

津波来襲時の石油に関連する災害

首藤伸夫*

1. 序

近年、沿岸地帯の変貌は極めて著しく、その結果過去には予想もされなかった様な新しい形の災害が、津波来襲時に生ずる可能性が増えつつある。中でも、大量に貯蔵されている石油等の危険物がどうなるかは、緊急な対処方法を必要とする重要な問題の一つである。ここでは、過去に生じた災害例を分類し、これから起こるであろう災害の大きさを推定する手法について考察を試みる。また、昭和39年新潟地震の際の実例について解析を試みる。

2. 災害例

1) 石油タンクの移動破壊。津波による移動破壊は比較的小さなタンクの場合に生じている。

i) 昭和19年東南海地震津波¹⁾

三重県二木島の重油タンクは高さ7mの津波で300m以上押し流された。石油缶3,000~4,000個分程の大きさで当時は空であった。

ii) 昭和35年チリ津波²⁾

岩手県大槌。波高3.8mで石油タンクが水に浮いて押し出されて傾いていた。この波高は痕跡高で海面上の値らしい。又、タンクの大きさについては述べられていない。

iii) 昭和35年チリ津波³⁾

岩手県玉ノ脇港。岸壁から約40m離れた九戸漁連油タンクには、地上から250cmの高さに痕跡があった。タンクそのものは被害が無かったと見え、何も報告されていない。

IV) 昭和58年日本海中部地震津波⁴⁾

韓国遠徳邑臨院。直径7m、高さ8m、容積130klの軽油タンクが円形のコンクリート基礎から離れ、約19m押し流されて、入っていた軽油48klが溢れ出た。ここでの津波水位は海面上3.6~4.0m、地上約2mであった。タンク基礎は地面とほぼ同じ高さである。

2) 石油タンクの破壊、油の流出と火災

i) 昭和43年十勝沖地震津波⁵⁾

北海道日高支庁庶野。漁業共同組合の重油タンクの底部に亀裂を生じ、重油を流出した。

ii) 1964年アラスカ地震津波。

アラスカ Valdez⁶⁾。地震と共に地滑りが生じた。直後に襲った津波の高さは10m以上。地震と津波の為に石油タンクが破壊され、油が流出した。数時間後、小型船泊地の東にある燃料油貯蔵タンク群の所から火が出て、石油タンク群は全滅した。

iii) 1964年アラスカ地震津波。

アラスカ Whittier⁶⁾。津波は第二波、第三波が大きく、10mから13mあった。津波により Union Oil、軍の石油タンクが傾き油が流出し、火を発生し、約8km²が焼けた。

IV) 1964年アラスカ地震津波。

アラスカ Seward⁶⁾。地震が始まって30s~45s経ったところ、Standard Oil Co.のタンクのパイプとバルブが壊れ、油が漏れ始めた。タンクが傾き、海へ向かって滑り始めると轟音と共に火を発生し70m近い火柱が立った。津波で運ばれた火は、他のタンクや鉄道の油槽列車のタンクを次々と誘爆させ、

* 東北大学工学部

火災は数日間続いた。

V) 昭和39年新潟地震津波⁷⁾

新潟。火元は2ヶ所であった。第1出火点の火事には津波は関係していない。地震で亀裂の入った昭和石油No.33タンクからのガソリンは、地震で溢れ出た地下水と津波の為に広がった。地震後約5時間経って第2の出火があり、広がった油によって延焼した。

3) 石油タンカーの事故

i) 昭和43年十勝沖地震津波⁸⁾

青森県八戸港。2,000tのタンカーがジェット燃料4,000klを揚陸中、津波に遭遇、沖合い脱出を図ったが、防波堤に激突し燃料が流出した。流出した量は約300klであったが、八戸海上保安本部、八戸市消防部、米軍石油廠によるオイルフェンスなどの共同作戦が功を奏し、火災には至らなかった。

ii) 昭和58年日本海中部地震津波⁹⁾

秋田県船川港。42,000tのタンカーが揚海中、海震を感じ、直ちに作業を中止した。津波は地震後30分位で来襲した。津波第一波の来襲が早かったため、ローディングアームやギャングウェイの取りはずしが間に合わず、ローディングアームの折損やギャングウェイの曲損等の被害が発生するとともに係留索が切断したため、船体が船尾方向に最大100m前後移動した。しかし、錨鎖の操作や機関、蛇の操船で対処し、これに成功して事故を防ぎ得た。津波の最大打ち上げ高で1.2m位であった。

4) 流出した油の人体への影響

明治29年三陸大津波。青森県沿岸¹⁰⁾

当時、鱈ノ粕製造中の為、魚粕、魚油が大量に沿岸に存在し、津波で流された。津波にさらわれた人が、これを呑み込み、病気になった。僅かしか呑まない場合にも、日が経つにつれ、身体が膨れ上がり、苦しんだという。これが重油であったとしたら、確実に一命を失うであろう。

5) 環境汚染

大正12年の関東大震災時に、横須賀海軍工廠の重油タンクが地震で破損し、火災となった。この時、石油が津波と潮流で運ばれ、東京湾奥の浦安の海底に堆積し、長時間にわたって汚染していたと云う伝聞がある。

3. 瞬間放出に対する推定法

3.1. 簡略法

単に油の拡がり面積だけを推定するのならば、次元解析をもとにした簡便な方法がある。これは、元来石油タンカーの座礁破壊の様な場合に対して開発されたものであるが、津波の場合にも適用可能である。

今、体積 v の油が瞬間に放出されたとする。これが静水中を円形を保ちながら拡がるものと仮定する。まず、重力と慣性力が重要な要素である重力-慣性力領域、ついで重力-粘性力領域が現れ、表面張力-粘性力領域を経て、極限領域になる。

油の拡がり半径 l は各領域に対して、次の様に与えられる¹¹⁾

重力-慣性力領域

$$l = k_i (dgvt^2)^{1/4} \dots\dots\dots (1)$$

重力-粘性力領域

$$l = k_v (dgvt^3/\nu_w^{1/2})^{1/6} \dots\dots\dots (2)$$

表面張力-粘性力領域

$$l = k_t (\sigma^2 t^3 / \rho_w^2 \nu_w)^{1/4} \dots\dots\dots (3)$$

極限領域

$$l = (k_a/\pi)^{1/2} (\sigma^2 v^6 / \rho_w^2 \nu_w D^2 S^6)^{1/16} \dots (4)$$

ここで、 g ：重力の加速度、 σ ：空気-油-水界面における正味の表面張力、 ρ_w ：水の密度、 ν_w ：水の動粘性係数、 $d = (\rho_w - \rho_o) / \rho_w$ 、 ρ_o ：油の密度、 t ：時間、 D ：分子拡散係数、 S ：油の水中への溶解率、 k_i 、 k_v 、 k_t 、 k_a ：各領域における比例常数でFayによると、それぞれ1.14、1.45、2.30、1である。

