

特集 「さあ、小惑星に行こう!—小惑星サンプルリターン計画」

蛍光X線スペクトロメーター

岡田達明¹、加藤 學²

1. はじめに

リモートセンシングによる蛍光X線観測は、1971～72年のアポロ15、16号の月面蛍光X線探査の成功によって[1]、宇宙空間での応用が実証された惑星表層物質の主要元素の代表的な定量分析法である。大気の極めて希薄な月や小惑星などの昼側表面からは、天然のX線源である太陽X線の照射によって励起された蛍光X線が常に放射している。この蛍光X線と太陽X線を同時に観測し、表層物質の主要元素組成を高精度かつグローバルに調べることによって、小惑星のスペクトル型に対応する物質を“その場”で同定することが、この観測の主な狙いである。

宇宙科学研究所では、西暦2002年初頭の打ち上げを目指し、小惑星探査(MUSES-C)計画が進行中である。探査天体は地球近傍小惑星のネレウスで、直径約1km、観測されたスペクトル型はE、M、P型やC型に近く、平坦なスペクトルである[2]。MUSES-C計画では、ネレウスにランデブーし、表面物質を採取して地球へ帰還するサンプルリターン探査のほか、ネレウス近傍で科学観測を行う。蛍光X線観測もそのひとつである。

われわれが地上観測で取得できるほとんど唯一の小惑星の物質科学的な情報は、可視・近赤外の反射スペクトル型である。表層の鉱物組成の違いを反映しており、代表的なスペクトル型は10種類程度ある。ラフな議論では、全ての小惑星を調べ

なくても、各スペクトル型に対応する物質が特定できれば、隕石データと照合することによって、“始原天体”である小惑星の研究が飛躍的に進展するといえる。しかしスペクトル型は鉱物組成だけでなく、表面の状態にも大きく影響されるため、実際の物質(隕石)との対応は容易ではない[3]。

このジレンマの解決には、蛍光X線観測が打ってつけである。蛍光X線観測では、物質(隕石)種の同定ができる精度で小惑星の主要元素組成を調べ、かつグローバルなマッピングを行う。もちろんサンプルリターン試料の分析データの方が詳細で精緻ではあるが、ローカル情報なので、これと相補的なグローバル情報が必要である。サンプルリターン探査はチャレンジングであり、主要元素組成を得る蛍光X線観測は、物質同定方法の保険としての意味もある。また、元素マップはサンプル採取地点の選定にも活用できる。

このような観測を実現するには、小型・軽量でありながら高性能を誇る機器の開発が必要である。最近のMOS技術の発展によって、X線用のシリコンCCD(電荷結合素子)が開発されてきている。このCCDを-40℃以下の温度で稼働することで、軟X線領域で高いエネルギー分解能を発揮する。MUSES-C計画では、CCDを用いた最新鋭機器による蛍光X線の観測を実現し、先進的なサイエンスを目指す。興味を持たれた方々には是非ご協力を頂き、一緒に夢を叶えたいと考えている。以下の話は、96年11月現在の検討を基にしており、今

¹宇宙科学研究所惑星研究系、²宇宙科学研究所次世代探査機研究センター

後さまざまな点で変更が生じることがあることをお断りしておく。

2. 蛍光X線観測の原理

蛍光X線分析は、物質の元素定量分析法として実験室では確立された技術である。物質に外部から粒子または電磁波を照射すると、物質の構成原子による吸収が起こる。軟X線領域での吸収の大部分は、K、L殻など内側の電子殻の電子の放出を伴う光電吸収である。電子放出後の隙間には、外側の電子殻からある確率で電子が遷移してくるが、エネルギー準位差だけ余剰分のエネルギーを電磁波として放出する(特性X線)。このような励起発光による特性X線を蛍光X線と呼ぶが、これは元素に固有のエネルギーをもつため、エネルギー(または波長)のスペクトル分析を行うことで、物質の元素組成を知ることができる。

