

大型タンカーの防災について (1)*

元 良 誠 三**

本講演は昭和42, 43両年度にわたり、海難防止協会が運輸省の補助金により行なった「大型タンカーによる災害の防止に関する調査研究」のうち、講演者が部長となり行なった「危険円」についてその概要を述べたものである。

大型タンカーが、人口密集地帯に近接した内海や港湾で衝突等の事故を起こし、大量の原油を流出し、さらにその原油に引火して火災となった場合を考えると、その被害は想像を絶したものとなる可能性がある。この場合、発生した海面火災が陸地の人家や、工場施設などに延焼するのと、しないのでは、災害の規模が格段に異なり、後者の場合は被害を最小限に止めることは論をまたない。

そこで、ある大きさのタンカーが十分ありうべき確率の衝突等の事故によって、流出する油量を考え、その原油が引火して海面火災を起こした場合の危険範囲を算定しておき、その危険範囲が、都会地や、工場地帯等の重要施設に触れないように、そのタンカーが近寄りうる海域を制限すれば、流出事故による大災害を防ぐことができるわけである。このような危険範囲を危険円と名づけ、本部会ではその定量的な算定を試みた。

本稿は、海難防止協会、昭和43年度「大型タンカーによる災害の防止に関する研究」完了報告書の中の「第3章、危険円」を、同協会のご厚意により転載したものである。なお同研究部会の委員は次のとおりである。

委員長 浅井 栄資 (造船技術審議会委員)
秋田 一雄 (東京大学)
北川 徹三 (横浜国立大学)
中田 金市 (消防研究所)
安藤 良夫 (東京大学)
小山 健夫 (東京大学)
部会長 元良 誠三 (東京大学)
折原 洋 (原子力船事業団)

坂上 治郎 (御茶水女子大学)

若園 吉一 (横浜国立大学)

なお執筆担当は次のとおりである。

第1章 元良 誠三

第2章, 第6章 秋田 一雄

第3章, 第4章 元良 誠三, 小山 健夫

第5章 坂上 治郎, 小山 健夫

第7章 元良 誠三

1. 危険円の概念

1.1 大量の原油流出が起こった場合の災害の種類とその評価

1.1.1 発火の場合と、非発火の場合の災害の性質の推定

(a) 油が流出してすぐ発火した場合 この場合は、破損したタンクの水面上の部分の油がかなり急速に流出し、水面に広がった油面の全域にわたって燃えるものと考えられる。初めのうちは軽質の成分が急速に燃え、ついで比重の大きな成分が、次第に熱で揮発して燃える。比重の重い成分ほど熱焼速度がおそくなり、ごく重質の成分を残して燃えつきるわけである。

熱焼速度はがかなり早く、ごく軽質のもので5mm/mim 重質のもので1.5mm/mim 程度であり、一方、10000m³の原油が流出して500m四方に広がるとすると、厚さは40mm程度であるから、周辺部は十数分で大体燃えつき、火災の範囲はかなり早く狭まってゆくことが予想される。

したがって、発火後十数分程度で、火災はタンカーの周辺の割合狭い範囲に局限され、そこでは、タンクの水面下の部分の油が浮き上って海水と置換するため、連続的に少量宛油が供給されるので、長時間火災が続く。

一方、火災のため破損しなかったタンクも次々に誘爆し、裂目から新たに油が流出して海面火災が広がる可能性があるが、一度に数タンクが爆発することはまず考えられないのと、爆発によるタンクの裂目は狭いと考えられるので、タンクの誘爆ごとに広がる海面火災の範囲は、最初の海面火災の範囲を越えないと考

* 第2回安全工学研究発表会(昭和44年12月16日)での特別講演より

** 東京大学工学部

えてさしつかえないであろう。

また、潮流等で火のついた油が流れることも考えられるが、油の燃焼速度がかなり早いことを考えると、それほど遠くに達しないと思われる。

すぐに火災になった場合、危険範囲は比較的狭いが、危険で近寄れないため消防ができず、全荷油が長時間にわたって燃える可能性がある。流出した油はごく重質のものを除き燃えつきるから、oil pollutionの問題は比較的少ないであろう。

このケースで一番問題となるのは、事故船および相手船の乗組員の安全で、一刻も早く安全圏に避難する手段を講じなければならない。

(b) 油が流出し時間を置いて発火した場合 原油が海面に広がってすぐに発火しない場合には、その揮発成分が揮発して、引火性のガスが海面を覆い、油の広がった範囲よりさらに遠くまで広がることが考えられる。

そして、そのガスに引火すると、その付近に火災を生じる上に、炎はガスを伝わって油面に伝わり、結局海面火災を誘発するであろう。それ以後の経過は大体(a)のケースと同じであるが、今の場合発火までに時間がかかっているため、その間に油が余計に広がり、潮流等の影響で事故船からかなり離れた所まで達している可能性があるため、(a)のケースより、危険範囲が大きくなることが予想される。

また(a)の場合は、火災の範囲が目に見えているので、危険範囲を避けて作業ができるが、(b)の場合は、ガス濃度が目に見えないだけに、作業につねに危険が伴うことが考えられる。

(c) 最後まで発火しない場合 揮発成分が全部蒸発し、燃焼限界濃度より薄くなると、一応火災の危険はなくなるが、油は時間が経つと共にますます広がり、潮流や風に流されて陸岸に達し汚損を生じる。油は無限に薄く広がるわけではなく、おそらくはある程度の厚さのグループとなり、一部はエマルジョン化して、風下、または潮流の当たる陸岸に押しよせるものと思われる。この場合は人命に対する危険は少なく、漁業、観光、衛生等に大被害を及ぼす可能性があるが、その範囲や規模の推定は困難である。

