

大規模油流出事故に伴う漂流経路の予測について*

小 田 巻

実**

Drift Route Predictions for Recent Huge Oil Spills

Minoru Odamaki

1997年1月のタンカー・ナホトカ号事故では、船体が二つに割れ、6,000 kl以上の重油が流出した。事故現場は100 km以上も沖合であったため、当初、対馬暖流に乗って沖合を流れ沿岸部には寄らないという予測が出たが、実際には、若狭湾沖の暖水渦に乗って岸に接近、対馬暖流沿岸分枝に乗って島根県から秋田県に及ぶ日本海沿岸を汚染した。この予測の外れた原因として、海流データ不足や風圧流・吹送流の見積もり不十分などが考えられた。水路部では、急遽、海流観測を実施するとともに、漂流予測手法について再検討した。主な改善点は、粒子分布モデルによる漂流範囲予測の導入、リアルタイム海流データベースの構築などである。漂流予測の実施経過と改善策について報告する。

In the incident of the tanker NAKHODKA, its body was broken into two parts and more than 6,000 ton heavy oil was spilled out into the Japan Sea. It occurred in the sea about 100 km off the coast. Initially, drifting route of the oil spill had been predicted as run-off far from the coast taking on the Tsushima warm current, but actual spilled oil, turning around warm eddy off Wakasa Bay, approached to the Japan Sea coast from Shimane to Akita prefectures and polluted its shore zone. Insufficient information on the current distribution and estimation for wind drift and wind driven current was considered as a reason of this drift prediction failure. Responding this oil spill, Hydrographic Department, Maritime Safety Agency, was carrying out the ocean current observation and trying to improve the oil spill drift prediction to develop the drift prediction of particles distribution including diffusion process and the real-time ocean current data base. In this report, the activities of the oil spill drift prediction and the progress were presented.

キーワード：油流出汚染・漂流予測・風圧流・粒子拡散予測・リアルタイム海流データベース

1. はじめに

1997年には、1月のナホトカ号事故以降、立て続けに1,000 klを越える大規模な油流出事故が起きた。

- (1) タンカー「NAKHODKA」号(13,157総トン)(以下、N号)1997年1月2日、隠岐諸島106 km, C重油6,240 kl(推定)流出
- (2) タンカー「OHSUNG No. 3」号(768総トン)(以下、O号)1997年4月4日、対馬海峡巨済島南方, C重油1,700 klの一部
- (3) タンカー「DIAMOND-GRACE」号(147,012総トン)(以下、D号)1997年7月2日、東京湾横浜本牧沖、原油1,550 kl
- (4) タンカー「Orapin-Global」(129,702総トン)と

「EVOIKOS」(75,428総トン)の衝突。1997年10月20日、シンガポール海峡, C重油28,500トン

我が国周辺でこのような大量の油流出災害が起こったのは、1974年の三菱石油水島精油所事故(7,500~9,500 kl流出)以来である。油流出事故では、規模が大きくなればなるほど、汚染される範囲や時間も拡大するため、防除活動や汚染対策に際して漂流経路や漂着範囲の予測が必要となる。N号事故では、当初、船体や漂流油は対馬暖流に乗って沖に流れ去るとの予想が流れていたため、漂着して海岸線を大規模に汚染するようになって改めて漂流予測の重要性が再認識されることとなった¹⁾。海上保安庁水路部は、もともと海図や水路通報など海上活動の安全確保に必要な情報を収集提供することが任務であり、このような大規模海上災害に際して漂流予測とその提供を行っている。以下では、これらの油流出災害に際して行った漂流予測とその課題について報告する。

なお、この報告は、あくまで著者による個人的な見解であって、公式なものではないことにご留意願いたい。

* 1999年1月18日受領, 1999年3月9日受理

** 海上保安庁水路部

連絡先: 小田巻実, 海上保安庁水路部

〒104-0045 東京都中央区築地5-3-1

E-mail odamaki@cue.jhd.go.jp

2. 漂流予測とは

水路部では、油に限らず木材や遭難者・船舶など様々な物体の漂流予測を行っているが、いずれの場合も漂流予測の基本的な考え方は以下の通りである²⁾。

(1) 漂流物体の移動に関係する要素

海面浮遊物体の漂流に関係するのは、大きく分けて海潮流などの海水の流れと海上風が物体を押し流す風圧流である。油の場合でも、初期には自分の重さで海面上を薄くなりながら広がるが、ある程度広がると、その後は、周囲の海水や風によって流されるようになる。漂流に関係する要素を図式的に表すと、Fig. 1 のようになる。

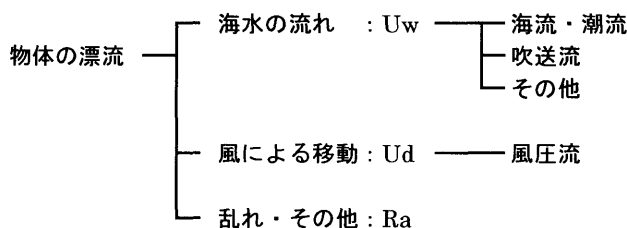


Fig. 1 Conceptual diagram of the elements related to floating articles drift trajectories

海水の流れは、黒潮や対馬暖流など1日以上継続する海流成分と、潮汐の干満と同様に1日に2回規則的に上げ下げのある潮流に大分される。海流については、昔からの観測を統計的にまとめた海流図が刊行されており、その時々々の現況については海上保安庁が隔週に発行している海洋速報で知ることができる。また管区海上保安本部からも管区海洋速報 (Fig. 2) が発行されており、外洋性沿岸域の流況についてもこれで知ることができる。潮流に関しては上げ下げの潮流を1時間毎に表した潮流図と、潮汐表に掲載されている毎日の転流時や最強時などを組み合わせてその時の潮流を知ることができる。また、最近では潮流をメッシュで予報する計算ソフトも準備されている。従って、海流や潮流については、これらを使ってある程度知ることができる。

問題は、風が海面を擦ることで生じる吹送流で、天気次第、風次第で変化するため、これを適切に見積もる必要がある。風が吹き始めると、海面直下の境界層に表皮流と呼ばれる薄い流れができるといわれるが、海面には波浪もあり、実体的には風圧流と見分けがつかなくなる。そのため、吹送流としては、簡単な鉛直粘性とコリオリの力のバランスで見積もることのできる Ekman 吹送流だけを考えることにしている。すなわち、海水の流れとしての吹送流は、10-20 m ぐらいの深いところまで影響するような部分のみを考え、残りは風圧流に含まれるようにみなしている。ただし、吹送流については、風が時間・空間的にも変化するとともに、沿岸域では水深や周

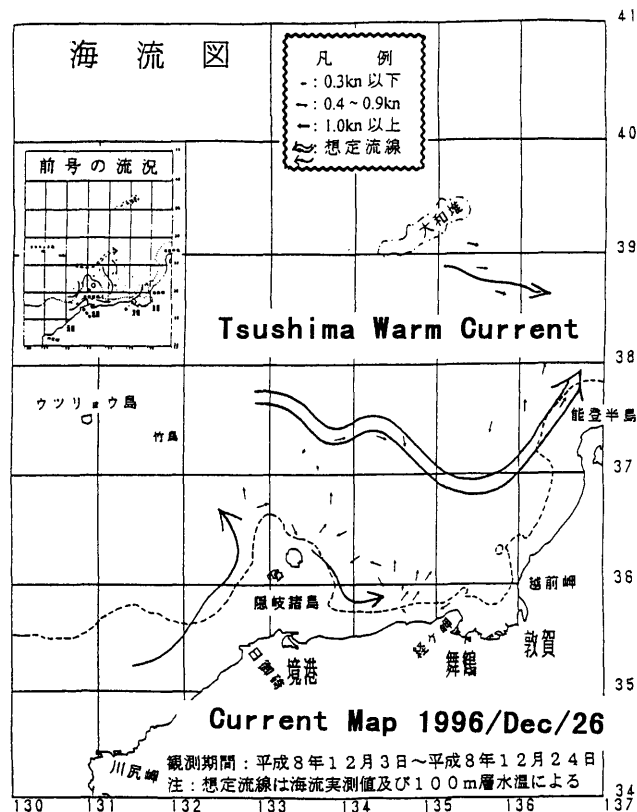


Fig. 2(a) Coastal current chart, from the Prompt Ocean Condition Report No. 14 published by 8th Regional Maritime Safety Headquarters, 1996 Dec. 26th.

