

海洋汚染のリモートセンシングに関する研究 — 衛星画像による汚染監視について —

山之内 博*、山岸 進*、野中 晃二**、
原口 富博**、二村 正**

Study on Remote Sensing of Marine Pollution
— Pollution Detection by Satellite Images —
by

Hiroshi YAMANOUCHI, Susumu YAMAGISHI, Koji NONAKA,
Tomihiko HARAGUCHI and Tadashi NIMURA

Abstract

Oil spill response reports were reviewed from the technical point of view. The state of the art of remote sensing was also investigated focusing on the cleaning up operation and the monitoring the marine environment.

Although there were many reports and statistics on ship accidents, causes and counter measures of the ship accidents were not sufficiently clear and effective. One of the reason is difficulties of analysis of accidents which were collision or grounding. More precise and time dependent analysis of accidents will be necessary. From statistics, major oil spills were caused by tankers and about 40 % of their causes were mis-maneuvering and about 30% were related with some defects on the maneuvering system. Therefore guide lines of the maneuvering of ships have to be reviewed and improved.

By processing satellite data, the major oil spills occurred in the Prince William Sound in Alaska and in Persian Gulf and the surface state of Tokyo Bay were analyzed. The results show that the contrast enhancement, especially, including the band 5 ($1.55\sim 1.75\mu\text{m}$) of LANDSAT is effective to distinguish the oil slick from the surrounding sea surface, and statistical analysis also provide referential data for detecting the change of the sea surface.

For further improvement of the image processing, the removal of effects of aerosol is important. The aerosol near the surface is especially influential and has to be treated more precisely. Lidar observations were effective for verifying the optical atmospheric model.

Although there are still many difficulties, the remote sensing from satellites is an attractive means of monitoring the marine pollution. Regular observation by satellites cooperated with air planes and ships is considered to be effective for detecting the change of marine environment in the early stages.

* 装備部

** 運動性能部

原稿受付 平成11年3月4日

審査済 平成11年9月8日

—目次—

1. 緒言
 - 1.1 研究の目的
 - 1.2 概要
2. タンカー安全対策の調査
 - 2.1 タンカーの航行支援対策
 - 2.2 海洋汚染検知技術
 - 2.2.1 リモートセンシング
 - 2.2.2 パッシブ検知技術
 - 2.2.3 アクティブ検知技術
 - 2.3 まとめ
3. 衛星画像
 - 3.1 画像処理システム
 - 3.2 コントラスト強調
 - 3.3 衛星画像データ
 - 3.4 エクソンバルディーズ号による油汚染
 - 3.5 湾岸戦争によるペルシャ湾油汚染
 - 3.6 東京湾データについて
 - 3.7 まとめ
4. 海面放射輝度
 - 4.1 処理データ
 - 4.2 処理方法
 - 4.3 海面放射輝度の平均値
 - 4.3.1 太陽高度の影響
 - 4.3.2 海面放射輝度の月変化
 - 4.3.3 海面放射輝度の年変化
 - 4.4 統計解析
 - 4.5 まとめ
5. 大気補正の精密化
 - 5.1 大気放射
 - 5.2 エアロゾルモデル
 - 5.3 ライダーによる大気放射輝度の測定
 - 5.4 まとめ
6. 結言
- 参考文献

1. 緒 言

1.1 研究の目的

海上輸送中の油や有害液体物質流出事故が発生した場合、海洋環境に及ぼす影響は計り知れないものがある¹⁻⁶⁾。未然に事故防止策を施すとともに、事故に際しては拡散範囲を予測し、早急に防除処置を施さねばならない。また、日本沿岸における油流出事故の発生と防除対策の記録⁵⁾からも分かるように、後をたたない小規模の流出油事故の海洋環境に及ぼす影響も留意すべきことであり、汚染の観点から見た不断の環境監視とデータの蓄積が必要である。

本研究では、タンカー事故に関する調査報告を調べ、未然に事故を防止するための安全対策とそれでも生ず

る事故への汚染防除対策の問題点を抽出した。次いで、急速な進歩を遂げつつある衛星画像を用いた汚染監視について、その可能性と高度化のための調査・研究を行った。

1.2 概 要

本報告は、「タンカー安全対策環境保全総合調査研究」環境保全総合調査研究促進費（平成5年度）、「海洋汚染物質のリモートセンシングに関する研究」（平成5年度～7年度）に関する総合報告である。

事故調査結果を事故防止へ結びつけるためには衝突・座礁事故に至るまでの複数要因の時系列的考察が重要であり、この解析方法を十分検討することが必要である。また、汚染監視には万能なセンサーはなく、複数のセンサーを組み合わせて用いることが必要である。事故状況の敏速な把握が第一であるが、汚染及びその処理が環境へ及ぼす影響を長期的に追跡評価することも欠かせない。

衛星画像の研究では、画像処理のプログラムを作成し、大規模汚染の画像抽出を行った。高度化のためには大気補正、特に対流圏下層のモデル化が重要であり、ライダーを用いた大気モデルの検証を提案し、実験で有効性を示した。しかし、エアロゾル（大気に浮遊する微粒子）の水平方向に変化がある場合の補正は、既存のモデルを使った手法では非常に困難である。

このように、衛星画像による汚染監視について未だ多くの課題はあるが、広域汚染監視には極めて有効な手段で、定期的に航空機や船舶と協調して観測を行い、衛星画像データを集積し、海洋環境変化の早期発見に努めることが有効な方策と考えられる。

第1章は、研究の目的と概要を述べ、第2章では、タンカーの安全に関する文献調査を行い、問題点を示した。また、汚染監視についてリモートセンシング技術を、パッシブ及びアクティブ技術に分類して各々の可能性を述べた。第3章以降は、衛星画像の海洋汚染検知への利用についての研究である。画像処理プログラムを作成し、代表的な大規模汚染の画像を示した。第4章は、太陽高度、海色変化等比較の基礎データを整理し、衛星画像による微弱な海洋汚染検知の可能性について検討した。第5章は、衛星画像の大気補正に用いられている代表的なLOWTRAN大気モデルの導入と地上設置ライダーを用いたモデル検証法について検討した。第6章は、以上をまとめ、結言とした。

2. タンカー安全対策の調査

2.1 タンカーの航行支援対策

1992年12月のスペイン沖で発生したタンカー座礁事故に引き続き、1993年1月にはシェトランド諸島沖の大規模な油流出事故とスマトラ北方沖合いのタンカー

衝突事故が相次いで発生した。これらの事故のうち、スマトラ北方沖合いタンカー衝突事故は、わが国への原油輸送中に発生したものである。過去にも多くのタンカー事故は発生しているが、日本のシーレーンにおける2万トン以上の油流出を起こした大規模なタンカー事故はこれが初めてであり、国内ではタンカー輸送の安全対策及び流出油対策の重要性に関する認識を新たにした。また、国際的にも、沿岸国に流出油が漂着する可能性のあるタンカー事故が頻発している状況を受け、対策を講じなければならないとの声が高まった。

このような、国内外の情勢を受け、1994年運輸省は、

- ① O S P A R (Oil Spill Preparedness And Response) の計画の繰り上げ実施、
 - ② O P R C (Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation) 条約の早期批准、
 - ③ I M O (International Maritime Organization) に対する既存タンカー対策の提案、
 - ④ 油汚染対策技術の開発促進、
- を対策として打ち出した。

①、②の計画及び条約については、1994年中に完了及び批准を決定した。1994年以降、わが国がこれらの国際約束を果たしていくためには、単にオイルフェンス等機材の準備を整えるだけではなく、これらを活用する方策があつて初めて、有効な油流出対策を講じることができる。また、船については、今般の事故を契機に、既存タンカーに対しては、二重船殻化に限らず、抜本的な事故防止対策を可能な限り早期に検討すべきとの声が加盟国間で高まり、電子海図の採用、新形式タンカーの研究等加盟国に対して説得力のある対策を打ち出すことが必要である。

このためには、まず第一に一連の事故における問題点を正確に把握する必要があることから、大型タンカーの海難事故防止に関連した調査・研究の概要を把握するため主として文献による調査を行った。

海難事故の調査に関しては、ロイド等の海難情報資料に基づく、事故の船種別発生件数、衝突・座礁・火災等の種類別発生割合、タンカー船主協会等による油流出事故の統計資料等、多数の調査結果が発表されている。しかしながら、どうしてそのような事故が起きたのか、そのような事故を防止するにはどうすればよいのか、という事については必ずしも調査研究は十分に進んでいないようである。海難事故の多くは、特に衝突・座礁事故では、複数の要因が重なり関連し合っており、きめ細かな事故防止対策の研究には、互いに干渉しながら変化してゆく複数の要因の時系列的考察による定量的な分析評価という面からの研究強化が望まれる。

船舶の海難事故において、油流出は当然の事ながらタンカー事故によるものが最も多い。そのタンカー事故において、衝突・座礁事故がロイドの海難資料に基

づく解析では約4割を占めている。タンカー事故における衝突・座礁の事故原因としては、1万トン以上のタンカー事故についてのアメリカ沿岸警備隊の調査では、40%近くが操船者のミス、約30%がその船の操縦性能に関係した事故であると分析されている。日本造船研究協会RR742委員会における大型船の海難事故調査においても、荒天時の衝突・乗揚事故の約半分に操縦性能が関係していると報告されている。これらの調査結果は衝突・座礁事故を少なくするには、操船者のミスを少なくすること及び操船性能の劣る船を少なくすることの必要性を示している。操船者のミスを少なくするには、操船支援設備等を充実させる他に、操船者に自船の操縦性能をよく知ってもらうことが重要である。

国際海事機関(IMO)における海難事故を少なくするための船舶の操縦性能に関する審議もこの2点から進められた。一つは、操船者に自船の操縦性能をよく知ってもらうための「操船ブックレット」の整備であり、もう一つは、操縦性能の劣悪な船を無くするための「操縦性能暫定基準」の策定であった。ただし、この基準は必ずしも十分な技術的検討を経て策定されたものではないため、今後見直しが予定されている。

当所でも海難防止を進めるためのIMOのこの動きに対応し、暫定基準見直し用の技術資料を作成するため、平成7年度より指定研究「IMO操縦性能基準の改正案に関する調査研究」を開始し、さらに平成9年度からは基準見直しのための技術資料作成に加えて、基準が国内規則として施行された場合に対応できる技術を開発するため、特別研究「船舶の操縦性能評価技術に関する研究」を開始した。

汚染防除に関しては、情報収集、回収技術、環境への影響評価に関する研究開発が必要であり、また、これらを統合するマネジメントが非常に重要であることが各報告で指摘されている。このうち汚染監視技術については、技術開発が急速に進展しており直ちに調査研究を開始した。

2.2 海洋汚染検知技術

2.2.1 リモートセンシング

相次ぐ油流出事故の防除対策の反省として、防除作業には刻々と変化する状況を的確に把握することが非常に重要であることが指摘されている。油汚染監視には、これまで観測船や係留ブイが主として用いられてきたが、時間空間的に変動する広大な海洋の環境状況を的確に把握するには十分ではない。そのためリモートセンシング技術で、広域をカバーして情報を得る試みが重ねられてきた⁸⁾。

一般にリモートセンシングと呼ばれているものは、光あるいはマイクロ波など電磁波を用いて遠隔から機器観測することであり、光学写真、赤外、可視光スペ

クトルスキャナー画像、レーダ等が用いられていた。航空写真による探査の歴史は古く、ライト兄弟の初飛行1902年から11年後1913年にはリビアの油田地帯の地質探査に使われていた。1960年代に至り、TIROSに始まりESSAシリーズの衛星搭載のセンサーにより宇宙からの驚異的画像情報がもたらされるようになった。1970年代にはLANDSAT衛星の画像情報が一般にも解放されるようになったためこの画像の活用が急速に広がり、検知技術と利用分野の開拓が進歩し、資源探査、地球規模の大気、生体系など各方面で成果を挙げている。陸域に比べて利用が遅れていた海洋観測も技術的進歩につれて情報の質も向上し、海洋物理学や水産関係の利用も盛んになった。海洋汚染監視にとっても非常に有効な手段になりつつある。欧米においては、衛星画像に限らず各種のリモートセンシング技術が防除体制の重要な部分として研究開発されてきた^{14, 21-23)}。

一般的に、海洋汚染検知センサーには次のことが要求されている。

- * 広域探査
- * 高分解能画像（詳細な形状と位置）
- * 速報性（実時間画像情報）
- * 随時観測（機動性も含む）
- * 夜間観測（昼夜を問わない）
- * 液体成分識別（変質状況も含む）
- * 気体成分識別（危険な気体成分）
- * 水面下の情報
- * 全天候型
- * 経済性

海洋汚染検知技術は、油流出の早期発見、流出源の特定、油の拡散の監視とその予測に不可欠であるとともに事故処理後の環境変化の追跡評価にも必要となる。

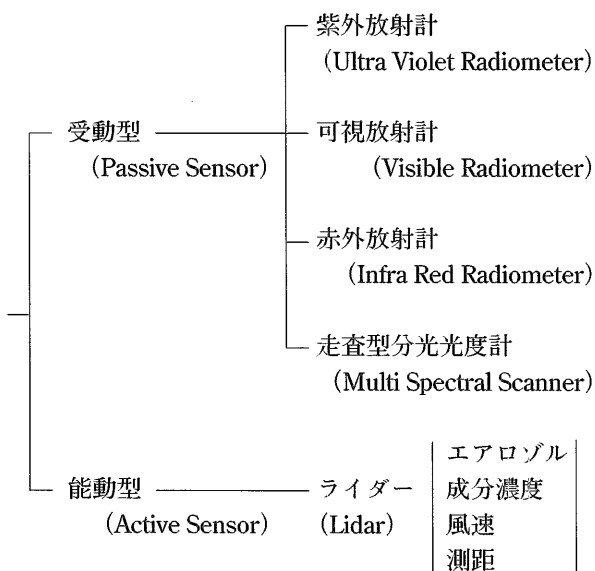


表 2—1 光学リモートセンサー

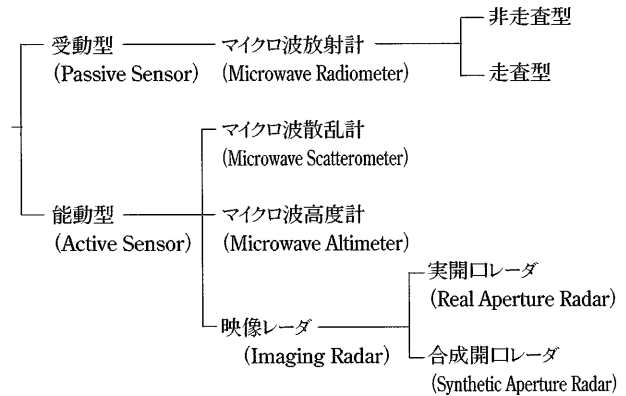


表 2—2 マイクロ波リモートセンサー

センサーは受動型と能動型に分類される。受動型は、太陽光の反射や散乱、あるいは目標物から放射される赤外線やマイクロ波を検知するもので古くから実用化されており、比較的小型である。能動型は、ターゲットに向かってマイクロ波やレーザ光を発射して、返ってくる信号を受信するもので、太陽光に影響されることが少ないが、一般的に装置は大型になる場合が多い。

2.2.2 パッシブ検知技術

リモートセンシングに用いられる電磁波を波長で分類すると、図 2—1 のようにそれぞれ特徴を持った帯域があり、多方面で活用されている。⁸⁾

電磁波の放射のスペクトル特性は黒体放射の輝度を与える Planck の関数 $B_\lambda(T)$ で表され、波長に対して次のように書ける。

$$\text{Eq. 2-1 } B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/kT} - 1)}$$

ここで、 $h=6.6262 \times 10^{-34} \text{Js}$ は Planck 定数、 $k=1.3806 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$ は Boltzmann 定数であり、 λ は波長、 T は温度、 c は光速である。

放射束密度（放射発度）は黒体温度によって決まり、Stefan-Boltzmann の法則により与えられる。

$$\text{Eq. 2-2 } W = \epsilon \sigma T^4$$

ここで、 $\sigma = 2\pi^5 k^4 / (15c^2 h^2) = 5.6698 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ が Stefan-Boltzmann 定数と呼ばれるものである。 ϵ は射出率を示す。