流出した油がごく少量のときは、陸岸に達しないうちに処理することも考えられるが、ある量以上になったら、処理不可能で、その場合の被害の規模は、大体流出した油の量に比例するとみてよいであろう。

1.1.2 事故の原因と災害の性質の関係 荷油を流出する原因として種々のものが考えられるが、普通起こりうるようなものは次の四つである。

(i) 他船との衝突

(ii) 座礁、触底

(iii) 接岸時の岸壁との接触

(iv) 荷役中のタンクの爆発

以上の四つについて、その結果としてどのような性質の災害が生ずるかを考えてみる。いずれの場合も、1.1に述べたような発火と非発火の場合が考えられるが、ここで問題とするのは、油の流出量およびその速度である。

(a) 他船との衝突 他船と衝突した場合、相手船の船首がタンカーにぶつかる場合には、よほどの小船でないかぎり船側外板が破れて、油が流出するものと考えなければならない。自船が他船の船側に衝突する場合には、油が流出する可能性は少ない。

相手船がどこに衝突するかわからないし、二つのサイドタンクのちょうど BRD の所にあたることもありうるため、二つのサイドタンクが同時に破れ、かつ破口は、水面上から水面下に、十分大きな面積をもつことはありうることである。

したがって、損傷したサイドタンクの荷油の、全量が流れ出すわけであるが、最初水面上にあった油は、ヘッド差により急激に流れ出して海面に広がり、水面下の部分は、それよりは緩やかに、海水と置換して出ていくものと考えられるが、この置換速度は2.に示すように一般に考えられているよりはかなり大きい。

このような過程で、前節の(a)、(b)、(c)の場合を考えると、(a)に対しては、最初水面上にあった油が、10分とか20分程度の短い時間に海面に広がるその範囲まで、海面火災が発生し、それからは火災の範囲は船の破口付近に局限され、以後他の損傷を受けなかったタンクが誘爆するたびに、火災の範囲はいったん広がり、また数分で船の付近に縮まる、という経過をたどるものと想像される。この場合、消火に失敗すれば結局全荷油が燃えるわけであるが、oil pollutionの被害は比較的少ないであろう。

(b)のケースでは、最初水面上にあった油が急速に広がり、数十分程度の間には揮発成分が揮発して、引火性のガス雲をつくり、ゆっくり拡散しながら風下に伝わってゆく(4.参照)。したがってそのガス雲の濃度が燃焼限界以下になる地点までは危険範囲にはいるわけで、(a)より危険範囲が広がることが想像される。

(c)の場合は、一応損傷したタンクの油が全部流出し、汚損を起こすと考えなければならないが、水面下の油が完全に流出するまでは、かなり時間がかかると思われるので、流出防止の対策が取られ、油の流出量を制限できるかもしれない。衝突によりセンタータンクが破れる可能性については、後に検討する。

(b) 座礁または触底の場合 座礁または触底により、かなり長い裂傷を受けるとすると、その傷が Longi. B^{HD} に沿い、かつ、二つのセンタータンクと二つの側タンクにわたることもありうる。

これらのタンクの荷油の全量が一度に流出すると、衝突の場合と比較にならないほどの広範囲な被害を生ずるが、座礁の場合、外板の損傷は主として底面に限られるから、タンクの上部が外気を通じていなければ、油はゆるやかに海水と置換してでてくるだけである。

この場合につき、(a)、(b)、(c)の各ケースを考えてみよう。

(a) のケースは、座礁では割合に起こりにくいと考えられるが、仮にすぐ発火したとすると、エアバルブを閉じるなどの処置が危険のため取れず、油が緩慢ながらたえず供給されるので、火災は継続するであろう。しかしながら、他のタンクに誘爆を起こさないかぎり、火災の範囲は割合に狭く、火勢もそれほど強くないから、消防が成功する可能性もある(この点は油の流出速度を含めて今後の研究が必要である)。不幸にして、他のタンクまたは損傷したタンクが爆発し亀裂を生ずると、多量の油が急速に流出し、衝突の場合と同様な経過となる。

(b) のケースは、座礁ではもっとも起こりやすいと考えられる。流出した油の揮発成分はすぐに揮発し、常温で揮発しにくい油が海面に徐々に広がっていく。

しかしながら船の近傍では、たえず少量の油が連続的に浮上してきて、その中の揮発成分が揮発するので、船から風下の方にある範囲まで燃焼限界以上の濃度のガスがたえず存在し、発火の危険は長時間持続する。しかしながらそのガスの範囲は、衝突の場合ほど広くないものと推定される。

(c) のケースは、座礁ではもっともありうるケースである。この場合損傷したタンクの油が全部流出すると、その量は衝突の場合をはるかに上回り、汚損による大被害を生ずるが、流出に時間がかかるので、損傷したタンクの油を他船または空のタンクに移すなどの作業で、流出油量を最小限にくい止めることも、不可能ではない。

1.1.3 接岸時の岸壁との接触 これは、衝突の場合とほぼ同様で、基地に近いので、消防や油の拡散防止の面で多少有利であろう。したがって衝突時の危険範囲を越えることはないと考えられる。