辺地形が影響するため、個々の海域や風系ごとに検討する必要がある。

風圧流とは、漂流物体の海面上の部分が風を受けて押し流される作用を指す。海面に浮かんだ物体が速度 U_d で押し流される場合、風速 W は速度 U_d よりも十分大きいとして、海面上の部分が受ける風圧力は $F_a = \rho_a \cdot C_{da} \cdot A \cdot W^2$ 、海面下の部分が海水から受ける摩擦抵抗力は $F_w = \rho_w \cdot C_{dw} \cdot B \cdot U_d^2$ 、と表される。ここで ρ_a , ρ_w はそれぞれ空気と海水の密度、 C_{da} , C_{dw} は形状で決まる抵抗係数、 A , B はそれぞれ風及び海水に対する断面積である。定常状態では、両者がバランスして流れるので、結局、風圧流 U_d は、

$$\begin{aligned}
 U_d &= (\rho_a / \rho_w \cdot C_{da} / C_{dw})^{1/2} \cdot (A/B)^{1/2} \cdot W \\
 &= C_w \cdot (A/B)^{1/2} \cdot W \\
 (C_w &= (\rho_a / \rho_w \cdot C_{da} / C_{dw})^{1/2}) \\
 &= k \cdot W. \quad (k = C_w \cdot (A/B)^{1/2}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

となる。油や材木などの場合、海面上と海面下で形状の違いは小さいと考えて近似的に $C_{da} \sim C_{dw}$ 、空気の密度は海水の1/1,000程度なので、結局、風圧係数 C_w は0.03程度と見積もられる。さらに浮遊油では、断面積も $A \sim B$ とみなせることから、風圧流は経験的に風速の3～5%と言われている³⁾。

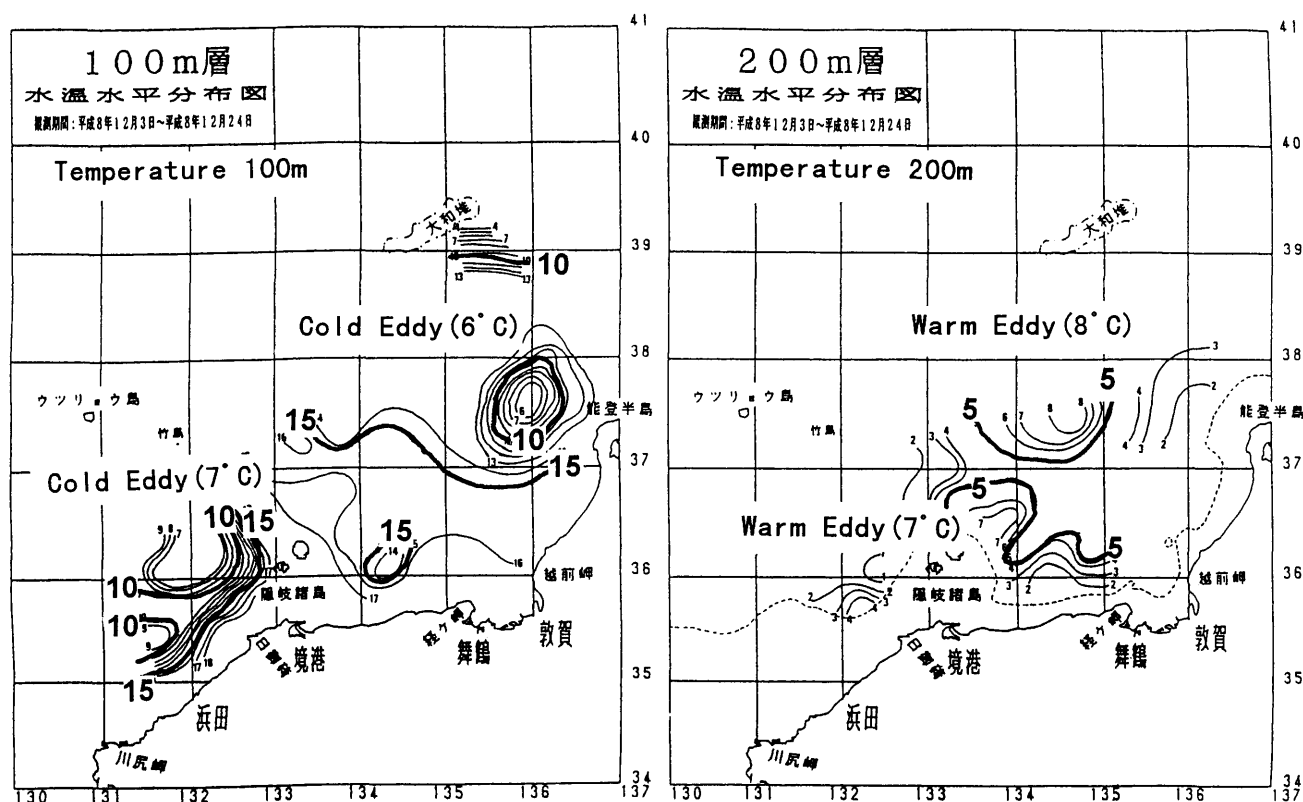


Fig. 2(b) Temperature distributions at 100 m and 200 m depth from the same report as Fig. 2(a).

乱れ・その他は、海流・潮流や風の乱れなどを示す。漂流予測に際し、時間や空間を一定間隔で区切ってその間は海流も風も一定と仮定するが、実際には空間的にも時間的にも変化しており、海流も風も代表値の周りに分布を持っている。どのような分布を持つかは、個々に検討しなければならないが、予測にあたってはその変動特性を見積もって確率分布のように予測範囲を考える必要がある。

(2) データの入手

もともと漂流予測にあたっては、どのような物が何時、何処で流出したか、ついで現場の流れや風の状況を知る必要がある。通常、事故の情報は、海上保安庁内の連絡網で流されるが、事故発生直後には、なかなか場所も時刻も細かくは特定できないこともあり、Fig. 1の乱れ・その他には、そのような不確定要素を考慮する必要がある。流れの情報は海洋速報や潮流図など、風は、観測値は付近の船舶や灯台から、予報風は気象庁などから入手する。普通、観測は毎時で行われることが多く、このようなデータの質も上述の乱れ・その他に考慮する必要がある。

3. どのように漂流予測したか

(1) N号は、海上暴風警報が発令されている日本海（風速約20 m/s、波高約8 m：気象庁パイロボットによる観測）を航行中、1997年1月2日午前2時40分隠岐島北北

東106 kmで遭難、船体が船首から約1/3のところで二つに割れ、船首部は漂流、残りは沈没した。乗組員は救命ボートで脱出、船長を除く31名が救助された。この事故で積み荷C重油19,220トンのうち、約6,000トン（推定）が日本海に流出した。流出油や船首部が沿岸部に漂流・漂着すれば、甚大な被害をもたらすだけでなく流出油の回収も困難になるため、巡視船を使って海上での処理回収の努力が続けられた。事故直後には、船体も流出油も対馬暖流（Fig. 2）に乗って沖合に流れ去るのではないかと、との希望的な情報も流れた。しかし、船首部は1月7日に三国町の海岸に漂着、流出油は1月から2月にかけて島根県から秋田県に及ぶ日本海沿岸に漂着し、地元や海上災害防止センター、自衛隊、ボランティアなどによる油除去活動が行われた⁴⁾。

第八管区海上保安本部水路部では、1月3日から巡視船艇・航空機等から報告された船首部と流出油の漂流状況をもとに、管区海洋速報の海流と気象台等からの気象情報を使って漂流予測を行い、関係先に提供した。漂流油の状況は、毎日、金沢海上保安部等の現地対策本部で集約され（Fig. 3）、ついで本庁の対策本部で全体の状況が取りまとめられる（Fig. 4）。さらに、Fig. 3の個々の油分布に即し、翌日、翌々日までの漂流経路を計算する（Fig. 5）。この時の漂流予測は、個々の漂流油ごとにその時刻・場所の海流・風を保って逐次漂流位置をたどる、

