

現代地球化学の父：ゴールドシュミット

(その3)

ブライアン・メースン*1 著
河内 洋佑*2 訳

第4章 産業原料研究所

第一次世界大戦によってゴールドシュミットの科学研究の方向は大きく変わった。戦争が進むにつれてノルウェーは外国との連絡を大部分絶たれたため、産業原料、特に輸入品の代替物が緊急に必要となった。1916年彼は輸入ボーキサイトに代わってノルウェーの粘土か長石をアルミニウム生産の原料に使う可能性を研究した。1917年11月ノルウェー政府は国内の鉱物資源の研究に財政援助を与えるよう決定し、ゴールドシュミットを議長とする産業原料委員会を組織した。彼の提唱によって委員会は国立産業原料研究所を設立することを決め、オスロ郊外のトイエンに新築された地質博物館内に新研究所が開設され、産業通商省の費用で新しいスタッフを雇い、新設備が備えられることになった。ゴールドシュミットは大学から独立した研究所を持ったわけである¹⁾。

この新しい組織における最初の成果の一つは経済的というよりもずっと科学的に重要なものであった。1918年5月ゴールドシュミットはその地域に知られていた石灰岩の採掘の可能性を探るために南部ノルウェーのフェンを訪れた。彼はそこで石灰岩の中からニオブを含む稀な鉱物であるパイロクロア、 $(\text{Na,Ca})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH,F})$ 、を発見し、その成因を局地的にナトリウムに富む火成岩が貫入しているせいであると結論した。8月に彼はブレッガー教授と一週間現地を訪れ、異常な岩石がいろいろ出ることを明らかにし、その分布図を作った。二人は1919年にもう一度そこを訪れて地図を完成し、ブレッガ

ーが鉱物学的岩石学的研究を行った。その結果はブレッガーの408ページもある古典的モノグラフ「ノルウェー、テレマークのフェン地域」²⁾となって結実した。主要な結論は「石灰岩」がそれまで考えられていたような堆積岩ではなく、炭酸塩に富む融体として貫入したものであるということであった。炭酸塩に富む融体はそれまでも数人の地質学者の興味を惹いてきた。しかしブレッガーのように詳しく調べた人はいなかったのである。フェン地域は一般にカーボナタイトの模式地として認められている(カーボナタイトはブレッガーの命名である)。現在類似した岩石は世界各地から知られている。

フェン地域のカーボナタイトのあるものには燐灰石と呼ばれる燐酸塩鉱物が相当量含まれている。第二次世界大戦中、ゴールドシュミットは1942年にノルウェーを離れるまで、農業省の予算で燐灰石から燐酸肥料を製造する研究プロジェクトに参加していた。ノルウェーにとってこの研究は重要だったので、一時的ではあったが、1942年ポーランドに追放されるのを免れることになった。第二次大戦後、カーボナタイトはニオブ原料としてのパイロクロアをとるために採掘された。ニオブは原子力産業に使われる特殊な鋼鉄の製造のために必要とされたからである。

産業原料研究所の早期の仕事は、もっぱらそれまで輸入に頼っていた物質の国内での発見と、可能なら適当な代替物質の発明に向けられていた。これらには粘土または灰長石(ノルウェーには灰長石を含む岩石が大量にあるが、この鉱物は Al_2O_3 を30%以上含んでいる)からのアルミニウムの生産；

*1 スミソニアン自然史博物館
(National Museum of Natural History, Smithsonian Institution):
Washington, D.C. 20560 USA

*2 中国鉱物資源探査研究センター:
中国北京市大屯路甲11号

キーワード：ゴールドシュミット, 地球化学

輸入カリ肥料の代わりにカリの多い鉱物、特に黒雲母の利用；燐酸塩鉱床の探査；塗料に利用する二酸化チタン製造のためのノルウェー産イルメナイト(FeTiO_3)の利用などがある。この研究の結果はゴールドシュミットに資源鉱物の化学的性質についてもっと詳しく検討すること、その結果として結晶化学について研究することを強いた。幸いなことにこの時期は鉱物の構造解明について新しい強力な技術が発展していた時期に合致していた。固体によるX線の回折は1912年にマックス・フォン・ラウエ³⁾によって発見され、結晶構造の決定に使われ始めていた。この技術は特にイングランドのW. H.⁴⁾およびW. L. ブラッグ⁵⁾によって発展されていた。しかし、彼らの方法では大きくてよい結晶の形をしたサンプルが必要だった。サンプルの準備やデータ収集は面倒で時間ばかりかかった。そのため第一次大戦の後この分野の研究に取り組む人は事実上いなくなっていた。1916年、P. デバイとP. シャラー、それと独立に1917年、A. W. ハルによって粉末回折法が発明され、よい結晶である必要がなくなり、データの収集も比較的単純で早くできるようになった。ゴールドシュミットはこの新しい技術をあざやかに応用して結晶化学という新しい科学の分野を発展させた。

