

太陽系始原天体サンプルリターン計画でめざすサイエンスと放射光分析

橋 省吾

北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻 〒060-0810 札幌市北区北10条西 8 丁目

要旨

2020年代以降の太陽系探査は大航海時代を迎え、探査機が太陽系の様々な天体から貴重な試料を地球に持ち帰る(サンプルリターン)。サンプルリターンミッションでは、回収試料を地球上でその時代の最先端手法で分析し、最大限の情報を引き出すことが可能となる。放射光による試料分析は、高感度、高空間分解能、高精度分析を非破壊でおこなえるという魅力がある。本稿では、様々なサンプルリターン計画のなかでも、太陽系最初期の時代に立ち戻り、銀河の進化と太陽系の進化をつなぎ、さらに太陽系での生命材料進化をさぐることを目的とした始原天体サンプルリターンの意義を解説し、それらを探索するための放射光分析および将来に向けた開発について紹介する。

1. 地球外物質の科学

星間空間の中で特にガスが濃い領域を分子雲とよぶ。分子雲の中でも特に密度の高い部分(分子雲コア)が収縮を始めることで星形成が開始する。分子雲コアはもともと角運動量をもっているため、中心に直接ガスが集まるだけでなく、原始星周囲にガスと固体微粒子(ダスト)からなる円盤(原始惑星系円盤とよばれる)がつくられ、円盤を通じて、原始星へとガスが降着する。この円盤の中で、やがてダストが集まり、100 km 程度の微惑星が誕生し、微惑星が集積し、惑星系がつくられることになる。今から約45億6800万年前、太陽系ならびに太陽系の多様な惑星達もこのような過程を経て、誕生したと考えられている。

初期太陽系でつくられた微惑星の名残と考えられるのは、現在、小惑星や彗星として観測される小天体である。現在も太陽系に数多く存在する小天体の一部は、天体規模の融解を経験せず(大型天体は表面からの放熱に対し、内部発熱の効果が大きく、形成後に大規模に融解してしまう)、集積したままの状態を保持しており、初期太陽系でつくられた物質(のみならず、太陽系誕生以前の物質も一部)が保存されている。それゆえに、未分化な太陽系小天体(始原天体)起源物質からは太陽系最初期の歴史を実証的に読み解くことができる。

人類はこれまでに水星や金星、木星の物質を手にしたことはないが、始原天体由来と思われる物質は隕石や宇宙塵としてすでに手にしており、始原天体起源物質の分析研究は、これまでも宇宙科学・惑星科学の発展に大きく寄与してきた。いくつかの例を挙げれば、太陽系元素存在度の決定、太陽系誕生年代の推定、初期太陽系進化の時間スケール制約、初期太陽系における高温過程の知見獲得、酸素同

位体不均一と太陽系進化の関係の解明、恒星内元素合成への制約、地球外有機物の発見などがそれにあたる^{1,2)}。

隕石や宇宙塵のように受動的に手に入れた物質だけでなく、人類が能動的に地球外から持ち帰った物質(リターンサンプル)も存在する。米国アポロ計画で採取された月岩石、旧ソ連ルナ計画で採取された月土壤、米国スターダスト探査機が採取した Wild2 彗星塵、そして日本の「はやぶさ」探査機が採取した小惑星イトカワ表面の塵である。原子レベルでのサンプルリターンとしては、ジェネシス探査機によって採取された太陽風粒子もある。これらのサンプルリターン探査で回収された物質の科学分析からは、いずれも太陽系科学を大きく進展させる発見がなされてきた。

月土壤サンプルに含まれていた数粒の斜長石の存在から誕生したマグマオーシャン仮説³⁾は、月に限らず、岩石天体の初期進化に対する重要な制約となっている他、月の起源、内部構造およびその不均質に関する重要な情報が得られた。また、月試料の年代測定に基づくクレーター年代学は他の太陽系天体にも応用され、惑星地質学において重要なツールとなっている⁴⁾。

スターダスト探査機が Wild2 彗星から採取した彗星塵子⁵⁾に難揮発性包有物 CAI (Ca, Al-rich inclusion) やコンドリュールといった始原隕石コンドライトに含まれる高温経験物質が含まれていることが明らかとなった⁶⁾。これらの事実は、初期太陽系において、内側領域(数天文単位(地球-太陽間距離))から外側領域(20-30天文単位)への物質移動があったということを示唆するものである。

