その場計測法

測定法
講座*In situ* ラマン分光法

二又 政之

1 はじめに

近年、走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope, STM) や原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope, AFM) をはじめとして表面 X 線散乱法 (Surface X-ray Scattering, SXS) などの進歩により、固/液界面で起こる構造変化を原子・分子レベルでとらえられるようになってきた。しかし、これらの手法では吸着種の同定を初めとして、配向性や基板との相互作用などの詳細な情報を直接得ることは困難である。この目的に対して原理的に重要な情報を与え得る振動分光法が、高感度法の開発により従来では得られなかった新しい知見を提供することができるようになってきた。ラマン分光法の原理と電気化学系への適用を含めた実験法の詳細についてはすでに多くの成書が出版されているので¹⁻⁴⁾、ここでは、表面プラズモンを利用したラマン分光法の高感度化の手法及びその固液界面への適用結果について解説するとともに、最近注目されているラマン分光法による単一分子検出の試みや近接場光学顕微鏡 (Scanning Near-field Optical Microscopy, SNOM) とラマン分光法の複合化などについて、今後の展望を含めて概説する。

2 ラマン分光法とは

ラマン分光法は、振動数 ν_i を持つ光 (通常は可視領域のレーザー光) を物質に照射するとき、入射光と異なる方向に $\nu_i \pm \nu_1, \nu_i \pm \nu_2, \dots$ の振動数を持って散乱されてくる微弱な光を検出するものであり ($\nu_1, \nu_2, \dots$: 分子の振動エネルギー)、選択則は、「分極率が振動モードにより変化すること」で、赤外吸収分光法とは相補的な関係にある³⁾。入射光の偏光方向や入射角の制御により、振動スペクトルから表面吸着種の構造、対称性、配向性、基板との相互作用及びその電位依存性などに関する詳細な情報が得られる。またラマン分光法では赤外分光法とは異なり、低波数領域まで溶媒の妨害がなく、吸着種と金属電極との相互作用について直接情報を得ることができる。まだ報告はないが、電極表面近傍の水の会合状態について、レーラー散乱の解析により詳しい情報が得られる可能性があることを指摘しておきたい⁵⁾。一方で、ラマン散乱の起こる確率 (散乱断面積: $10^{-30} \text{ cm}^2/\text{molecule}$) は、赤外吸収 ($10^{-20} \text{ cm}^2/\text{molecule}$) や電子エネルギー損失分光 ($10^{-16} \text{ cm}^2/\text{molecule}$) に比べて著しく小さい。そのため、ラマン分光法を、①集光系・検出器を含めた分光計の高効率化及び②散乱断面積を何らかの共鳴効果により増強することで高感度化する必要がある。

3 表面増強ラマン散乱 (SERS)^{2-4, 6, 7)}

電気化学的に粗された金属表面に吸着した化学種のラマンバンド強度が大きく増強されることは、最初 Fleischmann らにより 1974 年に報告された⁸⁾。当初は単に電極表面積の増大によるものと考えられていたが、のちに Van Duyne (1977) 及び Creighton (1977) により、吸着種のラマン散乱が 10^5 - 10^6 倍増強されていることが確認され、多くの研究者の注目を集めることになった (表面増強ラマン散乱, Surface Enhanced Raman Scattering, SERS): 原子レベルから波長程度の粗さを持つ金・銀・銅などの自由電子金属表面の吸着種のラマン散乱強度は 10^5 - 10^6 倍増強される)。一般に、飽和炭化水素や C-H 伸縮振動モードは、 π 電子系の特定の振動モードに比べて小さな増強度を示すなど化学種及び振動モード選択性が存在する⁶⁾。これまでに SERS について膨大な研究が行われてきたが、種々の条件下で作成された金属薄膜 (電気化学的酸化還元処理、化学エッチング、低温蒸着、還元による金属コロイド生成など) で観測されるスペクトルには、以下に述べる二つのメカニズムが混在しており、それらが定量的にどのように支配しているかは十分には明らかになっていない。(1) 化学的機構 [電荷移動 (CT) メカニズム]: 原子レベルでの粗さにより吸着種側にしめだした金属表面電子が、増強された電子-光子相互作用を通して、入射光によって第一層吸着種の最低空軌道 (Lowest Unoccupied Molecular Orbital, LUMO) へ (あるいは逆に最高被占軌道 (Highest Occupied Molecular Orbital, HOMO) から金属のフェルミ準位に) 励起される。この電荷移動吸収エネルギーに入射光が共鳴することで、大きな散乱光強度を与える。この第 1 層効果 ('first-layer SERS') は、共鳴ラマン効果であるので化学種及び振動モード選択性を有する⁶⁾。(2) 電磁氣的機構 (Electromagnetic Mechanism, EM): 金属微粒子に局在する表面プラズモン (Localized-Surface-Plasmon-Polariton, (LSPP)) が、表面粗さを通して入射光により励起され、その局所電場により吸着種のラマン散乱が増強される⁷⁾。この場合には、金属微粒子間の相互作用が局所電場に大きな影響を与えており、数分子層の有効距離を持つとされている。微粒子表面での分子配向性と局在 SPP 電場の大きな異方性 (局所表面に垂直な方向に著しく大きい) が、増強度の見かけの選択性を与える。これらの理由で、現状では観測されたスペクトルがどのようなサイトに吸着した化学種からのものであるのか不明である (平均としての吸着状態を示しているのか疑問)。そのため一般には、単結晶表面のボルタンメトリ、STM、SXS、EQCM などと対応させ

