

陸域・沿岸域でのリモートセンシングへの期待

伊東 永徳

1. はじめに

1999年11月5日の毎日新聞に「スパイ衛星並みの高解像度を持つ衛星画像の商用提供を行う米国スペースイメージング社（本社コロラド州）は4日、東京や札幌、北京など世界10都市の中心部を高度680キロの宇宙空間から撮影した衛星画像を報道陣に公開した」という内容の記事が掲載されました。

公開されたリモートセンシングデータは、米国スペースイメージング社によって1999年9月25日午前3時20分（日本時間）に打上げられた人工衛星（IKONOS）から撮影されたものです。空間解像度は1 mで、衛星画像から人間は見えませんが、自動車ならトラックや乗用車といった車種の識別が可能です。後日、テレビで日本の販売代理店である三菱商事により、IKONOSから皇居のカルガモが識別できたというニュースが流れました。

スパイ衛星の技術・データの公開は、米国政府のゴア副大統領により1994年に商業化として正式認可されました。ただし、（1）戦場や緊張地域に関して米国政府がデータ送信を禁止できる（2）イラク、リビアなど国務省指定の「テロ支援国家」に販売しない、などの条件が付けられています。商業化の正式認可を受けて、米国衛星調査会社は、1997年12月24日に世界初の民間スパイ衛星「アーリーバード1号」を打上げました。高密度デジタルカメラを搭載したアーリーバード

1号の空間解像度は、軍事衛星には及びませんが、現在活用されている民間探査衛星（最高で10m）に対して、3 mになります。

IKONOSをはじめ、今後打上げられる人工衛星から提供される高空間解像度のリモートセンシングデータは、地図作成、都市計画などの他に資源探査、環境調査にも威力を発揮すると期待されています。特に環境調査では、小規模な現象（養殖海域周辺の赤潮分布、小規模開発の土砂流出分布、藻場分布など）を明瞭に映し、発生メカニズムや分布過程の解析に大きく貢献すると考えられています。

本稿では、リモートセンシングデータを活用するために、基礎知識としてリモートセンシングの概略、特徴、現状を、そしてリモートセンシングの将来展望、利用例といったことについて述べていきます。

2. リモートセンシングの概略

2.1 リモートセンシングとは？

リモートセンシングとは、離れた場所から物質が太陽光などの電磁波を受けることにより反射・放射の特性を利用して、物質に直接接触することなく性質や状態を観測する技術のことをいいます（図1参照）。私たちが、リモートセンシングで得られる情報は、個々の物質のもつ波長特性と反射・放射の強さです（図2参照）。

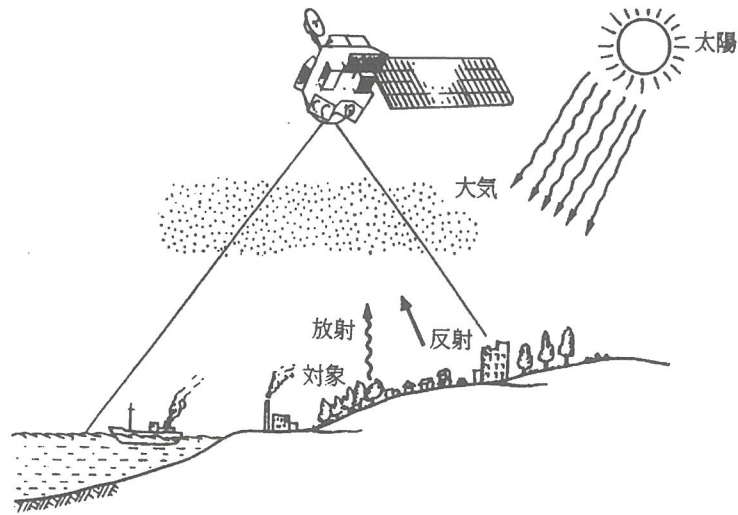


図1 リモートセンシングによるデータ収集。(資源観測解析センター編, 1990より)