「はやぶさ」探査機は当初予定されていた弾丸発射による試料回収ではなかったものの、回収コンテナからは小惑星表面への二度のタッチダウン時に捕集したと思われる1500粒以上の微粒子が発見された⁷⁻¹³⁾。回収試料の初期分

析によって、小惑星イトカワは太陽系最初期に誕生し、ひっそりと46億年を過ごした500 mの小さな天体ではなく、一度は20 kmを越えるような大きな天体として、内部で800°C程度の高温を経験、さらに破壊・再集積といった過程を経て現在のような姿になり、今なお太陽風の照射や隕石衝突によって、表層物質は破壊、移動、小惑星からの離脱を経験している活動的な天体であることがわかった。小惑星は太陽系史にわたって、内部から表層まで活動的な天体であることが明らかとなった。

ジェネシス探査機によって採取された太陽風粒子の分析からは、太陽風粒子の酸素同位体が難揮発性包有物 CAI の持つ酸素同位体組成に近いことが報告された¹⁴⁾。CAI は、始源隕石のバルク酸素同位体組成や地球や月、火星の岩石に比べ、¹⁶O に富む異常な酸素同位体組成を持つと考えられてきた。しかし、太陽風の酸素同位体分析結果は、CAI が太陽系の平均的酸素同位体組成を保持し、我々の方が異常であることを示唆している。これもまた宇宙で採取した物質の地上での高精度分析が可能であったからこそわかった知見である。

いずれの発見も太陽系科学にとってはエポックメイキングなもので、私たちの太陽系観を大きく変えるものであった。

これらのリターンサンプルの分析の内、スターダスト計画で採取された Wild2 彗星の塵、はやぶさ計画で採取されたイトカワの塵の分析には放射光施設が用いられ、大きな成果が挙げられた。特に我が国の放射光施設を用いておこなわれた分析の成果は、本小特集で紹介されている^{15,16)}。

2. これからの太陽系始原物質科学とサンプルリターン

始原天体由来と考えられる隕石や宇宙塵は地球上に沢山存在し、太陽系科学に対して、大きく貢献してきた。最近では、始原物質において、地球や海、生命の原材料物質ともいえる鉱物、水、有機物が相互に化学反応を起こし、物理的に作用しあい、構造をつくっていることがわかってきており、注目されている^{17,18)}。生命、海、地球の原材料物質が、太陽系最初期にはお互いに密接な関係を持ち、また、それらの相互作用の結果として、生命や海、地球を生み出す材料となった可能性すらあるのである。

水や有機物の主成分となる酸素、炭素、窒素には生命材料として以外の重要性も存在する。これらの元素は宇宙において、水素、ヘリウムに次いで多い元素であり、それらがつくる分子は天文観測でも分子雲や円盤の構造を調べるツールとして用いられてきた。最近では赤外線観測によって、C-H-O-N 系ガスの同位体が調べられるようになってきている。また、ALMA (アルマ望遠鏡。正式名称はアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計) の部分運用が始まっており、今後、電波を用いて、より高い空間分解能でC-

H-O-N 系ガスの分子種や同位体組成の分布が見えてくるのが期待される。我々が始原物質中の主として固体として存在する C-H-O-N 系物質から得られる情報は、天文観測によるガス情報に対して相補的なものとなり、観測天文学とあわせ、比較惑星系物質科学の展開が期待される。さらには、C-H-O-N 系物質は、低温の分子雲から原始惑星系円盤の高温期、小天体での熱過程において、相変化することで様々な固体をつくり、分子雲から小天体までの長期間にわたる広い温度領域のイベントのトレーサーとなる物質でもある。したがって、地球の生命や海に直結する以外に、原始惑星系円盤の進化の普遍性や特殊性から、初期太陽系円盤の詳細進化のトレースまで展開することができる対象といえることができる。