英国の物理学者で結晶化学を専門としているJ. D. バーナル⁶⁾はゴールドシュミットがX線回折を研究手段としてどのように適用したか⁷⁾について、次のような話をしている。

“彼が直接私に話してくれたのは次の通りだった。私はそれが本当の話かどうかは知らない。しかしかにもゴールドシュミットらしい話ではある。それは全部訴訟に関係する話だ。第一次世界大戦が終わったとき、英国政府は国内の化学工業が戦前非常に遅れた状態にあったので、その保護を図らねばならぬと感じて、有機化学製品の輸入に関税をかけることにした。その中には炭酸カルシウムも入っていた。英国の産業界はこれは有機化学製品だと主張し、ノルウェー政府はそうではないと主張した。ロンドンでテストケースとして裁判が行われることになった。ゴールドシュミットはノルウェー政府の委嘱により、専門家として証言することになった。彼はもちろん有

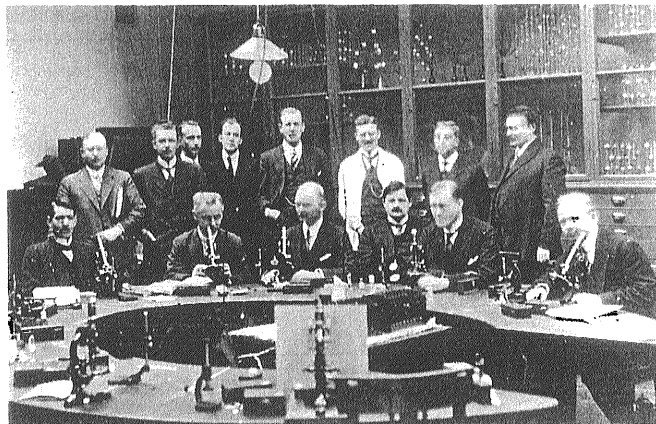
機化学が専門ではなかったが、英国に渡る船の中でにわか勉強して法廷に立つことになった。英国に到着したところで英国側の専門家がサー・ウィリアム・ポープであることを知って、これは到底かなわないと思って、別の方面から戦いを挑むことにした。幸いなことに彼はサー・ウィリアム・ブラッグを知っていた。そこで彼は炭酸カルシウムの一片の結晶を渡してその結晶構造を解析してくれと依頼した(実はゴールドシュミットの考えは全く間違っていたのだが、当時は誰もそのことに気がつくべくもなかった)。ゴールドシュミットは結晶構造が無機物の構造であるということ論拠に法廷で証言した。化学的にはこれに対して誰も反論できなかった。そして炭酸カルシウムは関税のリストから外された。ノルウェー政府は大変喜んで、どうやって勝ったのかを尋ねた。彼はそれはX線のせいだと答えて、そのことを根拠にX線管と粉末カメラをせしめたのである。”

この頃ゴールドシュミットは若い有能な研究者のグループをまわりに集めていた。彼らはその後皆すぐれた経歴を持つことになった。1918年にイヴァール・オフトェダール⁸⁾が学生助手として博物館のスタッフに加わり、ゴールドシュミットと共同研究をするようになった。この関係はゴールドシュミットが亡くなるまで続いたが、亡くなった後オフトェダールは鉱物学の教授としてゴールドシュミットの後を継いだ。ラルス・トーマッセン⁹⁾は1919年に化学技師として大学を卒業したが、それから1929年まで(カリフォルニア工科大学にいた1925-1927年を除き)ゴールドシュミットの主要共同研究者だった。彼はX線機器の製作維持に責任を負っていた。1921年6月にクリストファー・ステンビク¹⁰⁾が産業原料研究所の補助技術者として入所した。彼は大学で鉱物学、岩石学、および化学を習ってきたのだが、研究所では特にかんらん石を耐火物として利用するための研究でゴールドシュミットの右腕となって活躍した。彼らはお互いの足りないところを注目すべきやり方で補いあっていた。ゴールドシュミットは理論的知識と豊富なアイデアを出し、ステンビクはその技術的専門知識で。

かんらん石の利用は産業原料研究所の大成功物

写真1 (第14図版)

