

### 3. 当研究所における今後の研究課題

前章では、現有の油回収船や油回収装置の性能等に関する調査結果について述べてきた。その結果、高波浪下では油回収船が稼働できない場合や、油の回収効率が悪くなるなどの問題点が明らかとなった。また、流出油は波浪によりムース化した高粘度油になり、回収が困難になるといった問題点もある。

そこで高波浪下において、油を効率よく回収するために、静穏水域を創出するための船型と、高粘度油にも対処できる油回収装置に関する研究開発を行い、これらの技術をお回収船として組み合わせて総合的に対処する方法が有力な方策として考えられる。

ここでは、油回収船の現状及びナホトカ号油流出事故での経験等を踏まえ、当所において実施すべき油回収船と油回収装置に関する研究課題について検討を行った。

#### 3.1 油回収船の検討

##### 3.1.1 油回収船の想定稼働環境

当所では、外洋における油回収船の回収作業について検討を行うものとする。そこで、外洋で効率よく油回収作業をするためには、油回収船の稼働環境を把握する必要がある、また流出油がどのような波浪状況に曝されるかも把握しておかねばならない。本節では、油回収船の想定稼働環境を調べるために、日本近海の波浪データを調査した。

##### 3.1.1.1 日本近海の波浪データ

日本近海において波浪観測を実施し、観測資料を発行している機関として、気象庁や港湾技術研究所などがあり、それぞれの観測地点を図3-1に示す。観測結果は、以下の資料として発行されている。

##### 1) 気象庁<sup>35)</sup>

- ① 波浪図：気象庁では、北太平洋と日本沿岸域について、毎日午前9時（日本時間）の波浪の実況解析を行い、沿岸域については沿岸波浪実況図として、北太平洋については外洋波浪実況図としてそれぞれ第一気象無線模写通報(JMH)により放送している。
- ② 気象庁波浪資料：1982年～1995年の“気象庁外洋波浪図”と1976年～1995年の“気象庁波浪観測資料”を統合、沿岸波浪図を加えて、1996年分から“気象庁波浪資料 第1号（1997年3月）”が発行されている。この資料は、1996年の毎日（日本時間午前9時）の沿岸・外洋波浪実況図を掲載し、さらに観測地点に設置された気象庁沿岸波浪計で1996年に観測されたデータの統計資料を各地点毎に掲載したものである。以下に資料項目を挙げる。

- ・ 沿岸波浪実況図
- ・ 外洋波浪実況図

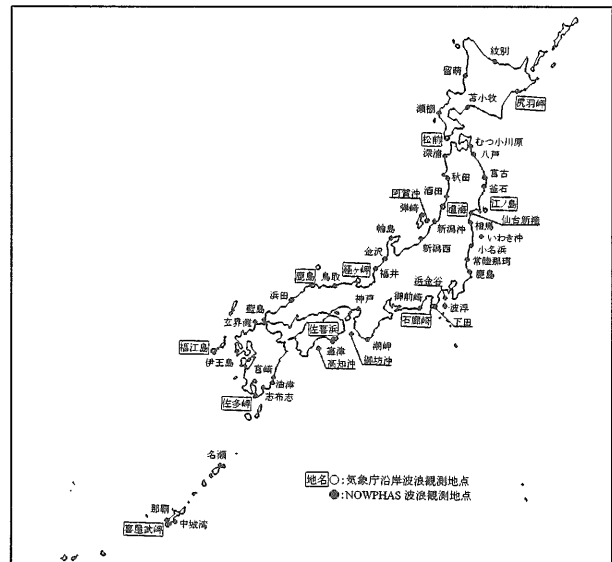


図3-1 沿岸波浪観測地点 35)36)

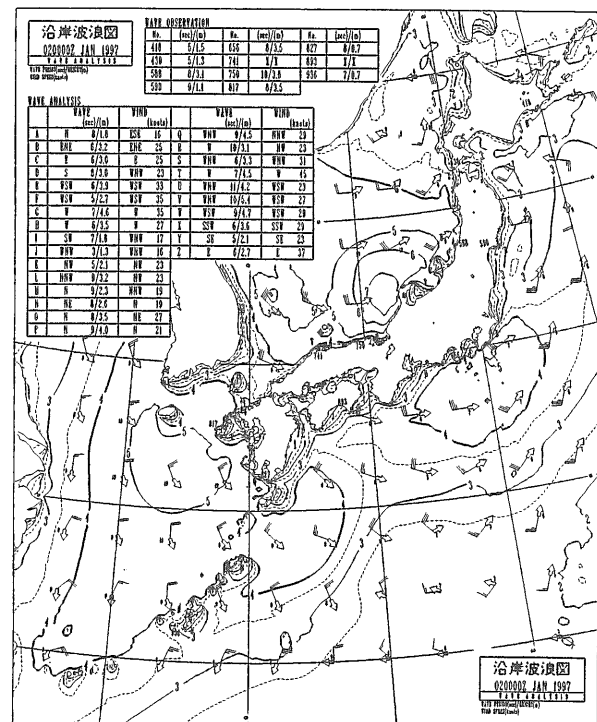


図3-2 沿岸波浪図（1997年1月2日午前9時） 35)

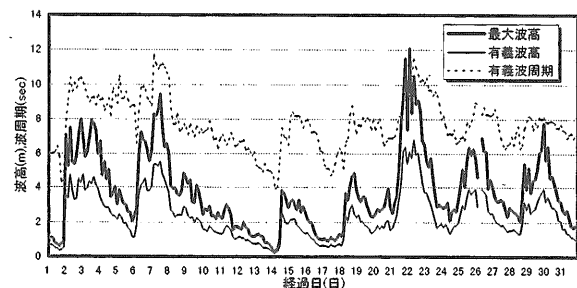


図3-3 時系列図（1997年1月、経ヶ岬） 35)

- ・時系列図(有義波高、最大波高、有義波周期)
- ・波浪観測年表(平均値、最大値、波高の階級別出現率、高波出現順位)
- ・波浪観測累年表(平均値、最大値、波高の階級別出現率、高波出現順位、波高・周期階級別出現率)一例として、1997年1月2日午前9時現在の沿岸波浪実況図(図3-2)、1997年1月の時系列図(経ヶ岬)(図3-3)を挙げる。

## 2) 港湾技術研究所<sup>36)</sup>

1970年以来、港湾局では全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarborS)を構築し、日本全国の沿岸海域(43地点)における波浪観測を実施している(図3-1参照)。港湾技術研究所では取得された観測記録の処理及び統計解析を分担し、その成果をこれまで波浪観測年報として毎年港湾技研資料として報告している。本資料における主な波浪統計項目は、次のとおりである。

- ・月/年間平均及び最大有義波
- ・最大有義波
- ・代表的気象じょう乱時の沿岸波浪分布
- ・波高・周期別出現分布
- ・波高・波向別出現分布(波向観測地点に限る)
- ・出現波高一覧

### 3.1.1.2 荒天日及び静穏日の出現・持続時間

北海道西岸・留萌・山形県・酒田・佐渡島北端・弾崎・能登・輪島・福井県・福井・島根県・浜田の観測地点について、有義波高 $H_{1/3}=3\text{m}$ に対する総継続日数及び出現頻度<sup>37)</sup>より、季節ごとの平均持続時間及び平均出現周期を求めた。その結果を表3-1に示す。

$H_{1/3}=3\text{m}$ 以上の海象は、年平均50回程度、北海道西岸では30回程度である。年平均持続時間は、北陸～東北では14時間程度、北海道西岸及び中国地方北岸では10時間程度である。最も厳しい冬季には、北陸沿岸で有義波高3m以上の海象が2～3日周期で出現し、15時間程度持続する。東北地方沿岸～北海道西岸及び中国地方沿岸の出現周期は、6日間程度である。夏季には全く出現しない。

また、海域ごとの波浪の特徴は、次のようである。中国地方の沿岸は、主として日本海低気圧の通過、冬型気圧配置によって高波がもたらされる。更に、九州～四国の経路をたどる台風によって6m前後の高波が出現することがある。北陸～東北地方沿岸は、主として冬型気圧配置によって高波がもたらされる。また、列島を縦断する台風によって、能登半島以東の沿岸で7mを超える高波が出現することがある。北海道西岸は、主として日本海低気圧の通過によって高波がもたらされる。表3-2に日本海沿岸各地の $H_{1/3}=1\text{m}$ に対する未超過継続時間<sup>37)</sup>を示す。これより、冬季においては、1m未満の波高の平均継続時間が1日以下であることがわかり、油回収船にとっては非常に厳しい稼働環境である