て議論するのが困難である。一方で、蒸着条件の制御により、(111) テラスを支配的に有しながら、IR 領域で十分大きな増強度（赤外反射吸収分光法 (Infrared Reflection Absorption Spectroscopy, IRAS) に比べて 100 以上）を示す金薄膜が調製できることが確かめられている^{9,10)}。今後はこのような配向膜を用いた SERS の観測が、高感度分光計¹¹⁾との複合化により有効と考えられる。

電気化学系への適用例としては、銀電極表面の水分子の状態について、カチオンの水和エネルギーが小さいとき (Cs^+ , Rb^+ , K^+) 3510 cm^{-1} 付近にシャープで対称的な O-H 伸縮振動 ($\nu\text{O-H}$) バンドが、水和エネルギーが大きいとき (Na^+ , Li^+ など) 3550 cm^{-1} 付近に幅広く非対称なバンドが観測された^{2,3,12)}。これらの電位依存性等から前者では水分子は酸素側で電極に吸着しており、後者では水分子は酸素側を外部ヘルムホルツ層のカチオンに向けて配向していると解釈されている。この場合、SERS 活性点の同定が困難であることや、特異吸着するハロゲンイオンを用いているために問題が複雑になっている。最近、電気化学触媒としても重要な遷移金属系への適用法として、SERS 活性な金表面に微小欠陥のない (pinhole-free) の Pt, Pd, Rh, Ir などの遷移金属薄膜 (1.0 ML-50 ML, ML: 単原子層) を電気化学的に調製する手法が開発された¹³⁾。このとき、電気化学的応答及び吸着した CO のラマンスペクトル、増強度の励起波長依存性などから、下地金属の効果だけではなく Pt などの遷移金属表面自身の SERS 効果が確認されている。それによりハロゲンと遷移金属との相互作用の違いが系統的に調べられている。生体物質系への適用は、SERS の増強メカニズムの解明が非常に重要であり、CT が支配的であれば、表面での特性を解析できるし、EM が効果的であれば、タンパクの 3 次元構造などについての情報が得られる可能性がある。最近、Fredericks らは、金属コロイド系に比べて表面電位が制御しやすい酸化還元処理した銀電極を用いて、19 種のアミノ酸及びペプチドについて、中性条件で zwitterion として存在し、基板とカルボキシル基で化学吸着していることなどの共通した特徴を見だし、カルボキシル基と銀との相互作用や、アミド I, III のバンドの比較から 2 次構造を議論している¹⁴⁾。いずれにしても、SERS はミクロな表面粗さを必要とするので、吸着サイトが規定される単結晶金属表面に対しては適用が困難である。一方で、全反射減衰法 (Attenuated Total

Reflection, ATR) により平滑な金属表面のプラズマ振動 (Surface Plasmon Polariton, SPP) を利用する ATR-SPP ラマン分光法は、粗さを必要とせず単結晶金属表面への適用が可能であるという点で重要である¹⁵⁾。