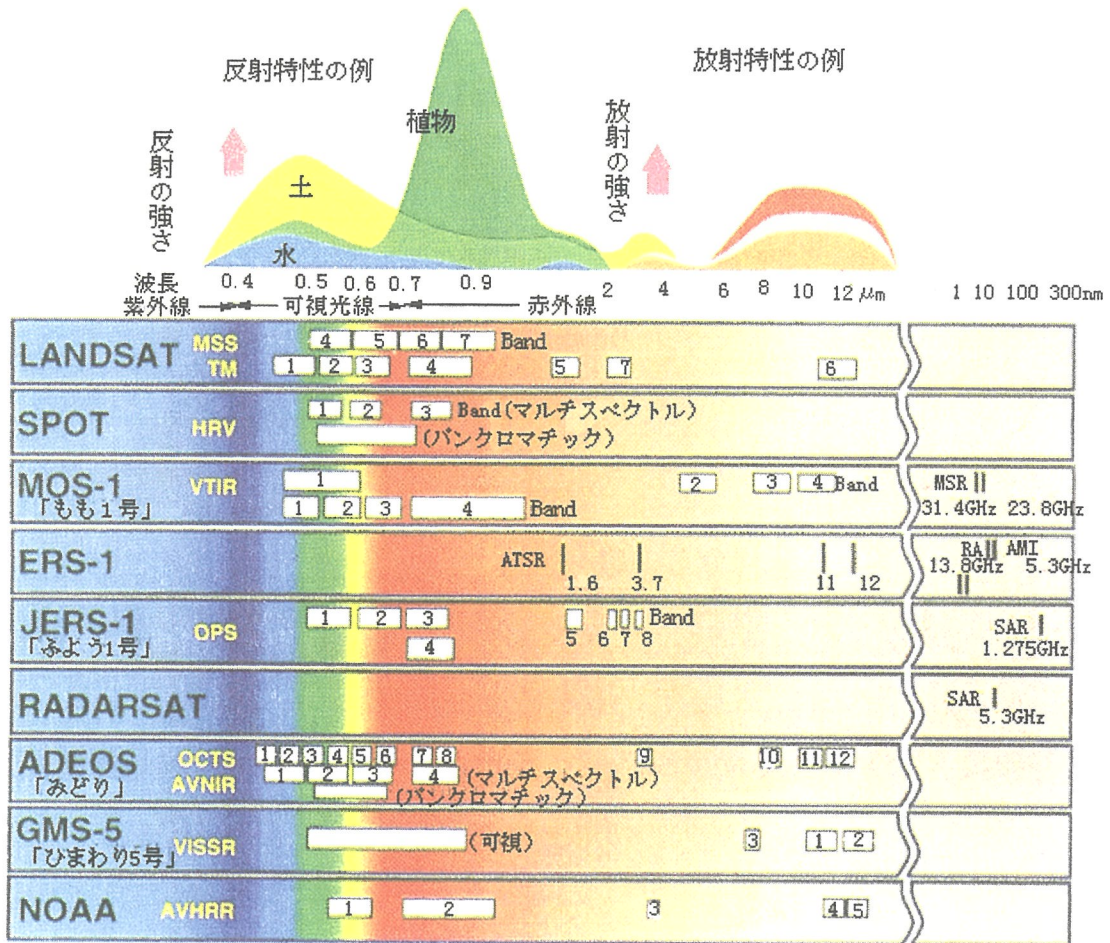


図2 リモートセンシングの利用波長域。

(<http://www2u.biglobe.ne.jp/~ryodia/experience/chart/tokusei.html>より引用)

2. 2 リモートセンシングの特徴

本稿は、人工衛星と航空機を利用するリモートセンシングを扱います。そのリモートセンシングには、次のような特徴が挙げられます。

- 1) リモートセンシングの長所
 - ・ 広い範囲を均質に観測できる
 - ・ 同地域を繰り返し観測できる
 - ・ 特定（極小）地域の観測が可能である（航空機レベル）
- 2) リモートセンシングの短所
 - ・ 検証するために現場観測データが必要
 - ・ 可視・近赤外域から熱赤外域までは、雲で覆われた地域の情報が得られない
 - ・ 大容量のデータを扱うので、それに耐える高速処理のシステムが必要

過去および現在、一般的によく使用されているLandsat、NOAAといった人工衛星・センサーの特徴を表1に、今後打上げられる予定の人工衛星・センサーの特徴を表2に示します。また、各センサーのもつ可視域、近赤外域および熱赤外域といった波長帯から、地表面温度、水温などの観測が可能である項目を表3に示します。

2. 3 リモートセンシングデータの特徴

リモートセンシングデータ（画像データ）には、物質の特性以外に、撮影角度による幾何学的歪みや大気中の水蒸気やチリといった情報も含まれています。これらを除く補正処理を行わなければなりません。

通常、私たちが画像データを使用する場合、幾何補正、大気補正が施された“補正済データ”を利用します。従って、私たち自身が解析を行う際には、補正処理を行う必要はありません。しかし、画像データが地図座標系、現場観測データとうまく合わないといった場合は、私たち自身で補正処理を行う必要があります。

3. リモートセンシングの現状

現在利用されている人工衛星は、あらかじめ調査対象物質を決定し、物質を捕らえるのに適切なセンサーを搭載して観測しています。そして人工衛星から得られたデータは、陸域・沿岸域といった特定地域の物質を捕えるのではなく、地球規模（グローバル域）での観測（1週間～1ヶ月の平均値）によく利用されています。これは、①低空間解像度（例えば1 km × 1 km）の精度で観測ができる、②雲で覆われる地域が極小、といった理由からです。陸域・沿岸域では、特定地域の物質を扱わなければならないので①、②といった問題は重要です。

陸域・沿岸域といった特定地域で、低空間解像度の問題を解決するには、Landsat/TM（可視域・カラーモードで40m）、SPOT/PAN（可視域・白黒モードで10m）・XS（可視域・カラーモードで20m）および航空機によって観測される空間解像度の高いデータを使用します。

特定地域が雲で覆われている場合は、観測頻度が高く、類似したセンサーより観測されたデータを使用します。しかし、解析の際には、各人工衛星・センサーの“観測時間（時間解像度）”、“空間解像度”の違いを考慮して進めなければなりません。

また、観測波長帯における各種鉱物・岩石（陸域）、植物プランクトン（海域）といった分光特性は、比較的明らかになってきています（Hunt, 1970；1974；1977, Halldal, 1981）が、利用されているセンサーには、物質の特徴を捕える代表的な波長帯のみ（低分光解像度）の設定になっています。例えば、ADEOS/OCTSやOrbView-2/SeaWiFSであれば、大まかな植物プランクトンの特性を捕らえるような観測波長帯の設定になっています（図3参照）。

表1 現在利用可能な人工衛星とセンサー一覧 (平野敏行 編, 1998より1部改変)

