



# はやぶさ宇宙探査機が 小惑星イトカワから持ち帰った 微粒子の中性子放射化分析

海老原 充

Ebihara Mitsuru

## 1. はじめに

はやぶさ宇宙探査機は2003年5月9日に鹿児島県内之浦から打ち上げられ、同年9月に小惑星25143イトカワに到着した。イトカワの周回軌道を回りながら数々の観測を行った後、11月には小惑星表面に降下し、表面物質を採取する試みを行った。その後、幾つかの困難を切り抜け、2010年6月13日にオーストラリアの砂漠に帰還した。打ち上げ時には、グラムオーダーの試料採取を見込んでいたが、当初予定していた試料回収操作が実施できず、回収量ゼロも覚悟せざるを得ない状況であった。回収された試料収蔵カプセルは直ちに相模原市の(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)・宇宙科学研究所(ISAS)に搬送された。同研究所内の“惑星物質試料受け入れ施設”において詳細に調べたところ、地球外起源と思われる粒子が1,500個以上見つかった。

日本の惑星探査計画では探査衛星打ち上げ前にその目的が工学系か、理学系かで色分けされるのが通常で、はやぶさ探査機は工学系ミッションとしての任務を負って打ち上げられた。打ち上げから地球帰還に至るまで、当初の計画をほぼ全て完璧に果たした点で、はやぶさ探査計画は大成功であった。予定された量の試料を回収できなかったとは言うものの、はやぶさ自身が自立航法を駆使して試料採取操作を行い、危

険を回避しながら試料を回収してきたとの知らせは筆者ら初期分析チームを大いに興奮させた。はやぶさ探査機の打ち上げ前から、回収された試料を分析する体制が検討され、客観的な評価に基づく選考後、初期分析チームが結成された。このチームは理学的研究目的を持った研究者から構成された。試料のサイズや量は当初の見込みと大きく異なり、粒子の大きさはほとんどが $100\ \mu\text{m}$  (10分の1 mm) 以下で、総質量も数 $10\ \mu\text{g}$  (10万分の1 g) 程度であった。はやぶさ帰還から約半年後、一連の初期分析の結果は2011年3月米国ヒューストンで開催された月惑星科学会議の特別セッションで口頭発表され、そのうち6つの研究内容が、同年8月26日号の*Science*誌上に論文として報告された。理学ミッションも十分果たせたのである。本稿ではこの初期分析の一環として行った中性子放射化分析の経過とその結果を紹介する。

## 2. 初期分析としての中性子放射化分析

はやぶさ回収試料は現在、国際公募制度の下、審査を経て国内外の誰でも研究対象とすることができる。しかし、回収直後に行われた初期分析は国内の一部の研究者に限られた。この初期分析に携わった研究者は極めて公平な手続きで選ばれた。はやぶさ回収試料の初期分析に関してはJAXAに統合される前のISAS内で

1998年以前から議論が開始され、米国宇宙航空局（NASA）の協力の下で完全な公募、及び peer review 制で行うことが決められた。第1回目の公募は1998年に開始された。peer review は書面審査と実技の2段階で行われた。書面審査は、初期分析の手法、適用可能性（feasibility）、期待される結果について英文で申請書を提出し、国内外の複数の査読者による査読意見に基づいて行われた。一次審査通過者には2種類の粉末試料が配布され、一次審査で提案した方法に従って分析し、その結果を論文形式の英文の報告書として ISAS に提出した。この報告の査読を経て、最終的な初期分析担当者が選定され、筆者らの中性子放射化分析プロポーザルは無事選ばれた。この初期分析の公募は2回行われた。

筆者らが初期分析で目指したことは、中性子放射化分析法によってイトカワから回収された微小粒子の元素組成を正確に求め、そのデータを用いて微粒子の特徴を明らかにすることであった。初期分析として元素組成を求める方法としては、中性子放射化分析以外に、蛍光X線分析、二次イオン質量分析が用いられた。これらの方法で行うのは表面分析であり、中性子放射化分析は全試料分析である点が大きな相違点であり、また、後で述べるように、表面分析では得られない大きな成果が得られた。中性子放射化分析法の概略は以下の通りである。中性子を試料に照射して中性子捕獲反応を起こし、安定な核種を不安定な放射性核種に変換する。生じた不安定核種が安定核種に変化する（壊変する）ときに余分なエネルギーを外部に放出する。この時放出されるγ線を測定して、そのエネルギーから元の安定核種の種類を、γ線の放出頻度からその量を求める。中性子放射化分析の原理を図1に示す。中性子放射化分析の最大の特徴は分析に用いる中性子とシグナルとしてのγ線がともに物質への透過能が高く、試料表面ばかりでなく、試料全体の組成を求めること

