



大型タンカーの危険円について



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などの事故を起こし、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と、しないとは、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う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などの事故によって、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、工場地帯などの重要施設にふれないように、そのタンカーが近寄りうる海域を制限すれば、流油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る。

日本海難防止協会は昭和 42, 43 両年度にわたり、運輸省の補助金によりこの危険円の定量的な算定を試み、ある程度の結論を得ることができた。

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 編、危険円」を、同協会のご厚意により抜粋したものである。なお同研究会の委員はつぎのとおりである。

委員長 浅井 栄 資 (造船技術審議会委員)

秋田 一 雄 (東京大学)

安藤 良 夫 (東京大学)

折原 洋 (原子力船事業団)

北川 徹 三 (横浜国立大学)

小山 健 夫 (東京大学)

坂上 治 郎 (お茶の水女子大学)

中田 金 市 (消防研究所)

部会長 元良 誠 三 (東京大学)

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

* 東京大学工学部

正 員 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。

燃焼速度はかなり早く、ごく軽質のもので 5 mm/min、重質のもので 1.5 mm/min 程度であり、一方、10,000 m³ の原油が流出して 500 m 四方に広がったとすると、厚さは 40 mm 程度であるから、周辺部は十数分でだいたい燃えつき、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、タンクの水面上の部分の油が浮き上って海水と置換するため、連続的に小量原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つぎつぎに誘爆し、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えてさしつかえないであろう。

また、潮流など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、それほど速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。

このケースでいちばん問題となるのは、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のが考えられる。

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、だいたい(a)のケースと同じであるが、いま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、潮流などの影響で事故船からかなり離れたところ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、油は時間が経つとともにますます広がり、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、風下または潮風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、衛生など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、だいたい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4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4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、2つのサイドタンクのちょうどBHDのところにあたることもありうるので、2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)より危険範囲が広くな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、流出防止の対策がとられ、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. BHDに沿い、かつ、2つのセンタータンクと2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とれず、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、流出量を最小限に食い止めることも、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、基地に近い場合、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1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合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、人口密集地帯におよぶのと、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・経済とも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、自船あるいは付近の船舶に甚大な被害をおよ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、あるいは港内に入れる場合に、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。

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

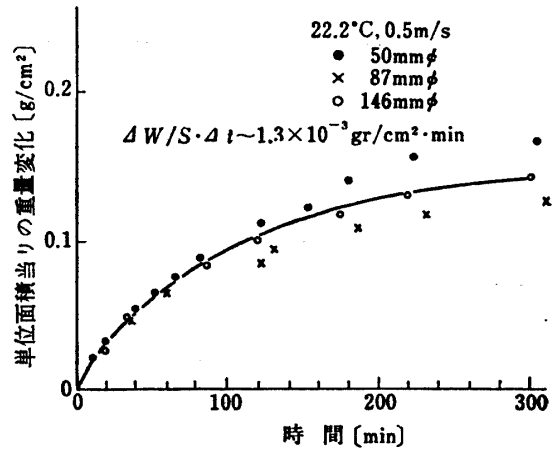
原油中に低沸点の成分を多く含むと気化する量が増し、したがって、引火点は低下し燃えやすくなる一方、蒸気の拡散を問題にするに当たって初期に蒸発する成分が増し、危険範囲が広がる。

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1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。

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

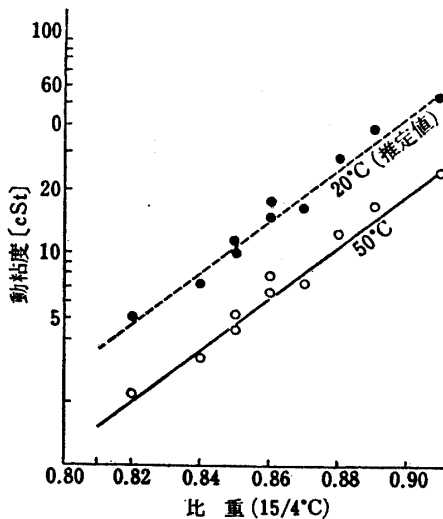
| (1) カフジ原油 | | (2) イラニアン・ライト原油 | |
|---------------|---------|-----------------|---------|
| 成分 | 含有率 (%) | 成分 | 含有率 (%) |
| プロパン | 0.184 | プロパン | 0.121 |
| i-ブタン | 0.283 | i-ブタン | 0.127 |
| n-ブタン | 0.565 | n-ブタン | 0.542 |
| i-ペンタン | 0.559 | i-ペンタン | 0.452 |
| n-ペンタン | 0.755 | n-ペンタン | 0.901 |
| 2-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2図 イラニアン・ヘビー原油の蒸発速度

第2表 原油の蒸発速度 (20°C, 0.5 m/s)

| 種類 | 比重 | 蒸発速度 (gr/cm² · 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 |



第1図 原油の粘度と比重の関係 (中東原油)

2.2 原油の蒸発性

イラニアン・ヘビー原油についての単位面積当たりの蒸発による重量変化の結果 (22°C, 風速 0.5 m/s) は第2図のとおりで (この場合の初期の蒸発速度は $1.3 \times 10^{-3} \text{gr/cm}^2 \cdot \text{min}$ 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 22.9 mmHg となる。また, 参考までに第2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。