この結果を図-1に示す。

3.2. 数値計算法

津波による油の拡がりを初めて計算したのは、後藤である¹²⁾。

水と油の運動を連動して解く。津波による水の流動には、油の影響は無いものと仮定する。油は津波によって運ばれると同時に比重差によって拡がる。以下の計算では、表面張力の効果は無視している。津波による流動は数時間のオーダーであるのに対し、表面張力が効果的であるのは、放出量の多少にもよるが、数日後だからである。

水平方向にx, y軸をとる。油の水平方向流速を u_0, v_0 , 水の水平流速を u, v とする。基準面からの油層表面の高さを η_0 , 水面の高さを η とおく。油の密度を ρ_0 , 水の密度を ρ , 重力の加速度を g とし油の鉛直加速度は重力加速度に比べ小さいと仮定すると、油の連続及び運動の式は

$$\frac{\partial Do}{\partial t} + \frac{\partial Mo}{\partial x} + \frac{\partial No}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial Mo}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_0 Mo) + \frac{\partial}{\partial y}(v_0 Mo) + gDo \frac{\partial \eta_0}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho_0} = 0 \quad \dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial No}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_0 No) + \frac{\partial}{\partial y}(v_0 No) + gDo \frac{\partial \eta_0}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho_0} = 0 \quad \dots\dots (7)$$

となる。ここで、 Do は油層の厚さであり、 $Mo = u_0 Do$, $No = v_0 Do$ である。 τ_x, τ_y は抵抗力を表わす。 Do と η_0 の関係を導く。図-2(a)の様に油層が水面上に浮いている場合と同図b)の様に油層が水底に達する場合とに分けて考える。ただし、図に示す様に、 η ,

η_0 は鉛直上向きを正、 h, h_0 は鉛直下向きを正にとる。油の鉛直加速度が無視出来ると、鉛直方向の力の釣合は、それぞれ

$$\rho g Do = \rho g (Do - \eta_0 + \eta) \leq \rho g D \quad \dots (8)$$

および

$$\rho g Do > \rho g (Do - \eta_0 + \eta) = \rho g D \quad \dots\dots (9)$$

したがって、 Do と η_0 との関係は

$$D \geq \rho_0 Do / \rho \text{ のとき } \eta_0 = \epsilon Do + \eta \quad \dots\dots (10)$$

および

$$D < \rho_0 Do / \rho \text{ のとき } \eta_0 = Do - h \quad \dots\dots (11)$$

となる。ここで、 $\epsilon = 1 - \rho_0 / \rho$ である。

油層底面に働く抵抗力は相対速度の2乗に比例するものと仮定し、

$$D \geq \rho_0 Do / \rho \text{ のとき}$$

$$\tau_x / \rho_0 = f (u_0 - u) [(u_0 - u)^2 + (v_0 - v)^2]^{1/2} \quad \dots\dots (12)$$

$$\tau_y / \rho_0 = f (v_0 - v) [(u_0 - u)^2 + (v_0 - v)^2]^{1/2} \quad \dots\dots (13)$$

$$D < \rho_0 Do / \rho \text{ のとき}$$

$$\tau_x / \rho_0 = f_B u_0 [u_0^2 + v_0^2]^{1/2} \quad \dots\dots (14)$$

$$\tau_y / \rho_0 = f_B v_0 [u_0^2 + v_0^2]^{1/2} \quad \dots\dots (15)$$

とおく。ここで、 $f (= 0.2 Re = 0.2 U_0 D_0 / \nu_0)$, $f_B (= 0.02 \text{ 程度})$ は界面及び底面における抵抗係数である。 U_0 は局所的な代表流速、 ν_0 は油の動粘性係数である。

後藤は以上の式による数値計算を行った。その結果を簡便な推定法と比較したのが図-3で、丸印が後藤の結果である。流出当初は初期条件の差が効いているが、そのうち両者は良い一致を示す様になる。従って、拡がりだけを問題にするならば、簡略法で十分であるが、油の流れて行く地域を問題にするのであれば、数値計算をする必要がある。

4. 昭和39年(1964)新潟地震津波の場合

4.1. 地震・発災及び災害の状況^{7),13)}

昭和石油新潟製油所は新潟市を貫流する信濃川の右岸河口部付近に位置し、ほぼ東西に長い敷地を有していた。その敷地の北側は直接日本海に面している。

工場の配置は図-4に示す通りであった。

1) 第一出火点

昭和39年6月16日午後一時頃地震が発生、A地区の東部にあった5基の巨大な原油タンク群も大揺れを起し、タンクの上端部から原油が溢れ出した。同時にNo.1103のタンクから出火、周辺に溢れ出していた油に延焼して、5基のタンクを含め全域が猛炎に包まれた。これを第一出火点からの火災と呼んでいる。これの延焼には津波は関係ない。

2) 第二出火点

第一出火点からの火災が、5つの巨大タンク群を包む猛炎となって燃え続け、相次ぐ余震や津波の襲来に人々は遠く避難して製油所内には殆ど人影を見ないと云う状況下に、当日午後6時~6時半頃、IH工場と呼ばれるD地区の東端にある新潟アスファルト工場と隣接の三菱金属鋳業との境界部付近から出火した。

