

海での石油の拡がり

中央大学 首藤伸夫

1. はじめに.

海面に放出された石油は、さまざまな因子の影響のもとで拡がって行く。石油を拡げるように作用する力には、重力、表面張力、剪断流の効果、乱流などがある。石油を移流させるものは、風、潮流、波、沿岸流などであろう。これに対し、石油を拡げないように働くのは、慣性力、粘性などである。これら諸因子の影響下に、石油の拡りや移動が決定される。

以下に、いくつかの解析方法、実験例を紹介する。また、現地実験例をもしめし、今後の研究を必要とする問題点を明らかにしたい。

2. 三つの領域

F_{ay} によると、静水上に放出された石油の拡りは、重力、表面張力、慣性力、粘性力のフリのあいによって決定される。或る瞬間に、体積 V の油が海上にあるとき、その後の拡がりを次のように解析する。

まず、蒸発等による体積減がないとすると、

$$V \sim l^2 R \quad \dots\dots\dots (1)$$

である。ここで、石油は半径 l の円形をし、厚さは R と考えている。 l, R 共、時間とともに変化して行く。

水の密度 ρ_w , 油の密度 ρ_o のとき、密度差 $\Delta\rho$ に起因する水平方向の圧力は、単位面積あたり $\rho_o \Delta g R$ で、これを総計すると、

$$\text{重力: } (\rho_o \Delta g R) R l \sim \rho_o \Delta g V^2 l^{-3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。もうひとつの拡げようとする力は表面張力である。 σ_w を空気・水界面、 σ_o を油・空気界面、 σ_{wo} を油・水界面に働く表面張力とすると、 $\sigma = \sigma_w - \sigma_o - \sigma_{wo}$ が拡げようとする方向に働くから、

$$\text{表面張力: } \sigma l \quad \dots\dots\dots (3)$$

であたえられる。慣性力は、油の全質量 $\rho_o R l^2$ と、加速度 $l t^{-2}$ とを用い、

$$\text{慣性力: } \rho_o R l^2 (l t^{-2}) \sim \rho_o V l t^{-2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

とかける。次に粘性力であるが、もし油の粘性が非常に強く、油層内の流速分布が一様とみなされる場合には、油にひきずられて動く水層内の速度勾配が問題となる。水中に発生している境界層の厚さは、 $(\nu_w t)^{1/2}$ に比例するから、 $\tau = \mu_w \frac{\partial u}{\partial y} \sim \mu_w (l t^{-1}) / (\nu_w t)^{1/2} = \rho_w \nu_w^{1/2} l t^{-3/2}$ を全底面に同じ集計すると、

$$\text{粘性力(1): } \rho_w \nu_w^{1/2} l t^{-3/2} l^2 = \rho_w \nu_w^{1/2} l^3 t^{-3/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

である。油の粘性が水のそれにくらべて小さいときは、水は殆んど動かず、粘性による力は、油層内の速度勾配と関連づけられる。このとき、上式の $(\nu_w t)^{1/2}$ のかわりに油層厚 R を使用して、²⁾

$$\text{粘性力(2): } \mu_o (l t^{-1}) / R \cdot l^2 = \mu_o l^3 V^{-1} t^{-1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

である。

さて、 F_{ay} によると、重力・慣性域は、(2) と (4) が運動を決定する領域であるから、

$$l \sim (\Delta g)^{1/4} V^{1/4} t^{1/2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

のように、油の至は、時間の平方根に比例して拡がって行く。時間が経過すると、慣性より粘性がきくので、

$$l \sim \nu_w^{-1/12} (\Delta g)^{1/6} V^{1/3} t^{1/4} \quad \dots\dots\dots (8)$$

が(2), (5) からえられる。油にくらべ水の粘性が勝るときには、(2), (6) から²⁾

$$l \sim \nu_w^{1/8} (\Delta g)^{1/8} V^{3/8} d^{1/8} \quad \dots\dots\dots (9)$$

が運動を記述する。油膜がさらに薄くなると、表面張力と粘性による力とで運動がきまる。(3), (5) とから

$$l \sim \sigma^{1/2} (\rho_w \nu_w)^{1/4} d^{3/4} \quad \dots\dots\dots (10)$$

をうる。

上の取扱いは、瞬間に放出された油が軸対称に拡がって行く場合のものである。拡がり幅が水路幅 b で規制される場合には、 l と l の関係は異なったものとなる。また、流量 Q で連続的に投入される場合の先端までの長さ l と l の関係も、類似の解析からえられる。結果を表-1にまとめてしめす。