蛍光X線が、可視光などに比べて固体物質の定量分析に相応しいことには理由がある。蛍光X線は、電子殻内の縮退度が小さく、電子殻間のエネルギー準位差が大きい内側の電子殻による吸収・放射現象である。このため、蛍光X線は狭く鋭いピークとして、測定することができる。また、光電吸収した後に実際に蛍光X線が発生する確率を蛍光収率と呼ぶ。この値は、岩石の主要元素の蛍光X線である軟X線領域では一般に小さく、数%以下である[4]。従って、測定されるX線の大部分は1次蛍光X線であり、吸収と放射を繰り返した多次蛍光X線の割合は少ない。そのため、複雑な元素組成をもつ岩石に対しても、定量分析ができる。逆に、小さい蛍光収率は弱い放射強度を意味しており、S/Nを稼ぐには長い積分時間が必要である。

惑星の蛍光X線探査は、このような実験室での蛍光X線分析法を、惑星サイズにスケールアップしたものである。周回軌道からのリモートセンシ

ングでは、驚異的にパワフルな励起X線源が必要となる。このため、探査機に励起源を搭載する代わりに、太陽X線を天然励起源として利用する。太陽X線は強度、スペクトル形状ともに時間変動するので、常時モニタする必要がある。モニタ方法にも直接測定法と、標準試料に一度照射させ、発生するX線を測定する標準試料法の2種類がある。後者は実験室での分析法と同様であり、蛍光収率などの文献値の誤差や、センサ特性などの影響を除外できる分だけ、定量性がアップする。さらに、惑星表面の粒子サイズ効果による強度変化を調べるには、組成と表面状態の分かった標準表面との比較観測が不可欠である。そこで、MUSES-Cに搭載する機器の太陽モニタでは、世界に先駆けて標準試料法を採用する。

惑星表面から放射される蛍光X線は微弱なので、限られた観測時間でカウント数を稼ぐには、有効面積を広く取れるエネルギー分散型のX線検出器が現実的である。アポロ15, 16号の月蛍光X線探査で比例計数管が選択された理由は、これである。幸運にも、比例計数管に比べてエネルギー分解能が数倍優れ、蛍光X線ピークを完全に分離して観測

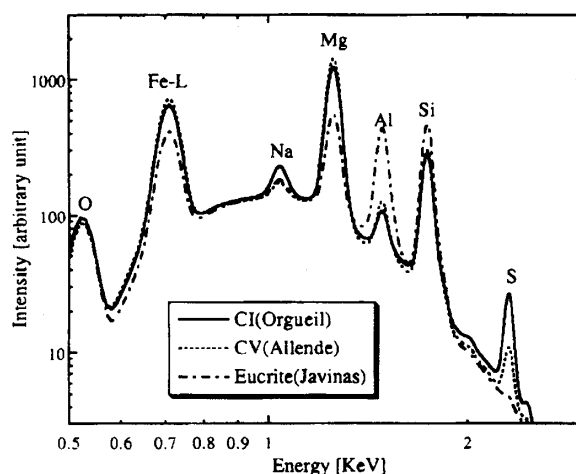


図1. 静穏時の太陽X線によって励起されるX線を、CCDで検出した場合のX線スペクトルの計算値。物質の組成はCI(Orgueil)、CV(Allende)、ユークライト(Juvinas)隕石の場合。

できるX線測定用の冷却CCDが実用化されてきた。一般的な静穏時の太陽X線[5]が、CIコンドライト(Orgueil), CVコンドライト(Allende), ユークライト(Juvinas)の組成[6]をもつ惑星表層物質に照射した場合に、この機器で観測が期待できるX線スペクトルの例を図1に示す。Mg, Al, Siの3元素に加えて、FeのL線, Na, Sのピークが見える。隕石種によるX線スペクトルの違いは一目瞭然である。元素の相対存在度から物質種を同定し、絶対強度から水など揮発性成分の存在度などの情報が引き出せると期待している。

3. 観測シーケンスと科学目標

MUSES-C計画のノミナル案では、探査機は2002年1月に地球を出発し、2003年9月にネレウス近傍に到着する。約2か月にわたってネレウスの観測やサンプル採取を行い、2006年1月に地球に帰還する。ミッション期間中に提案されている蛍光X線観測の主なプランは、以下のものである。

