高分解能固体 NMR の原理と応用

東京大学教養学部 錦織紳一

Shin-ichi NISHIKIORI: High Resolution Solid State NMR and its Application in Crystal Structure Study

High resolution solid state nmr gives information about structure of local sites in solid state samples, and has an advantage over X-ray diffraction method at the point of reflecting difference between nucleuses with near atomic numbers. An outline of CP/MAS nmr, which is a typical high resolution solid state nmr technique, is given here. And, problems of orientational disorder of bridging cyano groups in metal cyanide complexes are introduced as an actual crystal structure study using solid state nmr and diffraction method.

現在固体サンプルの研究手法としてなくてはならないものになりつつある高分解能固体 NMR と X 線結晶構造解析との併用による研究例を紹介する。X 線回折法から得られる空間的、時間的平均構造の情報に対し、固体 NMR より得られるのは局所的構造の情報であるとはよくいわれるが、これとは別に X 線回折法にない NMR の特色がひとつある。それは、X 線構造解析では近い原子番号を持つ原子の区別が難しいが、NMR では明確にその差があらわれるということである。最も、後の例で示すように実際の応用においては、これは先にあげた特色と関連してくる場合が多い。ここでは、粉末サンプルの高分解能 NMR のいわば標準的な測定法である ^{13}C 核の CP/MAS 法について解説した後、X 線回折法では不明確だった結晶構造に決着をつけた例を紹介する。

1. CP/MAS 法を中心とした高分解能固体 NMR の手法

高分解能固体 NMR では核スピン系に対して考慮すべき 3 つの相互作用がある。(1) ゼーマン相互作用。NMR は静磁場 (外部磁場) 中にサンプルを置き、ゼーマン相互作用によって分裂した核スピン (I) のエネルギー準位間の遷移を観測する手法である。従ってゼーマン相互作用はスピン系が受ける主たる効果となる。なお、 ^{13}C 核の場合スピンが $1/2$ なのでゼーマン相互作用によって生じる核スピンの状態は $1/2$ と $-1/2$ のふたつである。(2) 双極子-双極子相互作用。 ^{13}C 核は外部磁場のほかに、まわりにある ^1H 核 (スピン $1/2$) から直接磁氣的相互作用を受ける。これら ^1H 核の数は多くその方位、距離はさまざまであるため ^{13}C 核の受ける影響の程度もさまざまである。その重ねあわせとして粉末サンプルのシグナルは

ブロード化する。 ^{13}C 核どうしの相互作用は ^{13}C 核の天然存在度が低い (1.1%) ので無視できる。(3) 化学シフトの異方性の効果。分子中の ^{13}C 核は周囲の電子により外部磁場からの遮蔽を受けるため、本来の共鳴周波数からシフトした位置に共鳴線を与える。固体サンプル中では分子の方位はさまざまに固定されているため、個々の ^{13}C 核の受けるシフトもまちまちとなる。(2) と同じくシグナルのブロード化につながる。なお、一般に溶液サンプルの NMR では極めてシャープなピークが得られるが、それは (2) と (3) の効果が分子の等方的な運動によって平均化され、効いてこないからである。

次に、 90° パルスによる普通の NMR 測定についてベクトルモデルで説明する。自由スピンは磁気モーメント $\mu = \gamma \hbar I$ (スピン角運動量 $\hbar I$, 核磁気回転比 γ) を持つ系である。これが外部磁場 (H) 中に置かれゼーマン相互作用を受けると以下ようになる。磁気モーメントは、 H との相互作用により配向しようとして $\mu \times H$ のトルクを受ける。トルクは角運動量の変化に等しいので $\gamma (\mu \times H) = d\mu/dt$ となる。外部磁場の方向を z 軸 ($H_x = H_y = 0$, $H_z = H_0$) として、これを解くと、磁気モーメントが z 軸の回りで角速度 ($\omega = \gamma H_0$) で歳差運動をすることが示される。多数の磁気モーメントの集団を考えると、ひとつ、ひとつの磁気モーメントは上の歳差運動をおこなうが、それぞれの位相は異なっているので、すべてをたしあわせた巨視的磁化ベクトルは、外部磁場に垂直な x, y 軸方向には平均化してゼロ、外部磁場と平行な z 軸方向にはゼロでない成分を持つことになる (図 1)。この描像はゼーマン相互作用により 2 つに分裂したエネルギー準位間で熱平衡にある核スピンの分布状態に対応する。いま z 軸を回転軸として角速度 ($\omega = \gamma H_0$) で回転している回転