地球外物質分析から、私たちの材料となった始原の水や始原の有機物の科学をおこなうにあたって、無機鉱物、氷・鉱物中の水、有機物がそれぞれの相互関係を保った試料を分析することが重要である。しかしながら、地球上での汚染や揮発成分の損失が起こりうる地球上の始原物質試料から、水や有機物に関して、完全な始原情報を得ることは難しい。また、水や有機物を多く含む始原物質ほど強度が低く、大気圏突入時に燃え尽きるというサンプリングバイアスがかかっている可能性がある (実際、宇宙塵には超炭素質物質などが発見されているが¹⁹⁾、隕石としては存在しない)。さらに、地球上で発見される試料の場合、どのような天体を母天体としているのか、また、母天体のどの部分から来たものであるのか知ることができないという非常に大きな欠点がある。例えば、スターダスト探査で回収された彗星塵中の CAI やコンドリュールが宇宙塵として地球に降ってきても、我々はそれが彗星から来たかと判断することはおそらくできない。小惑星帯起源の塵だと判断することだろう。

「私たちはどこから来たのか」を考える人類が「地球」「海」「生命」の材料を追い求め、それらが生まれた場の進化を理解したいと考えることは自然な帰結であろう。そのための究極の始原物質を手にするための手段は、それが天から降ってくるのを待つことではない。科学的根拠をもとに目標天体を定め、自らの意志と技術によって、そのありかを訪ね、欲しい始原物質を探し当てて、地球上の実験室に持ち帰り、最先端の技術で分析することのみ実現できる。

太陽系小天体への探査計画は、我が国では「はやぶさ2」計画 (Fig. 1) が進行中であり、世界各国でもこれからの10年に向けて、開発や立案が進んでいる (Table 1)。サンプルリターンの第一の対象となる小惑星は、可視・赤外線反射スペクトルを用いて、S型、C型、P型、D型などのタイプに分類され、太陽からの距離の違いに応じて、主たるタイプがS→C→Dと変化する (Fig. 2)。反射スペクトルの違いは小惑星を構成する物質の違いを反映し、初期太陽系には太陽からの距離に応じた惑星材料物質の分布の違

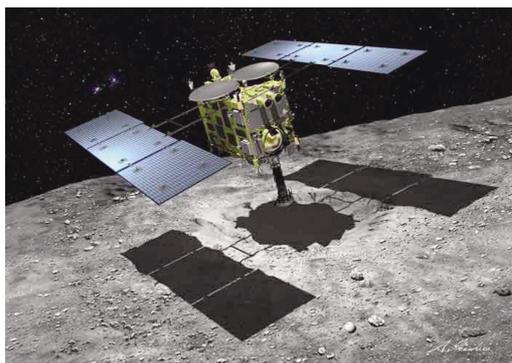


Fig. 1 (Color online) Hayabusa-2 mission. (c) JAXA.

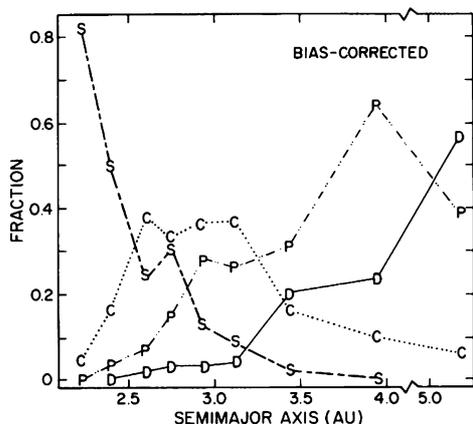


Fig. 2 Heliocentric distribution of major taxonomic classes of asteroids.

いがあったことを示唆する。「はやぶさ」が訪れたイトカワはS型小惑星に分類され、近地球型小惑星では最も多く存在するタイプの小惑星である。S型小惑星は普通コンドライトの母天体であることがイトカワ粒子の分析から示された^{7,8)}。一方、「はやぶさ2」、NASAのOSIRIS-REx、欧州宇宙機関(ESA)のMarcoPolo-Rなどがサンプルリターンをめざすのは近地球型C型小惑星である。C型小惑星はその反射スペクトルから炭素質コンドライトとの類似性が指摘されている。炭素質コンドライトにはかつて水が存在した証拠である含水鉱物や有機物を含むものが存在するため、C型小惑星のサンプルリターン計画では含水鉱物や有機物を含む地球外試料を天体スケールの地質情報とともに、かつ地球上での汚染がない形で手に入れることが期待される。「はやぶさ2」計画の対象天体1999JU3については、地上観測で含水鉱物由来と考えられる700 nmの吸収が存在する可能性が指摘されている²⁰⁾。ただし、この吸収はある時期の観測でのみ確認されたもので、天体表面全域ではなく、一部に700 nmの吸収を示す含水鉱物が存在する可能性があるとして解釈されている。700 nmに吸収を持たない含水鉱物も存在し、また含水鉱物に特有の3 μmのO-H振動は地上からは観測できないため、どの程