- ・小惑星表面の平均元素組成と物質の同定
- ・小惑星のローカルな元素分布
- ・小惑星の表面状態、凹凸についての情報
- ・宇宙背景X線の連続的観測

これらについて簡単に解説する。

3.1 小惑星表面の元素定量分析

地上観測で得られる小惑星のスペクトル型は、小惑星表面の「平均的」な物質情報を表すものである。この観測結果と比較するためには、グローバルな平均組成を調べる探査が必要である。小惑星から高度10~20km離れた南中静止位置、即ち太陽-探査機-ネレウスが一直線上になる位置から、蛍光X線の連続観測を実施する。観測は昼間側で行うが、小惑星の自転に任せて小惑星の経度方向にぐるりと観測でき、スペクトル型に対応する

小惑星の全表面の平均元素組成が得られる。表面の平均と言っても小惑星は小天体であり、内部も含めてほとんど一様均質の可能性が大きいだろう。例えば、直径10km級の小惑星ガスパラでも、誤差範囲内で表層物質は一様と考えても矛盾はない[7]。まして直径約1kmのネレウスでは、表面の平均組成=バルク組成、と考えても大きな間違いはなさそうである。言わずもがなであるが、この測定で得られた結果は、小惑星の原材料となった物質を知り、その形成・進化過程の研究に貢献するネタである。

ここで、蛍光X線観測で測定できる物質同定のレベルを考えよう。図2にFe-Al-Siの存在度で宇宙物質をプロットした例を示す[8]。この3元素の存在比を1割以下の誤差で決定できれば、各宇宙物質はほぼ同定できることがわかる。Mg-Al-Siについても同様の議論ができる[9]。これらの4元素を精度よく測定することによって、コンドライトに限らず、各種岩石の同定ができる。しばしば惑星進化の議論に登場するMg#(珪酸塩鉱物中のFeとMgの割合)も分かる。ここでは余談になるが、月の高地のように斜長石に富む大地を観測する場合、Na量が観測できることは、その岩石の成因や母岩を考える上で貴重である。

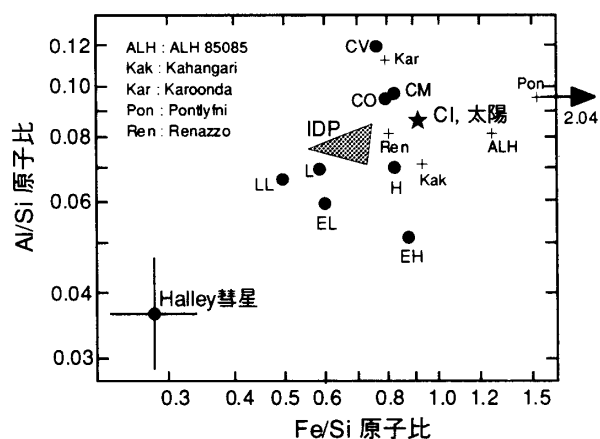


図2. 宇宙物質をAl/Si, Fe/Siの組成比でプロットしたもの([8]を改変)。

ネレウスは、揮発性物質に富むと考えられるC型やP型の可能性がある。蛍光X線観測では、水や有機物を直接的に検出することは難しいが、比較的揮発性の高いNaとSの観測はできる可能性がある。Na, Sの存在度と、コンドライトの種類の間関係を図3に示す[10]。4つの主要元素だけでは区別しにくいCM-COコンドライトも、揮発性元素の存在度から分類できそうである。また、図1に示されるように、含水量の異なるCIとCVで蛍光X線の絶対強度の違いが見られる。このことから、逆に含水量の推定ができるかもしれない。

3.2 元素の空間分布

小さい小惑星は、物質的にほぼ均質であるかのように書いた。事実、顕著な吸収パターンを持つスペクトル型であるS型のガスプラでさえ、ほぼ均質と考えても矛盾は無いわけで、いわんやネレウスをや、である。しかし、小さい小惑星が、過去に物質分化や不均質集積を経験した母天体からの分裂によって形成された場合、物質境界層だった分裂片もあるはずだ。あるいは、組成の異なる2つの天体が衝突合体した天体の場合もある。それゆえ、小惑星の表裏で組成が違うこともあり得る。