折りから付近一帯の浸水していた水面上に浮かんだガソリン等の油類に引火し、火はたちまち延焼拡大し、西南方向に伸びた火勢は遂に臨港町の民家約300戸を焼失するという大火災に発展した。これを第二出火点からの火災と呼ぶ。

i) 出火当時の気象条件

天候は晴、4.3m/sの北北東の風が吹いており、気温は19.2℃、相対湿度81%、実効湿度83.3%であった。

ii) 津波の状況

山の下臨港地区は元来零メートル地帯として、たびたび高潮や大雨等で部分的に水害を受けていた所であるが、この時の地震で益々

地盤の沈下量が増大した為、津波の襲来時はもとより、地下水の湧出とあいまって、この地区の三分の二以上が水に覆われてしまった。津波の浸水方向を図-5、地下水と津波とによる浸水深を図-6に示す。

iii) 出火前の状況

地震と同時にD地区内にあった数多くのタンク類を始め諸施設は傾斜、破損等の被害を受けた。特に同地区の東部にあったNo.33のタンク(ドーム型固定屋根、容量1,000kl、ガソリン)のパイプと側板の接続部が折損した。ガソリンは当初2mの高さに噴出し、防油堤の破損箇所より流出し、あたり一面に広がった。

D及びG地区では地震時に至る所に地割れが生じ地下水が噴出した為、この付近一帯は、深い所で約50cm、浅い所で約30cmの浸水状態となった。この水面上をNo.33から流出したガソリン及びその他各所から溢流又は漏出した石油類が浮かんで広がった。

この浸水地帯は製油所構内のうち、少しでも地盤高の高い部分を残し、D地区からG、E、H、Kと広い区域にわたって広がった。特に、当日の午後6時頃迄約10回にわたって来襲した津波により、西部の臨港町など港に近い方面はその影響も受けた様である。なお隣接のG地区との境界線上には組み立て式のコンクリート塀があったが、地震により傾斜や不同沈下を生じたため、水面に浮かんでいたガソリン等はG地区へと広がった。

午後1時40分頃、新潟アスファルト鋳業の工場長が最後に退避した時には既に半長靴の半ば位まで浸水し、隣の昭和石油のNo.33タンクからの油も水面に浮かんでいた。

午後2時頃に至り、浸水地帯に流出浮遊中のガソリン等から蒸発した可燃性混合気体に引火する危険が増大したので、退避命令が出された。G地区の三菱金属鋳業の保安要員の幹部が全員の退避を確認した後、最後に正門外に出たのは午後3時頃であった。この時、浸水は同工場の守衛室付近まで及んでいた。

第二出火点の出火時刻は、目撃者の言を総合すると、午後6時から6時30分の間と推定されている。出火場所はD地区の東端新潟アスファルト工場付近からG地区の西端にある木造の資材倉庫付近を包含する付近一帯というかなり広い面積の部分でそれ以上細部にわたり出火場所を特定する手がかりはない。

IV) 延焼状況

図-7は第一及び第二出火点の火災の延焼拡大の経過、ある時点における大体の焼失区域及び最終的焼失区域を示す焼止まり線等を示している。

一般の市街地火災の場合には、ほぼ風下方向に向かって広がりがながら延焼する傾向がある。所が、当時の風速が4~5 m/sと小さかった事も影響し、普通の場合とは異なった状況が認められる。すなわち、延焼拡大の方向、経路及び速度等是不規則であった。この理由は延焼拡大の媒体となった可燃物が、主として浸水地帯の水面上に浮遊したガソリン等の油類であったからである。地盤が僅かでも高く浸水を免れた場所では、風下にあっても焼け残った。例えば、C地区の事務所の例がこれである。

焼け止まり線は火災の後期に消防隊の組織的な消火活動が行われた結果である。

4.2. 石油の流出と火災過程の解析

1) 漏出量の推定

破損したNa33タンクは径13.4m、高さ7.5mで、ガソリン1,000klを貯蔵する能力を有しているが、当時どの位の量が貯蔵されていたかは、記録がなく不明である。

パイプの破損箇所から2mの高さにガソリンが吹き上げたと言われるから、貯油深は2m以上であったであろう。2mとすると、 $\pi \times 13.42 \times 2 / 4 = 282 \text{kl}$ となる。破損により生じた漏出口の形状にもよるが、ここでのエネルギーの損失を見込む必要がある。漏出流速 v は

$$v = K(2gh_1)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (16)$$

の様に内部貯油深 h_1 と流出係数 K とで与えられ、漏出後はこの運動のエネルギーが位置のエネルギーに変わったと仮定すると2mという吹き上げ高さ h_0 と h_1 とには

$$h_1 = h_0 / K^2 \quad \dots\dots\dots (17)$$

の関係がある。これより、内部の貯油深 h_1 は3.1m以上、従って、貯蔵量は425kl以上という方が尤もらしい。

2) 油の広がり

明確にこれについて述べた記述は見あたらない。

1時40分頃新潟アスファルト工場の工場長が退避したとき、Na33タンクからの油が水面に浮かんでいたというから、約40分で両者間の距離である65m以上は広がっていたと考えられる。

浸水と共に水面に乗ったガソリン等が押し寄せ、退避命令が出され、三菱金属鋁業の保安要員幹部が午後3時頃退出する時に守衛室まで浸水していた。油類も到達したと仮定しても良いかも知れない。約2時間で145m広がった事になる。

以上を長さ l (m)、時間 t (hr) を単位として表わすと

$$l = 87 t^{3/4} \quad \dots\dots\dots (18)$$

或は

$$l = 90 t^{2/12} \quad \dots\dots\dots (19)$$

の関係がある。たった2個の資料で大胆な経験式を作成したが、次に示す解析から明らかのように、式(18)では重力慣性領域にあるものとし、式(19)では重力粘性力領域にあると仮定したものである。

3) 連続放出の広がり法則

二次元的な解析から、2次元的な広がりを有する場合の、瞬間放出、連続放出の代表長さ l と初期体積 v 、連続流量 Q 、時間 t の関係が次の様に得られている。

瞬間流出

$$l = k_i (D g v t^2)^{1/4} \quad \text{重力慣性力領域} \quad \dots 20$$

$$= k_v (D g v^2 t^{3/2} / \nu_w^{-1/2})^{1/6}$$

$$\text{重力粘性力領域} \quad \dots 21$$

$$= k_t (\sigma^2 t^3 / \rho_w^2 \nu_w)^{1/4}$$

$$\text{表面張力粘性力領域} \quad \dots 22$$

$$= (k_a / \pi)^{1/2} (\sigma^2 v^6 / \rho_w^2 \nu_w D^3 S^0)^{1/16}$$

$$\text{極限領域} \quad \dots 23$$

ここで $k_i = 1.14$, $k_v = 1.45$, $k_t = 2.30$,

$k_a = 1$ である。

連続放出に対しては 14)

