

■ 研究論文 ■

石油基地の油流出災害の緊急予測モデル

Emergency Estimation Model of Oil Spill Disaster in Tank Yards

片岡 邦夫*・大村 直人**・今駒 博信***

Kunio Kataoka Naoto Ohmura Hironobu Imakoma
(原稿受付1997年5月23日, 受理日12月16日)

Abstract

This article deals with modeling and simulation for real-time estimation of the disaster extent of oil spill on the sea surface from a tank yard, which will provide information useful for emergency measures. Each tank is surrounded usually with a dyke for holding in check the oil spill on the land surface. There is, however, a possibility that such defensive facilities may be damaged due to a catastrophic earthquake such as the great Hanshin-Awaji earthquake. At such a state of emergency, many kinds of difficult decisions and responses should be made by officials at all levels of government and industry, but for example, it is of great importance to make ships of spreading oil fences (booms) effective as quickly as possible. Suppose that oil flows out through a crack of an oil tank, the disaster extent of an oil slick spreading on the sea surface can be estimated very easily and quickly by the proposed model. It has also been suggested in the case of the demonstrated simulation that breakwaters constructed as one of port facilities can play a role of emergency defense assisting oil fence (boom) ships.

1. はじめに

石油基地の防災対策については石油コンビナート等災害防止法(昭和50年法律84号)とその関連の政令, 省令, 施行令において規定されており, 重大な石油基地の災害はタンクの爆発・火災とタンクからのオイルの流出である。石油基地の大半が, 主たる輸送を海上に頼っているため, 敷地の全部または一部が海域に接しているが, 今次の阪神淡路大震災では幸いにも被災地内に大きなエネルギー基地が存在しなかったために, 海上まで災害が波及しなかった。しかし, もし震度7以上の激震が直撃すれば, 1974年12月18日に発生した水島の重油流出事故と同じ様な災害が起きる可能性も否定できない。

石油基地・石油コンビナートなど, 特別防災区域が所在する都道府県には石油コンビナート等防災本部が置かれ, その区域の特定事業所の特定事業者は油流出に関しては, 自治省令で定める規格のオイルフェンス

およびオイルフェンス展張船, 油回収船を備えなければならないことになっている。オイルフェンスの寸法は単体の長さが20mで, 海面上の高さ30cm以上, 海面下の深さ40cm以上が必要である。展張船は備え付けられたオイルフェンスを1時間以内に展張する能力を有しているべきことになっている。

発電所や精油所などの石油基地は「石油コンビナート等における特定防災施設等および防災組織等に関する省令」に規定されたタンクヤードの具備すべき安全対策や防災対策を守って建設されている。一般に大量の各種石油類は浮き屋根式平底円筒型タンクに貯蔵される。平常時の環境においては安全に十分に安定して貯蔵できる構造的条件を十分に満足して設計・建設されており, もし, タンクが損傷して石油の全貯蔵量が流出した場合でも, タンクを囲む防油堤(鉄筋コンクリート)内で流出をくい止められることになっている。防油堤を越えてさらに流出した場合を考えて, 屋外タンクの全ての防油堤を囲む防止堤(鉄筋コンクリートまたは土で造られ, 高さが地盤面より0.3m以上)を設置することになっている。このように防備の意味のリスク・マネージメントの防災計画はできているが, 今次のような震度7を超える激震ではタンクはもちろ

* 神戸大学工学部応用化学科教授・都市安全研究センター長

** " " 助手

*** " " 助教授

〒657-0013 兵庫県神戸市六甲台町1-1

ん、防油堤、防止堤とも破損しないとは言い切れないし、今次の大震災のような広域的な非常事態になり、防災体制の中心的機関自身も被災すれば、速やかな応急対策は無理で、大きな時間的遅れが出ることも考えるべき問題である。本研究はこのような災害発生時の非常事態のクライシス・マネージメントに役立つ情報を提供できる簡便な災害予測モデルの構築を目指している。

