荒天対応型大型油回収装置の開発（その2）

小 野 志 郎* 正員 大 森 英 行**
 正員 中 川 寛 之** 正員 岩 崎 徹***
 正員 山 賀 秀 夫* 正員 小 澤 宏 臣*

Model Test and Analysis on Oil Skimmer at Rough Sea (second report)

by Shirou Ono Hideyuki Omori, *Member*
 Hiroyuki Nakagawa, *Member* Toru Iwasaki, *Member*
 Hideo Yamaga, *Member* Hiroomi Ozawa, *Member*

Summary

In stormy weather on January 2, 1997, the Russian tanker "NAKHODKA" broke up at midship into two parts in the Sea of Japan just off the Japanese coast. The recovery operation was hampered by high waves, and the most serious problem was the lack of equipment to recover the spilled oil operable in stormy weather. In 1998, corresponding to this accident, the Association for Structural Improvement of the Shipbuilding Industry (ASIS) initiated a three-year research and development project on large-scale recovery systems to collect highly viscous oil with a minimum kinematic viscosity of $0.1\text{m}^2/\text{s}$ for severe sea conditions.

This paper focuses on the selection of an oil skimmer system suitable for recovery of highly viscous spilled oil emulsified under rough sea-state. The oil skimmer system is composed of a float, pump, hose, oil/water separator, etc. Dynamic simulations and tank tests were performed by using several types of floats for comparative evaluation. The basic design of the oil skimming and treatment system including various devices has been completed, based on constituent technologies, which are wave-response technology, highly viscous oil suction technology (reported on first report) and highly viscous oil collection technology.

1. 緒 言

平成9年1月に発生したロシア船籍タンカー「ナホトカ号」の事故は冬季の日本海で発生したため油防除活動は困難を極めた。この時、荒天下において高粘度化した油の回収作業に対応できる機材が未開発であることが大きな問題となった。「ナホトカ号」の事故の重大性、日本近海の高気象ならびに日本近海を航行するタンカーの事故の蓋然性、搭載油の性状等を鑑み、運輸省(当時)は「流出油防除体制総合検討

委員会」において、流出油防除対策等について総合的に検討し、最大波高4~6mの荒天下で動粘度 $0.1\text{m}^2/\text{s}$ 以上の高粘度油の回収が可能な資機材の技術開発の必要性を指摘した。

これを踏まえ、造船業基盤整備事業協会(当時)は、平成10年度から3カ年の計画で、「荒天対応型大型油回収装置等の研究開発」を実施し、荒天・高粘度に対応できる油防除機材の開発に着手した。¹⁾²⁾³⁾

「荒天対応型大型油回収装置等の研究開発」は、「荒天対応型大型油回収装置の研究開発」と「荒天対応型オイルフェンスの研究開発」の2種類の資機材の研究開発に分かれており、本研究は前者に関連するものである。

荒天対応型大型油回収装置の研究開発では、『荒天対応型大型油回収装置の開発(その1)』⁴⁾において、流出油を吸引する機材として全口径型ジェットポンプを選定し、その性能を明らかにした。さらに、高粘度油と共に吸引することが予想される海水およびポンプ駆動水を粗分離し、回収油のみを排

* 三井造船(株) 船舶・艦艇事業本部

** (株)三井造船昭島研究所

*** 三井造船(株) 技術本部

出する前方排出型重力分離式の油水粗分離装置を開発した。

本研究では前報に引き続き、油回収機の波浪追従性能および高粘度油集油性能についてシミュレーションおよび水槽、油槽での模型実験により把握し、それらの結果に基づき、荒天対応型大型油回収装置の基本設計を実施した。さらに、油回収装置と荒天対応型オイルフェンス⁵⁾を一体化した大型模型により、波浪・水流中で高粘度油吸引実験を実施し、油回収システムの総合機能を確認した。

2. 開発目標

荒天下における流出油回収作業に対応可能な油回収機の要求仕様を下記に設定した。

2.1 吸引性能

- ・吸引能力 : 300m³/h 以上(油水混合)
- ・油粘度 : 0.1m²/s 以上 (10 万 cSt 以上)

2.2 海象条件

- ・最大波高 : 6m (有義波高 3m)