人工衛星 センサ	Landsat MSS	Landsat TM	SPOT Pan	SPOT XS	MOS-1 MESSR	MOS-1 VTIR	MOS-1 MSR	ERS-1 ATSR	ERS-1 RA	ERS-1 SAR
稼働期間	1972~1983 (1,2,3) 1982~ (4,5)	1982~	1986~	1986~	1987~1996	1987~1996	1987~1996	1991~	1991~	1991~
空間解像度	79m(1,2,3) 82m(4,5)	28.5m 120m	10m	20m	50m	900m 2700m	23km 32km	1km 22km	-	30m
時間解像度 (回帰周期)	18日(1,2,3) 16日(4,5)	16日	26日	26日	17日	17日	17日	3日, 35日, 17日	3日, 35日, 17日	3日, 35日, 17日
分光解像度 - 可視域 (バンド数)	2	3	1	2	2	1				
近赤外域	2	1		1	2					
中間赤外域		2								
熱赤外域		1				3		4		
マイクロ波								2	2	1
ラジオメトリック解像度	6bits	8bits	8bits	8bits	6bits	8bits	10bits	3bits	3bits	3bits
観測範囲	185×170km	185×170km	60×60km	60×60km	100km	1500km	317km	500km	-	100km
衛星高度	900km(1,2,3) 705km(4,5)	705km	832km	832km	909km	909km	909km	780km	780km	780km
観測項目(海域)	水色、濁度	水色、濁度	濁度	濁度	水温	水色、水温	海水、水温	水温	海面粗度	海面粗度
値段(観測範囲)	¥97,500	¥463,700	¥259,700	¥226,600	¥50,000	¥34,400	¥9,700	280 (ECU)	400 (ECU)	¥183,200

人工衛星 センサ	JERS-1 SAR	JERS-1 OPS	Radersat SAR	ADEOS OCTS	ADEOS AVNIR	GMS(ひまわり) VISSR	NOAA AVHRR	OrbView2 SeaWiFS	IKONOS
稼働期間	1992~	1992~	1995~	1996~1997	1996~1997	1977~	1979~	1997~	1999~
空間解像度	18m	18.3m 24.2m	10~100m	680m	16m (Mu) 8m (Pa)	1.25km 5.0km	1.1km	1.13km	4m (Mu) 1m (Pa)
時間解像度 (回帰周期)	44日	44日	24日	41日	41日	1時間	12時間 6時間	2日	11日
分光解像度 - 可視域 (バンド数)		3		6	4 (Mu:3, Pa:1)	1	1	6	4 (Mu:3, Pa:1)
近赤外域				2	1		1	2	1
中間赤外域		4		1			1		
熱赤外域				3		3	2		
マイクロ波	1		1						
ラジオメトリック解像度	3bits	6bits	-	10bits	10bits	8bits	10bits	10bits	11bits
観測範囲	75km	75km	100~500km	1400km	80km	Global	2400km	2800km	13.8km
衛星高度	568km	568km	800km	800km	800km	35800km	833km	705km	680km
観測項目(海域)	海面粗度	水色、濁度	海水、海面粗度	水色、水温	水色、濁度	雲、水温	濁度、水温	水色	水色、濁度
値段(観測範囲)	¥120,000	¥120,000	¥540,000	¥20,000	¥180,000	-	¥33,000	\$500	¥5,500 (1km ²)

表2 将来利用可能な人工衛星とセンサー一覧 (平野敏行 編, 1998より)

人工衛星 センサ	EOS-AM/PM MODIS	EOS-AM/PM ATSR	ENVISAT MERIS	ADEOS II GLI
打上げ予定	1999 (AM) 2001 (PM)	1999 (AM) 2001 (PM)	2000	2000
空間解像度	1000m 500m 250m	15m 30m 90m	1200m 600m 300m	1000m 250m
時間解像度(回帰周期)	16	16	35	4
分光解像度 - 可視域 (バンド数)	10	3	8	16
近赤外域	10	6	5	13
中間赤外域	6			1
熱赤外域	10	5		6
ラジオメトリック解像度	12bits	12bits	12bits	12bits
観測範囲	2330km	60km	1450km	1600km
衛星高度	705km	705km	800km	803km
観測項目(海域)	水色、水温	水色、水温	水色	水色、水温

表 3 観測波長別による観測項目

観測地域	陸 域			沿 岸 域		
観測波長帯	可視・近赤外域	熱赤外域	マイクロ波域	可視・近赤外域	熱赤外域	マイクロ波域
観測項目	地表面上の物体 地形 植生分布 鉱物・岩石 積雪分布	地表面温度 鉱物・岩石 積雪分布	地形 鉱物・岩石 積雪分布	水色分布 日射量 海水分布	海面水温 海水分布	海面高度 海上風 波浪 海水分布

