

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03755

研究課題名(和文)はやぶさ2に向けた新手法開発による隕石のCT観察および初期太陽系の物質循環の解明

研究課題名(英文) Study of large scale circulation in early solar nebula using new method of CT analysis of meteorites for the analysis of Hayabusa2 returned samples

研究代表者

上楯 真之 (Masayuki, Uesugi)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門・研究員

研究者番号：20426521

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：はやぶさ2帰還試料分析に向けた、放射光CTによる、地球外試料の非破壊分析手法開発と、それを用いた炭素質コンドライト隕石の三次元分析を行う。放射光CTは極めて強力なツールだが、隕石を系統的に調べるための環境、試料ホルダや解析ソフトウェアなどは整備されておらず、個々の研究者が独立で開発していた。本研究ではこれらを統一して分析、解析するためのツールやソフトウェア、手法を開発した。

100以上の隕石を分析し、得られたデータを統計的に解析し、炭素質コンドライト隕石間の組成、及び包有物のサイズの分布の関連を解析し、その原始太陽系における形成環境を、統計的に、また定量的に調べる事が可能になった。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate large scale circulation of material inside the early solar nebula, we developed coordinated analytical method of meteorites, carbonaceous chondrites which especially most primitive class of the meteorites, using synchrotron radiation computed tomography (SR-CT). We developed sample holders, X-ray detector for the multi-scale tomography, data analysis program for multi-scale SR-CT and database for the. Using these devices and softwares, we could investigate more than 100 pieces of carbonaceous chondrites, and analyze the relation of chemical compositions and size of inclusions between carbonaceous chondrites, and investigate the formation environment of them in the early solar nebula statistically and quantitatively.

研究分野：惑星科学

キーワード：放射光CT 炭素質コンドライト隕石 惑星探査

### 1. 研究開始当初の背景

地球に飛来する隕石は、その大部分が小惑星からの飛来物であることが、小惑星探査衛星はやぶさのサンプルリターンによって明らかにされた。2014年に打ち上げられる、はやぶさ2では、有機物や水を含む炭素質コンドライトの母天体であると考えられているC型小惑星、リュウグウからのmmサイズの試料のサンプルリターンを計画しており、さらに詳細な初期太陽系における物質進化過程に対する情報を得ることが期待されている。

近年、X線CT法を用い、地球外物質の組織・構造の三次元観察を行う試みが始まっている。Uesugi et al. [1, EPSL, 2011]では、mmサイズの隕石を非破壊で観察するだけでなく、内部の鉱物の化学組成をX線の吸収を利用して定量的に調べ、バルクの化学組成を組織ごとに分解して調べることに成功した。Uesugi et al. [2, GCA, 2013]では[1]をさらに発展させ、隕石中の包有物とマトリクスの平均組成を調べ、鉄の含有量に相関があることを調べた。また、同論文ではCTによる包有物の形状解析と化学組成分析を組み合わせ、非破壊で隕石クラスを同定する手法を開発している。Tsuchiyama et al. [3, Science, 2011; GCA, 2013]ではこのX線CT法をはやぶさが小惑星イトカワから持ち帰った試料に適用し、100 $\mu\text{m}$ 以下の微小な粒子40個の試料の鉱物組成が、地上で発見されている隕石の一部と良い一致を示すことを調べるなど、大きな成果を上げた。

しかし、X線CT法にはいくつかの課題が残っている。最大の問題点は、視野の広さ(倍率)が固定であり、さらに視野から試料がはみ出ると著しく精度が悪くなることである。しかし小さい試料を使用すると、試料サイズが包有物より小さくなり、平均組成の分析に対して誤差が生じることになる。逆に視野の広さを稼ぐために分解能を荒くすると、空隙の多い炭素質コンドライトのマトリクス部分は、 $\mu\text{m}$ サイズの珪酸塩と空隙の間でX線の吸収係数の平均化が起こり、組成の定量解析の精度が著しく低下する。こういった問題のため、包有物のサイズやマトリクスの組織などによって実験条件を変えざるを得ず、統一された条件で取得されたデータに基づく統計的な議論を行うことが事実上不可能になっている。

また、現状は非破壊分析でありながら、試料を破壊するなどしてCT装置の視野のサイズに合わせる作業が必須であり、また試料は大気中で粘土や両面テープなどで固定されるなど、非破壊・非汚染の分析環境は十分整っているとはいえない。

