

分子研研究会開催報告 UVSOR-IIIにおける多様な量子ビームの発生と 先端利用に関する研究会

UVSORシンポジウム2022及び第5回次期施設建設検討会と連続の日程で2022年11月28日(月)に標記研究会を開催しました。UVSORでは、1982年の建設当初から光源開発に特化したビームラインを設け、アンジュレータを用いた自由電子レーザーや特殊な波面構造を持つ光渦、超短パルスレーザーを用いたコヒーレント放射光や超短パルスガンマ線の開発が行われてきました。これまでは光源開発が研究の中心でありましたが、最近ではビームライン(BL)1Uにおいて極端紫外光からガンマ線に至る幅広い波長域で、原子のコヒーレント制御、円偏光照射による生体分子のキラリティ発現、原子核物理、ガンマ線から発生する電子の反粒子である陽電子を用いた材料分析などといった独自性の高い利用研究が行われています。

本研究会では、光源開発者と利用者、利用者同士の情報交換を促すことで、BL1Uで進行中の研究を促進するとともに新しい研究アイデアが創出

されることを期待し、UVSOR職員やユーザーの方々にご講演いただきました。また、NewSUBARU放射光施設からもガンマ線BLについてご講演いただきました。研究会のプログラムは末尾に書かれている通りです。参加登録は、現地とオンライン合わせて39名でした。いずれの講演においても活発な議論が行われ、今後の展開に大きな期待を抱かせるものとなりました。最後に、研究会開催にあたってサポートして頂いた方々に深く感謝致します。

- ・UVSOR光源開発ビームラインの歴史(広島大学/分子研:加藤政博)
- ・自由電子レーザーの開発と利用・今後の展開(京都大学:全炳俊)
- ・UVSORでのコヒーレント高次高調波光源の開発(秋田高専:坂本文人)
- ・タンデムアンジュレータによるアト秒制御ダブルパルスの発生と原子分子実験への応用(SAGA-LS:金安達夫)
- ・放射光の時空間構造の制御とその利用の可能性(広島大学/分子研:加藤政博)



- ・紫外円偏光照射による有機物分子のキラリティの発現に関する研究(核融合研:小林政弘)
- ・UVSOR-IIIにおけるガンマ線源の開発と利用及び今後の展開(分子研:平義隆)
- ・ニュースバル γ 線ビームラインBL01の現状(兵庫県立大学:橋本智)
- ・ガンマ線を用いた原子核物理実験とその応用(京都大学:大垣英明)
- ・偏光検出コンプトンカメラの開発と応用(東京大学:島添健次)
- ・陽電子消滅法の基礎とパルス γ 線誘起陽電子発生装置への期待(千葉大学:藤浪眞紀)
- ・原子空孔を見て発光材料への不純物添加効果を探る(山形大学:北浦守)

敬称略

(平 義隆 記)

はやぶさ2 帰還試料の多機関連携分析

小型惑星探査機はやぶさ2が小惑星リュウグウにて採取した5.4 gの小石を携えたサンプルカプセルは、6年間にわたる旅を終えて、2020年末に無事に地球への帰還を果たしました。ここで得られた試料は、地球上の大気・物質による汚染や、大気圏通過時の加熱を受けていないので、地球上に存在する最も純粋な地球

外物質と言えます。僕が参加するPhase 2キュレーション高知チームは、リーダーの伊藤元雄博士(JAMSTEC高知コア研究所)を中心に、当のはやぶさ2が出発する前から、帰還した試料をどのように扱うか議論を重ね、分析技術の開発に取り組んできました。そして実際に試料を分析した最初の成果が、Nature

Astronomy誌に掲載されました^[1]。

リュウグウ試料と従来の地球外試料、つまり隕石との大きな違いは、先述のように、リュウグウ試料は地球上の物質に汚染されていないことです。この特徴を活用するためには、非汚染状態を維持する環境を整えなければなりません。そこで本研究の前提として、JAXA、

SPring-8、JAMSTEC、UVSOR、国立極地研究所と言った国内の各研究機関において、試料の大気非曝露状態を維持したまま試料を搬送し、受け入れから試料加工や分析までを行う手法を開発しました^[2]。まずJAXAより配分されたリュウグウ粒子に対して、SPring-8でX線CTによる非破壊3次元構造観察を行いました。その結果に基づき、皆で議論を繰り返し、最も分析して面白そうな場所をFIBにより、およそ25 μm四方、厚さ200 nmの超薄切片を各試料から切り出して、分析を進めました。