また、最大輝度の波長はその温度に反比例し、Wien の変位則で与えられる。

$$\text{Eq. 2-3 } \lambda_{\max} T = K$$

λ を cm で表す時 $K = 0.2897$ である。

赤外線やマイクロ波放射計は、上の原理を基にして油膜と水面の放射温度差を検知するものである。図 2

—2と図2—3は地表で観測される太陽のスペクトル放射束密度 (放射発度)、地表からの放射を衛星で観測した場合を示す。

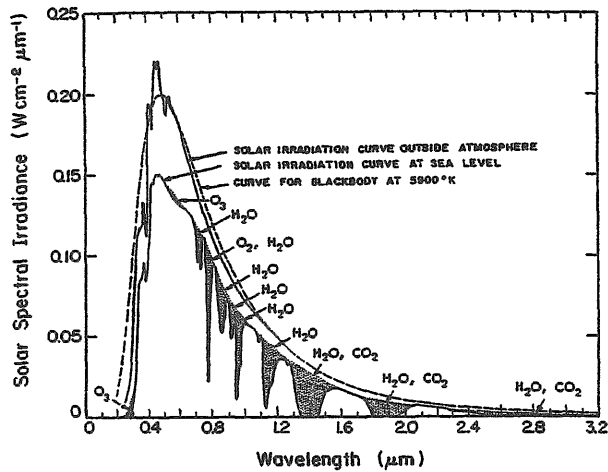


図 2—2

地表で観測された直達太陽光スペクトル放射束密度⁹⁾

図中の滑らかな曲線は、260、280、300K の黒体からのスペクトル放射輝度の計算値を示す。また、図2—4には海水の光透過度を示す。海表面に到達した光の一部は海水中に透過して吸収され、海面のアルベドが小さいため放射輝度は非常に小さくなる。アルベドは入射フラックスに対する反射フラックスの割合と定義されるが、条件 (入射角分布、波長等) によって大きく影響を受ける。

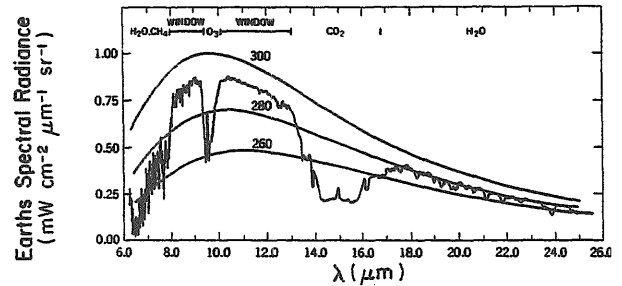
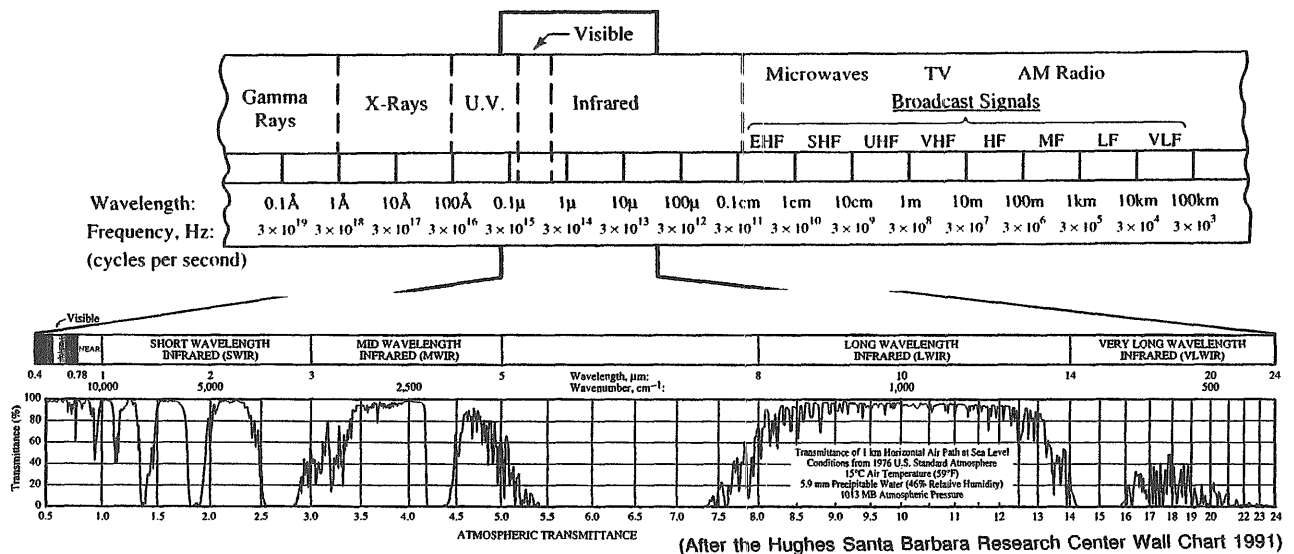


図 2—3

衛星から観測された地表面のスペクトル放射輝度¹⁰⁾



マイクロ波バンド名と波長

バンド名	周波数 (MHZ)	波長 (cm)
P	220 - 390	133 - 77
L	390 - 1550	77 - 19
S	1550 - 5200	19 - 5.8
C	3900 - 6200	7.7 - 4.8
X	5200 - 10900	5.8 - 2.7
K	10900 - 36000	2.7 - 0.83

図 2—1 電磁波のスペクトル⁸⁾

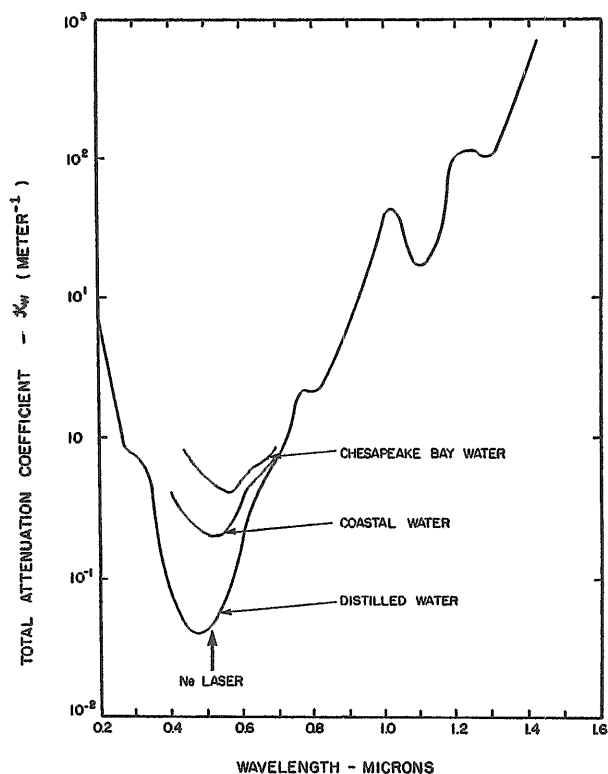


図 2—4 海水の光透過度¹¹⁾

(1) 可視・紫外カメラ、スキャナー

可視光領域では、光学機器が発達しており解像度の高いカラー観測が比較的容易にできる。写真、RBV (Return Beam Vidicon)、MSS (Multi Spectral Scanner) による記録・伝送が行われてきた。さらに CCD (Charged Coupled Device) 素子による画像の高分解能デジタルデータ化が非常に小型な高密度素子でできるようになってきた。

可視領域波長を用いて油膜を識別するには、油膜が水より強い反射¹²⁾ (放射率 水 0.4, 油 0.6) を示す性質を用いる。重油、ムース化油、軽質油膜は、各々特徴ある吸収帯を持っており、色調や照り具合が異なって見える。この場合、ブリュスター角 (Brewster Angle) を利用できると、偏光板で表面画像コントラストが一層向上する。しかし、油膜と水面との識別は間接的なもので、太陽の照り具合や、湧昇流、風浪の状況により誤認することが多く、沿岸域では海草などと油の識別は困難である。

紫外域でも同様な手法で油膜を識別することができる。このうち UVLS (Ultra Violet Line Scanner) は、スキャナーで紫外光の画像を作るもので、油膜の検知能力は $0.01 \mu\text{m}$ が限界と言われている。紫外線は大気による減衰が大きく気象条件が悪いと使えない。

(2) 赤外放射計

油の放射温度が海水と異なることから、油膜を判別するもので、検知には、 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ の波長がよく使わ

れる。通常、厚い油膜は強い放射源として映るが、油膜が薄いと水面と区別することはできない。また、中間的な厚さ ($50 \sim 150 \mu\text{m}$) の方が周囲の水面より暗く写ることも報告されている。この理由は蒸発による温度低下、水蒸気による吸収など挙げられているが未だ十分解明されていない¹³⁾。IRLS (Infra Red Line Scanner) は、スキャナーで赤外画像を作るもので、油膜 $1 \mu\text{m}$ 程度が検出限界とされている。

吸収や反射の油膜画像への影響が紫外域と赤外域では異なることから、これらを総合して、判断することが有効である。夜でも観測可能だが、雨や霧の中では減衰が大きくてうまくいかない。

(3) マイクロ波放射計

物体から放射されるマイクロ波から物体の放射輝度を測定するものである。物質の放射率が分かっているれば、物体の温度が求まる。また、放射率の異なる物質を識別できる。走査型マイクロ波放射計は $5 \sim 34\text{GHz}$ のマイクロ波で放射画像を作る。より高周波 (90GHz) を使って、油膜厚さを測る実験も行われている。油は海水中に放出されると短時間でエマルジョン化するが、エマルジョンは多様な形態をとり、放射率も変わるため測定は難しくなる。

2.2.3 アクティブ検知技術

(1) マイクロ波散乱計

目標海域に向けてマイクロ波を放射して、その反射を測定すると、海面の凹凸の度合いで反射波の強度が変化する。油膜は風浪が立ちにくいことから水面と識別することができ、光学センサーと同様な広い範囲の情報が得られる。

(2) マイクロ波レーダ

上述と同様な原理を用いて航空機搭載の高解像度のレーダ画像から油膜を識別することができる。サイドルッキングレーダ (SLAR: Side Looking Aperture Radar) によれば一連の広域観測ができる。さらに解像度の高い合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) があり、衛星に搭載され、地上分解能 30m の観測が可能である^{30, 31)}。SAR はマイクロ波レーダのアンテナが移動することを利用して、実質的に巨大な口径の高分解能アンテナと同等の効果をj得るようにしたもので、合成開口とパルス圧縮技術により通常のレーダに比べて格段に高い分解能が得られるという優れた特長を持つ。マイクロ波は雲や霧などの影響を受けにくい点が他の光学装置に比べて優れている。しかし、油膜の識別は間接的なものであり、風や湧昇流などの画像と誤認する場合が多く、表面波の解釈にはシートルース実験 (海面における比較検証データの収集) が必要となる。

(3) ライダー

ライダー (LIDAR: Light Detection And Ranging またはレーザレーダ) は、レーザ光を発射して、光と

物質との相互作用によって発生する散乱光などを分析することによって、光路に沿った濃度分布を計測するものである¹⁵⁾。この手法によれば、直接的な成分識別ができ、事故時に発生した気体成分を識別して、爆発等の危険域の判定に用いることも可能である。レーザー誘起蛍光を用いたライダーは、蛍光寿命が物質固有であることを用いて成分の同定や油膜の厚さ測定を行うものである。クロロフィル分布、油膜検知などの研究が行われているが¹⁵⁾、レーザー装置が大型なため汚染防除の現場に使用されることはほとんど無かった。しかし、半導体レーザー等の発達により、機器の小型化が進むと現場でも活用されるようになるであろう。



Lidar specification

Laser

Type	Nd : YAG
Wavelength	532,1064nm
Output	140mJ
Repetition	1 ~ 14Hz
Pulse Width	6 ~ 9 nsec

Transient Recorder

Type	TR8818/2012F
Sampling	100/20MHz
Accuracy	8 /12bit
Sensitivity	0.25/ 2 V F.S.

Scanning

Range	Az : 40~100, 260~320deg El : -20~80, 90deg
Resolution	< 0.1 mrad
Accuracy	< 0.4 mrad
Velocity	5 deg/sec
Output	BCD 5 Digit

図 2—5 ライダー⁴⁰⁾

2.3 まとめ

自然光源を利用するパッシブ検知は、特にCCD等の光電素子の発達により一層小型化し、解像度の良い画像が得られる。汚染検知においても基本的観測装置と

して欠くことのできないものである。衛星搭載の可視・赤外画像は、大規模油汚染を明瞭に画像化できるが、微弱な汚染検出は困難である。しかし、より高度な多波長センサーで詳細なスペクトルを観測できる海洋観測衛星の運用が進んでおり、詳細なスペクトルとともに空間分解能の高い画像が利用できれば汚染検知への貢献も増すと考えられる。

アクティブ検知は、人工的な光源を用いるため装置は複雑となるが、日照など自然条件に影響されることが少ない。成分識別、油膜厚さなど、これまで困難であったことも測定可能になると期待される。また、汚染防除現場では、小型飛行機、ヘリコプター、船などにも搭載できる機動性に富んだ計器が要求されている。技術的進歩は、これらの課題にも応える事が可能となってきた。

監視システムとしては、複数の補完し合う検知装置を航空機や衛星に搭載して、短時間に広域をカバーするように構成し、得られた情報を統合化し、画像情報として必要な機関へ迅速に送信できるようなネットワーク化を図る必要がある。

野外観測において可視と近赤外波長域では、天候の影響を受け易い。特にアルベドの小さい海洋観測では、エアロゾルの影響や表面の光学的効果を評価することが重要であり、

- 1) 海水の光学的特性に関する研究
 - 2) 海中、海面直上における放射輝度に関する研究
 - 3) 海面射出光の大気中での放射伝達に関する研究
- などの研究を十分行わなければならない。

3. 衛星画像

前章で述べたセンサーの多くは、衛星に搭載されて、広域探査に活用されている^{16,17,18)}。特に、NIMBUS-7に搭載されたCZCS (Coastal Zone Color Scanner)²⁵⁾は沿岸海色の画期的な画像情報をもたらした。この運用が終了した後は海洋を対象とした衛星は無くLANDSAT、SPOT等の画像が代用された。本章では衛星画像を用いた海洋汚染検知への可能性を検討する。

3.1 画像処理システム

デジタル衛星画像データは、CCT (Computer Compatible Tape)、フロッピーディスク、専用の光磁気ディスク、CD (Compact Disk)等の形でユーザに提供される。フロッピーディスクはデータの容量が比較的小さい。これら処理するために、PC (Personal Computer)とEWS (Engineering Work Station)を用いた⁴²⁾。システムは、パソコン本体 (PC-98RA)、光磁気ディスク (512Mバイト : 64Mバイト4ドライブ×2台)、マウス、ハイパーフレーム (R、G、B各8ビット : 640×400ピクセル)、拡張ラムディスク (容

量 4 Mバイト) 等により構成されている。

また、EWSはIBM パワーステーション 320を使用した。衛星画像データを取り扱うために1.1 GB (ギガバイト) の記録容量の光磁気ディスク (片面の記録容量、約573MB)、ディスプレイ画面の表示ドット (ピクセル) 数は1280×1024、R (赤)、G (緑)、B (青) に割り付ける各表示データ精度は8ビット (256階調) のフルカラー表示、メインメモリ80MBである。LANDSAT TM (Thematic Mapper) データはフルシーンデータ (185 Km 範囲) をCCT (記録密度 6250 bpi) で購入し、計算機センターから研究室の光磁気ディスクへ転送し、その後の処理を行った。TM 1 シーンは7バンドで約300MBの容量であり、1シーン分の衛星データを片面の光磁気ディスクに記録し、各シーン毎に光磁気ディスクを交換してその後の処理を行った。

3.2 コントラスト強調

目的とする画像を鮮明化するために、ある輝度範囲のデータに注目し、この範囲の最大・最小値をデータの上限と下限に割り当て差を拡大表示するとコントラストが強調される。以下はプログラムの流れである^{43,44)}。

- ① 全データについて輝度値とその頻度を表すヒストグラムを作成する。
- ② 作成したヒストグラムデータをもとにして、目的海域を画像表示するために上限と下限の閾値を決める。一般的に海域データの輝度値は陸域に比べて小さいので、陸域のデータはここで指定する上限の値より大きな値の部分が大きく、陸域の情報が画面に表示されたときには最大輝度値として表示される。画像表示のための変換は、各バンド毎のヒストグラムから決定した上限 (U) と下限 (L) の閾値を使用して、次式で計算する。
表示輝度値 = $(i - L) / (U - L) \times 255$
表示輝度値が負の場合、表示輝度値は0とする。
- ③ バンド毎のヒストグラムをもとにして決められた閾値を使用して、3つのバンドを用いて1シーン全体の画像を表示する。この時、表示のために使用する画像データは、等間隔にデータをサンプリングして行う。
- ④ 全体画像の中から、マウスを用いて任意の調べたい領域を指定し、目的の海域を画面に再表示する。
- ⑤ 表示された画面の中で調べたい領域をマウスで指定し、指定した領域についての観測輝度値の分布状態をグラフ表示して、バンド毎の分布の違いを調べる。

3.3 衛星画像データ

画像データのリストを表3-1に示す。比較的容易に入手できる衛星データとしては、LANDSAT (ランドサット)、SPOT (スポット)、MOS-1、1b (もも)、

ERS、JERS-1 等がある。これらのデータの多くは可視から、赤外線波長領域を幾つかの波長帯域 (バンド) に分けて、それぞれの波長帯域での放射輝度が記録されている。ここでは主に可視と近赤外線波長領域のセンサーで観測されたデータについて、センサー毎に観測輝度の頻度を示すヒストグラムを作り、各センサーで観測された画像例を示し、どの程度汚染を明瞭化できるかを見る。