表-1 領域の区分

	拡りの次元	重力・慣性域	重力・粘性域		表面張力・粘性域
			油内の速度勾配を無視	水内の速度勾配を無視	
瞬間放出 $V = \text{一定}$	1	$(\Delta g)^{1/3} \left(\frac{V}{b}\right)^{1/3} d^{2/3}$ $C = 1.39$ 理論 ³⁾ $C = 1.6$ 実験 ³⁾	$\nu_w^{1/8} (\Delta g)^{1/8} \left(\frac{V}{b}\right)^{1/8} d^{3/8}$ $C = 1.39$ 理論 ³⁾ $C = 1.76$ 理論 ³⁾ $C = 1.5$ 実験 ⁴⁾	$\nu_w^{1/8} (\Delta g)^{1/8} \left(\frac{V}{b}\right)^{1/8} d^{3/8}$	$\sigma^{1/2} (\rho_w \nu_w)^{1/4} d^{3/4}$ $C = 0.665$ 理論 ⁴⁾ $C = 1.33$ 実験 ⁵⁾
	2	$(\Delta g)^{1/4} V^{1/4} d^{1/2}$ $C = 1.14$ 理論 ¹⁾	$\nu_w^{1/12} (\Delta g)^{1/6} V^{1/3} d^{1/4}$ $C = 0.978$ 理論 ¹⁾ $C = 1.12$ 理論 ⁴⁾	$\nu_w^{1/8} (\Delta g)^{1/8} V^{3/8} d^{1/8}$ $C = 1.64$ 実験 ⁶⁾	$\sigma^{1/2} (\rho_w \nu_w)^{1/4} d^{3/4}$ $C = 0.128$ 理論 ⁴⁾
連続放出 $Q = \text{一定}$	1	$(\Delta g)^{1/3} \left(\frac{Q}{b}\right)^{1/3} d$	$\nu_w^{1/8} (\Delta g)^{1/8} \left(\frac{Q}{b}\right)^{1/8} d^{7/8}$	$\nu_w^{1/5} (\Delta g)^{1/5} \left(\frac{Q}{b}\right)^{3/5} d^{4/5}$	$\sigma^{1/2} (\rho_w \nu_w)^{1/4} d^{3/4}$
	2	$(\Delta g)^{1/4} Q^{1/4} d^{3/4}$	$\nu_w^{1/12} (\Delta g)^{1/6} Q^{1/3} d^{7/12}$	$\nu_w^{1/8} (\Delta g)^{1/8} Q^{3/8} d^{1/2}$	$\sigma^{1/2} (\rho_w \nu_w)^{1/4} d^{3/4}$

1) Fennlop & Walden, 2) Suchan, Liang, 3) Buckmaster, 4) Howlt, 5) Lee, 6) 日本海難防止協会

重力・慣性域と重力・粘性域の境界は、(4) と (5) とから

$$l \sim (\nu_w d)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる附近であらう。また、重力・粘性域と表面張力・粘性域との境界は、(2) と (3) から

$$l \sim (\sigma / \rho \Delta g)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