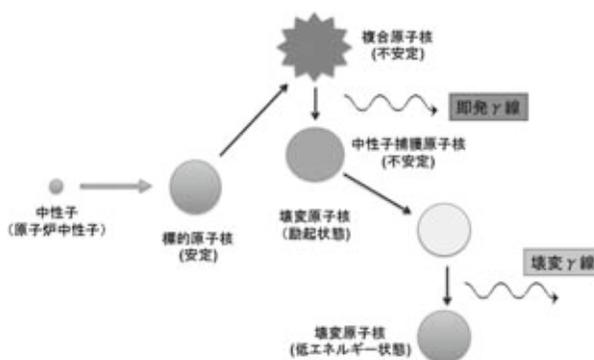


図1 中性子放射化分析の原理

ができることである。また、試料を破壊することなく複数の元素を高感度に定量できることもこの方法の大きな利点である。

### 3. イトカワ微粒子の中性子放射化分析

イトカワ微粒子の分析は2011年2月に行った。ここ10年来、中性子放射化分析には（独）日本原子力研究開発機構（JAEA）のJRR-3、JRR-4、及び京都大学原子炉実験所（KURRI）のKURがよく利用されてきたが、その時点ではJAEAの原子炉は定期点検中で、運転を休止していたこともあり、イトカワ試料の初期分析にはKURを利用した。実試料の分析のリハーサルとして、2011年2月2日から4日にかけて、キラボ隕石から調整した同様の微小試料や宇宙塵試料を用いて予備実験を行った。予備実験では、照射前の照射容器への試料の格納と照射後の照射容器からの試料の取り出し・移し替えに焦点を当てた。

当初の初期分析計画では回収試料の総量をグラムオーダーと想定しており、中性子放射化分析を用いる我々の計画では幾つかの放射化分析法を組み合わせて、なるべく多くの元素についての含有量を求めることを意図した。しかし、試料採取が予定通り行えなかった可能性が高いことが分かった時点で初期分析チームで議論を重ね、少量の試料量でもできるだけ多くの情報が得られるように、はやぶさ探査機が地球に帰

還する前に分析スキームの改訂版を完成させた。さらに試料回収カプセル内を調べた結果、はやぶさが持ち帰った試料量は当初想定していた量の100万分の1程度で、しかも試料の大きさが100 μm以下のものがほとんどであることが分かり、再度分析スキームを改訂し、図2に示す最終版を作成した。初期分析では52粒子を用い、そのうちの1粒子を中性子放射化分析に用いた。できる範囲で試料の使い回しをして、試料の損失を最小限にすることを心掛けた。

中性子放射化分析には、九州大学で先行する実験で使った5粒子の中から1粒子を選んで用いた。RA-QD02-0049と名付けられた粒子で、試料カプセル内のA室から回収された約1,500個のイトカワ由来の微粒子の中で大きさとしては最大級の粒子の1つとされた。この粒子の電子顕微鏡写真を図3に示す。2011年2月7日に、九州大学でこの粒子を中性子照射に用いる石英製のホルダーに格納し、高純度アルミニウム箔で包装する作業を行った。この石英製ホル

ダーに格納する際、粒子を一時見失うというハプニングがあった。朝から昼過ぎまでの約4時間にわたる搜索の末に無事発見し、照射用石英ホルダーに収容したときには極度の緊張から解放され、一種の放心状態であった。KURRIの関本俊助教とともに、喜びのうちに新幹線の人となった。大阪府熊取町にあるKURRIに移送するためである。この時は、この筆舌に尽くしがたい経験を翌々日もう一度味わうことになるとは思ってもよらなかった。

中性子照射は2月8日から9日に掛けて、KURのハイドロ照射孔で19時間行った。2月9日正午前照射を終了し、数時間冷却の後、試料の取り出しを行った。アルミ箔で包んだ石英ホルダーをシャーレ(ペトリ皿)に取り、試料が静電気で飛散ないようにアルコールを滴下し、注意深くアルミ箔を開いた。その後、石英製の蓋(カバー)をそっと外し、顕微鏡下で試料を確認したところ、前述のごとく、悪夢再来、再度試料を見失ってしまった。この時も約4時間の搜索の後、無事、試料回収に成功した。