1.1.4 荷役中のタンクの爆発 荷役中にタンク内のガスが引火爆発することも、従来の例から起こりうる事故の一つである。この場合は、タンクに亀裂が

はいれば油が流出し、同時に火災になって、衝突時にタンクに誘爆した場合と同じ経過をたどるものと考えられる。

1.2 危険円の考え方

1.1.1 および1.1.2で述べたタンカー事故による災害の性質を考えると、火災になった場合と、火災にならなかった場合とで非常に大きな違いがあることがわかる。

火災にならなかった場合に油の量が少なければ、油が広がる前に処理することも可能であるが、油の量がその地域の処理能力を越えると、水産資源や観光地に汚濁による被害を与える。この場合の被害は油の量にほぼ比例すると考えられるが、その被害を局限するために、タンカーの大きさや設計条件をどのように制限すべきかという問題は責任負担能力ともからみあって一概には論じられない。結局、各船の流出油量の期待値とその船の全荷油容量の比をある限度以下(たとえば0.09以下)に押えること、船の大きさに応じ、予想される流油汚濁による被害額の期待値に応じた保険を掛けるなどの配慮が必要であろう。

一方火災になった場合、あるいは発火の危険がある場合を考えてみると、問題の性質はかなり変わってくる。この場合、海面火災の範囲が陸上の重要施設や、人口密集地帯に及ぶのと、そうでないのとで、災害の規模も性質もガラリと変わってくる。前者では、人命、経済共に推定不可能なほどの大災害に発展する可能性があるのに対し、後者では、自船あるいは付辺の船舶に甚大な被害を及ぼす可能性はあるが、陸上の第三者に対する被害は非常に小さい。

したがって火災を考えた場合は、海面火災が陸上の重要施設や、人口密集地帯に延焼しないような範囲、すなわち必要な離隔距離を半径とする円(これを危険円と仮称する)を考え、船を湾内、あるいは湾内に入れる場合に、陸上の人口密集地帯にこの危険円が原則的に*に接触しないようにする必要がある。

危険円の大きさは、当然一船一船異なり、タンクの

* 延焼を防ぐ防火設備や、油の拡散防止の設備の整っているところでは、設備の整っていないところと、一概に論ずることはできない。ここでは一応設備がない場合を、原則的に論じている。

(1) 非発火→汚損→被害額は油量にほぼ比例する。流出油量の期待値から経済的に許容流出油量、ひいては船の大きさの限度が制限される。

(2) 発火→海面火災→延焼 被害は計りしれない。
→危険円により延焼を防止、港湾の地理的条件から最大許容危険円が定まり、ひいては船の大きさの限度が決められる。

以上、(1)、(2)の二つの判定方法より決められたうち、小さい方が許容される船の大きさの限度となるわけである。

容量、船体構造、諸設備、および船の大きさなどにより変わってくる。この危険円の考え方は、原子力船の安全評価と類似の考え方である。

狭水道の場合、タンカーが水路のどこで事故を起こしても、この危険円が陸上の人口密集地帯に接触しないようにすべきで、したがって一つの狭水道について最大許容危険円が存在し、それより大きな危険円を有する船は原則的*には通過できないわけである。

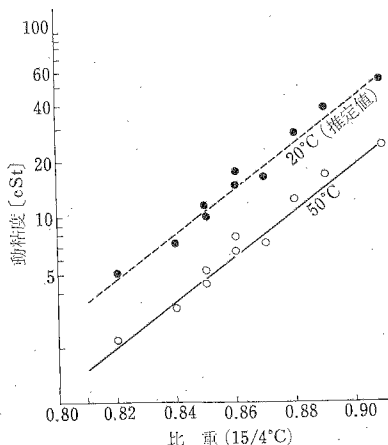
危険円の大きさは、タンクの配置、容量、船体構造および諸設備によってかなり異なるので、許容さるべき船の大きさは必ずしも一概に何万トンとは決められず、一船一船について検討を行なう必要がある。

2. 原油の性質

本章においては、以下の危険円の推定に当たって使用された原油に関する各種の特性値をまとめて記しておく。

2.1 原油の物性値

一口に石油といっても、このものは多種類の炭化水素の混合物で、その成分の種類、割合によって発火性、燃焼性は著しく異なる。したがって、どのような石油を対象に危険円を考えるかによって結果は大差を生ずるが、ここではタンカーを用いて多量に輸送されるのは主として原油であることを考え、この中でも最も代表的な性質をもち、輸入量も多いイラン・ペーを主として検討の対象とした。この原油はイラン産の硫黄分の少ない原油で、別名をガッチサラン(Gachsaran)原油といい、名前ほど重質でなく、近年需要が増してきた原油である。この原油の二、三の物性値は他の多くの輸入原油のそれと共に第1表に示したが、このうち油の流動の計算に必要な動粘度については、比重との関係において与えられた第1図から一般的に20°Cの値が求められる。



第1図 原油の粘度と比重の関係(中東原油)

なお、原油の表面張力の値については、個々の原油についての測定値に乏しいが、大体の値としては、次のようなものと考えてよいだろう。

原油-空気 26 dyne/cm

原油-水 48 dyne/cm

2.2 原油の成分

原油中に低沸点の成分を多く含むと気化する量が増し、したがって引火点は低下し燃えやすくなる一方、蒸気の拡散を問題にするに当たって初期に蒸発する成分が増し、危険範囲が広がる。大体の各種成分の割合は、収率という形で第1表と一緒に与えたが、同じ中近東産原油のカフジ(Khafji)とイラニヤン・ライト(Agahjari)について、ガスクロマトグラフを用いて低沸点の成分分析をした結果は第2表に示した。これから多くの場合沸点の低い炭素数6~7程度の炭化水素の含有率はほぼ5~6%(W)であると考えられる。