の附近である。諸法則の形がきまると、残る問題は比例係数の大きさとなる。

3. 理論解と実験実測値

3-1. 重力・慣性域

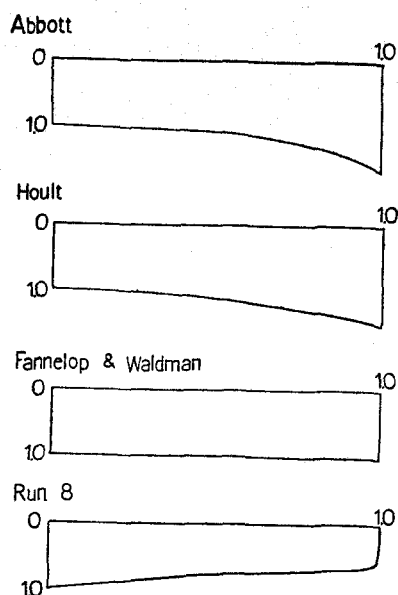
理論的解法としては、特性曲線法によるもの³⁾、相似解の存在を仮定するものがある^{4), 5)}。この領域の解をもとめるとき最も問題となるのは、先端の波速をどう表現するかということである。普通は、波速 U_f と先端での厚さ h_f の間に、 $U_f = h_f (\Delta g h_f)^{1/2}$ とおく。表-2に、実測された h_f の値をしめす。Benjaminの解析によると、粘性を無視できる重力流の場合、 h_f は h_f と水深 d の比の関数として、図-1の曲線のようにあたえられる。また中央大学での実験によると⁷⁾、 h_f は $Re = U_f h_f / \nu_w$ にも依存するようである。図-1の実は、軽油、機械油をつかった実験例である。沿岸にある石油タンクからの流出の場合、油の厚さが厚くなる程、粘性が増す程、 h_f が小さくなることを考へに入れる必要がある。

図-2は、三つの理論解、および実験から、油層の断面形状をしめしたものである。Abbottのものは、瞬間放出で軸対称、次の二つは瞬間放出で一次元、実験値は連続放出で一次元である。理論解は実験例と異なった形をし

表-2. k_f の値 (4), 3), 6), 8), 9), 10).

実験者	k_f	備考
Suchon, Liang	1.1	水と油
Abbott	1.31	流水とパラフィン
"	1.0	静水とパラフィン
船舶技研	1.23	水とA重油
"	1.04	水とB重油
Kaulagan	1.20	淡水と塩水 $k_f/d = 0.111$
"	1.07	" $Re > 500$
Wood	1.09	"
Yie	0.67	" $k_f/d = 0.5$
Simpson	0.30~0.65 平均 0.62	大気 厚さ 700m 位
Georgi	0.74	" " 350m "
Farguharson	0.9	" " 1100m "
Freeman	0.67	" " 1500m "
Dalsi	0.72	" " 1200m "

図-2. 重力・慣性域の断面形



ている。いずれも、横軸 1.0 が先端であり、厚さの基準は中部部（放出点）でのものをもっている。

3-2. 重力・粘性域

この領域での理論解には、Hoult⁴⁾、Fannelop & Walden⁵⁾、Buckmaster¹¹⁾のものがある。それぞれによる断面形状は、図-3に実線で示されている。三理論とも、油の粘性がきわめて大きく、あたかも平板が水面をすべっているのと同じ状態であると仮定している。Hoult は、水中の境界層の流れを完全には解きえず、一々の未知数を一次元実験の結果から決定した。この値を二次元の場合にも適用している。Buckmaster は、この難点を克服して、理論的に比例常数 1.76

をえた。実験値 1.5 との食い違いについては、「実験では乱流境界層となっているのだろう。」としている。三理論の主な差は、剪断抵抗の分布に顕著にあらわれている（図-3の実線参照）。

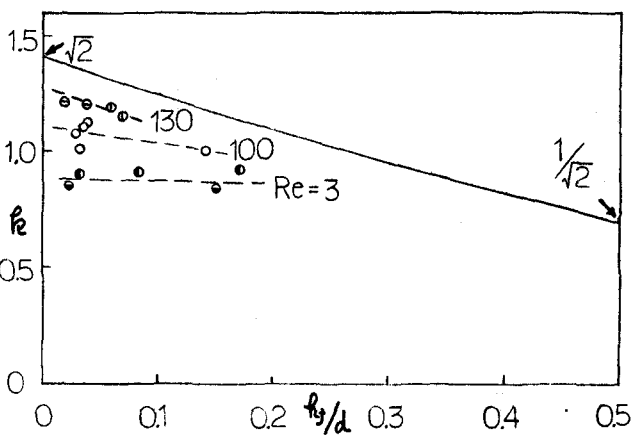
この他に、油内での粘性消費を重視する考えもある。日本海難防止協会の報告書によると²⁾、海上保安庁が八丈島沖で実施した実験結果は、この考え方で良く説明できるとされている。

