

リモートセンシングによる地すべり解析

高知工科大学 社会システム工学科 高木方隆

1. はじめに

衛星リモートセンシングの技術による地すべり解析は、1970年のLandsat打ち上げ依頼検討が続けられている。当初は、地上分解能が30~50mと良くないために、地すべり自身を明確に捉えることは、よほど大規模の地すべりでない限り困難であった。したがって、植生等の地すべり地周辺の土地被覆状態を解析することで、地すべりとの因果関係を探る研究が主として行われていた。しかし、地すべりは、地形・地質・土質・水収支などの要素が複雑に絡みあって発生するものであり、土地被覆の状態のみからの解析は困難である。1999年には商業用のリモートセンシング衛星IKONOSが打ち上げられ、地上分解能0.8mという高分解能の画像が販売されており、個々の地すべりに対するデータが得られるようになってきた。特に、ステレオペア画像より、三次元の地形データを取得できることに大きなメリットを有している。

一方、地上での測量技術の進歩も目覚ましい。トータルステーションもレーザーを利用したノンプリズム型のものが利用でき、モータードライブによる自動追尾機能も付加されてきた。また、スキャニング型レーザーにより、周辺の三次元情報を瞬時に取得できるようにもなってきた。さらにデジタルカメラの進歩により、デジタル写真測量の技術でも非常に効率良くデータを取得できる時代となっており、このような技術も地すべり観測への応用において、大きな期待が寄せられている。

さて、地理情報システム（GIS）も1970年頃より水道管理システムとして利用され始め、現在では位置情報を伴うデータの管理に非常に多くの分野で利用されている。リモートセンシング等の計測技術は、言うなれば「データ取得のための技術」であるのに対し、GISは、「データ解析のための技術」といえる。したがって、両者を有効に活用することが重要な課題といえよう。先にも述べたように、地すべりの発生は、多くの要素が影響しているため、GISは解析において大きな力を発揮する。

本稿では、地すべりの解析に焦点を当て、現在のリモートセンシングやGISの技術を駆使しすれば、どのような解析が可能かについて言及する。

2. リモートセンシングによる地形データの取得

リモートセンシングに用いられるセンサは、光学センサ、マイクロ波センサ、レーザーセンサの三つに大別できる。そして、センサを搭載する機器は、プラットフォームと呼ば

れている。地上で三脚などに据置くタイプからバルーン，飛行機，人工衛星など様々である。地上に近いほど分解能が高いが，地上から離れるほど広範囲をカバーできるが分解能が低くなる。ここでは，各センサの特徴と利用例について解説しておく。

2.1 光学センサ

デジタルカメラで利用されているCCDに代表されるセンサである。太陽などの光源の反射や物体自身の放射による電磁波をセンサが感知して画像化するものである。様々な波長帯での画像を取得することができるため，土地被覆の状況を把握するのに適している。また，ステレオペア画像を取得することにより，三次元計測も可能で地形データを得ることができる。ただ，気象の影響を受けるのが難点である。雲などがある場合は，観測できないという欠点を持つ。

人工衛星をプラットフォームとするものが多く，現在利用可能な日本の開発したセンサには，ASTER¹⁾がある。空間分解能は，15mで可視近赤外3バンド，短波長赤外6バンド，熱赤外5バンドの観測波長帯を持ち，土地被覆の分類に有効である。さらに，近赤外



図1. 空間分解能の違い

のバンドにおいては、直下視の画像に加えて、後方視のバンドを持っていることから、ステレオ画像による三次元計測も可能である。

また、近年注目を集めているのが、空間分解能が1m未満の高分解能商業衛星である。Space Imaging社のIKONOS²⁾は空間分解能84cm、Digital Globe社のQuickBird³⁾は空間分解能61cmである。これらは、可視近赤4バンドの観測波長帯を持ち、航空写真並の画像を提供している。また、衛星の機能として、対象範囲を狙ってデータを取得できることから、時期は異なるもののステレオ画像の取得が可能であり、三次元計測も可能となっている。

2.2 マイクロ波センサ

観測する物体にマイクロ波を照射し、その物体によるマイクロ波の後方散乱成分を観測することによって画像化される。したがって、物体のラフネス（粗さ）を見ることが出来る。マイクロ波という、比較的長い電磁波の波長帯域のため、雲などの影響を受けにくい特徴を持つ。さらに、2時期のマイクロ波データより、マイクロ波の干渉を利用することによって三次元計測も可能で、地形データを得ることが出来る。図2は、二時期のマイクロ波の干渉を利用することによって得られた三次元データを画像化したものである。二時期のデータといっても、三次元計測が可能な二時期の組み合わせは非常に稀であるため、実用化には至っていない。2000年にスペースシャトルによって2機のセンサを同時に利用し、地球の陸域の約7割の三次元計測を行うSRTM⁴⁾が注目を浴びたが、このように常に2

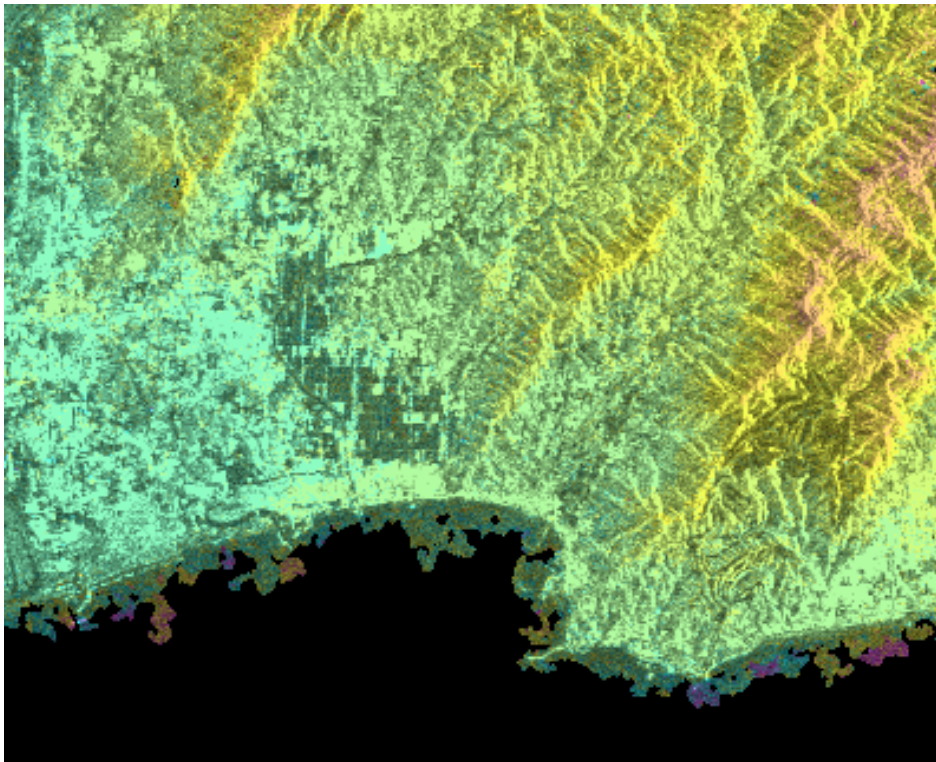


図2. マイクロ波センサによる三次元計測例

機体制で運用しなければ、マイクロ波での三次元計測は困難である。

マイクロ波センサを搭載した日本の開発した衛星にJERS-1¹⁾がある。18mの空間分解能を持ち、各機関で利用されていたが、太陽電池パネルの寿命により1998年に運用が停止されている。現在は、カナダのRADARSAT⁵⁾が広く利用されている。特にユーザーがからの観測要求を受け入れる体制が整っているため、災害時にその威力を発揮している。

2.3 レーザーセンサ

観測する物体にレーザーを照射し、返ってきたレーザーの時間や周波数を解析することで物体までの距離を測ることができる。このレーザーをスキャンングすることによって距離画像を生成することができる。現在、スキャンング型レーザーが人工衛星に搭載されている例はないが、最近では航空機に搭載されている。航空機自身の位置と姿勢をそれぞれGPSとジャイロにより計測することで、三次元計測が実現されている。図3は、航空機に搭載されたレーザーによって取得されたデータである。航空機からの計測となれば、空間分解能として1mよりも細かくデータを取得することができるため、標高ではなく、ビルなどの建築構造物や機などを含めた高さ情報となっている。

センサとプラットフォームは、対象に応じて使い分ける必要がある。例えば、人工衛星は分解能は低くなるものの、広範囲をカバーできる利点がある。したがって地すべり解析においては、地すべり発生の分布を見るのには非常に適している。図4は、Landsat画像上

