

第10回 ISSP 柏賞を受賞して

極限環境物性研究部門 内田 和人

はじめに

2年前のあの日のことを思い出しつつ、前の晩に慌てて買ったスーツを着て、授賞式に臨んだ。1月下旬、受賞の知らせをメールで頂いたときにも、何人かの方々に祝福されたときにも、誰も受賞理由については触れてくれないので、一番大事なことに確信が持てないまま、とうとうその日を迎えてしまった。まさか「なぜ賞を貰えるんですか？」とは誰にも聞けなかった。無駄に歳月だけは重ねてきて、いくつか思い当たる仕事も無くはないが、近い人しか知らないはず。そもそも何かの手違いかもしれないし。とにかく、準備した通りでよかった。

あらためて、3月11日、ISSP 柏賞という荣誉ある賞を戴き、授賞式でしっかりとお伝えできなかった感謝の気持ちを、この場をお借りして、お伝えできればと思います。日頃よりご支援頂いている方々、ありがとうございました。そして、受賞理由となった今回の仕事について、まだご存知ない方々に少しでも興味を持って頂ければ幸いです。

空間領域差分計測法による高分解能イメージング技術

スピンホール効果による半導体のスピン蓄積や、グラファイトの一原子層であるグラフェンへの室温におけるスピン注入の成功、「隠れた保存量」の発見など、「スピントロニクス」という名の新たな地平が徐々に拓かれつつある。この流れに乗ってか乗せられてか、平成21年度科学研究費助成事業基盤研究(C)に採択され、「イメージファイバを用いた空間2次微分スピンイメージング装置の開発」がスタートした。目的は、「スピントロニクス」の主役であるスピン流、あるいは蓄積されたスピン(磁化)の検出技術である。スピン検出には、従来、スピン偏極電子顕微鏡やスピン偏極トンネル顕微鏡、あるいは磁気力顕微鏡を用いる等の方法があるが、これらはナノメートルの高分解能を有する反面、操作が簡単ではなく、試料の広範囲の測定には長い時間を要する。最近では、n型GaAs試料において、反射光の偏光角が磁化の大きさに比例するという磁気光学カー効果を利用し、光学顕微鏡を用いてスピンホール効果による試料端でのスピン蓄積の観測が行われているが、この手法もマイクロオーダーの光スポットを試料表面で走査しなければならない点において簡便とは言いがたく、温度、磁場、電場等の多重な環境パラメータ下における測定では大きな制限を伴う。そこで本研究では、マイクロオーダーの分解能を持ち、極めて簡便(試料準備の容易さと極めて短い測定時間)かつ高感度で表面磁化の情報をイメージングできる技術として、空間領域差分計測法による新たなイメージング手法を提案した。この手法は、光学系と検出器を含めた測定系全体に対して、試料を結像面上で装置の空間分解能程度シフトし、信号強度の差分を検出することにより、CCDの固定パターンノイズ等、試料位置に依らない光信号成分を除去し、結果として分解能を向上させるものである。この手法を用いることにより、たとえば超伝導マグネット内に光学系を導入するのに便利なファイバスコープを用いた場合でも、ファイバのハニカム構造が目立たない高分解能なイメージングが可能となり、磁気光学カー効果を用いればスピンのイメージングにも応用することができる。

真顔で動機を聞かれれば、こんなことを答えてしまうのだが、実際には数年前に行った α -(BEDT-TTF)₂KHg(SCN)₄という低次元有機導体における角度依存磁気抵抗振動の研究に遡る。この研究では、少しユニークな二軸回転機構を設計・製作し、超伝導マグネット内で試料を全方位にわたって回転することで、フェルミ面の次元性を反映した複雑な層間磁気抵抗パターンを観察した。このとき、2次元画像(抵抗の濃淡プロット)に隠された構造をなんとか見つけ出そうと、画像処理技術(後述するラプラシアンフィルタ等)を勉強し、利用していた。そんな或る日、松戸のあたりを運転中にふと思いつき、キャンパス到着までの間に膨らんでいったものを、数年かけて吐き出したのが今回の仕事である。「ラプラシアンフィルタは隣接画素を用いて2次微分を計算する。ならば、隣接空間を実際に測定すればもっといいことがあるんじゃないか？」理屈は至って簡単、だからやることも簡単である。観察対象をちょっとだけ動かしてやればいい、動いたと気づかない程度に。実際の光学系と像の動き(8方向シフトの場合)を、

それぞれ図 1、2 に示している。まず通常どおり対象物を撮影する。そして、結像面上で対象物だけをシフトさせ、再び撮影する。これを縦・横・斜めと 8 方向すべてについて行う。都合、9 枚の画像を取得するわけだが、あとはシフトした画像とシフトする前の画像との差分を取り、それらを積算するだけでいい。(別に縦・横の 4 方向、あるいは用途によっては縦だけでも構わない。)ここまで説明すると、先に挙げたラプラシアンフィルタと混同されがちである。ラプラシアンフィルタは 1 枚の画像について、隣接する画素間で同様の

