

GISを基盤とする海洋環境管理事例と将来展望 — 『ナホトカ号』油流出再現シミュレーション —

中根 徹・大川 健

1. はじめに

海洋環境の研究は広範囲に及ぶ領域を対象とし、特にデータの位置（緯度経度）が重要な意味をもつ分野であるため、位置情報を持たせた形式でデータを管理する地理情報システム（Geographic Information System：GIS）が、環境管理ツールとして世界的に普及している。

ここでは、GIS上でのデータ管理とシミュレーションが、どのように海洋環境管理に資するかを具体的な事例をもって示す。GISを基盤とする海洋環境管理の一例として、1997年に起きたナホトカ号の大規模油流出事故を取り上げる。まず、この事故に関連するデータをGIS上で一元管理し、表示あるいは検索機能を使って事故のあらましを地理的に把握する。そして、同じ投影法下の座標軸上で、流出油の移流拡散と変質過程のシミュレーションを実施する。このシミュレーションによる予測結果に基づいて、流出油汚染からの沿岸域を優先的に保護すべきかを判断するために開発され、既にGIS化されている米国海洋大気局（the National Oceanic and Atmospheric Administration of the USA：NOAA）の環境感受性指標（Environmental Sensitivity Index: ESI）を紹介し、対応策を選択する際に優先順位を付けざるを得ないという現実的な視点から感受性分類の重要性を指摘する。また、GISを用いた流出油漂着後のモニタリング及び解析例として、ナホトカ号からの流出油による潮間帯に生息する生物への影響評価事例を紹介する。

GISソフトにはESRI社製のArcView3.2aを、シミュレーション・ソフトにはApplied Science

Associates, Inc. (ASA) 社製のOILMAP for ArcView (OILMAPAV) を用いた。

2. 『ナホトカ号』油流出事故

日本近海で発生した大規模油流出事故として記憶に新しいのが、1997年1月2日午前2時40分に日本海島根県沖で起こった、ロシア船籍タンカー「ナホトカ号」(13,157t)の事故である。海域に放出されたと見積もられている重油の総重量は、約6,240トンである（海洋工学出版部,1998）。油の種類は、Bunker C # 6重油で、非常に高い粘性を持ち、炭素、酸素、水素の他に硫黄やニッケルなどの有害物質や重金属を含む。事故発生後、ナホトカ号の船体は2つに裂け、船首は漂流し最終的には福井県三国町安島岬から200m沖付近に座礁した（山口, 1997）。後部は、北緯37度14.4分、東経134度24.9分、水深2,502mの海底に沈没した（海洋科学技術センター発表, 1997）（図1）。

GISを用いると図1に示すように、緯度経度座標軸上の電子地図にナホトカ号船首の座礁位置や母体沈没位置をデータとして格納し、且つ容易に表示でき、事故関連の情報管理と事故経緯の把握に有用である。また、座礁位置を示す船のマークに現地写真をリンクさせておけば、マークをクリックするだけでリンク先から写真を瞬時に呼び出し参照することが可能である。このように、様々な関連データを一元的に管理し、見た目にもきれいで分かり易く、実際に即活用できるのがGISの特長の一つである。

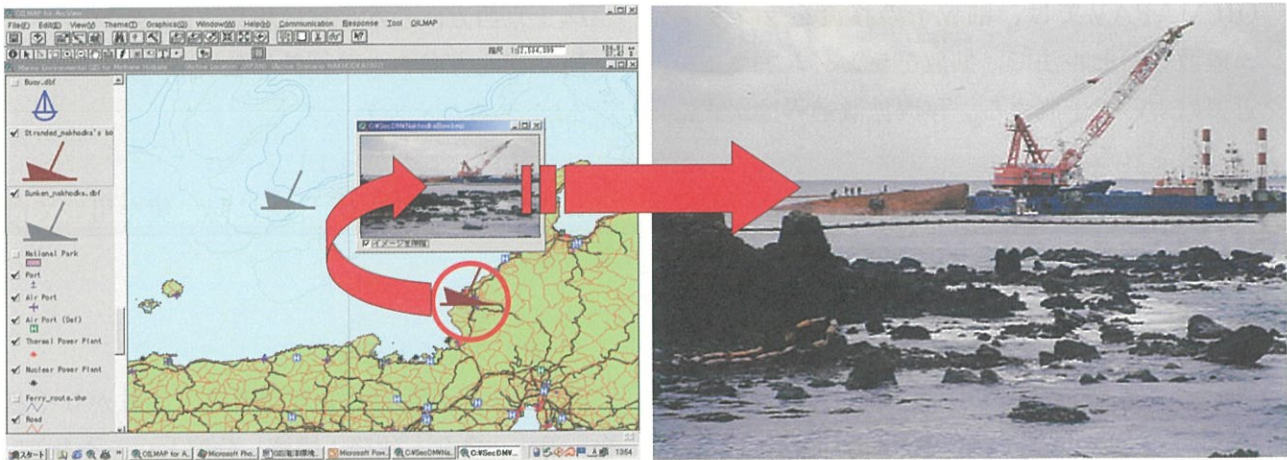


図1 ナホトカ号船首の座礁位置とリンクしている現場写真
 (撮影：(株)日本海洋生物研究所、1997年1月16日)