Recognized Spilled Oil Distribution 1997 Jan. 11th

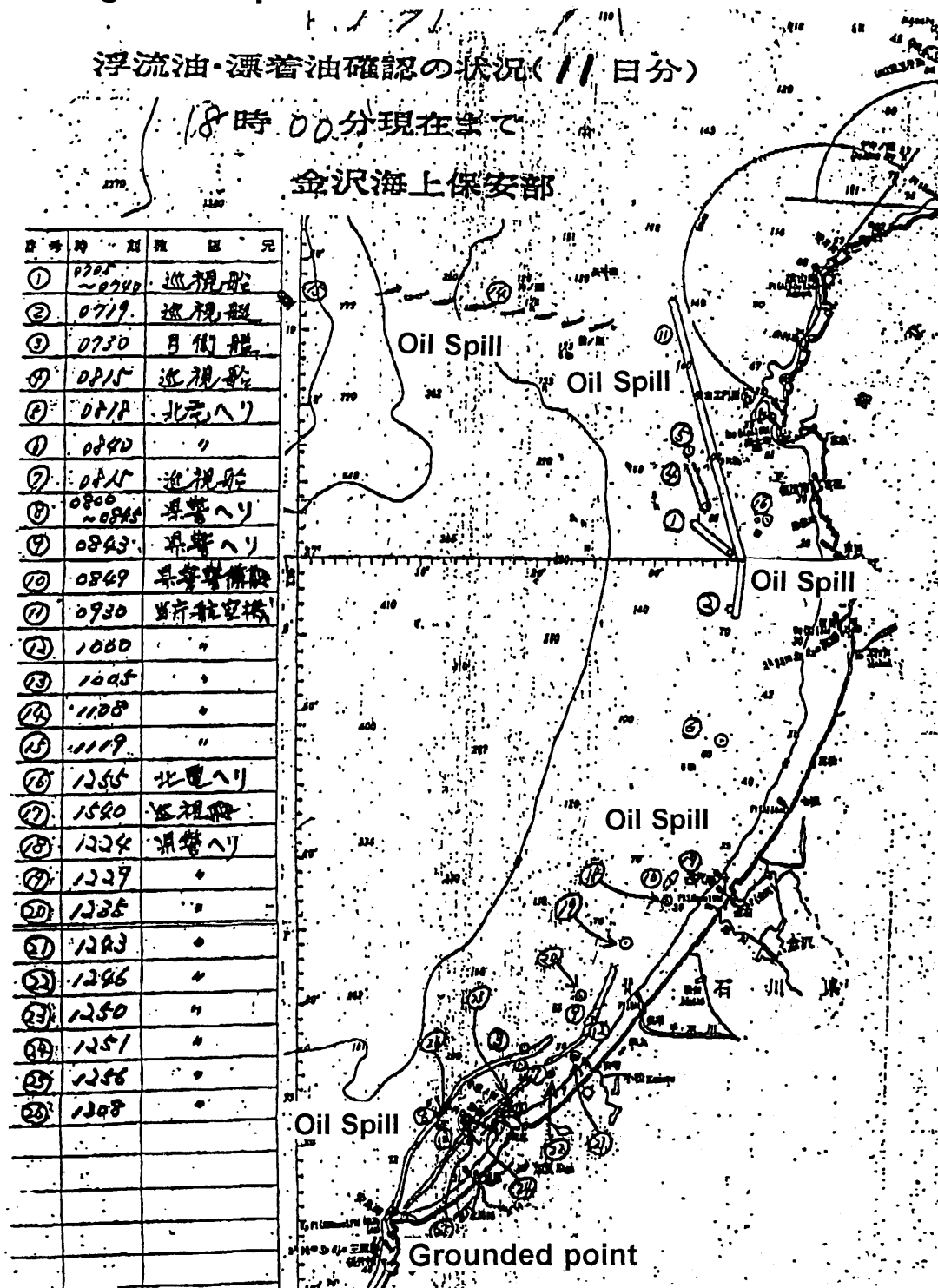


Fig. 3 Oil spill distribution report, 11 Jan., 1997 by Kanazawa Maritime Safety Office.

いわゆる「単線予測」であり、時間と労力のかかる作業となった。八・九管区の水路部では、油の回収が一段落するまで一ヶ月以上にわたり毎日、朝と夕方に集約される漂流油の情報に合わせ、このような漂流予測計算を繰り返すこととなった。

Fig. 2 でもわかるように、この時期の日本海では観測データは大変少ない。そこで水路部では、被害の甚大さと拡大に鑑み、1月中旬に急遽、測量船「海洋」を派遣、海底の船体搜索とともに、アルゴスプイの投入などによる海流観測を行った (Fig. 6)。さらに2月には、測量船

大規模油流出事故に伴う漂流経路の予測について

船首部位置及び漂着油・浮流油の状況

Recognized Spilled Oil Distribution 1997 Jan. 12th

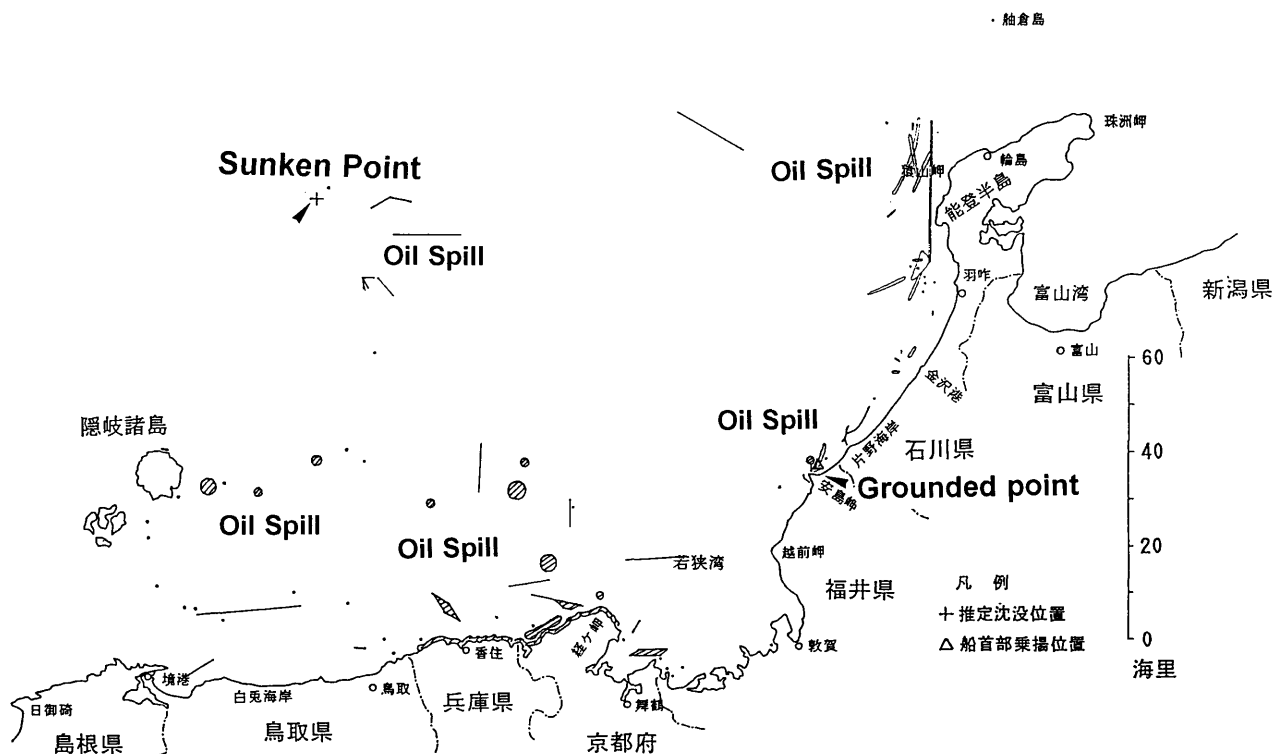
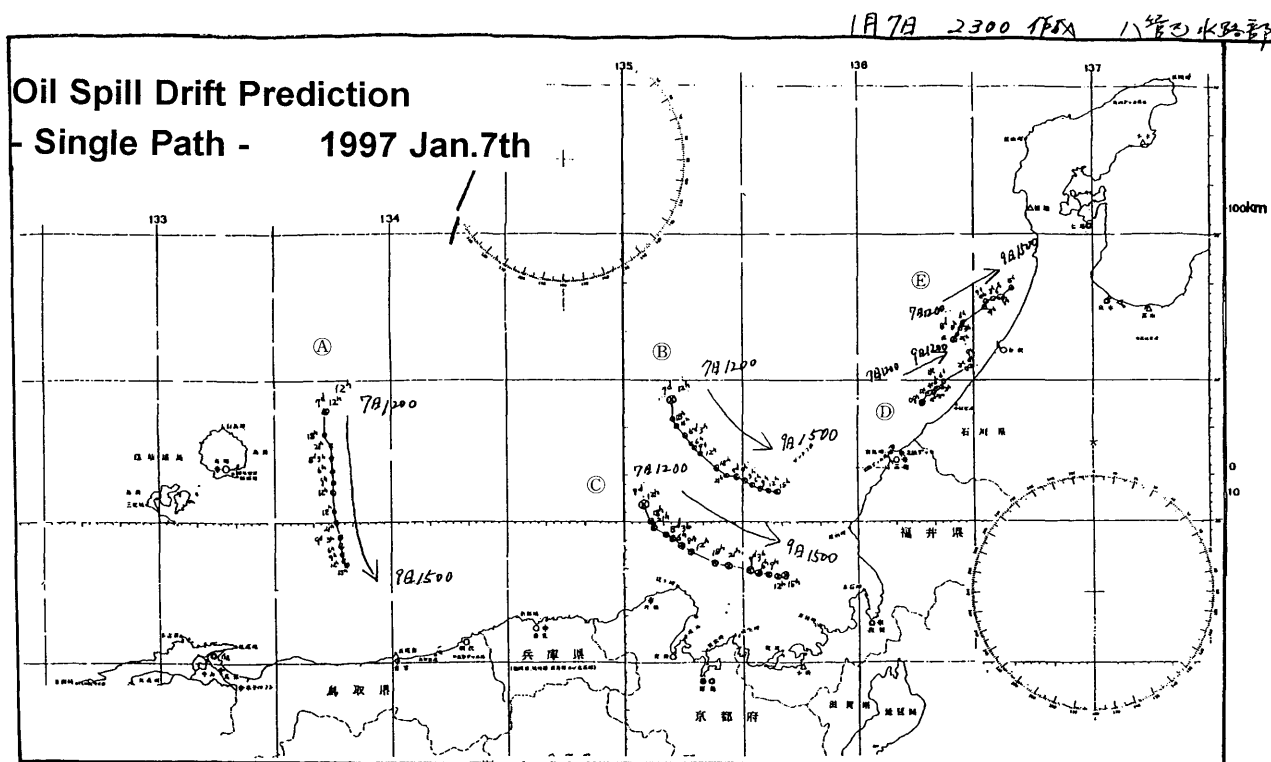