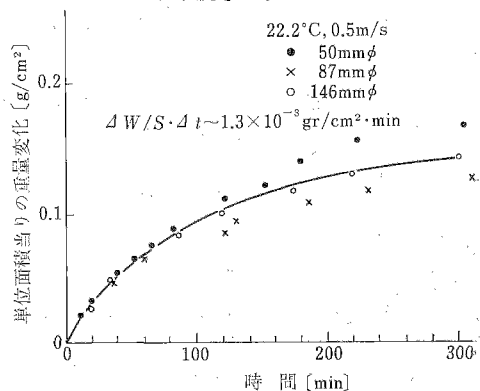
2.3 原油の蒸発性

原油の蒸発性は、定性的には前項の成分がわかれば予想はされるが、蒸気の拡散範囲の推定のような定量的な問題の場合にはこれでは間に合わない。

従来、広い液面をもつ液体の蒸発速度を表わす式としては、理論式や実験式などがいくつか提出されているが、ここでは数値計算に便利な形をもつ Powell と Griffiths によって提出された式

$$q_m = 2.12 \times 10^{-7} X^{0.77} (P_0 - P') (1 + 0.121 U^{0.85})$$

ここに q_m : 蒸発速度 [gr/sec], X : 液面の長さ [cm], P_0, P' : 液面上および離れた位置の蒸気濃度 [mmHg], U : 風速 [cm/sec].
を利用することにしたが、実際には原油の飽和蒸気圧 P_0 を知ることは面倒なので、この場合には比較的小さな容器を用いて風速が約 0.5m/s のときの単位面積当りの蒸発速度を実測し、その結果を基にして、上の式から等価の P_0 を定め、さらに違った風速下の蒸発速度を求めるという手続きを取った。



第2図 イラニヤン・ペー原油の蒸発速度

第1表 輸入原油の性状

地域名	中 東 原 油											
国名	サウジアラビヤ			中立地帯		クウェート	カタール	アブ・ダビ	イラク	イラン		
原油名	Aramco	Kkurs- aniyh	Safania	Wafra	Khafji	Kuwait	Quatar	Abu- Dhabi	Zubair	Agahjari	Gachsaran	
比重 $[15/4^{\circ}\text{C}]$	0.85	0.87	0.89	0.91	0.88	0.86	0.82	0.84	0.85	0.85	0.86	
蒸気圧 $[\text{kg}/\text{cm}^2]$ 37.8 $^{\circ}\text{C}$	0.34	0.49	0.59	—	0.71	0.58	0.83	0.74	—	—	0.44	
動粘度 $[\text{cSt}]$ 50 $^{\circ}\text{C}$	4.5	7.3	17	24	12	7.9	2.2	3.3	5.2	6.4*	6.6	
流動点 $[^{\circ}\text{C}]$	-35	-20	—	-20	-12	-30	-27	-17	-15>	-20	-18	
引火温度 $[^{\circ}\text{C}]$	—	0	—	—	0>	—	—	—	—	-15>	—	
収 率 (%)	揮発油留分	20	25	18	14	21	24	38	26	29	30	23
	灯油留分	17	8	7	8	7	9	12	9	10	10	9
	軽油留分	13	9	14	13	9	16	10	15	28	20	14
	残油留分	50	58	58	65	59	51	40	50	33	40	51
イオウ分 (%)	1.7	2.5	2.9	3.3	2.9	2.5	1.1	1.4	1.9	1.5	1.5	
輸入量 (昭40) (1 000kt)	2 351	9 808	1 744	888	10 000	19 874	520	480	5 605	3 625	13 399	

地域名	東南アジア原油					北米原油			ソ連原油			南米原油	
国名	インドネシア					ニュー ギニア	アメリカ		ソ連			ベネズ エラ	
原油名	Seria	Sumatra	Minas	Duri	Bunju	Klamono	Coalin- ga	San Joaquin	Ekhab- inskaya	Mukha- novskaya	Sokolo- vgor- skaya	Tia guaan	
比重 $[15/4^{\circ}\text{C}]$	0.84	0.74	0.84	0.93	0.86	0.93	0.96	0.96	0.86	0.83	0.83	0.90	
蒸気圧 $[\text{kg}/\text{cm}^2]$ 37.8 $^{\circ}\text{C}$	0.21	0.47	—	—	—	—	—	—	0.12	0.52	0.52	—	
動粘度 $[\text{cSt}]$ 50 $^{\circ}\text{C}$	2.6*	1.2*	9.8	—	—	33.2	120	200	3.0	2.8	8.2	30*	
流動点 $[^{\circ}\text{C}]$	10	-15>	35	17	17	-15>	-7.5	-12	-2.5	-15	-17	-51	
引火温度 $[^{\circ}\text{C}]$	—	—	—	—	—	67	85	65	-15>	-15>	-15>	—	
収 率 (%)	揮発油留分	41	67	16	7	3	8	3	3	30	29	29	20
	灯油留分	12	14	12	4	16	6	6	9	10	11	10	7
	軽油留分	29	5	13	12	17	14	26	8	17	16	19	9
	残油留分	18	14	58	77	34	72	65	80	43	44	42	64
イオウ分 (%)	0.07	0.03	0.09	0.26	0.08	0.97	0.75	0.9	0.30	0.76	0.50	1.6	
輸入量 (昭40) (1 000kt)	118	514	1 733	2 585	381	94	76**	64**	2 542**			209**	