流出油は、事故発生から5日後の1997年1月7日午前9時30分ごろに福井県三国町安島の海岸に漂着した(福井県環境科学センターWebサイト)。事故発生後、海上は大時化で、流出油漂着を阻止する対策にまで至らなかったのが実態である。その結果、流出油は陸に漂着してしまい、その回収は一部の重機作業を除き、自衛隊やボラ

ンティアグループによる地道な手作業に頼るものとなった。(写真1)

3. 流出油の移流拡散と変質過程モデル理論

ここで、簡単にシミュレーションに用いるOILMAPAVに組み込まれているモデル理論を紹介する。

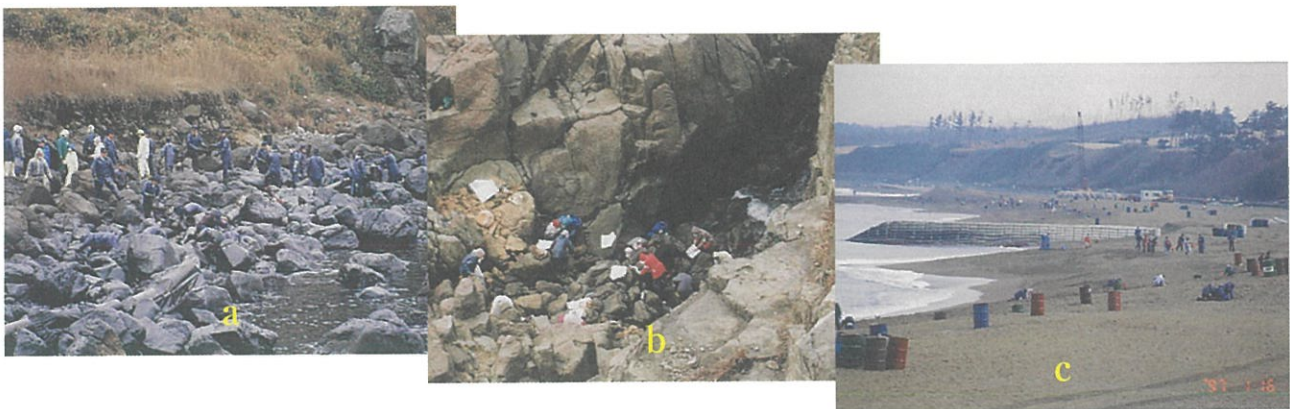


写真1 a 安島付近の巨礫浜、b 安島付近の岩場、c 浜地海岸、鳴き砂の砂浜
 (撮影：(株)日本海洋生物研究所、1997年1月16日)

3.1 移流拡散モデル

OILMAPAVでは、油粒子の移流をラグランジュ離散パーセル法で、拡散をランダム・ウォーク近似によって予測する。移流拡散過程は次式によって表される。

$$\vec{X}_t = \vec{X}_{t-1} + \Delta t \vec{U}_{oil}$$

ここで、

Δt : タイムステップ (s)

\vec{X}_{t-1} : $t-1 = t - \Delta t$ における海面油粒子の位置

\vec{U}_{oil} : 油粒子の移流速度 (m/s)

油粒子の移流速度 \vec{U}_{oil} は、次式で定義される。

$$\vec{U}_{oil} = \vec{U}_w + \vec{U}_t + \vec{U}_r$$

ここで、

\vec{U}_w : 風速 (m/s) ①

\vec{U}_t : 流速 (m/s) ②

\vec{U}_r : 渦動拡散の速度要素 (m/s) ③

ここで

①の風速は、ドリフト係数とドリフト角を考慮し、次式で表される。

$$\vec{U}_w = C_w u_w \cos \theta + C_w v_w \sin \theta + C_w u_w \sin \theta + C_w v_w \cos \theta$$

ここで、

C_w : ドリフト係数 (%)

u_w : 東西方向の風速要素 (m/s)

v_w : 南北方向の風速要素 (m/s)

