



本研究成果は論文掲載先である「Scientific Reports」から、以下の通り報道解禁設定があります。  
TV・ラジオ・WEB ……11月13日(月)午後7時(日本時間)  
新聞 ……11月14日(火)朝刊(日本時間)

平成29年11月13日

分野:自然科学系 キーワード: ミューオン特性 X線分析、非破壊分析、地球外物質、大阪大学核物理研究センター

## 素粒子ミューオンの連続ビームによる、 太陽系誕生時の有機物を含む隕石の非破壊分析に成功！

【施設見学会：11月27日(月)14時～@核物理研究センター(吹田キャンパス)】

### 【研究成果のポイント】

- ◇大阪大学核物理研究センターで世界最高効率の大強度ミューオン<sup>※1</sup>ビーム生成装置 MuSIC<sup>※2</sup>の開発に成功し、日本初の DC ミューオンビーム<sup>※3</sup>を用いた非破壊物質分析を開始！
- ◇「はやぶさ2<sup>※4</sup>」が持ち帰る小惑星物質のキャラクタリゼーションを想定した、炭素質コンドライト隕石<sup>※5</sup>の非破壊定量分析に成功！
- ◇試料を壊すことなく内部の炭素濃度を定量分析できるため、考古学、材料科学などへの応用にも期待。

### ❖ 概要

寺田健太郎教授(大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻)、佐藤朗助教(同物理学専攻)および二宮和彦助教(同化学専攻)らの研究チームは、大澤崇人主任研究員(日本原子力研究開発機構)及び橘省吾教授(当時:北海道大学(現:東京大学大学院理学系研究科))他と協力し、大阪大学核物理研究センターで開発された新しい DC ミューオンビーム(図1)を用いたミューオンX線分析法により、**有機物を含む炭素質コンドライト隕石 Jbilet Winselwan の Mg(マグネシウム), Si(ケイ素), Fe(鉄), O(酸素), S(硫黄), C(炭素)の非破壊定量分析に成功しました。**この世界に類を見ない革新的な分析手法は、試料を壊すことなく内部の炭素濃度を定量分析(透視)できるため、小惑星からの回収サンプルのような希少なサンプルの初期分析(キャラクタリゼーション分析)に応用できるほか、考古学、材料科学など、様々な分野への応用が期待されます。

本研究成果は、英国科学誌「Scientific Reports」に2017年11月13日19時(日本時間)にオンライン公開されます。(論文題目「Non-destructive elemental analysis of a carbonaceous chondrite with direct current Muon beam at MuSIC」)

また本件に関し、11月27日(月)14時から核物理研究センター(吹田キャンパス)にてミューオン施設 MuSIC の見学会を開催します。是非とも取材方よろしくお願ひ申し上げます。

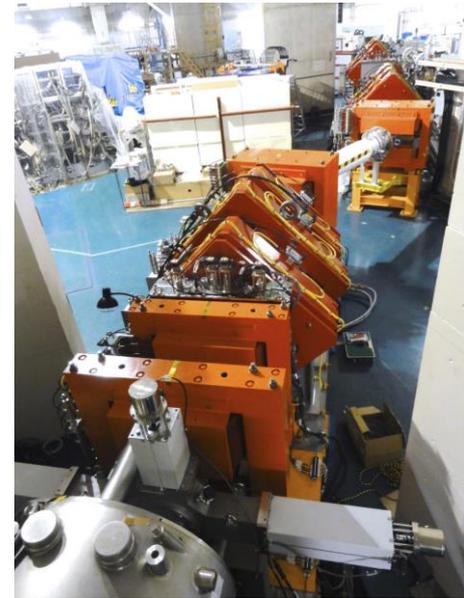


図1:大阪大学 MuSIC のビームライン

### ❖ 研究の背景

負ミューオン( $\mu^-$ 粒子)は、電荷が電子と同じ $-e$ で、電子の約200倍の質量を持つ不安定な素粒子です。この負ミューオンの入射により物質中から発生する特性X線<sup>※6</sup>を使った元素分析の可能性は、50年ほど前から指摘されていましたが(Rosen et al. 1971)、実用的な分析性能を達成するには大強度のミューオンビームが不可欠であり、専用のミューオン生成施設が必要です。ミューオンビームが利用できる実験施設は、現在、世界に5施設<sup>※7</sup>しかありません。そのうちの2つの施設が日本国内にあることから、日本はミューオン特性X線分析の先進国となっています(Terada et al. 2014)。特

Press Release

に、大阪大学核物理研究センターで新しく開発されたMuSICミュオンビーム生成装置では、ミュオン特性X線分析に適した日本初のDCミュオンビームの研究者への供給を2016年度から開始しました。これにより、DCミュオンビームの特性を活かし、ミュオン特性X線分析が飛躍的に発展すると期待されています。

