

# 固体物理学の周辺 ラジオ少年の夢

— 半導体との半世紀の付き合い —

勝本信吾

2023年8月29日

本年(2023年)3月をもって東大物性研を定年退職した。年齢65歳を過ぎて名実ともに高齢者となったが、未だにこれは夜に回路作りを楽しんでいた高校生が、うとうとしながら見た夢なんじゃないか、気が付くと目の前に真空管回路があって手にはヤニの煙をあげるはんだごてが握られているんじゃないか、と思うこともある。それくらいぼんやりしながら、あっという間に過ぎてしまった四十余年であった。過去の「固体物理」を見ると、定年を迎えられた先生方の重厚な研究歴が紹介されていて、引き換え、こんな安物の実験屋の話に読者が興味を持ってくれるかどうか心許ない限りである。が、私にも他の方と少々変わったところもあり、少々ずるいとは思いますが、その辺を中心に書けば本誌を手にとられた固体物理研究者の皆さんにも、年々厳しくなる研究競争の息抜きに「固体物理の周辺」を楽しんでいただけるのでは、と考え、筆を執った次第である。なお、表題の「ラジオ少年」は、筆者の少年時代にはよく使われていた言葉で、電子回路好きではんだごてを振り回していつも何か作っているが、ラジオ以外大したものを作れないのでラジオばかり作っている少年のことで、ラジオのリスナーのことではない。

## 1 生き立ちと病気・障害のこと

福岡県大牟田市で1957年に生を受けたが、同年の4月に東大物性研が産声をあげており、以来時間軸を同じくして歩んできたことになる。輝かしい歴史を刻み始める物性研に対し、私の方は、翌年ポリオに感染して全身麻痺状態となり、手当てが遅れたこともあり命が危険な状態にもなった。両腕は何とか常人の6~7割の力を取り戻したものの、両下肢は麻痺したままで、物心ついた頃には這い這い、というより手で体を引きずって動いていた。左脚に多少の力がついて、つかまり立ちができるようになったのが、3歳の頃で、間もなく肢体不自由児施設に預けられた。施設でのリハビリにより、力の戻らぬ右脚に装具をつけ、松葉杖なしに歩ける

ようになり親元に戻ったのは小学校入学直前であった。

学校では、障害学級ではなく普通学級で学ばせてもらった。大牟田では夕張と並んでポリオは大流行しており、各学年に肢体不自由者が何人かはいる状態で、否応なしに今でいうインクルージョンをせざるを得ない状態だった。栃木県宇都宮市に引っ越した際には障害学級に入る話もあったはずだが、それまでの実績により(?)、普通学級で学ばせてもらった。障害学級の先生とも交流があり、その先生の紹介もあって、東京まで出かけて11歳の時に当時大変有名だった和田博夫医師の執刀により右足首関節固定術を受け、振り子のように体を揺らす無理な歩き方ではあったが、ついに装具を外して何とか歩けるようになった。と言っても、相変わらず右下肢は動かず、左も常人の半分しか力がなく、医者によっては「なぜ歩けているのか?」と訝るほどだった。危ないバランスはしばしば崩れて転倒し、救急車の世話になることも多かったが、とにかくこれで今日までの道程を歩んできた。

## 2 半導体デバイスとの出会い

上記宇都宮に移動する際に、当時営業運転開始したばかりの新幹線車中で「子供の科学」という雑誌を読み、中に出ていたShockleyが顕微鏡らしきものの前に座り、それを挟んでBardeenとBrattainが立っている写真になぜか強く惹きつけられた。物理学の面白い研究をして、トランジスタのような大発明をして金持ちになる!とは何とすばらしい人生であろうか。この時から、物理と電子回路は私の2大テーマになった。

親にねだってトランジスタ回路を組めるキットを買ってもらい、様々な回路を組んで遊び始めたのが10歳の頃で、翌年には嵌め込み回路では満足できずにはんだ付けで回路を作るようになった。パッケージを壊して中の半導体に触ったわけではないが、1N60のようなガラス封じのダイオードを覗くと微小なGeに曲がった針が触っている様子が見えた。どこにでも転がって

いような石やガラスや金属の細工が、電源を入れた途端に生命を得て動き出し、様々なことをし出すのは何とも不思議で感動的だった。これが情報機器から電力制御、そして物理学の実験の舞台にもなる八面六臂の友、半導体との付き合いの始まりであった。電子工作を始めた頃は、店頭にある半導体素子は Ge が多かったが、産業界では Si の MOSFET が作られ、高校在学中には通産省主導の LSI 組合が発足、大学学部時代は Moore の「法則」は日本が担っている状態になった。

### 3 Anderson 弱局在効果

東大物理学科を卒業し、大学院は低温物理学の佐々木亘-小林俊一研究室に入れてもらった。当時の低温の実験室はクライオスタットや真空配管はもとより、測定回路など、何でも手作りするのが常識で、ラジオ少年にはなかなか適した環境だった。佐々木先生からは、Ge の磁気抵抗の異方性を希釈冷凍機温度まで測定するように、というテーマをいただいた。一方小林先生からは、Bell 研から客員でやってくる Gordon Thomas 博士の「おもりをする」(先生の言葉のまま)ように言われた。

この2つは関係していて、不純物伝導に関して Anderson 弱局在効果の観点から実験解釈の全面的な見直しが進められている最中だった。来日した Thomas 先生は助手の大塚洋一先生が中心になり蓄積されていた Ge の極低温域不純物伝導のデータを、大塚先生、学習院大の川畑有郷先生と共に弱局在理論に基づいて解析して新しい解釈を提示され、筆者もその末席に加えてもらった [1]。長年様々に行われてきた異常伝導の解釈が、自然なものに置き換わる現場に立ち会ったことになる。

磁気抵抗の異方性は、佐々木先生が長年追及されていた負の磁気抵抗の原因が、弱局在効果によるものであることを川畑先生が突き止められる [2] のに決め手となった実験データである [3]。川畑先生は「磁気抵抗の実験は沢山出版されていたが、解釈に基づいて加工した結果ばかり出されていて使い物にならない。唯一佐々木先生の論文がデータをきちんと示されていて助かった。」とおっしゃっていた。筆者もぜひそのような論文を世に出したいものだと思います、務めてきたつもりだが、何でも隅々まで説明がつかないと査読を通らない傾向には抗いがたく、解釈主体になる場合が多くなってしまっている。

希釈冷凍機の漏れ直しなどで悪戦苦闘したものの、とにかく、弱局在の中でもクーロン相互作用の効果が強く出ると思われた 1 K 以下の温度域で異方性を測定

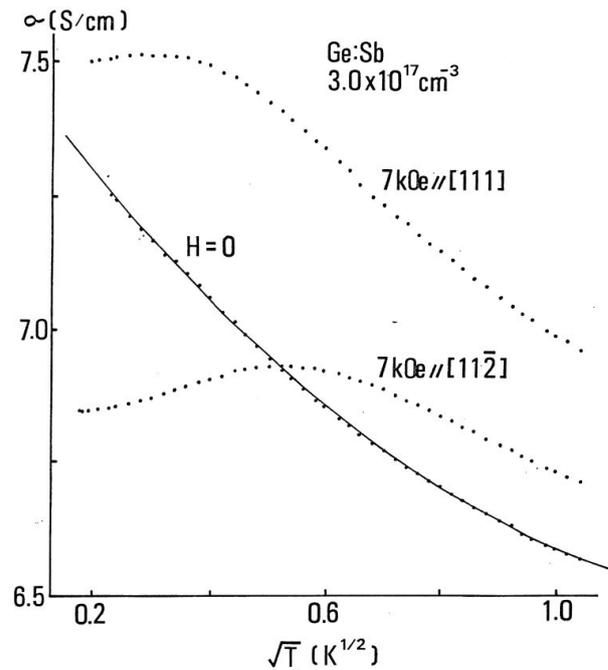


図1 [111] 方向への1軸性圧力により谷の数を1個にした Ge:Sb 伝導率の温度依存性. ゼロ磁場および [111] 方向, [112] 方向へ 7 kG の磁場を印可した場合. データは, [4].

