

## 流出油の回収システムに関する研究

上田 浩一\*、山之内 博\*、疋田 賢次郎\*\*、柴田 俊明\*  
原 正一\*、山川 賢次\*、星野 邦弘\*、湯川 和浩\*\*\*

### Study on a Spilled Oil Recovery System

by

Koichi UEDA, Hiroshi YAMANOUCHI, Kenjiro HIKIDA, Toshiaki SHIBATA  
Syoichi HARA, Kenji YAMAKAWA, Kunihiro HOSHINO and Kazuhiro YUKAWA

#### Abstract

In the case of oil spill incidents at sea like NAKHODKA incident, if the spilled oil drifts to the shore and sticks to rock and sand, it is very hard to remove. Then we researched on an effective technique to recover oil in waves. As it is necessary to remove the oil in offshore waves, a new technology to recover spilled oil efficiently in the open sea was developed. A barge type oil recovery vessel model was investigated, which is generally operated as a multipurpose work vessel for an offshore construction, sea surface cleaning and so on.

Spilled oil is taken into the moon-pool located at the center of the ship through the intake and waterway at the stern, where the gathered oil is to be lifted from the water surface by the mechanical equipment. The key issue for the effective recovery of spilled oil is how to subdue the water-surface movement in the moon-pool. With certain appendages attached to the ship, the goal of calming the operational water surface is to reduce the water surface movement in the center of moon-pool by less than 30 % of the incident wave height. The simplification of such appendages in order to attain the good efficiency of oil recovery operation is also important. This target has been attained.

The inflow of oil was turned out to be difficult due to the reflection wave from the sidewall of the intake area when the intake confronts with the incident wave in the tank experiment with floating oil. This tendency becomes outstanding in the long wave range. The inflow of oil was improved by changing the direction of intake against the wave not to generate the reflection wave, the removal of bottom plate of intake area and the installation of the watermill to accelerate the surface flow. However, it is considered to be necessary to improve the structure narrowed down to the waterway from intake. Since the stagnation is produced in the front of intake as for taking in of the floating oil in still water, the reconstruction preparing the duct penetrated from moon-pool to bow was performed.

As the oil recovery equipment was manufactured in order to investigate its performance independently, the breadth of net conveyer was approximately half in scale of that of moon-pool of oil recovery vessel. For this reason, oil in waves turned back of both sides of net conveyer leading to the fall of recovery efficiency.

---

\*環境・エネルギー研究領域

\*\*海上安全研究領域

\*\*\*海洋開発研究領域

原稿受付 平成13年10月 1日

審査済 平成14年 9月18日

Concerning the recovery of spilled high viscosity oil, as it is difficult to pump the oil, the performance of a test device with a net conveyer was examined experimentally. In the case of low viscous oils, it is important to thicken the oil layer at the oil recovery point in order to be pumped efficiently. Then the state of the oil layer at an advancing barrier was also investigated. A method is studied that creates a calm region inside a recovery vessel (skimmer), and induces the floating oil into the vessel and thicken the oil layer, then removes the accumulated oil. A baffle and a narrowed and widened water channel inside the vessel create a calm pool and accumulate oil.

As a result, the spilled oil is induced well into the recovery region when the vessel is heading into the waves and when the wavelength is shorter than that of the vessel. The 150° baffle gives a smooth surface and good water flow in the recovery area. Highly viscous oil is withdrawn well by the net conveyer. The collecting mixture with low viscous oils can be made to contain less water by controlling the position of the suction funnel.

目次	5.2	吸引口の位置制御による流出油の回収
1	はじめに	5.2.1 吸引口の位置制御による流出油の回収実験方法
2	堰前の滞留油層に与える波の影響	5.2.2 吸引口の位置制御による流出油の回収実験結果と考察
2.1	前進する堰前の滞留油層に与える波の影響実験	6
2.2	前進する堰前の滞留油層に与える波の影響の実験結果と考察	まとめ
3	ムーンプールの静穏化技術に関する研究	参考文献
3.1	ムーンプールの静穏化技術に関する研究の方法	
3.1.1	油回収船模型	
3.1.2	波浪低減用の付加物	
3.1.3	波浪低減用の付加物についての実験方法	
3.1.4	波浪低減用の付加物についての実験結果と考察	
3.1.4.1	模型船の船体運動	
3.1.4.2	相対水位の応答	
3.2	傾斜板の角度と絞り水路の効果	
3.2.1	傾斜板の角度と絞り水路の効果に関する実験方法	
3.2.2	傾斜板の角度と絞り水路の効果に関する実験結果と考察	
3.3	油回収装置搭載時の波浪低減状況	
3.4	油回収部の静穏化技術に関するまとめ	
4	ムーンプールへの油の導入	
4.1	浮遊油の集積	
4.2	模型船周りの浮遊油層流れの観察	
4.2.1	模型船周りの浮遊油層流れの観察実験方法	
4.2.2	模型船周りの浮遊油層流れの観察結果	
4.3	油回収部への浮遊油の流れ実験	
4.4	浮遊油の取入れ	
5	浮遊油の回収	
5.1	ネットベルトによる回収	
5.1.1	小型油回収装置模型	
5.1.2	波のない場合の油回収性能実験	
5.1.3	波のない場合の油回収性能実験結果	
5.1.4	波浪中での油回収性能実験	
5.1.5	波浪中での油回収性能実験結果と考察	

## 1. はじめに

1997年1月2日、冬季の季節風による荒天下の日本海でロシア船籍のタンカー「ナホトカ号」の海難事故が発生した。船体が折損・分離し、船尾側が沈没、船首部が積荷の重油を流出しながら漂流して海岸に漂着した。「ナホトカ号」からの重油流出量は、約6,200klと推定され、鳥取県から新潟県まで1府9県の日本海沿岸を汚染し、わが国で最大規模の海洋汚染となった。この重油流出事故で、海岸に打ち上げられた油の除去がいかに困難な作業であるかを、あらためて認識させられた。日本近海は油タンカーの輻輳海域であり、このような海難事故が再び発生する可能性は高いと考えられる。

「ナホトカ号」の海難事故は、油流出事故が発生した場合の防除の対応に際して、次のような問題点を改めて示した。

- 1) 流出油の拡散・漂流予測
- 2) 流出油の制御（包囲・収集）
- 3) 流出油の海上での回収
- 4) 損傷船舶の漂流防止（曳航）
- 5) 流出油の浅海域での回収
- 6) 汚染された海岸の清浄化
- 7) 回収した油の処理

不幸にしてこうした事故が発生した場合には、可能な限り流出油が海岸に漂着する前に洋上で回収することが肝要であるが、既存の油回収船・回収装置は港内や内海での油流出事故を想定した仕様であり、波浪中では稼働できないか、あるいは回収効率が大きく低下する。また、C重

油や経時変化によりムース化した高粘度油に対しても現有の油回収装置では必ずしも十分とは言えない。したがって、沖合で効率よく流出油を回収できるシステムの開発が必要となっている。

本研究は、海上技術安全研究所が「高波浪状況下での油回収技術に関する研究」を担当し、港湾空港技術研究所（前港湾技術研究所）が「沿岸域汚染防除のための油回収システムに関する研究」を担当した。本報告では、前者の研究をまとめた。

）流出油回収システムのコンセプト

本研究で対象とした油回収船は、取入部から水路部を経て船体中央部に設けたムーンプールと呼ばれる作業水面に漂流油を取り入れて機械的装置により回収する箱型台船である。取入部、水路部及びムーンプールの各部に波浪低減用の付加物を設けて静穏化を図るものである。

油回収作業は次のように実施される。

- (1) 流出油の取入部両舷から曳航索に取付けたオイルフェンスを八の字型に展張して、曳航しながら流出油を囲み込む。
- (2) 流出油は、取入部、水路部を経てムーンプールに流れ込む。
- (3) 取入部、水路部及びムーンプールで、それぞれ波浪低減の処置を施す。
- (4) 静穏化されたムーンプール に設置した油回収装置により流出油を回収する。

図1に流出油回収システムの概念図を示す。



図1 流出油回収システムの概念図

また、この作業船は、次のような特徴をもっている。

- (1) 本船は非自航型で、油回収装置、クレーン、ウインチ等を駆動する電源として発電機を装備している。
- (2) 回収船から直接回収装置が作業水面に設置される。
- (3) 船底が平坦でプロペラや舵等の突起物がないため、浅瀬における作業にも支障が少ない。
- (4) 箱型台船であるため、作業面積や回収タンクの容量が大きい。したがって、回収作業に参加した小型漁船等の母船的役割として作業機材の補給等も可能である。例えば、小型漁船の場合、ドラム缶の積載数が少ないため頻りに港の岸壁と作業水域とを往復する必要が

あるが、母船があることによって節約した時間を回収作業に充てることができる。

- (5) 油回収作業以外では、海面清掃や海洋工事・海洋調査等のダイバー支援船など、多目的作業船として有効に活用できる。

）海象条件

油回収船の稼働環境として、海象条件の最も厳しい冬季の日本海とした。大波高のなかでの作業は、現実には不可能であるので、冬季日本海の最多出現有義波高  $H_{1/3} = 2 \sim 3 \text{ m}$ 、有義波周期  $T_{H1/3} = 6 \sim 8 \text{ 秒}$  とした。

2. 堰前の滞留油層にあたる波の影響

浮遊油層を回収する場合、堰き止めて油層を厚くして回収する。そこでまず最初に油層の存在する水面上を前進する堰前の滞留油層に与える波の影響について調べた。

2.1 前進する堰前の滞留油層に与える波の影響実験

堰は浮体に取り付けた平板でモデル化し、前進する堰前の滞留油層について、波浪条件下と平水条件下で実験を行って比較した。実験は0.45m幅、0.45m水深、直線部8mの回流水槽で行った。

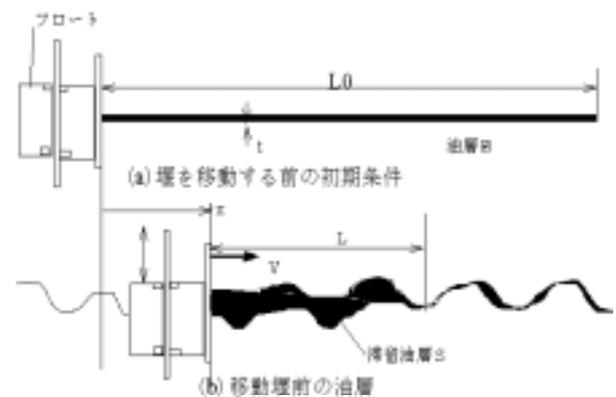


図2 移動堰前部の滞留油層挿入

図2の(a)に示すように、最初に12リットルの赤色に着色した灯油を水面に注ぎ、初期油層長さ  $L_0$  を計測した。 $L_0$ は672cmから801cmまで変化した。その後堰を一定速度で動かし、堰前の油層をモータードライブカメラ及びビデオカメラで撮影した。その写真を用いて、移動堰前部に滞留している油層の長さ  $L$  を計測した。そして平均滞留油層厚さと単位幅の滞留油層量を求め、後述するように無次元油層長さとお油層フルード数の関係性を求めた。

2.2 前進する堰前の滞留油層に与える波の影響の実験結果と考察

図 2(b)に示すように、堰の単位幅あたりの油量を  $S$  とし、 $L$  を前進する堰が影響を与えている油層の長さとする。油層フルード数と無次元油層長さをを用いて、油層の状態を評価する。流れの場に置かれた堰前の油層については Tamiya(1973)らによって解析されている<sup>1)</sup>。ここで油の密度を  $\rho_1$ 、水の密度を  $\rho_2$  とし、 $\sigma = \rho_1 / \rho_2$  とし、水流の速さを  $V$ 、 $L$  を堰から滞留油層先端までの長さとする。

油層フルード数  $F$  を  $F = \frac{V}{\sqrt{g(1-\sigma)\sqrt{S}}}$  とし、

無次元油層長さを  $\frac{L}{\sqrt{S}}$  とする。ここで  $g$  は重力加速度で

ある。流れの中に置かれた堰前の滞留油層については Tamiya らによって次式が与えられている<sup>1)</sup>。

$$\frac{L}{\sqrt{S}} = 2.1F^{-2}$$

この実験では流速の代わりに堰の前進速度を  $V$  とし、 $L$  を前進する堰が影響を与えている油層の長さとする。この

油層フルード数  $F$  と無次元油層長さ  $\frac{L}{\sqrt{S}}$  を用いて、移

動堰前の油層について平水中と波のある場合(噴水:50mm, 波高:7.8cm,波長:0.8m)とを比較した。堰の前進速度が約 0.28m/s の場合について図 3 に示す。

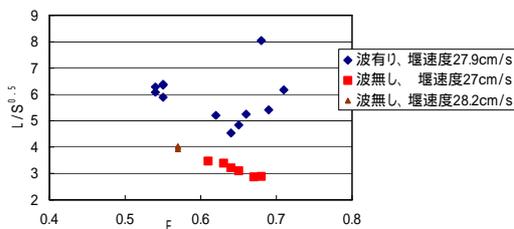


図 3 前進する堰前の油層への波の影響  
(噴水:5cm,波高:7.8cm,波長:80cm)

油層フルード数と無次元油層長さの関係について波浪中と平水中について比較している。これは着色した灯油を用いた実験結果で、堰前の油層長さは波により長くなったり、短くなったり先端部が振動する。波浪中での移動堰前の平均的滞留油層の長さは平水中の滞留油層の長さより長くなっている。油層は長くなり、油層の厚さは薄くなっているため波浪中では波を静穏化して回収し易くするとともに、油層を厚くするように油を集積する必要がある。