4 ATR-SPP-ラマン分光法¹⁵⁻¹⁸⁾

実験方法や得られた結果の詳細は、すでに別のところで詳しく紹介した¹⁵⁾。紙面の都合上ここでは要点のみまとめる。SPP の分散関係 (エネルギーと運動量の関係) から明らかのように、光を直接平滑な金属表面に照射しただけでは SPP を励起することはできない。ところが ATR 法などを用いて、入射光と SPP の波数ベクトルの大きさが一致するように入射角を選べば、光によって SPP が励起できる (粗い表面の LSPP とは異なり伝搬性 SPP)^{19,20)}。実際の SPP 励起光学系は Fig. 1 に示すプリズム底面から空隙を隔てて金属表面を置く Otto 配置¹⁹⁾とプリズム底面に直接金属を蒸着した Kretschmann 配置²⁰⁾とが知られている。SPP を効率的に励起するためには、前者ではギャップ厚さを、後者では金属膜厚を最適にする必要がある。我々はこの ATR-SPP ラマン分光法を確立するために、SPP 共鳴条件及びラマンバンド強度の構成要素である金属、吸着種、媒質、プリズムの誘電率・厚さ・励起波長に対する依存性について、おもに Otto 配置を用いて詳細に検討してきた¹⁶⁻¹⁸⁾。特徴: ①プリズム側で入射、集光するとき、増強された電場の減衰距離は約 16 nm であり、この手法は表面選択的である。②金・銀・銅などの金属系はもちろんのこと、白金、ニッケルなど減衰の大きな遷移金属系への適用が可能である (Table 1¹⁷⁾)。さらに③単結晶金属表面の吸着種が優先配向している場合には、増強度の理論値と実測値の比較から配向性の情報が得られることが明らかとなった¹⁶⁾。④拡散制限の問題がない Kretschmann 配置を用いて、電気化学系に適用することが可能である。自己組織化単分子膜として知られる *p*-ニトロチオフェノール (PNTF) の電気化学的還元過程の詳細や金属から *p*-アミノチオフェノール (PATF) の LUMO への電荷移動共鳴が確かめられた¹⁶⁾。

5 ラマン分光法による単一分子検出

最近いくつかのグループにより SERS を利用した単一分子検出が報告されている²¹⁻²⁵⁾。単一分子分光として先行する

Fig. 1 Optical set up for ATR-SPP Raman spectroscopy. (a) Otto configuration, (b) Kretschmann configuration.

Table 1 Enhancement factor for CuPc (6 nm in thickness) on various metal surfaces under SPP resonance.

Wavenumber (cm ⁻¹)		Enhancement*						
		Au [†]	Cu [†]	Ag	Ag In water**	Pt 3.5 [‡]	Pt 8.6 [‡]	Ni 4.5 [‡]
1535	A _{lg}	49.9	22.6	275	1228	288	164	24.5
Theory***								
	Random	25	24	354	1080	40	30	26.5
	Parallel	44	37	5710	9340	250	243	270
	Vertical	13	14	29	53	7.5	4.8	4.5
1457	B _{lg}	41.6	20.5	288	1305	291	163	23.7
1346	A _{lg}	55.4	22.5	286	1322	261	180	21.7

*Normalized to the external geometry, **In water, others in air, ***For random, parallel or perpendicular orientation of CuPc to the Pt surface, [†]Excited at 632.8 nm, others at 514.5 nm, [‡]Thickness of CuPc.

Fig. 2 AFM image of the Ag colloidal by NaBH₄ method. (a) as-grown isolated particles, (b) aggregated particles with the addition of dye and NaCl.