1923年3月オスロ鉱物・地質博物館で、V. M. ゴールドシュミット主催のセミナーに集まったノルウェーおよび海外からの地質学者。上部の電灯からの光は下についている鏡で反射されて顕微鏡光源となった。円形のテーブルはゴールドシュミットの設計したもので、周りの人を教えやすいよう彼が中央に立った。J. A. ドンスによれば立っている人は左よりトルロフ・フォークト(J. H. フォークトの息子で、トロントハイムの技術大学教授)；ペール・ガイエル(ストックホルムの技術大学教授、後にスウェーデン地質調査所所長)；イヴァール・オフトedal(後にオスロ大学鉱物学教授)；オラフ・アントン・ブロッホ(ノルウェー地質調査所)；ニルスーヘンリック・ゴル



デルupp(後にベルゲン大学教授)；H. シュナイダーヘン(白衣の人物。ドイツ人の鉱床学者。P. ラムドールと共に著書『Lehrbuch der Erzmikroskopie I, II』, 1931年, 1934年, ベルリン発行を著した)；ジャン・メッテ(顕微鏡メーカー代表)；ゴールドシュミット。坐っているのは左よりアルネ・ライタカリ(ヘルシンキの技術大学地質助手。後1936年-1960年フィンランド地質調査所所長)；カール・ブグゲ(ノルウェー地質調査所所長)；スタイナー・フォスリー(ノルウェー地質調査所)；ハンス・ヘンリック・ホルネマン(鉱山技師)；オラフ・アンダーセン(ゴールドシュミットの共同研究者で後にワシントンのカーネギー研究所でN. L. ボーエンと仕事をした)；ヘイッキ・ヴァイリネン(ヘルシンキ大学助手。後にヘルシンキの技術大学地質教授)。

語の一つである。ノルウェーにはかんらん石の大鉱床がある。生産は容易で船での積み出しも簡単にできる。最初ゴールドシュミットはかんらん石をマグネシウムやマグネシウム化合物の原料にすることを考えていた。というのはノルウェーのかんらん石には50%近いMgOが含まれているからである。しかしマグネシウムをかんらん石から取り出すのは岩塩や海水中から取り出すのに比べて経済的にあわないことがわかった。そこでゴールドシュミットはかんらん石を耐火物として利用することを思い付いた。彼によればこれは玄武岩溶岩の中に取り込まれたかんらん石の捕獲岩が高温や化学的溶解に耐えていることに気がついたからであるという。1925年にゴールドシュミットはマグネシウムに富んだかんらん石が以前考えられていたよりもずっと高い融点を持っていることを発見し、これを耐火物として応用できないか考えをめぐらせた。1930年代になって彼は研究費の大部分を自己負担して以前の研究を進展させ、ヨーロッパ、アメリカ、その他の国でたくさんの特許を取った。結局彼はこの研究から相当な収入を得ることになった。もっともかんらん石が広く商業的に利用されるようになったのは1947年に彼が亡くなってからのことになった。

1922年はゴールドシュミットの地球化学とその研

究にとって決定的に重要な転機になる年となった。彼はこの年短いが重要な論文2編を発表した。一つは「地球の分化」という論文で25ページ、もう一つは「化学元素分配の法則」という17ページの論文である。後者は1923年から1938年にかけて発表された9編の論文の最初のものとなった。前の論文中で彼は自分のアイデアをこう概観している。

地球はその始まりの時代に元素や化合物が均質ないしほとんど均質に分布していたことは十分考えられることである。しかし現在では地球は均質状態から大きく外れてしまっている。地球内部の物質分布は最終的な平衡関係から全く外れてしまっており、物質やエネルギーがどんどん再配分されているのを見ることができる。私たちの惑星に不均質性をもたらした過程や、物質の移動しつつある状態を私はこの論文の中で説明するつもりである(3ページ)。(原文はドイツ語)

隕石は当時、破壊された惑星の破片であると一般に信じられていたが、ニッケルと鉄の合金、鉄の硫化物(FeS)、および珪酸塩鉱物から成っている。この隕石との比較に基づいてゴールドシュミットは始源地球がまわりをガスに囲まれた熔融した球で

第1表 周期律表における元素の地球化学的分類。

H																	He				
Li	Be															B	C	<u>N</u>	O	F	<u>Ne</u>
Na	Mg															Al	Si	P	<u>S</u>	Cl	<u>Ar</u>
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	<u>Fe</u>	<u>Co</u>	<u>Ni</u>	<u>Cu</u>	<u>Zn</u>	<u>Ga</u>	<u>Ge</u>	<u>As</u>	<u>Se</u>	Br	<u>Kr</u>				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	<u>Mo</u>	<u>Ru</u>		<u>Rh</u>	<u>Pd</u>	<u>Ag</u>	<u>Cd</u>	<u>In</u>	<u>Sn</u>	<u>Sb</u>	<u>Te</u>	I	<u>Xe</u>				
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	<u>W</u>	<u>Re</u>	<u>Os</u>	<u>Ir</u>	<u>Pt</u>	<u>Au</u>	<u>Hg</u>	<u>Tl</u>	<u>Pb</u>	<u>Bi</u>							
		Th		U																	

