<報 文>

浦川地区の崩壊地調査におけるリモート・センシングの手法について

Collapsed Area Survey due to the Remote Sensing in Urakawa District

大本士 行* 吉村 就 行*
Shiko Omoto Motoyuki Yoshimura

1. まえがき

これは、リモート・センシング手法の一部門であるマルチ・バンド・カメラを使用した手法で、原理的にはすでに1900年代に完成されている天然色三原色分解法と近赤外線写真法を組合せて、同一地点の4個の航空写真画像を作成して画像解析を行う手法で、この両手法は写真科学的にまた写真光学的に世界の科学者達によって解明し尽された感があり、これらの人々の実験データを基礎として解析を行えば不安定なことはないと考えられるので過去3カ年を通じて浦川流域において実験したことを記述することにする。

2. 予備考察

浦川流域は長野県北安曇郡小谷村北小谷にあり、付近の山塊は第三紀およびジュラ紀の基岩の上に新旧乗鞍系火山堆積物および新旧風吹系火山堆積物で形成されており、明治44年8月稗田山の稜線を境にして、北面15億 m^3 の山塊が瞬時に大崩壊を起し、その飛沫が3.5km下流の標高750mの北小谷北野部落の民家まで飛び散ったと云うからいかに地下水のエネルギーが巨大であったか想像を絶するものがある。しかもその崩壊絶壁西部の上方から未だに数条の地下水が小滝となって落下しているのを確認した。昭和48年10月建設省北陸地方建設局松本砂防工事事務所から、マルチ・バンド・カメラ手法で、浦川流域中脆弱な個所の判定の依頼を受け、昭和48年10月31日乾期における同地域の撮影を完了し解析に移った。

3. 解析手法の選定-1

観察の第1目的はこの流域の細流を可能な限り発見することにある。この観察にはマルチ・バンド・カメラの写真映像中、第1バンド（青色光で撮影したもの）と第4バンド（近赤外線で撮影したもの）との2つを選定した。その理由は

- (1) 近赤外線は水に最も多く吸収され、植生の葉緑に最も多く反射される。
- (2) 青色光は水の反射する天空光に日陰においてもよく

く感光し、植生の葉緑を吸収する。

この相反する現象を利用したものである。例えば乾田中の水と稲村を焼いた灰は共に近赤外線を吸収するので立体視をしない限り判定し難いが、青色光を利用すれば黒灰は青色光を吸収し、水は天空光を反映するから青色光を反射し、その差を直ちに判定することができる。また航空写真の縮尺1:10000から幅25cmの表流水を観測しようとしても0.025mmで観測不能であるが、マルチ・バンド・カメラは白黒の単層乳剤であるから写真映像の解像力も50~60line/mmで、赤外カラー・フィルムおよびカラー・フィルムのような3層乳剤より鮮鋭度が高いから50倍~100倍の拡大率に耐えうるので当研究室において独自の開発による高倍率の加色合成ビューアを作製し50倍で観測すれば映写スクリーン上に幅25cmの表流水は1.25mmとなり、判定に有利になると同時に

- (1) 近赤外写真に緑色フィルターをかける
- (2) 青色光写真に赤色フィルターをかける

と前述の原理から水は赤く、植生は緑となり、細流の発見が容易になる。このようにして幅25cm以上の表流水およびその水源点と思われる位置の標高群を測定し編纂したものが図-1である。

4. 地形考察

北陸地方建設局の浦川流域調査報告書によれば、風吹大池南壁と金山沢源流点付近とは共に浦川流域における代表的硫気作用地域で岩石は変質し脆いとのあるので、この2つの地域のマルチ・バンド・カメラに影像された表流水、静水池、湿地等について比較して見ると

- 1) 風吹大池南壁は金山沢源流点より表流水、静水池が遙かに多く、かつ新しい湿地と思われるものが出現している。特に浦川上流北岸の西端部は数多くの地すべりを起した形跡があり、その地すべり頂頭部と思われる傾斜変換点には静水池が出現している。その最上部の小静水池群で形成している湿地から漏えいする地下水は西方の北岸の一部を湿地化している模様で、この部分の地下水（多分風吹大池との脈絡をもつと思われるが）のエネルギーは過去においてかなり強力に作用して緩傾斜の現在地形を形成したと思われる。また中央部の崩落台地は

