

稲田花崗岩の一軸引張割れ目の粗度計測 ーレーザスキャンと写真測量を用いた比較ー

藤井幸泰¹・高橋 学²・船戸明雄³

¹ 深田地質研究所

² 産業技術総合研究所

³ 応用地質株式会社

Fracture roughness of uni-axial tensile fractures in Inada granite;
a comparison between Laser Scanning and Photogrammetry

FUJII Yukiyasu¹, TAKAHASHI Manabu², and FUNATO Akio³

¹Fukada Geological Institute

²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

³OYO Corporation

要旨：稲田花崗岩の Rift, Grain, Hardway 面に平行に一軸引張割れ目を発生させ、破断面形状の三次元計測をレーザおよび写真測量を用いて行った。計測値から破断面粗度を数値化すると、レーザ・写真測量とも R→G→H の順に粗度が増すことが確認された。特に二乗平均平方根や中心線平均粗さは、写真・レーザとも値がよく一致した。粗度計測の結果はほぼ同程度の精度を示していたが、計測に要する時間、その他対象物への適用なども考慮し、レーザと写真測量による計測手法の比較検討を行った。

キーワード：レーザスキャン、写真測量、破断面、粗度

1. はじめに

野外や室内実験で観察・形成される岩石表面の形状には、岩石の破壊や風化の結果が表現されている。これら表面の形成メカニズムを明らかにするためには、その形状を正確に把握することが重要である。特に岩石中の割れ目は、岩盤のせん断強度に影響を与え、‘水みち’として岩盤の透水係数にも影響を与えるため、その表面形状が多数計測されてきた。過去の計測方法としては、触針式・写真測量・レーザスキャン

などが適用されてきた。触針式の計測器は、破断面に直接接触して測定する最も古典的な手法であり、現在でもコンピューター制御の機器などが測定に用いられている（杉本ほか, 1991；松本ほか, 1995；Develi et al., 2001；Sausse, 2002；Amitrano and Schmittbuhl, 2002）。しかしながら測定中に段差のある部分で停止するなど、いくつかの問題点も抱えている。一方、写真測量やレーザ計測は、非接触（いわゆるリモートセンシング）という利点をもっている。試験片スケールで特に良く利用されるレーザ計測は、近年多

数の対象物に適用されている (Lanaro, 2000 ; Wu et al., 2000 ; Xie et al., 2001 ; Zhou and Xie, 2004). デジタル写真測量技術を用いた試験片スケールの計測も, 数は少ないが行われている (Jessell et al., 1995 ; 藤井ほか, 2006). またレーザ計測や写真測量は試験片スケールのみならず, 地形測量などのマクロスケールにも積極的に活用されている (三戸ほか, 2002 ; 西山ほか, 2004 ; 村井・近津, 2004).

実際に割れ目破断面などを測定する際, どのような手法を用いるのが最適であろうか. また, 写真測量とレーザ計測を行った場合, それぞれの結果にどのような違いが出るのか, このような比較検討を行った研究例は皆無である. 今回は稲田花崗岩の一軸引張試験後の破断面を対象に, レーザと写真測量による計測を行った. 両者の計測方法の原理および実際の計測方法を踏まえ, その結果を比較検討することを試みた.

2. 試料と試験方法

林ほか (2007) で行われた, 稲田花崗岩の一軸引張試験後の破断面を対象に計測を行った. 以下に稲田花崗岩と一軸引張試験について簡単に説明を述べる.

稲田花崗岩の石目を考慮し, Rift 面, Grain 面, Hardway 面にそれぞれ垂直にコアリングを行って試料を採取した (図 1). 供試体は円柱で, 直径 30mm, 長さ 60mm である. 試験装置は MTS 社製の MTS-808 材料試験システムを用いた. 整形を行った試験片の端面は, エポキシ系接着剤を用いてエンドピースと固定した. 固定の際, 試験片とエンドピースの軸を揃えるため, 試験片の片端面をエンドピースに接着して固化した後, もう一方の端面を他方のエンドピースに, 十分注意を払って固定した. 引張試験は室温