$$l = C_i (Dg)^{1/4} Q^{1/4} t^{3/4}$$

$$\text{重力慣性力領域} \quad \dots 24$$

$$= C_v \nu_w^{-1/12} (Dg)^{1/6} Q^{1/3} t^{7/12}$$

$$\text{重力粘性力領域} \quad \dots 25$$

$$= C_t \sigma^{1/2} \rho_w^{-1/2} \nu_w^{-1/4} t^{3/4}$$

$$\text{表面張力粘性力領域} \quad \dots 26$$

ここで C_i , C_v , C_t は実験的に決められるべき常数であるが、これを決める手段が無いため、瞬間放出の係数を使用して決定する。

今、瞬間放出に対して添え字 1 、連続放出に対して 2 を使って表そう。重力慣性力領域と重力粘性力領域との境(添え字 a)では代表径が連続するから

瞬間放出に対し

$$l_{1a} = k_i (D g v t^2)^{1/4} = k_v (D g v^2 t^{3/2} / \nu_w^{-1/2})^{1/6}$$

$$\dots 27$$

が成立している。これから v を消去すると境界での l は

$$l_{1a} = k_i^4 k_v^{-3} (Dg)^{1/2} \nu_w^{1/4} t_1^{5/4} \dots 28$$

であたえられる。同様にして、連続流出にたいして

$$l_{2a} = C_i^4 C_v^{-3} (Dg)^{1/2} \nu_w^{1/4} t_2^{5/4}$$

$$\dots 29$$

となる。

更に、この境界では、重力の代表量(瞬間放出に対し $\rho_w V l_1 t_1^{-2}$ 、連続放出に対し

$\rho_w Q l_2 t_2^{-1}$) が粘性力の代表量 ($\rho_w \nu_w^{1/2} l_1^3 t_1^{-3/2}$; $\rho_w \nu_w^{1/2} l_2^3 t_2^{-3/2}$) と同程度になると仮定する。

すなわち、

$$\frac{\rho_w V l_1 t_1^{-2}}{\rho_w \nu_w^{1/2} l_1^3 t_1^{-3/2}} = \frac{\rho_w Q l_2 t_2^{-1}}{\rho_w \nu_w^{1/2} l_2^3 t_2^{-3/2}}$$

$$\dots 30$$

が成立すると置くのである。これに上の関係を代入して解くと

$$C_v = C_i^{2/3} k_i^{-2/3} k_v \dots 31$$

となる。

同様にして係数を決めて

$$l = C_i (Dg)^{1/4} Q^{1/4} t^{3/4}$$

$$\text{重力慣性力領域} \quad \dots 32$$

$$= C_i^{2/3} k_v k_i^{-2/3} \nu_w^{-1/12} (Dg)^{1/6} Q^{1/3} t^{7/12}$$

$$\text{重力粘性力領域} \quad \dots 33$$

$$= C_i^2 k_t k_i^{-1} \sigma^{1/2} \rho_w^{-1/2} \nu_w^{-1/4} t^{3/4}$$

$$\text{表面張力粘性力領域} \quad \dots 34$$

の様に、或は上にあげた係数値を代入して

$$l = C_i (Dg)^{1/4} Q^{1/4} t^{3/4}$$

$$\text{重力慣性力領域} \quad \dots 35$$

$$= 1.33 C_i^{2/3} \nu_w^{-1/12} (Dg)^{1/6} Q^{1/3} t^{7/12}$$

$$\text{重力粘性力領域} \quad \dots 36$$

$$= 2.02 C_i^2 \sigma^{1/2} \rho_w^{-1/2} \nu_w^{-1/4} t^{3/4}$$

$$\text{表面張力粘性力領域} \quad \dots 37$$

の様に重力慣性力領域の係数 C_i のみを未知として与えられる。

どの領域にあっても、 t の $3/4$ 乗かそれに近い形で広がって行く。

又、重力慣性力領域と重力粘性力領域との境界は、流量 Q を消去して

$$l = 1.33^{-3} C_i^2 \nu_w^{1/4} (Dg)^{1/2} t^{5/4} \dots 38$$

と与えられる。

4) 新潟の場合

ガンリンとして比重 $0.66 \sim 0.75$ の平均値

0.70を採用しよう。長さ*l*としてm, 時間*t*としてhr, 流量*Q*としてcm³/sをとる。*Δ*は0.3である。

比較的近距離のデータであったから, 重力慣性力領域であると仮定すると, 式から

$$l = C_i \times (0.30 \times 980)^{1/4} \times (3600 t)^{3/4} \times Q^{1/4} \\ = 19.25 C_i Q^{1/4} t^{3/4} \quad \dots\dots 39$$

となる。

これと新潟の場合の

$$l = 87 t^{3/4} \quad \dots\dots 40$$

とを等置して,

$$C_i Q^{1/4} = 4.52 \quad \dots\dots 41$$

が得られる。

又, 重力粘性力領域であると仮定すると

$$l = 5.88 C_i^{2/3} Q^{1/3} t^{7/12} \quad \dots\dots 42$$

これと新潟の場合の

$$l = 90 t^{7/12} \quad \dots\dots 43$$

とを等置して

$$C_i^{2/3} Q^{1/3} = 15.31 \quad \dots\dots 44$$

となる。

重力慣性力領域と重力粘性力領域との境界は

$$l = 673 C_i^2 t^{5/4} \quad \dots\dots 45$$

である。

図-8は得られた2点が重力慣性力領域に属するとした時のもので, パラメタは*C_i*である。これから, *C_i*は0.3よりも小さくなくてはならないことが結論される。もっとも, 多少の誤差を認めるならば, *C_i*は0.35より小さければ良い。

図-9は2点が重力粘性力領域にあるとした場合である。*C_i*は逆に0.4より大きくなければならない。誤差を認めることとすると, *C_i*は0.35より大きければ良い。

表-1は*C_i*の変化に対応する流量*Q*の値である。

タンクから油が流出し始めた時の噴出高さ2mに対応する放出流速は6.3m/s, 流出終了時に貯油深が零になるとすると, 平均の放出流速は初期流速の2/3であるから, 4.2m/sである。この流速で流量を除き流出断面積を求めて上の表に記してある。普通, ガソリンタンクからのパイプの径は, 大きくても8inch(20cm)程度, 断面積は324cm²位であろうから, *C_i*は0.22より大きくなくてはならない。ガソリンの流出はパイプと側板の接続部が折損して生じている。パイプ周長の半分位にわたって少なくとも1cm以上の幅で亀裂が生じたものとする, 流出断面積は30cm²以上はあったであろう。*C_i*は0.5以下位ではなかろうかと考えられる。