衛星名	最初の衛星打ち上げ年又は運用期間	センサー名	観測幅 (Km)	バンド名	観測波長 (μm)	地上分解能 (m)
LANDSAT-1,2,3,4,5	1972	MSS	185	4	0.5~0.6	80
				5	0.6~0.7	80
				6	0.7~0.8	80
				7	0.8~1.1	80
		TM	185	1	0.45~0.52	30
				2	0.52~0.60	30
				3	0.63~0.69	30
				4	0.76~0.90	30
				5	1.55~1.75	30
				6	10.4~12.5	120
				7	2.08~2.35	30
		OPS (VNIR)	75	1	0.52~0.60	18
				2	0.63~0.69	18
				3	0.76~0.86	18
				4	0.76~0.86	前方視(18)
		OPS (SWIR)	75	5	1.60~1.71	18
				6	2.01~2.12	18
				7	2.13~2.15	18
				8	2.27~2.40	18
MOS-1,1b	1987/2/19-1996/4/19	MESSR	185	1	0.51~0.59	50
				2	0.61~0.69	50
				3	0.72~0.80	50
				4	0.80~1.10	50
		VTIR	900	1	0.5~0.7	900
				2	6.0~7.0	2700
				3	10.5~11.5	2700
				4	11.5~12.5	2700
		MSR	317		23.8±0.2GHz	32000
					0.25GHz	32000
		HRV/XS	117	1	0.50~0.59	20
				2	0.61~0.68	20
				3	0.79~0.89	20
				4	1.55~1.75	20
ERS-1,2	1991/9	SAR	100		5.3GHz(C-band), VV	30
RADARSAT	1995/11	SAR	50~500		Cバンド(波長5.6cm)	10~100
IRS-1C,1D	1995/11	PAN	63~70		0.50~0.75	5.2~5.8
ADEOS	1996/8/17-1997/6/30	OCTS	1400	2	0.52~0.59	21~23
				3	0.62~0.68	21~23
				4	0.77~0.86	21~23
				5	1.55~1.70	63~70
					0.402~0.422	700
					0.433~0.453	
					0.479~0.501	
					0.511~0.529	
					0.555~0.575	
					0.660~0.680	
					0.745~0.785	
					0.845~0.885	
					3.55~3.88	
					8.25~8.80	
					10.3~11.4	
					11.4~12.5	
		AVNIR	80		0.42~0.50	16
					0.52~0.60	16
					0.61~0.69	16
					0.76~0.89	16
					0.52~0.69	8
		AVNIR(Pa)	80			

表 3-1 衛星と搭載センサー一覧

- LANDSATデータ：打ち上げ時1972年にはERTS (Earth Resources Technology Satellite) と呼ばれていたが1975年LANDSATと改名された。米国によりこれまでに5個打ち上げられている。観測装置としては、初期にはRBV (Return Beam Vidicon camera) と MSS (Multi Spectral Scanner) が使用されていた。その後地上空間分解能が79mで、4つの波長帯域での放射強度を検出する多重スペクトル走査計 (MSS: Multi Spectral Scanner) と、MSSの改良型の多重スペクトル走査計で、可視、近赤外領域での地上空間分解能が30mのセマティックマップパー (TM: Thematic Mapper) と呼ばれる観測装置が使用されている。TMセンサーは、10 μ m帯の赤外線帯域を1バンド含む7つのバンドで構成されている。図3-1はExxon Valdez 流出事故後のPrince William Sound の画面であるが、各バンドの特徴が示されている。
 - SPOTデータ：フランスの衛星で、1986年から1998年までに1号から4号までが打ち上げられた。センサーを斜め方向に向けた観測もできる点が特長の一つである。パンクロマチックモードとマルチスペクトルモードでのデータを提供している。
 - MOSデータ：海洋観測衛星 (Marine Observation Satellite) として宇宙開発事業団により打ち上げられた、日本初の地球観測の海洋観測衛星である。もも1号、1号bと名付けられた。
 - JERS1データ：宇宙開発事業団により、地球の全陸域を観測し、資源探査を主目的に国土調査、農林漁業、環境保全、防災、沿岸監視等の観測を行う地球観測衛星で、1992年に打ち上げられた。高性能の合成開口レーダ (SAR) と光学センサー (OPS) を搭載している。ADEOS は地球グローバル環境観測衛星として1996年に打ち上げられたが、太陽電池の不具合で1997年機能を停止した。
 - ERS衛星データ：The European Space Agency のヨーロッパリモートセンシング衛星1号は1991年、次いで1995年2号が打ち上げられた。RADARSAT はカナダ初の衛星である。
- その他にインドの衛星 (LISS-III) が高分解能の画像を提供している。EOS (Earth Observing System) 軌道ステーションからのデータも利用できるようになってきた。

3.4 エクソンバルディーズ号による油汚染^{1, 2)}

1989年3月24日にアラスカ湾Prince William海峡において、約200,000 klの原油を積載したエクソン・バルディーズ号が流氷群を避けるために、航路から外れ、暗礁に乗り上げ、その一部約42,000klの原油を流出し、1,000km以上に渡って拡散し、著しい環境破壊を招いた。この事故から2週間経過した4月7日に、

LANDSAT衛星で観測された原油の拡散状況がEOSAT (Earth Observation Satellite Company) で受信されていた³⁰⁾。このCCTを購入し、処理を試みた⁴²⁾。シーンは、LANDSAT 4号により4月7日に観測されたPath 67、Row18に相当するTMのデータである。1シーンは7つのバンドで構成されているが、購入したCCTは1,600bpiの記録密度であったため、各々のバンドについて1シーンを4分割したサブシーンのファイルで成り立つために、28個のイメージファイル (1ファイルは、13Mバイト弱の大きさである。) について転送を行う必要があった。所内のLAN (10Base-5) を経由したパソコンと汎用計算機間のファイル転送スピードは、約15Kバイト/秒で1ファイルの転送に約15分が必要である。この転送速度には、主に光磁気ディスクの書き込み速度が制限となっていると考えられる。

解析手順は、まず3.2節のコントラスト強調処理を行う。すなわち、各バンドについて一定間隔でデータをサンプリングし、圧縮した全体画面を作成し (図3-2)、これと同時に、全体のデータについて、輝度分布のヒストグラムデータを作成する (図3-3)。バンド6は温度情報を持ち、他のバンド情報とは幾分異なる。一般的に輝度値の低い側にあるピークが海面からの情報を含み、それより高い輝度値の領域に陸域からの情報が含まれている。図3-4 に示すように画像の表示のための下限と上限を指定することによって、表示の色を割り当てた。

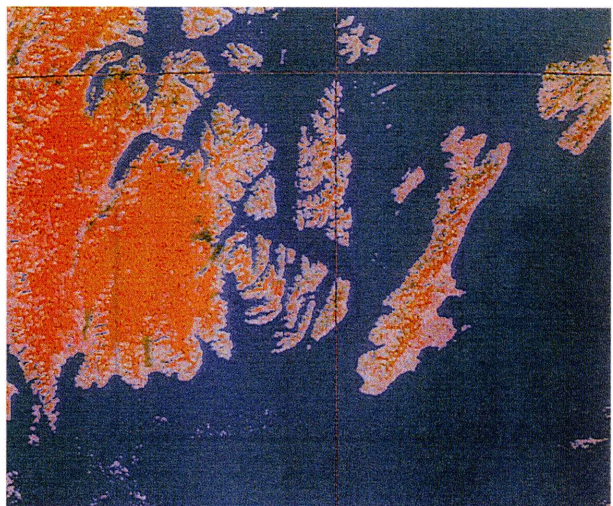
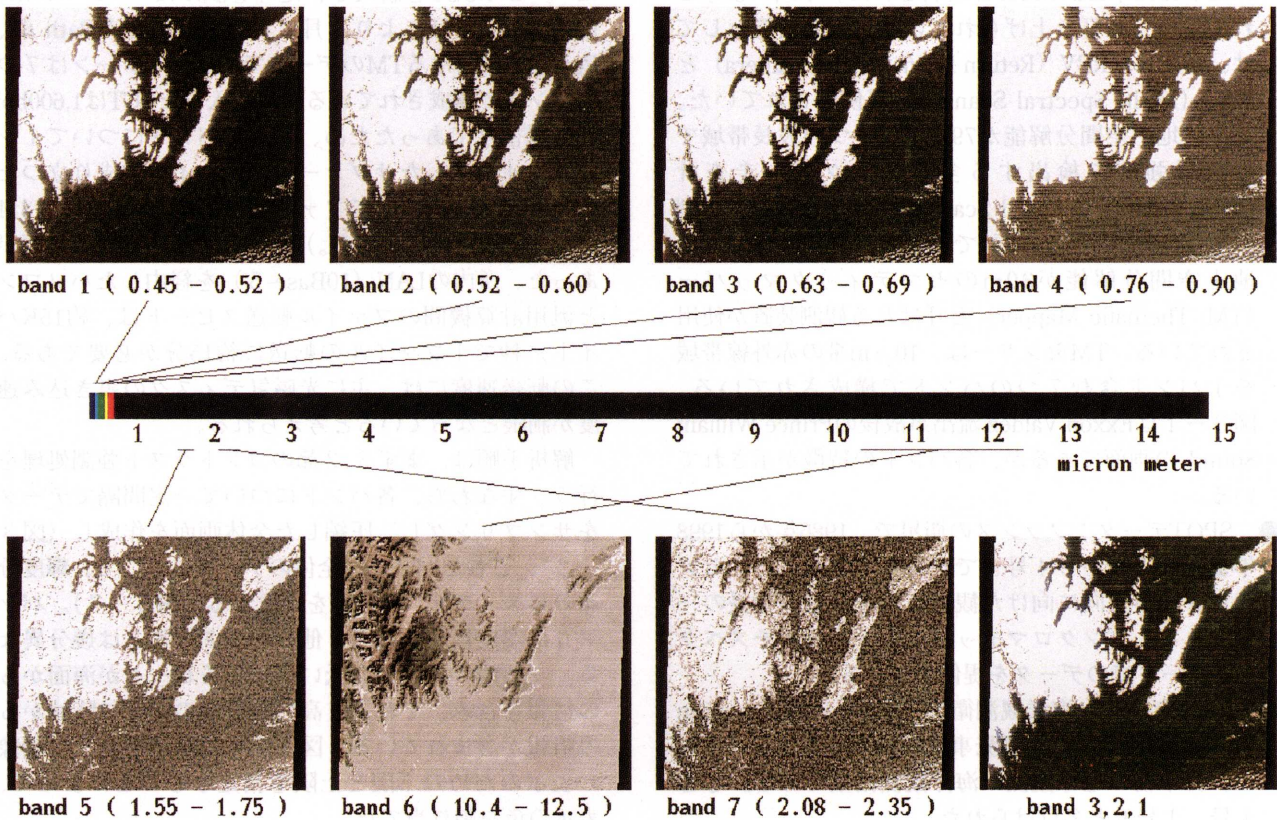


図3-2 全体画面(バンド5,2,1) (Prince William Sound)

LANDSAT THEMATIC MAPPER (TM) DATA



LANDSAT- 4 DATE:19890407

図 3—1 LANDSAT TMによるバンド毎の画像 (Prince William Sound)

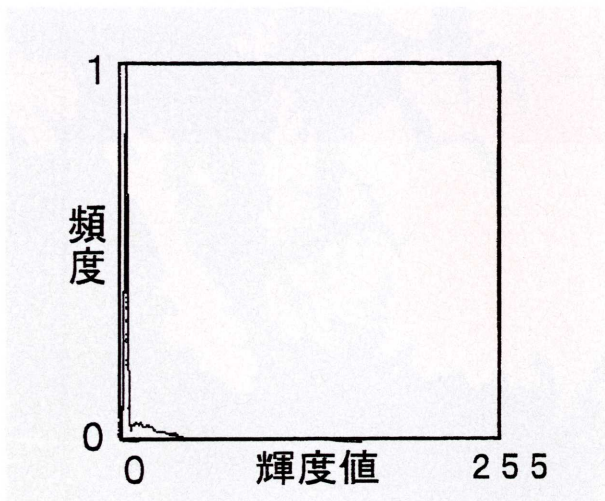


図 3—3 ヒストグラム(バンド5)(Prince William Sound)

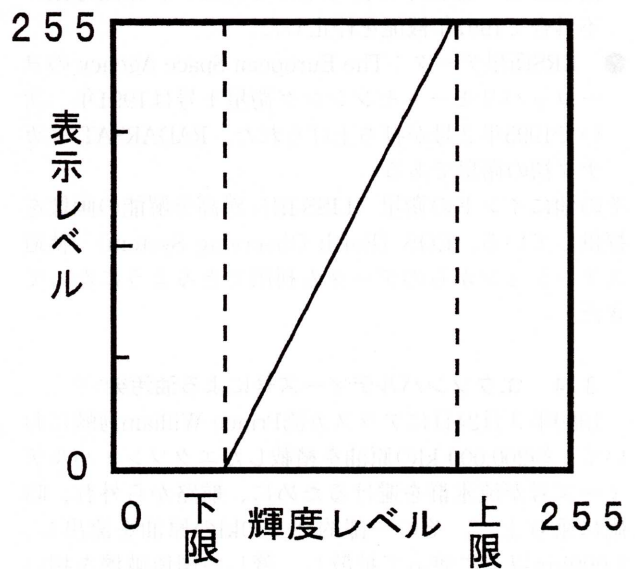


図 3—4 表示レベルの指定

また、全体の画面の中から指定した領域をラムディスクにサブ画面として切り出したサブ画面 (図3-5、表示領域 19×12km) を作成し、このサブ画面上で油の拡散領域をマウスで指定し、バンド毎に平均値と標準偏差を求め、その値の範囲にあるデータを油の領域として残すことによって、図3-6に見られる油の拡散状態を得た。この画面の作成にはバンド5 (波長1.55~1.75 μm)、バンド4 (波長0.76~0.90 μm)、バンド1 (波長0.45~0.52 μm) を使用し、表示のためのヒストグラムの輝度レベルの上限と下限の値はそれぞれ0~10, 0~15, 25~60とした。

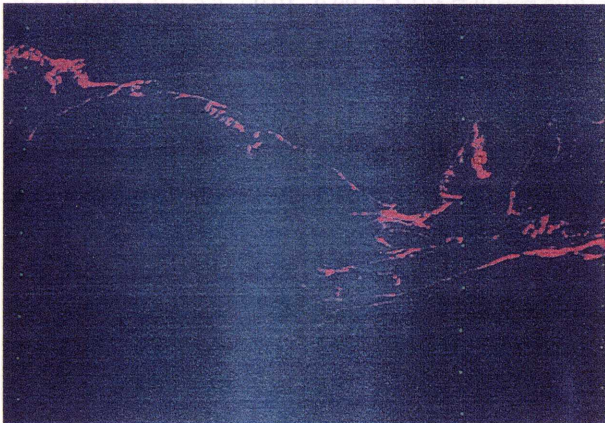


図3-5 油汚染のサブ画面 (Prince William Sound)



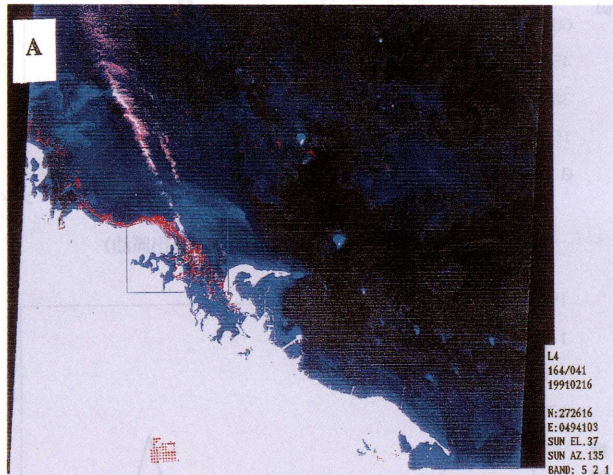
図3-6 流出原油の拡散状況 (Prince William Sound)

3.5 湾岸戦争によるペルシャ湾油汚染

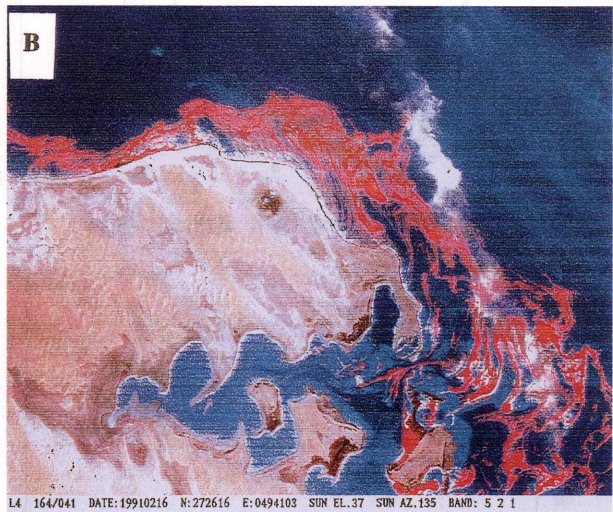
湾岸戦争 (1991年1月~2月) 時に発生した大規模流出油汚染に関するシーンから得られる原油の基本的なスペクトル情報について述べる⁴³⁾。