図1 90° パルスによる NMR 測定。(上) ベクトルモデルによる描像。(下) 時間に沿った測定手順。

座標系に乗ることにする。回転座標系では個々の磁気モーメントは静止してみえる。ここで、回転座標系上でみて直流の励起磁場（すなわち静止系では周波数 $\omega/2\pi$ の高周波磁場となる）を回転座標系の x' 軸方向からかける。すると巨視的磁化は x' 軸周りに回転を始めある時間たつと回転座標系の y' 軸上に倒れる。ここで励起磁場を切つてやる。これが 90° パルスである。 y' 軸上にいったん倒れた磁化は、緩和過程を経て元の平衡状態、すなわち z 軸に沿って立っていた状態にもどっていく（図1）。フーリエ変換 NMR では、元の状態に戻っていく巨視的磁化の運動により誘起される信号（Free Induction Decay, しばしば FID と略）を x あるいは y 軸に固定したコイルで検出し、後にフーリエ変換をしてスペクトルを得ている。以上は、90° パルスによる NMR 測定法である。

一方、もっぱら固体サンプルを対象とする CP/MAS 法では (1) ^1H 核から ^{13}C 核へ磁化を移動させて ^{13}C 核の磁化を行い（交差分極, Cross Polarization）、(2) 高出力デカップリングにより ^1H 核からの双極子-双極子相互作用を消去し、(3) Magic Angle Spinning により化学シフトの異方性の消去を行い、鋭化したスペクトルを得ている。まず、 ^1H 核に対し 90° パルスをかけ、 ^1H 核の巨視的磁化を回転座標系の y' 軸上に倒す。次に y' 軸方向から強度 H_{1H} の磁場をかけ続ける。これにより ^1H 核の巨視的

図2 交差分極による NMR 測定の手順。

磁化は回転座標系の y' 軸上に固定される（スピンロック）。個々の ^1H の磁気モーメントは y' 軸を中心軸として $H_{1H}\gamma_H = \omega_H$ で才差運動をする。同時に ^{13}C 核の回転座標系の y'' 軸方向から $H_{1H}\gamma_H = H_{1C}\gamma_C$ （Hartmann-Hahn の条件）を満たす強度の磁場をかける。これにより ^1H 核の磁気双極子も ^{13}C 核の磁気双極子も同じ速度 ω_H で運動をしていることになる。これは回転座標系でのゼーマン分裂が ^1H 核と ^{13}C 核で等しくなっていることに相当する。このような状況下では ^1H 核と ^{13}C 核間で双極子相互作用によりエネルギー交換が可能になり、それに伴い磁化の移動が誘発される。その結果、最終的な平衡状態は、 ^{13}C の存在度に比べ ^1H 核の存在度が大きいので、 ^1H 核の平衡状態に極めて近くなる。励起状態の核の占有数はゼーマン分裂のエネルギーに比例するので最終的に得られる ^{13}C 核の磁化は通常の場合の約 4 倍（ $-\gamma_H H_0 I - \gamma_C H_0 I \approx 4$ ）となる。十分 ^{13}C 核に磁化が移動した段階で ^{13}C 核にかけていた磁場を切る。すると ^{13}C 核の磁化は 90° パルスの NMR の場合と同じように、緩和過程を経て z 軸方向に戻っていく。この時の FID を観測するが、この間、 ^1H 核には引き続きパルスをかけ続ける。このパルスは ^1H 核からの双極子-双極子相互作用を消去する働きをする（高出力デカップリング）。すなわち、この段階では ^1H 核と ^{13}C 核では同じ速度で運動していないので、 ^{13}C 核から見ると ^1H 核は高速反転運動をしているように見える。この反転運動のため ^1H 核から生じる磁場は平均化され、 ^{13}C 核が ^1H 核から受ける双極子-双極子相互作用は消去される（図2）。