一方, *C_i*の理論値は1.03と云われている。2次元問題としての連続放出時の*C*の実験値は余り見あたらない。

1次元問題なら*C_i*に対する理論実験が存在する。重力慣性力領域において, 先端部の進行速度*u_{LE}*と先端部厚さ*h_{LE}*との関係として,

$$u_{LE} = k (Δgh_{LE})^{1/2}$$

と表現され, *k*の実験値が表-2や図-10の様に与えられている。

このとき,

$$l = C_i (Δg)^{1/3} q^{1/3} t \quad \dots\dots 46$$

であり,

$$qt = hl \quad \dots\dots 47$$

である事を考えに入れると, *u_{LE}*に対応する*dl/dt*は

$$dl/dt = C_i^{3/2} (Δgh)^{1/2} \quad \dots\dots 48$$

となり,

$$k = C_i^{3/2}$$

の関係にある事が判る。*C_i*の理論値は1次元

問題では1.26でkの値では1.41に対応する。kの実験値の最小値は表-2を参照すると0.3位で、これはC_iにすると0.45程度となる。すなわち、C_iの実際の値は理論値の0.36倍程度の事が有り得る。

同様な事が2次元連続流出でも生じうると仮定するとC_i = 0.36 × 1.03 = 0.38位までの値はそれほど不自然な値ではない。

以上を総合すると、C_iは0.4から0.5位の値であったと考えるのが尤もらしい。

5) 火災

16日18時か18時半頃出火した火災の延焼の拡がりは、図-7から表-3の通りとなる。

延焼面積A (m²)と経過時間t (hr)との間には、図-11の様に

$$A = 1.4 \cdot 10^4 \cdot t \quad \dots\dots 49$$

の関係が得られる。

この延焼は上に述べたガソリンのみによって燃え広がったものではない。火災が発生した為、引火して破壊された他のタンクから様々な種類の油が漏出し、これらによって誘発されたものと考えるべきであろう。

5. おわりに

石油タンクや化学製品の貯蔵がそれほど多くはなかった過去においても、地震や津波による事故は発生している。沿岸地方に大量の危険物が貯蔵されている現在、津波時の安全をはかる為の方策を講ずる事は緊急の課題の一つであろう。過去の事例に学ぶと云っても、参考となる例は少なく、生じうる全てを含んでいるとは云いがたい。石油タンクに対する安全基準の見直し、事故による災害形態の推測、火災発生時の対策の検討が想像力豊かになされなければなるまい。

参 考 文 献

1) 表俊一郎：昭和19年12月7日東南海大地震に伴った津波，地震研究所彙報，第24号，pp. 31 - 57，昭和21年。

2) チリ津波合同調査班：チリ地震津波踏査速報，p. 474，1960。

3) 気象庁：昭和35年5月24日チリ地震津波調査報告，気象庁技術報告，第8号，p. 126，昭和36年。

4) 都司嘉宣ほか：韓国東海岸を襲った海溢，海洋科学，Vol. 16, No. 9, pp. 527 - 537, 1984。

5) 気象庁：1968年十勝沖地震調査報告，気象庁技術報告，第68号，p. 69，昭和44年。

6) Committee on the Alaska Earthquake：The Great Alaska Earthquake of 1964, Oceanography and Coastal Engineering, 556 p. 1972。

7) 消防庁：新潟地震火災に関する研究，224 p., 昭和39年。

8) 青森県：青森県大震災の記録，pp. 275 - 276, 昭和43年。

9) 第二管区海上保安本部：日本海中部地震に関する報告書，146 p., 昭和59年。

10) 当時の東奥日報。

11) 例えば，土木学会編：水理公式集，昭和60年版，p. 591。

12) 後藤智明：津波による油の広がりに関する数値計算，土木学会論文集，No. 357/II - 3, pp. 217 - 223, 1985。

13) 気象庁：昭和39年6月16日新潟地震調査報告，気象庁技術報告，第43号，230 p., 昭和40年。

14) 首藤伸夫：海での石油の拡がり，第3回環境問題シンポジウム，土木学会，pp. 82 - 93, 1975。

表-1. C_1 の変化に対応する流量の範囲

C_1	重力慣性力	重力粘性力	断面積	断面径
1.0	-	12.9 kl/br	8.55 cm ²	2.9 cm
0.9	-	16.0	10.55	3.2
0.8	-	20.2	13.35	3.7
0.7	-	26.4	17.44	4.2
0.6	-	35.9	23.74	4.9
0.5	-	51.7	34.18	5.8
0.4	-	80.8	53.41	7.3
0.35	100.1 kl/h	105.5	66.23-69.76	8.1-8.4
0.3	185.5	-	122.7	11.1
0.2	939.2	-	621.13	24.9
0.1	1,502.6	-	993.8	99.7

表-2. k の値

実 験 者	k	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
Keulegan	1.20	淡水と塩水 $h_f/d = 0.111$
"	1.07	" $Re > 500$
Wood	1.09	"
Yie	0.67	" $h_f/d = 0.5$
Simpson	0.30~0.65 平均 0.62	大気 厚さ 700 m位
Georgi	0.74	350 m "
Farquharson	0.9	1100 m "
Freeman	0.67	1500 m "
Delsi	0.72	1200 m "

表-3. 火災延焼の拡がり

日	時	経過時間	延焼面積	同左代表半径
16日	18:30	0.3 hr	6,650 m ²	46 m
17日	0:00	5:30	59,190	137
	5:00	10:30	125,025	199
	8:00	13:30	161,425	227
	10:00	15:30	265,402	291

