

氏名	藤井 幸泰
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工乙第 219 号
学位授与年月日	平成 26 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	画像計測を用いた地圏素材の破断と内部構造評価および長期変化に関する研究
論文審査委員	委員長 教授 渡邊 邦夫 委員 教授 桑野 二郎 委員 准教授 小口 千明 委員 准教授 長田 昌彦 委員 准教授 山辺 正

論文の内容の要旨

遺跡などの歴史的構造物を調査する際、最初に行われるのはドキュメンテーション（documentation）である。ドキュメンテーションで作成された重要記録を保存し未来に伝達することがアーカイブ（archive）であり、歴史的構造物の長期変化を捉える事も可能である。長期変化を正確に捉えることは、歴史的構造物修復のための適切な時期や手法の選択に必要であり、長期保存に不可欠な要素である。また構造物を対象としたドキュメンテーションを実施する際、構造物全体の変化記録と共に、構造物を構成する素材の変化を記録することも重要である。これら変化に関わるプロセスやメカニズムとして、風化や侵食や破断があげられる。

この研究ではデジタル三次元写真測量とステレオロジーを用いて、地圏素材である来待砂岩の破断および構造評価を行った例を最初に示す。さらに地圏素材の一つである歴史的土構造物の変化を写真測量で捉えた例を示し、実際の修復に反映した例も示す。写真測量は同一の対象物を異なる地点から撮影した複数の写真を用いて、対象物の三次元表面モデルを構築する技術である。一方のステレオロジーは、対象物の複数の断面から内部構造を推定する技術である。

写真測量を用いて、試験後試料の破断面を詳細に計測および観察することにより、来待砂岩の三軸伸張試験における破壊の過程が明らかとなった。軸応力の低下により試料中のせん断応力が増加して応力円包絡線に接した際に降伏が起こり、軸方向を鉛直とした場合に 20°程度の傾斜をもつせん断割れ目が形成される。このせん断割れ目の傾斜は側方応力の増加とともに大きくなる傾向がみられる。せん断割れ目沿いのズレによって試料の側方が変位を起こすが、一部で応力集中が生じて引張り割れ目の発生および進展へと発達する。引張り割れ目の破断面上には進展の形跡である構造がみられる。また引張り割れ目の平滑度（ラフネス）は降伏時の軸応力に影響を受け、軸応力が高いほど平滑（ラフネス小）になる傾向がみられる。

上述と同じ中新世大森層中の来待砂岩を対象に、採石場から採取された試料を用いて帯磁率異方性測定を行った。また採石場でまれに観察される堆積構造を基に、古流向を考慮して塊状砂岩から直交する三方向の面を切り出し、研磨片および薄片上で粒子の抽出を行い、粒子形状を楕円近似して長軸の卓越方向を測定した。さらに粒子トレース結果からステレオロジーの手法により、粒子被表面積比テンソルを求めた。その結

果、以下の知見が得られた。1. 各面で観察される粒子を楕円近似した場合に長軸が最も卓越するのは古流向に直交方向である。2. 各面で観察される粒子を楕円近似した場合に長軸がやや卓越するのは古流向に平行方向である。3. 最小帯磁率方向（鉛直）は三方向の面で観察される粒子を楕円近似した場合に長軸が卓越しない鉛直方向と一致する。4. 粒子被表面積比テンソルも上記に整合的であり、水平面で最大、古流向に直交する鉛直面が中間、古流向に平行な縁直面が最小値を示した。5. 古流向に平行な縁直面で観察される粒子を楕円近似した場合、古流向に平行な方向とは別に南に約 50 度傾斜する方向にも長軸の卓越が認められた。6. 粒子被表面積比テンソルと方向別の一軸圧縮強度の主軸方向の異方性を比較すると、関係が非常に強いことが示された。以上より、ステレオロジーによる画像計測が地圏素材の内構造解析に大変有効であることを示せた。

ユネスコ文化遺産保存日本信託基金によるタジキスタン共和国アジナ・テパ仏教遺跡の修復・保存プロジェクトにおいて、写真測量技術を用いた遺跡のドキュメンテーションを実施した。具体的には倒壊の危機にある壁の保存記録と、遺跡全体の地形図作成である。壁の三次元モデルから断面を作成すると、オリジナルの形状や厚さからは相当変化して侵食を受けていることがわかる。30 年前の発掘以降、上部は風雨に晒されて侵食され、下部は塩類風化によって窪んでいることが解る。また壁-A において、プロジェクト期間中に窪んだ脚部より上部が崩壊し、これを写真測量で三次元ドキュメンテーションすることに成功した。そして歴史的構造物として壁の経年変化過程を、塩類風化による脚部の侵食→中部から上部の崩壊としてまとめることができた。更にこのような劣化過程を修復方法や実際の施工に生かすことができた。