Fig. 4 Press release of the oil spill distribution report by Maritime Safety Agency, 12 Jan., 1997.



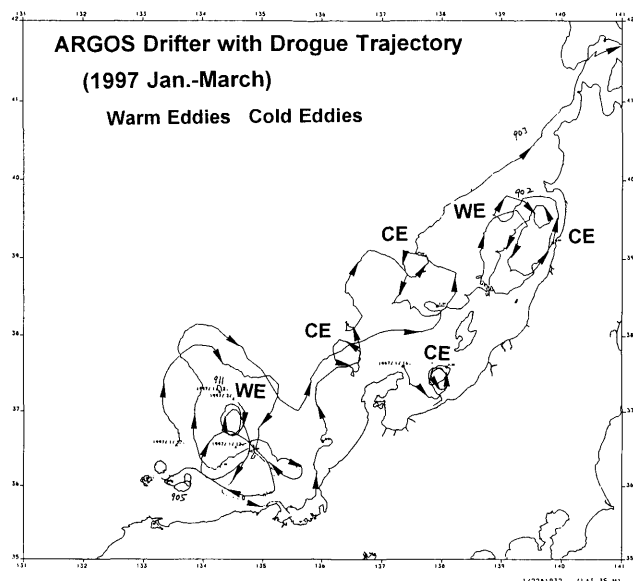


Fig. 6 ARGOS buoy drifting trajectory 1997 Jan.-March.

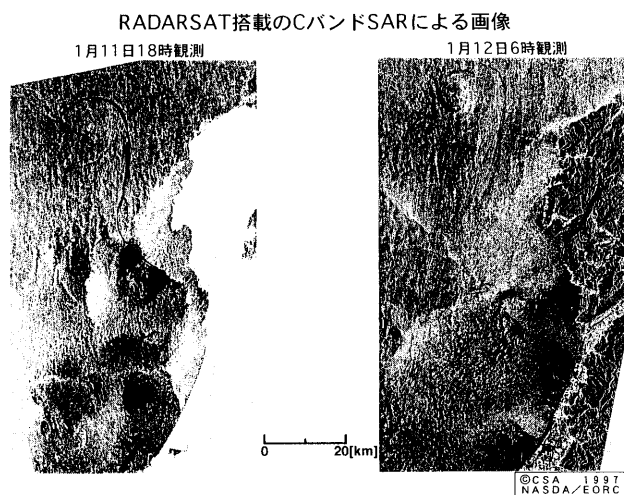


Fig. 7 Radarsat/Sar Images on 11 and 12 Jan. 1997 from the NASDA/EORC report⁶⁾.

「天洋」を再派遣、海水中の油分調査並びに海流観測を行うとともに、不確定要素の多い吹送流や風圧係数などを評価するための現場観測実験⁵⁾を行った。また、通信総合研究所がHFレーダーによる能登沖の海流観測を行ったり、宇宙開発事業団がカナダのRADARSAT衛星SARによる流出油の観測 (Fig. 7) を行う⁶⁾ など、それぞれの機関による取り組みも行われた。

(2) O号事故。対馬海峡は、水深が100 m前後で、対馬暖流と同程度の潮流が存在するため、時間・場所毎に潮流を計算しなければならない。対馬海峡には、あらかじめ潮流と対馬暖流を5'メッシュのテーブルにした流況予測・漂流予測モデル⁷⁾ を作成してあったので、最寄りの灯台の風観測データと気象台の風予報値を入力して漂流計算を行った (Fig. 8)。このモデルでも、乱れは含まれず、

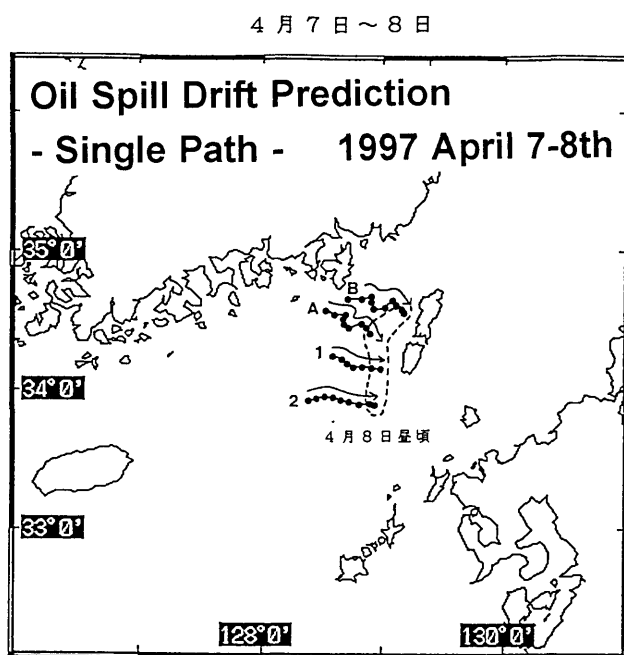


Fig. 8 Oil spill drift prediction in the Tsushima Strait, 7-8 April 1997.

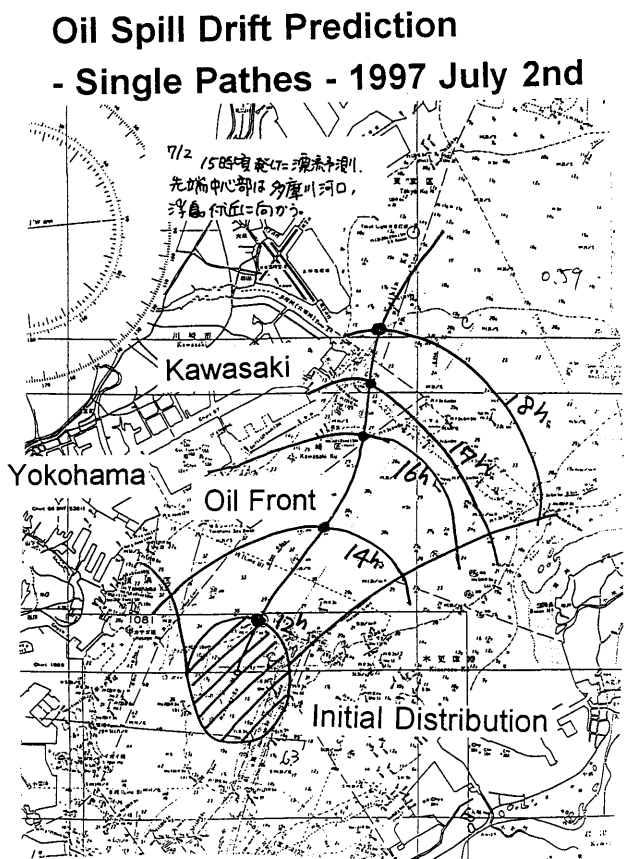


Fig. 9 Oil spill drift prediction in Tokyo Bay released about 15:00, 2 July, 1997.