した。負の磁気抵抗から正の磁気抵抗に変わると、異方性は反転した。Ge の多谷間散乱の効果を抑えるため、一軸性の圧力をかけて測定したが、結果は同じだった [4]。弱局在の当時の理論の解釈では、この結果は、異常磁気抵抗を与えるクーロン相互作用項の内、軌道運動に起因するものよりスピンゼーマン効果に起因する項が優勢であることを示していた。しかし3年後に、当時物性研の福山秀敏先生たちはかなり異なった解釈を示されていた [5]。弱局在効果もまだまだ奥深いと思われたが、やがて十分確立されたものとして、現在は色々なパラメーターの見積りに使われるようになっている。理論の前提が十分満たされているとは思えない場合にも適用されていて少々心配になることもある。

大学院の研究を通して、バンド構造に繰り返されて終わり、と思っていた量子現象が、その上のレベルでも現れてくる様が非常に印象的だった。半導体物理、低温物理の双方の醍醐味を味わい、結局、最後までこの分野で研究を続けることになった。世界の研究情勢を良くわからぬまま研究していたが、NTT 時代に不純物半導体の教科書 [6] を見ていて Author index に自分の名前を見つけて大変驚いた。Thomas 博士との論文 [1] が引用されていたもので、世界からも注目されるような研究をさせてもらっていた幸運に、遅まきながら気が付いたのであった。

## 4 耐放射線多接合太陽電池

1983年に修士課程を卒業後、日本電信電話公社(電電公社)に入社、1か月の研修を経て東海村にあった茨城電気通信研究所に配属された。企業でも、基礎研究・材料研究を進めよう、という機運が盛り上がっていて、固体物理には幸いな時期だった。配属先は、放射線応用研究室で、山口真史リーダーの下、宇宙用の太陽電池開発を行っていた。太陽電池を分子線エピタキシー(MBE)で作る、というので驚いたが、衛星打ち上げの費用を考えれば、効率が高くて寿命の長い太陽電池が作れば、MBEで作っても十分もとが取れる、という勘定であった。特に通信用衛星においては、静止軌道が高い位置にあって放射線も強く、耐放射線性が重要である。当時主流だったSiに比して、III-V族は直接遷移のため少数キャリア拡散長が短くても変換効率を保つ上に、光電流によって放射線損傷が回復するという現象もあって高耐放射線性が期待されていた。また、単純なpn接合太陽電池の光電変換効率には良く知られたSchokley-Queisser限界があり、これを超える高効率を達成する方法としては、バンドギャップの異なる半導体でpn接合を作ってこれを積層するタンデム型太陽電池が、ほぼ唯一の現実的選択肢であった。

寮のある水戸の赤塚駅と東海村駅、更に研究所間の公共交通は極めて不便で、研究所員は皆自家用車で通勤していた。そこで遅ればせながら運転免許を取ろうとしたのだが、左脚しか動かないので通常の車は運転できず、障害者用車両のある教習所は水戸では一か所だけで、その車両も採算が悪く廃車寸前だった。教習員も一般車両が優先され、教習が受けられない。廃車の期限が近付き、駄目かと思われたが、事情を上司に伝えたところ、公社から教習所に話があり、翌日から手の平を返したように教習を受けることができ、ぎりぎりです免許を取れた。障害基礎年金の貯金をはたいて安い車と左脚で運転できるセットを買い、ようやく帰りの時間を気にせずに研究に没頭できるようになった。東海村から高崎の原研まで、耐放射線性試験のために試料を持って出かけることもできるようになった。

III-V族のMBE成長と太陽電池のプロセス、測定に明け暮れたが、成長した薄膜の評価、という名目で別のデバイスを作ってみたり、界面の状態や深い準位に関する実験をしたりという自由もあった。また、手動で制御していたMBEや分光測定器をPC制御・自動測定にするため、専用LSIが入手困難のため汎用ロジックICを使い、GPIBのインターフェースを作るなど、半田ごてを握ってラジオ少年魂を発揮できたのだった。

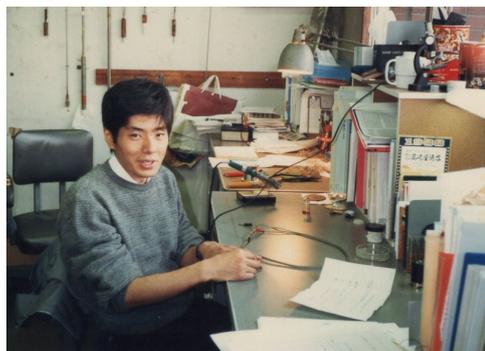


図2 東大理学部物理学科 助手時代。机上にはいつも半田ごてがあり、滅多に使わなかったが、Shockleyを気取って小さな顕微鏡も置いていた。

自動化した分光測定器が動く様子は、NHKがInP太陽電池の取材に来た際に収録・放映され、その後も大いに役に立った。

この頃の研究では、多接合のセルをつなぐためのトンネル接合特性測定が印象に残っている[7]。良く知られた現象とは言え、自らの手で作った素子で巨大な量子効果が現れるのを見た時の様子は脳裏に焼き付いている。江崎玲於奈博士がこの特性を初めて見たときの感動が想像できる瞬間だった。後年、江崎先生と会議の宿泊先で一緒した際、多接合太陽電池のセル間接続にトンネル接合を使っている話をした所大いに喜んでおられた。

NTTでの研究生活も3年になろうとしていた頃、古巣の小林俊一先生のもとで助手をさせてもらうことになった。多接合太陽電池研究は、途中で降りた形だが、その後山口リーダーの下で大きく結実し、シャープを始めとする企業の参入もあり、実際に衛星に搭載されるようになった。耐放射線性を発揮して太陽電池トラブル確率を大きく下げることとなり、技術の進歩にわずかながら関わったのは再びの幸運であった[8]。

## 5 金属絶縁体転移

NTTにいる間に、ランダム系での実験研究のフロンティアは、弱局在から金属絶縁体転移(MIT)に移っていた。ランダム系のMITは固体物理の重要な問題であるが、四人組のスケール理論による最小電気伝導率概念の修正などの変革を経て、電子間相互作用を考慮した場合のMITという超難問に繰り込み群や計算機を用いて挑もうという機運が起こり、実験でも臨界指数のような重要な量を高い信頼度で測定することが重要命題になっていた。MITが生じると考えられる3次元系で、試料の一様性を保ってMITの転移パラメーターを微細に調整することは容易ではなく、様々

な方法が試みられていた。

そこで思いついたのが、永続的光伝導 (PPC) を用いる方法である。混晶半導体  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  の Al 濃度  $x$  を 0.3 程度にすると、浅い準位を持つ Si などのドナーが深い準位を持つようになり、DX センターと呼ばれていた。Si を高濃度ドーピングしても、暗状態で冷却すると電子は DX センターにトラップされ絶縁体になるが、光照射するとトラップから電子は励起され、障壁が高いために再捕獲は起こらず、実効的に浅い不純物濃度が増加した状態になり、電気伝導を生じる。これが PPC であり、単一試料で実効ドナー濃度を変えて実験できる。問題は、 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  の厚膜のような変わった試料の調達だった。小林先生に相談したところ、関西学院大の佐野直克先生が学生時代の後輩だ、ということで、MBE 成長を依頼していただいた。佐野先生とは試料の細かな構造を電話等で相談し、程なく試料をお送りいただいた。佐野先生にはその後も 2 次元電子系やトンネル接合、Al の細線など様々な試料をご提供いただいた。

信頼度の高いデータを得るため知恵を絞った甲斐があり、最初の試料で明瞭な MIT を観測することができた。五晩徹夜して取ったのが、図 3 のデータで、0.5 K 以下では温度依存性を  $\sqrt{T}$  で近似できたため、これを用いて零度に外装した電気伝導度の電子濃度依存性である [9]。挿入図に示したように、臨界指数 1 を得ることができた。

1987 年は高温超伝導フィーバーと超新星爆発が重なり、物理学には大変な年だった。京都の低温物理国際会議のサテライトとして、Anderson 局在の会議が東大山上会館で開かれ、PPC による MIT 実験を発表し、一定の反響を得ることができた [10]。そのおかげか、大変名誉なことに、Nevil Mott 先生の有名な [11] や、学部時代の恩師でもある上村洗、青木秀夫両先生の [12] などの成書や、日本物理学会誌のレビュー解説 [13], [14] でも取り上げていただいた。運良く見つけた転移点近傍での実験手法であり、何とか測れるものは何でも測定してやろうと思ひ、実際絶縁体側での誘電率測定やホッピング伝導、トンネル状態密度など色々と測定を進めていた。しかし、分野の流行り廃りは厳しいもので、次第に同分野の実験屋が減り、自信満々で申請した科研費が 2 度立て続けに不採択になったのを機に、足が遠のくことになってしまった。