ことがうかがえる。

### 3.1.1.3 最多出現波浪

3.1.1.2節の日本海沿岸観測地点(酒田の代わりに阿賀沖とした)について、波高・周期度数分布表<sup>38)</sup>より最多出現有義波高・周期及び出現率を求めた。その結果を表3-3に示す。

最も厳しい冬季の最多出現有義波高及び有義波周期は、北陸～東北地方沿岸では $H_{1/3}=2.5\sim 3\text{m}$ 、 $T_{H1/3}=7\sim 8$ 秒である。北海道西岸及び中国地方沿岸では、 $H_{1/3}=2\sim 2.5\text{m}$ 、 $T_{H1/3}=6\sim 7$ 秒である。油回収船の設計波浪として、周期が6～8秒を考慮すればよいことがわかる。また、設定波高により油回収船の稼働率が決定される。

### 3.1.2 洋上想定回収性能

想定流出油量については、国としての確たる値は示されていないが、石油連盟の関連事項に係る調査研究では約12,000kℓの流出を想定した例がある<sup>17)</sup>。諸外国においては、概ね大型タンカーの貨物タンク2個分に相当する10,000～15,000kℓ程度とし、これを2～3日で回収することを基本としている。ただし、回収時の気象・海象条件まで規定されているか否かは明らかでな

表3-1  $H_{1/3}=3\text{m}$ に対する超過継続時間<sup>37)</sup>

季節	項目	留萌	酒田	弾崎	輪島	福井	浜田
冬季	総継続日数	6.5	17.0	25.0	22.5	17.0	12.5
	平均出現頻度(回)	15.0	33.0	39.0	35.0	27.0	18.0
	平均持続時間	10.4	12.4	15.4	15.4	15.1	16.7
	平均出現周期(日)	6.0	7.3	2.3	2.6	3.3	5.0
秋季	総継続日数	5.0	6.0	10.0	5.0	6.5	3.0
	平均出現頻度(回)	10.0	10.0	19.0	10.0	12.0	10.0
	平均持続時間	12.0	14.4	12.6	12.0	13.0	7.2
	平均出現周期(日)	9.0	9.0	4.7	9.0	7.5	9.0
夏季	総継続日数	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	平均出現頻度(回)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	平均持続時間	—	—	—	—	—	—
	平均出現周期(日)	—	—	—	—	—	—
春季	総継続日数	2.3	4.8	5.0	3.5	2.5	1.5
	平均出現頻度(回)	5.0	7.0	5.0	6.0	5.0	7.5
	平均持続時間	11.0	16.5	24.0	14.0	12.0	4.8
	平均出現周期(日)	18.0	12.8	18.0	15.0	18.0	12.0
年間	総継続日数	13.8	27.8	40.0	31.0	26.0	17.0
	平均出現頻度(回)	30	50	63	51	44	36
	平均持続時間	11.1	14.4	17.3	13.8	13.4	9.6

表3-2  $H_{1/3}=3\text{m}$ に対する未超過継続時間<sup>37)</sup>

季節	項目	留萌	酒田	弾崎	輪島	福井	浜田
冬季	総出現日数(日)	37.5	24.0	14.3	14.3	23.2	21.4
	平均継続時間(日)	1.0	0.7	0.5	0.5	0.8	1.0
秋季	総出現日数(日)	25.0	53.6	71.4	48.2	53.6	50.0
	平均継続時間(日)	1.3	1.6	1.3	1.4	1.6	1.5
夏季	総出現日数(日)	75.0	71.4	76.8	75.0	73.2	73.2
	平均継続時間(日)	3.5	4.5	3.2	4.4	4.3	2.8
春季	総出現日数(日)	75.0	58.9	53.6	58.9	64.3	60.7
	平均継続時間(日)	1.7	2.0	1.6	1.9	2.0	1.7

表3-3 最多出現有義波高・周期<sup>38)</sup>

季節	項目	留萌	阿賀沖	弾崎	輪島	福井	浜田
冬季	有義波高(m)	2.0-2.5	2.5-3	2-2.5	2-2.5	2.5-3	2-2.5
	有義波周期(sec)	6-7	6-7	7-8	7-8	7-8	6-7
	出現率(%)	6.9	5.7	7.0	7.5	4.9	5.6
秋季	有義波高(m)	0.5-0.75	0.25-0.5	1-1.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.25-0.5
	有義波周期(sec)	5-6	3-4	5-6	4-5	5-6	4-5
	出現率(%)	6.1	9.0	5.2	7.8	6.5	7.9
夏季	有義波高(m)	0.25-0.5	0.25-0.5	0.5-0.75	0.25-0.5	静穏	0.25-0.5
	有義波周期(sec)	4-5	3-4	3-4	4-5	3-4	4-5
	出現率(%)	9.5	17.7	14.4	17.7	17.9	17.7
春季	有義波高(m)	0.5-0.75	0.25-0.5	0.25-0.5	0.25-4-5	0.25-0.5	0.25-0.5
	有義波周期(sec)	4-5	3-4	静穏	4-5	4-5	4-5
	出現率(%)	6.9	11.2	15.7	9.8	11.9	11.0

い（ノルウェーは、波高9フィート未満としている）が、回収装置の現状から事実上平穏な海域での作業を想定するものとなっていると考えられる。

また、ナホトカ号からの流出量は約6,300kl、ジュリアナ号海難事故（昭和46年）で流出量は約7,200klであった。したがって、洋上流出油の想定量として約12,000kl程度は概ね妥当と考えられる。

想定流出油量についての現状の想定値を特段変更すべき必然性はないことから、回収船が備えるべき単位時間あたりの回収油量についても、現在配備されている回収装置の値の範囲内として想定すれば足りる。研究の最終的な目標は、油回収船の回収油量の向上であるが、現在は困難な高波浪下での回収を可能とするための基礎技術の蓄積により、その目的を達成することが可能となる。回収油量の向上に伴い、油回収船に搭載する回収油の貯蔵タンクを大きくする必要性が生じるので、油回収船の貯蔵量についても考慮しなければならないと考えられる。

現段階では、想定回収油量の想定にあたっては、国内外の現有回収装置の性能程度とする。国外の大型回収装置の当該値は、油水回収能力として200～300m<sup>3</sup>/h、国内の油回収専用船では約90m<sup>3</sup>/hとなっており、これらの値に留意することとなる。

### 3.1.3 高波浪への対応技術の研究開発

本節では、3.5～4mの高波浪下で必要な油回収技術として、次の2つの技術要素を取りあげる。まず第一の要素として、油回収船の主要寸法を決定するために必要な荒天下での動揺特性について調査する。第二の要素は、船内に取り込んだ油を効率良く回収するために必要な静穏化水面の創生技術である。

以下においては、船型別の一般的な動揺性能について述べ、油回収船の船型として通常は他の目的に使用される作業船で、甲板に広い作業面積と油回収タンク面積を確保できるバージ型を想定する。このバージ型船型を例にとり、その動揺性能について考察し、船舶技術研究所において実施された模型実験結果を紹介してその一般的な特徴を示す。また、取り込んだ油の回収技術に焦点を絞り、船内に設けられた静穏海域、いわゆるムーンプールについて解説する。

#### 3.1.3.1 船型別の動揺性能の比較

船型別の動揺性能の比較をするために、対象とする単胴船、双胴船及び小水線面積船(SWATH)の主要寸法を表3-4に示す。油回収船として稼働することを想定すると、低速時の動揺性能に着目しなければならない。図3-4に横波中の動揺応答の比較を波スペクトラムとともに示す。単胴船と小水線面積船は、応答のピークが極端に相違することがわかる。すなわち、単胴船と比較して双胴船の場合は波長が短い領域にそのピークが

存在し、単胴船ほど大きくない。荒天下においては波長が一般的に長くなることから、双胴船は動揺応答の観点から有利であるといえる。また図3-5に縦揺の動揺応答の比較を示す。船速が0ktの停止している場合については、一般的に単胴船の方が双胴船よりも応答が大きく、縦揺についても双胴船が有利である。また図3-6に船速に対する上下変位の比較を示す。これより、微速域では小水線面積船と単胴船ではそれほど大きな違いはなく、小水線面積船の優位性は高速域において顕著になることがわかる。

