地球観測衛星データの解析技術

—衛星からのデータ、最近の動向—

正会員 坂田俊文[†]、須藤 昇[†]

本格的な地球観測を行うための人工衛星の登場は1972年のLANDSATからである。現地調査が主であった資源探査や環境調査の世界において、上空約900kmの高度より広範囲を瞬時に観測できる衛星リモートセンシングの出現によりその研究方法は大きく変化した。その根本には、リモートセンシングセンサの開発と、取得されたリモートセンシングデータの解析技術がある。ここでは衛星リモートセンシングの歴史を振り返り、衛星開発・センサについて話を進め、最後にリモートセンシングデータの特徴とその解析処理技術について触れたい。

キーワード：リモートセンシング、画像処理

1. リモートセンシングの歴史

1.1 リモートセンシングによる地球観測

スプートニク以来、世界各国での宇宙開発競争が始まり、惑星探査機や人工衛星を宇宙に送り出してきた。

1960年代前半の気象観測衛星シリーズはTIROSで、続いてESSA、そしてNOAA (ITOS)と1970年代の終わり頃まで続いた。そして、TIROS-Nとして新シリーズのNOAAが打ち上げられ、現在も引き続きミッションが行われデータが送られている。1960年代の後半には多目的の気象衛星としてNIMBUSが打ち上げられ、オゾン、紫外線、海温分布、太陽エネルギーなどの様々な項目の観測機材が搭載されるようになった。NIMBUSは7号まで打ち上げられ、特に極地方におけるオゾンに関する貴重なデータを送り続けた。

国際協力による全地球の気象観測は、赤道上空約36,000kmの軌道に配置された静止軌道気象衛星によるものである。この軌道上において秒速約3kmで周回すると、地球上から静止している様に見えるので、静止軌道と呼ばれるのである。米国のGOES、日本のGMS (ひまわり)、ESA (欧州宇宙機構)のMETEOSAT、そしてインドのINSATである。GOESはEASTとWESTと2機あるので計5機の衛星で地球全球を観測している。

1.2 地球観測衛星とセンサ

NASAが地球観測衛星として打ち上げたLANDSATは、極方向へ地球を南北に周回しながら観測する極軌道衛星で、太陽同期準回帰軌道をとっている。地球観測衛星は殆どこの軌道で観測を行っている。太陽同期軌道では、同一緯度の場所では毎日、同一の地方時に同一方向に衛星が通過する。このため、太陽光の入射角をほぼ一定にできることから、太陽の

反射光を利用する受動型センサでは、観測条件を一定にできるという利点がある。しかし、回帰軌道では地球全体をカバーすることができず、通常の地球観測衛星はN日ごとに同一地点を通過する準回帰軌道を使用している。

LANDSAT 1号機から3号機までには多波長のスキャンニングセンサ (MSS) とリターンビーム・ビジコン・カメラ (RBV) の2種類が搭載された。4号機から、MSSに加えてセマッテック・マッパーTMが搭載された。MSSは空間分解能約80mであり、TMは空間分解能30mである。LANDSAT7号ではTMからETMと変更され空間分解能約15mのバンドが追加された。高度約712kmの軌道上から、飛行方向に対して左右にスキャンニングするシステムで、地表185kmの幅を軌道方向へ連続して観測している。1シーンの画像としては185kmの幅に対して軌道方向へ同じく185kmの正方形の大きさで定義され、約25秒で撮影する。画像センサはCCDでスペクトルの幅は可視、近赤外域をカバーしている。MSSセンサでは4バンド、TMセンサでは7バンドに分けて観測し、それぞれを信号に変換し地上の受信局に送信している。ランドサットはTMセンサの搭載により、地球観測と同時に、資源探査への道が広がったといえる。