以上は交差分極と高出力デカップリングの手法であるが、同時にサンプル・セルを外部磁場に対して傾き 54.7° の軸を回転軸として高速回転させる Magic Angle Spinning を行う。これにより化学シフトの異方性を消去する。これはサンプルを外部磁場に対して θ 傾けた軸回りに回転させた時の時間平均化学シフトテンソルの z 成分が等方

平均シフトの成分と $(3\cos^2\theta - 1)$ に依存する成分よりなることによる。2番目の成分は $\theta = 54.7^\circ$ (Magic Angle) とすれば消去でき、溶液サンプルの化学シフトと同様の等方平均値に対応するピークのみが観測される。最も、化学シフトの異方性が大きい時はこのピークの両側、回転数の間隔だけ離れた位置にスピニング・サイド・バンドがあらわれ、スペクトルを複雑にする。このような場合にはいくつかの回転数で測定を行う。サイドバンドは回転数によりその位置を変えるが、真のピークの位置は動かないので両者は識別できる。この回転操作のため CP/MAS 用のプローブは独特の構造を持っている。プローブの性能に依存するが通常 3000Hz ~ 6000Hz ぐらいの回転をかけることが多い。¹⁾⁻⁴⁾

CP/MAS 法でなければ先鋭化したスペクトルが得られない、というわけではない。実際にはサンプルに応じて交差分極の効率、双極子-双極子相互作用の程度をみはからって適切な方法を選ぶ必要がある。図3には、チューニング時のテスト・サンプルとしてよく用いられるヘキサメチルベンゼンの ^{13}C -NMR を CP/MAS 法 (図3 (A)) をはじめいろいろな方法で測定した結果を示した。図3 (B) は 90° パルス、高出力デカップリング、MAS によるスペクトル、図3 (C) は 90° パルスと MAS によるスペクトルである。各々でスペクトルの様子が異なるのは、 90° パルス法ではすべての ^{13}C 核が同等に磁化されるのに対

し CP 法では ^{13}C 核の環境によって交差分極の効率に差が生じるためである。例えば、 90° パルス法ではベース・ラインが盛り上がっているが、これはサンプル・セルの素材中に含まれるテフロン ^{13}C 核によるシグナルである。これは CP/MAS 法ではまったく観測されていない。また、測定時間の問題も現実問題として重要である。CP/MAS 法の場合は存在度の希薄な ^{13}C 核の長い緩和時間を ^1H の短い緩和時間まで短縮できる、すなわち一回あたりのデータ測定時間を短縮できデータ積算の効率を上げ得る利点があるが、 90° パルス法の場合は ^{13}C 核の長い緩和時間を覚悟しなければならない。図3 (D) は MAS をかけないで測定したスペクトルであるが、化学シフトの異方性がそのまま現れている。メチル基の炭素のシグナルは比較的シャープであるが、ベンゼン環の炭素のシグナルは幅のひろい、いわゆる軸対称のパターンとなっている。この形よりヘキサメチルベンゼンは分子の6回対称軸を中心軸とした回転運動をしていることが示唆される。先鋭化され高分解能で記録されたスペクトルは確かに素晴らしいものであるが、失う情報もあることは念頭に入れておくべきだろう。

2. シアン化合物のシアノ基の配向問題への 高分解能固体 NMR の応用

ここ数年来、筆者らはカドミウムを中心とするシアン化合物の構造化学を手掛けてきた。すなわちシアノ基 (CN^-) がしめす両端架橋構造を利用した多次元骨格構造の構築とその構造化学を解明することを主眼とした研究である。ことの起こりは $\text{Cd}(\text{CN})_2 \cdot \text{G}$ という包接化合物の合成がきっかけとなり始まった。⁵⁾ 包接化合物 $\text{Cd}(\text{CN})_2 \cdot \text{G}$ は図4に示すような四面体4配位の Cd 間を架橋シアノ基が結んでできたダイヤモンド型ホスト格子 $\text{Cd}(\text{CN})_2$ の中にゲスト分子 (G) が包接されている化合物である。ゲスト分子として四塩化炭素、シクロヘキサン等が可能である。この結晶構造は単結晶 X 線構造解析により決定されたが、その際問題となったのは、Cd 間を結んでいるシアノ基の配向であった。すなわち、シアノ基の配向が図4 (B) に示すような order した状態にあるのか、あるいは図4 (A) に示すような disorder した状態にあるのか、というわけである。order 構造だと Cd には2種類、すなわち Cd に N が四つ配位した Cd (これを CdN_4 と記すことにする) と、C が4つ配位した CdC_4 の2種類がある。また、disorder 構造だと、X 線構造解析的には CdX_4 という一種類の Cd が存在することになるが、X は50%の確率で C か N のどちらかであるから、実際には CdC_4 , CdC_3N , CdC_2N_2 , CdCN_3 , CdN_4 の5種類の Cd が存在することになる。 $\text{Cd}(\text{CN})_2 \cdot \text{G}$ の構造は一応空間群から後者の disorder 構造であることが示唆されたのであるが、包接体ではない化合物 $\text{Cd}(\text{CN})_2$ そのものの構造は、古くから粉末 X 線回折より前