油回収船は波浪中において低速で浮遊する油を回収するために、低速時の良好な動揺性能を有することが重要であるが、操船性能についても想定される要求性能をある程度満足することが必要条件となる。とりわけ荒天下において、高粘度化した油は一箇所に集中せず処々に散逸しており、機動性を重視すれば操船性能も重要となる。すなわち、微速域の操船性能については、外力として風、波漂流力が重要な要素となるが、DPS(Dynamic Positioning System)などの操船制御を対象とする研究により、良好な性能を満足できると考えられる。

#### 3.1.3.2 バージ型油回収船の主要寸法の決定法の一例

ここでは、3.5～4mの高波浪下において、静穏な油回収作業水面を創出するための船型、設備を有する油回収船について検討する。油回収船を考える場合、油回収機器据え付け、機材の収納・保守、回収した油の貯蔵などの十分な空間が必要である。また、低速域での良好な動揺特性とある要求性能を満足する操縦性能が必要である。このような観点から、バージ型油回収船

表3-4 単胴船・双胴船・小水線面積船(SWATH)の主要寸法<sup>39)</sup>

	SWATH SHIP	CONVENTIONAL CATAMARAN (AGOR 16)	CONVENTIONAL MONOHULL (DESTROYER)	
			EQUIV. LENGTH	EQUIV. DISPL.
LENGTH IN FEET*	220	220	220	380
DISPLACEMENT IN TONS	3200	3200	700	3200
BEAM (EACH HULL) IN FEET	8	24	23	40
HULL SPACING IN FEET**	100	54	—	—
DRAFT IN FEET	32	18.5	8	13
SPEED IN KNOTS***	20	14	20	20
FROUDE NUMBER	0.40	0.28	0.40	0.30

\*LENGTH IS DEFINED AS THE OVERALL LENGTH OF THE SUBMERGED HULL.

\*\*HULL SPACING IS DEFINED AS THE DISTANCE BETWEEN THE CENTERLINES OF EACH INDIVIDUAL HULL.

\*\*\*NORMAL OPERATING SPEED IN A SEAWAY.

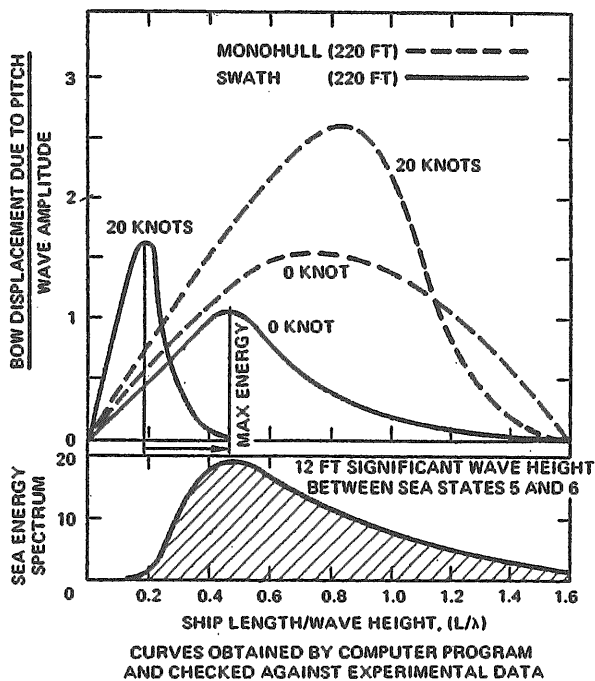
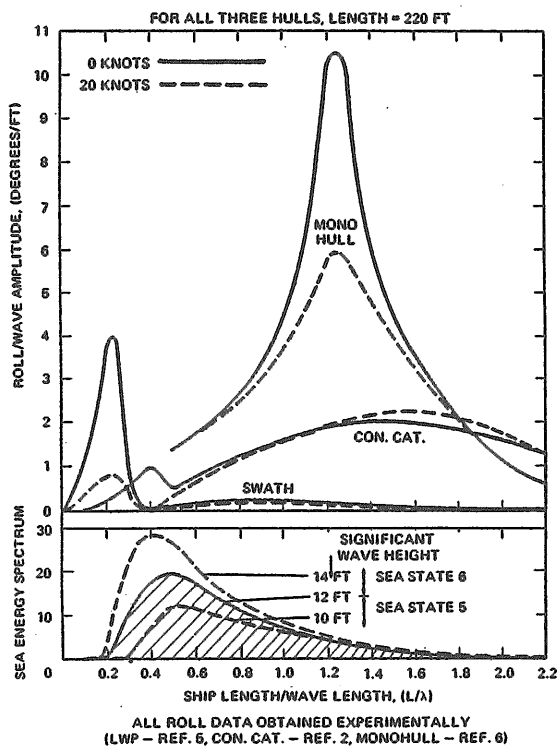


図3-5 縦揺の動揺応答<sup>39)</sup>

の初期設計について考えることにする。

船舶技術研究所で実施した模型実験<sup>40)</sup>において、使用したバージ型の模型船を図3-7に示す。これは、船体抵抗を軽減するための船首尾にカットアップのついた典型的なバージ船型である。今回の研究開発目的にあわせると、想定する海象条件として、冬期の日本海を

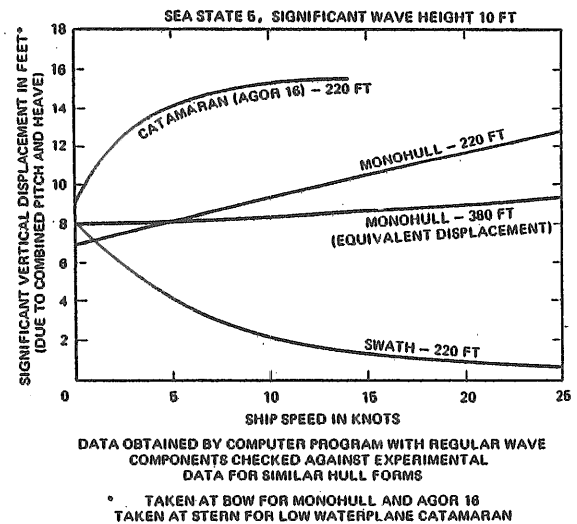


図3-6 船速に対する上下変位<sup>39)</sup>

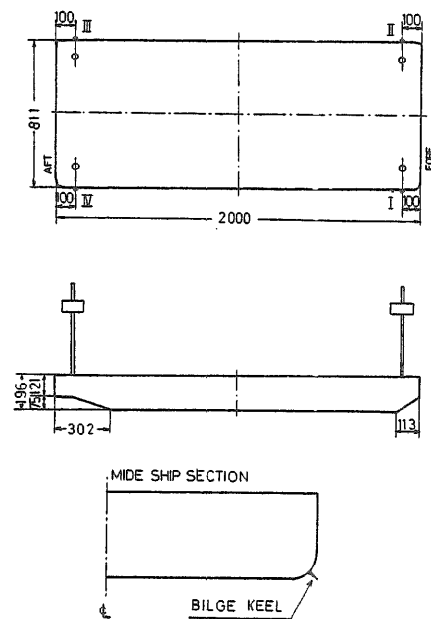
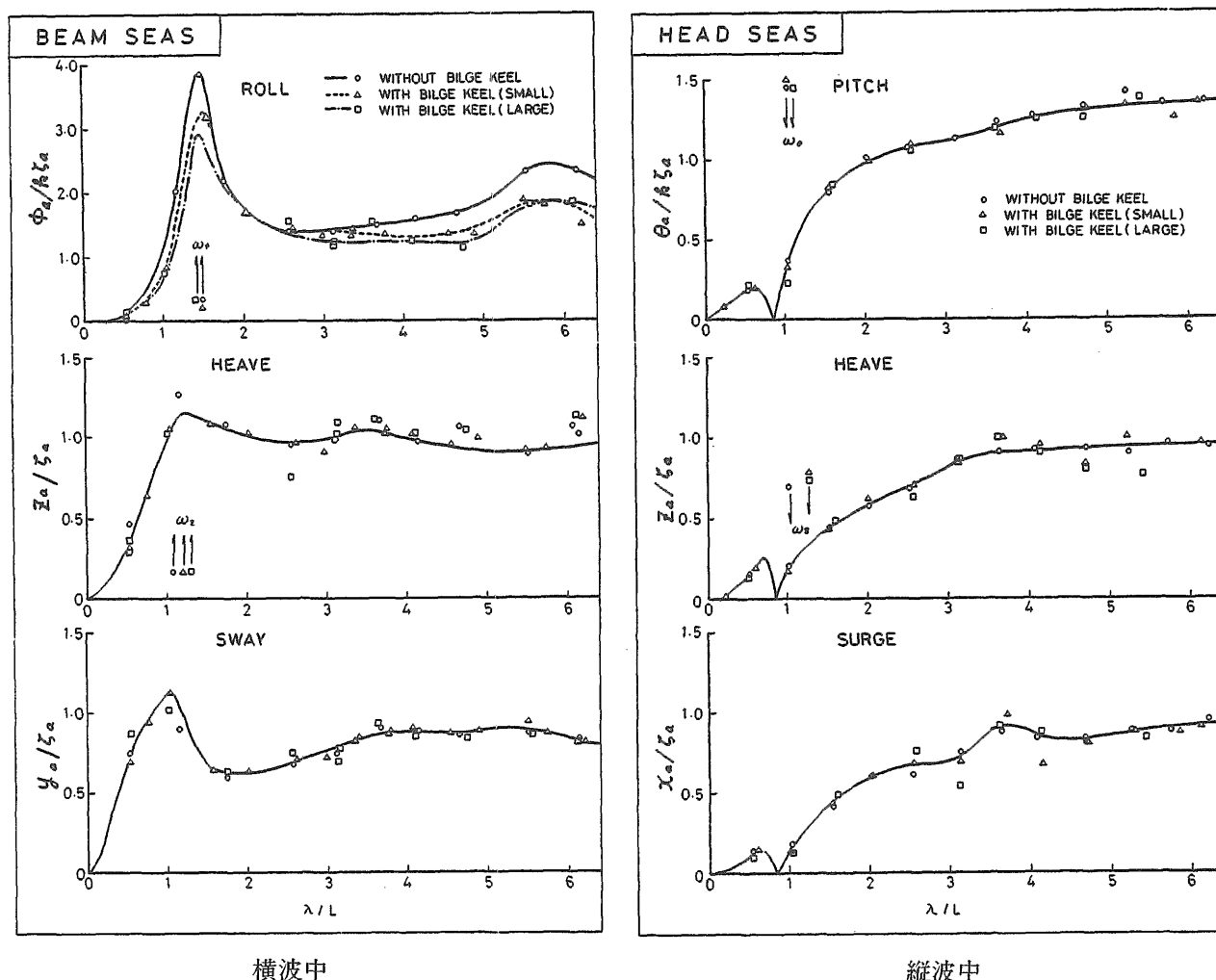