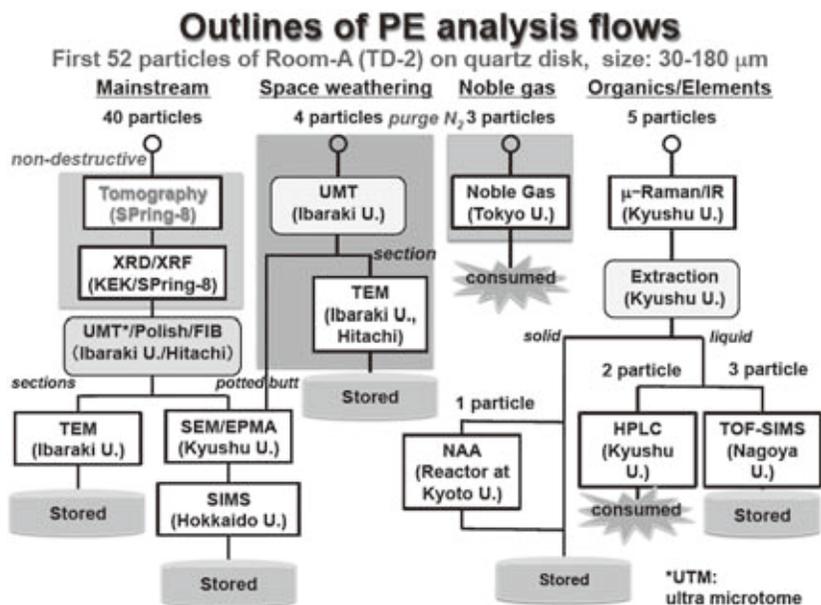


図2 初期分析スキーム

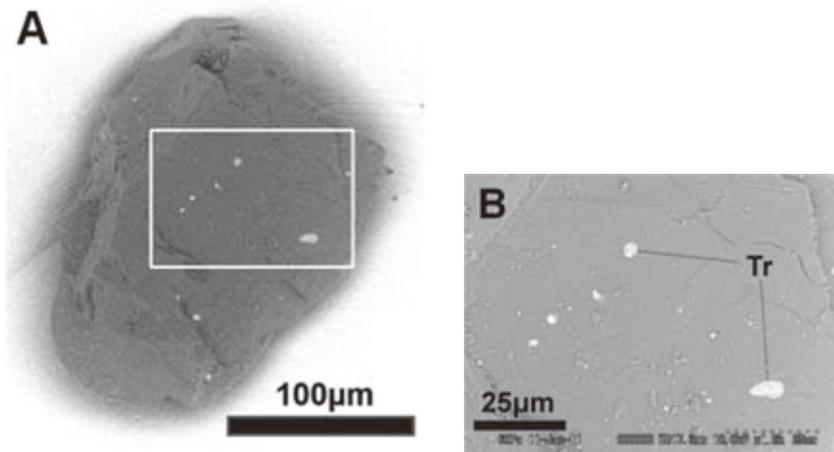


図3 中性子放射化分析に用いたイトカワ微粒子 RA-QD02-0049 の電子顕微鏡写真  
BはAの白枠部分を拡大したもの

驚いたことに、当初1粒であった試料が5粒に分解していた。鉱物学を専門とする初期分析チームのメンバーによれば、イトカワ回収試料には弱い力で形状を崩すものが珍しくなく、見掛けは1粒子に見えたものの、層状に弱くくっついている状態だったのではないかとのこと。5粒に分解したうちの1粒が元のほぼ半分の大きさで、これをRA-QD02-0049-1とし、残りの4粒は大体似たようなサイズの小粒子となったが、併せてRA-QD02-0049-2と名付けた。結果から言えば、こうして2つの試料に分割できたことは、後の分析結果を解釈する上で非常に好都合であった。とにかく、再度の大格闘の後に試料を新しいホルダーに移し替え、KURの通称ホットラボ内の測定室にあるGe半導体検出器を用いて $\gamma$ 線測定を開始した。一時は、試料の搜索・回収のために徹夜も覚悟したが、何とか新大阪駅からの東京行き新幹線の最終に間に合い、後の測定をKURRIの関本さんに託し、無事帰宅することができた。