つぎに、人工衛星による地球環境観測や資源探査について簡単に述べる。人工衛星のデータは航空写真と異なり広範囲に地形や植生などの地表面被覆物を観測できる。鉱物資源の種類によっては、特徴的な地質構造を持つ場合があるため、地質構造の判読によって資源探査を行うことも可能である。また、物体はそれぞれ固有の電磁波に対する特性を持つものが多く、予め探査対象のスペクトル特性を調べておけば、衛星データより判読が可能になる。植生は近赤外領域に特徴をもつスペクトル特性をもつので、植生の活性度や植生の分類を行うことも可能である。TMセンサは、短波長赤外域にある2バンドによって、変質帯の識別や、炭化水素鉱床の貯留層としての重要な石灰岩などの識別、マッピングを行った例が知られている。

[†] 東海大学情報技術センター

"Data Analysis of Earth Observation Satellite - Recent Trend of Satellite Data -"
by Toshibumi Sakata and Noboru Sudo (Tokai University Research and Information Center, Tokyo)

表1 代表的な地球観測衛星の諸元

Satellite	Sensor name	Band	IFOV [m]	Swath Width [km]	Pixel×Line /1scene	Data rate	Quantization level
MOS-1 (Japan)	MESSR	4	50	100×2	"2,048×2,000"	16Mbps	64
LANDSAT-5 (USA)	MSS	4	80	185	"3,200×2,400"	15.1Mbps	64
LANDSAT-5 (USA)	TM	7	30/120	185	"6,900×5,700"	84.9Mbps	256
SPOT (France)	HRV XS	3	20	60×2	"3,000×3,000"	50Mbps	256
SPOT (France)	HRV Pa	1	10	60×2	"6,000×6,000"	50Mbps	256→64
J-ERS-1 (Japan)	OPS VNIR	3	18×24	75	"4,680×4,200"	60Mbps	256
NOAA (USA)	AVHRR	5	"1,100"	"2,600"	"2,000×4,500"	48Mbps	1024
ADEOS (Japan)	AVNIR Mu	4	16	80	"5,000×5,000"	120Mbps	256→128
ADEOS (Japan)	AVNIR Pa	1	8	80	"10,000×10,000"	120Mbps	256→(128)

* IFOV [m] : Instantaneous Field of View

欧州宇宙機関 (ESA) の地球観測衛星第1号は1991年に打ち上げられたERS-1である。搭載センサはCバンド(5.3GHz)の合成開口レーダSARのほかに、測風マイクロ波散乱計(SCAT)、レーダ高度計(RA)などが搭載されている。海洋、海水分布、海上風、海洋循環等の観測に主点を置いている。

1992年に打ち上げられた日本の資源探査衛星であるJERS-1は、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目的としている。搭載センサはLバンド(1.275GHz)のSARのほかに光学センサ(OPS)があり、可視域から短波長赤外までの7つのバンドに分けて持ち、4バンドの短波長赤外では岩石や鉱物の識別が可能である。地表分解能は18m×24mで観測幅は75kmである。可視・近赤外バンドに前方立体視センサを積んでおり、精度の高い立体視を可能としている。

1996年8月にH-IIロケットによって打ち上げられた日本の地球観測衛星ADEOSは、8つのセンサを搭載した3.5tをこえる大型の多目的衛星であった。ADEOSは地球温暖化、オゾン層の破壊、熱帯雨林の減少、異常気象発生等の環境変化のデータを取得できる衛星である。高性能可視近赤外放射計(AVNIR)および海面色海温走査放射計(OCTS)の2センサを中心に、地球温暖化ガス、オゾン量の測定をするセンサが搭載されている。しかし、1997年6月30日に太陽パネルの故障により、機能停止した。

1.3 光学センサの空間分解能とスペクトル分解能

空間分解能というのは識別可能な地表の大きさと考えればよい。近年センサの高解像度化が進んでいる。高解像度化によって、より詳しく地表面の状況が観測できるようになった。しかし、スペクトル分解能を考えると長波長側においてはセンサの地表分解能を上げるのは技術的に困難な点も多い。また、高空間分解能センサでは、当然、そのデータ量は莫大なものとなる。衛星から地上局へデータを転送する場合、データ転送能力の制約等を受け、転送できるデータ量も決まってくる。そのため、バンド幅が狭くなり、バンド数も限られているのが現状である。