2.3 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っている必要

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。イラニアン・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, だいたい, 1.1~1.4 vol% 以内である。そこで, ここではイラニアン・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。

つぎに, 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, その種低沸点分は蒸気圧が大きいので引火点は低く, イラニアン・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, その大きさ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, 沸点別でほぼ第3表のような値をとる。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 5 mm/min から 1.5 mm/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3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。

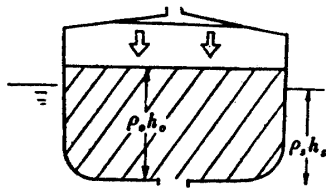
最後に、海面上に原油が広がった場合、その1点で発火が起こったとき、液面上を火炎が伝播する速度は、液温によって著しく変わり、初めに温度の上昇に伴って増大し、ついで最大値を経て減少する。しかし、その値自身はそれほど大きなものでなく、20°C の原油においてたかだか 1.0~1.5 m/s 程度のものと考えられる。

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)。



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。

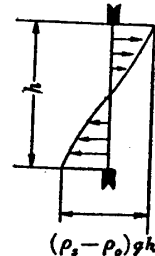
また、head 差による急激な流出中でも、タンク上部のバルブを閉じ、タンク内への空気の流入を止めてやれば、油面の大気圧が下るので破口の圧力は早く平衡状態に達し、油の流出をくい止めることができることは注意すべきであろう。

3.2 船側に破口ができたとき (水面下)

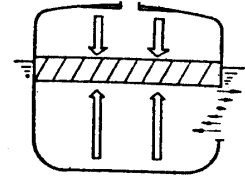
水面下の船側に破口ができると、まず水面上の原油は head 差により急激に流出するが、この場合は 3.1 とは異なり油面が下っても原油と海水の比重が異なるため、

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)。



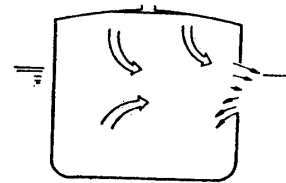
第4図



第5図

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6図)。



第6図

また、この場合は破口の上部が空気中に出ているので、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、つぎ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。

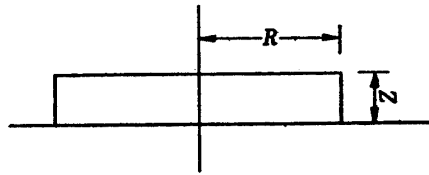
(2) 油は円形の平板状で広がるものとする。

(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。

(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 7 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

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

(2) 粘性による散逸エネルギー

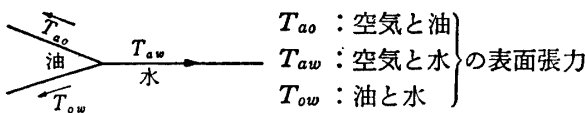
$$\frac{dE}{dt} = \frac{\pi C^2 \eta R^2}{2Z} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \dots\dots\dots (8)$$

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

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

ただし、



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

としたとき、

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

今は安全側をとって、

$$T = T_{ao}$$

とする。

(4) 位置のエネルギーの変化

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

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、

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

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

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

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、

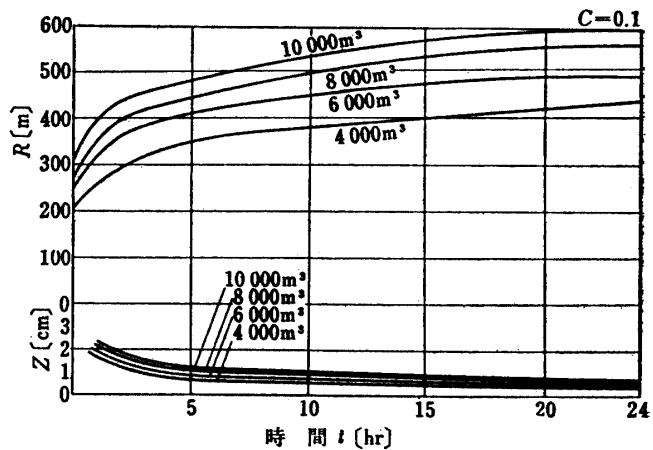
$$\frac{dR}{dt} = \frac{2\rho g V^3}{\pi^3 C^2 \eta R^7} \dots\dots\dots (12)$$

この解は、

$$R(t) = \sqrt[8]{\frac{16gV^3}{\pi^3 C^2 \eta} t + R_0^8} \dots\dots\dots (13)$$

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

速度こう配係数 C は宗像丸の資料などから 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 8 図のようになる。