## 6 超伝導絶縁体転移, メゾスコピック系

局在効果で大事な量に、電荷キャリアが量子コヒーレンスを保って伝播する距離、コヒーレンス長がある。

実験から求め得る量であり、系により低温では  $\mu\text{m}$  を超える長さに伸びる。これより小さな系での量子効果を調べる研究—メゾスコピック系の研究が盛んになりつつあった。微細加工の設備をそろえるのは大学では容易ではなかったが、小林研究室では小型の走査電顕を描画装置に改造するなど手を尽くしてメゾスコピック系に手を伸ばしていた。また、金属微粒子の久保効果研究から、単電子の帯電効果にも馴染みがあった。そこでまず研究対象になったのが、超伝導微粒子膜の超伝導絶縁体転移 (SIT) である。

表面を酸化した超伝導微粒子を 2 次元的に並べた微粒子膜は、ランダムな Josephson 接合 (JJ) 網と見ることが出来る。各微粒子は超伝導状態であるが、膜全体としては、超伝導、金属、絶縁体の各相が考えられる。酸化条件を変えて調べ、高温側の面抵抗軸上では超伝導相と絶縁相が隣接していて、色々と系を変化させても転移点での臨界面抵抗が  $h/4e^2$  という普遍的な値の近くなるということが明らかになりつつあった。この普遍的臨界面抵抗は、非常に多くの興味深い物理を含んでいて、泥縄式に懸命に勉強したものなかなか追い付かないほど研究が進んでいた。

中でも、単一 JJ に生じる古典-量子転移には惹かれた。開放系の量子情報拡散が、環境を Caldeira-Leggett 流にモデル化することで扱え [15]、このような系での一種の相転移が SIT として現れる、というのは極めて魅力的だった。ただ、Caldeira-Leggett 理論が 2 次元ランダム系にそのまま当てはまるわけではなく、様々な要因から SIT を捉えようとする多数の理論が存在した。一方、実験結果としては上記の通り、比較的単純 (もちろん、実験そのものは一つの系について行うだけでも大変である) で、数多あるモデルの検証を行うのは少々厳しく感じられた [16]。そこで、単一 JJ を半導体でシャントして抵抗値を可変とし、相転移を起こすことを考えた。実際にこれを行うとするとまずはマクロ量子コヒーレンス (MQC) を観測しなければならない。当時は、そこに手が出るどころか、単電子効果の観測もまだ難しい状況だった。

小林先生の周到な予算獲得が実を結び、また難波進先生の重点領域研究に参加させていただいたことで、微細加工設備が整い、メゾスコピック物理に乗り出すことになった。すでにかかなりの仕事ながされた後であったが、始めてみると毎日雲のようにアイデアが湧き、自分の手が遅いのがもどかしく感じる日々だった。元々、不自由な体をこき使ってがむしゃらに研究する性質で、毎日午前様で実験し、結果が出るとすぐ論文にしていた。一例が、図 4 の Fibonacci 格子の伝導で、微細加

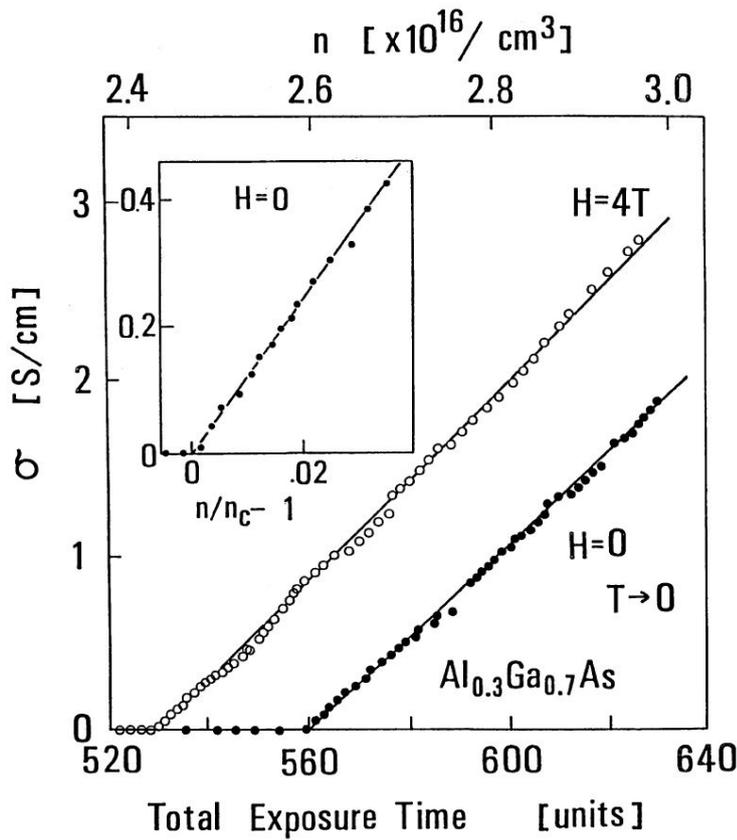


図3 永続的光伝導 (PPC) で起こした絶縁体-金属転移. 横軸は有効キャリア濃度, 縦軸は  $T = 0$  へ外挿した電気伝導率. 挿入図は, 転移点付近の拡大図. [9]より.

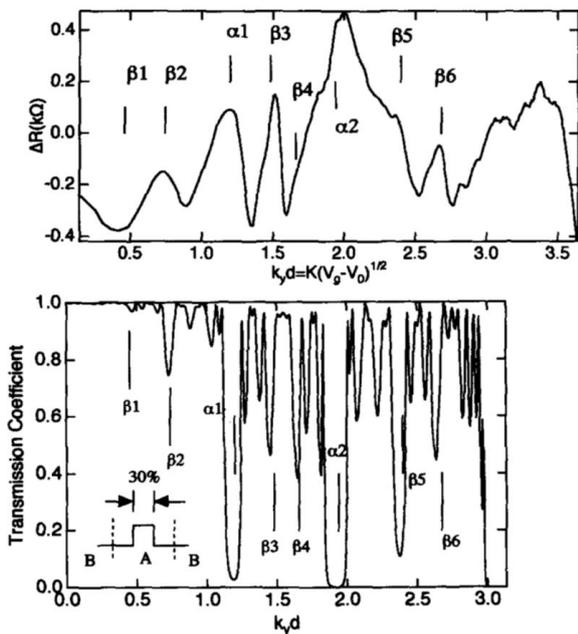


図4 思いついてはすぐ実験してすぐ論文にしていた頃の仕事の例. 上: 量子細線に Fibonacci ポテンシャルを作り込み, 量子 Hall プラトー上に現れた電気抵抗振動を電子波数の関数としてプロットした. 縦線は, 下の図の Fibonacci 格子の特徴的ギャップ位置を示したもの. 下: 甲元理論 (Phys.Rev. Lett. 58, 2436 (87) により計算した Fibonacci 格子の透過率の波数依存性.

工で Fibonacci 列によるポテンシャル変調をかけて量子 Hall 伝導度に変調される様子を調べたところ, 理論と非常に良く合う様子が見えて, 喜んですぐに論文にした. この時, 有効質量がバンド質量と非常に違って, 「量子 Hall だから当たり前」のような粗い議論で論文にしてしまい, 後で, エッジ状態質量について貴重な情報が得られるはずだったことに気付いてちょっとがっかりしたものである.

この頃, 単一 JJ で思いついたのと類似の実験を, 半導体量子ドットと量子干渉計を使ってできないか, ということを考え始めていた. 手始めに量子ポイントコンタクト (QPC) を干渉経路に組み込んで, 量子干渉を制御することを考えた. どういうわけか, 明瞭な結果が出ず困ったが, これは後述するように当然の結果だった. 最後はわずかに干渉パターンが動くのが観測され, 論文にしたが [17], 走りすぎを後悔することになる.