θ : ドリフト角 (°)

②の流れの速度要素に関しては、ナホトカ号事故発生時の日本海における流況データが入手できず、シミュレーションでは考慮しないため省略する。

③の渦動拡散の速度要素は、ランダム・ウォーク分散過程を組み込み、次式によって表される。

$$\vec{U}_r = \gamma \sqrt{\frac{6D_x}{\Delta t}} + \gamma \sqrt{\frac{6D_y}{\Delta t}}$$

ここで、

D_x : 東西方向の水平拡散係数 (m²/s)

D_y : 南北方向の水平拡散係数 (m²/s)

Δt : タイム・ステップ

γ : 乱数 (-1から1)

OILMAPAVでは、 D_x と D_y に同一値を用いて計算する。

3.2 フェイトモデル

油がひとたび海域に放出されると、拡がりや蒸発、混入、乳化、沈降、溶解、分解といった物理、化学、生物過程を経て変質していく(図2)。

OILMAPAVでは、油の分散にMackay et al (1980)、蒸発にMackay蒸発曝露アルゴリズム(Stiver and Mackay (1984))、混入速度にDelvigne and Sweeney (1988)、そして乳化にMackay et al (1980)とMackay and Zagorski (1982)理論を導入している。尚、OILMAPAVでは、溶解、沈降、分解過程を考慮しない。(Spaulding, 1994)

これらの理論モデルに基づいて、OILMAPAVは流出油の変質過程を予測し前述の移流拡散予測と組み合わせて、いつ、どこに、どのくらいの油が海面、水柱、大気、陸域に存在するかを算出する。この予測結果は、具体的な対応策を決定する際に不可欠な情報となる。そして、OILMAPAVの利点は、GIS上で稼動し計算時間が短いことである。

因みに、どんな資機材を、どこからどれだけ、いつまでに用意すべきかなどの具体的な対策を決定する支援ツールとしては、財団法人エンジニアリング振興協会石油開発環境安全センター所有のMEGIS (the Marine Environmental Geographic Information System) が挙げられ、このシステムもその名称から分かるようにGIS上に構築されている。

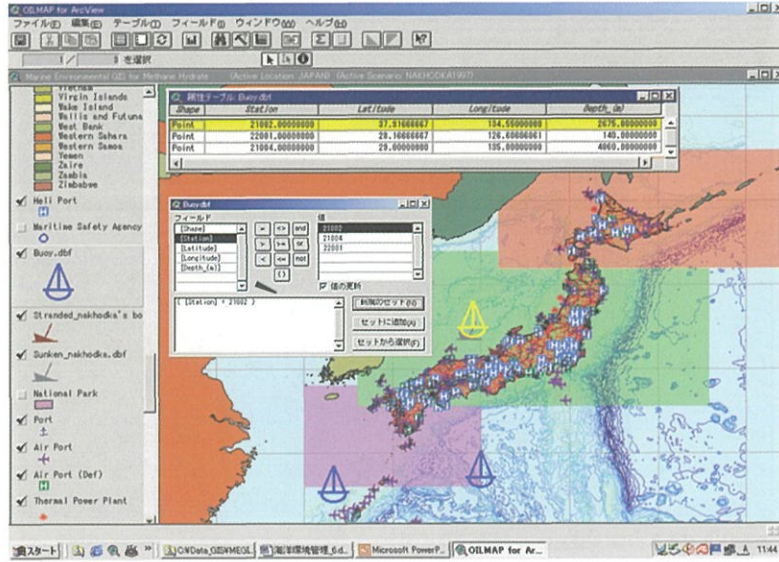


図2 気象庁観測ブイの検索とグリッド格子範囲 (緑の四角)

4. シミュレーション

北緯37° 55′ 東経134° 33′ に浮上する気象庁観測ブイ (図2) から得られた水温及び風況データを用いて、OILMAPAVによる移流拡散と変質過程のシミュレーションを試みた。

図2に示すように、GIS上ではどこに海上のブイがあるのか一目瞭然である。GISは位置情報を主キーとするリレーショナル・データベース形式であるため、あらかじめデータを入力しておけば、シミュレーションに使うデータを記録したブイを検索することも可能である。

今回利用したデータは、気象庁観測ブイNo.21001で記録されたものである。このNo.21001を検索するには、(1)ブイのマークとリンクしているデータベース (位置情報とその他の属性情

報) から、選択することもできるし (A: データテーブル上で地物のレコード (行) を選択すると、ビュー画面上でその地物は黄色く反転する)、(2) 関係代数の条件検索機能を利用して、求めているブイ名を直接入力して抽出することもできる (B: 条件式 [station] = [21002]) (図2参照)。