Vidensk. Skrifter. I. Math.-naturv. klasse, No.3, p.5 (ゴールドシュミット, 1923) による。

あったと考えた。この溶融球はニッケル-鉄、鉄硫化物、および珪酸塩という三つの互いに溶け合わない液体から成っていた。重力の影響のもとで、このうちの最も重い液であったニッケル-鉄は沈下して地球の核を形成した。核の周りを、多分いくらかの金属酸化物を含む硫化物の液が囲み、最も軽い珪酸塩の液が一番外側でマントルとなった。ゴールドシュミットはこれを始源地球化学的分化と命名した。元素はそれぞれの金属、硫化物、珪酸塩への親和性にに応じて三つの液相に分配された。窒素や炭酸ガスのような気相が始源大気となった。次は彼が第二次地球化学的分化と命名したものであるが、冷却と珪酸塩液の結晶化の段階である。鉄-マグネシウムの珪酸塩を主とする重い鉱物は沈み、石英や長石のような軽い鉱物はその上に浮いて集まり、大陸地殻を作った。結晶性の鉱物はそのあまり融通のきかない構造中に受け入れることがで

きる元素を取り込む一方、大きすぎたり小さすぎたりする元素を残すことによって個々の元素を選別する機構として働いた。

このような検討に基づいてゴールドシュミットは元素を四つのグループに分類して見せた。これらは親鉄元素 (siderophile: ニッケルや鉄に親近性を示す元素)、親銅元素 (chalcophile: 硫酸塩に親近性を示す元素)、親石元素 (lithophile: 珪酸塩に親近性を示す元素)、親気元素 (atmophile: 普通気体として存在する元素) である。以上のような地球化学的性質はその元素の周期表¹¹⁾中の位置に密接に関連している(第1表)。

1923年にゴールドシュミットが彼の地球化学的分類を提唱したときには、そのアイデアを裏付ける定量的データはあまりなかった。もちろんある元素の地球化学的性質は鉄、鉄の硫化物、珪酸塩という三つの液の間での実際の分配を測定すればはつき

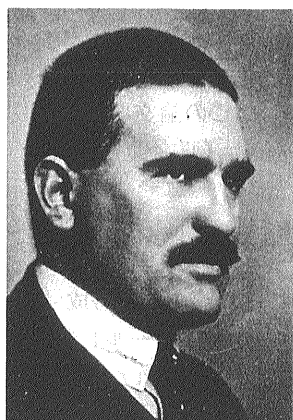


写真2

V. M. ゴールドシュミット[1923年](第12図版/左)と、それをもとに作られたV. M. ゴールドシュミットのエッチング[1974年発行のノルウェーの記念切手原版](第13図版/右)。

りするわけである。彼はこのような測定を実験室内で行うことが困難であることを認識していた。しかし隕石の分析をすればこのような分配をいわば化石化した状態で見ることになることを示した。隕石の多くはニッケル-鉄、トロイライト(FeS)、および珪酸塩から成っているがこれらは恐らく熔融状態から固結したのであろう。特定元素のこれら三つの相への分配の様子は系が熔融状態にあったときにできあがっており、個々の鉱物を機械的に分離しそれぞれを分析することで定めることができる。このような分析からある元素の金属相、硫化物相、珪酸塩相への分配を計算することは容易である。これ以来ゴールドシュミットと協力者はいろいろな元素について、隕石中のニッケル-鉄、トロイライト、および珪酸塩相の中での濃度を多数測定した。彼はこのような測定が元素の宇宙存在度あるいは絶対量についてのデータを提供するものであることに気がついた。なぜなら隕石はわれわれの太陽系が形成されたときの物質そのままを代表しているからである。彼はこのデータを使って1938年に元素絶対存在度の表を初めて発表した。この表は元素の起源についての理論の基礎を提供するものである。隕石の研究が科学の背景を構成するものに過