## 7 六本木の物性研究所

1993年4月, 物性研究所凝縮系研究部門に着任した. 2スパンの全く何もない部屋をもらい, 1人での実験室作りに悪戦苦闘の日々が始まった. 機械工作, 溶接, 測定回路作りはラジオ少年の得意とするところだったが, 高所作業やセメント流し込みなどのミニ土木工事

は身体能力的に厳しく、怪我が絶えなかった。実験できるまで何年かかるかわからなくなり、同部門の家泰弘先生の設備も使わせていただくことになった。以来、2015年に家先生が退職されるまで共同研究者として仕事をさせていただいた。家研の描画装置を改造し、何とかかんとか実験できるようになるのに、丸々1年、助手として平澤正勝氏が入ってきて、実際に論文になるデータが出始めたのは更に1年後だった。2年目には本格的な III-V 族の MBE が導入され、家研の助手の遠藤彰氏が高移動度 2 次元電子系を作れるようになった。中古屋で買い漁った測定器、自作の測定回路の寄せ集めでも、ちゃんと Coulomb 振動を観測することができ、さあ、これから、と考えていた。

着任当初より追いかけていたと思っていたテーマは、ひとつは (a) 量子ドットを含む量子干渉回路、もうひとつは、(b) 微小 JJ の量子-古典転移である。これ以外にもアイデアは山とあったが、まずはこれらに絞ろうと考えた。絞ったつもりアイデアだったが、ミニ土木工事に足を取られている間にイスラエル Weizmann 研究所の Heiblum グループから (a) のような実験が報告され、大いに落胆した [18]。この論文では、ドットのゲート電圧が共鳴位置を通過するとき、Aharonov-Bohm (AB) 振動の位相が  $\pi$  だけジャンプすることを報告し、通常の滑らかな  $\pi$  シフトでないため、何らかの多体効果に違いないと主張していた。

ところがこれには Markus Büttiker のコメントが付き、Onsager 相反性の帰結に過ぎず、2 端子素子では Aharonov-Bohm (AB) 振動の位相は、0,  $\pi$  に固定されるため、位相シフトの測定は困難、という結論だった\*1。いわゆる位相固定 (phase rigidity) の問題で、以前 QPC で観測した AB 振動位相の連続変化は本来、見えてはいけないことになる。簡単に見えるはずだと思っていた連続変化がなかなか見えなかった理由は腑に落ちたが、では、わずかながら見えたと思った変化は何だったのか？答は簡単だったが、当時は「間違いを論文にしたか？」と思い、青くなったものである。当時ぼんやり考えたのは、AB リングを理想的な 1 次元円形導波路ではなく中に穴の開いた共鳴器と思えば、器内の散乱体 (量子ドット) の位相シフト変化で、出入口付近のノード位置などが連続的に変化し、振動位相の連続変化として見えても良いのではないかと、いうものだった。とにかく、Weizmann の実験ですべて終わったわけではないと思い直し、こちらのやり方で実

験を始めることにした。

(a) の問題で本来考えていたことは、電子がドットを通過する際にクーロンブロックードを感じる、ということは、ドット内の電子と相互作用していることには疑いがなく、ドット内電子状態に変化を与えることはないのか？という点である。変化があるとすれば、干渉パスに分かれた電子が異なる環境を引き連れていることになり、干渉性が失われるのではないかと相互作用であればドット外でも至る所で行われているはずであるが、1 過程で 1 個の電子のトンネルしか許さないドットの特長が何か影響するかもしれないと考えた。特にドットの電子数が奇数の場合、ドットには  $1/2$  の局在スピンが存在するが、トンネルして入った電子のスピンと出た電子のスピンが異なれば、ドット上のスピンは反転することになり、明らかにトンネルの痕跡が残る。これが AB 振動振幅に現れると期待した。この考えは、物性研に客員で来てもらっていた北大の明楽浩史氏との議論を通して得たもので、明楽氏は non-crossing 近似を使い、理論にまとめてくれた [19]。Tel Aviv の Yuval Gefen のところでも、摂動論で同じ結果を得ており、実験すればすぐに結果が出ると楽観していたが、現実には厳しく、メゾスコピック AB リングの片方の干渉経路でゲート電圧操作をすると、他方にも結構な影響が出て実験は頓挫し、結果が出せるのはだいぶ後になる。

(b) では、超伝導単電子トランジスタ (SSET) を作って、クーロン島を超伝導リングにすることを思いつき、こちらはすぐに実験できたが、見えたのは Little-Parks 実験の SSET 版だった [20]。これで微小超伝導体の中の渦糸状態に興味湧き、(b) から寄り道に入ってしまった。低温 STM を使って、渦糸状態を可視化しようとしたが、色々選択の失敗があり、余り冴えた結果を出すことができなかった。また、(b) の方向では、米国で相当な予算で研究を進めたものの成功せず、彼らは「失敗の言い訳」の論文を山と書いていて、その中に「Nb のすごく良い接合でないため」と書いているのを信じ\*2、Nb の接合を作ろうとして実験がスタックしていた。そうこうしているうちに、NEC の中村泰信氏のグループで、Al 接合の Josephson-準粒子ピーク (JQP) で光子補助トンネル (PAT) の実験をするうち、MQC らしきものが見えた、という報文が出て [21]、大いに焦ることになった。次は、当初考えていた時間領域の実験だと思い、科研費を申請したものの、不採択で

\*1 筆者はこれを Büttiker 先生からのプレプリントで読んだが、出版された論文としては発見していない。

\*2 これは真っ赤な嘘であった。もちろん、嘘だと看破できなかった筆者の力量不足である。

臍を噛み、柏移転や物理学会理事でてんてこ舞いの頃、中村グループから時間領域の報文が出た [22]. 出版に先立ち国際研究集会で中村氏からプレプリントを手渡しでもらい、いずれ中村氏が達成するだろうとは思っていたものの、やはり落胆したのを覚えている。読むと中身は素晴らしく良く準備された実験だったのはもちろんであるが、金もかかり、冷凍機の冷却能一つとっても追いつくのは困難に思われた。

## 8 東京電力エネルギーワークショップ

1996 年から、この不思議なワークショップの主宰者にご指名を受け、2004 年まで続けることになった。これは、東京電力の会議室に色々な専門の 7~8 名の学究と、数名の東電社員が集まり、エネルギーや環境、その他様々な問題について、

メンバーやゲストからのプレゼンを聞いた後、2 時間ばかり討論する、というもので、3 か月に 1 回程度開催していた。メンバーの話によると、東電は公的機関に近い会社で、様々な問題で社会から批判を受ける可能性があり、その際に科学的な立場からの知恵や発信力を借りるためこれを開いている、とのことであった。年に 1 回、時には泊りがけで出かけるような東電施設の見学会があり、当時まだ動いていた柏崎刈谷の原発、揚水発電所、六ヶ所村の再処理施設、扇島火力、八丈島の地熱・風力発電所など、多くのものを見せていただいた。

それまで、物理実験ばかりで社会とは関係ない生活を送ってきたため、目的はどうあれ、このワークショップは毎回極めて面白かった。NTT で一応電力の端くれの研究をしていたものの、関東一円の膨大な電力を供給するとはどういうことか、頭では理解していたつも



図 5 東電エネルギーワークショップで訪れた六ヶ所村再処理施設での集合写真。向かって右から 5 人目(前列)が筆者。

りでも、巨大な設備群を目の当たりにすると、茫然とした。自らのプレゼンで太陽光の可能性について考え、非常に厳しいものであることを認識せざるを得なかった。また、様々な技術による生成物、そのライフサイクル評価 (LCA) という点についても目を開かされ、この点も太陽光利用研究の遅れは気になった。電力システムの初歩などを学び、太陽光を電力グリッドに編入する困難さも理解された。

東電は東日本大震災後、電力供給の責務を果たしながら、茨の道を歩み続けている。同じとは言わないが、自らの身に多少の類似性を感じなくもない。折角の学びを役立てたいところなのだが、何もできぬ自分が実に歯がゆいところである。

## 9 希薄磁性半導体

III-V 族半導体の InAs, GaAs の III 族サイトの一部を Mn で置換すると、p 型の導電体となり低温で強磁性を示すことが発見され、希薄磁性半導体 (DMS) として、様々な応用も期待されて研究が活況を呈すことになった。局在スピンをもつ Mn イオンがそろうことで強磁性になっていると考えられたが、それがいかなるメカニズムによるものか、電荷キャリアとどのような関係にあるのか、が問題の焦点であった。筆者もこれには (Ga,Mn)As 合成時から関り、電気伝導を中心に研究していた。当初は、東北大大野英男氏、東工大宗片比呂夫氏に試料をいただいていたが、スピン物性研究の CREST が採択になり、小型の MBE を用意して自前の試料を作り始めた。この頃、技術職員の橋本義昭氏が研究室に加わり、筆者の身体能力の欠如を補ってくれるようになったのは、大変ありがたく、退職の日まで一緒に仕事をさせていただいた。

