

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

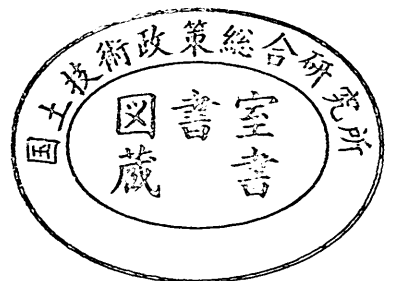
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 21

NO. 2

JUNE 1982

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第 21 卷 第 2 号 (Vol. 21, No. 2), 1982 年 6 月 (June 1982)

目 次 (CONTENTS)

1. Theoretical Properties of Oblique Waves Generated by Serpent-type Wave-makersTomotsuka TAKAYAMA..... 3
(造波機によって発生する斜め波の特性について高山知司)
2. レーザー・ドップラー流速計による砕波帯内の流速場の構造の解明
.....灘岡和夫・近藤隆道・田中則男..... 49
(The Structure of Velocity Field within the Surf Zone Revealed by Means of Laser-Doppler Anemometry
.....Kazuo NADAOKA, Takamichi KONDOH and Norio TANAKA)
3. プイ係留船舶の荒天時の振れ回り運動.....鈴木康正・諸石一幸..... 107
(On the Slow Motions of Ships Moored to Single-point Mooring Systems
..... Yasumasa SUZUKI and Kazuyuki MOROISHI)
4. 各種消波工による越波流量の減少効果
.....高山知司・永井紀彦・西田一彦..... 151
(Decrease of Wave Overtopping Amount due to Seawalls of Low Crest Types
..... Tomotsuka TAKAYAMA, Toshihiko NAGAI and Kazuhiko NISHIDA)
5. コンクリート舗装の目地部における荷重伝達機能
.....福手 勤・八谷好高・山崎英男..... 207
(Efficiency of Load Transfer at Joints in Concrete Pavements
..... Tsutomu FUKUTE, Yoshitaka HACHIYA and Hideo YAMAZAKI)
6. 7年間海洋環境下に暴露したプレストレストコンクリートはりの耐海水性につ
いて.....大即信明・下沢 治..... 237
(The Study on the Durability of PC beams after 7 Years' Exposure in Marine En-
vironment.....Nobuaki OHTSUKI and Osamu SHIMOZAWA)
7. 港湾経済効果の計測手法.....中野 勉・稲村 肇..... 261
(Development and Application of Synthetic Economic Evaluation Model for Port
PlanningTsutomu NAKANO and Hajime INAMURA)
8. 付着油除去システムの開発実験.....奥出 律・松本 茂..... 315
(Development of Removal System for Spilt Oil Sticking to Beaches and Coastal
StructuresTadasu OKUDE and Shigeru MATSUMOTO)

8. 付着油除去システムの開発実験

奥 出 律*・松 本 茂**

要 旨

本研究は、岩礁や護岸、海浜などに漂着し付着した流出油の除去技術の開発を目的としたものである。

自然岩礁や護岸等港湾構造物に付着した流出油を除去する方法として水ジェット法を適用し、その付着油はく離性能を調べた。実験結果は、噴流の運動量則より導いた付着油はく離力変数 f_j によって評価した。水ジェットを単独噴射して付着油をはく離する場合、 $f_j=100$ で約 80% の付着油はく離率が期待できることがわかった。

水ジェット法の性能を向上させるために、水ジェットに砂粒子を混入する砂混入2相ジェット法を提案した。その実験結果では、砂混入ジェット法は付着油のはく離作用に顕著な効果を有することが明らかになった。例えば、水ジェット単独噴射の場合に比べ、 $1/10\sim 1/20$ の f_j の値で同程度の付着油はく離率を得ることができた。

一方、海浜砂に付着した流出油を除去する方法として超音波洗浄法の性能を調べ、実用システムとして、(砂・油水)スラリージェット・超音波洗浄併用システムを開発した。本油汚染砂油分除去システムは、低濃度油汚染砂 (3,500~4,500 mgf oil/kgf sand) および高濃度汚染砂 (23,000~54,000 mgf oil/kgf sand) に対して、いずれも 90% 以上の油分除去率を示した。

また、流出油で汚染された自然海浜において、洗浄を必要とする油付着砂の範囲と量を推定するために、流出油の海浜への付着機構に関する実験を行うとともに、油の付着した海浜砂とごみを分離する技術についても言及した。

* 校材部 特殊作業船開発室長

** 校材部 特殊作業船開発室

8. Development of Removal System for Spilt Oil Sticking to Beaches and Coastal Structures

Tadasu OKUDE*
Shigeru MATSUMOTO**

Synopsis

The aim of this study is to develop a removal system for spilt oil sticking to beaches and coastal structures.

Adopting a water jet method for stuck oil on reefs, beaches and coastal structures, authors examined its oil removal efficiency. The experimental result was discussed by an oil removal factor f_j , which was derived from a law of conservation of momentum. Within the present study, an oil removal efficiency of water jet was expected to be 80 per cent when f_j was approximately 100.

It was possible to increase its efficiency by mixing sand particles into the water jet. Compared with the test result of water jet alone, sand-mixed water jet showed the same amount of removal efficiency with a smaller value of f_j , or less than 1/10 to 1/20 of that.

For the purpose of restoration of beaches contaminated by oil, authors examined an availability of ultrasonic wave washing method and proposed a slurry jet method with the aid of ultrasonic wave washing method. This newly developed system showed a good oil removal efficiency, or over 90 per cent, for heavily oil-contaminated beach sand (23,000~54,000 mgf oil/kgf sand).

In this paper another discussion is carried out concerning an oil contamination distribution on the seashore and oil infiltration into beach sand, and separation technique of oil-contaminated rubbish from beach sand.

* Chief of the Working Craft Development Laboratory, Machinery Division

** Member of the Working Craft Development Laboratory, Machinery Division

目 次

要 旨	315
1. ま え が き	319
2. 岩礁・護岸等に付着した油の除去実験	319
2.1 水ジェット法による付着油はく離実験	319
2.2 実験結果と考察	324
3. 海浜における流出油の付着機構に関する実験	328
3.1 模型海浜による流出油付着実験	328
3.2 実験結果と考察	330
4. 海浜砂に付着した油の除去に関する基礎実験	333
4.1 超音波による油汚染砂の洗浄実験	333
4.2 実験結果と考察	334
5. 油汚染砂油分除去システムの開発に関する実験	337
5.1 油汚染砂油分除去システムの設計	337
5.2 油汚染砂油分除去実験	337
5.3 油汚染砂油分除去システムの性能	338
6. 実用化に対する技術的検討	341
7. ま と め	343
8. あ と が き	343
参考文献	343
記号一覧表	344
付 録	344

1. まえがき

昭和54年度の統計¹⁾²⁾によると、我が国の原油輸入量は2億8千万キロリットルに及んでいる。国内の生産量は56万キロリットルであるから、需要のほとんどを輸入に依存しているわけである。超大型タンカーによって海上輸送されてきたこの大量の石油は、日本各地の石油基地において昼夜荷役されているわけであるが、これと平行してほぼ同量の石油製品が再び内航海運により国内各港間を輸送されている。

一方、最近における国際的エネルギー危機に対応してナショナルセキュリティの見地から石油国家備蓄量の増大が重要な施策となっており、遊休タンカーを活用した海上石油備蓄、フローティングタンク方式による石油の大規模洋上備蓄、あるいは大陸棚における海底油田の開発など、数多くのプロジェクトが積極的に進められている。

大型タンカーや石油コンビナート、あるいは大規模な石油備蓄基地の事故により、万一、大量の石油が海上に流出した場合、その被害は測り知れないものがある(付録1)。幸い、我が国では昭和49年末の水島事故以来流出油による大規模な事故は発生していないが、その蓋然性は皆無ではない(付録2)。

流出油の防除対策としては、油の拡散を防止し、油が海面を浮遊している間に早期回収することがなによりも肝要である。しかし過去における事故例をみても、流出油は海上を漂流し、海岸線に漂着して海浜や磯、防波堤や護岸等を汚染するのが常である。そしてそのような付着による油汚染は、潮の干満あるいは波浪によって長期間にわたり海洋環境を汚染している。

海面に浮遊する油の回収技術については各方面でかなり積極的な研究開発が行われ実用化が図られている。しかしながら、海浜や岩礁、あるいは防波堤・護岸・岸壁などに漂着し付着した油の除去技術についてはほとんど研究されていない。

本研究はこの分野の防除技術の開発を目的として行ったもので、自然岩礁や護岸等の港湾構造物に付着する流出油の除去技術に関する研究と、海浜砂に付着した流出油の除去技術に関する研究を行った。

岩礁や護岸等に付着した油の除去方法としては、温水または熱水洗浄機を使用する方法がIMCOによる海洋油防除指針³⁾にみられるが、その定量的性能評価が明

らかでない。そこで、本研究では水ジェット法の付着油はく離性能を調べるとともに、その性能を向上させるために砂混入ジェット法の研究を行った。

一方、海浜砂に付着した油の除去に関する研究としては米国環境保全局が開発したFroth Flotation法があるが⁴⁾、本研究では超音波洗浄法を研究し、(砂・油水)スラリージェット・超音波洗浄併用法を開発した。

また、洗浄を必要とする油汚染砂の範囲と量を推定するために、海浜への流出油付着機構を模型実験により調べるとともに、油の付着した海浜砂とごみを分離する技術についても実験を行い、その実用性を検討した。

2. 岩礁・護岸等に付着した油の除去実験

2.1 水ジェット法による付着油はく離実験

(1) 実験要素

護岸や岸壁などの港湾構造物、あるいは海岸線の岩礁に漂着し付着した流出油の付着性状は、被付着物体の形状や表面粗度、付着油の油質やその経時変化特性などの諸要因によってかなり異なる。

付着油に関する現地調査の結果、付着油を直接除去する方法としていくつかの案が考えられた。そのひとつとして、スクレーパーなどの道具を用い機械的に削り取っていく方法があった。この方法は固化した付着油や比較的平坦な岩面に付着した油の除去に対しては有効と思われたが、凹凸の多い岩礁に対しては凹部に付着する油を完全に除去することが難しく、また作業性、作業能率の点でも問題が多いと評価された。一方、水ジェットを噴射し、その噴射力でもって物体表面から付着油を除去する方法を検討した。この方法は岩礁等の複雑な形状に対しても追従性がよく、作業性、作業能率、装置規模(機動性、経済性など)の点でもいろいろ利点を有しており、また付着油の除去が問題となる大量油流出直後であれば、付着油の流動性もまだ高く水ジェットの噴射力で十分油膜を除去することができると判断した。

水ジェットの噴射力を付着油の除去に利用する方法はオイルタンクの洗浄等に広く使用されているものの、自然岩礁等に付着したタール状の油に対する除去効果についてはまったく知られていない。そこで本研究では、流動性のきわめて小さい(固化した状態の)付着油の除去に重点を置き、開発を進めることとした。

水ジェット法により付着油を除去(物体表面より付着油を削ぎ取るという意味で、以下本研究では「はく離」

という)しようとする場合, そのほか離効果は付着油の性状と水ジェットの高射条件にすべて依存する。

水ジェットの高射条件に関しては次の実験要素がある。

- ① ノズル径
- ② ノズル形状
- ③ 高射流量
- ④ 高射圧力
- ⑤ 高射角度
- ⑥ 高射距離
- ⑦ 高射時間
- ⑧ 水温
- ⑨ 水質 (例えば, 油処理剤の添加, 砂の混入など)

本研究では, まず基礎実験として, これらの諸要素が付着油のほく離効果に及ぼす影響について調べ, 次のほく離効果を向上させるための実用化実験として, 実験規模を大形化し, 基礎実験の結果を検証する一方, 水ジェットに砂を混入し, 2相ジェットによる付着油のほく離効果を調べた。

(2) 実験装置および実験方法

a) 基礎実験

高圧水ジェット発生装置には小型ジェット洗浄装置を用いた。本装置は石油バーナーを装備しており, 高温高圧の高射の高射が可能である。その主要諸元は次のとおりである。

- 吐出圧力; 0~100 kgf/cm²
- 吐出量; 26.7 l/min (標準状態でノズル径 2 mm, 吐出圧力 80 kgf/cm² のとき)
- 吐出水温; 最大 85°C
- ノズル径; 2~6 mm

油を付着させる供試体には縦 15 cm×横 15 cm×長さ 30 cm の四角柱形モルタルブロック (単位体積重量 2.2~2.4 gf/cm³, 吸水率 3~5%) を用いた。油の付着作業は, まずモルタルブロックを温度 40°C で 24 時間乾燥し自然放冷したのち, その表面に油質の明確な油を均一に塗布し, 再度 40°C で 24 時間乾燥させ, 自然放置した。このため, 供試体表面の付着油には揮発性成分はなく, 油膜表面は乾燥固化した状態となっている。

付着油のほく離実験は, この供試体に水および温水ジェットを高射し, 高射前後における供試体表面の付着油量を測定してほく離率を求めた。表-2.1 に実験条件を示す。実験条件 (I) は, 前述の実験要素を概括的に調べた実験であり, 実験条件 (II) は, ほく離効果の大き

表-2.1 実験条件 (基礎実験)

	I	II
ノズル径	4 mm	3 mm
ノズル形状	直進形, 円形	直進形, 円形
高射角度	45°, 90°	90°
高射距離	40 mm	40 mm
高射時間	10 min, 20 min, 30 min	10 min, 20 min, 30 min
水温	8°C, 60°C	60°C
流量	21.7 l/min 26.8 l/min	21.7 l/min 26.8 l/min
高射圧力 (ノズル出口)	4.0 kgf/cm ² 6.0 kgf/cm ²	13.0 kgf/cm ² 19.0 kgf/cm ²
洗剤添加量	—	500 cc/min

