

天文学と工学

—金沢工大におけるリモートセンシング研究—

寺下陽一*

1. はじめに

バビロニアの例を出すまでもなく、天文学は古くは工学との交流の頻繁な学問であった。あるときは天体現象の理解が人間社会の活動を助ける技術を生み出し、また逆に地上の技術の進歩が天文学の発展を促した。後者の動き、すなわち工業技術の天文学への寄与は現在でも顕著であるばかりか、その傾向はますます強くなっているようである。しかしながら、前者、すなわち天文学で得られた知識・経験が工学に応用されるという例は、少くとも我が国においては少ないように思われる。これは天文学という学問の進歩の必然の帰結なのか、それとも別の要因、例えば体制の問題などが働いているためなのか、その辺の事情は筆者には明らかでないが、オーソドクスな立場を離れてみると、交流の機会はまだまだあり、またそういう動きが望まれているという観測も十分可能であるように思われる。筆者は約7年前に縁あって金沢工業大学に奉職することとなったが、当時大学では情報処理・計算機工学関係の研究教育活動を重点的に発展させて行くという気運にあり、筆者もその一端を引き受けさせられることとなったのであるが、以後、天文学と工学（いまの場合は、情報処理・計算機工学）との交流の問題は大きな課題として筆者の頭を占めてきたわけである。その間、金沢工大には天文畑の方が何人か来られるようになり、同じ問題を一緒に考えるようになったが、そのひとつの結論は、天文学と云うと一般には割合に限定された学問分野のように受け取られがちであるが、そこで用いられている概念・手法は非常に広い範囲のものを含み、多くの分野に応用出来るものである、ということである。例えば、以下に述べるリモートセンシングの問題などは、遠方からの分光観測（多色測光）データの解析という点で、天文学の基本的な方法に直接通じているものである。

天文学と工学の交流のひとつのケーススタディとして、金沢工大でおこなっているリモートセンシングの研究を紹介する前に、当大学での天文関連スタッフについて紹介すると、情報科学研究所の上野季夫先生、向井苑生氏、川田剛之氏、情報処理工学科の福田一郎氏、水野

舜氏、計算機センターの日下迺氏と筆者、一般教育科目担当の鈴木雅一氏と向井正氏である。リモートセンシングの問題は上野先生のイニシアティブで始められ、向井氏、川田氏、計算機工学の門脇信夫氏、羽場保弘氏、松村秀逸氏、そして筆者が参加している。最近になって天体データの情報システムという問題が始められたが、これについては別稿で述べたい。

2. 背景

リモートセンシング (Remote Sensing) という言葉が我が国でひろく用いられるようになったのは、ここ数年来のことと思われる。発祥地の米国では10年ぐらいいか上るようである。技術という観点に立つと、米国においてそれまで集積されて来た宇宙科学技術のひとつの集大成とも云える。その技術の応用としては、通常、地球のグローバルな調査がとり上げられている。すなわち、人工衛星に下向きにとりつけられた観測装置により得られた画像情報より、地球の特定の領域あるいは全体的な状態を知ろうとする。

NASA の LANDSAT 計画では、1975年1月22日に LANDSAT-2 衛星が打上げられ、現在もデータを地上に送り続けている。衛星の平均高度は約900 kmで、極方向からややずれた軌道をとっている。一周するに要する時間は約100分、18日で地球全体のスキャンを完了する。地表(海面)観測はMSS(Multi-Spectral Scanner)およびRBV(Return Beam Videcon)によっておこなわれるが、現在我国で入手出来るのは前者である。MSSの原理は図1に