2. 研究の目的

大規模石油タンクヤードの地震等による災害は発生頻度は高くないが、一旦発生すると甚大な被害をもたらすから、災害の危険度は発生確率と災害規模との掛け算で評価すべきであるとされる¹⁾。タンクヤードの災害の中で危険度の高い、すなわち重要性の高い検討事項はタンク火災と油流出と考えられているが、流出油面における火災や爆発も重要な問題である。自治体等の防災計画策定で重要な問題の抽出には過去の災害・事故事例の頻度、規模、応急対応などのデータを考慮したET分析等により行われるべきである。本研究は神戸大学特定研究「兵庫県南部地震に関する総合研究」²⁾に参画するプロジェクト研究の一つであり、その目的は、エネルギー供給システムである石油基地の防災・安全対策、特に非常時の危機管理対策のために、地震により巨大タンクが損壊してオイルの海上流出が発生した非常時に刻々と変化する災害規模を緊急に予測できるモデルを構築すること、すなわち、いつ、どの地域において発生しても、現実に進行しつつある災害拡大に対する緊急・応急対策がとれるように、できるだけ速く災害の規模とその拡大傾向を予測できる情報を提供するために適応性、迅速性、簡便性に主眼を置いたモデルを構築することである。

3. 本モデルの特徴と仮定

簡便性を重視した本研究のモデルには以下の特徴がある。

- (1) 任意の地域、任意の流出位置に対する災害予測ができるように、計算に入る最初に問題となる地形データを入力する方法を採用した。災害地域の大きさに応じた任意の分割数でメッシュ分割された計算領域に問題の地域の地図を重ねて、地形データとして陸（防波堤を含む）と水上（海）の区別のみを各メッシュに入力できるようにした。
- (2) タンクが損壊した場合、油の流出速度は損壊部

の位置、面積と油面の損壊部からの高さなどにより変化するから、流出速度の時間変化を考慮して油膜を形成する総流出油量および油膜拡散速度を評価した。ただし、本モデルにおいてもタンクの損壊位置から防波堤、防止堤を經由して海面に至る所要時間を遅れ時間として考慮していない。以前の研究^{3), 4)}では総流出量が瞬時に海上のある1点に流出するという瞬間点源流出を仮定していたが、これは流出所要時間を無視した、過大な災害評価であったので、これを幾分現実的な方向に修正した。

(3) Fay⁵⁾, Hoult⁶⁾らの点源からの円形状拡散の式（油膜半径を時間の関数として表したもの）を時間に対して微分して得られる拡散速度式を油膜厚さの関数にして油膜の任意形状に対して拡張使用した。

(4) 本モデルは任意の風向、風速を入力して計算できる。シミュレーションの例題では、風向は流出点から防波堤出口の方向（北北西）をとり、これが最悪風向であるか他の風向と比較検討した。風速は無風と強風の5 m/sの2種について計算した。ただし、風の影響が強い5 m/sの場合の計算結果を图示した。

(5) 本研究ではオイル流出災害の防災の基本として内海域の防波堤内で流出災害をくい止めることを考えており、また、時間的にも位置的にも変化する潮流や海流のデータを入力することはモデルが難しく複雑になり、データ入力および計算時間が非常に長くなることから、潮流・海流の影響を考慮しないことにした。

(6) 緊急対応に必要な簡単なモデルにするため、流出災害が発生してから長時間経過後に現れる漂流や流出油が変質する蒸発、溶解、分散、沈降⁷⁾等は考慮しないことにした。

本シミュレーションで使用した仮定は以下である。

- (1) 海流、潮流、波の油拡散への影響は考慮しない。
- (2) 風は風速、風向とも拡散過程中、一定とする。
- (3) 流出油の性質（物性定数）は拡散過程中、不変とする。
- (4) 吹送流により運ばれる油膜は吹送流と同方向、同速度とする。
- (5) 油は水平な海面上を拡散する。
- (6) 油膜はちぎれたり、分散したりすることはない。
- (7) 油膜厚さは油面全体で一様であるとする。（油面上での油の移動は各時間ステップ毎に瞬時に起きると仮定する）
- (8) 表面張力の影響が支配的な拡散後期は考慮しない。

