニット 2.8φ × 0.18m) | : 5 セット       |
| ・クッションブイ (浮力 500kg/個)      | : 2 個 × 4 セット |
| ・主係留索 (ばね定数 860kg/m)       | : 4 点係留       |
| ・シンカー                      | : 4 セット       |

なお、供試模型の諸元値は、初期設計値に基づいて設定した。

### (1.3) 環境条件

模型に作用する外力は、実機換算値に直した場合に以下の値となる環境条件を組み合わせた。

- ・規則波

- |      |                    |
|------|--------------------|
| ・波周期 | : 8.6, 9.6, 10.6 秒 |
| ・波高  | : 4.0, 6.0m        |

- ・不規則波

- |        |             |
|--------|-------------|
| ・有義波周期 | : 9.7 秒     |
| ・有義波高  | : 4.7m      |
| ・最大波高  | : 7.4m      |
| ・潮流速   | : 2 または 4kn |

なお、設計条件は次の通りである。

- |        |         |
|--------|---------|
| ・有義波周期 | : 9.6 秒 |
| ・有義波高  | : 4.1m  |
| ・最大波高  | : 7.3m  |
| ・潮流速   | : 2kn   |

### (1.4) 浮体お上び係留索の配置

浮体（生け簀）および係留索の配置を Fig. 2.30 に示す。ここで、各係留索の役割を以下に示す。

- |              |   |
|--------------|---|
| ・主係留索        | : 浮体下の枠ロープを介し、浮体を海底と係留する。                         |
| ・鋼管フレーム取り付け索 | : 生け簀と水面下の棒ロープを接続する                               |
| ・枠ロープ        | : 浮体を係留するために、水面下に四角状に設置されたロープで 4 隅の頂点で主係留索に接続される。 |
| ・垂下ロープ       | : 浮体から吸着床を吊下げる                                    |

### (1.5) 計測項目

主係留索、鋼管フレーム取り付け索、垂下ロープの一部に張力計を取り付け、それぞれの索にかかる張力を計測した。張力計を取り付けた係留索を以下に示す。

- T1 : 主係留索（波上側）
- T2 : 主係留索（波下側）
- T3 : 中間索（波上側）
- T4 : 中間索（波下側）
- T5 : 吊下索（波上側）

また、地上および水中カメラによる浮体の挙動も同時に記録した。

#### (1.6) 試験水槽

試験は（株）三井造船昭島研究所の潮流水槽（長さ×幅×水深=55m×8m×2.5m）において実施した。

#### (1.7) 試験結果

##### (1.7.1) 環境条件

規則波（波周期、波高）、不規則波（有義波周期、有義波高）、潮流速をパラメータとして、以下の4種類の条件で実施した。

- ・規則波のみ
- ・不規則波のみ
- ・潮流のみ
- ・規則波+潮流

規則波中試験における各係留索の初期張力および張力の時系列から目視によりスラックの発生の有無を判定した。

##### (1.7.2) 試験状態

試験は当初、設計状態で実施した。その結果、係留索や鋼管フレーム取り付け索、垂下ロープにスラック現象が発生することが判明した。スラックが発生すると、鎖やスチールワイヤほどではないが、索に衝撃的荷重（スナップ荷重）が発生し、このような現象が定常的に頻発すると、索の破断の原因となる可能性がある。したがって、スラックの発生を防ぐために、下記の手法により試験状態を変更し、対策を検討した。

- ・吸着床に取り付けるウェイトの変更
- ・垂下ロープの間にに入るスプリングのバネ定数の変更
- ・主係留索の初期張力の変更
- ・钢管フレーム取り付け索の張り方の変更

また、異常状態での挙動を調べるために、4本の垂下ロープの内一本ない場合の状態についても試験を行った。

##### (1.7.3) 試験結果

試験結果から得られた知見を以下に述べる。

##### 1) 垂下ロープの張力

垂下ロープの張力は、ウェイトを取り付けないとスラック現象が発生し、索が緩むことがわかった。また、索が緩むとその反動で衝撃的な張力（スナップ荷重）が生じた。ただし、スチールワイヤほど大きな値とはなっ

ていないが、スラック現象が発生していない場合に比べて張力の変化の割合は速く、ピーク状となっている。このような現象は、海中にある吸着床が、海面にある生け簀の上下動に追随して動かないためであるので、生け簀に追随して動くようにするために、吸着床にウェイトを付加した。しかしながら、ウェイトを付加しても垂下ロープ（T5）のスラック現象を防止することができないことがわかった。次に垂下ロープにスプリングを取り付けて実験を行ったところ、垂下ロープにスラック現象が発生しないことがわかった。これより垂下ロープに適当なバネ強さを考慮し、吸着床に適当なウェイトを付加することによりスラック現象の発生を防げることがわかった。

## 2) 主係留索の張力

主係留索のスラック現象の発生を防ぐために、主係留索の初期張力を増やして実験を行った結果、初期張力を増やす前に比べて、波上側の主係留索（T1）にスラック現象が発生しないことがわかった。

## 3) 鋼管フレーム取り付け索の張力

钢管フレーム取り付け索は生け簀と枠ロープを接続しているロープであるが、波上側の钢管フレーム取り付け緊張力（T3）にスラック現象が発生した。钢管フレーム取り付け索の上端は生け簀に接続しているため、生け簀が波と共に前後方向に動搖すると、钢管フレーム取り付け索の上端も前後方向に動搖する。钢管フレーム取り付け索は、生け簀に対して、前後、左右方向に傾斜して接続されているため、生け簀の動搖方向に応じて、钢管フレーム取り付け索が緩む場合があり、この時にスラック現象が発生することになる。そこで、生け簀が水平方向に動搖しても、钢管フレーム取り付け索が緩まないように、生け簀の動搖方向に対して钢管フレーム取り付け索が直角となるように接続して実験した結果、スラック現象は発生しなくなることがわかった。

## 4) 垂下ロープが3本の場合

垂下ロープの1本を取り外して、3本にして実験を行った結果、例え垂下ロープが万が一1本なくなつたとしても、各係留索の張力は、4本の場合とほとんど変わらず、安定的に変化することがわかった。また、水中ビデオによっても、吸着床が異常な挙動を示すことは認められなかった。

## 5) 吸着床に付加するウェイトの影響

吸着床の動搖を安定させ、垂下ロープのスラック防止のためには、吸着床に付加ウェイトを取り付けることが効果的であることがわかったが、付加ウェイトはなるべく少ない量であることが望ましい。そこで、付加ウェイトの重量を変えて、どこまで少なくできるかを調べた結果、付加重量を0.4tonにしても、垂下ロープ張力（T5）は、ほとんど変化せず、かえって張力変化量がわずかに減少するほどであることがわかった。

## 6) 不規則波中の結果

不規則波中においても、規則波の場合と同様の対策を講じることにより、各索にスラック現象が発生しなくなることがわかった。特に本試験で使用した不規則波は、設計波よりも厳しい条件となったが、各索の張力に異常な現象等が生じていないことがわかる。

## 7) 潮流中の結果

潮流中の結果から、各索の張力には潮流の変動に対応していると思われる変動が見られたが、特に特異な現象が発生するようなことはなかった。また、設計条件である 2 ノットの場合、張力の増加量は、深度 4m の規則波中の場合と比べて小さく、4 ノットの場合に波高 4m の規則波中の場合と同程度の値となった。波と潮流を同時に発生させた場合には、潮流が無い場合に比べて、潮流によって生じる定常力の作用により、係留索張力の平均値が変化するが、張力の変化量は同等若しくは減少することがわかった。従って、波浪に潮流が加わった場合には、潮流によって作用する定常力を加算すればよいことがわかった。

#### (8) まとめ

本試験より得られた結果をまとめると次のことが言える。

(8.1) 波浪中において、各係留索にスラック現象が発生し、スチールワイヤなどで見られるスナップ荷重が見られたが、各索に対して次の対策を施すことにより、スラック現象の発生を防ぐことができた。

- ・主係留索：初期張力を適当な値に増やす。
- ・鋼管フレーム取り付けロープ：中間索の張り方を変える。
- ・垂下ロープ：適当な付加ウェイトを付けると共に、垂下ロープとして適当な伸び剛性（バネ強さ）を有する索を使用する。

対策を施す前の状態の結果と施した場合の結果の例を各々 Fig. 2.31、Fig. 2.32 に示す。

(8.2) 潮流があっても、各係留索の張力の平均値が変化するのみで、係留索の張力の変動量は波だけの場合に比べて増加することはない。

(8.3) 吊下索が 3 本になっても、吸着床の動搖は安定しており、緊張力にも異常な現象は生じなかった。

(8.4) 試験の観察結果より、不規則波中においても生け簀の挙動は安定しており、また、クッションブイなどが藻とからまるような現象は見られなかった。

#### (2) 第 2 回試験

##### (2.1) 目的

係留索に対する安全性の向上を図るため、生け簀（鋼管フレーム）のフロート関係の仕様を変更した。このため確認の追加水槽試験を行った。変更後の仕様では、係留索張力の低減のため、波高が大きくなると生け簀が没水するよう、生け簀のフロートのサイズを小さくした。

##### (2.2) 供試模型

試験に用いた供試模型は、第 1 回の試験で用いた模型等を流用し、フロートやクッションブイの容量を小さくした。

・浮体	: 7.55m 角。
・フロート	: 3 個×4 セット
・吸着床	: 2.8φ × 0.18m
・クッションブイ	: 2 個×4 セット
・主係留索	: バネ定数 860kg/m × 4 点係留
・吊下げ索	: バネ定数 460kg/m × 4 本
・シンカー	: 4 セット

生け簀のフロートおよびクッションブイの浮力は、係留索の張力を小さくするために、それぞれ当初仕様浮力の 60%、67% にした。Table 2.34 に供試模型の諸元を示す。

### (2.3) 計測項目

計測項目は、次の通り。

- ・主係留索の張力 (波上側×1 点)
- ・吸着床の吊下げ索の張力 (波上側×1 点)
- ・その他ビデオ記録 (水中、水上)

### (2.4) 試験条件と結果

#### (2.4.1) 試験条件

- ・水深 : 50m の状態において、規則波、不規則波および潮流中で行った。
- ・波の入射方向 : 2 種類
  - ・生け簀のフレームに直角な方向 (4 本係留、3 本係留)
  - ・生け簀のフレームの対角線方向 (1 本係留)
- ・係留状態 : 3 種類 (係留索の本数を変えた)
  - + 4 本係留 (通常の状態)
  - + 3 本係留 (通常の状態から波上側の 1 本を取り外した状態)
  - + 1 本係留 (対角線方向の波上側 1 本の状態、波下側も初期張力を設定するために仮に設置した)

各状態の概略を Fig. 2.33 に示す。
- ・外力条件 : 潮流、規則波、不規則波試験状態を Table 2.35 に示す。

#### (2.4.2) 試験結果試験

結果を Table 2.36, 2.37, 2.38 に示す。これらの結果より次のことが言える。

##### 1) 規則波中試験結果

Table 2.31 の結果より、波高に対する索張力の値を Fig. 2.34, 2.35 に示す。本図より次のことが言える。

### 前回仕様状態との比較

4 本係留において、変更前の前回仕様の結果に比べると、今回の状態における索張力は、主係留索については、約 1/2 以上に減少した。吊下げ索については、70~80% に減した。

### 係留本数の影響

係留本数が 4 本から 3 本、1 本と少くなってしまっても、主係留索張力が大きく変化することはなく、3 本、1 本の方が 4 本の状態の時よりも緊張力が減少した。

この原因としては、係留索の本数が減ると、外力に対する生け簀の拘束力が弱まり、その結果として索張力が低下したと考えられる。

吊下げ索張力については、主係留索のように張力が減少することはなかったが、4 本の場合とほぼ同じ値となつた。また、3 本、1 本係留の状態でも、生け簀が不安定な挙動を示すことはなく、4 本係留の場合と同じような挙動であった。

### 波周期の影響

周期が、9.6 秒から 12 秒に長くなつても、係留索、吊下げ索ともに張力に大きな差は生じなかつた。

### 波高の影響

波高が増加すると、1 本係留状態の主係留索を除いて、その他の場合については、波高当たりの張力は減少もしくは同等の値であった。1 本係留状態の主係留索についても、増加量はわずかであり、したがつて張力は波高に比例するとして、大波高時の張力を試験結果から算定しても安全側の結果となる。

## 2) 不規則波中試験結果

Table 2.37 の結果より次のことが言える。

### 前回仕様状態との比較

変更前の前回仕様の結果に比べると、今回の結果は主係留索については、50% の減少、吊下げ索については、24% 減少した。

### 潮流の影響

潮流があると、主係留索張力は増加し、吊下げ索張力は減少した。

## 3) 潮流中試験結果

Table 2.38 の結果より次のことが言える。

### 前回仕様状態との比較

変更前の前回仕様の場合と潮流速が異なるが、流速の 2 乗当たりの張力に直して比較すると、今回の場合の方が約 7% ほど減少している。

吊下げ索については、殆んど差が無かつた。

計測時の記録の例を Fig. 2.36, Fig. 2.37 に示す。

### (2.5) まとめ

本試験結果を要約すると次のことが言える。

- ・生け簀の余剰浮力を小さくすることにより、本試験で実施した波浪条件において生け簀が冠水する現象が確認できた。
- ・生け簀が冠水しても、生け簀、吸着床の挙動に、おかしな動きは見られなかった。
- 主係留索、吊下げ索の張力は、規則波および不規則波中のいずれにおいても、前回仕様状態の張力よりも減少した。
- ・係留本数を減らした場合においても、主係留索および吊り下げ索の張力は、4 本の場合よりも増加することはなかった。また、挙動的にも安定していた。

### 2.3.7 実験装置監視設備

実験装置の係留系は、十分な強度を有する様設計したが、万一事故等により係留系が切断し、装置が漂流することを防止するため、実験装置に GPS 位置監視設備を設置した。

#### (1) 機器構成

##### (1.1) 海上局 1 式

- ・衛星通信端末 (GPS アンテナ、送受信用アンテナ含む)
- ・インターフェースユニット
- ・太陽電池式電源装置
- ・ブイ本体

ブイの概形図を Fig. 2.38、鋼管フレームへの取り付け状態の写真を Photo 4 に示す。

##### (1.2) 受信局 2 式 (高崎及びむつ駐在に設置)

- ・データ受信装置
- ・受信局用ソフトウェア : 1
- ・ " : 2

#### (2) 機器仕様

##### (2.1) 通信仕様

通信方式	: オープコム衛星通信方式
送信データ	: 年月日時分 (UTC)
	位置情報 (緯度、経度)
	蓄電池電圧
通信周波数速度	: UpLink148~1501V1Hz2400bps
Dow11Link137~138	: MHz4800bps
送信 (測位) 間隔	: 2 時間 (通常)
必要環境	: LAN 方式インターネット E-Mail

## (2.2) 衛星通信端末

名称	: オーブコムデータコミュニケーション
型式	: KX-G7101/N
位置測定方法	: GPS 方式 (測地系 : WGS84)
位置測定精度	: 100m 2D RMS
送受信アンテナ	: 1.4m ホイップアンテナ (オーブコム専用アンテナ)

## (2.3) インターフェースユニット

機能	: GPS 動作モニター制御 電源 ON/OFF 制御 (ON/OFF 動作はスイッチにて行う)
----	---

## (2.4) 太陽電池式電源装置

太陽電池出力	: 14.8V, 2.1W (7.4V, 1.05W × 2枚)
蓄電池	: 密閉式鉛蓄電池 12V, 5Ah 1個
電池寿命	: 送信 (測位) 間隔による (例: 10 分_約 10 日、4 時間_通年)

## (2.5) ブイ本体

型式	: ZTB-R1
全高	: 約 700mm (アンテナ含む)
浮体径	: φ341mm
全浮力	: 約 123N
材質	: 浮体 . . . アルミニウム合金 フード . . . 透明ポリカーボネート樹脂
塗色	: オレンジ (フード部は透明)
全質量	: 約 6.5kg (搭載機器含む)

## (2.6) データ受信装置

名称	: デスクトップ型
機能	: LAN 方式インターネット接続 警報出力用音源

## (2.7) 受信局用ソフトウェア 1

名称	: ブイ位置監視システム
動作 OS	: Windows98
機能	: データ受信 データ表示

## 位置異常警報

### (2.8) 受信局用ソフトウェア 2

名称 : GPSAPI  
 動作OS : Windows98

#### 特記事項

周回衛星のため、データが遅延または欠測する場合がある。  
 オープコム通信は、オーブコムジャパンと契約する。

### (3) 監視体制

高崎研究所むつ駐在居室及び照射利用開発室居室にそれぞれ設置したパソコンで、位置情報を通常時は 2 時間毎に E メール受信し監視する。設置位置を中心にして一辺 200m 四方（アンカーの設置位置）を越えた場合警報が鳴るように設定してあり、定められた異常時の連絡及び対策をとる。

監視モニターの写真を Photo 5 に、受信した位置情報の例を Fig. 2.39 に示す。

## 2.4 製作・設置

### 2.4.1 製作

通常の輸送手段で輸送出来る設備機器は全て工場製作した。輸送が困難な大型設備は分割製作、現地組立（むつ事業所内むつ関根浜岸壁）又は現地製作とした。主要設備の製作方法は下記の通り。

- ・鋼管フレーム : 4 分割工場製作現地ボルト組立、フロート類取り付け
- ・大型吸着床 : 4 辺、底部分割工場製作現地溶接組立
- ・小型吸着床 : 工場製作
- ・アンカーブロック : 現地製作（型枠組み、配筋、コンクリート打ち）

### 2.4.2 作業スケジュール

現地組立、海上設置作業スケジュールを Table 2.39 に示す。

### 2.4.3 アンカーブロックの現地製作

製作工程を Table 2.40 に示す。

必要なコンクリート強度は、通常  $18\text{N/mm}^2$  であるが工程がタイトであり、養生期間が十分に取れない恐れもあるので、高強度コンクリート ( $24\text{N/mm}^2$ ) を使用した。又、強度チェックのため同時に試験片を作製し、強度測定を行った。検査結果の一覧を Table 2.41 に示す。

### 2.4.4 設置作業

#### (1) 設置位置

鋼管フレームの中心位置	北緯 $41^\circ 24.4'$ , 東経 $141^\circ 18.01'$
アンカーブロックの設置位置	No.1 北緯 $41^\circ 24.46'$ , 東経 $141^\circ 18.08'$

- No.2 北緯 41° 24.34' , 東経 141° 18.08'  
 No.3 北緯 41° 24.34' , 東経 141° 17.92'  
 No.4 北緯 41° 24.46' , 東経 141° 17.92'

## (2) 設置作業

実験設備の設置作業は、押船付起重機船（120ton 吊）、作業船、警戒船の3隻で行った。作業は、次の3工程に大別される。

- ・アンカーポジションの決定、アンカーブロックの設置（4個）
- ・鋼管フレームの設置
- ・吸着床の設置

これらの作業を平成11年9月27日から同年9月29日の3日間に分けて行った。尚、これらの作業内容は、八戸海上保安部に事前届出及び事後完了報告を行った。

## (3) 設置作業の方法

設置作業の手順は Scheme 4 に示すフローチャートのとおりであり、各作業手順ごとの作業内容を以下に示す。

### (3.1) マーカーブイ設置

アンカーブロック設置位置の確認及び作業船のアンカー打設目標とするために、予めアンカーポジション4点にマーカーブイを設置する。位置の確認は DGPS を使用し、予定地点に作業船を誘導し、土嚢袋、ロープ、耐圧ブイを投入する。（Photo 6）海上敷設作業終了後マーカーブイは撤去する。

### (3.2) アンカーブロック積み込み

本作業に使用する 40 トン型コンクリートアンカーブロックを関根浜港内岸壁から起重機船（旋回式）に係留用繊維ロープ（係留索）と一緒に積み込む。（Photo 7）

### (3.3) 回航

40 トン型コンクリートアンカーブロックを積み込み後、アンカーポジションまで起重機船を回航する

### (3.4) アンカーポジション据付

起重機船用アンカー4点を打ち起重機船を固定する。アンカーブロックに係留索を結束し、起重機船フック直上に取り付けた DGPS にて位置を誘導し、係留索を取り付けたままアンカーを海底まで吊り降ろし据え付ける。この際係留索と起重機船フックのワイヤーロープが絡まらないように、十分注意する。係留索は水深よりも長いので、据付後海面に浮上した会長分はコイルし、もし作業途中で海面に放置する場合に備えてフロートと簡易標識灯を取り付けておく。この作業内容を Fig. 2.40, 2.41 に示す。（Photo 8,9）

### (3.5) 鋼管フレームの回航

鋼管フレームは、岸壁で係留ユニットと結束し、関根浜港から装置設置現地まで起重機船で回航する。係留ユニットと2隅の係留索は、予めアンカーブロックに結束しておく。(Photo 10)

### (3.6) 鋼管フレーム及び係留ユニットの取付け

3個目のアンカーブロックを据え付けた後、係留ユニット（棒ロープ、鋼管フレーム取り付けロープ、交点リングおよびクッショングレイで構成）を海面におろす。その後、4個目のアンカーブロックを据え付け、残り2隅を緩衝用フロートセット（クッショングレイ）を介して係留索と接続する。この作業内容をFig. 2.42に示す。(Photo 11)

### (3.7) 係留索張力導入

係留ユニットの2隅は、アンカーブロックに連結した状態で設置し、チルホールを使用して残り2隅を接続する。1トンの初期張力を係留索に導入する。張力導入時では潜水作業を行う。また係留索は海水より軽い材質を使用するので、海面に浮上しないように土嚢袋を取り付ける。土嚢袋は係留索接続リングの位置にまとめて取り付ける。この作業内容をFig. 2.43に示す。(Photo 12)

### (3.8) 吸着床取り付け

捕集材を充填した吸着床を垂下ロープ（ナイロンエイトロープΦ35）を使用して、鋼管フレームに取り付け吊り下げる。3基垂下する大型吸着床ユニットの中心水深が20mになるように調整する。この作業内容をFig. 2.44に示す。(Photo 13, 14)

### (3.9) 標識灯取り付け

鋼管フレームにはむつ航路標識事務所の指示により、標識灯E-10を取り付ける。

### (3.10) 吸着床取外し・取り付け作業

実験期間中本装置の吸着床部分は、20～30日毎に捕集材交換を行う。このために取外し・取り付け作業のデモを行う。そのため設置作業終了後吸着床取り付け・取り外しの慣熟作業（確認作業）を行ってから設置作業を終了する。この作業の手順をFig. 2.45に示す。又、この作業内容をFig. 2.46に示す。

海上設置作業に関しては下記の安全管理を行った。

- (1) 作業船の使用に際しては、他の船舶に支障のないよう十分注意する。
- (2) 作業者間、関係方面との打ち合わせを密にし、事故の防止に努める。
- (3) 使用する船舶には、海上衝突予防法、港則法、海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律を遵守させる。
- (4) 気象・海象を十分把握して、作業の実施および中止の判断を行い、船の避難には万全を期す。
- (5) 施工場所は地元漁協の操業区域にあるので、作業中は警戒船を配し見張りを厳重にして、航行船舶、漁網等に常に注意を払い、事故防止に努める。
- (6) 作業員は、救命胴衣、ヘルメット等の保護具の着用を義務付ける。
- (7) 発注者、海上保安部長の指示ある場合はこれに従う。
- (8) 潮流速が早く、危険と判断された場合には潜水作業を中止する。

(9) 作業中止基準

波高 : ~0.7m 以上 (目視)

風速 : ~10m/sec 以上

視程 : ~2km 以下

地震 : ~震度 4 (中震) 以上

津波警報発令時

流速 : ~1.0m/sec 以下

作業中止決定者 : 作業責任者

設備の完成写真を Photo 15 に示す。

## 2.5 試験休止状態

10月20日に吸着床を回収し、平成11年の試験予定を終了した。同日、鋼管フレームの撤収を行い、装置を試験休止状態に変更した。即ち、付帯係留設備部分を残し、航路標識及び漂流ブイを桟ロープに係留した。

試験休止状態を Fig. 2.47, Photo 16 に示す。

### 3 まとめ

#### 3.1 設計仕様条件について

有用金属捕集材の海上設備を設計するに当たっては、3年間で1kg程度の有用金属を捕集できる規模とし、捕集材を充填する大型及び小型吸着床の係留を可能とする設備を設計した。安全性の検討には日本気象協会による波浪推算データと、運輸省第二港湾建設局による計測データの2種類の波浪データから設計波を算出し、10年確率波について採用した西防波堤施工時の設計波4.3m、最大波高7.3mを用いて設計を行った。係留装置とロープの安全性を見積もるため算定した安全率は、設計波を用いたとき6.4、すべての最大外力が同時に作用した場合も安全率3.7以上であり、安全性に問題がないことを確認した。また、鋼管フレーム及び吸着床は、捕集材の係留に際して十分に強度を持つよう設計した。実海域での鋼管フレームの移動量については、設計波で5.1m、一本の係留索が切断しても9.8m以内に入るために、安全上問題が生じないと考えられる。40tonアンカーブロックは、滑動しない重量であることが確認された。

#### 3.2 水槽試験について

外海の厳しい条件下での鋼管フレームの挙動を再現し、索の絡まりなどの現象が生じないか、また係留索にかかる張力を計測し、安全性能・強度ともに問題がないか確認するため模型を用いて2回の水槽試験を行った。試験では各箇所のロープ張力を調節して、垂下ロープヘイトを追加することにより、スラック現象の発生を防ぐことができることがわかった。さらに係留索の張力を低減させ、波高が大きくなると鋼管フレーム自体が没水するようフロートやクッションブイの容量を小さくした結果、主係留索で約50%、吊り下げ索で最大80%の減少が可能となり、実施した波浪条件で生け簀が没水し、安全性の向上が図られることが確認された。

係留索の切断を想定した試験でも主係留索及び吊り下げ索の張力は4本の場合よりも大きく増加することなく、安全性が保たれることができた。

#### 3.3 製作・設置について

海上設備で使用する鋼管フレーム・大型吸着床・小型吸着床・アンカーブロックの設置と各種係留索の結束、設置はアンカーブロックを設置後、係留索を結束した。その後、鋼管フレームを固縛してその中心に大型吸着床を垂下した。大型吸着床には捕集材を充填し、20日間の特性試験を行い、試験中に各海上設備と係留索との結合に問題がないことは目視により確認できた。特性試験終了後、当初の予定通り吸着床を回収、冬季の荒天に備えて鋼管フレームを撤収した。

### 謝辞

本研究を行うにあたって、本装置の設置場所であるむつ事業所の皆様方には、設計から設置に至るまでご指導、ご支援を頂いたこと心より感謝いたします。とりわけ海務課の方々には設置から監視に至るまでの多岐にわたりご指導、ご支援を頂きました。心より感謝いたします。設置に関して株式会社三井造船昭島研究所 小林正典 日根野 元裕、東京製綱繊維ロープ株式会社 市川正和より暖かいご指導、ご支援、ご協力を承りました。この場をお借りして感謝いたします。(敬称略)

### 参考文献

- 1) 昭和 57 年度新定係港波浪推算調査報告書 (S65.10)、(財) 日本気象協会
- 2) 新定係港建設記録、運輸省第二港湾建設局青森工事事務所、S63.3
- 3) 港湾施設の技術上の基準・同解説、(社) 日本港湾協会、H11.4
- 4) 原子力船「むつ」新定係港 (5.設計波の条件例)、運輸省第二港湾建設局青森工事事務所
- 5) 海洋開発技術ハンドブック、朝倉書店
- 6) 海洋鋼構造物設計指針 (案) 解説 土木学会編
- 7) 沿岸漁場整備開発事業施設設計指針 水産庁監修 全国沿岸漁業振興開発協会
- 8) H6 年度海底モニタリングシステム整備調査成果報告書、H7.3 日本原子力研究所

Table 1.1 年度別試験計画

年度 \ 月	試験計画											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
平成10年										許可	設備設計	契約
										▼	→	▼
平成11年	設備作成		据付・試運転・調製		装置機能試験				データ解析・評価			
	→		→		→				→			
平成12年	試験準備		捕集試験 6回						データ解析・評価			
	→		→						→			
平成13年	試験準備		捕集試験 6回						データ解析・評価・まとめ			
	→		→						→			

Table 1.2 吸着床の規模とウラン捕集量

		4m 規模	2m 規模
吸着床	大型吸着床	3 床	
	小型吸着床	12 床	5 床
捕集力セット		288 個	144 個
ウラン捕集量		288g/回	144g/回

Table 2.1 「海水中有用金属捕集材実海域試験」実海域試験装置 全体工程表

項目	平成11年3月			4月			5月			6月			7月			8月			9月		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
契約	3/31●																				
基本計画																					
基本設計																					
図面作成																					
鋼材手配																					
いけすフレーム製作																					
SUS吸着床ユニット製作																					
SUS吸着床サブユニット製																					
ロープ製作																					
ロープ類加工																					
アンカー製作																					
現場準備																					
現場設置																					
納入																					9/30●

Table 2.2 実測波高に対する実超過確率定数

定数 $\alpha$ , $\beta$			
分布函数名	k 値	$\alpha$	$\beta$
Gumbel分布		0.44	0.15
	0.75	0.54	0.64
	0.85	0.51	0.59
	1.00	0.48	0.53
Weibul分布	1.10	0.46	0.50
	1.25	0.44	0.47
	1.50	0.42	0.42
	2.00	0.39	0.37

Table 2.3 確率波（有義波高、有義波周期）

データ		波浪推算値（気象協会）					計測値	
	YEAR	NE	NNE	N	NNW	All direction	All season	Summer
有義 波高		2.61	3.45	3.40	2.26	3.62	3.66	2.19
	20	2.91	4.16	3.91	2.72	4.08	4.03	2.24
	30	3.07	4.57	4.18	2.95	4.35	4.25	2.26
	40	3.18	4.86	4.35	3.11	4.55	4.41	2.28
	50	3.27	5.08	4.49	3.23	4.69	4.54	2.30
有義 波周 期	10	8.63	8.90	8.43	8.01	9.32	7.51	8.20
	20	8.82	9.73	8.89	8.54	9.65	7.70	8.31
	30	8.92	10.21	9.13	8.81	9.83	7.82	8.37
	40	8.98	10.54	9.29	8.99	9.97	7.91	8.41
	50	9.03	10.80	9.41	9.13	10.07	7.97	8.45

Table 2.4 波方向に対する屈折係数

方向	NE	NNE	N	NNW
屈折係数	1	0.98	0.9	0.83

Table 2.5 各方向に対する屈折係数の平均値

方向	ENE	NE	NNE	N	NNW	不明	合計
データ数(N)	3	6	0	2	3	6	20
屈折係数(K)	1	1	0.98	0.9	0.83	0.83	-
N*K	3	6	0	1.8	2.49	4.98	18.27

屈折係数=0.9135

Table 2.6 沖波換算波高

データ	YEAR	(年)	10	20	30	40	50
計測値 (All season)	Hs (m)	3.66	4.03	4.25	4.41	4.54	
	屈折係数	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	
	Hs (沖波) (m)	4.0	4.4	4.7	4.8	5.0	
波浪推算値 (NNE)	Hs (沖波) (m)	3.5	4.2	4.6	4.9	5.1	

Table 2.7 西防波堤設計波

種類	項目	施工時	完成時
設計波	Hs (m)	4.3	5.6
	Hmax (m)	7.3	9.8
沖波	Hs (m)	3.9～4.3	4.8～6.0
	Ts (sec)	12	12

Table 2.8 最大波高

データ	YEAR	(年)	10	20	30	40	50
計測値 (all season)	Hs (沖波) (m)	4.0	4.4	4.7	4.8	5.0	
	Hmax (沖波) (m)	7.0	7.7	8.1	8.4	8.7	
波浪推算値 (NNE)	Hs (沖波) (m)	3.5	4.2	4.6	4.9	5.1	
	Hmax (沖波) (m)	6.0	7.3	8.0	8.5	8.9	

$H_{max}=1.75 \times H_s$

Table 2.9 風圧力及び潮流力（大型吸着床の場合）

	対象	抗力係数	外力（トン）
風圧力	鋼管フレーム	1.2	0.22
潮流力	フロート 大型吸着床	1.2 1.4	0.34 0.50

Table 2.10 水平波力（大型吸着床の場合）

種類	波高	設計波		参考値
		項目	7.3m	
フロート	抗力係数	1.2	1.2	
	質量力係数	2.0	2.0	
	抗力 (ton)	1.52	2.84	
	質量力 (ton)	1.90	2.59	
	合力 (ton)	2.43	3.84	
大型吸着床	抗力係数	1.4	1.4	
	質量力係数	2.0	2.0	
	抗力 (ton)	0.79	1.47	
	質量力 (ton)	0.57	0.78	
	合力 (ton)	0.97	1.67	
合計	(ton)	3.40	5.51	

$$\text{合力} = ((\text{抗力})^2 + (\text{質量力})^2)^{1/2}$$

Table 2.11 水平外力および上下外力（大型吸着床の場合）

項目	波高		設計波	参考値
			7.3m	10m
水平外力	風圧力	(ton)	0.22	0.22
	潮流力	(ton)	0.84	0.84
	水平波力	(ton)	3.40	5.51
	合計	(ton)	4.46	6.57
上下外力	上下波力	(ton)	1.35	1.35

Table 2.12 外力による張力の計算値（大型吸着床の場合）

項目	波高	設計波	参考値
		7.3m	10m
	計算	計算	
風、潮流による張力	(ton)	1.11	1.11
水平波力による張力	(ton)	3.57	5.79
上下波力による張力	(ton)	2.81	3.03
合計張力	(ton)	7.49	9.93

Table 2.13 風圧力および潮流力（小型吸着床の場合）

種類	対象	抗力係数	外力（トン）
風圧力（風速：30m/sec）	鋼管フレーム	1.2	0.22
潮流力 (流速：2ノット)	フロート	1.2	0.24
	小型吸着床	1.4	0.23

Table 2.14 水平波力（小型吸着床の場合）

種類	項目	波高	設計波	参考値
		7.3m	10m	
フロート	抗力係数	1.2	1.2	
	質量力係数	2.0	2.0	
	抗力 (ton)	1.04	1.95	
	質量力 (ton)	1.28	1.76	
	合力 (ton)	1.65	2.63	
小型吸着床	抗力係数	1.4	1.4	
	質量力係数	2.0	2.0	
	抗力 (ton)	0.36	0.68	
	質量力 (ton)	0.29	0.39	
	合力 (ton)	0.46	0.78	
合計 (ton)		2.11	3.41	

Table 2.15 水平外力および上下外力（小型吸着床の場合）

項目	波高	設計波	参考値
		7.3m	10m
水平力	風圧力 (ton)	0.22	0.22
	潮流力 (ton)	0.47	0.47
	波力 (ton)	2.11	3.41
	合計 (ton)	2.80	4.10
上下力	波力 (ton)	1.62	1.62

Table 2.16 外力による張力の計算値（小型吸着床の場合）

項目	波高	設計波	参考値
		7.3m 計算	10m 計算
風、潮流による張力	(ton)	0.72	0.72
水平波力による張力	(ton)	2.22	3.58
上下波力による張力	(ton)	3.05	3.34
合計張力	(ton)	5.99	7.64

Table 2.17 外力による張力（大型吸着床の場合）

項目	波高	設計波 (7.3m)	参考値 (10m)	
		計算	試験結果に基づく算定	計算
風、潮流による張力	(ton)	1.11	1.11*	1.11
水平波力による張力	(ton)	3.57		5.79
			2.77	4.01
上下波力による張力	(ton)	2.81		3.03
合計張力	(ton)	7.49	3.88	9.93
				5.12

Table 2.18 係留索の海底からの立ち上がり角度

状態	$\theta$	$\cos \theta$	$\sin \theta$
試験状態	26deg	0.8988	0.4384
設計状態	18deg	0.9511	0.3090
両者の比		0.945	1.422

Table 2.19 外力による張力（小型吸着床の場合）

項目	波高	設計波 (7.3m)		参考値 (10m)	
		計算	試験結果に基づく算定	計算	試験結果に基づく算定
風、潮流による張力	(ton)	0.72	0.72*	0.72	0.72*
水平波力による張力	(ton)	2.22		3.58	
上下波力による張力	(ton)	3.05	2.28	3.34	3.13
合計張力	(ton)	5.99	3.00	7.64	3.85

\*計算値を使用

Table 2.20(1/2) 最大張力（大型吸着床の場合）

項目	波高	設計波 (7.3m)		参考値 (10m)	
		計算	試験結果に基づく算定	計算	試験結果に基づく算定
初期張力	(ton)	1.0	1.0	1.0	1.0
外力による張力	(ton)	7.49	3.88	9.93	5.12
合計張力	(ton)	8.49	4.88	10.93	6.12
安全率		3.7	6.4	2.9	5.1