資源探査等の利用においては広範囲なスペクトルに対し高いスペクトル分解能(バンド数)が重要であり、高空間分

解能を持ち、かつスペクトル分解能も高いセンサの出現が待たれている。1999年に米国で打ち上げられたEOS-AM-I (Terra) 衛星に搭載されたASTERは可視・近赤外・熱赤外の間に15バンドを持ち、地表分解能もそれぞれ可視・近赤外・熱赤外、15m・30m・90mであり、地球環境観測、地質・資源探査、気象等への利用が進められている。

1.4 マイクロ波センサ

光学センサは受動的に太陽光による物質の反射吸収を測定している。太陽光を吸収した物体がそのエネルギーをマイクロ波で放射することがある。それを観測するのがマイクロ波放射計である。それに対し、センサがマイクロ波を送信し、その後方散乱を測定するアクティブ型センサがある。その代表的なものが合成開口レーダSARである。マイクロ波は光よりもはるかに長い波長域であるため、雲、雨、一部の植生等を通過して、直接地表面の情報を得られるという利点がある。

SARが初めて搭載されたのは米国のSEASATであり、1978年のことである。周波数はLバンドであり、空間分解能は25mであった。その後NASAは、スペースシャトルからSIR-A(1981年)、SIR-B(1984年)による観測を行っている。そして、1990年代にはESAのERS-1や日本のJERS-1が打ち上げられ、一番新しいSAR搭載衛星はカナダのRADARSAT(1996年)である。まさに、SARによるリモートセンシングが本格化する時代が到来したといえる。マイクロ波リモートセンシングは人間の視覚とは大きく異なった波長帯の電磁波の相互作用に依存しており、その特性を生かした利用研究が進められている。

2. データ容量と転送速度

衛星データの利用が促進されるにつれ、今まで航空写真の領域であった分野へ、衛星データの利用が考えられるようになり、ユーザの高分解能データへの需要が高まっている。現在、地球観測衛星の中で高分解能センサを搭載しているのは、フランスが打ち上げたSPOT(パンクロマチックPa:10m)、インドが打ち上げたIRS(Pa:5.8m)等がある。また、多目的の一般利用商業衛星の分野では米国が打ち上

げたIKONOS衛星がPaで1.0mの地上分解能を誇っている。

衛星データの高分解能化が進むにつれ、必然的に、そのデータ量は増加する事になる。データ増加は記憶容量の増加、転送データ容量の増加という問題へ直接つながっている(表1)。そこで、データ圧縮が必要になるが、本来の地球観測衛星の持つ正確な観測データの取得という目的を考えると圧縮法は限られてくる。

次の項目では、日本の地球観測衛星であるADEOSを例として衛星データの圧縮について説明する。

2.1 ADEOS AVNIRの圧縮方式

2.1.1 ADEOS AVNIR観測データ

AVNIRは、ADEOSに搭載されている高分解能の光学センサである。3つの可視バンドと1つの近赤外バンドのセンサで構成されている。4つのマルチスペクトルバンド(Mu)は地上分解能が16mであり、1つのパンクロマチックバンド(Pa)では地上分解能が8mとなっている。それぞれ、地上を80km幅で観測を行う。地表からの反射光を集光・分光し、各バンドの検出器(CCD)により光電変換を行う。光電変換されたアナログ信号を増幅し、A/D変換された後、多重化・フォーマット化(データ圧縮を含む)され、観測信号としてテレメトリ情報と共に衛星システム側へ送出する。通信リンクはXバンド3波(8.150・8.250・8.350GHz)で転送速度は60Mbpsである。

AVNIRの有効画素数と量子化ビット数を次に示す。

(1) Paバンド(パンクロマチックバンド)

量子化ビット数：8ビット/画素

画素数：10,000画素×1ch

(2) Muバンド(マルチスペクトルバンド)

量子化ビット数：8ビット/画素

画素数：5,000画素×4ch

2.1.2 AVNIRの画像圧縮方式

(1) Paバンド

画像デジタル信号について、最下位の1ビットを切り捨て、7ビットデータとする。(7ビット・スルー)