1月19日頃から原油積み出し施設や、大型タンカーから大量の原油がペルシャ湾に放出された。その量は、300万バレル~700万バレル (1バレル=159リットル) と見積られている。LANDSAT衛星で観測された油の拡散状況を報告に見ることができる^{4, 26, 31)}。ペルシャ湾は

平均水深が35~40 m程度の浅海で、湾の東側 (イラン側) はやや深い、西側は浅くなっており、沿岸部では干潮時に海底が露出する湿地帯や礁湖、珊瑚礁が存在する。浅海部では海底まで光が届き、衛星で観測するときの海面情報は東京湾で見られるものとは大きく異なる。



(a) アルジュベール沿岸 (全体)



(b) アルジュベール沿岸 (Aの枠部分)

図3-7 原油の拡散状況

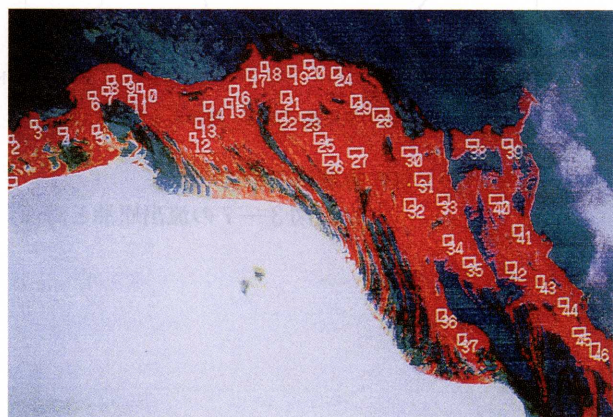
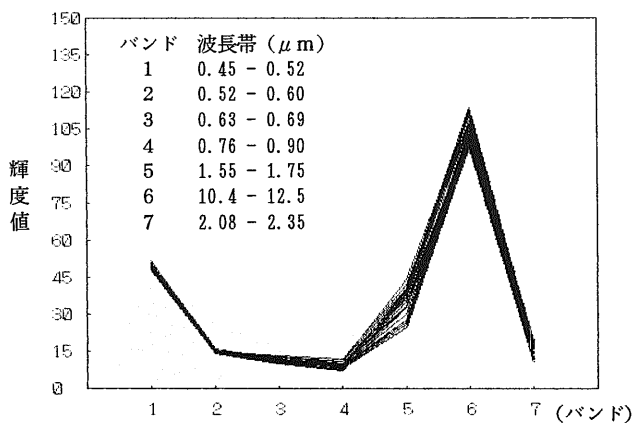
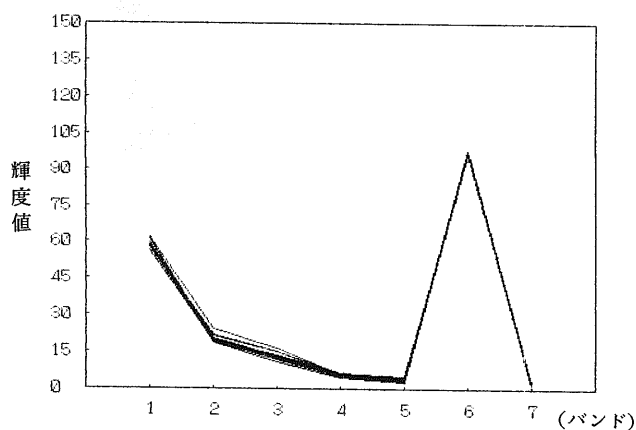


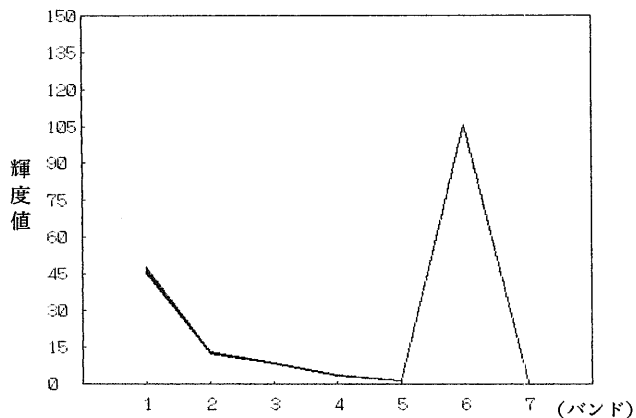
図3-8 流出油の領域指定



バンド毎の輝度値の平均値 (湾岸 流出原油)



バンド毎の輝度値の平均値 (湾岸 海岸に近い海面)



バンド毎の輝度値の平均値 (湾岸 海岸から離れた海面)

図3-9 バンド毎の輝度値の平均
(図3-7の流出原油と海面)

バンド	1	2	3	4	5	6	7
湾岸油汚染、ペルシャ湾							
1)油面	54.3	16.2	12.5	9.9	37.2	114.1	15.8
2)海岸に近い海面	64.6	21.9	14.2	6.0	3.7	106.7	1.9
3)海岸から離れた海面	50.9	13.9	9.0	3.7	1.3	115.9	0.8
アラスカ、エクソンバルディーズ号による原油流出							
4)油面	61.7	18.4	15.8	11.4	25.9	77.7	14.3
5)海面	61.7	18.5	14.7	8.5	4.6	73.4	3.3
東京湾、シーン1							
6)湾奥河川濁水均質	48.8	17.3	12.9	5.3	3.2	121.9	1.6
7)湾奥河川濁水	54.6	22.2	19.2	6.6	3.4	123.2	1.8
8)湾奥均質暗い部分	44.8	14.4	10.9	5.1	3.2	123.1	1.7
9)湾中央河川濁水	55.5	24.3	23.8	7.4	3.0	119.7	1.6
10)湾中央暗い部分	44.9	14.2	10.7	4.7	2.9	122.3	1.6
11)湾外河川濁水	59.3	23.3	16.3	5.5	3.0	125.5	1.6
12)湾外暗い部分	44.8	14.1	10.4	4.9	3.0	127.5	1.6
東京湾、シーン2							
13)湾奥薄い雲	63.3	23.8	23.2	13.7	8.6	95.9	3.7
14)湾中央薄い雲	61.9	23.0	22.1	12.5	8.0	98.3	3.5
15)湾外薄い雲	62.3	22.3	21.1	12.1	7.6	113.0	3.5
16)湾外雲無し	57.6	20.2	18.5	10.6	6.4	113.5	3.0

表3-2 領域での輝度値の平均

図3-7 はサウジアラビア沿岸の工業都市アルジュベールを含む185Kmの範囲について示したものである。アルジュベールの北西に位置するマサラニヤ湾から右下のアブアリ島にかけて大量の油が押し寄せているのが分かる。この画像は表示のためには赤色にバンド5、緑色にバンド2、青色にバンド1を割り当て、入力輝度値のコントラスト増幅を行っている。画面の一部に雲はあるが、薄い雲のところでは油の存在を認めることができる。沿岸に押し寄せた油について図3-8に示すように、明らかに油と認めることのできる微小領域をマウスで指定し、各々の微小領域の平均値をグラフで示すと図3-9 が得られる。ここで、横軸はTMデータの観測バンド1~7(可視波長から赤外波長領域、バンド6は熱赤外線領域)に相当し、縦軸は輝度値である。この油面についての各々のバンドでの輝度値の平均値を表3-2、1)に示す。以下、同様の処理を行い油と陸に挟まれた部分で、明らかに油を含まない部分についての輝度値の平均値を表3-2、2)に示す。陸から離れた海上で、シーンの中でもエアロゾルの影響の少ないと思われる部分についての輝度値の平均値を表3-2、3)に示す。

アラスカでの原油流出事故についてのTMデータと、湾岸の油汚染データを比較するために、先と同様な処理を行い、油と海面についての各バンドの輝度値の平均値を調べた結果について述べる。まず、油の部分に

についての結果を表3—2、4) に示す。油の周辺海域では、表3—2、5) に示す値であった。

表3—2より湾岸油汚染データについてのバンド1では、海岸に近い海面での輝度値の平均値は、油の部分より高くなっているが、海岸から離れた海上の輝度値の平均値を比較すると、海上の輝度値の平均値の方が油の輝度値より低くなっている。バンド4、5、7については、海面の輝度値より油の輝度値の方が高くなっていることが分かる。特にバンド5ではその差がはっきりとしているので、海上における油の識別のためにはTMバンド5を使用することが有効であることが分かる。また、熱赤外波長領域であるバンド6においては、輝度値をカラー表示することによって、油面についての温度差を画像の上で分類できることが分かった。今回計測された海上での油の状態について、その厚さについては資料が無いので言及できないが、3月12日にアルジュベール市の北部、マドマー地区でサンプリングされた油は、炭素数が12より少ない成分は蒸発していたことが記述されている。また同資料では、海上の油は安定して浮遊していたと考えられる。アラスカでのデータの場合、油面と海面について比較すると、バンド5とバンド7で周辺海域より明らかに輝度値の平均値は高くなっており、バンド5の方がその差が大きいことが分かる。ただし、湾岸における油の部分の放射輝度値の方が、アラスカにおける原油についてのものより高い値を示している。アラスカにおける流出原油の拡散が短期間に、広範囲にわたったことを考えると、これらの差は油膜厚さの違いによるものではないかと考えられる。

3.6 東京湾データについて

東京湾の二つのシーンについて、同様の処理により、東京湾奥、中央、湾外でのTMデータの放射輝度値の平均値を調べた結果について述べる。シーン1は、羽田沖に雲があるが、そのほかの東京湾については雲は認められず、河川の濁水の流入の認められるシーンである。湾奥についての各バンドの平均値の内、川からの濁水を含むが画像の上で均質な場所での結果を表3—2、6) に、画像の上で特に川からの濁水の認められる部分の結果を表3—2、7) に、画像の上で明らかに川からの濁水を含まない輝度の低い部分の結果を表3—2、8) に示す。湾中央についての各バンドの輝度値の平均値について、画像の上で特に川からの濁水の認められる部分の結果を表3—2、9) に、画像の上で明らかに川からの濁水を含まない輝度の低い部分の結果を表3—2、10) に示す。湾外についての各バンドの輝度値の平均値について、画像の上で特に川からの濁水の認められる部分の結果を表3—2、11) に、画像の上で明らかに川からの濁水を含まない輝度の低い部分の結果を表3—2、12) に示す。シーン2は、

河川からの濁水の流入は特に認められず、東京湾全体について薄い雲が認められ、一部房総半島の山の風下側で明らかな雲が見られなくなっている部分を含むシーンである。湾奥についての各バンドの輝度値の平均値の結果を表3—2、13) に湾中央での結果を表3—2、14) に、湾外で薄い雲の認められるところでの結果を表3—2、15) に、湾外で薄い雲の認められないところでの結果を表3—2、16) に示す。

東京湾についてのデータは、今後汚染が発生したときに経年的な変化も含めて、汚染識別のためのバックグラウンドデータとして使用できることが望ましいと考え、現状での平均的な値の抽出が可能かどうかに着目して二つのデータの比較を行った。バンド1の値の内、シーン1の河川の濁水を含まない値は、他のデータに比べて最も低い値となっている。シーン2の湾外で明らかな雲を含まないと思われる部分の値も同程度の値であることが期待されたが、実際には相当高い値を示している。

3.7 まとめ

原油の流出の識別については、コントラストの増幅を行い、画像化することによって識別が容易になる。EOSATより購入した、アラスカでの原油流出事故後の油の拡散状況を含むLANDSAT TMデータの処理を行い、バンド5 (1.55-1.75 μm) の中間赤外線画像に、海上に流出した油の特徴的なパターンを見ることが出来る。SPOT衛星と、MOS-1にはここで用いたバンド5に相当する波長帯が無いため、汚染の識別はここで述べたものと少し変わることが予想される。

大規模な油汚染については、可視、赤外、マイクロ波などを用いて得られた衛星画像もたびたび報道されている。しかし、周回軌道のため機動性に制約がある、可視、赤外観測機器は雲があると観測できない、成分識別が困難、情報処理に時間がかかることなど、汚染防除の現場の要求に応えることが未だ難しい。

4. 海面放射輝度

大量流出油拡散状況の識別には、LANDSATの場合バンド5に特徴的な情報があり、コントラスト増幅を行った表示により識別が容易になることが分かった。しかし、小規模な汚染や大規模汚染でも長期にわたって回復度を追跡することは困難である。このために、日本近海海面放射輝度データを蓄積し、詳細な比較検討によりその差を見出すことが一つの方法と考えられる。以下、東京湾を対象として分析を行った⁴⁶⁾。

4.1 処理データ

東京湾と相模湾、九十九里沿岸についてのデータを集めて検討した。図4—2に全体のシーンを示してい

る。関東地方南部を含む地域でパス、ロウ (107,35) で特定される地域について、1/2 シーン移動した地域である。

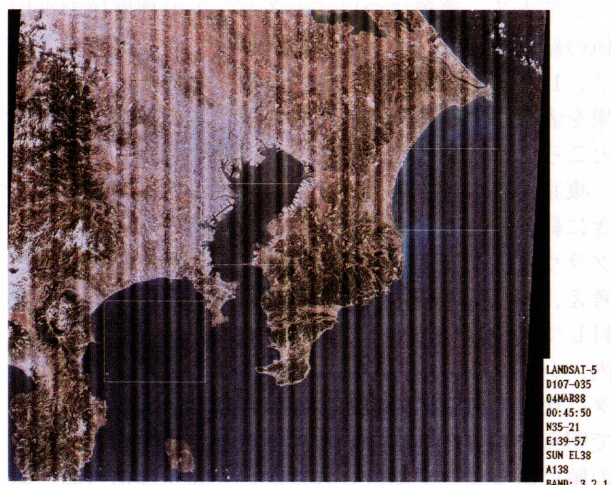


図4—1 関東地方の処理対象区域

各々のデータは、1986年8月6日、1987年3月18日、1988年3月4日、1990年2月22日、1990年3月26日、1990年5月29日、1990年8月17日、1990年11月5日、1992年1月27日、1992年3月31日、1993年3月18日に観測されたものである。処理領域は、図4—1に示す東京湾、相模湾、九十九里沿岸とした。シーンの中に明らかに雲を含むものはなるべくその影響を避けるように指定領域を選択した。明らかに雲やエアロゾルのため海上の輝度平均値の算出に適さないと判断されたものは以後の処理を行わなかった。

4.2 処理方法

光磁気ディスクに取り込んだファイルは、7つの波長帯（可視波長から近赤外波長6バンド、赤外域波長1バンド）により観測されたバンド毎の画像データとその他の付属情報を含むファイルよりなる。バンド6からは温度情報が得られる。

バンド毎の画像データについて図4—3 (a, b)

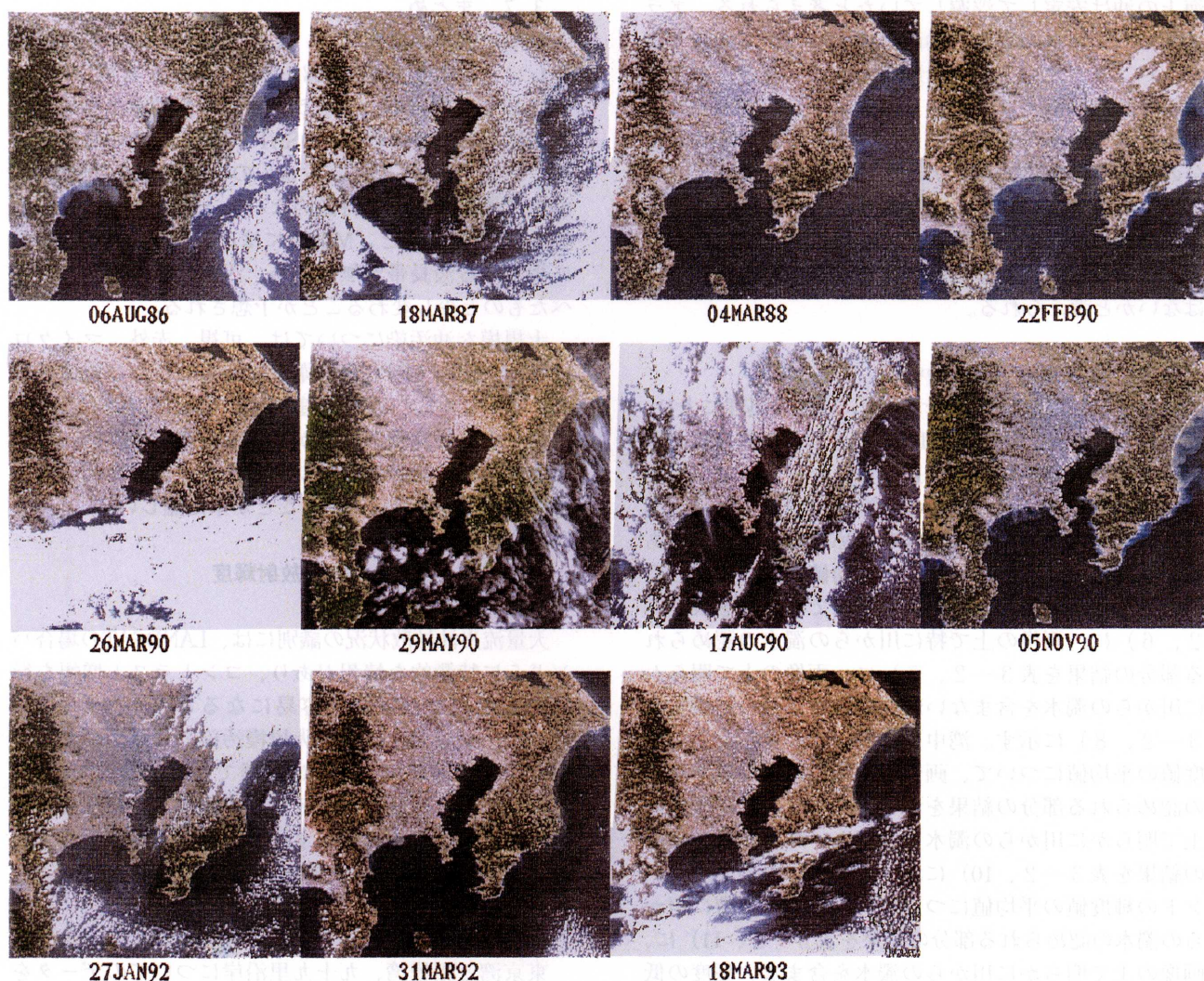


図4—2 処理対象とした全画像データ (東京湾)