い実験要素に絞って実験を行ったものである。

b) 実用化実験

水ジェット法による付着油のほく離効果の実用性を調べるとともに, ほく離効果の向上手法を検討した。

本実験に使用した装置は, 図-2.1 にその構成図を示すように, 水ジェットと砂混入ジェットの高射系統からなる。

水ジェットポンプには定格流量 1.0 m³/min, 全揚程

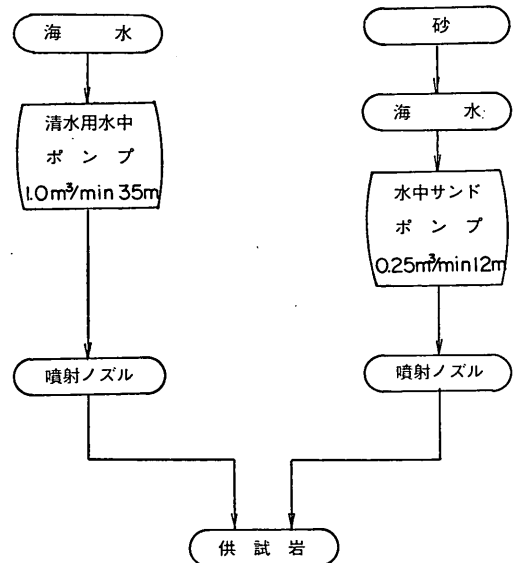


図-2.1 実用化実験装置系統図

付着油除去システムの開発実験

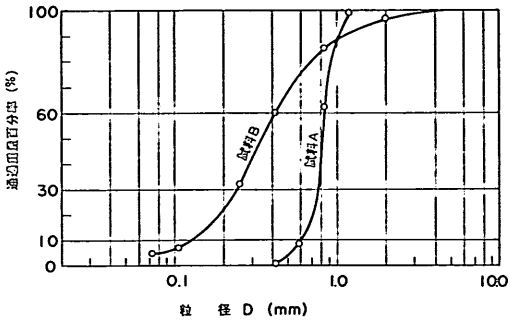


図-2.2 供試砂の粒度分布

35 m, 口径 100 mm の水中ポンプを使用し, 直径 21.4 mm の円形断面ノズルから噴射した。ノズルからの噴射流量は管路損失等のため 0.42 m³/min となったので, 流量弁を調整し 0.32~0.42 m³/min の範囲で実験条件を設定した。

砂混入ジェットポンプには定格流量 0.25 m³/min, 全揚程 12 m, 口径 50 mm の水中サンドポンプを使用し, 直径 22 mm の円形断面ノズルから噴射した。水中サンドポンプは 1 m×1 m×0.8 m (深さ) の鋼製タンクの中に設置し, ここへ 図-2.2 に示す粒度分布をもつ供試砂 A を定量づつ連続投入し, 吸引させ, スラリー濃度を一定 (体積濃度で平均 10%) に保った。水中サンドポンプの吐出流量は管路損失等のため流量低下を生じ 0.15 m³/min であった。したがって, ノズルからのスラリーの噴射速度は約 6.6 m/s となっている。

油を付着させる供試体にはモルタルブロックを主体に花崗岩, 珊瑚礁岩の自然岩石を使用し, これに一定量の油 (表-2.3 の C 重油) を付着して自然放置した。付着油量は供試体の大きさによって異なるが, 1 試料当たり 5~500 cc (4.7~472 gf), 単位付着面積当たりでは 40~414 mgf/cm² であった。油付着後実験に供するまでの経過日数は, 4 週間, 2 週間, および 1~2 日間の 3 種類とした。なお, 自然放置期間中の外気温度は昼間で 5~6°C 以下, 夜間には零度以下に下がっていたものと思われる。

実験は水ジェットおよび砂混入ジェットを単独または同時に一定時間供試体に噴射し, 噴射前後における付着油量を測定した。水ジェットの噴射角度は供試体表面に対しほぼ垂直に保ち, 砂混入ジェットの噴射角度は垂直, 60 度, 水平の 3 段階に変化させた。これは水ジェットとの交差角度の相異がはく離効果に及ぼす影響を調

表-2.2 実験条件 (実用化実験)

試料種類 ¹⁾	油付着条件 ²⁾		付着油はく離条件 ³⁾		
	付着油量 (gf)	単位面積当り付着油量 (mgf/cm ²)	油付着後経過時間	水ジェット噴射時間 (min)	砂混入ジェット噴射時間 (min)
小形モルタルブロック	4.5~47.2	40~414	4 週間 2 週間 1~2 日	0.5~20	0.5~5
大形モルタルブロック	47.2~472	40~143	4 週間 2 週間	10~30	10~30
一般岩石	9.4~47.2	51~77	4 週間 2 週間	1~20	1~5

- 注 1) 小形モルタルブロックの形状:
15 cm × 20 cm × 6 cm
大形モルタルブロックの形状:
70 cm × 70 cm × 40 cm
一般岩石の形状: 約 30 cm × 40 cm
- 2) 単位面積当り付着油量 = 付着油量 / 付着面積 [mgf/cm²]
- 3) 水ジェット流量: 0.32~0.42 m³/min
砂混入ジェット流量 × 吐出濃度:
0.15 m³/min × 10% by vol.
噴射距離: 2~3 cm
噴射角度: 水ジェットは垂直, 砂混入ジェットは垂直, 60° および水平

べるとともに, 最適ノズル形状を考察するために行ったものである。表-2.2 に本実験条件をまとめて示す。

小形モルタルブロックに対しては, 水ジェットを単独で噴射した場合, 砂混入ジェットを単独で噴射した場合, および両ジェットを同時に噴射した場合の 3 種類について実験を行った。水ジェットの噴射時間は 0.5 分, 1 分, 2 分, 3 分, 4 分, 5 分, 10 分, 20 分にとり, 砂混入ジェットの噴射時間は 0.5 分, 1 分, 2 分, 3 分, 4 分, 5 分とした。両ジェットを同時に噴射する実験では噴射時間は両ジェットとも同じとした。

大形モルタルブロックに対しては, 両ジェットを同時に噴射する実験のみ行った。ジェットの噴射時間は, 油付着面積が大きいので 10 分, 20 分, 30 分の 3 種類とした。

一般岩石試料に対しては, 小形モルタルブロックの場合とほぼ同じ噴射条件で実験を行った。

なお, ジェットの噴射距離は 2~3 cm とし, 実験には海水を使用した。

(3) 供試油の性状

岩礁等に付着した油の性状は

- ① 粘度
- ② 比重
- ③ 化学成分
- ④ 油膜厚
- ⑤ 付着後経過日数

などの諸要素により異なる。本実験に用いた油種は、A重油、B重油、C重油および原油(カフジ)の4種類で、その油質分析結果は表-2.3のとおりである。

表-2.3 供試油の油質分析結果

項目 種類	動粘度 (50°C cst)	残留炭 素分 (%)	いおう 分 (%)	水分 (%)	表面張 力 (dyne/ cm)	比重 (15/4 °C)
原油	11.3	7.31	2.2	<0.01	31.4	0.886
A重油	2.2	0.03	0.6	<0.01	31.5	0.830
B重油	16.5	5.15	1.8	<0.01	33.5	0.904
C重油	82.7	7.59	2.3	0.05	36.0	0.943

(4) 付着油量の測定

本実験では、供試体表面の付着油量を定量的に測定する必要がある。このため、図-2.3の構造をもつ付着油測定装置を考案し、試作した。本装置の測定原理は、測定部を供試体表面に密着させ、ノズルから四塩化炭素液を噴射して、付着油を溶解するものである。四塩化炭素液を一定時間循環噴射すると、付着油の溶解量がしだいに増す(四塩化炭素液中の油分濃度が増す)ので、この四塩化炭素液を赤外線油分濃度計で測定すれば、供試体からはく離した油分量を知ることができる。

図-2.4は本装置の性能を示すもので、洗浄時間(四塩化炭素液の噴射時間)と付着油はく離率の関係を示している。洗浄時間の増大とともに、はく離が進行し、一定時間(3分以上)で完全溶解することがわかる。

本装置の供試体は、図-2.5のように、Oリングを介して接するので、四塩化炭素液で洗浄される面はほぼ円形となる。

いま、洗浄面の直交する2軸の直径を測定すると、95.2%(データ数392個)は $ab=1.00$ であり、 $ab=1.00\pm 0.05$ の範囲には99.5%が入る。一方、 a, b の

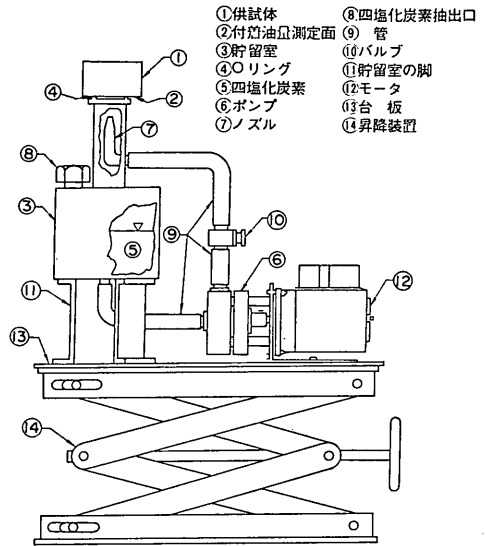


図-2.3 付着油量測定装置構造図

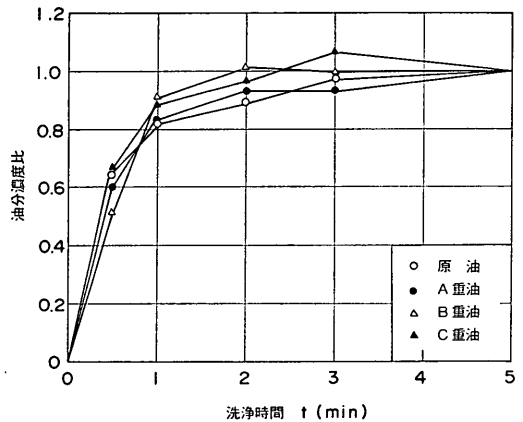


図-2.4 付着油量測定装置における洗浄時間と付着油はく離率の関係

相乗平均とOリング中心径との比 \sqrt{ab}/d_0 を調べると、図-2.6に示すヒストグラムとなった。これは、全データの97.1%は $\sqrt{ab}/d_0 \leq 1.35$ であるが、 $\sqrt{ab}/d_0 = 1.00$ の場合は24.4%で全体の約1/4程度であること、すなわち、洗浄面の面積は10~30% Oリングの中心径円より大きいということを示している。

この原因は、モルタルブロックの表面には微小な空隙が多数あるため、これを通して毛細管現象により四塩化

付着油除去システムの開発実験

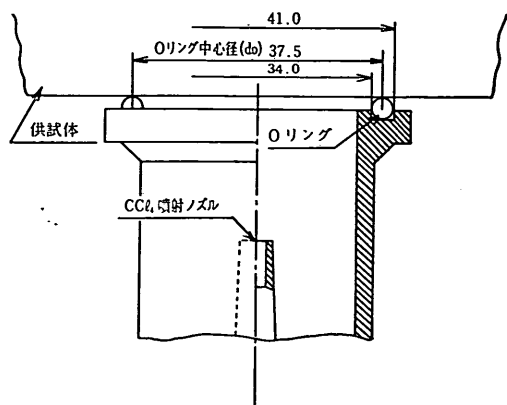


図-2.5 付着油量測定装置と供試体の接触状況

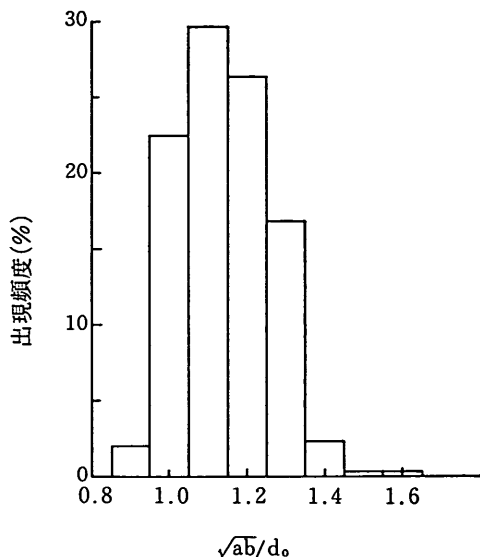


図-2.6 付着油量測定時の洗浄面の大きさ

炭素液が外部に浸透していくこと、また測定終了後、リングをモルタルブロックから離すとき、少量の四塩化炭素液が滴状になって供試体表面に残り、それが拡散して周辺の付着油を溶解させることなどによるものである。供試体の表面粗度が荒いほどこの傾向が強くなるので、測定値にばらつきが生じた。このばらつきを補正するには、油分濃度を単位測定面積（付着油のはく離した面積）当たりで表示する方法が考えられるが、測定面

積を正しく求めることが容易でないため、今回は平均的な測定値という意味で、リング中心径の面積をとり ppm/cm² で整理した。

上述の付着油量測定装置は、対象とする供試体の表面が平滑でない場合には、リングの密着状態が悪く測定が不可能となる。実用化実験に使用した供試体はほとんどがこれに類する形状であったため、この場合付着油量の測定は次の方法によった。

実験前における供試体の付着油量は、前述のごとく、付着させた油量と付着面積とから求めた。一方、実験後の付着油量は四塩化炭素を浸ませた脱脂綿により試料表面を繰返し拭きとり、これを定量の四塩化炭素液中に抽出したのち赤外線油分濃度計で測定した。

この方法は簡便な方法ではあるが、供試体表面の油分を完全に拭きとるのに手間がかかること、拭きとった面積が不明確なことなどの問題がある。そこで、一部の試料については試料表面を削り取り、その破片を四塩化炭素液の中に入れて付着油分を抽出した。また、付着油量測定装置が使用できる試料についてはそれを用いて測定を行い、拭きとり法と測定値の比較を行った。その結果、実験前の付着油量に比し実験後の付着油量が小さいため、入念に拭きとっておけば、本方法を用いても実用上問題ないと判断した。

油分量の分析に使用した赤外線油分濃度計の仕様を表-2.4に示す。

表-2.4 赤外線油分濃度計仕様

測定方式	四塩化炭素抽出赤外線吸収方式
光学系	非分散式ダブルビーム
赤外線検出器	半導体検出器＋多層膜干渉フィルタ
表示	0～20, 0～100 ppm, 二重目盛メータ
測定範囲	0～20, 0～100, 0～約2000 ppm
測定対象	原油, 重油, ガソリン, その他の油分
再現性	フルスケールの±2%以内

(5) 付着油のはく離効果の表示法

供試体からの付着油のはく離効果は、はく離実験前の油分濃度に対するはく離実験後の油分濃度の減少量の比率として表した。すなわち、

$$S = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (2.1)$$

ここに、 S は付着油はく離率 (%), A は初期付着油分量 (ppm/cm²), B ははく離実験後の付着油分量 (ppm/cm²) である。

2.2 実験結果と考察

(1) 付着油はく離効果に影響を及ぼす因子

a) 洗浄時間と付着油はく離効果

実験条件 I に対する実験結果を洗浄時間 t (水ジェット噴射時間) と付着油はく離率 S との関係で整理すると図-2.7~図-2.10 になった。同様に、実験条件 II に対する実験結果は図-2.11~図-2.12 となった。

図ではいずれも洗浄時間の増大に伴い付着油のはく離率が高くなっている。この傾向は油種、水ジェット噴射流量 Q , 噴射角度 θ , 水ジェット水温 T に関係なく認められる。しかし単位洗浄時間当りのはく離率で調べると、洗浄の初期においては大きいがいだいに減少しており、洗浄時間とともに飽和の傾向を示している。

