

運輸省第二港湾建設局 正会員 山口晶敬

〃 〃 正会員 ○中尾邦彦

(株)三井海洋開発 石寺 博

1. はじめに

近年、石油運送の用に供するため、多数の海底パイプラインが建設される様になり、その延長も現在では140 kmにも及んでいる。幸いにして、わが国においては、海底パイプラインによる漏油事故を経験していないが、今後その敷設距離の増大につれ、漏油事故の危険性も充分に考慮しておかなければならない。ところが、海底パイプラインから漏油が生じた場合には、通常の浸透水の問題と異なり、水で飽和された土中を水と混合しない油が一定の圧力で流出し、油と水の特性の相異、漏油口径、漏油圧等が油の拡散速度にどの様に影響を及ぼすか等に関して、未だ未解明の点も多い。ここでは、これらの問題を、定性的、定量的に把握するため、模型実験及び理論解析を行ない、今後、漏油対策を講ずる上での基礎資料を得ることを目的とした。

2. 漏油拡散模型実験

(1)実験装置及び実験方法

図1に実験装置の概略図を示す。二次元水槽には、ガラス球を30 cmの高さまで充填し、さらに底面から40 cmの高さまで食塩水を加える。この様な状態で、コンプレッサーにより加圧された灯油を水槽の下端に設けたノズルから噴出させる。これをカメラで撮ることにより、油の拡散状況及び拡散速度を測定する。実験ケースは、表1に示す通りである。

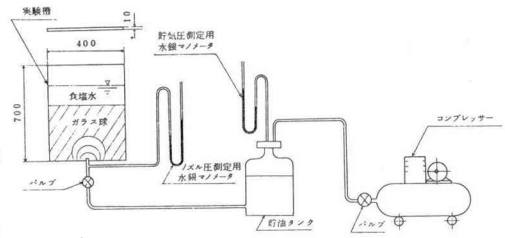


図1 実験装置

(2)実験結果および考察

1)漏油拡散の基本的パターン

油圧の変化とともに漏油拡散のパターンが大きく変化する。以下に3つの基本的パターンの特徴を述べる。

①圧力が小さく全領域がDarcy的に流れる場合(パターン1)

写真1に示すように、油と海水の境界面は半円状になる。漏油の拡散が進行するとともに、境界面は次第にぼやけてくる。これは、境界面が大きくなると油粒子の速度が小さくなり、界面現象がその運動の支配的要因となるためであろう。この場合、境界面付近を拡大してみると、油が枝状に分枝していることが観察される。これはフィンガーリングと呼ばれる現象である。

ガラス球径 ノズル径	2 (mmφ)	3 (mmφ)	4 (mmφ)
0.6	60,110	60,100	60,100
(mmφ)	160,200	140,260	120,160
1	60,110	60,100	20, 60,110
(mmφ)	210,310	160,260	160,260,310
2	20, 60	60,160	60,160
(mmφ)	160,260	260,360	260,360

表1 実験条件〔表中の数値は油圧 (mmHg) を示す〕

条件

ガラス球径 0.6 mmφ

ノズル口径 3 mmφ

油 圧

写真1 60 mmHg

写真2 160 mmHg

写真3 360 mmHg

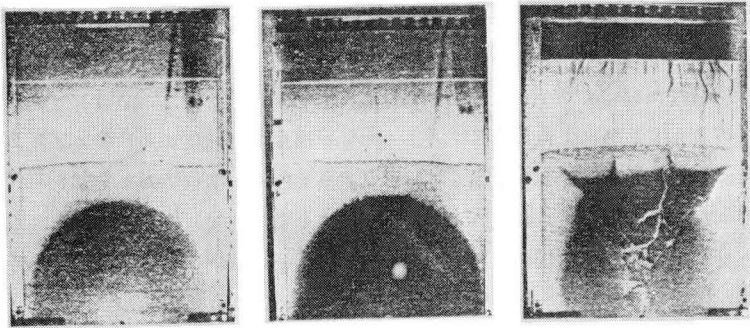


写真 1

写真 2

写真 3

②圧力がやや大きくなり漏油口付近で流動化する場合（パターン2）

油圧を大きくしていくと、やがて漏油口付近に円形の流動化領域が発生する。写真2の下部中央付近の白色の半円がそれにあたり、この領域を詳細にみると、油と砂が混合して渦をまいていることが観察される。この円形領域は、圧力の上昇とともに拡大され、やがて不規則な形となり、渦の運動・形も非定常となる。この時の圧力と流速の関係は、乱流的流動によるかなりの圧力損失のため、Darcy的でなくなる。