(Ga,Mn)As の Mn 濃度を上昇させると、ある点で金属に転移するが、転移点より若干低濃度で強磁性が生じる。金属に転移後、更に Mn 濃度を上げると、強磁性は維持される一方、伝導は再び絶縁体に戻ってしまう。自分で試料を作ってみて驚いたのが、冷却して絶縁体になるような試料を、より良い電極を取ろうとして低温でアニールすると、金属に変わってしまうことである [23]. これに伴い、キュリー点も上昇する。アニール温度や時間で様々な試料を作り出せることもわかり、一度の MBE 成長基板から多数のパラメーターの異なる試料を作れるようになった。

このような試料について、東大生産研の平川一彦氏が光学伝導度測定を行ったところ、バンドギャップ中にブロードなピークが現れ、キャリアの状態密度は大きい一方、局在性が非常に強いことが示唆された。こ

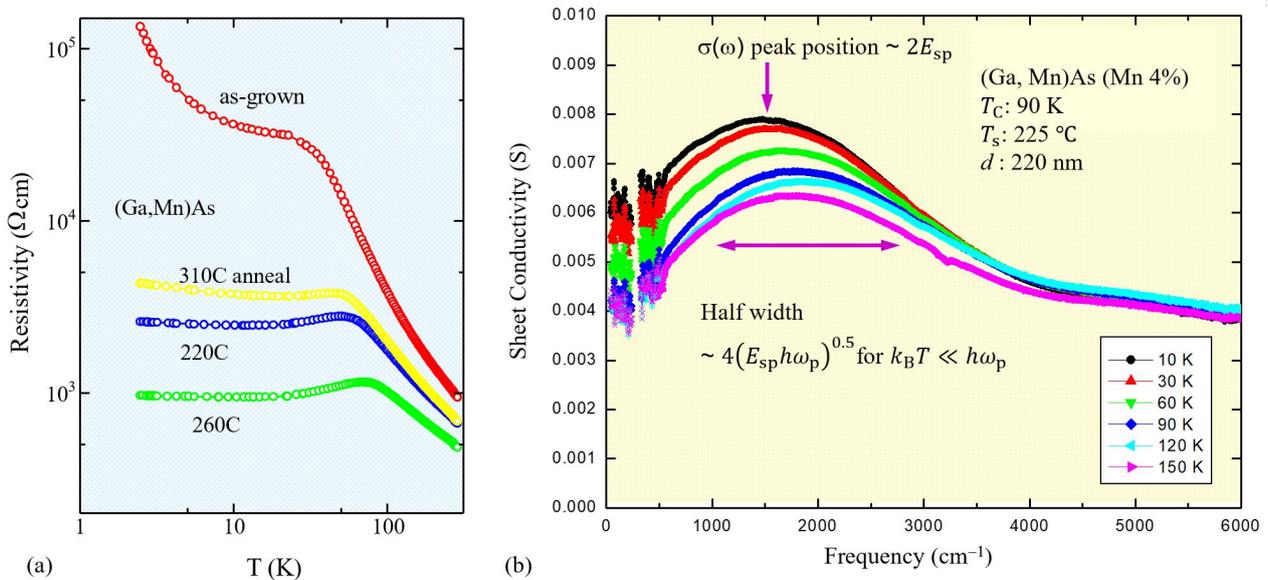


図6 (a) Mn 濃度 5% の (Ga, Mn)As を低温アニールすることで、絶縁体から金属に転移する様子 (抵抗率の温度依存性). [23] より. (b) 低温アニールして金属的になった試料の光学伝導度. データは [24] と同じ.

の状態密度が強磁性と強く相関していることもわかった [24]. このことと、MIT 近傍での伝導に対する 2 パラメータスケールリングなどの結果から、大きく異なる 2 つの局在長を持つような波動関数の空間分布を推論し、縮退半導体や不純物バンドのような単純なモデルには当てはまらない電荷キャリア (正孔) の振舞いを一通り説明した [25]. その後、この問題については、何度か蒸り返され激しいディベートも生じた。これを粘り強く追及された東大工学系研究科の田中グループの努力もあり、長い時間をかけてバンドの姿も含めて全容が明らかになってきた [26]. 我々の当時の結論については、現在の理解に照らしてもそれ程間違っていないと信じている。

このような特異なキャリアの振舞いから、III-V 族 DMS が通常の半導体デバイスに組み入れて使用できるようなものでないことが明らかになってきた。様々なデバイスのプロトタイプ的な研究が行われ、Nature, Science を賑わせ続けていたが、筆者には今一つピンと来なかった。そこで、様々な半導体超構造の上に DMS を積層してスピン注入源として使用することを考えてみた。現在の DMS スピントロニクスはこの方向で進められていると思うが、我々の研究室では膜成長技術やプロセス技術が今一つだったのか、さほど芳しい結果を得ることができず、それでも細々と研究を続けた。また、この分野全体も次第に縮小した。

## 10 柏移転と研究の進展

研究もようやく軌道に乗ってきた 97 年頃、物性研の柏移転の話が本格化し、筆者は建築委員に指名されてこちらにも忙しくなってきた。床面積を増やすため、基準特例申請する、ということでこのための膨大な作文と作図作業がのしかかってきた。建築委員の同僚末元徹氏とともに、キャンパス計画室を訪ねて新キャンパスのコンセプトなどを聞いたり、基本設計者の原広司氏にお目にかかって、物性研の研究の説明や建築への希望を申し上げたりした。出てきた最初の図面は、とても飲めるものではなく、すったもんだが始まったが、最後は双方譲歩して今ある形に落ち着いた。実施設計段階になると、建物のクオリティを巡って、少しでも安くしようとする東大本部施設係との激しいバトルが始まった。しかし、これは時の小淵政権の経済対策で公共事業投資の対象となって建設資金に余裕が生じ、最高級とまでは行かなかったが、相当良質な資材を使う方向で決着した。工事は遅れているように見えたが最後は突貫、というお決まりのパターンで、99 年には低層棟、2000 年には本館ができて完全移転した。移転時の予算で、最高級の描画装置、MBE が揃い、家研にはトップロード型希釈冷凍機が入り、更にしつこく出し続けていた科研費もようやく採択された。今度こそ、という気持ちで、六本木時代の終わり頃に助手として着任した小林研介氏と共に、量子ドット-量子干渉計の問題に再度取り組み始めた。柏移転での思わぬ福音は、東京タワーの電磁波から解放されたことで、メゾスコ

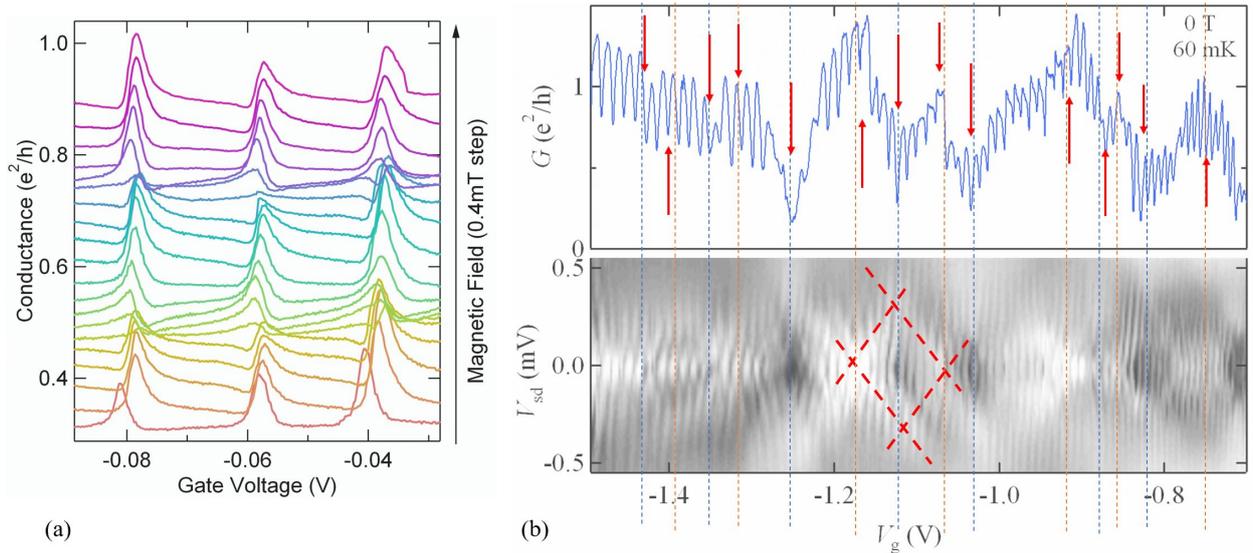


図7 (a) AB リングの片方の腕に量子ドットを埋め込んだ系の伝導に現れた Fano 歪 (ドットのゲート電圧に対する系の電気伝導度). リングを貫く磁束が磁束量子 ( $h/e$ ) の半分程度で歪む向きが反転している [27]. (b) 上: 解放状態に近い量子ドット伝導に現れたクーロンピーク. 強い結合状態がベースラインの振動として現れ, これと Fano 歪の向きが同期している. 下: 上の伝導度をグレースケール表示として, バイアス依存性を示した. 縦の細かい縞が個別のクーロンダイヤモンドで, これらをこのスケールで見ると更に強結合状態によるダイヤモンドが重畳している [28].