(2) Muバンド

多重化画像デジタル信号について、バンド毎に以下に示すデータ圧縮処理を行う。

- ① 可変長符号化：ハフマン符号化を用いた方法
- ② 固定長符号化：差分圧縮方式
- ③ 7ビットスルー：最下位1ビット切り捨て方式

ADEOS AVNIRにおいてはMuでは3種類の圧縮方式を搭載しており、ユーザの要求に応じて選択し実運用を行えるようになっている。しかし、圧縮の効率は良くなく、マルチバンドの場合で、転送レートで10%ほどの改善しか得られてない。

2.2 次世代衛星データの圧縮技術

今後も、地球観測衛星に搭載されるセンサの高解像力化は続いていくと考えられるが、地球観測衛星の本来の目的

である正確なデータの収集という点に立つならば、圧縮率の点では期待できないが、可逆圧縮が望ましいと考える。しかし、増大するデータを限られた時間・スペースで処理をするかという点からも、センサの特性を生かした形でのデータの非可逆圧縮アルゴリズムの検討および開発の必要である。

日本の次世代高分解能衛星であるALOSでは、JPEG方式の圧縮アルゴリズムの導入が予定されており、センサの観測目的や利用目的に応じた圧縮率の検討がなされている。

3. リモートセンシングデータの解析処理

リモートセンシングデータの利用目的には観測されたデータにより、観測対象が既知の何に相当するか分類することや経年変化の抽出等が考えられる。ここでは、衛星リモートセンシング画像処理アルゴリズムの中で画像分類に関する手法を中心に述べる。そして最後に分類以外の例として標高計測に関して簡単に触れる事にする。

図1に衛星画像処理アルゴリズムを示す。衛星画像処理においては図に示したとおり、複数の画像処理手法を組合せながら解析を行うことが多い。以下に衛星画像解析の特徴的な項目に関して述べる。

3.1 画像の補正

取得されたリモートセンシングデータはそのままでは解析に用いることができない。それは大気の影響やセンサの歪み、太陽高度や地形による影響のような、放射量に関する誤差とプラットフォームの位置や姿勢の誤差等による幾何学的な歪が含まれているからである。そのために、リモートセンシングデータを用いて解析前に補正をおこなう必要がある。

3.1.1 ラジオメトリック補正

放射量の歪を補正することをラジオメトリック補正という。これらは大気に起因するもの、センサに起因するもの太陽・地形に起因するものがある。

入射する電磁波は大気中の分子やエアロゾルによって散乱や吸収を受ける。この減衰量は観測される波長帯でも異なっている。大気の影響を補正することを大気の散乱吸収量を観測して補正すればよい。しかし、大気はその状態が著しく変化するため、大気の状態を同期観測するのが望ましい。しかし、現実的には不可能なことが多いため、モデル大気によるシミュレーション結果を用いて大気補正を行っている。

センサは入射する電磁波を電気信号に置き換えているが、ラインセンサの場合、各素子の感度のばらつきによって、画像化した場合に縞状のノイズが発生することがある。また、光学系(レンズ等の撮像系)による周辺減光やピントのボケが見られることがある。これらは、センサを校正することによって補正する。

光学センサは太陽光の反射によって、データを取得しているので太陽高度と地形の形状で放射率が変化する。例え

図1 衛星画像処理アルゴリズム

ば、太陽方向に傾斜している斜面では放射量が多く、陰になる部分では低下することになる。これらは、地形データを用いることによって補正することができる。

3.1.2 幾何補正

プラットフォームの位置や姿勢の誤差、地球の自転、地球の曲率、地形の起伏等による幾何学的な歪を補正することを幾何補正という。一般的にセンサデータを地図座標系に合わせることをいう。

テレメトリデータと呼ばれる衛星姿勢情報を用いた補正をシステム補正と呼ぶ。しかし、姿勢情報は精度が高くないため、画像上の位置と再配置する地図座標系との変換式をGCP(地上基準点)を用いて決定する方法を併用する。GCPとは、センサデータと地図座標系、および、地表面で互いに同一であると認識でき、かつ地理的な位置(緯度、経度、標高)が既知である点のことである。これらのペアを複数点取得し、座標変換式を推定し補正する。しかし、これらの補正方法では、地形の起伏に関する歪までは補正できない。これを補正するには各観測データの画素単位が観測している地点の標高値が必要になる。そのために、地図の標高データを数値化したDEM(数値標高モデル)が必要となる。地形起伏の影響まで補正した画像を正射投影画像と呼ばれ、各観測データがその解像度で地形図に整合することになる。

