

# メスバウアー分光法の学際領域への 展開を目指して

## Mössbauer Spectroscopic Characterization Toward Interdisciplinary Fields

薬袋佳孝

Yoshitaka Minai

This is a brief review of my works on Mössbauer effect applications in interdisciplinary fields in my academic carrier for nearly 50 years. Mössbauer spectroscopy has been developed in solid state physics and inorganic structural chemistry since the discovery of Mössbauer effect. This review indicates that more exotic applications could develop various fields of sciences, including human and cultural studies.

### 1. はじめに

メスバウアー分光法は固体中の鉄の状態分析の代表的な手法として、無機化学・応用物理学などの分野で広範な応用が展開されて来た。著者は、1977年以來、この方法を化学の周辺領域に適用し、学際領域である地球化学分野を中心に様々な研究を展開して来た。本報では、自らの研究史を辿る形で、メスバウアー分光法の学際領域研究について発表してきた研究例を順に紹介する。文理融合領域を含む今後の学際領域への発展の可能性についても論究する。

### 2. 実験法としてのメスバウアー分光法<sup>[1]</sup>

本研究での主要手法であるメスバウアー分光法の科学的技術的特徴について、説明する。この手法は R. L. Mössbauer が発見したメスバウアー効果（無反跳  $\gamma$  線共鳴吸収）に基づく。共鳴吸収は、赤外吸収分析、紫外可視吸収分析、原子吸光分析などの様々な分光分析の原理としてよく知られている。しかし、 $\gamma$  線領域

では高エネルギーの電磁波が吸収されるために、光子吸収に伴う反跳の効果が無視出来なくなる。紫外光や可視光では、供給される光エネルギー自体が低いので、反跳に費やされるエネルギー（反跳エネルギー）も僅かである。光吸収による励起状態のエネルギー準位の幅を越えないので、紫外光以下のエネルギーの光子の吸収には反跳は影響しない。しかし、 $\gamma$ 線では反跳エネルギーが $\gamma$ 線の共鳴吸収に関係する励起状態の核のエネルギー準位の自然幅を越える可能性が生じる。反跳で入射 $\gamma$ 線のエネルギーが失われるために、エネルギー準位と同じエネルギーの $\gamma$ 線では共鳴吸収は起こらないこととなる。また、 $\gamma$ 線の放射性核種からの放出の際も反跳によるエネルギー損失が起こる。

固体中では原子は格子に束縛されながら熱振動している。熱振動は温度の関数で、温度の低下とともに抑制される。十分に低温の条件では、原子振動も制限されて格子中に固定されてしまう。この状態の固体格子に $\gamma$ 線が入射した場合、 $\gamma$ 線吸収が引起こす反跳による運動は固体格子全体が担うこととなる。すなわち、物質系の性質と光子のエネルギーによっては、構成する個々の原子核が担う反跳エネルギーを無限小に近似し得る可能性がある。

R. L. Mössbauer は  $^{197}\text{Ir}$  について低温の固体の状態では $\gamma$ 線共鳴吸収現象の観測に成功し、それを中性子散乱で知られていた無反跳現象で説明した。1957年のメスバウアー効果の発見である。そして、この効果を分析手法として応用するメスバウアー分光法の始まりである。逆に、原子核の運動の自由度が高い気体や液体では、固体の場合のような取り扱いは成立しないので、メスバウアー効果の観測は困難である。このため、メスバウアー分光法が適用出来るのは固相に限定される。

メスバウアー効果の観測が最も容易なのは、 $^{57}\text{Co}$  から放出される 14.4keV の $\gamma$ 線による  $^{57}\text{Fe}$  の励起であった。 $^{57}\text{Fe}$  は同位体存在度が 2.3% と必ずしも高い値ではなくメスバウアー効果の観測には有利とはいえない。しかし、メスバウアー効果を示す確率が高いなどの理由で測定は最も容易である。しかも、分光法として利用した場合に得られる化学情報が豊富なのは、 $^{57}\text{Fe}$  のメスバウアースペクトルである。

むしろ、同位体存在度が低いのは、 $^{57}\text{Fe}$  濃縮同位体（90%程度の同位体存在度の酸化鉄や金属鉄が市販）を利用することで、大幅に感度を上げることが可能なことを意味している。また、鉄が地球上に普遍的に存在し生物の必須元素であるとともに、鉄や鉄を含む化合物が、人間社会で重要な役割を果たしていることも、 $^{57}\text{Fe}$  メスバウアー分光法の応用が盛んな理由の一つとも言えよう。

### 3. 研究の経過と成果

#### (1) 放射化学の世界へ—メスバウアー分光法に至るまで（1976-1977）

卒業研究（東京大学理学部化学科）では斎藤信房先生（放射化学講座担当）を指導教授として当時斎藤研究室で助手を務められていた佐藤純先生（1977年春から明治大学）の下で「RI 励起蛍光 X 線分析による状態分析の基礎的研究」にいそしんでいた。実験の場は東京大学アイソトープ総合センターであった。しかし、斎藤先生は1977年3月末に東京大学を定年退官されることとなっており、1977年4月からは不破敬一郎先生（無機化学講座）の研究室に筆者は移籍することが予定されていた。筆者は放射化学の研究室で研究を続けたかったことが、どうも先生方には伝わっていたようで、1977年春から放射化学講座を担当されることとなった富永健先生の元で大学院生としての研究がスタートした。

