

D-4 ペルシャ湾岸の原油汚染等が海洋環境に及ぼす影響の評価に関する研究
(3) 衛星リモートセンシングによる沿岸生態系のモニタリングに関する研究

研究代表者 国立環境研究所 安岡 善文

環境庁 国立環境研究所

地球環境研究グループ

社会環境システム部

水圏環境部

熱帯林・砂漠化チーム

情報解析研究室

土壌研究室

宮崎 忠国

安岡 善文・山形 与志樹

恒川 篤史

平成4～5年度合計予算額 9,617千円
(平成5年度予算額 4,562千円)

[要旨]

イラクのクウェート侵攻にはじまった湾岸戦争は、油田からの原油の流出や火災煙の拡散によって、湾岸地域の環境に大きな影響を与えた。これらの影響はその範囲が極めて広域に及んでいるため、被害を地上での調査のみで把握することは困難であった。本研究では、人工衛星からのリモートセンシングデータを用いて、流出油や火災煙の拡散状況及びその影響範囲を計測することを目的として、人工衛星NOAA/AVHRR画像からの火災煙の拡散範囲の、またLANDSAT TM画像からの流出原油の分布計測を行った。

[キーワード] 湾岸戦争、リモートセンシング、環境モニタリング、原油、火災煙

1. 序

湾岸戦争による原油流出、油田火災はペルシャ湾岸域における海洋生物、沿岸植生等へ大きな影響を与えた。これらの環境への影響は、その範囲が広いため、従来からの地上調査による方法のみでは、影響の質、程度及び範囲を正確に評価することは難しい。本研究では、人工衛星からのリモートセンシング画像データを用いて、湾岸地域の流出油、火災煙による影響を評価することを試みた。

平成4年度は、まず、湾岸戦争前後の人工衛星データの収集、及び戦争により影響を受けた地域の土壌、植生等の分光スペクトルデータ等衛星データ解析のための基礎データの収集を行った。これらのデータを基に、衛星リモートセンシングによる湾岸域の生態影響評価の可能性について検討を行った。また、平成5年度には、人工衛星画像からの火災煙及び流出油の検出手法を開発し、その影響範囲を調べた。

2. 湾岸戦争による流出原油及び火災煙の概要

湾岸戦争は、1990年8月2日、イラクのクウェート侵攻によりはじまり、1991年2月28日、イラクの降伏により終結した。この間、イラク軍は600以上の油田に火をつけ、さらにペルシャ湾に原油を流出させた。原油流出量は1991年1月から5月までに190万バレルから1100万バレルと推定されている⁽¹⁾。一方、油田からの火災煙も、ペルシャ湾岸地域に拡散し、多量のSO₂、NO_x、SPM

等の大気汚染物質、また、すす、タールが砂漠地帯に降下した。油田火災地域では昆虫が死滅したとの報告がされている。

原油の多くはペルシャ湾北西岸の南クウェート・ミナアルアマディ近くから流出した。そのおもなものは、1991年1月20日にはじまり、1991年1月28日、同盟軍により止められた。しかし、少量の流出はその後長く続いた。流出した原油は風により流された。1991年の前半、卓越したのは北西からの風である。浮遊原油の多くは、クウェートとサウジアラビアの沿岸部にたどりつき、アブアリ諸島の南から北岸の、クウェートとサウジアラビア領内に到達した。

原油は、サウジアラビア湾岸および沖の島にたどりつき、またアブアリ島の南では原油特有の光沢がみられた。しかしその多くは陸に沈着する前に分解した。湾北部では、ミナアルアマディからサウジアラビア国境にいたるクウェートの沿岸部が、ひどく原油づけにされた。少なくとも沿岸線のうち800kmが流出原油によって油づけにされたとみられる。オイルスリック（原油特有のぬめぬめとした光沢）はおよそ2000平方キロの範囲を覆ったと報告されている。本論文の対象としたアブアリ島周辺には1991年2月14日に原油が到達している。