漂流範囲は示すことができなかった。

(3) D号事故は、7月2日ちょうど低潮時の転流直後10時頃に発生した。現場の中ノ瀬付近は湾口に近いため潮流が強く、海流成分は相対的に弱い。東京湾についても潮流と吹送流を含むテーブル方式単線予測モデル⁶⁾を作っていたので、事故発生の情報もたらされるやいなや、油の位置と風を確認し直ちに計算、「横浜～川崎方面に漂流」という予測を提供した (Fig. 9)。その際、他の機関では幕張から千葉方面に向かうという予測を出したところもあったが、結果的には水路部の予測した扇島付近に7月2日夜から3日昼にかけて漂着した。この違いの原因としては、採用した風データの違いや吹送流の見積もり方の相違などが考えられる。その後、時間がたつにつれて流出油の範囲が広がったため、単線モデルでは予測が困難となり、いわゆる拡散モデルの必要性が痛感された。この事故は、N号やO号のムース化するC重油と異なり粘度の低い原油であったこと、流出量が当初の予想より少なかったこと、油処理が迅速に進んだことなどあって、流出油対応は発災後2～3日で終息した。しかし、人口と企業活動が密集し、船舶航行が錯綜する東京湾で起きたことからいろいろな面からの課題が残った⁸⁾。

4. 漂流予測向上への試み

日本海のN号事故の漂流予測に際して、海流観測データが少なく、この海域の海流現況がよくわからなかったこと、手間・暇がかかる単線予測しか使えなかったこと、拡散範囲や信頼範囲が評価できなかったこと、などの課題が指摘された。これを踏まえ、水路部では、N号事故の直後から以下のような課題克服に取り組んだ。

(1) 単線予測から粒子拡散予測へ

単線予測では、手間と時間が掛かるうえ、拡散範囲が示されず、適否の判断もできない。漂流予測に使う海流・潮流も海上風も一様ということではなく、平均値の周りに分布を持った統計的な値であることから、当然、漂流経路・範囲についても分布を持つはずである。そこで、N号事故の直後からメッシュ化された海流データに基づく粒子拡散モデル開発に取り組んだ。この方法では、多数の粒子を事故現場に投入し、時間ステップ毎に乱れを与えて拡散させることをモデル化したもの (Bowden, 1983)⁹⁾ で、流出油の漂流拡散には従来から用いられている (例えば Yanagi and Okamoto, 1984)¹⁰⁾。もし、海流や風が空間的に一様ならば、粒子雲は重心の周りに同心円上に広がりつつ全体的に平行移動するだけであるが、メッシュ毎に海流が変われば、分布が引き延ばされたり変形して広がって行く。船体のような一つの物体が漂流する場合は、粒子雲の中の一つの粒子が実際に起きる

ものであり、粒子の密度が漂流予測の確率を示すことになる。

乱れは、各ステップ毎に標準偏差 σ の正規分布による乱歩 R_a で次のように与える。

$$R_a = \sigma \cdot P_n(0, 1) \quad (2)$$

$$\sigma = (2 \cdot K \cdot \Delta t)^{1/2} \quad (3)$$

ここで $P_n(0, 1)$ は、平均0、標準偏差1の正規確率、 K は拡散係数、 Δt は予測時間間隔である。 K は $10^1 \sim 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ 程度とすることが多い。

Fig. 10(a)は、佐藤ほか(1997)¹¹⁾ による、粒子拡散予測をN号事故に適用した試行結果である。Fig. 10(b)は、Fig. 10(a)に与えた海流場で、日本海洋データセンターの海流データを15'メッシュで季節毎に平均したものである。隠岐諸島から能登半島沖にかけて沿岸に沿って東向流があ

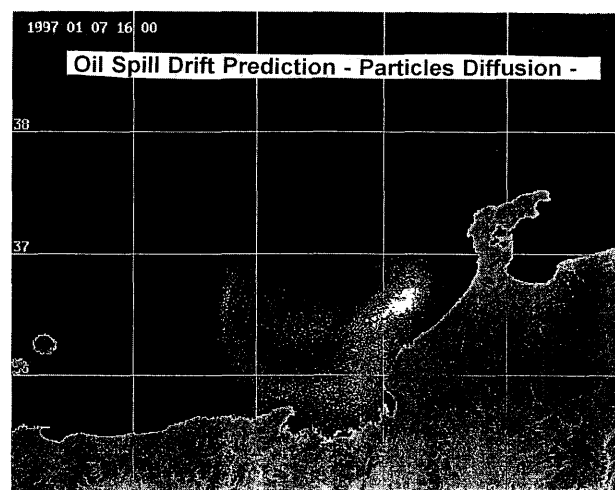


Fig. 10(a) Particles diffusion model for the drifting article prediction by Sato (1997)¹¹⁾. Compare to Figs. 3 and 4.

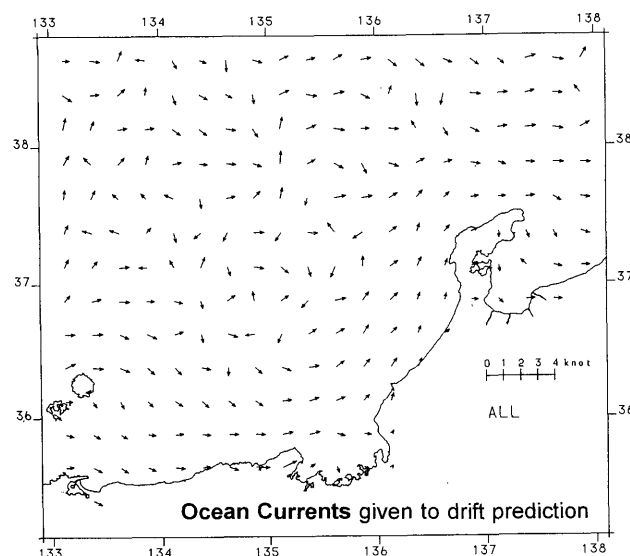


Fig. 10(b) Coastal currents mesh data by Sato (1997)¹¹⁾, one of the data bases for the prediction of Fig. 10(a).

り、北緯38°付近にも東向流の傾向がみられ、対馬暖流が現れているようである。事故現場は、沿岸の流れと沖合の流れの間に位置し、はっきりした傾向はみられない。Fig. 10(a)は、この海流と、風圧流、さらに乱れによって1月7日の分布を再現しており、Figs. 3, 4の分布と比較的合っている。

(2) 漂流予測要素を評価するための現場実験観測^{5,11)}

漂流予測を向上させるためには、個々の漂流要素の見積りを的確にしなければならない。そこでN号事故現場付近で、風圧流や吹送流、乱れを評価する実験観測を試みた。Fig. 11に示す三種のフロートを用意し、事故地点近くの沖合い(A)と沿岸部(B)の2地点で、24時間の漂流追跡実験を行った。ドローグを付けたDフロートは、海中部の断面積が圧倒的に大きく海水の流れを代表、ドローグ無しのNフロートは海水の流れと風圧流の両方が効いて漂流する。また、ドローグの代わりに ADCP (超音波ドップラー流速プロファイラー) を吊り下げたCフロート

で海面近くの流速鉛直プロファイルを測り、吹送流の評価を試みた。なお、表面のフロートは、海面上でべたっと広がる漂流油を想定して、直径1 m厚さ8 cmの発泡スチロールを鉄板で挟み、大気と海水に触れる面積をほぼ等しくしてある。

〈風圧流・風圧係数と拡散係数の評価〉

各時間毎の漂流物体の移動 $u \cdot \Delta t$ は、

$$u \cdot \Delta t = U_w \cdot \Delta t + U_d \cdot \Delta t + R_a \\ = U_w \cdot \Delta t + C_w \cdot W \cdot \Delta t + \sigma \cdot P_n(0, 1) \quad (4)$$