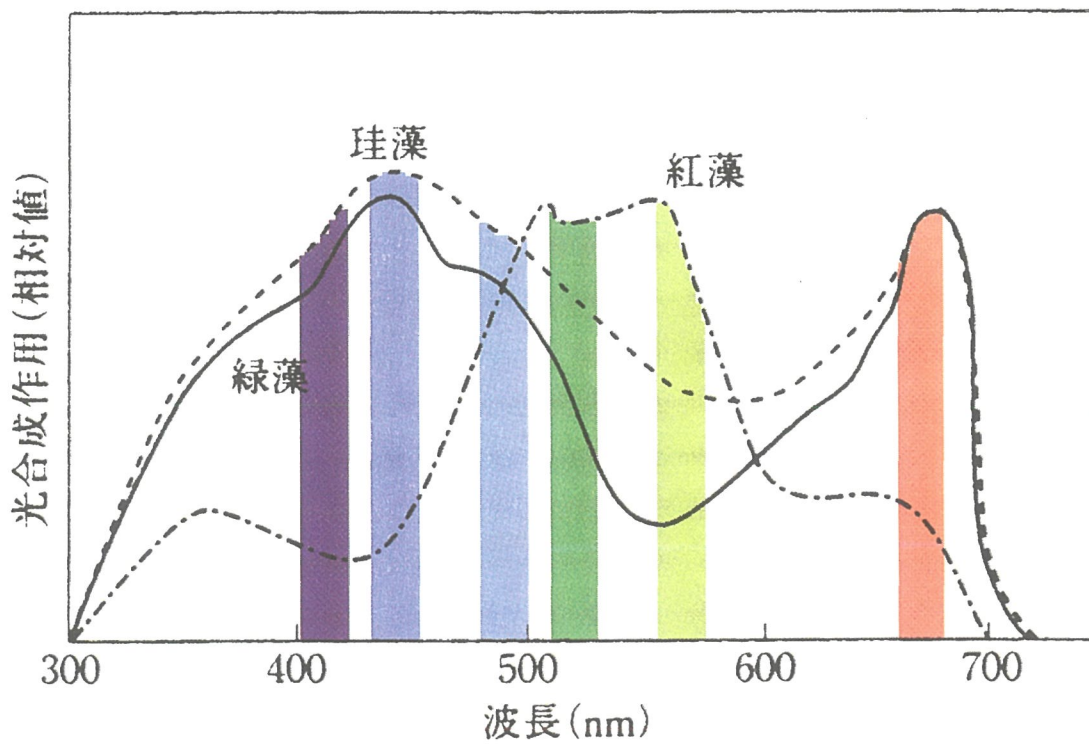


図 3 相対的な珪藻型、紅藻型、緑藻型の光合成作用スペクトルと ADEOS/OCTS の観測波長域。
 (Halldal, 1980 より 1 部改変)

4. リモートセンシングの将来展望

冒頭で触れた人工衛星 IKONOS は、軍事技術の民間転用の一環として米国政府が偵察衛星技術の商業利用を許可して以来、世界で初めて高空間解像度で観測できる人工衛星です。そして分光解像度は、Landsat/TM(可視域のみ)、SPOT/Pan と同じなので、可視・近赤外域・カラーモードで 4 m、可視・近赤外域・パングロモードで 1 m と、いままで利用してきたデータの“1/10”の高空間解像度で観測が行われ、人工衛星から航空機レベルの観測が可能になります(図4参照)。陸域・沿岸域での利用には、数mの空間解像度で観測できる航空機が主でしたが、これからは人工衛星から高空間解像度のデータ収集が可能となり、特定地域での活用に期待されます。

2000年以降に打上げが予定されている人工衛

星は、陸域・海域・大気といった地球上すべての物質を捕えるために多くのセンサーを搭載するものです。そしてセンサーからは、高空間解像度、高分光解像度データの観測が予定されています。特に、ADEOS II/GLIは、可視域から熱赤外域までに“36”の観測波長帯を持つといった高分光解像度です。また、EOS/ASTERは、14の分光解像度をもち、なおかつ可視域で15m、近赤外域で30mという高空間解像度で観測するといったセンサーです。

このような高空間・分光解像度のデータを用いることにより、より詳細な物質の分光特性が捕えられるので、近赤外から熱赤外域に特性のある各種鉱物・岩石、そして植物プランクトンの種類の識別が可能になると思われます(図5、6参照)。