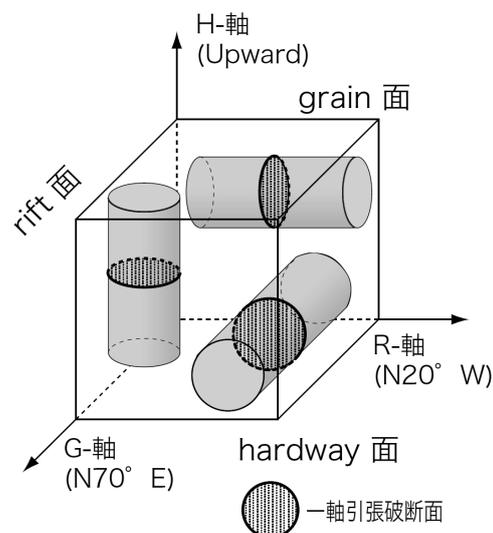


図 1 稲田花崗岩の石目と試料の採取方向 (藤井ほか, 2006)

25° の一定の環境下で, 6.0×10^5 mm/sec の変位速度で行った. また, ひずみはゲージ長さ 10 mm の箔ひずみゲージを使用し, 軸と周方向に対して四箇所測定した. 実験は最終的に割れ目が形成されるまで行い, それぞれの方向について 3 試料ずつ行った. Rift 面に垂直な試料の名称を R-1~3, Grain 面には G-1~3, Hardway 面には H-1~3 とした (Rift 面に垂直な試料には, Rift 面に平行な引張割れ目ができている). ひずみは軸と周方向とも, 各試料の四箇所ではほぼ均一な値を示し, R 試料は 3.49~4.53 MPa, G 試料は 6.61~7.19 MPa, H 試料は 7.85~8.24 MPa で最終破断をむかえた. 実験終了後にそれぞれの試料の割れ目破断面を露出し, 計測の準備を行った.

3. 計測方法

3.1 写真測量

写真測量は写真上で対象物 (被写体) の計測を行う技術である. 1 枚の写真からは 2 次元情報しか得られないが, 2 枚 1 組の立体写真があ

れば3次元情報を得ることができる。立体写真撮影時の左右カメラの位置と撮影方向の情報があれば、対象物に関する両画像間の視差から対象物の3次元座標を計算できる。しかしながらカメラの位置と方向を、写真撮影時に精密に測定することは容易でない。そこで「標定点」と称する既知のポイントを複数設定し、撮影時に左右2枚の写真に対象物と共に写し込む。それら標定点の写真上での視差と実位置から、撮影時のカメラの位置と方向が計算できる。

この研究ではあらかじめ試験片のスケールにあわせたフレーム（標定点が記してある）を作成し、化石などを撮影する接写台を用いて、破断面の立体写真をデジタルカメラで撮影した（図2、写真1）（藤井ほか、2006）。カメラの焦点距離（C）は約51 mm、CCDサイズは2/3インチ（縦6.6 mm、横8.8 mm）で500万画素を有する（2560×1920pixel、分解能； $\delta_{\text{CCD}}=0.0034$ mm）。カメラステーションの距離（左右カメラの間隔；B）は約60 mmで、破断面からカメラまでの距離（H）は約300 mmである（図2）。立体写真測量における被写体平面方向の測量分解能（ δ_{xy} ）と、奥行き方向の測量分解能（ δ_z ）は、 $\delta_{xy}=H/f\delta_{\text{CCD}}$ 、 $\delta_z=H/B\delta_{xy}$ 、で表される（村井・近津、2004）。図2に示す撮影状態では、破断面に平行な方向で $\delta_{xy}=0.02$ mm、破断面に垂直方向で $\delta_{xy}=0.1$ mm程度となる。

三次元計測ソフト上で標定点から左右カメラ位置の計算を行うが、計算時の最小二乗法による残差は約0.15mm程度と、上述の奥行き分解能（ δ_z ）にほぼ等しくなった。コンピュータ上で左右写真を撮影時の状態に復元した後、三次元計測ソフトは左右写真上で自動的に同じ位置を見つけだし、3次元ポイントを作成する。3次元ポイント作成用の画像は100万画素（1200×800pixel）に縮小することにより、約

