

「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」
平成 16 年度採択研究代表者

米田 忠弘

東北大学多元物質科学研究所・教授

低次元ナノマテリアルと単一分子の振動分光・ESR 検出装置開発

1. 研究実施の概要

我々のグループにおいてはトンネル電流の高感度・高精度解析を原理とした STM-ESR 分光計測装置と STM-分子振動分光 (IETS) を開発してきたが、H19 年度には装置開発に加えて、それら開発された装置を用いた実際の物理測定においても成果が見られた。

STM-ESR 装置の開発では H18 年度までに開発した超高真空環境下におけるスピン検出 STM を用い、単一スピンからの寄与によって得られる高周波でのトンネル電流の変調から得られるピークをシリコン酸化膜で詳細に調べた。ここでは単一スピンにおいて得られたスペクトルは鋭いピークを示すが、その周波数は揺らぐことが観察された。その周波数をヒストグラムを用いて統計的に示すことで、ピークの揺らぎに見られる周波数の幅は通常の ESR で得られるピーク幅とほぼ等しいことを見出した。またそのピーク周辺においてピークの分裂が生じることを示した。これらは、 g 値の空間的あるいは動的な不均一性によって生じるとして説明でき、従来単一分子スペクトロスコピー (SMS) において調べられた、光学吸収・発光で単一分子で得られたピークは鋭く、しかしそのピークは揺らぎを生じ、分子のアンサンブルで得られたスペクトルは広いスペクトル幅を示すという現象に類似したことが単一スピンにおいても現れることを初めて示した。

STM-分子振動分光においては 400mK、11 テスラ磁場、超高真空という複合極限環境下で動作する STM システムを使って、Cu(110)清浄表面および Cu(110)(2x1)-O 表面に吸着した鉄(II)フタロシアニン (FePc) 分子の非弾性トンネルスペクトル (STM-IETS) 測定を行った。FePc 分子の Fe3d 準位の電子配置は、配位子場分裂により三重項状態をとる。この三重項状態は、スピン軌道相互作用により部分的に縮退が解け零磁場分裂と呼ばれる微細構造を示す。バルク結晶中では零磁場分裂定数は $D=8.7\text{meV}$ 、 $E=0\text{meV}$ 、と見積もられている。Cu(110)(2x1)-O 表面に吸着した FePc 分子について、 $\pm 2.4\text{meV}$ と $\pm 4.8\text{meV}$ に零磁場分裂に由来する構造を直接的に観測した。また磁場中の測定で、11 テスラの磁場下でゼ

ーマン効果により $\pm 4.4\text{meV}$, $\pm 5.5\text{meV}$ にシフトした。スペクトルの印加磁場依存性から、 $D=-3.6\text{meV}$ 、 $E=1.2\text{meV}$ と見積もった。

極低温 STM を用いた、電子状態マッピングにおいては、劈開性が強く STM 観察に理想的な表面を容易に構築できる強相関係である $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ や $\text{Ca}_2\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ を研究対象とした実験を行っている。本年度は、Mn 近傍の詳細な電子状態マッピングに成功したほか、Ti をドーブした試料に対する測定も行い、不純物近傍の局所電子状態が不純物の種類によってどのような類似性や相違点を持つのか調べた。強磁場極低温超高真空 STM を利用し、電子状態およびスピン状態マッピングを行い、孤立不純物周辺や界面における誘起スピン状態と巨視的物性との関連を明らかにした。