また、油田からの火災煙は、油田火災が全て鎮火する10月まで続き、湾岸地域の生態系に大きな影響を与えた。火災煙は、その時期の卓越風である北西の風に乗れ、クウェートから、サウジアラビアを越え、カタールまで達した。

3. NOAA AVHRR データによる火災煙の影響範囲の評価

米国の人工衛星NOAAに搭載の可視・近赤外センサAVHRRのデータを収集し、火災煙の影響範囲を調べた。AVHRRは地上の空間分解能1kmで1シーンの走査幅は約2700kmである。地上での分解能は粗いものの、1日に2回ほぼ同じ場所を撮影するため、煙の動きなど変化の早い現象を把握する上で有効である。また、湾岸全域を同時に観測できるため広域的な評価にも有効である。ここでは、流出油や火災煙による影響を評価するためにペルシャ湾岸域を撮影したほぼ晴天時のデータを戦前（1986年、1989年）、戦中（1991年）及び戦後（1992年）について計29シーン収集した。収集データは、データ相互の比較が可能となるよう幾何補正により重ね合わせた。

図1には一例として、戦時中の NOAA AVHRR 画像（1991年2月12日、火災煙による影響地域を拡大表示）を示した。図1の画像では火災煙を海及び陸から分離して強調するよう表示しているが、図中で火災煙がクウェートからサウジアラビア海岸に沿って南東に流れ、カタール南部にまで達しているのが判る。湾岸戦争の影響範囲が極めて広く、火災煙が約半年続いたことから、煙による植生等への今後の影響評価を広域的に行うことが必要なことを示している。

4. 分光スペクトルデータによる土壌、植生等への被害の影響の評価

(1) 分光スペクトルデータの収集

衛星からのリモートセンシングデータ解析のための基礎データとして、また、地上のレベルで火災煙や流出油の影響がどの程度まで計測、評価できるのかを検証するために、グラントルースデータの収集実験を行った。実験は、流出油等による被害が生じていたサウジアラビア東部の都市 ジュベイユ 及び ダーラン 周辺で行い、ポータブルスペクトロメータによる分光スペクトルデータ、土壌サンプル等を収集した（図2）。実験は1991年12月9日～12月11日にキングファハド石油鉱物資源大学（KFUPM）との共同で実施し、



