

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

2022年2月

岩森 暁如  
Akiyuki IWAMORI

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

2022年2月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科  
地球・環境資源理工学専攻 構造岩石学研究

岩森 暁如  
Akiyuki IWAMORI

## 目次

Abstract.....	1
1. 序論.....	3
2. CT 値を用いた定量的解析手法.....	5
2-1 X 線減弱の原理および検討方法.....	6
2-2 撮影条件.....	8
2-3 X 線の実効エネルギーおよび水の線減弱係数 $\mu_w$ .....	10
2-4 CT 画像解析結果.....	11
2-5 X 線の透過性およびコントラスト分解能.....	13
2-6 CT 画像の代表 CT 値.....	16
2-7 $N_{CT}$ と試料厚さとの関係.....	23
2-8 鉱物試料の $N_{CT}$ , 密度 $\rho_t$ , 有効原子番号 $Z_{et}$ の関係.....	25
2-9 鉱物試料の実効エネルギー $E_e$ と $N_{CT}$ の関係.....	28
3. 断層破碎帯の最新活動部の認定法.....	32
3-1 断層の地質構造的特性および岩石構造的特性.....	32
(1) 長野県上伊那地域の MTL (非持露頭; 活断層).....	34
(2) 三重県松阪付近の MTL (栗野田引露頭; 非活断層).....	36
(3) 敦賀断層 (折戸谷露頭; 活断層).....	38
(4) 山田断層 (虫生露頭; 活断層).....	42
3-2 密度, 空隙率および有効原子番号.....	44
(1) 測定方法.....	44
(2) 測定結果.....	44
3-3 CT 画像解析および $N_{CTM}$ , 密度, 有効原子番号の関係.....	48
(1) MTL 非持露頭.....	48
(2) MTL 栗野田引露頭.....	51
(3) 敦賀断層折戸谷露頭.....	53
(4) 山田断層虫生露頭.....	55
4. 議論.....	57
4-1 $\rho_t$ と $\rho_c$ との関係および $Z_{et}$ と $Z_{ec}$ との関係.....	57

4-2 $N_{CTM}$ および母岩に対する断層岩の密度比・有効原子番号比に基づく断層岩の特徴	58
4-3 断層の最低密度領域と最新活動部との関係.....	61
4-4 岩石試料の実効エネルギー $E_e$ と $N_{CT}$ の関係.....	62
5. 結論 .....	67
6. 謝辞 .....	70
7. 文献 .....	71
研究業績 .....	75

## Abstract

Determination of the youngest active domains in fault zones that are not overlain by Quaternary sedimentary cover are critical for evaluating recent fault activity, determining the current local stress field, and mitigating the impacts of future earthquakes. Considering the exhumation of a fault zone, the youngest active domain in a fault zone is supposed to correspond to the activity at the minimum fault depth of a buried fault, such that the most vulnerable area, which possesses the lowest rock/protolith density ratio, is assumed to be indicative of this recent fault activity. However, it is difficult to measure the density of fault rocks and map the rock/protolith density ratio across a given fault zone.

Here I utilize medical X-ray computed tomography (CT), a non-destructive technique for observing and analyzing materials, to investigate the fault characteristics of several fault zones and their surrounding regions in Japan. And I also attempt to determine the lowest density domain of a given fault zone based on its CT numbers, which are a function of the density and effective atomic number of the fault rock and protolith.

A CT image is essentially a bitmap of each pixel's CT number; however, it also contains various artifacts due to the X-ray photography and image reconstruction. Therefore, the effects of these artifacts, especially beam hardening (BH), must be eliminated or reduced to ensure the accuracy of the CT numbers and therefore provide an accurate quantitative analysis. BH artifacts cause the edges of a CT image to appear brighter than the center, such that the CT numbers along the edges of a sample are greater than those in the center. This occurs because the lower-energy X-rays are absorbed more readily than the higher-energy ones when polychromatic X-rays pass through a sample near its center, where the transmission thickness is large. Therefore, prior to the study using rock samples, which are aggregates of minerals, the dual-energy methods (tube voltages: 140 and 100 kV) are carried out to analyze the medical CT images of six different minerals with known densities and effective atomic numbers (quartz, calcite, fluorite, rhodochrosite, cryptomelane, and hematite) and found the following.

- (1) The modal CT number,  $N_{CTM}$ , which is calculated from the two-dimensional (2D) CT image whose peripheral CT values are excluded due to significant BH, could be used to estimate the  $\rho$  and  $Z_e$  values of the mineral samples.
- (2) The recorded CT values for a single tube voltage (140 kV) can be used to estimate  $\rho$  and  $Z_e$  for the mineral samples since these parameters possess a positive correlation.

This study considered fault rock and protolith samples that were derived from pelitic schist, tonalite, metabasalt, and granite along active faults (MTL, and Tsuruga and Yamada faults) and an inactive fault (MTL) using the results of six different minerals study. The density, porosity, and

effective atomic number were determined for the different fault and protolith types, and relationships among the CT value, density, and effective atomic number were investigated. Major results and conclusions are as follows.

- (1) The fault rock density,  $\rho_t$ , decreases as it approaches the youngest active fault plane, and the porosity,  $\phi$ , tends to increase by  $\sim 24\%$  as  $\rho_t$  decreases by  $1 \text{ g/cm}^3$ , regardless of the fault rock or protolith type. The porosity of the cataclasite adjacent to the fault gouge along the active faults is  $19.7\%$ , which is significantly larger than those of the other cataclasite sample locations; this increased porosity may be due to the shallow depth that is affected by this proximal fault activity.
- (2) The mean  $\phi$  values are  $1.5\%$  (SD =  $1.0\%$ ) for the protoliths,  $12.6\%$  (SD =  $6.9\%$ ) for cataclasite,  $12.0\%$  (SD =  $4.8\%$ ) for the fault gouge along the inactive fault,  $17.4\%$  (SD =  $4.6\%$ ) for the fault gouge along the active faults, and  $32.2\%$  for the fault breccia.
- (3) There is a positive correlation between  $\rho_t$  and the effective atomic number,  $Z_{et}$ , which is unique to each fault and protolith type.
- (4) The modal CT number,  $N_{CTM}$ , which is calculated from a 2D CT image (excluding the periphery where BH is significant, and the influences of cracks and minerals with a large effective atomic number) can be used to estimate the  $\rho_t$  and  $Z_{et}$  values of the protolith and fault rock samples.
- (5) The  $N_{CTM}$  values were  $\sim 1900 \pm 300$  for the protolith,  $\sim 1650 \pm 250$  for cataclasite,  $\sim 1450 \pm 200$  for fault gouge in the inactive fault, and  $\sim 1100 \pm 100$  for fault gouge in the active faults. Both  $N_{CTM}$  and the variation in  $N_{CTM}$  decreased near the main fault plane. The  $N_{CTM}$  of the fault rock in each fault is the lowest in the fault gouge from the youngest active domain.
- (6) The rock/protolith density ratio was  $\sim 0.8 \pm 0.15$  for cataclasite and fault gouge along the inactive fault, and  $\sim 0.7 \pm 0.1$  for fault gouge along the active faults.
- (7) The change in fault rock characteristics due to the transition to the youngest active domain of the fault zone is more distinct when analyzing  $N_{CTM}$ , which is a function of the  $\rho_t$  and  $Z_{et}$ , than the rock/protolith ( $\rho_t$  and  $Z_{et}$ ) ratios. This is also due to how  $N_{CTM}$  and the rock/protolith ratios are calculated:  $N_{CTM}$  is calculated from more than 12,000 pixels of data by eliminating the sample area due to the influence of cracks or minerals with a large effective atomic number, with the rock/protolith  $\rho_t$  and  $Z_{et}$  ratios also calculated using only a portion of each sample area.
- (8) The  $N_{CTM}$  can be used to identify the lowest density domain of a fault.

In conclusion, it is highly possible to identify the youngest active domain in major fault zones via a joint analysis of the lowest density domain using the  $N_{CTM}$  and microstructure observations of fault outcrop and fault gouge.

## 1. 序論

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。従来より基盤岩中の断層の最新活動領域の抽出については、様々な手法を用いて試みられてきた (例えば Mizoguchi and Ueta, 2013; Shigematsu et al., 2017; 田中ほか, 2018)。断層帯の隆起・削剥を考慮すると、断層の最新活動領域は、断層の最小深度における活動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。断層周辺の岩石の密度について検討された事例はあるが (例えば Morrow and Lockner, 2001; 竹内ほか, 2005)、密度を用いた断層岩の定量的な分類までは行われていない。Rempe et al. (2013) は、サンアンドレアス断層を対象として地震屈折トモグラフィーおよび断層岩の微細構造観察を行い、主断層面に近づくにつれて P 波速度が増加する要因として密度低下の影響を推定している。池田ほか (2001) は、1995 年に発生した兵庫県南部地震で活動した野島断層帯を貫くボーリング孔を用いて実施された孔井内物理検層の結果、破碎されていない花崗岩の密度は  $2.6\sim 2.7\text{ g/cm}^3$  であるのに対し、断層破碎帯では  $1.5\sim 2.5\text{ g/cm}^3$  程度に減少するとしている。ただし、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。X 線 CT は、医療用の画像診断技術として 1972 年に Hounsfield によって実用化されて以降 (Hounsfield, 1973)、地球科学分野においてもその有用性が認識され、1980 年代前半以降、同技術を活用した研究成果が多数報告されている (例えば Wellington and Vinegar., 1987; Raynaud et al., 1989; Orsi et al., 1994; Boespflug et al., 1995; Verhelst et al., 1996; Geet et al., 2000; Ueta et al., 2000)。Hirono et al. (2008) は、医療用 CT による CT 値が物質の密度と化学組成の関数であることに着目し、1999 年集集地震で活動した活断層のボーリングコアを対象に断層破碎帯のガウジの CT 画像解析を行った結果、断層ガウジの CT 値は周囲に比べて小さいことを報告しているが、CT 画像には線質硬化の影響が含まれており、CT 値と密度の関係については検討されていない。相山ほか (2017) は、医療用 CT を用いて断層破碎帯内部の構造を観察した結果、断

層ガウジ帯の CT 画像はカタクレーサイトの CT 画像に比べて暗く、低密度であることを報告している。

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 装置が用いられるが、サイズの小さい試料や密度の小さい未固結堆積物等では医療用 CT 装置を利用することができる (西澤ほか, 1995)。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 (Ketcham and Carlson, 2001)。中野ほか (2000) は、医療用 CT を用い、湖底堆積物試料、玄武岩試料および花崗岩試料を対象とし、X 線の吸収のメカニズム、線質硬化の発生の原因とその対処法などを考慮に入れて、岩石試料の内部構造の観察・解析を行っているが、スキャナの X 線のスペクトルが既知であることが必要であり、既存の装置を利用する一般のユーザーは容易に関与できない。Ketcham and Hanna (2014) および Geet et al. (2000) は、マイクロ CT を対象として線質硬化の影響軽減に関する検討を行っているが、このうち、Geet et al. (2000) は、Dual Energy 法により密度と有効原子番号を推定している。なお、Dual Energy 法は、2 種類の管電圧による CT 画像を用いた解析手法であり、物質の X 線エネルギーの違いによる CT 画像のコントラストの変化に着目して物質の弁別に利用されている。

本博士論文は、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 値から断層帯の最新活動領域の認定法の確立のために取り組んだものである。

次の第 2 章において、密度と有効原子番号が既知である鉱物試料を用い、医療用 CT を活用した CT 値の定量的解析手法を提示した後、第 3 章では、活断層および非活断層の断層露頭の基盤岩中で採取した断層岩およびそれぞれの母岩を対象とし、密度、空隙率、有効原子番号および CT 値の関係について整理する。第 4 章では総合的な議論をおこない、最後の第 5 章では、本論文により得られた結論ならびに知見を取りまとめるとともに、今後の研究課題について述べる。



## 2. CT 値を用いた定量的解析手法

X 線 CT 画像は、各ピクセルが有する CT 値を画像化したものであるが、X 線撮影や画像の再構成による諸問題による偽像が含まれるため、正確な CT 値の把握や CT 値による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。

線質硬化は、試料の中央部付近が縁辺部に比べて暗く、CT 値が小さいことで認識される。これは、医療用 CT で使用されている連続スペクトルを有する白色 X 線が試料を透過する際、透過厚さが大きい試料中央部付近では低エネルギー成分の X 線が大きく減衰し、減弱しにくい高エネルギー成分の X 線の割合が大きくなることにより発生するものであり、白色 X 線を用いた CT 値の定量的分析を行う際に最も留意する必要がある。

本章では、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代表的な 6 種類の鉱物試料 (早稲田大学教育学部地球科学教室所蔵) (Fig. 2-1, Table 2-1) を対象とし、医療用 CT を用いて取得した CT 画像の CT 値を用いて、線質硬化の影響軽減に有効な CT 値を定義し、CT 値から密度と有効原子番号を推定する手法について検討する。

また、中野ほか (2000) は、医療用 CT を用いた線質硬化の影響検討において、玄武岩のコア試料の試料厚さが大きくなるにつれて X 線の低エネルギー成分がより選択的に吸収されることにより、X 線の線減弱係数が小さくなるとしている。このことは、試料厚さが変化すると線質硬化の影響の程度が変化し、線減弱係数と関係する CT 値も影響を受けることを示している。このような観点からすれば、線質硬化の影響を抑制するためには、コア試料のように、試料の形状のジオメトリーを極力均一にすることが有効である。しかし、一般に、岩石試料や鉱物試料は複雑な形状を呈し、試料の大きさも様々であり、岩石試料や鉱物試料を対象として CT 値による定量的評価を行う場合には、試料の厚さの影響の有無を確認する必要がある。

したがって、本章では、CT 値に対する試料厚さの影響を把握することを目的として、大きさの異なる石英の鉱物試料 (Figs. 2.1a, g, Table 2-1) を用いて、CT 値と試料厚さの関係についても検討した。

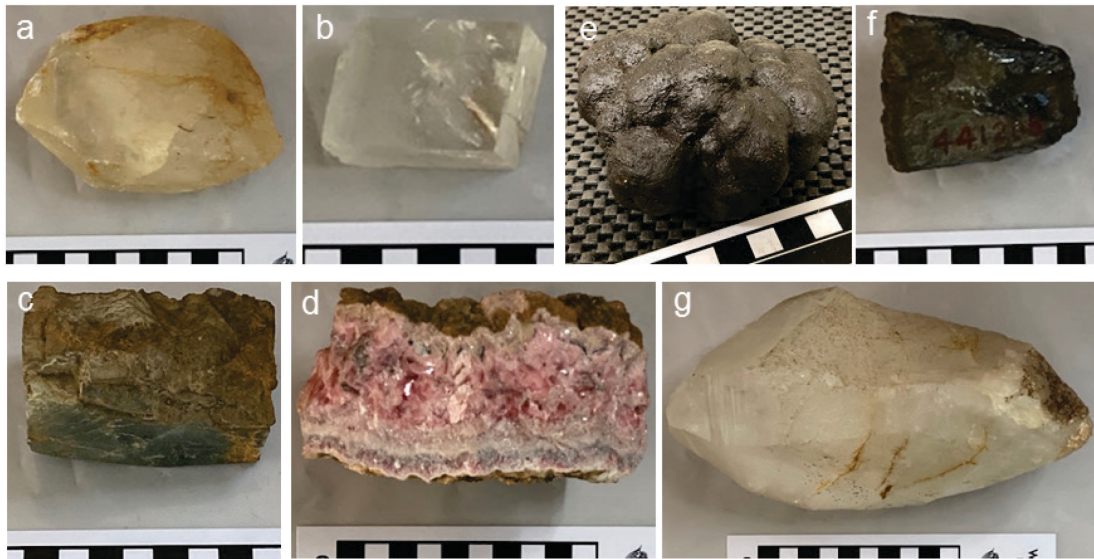


Fig. 2-1. Mineral samples used in this study. (a) quartz, (b) calcite, (c) fluorite, (d) rhodochrosite, (e) cryptomelane, (f) hematite, (g) large quartz. Scales in cm.

Table 2-1. Mineral samples and specifications of CT image used in this study

No.	Material	Chemical formula	Density $\rho_t(\text{g/cm}^3)$	Effective atomic number $Z_{et}$	Specifications of CT image		Locality
					Pixel size mm	Slice width mm	
a	Quartz	$\text{SiO}_2$	2.65	11.85	0.107	0.25	Otome, Yamanashi, Japan
b	Calcite	$\text{CaCO}_3$	2.7	15.88	0.059	0.25	Chihuahua, Mexico
c	Fluorite	$\text{CaF}_2$	3.2	17.08	0.088	0.25	Higashikanbara, Niigata, Japan
d	Rhodochrosite	$\text{MnCO}_3$	3.7	20.39	0.137	0.25	Yoichi, Hokkaido, Japan
e	Cryptomelane	$\text{KMn}_8\text{O}_{16}$	4.44	21.86	0.098	0.25	Yoichi, Hokkaido, Japan
f	Hematite	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5.3	23.56	0.088	0.25	Anhui, China
g	Quartz	$\text{SiO}_2$	2.65	11.85	0.205	0.25	Otome, Yamanashi, Japan

## 2-1 X線減弱の原理および検討方法

CT画像は、試料内部の物質の線減弱係数の3次元分布を可視化したものである(たとえば中野ほか, 2000; 土山ほか, 2000; Ketcham and Carlson, 2001). 厚さ  $S$  の均質な物質を単色 X 線が透過したとき, X 線減弱の度合いは,

$$I = I_0 \exp(-\mu S) \quad (2-1)$$

により表される. ここで,  $I$  および  $I_0$  は X 線の透過および入射強度,  $\mu$  は線減弱係数である.  $\mu$  は, 試料のかさ密度  $\rho$  と原子番号  $Z$  に依存し, 次式により表される (Wellington and Vinegar, 1987).

$$\mu = \rho (a + bZ^{3.8}/E^{3.2}) \quad (2-2)$$

ここで、 $E$  は撮影時の X 線エネルギー (keV)、 $a$  はクライナー係数、 $b$  は定数である。放射光施設のように X 線の単色化が可能な場合には式 (2-2) がそのまま使えるが、市販の CT 装置のように白色 X 線を用いる場合には、同じ物質であっても  $\mu$  は X 線のエネルギーによって異なるため、式 (2-2) から  $\mu$  を一義的に求めることはできない (たとえば中野ほか, 2000 ; 土山ほか, 2000)。

複数の種類の原子からなる化合物の光電吸収は、次式から算定される有効原子番号に比例する (Wellington and Vinegar, 1987)。

$$Z_e = (\sum f_i Z_i^{3.8})^{1/3.8} \quad (2-3)$$

ここで、 $f_i$  は全電子量に対する  $i$  番目の原子の電子の割合、 $Z_i$  は  $i$  番目の原子の原子番号である。例えば、1 つのケイ素原子 ( $Z = 14$ ) と 2 つの酸素原子 ( $Z = 8$ ) から構成される石英の有効原子番号は  $11.85 [(14/30 \times 14^{3.8} + 16/30 \times 8^{3.8})^{1/3.8}]$  となる。

一方、CT 画像のコントラストを決める CT 値 ( $N_{CT}$ : 単位は Hounsfield Unit) は、次式で示される。

$$N_{CT} = 1000 \times \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \quad (2-4)$$

ここで、 $\mu$  は試料の線減弱係数、 $\mu_w$  は水の線減弱係数である。白色 X 線の CT 装置の場合、 $\mu$  は前述のとおり使用する X 線エネルギー (実効エネルギー) の影響を受けるが、 $N_{CT}$  の計算では  $\mu_w$  との比をとって規格化しているため、実効エネルギーに対応した  $\mu$  の X 線エネルギー分布の違いによる影響は抑制される。

以上より、CT 画像撮影時の管電圧を一定とし、X 線の実効エネルギーが同一である場合、線減弱係数  $\mu$  はかさ密度  $\rho$ 、有効原子番号  $Z_e$  に依存し、試料の線減弱係数  $\mu$  と水の線減弱係数  $\mu_w$  との比で定義される CT 値も同様に、これら 2 つのパラメータに依存する。

Geet et al. (2000) は、マイクロ CT を用いて Dual energy 法により密度と有効原子番号を推定している。具体的には、式 (2-2) より

$$\frac{\mu_E}{\rho} = A(E) + B(E)Z_e^{3.8} \quad (2-5)$$

を導き、管電圧 130 kV, 100 kV で撮影した際の試料の  $\mu_E/\rho$  と、各試料の有効原子番号  $Z_e^{3.8}$  とを直線回帰で近似して算出した定数  $A$ ,  $B$  を用いて密度  $\rho$ 、有効原子番号  $Z_e$  および X 線の実効エネルギーに対応した線減弱係数  $\mu_E$  との関係を次式で整理している。

$$\rho = \frac{B_h \mu_{E1} - B_l \mu_{Eh}}{B_h A_l - B_l A_h} \quad (2-6)$$

$$Z_c = [(A_l \mu_{Eh} - A_h \mu_{E1}) / (B_h \mu_{E1} - B_l \mu_{Eh})]^{1/3.8} \quad (2-7)$$

ここで、定数 A, B の添え字の h と l は、撮影時の管電圧のエネルギーの状態 (h : 高エネルギー, l : 低エネルギー) を示す。

本論では、6 種類の鉱物試料を対象に、管電圧を 140 kV および 100 kV として CT 画像解析を行い、密度  $\rho$  と有効原子番号  $Z_c$  について、それぞれの真値 ( $\rho_t$  および  $Z_{ct}$ , Table 2-1) と式 (2-6) および式 (2-7) から得られる計算値 ( $\rho_c$  および  $Z_{cc}$ ) との比較を行い、密度および有効原子番号の推定に有効な CT 値の代表値について検討した。

具体的には、試料中央部付近で抽出した 2 次元の CT 画像を用い、2 次元画像の中央付近の任意の断面線および 2 次元画像全体の 2 ケースを解析対象とし、各ケースの中央値、平均値および最頻値を算出した。また、土山ほか (2000) および Tsuchiyama et al. (2002) では、CT 値を用いた定量解析を行う際、線質硬化の影響を受けて CT 値が高い試料縁辺部を除き、CT 値がほぼ均質になる試料中心部付近のみを対象としていることを踏まえ、本論においても任意の断面線および 2 次元画像全体の各ケースについて、全領域を対象とする場合と試料中央部付近のみを対象とする場合について検討した。

以上を踏まえ、全 4 ケースについて中央値、平均値および最頻値を算出し、真値 ( $\rho_t$  および  $Z_{ct}$ ) の再現性が最も良好な CT 値を CT 画像の代表値として選定することとした。なお、密度の真値  $\rho_t$  は、石英、方解石、蛍石、菱マンガン鉱および赤鉄鉱については Deer et al. (2013)、クリプトメレンについては Anthony et al. (1997) の値を採用した。

## 2-2 撮影条件

本論では、(一財) 電力中央研究所 (以下では CRIEPI と略称する) の医療用 X 線 CT スキャナとして、第 3 世代の 160 列マルチスライスヘリカル CT (キヤノンメディカルシステムズ(株)製 Aquilion Precision TSX-304A) (Fig. 2-2a) を使用した。

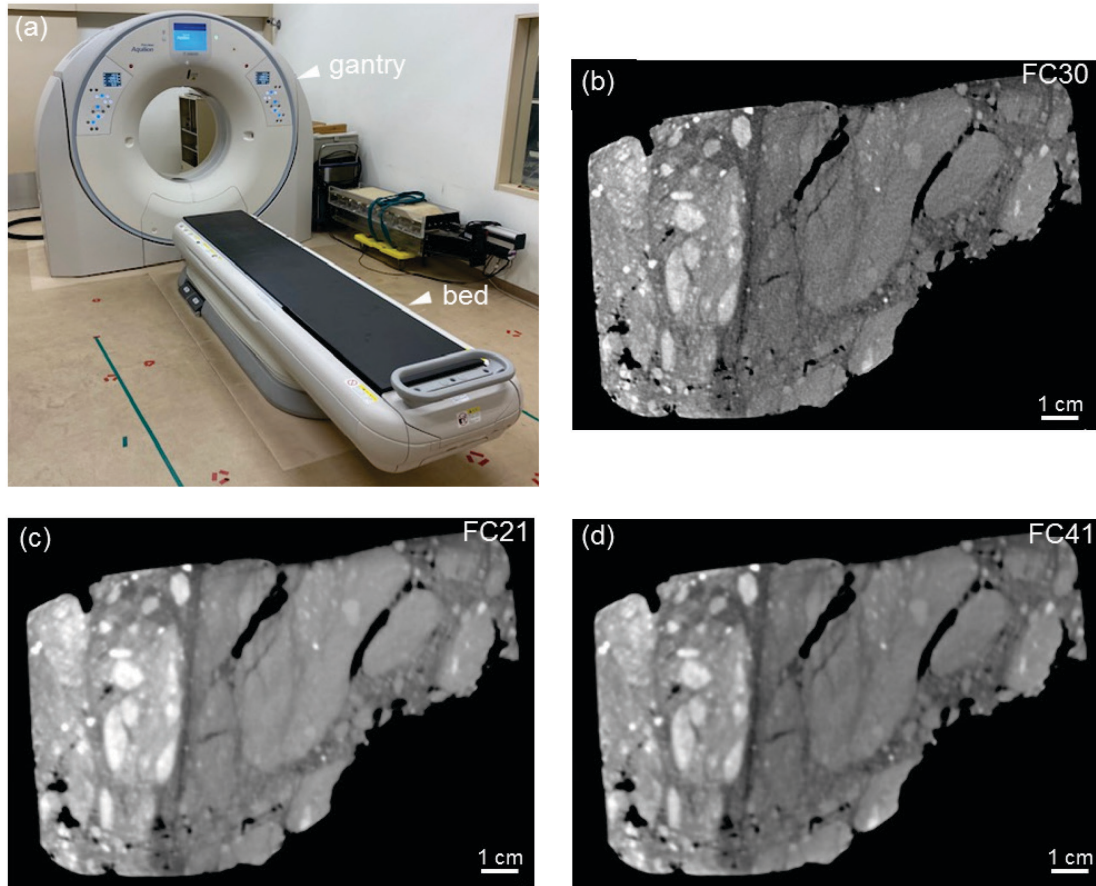


Fig. 2-2. (a) Medical X-ray CT system used in this study. (b, c, d) Investigation of proper reconstruction function for X-ray CT image analyses of rock samples using a fault rock sample. (b) FC30, (c) FC21, (d) FC41.

X線源はWをターゲット、焦点サイズは $0.4 \times 0.5 \text{ mm}$ 、スキャナのスライス厚は $0.25 \text{ mm}$ であり、本章における鉱物試料を用いたCT画像の1ピクセルのサイズは $0.059 \sim 0.205 \text{ mm}$ とした (Table 2-1).

管電圧は、Dual Energy法による検討を行うため、本装置の上限 $140 \text{ kV}$ および $100 \text{ kV}$ の2種類とした。一方、管電流時間積は、装置の帯熱によりCT画像の取得作業に支障をきたさないこと、および画像ノイズを極力低減することを勘案して $300 \text{ mAs}$ とした。

画像の再構成には逐次近似応用再構成法 (Hybrid IR法) のAIDR 3Dを用いた。本装置には、骨、頭部、腹部等の人体の各構成要素に応じた画像の再構成関数が設定されており、頭部については、頭蓋骨と脳との密度差により発生する線質硬化に対応するため、「BHC (Beam Hardening Control) 付」と「BHC 無」のいずれかを選択できるように設定されている。本論では、骨と頭部のCT値が比較的岩石試料に近いことに着目し、FC30 (骨, BHC 無), FC21 (頭部, BHC 有), FC41 (頭部, BHC 無) の3種類の関数を用いて、岩石試料の

X 線 CT 画像の再解析に適切な再構成関数について検討した (Figs. 2-2b-d). その結果, FC30 (骨, BHC 無) で取得した CT 画像の解像度が最も高く, 断層岩の詳細観察に適していることから, 本論で使用する画像の再構成関数は FC30 (骨, BHC 無) とした.

以上の撮影条件に基づいて各試料の 3 次元画像を取得し, 試料中央部付近の任意の 2 次元断面の CT 画像 (1,024 × 1,024 ピクセル) を抽出した.

### 2-3 X 線の実効エネルギーおよび水の線減弱係数 $\mu_w$

日本規格協会 (2013) によれば, 白色 X 線の実効エネルギーは, X 線の強度が物質によって 1/2 に減弱する透過厚さ (半価層) における線減弱係数に対応する単一の X 線エネルギー, すなわち, 半価層が等しい単色 X 線のエネルギーとして定義付けられる.

半価層の厚さ  $S_{0.5}$  は式 (2-1) に  $I/I_0 = 0.5$  を代入することにより次式で示される.

$$S_{0.5} = \ln 2 / \mu = 0.693 / \mu \quad (2-8)$$

本論では, アルミ板を用いた固定照射法により各管電圧の半価層の厚さを測定した結果, 140 kV は 10.0 cm, 100 kV は 7.87 cm である (Fig. 2-3a).

次に, 測定した半価層の厚さ  $S_{0.5}$  に対応する X 線の実効エネルギーを算出するため, Hubbell (1982) に示されたアルミニウムに関する光子エネルギーと質量減弱係数  $\mu/\rho$  との関係に基づいて検討した. 具体的には, アルミニウムの密度を  $2.7 \text{ g/cm}^3$  とし各光子エネルギーに対応する線減弱係数  $\mu$  を算出し, 算出した  $\mu$  を式 (2-8) に代入して光子エネルギーとアルミニウムの半価層の厚さの関係について整理した (Fig. 2-3b). 最後に, Fig. 2-3b と固定照射法により算出した半価層の厚さの対応関係について検討した結果, 各管電圧の実効エネルギーは 140 kV は 64.1 keV, 100 kV は 53.7 keV である.

水の線減弱係数  $\mu_w$  は, アメリカ国立標準技術研究所より公開されたエネルギー別の水の線減弱係数 (NIST, 2004) および実効エネルギーの測定結果を踏まえ, 140 kV の場合は  $0.201 \text{ cm}^{-1}$ , 100 kV の場合は  $0.219 \text{ cm}^{-1}$  とした.

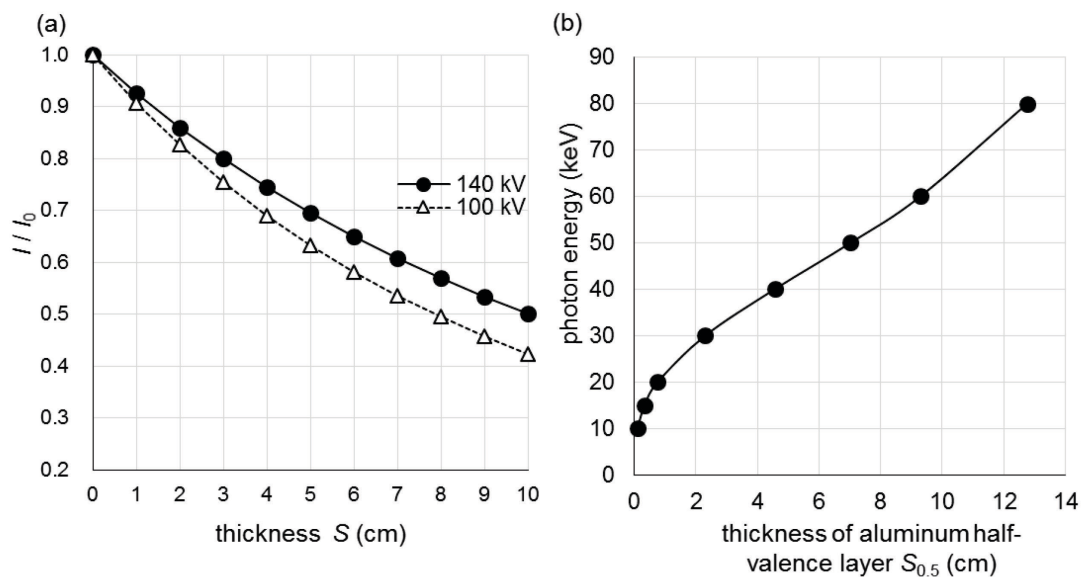


Fig. 2-3. (a)  $I/I_0$  versus thickness of aluminium  $S$ . (b) photon energy versus thickness of aluminum half-valence layer  $S_{0.5}$ .