2. 研究実施内容

①米田研究グループ（東北大学多元物質科学研究所）

H19 年度においては、超高真空環境下におけるスピン検出 STM を用いた単一スピンに関する ESR-STM 信号をもちいた実際の測定が順調に進み、単一スピンについての物理知見を得る成果が得られた。トンネル電流における高周波成分に単一スピンに由来する Larmor 周波数成分が得られることは H18 年度までに得られていたが、本年においてはその検出感度の向上とデータ処理能力を向上させることによって信頼性の高いデータの蓄積が可能となった。その結果、スピン由来のピークはシャープな形状をもつが、その周波数の中心位置がふらつく現象が観測された。その周波数の分布はヒストグラム解析によって通常の ESR のスペクトルと同様のピーク幅が得られることが明らかとなった。またそのヒストグラムは Larmor 周波数に中心を持つがその周辺で分裂することが示された。この事象は、光スペクトロスコープでスペクトロ・ディフュージョンと呼ばれている現象に類似していることを指摘した。その現象は単一分子スペクトロスコープ（SMS）とよばれる研究分野において、単一分子から得られる鋭いスペクトルと、分子集団から得られるブロードなスペクトルとの関係に類似している。ピーク周波数が広がりをもって分布すること、また中心に分離したピークをもつ両方の現象は、 g 値の不均一な分布によるものという解釈で説明されることが示された。

高周波検知システムとしては検出感度を向上させ、かつ外部雑音誤認を防ぐために有効な位相検知型スピン信号検知システムを新規に構築し、信頼性の高いデータの取得に成功した。またこのシステムの真空組み込みが成功したため、超高真空中でシリコン酸化膜を用いた実験を行うことが可能となったが、今年度においては高周波成分を有効に捉えるために、FET 素子をもちいた回路を作成しそれをインピーダンスマッチングとして用いることを行った。通常、高周波信号を効率よく捕らえる目的にはパイ回路と呼ばれる回路が用いられるが、STM の試料と探針の間に形成されるギャップはその形状が一定でなく、また

観測によっても変化するものであり、そのインピーダンスを正確に決定することはほぼ不可能である。ある一つの条件でパイ回路などを作成しても常に変化するパラメータに最適な値をとることはできない。そこで今回はFFTを用いたインピーダンスマッチング回路を用いてその損失を最小とする試みを行った。この回路はWes Hayward, 'Introduction to RF design' などにも見られる良く知られた回路であり、またP. Krukowski¹, W. Olejniczak, Z. Klusek, M. Puchalski, P. Kobierski and K. Gwozdziński, "Investigations of Electron Spin Resonance Scanning Tunnelling Microscope (ESR-STM) Signals from the TEMPOL/Au(111) Surface" Appl. Phys. A (submitted)などの研究例でも用いられている。この回路を用いることにより、広い条件で高周波成分の損失を小さくすることが可能となり、スピン由来の信号検知の効率が上昇した。また今年度はSTMに特有な熱ドリフトを補正する実験装置を完成させ、スピンの挙動の表面位置依存性についての実験が行えるようになった。

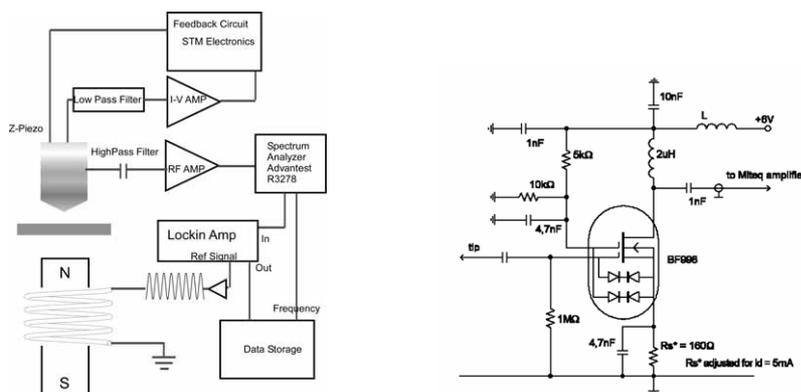


図1(左図) ロックインアンプを用いた位相検知 STM-ESR の概念図。

図2(右図) FETで構成されたインピーダンスマッチング P. Krukowski¹ Presented in the SPS06, Hamburg Germany.