富永健先生は斎藤研究室のご出身で大学院修了後はスタッフとしてそのまま研究室を支えて来られた。先生はホットアトム化学で世界的にも著名であり、メスバウアー分光法もご専門の一つとして広い領域で活躍されていた。先生からは大学院の研究テーマとして考えておられた様々な内容を説明していただいた。今も印象に残っているのは有機ケイ素化合物の光化学である。斎藤研究室の最後のころには有機ハロゲン化合物の光化学や放射線化学の研究を始めておられ、その発展上に構想されたテーマであった。結局、このテーマはその後の富永研究室の時代を通じて展開されることはなかったが、伺って直ぐにチャレンジしたいと思った。しかし、筆者は修士課程で修了するつもりにしており、研究者としてやって行けそうだったら博士課程に進むこととしていた。先生から、このテーマは博士課程5年あるいはそれ以上のテーマだからということで、むしろお奨めになられ

たのがメスbauer分光法による表面や界面で起こる現象の解明というテーマであった。

そこから、筆者とメスbauer分光法の繋がりが始まる。

## (2) 地球化学的試料のメスbauerスペクトル (1977-1979)

最初の1年は富永研究室の立ち上げの時期であったが、そのころから研究データを連日出していたのはメスbauer分光装置であった。1976年まで英国リーズ大学にポスドクとして留学されていた竹田満洲雄先生が担当されていた。竹田先生は富永先生が斎藤研究室の助教授を務められておられたころから、一貫してメスbauer分光法による錯体化学の研究を富永先生と進められていた。リーズ大学への留学も世界的に著名なメスbauer分光法の専門家であるGibb先生の指導を受けることを考えられてのものであった。

竹田先生からは測定法の基礎、スペクトルの測定方法、解析手法、試料の調製方法など、様々な知識を教えていただいた。また、当時大学院を修了される直前の佐藤春雄先生(1978年春から富永研究室助手)は「凍結溶液系での無機化学反応の追跡」というテーマにメスbauer分光法でチャレンジされていた。佐藤先生からは実験技術の大切さをまさに研究の現場であるラボラトリーで教えていただいた。

研究の技術的ベースはこうしてメスbauer分光法ということになった。問題は対象である。当時、富永先生と協力関係にあったのが当時発足しようとしていた地殻化学実験施設担当の脇田宏先生であった。脇田先生は化学の立場からの地震予知研究で著名であり、地殻化学実験施設を足場に化学の立場からの地震予知研究とその基礎としての地球化学の研究を本格的に展開しようとされていた。この施設は理学部の地球物理学教室、化学教室、地質学教室の3教室が運営に関与していた。物理学、化学、地質学の学際領域に地球化学が位置付けられたためである。富永先生は化学教室を代表して運営や今後の発展についての企画にコミットメントされていた。こうした繋がりもあり、脇田先生からは地球化学関係の様々なテーマや試料などが富永先生の所に届けられていた。地球化学試料へのメスbauer

ウアー分光法への応用をベースとした共同研究の可能性が拓けて来たのである。

具体的には、岩石の風化現象をメスバウアー分光法による鉄の存在状態の変化から解明するというテーマがスタートとなった<sup>[3]</sup>。最初に実験に入った試料は西マリアナ海盆の古い海山から採取されたアルカリ玄武岩であった。風化が進んでいない部分から周縁部に向かって層状に試料を切り出して、それぞれにメスバウアースペクトルを測定する。基礎データとして化学分析で元素組成の変化を調べるといった内容であった。特に風化による変質部では、室温で測定したスペクトルと液体窒素温度で測定したスペクトルに大きな違いがみられた。風化によって生成した水酸化鉄(III)などが微粒子として存在することによる超常磁性現象として、スペクトルの変化を説明することが出来た。

1億年近い昔に太平洋で海底火山活動で生成した玄武岩が自分の手の中にあり、長期間の海底環境で起こった色の変化や岩石構造の変化が、今、自分の持つ測定技術と思索の中で説明づけられて行く。これまで人間が知らなかった自然現象の極々一部ではあるが、とにかく自らの力で解明出来たことに素直に感激した。拙い論文ではあったが、国際雑誌に掲載され、化学系論文情報データベース Chemical Abstract にも登録された。化学系大学院生の当たり前に通る道筋ではあるが、とにかく第一歩が記されたことに充足感があった。

これを皮切りにオレゴン州の陸上玄武岩についても同様の研究を展開した<sup>[4]</sup>。また、地球のコア付近から地上にもたらされたともいわれる josephinite という鉄ニッケル合金で出来た鉱物のメスバウアー測定にも当たった。メスバウアースペクトルからどのような合金であるのかについて、かなり詳細な情報を得るのに成功したのである<sup>[5, 6]</sup>。この間の数年はそれまでの学習体験とは全く異質である常に創造的な研究の世界を楽しんだ。その後の50年間研究の世界を楽しめたのは誠に幸せなことである。