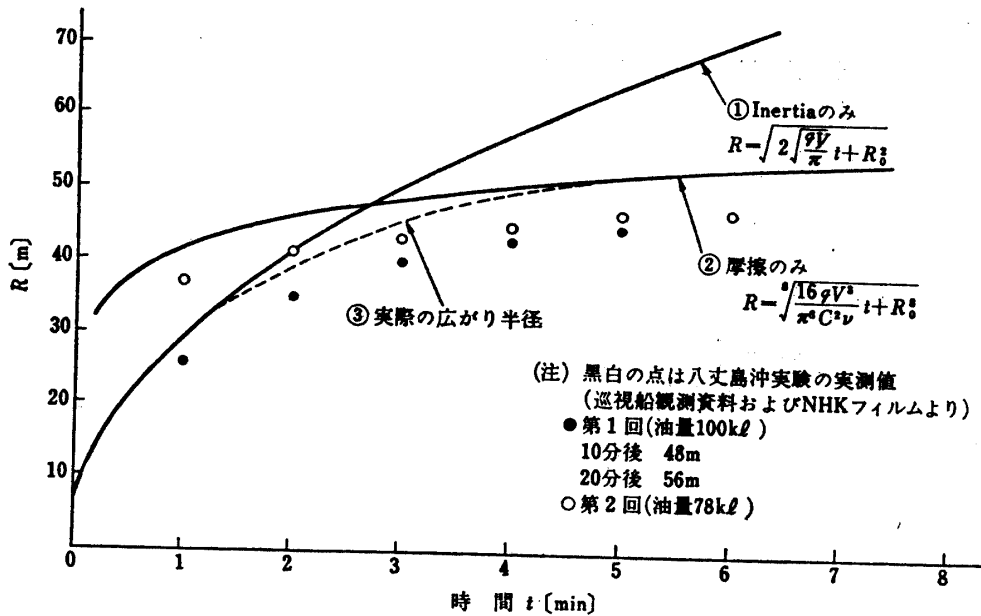


第 8 図 流出した油の量による R および Z の変化

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 9 図のようになる。

流した原油は第 1 回 100 kl で、図中で実測値を黒丸で示してあり、また第 2 回は 78 kl 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対応し、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



第9図 100 m³ の原油の広がり半径

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などを考える場合も、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。

前にも断ったように、この式は、風や潮流のないときで、かつあまり時間が経過しないときにしか用いられない。したがって、油が流出してから1時間以上経過し、広域の汚染が問題となるような場合には、潮流による拡がりの歪みや、風や波による薄膜状の拡散を考慮しなければならない。この場合、油の拡散範囲はこの式で与えられるよりも遙かに大きくなるであろう。

5 石油ガスの拡散

石油ガスの濃度計算を、下記の(1)~(9)の条件の下で行なった。

- (1) 原油から蒸発するガスの蒸発速度については、2.2.3に示された値を参考にする。
- (2) 単位面積からの蒸発速度は油面の総面積に無関係であるとする。
- (3) 単位面積からの蒸発速度の風速による影響は、Powell-Griffithsの式(2.2.3参照)

$$q_m = 2.12 \times 10^{-7} x^{0.77} (P_0 - P') (1 + 0.121 U^{0.85}) \quad (\text{cgs}) \quad \dots \quad (14)$$

による。

- (4) 油面の広がる速度は4。(13)式を用いる。

$$R = \left(\frac{16g\rho V^3}{\pi^3 C^2 \eta} t \right)^{1/8} = (\alpha t)^{1/8} \dots \dots \dots (15)$$

$$\alpha = \frac{16gV^3}{\pi^3 C^2 \nu}$$

$$V = 4.5 \times 10^8 \text{ m}^3 = 4.5 \times 10^9 \text{ cm}^3 \quad (\text{3万kl流出のとき})$$

$$C = 0.1, \nu = 0.1 \text{ St}$$

とすると、

$$\alpha = 4.56 \times 10^{34} \dots \dots \dots (16)$$

- (5) 原油の蒸発成分が油面から蒸発しきる時間TはM₀を総量、Mを残存量とすると、

$$\frac{dM}{dt} = -q_m R^2 \dots \dots \dots (17)$$

$$\begin{aligned} M &= M_0 - 4 \int_0^t q_m R^2(t) dt = M_0 - 4q_m \int_0^t (\alpha t)^{1/4} dt \\ &= M_0 - 4q_m \alpha^{1/4} \cdot \frac{4}{5} t^{5/4} \dots \dots \dots (18) \end{aligned}$$

t = T のとき M = 0

$$T = \left(\frac{5}{16} \frac{M_0}{\alpha^{1/4} q_m} \right)^{4/5} \dots \dots \dots (19)$$

- (6) 蒸発速度の vol 単位表示 vol は 20°C 1 atm に換算する。

$$\begin{aligned} q_v &= \frac{q_m}{2R} \times 22.4l \times \frac{293}{273} = 2.41 \times 10^{-2} \frac{q_m}{2R} \\ &[\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{sec}] \dots \dots \dots (20) \end{aligned}$$