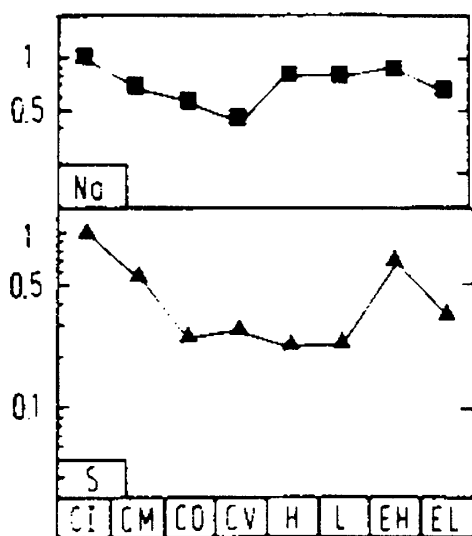


図3. コンドライトの揮発性元素の存在度を比較したもの。CIで規格化してある。(9)から改変)

ネレウスから距離10~20kmからの連続観測を行うと、小惑星の自転に伴って経度方向に沿った元素組成分布を調べることができる。表1に、各隕石の組成に対して3 σ で10%以上の精度を達成するのに必要な観測時間を示す。多くの主要元素に対して1日で全表面の平均組成、1週間程度で経度方向の空間分布を調べることができる。

サンプリングのためのネレウスへの降下及び上昇時には、ローカルな地域の観測ができる。着地前に高度2~3kmで数時間停止するフェーズを作ると、蛍光X線を含めた観測によって、サンプリング地点付近の地質情報が取得できる。

3.3 小惑星表面の状態と微小凹凸

レゴリスに覆われたり、剥きだしの岩肌が露出する小惑星表面は、理想的な試料表面ではない。おまけに小惑星表面は、宇宙放射線、太陽風、微小隕石などによる“スペースウェザリング”の効果を受け、破碎や化学反応が生じている。これらの影響によって、鉱物組成や表面形状、粒度が変化する。このため、スペクトル型から単純に物質を

表1. 高度10kmから観測する場合の、静穏時の太陽X線に対する必要観測時間(3 σ で10%以上)。×は60日以内では観測不能なもの。H:Hour, D:Day.

| 元素 | CI | H | Eucrite | Pallasite | Iron |
|-------|-------|-------|---------|-----------|-------|
| Fe(L) | 0.53H | 0.40H | 1.0H | 0.22H | 0.24H |
| Na | 12H | 12H | 1.9D | × | × |
| Mg | 0.08H | 0.07H | 0.36H | 0.11H | × |
| Al | 11H | 12H | 0.31H | × | × |
| Si | 0.36H | 0.27H | 0.15H | 1.0H | × |
| S | 5.4H | 2.5D | × | × | × |
| Ca | 46D | 37D | 1.6D | × | × |
| Ti | × | × | × | × | × |
| Fe | 9.8D | 8.8D | 16D | 6.5D | 6.3D |

同定することは不可能である。蛍光X線強度は、鉱物ではなく、構成原子の存在度に関する現象であるから、スペースウェザリングの影響をほとんど受けない。スペクトル型の情報と、蛍光X線観測による物質の同定によって、物質表面が経験した状態や化学変化の程度を逆に知る手がかりが得られるだろう。

平坦に磨かれた理想的な表面と比べて、でこぼこな表面では蛍光X線の絶対強度が減少することが実験的に分かっている。また、レゴリスの粒度が粗いほど、蛍光X線強度が小さくなる傾向にある[11]。しかし、蛍光X線の強度の変化量は、粒子サイズが数 μm 径と100 μm 径の場合で10%程度であり、相対強度の変化はそれよりずっと小さいので、表面がレゴリスに覆われている場合は物質の同定に大きな問題はない。逆に、この特徴を表面状態の観測に応用することを検討してはどうか。太陽X線を標準試料法によりモニタして、絶対強度の議論ができる高精度の蛍光X線観測データを取得すれば、代表的な表面の粒度(またはサブミリ・スケールの粗さ)に関する情報が得られる。表面状態の影響には、位相角(太陽-小惑星-探査機のなす角)依存性がある。探査機位置を南中位置から位相角45度程度まで段階的にスキャンするシーケンスによって、位相角依存性を調べ、表面状態に関する情報の信頼性を増すことができる。