#### 4. イトカワ微粒子の元素組成

中性子照射後の試料の $\gamma$ 線測定は照射終了日の2月9日から3月1日までKURRIのホット

ラボで継続的に実施した。続いて、金沢大学環日本海域環境研究センターの山本政儀教授、浜島靖典助教の協力の下、同センター低レベル放射能実験施設の尾小屋測定室で $\gamma$ 線計測を継続した。初期分析段階では、イトカワ試料の移送は2名で行い、空路は利用しないというルールが敷かれていた。尾小屋測定室での $\gamma$ 線計測を実施するために、3月2日に関本さんとともに陸路、鉄道によって試料を搬送した。尾小屋測定室での $\gamma$ 線測定は4月初めまで行われ、4月5日に浜島さんと関本さんによって尾小屋測定室から再度KURRIに試料が搬送された。その後、約1か月間KURRIで測定が継続され、5月11日にISASに試料を返還して、粒子RA-QD02-0049に関する初期分析は終了することになった。

$\gamma$ 線測定の結果、2つの試料(RA-QD02-0049-1, RA-QD02-0049-2)に対して、Na, Sc, Cr, Fe, Co, Ni, Zn, Irの8元素を定量することができた。定量値を求めるために比較標準試料としてアイエンデ隕石粉末(米国スミソニアン博物館で調整された試料)と玄武岩JB-1(日本地質調査所で調整された試料)、及び高純度鉄(細粒)を合成石英管に封入し、イトカワ試

料と同じ条件で照射し、 $\gamma$ 線測定を行った。放射線強度が異なる場合は測定位置を変えて、測定器の不感時間を一定値以下にするようにした。測定試料間での試料と測定器の幾何学的位置関係の違いに起因する検出効率の違いは、標準試料を測定することにより補正した。本研究で用いた粒子に対しては、中性子放射化分析に先立って、エネルギー分散型X線分析装置付き走査電子顕微鏡 (SEM-EDX) による事前観察が行われており、その時の分析からはほぼ純粋な橄欖石であることが分かっていた。この時のFeとMgの元素比と放射化分析で得られたFeの定量値(質量)からRA-QD02-0049-1とRA-QD02-0049-2の2試料の質量を計算し、それぞれ1.6  $\mu\text{g}$ 、1.5  $\mu\text{g}$ と求められた。この質量を元に定量できた8元素の濃度を計算したところ2試料間で測定誤差の範囲で一致し、これら8元素に関してはRA-QD02-0049中に均一に存在していることが確認できた。それとともに、二度のアクシデントを経て回収された微粒子に不純物が混入していなかったこと、分析過程に大きな誤りがなかったことを間接的に支持する結果となった。

### 5. イトカワ微粒子の元素組成が意味すること

宇宙化学の研究ではいくら良いデータが得られても、それに見合う解釈がないと科学的に評価されない。そこで、元素組成を基に宇宙化学的考察を試みた。図4は分析したイトカワ微粒子のFeとScの含有値を地球の岩石、火星から飛来したと考えられる隕石(火星隕石)、地球への落下頻度の高いコンドライト隕石等の値と比較した図である。地球のように金属核を持つ惑星ではFeはかなりの部分が核に集まっているが、Scの

ようなケイ酸塩岩石に入りやすい元素(親石性元素)はほぼ全てマントルや地殻中に存在する。一方、コンドライト隕石の母天体ではそのようなケイ酸塩と金属鉄の分化が起こっていないために、FeとScの存在比は太陽系の起源物質の値に近い値を持つ。したがって、中心に金属核を持つような分化した天体のケイ酸塩試料中のFe/Sc比はコンドライト隕石の値よりも小さい。火星由来の隕石も同様の傾向を示す。

既に述べたとおり、今回分析したイトカワ粒子は大部分が橄欖石で構成されているが、図4で示されるように、この試料のFe/Sc比は地球や火星の橄欖石の値よりも大きく、コンドライト隕石の中で普通コンドライトと分類される隕石から分離した橄欖石の値に似ていることが分かった。このことから、分析した微粒子は地球外物質であり、はやぶさ探査衛星が小惑星イトカワから試料を回収して地球に帰還したことを証明した。また、その組成から、小惑星イトカワはコンドライト隕石と同様の化学組成を持つことが分かった。