2R (分子量) は正確な値はわからないが、一応 85 とする。

- (7) 濃度計算 式は坂上の式を用い、油面は1辺2Rの正方形とする。

$$C(x, y, o, t) = q_v \int_k^t \frac{1}{B} \frac{\phi\left(\frac{x+R-U\xi}{\sqrt{A}}\right) - \phi\left(\frac{x-R-U\xi}{\sqrt{A}}\right)}{2} \times \frac{\phi\left(\frac{y+R}{\sqrt{A}}\right) - \phi\left(\frac{y-R}{\sqrt{A}}\right)}{2} \xi d \dots (21)$$

$$k = \begin{cases} 0 & t \leq T \\ t - T & t \geq T \end{cases}$$

$$\left. \begin{aligned} A &= q_A \left(\frac{\varphi_A x}{u} + \exp\left(-\frac{\varphi_A x}{u}\right) - 1 \right) \\ B &= q_B \left(\frac{\varphi_B x}{u} + \exp\left(-\frac{\varphi_B x}{u}\right) - 1 \right) \end{aligned} \right\} \dots (22)$$

(8) 気象条件はやや安定とし

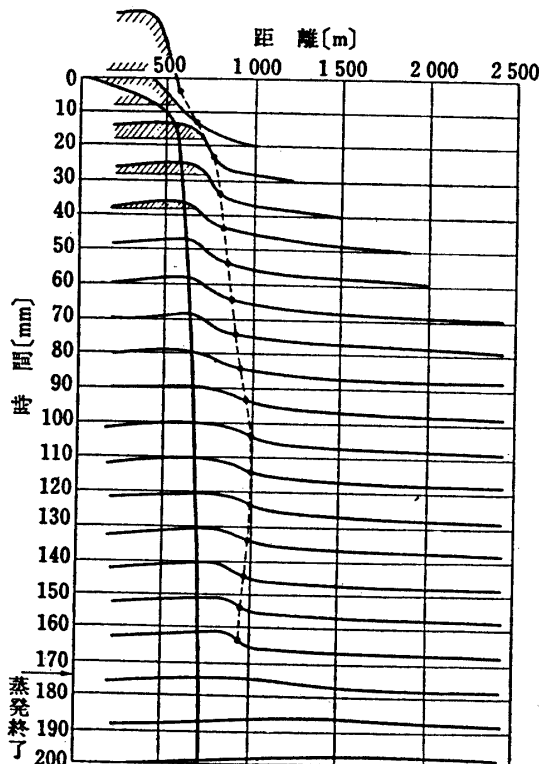
$$\begin{aligned} \varphi_A &= 4.78 \times 10^{-2} & \sqrt{q_A} &= 1.29 \times 10^{-1} \\ \varphi_B &= 4.20 \times 10^{-2} & q_B &= 3.50 \times 10^{-1} \dots (23) \end{aligned}$$

とする。

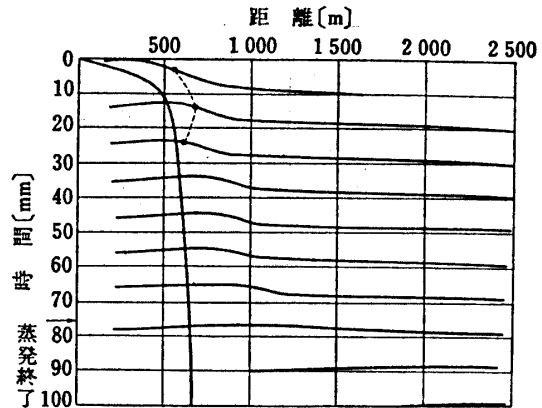
(9) 計算条件

- (イ) 流出油量 (kl) 6,000 10,000 30,000
- (ロ) 風速 (m/sec) 0.5 2 8
- (ハ) 原油中の常温の蒸発成分 5%
- (ニ) 風速 0.5 m/sec における蒸発速度
5 × 10⁻⁴ g/cm²·min

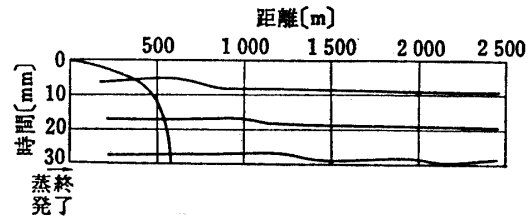
以上の条件の下で電子計算機により数値計算を行なった結果を、第 10 図～第 12 図に示す。



第 10 図 30,000 kl, 0.5 m/s のとき



第 11 図 30,000 kl, 2 m/s のとき



第 12 図 30,000 kl, 8 m/s のとき

図では流出後 10 分ごとの石油ガスの濃度を (1 vol% を 1 cm として) 油面の中心からの距離に対応して示しており、参考のために蒸発終了時刻 T と原油の広がり半径 R も記入してある。また、爆発下限界 (1.2 vol% とした) 以上のガス濃度の範囲を斜線で示し、爆発下限界の 1/2 の距離の点を破線でむすんだ。

これらの図をみてわかるとおり、風速の影響は非常に大きく、無風のときはきわめて長時間爆発の危険性があるが、風速が 2 m/s をこえるとごく短時間で危険はなくなる。