油の種類、粘性係数などについての詳細が不明なので、上の二通りの考えのいずれが、どのような条件下に妥当なのか判断できない。

3-3. 表面張力・粘性域

Hoult の理論解があるが⁴⁾、表-1にある通り、Lee の実験値とは大きく異なる値をあたえる⁷⁾。この原因は、いまだにあきらかでない。

図-1. $k_f \sim k_f/d$



4. 最終的な膜厚

油膜が水上にレンズ状の断面をもって安定すると考えると、 σ の値が最終厚さをきめることとなる。いくつかの測定値を表-3に示す。Langmuir⁽¹²⁾によると、 σ が正であるかぎり、油膜は膜厚が厚く、ついに単分子の厚さになる。 σ の値は、いろいろな因子によって影響を受け変化する。ほんの僅かでも表面活性成分が入っていると、表面張力は著しく減少する。石油を構成する各成分は、それぞれ異なる σ を有している。風等の影響により、揮発しやすい成分の蒸発は促進され、全体としての σ の値が変わる。さらに温度の影響もある。

このように、最終的な膜厚をきめる σ は一義的には定まらないのが普通であるが、一考では至極的に、最終厚さは 10^{-3} in. としよという報告もある。^{(4),(13)}

もうひとつの考え方は、油中に存在する表面活性成分が大部分水中に入り込み、その結果最終的な σ がきまると考える。この成分の溶解度 S 、拡散係数を D とすると、最終面積 A は代表的な値に対して⁽¹⁴⁾

$$A \sim (\sigma^2 V^6 / \rho^3 D^2 S^6)^{1/8} \sim 10^5 V^{3/4} \dots \dots (13)$$

とあたえられる。ただし、 A は m^2 、投入量 V は m^3 の単位である。

5. 流れ、風、波の影響

普通には、油膜の中心位置を決定するのが潮流などの流れであると考えられる。しかし、流れが平面的、さらには鉛直方向にも一様性を欠く場合には、事態は簡単ではない。海表面に拡がった油は、表層水と動きを殆んど等しくするので、流れのパターンが正確に推定されていなければならない。通常の潮流計算では、鉛直方向は密度や流速が一様分布をなすとした二次元モデルが多く用いられるが、特に沿岸地帯では、地形の影響、流入河川水などの効果により流れのパターンが支配されることがあるので注意を要する。

海表面を吹く風は、波を起すだけでなく、流れをも生起する。水中に乱れの場合が存在する場合、コリオリの力、風による剪断力、乱れにもとづく抵抗力がつりあった定常状態では、エクマンの流れが生じ、流速は風速の3%程度で、流向は北半球では45°だけ時計方向にずれる。ただし、水深の浅い所では、海底摩擦が大ききくために、流れの方向は風向とほぼ一致する。実際には、必ずしも定常状態が実現するとはかぎらない。風による流れは、吹送流と波の質量輸送の和であり、その大きさは吹送距離によって異なるという見解もある。⁽¹⁵⁾ ただし、一般的には、その原因がなんであるかとも、観測された流れの大きさは、風速の3~4%であることが多く、実用上は3.5%であるとしても良いようである。

流れや波が風によって誘起されると、単に移流効果のみでなく、これらにともなう生ずる乱れがあるので、石油の拡散も影響を受ける。図-4は実験例と実験値を示す。⁽¹⁶⁾ Case 1 は風と波、Case 2 は流れと波とが共存する場合で、静水中に拡がって行く Fay の様相にくらべ、大きな拡がりをもつことがわかるであろう。

波の質量輸送は、深海では大きなものでなく無視できよう。しかし沿岸近くでは、波高の増大とともに質量輸送は増大し、やがては沿岸流や离岸流の複雑な海流系を構成し無視できなくなる。

また波が砕波するようになると、Oil-in-water emulsion の生成に大きくきいてくるので、⁽¹⁷⁾ 今後の研究によりその実態を明らかにする必要がある。

図-3 重力・粘性域

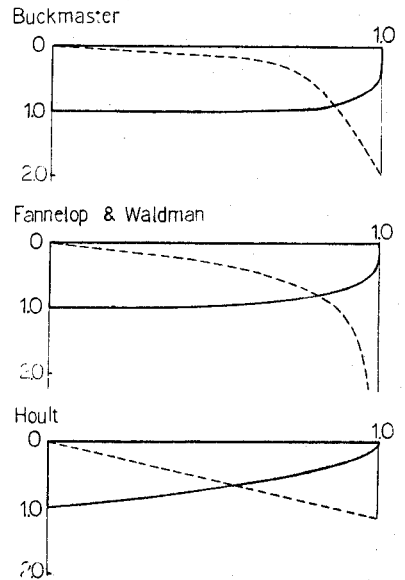


表-3 σ ⁽¹²⁾

油の種類	σ (dyne/cm ²)
Libyan (Brega)	27
Iranian Heavy	18
Kuwait	17
Iraq (Kirkuk)	21
Venezuela (Tia Juana Medium)	17