### 3. 油回収部の静穏化技術に関する研究

前章で述べたように波浪中で油層を堰き止めると、浮遊油層が前方へ広がり油層厚さが薄くなるので、外洋波浪中で流出油を回収する場合、次のことが必要である。

- (1) 油回収船の油回収部を静穏化する。
- (2) 流出油を油回収部へ効率よく誘導する。
- (3) 油回収部で油層を厚くする。

そして後で述べるように、

- (4) 回収油中の含水率を小さくするように回収する。

ここでは、取り入れ部で水面を絞り、そこから絞った水路を設け、急拡大したムーンプールへ油を導くこと及びそれらに付加物を設置して波浪の低減化を図る方法を検討した。波浪中で流出油をオイルフェンスで油回収船部へ誘導する場合には強い乱流や流れの障害を防ぐために、短かめのオイルフェンスにする必要がある<sup>2)</sup>。

#### 3.1 ムーンプールの静穏化技術に関する研究方法

コンセプトに示した船体中央部にムーンプール(作業水面)を有する油回収船模型を製作した。次に、波浪低減処置を施さない状態の油回収船模型の波浪中における船体の動揺特性及び取入部、水路部、ムーンプールにおける相対水位変動特性を調査した。その結果を踏まえて、付加物による相対水位変動特性の改良、すなわち波浪低減効果を実験的に調査して、改良の方針を立てた。

そして、より効果的な波浪低減用付加物を選定するために水槽実験によって、その効果を確認した。

さらに、水槽実験によって油回収装置を搭載した状態に適する波浪低減用付加物を選定及びその配置を検討した。その結果をふまえて、後で述べるように重油を用いた水槽実験で総合的な実験を行った。

##### 3.1.1 油回収船模型

この研究で使用した油回収船模型は、全長 3,500mm × 全幅 1,200mm × 型深さ 250mm、船体中央部に長さ 1,000mm × 幅 600mm のムーンプールと呼ばれる開口部を設けた箱型台船である。漂流物の取入部を設け、水路部を経て水面がムーンプールに通じるものである。取入部と水路部には船底と同一面の底板を設けた。図 4 に供試模型の形状及び主要寸法を示す。模型船の縮尺は想定される実機の 1/20 とした。この状態を原型として、取入部、水路部及びムーンプールに波浪低減用の各種付加物を装着して、その効果を調査した。また、詳細は後述するが、ムーンプールへの流れ込みを促進するためにムーンプールから船首部に貫通するダクトの設置及び船体運動の影響による流出油の捕捉を良好にするため取り入れ部の底板の一部を除去する改造を行った。

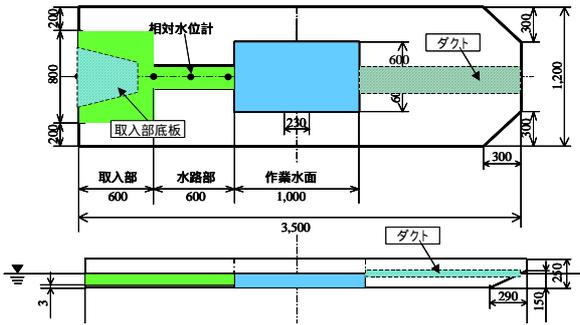


図4 油回収船模型

### 3.1.2 波浪低減用の付加物

波浪低減用の付加物は、効果が期待される構造物を即物的に選定して検討した。これらの波浪低減用の付加物を表1に示す。図5～図6に検討した付加物の形状と配置を示す。油回収装置を搭載した状態で採用した付加物の形状と配置を図32に示す。

この研究で検討した波浪低減用の付加物を表1に、その形状を図5～図6に示す。

表1 波浪低減用の付加物

取付場所	付加物の名称
取入部水面下	垂直堰
取入部・水路部	底板の穴
ムーンプール	I型フランジ
ムーンプール	L型フランジ
取入部・水路部	多孔床
ムーンプール	平板列底板
ムーンプール	消波壁
ムーンプール	傾斜板
ムーンプール入口水面下	垂直堰
ムーンプール入口水面下	傾斜堰
取入部中間水面下	傾斜堰

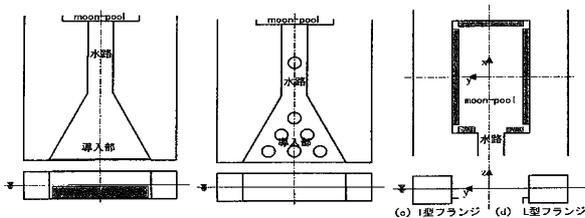


図5 波浪低減用付加物 ( ~ )

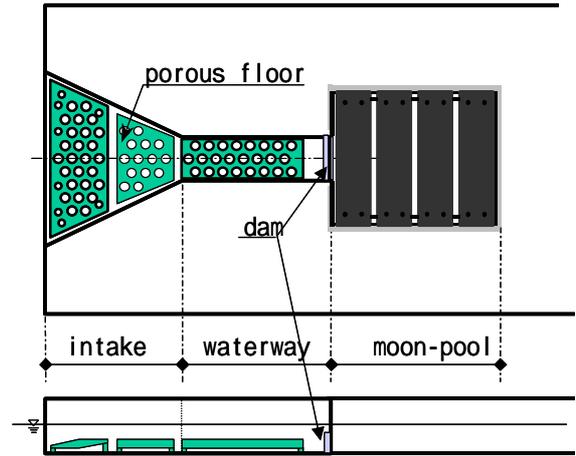


図6 波浪低減用付加物 (多孔床、垂直堰、スリット付き板)

### 3.1.3 波浪低減用付加物についての実験方法

図7に水槽実験時の油回収船模型の配置例を示す。動揺実験時の模型は、船体中央部両舷から突き出したアームの先端と船体中心線の船首側及び船尾側の4点を水系で菱形状に結んで船首揺れを拘束し、前後揺れを妨げない程度のばねで漂流を支えた。

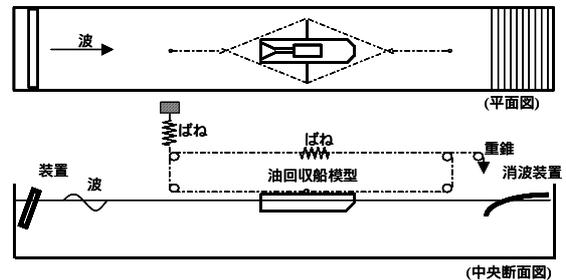


図7 水槽実験時の模型の配置

波向は、波浪による水塊が直接ムーンプール内に流入する状態が最も厳しいと考えられるので、主に取入部を波の入射方向に向けて波浪低減用の各種付加物の効果を調べた。取入部を波下側に向けた状態についても総合的に波浪低減効果を確認する実験を行った。実験時の波浪条件は、波長を  $\lambda$ 、船長を  $L$  として、次のように設定した。規則波は  $\lambda/L=0.3 \sim 2.5$ 、不規則波はランダムノイズジェネレータの信号を  $\lambda/L=0.45 \sim 2.79$ (ピーク周波数相当)の選択フィルタを通した信号で造波装置を駆動した。波高は実機のスケールで通常2～3mとし、波高影響を調べる時は6mまでとした。

実験に使用した施設は、当所の動揺水槽(長さ50m×幅8m×水深4.5m)、三鷹第三船舶試験水槽(中水槽、長

さ 1 5 0 m × 幅 7.5 m × 水深 3.5 m) である。

入射波は、模型の前方(造波装置側)約 4 m の位置にサーボ式波高計を設置して計測した。船体運動は、船体に固定した 2 点の LED (発光ダイオード) の 2 次元運動を PSD カメラ (半導体位置検出素子 (PSD) カメラ) により計測して、前後揺れ(Surge)、上下揺れ(Heave)、縦揺れ(Pitch) の運動の解析を行った。波浪低減効果を調査する段階での相対水位の計測は、取入部及び水路部で 5 点、ムーンプールで 5 点を船体中心線上で計測した。取入部の相対水位計から順に ~ と番号を付す。相対水位計の配置を図 4 の油回収船模型に印で示した。一部の実験では、ムーンプール内の水面変動の分布を調べるため計測点を 10 点増やし、傾斜格子モアレトポグラフィによる計測と比較した。また、油回収装置模型を搭載した状態の実験(清水中および重油を使用した実験)では、ムーンプールの中心部(油回収装置の前面)の相対水位を超音波水位計で計測した。

流れの計測は、入浴剤をトレーサーとして PIV (Particle Image Velocimetry) 法を試みたほか、スーパーボールによる目視観測を行った。

3.1.4 波浪低減用付加物についての実験結果及び考察

3.1.4.1 模型船の船体運動

波浪低減用の付加物を装備しない状態において規則波中の油回収船模型の運動応答を図 8 に示す。波向きは、取入部を波の入射方向に向けた状態における運動応答である。の記号は実験値で、実線は三次元特異点分布法による計算値である。横軸は船の長さ L で無次元化した波長 /L で、縦軸は前後揺れおよび上下揺れは入射波の振幅 Ha で、縦揺れは最大波傾斜 k・Ha (k = 2/g、= 2 /Tw、Tw : 波の周期) で無次元化した値である。実験値にばらつきおよび計算値との差異が見られるのは、相対水位計をムーンプール内に 15 点、取入部から水路部に 5 点、船体中央部の舷側に 1 点、合計 21 点配置したため、そのケーブルが前後揺れに影響したものと考えられる。

3.1.4.2 相対水位の応答

取入部から取入れられた水塊は、図 9 に一例を示すように、分散で無次元化した値で表した。波形は取入部と水路部の底板による浅水影響と付加物によって変形するため、水位変動の評価を振幅と周期の情報で行うのは適当でないと考えられる。したがって、不規則波と同様の解析をすることとして、パワースペクトルの 0 次のモーメント m<sub>0</sub> に相当する分散で無次元化した値で表した。相対水位の変動は、相対水位の分散を入射波の分散で無次元化した値で表した。記号は RH<sub>w</sub>/H<sub>w</sub> とした。