*日本航測株式会社研究室

図-1

地下水の内部浸蝕のため、相前後して1次、2次崩壊を起した形跡が明らかで写真-1はこれを裏づけている。す

写真-1 風吹大池南壁 昭和49年8月5日雨期直後の撮影

なわち

- (1) 崩落台地の植生は、熊笹が主体で、その先端部にツガ、コメツガが僅かに残存し、崩壊壁上部の植生群と同種と推定されることから台地西部が1次崩壊作用を起したと思われる。
- (2) 台地中央の植生群落の右辺が不自然にも南北に見事に一直線に削り取られ、右方は岩盤が剪断崩落した形跡があり、立体視によれば、その先端部の地盤は圧縮されてやや隆起して南部崖面に連なり台地北部の頂頭部には4個の静水池、崩落先端部に1個の静水池が見受けられることより台地東部は2次崩壊によるものと思われる。
- (3) 崩落台地周辺から浦川上流に注ぐ表流水は、この台地を東西に囲む2つの代表的なものと、現在は台地により南北に分断されその水勢も雨期直後でありながら微々たるもので問題にならないが、かつて崩落の原因である内部浸蝕を起したと思われる台地南崖下の中央より流出する表流水とが主で、将来なんらかの物理的圧力の加えられない限り3次崩壊の危険はないと推定される。

- (2) 金山沢源流点付近の上部崩壊壁面は北陸地方建設局の浦川流域調査報告書によれば、1960年9月撮影の地上写真判定の結果、全面的に下降しているとしている。この地区の表流水は

写真-2 金山沢源流点 昭和49年8月5日雨期直後の撮影

A: 下方は稗田山の崩壊壁面
B: 崩壊の根源と推定される天狗原、梅池の湿地帯

写真-3 アーツ衛星写真

雨期直後の写真-2に見られるように崩壊壁の岩盤基底部から流出する6条の中、西北部の2条はかなり豊富な水勢でありこれらの中の3条は崩落土石群で形成されている扇状地帯に伏流となっているのが観察される。風吹南壁の表流水は乾期、雨期を通じて流条に大差がないように見受けられるが、この地域は乾期に表流水が皆無だけに不気味であり、アーツ衛星写真(写真-3)の観察によれば、その地下水の根源が天狗原、梅池の湿地帯に脈絡があると推定され融雪、雨水の浸透量は前記風吹南壁とは問題にならない大きな規模のように考えられる。

総じて浦川流域は石英斑岩、花崗岩、ジュラ紀基岩の地帯を除いては、吸水性および滲出性に富む地帯が多く、もし昭和39年に測図された縮尺1:5000の航空写真測量図の地物表現が正しいと仮定するならば、今回撮影のマルチ・バンドの写真と比較して

- (1) 消失した池
 - 浦川上流南岸 1カ所
 - 浦川下流北岸の谷 1カ所
- (2) 新しくできた池
 - 浦川上流北岸の谷 1カ所
 - 風吹南壁崩落台地 5カ所
 - 板倉沢南岸 1カ所
- (3) 新しい湿地
 - 浦川上流北岸 1カ所
- (4) 消失した湿地

金山沢中流北岸の谷

1カ所

(5) 移動した湿地

金山沢下流金谷橋と板倉沢の中間 2カ所

[注] この2カ所の湿地は測図位置が正しいとすれば、昭和48年に1カ所は東に、他の1カ所は北にそれぞれ40m〜50m移動している。これは板倉沢上流部に巨大な土石流のエネルギーが存在することと、周辺地質が稗田山の崩壊堆積土であり、かつ雨水の溜り易い地形であることから緩慢な地すべりを起しているのではないかと考えられる。

以上の各現象の見られることは、水に関して消長のはげしい地質構造のようである。

5. 解析手法の選定-2

水系調査に次いで観察を必要とすることは、2つの抽出された代表地域の土の透水面の把握である。土の透水度は通常含水率または含水比で表現されているが、コア・ボーリングのように攪乱採取法で、自然のままの土の透水状態を把握できるかどうか疑問を感じる。極めて素朴な例であるが

- (1) 海水に浸透された砂を掬うと跡に水溜りができるがこの水はいずれに所属するのか
- (2) ボーリングによって採取した土に摩擦熱、注入水、ポアソン比、重力の影響をどのように含水率に修正を加えたらよいのか

元来水は土の粒子間隙を満たしているもので、外圧により吸水もされれば滲出もする。水に浸透された土が写真濃度を変化させることは白黒写真の時代から分っていることであるが、これを実測含水率に置換することは互いに不確定要素があるので、むしろ土の間隙比に置換するかまたは写真濃度指数としてその目的に応じた数値換算は専門分野に任せの方がよいと考えるのが筆者の持論である。

マルチ・バンド・カメラで土の透水度を測定する場合のバンドの組合せであるが、これはフォールス・カラー(天然色構成でなく可視光と不可視光の組合せによる仮色)合成写真により面の把握を行った方が分り易いので、表流水観測と同様、1バンド(青色光)と4バンド(近赤外線)を採用した。その理由は写真-4について