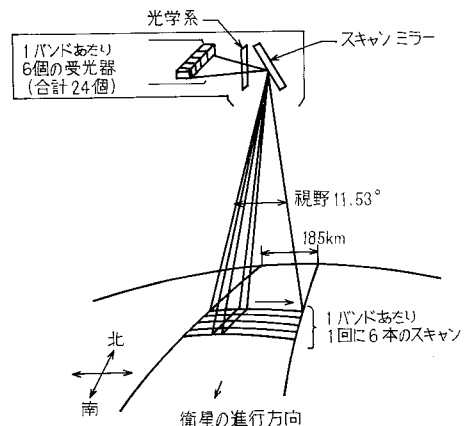


図1 LANDSAT マルチスペクトラル・スキャナによる地表の観測

* 金沢工業大学計算機センター Y. Terashita: Astronomy and Engineering—Remote Sensing Project at the Kanazawa Institute of Technology—

示すようなものである。上方への放射は東西方向にスキャンされ、その幅は地上での距離にして185 kmとなる。1回のスキャンにおいて約3250 (3247±5)回のサンプリングがおこなわれる。サンプルされたデータ(放射強度)はデジタル化されたのち、地上受信所に送られ、NASAデータ処理センターで編集され、計算機用磁気テープ(CCT, Computer Compatible Tape)に記録され、研究者に配布される。MSSによる観測は航空機によっても広くおこなわれている。この場合にはよりローカルな(したがって詳細な)情報が得られるが、観測データの補正は、航空機の姿勢が不安定であるため、人工衛星の場合に比べてより困難となる。

LANDSATの場合、データはsceneと呼ばれる単位で配布される。1sceneは2340本のscan lineから成り、これは地表の185 km×185 kmの領域に対応する。言い換えれば、1sceneは約7,600,000個のデータから成り、これが1個の波長域(Band)について与えられる。Band 4は0.56~0.6 μ , Band 5は0.6~0.7 μ , Band 6は0.7~0.8 μ , Band 7は0.8~1.1 μ である。将来打上げられるLANDSAT衛星ではBand 8 (10.4~12.6 μ)が加えられることになっている。1個の観測データ(放射レベル)はpixelと呼ばれ、磁気テープ上には8ビット(1バイト)情報として記録されている。したがって、1sceneに含まれるデジタル情報は約30メガバイトとなり、これは可成り大量のものである。この1sceneのデジタルデータを2次元の濃淡出力として、プリンタ用紙、CRT、あるいはフィルムに出すと画像が得られる。画像の解析には写真技術もよく用いられるが、ここでは最近発達しつつあるデジタル技術を前提として話を進める。リモートセンシングの画像データの解析には、大きく分けて、広い意味での物理的方法と、統計的あるいは工学的な方法があるが、リモートセンシング技術はもともと計算機工学者が主体となって発達して来たためか、現状では後者が主流を占めている。しかしながら、我々の短期間の経験では、物理的方法はまだ未整理の状態であり、これを工学的方法とうまく結合することが、この技術の今後の発展の鍵になるのではなからうかと思われる。

3. 物理的側面

リモートセンシングは、いくつかの波長域における放射強度の観測、すなわち分光観測であるので、分光学の手法を直ちに適用したいところであるが、それが少々困難なのが現状である。いくつかの例をとり上げてみると例えば、森林地帯の調査はリモートセンシング技術を用いることにより、短時間で広域を対象に出来るものと期待されているが、この問題を物理的に扱うためには、先

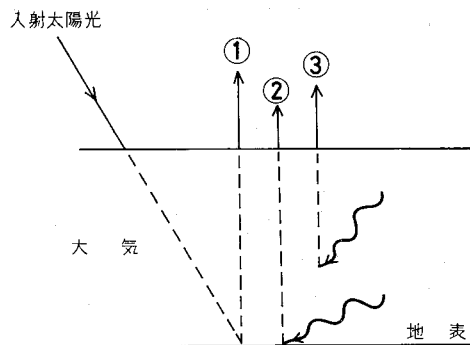


図2 マルチスペクトラル・スキャナによって観測される放射の3成分

ず木の葉の分光反射係数を知らねばならない。これは一般には、反射角に依存するものであり、樹木の種類、季節、さらには発育状態によって異なる。実際には、樹木の集合として観測されるため、葉の形、その空間的分布状態により、観測結果は異なるはずである。対象が市街地の場合、路面や屋根瓦の反射係数が問題になり、森林の場合と同じように建物の形、分布状態がやはり観測結果に大きく影響する。