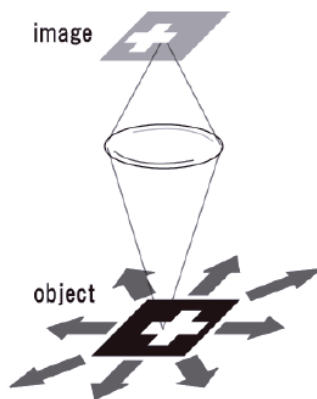


図 1 空間領域差分計測法による高分解能イメージング手法での観察対象の動き

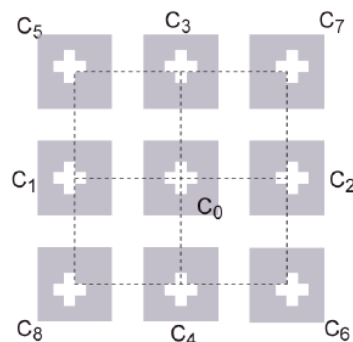


図 2 実際に取得する画像データ (縦・横・斜めの 8 方向シフトの場合)

演算、すなわち画像の 2 次微分処理を行いエッジを強調させるという数値演算である。対して、我々の手法は空間領域差分計測法と呼ぶべき、異なる空間における観測による実測法であり、シフト量に対して同程度の空間周波数成分のみが抽出され、それ以外の周波数成分は除去されるという効果を持つ。すなわち、CCD 素子の欠陥や固定パターンノイズ、照射ムラ、迷光、イメージファイバのハニカム構造等、対象物の位置によらない信号成分は除去される可能性が高い。そしてシフト量を空間分解能程度に設定すれば、結果的に装置の分解能が向上することになる。このとき、シフト前後での画像の差分を積算すると、シフト方向におけるリアルな空間 2 次微分イメージが出力される。この差分積算画像にさらに元の画像を加算することにより、より自然でかつ鮮鋭化された高分解能イメージが得られる。この手法を炭素の一原子層であるグラフェンの顕微鏡観察に適用した結果を、通常の結果とともに図 3、4 に示す。顕微鏡のステージ部にピエゾ駆動機構を追加し、顕微鏡の空間分解能より若干小さい 0.3 ミクロンのシフト量で実験を行った。

ホールバーの中央に単層や複数層からなる細長いグラフェンが見られる。ディラック電子系の特徴として知られているように、単層グラフェンの光吸収率は微

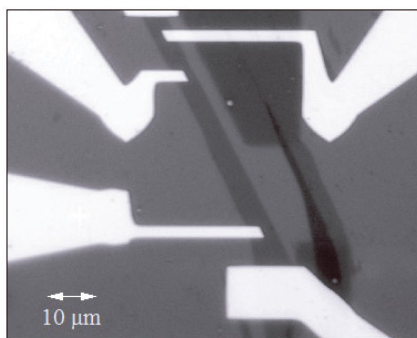


図 3 ホールバー型グラフェン試料の顕微鏡像 (中央縦に配置しているのが単層グラフェン)

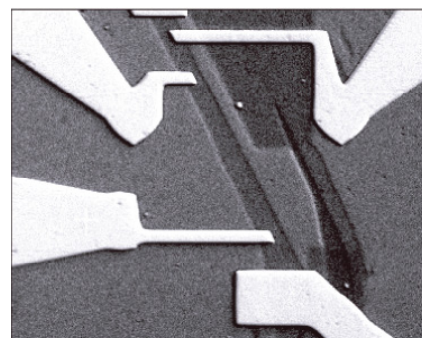


図 4 空間領域差分計測法によるホールバー型グラフェン試料の顕微鏡像

細構造定数で表せ、物質固有の性質に依らず波長にも依存しない約 2.3% という値である。この小さな吸収率のせいで、機械的剥離法によりシリコン基板上に転写されたであろう薄い青色をしたグラフェン探しは、時に地味で過酷な顕微鏡観察となる。この手法により、グラフェンの皺や断裂等の欠陥、不純物、さらに電極部分の表面の状態などを、より鮮明に捉えることができ、グラフェン試料の観察・作製に威力を発揮している。次にこの手法を CCD カメラと光学系をイメージファイバで結合した装置に適用した結果を図 5、6 に示す。ここでは、この手法の有効性を実証するために、分解能の評価に用いられるテストターゲットの観察を行っている。装置全体の分解能は光ファイバ素線の直径 (2-3 ミクロン) で決まっており、シフト量を 2 ミクロンとした。イメージファイバとは、医療や工業の分野で広く用いられるファイバスコープの画像伝送を担う微細な光ファイバの束である。レンズ光学系では不可能な奥まった場所にある物を観察するのに大変有効なツールだが、ファイバ素線の直径により空間分解能が制限される点や、ファイバのクラッド部分によるハニカム構造がノイズとなり像が不鮮明になるという欠点がある。特にハニカム構造は光が伝達されないために、どのような画像処理によってもうまく除去できない。しかしながら、この手法では個々のファイバのコア部分 (光の伝送部) が探針と