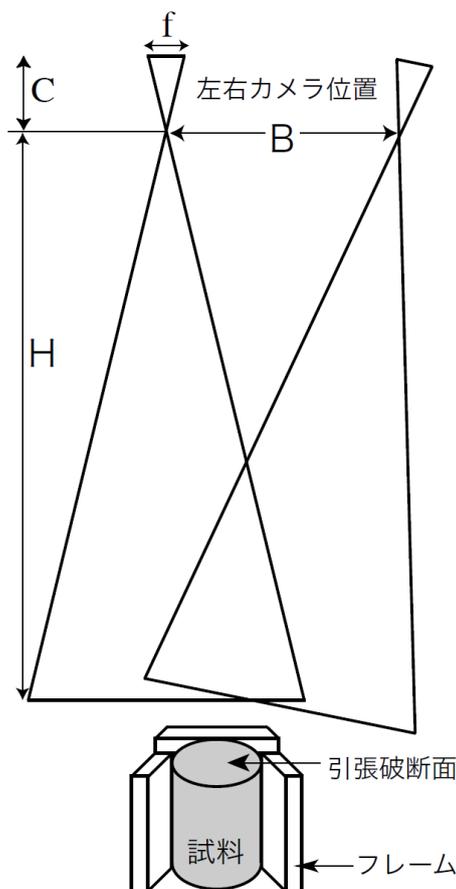


図2 立体写真撮影図（藤井ほか、2006）
Hは破断面からカメラまでの距離。Bは左右カメラ間の距離。fはCCDサイズ、Cはレンズの焦点距離。破断面直径は30 mm、H=300 mm、B=60 mm、C=51 mm、f=8.8 mm

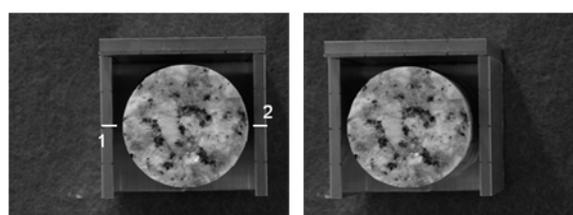


写真1 一軸引張破断面の立体写真（藤井ほか、2006）

2600個の三次元ポイントを破断面上に発生させ、それらポイントを頂点とする約5000個の三角形群で破断面モデルを構成した（図3a）。

3.2 3Dレーザスキャン

3Dレーザスキャンは対象物に向かってレー

ザ光を照射し、発射光と対象物から返ってきた反射光との位相差から距離を計測する。また内部に組み込まれたプリズムやミラーを回転することにより、面的に座標を得ることができる。

計測にはVIVID900 (Minolta 製) を利用した。これはスリット上のレーザ光で対象物をスキャンする光切断方式で、反射光を CCD カメラで受光して三角測距の原理で対象物との距離情報を得る (図 4)。また同時に写真画像を入力することもできる。CCD の解像度は 30 万画素 (640×480pixel) であり、受光レンズに焦点距離の最も長いものを用いた場合 (C=25 mm), VIVID900 と対象物の距離を 0.6 m まで近づけることができ、111×83 mm の平面領域をスキャンすることができる。径 30mm の一軸引張破断面をスキャンした際 (写真 2), 破断面領域は約 2 万 4 千点

の計測が行われる。これを専用のソフトウェア上で 1/9 に圧縮することにより、約 2600 個の三次元ポイントを破断面上で計測し、それらポイントを頂点とする約 5000 個の三角形群で破断面モデルを構成した (図 3b)。

