

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

X線CT画像を用いた断層破碎帯の最新活動部の認定法の開発

Development of the method for estimating the youngest active domain in
major fault zones using X-ray CT images

申請者

岩森 暁如

Akiyuki IWAMORI

地球・環境資源理工学専攻 構造岩石学研究

2022年2月

第四紀の被覆層のない基盤岩中に発達する断層破碎帯の中でも最新活動領域を抽出することは、断層の活動性の評価やスリップデータから求められる最新応力場の復元および地震防災の観点からも重要である。断層帯の隆起・削剥を考慮すると、断層の最新活動領域は、最も浅い深度における地震活動の痕跡に対応すると考えられることから、断層岩において最も脆弱な領域、換言すれば母岩に対する密度低下が最大の領域であることが想定される。しかし、断層岩試料は非常に脆弱であるため、乱れの影響を受けずに断層岩の密度を直接測定することは容易ではない。

本研究は、物質の3次元内部構造に関するデータを非破壊で簡便に取得できる医療用X線CTを活用し、密度と有効原子番号の関数であるCT値から断層帯の最低密度領域を定量的に認定する手法について提案し、露頭観察で認定した最新活動部と最低密度領域との関係を組み合わせ、CT値を用いて断層破碎帯の最新活動領域を認定する手法を確立することを目的としている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的、関連分野の現状と問題点および本論文の構成と概要を示した。

第2章では、医療用CT（電力中央研究所所有のTSX304A）により撮影したCT画像のCT値を用いて密度と有効原子番号を推定する手法について検討した。とくに線質硬化の影響を軽減した定量的解析手法を検討するため、密度と有効原子番号が既知である6種類の鉱物試料を対象とし、CT値を用いて密度と有効原子番号を推定する手法について検討した。線質硬化の影響が大きい範囲を除外する場合、任意の断面線全体を対象として算出される中央値 $N_{CTMedian}$ が目安になり、CT値が $N_{CTMedian}$ を上回る試料縁辺部を除外することが統計的に有効であることを示した。密度と有効原子番号は、まず線質硬化の影響を除いたCT画像の中心部を対象としたCT値のヒストグラムの最頻値 N_{CTMode} をCT値の代表値（以下 N_{CTM} ）として算出し、次に2種類の管電圧で撮影したCT画像を使用したDual Energy法を用いることにより推定することができることを明らかにした。また、密度と有効原子番号に正の相関関係がある場合には、1種類の管電圧で撮影したCT画像から得られた N_{CTM} から密度および有効原子番号を直接推定することが可能であることを明らかにした。また、試料の厚さの増大に伴うCT値の減少については、試料の断面積が6倍程度、換算透過厚さ t_e が2.5倍程度の増大によるCT値への影響は数%程度に抑えられることが明らかとなった。

第3章では、西南日本における3つの活断層（敦賀断層、山田断層、中央構造線非持露頭）および1つの非活断層（中央構造線栗野田引露頭）の基盤岩中の断層露頭で採取した断層岩およびそれぞれの母岩を対象とし、断層別・岩種別に密度、空隙率および有効原子番号を測定した。また、CT画像を用い、第2章で得られた手法を用いてCT値、密度および有効原子番号の関係について整理した。以下、結論を示す。