サンプルとしてはシリコン(111)-7x7 清浄表面および清浄表面を数L (1L~1x10⁻⁶ torr sec) の酸素に暴露した表面について実験を行った。よく知られているように7x7表面には19のダングリングボンドが存在し、それらはスピンセンターとなり得る。これらのピークは清浄表面よりむしろ酸素を少量暴露した表面において強度が最も強くなることが知られている。これは酸素暴露によってダングリングボンドの数は減少するが、表面の金属性も低くなり ESR 信号が強められることによると理解されている。このスピンセンターは P₅₀ と表記されるが、この実験においてはこのスピンセンターによるトンネル電流の変調を捕らえようとする。図1は実験装置全体を示したものである。実験装置は前年度までに完成させたが今年度は図2のFETインピーダンスマッチング装置をトンネル信号の近傍に設置し、信号の効率の良い検知を狙った。100-300 Gauss程度の静磁場はSmCo磁石を用いて発生させた。磁場は真空に入れる前にホール素子によって決定したが、磁石が真空中で用

いることを考慮して小型のものを使用したため、測定時の素子位置の誤差による磁場の測定誤差が大きい。しかしながら磁場自体の時間変化は認められなかった。ロックインアンプによる検出を行うために、交流磁場を印加するが、その手法にはロックインアンプの参照信号をパワーアンプにより増幅し、試料近傍におかれたコイルに電流を流すことで発生させた。すでに報告されているように (Y. Manassen, J. Magn. Reson. **126**, 133 (1997)) もっとも有効に信号を検知するために、偏重電圧と周波数の指数が2に近くすることが必要で、その条件を満たす 10mG、15KHz の交流磁場を印加した。

図 3 (a)(b)は得られたピークの例である。それぞれシャープな周波数分布 (半値幅 ~ 0.2 MHz) を与えるが中心周波数は互いに異なっている。この周波数のふらつきは大きな疑問であるが、それを明らかにするため、統計的にピークの周波数分布を調べたのが図 4 に示すヒストグラムである。図 4 (a)は静磁場に 288 G (160 G)をもちいたピークの周波数をヒストグラム化し実線(点線)で表したものである。288 G の磁場において Larmor 周波数はこの周波数レンジに予想されるが(~ 806 G)、得られたヒストグラムのピークはその値に近い。周波数の Larmor 周波数からの差はホール素子による磁場の読み取り誤差(素子の位置決定誤差)によるものと思われる。また 160 G の磁場を用いたときには、Larmor 周波数はこのレンジから大きく外れるが、予想されたようにピークは存在しない。また 160 G を用いたとき予想される 448 MHz の近傍で得られたデータ (図 4(b)) にはピークを生じる。

これらをまとめたものが図 5 である。ヒストグラムの中心周波数に加えてピークの幅が縦方向のエラーバーとして示してある。横方向に関しては中心はホール素子の読みであるが、読み取り誤差が前述のように予想される。それを横方向のエラーバーとして示した。注目すべきは Larmor 歳差運動で予想される周波数と磁場の比例関係を満足していること、およびその周波数の広がり (エラーバー) が磁場とともに増大していることである。これはその広がりの原因が g 因子の不均一性に寄与しているとする理解しやすい。このことをイントロで述べた SMS との類似性を考慮に入れて記述してみる。SMS においては単一分子について吸収や発光スペクトルが得られるが、特徴的なのは単一分子で得られるピークが、多くの分子のアンサンブルとして得られる通常のスペクトルに比較して非常にシャープなものであることである。これらシャープなピークの周波数のふらつきは、空間的な不均一性や時間依存する分子の動的な変化によるものであると考えられ、分子の集団について調べるとそれらが均された広がったピークになると理解されている。動的な過程には分子の形状変化や化学変化などが考えられている。これらのアナロジーで今回の観察を考えるが、そのためにはスピンの集合で得られたデータと比較する必要があり、通常の ESR と比べるのが最適と考えられる。X-band で得られた P_{s0} スピンセンターは中心周波数を基準として約 1.5% のピーク幅があるが、今回得られたヒストグラムも $\sim 2\%$ の広がりを持っており、両者は近い値であると考えられる。したがって、今回我々が得たシャープなスナップショットと広がった周波数分布は、単一スピンで得られた g 因子の不均一性に由来するものであると考えられる。