ピック系の量子輸送現象がこれまでが嘘のように安定で明瞭に見えるようになったことである. また, ドットの形成法をラップゲート式にしたことで, ドット間の静電干渉も激減した.

Weizmann グループは, 2 端子から 4 端子に素子を替え, 今度は連続するドット内固有関数のパリティがすべて同じように見える, という「パリティ固定問題」を見つけて今度こそ多体効果だと主張していた [29]. 2 端子素子の AB 振動にはドットの位相シフト情報がないとしても, クーロン振動には何か現れないのか? 自然の女神は, Fano 効果によるピーク歪, という形で鮮やかに答を出してくれた (図 7(a)) [27]. パリティ固定問題に相当するものも Fano 効果の実験で見えてはいたが, これについては, ドット内に現れる強結合状態によるパリティ支配, の問題として説明ができ, これについての明瞭な実験も行うことができた (図 7(b)) [28]. ドット上のスピンによるコヒーレンスの変化の可能性についてはすでに述べたが, 柏での安定した実験でようやく議論可能なデータが得られるようになり, それでも散々苦労して, これなら, という結果を得ることができた [32]. 10 年越しの成果だったが, この時はしかし, 先に進むべき問題があり, それは, 近藤効果がコヒーレンスにどのような影響を与え, 共鳴時の位相シフトはどうか, というものだった. この問題に取り組む際, Fano 歪の実験で学んだことを応用し, 干渉計を組むのに一旦 AB 型ではなく, Fabry-Pérot

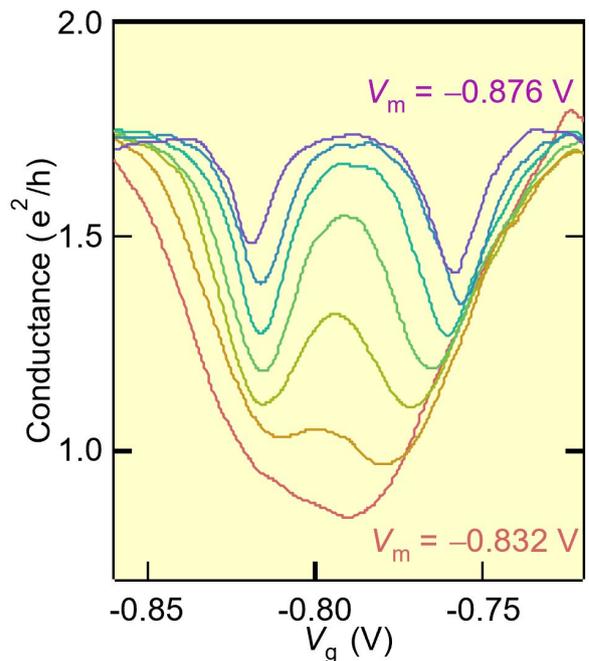


図8 量子ドットに側面結合した量子細線に現れた, Fano-近藤反共鳴の伝導波形. 結合を強くするに従い, 最初は2つに分離していたクーロン・ディップが, 近藤効果によって一つの幅の広いディップに変化する様子が見られる [30].

(FP) 型, すなわち, 量子細線の側面に量子ドットを接触させただけの簡単な形状を採用した. 沢山のクーロンピークで確かな近藤効果を探すという, 根気勝負の実験で, かつ磁場の向きを変えるためにヒートサイ

クルで量子ドットが変化しない、という幸運を祈るようなものだったが、何とか成功し、高い量子コヒーレンスと位相シフトの  $\pi/2$  へのロック現象を確認することができた (図 8)[30]. この成果は、David Ferry 氏の有名な成書 [31] で大きく取り上げていただいた。同じ実験は AB 型でも成功し、スレーブボソン法によってピーク形状の再現をすることもできた [33]. 近藤状態は、局在スピンと伝導電子スピンの間に生じる最大エンタングル状態であるが、1 対多のエンタングルのため、個別伝導電子に対するエンタングルの度合いは大きく低下する。平たく言うと、局在スピンは頻繁に反転してドットのスピンの反転していてもどの伝導電子が反転させたのかはわからず、通過してもドットに「通過の印」が付くことはない。言われてみれば当たり前だが、筆者のように鈍い物理屋は、実験して初めて腑に落ちたのだった。

これらの実験について、産総研の中西毅氏、イスラエル Ben Gurion 大の Amnon Aharony, Ora Entin-Wohlman 両氏、慶応大の江藤幹雄氏に理論的な援助をいただいた。特にイスラエルの 2 人については、客員で来てもらい、毎日実験データを眺めて解析しつつ議論し、以前より胸につかえていた、AB 振動位相の連続変化について、多重経路の効果として明快に説明し、データのほぼ完璧なフィッティングまですることができた [34]. [17] では、多重経路のせいでシフトが見えにくいのではないかと推論していたがこれは全く逆で、多重経路によって Onsager 相反性を満たしつつシフトも生じていたのであった。

量子ドット系の実験が忙しくなる一方、JJ と MQC の方の話は IBM の参入などもあってどんどん進んでしまい、追いつくのが更に難しくなっていた。ただ、開放系の言葉で言えば、環境との結合が弱くて環境の記憶効果が無視でき、Lindblad 型の方程式で記述できるような場合が扱われていて、本来興味があった領域の実験は余り行われていなかったため、MQC の方は極力簡単な実験で環境結合を強くすることを考えてみた。助手として柏に来てくれた阿部英介氏と行ったのは、JQP の PAT という古い方法ながら、2 次元電子系で JJ をシャントしてその濃度を連続的に変化させて MQC ギャップを測定するものだった [35]. 確かに、シャント抵抗を下げるとギャップが消失する様子は見えたが、肝心な部分を測定しようとする、JJ の特性が不安定になり、相転移の確認までは行かなかった。

量子操作の先端の研究では、JJ とキャパティ電磁場との強結合が考えられ、トランズモンの採用によってコヒーレンス時間が更に飛躍的に伸び [36]、現在では

「量子コンピューター」という名前が冠される実験回路が動くまでになっている。社会的な実用にはまだ遠いが、例えば環境結合の初期過程、量子カオスの発生など、量子情報の教科書でしかお目にかかれないと思っていた実験を実行できる可能性があるのは、誠にうらやましい限りである\*<sup>3</sup>。阿部氏は現在は、理研の量子コンピューター研究センターでハードウェアのリーダーを務めている。蠅の斧を最新兵器に持ち替え、ぜひ世界の目を剥く研究をしてほしいと願っている。

## 11 太陽光エネルギー CREST

引き続きエネルギー問題への関わりについて少しだけ述べておきたい。2009 年から 2016 年まで、NTT 時代の上司山口真史氏 (現豊田工大教授) が総括を務める太陽光クリーンエネルギーがテーマの戦略的基礎研究 (CREST) において、アドバイザーを務めさせていただいた。太陽光エネルギーを真の意味 (オープンパリティで電力供給できるようになる) で実用化するのは容易ではない。そのために、真剣に様々な角度から基礎研究を行おうという方々が集ったこのプロジェクトは非常に興味があるものだった。また、CREST 研究の出口でもある NEDO プロジェクトの審査にも加わり、研究の様々な面を見た。筆者が気になっていた LCA についても、相当な研究が進んでいた。