供試体に水ジェットを噴射し、その表面に付着する油

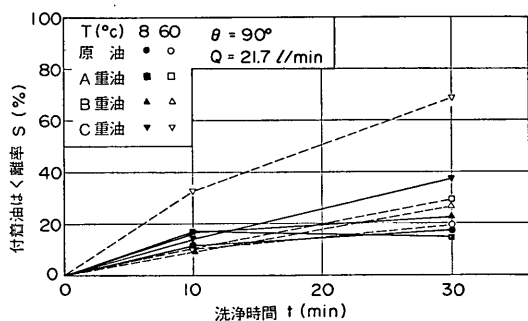


図-2.7 洗浄時間と付着油はく離率の関係 (1)

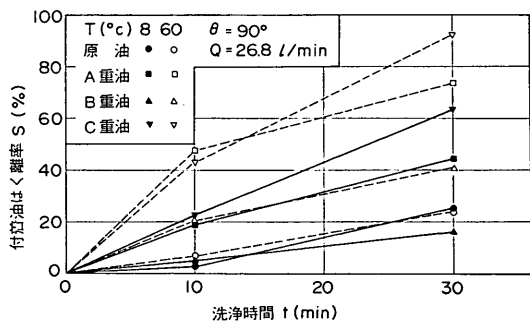


図-2.8 洗浄時間と付着油はく離率の関係 (2)

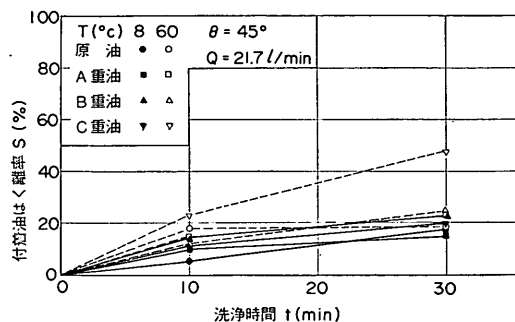


図-2.9 洗浄時間と付着油はく離率の関係 (3)

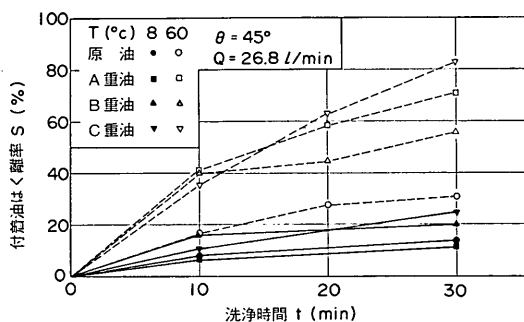


図-2.10 洗浄時間と付着油はく離率の関係 (4)

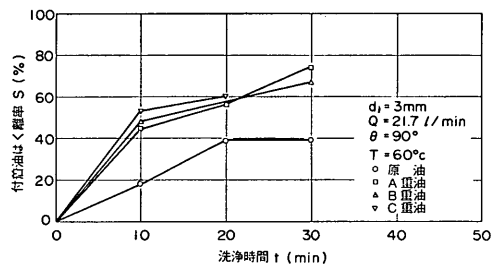


図-2.11 洗浄時間と付着油はく離率の関係 (5)

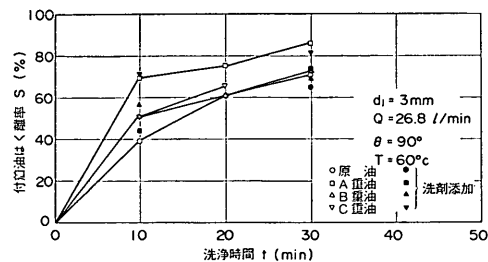


図-2.12 洗浄時間と付着油はく離率の関係 (6)

をはく離するときのメカニズムを考えてみると、まず第1段階として、水ジェットが油膜に衝突し、その力で油膜を破り、供試体壁面に沿って流れる水流によって油膜をはがし運び去る作用が考えられる。この段階では、油膜層内の分子間引力より水ジェットの衝突力のほうが大きければ急速に油膜のはく離は進む。第2段階は、物体(固体)の分子と油(液体)の分子が結合する界面ではく離過程に移行する。ここでは、水ジェットの作用力が油と物体の付着張力より大きいときはく離作用は進行する。また水ジェットの作用力が強力で固体表面の一部を破砕するような場合にも、はく離作用が認められよう。この段階では、付着油はまだ直接水ジェットの噴流にさらされているので、長時間噴射すればはく離作用の進行が期待できる。第3段階は、供試体の表面は一般に粗く、微細な空隙が無数にある。これらの空隙の形状あるいは位置によっては直接噴流が作用しないものもある。それゆえ、この種の空隙内に浸透し付着した油に対しては水ジェットのはく離作用は弱く、洗浄時間だけでは解決しえない。

付着油のはく離過程を上述のように考えると、図-2.7~図-2.12の結果が説明される。

b) 噴射流量および噴射圧力と付着油はく離効果

水ジェットの噴射流量と噴射圧力が付着油のはく離効果に及ぼす影響を図-2.7と図-2.11、図-2.8と図-2.12によって比較すると、噴射流量が多いほど、噴射圧力が高いほど付着油のはく離効果は高くなっている。この差は特に洗浄時間の短いところで顕著である。これは噴射圧力が高いほど油膜を破る力が大きいことによるものであろう。

c) 水ジェットの温度と付着油はく離効果

図-2.7~図-2.10を比べると、水ジェットの温度が付着油のはく離作用にかなり大きな影響をもつことがわかる。これは油の物理的性状が温度により大きく変化することによるもので、高温の水ジェットを噴射することにより油の粘度が下がり表面張力が減少するため、油膜が破れやすくなると考えられる。実験条件IIは噴射圧力と水温に重点を置いた実験であったが、図-2.11~図-2.12にみるように、高温高圧の水ジェットがより有効であることを示している。

d) 噴射角度と付着油はく離効果

噴流が壁面に衝突する場合、壁面に垂直に作用する力は噴射角度の関数となる。最大圧力は噴流が壁面に垂直に作用するときが発生するので、斜め噴射よりも垂直噴

射の場合のほうが付着油のはく離効果は大きいと予測される。

図-2.7と図-2.9、図-2.8と図-2.10を比較すると、噴射角度による付着油のはく離率の差は、洗浄時間の短い領域においては明確ではないが、洗浄時間の大きいところでは若干の差が認められる。

e) 洗剤の添加と付着油のはく離促進効果

洗剤(処理剤)の使用については毒性の問題も含めて慎重に取り扱う必要がある。本研究では、洗剤等の添加は本質的には避けるという方針であったので、少量添加の場合についてのみ実験した。

実験は水ジェットの噴射流量が26.8l/min、噴射圧力が19kgf/cm²の場合に、市販のアルカリ系洗剤*を500ml/minの割合で定量添加し、付着油のはく離作用における促進効果を調べた。その結果は図-2.12に併記したが、特に顕著な効果は認められなかった。

油に対する洗剤(処理剤)の効果は、その種類と添加量に依存することが知られている。本実験のような使い方の場合でも、2%以下の添加量ではその効果を期待することはできなかった。

(2) はく離力変数による付着油はく離効果の表示

噴流が θ の角度で固定壁面に衝突する場合、壁面に垂直に作用する力は運動量の法則より求まる。

$$F = \frac{\gamma Q}{g} V \sin \theta \quad (2.2)$$

ここに、 F は噴流が壁面に垂直に作用する力、 γ は水の単位体積重量、 g は重力の加速度、 Q は噴射流量、 V は噴流の速度、 θ は噴流が壁面となす角度である。

いま、噴流の断面積を A とし、その直径を d_j とすれば、式(2.2)は

$$F = \frac{\gamma}{g} \frac{Q^2}{A} \sin \theta = \frac{4\gamma}{\pi g} \left(\frac{Q}{d_j} \right)^2 \sin \theta \quad (2.3)$$

となる。この力が t 時間壁面に作用すれば、力積 $F \cdot t$ は[m⁴/s]の次元をもつ変数

$$f_j = \left(\frac{Q}{d_j} \right)^2 \sin \theta \cdot t \quad (2.4)$$

の関数となる。

大気中で水ジェットを噴射すると噴流はしだいに広がり、噴流速度と d_j はノズル出口からの距離の関数となる。それゆえ、式(2.4)で表される変数 f_j は水ジェッ

* アルカリ度: 原液 pH 13.

成分: 直鎖型ドデシルデンゼンスルホン酸ソーダ, アルキロールアマノイドリン酸エステル, ニトロ酸酢酸ソーダ, ケイ酸塩, 香料, 水分

トの噴射条件を表すひとつのパラメータと考えることができる。そこでここでは、噴射距離が小さいので d_j としてノズル口径をとり、そのときの f_j を「はく離力変数」と定義し、この f_j と付着油はく離率 S との関係調べた。

図-2.13~図-2.16 は 図-2.7~図-2.12 の測点を油種別に f_j - S の関係として図示したものである。測点にばらつきがみられるものの、いずれの油種においても同一傾向、すなわち f_j の増大とともに S が高くなる傾向を示している。またこの表示によれば水ジェット温度の差による付着油はく離効果の差も明瞭にわかる。

図において、水ジェット温度が 60°C の場合、 $f_j=40\sim50$ で $S\approx 80\%$ が期待できる。いま f_j - S の関係を外挿し $S\approx 100\%$ の完全はく離の状態を想定すると、油

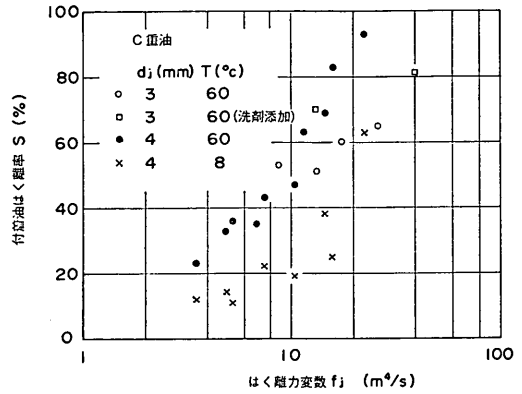


図-2.15 はく離力変数と付着油はく離率の関係 (C重油)

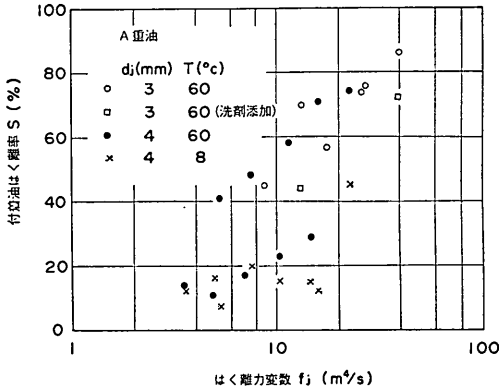


図-2.13 はく離力変数と付着油はく離率の関係 (A重油)

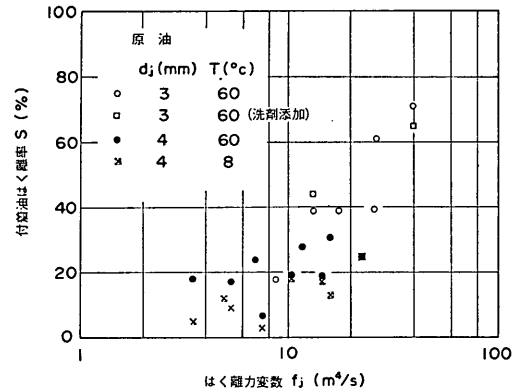


図-2.16 はく離力変数と付着油はく離率の関係 (原油)

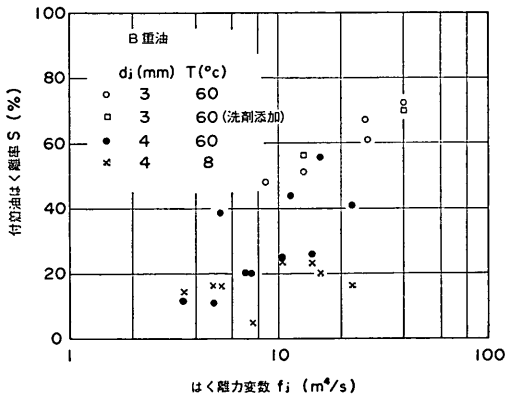


図-2.14 はく離力変数と付着油はく離率の関係 (B重油)

種によって多少差があるが、 $f_j=100\sim200$ の噴射条件が必要になると推定される。

f_j を大きくするには、式 (2.4) において Q または t を大きくする必要がある。いま、 Q を大きくした場合の効果を実用化実験の結果から検討してみると、図-2.17 はC重油を付着させた供試体に海水ジェットのみ単独噴射した場合の f_j と S との関係を示したものである。基礎実験の供試体と実用化実験の供試体とは付着油の性状に差があるので同一レベルでの評価には注意を要するが、結果は両者とも同じ傾向を示した。すなわち f_j による表示がほぼ妥当であることを示した。

図-2.17 によると、常温の水ジェットを単独噴射した場合、はく離力変数が約 100 のとき 80% 近くのはく離率が期待できることがわかる。また 100% の完全はく離

付着油除去システムの開発実験

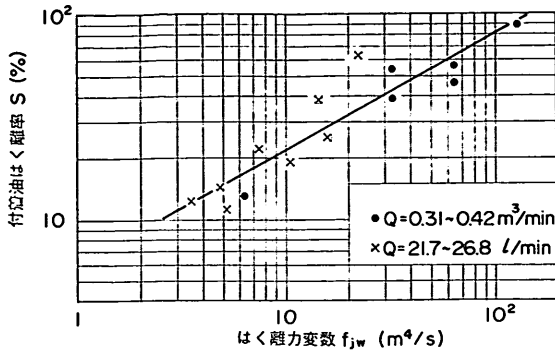


図-2.17 水ジェット容量の増大による付着油はく離率の向上 (C重油)

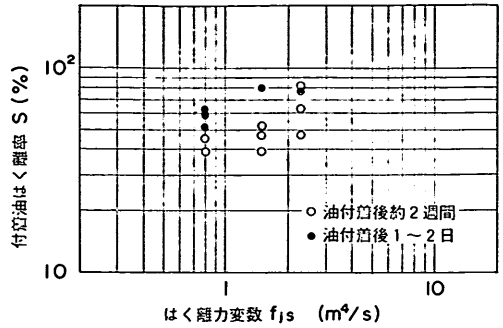


図-2.18 砂混入ジェットを単独噴射した場合の付着油はく離効果

を達成するには、はく離力変数を 200 前後にとる必要がある。いずれにしても、水ジェット温度が 60°C の場合に比べ、はく離効率は低い。

水ジェットの噴射流量および噴射圧力を増すことは装置の大型化を意味し、一方噴射時間の延長は作業能率の低下をもたらす。また温水ジェットの採用についても容量等装置上の限界があると考えられる。そこで、付着油のはく離効率をさらに高めるために別の手段の検討が必要になった。