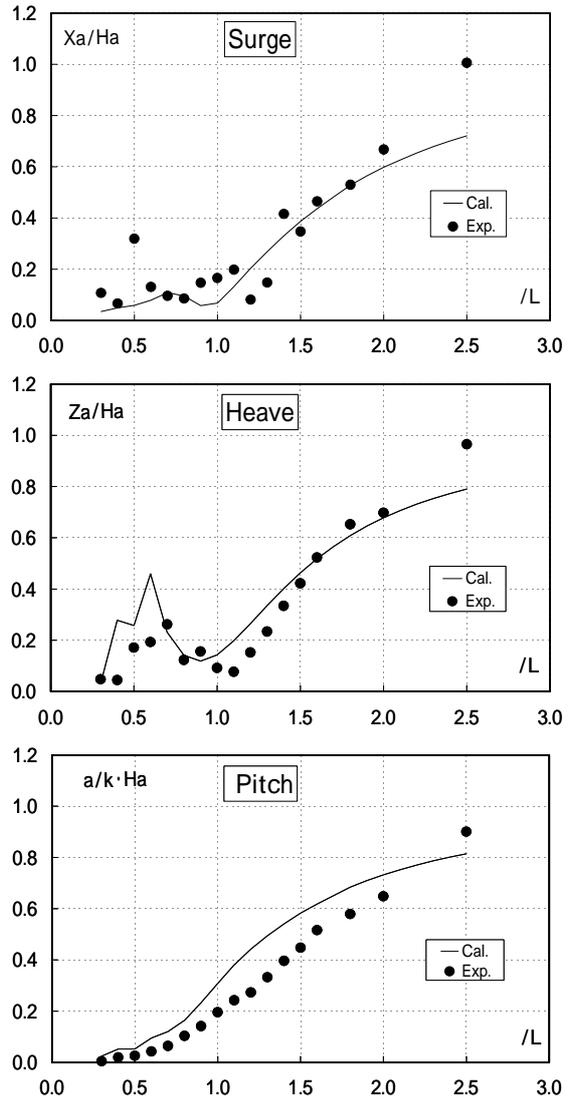


図 8 油回収船模型の運動応答

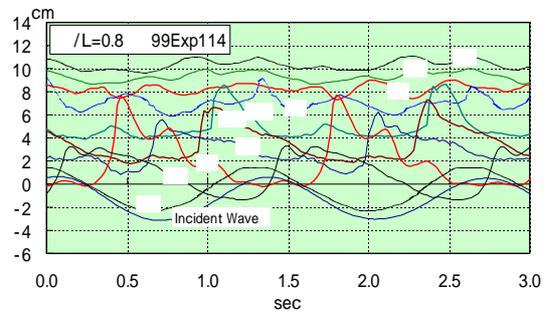


図 9 取り入れた水塊の波形の変化

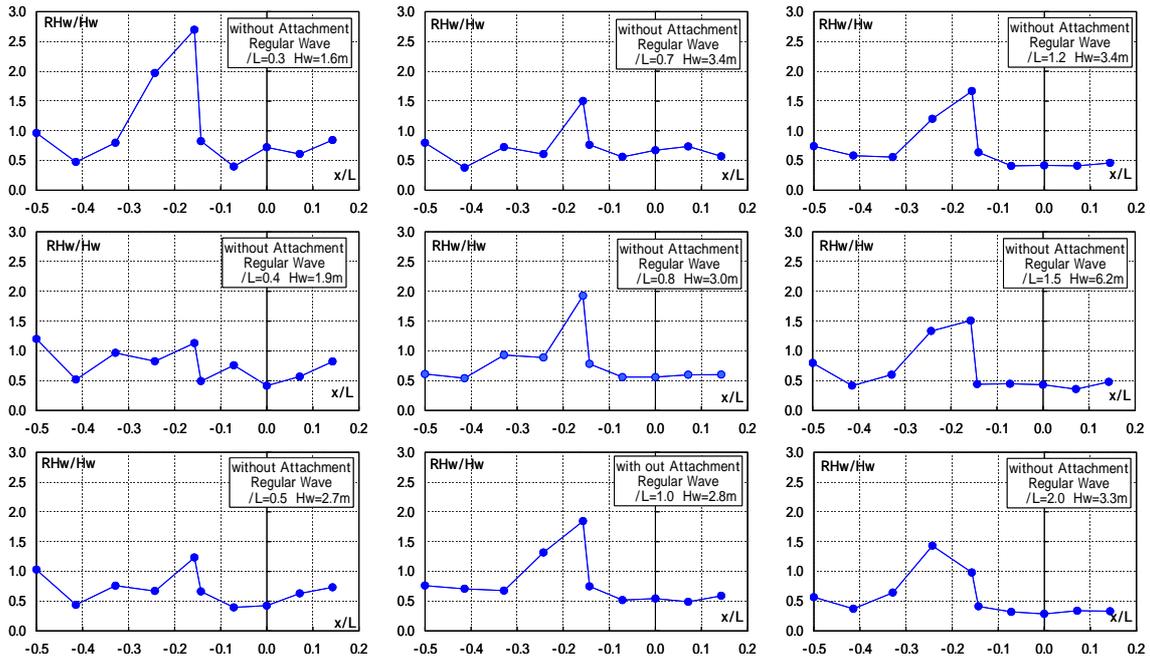


図10 波浪低減用付加物のない状態の水位変動分布

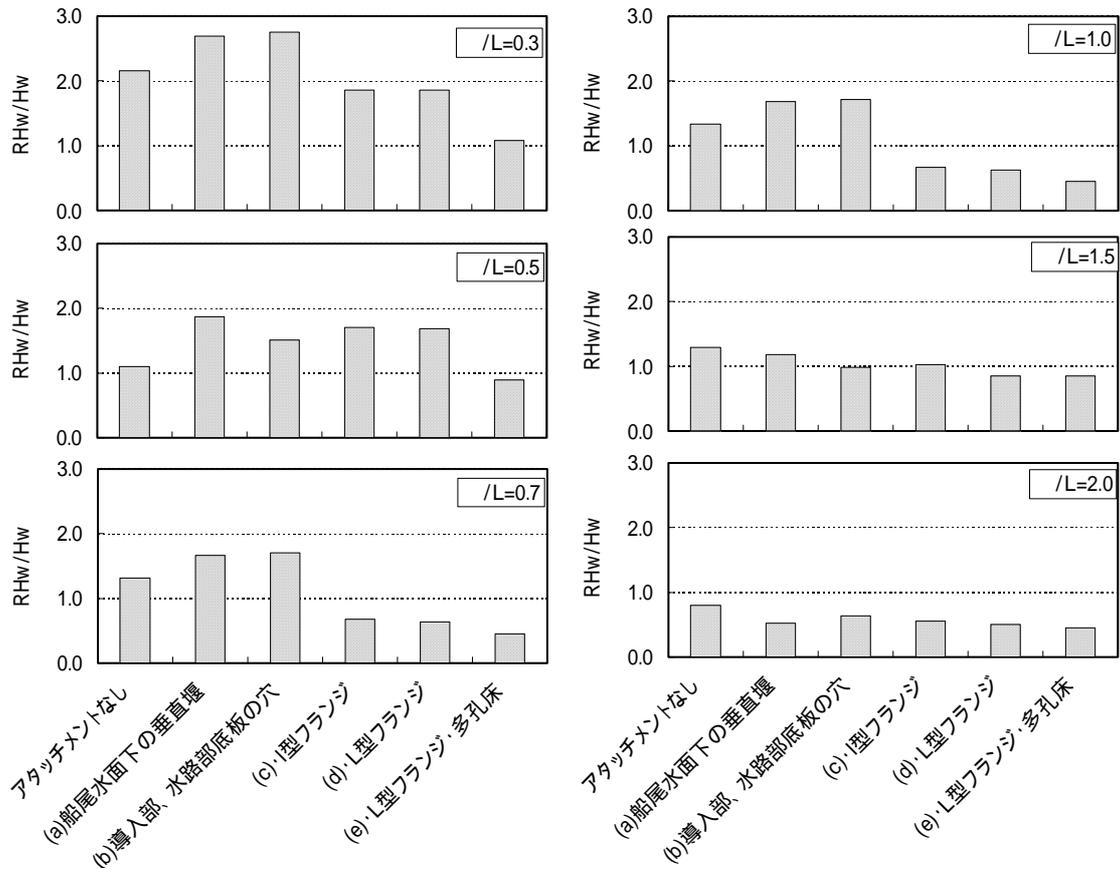


図11 波浪低減用付加物の性能比較

1) 波浪低減処置を施さない状態の相対水位の応答

図10は、波浪低減用付加物のない状態に対する規則波における相対水位の計測結果である。横軸は、ムーンプールの中央(船体中央)を原点とする各水位計の座標  $x$  を船長  $L$  で無次元化した値で、取入部からムーンプールの最前部までの相対水位の分布として、その応答を表したものである。各図は、船長で無次元化した波長  $\lambda/L = 0.3 \sim 2.0$  に対する応答である。 $\lambda/L = 0.3$  の図中の記号の数字は、取入部からムーンプール側の壁までに配置した相対水位計の番号である。取入部に入った水塊は、水路の入口(相対水位計の位置)で絞られ、水路に流れ込み相対水位計の位置ではムーンプール内からの反射波と干渉してムーンプールの入口の位置で最も大きい値となる。波浪低減の目標は、このような現象を緩和すること、ムーンプール中央部で油回収装置が機能する程度に静穏化することである。海象条件の最も厳しい冬季の日本海の最多出現波浪は、有義波高  $H_{1/3} = 2 \sim 3$  m、有意波周期  $T_{1/3} = 6 \sim 8$  秒である。この波浪条件でこの油回収船が稼動するものとして、波浪低減の目標は取入部からムーンプール入口までの相対水位変動を  $RH_w/H_w < 1.0$ 、油回収装置が作動するムーンプールの中央部で  $RH_w/H_w < 0.3$  を波浪低減の目標とした。

2) 波浪低減の効果

図11は、波浪低減用付加物の効果を調べるため、付加物に対する効果を図10から見られる相対水位変動の最も大きいムーンプール入口の相対水位計の応答で表し

た結果である。

棒グラフは左から付加物なし、(a)船尾水面下の垂直堰、(b)取入部・水路部底板の孔、(c)底板の孔とI型フランジ、(d)底板の孔とL型フランジ、(e)底板の孔及びL型フランジと取入部・水路部の多孔床である。各グラフは  $\lambda/L = 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0$  に対する応答である。この結果から、取入部水面下の垂直堰と取入部・水路部底板の孔は、逆効果であることがわかる。I型フランジとL型フランジの効果はほぼ同程度とみられる。ムーンプールの寸法(長さ 1000mm × 幅 600mm)に対してフランジの幅は 50mm であり、効果的な寸法でなかったように考えられる。 $\lambda/L = 0.3, 0.5$  で付加物なしの状態より大きくなっているのは、取入部・水路部底板の孔の影響と考えられる。(e)は(d)に多孔床を付加した状態で、取り入れた水塊がムーンプールの入口(相対水位計)に達するまでに低減されていることがわかる。ムーンプール入り口での水位変動は、取り入れた水塊とムーンプール内部からの反射波との干渉によるものと考えられるので、取り入れた水塊の変動を抑えるとともに干渉を小さくする手立てが必要であることがわかる。図11の結果によると、取入部及び水路部の多孔床の効果は顕著であり、取入部と水路部、特にムーンプール入口の急激な水位変動を抑制することができることがわかる。1)多孔床[表2の ]、2) ・ムーンプール入口水面下の垂直堰[表2の ]、3) ・ ・ムーンプールのスリット付底板[表2の6]、4) ・ ・ ・ムーンプールの消波壁[表2の ]の4種類の付加物の組み合わせについて、

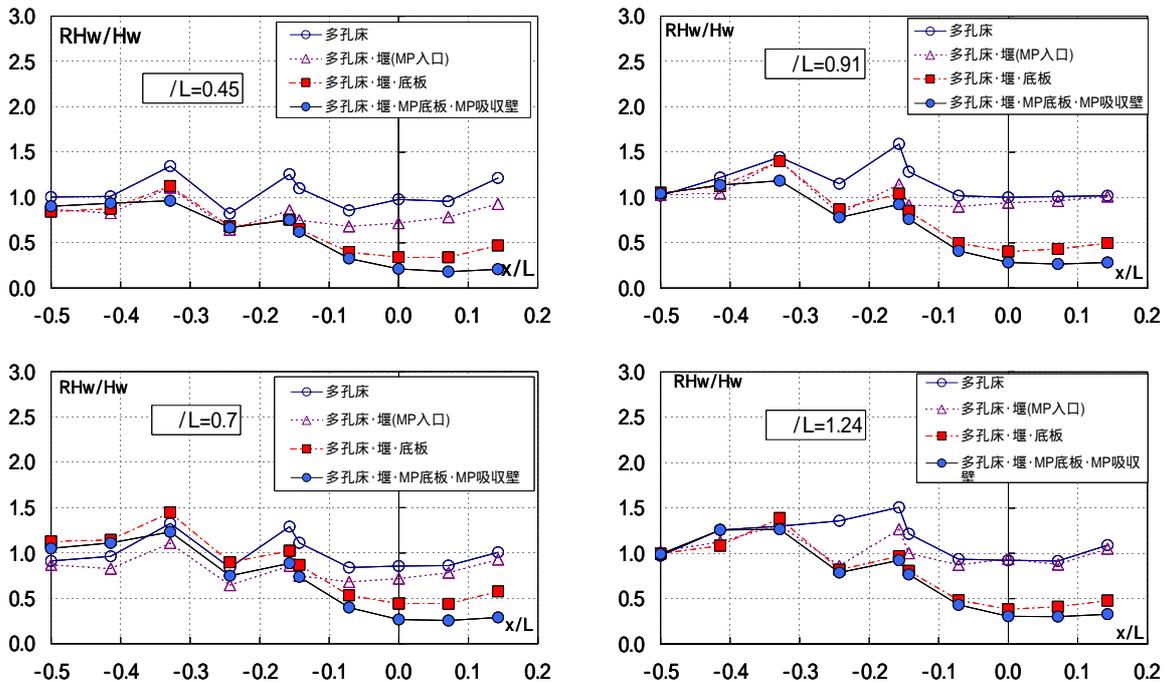


図12 波浪低減効果の比較

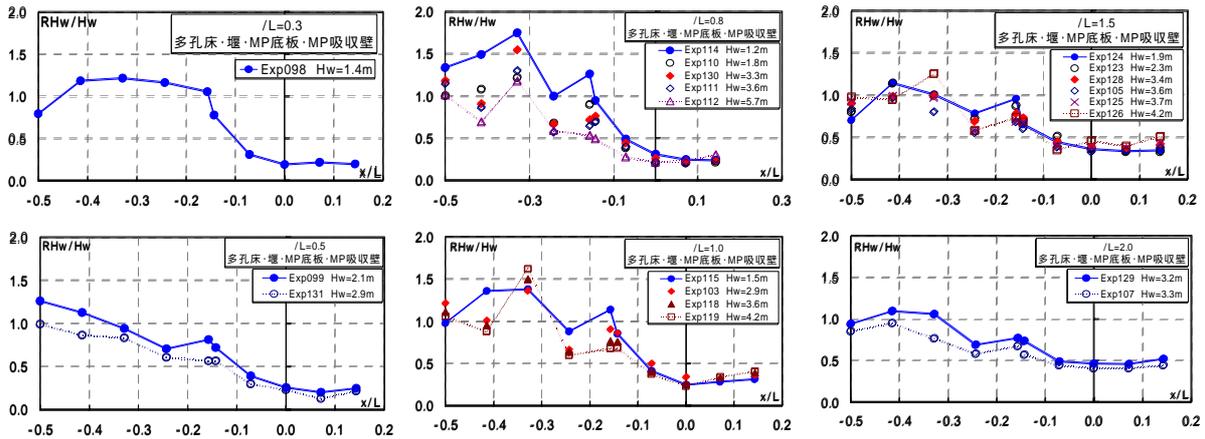


図13 波浪低減処置後の規則波中の相対水位の応答

不規則波中で調べた相対水位変動の応答例を図12に示す。図中の  $L/\lambda$  の値は、不規則波の中心周波数に相当する値である。取入部及び水路部の多孔床のみ(印)と多孔床にムーンプール入口の垂直堰(印)を比較すると、両者は水路部中央部とムーンプール入口の水位変動が顕著に異なり、堰の効果が顕著に現れていることがわかる。堰の効果はムーンプール内部からの逆流を防ぐ効果があるものとみられる。多孔床と垂直堰に加えてムーンプールにスリットつき底板を付加した状態(印)では、スリットつき底板を付加することによってムーンプール内の静穏化が促進されることがわかる。また、消波壁を付加することにより、ムーンプールの壁面からの反射が抑制されるため、さらに良好に静穏化された水面が得られた(印)。この「多孔床・ムーンプール入口水面下の垂直堰・ムーンプールのスリット付底板・ムーンプールの消波壁」の付加物を装着した状態について、規則波中 ( $L/\lambda=0.3 \sim 2.5$ ) および不規則波中 ( $L/\lambda=0.45 \sim 2.79$ ) で相対水位の応答を調べた。実験時の波向きは、主として入射波が最も厳しい状態で流入する油回収船模型の取入部(船尾)を波の方向(波上側)に向けた状態について実施した。また、規則波中の実験では入射波の波高を変化させた場合の応答の変化、いわゆる波高影響を、不規則波中の実験では、取入部を波下側に向けた状態についても調べた。実験結果を図12および図13に示す。