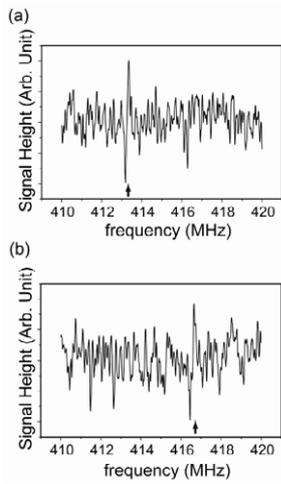


図3 検出されたスピン由来の高周波ピーク。(a)(b)ともにシャープなピークが得られるが周波数がシフトしている。

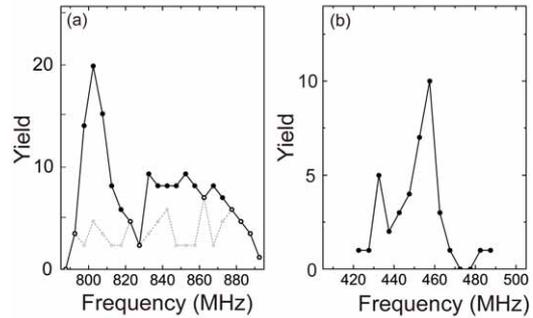


図4 ピークの中心周波数を統計的にまとめたヒストグラム。(a)288G (160G)の結果を太線(細線)で示す。(b)160Gで得られた結果

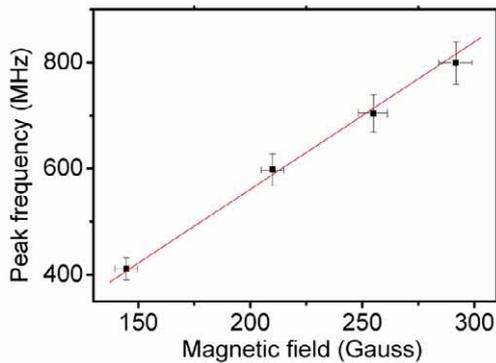


図5 ピーク位置の磁場強度依存性。図4で示した信号の磁場依存性。

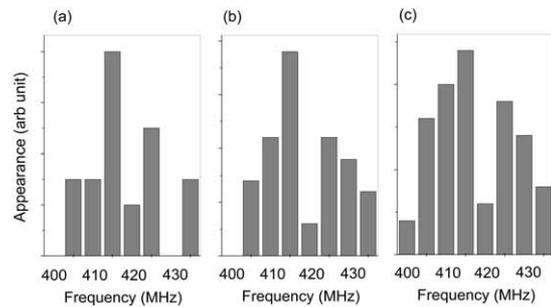


図6 中心周波数付近で見られたピークの分裂

このことを裏付けるものとして、ピークを中心付近でヒストグラムが分裂して見える現象について図6に示す。Larmor 周波数付近でピークが分裂していることが観察されるが、理由の一つは微妙な化学環境の違いにより g 因子が異なるものを観察していることが上げられる。酸化シリコンは酸化状況の違いにより P_{s1} や P_b センターをもつことが知られている。別の要因としては、ティップによる動的な変化が考えられる。ストレスによる g 因子の変化は古くから知られているが、STM 観測が表面に大きな力をおよぼすことはすでに知られており、またフォールティッド、アンフォールティッドと異なったドメインが同一表面上に存在すること、それらが力に対して異なった振る舞いをする事が予想されることから、これらがピークの分裂に寄与したことが考えられる。