上記の実例への適用例をその精度も含めて考察し、特に写真測量を対象物に適用する場合の注意点について検討した。すなわちカメラから対象物までの距離 H 、左右カメラの間隔 B 、カメラのレンズ焦点距離 c を適切に決定する必要があり、対象物の大きさ L や奥行き D も考慮しながら撮影計画を検討することが重要である。具体的には $B/H \approx 1/5$ 程度 ($1/3 \sim 1/10$ の範囲)、 $D \leq H \times 0.3$ である。また精度良く写真測量を行うには、標定点の設置やそれらの適切な測量も必要である。

論文の審査結果の要旨

土や岩などの自然材料である、いわゆる地圏素材で作られた構造物の長期変化や、地圏素材そのものの破壊・変形現象を科学的に評価するには、まず構造物や破断面などを3次元で映像化し精度良く評価することが基礎となる。しかし従来は、①3次元映像の作製に手間がかかること、②映像の精度評価の困難さ、③具体的に長期変化や破断面などの評価に結び付けて行く方法論の不明確さ、などの問題があり3次元映像化は必ずしも一般に行われて来なかった。本研究では、3次元映像化手法として写真測量の技術を用いて、土で建築された遺跡構造物や岩石の破断面などの3次元映像化を行い、それを構造物の長期的変化現象や、岩石の破断面現象の評価に活用する考え方と方法を体系的にまとめる研究を行った。また、その研究過程で岩の破断面現象の解明には、内部構造による強度などの異方性が必要である事を指摘し、内部構造の異方性評価の基礎研究も併せて行った。本論文では、それらの研究成果を第1章から第6章に分けて論述している。

第1章では、地圏素材の定義を述べ、それで作られた構造物の長期的変化の把握や岩などの破断・変形現象の評価では高精度な3次元映像化が重要である事を述べている。また本研究では、映像化データの取得の容易さから写真測量技術を取り上げる事を述べている。

第2章では、まず、写真測量の原理や3次元映像化の方法と注意点について多くの経験に基づいて説明している。次いで、3次元映像化では写真測量と同様に一般に使われているレーザースキャン計測との比較を行い、両方法の精度や適応上の利点・欠点を、本研究者が得た多くの例を用いて論述している。結果として、カメラさえあれば様々なスケールの対象に用意に適用できること、画像も同時に取れること、3次元映像化のためのデータを保存できることなどから、本研究では写真測量を選んだ事を述べている。

第3章では、自然素材である土を用いた歴史的構造物である、タジキスタン仏教遺跡アジナ・テパの崩壊現象やこの構造物の修復過程を記述する研究に、写真測量による3次元映像化を適用した成果を論述している。本遺跡では、2005年から2008年に掛けてユネスコにより修復・保存プロジェクトが行われた。まず、遺跡全体の3次元映像化を行い高精度地図を作製した。この作製過程では遺跡を多くの部分に分けてそれぞれ映像化しそれを統合した。この初期の全体映像化は、その後の遺跡崩壊プロセスを明らかにする上で極めて有用であった。このプロジェクト期間内でいくつかの壁が崩壊した。崩壊後の壁を3次元映像化し、元の映像と比較する事によって、崩壊のメカニズムを明らかにする事ができた。具体的な崩壊プロセスは、塩類風化による壁下部の不安定化とその後の崩落もしくは転倒である。この事を踏まえ、修復として、残存壁を新しい土材料（日干しレンガ、版築壁）で被覆するほう方法が選択された。本研究により、3次元映像化を構造物の崩壊プロセスの評価に用いる技術を体系化することができた。

第4章では、3次元映像化を、岩石サンプルの破断メカニズムの研究に適用した成果を論述している。具体的には、来待砂岩を用いて室内での三軸伸張試験を実施し、その破断プロセスを、破断面形状の3次元映像化を通してフラクトグラフィーにより明らかにした。この実験では、軸方向を鉛直とした場合に20°程度の傾斜角をもつせん断割れ目が形成される。また、せん断割れ目沿いのズレによって試料の側方が変位を起こすが、一部で応力集中が生じて引張り割れ目の発生および進展へと発達する。引張り割れ目の破断面の3次元形状の観察から、割れ目形成時にできる羽毛状形状やハックルマーク形状、および割れ目のラフネスの特性を明らかにした。本研究によって、上記の破断プロセスを明らかにする事ができた。

第5章は、第4章の成果をさらに発展させた研究成果について論述している。実験に用いた来待砂岩を構成する砂粒子の配列をステレオロジーにより定量化しその異方性を明らかにし、試料の力学異方性との関係について検討した。定量化では写真測量によって作られた映像を用いた。この結果、粒子配列の異方性が力学異方性に密接に関連している事を明らかにした。

第6章は、以上の成果を整理した章である。

本研究は、まず丹念な計測を繰り返して行い、精度の高い映像を得るための写真測量の方法、還元すれば、写真の撮り方の技術を明確にした。その技術を用いて、土構造物の長期プロセスや岩石破断現象を体系的に評価できる事を明らかにした。これらの成果は新規性、発展性に富んでいる。また、本研究成果は、11編の国内外学術誌論文（査読付）などに取りまとめられており、国内外でも十分評価されている。博士学位論文として十分な内容を持つと判定し審査を合格とした。