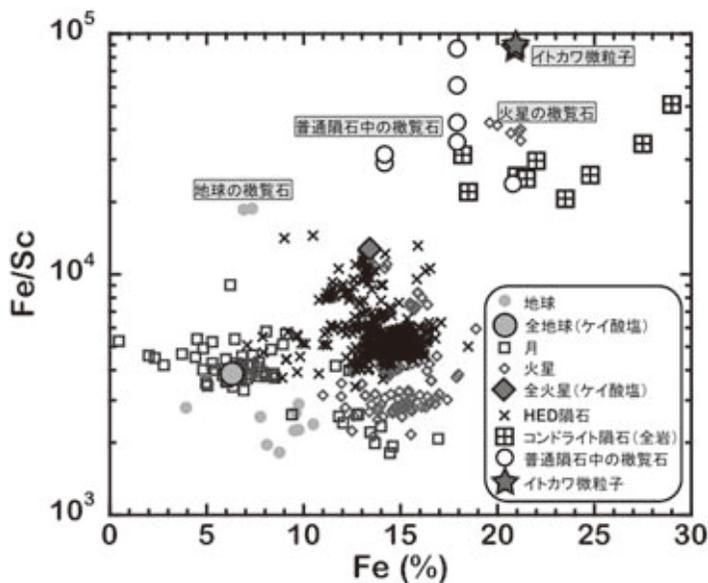


図4 イトカワ微粒子 RA-QD02-0049 を含む幾つかの地球外物質と地球物質中のFeとScの含有値の比較

今回分析した試料ではFeに加えて、Co, Ni, Ir等金属に入りやすい元素(親鉄性元素)の含有量が地球の表層物質に比べて非常に高いことが分かった。図5は、分析したイトカワ試料のNiとCoの含有量を、幾つかの異なる種類の隕石試料やその構成物、及び地球の地殻物質の値とともに示したものである。図中の直線は太陽系の元素組成を与える隕石として知られるCIコンドライト隕石中でのNi/Co比を示すもので、コンドライト隕石のような未分化な隕石や鉄隕石の両元素比は全てこの直線上にプロットされる。図5で示されるように、イトカワ試料は2試料ともこの線上に乗ることが分かった。分化した隕石中のケイ酸塩や地球の地殻物質ではNiとCoの間で元素間の分別を起しており、それらのNi/Co比はCIコンドライト直線上には乗らない。図5から、本研究で分析したイトカワ粒子は未分化な隕石物質であり、かつ、コンドライト隕石から分離した球粒試料(コンドルール)と非常に似た組成を持つことが分かった。このコンドルールはコンドライト隕石を特徴づけるもので、図5に示されるものはコンドライト隕石の岩石学上の分類でタイプ3に属する、分化の程度の低い種類の隕石から分離されたものであることから、分析したイトカワ試料はそのような未分化なコンドライト隕石を構成する物質と同様の特徴を持つことが分かった。

分析したイトカワ試料ではCoやNiに加えて、Irも定量できた。その含有量は約30 fg ( $30 \times 10^{-15}$  g)で、この元素に対する中性子放射化分析の分析感度が非常に高いことが分かる。IrはNiやCoに比べてより親鉄性が高く、ケイ酸塩相に対する金属相への元素の分配係数が非常に大きい。したがって、地球のように一度溶融して金属とケイ酸塩が分離した天体ではIrはそのほとんどが中心核に濃集される。一

方、前述の通り、コンドライト隕石母天体ではそのような溶融・分化過程が起こらなかったで、同隕石中では親鉄性元素と親石性元素間にほとんど分別がない。図5で示されるように、今回分析したイトカワ試料は明らかにコンドライト隕石と同様の物質であり、Ni, Co間では分別が見られなかった。ところがこの試料のCo, Ni, Irの元素組成を詳細に調べると、Ir/Ni比, Ir/Co比がコンドライト隕石の持つ値よりも約5倍小さいことが分かった(図6)。Co, Ni, Irは親鉄性元素として共通するものの、凝縮温度は互いに異なり、Ir(1,610 K), Ni(1,354 K), Co(1,351 K)の順に凝縮温度が小さくなる(括弧内は太陽系の元素組成を持つ $10^{-4}$ 気圧の気体から各元素が50%固体に凝縮する絶対温度)。太陽系のうち、太陽に近い惑星領域ではその形成最初期に一度2,000 Kを超えるような高温状態におかれ、時間の経過とともに温度が低下したと考えられている。初めは気体状態で存在していた元素が全て一緒に固体に凝縮すれば元素間で分別が起こることはない。図6に見られるIr, Ni, Co 3元素間での分別はこの凝縮過程でIrだけが別の挙動をとったと考

