

山岳道路建設のための地形・地質調査における 航空機 MSS データの活用

APPLICATION OF AIRBORNE MSS DATA TO GEOMORPHOLOGICAL AND GEOLOGICAL SURVEYS FOR ROAD CONSTRUCTION IN MOUNTAINOUS AREA

後藤恵之輔*・瀬戸島政博**・深津信義***・古賀真綱****

By Keinosuke GOTOH, Masahiro SETOJIMA, Nobuyoshi FUKAZU and Masatsuna KOGA

The construction of a new expressway in mountainous areas requires cutting off slopes and crossing over desolated valleys throughout the areas. For the purpose of rational design and performance of such a road, a considerable amount of information has to be acquired on the nature of the terrain through which the road will be built. This paper discusses the value of using the remote sensing technique for geomorphological and geological surveys recently undertaken for a highway in Kyushu district, southern part of Japan. Remote sensing data used for analysis were obtained with a multispectral scanner (MSS) on board an airplane. These data are analysed both analogly and digitally in comparison with results from interpretation of aerial photographs and direct reconnaissance surveys.

1. ま え が き

わが国の高速道路建設は、縦貫自動車道から横断自動車道の時代に移行しつつある。横断自動車道は急峻な山岳地帯を通過するようになり、これに伴い切土のり面の占める割合が増加し、さらには荒廃溪流を横過することが多くなる。このような地域において、建設段階で崩壊を起こしやすい地山の状況や土石流の発生しやすい溪流など、いわば動的な地形・地質情報を調査段階で明確にしておくことは、合理的な設計・施工を行っていくうえで不可欠である。

このような調査は、従来から空中写真判読と踏査を主体になされてきたが、横断自動車道建設では急峻な山岳地帯がその対象であり、現地調査に今まで以上の経費と労力を必要とする。したがって、道路建設の調査・準備段階で「空からの調査」を十分に実施して、現地調査地点の絞り込みを行う必要がある。そのための手法として、

従来の空中写真判読に加えて、リモートセンシングの導入が期待される。リモートセンシングは、空中写真に比べて画質、精度といった面では若干劣るが、多波長域のデータを広範囲にかつリアルタイムに処理できる利点がある。ただ、この技術はわが国に導入されてまだ10年余でしかなく、特に本題のような土木工学への応用がどの程度可能であるかは現状では明らかでない。このような意味でリモートセンシングが道路建設に関係して、災害調査等などの程度利用できるかを明らかにしていくことは、重要な意味がある。

本論は、リモートセンシングのうち航空機によるマルチスペクトル・スキャナ (MSS) データを使用して、その山岳道路建設のための地形・地質調査への活用性を見出すために試みるものである。本論の究極的な目的は道路全般への適用にあるが、ここでは九州縦貫自動車道に併走する国道219号線を対象として論を展開する。航空機により観測されたMSSデータに基づいて、アナログ解析によるリニアメント(画像上でみられる線状構造)分布の抽出と、デジタル解析による未固結堆積物分布地域の抽出および崩壊危険箇所の予測を行い、同時に実施した空中写真判読および現地調査による結果と比較して総合的検討を加えるとともに、路線選定段階における航空機MSSデータの有効性について述べることにする。

* 正会員 工博 長崎大学助教授 工学部土木工学科
(〒852 長崎市文教町1-14)