VIVID900 の仕様書によれば、測定精度は X: ±0.22 mm, Y: ±0.16 mm, Z: ±0.19 mm となっている。

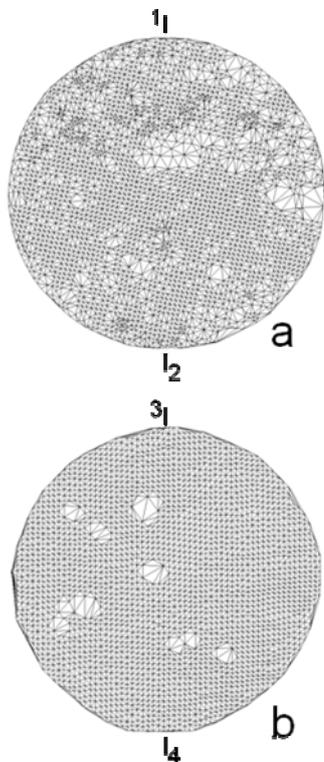


図 3 破断面モデルの平面図
a: 写真測量, b: レーザスキャン

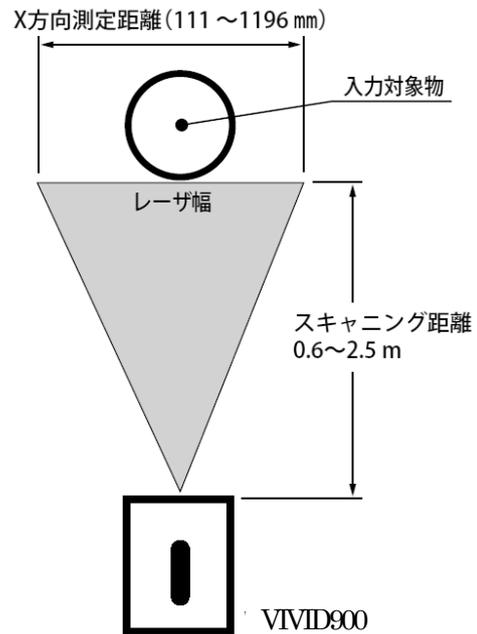


図 4 レーザスキャンの測定方法 (VIVID900 のパンフレット)

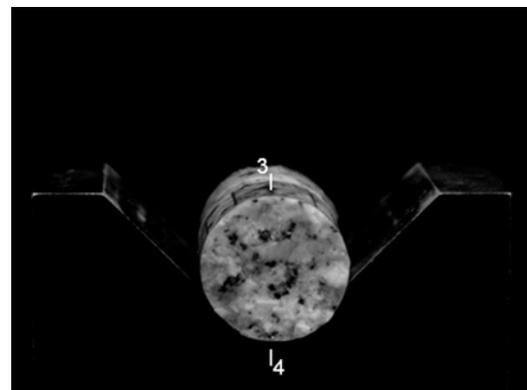


写真 2 VIVID900 による一軸引張破断面の写真

4. 計測結果

4.1 デジタルモデル

図3に写真測量とレーザスキャンで作成した三角形群による破断面モデルの平面図を示した。これらを鳥瞰図にあらわしたものを図5として示す。どちらもH-1試料である。写真測量・レーザスキャンとも全体的な形状は良く似ている

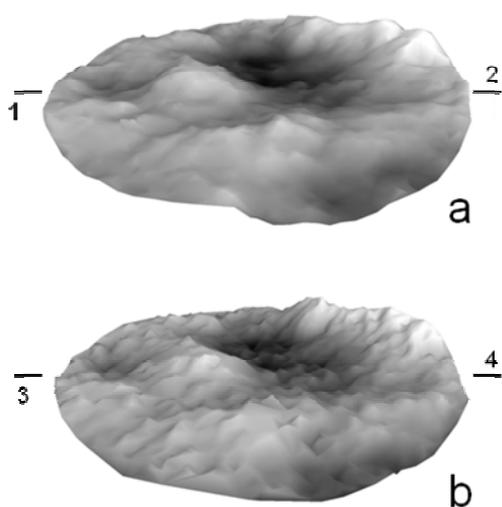


図5 破断面モデルの鳥瞰図
a: 写真測量, b: レーザスキャン

が、細部においてちがいがみられる。両者の詳細な比較は次章にて述べる。

他の試料にも写真測量およびレーザスキャンによる計測を行い、図3や図5のような破断面モデルを作成した。すなわち合計9試料 (R-1~3, G-1~3, H-1~3), 18モデルの作成を行った。

4.2 破断面粗度

上述の写真測量およびレーザスキャンそれぞれから得られた三次元破断面モデルを利用し、破断面粗度への数値化を行った。破断面粗度の数値化については多数のパラメーターが提案されているが (杉本ほか, 1991; 松本ほか, 1995; Aydan and Shimizu, 1995), 特に一般的に用いられている, ①二乗平均平方根粗さ (RMS), ②中心線平均粗さ (CLA), ③最大粗さ (MAX) を利用した。