## 2-4 CT 画像解析結果

全 6 試料の CT 画像および CT 画像解析結果を Fig. 2-4～Fig. 2-9 に、各ケースで算出した中央値、平均値および最頻値を Table 2-2 および Fig. 2-10 に示す。

密度および有効原子番号の増大に伴い、試料縁辺部における線質硬化の影響が増大する傾向が見られるが (Fig. 2-4～Fig. 2-9 の c, d および g)、石英、方解石および蛍石については解析対象領域の範囲の設定にかかわらず、全 4 ケースの中央値、平均値および最頻値はほぼ同等である (Fig. 2-10)。このことは、CT 値のヒストグラムの分布形状が概ね正規分布を示すことと整合している (Fig. 2-4～Fig. 2-9 の f および i)。

一方、菱マンガン鉱、クリプトメレンおよび赤鉄鉱については、石英、方解石および蛍石に比べて各算出値のばらつきが大きい。試料縁辺部を除いたケース 2 およびケース 4 では、全領域を対象としたケース 1 およびケース 3 に比べてばらつきが小さく、各算出値も概ね同程度になる (Fig. 2-10)。このことは、試料縁辺部を除くことにより線質硬化の影響が軽減されていると考えられる。算出値のばらつきの主な要因としては、菱マンガン鉱は試料中に含まれる夾雑物の影響、クリプトメレンは試料中の空隙の影響、赤鉄鉱は X 線エネルギーの低減の影響が考えられる。

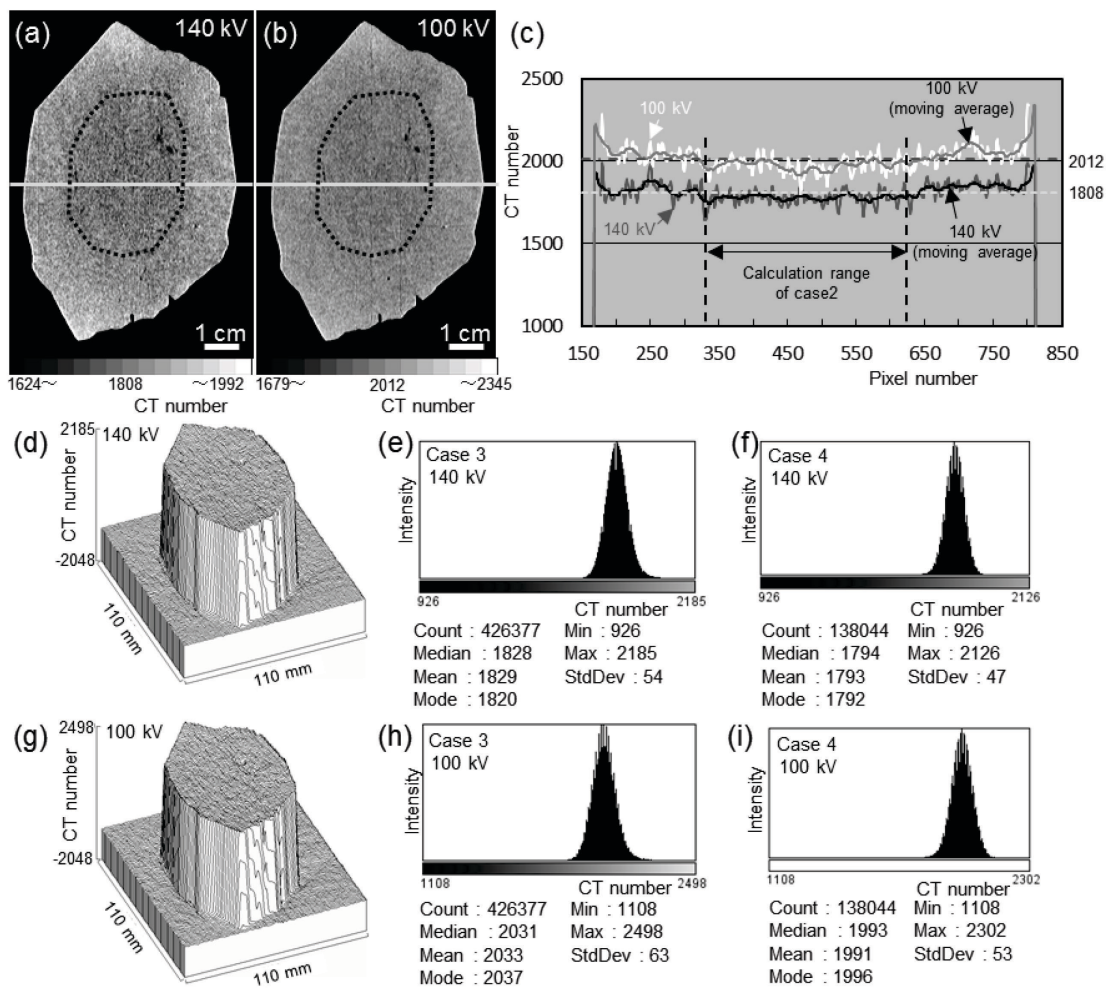


Fig. 2-4. X-ray CT image analysis result of quartz (No. a). (a) and (b) CT image of quartz (No.a) for which tube voltage was maintained at (a) 140 kV and (b) 100 kV. (c) Traverses of CT numbers in images (a) and (b), along superposed light-grey lines. Each CT number in Case 1 was calculated for all data on the lines, meanwhile, in Case 2 it was calculated for the area excluding the peripheral area. The moving average value was calculated by the centralized moving average of 10 points on the left and right. The dashed line shows the median of 140 kV, and the alternate long and short dash line shows the median of 100 kV. (d) Distribution chart of CT number of the 2D-CT image of 140 kV (a). (e) and (f) CT number histogram of (e) the whole area of 2D-CT image (140 kV) and (f) near the central part (within the black dotted line) excluding the peripheral area. (g) Distribution chart of CT number of the 2D-CT image of 100 kV (b). (h) and (i) CT number histogram of (h) the whole area of 2D-CT image (100 kV) and (i) near the central part (within the black dotted line) excluding the peripheral area.

線質硬化が大きい試料縁辺部の領域は、任意の断面線 (ケース 1,2) では CT 値の分布状況と単純移動平均 (左右 10 点の中心化移動平均) との比較 (Fig. 2-4~Fig. 2-9 の c) により設定し、2 次元画像全体 (ケース 3, 4) では CT 画像の明るさの変化を肉眼観察により確認し、個別に設定した (Fig. 2-4~Fig. 2-9 の a および b の破線で設定した範囲を対象)。このうち、任意の断面線 (ケース 1,2) において設定した解析対象範囲と解析対象から除外する



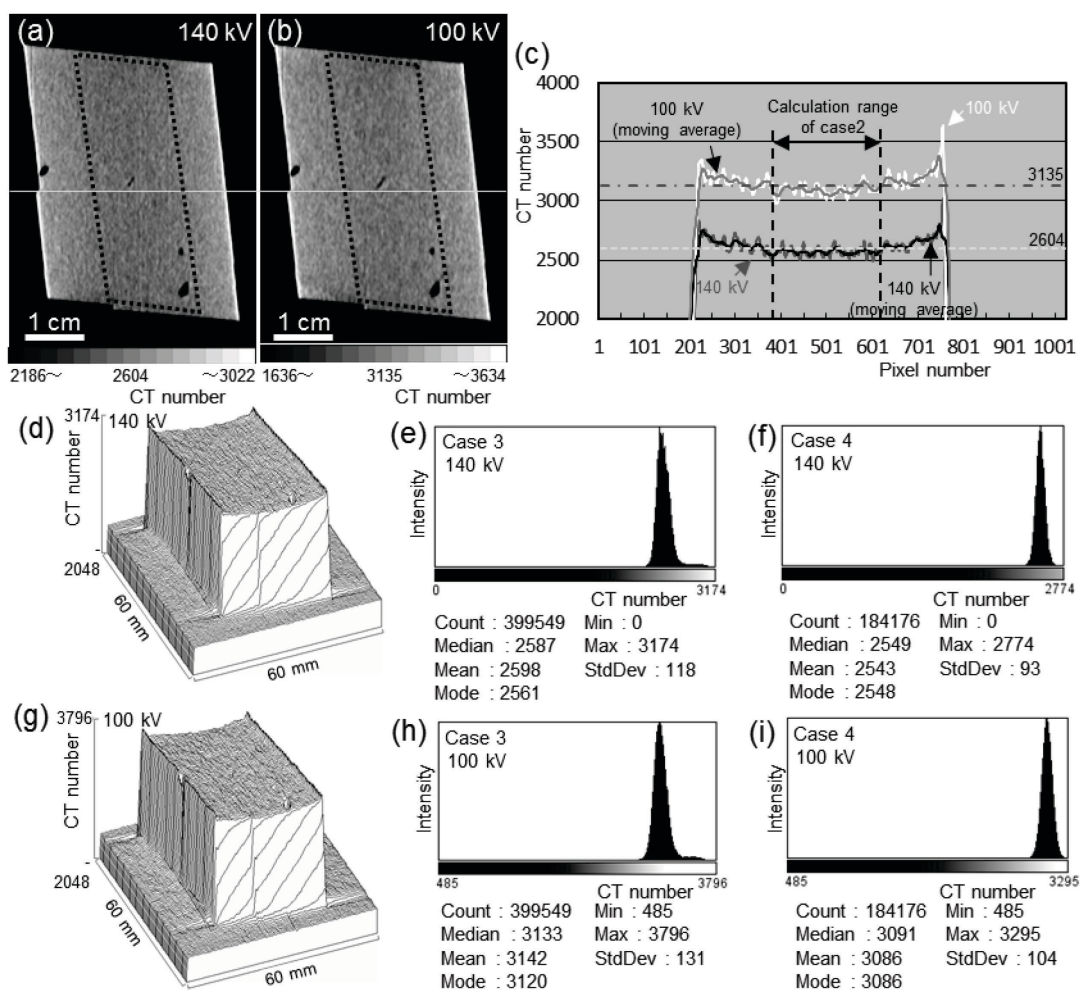


Fig. 2-5. X-ray CT image analysis result of calcite (No. b). (a) – (i) are the same way of Figure 2.

範囲との境界は、断面線全体を対象とした場合の中央値と整合していることから (Fig. 2-4 ~ Fig. 2-9 の c), 線質硬化の影響範囲の設定には任意の断面線全体を対象として算出した CT 値の中央値が目安になると考えられる。

## 2-5 X線の透過性およびコントラスト分解能

Tschiyama et al. (2002) では、マイクロ CT により取得した CT 画像を用いた定量解析を行うに際し、X線の透過性について検討し、X線エネルギーが低い場合では密度や有効原子番号が大きい試料の CT 値は、理論的に期待される CT 値に比べて小さくなることが報告されている。このように、X線の透過が不十分な試料の場合の CT 値が、理論的に期待

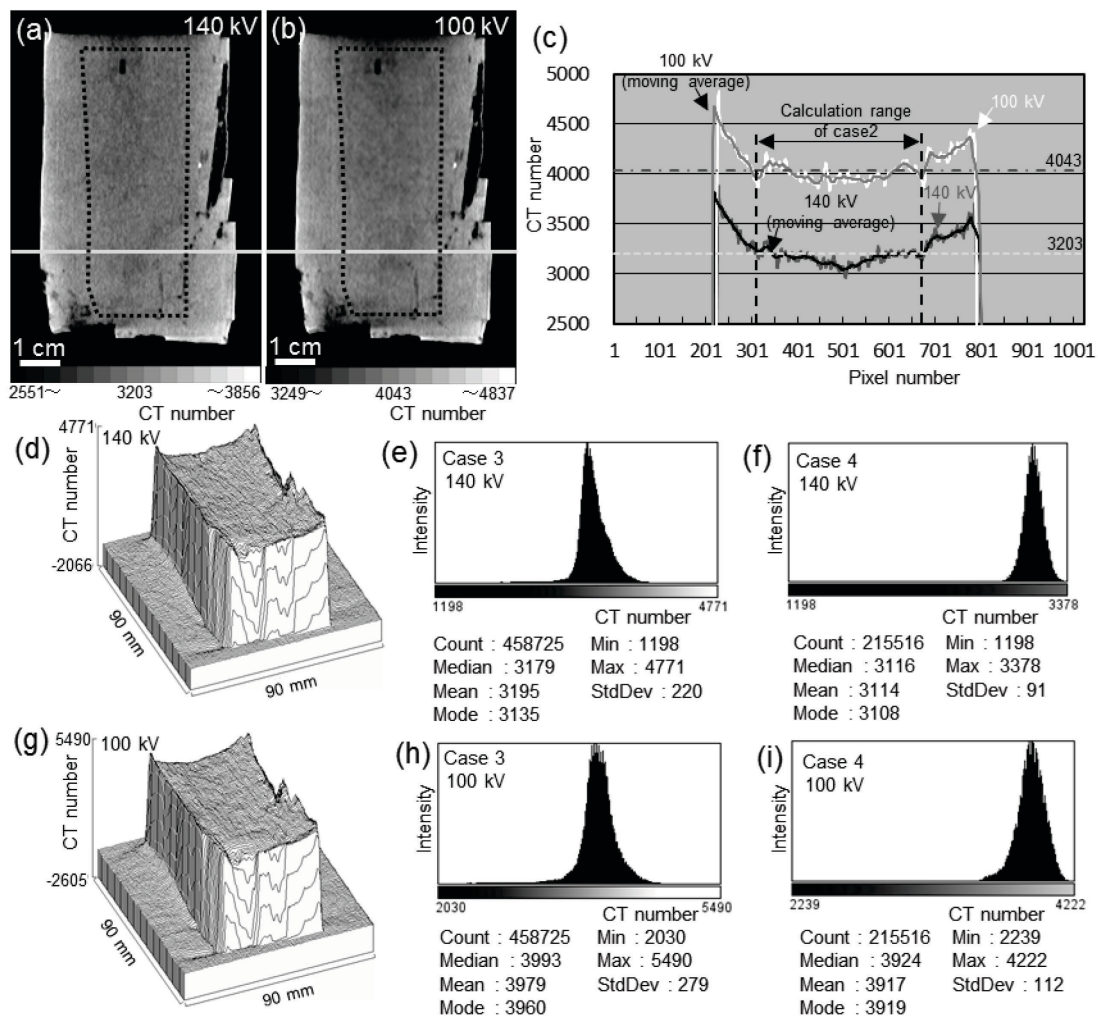


Fig. 2-6. X-ray CT image analysis result of fluorite (No. c). (a) – (i) are the same way of Figure 2.

される CT 値に比べて小さくなる現象は、単色 X 線を用いた検討でも知られている (例えば, Tsuchiyama et al., 2005). また, Tsuchiyama et al. (2005) では, 単色 X 線を用いて取得した CT 画像を用いた定量解析を行うに際し, 実験で得られた線減弱係数の最頻値と標準偏差との関係に基づいて, CT 画像のコントラスト分解能について検討している.

本論においても, Tsuchiyama et al. (2002) および Tsuchiyama et al. (2005) に示された手法に基づいて, 医療用 CT により取得した各試料の CT 画像の X 線の透過性およびコントラスト分解能について検討した. なお, 理論値  $\mu$  は中野ほか (2000) を参照し, 各管電圧の実効エネルギーを考慮して算出した.

X 線の透過性に関する検討は, 石英を標準鉱物として CT 値および理論値  $\mu_T$  を規格化して検討した結果,  $\mu_T/\mu_T(\text{quartz})=3.24$  以下の石英, 方解石および蛍石では, CT 値と理論値

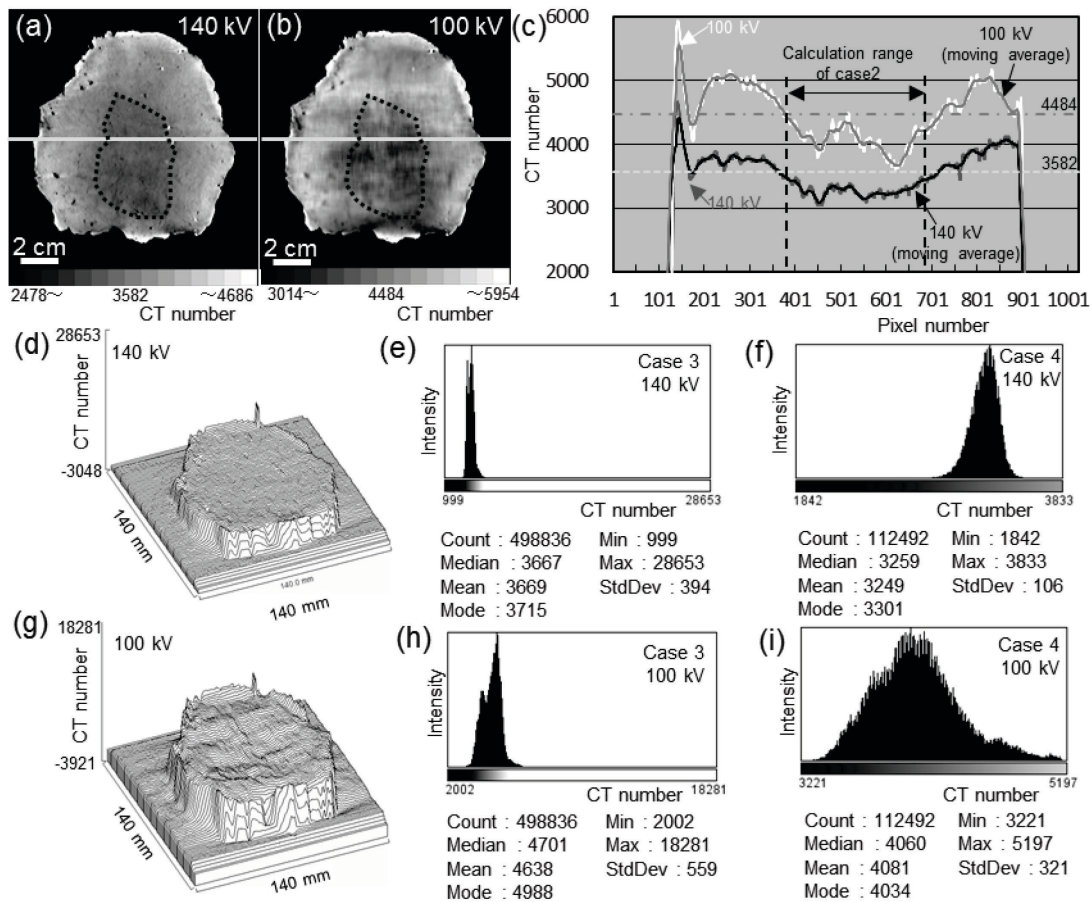


Fig. 2-7. X-ray CT image analysis result of rhodochrosite (No. d). (a) – (i) are the same way of Figure 2.

$\mu_T$  の関係は直線回帰式で近似 ( $\gamma=0.989$ ) される (Table 2-3, Fig. 2-11a). 一方,  $\mu_T/\mu_T(\text{quartz}) = 6.51$  以上の菱マンガン鉱, クリプトメレンおよび赤鉄鉱では, 直線回帰式から離れるものの, 対数回帰式 ( $\gamma=0.921$ ) で近似される (Table 2-3, Fig. 2-11b). このことから, 菱マンガン鉱, クリプトメレンおよび赤鉄鉱では, 石英, 方解石および螢石に比べて X 線エネルギーが指数関数的に低減することが示唆される. なお, 菱マンガン鉱は, 他の鉱物とは異なり全ケースにおいて規格化した CT 値が回帰式を下回るが, これは夾雑物の影響を受けていると考えられる.

コントラスト分機能に関する検討は, Tsuchiyama et al. (2005) を参考とし, 最頻値  $N_{CTMode}$  を用いて標準偏差  $\sigma \times 2^{0.5} / N_{CTMode}$  より算出した結果, 全領域を対象としたケース 1 およびケース 3 では, 石英, 方解石および螢石のコントラスト分解能は 0.1 以下であるが, 菱マンガン鉱, クリプトメレンおよび赤鉄鉱では 0.2~0.5 程度となり, コントラスト分解能が

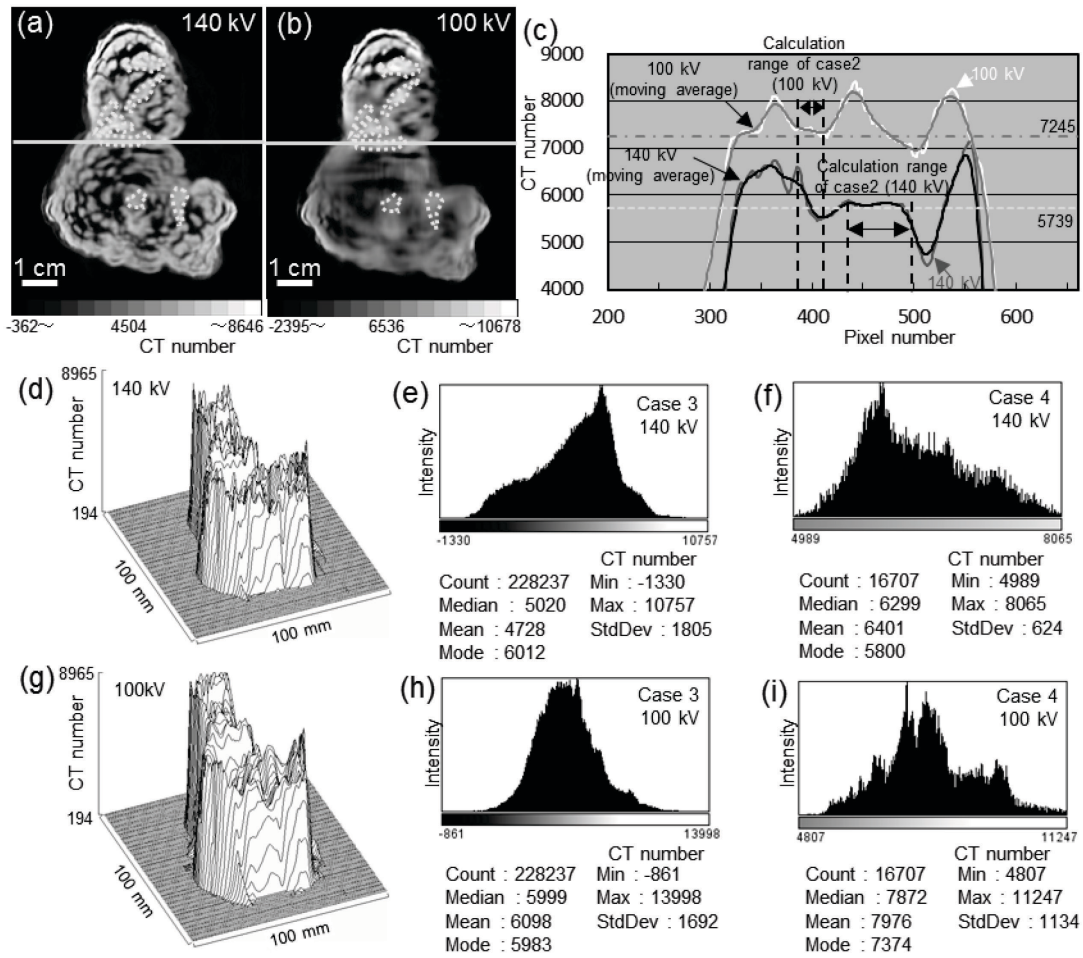


Fig. 2-8. X-ray CT image analysis result of cryptomelane (No. e). (a) – (i) are the same way of Figure 2.

増大する。一方、試料縁辺部を除いた領域を対象としたケース2およびケース4では、空隙の影響を受けるクリプトメレンを除いて概ね0.1程度以下である (Table 2-2, Fig. 2-12).

## 2-6 CT 画像の代表 CT 値

Dual energy 法により CT 画像の代表 CT 値について検討した結果を Table 2-4, 各検討結果の代表例 (ケース1およびケース4) を Fig. 2-13~Fig. 2-15 に示す。

最初に, Table 2-2 に示す管電圧 140 kV および 100 kV の CT 値から, 各試料の管電圧別線減弱係数  $\mu$  を次式により算出した。

$$\mu = \left( \frac{N_{CT}}{1,000} + 1 \right) \times \mu_w \quad (2-9)$$

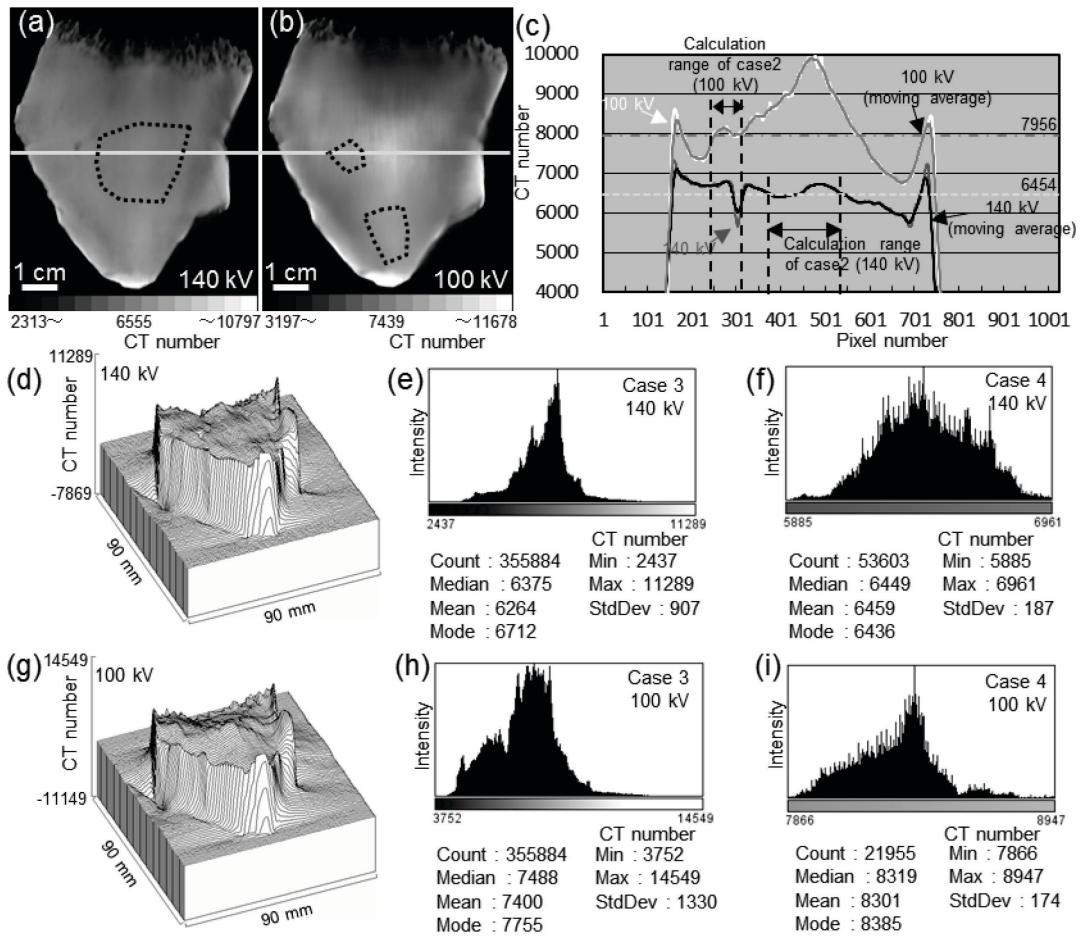


Fig. 2-9. X-ray CT image analysis result of hematite (No. f). (a) – (i) are the same way of Figure 2.

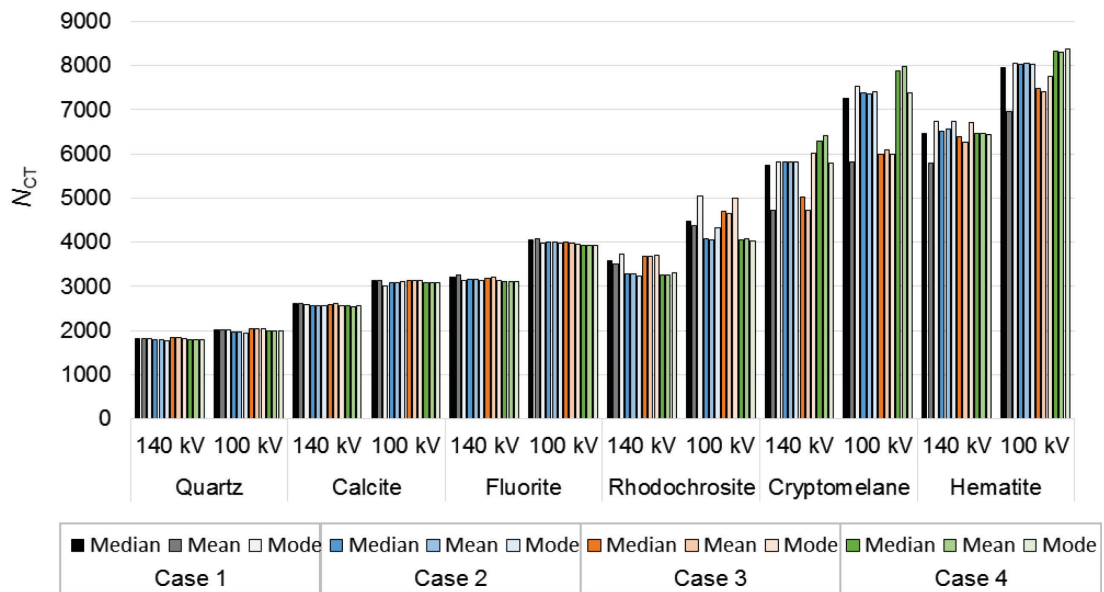


Fig. 2-10. Results of CT values of each mineral sample for each case calculated by CT image analysis.

Table 2-2. Results of CT values of each mineral sample calculated by CT image analysis

Calculation range	Case *1	Results	Quartz		Calcite		Fluorite		Rhodochrosite		Cryptomelane		Hematite	
			140 kV	100 kV	140 kV	100 kV	140 kV	100 kV	140 kV	100 kV	140 kV	100 kV	140 kV	100 kV
Arbitrary section line	Case-1	Median	1808	2012	2604	3135	3203	4043	3582	4484	5739	7245	6454	7956
		Mean	1808	2013	2607	3132	3248	4079	3505	4367	4711	5811	5783	6967
		Mode	1809	2006	2574	3018	3139	3974	3734	5053	5806	7528	6731	8039
		Standard dev.	52	64	107	148	160	177	595	819	2140	2697	1850	2671
		Contrast resolution *2	0.04	0.05	0.06	0.07	0.07	0.06	0.23	0.23	0.52	0.51	0.39	0.47
		Number of data	625	625	553	554	564	565	791	801	343	377	685	735
	Case-2	Median	1782	1973	2564	3091	3162	3992	3271	4081	5808	7371	6514	8032
		Mean	1779	1974	2569	3091	3157	3999	3275	4061	5814	7354	6551	8040
		Mode	1771	1941	2564	3096	3139	3974	3240	4317	5806	7404	6728	8032
		Standard dev.	40	48	39	47	64	73	101	204	33	59	120	79
		Contrast resolution *2	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.07	0.01	0.01	0.03	0.01
		Number of data	301	301	231	231	357	357	295	295	61	31	163	67
Case-3	Median	1828	2031	2587	3133	3179	3993	3667	4701	5020	5999	6375	7488	
	Mean	1829	2033	2598	3142	3195	3979	3669	4638	4728	6098	6264	7400	
	Mode	1820	2037	2561	3120	3135	3960	3715	4988	6012	5983	6712	7755	
	Standard dev.	54	63	118	131	220	279	394	559	1805	1692	907	1330	
	Contrast resolution *2	0.04	0.04	0.07	0.06	0.1	0.1	0.15	0.16	0.42	0.4	0.19	0.24	
	Number of data	426377	426377	399549	399549	458725	458725	498836	498836	228237	228237	355884	355884	
2D-cross section	Case-1	Median	1794	1993	2549	3091	3116	3924	3259	4060	6299	7872	6449	8319
		Mean	1793	1991	2545	3086	3114	3917	3249	4081	6401	7976	6459	8301
		Mode	1792	1996	2548	3086	3108	3919	3301	4034	5800	7374	6436	8385
	Case-4	Standard dev.	47	53	93	104	91	112	106	321	624	1134	187	174
		Contrast resolution *2	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.11	0.15	0.22	0.04	0.03
		Number of data	138044	138044	184176	184176	215516	215516	112492	112492	16707	16707	53603	21955

\*1 Case 1 and case 3 are the cases where all data of arbitrary cross section or 2D cross section is the calculation target, and case 2 and case 4 are the cases where the data of the region excluding the peripheral part affected by the beam hardening is the calculation target.

\*2 The contrast resolution of CT images  $\sigma \times 2^{0.5}$  is normalized by the mode value.

次に、各ケースで算出した CT 値の中央値、平均値および最頻値を用いて  $\mu/\rho_t$  と有効原子番号  $Z_e^{3,8}$  との関係を整理し、直線回帰式より各試料の管電圧別定数 A(回帰式の Y 切片) および B(回帰式の勾配) を算出した (Fig. 2-13).

最後に、算出された A および B を式 (2-6) および式 (2-7) に代入し、密度  $\rho$  と有効原子番号  $Z_e$  について、それぞれの真値 ( $\rho_t$  および  $Z_{et}$ ) と計算値 ( $\rho_c$  および  $Z_{ec}$ ) との比較を行った (Figs. 2-14, 2-15).