に示すようにヒストグラムを作成する。図では横軸に観測された輝度値を示し、縦軸に各々の輝度値の頻度を表している。輝度値は0から255の範囲に分布しているが、ここではヒストグラムを表示するために、1から254について最大の頻度のものを1として表している。図4-3(a)はエアロゾルまたは雲の少ないシーンについてのバンド1の例であり、図4-3(b)はエアロゾルまたは雲の多いシーンについてのバンド1の例である。

画像の表示は、任意の3バンドを選択し、各々のヒストグラムから頻度の多い部分について、その上限と下限の値を選択し、0から255の値に変換することによってコントラストを強調した表示を行う。図4-1はバンド3、2、1の画像データをそれぞれ赤(R)、緑(G)、青(B)に割り付けて表示したものである。全体シーンを表示するためにデータを等間隔で間引いて表示しているが、全体シーンに含まれるデータ数は表示画面上のドットの数より非常に多いので、表示された全体シーンの中から表示画面のドットの数に合うデータ領域を枠で表示し、目的の海域をマウスで指定してディスプレイに表示する。その後、ディスプレイ上で海上の船舶等を避けた海面部分について、マウスで領域指定を行い、各バンド毎の放射輝度平均値を求めた。

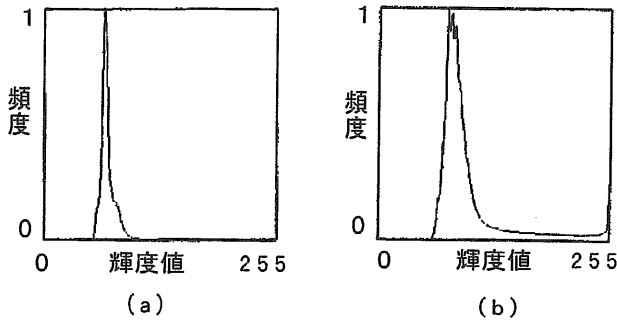


図4-3 ヒストグラム

(a)エアロゾルの少ない画面、(b)エアロゾルの多い画面

4.3 海面放射輝度の平均値

図4-4は、東京湾について指定した領域での放射輝度平均値を、横軸にバンドをとり、縦軸に放射輝度平均値をとって示している。図には、指定した微小領域毎の平均値と、指定された領域全体についての平均値を重ねて示している。同一シーンの中でも指定領域によって海面放射輝度の平均値に差のあることが分かる。

4.3.1 太陽高度の影響

図4-5(a、b、c)は、東京湾、相模湾、九十九里沿岸について、横軸に太陽高度をとり、縦軸に海面放射輝度の平均値を示している。それぞれのデータでエアロゾル影響の度合いが異なるので、絶対的な海

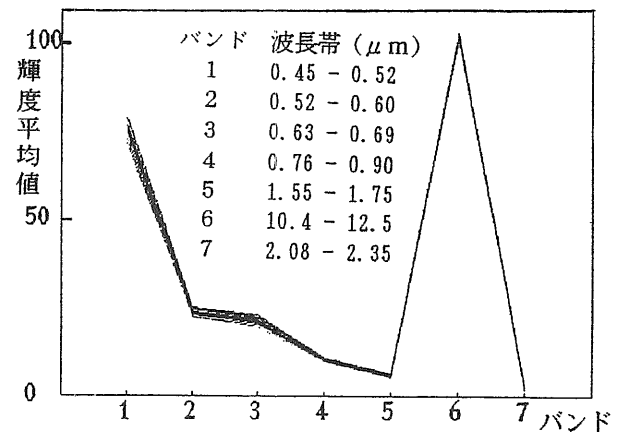
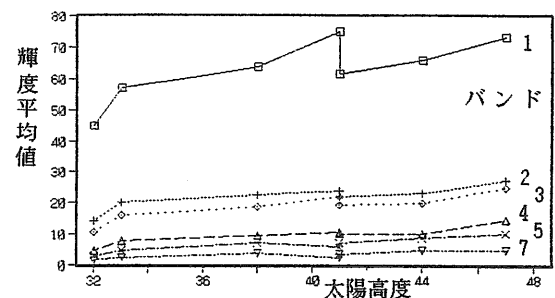
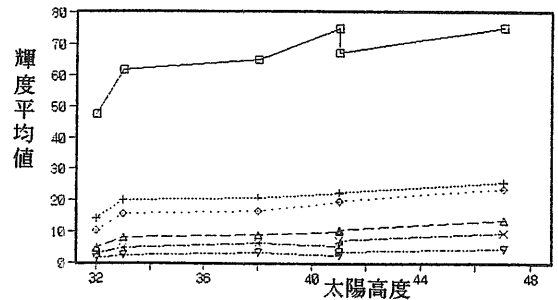


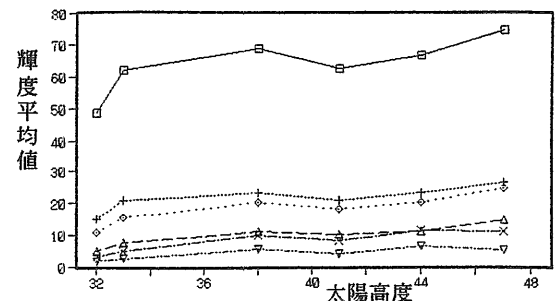
図4-4 バンド毎の海面放射輝度の平均値(東京湾)



a 太陽高度と放射輝度平均値(東京湾)



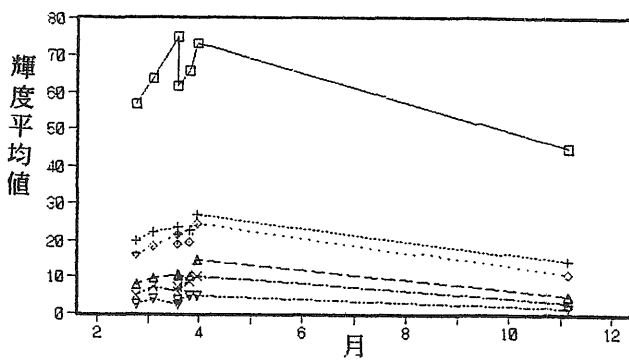
b 太陽高度と放射輝度平均値(相模湾)



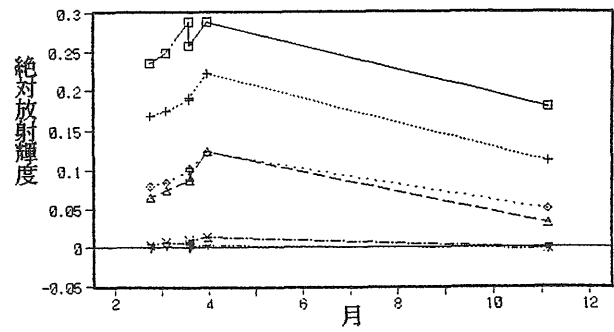
c 太陽高度と放射輝度平均値(九十九里沿岸)

図4-5 太陽高度と放射輝度(3月)(東京湾)

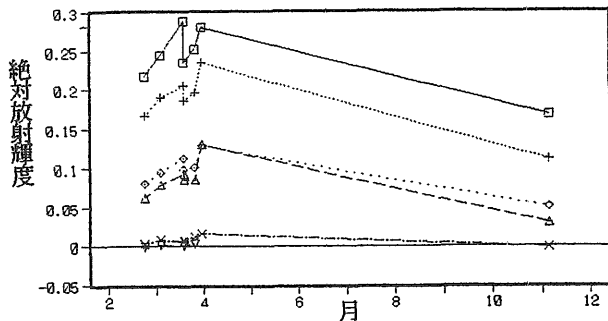
面放射輝度値としての比較はできないが、太陽高度の変化に伴う要因によって海面放射輝度の平均値が変化していると考えられる。また、同一シーンに含まれる各々の海域での放射輝度平均値の相違は最大のもので6程度であった。以下の図の各バンドの記号は図4-5(a)に表示したものと同様である。



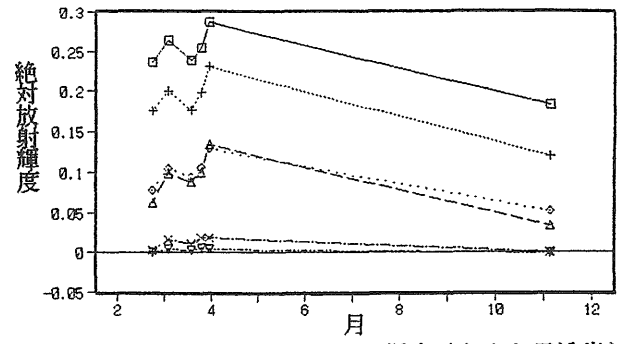
a 観測月と放射輝度平均値（東京湾）



c 観測月と絶対放射輝度（相模湾）



b 観測月と絶対放射輝度（東京湾）



d 観測月と絶対放射輝度（九十九里沿岸）

図4-6 観測月と放射輝度（東京湾）

4.3.2 海面放射輝度の月変化

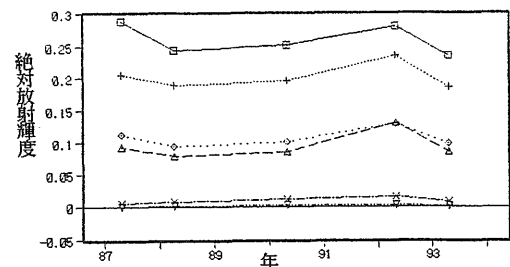
図4-6 (a) は東京湾についての月毎の変化を示したデータを、横軸に月をとり、縦軸にバンド毎の放射輝度平均値を示している。また、図4-6 (b、c、d) は絶対放射輝度値として得られる値を各々の海域について示したものである。横軸に月をとり、縦軸に絶対放射輝度を表示している。使用したデータの範囲では、5月と8月のデータが雲またはエアロゾルの影響で利用できなかった。絶対放射輝度値への変換は、資料4-1 MSS/TM デジタル値から絶対放射輝度への変換式の6-1式によった。

4.3.3 海面放射輝度の年変化

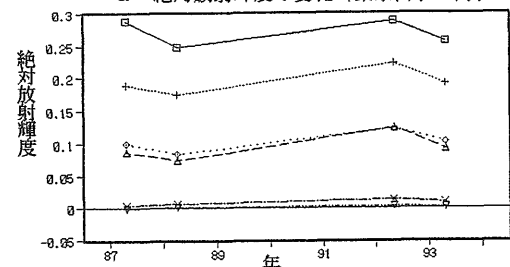
図4-7 に示す放射輝度の年変化 (a、b、c) は3月における経年的なデータを、横軸に年を、縦軸に絶対放射輝度値を示した。ここでa、b、cは各々東京湾、相模湾、九十九里沿岸である。使用したデータは3月4日から31日のものであり、太陽高度の値が38度から47度の範囲にある。

4.4 統計解析

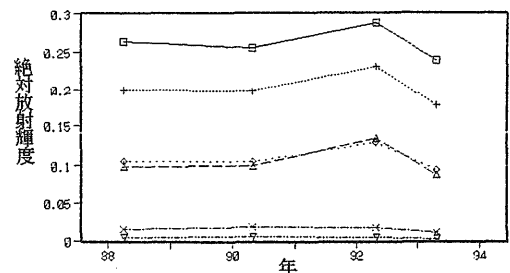
海面放射輝度は一般に小さく、個々の値のばらつきも大きい。このようなデータの集合から海面情報を抽出するために統計的処理を行ってその相関を調べることを試みる。このため、東京湾と大量流出油データについてバンド間の相関解析を行った⁽⁹⁾。



a 絶対放射輝度の変化（東京湾、3月）



b 絶対放射輝度の変化（相模湾、3月）



c 絶対放射輝度の変化（九十九里沿岸、3月）

図4-7 絶対放射輝度の年変化（東京湾）

計算手順は、まず、コントラスト強調画面を作り、この画面上で雲や河川流入の影響が明らかところは避けて、小区画を選定する。複数の小区画について、バンド毎の平均、分散、標準偏差、バンド間の共分散、相関係数を求める。

図4—8は東京湾での輝度値を7つのバンドに対してプロットされた輝度値を示す。画像の中でエアロゾルや汚濁水が明らかには認められない個所の選択された部分のCCTカウントである。横軸にセマティックマップの7つのバンドを示し、縦軸に輝度値を示す。バンド6以外のデータのばらつきは少ない。図4—9は7つのバンドに対してプロットされた油面と周りの海面についての輝度である。バンド5, 6, 7のデータのばらつきは広く、1, 2, 3, 4バンドは狭い。油面についてのバンド5, 7の平均値は周りの海面より高くそのばらつきはより大きい。

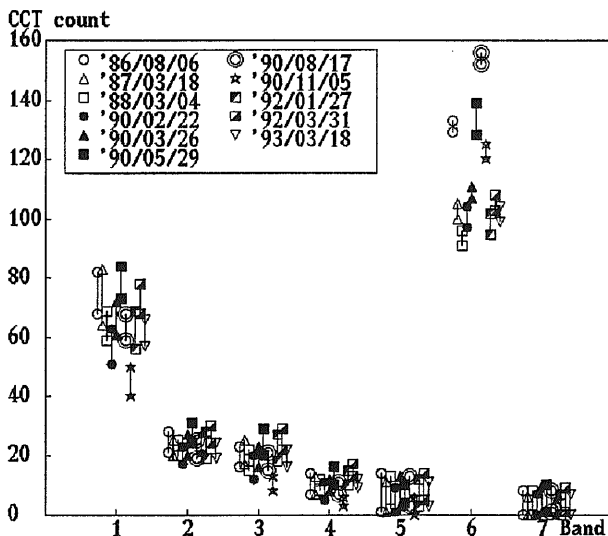


図4—8 海面シーンにおける輝度値(東京湾)

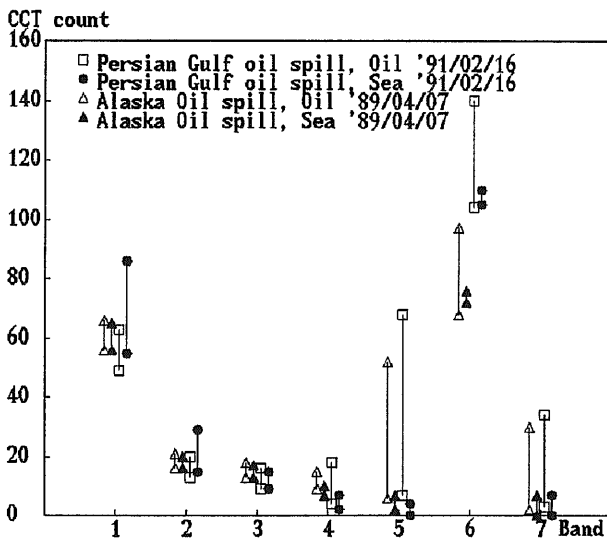


図4—9 流出油シーンにおける輝度値(湾岸流出油)

種々のバンド組み合わせでの輝度の頻度を図4—10に示す。このデータは1990年5月29日のもので、それぞれの組み合わせに対して回帰直線を計算した。図4—11は各々のバンドの組み合わせに相当するように配置された回帰直線の傾き計数を示す。横軸にバンドの組み合わせ、縦軸に傾き係数を示した。東京湾で僅かな汚染が観測された1990年5月29日の一つのグループを除いて、絶対値は1.0以下である。画像の中で選択されたそれぞれの組の輝度値は幾分変わるが、全体の変化パターンは各バンドについて互いに類似していることが分かる。図4—12は相関係数についての表示であり、基準化されており他との比較上都合が良い。