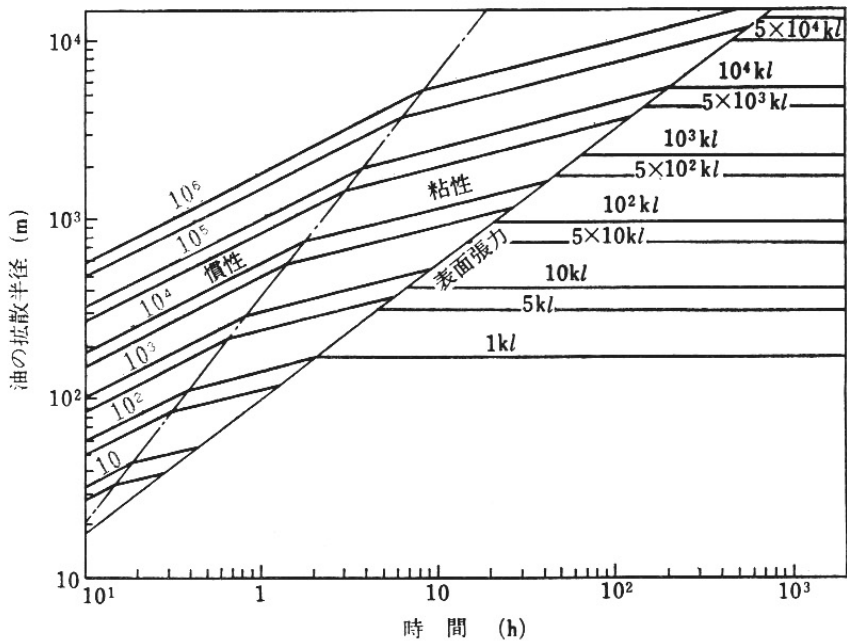


図-1. 瞬間放出に対する石油拡散半径の簡略推定法

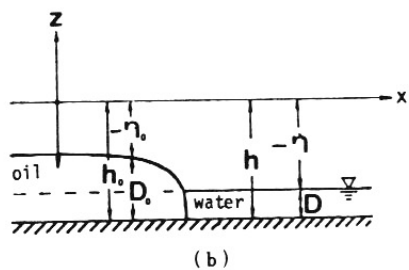
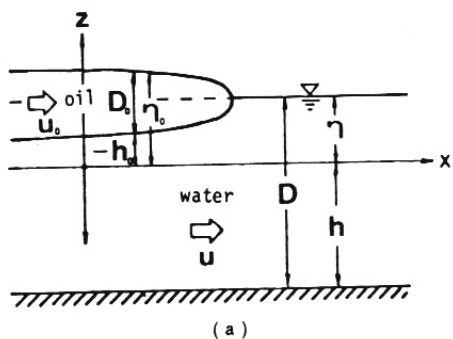