図3-7 供試模型<sup>40)</sup>

第一義的に考慮するのが妥当である。先に述べたように表3-3から冬季の日本海の最多波周期は6~8秒、波長は56~100m、中間の波周期7秒に対して波長76mである。一方、本船の横波中と縦波中の動揺の応答関数を図3-8に示す。この図より、波浪条件が $\lambda/L=1.5$  ( $\lambda$ :波長、 $L$ :船長) 以下の場合、その動揺応答は縦波中、横波中ともに良好である。

したがって、バージ型船舶の主要寸法を決定する際、船長は約70m以上で、経済性等を考慮すると70~90mの範囲が妥当である。実船を模型実験の供試模型と相似形と仮定すると、幅28mで型深さは7mと大きく、海面

図3-8 動揺の応答関数<sup>40)</sup>

からデッキまでの距離が大きすぎる。また、安易に型深さを小さくすると船体の曲げ剛性が小さくなるので検討を要する。

### 3.1.3.3 ムーンプール型船型

高波浪下においても静穏な船内油回収作業水面を創出するための有力な船型としてムーンプール型船型が考えられる。ムーンプールは、海洋関連産業における応用分野で意外に幅広く利用されており、その研究としてはムーンプールの開口部の水面の応答の推定法が主であった。最近では、浮体式石油生産システム (FPSO: Floating Production Storage and Offloading System) における係留施設 (Turret Mooring) のために船体に開口部を有するものが多くみられる。ムーンプールは、ROV (Remote Operating Vehicle) などの海中作業用の機器の揚げ下ろしに狭い領域でも静穏な海水面が必要であることからその有用性がある。潮流や風の影響を受け難く、波の上下方向の作用については一種の

低周波フィルターのような働きをするものである。また、ムーンプールを船体中央に配置すれば、縦揺れや横揺れの影響を少なくできる。しかしながら、ムーンプールの設計如何によっては、ムーンプール内の相対水位変動が共振を引き起こす可能性も有していることも忘れてはならない。ここで想定するムーンプール船型は、従来のムーンプールが外海と遮断されているのに対し、外海とムーンプールがつながっている点に特徴がある。ムーンプールの水面の相対水位の最適設計をするためには、まず開口部水面に対する強制力のメカニズムを解明することが重要であり、以下に従来の研究<sup>41)</sup>を概観する。

#### (1) ムーンプール開口部水面の応答

##### (a) 同調周波数

ムーンプールを有することによって船体の応答がどのように変化するかは大きな問題ではなく、開口部水面の相対水位変動について考察する。まず、開口部水

面を動揺させる外部からの強制力のメカニズムにふれると、船体まわりの圧力変動分布などの要素によってムーンプールの開口部水面は影響を受ける。同調周波数は、船の喫水に依存し、通常は波の周波数よりも高

者の位相差が $180^\circ$  となると、船体とムーンプールに関する連成成分が強くなる。同調周波数を越えた高周波数領域でこのような現象が起こり、ムーンプール水面の相対水位変動が極度に大きくなる。

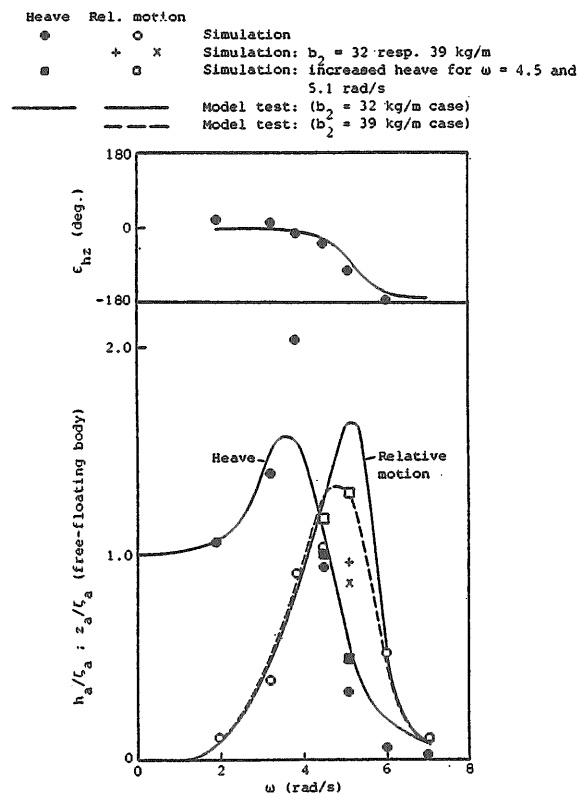


図3-9 向波中における船体内のムーンプールのシミュレーション計算と模型実験との比較<sup>41)</sup>

いことが知られている。図3-9に示すように、上下動揺の同調周波数と比較すると開口部水面の相対運動の同調周波数は高くなる。

#### (b) ダンピングのメカニズム

ムーンプールの開口部水面の相対水位に関する減衰力については、開口部底面から生ずる渦によって発生する粘性圧力減衰が大きい。これは、相対水位の速度の2乗に比例する項であり、摩擦などの他の要因による影響は粘性減衰と比較して小さい。しかしながら、これは通常計算では求めることはできない。

#### (2) 位相差の影響

船体運動特に上下運動とムーンプールの水面の相対水位は密接に関係し、その位相差は重要である。図3-9に示すように低周波数領域では、波浪強制力と上下運動は同位相である。これは、ムーンプールの相対水位の強制力と波浪強制力が相殺するからである。逆に両

#### (3) ダンピングプレート

開口部の水面の上下動を低減するために、開口部の内壁にフランジ（ダンピングプレート）を設ける方法がある。深さ方向のどの位置に設置すれば有効に水面変動を押さえることができるかを調査した実験的研究<sup>42)</sup>がある。それによると、開口部の下部付近に設置した場合、sharp edgeからの渦が非常に大きくダンピングプレートの効果が少なく、開口部の底から若干上部に設置した場合、2次の減衰成分の寄与が大きいといえる。

図3-10に示すように、ダンピングプレートが存在すると動揺ピーク周波数での応答が大きく低下することがわかる。また図3-11で示すとおり、この効果は動揺基本周波数よりも高次の周波数、特に2次周波数成分の低減に大きく寄与している。図3-12に波とムーンプール内の相対運動の時系列を示す。この図から、入射波に対してムーンプール内の相対水位が小さくなっていることがわかる。