① 二乗平均平方根粗さ (RMS); 中心面からの距離の標準偏差であり, 粗さ曲面を z , 測定範囲を S とすると,

$$RMS = \left(\frac{1}{S} \iint_S z^2 dx dy \right)^{1/2}$$

表1 破断面粗度の結果の比較

試料番号	引張強度 (MPa)	写真測量			レーザスキャン		
		RMS (mm)	CLA (mm)	MAX (mm)	RMS (mm)	CLA (mm)	MAX (mm)
R-1	4.53	0.48	0.39	2.87	0.47	0.41	2.88
R-2	3.99	0.57	0.46	3.00	0.53	0.45	3.10
R-3	3.49	0.43	0.34	2.95	0.43	0.37	2.67
average	4.00	0.49	0.40	2.94	0.48	0.41	2.88
G-1	7.19	0.66	0.54	3.81	0.64	0.55	4.08
G-2	7.13	0.58	0.47	3.40	0.61	0.51	3.47
G-3	6.64	0.62	0.51	4.30	0.61	0.52	4.28
average	6.99	0.62	0.51	3.84	0.62	0.52	3.94
H-1	8.24	0.78	0.58	4.30	0.73	0.61	4.44
H-2	8.74	0.62	0.52	3.17	0.64	0.56	3.53
H-3	7.85	0.74	0.58	4.30	0.70	0.59	4.28
average	8.28	0.71	0.56	3.92	0.69	0.59	4.08

② 中心線平均粗さ (CLA) : 中心面からの平均距離であり,

$$CLA = \frac{1}{S} \iint_S |z| \, dx dy$$

③最大粗さ (MAX) : 領域内における最高点と最低点との高さの差.

それぞれの試料における①～③の粗度を表 1 に示す. 左は写真測量, 右はレーザスキャンによる測定結果である. 両者の比較は次章にて述べる.

5. 考察

5.1 破断面モデルの直接比較

図 3 の破断面モデルの平面図を比較すると, レーザスキャンでは格子配列に近い三次元ポイントが取得されているが, 写真測量では比較的ランダムにポイントが作成されている. レーザスキャンは受光部でメッシュ状に三次元情報を取得する. 一方, 写真測量は左右画像で同一ポイントと認識できる部分でのみ, ポイントを発生することができる. 特に花崗岩は珪長質な岩石で白色が多いため, 左右画像間で同一ポイントを探しにくいのも原因の一つと考えられる. 一方, レーザスキャンの結果は部分的に情報が

取得できていない領域が存在する. これは写真-1 と比較すれば明瞭であるが, 黒雲母部分の三次元情報が取得できていない. 黒雲母は黒色でレーザ光を吸収するため, 反射光が弱まっているのが原因と考えられる.

図 5 の鳥瞰図を比較すると, 写真測量・レーザスキャンとも全体的な形状は良く似ている. しかし写真測量は細部においても平坦な形状を示すが, レーザは細かい凸凹形状がみられる. そこで, 図 3 や図 5 のモデルの同じ部分で断面線を作成した (図 6). 図 6 の断面線を比較すると, 両者の全体的な形状は似ている. しかしながらレーザによる断面は, 中心部で波長 2~3mm, 振幅 0.5mm 程度の波状の形態がみとめられる. 振幅 0.5mm というのは, レーザスキャンの測定精度 $\pm 0.2\text{mm}$ とほぼ同じ数値となる. したがって対象物の正確な形状を得るには, 複数回スキャンを行って平均を取る必要がある (三戸ほか, 2002). 今回利用した VIVID900 にはそのような機能が無いので, 複数回スキャンを試す機会は得られなかった.