(3) 砂混入ジェットの付着油はく離性能

水ジェット方式のはく離効果を高める手段として考えられたのが、水ジェットの中に砂粒子を混入する砂混入 2 相ジェットの採用である。これはスラリーパイプの摩耗などから考えて、砂粒子による油膜層、および油・岩石界面に対する研磨効果を期待したものであった。

図-2.18 は砂混入ジェットのみ単独噴射した場合のはく離力変数 f_{js} (添付 s は砂混入を表す) と付着油はく離率 S の関係を調べたものである。なお f_{js} の計算に際しては、 Q としてスラリーの吐出流量をとった。

この実験では、サンドポンプに手持ちのものを使用したため容量が小さかったが、図-2.17 に比べて非常に高いはく離率を示した。またこの実験によって、油の付着後の経過日数が短い試料ほどはく離率が高くなることが実証された。流出油が時間の経過とともに物理的・化学的性状を変化させることはよく知られている⁵⁾⁶⁾。C重油のように高粘度の油でも短時間にその諸性質が変化する。萩原は⁷⁾、C重油の粘度の経時変化として、流出後 1~2 日で約 4,000 cp (20°C) のものが、2 週間後には約 22,000 cp (20°C) に変化したと報告している。

付着油は表面から揮発分が蒸発するにつれ油膜がしだいに硬化していくので、それを破るだけの力が水ジェットになければ油膜をはく離することはできない。砂粒子を混入した 2 相ジェットは、水ジェットの運動量に砂粒子の運動量に加わり、かつ砂粒子の研磨作用も相乗するので、油膜を破る能力が大きくなったものと考えられる。

このような作用機構を考えると、砂粒混入ジェットに対するはく離力変数には砂粒子の効果を考慮したものにすべきである。しかし固・液 2 相ジェットの流体力学的な取り扱い複雑でまだ解明されていない。それゆえここでは単に砂混入ジェットの噴射流量をもって f_{js} を表示するにとめた。

次に、上述の結果から考えて、砂粒子の運動量を増し、かつ砂粒子を効率よく油膜に衝突させてやれば、はく離効果がさらに向上すると思われる。そこで、高圧水ジェットと砂混入ジェットとの併用実験を行いその効果を調べた。

図-2.19 はこの実験結果を示したもので、図の横軸には水ジェットのはく離力変数 f_{jw} (w は水ジェットのみを表す) をとっている。

この実験では、水ジェットの噴射流量を変化させ、砂混入ジェットの噴射流量は一定とした。噴射時間は両ジェットとも同一である。噴射角度は水ジェットはほぼ垂直とし、砂混入ジェットは垂直、60°、水平の 3 段階に変化させた。砂混入ジェットの噴射角度による効果は、結果的には顕著に現われなかったので、図-2.19 では区別せず表示している。これに対し、モルタルブロック、花崗岩など岩質とはく離率との関係は供試体の表面粗度に依存し、いずれの場合も表面が粗いほどはく離率は悪

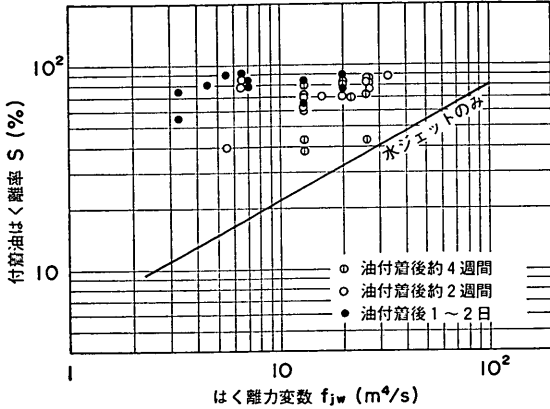


図-2.19 海水ジェットと砂混入ジェットを併用した場合の付着油のはく離効果

かった。図-2.19 における測点のばらつきは、油付着後経過日数の差と表面粗度の違いによるものが支配的となっている。

図-2.19 を 図-2.17 および 図-2.18 と比較すると、図-2.19 のはく離効果が著しく増大していることがわかる。水ジェットの場合に比べると、 f_{jw} の小さいところではく離率の向上が目立ち、絶対値にして $1/10 \sim 1/20$ の f_{jw} で同程度のはく離効果が得られている。

一方、 f_{jw} の増加に伴ってはく離率は向上するという

ものの、その増加率はしだいに減少傾向にある。このことは、完全にはく離の難しさを示している。

今回の実験では、水ジェットと砂混入ジェットを別々のノズルから独立して噴射し、試料表面で混合する方式をとったが、水ジェットの噴射圧力が高くなるとその噴流の中に砂混入ジェットを効率よく混入させることが難しくなると思われる。今後、ノズル構造を改良し、高圧ジェットの中に直接砂を混入する方法をとれば、より少ない砂濃度でより高いはく離率を得ることが可能と考えている。

写真-1 および 写真-2 は本実験前後の試料表面の状況を示したものである。

3. 海浜における流出油の付着機構に関する実験

3.1 模型海浜による流出油付着実験

(1) 実験装置および実験方法

流出油が海岸線に漂着し、砂浜に付着するときの機構（付着範囲、砂中浸透深さ、濃度分布など）を究明することによって、油で汚染される砂浜の広さや洗浄を必要とする油汚染砂の量を推定することができる。

そこで、図-3.1 の造波水路の中に図-3.2 の断面をもつ模型海浜を作り、これに波をあてながら水槽内に油（C重油）を一定量投入し、それが波により打ち寄せられ海浜に漂着、付着する状況を調べた。

模型海浜の海底勾配は外浜（砕破域）を $1/30$ 、前浜を

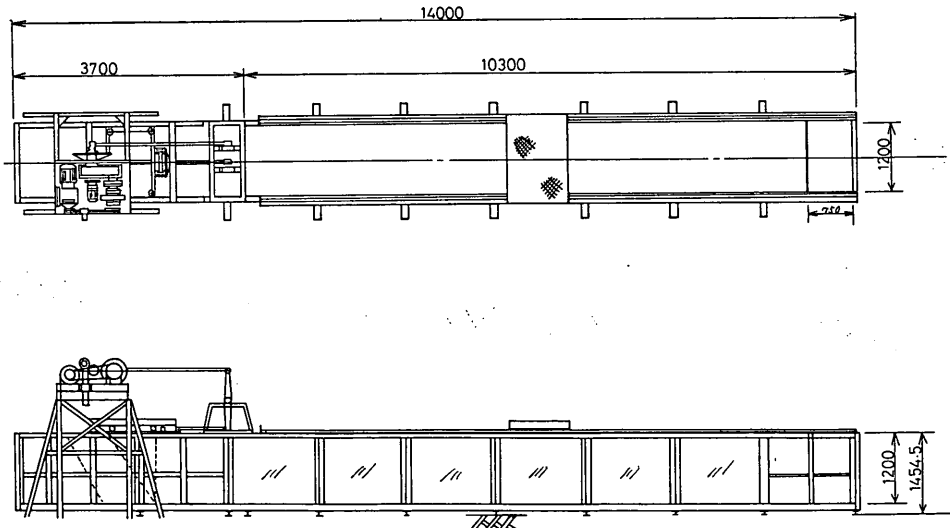


図-3.1 実験水槽

付着油除去システムの開発実験

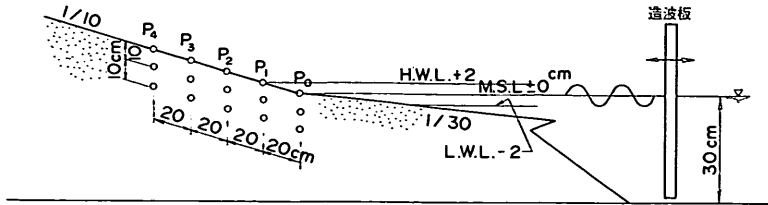


図-3.2 模型海浜断面図

1/10 に作り、平均潮位 (M. S. L.) を海底勾配の変わる位置とした。水深は造波板の位置で 30cm にとり、潮位の変化は ± 2 cm とした。潮位の調節は小型ポンプを使い、12.5 min/cm の割合で周期的に連続して水を供給あるいは排水した。

この模型断面は実際の海岸のおよそ 1/50 程度を想定して作ったので、波高、周期、潮位および波の来襲時間の模型値は、原型値に換算しておよそ表-3.1 の値となる。なお、実験は規則波で行った。

海浜砂には普通海砂 (図-2.2 の試料B) を用いたが、砂粒子の粒度分布と油の浸透性状との関係を探る目的で1ケースだけ粗砂 (図-2.2 の試料A) を使用した。水槽内の砂は油で汚染されるため、1実験ごとに全量取り換えた。

実験は全部で7ケース行った。表-3.2 にその実験条

表-3.1 模型実験条件の原型換算値 ($\lambda=1/50$)

	模 型	原型換算値
波 高(H)	2 cm, 3 cm	1.0 m, 1.5 m
周 期(T)	0.85 sec	6 sec
造波時間(t_0)	3.4 hr, 6.8 hr, 10.2 hr	24 hr, 48 hr, 72 hr
潮 位 差	4 cm	2 m

表-3.2 海浜への油付着実験条件

Test No.	波 高 H (cm)	周 期 T (sec)	油 量 (ml)	造波時間 t_0 (hr)	海底砂
1	2	0.85	50	3.4	A
2	"	"	"	6.8	B
3	"	"	"	10.2	"
4	"	"	100	"	"
5	3	"	50	3.4	"
6	"	"	"	10.2	"
7	"	"	100	"	"

(備考) 潮位(水位)は 12.5 min/cm で変化させた

件を示す。

(2) 油付着砂の油分量測定

模型海浜における砂試料の採取位置は水槽の中心線上当り、M. S. L. 点 (P_0) より波のそ上方向に 20 cm 間隔に4点 (P_1, P_2, P_3, P_4) で採取した。一方、砂浜の深さ方向については、海浜表面の採取点に対応した位置

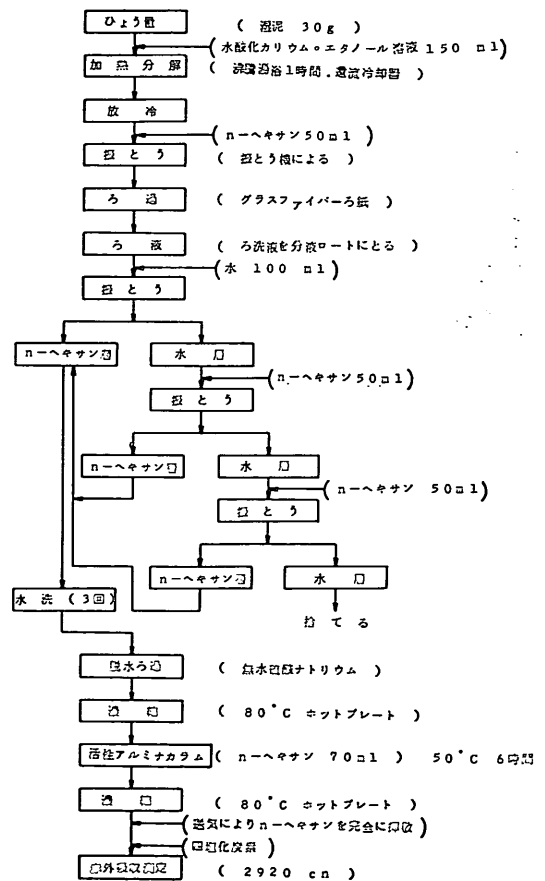


図-3.3 砂に付着した油分量の分析手法 (n-ヘキサ抽出法)

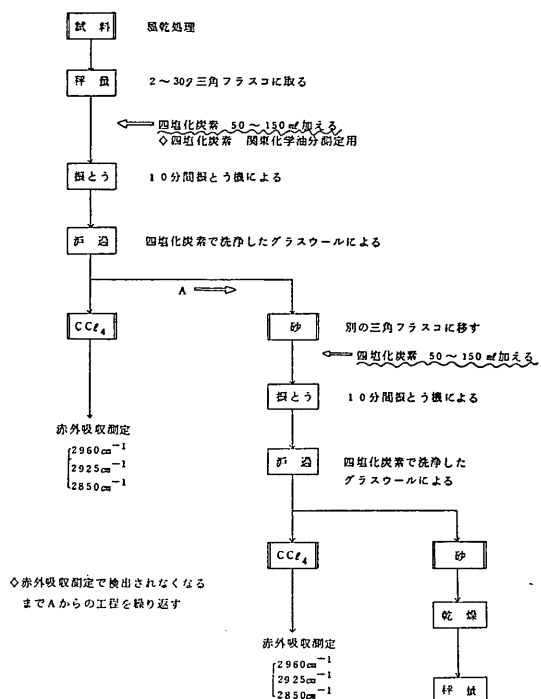


図-3.4 砂に付着した油分量の分析法（四塩化炭素抽出法）

で 10 cm 間隔に 2 層でとった。すなわち、海浜表面より 20 cm 下までとした (図-3.2)。

砂に付着した油分量の分析方法としてはまだ確立したものが無い。本実験では、付着油分量が少ない場合は n-ヘキサン抽出法 (図-3.3) を、また付着油分量が多い場合は四塩化炭素抽出法 (図-3.4) をとった。前者は主として現地海浜砂の分析に適用し、後者は室内実験試料砂に対し適用した。

3.2 実験結果と考察

(1) 流出油の海浜への付着機構

水槽内に油を注入すると、油は浮遊拡散しながらもしだいに波によって海岸へと打ち寄せられてくる。てい線付近では、油は波の動きに合わせて前進したり後退したりする揺動運動を繰り返しているが、一部の油が砂に付着すると、それを核として表面張力の作用する範囲の油が砂に付着し、そ上する波によって徐々に打ち上げられていく (写真-3)。しかし、なかには波の来襲によって砂に付着していた油が再浮上し、水面に引き戻されて、てい線付近を再び揺動するものもある。このような運動

を繰り返すうちに、満潮てい線付近には付着する油の量がしだいに増えていく。

一方、この付着過程には潮位の変化が大きな役割を果たしている。潮位が下がるとともにてい線は後退するが、満潮てい線から波のそ上する範囲の砂に付着した油はほとんどそこに残る。てい線付近では、浮遊油は上述の運動を繰り返しており、波のそ上によって砂への付着が続くが、浜を下るに従って海浜砂への油の付着量は減少していく。干潮時にすべての油が海浜に付着してしまうわけではなく、依然として干潮てい線付近を揺動する油も多い (写真-4)。