図1 ペルシャ湾 NOAA AVHRR 画像（戦争中、1991年2月12日）

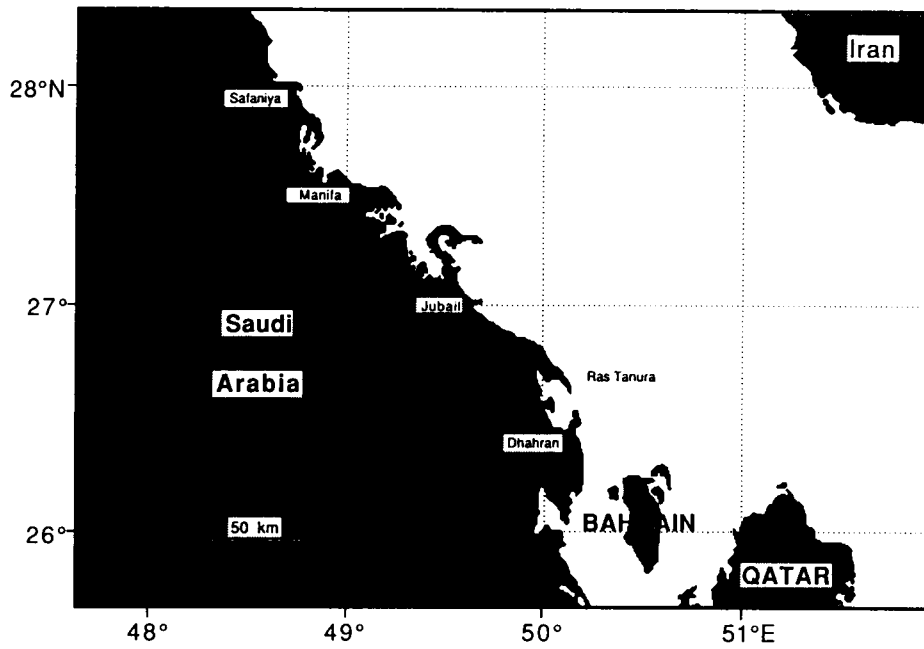


図2 グランドトルース実験フィールド（Jubail, Dhahran）

①流出油による海岸線の砂、土壌の汚染状況の評価

②火災煙による植生、砂、土壌の汚染状況の評価

を目的に、砂、土壌、植生等の分光スペクトルデータを収集した。

図3及び図4には得られた分光反射スペクトルデータの例を示す。図3は ジュベユ 周辺の海岸で得られた、(a)海岸に残っている重油(タール)、(b)油に汚染され少し黒ずんでいる砂、(c)正常な砂、の3つの分光反射スペクトルであり、それぞれ違いが明瞭に示されている。海岸の流出油による汚染状況及びその回復状況の把握は湾岸諸国の最も重要な問題となっているが、図3のデータは、リモートセンシングによる海岸砂の汚染監視の可能性を示すものといえる。また、図4は ダーラン 周辺で得られた3種類の砂漠草本の分光反射スペクトルで、やはりその違いが明瞭に示されている(但し、この違いは植生の種類の違いによるもので、火災煙の影響によるものではないと考えられる)。

(2) 植生指数による植生環境の評価

沿岸域の植生分布を調査することはペルシャ湾岸の火災煙による影響を評価する上で不可欠である。しかしながら、この地域の植生はその分布がまばらであり、例えば、1kmの分解能のNOAA AVHRRデータでは、画素全域が植生で覆われている場所はほとんどない。すなわち、各画素が砂(土壌)と植生の混合となっており、そのスペクトル特性も植生と砂の面積混合比で決まるような複合スペクトル特性となる。このような複合スペクトルから一画素中にどの程度の面積比率で植生が含まれているかを推定する問題は画素分解と呼ばれるが、本研究では、植生指数により画素分解を行う手法について検討した。

植生指数は、植生が近赤外域で高い反射率を有することを利用して(図3、4参照)、

$$NDVI = \frac{N_{NIR} - N_V}{N_{NIR} + N_V} \quad (N_{NIR}, N_V \text{ は近赤外、可視域の分光スペクトル})$$

により、地表面が植生で覆われている程度を指標化したものである。植生で覆われている程、植生指数は高くなる。ここではまず第一歩として、地上で得られたスペクトルデータから、植生や土壌が混合した画素において、複合スペクトルがどのように変化するか、またその植生指数がどのように変化するかを調べた。図5には、一例として、地上スペクトルデータに基づくシミュレーションにより植生と砂の混合の比率を0-100%の範囲で25%刻みで変化させた場合の分光反射スペクトルと植生指数の変化を示した。図5に示されるように、スペクトル、植生指数とも対象の混合比率によって、大きく変化している。図6には、1991年2月16日に観測されたLANDSAT TM植生画像のバンド3及び4(それぞれ N_V , N_{NIR} に対応)を用いて算出した正規化植生指数図を示した。対象地域内において植生指数の高い地点は砂漠内のプランテーション地域(右左下)及び沿岸域のごく一部のみであることが判る。これらの地域の植生が今後どのように変化していくか長期的な監視が必要であろう。