- (1) シアン・マゼンタ・イエローの3種の代表的補色を青色フィルターを透して撮影した場合、イエローを最も多く吸収し、シアンを最も多く透過する。こ

写真-4

表-1 近赤外線の日吸収帯

		波 長 (μm)			
水	蒸	745	850	980	1,180
	気	720	830	935	1,130

のことは黄土等の写真濃度は暗く、天空光(紫外線および短波可視光を多く含む)を多く反映する水および水蒸気等は明るく感じることを意味する。

- (2) 近赤外線は表-1のように水および水蒸気に対して吸収帯を持つ。マルチ・バンド・カメラ用赤外フィルム #2424は $700\mu\text{m}$ ~ $900\mu\text{m}$ の近赤外線に感光するから水および水蒸気の量の多くなるに従って写真濃度は暗くなる。また近赤外線は不可視光であるから色彩に左右されない。

したがって(1)および(2)の共通点は黄土色に対して色盲写真であると同時に水および水蒸気に対して相反する感光性を有するから、加色合成のような、色の光を重ねた場合に黄土色を強く吸収

写真-5

して水および水蒸気だけを反映する1バンドをバック・グランドとしてこれに4バンドを重畳させれば最も効果

(a) 新宿御苑写真濃度曲線(昭和47年6月撮影)

(b) 千葉県市原市是佐地区マルチ・バンド濃度指数(昭和48年1月26日撮影)

図-2

(a) 風吹大池南壁(東部)

(b) 風吹大池南壁(西部)

図-3

図-4 風吹大池南壁地すべりブロック地下水浸透推定分布図

図-5 金山沢谷頭地区地下水浸透推定分布図

的な水および水蒸気の現象を捉えることができる。加色合成は余色関係のフィルターすなわち赤色と緑色のフィルターを併用すれば効果が高い。写真-5は2枚の同質グレイ・スケールに余色フィルターを併用した場合の加色合成色と地物解析例と写真濃度の絶対値の差との相関を示したものである。ただし1, 2, 3, 4 (青, 緑, 赤, 近赤外) の各バンド別の地物変化による写真濃度指数 (数値の多いほど暗くなる) の変化は図-2および図-3を参考にされたい。

以上の原理に基づいて昭和48年10月31日撮影された乾期における浦川流域の2つの代表的な硫気作用地区の透水層の面的把握をした分布図が図-4および図-5である。

6. 4 バンド (近赤外線) 写真による透水層の測定

前項5において抽出された透水層の写真濃度測定器には写真濃度指数に相当する $\log D$ 値を12段階のカラー・ステップに分離する電子回路を有するデジタル・カラー・データ・1200を用いた。測定原板は μ 吸収帯を持ちかつ色彩に左右されない4バンドを使用し、解析因子としては昭和48年2月千葉県市原市是佐地区の乾田および昭和48年11月3日金山沢下流の金谷橋付近の現地サンプリングの資料を基礎として写真濃度指数, $\log D$ 値, 地物判読の相関キを作成した。表-2がそれである。これによる浦川流域の脆いと思われる崩壊地の写真濃度指数はおおむね4~6である。なお金山沢において表面採取した資料の粗砂の実測含水率と写真濃度指数との相関性は薄いと感ぜられた。ただし千葉県是佐地区の含水率は地下平均1mの深度における壤土質砂土についてである。

7. 崩壊予測の判定の結果

以上の予備考察, 地形考察およびアーツ衛星写真, 選択した解析手法を基礎として作成されたフォールス・カラーおよびデジタル・カラーの観察結果と, 未完成のた

め発表を差し控えている完全排水仮説論に基づく, 250m×250mメッシュをユニット結合によりさらに30分割した基本型と地形, 地質, 植生等との条件変化指数による水の浸透量の仮数値からの考察を加えた結論として, 風吹南壁より金山沢源流点付近の方が崩壊因子が多いと推定されるので, この旨を建設省松本砂防工事事務所に報告した。同所からも「そのように考える」との回答を受けた。

8. 金山沢トレーニング・エリアの調査

以上の結論に基づいて昭和49年7月から8月初旬にかけての雨期明け直後に, 建設省松本砂防工事事務所は金山沢源流点付近に約200m²のエリアを設け縮尺1:200

表-2

写真濃度指数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
カラー・データ・1200 の濃度色彩	白	青	藍	緑	茶	黄	濃茶	濃 緑	赤	藤色	赤紫	黒
コダック No 2 ステップ logD 値	0.05	0.20	0.34	0.49	0.64	0.80	0.94	1.10	1.26	1.40	1.55	1.71
物質判定例 (1)	樹	木	草 地	荒 地	透 水	土	水浸しの土	水	水	の 深 度		
同 上 (2)	かたい岩石	かたい土 もろい岩石	ややかたい土	ややもろい土 もろい土	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上