以上のとおり検討した結果、密度および有効原子番号を最も良好に推定できるケースは、2次元 CT 画像の試料中心部を対象としたケース 4 であり、中央値、平均値および最頻値のいずれの算定値も同程度の再現性を有するが、最も良好な再現性が得られるのは最頻値 (以下、ケース 4 の  $N_{CTMode}$ ) である。この検討結果は、試料縁辺部の CT 値が高い領域を除くことにより線質硬化の影響が軽減されることを意味していると考えられる。また、ケー

Table 2-3. Relation between normalized CT value,  $N_{CT} / N_{CT}(\text{quartz})$ , and normalized  $\mu / \mu(\text{quartz})$

Tube voltage	Material	$\mu / \mu(\text{quartz})$	$N_{CT} / N_{CT}(\text{quartz})$											
			Case-1			Case-2			Case-3			Case-4		
			Median	Mean	Mode	Median	Mean	Mode	Median	Mean	Mode	Median	Mean	Mode
140 kV	Quartz	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Calcite	2.25	1.44	1.44	1.42	1.44	1.44	1.45	1.42	1.42	1.41	1.42	1.42	1.42
	Fluorite	3.00	1.77	1.80	1.74	1.77	1.77	1.77	1.74	1.75	1.72	1.74	1.74	1.73
	Rhodochrosite	6.51	1.98	1.94	2.06	1.84	1.84	1.83	2.01	2.01	2.04	1.82	1.81	1.84
	Cryptomelane	8.89	3.17	2.61	3.21	3.26	3.27	3.28	2.75	2.59	3.30	3.51	3.57	3.24
	Hematite	13.38	3.57	3.20	3.72	3.66	3.68	3.80	3.49	3.42	3.69	3.59	3.60	3.59
	100 kV	Quartz	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Calcite	2.40	1.56	1.56	1.50	1.57	1.57	1.60	1.54	1.55	1.53	1.55	1.55	1.55	
Fluorite	3.24	2.01	2.03	1.98	2.02	2.03	2.05	1.97	1.96	1.94	1.97	1.97	1.96	
Rhodochrosite	7.20	2.23	2.17	2.52	2.07	2.06	2.22	2.31	2.28	2.45	2.04	2.05	2.02	
Cryptomelane	9.92	3.60	2.89	3.75	3.74	3.73	3.81	2.95	3.00	2.94	3.95	4.01	3.69	
Hematite	15.02	3.95	3.46	4.01	4.07	4.07	4.14	3.69	3.64	3.81	4.17	4.17	4.20	

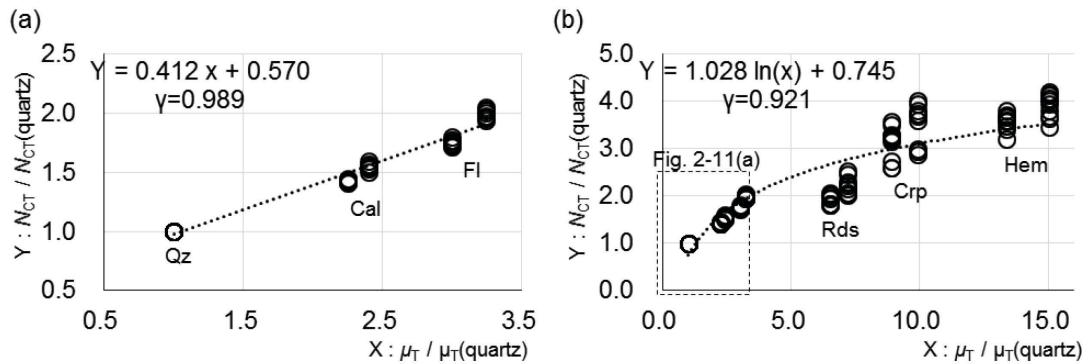


Fig. 2-11. Relation between normalized CT number,  $N_{CT} / N_{CT}(\text{quartz})$ , and normalized linear attenuation coefficient,  $\mu_T / \mu_T(\text{quartz})$  of (a) quartz, calcite and fluorite and (b) all samples. Abbreviations: Qz: quartz; Cal: calcite; Fl: fluorite; Rds: rhodochrosite; Crp: cryptomelane; Hem: hematite.

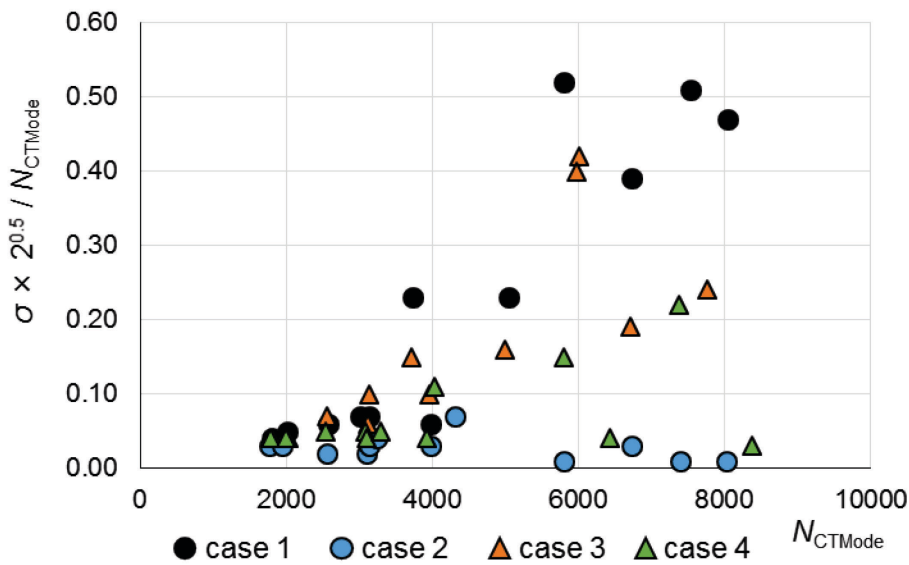


Fig. 2-12. The degree of contrast resolution defined by the relation between  $N_{CTMode}$  and  $\sigma \times 2^{0.5} / N_{CTMode}$ .

Table 2-4. Results of typical CT value by dual energy method

Case	Calculated value	Material	140 kV			100 kV			$\rho_c$	$\frac{\rho_c}{\alpha_1} \frac{\beta_1 + \beta_2}{\gamma}$	$Z_{ec}^{3.8}$	$Z_{ec}^{3.8} = \alpha_2 Z_{et}^{3.8} + \beta_2$										
			$N_{CT}$	$\mu$	$\mu/\rho_l$	A	B	$\gamma$					$N_{CT}$	$\mu$	$\mu/\rho_l$	A	B	$\gamma$				
1	Median	Quartz	1808	0.564	0.213			2012	0.660	0.249			-48645									
		Calcite	2604	0.724	0.268			3135	0.906	0.336			37537									
		Fluorite	3203	0.845	0.264	0.233	$3.87 \times 10^{-7}$	0.715	4043	1.104	0.345	0.284	$6.86 \times 10^{-7}$	0.749	3.05	1.025	-0.098	0.981	113186	0.985	2242	0.766
		Rhodochrosite	3582	0.921	0.249				4484	1.201	0.325			109383								
		Cryptomelane	5739	1.355	0.305				7245	1.806	0.407			156014								
		Hematite	6454	1.498	0.283				7956	1.961	0.370			117151								
		Quartz	1808	0.564	0.213				2013	0.660	0.249			-100139								
		Calcite	2607	0.725	0.269				3132	0.905	0.335			39643								
		Fluorite	3248	0.854	0.267	0.242	$1.24 \times 10^{-7}$	0.343	4079	1.112	0.348	0.297	$2.83 \times 10^{-7}$	0.456	3.28	0.997	0.005	0.987	149007	1.044	-4365	0.622
		Rhodochrosite	3505	0.906	0.245				4367	1.175	0.318			137925								
Cryptomelane	4711	1.148	0.259				5811	1.492	0.336			143756										
Hematite	5783	1.363	0.257				6967	1.745	0.329			103213										
1	Mean	Quartz	1809	0.565	0.213			2006	0.658	0.248			-49595									
		Calcite	2574	0.718	0.266			3018	0.880	0.326			2787									
		Fluorite	3139	0.832	0.260	0.229	$4.66 \times 10^{-7}$	0.816	3974	1.089	0.340	0.280	$8.11 \times 10^{-7}$	0.812	3.03	1.145	-0.509	0.904	98166	0.985	2242	0.766
		Rhodochrosite	3734	0.952	0.257			5053	1.326	0.358			240626									
		Cryptomelane	5806	1.368	0.308			7528	1.868	0.421			187195									
		Hematite	6731	1.554	0.293			8039	1.980	0.374			54204									
		Quartz	1782	0.559	0.211			1973	0.651	0.246			-46741									
		Calcite	2564	0.716	0.265			3091	0.896	0.332			39625									
		Fluorite	3162	0.837	0.262	0.228	$4.10 \times 10^{-7}$	0.674	3992	1.093	0.342	0.277	$7.23 \times 10^{-7}$	0.722	3.06	1.043	-0.161	0.969	110527	0.985	1849	0.767
		Rhodochrosite	3271	0.858	0.232			4081	1.113	0.301			98156									
Cryptomelane	5808	1.368	0.308			7371	1.833	0.413			164137											
Hematite	6514	1.510	0.285			8032	1.978	0.373			116524											
2	Mean	Quartz	1779	0.559	0.211			1974	0.651	0.246			-43948									
		Calcite	2569	0.717	0.266			3091	0.896	0.332			43966									
		Fluorite	3157	0.836	0.261	0.228	$4.17 \times 10^{-7}$	0.677	3999	1.095	0.342	0.276	$7.24 \times 10^{-7}$	0.722	2.97	1.046	-0.202	0.970	127307	0.959	9263	0.728
		Rhodochrosite	3275	0.859	0.232			4061	1.108	0.299			97198									
		Cryptomelane	5814	1.370	0.309			7354	1.830	0.412			171001									
		Hematite	6551	1.518	0.286			8040	1.980	0.374			118783									
		Quartz	1771	0.557	0.210			1941	0.644	0.243			-70279									
		Calcite	2564	0.716	0.265			3096	0.897	0.332			32393									
		Fluorite	3139	0.832	0.260	0.225	$4.57 \times 10^{-7}$	0.713	3974	1.089	0.340	0.276	$7.54 \times 10^{-7}$	0.755	2.98	1.16	-0.593	0.881	118723	1.005	15810	0.513
		Rhodochrosite	3240	0.852	0.230			4317	1.164	0.315			242151									
Cryptomelane	5806	1.368	0.308			7404	1.840	0.414			191152											
Hematite	6728	1.553	0.293			8032	1.978	0.373			61502											



Table 2-4. (Continued)

	Quartz	1828	0.568	0.214	2031	0.664	0.251	3.11	-179124
	Calcite	2587	0.721	0.267	3133	0.905	0.335	2.92	41730
	Fluorite	3179	0.840	0.263	3993	1.093	0.342	2.75	238606
Median	Rhodochrosite	3667	0.938	0.254	4701	1.249	0.338	2.60	428129
	Cryptomelane	5020	1.210	0.273	5999	1.533	0.345	4.66	84552
	Hematite	6375	1.482	0.280	7488	1.859	0.351	6.01	38910
	Quartz	1829	0.569	0.215	2033	0.664	0.251	2.61	-94063
	Calcite	2598	0.723	0.268	3142	0.907	0.336	2.94	38804
	Fluorite	3195	0.843	0.263	3979	1.090	0.341	3.23	108903
Mean	Rhodochrosite	3669	0.938	0.254	4638	1.235	0.334	3.46	156312
	Cryptomelane	4728	1.151	0.259	6098	1.554	0.350	4.01	230199
	Hematite	6264	1.460	0.275	7400	1.840	0.347	5.88	48806
	Quartz	1820	0.567	0.214	2037	0.665	0.251	1.68	228049
	Calcite	2561	0.716	0.265	3120	0.902	0.334	3.06	11183
	Fluorite	3135	0.831	0.260	3960	1.086	0.339	4.13	-58880
Mode	Rhodochrosite	3715	0.948	0.256	4988	1.311	0.354	5.79	4.284
	Cryptomelane	6012	1.409	0.317	5983	1.529	0.344	2.33	-137916
	Hematite	6712	1.550	0.292	7755	1.917	0.362	6.08	792392
	Quartz	1794	0.562	0.212	1993	0.655	0.247	2.63	54565
	Calcite	2549	0.713	0.264	3091	0.896	0.332	2.90	-26946
	Fluorite	3116	0.827	0.258	3924	1.078	0.337	3.10	43271
Median	Rhodochrosite	3259	0.856	0.231	4060	1.108	0.299	3.27	88254
	Cryptomelane	6299	1.467	0.330	7872	1.943	0.438	5.30	0.991
	Hematite	6449	1.497	0.282	8319	2.041	0.385	5.02	-3567
	Quartz	1793	0.561	0.212	1991	0.655	0.247	2.61	110923
	Calcite	2545	0.713	0.264	3086	0.895	0.331	2.87	158059
	Fluorite	3114	0.827	0.258	3917	1.077	0.337	3.05	-23063
Mean	Rhodochrosite	3249	0.854	0.231	4081	1.113	0.301	3.14	47435
	Cryptomelane	6401	1.488	0.335	7976	1.966	0.443	5.28	95139
	Hematite	6459	1.499	0.283	8301	2.037	0.384	4.92	1.020
	Quartz	1792	0.561	0.212	1996	0.656	0.248	2.53	1719
	Calcite	2548	0.713	0.264	3086	0.895	0.331	2.88	0.903
	Fluorite	3108	0.826	0.258	3919	1.077	0.337	3.12	96227
Mode	Rhodochrosite	3301	0.865	0.234	4034	1.102	0.298	3.41	116902
	Cryptomelane	5800	1.367	0.308	7374	1.834	0.413	4.87	165533
	Hematite	6436	1.495	0.282	8385	2.055	0.388	5.05	16396
	Quartz	1792	0.561	0.212	1996	0.656	0.248	2.53	-16396
	Calcite	2548	0.713	0.264	3086	0.895	0.331	2.88	48275
	Fluorite	3108	0.826	0.258	3919	1.077	0.337	3.12	48275
Mean	Rhodochrosite	3301	0.865	0.234	4034	1.102	0.298	3.41	92094
	Cryptomelane	5800	1.367	0.308	7374	1.834	0.413	4.87	1.018
	Hematite	6436	1.495	0.282	8385	2.055	0.388	5.05	79.32
	Quartz	1792	0.561	0.212	1996	0.656	0.248	2.53	0.966
	Calcite	2548	0.713	0.264	3086	0.895	0.331	2.88	64447
	Fluorite	3108	0.826	0.258	3919	1.077	0.337	3.12	130686
Mode	Rhodochrosite	3301	0.865	0.234	4034	1.102	0.298	3.41	168282
	Cryptomelane	5800	1.367	0.308	7374	1.834	0.413	4.87	
	Hematite	6436	1.495	0.282	8385	2.055	0.388	5.05	

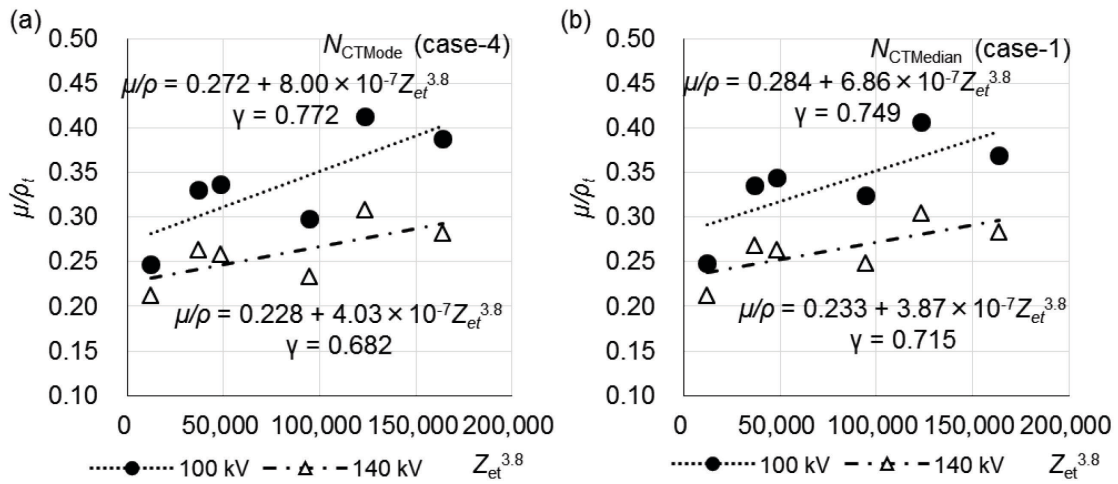


Fig. 2-13. Crossplot of effective atomic number exponent 3.8 versus attenuation  $\mu/\rho$  calculated by (a)  $N_{CTMode}$  (case-4) and (b)  $N_{CTMedian}$  (case-1). Regression lines were determined by least-squares analysis.

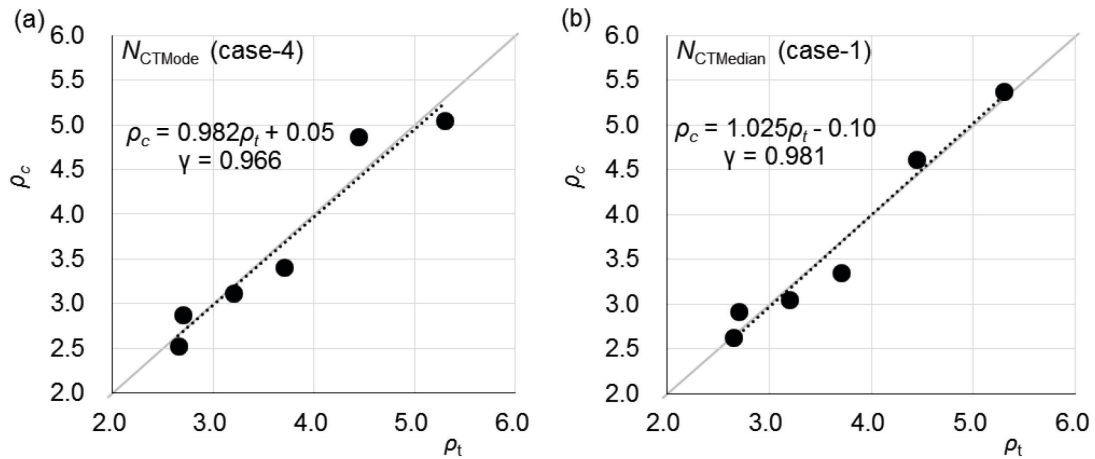


Fig. 2-14. Crossplot of real density versus measured density calculated by (a)  $N_{CTMode}$  (case-4) and (b)  $N_{CTMedian}$  (case-1). Regression lines were determined by least-squares analysis.

ス4に次いで良好な再現性が得られるケースは、任意の横断線の全領域を対象としたケース1であり、密度および有効原子番号の両方の再現性が良好であるのは中央値（以下、ケース1の  $N_{CTMedian}$ ）である。なお、両ケースともにCT値から算出された石英の有効原子番号は負の値となったが、この要因の解明は今後の課題である。

以上より、CT画像の代表CT値の設定には、2次元画像の中心部を対象として最頻値  $N_{CTMode}$  を算出することが有効である。

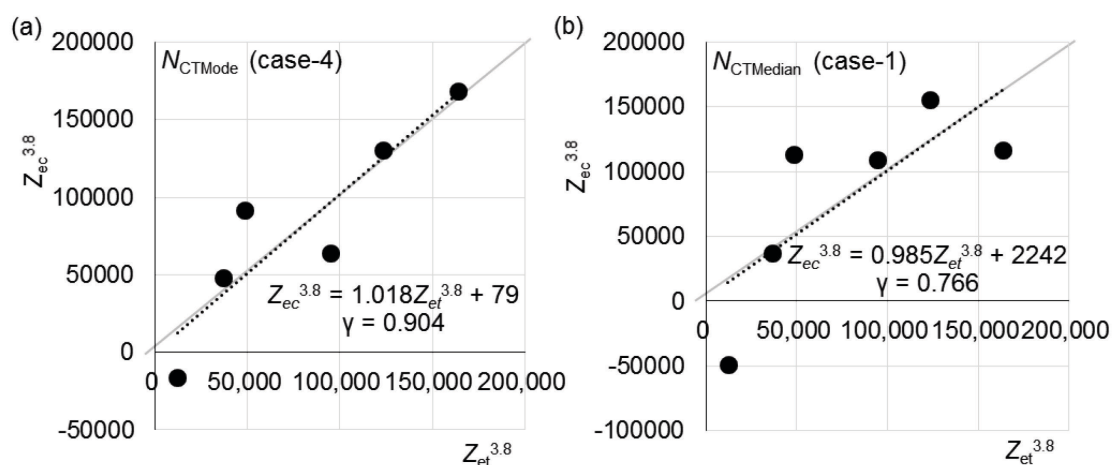


Fig. 2-15. Crossplot of real effective atomic number exponent 3.8 versus measured effective atomic number exponent 3.8 calculated by (a)  $N_{CTMode}$  (case-4) and (b)  $N_{CTMedian}$  (case-1). Regression lines were determined by least-squares analysis.

以降の検討ではケース4の最頻値  $N_{CTMode}$  を対象とするが、ケース1の中央値  $N_{CTMedian}$  についても検討対象とし、その適用性についてあわせて検討する。

## 2-7 $N_{CT}$ と試料厚さとの関係

$N_{CT}$  と試料厚さとの関係に関する検討は、大きさの異なる2個の石英 (Figs. 2-1a, g) を用いて実施した。小さい試料 (Fig. 2-1a) は幅約 6.7 cm, 長さ約 9.1 cm, 大きい試料 (Fig. 2-1g) は幅約 9.4 cm, 長さ約 18.9 cm であり、撮影断面を幅方向および長さ方向とすることにより、X線の透過厚さを変化させて検討した。

各試料の撮影断面積は、Fig. 2-16 に示すとおり約 20~126 cm<sup>2</sup> であり、面積が等価な円の直径 (以下、換算透過厚さ  $t_e$ ) に換算すると約 5.1~12.7 cm に相当する。なお、本検討では、低エネルギーの X 線減弱の影響低減の観点から管電圧 140 kV で撮影した CT 画像を用い、Fig. 2-16 に示す 2 次元 CT 画像の中心部を対象として算出したケース4の最頻値  $N_{CTMode}$  および試料中央部付近の断面線全体を対象として算出したケース1の中央値  $N_{CTMedian}$  を使用した (Table 2-5)。

$N_{CT}$  と  $t_e$  との関係について検討した結果、 $t_e$  が増大するにつれて  $N_{CT}$  が減少し、断面積が6倍、 $t_e$  が2.5倍増大すると  $N_{CT}$  は約8%減少している (Table 2-5, Fig. 2-17)。ケース4の  $N_{CTMode}$  と  $t_e$  との関係は次式で表される。

$$N_{CTMode} = 1866 - 16.7t_e \quad (2-10)$$

また、ケース 4 の  $N_{CTMode}$  の比  $R_N$  と、試料 a の換算透過厚さを基準とした  $t_e$  の比  $R_t$  との関係は

$$R_N = 1.04 - 0.05R_t \quad (2-11)$$

で表される。なお、ケース 1 の  $N_{CTMedian}$  についても、ケース 4 の  $N_{CTMode}$  とほぼ同様の結果が得られた。

今回得られた結果は、X 線の透過厚さが増大するにつれて、高エネルギーの X 線の割合が増大し、X 線の線減弱係数が減少することを意味している。これは、試料の中央部付近が縁辺部に比べて暗くなる線質硬化が起こっていることと整合的である。

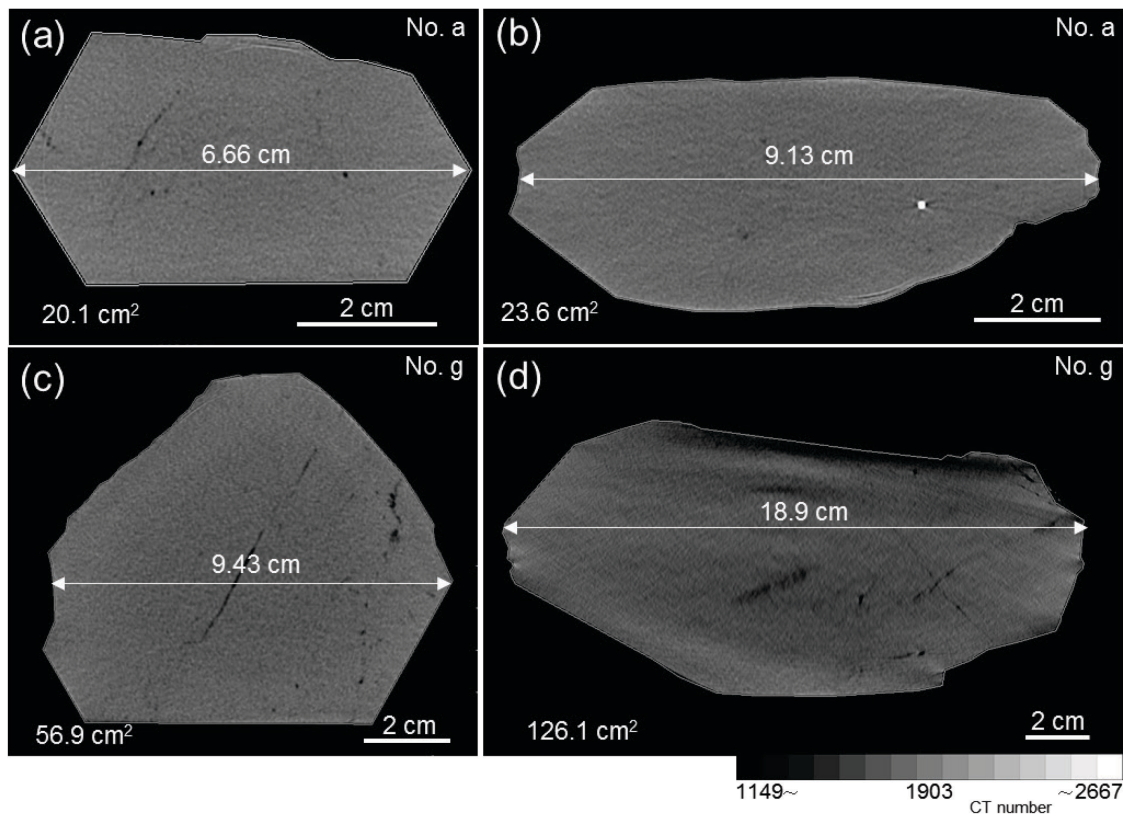


Fig. 2-16. Cross-sections of CT images for studying the effect of sample thickness. (a) and (c) Cross section in width direction. (b) and (d) Longitudinal section. No. a and No. g are the small quartz sample and the large quartz sample, respectively.

Table 2-5. Results on the relationship between CT number and sample thickness

No.	Cross-sectional area (cm <sup>2</sup> )	Equivalent transmission thickness $t_e$ (cm)	Ratio of $t_e$ $R_t$	Case-4 (Mode)		Case-1 (Median)	
				$N_{CT}$	Ratio of $N_{CT}$ $R_N$	$N_{CT}$	Ratio of $N_{CT}$ $R_N$
a	20.1	5.06	1.00	1801	1.00	1805	1.00
b	23.6	5.48	1.08	1764	0.98	1778	0.99
c	56.9	8.51	1.68	1703	0.95	1725	0.96
d	126.1	12.67	2.50	1663	0.92	1674	0.93

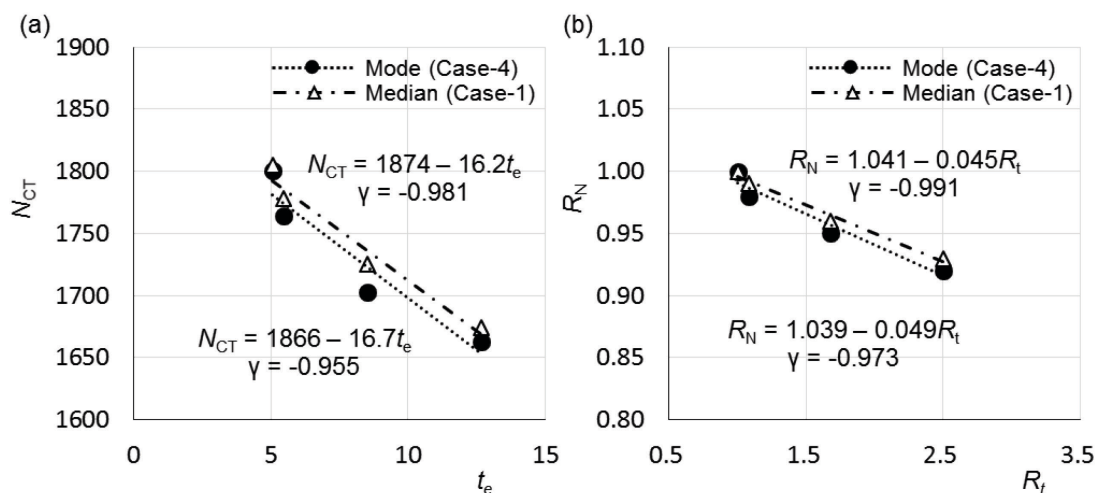


Fig. 2-17. (a) CT number  $N_{CT}$  versus equivalent transmission thickness  $t_e$  and (b) ratio of  $N_{CT}$  versus ratio of  $t_e$ .

## 2-8 鉍物試料の $N_{CT}$ , 密度 $\rho_t$ , 有効原子番号 $Z_{et}$ の関係

2.6 章で定義されたケース 4 の  $N_{CTMode}$  およびケース 1 の  $N_{CTMedian}$  を用い, 6 種類の鉍物試料を対象として  $N_{CT}$  と密度  $\rho_t$  および有効原子番号  $Z_{et}$  との関係について検討した. なお, 検討に使用する CT 画像は, 管電圧 140 kV で撮影した CT 画像を用いた.

ケース 4 の  $N_{CTMode}$  と密度  $\rho_t$  との関係は, Table 2-6 および Fig. 2-18a に示すとおり式 (2-12) のように直線回帰式 ( $\gamma = 0.970$ ) で表され, ケース 1 の  $N_{CTMedian}$  と密度  $\rho_t$  の関係も  $N_{CTMode}$  とほぼ同様である.

$$\rho_t = 5.45 \times 10^{-4} N_{CTMode} + 1.58 \quad (2-12)$$

線減弱係数  $\mu_E$  は, 式 (2-5) に示すように, 物質の密度  $\rho$  と有効原子番号  $Z$  に依存するため, 密度  $\rho$  と  $N_{CT}$  との関係は式 (2-5) および式 (2-9) から式 (2-13) で表されるとおり, 密度  $\rho$  は  $N_{CT}$  および  $Z$  の両方に依存する.

$$\rho = (N_{CT} / 1000 + 1) \times \mu_w / (A + B \times Z^{3.8}) \quad (2-13)$$

ここで、管電圧 140 kV の場合の  $\mu_w$ 、ケース 4 の  $N_{CTMode}$  の場合の A および B を式 (2-13) に代入すると

$$\rho = (N_{CT} / 1000 + 1) \times 0.201 / (0.228 + 4.03 \times 10^{-7} \times Z^{3.8}) \quad (2-14)$$

が得られる。

一方、密度の真値  $\rho_t$  と有効原子番号の真値  $Z_{et}$  には高い正の相関関係 ( $\gamma = 0.925$ ) が認められ (Fig. 2-18b), 式 (2-15) で表される。

$$Z_{et} = 3.83\rho_t + 4.40 \quad (\gamma = 0.925) \quad (2-15)$$

式 (2-14) の  $Z$  に式 (2-15) を代入すると、石英の密度  $\rho_t = 2.65$  の場合、

$$\rho = 8.41 \times 10^{-4} N_{CT} + 0.841 \quad (2-16)$$

赤鉄鉱の密度  $\rho_t = 5.3$  の場合

$$\rho = 6.55 \times 10^{-4} N_{CT} + 0.655 \quad (2-17)$$

の関係式が得られる。式 (2-16) および式 (2-17) を Fig. 2-18a にあわせて示す。式 (2-12) は密度が小さい場合は式 (2-16) に漸近し、密度が増大するにつれて式 (2-17) に連続的に推移していることから、式 (2-12) には密度の増大に伴う有効原子番号の増大の影響も織り込まれており、式 (2-12) を用いることにより  $N_{CTMode}$  から密度  $\rho_t$  を算出することが可能である。したがって、密度と有効原子番号には正の相関関係がある場合、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。

各試料の撮影断面積は約 7.9~53.7 cm<sup>2</sup>、換算透過厚さ  $t_e$  は約 3.2~8.3 cm であることから、試料の大きさの違いの影響は数%程度と考えられる。

なお、式 (2-12) から算定される密度の計算値  $\rho_c$  と真値  $\rho_t$  には良好な整合性が認められる (Fig. 2-18c)。また、ケース 1 の  $N_{CTMedain}$  に関する検討結果についても Figs. 2-18a, c, d に示すとおり、ケース 4 の  $N_{CTMode}$  と同様の結果が得られた。

次に、 $N_{CT}$  と有効原子番号  $Z_{et}$  との関係について検討する。

管電圧 140 kV で撮影したケース 4 の  $N_{CTMode}$  の場合、Table 2-4 より式 (2-5) は

$$\mu_E / \rho = 0.228 + 4.03 \times 10^{-7} Z^{3.8} \quad (2-18)$$

となり、式 (2-18)、式 (2-9) および式 (2-12) より算定される有効原子番号  $Z_{ec}$  は

$$Z_{ec} = \left\{ \frac{\left( \frac{N_{CTM}}{1000} + 1 \right) \times \frac{0.201}{(5.45 \times 10^{-4} N_{CTM} + 1.58)} - 0.228}{4.03 \times 10^{-7}} \right\}^{1/3.8} \quad (2-19)$$

で表される. 式 (2-19) から算定される有効原子番号の計算値  $Z_{ec}$  と真値  $Z_{et}$  には良好な整合性が認められる (Fig. 2-18d).