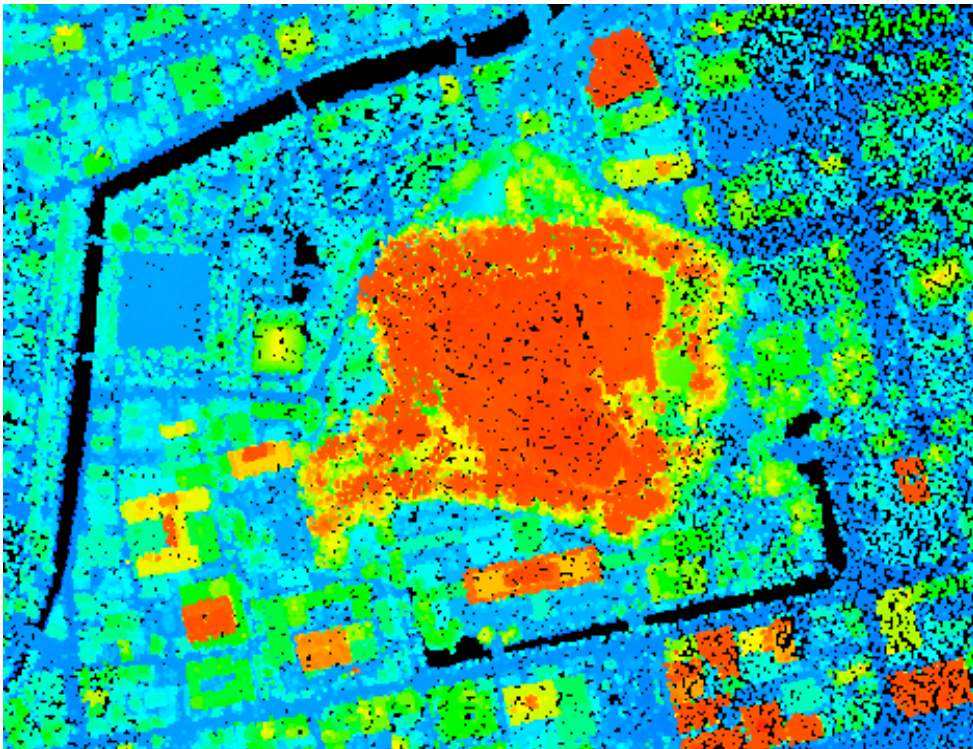


図3. レーザーによる三次元計測例

に地すべり防止区域をプロットしたものである。Landsatは、土地被覆分類に適しているセンサであり、この図から、水田などの農地に地すべりが多いことが解る⁶⁾。

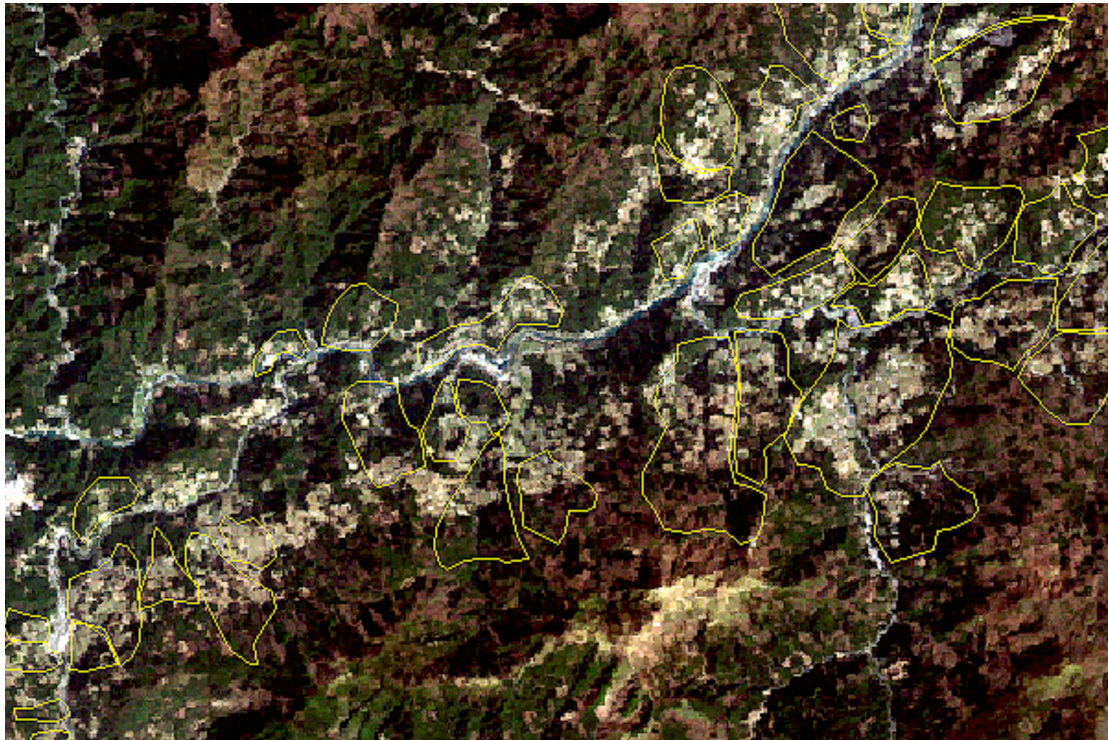


図4. Landsat画像による地すべり分布の解析例

3. リモートセンシングによる地すべり変位観測の実態

現在、地すべり地において行われている地上での変位観測は、伸縮計やGPSの観測に頼っている。伸縮計は、ある測線の変位を捉え、GPSは、ある点の変位を捉える。地すべりは、非常に動きが緩慢であることから、不動土塊と移動土塊との境界を特定することが難しく、何処が最も変位が大きいのかを把握することは非常に難しい。したがって、面的な地形の変位観測が望まれている。面的な観測においては、リモートセンシングが期待されている技術の一つである。

リモートセンシングによって地すべりの変位観測を行う場合、大規模な地すべりにはプラットフォームとして人工衛星の利用も可能であるが、多くの地すべりの規模は水平距離にして100m前後である。現在の高分解能衛星は、1m未満の分解能を有しているが、衛星リモートセンシングでは、地すべりの変位観測には分解能が低すぎて対応できない。したがって、プラットフォームとして航空機やバルーンなどを用いる比較的近い距離からの三次元計測であるデジタル写真測量やスキャン型レーザが適している。

ここで、リモートセンシングによって地すべりの変位を捉えるには、どのようなスペックが必要かを整理しておきたい。地すべりは、年間に数cm～数10cmと動きが緩慢なので、変位状況を明確に捉えるには、少なくとも地上分解能は1cm未満でなければならな

い。特に地すべり監視システムを実現する場合には、1mm未満の分解能が要求される。リモートセンシングによって1mm未満の分解能を実現するには、現段階では極めて困難である。このスペックに対しては、今後も測線間の距離を測る伸縮計でしか対応できないであろう。さて、GPSの精度にしても干涉測位で1cm程度の分解能である。1cm程度の分解能であれば、デジタル写真測量でも実現可能である。デジタル写真測量によって面的なデータを得られるのであれば、解析においては、そちらの方が有用なデータとなり得る。また、最近ではスキャニング型のレーザー（レーザープロファイラ）も地形データを取得するのに有用な機器となっている。以下に、デジタル写真測量とスキャニング型レーザーの特徴について述べる。

3.1 デジタル写真測量

デジタル写真測量における分解能は、撮影距離、レンズの口径と焦点距離、CCDの密度、 B/H （カメラ間の距離 B と物体までの距離 H ）に依存する。撮影距離を短くし、大口径・長焦点レンズで、高密度のCCDを用い B/H を1程度にすれば、1cmの分解能は簡単に実現できる。そこで、一般に販売されているデジタルカメラを用いて、どの程度の精度で計測できるかについて実験を行った。利用したデジタルカメラのスペックは、以下の通りである。

製品名：Fuji FinePix4700z

レンズ口径： 2.96mm

レンズ焦点距離： 8.3mm

CCD画素数： 2400×1800

CCDサイズ： 7.524×5.650mm

このカメラをバルーンを利用したプラットフォームに載せ、様々な距離からステレオペア画像を取得し、それぞれ3次元計測を行った。前ペー

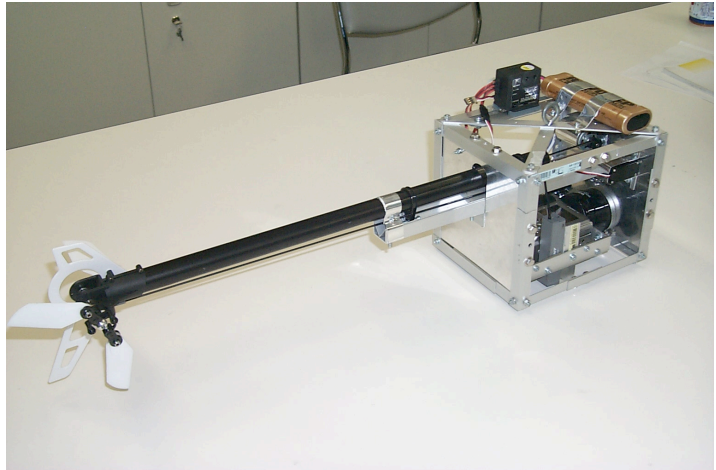


図5. バルーン搭載型プラットフォーム

ジの写真（図5）は、当研究室にて作成したプラットフォームである。ジャイロセンサを搭載し、テールロータが取り付けられているのでカメラの姿勢を制御することができる。このプラットフォームをバルーンにつり下げて撮影する。今回は、直径3mのバルーンを使用した。このバルーンでおよそ15kgのプラットフォームを釣り上げる能力がある。

図6は、高度別の B/H と誤差との関係を表したものである。この図より、 B/H 1～2において安定した誤差量を示している。 B/H は、先にも述べたように2台のカメラ間の距離 B とカメラの高度の比である。カメラの高度が一定の場合、 B/H が小さいと、カメラ間

の距離は短くなるので、対象物に対して十分な角度で観測することができず、誤差が大きくなる。一方、 B/H が大きいと、カメラ間の距離が長くなり、対象物に対して十分な角度で観測できるが、今度は右画像と左画像において全く異なる角度で撮影されるため、左右の画像において、同一ポイントを抽出すること（ステレオマッチング）が困難になる。したがって B/H が大きいとステレオマッチングにおいてミスが多くなり、誤差が大きくなる。

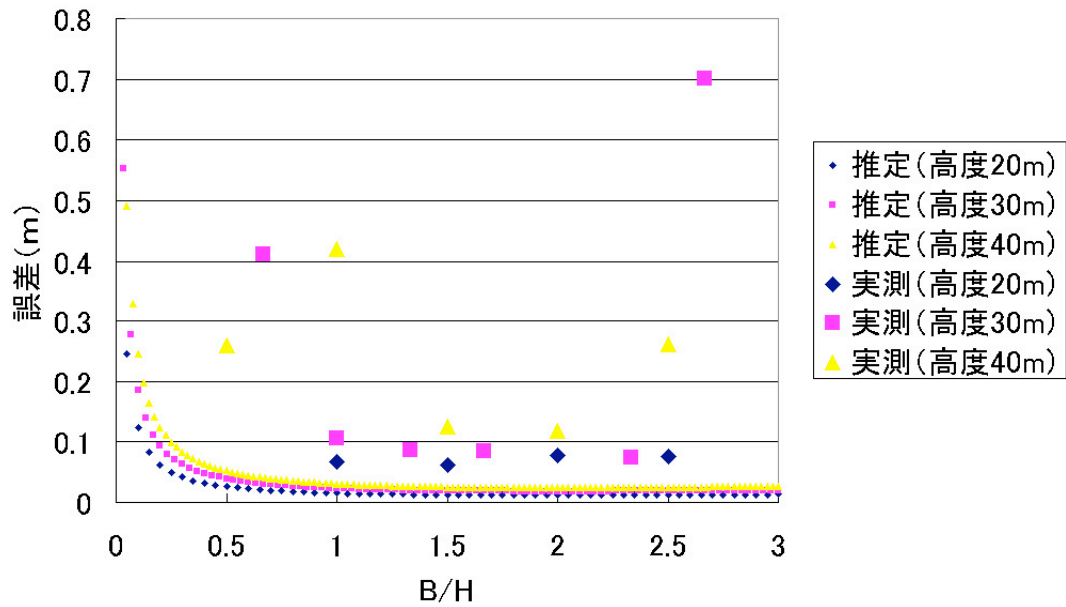


図6. 高度別の B/H と誤差との関係 (Z軸方向)