地表目標物あるいは海面の分光的性質が明らかになったとしても、リモートセンシングデータの解析は直ちにおこなえない。まず、観測される(目標物によって放射される)輻射はすべて太陽光によって定まるわけであるから、その入射角度、強度、直射光以外の入射拡散光の強度分布が問題に含まれている。さらに厄介なことに、観測データには相当量の大气拡散光が含まれており、これには地表(海面)に関する情報は含まれていないと云える。(もともと大气拡散光は境界条件によって定まるものであるから、この云い方は不正確であるが、その情報は別の意味で拡散させてしまって殆んど役に立たないという意味である)。すなわち、地表観測を目的とした場合、大气拡散光は“かぶり”であり、これをうまく分離する必要がある。図2に地球大气における輻射輸送のモデルを示す。

大气圏外より観測される上方向放射強度を、①入射太陽光が減衰されて地表で拡散反射され、再び減衰されて観測器に到達するもの、②大气中の拡散光が地表で拡散反射され、減衰されたのち観測器に到達するもの、③大气中の拡散光が大气中で散乱され、減衰されて観測器に到達するもの(path radiance)に分ける。①と②は地表の情報を直接観測者に教えるものであり、③は(間接的には地表の反射特性に依存するが)地表の情報に対する“かぶり”となり、これを分離する必要がある。言い換えれば①+②に対して減衰に関する補正をおこなうと、地上で観測をおこなった場合と同じ結果が得られることになる。

大気拡散光の強度は短波長で大きく、長波長では小さいという強い波長依存性がある。したがって、MSS のデータを分光学的に解析しようとした場合、これをうまく処理しなければ分光学的に定量的な結果は得られない。これは特に海面データにおいて顕著である。拡散光の取扱いは、基本的には輻射輸達方程式に集約されるわけであるが、惑星大気の場合と異なり、より詳細なパラメータの設定が必要となる。すなわち、地表での境界条件は、物体の分光的性質、形状、分布によって決まる極度に複雑なものとなる。また、大気の状態（水蒸気、エアロゾルの密度分布、雲の存在など）の時間的変化も考慮に入れなければならない。海面データを扱う場合には、大気部分と水部分とからなる複合系の方程式を解かねばならぬことになる。予想されるように、問題に含まれる多数のパラメータ（値および関数形）のうち同定されているものはほんのひと握りに過ぎない。また、ある精度で同定されていたとしても、地理的変化、時間的変化が不規則であるので、例えば LANDSAT データの各 scene に適用出来るような信頼性のある手続きを見付けることは極度に困難である。問題（方程式）を直接方法で解くにしても、種々の近似・仮定が必要となることは当然であるが、それに加えて高度の内挿および外挿技術が必要であるように思われる。すなわち、ある程度信頼性のある解を求めるにはふつう多量の計算機時間を必要とするので、いくつかの典型的かつ理想化されたモデルについて解を求めておき、個々の観測データの解析においてはそれらの解の何らかの組合せを用いる手続きが見つかるようにすることが望ましい。

4. 工学的方法

リモートセンシング・データの解析において用いられる統計的手法は、主として画像情報処理工学の分野で研究されて来た。地表に多種類の対象物が散在しているとき、それらを同定し、分布状態を調べるために、分類 (Classification) という手法がよく用いられる。これは画像の各画素またはその局所的な集合に対して属性 (signature) を定義し、その値によって画像全体をいくつかのクラスに塗り直す。属性としては、ふつう各画素の放射レベル (n 個の波長域で観測される場合には n 次元ベクトル) がとられ、その画素がどのクラスに属するかは、 n 次元空間内の位置によって決められる。もっとも単純な方法としては、各クラスの代表点を n 次元空間内に与えておき、各画素がどの代表点にもっとも近いかを調べることにより、その属するクラスを決める。あるいは、この空間内に各クラスに対応して閉領域を決めておき、それらに含まれるかどうかによってクラスを決める。この場合、いずれかのクラスにも属さない画素もあり得る。

