

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20941

研究課題名（和文）試料観察革命：革新的X線CT技術による非破壊3次元化学組成強度分布測定への挑戦

研究課題名（英文）Revolution of sample observation:Non-destructive 3D chemical compositional intensity mapping by innovative X-ray CT technology

研究代表者

森下 知晃（MORISHITA, TOMOAKI）

金沢大学・地球社会基盤学系・教授

研究者番号：80334746

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では金沢大学で開発が進められている光子係数型CT（フォトンカウンティングフォトンカウンティングCT:PC-CT）を岩石試料に初めて適応することを目的として行われた。その研究成果は、以下のようにまとめることができる。1）通常CTよりも適切なエネルギー帯を選ぶことで、よりコントラストのついた画像が得られる。2）平均CT値に加えて、エネルギー帯ごとのCT値を用いた平均CT値の差の平均という新しい判断基準を使うことで、分別する鉱物情報があれば、それらをCT値から分別できる可能性が見出せた。これらの結果は、PC-CTが非破壊での岩石内部構造観察に通常CTよりも有用な情報を与えてくれることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体試料を非破壊でその内部にどのような物質がどのように分布しているのかを明らかにすることは、岩石試料を取り扱う時に試料を粉砕する前の情報を得るために極めて重要である。本研究ではこれまで行われてきた通常のCT像と比較して、新しい光子係数型CTを世界で初めて岩石試料に適用し、通常CTよりもよりコントラストのつく画像を得られることだけでなく、前もって、予想される物質がある場合は、CT値情報だけで、それらをそれらの物質と認識して分別できる可能性を示唆した。これらの結果は、通常のCTのその先の未来の新しい非破壊内部観察装置の開発に向けた貴重なデータの提示となる。

研究成果の概要（英文）：We report the first results of applying PC-CT to basic minerals such as quartz and calcite. In the low-energy range, PC-CT produced higher contrast images than conventional CT. Minerals were successfully identified from the relationships between the mean CT values for each energy window and the mean difference between pairs of energy windows. These results suggest that PC-CT can produce high-contrast images of minerals and may be able to distinguish mineral phases with different attenuation curves, even when their CT values are similar. Given some prior knowledge of mineral phases from other methods, it may be possible to use PC-CT imaging to obtain further information about their chemical compositions.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：光子係数型CT 岩石非破壊観察

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

一般普及が可能である革新的 X 線トモグラフィ技術を世界で初めて地球科学的試料に応用し、従来の X 線 CT 手法では不可能であった試料内部の非破壊 3 次元化学組成強度の簡便・短時間測定に挑戦することであった。

### 2. 研究の目的

地球科学試料を構成している相の同定・形状・サイズ・分布は、試料の成因、およびその試料を含む地質帯の地球史を解読する上で重要な基本情報であり、これらを高精度で測定するためには 3 次元での観察が不可欠である。地球科学的試料の 3 次元内部構造観察として X 線トモグラフィ(X 線 CT)が広く使用されているが、現在普及しているシステムでは内部構造観察に制限があるため、試料によっては構成相の分離ができない。そこで、本研究の目的は、一般普及が可能で革新的 X 線 CT 技術を世界で初めて地球科学試料に応用し、従来の X 線 CT 手法では不可能な試料内部の非破壊 3 次元化学組成強度イメージの簡便・短時間測定に挑戦し、試料非破壊内部観察技術のパラダイムの変革を起こすことである。

### 3. 研究の方法

X 線トモグラフィ (Computed tomography, CT) は、物質に対する X 線の高い透過力を利用し、非破壊で物体内部の 3 次元構造の観察を可能とする測定手法として地球科学を含む幅広い分野に使用されている。しかし、従来の X 線 CT 像の X 線画像は、エネルギー情報が不十分で、化学組成差があっても密度差の少ない相同士の違いを検出できないという欠点がある。そこで本研究では、従来 X 線 CT で使用されている検出器 (フォトダイオード) とは異なる高い信号増幅率という特徴を持つマルチピクセルフォトンカウンター (MPPC) を採用したシステムを用いて高速シンチレータと組み合わせることで ノイズを抑えた個々の X 線光子エネルギー情報を得て、地球科学試料の非破壊 3 次元化学元素強度測定に挑戦する。