ぎず、ただの記載と分類に留まっていた時代に、ゴールドシュミットが隕石の組成が地球化学に持つ基本的な意義を認識したことは彼の天才的先見性を示す好例である。

1922年にゴールドシュミットは新しい地球化学の基礎概念を確立した。今やこの骨格を実際の鉱物や岩石中の元素分析値データで肉付けをすることが残されていた。これには2種類の情報が必要だった。一つは元素の分布を規制している結晶構造についての知識であり、もう一つは実際の鉱物についての主要および微量元素分析値であった。新たな研究手段が使えるようになり、機は熟していた。粉末X線回折が結晶構造の決定と比較について手軽な方法を提供するようになった。鉱物の元素分析については新たな分析法が使えるようになった。1921年にスウェーデンの科学者でゴールドシュミットの友人だったアッサール・ハディング¹²⁾が鉱物分析専用のX線分光器を設計していた。X線スペクトルはある元素から次の元素へ比較的簡単な法則性を持った線のパターンを示している。古典的な化学分析に比べて、この方法は個々の元素を別々に測定する必要がないという大きな利点を持っている。鉱物粒は直接X線の対陰極に装着される。存在する元素は一つのスペクトル中にいくつかの線となって現われ、線の強度は元素の含有量にほぼ比例しているのである。

ゴールドシュミットが彼の地球化学的研究においてどれほどハディングのX線分光器を評価していたかは1924年1月19日付けの次の手紙によく現われている。

“親愛なる友よ... 化学元素分配の法則の研究にとってX線分光分析がいかに優れた方法であるかを私たちは毎日痛感しています。この問題を解決するという私たちの仕事にとって、この方法ほど早くかつ正確にデータを出せる方法は他にありません。私の研究所がこれ以上役に立つ機器を入手したことはかつてなかったことです... 貴兄はこのような方法を開発したことについて当然誇ってしかるべきだと思う次第です。この方法は鉱物学研究にとって広大な新分野をもたらすものですから。”(原文はノルウェー語)



写真3(第32図版) 1936年6月南部ノルウェーの地質見学旅行中のゴールドシュミットとアッサール・ハディング(ルンド大学教授)。

1922年3月トーマッセンはハディングのデザインに基づいたX線分光器を製作した。この機械はゴールドシュミットの研究所で引き続き数年の間多数の研究に利用された。しかし、その最初の応用は第72番元素を探すという研究であった。

第4章産業原料研究所 原注

- 1) 産業原料研究所創設の前にゴールドシュミットはノルウェーの会社であるA/E Electroverk社やA/S Titan社などのコンサルタントとして産業界との接触を始めていた。1916年にはコンサルタント収入は教授としてのサラリーと同額に達していた(年収7000クローネ)。産業原料研究所の所長になってコンサルタントを辞めたが、産業通商省は年6000クローネを所長職に対する謝金として支払った。この額は1947年に亡くなるまで変わらなかった。産業原料研究所は報告をシリーズとして出したが、ほとんどはノルウェー地質調査所報告として印刷された。
- 2) Norsk Vidensk. Selsk. Skrifter. I. Math.- naturv. klasse, 第9号, 1921年。
- 3) マックス・フォン・ラウエ(1879-1960)はドイツの物理学者で、1912年に結晶によってX線が回折されることを発見した。1914年にこの発見に対してノーベル賞を贈られた。1912-1914年チューリッヒ大学, 1914-1919年フランクフルト・アム・マイン大学, 1919-1943年ベルリン大学, 1946-1951年ゲッチンゲン大学で物理学の教授を歴任した。1951-1958年フリッツ・ハーベル物理化学研究所の所長を勤めた。
- 4) ウィリアム・ヘンリー・ブラッグ(1862-1942)はイギリスの物理学者で、息子のW. L. ブラッグとともにX線回折を用いた結晶構造の決定に対して1915年ノーベル物理学賞を受賞した。1908-1915年アデレード大学(オーストラリア), 1915-1925年リーズ大学, 1915-1925年ロンドン大学の物理学教授を歴任, 1925-1942年ロンドンの王立研究所所長。
- 5) ウィリアム・ローレンス・ブラッグ(1890-1971)はイギリスの物理学者で、W. H. ブラッグの息子。1919年にラザフォードの後をついでマンチェスター大学物理学教授になり、結晶構造決定で優れた学派を築きあげた。1937-1953年ケンブリッジ大学のキャベンディッシュ研究所の教授兼所長(ラザフォードの後任だった)。1953-1966年ロンドンの王立研究所所長。
- 6) ジョン・デズモンド・バーナル(1901-1971年)はイギリスの物理学者, X線結晶学者。1938-1963年ロンドン大学物理学教授, 1963-1968年結晶学教授。
- 7) J.Chem.Soc. (London), 2108ページ, 1949年。
- 8) イヴァール・ウエルナー・オフテダール(1894-1976)は