と表すことができる。各フロートの位置は5分毎に求めたが、風や海流データと合わせて1時間毎の値に整理した。乱れ R_a は後から評価することとして、とりあえず無視すると、Dフロートは海水の流れ U_w 、Nフロートは U_w と風圧流 U_d で流されるので、両者の差は、風圧流 U_d となり、現場風の測定値 W から風圧係数 C_w を評価することができる。

[実験A] 期間中の海流は南東0.2~0.7 m/s、海上風は

Drifters used in the validation of drift prediction

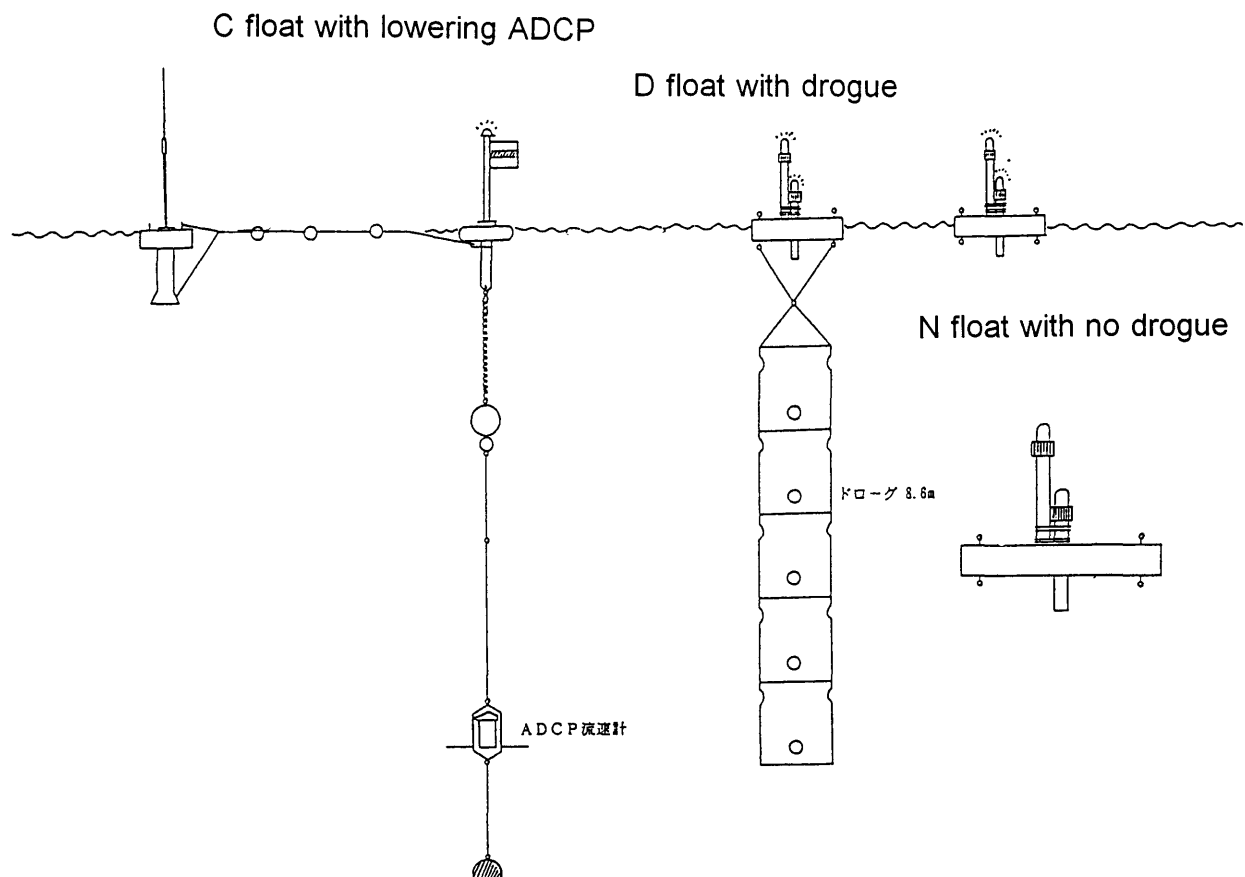


Fig. 11 Three drifters for the validation of drift prediction.

西ないし西北西約10 m/s, 海流と風圧流の比は0.3~0.7, 風圧係数は0.004~0.073 (平均0.036), 風圧流の海上風に対する偏角は-29~+64度 (平均+4.7度) であった。

[実験B] 海流は東北東0.1~0.3 m/s, 海上風は4 m/s程度の弱い南東の風から西南西ないし西北西9 m/sに変化した。海流と風圧流の比は0.4~3.8, 風圧係数は0.02~0.08 (平均0.046), 偏角は-49~+41度 (平均-1.7度) であった。

この実験による風圧係数の平均値0.41は、「漂流油の風圧流は風の3~5%」という今までの知見³⁾とほぼ合っていた。

二つの実験の平均風圧係数 $k = 0.041$ を使って, 各時間毎の乱れ R_a 及びその標準偏差 σ を評価すると1時間あたり234 m, さらに(3)式を使って拡散係数 K を評価すると $7.6 \text{ m}^2/\text{s}$ となった。さらに実測の海流と海上風に平

均風圧係数を使ってNフロートの漂流経路を予測し, 実際の経路を比較し Fig. 12 に示した。図中の誤差円は, この乱れに基づいた誤差範囲 2σ を示し, 実験(A), (B)ともに実測値は範囲内に入っている。

以上の R_a や σ は, 現場の海流と海上風がわかっているときの誤差であるが, 実際には現場の海流も海上風も予測/推定して与えねばならず, その予測/推定誤差を見積もる必要がある。そこで, 試みに漂流実験中 (24時間) の平均海流と平均風のみを与えたときの誤差 σ を考えると, 実測の海流と海上風を与えた場合の10倍程度となった。(3)式に従えば, 拡散係数 K は100倍の $7.6 \times 10^2 \text{ m}^2/\text{s}$ 程度になる。実際の海難の際は, 現場の気象・海象がわからないことが多く, この程度の予測誤差・拡散係数は考えておく必要がある。

〈吹送流評価の試み〉Cフロートによる表層流速プロファイルの観測では, 下層にゆくにつれて流向が右旋するなど, エクマン吹送流の性質は顕著に現れていたものの, 鉛直粘性係数などの評価には至らなかった。

(3) 流出油の拡散範囲と経過の見積り

東京湾のD号事故に際して, 当初, 流出油量が実際の1,550 klの10倍以上という憶測が流れ, 人口や産業活動が集中した東京湾で起こったことから, 非常な危機感が高まった。もし, 実際に10倍の量が流れたとしたら, 漂流予測どころか東京湾全体が油に覆われたかもしれない。そこで, 流出油量に対する拡散範囲についての見通しがすぐできるようにしておく必要がある。Fig. 13 は, 東京湾の油の流出経過を模式図に示したものである。蒸発・沈降・溶出など流出油の変質や油処理が進んだこともあるが, 19時間後の135 km² を最大に縮小してゆく。Fay (1969)¹²⁾ によれば, 流出直後は自重によって重力流的に急速に, その後は表面張力によって広がるが, 海水と油の間の粘性力 (摩擦力) がブレーキとなって表面張力とバランスした状態で油自体による拡散は止まり, あとは周囲の流れや風圧流によって拡散してゆくこととなる。川村・清水 (1976)¹³⁾ によれば, 表面張力による油自体の広がり I のスケールは,

$$I = 10(s^2 t^3 / \rho^2 \nu)^{1/4} \quad (5)$$

放出油量 V_o が与えられた時の表面張力と粘性力がバランスした油自体の最終的な広がり L は,

$$L = [s^2 V_o^6 / \rho^2 \nu D^3 S^6]^{1/6} \quad (6)$$

で与えられる。ここで, s は単位長さあたりの表面張力 (油-海水), ρ は海水の密度, ν は海水の動粘度, t は経過時間, D は油の分子拡散係数, S は海水に対する油の溶解度である。Figs. 14, 15 は, (5)と(6)式に基づいて経過時間 t と拡散水平規模 I , 並びに流出油量 V_o と最終広がり L の関係を示したものである。そのうえにD号