5. LANDSAT TMデータによる流出原油の検出

(1) 人工衛星データからの原油検出手法の比較

これまで原油の流出をリモートセンシング、とくに衛星画像により検出した研究としては、大

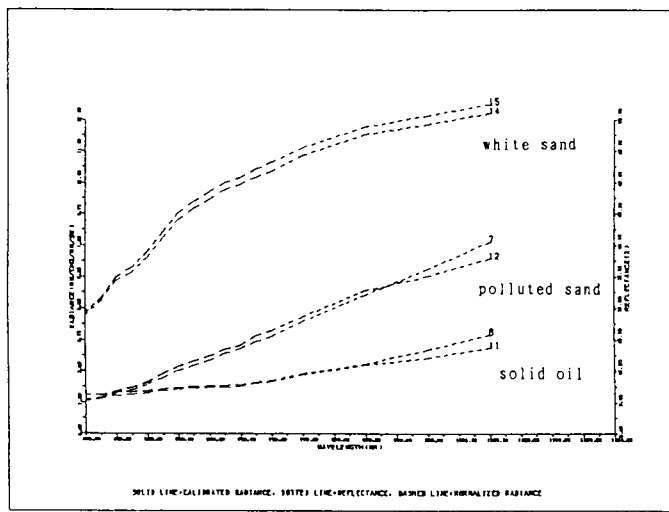


図3 分光反射スペクトルデータ例（海岸砂、Jubailで収集）

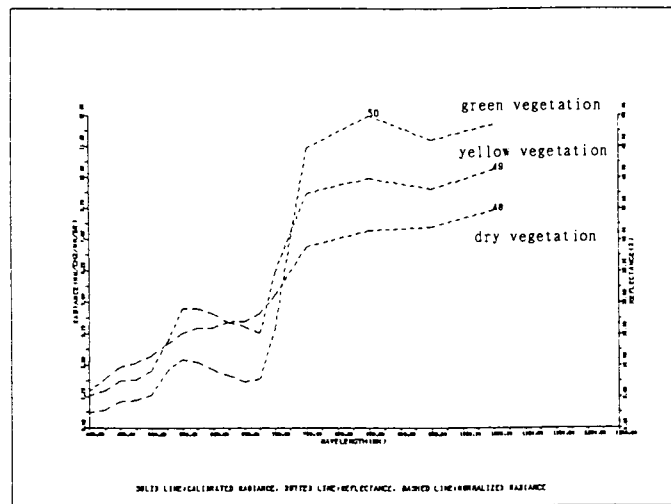
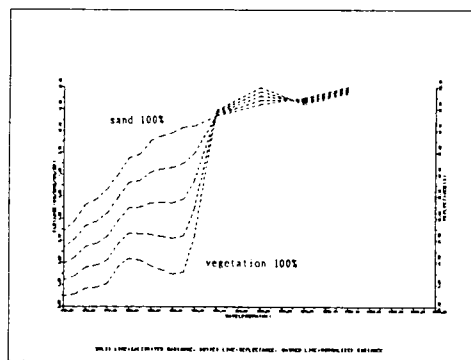