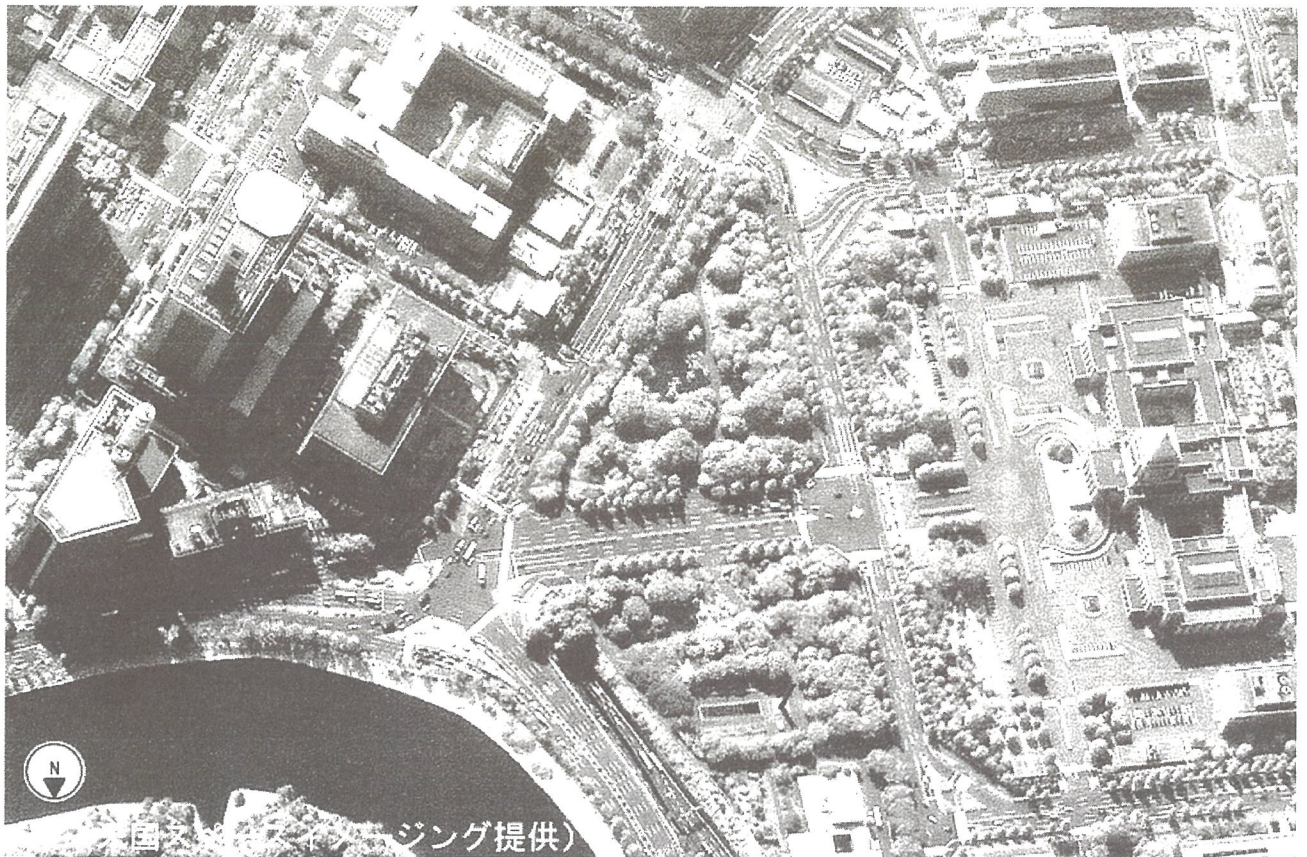


図4 IKONOSより収集された東京・霞ヶ関周辺。

画像提供：米国スペースイメージング 画像提供協力：日本スペースイメージング株式会社
(<http://www.mitsubishi.co.jp/jsi/conte/sampleimage/jpeg6.html>より)

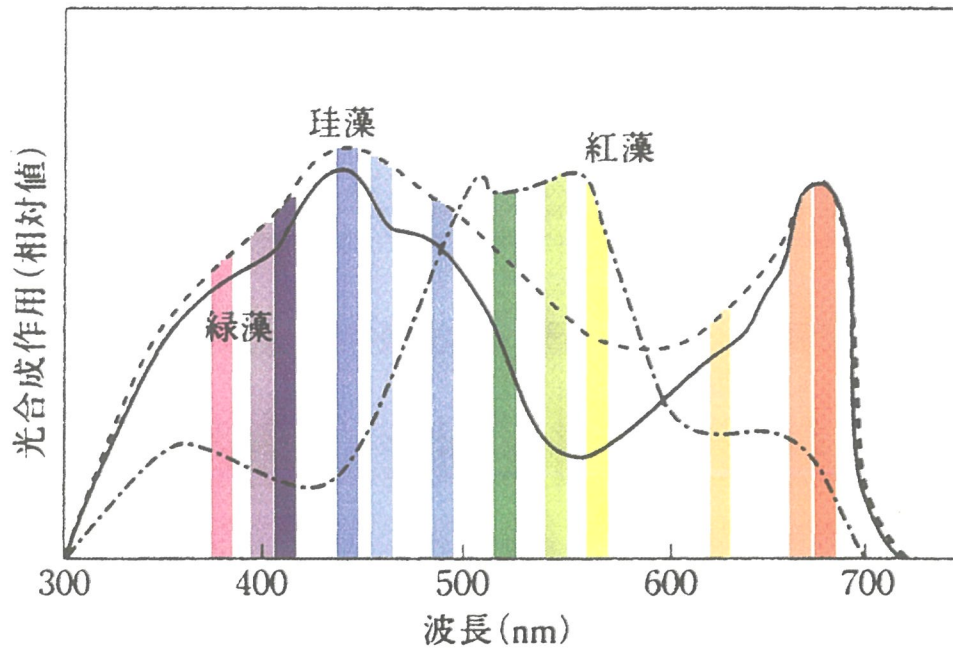


図5 相対的な珪藻型、紅藻型、緑藻型の光合成作用スペクトルと ADEOS II/GLI の観測波長域.
(Halldal, 1980 より一部改変)

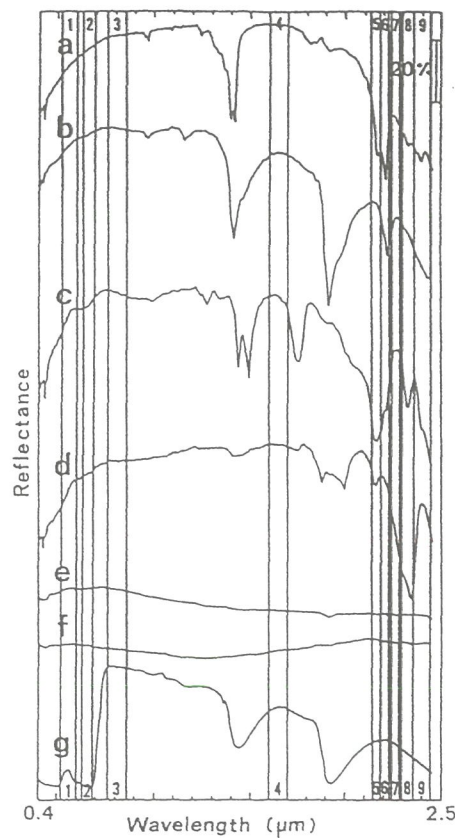


図6 ASTER VNIR (可視近赤外域) と SWIR (短波長赤外域) の観測波長域と典型的な鉱物、岩石、植生の分光反射率: (a) カオリナイト; (b) モンモリロナイト; (c) 明礬石; (d) 方解石 (e) 安山岩; (f) 花崗岩; (g) 植物葉 (Yamaguchi et al., 1993より)