度の含水鉱物があるのかなどの情報は得られていないが、1999JU3は現時点でサンプルリターン可能な小天体のうち、始原の水や有機物、およびそれらの天体内での進化を理解するためにもっとも適した天体である。有機物を含むC型小惑星は、太古の地球に生命材料の有機物をもたらした可能性の高い天体である。そのため、「はやぶさ2」計画では科学目標のひとつとして「小惑星での鉱物・水・有機物相互作用による有機物複雑進化の探索」を掲げ、リターンサンプルの分析を通じ、生命材料が地球にもたらされる以前の最終進化を解明することをめざしている。

3. 始原天体リターンサンプルの放射光分析

ここでは「はやぶさ2」計画の科学目標のひとつである「小惑星での鉱物・水・有機物相互作用による有機物複雑進化の探索」に重点をおいて、放射光に関連したリターンサンプル分析について、将来構想含めて、紹介する。放射光X線CT、放射光XRD、放射光XRFを用いたリターンサンプル分析は非常に有効な非破壊分析手段であり、本小特集において紹介されているように、これまでも大きな成果を挙げている^{15,16)}。

3.1 STXM-XANES (走査型透過X線顕微鏡-エックス線吸収端近傍構造)・放射光顕微FT-IRを用いた地球外有機物分析

走査型透過X線顕微鏡(STXM: Scanning Transmission X-ray Microscope)を用いて、X線のエネルギーを変化させながら、薄膜状にした試料を観察する。吸収端の前後数十eVのエネルギー領域においては、内殻電子が異なるエネルギー準位へと励起され、その影響が吸収端近傍のスペクトルに微細構造として現れる。この励起状態が原子間結合によって異なることを利用し、有機物に関しては吸収端近傍のスペクトルの微細構造から結合状態(官能基)の分布を高空間分解能で得ることができる²¹⁻²³⁾。なお、軟X線領域ではXANESではなく、NEXAFS(Near Edge X-ray Absorption Fine Structure)とよぶのが一般的であるが、地球外有機物分析においてはXANESを用いることが多いため、本稿ではXANESと記す。

スターダスト探査機が採取したWild2彗星塵中の有機物²⁴⁾に対するSTXMを用いたC-XANES分析から、Wild2彗星塵に含まれていた有機物は小惑星起源と考えられる炭素質コンドライト中の不溶性有機物に比べ、芳香族炭化水素の割合が低く、脂肪族炭化水素の割合が高いことが明らかとなった(Fig. 3)²⁵⁾。また、N-XANES、O-XANES分析の結果も合わせると、Wild2彗星塵中の有機物は炭素質コンドライトの不溶性有機物に比べ、窒素、酸素ともに富んでいることが明らかとなった(Fig. 4)。脂肪族炭化水素の割合が高いという構造的特徴、窒素、酸素に富んでいるという組成的特徴はいずれもWild2彗星中の