なって対象物の縦・横・斜めの光の変化を捉えるために、ハニカム構造が影を潜め、対象物のコントラストのみが際立つことになる。テストターゲットの中で最も微細なパターン(中央部横3本×6列)について、各々プロファイルを図7に示している。通常観察では、イメージファイバのハニカム構造によりどのパターンも全く識別できないのに対して、この手法では、すべてのパターンについて3本のピークが明瞭に観察できている。この結果をもとに分解能を定量的に評価すると、実に200%以上の分解能の向上となった。強調しておきたいのは、ラプラシアンフィルタでは、このハニカム構造は全く除去できないどころか、かえってノイズ源になるという点である。ちなみに、イメージファイバを用いない通常のレンズ光学系の場合についても同様のテストターゲットによる評価実験を行い、約25%の分解能の向上を確認している。

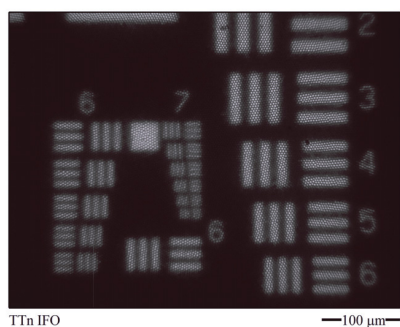


図5 イメージファイバ光学系を用いたテストパターンの観察結果

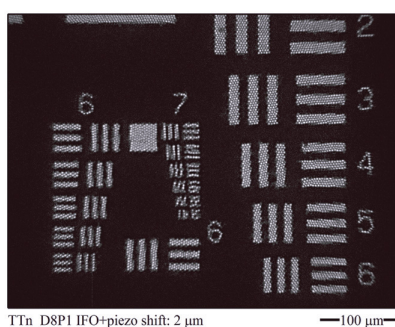


図6 空間領域差分計測法を用いた場合のテストパターンの観察結果

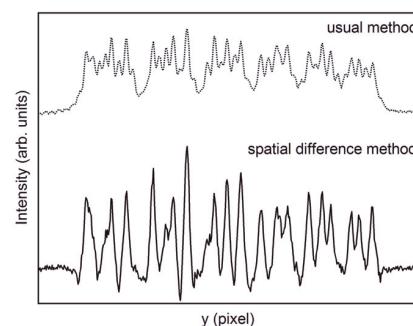


図7 通常の方法(上)と空間領域差分計測法(下)でのパターンのプロファイル

従来の技術との違い

CCDを縦・横に画素の半分だけずらして撮像し、見かけの画素数を4倍に増やす手法は、「画素ずらし」(ピクセルシフト)と呼ばれている。これは、CCDに特有の光の不感部分(電荷の転送部)を補間するという効果もあるが、基本的には、小さな写真を4枚つないで大きくし、同じ画角で見たときに元の写真よりも解像度が上がっているように見えるという理屈であって、分解能は向上しない。我々の手法と決定的に違うのは、画像を加算により合成している点であり、ノイズやぼやけ等も加算される。また、巷では最近、「超解像技術」という言葉を良く目にする。これは、低解像度画像から高解像度に見える画像を生成するために、不足している画像データを推定により補間し、あたかも解像度が上がったかのような画像を作成する技術である。このデータ補間の方法は、画像再構成や運動推定の過程で、なんらかのモデル(仮定)が必須であり、得られた高解像度画像が現実の被写体に忠実である保証はない。つまり高分解能技術の範疇には入らない。繰り返しになるが、我々の手法はモデルや仮定を必要としない実測法である。

さいごに

2011年8月31日、応用物理学会で掲げたポスターの前に、ちょっとした人だかりが出来たとき、何かしら胸騒ぎのようなものは覚えていた。けれど、その中におられた某カメラメーカーの方の「これ、特許とれますよ。」の一言がなければ、この原稿を書くこともなかっただろう。今から思えば社交辞令だったかもしれないその言葉に乗せられ、学会から戻った日の朝、事務所に駆け込んだのだった。「あのお、発明が発生したみたいなんですけど。」応対して頂いた方も、あまりないことだったのか、少し慌てておられたようだったが、こちらの方も慌てていたので記憶は正確ではない。実は、科研費の実績報告書がネット上に公開されたのがその年の5月31日、新規性喪失の例外期間は6ヶ月、すなわち出願できる期限は11月30日だった。それから程なくして知的財産部による大学への承継が認められ、東京大学TLOの方々や弁理士の先生による面接・ヒヤリング等がまさに怒濤のように押し寄せたものの、自分のアイデアに真剣に耳を傾けて戴けることの喜びの方が遙かに大きく、気がつけば師走の風が吹きそうな11月25日、とうとう出願にこぎ着けることができた。期せずして自分の誕生日と重なり、家族でささやかなお祝いをしたのがまだ昨日のこことである。今はTLOの方々による営業活動の渦中にある。いくらか世間のお役に立てるような商品へと繋がってくれば望外の喜び、叶わなくても、いくらかでも波風が起きて、誰かの帆を進める手助けになればと願っている。