の原形実測を行うと共に、10m×10m メッシュ座標交点の含水率実測（表層約 130 点）を行い、マルチ・バンドカメラとの比較実験を試みた。

1) マルチ・バンド・カメラによる測定

昭和49年 8 月 5 日雨期直後縮尺 1 : 4500 の撮影がなされ、それ以前に現地に45%, 15%, 5 % の反射率を有する1.8m×1.8m の3種のグレイ・スケールが設置された。これらはカラー・データ・1200による写真濃度測定に際してカラー・モニターのキャビネットの温度上昇に伴うカラー濃度パターンの時間的変化をフィード・バックするのに好都合であったが、山地の場合は植生、河水、露岩に富み、近赤外線写真の測定においては前出の表-2のようにこれらの因子とカラー濃度スケールの位置付けが決定しておりコントラスト比の調整可能な同機としてそれほど重要な意味はない。それよりも重要なことはプロット原図縮尺 1 : 200 というリモート・センシングとして

は世界に類例のない高解像性を要求されたことである。このため測定器を改造して50倍の拡大装置により観測縮尺を 1 : 90 に変倍し、粒径 22.5cm の溪流傍の礫と水とを分離した。

2) 含水率測定結果の比較

マルチ・バンド・カメラを用いたリモート・センシングによる結果と、実測による結果の較差を示したものが図-6で、これに依れば較差は+3.5%〜-39.1% で同図下段の抽出されたメッシュ（10m×10m）内のリモート・センシングによる土石の粒径別分布率と比較して土の間隙比の小さいものより間隙比の大きいものほど較差が大きいことを示している。

3) マルチ・バンド・カメラによる含水率測定結果に関する考察

今回の解析中、3つの疑問点に打ち当たった。すなわち

(1) 前述の金山沢中流の標本資料（粗砂）の含水率と

図-6 金山沢トレーニングエリア・リモート・センシングと実測含水率の比較

近赤外線写真濃度からの換算率と一致しないこと。

- (2) 雨期直後撮影された当時の天候は撮影記録によれば薄曇りで、その下をくぐって撮影したもので、快晴時特有のハイ・ライトとシャドーの差はほとんど無く、コントラスト比 $\gamma=1.10$ という測定には理想的な写真であるにもかかわらず近赤外写真は他の可視光領域写真に比し異なった結果が出た。

- (3) 溪流地帯においては水と川原の石との反射率の差が写真濃度指数に換算して緑色光バンドは

水：石＝9：2

に対して近赤外線バンドは

水：石＝9：6

を示し、しかも溪流の川原を埋めている土石群の幅と方向に従って高写真濃度指数を示している。

以上を総合した場合および前述の近赤外線の μ 吸収帯とを考えると

- (1) 地下水の浸透が比較的大きいと考えられる地域すなわち写真濃度指数5～8を示す地区において撮影レンズ空間における空気密度より、異なった密度の空気によって地表面にレンズ状の層（例えば陽炎の層厚）が形成され、これに近赤外線が吸収されるのではないかという推定が生れる。

- (2) 近赤外線の捉えた現象が含水であるならば、内部摩擦角の小さい粘性土の方が写真濃度指数が大となるはずであるが、これと反対現象を生じているのであるから図-7のように地層の粒子間の間隙比に正の相関において発生量を増減することと、前(1)項の現象とを加算した場合、また土石流によって形成された扇状地帯の凸線部分にも高写真濃度現象を生じていることから、ガス体以外に考えられず従ってこの場合水蒸気と判断する以外にない。

以上のことから次の想定が生れる。すなわち

- (3) 日照、地熱または他の原因により、地下の透水層から発生する水蒸気が表層の土または石の疎なる間隙を縫って地上に発散し、陽炎様のレンズ膜層を形成しこれに近赤外線が吸収される。

と考えた方が妥当のようである。以上の想定は短波光についても同様なことがいえる。すなわち

- (4) 地表面をレンズ状の水蒸気膜層で覆った場合、この部分

溪流地帯

土石堆積地帯

図-7

に太陽輻射熱等の原因により膨張された空気の脈流を形成し短波光の拡散が強くなり、青光波はその強弱に感応することになる。したがって近赤外線が負の相関を持つのに対して正の相関を持つと想定される。