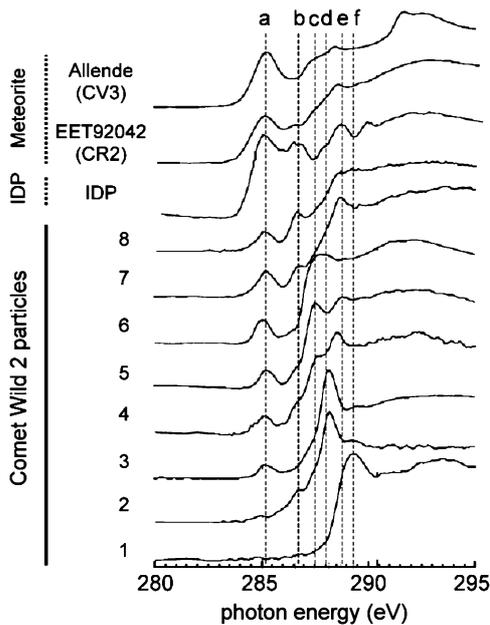


Fig. 3 C-XANES spectra of organic materials from Comet Wild2 particles. The spectra from insoluble organic materials from carbonaceous chondrites are also shown for comparison. The scale on the vertical axis is arbitrary. The peaks can be attributed to a: aromatic carbon, b: nitrile, c: aliphatic carbon, d: carbonyl carbon in amide moieties, e: carbonyl carbon in carboxyl or ester moieties, f: alcohol or ether moieties (Fig. 1 in 23; Original data from 25)).

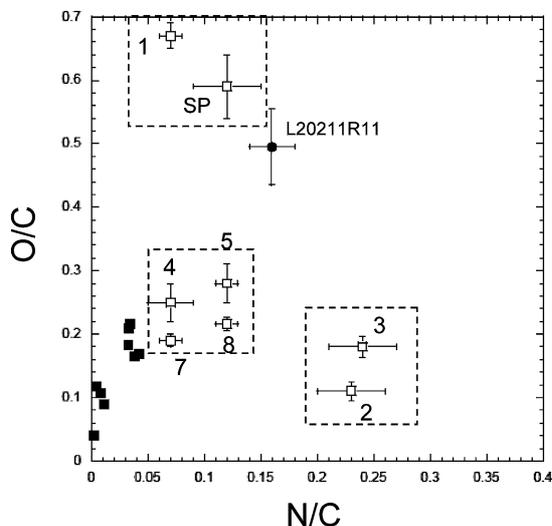


Fig. 4 Bulk N/C and O/C ratios of organic materials from Comet Wild2 recovered by Stardust, estimated from C-, O-, and N-XANES analyses (open squares). The N/C and O/C ratios of insoluble organic materials from carbonaceous chondrites (solid squares) and an IDP L20211R11 (solid circle) are also shown for comparison (Fig. 3 in 23; Original data from 25)).

有機物が熱による変成をあまり受けていないことを示唆するものであった。このように STXM-XANES 分析は少量の有機物試料を高空間分解能でその組成や構造の空間分布

を定性・定量的に調べることができる有用な分析手段である (しかし、現在、国内の放射光施設にはその設備はなく、日本人研究者も海外の放射光施設で分析をおこなっている)。

スターダスト探査機は Wild2 彗星からの塵をエアロジェルの捕集器に回収した。粒子回収の際につくられた突入痕 (トラック) に対しては、放射光顕微 FT-IR 分析がおこなわれており、トラック内部や周囲に粒子起源の有機物が存在することも確認された。N, O を含む官能基が確認された他、脂肪族炭化水素 (芳香族炭化水素に対する存在比) が炭素質コンドライト中の不溶性有機物に比べて、多く含まれることも確認され、STXM-XANES の結果と調和的である²⁴⁾。

Wild2 彗星塵の有機物に関しては、STXM-XANES 分析ではないが、採取有機物の熱水抽出液を加水分解し、アミノ酸であるグリシンが検出されたと報告されている²⁶⁾。一方、炭素質コンドライトの有機物の熱水抽出・加水分解処理ではより多くの種類のアミノ酸が検出されている。これらの事実は、地球外アミノ酸は、彗星のような天体ではなく、小惑星のように天体内で氷が溶け、含水鉱物をつくるような水質変成反応が起きた天体において、多様化したことが示唆され、「はやぶさ2」計画においても重要な科学ターゲットとなっている。

3.2 ミュオン非破壊軽元素分析を用いた地球外有機物非破壊探索

「はやぶさ2」を含め、今後の始原天体からのサンプルリターン計画において、回収直後の試料の初期分析で重要となるのは、試料を地球大気に触れずに非破壊で有機物含有量の多寡 (炭素量として多くて 2-3 wt%) を見分け、速やかに有機物分析をおこなうことである。しかし、現状で数 mm サイズ以上の試料の全岩有機物量を非破壊で分析する有効手段はなかった。

