鍋の中身の話：有機金属溶液の X線構造解析

松原誠二郎*

大嶋幸一郎

松原英一郎

Ingredients of the Soup in the Chemist's Cauldron: Structural Analysis of Organometallics in the Solution by X-ray

Seijiro Matsubara*, Koichiro Oshima, and Eiichiro Matsubara

In the modern highly selective organic synthesis, organometallic reagents are indispensable. Although the plausible mechanism and structure of these reagents are also demonstrated based on the single crystal X-ray analysis, only a few efforts has been tried to analyse their structure in the solution. In this sense, there is no great difference between the reaction vessel of the modern chemists and the cauldron of the ancient alchemists. We introduce the direct method to analyse the organometallic reagents in solution by X-ray analysis.

Key words: AXS, SAXS, EXAFS, XAFS, AFM, solution, pinacol coupling

はじめに

ハリー・ポッターという話をご存知だろうか。昨年・一昨年と世界中で大人気となり、昨年暮には映画も公開された冒険小説であるが、最初に主人公のハリー少年が魔法使い養成学校に入学するくだりがあり、その時に携行品として「cauldron」(図1)が指定されている。魔女が薬をつくる時に使う足つきの大鍋のことである。この「魔女の鍋: cauldron」という表現が欧州の有機合成化学者の冗談でよくでてくる。ある化合物に反応剤を作用させて、目的物をつくる、という作業が有機合成化学者の基本作業であるが、2つのものを「混ぜ合わせる」ことをこのように揶揄するのである。反応容器中で何が起ころうと知ったことではない、爆発させなければ、めでたく目的物が取り出せる、というわけである。筆者もこの表現をスイスのローザンヌ大学の超強塩基の開発者として有名な教授のもとで塩基による脱フッ化水素の実験を行っているときに直接言われたことがある。超強塩基とは KOt-Bu と BuLi を混ぜ合わせると非常に強い塩基が得られるというものであるが、他の大学のドイツ人の教授に「あの cauldron base は試したのか」と質問された。超強塩基開発者本人が聞けばその性格上激怒されるだろうが、この表現は誠に上手い。

有機合成化学者にとって一番の目的は、望む化合物を

100%の収率で取りだすことである。これに対し、物理有機化学者達は、反応機構に興味を示し、その説明を反応速度論や分子軌道計算を用いて行う。両者は、互いに若干の尊敬と反感を持ちながら、共生しようとするが、魔女の鍋の中身をあれこれ想像するのは意味があるのか、ないのかという議論になることになる。しかし、有機化学は分子レベルでものづくりを考え、設計できるということに関しては、お互い疑問を持つことはないだろう。

ここで注意して欲しいのは、典型的な有機合成化学者の言う分子という概念は、物理学の要因を含む化学を研究する多数の化学者のそれと、大きな差があるということである。前者の描く分子とは一言で言えば「分子記号」と表現するのが最も適切かもしれない。かくして、有用物質を生み出す魔女の鍋は、無機質な原子記号で書く反

Fig. 1 Cauldron

* 京都大学大学院工学研究科 ()

* Department of Material Chemistry, Graduate School of Engineering, Kyoto University ()

応機構の説明で、内容物を明らかにされたことになる。これをもって分子レベルと言っても良いのだろうか、というのが私達の持った疑問である。もちろん、従来の反応機構も決して根拠のないものではない。綿密な傍証や、核磁気共鳴・赤外スペクトル等の方法を組み合わせた信頼度の高いものが多数ある。しかし、想像や間接法は良くない。勇気を出して無駄と言われても鍋の中身を直接のぞかないといけないのではないか。

有機合成反応は、錬金術・仙丹調製の時代からの長い歴史を持つものであり、まさしく「魔女の鍋」を経ているものである。しかし、近年は、単に炭素結合を組み合わせるのではなく、不斉炭素の制御を伴う高度な分子構築方法が要求される。このためには、反応を行う際に、例えば酵素に代表されるような複雑な反応場を構築することが必要となる。もちろん、酵素そのものを反応に用いては高効率の有機合成が実現できないので、その代わりに金属化合物を用い、その配位場を利用する有機金属を利用した合成化学が、全盛となっており、昨年の野依良治先生の御受賞がその偉大なる頂点である。そのような理由からも、現代の魔女の鍋の重要な中身は有機溶媒中の金属化合物溶液であると言ってもよいと思う。こうなるとやはりX線の登場が望ましい。これは、古くからある手法であり、X線による溶液構造に関する総説¹⁾もあるが、溶液のX線は単結晶X線解析の美しい世界に従事する有機金属化学者からは懐疑の目をもって見られる。鍋の中身は溶液であり、どうしてもここで問題が生じることになる。