再び潮が満ちはじめると、前浜に付着していた油が比重差によって再浮上し、先と同じ過程で後浜へ打ち寄せられていく。波が大きければ波のそ上範囲も大きくなるので、油もより前方へ打ち上げられ付着する。

実際の海岸では、この周期的な繰り返し過程の中で油の中の揮発性分が気化したり、ごみなどが付着したりして粘度、比重などの特性を変化させる。それゆえ、前浜に付着した油が満潮時に必ずしも再浮上するとも考えられないし、漂着流量、油質によっても、てい線付近での油の運動に差がある。また、実際の海岸では打ち寄せる波の大きさと周期が不規則であるから、てい線付近では油が攪乱され、一部の油はエマルジョン化する。

(2) 海浜における油付着の分布

模型海浜に打ち上げられた油は、必ずしも海浜幅全域にわたって一様に付着しておらず濃淡を生じていた。試料砂の採取は、前述のように、海浜幅の中央位置としたから、採取砂の分析結果はその海浜における油付着濃度の絶対値を正しく表していない。この点を考慮し、ここでは油分濃度の絶対値の比較はやめ、定性的な評価に止めた。

図-3.5 は砂浜表面に付着した油の分布を示したものである。P₀~P₂ 間にみられるデータのばらつきあるいは絶対値の差は、P₁ 付近がちょうど満潮てい線となるので、P₀~P₂ 間は常に波の作用を受ける領域であること、油の最大付着域が必ずしも海浜中央でなく片寄ること、などによるものである。

図-3.5 は、波の来襲時間が増すとともに油は浜の奥へと打ち上げられていくこと、その傾向は波高が大きいほど顕著であることを示している。油の最大付着範囲が満潮てい線から波のそ上する範囲が主体ということは、ごみや廃油ボールの打ち上げ状況とまったく同様である。このことから、漂着油は海浜砂のみならず、ごみ等

付着油除去システムの開発実験

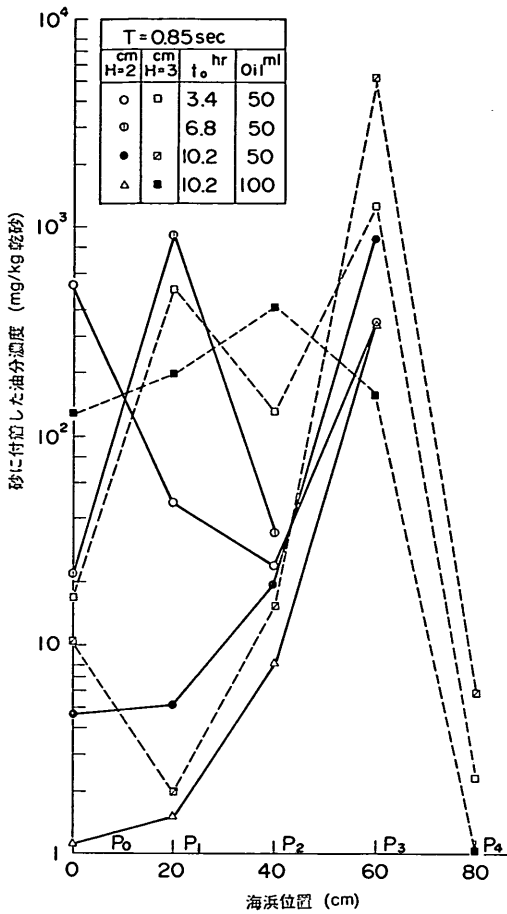


図-3.5 海浜表面に付着した油の濃度分布

にも大量に付着するので、油汚染砂の洗浄システムの設計ではこの点を考慮しなければならない。

一方、海浜の深さ方向における付着油の分布を調べると図-3.6 および 図-3.7 となった。この図は、横軸に各サンプル位置における付着油分量を、縦軸にサンプル深度をとって図示したものである。図では、いずれのケースも表層下 10 cm の位置では 10 mgf/kgf 乾砂、表層下 20 cm の位置では数 mgf/kgf 乾砂になり、表層に比べると極めて低い値を示した。

砂層中への油の浸透は、油と砂粒子間の吸着力、毛管作用、重力などの作用によって生じるが、油の比重、粘度等の要素によりかなり異なると考えられる。図-3.8 は直径 30 cm、深さ 40 cm の容器の中に模型海浜に使用した砂と同じものを入れ、上から水と油（表-2.3 の C 重油）を注入し、油の自然浸透実験を行ったときの結果である。実験では、容器の底に排水用の小孔を多数あけてあるので、表面の水が引くと油は砂に付着、浸透するが、再び表面に水がたまるほど水を注入すると、砂に付着していた油が再浮上し、水面に浮遊する状況が観察された。

これを数回繰り返したのち完全排水し、表面から 2 cm ごとに深さ方向のサンプルを採取して、それに付着する油分量を分析したのが 図-3.8 である。

砂層表面における付着油の絶対値は、初期注油量に依存するのでその絶対値は別にして考えると、油の深度方向の浸透分布は模型海岸の実験結果と同様の傾向が認められた。

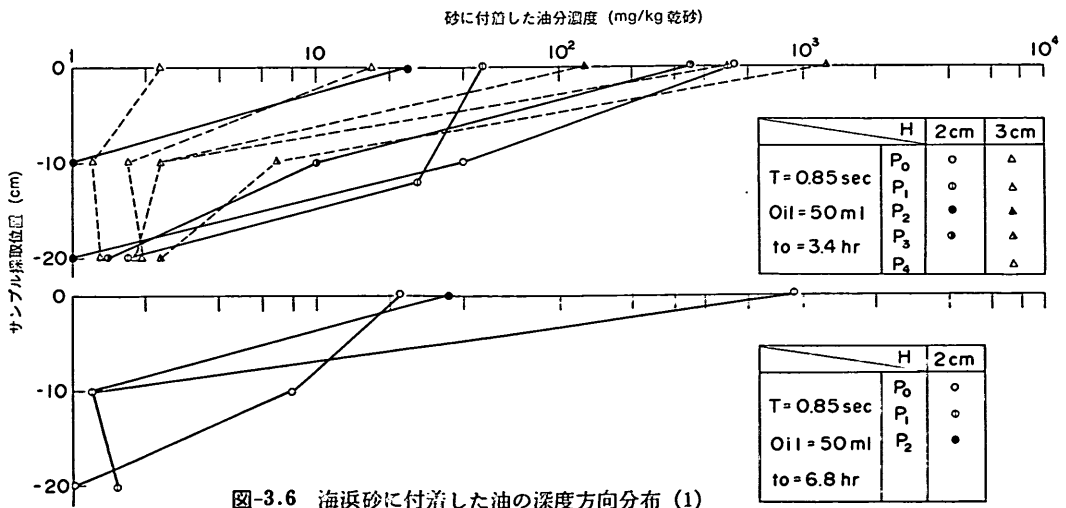


図-3.6 海浜砂に付着した油の深度方向分布 (1)

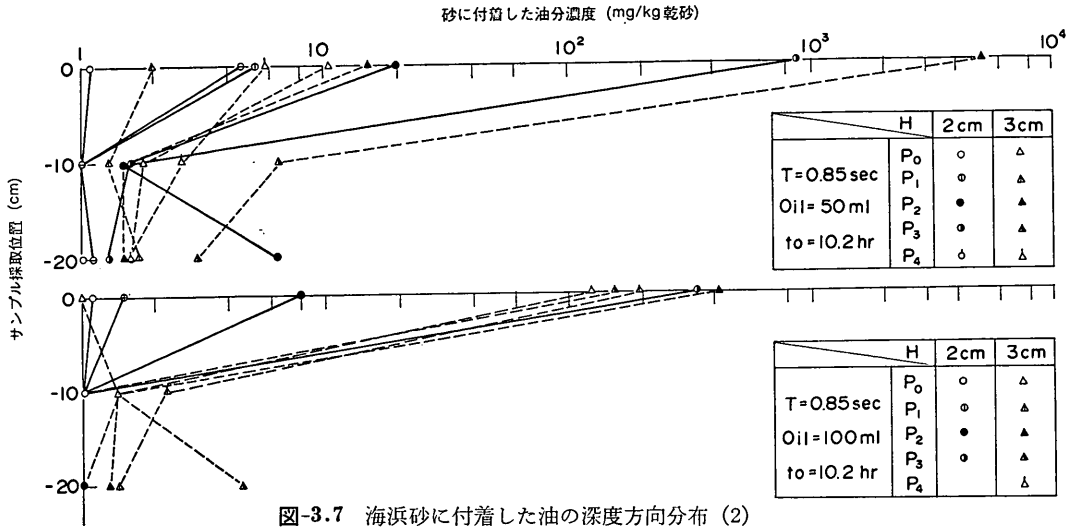


図-3.7 海浜砂に付着した油の深度方向分布 (2)

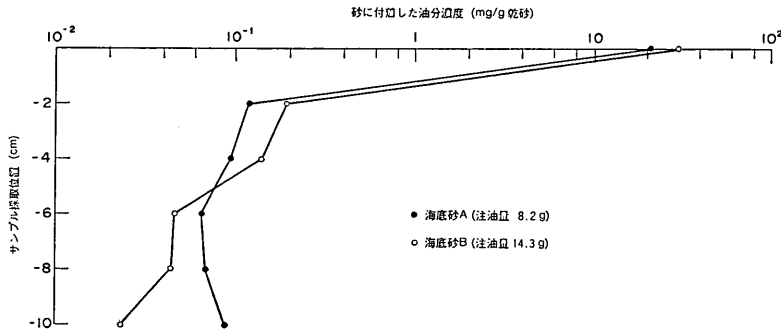


図-3.8 砂層に対する重油の浸透実験結果

以上2つの実験は外気温度が 25~30°C のときに行われたものであるから、C重油の流動性は普通の状態と考えることができる。その点も考慮すると、漂着油の砂浜への付着・浸透範囲は表層下 10cm 程度までと推測される。

また、洗浄対象とする油汚染砂は、掘削・運搬機材の特性を考えて、表層 15~20cm 程度を処理対象とすればよいと思われる。

一方、現地海浜で採取した砂には 0.6~2.1mgf/kgf 乾砂程度の油分が付着していた。満潮でい線付近を基準に浜側の砂の付着油分量を調べると 図-3.9 および 図-3.10 となった。これらの海岸は特に流出油事故があ

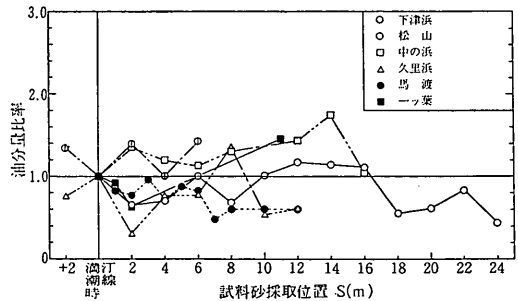


図-3.9 現地海浜における油分濃度分布(海浜表面)

たわけでもないで、一般の海浜は通常このような状況にあるものと考えられる。

付着油除去システムの開発実験

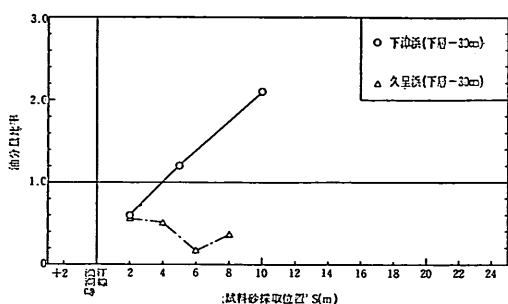


図-3.10 現地海浜における油分濃度分布 (下層 30cm)

4. 海浜砂に付着した油の除去に関する基礎実験

4.1 超音波による油汚染砂の洗浄実験

(1) 超音波洗浄の原理と実験要素

超音波による洗浄法は精密機械工業の分野で現在広く利用されている技術である。その洗浄のメカニズムは洗浄条件が非常に多く複雑で解明が困難なため、現状では決定的な理論が確立されていない。一般に推定されている洗浄のメカニズムは次の2つの作用である⁸⁾。

ひとつは、「振動により生ずるキャビテーションによる効果」といわれているもので、洗浄液中に超音波を照射すると、疎密波であるために圧力の変動が繰り返し起こる。これがある限界以上になると、空洞が発生したり消滅したりするいわゆるキャビテーション現象が発生する。空洞が破壊するときの機械的な力は非常に大きく、数気圧から 1,000 気圧程度になるともいわれており、そのときに付着した塵埃を吸収はく離する。

キャビテーション効果は振動数が増すと減少することが知られている。これは気泡の成長や消滅には時間を要するので、振動数が高くなると音の半周期に行われる気泡の膨張・収縮が小さくなり、キャビテーションが起こりにくくなるためとされている。

もうひとつの作用は、「洗浄液の微小振動、攪乱、脱泡、乳化作用による洗浄液と塵埃間の物理的・化学的反応の促進効果」である。

超音波洗浄の性能を決める主要因子は次のものである。

- ① 周波数
- ② 出力
- ③ 洗浄液 (水質, 温度)
- ④ 洗浄法

本研究では、超音波洗浄のメカニズムを理論的に究明

することが目的ではなく、その原理の応用と、油汚染砂を洗浄するという実用技術への適用性の検討、およびシステム設計のための技術的検討を行うことにあった。

(2) 実験装置および実験方法

砂に付着した油分を超音波によりはく離する場合の能力と問題点を検討するために、次の基礎実験を行った。

実験は、図-4.1 に示すように、直径 535 mm、高さ 540 mm のステンレス製容器に 500 mm の高さまで清水を入れ、その底に油を付着させた供試砂を置き、その真上に超音波振動子を振動面が砂層表面とほぼ平行になるよう設置し、一定時間超音波を照射した。超音波振動子の周波数は 28 kHz と 50 kHz の 2 種類を選んだ。超音波振動子の仕様を表-4.1 に示す。

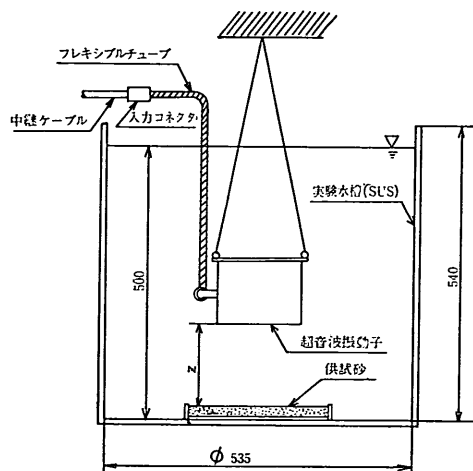


図-4.1 超音波による油汚染砂の洗浄基礎実験方法図

供試砂には 図-2.2 の試料 A を使い、水洗後乾燥炉で十分乾燥したのち、C 重油を均一に付着させた。その際、C 重油は粘度が高く砂が塊状になるので、C 重油を一度四塩化炭素液に溶解し、その溶解液を砂にふりかけ混合攪拌した。実験には風乾により四塩化炭素を完全に気化させたものを使用した。供試砂を調整したときの油と砂の重量比はおよそ 7.25 mgf/gf であった。