2.3 形状・寸法

- ・陸上輸送・船舶搭載を考慮し小型軽量化を図ること

3. 油回収機浮体の波浪追従性能

油回収機の浮体形状を決定することを目的に、現状技術の調査、波浪追従シミュレーションおよび縮尺模型を用いた波浪・水流中での模型実験を実施した。

3.1 油回収機浮体の候補とその特徴

油回収機が荒天時においても十分な油吸引性能を発揮するためには、油吸引口を油面に対して極力一定に保ち、かつ、高波浪中でも吸引口への油の流入量が多い浮体形状が必要である。現状技術を調査した結果、油回収機浮体のフロートの数は油の流入性能やフレーム構造に関係し、一般的に2～4個であることが判明した。フロートは流入する油を妨げるので、油の吸引口に余り影響しないように離れた位置に配置

Catamaran Type (2 Floats) Cylinder Type (3 Floats)

Strut Type (4 Floats)

Fig.1 Selected float types of oil skimmer

することが望ましいが、離し過ぎると装置全体が大きくなり、輸送上、構造強度上の問題が発生する。本回収機は荒天時に高粘度の油を回収する機材であるため、波浪追従性能、集油性能、可搬性、構造強度等の面から比較検討し、適切な形状を採用する必要がある。2、3 および 4 個のフロートを持つ浮体について油回収機浮体候補としての検討を行った。Fig.1 に油回収機浮体候補の概念図を、Table 1 に油回収機浮体候補を設計・ハンドリングおよび幾何学的な油流入性能の観点から比較検討した結果を示す。なお、この表では、評価の高さは◎○△の順に示してある。

Table 1 Comparison of characteristics of floats

Type	Catamaran (2 Floats)	Cylinder (3 Floats)	Strut (4Floats)
Design & Handling			
Transportation	◎	△	◎
Mooring with oil fence	○	○	○
Handling	○	○	△
Geometric balance	△	○	○
Weight	◎	○	△
Structural Strength	○	○	△
Evaluation	◎	○	○
Geometrical Oil Flow-in Performance			
Front side	◎	△	◎
Lateral side	△	◎	◎
Evaluation	○	○	◎

3.2 波浪追従シミュレーション

設計・ハンドリングおよび幾何学的な油流入性能の観点から、油回収機浮体としてカタマラン型およびストラット型が適していると考えられたが、波浪追従性能および波浪荷重の確認のため、3種類の候補浮体について計算を実施した。

3.2.1 計算手法

3種類の候補浮体について、3次元特異点分布法に基づく波浪中浮体運動応答シミュレーションプログラム(三井造船(株)所有)を用いて浮体の規則波応答の計算を実施して周波数応答関数を求め、線形重ね合わせ法により不規則波中での浮体運動、吸引口の海面に対する相対水位および波浪荷重を推定した。この時、没水体である集油ホッパーおよびジェットポンプ送流管による非線形抗力を考慮して計算を実施している。なお、集油ホッパーおよびジェットポンプ送流管が各浮体で共通なことから、高粘度油層の存在が各浮体運動に及ぼす影響の度合いに大きな差は無いと考え、油層を考慮しない、水中での浮体運動応答シミュレーションプログラムを用いて計算を実施した。

3.2.2 計算条件

計算波浪条件として要求仕様ならびに冬季日本海の荒天時の波浪データを基に、有義波高 3m、有義波周期 6 秒を設定した。不規則波の波スペクトルにはブレッドシュナイダー・光易型を用いた。

3.2.3 計算結果および考察

油回収性能に対する影響の大きい、上下揺およびホッパーの水面との相対水位と計算において最も大きな荷重を示した重心位置でのスプリットフォースの不規則波中での計算結果をFig.2に示す。この図には、上段に上下揺を、中段に相対水位を、下段にスプリットフォースをそれぞれ無次元化し、波向をパラメータに取って示してある。また、これらのグラフで、斜線塗がカタマラン型を、点塗がシリンダ型を、黒塗がストラット型を示している。なお、規則波中での周波数応答関数の計算結果についてはFig.5～Fig.6に波浪中実験結果と共に後述する。