引張り強さ：31.2トン（マリンタフロープ、50φ）

Table 2.20(2/2) 最大張力（小型吸着床の場合）

項目	波高	設計波 (7.3m)		参考値 (10m)	
		計算	試験結果に基づく算定	計算	試験結果に基づく算定
初期張力	(ton)	1.0	1.0	1.0	1.0
外力による張力	(ton)	5.99	3.00	7.64	3.85
合計張力	(ton)	6.99	4.00	8.64	4.85
安全率		4.5	7.8	3.6	6.4

引張り強さ：31.2トン（マリンタフロープ、50φ）

Table 2.21(1/2) アンカーブロック重力（大型吸着床の場合）

項目	波高	設計波 (7.3m)		参考値 (10m)	
	計算	試験結果に基づく算定	計算	試験結果に基づく算定	
合計張力	(ton)	8.49	4.88	10.93	6.12
アンカーブロック重力	(ton)	34	20	44	24

Table 2.21(2/2) アンカーブロック重力（小型吸着床の場合）

項目	波高	設計波 (7.3m)		参考値 (10m)	
	計算	試験結果に基づく算定	計算	試験結果に基づく算定	
合計張力	(ton)	6.99	4.00	8.64	4.85
アンカーブロック重力	(ton)	28	16	34	19

Table 2.22 吸着床に作用する外力の計算値

項目	大型吸着床			小型吸着床	
	波高	設計波	参考値	設計波	参考値
水平外力	(ton)	7.3m	10m	7.3m	10m
上下外力	(ton)	1.47	2.17	0.69	1.01

項目	大型吸着床			小型吸着床	
	波高	設計波	参考値	設計波	参考値
水平外力	(ton)	11.65	15.96	6.05	8.29
上下外力	(ton)				

Table 2.23 外力による張力の計算値

項目	大型吸着床		小型吸着床		
	波高	設計波	参考値	設計波	参考値
		7.3m	10m	7.3m	10m
外力による張力 (ton)		3.91	5.37	2.03	2.79

Table 2.24 水槽試験結果から算定した張力

項目	大型吸着床			小型吸着床	
	波高	設計波	参考値	設計波	参考値
		7.3m	10m	7.3m	10m
潮流による張力 (ton)		0.27	0.27	0.11	0.11
波による張力 (ton)		1.91	2.64	1.02	1.40
外力による張力の合計 (ton)		2.18	2.91	1.13	1.51

Table 2.25(1/2) 最大張力 (大型吸着床の場合)

項目		波高	設計波 (7.3m)	参考値 (10m)	
		計算	試験結果に基づく算定	試験結果に基づく算定	
初期張力	(ton)	0.76	0.76	0.76	0.76
外力による張力	(ton)	3.91	2.18	5.37	2.91
合計張力	(ton)	4.67	2.94	6.13	3.67
安全率		4.8	7.6	3.6	6.1

引張り強さ : 22.3ton (ナイロンエイトロープ、35φ)

Table 2.25(2/2) 最大張力 (小型吸着床の場合)

項目		波高	設計波 (7.3m)	参考値 (10m)	
		計算	試験結果に基づく算定	計算	試験結果に基づく算定
初期張力	(ton)	0.33	0.33	0.33	0.33
外力による張力	(ton)	2.03	1.13	2.79	1.51
合計張力	(ton)	2.36	1.46	3.12	1.84
安全率		9.4	15.3	7.2	12.1

\*引張り強さ : 22.3ton (ナイロンエイトロープ、35φ)

Table 2.26 最大張力 (大型吸着床の場合)

項目	設計条件	参考値	
		(波高=7.3m、潮流=2ノット)	(波高=10m、潮流=2ノット)
風圧力	(ton)	0.22	0.22
潮流力	(ton)	0.84	0.84
水平波力	(ton)	3.40	5.51
上下波力	(ton)	1.35	1.35
最大張力	(ton)	4.66	6.71
安全率		4.4	3.1

\*最大張力 = ((水平力)<sup>2</sup> + (上下波力)<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>

Table 2.27 鋼管フレームに作用する荷重

項目	波高 (kg · m)	設計波 7.3m	参考値 10m
曲げモーメント	16.9	23.2	
曲げ応力 (kg / mm <sup>2</sup> )	0.5	0.7	
歪 (mm)	2.9	4.0	

鋼管フレーム : SGP80A 管 引張り強さ = 30 kg/mm<sup>2</sup>

Table 2.28 吸着床フレームにかかる力の算定のため条件

寸法	強度部材
2 m × 2 m	枠 : L型鋼 (50 × 50 × 6 ton)、丸鋼 (φ6) × 4 本
4.5 m × 4.2 m	枠, 中央部材、斜材 : L型鋼 (75 × 75 × 9 ton)

Table 2.29 吸着床に作用する荷重

種類	項目	波高 (kg · m)	設計波 7.3m	参考値 10m
小型吸着床	曲げモーメント	44.8	61.4	
	歪 (mm)	5	7	
	曲げ応力 (kg / mm <sup>2</sup> )	6.19	8.48	
	曲げ応力/ 降伏点 (%)	29	40	
大型吸着床	曲げモーメント	137.4	188.2	
	歪 (mm)	12	16	
	曲げ応力 (kg / mm <sup>2</sup> )	5.56	7.62	
	曲げ応力/ 降伏点 (%)	26	36	

\*吸着床材質 : SUS316、引張強さ = 53 kg/mm<sup>2</sup>、降伏点 = 21 kg/mm<sup>2</sup>

Table 2.30 鋼管フレームの移動量と係留ロープ張力（大型吸着床の場合）

項目	波高 （m）	設計波（7.3m）		参考値（10m）	
		計算	試験結果に基づく算定	計算	試験結果に基づく算定
移動量	(m)	9.8	5.1	13.0	6.7
張力	(ton)	8.49	4.88	10.93	6.12

Table 2.31 ロープ類の安全率

項目	波高 （m）	設計波（7.3m）		参考値（10m）	
		計算	試験結果に基づく算定	計算	試験結果に基づく算定
係留索	大型吸着床	3.7	6.4	2.9	5.1
	小型吸着床	4.5	7.8	3.6	6.4
垂下ロープ	大型吸着床	4.8	7.6	3.6	6.1
	小型吸着床	9.4	15.3	7.2	12.1
鋼管フレーム取り付けロープ	大型吸着床	4.4	(7.3)	3.1	(5.4)

注：( )は、大型吸着床の場合の係留策、垂下ロープの計算と試験結果に基づく算定値の比より推定した。

Table 2.32 40 ton型アンカーブロックの余裕重量

項目	波高 （m）	設計波（7.3m）		参考値（10m）	
		計算	試験結果に基づく算定	計算	試験結果に基づく算定
小型吸着床の場合 (ton)	6	20	-4	16	
大型吸着床の場合 (ton)	12	24	6	21	

Table 2.33 鋼管フレーム、吸着床の曲げ応力/降伏点

	波高 (%)	設計波	参考値
		7.3 m	10 m
		計算	計算
钢管フレーム	5	7	
大型吸着床	26	36	
小型吸着床	29	40	

尚、钢管フレームの降伏点は大型吸着床の値より推定した。

Table 2.34 供試模型諸元

	重量(kg)	全浮力(kg)	設置時浮力(kg)	余剰浮力(kg)
生け簀フレーム	1,400	- - -	- - -	- - -
吸着床 (含むウエイト)	2,120	- - -	- - -	- - -
フロート	生け簀に含む	5,080	3,520	1,560
クッションブイ	80×4個	2,720	470×4個	210×4個
合計	3,840	7,800	5,400	2,400

尚、設置時浮力と重量の差( $390 \times 4 = 1,560$  kg)は、係留索の初期張力(約 1 ton)の付加分に相当する。

Table 2.35 試験状態

外力種類＼係留本数	4本	3本	1本
規則波	○	○	○
不規則波	○	- - -	- - -
潮流	○	- - -	- - -
方向	生け簀フレームに直角方向		対角線方向

Table 2.36 試験結果（規則波中）

係留本数	周期	波高	初期張力	係留策張力	吊下策張力
	T <sub>w</sub> (sec)	H <sub>w</sub> (m)	T <sub>0</sub> (ton)	T <sub>1A</sub> (ton)	T <sub>2A</sub> (ton)
4 本	9.6	4.3	0.98	0.70	0.70
	9.6	9.3	0.98	1.36	0.98
	12.0	4.6	0.98	0.96	0.58
	12.0	6.3	0.98	1.18	0.77
3 本	12.0	4.4	0.38	0.61	0.59
	12.0	7.3	0.38	1.02	0.70
1 本	12.0	4.3	0.71	0.63	0.50
	12.0	6.4	0.71	1.03	0.62
4 本（前回仕様）	9.6	3.8	1.65	1.48	0.76
	9.6	5.7	1.65	2.22	0.89

Table 2.37 試験結果（不規則波中）

係留本数	有義周期 T <sub>s</sub> (sec)	有義波高 H <sub>s</sub> (m)	最大波高 H <sub>MAX</sub> (m)	係留索張力		吊下索張力	
				T <sub>1A</sub> (ton)		T <sub>2A</sub> (ton)	
				有義値	最大値	有義値	最大値
4 本	9.7	4.8	7.4	0.60	1.04	0.46	0.99
	同上+潮流 (1.9 k <sub>t</sub> )			1.28	1.72	0.31	0.75
4 本（前回仕様）	9.7	4.8	7.4	1.10	2.78	0.55	1.50

Table 2.38 試験結果（潮流中）

係留本数	潮流速	主係留索初期張力	係留策張力	吊下げ策張力
	V (ノット)	T <sub>0</sub> (ton)	T <sub>1A</sub> (ton)	T <sub>2A</sub> (ton)
4 本	1.9	0.98	0.42	0.1
4 本（前回仕様）	2.1	1.65	0.55	0.11

Table 2.39 海中有用金属捕集材実海域試験装置—現地搬入・組立・設置工程—

項目	1999年9月												1999年10月																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	
(準備作業)	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	
資材受入準備等																																				
(資材搬入)																																				
鋼管フレーム																																				
フロート																																				
大型吸着床																																				
小型吸着床																																				
ロープ及びロープ加工品																																				
SUS316シャックル																																				
標準灯																																				
捕集材カセット																																				
重錨																																				
(陸上組立作業)																																				
大型吸着床組立																																				
アンカー・ブロック製作																																				
鋼管フレーム組立																																				
係留ユニット組立																																				
アンカー・ブロック出来型検査																																				
(海上設置作業)																																				
資材積込																																				
係留ユニット																																				
係留索張力調整																																				
鋼管フレーム海上取付																																				
吸着床取付・取り外し確認																																				
完成検査																																				

Table 2.40 海水中有用金属捕集材実海域試験装置—アンカー製作工程—

工種	種別	単位	数量	1999年9月																													
				1 水	2 木	3 金	4 土	5 日	6 月	7 火	8 水	9 木	10 金	11 土	12 日	13 月	14 火	15 水	16 木	17 金	18 土	19 日	20 月	21 火	22 水	23 木	24 金	25 土	26 日	27 月	28 火	29 水	30 木
(準備作業)		式	1																														
アンカー方塊製作		個	4	3.5*3.5*1.45																													
	底面工	式	1	歎心、熟鉄板設置																													
	型枠組立	m^2	81	鉄筋組立	式	1	D13用心鉄筋																										
	コンクリート打設	m^2	71																														
	養生	式	1																														
	脱型	m^2	81																														
	後片づけ	式	1																														
	出来型検査																																

車両の出入り

運搬用	4tユニック車	台	1																												
10tダンプ車		台	1																												
コンクリート打設	コンクリートミキサー車	台	20																												

Table 2.41 アンカーブロック検査結果

品名	仕様・規格	材料・材質	検査の種類	検査方法	検査結果
	40ton型*4個 3.5m*3.5m*1.45m	コンクリート製方塊	・外観 ・数量、寸法、重量 ・性能（材料、強度）	・目視 ・測定、計算 ・メーカー試験成績表	良 良 良
アンカーブロック			・外観（海底面） ・設置位置 ・外観（姿勢、索の絡まり）	・音深 ・DGPS ・目視(RTV)	良 良 良
小型吸着床用 700kg型重錘	寸法： 0.7*0.7*0.7m 重量：790kg	コンクリート製方塊	・数量、寸法、外観 ・重量 ・性能（材料、強度）	・目視 ・測定、計算 ・メーカー試験成績表	良 良 良

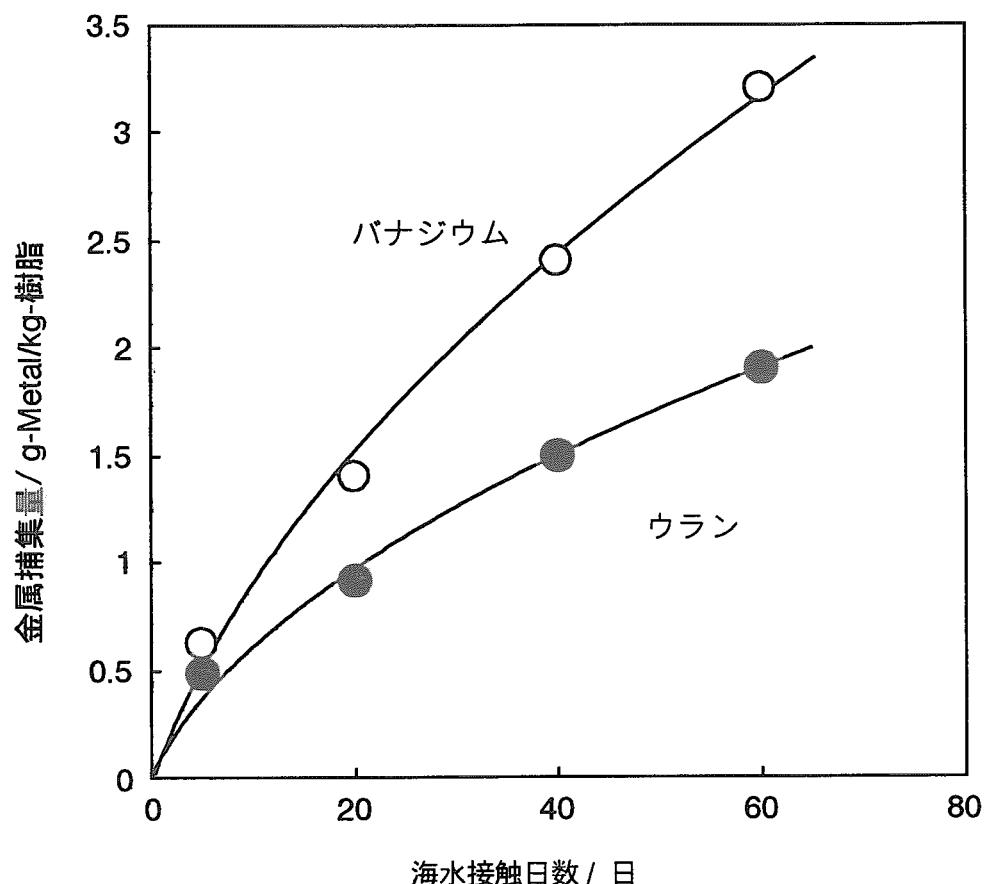


Fig. 1.1 海水中有用金属捕集性能

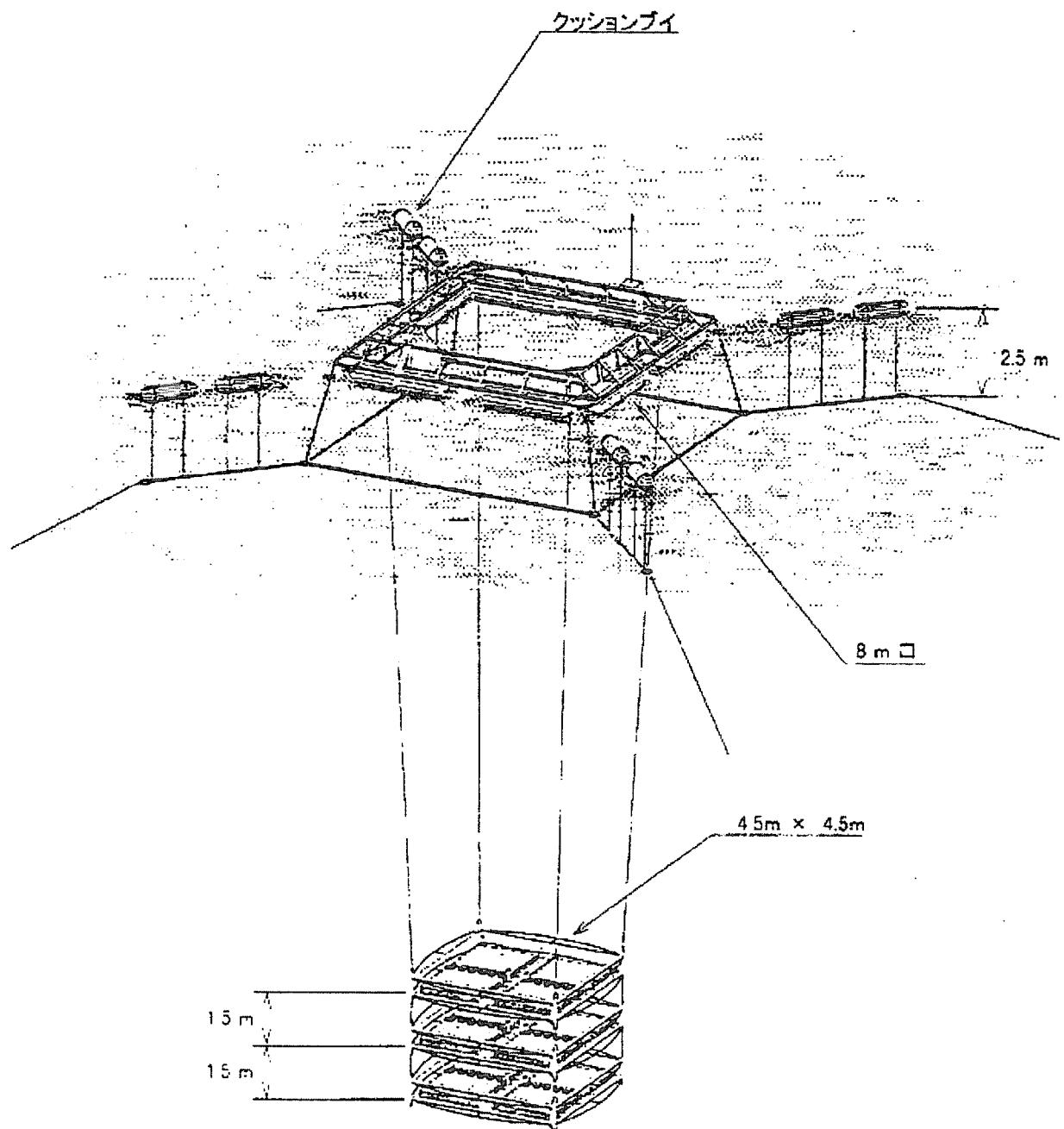


Fig. 2.1 実海域試験装置のイメージ図

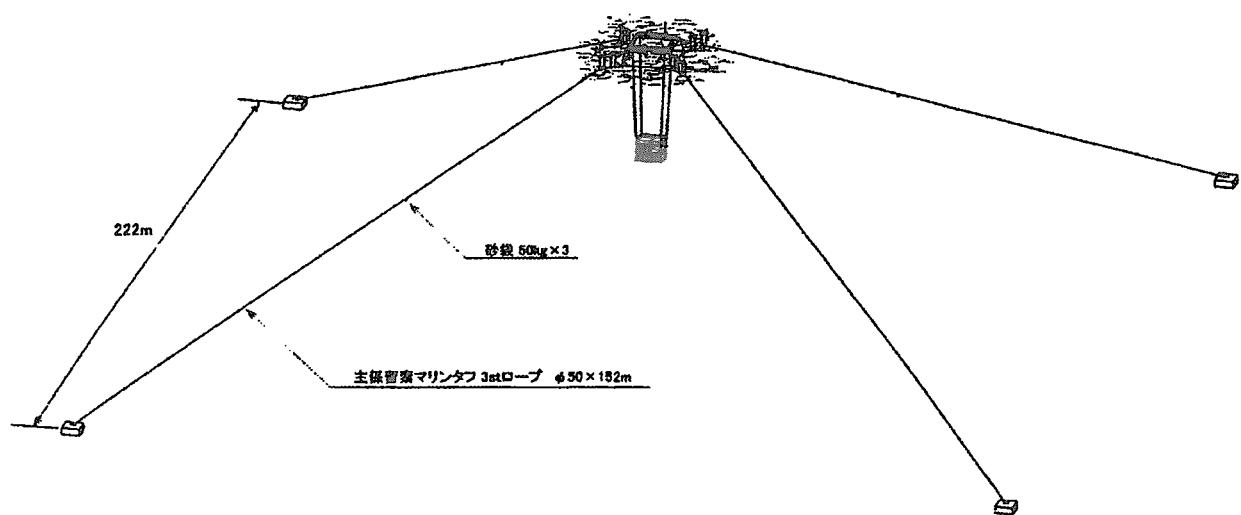


Fig. 2.2 実海域試験装置の設置イメージ図

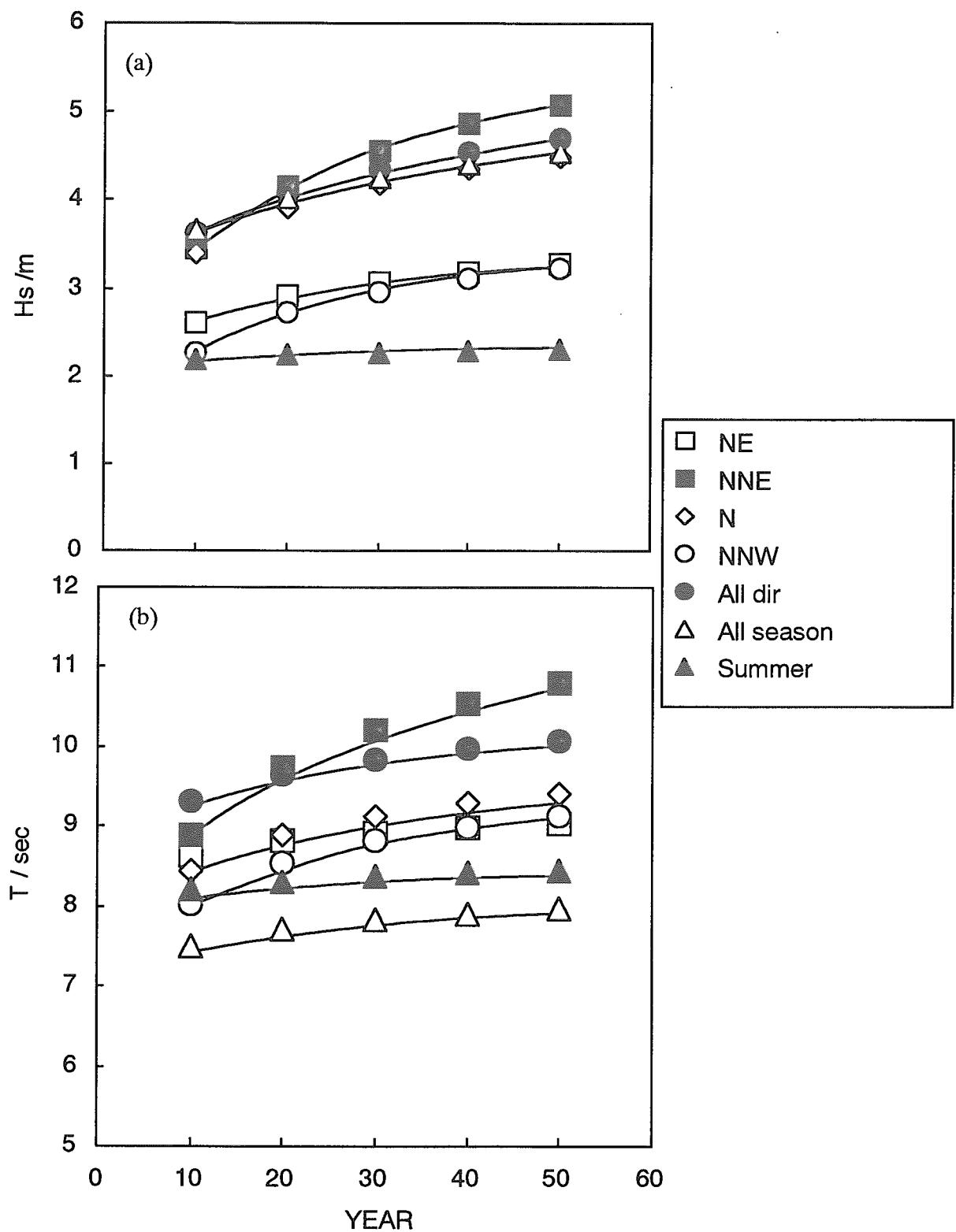


Fig. 2.3 確率波高(a):有義波高, (b):有義波周期

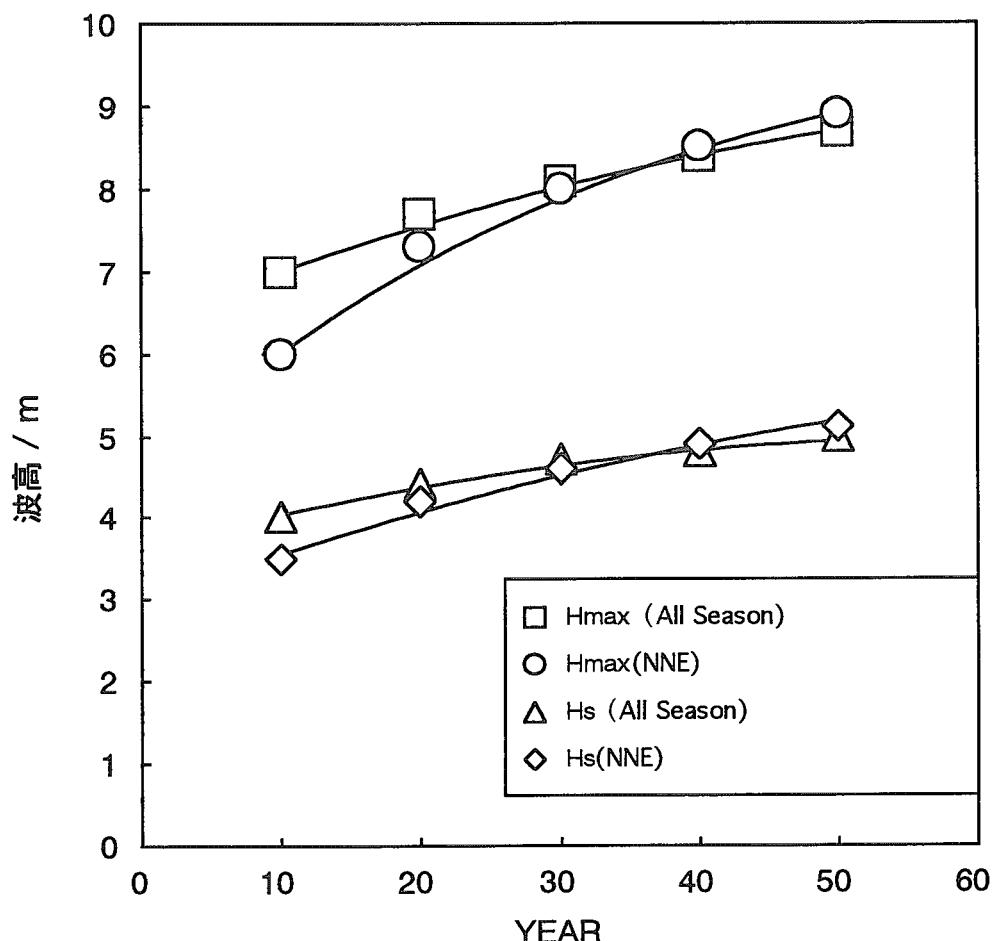


Fig. 2.4 確率波高(沖波換算波高)