ミュオン特性X線分析の最大の特徴は、負ミュオンが測定試料内で重い電子のように振舞うことです。負ミュオンは電子よりも原子核に近い軌道を周回します。その結果、EPMA<sup>※8</sup>のような電子プローブ分析に比べ、約200倍高いエネルギーをもつ特性X線が発生します(図2、表1)。このような高いエネルギーを持つ特性X線は、1cm程度の岩石試料であれば透過することが可能であり、物質内部の化学組成を軽元素から重元素まで試料を破壊することなく分析することが可能になります(Terada et al. 2014)。

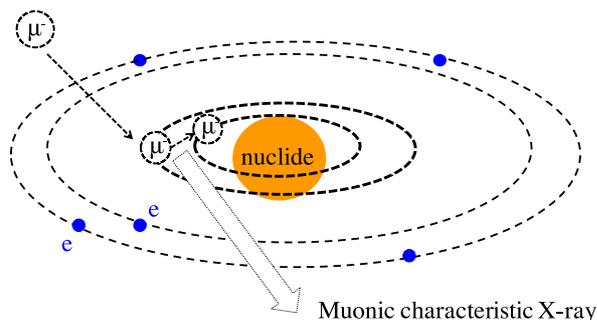


図2:ミュオン原子から特性X線が出る仕組み

表1 主要元素の特性X線の比較

	e-特性X線	μ-特性X線
	$K_{\alpha}$ (keV)	$K_{\alpha}$ (keV)
B	0.183	52
C	0.277	75.3
N	0.392	102.4
O	0.525	133.5
F	0.677	168.6
Mg	1.253	296
Al	1.486	346
Si	1.739	400
Fe	6.398	1256

❖ 研究成果

本研究では、次の2点に成功しました。

(1)大阪大学核物理研究センターのミュオン施設 MuSIC では、世界最高効率でミュオンビーム( $10^8$  muons/s with a 0.4 kW proton beam)を生成することに成功し、日本初となるDCミュオンビームを活用した研究が開始されました。

(2)このMuSICのミュオンビームラインを用いて、最近発見された炭素質コンドライト隕石であるJbilet Winselwanの特性X線分析を行い、地球惑星物質中のMg(マグネシウム), Si(ケイ素), Fe(鉄), O(酸素), S(硫黄), C(炭素)元素の非破壊定量分析に世界で初めて成功しました(図3)。この隕石は太陽系誕生時の記憶を残しており、生命材料ともなりえた地球外有機物を含む隕石です。炭素質コンドライト隕石の中でもCMグループ<sup>※9</sup>との類似が指摘されてきましたが、全岩の化学組成はよくわかりませんでした。本分析によって、隕石全体の主要元素の存在度のパターンが炭素を含めCMグループとよく一致することがわかりました。このように、Jbilet Winselwan隕石がCMグループ炭素質コンドライトとして分類できることが、地球化学的に初めてわかりました(図4、図5)従来の電子ビーム分析では極表面付近の数 $\mu\text{m}$ 程度の深さの、Na(ナトリウム)以上の元素しか定量できませんでした。

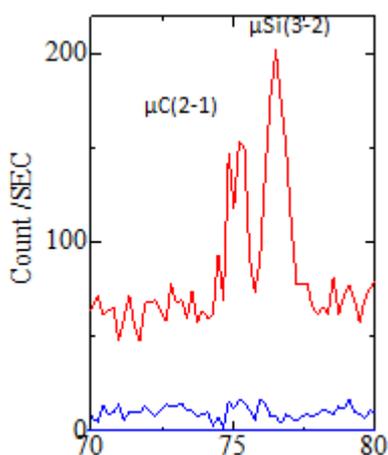


図3: Jbilet Winselwan 隕石のミュオン X 線スペクトル。左が炭素のピーク、右がケイ素のピーク。濃度 2t%の炭素のシグナルを有意に検出。

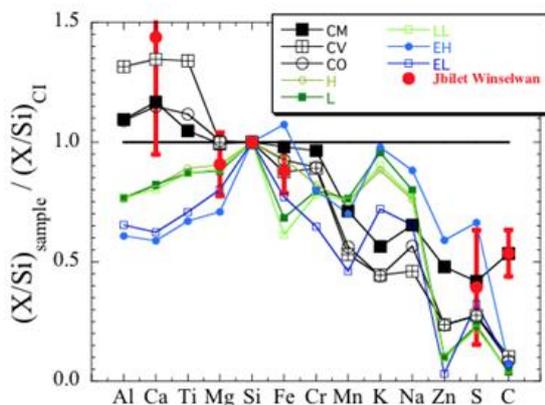


図4: Jbilet Winselwan 隕石(本研究)と様々なコンドライト隕石グループの元素パターンの比較。Si(ケイ素)に対する元素比をCIコンドライト隕石の値で規格化してある。右側の元素ほど、揮発性が高い。