③圧力が大きくなりコーン状の亀裂が起る場合（パターン3）

油圧が更に大きくなると、写真3に見られるような亀裂が発生し、油が亀裂を通して流出する。亀裂の入る角度・大きさは、充填材によって大きく異なるが、およそ60°の傾きを持つ。亀裂が入ると、亀裂を通して油が流出するため、漏油量は飛躍的に増加する。

2)油の平均流出速度（図2参照）

平均流出速度 $\bar{V}$ を、 $\bar{V} = Vol / (t \cdot A)$ (Vol : 油の流出量, t : 流出時間, A : 漏油口断面積) とすれば、油圧の小さい場合、 $\bar{V}$ は油圧に比例する。これは拡散パターン1の現象が支配的なためである。しかし圧力の上昇とともに流出速度の増加率は次第に小さくなり、パターン2の現象が支配的となり、直線的でなくなる。圧力が更に大きくなるとパターン3の現象に移行し、流出速度は急激に増加する。また油圧一定の場合は、流出速度の時間的変化もほとんどない。漏油口径の大きいほど流出速度が小さく流動化が起こりやすい。また粒状体 粒径をパラメタとした流出速度の変化については、粒径が小さい程流出速度も小さく流動化を生じやすい。

3)平均漏油拡散速度（図3参照）

漏油拡散速度は、油が球状体に拡散していくため、拡散の初期は、速度が極めて大きく、拡散範囲が広がるとともに急激に小さくなる。そこで漏油が粒状体表面に到達するまでの時間で、粒状体の高さを除した値を平均漏油拡散速度 ($\frac{R_I}{R_I}$) と定義すれば、油圧による $\frac{R_I}{R_I}$ の変化は、パターン3の現象が起こっている場合は、油圧の増加とともに急激に拡散速度が大きくなるが、その他の場合は、一般に $\frac{R_I}{R_I} \propto \sqrt{P}$ (P : 漏油圧) の関係がある。漏油口径をパラメタとした場合は、口径が大きい程拡散速度も大きい。また粒径が大きい程拡散速度も大きいが、粒径が小さい場合には流動化が起こりやすく、パターン3による亀裂が生じる場合は、拡散速度も急激に増大する。

3. 理論解析

図4のような球状拡散のモデルを考え、①土中の水及び油はDarcy的に流れる、②油は無限領域の中で1つの孔から拡散していく、③重力は球対称的である、④油の拡散は準定常状態である、⑤油は海水を排除しつつ球対称的に拡散していくとの仮定で解析を行なった。その結果、拡散速度 $\dot{R}_I$ は次式で与えられる。

$$\dot{R}_I = \frac{1}{R_I^2} \cdot \frac{P_h - \{ \rho_1 (R_I - R_R) + \rho_2 (R_{III} - R_I) \} g - 2 \sigma / R_I}{\beta_1 (1/R_h - 1/R_I) + \beta_2 (1/R_I - 1/R_{II})}$$

σ : 油と水の界面エネルギー密度 β 粘性係数/透過係数

これを無次元化し、平均したものが図3の実線である。理論値と実験値が、圧力の小さいところでは良く一致している。

4. 最後に 理論解析を行なうにあたって、東京大学工学部計数工学科 大島信徳教授に全面的に御指導いただいたことを、ここに付記する。

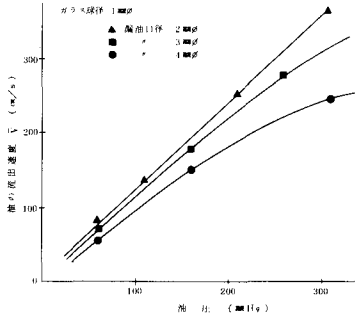


図2 油圧と油の流出速度の関係

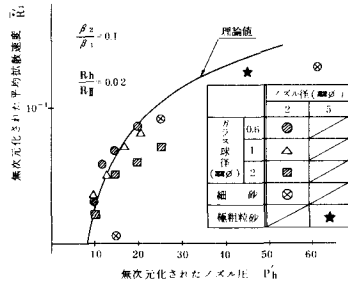


図3 ノズル圧と平均的な拡散速度の関係

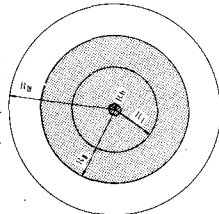


図4 解析モデル

P_h : 漏油口での油圧
 Z : 土砂層空隙率
 ρ : 密度
 g : 重力加速度
添字 1: 油
2: 水

R_h : 油の流出口径
 R_I : 漏油の進行波面
 R_{II} : 土砂層の厚さ
 R_{III} : 海水の深さ