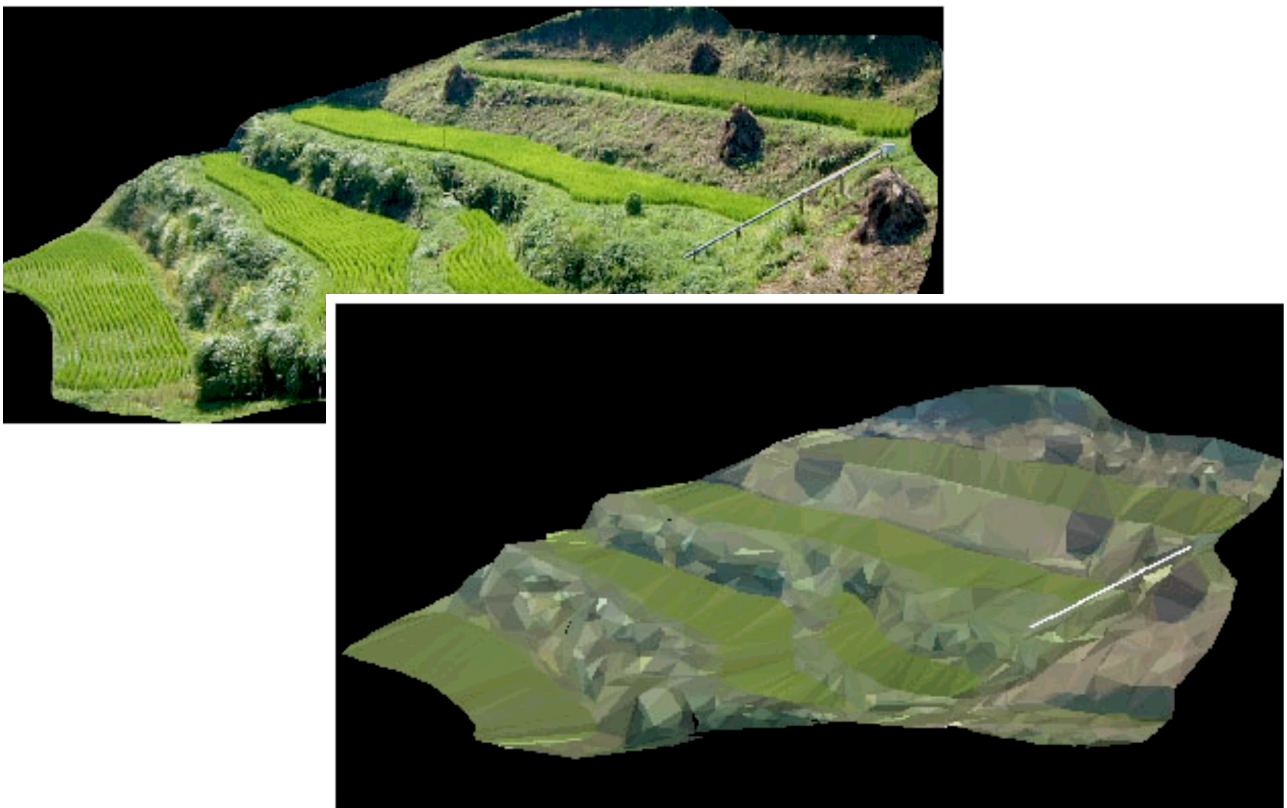


図7. 地すべり地における三次元モデルの例

なるのである^{7),8)}.

今回は、一般的な400万画素タイプのデジタルカメラで、ディストーション（レンズ歪み）のあまり良くない製品を利用したが、それでも20m程度の高さから、8cm程度の誤差で測量することができた。ディストーションを解決した上で、さらに高密度CCDのデジタルカメラを用いれば、1cmの精度での三次元計測は簡単に行えるものと期待できる。

3.1 スキャニング型レーザー

最近ではレーザーを利用した測量機器もどんどん市場に投入されている。ノンプリズムタイプのトータルステーションは、レーザーを利用したものが増えてきた。レーザーは、プラットフォームから物体までの距離を測ることができるため、プラットフォームの位置と姿勢さえ分かれば、三次元計測は簡単に行うことができる。このレーザータイプの測量機器は、トータルステーションにモータードライブが内蔵され、ユーザーの指示した個所を自動的に計測するタイプと、レーザーを一定の角度ずつ縦方向・横方向にスキャンし、面的な計測をするタイプとに大別できる。スキャニング型のレーザーは、トータルステーション型に比べて精度は劣るものの面的な情報を瞬時に捉えることができる。つまり、面情報を重んじる場合は、スキャニング型レーザー、各点の精度を重んじる場合は、トータルステーション型が適していると言えよう。

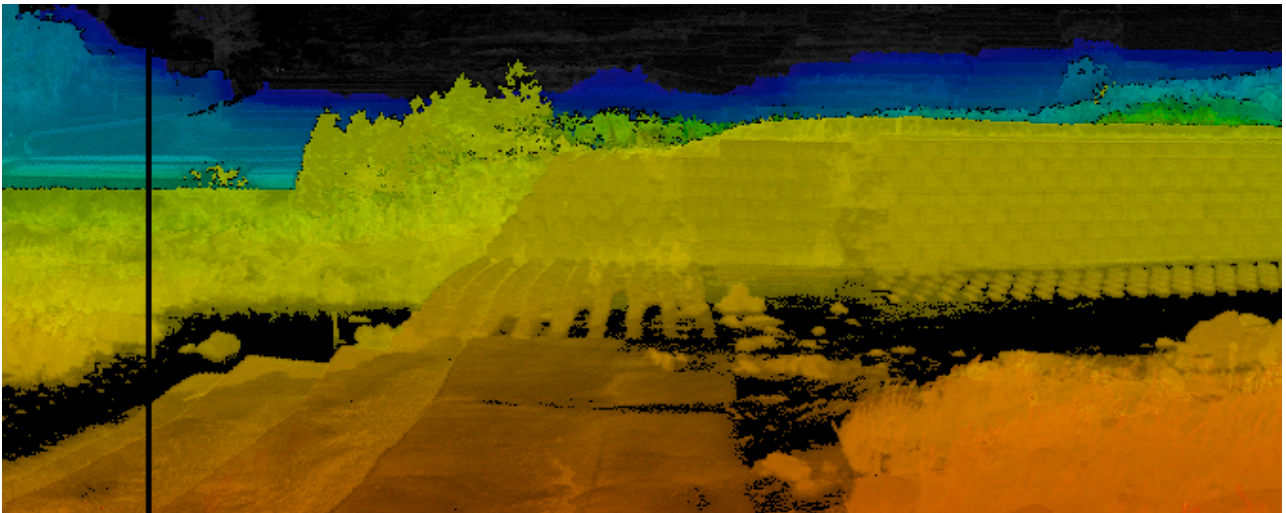


図8. スキャニング型レーザーで取得した室内の様子（近い物体ほど赤色）

図8は、スキャニング型レーザーで捉えたある地すべり地の距離画像である。近い物体ほど赤い色で表示されている。スキャニング時間は数分間なので、リアルタイムに近い計測が可能である。デジタル写真測量においては、ステレオマッチングをある程度自動化することができるが、B/Hが大きくなると、ステレオペア画像はそれぞれ見た目の異なる

る画像となり、自動マッチングが困難になる。一方、スキャニング型レーザーは、ステレオマッチングのような作業なしでデータの三次元化が可能のため、極めて効率が良い。現時点では、スキャニング型レーザーは非常に効果であるが、今後重要な測量機器になると考えられる。



図9 スキャン型レーザー画像によるグリッド型三次元モデル

図9は、スキャン型レーザー画像をグリッド型の三次元モデルに変換したものである。明るいものほど標高が高いことを示しており、黒くなっている部分は、データの取得されていない部分を表している。このように1点からの計測においては、計測されない部分が多い数出てくる。したがって、計測場所を数点設け、データを融合しなければ、十分なデータが得られないことが解る。測点数を減らすためには、高所作業車やクレーンなどにスキャン型レーザーを搭載し、高い位置より計測するのが効率的といえよう。

3.1 三次元データモデル

デジタル写真測量にしても、スキャニング型レーザーにしても、これを三次元画像に変換し、対象物の三次元モデルを生成する必要がある。地形を表すデータモデルとしては、グリッド型、TIN (Triangulated Irregular Network)型が一般的である(図10)。グリッド型は、格子状に対象領域を区切り、その格子点毎に標高の情報が収められている。一方、TIN型は、ランダムな三次元のポイントデータより三角形を生成し、その三角形の面の情報の集まりとして地形表現するものである。何れも低い分解能で地形を表現するに

は問題ないが、分解能が高くなり、地表だけでなく、木や家屋、土木構造物もデータとして取り込まれることとなると、これらのデータモデルは、十分とは言えない。データとして、オーバーハングした崖やその崖にある亀裂、家屋の軒下なども表現される必要がある。このような状況においては、グリッドにしてもTINにしても表現できないため、コンピュータグラフィックスの世界で用いられているようなデータモデル