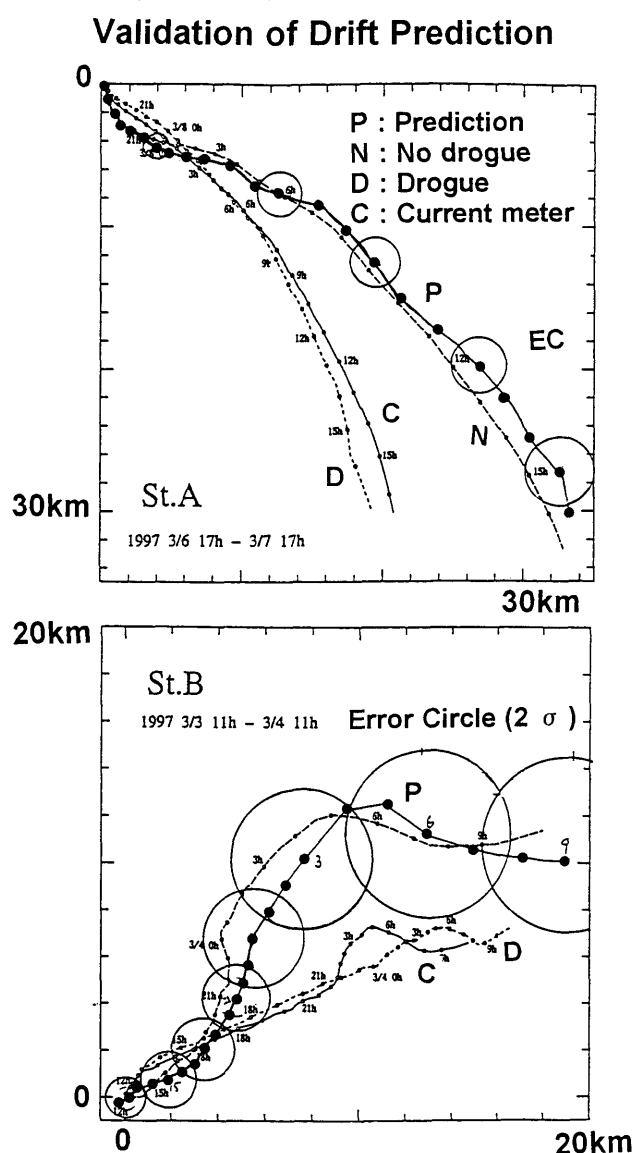


Fig. 12 Validation results of drift prediction. Thick line with dots means drift prediction and circles mean error scale 2σ .

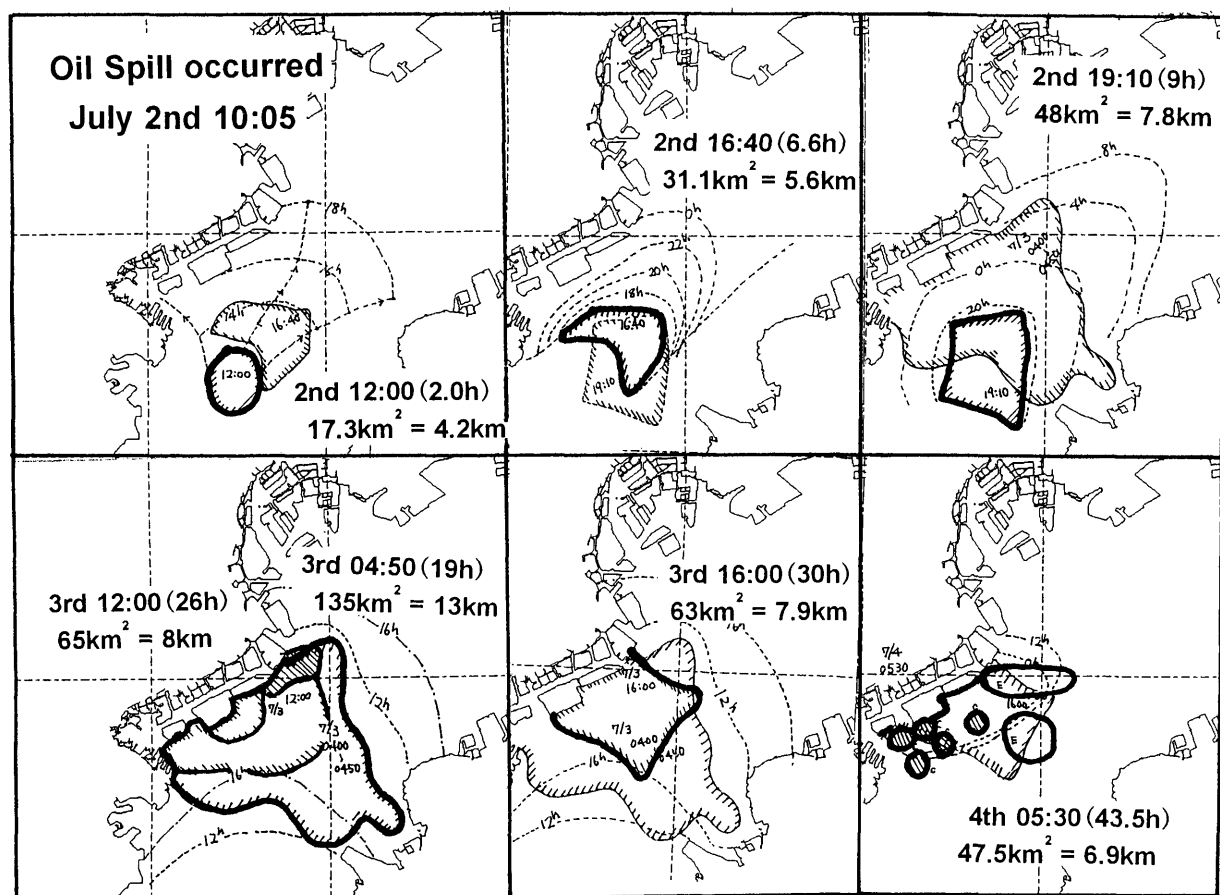


Fig. 13 Oil spill distribution change in the incident of Diamond Grace, 2 July, 1997. Maximum oil spill area occurred at 04:50, 3 July, 19 hours after the incident.

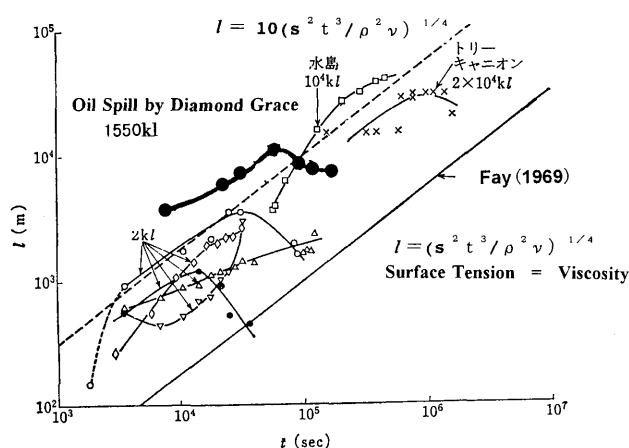


Fig. 14 Relation of horizontal scale of the oil spill to the elapsing time. The case of Diamond Grace is plotted on the original figure of Kawamura and Shimizu (1976)¹³⁾. Dots correspond to each distribution of Fig. 13.

事故をプロットしたところ、(5)や(6)式に比較的良好に合っており、このような事故の際に概略の範囲を見積もるには有効と思われる。

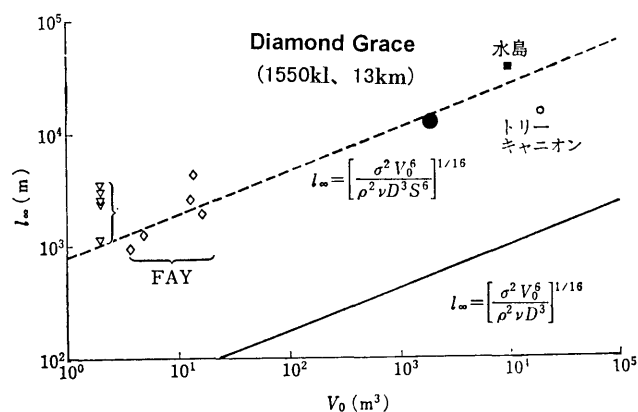


Fig. 15 Maximum horizontal scale and the spilled oil volume. The case of Diamond Grace, a large dot, is plotted on the original figure of Kawamura and Shimizu (1976)¹³⁾.