図4 分光反射スペクトルデータ例（植生、Dhahranで収集）



vege.	sand	NDVI
100%	0%	0.91
75	25	0.83
50	50	0.76
25	75	0.69
0	100	0.63

図5 植生、砂（土壌）の混合による分光反射スペクトル及び植生指数の変化

Saudi Arabia

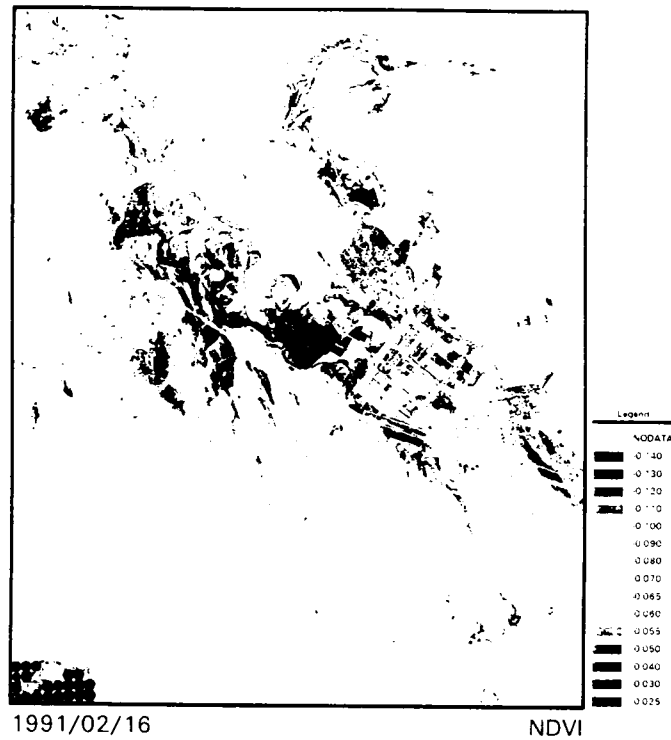


図6 LANDSAT TM画像からの植生指数図の作成(1991年2月16日)

大きく分けて熱赤外の波長を使ったものと、中間赤外の波長を使ったものがある。

熱赤外を使った研究例としては、たとえばSalisbury et al.⁽²⁾は、オイルスリックの反射特性をスペクトロメータで直接計測し、とくに熱赤外の波長でその特徴を示すことを指摘した。またLegg⁽³⁾、Cross⁽⁴⁾はともにNOAA/AVHRRの熱バンドを用いて湾岸戦争による原油流出をモニタリングしている。これらは湾岸の広い範囲を同時にとらえることができ、しかも天気さえよければ毎日のデータが得られるなどの点で効果的であった。

しかし、たとえばCrossが指摘しているように原油と水の熱特性は複雑であり、今回の湾岸戦争の原油流出の際に用いられた現象、すなわちオイルスリックが日中には周囲の水よりも熱く、夜間および早朝には逆に周辺に比べて冷たいという現象は、アラスカ湾のエクソン・バルディーズ号事件の原油流出事件の際には認められず、このときにはオイルはつねに周囲の水よりも冷たかった。このように熱赤外のバンドの利用は、効果的ではあるがその手法は普遍的なものとはなっていない。

一方、中間赤外を用いた研究例をみると、Clourisは、タールサンドの太陽反射をフィールドで計測した結果、1.5~2.2マイクロメートルに0.20以上の反射があることを示している。またStringer et al.⁽⁵⁾は、エクソン・バルディーズ号による原油流出をLANDSAT TMセンサの中間赤外帯(バンド5)を用いて検出することに成功している。

(2) 原油の検出

本研究では、熱赤外よりも手法的に普遍性が高いと思われる中間赤外域のバンド(LANDSAT TM

の場合、バンド5)を用いて、湾岸戦争による原油流出のモニタリング手法を検討した。ここで使用した LANDSAT TM データは、パス164、ロウ41の1991年2月16日および3月20日観測のデジタルデータである。この画像データは、ペルシャ湾のサウジアラビア領、ジュベユ、アブアリ湾を中心とする約180km×180kmの範囲である。本研究ではそのなかからアブアリ湾を中心とする1024×1024画素、地上でおよそ30km×30kmの範囲を切り出して処理をおこなった。

この2枚の画像から計63箇所のトレーニングエリアを抽出し、バンド1～7の平均輝度値を算出した。この結果、海上の原油は、バンド5においてきわだった反射特性があることが判明した。さらに、この特徴を強調するためにいくつかの指数をつくり比較をおこなった結果、バンド5-4を用いた正規化差指数とバンド5-1を用いた正規化差指数がもっともよく流出原油を判別した。

図7は、このふたつの正規化差指数を縦軸・横軸にとった散布図である。この図からわかるように海面では油の多い、少ないに応じて両者ともに平行な動きをすることから、どちらも流出原油のモニタリングに有効である。しかし陸域のデータについては、バンド5-4の正規化差が比較的狭い範囲に集中するのに対して、バンド5-1では範囲が大きいことがわかる。したがって、陸域をマスクしたうえで海域の油を評価するにはどちらも同じような結果が得られるが、そうでない場合にはバンド5と4の正規化差を用いた方が誤解を招きにくいといえる。