* 30 $^{\circ}\text{C}$ における動粘度, ** 昭和39年度の輸入量

第2表 原油の低沸点成分

(1) カフジ原油 (2) イラニアン・ライト原油

成分	含有率 (%)	成分	含有率 (%)
プロパン	0.184	プロパン	0.121
i-ブタン	0.283	i-ブタン	0.127
n-ブタン	0.565	n-ブタン	0.542
i-ペンタン	0.559	i-ペンタン	0.452
n-ペンタン	0.755	n-ペンタン	0.901
2-メチル・ペンタン	0.509	2-メチル・ペンタン	0.565
3-メチル・ペンタン	0.568	3-メチル・ペンタン	0.837
n-ヘキサン	0.878	n-ヘキサン	0.967
3,3-ジメチル・ペンタン	0.026	3-ジメチル・ペンタン	0.116
3-エチル・ペンタン	0.441	3-エチル・ペンタン	0.906
n-ヘプタン	0.766	n-ヘプタン	0.949
計	5.534	計	6.483

第3表 原油の蒸発速度 (20 $^{\circ}\text{C}$, 0.5m/s)

種類	比重	蒸発速度 $[\text{gr}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}]$
イラニアン・ヘビー	0.85	13×10^{-4}
カフジ	0.88	3.7×10^{-4}
揮発油	0.75	8.1×10^{-3}
灯油	0.79	5.9×10^{-3}
n-ヘキサン	0.65	5.2×10^{-3}

なお、イラニアン・ヘビー原油についての単位面積当りの蒸発による重量変化の結果 (22 $^{\circ}\text{C}$, 風速 0.5m/s) は第2図のとおりで (この場合の初期の蒸発速度は $1.3 \times 10^{-3} \text{gr}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ 程度), この値は容器径の大小にほとんど依存しないので, 大規模な油面にも適用できると考えた。かくて, この結果から $P'=0$ としてイラニアン・ヘビー原油の等価飽和蒸気圧を求めるとほぼ 22.9mmHg となる。また, 参考までに第3表

には同じ条件下で他の石油の初期の蒸発速度を測った結果を示した。

2.4 原油の燃焼性

燃料蒸気が空気と混って燃焼するためには、混合気組成は燃焼範囲と呼ばれる特定の割合にはいる必要がある。普通、この範囲の両端を燃焼の下限界および上限界と呼ぶが、危険円の場合問題になるのは、主として下限界である。イラニヤン・ヘビー原油の燃焼限界値については測定値が見当たらず、また成分が複雑なため各成分単独のときの限界値から計算によって推定することもむずかしい。しかし、ここで発火対象となる成分は前記のように炭素数が6~7程度の低沸点分であるだろうと考えると、その限界値は炭素数が少なくなるほど増加するが、大体、1.1~1.4 vol % 以内である。そこで、ここではイラニヤン・ヘビーを含めて原油の燃焼下限界はほぼ 1.2 vol% 程度であろうと推定した。

次に、液面上の蒸気量がちょうどこの燃焼下限界に相当する液体の温度である引火点については、この種低沸点分は蒸気圧が大きいので引火点は低く、イラニヤン・ヘビー原油などは 0°C 以下である。

なお、原油が液面上で燃焼する場合、燃料の燃焼速度はしばしば液面の降下速度で与えられ、その大小は液面の大きさによってかなり違うが、直径が約 1 m より大きい場合には、ほとんどその大きさに依存せず、沸点別では第 4 表のような値を取る。したがって、これらの混合物である原油の場合には燃焼の進むにつれて組成が変化するため、燃焼速度は 5mm/min から 1.5mm/min に次第に小さくなるが、原油の燃焼完了時間については、最後に重油が残るので、その速さで支配される。

第 4 表 原油成分の燃焼速度

種 類	揮発油	灯 油	軽 油	重 油
燃焼速度 [mm/min]	5	4	3	1.5

第 3 章の結果を用いて流出油が発火した場合の燃焼完了時間を推定すると、多くの場合 10~20 分以内に完了することがわかる。この値は八丈島沖実験を含む多くの実験からみて妥当である。

最後に、海面上に原油が広がった場合、その 1 点で発火が起こったとき、液面上を火災が伝ばする速度は液温によって著しく変わり、始めは温度の上昇に伴って増大し、ついで最大値を経て減少する。しかし、その値自身はそれほど大きなものでなく、20°C の原油においてただだか 1.0~1.5 m/s 程度のものと考えられる。

2.5 原油蒸気の毒性

石油蒸気を吸入すると、一般に麻酔作用と軽い刺激作用を与えるとされているが、石油の成分である炭化水素についていえば、炭素数が増すほどこの作用は大きいとされている。ところで、この種毒性の危険性を示す指標については、急性曝露の場合、50%の動物に変化の起こる量をもって表示する 50%致死量(LD₅₀)、50%致死濃度(LC₅₀)などが用いられるが、石油蒸気についてのデータにとぼしい。

しかし、この種の数値が求められているベンゼン、トルエン、その他の溶剤から判断すると 30 分以内で LC₅₀ に達する濃度は 10 000ppm よりかなり大きいと想像され、短時間の急性曝露に対してとくに危険とは考えられない。一方、慢性曝露に対する指標としては 8 時間労働に対する許容濃度(TLV)その他の指標が用いられているが、石油蒸気についてのこの危険性はたとえば TLV の場合 500 で、この値は LPG の 1 000、エタノールの 1 000 より多少小さく、ありふれたエーテル、ケトン、エステルなどの 200~300 よりやや大きい程度である。