5.2 破断面粗度の比較

写真測量およびレーザスキャンで得られた結果から, 二乗平均平方根粗さ (RMS), 中心線平

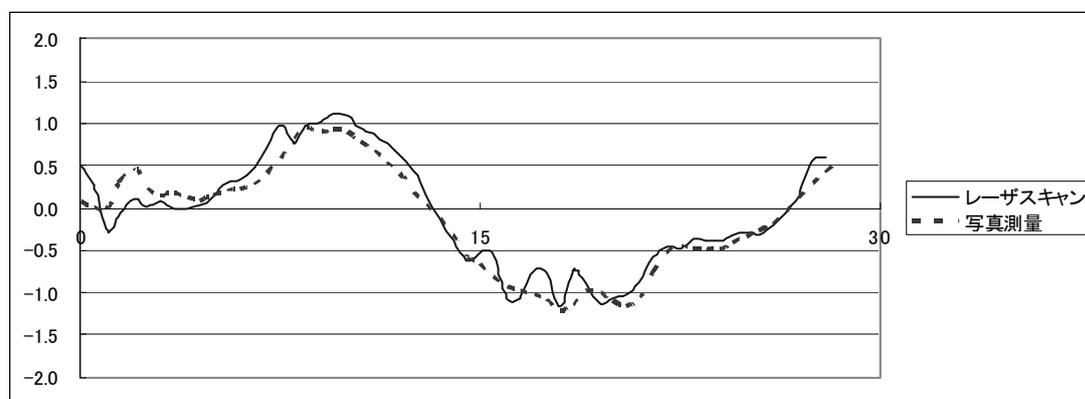


図 6 破断面モデルから作成した断面図

均粗さ (CLA), 最大粗さ (MAX) による粗度の数値化を行った (表 1). 写真測量およびレーザスキャンの結果を比較すると, RMS および CLA では両者の値が非常によく一致し, 最大でも 0.05 mm 程度の差しか認められなかった. 図 6 のように, レーザスキャンの結果に細かい振幅が認められていても, 粗度の結果に差は認められなかった. これは RMS や CLA のような統計的な処理を行えば, 計算結果に大きな違いは認められないことが原因と考えられる.

最大粗さであるが R-3, G-1, H-2 に関して, 測定値にやや大きな差が認められた. このうち G-1 と H-2 はレーザスキャンの結果が 0.3 mm ほど大きな値となっている. これは図 6 の断面線のような振幅誤差が最大あるいは最低点で発生していると仮定すれば理解できる. しかしながら R-3 の最大粗さにおいて, 写真測量の結果が 0.3 mm ほど大きく出ている原因はよくわからなかった.

さて, 最大粗さに多少の差は見られるものの, それぞれの方向 (R, G, H) の平均をとれば, RMS, CLA, MAX のどの粗度においても, また写真測量あるいはレーザ測量どちらを用いても, R→G→H の順序で粗度が増加していることが確認できる. 花崗岩中に R, G, H 面としてあらわれる力学異方性は, 既存マイクロクラックの定向配列や方向による密度差が原因である (竹村・小田, 2002). またこれらに平行に形成された一軸引張り割れ目は, 既存マイクロクラックの開口や再進展による結合で形成され, その破断面粗度も R→G→H の順序で粗度が増加する (藤井ほか, 2006). すなわち, 写真およびレーザのどちらの手法を用いても, 良い結果を得られることができた.

5.3 計測手法の比較

ここで行った, 写真測量とレーザスキャンに

よる測定方法や精度などの概要を表 2 にまとめる.

まずは 1 試料の計測にかかる時間であるが, レーザスキャンはスキャンにかかる時間は 2.5 秒であるが (VIVID900 仕様書), その後のコンピュータ処理など破断面モデル作成までには 3~5 分程度で事足りる. それに比べて写真測量は左右写真の撮影, 標定点を手入力しなくてはならないため, 破断面モデル作成までにはおよそ 20~30 分は必要となる.

測定精度であるが, $\sigma_x \sim \sigma_z$ のうち, 最も大きい値を示したレーザスキャンは σ_z の 0.2 mm である. 単数回のスキャンではこれがバラツキとなって形状に表れる (図 6). 写真測量はカメラ位置計算時の残差 (0.15 mm) を示した. 写真測量は左右画像の視差から三次元形状を取得するため, レーザのようなバラツキが現れることは少ない. レーザスキャンで複数回スキャンを行って平均をとれば, バラツキの少ない三次元形状が取得することが予想できるが, 回数が増えれば後のデータ処理も含めて計測にかかる時間も増加することになる.

測定時に取得できる画像情報であるが, レーザスキャンは 30 万画素と物足りない. 写真測量は今回利用したデジタルカメラが 500 万画素であった. 写真測量はそもそもデジタル画像上で計測を行うものであり, 得られる画像の画素数や鮮明さが測量精度に影響を及ぼす.

さらにその他対象物への適用であるが, レーザスキャンは VIVID900 を利用する限り, 1.2×0.9 m 程度の範囲で, 計測距離も 2.5 m 程度までである. さらに大きな対象物に対しては, 別のレーザスキャン機器が必要となる. 写真測量は対象物までの距離とレンズ焦点距離を調整すれば, 数 km 程度のスケールまで適用することができる (藤井ほか, 2006).