なお、ここに示した結果は多くの未確認の仮定を前提としており、数値計算もかなり荒い方法をとっているので、あくまで 1 つのメヤスとして参照されたい。

6 ふく射熱による危険範囲

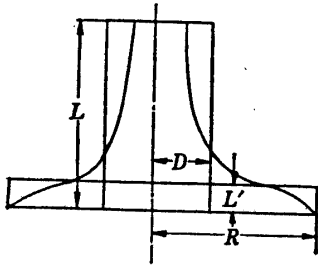
6.1 ふく射源 (火炎) に関する仮定

6.1.1 ふく射源の形状

石油火災における炎の形は周囲の状況によって変わるが、広い海面上において火災が発生した場合、その形状はまわりからの空気の吸込みのため、裾を引いた円錐形になるだろうと思う。そこで、ここでは火炎を第 13 図に示したような背が高く細い円筒と、背が低く直径の太い円板より構成されると考えた。

6.1.2 ふく射源の輝度

つぎに火炎の輝度については、発光源となる炭素粒子は火炎の外周に多く分布していることを考え、発光は円



第 13 図 火炎の形状

筒および円板の外側の表面からのみ生ずるとし、さらに円筒の場合は観測位置にいたる距離に比べてその直径は小さいので、発光面は縦方向の断面で置き換えられるとし、逆に円板の場合は背が低いので高さ方向の変化は無

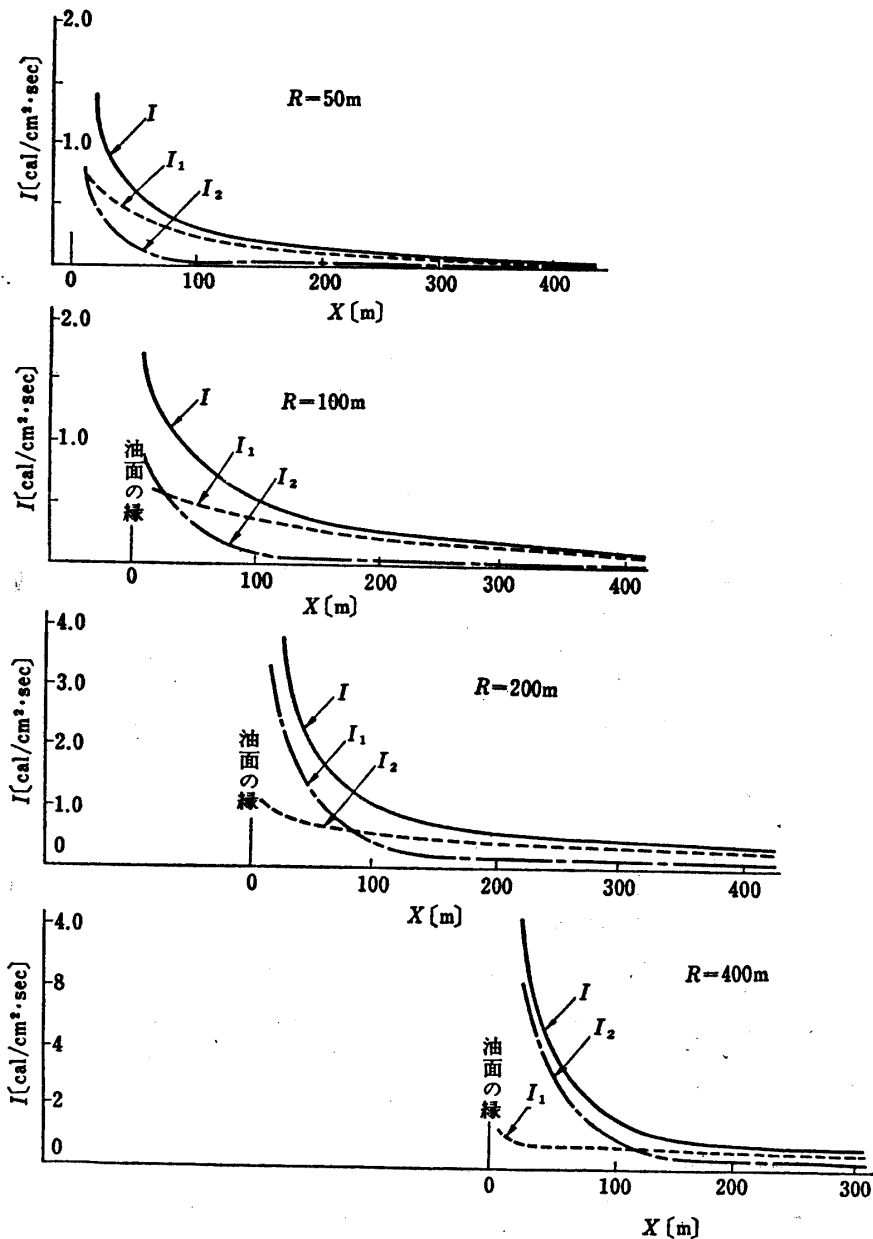
視できるとした。かくて、実際の計算においては円筒は高さ方向のみ積分され、円板は水平方向のみが積分されている。

なお、石油火災の場合、火炎温度 T は変動が激しくまた位置による差が大きいので、どの値を平均として用いてよいかは判然としない上、ふく射能 ϵ も確実な測定に乏しいので、ここでは、両者の積 $\epsilon \cdot T^4$ をひとまとめにして実験と合うように与え、これらを別々に与えることを避けた。軽質留分を含む石油についてのこの値は、

$$B \equiv \epsilon \cdot T^4 = 1.80 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$$