3. 原油流出の機構

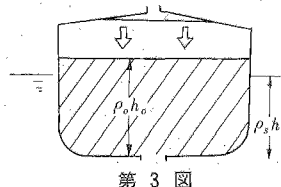
衝突、乗り揚げなどによりタンカーに破口ができたとき、タンク内の原油がどのような機構で流出するかについて述べる。

3.1 船底に破口ができたとき

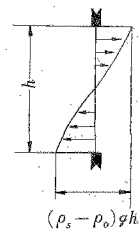
船底に破口ができたときは、満載されたタンクの船底では原油の圧力の方が外の海水の圧力よりも大きいので、原油は急激に流出しはじめ油面が下って破口における原油と海水の head 差がなくなるまで流出は続く(第 3 図)。

破口における head 差がなくなると、破口ではつり合いが保たれるので、あとは船の動揺あるいは海水の流動によって流出するほかはこれ以上流出が続くことはない。

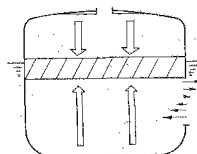
また、head 差による急激な流出中でも、タンク上部のバルブを閉じ、タンク内への空気の流入を止めて



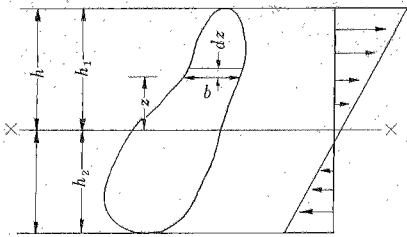
第 3 図



第 4 図



第 5 図



第 6 図

やれば、油面の大気圧が下るので破口の圧力は早く平衡状態に達し、油の流出をくいとおめることができることは注意すべきであらう。

3・2 船側に破口ができたとき (水面下)

水面下の船側に破口ができるとまず水面上の原油は head 差により急激に流出するが、この場合は 3・1 とは異なり油面が下っても原油と海水の比重が異なるため、破口全面で圧力がつり合うことはない (第 4 図)。

したがって、破口を通じて油と海水の置換が続き、破口の上端まで置換したとき流出は止まる (第 5 図)。

油と水の置換速度は次のようにして求められる。

孔の上部から油が、下部から水が同量出入するわけであるが、その境界線を ×× とする。

×× より上に z をとれば、油と水の差圧 ΔP は

$$\Delta P = (\rho_s - \rho_0)gz \quad (1)$$

(ρ_s, ρ_0 : 海水, 油の密度)

z のところの孔の幅を b とすると、 bdx の部分から出る油の量は単位時間当たり

$$q_1 = C\sqrt{2g\left(\frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}\right)z} \cdot bdx \quad (2)$$

(C : 縮流係数)

となる。

したがって、×× より上の部分、すなわち流出する油の全量は

$$Q_1 = C \int_0^{h_1} \sqrt{2g\left(\frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}\right)z} \cdot b dz \quad (3)$$

同様に、流入する水の量は

$$Q_2 = C \int_0^{h_2} \sqrt{2g\left(\frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_s}\right)z} \cdot b(z) dz \quad (4)$$

(3), (4)式で $Q = Q_2$, $h_2 = h - h_1$ の条件を入れれば流入量が求められる。

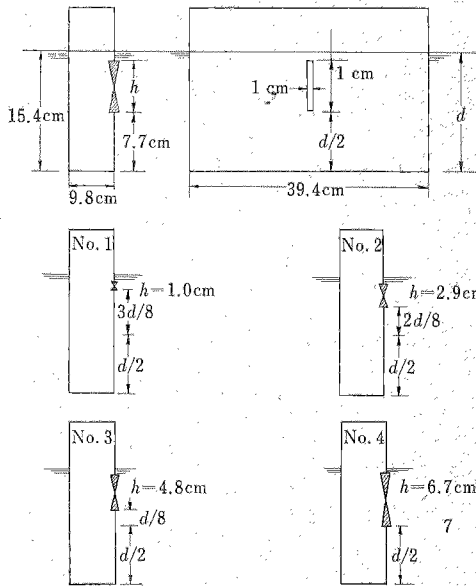
孔の幅が一定の場合は、割合簡単に求められるが、それでも、油と水の密度が異なるため、 h_1 と h_2 は等しくなく、かなり複雑な形となる。

したがって、(3)から次のような形で流出量が表わされるものと仮定して、流量係数 C' を実験的に求めることにする。

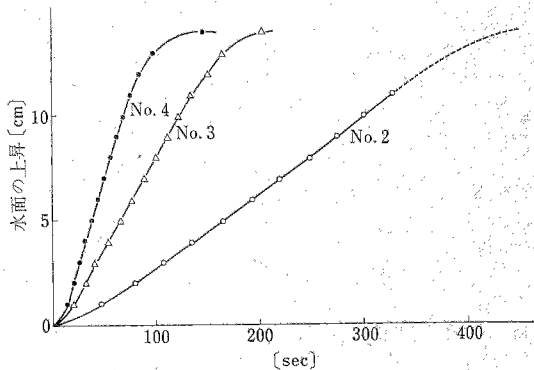
$$Q = C'A\sqrt{2g\left(\frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}\right)h} \quad [\text{m}^3/\text{sec}] \quad (5)$$

C' : 流量係数, A : 孔の面積 [m^2], h : 孔の高さ [m]

