

東京大学 工学部 玉井 信行
 東京大学 大学院 ○福嶋 祐介

1 序

昭和49年12月18日に発生した三菱石油水島製油所のタンク事故により、大量の重油が瀬戸内海に流出した。流出油の到達範囲は水島以東、淡路島・鳴門に及んだ。

流出油の初期の移流は物理法則によって支配され、移動した場所における化学的・生物学的反応がその後の段階において開始される。本報告は、初期の流出油の挙動によりその後の影響圏の大きさが決定される、との認識に立ち、水島事故の際の油の移動の特性を論ずるものである。初期数日間の挙動には風が支配的な要因であると判断され、風速と移動速度との関係が議論された。通例、「油の拡散」という言葉が使用されるが、「拡散」という概念は混合現象において用いられ、かつ時間的な速度偏差が支配的な要因である場合に用いられるべき用語である。こゝで取扱かうのは油の成分が海水と混合する以前の、海域における流動が卓越する期間であるので、この「拡散」という術語を敢えて用いていない。

2 流出源付近の状況

三菱石油水島製油所の配置の概要を図-1に示す。事故を起こしたのは重油を貯溜していた270号タンクで、直径52m、側板の高さ24m、屋根部分を含む全体の高さ30m、内容量公称5万klのドームルーフ型タンクである。このタンクは隣接する271号タンクと20インチパイプにより連結されている。防油堤は同種のタンク6基を囲んで設置されている。防油堤に対する消防庁の基準は、高さが1.5m以下、防油堤内の容積は、最大タンクの容量の5割にその他のタンクの容量の和の1割を加えたものを下廻らないことが要求されている。270号タンク周辺の防油堤は、地盤面から天端までの高さ1.5m、天端での厚さ12cm、地表面での厚さ20cmの鉄筋コンクリート擁壁となっている。

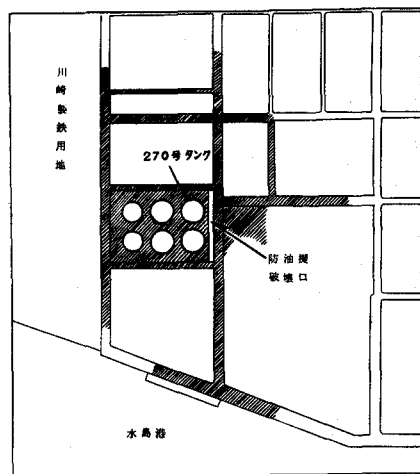


図-1 水島製油所構内における重油汚染区域の概況

(a) 事故の概況： 12月18日20時40分頃タンクからの重油洩れを巡視員が発見、警戒している中を21時10分頃底部より急激な流出が生じた。この時点での流量は、タンク内の液面降下速度から判断して8.5 m³/secと推定されている。270号タンク内の重油量は当時約37,000 m³であった。当初は、この量のみが流出したものと考えられていたが、その後の調査により、漏洩発見当初に保安要員が液面の高い270号タンクの重油を271号タンクに移送しようとしてバルブを開放したことが判った。しかし、タンクの底板と側板との境界部の亀裂が拡大し流出量が増大した21時10分以降はこのバルブを閉めることが不可能となり、271号タンクの貯油量約6,000 m³が最終的には270号タンクへ逆流し、総流出量は約43,000 m³に達した。270号タンクには点検用の垂直型のはしごが取り付けられているが、このコンクリート製基礎（約30トン）がタンクに生じた亀裂部付近にあったため、流出油による地盤の洗掘及び流体力を受けて滑動し防油堤に激突し、これを深さ90cm、天端での長さ10mにわたり三角形に破壊し、一部は防油堤外にまで移動した。はしごの上部は吊構造となってタンクに支持されていたので、はしごの先端は防油堤内に

タンクに向って倒壊した。さらに、こうした激しい流出は通気管の能力(4000 m³/hr)をはるかに超えたのでタンク内に負圧状態が生じ、それにより屋根全体がへこみ衝撃的に圧力が増加したと考えられる。その際には流出量が急激に増加し、約26 m³/secに達している。