3.2 リモートセンシングデータの画像化

リモートセンシングデータを解析するとき、解析者が視覚判読により情報抽出しやすいように画像強調、およびカラー合成を行う。

カラー合成は光学センサのマルチバンドデータの場合、3つのバンドを選び、3原色を割当てて表示するとカラー合成画像が得られる。バンドの組合せ方によって判読できる特徴が変化する。画像強調には濃度変換、HSI変換等がある。濃度変換は原画像のコントラストが低い場合、画像の濃淡情報に線形変換、区分線形変換、連続関数変換等の処理を施しコントラストを向上させる手法である。また、画像の濃度値のヒストグラムに着目し、望ましいヒストグラム形状へと変換する手法もある。

3.3 特徴抽出

リモートセンシングデータを解析するにあたって利用される代表的なデータ特徴は以下の3つである。

- (1) 濃度、色等の分光的特徴
- (2) エッジ、線、テクスチャ等の空間的特徴
- (3) 位置関係、概念的関係による特徴

これらの特徴を用いてリモートセンシングデータより対象物が何であるかを判読することを分類という。

3.3.1 分光的特徴

それぞれ違う観測波長帯を持つ複数(多バンド)のセンサ

(a) 直下視画像

(b) 後方視画像

図2 ASTERによるステレオ画像 ERSDAC提供

を使用し、対象物の分光反射特性の差によって対象物を分類するのがスペクトル解析である。センサの種類にもよるが、光学的センサの場合、可視—短波長赤外—熱赤外の間で数バンド(チャネル)のデータを取得できる。そのデータを組合せることによって特徴を抽出す手法に、チャネル間の演算や、バンド間相関がある。その主な手法の一つに主成分分析がある。

3.3.2 空間的特徴

空間的特徴には、濃淡の著しい差(エッジや線)や、規則性をもった濃淡パターンを特徴とするテクスチャがある。

エッジ、線等を検出するには、局所オペレータを用いることが多い。局所オペレータは 3×3 または 5×5 等の奇数の行列であり、検出する画像と演算することによって抽出することができる。エッジの抽出は、微分によるものが多く、1次微分ではプレウィッツオペレータやソベルオペレータがあり、2次微分ではラプラシアンオペレータが代表的である。

線の検出にはまず、エッジ抽出を行った後、検出形状をテンプレート化したものを適用させ検出をする。

テクスチャは画像中のある広がりをもった特徴量であるため、ある大きさの窓に対してその特徴量を求めることになる。テクスチャ解析の手法には統計的特徴による抽出、幾何学的特徴による解析、フラクタル次元による解析等がある。リモートセンシングデータでは統計的特徴抽出の中の、濃度ヒストグラムによる方法、同時生起行列による方法がよく用いられる。

3.4 画像分類

リモートセンシングデータより、既知情報に基づき、画像データを複数のあらかじめ決定しておいた分類項目ごと

に分けることを分類と呼ぶ。この場合、既知の情報とはデータ上のある個所の分類項目を教師データとして与えることになる。したがって、教師付き分類と呼ばれる。既知の情報がない場合はデータの特徴量(統計量)によって、複数の項目に分け、分類結果後に、他のデータを参考にしながら項目名を決定することになる。この分類手法は教師なし分類と呼ばれる。

教師なし分類手法の代表例はクラスター分析である。教師付き分類で最もよく用いられるのは最尤法であり、その他には、マルチレベルスライス法、デシジョンツリー法が用いられる。

新しい分類方法ではニューラルネットワークやファジィ理論を用いたものもある。

4. 標高計測

地球観測衛星データからの標高計測には、異なる軌道または同一軌道の場合は前方視・後方視等の異なる視野をもって観測された2つの画像(ステレオペア)データより求めることができる。