C' を求めるために、第 7 図に示すような箱に、高さの異なる孔をあけて油の流出速度を計測した。結果を第 8 図に示す。



第 7 図 実験状態



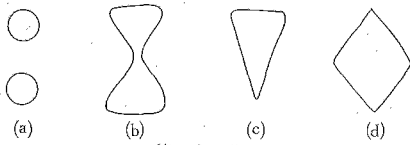
第 8 図 油の換水速度

これより C' を求めると、ほぼ 0.18 程度となる。したがってこの実験に限り、次式で流出速度が与えられる。

$$Q = 0.18A\sqrt{2g\left(\frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}\right)h} \quad [\text{m}^3/\text{sec}] \quad (6)$$

実際の場合は尺度影響で C' はかなり異なった値になるかもしれないが、一応の目安としては用いられると考える。

たとえば幅 2 m 高さ 3 m の長方形の破口ができたとすると、置換速度は毎分 200 kJ 程度となり、相当な



第 9 図

勢いで油が流出するとみななければならない。

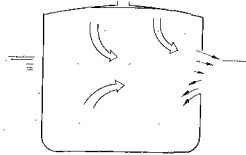
なお、(6)式は孔の幅が一定の場合であるが、この幅が上下で異なる場合は C' の値が変わってくる (第 9 図)。

(a) の場合は C' の値は最も大きく、0.25 程度になると考えられる。(b) の場合は (a) より C' の値はやや小さいが矩形の場合より大きく、(c) は矩形の場合と大差なく、(d) は矩形の場合より小さくなるのが予想される。

なお、船側に破口ができたときは、deck 上のバルブを閉じて初期の head 差による流出は防ぐことができるが、比重差による油と海水の置換を防ぐことはできない。したがって破口が比較的小さいときは初期の流出速度を小さくおさえる効果はあるが、破口が大きいときはほとんど効果はない。

3.3 船側の破口が水面上にも及ぶとき

船側にできた破口が水面上に及ぶときは、初期は head 差により、その後は 3・2 で述べた置換により油は流出し、その途中で油と水がバランスする状態はないので、タンク内の油は全部流出してしまうことになる (第 10 図)。



第 10 図

また、この場合は破口の上部が空气中にできているので、当然のことながら、deck 上のバルブを閉めてもなんの効果もない。

4. 原油の拡散

船が衝突した場合には相当大きな破口から急激に油が流れ出すことが予想されるが、この場合の油の海面上の広がりや時間的な変化を推定することは、災害防止の見地から重要である。油の広がりを厳密に計算するのはむずかしいので、次のような仮定に基づいて計算を行なう。

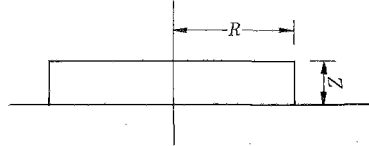
4.1 仮定

- (1) 油は最初半径 R_0 の円筒状をなし、タンクの破損と同時にその周囲の壁が急に取り去られるものとする。
- (2) 油は円形の平板状で広がるものとする。
- (3) 油の全量を V_0 とすると、水面上にある部分の容量 $V = V_0 \frac{\sigma_s - \sigma_0}{\sigma_s}$ (σ_s : 海水の比重, σ_0 : 油の比重)

が、滑らかな平板上を重力により広がる場合を考えると、それが海面上の油の広がりに近似的に等しいものと仮定する。すなわち水面下の部分の油、容量にして V_0 は浮力により広がり、ちょうど水面上の部分の油と同じ速度で広がるものとするわけである。

(4) 油が最初もっていたポテンシャルエネルギーが、運動エネルギー、粘性による散逸エネルギーおよび表面張力によるエネルギーに転化すると考える。

4.2 運動方程式



第 11 図

任意の時刻 t における油の広がり半径を R 、油の高さを Z 、油の密度を ρ_0 とすると

(1) 運動エネルギーの変化

$$\frac{dK}{dt} = \left(\frac{\rho V}{R} + \frac{4\rho V^3}{\pi^2 R^7} \right) \left(\frac{dR}{dt} \right)^3 \quad (7)$$

(2) 粘性による散逸エネルギー

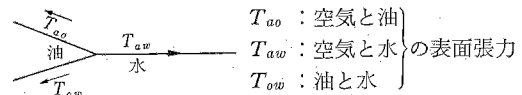
$$\frac{dE}{dt} = \frac{\pi C^2 \eta R^2}{2Z} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \quad (8)$$

ただし、 C は速度こう配係数で 1 と 0 の間にある。

(3) 表面張力によるエネルギー

$$\frac{dE_T}{dt} = 2\pi RT \frac{dR}{dt} \quad (9)$$

ただし、



$$\vec{T} = \vec{T}_{aw} + \vec{T}_{ao} + \vec{T}_{ow}$$

としたとき

$$|\vec{T}| < |\vec{T}_{aw}|$$

今は安全側を取って

$$T = T_{aw}$$

とする。

(4) 位置のエネルギーの変化

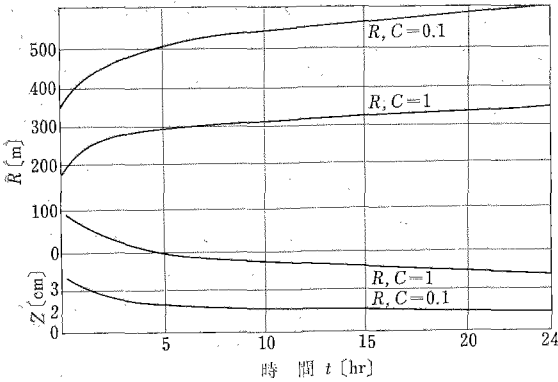
$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{2} \rho g V \frac{dZ}{dt} = - \frac{\rho g V^2}{\pi R^3} \frac{dR}{dt} \quad (10)$$