(b) 防油堤破壊口からの流出： 防油堤からの流出は、ほぼ三角形の切欠きからの流出であると考えることができる。越流深をh mとしたときの流量は

$$Q = 2361 \tan \frac{\theta}{2} \cdot C h^{5/2}$$

であり、Cは流量係数である。流量係数については切欠き角度が鈍角である場合は在来の公式の範囲外であるが、大略の値として0.60を用いる。切欠き角の正接としては $\tan \theta/2 = 5.55$ であるから上述の式を用いての推定流量は

$$Q = 2361 \times 5.55 \times 0.60 \times 0.9^{5/2} = 60 \text{ m}^3/\text{sec} \quad (1)$$

となる。タンクからの流出量は前述のごとくこの値を上廻っているので、流出油は防油堤内にほぼ全面的に貯留され、その後破壊口からの流出が続いたものと思われる。ただし、重油は事故を起こした270号タンクと道路を隔てて対置している原油タンク群の防油堤を乗り越えてその堤内に侵入しており、流出の最盛時には270号タンクの防油堤自体も相当の幅にわたって乗り越え、式(1)で与えられる値より大きな流量が防油堤外へ流出したものと思われる。

(c) 地表面での拡がり： 水島製油所構内において、流出した重油が到達した範囲の概況は図-1に示されており、計80000 m²の面積と推定される。構内は防油堤で区切られた形式となっているので、重油は防油堤壁面にはさまれた道路上を一次的に拡がった結果となっている。道路沿いの防油堤壁面の痕跡は、油面勾配がほぼ一定であったことを示している。構内の図面より重油は大略400 m流れて食い止められている。液面差は1.5 mであるので、平均液面勾配は1/267、油の平均深さは0.75 mである。路面はアスファルト舗装であるので、粗度係数の値としてn=0.014を採り、上記の液面勾配が定常的に存在していたものと考えた場合の平均流速を算定する。

$$v = \frac{1}{n} h^{2/3} I^{1/2} = \frac{1}{0.014} (0.75)^{2/3} (1/267)^{1/2} = 3.6 \text{ m/sec} \quad (2)$$

現場で警戒に当たっていた人の言では、流出した重油先端の進行速度は相当速いものであったらしく、逃げるのに精一杯であり、膝まで浸った人も多かったという。従って、式(2)の推定はほぼ妥当なものであろう。しかし、今回の流出は両側に防油堤の存在する水路中の流動とも言え、もし半円形あるいは円形に近い形状で流出する場合の速度は数分の一になるであろう。

8 海面上における油の拡がり

まず、海面上に流出した重油量の算定を行なう。

防油堤内残存量 $160 \times 240 \times 0.6 \approx 23000 \text{ m}^3$

構内残存量 $80000 \times 0.1 = 8000 \text{ m}^3$

全流出量からこれらを差引くと12000 m³となる。構内における地盤中への浸透を見込んでも、約10000 m³の重油が海上へ流出したと推測される。海上へ流出した重油量については、新聞発表でも当初の8000 m³から数週間後の8000 m³まで変化している。海面上での油層の挙動を考える際の基準としては、本報告では10000 m³の重油が初期に海上に放出されたと考えて考察を進める。

図-2

流出油観測結果

12月19日 1545

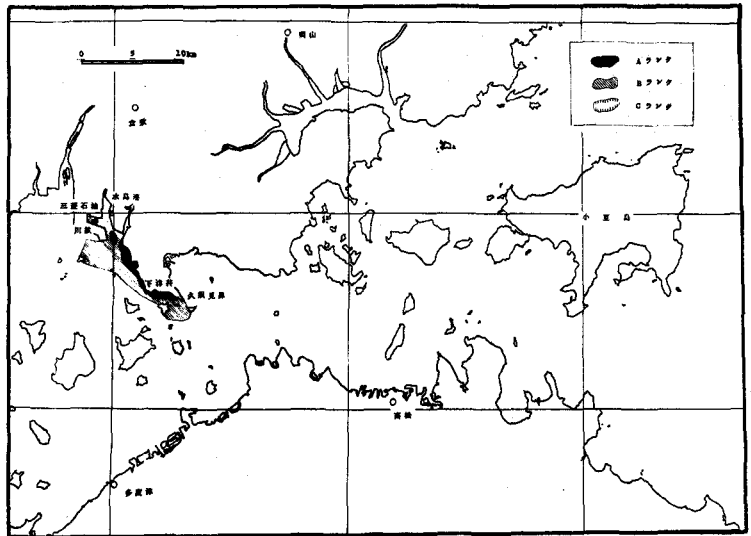


図-3

流出油観測結果

12月20日 1530~

1610

西風 12m/s (1545)