さらに、ムーンプールを有する船型において、より系統的に油回収効率を増大させる工夫として以下のようなものが考えられる。

#### (4) ムーンプール型船型の波浪静穏化技術

##### (a) ムーンプールへ入射する波浪の低減技術<sup>43) 44)</sup>

波浪制御装置を水面上に設置すると反射波が問題となるため、水面下に制御系を置くのが妥当である。例えば、没水平板型消波装置及び可動板型Radiation Wave Generatorによる波浪制御等がそれである。

##### (b) ムーンプール内部の水面の静穏化技術<sup>45) 46) 47) 48)</sup>

ムーンプールの水面周囲に波浪エネルギー吸収装置を設置する。しかしながら、エネルギー吸収装置が動揺するので、装置自体の動揺を考慮に入れた最適制御が必要となり、複雑な問題となる。波浪エネルギー吸収に必要なパワーを考慮すると、経済的観点から実現は非常に難しいと考えられる。

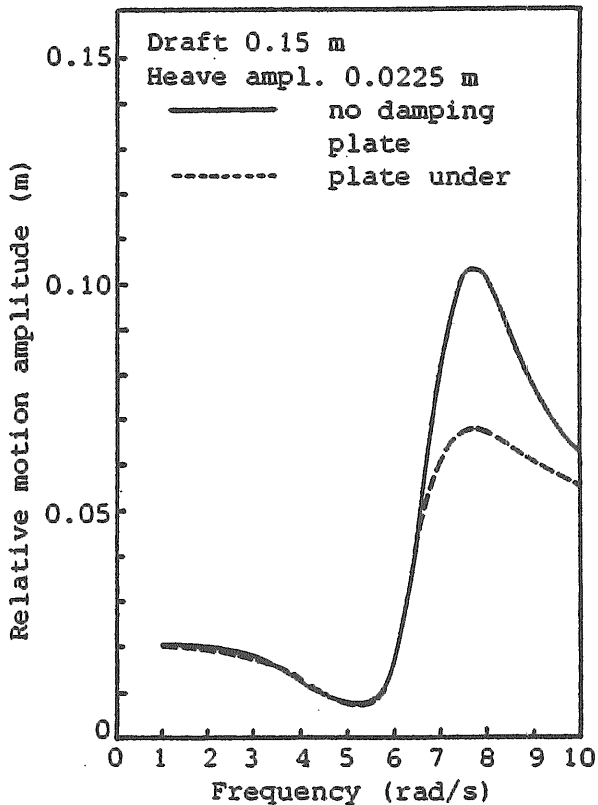


図3-10 ムーンプール内の相対運動に対するダンピングプレートの効果<sup>42)</sup>

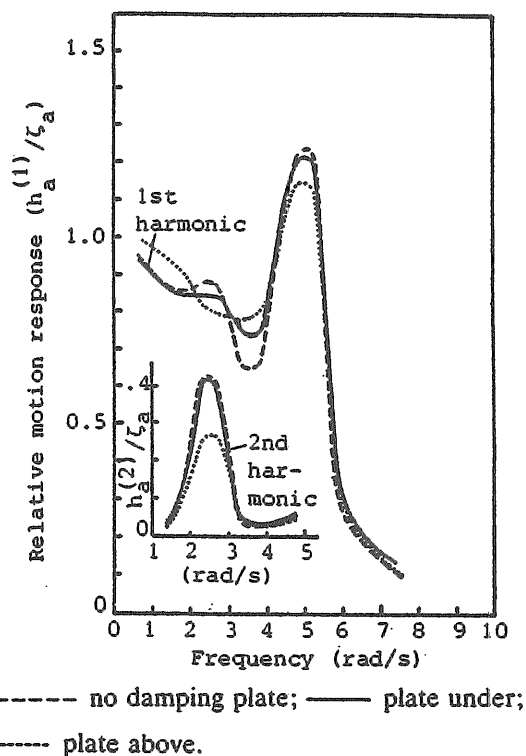


図3-11 波浪中の拘束浮体に対するダンピングプレートの効果<sup>42)</sup>

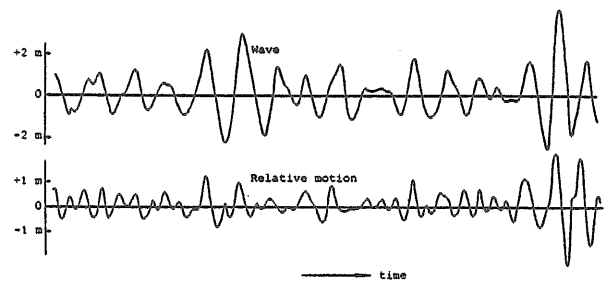


図3-12 波とムーンプール内の相対運動との時系列<sup>42)</sup>

### 3.2 高粘度油回収技術の検討

油回収装置の現状については、第2章においてその有効性について調査した。

また、船舶技術研究所では、これまでも油タンクの洗浄、油水分離器、流出油の探索、流出油の漂流・拡散、流出油の拡散防止、流出油の回収等、海洋の油汚染防止のための研究を行ってきた。ここでは高粘度油回収技術検討のために、流出油拡散防止と機械的流出油回収に関する比較的最近の研究を振り返る。

流出油拡散防止のための研究では、二次元模型実験によりオイルフェンスの滞油性能について調べ、流れに対する滞油性能は油層フルード数と無次元油層長さで表現できることを明らかにした。さらに、オイルフェンスの漏油防止のために格子状の網を付加することにより、流速にして50%以上の性能向上が図れることを確認した<sup>6) 52)</sup>。また、水中より気泡を噴出し、気泡が水面に達して向きを変え表面流を作るという特徴を利用して、流出油の封じ込めに利用できるかどうかを実験によって確認した。模擬油を利用した実験により漏油を阻止できる限界流速を明らかにし、この方式の適用すべき方向性について見通しを得た<sup>49)</sup>。流出油回収技術では、付着を原理とするものについて研究を行い、油の付着にベルトや回転円板などの油を付着させる材質の影響は少ないことを実験により明らかにした。また、回収量が最大となるベルトの速度や円板の回転角速度を解析的に求めた<sup>7) 50)</sup>。

さらに、寒冷海域における油流出対応のための研究も現在行われているところである<sup>53)~57)</sup>。

当所でのこれまでの研究は、比較的静穏水面での技術であり、必ずしも高波浪下において風化・乳化した高粘度油を回収するためにおこなわれたものではなかったため、新たな検討を加える必要がある。そこで、以上の結果を考慮した上で、3.1項で検討した高波浪下でも稼働可能な船型の油回収船に搭載する油回収装置について、高粘度油にも対応可能で回収効率が良いと考えられる回収方式を本項で検討することにする。

### 3.2.1 油の性状変化

油の性状によって最適な回収方法が異なることから、油回収装置の開発研究にあたっては、油の性質や特性などを把握する必要がある。これまでに石油を中心とした油の流出後の性状変化に関する研究報告が多くなされている。例えば、北大<sup>58)</sup>、シップ&オーシャン財団<sup>59)</sup>及び石油連盟<sup>60)</sup>等が波浪中も含めた油の性状変化について研究している。その研究結果について、以下に箇条書きに整理して列挙する。

#### (1) 蒸発率

- ・ 蒸発量が面積に比例するため、波により蒸発面積が増えることから波浪中では平水中よりも若干高くなる<sup>59)</sup>。
- ・ 油膜厚さが薄いほど、速く蒸発する。実際の海域では、実験室よりも拡散が大きく蒸発量も大きい<sup>59)</sup>。
- ・ 波浪中では平水中よりも少し高くなるが、3日経過したあたりからの差は1~2%程度まで縮まる<sup>60)</sup>。
- ・ 海水温度が高いほど蒸発率は大きくなる<sup>60)</sup>。