4.3 流出直後の広がり

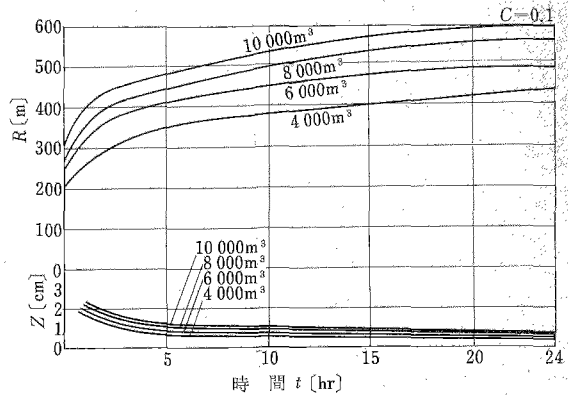
流出しはじめてまだ時間があまり経過しない場合には、ポテンシャルエネルギーは主として運動エネルギーに変わり、他の項は小さいから(7)式と(10)式を等置して

$$\frac{\rho V}{R} \left(\frac{dR}{dt} \right)^3 - \frac{\rho g V^2}{\pi R^3} \left(\frac{dR}{dt} \right) = 0$$

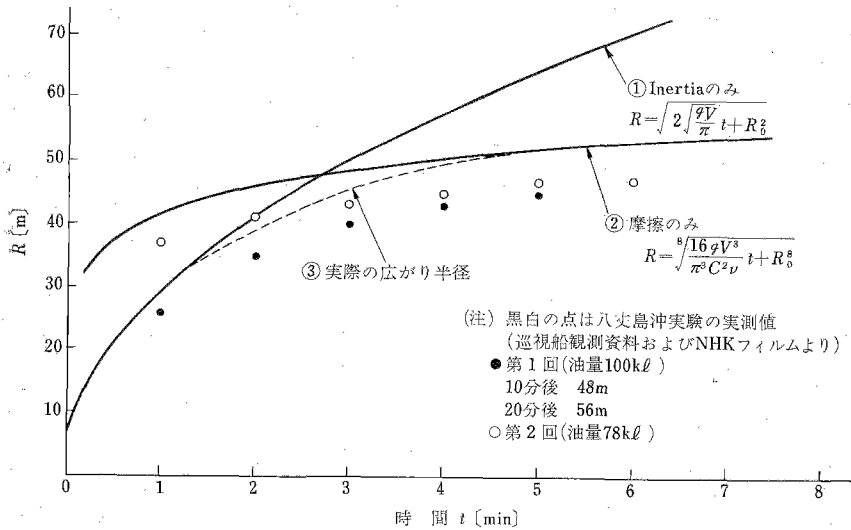
$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{\frac{gV}{\pi}} \frac{1}{R}$$



第12図 10 000m³の原油の広がり半径と油層の厚さ



第13図 流出した油の量によるRおよびZの変化



第14図 100m³の原油の広がり半径

$$R(t) = \sqrt{2\sqrt{\frac{gV}{\pi}}t + R_0^2} \quad (11)$$

となる。

4.4 かなり時間が経過した場合の広がり

時間が経つにつれて、粘性影響が無視できなくなると同時に、運動エネルギー（慣性に相当）の項は、比較的小さくなってくるので、(8)式と(10)式を等置し、小さな項を省略すると

$$\frac{dR}{dt} = \frac{2\rho g V^3}{\pi^3 C^2 \eta R^4} \quad (12)$$

この解は

$$R(t) = \sqrt[3]{\frac{16gV^3}{\pi^3 C^2 \eta}t + R_0^3} \quad (13)$$

$$V = \frac{(\sigma_s - \sigma_0)V_0}{\sigma_s} \quad (V_0: \text{全油量})$$

速度こう配係数Cは宗像丸の資料等から0.1程度と考えられる。C=0.1とした場合の広がりを(13)式によ

り $V_0 = 10\,000\text{m}^3, 8\,000\text{m}^3, 6\,000\text{m}^3, 4\,000\text{m}^3$ について計算すると第12図のようになる。また、そのときの油の層の厚さを計算すると第13図のようになる。

ただし実際は潮流等があるので、あまり時間の経過したところは意味がない。

4.5 実験値との比較

43年夏、海上保安庁により八丈島沖で行なわれた流出油実験のときの巡視船、および航

空機よりの観測による油の広がりの実測値と、計算値を比較してみると第14図のようになる。

流した原油は第1回100klで、図中で実測値を黒丸で示してあり、また第2回は78klで図中白丸で示してある。計算値は、①が(11)式で、初期の油の広がりに相当し、②が(13)式で時間が十分経過したときに相当する。(10)式を厳密に解けば、①と②を繋ぐ③のような値になるものと考えられる。

計算値はかなり実測値によく合っており、実際の事故の場合、流出して火災になるまでに多少時間のあることを考えると、海面火災の場合も、また火のつかなかった場合の処置等を考える場合も、②すなわち(13)式を用いて油の広がりを推定しても、かなりよい近似を与えると考えてよいようである。(つづく)