UVSORでは、走査型透過X線顕微鏡(STXM)を用いて、有機物の2次元化学状態分析を行いました。特徴的だった結果として、炭素K吸収端近傍のX線吸収スペクトルにおいて、287.5 eVのピークが顕著であったことが挙げられます (Fig.1 参照)。このピークは脂肪族炭化水素の存在を示唆しています。この分布は、JAMSTECでの超高分解能透過電子顕微鏡 (TEM) による観察との比較対応から、含水ケイ酸塩鉱物と混在していることがわかりました。この組織は、有機物が水の存在下で鉱物と反応したことを示す、世界で初めての直接的な証拠となります。また脂肪族炭化水素は熱に弱く、30℃以上で分解するという報告から、リュウグウはそれ以下の温度しか経ていないものと考えられます。これは、はやぶさ2帰還試料が大気圏突入時に加熱を経ておらず、また地球上の物質で汚



Phase 2 チームの分析メンバー。赤い矢印が執筆者。左隣がリーダーの伊藤元雄博士

染されていない、そして長年の議論に基づいて有機物分析に最適化したSTXMの分析条件がマッチしたために、発見につながった成果です。

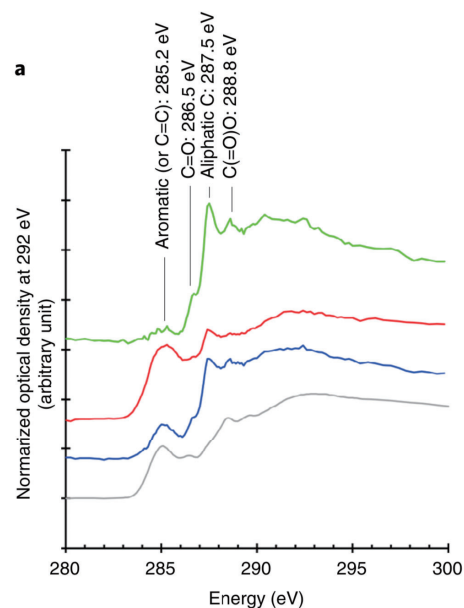
続いてJAMSTECにて、超高分解度2次イオン質量分析 (NanoSIMS) によって同位体分析を行ったところ、水素と窒素は地球上のものとは比べて重い同位体成分に富んでいることがわかりました。この傾向は、太陽系外縁部由来と言われている宇宙塵と良い一致を示すだけでなく、彗星に近い傾向も見られます。これより、リュウグウの粒子は熱の影響をあまり受けず、形成時の物質科学的情報を保っていることを示唆しています。我々は、小惑星リュウグウは太陽系外縁部で形成後、現在の位置まで移動してきたものと考えています。

以上の結果から、含水ケイ酸塩鉱物が、水や有機物の“ゆりかご”となって、地球や他の天体に運ばれた可能性が考えられる、と結論づけました。本研究の成果は数々のメディアに取り上げて戴いた上に、我々のリュウグウ試料の電子顕微鏡イメージは華々しく掲載誌の表紙となりましたので、ぜひともご照覧あれ。本研究において難しかったのは、各実験のスケジュール調整でした。JAXAでの試料配分の日程から測定、加工にかかる日数を勘案して、タイトにスケジュール調整をしなければなりません。特に放射光施設であるSPring-8とUVSORは、いつでも自由に使える装置ではなく、課題採択時にビームタイムが割り当てられます。今回は、試料が帰還した直後、試料分配が決定する前にビームタイムの日程を押さえておく必要

がありました。ここでのスケジュール調整に、2015年に各分析機関の間で交わっていた連携協定が非常に役立つことになりました。今後、この研究で開発されたような多機関連携分析技術は、このようなサンプルリターン計画のみならず、様々な多角的分析のスタンダードになっていくであろうと考えています。BL4Uはもう僕の手を離れますが、引き続き柔軟な運営のビームラインであることを望んでいます。

そして、リュウグウ試料の分析は、これで終わりではありません。我々のチームだけでも既に3本の論文が出版され^[1,3,4]、2022年12月現在では2本が受理、1本が再査読中です。今後も引き続き、研究成果にご注目下さい。

(大東 琢治 (高エネルギー加速器研究機構) 記)



リュウグウ切片の炭素吸収端でのX線吸収スペクトル

Material from: M. Ito, et al., *Nat. Astron.*, **6**, (2022), 1163-1171

参考文献

- [1] M. Ito, et al., *Nat. Astron.*, **6**, (2022), 1163-1171. DOI: 10.1038/s41550-022-01745-5
- [2] M. Ito, et al., *Earth Planets Space*, **72**, (2020), 133.
- [3] M-C. Liu, et al., *Nat. Astron.*, **6**, (2022), 1172-1177. DOI: 10.1038/s41550-022-01762-4
- [4] R. Greenwood, et al., *Nat. Astron.*, (2022) DOI: 10.1038/s41550-022-01824-7