風の効果は、油の変質をもたらす事にもあらわれる。風が強い程、粘性の小さい揮発成分は蒸発しやすく、したがって残された油の粘性は大きくなり、拡がりにくくなる。図-4は、揮発成分の蒸発が風によって如何に促進されるかをしめす。石油の拡りを追跡していく計算プログラムで、揮発成分の減少や石油温度の変化にもとづく粘性変化を考へに入れたものは、今の所ないようであり、今後に残された問題のひとつである。

6. 現地実験例

ニで、海中に油を投棄し、計算によりその拡がりや位置を予測したものと、実測されたものとを比較した例を二紹介する。

最初の例は、⁽¹⁸⁾ San Pedro Bay¹⁸で行われたもので、追跡計算の方法は次の通りである。

流れと石油の拡がりとは別々に計算したのち重ね合わせる。流れは実測値を使うが、あるいは別個に計算した値を入れる。この場合は、30分毎に計算した潮流データを与えた。全区域を ΔS ごとの格子に切り、各格子点にこの値を与える。

油の拡がりとは、2節で述べた法則に支配されるものとし、比例常数は実験値を用いる。ある格子点ととり、この点を中心とした面積 $(\Delta S)^2$ の油のパッチを考へる。これの中心は上にあたえられた流速で流されるとともに、油は他の格子点の油とは独立に拡がって行く。計算の各時間ステップ毎に、各油パッチの重複部分が出るから、計算結果を重ね合せて、次のステップのための厚さと拡がりをもとめる。

さて、実験のためには、防波堤内に大豆油を数回投入した。一回の投入量は約45ℓであった。この程度の量であると、すぐに表面張力・粘性域に達してしまい、しかもパッチの大きさが $(\Delta S)^2$ に達しなかったため、油膜厚や拡がりを上述の方法で求めるか否かは確かめられなかった。一方、油の中心位置は、風による流れが右に10°偏向するとして潮流に加えると、実測値と良く一致した。

他の実験例でもそうであるが、この実験でも、観測された油のパッチの形状は、円形とはほど遠く、流れの方向にひきのばされた形をしている。拡がりが等方的でないことをとり入れる必要がある。

オニの例は、⁽¹⁹⁾ カナダの St. Lawrence河での実験例である。

一回目は、370ℓのガソリン原油を投入し、7時間24分にわたって、27km間追跡した。このとき、風速は8%sec、油の最大移動速度は1.2%secであった。二次元モデルをつかって計算した潮流に、風による流れを加えると、油パッチの位置はほぼ正しく推定された。

オニ回目は、その翌日、やゝ北方の地点に800ℓの同原油を投入して行なわれた。9時間12分にわたって、37km追跡した。風速は15%sec、漂流速度は最大3%secであった。所がこの日この場所では、潮流は地形などの影響下に複雑な動きをしめし、風の効果を加えても、再現できなかった。簡単な二次元モデルによる潮流計算は無力であった例である。

図-4. 風、波、流れの拡がりに及ぼす影響

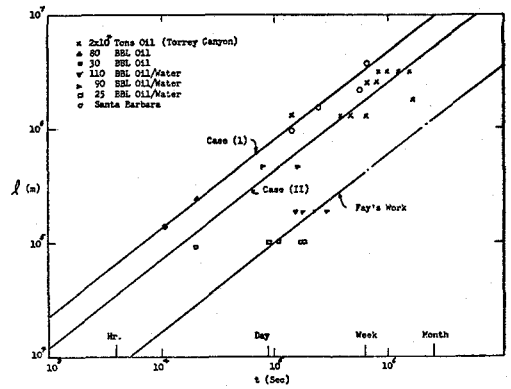
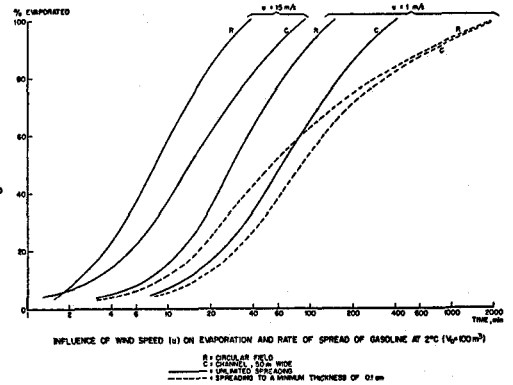