実験は次の 4 項目について行った。

- ① 超音波照射距離の影響
- ② 超音波出力の影響
- ③ 超音波照射時間の影響
- ④ 洗浄液の影響

表-4.1 超音波振動子仕様

周波数	28 kHz	50 kHz
構造	全密閉浸漬型	全密閉浸漬型
寸法	(W)145×(D)145×(H)115 mm	(W)185×(D)175×(H)90 mm
接液部材質	ステンレス鋼 (SUS27)	ステンレス鋼 (SUS27)
変換素子	フェライト	フェライト

表-4.2 超音波照射距離の影響実験条件

超音波周波数 f (kHz)	28, 50
超音波出力 P (W)	150, 350
超音波照射時間 t (sec)	30
超音波照射距離 z (cm)	2, 3, 5, 10, 30
洗浄液	清水, 常温

表-4.3 超音波出力の影響実験条件

超音波周波数 f (kHz)	28
超音波出力 P (W)	50, 100, 150, 200, 300, 350, 370
超音波照射時間 t (sec)	30, 60
超音波照射距離 z (cm)	3, 5
洗浄液	清水, 常温

表-4.4 超音波照射時間の影響実験条件

超音波周波数 f (kHz)	28
超音波出力 P (W)	150, 300
超音波照射時間 t (sec)	10, 20, 30, 60, 120, 300
超音波照射距離 z (cm)	3, 5
洗浄液	清水, 常温

表-4.5 洗浄液の影響実験条件

超音波周波数 f (kHz)	28	
超音波出力 P (W)	200	370
超音波照射時間 t (sec)	30	
超音波照射距離 z (cm)	3	5
洗浄液	洗剤 5%, 常温	清水, 50°C

それぞれの項目における実験条件は表-4.2~表-4.5のとおりである。

(3) 付着油はく離効果の数量化

約 5gf の砂を供試砂の表層から薄く採取し、秤量したのち、四塩化炭素液で油分を完全に抽出し、赤外線油分濃度計で測定した。

付着油のはく離効果は次式により求めた。

$$S = \frac{A-B}{A} \times 100 (\%) \quad (4.1)$$

ここに、 S は付着油はく離率 (%), A は超音波照射前の砂 1gf に対する付着油分量 (mgf/gf), B は超音波照射後の砂 1gf に対する付着油分量 (mgf/gf) である。

4.2 実験結果と考察

(1) 超音波照射距離が付着油はく離効果に及ぼす影響

周波数、出力および照射時間を一定とし、照射距離を変えた場合の付着油はく離率の測定結果を図-4.2 に示す。

砂層に対し超音波を照射すると、砂層内では超音波が減衰するので超音波による洗浄作用は砂層のごく表面に近い砂粒子にしか及ばない。実験後試料を採取するとき、できるだけ表層の砂を採取するようにしたがある程度下層の砂が混入するのは避けられなかった。そのためか、その混入程度によって測定値に変動を生じた。

測定値を平均値で見ると、付着油はく離率は 15~35% の範囲に分布し、照射距離との相関は認められない。

超音波による洗浄作用が媒質液に発生するキャピテーションによるものであるとすれば、キャピテーションを発生させるためにある値以上の超音波強度が必要である。超音波強度は単位面積を通過する音のパワー (W/cm^2) であるから、音圧と粒子速度の積として求められる。

いま、ピストン振動面の音波放射に関する理論解析を

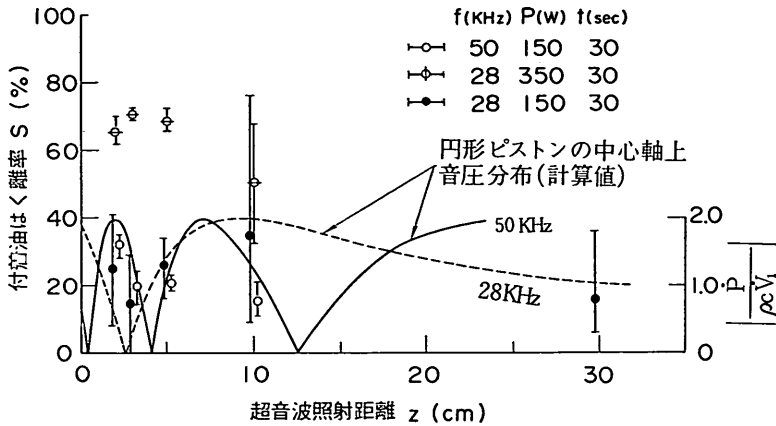


図-4.2 超音波照射距離と付着油はく離率の関係

調べると、中心軸上の近距離の音場における音圧の絶対値は式(4.2)で与えられている(ただし、円形振動面の場合)⁸⁾。

$$|\dot{P}| = \rho c |\dot{V}_1| \left| 2 \sin \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + a^2} - x) \right| \quad (4.2)$$

ここに、 \dot{P} は中心軸上振動面から x の距離の音圧、 ρ は媒質の密度、 c は音波の伝播速度、 \dot{V}_1 は振動面の振動速度、 λ は音波の波長 ($=c/f$)、 f は音波の振動数、 x は中心軸上振動面からの距離、 a は円形振動面の半径である。

式(4.2)は、 $\sqrt{x^2 + a^2} - x$ すなわち中心からの距離と周辺からの距離の差が波長の整数倍になる位置では音圧が0となることを示している。実験に使用した振動子は表-4.1の寸法をもつ矩形振動面であるが、ここで $2a=14.5\text{ cm}$ ($f=28\text{ kHz}$) あるいは $2a=18.0\text{ cm}$ ($f=50\text{ kHz}$) と仮定し、式(4.2)より円形ピストンの中心軸上音圧分布 $|\dot{P}|/\rho c \dot{V}_1$ を計算したのが図-4.2の破線 ($f=28\text{ kHz}$) と実線 ($f=50\text{ kHz}$) である。計算では中心軸上の位置によって音圧の絶対値が0になるところと最大になるところがある。この結果と付着油はく離率の結果が必ずしも一致していないのは、超音波振動子から放射される音波は指向角をもち、砂層面で面的広がりを有していること、実験槽が小さく壁面反射によって乱れた音場となっていることなどにより、中心軸上だけに限定した式(4.2)よりは広い範囲の砂粒子に音圧が作用しているためであろうと思われる。

式(4.2)の使用には限界があるにしても、照射距離に対する音圧分布から推定すると、本実験のように10cm

以下の照射距離に対しては、照射距離は付着油のはく離効果に影響を及ぼさないと考えられる。

なお、図-4.2において超音波周波数と付着油はく離率の関係を調べると、超音波出力が同じであれば28kHzと50kHzに顕著な差は認められない。そこでの差は、周波数よりもむしろ超音波出力による影響が大であることがわかる。

(2) 超音波出力が付着油はく離効果に及ぼす影響
周波数、照射時間および照射距離を一定とし、出力を変えた場合の付着油はく離率の測定結果を図-4.3と図-4.4に示す。

両図とも出力の増大とともにほぼ直線に近い傾向で付着油のはく離効果が増大しているが、しだいにその増加率が減少する傾向が認められる。また図-4.3と図-4.4を比較すると図-4.4のほうが同じ出力に対し付着油は

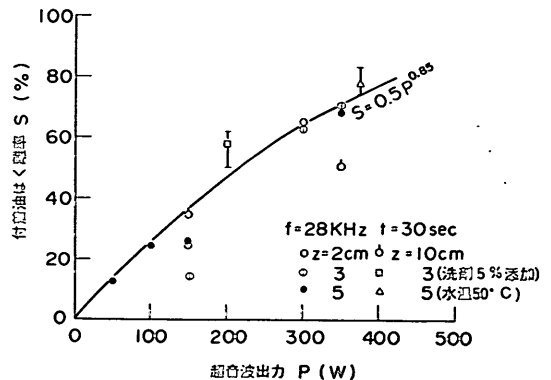


図-4.3 超音波出力と付着油はく離率の関係 (1)

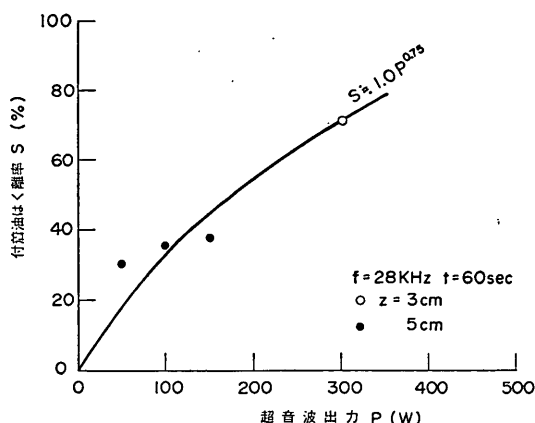


図-4.4 超音波出力と付着油はく離率の関係 (2)

く離率が少し高い。これは超音波照射時間の差にもとづくものである。しかし、照射時間を2倍にしても、それに比例して付着油はく離率は増加していない。

砂粒子に付着する油膜のはく離機構は、前述の岩礁等に付着する油を水ジェットの噴射力ではく離する場合のメカニズムと同様に考えることができる。すなわち、まず付着する油膜層内ではく離が生じ、次に砂粒子と油との界面ではく離に移行する。したがって、油膜層での初期はく離作用は急速に進むが、界面はく離の段階に近づくに従い、はく離作用が難しくなるため、図のような結果になるものと理解される。

(3) 超音波照射時間が付着油はく離効果に及ぼす影響

周波数、出力および照射距離を一定とし、照射時間を変化させた場合の付着油はく離率の測定結果を図-4.5に示す。

出力を増大すれば、はく離効果が著しく増大することがこの図からも明らかにわかる。照射時間に関しては、照射初期においてははく離作用が急速に進むが、時間の経過とともにしだいにその効果は減少している。この傾向は、付着油のはく離のメカニズムに起因するものと、実験条件に起因するものがある。後者について述べると、実験は図-4.1の槽底に供試砂を静置して行っているため、超音波の照射を受ける砂粒子の数は表面層のものに限定される。それゆえ、表面の砂粒子のはく離作用が進んでも、試料全体の平均値は上がらないということが考えられる。このことより、油汚染砂の付着油除去システムの設計に際しては、すべての砂粒子に均一に超音

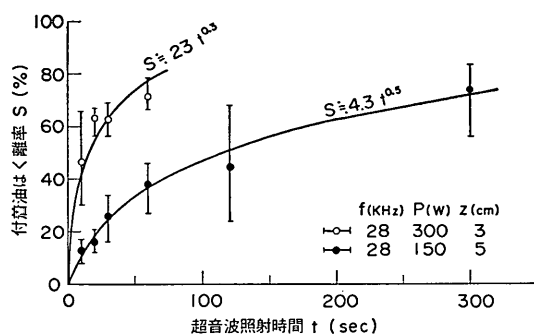


図-4.5 超音波照射時間と付着油はく離率の関係

波を照射するような構造を考える必要がある。

(4) 超音波洗浄液が付着油はく離効果に及ぼす影響

図-4.3に、洗浄液に洗剤(2.2(1)eと同じもの)を5%添加した場合、水温を50°Cにした場合の付着油はく離率の測定結果を示した。いずれも、はく離効果の向上は認められるが、飛躍的な効果促進は期待できない。四塩化炭素液など溶剤の利用も考えられるが、本研究では、化学的方法によらず、物理的(機械的)に解決することを目標とした。

(5) 油汚染砂に対するはく離力変数

いま、油付着砂を超音波によって洗浄しようとする場合、その洗浄効果に影響を及ぼす主要素は、超音波出力、超音波照射時間、および照射距離の3つであると仮定する(周波数は市販品を利用すると考え、28kHzとする)。この3要素と付着油はく離率の間には次の関数関係が成り立つと仮定する。すなわち、

$$S = K \cdot P^\alpha \cdot t^\beta \cdot z^\gamma \quad (4.3)$$

ここに、 S は油付着砂の超音波による付着油はく離率(%), P は超音波出力(W), t は超音波照射時間(sec), z は超音波照射距離(cm), そして K は定数とする。

t, z を一定とし、 S と P との関係式を求めると、図-4.3および図-4.4より $\alpha=0.75\sim 0.85$ となる。一方、 P, z を一定とし、 S と t との関係式を求めると、図-4.5より $\beta=0.3\sim 0.5$ となる。また、 P と t が一定のとき、 S と z との関係は前述の考察のごとく $\gamma=0$ となる。指数 α, β はそれぞれ t あるいは P と関数関係にあり定数とはならない。しかしここでは、油汚染砂洗浄システムにおける超音波洗浄装置の設計条件は本実験条件の範囲内であると仮定して、 $\alpha=0.8, \beta=0.4$ と置く。 $f_s = P^{0.8} \cdot t^{0.4}$ を油汚染砂に対する付着油はく離率と呼び S と f_s の関係を求めると、図-4.6のごとくになった。

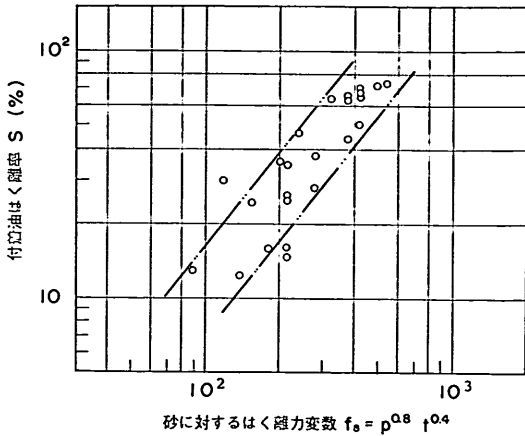


図-4.6 砂に対するはく離力変数と付着油はく離率の関係

これによると、油汚染砂から完全に油分を除去するには $f_s=600\sim 700$ が必要となることがわかる。いま出力 300 W の超音波振動子でこの洗浄を行うとすれば、洗浄時間は 98~144 sec となり、かなりの処理時間を必要とする。これは実用化上問題がある。これを解決するには、超音波出力を増大させるとともに、何か他の補助手段の開発が必要であると考えた。

5. 油汚染砂油分除去システムの開発に関する実験

5.1 油汚染砂油分除去システムの設計

これまでの実験結果を基に、油で汚染した海浜砂から油分を除去するための実験装置を試作し、その性能について調べた。図-5.1 に試作した処理システムの構成図を示す。

本実験装置の主要な設計条件は、① 砂粒子に均一に超音波が照射すること、② 砂粒子はできるだけ長く超音波の照射を受けること、③ 高濃度の油付着砂に対しても対応できること、④ 付着油の除去効率に秀れること、⑤ 装置規模が小さいこと、⑥ 油分を含む排水を少なくすること、などであった。