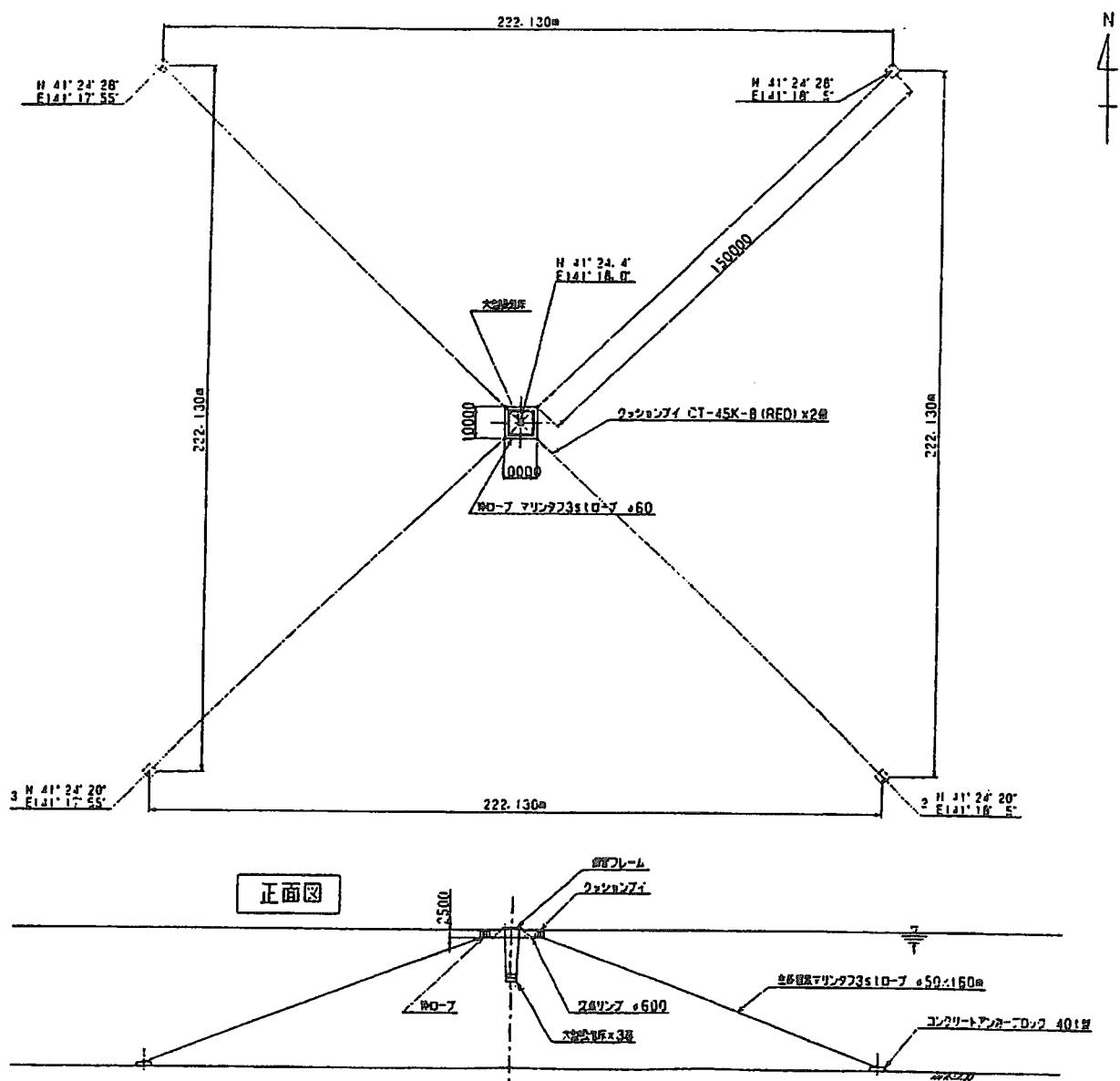


Fig. 2.5 係留施設平面図

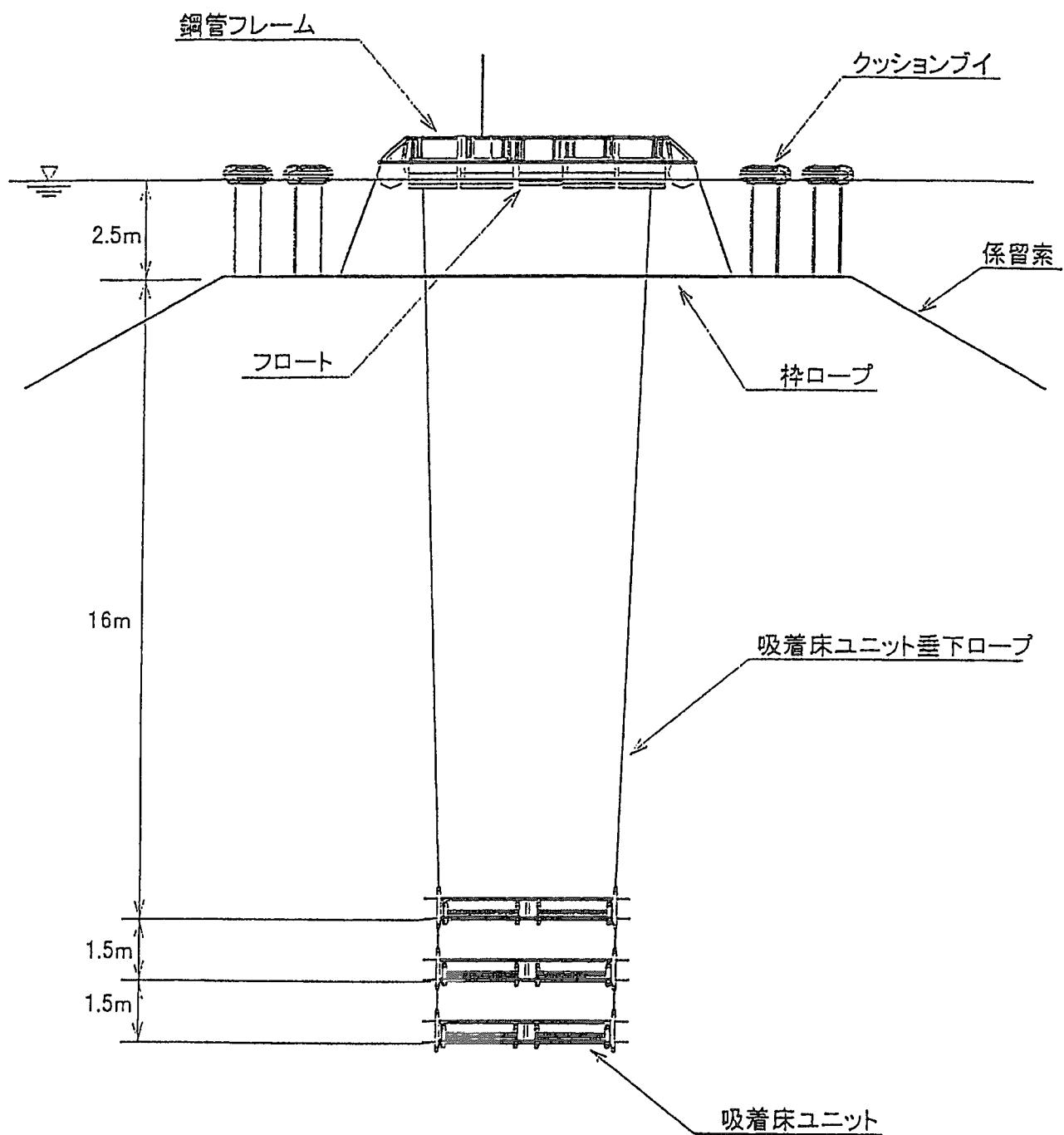


Fig. 2.6 実海域試験装置 全体図

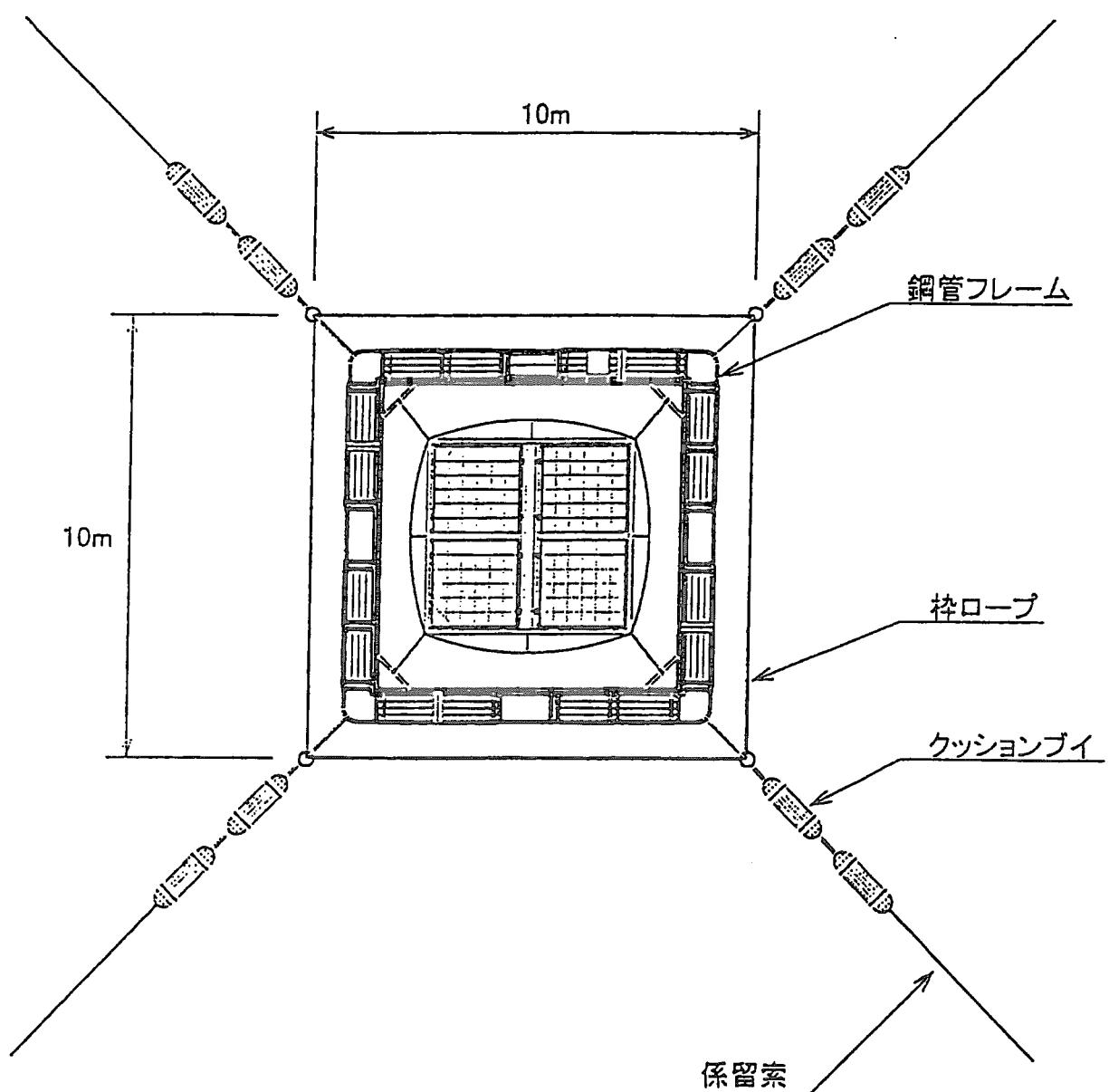


Fig. 2.7 実海域試験装置 全体図

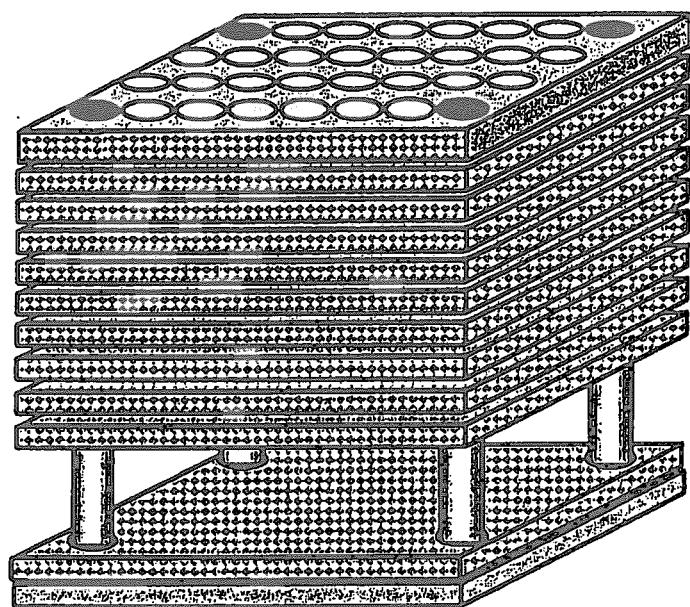


Fig. 2.8 カセット組立模式図

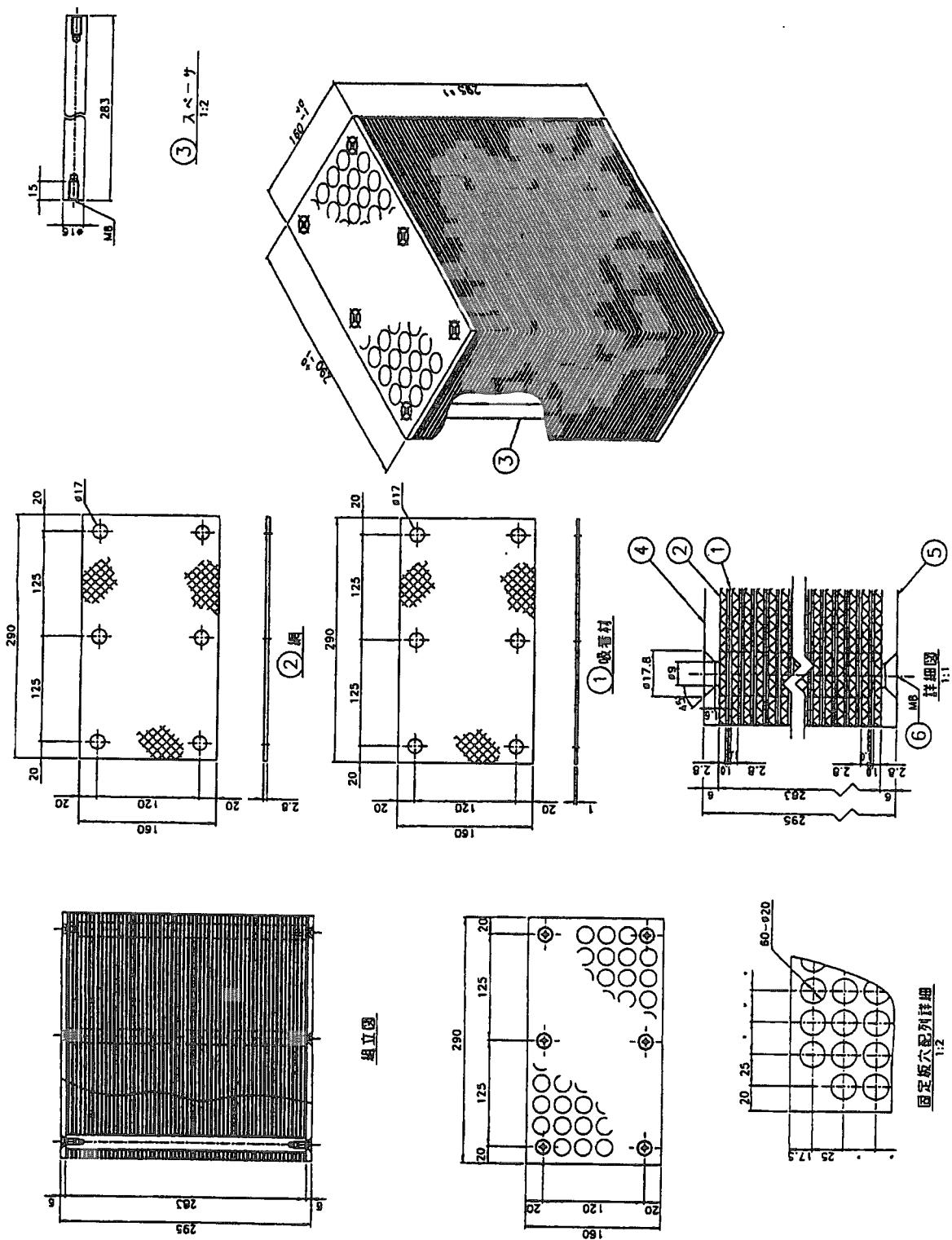


Fig. 2.9 捕集材力セット

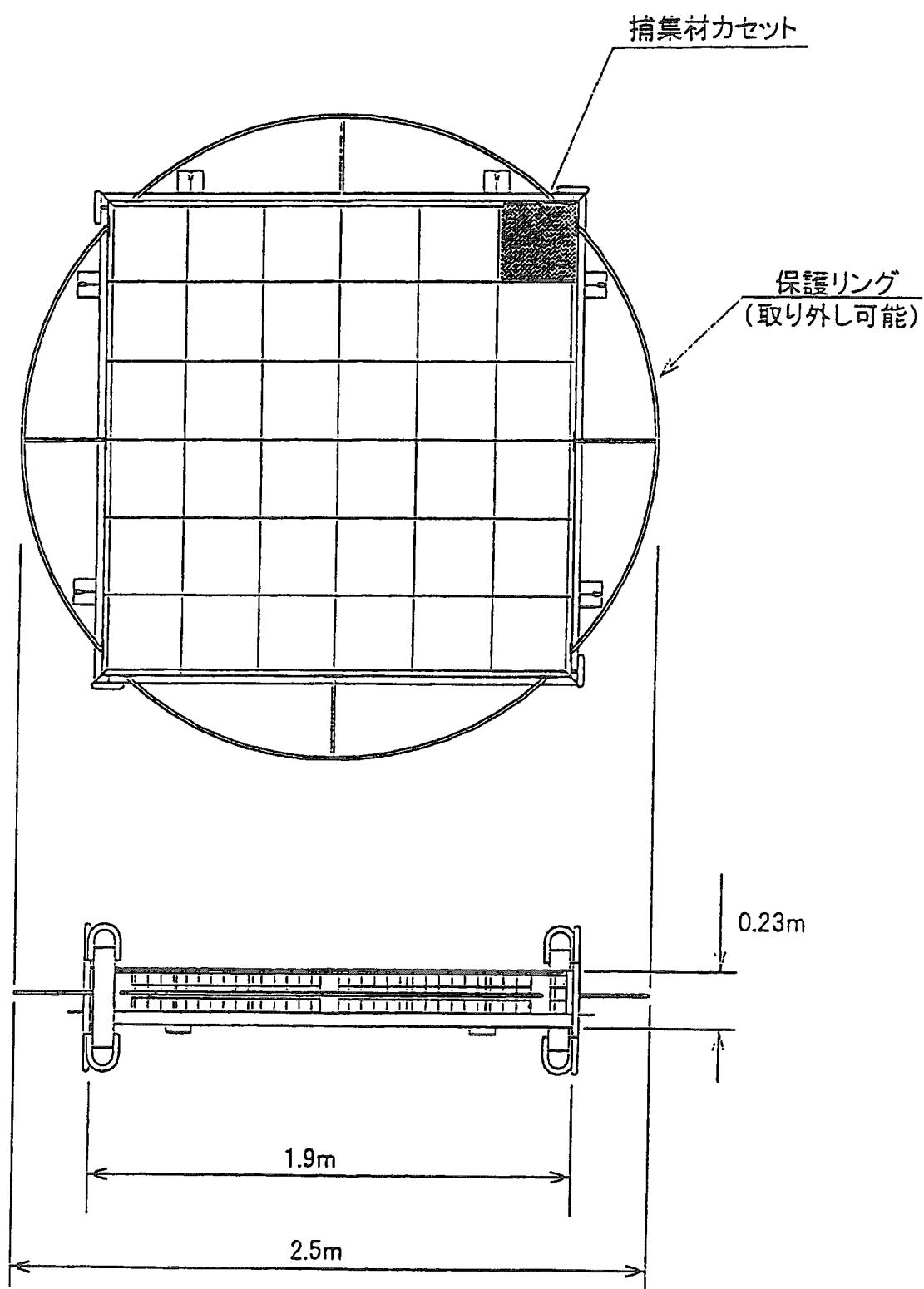


Fig. 2.10 小型吸着床略図

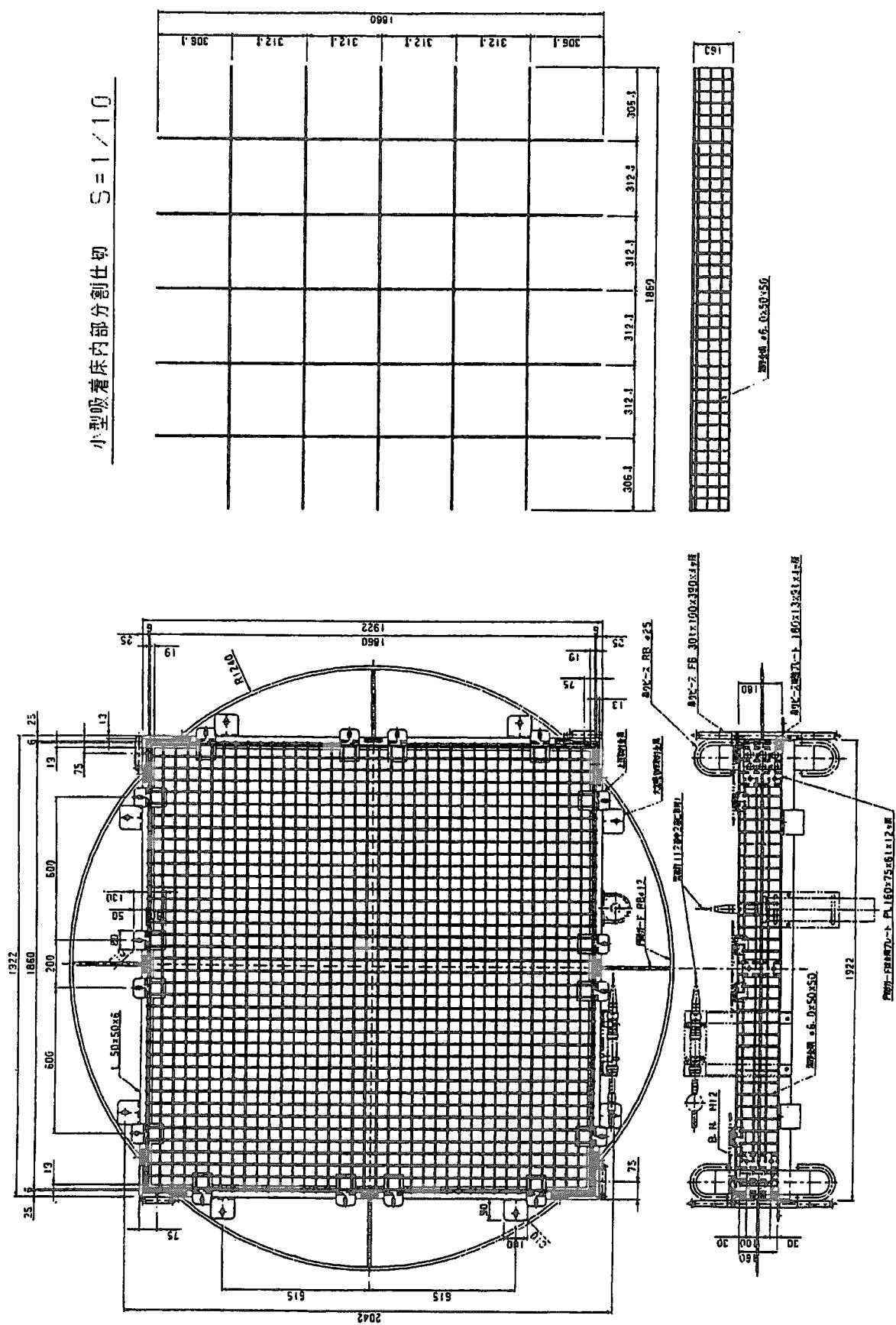


Fig. 2.11 小型吸着床詳細図

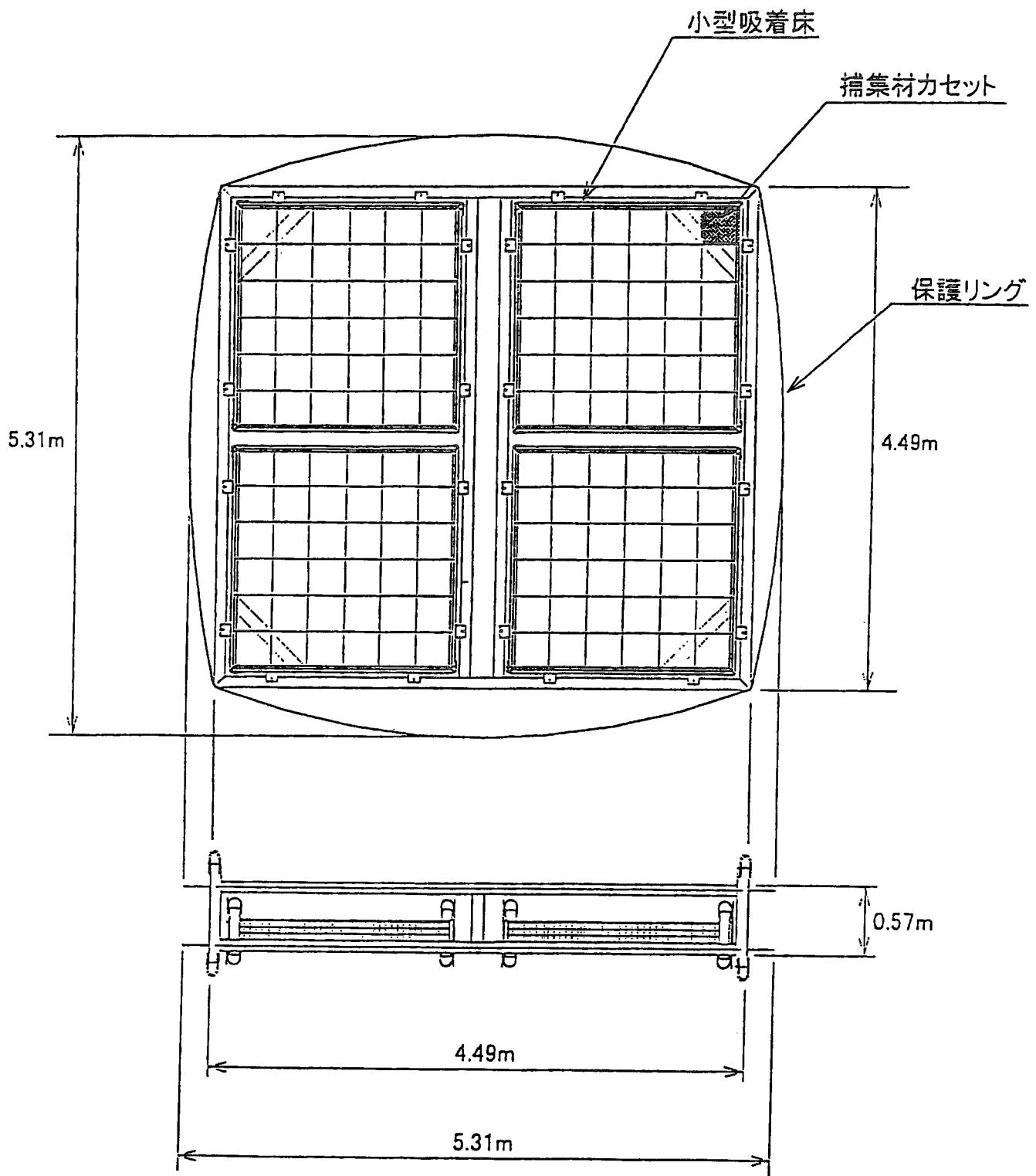


Fig. 2.12 大型吸着床略図

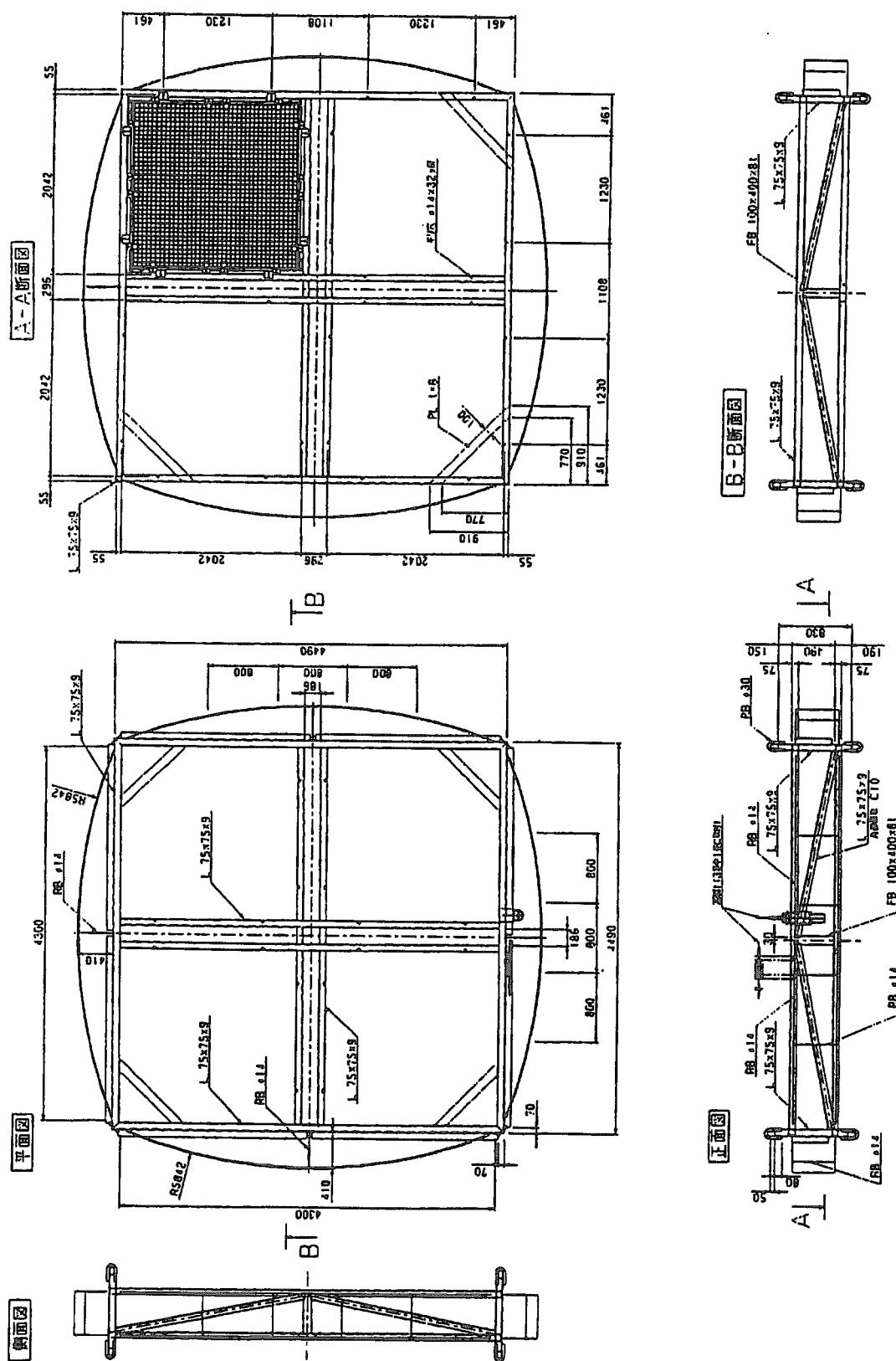


Fig. 2.13 大型吸着床詳細図

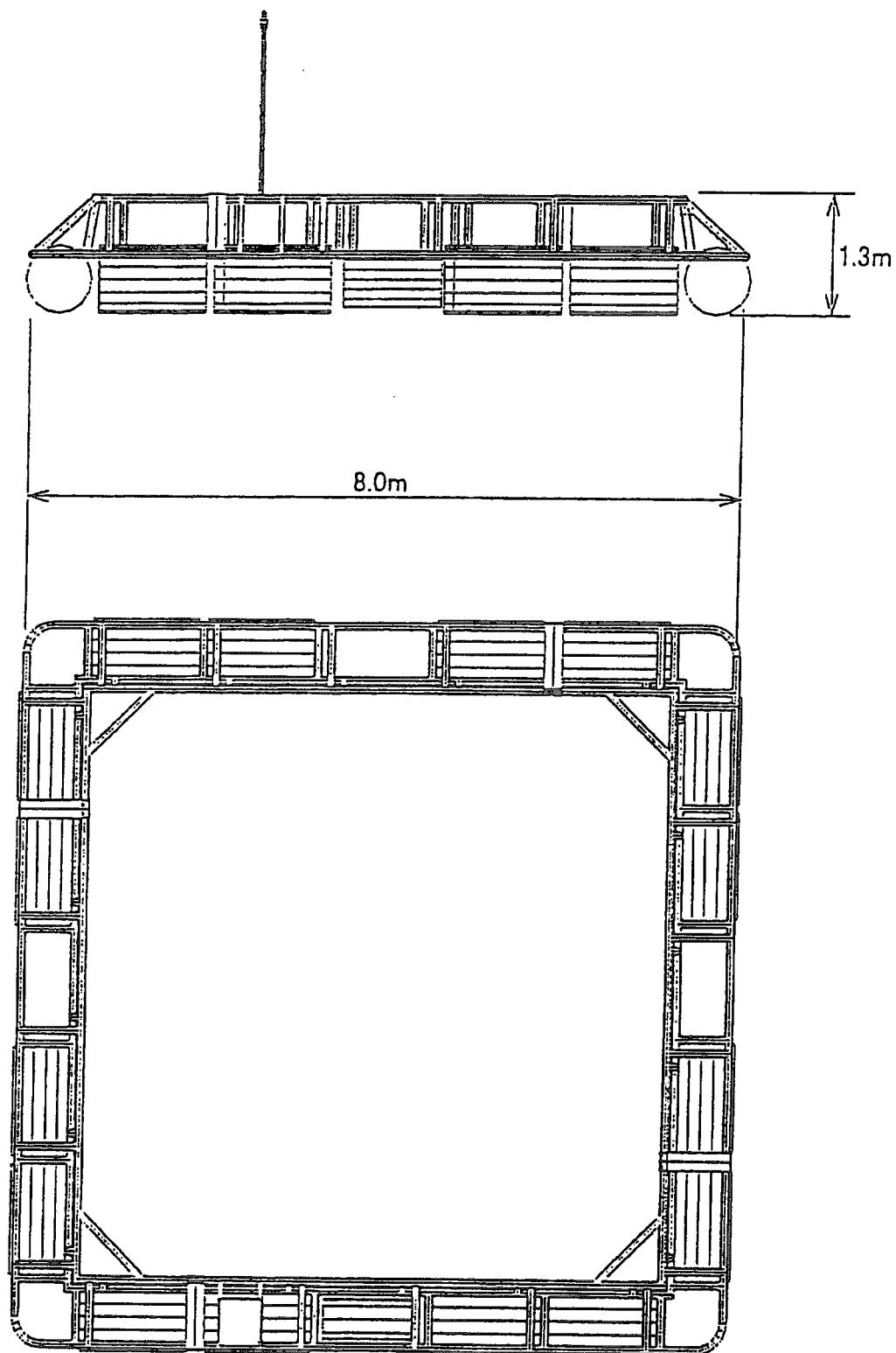


Fig. 2.14 鋼管フレーム

6. 56m x 6. 56m 角型鋼管フレーム S=1/30  
(大型吸着床設置時の状態)