3.4 宇宙背景X線の観測

打ち上げから小惑星に到着するまでの巡航期間と、小惑星を出発してから地球に帰還するまでの(可能ならば地球帰還後も)長い道程において、宇宙X線の観測を行う。イオンエンジンを使用する関係上、任意の方向のX線天体を観測することは無理だが、約5度の視野幅で宇宙の背景X線を観測することができる。これは科学観測のみならず、X線センサの機上での校正テストも兼ねる重要な観測で

ある。

4. 機器の概要

以上の説明から、蛍光X線観測が、MUSES-C計画の科学目標の達成に重要な役割を果たすことがご理解いただけたかと思う。ここで観測機器に要求される性能のポイントを次に挙げる。

- ・主要元素を検出するエネルギー帯域
- ・各蛍光X線を分離するエネルギー分解能
- ・弱い蛍光X線に対するカウント数の確保
- ・定量分析のための太陽X線モニタ

観測に必要なエネルギー帯域は、軟X線(0.7~3 KeV)に高い感度を持つX線検出器と、透過率の高いX線入射窓を使用することで達成される。カウント数確保のためには、有効面積の稼げるエネルギー分散型X線検出器が望ましい。その中でも、蛍光X線ピークの相互分離が可能な高いエネルギー分解能をもつものがよい。厳しい重量制限も考慮しなければならず、長年に渡る苦渋の検討を重ねた結果、現在一つの雛形ができつつある。ここでは雛形として、先端的な技術とアイデアを駆使

表2. 蛍光X線スペクトロメーターの緒元

| | 小惑星観測用 | 太陽モニタ用 |
|------------|---|------------|
| センサ構成 | 1"CCD×4枚 | 1"CCD×1枚 |
| サイズ | センサボックス：90 x 120 x 60 mm ³ エレキ：200 x 150 x 80 mm ³ | |
| 重量 | 合計：3.3kg (センサ系：1.0kg、エレキ系：2.0kg、他：0.3kg) | |
| 電力 | 15W | |
| 検出帯域 | 0.7~10.0KeV | |
| ΔE | 90eV@Al-K、140eV@Mn-Kを目標 | |
| 稼働温度 | 230K (CCD) | |
| データレート | 0.1kbps (ヒストグラム出力) | |
| 有効面積 | 25cm ² | TBD |
| 視野角 | 5deg | -3~+40 deg |
| 標準試料組成 | — | TBD |
| 計数率 | 数 cps/chip | 数 10 cps |

したCCD搭載型の蛍光X線スペクトロメーターのセンサー部を図4、緒元を表2に紹介する。幾つかの部分については以下に解説する。

4.1 X線検出器

1インチ角のX線CCDを、4枚貼り合わせたものを小惑星観測用として使用する(有効面積25cm²)。また、太陽モニタ用には、同じチップを1枚使用する。CCDに入射したX線光子は光電吸収され、発生した光電子とオージェ電子が周囲の構成原子と衝突することによって次々に電子が発生し、結果

的には約3.65eVにつき1個の割合で電子が発生する。例えばSi-K α 線の場合、約480個の電子が発生する。小惑星表面から発生する蛍光X線強度は弱く、2個以上のX線光子が、短時間にCCDの1画素に入射する確率は極めて小さい。それゆえ、各画素から読み出される信号強度は、入射X線光子のエネルギーに比例する。CCDは画素が小さく、発生した電子が電極に達するまでの距離が短い。このため、拡散によるロスが少なく、高いエネルギー分解能が得られる。