(9) タンクの損壊箇所から海上の流出点までの距離とその間の移動(遅れ)時間は考慮しない。

4. 基礎式

4.1 流出速度と流出総量

直径Dmのタンクで、損壊部(亀裂面積 $A\text{m}^2$)からタンク内の油面までの高さが $h\text{m}$ の時の流出速度は $Q = A \sqrt{2gh}$ (1) ここで損壊部の形状による流出係数は1と仮定している。

油面高さの時間変化は、油面の初期高さを $h_0\text{m}$ として

$$h = h_0 - \sqrt{2gh_0} kt + \frac{1}{2} g k^2 t^2 \quad (2)$$

ただし

$$k = \frac{A}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

総流出油量は

$$V_0 = \int_0^1 Q dt \quad (3)$$

4.2 拡散速度と油膜厚さ

4.2.1 拡散初期

油膜が厚く、拡散速度に関して重力と慣性力が支配的な拡散初期については、Fay⁵⁾、Hoult⁶⁾の油膜半径の式を微分して得られる拡散速度式が油膜の任意形状に拡張使用できると仮定して次式を用いた。

(拡散速度)

$$U = \frac{\sqrt{\pi}}{2} K_i^2 \left[\left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} \right) g \delta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここでは、実験定数 $K_i=1.14$ と仮定した⁵⁾。

(油膜厚さ)

総流出油量が厚さ一様に分布すると仮定して

$$\delta = \frac{V_0}{\pi K_i^2 \left[\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} g V_0 \right]^{\frac{1}{2}} t} \quad (5)$$

4.2.2 拡散中期

重力と粘性力が支配的になる拡散中期についてもFay⁵⁾、Hoult⁶⁾の油膜半径の式を微分した上、任意形状に適用できると仮定して次式を用いた。

(拡散速度)

$$U = \frac{\pi^{3/2} K_v^4}{4} \left[\left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \right) \frac{g}{v_w^{1/2}} \right]^{2/3} V_0^{-1/6} \delta^{3/2} \quad (6)$$

ここで、実験定数を $K_v=1.45$ と仮定した⁵⁾。

同様に、油膜厚さは一様として

(油膜厚さ)

$$\delta = \frac{V_0}{\pi K_v^2 \left[\left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \right) \frac{g V_0^2}{v_w^{1/2}} \right]^{1/3} t^{1/2}} \quad (7)$$

4.2.3 拡散後期

拡散後期は油膜は非常に薄く、油拡散に対する抵抗として表面張力が支配的であるが、十分に時間(週のオーダー⁶⁾)が経過してから現れる状態である。防災の観点から初期の応急対策は6時間から10時間程度が勝負と考えられるので、拡散後期の式は使用しない。

4.3 吹送流による拡散速度

海面上の風の剪断力による油膜の拡散への影響は次式により評価した⁴⁾。

(1) 風速Wが4m/s以下の時

$$U_w = \frac{0.259}{\sqrt{\sin \phi}} W^{1/2} \quad (8-1)$$

(2) 風速Wが4m/s以上の時

$$U_w = \frac{0.0126}{\sqrt{\sin \phi}} W \quad (8-2)$$

緯度として日本を考えて北緯 $\phi = 34^\circ 45'$ を採用した。(これもパラメータとして変化させることはできる。)

4.4 遷移時間の問題

油膜の拡散が重力支配から粘性支配へ遷移する時間は拡散初期と中期の速度が等しくなる時間であり、次式で求められる。

$$t_c = \left(\frac{K_v}{K_i} \right)^4 \left[\frac{\rho_o^3 V_0}{\rho_w^2 (\rho_w - \rho_o) g v_w} \right]^{1/3} \quad (9)$$

5. 結果と考察

タンクの大きさ、貯蔵量(油面高さ)、タンクの損壊程度(亀裂面積をパラメータ)、流出位置、風向、風速などを変化させて計算できるモデルにした。実際の流出の仕方を特定できないが、いかに流出をくい止めるかが問題であり、損壊部からの流出でタンク内の油面高さが時間変化することを考慮した。図-1に示すように、例題に用いた地形は、北側にタンクヤードのある陸地の岸壁(縦軸に一致)が東西方向にのびており、南側に沖合い1.5kmまで防波堤があり、南東にその出入口がある海域である。この東西2km、南北2