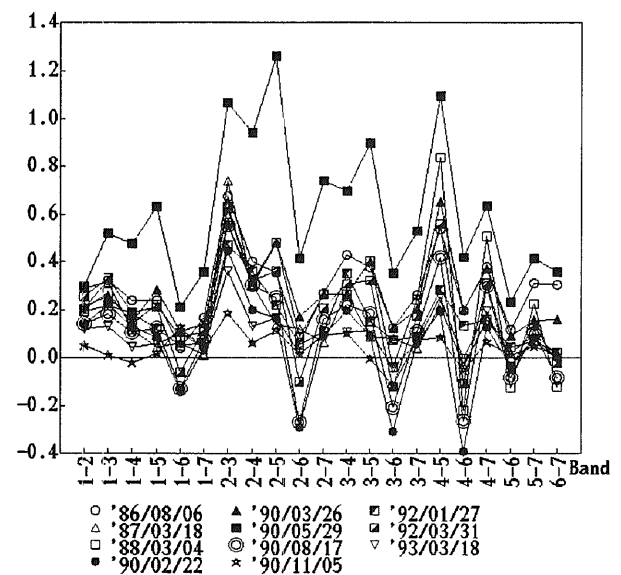


図4—11 バンドの組み合わせ毎の傾き係数(東京湾)

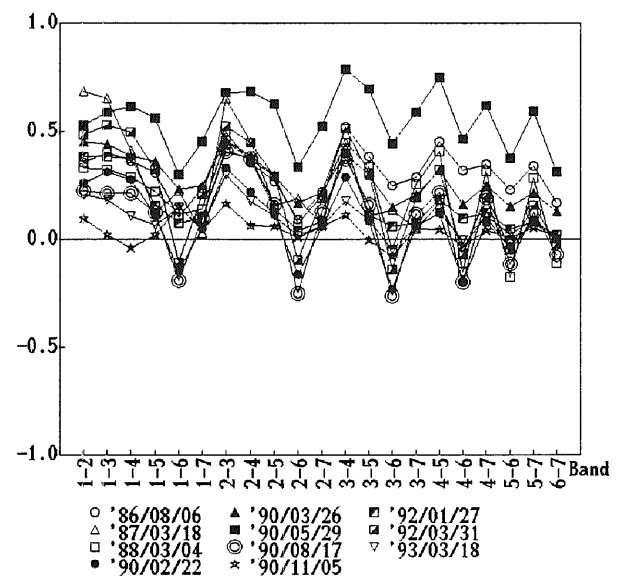


図4—12 バンドの組み合わせ毎の相関係数(東京湾)

Regression function
 $\text{Band}(j) = a \times \text{Band}(i) + b$
 a : Gradient coefficient

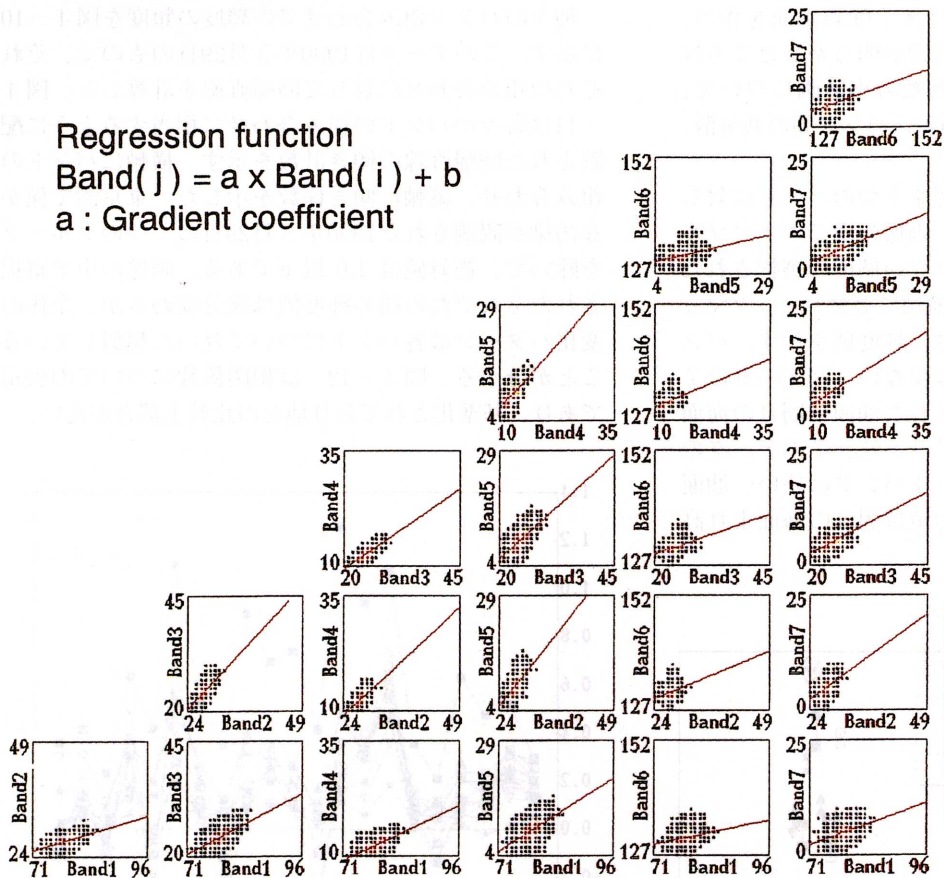


図 4-10 バンド毎の組み合わせデータの分布 (東京湾)

Regression function
 $\text{Band}(j) = a \times \text{Band}(i) + b$
 a : Gradient coefficient

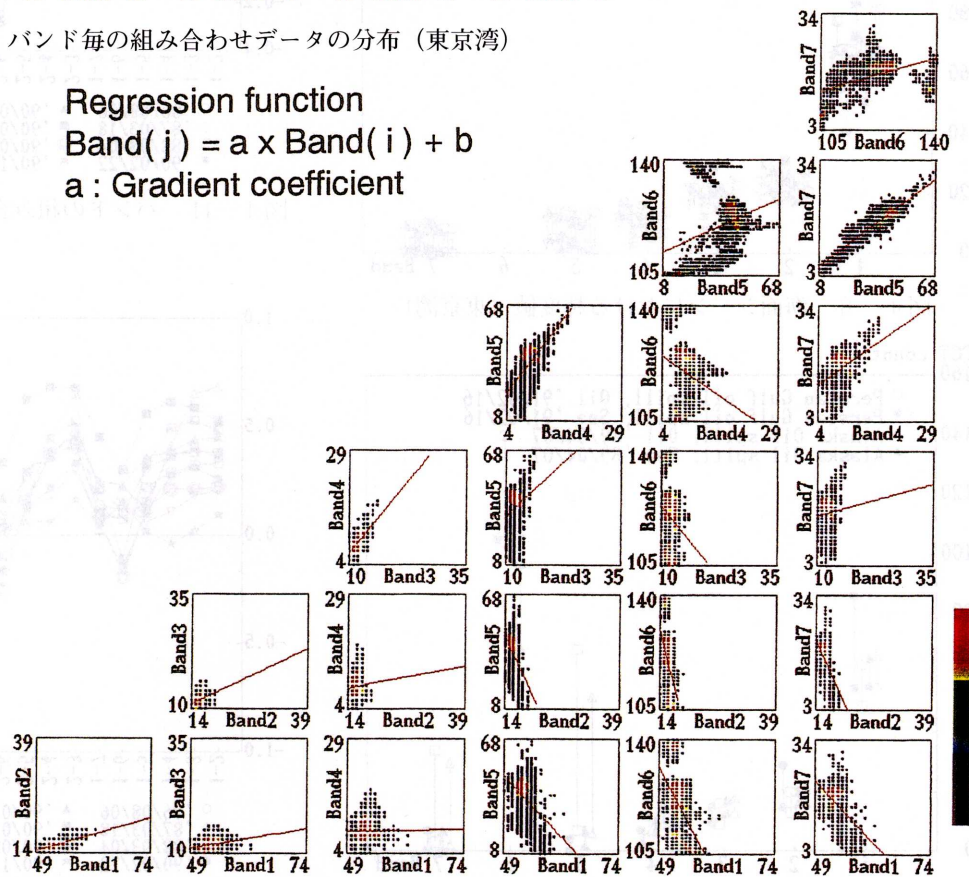


図 4-13 バンド毎の組み合わせデータの分布 (湾岸流出油)

図4—13 は1991年2月16日のペルシャ湾の油膜についての、バンドの組み合わせに対する輝度値の頻度を示している。図4—14 はバンドの組み合わせに相当するように配置された油膜についての回帰直線の傾き係数である。これらの値のばらつきは東京湾のものより大きく、最大の値は5.4である。これらの組のパターンはお互いに似ているが、東京湾のものとは異なっている。図4—15 はそれぞれのバンドの組み合わせに相当するように配置された油膜上の輝度値の相関係数を示している。値の範囲は東京湾のものより広く、バンド5と7の相関係数は最大で0.9である。これらの組のパターンは似ているが、東京湾のものとは異なっている。バンド毎の相関係数と回帰直線の傾き係数を解析することにより、輝度値のばらつきと輝度値の組み合わせパターンが海上の汚染の情報を持つと考えられる。

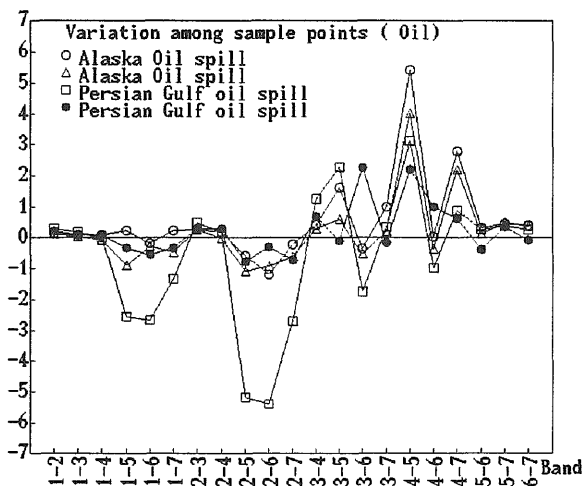


図4—14 バンドの組み合わせ毎の傾き係数
(湾岸流出油)

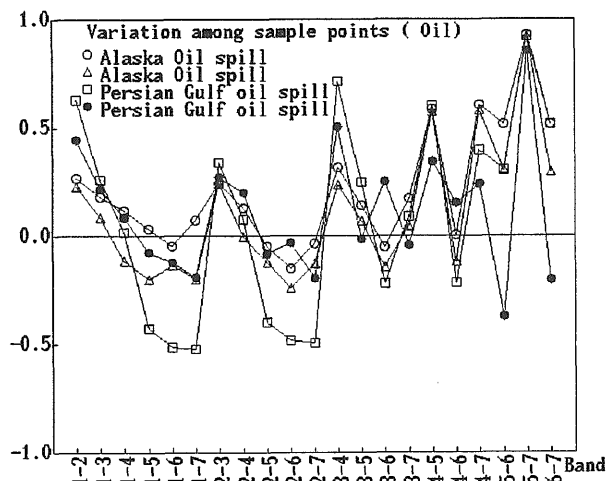


図4—15 バンドの組み合わせ毎の相関係数
(湾岸流出油)

4.5 まとめ

海面について観測された放射輝度値と太陽高度とに一定の関係のあることが分かった。これは、季節的変化、月変化にも現れている。検知器が同一のもでないため、経年的な変化を調べるためには絶対放射輝度値測定精度について検討しなければならない。また、これら輝度値には、大気中のエアロゾルの影響も大きく作用するため十分その影響を考慮しなければならない。

東京湾と大量流出油についてのLANDSAT TMデータを画像強調とバンド間の相関解析を用いて解析した。油膜上のバンド5と7の輝度は東京湾のものより大きく、データのばらつきは周りの海面より大きい。バンドの組み合わせの並びを同一にとると傾き係数と相関係数のパターンは、お互いに類似している。油膜についての絶対値のばらつきは、東京湾のものより非常に大きい。油膜についてのバンドの相関係数、特にバンド5, 7は汚染の無い海面より大きく、データのばらつきも周りの海面より大きい。統計的解析は、このように個々のデータ差からは判別し難い場合でも、傾向としてその差を見出すことができるため汚染監視に有効な情報を与えることが分かった。

5. 大気補正の精密化

太陽光は、地表に到るまでに大気分子とエアロゾルの散乱と吸収を受けて減衰する。海表面に到達した光は水に透過吸収される。このため海面からの放射は非常に小さく、相対的に大気からの放射分が大きな部分を占めることとなる。海洋では、衛星で観測される放射輝度のうち、大気放射が約80%も占めることが航空機観測から推定されている²⁰⁾。ここがアルベド(albedo)の大きい陸上画像と大きく異なる点で、大気散乱とエアロゾルの寄与を補正する事が衛星画像を解釈する上で重要な仕事となる。基礎的なアプローチは、海面からの放射輝度をもとに海中のプランクトン濃度を推定しようとする目的で、CZCS画像の解析に際して開発された。本章では、このGordon¹⁹⁾の方法による大気補正の方法の導入と、ライダーを用いて大きな影響を与えるエアロゾルモデルの検証と精密化についての試みについて述べる。

5.1 大気放射

大気分子によるレイリー散乱とエアロゾルのミー(Mie)散乱は光学的特性が異なるため区別して取り扱う。以下、Gordonによる大気補正の手法に従って、多重散乱と太陽の輝点反射は無いものとして議論を進める。衛星で受信する放射強度 L_t を成分に分けて考える。

$$\text{Eq. 5-1 } L_t = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda)$$

ここで、 L_r はレイリー (Rayleigh) 散乱成分、 L_a はエアロゾルによるミー散乱成分、 λ は波長、 $t L_w$ は海面からの放射が大気の散乱を受けてセンサーに到達した部分を示す。 L_r 、 L_a は次式で与えられる。

$$\text{Eq. 5-2 } L_x = \omega_x(\lambda) \tau_x(\lambda) F_0(\lambda) p_x(\theta, \theta_0, \lambda) / 4\pi$$

ここで、 L_x は x (r または a) の単散乱アルベド、 ω_x は x の光学的厚さ、 F_0 は大気圏外の太陽光強度、 τ_x は表面とセンサー間の透過率、 p は位相関数、 θ は太陽天頂角、 θ_0 は観測海面とセンサーを見る角度を示す。

エアロゾルの分布と注目する画像の屈折率が均質であると仮定する。エアロゾルの位相関数は可視域での波長依存性は小さいと仮定できるとすれば³⁷⁾、2波長で測定を行うと次式が得られる。

$$\text{Eq. 5-3 } t(\lambda) L_w(\lambda) = L_t(\lambda) - L_r(\lambda) - S(\lambda, \lambda_0) [L_t(\lambda_0) - L_r(\lambda_0) - (\lambda_0) L_w(\lambda_0)]$$

ここで $S(\lambda, \lambda_0)$ は次の式で与えられる定数である。

$$\text{Eq. 5-4 } S(\lambda, \lambda_0) = e(\lambda, \lambda_0) \left[\frac{F_0(\lambda)}{F_0(\lambda_0)} \right] \exp \left[(\tau_0(\lambda) - \tau_0(\lambda_0)) \left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0} \right) \right]$$

ここで τ_0 はオゾンの光学的厚さ、 μ 、 μ_0 は衛星から目標海面を見るとき及び太陽の天頂角の余弦成分である。 $e(\lambda, \lambda_0)$ は光学的厚さと単散乱アルベドの波長依存性を示す。

$$\text{Eq. 5-5 } e(\lambda, \lambda_0) = \frac{\omega_0(\lambda) \tau_0(\lambda)}{\omega_0(\lambda_0) \tau_0(\lambda_0)}$$

条件の良い場合は $t=1.0$ とおくことができ、さらにGordonは、 λ_0 をCZCSの4バンド (750nm) にとると、

$$\text{Eq. 5-6 } t(\lambda_0) L_w(\lambda_0) = 0$$

が成立するとした。すると、 $S(\lambda_0, \lambda)$ を資料から計算できるとして、Eq.5-3から任意の波長について $L_w(\lambda)$ を求めることができる。実際は、Eq.5-6の仮定か、ある点での現場測定値を用いてEq.5-3から $S(\lambda_0, \lambda)$ を求めて、画面全体の補正に用いることとなる。定数は、分子のレイリー散乱、オゾンの体積吸収率は大気的光学的透過と放射特性からかなりの精度で推定することができるが、エアロゾル効果は不確定要素が多く精度が低い場合が多い。

5.2 エアロゾルモデル

衛星画像の輝度には少なからぬ影響を与えるエアロ

ゾルについて少し詳しく検討する⁴⁵⁾。変化が速くしかも大きく変化するエアロゾルには多くのモデルが提唱されている。これらの代表的なものがLOWTRAN大気モデルに組み込まれている³⁸⁾。モデルは、大気を高度で4区分して各々独立した特性を与えている。即ち、地表に最も近い混合層 (0~2km)、対流圏上層 (2~10km)、成層圏下部 (10~30km) そして成層圏上部 (30~100km) である。混合層を除けば、エアロゾル分布の変化は緩やかで、季節的変動を考慮した一般的なエアロゾルモデルで表すことは妥当と考えられる。ただ、時により大規模な火山噴火により成層圏に多量の噴煙の注入が行われると、通常の100倍を超える濃度となることがある。図5-1にはエアロゾルのタイプを5種類モデルを計算したものであり、かなりの差が認められる。