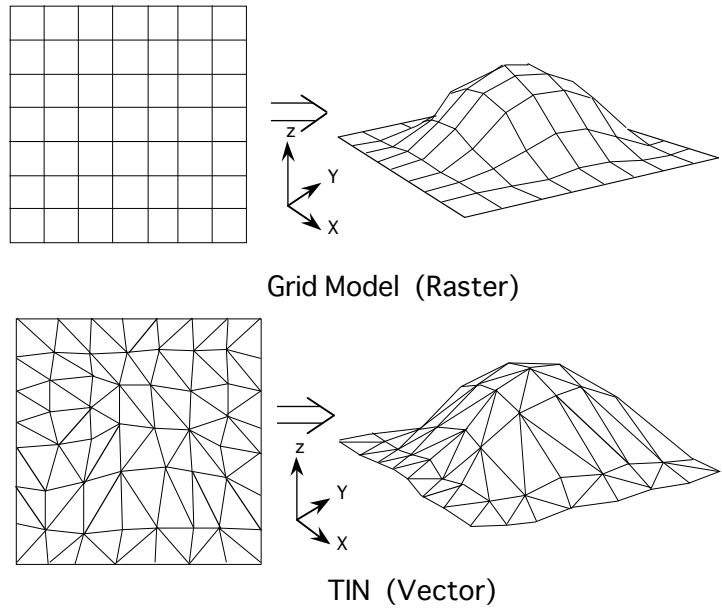
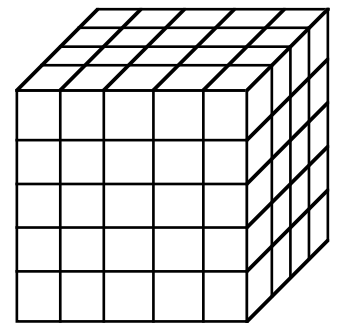
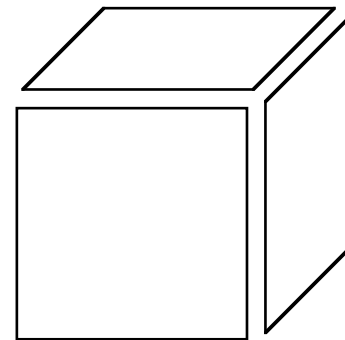


図10. 地形三次元モデルの例

が必要となる。例えば、サーフェスモデルやボクセルモデルといった形式を利用するべきであろう(図11)。ボクセルモデルは、グリッド型の拡張したものといえ、微少立方体によってデータを表現するものである。微少立方体のサイズを小さくすることによって、微細な構造を表現することができる。医療分野においては積極的に利用されており、CT等で撮影された画像の解析はボクセルモデルで行っている。解析には非常に大容量のメモリを必要とするが、コンピュータの処理能力が交渉している昨今においては、今後注目すべきデータモデルといえる。一方、サーフェスモデルは、TINを拡張したものといえる。TINが三角形に限定しているのに対し、サーフェスモデルは、多角形でデータを表現する。取得されたデータ全てを利用して三画網を構成するのではなく、対象物毎に集約された面によってデータを表現するため、データ量が少なく済み、



Voxel Model (Raster)



Surface Model (Vector)

図11. その他の三次元モデル

解析においても有利である。三次元データとして得られた各点が、何の点の一部なのかを判断する必要がある⁹⁾。今のところ、デジタル写真測量やスキャニングレーザーは、三次元の位置情報を取得することのみの機能であるが、今後は位置情報と同時に色情報や分光反射の情報を用いることで、物体判読や領域分割の機能付与が重要な課題といえる。

さて、地すべりの動きを捉える場合には、留意しておかなければならない点がある。簡単に考えると、異なる時期に得られた三次元モデルを比較することであるが、

単純に比較する訳には行かない。つまり、始めに計測した点と、次に計測した点とが全く同じ点であれば問題ないが、そのような状況はほとんどないからである。デジタル写真測量の場合、画像から変位を追跡する点を抽出し、その点の変位を求めることもできるが、デジタル写真測量は自動ステレオマッチングにより、簡便に面的な三次元測量を実現するところに価値がある。あらかじめ、面的な解析が可能なほど変位追跡点を設定することは、非常に多くの労力を伴ってしまう。また、スキャニング型レーザーの場合も、同様に全く同じ点の計測をすることができない問題をかかえている。一定の角度毎にデータを取得して行く訳であるから、変位を追跡するためには、スキャニング型レーザーの設置を毎回全く同じ状況にする必要がある。この設置の再現性は、現在のスキャニング型レーザーでは非常に悪いため大きな問題点となっている。全く同じ状態で設置できたとしても、対象地域は地すべり活動によって変位する訳であるから、毎回同じ点の移動量を追跡している訳ではないのである。さらに、時期によって土地被覆の変化が変わってしまうと、さらに状況は複雑になり、変位の要因が、地すべり活動なのか、土地被覆の変化なのかを見極める必要がある。このように変位追跡の解析は、このように極めて慎重に行わなければならない問題である。したがって、この点を考えても、三次元計測と同時に土地被覆の状況把握は極めて重要と言える。測点がどのように変位しているのかを解析するのではなく、ある面が、全体的にどのような動きをしているかを把握する必要がある。我々は、このような解析が可能な三次元モデルの自動生成について、目下研究中である。

4. リモートセンシングによる地中モニタリング

地すべり自身、地中内部で発生するものであるから、地表を見ることよりも、地中の状況をリアルタイムでモニタリングすることが理想である。地中内部をモニタリングするには、直接ボーリング孔を利用する方法から、弾性波探査、ジオトモグラフィーへと進化してきた。しかしながらこれらの手法は、地中内部を常時監視するといったモニタリングは極めて困難である。埋設型の傾斜計や縦型の伸縮計は、リアルタイムモニタリングに適しているが、点でしか捉えられないことやすべり面を把握しておかなければ設置できないところが問題である。一方、リモートセンシングは、非接触での観測のため、実現が可能であれば、リアルタイムモニタリングが可能である上、すべり面を把握しておく必要もない。しかし、モニタリングとして、衛星リモートセンシングのように電磁波を観測することをベースにおくと、地中からの電磁波としては、温度程度しか観測できないのであまり役に立たないのが現実である。そこで、電極を地中に埋設し、電位の変化を監視することで地すべりの動きをキャッチする方法が提案されている。この方法は、地すべり活動や地下水の急激な変化によって誘導電流が発生するという原理を利用しているもので、従来よ

り様々な機関において実験されているが、電極自身の腐食などの影響でノイズが発生し、 $nV \sim \mu V$ レベルでの観測が長期間できないことが問題であった。ところが近年、非常にノイズの少ない電極が開発され、海底での火山監視に利用されている電界センサというセンサが開発されている。本節においては、未だ観測方法は確立されていないが、我々自身実験中である電界センサを利用した地中モニタリングの状況について、その可能性について述べたい。

現在、我々は高知県の地すべり防止区域において、電界センサを設置している。センサは、地すべりの頭部で深さ約1.5mに5本設置している(図12)。センサ電極周辺は、ベントナイトにより、周囲とのトランジションを良くする工夫を施している。従来の電極は、銀を用いたり、銅・硫酸銅を用いていた。銀の電極は、腐食しやすく時間的に不安定であり、銅・硫酸銅の電極は、土中に銅イオンが流出し、土中の状況を把握するのには適していない。我々の用いた電極は、銀・塩化銀を用い、土壌との接触抵抗が低く、電極の変質は少ないため安定してデータを取得することができる。

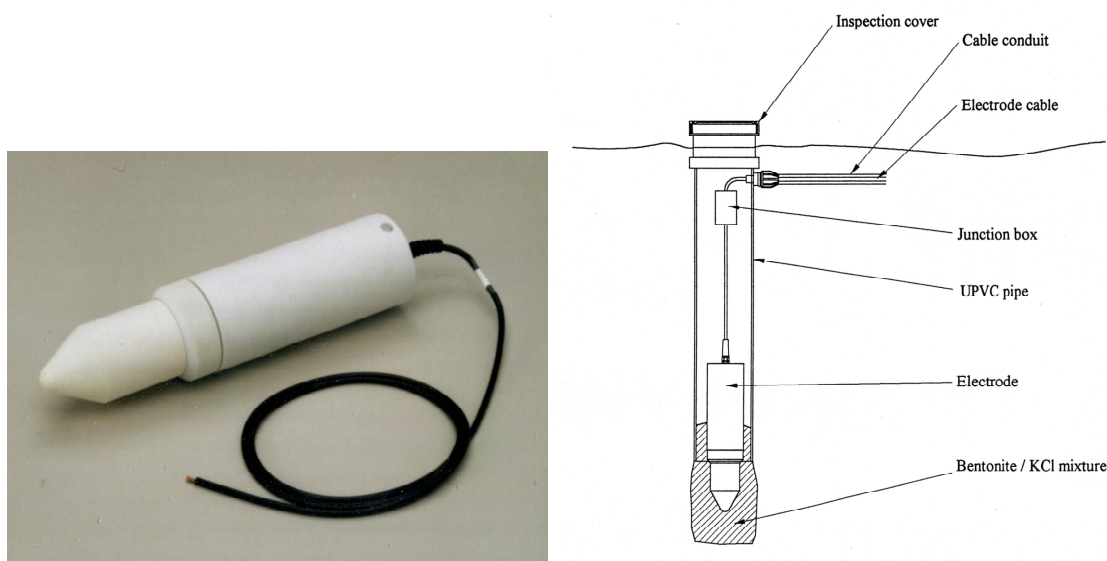


図12 埋設した電界センサとその設置状況

本実験で使用した電界センサの仕様を以下に示す。

チャンネル	3チャンネル(3軸)
出力範囲	$\pm 10V / \pm 100 \mu T$ ($100mV / \mu T$)
測定誤差	$\pm 0.5\%$
直線性誤差	0.0015%以下
出力リップル	0~1kHzは平坦, 1kHz以上は $\pm 5\%$
オフセット誤差	$\pm 5 nT \pm 0.1 nT / ^\circ C$
スケール誤差	$+ 20 ppm / ^\circ C$

