

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2014

課題番号：25706032

研究課題名(和文)世界最高強度の負ミュオンビームが拓く量子ビーム応用分析の新展開

研究課題名(英文)Development of muonic X-ray analysis system

## 研究代表者

大澤 崇人(OSAWA, Takahito)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力研究開発部門 量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

研究者番号：70414589

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,900,000円

研究成果の概要(和文)：ミュオンは物質の透過性が高く、またこれを試料に照射した際に発生する捕獲特性X線のエネルギーが高いため、物質の内部を非破壊で分析可能である。大強度陽子加速器J-PARCでは世界最高強度のミュオンビームを発生させることが可能となり、これまでにない分析が可能となりつつある。本研究では、これまで分析手法として確立されていないミュオンX線分析を手法として確立・発展させるため、分析装置を開発した。アルミチェンバーと偏向電磁石から構成された本装置をJ-PARCミュオンビームラインに設置して実験を行った。結果、バックグラウンドレベルを大幅に低下させることに成功し、地球外物質に含まれる全主要元素を検出できた。

研究成果の概要(英文)：The principle of muonic x-ray transitions and the use of negative-muon beams for chemical analysis were first suggested over 50 years ago. Since then, muonic x-ray spectrometry has been tested as a nondestructive method for elemental analysis. However, because a highly intense muon beam is required to analyze real samples, this method has heretofore never been practical as an analytic technique. I developed a new elemental analysis system that uses an intense negative-muon beam at J-PARC and measured meteorites and a standard material. The main system components are an electromagnet, an Al flight tube, an Al sample chamber, a lead shielding body, and a Ge detector. The background and signal-to-noise ratio was significantly better than that obtained in a previous study, and all significant elements in the meteorite and standard samples were detected. Thus, this system can be used for muonic x-ray analysis of extraterrestrial materials.

研究分野：分析科学

キーワード：ミュオン 分析 隕石

### 1. 研究開始当初の背景

小惑星探査機はやぶさは小惑星イトカワの砂を地球に持ち帰り、人類は初めて小惑星の試料を手に入れた。研究代表者を含むはやぶさ試料初期分析チームはイトカワの砂の分析を行い、惑星科学上多くの重要な発見をした。この壮举を受け継ぎ、日本の宇宙研究開発を飛躍的に前進させるべく、現在次期小惑星探査機はやぶさ2の開発が進められている。はやぶさ2は、はやぶさとは異なり、水や有機物に富むと考えられているC型小惑星の探索を目指しており、有機物や水の分析によって生命の起源に迫ろうとしている。しかし、貴重で微量な小惑星試料中に含まれる有機物を、非破壊で分析することは現状では困難である。研究代表者は有機物を多く含む隕石である炭素質コンドライトの赤外スペクトルの研究も行ったが、分光学的に非破壊で有機物を検出することは容易ではなく、また定量性も皆無である。

研究代表者を含むはやぶさ2プロジェクト・サンプリングチームはこのような背景の中、炭素を含む軽元素の濃度や分布状態を非破壊で分析できる画期的なツールとして負ミュオンビーム元素分析に着目した。

J-PARCでは世界最高強度のミュオンビームを発生させることに成功しており、これを試料に照射する際に発生するミュオン捕獲特性X線を検出することで元素を分析することが可能となった。この分析手法は他の分析法にはない幾つもの優れた潜在能力を有している。列挙すれば、非破壊分析、炭素など軽元素を含む多元素同時分析、負ミュオンの運動量とビーム制御による3次元元素マッピング、化学形分析、同位体分析、が挙げられる。これらの優れた特長ははやぶさ2試料に含まれる有機物中の炭素など、軽元素を非破壊で検出し、その分布状態や化学状態を分析できる強力な分析ツールとして応用可能であることを示している。

研究代表者は本分析法が実際の地球外物質に応用可能かどうかを検証すべく予備実験を行った。試料として炭素質コンドライト(マーチソン隕石)を選択し、J-PARCにてミュオン特性X線を測定した。仮設のアルミ真空チェンバーを用いた分析であったにもかかわらず、炭素を含む隕石中の全主要元素の検出に成功し、本分析手法の驚くべき潜在能力が証明されたが、一方で以下の問題点も浮き彫りとなった。

水平なビームに対し垂直に試料を設置するため、試料をアルミホイルに接着剤で固定しなければならず、試料を地球物質の汚染なく測定することが現状では不可能である。また、小惑星試料のような少量の粉末試料を測定することも不可能である。