以上より, 医療用 CT で撮影した 2 次元 CT 画像の中心部を対象として算出した代表値  $N_{CTMode}$  を用いることにより線質硬化の影響が軽減され, 鉍物試料の密度および有効原子番号を推定することが可能であることが明らかとなった. また, 任意の横断線全体を対象として算出された  $N_{CTMedian}$  を用いることにより, 代表値  $N_{CTMode}$  と同程度の精度で密度と有効原子番号を推定することは可能であるが, 菱マンガン鉍, クリプトメレンおよび赤鉄鉍のように密度と有効原子番号が大きい試料の場合には線質硬化の影響が増大し, 解析対象となり得るデータ数が減少するため, 検討結果のばらつきが大きくなることに留意する必要がある.

Table 2-6. Results on the relationship among  $N_{CT}$ ,  $\rho_t$  and  $Z_{et}^{3.8}$

Material	Cross-sectional area (cm <sup>2</sup> )	Equivalent transmission thickness (cm)	$\rho_t$	$Z_{et}$	$Z_{et}^{3.8}$	Case-1 (Median)			Case-4 (Mode)		
						$N_{CTM}$	$\rho_c$	$Z_{ec}^{3.8}$	$N_{CTM}$	$\rho_c$	$Z_{ec}^{3.8}$
Quartz	20.1	5.06	2.65	11.85	12026	1808	2.49	-17364	1792	2.56	-21083
Calcite	7.9	3.17	2.7	15.88	36579	2604	2.94	34432	2548	2.97	30336
Fluorite	14.6	4.31	3.2	17.08	48245	3203	3.28	64100	3108	3.27	60080
Rhodochromite	53.7	8.27	3.7	20.39	94577	3582	3.49	79921	3301	3.38	69086
Cryptomelane	25.5	5.70	4.44	21.86	123217	5739	4.70	142702	5800	4.74	149612
Hematite	19.0	4.92	5.3	23.56	163782	6454	5.10	156939	6436	5.09	163223

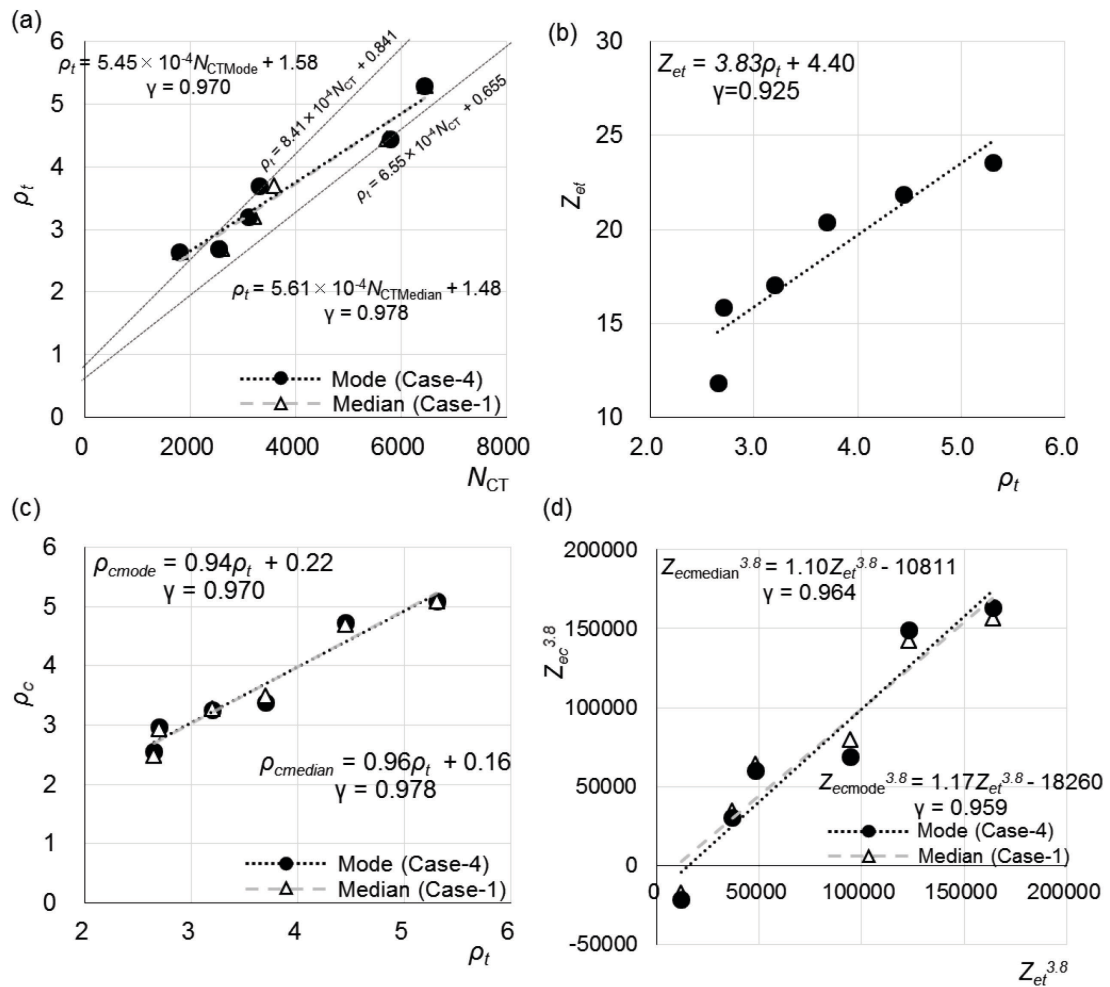


Fig. 2-18. (a) Real density  $\rho_t$  versus CT number  $N_{CT}$ , (b) real effective atomic number  $Z_{et}$  versus real density  $\rho_t$ , (c) calculated density  $\rho_c$  versus  $\rho_t$  and (d) calculated effective atomic number exponent 3.8  $Z_{ec}^{3.8}$  versus real effective atomic number exponent 3.8  $Z_{et}^{3.8}$ .

## 2-9 鉍物試料の実効エネルギー $E_e$ と $N_{CT}$ の関係

本論で用いた X 線 CT 装置の実効エネルギー $E_e$ は、管電圧 140 kV の場合は 64.1 keV, 100 kV の場合は 53.7 keV であるが、使用する X 線 CT 装置が異なると実効エネルギー $E_e$ が異なり、 $N_{CTMode}$  も変化する。そこで、本論で得られた検討結果を異なる CT 装置での検討に適用することを勘案し、実効エネルギー $E_e$ と  $N_{CTMode}$  との関係について整理した (Table 2-7)。その結果、 $N_{CTMode}$  は実効エネルギー $E_e$ の増大に伴い減少し、その変化の程度は  $N_{CTMode}$  の増大に伴い増加する (Fig. 2-19a)。そこで、6 種類の鉍物のそれぞれについて実効エネルギー $E_e$ と  $N_{CTMode}$  との関係直線回帰式で近似し、勾配 A および切片 B と  $N_{CTMode}$  との関係について整理した結果、いずれも良好な相関関係が得られた (Figs. 2-19b, c)。これらの関



係を用いて、管電圧 140 kV (64.1 keV) の  $N_{CTMode}$  を基準とした実効エネルギー  $E_e$  と  $N_{CT}$  との関係を図 2-19d および Table 2-8 に示す。なお、Fig. 2-19d では、本論における  $E_e$  および  $N_{CT}$  の検討範囲を考慮し、 $E_e$  については 54~64 keV、 $N_{CT}$  については 1800~6400 の範囲における関係を示した。この関係は本論における検討結果 (Fig. 2-19a) と整合する。

以上より、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ためには、CT 装置の実効エネルギー  $E_e$  を測定し、Fig. 2-19d を活用することにより、本論における管電圧 140 kV (64.1 keV) の  $N_{CTMode}$  との関係について整理できるとともに、同じ種類の鉱物を用いて取得された  $N_{CT}$  を比較することにより、CT 装置の実効エネルギー  $E_e$  を推定することが可能である。

Table 2-7. Relation between effective energy  $E_e$  and  $N_{CTMode}$

Calculated value	Tube voltage	Effective energy (keV)	Quartz	Calcite	Fluorite	Rhodochrosite	Cryptomelane	Hematite
$N_{CTMode}$	140 kV	64.1	1792	2548	3108	3301	5800	6436
	100 kV	53.7	1996	3086	3919	4034	7374	8385
$N_{CTMode} = AE_e + B$		A	-19.6	-51.7	-78	-70.5	-151.3	-187.4
		B	3049.3	5863.9	8106.6	7818.8	15501.3	18448.6

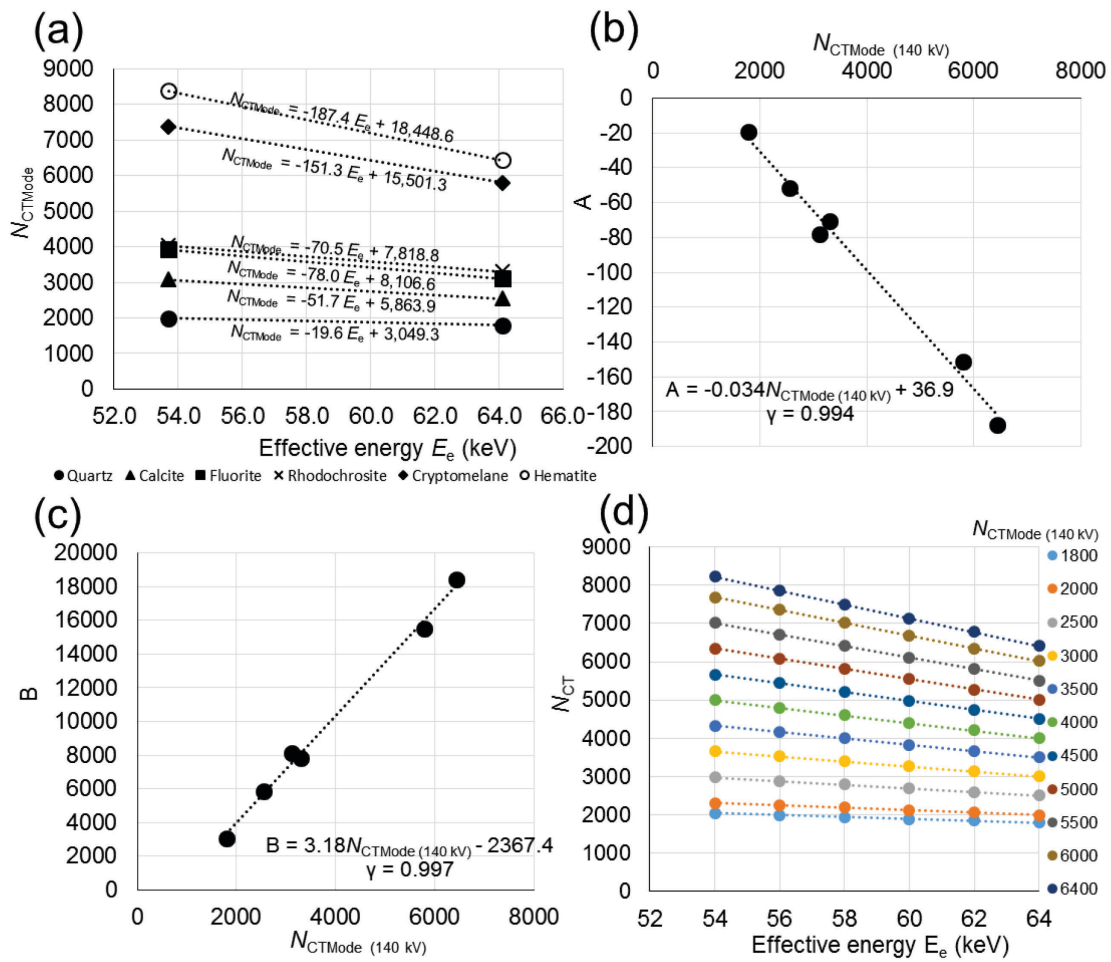


Fig. 2-19. (a) CT number  $N_{CTMode}$  versus effective energy  $E_e$ , (b) relation between the gradient  $A$  of the linear regression equation for  $E_e$  and  $N_{CTMode(140kV)}$ , (c) relation between the intercept  $B$  of the linear regression equation for  $E_e$  and  $N_{CTMode(140kV)}$  and (d) relation between  $N_{CT}$  and effective energy  $E_e$  based on  $N_{CTMode(140kV)}$ .

Table 2-8. Relation between  $N_{CT}$  and effective energy  $E_e$  based on  $N_{CTMode(140\text{ kV})}$

$N_{CTMode}$ (140 kV)	A	B	Effective energy (keV)	$N_{CT}$	$N_{CTMode}$ (140 kV)	A	B	Effective energy (keV)	$N_{CT}$
1800	-24.3	3357	54	2045	4500	-116.1	11943	54	5674
			56	1996				56	5441
			58	1948				58	5209
			60	1899				60	4977
			62	1850				62	4745
			64	1802				64	4513
2000	-31.1	3993	54	2314	5000	-133.1	13533	54	6346
			56	2251				56	6079
			58	2189				58	5813
			60	2127				60	5547
			62	2065				62	5281
			64	2003				64	5015
2500	-48.1	5583	54	2986	5500	-150.1	15123	54	7018
			56	2889				56	6717
			58	2793				58	6417
			60	2697				60	6117
			62	2601				62	5817
			64	2505				64	5517
3000	-65.1	7173	54	3658	6000	-167.1	16713	54	7690
			56	3527				56	7355
			58	3397				58	7021
			60	3267				60	6687
			62	3137				62	6353
			64	3007				64	6019
3500	-82.1	8763	54	4330	6400	-180.7	17985	54	8227
			56	4165				56	7866
			58	4001				58	7504
			60	3837				60	7143
			62	3673				62	6782
			64	3509				64	6420
4000	-99.1	10353	54	5002					
			56	4803					
			58	4605					
			60	4407					
			62	4209					
			64	4011					

### 3. 断層破碎帯の最新活動部の認定法

本章では、活断層および非活断層の断層露頭の基盤岩中で採取した断層岩およびそれぞれの母岩を対象とし、まず、断層岩の種類別に密度、空隙率および有効原子番号の特徴について整理した。

次に、医療用 CT を用いて CT 画像を取得し、断層岩の種類別に CT 値、密度および有効原子番号の関係について整理し、断層の最低密度領域を定量的に認定する手法について提案する。

さらに、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について検討し、CT 値から特定した最低密度領域から最新活動部を認定する手法について提案する。

なお、各試料の CT 値の算出には第 2 章で提案した手法を用い、線質硬化の影響軽減に留意した。また、試料厚さの違いの影響軽減および X 線エネルギー低減に伴う CT 画像の品質低下を回避するため、X 線透過厚さが約 10 cm となるように試料サイズおよび撮影方向の調整を行った。

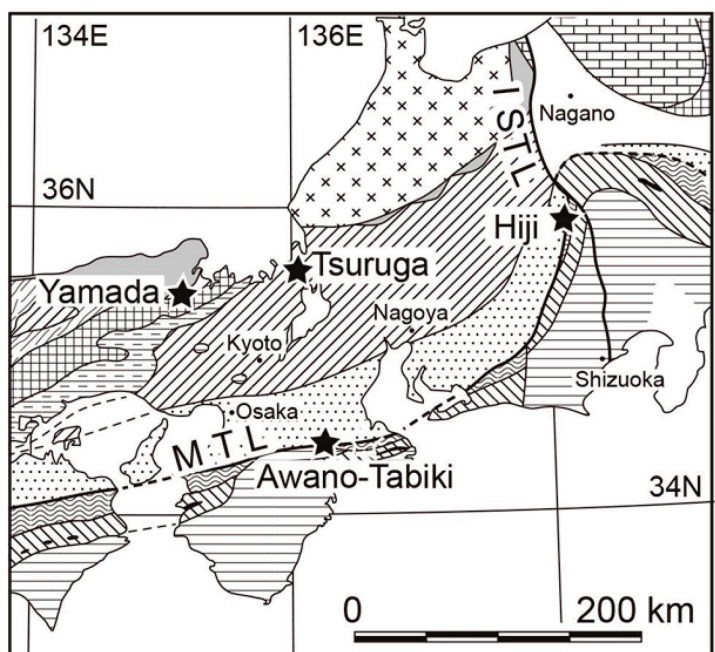
#### 3-1 断層の地質構造的特性および岩石構造的特性

本章では、活断層であることが明瞭な露頭が存在し、非活断層の良好な露頭も存在する中央構造線 (以下では MTL と略称する) を検討対象とした。また、MTL で検討対象とした断層岩の原岩は、主に三波川結晶片岩および領家帯のトーナル岩であることから、花崗岩中の活断層の事例として山田断層、変玄武岩—花崗岩の境界をなす活断層の事例として敦賀断層についても検討対象とした。なお、断層岩の諸特性は、基盤岩中の断層岩と、基盤岩と堆積物が接する断層岩では異なることが推定されるため、本論では基盤岩中の断層岩を対象として検討した。

本検討で使用した試料および地質概要を Table 3-1 および Fig. 3-1、各調査地点付近の地質図を Fig. 3-2 に示す。なお、本検討では、「活断層」を後期更新世以降に活動が認められる断層、「非活断層」を後期更新世以降の活動が認められない断層として使用する。

Table 3-1. Analyzed materials of the CT analyses, density analyses and XRF analyses performed during this study. See Figs 3-1 and 3-2 for sample locations.

Fault	Location	Sample		Protolith	Fault activity classification	
		Fault rock	Protolith		Active	Inactive
MTL	Hiji	HJ-8	MZ-5	schist	○	—
	Awano–Tabiki	AT, ATR-2,3,4	ATS-1, 2, HA-1	tonalite, schist	—	○
Tsuruga	Oritodani	T-3, C-1, C-2	K-1, T-5	granite, metabasalt (greenstone)	○	—
Yamada	Mushu	YDA	YK-1	granite	○	—



MTL : Median Tectonic Line

ISTL : Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line

met. : metamorphic

Fig. 3-1. Simplified geotectonic map showing the location of the study area around the MTL and the Tsuruga and Yamada faults. The stars denote the approximate locations where the samples were collected; see Fig. 3-2 for further details on each sample site.

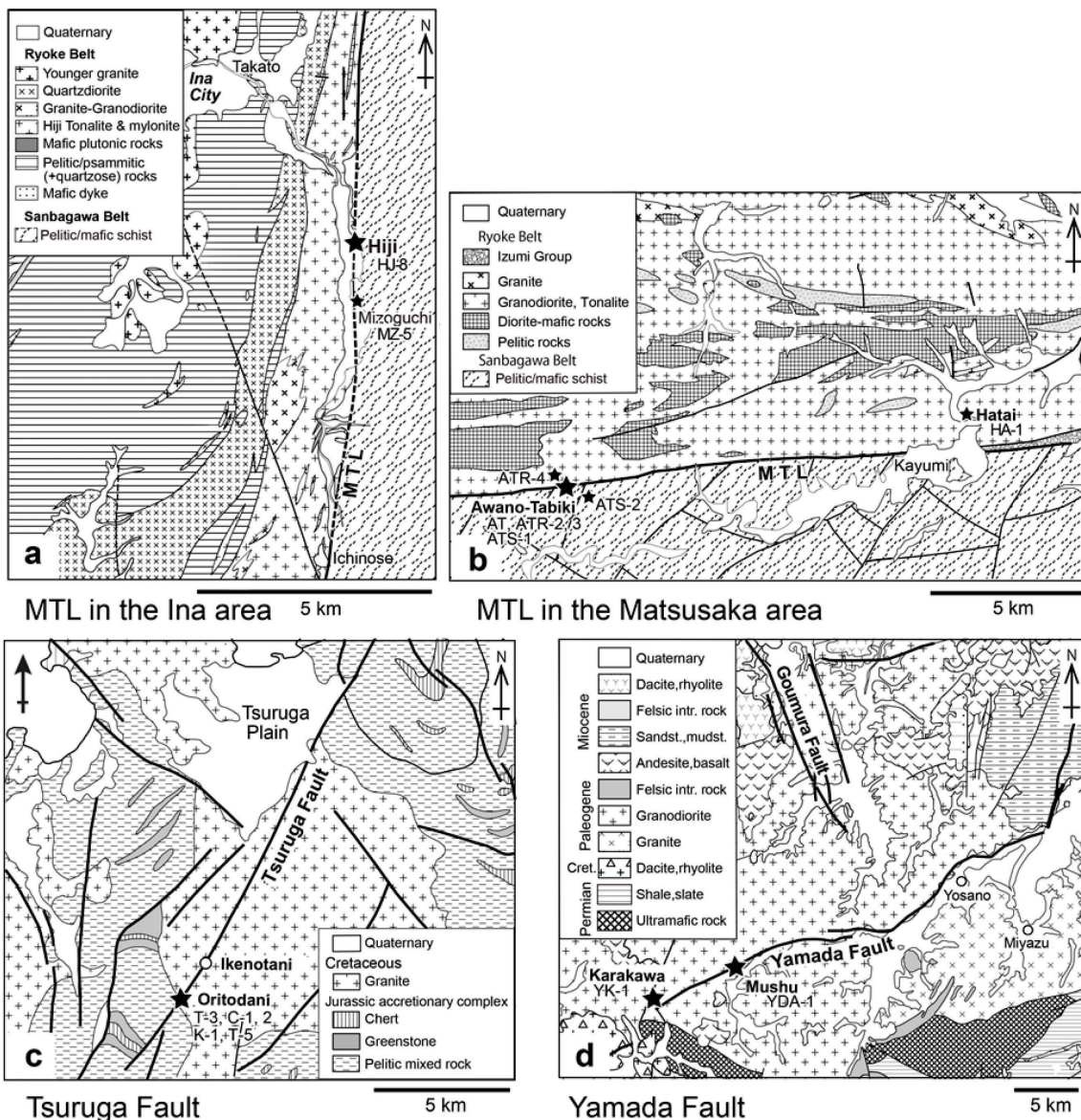


Fig. 3-2. Geological maps of the area around (a) the MTL in the Ina area, (b) the MTL in the Matsusaka area, (c) the Tsuruga Fault, and (d) the Yamada Fault. These maps have been simplified and partly modified after the 1/200,000 geological maps from the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST): (a) Kofu (2002), (b) Ise (2010), (c) Gihu (1992), and (d) Miyazu (1968). The stars denote the approximate locations of fault outcrops and where the samples were collected.

### (1) 長野県上伊那地域の MTL (非持露頭；活断層)

MTL は、西南日本のほぼ中央部を縦走する大地質構造であり (Fig. 3-1)、その延長距離は千 km 以上にも達する (例えば岡田, 1992)。長野県上伊那地域の MTL は、わずかに曲線を描きながらも南北に走っている。本地域の MTL の西側約 1 km 以内には非持トータル由来のマイロナイトが分布し、MTL に近いもの程細粒であり、変質も進むが、角礫化や粘土

化はほとんど認められない (高木, 1984). 一方, 東側の三波川帯結晶片岩は, MTL から数 m の間で部分的に粘土化し, レンズ状にひきちぎられているものの, 10–20 m 離れた所では肉眼的な破碎はほとんど認められない (高木, 1984).

非持露頭 (北緯 35 度 48 分 10.0 秒, 東経 138 度 4 分 58.0 秒) は, 上伊那郡長谷村南非持の美和湖東岸のグランドの下に位置し, 領家帯の非持トータル岩と三波川帯の結晶片岩が接している (Figs. 3-2a, 3-3a).

露頭観察の結果, MTL から約 80 cm 東側の三波川帯の結晶片岩中に第四紀の砂礫層を切る断層の延長が認められ, 中央構造線の最新活動面と考えられる (高木ほか, 2019). 最新活動面 Y は高い直線性を有し, 他の面構造に切られることなく露頭下部に連続して分布する. 最新活動面 Y の走向傾斜は N3°E, 74°W であり, 北に 20°–30°沈下する条線が認められ, 右ずれのセンスを示す断層ガウジが認められる (Figs. 3-3a, b). 最新活動面 Y に切られる砂礫層中に挟在するシルトおよび砂層を対象に火山ガラス分析を行った結果, 御岳第 1 テフラ (On-Pm1) 由来の火山ガラスが含まれており, この断層の最新活動時期は約 10 万年前以降である (高木ほか, 2019). なお, この断層において砂礫層の基底面に 60 cm の落差が認められたことから, 仮に砂礫層の堆積年代を 10 万年前とするとこの断層の実変位速度は 0.012–0.018 m/ky となる (高木ほか, 2019).

非持露頭では, 上記の最新活動面 Y の延長部として認定される最新活動部を挟むように方位試料 (HJ-8) を採取した. 試料 HJ-8 は, 断層破碎帯の固結の程度から断層ガウジ (HJ8-2, HJ8-3, HJ8-4) およびカタクレーサイト (HJ8-1, HJ8-5) に分類され, HJ8-2 と HJ8-3 の境界は砂礫層を切る主断層面 Y に対応する (Fig. 3-3b). なお, 断層岩類の分類は高木・小林 (1996) に基づいて行った.

また, 断層岩と母岩との比較検討を行うため, 非持露頭から約 1.2 km 南に MTL が出現する溝口露頭の約 20 m 東側 (北緯 35 度 47 分 29.4 秒, 東経 138 度 4 分 57.7 秒) において, 三波川帯泥質片岩の母岩の試料 MZ-5 を採取した (Figs. 3-2a, 3-3c).

断層岩の薄片写真を Figs. 3-3d–3-3e に示す. 断層岩のカタクレーサイト (HJ8-1) には主に直径 1 mm 以下の石英, 曹長石のフラグメントが含まれ, 右ずれの複合面構造が発達する. 最新活動面 Y に接する断層ガウジ (HJ8-3) には細粒な粘土鉱物が一様に分布し, 右ずれの複合面構造が発達する. 母岩 MZ-5 には主に石英, 曹長石, 白雲母および微量の方解石と緑泥石が認められる (Fig. 3-3f) .

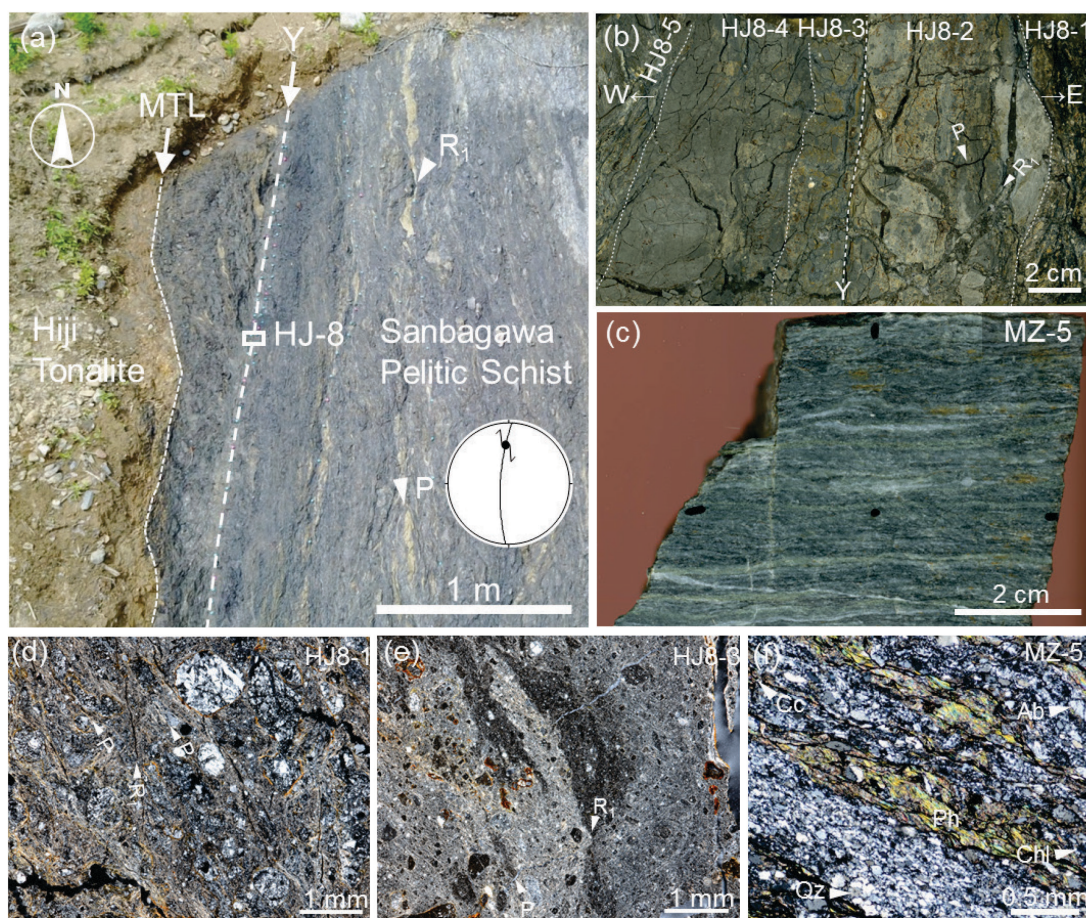


Fig. 3-3. (a) Photograph of the Hiji outcrop of the MTL. The stereonet shows the orientation of the fault plane Y and the direction of slip in the zone formed during the most recent fault movement. (b) Photograph of the brittle fault rock HJ-8 observed from the direction perpendicular to the fault plane and parallel to the lineations. (c) Photograph of protolith sample MZ-5. (d, e, f) Photomicrographs (cross-polarized light) of the fault rock samples and the protolith. (d) HJ8-1. (e) HJ8-3. (f) MZ-5. Abbreviations in (d, e, f): P: P-foliation; R<sub>1</sub>: Riedel shear; Qz: quartz; Ab: albite; Chl: chlorite; Ph: phengite; Cc: calcite.

## (2) 三重県松阪付近の MTL (栗野田引露頭 ; 非活断層)

三重県松阪付近の MTL は、ほぼ東西に走り (西岡ほか, 2010)(Fig. 3-2b), 低位の河岸段丘面を変位させておらず, 第四紀後期の活動はない (岡田, 1992). 本地域の MTL の北側 2 km 以内には畑井トータル岩が分布する. 畑井トータル岩は主に斜長石, ホルンブレンドおよび緑泥石化した黒雲母からなり, MTL 沿いでマイロナイト化を被り, MTL にほぼ平行な面構造が発達している (高木, 1985).