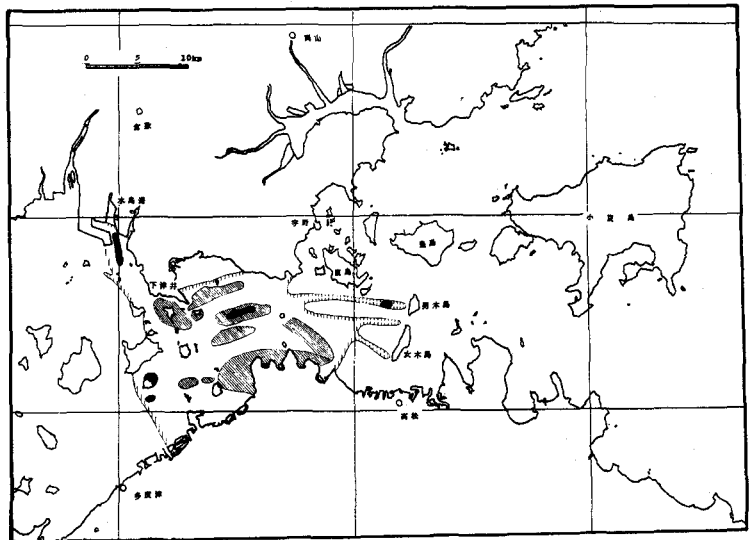
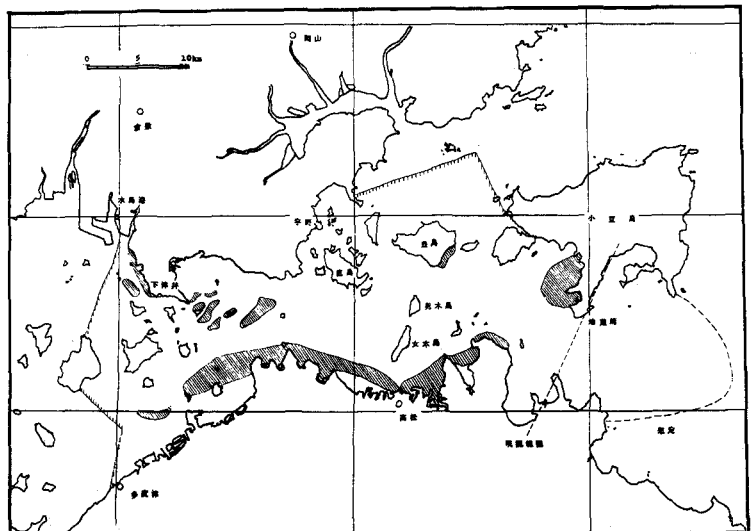


図-4

流出油観測結果

12月21日 1545~

1650



境界条件が明確に規定されている実験室内での油層の拡がりについては、粘性係数、表面張力などの関数として油層厚さ、拡がり速度などが一次元、二次元の場合について検討されている。水島の事故に関しては流出時刻が夜間であり、水島港内に流出した初期の状態については詳しい状況が判然としない。従って、細かな議論はできないので、海面上に流出した後の油層の挙動につき特徴的な事柄の大綱をまとめると共に、簡略化した境界条件の下で在来の式に基づいて算定された結果と比較検討を行なう。

第六管区水島海上保安部の観測結果を図-2, 3, 4に掲げる。重油流出後19日零時頃水島港切込港湾においてオイルフェンスを張る作業が行なわれたが、毎秒10mを越す強い北西風によりこれが切断された。こうした状況から判断して、水島港口に流出重油が到達したのは19日早朝(例えば3時頃)と考えられる。図-2は19日1545時の観測であり、Aランクの油層の先端は久須見鼻付近に達している。油層のランクは目視による階級を示し、Aは茶褐色あるいは暗褐色に見える油層、Bは七色の暗い色調、Cは七色の明るい色調等で、この順に油膜の厚さが減少している。図-4では、Aランク域の先端は男木島西部まで移動しており、図-5では小豆島地蔵崎に達している。これをまとめると、Aランク域の進行距離は表-1のようにまとめられる。Aランク域に着目したのは、この油層は層厚も一番大きく、局所的な流動に作用されず海域の大局的な性状を代表していると考えられる故である。この結果、水島港より西部の海域には殆んど到達していないのが特徴的である。