ノルウェーのラルビクで生まれた。1913年オスロ大学入学。1918年に地質博物館に学生の身分でゴールドシュミットの鉱物学助手として採用され、長期間にわたって地質博物館に勤務することになった。後に先任学芸員(ゴールドシュミットがイギリスにいた期間と、その死後短期間は館長代理を勤めた)。1920年代に彼はゴールドシュミットと一緒に結晶化学研究に従事したが、後には鉱物と地球化学について独立して研究するようになった。1947年ゴールドシュミットが亡くなると、その後を継いで鉱物学教授となり、1964年に引退するまでその職に留まった。

- 9) ラルス・トーマッセン(1896-1972)はオスロ生まれで、1919年トロントハイムのノルウェー工科大学の化学工学科を卒業した。1919年から1924年、そして1927年から1929年、彼はゴールドシュミットの主な共同研究者だった。彼はオスロの主な研究手段だったX線分光器の製作と保守の責任者だった。1926年には濃度0.1%レベルまでの元素の検出と測定方法について詳細に記載した論文を発表している。1924年12月国際教育委員会の奨学金を得てR.A.ミリカン教授と共同研究するためにカリフォルニア工科大学へ赴いた。1927年9月にノルウェーに帰国する前に論文を提出して博士号を得た。1929年ミシガン大学の化学工学科の教授になり、金属学を専門とした。1966年に引退するまでその地位に留まった。
- 10) クリストファー・ステンピク(1892-1959)はトロントハイムスフィヨルドのイッテロイで生まれた。16歳で工業・鉱山会社の機械工となり、1921年6月まで働いたが、産業原料研究所の工作担当助手として採用されて移った。働くかたわら大学で鉱物学、岩石学、化学を勉強し、ゴールドシュミットの右腕となった。このみごとなペアはお互いの足りないところを補いあったのである。ゴールドシュミットは理論的知識と豊富なアイデアを出し、ステンピクは技術的能力を提供した。ゴールドシュミットの生涯を通じてこの二人は密接に協力しあった。特に1925年頃から始まったノルウェーのかんらん石岩を耐火原料として利用する技術の開発に際して、いくつかの特許を共同出願している。1947年10月にノルウェーのかんらん石(Olivine)鉱床利用のためA/S Olivinという会社が設立され操業を開始したが、ステンピクは1957年に産業原料研究所に戻るまで、ほとんど10年近くこの会社の操業責任者を勤めた。
- 11) 第7図にもっと詳しい周期表が掲げている。(第6章, 次回掲載)
- 12) アッサール・ロバート・ハディング(1886-1962)はスウェーデンの地質学者・鉱物学者で、ルンド大学を1913年に卒業した。初め助教授, 1934年に教授に昇進, 1947-1951年ルンド大学学長となった。ハディングは多才の人で事実上地質学のあらゆる分野で活躍

した。特に鉱物学と地球化学にX線分光学とX線回折を応用することで先駆的業績を残し、ゴールドシュミットから高い評価を得た。生涯を通じてゴールドシュミットとハッディングは親友だった。

第5章 中休み：第72番元素の探索¹⁾

元素の周期律の法則を最初に明らかにしたのはD.I.メンデレーエフ(1834-1907)で、1869年のことだった。周期表では元素が規則的に並べられており、まだ発見されていない元素の性質を予想することができるようになったが、バリウム(原子量137.33)とタンタル(原子量180.95)の間に入る希土類元素の数がはつきりしなかったため元素の総数はわからなかった。バリウムは2価で希土類は3価、タンタルは5価であったので、後から考えてみると希土類とタンタルの間には4価の元素があるべきだったが、当時は誰もこのことに気がついていなかった。

元素の総数の問題はH.G.J. モーズレー(1888-1915)によって解決された。1910年にオックスフォード大学を卒業したモーズレーはマンチェスター大学のラザフォードの研究グループに参加した。そこでの仕事は放射能と原子の構造に集中していたが、マックス・フォン・ラウエによって1912年に結晶がX線を回折することが発見されてからモーズレーの興味はこの新しい分野に向けられた。彼は回折技術を特定の元素からなる標的に電子を当てたとき出るX線の波長を決定することに利用した。この結果はPhilosophical Magazineの1913年12月と1914年5月号に発表された。後の方の論文にはアルミニウム(原子番号13)から金(原子番号79)までの元素のリストが載っていた。そして彼は“アルミニウムから金までの元素は全てX線のスペクトルを決定する整数Nによって特徴づけられる。この整数とは原子番号である”と述べた。そしてこの列の中に3つの空きがあること、すなわち原子番号43、61、および75が知られていないことを明らかにした。