## (大型吸着床設置時の状態)

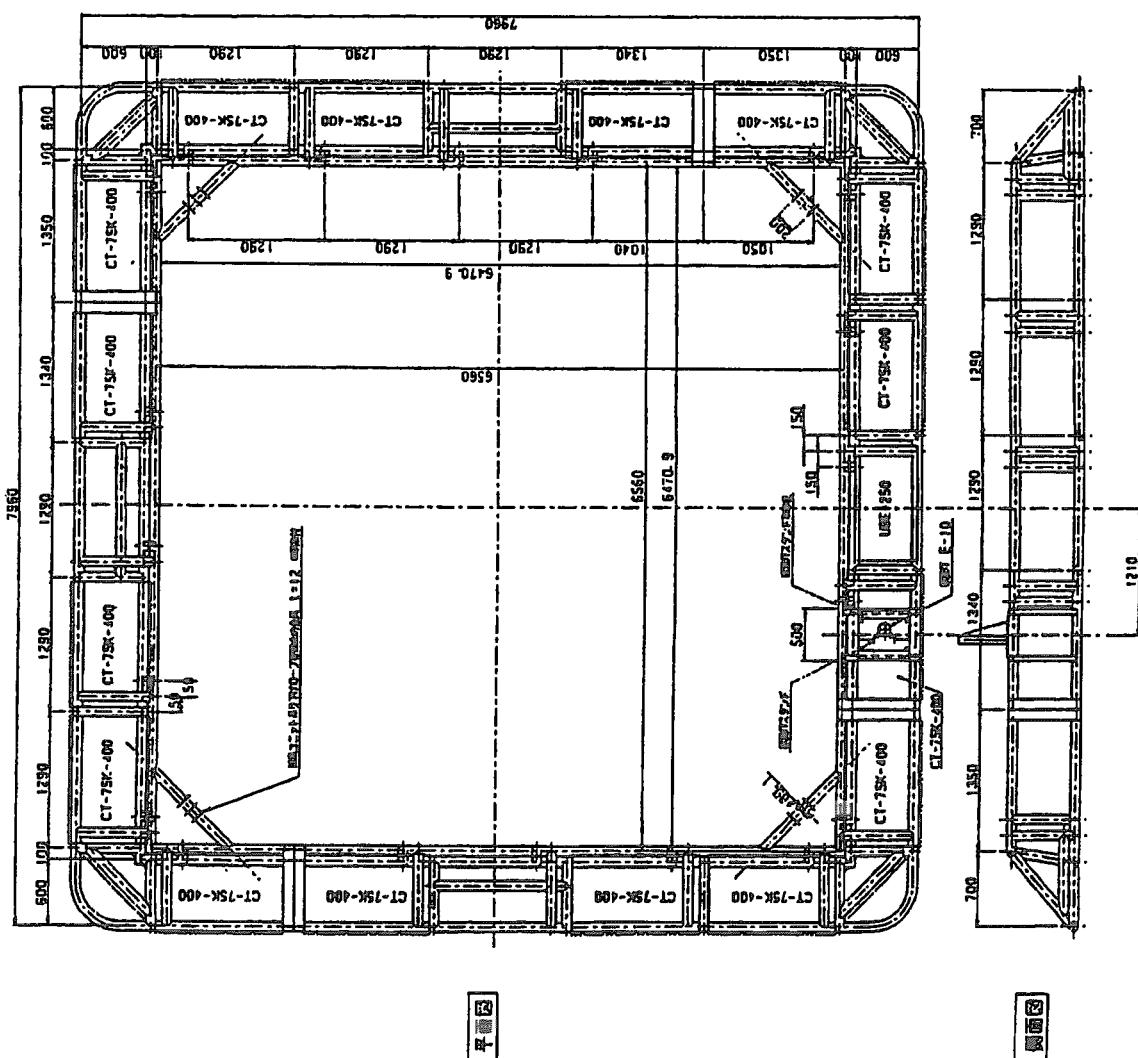


Fig. 2.15 鋼管フレームフロート詳細図（大型吸着床吊り下げ時）

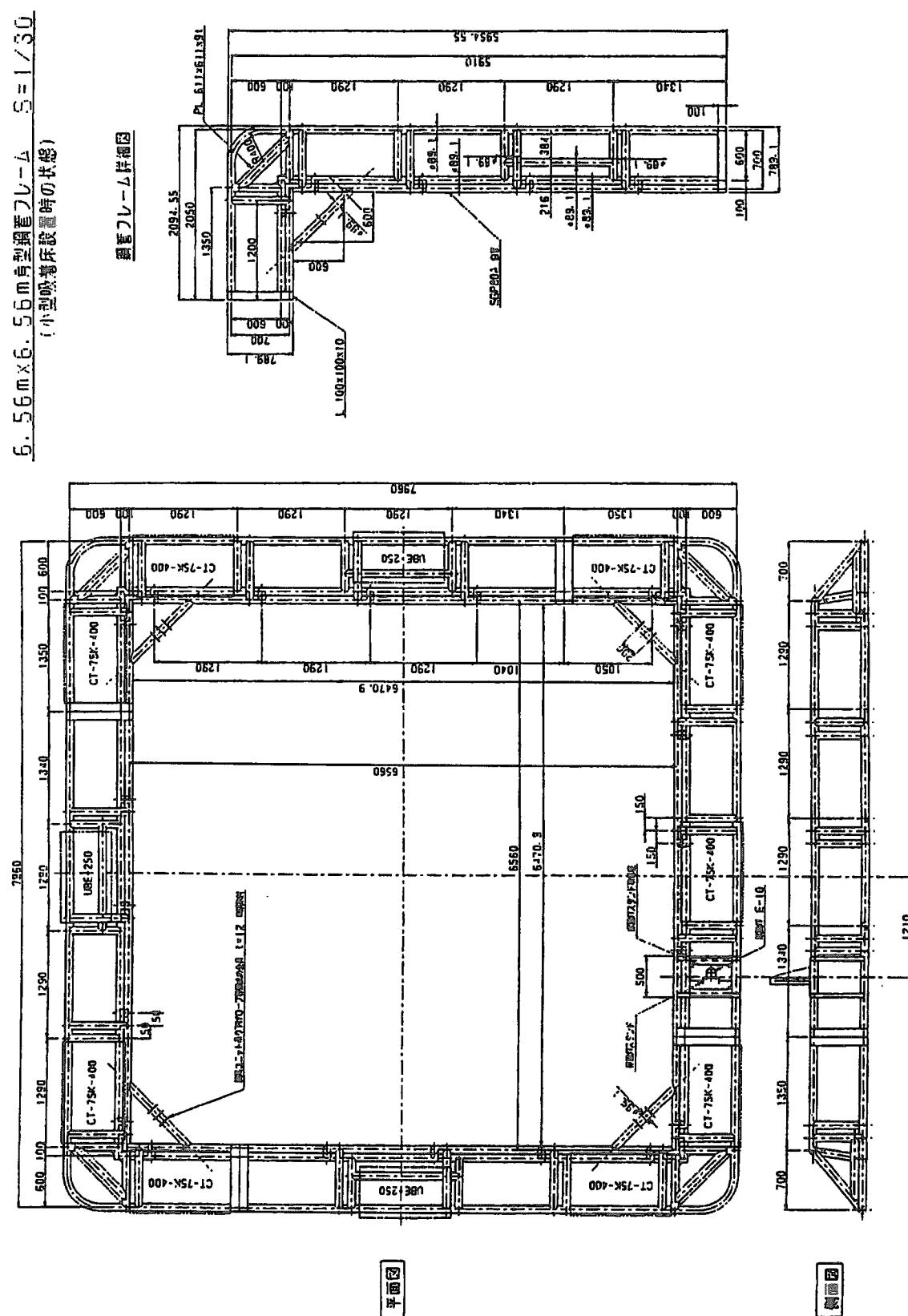


Fig. 2.16 鋼管フレームフロート詳細図（小型吸着床吊り下げ時）

## 40ton型アンカーブロック S=1/20

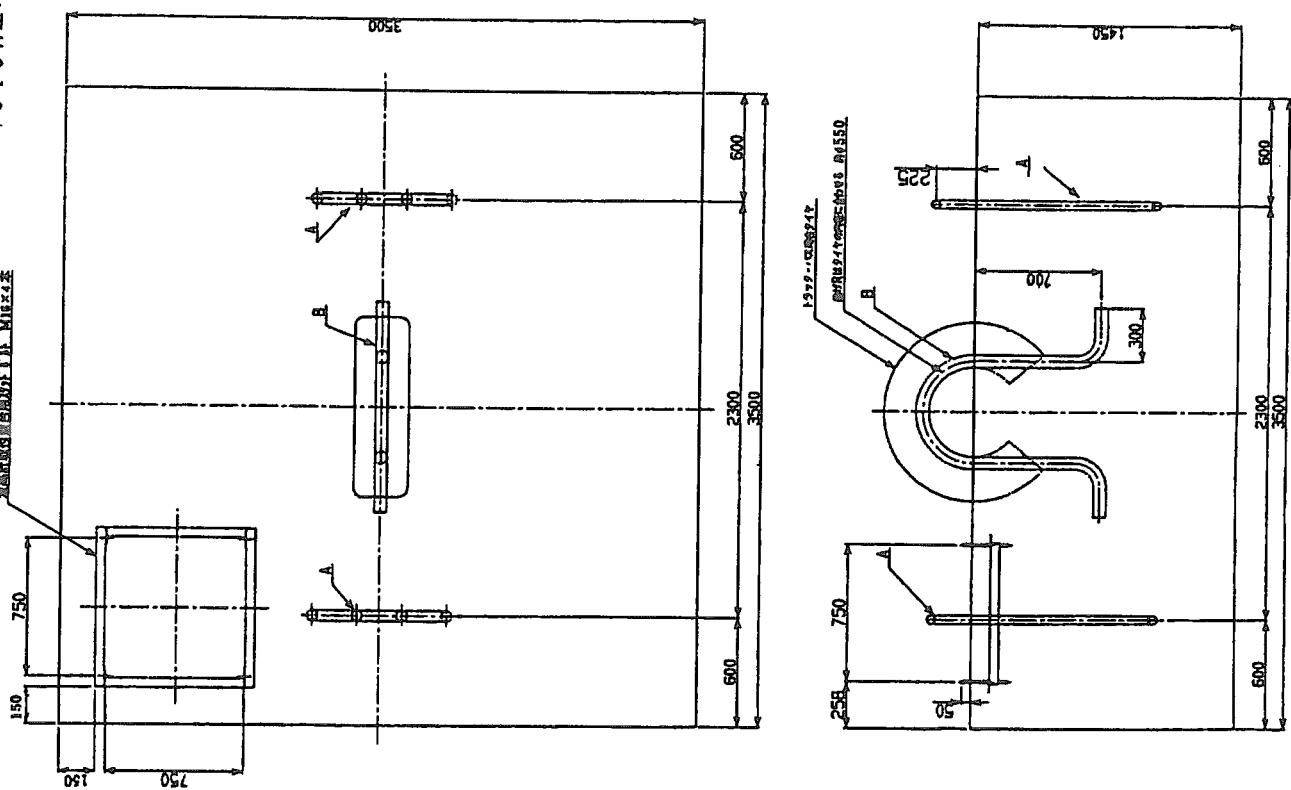


Fig. 2.17 アンカーブロック

- 1) 製作数量 4基
- 2) スタッドボルト付きは4基のうち1基とする

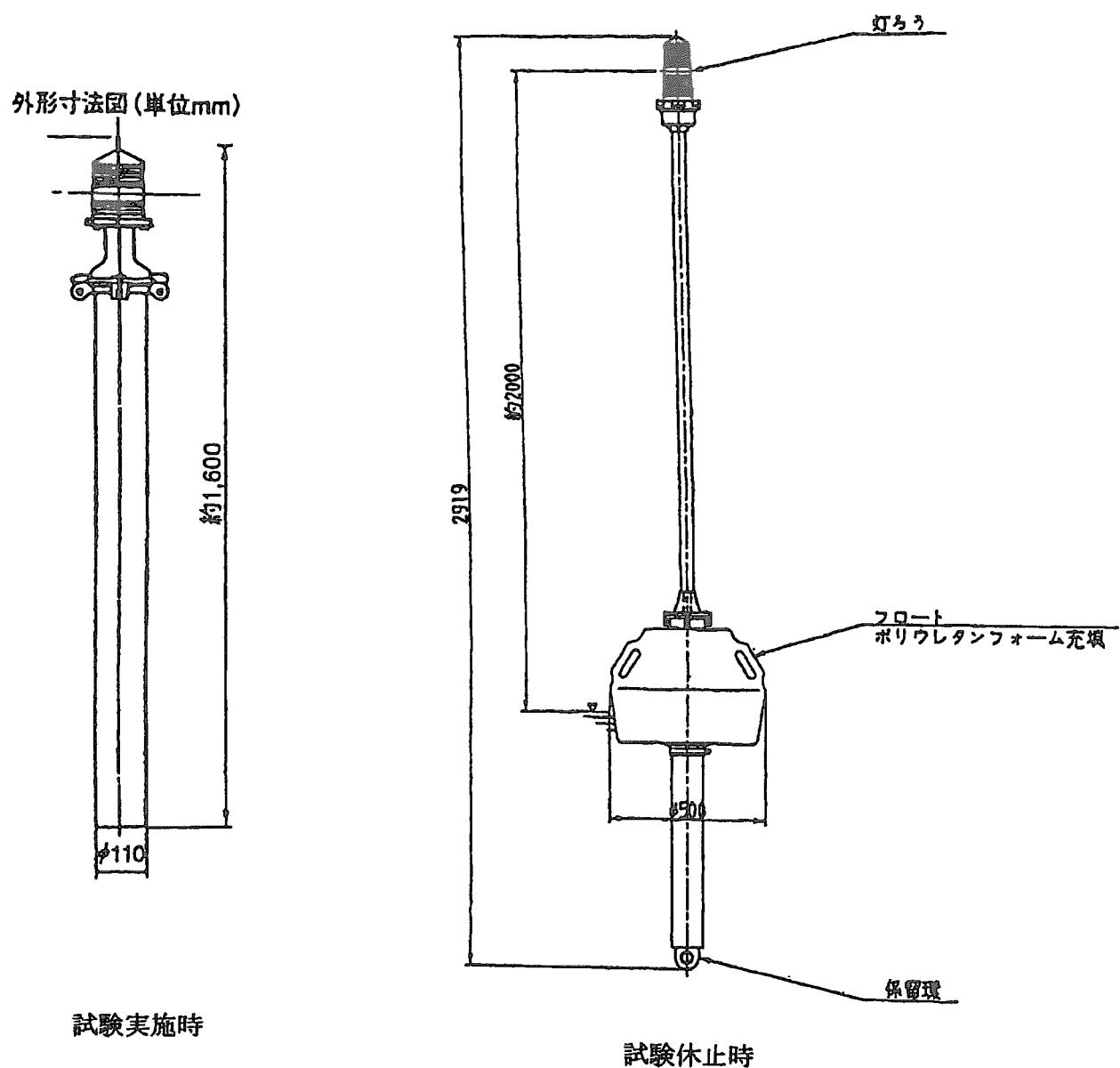


Fig. 2.18 標識灯

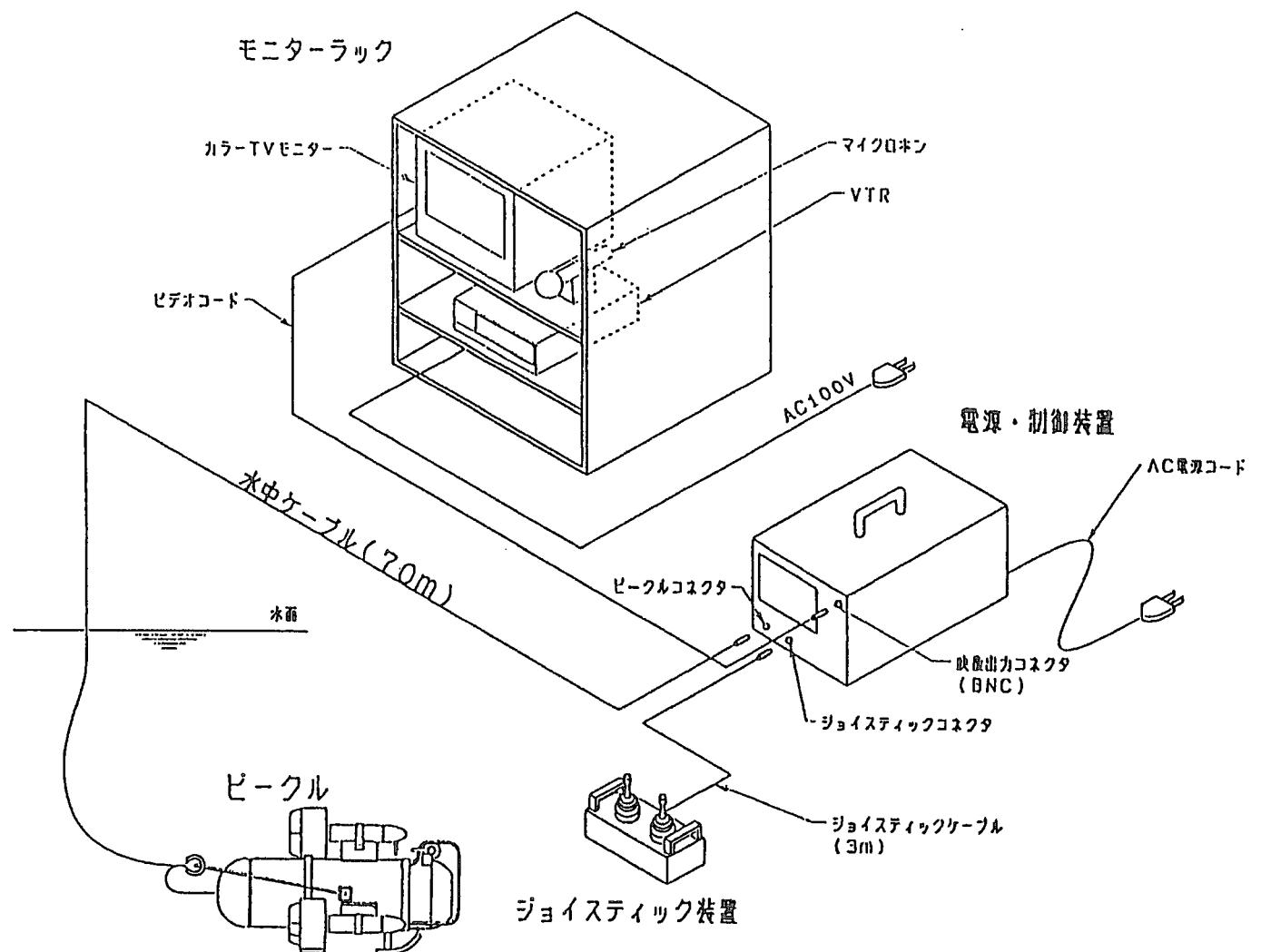


Fig. 2.19 水中モニター装置構成

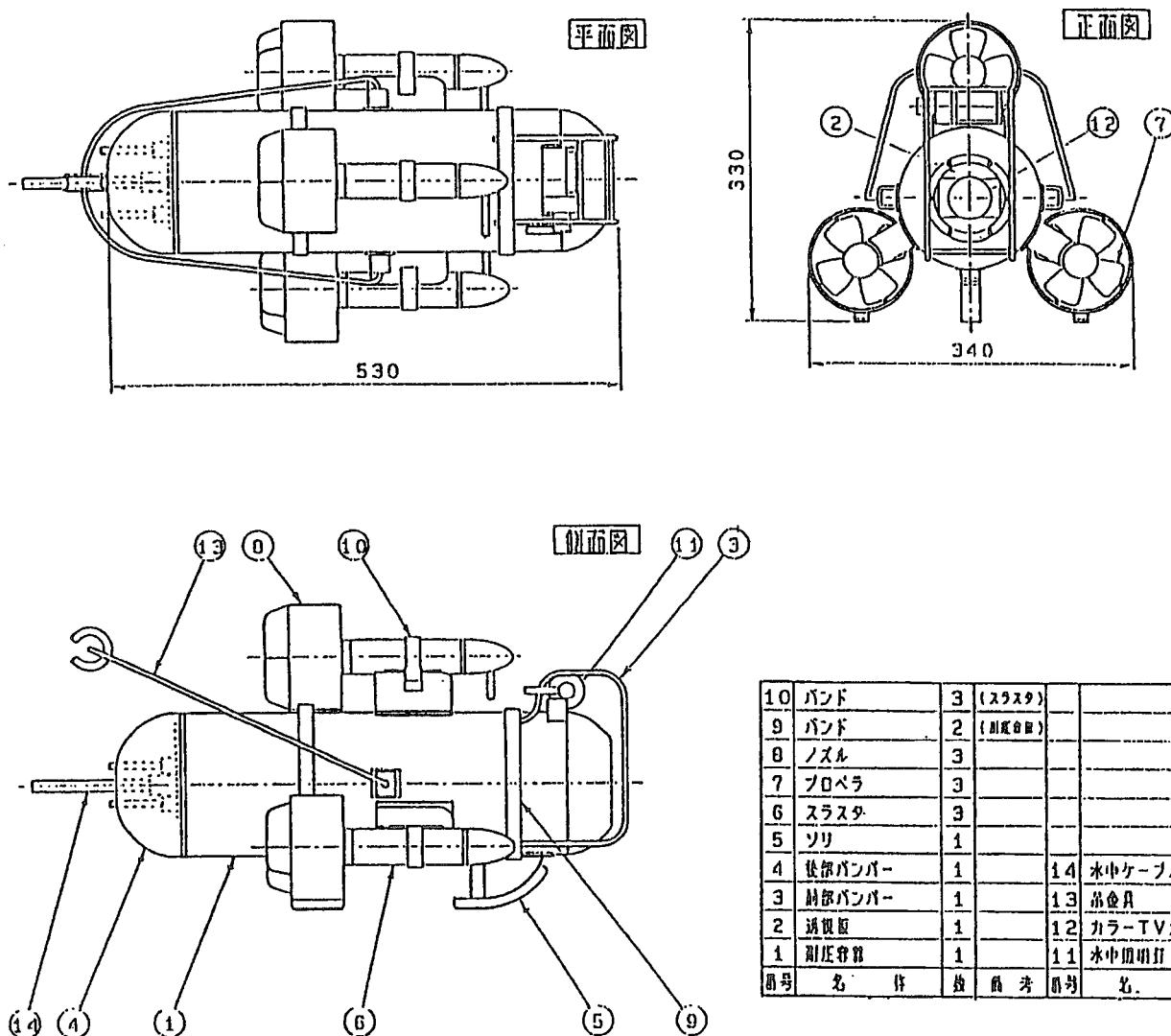


Fig. 2.20 水中モニター装置本体

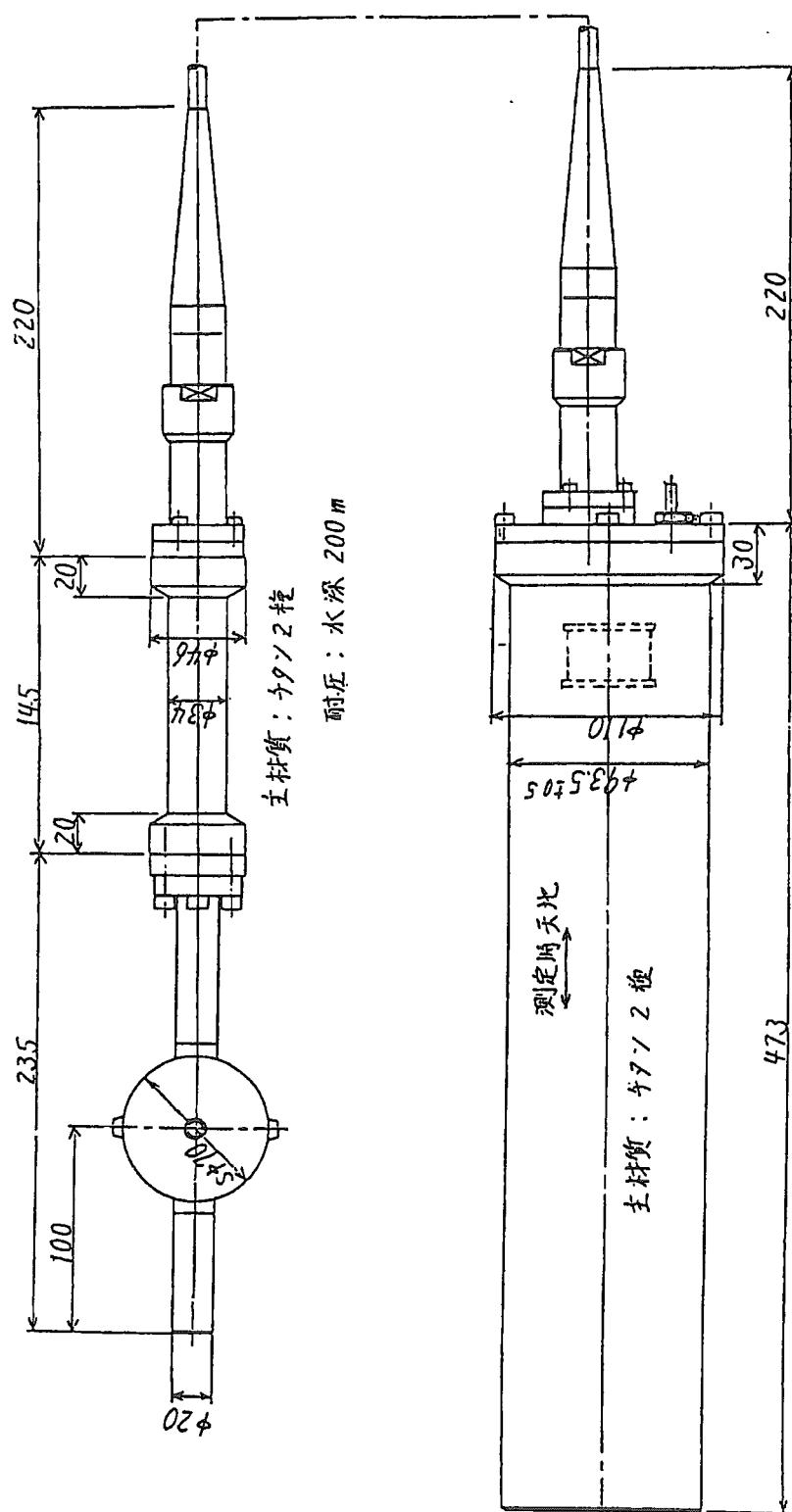


Fig. 2.21 電磁流速計外観

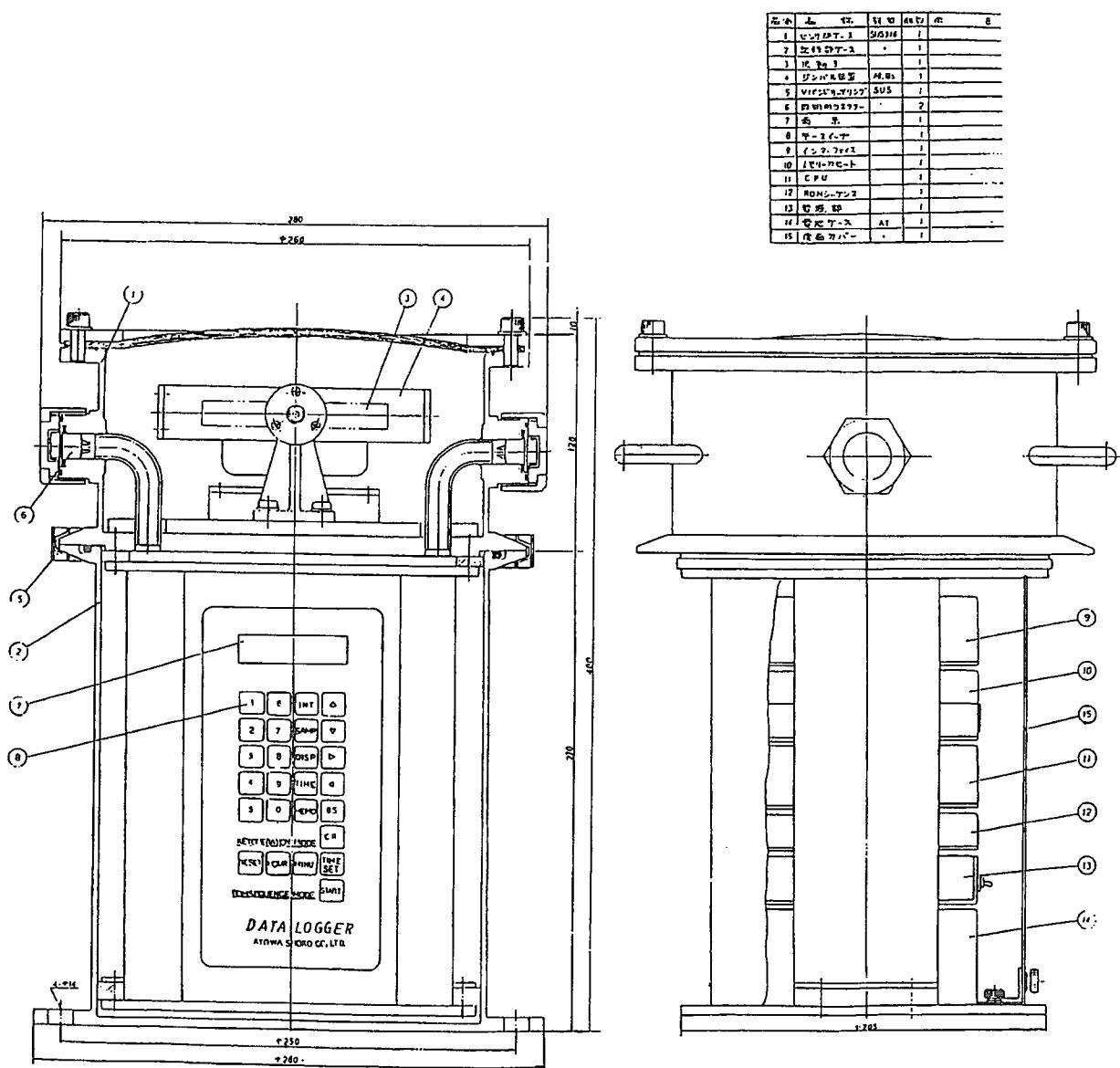


Fig. 2.22 超音波式波高計外観図

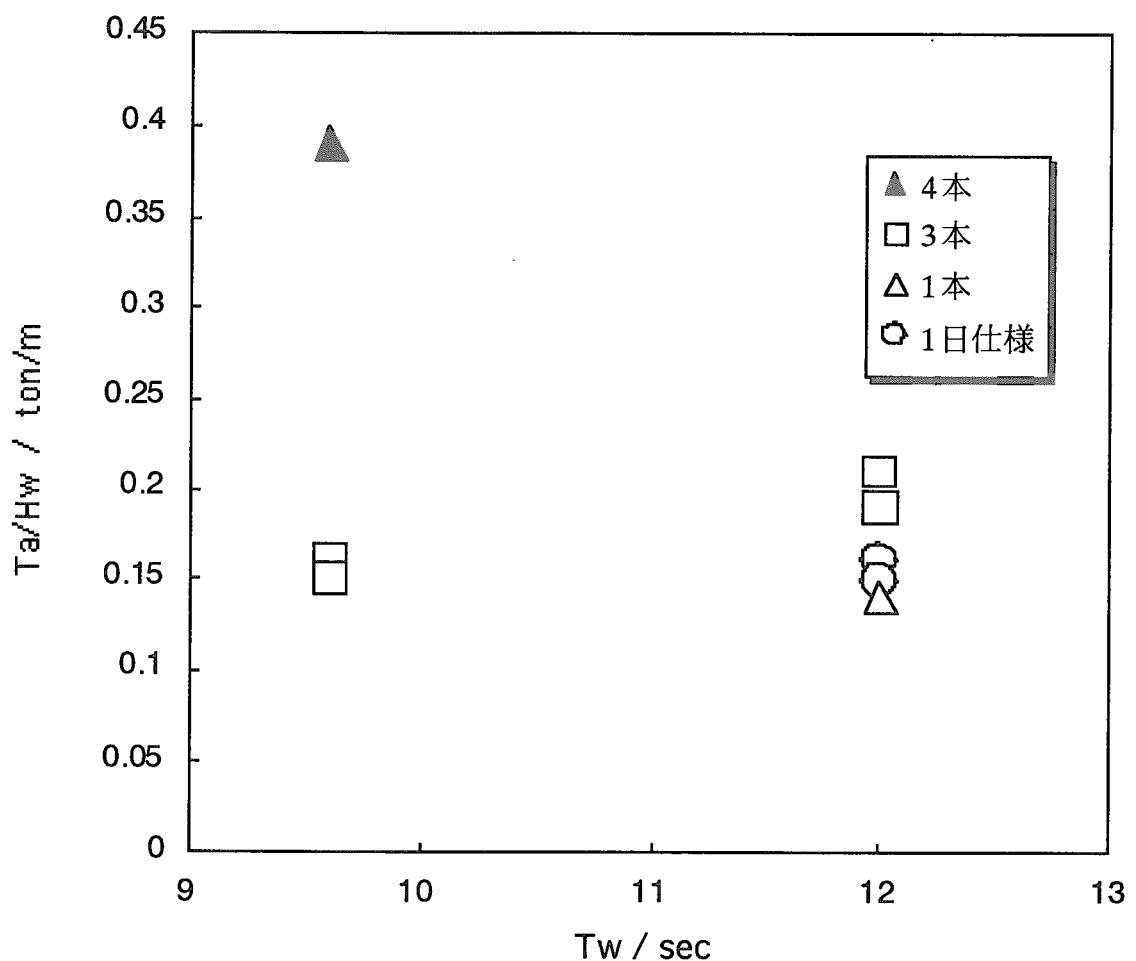


Fig. 2.23 主係留索の張力

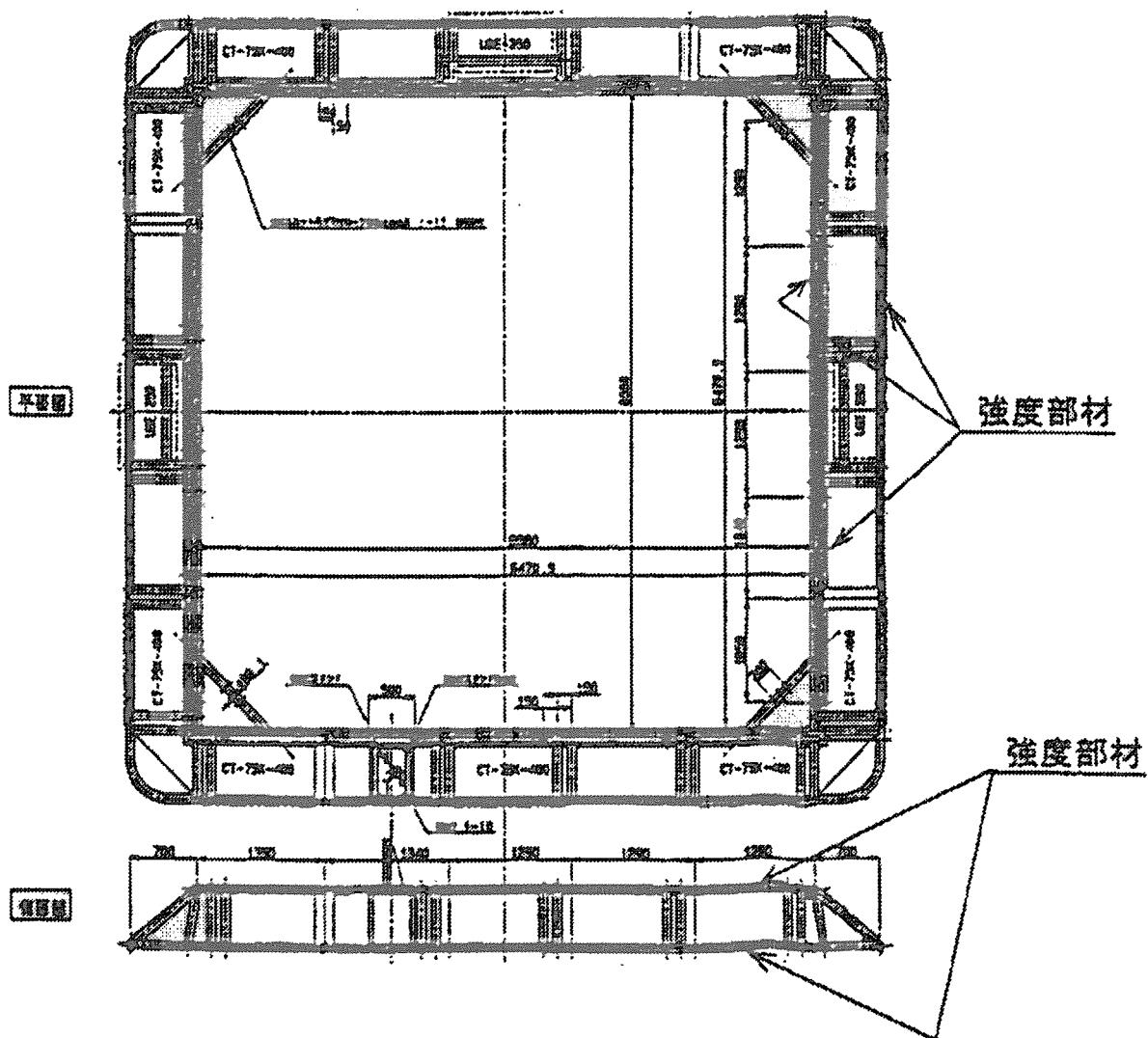
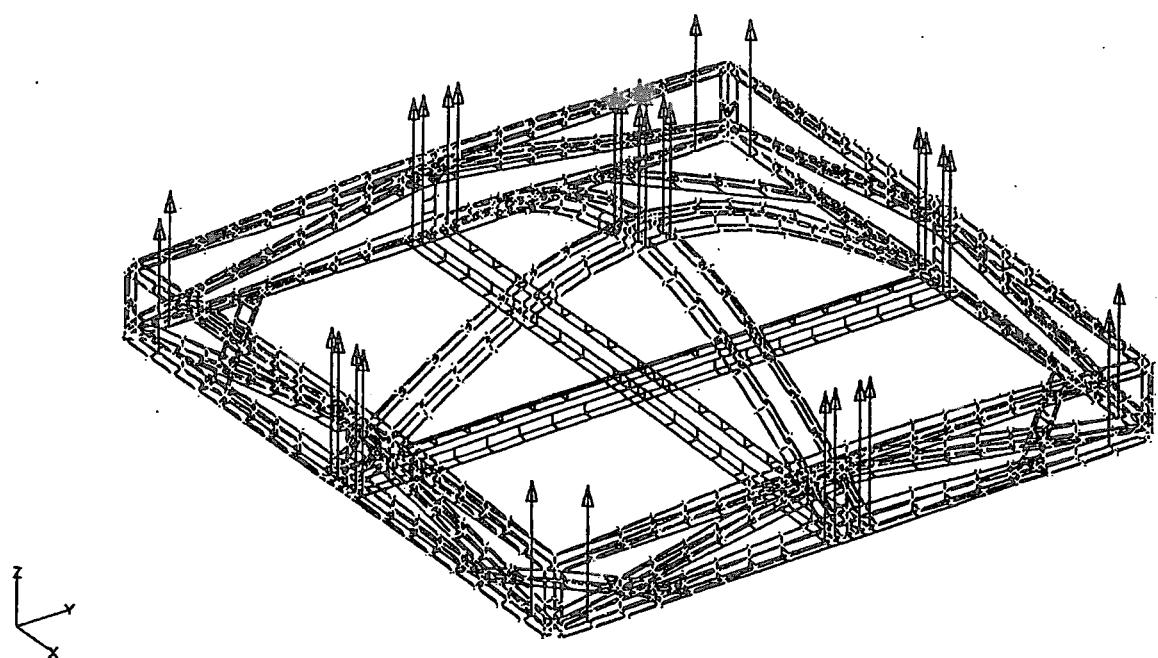


Fig. 2.24 鋼管フレームへの強化部材



Output Set: CAEFEM (C:1 L:1)  
Deformed(0.0183): T3 Translation

Fig. 2.25 大型吸着床の FEM 解析モデルと荷重負荷後の形状

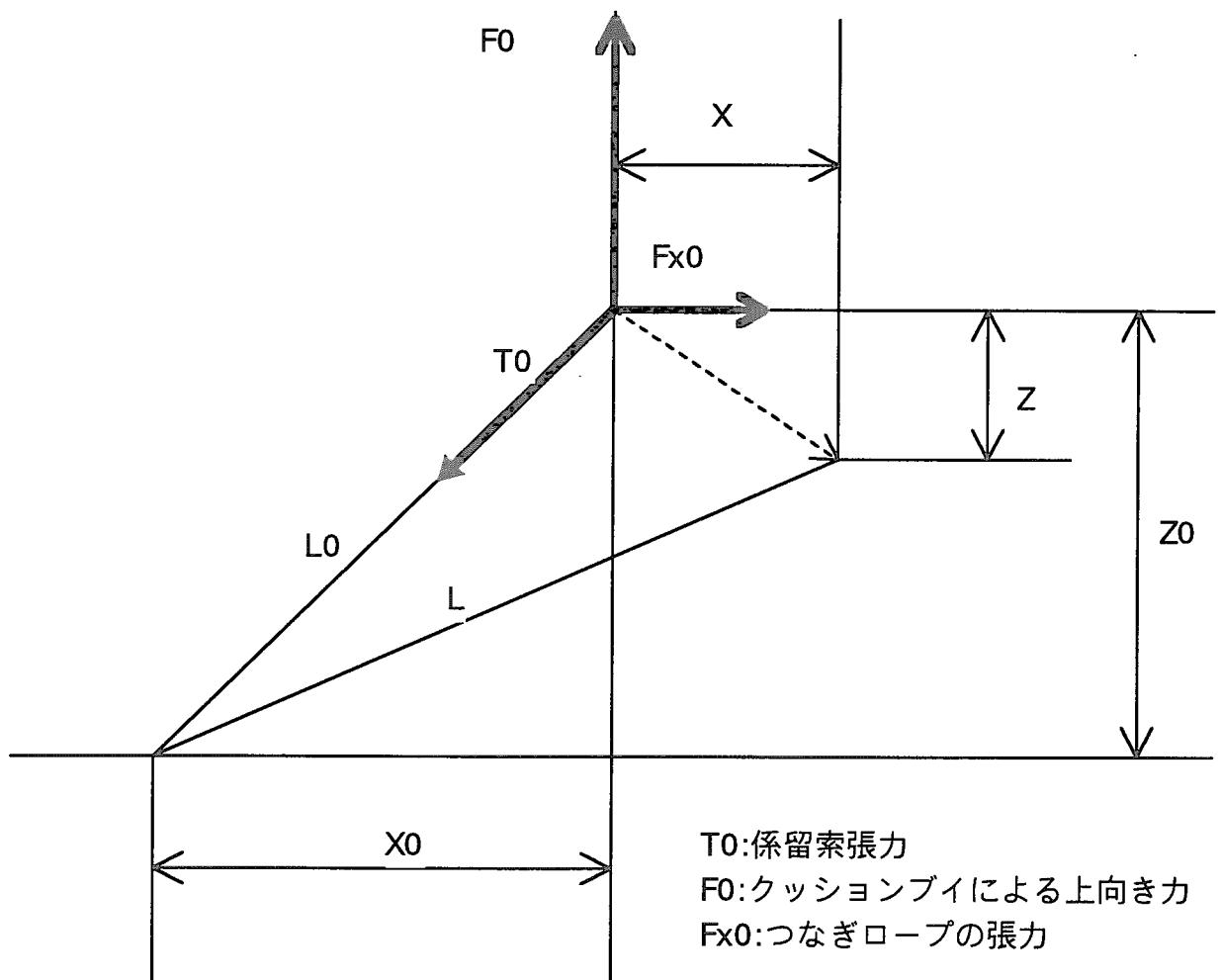


Fig. 2.26 生け簀水平移動時の係留索幾何形状

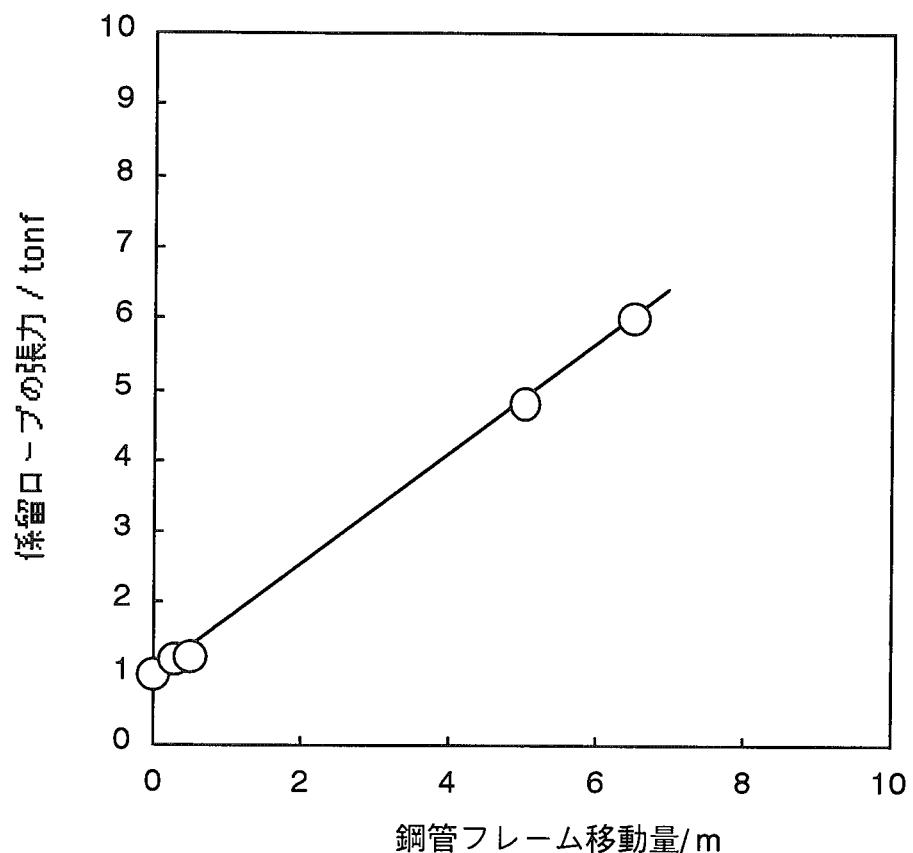


Fig. 2.27(a) 移動量 - ロープ張力 (試験結果に基づく算定)