表-1において参考のために掲げられたH O U L Tの式を以下に示す。この計算では現象はすべて一次元として扱われ、簡単化された以下のような前提の下で算出されている。初期流出量は前述の如く $V=1$ 万 m^3 である。水島港は幅800m、長さ3kmの水路、水島港口より下津井までは幅2km、長さ7kmの水路、下津井以東の瀬戸内海は幅10kmの水路に置換されている。通例、油層の運動は慣性域、粘性域、表面張力域の順に生ずるとされ、それぞれの領域での油層先端までの長さ l と時間 t の関係は次式で示される。

慣性域

$l = 1.5 (\Delta g A t^2)^{1/3}$

粘性域

$l = 1.5 (\Delta g A^2 t^{3/2} / \nu^{1/2})^{1/4}$

(3)

表面張力域

$l = 1.33 (\sigma^2 t^3 / (\rho^2 \nu))^{1/4}$

ここに、 Δ は油の密度 ρ_o と海水の密度 ρ の差を表わす比($\rho_o = \rho(1 - \Delta)$)、 g は重力加速度、 A は単位幅当りの流出油量、 ν は海水の動粘性係数、 σ は油の表面張力である。水温は10℃とし、海水と水の動粘性係数は等しいと考えて、 $\nu = 0.0130 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、表面張力は原油の代表値 $\sigma = 25 \text{ dyne/cm}$ を用いている。

表-1 Aランクの油層の進行距離

日 時	油層東端位置	進 行 距 離 (km)	
		観 測	H O U L T の 式 (1)
18日2200時	三菱石油		
19日0300時	水島港口	3	1.1 (慣性域及び粘性域)
1545時	久須見鼻	10	1.3 (粘性域及び表面張力域)
20日1545時	男木島西方	20	2.6 (表面張力域)
21日1615時	地蔵崎	20	2.1 (表面張力域)

観測時刻		12月18日		12月19日		12月20日		12月21日		12月22日		12月23日		12月24日	
		風向	風速 0.1m/s	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速
多度津	03	06	003	14	088	07	020	13	028	07	017	07	007	04	003
	06	00	000	13	048	13	005	13	030	07	017	06	015	05	013
	09	15	012	14	042	13	063	13	033	06	015	05	013	06	010
	12	09	003	14	045	13	067	13	035	15	018	01	030	16	012
	15	11	033	15	038	13	042	11	040	15	018	02	037	13	023
	18	14	020	15	038	13	075	12	013	08	013	06	015	10	025
	21	14	026	14	045	13	060	06	020	06	013	05	015	12	038
24	13	067	07	012	13	048	06	017	06	013	06	015	14	050	
高松	03	08	013	14	053	10	022	12	047	09	010	11	018	08	017
	06	05	005	13	040	11	016	13	028	10	020	09	018	09	008
	09	10	015	13	030	10	028	12	035	11	015	08	007	11	012
	12	11	025	14	048	13	065	15	042	16	027	16	040	03	010
	15	11	027	15	062	13	043	15	025	01	023	04	035	14	030
	18	13	038	13	040	14	037	10	022	07	012	07	063	14	012
	21	14	053	10	012	13	028	09	015	10	013	08	012	11	008
24	14	043	11	022	13	042	08	013	11	015	08	017	14	043	
岡山	03	02	013	11	015	00	002	14	020	00	002	00	002	00	002
	06	05	005	13	025	13	005	00	000	00	000	00	000	02	003
	09	07	012	12	033	11	008	13	008	05	008	04	007	00	000
	12	11	010	14	052	12	060	12	012	09	013	05	013	12	007
	15	11	020	15	025	12	060	02	015	09	017	03	020	11	003
	18	12	030	12	013	12	040	15	020	00	000	00	000	11	008
	21	13	017	12	017	13	017	11	012	11	003	00	000	11	035
24	12	022	11	010	12	028	13	005	11	008	15	008	11	035	

表-2 風向・風速観測結果 (2)

この結果よりAランク部分の24時間内の東方への進行距離は約20kmと判断される。24時間の時間間隔を選んだのは、この時間は潮汐は2周期に相当し、往復流成分はほぼ零と考えられる故である。水島沖において浮子を投入して混合係数を調べた報告によれば、この海域で東方へ向かう潮流成分が特に強い、という結果はなく、表-1の移動距離への潮汐の寄与は殆んどないと言ってよいであろう。また、瀬戸内海においては東へ向かう有意な大きさの恒流成分は報告されていない。HOUTの解析は、油層と海水との間に存する圧力、慣性力、粘性力、表面張力の平衡から得られたものであり、油と海水の系の内力から得られた結果である。