図-5. 風による蒸発の促進



油の拡がりは、空中写真から判定された。図-6に、その結果が示されている。投入後10⁴sec至過ぎた時までは、大量投入したオガ、かえって小さな拡がりにあたえている事がわかる。このヴェネズエラ原油は、Water-in-oil emulsionに作りやすく、投入後2時間至過ぎたサンプルから、70%程度の水をふくみ、2040 cpsの粘性をもっている事が判明した。このような、いわゆる“Chocolate mousse”が生じると、石油の拡がり速度が大きく左右されることが多い。

7. おわりに

石油の拡がりを推定する手法等について解説を試みた。しかし、これらの理論や実験値にもとづいて現実に生じていることと正確にたつむことは、まだ出来ない状況にある。今後の研究が盛んになることを望む次第である。それと同時に、現実には今日にでも生ずる事故等に対し、漂流流向流速図の作成²⁰⁾、現時点でわかっている知識とつがっての追跡プログラムの準備などを行って、備えておく必要がある。

引用文献

1. Fay, J.A.: The spread of oil slicks on a calm sea, Oil on the sea, Plenum, 1969.
2. 日本海難防止協会: 大型タンカーによる災害の防止に関する調査研究, 完了報告書, 昭43.
3. Abbott, M.B.: On the spreading of one fluid over another, La Houille Blanche, Nos.5,6, 1961
4. Hault, D.P.: Oil spreading on the sea, Annual Review of Fluid Mechanics, 1972.
5. Fannelop, T.K. & G.D.Waldman: The dynamics of oil slicks-or "creeping crude" AIAA 9th Aero.Sci.Meet., 1971
6. Benjamin, T.B.: Gravity currents and related phenomena, J.F.M., Vol.31, Part 2, 1968.
7. 首藤, 大野: 海面上の石油の拡がり (オニ穀), 土木学会年報, 1975 (投稿中).
8. 科学技術庁研究調整局: タンカーの油流出事故対策に関する特別研究報告書, 昭44.
9. Yih, C.S.: Dynamics of nonhomogeneous fluids, Macmillan, 1965.
10. Simpson, J.E.: A comparison between laboratory and atmospheric density current, Quart. J.R.Met.Soc., Vol.95, 1969.
11. Buckmaster, J.: Viscous-gravity spreading of an oil slick, J.F.M., Vol.59, Part 3, 1973
12. Barridge, S.A. et al.: The properties of persistent oils at sea, J. Inst. Petro., Vol.54, No.539, 1968
13. Blokner, P.C.: Spreading and evaporation of petroleum products on water, Proc. 4th Int. Harbour Conf., 1964.
14. Fay, J.A.: Physical processes in the spread of oil on a water surface, Conf. on Prevention & Control of Oil Spills, Washington D.C. 1971
15. Wu, J.: Wind-induced drift currents, J.F.M., Vol.68, Part 1, 1975.
16. Kim, Y.C.: Oil spreading on coastal waters, Proc. 14th Conf. on Coastal Engg., 1974.
17. Forrester, W.D.: Distribution of suspended oil particles following the grounding of the tanker Arrow, J.M.R., Vol.29, No.2, 1971.
18. Wang, S. & L.Huang: Numerical simulation of oil slick transport in bays, Proc. 14th Conf. on Coastal Engg., 1974.
19. Drapeau, G. et al.: Oil slick fate in a region of strong tidal currents, Proc. 14th Conf. on Coastal Engg., 1974.
20. Harrison, W.: Environmental analysis for Bahama Supertanker Port, Proc. 14th Conf. on Coastal Engg., 1974.

図-6. 実験された油の拡がり