(σ : Stefan-Boltzmann 常数)

くらいと考えてよいが、重油などでは平均火炎温度が低



第 14 図 海面上の石油火災におけるふく射熱の推定

いのもう少し小さくなる。

6.1.3 ふく射源の大きさ

石油火災の場合、火災の大きさは油面の大きさに関係しているため、前記円筒、円板の高さおよび半径は油面半径の関数とし、ここではつぎのように置いた。

$$L = \alpha R = 3.0R$$

$$L' = \beta R = R/25$$

$$D = \gamma R = R/3$$

ただし、ここに L は円筒の高さ、 L' は円板の高さ、 D は円筒の半径、 R は油面半径で、比例定数 α 、 β 、 γ の数値は従来の測定および火災の形状より推定した値である。なお油面の形が円形でなく、矩形または楕円の場合には火災の高さは短辺で左右されるので、 L 、 L' を計算するに当たっては短辺を R にとり、また D の計算にはふく射を受ける方向によって長辺ないし短辺をとる。

6.2 ふく射熱の計算

以上の仮定に基づいてふく射熱の計算が行なわれたが、ここでは詳細は省略する。

6.3 危険範囲の推定

ここに行なった計算による推定は実験と一応よく合うことがわかったので、つぎにはこれに基づいて燃焼油面の半径が 50 m、100 m、200 m、400 m の場合につき、種々の距離における海面上のふく射強度を計算した。結果は第 14 図に示す。図中点線は前記の円筒型火災よりの値、鎖線は円板型火災よりの値で、実線は両者の合計である。

ところで、ふく射熱の危険な程度については、とくに判然とした基準はないが、前にもふれたように木材などの発火は $2\sim 3 \text{ cal/cm}^2\cdot\text{sec}$ から起こるので、これは 1 つのメヤスとなり、さらに人間の皮膚は $0.2 \text{ cal/cm}^2\cdot\text{sec}$ 程度のふく射にさらされると 20 秒ぐらい、また $0.4 \text{ cal/cm}^2\cdot\text{sec}$ では 5 秒ほどで水泡状の火傷を負うとされているから、これももう 1 つの危険なメヤスになるだろうと思う。そこでこのような基準のもとに第 14 図の結果から危険範囲を推定すると、石油火災の油面半径が 50 m 程度の場合にはふく射熱は 25 m ぐらいの近くでも繊維物質を発火させるほどのことはないが、油面の増大に伴い付近は次第に強いふく射を受けるようになり、半径が 400 m ぐらいになると約 100 m 以内の物質は燃え始め、400 m 以内の範囲では皮膚は火傷を負いそうである。

なお、第 28 図において距離 X を油面半径 R で割った値で表示すると、第 4 表に示すようにふく射量は油面半径にかかわらずほぼ同じぐらいの値をとるから、もし有機物質の発火を防ぐために必要な距離は油面半径の $1/5\sim 1/4$ (中心から $1.2\sim 1.25R$)、また人間に対して

はっきりした火傷を避けるためには油面半径と同程度 (中心から $2R$ 程度) の距離が必要ながわかる。この結果は予防措置を講ずる上にはすこぶる便利である。

第 4 表 無次元距離に対するふく射受熱量
($\text{cal/cm}^2\cdot\text{sec}$)

| X/R | 1/16 | 1/8 | 1/4 | 1/2 | 1 | 2 | 4 | 8 |
|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 50 | | | | 0.945 | 0.504 | 0.270 | 0.117 | 0.400 |
| 100 | | | 1.79 | 0.889 | 0.501 | 0.270 | 0.119 | |
| 200 | | 4.33 | 1.83 | 0.975 | 0.535 | 0.310 | | |
| 400 | 12.6 | 4.27 | 1.58 | 0.944 | 0.528 | | | |

7 危険円とその適用

7.1 仮定

2. で述べたように、流出した原油が発火して、海面火災を生じる場合を想定すると、その火災が陸上の人口密集地帯や、重要施設に延焼その他の被害を与えないために、必要な隔離距離として危険円を考える必要がある。船が問題とする場所の近くで衝突を起こし、大量の油を流出するという確率は非常に小さいけれども、いったん事故を生じれば、相当量の油が流出することは事実で、期待値のように、流出する油の量に確率をかけるわけにはいかない。

そこで危険円としては、常識的な一定の確率以上の確率で起こるような規模の事故を考え、そのときの流油量を仮定することにより、絶対量として定義する必要がある。以下そのための仮定を述べる。

(1) 1.1 で検討したように、座礁の方が多くの区画に損傷を受ける可能性があるが、油の流出速度が緩慢なので、衝突で急激に油が流出したほうが、危険範囲は広くなると考え、衝突の場合について危険円を考える。

(2) 衝突の場合、外側に面した相隣る 2 つのタンクが同時に破れることはありうべきことなので、種々の組合せで相隣る 2 つのタンクの合計容量を計算して、そのうち最大のものを流出油量と考える。水面下の部分の油は水面上の部分に比べて、流出速度が小さいと考えられてきたが、3. に示すように、堅長の穴では、かなり流出速度が大きいので、2 つのタンクの全量が流出すると考えた。この量は、現存するタンカーでは $30,000 \text{ m}^3$ が最大である。