(4) リアルタイム海流データベースの充実

漂流予測の精度向上には、やはり現場の海流を把握することが重要である。特に冬の日本海では海流データが決定的に少ない。そこで N 号事故では、海流を把握するために放流したアルゴスブイの軌跡 (Fig. 6) を見ると、現場付近は大きな右回りの環流があり、これが沖合から

沿岸部に船首部と油を運び、京都府から鳥取県方面に油を流したものと考えられる。この右旋環流は、Fig. 2(b)の200 m 層水温分布にも暖水性の渦として現れている。さらに Fig. 2(b)の100 m 層には能登半島西沖に小さな冷水渦も現れている。この冷水渦らしき特徴は、RADAR-SAT/SAR 画像 (Fig. 7) にも顕著に現れている。これらの渦と渦の間や対馬暖流の間では流れのシアが大きく、Figs. 3, 4 に見られる能登半島西の南北に延びた油分布にも、このようなシアの影響が考えられる。漂流予測の精度向上には、このような沖合の対馬暖流第二分枝と沿岸の第一分枝の間にある暖冷水渦の実態¹⁴⁾を把握しておくことが必要である。水路部では、このような現況の海流分布を把握しておくことの重要性に鑑み、庁内外の船舶の協力を得て船から観測データを水路部に送る伝送システムを整備するとともに、漂流予測にすぐ使えるようなリアルタイム海況データベースを構築・維持運用することとしている。

5. 最後 に

第2節で、漂流予測の基本的な考え方は物体に依らないと述べたが、災害の種類によって漂流予測への要求が異なる。一刻を争う人命救助では、一番可能性の高い漂流経路の予測を示す必要があるし、少しでも油が漂着したら被害の出る養殖場や発電所などでは小さな可能性の漂流経路の予測も必要である。今までの単線予測は、最大可能性のものしか示されず、後者には対応が難しかった。漂流予測を的確に行うためには、いろいろなシナリオに合わせる必要がある¹⁵⁾。今後は、粒子拡散予測をさらに発展させて、存在確率のような定量化した表示とし、目的に合わせられるアウトプットができるようにしたいと考えている。

さらに、水路部では、1998年4月に沿岸域海洋情報管理室を設置し、漁場などの沿岸環境や防除資機材基地などの情報を提供してゆく体制を整え、漂流予測のみならず海上災害対応の近代化を図ってゆくこととしている。

ここに取り上げた一連の油流出に際しては、巡視船や漁船などが海洋上で防除活動を行うとともに、多くの地元住民や自治体、ボランティア、海上災害防止センターを始めとする関係機関が協力して除去作業を行った。ここに取り上げた漂流予測や実験観測には、多くの水路部職員の努力があった。あらためてすべての関係者の努力に敬意を表するとともに、取りまとめに協力された各位に謝意を表す。

なお、日本海での海流観測や漂流実験の一部は、平成8年度科学技術振興調整費「ナホトカ号油流出事故による環境影響に関する緊急研究」⁵⁾によるものである。ま

た、Fig. 7 は、宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センター⁶⁾の提供による。

参 考 文 献

- 1) 朝日新聞社 (1997): 「落とし穴」にはまった漂流予測. SCiAS 1997. 04. 04号, 14-15.
- 2) 小田巻実 (1985): 沿岸域における漂流予測の試み. 沿岸海洋研究ノート, **23**, 148-154.
- 3) 海上災害防止センター・海上防災事業者協会 (1996): 海上防災ハンドブック. 164pp.
- 4) 佐々木邦昭 (1997): ナホトカ号重油流出事故一現地における防除活動の記録一. Quality No. **132**, 2-10, 昭和シェル石油株式会社.
- 5) 科学技術庁研究開発局 (1997): 「ナホトカ号油流出事故による環境影響に関する緊急」研究成果報告書. 119pp.
- 6) 宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センターナホトカ号流出油観測緊急対策チーム (1997): 人工衛星・航空機による漂流重油の観測一ナホトカ号重油流出事故衛星観測調査報告書一. 108pp.
- 7) 「重要海域の流況予測用データテーブルの整備 (対馬海峡を中心とする九州北西岸域)」. 平成2年3月, 日本水路協会, 全161pp.
- 8) 「ダイヤモンド・グレース号の海難に思う」, 海と安全97-8, 2-10, 日本海難防止協会.
- 9) Bowden, K. F. (1983): Physical Oceanography of Coastal Waters. Ellis Horwood Lim., 302pp.
- 10) Yanagi, T. and Y. Okamoto (1984): A numerical simulation of oil spreading on the sea surface. La mer, **22**, 137-146.
- 11) 佐藤敏・斉藤茂幸・工藤宏之・小田巻実 (1997): 漂流予測システムの高度化の取り組み. 1997年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, p 104.
- 12) Fay, J. A. (1969): Oil on the Sea. ed. Hoult D. P., 53-63, Prentice Hall, New York.
- 13) 川村雅彦・清水浩輔 (1976): 海面における油の広がりや分散. 津田寛編「流出重油の海水中における挙動とその影響」, 文部省科学研究費補助金研究報告.
- 14) 川合英夫 (1974): 日本海における海流像の変遷. 対馬暖流一海洋構造と漁業, 日本水産学会編, 恒星社厚生閣刊, 7-26.
- 15) Hazardous Materials Response and Assessment Division/NOAA and Florida Marine Research Institute/FDEP (1996): Digital Distribution Standard for NOAA Trajectory Analysis Information. HAZAMAT Report 96-4, 43pp.

質 疑 応 答

問: ①風圧係数をD号の際に6%にした理由は(係数のパラメータの決定方法)?

②拡散係数は、 $10^5 \sim 10^6$ とレンジが広いが、どのように係数を決定するのか。(気象庁, 高野 洋雄)

答: ①通常は、3~5%にしているが、流出油のもっとも先端部の標着する地点を見たかったので大きめに設定した。あとから見ると、4%程度の方がよかった。

小 田 巻

実

②拡散係数は、モデルの格子サイズに依存する。よく使われている空間スケールの4/3乗則によるのも一便法、検証実験を行って実用的な値を評価してゆくこととしている。

問：表面吹走流の流速 u_s は風の摩擦速度を u^* とすると、次式で与えられます。(実験式；かなり精度が良い)

$$\textcircled{1} \quad u_s/u^* \sim 0.50 \sim 0.55$$

$$\textcircled{2} \quad u^* = \sqrt{(\tau_0/\rho_a)}, \quad \tau_0: \text{風の shear stress}$$

ρ_a : 大気密度

$$\tau_0 = \rho_a \cdot C_D \cdot u_{10}^2 \quad u_{10}: 10 \text{ m 高度の風速}$$

C_D : 海面の抵抗係数

従って

$$\textcircled{3} \quad u^* = \sqrt{C_D} \cdot u_{10},$$

(例1) $C_D = 1.6 \cdot 10^{-3}$ (仮定：中風速)

$$\rightarrow u^* = 0.04 \cdot u_{10}$$

$$u_s/u_{10} = 0.02 \sim 0.022 \rightarrow \text{風圧係数}$$

(例2) 最近の研究によると $C_D = A + B \cdot u_{10}$, 細かな係数は覚えていませんが、低風速では $C_D \sim 10^{-3}$, 高風速では $3 \cdot 10^{-3}$ 程度で風速に依存します,

(例3) $C_D = 3.6 \cdot 10^{-3}$ とすると (高風速), $\sqrt{C_D} =$

$$6 \cdot 10^{-2}, u^* = 0.06 \cdot u_{10}, \text{これを使用すると}, u_s/u_{10} = 0.03 \sim 0.033 \text{ (風圧係数)},$$

従って基礎研究からの結論としては、風圧係数0.02–0.04は妥当と認められ、若干風速に応じて変化させる事が望ましい。但し、上記の①式は室内実験の結果ですから、ウォール・エフェクトの検討が必要かもしれません。(広島工業大学, 光易 恒)

答：摩擦係数の風速依存性については、従来から Bowden(1983)⁹⁾ などでも言及されており、また大気境界層の安定性にも関係するので、コメントを参考に、今後、このような予測検証をいろんな条件下で行い、実的なものを検討して行きたい。

問：(油の漂流速度)/(風速)の値は、油質と地形のどちらが効き易いか。Open oceanに近いトレーキャニオン号の時は、二桁の3.3%を出しているが。

(三好 寿)

答：油の種類で動粘度が100倍くらい異なる場合があり、地形との比較ではよくわからない。今回の約4%との違いは、吹送流が地形で異なることによる可能性はあると思う。