### 4. 研究成果

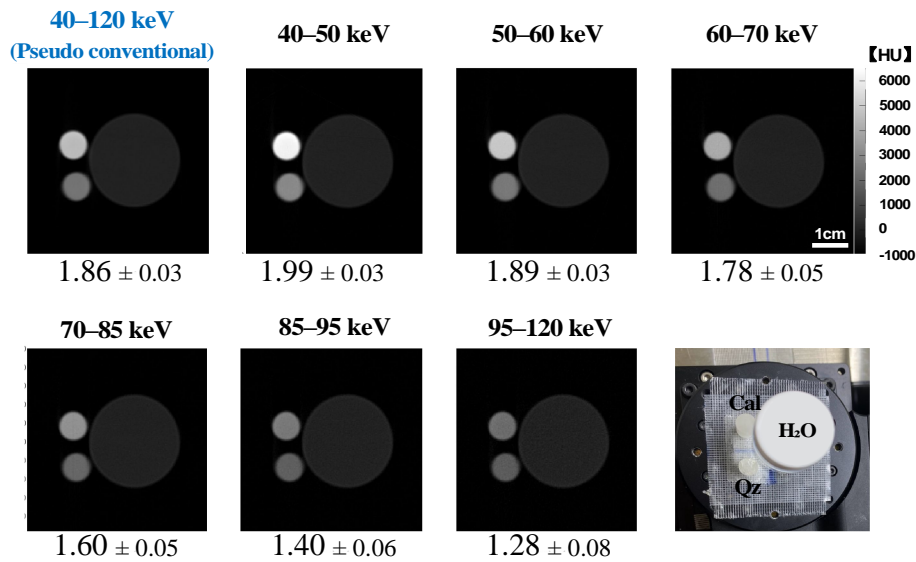
#### 測定条件の検討

本研究は PC-CT 装置を岩石試料に応用する初めての研究となるため、まずは観察に適した試料のサイズ、形状について検討した。観察試料の形状は通常の岩石試料 (5cm x 5cm x 5cm 程度の大きさ) に X 線を照射して観察した結果を踏まえて、形状は円柱状とし、全体的にアーチファクトの影響を抑えられる (アーチファクトの補正を行わない) サイズとして 8mm 直径のサイズとした。