蛍光分光法に比べて、分子構造・吸着状態などについてより詳しい情報が得られるために、この方法が注目を集めている。通常の顕微ラマン分光法を用いた SERS 測定では、波長より小さな粗さを有する表面を (φ 1 μm 程度の) マクロにとらえているために、非常に大きな増強度を有する活性点が少数存在しても、統計平均されて、見かけ上より小さな増強度として観測される可能性がある。単一分子検出の根拠として、彼らが提示していることは、視野の中の金属コロイド表面に吸着した分子数を減らしていき、平均分子数が 1 個以下になったとき、①ラマン信号の出現頻度と強度の関係がポアソン分布になること (視野内の分子数が 0, 1, 2... 個に対応した強度ピークの出現)²²⁾, ②同じ条件でラマン信号強度が時間とともに **blinking** (点滅) すること (吸着分子のコロイド表面での拡散)²¹⁾, ③回転楕円体微粒子の長軸方向に平行な偏光のときのみラマン散乱が観測されること (長軸に平行な方向の LSPP が励起される)²¹⁾, ④ストークス/アンチストークス光強度の比から、振動励起が著しく高い効率で起きていること²²⁾ (散乱断面積の著しい増大) などである。さらに秩序配列した金属粒子間の局所電場の理論計算や最適構造の予測、電子ビームリソグラフィを用いたその実験的な証明など、特に EM メカニズムの解明のための大きな進展がみられつつある²⁵⁾。一方で CT メカニズムに関連する孤立金属微粒子上の活性サイト、凝集系ではフラクタルにおける活性点の同定が今のところ明確には行われていない。この活性点の同定及び増強メカニズムを解明することは、SERS の高感度分光分析法としての適用性を大きく広げるものである。そこで、我々は金属コロイド微粒子の形状・サイズ・凝集状態を調製条件により制御しながら、AFM による微視的な構造と

LSPP 吸収スペクトル・ラマンバンドの増強の関係を詳細に検討している²⁶⁾。これまでの結果をまとめると：①AgNO₃ を NaBH₄ により還元して得られる直径約 20 nm の球状 Ag コロイドは、分散溶液への NaCl (1 mM) と色素 (10⁻⁷ M) の添加により凝集 (直径 ≤ 数 μm) を起こし (Fig. 2), LSPP によるシャープな吸収が 395 nm から長波長側に幅を広げながら大きくシフトする (Fig. 3a)。②凝集した Ag コロイド粒子からは大きな増強が観測された (Fig. 3b)。クリスタルバイオレット (CV) などのカチオン性色素だけでなく、DNA 塩基のアデニンなど可視部に吸収を持たない吸着種に対しても 10⁵-10⁶ の大きな増強が得られた。③これに対して、クエン酸還元法により得られる Ag コロイドは、最初から、球状、柱状、クラスター集合体など種々の形状・サイズ・凝集状態を持っている。この系では、凝集していない孤立コロイドからも大きな増強が得られる。しかもその値は、吸着色素量を少なくしていくとともに、次第に増加して、10⁻¹² M のとき 10⁸ の増強度を与えた。このとき Ag 粒子 1 個あたり平均 0.1 個の色素分子が吸着しているので (視野の中に約 4 個の色素分子に相当)、信号強度約 50 cts (488 nm 励起, 0.6 μW × 10 秒積算) であることから、感度が単一分子検出レベルであることを示している²⁶⁾。ラマン散乱光が時間とともに強弱を繰り返すことなどから、著しい増強を与える活性点の存在と、金属表面での色素分子の拡散が示唆された。

6 SNOM との複合化

すでに述べたように、化学種の吸着サイトの同定と同時に振動スペクトル測定を行うことができれば、SERS メカニズムの解明とその幅広い適用を図ることが可能となる。そのた

めには, SNOM²⁷⁾と振動分光の複合化が有効である. これは, 波長よりずっと小さな開口 (あるいは構造) に光を集光するとき, 微小開口近傍に局在する (伝搬しない) エバネッセント波が回折限界 ($\sim \lambda/2$) を超えた超解像像を有することにもとづいている. 波長より細かい構造を持つ試料を, 微小開口プローブ (光ファイバーや STM チップの先端を尖らせたもので先端の曲率で分解能が決まる) に十分接近させると, エバネッセント波は試料の電気双極子を励振し, その結果伝搬光に変換される. この光強度は, 試料とプローブの間の距離 (微視的構造) や, 試料の光学的性質を反映しているのので, そのような構造を持つ試料の表面に沿って微小プローブを走査すると, 試料の形状や光学的特性を回折限界を超えて観測することができる. この SNOM は, 60 年以上前に提案されたが, ①最近のプローブ顕微鏡の発展により試料-チップ間の距離および lateral 方向の nm サイズでの制御が可能となり, かつ②ナノメートルサイズのチップ, プローブ作成技術の進展により 1984 年に Pohl らや Lewis らにより独立にほぼ同時に実現された. 現状では, STM や AFM に比べて SNOM の空間分解能はチャンピオンデータで比較してもやや低い ($\leq$ 数 nm) が, 通常の顕微分光法では得られない分解能 (約 100 nm) で蛍光スペクトルやラマンスペクトルが測定されている²⁸⁾. この場合, 単分子層吸着種からのラマンスペクトル測定に比べて, さらに狭い領域からの信号光を検出しなければならないので, ここでまとめた高感度振動分光法が有用と考えられる. 即ち, 表面プラズモンを利用した振動分光法の高感度化は, 単に時間分解能を向上させるだけでなく, 空間分解の向上に寄与しうる.