また、シミュレーション計算は、図2に示している本州沿岸域をほぼ網羅している緑色の区域を対象範囲とするLand-Water Gridという格子を作成して実施した。海域と陸域に関しては、5′ × 2′ 30″ を格子単位とし、沿岸域に関しては、海域及び陸域の格子を縦横両方向に4等分したものをを用いた (図3)。

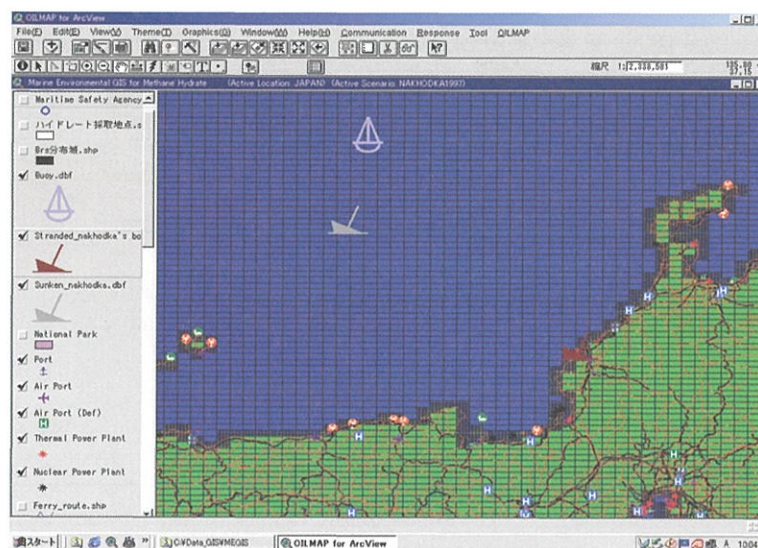


図3 Land-Water Grid

4.1 シナリオ作成とパラメータ設定

気象庁観測ブイ (No. 21002) で記録した水温及び風況データと既往文献等の情報に基づいて、以下のようなシナリオをOILMAPAVで作成した。

1997年1月2日の午前2時40分に、島根県沖 (北緯 $37^{\circ}15'$ 、東経 $135^{\circ}25'$ (Nakata, 1997)) で、ロシア船タンカー「ナホトカ号」から6,240トンのC重油 (Bunker C Fuel Oil # 6) が流出。水温と風況は、観測ブイで取得されたデータに基づき、水温は 15°C 一定と仮定し、風況は1997年1月2日午前0時から1997年1月20日午前0時までの観測値を使用。油流出は24時間続いたものとし、流出油軌跡を240時間後まで予測する。

移流拡散軌跡を予測するためのモデルパラメータとして、計算タイムステップ (Δt) を1時間、出力タイムステップを1時間、ラグランジュ油粒子数を100、ドリフト係数 (C_w) を3.5%、ドリフト角 (θ) を0度、水平渦動拡散係数 (D_x と D_y) を $30\text{m}^2/\text{s}$ とした。なお、水平渦動拡散係数の $30\text{m}^2/\text{s}$ は、暴風時に沖合いで油が流出し、流れ

のデータを持ち合わせていない場合のASAによる推奨値である。Nakata (1997) らは、JODCの水温、塩分、流況データを用いて独自の流体力学モデルにより流れのデータを作成し、水平渦動拡散係数を $4.6\text{m}^2/\text{s}$ に設定し、長期的なナホトカ号流出油の軌跡を再現している。

4.2 シミュレーション結果

流出油の移流拡散軌跡と変質過程のシミュレーション結果を図4に示す。

計算結果では、油粒子は事故発生から5日後の1997年1月7日午前3時30分に、福井県三国町付近に漂着した (図4中の青矢印)。現地観測では、同じく5日後の、1997年1月7日午前9時30分に漂着が観測されており、その差は7時間である。この結果から、三国町付近での当該予測結果は、妥当なものと考えられる。ところが、実際には流出油は島根県隠岐島や佐渡沖などへも到達しており、OILMAPAVによって予測できていない部分は多分にある。しかし、OILMAPAVには、予測の限界を補う実用性がある。風化グラフ