始まって 2 年が経過した頃東日本大震災が発生し福島事故を受けて、補助金と固定価格買取制度 (FIT) による強引な太陽光発電の普及が始まった。太陽光発電は、実用技術としてはまだ研究開発途上であり、筆者は無理な政策によって基礎研究が潰れてしまうことを恐れ、何も頭がないと思いき首相の空虚な笑顔を TV で見て暗澹たる気分になった。案の定、日本の政策だけが引き金ではないが、中国からの太陽電池パネルのダンピングが始まり、先端的太陽電池メーカーは米国ソリンドラに続いてドイツの Q セルズまで倒産した。最近では、日本発の優れた技術だった HIT 太陽電池も三洋電機から継承していたパナソニックから生産停止がアナウンスされた。この CREST でも、太陽電池の真の低価格化、低エネルギーコスト化を目指していた良質な研究が、当座のマーケット的な意味を失い、困った状況に立ち至った。代ってペロブスカイト太陽電池が研究の主流になっていき、CREST 終了後には Si とのタンデムセルなどの技術も開発されたが、現在に至って少なくともセル単位の変換効率競争では、日

\*<sup>3</sup> オープンになっているものが多いので、筆者でも良いプランを立てて申し込みができるのかもしれない。この原稿を書きながら少しやりたくなってきた。

本の存在感はほとんどなく、サウジアラビアなどの後塵を拝しているように見える。ただ、FITなどに頼らない真の実用化においては、今のところ蓄電の方がポトルネック技術である。こちらはまだまだ固体物理の基礎研究が大事な領域であり、今後固体物理から蓄電のイノベーションが起こることを期待している。

地震から2年ほど経ち、物性若手夏の学校で固体物理の実用技術研究について話す機会があり、太陽電池研究について話した [37]。当時の研究や実用化の状況について相当批判的な内容になってしまったが、野山を埋め尽くす太陽電池パネルが悪者扱いされている今、危惧が残念ながら当たってしまったと言わざるを得ない。CREST 全体で非常に勉強になり、有難かったが、一方太陽光発電政策については、直接関わりあるわけではないが、苦い思いの残るものにもなった。

## 12 量子操作と電気伝導

側面結合型の量子ドットから諸々の情報が得られることがわかった。側面結合ドットは、伝導路との結合度を保ちつつドット内の電子数を0個まで減らすことができる [38]。ドット内電子状態をスピン状態まで含めて把握できることから、ドットを対象に対する擾乱の極めて少ないプローブとして使用することを考えた。測定対象となる伝導体のスピン偏極を検出する手法として、ドット中のスピン一重項、三重項の差を利用するもの [39]、また、2個の電子をドットに取り込む際に生じるスピントロニックの一種を利用するもの [40] を思い付き、量子細線、および量子ポイントコンタクト (QPC) にそれぞれ応用した。後者は思いついてから、実際に応用し、論文にできるまで6年も要してしまったが、理論提案から長い間検証されていなかった QPC の第一プラトー (コンダクタンス  $2e^2/h$ ) でのスピン偏極 [41] を明瞭に捉えることができた。同時に、 $1/2$  プラトー (同  $e^2/h$ ) でもメカニズムの異なるスピン偏極、更に、近藤効果と思しき伝導度ピーク付近での偏極の減少もすべて観測することができた。

この実験の頃から、中村壮智助教が加わった。QPC 通過によるスピン偏極現象をどう捉えれば良いのか再度考えていたが、オリジナルの理論 [41] にもあるように、伝播する電子波束の重心に座標軸を固定し、伝播に従い局所ハミルトニアンが変化している、と考えると、あたかもこの電子に対して外部から量子操作を行っているように見ることができる。量子操作の速さに応じて、系には断熱的から非断熱的まで、様々な遷移が生じるが、QPC の場合、中央のポテンシャル頂上付近では断熱的、出口付近では非断熱的な遷移が主になるた

めスピン偏極が生じると考えることができる。

QPC のような特別な構造を使うと、スピン偏極電流を作り出せることが示せたが、このような電流を使って弾道的伝導を起こすと何が生じるだろうか？我々が期待したのは、スピン-軌道相互作用 (SOI) が強い2次元系での Zitterbewegung (ジグザグ運動, ZB) と呼ばれるものが伝導に現れることだった。InAs で特に Rashba 型 SOI が強くなる構造を用意し、QPC の  $G = 2e^2/h$  プラトーを使って電子を注入し、レシーバーも QPC を使ったところ、ユニバーサル伝導度揺らぎ (UCF) と良く似た磁気抵抗振動が現れた。しかし、QPC ではない普通の電極を使うと同じ試料でもこのような振動は現れず、UCF ではないことが明らかだった。色々検討した結果、この磁気抵抗振動は ZB によるものであると結論付けた [43]。

このように、電子が界面を通過する際に、非断熱的な過程を経験しスピン状態が変化する可能性がある。ここで、頭に浮かんだのが、DMS の項で述べた田中グループで合成された、Fe を磁性イオンとする DMS の (In,Fe)As である [44]。ベースになった InAs は表面でバンドが下がり、自然2次元電子系ができていて知られており、(In,Fe)As は (In,Mn)As と異なり n 型導電体であるから、金属と良好な接触が取れることが期待された。また、DMS の多くが経験的にスピン偏極 100% のハーフメタルであった。このことから、(In,Fe)As で超伝導電極を取れば、超伝導近接効果においてスピン三重項超伝導が生じる可能性があるのではないか、と考えた。思いついてすぐに田中雅明氏に連絡を取り、基板をご提供いただいた。Nb で電極を取ってみると、近接効果が  $1 \mu\text{m}$  以上に及ぶことが見出された [42]。当初は、基板背面の In の影響などで不思議なデータが出ていたが、その後中村氏の努力で、スピン三重項超伝導の特徴を示すデータが得られた (図9)。この現象においても、やはり界面のところで非断熱過程によってスピン反転が生じる必要があると考えられる。というのも、(In,Fe)As よりもポテンシャル空間乱れが少ないと期待されたハーフメタルのホイスラー合金で同じことをトライしたところ、接触抵抗は桁違いに低かったが近接効果が観測されることはなく、交換ギャップによって一重項ペアが壊されたとみられるからである。(In,Fe)As のスピン三重項超伝導は、超スピン流が流れていることを意味し、超伝導スピントロニクスに応用されることが期待されている。

更に高い量子コヒーレンスを示す系として、量子 Hall 効果のエッジ状態が考えられる。電子相関の効果のため、比較的低磁場からスピン分裂したエッジ状態

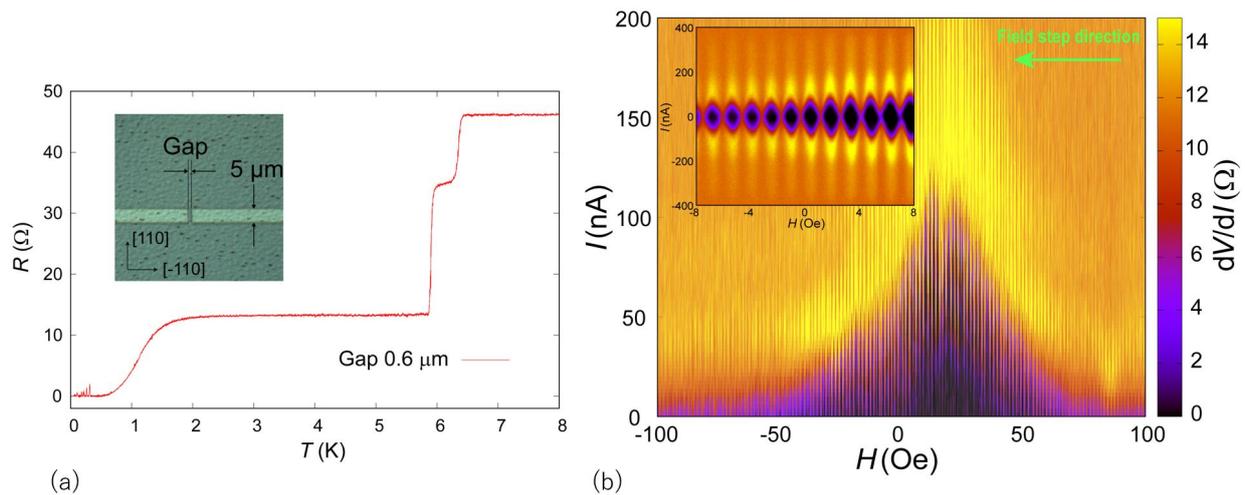


図9 (a) (In, Fe)AsにNbのギャップ  $0.6 \mu\text{m}$  を作りつけた系に現れた近接効果超伝導. 電気抵抗の温度依存性. 挿入図は試料の光学顕微鏡像. (b) 電流電圧特性の磁場依存性に生じた超伝導ダイヤモンド. 黒色の縦に延びる線それぞれがダイヤモンドになっている. 挿入図は一部の拡大で, ダイヤモンドが並んでいることが確認できる [42].