図3 ヘキサメチルベンゼンの ^{13}C NMR. 17ppmにメチル基の炭素、132ppmに芳香環の炭素のピークが見える。*はすべて132ppmのピークのスピニングサイドバンド。MASにおけるサンプル回転速度は5000Hz。(A) CP/MAS法によるスペクトル。(B) 90° パルス、高出力デカップリング、MASによるスペクトル。(C) 90° パルス、MASによるスペクトル。線幅、SN比に双極子-双極子相互作用の影響が出ている。(D) CP、高出力デカップリングによるスペクトル。

図4 $\text{Cd}(\text{CN})_2 \cdot \text{G}$ のホスト構造。ダイヤモンド型ホスト格子の内部には直径約7 Åの空孔があり、そこにゲスト分子が包接される。(A) disorder 構造。シアノ基の配向に disorder があるため、Xは50%の確率でCかNとなる。(B) order 構造。シアノ基の配向に秩序がある構造。

図5 $\text{Cd}(\text{CN})_2$ の構造。白と黒の二つのダイヤモンド型格子が相互貫入して格子内の空孔をつぶしている。

者の order したダイヤモンド型格子がふたつ互いに貫入した、いわゆる逆赤銅鉱型構造をとるとされていた^{6,7)} (図5)。構造的に大差ないと思われる2つの構造の間にこれだけの差が生じるのを疑問に思うのは当然だろう。そこで、 ^{113}Cd 核の NMR の測定が行われた。⁸⁾ ^{113}Cd は 1/2 のスピンを持ち、その配位環境によって大きく化学シフトが変化するので両者の構造を見極めるのには都合のよい核種である。包接体のスペクトル測定には $\text{Cd}(\text{CN})_2 \cdot$

図6 (A) $\text{Cd}(\text{CN})_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_{12}$ の ^{113}Cd MAS NMR スペクトル。(B) $\text{Cd}(\text{CN})_2$ の ^{113}Cd MAS NMR スペクトル。両者において disorder 構造の5種類のCdに対応する5つのピークが観測された。*はスピニングサイドバンド。化学シフト (δ) は $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ を外部標準とした値。

C_6H_{12} すなわちシクロヘキサン包接体を用いられた。これはサンプル中に ^1H 核を多く含ませ交差分極の効率をあげようとのねらいがあったが、ゲスト分子シクロヘキサンに大きな分子運動がありほとんど交差分極が効かず、結局 ^{113}Cd 核への 90° パルスと MAS での測定となった。図6 (A) にスペクトルを示す。⁸⁾ サイドバンドが乱立していて複雑であるが、いくつかのサンプル回転速度で測定を行い、5本の独立したシグナルを確認した。その結果、disorder 構造が正しいと判定できた。一方、 $\text{Cd}(\text{CN})_2$ についても NMR 測定を行った。このサンプルはもともと ^1H 核を含んでいないので、始めから 90° パルスと MAS により測定した。結果は図6 (B) である。⁸⁾ order 構造なら2本のピークしか現れないはずであるが5本のピークが確認されたので、この場合も disorder 構造が正しいと判定された。これに基づき、我々は $\text{Cd}(\text{CN})_2$ に対して従来いわれてきた空間群 $P43m$ に対し新たな空間群 $Pn3m$ を採用した構造を提案している。^{9),10)}

この、 $\text{Cd}(\text{CN})_2 \cdot \text{G}$ 包接体をきっかけとして Cd-CN 系の多次元骨格構造を有する数多くの化合物が、海外を含む多くの研究者により合成、構造決定され、それは現在も継続されている。その中には、3次元的な骨格構造の基

図7 $\text{Cd}(\text{CN})_2 \cdot 2/3\text{H}_2\text{O} \cdot \text{tBuOH}$ のホスト構造. Cdには4つのシアノ基と2つの H_2O 分子が配位した6配位構造のものと、4つのシアノ基が配位した4配位構造のものがある. ゲスト分子 tBuOH は図示されていない. (A) R. Robsonらが示した構造. (B) ^{113}Cd CP/MAS スペクトル (図8) より推定される構造.