** 正会員 国際航業主任技師 調査解析部
(〒191 日野市旭が丘3-6-1)

*** 日本道路公団所長 福岡建設局日田工事事務所
(〒877 日田市田島2-1-20)

**** 理博 日本気象協会参与 中央本部研究所
(〒102 千代田区麹町4-5)

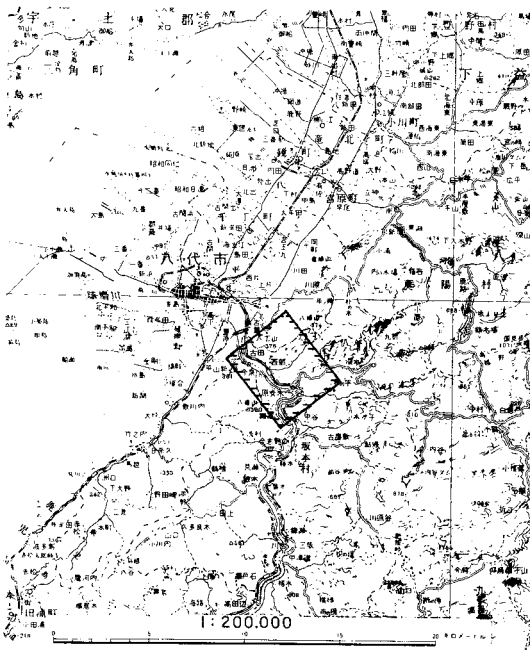
2. 動的地形・地質情報とは

今村¹⁾によれば、崖錐や扇状地、沖積段丘、沖積堆あるいは軟弱地盤といった地形面や、断層、褶曲、節理といった地質構造などは、単にそれが地形面を構成しているという観点だけからみると、現地表面のもつ静的な地形・地質情報すなわち種々の現象に対する素因的情報しか提供しないかもしれない。しかし、これらはたとえば崖錐が落石や土石流、地すべりなどの結果形成されるように、それぞれ過去の各種の動的地形・地質現象の集積によって形成され、現在の形態をもつに至ったものである。

したがって、それらには別の観点から詳細に観察すれば、そういった過去の諸現象の形跡が認められることになり、すなわち静的な地形・地質情報から過去の動的地形・地質現象がどうであったかを抽出できるはずである。しかも過去の現象のあるものは、単に過去の現象というにとどまらず、「将来再び発生する」可能性がある。したがって、道路建設の調査段階でこのような動的地形・地質情報を把握しておくことは、きわめて重要である。

3. 解析範囲と使用データ

解析範囲は、図一1に示すように熊本県八代市と人吉市を結ぶ国道219号線のうち、八代市妙見町から同市原女木までの約6 km間をテストエリアとした。この地域



図一1 解析範囲（四角の枠内）

表一1 DS-1250の波長帯域と仕様

チャンネル番	波長域(μm)	チャンネル番	波長域(μm)
1	0.38~0.42	7	0.65~0.69
2	0.42~0.45	8	0.70~0.79
3	0.45~0.50	9	0.80~0.89
4	0.50~0.55	10	0.92~1.10
5	0.55~0.60	11	9.5~12.0
6	0.60~0.65		

分光分解能：2.5 mrad

走査角度：87°20'

映像角度：77°20'

走査回数：80 rps

温度分解能：0.2°C

温度検知幅：-10°C~50°C

記録方式：アナログテープ

は中央構造線の南側に位置し、白杵・八代構造線を始め数本の構造線が分布しており、地質は古生代の粘板岩・チャート・石灰岩、中生代の砂岩・頁岩などの硬質岩相を基盤としている²⁾。したがって、風化・侵食に対する抵抗が強く、このため本地域には急傾斜地（平均傾斜30°~40°）が多くみられる。

MSSの観測は、1982年9月4日午前9時35分から撮影高度2500 mで実施した。使用したMSSはDEADALUS社製のDS-1250である。表一1に本MSSの波長帯域と仕様を示す。また、空中写真判読には、1979年9月撮影のカラー空中写真（縮尺1：10 000）および1948年5月撮影の白黒写真（縮尺1：40 000）を使用した。

4. 解析方法

解析方法は図一2のフローチャートに示すとおりである。基本的には、①空中写真判読および踏査を主体とした動的地形・地質情報の抽出と、②航空機MSSデータを解析し動的地形・地質情報を推定していく方法とに大別される。

(1) 空中写真判読および踏査

空中写真判読³⁾は現地踏査の前2回にわたって実施し、第一次判読では現地調査図の作成を主目的に、第二次判読では現地踏査で確認あるいは補足・修正された事項について再確認のために実施した。

(2) エッジ強調処理

エッジ強調処理⁴⁾は、画像の鮮鋭化をし画像上の線状構造を強調させて、これと関連深い断層・節理などの動的地形・地質情報を把握するために試みたものである。MSSのチャンネル9を使い、アナログ記録方式のテープからアナログプロセッサ・プリンタに5インチ幅のモノクロネガフィルムを出力した。このネガフィルムからポ