- (1) 断層岩の密度 ρ_t は最新活動面に近づくにつれて減少し，空隙率 ϕ は岩種や断層の違いによらず密度が 1 g/cm^3 減少するにつれて約 24%増大する．
- (2) 母岩および断層岩の空隙率は，母岩が $1.5 \pm 1.0\%$ (1σ) カタクレーサイトが $12.6 \pm 6.9\%$ ，非活断層の断層ガウジが $12.0 \pm 4.8\%$ ，活断層の断層ガウジが $17.4 \pm 4.6\%$ ，断層角礫が 32.2%である．また，活断層のガウジに近接するカタクレーサイトの空隙率は 19.7%であり，他のカタクレーサイトの空隙率に比べて著しく大きい，これは断層活動が発生した深度が浅いことが要因と考えられる．
- (3) 母岩および断層岩の密度 ρ_t と有効原子番号 Z_{et} には，断層別および岩種別に固有の正の相関関係が認められる．
- (4) 1種類の管電圧 (140kV) の CT 画像より算出した N_{CTM} は，割れ目の影響や有効原子番号の大きい鉱物の影響を回避した岩石試料の代表値として有効である．また，密度 ρ_t との関係を整理事ることにより， N_{CTM} から密度と有効原子番号を算出することができる．

第 4 章では，分析結果による密度 ρ_t ，有効原子番号 Z_{et} と N_{CTM} から推定される密度 ρ_c ，有効原子番号 Z_{ec} との関係， N_{CTM} および母岩に対する断層岩の密度比・有効原子番号比の関係について検討した．さらに，これらの検討結果に基づいて N_{CTM} から断層の最低密度領域と最新活動部を推定する方法について検討した．以下，結論を示す．

- (1) 母岩および断層岩の N_{CTM} は，母岩は 1900 ± 300 (単位は Hounsfield) 程度，カタクレーサイトは 1650 ± 250 程度，非活断層の断層ガウジは 1450 ± 200 程度，活断層の断層ガウジは 1100 ± 100 程度であり，最新活動部に近づくにつれて N_{CTM} は減少し，そのばらつきも小さくなる．また，各断層における断層岩の N_{CTM} は，最新活動部の断層ガウジにおいて最低値をとる．
- (2) 母岩に対する密度比 (実測値) は，カタクレーサイトと非活断層の断層ガウジは 0.85 ± 0.10 程度，活断層の断層ガウジは 0.70 ± 0.10 程度である．
- (3) 最新活動部への移行に伴う断層岩の特徴の変化は，母岩に対する密度比および有効原子番号比に比べて，密度と有効原子番号の関数である N_{CTM} において明瞭である．したがって， N_{CTM} を活用することにより，断層の最低密度領域を認定することが可能である．
- (4) N_{CTM} により特定した最低密度領域について，断層の露頭観察および断層ガウジの微小構造観察と組み合わせることにより最新活動領域を推定できる可能性がある．

第 5 章では，本研究によって得られた結論が取りまとめられている．

本研究は CT 画像を用いた手法を活用することにより，断層破碎帯の最低密度領域を CT 値 (N_{CTM}) により認定できることを定量的にはじめて明確にした．一方，断層岩の密度低下は，断層活動による剪断以外の影響 (例えば流体の移動に伴う 2 次鉱物の沈殿など) を受ける場合もあり， N_{CTM} により特定した最低密度領域と

最新活動部との対応関係については、露頭および断層ガウジの観察とあわせて慎重に検討する必要がある。本研究で対象とした4つの断層においては、 N_{CTM} により特定した最低密度領域が、断層の性状および断層ガウジの運動像によって推定された最新活動部と一致することを明らかにした。これらの成果は、第四紀の被覆層のない基盤岩中に発達する断層破碎帯において、 N_{CTM} により特定した最低密度領域が断層の最新活動領域として抽出できることを示しており、今後さらに様々な活動性を有する断層を対象としたデータの収集・検討の蓄積が期待される。

以上より本論文はCT値による断層岩評価という観点からオリジナリティを有する最先端の研究成果を挙げており、学術的価値を有することに加え、地震防災などに関する断層活動性評価の高精度化に資する内容であることなどから、本論文が学位（理学）としてふさわしいものと認める。

2022年2月

審査員

（主査）早稲田大学教授 理学博士（名古屋大学）

高木秀雄

早稲田大学教授 博士（理学）（早稲田大学）

太田 亨

（一財）電力中央研究所研究参事 博士（理学）（九州大学）

上田圭一