(3) 消防の効果は一応考慮しない。

(4) オイルフェンスなどによる油の拡散防止の対策の影響は一応除外する。

(5) ガスの滞留は、風速が小さいほど条件が悪い。原子炉の場合、放射性ガスの拡散の計算は、風速 1 m/

sec で行なっているが、今の場合ガスの存在する場所が低いと、問題になる時間が短いので、安全側をとって 0.5 m/sec とした。

7.2 危険円の定義

危険円は本来、海面火災が陸上の人口密集地帯に延焼することにより、予想外の大きな災害になることを防ぐための離隔距離として考えられたが、もう少し広く解釈して引火の危険性、火傷の危険性あるいは石油ガスによる中毒の危険性をも含めて考えてみる。

結局、危険円はそれぞれの危険性の要因に対する必要離隔距離として定義されるわけで、どの定義の危険円を用いるかは、現在考えている場所の立地条件により適当に選ぶことができる。

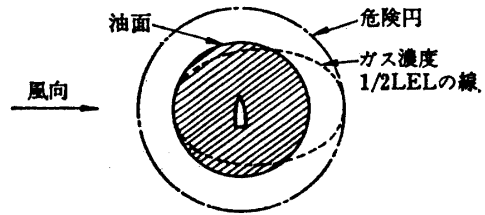
7.2.1 引火の危険性より定義した危険円 R_E

5. に述べたように、海面に広がった油面から蒸発したガスは、ガス雲を形成して風下側に希釈されながら移動していく。したがって、風下側には油面から外側のある距離まで、爆発下限界以上の濃度のガスが数 10 分程度存在する。この範囲に着火源があると、爆発を起こし海面火災を発生するものと考えられる。

いまは計算の仮定があることを考慮し、安全側として爆発下限界の 1/2 以上の濃度のガスの存在する範囲を危険円と定義し、その半径を R_E とする。実際にはガス雲は風下側のみにたな引くので危険範囲は円ではないが、事故のときの風向きがどの方向であるかはまったく予測できないので、最大の距離を半径とする円を危険円とするわけである (第 15 図)。

7.2.2 ふく射熱より定義した危険円 R_C, R_I

海面火災が発生すると、その範囲は最大でも油面の広



第 15 図

がりの範囲であろう。この場合火災のふく射熱によりある範囲のところ (半径 R_C) では固形有機物の引火の危険が生じ、またある範囲のところ (半径 R_I) では人体に火傷を生ずる危険が生ずる。その範囲については 6. に述べてあるが、このようなふく射熱より定義した危険円が当然考えられ、陸上の人口密集地帯に影響を及ぼさないという本来の危険円の趣旨にもっとも合致したものといえよう。

7.2.3 ガス中毒の危険性より定義した危険円 R_T

油面から蒸発したガス雲が人口密集地帯を覆う場合、火災にはいたらなくてもガスによる中毒の危険がある。久我正男氏によればガス濃度 0.5~1.5% の範囲では、1~2 時間でもかなり重い中毒症状が現われ、1.5% の場合は 4 時間以上吸入すれば死亡することもありうる。爆発下限界濃度 (LEL) は 1.2% であるから 1/2 LEL 程度が重い中毒症状を起こす限界の濃度と考えられ、危険円の 1 つの定義になりうる。この半径を R_T とする。

なお、1/2 LEL 以下の濃度では、ガスの滞留する可能性のある時間 (1~2 時間) では重い中毒症状は現われないが、臭いが強い待避などの必要を生ずることは考えられる。まったく人体に影響のない濃度は $1/5$

第 5 表 危険円の大きさ

| 流出油量 (m^3) | 風速 (m/sec) | 油面半径 R_o (m) | 引火の危険円 $R_E=1/2LEL$ | 中毒の危険円 $R_T=1/2LEL$ | ふく射熱の危険円 | |
|-------------------|---------------|-------------------|------------------------|------------------------|----------|-------|
| | | | | | 発火 | 火傷 |
| 6,000 | 0.5 | (60 分後) 330 | (70 分後) 660 | (70 分後) 660 | 410 | 660 |
| | 2 | " | (10 分後) 330 | (10 分後) 330 | | |
| | 8 | " | " | " | | |
| 10,000 | 0.5 | (60 分後) 420 | (120 分後) 740 | (120 分後) 740 | 530 | 840 |
| | 2 | " | (20 分後) 420 | (20 分後) 420 | | |
| | 8 | " | " | 420 | | |
| 30,000 | 0.5 | (60 分後) 640 | (120 分後) 1,000 | (120 分後) 1,000 | 800 | 1,280 |
| | 2 | " | (20 分後) 680 | (20 分後) 680 | | |
| | 8 | " | 640 | 640 | | |