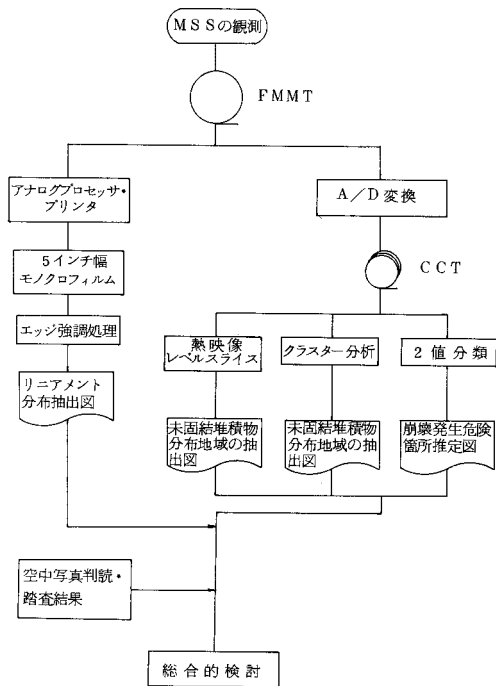


図-2 解析のフローチャート

ジフィルムを作成し、両フィルムの乳剤面を合わせ、相対的に飛行方向に対して45°の方向にずれ量1mmで強調画像を作成した。

(3) 熱映像のカラーレベルスライス

動的地形・地質情報のうち、崖錐、地すべり地、旧土石流堆などの未固結堆積物の分布をどの程度把握することが可能かを知るために実施した。この場合、温度解析のためのグランドトゥースはあえて行わず、あくまでも熱分布の相対的な違いから未固結堆積物の分布地域を推定していった。温度レベル幅は1.5°Cである。

(4) クラスター分析

(3)と同様、未固結堆積物の分布を推定する目的からこの解析を実施した。すなわち、デジタル画像解析によって未固結堆積物のような地中の情報を抽出する場合、地表面の土地被覆状況から情報を地表面下の情報に読み換えていかざるを得ない。このためには、正確な地表面の土地被覆情報が必要となる。この意味でクラスター分析による教師なし分類（教師とは現地調査結果のことで、教師なし分類とはこの結果を用いないで分類していく方法）は、主観の入らない地表面の被覆状況を正確に表現した情報といえる。今回は16種類のクラスに分類した後でクラスターの統合を図り、未固結堆積物の分布地域がどの程度抽出できるかを調べた。

(5) 2値分類

ここでいう2値分類は、データまたは画像を2つのカ

テゴリに分類することであり、画像を構成する各画素があらかじめ設定した基準統計量に適合するか否かを判定するものである。すなわち、画像を構成する各画素の値が設定した統計量の範囲内に含まれていれば255、含まれていなければ0という数値に置き換える処理を行う。

実際の解析にあたっては、新旧2時期の空中写真から、崩壊跡地や崩壊頻発斜面など将来とも崩壊を起こす可能性の高い箇所を判読し、これと同じ性質（数値的）をもつ箇所を画像中から探し出すことによって、崩壊発生の危険箇所として推定していくことができると考えた⁵⁾。

5. 解析結果および考察

空中写真判読および現地踏査によって動的地形・地質情報を抽出したのが図-3、航空機MSSデータの解析による抽出結果が図-4である。

(1) リニアメント分布の抽出

解析範囲は球磨川を中心として北西～南東方向に撮影されている。写真-1と図-4に示すように、撮影コースに直交あるいは斜交するリニアメントが無数認められた。これらのリニアメントは、既往地質図²⁾あるいは空中写真判読による結果（図-3）ときわめてよく整合し、この地域の地質構造（北東～南西方向への帯状構造）の反映と推定される。今回のようにアナログ処理によるエッジ強調でも、本地域の線状構造の分布と密度をマクロに知るうえでは、かなり期待できそうである。特に、今後の横断自動車道建設の路線選定では、このようなエッジ強調処理を行うことにより調査地域全体の線状構造の分布と密度を知り、必要な箇所だけについて空中写真判読などのより詳細な調査に委ねていけば、調査全体の省力化を図ることも可能となる。

(2) 未固結堆積物分布地域の抽出

未固結堆積物分布地域の抽出には、チャンネル11のカラーレベルスライスとチャンネル5, 7, 9, 11を用いたクラスター分析を試みた。

a) チャンネル11のカラーレベルスライス結果

熱映像でとらえることができるのは、表面（地表面、水面）のマクロな温度情報である。特に火山地帯のような場合は、熱映像だけでも土質地質分野の情報をかなり効果的に収集できる。しかし、本地域のような山岳地の場合、熱映像そのものを直接土質地質分野に有効に利用できるかどうかは疑問である。今回の場合は、熱映像を単なる地表面の熱分布をとらえる手段として利用するのではなく、この映像を空中写真判読結果やその他のリモートセンシング解析結果（クラスター分析、2値分類）などと比較照合することによって、解析対象である地すべり、崖錐、旧土石流堆などの未固結堆積物の分布がどの