我々は, この目的で ATR 配置により SNOM とラマン分光法の複合化を行っている²⁹⁻³¹⁾ (Fig. 4). プリズム側面から入射された励起光によりプリズム上面に滲み出したエバネッセント波は, 試料により摂動 (ラマン散乱を含む) をうける. あらかじめ光学ファイバ先端を化学エッチングにより数 10 nm に先鋭化する. このファイバをシアフォースモードで距離を制御しながら, 上方から試料に約 10 nm まで近づけたとき, エバネッセント波が伝搬光に変換され, ファイバに取り込まれる. この SNOM 信号光をホトマルあるいは分光器を通して電荷結合素子 (Charge Coupled Device, CCD) により検出する. この装置の特徴をまとめると, ①ファイバから光を照射する方式に比べて, ファイバ自身の蛍光やラマン光が妨害とならない, ②メタルコートが必要としないので

より強い励起光を用いることが可能である, ③SPP によるラマンバンドの増強を利用できるなどの利点がある. 最初に, ファイバからの SNOM 信号光を直接ホトマルで検出する方式で, 金薄膜のシアフォースによるトポ像と SNOM イメージを数 10 nm の空間分解能で, 同時に測定できることを確

Fig. 4 ATR-SNOM-Raman setup.

Fig. 5 Topographic (a) and simultaneously obtained SNOM (b) image of Au island film.

Fig. 3 Optical properties of Ag colloid. (A) LSP extinction spectra, (B) SERS spectra from CV on Ag.

Fig. 6 ATR-SNOM-Raman spectra from CuPc on prism.

かめた (Fig. 5). 次に, SNOM-ファイバ端を分光器に接続して, プリズム表面に直接蒸着した CuPc 薄膜のラマンスペクトルを, 何の共鳴効果も用いずに測定することができた (Fig. 6, 測定時間 600 秒)³⁰⁾. さらに, プリズム表面にあらかじめ銀の島状膜を蒸着して, その上に CuPc を蒸着することで SERS による 100 倍の増強を得ている. これにより約 1 秒での SNOM-Raman スペクトル測定が可能になった³¹⁾. LSPP 共鳴条件や光学系の最適化により, トポ像と同時にラマンイメージを取得することが近い将来可能となるであろう. さらに, もし SNOM の空間分解能を分子レベルまで上げることができれば, 金属表面の異なるサイトあるいはドメインに吸着した化学種の振動スペクトルを直接観測することで, 電気化学反応のそれぞれのサイトでの反応素過程がより詳細に解明され, 制御されるものと期待される.

文 献

- 1) 濱口宏夫, 平川暁子 (編); ラマン分光法 (学会出版センター, 1988) 2, 3 章.
- 2) B. Pettinger, in *Adsorption of Molecules at Metal Electrodes*, J. Lipkowski, P. N. Ross (Eds.), VCH 1992, Chap. 6.
- 3) J. E. Pemberton, in *Electrochemical Interfaces*, H. D. Abruna (Ed.), VCH, 1991, Chap. 5.
- 4) W. Suétaka, *Surface Infrared and Raman Spectroscopy*, Plenum, 1995.
- 5) 西 信之, マイクロクラスター科学の新展開 (化学総説 38, 1998) 学会出版センター, 13 章.
- 6) A. Otto, I. Mrozek, H. Grabhorn, and W. Akemann, *J. Phys. Condens. Matter*, 4, 1143 (1992).
- 7) M. Kerker, *Surface Enhanced Raman Scattering* (SPIE, Vol. MS 10, 1990).
- 8) M. Fleischmann, P. J. Hendra, and A. J. McQuillan, *Chem. Phys. Lett.*, 26, 123 (1974).
- 9) M. Osawa, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 70, 2861 (1997).
- 10) M. Futamata, *Surf. Sci.*, 427/428, 179 (1999); *Vibrational Spectrosc.*, 19, 187 (1999); *Chem. Phys. Lett.*, 317, 304 (2000); *Chem. Phys. Lett.*, in press.