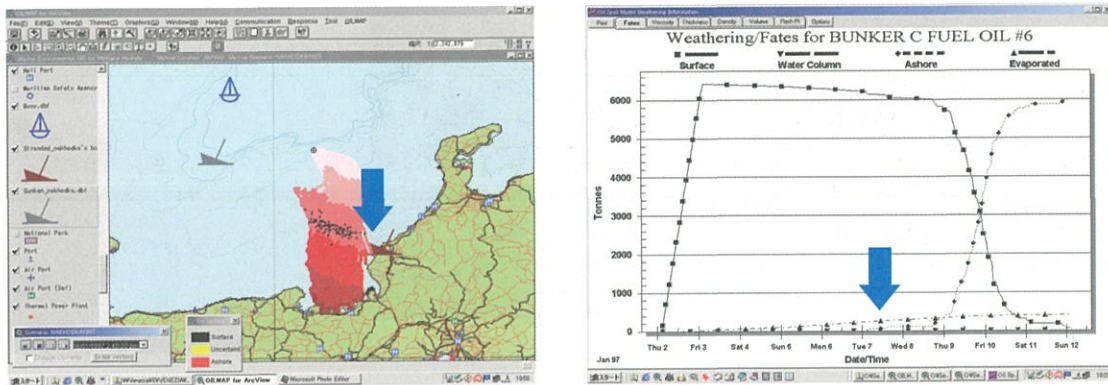


図4 シミュレーション結果（移流拡散軌跡（左）とフェイト（右）、青い矢印は流出油漂着地点と時刻を示す）

(Weathering Graph) 機能を使って、海面、水柱、陸上、そして大気に分布した流出油の質量バランスの経時変化予測や、油膜の厚さ、粘性などの変質予測が可能なので、それらのデータを用いて対策用資機材の必要量算出を実施することも可能である。さらに、ここでは割愛するが、OILMAPAVには、現地飛行調査結果を取り込み、即座に軌道修正を図る機能も備わっている。そして何より、計算時間が数秒から数分で済んでしまうため、即対策の手を打たなければならない状況下では、「使える」ツールとなろう。

5. 沿岸域の流出油汚染に対する感受性

写真1に示されているように、ナホトカ号からの流出油は様々な形態の海岸線に漂着している。海岸線a, b, cは、NOAAのESIにおける、ランク6, 1, 4にそれぞれ相当する（写真2）。

ESIは、(1) 波と潮汐エネルギーへの相対的開放度、(2) 海岸線の傾斜、(3) 基質タイプ、そして(4) 生物学的生産性を考慮し、漂着油に対する海岸線の感受性を、1～10にランク分けし、ランク10の湿地帯を最も脆弱な海岸線であると定義している。ESIマップはESRI ArcView

などのGISソフトウェア上で利用可能な形態で開発されており、油流出事故が生じた場合、どの沿岸域を優先して保護するか意思決定支援ツールとして活用できる。つまり、資機材の量や輸送時間に制限がある場合、前述のようにOILMAPAVなどでシミュレーションを行い、漂着先を予測し、その海岸線の感受性を確認して、どこに資機材と人員を優先的に集結させるべきかの判断がつく。この判断を下せるかどうか、海洋環境管理の生命線であり、GISを活用する所以である。例えば、写真1に示されている3種類の海岸線の場合は、ESI基準に従えばaの巨礫浜を最優先して保護すべきだという結論に達する。

またESIマップは、沿岸域に生息する生物の季節性や生活史のデータも格納しているため、海岸線の空間的な感受性のみならず、時期的あるいは季節的な感受性をも考慮した上で、危険に曝されている沿岸域の保護優先順位を決定することを可能にする。さらに、ESIマップは、生物資源に加えて史跡などの社会経済資源データも含む。そして、それらのデータは全てリンクしているため、まさに総合的な環境影響評価を可能にする。図5に、参考としてArcView上の米国サンフランシ