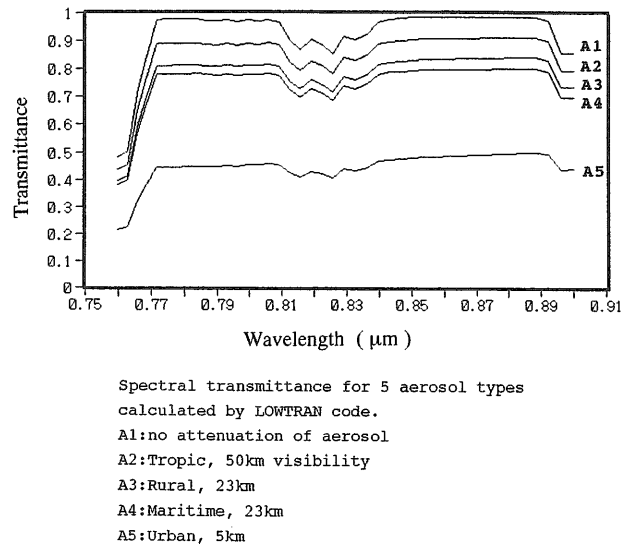


図5-1 大気的光学的特性のモデル
(LOWTRAN 6による計算)

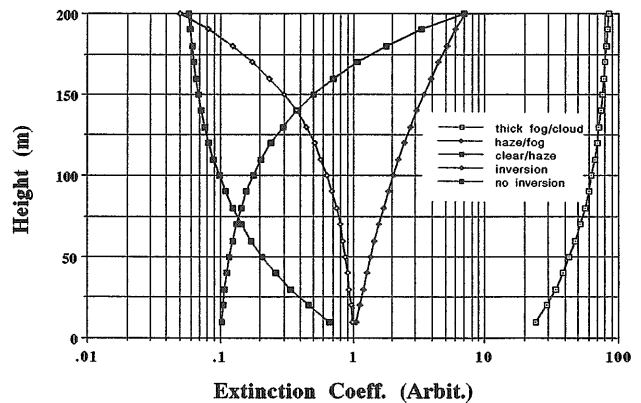


図5-2 大気下層の光学的特性のモデル
(LOWTRAN 6による計算)

地球表面に接している大気混合層はエアロゾル濃度変化が最も大きいところである。海面近くのエアロゾルの多くは海塩粒子で、それは飛沫から水分が蒸発したもの、あるいは湿度の高い状態で水分が核の周りに凝縮したものであり、光学的特性は海水に近い。しかし、上層大気に含まれているエアロゾルは大気団の通過した軌跡によって特性は異なる。日本の場合は大陸の気団の影響を受けることが多いと考えられる。

大気の透過率は次式で表される。

$$\text{Eq. 5-7 } T = \exp(-\tau)$$

ここで、 τ は光学的距離を示し、消散係数を用いて次のように表される。

$$\text{Eq. 5-8 } \tau = \int_0^{\infty} \alpha(z) dz$$

この光学的距離を各特性を持った層成分に分けて表す。

$$\text{Eq. 5-9 } \tau = \alpha_m h + \tau_s + \tau_t$$

α_m は混合層の平均的消散係数を、 h は混合層厚さを示す。また、 τ_t は対流圏上層部の光学的距離、 τ_s は成層圏の光学的距離を示し、各々は次式で表す。

$$\text{Eq. 5-10 } \tau_t = \alpha_t l_t$$

$$\text{Eq. 5-11 } \tau_s = \alpha_s l_s$$

l_t 、 l_s は層の厚さを示す。 α_0 は、地表での消散係数として、平均的消散係数 α_m と定数因子 f を用いて次のように表す。

$$\text{Eq. 5-12 } \alpha_0 = f \alpha_m$$

ここで、 τ_t 、 τ_s はLOWTRAN大気モデルから求めることができる。 f が状態を表すパラメータとして混合層モデルで与えられるとすれば、 α_0 は次式で求めることができ、視程測定データを用いて検証することができる。

$$\text{Eq. 5-13 } \alpha_0 = f(\tau - \tau_s - \tau_t)/h$$

しかし、 f は多様な気象条件に対応した値が必要である。

5.3 ライダーによる大気放射輝度の測定

ライダーの信号強度は5-14式で表すことができる¹⁵⁾。

$$\text{Eq. 5-14 } P(R) = \frac{C \cdot P_0 \cdot \beta(R) \cdot T^2(R)}{R^2} + P_b$$

ここで、 $P(R)$ は距離 R 隔たったターゲットからの信号強度、 P_0 はレーザ強度、 β は体積散乱係数、 T は大気の透過率、 C は機器定数、 P_b は背景光強度を示す。大気の透過率は5-7式で計算する。

図5-3は、大気補正のため衛星画像観測に合わせて観測したライダーデータである。この図からエアロゾルは400m以下で高い濃度でかつ鉛直方向に大きな変化が見られる。その上1.5kmまではほぼ一定の値を保った層をなしており、ここまですべての大気混合層と考えられる。消散係数は、このようにライダーによる後方散乱の観測から求めることができる⁴¹⁾。ライダーを用いた実験から Eq.5-14 をもとに求めた大気の放射輝度は 0.532nm における値が0.04mW/cm²/sr(干渉フィルターのFWHM=3±0.5nm)で、スペクトル放射輝度は0.013mW/cm²/sr/nmに相当する。

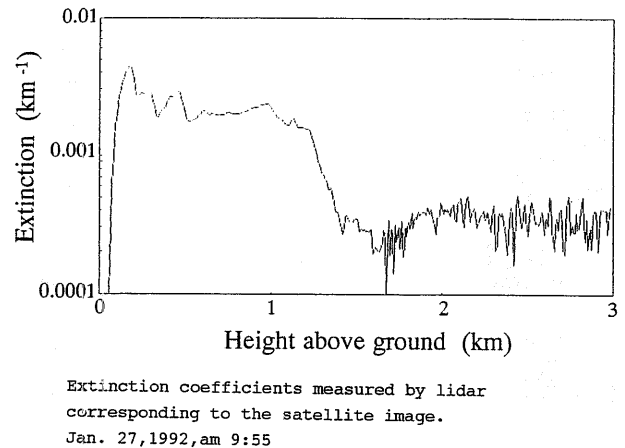


図5-3 衛星に同期したライダー観測
(図5-4 Jan.27,1992と同期)

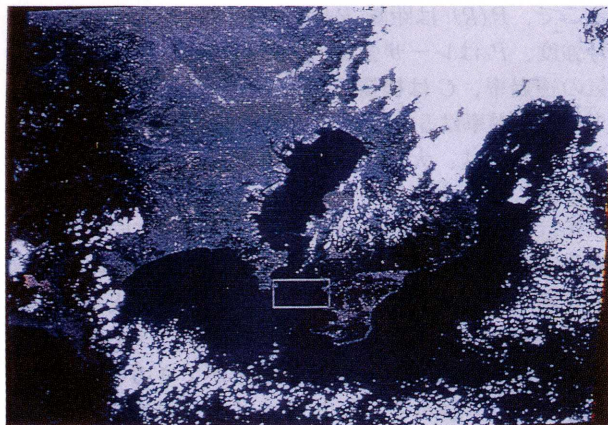
R バンド	(a)エアロゾルが多い		(b)エアロゾルが少ない		(c)差(a-b)	
	count	$\mu\text{W/cm}^2/\text{sr}$	count	$\mu\text{W/cm}^2/\text{sr}$	count	$\mu\text{W/cm}^2/\text{sr}$
3(R)	21	1.57	18	1.33	3	0.24
2(G)	23	2.44	20	2.07	3	0.35
1(B)	63	3.65	58	3.34	5	0.31

$R = V(R_{\max} - R_{\min}) / 255 + R_{\min}$ 、 V は補正済CCTのデジタル値、 R はその時の絶対放射輝度

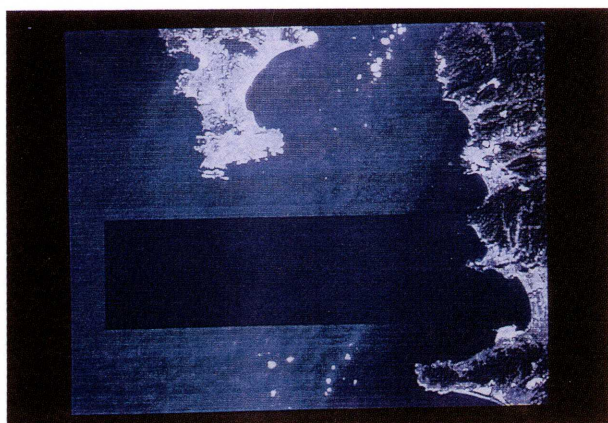
図4-2の値を資料4-1のLANDSAT TMを基に計算

表5-1 衛星画像の海面放射輝度の絶対値

(Jan. 27, 1992: LANDSAT TM)



TM image of Tokyo bay,
Jan. 27, 1992



After correction(marked part)

図5-4 大気補正の効果 (Jan. 27, 1992:LANDSAT TM)

一方、衛星画像の放射輝度の絶対値はLANDSATのキャリブレーションデータを使って求めることができる。資料3-4、資料4-1のデータを用いて得た値を表5-1に示す。衛星(LANDSAT 5号TMバンド2: $0.52 \sim 0.60 \mu\text{m}$)による放射輝度の絶対値 $0.35 \mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{sr}$ をバンドスペクトル幅 80 nm で割ったスペクトル放射輝度の観測値は $0.004 \text{ mW}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{nm}$ である。ライダーによる推定値が層の厚さと消散係数の測定から 400 m 以下の層に対する計算値であり、一方、衛星画像から求めた値はエアロゾルの濃いところと薄いところの差をとったものである。両者の差は、このように条件が少し異なっているためと考えられる。

図5-4は、ライダーによるエアロゾル放射輝度推定値を用いて、東京湾入り口における海面放射輝度の補正を行った例を示す。エアロゾル層の放射輝度分を差し引くことにより、枠内の値が、比較的低いところ

(400 m)にあるエアロゾルの流れが無い房総半島沿岸の海面放射輝度と近い輝度となることが分かる。このようにライダーを用いた方法によれば、観測による各大気層の放射輝度が推定でき、衛星画像大気補正の検証が可能で、モデル精度の向上が期待できる。しかし、エアロゾルの持つ水平方向の不均一さがある場合にはさらに工夫が必要である。

5.4 まとめ

大気補正にはLOWTRAN大気モデルが広く用いられており有効である。しかし、対流圏下層については非常に困難であり、適応できる条件は限られている。大気放射の補正の測定精度向上のためには、大気観測用のライダーでエアロゾルの鉛直分布を直接測定すること、あるいはこれを用いて大気モデルを精密化することが有効である。

6.結 言

本報告では、海難事故調査及び汚染監視技術に関して調査を行って問題点を抽出し、さらに、急速な進歩を遂げている衛星画像利用の可能性と高度化のための調査・研究を行った。その結果次のことが明らかにされた。

海難事故の多く、特に衝突・座礁事故では、複数の要因が重なり関連し合っていると考えられるが、きめ細かな事故防止対策の研究には、互いに干渉しながら変化してゆく複数の要因の時系列的考察による定量的な分析評価という面からの研究強化が望まれる。

不幸にして事故が生じた場合の汚染防除に関しては、一刻を争う現場には詳細情報の迅速な提供が要求されるが、現状では決定的な手段は無く、複数の補完し合うセンサーを航空機や衛星に搭載して、観測した画像情報をリアルタイムで送信できるようなネットワーク化を図る必要がある。

CCD等の光電素子を用いた小型機器や小型アクティブ検知手法の開発により、成分識別などこれまで困難であったことも可能になると期待される。

衛星画像によれば、可視、赤外データを用いて、エンハンスメントと汚染に敏感なバンド(LANDSAT TMでは5バンドが油汚染には有効)を組み合わせることで画像を作成することにより大規模な油汚染の検知は可能である。

しかし、小規模な汚染やより微弱な汚染検知は困難である。このような海面の変化を知るためには、系統的に蓄積されたデータを比較することが有効である。また、多くのデータについて相関関係を分析することにより、個々のデータ差からは判別し難い変化も、スペクトル相互間の傾向の相違として差を見出すことができる。

海面の衛星画像から微妙な変化を捉えるためには、エアロゾルの影響を無視することはできず、大気補正が必要である。各種の大気モデルが提案されているものの、対流圏下層に関しては十分な効果が得られない場合が多い。このような大気放射の補正とモデルの検証には、ライダーでエアロゾルの分布を直接測定し、これを用いて補正を精密化することが有効である。衛星画像に現れる水平方向の変化については更なる研究が必要である。

衛星画像による汚染監視については未だ多くの課題がある。しかし、広域汚染監視としての衛星の利用は極めて有効な手段であり、海洋環境変化の早期発見には、定期的に航空機や船舶による観測と協調してデータを集積することが有効な方策と考えられる。

その後、1997年1月にナホトカ号油流出事故が生じた。冬季で日本海には雲がかかることが多く可視・赤外の衛星観測のできる機会は少なかったが、マイクロ波によるRADARSATのSARによるOil Slickの鮮明な画像が観測された。しかし、これらが汚染防除の現場で重要な情報源として活用された報告は聞かれず、情報収集に関して本研究の行われた状況に比べて大きな変化は無かったと思われる。

最近に至っては、新たな衛星や軌道プラットフォームによる海洋観測データが次々に提供されるようになってきた。今後、空間分解能の高い、可視・赤外の精密なスペクトル画像が利用できるようになれば本報告で指摘された多くの問題が解決され、海洋汚染の防止に大いに貢献することが期待される。

謝 辞

ここで使用したLANDSAT データの一部は、宇宙開発事業団地球観測センターから研究向けとして提供戴いたことに謝意を表します。

参考文献

1. The EXXON VALDEZ OIL SPILL, A Report to the President of the United States of America, the US National Response Team (May, 1989)
2. "Exxon Valdez 号流出油事故調査について, 海上防災, '89-No62 (1989)
3. ジュリアナ号原油流出事故報告書, 海上保安庁 (1972)
4. ペルシャ湾原油流出 (調査、防除) 特集号, P-21, 海上防災事業家協会
5. 海上防災資料集, 海上災害防止センター (平成5年1月)
6. 大量油流出事故の防除に係わる条約対応のための緊急調査報告書, 海上保安庁 (平成2年)
7. OSPAR計画報告書, 運輸省運輸政策局環境・海洋課, 海上保安庁警備救難部海上防災課 (平成6年)
8. Vincent, R. K., Fundamentals of Geological and Environmental Remote Sensing, Prentice Hall (1997)
9. Valley, S.L., ed. Handbook of Geophysics and Space Environments, McGraw-Hill, New York (1965)
10. Lintz, J., Jr. and Simonett, D.S. Remote Sensing of the Environment, Addison-Wesley (1976)
11. Tyler, J.E. and Preisendorfer, R.W., The Sea (M.H.Hill, Ed.), Wiley-Interscience, New York (1962)
12. Horvarth, R. Larrow, V. and Steward, S. "Measurement and Analysis Program for Oil Slick Characteristics", Quaterly Progress Report, Jan.1-March31, Willow Run Laboratory, University of Michigan.
13. O'Neil, R. A. et al., Environment Canada Report Number EPS-4-EC-83-3, Ottawa (1983)
14. The Archimedes Experiment, Commission of the European Communities (1985)
15. Measures, R.M., Laser Remote Sensing, John Wiley & Sons, (1984)
16. 和達清夫他編, リモートセンシング, 朝倉書店 (1976)
17. 杉森康宏, 海洋のリモートセンシング, 共立出版 (1982)
18. John R. Jensen, Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective (1986)
19. Gordon, H. G., "Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans", Applied Optics, Vol.17, p1631 (1978)
20. Hovis, W.A. and Clark, D.K., Opt. Eng., Vol 16, P157 (1977)
21. Douglas Cormack, "Remote Sensing Techniques for Detecting Oil Slick at Sea", Proc. Oil Spill Conf., p95 (1987)
22. Yvon, J.F., Rolland, B., "Real time processing of oil spill remote sensing data", Proc. Oil Spill Conf. p71 (1987)
23. O'Neill, N.T., Miller, J.R. and Ahern, F.J., Proceedings 5th Canadian Symposium on Remote Sensing, p572 (1978)
24. Gordon, H.R., Brown, J.W. and Evance, R. H., "Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner", Applied Optics, Vol.27, p862 (1988)
25. Hovis, W. A., et al., "Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner: System Description and Initial Imagery", Science, Vol.210, p60 (1980)
26. ERSDACニュース No.31 (1992)
27. リモートセンシング技術センターホームページ (<http://www.restec.or.jp>)
28. 宇宙開発事業団地球観測センターホームページ