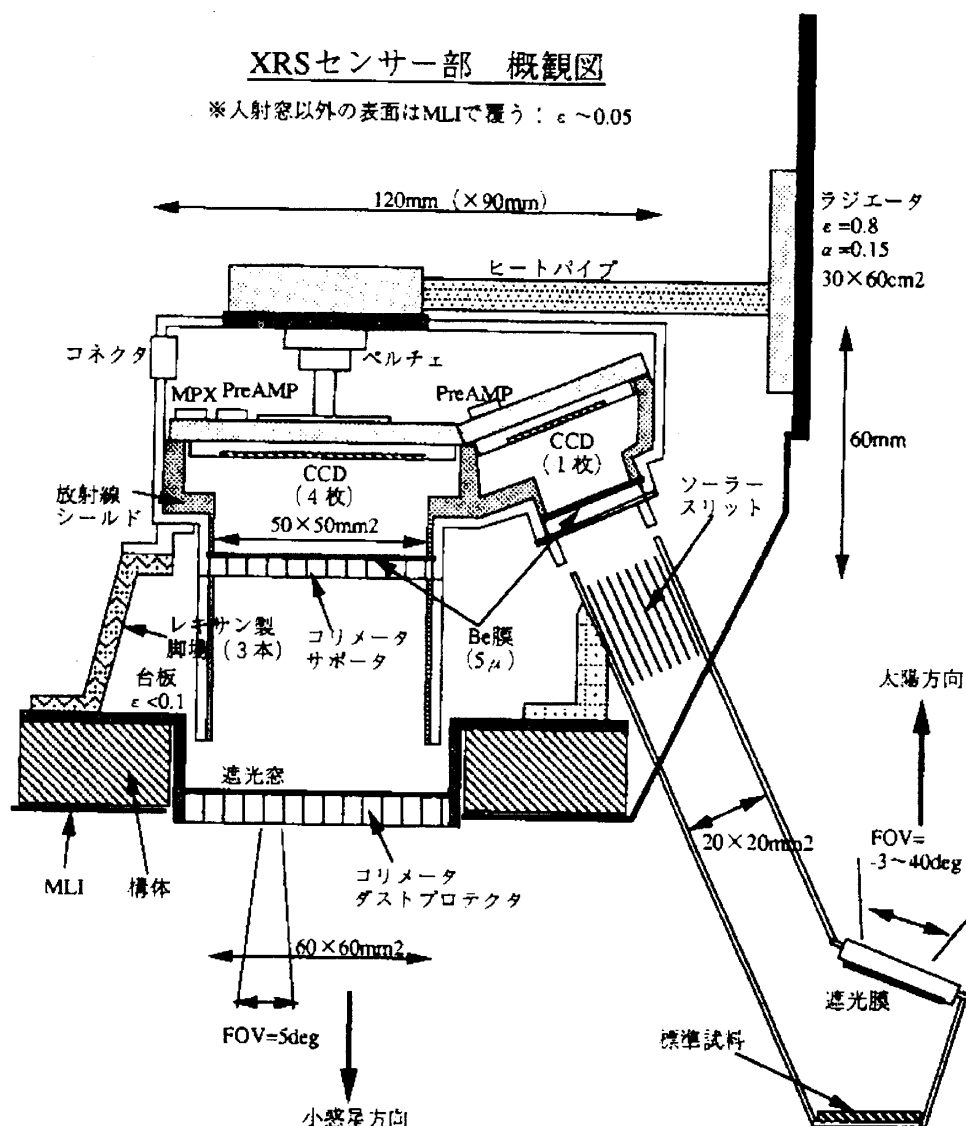


図4. 蛍光X線スペクトロメーターの概形

4.2 冷却機構

CCDを高エネルギー分解能のX線検出器として使用するには、冷却が必要である。CCDはそれ自身で信号増幅を行わないので、熱雑音を低下させることによってS/Nを稼ぐ。使用を検討しているCCDと同系列品について、温度とエネルギー分解能の関係を調べてみたところ、 -40°C 以下で満足できるエネルギー分解能が実現することが分かった。冷却には、ペルチェ素子による電子冷却と、放射冷却を併用する。CCDは、ペルチェ冷却によって温度規定点との温度差を約 30°C にする。温度規定点は、ヒートパイプを使ってラジエータへ熱を運び、ラジエータで放熱する。これによって、温度規定点の温度を -10°C 以下に保持するように設計する。