写真2 ESI 6：礫浜（左）、ESI1：開放性の崖（中央）、ESI 4：粗粒の砂浜（右）（出典：NOAA）

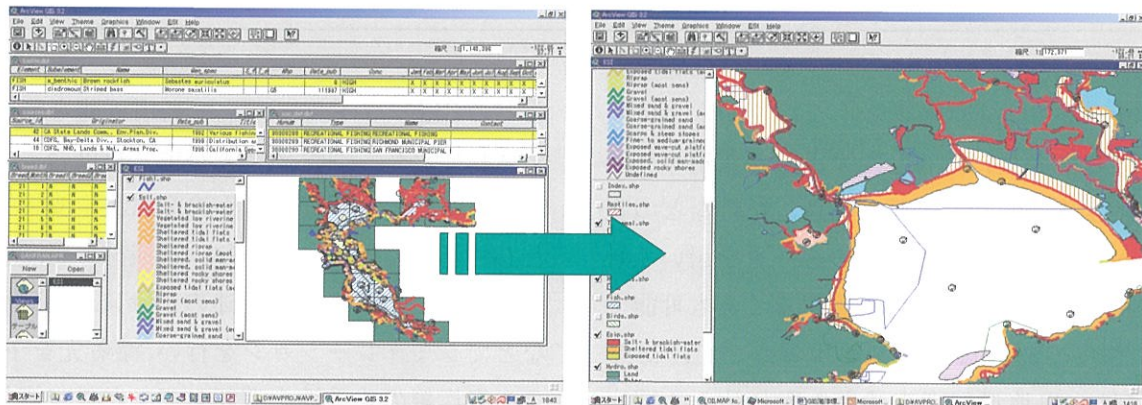


図5 NOAAサンフランシスコ湾のESIマップ（左図で、黄色く反転している部分は各テーブル上でデータがリンクしている状態を示している。）

スコ湾のESIマップを示す。

東京湾や大阪湾をはじめとする日本のあらゆる沿岸域で、ナホトカ号に継ぐ新たな大規模油流出事故が生じた場合に、リスク評価を迅速に遂行できるように、日本列島の全沿岸域における海岸線の感受性分類とそのマッピング、そしてGIS化は、今後海洋環境管理分野において為されるべき喫緊な課題の一つである。実際のところ、海上保安庁はNOAAのESIを鑑み、日本全国の海岸線を10段階に分類し、2006年度までに日本版ESIマップの完成を目指す意向を表明している。

6. 流出油の生態系影響解析

前章までに、流出油が陸に漂着するまでの対応にGISを使ってどのようなことができるかを説明した。この章では、ひとたび流出油が陸に漂着してしまった場合、その後における漂着油の影響をどのようにGIS上で管理できるかについての事例（小松, 2001）を紹介する。

図6に兵庫県香住町今子浦海岸に漂着したナホトカ号流出油の時系列的濃度変化を示す。波と潮汐による影響の少ない海岸線地形部に油が多く残留することは直感的に予想できるが、調査結果を

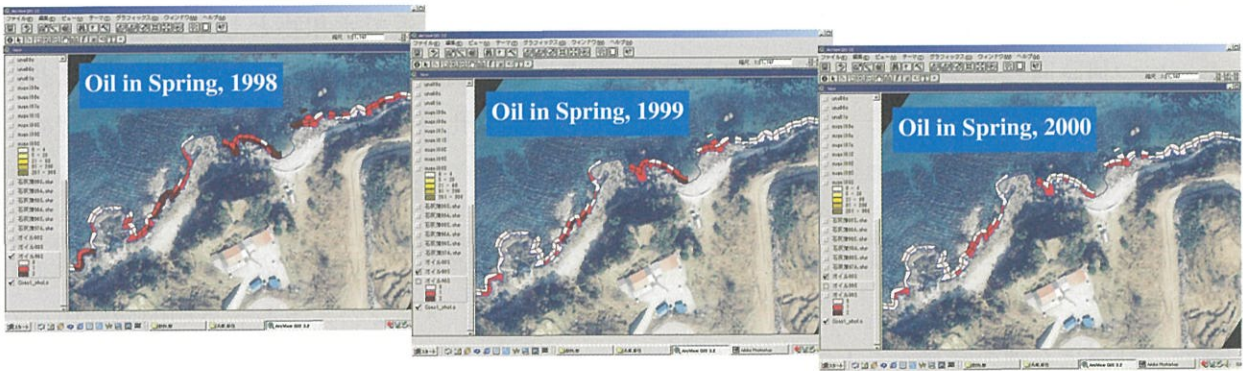


図6. 兵庫県香住町今子浦海岸に漂着したナホトカ流出油の経年変化 (出典: Komatsu. et al)