#### (2) 含水率

- ・ 水の量が増えると水中油滴型から油中水滴型に転相するため、水の体積割合は0.75程度まで達する<sup>58)</sup>。
- ・ エマルジョンは安定しており自然の油水分離は起きない<sup>58)</sup>。
- ・ 平水中ではほとんど乳化が進行しないのに対して、波浪中では蒸発率がある程度の大きさを超えると急激に乳化が進行する<sup>59)</sup>。
- ・ 油の蒸発と乳化には密接な関係がある<sup>59)</sup>。
- ・ \* 含水率の増加は、油水界面に外部からエネルギーが加わって動揺・攪乱が生じ、油中の成分で界面活性剤的な役割を果たすといわれるアスファルテン等と水が結びつく化学的な結合と、蒸発により粘性が高くなった油の中に水滴がとりこまれて重力による分離が不可能となる物理的な混合とが相互に作用してもたらされと考えられる。
- ・ 30分を経過したあたりから急激に乳化が進行する。平水中より波浪中での乳化の進行は大きい<sup>60)</sup>。
- ・ 油の蒸発と乳化には密接な関係がある<sup>60)</sup>。
- ・ 1日経過した含水率がピークとなる。海水温度による差は顕著ではない<sup>60)</sup>。

#### (3) 粘度

油は温度が低いと粘度が高くなるが、油の種類により粘性変化が異なっている。温度と油との粘性変化の関係を図3-13<sup>57)</sup>に示す。

- ・ 純水、食塩水、海水を用いたC重油のエマルジョンの粘度にはほとんど差が無い<sup>58)</sup>。
- ・ 波浪中では、平水中と比較して粘度が時間とともに急激に増加する<sup>60)</sup>。波浪中では水が多く取り込まれるので粘度は油水混合物としての値となる。粘

度の変化には、蒸発率と含水率が密接に関係し、特に含水率の影響が大きい<sup>59)</sup>。

- ・ 海水温度が低い場合、2時間経過したところから既に1万(cP)をこえるようになる<sup>60)</sup>。

#### (4) 密度

- ・ 波浪中では、蒸発率が21.5%まではその2次曲線近似ができ、それを超えると直線的に増加する<sup>59)</sup>。
- ・ 波浪の有無、海水温度の高低による顕著な影響はみられない<sup>59)</sup>。

上記のような油の性状変化から、波浪中ではごく短

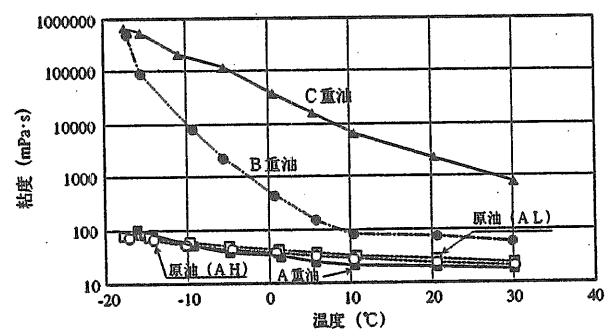


図3-13 油の粘度の温度依存性<sup>57)</sup>

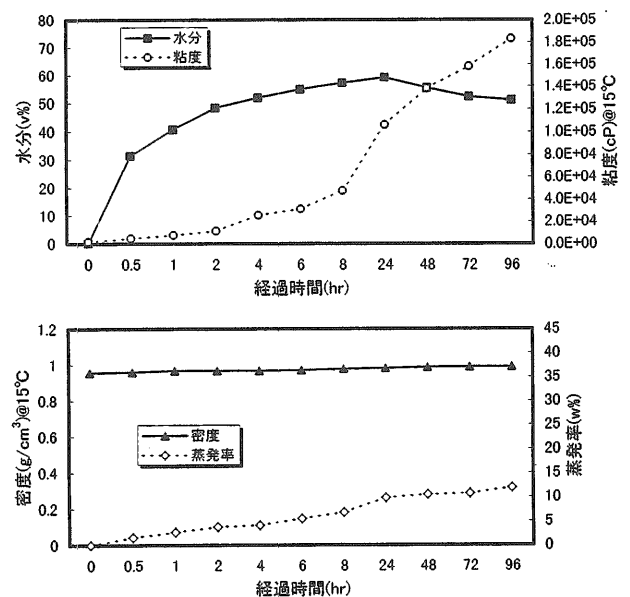


図3-14 流出油の性状変化 (C重油)<sup>60)</sup>



時間の間にムース化状態の高粘度油になる傾向があると考えられる。また、一例としてC重油の経時変化を図3-14<sup>60)</sup>に示す。

### 3.2.2 ナホトカ号油流出事故における油の性状変化

1997年1月2日、島根県隠岐島北北東110km付近で、荒天のため破断難破したナホトカ号から約6,240kl（推定）の重油が流出した<sup>61)</sup>。この事故は、沿岸から100km以上離れた海上で船体が破断難破したため、油は沖合いの風や波に曝されて、結局長く伸びた沿岸線に油濁の脅威をもたらした。船が破損したときに流出した重油は自然に分散し、直径1～10m程の大きさの乳化が著しく進んだ重油の層状物になり、沿岸に向けて漂流した。流出した油は中粘度で、海の波の作用による物理的な減損にも耐え得る安定性で、持続性の高い油中水滴型エマルジョンを形成した。そのエマルジョンの水分含有量が80%を超えたために、4～5倍に汚染物質の量が増加した。乳化油の持続性が高まったため、その状態のまま長い距離を漂流することができたために、汚染の被害が広域に及んだ<sup>62)</sup>。

搭載していた油の動粘度は50℃で137.46cSt（10℃換算約6,000cSt）、流動点が-17℃であったが、事故発生3日後に採取した漂流油の粘度は、12℃で約1,232,000cStに達していた<sup>63)</sup>。これは前に述べた油の経時変化から見ると、油の粘度の特性を表しているように思われる。このように流出油の絶対量に加えて乳化油の粘度が高くなったため、ポンプやパイプの目詰まりを度々生じさせ、回収された廃棄物の取扱い、汲み出し、運搬、処分に問題が生じた<sup>62)</sup>。

### 3.2.3 高粘度油回収技術の方式

ムーンプール内に収集した高粘度油を回収するのに有効であると考えられる方式として、以下の3つが挙げられる。

#### (a) バケツ方式（底は水抜きのためメッシュスクリーン）

長所：機構が簡単で、取扱いが容易である。水分が少ないので油水分離が必要ない。

短所：ムーンプールの面積に対しバケツが小さいと、効率が悪くなる。バケツを大きくすると大規模設備になり、波浪中の作業は危険である。

#### (b) 吸引（投げ込み）式ポンプ

長所：比較的小型で取り扱いが容易である。配管をストレージタンクまで導入することにより、周辺機械が必要ない。

短所：高粘度油を吸い出すためにはパワーが必要であり、ゴミによって配管系統が詰まるおそれがある。また、ムーンプール内海面上でのポンプの

挙動制御装置が必要である。

#### (c) オーバーフロー堰式回収

長所：堰には表面部分が集まりやすいので、水より比重の小さい油の収集が容易である。ゴミは堰から流出後に除去できるので、ゴミ対策が比較的容易である。

短所：海水を多く含むので油水分離が必要である。また、ムーンプール内の海面と船の運動が同期するとは限らず、堰に対する制御が必要である。

上記の3つの方式が考えられ、それぞれの方式の長所、短所を吟味、検討した上で、高粘度油回収の技術開発に向けて、研究を進めていくことが必要である。

## 4. まとめ

本報告書では流出油回収技術の現状について調査し、当研究所における今後の研究課題について検討した。

その結果、現有の油回収船・油回収装置では、高波浪下または高粘度の油に対しては回収不可能であるか、または大きく回収効率が低下する現状が明らかになった。したがって、高波浪下または高粘度の油に対する油回収技術の向上が望まれる。

そこで、油回収装置が稼働できる静穏水域を創り出すため、ムーンプールが有効であると考え、従来のムーンプール型船型について検討した。外海とムーンプールがリンクした船型について、高波浪下でも静穏水域を創り出すことができるかの検討は今後の課題である。また、現有の油回収装置を高粘度油に対して使用した場合の回収能力について検討し、油回収装置に関しては、高粘度に対応できるように改良や開発などの余地があることがわかった。

油回収船としては、ムーンプール型船型と高粘度油に対応した油回収装置の組み合わせが有効であると考え、今後このような油回収船の基礎的研究を進めていく予定である。

最後に本報告書をまとめるにあたり、参考資料やデータをご提供頂いた関係機関・団体の関係者の方々に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 運輸技術審議会 総合部会 流出油防除体制総合検討委員会：中間答申 流出油防除体制の強化について、1997.12
- 2) 海上災害防止センター：海上防災, No.93-95, 海上防災事業者協会, 1997
- 3) 石油連盟：油流出に関する国際シンポジウム - ナホトカ号事故対応の教訓を生かすために -, 1997.7