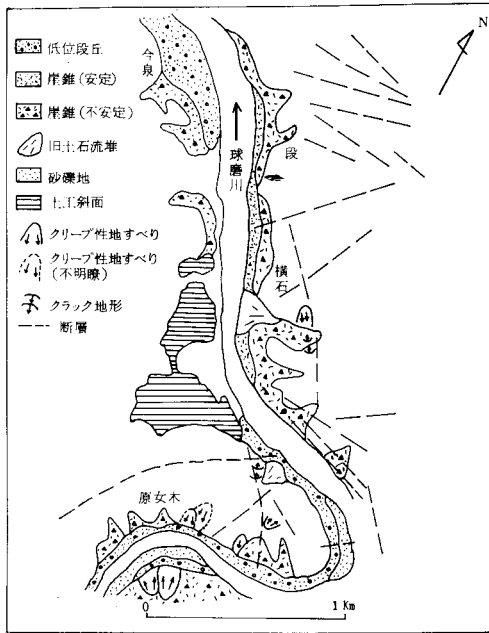


図-3 写真判読と踏査による動的地形・地質情報図

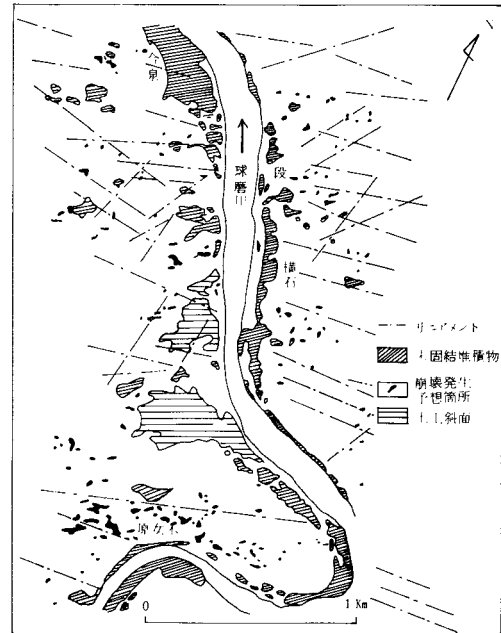


図-4 航空機 MSS による動的地形・地質情報図

程度熱映像に反映されているかを検討した。写真-2と図-4にその結果を示す。今泉付近では、球磨川兩岸の斜面に分布する崖錐、旧土石流堆、低位段丘などの未固結堆積物と熱映像の高温域とがよく対応していた。また、球磨川右岸側の段、横石などの急傾斜指定地区に分布する崖錐、低位段丘堆積物などの分布も高温域との対応がよかった。以上より

① 未固結堆積物の分布が土地被覆状況に反映されているような地域では、熱映像から動的地形・地質情報が比較的容易に抽出できるため、上記の結果を得たものと解釈される。

② 前記の対応があまり十分でない場合、たとえばクリープ性地すべりなどの分布地域では、ほとんどの場合これらは森林内に発生しており、熱映像では明瞭な識別ができない。

③ 熱映像は空中写真では得られないリモートセンシング固有の情報であり、路線選定の調査には相当な利用性が秘められていると思われる。

b) クラスタ分析のクラスター統合による結果

未固結堆積物など地表下の情報は、リモートセンシングによって直接判別できるものではない。したがって、デジタル画像解析によって地表下の情報抽出を試みる場合、地表面の土地被覆情報から地表下の情報に読み換えていかざるを得ない。それには、正確な地表面の土地被覆情報が必要となる。このとき、教師つき分類（現地調査結果に基づく分類手法）では、現地調査結果の入力の

仕方によって判別結果が大きな影響を受ける。これに対して、教師なし分類では、それぞれに区分されたクラスごとの内容は現地調査を行わない限り特定できないが、主観の入らない地表面の被覆状況を正確に表現した情報といえる。このような意味で、今回は16クラスに分類した結果からクラス統合を図り、未固結堆積物の分布地域がどの程度抽出できるのか解析を試みた。その結果を写真-3に示す。クラスター・クラスの可視光、近赤外光の平均値の分布に着目すると、以下の4つのパターンが認められる（図-5参照）。