当時元素72番は1911年に長年希土類元素の分離と確認に従事していたフランスの化学者ジョルジュ・ウルベイン(1872-1938)によって発見済みと信じられていた。ウルベインはそれをセリウムと

命名していた。彼はモーズレーの仕事に感銘を受け、1914年6月にセリウムを含むと思われる貴重なサンプルを持ってモーズレーを訪れた。二日後にモーズレーはX線スペクトルの結果を出したが、残念なことにそのスペクトルは原子番号70番のイッテルビウムと71番のルテチウムしか含んでいなかった。すなわち原子番号72番の元素は未発見だったのである。

これがモーズレーの最後の科学的仕事になってしまった。このすぐ後彼はメルボルンであった英国科学振興会の会合に出席するためにオーストラリアに向かった。この会合の間に第一次世界大戦が勃発した。モーズレーは徴兵に應ずるために急いでイギリスに戻り、軍の技術将校として勤務することになった。ラザフォードは彼のように優れた科学者を軍隊に勤務させることに反対して国立物理研究所に転勤させるよう運動した。転勤は認められたが遅すぎた。モーズレーはガリポリに送られ、1915年8月10日トルコ軍の銃弾に倒れたのであった。

第一次世界大戦とそれに続く混乱によって、戦争に直結していない科学研究はほとんど停止に追い込まれた。72番元素の探求の再開には1922年まで待たなければならなかった。その探求が今度はコペンハーゲンとオスロで行われることになった。デンマークの物理学者ニールス・ボーア(1885-1962)は彼の原子構造に関する理論に基づいてこの元素が希土類元素ではあり得ず、4価で、チタンやジルコニウムの類似物であるはずであると予想した。1922年の夏、ボーアの研究所に勤務していたジョージ・ド・ヘヴシーが地球化学に興味を抱き、ジルコン鉱物中にこの捕らえどころのない元素を見つけようと仕事を始めた。

ヘヴシーはモーズレーと同じ頃ラザフォードの研究所で働いており、お互いに親友だった。実のところヘヴシーは1914年の夏にモーズレーに声をかけられてX線分光の仕事と一緒に進めようとしていたところだった。モーズレーがオーストラリアに行ったためこの共同研究は延期され、さらに戦争が始まったため中止になってしまっていたものだった。今回ヘヴシーは、X線分光器を作るためにオランダの物理学者で1922年にボーアの研究所に来たダーク・コスターと組むことにした。ヘヴシーはコペンハーゲンの鉱物博物館からジルコニウム鉱物の標本

を入手した。彼はジルコン ($ZrSiO_4$) を熱した酸で処理し可溶成分を除いた、溶け残りにはジルコニウムと恐らく72番元素が入っているはずだったが、これを分光器の銅製の対陰極 (anticathode) に固定した。コスターがとった最初の写真に、それまで見つかっていなかった元素の線が予想されていた位置に写っていた! ヘヴシーはこう言っている²⁾。
 “当時我々の持っていた器具はとても原始的なもので、新元素を発見したのだという確実な証拠を得るためにはさらに数週間もかかりました。” 1923年1月2日付けで投稿され、1月20日に発行されたネチャー誌に印刷発表された短報の中でコスターとヘヴシーは原子番号72番の新元素を発見したことを述べ、この元素にコペンハーゲンのラテン語の名前に基づいてハフニウムという名前を与えている。

1922年にはゴールドシュミットとトーマッセンも地球化学研究用に新しく組み立てられた彼らのX線分光器を使って72番元素を探していた。1923年1月31日に出たNorsk Geologisk Tidsskriftの最初の号に彼らは“Das Vorkommen des Elementes No.72 im Malacon und Alvit” (マラコンとアルビット中に出る原子番号72番の元素の産状) (MalaconとAlvitはジルコンの変種) という論文を発表している。

72番元素の発見の発表において29日の差で先を越されたことはゴールドシュミットにとって大きな失望だった。それから後何年も彼はそれまで未知だった61番元素の発見のために時間と労力を費やした。それは希土類元素の一つだったので、博物館で新たに受け入れる希土類鉱物を片端から分析したものである。しかし1930年代になって、この元素は恐らく安定な同位体を持たず、天然には産出しないと結論するに至った。1940年代になってこの元素はウランの壊変産物の一つとして同定され、ゴールドシュミットの結論が確認された。この元素は神話中で天国から火を盗んだとされるプロメテウスに因んでプロメチウムと命名された。プロメチウムにはいくつかの同位体が存在するが、半減期は最も長いもので17.7年となっている。