以上に述べたような特性を用いてバンド5-4の正規化差を以下のようにレベルスライスして流出油分布図を作成した(図8)。この図では、TMバンド4(近赤外)の輝度値が40以上の部分を灰色でマスクしている。この部分は両画像ともに陸域、雲、および浅海と判断された。

$$NDO I = (TM5 - TM4) / (TM5 + TM4)$$

$$CO I = (NDO I + 1.0) \times 127$$

CO I 0 ~ 140 原油のない海面

141 ~ 177 少量の原油におおわれた海面、陸域

178 ~ 255 原油におおわれた海面

(NDO IはNormarized Difference Oil Index、CO IはCaribrated Oil Indexの略)

図8において、2月の画像では、北西から流れ込んだ原油が細長く带状に広がり、アブアリ島の西部や小さな島と陸のあいだに漂着しているようすがわかる。一方3月の画像では、CO Iで178以上の部分は認められず、薄い原油が湾の内部や入り組んだ、潮の流れの比較的緩やかな部分に残っているようすがわかる。

6. まとめ

湾岸地域においては、戦争による流出原油や火災煙により広大な海岸域のどの部分が汚染されているのか、それがどのように変化しているのか、その分布を衛星データで調査することが最も期待されている。本研究では、NOAA AVHRRデータ、LANDSAT TM データ、及び地上でのグランドトルースデータから、流出油等による汚染状況を評価することを試みた。研究担当者の一人である安岡が戦争終了後(1991年12月)に現地を訪れた時点では、海上には浮遊原油は見られず、一見清浄な海面であった。また、植物の大量枯死など陸上生態系への直接的な影響は観察できなかった。しかしながら、ジュベユの海岸線にタール等の流出油の残滓が見られた他、海底には

全面に原油が沈殿した状態で、一見きれいに見える海岸も10cmほど掘ると地中に油が残っている状態であった。今後、定期的な観測により、海中、海岸の原油や沿岸の植生がどのように変化していくか、長期的な調査が必要と考えられる。

7. 本研究により得られた成果

本研究では、人工衛星データ及び地上で実測した分光スペクトルデータ等から湾岸戦争による流出油、火災煙を検出し、その影響を評価する手法を開発した。これらの手法を基に、流出油分布図、火災煙分布図を作成した。本研究により得られた成果は、今後、石油工場やタンカー事故による流出油の検出及びその被害の評価、また火災煙の検出及びその被害の評価等に利用できるものと期待される。

8. 研究発表の状況

- (1)恒川篤史(1992); 衛星リモートセンシングによる植生の解析、遺伝、vol. 46(4)、68-74.
- (2)沖一雄・島田道彦・宮武直樹・安岡善文(1993); 分光スペクトル計測に基づく水質定量モデルの検証、第19回リモートセンシングシンポジウム、17-18.
- (3)Y. Yasuoka, M. Tamura and Y. Yamagata(1994); Application of remote sensing to Environmental Monitoring (Invited Paper), Proc. of the third OWLS (Optics within Life Science) Symposium.
- (4)武内和彦・恒川篤史編(1994); 環境資源と情報システム、古今書院、pp219.