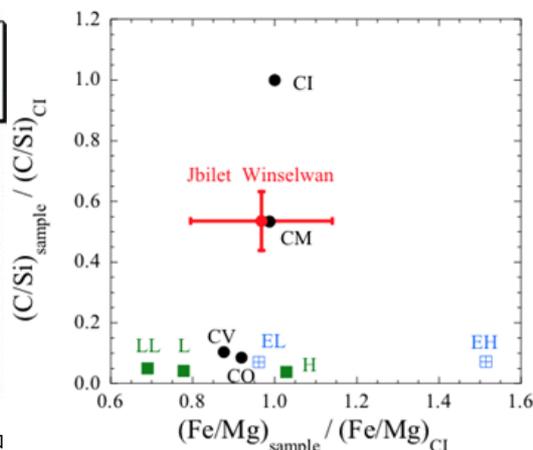


図5: コンドライト隕石グループの元素比の比較。縦軸、横軸ともに、CIコンドライト隕石の元素比を基準にしている。本研究により、Jbilet Winselwan 隕石は、CMコンドライト隕石に分類されることが、地球化学的にわかった。

## ❖ 本研究成果が社会に与える影響（本研究成果の意義）

現在、JAXA では「はやぶさ2」、NASA ではオシリス・レックス (OSIRIS-REx)による C 型小惑星<sup>※10</sup>らのサンプルリターン計画が進行中で、2020 年に有機物を含んだ小惑星物質が地球に帰還すると期待されています(図6)。これらのミッションの目標は、対象小惑星(リュウグウ<sup>※11</sup>、ベンヌ<sup>※12</sup>)そのものの理解だけでなく、分子雲<sup>※13</sup>のような低温環境でつくられた単純な有機物が、小惑星内部における熱や水が関わるプロセスで、どのように組成や構造を変えながら複雑化したかを理解することです。そのためには、いかに地球物質(特に地球の有機物)で汚染されることなく、非破壊で回収サンプルの素性(化学組成、酸化還元状態、同位体)を明らかにし(キャラクタリゼーション)、いかに回収試料の最適部位を特定し世界最先端分析機関に配分するか(キュレーション)が、重要な課題です。今回我々が開発した「ミュオン特性 X 線分析」では、サンプルにダメージを与えることなく、非破壊で炭素や酸素を定量的に分析することが可能です。さらには、窒素の定量分析までできる可能性もあり、太陽系初期につくられた有機物の主成分の非破壊分析を可能とする大きなポテンシャルを秘めた唯一無比の分析手法といえます。

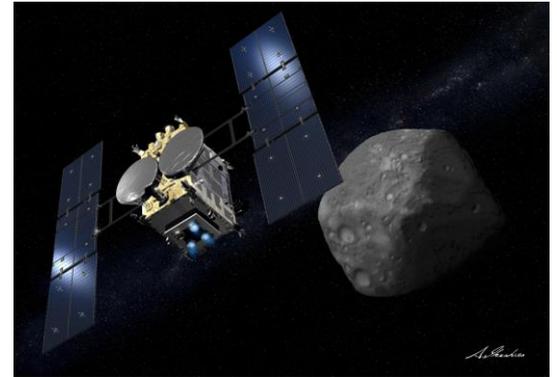


図6:「はやぶさ2」による小惑星サンプルリターンの想像図(イラスト:池下章裕)

大阪大学核物理研究センターMuSIC では、2016 年度より日本初の DC ミュオンビームラインの実験者向け利用運転を開始しました。この手法は、**地球惑星物質のみならず、非破壊分析が望ましい貴重な考古学試料などの重要文化財の化学分析や、リチウムイオンなどの産業機器の元素動態分析(動作中の装置内の化学組成を透視)など、様々な学術・応用分野において応用され新しい展開の道を開く可能性**があります。

## ❖ 特記事項

本研究成果は、寺田健太郎(大阪大学大学院理学研究科)、佐藤朗(同)、二宮和彦(同)、川島祥孝(大阪大学核物理研究センター)、下村浩一郎(大阪大学核物理研究センター/高エネルギー加速器研究機構)、吉田剛(当時:大阪大学大学院理学研究科(現:高エネルギー加速器研究機構))、河井洋輔(大阪大学大学院理学研究科)、大澤崇人(日本原子力研究開発機構)、橋省吾(当時:北海道大学(現:東京大学大学院理学系研究科))によって行われました。本論文は、2017 年 11 月 13 日 19 時(日本時間)、英国科学誌「Scientific Reports」のオンラインで公開されます。