(1) 浮体の上下揺

浮体の上下揺には浮体形式および波向の違いによって大きな差は無く、3種類の浮体およびすべての波向においてほぼ有義振幅程度の値となっている。

(2) ホッパーの水面との相対水位

ホッパーの水面との相対水位は浮体の種類に依らず波浪状態で無次元値で0.3程度となっている。

(3) スプリットフォース

スプリットフォースは、カタマラン型およびストラット型の場合、縦波中が横波中に比べて小さい。これに対して、シリンダ型の場合、横波中より追波中に大きく、他形式の浮体の2～3倍程度になる。しかし、これらは構造上問題となるような荷重ではないことが判明した。

Fig.2 Simulation results in irregular wave
($H_{1/3}=3\text{m}$, $T_{11/3}=6\text{s}$)

3.3 波浪追従性能に関する模型実験

シミュレーションの結果、3種類の何れの油回収機浮体候補も波浪追従性能が良く、また、問題となるような波浪荷重は作用しないことが判明した。集油ホッパー等の粘性ダンピングが浮体の運動に及ぼす影響の確認、ならびに浮体周辺の油の挙動に影響を及ぼす高波高時の波浪による反射波の状況および浮体曳航時の集油ホッパー周辺の流況観察を目的として、設計・ハンドリングおよび幾何学的な油流入性能の観点から選定されたカタマラン型とストラット型の2種類の浮体について、水理模型実験を実施した。

3.3.1 実験装置および方法

(1) 実験水槽

実験は(株)三井造船昭島研究所 潮流水槽において実施した。Fig.3に水槽の主要目を示す。

- ・水槽主要寸法：長さ 55m×幅 8m×水深 2.5m
- ・造波装置：プランジャ型造波装置 最大波高 45cm
最大波長 10m

Fig.3 Current water tank

(2) 実験方法および供試模型

縮尺 1/12の浮体模型を用いて波浪中運動応答実験およびトレーサー実験の2種類の水理実験を実施した。なお、これらの実験では油は使用していない。浮体模型は、実際にホッパーから水を吸引することが可能な構造となっており、トレーサー実験では波浪・水流中において実機相当の流量でホッパーから水を吸引し、浮遊するトレーサー（プラスチックベレット）を散布して回収の様子を観察した。このとき、水流中実験は浮体曳航時を模擬したものである。Fig.4にストラット型浮体模型を示す。

Fig.4 Float model for the tank test(Strut Type)

3.3.2 実験条件

Table 2に波浪中運動応答実験、Table 3にトレーサー実験の条件を実機スケールで示す。

Table 2 Condition of wave-response test (actual scale)

Wave	Period	height	Angle
Regular	2s.～8s.	0.3m～5.3m	Head

Table 3 Condition of tracer test (actual scale)

Irregular wave	Current
Wave period : 6s. ($T_{1/3}$)	Current speed
Wave height : 3m ($H_{1/3}$)	: 1kn～2kn
Angle : Head, Vacuum amount : 300m ³ /h	

3.3.3 結果および考察

(1) 波浪中運動応答実験

Fig.5 および Fig.6 に規則波・向波中での上下揺の振幅 (Z_a) およびホッパー中心位置の相対水位の振幅 (h_a) を入射波振幅 (ζ_a) で無次元し、カタマラン型とストラット型を比較して、横軸に波長・船長比 (λ/L) をとって示す。これらの図には実験結果とシミュレーション計算による周波数応答関数を同時に示してあり、○印がカタマラン型、□印がストラット型の実験結果を、実線がカタマラン型、点線がストラット型の周波数応答関数を示している。これらの図から、比較的波長の短い領域ではカタマラン型の運動がストラット型に比べて若干大きい、設計周期 (波周期=6 秒、 $\lambda/L=14$ 程度) 付近ではほとんど差はみられないことが判る。また、波長が長くなると波向によらず浮体運動は無次元値でほぼ 1 に、ホッパー中心の相対水位は波長が長くなると単調に減少し、ゼロに漸近している。このことから、カタマラン型、ストラット型ともに良好な波浪追従性能を有していることが判る。