① チャネル7 < チャネル9 ≤ チャネル5 (クラス1, 2, 4, 5がこれに属す)

② チャネル7 < チャネル5 ≤ チャネル9 (クラス6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15がこれに属す)

③ チャネル9 < チャネル7 ≤ チャネル5 (クラス3, 7, 14がこれに属す)

④ チャネル9 < チャネル5 ≤ チャネル7 (クラス16がこれに属す)

①と②は植生パターンを示しており、ほとんどが林地に対応している。パターン③のクラスは水域、崖錐、旧土石流堆の3種に分けられ、さらに崖錐と旧土石流堆は熱赤外領域のカウント値の高さで判別される。また、パターン②に含まれる崖錐のクラスは、植生と判断されるクラスと比較して熱赤外領域のカウント値が高く、一般の林地と異なる被覆状況にあることがわかる。

結局、未固結堆積物分布地域の抽出には、熱赤外情報



写真-1 エッジ強調画像

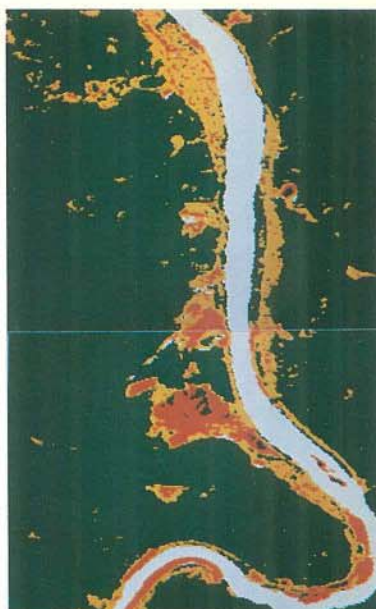


写真-3 クラスター・クラス統合画像

黄色：崖錐などの崩積工
 橙色：砂堆・裸地など非植生域の未固結堆積物
 緑色：植生域



写真-2 熱映像カラーレベルスライス画像

黒色：13.5°C以下、灰色：13.5～15.0°C、淡灰色：15.0～16.5°C、淡青色：16.5～18.0°C、シアン：18.0～21.0°C、紫色：21.0～22.5°C、オリーブ色：22.5～24.0°C、緑色：24.0～25.5°C、淡緑色：25.5～27.0°C、黄色：27.0～28.5°C、茶色：28.5～30.0°C、橙色：30.0～31.5°C、マゼンタ：31.5～33.0°C、赤色：33.0°C以上



