

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文概要

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

2021年12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。

一方、コンピュータ断層撮影法 (X-ray computed tomography: X線 CT) は、物質の3次元内部構造を非破壊で観察・解析することが可能な技術である。現在普及しているX線CTは医療用と産業用に大別され、密度の大きい硬い岩石や鉱物に対してはX線エネルギーが高い産業用CT装置が一般的に用いられている。一方、医療用CTは産業用CTに比べて容易に利用可能であるが、X線強度が低く、CT画像の偽像 (artifact) が生じやすいため、CT画像のピクセル値であるCT値を用いた定量的評価を行う際には、偽像、特に線質硬化に対する考察が必要となる。

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の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ために取り組んだものである。以下に、各章で得られた結論を示す。

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、鉱物の集合体である岩石試料を用いたX線CT画像解析に先立ち、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。以下、結論を示す。

(1) 密度と有効原子番号は、線質硬化の影響が大きい試料縁辺部を除いた2次元CT画像の中心部を対象として最頻値 N_{CTMode} をCT画像の代表値として算出し、Dual Energy法を用いることにより推定することができる。

(2) 密度と有効原子番号には正の相関関係があることから、1種類の管電圧で撮影したCT画像の代表値 N_{CTMode} 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。

(3) 試料厚さが増大するにつれて N_{CTMode} は減少するが、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 N_{CTMode} への影響は数%程度である。

(4) 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有効である．

第 3 章では，活断層および非活断層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，医療用 CT の 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 減少するにつれて空隙率が約 24% 増大する．

(2) 母岩および断層岩の空隙率は，母岩が 1.5% (標準偏差 1.0%)，カタクレーサイトが 12.6% (標準偏差 6.9%)，非活断層の断層ガウジが 12.0% (標準偏差 4.8%)，活断層の断層ガウジが 17.4% (標準偏差 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 CT 値の最頻値 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} 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 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となる．

(2) 母岩に対する密度比は，カタクレーサイトと非活断層の断層ガウジは 0.80 ± 0.15 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．これは， N_{CTM} が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、各領域における約 1.2 万ピクセル以上のデータを対象として算出されているのに対し、密度比および有効原子番号比は各領域におけるピンポイントのデータを対象とした分析結果であることも要因の 1 つと考えられる。

(4) 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。

(5) 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。

最後に、この第 5 章では、本研究によって得られた結論を取りまとめた。

また、本論で得られた検討結果を異なる CT 装置における検討に適用する場合、CT 装置の実効エネルギー E_e を測定し、 E_e と N_{CT} の関係を活用することにより、本論における管電圧 140 kV の N_{CTM} との関係について整理できること、同じ種類の鉱物や岩石試料を用いて取得された N_{CT} を比較することにより、CT 装置の E_e を推定することが可能であることを示した。

このように、本研究は、医療用の X 線 CT を活用した断層破碎帯の最新活動領域の認定法を確立するために取り組んだものである。

鉱物試料を用いた検討では、医療用 CT は工業用 CT に比べて X 線強度が低いものの、線質硬化の影響が大きい試料縁辺部を除いて算出した 2 次元 CT 画像の代表 CT 値 N_{CTM} を用いて密度と有効原子番号を推定できることを示した。また、試料の密度と有効原子番号に正の相関関係がある場合、Dual Energy 法によらず、1 種類の管電圧で撮影した CT 画像の N_{CTM} から密度および有効原子番号を直接推定できることを示した。

さらに、この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 N_{CTM} により認定できるとともに、露頭観察において断層活動の痕跡が認められる最低密度領域は断層破碎帯の最新活動領域として認定できることが明らかとなった。

なお、断層岩の密度低下は、断層活動によるせん断以外の影響を受ける場合があることに留意する必要がある。また、 N_{CTM} により特定した最低密度領域が最新活動部に対応する可能性については、露頭観察における性状観察や、せん断の影響により形成される断層ガウジ中の線構造や複合面構造の有無などとあわせて慎重に検討する必要がある。本検討で対象とした 4 断層では、露頭観察により最新活動部を認定し、断層ガウジ中に最新活動のせん断の影響を受けた線構造や複合面構造を確認したことから、最低密度領域が最新活動部に対応しているケースとして整理できる。

以上より、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も、 N_{CTM} により特定した最低密度領域は、線構造や複合面構造などの断層活動の痕跡が認められる場合には最新活動領域として抽出することが可能であることが明らかとなった。

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

氏名： 岩森 暁如 印

(2021年11月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	○Iwamori, A., Takagi, H., Asahi, N., Sugimori, T., Nakata, E., Nohara, S., Ueta, K., 2021, Quantitative determination of the lowest density domain in major fault zones via medical X-ray computed tomography, Progress in Earth and Planetary Science, 8, no.54.
論文	○岩森暁如・高木秀雄・朝日信孝・杉森辰次・中田英二・野原慎太郎・上田圭一, 2020, 医療用X線CTの活用による鉱物試料の密度と有効原子番号を推定する手法の開発, 岩石鉱物科学, 49, 101-117.
講演 (ポスター)	○岩森暁如・高木秀雄・朝日信孝・杉森辰次・中田英二・野原慎太郎・上田圭一, 2021, 医療用X線CTによるCT値を用いた断層の最新活動領域の認定. 日本地球惑星科学連合2021年大会
その他	(医療用CT関係)
講演	岩森暁如・牧田陽行・朝日信孝・野原慎太郎・高木秀雄, 2021, ネパールTsergo Ri地すべりに伴うシュードタクライトに発達した気泡の三次元形態とメルトの流動パターン. 日本地質学会第128年学術大会(名古屋)
講演 (ポスター)	岩森暁如・高木秀雄・島田耕史・朝日信孝・杉森辰次・佐々木俊法・相山光太郎, 2017, X線CT画像を用いた断層の運動方向の認定方法. 日本地質学会第124年学術大会(愛媛)
	(地形・地質構造関係)
論文 (連名)	亀高正男・菅森義晃・石田直人・松井和夫・岸本弘樹・梅田孝行・東篤義・山根博・杉森辰次・魚住誠司・永田高弘・松場康二・桑島靖枝・岩森暁如・金谷賢生, 2019, 舞鶴-小浜地域の地質: 超丹波帯・丹波帯の地質構造発達史と上林川断層の横ずれインバージョン, 地質学雑誌, 125, 793-820.
講演 (ポスター)	岩森暁如・佐々木俊法・杉森辰次・相山光太郎・後藤憲央・柳田誠・重光泰宗・田中豊, 2015, 山田断層の第四紀後期における活動履歴-但東町虫生地点の露頭調査-. 日本活断層学会2015年秋季学術大会
講演 (連名)	佐々木俊法・後藤憲央・岩森暁如・原田暁之・市川清士・松島義章・佐藤武宏・柳田誠・杉森辰次・東田優記・重光泰宗・田中裕, 2015, 詳細な生物遺骸群集の観察に基づく若狭湾周辺における地震性地殻変動. 日本第四紀学会2015年大会(早稲田)
論文 (連名)	大野頭大・後藤憲央・佐藤武宏・松島義章・岩森暁如・市川清士・大塚良治・松田周吾・佐々木俊法, 2021, 越前海岸におけるヤッコカンザシの生息深度についての浸漬板調査, 日本ベントス学会(投稿中)

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

氏名： 岩森 暁如 印

(2021年11月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (連名)	久岡慎吾・審浩年・山田浩二・岩森暁如・井上大榮, 2021, 硬岩サイトにおける反射法地震探査とその他の調査方法との比較. 物理探査学会第145回学術講演会