4.3 入射窓

蛍光X線観測では小惑星の昼側表面を観測するため、軟X線を透過し、かつ可視光を遮断する“魔法の窓”が必要である。FeのL線の検出など、1 KeV以下まで検出帯域を拡げるには、入射窓の検討と開発が必要である。一つの候補は、厚さ $5\mu\text{m}$ の超薄膜ベリリウムである。これは、一応は入手可能だが、現在の製作法が延展法のため、厚さにばらつきが見られるという欠点がある。このため、アルミ等を蒸着した $1\mu\text{m}$ 厚のポリイミド膜も検討している。ポリイミド膜はぺらぺらの薄い膜なので、ロケットの打ち上げの時の衝撃に耐えるような支持構造の検討も必要である。また、CCD表面に直接、厚さ $0.5\mu\text{m}$ 以下のアルミ蒸着する方法も検討している。この方法だと、入射窓に関する構造上の問題は解決される。

4.4 標準試料法の太陽モニター

既に述べたように、励起源である太陽X線を、一度標準試料に照射させて蛍光X線を発生させ、そ

れを小惑星観測用と同等の検出器で測定するのが標準試料法による太陽モニターである。標準試料としては、既知の元素組成をもつ、均質のガラス板を考えている。この方法の長所は、(1)実験室と同様の定量分析方法が使える、蛍光収率等の誤差の大きい文献値を使わずに済むこと、(2)その結果、分析精度において1桁以上のアップが見込まれること、(3)励起される蛍光X線の輝線を使ってエネルギー校正ができるので、校正用のX線源の搭載が不要となること、などが挙げられる。アポロやNEARに搭載された蛍光X線観測装置では、機器の構造的な簡便さから、太陽X線の直接観測法が取られていたが、この方法では分析技術として精度的に限界がある。CCDを使用する高精度観測の時代では、標準試料法を採用すべきであろう。

5. 蛍光X線観測装置の現在・過去・未来

これまでの惑星探査ミッションで、使用・提案されたりリモートセンシング用蛍光X線観測装置は数例ある。最初に使用されたのはルナ10号の月周回衛星のもので、入射窓のフィルターにより検出帯域を変えたガイガーカウンターを3本並べ、月からの軟X線放射を観測した[12]。最初の本格的な蛍光X線観測は、アポロ15、16号の月周回司令船に搭載された機器で行われた。

これは月観測用に3本、太陽モニター用に1本の比例計数管から構成される。厚さ $25\mu\text{m}$ のベリリウム膜の入射窓に、MgとAlの蒸着を施してX線透過特性を変えた3本の比例計数管で同時に観測することで、Mg-Al-Siの存在比が得られるという、当時としては最高のアイデアと性能を誇った。その後、比例計数管の性能アップや電子回路の進歩などマイナーチェンジこそあれ、同型機器は現在でも活躍している。小惑星エロスの観測を行う

NEARミッションに搭載されている機器 (XGRS = X-ray/gamma-ray spectrometer) は、これと同型の機器に加え、太陽X線モニターにPINダイオードを併用したものである[13]。この方式でも主要な3元素の存在度がラフに決定できるので、コンドライトや玄武岩といった大まかな岩石タイプの決定は十分できる。

高精度分析による革命的進歩を目指して、CCDの搭載を最初に検討したのは、ESAの月探査計画MOROである[14]。放射冷却によってCCDを235K以下に冷却し、月面の全面元素組成マッピングを提案した。計画そのものが暗礁に乗り上げているのは、何とも残念である。MUSES-Cの蛍光X線観測では、優れた研究実績を上げている日本のX線天文学分野からの協力を得ることができたこともあり、CCD搭載型の機器の提案が実現した。太陽モニターの標準試料法を初めて導入することで、さらに1桁高い精度の科学的成果を狙っている。これと併行して、月探査周回衛星計画(SELENE)において、このMUSES-C用の機器の大型版の搭載が提案されており、月の元素組成グローバルマッピングを行う予定である。今後も、次の小惑星ミッションや水星ミッションなど、大気のない惑星の探査には、CCD搭載型、あるいは更に新しい種類の蛍光X線スペクトロメータを用いた観測が期待される。