これらの原因を明らかにするためには、表面の観察位置とスピンの挙動の相関を詳しく

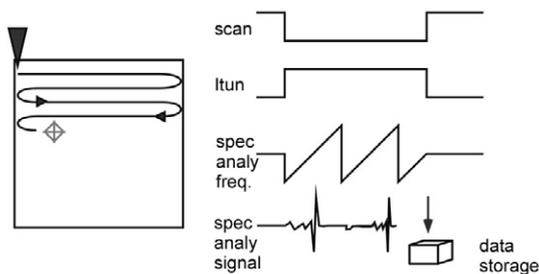


図7 像観察と表面特定サイトにおけるスペクトロスコピー取得の模式図。実際には図8で説明するドリフト補正を加えて、サイクルを繰り返す。

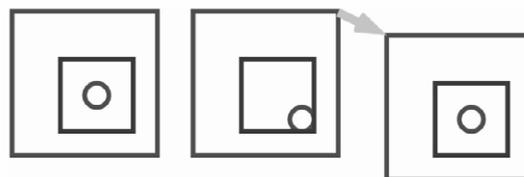


図8 同一箇所測定のためのドリフト補正の手法。円で表すターゲットの周辺に探索領域を決め、ドリフト修正時には領域内を探索しターゲットと同等の高さの構造の位置を決定、最初と同じ相対位置になるようスキャン範囲を修正してドリフト補正とする。

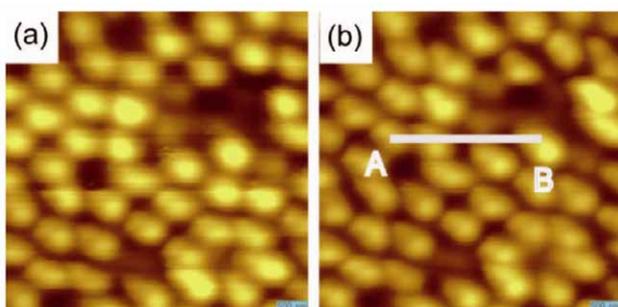


図9 像観察-スペクトロスコピー-ドリフト補正のサイクルを繰り返した観測での像の変化。(a)(b)の像観察には約2時間経過している。

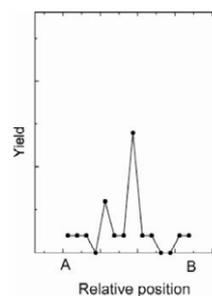


図10 像観察-スペクトロスコピー-ドリフト補正のサイクルを繰り返した観測での像の変化。(a)(b)の像観察には約2時間経過している。

調べる必要がある。この目的のため今年度は、同一の箇所ですペクトルを積算できるよう、ドリフトを補正する測定手法を開発した。図7に像観察と表面特定サイトにおけるスペクトロスコピー取得の模式図を示す。STM ティップは通常の像観察を行うが、指定されたサイトに走査が到達したときスペクトロスコピーが開始される。トンネル条件は像観察とスペクトロスコピーにおいて最適なものは異なるから、スペクトロスコピーを開始する直前にこれらは変更される。約6分間のスペクトロスコピー観察の後、データを記録するとともに、トンネル条件を元に戻し走査が再開される。このサイクルに約10分程度必要であるがこの間に生じるドリフトを補正しなければ同一箇所の測定はできない。我々の装置はSTM ユニットを小さいキャビネットに格納したことから熱ドリフトは大変小さいが、わずかなドリフトを像の中の特徴のある構造をコンピューターが認識し連続する走査の間で生じるずれを計算し、走査する領域を補正する仕組みである。この様子を模式的に示したの