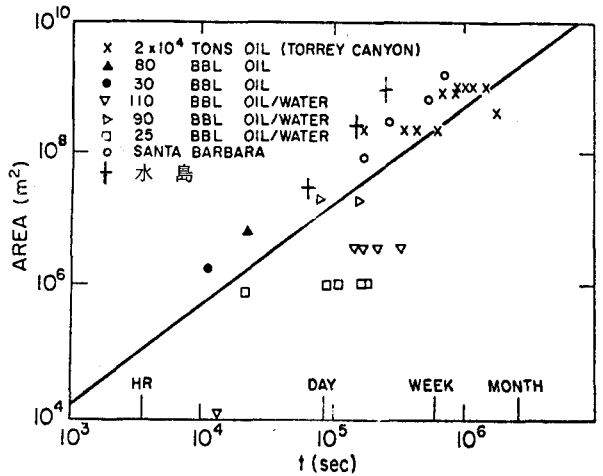


図-5 表面張力域での面積変化

この結果が観測結果に比べて十分に小さいことは、油層の移動に支配的な役割を果たしたのは海域の構造であり、東方のみへ移動したのはこの当時相当強かったと言われる北西あるいは西の風によるものと判断される。

流出海域付近で風向・風速の測定結果が入手できるのは岡山、多度津、高松の三地点であり、事故当時の結果を表-2に示す。これらはいずれも陸上の測候所で得られた値であり、観測機が海上から報告した値より相当小さくなっている。因みに流出当日は北西の風が強く（毎秒10m以上）波も高く、オイルフェンスが切れたことが報告されていたり、20日の観測時点では西の風12m/sが記録され、21日11時の観測では西北西の風5m/sが記録されている。海上における風速値と陸上における値との相関には不明な点が多いが、海上での観測値をもとに移動距離との関係を求めておこう。表-1の移動が観測された2日半の間の平均風速を6m/sと考えると

$$(\text{Aランク先端の移動速度}) = (\text{平均風速の} 39\%)$$

という結果になり、従来も報告されている風速の3~4%の範囲内にある〔3〕。

表面張力域と考えた油の表面積の変化と観測値との比較を参考のため図-5に掲げる。油の影響面積の増大にはあらゆる要因が影響しているが、長期にわたる油と海水の系の内力としては表面張力が支配的であるので、従来の事故結果もこうして比較されている。これをみると今回の流出油の拡がり面積は一番大きな傾向を示し、系外からの風の影響が非常に強かったことを示している。

瀬戸内海は地形が複雑で、地形性の環流が発達する水域であるので、風が強くなければ潮流の残存成分に加えて拡散型によっても油濁現象は伝播する。流出一週間後の移動状況を見ると、油の移動外縁は水島沖から西方にも約20km及んでいる。この時点では東方には100km以上伸びており、鳴門海峡を越え紀伊水道に達している。水中に溶け込んだ油の成分が拡散により伝わる距離 ℓ_d のオーダーは、 $O(\ell_d) = (Dt)^{1/2}$ である。ここに、 D は縦方向移流拡散係数で瀬戸内海においては $10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーと考えられる〔4〕。従って、1週間での伝播距離は25kmのオーダーであり、水中の成分もこの程度の距離に影響を及ぼすことになる。しかし、瀬戸内海の海水は従来より油分が高いと言われており、今回の流出に伴う広域的な油分の増加については検定が非常に難しい面がある。

4. 結語

一週間程度の範囲内では、流出油の移動を支配するのは風と海域の流況であり、その後は移動した場所での化学的・生物学的反応が重要になるものと考えられる。風速と油層の移動速度の間には、従来発表されてきた関係が当てはまるようである。

昭和49年12月28日の現地調査にあたり、種々の便宜を図られた総合安全工学研究所、東京消防庁の関係者に謝意を表する。

参考文献

- 〔1〕 HOULT, D. P. : Annual Review of Fluid Mech., Vol. 4, 341, 1972.
- 〔2〕 気象庁 : 地上気象観測日原簿
- 〔3〕 O'BRIEN, J. A. : J. Hydraulic Res., Vol. 9, No. 2, 197, 1971.
- 〔4〕 TAMAI, N. : Coastal Eng. in Japan, Vol. 17, 185, 1974.