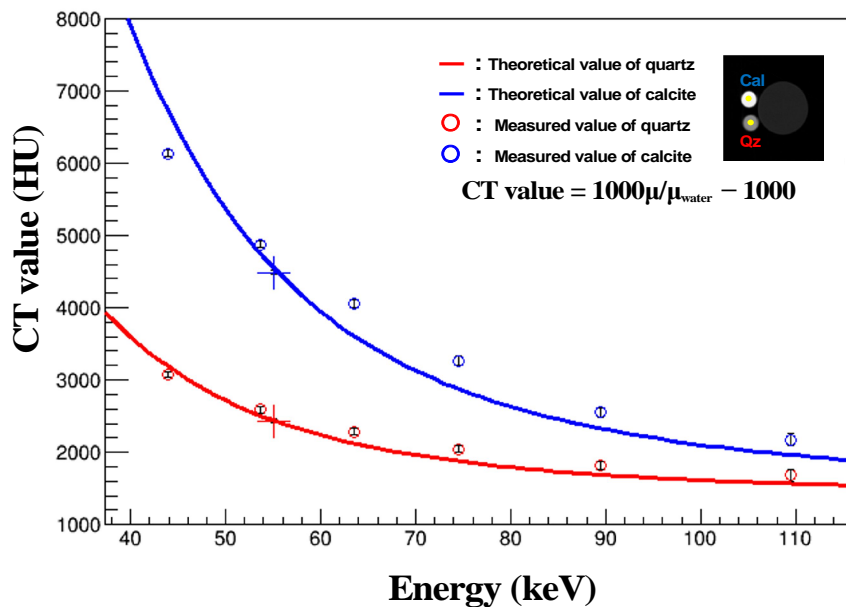
#### PC-CT による CT 像の特徴と利点

地球の地殻を構成している岩石の中でも主要な鉱物である石英や方解石の単結晶を用いて測定した結果を示す (図 1)。図 1 は 6 つの異なるエネルギー幅で得られた画像を示した。比較のために水も同時に撮影している。図 2 は光子エネルギー値と CT 値の関係を示した図である。理論的に求められる値は実線で示されている。この図から、より低エネルギーの幅で得られた図がよりコントラストが得られていることがわかる。このコントラストは通常の全てのエネルギーを使う通常の CT 像よりも、その物質に適したエネルギー幅で得られた図を使えばよりコ

コントラストがついた図を得られることがわかった。



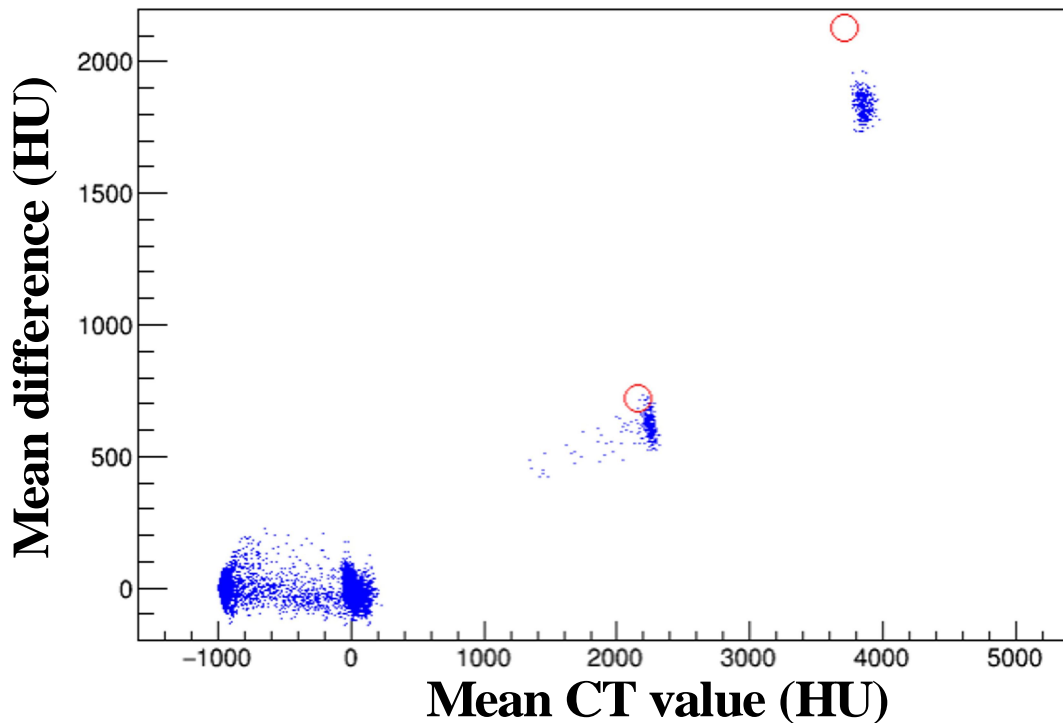
**FIGURE 1.** CT images acquired using six different energy windows and the full energy range of 40–120 keV. The image from using the full energy range is a pseudo-conventional CT image. The ratio of the CT values of calcite and quartz ( $CT_{cal}/CT_{qtz}$ ) for each figure is also shown. Increasing brightness indicates increasing CT values, as quantified by the gray-scale bar on the right of each figure. In each figure, the upper small circle is calcite, the lower small circle is quartz, and the large circle is water. HU = CT value with the Hounsfield unit.