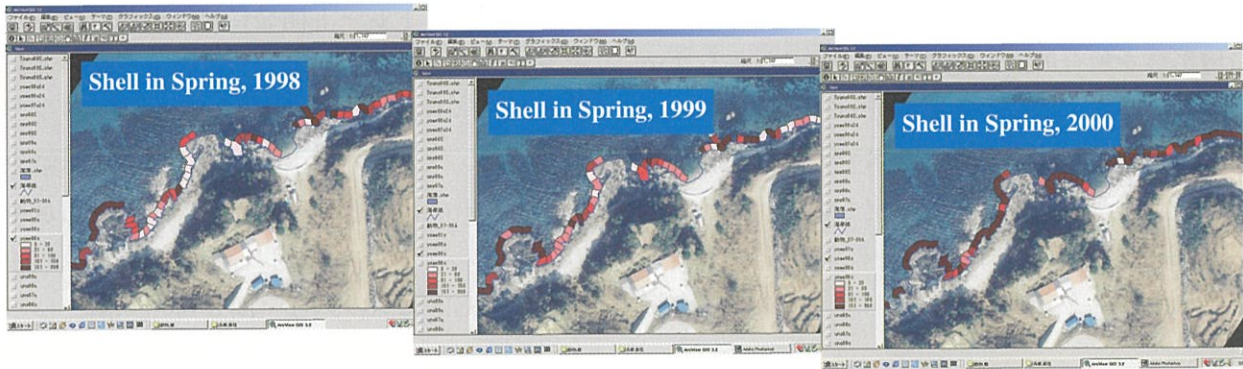


図7 兵庫県香住町今子浦海岸におけるヨメガカサガイ現存量の経年変化 (出典: Komatsu. et al)

GIS上で表示すると、そのことをはっきりと視覚的に確認することができる。事故から3年後の2000年春の段階で、波が直接打ち付けるような開放性海岸では、ほとんどの漂着油が洗い流されていることが確認できる。

図7に、同じ調査範囲の潮間帯における生物現存量の時系列変化を示す。調査対象生物は、貝類のヨメガカサガイ (*Cellana toreuma*) で、その現存量が徐々に回復している様子を見ることができる。

このように、生物データを地理的に表示し、時系列的变化を解析することもできるし、生物の

データ・レイヤが蓄積されれば、それらを重ね合わせて、空間的な相関性を解析することも可能である。以上述べたように、GIS上で (1) データを管理し、(2) シミュレーションモデルを走らせ、(3) ESIを組み込み、(4) 生物も含めたモニタリングデータを取り入れ蓄積することによって、海洋環境を管理する上での判断材料となる実用的な情報を抽出することが可能である。そして、それらの抽出されたデータが、地図的に表記されているからこそ、管理者は意思決定を下し易い訳であり、それこそがGISを用いる真の意義である。

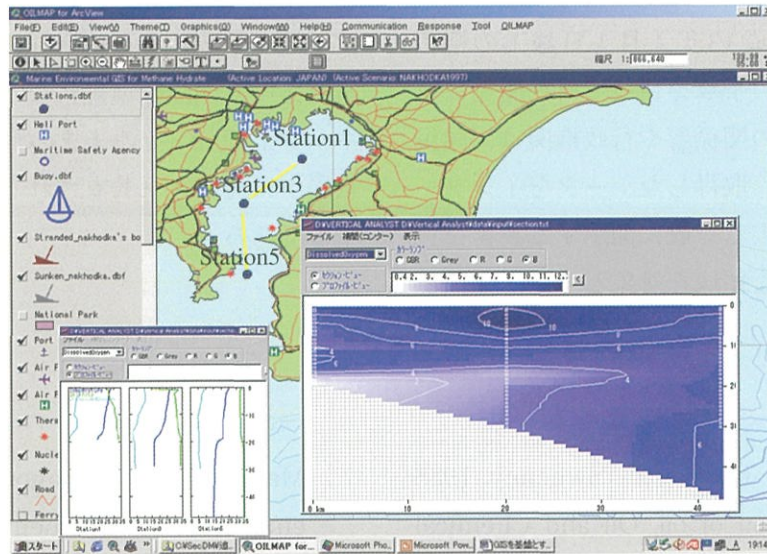


図9 東京湾におけるDOの鉛直断面図 (株日本海洋生物研究所、1997年8月12日)

あるいは、実海域での調査において取得される水質データの鉛直構造解析を Vertical Analystを用いてGIS上で試み、開発対象海域の構造把握に役立てる。(図9にVertical Analystの出力イメージとして、1997年8月12日の東京湾におけるDOの鉛直断面図を示す。) さらに、Geostatistical Analystを用いて、地球統計学的に、ボーリング調査結果から海底地質解析やメタン埋蔵量の推定を試みる。(新製品Geostatistical Analystの出力

イメージとして、図10に、チェルノブイリ原発事故で放出された放射性セシウムによって汚染された土壌に関する、濃度 $25\text{Ci}/\text{km}^2$ 以上の確率分布図を示す。)

これらのGIS的データ管理や解析に加え、今回紹介したOILMAPAVのような、PC上で計算が可能で、且つGISとリンクできるシミュレーションモデルを開発し、メタンハイドレート開発に伴う環境影響評価システムを構築することが、日本