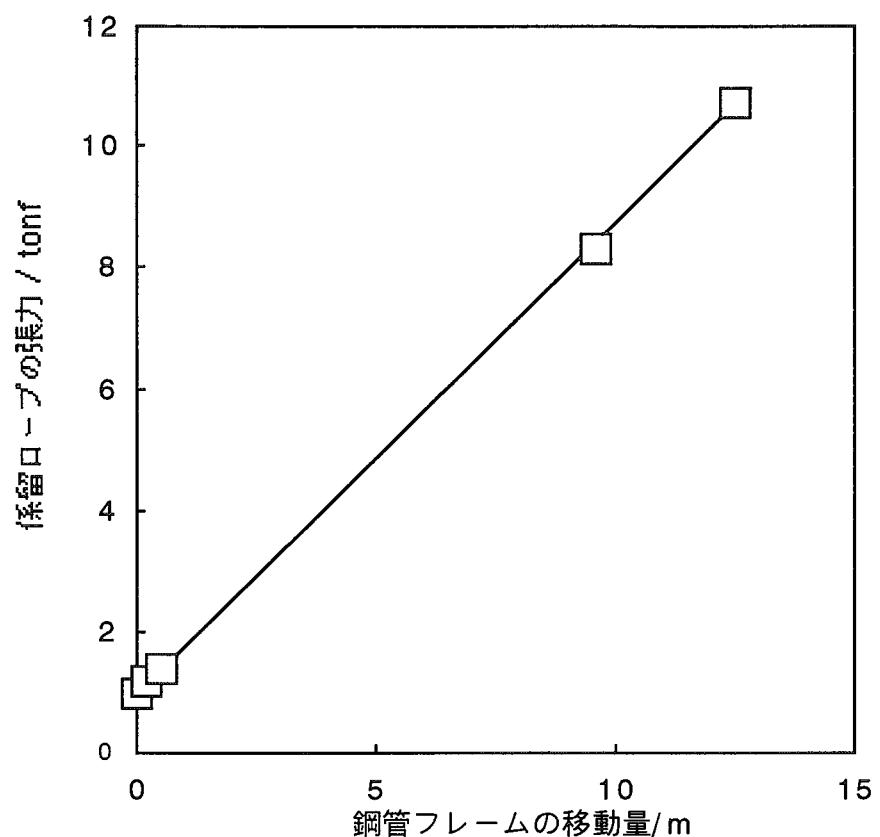


Fig. 2.27(b) 移動量 - ロープ張力 (計算値)

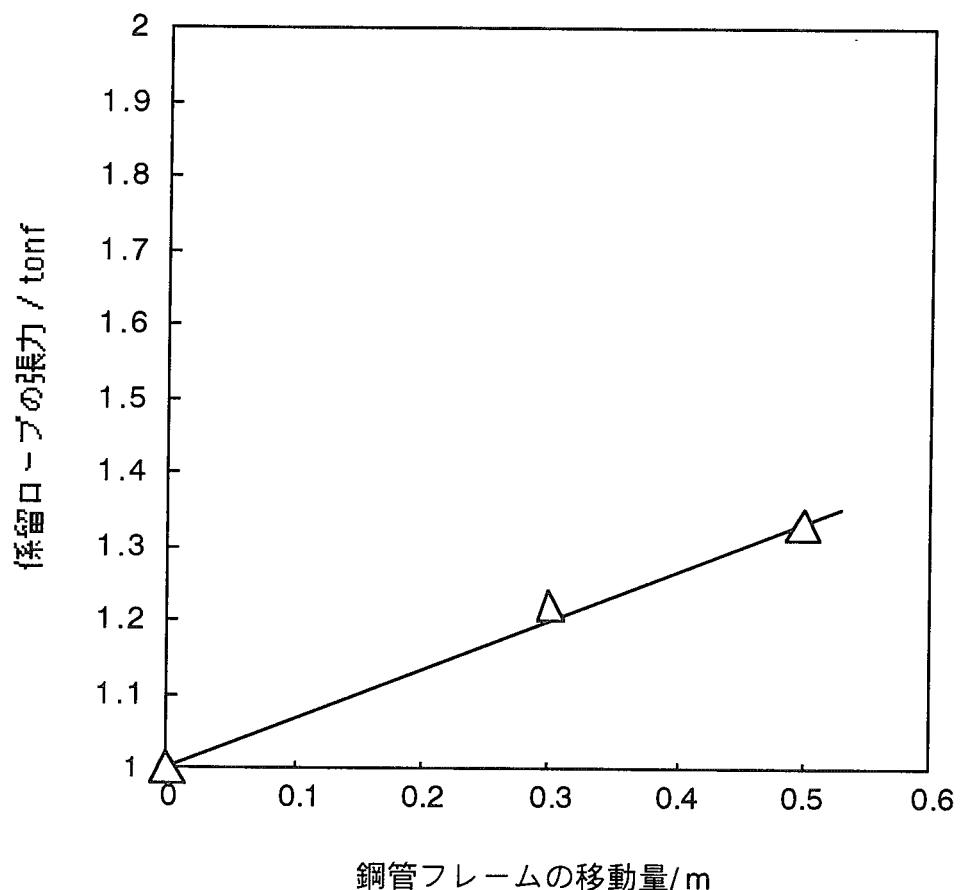


Fig. 2.28 移動量 - ロープ張力(試験結果拡大)

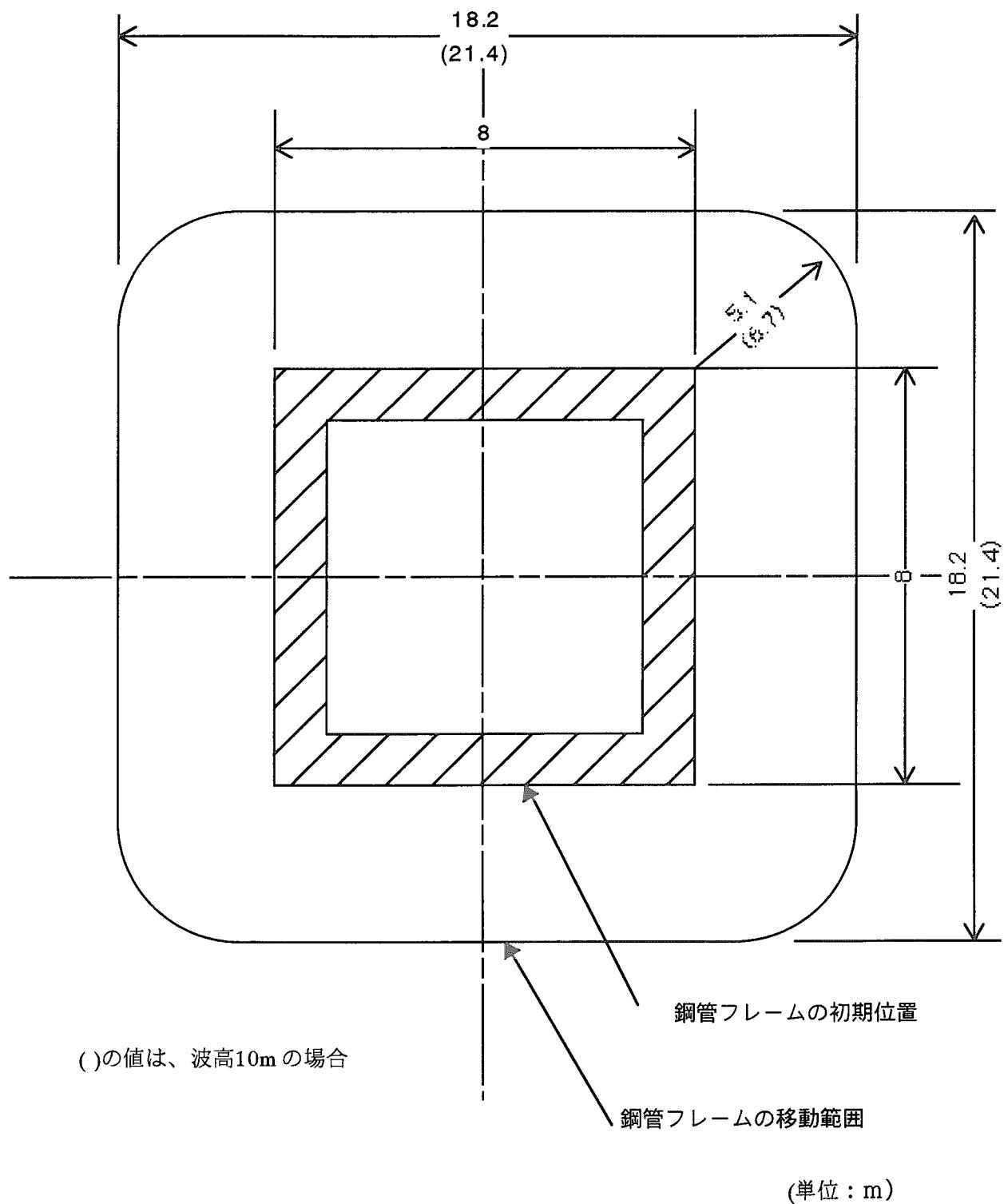


Fig. 2.29 鋼管フレームの移動範囲 (試験結果に基づく算定)

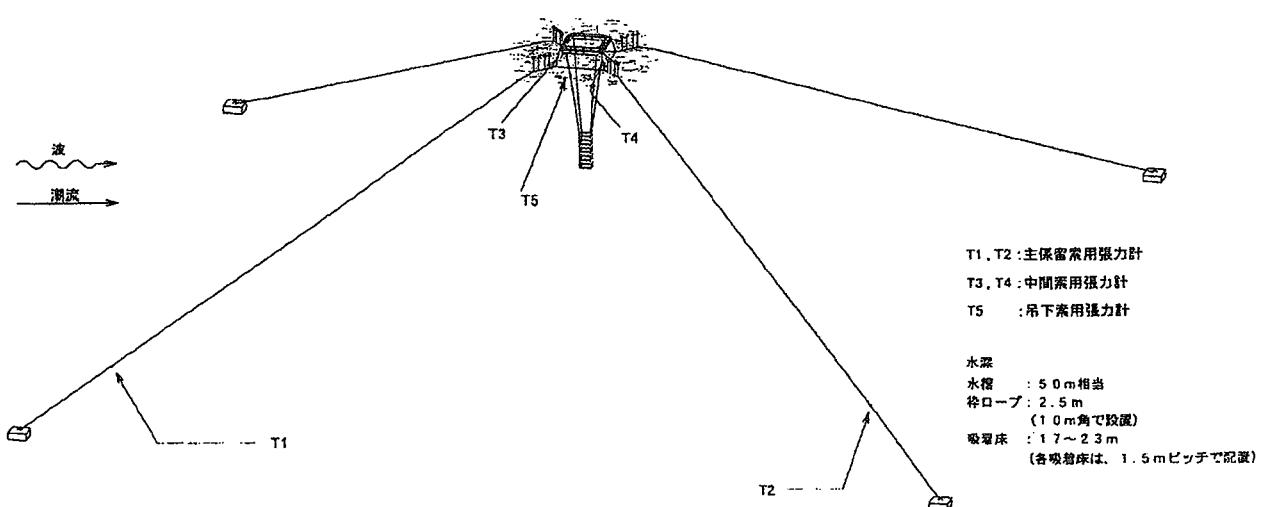


Fig. 2.30 実海域試験装置の設置図

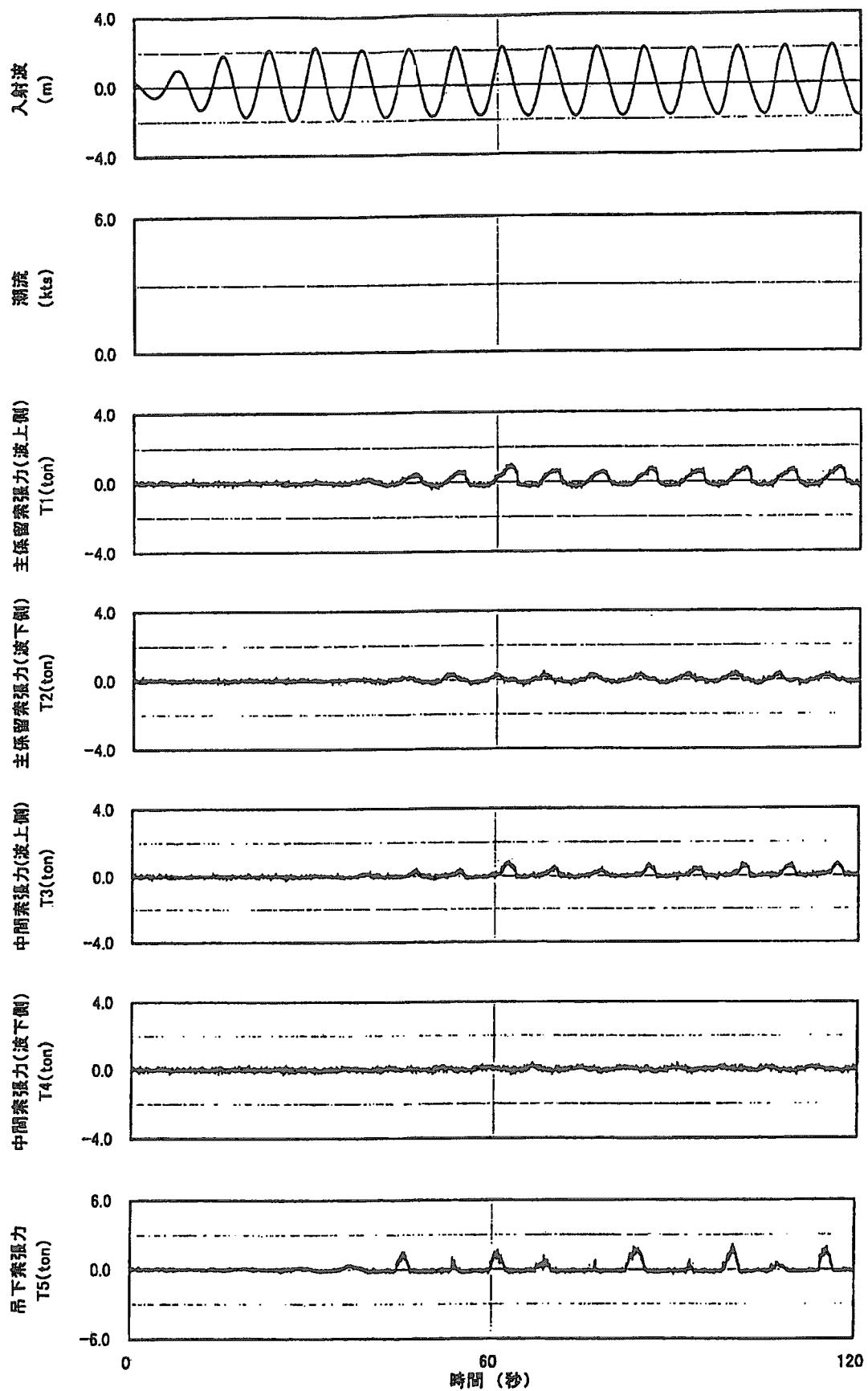


Fig. 2.31 規則波中試験(R1001) コンディション1：周期 9.6秒 : 波高 4.0m

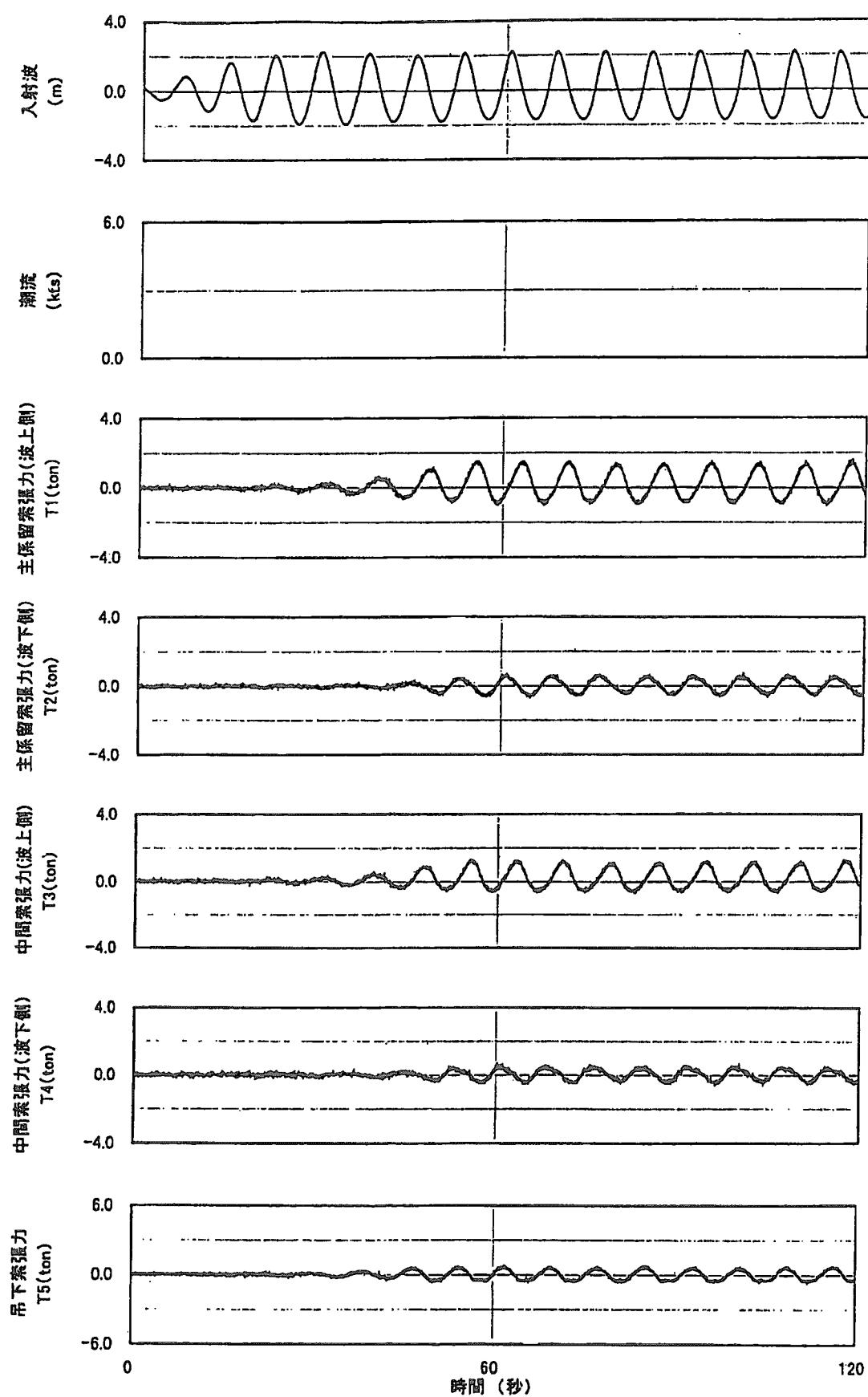


Fig. 2.32 規則波中試験(R9301) コンディション 13 : 周期 9.6 秒 : 波高 4.0m

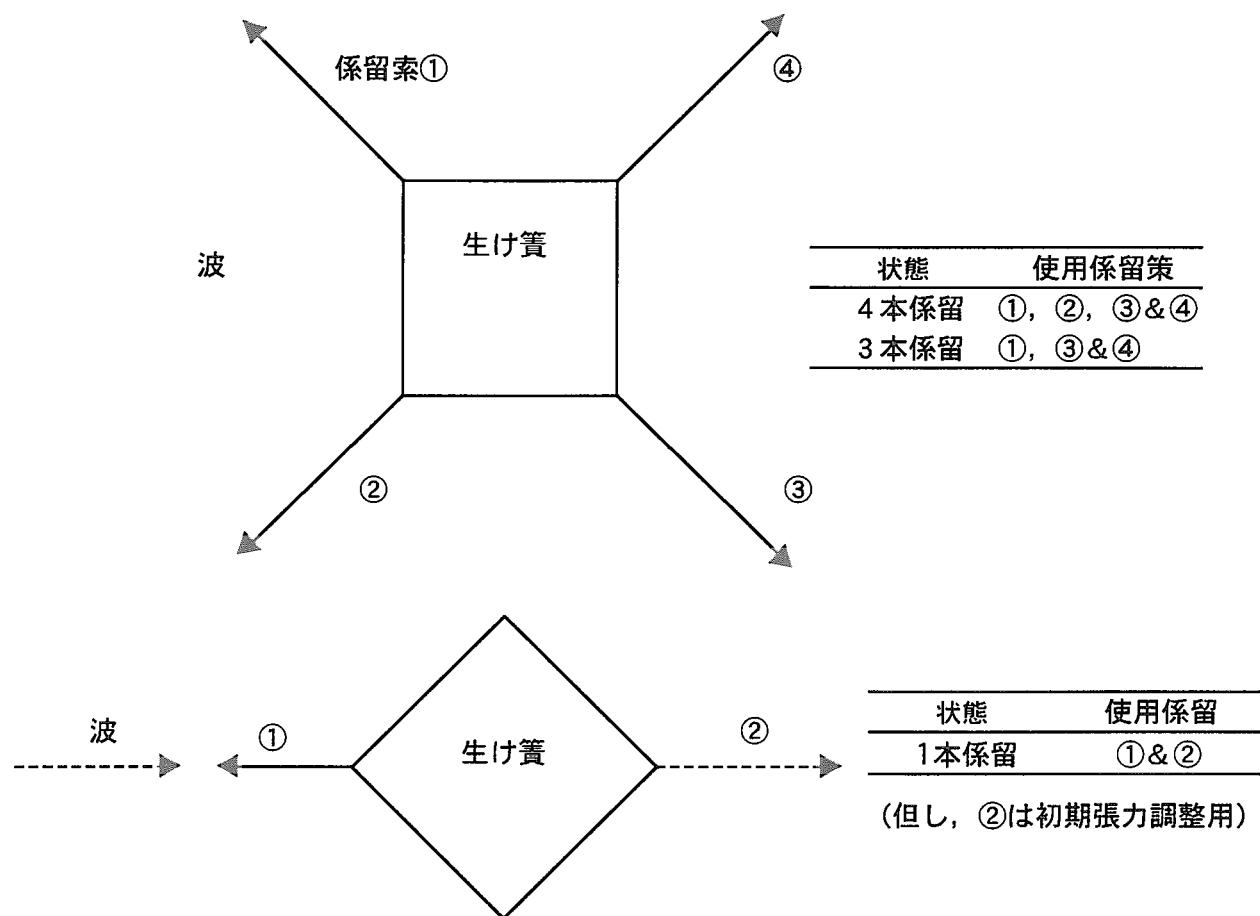


Fig. 2.33 係留状態図

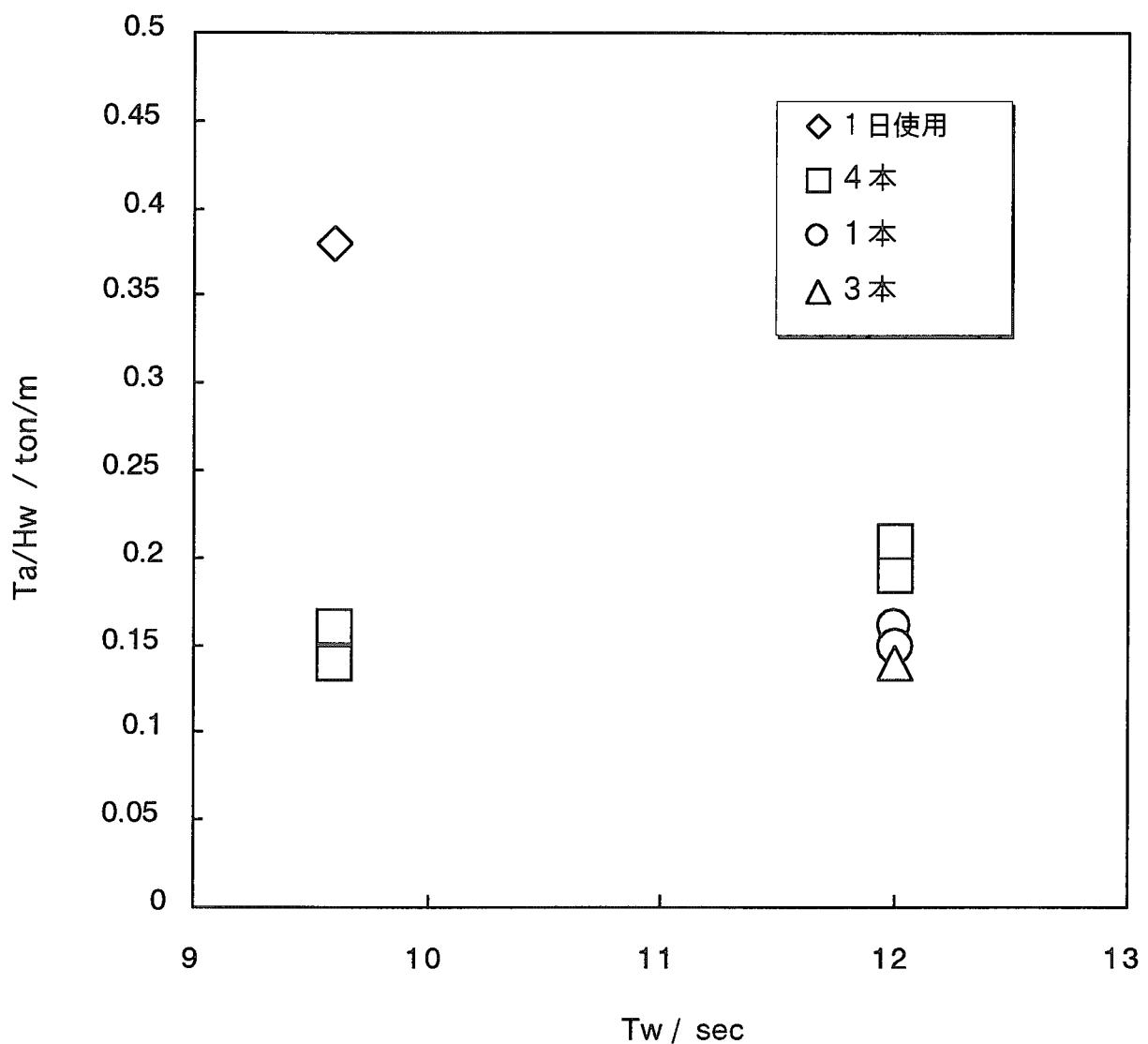


Fig. 2.34 係留索の張力

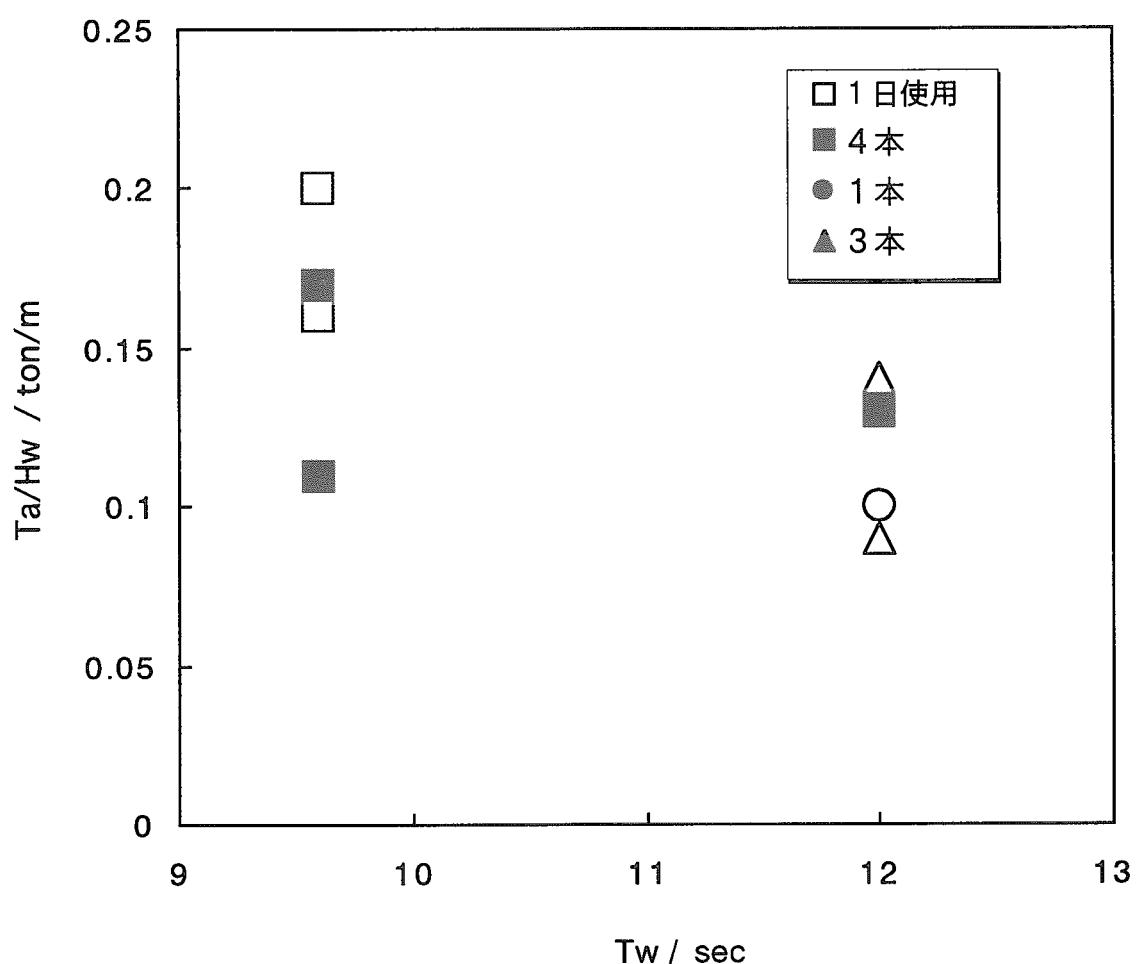


Fig. 2.35 吊り下げ索の張力

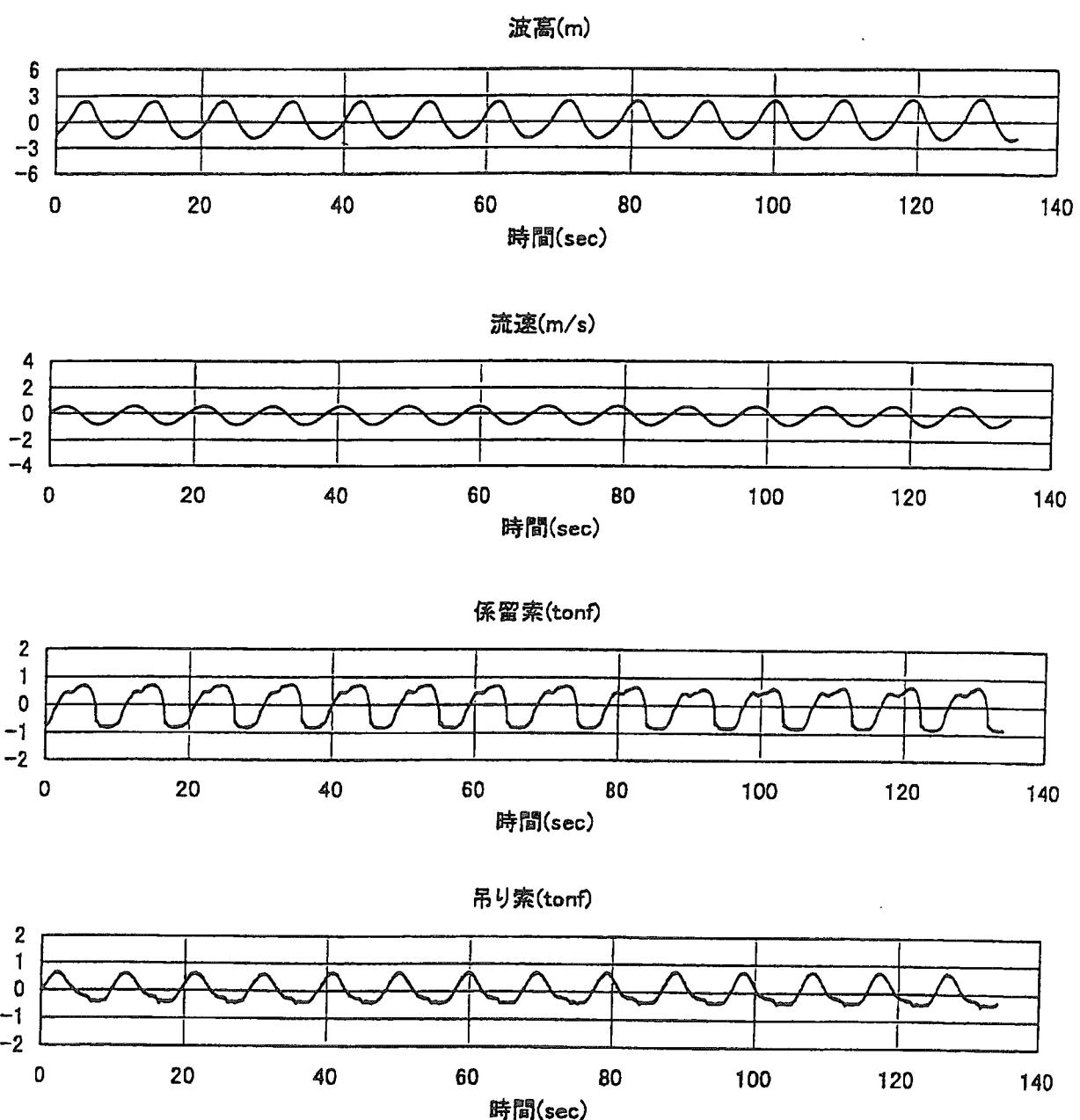


Fig. 2.36 規則波中時系列 (周期 9.6 秒, 波高 4.3m, 係留索 4 点)