Fig.5 Heaving motion

Fig.6 Relative water height at the hopper

(2) トレーサー実験

Fig.7 にトレーサー実験の代表的な例として、ストラット型の波浪中での実験状態を示す。この図には、フロートを白で、観察されたトレーサーの主な動きを灰矢印で示してある。図に示される波浪中実験では、ストラット

型の場合は、前後左右方向からのトレーサーの流入が見られ、浮体側面近傍にあるトレーサーについては、ホッパー方向に吸い寄せられ集まる様子が観察された。カタマラン型の場合は、前後方向からトレーサーの流入が見られ、浮体の間にあるトレーサーはホッパーに吸い寄せられ集まるが、浮体外側付近にあるトレーサーは浮体の反射波により離れていく様子が観察された。トレーサー回収率で比較するとストラット型の方がカタマラン型よりも 2 倍程度高い値を示した。

一方、水流中では、ストラット型の場合は、浮体外側の浮体から離れているトレーサーは浮体に平行に流れるが、浮体側面近傍にあるトレーサーはホッパー方向へ吸い寄せられ集まる様子が観察された。カタマラン型の場合には、浮体外側ではトレーサーが浮体に平行に流れ、浮体の間ではトレーサーがホッパー上部に吸い寄せられ集まる様子が観察された。トレーサーの回収率で比較すると、カタマラン型の方がストラット型より若干高い値を示した。

Fig.7 Tracer recovery in waves of the strut type

3.4 油回収機浮体の選定

油回収機がオイルフェンスと共に油回収作業に供される場合、高粘度油は浮体周辺に滞留し、浮体周辺の流れは非常に遅くなると考えられる。波浪中トレーサー実験においてトレーサー回収率が高く、周辺のトレーサーへの影響も小さいこと、ならびに、輸送、ハンドリング、機器装備等の観点から比較評価した結果、油回収機浮体としてストラット型を選定した。

4. 高粘度油集油性能

4.1 シミュレーション

集油ホッパー周りの流れのパターンは油回収装置の性能と密接な関係がある。実験では計測できない流速等のデータの取得、実験点数の補完およびホッパー周辺の流況変化を把握することを目的としてシミュレーション計算を実施した。

4.1.1 計算手法

計算には流体体積法 (VOF 法) により油と水の 2 流体の解

析が可能な汎用流体解析プログラム FLOW-3D を使用した。高粘度油は非ニュートン流体であるが、シミュレーションではニュートン流体として扱い、動粘度を高粘度油相当として計算を実施した。また、油回収装置の油吸引口付近は軸対象であり、物理現象は鉛直方向および半径方向には変化するが円周方向には変化しないと考えられるため、シミュレーションでは、円周方向に平均化した現象を計算した。ただし、高粘度油が水の上に成層化した状況を基本とするので、油水混合の無い境界においては、密度成層の考え方を導入した。

4.1.2 計算条件

Table 4 に集油シミュレーションの計算ケースを示す。この時対象とした油層実験は『荒天対応型大型油回収装置の開発(その1)』⁴⁾において報告された高粘度油吸引模型実験である。

Table 4 Oil collecting simulation case

	Vacuum amount (m ³ /h)	Initial oil layer thickness(m)	Oil viscosity (m ² /s)
Oil tank test simulation	52.4 ~69.45	0.09~0.52	0.004 ~0.363
Rake simulation*	68.0	0.05~0.15	0.1

*Forced velocity:0.075m/s

4.1.3 計算結果および考察

(1) 実験対応計算

Fig.8 に油面変位形状計算結果の一例を実験結果と比較して、横軸に吸引口中心からの距離、縦軸に鉛直座標として示す。図中で●印および◆印が実験結果を示しており、実線および点線が計算結果を示している。高粘度油を吸引する場合、油面形状はホッパー内で凹む傾向があり、油水境界面はホッパー側壁で初期位置より下がることが判明した。これらの傾向は『荒天対応型大型油回収装置の開発(その1)』⁴⁾の油槽実験においても観察された。計算結果と実験結果は、他の計算結果も含め良く一致しており、高粘度油をニュートン流体として扱う本シミュレーション手法によって実現象を再現することが可能であることが確認された。

(Vacuum amount : 50.9m³/hr, Oil viscosity : 0.12m²/s)