以上の総合観察の結果を建設省土木研究所赤羽支所砂防研究室長に報告した。室長も「表面現象でなく内部現象と考える」とのことで昭和50年3月適当の試料選定の上シミュレーションを実施する意志を表明された。

9. シミュレーションの結果

昭和50年3月13日、東建地質調査株式会社西川口土質研究所構内において砂防研究室長の指導監督の下に当社研究室、東建地質調査株式会社土質試験室の共同作業で細砂、粗砂、混合、7号碎石の4試料について水蒸気発生によるマルチプル・トライ・カメラ（青光波、緑光波、近赤外線）の試験撮影を実施した。その結果として初めて写真映像について

写真-6 マルチプル・トライ・カメラによる試料撮影 (10時40分)

写真-7 マルチプル・トライ・カメラによる試料撮影 (13時30分)

1) 写真-6に実験開始直後(10時40分)および写真-7は終了時(13時30分)の各試料の波長別写真であるが、やはり想定どおり可視光線に比して近赤外線が顕著に水蒸気に吸収され被写体コントラストを低下させている。

次に表-3は4試料中、含水率を代表する細砂と水蒸気量を代表する7号砕石と各光波バンドの写真濃度(対数値)と実測値との比較を試みた。実測値は必ずしも良いコンディションではなかったが(例えば湿度の測定等)、グレイ・スケールにより濃度修正を行った各バンド写真濃度(対数値)との比較においてその傾向の概要を捉えて見ると

2) 表-3の結果は

(1) 含水率に関しては青光波、緑光波、近赤外線の写真濃度の傾向は共に正の相関を示す。

(2) 水蒸気量に対しては

近赤外線は正の相関を示し

青光波、緑光波は負の相関を示す。

以上の表から緑色光の相関が最も高いようであるが、これは見掛上の写真濃度であり色感度修正をしていないので正確とはいえない。何故ならば写真-8および表-3はカラー・コントロール・パッチを3原色分解用フィルターで撮影し色彩についてのフィルター効果と写真濃度数値の変化を求めたもので黄色についてこのような変化

写真-8

を考慮しないと緑色光、赤色光の各バンドから相関を求めても意味がない(ただし3種の写真濃度は共にコントラスト比 $\gamma=0.746$ である)。

10. 金山沢源流点付近のマルチ・バンド写真の判定

以上の総合結論を基礎として雨期直後撮影の同地区の写真-9をフィード・バックして見ると青光波、近赤外線両写真の写真濃度構成上、共に地下(推定1m位までの深度)から太陽熱等の原因により発散された水蒸気を捉えていると判定される。なお3項(3)の緑色光バンドと近赤外線バンドの水と石のコントラスト対比の差を水蒸気要因とすれば両バンドの対比において

$$\begin{aligned} \text{緑色光バンドの差} & \log D_G = 1.06 \\ \text{近赤外線バンドの差} & \log D_{IR} = 0.46 \\ \text{両者の差} & \Delta \log D = 0.60 \end{aligned}$$

これに今回のシミュレーションによる細砂の含水率差と近赤外線との濃度差との相関は、 $0.13 (\log) \div 8.5\%$ (含水率) となり、したがって金山沢における写真濃度指数6の含水率 $\div 39.2\%$ と換算される(ただし地下1m位までの深度と推定)なお参考までに千葉県市原市是佐地区乾田の平均地下1mの壤土質砂土の含水率カーブによって換算した金山沢源流点トレーニング・エリアの写真濃度指数6は含水率35.6%である。

11. あとがき

以上の結果を総括して昭和48年以来続いた近赤外線写真の現象に関する疑問点の数々が1900年代初期科学者によって発表された μ 吸収帯の存在を再確認すると共に、地下の土の間隙比の違いによって発散された水蒸気量の変化と写真濃度とがバランスしていると解釈すれば氷解すると同時に、昭和50年5月、写真測量学会における日本林業技術協会の梶山氏の「マルチ・バンド写真による地

表-3

試料 細砂

試料 7号 砕石

写真-9

すべり地の土壌含水比調査」の論文中「IR（注：近赤外線）バンドの映象が地下 50cm の含水率と不思議に一致し、可視光域では捉えられない地下の何かを記録している」としている部分の解答にもつながると考える。終りに臨み浦川地区のマルチ・バンド・カメラによるリモート・センシングの推進をされた建設省北陸地方建設局、

同松本砂防工事事務所、研究統行の推進ならびに指導をされた建設省土木研究所赤羽支所砂防研究室の皆様感謝します。

なお資料写真の作成および測定は当研究室吉村研究員をわずらわした。

（原稿受理日 昭和50年10月22日）