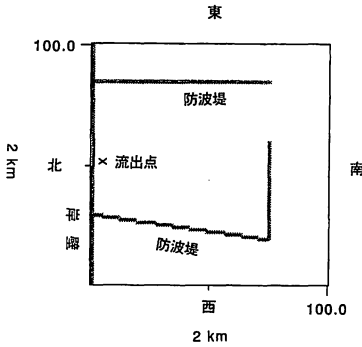


図-1 計算対象の海域と流出点

kmの海域をそれぞれ100等分にメッシュ分割し、計算領域とした。任意に指定できる流出点として東西方向の岸壁に接し、ほぼ中央の点(2, 51)を与えた。したがって、流出点から防波堤出口の方向が北北西となる。

[1] 結果の1例として、タンク直径 $D=50m$ 、損壊発生時のタンク内油面高さ $h_0=20m$ 、亀裂面積 $A=0.5, 0.2, 0.1m^2$ について計算した。

計算条件：C重油が岸壁中央付近に連続的に流出
(パラメータ：亀裂面積)

風向：北北西

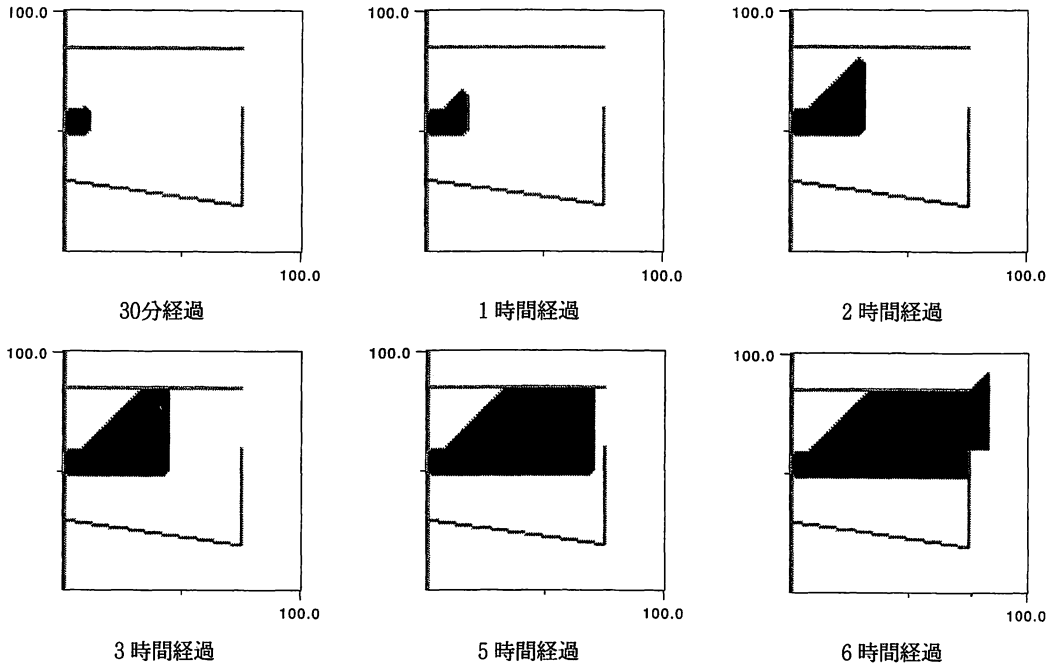
風速(平均)： $5 m/s$ (強風)

$A=0.1m^2, 0.5m^2$ の場合の計算結果を図-2、図-3に示す。

本例のタンクは大きさ(直径)として、 $D=50m$ を与えており、大型タンクの部類に属す。損壊時の損壊部分から油面までの高さとして $h_0=20m$ を与えており、かなり大きな災害を想定する条件設定になっている。また大きな風速で風向が流出点から防波堤出口に向かう北北西の場合を計算している。縦軸、横軸の数値100.0は2kmを意味する。