5. リモートセンシングデータの利用例

5. 1 画像解析ソフトおよび沿岸域での画像データの現状

画像解析の分野では、ENVI、IMAGINEといった多種多様な商用ソフトがあり、様々な形式の画像データの読み込み、補正処理技術といった優れた機能をもっています。しかし、専門的な知識を用いた処理が必要な場合には、それなりの金額を投資して高機能を装備したソフトを入手しなければなりません（例えば、IMAGINEは3バージョンあり、一般的な画像解析ができる機能を備えた低レベルのもので¥700,000）。一方、NASAから提供されているSeaDASという無料ソフトもあります。ここでは画像解析ソフトの1つであるSeaDASを例にして画像解析ソフトおよび沿岸域での現状について述べていきます。

今年（1999年）の8月29日から9月3日にかけて、千葉大学環境リモートセンシング研究センターにより水色センサーについてのシンポジウムが開催され、その一環で解析ソフトの講習会が開かれました。その講習会で使用されたソフトがSeaDASです。

SeaDASは、NASAにより海色（観測波長帯は可視域）を主とした画像データの解析ソフトとして開発されたソフトです。ただしSeaDAS単体では稼働せず、別途IDLという解析ソフト（UNIX：約¥700,000、Linux：約¥370,000）が必要です。これは、NASAがアプリケーション開発費を削減するため、IDLの機能を利用して作成したためです。

図7は、SeaDASを使用した結果の1例です。図では日本列島の周辺（沿岸域）が、水色で覆われています。これは、データに付属している補助データより、水深が浅く、陸域から流出してくる懸濁物の影響のために物理量として不明確な値であることを示す範囲になります。つまり、沿岸域で海色データを活用する場合は、私たち自身が未補正の画像データから解析を開始し、目的に応じ

て独自の物理量への換算方法を考案しなければなりません。しかし、ADEOS II/GLIといった高分光解像度の画像データから懸濁物の把握といったことも期待でき、沿岸域での物質の識別認識が可能になると思われます。

5. 2 画像データの評価方法

画像データは、現場観測データと比較して検証しなければなりません。この検証作業を効率的に処理し、なおかつ他の付属する現場観測データと連動させて解析を進めていく上で、地理情報システム（GIS）が有効です。以下にGISを用いた画像データの利用方法を示します。

図8は、ADEOS/OCTSによる水温とクロロフィルa濃度の分布です。この図から三陸沖に三陸沖暖水塊が確認できます。ここで、水温画像データから漁場の選定を試みてみます。好漁場は、経験的に流れ、水温、塩分が急激に変化している潮境、潮目と呼ばれる付近であることが知られていますから、演算機能を水温画像データに施して水温変化のある部分の抽出を行います。図9がその結果になり、三陸沖暖水塊やその周辺に潮目が確認できます。

漁獲量情報といった現場観測データがあれば、水温画像データから見積った潮目やクロロフィルa濃度の画像データと比較して漁獲量との関係の把握といった解析に適応できると思われます。

図10は、NOAA/AVHRRより得られた植物の活性度を表す植生指数です。この植生指数については、今までに様々な方程式が提案されていますが、ここでは一般的によく用いられる正規化植生指数（NDVI：Normalized Difference Vegetation Index）を適応し、GISの演算機能を用いて計算しました。

正規化植生指数と植物の現存量、種類などと因果関係が見出されれば、GIS上で特定地域の現存量の把握、植物の分類分けが行えるでしょう。

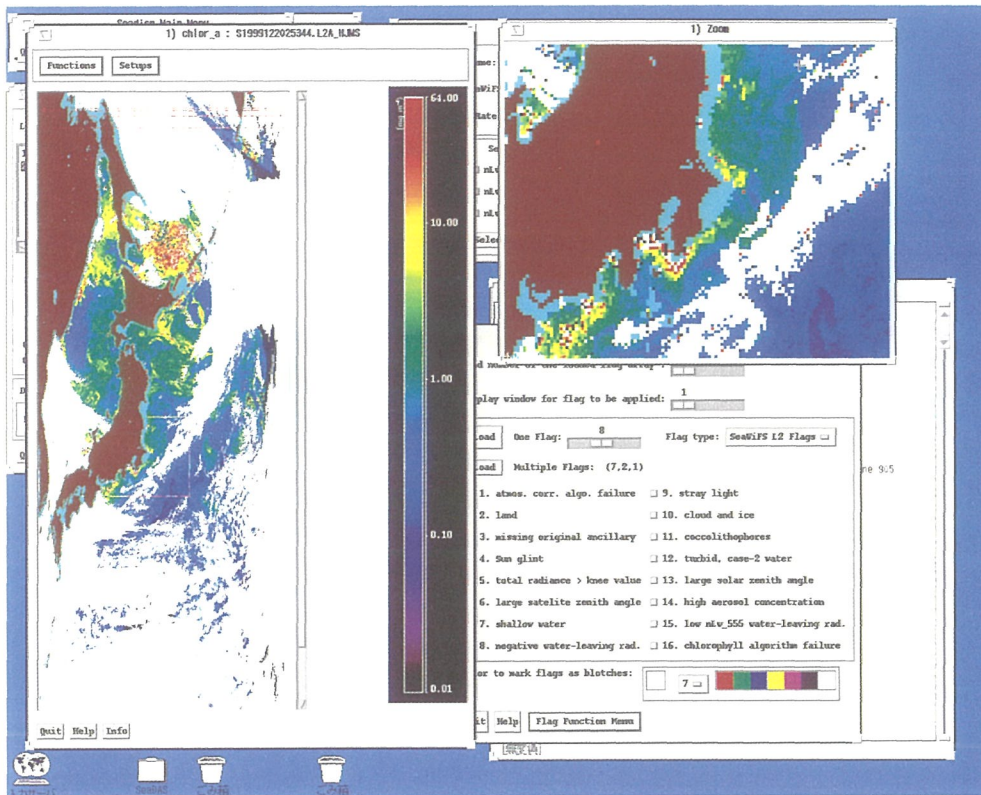


図7 SeaDASのアプリケーション画面。(データ提供：浅沼市男(海洋科学技術センター))