### (3) 海洋底堆積物の地球化学-放射化分析とメスバウアー分光 (1979-1981)

1979年春に博士課程に進学した。テーマは海洋環境での玄武岩の変質や化学的風化の機構解明を目指して、岩石-水相互作用とした。ツールとしては地質学

教室に設置された新鋭の熱量計が予定されていた。しかし、予定通りにはなかなか行かないもので、結局、放射化分析による微量元素分析とメスbauer分光法の二本立てでこの大テーマに向かうこととなった。その代わり、対象を海洋底堆積物も含めた形に拡大することとした。堆積物は海洋環境では粘土鉱物などの固体の粉末の間に間隙水と呼ばれる海水が混在している。間隙水と粘土鉱物の界面では岩石-水相互作用としての化学反応が起こり、水の組成は変化して行く。それに加えて、堆積物が時間の経過とともに上層に降り積もるので、間隙水は堆積物表層に絞り出され、溶存成分も水の移動とともに海底の表面に移動して行く。いわば化学変化と水の物理的移動が組み合わさった系であり、分析化学でいうクロマトグラフィーの状態が発生する。分析化学の概念を適用することで、自然界の海洋底堆積物中で起こっている現象を解明しようという訳である。化学と海洋地質学との境界領域への展開を意図していた。

しかし、実際の研究はそこまで行き着くことなく、堆積物中の鉄の酸化状態をメスbauer分光法で分析して微量元素の分布状況や堆積環境との関係を実証的に解明する方向に進展した<sup>[7]</sup>。海洋底岩石の変質のテーマも含めてであるが、東京大学海洋研究所大洋底構造地質部門（小林和男先生）とのコラボレーションが本格的に始まった。

こうした研究経過の中で、メスbauer分光法による鉄のキャラクタリゼーションがどの程度の定量性を有するのかを分析化学の立場から解明するという新たなテーマが浮上して来た。この検証のために、標準岩石試料として通商産業省地質調査所（現在の産業技術総合研究所の一部）から配布されていたJG-1 (granodiorite) やJB-1 (basalt)、その他、外国の試験研究機関発行の標準岩石試料も含めてメスbauerスペクトルを測定した。古典的な化学分析により報告されていた $\text{Fe}^{3+}$  と  $\text{Fe}^{2+}$  の推奨値とメスbauer分光法のデータから算出した同成分の分析値を比較した所、メスbauer分析の定量性が古典的な方法と比較しても十分な信頼性を持っていることが確かめられた<sup>[1, 8]</sup>。学際領域である地球化学の分野での応用のために、分析の確からしさを検証するという化学固有の領域に新しい進展がみられた例でもある。境界領域での研究は単なる応用ではなく、

それぞれの固有領域そのものに新たな展開をもたらすのである。つながることでそれぞれの固有の領域に影響を及ぼす仕組みは学問の世界にも垣間みえるのである。

#### (4) 無機光化学・ランタノイド化学・触媒化学分野への発展 (1982-1986)

1982年夏から筆者は富永研究室のスタッフに助手として加わった。佐藤春雄先生が米国カリフォルニア大学アーバイン校のローランド研究室にポスドクとして加わることとなったための代員としての採用であった。

佐藤先生は低温マトリックス単離された鉄化合物の孤立分子をメスバウアー分光法によるキャラクタリゼーションで電子構造などを解明するという大テーマに山田康洋君（後に、東京理科大学）とともにチャレンジされていた。このテーマは富永先生が長く温めて来られた無機光化学研究の中核部を成すものであった。そのプロジェクトの推進者である佐藤先生が海外留学、その間のピンチヒッターが小生であった。残念ながら、私の実験技術は佐藤先生にも山田君にも全く及ばないため、専ら相談相手になるだけであった。山田君の博士論文の一部ともなる学術論文には、私も共著者として名を連ねてはいるが<sup>[9, 10]</sup>、十分な貢献が出来たのかという点は今も自問自答する所である。しかし、無機化学の最前線への展開を目指した研究プロジェクトであることから、研究への意識や責任感を新たにした体験であった。無機化学という伝統的な分野の範囲自体を広げる性格を帯びたプロジェクトで、いわば「未知領域」との境界領域に展開して行く研究活動であった。

小生自身のメスバウアー研究は<sup>151</sup>Euをメスバウアー核とする研究分野に向かっていた。ユウロピウムなどのランタノイド元素はfブロック遷移元素であり、鉄などのより一般的なdブロック遷移元素とは構造・物性・反応性などが異なる物質群を形成していた。その中でユウロピウムの同位体である<sup>151</sup>Euはメスバウアースペクトルの測定が容易な同位体としてよく知られていた。ランタノイド化学の分野に新たな解析手段としての<sup>151</sup>Euメスバウアー分光法を加えることで、ランタノイドの無機化学にチャレンジすることを意図した。山内繁君が研究の中