不規則波中の実験結果(図12)と規則波中の実験結果(図13)に差異が見られるのは、規則波は単一周波数成分であるのに対して、不規則波はピークの周波数を中心に多数の周波数、振幅及び位相の成分をもっている。したがって、不規則波中の応答は、各周波数成分に対する応答が平均化された値となり、規則波中では単一周波数成分に対する応答となるため大きくなるものと考えられる。ムーンプールにおける応答は、規則波中と不規則波中との実験結

果が類似した傾向となっているのは、ムーンプール内では付加物の影響で規則波の性質を失ってしまって不規則な水位変動となっているため、両者の差異は小さいと考えられる。

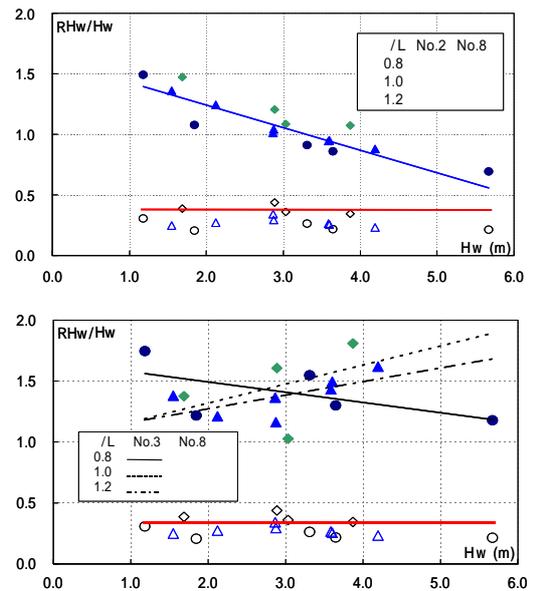


図14 波高影響

波高影響を調べた結果を図14に示す。相対水位計No.2(取入部中央)No.3(水路部入口)およびNo.8(ムーンプール中央)の水位変動の応答を実機の値に換算した波高に対してプロットした図である。この図に見られるように、取入部の中央の相対水位No.2は、底板の浅水影響によって波が砕かれるため波高に逆比例して水位変動が小さくなっていることがわかる。水路部の入口の相対水位No.3は、波長が  $L/\lambda=0.8$  では取入部中央のNo.2と同様の波高に逆比例するが、  $L/\lambda=1.0, 1.2$  に対しては波高に比例し

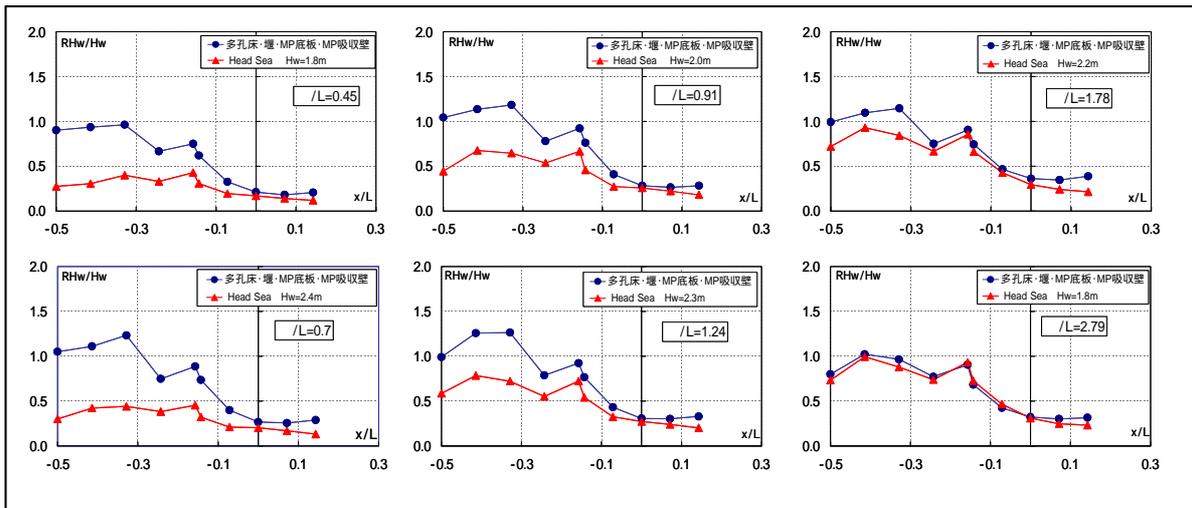


図 15 追波中及び向波中の相対水位応答

て相対水位の変動が増加する傾向にある。これは波長が大きくなるとムーンプール側からの反射波が大きくなり、狭い水路部に絞り込まれた水塊と干渉するためと考えられる。

不規則波中の向い波及び追波に対する相対水位の応答を図 15 に示す。波向の違いによる水位変動の応答は、取入部を波下側に向けた状態が小さく、その差異は波長が短いほど大きく、 $\lambda/L=2.79$  でほぼ一致している。

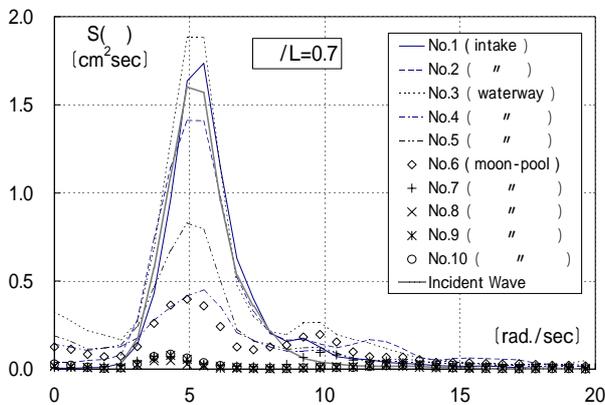


図 16 相対水位のスペクトルの例

取入部からムーンプールまでの相対水位の変化をスペクトルで比較した例を図 16 に示す。取入部からムーンプールまでを線で、ムーンプール内を記号で表した。入口の水位計を除けば、エネルギーが 2 桁低下している。値が小さいが、水位計 ~ のピークが低周波数側へ移行している。このことはムーンプールの中では入射波が砕波して変形するためであろうと考えられる。

### 3.2 傾斜板の角度と絞り水路の効果

取入部の絞り、絞り水路、急拡大のムーンプール、付加物により消波効果があることが、前述の実験により把握できた。ここではさらに傾斜板の角度と絞り水路による消波効果と表面流について調べる。先ずここでは、消波の状況や表面の流れや後の実験で油層の流れを観察するために透明なアクリルで、図 17 に示す 1/53 と 1/20 の油回収船模型を製作し、波振幅の変化を把握する実験を行った。図中の取入部及び水路部の底部には底板がついている。また、ムーンプールとかかれた部分には、底板はついていない。1/53 油回収船模型の主要寸法は、全長 (L) 1312mm、幅 (W) 447mm、高さ (H) 90mm である。取入部入口幅 300mm、水路部幅 75mm、水路部長さ 206mm、取入部の長さ 225mm、ムーンプールの幅 225mm、ムーンプール長さ 375mm である。

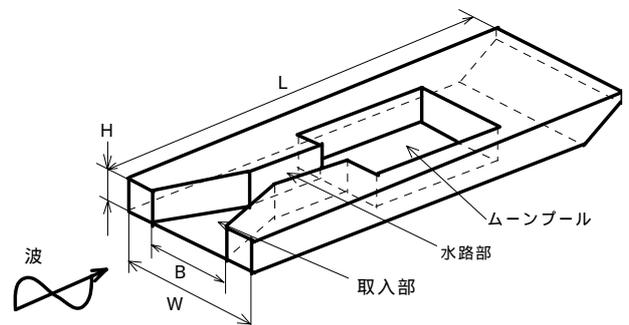


図 17 油回収作業船模型

波の入射方向に取入部を向けた場合、油回収船の取入部に波が進入し、取入部で波のエネルギーは流れのエネルギ

ーに変化する。ムーンプールと表示した領域には底板が無い  
ため、この状態では作業船の取入部前面での波のエネルギーは、取入部及び水路部の下方を通過してくる波のエネルギーによってムーンプールの水位の上下の動きは減衰することなく、殆ど同じ振幅として観察される。この時、ムーンプールで上昇する水位の変化と、取入部からの流れがムーンプール入り口でぶつかるために、ムーンプールへのスムーズな流れ込みが期待できない。

海面にある浮遊油をムーンプールに取り込むためには、ムーンプールの水の動きを制限し、取入部からムーンプールへスムーズに水が流れ込み、流れ込んだ水がムーンプール下方に流れるようにする必要がある。この目的のために、水路部の流れを利用して浮遊油を取り込み、ムーンプールでの水位の変化を小さくし、ムーンプールに取り込まれた油層を厚くするための工夫が必要になる。ここでは、図18に示す種々の構造物をムーンプールに置き、そこでの水の動きを制限することにより取入部からムーンプールへ至る流れの状況を調べ、海面上の油層をムーンプールに取り込むために最適な傾斜角度について調べた。

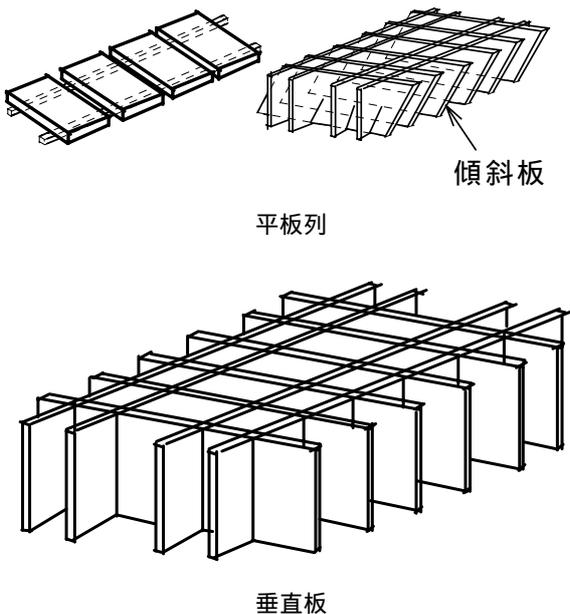


図18 ムーンプールに取り付けた構造物

3.2.1 傾斜板の角度と絞り水路に関する実験

図17に示す油回収船模型のムーンプールに取り付けたそれぞれの構造物は、平板列、傾斜板列、垂直板列である。平板列は、一定間隔を開けて平板を並べた構造で、平板を保持する縦材の底面が、作業水面の底面になるように取り付けられた。傾斜板列は、船の幅方向の板を前後方向に一定角度で傾斜させた傾斜板列で、前後方向の縦板に一定間隔で保持させている。この傾斜板列の下端は模型船の底面と同じにし、傾斜格子の上端は喫水面よりわずかに低い高さに

なるように取り付けられた。傾斜板の角度は、図19に示すように波の来る方向を零度とし、時計回りに角度を増加させている。傾斜板としては、図に示す角度のうち30度、60度の物を制作し、これを逆向きに使うことにより、120度、150度についての実験を行った。

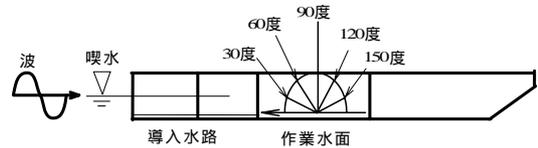


図19 傾斜格子の角度の設定

実験は、造波機を備えた回流水槽(直線部:8m,幅:45cm,水深:45cm)に模型船を浮かべ、取入部を造波機側に向けて行った。波高の変化については、抵抗式波高計(KENEK製)により模型船前方での波高を、また、サーボ式波高計(電子工業製 VC-504)波高計により作業水面中央での波高の変化を計測した。また、導入水路部での波高の変化は、ビデオ撮影により波の状況と表面の流れを観察した。