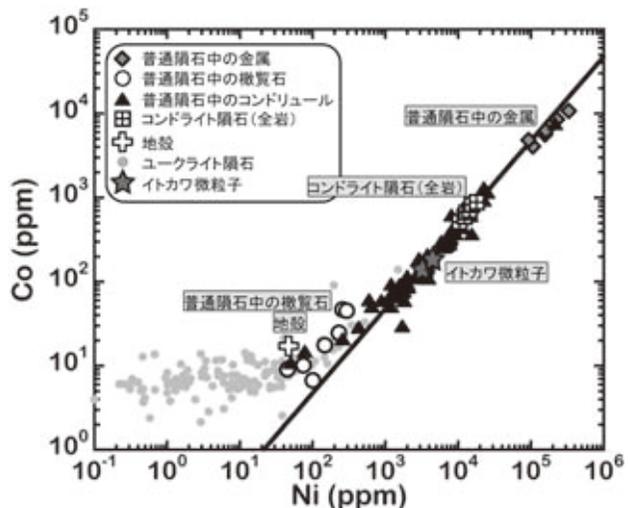


図5 イトカワ微粒子 RA-QD02-0049 を含む幾つかの地球外物質と地球の地殻物質中のNiとCoの含有量の関係

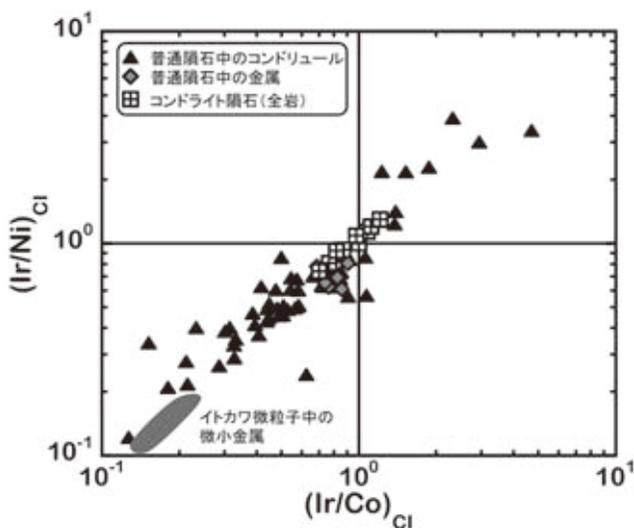


図6 イトカワ微粒子 RA-QD02-0049, コンドライト隕石全岩, コンドリユール, 金属相で見られる Ir/Ni 比と Ir/Co 比の関係

えるほかない。このイトカワ粒子は太陽系初期に起こった元素の凝縮過程をいわばスナップショット的に捉え、凍結保存したまま、45億年以上の年月を経て我々の目の前に姿を現したものであることが分かった。

## 6. ヒューストンでの発表、そして震災

2011年3月7日から11日まで、テキサス州ヒューストン近郊のウッドランズで第42回惑星科学会議が開催された。この会議はアポロ宇宙船が月から試料を回収して地球に持ち帰った翌年の1970年に第1回が開催され、それ以来、毎年開催されている惑星科学の最も重要な研究集会である。この会議の4日目である3月10日の午前にはやぶさセッションが生まれ、初期分析の結果がまとめて発表された。この発表に当たって、1月4日締切で発表要旨を提出したものの、その段階では初期分析は始まっておらず、初期分析が始まればこういう結果が得られるかもしれないという内容で紙面を埋めざるを得なかった。そのような要旨にも関わらず、口頭発表による特別セッションが組まれた。要旨提出の1か月後、ようやく初期分析に

取り掛かったが、まずはリハーサルから始め、直後の本番では種々のハプニングが起り、講演取り止めの連絡をしなければいけないと冷や汗混じりに本気で考えたこともあった。しかも、2度も。土壇場で何とか最悪の事態は免れ、無事に照射が終わり、測定データも得られたので、当初の予定通り、会議に参加した。とはいうものの、データの解釈は全くできていないままの状態で会議に臨むという、やはりこれまで経験したことの無い状況が続いていた。インターネット経由でKURRIの関本さんから送ってもらった最新のデータを基に、会場の片隅で、同僚の白井直樹助教と発表の直前まで議論を重ねて得られたのが、先の“イトカワ微粒子の元素組成が意味すること”で述べたストーリーである。