核を担い、博士論文の一部ともなった学術論文に小生も共著者として名を連ねることとなった<sup>[11, 12]</sup>。

この時期に、メスバウアー分光法についてももう一つ新たな研究活動が展開される。触媒化学分野とのコラボレーションである。市川勝先生（北海道大学）、福島貴和先生（横浜国立大学）らが触媒試料を調製して触媒活性や分光分析などのデータを取得、富永研究室側はメスバウアースペクトルの測定、解析、解釈を担当した。メスバウアー分光法では試料を透過する $\gamma$ 線を測定するのだが、 $\gamma$ 線は透過性が高いため反応ガスの存在下でもスペクトル測定が可能である。すなわち、触媒の反応条件に近い条件下での *in situ* 測定が可能ということで、鉄を含む触媒のキャラクタリゼーションに触媒機構の解明の糸口を期待する研究者にとっては大変に魅力ある存在であった。同じような特徴は、X線吸収スペクトルの測定によるEXAFSやXANESにもみられる。しかし、メスバウアー分光法とは原理の異なるキャラクタリゼーションの手法であることから、得られる物質情報も当然に異なる。鉄に限定すると、酸化状態、配位状態、微視的磁場などの情報はメスバウアー分光法、鉄原子間の距離や平均酸化状態についてはEXAFS/XANESにアドバンテージがあるとされる。しかし、測定する電磁波のエネルギーは $\gamma$ 線計測によるメスバウアー分光法もX線計測によるEXAFS/XANESも余り違いはないので、共通の *in situ* 測定用セルを設計して、その中で触媒試料を合成メスバウアー分光測定およびX線吸収スペクトル測定によるキャラクタリゼーションをそのまま反応ガス雰囲気下で実施するという流れを構築することが出来た。

具体的な対象は、シリカゲル表面に触媒成分を吸着さらにセル中での水素還元により調製したRh-Fe、Pd-Fe、Pt-Feなどの担持触媒であった。反応容器中のガス雰囲気を変えての *in situ* 測定も可能であった。メスバウアースペクトルは触媒の主成分である白金族元素の種類、鉄の添加量の増減、反応ガスの種類などに依存して変化した。そして、シリカゲル表面の触媒構造のモデルの提案にまで遂には至った<sup>[13-16]</sup>。

化学は自然科学の一分野で一枚岩のように見えるかもしれないが、専門領域は

学問の専門化の流れの中で細分化と深化の歴史を辿って来た。結果として、化学の分野は物理化学、有機化学、無機化学などにグループ化し、その中でさらに細分化が進行して来た。触媒化学は物理化学、メスバウアー分光法は放射化学ないしは分析化学の領域で発達したため、通常は無関係の他領域の関係にある。お互いの考え方や方法論を理解した上で、初めてまとまった成果を得るに至った共同研究であった。

#### (5) 空白の30年 (1986-2015)

1986年12月、筆者は助手を休職、2年間の米国研究留学に赴く。Florida State University の化学科の Gregory R. Choppin 先生の下でのポストドクである。ショパン先生はアクチノイドおよびランタノイドの溶液化学の世界的な権威である。特に、カリフォルニア大学パークレー校でのポストドク時代にシーボグ研究室で新元素の合成プロジェクトに参画、メンデレビウム Md の発見者の一人として化学史に名前を残す人物である。アクチノイド化学は放射化学の中核分野であるが、放射性物質や核燃料物質についての規制が極めて厳しい日本では原子力研究開発機構などの特殊施設を除くと、実験的な研究は不可能である。Tallahassee 市の先生の研究室で筆者は初めてプルトニウムやアメリシウムなどの人工的に合成されたアクチノイドの水溶液を身近に見て、自分が欧米系の放射化学の中核分野に今入ろうとしていることを実感した。

ショパン研究室でスタートしたアクチノイド化学の分野への参入、特にアクチノイドの環境挙動へのフミン酸の影響についての研究は1988年の帰国後も国内で継続、発展させる機会を得た。日本原子力研究所（現在は原子力研究開発機構）のアクチノイド化学グループとのコラボレーションである。

また、理化学研究所核化学研究室とのコラボとなるマルチレーザーの製造と環境分野への応用、日本原子力研究所中性子ビーム利用の一環としての即発 $\gamma$ 線分析の利用、大学院生の後半から断続的に実施して来た海洋底堆積物の放射化分析など、様々なプロジェクトを進めた。

メスバウアー分光法についての研究を自らが主体となって実行する時間は徐々

に少なくなっていく。大学院生や卒業研究生のメスbauer分光法による研究を支援したり指導したりすることはあったにしても、自らがプロジェクトを引張るというよりは後方支援という状況であった。そうした中で、ゼオライト空孔中に錯体を合成するなど分子内の空間に金属錯体を合成、その構造や電子状態の変化をメスbauer分光法で追跡して博士論文にまで昇華させた高橋（田中）美穂さん（現在は東京海洋大学）そして梅村泰史君（現在は防衛大学校）など<sup>[17, 18]</sup>、それぞれに高いレベルの研究能力を感じさせるものがあつた。

1996年に武蔵大学に研究拠点を移したため、メスbauer分光法による実験的研究を第一線で引張ることは無くなつていく。これまでの研究成果を共同研究者と論文にまとめる。或いは、まとめるために必要な実験を追加する。そうした活動が研究面では中心となつた。

さらには、化学教育についての新しい動きであつた「高校化学グランプリ」の企画と運営、「国際化学オリンピック」参加への足場固めなど、日本化学会の化学教育プロジェクトを支える一翼を担うこととなつた<sup>[19, 20]</sup>。前任の伊能敬先生、さらには玉蟲文一先生にまで遡る武蔵の化学教員の義務ともいべき化学教育への貢献の日々が始まつた。

そして、2011年3月、福島第一原子力発電所事故で筆者のメスbauer分光法とのつながりはほぼ完全に失われてしまう。環境放射能関係の研究テーマを緊急に実施すること、講演会などで一般の方たちに状況を的確に説明することなどの専門家としての社会貢献に2015年辺りまでは集中することとなつた。