が図8である。走査全域に比較して小さい領域を定義しその中の特徴ある構造を記憶させる。走査終了後その領域を再走査して像を得、先ほど記憶した構造の位置を検出する。前回の位置と異なっている場合、それがドリフトによるものであると判断し走査の原点を移動させることで走査像が移動しないようにする。この手法は像のすべての構造について相関関数を計算するのではないため、迅速な計算・制御が可能ではあるが注目する構造の位置が大きくずれるときには適用できない。ドリフトが少ない条件で威力を発揮する。前述のように温度が一定であるキャビンに入っていること、また試料作成後長時間真空中にあってもほとんど残留気体の吸着の影響をいけないうシリコン酸化膜の特性を生かしてなるべくヘッドに置く時間を長くすることを組み合わせることで長時間ドリフトを最小に抑えられた。その一例を、図9に示す。これはSi(111)-7x7表面を0.5Lの酸素分子に露出することで得られた表面であり、通常の7x7構造に加えて酸化によると思われる暗い領域が見られる。(a)と(b)の像は、像観察とスペクトル取得のサイクルを多数繰り返し、2時間程度経過しているがほとんど相対位置が変化していない。これらのドリフト補正を用いて表面の構造とスピンの挙動の相関の関係を調べた例を図10に示す。これは図9(b)に示したAよりBまでの線上でLarmor周波数付近に現れたピークのイールドを測定したものである。図に示したように、線上の一部でその強度が増大しており、シリコン酸化状態との関係が考えられるが、現在までのところ結論には至っていない。実験データが蓄積しつつありその相関が明らかになると考えられる。

②川合研究グループ（東京大学新領域創成科学研究科）

H19においては、以下の研究を行った。

(1) Cu(110)清浄表面およびCu(110)(2x1)-O表面に吸着した鉄(II)フタロシアニン(FePc)分子の非弾性トンネルスペクトル(STM-IETS)測定を行った。FePc分子のFe3d準位の電子配置は、配位子場分裂により三重項状態をとる。この三重項状態は、スピン軌道相互作用により部分的に縮退が解け零磁場分裂と呼ばれる微細構造を示す。バルク結晶中では零磁場分裂定数は $D=8.7\text{meV}$ 、 $E=0\text{meV}$ 、と見積もられている。Cu(110)(2x1)-O表面に吸着したFePc分子について、 $\pm 2.4\text{meV}$ と $\pm 4.8\text{meV}$ に零磁場分裂に由来する構造が観測された。これらは、11テスラの磁場下でゼーマン効果により $\pm 4.4\text{meV}$ 、 $\pm 5.5\text{meV}$ にシフトした。スペクトルの印加磁場依存性から、 $D=-3.6\text{meV}$ 、 $E=1.2\text{meV}$ と見積もった。バルク結晶と比較するとCu(110)(2x1)-O表面では磁気異方性や配位子場の対称性が吸着により変化していることがわかる。特に、磁気異方性と関係する定数Dの符号が正(バルク)から負(吸着系)に変化したことは、スピンの容易化軸方向がFePc面内方向(バルク)から面直方向(吸着系)に変化していることを意味している。一方、Cu(110)清浄表面に吸着したFePcでは、零磁場分裂に対応する構造は観測されなかった。Fe3d電子が基板電子と強く混成し、Feの価数やスピン状態が変化したことが考えられる。

(2) Cu(110)表面におけるマンガノセンMn(C5H5)2の吸着状態と電子構造をSTMと第一

原理計算により調べた。マンガノセンは、マンガン原子が五員環でサンドイッチされた構造をもつ特色ある分子である。マンガンの3d電子の電子配置は、高スピン状態 ($S=5/2$) をとることが固体の研究で知られている。マンガノセンのSTM像と第一原理計算によるSTM像との比較から、分子状で化学吸着することを明らかにした。また、第一原理計算から、Mnのスピン状態は、吸着によっても $S=5/2$ を維持している可能性が高く、IETSによるスピン検出に有望な吸着系である事がわかった。

③山田研究グループ (理化学研究所)