溶液の構造で明らかにしたい点は2つに分けることができる。1つは、溶質の部分構造であり、もう1つは集合体としての挙動である。例えて言えば、海中で鰯を発見したとしよう(図2a)。微視的な鰯の1匹1匹の形(b)と巨視的な群れとしての怪しい動き(c)、どちらもを理解して、「海中の鰯」という状態を理解することができるだろう。これをもし、数匹釣り上げて分析すると、単結晶解析のように微細な構造もわかるのではあるが、これ

はもはや標本の鰯であり、ひょとすると「メザシ」(d)の分析かもしれないし、下手をすると数尾固まって「たたみいわし」になってしまっているかもしれない。溶液というものを見る時の難しさと意味は、このイメージを持つと理解してもらえらるだろう。しかし、溶液に対するX線を用いた分析法の進歩もめざましい。そこで、X線を中心とした鍋の中身の解析の試みについて述べていきたいと思う。

溶液X線回折について²⁾

単結晶のX線回折法は、有機金属化学の華ともいえる。結晶では長範囲にわたって原子が規則的に配列するので、ここにX線を入射させ構造を解析すると単位胞中での原子の配列が明らかになる。しかし、溶液・非晶質系においては、長範囲にわたる規則性は持たず、しかも気体のような完全無秩序な状態でもない。このような系の回折実験においては、確かに存在する三次元構造も、得られてくるのは空間的・時間的に平均化された一次元情報となる。いわゆる動径分布関数である。これに加えて、溶液の中の分子は単原子でないことがほとんどである。つまり、得られる動径分布関数は、原子を特定することなくますます平均化される。これらの乏しいデータを元にして三次元構造モデルを立てていくことになる。つまりかなり大胆なモデル化が必要となる。この方法で、溶液中の金属錯体の構造を算出した仕事は数多くある。先程の鰯の例に当てはめると、激しく動きまわる姿を大雑把に平均し、そこから大胆に1匹ずつの姿を求めるものであり、しかも全体像は見えてこない。

また、X線の回折という現象を思い起こしてほしい。回折は、試料中の元素の電子との相互作用より生じる散乱X線の干渉作用である。単結晶のような構造とは異なる乱雑な溶液においては得られる回折データの強度も弱く、測定も困難になる。これから述べる方法は、これらの点をカバーする方法である。

小角X線散乱法(Small Angle X-ray Scattering: SAXS)³⁾

ある程度の大きさの粒子や高分子の溶液中でのX線回折現象を見る時、回折角をどんどん浅くした場合、この系の溶質の原子各々の電子に起因する回折現象は見えず、溶質が電子均一な固まりとして散乱現象が観測されるようになる。この現象を利用するのが小角X線散乱法であり、松岡・伊勢(京都大)らは高分子コロイドの粒度分布、形状分析に利用してきた。「電子均一な固まり」としてみるのがポイントであり、その固まり内部の状態は結晶であろうとアモルファスであろうと関係ない。測定にとって重要な点は、これらの溶質内外で電子密度の

Fig. 2 「溶液中」の金属錯体のイメージ図

差があることである。また、粒子の大きさと散乱角はいわば反比例の関係であり、小角領域の散乱は比較的大きな粒子を観測する領域であると考えられていた。一般に測定が行われている有機高分子コロイドの場合でいうと、粒径が μm 単位であり、有機金属分子のクラスター等から較べるとはるかに大きめである。しかし、有機金属化合物溶液の場合は、溶媒と有機金属化合物との電子密度の差が大きく、有機高分子のコロイドに比べ、散乱強度がはるかに強く、ナノ単位の大きさでも小角領域の散乱現象が分析の利用できることが明らかになった。これら溶質の粒子に関して得られる情報は、大きさと形状から、粒度分布までにわたる。我々の不斉ピナコールカップリングにおける低原子価チタン-アミン錯体のテト