写真-4 2値分類画像

2値分類の結果をナチュラルカラー合成画像の上に出力したものを。淡紅色の部分が2値分類により推定された崩壊発生可能箇所を表わす。

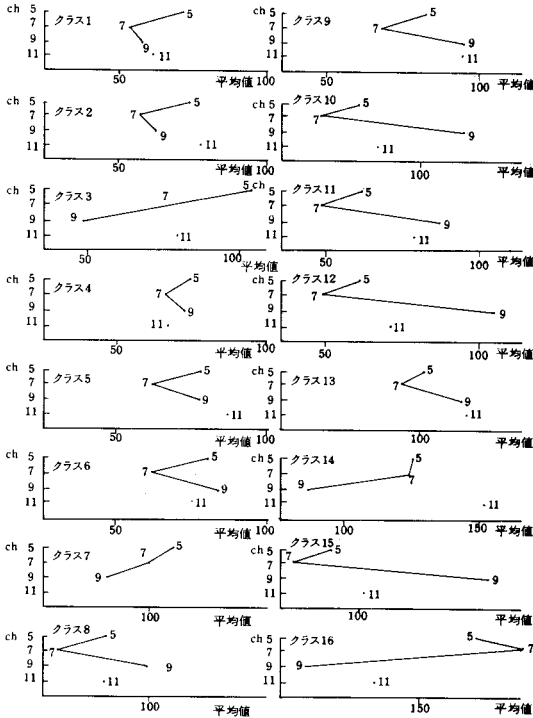


図-5 クラスター統計量(平均値)プロット図

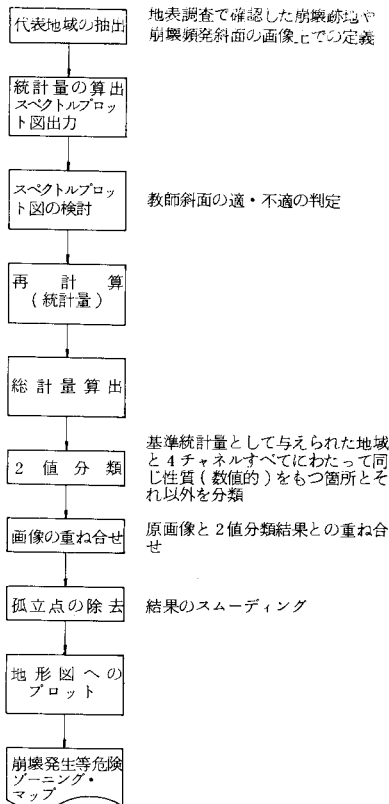


図-6 2値分類解析のフローチャート

がかなり有効であることが明らかとなった。これは、対象地域のように急峻な山岳地帯では、斜面のほとんどが林地となり、土石流などによる二次的に堆積物が分布するような緩傾斜地はほとんどが集落、畑地などに利用され、この違いが熱赤外情報に強く表現されたためである。換言すれば、急峻山岳地域の動的地形・地質情報を抽出していく場合、地表面の土地被覆状況を正確にとらえておけば、ある程度の情報の読み換えが可能となろう。その際に、地表面被覆状況を客観的に区分するクラスター分布や熱映像などの情報は、有効なデータとして活用し得ると考えられる。

(3) 崩壊発生危険箇所の推定

崩壊発生危険箇所の推定は、図-6のフローチャートに従って解析した。すなわち、

① 現地調査と2時期の空中写真判読から、崩壊跡地や崩壊頻発斜面などのような地形・地質的に崩壊を発生しやすい条件(素因)をもち、崩壊発生の直接的な原因となるような地域を確認する。

② このような地域を教師斜面とし、その統計量(平均値と標準偏差)を算出する。

③ この統計量を基準に、画像を構成する各画素について統計量の比較検討を行い、基準値に対する適、不適を調べる。

④ 適合データを255、不適合データを0として出力し、オリジナルデータに重ね合わせる。

⑤ 後処理や実用面での向上を図るために、2値化した画像データに対して、画像の平滑化(今回の場合は3×3画素を1つのまとまりとして扱い、これより小さなまとまりを除去して画像を平滑化した)を行い、最終結果として出力する。

この解析で注意すべきことは、解析対象地域が山岳地帯を主体とするため、山の斜面と太陽高度の関係で日向と日陰の部分に画像が分かれることである。これにより基準統計量の算出範囲に、日向または日陰の部分に分かれる場合と両者にまたがる場合とがある。そのため、基準統計量は日向のみ、日陰のみ、日向・日陰の混在部分の3つの場合を想定し、3種類の2値分類を行って、その結果を一画面上に重ね合わせた。

以上の方法により崩壊発生危険箇所を推定した結果を写真-4と図-4に示す。これを図-3の空中写真判読結果と比較すれば、次記となる。

① 空中写真判読結果による動的地形・地質情報ときわめてよく整合する箇所が多いが、整合しない箇所も存在する。

② ①の中で整合する所は、崩壊跡地、クレープ性地すべり地、不安定な崖崖部などである。

③ 判読結果と整合しない危険箇所として抽出されて

いる所は、顕著な集水地形を示す谷壁斜面や急傾斜地に対応する場合が多い。

④ 両結果を比較する限りでは、2値分類による崩壊発生危険箇所抽出方法は完璧なものではないが、斜面对策の概略的な検討を行ううえで活用できる手法といえる。

この解析は、基準統計量に対して画像を構成する各画素の数値がある範囲に含まれているか否かを判定するものである。判定はあくまでも数値としてのみ実行されており、地表面の状態は仮に地質や土地利用の差があったとしても統計量という数値でしか表現されない。したがって、分類された結果は、地質の連続性や植生の同一性ないし土地利用形態の類似性のようなパターンの分類ではなく、地表面の分光データの統計量から画素を判定しているため、基準として選定した地域（教師斜面）と同一の分光特性を有する地域を抽出したことになる。したがって、2値分類で表示されていない箇所が安全であるとは断言できないが、統計量からみる限りでは危険性が低いということである。このことは空中写真判読の場合でも同様で、空中写真で動的地形・地質情報が読み取れない箇所でも、実際に崩壊が発生する場合も多々ある。結局、2値分類結果を利用する場合は、1つ1つの危険箇所を問題にするのではなく、それが多数分布するゾーンそのものを危険箇所と考えていくことが肝要であろう。