周波数特性	0 ~ 3 kHz
Z 軸相対誤差	± 0. 1°
自己ノイズ	4 ~ 6 pTrms/√Hz at 1 Hz
出力インピーダンス	1 Ω 以下
消費電流	+ 27 mA, - 8 mA
電源仕様	DC ± 12 V ~ ± 17 V
動作環境	- 40 ~ + 70 °C
本体側コネクタ	Amphenol 62GB-12E10-7P
適応コネクタ	Amphenol 62GB-16J10-7S
添付ケーブル	7 芯シールドケーブル 5 m
ケーブル終端適応コネクタ	HIROSE RM15TPD10S
筐体	32 × 32 × 166 (取付ネジを除く)
取付方法	M5 ネジ × 2
重量	160 g

次いで、電界センサ用アンプについて解説する。非常に微弱な電界をキャッチするため、アンプも極めて重要な要素である。本アンプは、電界センサの信号増幅のために設計された、土中電界センサアンプである。3チャンネルの差動入力は、金メッキされたオーディオ用コネクタで接続され、その接触部は低雑音仕様となっている。それぞれのチャンネルには、下記に示す通り異なった周波数帯域の3つの出力があり、増幅率は、センサー設置環境に合わせて、10倍、又は100倍を選択できるようになっている。各アンプ入力は、サージ保護回路により、落雷等、過電圧による損傷を防止している。

アンプ仕様は、次の通り。

アンプ回路数	3チャンネル
入力インピーダンス差動入力	2 MΩ
増幅率 (チャンネル毎)	10倍, 又は100倍
出力電圧範囲	約 ± 10 V
周波数帯域 A	DC ~ 0. 7 Hz
周波数帯域 B	10 mHz ~ 0. 7 Hz
周波数帯域 C	1 kHz ~ 9 kHz の絶対値信号の平均値
電源仕様	DC 12 V 120 mA
入力コネクタ	RCA ピンプラグ (金メッキ仕様)
電源コネクタ	D-SUB 9 ピン
出力コネクタ	D-SUB 25 ピン
ケースサイズ	250 × 160 × 57 mm (突起部を除く)

ケース材質

ポリカーボネート

このセンサを用い、1.5mの深さにおいて、20~30m下の地すべり面での活動を捉えることができれば、極めて有効なモニタリング手法となる。電極から得られる信号は電圧として捉えられ、その電圧のデータをアナログアンプを通し、2Hzにて取得している。図13は、電界センサの設置状況を表している。地すべり活動は、北北東に向かって移動しており、センサをその方向に沿うものと、直角方向との2方向の様子を捉えられるように設置した。

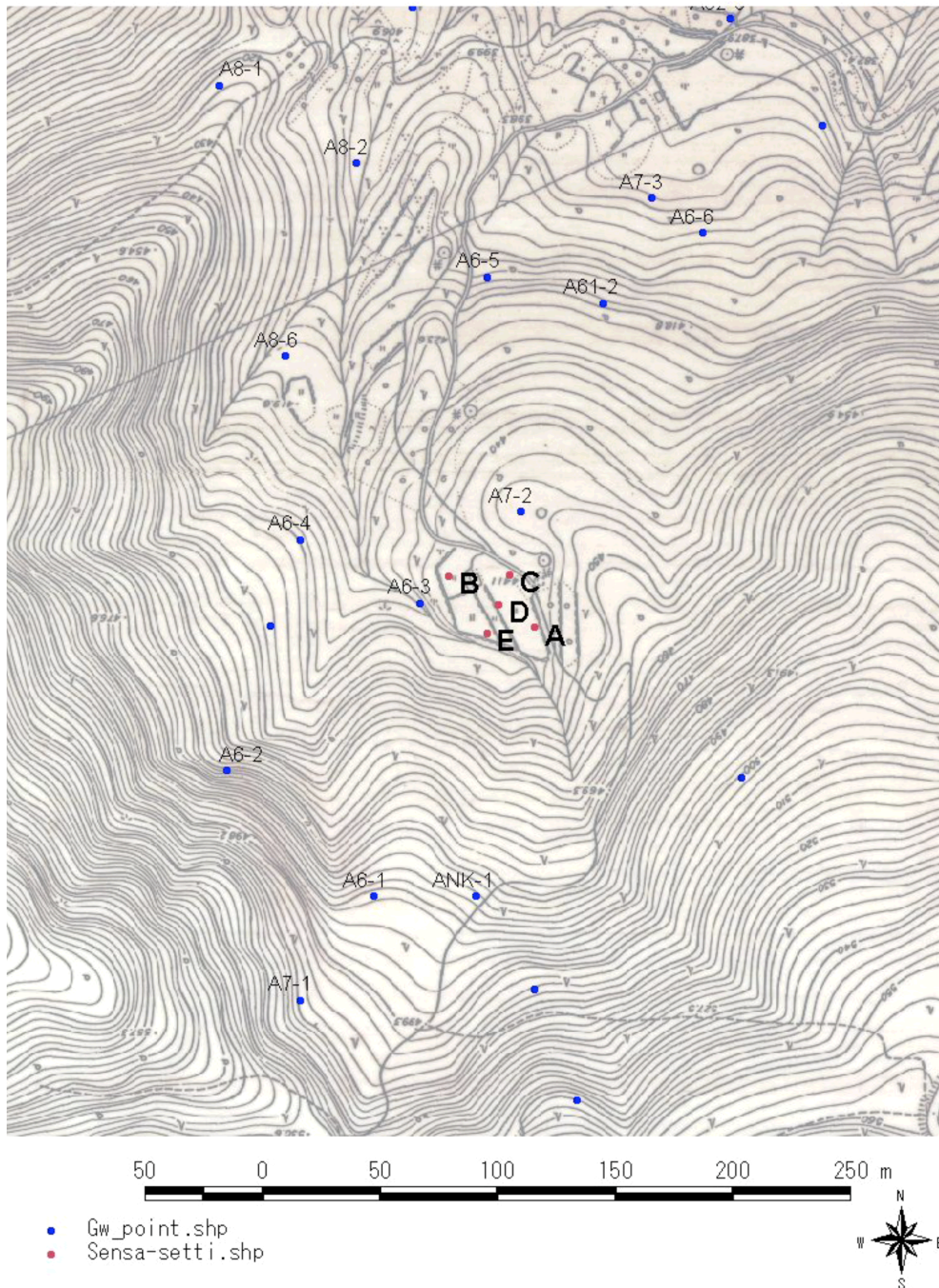


図13 電界センサ設置状況

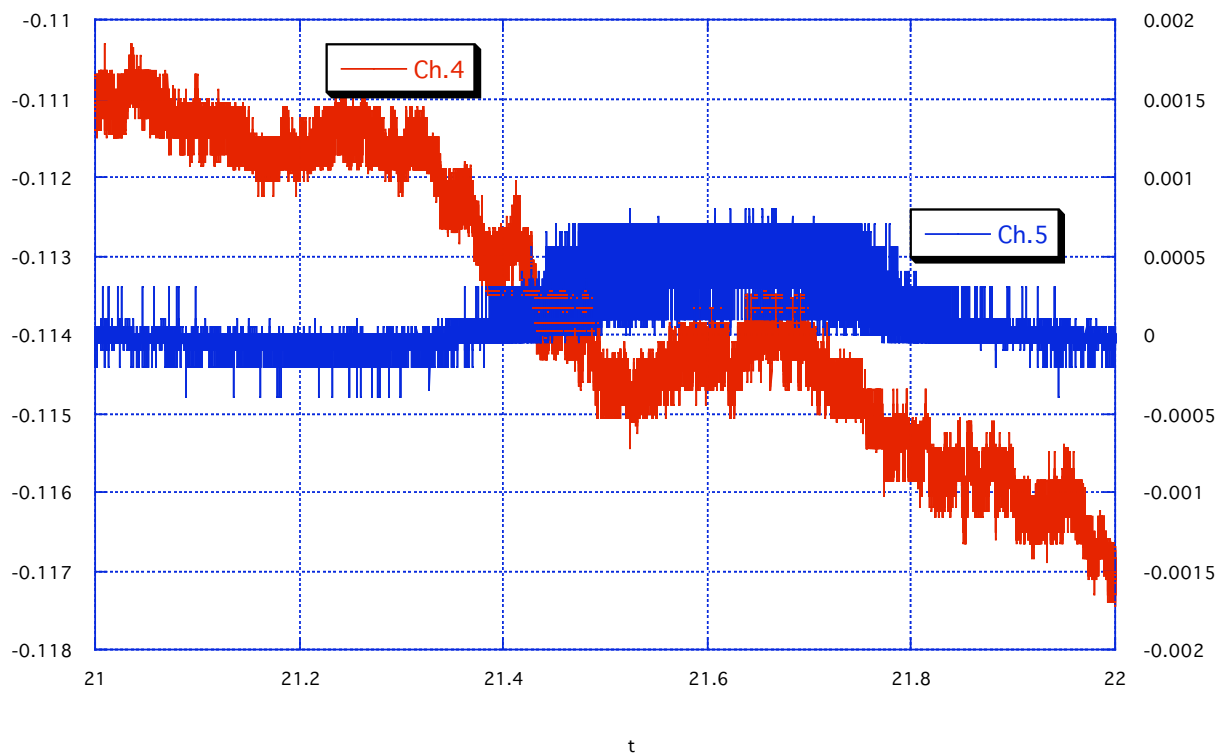


図14. 平常時の誘導電位の変化 Ch.4 出力A, Ch.5 出力B 横軸：時間（日） 縦軸：電位（mV）

図14は、電界センサより得た誘導電位の日変化を見たものである。Ch.4は、出力A、つまりDC~0.7Hz帯のデータで、Ch.5は、出力B、つまり10mHz~0.7Hz帯のデータである。何れのデータも高周波のノイズとともに低周波での変動を確認することができる。この様子を数週間単位で見ると、出力Aの低周波での変動に規則性はなかったが、出力Bの低周波での変動は、周期性が認められた。その周期性は、変動の上昇、ピーク、下降の時刻が、日射の状況と極めて高い状況にあることであった。しかし、電極自身は深さ1.5mのところ設置されているので日射の影響があるとは考えにくい。したがって、電極部分ではなく、地表面に出ているアンプの日射によるノイズと考えられる。この変動は、 $1\mu\text{V}$ 以下であるため、非常に微弱なものであり、地すべりの活動による想定される誘導電位よりも小さいものと予測された。