さらに精密におこなう場合には、この空間内に各クラスの確率分布を定めておき、最尤決定法などにより各画素の属するクラスを決定する。クラスの定義をおこなうには、clustering などの手法を用いる。すなわち、考えている画像の画素全体が n 次元空間で如何なる分布をしているかを調べ、cluster が認められれば、それをひとつのクラスに対応づける。

問題は、上で述べたクラスが現実には如何なる表面物質に対応するかということであるが、このためには、画像上の特定の領域に関する現場の知識を必要とする (ground truth)。そして、同時にこれらの領域は、用いられる分類のアルゴリズムが妥当であるかどうかの training area として利用されることにもなる。この方式では、1 個の画像を解析するために、それに伴う ground truth が必要になるので、ぼう大な人間の労力を要し、データの活用範囲は著しく制限されることになる。そこで、例えば、同じ地域に関する何回かの観測データに対しては、1 回の観測について基準 ground truth を得ておけば、それを基にして他の観測データの解析が行えるようにすることが望ましい。これを signature extension と呼んでおり、信頼性のある signature extension 方式を確立することが、リモートセンシング・データの解析では目下、重要な課題となっている。signature extension が困難である理由としては、1) 地表の状態が時間的に変化すること (例えば植物は季節的に変化すること)、2) 太陽の高度の違いにより、地表物質からの放射レベルが変わること、そして 3) 大気の状態が変動することに伴って大気による散乱および減衰の影響が異なること、などである。このうち、3) の扱いが最も困難である。すなわち、各地域における大気の構造が如何なるものであるか、そしてそれが観測の都度どのように変動しているかを正確に知ることは先ず不可能である (勿論、観測ごとに大気の状態を別の方法で測定すれば別であるが)。そして、仮に適当な方法でそれが判ったとしても種々の反射物質が複雑に分布しているような系の輻射輸達の問題を解かねばならないことになる。

5. 研究の現状

我々の研究では、一方にはリモートセンシングデータのデジタル処理方式を研究するグループと、他方には大気中の輻射過程を研究するグループとがあり、研究は並行しておこなわれている。いずれの場合も大型計算機が必要なことは言うまでもないが、それに加えて画像用入出力装置がどうしても必要となる。現在用いられているのは制御用計算機を通じて中央計算機に接続されたフライング・スポット・スキャナであり、装備されたカメラにより画像出力 (黑白写真として) を撮影することが出