- 4) (財)シップ・アンド・オーシャン財団: International Symposium on Marine Oil Spill Response (海洋における油流出事故に関する国際専門家会議 講演予稿集), 1997.7
- 5) 瀬尾、稲見、渡辺、加藤、松島: 流出油対策実験について, 昭和45年度春季(第15回)船舶技術研究所研究発表会講演集, 1970.5, pp.64-67
- 6) 上田浩一、植田靖夫、山之内博、渡辺和夫: オイルフェンスの漏油防止, 船舶技術研究所報告第22巻第5号, 1985.9, pp.33-44
- 7) 上田浩一、山之内博、植田靖夫: 付着による流出油の回収, 船舶技術研究所報告第24巻第5号, 1987.9, pp.1-13
- 8) 大坪英臣: (3)衝突・座礁事故と船体強度, 「船の強度と災害防止」シンポジウム, 日本造船学会, 1995
- 9) 石油連盟: 石油あれこれ, <http://www.paj.or.jp/>, 1998.6
- 10) INTERTANKO: Sources of Oil Pollution, <http://www.intertanko.com/public/sources.htm>
- 11) Smithsonian Institution's OCEAN PLANET: Oil Pollution, [http://seawifs.gsfo.gov:80/OCEAN\\_PLANET/HTML/peril\\_oil\\_pollution.html](http://seawifs.gsfo.gov:80/OCEAN_PLANET/HTML/peril_oil_pollution.html)
- 12) ITOPF: Sources of Oil Pollution, <http://www.soton.ac.uk/~engenvir/environment/water/oil.sources.html>
- 13) IMO: MARPOL 73/78, Annex I Reg.13E, Consolidated Edition, 1991
- 14) 造船業基盤整備事業協会: 船舶の衝突・座礁事故データベース構築等に関する調査報告書(平成4年度), 1993
- 15) ITOPF: Statistics, <http://www.itopf.com/stats.html>, 1998.6
- 16) Oil Spill Intelligence Report: Oil Spill Involving More Than 10 Million Gallons, <http://www.cutter.com/osir/biglist.htm>, 1998.6
- 17) 石油公団、海上災害防止センター: 国家石油備蓄基地海上防災体制に関する報告書(平成7年度), 1996
- 18) D.A.Toenshoff Jr., U.S.A.: MSRC-a Company of Change to Meet the Needs of its Customers
- 19) ボン協定(Bonn Agreement), 油による北海汚染対策の協力に関する協定, 処理目標は15,000トンの油を3日間で回収(15,000トンは油タンカーのタンク2個分と想定したもの), バルト海においては10,000トンを10日間で回収
- 20) ITOPF: 海洋油流出対応, 石油連盟翻訳, 1997.6
- 21) 海上災害防止センター: 油濁防除マニュアル[その4], 海上防災, No.63, 1989, 海上防災事業者協会, p.16
- 22) 海上災害防止センター: 外洋型大型油回収装置トランスレックシステム, 海上防災, No.97, 1998, 海上防災事業者協会, p.46
- 23) Environment Canada: The Basics of Oil Spill Clean Up, Supply and Services Canada, 1979, pp.72-86
- 24) J. W. Doerffer: Oil Spill Response in the Marine Environment, Pergamon Press, 1992, pp.159-222
- 25) Robert Schulze Environmental Consultant Inc.: World Catalog of Oil Spill Response Products, Fourth Edition, 1993, pp. 2-1 - 2-31
- 26) Marshall Sitting: Petroleum Transportation and Production Oil Spill and Waste Treatment, Noyes Data Corporation, 1978, pp.257-302
- 27) Robert Schulze Environmental Consultant Inc.: World Catalog of Oil Spill Response Products, Fourth Edition, 1993, p. 2-149
- 28) 運輸省海上技術安全局技術課: 国内の油回収装置, 技術課技術資料, 1997
- 29) 運輸省海上技術安全局技術課: 国外の油回収装置・オイルフェンス, 技術課技術資料, 1997
- 30) Jon O. Rodal: Offshore Oil Spill Contingency in NORWAY, International Symposium on Marine Oil Spill Response, (財)シップ・アンド・オーシャン財団, 1997.7, pp.111-117, pp.257-264
- 31) 海上災害防止センター: 海上防災ハンドブック, 海上防災, No.90-91, 1996.9, 海上防災事業者協会,
- 32) JETRO: 欧州における油回収船リスト, JETRO(London) 技術資料, 1997
- 33) G.F. Clauss, W.L. Kuhnlein: Hydrodynamic Problems of Offshore Oil Skimming Systems, Technical University of Berlin, 1986
- 34) O. Krause, G. Clauss, D. Ey: Oil Skimming Systems - Concepts and Practical Experiences, International Shipping & Marine Technology Market with Congress(SMM '90), HANSA, 127.Jahrgang 1990 Nr.22, pp.1516-1522
- 35) 気象庁: 気象庁波浪資料第1号, 1997.3
- 36) 永井紀彦ほか: 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 1995), 港湾技研資料No.859, 1997
- 37) 高橋智晴ほか: 沿岸波浪の統計的性質, 第29回海岸工学講演会論文集, 1982, pp.11-15
- 38) 菅原一晃ほか: 沿岸波浪観測15ヶ年統計(昭和45年~昭和59年), 港湾技研資料No.554, 1986
- 39) Nils Salvesen: Seakeeping Characteristics of Small-Waterplane-Area-Twin-Hull Ships, Journal of Hydronautics, Vol.7, No.1, 1973
- 40) 安藤定雄、山川賢次: 作業船の動揺試験, 昭和46年度秋季(第18回)船舶技術研究所研究発表会講演集, 1971.11, pp.53-56
- 41) Aalbers, A. B.: The Water Motions in a Moonpool, Ocean Engineering, Vol.11, No.6, 1984, pp.557-579

- 42) 福田和廣：船体を貫通する垂直方向の開口部における流体の挙動とその影響，日本造船学会論文集，第141号，1977，pp.107-122
- 43) Shih, Su-Liek and Fang, Hui-Ming: Wave Energy Dissipation Due to the Submerged Elastic Structure, Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering conference, 1996, pp.577-580
- 44) Takaki, Mikio, et. Al.: Ocean Wave Control and Renewal of Seawater by Means of Submerged Horizontal Plates, OMAE 1992, pp.9-16
- 45) 経塚雄策：吸収式造波装置の研究，西部造船会会報第70号，1985，pp.77-88
- 46) 木下 健，高岩千人：反射波吸収型造波装置の動作原理と性能，第2回波浪エネルギー利用シンポジウム，1987，pp.171-180
- 47) 中村彰一，内藤 林：不規則波のエネルギー吸収について，第1回波浪エネルギー利用シンポジウム，1984，pp.275-284
- 48) 内藤 林，黄 俊，森 淳彦，中村彰一：新しい消波装置の特性，第2回波浪エネルギー利用シンポジウム，1987，pp.181-189
- 49) 原 正一，伊飼通明，波江貞弘：水中気泡群によって誘起される二次元噴流-気泡噴流型油拡散防止装置の基礎的研究-，船舶技術研究所報告第22巻第3号，1985，pp.107-131
- 50) 植田靖夫，渡辺和夫，上田浩一，山之内博：ベクトルによる油回収について，昭和52年度春季（第29回）船舶技術研究所研究発表会講演集，1977.5, pp.135-138
- 51) 上田浩一：汚染質の拡散，昭和57年度春季（第39回）船舶技術研究所研究発表会講演集，1982.5, pp.69-72
- 52) 上田浩一，渡辺和夫：流出油拡散防止の研究，昭和59年度春季（第43回）船舶技術研究所研究発表会講演集，1984.5, pp.152-155
- 53) 泉山 耕，成田秀明，吉田三雄，金田成雄，宇都正太郎，田村兼吉，下田春人：氷板下への油流出に関する基礎的実験結果について，平成8年度秋季（第68回）船舶技術研究所研究発表会講演集，1996.12, pp.48-51
- 54) 成田秀明，山口真裕，上田浩一，在田正義：寒冷海域での油汚染に関する研究計画，平成9年度秋季（第70回）船舶技術研究所研究発表会講演集，1997.12, pp.184-189
- 55) 上田浩一，前田利雄，高島逸男，山之内博，桜井昭男：既存の油回収・処理技術の寒冷海域適応性の評価-第1報 油層流れの堰止め-平成9年度秋季（第70回）船舶技術研究所研究発表会講演集，1997.12, pp.190-193
- 56) 泉山 耕，成田秀明，金田成雄，若生大輔：氷板下における油流出の拡散について，平成9年度秋季（第70回）船舶技術研究所研究発表会講演集，1997.12, pp.194-199
- 57) 前田利雄，上田浩一，高島逸男，桜井昭男：寒冷海域における流出油の性状変化，平成9年度秋季（第70回）船舶技術研究所研究発表会講演集，1997.12, pp.200-203
- 58) 朝倉國臣，池田朋介，中島 巖：流出重油の粘度増加と油面拡張，資源・素材'97C資料，1997，pp.63-66
- 59) シップ&オーシャン財団：海上流出原油の風化について，シップ&オーシャン財団報告書，1995.8
- 60) 石油連盟：流出油の経時変化に関する実験調査報告書，1993.3
- 61) 海上災害防止センター：「ナホトカ号」大規模流出油事故の概要，海上防災，No.93, 1997，海上防災事業者協会
- 62) T.H.Moller: テクニカル・アドバイザーの立場から見たナホトカ号石油流出事故の対応と問題点，油流出に関する国際シンポジウム，1997.7
- 63) Suzuki, Y: ナホトカ号重油流出事故における油回収処理と使用資機材，Proceedings of International Symposium on Marine Oil Spill Response, 1997，pp.173-180
- 64) Bianchi, Ralph A.: The Impact of Regulations on the Development of Oil Spill Recovery Vessels, Oil Spill Conference 1993, pp.667-674
- 65) Brown, H. M. and R. H. Goodman: The Recovery of Spilled Heavy Oil with Fish Netting, Oil Spill Conference 1989, pp.123-126
- 66) Chung, Jin S.: Added Mass and Damping on an Oscillating Surface-Piercing Column with a Horizontal Cylinder: Square Cross Sections, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 5, No.3, 1995, pp.595-602
- 67) Clauss, G. F. and W. L. Kuhnlein: Efficiency of Selected Oil Skimming Systems in Irregular Seas, Oil Spill Conference 1991, pp.115-124
- 68) Clauss, G.: Hydrodynamic Problems of Offshore Oil Skimming Systems, OMAE 1986, pp.540-546
- 69) Day, A. H., Lee, B. S., and Kuo, C. : The Prediction of Moonpool Response —Water Column Oscillation and Hydrodynamic Forces—, The Royal Institution of Naval Architects, 1988, pp.317-329
- 70) Day, A. H.: The Design of Moonpools for Subsea Operations, Marine Technology, Vol.27, No.3, 1990, pp.167-179
- 71) English, J. W.: A Means of Reducing the Oscillations in Drillwells Caused by Vessels' Forward Speed, The Naval Architect, 1976, pp.88-90
- 72) Farlow, J. S., and J. M. Cunningham: Oil Spill Research and Development Needs for the 1990s, Oil