そうした日々の中で、以前メスbauer分光法でつながっていた富永研究室の後輩との遭遇もあつた。例えば、佐野千絵さん（東京文化財研究所・東京芸術大学）である。福島県などの博物館や美術館からは放射能汚染に対する対策、それも汚染状況の有無の判定から除染の方法に至るまで、東京文化財研究所には様々な問い合わせがあつた。その対策を担うことになり、同期の久保謙哉君（国際基督教大学）などと協力して対策についてのガイドライン作成の準備に入つていた。それに加勢して欲しいとの依頼であつた。佐野さんが修士課程のころ、研究を進める上でのサポート役となつていたという縁があつたので早速に協力した次第で

ある。久保君はメスbauer分光法とは別テーマであったが、彼が修士課程までは私が研究のサポート役であった。福島原発の事故のころには、放射化学分野の中堅のリーダー的存在でメスbauer分光法に関わる先駆的研究にも参画していたように思う。

このように1986年から2015年に至る30年は放射化学に関係した様々な活動を展開していた。しかし、メスbauer分光法についてはスペクトルを測定することすらもしなかったという時期ではあった。大学院生のころに始まったメスbauer分光法についての研究史を年代順に記述して行くこの小作の中では、「空白の30年」と記述せざるを得ないのである。ただし、「空白」というのは「何もしなかった（いわば真空の状態）」を連想させるので、「他の色々なものが混ぜこぜに詰まった30年」が正しいのだろう。

しかし、「空白の30年」には唯一の例外がある<sup>[21]</sup>。小惑星リュウグウの土を持ち帰り、その成因を解明するはやブサブプロジェクトはJAXAの研究プログラムとしてよく知られている。2回に渡る探査が試みられ、成功例である2回目の試料採取と研究プログラムについては国民的な関心が寄せられた。残念ながら、試料採取が極めて少量であったため、十分な研究が展開できなかったのが1回目である、事前に研究計画の審査が行われ、参加者にはJAXAから模擬試料が送られて研究計画の実行能力が試されるという選考過程が公開されていた。これに酒井陽一先生（大同大学）の主導で応募したのである。酒井先生は私が大学院生の頃に富永研究室の助手として勤務されていた。当時、富永研究室には3名の助手（巻出義紘先生・佐藤春雄先生・酒井陽一先生）の先生が居られ、酒井先生は最も若手であった。酒井研究室にはメスbauer分光装置が設置されていて、「放射化学討論会」などでも発表されていた。JAXAから送られる模擬試料の測定は酒井先生、解析と解釈は薬袋が担当という研究組織でメスbauer分析の結果を報告、コンペに手を挙げたのである<sup>[21]</sup>。

結局、イトカワからの試料の回収量が第一次はやぶさの探査では余りに少なかったため、メスbauerスペクトルの測定には至らなかった。

(6) 再びメスバウアースペクトルの世界に：文理融合の時代へ（2016年以降）

2017年度は武蔵大学着任後3回目のサバティカル年度であった。丁度、サバティカル制度自体の見直しがあり、筆者は海外渡航前提のサバティカル計画を提出する必要性が生じていた。このため、これまでのサバティカルの受け入れ先であった米国ワシントン州立大学 Washington State University の放射化学グループをまず渡航先とした。丁度7年前は Nathalie Wall 助教授、そのさらに7年前は Sue Clark 教授に受け入れ教員として手を挙げていただいた。結局、今回は Nathalie Wall 助教授となった。

研究計画としては、日本画用の顔料の中性子放射化分析をワシントン州立大学の研究用原子炉（担当教員 Donald Wall 教授、Nathalie の夫君）で実施するという内容とした。試料の中には鉄化合物が使われているものがあるので、それらについてはメスバウアースペクトルを測定して、化合物およびその副成分を同定および定量することとした。日本画用の絵具は伝統的には鉱物利用による「岩絵具」が用いられて来た。しかし、近現代に合成された無機化合物も絵具として市場には流通している。これを区別するために、不純物として天然鉱物中には存在しているが、人工的な化合物では原料試薬を合成するまでに除去されてしまうような微量元素を見出すこととして、そのために微量元素の定量に有効とされて来た放射化分析のデータを適用した。

結果については本誌にて予報を発表した通りで、複数の鉄鉱物が混合されて調製された可能性が高い試料がメスバウアースペクトルのデータから見出された<sup>[22]</sup>。低温測定によるスペクトルパターンの変化を調べるのが次の課題となった。メスバウアースペクトルの測定は東京理科大学で教授を務めていた山田康洋君（富永研究室の出身で本稿では既出）との共同研究であったが、数年前に急逝、本プロジェクトの進行はそこで停止した。山田研究室に遺されていた資材などは同世代の研究者仲間が引き継いだが、その中には彼が分析した資料も含まれているとのこと、文理融合の方向性が様々な領域で加速している中、プロジェクトの再開も近いかも知れない。

福島原発の事故が無ければ、2010年代には完了するはずのテーマであった。

絵具試料の選定にあたった富沢威先生（本学元非常勤講師）は研究の一線を既に離れた。今後の展望はこれからのこととなるが、加速器利用などの様々な領域で文理融合を前面に押し出している学際領域研究のプロジェクトが展開されている中、新たなスタートを期待している。