6. 路線選定段階における航空機 MSS データの有効性

航空機 MSS データを路線選定段階で利用していく場合、これまでこの分野で主体的に利用されてきた空中写真判読技術と有機的に結合させた統合的なリモートセンシング技術が効果的である。さらにリモートセンシングそれ自体も、この分野で現在主流となっているコンピュータ処理によるデジタル画像解析手法のみでなく、アナログ写真処理による判読・解析も十分に活用すべきと考える。ここでは、前述した本解析の結果を踏まえ、リモートセンシング手法がどのように路線選定のための調査に位置づけられるかを以下に検討する。

路線選定段階の調査は、予備調査（予測ルートについての地質・防災上の問題提起）と比較調査（比較ルートの工事、経済上の難易、工法の適応性、線形比較など）に分けられるが、リモートセンシング手法による地形・地質調査の結果は、このいずれに対してもマクロな選定条件の把握に役立つ。路線計画者にとって、リモートセンシングによる動的地形・地質情報から、次のようなことが役立てられる。

① 路線選定と路線決定に重要なファクターとなる地

形地質的なコントロールポイントに関する情報（分布位置、規模、性状）の提供。

② ①の情報の路線選定の際の重要度判定。

③ 問題箇所、懸念箇所についての概査、精査上の優先度の判定。

図-7には、路線選定段階でのリモートセンシングによる地形地質調査の位置づけをまとめている。

以上より、リモートセンシングを主体とした路線選定のための調査体系を考えてみれば、図-7を基調とする空中写真判読や現地調査などの従来の技術とリモートセンシングを組み合わせた総合的な手法が必要である。また、このような並列的技術の横方向の組合せだけでなく、図-8に示すように調査全体にわたって広域から狭域への絞り込みという、いわば「マルチステージ（多段階的）調査法」が必要である。この調査法によって、次の効果が得られることとなる。

① 解析対象地域を広域から狭域へと絞り込んでいき、現地踏査に負担される経費と時間をできるだけ切り詰める（データ解析の省力化を目的とする）。

② 解析精度そのものが低精度から高精度へとアップできる。

③ 全体的なイメージを頭の中に植えつけるうえで、詳細にわたる解析ができる。

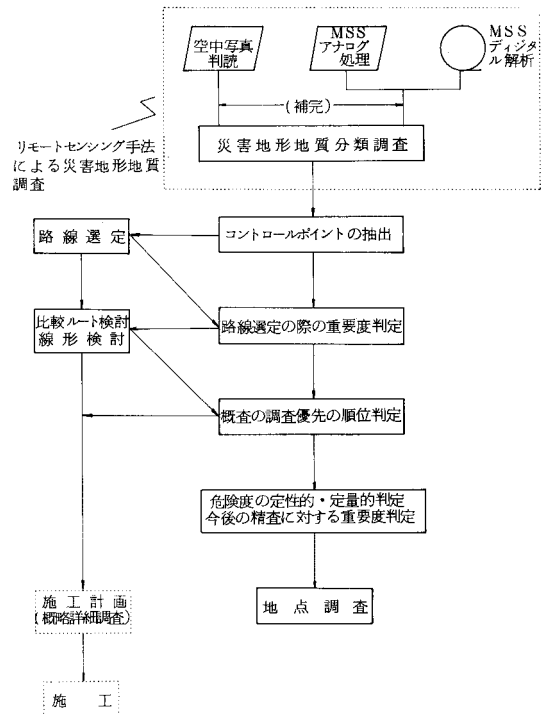
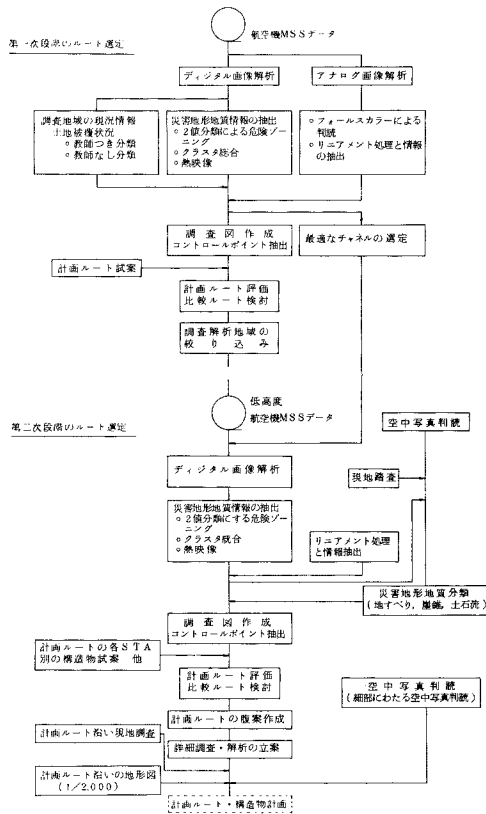