Fig.8 Transformation of oil surface

(2) ケーススタディー

油層厚 0.10m、ホッパー壁面上端の深度(ホッパー深さ)0.05m で、ホッパー外側の油をかき寄せた場合について検討した。Fig. 9 に計算結果の一例として、油吸引と同時に油層表面でホッパー中心方向に 0.075m/s の強制速度を与える‘かき寄せ’を実施した場合の断面流速分布を示す。この図ではベクトルの色の濃い部分の流速が速く、薄い部分が遅くなっている。また、この図には計算による油水境界面形状も同時に示してある。計算結果から、かき寄せを実施しない場合には吸引口付近で油が無くなり穴が開くが、かき寄せを実施した場合には集油ホッパー内で十分な厚さの油層が確保され、定常的な油の吸引が可能であることが判明した。これは、ホッパー上端部で十分な水平方向流速が発生するためである。また、かき寄せを実施した場合、ホッパー外部の油塊はホッパー下端付近まで沈降すると共に、半径方向の油層も標準状態に比べて厚くなる事が判明した。これは、かき寄せによりホッパー周辺の油層厚を確保することが可能であり、かき寄せが油層の薄い場合の高粘度油吸引性能の向上に有効であることを示している。

Fig.9 Cross section velocity profile on rake condition

4.2 かき寄せ装置模型実験

シミュレーションの結果、油層表面に外部から速度を与える‘かき寄せ’が油回収性能の向上に有効であることが判明した。かき寄せ装置の方式としては、機械的な方式と流体噴射による方式などが考えられるが、水噴射方式は波浪中でも大きな荷重を受けることのない単純で軽量の構造にできる利点があるので、まず水噴射方式の実現可能性を検討した。

かき寄せ装置模型実験は、水噴射方式かき寄せ装置の基本設計に必要なデータを取得することを目的とし、ノズル形状、噴射圧、噴射角度および噴射位置をパラメータとして実験を実施した。実験の結果、ホッパー端部の位置で油面が盛上がる油面形状が得られる噴射条件および配置において最もかき寄せの効果が得られることが判明した。

4.3 かき寄せ装置の選定

シミュレーションならびにかき寄せ装置模型実験により、かき寄せ方式として水噴射式が使用可能であることを確認した。

5. 基本設計

基本仕様と設計条件を満たす荒天対応型大型油回収装置の主要機器の基本設計を実施した。

5.1 全口径型ジェットポンプ

『荒天対応型大型油回収装置の開発(その1)』⁴⁾で得られた設計データベースに基づき、全口径型ジェットポンプの基本設計を実施した。本設計により得られたポンプは非常にコンパクトな形状をしている。Fig.10 に外形図を示す。

Fig.10 Concept of the full-bore type jet-pump

5.2 大型油回収装置

Fig.11 に大型油回収機の全体装置図を示す。本回収機は以下の装置より構成されている。

- ①浮体 (ストラット型浮体)
- ②全口径型ジェットポンプ
- ③集油ホッパー
- ④水噴射式かき寄せ装置

Fig.11 General arrangement of the oil skimmer

5.3 油回収システム

油回収機により回収された油は母船上に設置した油水粗分離装置に導かれる。分離油は油受槽に一時的に排出された後、ポンプで貯油タンクに移送する。また、分離水は水受槽に一時的に移送された後、ポンプで貯水タンクに移送する。本システムではジェットポンプ駆動水およびかき寄せ水に分離水を再供給することによって、母船上の貯水量を低減し

た。Fig.12に油回収システムの概念図を示す。

また、Table 5 に油回収機システムの主要目を示す。

Fig.12 Oil recovery system

Table 5 Principal particulars of oil skimmer system

Float	Type	Strut type (4 float type)
	Dimensions	Length :5.6m×Width :2.6m ×Height:1.7m
	Material	Float :aluminum alloy Flame :Steel
	Weight	1500kg
Pump ⁴⁾	Type	Full-bore type jet-pump
	Capacity	300m ³ /h
	Dimensions	Length :3m, Weight :200kg(dry)
Power unit	Type	Diesel Eng. Plunger pump
	Power	260kW×2 Sets
Rake system	Type	Water spray type
	Pressure	0.3MPa
Oil/water separator	Type	Gravity type
	Capacity	400m ³ /h
	Dimensions	Length :6m×Width :2.5m ×Height :2.6m
	Weight	5000kg(dry)