ヘヴシーはゴールドシュミットの持っていたアルビットのサンプルを送られて、ハフニウム含量が高い (HfO_2 が、ジルコン中では普通1.3から6%である

のに対して、16%もある) ことを確認した。ベルリンで行われたドイツ化学会の1923年の年会での招待講演に際してヘヴシーはこれを、他の結果とあわせて発表した。ゴールドシュミットに提供されたサンプルであることを述べなかった。この会合に出席したノルウェーの同僚からそのことを聞かされたゴールドシュミットは、ヘヴシーの言によれば、“一切の関係を絶ってしまった。”しかし、その後公開された研究報告に出所がはっきり述べられていたことから、友好関係は復活した。だが研究上の事柄について敏感な態度はその後も残り、1925年には新しい事件が発生することになった。それはゴールドシュミットが行った講演に関してデンマークのある新聞に載った記事について、多分ヘヴシーが先取権について誤解があるということを書いたことに触発されて、ゴールドシュミットが次のような手紙を書いたことに暗示されている。³⁾

“前略。ストーマー教授のご厚意により最近私はデンマークの新聞“Nationaltidende” (コペンハーゲンの新聞) の2月3日号を目にしました。その6ページに私が行った講演についての記事が出ています。それには他人、特に貴兄の研究所の得た結果を私が横取りしているような誤解を与える書き方がされているようです。私は講演の中で自明のこととして、定量的X線分光分析がコペンハーゲンの研究所で最初に行われたという事実に注意を喚起しました。それについては講演について記事を書いた唯一のノルウェーの新聞にも明記されています。この記事は同封しましたのでご覧いただけると存じますが、他の研究所の成果を自分の功績にするようなことは、私として絶対していません。Aftenposten” (オスロの新聞) に私個人について余計なことが書かれている部分があることは残念ですが、いかなる事情があろうとも、私としては貴兄がこの記事をお読みいただいて判断されること、そしてコペンハーゲンの記事で言われているようなボーアの研究所に帰せられるべき名誉を盗むようなことをしていないことをご理解いただけることを確信しております。もし貴兄が必要ないしは好ましいと判断されるならば、NationaltidendeにAftenpostenのもとの記事を提供されることを希

望しております。私としてはNationaltidendeの記事は電報か電話取材の記事に基づいて誤解して書かれたものと思っています。私の講演の内容は実のところ特に定量分光分析についてと、異なる波長のスペクトル範囲での感度の変化、さらに定量X線分光分析についてトーマッセンの経験の総括でした。その中でまた私はダイヤモンドの結晶を用いた初めてのスペクトルも見せました。もしご希望ならば、この冬に新たに発見されたハフニウム酸化物の含量7-8%のアルビットを多分お分けすることもできます。敬具。

ゴールドシュミット。

最近になって発見されたにもかかわらずハフニウムは特別まれな元素というわけではない⁴⁾。地殻についていえばハフニウムは砒素や錫などのよく知られた元素よりも多量に含まれている。ゴールドシュミットはハフニウムを“カモフラージュされた元素”と呼んだ。なぜならハフニウムは他のもっと普通に出る元素によく似ているためそれ自身を主成分とする鉱物を作らないで、常にもっと多量にある元素の作る鉱物の中に少しずつ散らばって出からである。

1940年3月、私はゴールドシュミットの家で、ちょうど招待されて泊まっていたヘヴシーに会って食事をともにするという機会に恵まれた。彼はそのとき行っていた放射性トレーサーを使った生物学的

研究について熱情をこめて語った。私が興味を示したところ、夏のあいだにコペンハーゲンの彼の研究所に客員としてきたらどうかとすすめてくれた。しかし、4月にドイツがデンマークとノルウェーへの侵略を開始したので、この魅力的な招待はだめになってしまったのである!

第5章 中休み：第72番元素の探索 原注

- 1) この章の一部は“George de Hevesy, 1885-1966” (G. マルクス編集) 1988年ブダペストのAkademiai Kiado社刊行、11-36ページに載ったグスタフ・アルレニウスとヒルデ・レビによる“The era of cosmochemistry and geochemistry, 1922-1935”によっている。
- 2) ニューヨークのマグローヒル社1932年刊、Chemical Analysis by X-rays and its Applicationsの182ページによる。
- 3) 1925年2月7日付けの手紙。原文はノルウェー語。カリフォルニア大学サンディエゴ校グスタフ・アルレニウス教授の翻訳による。
- 4) 現在アメリカでのハフニウムの需要は年間50トン以上に達している。主要な用途は原子炉の制御棒であるが、特殊な合金の成分としても僅か使われている。

MASON Brian (1992): Victor Moritz GoldSchmidt: Father of Modern Geochemistry -3-. [Translated by KAWACHI Yosuke].

<受付：2000年1月11日>