図-2. 石油拡散計算の為の諸量の定義

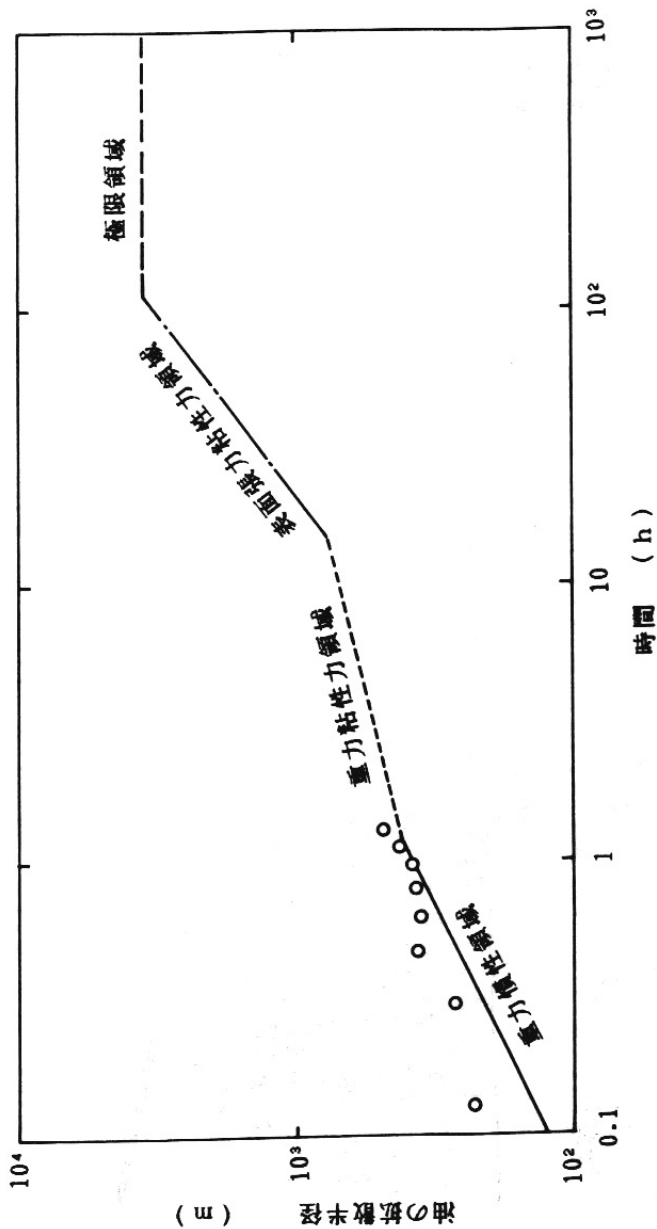


図-3. 数値計算結果と簡略法の結果の比較

施設配置図

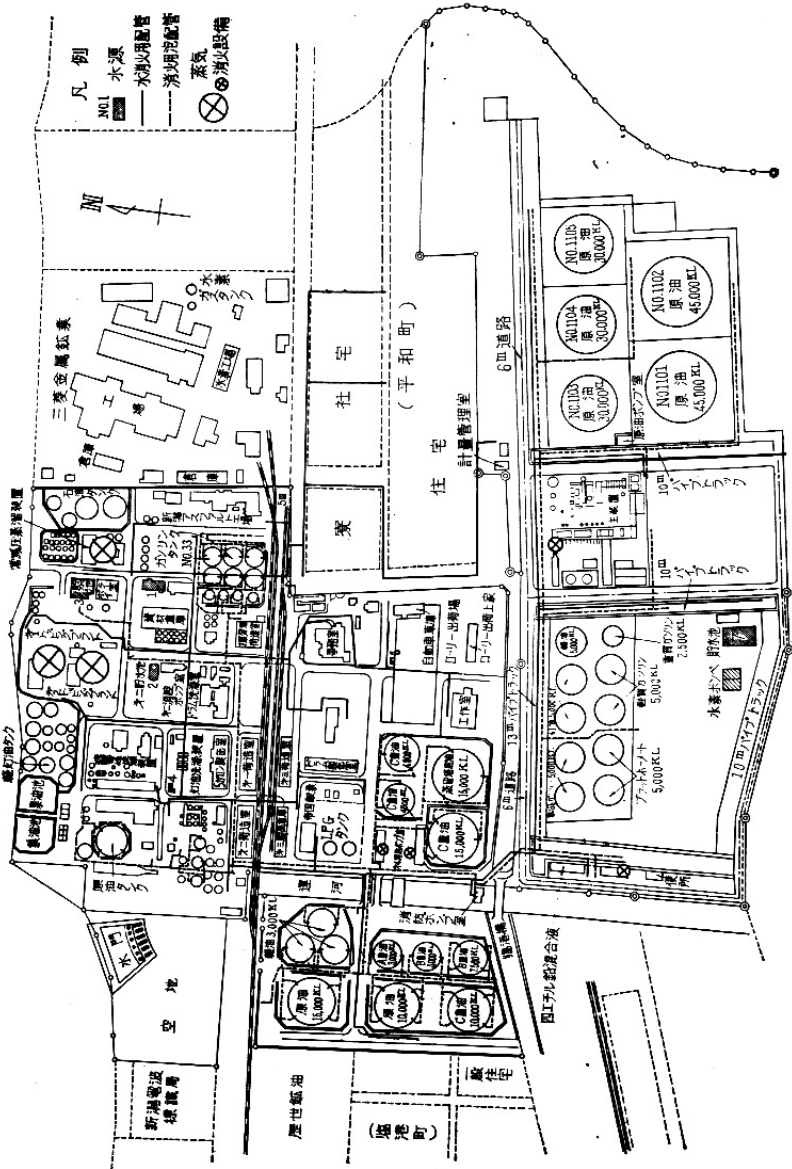


図-4. 新潟地震時の火災関連諸施設配置図

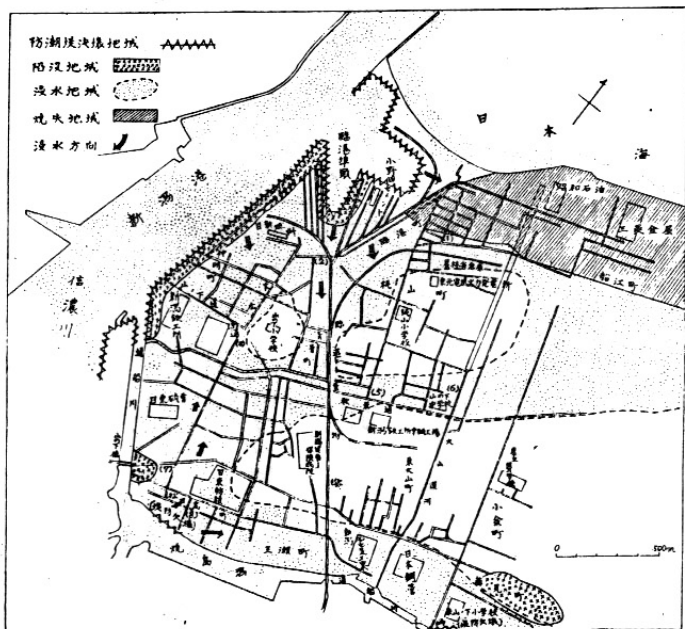


图-5. 津波浸水方向

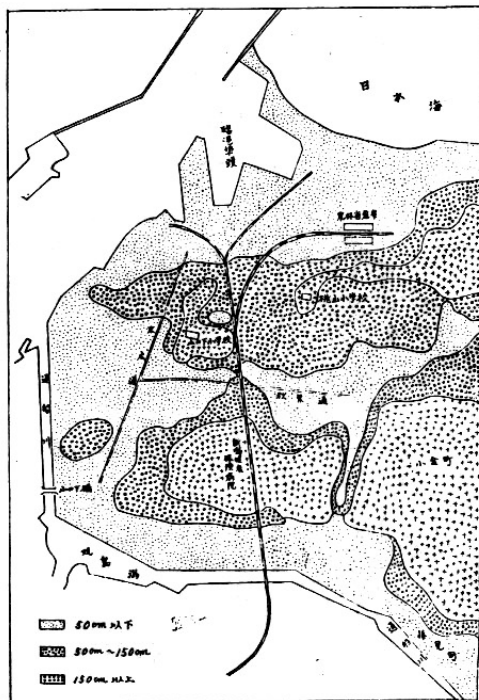


図-6. 津波浸水深

延焼状況および焼失区域図

日本海