① および ② の要件のために、砂粒子の浮遊沈降方式を採用するとともに、沈降経路を長くとするよう沈降経路を屈折させ、また、超音波振動子を直列3段に設置した。③、④ および ⑤ の要件のために、超音波洗浄の前段に前処理工程を設けることとし、高温高圧ジェットによる攪拌と、砂・油水スラリーのジェット噴射工程を併

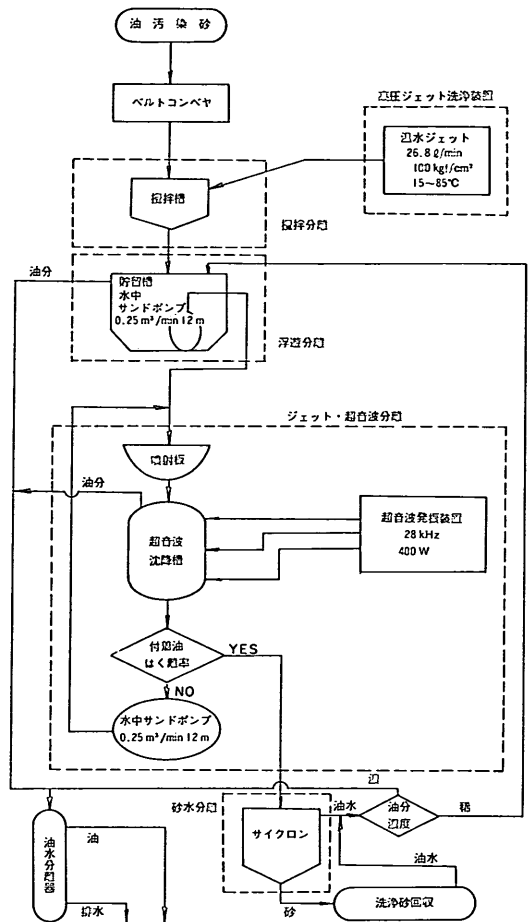


図-5.1 油汚染砂油分除去実験装置システムフロー図

用した。また ⑥ の要件のためには、本装置をクロードシステムにし、処理の最終段階でサイクロンによって砂と油水を分離する設計とした。

本装置の主要部である(砂・油水)スラリージェット噴射・超音波槽の構造は図-5.2のとおりである。

5.2 油汚染砂油分除去実験

実験は、まず前もって油(表-2.3のC重油)を付着させた供試砂約 30 kgf をベルトコンベヤで攪拌槽にバッチ投入した。ここに高温高圧の水ジェットを噴射し、混合攪拌しながら第1次処理を行った。攪拌ジェットの噴射条件は $94\sim 100 \text{ kgf/cm}^2 \times 13 \text{ l/min}$ 程度で、5分間噴射した。攪拌槽から排出した砂と油水はその下に設けたタンクに受け、これを水中サンドポンプで吸引して超音

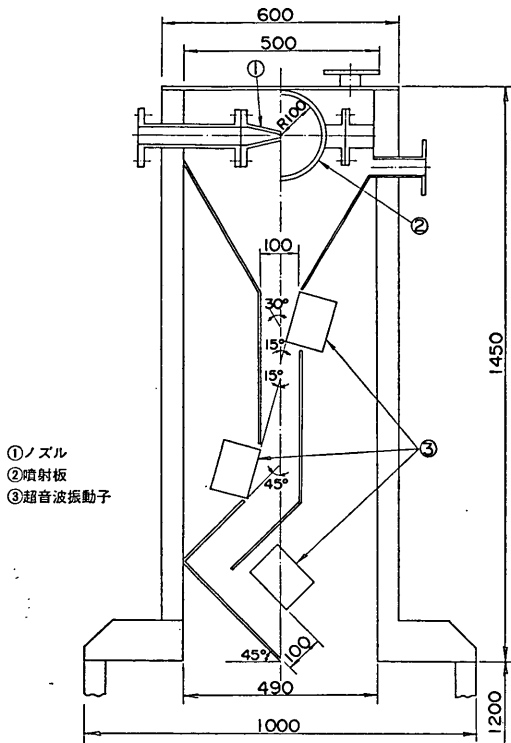


図-5.2 油汚染砂油分除去実験装置の(砂・油水)スラリージェット・超音波槽断面図

波槽のノズルから噴射板に噴射した。噴射板の形状は半球形に設計し、ノズルと噴射板との間隔は 10 mm とした。ノズルからのスラリー噴射量は 0.22 m³/min であったから、その噴射速度は約 7 m/s となっている。

噴射板に衝突した砂粒子は、その衝撃によって付着油をはく離しながら超音波槽の中へ沈降していく。砂粒子の沈降管路は、幅 300 mm×奥行 100 mm の矩形断面

で、この管路の側壁に超音波振動子(定格出力 400 W)を 3 台直列に配置した。超音波振動子は沈降する砂粒子に均一に超音波が照射するように、また照射範囲が広くなるよう角度をつけて取り付けられた。

超音波槽の底に沈降堆積した砂は水中サンドポンプにより吸引し、再び噴射ノズルから噴射する循環洗浄を行うか、サイクロンに導き洗浄砂と油水を分離した。

実験は 2 段階に分けて行った。第 1 段階は、本装置の基本性能を調べるための実験で、比較的低濃度の油汚染砂を対象に表-5.1 の実験条件で 24 ケース行った。第 2 段階は、高濃度の油汚染砂に対する本装置の実用性能を調べるための実験で、表-5.2 の実験条件で 8 ケース行った。

供試砂には図-2.2 の試料 A と試料 B を用いた。付着させた油は表-2.3 の C 重油で、付着油分量は、低濃度付着油除去実験が 3,500~4,500 mgf/kgf 乾砂、高濃度付着油除去実験が 23,000~54,000 mgf/kgf 乾砂であった。供試砂に油を付着させたのち実験に供するまでの期間は約 1 週間である。

砂に付着した油分量の分析方法は、図-3.4 の四塩化炭素抽出法により、付着油除去率の計算は式(4.1)と同じ考えによった。

5.3 油汚染砂油分除去システムの性能

(1) 低濃度付着油除去実験の結果と考察

低濃度付着油除去実験の結果をまとめて表-5.3 に示す。油分除去率は 24 ケースとも 90~100% という高い値を得ることができた(写真-5)。

表-5.3 からわかるように、超音波槽内での砂の循環時間と油分除去率の間には有意な差が認められない。そこでいま、各実験条件ごとに 4 個のデータを平均的に処理することとし、表-5.3 から表-5.4 を作成した。

表-5.1 低濃度付着油除去実験

攪拌ジェット温度 (°C)	超音波照射	砂循環時間 (min)	供試砂	初期付着油分量 (mgf/kgf 乾砂)
85	ON	0, 1, 3, 5	試料 A	3,500~4,500 mgf/kgf
15	"	"	(図-2.2)	"
85	OFF	"	"	"
15	"	"	"	"
OFF	ON	"	"	"
"	OFF	"	"	"

付着油除去システムの開発実験

表-5.2 高濃度付着油除去実験条件

	攪拌ジェット温度 (°C)	攪拌ジェット噴射時間 (min)	超音波照射	砂循環時間 (min)	供 試 砂	初期付着油分量 (mgf/kgf 乾砂)
1	15	5	ON	0	試料 A (30 kgf)	22,727
2	85	5	ON	0		32,500
3	OFF	—	OFF	0		26,000
4	15	5	ON	0	試料 B (30 kgf)	50,400
5	85	5	ON	0		50,400
6	OFF	—	OFF	0		54,240
7	85	10	ON	5	試料 A (62 kgf)	26,000
8	85	10	ON	5	試料 B (48 kgf)	54,240

表-5.3 低濃度付着油除去実験結果

Test No.	攪拌ジェット水の温度 (°C)	砂循環時間 (min)	超音波照射	洗浄前砂の付着油分量 (mgf/kgf)	油除去率 ⁵⁾	Test No.	攪拌ジェット水の温度 (°C)	砂循環時間 (min)	超音波照射	洗浄前砂の付着油分量 (mgf/kgf)	油除去率
1	85	0	ON	27	0.99	13	15	0	OFF	145	0.96
2	"	1	"	17	1.00	14	"	1	"	87	0.98
3	"	3	"	40	0.99	15	"	3	"	68	0.98
4	"	5	"	23	0.99	16	"	5	"	100	0.98
5	15	0	"	24	0.99	17	OFF	0	ON	107	0.97
6	"	1	"	60	0.99	18	"	1	"	126	0.97
7	"	3	"	29	0.99	19	"	3	"	143	0.97
8	"	5	"	30	0.99	20	"	5	"	304	0.93
9	85	0	OFF	56	0.99	21	"	0	OFF	204	0.95
10	"	1	"	75	0.98	22	"	1	"	138	0.97
11	"	3	"	44	0.99	23	"	3	"	167	0.96
12	"	5	"	106	0.97	24	"	5	"	251	0.94

注 1) 攪拌ジェットノズル出口圧力×流量=100 kgf/cm²×13 l/min

2) 超音波槽の中で砂を循環させた時間；時間が0は自由沈降のみ

3) 超音波発振器の出力=240~260 W/台×3台

4) 洗浄前の砂の付着油分量=3,500~4,500 mgf/kgf (平均 4,090 mgf/kgf) [oil/sand]

5) 油分除去率=(洗浄前砂の付着油分量-洗浄後砂の付着油分量)÷洗浄前砂の付着油分量

表-5.4 を基に本システムの性能を評価すると以下のことがいえよう。

a) 攪拌ジェットの効果

攪拌ジェットを本システムに組み入れた目的は、大量の油が砂に付着している場合、あるいは砂にごみが混在しごみにも油が付着している場合を想定し、まず1次処理として、水ジェットの噴射力を利用して、砂・ごみから大まかに油を除去することにあつた。低濃度付着油除去実験条件は必ずしもこれに該当しないが、攪拌ジェッ

トを作用させた場合の効果と、水ジェットの水温による効果を調べてみる。

攪拌ジェットを使用した場合としない場合に生じる油除去性能の変化を洗浄砂の含油分量 (mgf oil/kgf sand) で比較すると、後者を1.00とした場合、前者は0.37~0.53 (ただし、超音波洗浄をしない場合)、および0.16~0.21 (ただし、超音波洗浄をした場合) となる。超音波洗浄の有無にかかわらず、攪拌ジェットの使用による効果が認められる。

表-5.4 低濃度付着油除去実験における油除去性能の評価

Test No.	攪拌ジェット水の温度(°C)	超音波 ¹⁾ 照射出力(W)	洗浄 ²⁾ 砂平均含油量(mgf/kgf)	性能評価	
1~4	85	750	27	0.14	0.16
5~8	15	750	36	0.19	0.21
9~12	85	0	70	0.37	0.41
13~16	15	0	100	0.53	0.59
17~20	OFF	750	170	0.89	1.00
20~24	OFF	0	190	1.00	1.12

注 1) 表-5.3 注 3) より 250 W×3=750 W

2) 表-5.3 において砂循環時間 0 分, 1 分, 3 分, 5 分に対する洗浄砂含油量の平均値

攪拌ジェットの水温による性能の変化を同様に洗浄砂の含油量で比較すると、低温(15°C)の場合を 1.00 とすれば、高温(85°C)の場合は 0.7~0.75 となる。水ジェットの水温による付着油のはく離効果の向上は、モルタルブロックに付着した油のはく離実験においても明らかに認められている。したがって、攪拌ジェットの噴射条件としては、高温高圧のジェットを使用する必要がある。

b) 超音波洗浄の効果

超音波洗浄を行った場合と行わない場合における付着油除去効果の相異を洗浄砂の含油量で比較すると、攪拌ジェットに比べ、その効果の現れ方は顕著でない。これは次の理由によるものと考えられる。

砂・油水スラリージェットが噴射板に噴射され、超音波槽を沈降するときには、大部分の油膜は既に除去され、砂粒子との界面に残着する油のはく離となる。付着

油のはく離のメカニズムを考えれば、既にみたように、この段階になると、付着油のはく離効率が急速に低下するので、超音波照射の効果が顕著に現れないのであろう。

そこで、超音波による洗浄効果をさらに高めるには、超音波出力を増大させること、超音波照射時間を増大すること、などが考えられる。特に、後者に係る設計上の改良策としては、スラリージェット・超音波槽を高くし、砂粒子の沈降時間を長くすること、砂粒子沈降管路形状を改良し超音波振動子の配置を検討すること、槽内に上昇流を作り砂粒子の浮遊時間を助長すること、などの案が考えられる。これらは、最終システムの単位時間当たり処理能力との関連で決定していくことになる。

c) 砂・油水スラリーの噴射による効果

攪拌ジェットおよび超音波洗浄の効果を個別に考察すれば上述のごとくなるが、回収された洗浄砂の油分除去率でいえば 6% 程度の差でしかない。したがって、油付着砂から有効に油を除去した工程が他にあったと考えられる。本システムの残りのプロセスとしては、砂・油水スラリーの噴射工程と、サイクロンによる砂と油水分離工程がある。サイクロンは遠心力を利用し砂と油水を分離するのが主作用であり、砂粒子表面に付着する油を力学的に除去するだけの能力はないと思われる。これに対し、高速の砂粒子が固定壁面に衝突すればその衝撃力と研摩作用によって表面の油膜を破壊することが十分可能である。この点を考慮し、砂・油水スラリーの噴射条件をさらに高めれば、より高い洗浄効果を期待することができると考えている。例えば、水中ポンプの容量を上げ高圧スラリージェットにする方法、直列 2 段のスラリージェット工程とする方法などが考えられる。

(2) 高濃度付着油除去実験の結果と考察

高濃度付着油除去実験の結果を 表-5.5 に示した。

表-5.5 高濃度付着油除去実験結果

Test No.	攪拌ジェット水温(°C)	砂循環時間(min)	超音波照射出力(W)	初期付着油分量(mgf/kgf 乾砂)	洗浄砂付着油分量(mgf/kgf 乾砂)	油分除去率
1	15	0	750	22,727	1,250~ 2,500	0.89~0.94
2	85	"	"	32,500	360~ 520	0.98~0.99
3	—	"	0	26,000	1,350~ 1,650	0.94~0.95
4	15	"	750	50,400	19,670~26,450	0.48~0.61
5	85	"	"	50,400	3,380~ 6,260	0.88~0.93
6	—	"	0	54,240	19,200~33,000	0.39~0.65
7	85	5	750	26,000	420~ 520	0.98
8	85	"	"	54,240	3,720~ 4,340	0.92~0.93