栗野田引露頭 (北緯 34 度 26 分 34.6 秒, 東経 136 度 15 分 10.5 秒) は三重県松阪市に位置し, 畑井トータル岩と三波川帯の結晶片岩が接している (Figs. 3-4a, b). MTL に接する領家帯には風化が進み淡褐色を呈する畑井トータル岩の断層岩類が分布し, 不規則な割れ目



が発達するものの、断層に伴う角礫化や粘土化は認められない。一方、三波川帯結晶片岩は、MTL から約 2 m の間で部分的に粘土化し、明瞭な右ずれの複合面構造が発達するものの、20 m 程度離れた所では肉眼的な破碎はほとんど認められない。

Shigematsu et al. (2017) は、本露头において断層岩の変形構造に関する詳細検討を行った結果、本断層には暁新世以降に 4 つの活動ステージが認められ、最新活動の運動センスは中新世の南北引張応力場における正断層センスとしている。

本検討では、Shigematsu et al. (2017) が最新活動の痕跡を残すと評価する 2 条の断層のうち、領家帯と三波川帯の地質境界の断層を対象として検討した。

露头観察の結果、領家帯と三波川帯の境界をなす MTL に沿って幅約 1–3 cm の断層ガウジが認められ、他の面構造に切られず高い直線性を有する。断層の走向傾斜は N76°E, 31°N、北西に 88°沈下する条線が認められ、最新活動の運動センスは正断層センスであり、Shigematsu et al. (2017) のステージ 4 の特徴と整合する (Fig. 3-4b)。

本露头では、最新活動部である物質境界としての MTL を挟むように定方位試料 (AT) を採取した (Fig. 3-4c)。試料 AT は、AT-1 および AT-2 が三波川帯、AT3–5 が領家帯に対応し、断層破碎帯の固結の程度から断層ガウジ (AT-2, AT-3) およびカタクレーサイト (AT-1, AT-4, AT-5) に分類され、AT-2 と AT-3 の境界は、最新活動面 Y に相当する。

また、固結の程度が異なる断層岩および母岩との比較検討を行うため、領家帯については本露头の MTL から約 5 m 北側で畑井トータル岩のカタクレーサイト試料 ATR-2 および ATR-3 (Fig. 3-4b)、約 500 m 北西側 (約 300 m 北側) で畑井トータル岩のマイロナイト試料 ATR-4 (転石) (Fig. 3-2b)、約 13.5 km 東北東に位置する畑井露头で母岩 HA-1 (Figs. 3-2b, 3-4e) を採取した。一方、三波川帯については本露头の MTL から約 20 m 南側および約 1 km 南東側で泥質片岩の母岩試料 ATS-1 (Fig. 3-4b) および ATS-2 (Figs. 3-4d, 3-2b) を採取した。ATS-2 は片理が発達する密実な泥質片岩であるのに対し、ATS-1 には直径約 2 cm 程度の石英の結晶が含まれる。なお、畑井トータル岩のカタクレーサイト試料 ATR2 および ATR3 については、ATR2 を用いて X 線 CT 画像解析、ATR3 を用いて密度分析および XRF 分析を行った。

断層岩の薄片写真を Figs. 3-4f, g に示す。断層岩の薄片 AT は、三波川帯のカタクレーサイト AT-1 および断層ガウジ AT-2、領家帯のカタクレーサイト AT-4 に分帯され、最新活動面 Y は AT-4 との境界近くの AT-2 中を高い直線性を有して他の面構造に切られることなく連続する。三波川帯のカタクレーサイト AT-1 には主に直径約 0.2 mm 以下の曹長石のフラ

グメントが含まれ、逆断層センスの複合面構造が発達する。また、領家帯のカタクレーサイト AT-4 では、直径が最大約 0.5 mm のマイロナイト化した石英のフラグメントが破碎流動の影響を受けるとともに、断層ガウジ AT-2 と近接した位置において逆断層センスの R1 面により変位を受ける幅 0.2 mm 程度の方解石脈が認められる。一方、三波川帯の断層ガウジ AT-2 には、AT-1 のフラグメントを挟在しながら粘土鉱物が一様に分布し、明瞭な正断層センスの複合面構造が発達する。

三波川帯結晶片岩の母岩 ATS-2 (Fig. 3-4h) には主に石英、曹長石、白雲母および方解石が認められ、いずれの鉱物も直径約 0.2 mm 以下と非常に細粒である。MTL から約 20 m 南側で採取した母岩 ATS-1 には主に石英、曹長石、白雲母および石墨が認められ、いずれの鉱物も直径約 0.2 mm 以下と非常に細粒であり、ATS-2 に比べて白雲母が少ない。ATS-1 および ATS-2 の片理は、ともに石英と曹長石の凝集体や白雲母の配列により規制されている。

一方、畑井トータル岩の母岩 HA-1 およびマイロナイト ATR-4 には主に斜長石、石英、角閃石および緑泥石が認められる。HA-1 に含まれる斜長石および角閃石の直径は約 2 mm 以下、石英および緑泥石の直径は約 0.5 mm 以下である (Fig. 3-4i)。一方、マイロナイト ATR-4 に含まれる斜長石および角閃石の直径は約 1 mm 以下であり、HA-1 に比べて小さく、その隙間を石英の再結晶集合体が充填している。カタクレーサイト ATR-3 には主に直径 0.2 mm 以下の斜長石、石英および微量の緑泥石のフラグメントが認められ、マイロナイト化した石英の破碎流動が認められる。

### (3) 敦賀断層（折戸谷露頭；活断層）

敦賀断層は、若狭湾南東部の福井県中部を NE-SW 方向に延びる右横ずれの活断層であり、その延長は約 25 km である (産総研地質調査総合センター, 2016)。敦賀断層周辺には江若花崗岩 (後期白亜紀) 及び美濃-丹波帯の変玄武岩 (中期-後期ジュラ紀付加体) が分布している (Fig. 3-2c)。栗本ほか (1999) は、池の谷地区におけるトレンチ調査の結果に基づき、敦賀断層南部の最新活動時期は 12 世紀後半~14 世紀末、最新活動に伴う上下変位量は 1.5-2 m、平均上下変位速度は 0.5-0.6 m/10<sup>3</sup> 年程度としている。

池の谷地区から約 1.7 km 南西に位置する折戸谷露頭 (北緯 35 度 32 分 15.0 秒、東経 136 度 1 分 8.6 秒) では、江若花崗岩と美濃-丹波帯の変玄武岩が接し、地質境界に沿って幅約 10-20 cm の断層ガウジが認められる (Fig. 3-5a)。断層面は直線性および連続性が高く、上

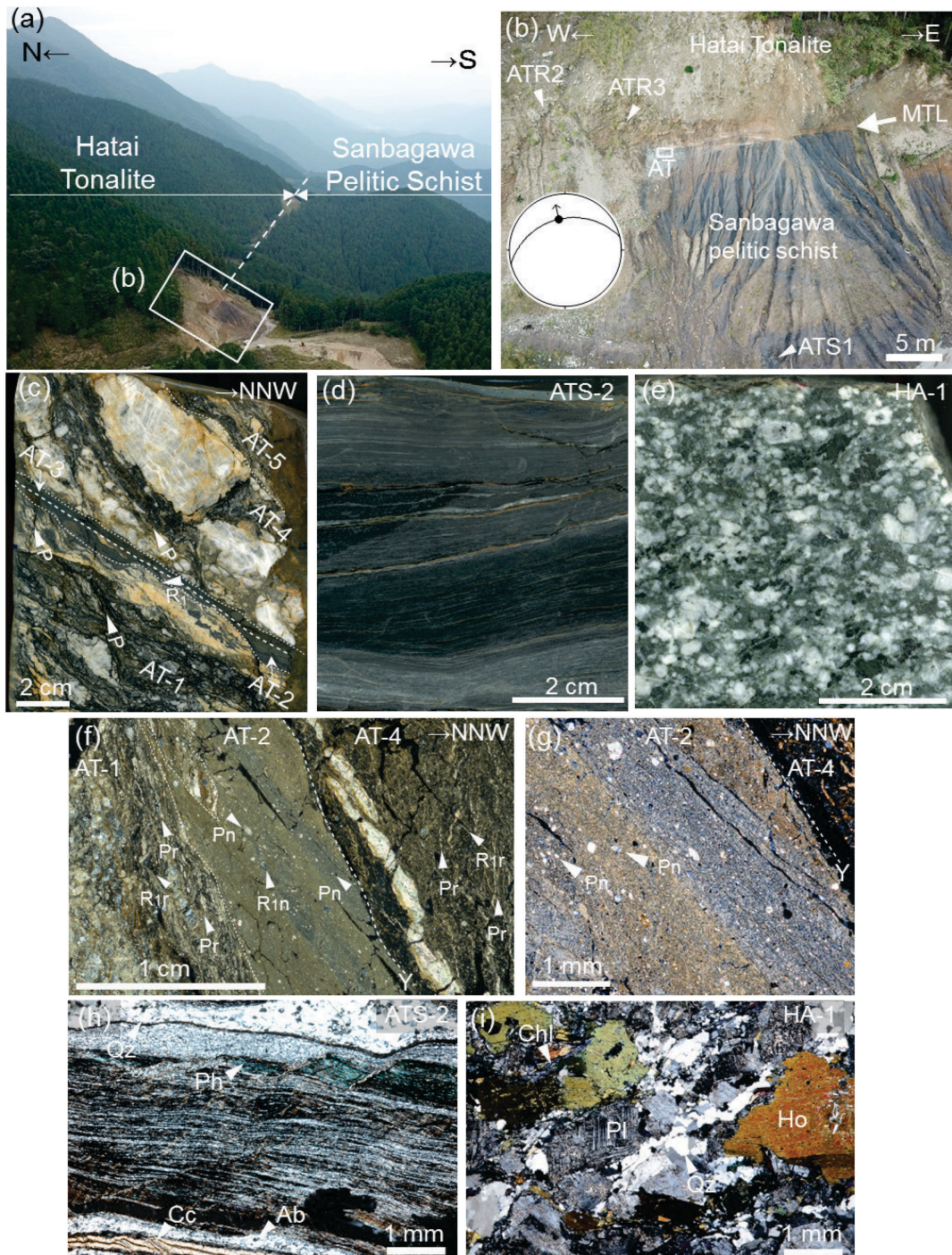


Fig. 3-4. (a, b) Photographs of the Awano-Tabiki outcrop of the MTL. The stereoplotted shows the orientation of the fault plane Y and the direction of slip in the zone formed during the most recent fault movement. (c) Photograph of the brittle fault rock AT observed from the direction perpendicular to the planar features and parallel to the lineations. (d, e) Photographs of protolith samples. (d) ATS-2. (e) HA-1. (f, g, h, i) Photomicrographs (cross-polarized light) of the fault rock samples and the protolith. (f, g) AT. (h) ATS-2. (i) HA-1. Abbreviations in (c, f, g): P: P-foliation; R<sub>1</sub>: Riedel shear; P<sub>n</sub>, P<sub>r</sub>: P foliations showing normal and reverse senses of shear, respectively; R<sub>1n</sub>, R<sub>1r</sub>: Riedel shear showing normal and reverse senses of shear, respectively. Abbreviations in (h, i): Qz: quartz; Pl: plagioclase; Ho: hornblende; Chl: chlorite; Ab: albite; Ph: phengite; Cc: calcite.

部の新期扇状地堆積物に変位が認められる。断層の走向傾斜は N49°E, 78°W であり，北に 15°沈下する条線が認められ，最新活動の運動センスは右横ずれである。断層ガウジ T-3-1-T-3-3 のうち，上載層を切る最新活動面は美濃丹波帯中・古生層の断層ガウジ T-3-3 中に延伸し，非常に軟質である。

本露頭では，上記の最新活動部 T-3-3 を挟むように定方位試料 (T-3) を採取した。試料 T-3 は，T-3-1 および T-3-2 が江若花崗岩，T-3-3 および T-3-4 が美濃丹波帯の緑色岩に対応し，断層破碎帯の固結の程度から断層ガウジ (T-3-1, T-3-2, T-3-3) およびカタクレーサイト (T-3-4) に分類される (Fig. 3-5b)。最新活動面は T-3-2 と T-3-3 の境界に近接する T-3-3 中を，高い直線性を有しながら連続している。褐色ガウジ T-3-1 および白色ガウジ T-3-2 は，T-3-3 に比べてやや硬質であるが，T-3-1 と T-3-2 の境界付近では，白色ガウジ T-3-2 の右ずれの P フォリエーションが発達していることから，最新活動面から約 10 cm 程度の範囲は最新活動の影響を受けていると推測される。

また，固結の程度が異なる断層岩および母岩との比較検討を行うため，江若花崗岩についてはカタクレーサイト試料 C-2, C-3 および母岩試料 K-1 (転石, Fig. 3-5f)，美濃丹波帯の変玄武岩についてはカタクレーサイト試料 C-1，母岩試料 T-5 (Fig. 3-5g) を採取した。

断層岩の薄片写真を Figs. 3-5c-e に示す。最新活動面付近の薄片 T-3 は，江若花崗岩の断層ガウジ T-3-2 および美濃丹波帯の断層ガウジ T-3-3 に分帯され，最新活動面は，T-3-3 中を高い直線性を有して他の面構造に切られることなく連続する。T-3-3 には細粒な粘土鉱物が一様に分布し，最新活動面付近には右ずれの P フォリエーションが発達する。一方，江若花崗岩の断層ガウジ T-3-2 には主に直径 0.2 mm 以下の石英，カリ長石，斜長石のフラグメントが T-3-3 に比べて多く含まれ，明瞭な複合面構造は認められない。したがって，この断層の最新活動は，最も脆弱な断層ガウジ T-3-3 に限定されると考えられる。

江若花崗岩の母岩 K-1 (Fig. 3-5h) には主に直径約 2 mm の石英，斜長石，カリ長石および直径約 1 mm 以下の黒雲母が認められる。江若花崗岩のカタクレーサイト C-2 には主に直径約 0.3 mm 以下の石英，斜長石，カリ長石および微量の黒雲母のフラグメントが認められる。

一方，美濃丹波帯の母岩 T-5 (Fig. 3-5i) には主に直径約 0.1 mm 以下の角閃石および単斜輝石が認められる。カタクレーサイト C-1 には主に直径約 0.1 mm 以下の角閃石，緑泥石，斜長石のフラグメントが認められ，T-5 に比べて角閃石が少ない。

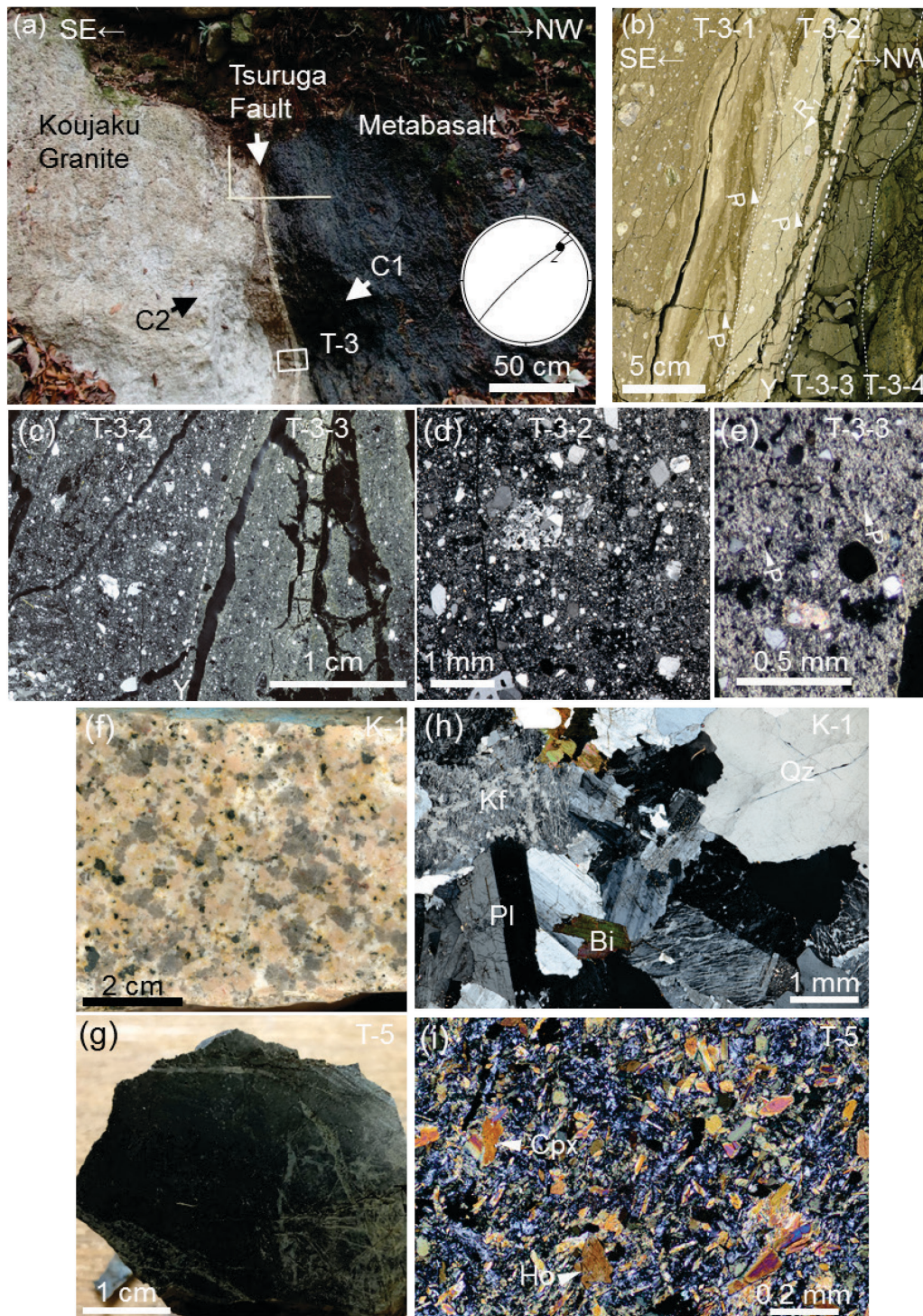


Fig. 3-5. (a) Photograph of the Oritodani outcrop of the Tsuruga Fault. The stereonet shows the orientation of the fault plane Y and the direction of slip in the zone formed during the most recent fault movement. (b) Photograph of the brittle fault rock T-3 observed from the direction perpendicular to the planar features and parallel to the lineations. (c, d, e) Photomicrographs (cross-polarized light) of the fault rock samples. (c) T-3-2–T-3-3. (d) T-3-2. (e) T-3-3. (f, g) Photographs of protolith samples. (f) K-1. (g) T-5. (h, i) Photomicrographs (cross-polarized light) of the protolith. (h) K-1. (i) T-5. Abbreviations in (e, h, i): P: P-foliation; Qz: quartz; Pl: plagioclase; Kf: K-feldspar; Bi: biotite; Ho: hornblende, Cpx: clinopyroxene.

#### (4) 山田断層（虫生露頭；活断層）

山田断層帯は、京都府北部の丹後半島基部に分布する約 33 km の活断層であり、北から弥助山西の断層、山田断層、高竜寺付近の断層の 3 つの断層から構成されるが（地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2004）、本論文では山田断層帯を山田断層と称して検討する。山田断層周辺には宮津花崗岩（後期白亜紀-古第三紀）が分布している（Fig. 3-2d）。

虫生露頭（北緯 35 度 31 分 2.0 秒，東経 135 度 0 分 28.7 秒）の a 露頭には宮津花崗岩のカタクレーサイト帯が分布し、幅 1-2 cm の断層ガウジを伴う直線性および連続性が高い断層面が認められる（Figs. 3-6a, b）。断層の走向傾斜は N55°E, 62°W であり、南に 20°沈下する条線が認められ、最新活動の運動センスは右横ずれである。相山ほか（2017）は、a 露頭を対象として山田断層の活動性について検討した結果、第四紀以降に活動した主断層面では断層ガウジ帯が分布すること、断層ガウジ帯中にはスメクタイト生成以降の繰り返しの活動を示す 10 枚の断層ガウジからなる層状構造が認められることを報告している。岩森ほか（2015）は、a 露頭の上方の堆積層に変位を与える断層が分布する b 露頭において山田断層の活動履歴について検討した結果、約 20 万年前以降に 6 回の活動イベントが認められ、最新活動時期は約 2,000 y.B.P.以降、約 200 y.B.P.以前としている。

本検討では、第四紀の堆積物を切断する活断層の延長部をなす最新活動部の断層ガウジを挟むように定方位試料（YDA）を採取した（Fig. 3-6c）。試料 YDA は、断層破碎帯の固結の程度から断層角礫（YDA-1, 2）、断層ガウジ（YDA-3）およびカタクレーサイト（YDA-4）に分類され、最新活動面 Y は YDA-2 と YDA-3 の境界に相当する。断層角礫は酸化鉄の沈着により強褐色を呈する。また、断層岩と母岩との比較検討を行うため、本露頭から約 6 km 西南西に位置する唐川地点で宮津花崗岩の母岩試料 YK1（転石, Fig. 3-6f）を採取した。

断層岩の薄片写真を Figs. 3.6d, e に示す。最新活動面付近の薄片 YDA2・3 は、断層角礫 YDA-2 および断層ガウジ YDA-3 に分帯され、最新活動面は、YDA-2 と YDA-3 の境界近くの YDA-3 中を高い直線性を有して他の面構造に切られることなく連続する。YDA-3 には主に直径約 0.2 mm 以下の石英、カリ長石および斜長石のフラグメントを挟在しながら細粒な粘土鉱物が一様に分布し、右ずれの P フォリエーションが発達する。断層角礫 YDA-2 には主に直径約 0.3 mm 以下の石英、カリ長石、斜長石のフラグメントが含まれ、その隙間を褐色の粘土鉱物が充填している。カタクレーサイト YDA-4 には直径約 0.2 mm 以下の石英、カリ長石、斜長石および黒雲母のフラグメントが認められ、その隙間を粘土鉱物が充填している。

一方、母岩 YK-1 には主に直径約 5 mm 以下の石英、斜長石、カリ長石および黒雲母が認められる (Fig. 3-6g).

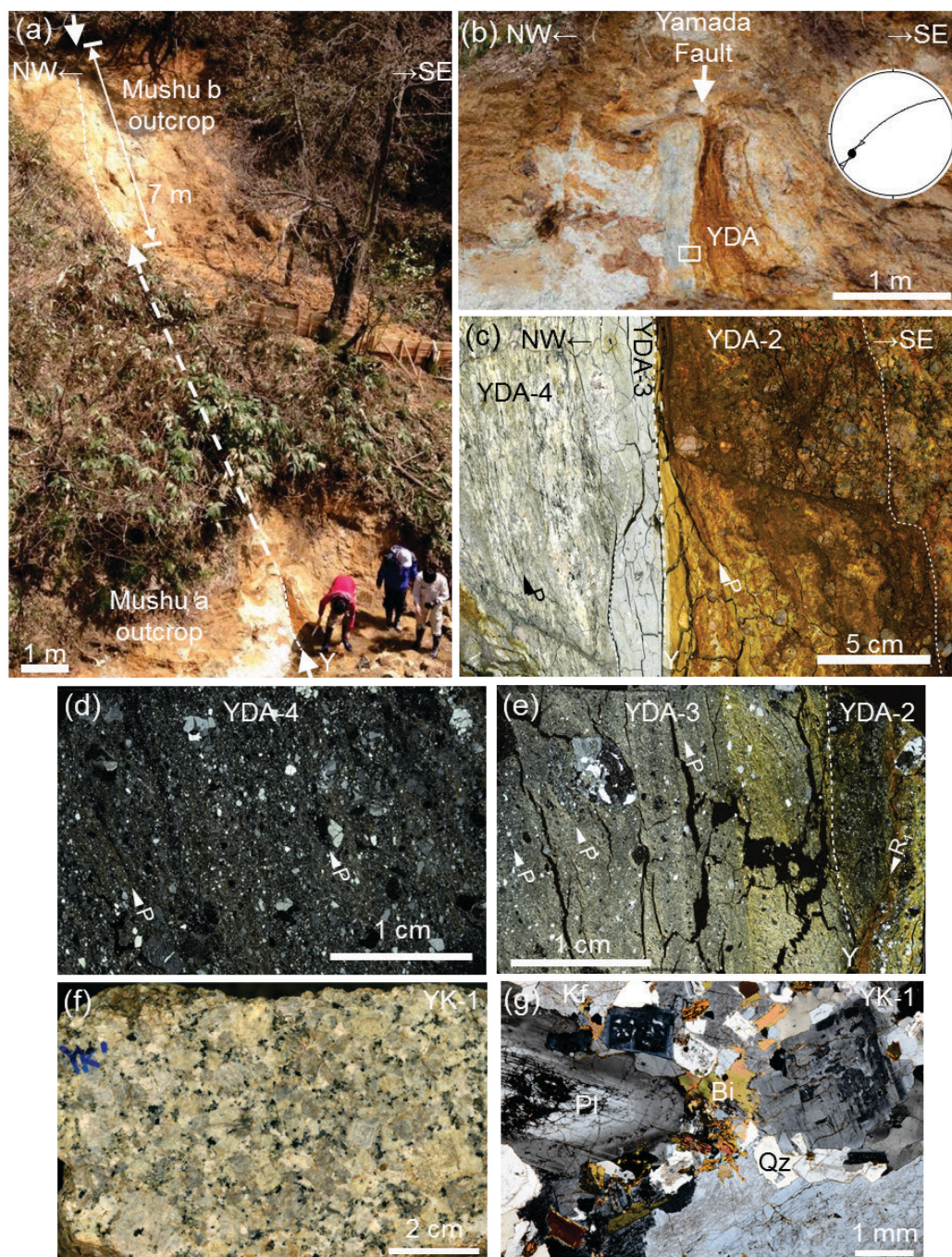


Fig. 3-6. (a, b) Photographs of the Mushu outcrop of the Yamada Fault. The stereonet shows the orientation of the fault plane Y and the direction of slip in the zone formed during the most recent fault movement. (c) Photograph of the brittle fault rock YDA observed from the direction perpendicular to the planar features and parallel to the lineations. (d, e) Photomicrographs (cross-polarized light) of the fault rock samples. (d) YDA-4. (e) YDA-2–YDA-3. (f) Photograph of protolith sample YK-1. (g) Photomicrographs (cross-polarized light) of the protolith YK-1. Abbreviations in (d, e, g): P: P-foliation; R<sub>1</sub>: Riedel shear; Qz: quartz; Pl: plagioclase; Kf: K-feldspar; Bi: biotite.

## 3-2 密度, 空隙率および有効原子番号

### (1) 測定方法

断層岩試料は, 後述するように多くの空隙を含むことから, 密度測定は, 母岩と断層岩とで異なる測定方法を用いて行った.

母岩の密度試験は, 岩石の密度試験 JGS2132-2009(地盤工学会, 2017) に基づいて実施した. 一方, 断層岩試料の密度試験は, 試料内部の微細な割れ目や空隙を詳細に把握するため, CRIEPI の水銀圧入式ポロシメーター (Micromeritics 社製, AutoPore IV 9500 Version 2.02) を使用した.

断層岩および母岩の有効原子番号  $Z_{et}$  は, XRF 分析により算出した各試料の主要成分 ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) の含有率および式 (2-3) を用いて算出した. なお, XRF 分析は, CRIEPI 所有の XRF-1500(X 線管球フィラメント: Rh)(島津製作所製) を使用し, ガラスビート法により行った.

### (2) 測定結果

密度  $\rho_t$ , 空隙率  $\phi$  および有効原子番号  $Z_{et}$  の測定結果を Table 3-2 および Fig. 3-7 に示す. また, 岩石の有効原子番号の実測値を求めるための XRF 分析結果を Table 3-3 に示す.

いずれの断層においても, 露頭観察により認定した断層の最新活動面 Y に近づくにつれて密度  $\rho_t$  が減少する (Fig. 3-7a). 全岩種の断層岩別密度の平均値は, 母岩が  $2.69 \text{ g/cm}^3$  (標準偏差  $0.10 \text{ g/cm}^3$ ), カタクレーサイトが  $2.28 \text{ g/cm}^3$  (標準偏差  $0.24 \text{ g/cm}^3$ ), 非活断層の断層ガウジが  $2.16 \text{ g/cm}^3$  (標準偏差  $0.21 \text{ g/cm}^3$ ), 活断層の断層ガウジが  $1.92 \text{ g/cm}^3$  (標準偏差  $0.16 \text{ g/cm}^3$ ), 断層角礫が  $1.73 \text{ g/cm}^3$  である (Table 3-2). 密度  $\rho_t$  と空隙率  $\phi$  との関係について整理した結果, 岩種や断層の違いによらず, 密度が  $1 \text{ g/cm}^3$  減少するにつれて空隙率が約 24% 増大する傾向が認められる (Fig. 3-7b). 全岩種の断層岩別空隙率の平均値は, 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% であり, 活断層の断層ガウジは非活断層の断層ガウジに比べて密度が小さく, 空隙率が大きい (Table 3-2). ここで, 敦賀断層の断層ガウジ (T-3-1, T-3-2, T-3-3) については, 後述の検討結果を踏まえて美濃-丹波帯の断層ガウジ T-3-3 を活断層, 江若花崗岩の断層ガウジ (T-3-1, T-3-2) を非活断層に分類した. また, カタクレーサイトのうち, 活断層の断層ガウ



Table 3-2. Density, porosity, and XRF analysis results

Fault name	Location	Material	Sample number	Bulk density		Effective atomic number	Fault gouge classification		Protolith		
				$\rho_t$	$\phi$		$Z_{et}$	Active		Inactive	
Hiji	Hiji	Cataclasite	HJ8-1	2.03	19.5	12.30	—	—	schist		
		Fault gouge	HJ8-2	1.70	25.4	12.04	○	—			
		Fault gouge	HJ8-3	1.89	13.9	12.24	○	—			
		Fault gouge	HJ8-4	1.80	19.8	12.12	○	—			
		Cataclasite	HJ8-5	1.87	17.7	12.11	—	—			
	Mizoguchi	Protolith	MZ-5	2.77	1.2	12.38	—	—			
		Protolith	ATS-2	2.66	2.4	12.64	—	—			
	MTL	Mizoguchi	Protolith	ATS-1	2.61	1.5	12.63	—	—	schist	
			Cataclasite	AT-1	2.26	14.4	11.34	—	—		
		Awano-Tabiki	Fault gouge	AT-2	1.79	20.0	11.52	—	○	tonalite	
Fault gouge			AT-3	2.31	7.4	11.36	—	○			
Cataclasite			AT-4	2.61	1.7	11.45	—	—			
Cataclasite			AT-5	2.44	7.4	11.42	—	—			
Cataclasite			ATR-2,3*	2.56	3.3	12.17	—	—			
Mylonite			ATR-4	2.65	1.0	12.13	—	—			
Protolith			HA-1	2.76	0.6	12.72	—	—			
Protolith			K-1	2.58	0.3	12.16	—	—			
Tsuruga	Oritodani	Cataclasite	C-3	2.47	4.6	12.11	—	—	granite		
		Cataclasite	C-2	2.16	16.1	12.10	—	—			
		Fault gouge	T-3-1	2.28	10.1	11.96	—	○			
		Fault gouge	T-3-2	2.27	10.4	12.08	—	○	metabasalt		
		Fault gouge	T-3-3	2.15	13.4	12.54	○	—			
		Cataclasite	T-3-4	2.23	18.9	13.55	—	—			
		Cataclasite	C-1	2.43	12.4	14.10	—	—			
		Protolith	T-5	2.90	3.5	13.96	—	—			
		Yamada	Mushu	Fault breccia	YDA-1	1.84	28.0	12.43	—	—	granite
				Fault breccia	YDA-2	1.61	36.3	12.43	—	—	
Fault gouge	YDA-3			2.05	14.3	11.99	○	—			
Cataclasite	YDA-4			1.98	22.7	12.05	—	—			
Karakawa	Protolith		YK-1	2.61	1.7	12.45	—	—			
—	Material		Number of samples	Bulk density	STD	Porosity	STD	Fault activity classification			
Mean of all samples	Fault breccia	2	1.73	—	32.2	—	Active fault				
	Fault gouge	5	1.92	0.16	17.4	4.6	Active fault				
	Fault gouge	4	2.16	0.21	12.0	4.8	Inactive fault				
	Cataclasite	11	2.28	0.24	12.6	6.9	—				
	Protolith, Mylonite	8	2.69	0.10	1.5	1.0	—				

\* : ATR-2 was used for X-ray CT image analysis and ATR-3 was used for density and XRF analysis.

ジに近接した 4 試料 (HJ8-1, HJ8-5, T-3-4, YDA-4) の密度と空隙率の平均値は  $2.03 \text{ g/cm}^3$ , 19.7%であり, 非活断層の断層ガウジに近接する 3 試料 (AT-1, AT-4, AT-5) の  $2.44 \text{ g/cm}^3$ , 7.8%に比べて密度が小さく, 空隙率が大きい. さらに, 活断層の最新活動面から約 50 cm 離れた 2 試料 (C-1, C-2) の密度と空隙率の平均値は  $2.30 \text{ g/cm}^3$ , 14.3%, 約 20 m 離れた C-3 では  $2.47 \text{ g/cm}^3$ , 4.6%であり, 最新活動面からの離隔が大きくなるにつれて密度が上昇し, 空隙率が減少する傾向が見られる. なお, 非活断層の最新活動面から約 3 m 離れた ATR-3 の密度と空隙率は  $2.56 \text{ g/cm}^3$ , 3.3%である. Zhang et al. (2000) は, 断層ガウジの摩擦剪断時の挙動について実験的研究を行い, 膨張, 摩擦強度, 安定性, 回復について検討した結果, 断層ガウジのダイレイタンスは法線応力の増加に伴い減少するとしている. したがって, 活断層のガウジの空隙率が非活断層のガウジの空隙率に比べて大きいことの要因としては,

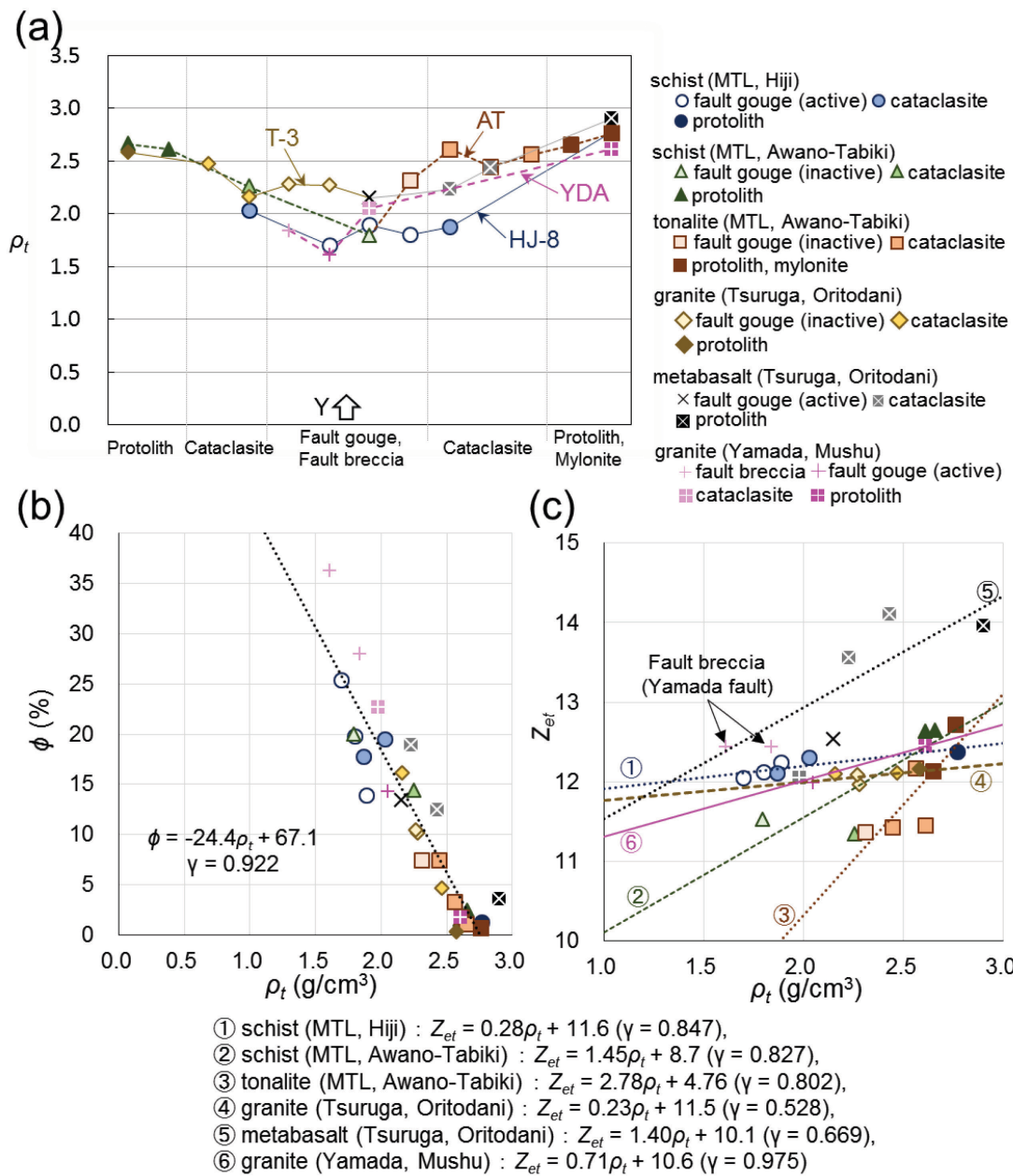


Fig. 3-7. Density, porosity, and effective atomic number measurement results. (a) Relationship between fault rock type and real density,  $\rho_t$ . (b) Crossplot of porosity,  $\phi$ , versus  $\rho_t$ . (c) Crossplot of effective atomic number,  $Z_{et}$ , versus  $\rho_t$ .

