

# STXM 炭素学の必須性: 太陽系の誕生から地球環境の将来まで

高橋 嘉夫・菅 大暉・坂田 昂平 (東京大・院理、広島大・院理)

## はじめに

筆者は主に環境化学・地球化学の分野で、岩石・土壌・隕石・エアロゾル・微生物などに XAFS を適用し、様々な元素の化学種を分子レベルから明らかにすることで、物質循環・環境問題・温暖化・地球史などに関する知見を得てきた。非破壊で化学状態が分かるという XAFS の特徴を生かしつつ、これらの分野への応用をさらに発展させる重要なファクターとして、(i) 顕微分析、(ii) 超微量元素への適用、(iii) 炭素などの軽元素への適用、などが常に重要な技術的課題であった。このうち(i)と(iii)について我々の要求を満たすのが走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) である。世界的には 2003 年頃からこの分野への STXM の応用が始まっており、日本にこの装置がないことに学生共々ずっと歯痒い思いをしてきた。2012 年からよい機会を頂いて PF の STXM に関わることになり、また同時期に UVSOR にも STXM が導入され、共同研究者と共に様々な試料 (隕石、土壌、微生物、エアロゾル、河川懸濁粒子、植物、炭素材料など) に STXM を応用させて頂いている。これらから改めて分かった重要なことは、STXM を用いることで高空間分解能で試料中の特定の元素の化学状態が分かる点、特に電子顕微鏡では損傷が大きく分析が困難な有機物に対しても局所官能基分析が可能である点である。地球惑星の進化、生命の誕生・進化、微生物の機能、石油石炭などの資源、現在の地球温暖化や環境問題、現代社会を支える炭素材料など、あらゆる分野に炭素物質・有機物が関わっており、その局所状態分析法としての STXM は、大きなインパクトを持っている。これらを含む STXM-有機物-局所状態分析の研究は、「STXM 炭素学」とも呼ぶことができ、STXM は様々な分野で必須な手法として今後さらに広く活用されていくであろう。

## 地球化学・環境化学への適用

講演では、STXM の地球科学・環境科学への応用例として、土壌や河川懸濁粒子中の天然有機物やエアロゾル中の有機物について触れる。

土壌などに含まれる植物由来の難分解性有機物は腐植物質とよばれ、地球表層に広く分布している。これらは、実際には他の無機物と複合体を作り、複雑な形態で存在している。この存在形態は、土壌中での有機物の分解速度、ひいては地球表層の炭素循環や地球温暖化に影響を与える。一方で、天然で有害イオンを吸着する粘土鉱物などの無機担体の表面に腐植物質は吸着し、粘土鉱物が単体で持つ金属イオンに対する吸着特性を変質させる。例えば、福島原発事故で放出された放射性セシウムは、2:1 型層状珪酸塩などに安定に吸着するが、腐植物質により被覆されることで、その吸着特性は大きく減少する。

一方、大気中の微粒子であるエアロゾル中にも有機物が多く存在し、その機能を変える。例えば、海塩粒子は海水の飛沫から生成する無機エアロゾルであり、吸湿性が高いために雲核となって雲形成を促進し、地球を寒冷化する効果を持つとされる。しかし、1 ミクロン程度の海塩粒子を STXM で観察すると、その粒子は実際には有機物に被覆されていることが分かる。この有機物は、高級脂肪酸であると推定され、そのため疎水性が強く、雲形成には負の効果を与える可能性がある。またこの被覆を持った海塩粒子内部には、硫化ジメチル (DMS) などの還元的な硫黄が存在している。これまで DMS は、大気中で容易に酸化されて硫酸エアロゾルとなり、雲形成に寄与すると考えられてきた。そのため、この有機物の殻に守られて DMS が酸化を免れて安定化することも、雲形成には負の効果があるとみられる。

このように天然有機物や有機エアロゾルの地球表層でのふるまいは、温暖化問題や有害元素の挙動に大きな影響を及ぼすことが、STXM の利用によって明確に理解される。こうした知見は、他の手法では得られない、STXM ならではの情報である。

## 今後の展開

ここで示した以外の研究も含めて、炭素をはじめとした様々な元素への STXM の応用は、幅広い分野に展開可能である。原理的には単純な手法であるため、Ptychography などへの発展も既に ALS などでは試みられており、手法的にも様々は発展が見込まれる。このようなハイスループットかつ適用範囲が広い STXM を BL-19 において運用し、日本の多くの研究者が利用できるようにすれば、様々な分野で 1 ランク上の研究をするための重要な基盤となるであろう。