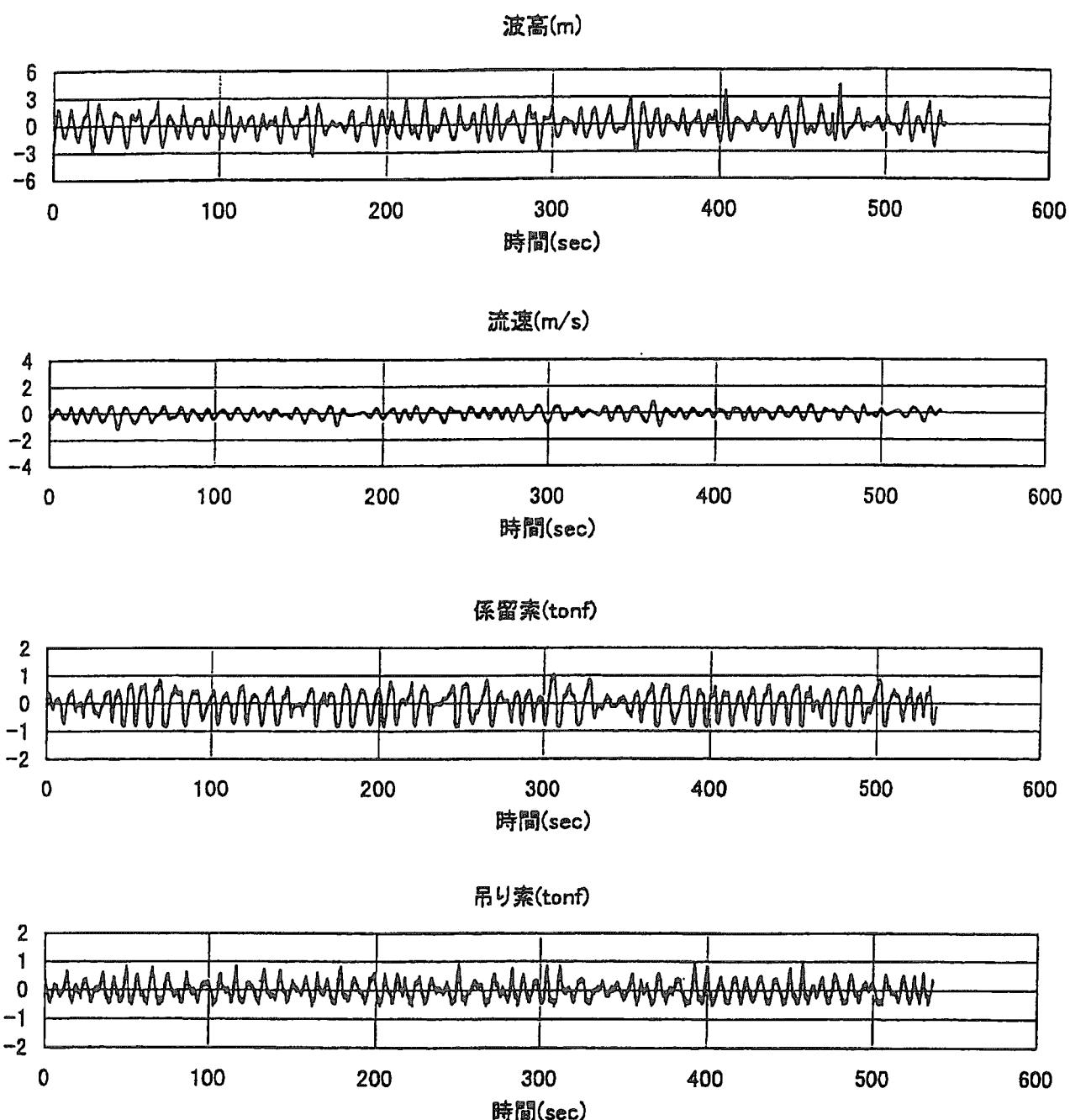


Fig. 2.37 不規則波中時系列（周期 9.7 秒，波高 4.8m，最大波高 7.4m，係留索 4 点）

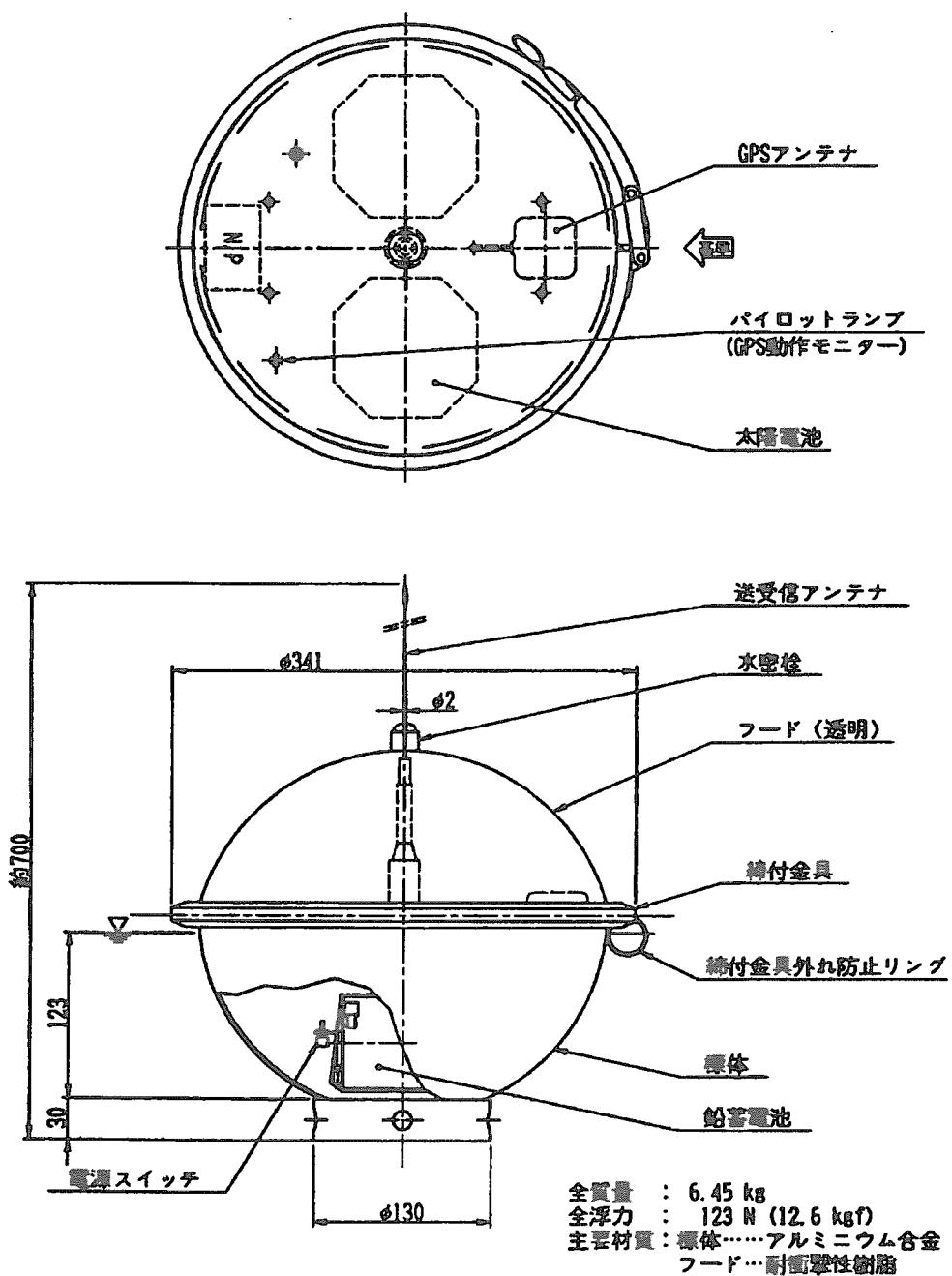


Fig. 2.38 試験設備監視ブイ

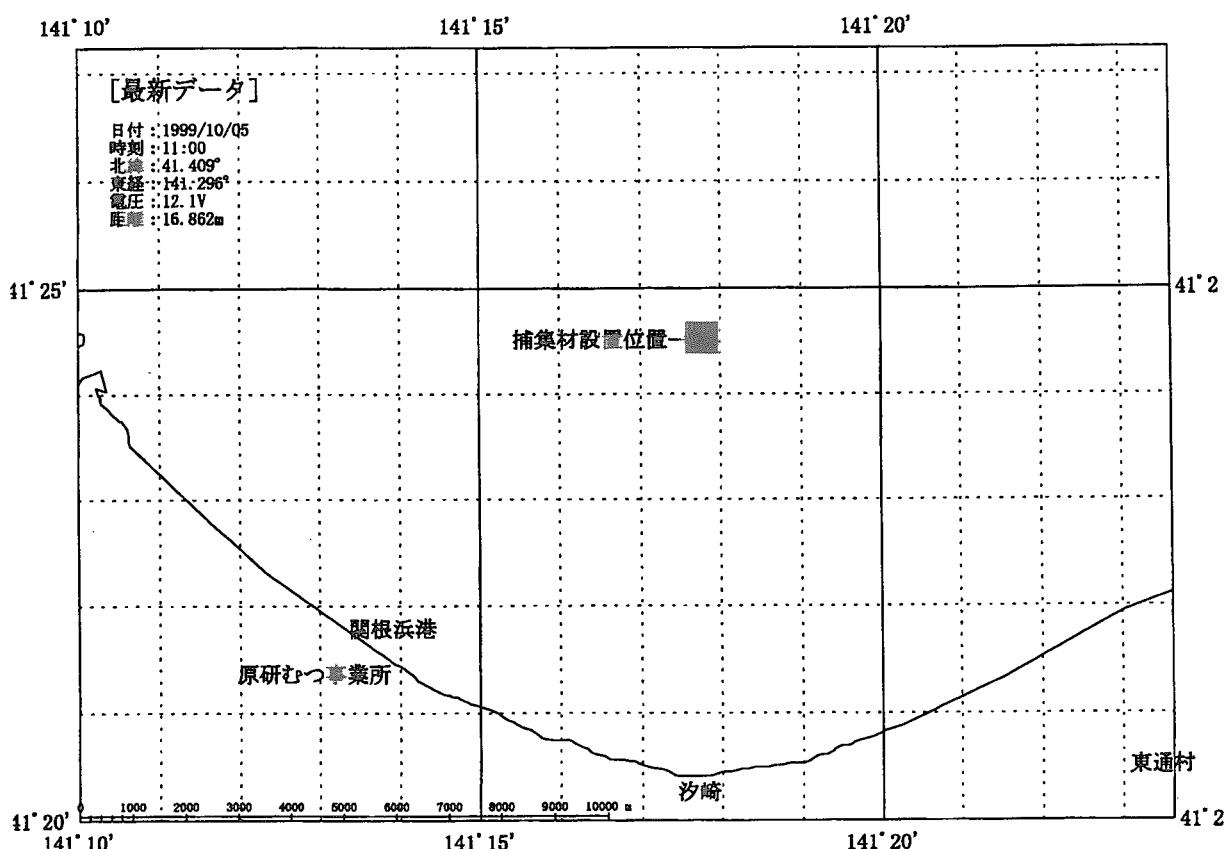
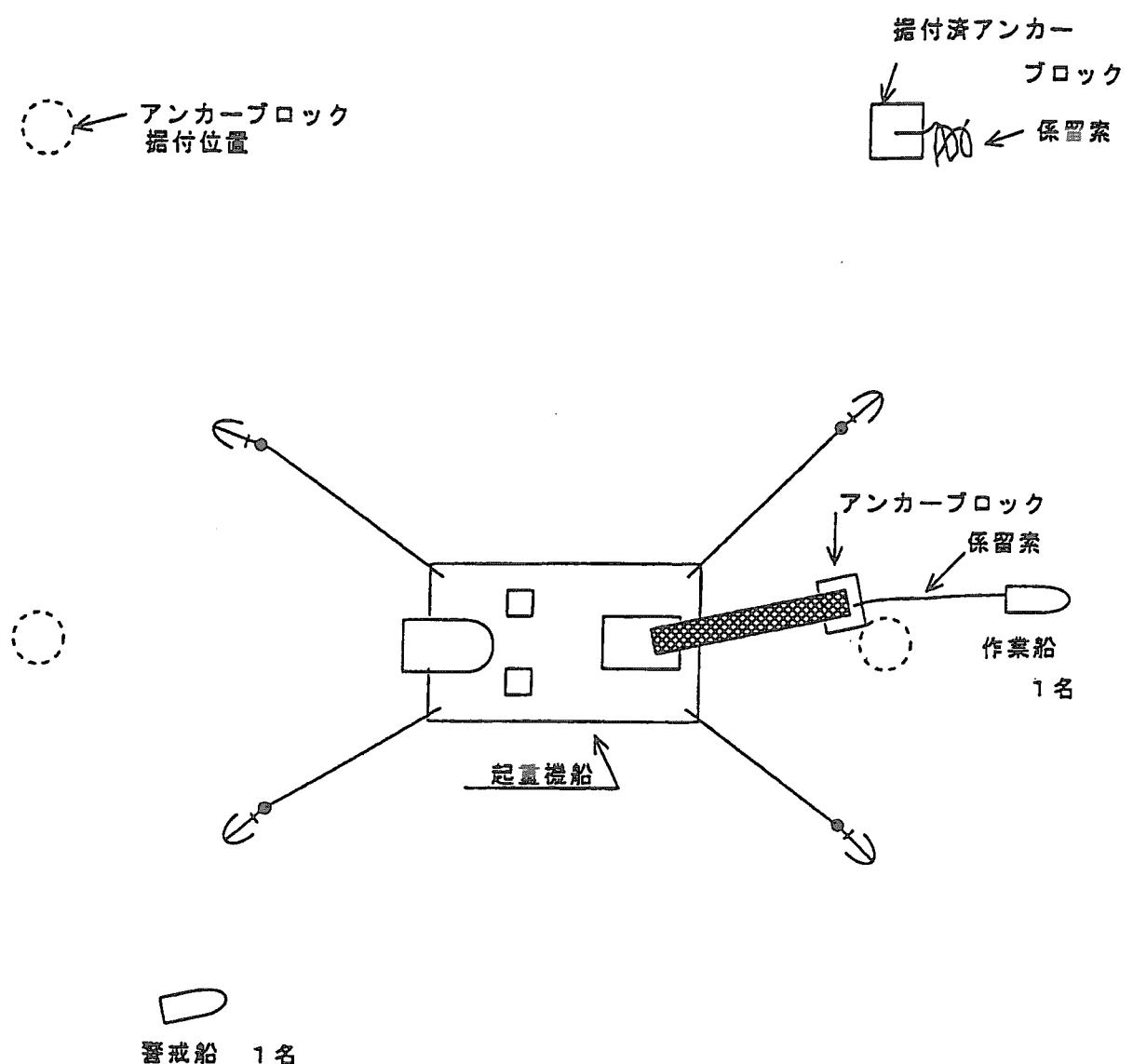


Fig. 2.39 試験装置監視モニター表示例



- ・起重機船のアンカーの位置は流向、風向により判断する。
- ・潮位は考慮せずに作業可能である。

Fig. 2.40 アンカーブロック及び係留索据付作業(1)

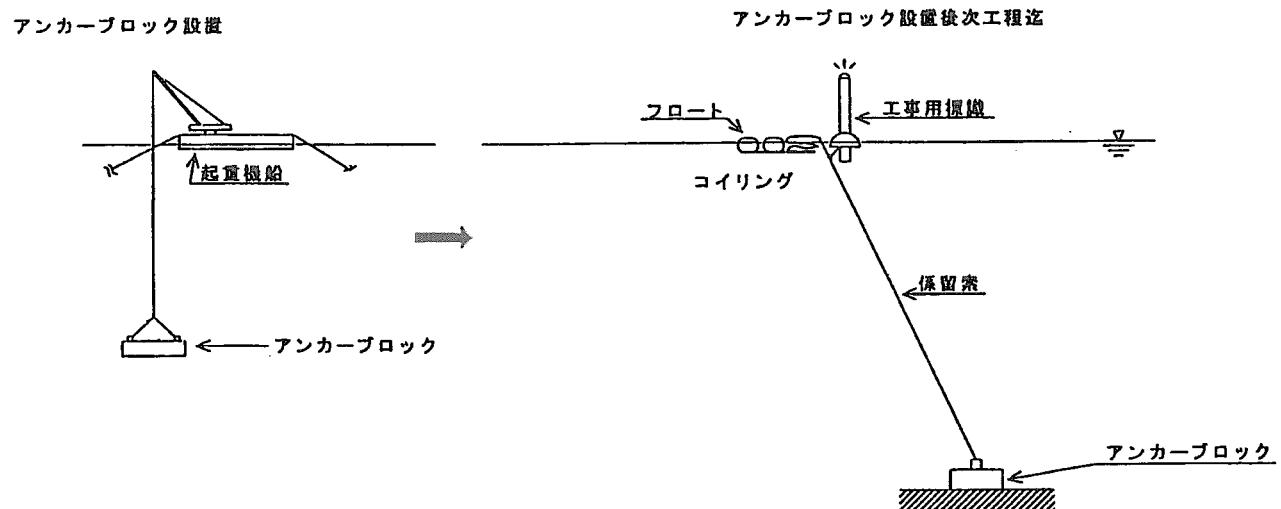
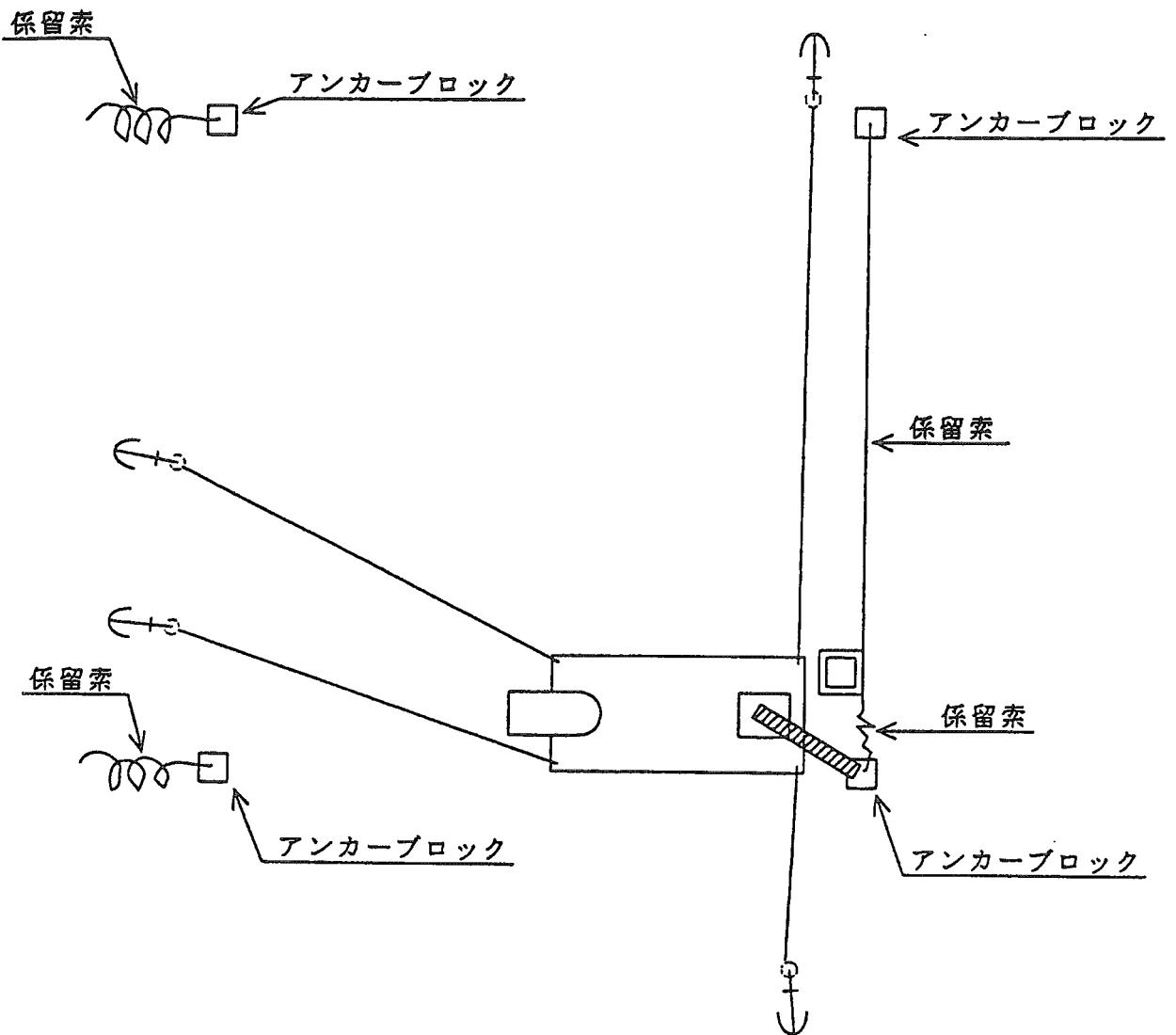
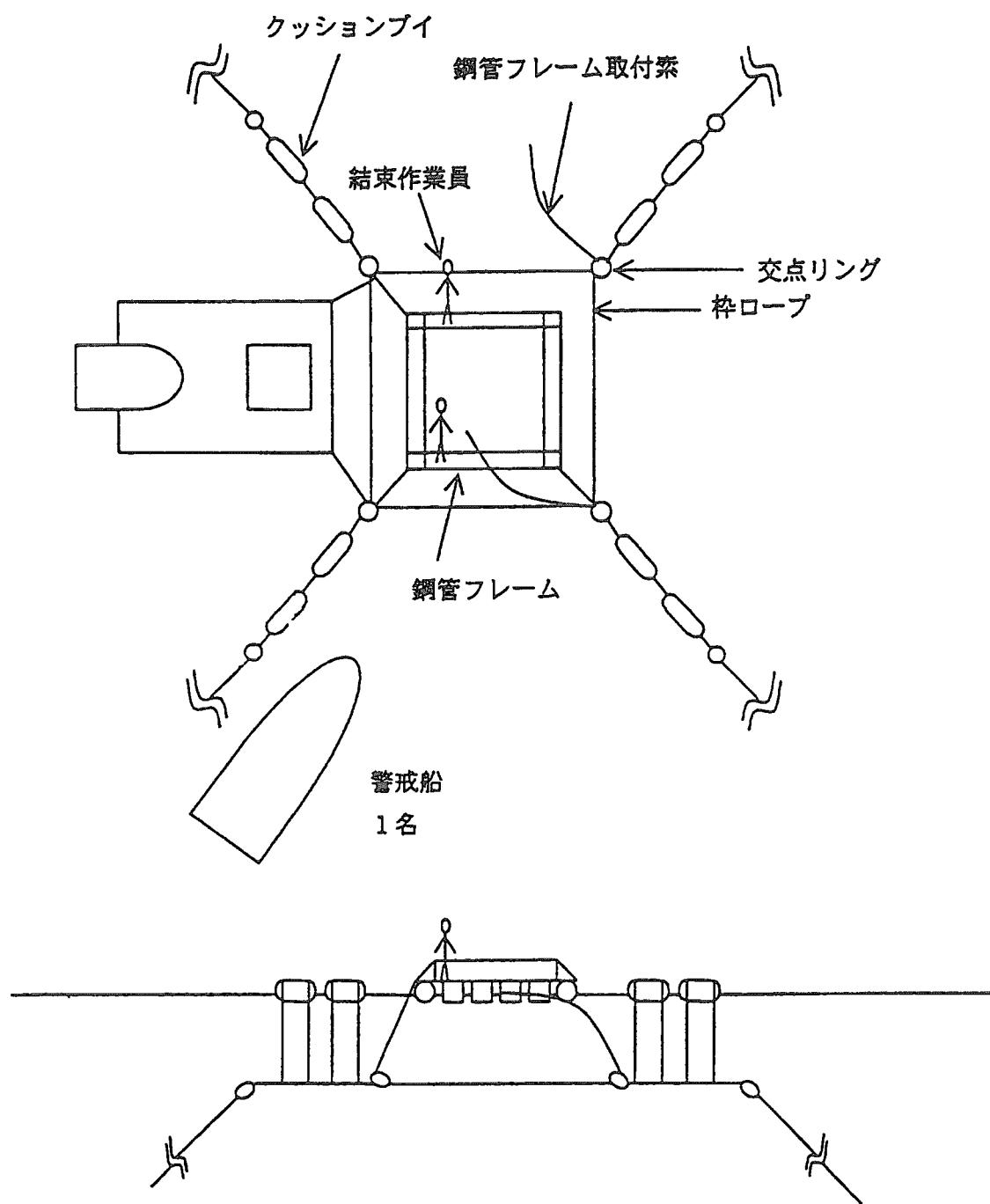


Fig. 2.41 アンカーブロック及び係留索据付作業(2)



- 起重機船が3個目のアンカーブロックを保留索付きで据付け後、保留ユニット付鋼管フレームを海上に浮かべる。最後に4個目のアンカーブロックを据付ける。（4個のアンカーブロックが据付けられた状態では2本の保留索が連結されていることになる。）

Fig. 2.42(a) 保留ユニット、鋼管フレーム及びアンカーブロック据え付け作業



- 既に据付けた 2 個のアンカーブロックと結束後、全体調整を行う。  
(海上での係留ユニットと係留索の結束作業は 2 力所となる。)

Fig. 2.42(b) 鋼管フレーム取付作業

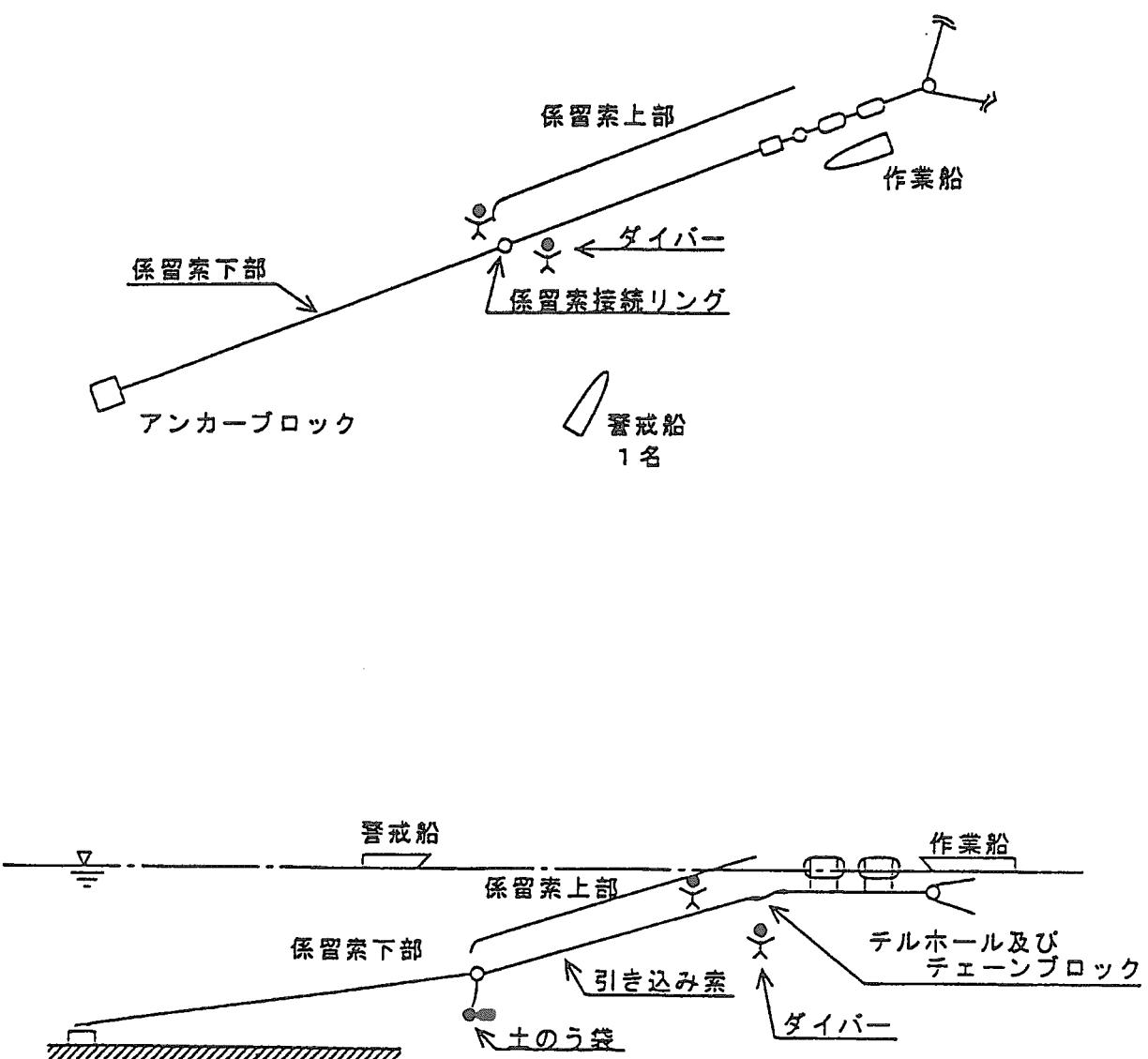


Fig. 2.43 係留索張力導入作業

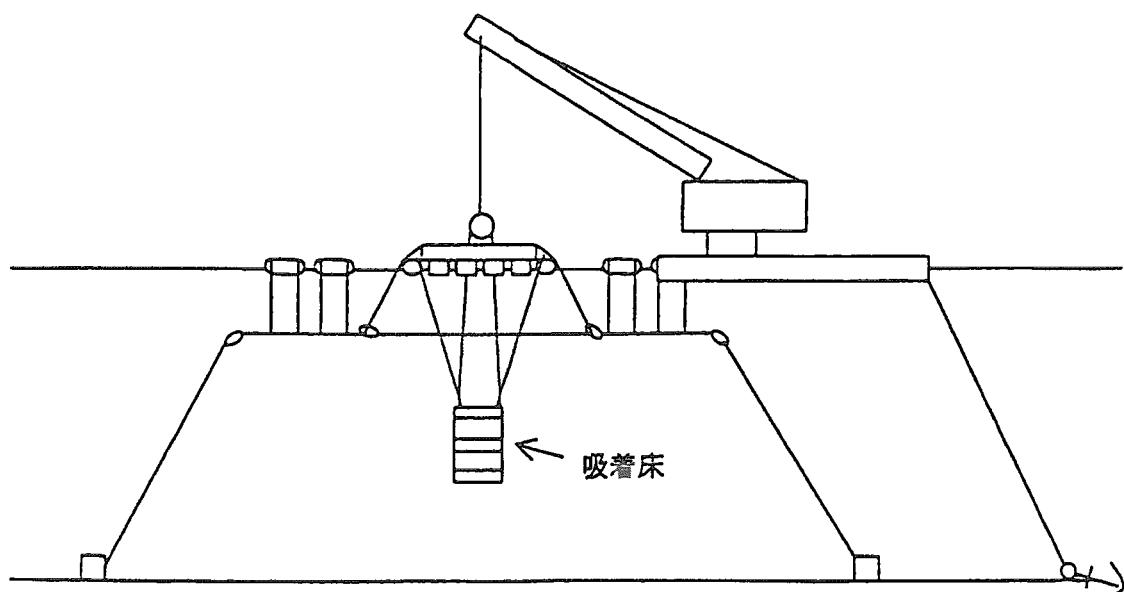
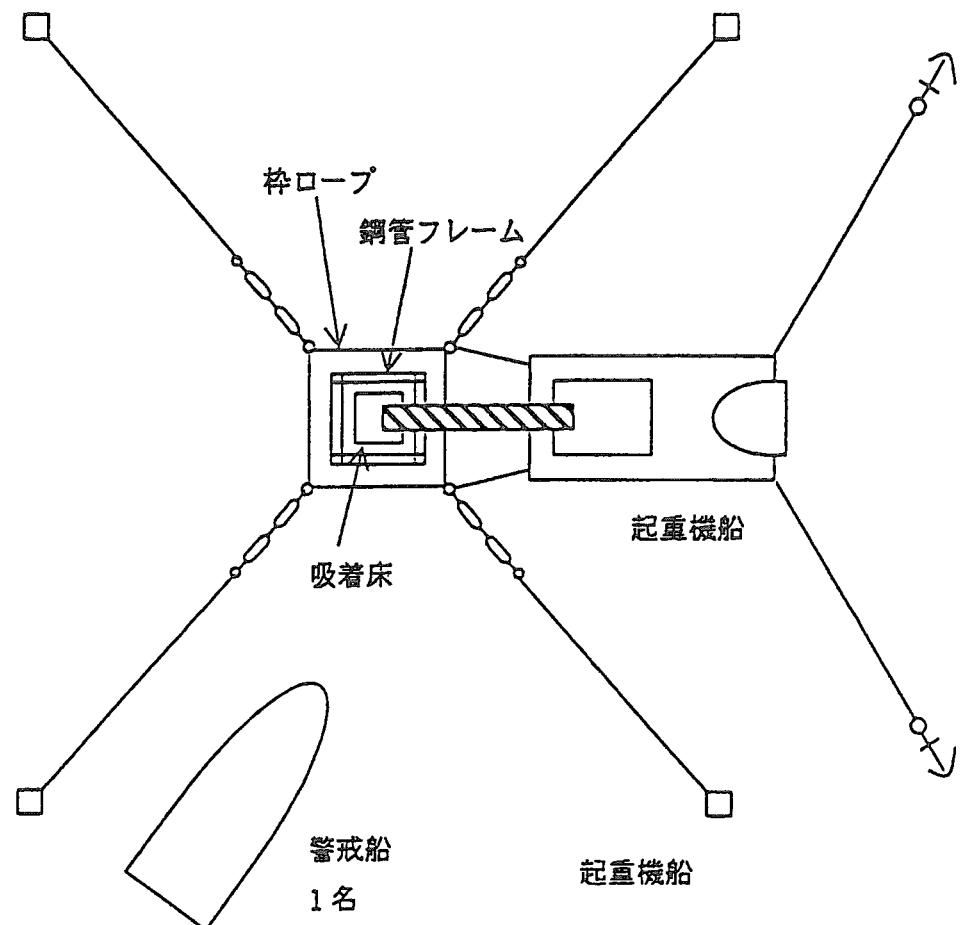
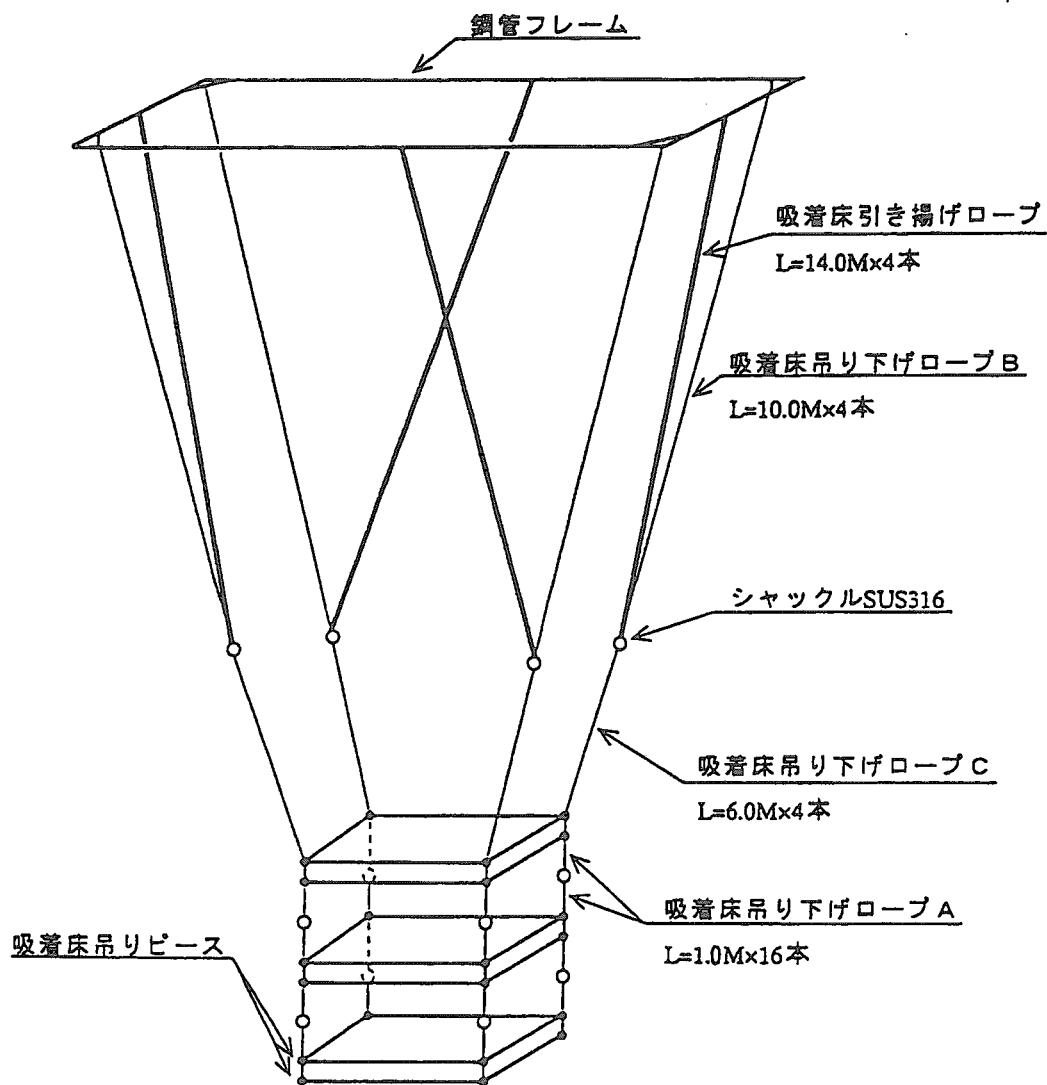


Fig. 2.44 吸着床取付作業



#### 吸着床取り外し・取付の手順

1. 吸着床垂下時の吸着床引き揚げロープは、軽く張った状態で鋼管フレームに固定(軽く結束)しておきます。
2. 引き揚げ作業時には、最初に吸着床引き揚げロープ4本を、起重機船の主巻きフック(あるいは補巻きどちらのフックでも良い)に掛けて巻き上げます。
3. 引き揚げ索に荷重が掛かると、吸着床吊り下げロープBは荷重が緩みます。
4. 吸着床吊り下げロープB・C間のシャックル部が海面に出て来たら、吸着床吊り下げロープBの鋼管フレーム側を取り外します。
5. 補巻きフック(2. 項と別のフック)からシャックルに別のロープ(ワイヤロープを用いる)を取り付け、補巻きで吸着床をさらに海面上まで巻き上げ、台船上に取り込みます。
6. 取付は上記の逆の手順で行います。