9. 参考文献

- (1)Sadiq, M., and McCain, J. C. (1993); The Gulf War Aftermath - An Environmental Tragedy, Kluwer Academic Publishers, 298pp.
- (2)Salisbury, J.W., D'Aria, D.M. and Sabins, F.F. (1993); Thermal Infrared Remote Sensing of Crude Oil Slicks, Remote Sens. Environ., 45, 225-231.
- (3)Legg, C.A. (1991); The Arabian Gulf of oil slick, January and February 1991, Int. J. Remote Sensing, 12(9), 1795-1796.
- (4)Cross, A.M. (1992); Monitoring marine oil pollution using AVHRR data: observations off the coast of Kuwait and Saudi Arabia during January 1991, Int. J. Remote Sensing, 13(4), 781-788.
- (5)Stringer, W. J., Dean, K. G., Guritz, R. M., Garbeil, H. M., Groves J. E. and Ahlnaes, K. (1992); Detection of petroleum spilled from the MV Exxon Valdez, Int. J. Remote Sensing, 13(5), 799-824.

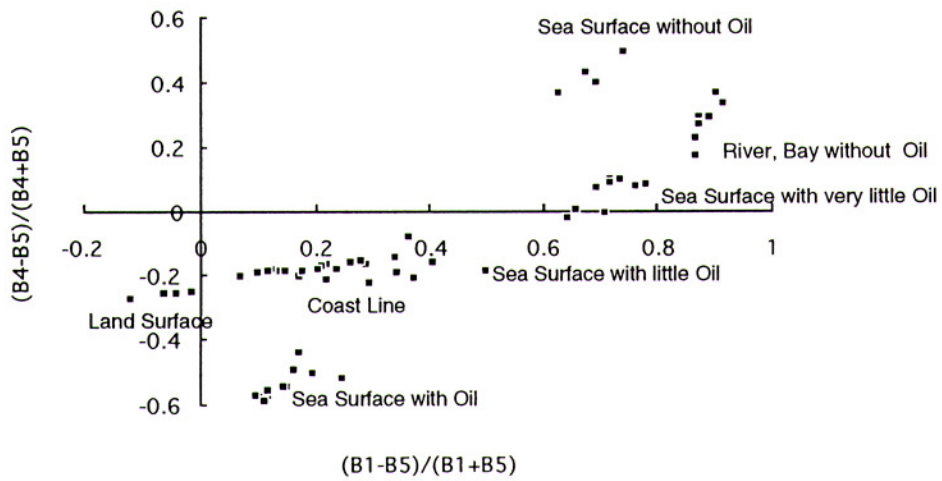
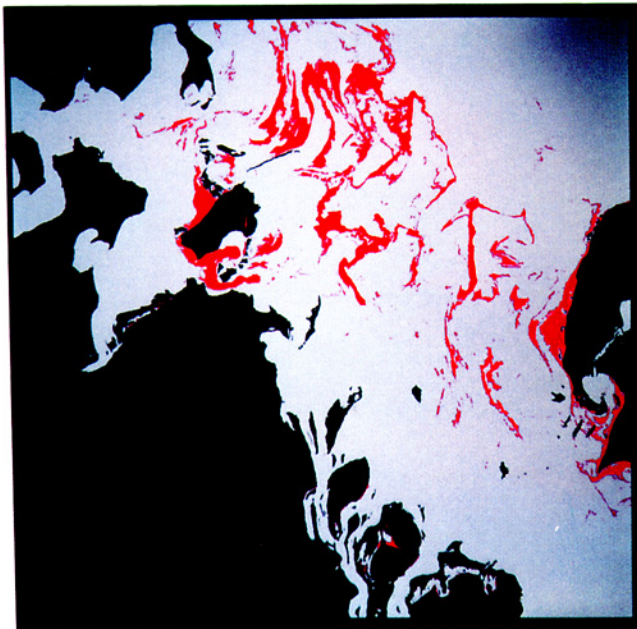


図7 原油に対するLANDSAT TMバンド間の正規化差指数散布図



原油分布推定図 (2月16日)



原油分布推定図 (3月20日)

正規化差指数 $(B5-B4)/(B5+B4)$ を3段階にレベルスライスし、
陸地についてはマスクをかけた。

図8 LANDSAT TM画像から 出された原油分布図 ((a)1991年2月16日, (b)1991年3月20日)