Fig. 3 低原子価チタン-光学活性アミンによる不斉ピナコールカップリング⁴⁾

Fig. 4 低原子価チタン-光学活性アミンの THF 溶液の SAXS。縦軸は、散乱相対強度。横軸は、散乱ベクトル ($q = 4\pi \sin(\theta)/\lambda$) で、左側が広角部、右側が小角部となる⁴⁾。

ラヒドロフラン溶液の研究の結果を示す⁴⁾。

図に示す低原子価チタン-アミン錯体によるピナコールカップリングは、見た目は溶液状態で進行し、これまでの概念では「均一系」である。しかし、不斉合成を行う場合、その「均一さ」に厳密度が求められる。本当は、どのような大きさで、どのような会合度の反応活性種を使っているのだろうか。この疑問に対する答えを与えてくれたのが SAXS 法である。式に示すように調製した低原子価チタン-アミン錯体のテトラヒドロフラン溶液を分析した。その結果、図に示すような散乱曲線が得られたが、この実測曲線は、半径 7.7 Å の球状粒子と半径 85.0 Å の球状粒子が 550:1 の数比で存在するとした場合の曲線とよい一致を示す。言い換えれば、この均一系と称する溶液は、実際にはこのような粒子の混合物であることが測定により明らかになったのである。この結果は、溶液の全体像を巨視的に観察しているものであり、「全体像」の情報を与える有効な方法であるといえる。

EXAFS 法⁵⁾

X 線を物質に照射した場合何が起きるのか、有機合成化学を専門にする人でもずっと昔に暗記した覚えがないだろうか。反跳電子、散乱 X 線・透過 X 線・蛍光 X 線 (特性 X 線)・放出電子等の現象が起きる。散乱の利用に関してはすでに述べたが、他の現象も重要な分析情報となる。このような現象の後、透過してきた X 線に注目してみよう。この透過してくる X 線を見ると吸収 X 線を測定できるが、多くの現象があるとはいえ、一番大きく吸収されるのは、各元素中の電子がイオン化されるためのものである。これは、各元素特有のイオン化エネルギーに対応するものであり、この透過 X 線を観察すると、イオン化エネルギーに一致するエネルギーの波長のところで X 線が著しく吸収されることになる。これを特性吸収端と呼ぶ。実際に測定を行うと、この特性吸収端付近には微細な変化がある。これは、X 線吸収スペクトルに現れる微細構造を意味する英語の頭文字をとり XAFS (X-ray absorption fine structure) と呼ぶ。特性吸収端のエネルギーは、各元素固有のものであり、物質の構造による差はあまりないことが予想されるが、この XAFS は元素の構造に基づき変化するのである。この XAFS において吸収端すぐそばの構造を XANES (X-ray absorption near edge structure) と呼び、数十 eV 離れたところのものを EXAFS (extended X-ray absorption fine structure) と呼び区別する。特に EXAFS 領域に関しては光電子の干渉の結果であると説明されている。光電子とは X 線の吸収によるイオン化により飛び出した内殻電子である。この光電子の挙動は球面波として表すことができるが、近傍に他の原子がある場合、相互作用が起

り EXAFS が生じることになる。これを詳しく解析すれば、ある原子を選択するとその周囲の原子の数やその核間距離が明らかになる。しかも EXAFS においては、溶液であることにより測定がさまたげられることもない。しかし、明らかになるのは選んだ中心原子の 5–6 Å 程度の近傍のみである。EXAFS は、単結晶以外のもののアモルファス物質・溶液物質の構造解析に盛んに用いられている。また、表題の有機金属化合物溶液に関しても利用されている。例えば、内山・根東・坂本(東北大)らは、亜鉛アト錯体の溶液での構造の解析の一方法として EXAFS を用いている。アト錯体中に Zn-CN 結合があるということを示したものであるが、図 5 に示す 4 つのスペクトルにおいて、中心に置いた亜鉛原子の近傍に炭素と窒素が 1 Å 余りの差をおいて存在することを示している⁶⁾。筆者自身の Bis(iodozincio)methane の Schelenk 平衡と溶媒の関係に関する EXAFS の研究も参考にして欲しい⁷⁾。この方法は局所的なデータを得る方法として、先程の X 線回折法に比べ制約が少なく、有効な方法といえることができる。

Fig. 5 Zn(CN)_2 , $\text{Me}_2\text{Zn(CN)}_2\text{Li}_2$, Me_4ZnLi_2 , Me_2Zn の EXAFS データ⁶⁾
縦軸は相対強度、横軸は亜鉛原子からの距離を表す。例えば、 Zn(CN)_2 の所での矢印(4.8 Å)は、Zn-Zn の距離に相当すると考えられる。