参考文献

- [1] 例えば, Adler, I., Trombka, J., Gerard, J., Lowman, P., Schmadebeck, R., Blodgett, H., Eller, E., Yin, L., Lamothe, R., Gorenstein, P., and Bjorkholm, P., 1972a: Preliminary Report of the Apollo 15 X-ray fluorescence Experiment. *Science* **175**, 436-440.
- [2] Tholen, D., 1995: Personal Communication.
- [3] Hiroi, T., Pieters, C. M., Zolensky, M. E., and Lipschutz, M. E., 1993: Evidence of Thermal Metamorphism on the C, G, B, F Asteroids. *Science* **261**, 1016-1018.
- [4] Bambynek, W., Crasemann, B., Fink, R. W., Freund, H. U., Mark, H., Swift, C. D., Price, R. E., and Venugopala Rao, P., 1972: X-ray Fluorescence Yields, Auger, and Coster-Kronig Transition Probabilities, *Rev. Modern Phys.* **44**, 716-813.
- [5] 例えば, Mewe, R., Lemen, J.R., and van den Oord, G. H. J., 1986: Calculated X-radiation from Optically Thin Plasmas. VI. *Astron. Astrophys. Suppl.* **65**, 511-536.
- [6] Jarosewich, E., 1990: Chemical Analyses of Meteorites: A compilation of Stony and Iron Meteorite Analyses. *Meteoritics* **25**, 323-337.
- [7] Belton, M. J. S., Veverka, J., Thomas, P., Helfenstein, P., Simonelli, D., Chapman, C., Davies, M. E., Greeley, R., Greenberg, R., Head, J., Murchie, S., Klaasen, K., Johnson, T. V., McEwen, A., Morrison, D., Neukum, G., Fanale, F., Anger, C., Carr, M., and Pilcher, C., 1992: Galileo Encounter with 951 Gaspra: First Pictures of and Asteroid. *Science* **257**, 1647-1652.
- [8] Scott, E. R. D., and Newsom, H. E., 1989: Z. *Naturforsch.*, 44a, 928. in *Solar System Evolution* (Taylor, S. R., Eds.), Fig.3.10.2, Cambridge, 1993.
- [9] Larimer, J.W. and Wasson, J.T., 1988: Refractory Lithophile Elements. in *Meteorites and the Early Solar System* (Kerridge, J. F. and Matthews, M. S., Eds.), Univ. Arizona Press, 394-415.
- [10] Palme, H., Larimer, J.W., and Lipschutz, M.E.,

1988: Moderately Volatile Elements. in *Meteorites and the Early Solar System* (Kerridge, J. F. and Matthews, M. S., Eds.), Univ. Arizona Press, 436-461.

- [11] 桑田良隆, 岡田達明, 水谷仁, 1997: 蛍光X線観測における粒子サイズ効果. 地球惑星科学関連学会1997年合同大会予稿集, 577; Okada, T., and Kuwada, T., 1997: Effect of Surface Roughness on X-ray Fluorescence Emission from Planetary Surfaces. *Lunar Planet. Sci. XXVIII*, 1039-1040.
- [12] Mandel'shatam, S., Tindo, I., Cheremukhin, G., Sorokin, L., and Dmitriev, A., 1968: Lunar X-rays and the Cosmic X-ray Background Measured by the Lunar Satellite. *Cosmic Res.*, **6**, 100-109.
- [13] Santo, A. G., Lee, S. C., and Gold, R. E., 1995: NEAR Spacecraft and Instrumentation. *J. Astronautical Sci.* **43**, 373-397.
- [14] Coradini, A., Foing, B., Harrison, M., Hoffmann, H., Janle, P., Langevin, Y., Milani, A., Neukum, G., Picardi, G., Racca, G., Raitala, J., d'Uston, C., Waltham, N., and Waenke, H., 1996: The MORO model payload. Chap. 5 in *MORO Phase-A Study, ESA-SCI(96)*, **1**, 47-80.