3.2.2 傾斜板の角度と絞り水路による実験結果と考察

波高計を使用してそれぞれの位置で計測した波高記録の例を図20、21に示す。

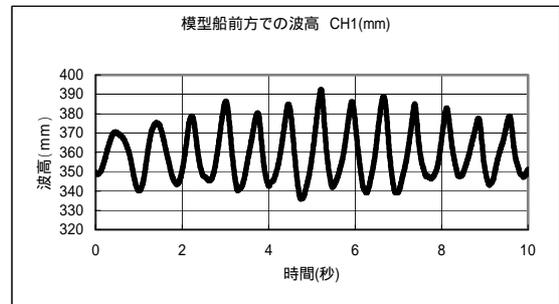


図20 模型船前方での波高

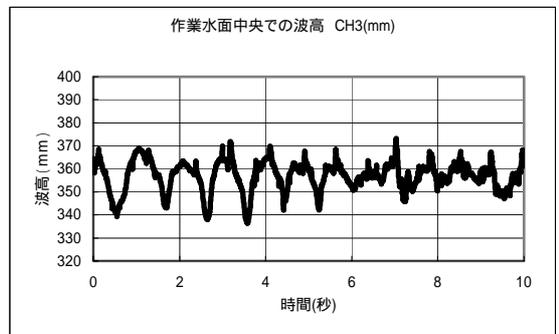


図21 ムーンプール中央での波高

図 20、21 に示す実験条件は、ムーンプールに 150 度の傾斜格子を入れ、波周期 0.7 秒で流れの無い場合の計測結果である。横軸に計測時間をとり、縦軸に波高の変化を示している。それぞれ模型船前方での波高とムーンプール中央での波高を示している。波高計測に関する以下のグラフも同様に示している。

図 22、23 に、作業水面に 150 度の傾斜板列を入れ、波周期 0.7 秒で平均流速 9 cm / 秒の流れを起こした場合の結果を示す。

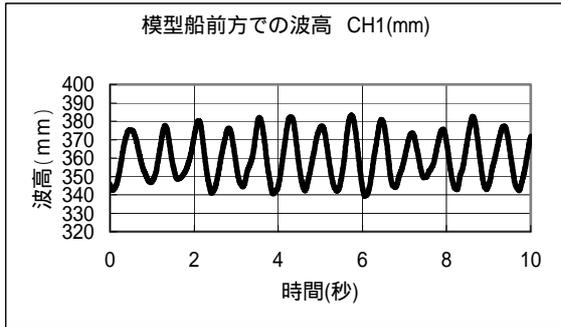


図 22 模型船前方での波高 (波周期:0.7 秒)

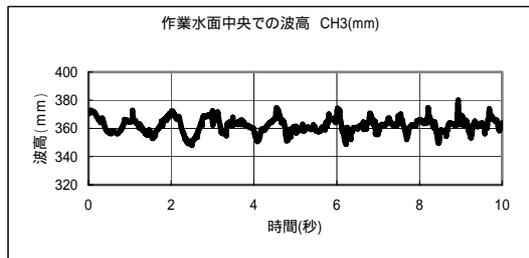


図 23 ムーンプール中央での波高 (波周期:0.7 秒)

次に波長の影響を調べるために、波周期を 0.9 秒に変えたときの波高の変化を図 24、25 に示す。先ほどと同様にムーンプールに 150 度の傾斜板列を入れ、流れの無い場合である。また、図 26、27 に波周期 0.9 秒で、ムーンプールに 150 度の傾斜板列を入れ、平均流速を 9cm / 秒とした場合を示す。

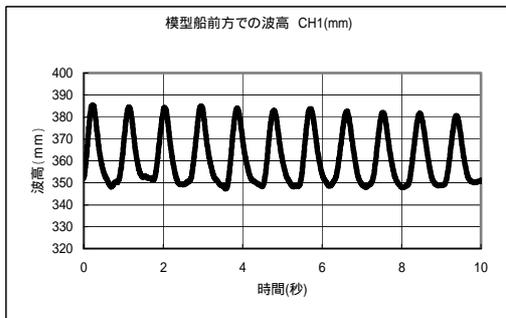


図 24 模型船前方での波高 (波周期:0.9 秒)

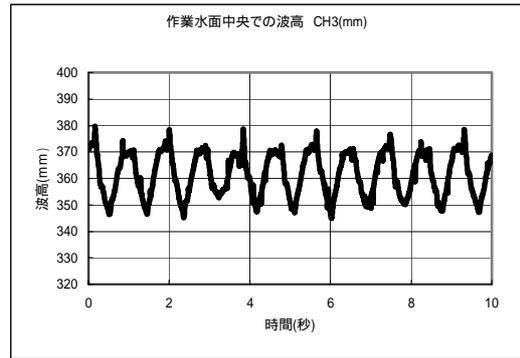


図 25 ムーンプール中央での波高 (波周期:0.9 秒)

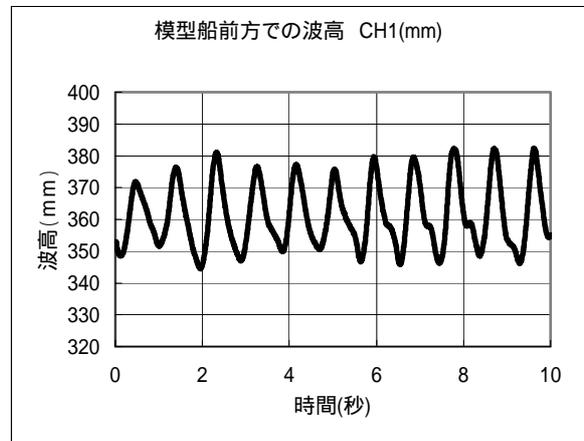


図 26 模型船前方での波高

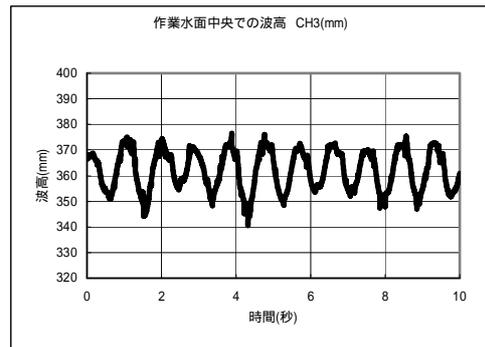


図 27 ムーンプール中央での波高

波周期が 0.7 秒の場合には、波長は約 76cm であり、波周期が 0.9 秒の場合には波長は 1.26m である。実験に用いた模型船の喫水線の長さは 1.29m なので、2 つの波長を比べると、波周期が 0.9 秒の方が  $L=0.98$  で模型船の船長に近くなるために、船体にピッチング運動が生ずるようになり、ムーンプールにある水もこの船体の運動を受けるた

めに、ムーンプール中央での波高の減衰効果は波の周期0.7秒と比べると小さくなると考えられる。なお、造波機の造波特性によりそれぞれの周期の波の振幅は、周期0.7秒の波の方がいくらか大きな振幅となっている。

ムーンプールの傾斜格子角度に対する模型船前方での波の最大振幅に対する、ムーンプール中央での波の最大振幅の比を図28に示す。この時の実験条件は、波周期：0.7秒で流れの無い場合である。また、図29に、波周期0.7秒で回流水槽に平均流速9cm/秒の流れを与えたときの最大振幅の比を示している。

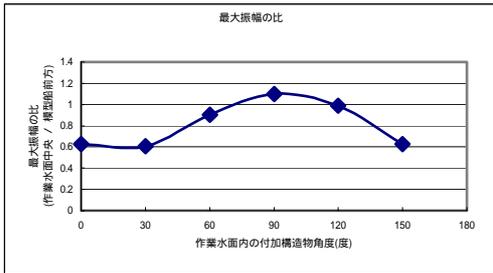


図28 波高の変化(最大振幅の比)

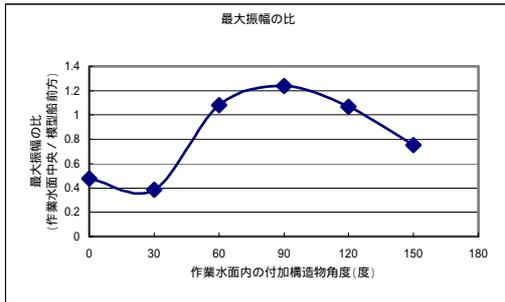


図29 波高の変化(最大振幅の比)

また、同様の処理により、波周期：0.9秒で流れの無い場合を図30に示す。また、図31に、波周期0.9秒で平均流速9cm/秒の流れを与えたときの最大振幅の比を示している。

模型船のムーンプールに種々の付加物を取り付けた場合の水面の変動について、ビデオ記録に基づきその変化を見ると、まず、ムーンプールに何も取り付けない場合には、模型船前方での波高の変化は、殆どそのままの振幅でムーンプールに現れている。ムーンプールに等間隔に隙間の空いた平板を置いた場合には、ムーンプールでの水位の上下は大きくないが、等間隔に開いた隙間の部分で上下方向の強い流れが観察される。30度または60度の傾斜板列を取り付けた場合には、模型船前方での波高の変化は、取入

部から水路部で流れになりムーンプールに向かう流れと、取入部と水路部の下側を通過した波のエネルギーにより、ムーンプール下方から上に向かう水の動きとがムーンプール入り口水路部で衝突し、水路部にできた流れがスムーズに流れ込まない。垂直板を使用した場合には、ムーンプールで定在波に近い水面の動きがおこり、水路部からの流れもムーンプール入り口でスムーズな流れとならないために、水の表面流はスムーズに流れ込まない。120度または150度の傾斜平板を使用した場合には、取入部および水路部の下部を通過してきた波のエネルギーは、ムーンプールで上昇するときに、水路部から見て下流側への流れを作ることになり、取入部及び水路部の上側を通過してきた流れと衝突を起こし難く、表層の流れがスムーズである。ただ、傾斜平板の角度が120度の場合には、水位の上下が大きく観察される。流れによって取り込まれた油層をムーンプール内に保持するためには、150度の傾斜平板を使用する方が有効であると考えられる。

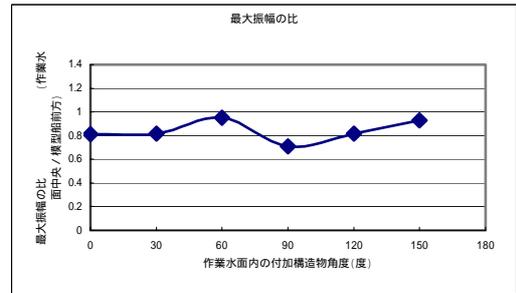


図30 波高の変化(最大振幅の比)

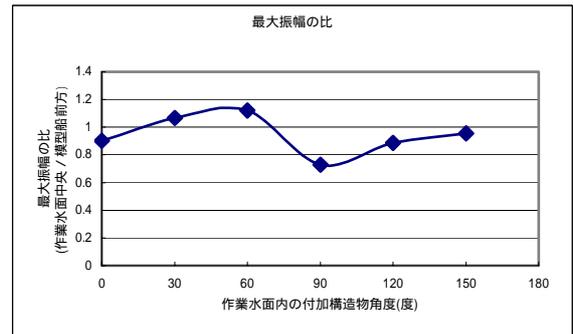


図31 波高の変化(最大振幅の比)

### 3.3 油回収装置搭載時の波浪低減状況

油回収船の取入部からムーンプールまでの静穏化について、波浪低減用付加物の検討を行った結果、ほぼ目標の値を達成することができた。次の段階は、油回収装置を搭載して、油の取入れに耐えられるように波浪低減用の付加物をできるだけ簡素化する必要がある。使用した油回収機

模型は図 43 に示すもので、搭載した油回収装置は、幅 240mm のネット(メッシュ 5 × 5mm)のネットコンベア式である。回収装置は、ネットコンベアの下端がムーンプールの中央部に位置するように設置した。使用した波浪低減用の付加物は、取入部水面下の傾斜堰、ムーンプール入口水面下の垂直堰または傾斜堰、ムーンプール内のスリット付底板及び水面下の傾斜板である。油回収装置及び波浪低減用の付加物の配置を図 32 に示す。

図 33 は、ムーンプール入口の堰の傾斜の効果を確認した結果で、水路部の入口とムーンプールの入口、すなわち相対水位計 No.3 と No.5 で傾斜堰の効果が顕著であることがわかる。垂直堰の場合は、取込まれた水塊の一部が反射されるためではないかと考えられる。図は省略するが、傾斜堰の位置をムーンプール入口に設けた場合と水路部の約 1/3 (220mm) 後方に設けた場合を比較した結果、前者がより有効であることが確認された。取入部の傾斜堰については、ムーンプール中央部への影響はほとんど見られないが、水路部の入口で若干の効果がみられる。図 34 は、ムーンプール内の底板と傾斜仕切板の効果を比較したものである。ムーンプール内の静穏化は、底板の効果が良好であるが、取入部及び水路部に対しては傾斜仕切板の効果が良好であることがわかる。この実験では両方の付加物をつけた。