6. 大型模型を用いた波浪中高粘度油吸引実験

基本設計の結果を受け、油回収機と別途開発されたトラップブーム⁵⁾とを一体にした大型模型を用い、本油回収装置の油回収システムとしての総合機能を確認することを目的として、波浪・水流中で高粘度油を吸引する大型模型実験を実施した。

6.1 実験装置

(1) 使用水槽

高粘度油の使用が可能で、波および水流を発生することができる施設として海上災害防止センターの水槽を借用し実験を実施した。Fig.13に水槽の主要目示す。

実験水槽諸元

- ・ 名称：海上災害防止センター 機材取扱プール
- ・ 寸法：幅8m×長12m×深3.5m(標準水深3m)
- ・ 最大波高：53cm (@波長6m, 反射波含む, 標準水深時)
- ・ 流速：最大…約0.8m/s
：水槽中央…約0.3m/s

Fig.13 Training pool
(At Marine Disaster Prevention Center)

(2) 供試模型

1/2 スケールの油回収機浮体模型、トラップブーム・ガイドフェンス模型および『荒天対応型大型油回収装置の開発(その1)』⁴⁾において使用した 1/3 スケールの油水粗分離装置模型を用いて実験を実施した。Fig.14 に大型模型実験の実験状況を示す。

Fig.14 Large-size model test in waves and current

6.2 実験方法

波浪および水流中でトラップ内に散布した粘度 $0.25\text{m}^2/\text{s}$ ～ $0.32\text{m}^2/\text{s}$ のエマルジョン油を全口径型ジェットポンプで吸引させ、波浪追従性能、高粘度油回収性能、油水粗分離性能等を把握した。なお、油水粗分離性能実験については、模型縮尺が他と異なるため、吸引した高粘度油の一部分を油水粗分離装置に分岐させて油水流入量を模型縮尺に合わせた。

6.3 実験条件

実験条件を以下に示す。条件は実機スケールで示してある。

また、Table 6 に実験ケースを示す。

1) 吸引性能

計画吸引量： $300\text{m}^3/\text{h}$ 以上
油粘度： $0.1\text{m}^2/\text{s}$ 以上

2) 波浪・水流条件

波高： 0.8m 、波周期： 4.0s
水流： 0.43m/s

3) 高粘度油散布条件

油層厚： 0.25m 、 0.35m
ホッパー深さ： 0.20m 、 0.30m

Table 6 Synthesized model test condition

Oil layer thickness	Rake	Measurements
Non (Water suction test)	Enforced	3 times*
0.25m	Enforced, Not enforced	2 times
0.35m	Not enforced	1 times

*Parameter : Pump driving pressure

6.4 実験結果および考察

6.4.1 波浪追従性能

Fig.15 に油回収機浮体の上下揺の振幅(Za)を、Fig.16 にホッパーの油・水面との相対変位の振幅(ha)を入射波振幅(ζa)で無次元化して、横軸に波長・船長比(λ/L)を取って示す。この図で、実線が油の無い状態の波浪追従シミュレーション結果を、□印が水槽での波浪追従性能実験結果を、○印が油層の無い場合の大型模型実験結果を、●印が油層の有る場合の大型模型実験結果を示している。

(1) 油回収機浮体の運動

Fig.15 から、油回収機浮体の上下揺は、油層が無い場合には無次元値で 0.86 程度、油層がある場合で 0.84 程度となっており、油層がある場合に運動が 3% 程度小さくなっているものの、大型模型実験とシミュレーションならびに水槽における波浪追従実験結果に大きな差は見られない。これは、 $\lambda/L=5$ 付近以上の領域では、油層が油回収機浮体の運動に対して及ぼす影響が小さいことを示しており、設計点が $\lambda/L=14$ 程度であることから、設計上は水槽実験結果または水中で実施したシミュレーション結果を用いることが可能であると考えられる。