### 2. 研究の目的

放射光CT装置を用いたmmサイズの隕石試料の観察のためのズーム光学系CTシステムと、非汚染型試料セルを開発する。この装

置を使用した隕石試料の分析ルーチンを定式化し、統一された条件で取得した隕石の三次元データのアーカイブを作成する。これにより、炭素質コンドライトのコンポーネントの組成を系統的に解析し、隕石母天体の形成過程を制約すると共に、サンプルリターン計画で得られる試料の非破壊分析に対して新しい手法を提供する。

### 3. 研究の方法

本研究の開発要素は、以下の4つで構成される。

- ・放射光実験用試料ホルダ開発
- ・倍率可変型放射光CT用検出器の開発
- ・解析手法の定式化
- ・データベースプログラムの開発

これまでの研究では、低分解能と高分解能の放射光CTを行う場合、別々の試料ホルダを使用していた。これは、低分解能のCTではドリフトの影響が小さいが試料が大きいためしっかりしたホルダを使う必要があるが、高分解能のCTではドリフトの影響が大きく、また試料が小さいためにホルダの影響を作らないようにする必要があるので、ファイバーなどを利用して来たためである。しかし、本研究では、倍率可変型の放射光実験を行うため、mmサイズの試料を、sub- $\mu\text{m}$ の分解能で分析するために、試料をしっかりと固定した上で、sub- $\mu\text{m}$ のドリフトを起こさない、高性能の試料ホルダが必要になる。また、3次元空間中で特定の領域を指定して高分解能観察を行う場合、データ量が跳ね上がる上に、それぞれのデータの相関を把握しながら解析を行う必要がある。また、その解析データを管理するデータベースも、そのようなデータの相関性を管理できる必要がある。

このような問題を解決した上で、得られたデータを統計的に解析し、炭素質コンドライト隕石の物性とその成因を調べる手法を開発する。

- ・放射光実験用ホルダの開発

本研究では、当初はSiNを用いたメンブレンホルダを開発する予定であった。しかし、検証を重ねるうちに、ポリイミドフィルムを使ったホルダが極めて高精度である事がわかったため、これを利用して同形状の試料ホルダを作成し、安定して試料を保持することに成功した(図1)



図1 ポリイミドチューブを利用した試料ホルダ。チューブの厚さは10 $\mu\text{m}$ 程度で、分析に影響を与えない。また、ドリフトも1 $\mu\text{m}$ 以下の精度である。

・倍率可変型の放射光実験用検出器の開発

図2に本研究で開発した2段階の倍率可変型の検出器システムを示す。当初はレンズを入れ替えてズームを実現する予定だったが、10倍の倍率を実現するためには検出器そのものを入れ替える必要がある事がわかった。そのため、図にしめされるように、二つの検出器を一つの並進ステージ上に設置し、切り替えて光軸上に移動させることで同じ試料を10倍の倍率の二つのCTセットアップで観察する事に成功した

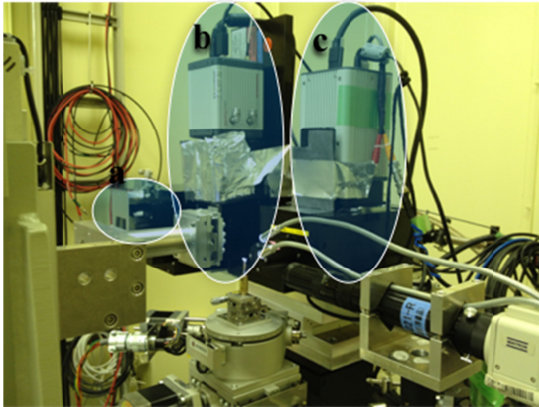


図2 放射光実験用検出器。3つの検出器が並んでおり、左から、XRD用検出器、低分解能広視野CT用検出器、高分解能CT用検出器。

・解析手法の定式化

本研究では倍率の違う複数のCTを連動して解析する。このためには複数のデータを関連し、統一して解析するためのソフトウェアが必要である。本研究では、放射光CTを行う際のステージの位置情報を取得し、そこから計算された試料の位置関係を解析に組み込むソフトウェアを開発した。さらに、ヒストグラムや鳥瞰図など、複数の解析を一つのコマンドで実施することが可能となるプログラムを開発し、極めて短時間に自動で解析を行えるようにした(図3)

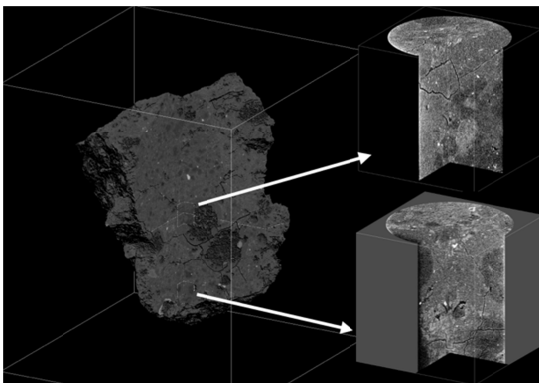


図3 倍率の違う複数のCTデータを、位置情報を元に管理する為に、自動生成された鳥瞰図画像。低倍率のCTデータのうち、2箇所を高倍率で観察した結果の位置情報を表示している。