論文タイトル:Non-destructive elemental analysis of a carbonaceous chondrite with direct current Muon beam at MuSIC([www.nature.com/articles/s41598-017-15719-5](http://www.nature.com/articles/s41598-017-15719-5))

著者:K. TERADA, A. SATO, K. NINOMIYA, Y. KAWASHIMA, K. SHIMOMURA, G. YOSHIDA, Y. KAWAI, T. OSAWA & S. TACHIBANA

## ❖ 用語説明

※1 ミュオン(μ粒子):電荷-e、質量が電子の約200倍の素粒子。平均寿命は  $2.2 \times 10^{-6}$  秒。

※2 MuSIC (MUon Science Innovative Channel):大阪大学核物理研究センター(吹田キャンパス)加速器施設のビームライン。新しく開発した新方式ミュオン生成装置により、世界最高効率でミュオンビームを生成することに成功した。

※3 DC ミュオンビーム:大型加速器で人工的に作ったミュオンの連続時間構造(Direct Current)のビーム。大強度陽子加速器施設(J-PARC)物質・生命科学実験施設で利用可能な「パルスミュオンビーム」とはミュオンビー

## Press Release

ムの時間構造が異なる。DC ミューオンビームでは、ミューオンが一つずつ間隔を置いてパラパラと飛んでくる。一方、パルスミューオンビームは、パルス状に集まったミューオン群が、一定時間間隔で飛んでくる。

**※4 はやぶさ2**: 太陽系の起源・進化と生命の原材料物質を解明するため、近地球 C 型小惑星「1999 JU<sub>3</sub>」からのサンプルリターンを目指す小惑星探査機「はやぶさ」の後継機。2014 年打ち上げ、2018 年に小惑星に到着予定。小惑星表面から試料を採取し、2020 年に地球帰還の予定。

**※5 炭素質コンドライト隕石**: コンドリュールと呼ばれる球粒を含む石質隕石のうち、炭素、硫黄、水などの揮発性成分を多く含んでいる隕石グループの総称。この隕石は固結してから高温を経験しておらず、太陽系創生時や太陽系形成前の情報を保持している。

**※6 特性 X 線**: 原子核を周回する荷電粒子(電子や負ミューオン)の軌道において、高いエネルギー準位を持つ外殻軌道から低いエネルギー準位の内殻軌道へ遷移する過程で放射される X 線である。荷電粒子の内殻・外殻のエネルギー差は元素ごとに固有であるので、特性 X 線のエネルギーも元素に固有である。このことから、特性 X 線のエネルギーと強度を求めることにより、測定試料を構成する元素の濃度分析を行うことができる。

**※7 5 施設**: Rutherford Appleton Laboratory(イギリス)、Paul Scherrer Institut(スイス)、TRIUMF(カナダ)、大強度陽子加速器施設(J-PARC)(日本)、大阪大学核物理研究センター(日本)

**※8 EPMA (Electron Probe Micro Analyzer)**: 電子線を試料に照射し、得られる特性 X 線のスペクトルから元素分析する電子ビーム分析の一つ。

**※9 CM グループ**: 炭素質コンドライト隕石(Carbonaceous chondrite)の中で、ウクライナ・ミゲイ(Mighei)に落下した Mighei 隕石に代表される隕石グループの総称。

**※10 C 型小惑星**: 反射スペクトルが炭素質コンドライト隕石と類似した特徴を示す小惑星。炭素質コンドライト隕石は太陽系初期の記憶を残す隕石で、また有機物を含むものもあることから、C 型小惑星には太陽系や生命材料物質の進化の証拠が残されていると考えられている。

**※11 リュウグウ**: 地球近傍小惑星の1つ。反射スペクトルが炭素質コンドライト隕石と似ていることから、有機物を保持していると期待されている。現在進行中の小惑星探査プロジェクト「はやぶさ 2」の目標天体である。

**※12 ベンヌ**: 地球近傍小惑星の1つで正式名称は「101955 Bennu」。反射スペクトルから有機物を保持していると期待されている。現在進行中の NASA の「オシリス・レックス」の目標天体である。

**※13 分子雲**: 主成分が「水素分子」からなる星間ガス。

### ❖ 本件に関する問い合わせ先

大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻(惑星科学グループ)

教授 寺田健太郎(てらだ けんたろう)

TEL: 06-6850-5495 FAX: 06-6850-5480

E-mail: terada@ess.sci.osaka-u.ac.jp

大阪大学理学研究科庶務係 安川 瑠璃葉(やすかわ るりは)

TEL:06-6850-5280 FAX:06-6850-5288

E-mail:ri-syomu@office.osaka-u.ac.jp