図-7 路線選定段階でのリモートセンシングによる災害地形地質調査の位置づけ



図—8 リモートセンシング・マルチステージ調査による路線選定の方法

④ 各ステージごとの調査データを補完することができる。

7. あとがき

現在までのところ、今回のような土木地質分野では、リモートセンシングを十分に活用しているとはいいがたい。その理由は次のとおりである。

① 現在のリモートセンシング技術は著しく進歩したとはいえ、あくまでも地表面の電磁波の反射・放射特性をより所として判別解析している。したがって、土木地質分野で要求されているような内容や精度に十分に応えるまでには至っていない。

② 土木地質分野でのリモートセンシング利用の基礎的研究が他の分野に比べて遅れている。

③ 土木地質分野での解析は、新しいリモートセンシング技術を適用せずとも、従来の空中写真判読で精度、

コストとも満足されていた面がある。

④ 利用面での研究、開発が遅れている。

これらの問題は、すぐにその解決策が見出されるべき性格のものではなく、今後の研究や調査を実施していくうえで解決、改善されるべき内容のものである。ただ、本解析を通じて常に考えてきたように、土木地質分野でリモートセンシングデータを取り込んでいく場合に留意すべきことは、他分野と違って単一のリモートセンシング手法だけで考えるのではなく、空中写真判読（現地調査を含む）などの従来の技術と組み合わせた総合的な調査・解析手法を進めていくことである。また、リモートセンシングデータは地表面情報であり、これから土木地質情報を導き出していくのに、直接的に読み取ることができる場合と、情報の読み換えにより最適のデータを抽出することの可能な場合があることを考慮しておく必要もある。

リモートセンシングはわが国に導入されてからまだ日が浅い。特に、自然を対象とする土木工学においては、自然のもつ複雑さゆえその適用例は多くない。本研究が土木工学におけるリモートセンシングの応用に一助となれば幸いである。

謝 辞：本研究は日本道路公団による九州縦貫自動車道八代～人吉工事に関連して行ったものである。研究の機会を与えて頂いた前日本道路公団福岡建設局長（現東京第二建設局長）持永龍一郎氏に深甚の謝意を表する次第である。また、研究の遂行にご協力頂いた福岡建設局技術第三課の各位、資料収集に便宜を図って頂いた福岡建設局八代、人吉両工事事務所、熊本県八代、人吉両土木事務所の各位、ならびに貴重な助言を頂いた国際航業地質事業部長 今村遼平氏に併せて心から御礼申し上げたい。

参 考 文 献

- 1) 今村遼平：静的地形・地質情報からの土木地質に必要な動的地質情報の把握に関する研究（Ⅰ）、（Ⅱ）、応用地質、Vol.17, No.1, pp.20～33, 1976；Vol.18, No.3, pp.89～106, 1977.
- 2) 20万分の1熊本県地質図。
- 3) 日本写真測量学会編：空中写真の判読と利用、鹿島出版会、1980。
- 4) 日本リモートセンシング研究会編：画像の処理と解析、共立出版、pp.231～238, 1982。
- 5) 後藤恵之輔・岡崎修平：リモートセンシングによる斜面崩壊発生地点の予測、土木学会第37回年次学術講演会講演概要集、Vol.3, pp.245～246, 1982。

(1984.6.8・受付)