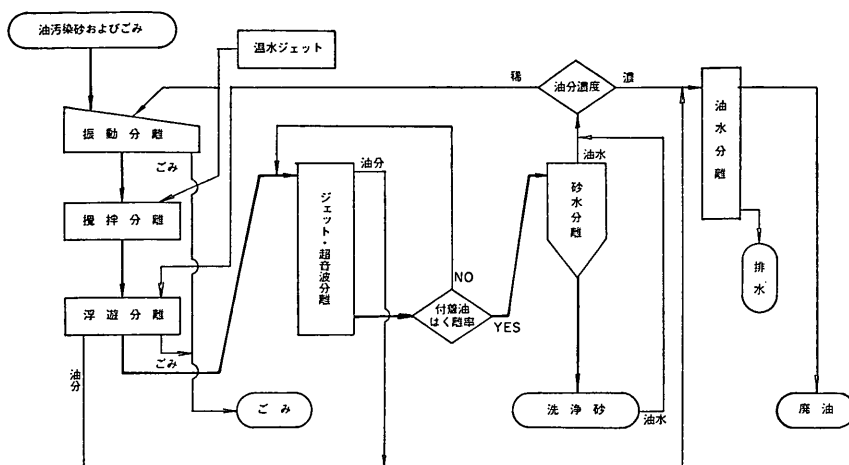


図-6.1 油汚染砂油分除去システムの提案

ごみと砂を混合しただけの試料の場合、篩機のスクリーン上に残留する量は投入量の13~50%で、そのうち砂の量は砂投入量の7~33%であった。この砂は湿った海草中に残ったものである。次に、スクリーン上に水ジェットを噴射しながら試料を投入すると、砂分は完全に流出し篩機にはごみのみ残留した。

油を付着させたごみと砂の試料に対しても、スクリーン上への水ジェットの噴射は効果的で、ほぼ完全にごみと砂を分離することができた。

水ジェットを噴射することの利点は、砂とごみを完全に分離するとともに、付着油の除去にも効果的に作用することである。実用化に際しては、この水ジェットを高温高圧の水ジェットにすることにより、この効果をさらに期待できると考えている。

(2) 油汚染砂油分除去システムの提案

油汚染砂油分除去をシステムとして図-6.1のシステムを提案する。本システム構成を簡単に説明すると

a) 前処理

篩機によってごみと砂を振動分離したのち、攪拌ジェットにより砂から油分を1次除去する。使用する水ジェットはいずれの工程とも高温高圧の水ジェットとする。攪拌槽では攪拌翼による機械的攪拌を併用することも考えられる。

b) スラリージェット・超音波分離

砂・油水スラリー噴射工程と超音波洗浄工程を組み合わせる。砂・油水スラリーの噴射条件は出来るだけ噴射流速を高くする(モルタルブロック付着油はく離実験を

参考とし、噴射流速は20m/sec以上に設計する)。また、スラリージェット噴射工程を直列2段に設計するのも効果的であろう。

c) 砂・油水分離

サイクロン方式により洗浄砂と油水を分離する。排水はクローズドシステムとし、油分濃度が高くなるまで循環使用する。

(3) その他

a) 砂混入ジェットノズルの改良

岩礁や護岸に付着した油を水ジェット法によりはく離する場合、水ジェットに砂を混入するのが効果的であり、また作業能力も良い。しかし大量の砂を使用すれば砂の沈澱等による2次汚染を誘起することも考えられるので十分注意する必要がある。この問題を解決するには、少量の砂を効率よく水ジェット中に混入するノズルを開発することである。現在、水ジェット砕岩工法の研究開発において、砂混入ジェットの研究が行われているのでそれらの技術を応用することが可能であろう。

はく離後の油は、一部はo/wエマルジョン化するが、大部分は海面に再浮遊するので、その回収は従来の海面浮遊油回収装置を用いて回収処理することとなる。

b) 岩礁海域へ接近できる作業船の開発

岩礁付近での防除作業は、海象・気象条件、地形等によって作業能率が大幅に左右される。特に陸側から海岸線への接近が困難なところでは海側から作業船によって接近することになるが、このような海岸線は海側からの接近も危険を伴うことが多い。

トータシステムとしての防除作業は、このような場合にも高い能率と安全性を備えた活動が要求される。今後、このような条件にも十分対応できるような作業船の開発が合わせ必要だろう。

7. ま と め

本研究によって次のことが明らかになった。

(1) 岩礁・護岸等に漂着し、付着した油を除去する方法として水ジェット法を適用し、その付着油はく離性能を調べた。付着油はく離性能の評価には、はく離力変数 f_j を導入した。

(2) 水ジェットのみを噴射によって付着油をはく離する場合、付着油はく離率 80% を達成するには $f_j = 100$ が必要であった。この結果より推定すると、100% の完全はく離を達成するには $f_j > 200$ が必要となる。

(3) 水ジェットに砂を混入することによって付着油のはく離率を著しく高めることができた。そのはく離促進効果は、水ジェットを単独に使用したときに比べ $1/10 \sim 1/20$ のはく離力変数で同程度のはく離率が期待される。

(4) 付着油はく離率は、油の付着後（流出後）の経過日数によって差が生じ、経過日数の長い場合ほど付着油は固化し、はく離率の低下がみられた。

(5) 海浜に漂着し、付着する流出油の分布は、満潮でい線から波のそ上する範囲が主体である。

一方、砂浜の深さ方向への油の浸透は主として表面下 10 cm 程度までであった。したがって、処理対象とする油污染砂は表層の 15~20 cm と考えられる。

(6) 海浜砂に付着した油の除去方法として超音波洗浄法を適用し、その性能を調べた。油付着砂の超音波洗浄能力を評価する方法として、砂に対するはく離力変数 f_s を導入した。本実験条件の範囲内では、 f_s は超音波出力の 0.8 乗に、また超音波照射時間の 0.4 乗に比例した。

(7) 油污染砂から付着油を除去する方法として、(砂・油水) スラリージェット・超音波併用システムを試作し、その性能を調べた。低濃度油污染砂および高濃度油污染砂の洗浄に対し、付着油の除去率は 90% 以上を示したが、高濃度油污染砂の場合には洗浄砂に残る油分も多いので、その対策を検討した。

(8) 油の付着したごみと砂から、ごみと砂を分離する方法として振動式篩分法が有効であることを示した。なお、篩分時に高温高圧の水ジェットを噴射すれば、分

離は効果的に行われた。

8. あとがき

流出油の問題は、普段はほとんど関心を示されないが、いったん事故が起こるとその被害は多方面に甚大なものがある。今後一段とエネルギー備蓄の動向が強まるなかで、このような事態を想定した研究開発や対策がムード的なものでなく、基本的な問題として日ごろから着実になされるべきだと思慮される。

基礎研究は一応これで完了したが、実用プラントによる性能の確認、フィールドテストによる技術的問題点の検討を行い、その実用性を検証する必要がある。また、特に本研究では処理能力については触れていない。これは実用プラントの設計段階で決められると考えたからである。実験室規模の研究では十分解明され得ない問題も多いと思われるので、機会があれば、さらに研究を継続したいと考えている。

謝 辞

本論文は、昭和 53 年度より昭和 55 年度までの 3 か年に実施した「廃油ボール等による海洋汚染の防止・除去技術に関する研究」(環境庁国立研究機関公害防止等試験研究費)の結果に、一部追加実験の結果を加筆してとりまとめたものである。

研究計画の立案など本研究の前半は、前特殊作業船開発室長(故)宮崎昭児氏の担当によるものである。

付着油の定量的評価に必要な付着油量測定装置(特許出願中)は、機材部作業船研究室の秋園純一君の考案によるものであり、また、現地調査に際しては、機材部木原純孝主任研究官、高橋英俊主任研究官、秋園純一研究員および緒方康正技官(前機材部機械課係長)の協力を得た。

本研究の実施に際し、環境庁企画調整局研究調整課、運輸省大臣官房、港湾局、港湾建設局、および港湾技術研究所の関係各位に多大な配慮をいただいた。ここに深甚なる謝辞を表す次第である。

(1982年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) 昭和 55 年版通商白書, 通商産業省編
- 2) 昭和 55 年版運輸白書, 運輸省編
- 3) IMO による海洋油濁防除指針, 海文堂, pp. 67-79
- 4) Restoration of Beaches Contaminated by Oil, Envi-

ronmental Protection Technology Series, EPA-R2-72-045, 1972年9月, pp. 1-138

- 5) 近藤五郎ほか,「流出原油の経時変化に関する研究, 浮上油の物性の経時変化(第1報)」, 環境技術, Vol. 1, No. 10, 1972, 10
- 6) 佐藤寛ほか,「流出原油の経時変化に関する研究, 浮上油の化学性の経時変化(第2報)」, 環境技術, Vol. 1, No. 11, 1972, 11
- 7) 萩原一芳,「流出油対策」, PPM, 1978, 4
- 8) 日刊工業新聞社,「超音波工業便覧」, 昭和41年10月
- 9) 宮崎昭児ほか,「廃油ボール等による海洋汚染の防止・除去に関する研究, (2) 付着油の除去システムの開発」, 環境保全研究成果集(昭和53年度), 環境庁企画調整局研究調整課編, 昭和54年8月
- 10) 奥出 律ほか,「廃油ボール等による海洋汚染の防止・除去に関する研究, (2) 付着油の除去システムの開発」, 環境保全研究成果集(昭和54年度), 環境庁企画調整局研究調整課編, 昭和55年8月
- 11) 奥出 律ほか,「廃油ボール等による海洋汚染の防止・除去に関する研究, (2) 付着油の除去システムの開発」, 環境保全研究成果集(昭和55年度), 環境庁企画調整局研究調整課編, 昭和56年8月

記号一覧表

- A* : 供試体に付着する初期油分量, または噴流の断面積
- B* : 供試体に付着するはく離実験後の油分量
- F* : 噴流が壁面に垂直に作用する力
- K* : 定数
- P* : 超音波出力
- \dot{P} : 中心軸上振動面から *x* の距離の音圧
- Q* : 水ジェットの噴射流量
- S* : 付着油はく離率
- T* : 水ジェットの水温
- V* : 水ジェットの噴射速度
- \dot{V}_1 : 振動面の振動速度
- a* : 円形振動面の半径
- c* : 音波伝播速度
- d_j* : 水ジェットのノズル径

- f* : 音波の振動数
- f_j* : はく離力変数 (添字 *w* は水ジェット, *s* はスラリージェット)
- g* : 重力の加速度
- t* : 水ジェットの噴射時間, または超音波洗浄時間
- x* : 中心軸上振動面からの距離
- z* : 超音波照射距離
- α : 指数
- β : 指数
- γ : 指数, または水の単位体積重量
- θ : 水ジェットの壁面となす角度
- λ : 音波の波長 ($=c/f$)
- ρ : 媒質の密度

付 録

(1) 最近の例では, 1978年3月, フランス西部ブルターニュ半島沖合で座礁した大型タンカーから流出した原油22万トンが, 同半島北西部海岸を約25km以上にわたって汚染した(朝日新聞, 1978年(昭和53年)3月19日, 3月23日)。また, 1979年6月から8月には, メキシコ湾岸のユカタン半島沖の海底油田から噴出し続けた大量の原油が, メキシコタンピコ南部海岸から米テキサス州沿岸までのメキシコ湾岸地域に漂着し, 大規模な汚染をひき起こした。そのとき海岸に漂着した油塊の厚さは10cmに達したと報じられている(朝日新聞, 1979年(昭和54年)7月23日, 8月8日, 8月15日, 8月16日)。

我が国では, 昭和49年12月18日水島港において重油タンクの破損から重油約7,500~9,500klが流出し, 閉塞海域である瀬戸内海およびその沿岸を長期間にわたって汚染した(海上保安白書)。

(2) 例えば, 昭和54年度に発生した油の排出による事故は1,257件, そのうち防除措置を講ずるに至った事故は646件と報告されている(昭和55年版海上保安白書, 海上保安庁編)。



付着油量 84 mgf/cm²
経過日数 2日
 $f_{jw} = 20$ (砂混入ジェット併用)

写真-1 付着油のはく離状況 (1)



付着油量 63 mgf/cm²
経過日数 15日
 $f_{jw} = 26$ (砂混入ジェット併用)

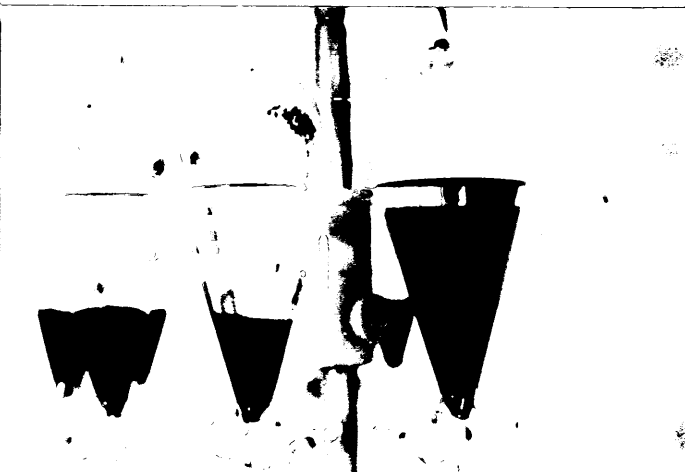
写真-2 付着油のはく離状況 (2)



写真-3 流出油の海浜への漂着および砂への付着



写真-4 干潮時に海浜に残った流出油



試験前 (右) 油分量=4,286 mgf/kgf

試験後 (左) 油分量=24~60 mgf/kgf

写真-5 油汚染砂油分除去システムによる試験試料

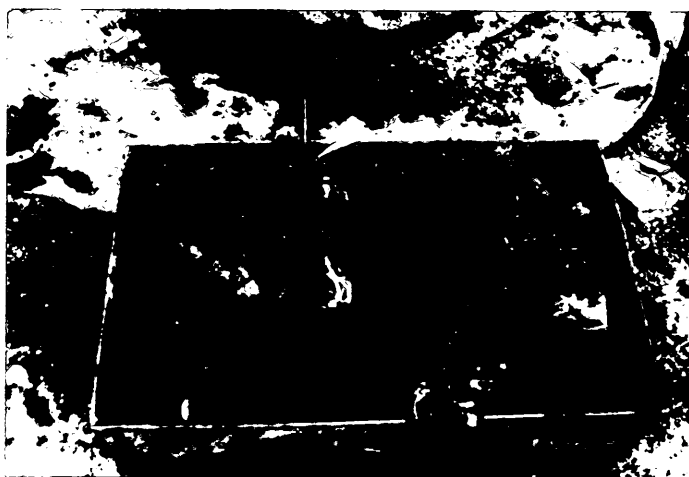


写真-6 ごみと海浜砂の分離実験に供した試料
(木片・プラスチック容器等は前処理で除去)