#### 4. まとめ

本報では、小生の研究史の中でメスバウアー分光法に関わる部分を抽出して綴る形で、研究の方向性の変化などを記して来た。共同研究者のお名前なども随時織り込んでの叙述のスタイルを取ったが、そこには筆者の出身研究室の名前が数多く出て来る。本人を連想できる方にはその頃を思い起こす縁ともなろうが、そうでない場合には余計な記述ともとられたかもしれない。本章ではもう少々我慢していただいて、全体をまとめたい。

3章「研究の経過と成果」の本文中にお名前を記した方々の職務や専門分野の特徴などを表1にまとめた。筆者の独断と偏見が潜んでいる一方的な内容の記述を含むことを前提として、若干の説明を加える。

まず、3章1節「放射化学の世界へ - メスバウアー分光法に至るまで（1976-1977）」では、筆者が卒業研究生の頃、或いは大学院生での研究に入る頃からご指導いただいた先生方のお名前が並ぶ（表1）。いずれの先生方も、学際領域それも文理融合領域（文化財・環境・科学史・科学教育等の人文科学あるいは社会科学との複合領域）に関係した活動についての記述が並ぶ。放射性炭素年代測定法は考古学の分野での信頼性の高い年代測定法として足場を固めていた。そして、この時代には文部省科学研究費でも大規模な予算が組まれ、人文科学と自然科学の融合研究が総合的に展開された時代でもあった。日本文化財科学会が内容もさることながら組織形態も文理融合型の学会として登場したのもこの時期である。そして、この数年後には化学史学会も発足する。科研費の分科細目にも学際領域・文理融合領域をテーマとする項目が少しずつ現れるのはもう少し後のことである。

そうした動きが形を成して来たのは1977年ごろであろう。当時、指導的な立

表1 3章で触れた研究者の学際領域や文理融合領域に関わる活動

節	氏名(敬称略)	職責・専攻など	専門分野、学際領域や文理融合領域との関わり合いなど
1	斎藤信房	無機化学講座教授・放射化学講座教授、故人	東京大学放射性炭素委員会委員長などで放射年代測定法の普及を主導など
1	佐藤 純	斎藤研スタッフ(助手・専任講師)、故人	放射性炭素年代測定で必要となる微弱放射線計測のエキスパート
1	不破敬一郎	無機化学講座教授、故人	後に国立環境研副所長、福島復興にも貢献
1	富永 健	放射化学講座教授	フロンの環境化学を展開、一般への環境レクチャー教育にも貢献。「考古学と化学の10章」などの文理融合領域の著作の編集・出版
2	竹田満洲雄	斎藤研・富永研助手、東邦大学理学部教授	メスbauer分光で土器の焼成温度を実験的に推定(富永研究室)、黒曜石にも着目。
2	佐藤春雄	富永研助手、東京理科大学理学部助教授時、故人	富永研客員富沢威氏の古代ガラス研究を放射化分析・メスbauer分光についてサポート
2	脇田 宏	地殻化学実験施設教授	地震予知研究を通じての社会へのインパクト。地球化学分野の後進の育成
3	小林和男*	海洋研究所大洋底地質部門教授	地球電磁気学・地球年代学
4	山田康洋	東京理科大学理学部第二部教授、故人	マトリックス単離分子のメスbauer法などによる分光的研究、メスbauer法による赤色顔料のキャラクタリゼーション
4	山内 繁	秋田県立大学教授	木質材料の利用。木質研究にメスbauer分光も適用
4	市川 勝*	北海道大学触媒化学研究センター担当	触媒化学
4	福島貴和*	横浜国立大学助教授から家業へ	触媒化学
5	高橋(田中)美穂	東京海洋大学教授	分析化学・海洋化学、男女共同参画への貢献
5	梅村泰史	防衛大学校教授	無機化学・錯体化学
5	佐野千絵	東京文化財研究所教授	保存科学・文化財科学
5	久保謙哉	富永研助手、国際基督教大学教授	無機化学・放射化学、加速器利用の文理融合領域への展開を推進
5	酒井陽一	富永研助手、大同工業大学教授	医学分野とのコラボ、宇宙物質研究への展開の試み
6	富沢 威	富永研客員、元東京藝術大学助手	古代ガラスを対象とした文理融合研究がライフワークであった。銅銭や絵具などでも共同研究。

\* 東京大学理学部化学教室無機化学分析化学グループ以外の研究者。

場にあった先生方は、このような動きも周知されて、その後の時期も含めて、文理融合領域のサポートに注力された。

続いての3章2節「地球化学的試料のメスバウアースペクトル (1977-1979)」では、修士課程のころに特にお世話になった先生方のお名前が並ぶ。いずれの先生も自らの研究テーマの中で文理融合研究あるいは学際領域研究を実践されている(表1)。

3章3節「海洋底堆積物の地球化学-放射化分析とメスバウアー分光 (1979-1981)」では博士課程のころに始まった東京大学海洋研究所との共同研究でお世話になった地球物理学出身の小林和男先生のお名前を記したが、大洋底テクトニクスに関わる研究を深化し、他の関連分野の研究を支援して行くというスタンスを一貫して取られていたように思う。学際領域研究への目配りがあったからこそ、新規の研究チームの参加の一環として、筆者らの参画が認められたのだろう。海洋研究所のような共同研究機関の性格を熟知されての対応であったように思う。