- (<http://www.eoc.nasda.go.jp>)
29. 地球観測データ利用ハンドブック LANDSAT編・改訂版, 宇宙開発事業団
 30. Landsat data user's notes, EOSAT, Volume 4, Number 2 - June (1989)
 31. Landsat data user's notes, EOSAT, Volume 6, No.1,P-7, Spring (1991)
 32. RESTEC MOS-1 カタログ
 33. 地球観測データ利用ハンドブック JERS-1編, 宇宙開発事業団
 34. RESTEC JERS-1 カタログ
 35. 地球観測データ利用ハンドブック SPOT編, 宇宙開発事業団
 36. Gordon, H.G., et al., "Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates", Applied Optics, Vol.22. P20 (1983)
 37. Bullrich, K., Scattered Radiation in the Atmosphere and the Natural Aerosol, in Advances in Geophysics (Academic P., New York, vol.10 (1964)
 38. Kneizys, F. X., et al. Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 6 (1983)
 39. Hurford, N., "The Remote Sensing of Oil Slicks", Lodge, A. E. ed. (1989)
 40. Yamagishi, S., Yamanouchi, H. and Tsuchiya, M., "Lidar Observation of Marine Mixed Layer", 16th International Laser Radar Conference, NASA CP3158, p719 (1992)
 41. Klett, J.D., "Stable analytical inversion solution for processing lidar return", Applied Optics, Vol.20,P211 (1981)
 42. 山之内博, 山岸 進, "有害液体物質のリモートセンシングに関する研究, 第1報 衛星画像処理システムについて", 第55回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1990)
 43. 山之内博, 山岸 進, "有害液体物質のリモートセンシングに関する研究, 第2報 流出油分の画像抽出について", 第61回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1993)
 44. 山之内博, 山岸 進, "衛星データによる大規模流出油の画像", 第23回安全工学シンポジウム (1993)
 45. Yamagishi, S., Yamanouchi, H., "Effects of the Marine Atmospheric Boundary Layer for Detecting the Pollution", UJNR (1994)
 46. 山之内博, 山岸 進, "海洋汚染物質のリモートセンシングに関する研究, 第3報 海面放射輝度の変化について", 第61回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1994)
 47. Yamagishi, S., Yamanouchi, H., "Effects of the Marine Atmospheric Boundary Layer for Detecting

- the Pollution by Satellite Images", UJWST (1994)
48. 山之内博, 山岸 進, "海洋汚染物質のリモートセンシングに関する研究", 第18回リモートセンシング学会講演会 (1995)
 49. 山之内博, 山岸 進, "海洋汚染物質のリモートセンシングに関する研究, 第4報 スペクトル変化の抽出について", 第63回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1995)
 50. Yamanouchi, H., and Yamagishi, S., "A Study of Remote Sensing of Marine Pollutants ", MARIENVE'95 (1995)

資料

資料3-1 LANDSAT (地球観測衛星) ²⁹⁾

主要諸元

高度:	900~950Km (LANDSAT-1)
	900~914Km (LANDSAT-2)
	897~918Km (LANDSAT-3)
	705Km (公称) (LANDSAT-4, 5)
軌道:	太陽同期準回帰軌道
回帰周期:	18日 (LANDSAT-1, 2, 3)
	16日 (LANDSAT-4, 5)

設計寿命:

打ち上げ日:	LANDSAT-1 1972年7月23日
	LANDSAT-2 1975年1月22日
	LANDSAT-3 1978年3月5日
	LANDSAT-4 1982年7月16日
	LANDSAT-5 1984年3月1日

MSS (多重スペクトル走査放射計スペクトルバンド)

	LANDSAT-1,2,3	LANDSAT-4,5
バンド4	0.5~0.6 μm	0.495~0.605 μm
バンド5	0.6~0.7 μm	0.603~0.698 μm
バンド6	0.7~0.8 μm	0.701~0.813 μm
バンド7	0.8~1.1 μm	0.808~1.023 μm
バンド8	10.4~12.6 μm (L-3のみ)	

RBV (リターンビームビジョコンカメラ)

LANDSAT-1, 2号では3台のカメラによるマルチバンド画像
 LANDSAT-3では2台のカメラによるパンクロマチック画像
 (観測波長帯 0.505~0.75 μm)

TM (セマティックマップパ スペクトルバンド)

バンド1	0.45~0.52 μm
バンド2	0.52~0.60 μm
バンド3	0.63~0.69 μm
バンド4	0.76~0.90 μm
バンド5	1.55~1.75 μm
バンド6	10.4~12.5 μm
バンド7	2.08~2.35 μm

資料3-2 LANDSAT MSSとMOS MESSRの入射光量とアルベド²⁹⁾

放射計	MSS (LANDSAT)				MESSR			
バンド	4	5	6	7	1	2	3	4
波長帯(μm)	0.50~0.60	0.60~0.70	0.70~0.80	0.80~0.90	0.51~0.61	0.61~0.72	0.72~0.80	0.80~0.90
	0.60	0.70	0.80	1.10	0.59	0.69	0.80	1.10
波長帯内太陽放射輝度 ($\text{mw}/\text{cm}^2/\text{sr}$)	6.139	5.176	4.048	7.843	4.898	4.148	3.157	7.843
最大放射輝度 ($\text{mw}/\text{cm}^2/\text{sr}$)	2.48	2.00	1.76	4.60	2.25	1.87	1.61	5.36
最大放射輝度 (%) / 波長帯内太陽放射輝度	40	39	44	59	46	45	51	68
最大放射輝度の反射率変換値	50	49	55	74	50	49	55	74
最小放射輝度 ($\text{mw}/\text{cm}^2/\text{sr}$)	0.22	0.19	0.16	0.30	0.20	0.17	0.15	0.35
最小放射輝度 (%) / 波長帯内太陽放射輝度	3.6	3.7	4.5	3.8	4.2	4.3	4.6	4.4
最小放射輝度の反射率変換値*	4.5	4.7	5.0	4.8	4.5	4.7	5.0	4.8

*地球の反射(地表、大気等を総合した反射がランベルトの法則に従うものとした場合の反射率(アルベドに相当))

(注) MESSRの値は太陽放射強度、地方時角の違いによってMSSの最大・最小放射輝度を変換した。

各地方時はMSS (LANDSAT) 9時30分
MESSR (MOS-1) 10時30分とした。

資料3-3 LANDSAT/MSSの最大、最小放射輝度²⁹⁾
単位 ($\text{mW}/\text{cm}^2/\text{sr}$)

Band	ランドサット 2号		ランドサット 3号		ランドサット 4号		ランドサット 5号		バンド幅 (μm)
	Rmin	Rmax	Rmin	Rmax	Rmin	Rmax	Rmin	Rmax	
4	0.08	2.63	0.04	2.50	0.04	2.38	0.04	2.38	0.1
5	0.06	1.76	0.03	2.00	0.04	1.64	0.04	1.64	0.1
6	0.06	1.52	0.03	1.65	0.05	1.42	0.05	1.42	0.1
7	0.11	3.91	0.03	4.50	0.12	3.49	0.12	3.49	0.3

(ただしローゲイン値を示す)

資料3-4 LANDSAT5号TMの最大、最小放射輝度²⁹⁾
単位 ($\text{mW}/\text{cm}^2/\text{sr}$)

Band	Rmin	Rmax	バンド幅 (μm)
1	-0.0099	1.004	0.066
2	-0.0227	2.404	0.081
3	-0.0083	1.410	0.069
4	-0.0194	2.660	0.129
5	-0.00799	0.5876	0.216
6	0.1534	1.896	1.239
7	-0.00375	0.3595	0.250

資料3-5 SPOT (System Probatoire d'Observation de la Terre)³⁵⁾

主要諸元

高度:	約832Km
軌道:	太陽同期準回帰軌道
回帰周期:	26日
打ち上げ日:	SPOT-1 1986年2月22日 SPOT-2

HRV (High Resolution Visible Imaging System)

スペクトルバンド	衛星直下の画素
(XS) マルチスペクトルモード	0.50~0.59 μm 20*20m 0.61~0.68 μm 0.79~0.89 μm
(P) パンクロマチックモード	0.51~0.73 μm 10*10m
観測平面鏡の角度の変更により斜視観測が可能	

資料3-6 SPOT等価ラジアンズに従って決定された測定レンジ³⁵⁾

SPOT等価ラジアンズレベル	XS1	XS2	XS3	P
L_1	8.56	4	2.36	5.4
最小 ($\rho=0.02$)	($\rho=0.01$)	($\rho=0$)		
L_2	181	184	129	178
平均				
L_3	350	355	262	345
最大 ($\rho=0.02$)	($\rho=0.8$)	($\rho=0.9$)		

注) ラジアンズLの計測単位: $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$

ρ の値はXSモードの L_1 と L_2 を決定するのに用いた反射率

ここでは、通常Rで表すラジアンズをフランス語の輝度L (luminance) を用いている。

バンド毎の最小等価ラジアンズと最大等価ラジアンズ (L_1 と L_3) は有効測定範囲の上限と下限に相当している。

等価ラジアンズ L_3 が太陽仰角75度の時の値であるのに対して、等価ラジアンズ L_2 は、30度の太陽仰角に対して定義されている。

資料3-7 MOS-1 (海洋観測衛星 もも1号)³²⁾

主要諸元

高度:	909Km
軌道:	太陽同期準回帰軌道
回帰周期:	17日
打ち上げ日:	MOS-1 1987年2月19日 MOS-1b 1990年2月7日

光学センサー

MESSR (可視近赤外放射計スペクトルバンド)

バンド1	0.51~0.59 μm
バンド2	0.61~0.69 μm
バンド3	0.72~0.80 μm
バンド4	0.80~1.10 μm

VTIR (可視熱赤外放射計スペクトルバンド)¹⁰³⁾

可視	0.5~0.7 μm
----	-----------------------

赤外	6.0～7.0 μm 10.5～11.5 μm 11.5～12.5 μm
地上分解能	50m (MESSR) 約 1 Km (VTIR可視波長域) 約 3 Km (VTIR赤外波長域)
CCD素子の数	2048/バンド (MESSR)
観測幅	185Km (MESSR) 1500Km (VTIR)
MSR (マイクロ波放射計)	
観測周波数	23.8±0.2GHz 31.4±0.25GHz
観測幅	317Km

資料 3-8 OPS総合S/N³²⁾

バンド	高入力レベル 注(1)		低入力レベル 注(2)	
	S/N	入射光量 (db) (W/m ² /sr/ μm)	S/N	入射光量 (db) (W/m ² /sr/ μm)
1	36	324	23	64.8
2	35	250	22	50.0
3	36	248	23	49.6
4	36	239	23	47.8
5	32	33.3	19	6.66
6	30	17.8	16	3.56
7	28	13.7	14	2.74
8	24	10.8	10	2.16

注(1) OPS総合のダイナミックレンジ内で、最大の入射光量を
高入射レベルと定義する。

注(2) 低入力レベルは、高入力レベルの 1/5 で定義する。

資料 3-9

JERS1 衛星 (地球資源衛星 1 号: ふよう 1 号) ^{33,34)}

主要諸元

高度:	568Km
軌道:	太陽同期回帰軌道
回帰周期:	44日
設計寿命:	打ち上げ後 2 年
打ち上げ日:	1992年 2 月11日
合成開口レーダ	
周波数及び偏波	1.275GHz (L-band) ,HH
入射角	38.5度 (Swathの中心まで)
光学センサー	

VNIR (可視近赤外放射計スペクトルバンド)

バンド 1	0.52～0.60 μm
バンド 2	0.53～0.69 μm
バンド 3	0.76～0.86 μm
バンド 4	0.76～0.86 μm

SWIR (近赤外放射計スペクトルバンド):

1993年12月より観測停止	
バンド 5	1.60～1.71 μm

バンド 6	2.01～2.12 μm
バンド 7	2.13～2.15 μm
バンド 8	2.27～2.40 μm
立体観測 (Stereo angle)	15.3度 (バンド 4)
地上分解能	約18m
CCD素子の数	4096/バンド
観測幅	75Km

資料 3-10

ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite) ²⁸⁾

地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」

打ち上げ日 1996年 8 月17日 (その後制御不能となった。)

搭載センサー

高性能可視近赤外放射計 (AVNIR)

マルチスペクトルバンド (MU)

0.42～0.50 μm

0.52～0.60 μm

0.61～0.69 μm

0.76～0.89 μm

地上分解能 16m

観測幅 (直下) 80Km

パンクロマチックバンド (Pa)

0.52～0.69 μm

地上分解能 8 m

観測幅 (直下) 80Km

海色海温走査放射計

(OCTS: Ocean Color and Temperature Scanner)

観測波長、S/D、NEDT/Spectral Band

バンド(μ)	入力輝度 S/D, Radiance	
	(W/square meter/sr/ μm)	NEDT
0.402～0.422	145	450
0.433～0.453	150	500
0.480～0.500	130	500
0.510～0.530	120	500
0.555～0.575	90	500
0.655～0.675	60	500
0.745～0.785	40	500
0.845～0.885	20	450
3.55～3.88	0.15K	
8.25～8.80	0.15K	ターゲット温度 Target Temperature
10.3～11.4	0.15K	@300K
11.4～12.5	0.20K	

改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS)

極域成層圏のオゾンを監視・研究するための大気センサー

太陽を光源として対流圏上部から成層圏の赤外 (850—1610cm⁻¹) 及び可視 (753—784nm) の 2つのバンドでの大気の周縁方向の吸収スペク

トルを測定
 オゾン全量分光計 (TOMS)
 地球大気のアルベドを測定
 観測波長
 308.6、312.5、317.5、322.3、331.2、360.0nm
 NASA散乱計 (NSCAT)
 2日ごとに、全海域の90%の風速と風向を天候に左右されることなく、観測
 特殊なマイクロ波レーダーであり、アンテナから地球表面の広い海域にわたって14GHz帯のパルス電波を発射し、同一アンテナで海上からの後方散乱波を受信
 地表反射光観測装置 (POLDER)
 地球表面、エアロゾル、雲、海で反射される太陽光の偏光、方向性及び分光特性を測定、可視から近赤外までの8つのバンド (443、490、565、665、763、765、865、910nm (偏光なし)、443、665、865nm (3種の異なる偏光)) を観測
 温室効果気体センサ (IMG)
 地球の熱放射収支、大気温度の垂直分布、地表温度、雲の物理的特性を監視、研究するためのセンサ観測スペクトル範囲 $714\sim 3030\text{cm}^{-1}$ ($14\sim 3.3\mu\text{m}$) IMGはマイケルソン干渉計を用いたフーリエ変換赤外分光計
 地上・衛星間レーザ長光路吸収測定用リトロリフレクタ (RIS)
 地上から発射されるレーザー光を地上に反射するためのリトロリフレクターで、往復の光路の大気吸収スペクトルを測定することによって大気中の微量分子の濃度を測定

資料3-11 ERS-1 (ヨーロッパ リモートセンシング衛星1号)²⁷⁾

主要諸元

高度 780Km
 軌道 太陽同期軌道
 回帰周期 35日 (標準)

搭載センサー

SAR (合成開口レーダ)
 SCAT (測風散乱計)
 RA (レーダ高度計)
 ATSR-M (走査放射計及びマイクロ波サウンダ)
 LRR (レーザ反射鏡)
 PRARE (精密測距装置)

資料3-12 RADARSAT (CANADA)²⁷⁾

主要諸元

高度 798Km
 軌道 太陽同期準回帰軌道
 回帰周期 24日

打ち上げ日 1995年11月4日 (カナダ)
 寿命 5年
 搭載センサー
 合成開口レーダ
 Cバンド (5.6cm)
 観測対象により入射角を20度から50度 (60度まで可能) の間で変化可能なポインティング機能
 7つの観測モードにより
 分解能は10~100m
 走査幅は50~500Km

資料4-1 MSS・TM デジタル値から絶対放射輝度への変換式²⁹⁾

MSS・TMでは観測された放射輝度 ($\text{mW}/\text{cm}^2/\text{sr}$) はデジタル値で出力される。通常のデータ利用においてはバンド間あるいは単バンド中のデジタル値の差異を議論し、絶対放射輝度を問題とすることは少ない。しかし、大気効果の補正等のようにMSS/TMで測定された絶対放射輝度が必要となる場合もあるので、デジタル値から絶対放射輝度を求める変換式を示す。

地上で補正されたデジタル値は観測放射輝度と線形関係にあるのでMSS/TMデータの絶対放射輝度値は式6-1により求めることができる。

$$R = V/D_{\max} (R_{\max} - R_{\min}) + R_{\min} \quad (6-1)$$

$$D_{\max} = 127 : \text{MSS} \\ = 255 : \text{TM}$$

ここで、Vは補正済CCTのデジタル値、Rはその時の絶対放射輝度、 $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ は検出器の最大および最小放射輝度であり、デジタル値 $D_{\max}$ および0にそれぞれ対応している。すなわち、入力放射輝度が $R_{\max}$ 以上の時、出力は $D_{\max}$ になり $R_{\min}$ 以下の入力放射輝度に対し出力が0になる。ランドサット2号から5号までのMSSに対する $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ の値を資料3-3に、ランドサット5号のTMに対する $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ の値を資料3-4に示す。

TMの熱バンド (バンド6) のデータにおける放射輝度R ($\text{mW}/\text{cm}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$) と絶対温度T (K) の関係は、 $R = 5.1292 \times 10^{-5} T^2 - 1.7651 \times 10^{-2} T + 1.6023$ (6-2) により与えられる。デジタル値0に対応する温度は200K、255に対応する温度は340Kである。