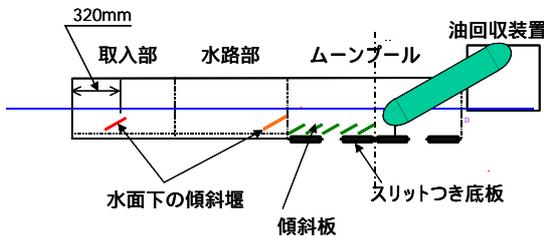


図 32 油回収装置搭載時の付加物の配置

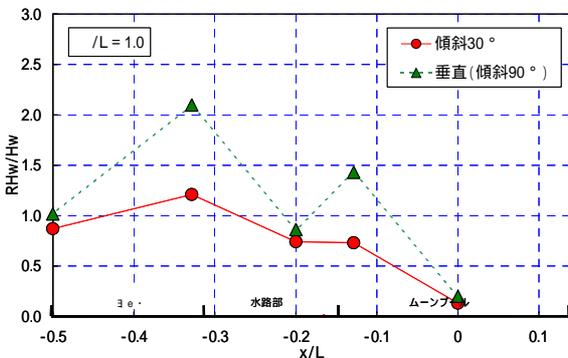


図 33 傾斜堰の効果

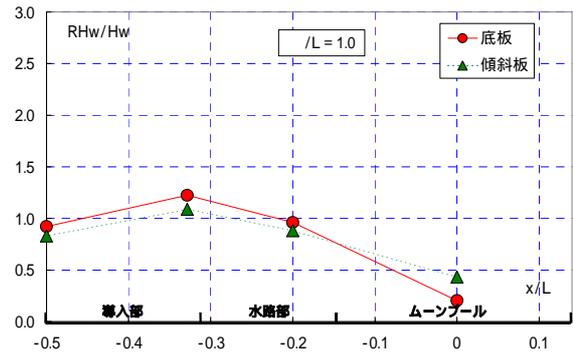


図 34 ムーンプールの底板と傾斜板の比較

### 3.4 油回収部の静穏化技術に関するまとめ

箱形台船型油回収船でムーンプールと呼ばれる油回収部を静穏化して取入れた流出油を回収するというコンセプトに基づいて波浪中で稼働可能な油回収船の開発研究を実施してきた。ムーンプールの静穏化をはかるため実験的に波浪低減用の付加物を検討して、機械的回収装置が設置されるであろうムーンプール中央部の相対水位変動(相対水位の振幅/入射波の振幅)を目標値である 0.3 程度に静穏化することができた。

流れによって取り込まれた油層をムーンプール内に保持するためには、150 度の傾斜平板を使用する方が有効である。油回収装置の搭載および高粘度油を取入れた場合に障害とならないように波浪低減用の付加物の簡素化をはかった。油回収装置を搭載した状態で、ムーンプール入口水面下の傾斜堰(傾斜 30 度)、ムーンプールの平板列の底板および水面下の傾斜仕切板の組合せが効果的で、波長-船長比  $\lambda/L=0.3 \sim 2.5$  の範囲で、ムーンプール中央部の相対水位を目標値の程度に静穏化することができた。

## 4. ムーンプールへの油の導入

### 4.1 浮遊油の集積

前章までの実験結果から整流消波板の傾斜角度が 150° の場合が消波効果が良く表面の流れがスムーズであったため、模型船の作業水面に 150° の傾斜格子を取り付け、灯油を赤く着色して実験を行った。

模型船前方から取入部、水路部に入った波と水面上の着色灯油は、水路部をムーンプールに向かって流れ、油はムーンプール下流側に蓄積される。流入した水は傾斜格子に沿って、模型船の下方へ流れ排出される。

波浪中での油の集積概念図を図 35 に示す。模型船の油の取入部を波の来る方向に向けると、図中右側から A に向かって進んでいた波は、取入部の底板で波の動きが制限され、A から B の方向へ向かう流れを作る。この流れの内、

Bのラインを越えた流れは、下流側へ流れ続け、油は最も下流(図中の左側)に押し流される。流れ込んだ水は、傾斜格子に沿って船底へ排出される。写真1に見られるように、一部の油が水路部からムーンプール入り口部で、この流れに乗り船底の方向へ流出しているのが観察された。実験で観察されたこの船底から流出する油の量は、ムーンプール下流側に蓄積される油の量に比べるとそれほど多くないことがわかる。



写真1 着色灯油を使用した実験

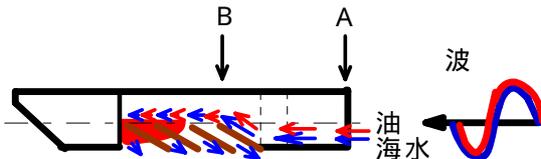


図35 油集積概念図

#### 4.2 模型船周りの浮遊油の流れの観察

##### 4.2.1 模型船周りの浮遊油の流れの観察実験方法

(株)海洋開発技術研究所において、造波装置を備えた長さ23m、幅13m、深さ1.2mの水槽を使用して、水面に油を浮かべ所定の波を起こした状態で、模型船を一定速度で曳航することにより波浪中での作業船への油の取り込み状況とムーンプールでの保油状況を調べる実験を行った。

実験に使用したアクリル製油回収作業船模型は、図17に示した構造の模型船で、その主要寸法は、全長(L)3500mm、幅(W)1200mm、高さ(H)250mm、喫水125mm、取入部入り口部幅800mm、導入水路平行部幅200mm、水路部長さ400mm、取入部入り口部から平行部までの長さ600mm、ムーンプールの幅600mm、ムーンプール長さ1300mmである。図17に示す模型船によって得られた波による取入部とムーンプールの水の動きの観察結果を考慮し、ムーンプールでの油の保持状況を改善する目的で、この模型船では水路部の平行部の長さを短くし、ムーンプールの前後方向の長さを少し長くしている。

実験の手順は、まず、角水槽の中央付近に直径2.91mのリング状のパイプを水面に吊り下げた状態で浮かせ、その中に40リットルのC重油または潤滑油を入れる。実験開始時にこのリング状のパイプを水面から吊り上げ、角水槽水面の所定の位置に油層を浮かべた。油のセットの状況を写真2に示す。この状態で、造波装置により一定波長の波を起こす。この波が角水槽の対岸にはじめに置いた模型船まで到着してから、パルスモータにより一定速度で模型船をワイヤーで曳航する。模型船が浮遊油層の初期位置を通り過ぎるまで曳航を継続し、この浮遊油層の場所を通り過ぎる前後での模型船と水面上の油の状況についてビデオ撮影によりその状況を観察する。



写真2 油のセットの状況

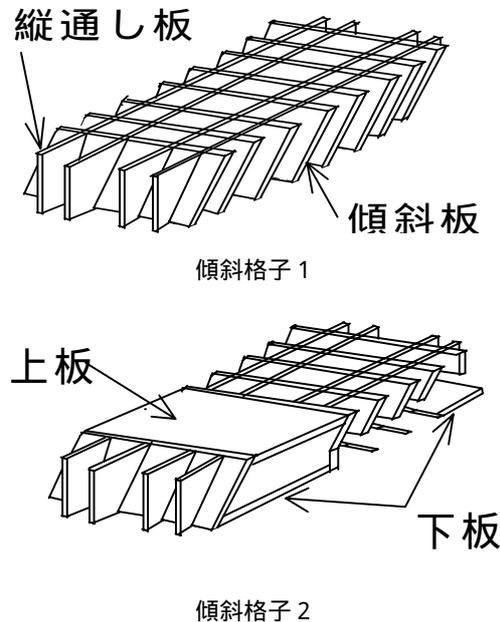


図36 ムーンプールに取り付けた構造物

ムーンプールに取り付けた構造物を図36に示す。図中の傾斜格子1は、図18に示した傾斜格子角度が150度のもので、この傾斜格子の場合、写真1に見られるように、取入部からムーンプールに入り込んだ一部の微粒化した

油粒は、油回収作業船の船底から流れ出す。これに対処するために、傾斜格子2では、ムーンプール入り口に上板を取り付け、そこでの上下方向の流れを制限し、また油回収部となる作業水面後方の船底には、下板を付けることにより集積された油が船底から漏れ出るのを防ぐ構造となっている。写真3に試験水槽に浮かべた模型船を示す。



写真3 試験水槽に浮かべた模型船  
(吸引口高さ制御装置付油吸引回収装置取付)

#### 4.2.2 模型船周りの浮遊油の流れの観察結果

実験は、模型船の長さ  $L$  に対する波長の比  $\lambda/L=0.5$ 、 $1.0$ 、 $1.5$  と変えて模型船の波への応答と模型船前方にある水面上の油の動きについての観察を行った。一般に水面上にある油は、波がある場合、波とともに上下運動を行うが、波が進行しても油は元の位置にとどまっている。水面に流れがあるか、水面上を風が吹いている場合、または極端に波長の短い波に出会った場合のみ、油は影響を受けて元の位置から移動する。水槽の水が静止した角水槽の実験では、油に向かって模型船を曳航する必要があり、約  $15\text{cm}/\text{秒}$  で水面上の油に向かって模型船を曳航し、模型船への油の取り込み状況を観察した。

表2 浮遊油層の流れの観察結果

Test NO.	波長	波の方向	油掻き込み装置	整流消波板	油の集積
1	なし	-	-	傾斜板	なし
2	なし	-	設置	傾斜板	良い
3	1/2	向かい波	-	傾斜板	良い
4	1/2	向かい波	-	傾斜板	良い
5	1	向かい波	-	傾斜板	良い
6	2	向かい波	設置	傾斜板	なし
7	1	追波	設置	傾斜板	なし
8	1	追波	設置	傾斜板	なし
9	1	追波	-	傾斜板	なし
10	1	追波	-	傾斜板	なし
11	2	追波	-	傾斜板	なし
12	1/2	向かい波	-	傾斜板+水平板	少しあり
13	1	向かい波	-	傾斜板+水平板	なし
14	2	向かい波	-	傾斜板+水平板	なし

観察結果を表2に示す。まず、ムーンプールに図33の傾斜板1を取り付け水面上の油膜の取り込みに関する実験を行った。波長が船長より短い ( $\lambda/L=0.5$ ) 場合には、水面上に浮かべた油に向かって模型船を曳航することにより、模型船に水面上の油が波の働きにより取り込まれることを確認した。この時、取入部前面にある油はムーンプールに取り込まれるが、取入部前面より左右にある油層は、模型船の左右へ移動し油回収のためのムーンプールへは取り込まれない。また、波長が船長と同じ ( $\lambda/L=1.0$ ) の場合にも、浮かべた油に向かって模型船を曳航することにより、模型船に水面上の油が波の働きにより取り込まれることを確認した。この時も、取入部前面にある油はムーンプールに取り込まれるが、取入部前面より左右にある油層は、模型船の左右へ移動し油回収のためのムーンプールへは取り込まれない。写真4に水面に浮かべた油に向かって模型船を曳航している様子と、浮遊油を通過している模型船の様子を示す。波の波長が長くなることによる模型船の縦揺れ(ピッチング)は、前の場合よりいくらか大きくなる。さらに、波の波長が船長より長い ( $\lambda/L=1.5$ ) 場合には、平水中に浮かべた油に向かって模型船を曳航すると、模型船の船長より波の波長が長くなることによる模型船の縦揺れ(ピッチング)が大きくなり、一度取入部へ入り込んだ水が模型船のピッチング運動のために、勢いよく前に流れ出す現象がおき、模型船前面にある油層は模型船へ近づけなくなるため、ムーンプールへの油の流れ込みは見られなくなる。



写真4 浮遊油層に向かう模型船と浮遊油層を通過している模型船の様子  
(波の波高10cm、波長3.5m、模型船曳航速度15cm/秒)

### 4.3 油回収部への浮遊油の流入実験

油を使用した水槽実験の実験条件を表3に示す。実験時の油回収船模型は、取入部を造波装置側に向けて係留した状態で波浪中での船体周りの油の挙動を調べた。実験は、前述の実験と同様に、写真2に示すように造波装置と油回収船模型との中間部の水面直径3mのリングを仮設して、円形に一定量の油を投入してからリングを除去した。

表3 実油を使った実験条件

波浪条件	波長： $\lambda L=0.5, 1.0, 1.5$ 波高：約10cm (実機で2m相当)
油の性状	C重油：粘度 4300mPa・s 高粘度油：粘度 120000mPa・s

図37は、油回収装置が作動するムーンプール中央部の相対水位変動の波長に対する応答を示す。印は波浪低減処置を施さない状態の実験値(図11)で、印は図32に示すように油回収装置を搭載して、波浪低減用の付加物を配置した状態の動揺水槽における実験値である。印はムーンプールに重油を取込んだ状態の海洋水理実験水槽における実験値で、印は同水槽における重油のない状態の実験値である。

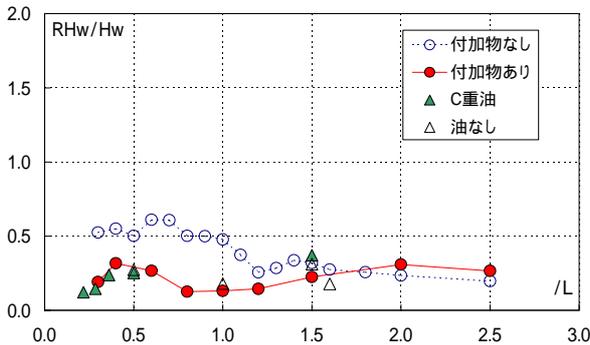


図37 ムーンプール中心部の相対水位の応答 (油回収装置搭載時)

ムーンプールに取込んだ油の回収についての詳細は後述するが、波浪低減用付加物を装着した状態でC重油(粘度4.3Pa・s)及びムース化油(粘度120Pa・s)5.7kgを予めムーンプールに注いでおいて波浪中で1分間回収装置を駆動して回収量を計測した結果、平水中での回収量が最も大きく、静穏化が良好であるほど回収効率が高くなることがわかった。また、波浪中では回収装置の前面(ムーンプール中央部)の静穏の程度が一定であれば、波長が長くなるにしたがって回収量が大きくなる傾向がある。C重油とムース化した重油とともに類似の傾向にあることがわかった。