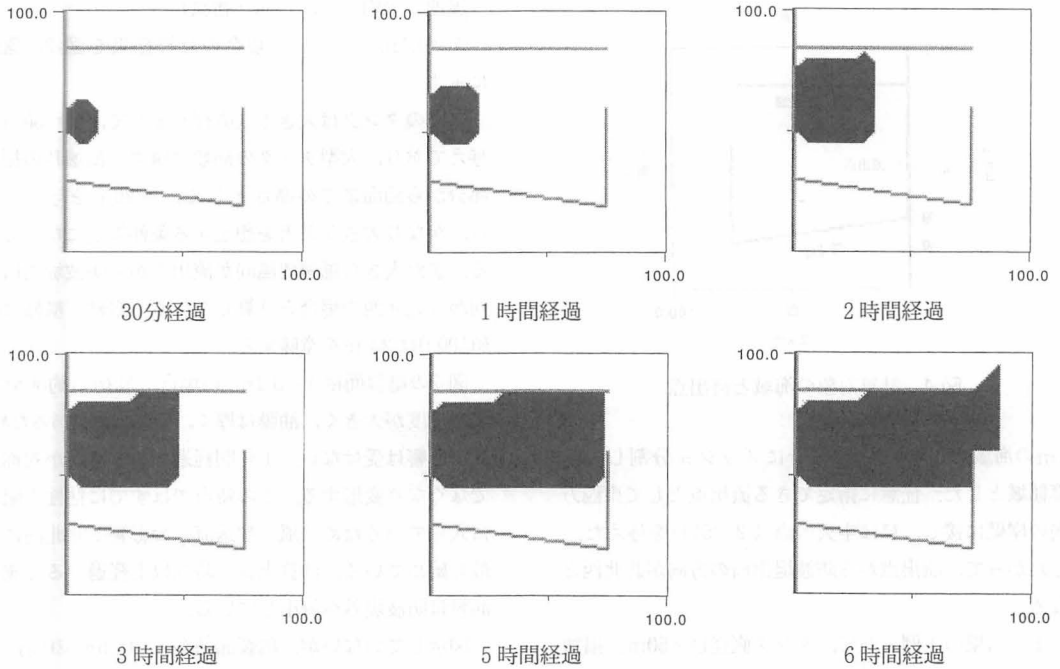
図-2の亀裂面積 $A=0.1m^2$ の場合、最初の約30分は流出速度が大きく、油膜は厚く、重力支配であるため、風の影響は受けない。1時間経過すると油膜が対称形でなくなり変形する。この時点ではすでに粘性支配域に入っているため、風(吹送流)の影響で北北西に拡散し始めている。計算上は5時間以上経過すると流出油膜は防波堤外へ流出している。

図示していないが、亀裂面積が $A=0.2m^2$ の場合でも、油膜の拡散の傾向はほとんど同じになった。図-3の亀裂面積が $A=0.5m^2$ の場合には、少し流出速度が大きいため、風(吹送流)の影響を受けるのは2時間近く経過してからになった。しかし、いずれの亀裂面積の場合でも流出油膜の拡散速度に大きな差はなく、5