本的な骨組みについては疑問はないものの、架橋シアノ基の配向については問題を含んでいるものがあると思われる。ひとつ、 $(\text{CH}_3)_3\text{COH}$ (tBuOH と略記) をゲストとした包接体 $\text{Cd}(\text{CN})_2 \cdot 2/3\text{H}_2\text{O} \cdot \text{tBuOH}$ の例をあげる。この化合物は R. Robson らにより合成され、構造決定が行われた。^{11), 12)} $\text{Cd}(\text{CN})_2 \cdot \text{G}$ と類似の条件からまったく異なるホスト構造が生成する点で構造化学的に意味のある仕事であるが、架橋シアノ基の配向については疑問があった。R. Robson らは空間群 $\text{Amm}2$ を採用し、それに合致した order したシアノ基配向を考えているが、化学的に等価と考えられる Cd にわざわざ区別をおいたいかにも不自然なシアノ基の配向状態である (図7 (A))。彼らの構造からは3種類の Cd があることになるが ^{113}Cd -CP/MAS NMR (図8) からは4種類の Cd の存在が示された。これに基づいて図7 (B) に示す disorder 構造を考えると、先の二つの Cd も平均構造として等価となり自然な構造に落ち着く。¹³⁾

NMRの方法はカドミウムのシアノ化合物では非常に

図8 $\text{Cd}(\text{CN})_2 \cdot 2/3\text{H}_2\text{O} \cdot \text{tBuOH}$ の ^{113}Cd CP/MAS スペクトル. 4種類の Cd の存在を示す.

うまくいったが、常にどの元素についてうまくいくとはかぎらない。この架橋構造シアノ基の配向問題は、今に始まったことではなく、1960年代から銅のシアニ化物の結晶構造において問題となっていた。そして、我々 X 線構造解析を手掛けるものは誰でも御厄介になる原子散乱因子のデータで有名な D. T. Cromer を悩ませた問題でもあった。¹⁴⁾ 銅の化合物の NMR 測定は可能ではあるが、銅が四極子核であるため (前節では考察していない要因によって) 単純ではない。現実には、よほど銅まわりの構造対称性がよくないかぎりシグナルがブロードになりピークとしてとらえることができない。銅 (I) シアニ化物の場合、正四面体 4 配位構造の CuC_4 , CuN_4 なら測定可能であるが CuC_3N のような構造になると実際上不可能となる。したがって、銅のシアニ化物の場合は残念ながら Cd のシアニ化物のように NMR は使えない。核種によって明確に差がでるものの、逆にいえば核種を選ぶという点が、どんな原子でも同じように観測できる回折法とちがって NMR の短所といえる。最も、場合によっては特殊な工夫をこらすとによって NMR も使えないわけではない。シアニ化合物 $[\text{N}(\text{CH}_3)_4][\text{CuZn}(\text{CN})_4]$ は $\text{Cd}(\text{CN})_2 \cdot \text{G}$ のホスト格子と同構造のダイヤモンド格子骨格を持っている。すなわち、Cd のかわりに Cu と Zn が格子骨格の構成原子となっている。そして、格子骨格の電荷が -1 となるので、電荷のバランスをとるため格子骨格の空孔に $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]^+$ がゲストのように入り込んでいる。Cu と Zn の原子番号がとなりあっているために、この化合物においては金属原子自体の配置の order, disorder さえ X 線回折法からは判定困難であった。¹⁵⁾ この問題の解決には ^{13}C と ^{15}N をenrichしたサンプルの ^{13}C -MAS NMRが用いられた。¹⁶⁾ 得られたシグナルは4本に分裂しており