搭載した油回収装置は、単独で装置の性能を調べるために製作したものであるため、ネットコンペア-は油回収船模型のムーンプールの約1/2幅であった。このためは波浪

中では供試油がネットコンペア-の両側から後方に回り込んで回収効率が低下していると見られる現象があった。また、ネットコンペア-自体も波浪低減用の付加物の一つとして考えられる。模型船との寸法の整合性が良好であれば図13の特性のより良好であったものと推測される。

図38は、オイルフェンスを前方に取り付けた場合と取り付けない場合について波浪中に静止した油回収船周りの油の挙動を観察した結果である。浮遊する油は取入部から約1m前方で左右に分離して船体を包むように舷側に沿って波下側に流れる。この現象は、取入部の形状による反射波により油が入ってこないためと考えられる。ムーンプール内の油の挙動は、予め一定量の油をムーンプールに注いで、波浪中における回収性能と油の挙動を調査した。

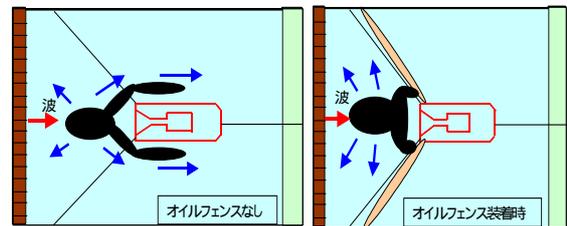


図38 船体周りの油の挙動

図39は、ムーンプール内の油の波浪中での挙動を模式的に表したものである。ムーンプールに浮遊する油は、波浪中で水面下に引き込まれてスリット付底板や船底に貼りつき、造波を停止して平水に戻ると、ムーンプールの中に浮上して戻ってくるが観察された。ムーンプール内に底板がない状態では、水面下に引き込まれた油は流失し、特に、ムース化した油は、団子状にちぎれて流出した。ムーンプール内のスリット付底板は波浪低減用の付加物としての役割のほか、取込んだ油の流出を防ぐ役割を果たしていることが確認された。

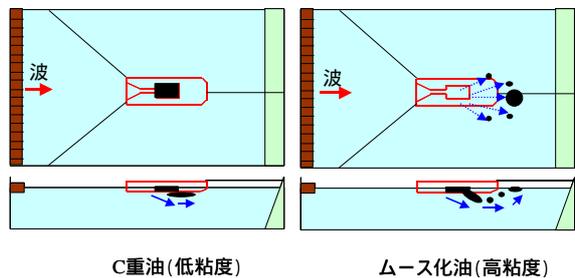


図39 ムーンプール内の油の挙動

### 4.4 浮遊油の取入れ

浮遊物の取込みを調べるため、平水中で曳航して、入浴剤をトレーサーとしてPIV法で流れの観察を行った。その結果、取入部で淀みが生じてムーンプールに流れ込まず、

船体左右に分離する現象となった。これは取入部側からの投影面積を考えると水路部の断面積は船体の横断面積の16%であり、ムーンプールは船底まで貫通した開口部であるが、流路となりえないため模型船が抵抗体となって淀みが生じたものである。船体の中心線上の流れを促進するため、図40に示すようにムーンプールから船首の間に貫通する幅200mm×高さ60mmのダクトを設けた。その結果、平水中の曳航時の取入れが可能となった。写真5は、曳航速度0.1m/sで画面の左側に曳航しているときの一例であるが、流れがベクトルで表されている。

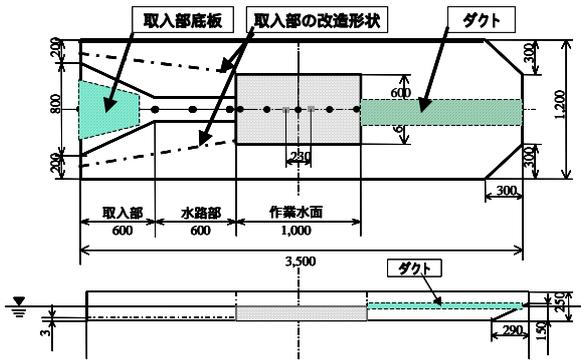


図40 油回収船模型の改造

除去する改造を行った。この結果、船体運動の影響を受けることなく水路部の入口まで浮遊物を引き寄せることができ、曳航しながら浮遊物の取込みが可能となった。また掻きこみ水車を図41のように水路部の入口に設置して駆動することによって、取り込みを促進することができた。写真6にトレーサーとして直径22mmのスーパーボールを用いた実験状況を示す。しかし、波のオービタルモーションが大きくなるため浮遊物が水中に巻き込まれて上下運動する現象が生じる。また、取入部の底板は、取入れた水塊を浅水影響で変形させる効果を利用しているので、さらに詳細な検討が必要である。

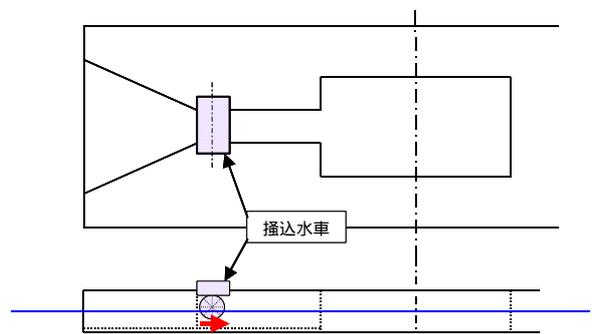


図41 掻き込み水車の取り付け

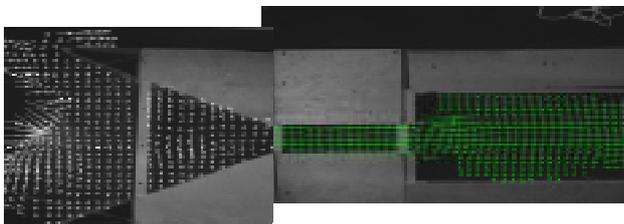


写真5 PIV法により解析した水面)の流れ分布

平水中で浮遊油を回収するために図41に示す掻き込み水車を製作した。水車の設置箇所は水路部の取入部側として主要寸法は、水車の直径200mm、幅100mmである。平水中で使用した結果、図42のように浮遊した油を広範囲にわたって良好に収集することが確認された。

波浪中での取込みの問題点は、取入部から水路部へ絞り込む壁面による波の反射によるものと考えられる。取入部の壁面による反射を避けるため、取入部を波下側に向けて曳航することを試みた。その結果、波長が船長より短い波については浮遊物の取り込みが可能となったが、波長が大きくなって  $L=1$  程度になると縦揺れ運動が大きくなり水塊は取入部を出入りするのみで浮遊物の取入れが困難になる。このため取入部の底板を図40のように台形状に

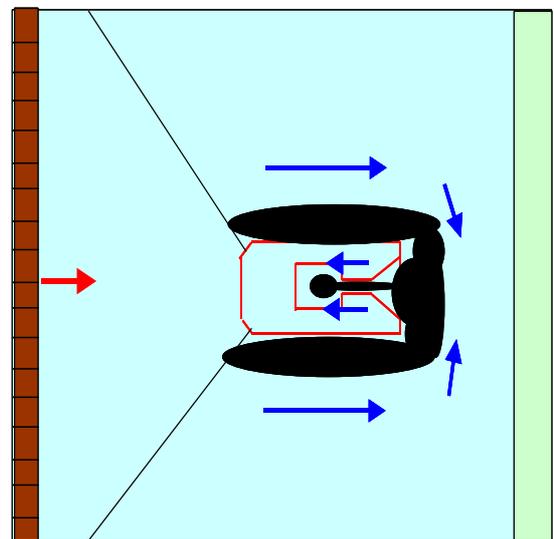


図42 掻き込み水車による浮遊油の取り込み

取入部における波の反射を小さくするような形状に改造する必要があるので、一案として図40に取入部の改造形状を一点鎖線で示す。

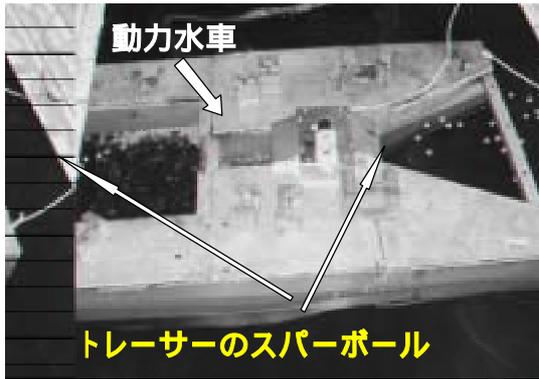


写真6 波浪中における浮遊物の取入実験

## 5. 流出油の回収

流出油を回収する場合、回収効率を上げるために回収油中の含水率を小さくすることが必要である。また海水等と攪拌して、エマルジョン化が促進されると、水分や塩分を多く含む。C重油等のエマルジョンは安定していて壊れ難く、後の焼却処理等に負担がかかるようになる。そこで本回収には含水率が小さく、回収作業によるエマルジョン化も少ないと考えられる方法を採用した。油回収を行うために油の粘度に合った回収方法を選択する必要がある。粘性係数が  $3\text{Pa}\cdot\text{s}$  以上の油はネットベルト等による方式<sup>3)</sup>、それより低粘性の油は人工芝コンベア方式及び水面上からの吸引方式を採用して実験を行った。

### 5.1 ネットベルトによる回収

文献調査等の結果を踏まえ、高粘度油対応型油回収装置については、ネットベルト等を油回収要素とした小型油回収装置模型を製作した。これを小型油漂流再現装置(回流水槽)に設置して、波浪中における油回収性能の把握を行った。

#### 5.1.1 小型油回収装置模型

小型油回収装置模型は、コンベアベルト式で、ベルト材にネットまたは人工芝を装着したもので、回収油の粘度に応じ適当な目合のベルト等に交換して使用する。

ベルト幅 240mm、ベルト駆動速度最大 0.5m/秒で、回収された油は、ベルトに樹脂製ローラを圧着することにより絞られ、またはスクレーパにより削ぎ落とされ、ローラ下部に設置された油貯蔵タンクに落とし込まれる。図 43 に小型油回収装置模型を示す。

#### 5.1.2 波のない場合の油回収性能実験

油回収性能実験は、小型油漂流再現装置の観測部水路に小型油回収装置模型を固定、回収装置上流に流出油を模擬

した供試油を投入し、流れの中で、油の粘度、ネットメッシュ寸法及びコンベア速度が油回収性能に及ぼす影響を調べた。回収要素として人工芝ベルトを装着し、回収性能について実験を行った。

ネットコンベアによる回収性能実験は、メッシュ 10mm のネットにおいて、半固体状の高粘性油(計測値で粘度  $10^3\text{Pa}\cdot\text{s}$  以上、比重 0.90)を用い、流速 0.26 m/s、ベルト速度を 0.1 ~ 0.5m/s まで変えて行った。

人工芝コンベアによる回収性能実験は、B重油(粘度  $0.150\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、比重 0.91)を用いて、流速 0.26 m/s、ベルト速度を 0.1 ~ 0.5m/s まで変えて行った。実験項目を表 4 に示す。

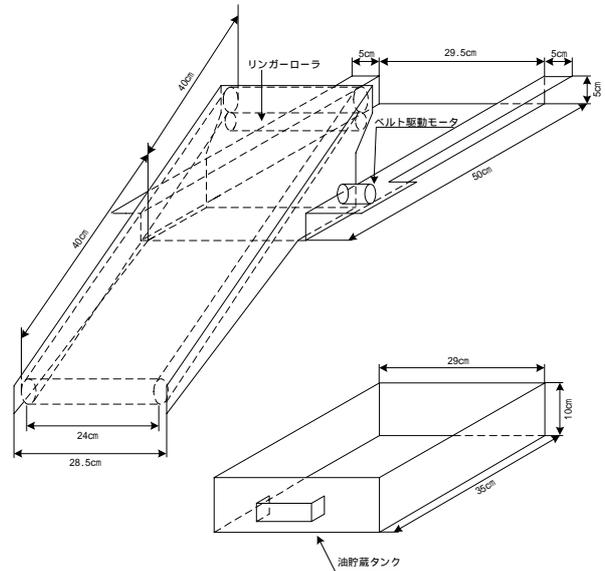


図 43 小型油回収装置模型

表 4 実験項目

回収要素		ネット 10mm メッシュ		人工芝
		ローラ	スクレー パ	ローラ
供 試 油	油種	高粘性油		B重油
	粘度 [mPa·s]	100 万以上		150
	比重	0.90		0.91
流速 [m/s]		0.26		0.26
コンベア対水角度 [°]		30		30
コンベア 巻き 上げ速 度 [m/s]	0.1	1	4	6
	0.3	2	5	7
	0.5	3		8
実験番号				

5.1.3 波のない場合の油回収性能実験結果

波のない場合の油回収性能実験結果を表5に示す。

ネットコンベアによる半固体状の高粘性油の回収は良好であったが、人工芝ベルトによる回収実験結果では全回収量の中に約60%の水分を含んでいた。

表5 波のない場合のネットコンベアによる油回収実験結果

実験番号	1	2	3	4	5	6	7	8
投入油量 [kg]	4.8	4.6	2.6	2.6	1.9	4.3	3.8	4.1
回収油水量 [kg]	3.7	4.3	2.8**	2.4	1.5	9.1	11.2	11.1
含水率 [%]	*	*	*	*	*	76	74	67
回収油量 [kg]	3.7*	4.3*	-	2.4*	1.5*	2.2	2.9	3.7
油回収率 [%]	77	93	-	92	79	52	76	91