表2 レーザスキャンと写真測量における計測の比較

	レーザスキャン* ¹	写真測量* ²
計測にかかる時間(1試)	5分程度(単数回)	20~30分
測定精度	0.2mm程度	0.15mm程度
測定結果の比較	バラツキ多→複数回 スキャンの平均必要	バラツキ少
画像貼り付け	30万画素	500万画素
対象物のスケール	0.1~1.2m	0.1~1000m

*1: Minolta VIVID 900使用時

*2: 市販のデジタルカメラ(Minolta Dimage 7)および川惣電機Stereo Eye V3使用時

これらの結果から著者らの意見を述べれば、単純に三次元形態を取得したいのであれば、標準や写真撮影などわずらわしい作業の少ない、レーザ計測が短時間で便利である。また最近ではレーザの反射強度情報を利用する試みもあり(小山ほか, 2008), これらの将来性にも期待が掛かる。一方、鮮明な画像情報も取得し、立体視観察や判読なども同時に行いたいのであれば、写真測量技術の適用が最適であろう。また様々なスケールの対象物に適用できる点も、写真測量の魅力といえる。

参考文献

Amitrano, D. & Schmittbuhl, J. (2002): Fracture roughness and gouge distribution of a granite shear band, *Journal of Geophysical Research*, 107, B12, s2375, doi:10.1029/2002JB001761.

Aydan, Ö. and Shimizu, Y. (1995): Surface morphology characteristics of rock discontinuities with particular reference to their genesis, In *Fractography :fracture topography as a tool in fracture mechanics and stress analysis* (ed., M. S. Ameen), Geological Society Special Publication Vol. 92, London, pp.11-26.

Develi, K., Babadagli, T., Comlekci, C. (2001): new computer-controlled surface-scanning device for measurement of fracture surface roughness,

Computers & Geosciences, Vol. 27, pp.265-277.

藤井幸泰・堀伸三郎・高橋学・竹村貴人・林為人 (2006) : デジタル立体写真測量による、稲田花崗岩の異方性と一軸引張破断面粗度のちがいにについて, *応用地質*, Vol. 47(5), pp. 252-258.

林 為人・高橋 学・藤井幸泰・西山 哲・竹村貴人 (2007) : 一軸引張状態における数種類の花崗岩質岩石と斑れい岩の変形特性, *材料*, Vol. 56(7), pp. 654-659.

Jessell, M. W., Cox, S. J. D., Schwarze, P. & Power, W. L. (1995): The anisotropy of surface roughness measured using a digital photogrammetric technique, *Special Publication of Geological Society*, London, Vol. 92, pp. 27-37.

小山倫史・Quanhon Feng・大西有三 (2008) : レーザースキャナを用いた岩盤不連続面幾何学情報の取得に関する研究, 第43回地盤工学会研究発表会講演集, pp. 233-234.

Lanaro, F. (2000) : A random field model for surface roughness and aperture of rock fractures, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 37, pp.1195-1210.

松本浩二・小島隆・村井正 (1995) : 花崗岩中の小規模水圧破碎き裂の表面粗さと初期間隙分布, *日本地熱学会誌*, Vol. 17, pp.213-232.

三戸嘉之・本多政彦・小野尚哉・藤井徹・安原裕

- 貴・浅野広樹・石井靖雄,2002,のり面・崖地の高密度三次元座標データの取得と応用地質分野への活用—2点間の高精度計測から,面的な高密度計測へ—, 応用地質, Vol. 42(6), pp. 351-364.
- 村井俊治・近津博文 (2004) : デジタル写真測量の理論と実践, 社団法人日本測量協会, 東京, 343p.
- 西山哲・大西有三・大津宏康・矢野隆夫・龍明治・李徳河,2004,デジタル画像計測法の斜面防災モニタリングシステムへの応用に関する研究, 応用地質, Vol. 44(6), pp. 331-340.
- Sausse, J. (2002): Hydromechanical properties and alteration of natural fracture surfaces in the Soultz granite (Bas-Rhin, France), *Tectonophysics*, Vol. 348, pp.169-185.
- 杉本文男・古住光正・阿部司 (1991) : 岩石の破断面の粗さに関する研究, 応用地質. Vol. 32(3), pp. 12-18.
- 竹村貴人・小田匡寛 (2002) : マイクロクラックの三次元構造解析による花崗岩質岩石の脆性破壊機構. *地質学雑誌*, 108, 453-464.
- Wu, K., Yan, A., Liu, J., Zhang, D. & Yao, W. (2000): Reconstruction and analysis of 3-D profile of fracture surface of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp.981-987.
- Xie, H., Sun H., Ju, Y. & Feng Z. (2001): Study on generation of rock fracture surface by using fractal interpolation, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp.5765-5787.
- Zhou, H. W. & Xie, H. (2004): Anisotropic characterization of rock fracture surfaces subjected to profile analysis, *Physics Letters A*, Vol. 325, pp.355-362.