検出器周囲に何の遮蔽もないため雑音が多く、検出器の位置再現性もない。

試料をアルミホイルに接着しているためAlのバックグラウンドが著しく高い。

元素の定量方法が確立されておらず、現状では定性分析しか行えない。

### 2. 研究の目的

本研究ではこれらの問題を解決する分析装置を、新たに開発する。まず問題を解決するために、偏向電磁石を用いて負ミュオンビームを下方に45°曲げる。これにより試料を垂直に設置する必要がなくなり、粉末試料の設置も可能となる。の問題は検出器周囲に鉛遮蔽を設け、検出器を固定する架台を設置することで解決する。の問題はミュオン透過性に優れたBe板を試料台に用いることで解決する。試料をBe板中央に置くだけで固定する必要がないため地球物質の汚染を防ぐことができる。の定量性の問題は、検出器の位置再現性を確保し、元素濃度既知の標準物質を用いるだけでなく、実験的に決定した鉱物組成ごとの捕獲効率で補正する新しい定量法を確立する。組成に有限の幅を持つ地球外物質ではこの手法は有効である。

### 3. 研究の方法

下方照射負ミュオンビーム元素分析装置の開発を行う。偏向電磁石は回転半径350mm、磁場強度0.45Tの間接水冷式を採用する。真空チェンバーはAl以外のバックグラウンドを抑える目的で全てAl製とし、4つのパーツから構成される。カプトンフィルムは下流部の真空が不意に破れた際にも上流のビームライン側に被害が及ばないように設置される。

最下流部の試料チェンバーにはロードロックハッチを設置し、試料を載せたBe板を横から挿入して試料導入する。真空チェンバーはターボ分子ポンプ一台とドライポンプ一台にて排気する。使用するGe検出器は低エネルギー(3~300keV)に感度を持つ機種を選択し、試料斜め上に専用の架台を造ることで位置再現性を確保し、周囲に鉛の遮蔽を設ける。分析装置はJ-PARC MLFに搬入し、ミュオンビームラインD2に設置する。設置後コールドカソードピラニゲージを用いて真空度を確認する。

試料チェンバーとフライトチューブの間にはアルミ製コリメータアダプタを設置し、任意のコリメータを設置可能とする。また試料の斜め下にアクリルフランジを設置し、その下にイメージインテンシファイアとCCDカメラを設置することでビームプロファイルの撮像を可能とする。

ミュオンビームの運動量を30~45MeV/cの間で変化させながらビームプロファイルを撮像し、最適な励磁電流値を経験的に決定する。最適な条件を決定した後に標準試料と隕石試料の測定を行う。

### 4. 研究成果

分析装置はおよそ1年間の開発期間を経て完成し、これをJ-PARC MLFに導入して実験を

行った。開発したミュオン分析装置の写真を図1に示す。

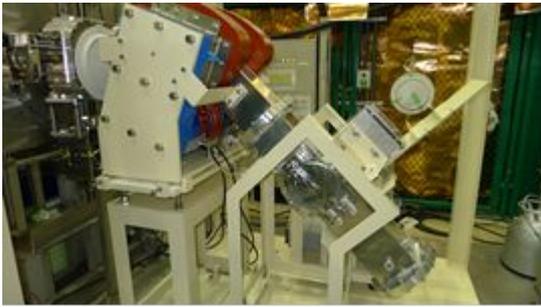


図1 ミュオン X 線分析装置

当初はビームプロファイルが撮像できなかったためにビームを試料に的確に照射することが困難であったため、およそ1ヶ月の期間をかけて装置の改良を行い、ビームプロファイル撮像系とビームコリメータを開発した。その結果、ビーム形状を最適化することが可能となり、S/N比が劇的に向上した。設置したコリメータの孔径とビームプロファイルとの関係を図2に示す。

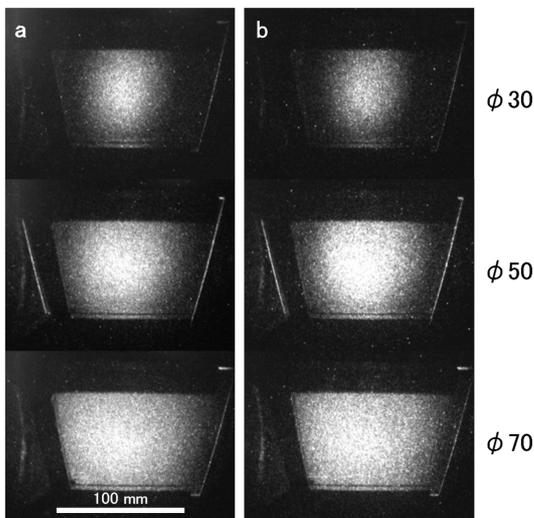


図2 ミュオンビームプロファイルとコリメータ径の関係。(a) 運動量 30 MeV/c, 励磁電流 40.6A. (b) 運動量 45 MeV/c, 励磁電流 67.2 A.