これはCuと ^{13}C とのスピンスピン相互作用によるものと帰属された。すなわち、Cuは ^{63}Cu （天然存在度69.09%）と ^{65}Cu （30.91%）よりなっており、両者ともスピンは3/2であるので外部磁場中におかれた核スピンの状態として3/2, 1/2, -1/2, -3/2の4種類がある。これらが ^{13}C 核と相互作用して4本に分裂したスペクトルを与える。さらに、 ^{63}Cu , ^{65}Cu で相互作用の大きさが異なるため、スペクトルは4本に分裂するとともに微細構造を示した。一方、Znはスピンスピン5/2（ ^{67}Zn , 4.11%）であるため、もしZnが隣接していればスペクトルの様子は異なってくる。このことよりCに結合しているのはCuであり、この化合物では金属およびシアンすべての原子はorderして配置していると結論された。¹⁶⁾ 魅力的な方法ではあるが、enrichしたサンプルが必要という点で常に可能な方法ではないのがつらいところである。

以上、筆者の身近な例をいくつかとりあげた。現在、固体サンプルも取り扱えるNMR装置が普及しつつあり、とうに高分解能固体NMRは特別な測定法というイメージは払拭されたと思う。要は何に使うか、何に使えるか、工夫しだいである。

文 献

- 1) 化学総説 No.49, 1986, 新しい磁気共鳴と化学への応用, 日本化学会編, 学会出版センター (1986)。
- 2) 現代化学増刊 11, 高分解能NMR —基礎と新しい展開—, 斎藤肇, 森島績 編, 東京化学同人 (1987)。
- 3) 第4版 実験化学講座 5 NMR, 日本化学会編, 丸善 (1991)。
- 4) 高分子の固体NMR, 安藤勲編, 講談社サイエンティフィク (1994)。
- 5) T. Kitazawa, S. Nishikiori, R. Kuroda and T. Iwamoto: *Chem. Lett.* **1988**, 1729-1732.
- 6) H. Zhdanov: *C.R. Acad. Sci. USSR*, **31**, 352-354 (1941)。
- 7) E. Shugam and H. Zhdanov: *Acta Physicochemica, USSR* **20**, 247-252 (1945)。
- 8) S. Nishikiori, C. I. Ratcliffe and J. A. Ripmeester: *Can. J. Chem.* **68**, 2270-2273 (1990)。

- 9) T. Kitazawa, S. Nishikiori, R. Kuroda, A. Yamagishi and T. Iwamoto: *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **1992**, 413-415.
- 10) T. Kitazawa, S. Nishikiori, R. Kuroda and T. Iwamoto: *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* **1994**, 1029-1036.
- 11) B. F. Abrahams, B. F. Hoskins and R. Robson: *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **1990**, 60-61.
- 12) B. F. Abrahams, B. F. Hoskins and J. Liu, R. Robson: *J. Am. Chem. Soc.* **113**, 3045-3051 (1991)。
- 13) S. Nishikiori, C. I. Ratcliffe and J. A. Ripmeester: *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **1991**, 735-736.
- 14) D. T. Cromerは銅シアン化物のシアノ基配向問題に対しValence-electron population parameterを用いて回折学の立場から対処している。D. T. Cromer and A. C. Larson: *Acta Cryst.* **B29**, 251-253 (1973)。
- 15) B. F. Hoskins and R. Robson: *J. Am., Chem. Soc.* **112**, 1546-1554 (1990)。
- 16) R. D. Curtis, C. I. Ratcliffe and J. A. Ripmeester: *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **1992**, 1800-1802.

プロフィール

錦織 紳一 Shin-ichi NISHIKIORI

東京大学 教養学部 広域科学専攻 関連基礎科学系,
〒153 東京都目黒区駒場3-8-1

Department of Basic Science, Graduate School of
Multi-Disciplinary Sciences, The University of Tokyo,
3-8-1, Komaba, Meguro, Tokyo 153, Japan

TEL. 03-5454-6569 FAX. 03-3485-2904

e-mail: nskor@tansei.cc.u-tokyo.ac.jp

最終学歴：東京大学理学系研究科化学課程博士課程
1980年中途退学

専門分野：錯体化学, 包接体化学

現在の研究テーマ：新規な構造を持つ包接化合物
の合成とゲスト分子の動的挙動の研究

趣味：テニス, 時代小説の乱読など