Fig.15 Heaving motion of oil skimmer float

(2) ホッパーの油・水面に対する相対変位

Fig.16 から、油層が無い場合の相対水位は無次元値で 0.1 程度であり、シミュレーションおよび波浪追従性能実験結果と良く一致している。これは、油回収機浮体がトラップブーム内に設置されても、浮体のフロートおよびトラップブーム内壁の反射波は小さく、油回収機浮体周辺の波浪場が回収機浮体単体の場合とほとんど変わらないことを示している。

浮体の上下運動に対する油層影響が小さいにもかかわらず(Fig.15)、油層がある場合の相対変位がほぼゼロになっている。これは、油が高粘度で流動しにくいいため、浮体が上下揺してもホッパー上部の高粘度油の油層厚がほぼ一定に保たれ、さらに、高粘度油により浮体周辺の波浪場が油層の無い場合に比べて穏やかになっているためであると考えられる。この現象は目視観察により確認された。

Fig. 16 Relative water height in the hopper center

6. 4. 2 波浪・水流中の全口径型ジェットポンプの特性

Fig. 17 に波浪・水流中の全口径型ジェットポンプの特性を示す。この図で、実線は『荒天対応型大型油回収装置の開発(その1)』⁴⁾で得られた結果から推定した実験用の全口径型ジェットポンプの吸引特性を示し、○印が油層の無い場合、●印が油層のある場合の大型模型実験結果を示している。この図から、全口径型ジェットポンプは波浪・水流中で高粘度油を吸引する場合においても、水を吸引する場合と同様の吸引特性を有していることが判る。

Fig. 17 Full-bore type jet pump characteristics

6. 4. 3 油水吸引性能

Fig. 18 に油層厚 0.25m および 0.35m でかき寄せを実施しない場合ならびに油層厚 0.25m でかき寄せを実施した場合の油水吸引量を比較して示す。この図で、塗り潰しがかき寄せを行わない場合、グラディエーションがかき寄せを実施した場合を示している。

(1) 油層厚影響

かき寄せを実施しない場合、油層厚 0.35m での油水吸

引量は 355m³/h 程度であり、計画吸引量(300m³/h)を満足していることが判る。この時の高粘度油回収量は 185 m³/h 程度である。一方、油層厚 0.25m では計画吸引量で油水を吸引させると高粘度油のホッパーへの流入量が不足し、ホッパーの浮力によってホッパーが油面から露出するため、油水を連続して吸引させるためにはポンプの作動点を下げる必要があった。この時の油水吸引量は 105m³/h 程度、高粘度油回収量は 70m³/h 程度である。

(2) かき寄せ影響

油層厚 0.25m でかき寄せを実施した場合の油水吸引量は 470m³/h 程度であり、計画吸引量を十分に満足していることが判る。このことから、かき寄せを実施することにより、油層が極薄い場合でも、全口径型ジェットポンプの吸引流量を下げることなく、連続的に油水を吸引することが可能であることが判明した。なお、この時の高粘度油回収量は 90m³/h 程度であり、かき寄せを実施しない場合の 1.3 倍程度になっている。

Fig. 18 Oil/water vacuuming performance

6. 4. 4 油水粗分離性能

(1) 油水粗分離性能

Fig. 19 に吸引油水の油水比率と粗分離水率、分離油中水濃度の関係を示す。この図で、黒印が粗分離水率、白印が分離油中水濃度を示している。この図から、本油水粗分離装置は波浪・水流中で回収される油水比率が低い回収油水に対しても、油水粗分離模型実験で得られた結果と同様に良好な油水粗分離性能を有することが判る。

Fig. 19 Oil/water separating performance

(2) 吸引前後の油粘度

Table 7 に高粘度油の吸引前後の粘度を示す。この図から、ジェットポンプによって吸引された油の粘度は初期粘度に比べおおよそ 1/4～1/5 に低下していることが判る。これは、『荒天対応型大型油回収装置の開発(その 1)』⁴⁾ で報告された結果と同様であり、波浪・水流中で高粘度油とともに水を吸引した場合においても、油粘度が低下することが確認された。