\* 高粘性油については水分少量につき回収油水量と油量を同量として取り扱った

\*\* 装置に付着していた油が混入したため参考値

5.1.4 波浪中油回収性能実験

波浪中での油回収実験には、油回収船模型に、今回製作した小型油回収装置模型を設置した。ネットコンベアにはメッシュ5mmのものを取り付けた。ムーンプール内に予め6リットル(5.7kg)の油を注ぎ、波高10cmの波浪中で1分間コンベアを駆動して、回収容器に溜まった重量を油水回収量とした。

供試油には、C重油、及びC重油と水をミキサにて攪拌して作成したムース化した高粘度油を使用した。実験状況を写真7に示す。



写真7 油回収実験用の油回収船模型

5.1.5 波浪中油回収性能実験結果と考察

C重油の実験結果を図44に、高粘度油を図45に示す。(λは波長、Lは船長)

また、図46は左から右に順次、波浪低減用付加物を除去して、各々についてC重油の回収量を計測した結果である。

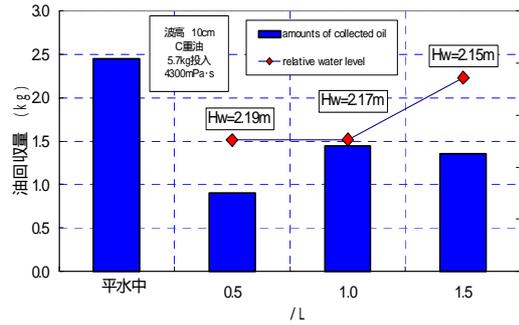


図44 C重油時の油水回収量

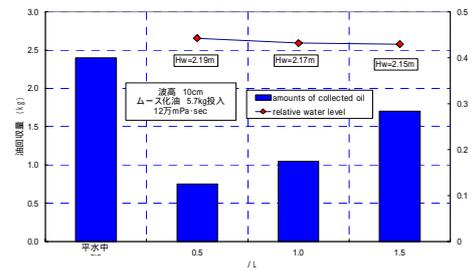


図45 高粘度油(ムース化した油)時の油水回収量

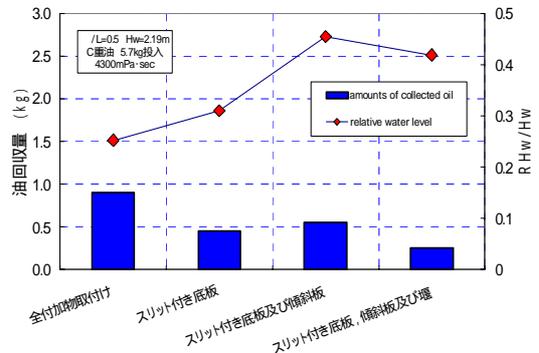


図46 静穏化と回収量の変化

ネットコンベアによる回収は流れを透すので、ネットコンベアの上面に、半固体状の油を載せるような方向の回転で充分回収できることを確認した。

しかしながら、人工芝ベルトによる回収は流れを妨げるので、流出油が回収用の人工芝ベルトまで達しにくい。流れを乱さないように、回転方向を逆にし下側のベルトで回収する方が良いと考えられる。

また、人工芝ベルトは強度的にあまり強くないので、特に縫ぎ目部分の処理を適切に行わないと、その部分が弱点となる。これ以上の大型化の際は、張力を別の部材で持

たせる等、設計上の工夫が必要と考えられる。

高粘性油の回収時、スクレーパのローラへの圧力が足りず、ネット上の油を上手く削ぎ落とせない状況が一部に観察された。圧力が強すぎると抵抗が大きくなり、必要なモータートルクも大きくなるので、スクレーパ圧力は、状況に応じてある程度可変できることが望ましいと考えられる。波浪中での油回収性能は、図44、図45より、平水中での回収量が最も大きく、静穏化が良好であるほど回収量が増加しているのがわかる。また、波浪中では回収装置の前面(ムーンプール中央部)の静穏の程度が一定であれば、波長が長くなるに従い回収量が大きくなる傾向がある。

また、図46よりムーンプールの静穏化のための付加物を除去していくに従い、相対水位が上昇し、回収油水量も減少していく傾向、即ち水面が静穏であるほど回収量が増加する傾向が見られる。

## 5.2 吸引口の位置制御による流出油の回収

ネットコンベアにより油が容易に回収されるには、油の粘度が約 $2.5\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以上にならないと網から漏れ易い<sup>3)</sup>。外洋で流出直後に油を回収する場合それ以下の低粘性の油にも対処する必要がある。その時水面上にある流出油を対象として、油のみを吸引するために、吸引装置の位置が油層の表面に追従するように制御する方法を考えた。

### 5.2.1 吸引口の位置制御による流出油の回収実験方法

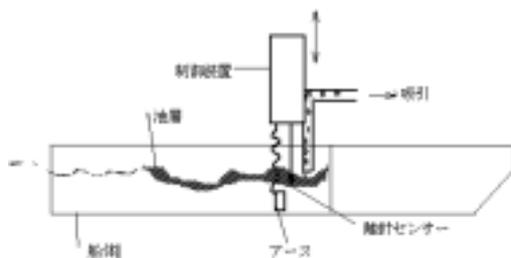


図47 吸引口制御装置説明図

吸引口の位置制御は図47に示すようにアース電極を水中にセットし、センサーの針が水面に接触したとき、電流がセンサーの針を流れ、その時センサーの位置を保持する構造である。吸引口をその装置に取り付け、フレキシブルホースを吸引口に取り付け、油を真空タンクに吸引回収した。この油吸引回収装置を油回収船模型に取り付け曳航した。水面上の浮遊油が模型船の油回収部へ誘導された後、吸引のために真空タンクに取り付けたコックを開いた。真空タンクに回収された油と水はしばらく静置され、回収油

量と回収水量を計量した。吸引口の幅は8mmで長さは160mmである。模型船はコントロールされたモーターで曳航した。流出油の回収実験は次の二通りの方法で行った。一つは模型船の周りの油の流れの観測実験時(4.2の場合)に行った。油の回収は円形の油層が模型船の油回収部に流れ込んでから通り過ぎるまで行った。回収油はガラス製の真空タンクに吸引回収し、油水混合物が水と油に分離するまで静置した。そして模型船長さLに対する波長を変えた実験を行った。試験は吸引口の位置をコントロールする場合としない場合について実験を行い、吸引時間、回収油量、回収水量の計量を行った。

もう一つの実験は、水槽を約170cm幅にオイルフェンスで仕切って長さ18mの水路を作り、195リットルの潤滑油(粘度: $1.3\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,<sup>6)</sup>)を注いだ。そして10cm/sおよび15cm/sの速さで模型船を曳航した。曳航速度は油を堰で堰き止める場合に堰部から漏油が生じない最大速度が良い。それは平水上では油層フルード数が約0.6程度になるときで、この模型の場合には平水上では約30cm/秒と考えられるが、今回の試験は波浪中の吸引口の制御の影響を調べるのが目的で、それより低速で堰から漏れないと考えられる状況下で実験を行った。そして浮遊油が回収部に流れ込んだ時、油を吸引回収した。この実験の様子を写真8に示す。



写真8 制限水路での実験

### 5.2.2 吸引口の位置制御による流出油の回収実験結果

回収された油と水の回収量の結果を表6に示す。No.3とNo.4は吸引口の位置を制御した場合としない場合の比較である。制御した方がしなかった場合より多くの油を回収している。実験2は波のない場合で油回収部へ油を誘導するために、油を掻きこむ水車を使用した。この場合、水路部の流速が50cm/秒程度の平均速度になるように水車を回すことにより、ムーンプールに油を集積することができ、油を回収することができた。吸引口の位置を油層表面に追従するように制御した場合は、制御しない場合に比べて水の回収量が少なくなっている。

表6 油回収実験結果(供試油粘度:1.3Pa·s,比重:0.96,温度6 )

No.	波長	整流消波板	散布油量	曳航速度	制御	間隙	吸引時間	回収水量	回収油量	含水率
	波長/船長		Liter	cm/s		mm	秒	Liter	Liter	%
2	-	傾斜板	40(円形)	15	なし	0	29	7.2	1.4	8.4
3	1/2	傾斜板	40(円形)	15	あり	0	30	23.7	3.8	8.6
4	1/2	傾斜板	40(円形)	15	なし	0	33	10.4	1.7	8.6
5	1	傾斜板	40(円形)	15	なし	0	33	20.5	2.1	9.1
15	1/2	傾斜+水平板	195(全面)	10	あり	0	100	40	30	5.7
16	1/2	傾斜+水平板	165(全面)	15	あり	10	63	0	20	0

No.15 と No.16 の場合は油を水面上に全面に散布した場合である。No.15 の場合、吸引口を油層表面に接触するように設置した。油がセンサーの針に付着し、そのためセンサーの針が水中に潜るため、吸引口が油水界面より下に潜った。そして多くの水を含んだ油が回収された No.16 の場合吸引口が油水界面より深く潜るのを防止するために、吸引口を油層面より 1 cm 上にセットした。この場合回収油は水を含まず油のみが回収された。しかし実験の途中吸引パイプが油の粘性のために閉塞した。油の回収については、ホース内の抵抗が大きくなるため、掃除機のような吸引ポンプより真空ポンプの方が効果的である。この実験では内径 30mm,長さ 30m のフレキシブルホースを使用した。吸引口から真空タンクまで長く実験 16 ではホースが閉塞した。従って吸引口と真空タンクの距離を短くする必要がある。油水界面の検知に針のセンサーを用いた場合、油の粘性が大きくなると油が針に付着しセンサーの針が油層を突き抜け水中へ深く潜る。従って高粘性油の油水界面の検知には非接触の超音波等による検知のような方法が必要である。

## 6. まとめ

前進中の堰前の油層については、波がある場合には静水面上より前方に広がり油層厚さが薄くなる。油回収船内の静穏化した静かな水面で油を回収するにはその回収部に流出油を誘導することが必要であるが、向かい波で波の波長が船の長さより短い時には浮遊油層を油回収船の油回収部へ油を比較的容易に誘導することができる。波のある場合傾斜板列を用いると波の減衰及び浮遊油層の集積に効果があり、その傾斜角は  $150^\circ$  が最適であった。静水面上や、追い波及び向かい波でも波の波長が船長より長い場合には浮遊油層を誘導する装置が必要である。

高粘度油対応型ネットコンベア式及び、人工芝コンベア式小型油回収装置模型を製作した。これらの装置を小型

回流水槽に設置して、油回収性能の把握を行った。

ネットコンベアにより、高粘性油を回収できることを確認した。高粘性油は含水率が少なかったが、人工芝による  $0.15\text{Pa}\cdot\text{s}$  の比較的低い粘度の油の回収では 70%程度の含水率がみられた。

波浪中での油回収実験を、ムーンプール付き油回収船模型に小型油回収装置を取り付けて行い、水面の静穏化が良好であると回収量が増加する傾向があることを確認した。

吸引口の位置を油面に追従制御することにより回収水の含水量を少なくすることができた。

波浪中で、吸引回収できる低粘度油 ( $1300\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) で油層厚さが 6mm の時、1/20 の模型で毎分 1.9 リットルの油が回収されたが、これの縮尺模型の倍率 2.0 倍を掛けた  $23\text{m}^3/\text{h}$  の回収ができる可能性がある。

## 参考文献

- 1) Tamiya, S., H. Kato, Y. Watanabe, T. Komura, "A Treatment of Equilibrium of Oil Layer on Water Flow", Journal of Society on Naval Architects of Japan, No.135, pp.71-80,1974
- 2) Ayrs, R.R. and J.P. Fraser, "Developing an open-seas Skimmer", Proceedings of the Conference on prevention and Control of Oil Pollution, American Petroleum Institute, Environmental Protection Agency and United States Coast Guard, SAN Francisco, pp.401-408,1975
- 3) Ueda, K., H. Yamanouchi, T. Maeda, S. Fujii, "Withdrawal of Highly Viscous Oil and Oil Layer at Moving Barrier", Proceeding of the Twenty-second Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, Environmental Canada, Ottawa, Canada, 1999
- 4) 木原洗、原正一、野中晃二、山川賢次、宮崎英樹、山尾崇、坂本真二、疋田賢次郎、今里元信：流出油回収技術と課題、船舶技術研究所報告、第35巻 第6号、平成10年11月、研究資料

- 5) 山川賢次、原正一、星野邦弘、湯川和浩、影本浩：  
多目的作業船の性能向上に関する研究、関西造船協会誌、第233号、平成12年3月
- 6) 海洋工学研究所出版部編：重油汚染・明日のために  
「ナホトカ」は日本を変えられるか、1998年12月
- 7) 山川賢次、原正一、星野邦弘、湯川和浩、影本浩、  
木下嗣基、丸亀力：Development of An Oil-Recovery  
Ship Workable in Large Waves,20st OMAE(Offshore  
Mechanics and Arctic Engineering)、2001年6月
- 8) 気象庁波浪観測資料、第1号、1997.3

#### 謝 辞

東京大学工学部 影本 浩教授、木下嗣基助手および日本サルヴェージ(株)小松正博技師長には、研究の過程で貴重な助言をいただいた。また、本研究の一部は東京大学工学部海洋船舶工学科の豊田聖史君、船井玲子さん(1998年度)、松本乙伸君(1999年度)、丸亀力君(2000年度)の卒業研究として実施し、実験および解析に協力していただいた。

ここに記して謝意を表します。