LEL であるといわれるが、タンカー事故の確率がきわめて小さいことや、待避により十分避けられることを考えると、そこまで離隔距離をとる必要はないと思われる。

7-2-4 このほか煙による被害が考えられるが、その範囲程度については今回は調査を行なわなかった。今後考慮すべき問題であろう。

7.3 危険円の大きさ

7.2 の定義に基づいて、油量 6,000 m³、10,000 m³、および 30,000 m³ の場合につき、危険円を計算してみると、第5表のようになる。なお、油量 6,000 m³ はほぼ 50,000 DWT クラスのタンカー、10,000 m³ は 80,000 ~100,000 DWT 程度、30,000 m³ は 150,000~250,000 DWT クラスのタンカーに相当する。なお()内の時間は最大の半径となる時間を示す。

以上をまとめてみるとだいたいつぎのようになる。

油面半径 R_0

引火の危険円 (1/2 LEL の範囲) $R_E=2R_0$

(LEL の範囲をとると 1.1R 程度である)

中毒の限界 (1/2 LEL の範囲) $R_T=2R_0$

ふく射熱による有機物の発火限界 $R_C=1.25R$

ふく射熱による人体の火傷の限界 $R_I=2R_0$

これよりみてもっとも範囲の狭いのは、ふく射熱による有機物の引火限界から定義される危険円 R_C であり、ガス爆発の限界 R_E 、中毒の限界 R_T 、人体の火傷の限界 R_I などはいずれも同程度でほぼ $2R_0$ である。

なお 7.3.2 に述べた人体にまったく影響のないといわれるガス濃度 (1/5 LEL) の範囲は、ほぼ $3R_0$ に相当する。これは危険円というより、むしろ事故のさいの待避の必要性などの判断の資料として用いられるべきものである。

7.4 危険円の適用例

危険円を実際に適用する場合には、だいたいつぎの諸点を原則的な方針としてとることを提案する。

(1) 問題とするタンカーの相隣る2つのサイドタンクの合計容量のうち、最大のものを取り V_0 (m³) とし、次式により R_0 (1 時間後) を計算する。

$$R_0 = \{\beta(\delta_s - \delta_0)^2 V_0\}^{1/3} \quad [\text{m}]$$

ただし、 $\beta: 1.82 \times 10^{11}$, δ_s : 海水比重,

δ_0 : 油の比重

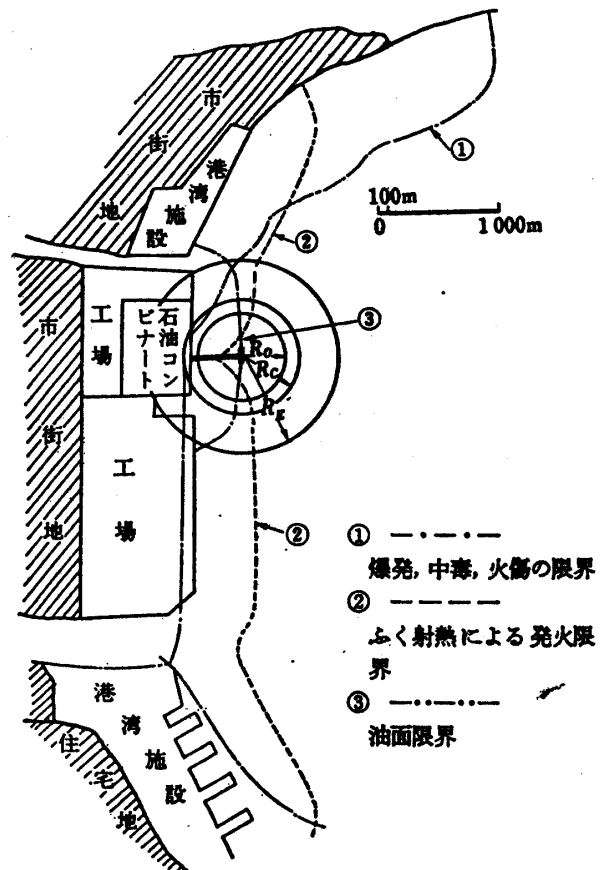
(2) 市街地および人口密度の高い住宅地の海に近い境界から $R_E=R_T=R_I=2R_0$ の限界線を引く。これを①で示す。

(3) 工場、港湾施設などの海に近い境界から $R_C=1.25R_0$ の限界線を引き②で示す。

(4) 常設の消火装置 (たとえば石油コンビナートの撤水装置など) のあるところでは、施設の限界から R_0 のところに限界線を引き③で示す。

(5) 以上の①②③のうち陸よりもっとも離れたものを連ねて限界線とし、問題のタンカーはその線より内側に立ち入ることを禁止する。したがって、ドルフィンなどはその限界線の外側に設けることが望ましい。

一例として第16図に模型的な港湾について、8万トンのタンカーの立入り限界線を示す。なお(4)の条件は、油面が岸壁でせき止められて、それ以上、中にはいらないことを考えると、必ずしも R_0 だけの離隔は必要でないかもしれない。しかしながら、その場合岸壁でせき止められて変形した油面の境界が他の陸上施設に $1.25R_0$ より近づかないような配慮が必要であろう。



第16図 危険円適用の例

以上は一応の原則として提案されたもので、実際に用いる場合には、消防設備の優劣や、油の拡散の防止装置の有無、あるいは衝突事故を減ずるための措置がとられているかどうかによって、離隔距離を修正する必要がある。