・データベースプログラムの開発

図4はデータベースプログラムのインターフェースである。本研究で開発したデータベースプログラムは、定式化された解析手法の為にプログラムで生成された画像を一覧表示し、それぞれのデータをクリックすることで、さらに詳細な分析情報を表示することが可能である。ヒストグラムなどの数値データも閲覧できるようになっており、その場で簡単な解析が可能である。また、画像処理用のプログラムを実行するインターフェースも備えており、必要に応じて画像処理をwebブラウザから実行し、その出力された結果の画像をブラウザで閲覧することも可能である。

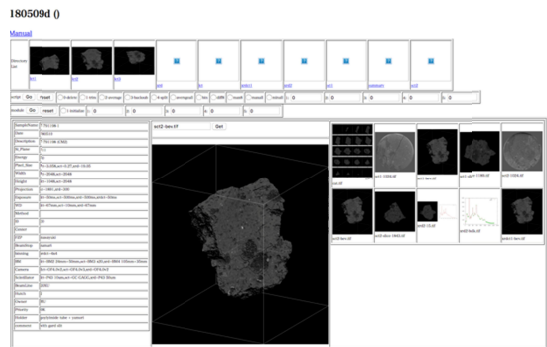


図4 データベースプログラムのインターフェース。上に各データディレクトリのサムネイルとリンク、左に試料情報、右側に解析結果のサムネイル画像が表示されており、中央にその拡大画像が表示される。

4. 研究成果

本研究では上記の様な開発をもとに、炭素質コンドライトの試料を観察した。以下にその具体例を列挙する。

- CI:Ivuna, Orgueil, Y-980115
- CM:Murchison, Murray, NWA4428, Y-791198
- CV:Allende, Efremovka, Vigarano, Sahara98044
- CO:Y-791717, Y-081020, Kainsas
- CK:Karoonda, Maralinga, Fenza
- CR:NWA852, NWA1180, Y-881895, Y-793495
- CH:SaU290

Ungrouped:Tagish Lake

各隕石を最低2試料以上分析しており、総データ数は200を越えている。これらの炭素質コンドライトのX線吸収係数から得られるバルクの化学組成、及び、包有物のサイズ等の統計データ、及び、その局所観察で得られた高分解能CT観察の結果は論文に投稿中であり、本報告書では上記リストを公開するにとどめる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0件)

現在、2件論文を投稿中。解析が進み次第、

あと2本投稿する予定である。

〔学会発表〕(計5件)

- 1.発表者名 Masayuki Uesugi
- 2.発表標題 放射光CTを用いた、隕石の総合観察システムの構築
- 3.学会等名 日本地球惑星関連連合大会
- 4.発表年 2017年

- 1.発表者名 Masayuki Uesugi
- 2.発表標題 Development of XRD combined CT for the observation of mm-sized meteorites.
- 3.学会等名 Goldschmidt conference 2017(国際学会)
- 4.発表年 2017年

- 1.発表者名 Masayuki Uesugi
- 2.発表標題 Current status of developments by the collaboration team with ESCuC/JAXA for curation works and analysis of Hayabusa2 returned samples
- 3.学会等名 Hayabusa 2017(国際学会)
- 4.発表年 2017年

- 1.発表者名 Masayuki Uesugi
- 2.発表標題 A new analytical protocol of synchrotron radiation computed tomography coupled with x-ray diffraction for the observation of extraterrestrial materials
- 3.学会等名 The 24th congress of the International commission for optics(国際学会)
- 4.発表年 2017年

- 1.発表者名 M. Uesugi, K. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Suzuki
- 2.発表標題 Development of multiscale tomography by Synchrotron radiation for future sample return missions
- 3.学会等名 HAYABUSA 2015: 3rd Symposium of Solar System Materials(国際学会)
- 4.発表年 2015年

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6.研究組織

(1)研究代表者

上梶 真之(Masayuki Uesugi)

高輝度光科学研究センター・  
利用研究促進部門・主幹研究員  
研究者番号：20426521

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者

上杉健太郎(Kentaro Uesugi)  
高輝度光科学研究センター・  
利用研究促進部門・主幹研究員  
研究者番号：80344399