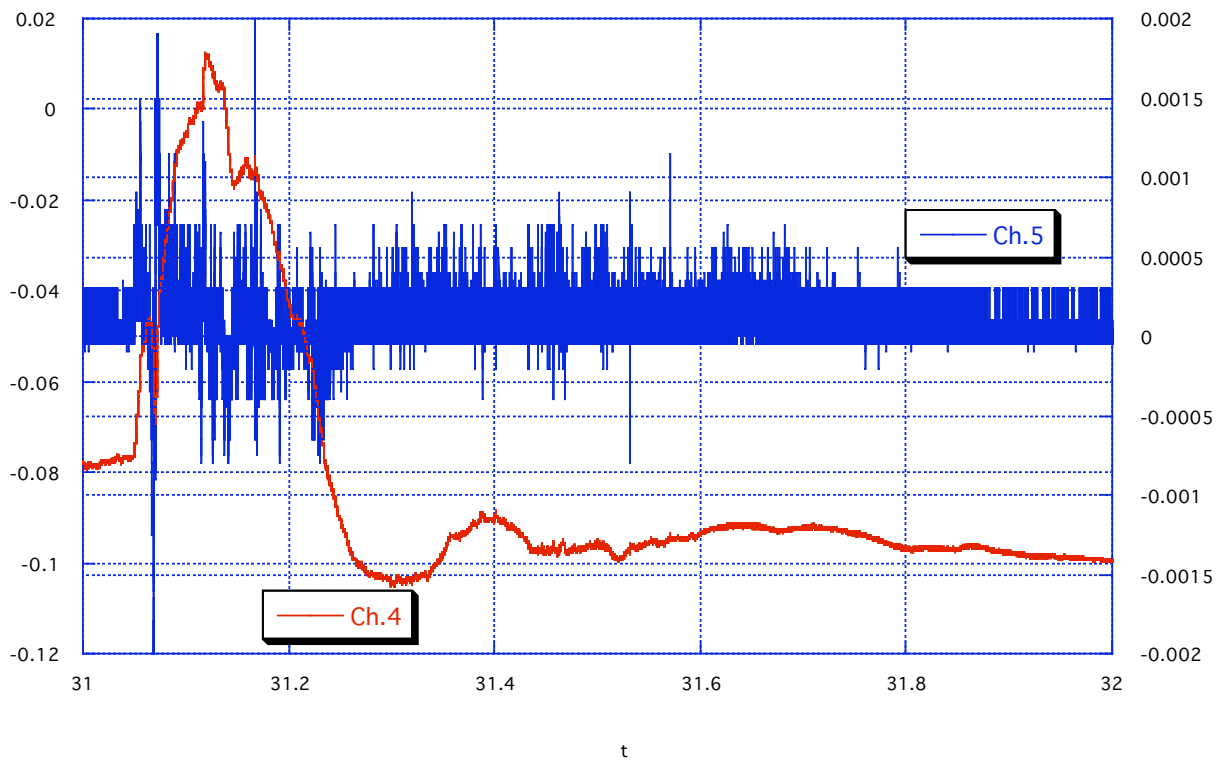


図15. 地すべり活動時の誘導電位の変化1 Ch.4 出力A, Ch.5 出力B 横軸：時間（日） 縦軸：電位（mV）

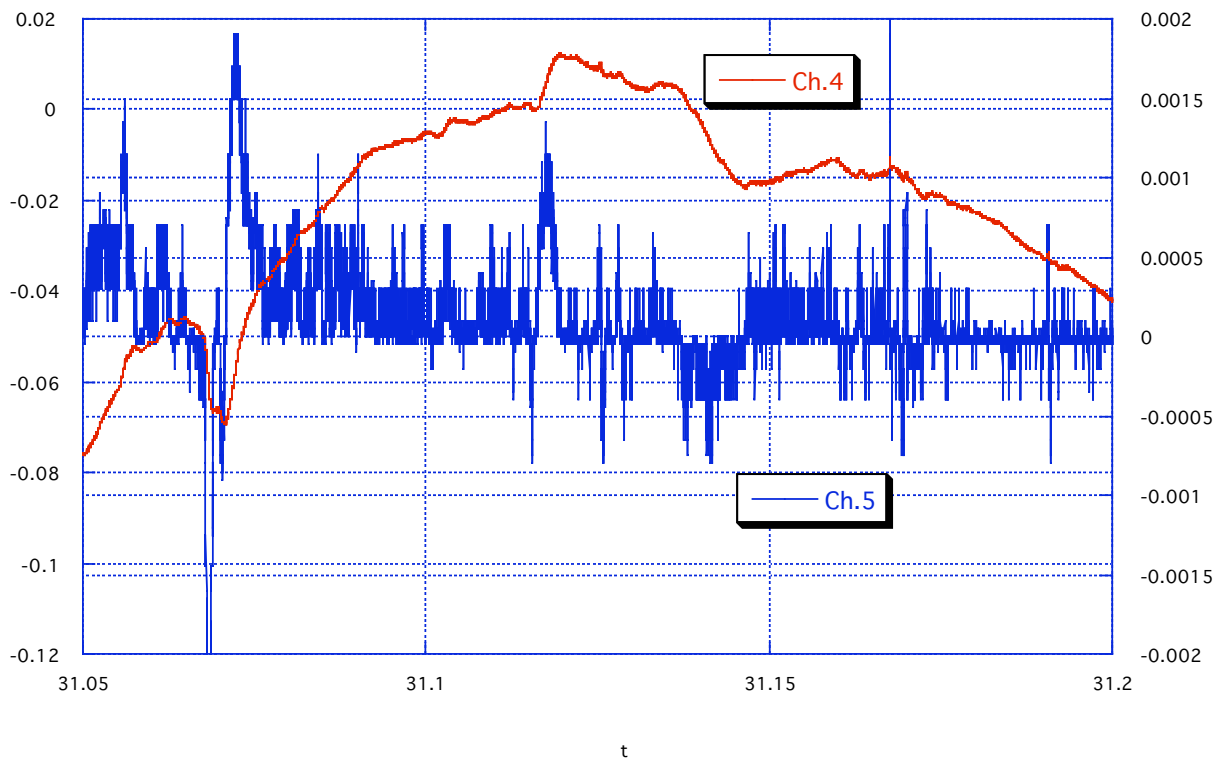


図16. 地すべり活動時の誘導電位の変化2 Ch.4 出力A, Ch.5 出力B 横軸：時間（日） 縦軸：電位（mV）

図15は、地すべり活動時において、電界センサより得た誘導電位の日変化を見たものである。先の図と同様に、Ch.4は、出力A、電界センサより得た誘導電位の日変化を見たものである。平常時に比べて誘導電位の変動が非常に激しい。図16は、ある期間を拡大したものである。31.07日においては、出力A、Bともに急激な変化を見せている。この時刻において、地すべり活動が発生した可能性が高い。

5. GISによる地すべり解析

リモートセンシングがデータ取得技術なのに対して、GISはデータ解析技術といえる。地すべりは、はじめにも述べたように様々な要素が複雑に絡みあって発生するものなので、GISを用いた解析は極めて自然な取り組み方である。今まで地すべりに関する研究は、特定の地すべりを対象に地形・地質・土質などの個々の分野において行われているのがほとんどで、発生しているたくさんの地すべりを対象に様々な分野の特徴量を系統的に解析しているものは少ない。これは、系統的に多くの地すべりを解析しても際立った特徴を見出すことが困難だったからであろう。GISは、系統的に地すべりに関連するデータを蓄積し、柔軟な解析を行う能力を有している。したがって近い将来、地すべりに関連する詳細なデータを収集し、GISを利用することによって、各地すべりの特徴量が導かれ、定量的に分類し、正確な地すべり危険マップを作成することができると期待している。著者の研究室において保有しているGISデータは、一般に入手可能で精度もあまり良くないのであるが、それらを用いて地すべり解析を行った結果を紹介する。以下は、今回使用したデータのリストである。

データ	データ整備主体
地すべり防止区域	四国地方建設局1/200000地図
地質	工業技術院地質調査所CD-ROMによる（日本列島の地質）250mメッシュ
標高	国土交通省 国土地理院 四国地方の数値地図 50mメッシュ
土地利用	国土交通省 国土地理院 国土数値情報 100mメッシュ
水系	国土交通省 国土地理院 1/50000地図より取得
地形	標高データより作成 50mメッシュ

図17は、四国の地質図に地すべり防止区域をプロットしたものである。一般に言われているように、三波川変成帯、御荷鉾帯、秩父累帯に多く分布している。和泉層群における地すべりは、徳島県側では多く見られるが、愛媛県側ではほとんどない。