3章4節「無機光化学・ランタノイド化学・触媒化学分野への発展 (1982-1986)」は筆者が助手に任官されて、研究室の後輩に当たる大学院生の世話に当たった時期である。様々な研究分野の先生方とのメスバウアー分光法を応用した共同研究も始まったので、そうした他分野の先生方もリストに加えた。市川先生、福島先生ともに化学全体のコア分野の一つである触媒化学がご専門で、その分野での研究の深化の方法として、キャラクターゼーションの重要性に着眼されての共同研究であったように思う。学際領域への参入への努力を補うに余りあるものが他領域から得られるならば、共同研究は成立する。

この節で登場した山田康洋君は博士課程終了後、日本原子力研究所、富永研究室の助手などを務めた後、東京理科大学理学部で研究室を設ける。後になって、私と日本画の顔料のメスバウアー分光法によるキャラクターゼーションについての共同研究を実施した。山内繁君は博士課程終了後、秋田県立大学高度木材加工技術研究所教授として学者としてのキャリアを全うした。地方創生に対する意識が高く、メスバウアー分光法の応用も常に視野に入れて地場産業との繋がりにも配慮した研究を展開して来た。

3章5節「空白の30年 (1986-2015)」では、私の二歳先輩に当たる酒井陽一先生の他は、富永研究室の博士課程修了生である。酒井先生は医学・宇宙などの自然

科学分野との境界領域を意識した放射化学の展開を実践されていた。医学・宇宙は一般市民の関心も高い領域である。即発γ線分析の医学分野への応用、メスパウアー法による宇宙物質のキャラクタリゼーションなどへの研究の展開は、社会教育のテーマとしても取り上げやすい分野である。文理融合領域や学際領域などの既存領域に無い新分野への展開には、社会からのサポートが追い風となるのである。

この節ということで表1にリストした他の4名は富永研究室の博士課程出身者である。高橋（田中）美穂さんは博士課程修了後、現在は東京海洋大学で教授職にある。その間、男女共同参画に関する社会的貢献などの活動、教養教育の実践にも力を尽くされたと承知している。梅村泰史君は防衛大学の教養教育の要を占める人物である。そして、久保謙哉君も教養教育重視の国際基督教大学を担う重要な教員として活躍している。また、日本放射化学会会長など加速器関係学会の要職にあり、文理融合研究の推進の旗振り役も務めている。

佐野千絵さんは文理融合研究を体現して来た存在であり、原発事故後の社会貢献を含めて5節の叙述の中で詳しく紹介した。

そして、3章6節「再びメスパウアースペクトルの世界に：文理融合の時代へ」では富沢威先生をリストアップした。文理融合領域での研究活動を継続されて来られたが、その最後になりそうなのが顔料研究であった。古代ガラスについては本誌で数件の論文を発表している<sup>[23, 24]</sup>。

このように、表1のリストには学際領域あるいは文理融合領域で活躍されて来た研究者の名前が数多いのである。また、ポストを通覧すると教養科目の担当者と思われる方が意外と数多いことが分かる。専門科目の担当者の任用では、学際領域や文理融合領域での業績よりも専門科目に近い研究分野の業績が高く評価されがちなのかもしれない。ところが、教養科目の担当者の任用ならば、分野の広がりを感じさせるような業績リストになるので、むしろ向いているという訳である。また、研究大学の任用においても、専門分野に特化した論文が並ぶ方が高い印象を与え、学際領域の論文さらには文理融合の論文が並ぶ場合には応用に走ったとも捉えられて低めの評価となるともみられる。

文理融合の方向性は学術の新しい可能性を示すものであり、社会へのインパクトも大きいだけに、そうした分野を担う或いは担おうとしている若手をサポートしたく思う。しかし、そのためには業績評価の在り方なども含めて、様々な所に目配りすることが依然として必要なのだろう。

最後にこの50年を通じてメスバウアー分光法の同世代のエキスパートとして活躍された松尾基之さん（東京大学特任教授）への感謝とリスペクトを以て本報を閉じたい。共同研究を展開する機会は無かったが、環境分野へのメスバウアー法の適用などの先端的研究を文理融合のメッカとも言うべき駒場で展開された。素晴らしい内容で、メスバウアー法の境界領域へのチャレンジのあり方を改めて学ぶことが出来たように想う。メスバウアー法を介しての50年の厚誼に深く感謝の意を表する次第である。

## 文献

- [1] メスバウアー分光法の地球化学・考古計測学での応用の可能性、薬袋佳孝、武蔵大学人文学会雑誌、40(3)、B31-53(2009)
- [2] 核的手法による赤色顔料のキャラクタリゼーション、富沢威、薬袋佳孝、武蔵大学人文学会雑誌、50(3-4)、B7-B22(2019)
- [3] A Mössbauer Study of Alteration of a Deep Sea Basalt, Y. Minai, M. Takeda, H. Wakita and T. Tominaga, Radiochemistry and Radioanalytical Chemistry Letters, 36(2-3), 199-206 (1978)
- [4] Study on Alteration of a Continental (Flood) Basalt by Fe-57 Mössbauer Technique, Y. Minai, M. Takeda, H. Wakita and T. Tominaga, Radiochemistry and Radioanalytical Chemistry Letters, 39(4-5), 279-86 (1979)
- [5] Characterization of Iron in Josephinite by Fe-57 Mössbauer spectroscopy, Y. Minai, H. Wakita and T. Tominaga, Radiochemistry and Radioanalytical Chemistry Letters, 36(2-3), 193-7 (1978)
- [6] Iron-nickel Alloy Superstructure in the Mineral Josephinite, J. Danon, R. B. Scorzelli, I. S. Azevedo, J. F. Albertsen, J. M. Knudsen, N. O. Roy-Poulsen, Y.