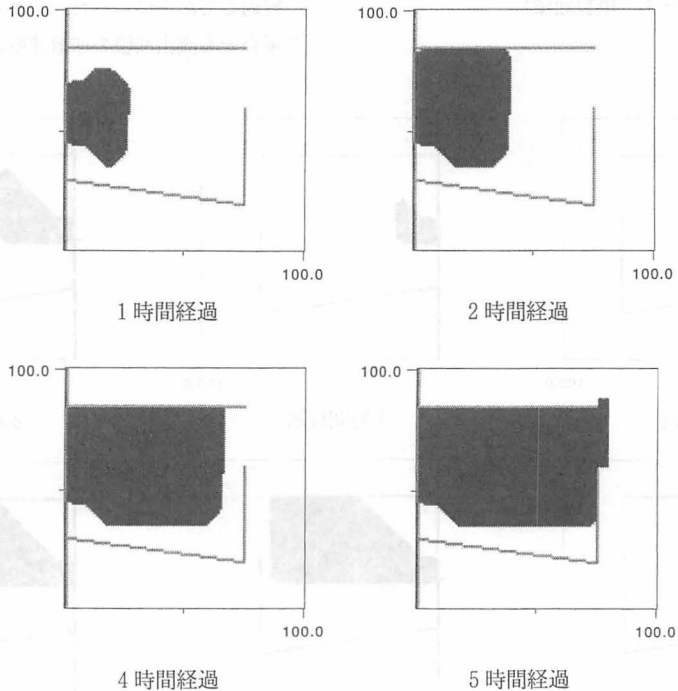
亀裂面積： $0.1m^2$ ，風速： $5 m/sec$ ，風向：北北西

図-2 流出油膜の時間変化



亀裂面積：0.5m²，風速：5 m/sec，風向：北北西

図-3 流出油膜の時間変化



亀裂面積：2.0m²，風速：5 m/sec，風向：北北西

図-4 流失油膜の時間変化

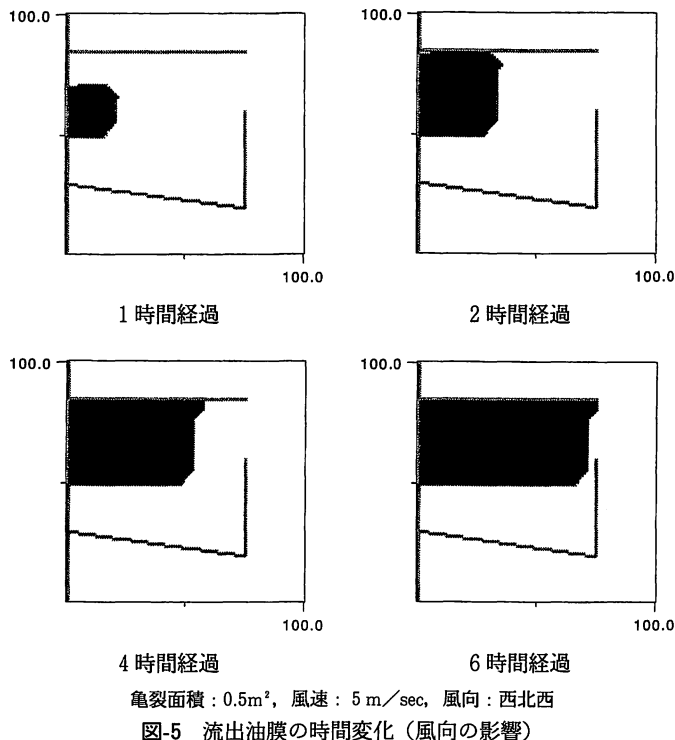


図-5 流出油膜の時間変化 (風向の影響)

時間経過時には油膜はまだ防波堤内にあるが、6時間経過時にはすでに防波堤外へ出ている結果となった。以上の結果を見ると、この程度の損壊規模(亀裂面積)では沖合い1.5kmまで囲む防波堤の災害抑止効果が高いこと、災害発生後、5時間程度までならば防波堤出口にオイルフェンスを張ることにより流出油膜の拡大をくい止められることがわかった。

[2] 亀裂面積が $A=0.1\sim 0.5\text{m}^2$ 程度では油膜の拡散速度に大きな差がなかったため、損壊が非常に大きい $A=2.0\text{m}^2$ の場合について同様の計算をした。他の条件はすべて[1]と同じにした。その結果を図-4に示す。油膜は[1]の場合より1時間早い4時間で防波堤外へ流出することがわかった。やはり、大きな亀裂になると重力支配の拡散初期の流出速度が大きく、油膜の拡大が速くなるので、防波堤外へ流出しないように迅速な応急対応が必要である。

[3] 北北西の風が最悪風向であるか調べるために、風向のみを変化させて比較した。その1例として亀裂面積 $A=0.5\text{m}^2$ 、西北西の風向の計算結果を図-5に示す。亀裂面積、風向以外の条件は[1]と同じとした。