- 11) M. Futamata, *Appl. Spectrosc.*, 50, 199 (1996); Proc. 2nd Int. Conf. Optical Design and Fabrication (ODF 2000) p.21.
- 12) T. T. Chen and R. K. Chang, *Surf. Sci.*, 158, 325 (1985).
- 13) S. Zhou, M. J. Weaver, X. Q. Li, and Z. Q. Tian, *J. Phys. Chem.*, B 103, 4218 (1999); M. J. Weaver, S. Zou, and H. Y. H. Chan, *Anal. Chem.*, 72, 38A (2000).
- 14) S. Stewart and P. M. Fredericks, *Spectrochim. Acta*, A55, 1615 (1999); and *ibid.*, 1641.
- 15) 二又政之, 分光研究, 46, 91 (1997); *Int. J. Vibrational Spectrosc.*, 4, 9 (2000).
- 16) M. Futamata, *J. Phys. Chem.*, 99, 11901 (1995); *Langmuir*, 11, 3894 (1995); *Appl. Opt.*, 36, 364 (1997); *Surf. Sci.*, 386, 89 (1997).
- 17) M. Futamata, E. Keim, A. Bruckbauer, D. Schumacher, and A. Otto, *Appl. Surf. Sci.*, 100/101, 60 (1996).
- 18) M. Futamata, P. Borthen, J. Thomassen, D. Schumacher, and A. Otto, *Appl. Spectrosc.*, 48, 252 (1994).
- 19) A. Otto; *Polaritons*, E. Burstein, and F. de Martini, Eds. Pergamon Press, New York, (1974) p.117.
- 20) K. Raether, *Surface Plasmons* (Springer-Verlag, 1988).
- 21) J. T. Krug, G. D. Wang, S. R. Emory, and S. Nie, *J. Am. Chem. Soc.*, 121, 9208 (1999); S. Nie and S. R. Emory, *Science*, 275, 1102 (1997) 及び引用文献.
- 22) K. Kneipp, H. Kneipp, I. Itkan, R. R. Dasari, and M. S. Feld, *Chem. Rev.*, 99, 2957 (1999) 及び引用文献.
- 23) M. Michaels, M. Nirmal, and L. E. Brus, *J. Am. Chem. Soc.*, 121, 9932 (1999).
- 24) H. Xu, J. Aizpurua, M. Käll, and P. Apell, *Phys. Rev.*, E 62, 1 (2000).
- 25) Z.-Q. Xian and B. Ren (Eds.), *Proc. Int. Sympo. Surf. Raman Spectrosc.* (Xiamen Univ., 2000). S.-L. Zang (Ed.) *Proc. XVIIth ICORS* (John Wiley & Sons, 2000).
- 26) M. Futamata, Y. Maruyama, and M. Ishikawa, *Surf. Sci. Catal.*, in press; Y. Maruyama, M. Ishikawa, and M. Futamata, submitted to *Appl. Spectrosc.*
- 27) 大津元一, 河田 聡編, 近接場ナノフォトニクスハンドブック (オプトロニクス社, 1997).
- 28) For example, D. A. Smith, S. Webster, M. Ayad, S. D. Evans, D. Fogherty, and D. Batchelder, *Ultramicroscopy*, 61, 47 (1995); V. Deckert, D. Zeisel, and R. Zenobi, *Anal. Chem.*, 70, 2646 (1998).
- 29) 高橋 賢, 二又政之, 小島勇夫, 分析化学, 47, 1055 (1998).
- 30) S. Takahashi, M. Futamata, and I. Kojima, *J. Microsc.*, 194, 5 19 (1999).
- 31) M. Futamata and A. Bruckbauer, submitted to *Chem. Phys. Lett.*

●著者プロフィール

氏名: 二又 政之 Masayuki FUTAMATA

所属: アトムテクノロジー研究体¹, 工業技術院産業技術融合領域研究所アトムテクノロジーグループ² (〒305-8562 つくば市東1-1-4)

役職: シニアリサーチサイエンティスト¹, 主任研究官²

趣味: 乱読 (船橋洋一, 筒井康隆, 村上春樹, 椎名 誠などの文庫本)