**FIGURE 2.** Relationship between photon energy and CT value. Red and blue open circles are CT values for quartz and calcite, respectively, measured using the six energy windows shaded orange (40–50 keV), yellow (50–60 keV), light green (60–70 keV), green (70–80 keV), light blue (80–95 keV), and light purple (95–120 keV). HU = CT value with the Hounsfield unit. Red and blue solid lines are theoretical CT values for quartz and calcite, respectively, derived using ideal linear attenuation coefficients from the NIST database

(<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>). Red and blue crosses show the CT values from pseudo-conventional CT (using the 40–120 keV range). See the text for details.

これらの関係から、CT の平均値とエネルギー幅の間の差の平均値を取ると、鉱物を特定することができる（図 3）。



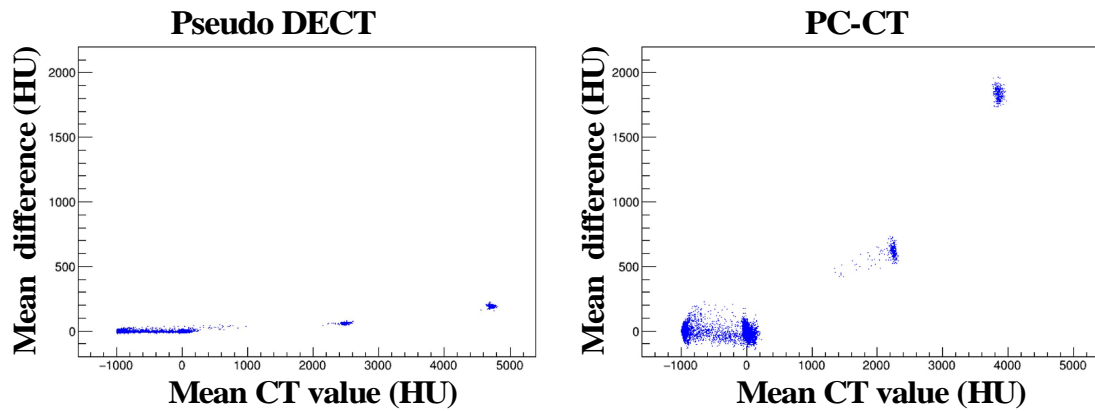
**FIGURE 3** Relationship between mean CT values (Mean CT) and the mean of the differences between CT values obtained using different pairs of energy windows (Mean Diff). HU = CT value with the Hounsfield unit. Blue dots are all the pixels in the CT image. Red open circles are ideal values for calcite and quartz. The orange area is the mixture of water (CT value around 0) and air (CT value around -1000). Red and blue areas represent the CT ranges of quartz and calcite, respectively, at the spatial resolution of this study (i.e., the deviations from the main cluster represent a mixture of each material and the surrounding material such as air).

これらの関係から、CT の平均値とエネルギー幅の間の差の平均値を取ると、鉱物を特定することができる（図 3）。また、これまでの CT と比較して、エネルギー値の差の平均値という値を比較することができるため、従来の CT 値の平均値では差がない場合でも区別できる可能性が指摘できる（図 4）。