1. スピンの関与する強相関電子系の電子状態マッピングによる研究

スピンの関与する強相関電子系の典型例として $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ に着目し、研究を行っている。 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ は様々な摂動(磁場、圧力、不純物ドーピング等)によって種々の電子相転移を示す。これまで、メタ磁性転移に伴う電子状態変化や、Ru サイトにドーピングされた Mn 近傍の電子状態をトンネル分光法によって調べてきた。本年度は、Mn 近傍の詳細な電子状態マッピングに成功したほか、Ti をドーピングした試料に対する測定も行い、不純物近傍の局所電子状態が不純物の種類によってどのような類似性や相違点を持つのか調べた。ドーピングされた Mn は 3+で置換され荷電不純物であるのに対し、Ti は Ru と同様 4+であり、電荷を持たない。また、両者は全く異なる *d* 電子数やスピンを持っている。本年度は 0.5 %から 1 %程度の低濃度ドーピングされた試料に対して実験を行った。昨年報告した Mn ドーピング試料と同様、Ti をドーピングした試料でも、最表面直下の RuO_6 八面体二重層の内、表面に近い層と遠い層の Ru を置換する Ti を別々に可視化することに成功した。また、いずれの系でもトンネルスペクトルの詳細なマッピングに成功し、不純物近傍の電子状態変化は Mn でも Ti でも空間的には約 4 格子程度に及んでいることが分かった。不純物近傍のトンネルスペクトルは、Fermi エネルギー近傍±約 20 meV 程度の「擬ギャップ」領域で大きく変化するが、Fermi エネルギーの極近傍(~数 meV)を除き、Mn でも Ti でも驚くほど似通った変化を示すことがわかった。今後、磁場依存性の測定から、このような不純物誘起電子状態変化に対するスピンの寄与を検討する。また、 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ の基底状態は、Mn を 5%程度ドーピングすると常磁性金属から反強磁性絶縁体へ変化するが、Ti ドーピングではこのような相転移は報告されていない。より、高濃度ドーピングされて不純物状態が空間的に重なった場合に、Mn と Ti 近傍の局所電子構造にどのような違いが生じるのかについても研究する予定である。

2. 低温超高真空磁場可変 ESR-STM の開発

昨年度に引き続き、ESR-STM の開発を継続している。これまで装置が設置されていた実験室は音響振動が大きく、より静かな環境への装置の移設を行った。その結果、振動ノイズはほぼ無視できるレベルまで低減した。また、ロードロックチャンバーの付加を行い、スループットを向上させた。現在、 NbSe_2 を試料として性能評価を行っている。これまでに原子分解能の STM 像の取得、10 時間程度の電子状態マップが可能であることを確認した。今後、低温で動作する超低ノイズの高周波アンプを組み込み、ESR 信号の取得を試みる予定である。

3. 超伝導体／非磁性常伝導体／強磁性体界面の研究

非磁性常伝導体の伝導電子を介した強磁性と超伝導の相互作用を調べる目的で、Nb/Au/Fe、Nb/Au/Co、Nb/Au/Ni、Nb/Ag/Fe 及び Nb/Pt/Fe の一連の三層膜を MBE 装置によって作製し、構造・物性の評価を行ってきた。これらの試料のうち界面状態と各層の結晶構造の極めて良好な Nb/Au/Fe と Nb/Au/Co だけが超伝導転移温度 (T_c) の非磁性常伝導体層厚 (t_N) 依存性において明確な振動を示すことが判明した。この新奇な量子干渉効果の発現には高度な構造コヒーレンスが必要であるという前年度の予測が裏付けられ、位相コヒーレンスの重要性が明らかとなった。 T_c 振動の機構は未だ説明されておらず、単一の長さスケール t_N しか含まない従来の Usadel 形式の理論ではこの振動の解釈は不可能である。しかし Nb/Au/Fe と Nb/Au/Co の結果を比較することにより、S/N/F 系に関する重要な示唆が今年度得られた。第一に、2.1 nm の長周期振動は t_{Au} の大きい領域 ($t_{Au} > 2$ nm) において、0.76 nm の短周期振動は t_{Au} の小さい領域 ($0 < t_{Au} < 4$ nm) において観測されている。第二に、長周期振動は強磁性体の種類によらずに出現している。そして第三に、強磁性体を Co から Fe に替えた時に振動の位相が反転する結果が得られた。この位相反転で興味深いのは膜厚 t_{Au} が 2.1 nm の整数倍を取る場合は Co と Fe の両者に対して T_c は完全に一致していることであり、 T_c - t_{Au} 相関の普遍性が示唆された。Nb/Au/Fe において短周期振動が消失している点も理論的解釈が将来的に必要であるが、Au/Fe 界面におけるエピタキシャル歪による Au 層の構造歪みによって Au フェルミ面のネスティングが消失している可能性が予備的なバンド計算から予想されている。奇周波数スピン 3 重項対の超伝導特性への寄与の可能性を含めて、S/N/F 接合が豊富な物理現象を内包していることは確かであり、実り豊かな研究領域となりうるものと考えられる。今後、今までに得られた実験結果を詳細に解析し理論家と共同して理論構築を試みるほか、STM での計測が可能な、表面に界面が露出した構造の物性探索も精力的に行う。