同じ亀裂面積で北北西の場合(図-3)と比較して、風の影響で油膜は早く東側の防波堤に衝突するが、6時間経過しても防波堤外へ流出していない。すなわち、

流出点から防波堤出入口へ向かう北北西が最悪風向であることがわかる。

今次のような大地震になれば、防波堤自身も被害を受ける可能性はあるが、海面下に沈まない限りオイルフェンスのような役目は十分に果たすことができると考えられる。石油基地の岸壁を囲むような防波堤の出口にオイル・フェンスを張ることができれば最も効果的である。地震のような非常事態にオイル・フェンス展張船が速やかに出動することは困難であるが、進行中の災害の拡大を予測する情報をできるだけ早く提供する計算システムが危機管理システムの中に配備される必要がある。本研究で計算したタンクの損壊規模ならば、災害発生時から遅くとも5時間以内に展張船が防波堤出口に到達し、オイルフェンスを張る必要がある。

おわりに

本研究は油流出災害のみを取り扱っている1例に過ぎないが、いろいろな災害・事故に対する緊急予測モデルを構築し、階層的に組み合わせて連携できるシステムにして行くことが、これからの危機管理体制に必要な問題になって行くと思われる。石油コンビナート等災害防止法による石油基地の防災対策を今次の阪神

淡路大震災のような大規模災害の非常事態に対してまで整備して行くためには、災害に備えるリスク・マネジメントだけでなく、災害発生時の非常事態でのクライシス・マネジメントのためのシステムを整備して行くべきである。特別防災地域の所在する都道府県などの自治体にとって、災害が発生した後、時間とともにどのように災害が拡大して行くかを緊急予測できる、すなわち、緊急対応に必要な情報を提供するための計算システムの配備が重要であるが、そのためには本研究のシミュレーション・モデルのように、任意の地域に対処できるように地形と風のデータを入力するマニュアルを用意する程度の高度な専門家を要しない簡便で短時間に結果が出るモデルの開発・常備が望まれている。本モデルは河口や潮流、海流のような流れの影響を考慮していない簡略モデルであるので、次段階としては、流れの情報をいかに簡単に短時間に入力するかが重要である。災害が発生する任意の地域の流れの情

報をシミュレーションに適用するために便利な形でいかに迅速に入手するか、その情報のデータベース化や入手する情報ネットワークを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 井上威恭：「社会的に許容される安全水準」, 高圧ガス, Vol.17, pp.10-19 (1980)
- 2) 文部省特定研究「兵庫県南部地震に関する総合研究」平成8年度報告書, 神戸大学, pp.161-168 (1997)
- 3) 兵庫県石油コンビナート等防災本部編：兵庫県石油コンビナート等防災計画(各年度修正), 資料編, pp.150-152 (1993)
- 4) 神戸大学災害調査研究会編：石油コンビナート等災害想定手法策定業務結果報告書(1980, 1982)
- 5) Fay, J. A. : "Oil on the Sea", ed. By D. P. Hoult, Plenum Press, pp.53-63 (1969)
- 6) Hoult, D. P. : Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 4, pp.341-368 (1972)
- 7) 松崎憲四郎：「海上への油流出・拡散シミュレーション」, 安全工学, Vol.36, pp.159-167 (1997)

協賛行事ごあんない

「動力・エネルギー技術の最前線'98」

<主催>日本機械学会

<開催日>1998年11月10日(火), 11日(水)

<会場>川崎市産業振興会館(川崎市)

<オーガナイズド・セッションテーマ>

1. 新発電, 新エネルギー技術

(高温高効率発電技術, 燃料電池と電力貯蔵技術,
新種燃料と環境技術, 省エネルギー技術 他)

2. 原子力利用における将来技術

(次世代軽水炉技術, 新型炉技術, 放射性廃棄物処理処分・核燃料サイクル・経年化・廃炉技術, 知能化技術)

<問い合わせ先>

日本機械学会 事業課 野地礼子

TEL 03-5360-3505, FAX 03-5360-3508