活断層における断層活動の深度が非活断層に比べて浅く、ダイレイタンスーが大きいことが考えられる。また、活断層のガウジに近接するカタクレサイトの空隙率が、最新活動面から離れたカタクレサイトや非活断層のガウジに近接するカタクレサイトに比べて大きいことの要因についても、断層活動の発生深度が浅いためであると考えられる。

Table 3-3. XRF analysis and effective atomic number ( $Z_{\text{et}}$ ) results for the rock samples

Fault name	Location	Material	Sample number	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ig.loss*	Total	Effective atomic number of rock sample		
effective atomic number				11.85	19.13	11.34	23.56	23.26	10.87	18.36	10.42	18.11	12.37	—	—	—		
MTL	Hiji	Cataclasite	HJ8-1	67.05	0.72	13.96	6.57	0.28	3.23	0.61	1.41	2.21	0.10	3.86	100.00	12.30		
		Fault gouge	HJ8-2	61.83	0.71	15.04	7.57	0.14	6.15	1.08	0.43	0.75	0.05	6.25	100.00	12.04		
		Fault gouge	HJ8-3	63.71	0.73	14.07	8.15	0.20	5.23	1.00	0.71	0.85	0.05	5.30	100.00	12.24		
		Fault gouge	HJ8-4	62.28	0.74	15.10	7.73	0.37	5.67	1.11	0.41	0.56	0.08	5.95	100.00	12.12		
		Cataclasite	HJ8-5	67.34	0.62	12.02	6.69	0.20	5.41	0.71	0.43	1.37	0.06	5.15	100.00	12.11		
	Mizoguchi	Protolith	MZ-5	66.22	0.60	14.98	5.49	0.13	2.02	1.65	2.25	3.44	0.10	3.10	100.00	12.38		
		Protolith	ATS-2	64.95	0.70	17.10	6.16	0.19	2.05	0.93	2.62	3.80	0.18	1.33	100.00	12.64		
	Awano-Tabiki	Protolith	ATS-1	57.10	0.76	17.34	9.22	1.89	1.63	0.69	1.58	3.60	0.15	6.04	100.00	12.63		
		Cataclasite	AT-1	56.36	0.33	6.96	3.92	0.15	5.93	10.23	1.23	1.04	0.07	13.78	100.00	11.34		
		Fault gouge	AT-2	59.53	0.69	13.23	4.23	0.10	4.75	4.66	0.56	2.07	0.10	10.08	100.00	11.52		
		Fault gouge	AT-3	52.90	0.54	10.99	5.17	0.15	5.89	8.15	0.21	1.76	0.08	14.16	100.00	11.36		
		Cataclasite	AT-4	57.93	0.73	12.59	8.68	0.12	4.85	1.81	0.36	0.18	0.12	12.63	100.00	11.45		
		Cataclasite	AT-5	56.18	0.52	10.73	6.15	0.13	5.74	5.87	0.07	1.31	0.14	13.16	100.00	11.42		
		Cataclasite	ATR-2,3	70.28	0.68	15.72	3.98	0.06	0.60	0.36	2.86	2.91	0.14	2.41	100.00	12.17		
		Mylonite	ATR-4	65.44	0.52	16.05	3.97	0.07	1.42	3.50	3.33	1.90	0.10	3.70	100.00	12.13		
		Protolith	HA-1	57.97	0.85	16.14	7.51	0.13	3.22	5.95	2.77	1.69	0.15	3.61	100.00	12.72		
		Protolith	K-1	76.87	0.07	12.63	1.26	0.04	0.07	0.42	3.59	4.64	0.01	0.39	100.00	12.16		
	Tsuruga	Oritodani	Cataclasite	C-3	76.65	0.06	12.78	1.19	0.01	0.12	0.48	3.53	4.50	0.01	0.66	100.00	12.11	
			Cataclasite	C-2	77.48	0.05	12.03	0.87	0.02	0.15	0.84	2.88	4.74	0.01	0.92	100.00	12.10	
			Fault gouge	T-3-1	72.91	0.05	12.06	1.34	0.08	0.40	3.29	1.71	4.31	0.02	3.83	100.00	11.96	
Fault gouge			T-3-2	76.48	0.05	12.69	1.64	0.01	0.43	0.52	2.12	4.49	0.02	1.57	100.00	12.08		
Fault gouge			T-3-3	67.55	0.94	12.52	6.48	0.10	1.91	2.43	1.52	2.98	0.22	3.34	100.00	12.54		
Cataclasite			T-3-4	55.34	3.21	11.60	14.02	0.26	4.37	4.15	1.37	1.37	0.59	3.72	100.00	13.55		
Cataclasite			C-1	49.73	2.84	13.04	16.39	0.27	4.06	6.67	3.06	0.98	0.80	2.16	100.00	14.10		
Protolith			T-5	50.24	1.80	11.89	12.31	0.23	6.47	11.35	3.02	1.30	0.18	1.20	100.00	13.96		
Yamada			Mushu	Fault breccia	YDA-1,2	70.22	0.37	14.70	4.28	0.12	0.37	1.09	3.20	4.13	0.08	1.45	100.00	12.43
				Fault gouge	YDA-3	70.97	0.62	16.10	3.32	0.00	0.79	0.77	0.58	2.96	0.23	3.66	100.00	11.99
	Cataclasite	YDA-4		74.45	0.29	14.51	1.52	0.01	0.46	0.81	2.12	4.07	0.08	1.67	100.00	12.05		
	Karakawa	Protolith	YK-1	70.01	0.43	14.98	3.30	0.08	0.82	2.00	3.65	4.04	0.10	0.60	100.00	12.45		

\* : ig.loss indicates ignition loss of each sample.

一方、密度  $\rho_t$  と有効原子番号  $Z_{\text{et}}$  の関係について整理した結果、密度の変化に対する有効原子番号の変化の程度は、岩種や断層によって変化の程度に違いは認められるものの、いずれについても密度  $\rho_t$  と有効原子番号  $Z_{\text{et}}$  には正の相関関係が認められる (Fig. 3-7c). なお、山田断層の断層角礫 YDA-1 および YDA-2 は、母岩 YK-1 に比べて  $\rho_t$  が最大 40% 程度減少するものの、 $Z_{\text{et}}$  は同程度であり、最新活動面に近づくにつれて  $\rho_t$  および  $Z_{\text{et}}$  が減少する傾向とは大きく異なる。これは、露頭観察において断層角礫は強褐色を呈すること、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  の含有量が断層ガウジ、カタクレサイトおよび母岩を大きく上回る 4.28wt% である (Table 3-3) ことから、強風化の影響を受けていると考えられる。このため、後述する密度  $\rho_t$  と有効原子番号  $Z_{\text{et}}$  の関係の検討においては、断層角礫の 2 点を検討対象外とした。また、最新活動面に近接する断層ガウジ HJ8-3 および AT-2 では、隣接する断層ガウジまたはカタクレサイトに比べて有効原子番号  $Z_{\text{et}}$  が 0.1 – 0.2 程度増加する傾向が認められる (Table 3-2)。これは、最新活動面に近接する断層ガウジは間隙率が高く、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  が多く含まれることから (Table 3-3)、地下水による酸化鉄の沈着の影響が要因として推定される。

### 3-3 CT 画像解析および $N_{CTM}$ , 密度, 有効原子番号の関係

前章において, 露頭観察により認定した断層の最新活動面 Y に近づくにつれて密度  $\rho_t$  と有効原子番号  $Z_{et}$  が減少することが明らかになった. 一方, CT 値は密度  $\rho_t$  と有効原子番号  $Z_{et}$  の関数であることから, 断層別・岩種別に CT 値, 密度および有効原子番号の関係について検討し, CT 値を用いた断層岩の特徴の定量的評価を試みた. なお, 以降の検討では, 強風化の影響を受けていると考えられる山田断層の断層角礫 (YDA-1, YDA-2) を除く全 28 データを検討対象とした.

第 2 章において, 6 種類の鉱物試料を対象として, 線質硬化の影響を軽減した CT 値による定量的解析手法を提案したが, 鉱物試料の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 (140 kV) で撮影した CT 画像の CT 値から鉱物試料の密度と有効原子番号を推定可能であることを示した.

前章において, 本検討で用いた岩石試料の密度と有効原子番号には, 各断層・各岩種ごとに正の相関関係が認められることが明らかとなったことから, 本章では, 1 種類の管電圧 (140 kV) で撮影した CT 画像の  $N_{CTM}$ , 密度および有効原子番号の関係について検討した.

なお, スキャナのスライス厚は 0.25 mm, 1 ピクセルのサイズは 0.098–0.313 mm, 撮影条件は, 管電圧 140 kV, 管電流時間積 300 mAs として CT 画像 (1,024 × 1,024 ピクセル) を取得した.

CT 画像解析結果と密度分析結果の総括表を Table 3-4 に示す. なお, CT 値の最頻値  $N_{CTM}$  を算出する際, 線質硬化の影響が大きい試料縁辺部を除くこと, 断層岩試料の場合は隣接ゾーンの影響や隣接ゾーンとの境界の割れ目の影響を除くこと, 線質硬化の影響軽減のための解析対象範囲の選定には任意の断面線全体を対象として算出される CT 値の中央値  $N_{CTMedian}$  が目安になることを踏まえ, 各ゾーンの縁辺部を除いた範囲(各 CT 画像中に示す白点線枠内) を対象として  $N_{CTM}$  を算出した.

#### (1) MTL 非持露頭

三波川帯泥質片岩の断層岩試料 HJ8 の CT 画像は, 主断層面 Y の周囲の断層ガウジ (HJ8-2, HJ8-3, HJ8-4) で暗く (Fig. 3-8a), 各ゾーンにおける CT 値の最頻値  $N_{CTM}$  は 994–1109 であり, 主断層面 Y に接する最新活動部の断層ガウジ HJ8-3 の  $N_{CTM}$  が最小である.

Table 3-4. Relationship among  $N_{CTM}$  (calculated from the CT images at 140 kV),  $\rho_t$ , and  $Z_{ct}$  for each of the samples.

Fault name	Location	Material	Sample number	Pixel count	$N_{CTM}$	SD of $N_{CTM}$	$\rho_t$	$\rho_c = \frac{AN_{CTM}+B}{A}$		$(\rho_c - \rho_t)/\rho_t$	$Z_{et}$	$Z_{ec} = \frac{CN_{CTM}+D}{C}$		$Z_{ec}$	$(Z_{ec} - Z_{et})/Z_{et}$						
								A	B			C	D								
Hiji		Cataclasite	HJ8-1	113570	1333	277	2.03	9.54×10 <sup>-4</sup>	0.76	2.03	0.0%	12.30	2.67×10 <sup>-4</sup>	11.8	12.16	-1.1%					
		Fault gouge	HJ8-2	122389	1109	192	1.70										1.82	7.1%	12.04	12.10	0.5%
		Fault gouge	HJ8-3	73380	994	176	1.89										1.71	-9.5%	12.24	12.07	-1.4%
		Fault gouge	HJ8-4	61075	1065	170	1.80										1.78	-1.1%	12.12	12.08	-0.3%
		Cataclasite	HJ8-5	39613	1281	312	1.87										1.98	5.9%	12.11	12.14	0.2%
Mizoguchi		Protolith	MZ-5	132804	2056	112	2.77	2.72	-1.8%	12.38	12.35	-0.2%									
		Protolith	ATS-2	119482	1961	129	2.66	2.68	0.8%	12.64	12.55	-0.7%									
MTL		Protolith	ATS-1	63283	1640	177	2.61	1.08×10 <sup>-3</sup>	0.56	2.33	-10.7%	12.63	1.57×10 <sup>-3</sup>	9.47	12.04	-4.7%					
		Cataclasite	AT-1	202405	1765	171	2.26										2.47	9.3%	11.34	12.24	7.9%
	Awano-Tabiki		Fault gouge	AT-2	17591	1209	143	1.79	1.87	4.5%	11.52	11.37	-1.3%								
			Fault gouge	AT-3	11968	1665	104	2.31	2.38	3.0%	11.36	11.38	0.2%								
			Cataclasite	AT-4	103475	1864	161	2.61	2.62	0.4%	11.45	12.04	5.2%								
			Cataclasite	AT-5	52123	1718	123	2.44	2.44	0.0%	11.42	11.56	1.2%								
			Cataclasite	ATR-2,3	80661	1943	90	2.56	2.71	5.9%	12.17	12.30	1.1%								
			Mylonite	ATR-4	132075	1820	210	2.65	2.57	-3.0%	12.13	11.89	-2.0%								
			Protolith	HA-1	134722	1908	209	2.76	2.67	-3.3%	12.72	12.19	-4.2%								
			Protolith	K-1	311751	1656	186	2.58	2.49	-3.5%	12.16	12.07	-0.7%								
Tsuruga	Oritodani	Cataclasite	C-3	234228	1699	164	2.47	2.54	2.8%	12.11	12.08	-0.2%									
		Cataclasite	C-2	241788	1471	93	2.16	1.23×10 <sup>-3</sup>	0.45	2.26	4.6%	12.10	2.83×10 <sup>-4</sup>	11.6	12.02	-0.7%					
		Fault gouge	T-3-1	94154	1492	70	2.28	2.29	0.4%	11.96	12.02	0.5%									
		Fault gouge	T-3-2	64118	1428	121	2.27	2.21	-2.6%	12.08	12.00	-0.7%									
		Fault gouge	T-3-3	19558	1185	140	2.15	2.07	-3.7%	12.54	13.01	3.7%									
		Cataclasite	T-3-4	78628	1622	206	2.23	2.31	3.6%	13.55	13.34	-1.5%									
		Cataclasite	C-1	203854	1981	177	2.43	5.47×10 <sup>-4</sup>	1.42	2.50	2.9%	14.10	7.66×10 <sup>-4</sup>	12.1	13.62	-3.4%					
		Protolith	T-5	201781	2590	204	2.90	2.84	-2.1%	13.96	14.08	0.9%									
		Yamada	Mushu	Fault gouge	YDA-3	49921	1108	130	2.05	1.93	-5.9%	11.99	11.97	-0.2%							
Cataclasite	YDA-4			165093	1333	119	1.98	9.79×10 <sup>-4</sup>	0.85	2.16	9.1%	12.05	6.95×10 <sup>-4</sup>	11.2	12.13	0.7%					
Karakawa	Protolith		YK-1	329517	1730	244	2.61	2.54	-2.7%	12.45	12.40	-0.4%									

また、断層ガウジの外側のカタクレーサイト (HJ8-1, HJ8-5) の CT 画像は断層ガウジに比べて明るく、 $N_{CTM}$  は 1281 – 1333 である。

母岩試料 MZ-5 の CT 画像では、片理面に相当する縞状の模様が認められ (Fig. 3-8b),  $N_{CTM}$  は 2056 である。幅 1 mm 程度以下の白色部は、薄片観察の結果との対比から、石英や曹長石に比べて有効原子番号が大きい白雲母の鉱物脈に相当すると考えられる。

$N_{CTM}$  の算出の対象とした各領域の CT 値の頻度分布の例を Figs. 3-8c–e に示す。各領域における約 4 万～13 万ピクセルを対象として検討した結果、CT 値は概ね正規分布にしたがい、標準偏差は 112–312 である (Table 3-4)。なお、試料中に多くの割れ目が含まれる場合、 $N_{CTM}$  より低い側において頻度の増加や小規模なピークが認められる場合があるが、 $N_{CTM}$  は割れ目の影響を除いた基質部の CT 値に対応している。

一方、CT 画像中の一点鎖線断面における CT 値の分布は Fig. 3-8f および Fig. 3-8g に示すとおりであり、 $N_{CTMedian}$  (HJ-8 : 991 – 1278, MZ-5 : 2088) は 2 次元 CT 画像より算出された上記  $N_{CTM}$  と概ね整合している。

以上より算出した  $N_{CTM}$  を用い、非持露頭付近の三波川帯泥質片岩を対象として  $N_{CTM}$  と  $\rho_t$  との関係について検討した結果、両者には高い正の相関関係 ( $\rho_t = 9.54 \times 10^{-4} N_{CTM} + 0.76$ ,

相関係数 0.958) が認められた (Fig. 3-12a). この関係式を用いて  $N_{CTM}$  より算出した密度  $\rho_c$  と実測値  $\rho_t$  との誤差は約 10%以下である (Table 3-4).

また, 上記関係式と, Fig. 3-7c に示す  $\rho_t$  と  $Z_{et}$  との関係式 ( $Z_{et} = 0.28\rho_t + 11.6$ , 相関係数 0.847) から誘導される  $N_{CTM}$  と  $Z_{et}$  との関係式 ( $Z_{et} = 2.67 \times 10^4 N_{CTM} + 11.8$ ) を用いて有効原子番号  $Z_{ec}$  を算出した結果,  $Z_{et}$  との誤差は 1.4%以下である (Table 3-4).

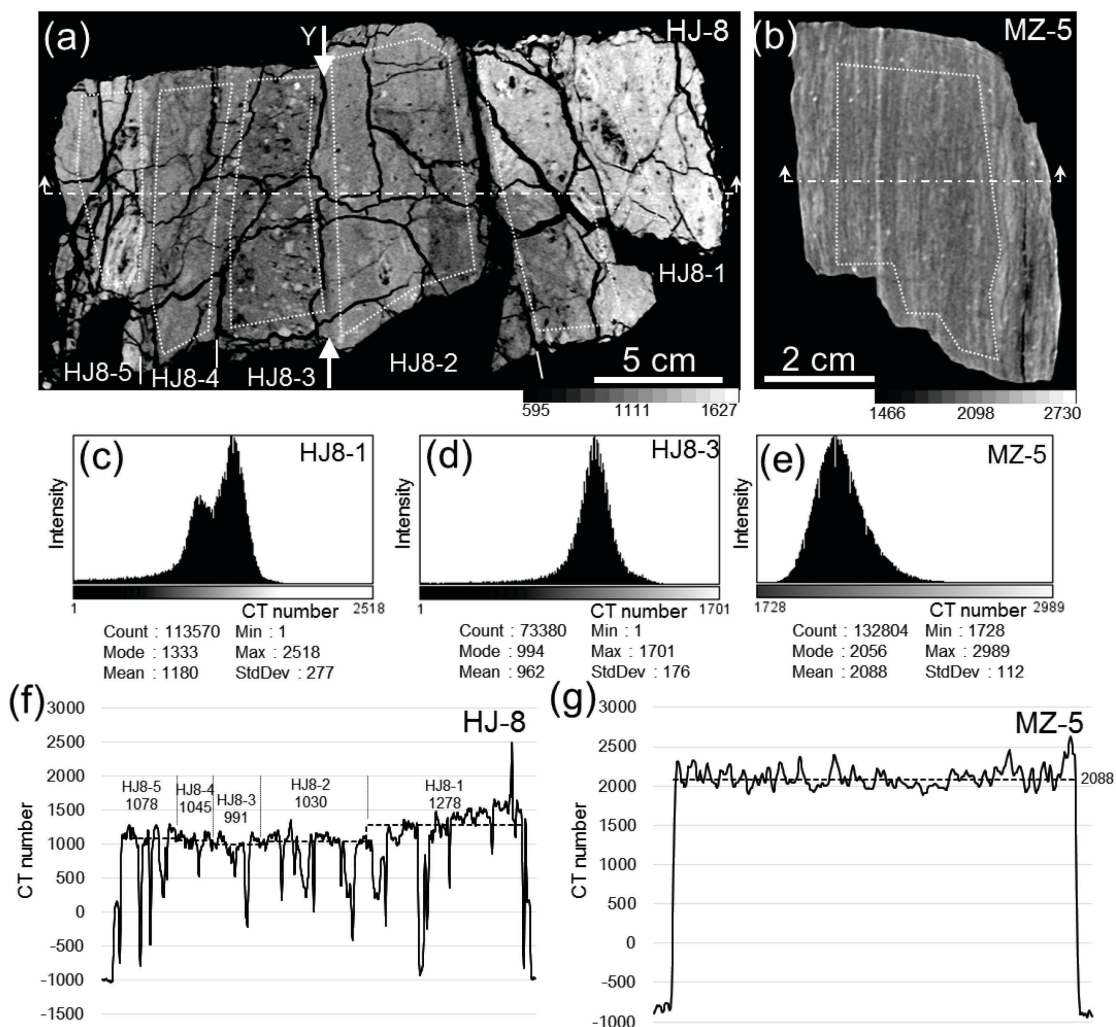


Fig. 3-8. X-ray CT image analysis results for the Hiji outcrop samples. CT images of samples (a) HJ-8 and (b) MZ-5. CT number histograms for (c) HJ8-1, (d) HJ8-3, and (e) MZ-5. The modal CT number,  $N_{CTM}$ , for each zone was calculated near the center (within the white dotted line), with the peripheral CT numbers excluded. CT number profiles for (f) HJ-8 and (g) MZ-5, with the values calculated along the dash-dotted lines in (a) and (b), respectively.

## (2) MTL 栗野田引露頭

栗野田引露頭付近で採取した7試料(AT, ATR2, ATR3, ATR4, HA-1, ATS1, ATS2)のうち、AT, HA-1およびATS-2のCT画像解析結果を代表例としてFigs. 3-9a-cに示す。

領家帯と三波川帯との地質境界にある最新活動部を挟むように採取した断層岩試料ATのCT画像は、主断層面Yの周囲の断層ガウジ(AT-2, AT-3)で暗く(Fig. 3-9a)、各ゾーンにおけるCT値の最頻値 $N_{CTM}$ は1209-1665であり、主断層面Yに接する最新活動部の三波川帯の断層ガウジ(AT-2)の $N_{CTM}$ が最小である。また、断層ガウジの外側のカタクレーサイト(AT-1, AT-4, AT-5)のCT画像は断層ガウジに比べて明るく、 $N_{CTM}$ は1718-1864である。

領家帯畑井トーナル岩の母岩試料HA-1のCT画像では、暗灰色部と斑状を呈する白色部が認められ(Fig. 3-9b)、 $N_{CTM}$ は1908である。幅1-2mm程度の白色部は、薄片観察の結果との対比から、石英や斜長石に比べて有効原子番号が大きい角閃石や緑泥石に相当すると考えられる。

三波川帯泥質片岩の母岩試料ATS-2のCT画像では、片理面に相当する縞状の様子が認められ(Fig. 3-9c)、 $N_{CTM}$ は1961である。幅約1mm以下の白色部は、薄片観察の結果との対比から、石英に比べて有効原子番号が大きい白雲母や方解石の多い薄層に相当すると考えられる。

$N_{CTM}$ の算出の対象とした各領域のCT値の頻度分布をFigs. 3-9d-hに示す。各領域における約1.2万~20万ピクセルを対象として検討した結果、CT値は概ね正規分布にしたがい、標準偏差は90-210である(Table 3-4)。なお、試料中に含まれる有効原子番号の大きい鉱物の影響を受けて、 $N_{CTM}$ より高い側において頻度がやや増加する傾向が認められる場合があるが、 $N_{CTM}$ はこれらの鉱物の影響を除いた基質部のCT値に対応している。

一方、CT画像中の一点鎖線断面におけるCT値の分布はFigs. 3-9i-kに示すとおりであり、 $N_{CTMedian}$ (AT: 1366-1801, HA-1: 1965, ATS-2: 1953)は2次元CT画像より算出された上記 $N_{CTM}$ と概ね整合している。

以上より算出した $N_{CTM}$ を用い、栗野田引露頭付近の三波川帯泥質片岩および領家帯畑井トーナル岩を対象として $N_{CTM}$ と $\rho_t$ との関係について検討した結果、いずれの岩種においても両者には高い正の相関関係(泥質片岩： $\rho_t = 1.08 \times 10^{-3} N_{CTM} + 0.56$ , 相関係数0.857; 畑井トーナル岩： $\rho_t = 1.19 \times 10^{-3} N_{CTM} + 0.40$ , 相関係数0.813)が認められ(Figs. 3-12b, c),

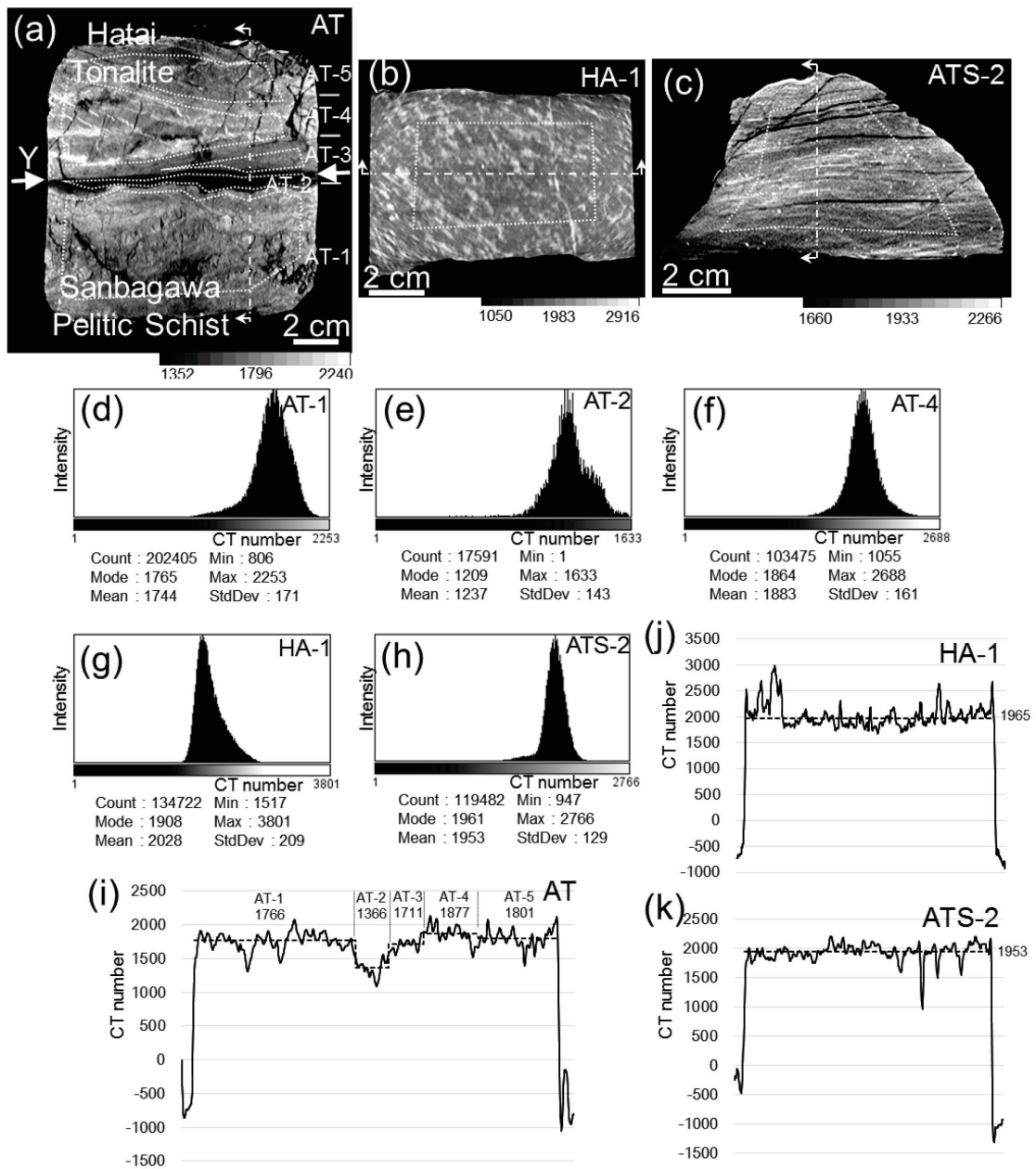


Fig. 3-9. X-ray CT image analysis results for the Awano-Tabiki outcrop samples. CT images of the (a) AT, (b) HA-1, and (c) ATS-2 samples. CT number histograms for the (d) AT-1, (e) AT-2, (f) AT-4, (g) HA-1, and (h) ATS-2 samples. The  $N_{CTM}$  value for each zone was calculated near the center (within the white dotted lines in (a)–(c)), with the peripheral areas excluded. CT number profiles for (i) AT, (j) HA-1, and (k) ATS-2, with the values calculated along the dash-dotted lines in (a)–(c), respectively.

この関係式を用いて  $N_{CTM}$  より算出した密度  $\rho_c$  と実測値  $\rho_t$  との誤差は約 10%以下である (Table 3-4).



また、上記関係式と、Fig. 3-7c に示す  $\rho_t$  と  $Z_{et}$  との関係式 (泥質片岩 :  $Z_{et} = 1.45\rho_t + 8.7$ , 相関係数 0.827 ; 畑井トータル岩 :  $Z_{et} = 2.78\rho_t + 4.76$ , 相関係数 0.802) から誘導される  $N_{CTM}$  と  $Z_{et}$  との関係式 (泥質片岩 :  $Z_{et} = 1.57 \times 10^{-3} N_{CTM} + 9.47$  ; 畑井トータル岩 :  $Z_{et} = 3.31 \times 10^{-3} N_{CTM} + 5.87$ ) を用いて有効原子番号  $Z_{ec}$  を算出した結果、 $Z_{et}$  との誤差は 7.9%以下である (Table 3-4).