が生じ, スピン反転は分裂したエッジ状態間のトンネル現象と同値である. エッジ状態を伝播する電子に非断熱的な遷移を起こすため, すでに知られていた方法ではあったが, 軌道に曲率半径の小さなカーブを設けることで局所的に角運動量を発生させ, 部分的にトンネルを起こしてスピンの天頂角を回し, 更に伝播路の間隔をゲートで変化させることで方位角回転量を制御することに成功した [45]. 更に, 鋭角のエッジを用意し, Mach-Zehnder 型の干渉計を構成することで, 可視度 85% を超える干渉パターンを得ることに成功した [46]. 更に, 有限バイアスに対してショット雑音密度が振動する様子を見ることができたが, これらについては, 機会があれば別稿で紹介したいと思っている.

### 13 さいごに

元々弱かった両脚であったが, ポストポリオの影響で, 年齢と共に更に弱くなり, 最近では2年に1回くらいの割で骨折して救急車の世話になっている. それでも, 若い頃から, どうせ長生きできないから, ということでやけくその様に体に鞭打ち不摂生をして来た割には, 幸い重篤な病気からは逃れ続けて定年を迎えることができた. 物理実験からはとりあえず引退したが, 本年4月からは, 東京都市大の電気電子通信工学科で学生に電気回路を教えたり実験の面倒を見たりする仕事についている. まだラジオ少年 (と言っても半世紀近く年齢の違う学生たちは誰もわからないが) でいたいらしく, 物理屋ではなくなっても半導体からは今しばらく離れられないようである.

### 参考文献

- [1] G. A. Thomas, A. Kawabata, Y. Ootuka, S. Katsumoto, S. Kobayashi and W. Sasaki: Phys. Rev. B **26** (1982) 2113.
- [2] A. Kawabata: J. Phys. Soc. Jpn. **49** (1980) 628.
- [3] W. Sasaki: J. Phys. Soc. Jpn. **20** (1965) 825.
- [4] Y. Ootuka, S. Katsumoto, S. Kobayashi and W. Sasaki: Solid-State Electronics **28** (1985) 101.
- [5] C. Castellani, C. DiCastro, H. Fukuyama, P. A. Lee and M. Ma: Phys. Rev. B, **33** (1986) 7277.
- [6] B. Shklovskii and A. Efros: "Electronic Properties of Doped Semiconductors" (Springer, 1984).
- [7] S. Katsumoto and C. Amano: J. Appl. Phys. **63** (1988) 1238.
- [8] M. Yamaguchi, S. Katsumoto and C. Amano: in Proceedings IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp.2149 (1994).
- [9] S. Katsumoto, F. Komori, N. Sano and S. Kobayashi: J. Phys. Soc. Jpn. **56** (1987) 2259.
- [10] S. Katsumoto: in Springer Proceedings in Physics (1988) 45.
- [11] N. Mott: "Metal-Insulator Transitions", (CRC Press, 2007).
- [12] H. Kamimura and H. Aoki: "The physics of interacting electrons in disordered systems",

- (Clarendon Press, 1989).
- [13] 長岡 洋介：日本物理学会誌 **51** (1996) 485.
- [14] 大槻 東巳, 河原林 透：日本物理学会誌 **51** (1996) 821.
- [15] A. Caldeira and A. Leggett: *Ann. Phys.* **149** (1983) 374.
- [16] S. Katsumoto: *J. Low Temp. Phys.* **98** (1995) 287.
- [17] S. Katsumoto, N. Sano and S. Kobayashi: *J. Phys. Soc. Jpn.* **61** (1992) 1153.
- [18] A. Yacoby, M. Heiblum, D. Mahalu and H. Shtrikman: *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 4047.
- [19] H. Akera: *Phys. Rev. B* **47** (1993) 6835.
- [20] H. Sato, S. Katsumoto and Y. Iye: *Physica B: Condensed Matter* **249-251** (1998) 453.
- [21] Y. Nakamura, C. D. Chen and J. S. Tsai: *Phys. Rev. Lett.* **79** (1997) 2328.
- [22] Y. Nakamura, Y. A. Pashkin and J. Tsai: *Nature* **398** (1999) 786.
- [23] T. Hayashi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto and Y. Iye: *Appl. Phys. Lett.* **78** (2001)1691.
- [24] K. Hirakawa, S. Katsumoto, T. Hayashi, Y. Hashimoto and Y. Iye: *Phys. Rev. B* **65** (2002) 193312.
- [25] S. Katsumoto, T. Hayashi, Y. Hashimoto, Y. Iye, Y. Ishiwata, M. Watanabe, R. Eguchi, T. Takeuchi, Y. Harada, S. Shin and K. Hirakawa: *Mat. Science and Engineering: B* **84** (2001) 88.
- [26] M. Tanaka: *Jap. J. Appl. Phys.* **60** (2020) 010101.
- [27] K. Kobayashi, H. Aikawa, S. Katsumoto and Y. Iye: *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 256806.
- [28] H. Aikawa, K. Kobayashi, A. Sano, S. Katsumoto and Y. Iye: *J. Phys. Soc. Jpn.* **73** (2004) 3235.
- [29] R. Schuster, E. Buks, M. Heiblum, D. Mahalu, V. Umansky and H. Shtrikman: *Nature* **385** (1997)417.
- [30] M. Sato, H. Aikawa, K. Kobayashi, S. Katsumoto and Y. Iye: *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 066801.
- [31] D. K. Ferry, S. M. Goodnick and J. Bird: "Transport in Nanostructures" (Cambridge, 2009).
- [32] H. Aikawa, K. Kobayashi, A. Sano, S. Katsumoto and Y. Iye: *Phys. Rev. Lett.*, **92** (2004) 176802.
- [33] S. Katsumoto, H. Aikawa, M. Eto and Y. Iye: *physica status solidi c* **3** (2006) 4208.
- [34] A. Aharony, O. Entin-Wohlman, T. Otsuka, S. Katsumoto, H. Aikawa and K. Kobayashi: *Phys. Rev. B* **73** (2006) 195329.
- [35] E. Abe, Y. Kimura, Y. Hashimoto, Y. Iye and S. Katsumoto: *J. Phys.: Conf. Series* **150** (2009) 052001.
- [36] J. Koch, T. M. Yu, J. Gambetta, A. A. Houck, D. I. Schuster, J. Majer, A. Blais, M. H. Devoret, S. M. Girvin and R. J. Schoelkopf: *Phys. Rev. A* **76** (2007) 042319.
- [37] 勝本信吾：物性研究・電子版 **3** (2014) 1.
- [38] T. Otsuka, E. Abe, S. Katsumoto, Y. Iye, G. L. Khym and K. Kang: *J. Phys. Soc. Jpn.* **76** (2007) 084706.
- [39] T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto: *Physica E* **42** (2010) 809.
- [40] S. Kim, Y. Hashimoto, T. Nakamura and S. Katsumoto: *Phys. Rev. B* **94** (2016) 125307.
- [41] M. Eto, T. Hayashi and Y. Kurotani: *J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 1934.
- [42] T. Nakamura, L. D. Anh, Y. Hashimoto, S. Ohya, M. Tanaka and S. Katsumoto: *Phys. Rev. Lett.* **122** (2019) 107001.
- [43] Y. Iwasaki, Y. Hashimoto, T. Nakamura and S. Katsumoto: *Scientific Reports* **7** (2017) 7909.
- [44] L. D. Anh, P. N. Hai and M. Tanaka: *Nature communications* **7** (2016) 13810.
- [45] T. Shimizu, T. Nakamura, Y. Hashimoto, A. Endo and S. Katsumoto: *Phys. Rev. B* **102** (2020) 235302.
- [46] T. Shimizu, J. Ohe, A. Endo, T. Nakamura and S. Katsumoto: *Phys. Rev. Appl.* **19** (2023) 034085.