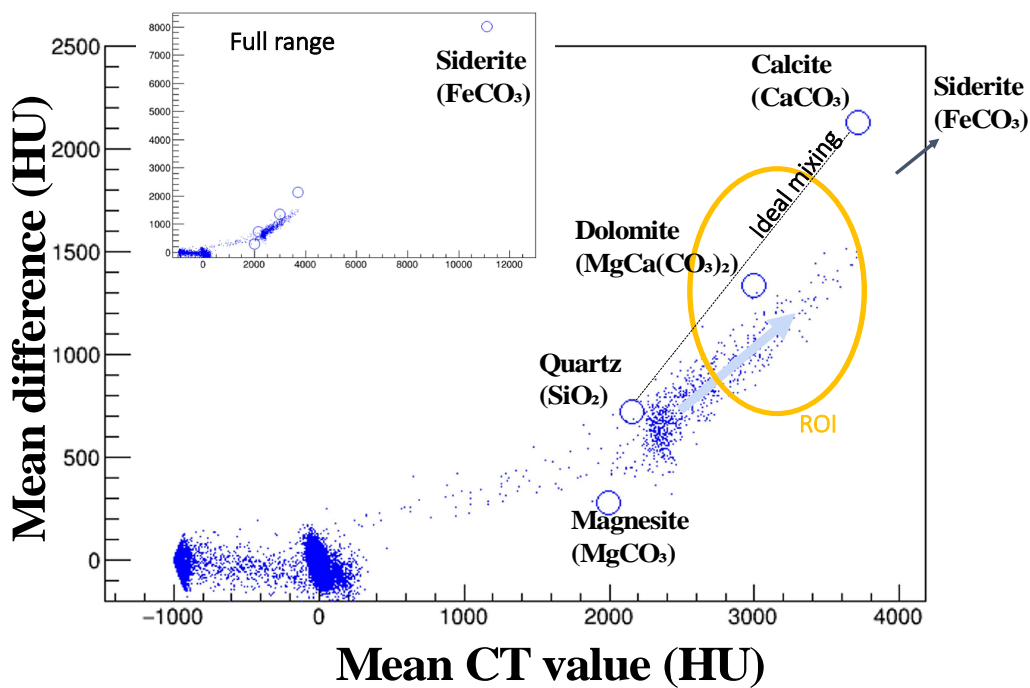
#### PC-CT による非破壊での化学組成情報収集の可能性

PC-CT を石川県の手取川の堆積岩（砂岩とオルソコーツァイト及びその中の炭酸塩脈）に適応した。その結果、本装置の空間分解能では炭酸塩鉱物を同定するのは難しいが、単純に主要な構成鉱物である石英と方解石との混合ラインから外れることが示唆された。このずれは、炭酸塩鉱物に鉄に富む成分（シデライト成分）が含まれているとすると説明可能であり、実際に鉱物の化学組成を測定したところ鉄に富む炭酸塩鉱物であることがわかった（図

6)。つまり本手法を用いれば先に別の情報によって主要な構成鉱物が予想される場合、鉱物の化学的特徴の情報を得られる可能性が指摘できる。これらの内容は現在投稿中である。



**FIGURE 5.** Comparison of relationships between the mean CT value and the mean difference in CT values obtained from two energy regions (40–75 and 40–60 keV). Data obtained from the broader energy range (40–75 keV) are essentially identical to DECT results obtained from the same energy range (“pseudo-DECT” in the text). HU = CT value with the Hounsfield unit. The right panel is also shown in Fig. 3.



**FIGURE 10.** Relationship between mean CT values (Mean CT) and the mean of differences in CT values (Mean Diff). HU = CT value with the Hounsfield unit. Blue dots represent all pixels in the CT image. Blue open circles are ideal values for carbonate minerals (calcite, dolomite, magnesite, and siderite) and quartz. The orange area represents the CT ranges for mixtures of quartz and carbonate minerals. Yellow circle is the region of interests (ROI) indicated by a radius of 600 HU (dimension-less CT value with the Hounsfield unit) centered on the mean value of Mean CT and Mean Diff values for the carbonate vein.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 石黒歩・森下知晃
2. 発表標題 RANSを用いた岩石試料の中性子イメージングによる岩石-水反応の可視化・定量化
3. 学会等名 JpGU
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石黒歩・森下知晃
2. 発表標題 岩石試料中の水貯蔵・輸送解明に向けたRANS中性子イメージング
3. 学会等名 2022年度 RANS シンポジウム ついに始まった中性子現場利用 - 中性子のものづくり・インフラ産業での利用とサイエンスへの挑戦 -
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ishiguro, A. et. al.
2. 発表標題 Neutron Imaging for Rock Samples Using by RANS
3. 学会等名 Water-Rock Interaction: WR-17 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石黒歩ほか
2. 発表標題 フォトンカウンティングCTの岩石試料への初適用例
3. 学会等名 JpGU
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------