3. 研究実施体制

(1) 「米田研究」グループ

① 研究分担グループ長: 米田 忠弘 (東北大学、教授)

② 研究項目

- ・局在したスピンは磁場中で歳差運動を行うが、その周期に同期したトンネル電流の変化を周波数分解することで検知する単一スピン ESR-STM 装置開発。低温化で期待される単一分子振動分光の高精度化とあわせて分子レベルでの化学分析の実現を目指す。

(2) 「川合研究」グループ

① 研究分担グループ長: 川合 真紀 (東京大学、教授)

② 研究項目

- ・表面の特性を生かしたナノ構造の構築とそれによって出現する特異な物性を局所的な化学分析、とくに ESR-STM を用いたスピン情報および単一分子分光をもちいた振動

情報の解析を用いて行おうとする。

(3) 「山田研究」グループ

① 研究分担グループ長: 山田 太郎 (独立行政法人理化学研究所、専任研究員)

② 研究項目

・極低温 STM を用いた電子状態マッピングと新たに構築する ESR-STM を相補的に利用し、強相関電子系における電子不均一や強磁性超伝導界面など、スピン自由度が重要な役割を果たすヘテロ構造における新物性を探索する。

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

国内

荒船竜一, 林慶, 高木紀明, 川合真紀, 上原洋一, 潮田資勝, “レーザー光電子スペクトル中に現れる振動励起非弾性構造”、表面科学 28 (2007) 378-384.

国際

1. Mn-Coordinated Stillbenedicarboxylic Ligand Supramolecule Regulated by the Herringbone Reconstruction of Au(111), Y.-F. Zhang, , N. Zhu, , and T. Komeda, J. Phys. Chem. C 111, 16946-50 (2007).
2. Programming of a Mn-coordinated 4-4'-biphenyl dicarboxylic acid nanosystem on Au(1 1 1) and investigation of the non-covalent binding of C60 molecules, Y.-F. Zhang, N. Zhu, T. Komeda, Surf. Sci. 602 (2008) 614-619.
3. Estimation of Friction of a Single Chemisorbed Molecule on a Surface Using Incident Atoms, T. Takaoka, T. Komeda, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 046104-046104.
4. Molecule-Precision Cavity Formation in Molecular Layer Using Scanning Tunneling Microscope Lithography, T. Osada, N. Zhu, Y. Zhang, T. Komeda, J. Phys. Chem. C 112 (2008) 3835-3839.
5. Electronic structure and magnetism of one-dimensional Fe monatomic wires on Au(788) investigated with ARPES and XMCD, Hideki Fujisawa, Susumu Shiraki, Masashi Furukawa, Shintaro Ito, Tetsuya Nakamura, Takayuki Muro, Masashi Nantoh and Maki Kawai, Phys. Rev. B 75 (2007) 245423-1-245423-8.
6. Local Tunneling Spectroscopy across a Metamagnetic Critical Point in the Bilayer Ruthenate Sr₃Ru₂O₇, K. Iwaya, S. Satow, T. Hanaguri, N. Shannon, Y. Yoshida, S.

I. Ikeda, J. P. He, Y. Kaneko, Y. Tokura, T. Yamada, and H. Takagi, *Phys. Rev. Lett.*,
99, 057208 (2007).