Fig. 2.45 吸着床取り外し・取付手順

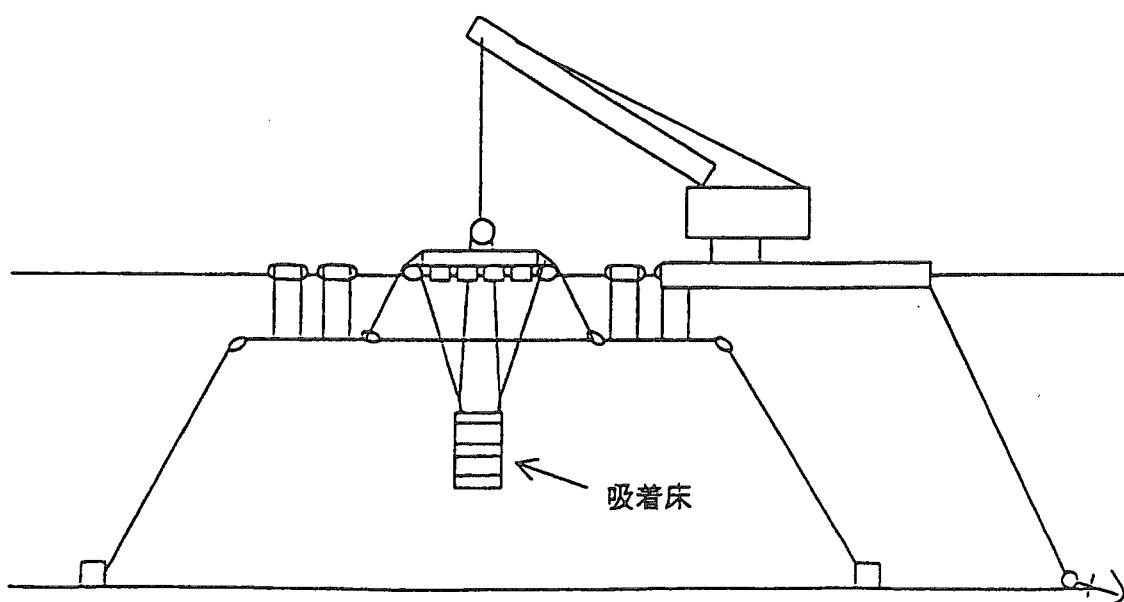
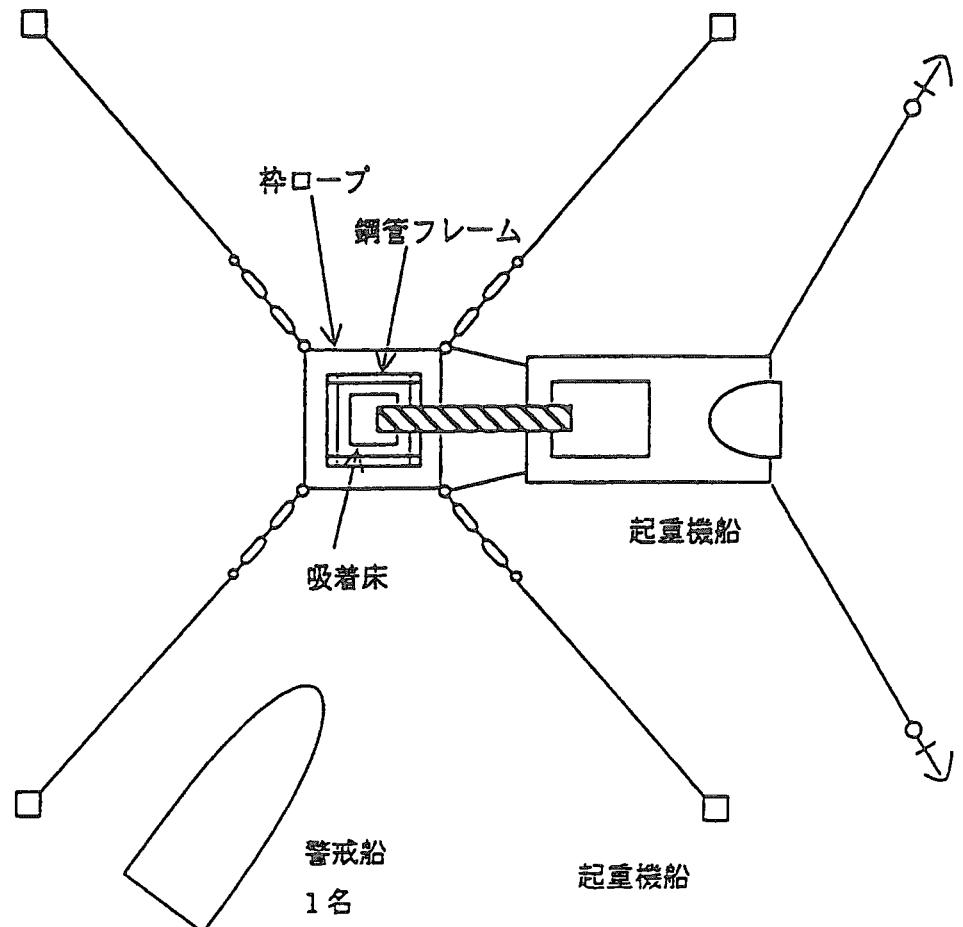


Fig. 2.46 吸着床取り外し作業

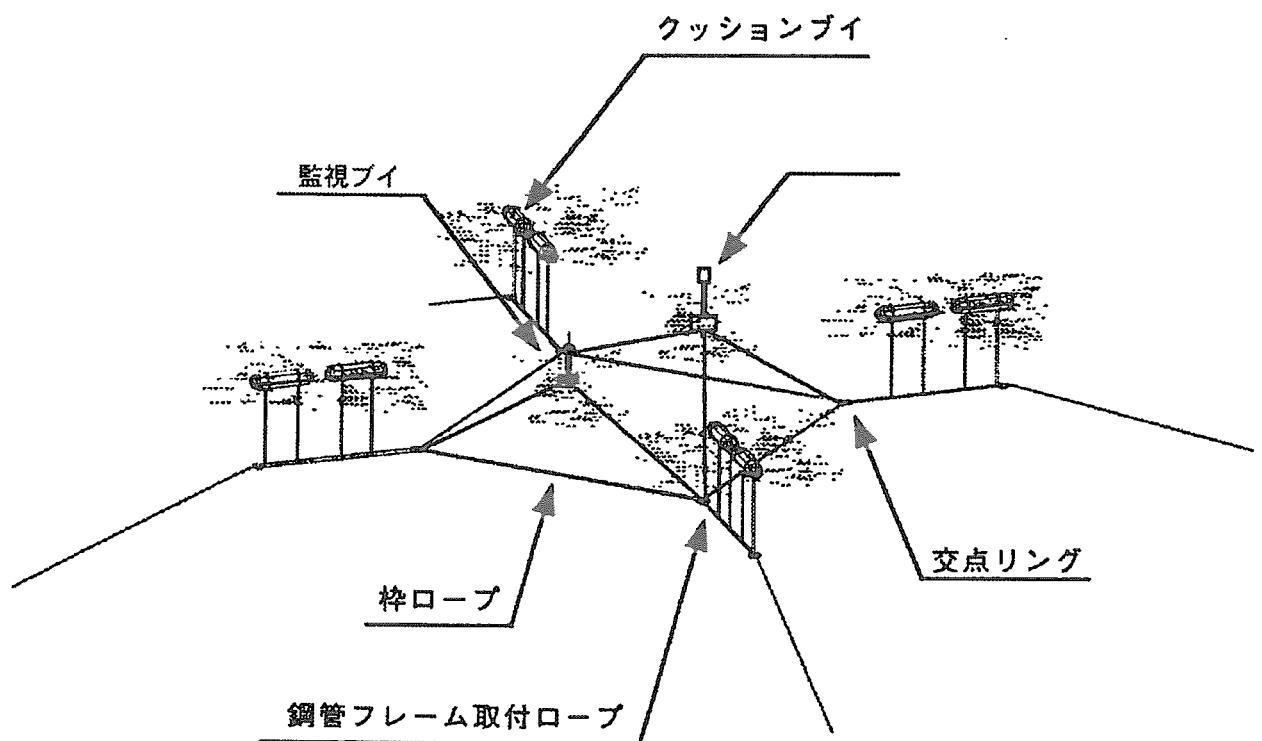
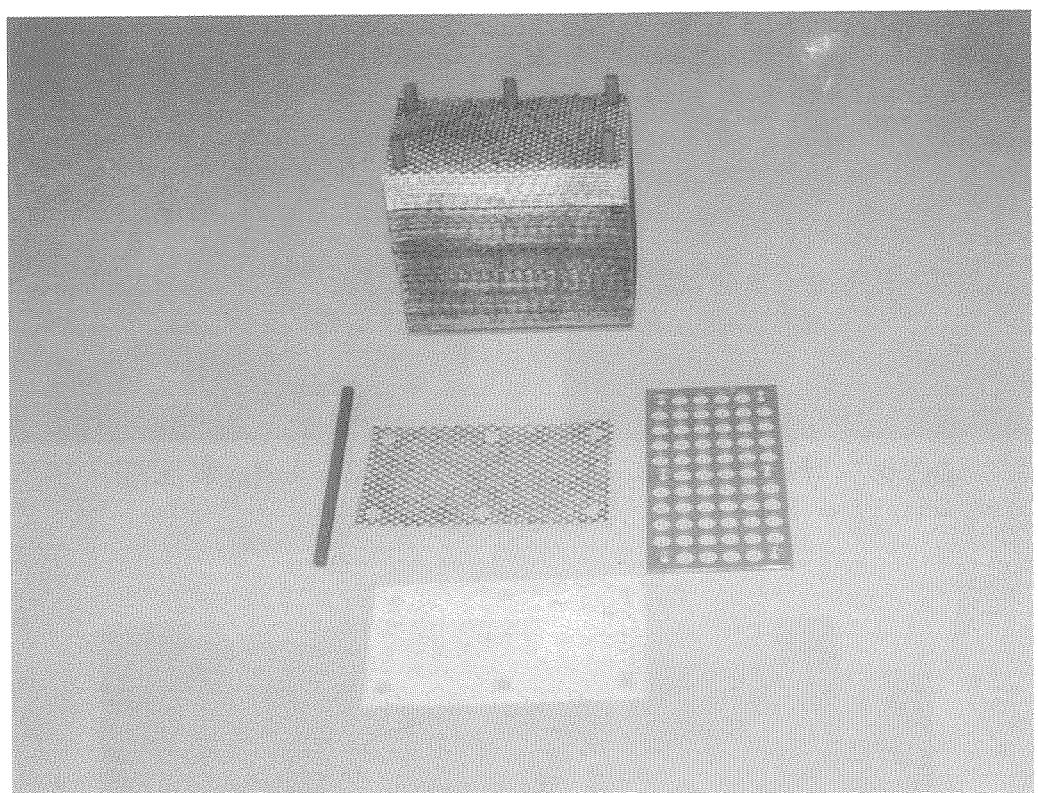
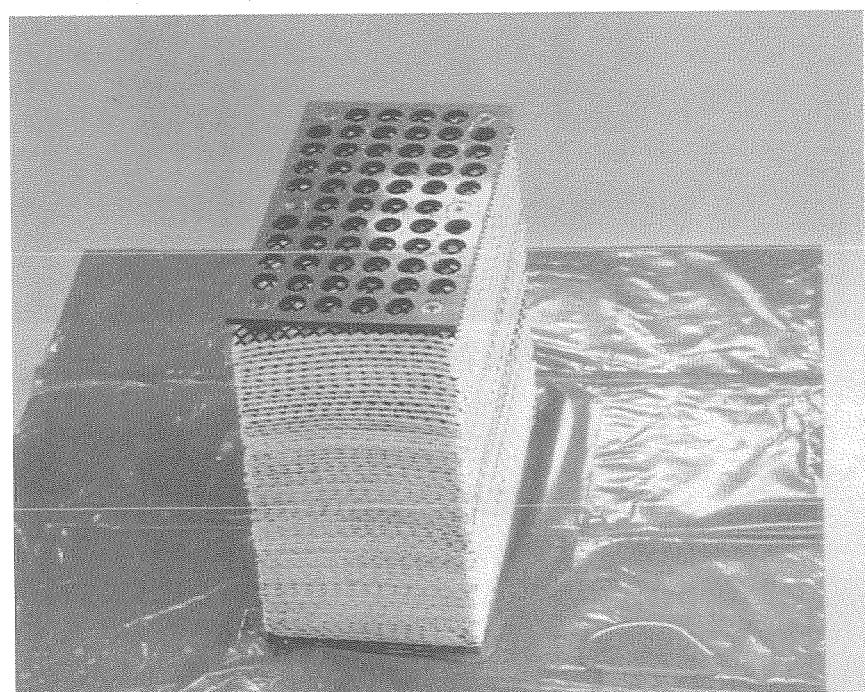


Fig. 2.47 実海域試験装置 試験休止時状態図

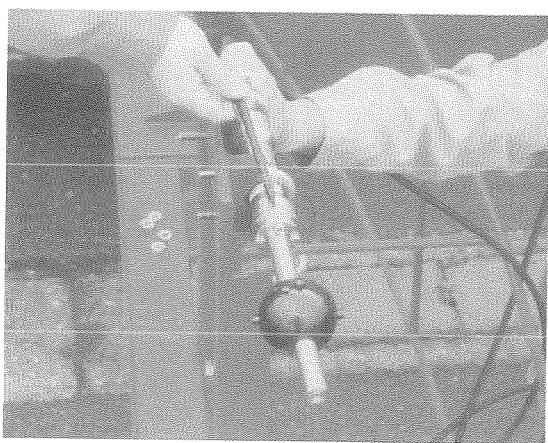


(a) カセット構成

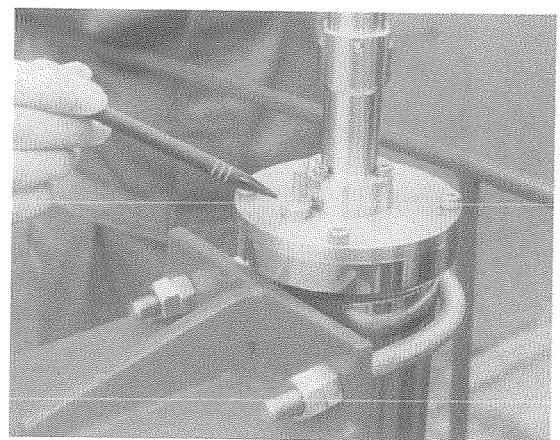


(b) カセット組上がり

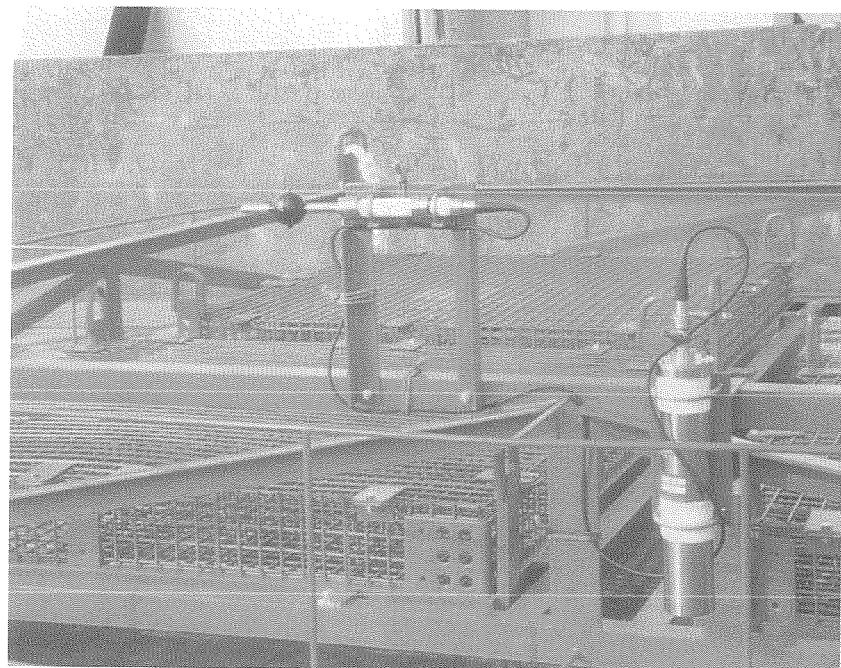
Photo 1 捕集材カセット



(a)センサ一部



(b)本体部

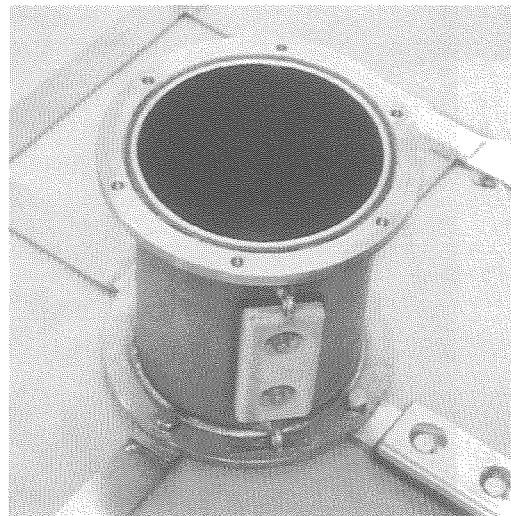


(c)大型吸着床取り付け時

Photo 2 電磁流速計据え付け



(a) 内部



(b) 収納容器



(c) アンカーブロック据え付け時

Photo 3 超音波式波高計据え付け

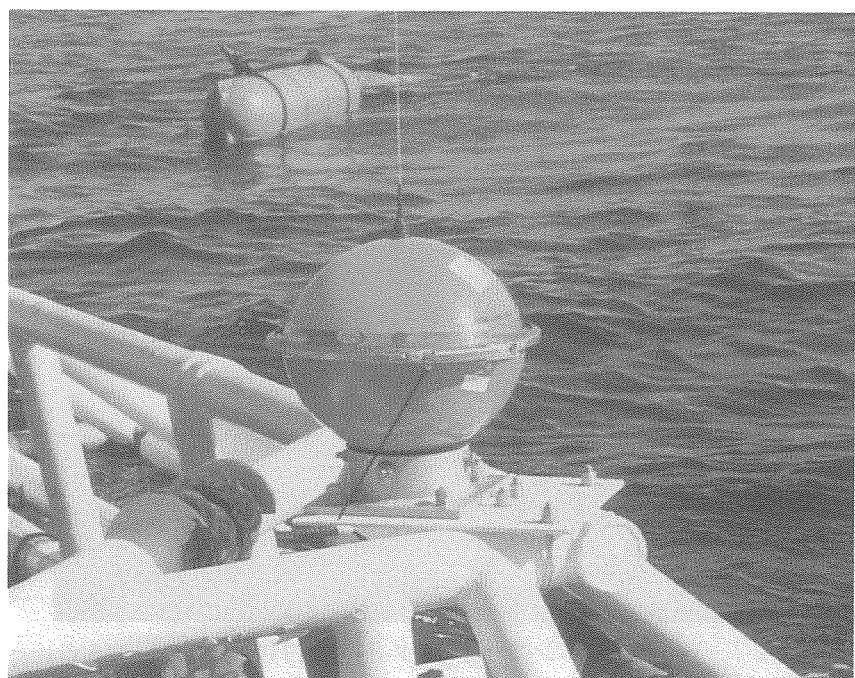
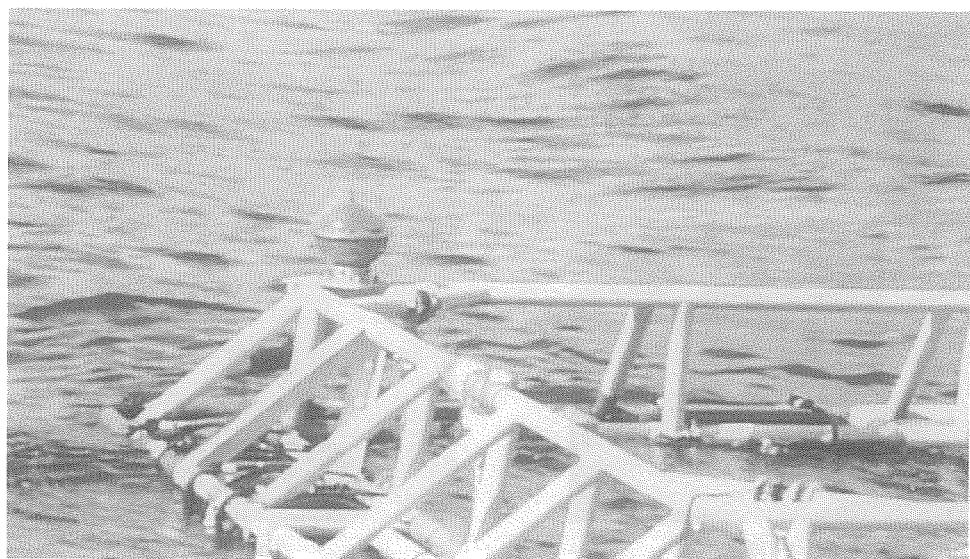
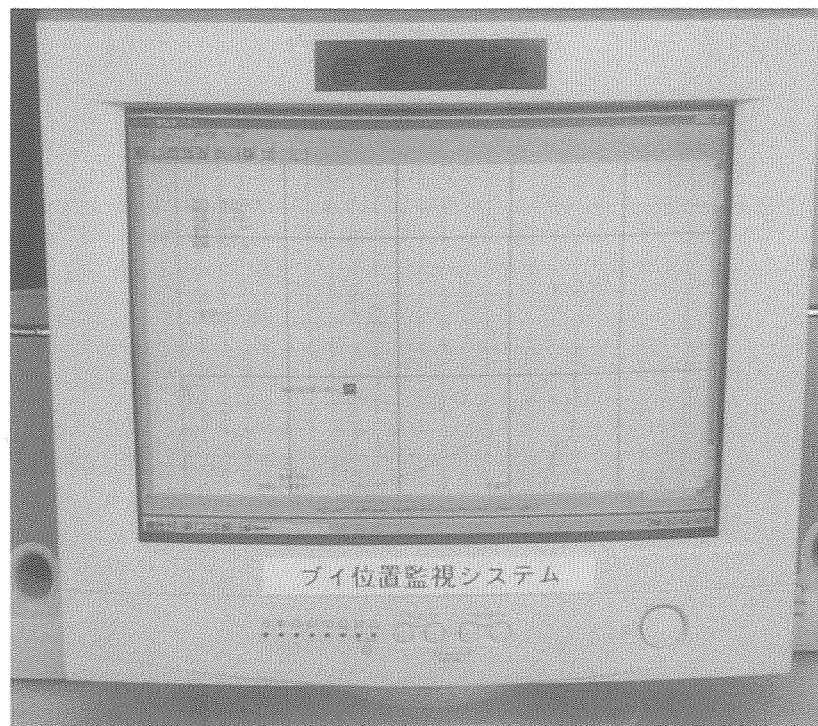
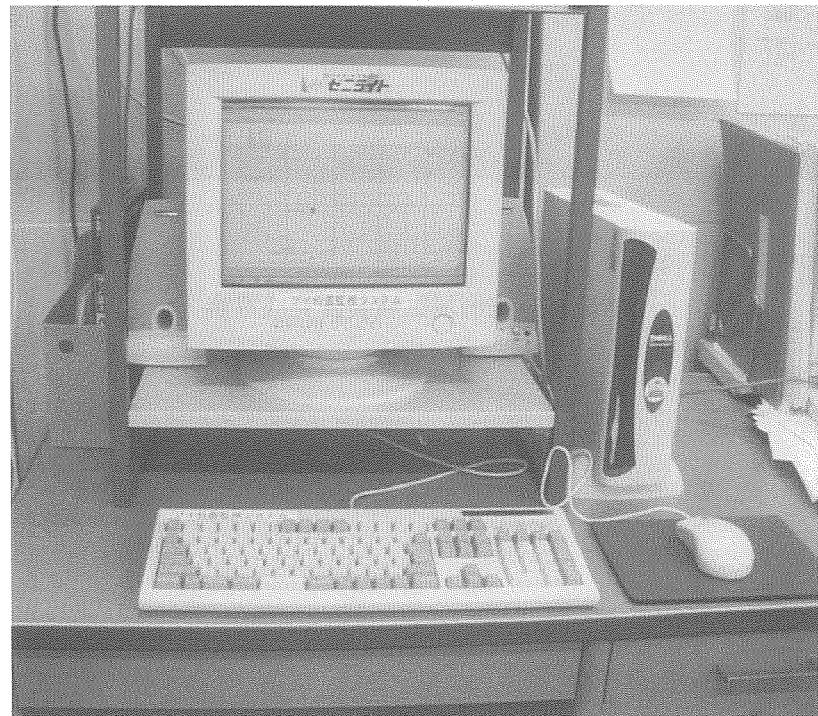


Photo 4 鋼管フレームへのGPSブイ取り付け



(A) モニター画面



(B) 全景

Photo 5 監視モニター

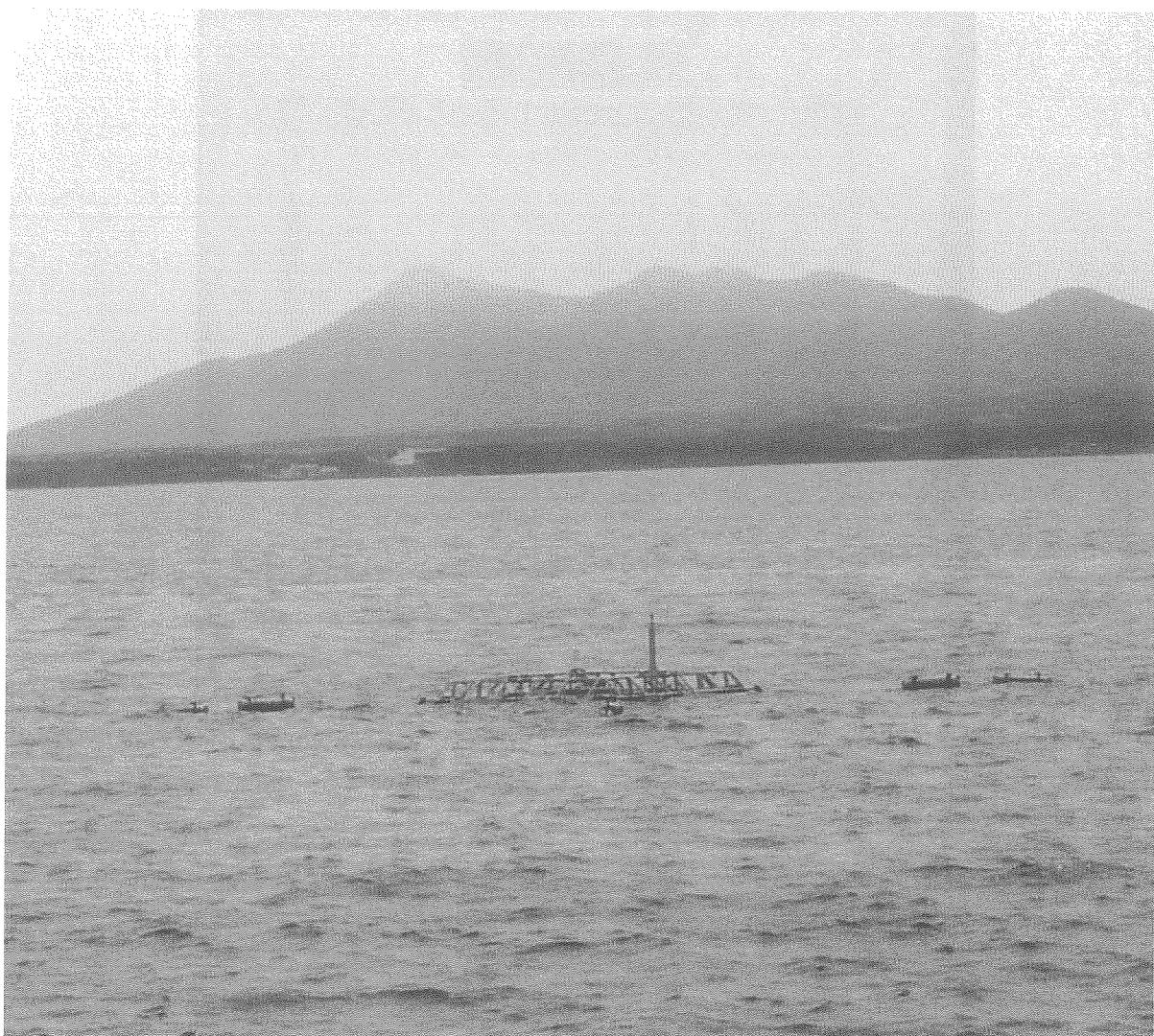


Photo 6 実海域試験装置完成写真

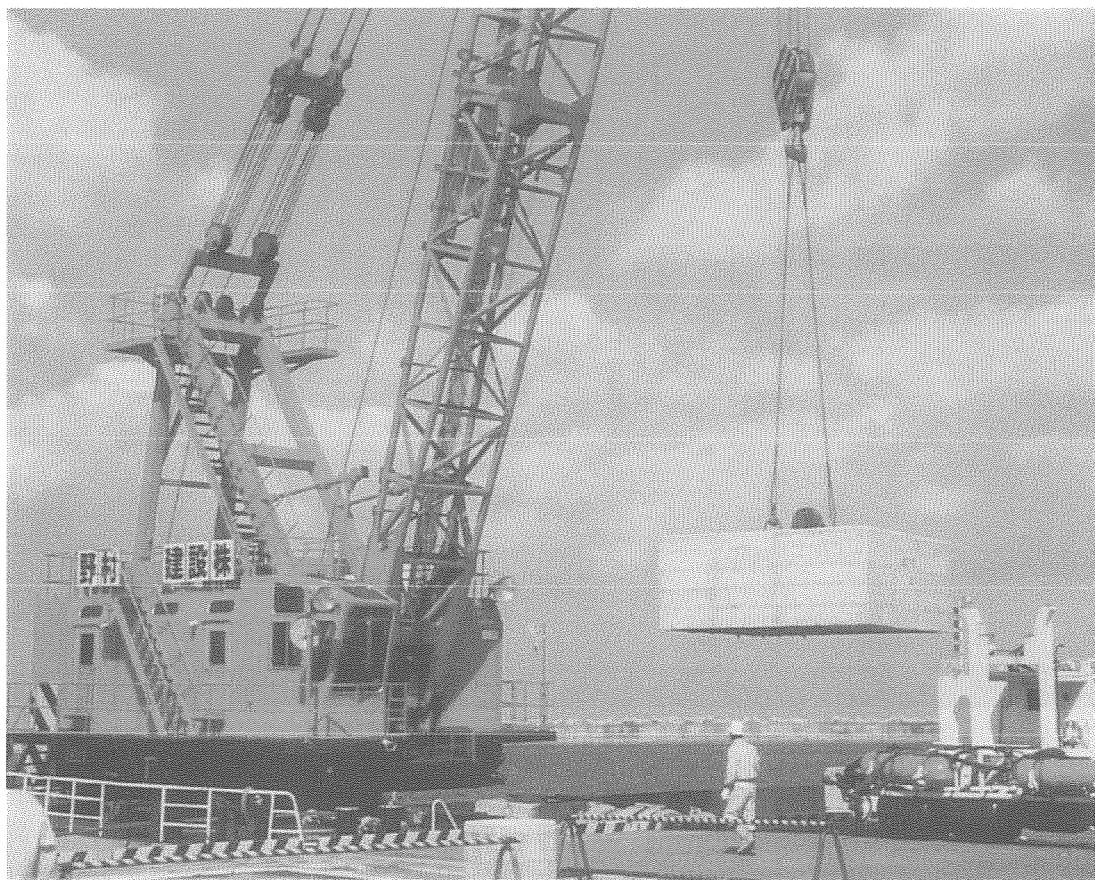


(a) 作業船

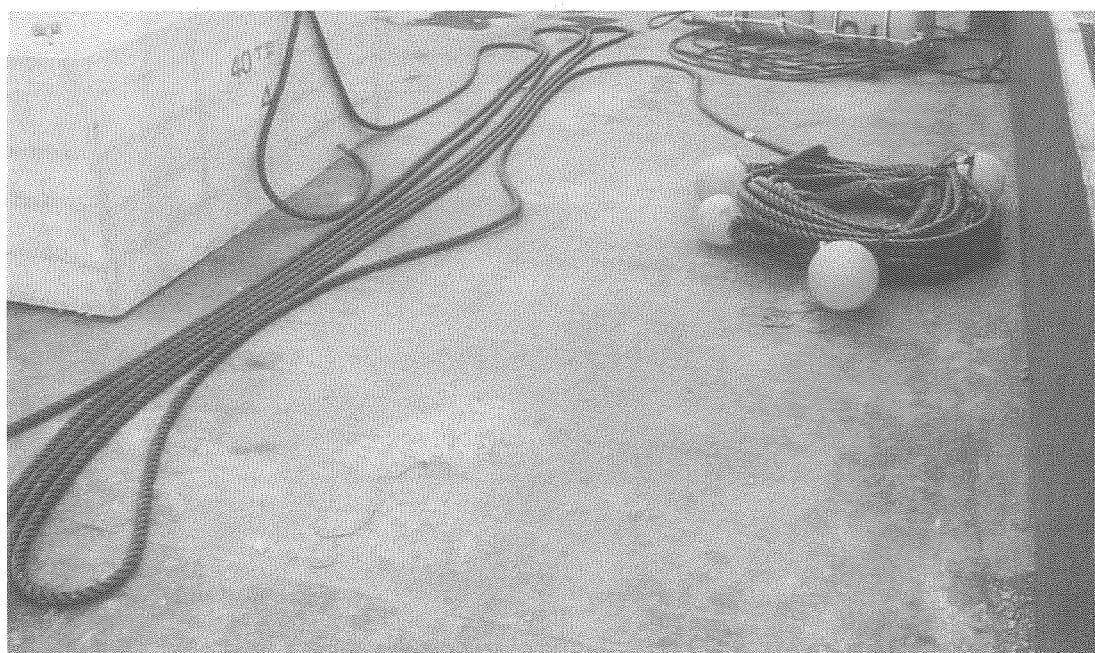


(b) マーカーブイ

Photo 7 マーカーブイ設置

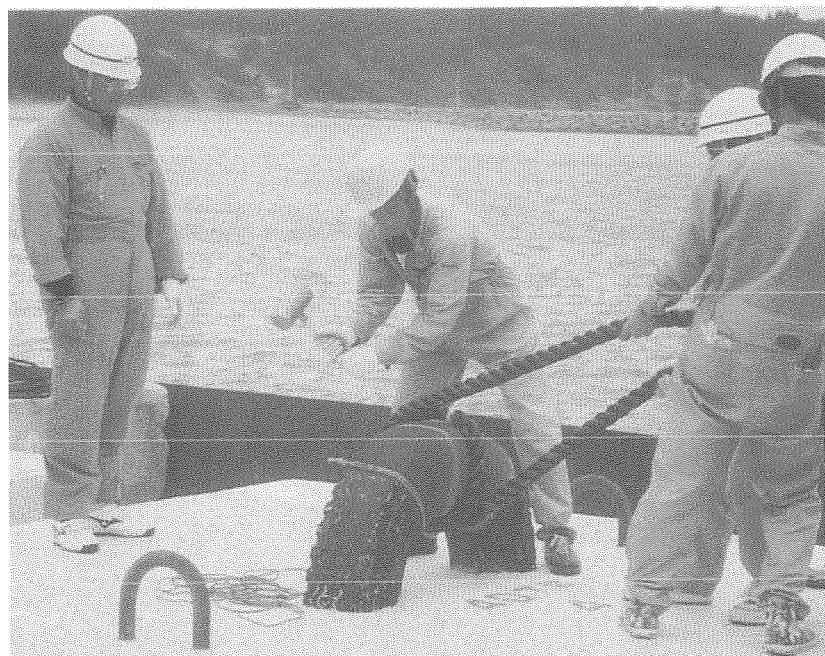


(a) アンカーブロック積み込み



(b) 船上の係留索

Photo 8 アンカーブロック積み込み

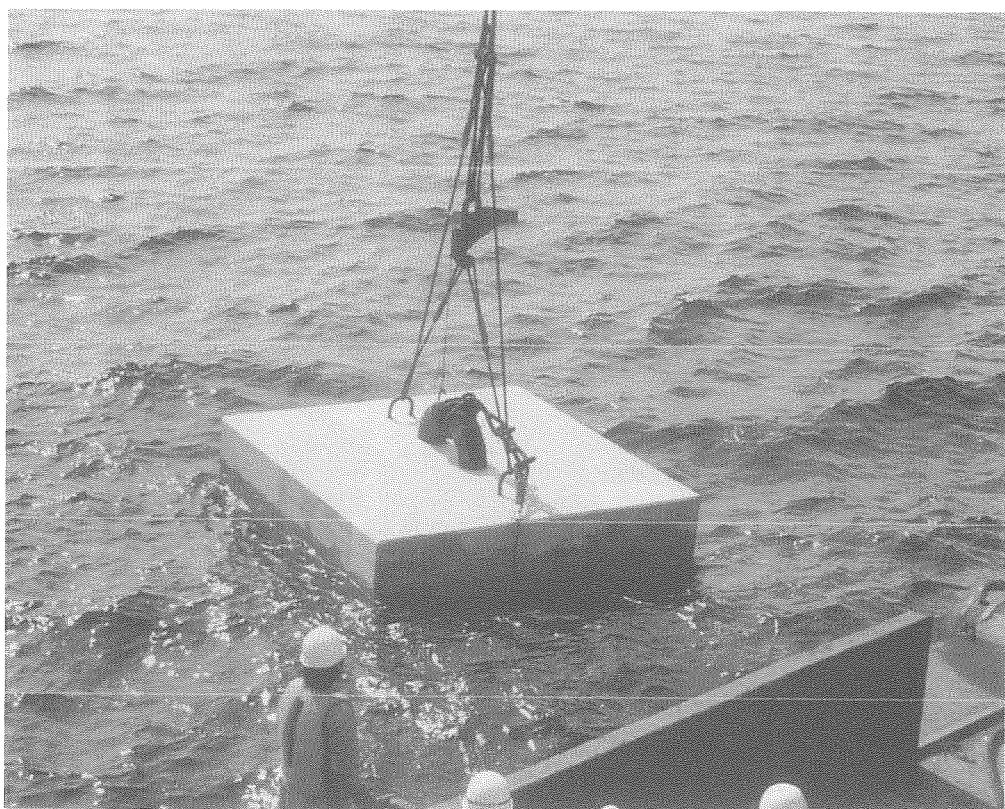


(a)アンカーブロックに係留索結束

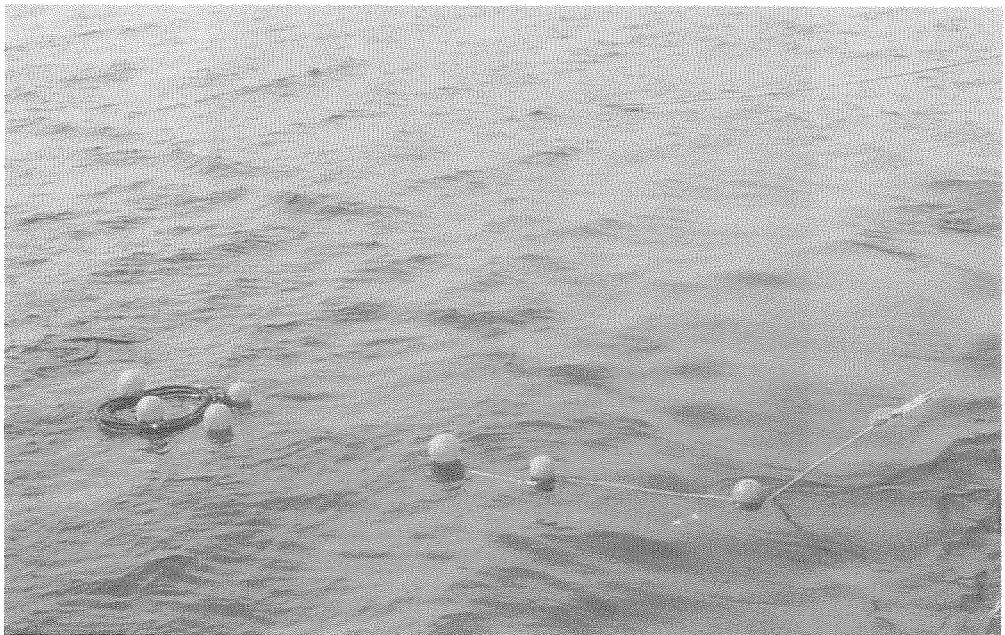


(b)起重機船へのDGPS取り付け

Photo 9 アンカー及び係留索据付け(1)