### (3) 敦賀断層折戸谷露頭

折戸谷露頭で採取した 6 試料 (T-3, C-2, C-3, K-1, C-1, T-5) のうち、T-3, K-1 および T-5 の CT 画像解析結果を代表例として Figs. 3-10a-c に示す。

美濃丹波帯変玄武岩と江若花崗岩との地質境界付近にある最新活動部を挟むように採取した断層岩試料 T-3 の CT 画像は、主断層面 Y の周囲の断層ガウジ (T-3-1, T-3-2, T-3-3) で暗く (Fig. 3-10a), 各ゾーンにおける CT 値の最頻値  $N_{CTM}$  は 1185 - 1492 であり、主断層面 Y を含む最新活動部の変玄武岩の断層ガウジ (T-3-3) の  $N_{CTM}$  が最小である。T-3-2 は前述のとおり最新活動の影響を受けていると考えられるが、 $N_{CTM}$  は T-3-1 と同程度の 1428 であり、非活断層の断層ガウジである AT-2 の  $N_{CTM}$  1209 を上回る。また、褐色ガウジ T-3-1 および白色ガウジ T-3-2 は、T-3-3 に比べてやや硬質である。さらに、薄片観察の結果、T-3-3 には細粒な粘土鉱物が一様に分布し、最新活動面付近には右ずれの P フォリエーションが発達するのに対し、T-3-2 には主に直径 0.2 mm 以下の石英、カリ長石、斜長石のフラグメントが T-3-3 に比べて多く含まれ、明瞭な複合面構造は認められず、最新活動は T-3-3 中の断層ガウジに限定されていることから、本論では T-3-1 および T-3-2 を非活断層のガウジ、T-3-3 を活断層のガウジとして分類する。また、断層ガウジの外側のカタクレーサイト (T-3-4) の CT 画像は断層ガウジに比べて明るく、 $N_{CTM}$  は 1622 である。

江若花崗岩の母岩試料 K-1 の CT 画像では、暗灰色部と細粒な白色部が認められ (Fig. 3-10b),  $N_{CTM}$  は 1656 である。直径 2 mm 程度以下の白色部は、薄片観察の結果との対比から、石英や斜長石に比べて有効原子番号が大きい黒雲母に相当すると考えられる。

美濃丹波帯の変玄武岩の母岩試料 T-5 の CT 画像では、試料右上の白色部を除いて灰色を呈し (Fig. 3-10c),  $N_{CTM}$  は 2590 である。

$N_{CTM}$  の算出の対象とした各領域の CT 値の頻度分布を Figs. 3-10d-h に示す。各領域における約 2 万~31 万ピクセルを対象として検討した結果、CT 値は概ね正規分布にしたがい、標準偏差は 70-206 である (Table 3-4)。なお、試料中に含まれる有効原子番号の大きい鉱物

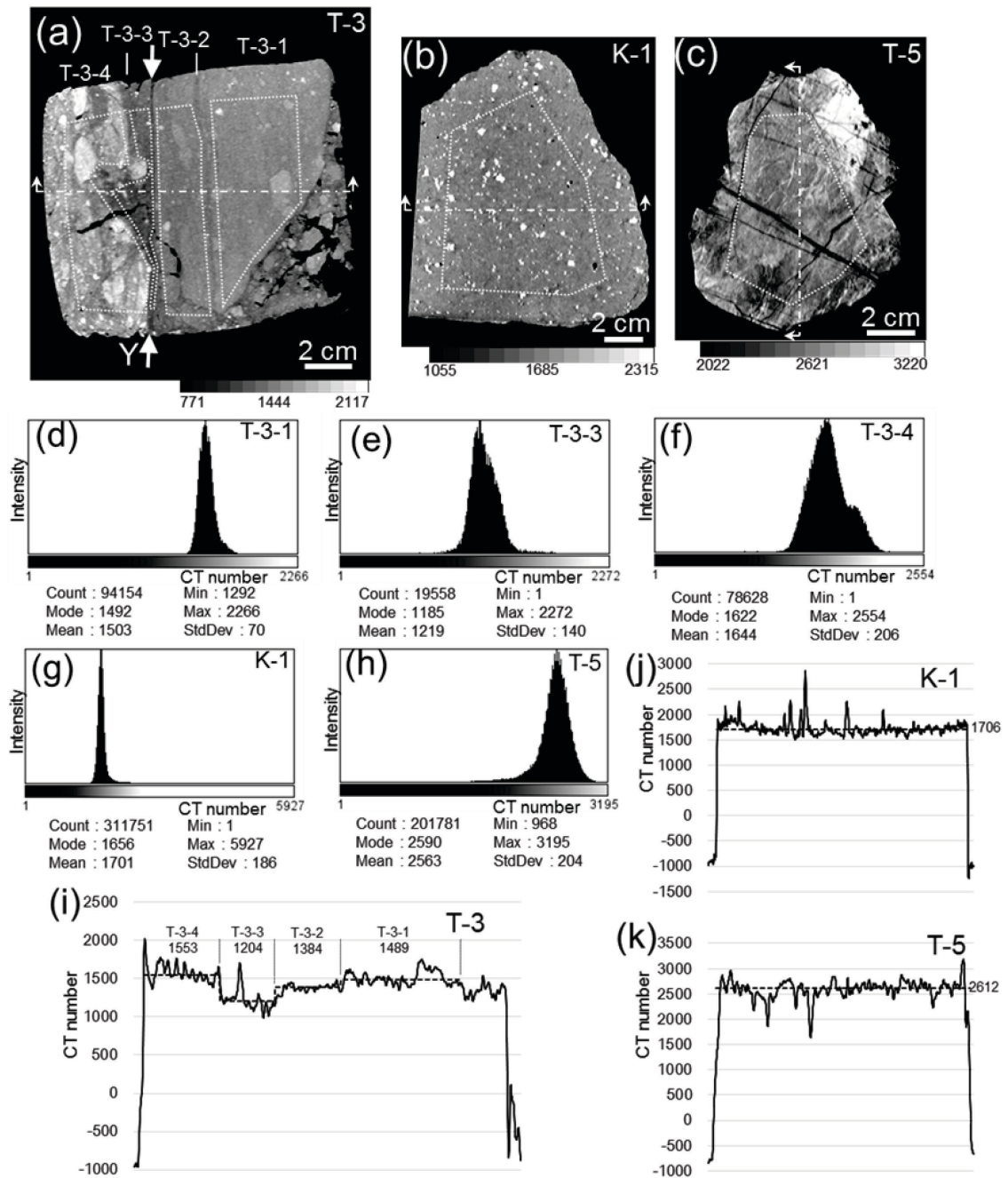


Fig. 3-10. X-ray CT image analysis results for the Oritodani outcrop samples. CT images of samples (a) T-3, (b) K-1, and (c) T-5. CT number histograms for (d) T-3-1, (e) T-3-3, (f) T-3-4, (g) K-1, and (h) T-5. The  $N_{CTM}$  value in each zone was calculated near the center (within the white dotted lines in (a)–(c)), with the peripheral values excluded. CT number profiles for (i) T-3, (j) K-1, and (k) T-5, with the values calculated along the dash-dotted lines in (a)–(c), respectively.

の影響を受けて、 $N_{CTM}$  より高い側において頻度がやや増加する傾向が認められる場合があるが、 $N_{CTM}$  はこれらの鉱物の影響を除いた基質部の CT 値に対応している。

一方、CT 画像中の一点鎖線断面における CT 値の分布は Figs. 3-10i-k に示すとおりであり、 $N_{CTM_{Median}}$  (T-3 : 1204 – 1553, K-1 : 1706, ATS-2 : 2612) は 2 次元 CT 画像より算出された上記  $N_{CTM}$  と概ね整合している。

以上より算出した  $N_{CTM}$  を用い、折戸谷露頭付近の江若花崗岩および美濃丹波帯変玄武岩を対象として  $N_{CTM}$  と  $\rho_t$  との関係について検討した結果、いずれの岩種においても両者には高い正の相関関係 (江若花崗岩 :  $\rho_t = 1.23 \times 10^{-3} N_{CTM} + 0.45$ , 相関係数 0.872 ; 変玄武岩 :  $\rho_t = 5.47 \times 10^{-4} N_{CTM} + 1.42$ , 相関係数 0.967) が認められ (Figs. 3-12d, e), この関係式を用いて  $N_{CTM}$  より算出した密度  $\rho_c$  と実測値  $\rho_t$  との誤差は約 5%以下である (Table 3-4).

また、上記関係式と、Fig. 3-7c に示す  $\rho_t$  と  $Z_{et}$  との関係式 (江若花崗岩 :  $Z_{et} = 0.23\rho_t + 11.5$ , 相関係数 0.528 ; 変玄武岩 :  $Z_{et} = 1.40\rho_t + 10.1$ , 相関係数 0.669) から誘導される  $N_{CTM}$  と  $Z_{et}$  との関係式 (江若花崗岩 :  $Z_{et} = 2.83 \times 10^{-4} N_{CTM} + 11.6$  ; 変玄武岩 :  $Z_{et} = 7.66 \times 10^{-4} N_{CTM} + 12.1$ ) を用いて有効原子番号  $Z_{ec}$  を算出した結果、 $Z_{et}$  との誤差は 3.7%以下である (Table 3-4).

#### (4) 山田断層虫生露頭

宮津花崗岩の断層岩試料 YDA の CT 画像は、主断層面 Y を含む最新活動部の断層ガウジ (YDA-3) で最も暗く (Fig. 3-11a), CT 値の最頻値  $N_{CTM}$  は 1108 であり、全ゾーンで最小である。また、断層ガウジの外側のカタクレーサイト (YDA-4) の CT 画像は断層ガウジに比べて明るく、 $N_{CTM}$  は 1333 である。なお、CT 画像解析の対象外とした断層角礫の YDA-1 および YDA-2 には、強風化で沈着した酸化鉄に対応する白色部が脈状に分布している。

一方、母岩試料 YK-1 の CT 画像では、暗灰色部と細粒な白色部が認められ (Fig. 3-11b),  $N_{CTM}$  は 1730 である。直径 2 mm 程度以下の白色部は、薄片観察の結果との対比から、石英や斜長石に比べて有効原子番号が大きい黒雲母に相当すると考えられる。

$N_{CTM}$  の算出の対象とした各領域の CT 値の頻度分布を Figs. 3-11c-e に示す。各領域における約 5 万~33 万ピクセルを対象として検討した結果、CT 値は概ね正規分布にしたがい、標準偏差は 119-244 である (Table 3-4)。なお、試料中に含まれる有効原子番号の大きい鉱物の影響を受けて、 $N_{CTM}$  より高い側において頻度がやや増加する傾向が認められる場合があるが、 $N_{CTM}$  はこれらの鉱物の影響を除いた基質部の CT 値に対応している。

一方、CT 画像中の一点鎖線断面における CT 値の分布は Fig. 3-11f および Fig. 3-11g に示すとおりであり、 $N_{CTM_{Median}}$  (YDA : 1105 – 1325, YK-1 : 1782) は 2 次元 CT 画像より算出された上記  $N_{CTM}$  と概ね整合している。

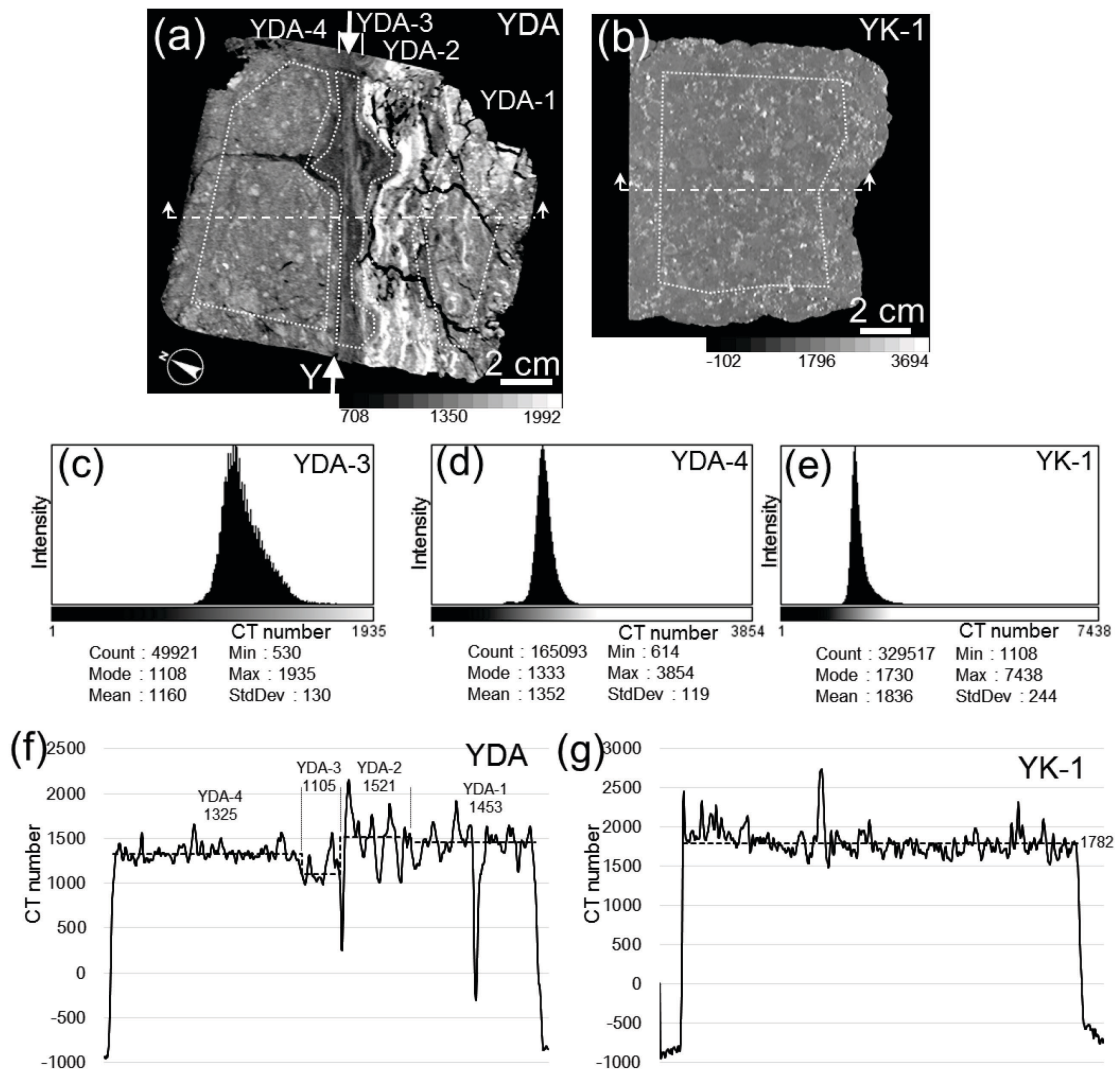


Fig. 3-11. X-ray CT image analysis results for the Mushu outcrop samples. CT images of the (a) YDA and (b) YK-1 samples. CT number histograms for (c) YDA-3, (d) YDA-4, and (e) YK-1. The  $N_{CTM}$  values were calculated near the center (within the white dotted lines in (a) and (b)) of each zone, with the peripheral areas excluded. CT number profiles for (f) YDA and (g) YK-1, with the values calculated along the dash-dotted lines in (a) and (b), respectively.

以上より算出した  $N_{CTM}$  を用い、虫生露頭付近の宮津花崗岩を対象として  $N_{CTM}$  と  $\rho_t$  との関係について検討した結果、両者には高い正の相関関係 ( $\rho_t = 9.79 \times 10^{-4} N_{CTM} + 0.85$ , 相関係数 0.893) が認められ (Fig. 3-12f), この関係式を用いて  $N_{CTM}$  より算出した密度  $\rho_c$  と実測値  $\rho_t$  との誤差は約 10% 以下である (Table 3-4).

また、上記関係式と、Fig. 3-7c に示す  $\rho_t$  と  $Z_{et}$  との関係式 ( $Z_{et} = 0.71\rho_t + 10.6$ , 相関係数 0.975) から誘導される  $N_{CTM}$  と  $Z_{et}$  との関係式 ( $Z_{et} = 6.95 \times 10^{-4} N_{CTM} + 11.2$ ) を用いて有効原子番号  $Z_{ec}$  を算出した結果、 $Z_{et}$  との誤差は 0.7% 以下である (Table 3-4).

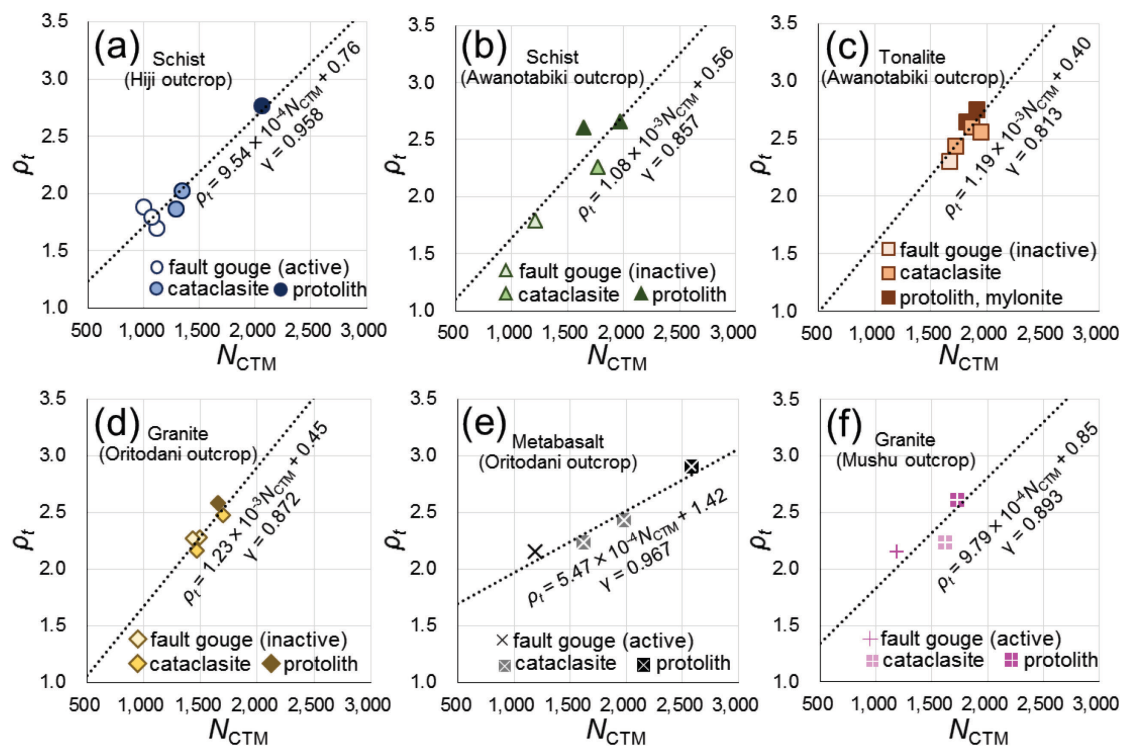


Fig. 3-12.  $\rho_t$ - $N_{CTM}$  crossplots for the sampled fault rocks and protoliths. (a) Schist (Hiji outcrop). (b) Schist (Awanotabiki outcrop). (c) Tonalite (Awanotabiki outcrop). (d) Granite (Oritodani outcrop). (e) Metabasalt (Oritodani outcrop). (f) Granite (Mushu outcrop).

## 4. 議論

前章において、各断層について岩種別に検討した結果、 $N_{CTM}$ を用いることにより母岩および断層岩の密度と有効原子番号を算出可能であるとの結論が得られた。そこで、本章では断層別・岩種別の検討結果を踏まえて、(1) $\rho_t$ と $\rho_c$ との関係および $Z_{et}$ と $Z_{ec}$ との関係、(2) $N_{CTM}$ および母岩に対する断層岩の密度比・有効原子番号比に基づく断層岩の特徴、(3)断層の最低密度領域と最新活動部との関係について検討した。

### 4-1 $\rho_t$ と $\rho_c$ との関係および $Z_{et}$ と $Z_{ec}$ との関係

Fig. 3-7bおよびFig. 3-7cに示すとおり、密度と空隙率との関係では断層や岩種によって顕著な傾向の違いは認められないが、密度と有効原子番号との関係では断層や岩種によって傾向の違いが認められることから、密度と有効原子番号の関数である $N_{CTM}$ を用いて母岩および断層岩の特徴を検討するためには、断層別・岩種別での検討が必要となる。

したがって、前章では、断層別・岩種別に  $N_{CTM}$  を用いて密度  $\rho_c$  および有効原子番号  $Z_{ec}$  を算出したが、断層別・岩種別に算出された全ての  $\rho_c$  と  $Z_{ec}$  について実測値  $\rho_t$  および  $Z_{et}$  との関係について整理した結果、 $\rho_c$  および  $Z_{ec}$  は  $\rho_t$  および  $Z_{et}$  と良好な整合性を有するとともに、いずれも全体として一貫した正の相関関係が認められる (密度：相関係数 0.944, 有効原子番号：相関係数 0.895) (Fig. 4-1).

以上より、断層別・岩種別の  $N_{CTM}$  を用いることにより、密度と有効原子番号を算定することが可能である。

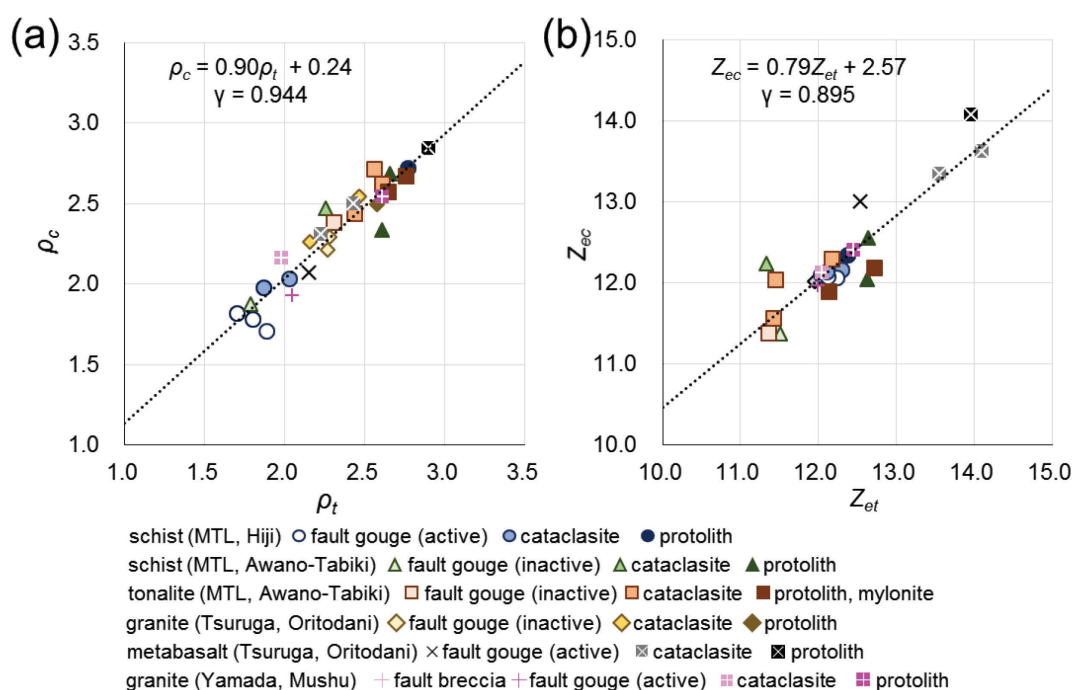


Fig. 4-1. Crossplots of (a) the real density,  $\rho_t$ , versus the measured density,  $\rho_c$ , which is calculated from  $N_{CTM}$ , and (b) the real effective atomic number,  $Z_{et}$ , versus the measured effective atomic number,  $Z_{ec}$ , which is calculated from  $N_{CTM}$ . Regression lines were determined via least-squares analysis.

#### 4-2 $N_{CTM}$ および母岩に対する断層岩の密度比・有効原子番号比に基づく断層岩の特徴

母岩および断層岩を対象として密度、有効原子番号、CT 値について検討した結果、 $\rho_t$ ,  $Z_{et}$  および  $N_{CTM}$  は、いずれも露頭観察で認定した断層の最新活動部に近づくにつれて減少する結果が得られた。また、 $\rho_t$  は Fig. 3-7c に示すとおり断層別・岩種別にそれぞれ固有の  $Z_{et}$  の影響を受けるが、母岩に対する断層岩の密度比を断層別および岩種別に算出して規格化することにより、 $\rho_t$  に対する  $Z_{et}$  の変化の影響は抑制される。

そこで、 $N_{CTM}$  および母岩に対する断層岩の密度比の観点から断層岩の特徴について検討するとともに、有効原子番号についても母岩に対する断層岩の比について検討した。これらの検討結果について Table 4-1 に示すとともに、それぞれの四分位数および平均値を Table 4-2 および Figs. 4-2a-c に示す。

$N_{CTM}$  は、Fig. 4-2a に示すとおり、母岩は  $1900 \pm 300$  程度、カタクレーサイトは  $1650 \pm 250$  程度、非活断層の断層ガウジは  $1450 \pm 200$  程度、活断層の断層ガウジは  $1100 \pm 100$  程度であり、破碎の程度が進み、最新活動部に近づくにつれて減少するとともに、そのばらつきも小さくなる。

Table 4-1. Comparison of  $\rho_t$ ,  $Z_{et}$ ,  $N_{CTM}$ , and the rock/protolith ratios ( $\rho_t$  and  $Z_{et}^{3.8}$ ) for each of the analyzed samples

Fault name	Location	Material	Sample number	$\rho_t$	$Z_{et}$	$N_{CTM}$	Rock/Protolith ratio and compared protolith (No.)			Remarks	
							$\rho_t$	$Z_{et}^{3.8}$	protolith (No.)		
MTL	Hiji	Cataclasite	HJ8-1	2.03	12.30	1333	0.73	0.98	(MZ-5)	schist	
		Fault gouge	HJ8-2	1.70	12.04	1109	0.61	0.90	(MZ-5)		
		Fault gouge	HJ8-3	1.89	12.24	994	0.68	0.96	(MZ-5)		
		Fault gouge	HJ8-4	1.80	12.12	1065	0.65	0.92	(MZ-5)		
		Cataclasite	HJ8-5	1.87	12.11	1281	0.68	0.92	(MZ-5)		
	Mizoguchi	Protolith	MZ-5	2.77	12.38	2056	1.00	1.00	(MZ-5)		
	Awano-Tabiki	Mizoguchi	Protolith	ATS-2	2.66	12.64	1961	1.00	1.00	(ATS-2)	schist
			Protolith	ATS-1	2.61	12.63	1640	0.98	1.00	(ATS-2)	
		Awano-Tabiki	Cataclasite	AT-1	2.26	11.34	1765	0.85	0.66	(ATS-2)	tonalite
			Fault gouge	AT-2	1.79	11.52	1209	0.67	0.70	(ATS-2)	
			Fault gouge	AT-3	2.31	11.36	1665	0.84	0.65	(HA-1)	
			Cataclasite	AT-4	2.61	11.45	1864	0.95	0.67	(HA-1)	
			Cataclasite	AT-5	2.44	11.42	1718	0.89	0.66	(HA-1)	
	Tsuruga	Oritodani	Cataclasite	ATR-2	2.56	12.17	1943	0.93	0.85	(HA-1)	metabasalt
			Mylonite	ATR-4	2.65	12.13	1820	0.96	0.83	(HA-1)	
Protolith			HA-1	2.76	12.72	1908	1.00	1.00	(HA-1)		
Protolith			K-1	2.58	12.16	1656	1.00	1.00	(K-1)		
Cataclasite			C-3	2.47	12.11	1699	0.96	0.98	(K-1)		
Cataclasite			C-2	2.16	12.10	1471	0.84	0.98	(K-1)		
Fault gouge			T-3-1	2.28	11.96	1492	0.88	0.94	(K-1)		
Fault gouge			T-3-2	2.27	12.08	1428	0.88	0.98	(K-1)		
Yamada	Mushu	Fault gouge	YDA-3	2.05	11.99	1108	0.79	0.87	(YK-1)	granite	
		Cataclasite	YDA-4	1.98	12.05	1333	0.76	0.88	(YK-1)		
	Karakawa	Protolith	YK-1	2.61	12.45	1730	1.00	1.00	(YK-1)		
		Fault gouge	—	1.92	12.19	1092	0.69	0.86	—		Active fault
		Fault gouge	—	2.16	11.73	1449	0.82	0.82	—		Inactive fault
Mean of all samples	Cataclasite	—	2.28	12.25	1637	0.84	0.86	—	—		
	Protolith, Mylonite	—	2.69	12.63	1920	1.00	1.00	—	—		

Table 4-2. Statistics of the determined  $N_{CTM}$  values and rock/protolith ratios ( $\rho_t$  and  $Z_{et}^{3.8}$ )

Item	$N_{CTM}$				Rock/Protolith $\rho_t$ ratio			Rock/Protolith $Z_{et}^{3.8}$ ratio		
	Fault gouge (Active)	Fault gouge (Inactive)	Cataclasite	Protolith, Mylonite	Fault gouge (Active)	Fault gouge (Inactive)	Cataclasite	Fault gouge (Active)	Fault gouge (Inactive)	Cataclasite
Max	1185	1665	1981	2590	0.79	0.88	0.96	0.96	0.98	1.04
75%	1109	1535	1815	1985	0.74	0.88	0.91	0.92	0.95	0.98
Median	1108	1460	1699	1864	0.68	0.86	0.84	0.90	0.82	0.89
25%	1065	1373	1402	1712	0.65	0.80	0.77	0.87	0.69	0.76
Min	994	1209	1281	1640	0.61	0.67	0.68	0.67	0.65	0.66
STD	62	163	239	288	0.06	0.09	0.09	0.10	0.14	0.13
Mean	1092	1449	1637	1920	0.69	0.82	0.84	0.86	0.82	0.86
Number of data	5	4	11	8	5	4	11	5	4	11

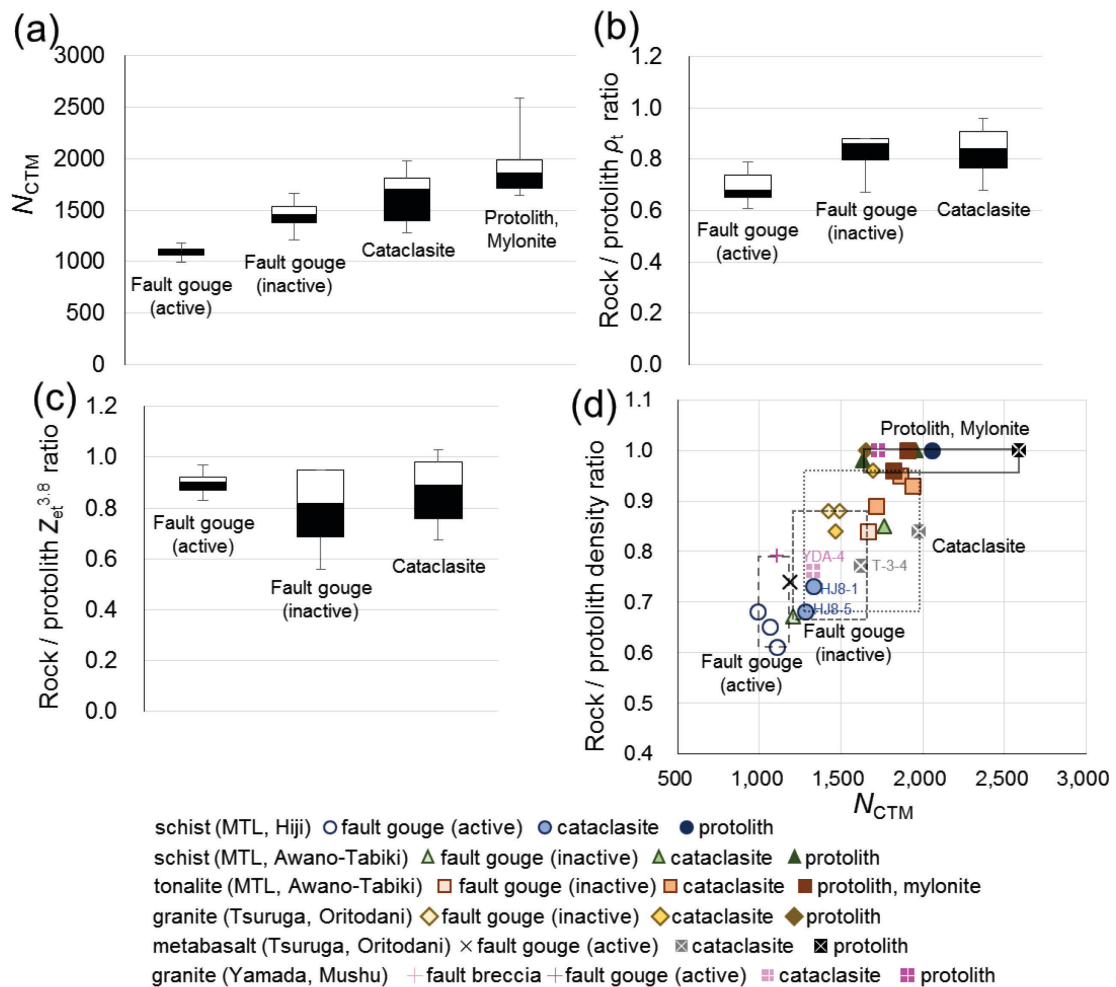


Fig. 4-2. Box plots of (a)  $N_{CTM}$ , (b) rock/protolith  $\rho_t$  ratio, (c) and rock/protolith  $Z_{et}^{3.8}$  ratio, and (d) crossplot of  $N_{CTM}$  versus rock/protolith  $\rho_t$  ratio.