高粘度油を成分分析した結果、高粘度油は Oil in Water エマルジョンであり、回収前には 70% 程度の水分量であったが、回収後には 50% 程度に低下していた。これは、ジェットポンプの高圧駆動水が高粘度油のエマルジョンを分解しているためであると考えられる。

Table 7 Viscosity change of vacuumed oil

Test case		Initial oil viscosity (m ² /s)	Vacuumed oil viscosity (m ² /s)
Oil layer thickness	Rake operation		
0.25m	Not enforced	0.300	0.058
0.25m	Enforced	0.315	0.085
0.35m	Not enforced	0.248	0.054

6.5 油回収システムの総合機能

波浪・水流中で高粘度油の吸引実験を実施した結果、以下の事項が確認された。

- ・本油回収機は目標吸引量 300 m³/h を十分に満足する油水吸引性能を示し、さらに、かき寄せ装置を併用することにより、高粘度油回収量を増加させることが可能である。
- ・油水分離装置は油水分率が低い回収油に対して、良好な油水分離性能を有しており、油水分離装置により回収油の貯油効率を向上させることが可能である。
- ・全口径型ジェットポンプによって吸引された高粘度油の油粘度は初期粘度に比べ低下するため、吸引後の油移送、貯油、回収油の処理のプロセスにおいてハンドリング性を向上させることが可能である。

7. まとめ

ナホトカ級の油流出事故を想定した高粘度、高波浪対応の油回収装置の開発に着手し、平成 9 年度の技術調査を踏まえて平成 10 年度から 2 年間に亘る要素研究開発を実施した。それら要素技術開発の結果に基づき、全口径型ジェットポンプを中心に油回収装置の小型、軽量化及び高効率化を図り、プロトタイプの実機 1/2 相当の大型模型を用いて海上災害防止センター横須賀研究所における高粘度油を用いた大掛かりな波浪中高粘度油吸引実験を実施することができた。その結果、本回収機は実海域において所期の性能を発揮できることが確認され、荒天下の高粘度油回収作業において有効な機材であることが実証された。さらに、総合的な船上処理装置

の設計が可能となったことで、高波浪下（最大波高 6m）で高粘度油（10 万 cSt 以上）を多量（300m³/h）に回収することが可能な高性能油回収装置の実用化の段階に至った。

本研究の成果は研究で終わるものではなく、出来るだけ早く実機を供給し、油流出による海洋汚染の防除体制の一端を担うことによって、真の貢献が評価されるものと確信している。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、貴重なアドバイスを賜った本プロジェクト技術委員会の加藤洋治委員長他各員の方々に厚く御礼申し上げます。また、本研究を立上げ、実施するにあたり、多大な尽力を賜った造船業基盤整備事業協会山本理事長他関係者の方々に御礼申し上げます。さらに、大型模型による波浪中高粘度油吸引実験においてご指導いただいた、海上災害防止センター 伊藤所長、萩原主任教官、ならびに山口教官に御礼申し上げます。また、共同で全体システム設計を実施すると共に、大型模型による波浪中高粘度油吸引実験においてオイルフェンス部分を担当いただいた三菱重工業(株)の関係者の方々、ならびに、高粘度油を用いる実験において、数々の助言・協力をいただいた城野清治常務他海洋開発技術研究所の関係者の方々に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 造船業基盤整備事業協会、平成 10 年度環境保全技術研究開発成果報告会資料、1999
- 2) 造船業基盤整備事業協会、平成 11 年度環境保全技術研究開発成果報告会資料、2000
- 3) 造船業基盤整備事業協会、平成 12 年度環境保全技術研究開発成果報告会資料、2001
- 4) 小野志郎、末田高嗣、岩崎徹、中川寛之、山賀秀夫、小澤宏臣、荒天対応型大型油回収装置の開発（その 1）、日本造船学会論文集第 189 号、2001、337-345
- 5) 小林英一、重入義治、池上国広、西村好之、大江清登、山瀬晴義、荒天対応型オイルフェンスの開発（その 1）、日本造船学会論文集第 188 号、2001、325-334
- 6) 小林英一、末田高嗣、西村好之、大江清登、池上国広、山瀬晴義、荒天対応型オイルフェンスの開発（その 2）、日本造船学会論文集第 189 号、2001、347-356