現状ではミュオンビームをフォーカスさせることができないため、コリメータでビームを切ることで試料のみにビームを当てる必要がある。

30のコリメータを使用し、運動量 40 MeV/c の条件で実試料の分析を行った。用いた試料は炭素(5T x 50mm x 50mm)、岩石標準(JP-1)、イミラック隕石(石鉄隕石 約 30 mm x 20 mm)、ブラウンフィールド隕石(H3 普通コンドライト約 40 mm x 30 mm)である。岩石標準は粉末であるため、アルミシャーレに粉末を満たした後にアルミホイルで包んで飛散を防止した。ミュオンはアルミホイルを完全に貫通してしまうためにアルミホイル

は分析の障害とはならない。炭素板と2つの隕石はそのまま測定に供した。いずれの試料も厚さ 1 mm のベリリウム板に載せ、試料チェンバーに導入した。測定結果を図3に示す。

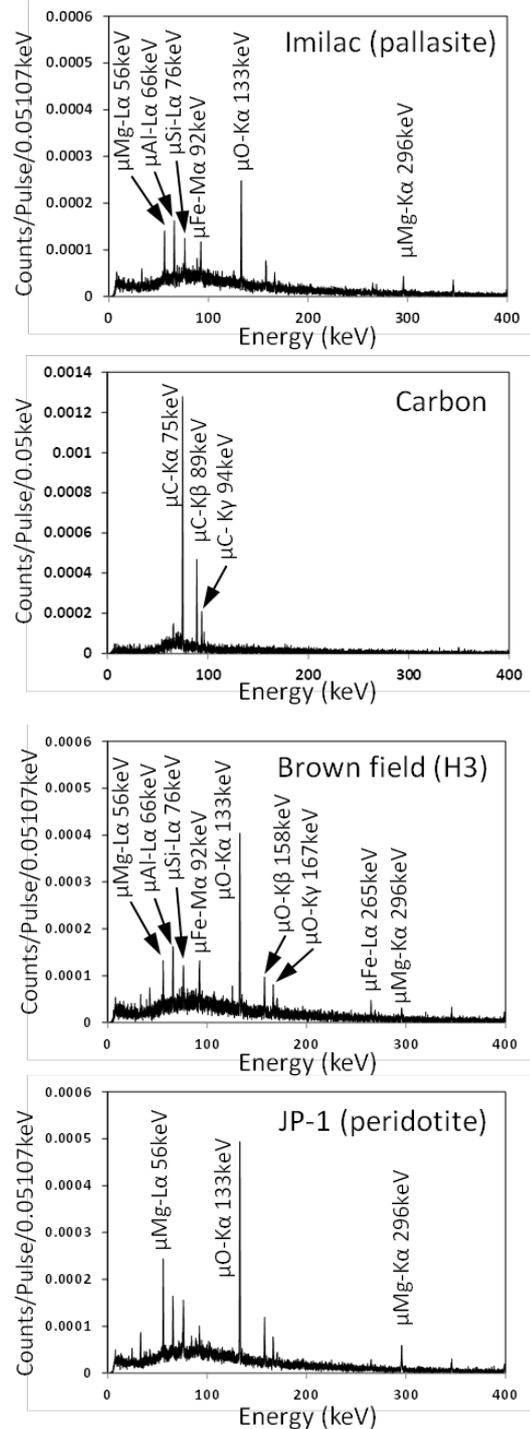


図3 ミュオン捕獲特性 X 線スペクトル

いずれのスペクトルでも主要元素が検出されており、装置開発前に行った予備実験時と比較してバックグラウンドが大きく低減され、S/N比の向上を達成した。

しかし装置の架台の構造に問題があるなど幾つかの課題も浮き彫りとなったため、ビーム停止期間を利用して大幅な装置の改造

を行った。半年間の開発期間をかけて装置は大幅にスリム化され、架台の可動性の向上と遮蔽体の増設を行い、性能の向上が図られた。しかし J-PARC の火災事故によってビームタイムがキャンセルされてしまったため、性能評価実験は行うことができなかった。

#### 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 2 件)

(1) Osawa T., Ninomiya K., Yoshida G., Inagaki M., Kubo K. M., Kawamura N., and Miyake Y. (2015) Elemental Analysis System with Negative-Muon Beam. JPS Conf. Proc. (in press).

(2) Terada K., Ninomiya K., Osawa T., Tachibana S., Miyake Y., Kubo K., Kawamura N., Higemoto W., Tsuchiyama A., Ebihara M. and Uesugi M. (2014) A new X-ray fluorescence spectroscopy for extraterrestrial materials using muon beam. Scientific Reports 4, 5072. doi:10.1038/srep05072

〔学会発表〕(計 1 件)

(1) T. Osawa, K. Ninomiya, M.K. Kubo, N. Kawamura, and Y. Miyake, Development of an elemental analysis system using negative muon beam. The 2<sup>nd</sup> international symposium on science at J-PARC, Tsukuba, June 14, 2014.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

大澤 崇人 (OSAWA Takahito)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

研究者番号：70414589

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：