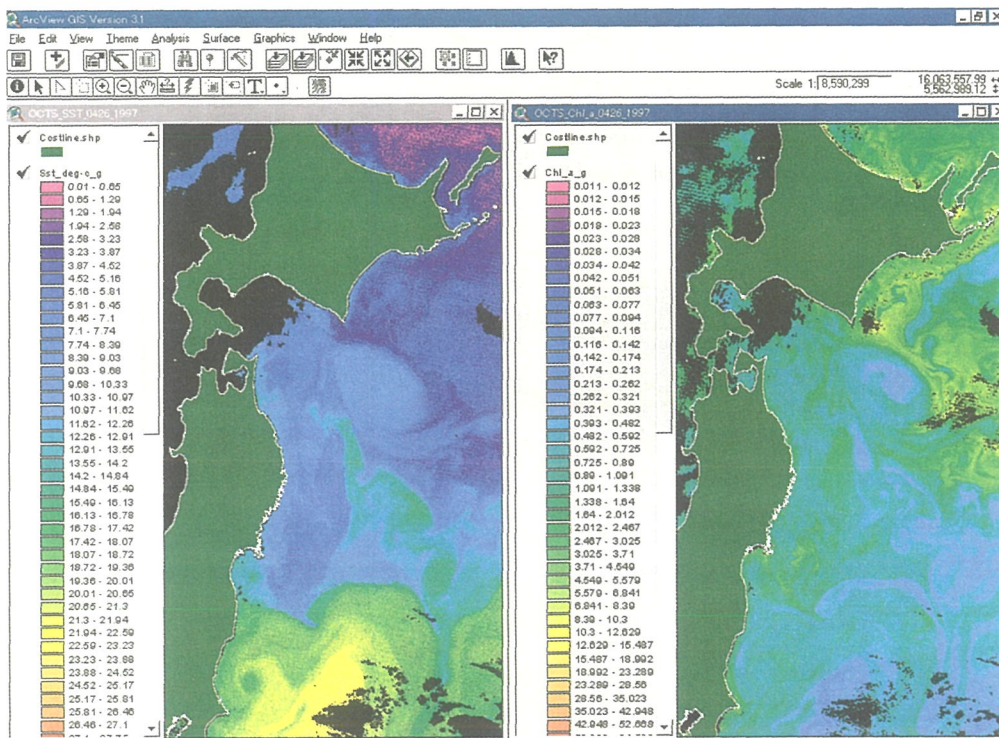


図8 OCTS画像をGIS上で表示した結果(1997年4月26日)。

左図は海表面温度(°C)、右図はクロロフィルa濃度(mg/m³)。使用したデータレベルは準リアルデータ。
(c)NASDA/EORC : <http://www.eorc.nasda.go.jp/ADEOS/ILAC/RtcL3p.html>より)

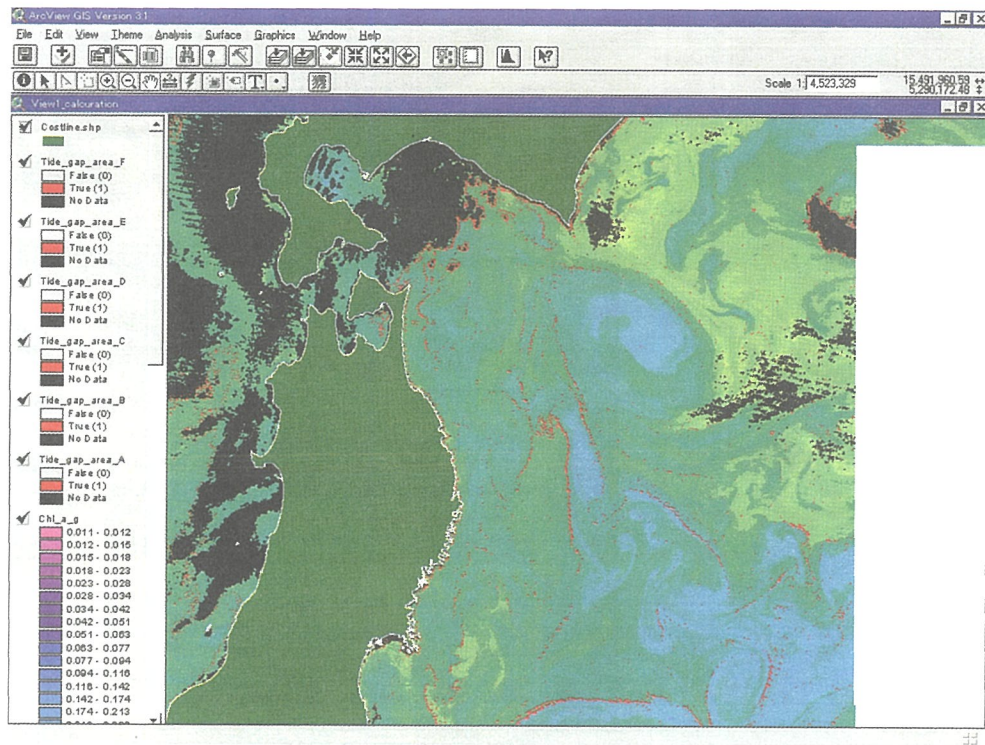


図9 演算機能を使った抽出結果（クロロフィルa濃度分布上に抽出結果を表示）。
 図中の赤部が水温差0.1～0.4℃の変動を示す。
 ((c)NASDA/EORC : <http://www.eorc.nasda.go.jp/ADEOS/ILAC/RtcL3p.html>より)