ミュオン照射で発生する特性 X 線は、通常の電子線や X 線で発生する特性 X 線に比べて、100倍以上高いエネルギーをもつことが知られているが、このミュオン由来特性 X 線を用いることにより、通常の特異 X 線分光では測定できない試料内部からの特性 X 線の測定が可能となり、炭素や窒素といった軽元素の試料全体での含有量を分析可能となることが期待される。このため、ミュオン非破壊元素分析は次世代のリターンサンプル分析において地球外有機物の非破壊探索に重要な役割を果たす次世代の研究手法である。本手法は放射光を用いた分析ではないが、放射光施設に関連した新世代の分析手法ということで、ここで紹介させていただきたい。

ミュオン (μ) は電子の約 200 倍の質量を持つ素粒子で正または負の電荷を持つ。正のミュオン (μ^+) は磁性研究に用いられ (μ SR), また宇宙線起源のミュオンの透過率を用いた火山の内部構造解析²⁷⁾ などもおこなわれてい

る。負のミュオン (μ^-) は物質中で原子核に捕獲され、低エネルギー準位へと遷移する際にミュオン特性 X 線を放出する。ミュオン特性 X 線は電子線や X 線照射によって、原子内の電子の軌道遷移で発生する特性 X 線に比べ、電子との質量比に対応してエネルギーが高いため、炭素や窒素といった軽元素を起源とするミュオン特性 X 線であっても、試料内部から放出され、試料内部の元素組成を非破壊で調べることが可能である (例えば、 $\mu\text{-C K}\alpha$ 線 = 75 keV, $\mu\text{-N K}\alpha$ 線 = 102 keV)。このようなミュオン特性 X 線を用いた元素分析手法が提案されたのは70年代初頭であるが²⁸⁾、高強度のミュオンビームを得るのが難しいなどもあり、物理的側面の研究はおこなわれてきたものの、新たな分析手法として、多様な対象に対して応用されてはこなかった。しかし、J-PARC ミュオン施設の稼働により、高強度ミュオンビームが得られるようになり (光速に近い速度まで加速した陽子ビームをグラファイトターゲットに照射し、パイ中間子を発生させ、パイ中間子の崩壊によってミュオンを得る)、ミュオン非破壊元素分析を次世代の物質分析手法として開発する準備が整った状況といえる。

筆者を含め、寺田健太郎 (阪大) を中心にしたグループはこれまでに J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) ミュオン D1 実験装置において、炭素質コンドライト (マーチソン隕石) 内部からの炭素由来ミュオン特性 X 線検出に成功した他 (Fig. 5)、人工積層試料 (石英ガラス-グラファイト-窒化ホウ素-石英ガラス) の深さ方向分析にも成功した (Fig. 6)²⁹⁾。試料内でミュオンが原子に捕獲される深さは、入射ミュオンの運動量に依存するため、ミュオンビームの運動量を変えることで深さ方向元素分析が可能となる。天然試料からの軽元素検出や深さ方向詳細分析はこれまで研究がほとんどおこなわれてこなかった。現在、軽元素の検出精度および分析の定量性の向上、より小さな試料での分析手法開発などに取り組んでいる。

将来的にミュオンビームを mm スケールより細く絞ることが可能となれば、ミュオンビームに対して、試料を二次元に動かし、またミュオンビームの運動量を変化させ、ミュオンの侵入深さを変えることで、非破壊三次元元素分析が可能となる。これが実現すれば、炭素・窒素・酸素・リチウム・ホウ素などの軽元素の空間分布を非破壊で調べることができるようになり、材料科学、生命科学はもちろんのこと稀少な文化財の分析にも大きな貢献が期待される。さらには、原子核に捕獲されたミュオンはその質量のために、電子に比べ原子核に近い軌道を占める。そのため、ミュオン特性 X 線のエネルギーには原子核の状態が反映され、同位体効果が存在する (同位体によって特性 X 線のエネルギーが異なる) ことも知られている。これは質量分析計を用いない非破壊の同位体分析手法となり、その応用範囲は材料科学・生命科学・地球科学など多分野にまたがるものである。