4.1 ステレオマッチング

異なる軌道より同じ場所を観測すると、対象地点の視差によりその場所の標高値を求めることができる。そのためには、ステレオペア画像間において、対象地点のペアの探索を行う必要がある。それらの作業は、人間が手動で行っていたが、ステレオマッチング手法の開発により、自動化が図られるようになってきた。

ステレオマッチングの手法は幾つかあるが、一般的には、マスター画像の中にある領域を決め、スレーブ画像(探索領域内)の窓領域を移動させて最も対応が強い位置を探索

(a) 富士山近郊での干渉画像（強度画像に重ね合わせ）

(b) 干渉画像より作成したDEM画像（シェード表示）

図3 JERS-1 SARによる標高計測

することによって対応点を求める。最も対応していると判断する指標には面積相関、画像間ノルム、空間特徴（エッジ、ライン）等がある。

光学センサによるステレオペアの例としてASTERの直下視、および、後方視の画像の例を図2に示す。直下視・後方視で雲の位置および雲の陰の位置が異なることわかる。

4.2 SARによる標高計測

合成開口レーダを用いた標高計測手法の1つにインタフェロメトリー（干渉）がある。

干渉SARは同じ地域において、2つの異なる場所から撮影し、その2つの画像の位相データを重ね合わせてDEMや地表変動検出を行う技術をいう。干渉SARの撮影方式にもいろいろあり、衛星軌道の回帰ごとに撮影する様に、プラットフォームが時間差をおいて2度撮影する方式や、1つのプラットフォームに2つのSARセンサを搭載して撮影する方式等がある。また特殊なものにERSのタンデム軌道のように2つの衛星を使って、1日違いで同一場所を撮影する方式もある。図3(a)にJERS-1のSAR強度画像に干渉縞画像を重ねたもの、図3(b)に干渉画像より求めた標高データを陰影表示したものを示す。

5. む す び

本解説ではリモートセンシングのデータの処理技術に関して、地球観測衛星によるリモートセンシングの歴史とセンサ、そして、衛星リモートセンシングのネックであるデータ転送に伴う問題、そして、最後に著者らが現在取り組んでいる合成開口レーダを用いた解析について解説を行った。リモートセンシングの利用分野は広く、ほんの一部を紹介したに過ぎない。特に画像解析は画像からの情報の抽

出、判読、理解等の新しいデータ作成のための技術であって広範囲な利用分野に対応するため様々な処理アルゴリズムが開発されている。リモートセンシングにおける画像処理に関しては、参考文献1)に詳しく述べられている。

地球温暖化等の地球規模での環境問題に注目されている近年、地球環境とリモートセンシングは21世紀の人類にとって重要なキーワードとなるであろう。

(2001年8月2日受付)

〔文 献〕

- 1) 高木幹雄，下田陽久編：“画像解析ハンドブック”，（社）東京大学出版会，（1991）
- 2) 日本リモートセンシング研究会編：“図解リモートセンシング”，（財）日本測量協会，（1992）
- 3) 新井康平：“地球観測衛星データの利用方法”，森北出版（株），（2000）
- 4) （財）資源観測解析センター編：“資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ①宇宙からの地球観測システム”，（財）資源観測解析センター，（2001）
- 5) 坂田俊文：“地球を観測する”，NHKブックス，（1990）
- 6) （財）リモートセンシング技術センター編，“ADEOSリファレンスマニュアル”，宇宙開発事業団，（1996）

坂田 俊文 1957年，千葉大学工学部卒業後，東京大学生産技術研究所を経てイタリア・ボロニア大学，西ドイツ・ミュンヘン大学に留学。1981年より，東海大学教授。1979年，同大学情報技術センター所長。1994年，宇宙情報センター所長を兼任し，衛星画像データの研究に従事。工学博士。

須藤 昇 1980年，東海大学工学部卒業。1996年，同大学大学院博士課程前期修了後，同大学総合科学技術研究所講師，情報技術センター研究員を兼務。マイクロ波リモートセンシング，およびハイビジョンカメラを用いたSTS/ISS地球観測実験に従事。