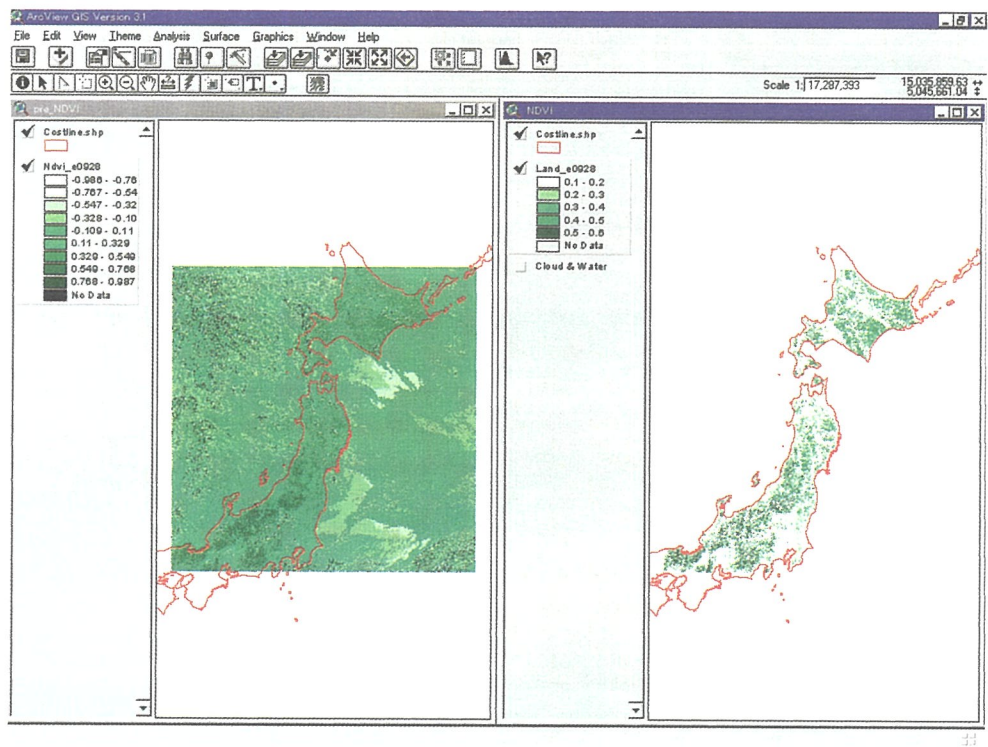


図10 演算機能を使った植生指数. 使用したデータはNOAA-12 (1999年9月28日).
 左図は計算結果であり、右図は雲・水の情報を除去した結果。
 (JAIDAS (日本画像データベース) : <http://web.cc.tohoku.ac.jp/cc/noaa.html>より)

6. まとめ

リモートセンシングを利用するに当たり、最低限理解しなければならないキーワードは、形を認識する空間解像度（詳細な物質の状態）、物質の特性を見分ける分光解像度（植物プランクトンの吸収特性など）および経時変化を捕える時間解像度（人工衛星の回帰日数）です。従って、私たちが画像データを利用する場合には、空間解像度、分光解像度および回帰日数を理解し、目的の物質を捕えることのできるリモートセンシング（画像データ）を選択する必要があります。また、特定地域での利用に当たっては、画像データとグラウンドトゥールズやシートゥールズの現場観測データから検証し、画像データから得られた精度（例えばクロロフィルa分布など）を十分理解する必要があります。

2000年以降には、高空間・分光解像度のセンサーを搭載した人工衛星の打上げが次々と予定さ

れています。今後ますます特定地域の自然現象を人工衛星から捕らえることが予想でき、陸域・沿岸域の分野での活用に期待されます。

画像解析については、いままでスーパーコンピュータ・ワークステーションレベルでないと扱えませんでした。コンピュータ技術の発達により、パーソナルコンピュータレベルでの処理が可能になり、簡易的に操作・解析できるようになってきました。

現場観測で環境調査を計画する場合には、自然現象の時・空間変化について、十分把握しておかなければなりません。しかし、現状の調査方法では、時間的にも物理的（経費も含む）にも時・空間変化を十分に捕らえる内容のものではありません。リモートセンシングを利用した技術は、自然現象における時・空間変化のより詳細な情報を私たちに与えてくれるでしょう。

参考文献

- 1) 物理探査学会 編 1999 物理探査ハンドブック. 物理探査学会, 1336pp.
- 2) Halldal, P. 1981 海洋植物による太陽エネルギー捕獲. 柴田和雄・池上明・山田瑛 (編), 太陽エネルギーの生物・化学的利用Ⅲ, 学会出版センター, pp.278.
- 3) 平野敏行 編 1988 沿岸の環境圏. フジ・テクノシステム, pp.1497-1503.
- 4) Hunt, G. R. 1977 Spectral signatures of particulate minerals in visible and infrared, *Geophysics*, 42, pp.501-513.
- 5) Hunt, G. R. and J. W. Salisbury 1970 Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. I. Silicate minerals, *Modern Geology*, 1, pp.283-300.
- 6) Hunt, G. R., J. W. Salisbury, and C. J. Lenhoff 1974 Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. IX. Basic and ultrabasic igneous rocks, *Modern Geology*, 5, pp.15-22.
- 7) 日本リモートセンシング研究会 編 1996 図解リモートセンシング. 日本測量協会, pp.3, 226.
- 8) 資源観測解析センター 編 1990 宇宙からの地球観測システム. 資源観測解析センター, pp.23-64.