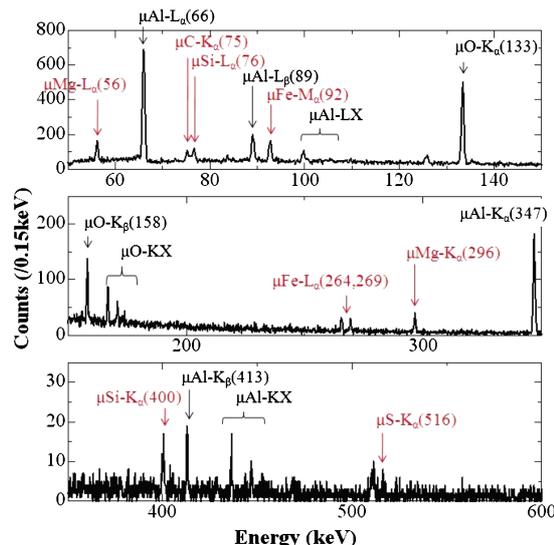


Fig. 5 (Color online) The muonic X-ray spectrum obtained from the Murchison carbonaceous chondrite (CM2), which contains a few wt% of carbon.

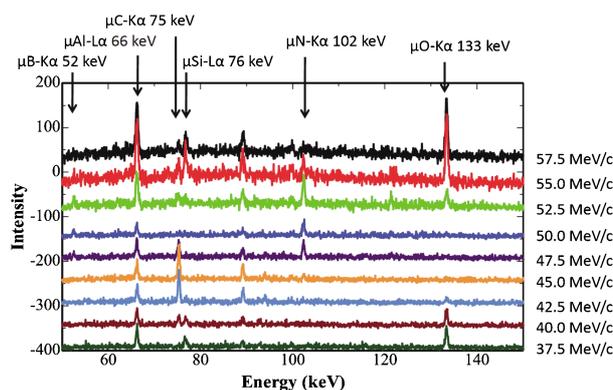


Fig. 6 (Color online) The muonic X-ray spectra from the four-layered sample consisting of SiO₂, C (graphite), BN (boron nitride) and SiO₂ using the D2 beam line at J-PARC MUSE. The difference in the momentum of muon (37.5–57.5 MeV/c) corresponds to the difference (~1–5 mm) in the stopping distance of muon in the sample.

4. 10年後に向けて

天文学の進展で我々は開闢直後の宇宙の姿や太陽系外の惑星の姿まで知ることができる。しかし、天文学で得られる情報は主として光子からで、様々な情報がそこに縮退されている。それに比べ、地球外物質からは光のみからは決して得られないより深化した情報を得ることができ、人類の知の広がりには大きな貢献をすることができる。だからこそ、我々はサンプルリターン計画に挑む。

2020年代以降の太陽系探査は、地球を出た探査機が太陽系の様々な天体から「宝」を地球に持ち帰る大航海時代を迎える。サンプルリターン計画は、到着した天体でその場観測のみをおこなう惑星探査計画と違い、回収試料をそ

の時代の最先端手法で地上分析できる点が最大の利点である。しかし、最先端分析手法の開発は試料が地球に戻ってきてから開発を始めたのでは遅い。今から始めておく必要がある。放射光による試料分析は、高感度、高空間分解能、高精度分析を非破壊でおこなえるため、リターンサンプルを最大限に活かすことができるという魅力がある。惑星物質科学の研究者と放射光分野の研究者が手を携えて、放射光分析の進展・開発を進めていくことで、10年後、20年後に我々が手にするリターンサンプルから太陽系や地球、生命材料に関する私たちの常識を大きく書き換える発見がなされることを期待したい。本稿でリターンサンプルの分析に関して、少しでも興味を持っていただければ幸いである。