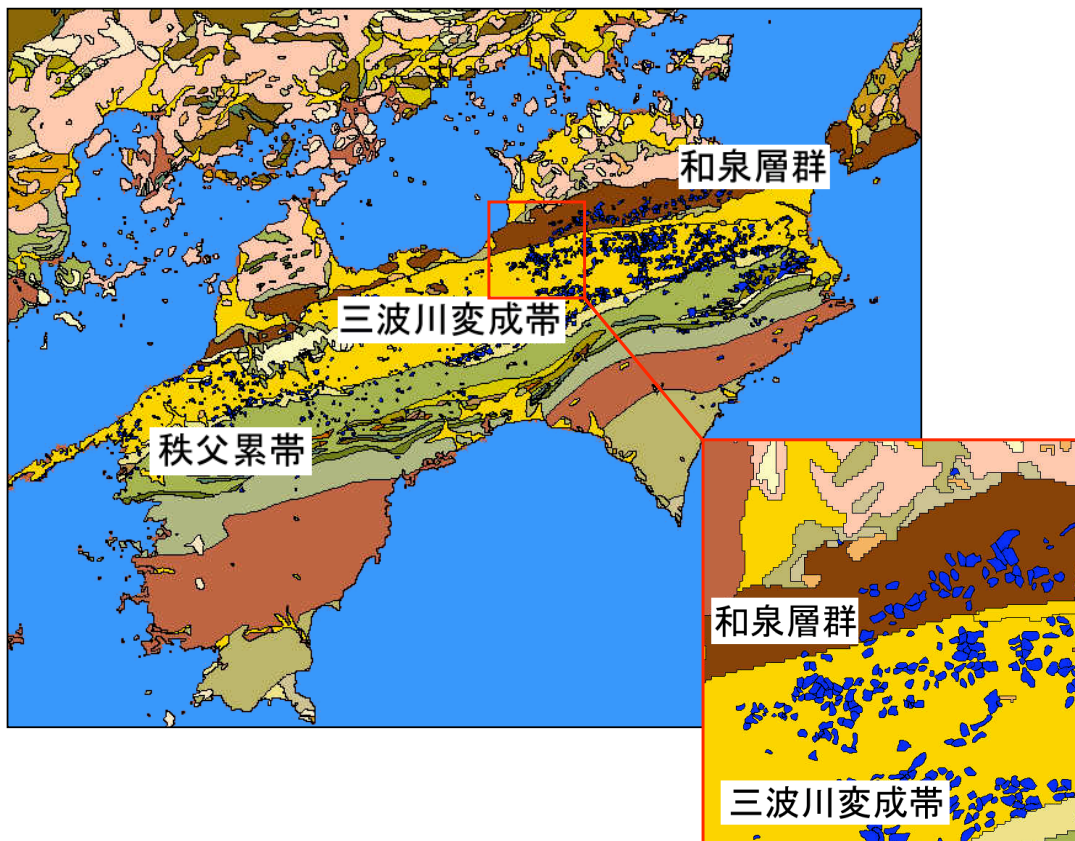


図17. 四国の地質と地すべり

次に地形について検討したい。地形分類は、目視によって分類することが多いが、デジタルの標高データがあれば、ある程度コンピュータによって自動分類できる。特にメッシュ型の標高データであれば、画像処理手法を適用することで分類が可能である。そこで今回は、「標高データを用いた画像処理手法による地形分類」，岩橋純子，神谷泉(1995)を参考に分類を行った。

a. 傾斜の分類

傾斜の分類では、緩やかな傾斜と急な傾斜に分類した。四国地方における平均傾斜を閾値として、平均以上であれば急傾斜地形とし、平均傾斜未満であれば、緩傾斜地形とした。

b. 凹凸の分類

凹凸は3×3画素の局所領域においてLaplacian filterを施し、傾斜量の変換点を抽出した。Laplacian filterによって正の値になる画素を凸地形、負の値になる画素を凹地形とした。

c. 尾根・谷・平地の分類

Median filter は、尾根・谷などの鋭いエッジの角が丸まって出力される。出力画像から原画像を引くと尾根は、正の値に、谷は負の値に、そして平地は0として表現さ

れる。

作成された3つの分類画像をオーバーレイすることにより地形は、12カテゴリーに分類することができる。図18に地形分類結果を示す。この図からは判断し辛いですが、集計した結果、凹地形に地すべりが多いことが判明した。

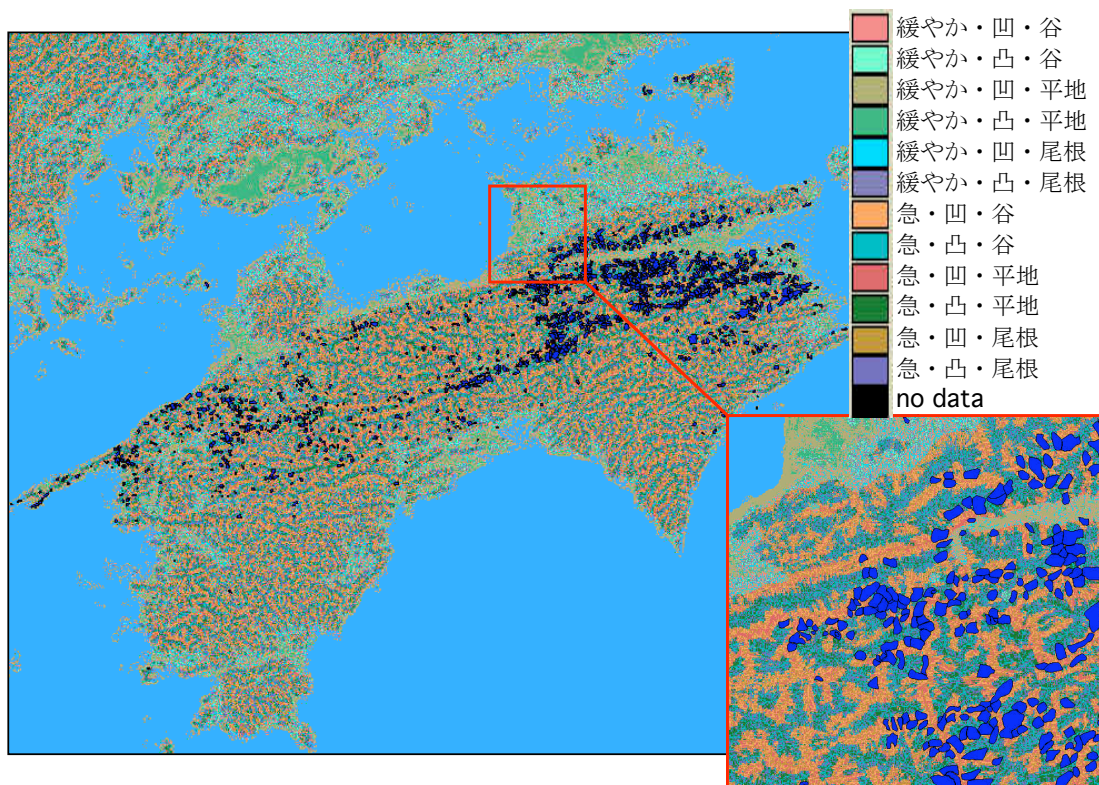


図18. 地形分類結果と地すべり

地質に着目すると、和泉層群では徳島県側には地すべり防止区域が多かったのに対し、愛媛県側にはほとんどなかった。一方、地形に着目すると、和泉層群では徳島県側には大規模な凹地形が多かったのに対し、愛媛県側にはほとんどなかった。したがって、地質と地形をを総合的に考察するだけでも地すべりの発生ヶ所を特徴づけることが可能であるといえる^{10), 11)}。

先のGIS利用例は、多くの地すべりを対象に地すべりの分布を系統的に把握するためのものであったが、個々の地すべりについてもGISは活用できる。地すべり地においては、様々な調査業務が実施されているが、その調査は必ず位置情報が付随する。したがって、調査項目ごとにGISデータとして整備すれば、調査結果を効率良く検討できるのである。図19は、ある地すべり地において、観測されている地下水位のポイントを地形の情報と重ね合わせて三次元表示させたものである。地下水位の高さ毎に色を変えたり、他の項目との重ね合わせも可能である。

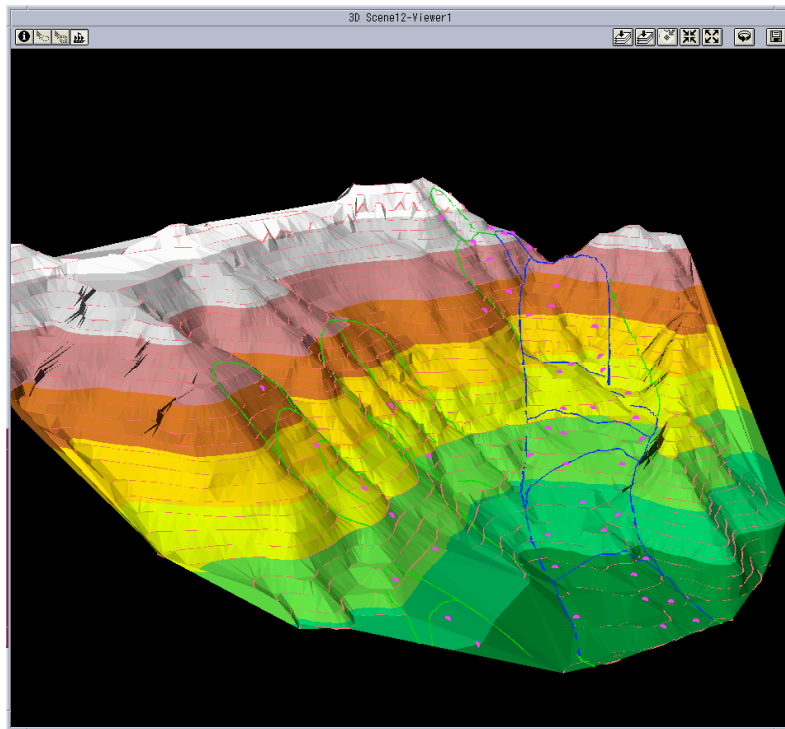


図19. 地すべり地の地形と地下水観測地点の表示例

多くの観測項目を一度に把握するのに、GISを用いて柔軟な表示形式を実現することは、非常に重要なことである。これにより、今までにない新しい知見を得る可能性が高くなると思われる。

6. 解析に適した空間分解能

本稿では、これまで地すべり地におけるリモートセンシング技術とGIS技術の利用可能性について述べてきた。技術の発達に伴って、高い空間分解能でデータを取得することができるようになったが、反面、不必要なデータも取得され、データの分類が極めて重要であることが認識された。まだまだ、地すべりの動きを面的に捉えるには乗り越えなければならない問題がある。さて、動きを捉えるのではなく、地すべり解析では、どの程度の空間分解能・精度でデータを整備しなければならないのであろうか。無論、分解能が高い方が良いであろうが、適切な分解能でのデータ整備は、コンピュータで処理する場合には、メモリやストレージの問題において極めて重要である。