3月10日の発表が無事終わって、休憩時間になったときに、たくさんの人から高い評価の言葉もらった。少なからぬ数の日本人も参加していたが、なぜかそうした賛辞はほとんど外国の友人からであった。白井さんは入試業務のために発表の場には居合わせることができず、発表が終わった日の晩、筆者は1人で祝杯をあげ、とりあえず重い荷を少しだけ降ろすことができた。

発表の翌日(3月11日)、もう1日会議の日程が残っていたが、国内で開催される大事な会議に出席するために帰国の途に就いた。ヒューストン空港からアトランタ経由で成田空港へ向かう予定だったが、アトランタ空港に着いたとき、空港ロビー内のテレビニュースで東日本大地震のニュースが報じられていて、事の重大さを知ることになった。その時点で東京電力(株)福島第一原子力発電所のことも既に大きく取り上げられていたのが印象的で、帰国後の日本での報道内容とのギャップに違和感を感じた。今考えると、アメリカでは初期の段階で的確に状

況を判断し、かつ、ニュースとして報道していたわけで、日米両国間での危機意識に大きな違いがあったことを思い知らされる。3月12日の夕方、成田空港に着き、迂回しながら無事帰宅できたものの、予定の会議は中止になり、福島第一原発の事故が深刻さを増す中、3月16日早朝に、羽田空港から再度米国ヒューストンに飛んだ。テキサス州カレッジステーションのテキサス A&M 大学で開催された第13回「放射化分析の最近の動向」国際会議に出席するためである。会議場で多くの参加者から日本の状況を聞かれ、また、暖かい言葉をたくさんいただいた。この滞米中、日本で何が起きているかが心配で、不安な毎日を通り、当時会長をしていた日本地球化学会の会員に電子メールと学会のホームページを通じて、福島第一原発事故由来の放射性核種の拡散調査・測定に対してボランティア活動による参加を呼び掛けることになった。21日の早朝に再度帰国したが、この後、放射化学会や日本地球惑星科学連合の大気科学関連の研究者と連携しながら、文部科学省に災害特別研究の科研費を申請し（3月31日）、更には理論物理の方々と一緒になって、総合科学技術会議の戦略推進費による福島県内放射性核種土壌濃度調査（6月4日開始）とマップの作成（8月末）に突き進むことになった。

イトカワ微粒子の分析結果に関しては、月惑星科学会議での発表後、初期分析チームで *Science* 誌に論文を投稿することを決め、5月2日に投稿した。6月25日に査読結果が戻り、minor revision をして7月23日に再投稿し、8月2日に受理の返事を受け取った。この間、福

島第一原発事故関連の活動と完全に重なり、今思えばこの間もかなり際どい日々を送ったが、白井さん、関本さんという若い同僚の援護もあって、何とか乗り越えることができ、8月26日の論文発表に至った<sup>1)</sup>\*。発表記者会見は JAXA 本部と東北大学理学部で同時に行った。少しでも震災復興に寄与できればとの思いから、初期分析のチームは東北大学に集結した。この記者会見と *Science* 誌の発行で、2月7日に始まったイトカワ微粒子との格闘にひとまず終止符を打つことができた。2011年は筆者にとって還暦を迎えた年でもあり、誕生日（6月27日）はイトカワ微粒子の結果の論文作成と原子力発電所事故による放射性核種土壌濃度マップ作成の中で過ぎていった。2011年は間違いなく、これまでの60年で最も忙しい年であり、この先、もう二度と同じような事態が繰り返されてはならない、たとえ起こったとしてもとても対応できないだろうと思うと、今となってはとても感慨深いものがある。

#### 参考文献

- 1) Ebihara, M., Sekimoto, S., Shirai, N., *et al.*, Neutron activation analysis of a particle returned from asteroid Itokawa, *Science*, **333**, 1119–1121 (2011)

(首都大学東京大学院理工学研究科)

---

\*この号には参考文献1)のほか、以下の5報の論文が掲載されている：Nakamura, T., *et al.*, **333**, 1113–1116；Yurimoto, H., *et al.*, **333**, 1116–1119；Noguchi, T., **333**, 1121–1125；Tsuchiyama, A., *et al.*, **333**, 1125–1128；Nagao, K., *et al.*, **333**, 1128–1131.