X 線異常散乱法 (Anomalous X-ray Scattering: AXS)⁸⁾

EXAFS は、非晶質・溶液に関し、特定元素を 1 つ選びその近傍の情報を得る方法として非常にすぐれているように見える。しかし、得られた動径分布曲線においてどこにどの元素を置くかは、多分に任意的なものである。有機金属化学の溶液中での構造で問題となるものに会合度という要因がある。歴史的には、モル沸点上昇等を利用して決めた例もあるが、実際は「神の手」が必要な程難しいものであると、聞いたことがある。この会合状態を明らかにするためには、EXAFS では十分な情報

が得られない特定元素間の距離等の情報が必須となる。この情報を得るために、X 線異常散乱法 (Anomalous X-ray Scattering: AXS) と呼ばれる理想的な方法がある。X 線照射をする際、入射 X 線のエネルギーがある元素の電子の基準エネルギーに近い場合、共鳴による異常散乱が起こるようになる。この効果を利用すると特定原子間同士の距離の情報が広範囲にわたり得られる。特に多成分系の非晶質・溶液の解析に大きな力を発揮する。ただ、X 線源として強力な放射光が必要であるなどまだまだ特殊実験の様相を示している。筆者らが大きな期待を持って測定を繰り返しているのはこの方法である。微視的、巨視的な構造に関する情報が一挙に得られる可能性がある。

目で見ると？

これは X 線による解析方法ではないが、述べておきたいことがある。有機化学における分子模型は視覚的な点に訴えるという意味で、誠に重宝なものである。目で見えるようにしたところで、どのような意味があるのかというようなことを考える前になにかしら納得してしまうものである。X 線のデータも分子モデルで書き換えると説得力が飛躍的に向上する。このような「視覚的」データを直接的に与える方法として顕微鏡がある。しかし顕微鏡を用いて分子レベルで溶液の中をのぞくことは不可能である。そこで、溶質である有機金属分子体をステージに引き上げ顕微鏡で観察することになる。解像度という意味では電子顕微鏡が申し分ないが、電子線の照射とともにステージ上の有機金属分子が吹き飛ばされたりするので、測定が困難となる。試料を傷めず、測定方法として汎用性があるという意味では、原子間力顕微鏡 (AFM) の利用が望ましい。原子間力顕微鏡とは、微小なチップで試料上を走査しその時、チップと試料間に働く原子間力を利用するものである。片手で何かを触りながらももう一方の手でその表面形状を絵にして書いている人を思い浮かべて欲しい。この解像度は、高さ方向で 0.2 Å にまで及ぶ。ただ、測定においては溶質である有機金属分子体をステージに引き上げ溶媒を乾燥させ除くことになるが、溶質分子が凝集してしまう。しかし、十分に希釈することによりある程度、凝集するのを防ぐことができる。このようにしても、用いるステージが有機金属化合物に侵されない材質で、かつ原子レベルに平滑でないと、小さな溶質である有機金属化合物は測定できない。よくしたものでこの原子レベルに平滑なステージの研究を行っている人がいる。吉本(東工大)らは、人工サファイアの表面を熱処理すると表面エネルギーの極小化の方向に表面が原子レベルで平滑な階段状になることを利用し、原子レベルに平滑で、耐薬品性に富む超平坦

サファイア製 AFM 用ステージを開発している⁹⁾。先に SAXS の項で述べた低原子価チタン-アミン錯体を十分に希釈した上でこのサファイアステージに乗せ、AFM を測定すると直径 8.4 Å と 105.5 Å の 2 種類の粒子が見られた⁴⁾。勿論この AFM の装置は窒素ボックス中に設置しており、酸素・湿気の影響は受けないようにしている。これは、一度溶液から引き上げ、乾燥しているので、溶液内での錯体の構造を示すものではないということに留意せねばならないが、SAXS の結果と比較して考えると興味深い。先程示したように SAXS の測定により溶液中では直径 15.4 Å (半径 7.7 Å) と直径 170 Å (半径 85 Å) の 2 種類の球形粒子の存在が示された。乾燥による影響を考えると、よい一致を示しているということが言える。