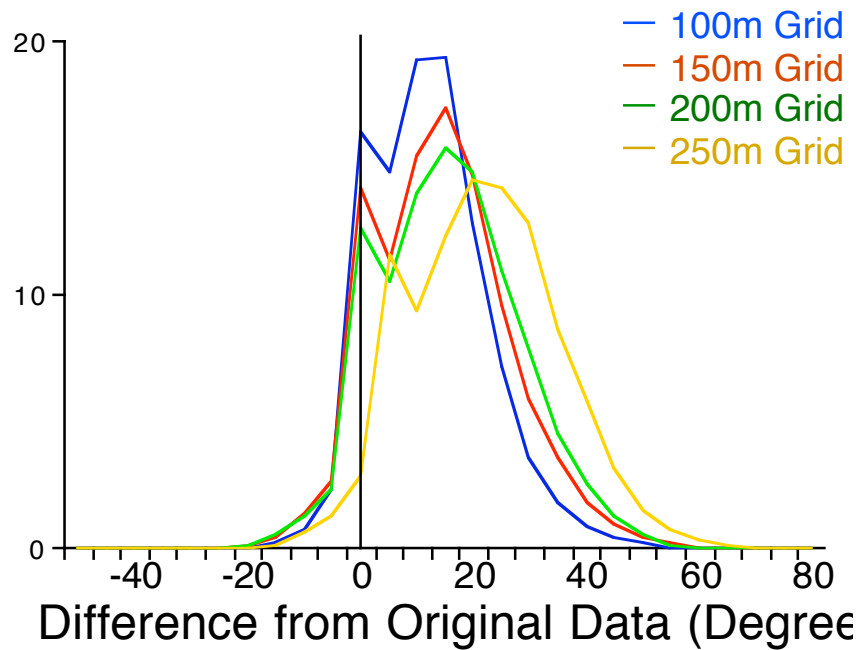


図20. 空間分解能の違いによる傾斜量図のヒストグラムの差異

図20は、ラスタ型の高データを用い、50m空間分解能のものを100m～250mの分解能にしたとき、傾斜量のデータがどのように変わって行くかをヒストグラムで表したものである。分解能が大きくなるに従って、傾斜量が緩やかになっているのが解る。したがって、このような状況は斜面安定解析などに大きな影響を与えるため、できるだけ、細かなデータが必要なことが解る。これまでは、高分解能のデータを得ることが困難であったが、近年は先にも述べたように、デジタル写真測量やレーザースキャナの登場によって簡単に高分解能のデータを得ることができるようになった。そこで、高分解能のデータを用いた検討について述べたい。

高分解能データにおいては、空間分解能の違いによる精度の評価をするのに自己相関関数を利用する。あるデータに対して、少しずつずらしながら相関係数を算出したものが自己相関関数である。標高データは二次元の配列であるため、ずらすのも二次元空間でずらして行くことになる。自己相関関数は、ランダムなデータを解析するのにその周期性を見るために使われる。自己相関係数は、始めは1を示し、ずらす毎に相関係数は、低くなって行く。その程度が大きい場合には、複雑な地形であることを示し、高い空間分解能でのデータ整備が要求される。一方、相関係数低下の程度が小さい場合には、単純な地形であることを示し、それほど高い分解能でのデータ整備は必要ないことになる。

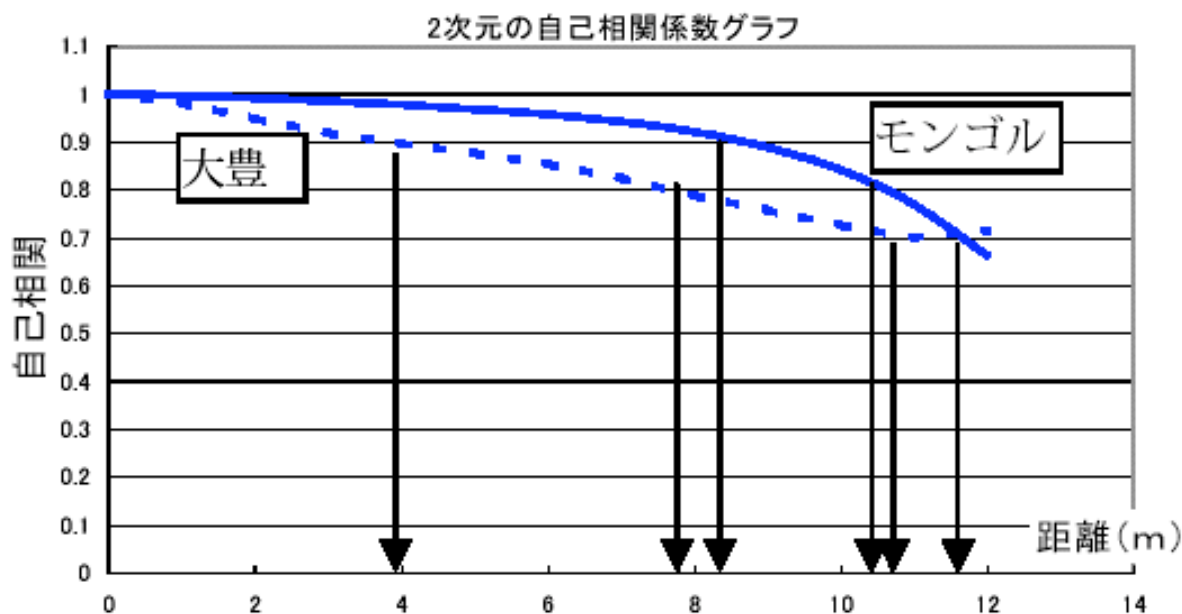


図21. 自己相関関数の例

図21は、地形の単純なモンゴルと複雑な高知県大豊町の自己相関関数を表したものである。横軸は、ずらした量を距離(m)で表している。この図より、相関係数0.9という数字を維持するためには、モンゴルにおいては、8mの空間分解能で良いのに対し、大豊町では、4mで既に0.9となってしまう。この相関係数0.9という数値がどのような意味を持つかについては、今後検討する必要があるが、自己相関係数は、地形データを整備するのに必要な空間分解能を示す指標に利用できるであろう。現在は、航空機を使って1m未満、地上からの計測で10cm未満の空間分解能を実現できる。今後、分解能に応じた利用方法を検討しておく必要がある。例えば、地すべりの移動量の追跡には、10cm未満の分解能が必要であるし、地すべりの傾斜量や斜面安定解析においては、1m程度の分解能が必要であろう。さらに地すべりの分布を解析するには10m～50mの分解能が必要と考えられる^{12), 13), 14), 15), 16)}。

7. おわりに

地すべりの移動量の監視をリモートセンシングで実現できるか検討を行った。現時点では未だ研究レベルであり、業務での利用においては困難な状況であると言わざるを得ない。しかし、超高分解の出のデータ取得は可能な状況であることから、近い将来、問題は解決されると期待している。電界センサを用いた地中モニタリングについても同様で、地すべり活動のシグナルは、確実に捉えているものの、ノイズに埋もれた中から抽出する手法を検討する必要がある。スキャン型レーザーにしても電界センサにしても、莫大な量のデータを取得することができる。それらデータには、解析に不要なノイズも多く含まれて

おり、それを除去する技術が、現在最も求められている。

さて、現時点で全国規模で容易に利用できる地質データの地上分解能は250m、標高データは50mと、非常にラフなものである。したがって今回、GISを用いた地すべり解析では、地すべり発生ヶ所ではなく、地すべり防止区域というラフなものを地すべり発生ヶ所と見なして集計した。今後は、さらに詳しい標高データを取得し、厳密な地すべり発生ヶ所のデータを利用して集計する必要がある。標高データは、デジタル写真測量やスキャン型レーザーによって容易に高精度のデータを取得することが可能となってきた。地すべりに関する詳細な情報をリモートセンシング技術を利用して取得し、GISによって積み上げて行くことが、地すべり発生の解明においては極めて重要であると考えられる。

- 1) 資源・環境観測解析センター <http://www.ersdac.or.jp/>
- 2) 日本スペースイメージング <http://www.spaceimaging.co.jp/main.html>
- 3) 日立ソフトウェアエンジニアリング http://www.hgiis.com/index_jp.html
- 4) RADARSAT <http://www.rsi.ca/>
- 5) SRTM <http://www.jpl.nasa.gov/srtm/>
- 6) 元久慎哉・高木方隆, リモートセンシングとGISによる地すべり防止区域の土地被覆解析, 地理情報システム学会平成12年度講演会, pp.157-160, 2000
- 7) 野村努・高木方隆, デジタル写真測量による地すべり地の3次元移動追跡への適用可能性, 日本写真測量学会平成12年度秋季学術講演会発表論文集, pp.287-290, 2000
- 8) 光岡操・野村努・高木方隆, 地すべりGISのためのバルーン搭載型CCDカメラによる三次元計測, 地理情報システム学会平成13年度講演会, pp.93-96, 2001
- 9) 動体計測研究会, 1997, 「イメージセンシング」第5章三次元データの可視化, 日本測量協会, pp.75-90
- 10) 山本景子・浅野裕史・高木方隆, GISによる四国の地すべりの地形的特徴, 土木計画学研究・講演集24(2), pp.957-960, 2001
- 11) 浅野裕史・高木方隆, 地理情報システムと斜面安定解析の統合による地すべり危険箇所の抽出, 日本写真測量学会平成14年度秋季学術講演会発表論文集, pp.251-254, 2002
- 12) Masataka Takagi, "Relationship between Spatial Resolution and Terrain Feature in DEM Accuracy", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.33 Part B4, pp.1038-1045, 2000
- 13) 門田貴江・吉野敦雄・高木方隆, 地形測量による測点数と精度との関係, 日本写真測量学会平成12年度秋季学術講演会発表論文集, pp.247-250, 2000
- 14) 菊池有起・野村努・高木方隆, 地形計測における要求精度, 日本写真測量学会平成13年度秋季学術講演会発表論文集, pp.255-258, 2001
- 15) 浅野裕史・山本景子・高木方隆, 空間分解能を異にした地形分類結果, 日本写真測量学会平成13年度秋季学術講演会発表論文集, pp.263-266, 2001
- 16) Masataka TAKAGI, Hiroshi ASANO and Yuki KIKUCHI, Optimum Spatial Resolution of Digital Elevation Model for Topographical Analysis, Proceedings of the Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, 2002
- 17) 高知工科大学高木研究室 <http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/takagi/>