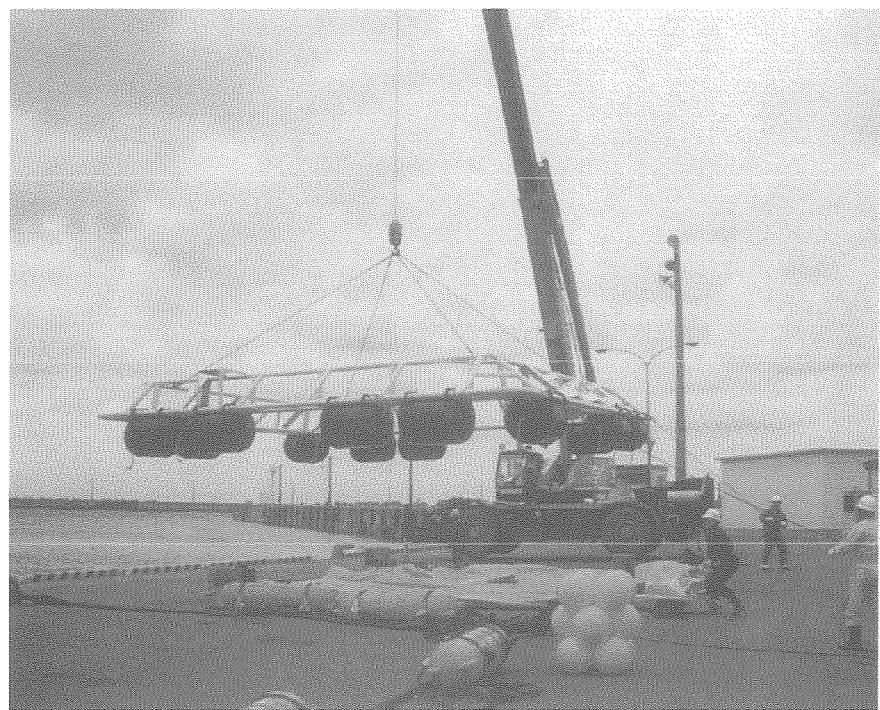


(a)アンカーブロック吊り降ろし

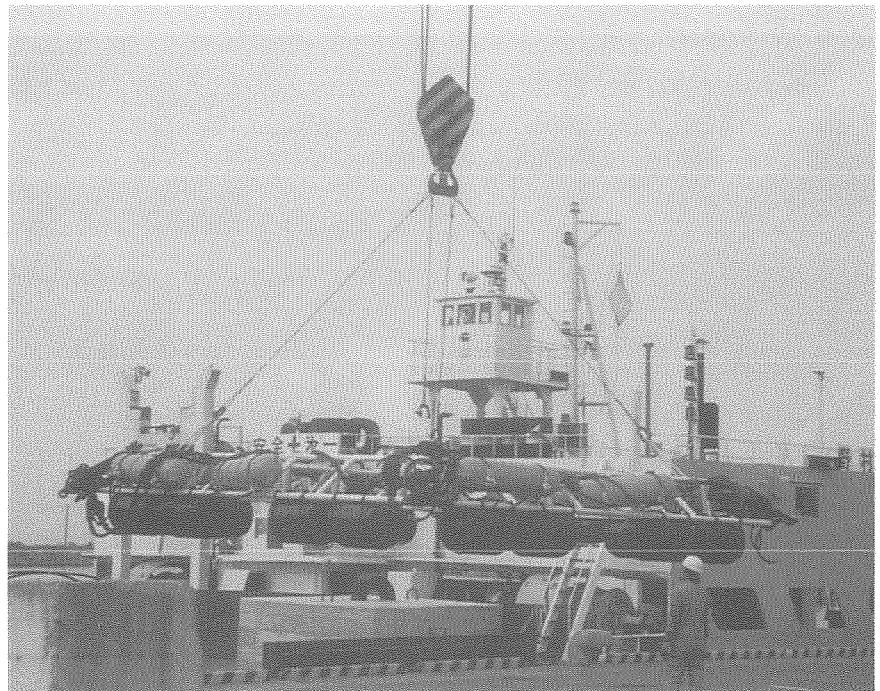


(b)アンカー据え付け後の係留索、フロート及び簡易標識灯

Photo 10 アンカー及び係留索据え付け(2)

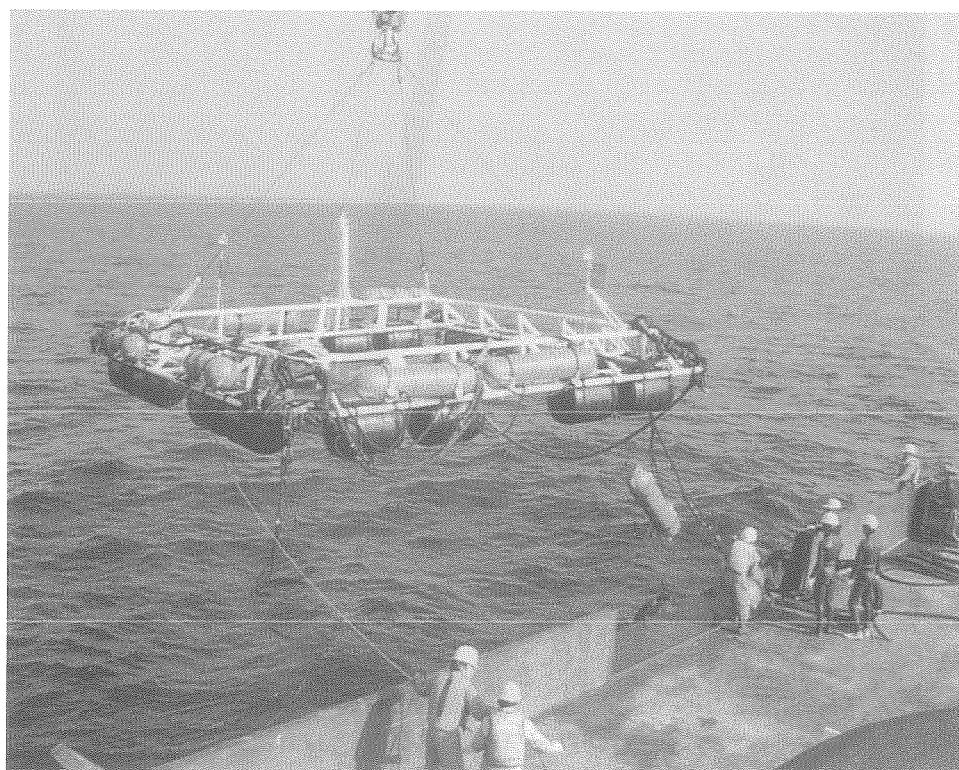


(a)アンカーブロック積み込み

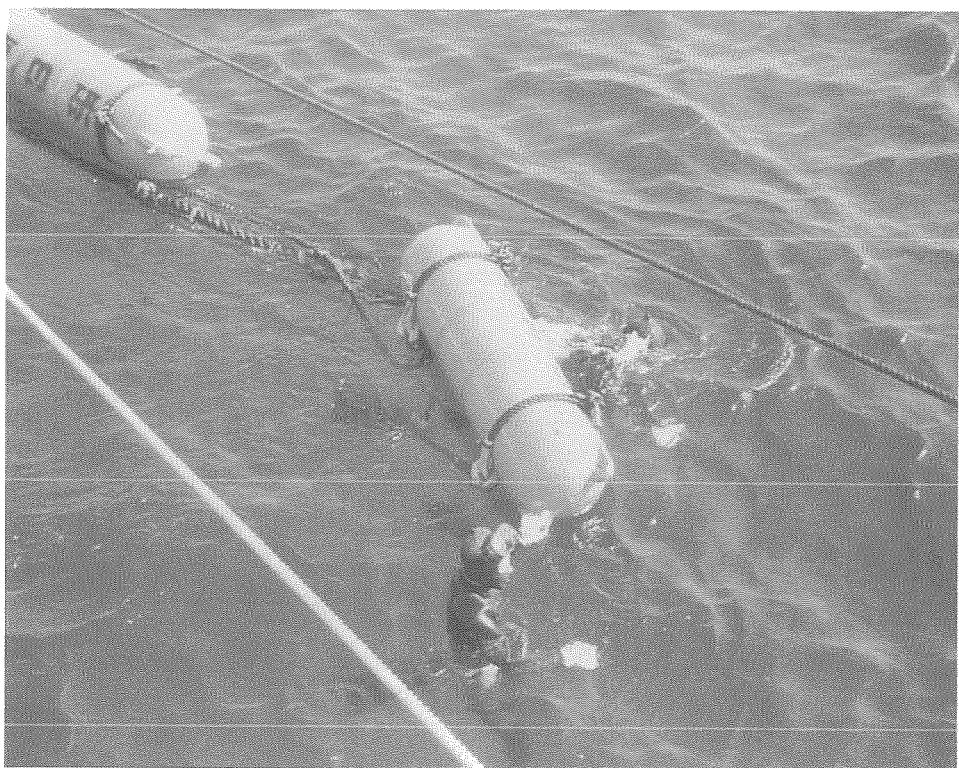


(b)起重機船への搭載

Photo 11 鋼管フレームの回航



(a)係留ユニットの吊り降ろし



(b)係留ユニットと係留索の結束作業

Photo 12 鋼管フレーム及び係留ユニットの取り付け

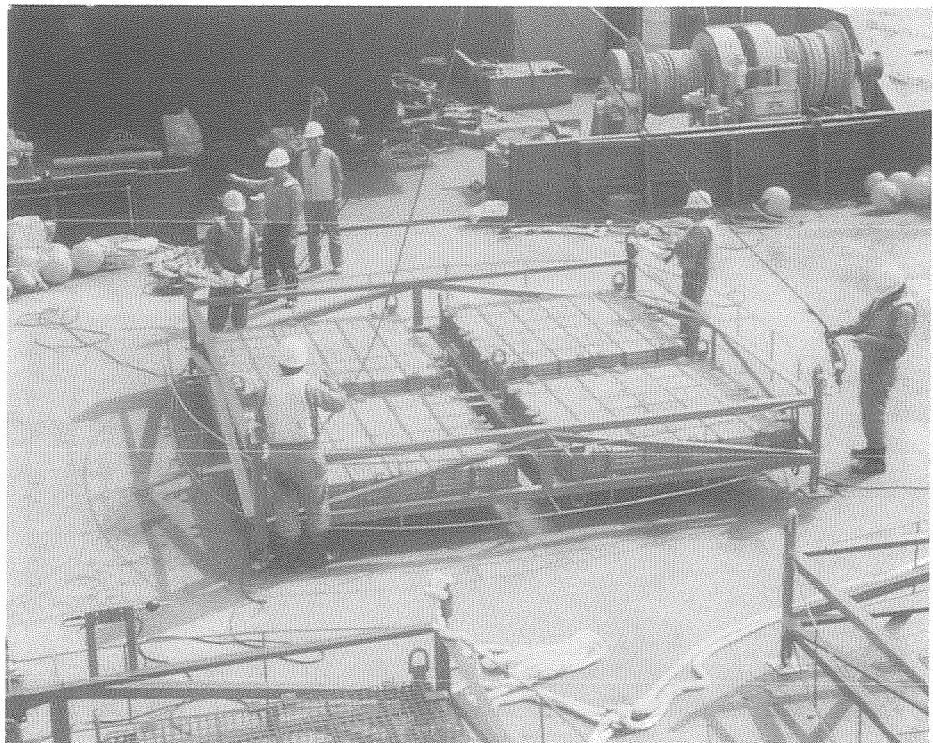


(a)係留索への張力導入

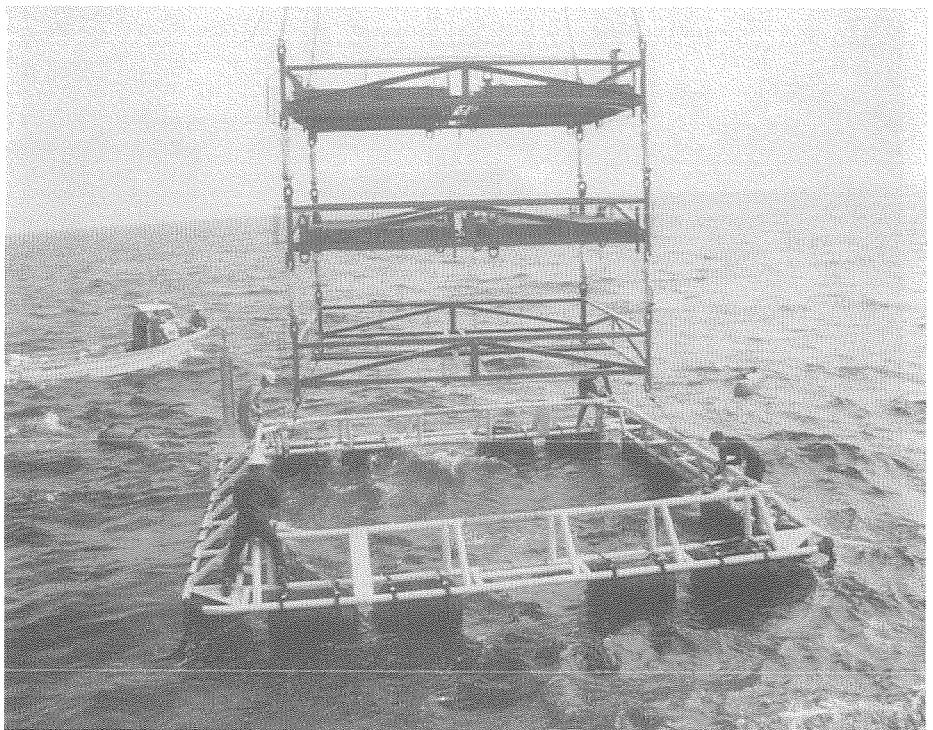


(b)係留ユニットの設置終了

Photo 13 係留索張力導入

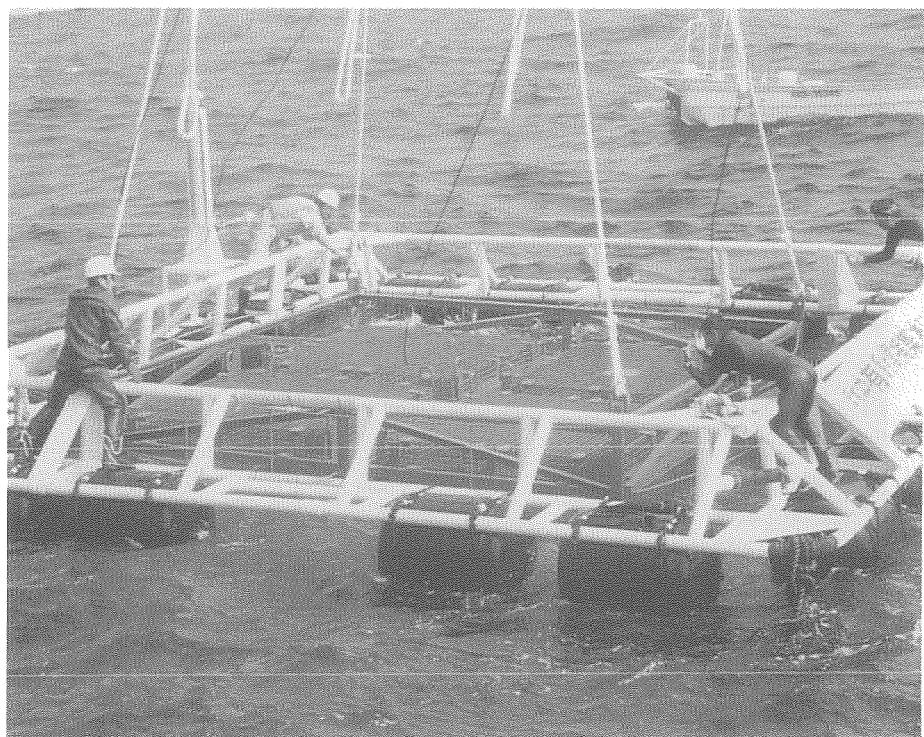


(a)捕集材を充填した吸着床

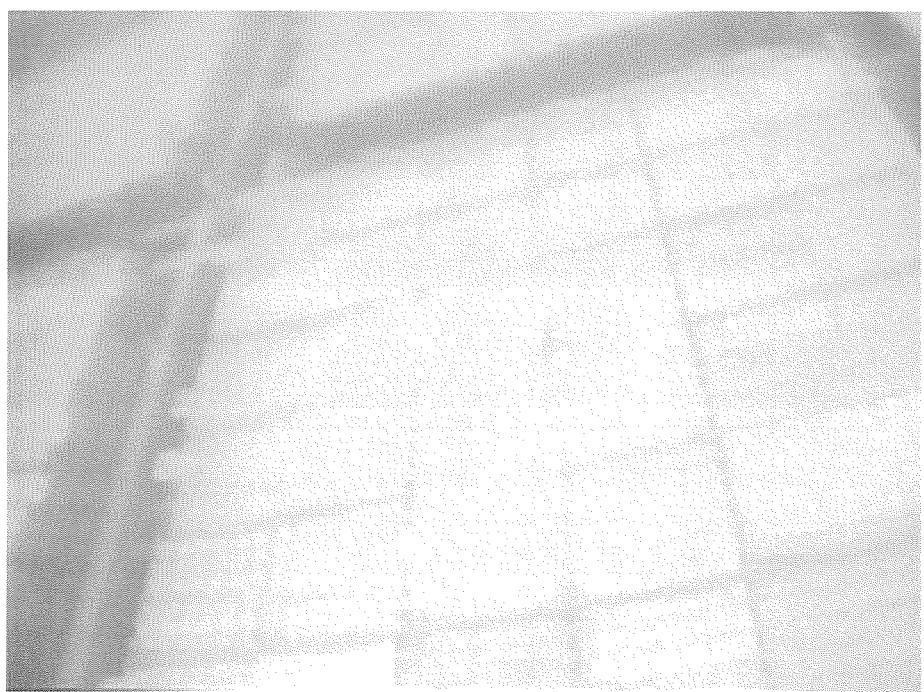


(b)鋼管フレーム内への吸着床の挿入

Photo 14 吸着床取り付け(1)



(a)鋼管フレーム内への吸着床の挿入終了



(b)取り付け後の大型吸着床（水中）

Photo 15 吸着床取り付け(2)

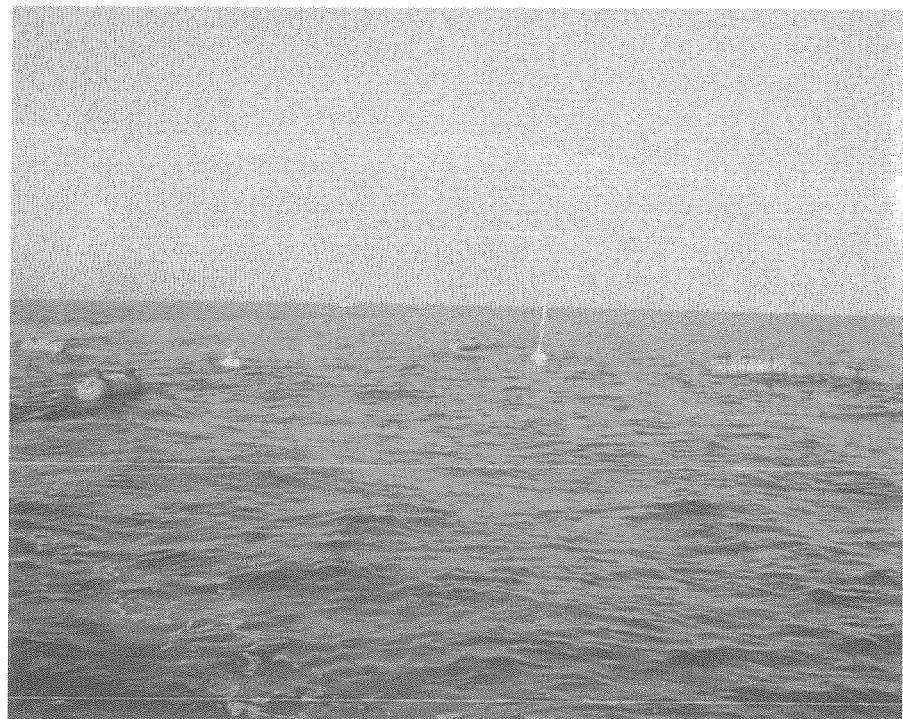
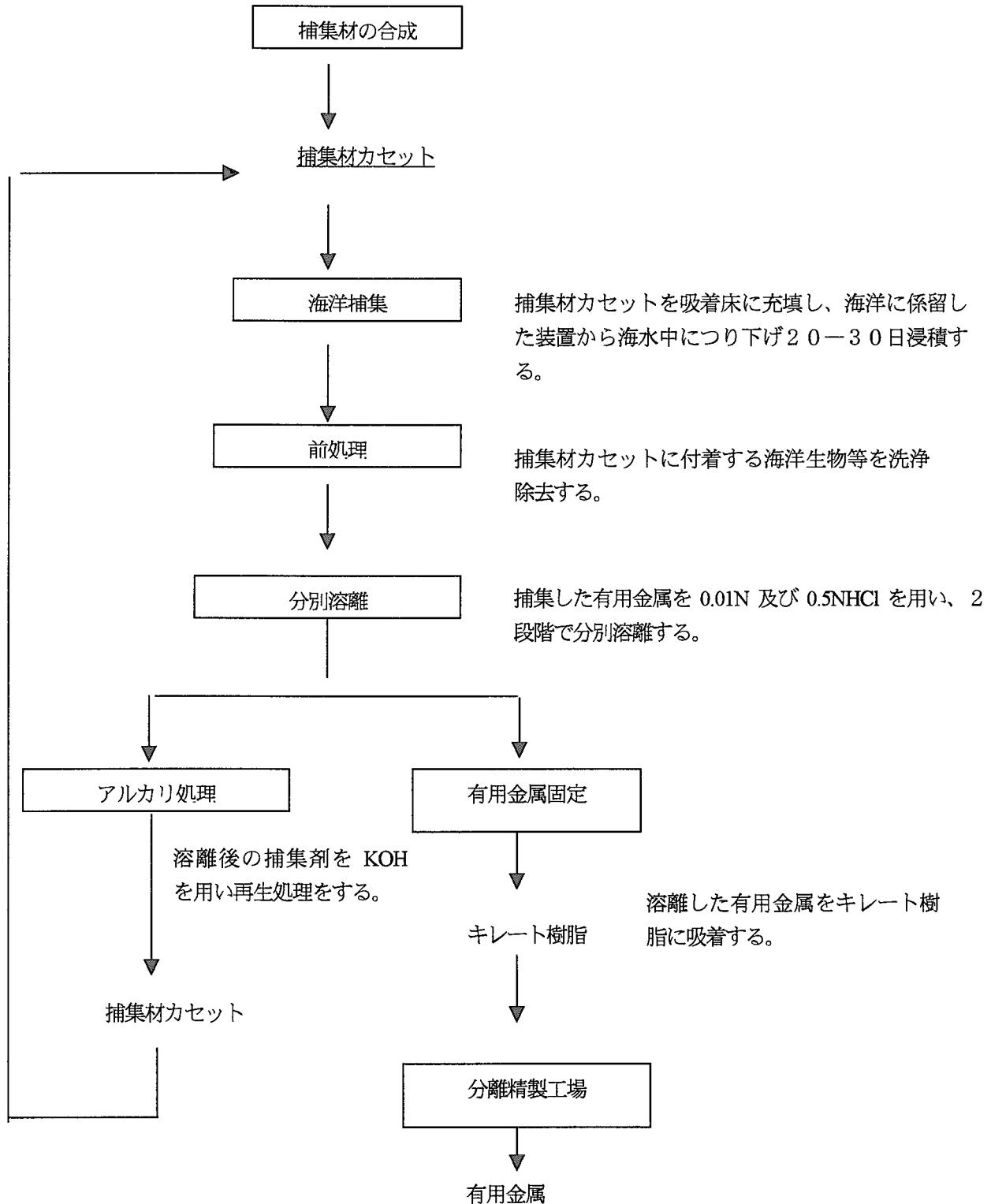
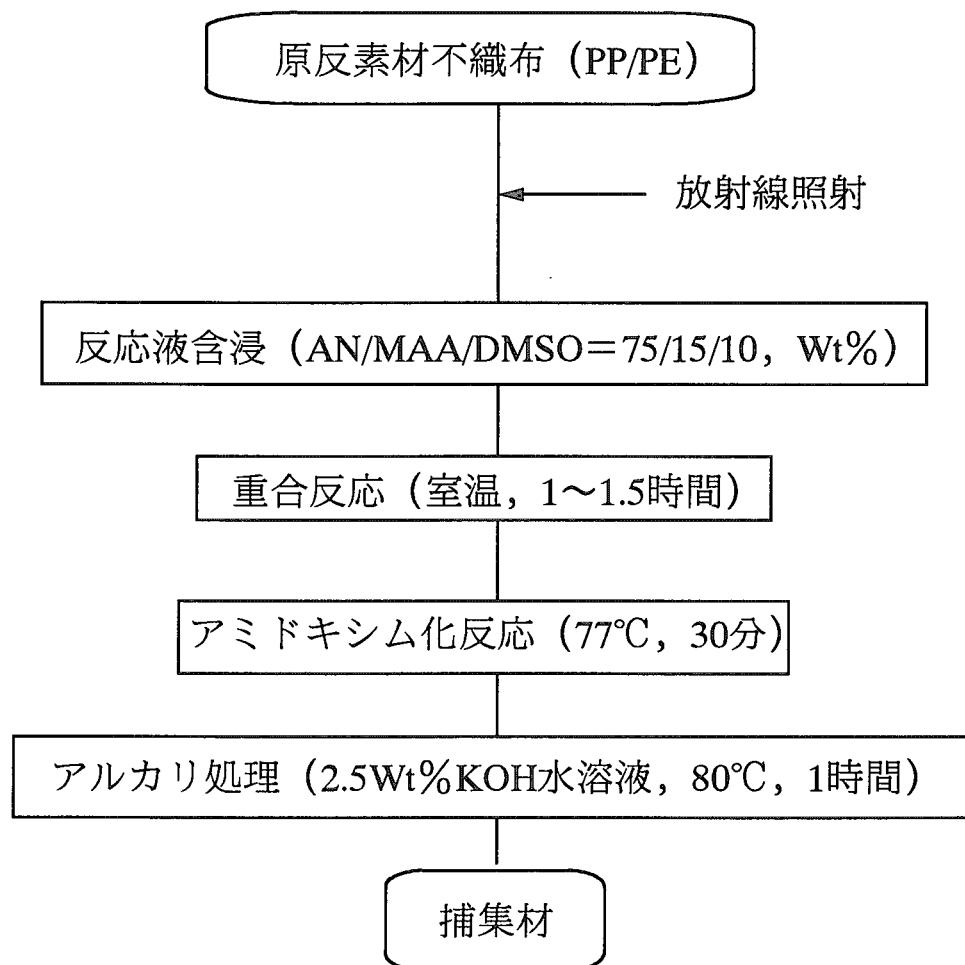


Photo 16 実海域試験装置 試験休止時

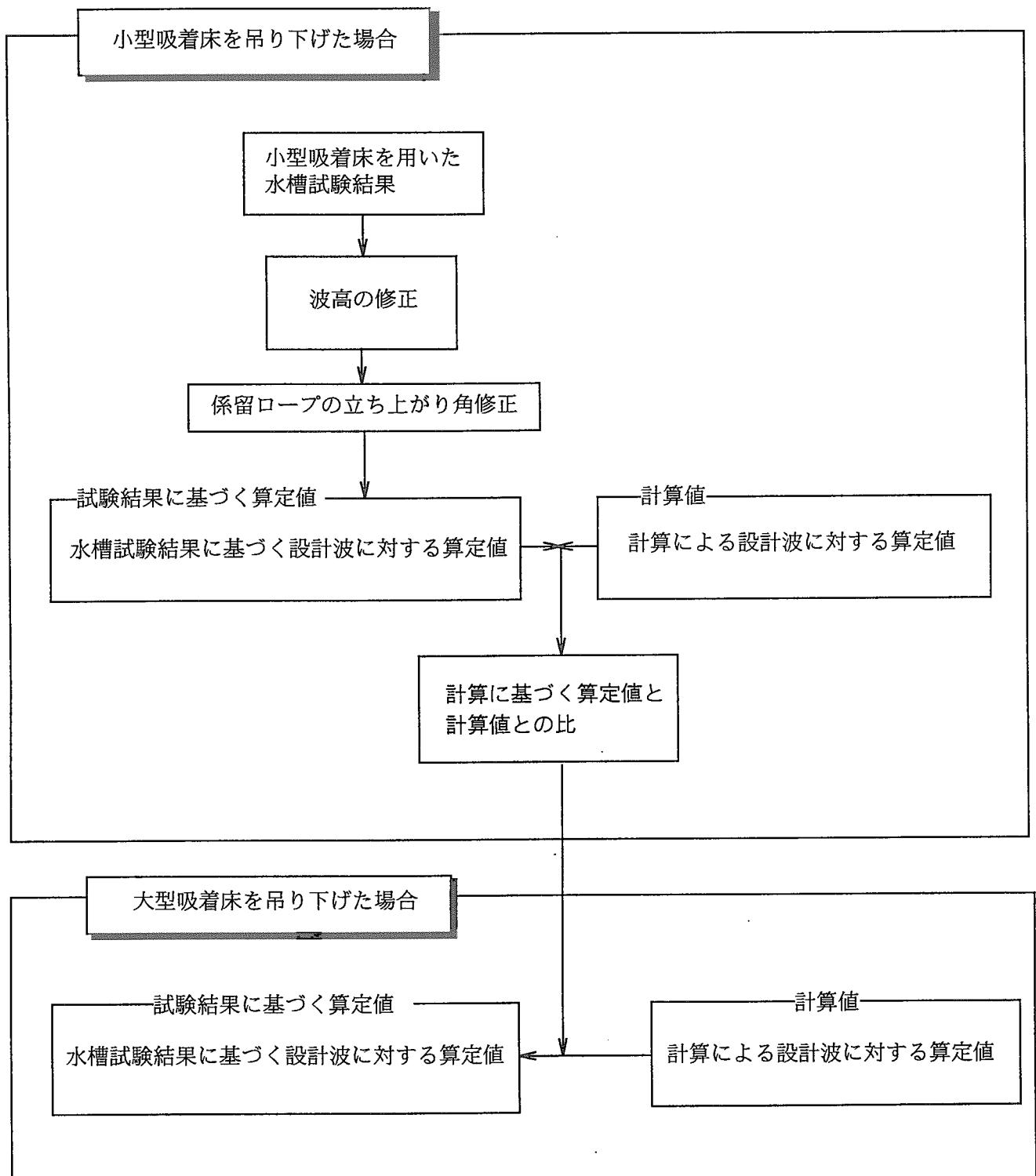
Scheme 1 捕集材の合成から捕集金属精製までの基本プロセス



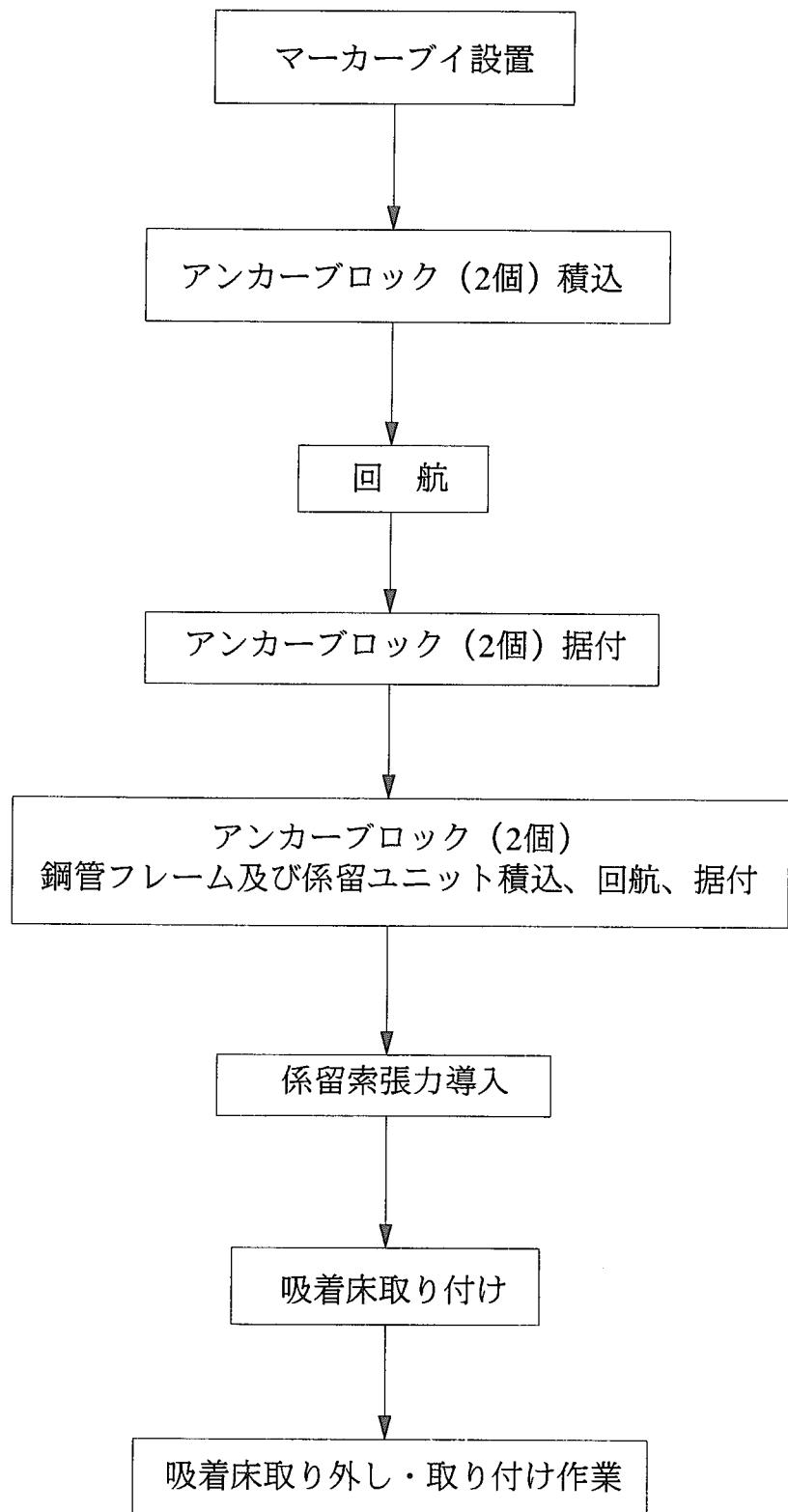
Scheme 2 捕集材作製フローシート



## Scheme 3 水槽試験結果に基づく係留ロープ張力の算定



Scheme 4 海上施設作業手順



# 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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	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·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
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·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
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5 SI接頭語

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(注)

1. 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「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 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

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

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

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

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV
1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	1 cal = 4.18605 J(計量法)
9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	= 4.184 J(熱化学)
3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	= 4.1855 J(15 °C)
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	= 4.1868 J(国際蒸気表)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	仕事率 1 PS(仏馬力)
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 75 kgf·m/s
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	= 735.499 W

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R
1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>	1	0.01	100	1	1	3876	1
3.7 × 10 <sup>10</sup>	1		0.01	1		2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