Fig. 6 TiCl_3 (2.0 mmol) とアミン 4 (4.0 mmol) の THF (5 ml) 溶液をベンゼンで 3000 倍に希釈し、超平坦サファイアステージで観察した AFM イメージ。図の上下方向に走るステップは高さ 2 Å、幅 180 Å のくり返し構造を持つ。

問題点

これらの方法を組み合わせれば溶液中の有機金属の構造解析が確立されるという大きな期待がかかる。しかし、この測定には、単色の強い X 線源が必要である。つまり放射光装置が必要であり、筑波高エネルギー研か播磨 Spring 8 に行くしかない。研究の独自性という点からは、ある意味理想的なのかもしれないが、何度も測定してみることができないのである。これは、有機合成化学者にとっては苦痛である。フラスコ内での実験は容易に試すことができるので、「気軽に」手をつけることが多い。それに対し、この測定は、一発勝負の感がある。共同研究者は兄 (EM) であり、あまり遠慮がなく再測定を頼んだりするが、明らかに相手が不快感を示していることを感じてしまうこともある。放射光装置は、望む時に使えるものでもない。従って限られた時間内に

研究室総出で昼夜を問わず測定を行う。有機金属溶液のような試料は、測定のプロにとって見当のつかぬものであるらしい。セルの考案等は、こちらの仕事となる。測定のドシロウトの筆者 (SM) は、サンプルをその場で調製してしまうと血走った目をした人々の間をウロウロしているだけで、試料に不都合があれば駆け付けるだけのことである。恥ずかしいことこの上ない。子供の時から兄を尊敬できないのが、世の大部分の弟の常であると私は信じているが、この数日間の測定中には心から兄 (EM) を尊敬してしまう。ある夜、兄が「休憩しようか」といって控え室でお茶を飲んだことがあった。そこにテレビがあり、「プロジェクト X」の再放送をやっていた。感動的なエンディングテーマを聞き、我々の「プロジェクト」に子供っぽい思いをはせていると、その後ニュースがあり、当時世を騒がせていた遺跡ねつ造事件を報じていた。兄は「我々の実験は、こんな装置を使う以上、誰も追試してくれないかもしれない。逆に実験それぞれにすごい責任があるなあ」と冗談とも本気ともつかない感想をもらした。急に現実に戻された。その精度に対する責任、結果が一人歩きする恐ろしさ、またそれを予想する緊張感等さまざまな模様を有した実験でもある。

またこれらの方法は、有機金属化合物溶液の金属等の重原子を中心にした情報に限られてくる。有機金属化合物の大部分は炭素・水素である。特に水素の情報には欲がでてる。つまり魔女の鍋の中身に鳥ガラを発見したが、肉が付いているかどうかを知る必要がある。これには中性子散乱法が必要になる。今度は放射光施設ではなく原子炉に行かねばならない。

おわりに

2001 年 8 月にドイツ・マールブルグ大学にて第 6 回国際カルバニオン会議が開かれた。その組織委員長の R.W. ホフマン教授が閉会の辞で次のようなことを述べた。「反応の鍋の中(彼は pot と述べた)は、鍋の中なのだから見る必要がないという人も多い。しかし、これだけ化学と技術が進歩した今、鍋の中を見たり考えたりする努力をすることにより全く新しい化学の概念、化合物、超分子が見つかる」たしかに鍋の中身を知ったところで、何になる。こういう批判があるだろうし、自分でもそのように考えることもある。有機合成もサイエンスである以上、少なくとも見る努力をしないとけない、とホフマン教授の言葉を思い起こしながら自分自身を奮い立たせている。

本音をいうと、このような話しを書くこと自体恥ずかしい程、研究の進展は遅々としている。ただ、道はるかなり、といえども必要な研究であると確信している。また、総合研究である。ほんの小さなきっかけから始まっ

たプロジェクトであるが、周囲の人的環境には、奇跡のようにめぐまれている。どこかで、この浮き世離れた研究の成果をご披露できることを夢にみながら、この稿を終えたいと思う。