- Spill Conference 1989, pp.261-263
- 73) Frank, W.: Oscillation of Cylinders in or below the Free Surface of Deep Fluids, Hydromechanics Laboratory Research and Development Report, 1967
  - 74) Fung, D. P. K.: Added Mass and Damping of Circular Moonpools, Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering conference, 1996, pp.247-254
  - 75) 福井県立大学海洋生物資源学科重油流出事故研究班: ナホトカ号重油流出事故について(第1報~第3報), <http://www.fpu.ac.jp/index-j.html>, 1997
  - 76) Kerambrun, L. and G. Peigne: Analysis of Oil Recovery Vessels Used Worldwide, Oil Spill Conference 1991, pp.125-130
  - 77) Kowalski, Tadeusz: Oil Spill Cleanup in Severe Weather and Open Ocean Conditions, Oil Spill Conference 1993, pp.787-859
  - 78) 清川哲志, 三俣正和, 田中正博, 大山 巧: 可動板型 Radiation Wave Generatorによる波浪制御, 第34回海岸工学講演会論文集, 1987, pp.472-476
  - 79) Lee, B. S., Day, A. H.: The Water Column Oscillation in a Duct Between Two Half Ship Section Barriers, Journal of Ship Research, Vol. 30, No. 2, 1986, pp.127-133
  - 80) Lunel, T.: Response to the Pollution Caused by the SEA EMPRESS Incident and the Shoreline Restoration Process, Proceedings of International Symposium on Marine Oil Spill Response, 1997, pp.141-145
  - 81) Milgram, Jerome H.: Active Water-Wave Absorbers, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 43, part 4, 1970, pp.845-859
  - 82) 牧 秀明, 佐々木哲也: 原油の分析手法と流出油の特性, 水環境学会誌, Vol.20, No.10, 1997, pp.9-13
  - 83) Newman, J. N.: Interaction of Water Waves with Two Closely Spaced Vertical Obstacles, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 66, part 1, 1974, pp.97-106
  - 84) 長塚誠治: 日本海沿岸のタンカーの石油流出や座礁船放置などの外国船海難について, 海運, 1997年3月号, pp.44-50
  - 85) 緒方正名, 藤澤邦康: 石油汚染の海洋生物への影響評価, 水環境学会誌, Vol.20, No.10, 1997, pp.14-18
  - 86) 岡田光豊: PSCの現状と課題 —その1— 東京MOUの仕組みと活動, 海運, 1997年5月号, pp.50-54
  - 87) 岡市友利: 石油流出事故による海洋汚染の機構, 水環境学会誌, Vol.20, No.10, 1997, pp.2-8
  - 88) 岡本博之: 流出油回収の現状と問題点, 資源・素材'97C資料, 1997, pp.75-77
  - 89) 大西章敬: 大型曳航救助船「航洋丸」の代替船建造に着手, 海運, 1996年11月号, pp.30-34
  - 90) Qiu, Dahon and Wang Lisheng: Numerical and Experimental Research for Wave Damping Over a Submerged Porous Breakwater, Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering conference, 1996, pp.572-576
  - 91) Rørdal, J. O.: Offshore Oil Spill Contingency in Norway, Proceedings of International Symposium on Marine Oil Spill Response, 1997, pp.131-137
  - 92) Schroh, K.: Oil Spill Strategy in the Federal Republic of Germany, New Technical Developments in Mechanical Spill Response, Oil Spill Conference 1989, pp.261-271
  - 93) 鈴木 勲, 三木憲次郎, 矢木孝宣: 油回収船まわりの油層の流れ, 日本造船学会論文集, 第167号, 1990, pp.55-68
  - 94) 運輸省第五港湾建設局海域整備課: ロシアタンカー流出油事故における「清龍丸」の油回収緊急出動, 作業船第232号, 1997, pp.26-31
  - 95) Walker, Michael, et. Al.: Comparison of Observed and Predicted Changes to Oil after Spills, Oil Spill Conference 1993, pp.389-393
  - 96) 渡辺正孝: 流出油の回収技術および汚染修復技術, 水環境学会誌, Vol.20, No.10, 1997, pp.19-22
  - 97) Yip, T. L. and Chwang, T.: A Pitching Plate as an Active Water-Wave Controller, Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering conference, 1996, pp.408-413
  - 98) 山本 孝: ナホトカ号事故と船舶安全確保の新たな仕組み, 海運, 1997年6月号, p.11
  - 99) 「95年の漏油事故は過去最小を記録」, 海運, 1996年10月号, pp.74-77
  - 100) 「ナホトカ号事故原因調査結果発表」, 海運, 1997年9月号, pp.58-60
  - 101) 「日本海におけるタンカーの重油流出事故」, 海運, 1997年3月号, p.43
  - 102) Suzuki, Yoshio: Recovery of Oil Spilled from the Nakhodka and Materials and Equipment used, International Symposium on Marine Oil Spill Response 1997
  - 103) Lunel, T.: Response to the Pollution Caused by the Sea Empress, Incident and the Shoreline Restoration Process, International Symposium on Marine Oil Spill Response 1997
  - 104) 海上災害防止センター油防除式材性能評価調査研究委員会第2回物理的処理部会部内資料
  - 105) Toenshoff Jr., D. A.: MSRC-a Company of Change to Meet the Needs of its Customers
  - 106) 石油公団、海上災害防止センター: 国家石油備蓄基地海上防災体制整備に関する報告書(平成7年度), 1996
  - 107) Evans, D. V. and Linton C. M.: Submerged Floating

Breakwaters, pp.279-285

- 108) むつ小川原石油備蓄株式会社: 油回収船第三たかほこ丸 パンフレット
- 109) Spangeberg, Sfren and Jacobson, Kofoed: Reduction of the Water Motion in the Moonpool, Proceedings of Marine Technology, 1983, pp.1-12