母岩に対する断層岩の密度比は、Fig. 4-2b に示すとおり、カタクレサイトと非活断層の断層ガウジは  $0.8 \pm 0.15$  程度、活断層の断層ガウジは  $0.70 \pm 0.10$  程度であり、破碎の程度が進み、最新活動部に近づくにつれて減少する。ただし、密度比のばらつきの大きさは同程度であり、各断層岩の分布領域の違いは  $N_{CTM}$  に比べて小さい (Fig. 4-2b)。



母岩に対する断層岩の有効原子番号比は、Fig. 4-2c に示すとおり、断層岩の種類にかかわらず 0.85 程度であり、断層岩の種類に応じた傾向の違いは認められない。したがって、有効原子番号は断層岩の種類との関連性は低く、Fig. 3-7c に示すとおり母岩の種類によって独自の特徴を示すと考えられる。

以上より、最新活動部への移行に伴う断層岩の特徴の変化は  $N_{CTM}$  において最も明瞭であること、密度比は活断層の断層ガウジが他の断層岩に比べて小さいこと、有効原子番号比は断層岩の種類にかかわらず 15%程度の低下にとどまることが明らかとなった。 $N_{CTM}$  において断層岩の特徴の変化が最も明瞭にあらわれる要因としては、密度と有効原子番号の関数である  $N_{CTM}$  では、断層岩の種類に応じた密度の変化と有効原子番号の変化が重複するためであると考えられる。また、 $N_{CTM}$  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。

$N_{CTM}$  と母岩に対する断層岩の密度比の関係を Fig. 4-2d に示す。 $N_{CTM}$  および密度比は、破碎の程度が進み、最新活動部に近づくにつれて減少するが、非活断層の断層ガウジとカタクレサイトの分布領域は大きく重複している。これは、活断層の断層ガウジに近接するカタクレサイト (HJ8-1, HJ8-5, T-3-4, YDA-4) が、地下浅部で発生した活断層の地震活動の影響を受けることにより、空隙率の増大と、 $N_{CTM}$  および密度比の低下が他のカタクレサイトに比べて顕著となり、低  $N_{CTM}$  側・低密度比側のカタクレサイトの分布領域が広がることが要因である。

#### 4-3 断層の最低密度領域と最新活動部との関係

本検討で対象とした 4 断層では、いずれも露頭観察において認定した最新活動部の断層ガウジ (HJ8-3, AT-2, T-3-3, YDA-3) において  $N_{CTM}$  が最低値になるとともに、母岩に対する断層岩の密度比についても最新活動部またはその付近において最低値になることが確認された。これは各断層の最新活動時の地震発生深度が、過去の断層活動において最も浅いことが要因と考えられる。

したがって、断層の最低密度領域は、その断層の最新活動領域に対応する可能性があり、密度と有効原子番号の関数である  $N_{CTM}$  を用いることにより最新活動部を推定できる可能性がある。

しかし、断層岩の密度低下は、断層活動による剪断の影響以外にも、鉱物の沈殿や相転移、地下水への溶解などの二次鉱物の生成による影響を受ける場合もあるため、断層の最低密度領域が必ずしも最新活動部に対応しない場合があることに留意する必要がある。 $N_{CTM}$ 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、剪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剪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、 $N_{CTM}$ 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り、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部を認定できる可能性がある。今後は、活断層、非活断層およびそれぞれの母岩の検討事例を増やし、本検討で得られた $N_{CTM}$ を活用して断層の最低密度領域および最新活動部を認定する手法の有効性をさらに高めることが期待される。

#### 4-4 岩石試料の実効エネルギー $E_e$ と $N_{CT}$ の関係

2.9章では、6種類の鉱物試料を対象として実効エネルギー $E_e$ と $N_{CT}$ との関係について整理し、本論で得られた検討結果を異なるCT装置における検討への適用方法について検討した。本章においても、前章と同じ方法を用い、岩石試料に関する実効エネルギー $E_e$ と $N_{CT}$ との関係について各露頭の岩種別に整理した (Table 4-3)。この際、前章までの検討で使用した管電圧140 kV (64.1 keV) の $N_{CTMode}$ に加えて、同じ解析対象範囲で算出した管電圧100 kV (53.7 keV) の $N_{CTMode}$ を活用して検討した。

その結果、各岩種ともに $N_{CTMode}$ は実効エネルギー $E_e$ の増大に伴い減少し、その変化の程度は $N_{CTMode}$ の増大に伴い増加する (Figs. 4-3a, d, g, j, m, p)。岩種別に実効エネルギー $E_e$ と $N_{CTMode}$ との関係を直線回帰式で近似し、勾配Aおよび切片Bと $N_{CTMode}$ との関係について整理した結果、 $N_{CTMode}$ の分布範囲が狭いケースを除いていずれも良好な相関関係が得られた (Figs. 4-3 b, c, e, f, h, i, k, l, n, o, q, r)。また、岩種別に算定された全ての勾配Aおよび切片Bと $N_{CTMode}$ との関係について整理した結果、全体としても概ね一貫した相関関係が認められる (Figs. 4-4a, b)。なお、各岩種の母岩は、鉱物試料の検討結果 ( $A = -0.034N_{CTMode(140\text{ kV})} + 36.9$ ,  $B = 3.18N_{CTMode(140\text{ kV})} - 2367.4$ ) と良好な整合性が認められるが、活断層のガウジ

のように  $N_{CTMode}$  が小さい場合には、 $E_e$  に対する  $N_{CTMode}$  の変化の程度は鉱物試料に比べて小さい。

これらの関係を用いて、管電圧 140 kV (64.1 keV) の  $N_{CTMode}$  を基準とした実効エネルギー  $E_e$  と  $N_{CT}$  との関係を整理し (Table 4-4), 各断層岩の  $N_{CT}$  の代表値 (活断層の断層ガウジ: 1100, 非活断層の断層ガウジ: 1450, カタクレーサイト: 1650, 母岩: 1900) を例として検討した結果, 各断層岩の  $E_e$  と  $N_{CT}$  の関係は岩種別の検討結果と整合する (Figs. 4-3a, d, g, j, m, p). なお, この検討では, 本論における  $E_e$  の検討範囲を考慮して 54~64 keV の範囲における関係を示した。

以上より, 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ためには, CT 装置の実効エネルギー  $E_e$  を測定し, Figs. 4-3a, d, g, j, m, p を活用することにより, 本論における管電圧 140 kV (64.1 keV) の  $N_{CTMode}$  との関係について整理できるとともに, 同じ種類の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 装置の実効エネルギー  $E_e$  を推定することが可能である。

Table 4-3. Relation between effective energy  $E_e$  and  $N_{CTMode}$  of each protolith type

Fault name	Location	Material	Sample number	Pixel count	140 kV ( $E_e = 64.1$ keV)		100 kV ( $E_e = 53.7$ keV)		$N_{CTMode} = AE_e + B$		Protolith	
					$N_{CTM}$	SD of $N_{CTM}$	$N_{CTM}$	SD of $N_{CTM}$	A	B		
	Hiji	Cataclasite	HJ8-1	113570	1333	277	1572	324	-23.0	2806	schist	
		Fault gouge	HJ8-2	122389	1109	192	1331	223	-21.3	2477		
		Fault gouge	HJ8-3	73380	994	176	1167	205	-16.6	2060		
		Fault gouge	HJ8-4	61075	1065	170	1254	193	-18.2	2230		
		Cataclasite	HJ8-5	39613	1281	312	1464	355	-17.6	2409		
	Mizoguchi	Protolith	MZ-5	132804	2056	112	2384	138	-31.5	4078		
		Protolith	ATS-2	119482	1961	129	2261	146	-28.8	3810		
	MTL		Protolith	ATS-1	63283	1640	177	1911	211	-26.1	3310	schist
			Cataclasite	AT-1	202405	1765	171	2086	194	-30.9	3744	
			Fault gouge	AT-2	17591	1209	143	1444	136	-22.6	2657	
Awano-Tabiki		Fault gouge	AT-3	11968	1665	104	1992	102	-31.4	3681	tonalite	
		Cataclasite	AT-4	103475	1864	161	2130	180	-25.6	3504		
		Cataclasite	AT-5	52123	1718	123	1929	136	-20.3	3019		
		Cataclasite	ATR-2,3	80661	1943	90	2271	102	-31.5	3965		
			Mylonite	ATR-4	132075	1820	210	2138	270	-30.6	3780	
			Protolith	HA-1	134722	1908	209	2270	240	-34.8	4139	
			Protolith	K-1	311751	1656	186	1909	224	-24.3	3215	
Tsuruga	Oritodani	Cataclasite	C-3	234228	1699	164	1914	208	-20.7	3024	granite	
		Cataclasite	C-2	241788	1471	93	1678	108	-19.9	2747		
		Fault gouge	T-3-1	94154	1492	70	1721	74	-22.0	2903		
		Fault gouge	T-3-2	64118	1428	121	1645	138	-20.9	2766		
		Fault gouge	T-3-3	19558	1185	140	1380	168	-18.8	2387		
			Cataclasite	T-3-4	78628	1622	206	1960	256	-32.5	3705	metabasalt
			Cataclasite	C-1	203854	1981	177	2485	221	-48.5	5087	
			Protolith	T-5	201781	2590	204	3172	267	-56.0	6177	
	Yamada	Mushu	Fault gouge	YDA-3	49921	1108	130	1280	171	-16.5	2168	granite
			Cataclasite	YDA-4	165093	1333	119	1515	136	-17.5	2455	
Karakawa		Protolith	YK-1	329517	1730	244	1966	298	-22.7	3185		

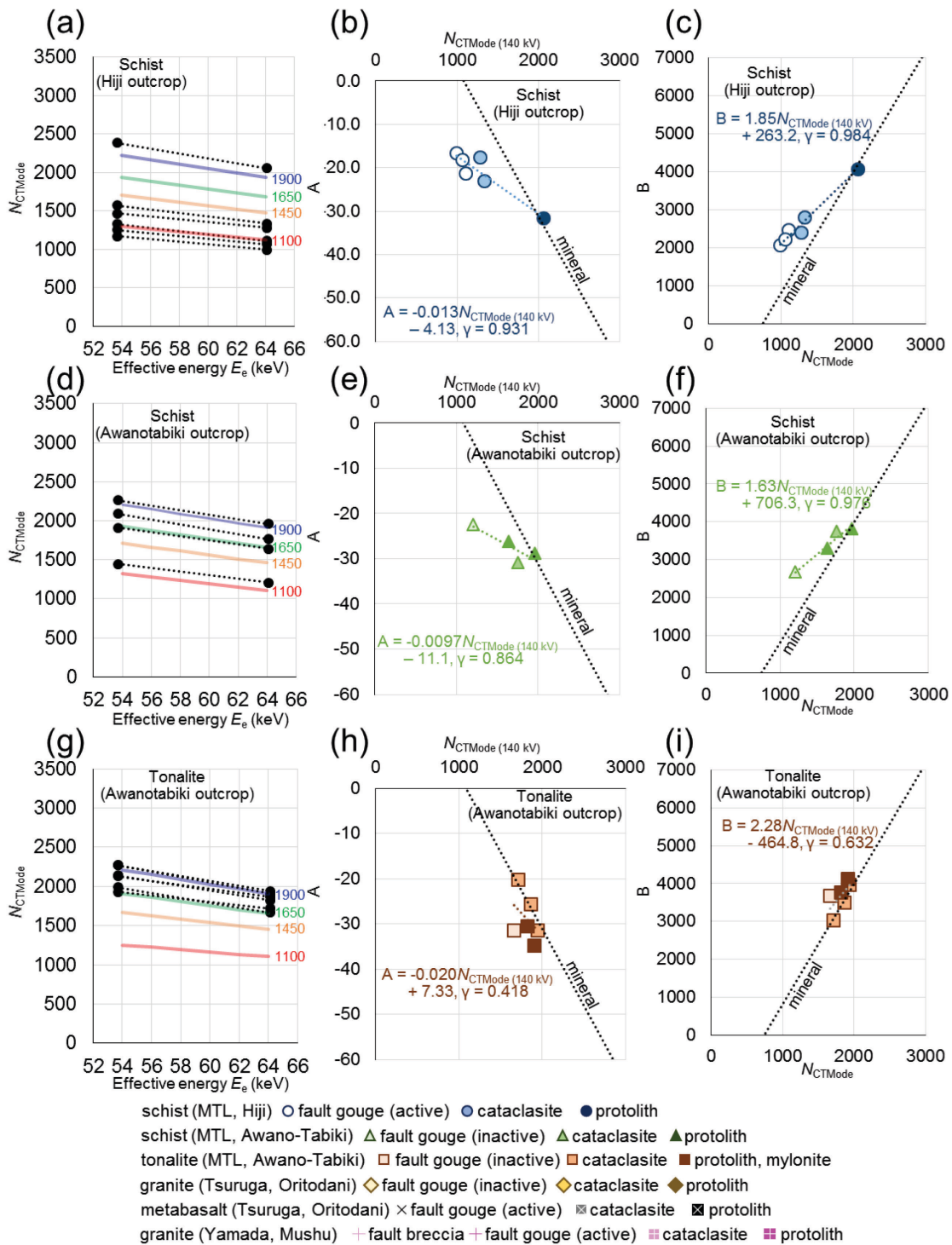


Fig. 4-3. (a, d, g, j, m, p) CT number  $N_{CTMode}$  versus effective energy  $E_e$ . Colored lines, which are calculated from relation between  $N_{CT}$  and effective energy  $E_e$  based on  $N_{CTMode(140\text{ kV})}$ , show the trend of representative values of  $N_{CT}$  of active fault gouge, inactive fault gouge, cataclasite and protolith. (b, e, h, k, n, q) relation between the gradient  $A$  of the linear regression equation for  $E_e$  and  $N_{CTMode(140\text{ kV})}$ , (c, f, i, l, o, r) relation between the intercept  $B$  of the linear regression equation for  $E_e$  and  $N_{CTMode(140\text{ kV})}$ .

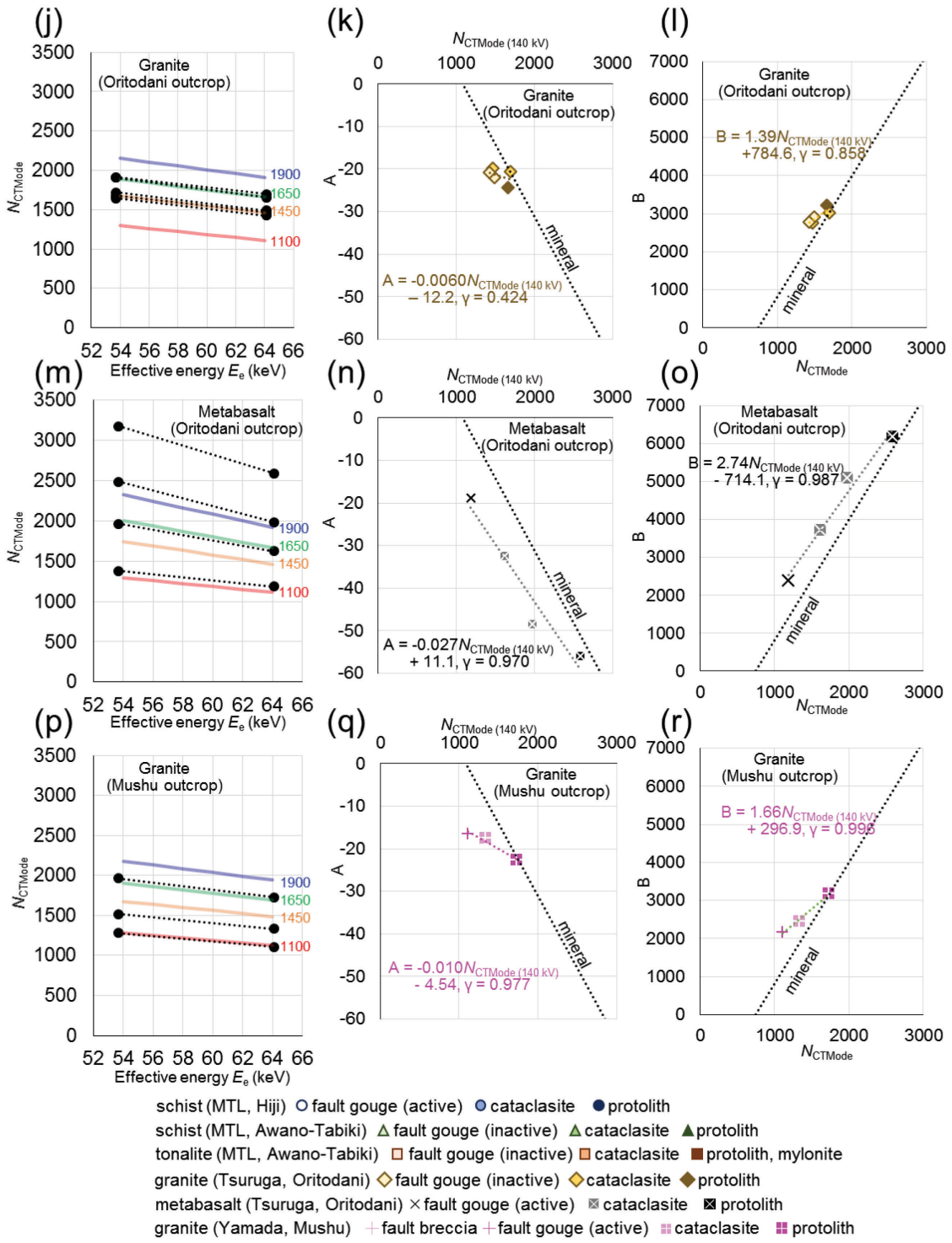


Fig. 4-3. (Continued)

Table 4-4. Relation between  $N_{CT}$  and effective energy  $E_e$  based on  $N_{CTMode(140\text{ kV})}$  of each protolith type

Fault name	Location	Protolith	$N_{CTMode}$ (140 kV)	A	B	$E_e$ (keV)	$N_{CT}$	Fault name	Location	Protolith	$N_{CTMode}$ (140 kV)	A	B	$E_e$ (keV)	$N_{CT}$
MTL	Hiji	schist	1100	-18.4	2298.2	54	1303	Tsuruga	Oritodani	granite	1100	-18.8	2313.6	54	1298
						56	1266							56	1261
						58	1229							58	1223
						60	1192							60	1186
						62	1156							62	1148
						64	1119							64	1110
			1450	-23.0	2945.7	54	1705	1450	-20.9	2800.1	54	1672			
						56	1659				56	1630			
						58	1613				58	1588			
						60	1567				60	1546			
						62	1521				62	1504			
						64	1475				64	1463			
			1650	-25.6	3315.7	54	1934	1650	-22.1	3078.1	54	1885			
						56	1883				56	1841			
						58	1832				58	1796			
						60	1781				60	1752			
						62	1730				62	1708			
						64	1679				64	1664			
			1900	-28.8	3778.2	54	2221	1900	-23.6	3425.6	54	2151			
						56	2164				56	2104			
						58	2106				58	2057			
						60	2048				60	2010			
						62	1991				62	1962			
						64	1933				64	1915			
Awano-Tabiki	schist	schist	1100	-21.8	2499.3	54	1324	Tsuruga	Oritodani	metabasalt	1100	-18.6	2299.9	54	1296
						56	1280							56	1258
						58	1237							58	1221
						60	1193							60	1184
						62	1150							62	1147
						64	1106							64	1110
			1450	-25.2	3069.8	54	1711	1450	-28.1	3258.9	54	1744			
						56	1661				56	1688			
						58	1610				58	1632			
						60	1560				60	1576			
						62	1510				62	1520			
						64	1459				64	1464			
			1650	-27.1	3395.8	54	1932	1650	-33.5	3806.9	54	2001			
						56	1878				56	1934			
						58	1824				58	1867			
						60	1770				60	1800			
						62	1715				62	1733			
						64	1661				64	1666			
			1900	-29.5	3803.3	54	2209	1900	-40.2	4491.9	54	2321			
						56	2150				56	2241			
						58	2091				58	2160			
						60	2032				60	2080			
						62	1972				62	2000			
						64	1913				64	1919			
Awano-Tabiki	tonalite	tonalite	1100	-14.7	2043.2	54	1251	Yamada	Mushu	granite	1100	-15.5	2122.9	54	1284
						56	1222							56	1253
						58	1192							58	1222
						60	1163							60	1191
						62	1134							62	1159
						64	1104							64	1128
			1450	-21.7	2841.2	54	1671	1450	-19.0	2703.9	54	1676			
						56	1628				56	1638			
						58	1584				58	1600			
						60	1541				60	1562			
						62	1498				62	1523			
						64	1454				64	1485			
			1650	-25.7	3297.2	54	1911	1650	-21.0	3035.9	54	1900			
						56	1860				56	1858			
						58	1808				58	1816			
						60	1757				60	1774			
						62	1706				62	1731			
						64	1654				64	1689			
			1900	-30.7	3867.2	54	2211	1900	-23.5	3450.9	54	2180			
						56	2150				56	2133			
						58	2088				58	2086			
						60	2027				60	2039			
						62	1966				62	1991			
						64	1904				64	1944			

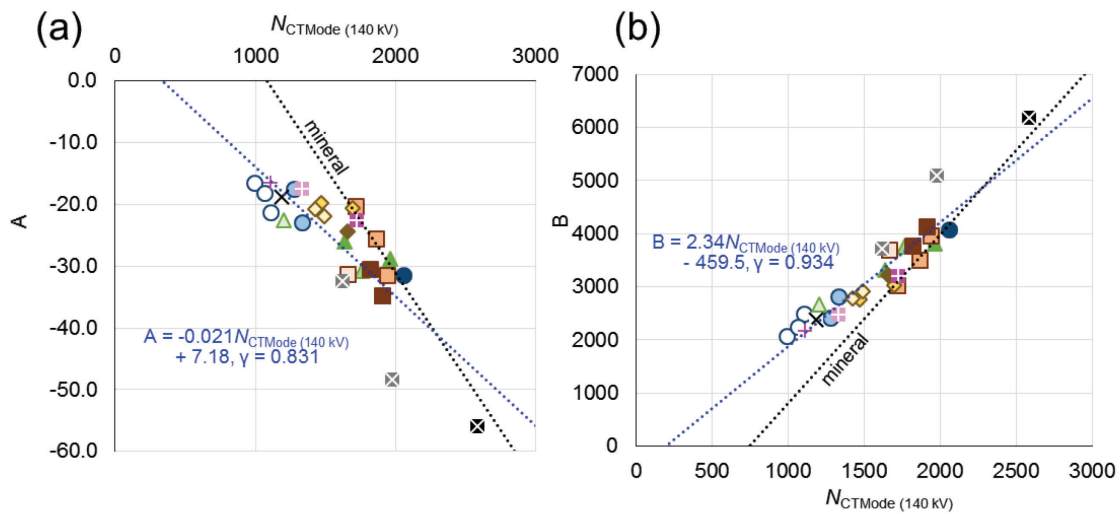


Fig. 4-4. (a) Relation between the gradient \$A\$ of the linear regression equation for \$E\_c\$ and \$N\_{CTMode (140 kV)}\$ for all protolith, (b) relation between the intercept \$B\$ of the linear regression equation for \$E\_c\$ and \$N\_{CTMode (140 kV)}\$ for all protolith.

## 5. 結論

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・削剝を考慮すると、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するとともに、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により取得した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  $\rho_t$  は最新活動面に近づくにつれて減少し、空隙率  $\phi$  は岩種や断層の違いによらず密度が  $1 \text{ g/cm}^3$  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、活断層の断層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  $\rho_t$  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、 $N_{CTM}$ 、密度  $\rho_t$  および有効原子番号  $Z_{et}$  の関係を整理することにより、 $N_{CTM}$  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  $\rho_t$ 、有効原子番号  $Z_{et}$  と  $N_{CTM}$  から推定される密度  $\rho_c$ 、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  $1900 \pm 300$  程度、カタクレーサイトは  $1650 \pm 250$  程度、非活断層の断層ガウジは  $1450 \pm 200$  程度、活断層の断層ガウジは  $1100 \pm 100$  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  $0.8 \pm 0.15$  程度、活断層の断層ガウジは  $0.70 \pm 0.10$  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  $E_c$  を測定し、 $E_c$  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 (64.1 keV) の  $N_{CTMode}$  との関係について整理でき、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  $E_c$  を推定することが可能である。

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。

また、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可能性があることを示した。

しかし、断層岩の密度低下は、断層活動による剪断の影響以外にも、鉱物の沈殿や相転移、地下水への溶解などの二次鉱物の生成による影響を受ける場合もあるため、断層の最低密度領域が必ずしも最新活動部に対応しない場合があることに留意する必要がある。 $N_{CTM}$  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、剪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剪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。

## 6. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、早稲田大学教育・総合科学学術院高木秀雄教授には終始懇切なるご指導をいただいた。早稲田大学教育・総合科学学術院太田亨教授には、副査として本論文の審査をお引き受けいただくとともに、画像解析の見地から熱心なるご指導をいただいた。(一財) 電力中央研究所上田圭一研究参事には、副査として本論文の審査をお引き受けいただくとともに、研究全般に関してご支援をいただいた。(一財) 電力中央研究所中田英二氏、野原慎太郎氏には、CT 画像解析および試料分析結果の評価、研究の進め方の見地から有益なご助言をいただいた。(株)ダイヤコンサルタント杉森辰次氏、朝日信孝には、露頭観察、試料採取、CT 画像データおよび試料分析データの整理の見地からご支援をいただいた。吉沢技研計測(株)の又吉盛次氏には、CT 画像撮影でご協力いただいた。(株)セレスの

山田晃裕氏には、XRF 分析および密度試験でご協力いただいた。キヤノンメディカルシステムズ㈱の田辺花奈氏、山本祥太郎氏、清瀬公三氏、北條弘一氏および倉元航大氏には、実効エネルギーの計測および CT 画像の撮影条件の詳細について丁寧なご指導をいただいた。西崎忠宏氏には、全ての断層岩の定方位試料採取でご協力いただいた。関西電力㈱OB 橋本徳昭氏、大石富彦氏、金谷賢生氏には、原子力発電所の審査対応で実施した断層調査に関する技術の幅を広げる見地から博士後期課程に挑戦する機会をいただいた。関西電力㈱多田隆司執行役常務、大阪地区開発㈱浅野真一朗代表取締役社長、日本原子力発電㈱堀江正人執行役員には、原子力発電所の審査対応業務と大学での研究の両立に挑戦する環境を整備していただいた。関西電力㈱地震津波評価グループの諸氏には、研究の推進に際し、社内手続きの調整・対応にご協力をいただいた。国立研究開発法人日本原子力研究開発機構島田耕史には、博士後期課程に挑戦するにあたり、高木秀雄先生にご紹介いただくとともに、構造地質学の見地から多くを学ばせていただいた。以上の方々に心よりお礼申し上げます。これまであたたかく励ましてくれた両親と、いかなる時も力強く支えてくれた妻一美、長女美海に心より感謝申し上げます。最後に、早稲田大学における二度の学生生活を通じて工学と理学を学ぶ機会をいただいたことに深く感謝するとともに、今後も自然から学び、研鑽を続けることを誓います。

## 7. 文献

- 相山光太郎・田中姿郎・佐々木俊法, 2017, 断層破碎帯の詳細構造解析に基づく断層の活動性の検討: 山田断層の例, 応用地質, **58**, 2-18.
- Anthony, J. W., Bideaux, R. A., Bladh, K. W., Nichols, M. C., Eds., 1997, Handbook of Mineralogy, III, Mineral. Soc. Amer., Chantilly, VA 20151-1110, USA.  
<http://www.handbookofmineralogy.org/>.
- Boespflug, X., Long, B.F.N., Occhietti, S., 1995, CAT-scan in marine stratigraphy: a quantitative approach. *Marine Geol.*, **122**, 281-301.
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 2013, An Introduction to the Rock Forming Minerals, 3rd. ed., Longman Group Ltd., England.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2004, 山田断層帯の長期評価について.  
[https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou\\_pdf/74\\_yamada.pdf/](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/74_yamada.pdf/)

- Geet, M.V., Swennen, R., Wevers, M., 2000, Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography. *Sedimentary Geol.*, **132**, 25-36
- Hirono, T., Sakaguchi, M., Otsuki, K., Sone, H., Fujimoto, K., Mishima, T., Lin, W., Tanikawa, W., Tanimizu, M., Soh, W., Yeh, E., Song, S., 2008, Characterization of slip zone associated with the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake: X-ray CT image analyses and microstructural observation of the Taiwan Chelungpu fault. *Tectonophysics*, **449**, 63–84.
- Hounsfield, G.N., 1973, Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system. *British J. Radiology*, **46**, 1016–1022.
- Hubbell, J.H., 1982, Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, **33**, 1269-1290.
- 池田隆司・小村健太郎・飯尾能久・新井崇史・小林健太・松田達生・島田耕史・田中秀実・富田倫明・平野 聡, 2001, 1995 年兵庫県南部地震に伴う野島断層を貫くドリリング調査, 防災科学技術研究所研究報告, **61**, 141-153.
- 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 裕, 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 年度秋季学術大会講演予稿集, 62-63.
- 日本規格協会, 2013, JIS B 7442-2013 : 産業用 X 線 CT 装置—用語, 1-22.
- Ketcham, R.A., Carlson, W.D., 2001, Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Comp. Geosci.*, **27**, 381–400.
- Ketcham, R.A., Hanna, R.D., 2014, Beam hardening correction for X-ray computed tomography of heterogeneous natural materials. *Comp. Geosci.*, **67**, 49-61.
- 栗本史雄・内藤一樹・杉山雄一・中江 訓, 1999, 敦賀地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター
- Mizoguchi, K., Ueta, K., 2013, Microfractures within the fault damage zone record the history of fault activity, *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 2023–2027.
- Morrow, C. A., Lockner, D.A., 2001, Hayward fault rocks : Porosity, density and strength measurements. U.S. Department of the Interior, *U.S. Geological Survey*.
- 中野 司・中島義人・中村光一・池田 進, 2000, X 線 CT による岩石内部構造の観察・解析法, 地質学雑, **106**, 363-378.

- 産総研地質調査総合センター, 2016, 活断層データベース「151 敦賀起震断層」,  
<https://gbank.gsj.jp/activefault/>.
- National Institute of Standards and Technology, 2004, X-Ray Mass Attenuation Coefficients. NIST Standard Reference Database 126.  
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ComTab/water.html>
- 西岡芳晴・中江 訓・竹内圭史・坂野靖行・水野清秀・尾崎正紀・中島 礼・実松健造・名和一成・駒津正夫, 2010, 20 万分の 1 地質図幅「伊勢」, 産総研地質調査総合センター
- 西澤 修・中野 司・野呂春文・稲崎富士, 1995, X 線 CT による地球科学試料の内部構造分析技術の最近の進歩について, 地質調査所月報, **46**, 565-571.
- 岡田篤正, 1992, 中央構造線活断層系の活動区の分割試案, 地質学論集, **40**, 15-30.
- Orsi, T.H., Edwards, C.M., Anderson, A.L., 1994, X-ray computed tomography: A nondestructive method for quantitative analysis of sediment cores. *J. Sed. Res.*, **A64**, 690-693.
- Raynaud, S., Fabre, D., Mazerolle, F., Geraud, Y., Latiere. H.J., 1989, Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a non-destructive method: X-ray tomodensitometry. *Tectonophysics*, **159**, 149-159
- Rempe, M., Mitchell, T., Renner, J., Nippres, S., Ben-Zion, Y., Rockwell, T., 2013, Damage and seismic velocity structure of pulverized rocks near the San Andreas Fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**, 2813-2831.
- Shigematsu, N., Kametaka, M., Inada, N., Miyawaki, M., Miyakawa, A., Kameda, J., Togo, T., Fujimoto, K., 2017, Evolution of the Median Tectonic Line fault zone, SW Japan, during exhumation. *Tectonophysics*. 696–697, 52–69.
- 高木秀雄, 1984, 長野県高遠～市野瀬地域における中央構造線沿いの圧砕岩類, 地質雑, **90**, 81-100.
- 高木秀雄, 1985, 紀伊半島東部粥見地域における領家帯の圧砕岩類, 地質雑, **91**, 637-651.
- 高木秀雄・小林健太, 1996, 断層ガウジとマイロナイトの複合面構造—その比較組織学, 地質雑, **102**, 170-179.
- 高木秀雄・杉山幸太郎・田村糸子・水野清秀・北澤夏樹・河本和朗, 2019, 長野県伊那市の中央構造線非持露頭における最新活動の認定, 活断層研究, **50**, 1-12.

- 竹内文朗・中村佳重郎・松村一男・渡辺邦彦, 2005, 山崎断層系における岩石密度の測定, 京都大学防災研究所年報, **48B**.
- 田中義浩・亀高正男・岡崎和彦・鈴木一成・瀬下和芳・青木和弘・島田耕史・渡邊貴央・中山一彦, 2018, 断層面の形態観察に基づく断層活動性評価手法の検討, 応用地質, **59**, 13-27.
- (公社) 地盤工学会, 2017, JGS2132-2009 : 岩石の密度試験, Japanese Geotechnical Society Standards Vol. 2-Laboratory Testing Standards of Geomaterials, 300p.
- 土山 明・上杉健太郎・中野 司, 2000, 高分解能 X 線 CT 法による岩石・鉱物の 3 次元構造の研究－太陽系初期物質とコンドリュール－, 地学雑, **109**, 845-858.
- Tsuchiyama, A., Nakamura, T., Nakano, T., Nakamura, N., 2002, Three-dimensional description of the Kobe meteorite by micro X-ray CT method: possibility of three-dimensional curation of meteorite samples. *Geochem. J.*, **36**, 369–390.
- Tsuchiyama, A., Uesugi, K., Nakano, T., Ikeda, S., 2005, Quantitative evaluation of attenuation contrast of X-ray computed tomography images using monochromatized beams. *Amer. Min.*, **90**, 132–142.
- Ueta, K., Tani, K., Kato, T., 2000, Computerized X-ray tomography analysis of three-dimensional fault geometries in basement-induced wrench faulting. *J. Eng. Geol.*, **56**, 197-210.
- Verhelst, F., David, P., Fermont, W., Jegers, L., Vervoort, A., 1996, Correlation of 3D-computerized tomographic scans and 2D-colour image analysis of Westphalian coal by means of multivariate statistics. *Int. J. Coal Geol.*, **29**, 1–21.
- Wellington, S.L., Vinegar, H.J., 1987, X-ray computerized tomography. *J. Petrol. Tech.*, **39**, 885–898.
- Zhang, F., An, M., Zhang, L., Fang, Y., Elsworth, D., 2020, Effect of mineralogy on friction-dilation relationships for simulated faults: Implications for permeability evolution in caprock faults. *Geoscience Frontiers*, **11**, 439-450.

## 研究業績

論文	<p><u>Iwamori, A.</u>, 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, <i>Progress in Earth and Planetary Science</i>, <b>8</b>, no.54.</p>
論文	<p><u>岩森暁如</u>・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, <i>岩石鉱物科学</i>, <b>49</b>, 101-117.</p>
講演 (ポスター)	<p><u>岩森暁如</u>・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</p>
その他	<p>(医療用 CT 関係)</p>
講演	<p><u>岩森暁如</u>・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キ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)</p>
講演 (ポスター)	<p><u>岩森暁如</u>・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)</p>

論文 (連名)	(地形・地質構造関係) 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・ <u>岩森暁如</u> ・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, <b>125</b> , 793-820.
講演 (ポスター)	<u>岩森暁如</u> ・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・ <u>岩森暁如</u> ・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・ <u>岩森暁如</u> ・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, 日本ベントス学会誌, (投稿中)
講演 (連名)	久岡慎吾・審浩年・山田浩二・ <u>岩森暁如</u> ・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