謝 辞 この研究の発端は、数年前、京都大学名誉教授内本喜一朗先生が、当時から扱っていた有機二重鉛種の溶液中での構造研究に SAXS を使えばいいのではないかとご指摘下さったことだと思います。着手にあたっては、筆者(SM)と兄(EM)の無責任な会話からスタートしました。この研究は現在も継続中であるが、いつも測定をしていただいている東北大学金属材料研究所の松原(英)研究室の皆さまに篤くお礼申し上げます。また、京都大学大学院工学研究科助教授で小角 X 線散乱に関する共同研究者であり、指導者である松岡秀樹先生、EXAFS の手ほどきをしていただいている田中庸裕先生、東京工業大学応用セラミック研究所助教授で AFM の指導をして下さっている吉本護先生にも篤くお礼申し上げます。この御三方は、筆者(S.M.)の京都大学工学部時代の同級生でもあります。また、この奇妙な研究を2年前に着手した時に、一番積極的であり、大いなる推進力となった学生、京都大学工学修士橋本祐子氏(現在 SHARP に勤務)にも篤くお礼申し上げます。また、東京大学理学部教授中村栄一先生には、この研究に関し当初より励ましとご助言をいただきました。適切なお礼の言葉も見つからない程感謝いたしております。

(2002 年 1 月 7 日受理)

文 献

- 1) 例えば, H. Otaki, *Pure Appl. Chem.*, **59**, 1143 (1987)
- 2) 西川恵子, 日本化学会編「実験化学講座第4版」丸善(1992), pp 371-392
- 3) N. Ise, T. Okubo, S. Kunugi, H. Matsuoka, K. Yamamoto, Y. Ishii, *J. Chem. Phys.*, **81**, 3249 (1984); 松岡秀樹, 日本結晶学会誌, **41**, 213 (1999)
- 4) Y. Hashimoto, U. Mizuno, H. Matsuoka, T. Miyahara, M. Takakura, M. Yoshimoto, K. Oshima, K. Utiomoto, S. Matsubara, *J. Am. Chem. Soc.*, **123**, 1503, 4869 (2001); S. Matsubara, Y. Hashimoto, T. Okano, K. Utimoto, *Synlett*, **1999**, 1411
- 5) 宇田川康夫編, X 線吸収微細構造, 学会出版センター(1993)
- 6) M. Uchiyama, M. Kameda, O. Mishima, N. Yokoyama, M.

Koike, Y. Kondo, T. Sakamoto, *J. Am. Chem. Soc.*, **120**, 4943 (1998)

- 7) S. Matsubara, Y. Yamamoto, K. Utimoto, *Synlett*, **1999**, 1471
- 8) 早稲田嘉夫, 松原英一郎編, X 線構造解析, 内田老鶴堂(1998)
- 9) M. Yoshimoto, T. Maeda, T. Ohnishi, H. Koinuma, O. Ishiyama, M. Shinohara, M. Kubo, R. Miura, A. Miyamoto, *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 2615 (1995)

PROFILE

松原誠二郎 京都大学大学院工学研究科・助教授

〔経歴〕1981 年京都大学工学部工業化学科卒業, 1984-85 年スイス連邦ローザンヌ大学博士課程(Schlosser 教授), 1986 年京都大学大学院工学研究科博士課程修了(工学博士), 1986 年京都大学工学部助手, 1988-89 年米国スタンフォード大学博士研究員(Trost 教授), 1995 年より現職。〔受賞歴〕1986 年井上科学財団奨励賞, 1998 年有機合成化学協会奨励賞。〔専門〕有機材料化学, 有機合成化学

大脇幸一郎 京都大学大学院工学研究科・教授

〔経歴〕1970 年京都大学工学部工業化学科卒業, 1975 年京都大学大学院工学研究科博士課程修了(工学博士), 1975-77 年米国 MIT 博士研究員(Sharpless 教授), 1977 年京都大学工学部助手, 1984 年京都大学工学部講師, 1986 年京都大学工学部助教授, 1993 年より現職。〔受賞歴〕1983 年有機合成化学協会奨励賞。〔専門〕有機材料化学, 有機合成化学。〔連絡先〕

松原英一郎 東北大学金属材料研究所・教授

〔経歴〕1977 年京都大学工学部冶金学科卒業, 1979 年京都大学大学院工学研究科冶金学専攻修了, 1984 年米国ノースウエスタン大学大学院材料化学専攻博士課程修了(Ph.D.), 1984 年東北大学選鉱製錬研究所助手, 1992 年同講師, 1993 年京都大学工学部材料工学助教授を経て, 2000 年より現職。〔受賞歴〕1991 年財団法人村上記念会奨励賞受賞, 1996 年日本金属学会功績賞受賞(物性部門), 1999 年日本金属学会技術開発賞受賞。〔専門〕材料物性学, 材料回析評価学。〔連絡先〕