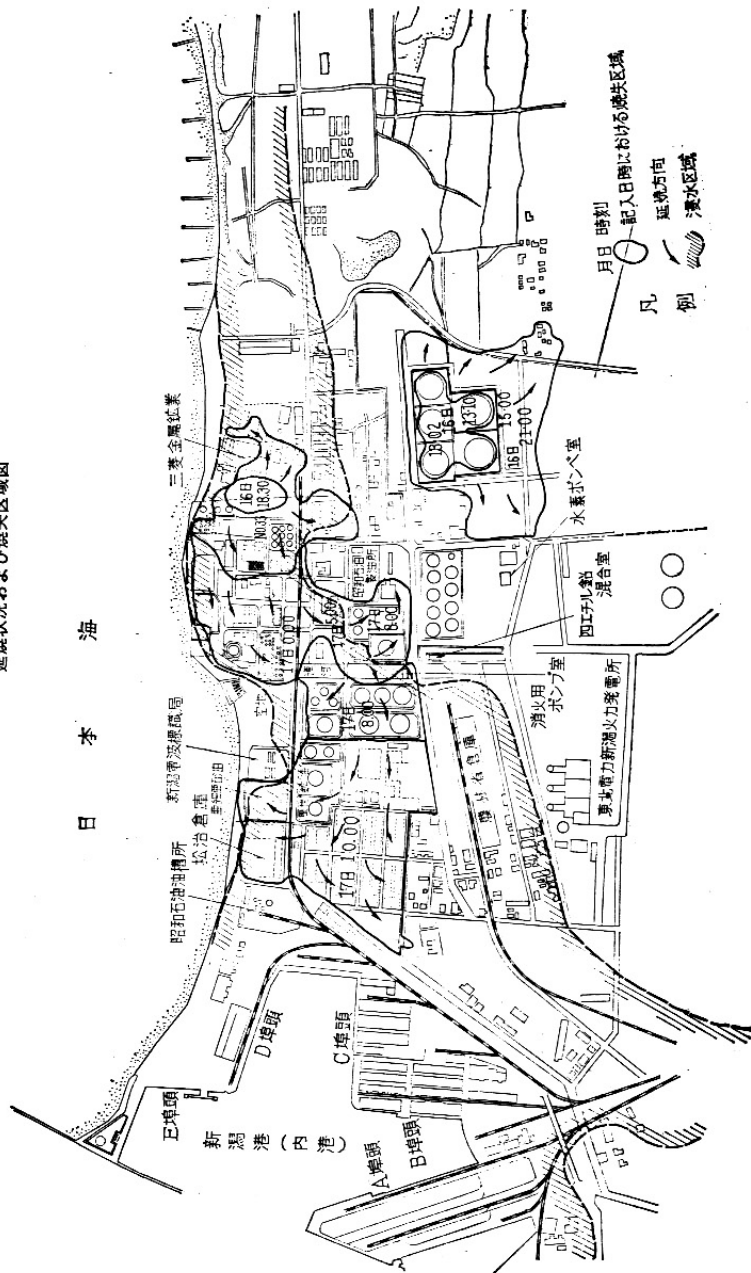


図-7. 延焼状況

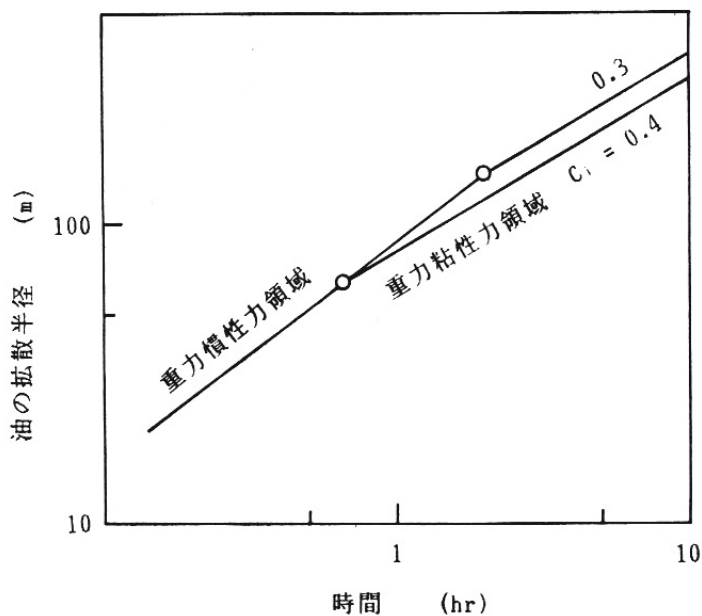


図-8. 重力慣性力域の仮定による拡散経過

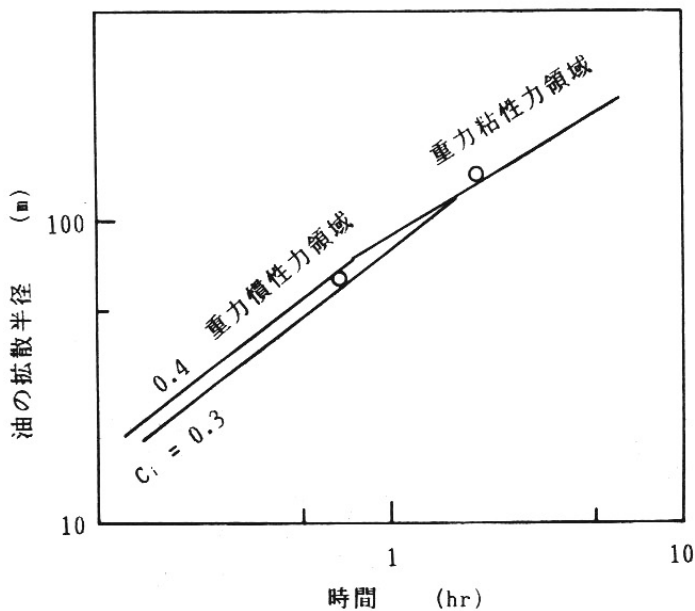


図-9. 重力粘性力域の仮定による拡散経過

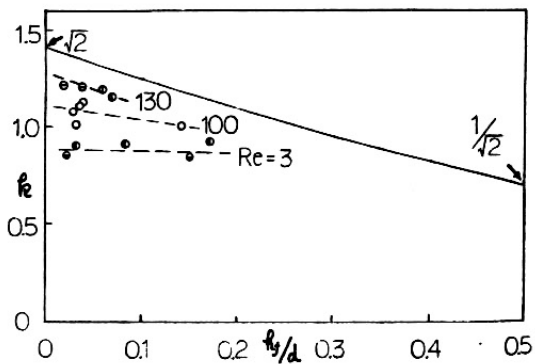


図-10. 重力慣性力域の k 値

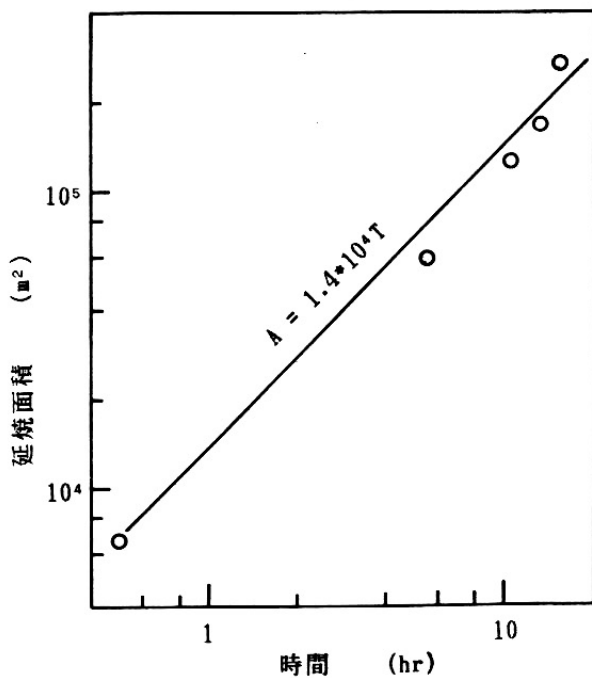


図-11. 火災延焼拡大の経過