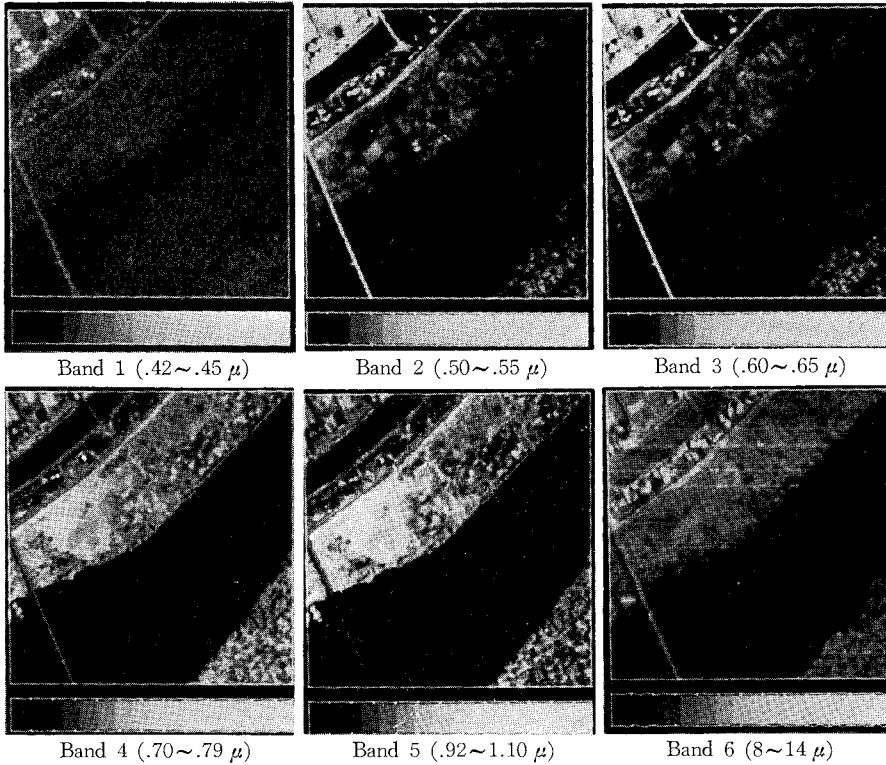


図3 航空機マルチスペクトラル・スキャナによる画像データ（神通川富山市付近，観測 B&G 財団）

来る。しかしながら分類マップなどを出力する場合には黑白写真ではどうしても不便であるため，カラー表示装置を現在作成中である。デジタル処理グループの第一目標は，標準的な分類のソフトウェアを作ることであり，

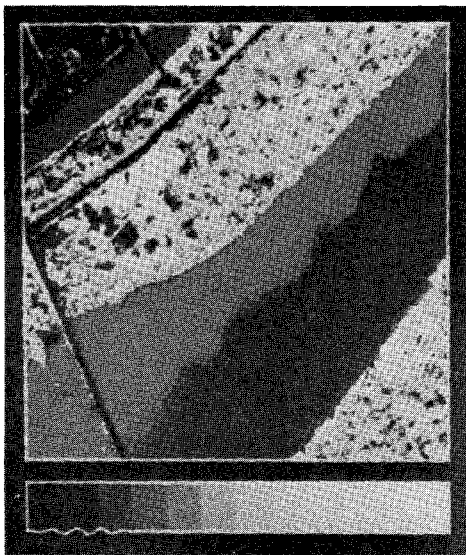


図4 図3のデータによる分類結果（クラス数5）

その基本型は現在使用出来る段階に到っている。これはクラスター解析によりクラスの定義をおこない，それに従って分類マップを出力するという可成り自動化されたものである。これを用いて種々のデータについてテストし，システムの精度，効率などを調べているが，次の段階として，更に複雑なアルゴリズムを種々検討し，より実用に耐えるようなシステムにする予定である。図4はMSSデータの写真出力の例である。このデータに対して6次元の分類をおこなった結果が図4に示されている。

先に述べたように，地球大気における輻射過程を調べる際の困難のひとつは地表の反射率の多様性であり，もうひとつは大気成分の時間的変動である。第一段階として，画面の範囲内では拡散光（図2における③成分）は一定であると仮定し，平均の地表反射率に対して輻射輸達方程式を解いている。大気としては標準大気を用いているが，これは当然問題となる。我々の考えとしては，地上物質間のコントラストを画像上で測定することにより，大気の光学的厚さを決め，それによってより現実に近い大気を用いることが可能であろうと思われる。地表の反射率を厳密にとり扱うためには，本来は2次元底面の輸達方程式を解くということになるわけであるが，数値解析上の問題としては現在のところ極度に困難である。したがって，局所的に通常の1次元モデルを適用するのが現実的であるが，その適用の方法，その有効範囲のチェックなどが今後の課題となっている。一様反射率，標準大気のモデルを用いてLANDSATのデータにおける拡散光成分を計算してみた結果，バンド4（拡散光がもっとも大きい部分）では50%程度（太陽高度48°）に達している。当面の問題として，このような拡散光成分についての補正が，クラスター解析，分類にどのような影響をおよぼすか調べているところである。