- Minai, H. Wakita and T. Tominaga, Radiochemistry and Radioanalytical Chemistry Letters, **38**(5-6), 339-42 (1979)
- [7] A Mössbauer Study of Deep Sea Sediments, Y. Minai, T. Furuta, K. Kobayashi and T. Tominaga, Radiochemistry and Radioanalytical Chemistry Letters, **48**(3-4), 165-74 (1981)
- [8] Mössbauer Analysis of Iron(II) and Iron(III) in Geological Reference Materials, Y. Minai and T. Tominaga, International Journal of Applications of Radiation and Isotopes, **37**, 513-7 (1982)
- [9] Mössbauer Studies on Photoaggregation and Photoreduction of Tris( $\beta$ -diketonato) Iron(III) Complexes Isolated in Low Temperature Matrices, Y. Yamada, Y. Minai, H. Sato and T. Tominaga, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters, **87**(6), 359-72 (1984)
- [10] Mössbauer Study on the Photolysis of Pentacarbonyliron Isolated in Low Temperature Nitrogen Matrix, Y. Yamada, Y. Minai, H. Sato and T. Tominaga, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters, **96**(5), 503-12 (1985)
- [11] Mössbauer Study on the State of Dispersion of Eu(II) in Frozen Aqueous Solutions and Its Photooxidation to Eu(III), S. Yamauchi, Y. Minai and T. Tominaga, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters, **93**(4), 237-44 (1985)
- [12] A Conversion Electron Mössbauer Study on the Photolysis of Europium(III) oxalate, S. Yamauchi, Y. Minai, T. Watanabe, and T. Tominaga, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters, **96**(5), 513-20 (1985)
- [13] Characterization of Silica Supported Rh-Fe Catalysts by Mössbauer Technique, Y. Minai, T. Fukushima, M. Ichikawa and T. Tominaga, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters, **87**(3), 189-202 (1984)
- [14] Mössbauer Effect Characterization of Silica Supported Rhodium-Iron

- Catalysts, Y. Minai, T. Tominaga, T. Fukushima, and M. Ichikawa, in G. J. Long and J. G. Stevens (eds.), "Industrial Applications of the Mössbauer Effect", Plenum Publishing Corporation, New York, 635-47 (1986)
- [15] A Mössbauer Study on Remarkable Changes in Chemical States of Iron in Silica-Supported Pd-Fe Bimetallic Catalysts by Varying Fe Contents, Y. Minai, T. Fukushima, S. Ogasawara, M. Ichikawa, and T. Tominaga, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters, **106**(3), 167-74 (1986)
- [16] Bimetallic Promotion of Alcohol Production in CO Hydrogenation and Olefin Hydroformylation on RhFe, PtFe, PdFe, and IrFe Cluster-Derived Catalysis, A. Fukuoka, T. Kimura, N. Kosugi, H. Kuroda, Y. Minai, Y. Sakai, T. Tominaga, and M. Ichikawa, Journal of Catalysis, **126**, 434-50 (1991)
- [17] Mössbauer and ESR Study of the Effect of Acid Sites on Formation of Phthalocyanineiron(II)-pyridine Adduct in Zeolite Supercage, M. Tanaka, Y. Minai, T. Watanabe, and T. Tominaga, International Journal of Radiation Applications and Instruments, Part A, Applications of Radiation and Isotopes, **45**(4), 501-8 (1994)
- [18] Spin-crossover of Tris [2-(aminomethyl)pyridine] iron(II) Ion in Y-Zeolite, Y. Umemura, Y. Minai, N. Koga, and T. Tominaga, Journal of Chemical Society, Chemical Communications, (7), 893-4 (1994)
- [19] 国際化学オリンピック、薬袋佳孝、創造性の育成塾 (2017)
- [20] 国際化学オリンピックでの放射化学関連テーマの出題：第 1 回から第 25 回、薬袋佳孝、武蔵大学リベラルアーツ & サイエンス学会雑誌、(1)、p.33-47 (2024)
- [21] Mössbauer spectroscopic characterization of iron species in the test samples of 4A and 4B for the second HASPET competition, Yoichi Sakai and Yoshitaka Minai, JAXA Special Publication, JAXA-SP-05-021E, 75-83 (2006)
- [22] 核的手法による赤色顔料のキャラクタリゼーション、薬袋佳孝、武蔵大学人文学会雑誌、50(3-4)、B7-B22(2019)

- [23] ガラス質文化財の変質に関する核的手法による研究、富沢威・葉袋佳孝、  
武蔵大学人文学会雑誌 34(4)、B113-B125(2003)
- [24] ガラス質文化財試料の原子炉中性子即発 $\gamma$ 線分析、富沢威・葉袋佳孝・米  
沢伸四郎、武蔵大学人文学会雑誌 36(1)、B75-B86(2004)