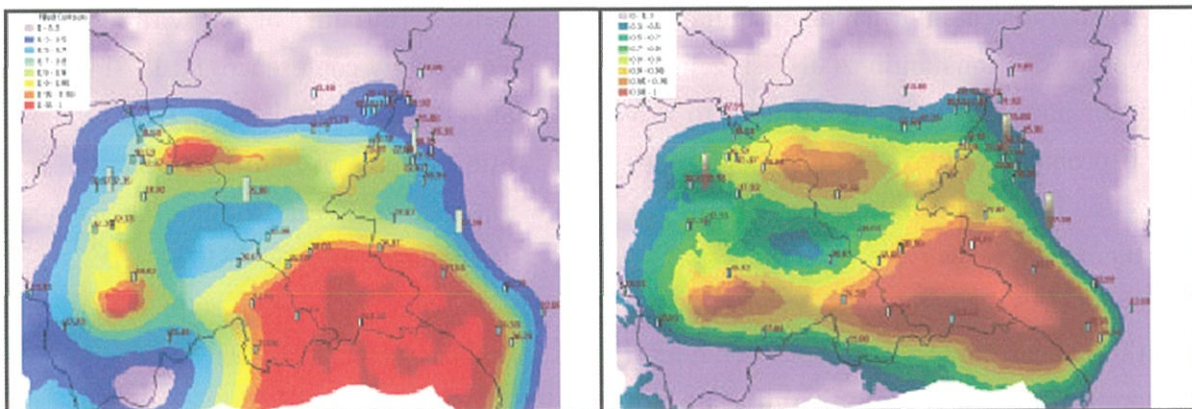


図10. 放射性セシウム濃度が $25\text{Ci}/\text{km}^2$ 以上である土壌の確立分布図 (逐次非線形クリギング補間 (左)、単純クリギング補間、出典: Krivoruchoko, 2001)

におけるエネルギー資源開発と海洋生態系保全とを共存させる上で不可欠であると言える。

さらに、今後は平成13年4月1日施工の情報公開法に基づき、国の予算を使って研究開発に取り組む海洋環境管理の関係者や行政機関は、国民からの請求に応じて、取得したデータをインターネットなどを通じて広く一般に開示する義務を負う。そして、広範囲な領域を対象とする海洋環境

管理分野の研究成果は、これまでの文字情報や画像情報に留まらず、JIS規格のG-XML (JIS X7199) やまもなくISO TC/211下で統一化されるであろう国際標準規格などに準拠し、インターネット上でGISそのままの形態で、日本中そして世界中に発信され共有される、そんな時代が到来するであろう。

参考文献

- 1) Delvigne, G. A. L., & C.E. Sweeney 1988 Natural dispersion of oil. *Oil and Chemical Pollution*. 4: 281 - 310.
- 2) ITOPF. Fate of oil spilled at sea showing the main weathering processes
<http://www.itopf.com/fate.html>
- 3) 海洋工学研究所出版部編 1998 重油汚染・明日のために - 「ナホトカ」は日本を変えられるか -.
- 4) Komatsu, Teruhisa, M. Nakaoka, H. Kawai, T. Yamamoto, Marine Life Research Group of Takeno, and K. Ohwada (投稿中) Impacts by heavy - oil spill from Nakhodka on inter - tidal ecosystem in the sea of Japan III : an approach to impact evaluation with geographical information system.
- 5) Krivoruchko, Konstantin 2001 Using linear and non-linear kriging interpolators to produce probability maps. Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology.
- 6) Mackay, D., S. Paterson & K. Trudel 1980 A mathematical model of oil spill behaviour. Department of Chemical and Applied Chemistry. University of Toronto, Canada.
- 7) Mackay, D. & W. Zagorski 1982 Water-in-oil emulsions. Environment Canada Manuscript Report EE-34, Ottawa, Ontario, Canada.
- 8) Nakata, K., S. Sugioka & T. Hosaka 1997 Hindcast of a Japan Sea Oil Spill. *Spill Science and Technology Bulletin*. 4. No.4: 219-229.
- 9) NOAA. Shorelines Types
http://response.restoration.noaa.gov/shor_aid/shore/shore.html
- 10) 佐藤 幹夫 2001 メタンハイドレートの分布とメタン量・資源量. *海洋と生物*. 136 : 406-464.
- 11) Spaulding, M.L., & A. Chen 1994 A shell based approach to worldwide oil spill modeling. *Journal of Advanced Marine Technology conference*. 11: 127-141.
- 12) Stiver, W. & D. Mackay, 1984 Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. *Environmental Science and Technology*. 18 : 834 - 840.
- 13) 武富 義和・市原 秋男 2001 我が国の取り組み状況. *海洋と生物*. 136: 498-508.
- 14) 山口晴幸 1997 ロシアタンカー流出重油日本海沿岸を襲う *土木学会誌* 82: 28-34.