謝辞

寺田健太郎氏、藪田ひかる氏には原稿執筆に際し、貴重なコメントをいただいた他、図版の使用をお許しいただきました。三宅康博氏はじめ J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) ミュオン分析グループの皆さまには地球外試料ミュオン非破壊分析手法開発に向けて、多大なご協力をいただきました。また、二名の査読者の方には有益なコメントをいただきました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 松田准一, 坂本尚義: 宇宙・惑星化学 (培風館, 2008), 291.
- 2) 海老原充: 太陽系の化学—地球の成り立ちを理解するために (裳華房, 2006), 230.
- 3) J. A. Wood, J. S. Dickey, Jr., U. B. Marvin and B. N. Powell: Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., 965 (1970).
- 4) 宮本英昭, 橘 省吾, 平田 成, 杉田精司: 惑星地質学 (東京大学出版会, 2008), 260.
- 5) D. Brownlee *et al.*: Science **314**, 1711 (2006).
- 6) T. Nakamura *et al.*: Science **321**, 1664 (2008).
- 7) T. Nakamura *et al.*: Science **26**, 1113 (2011).
- 8) H. Yurimoto *et al.*: Science **26**, 1116 (2011).
- 9) M. Ebihara *et al.*: Science **26**, 1119 (2011).
- 10) T. Noguchi *et al.*: Science **26**, 1121 (2011).
- 11) A. Tsuchiyama *et al.*: Science **26**, 1125 (2011).
- 12) K. Nagao *et al.*: Science **26**, 1128 (2011).
- 13) E. Nakamura *et al.*: Proc. Nat. Acad. Sci. **109**, doi: 10.1073/pnas.1116236109 (2012).
- 14) K. D. McKeegan *et al.*: Science **332**, 1528 (2011).
- 15) 主山 明: 放射光 **25**, 328 (2012).
- 16) 中村智樹: 放射光 **25**, 336 (2012).
- 17) K. Nakamura-Messenger, S. Messenger, L. P. Keller, S. J. Clemett and M. E. Zolensky: Science **314**, 1439 (2006).
- 18) D. P. Glavin and J. P. Dworkin: Proc. Nat. Acad. Sci. **106**, 5487 (2009).
- 19) J. Duprat *et al.*: Science **328**, 742 (2010).
- 20) F. Vilas: Astrophys. J. **135**, 1101 (2008).
- 21) 藪田ひかる, スターダスト 1 次分析有機物チーム: 遊星人, **16**, 299 (2007).
- 22) 藪田ひかる: Viva Origino **36**, 20 (2008).
- 23) 藪田ひかる, G. D. Cody, C. M. O'D. Alexander, A. L. D. Kilcoyne, 荒木 暢, S. A. Sandford: 地球化学 **43**, 155 (2009).
- 24) S. Sandford *et al.*: Science **314**, 1720 (2006).
- 25) G. D. Cody *et al.*: Meteorit. Planet. Sci. **43**, 353 (2008).
- 26) J. E. Elisila, D. P. Glavin and J. P. Dworkin: Meteorit. Planet. Sci. **44**, 1323 (2009).
- 27) H. K. Tanaka *et al.*: Nucl. Instrum. Methods A, **507**, 657 (2003).
- 28) L. Rosen: Science **173**, 490 (1971).
- 29) K. Terada *et al.*: KEK-MSL Progress Report 2011, in press.

著者紹介



橘 省吾

北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻・講師, はやぶさ 2 サンプラーチームサイエンス主任研究員
E-mail: tachi@ep.sci.hokudai.ac.jp
専門: 宇宙惑星化学・宇宙鉱物学

【略歴】

2000年大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻博士課程修了, 博士(理学)。日本学術振興会 PD を経て, 2003-2009年東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻助手, 2009-2011年同助教。2012年より北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻講師。地球化学研究協会2011年度奨励賞, 2008年 Meteoritical Society Nier Prize (国際隕石学会ニール賞), 文部科学大臣表彰2007年度若手科学者賞, 日本鉱物学会2007年度奨励賞, 日本地球化学会2006年度奨励賞, 日本惑星科学会2005年度最優秀研究者賞。

Future sample-return missions from primitive small bodies and in-situ synchrotron analyses of returned samples

Shogo TACHIBANA Department of Natural History Sciences, Hokkaido University
N10 W8, Sapporo 060-0810, Japan

Abstract Abstract Sample-return missions from primitive solar-system small bodies are now being planned for the next couple of decades, and we will obtain returned samples from various small bodies with geologic information but without serious terrestrial contamination. The state-of-the-art analytical techniques can be applied to precious returned samples to understand the evolution of the solar system and the pre-biotic diversification of organic materials prior to the accretion of the Earth. In-situ synchrotron analyses are powerful non-destructive methods to extract the maximum information from the precious samples, of which usefulness is discussed in the article.