

スピンの切り拓く未来を支える日英共同研究

廣畑 貴文・Atsufumi Hirohata

英国ヨーク大学 電子工学科・教授、スピントロニクス素子・磁性材料
1997年10月～2002年3月、物理学科・Ph.D., Selwyn College
atsufumi.hirohata@york.ac.uk

1、ケンブリッジでの研究生活

ギリシャの言い伝えによれば、人生にはチャンスが3回あるという。私にとって最初のチャンスがケンブリッジ留学であった。日本で修士課程進学に際して研究の先行きが見えなくなっていた私は、当時在籍していた研究室に滞在していたドイツからの研究員の助けを借りながら、新天地を求め米英の大学に留学の可能性について尋ねる電子メールを送った。米国の大学は博士課程奨学金の出願締め切りが過ぎていたため断られてしまったが、英国からはケンブリッジ・オックスフォード両大学物理学科から入学願書が郵送されたきた。英語圏への留学に際し、研究テーマを変更することは困難であると考えられたので、学部4年生から修士課程まで学んでいた磁性分野の先生を紹介してもらえるか両大学に問い合わせたところ、ケンブリッジ大学からのみ返事をもらった。そこで紹介してもらえた数名の先生に電子メールを出すと、Tony Bland 先生からのみ返事があり、ちょうど東芝研究開発センターで講演をするため来日するのでその際に品川のホテルで会ってもらえることとなり、トントン拍子に留学が決まった。幸いなことに母親からの資金援助と東芝・セルウィンカレッジからの奨学金も得られて、晴れて1998年1月からキャベンディッシュ研究所 Physics and Chemistry of Solids 部門 Bland グループにおいて博士課程の研究を始めることとなった。

研究室では、円偏光を用いた半導体中へのスピン偏極電子の生成と検出という研究を行った。この内容は1990年に理論提案された論文が基になっており、それは私自身が学部4年生の輪講で発表した論文であり、不思議な縁を感じたものである。磁性分野においては、原子の周りを回る電子が持つスピンと呼ばれる物理現象が鍵を握っている。スピンは電子の回転が生み出す磁場として、円形コイルに電流を流した場合に磁場が生成されるということと同様の現象であると単純化できる。この現象は20世紀になって確立された量子力学を用いなければ理論的な説明がつかないのではあるが、現象としては中国の磁州やギリシャのマグネシア地方で紀元前から磁石として知られており、世界最古の量子力学現象であると言えよう。身近には冷蔵庫の磁石として使われるような磁性体は、磁気記録材料・素子としても長年にわたって用いられている。特にハードディスクドライブはクラウドサーバーとして幅広く用いられており、例えばスマートフォン 120 台及びタブレットコンピュー

ター80 台に対してそれぞれ約 1 台のサーバーがバックアップに必要とされている。そのため人類が生み出すデータの約 90%がハードディスクドライブに記録されていると推計されており、それらの中で重要なデータはさらに磁気テープに毎日深夜にバックアップされている。そのため我々の日常生活は磁性に支えられていると言っても過言ではない。

こうした情報機器の普及率は日英ともに 8 割前後となっており、今後さらなる普及が世界的に見込まれている。そこで問題となるのは情報機器の電力消費量である。特に先進国においては複数台の情報機器が 1 人によって利用され、発展途上国においても情報機器が幅広く普及し始めている。そのため各情報機器におけるデータプロセッサやメモリの電力消費量を抑制する新技術・材料の開発が欠かせない。電子スピンをを用いた素子や高効率に電子スピンを生成する材料の開発については、世界中の研究者がしのぎを削っている。私自身も博士課程において研究を進めた光磁気トランジスターによって現行トランジスターを置き換えることで消費電力低減を目指した。こうした成果については 2000 年に十色会でもお話しさせていただく機会を得て、研究を紹介させていただくことの難しさを痛感すると共に、白熱した議論をさせていただいた。ケンブリッジ卒業後は米国と日本でのポスドク研究員を通じて、スピントロニクスと呼ばれる磁性の一分野において消費電力低減と高効率化を目指し、様々な素子・材料研究に従事してきた。



Bland 研究室メンバーとギリシャ・ロードス島のサマースクールにて。右から 3 番目が筆者。

2、再び英国へ

2007年からはこうした経験を生かし、英国に戻りヨーク大学電子工学科において初めてのパーマネントポジションを得て、ゼロから研究室立ち上げを行った。幸運にも日英欧からの研究費をいただいて、10年強かけてスピントロニクス研究において世界的な競争に耐えうるような設備を有する研究室を目指してきた。私の研究室では成膜装置、磁気特性・結晶構造評価装置を中心として、平滑な界面の形成や新規磁性材料の開発と評価、高効率なスピン素子の作製及び新規スピンメモリの提案などを行っている。例えば、断面透過型電子顕微鏡観察結果をフィードバックすることで最適化した成膜プロセスにより、2013年に世界で初めて原子レベルで完全分離したFe/GaAs界面を形成し、その磁気伝導特性を解明した¹⁴。他にも、スピン偏極電流経路の形状をナノメートルスケールで制御し伝導特性を向上させたり(2014年¹⁵、2016年¹⁶)、磁気メモリにおいて記録ビットを反強磁性体で固定したり(2014年)¹⁷、遠赤外線円偏光を使ってスピン状態密度を測定する手法を開発したり(2014年)¹⁸、電子線の加速電圧を制御することで埋め込まれた界面を非破壊で観察する技法を確立(2016年)¹⁹したりしてきた。こうした成果は学会・論文発表や特許申請などを通じて公開し、実用化を目指して企業や他大学との共同研究を進めている²⁰。

英国においては最小の努力で最大の成果を得ることを求められることが多く、系統的な研究を好む日本との違いは明白である。こうした差異を逆手にとって、世界各地から集まった学生・ポスドク研究員と協力しながら、隙のない研究を進められるような研究室を作っていくのが私の目標である。なお、私個人は博士課程において忍耐と継続の重要性も学び、ドイツ・香港・ギリシャをはじめ各国出身の多くの友人を得た。お互いに100%分かり合うことは不可能かも知れないが、生い立ちの異なる学生やポスドクがお互いの相違を認め合った上で協力し合い、成果を出していくというのは国際化の見地からも極めて重要であり、日本ではなかなか実現しづらい環境であろう。その際に一部の歴史の浅い国にありがちな白

¹⁴ L. R. Fleet *et al.*, "Correlating the interface structure to spin injection in abrupt Fe/GaAs(001) films," *Physical Review B* **87**, 024401 (2013).

¹⁵ R. M. Abdullah *et al.*, "Spin-current signal amplification by a geometrical ratchet," *Journal of Physics D: Applied Physics* **47**, 482001(FTC) (2014).

¹⁶ B. A. Murphy *et al.*, "Highly efficient spin-current operation in a Cu nano-ring," *Scientific Reports* **6**, 37398 (2016).

¹⁷ I. Polenciuc *et al.*, "Domain wall pinning for racetrack memory using exchange bias," *Applied Physics Letters* **105**, 162406 (2014).

¹⁸ T. F. Alhuwaymel *et al.*, "New bandgap measurement technique for a half-metallic ferromagnet," *IEEE Transactions on Magnetics* **50**, 2600504 (2014).

¹⁹ A. Hirohata *et al.*, "Non-destructive imaging of buried electronic interfaces using a decelerated scanning electron beam," *Nature Communications* **7**, 12701 (2016).

²⁰ 詳細については研究室ホームページ <http://www-users.york.ac.uk/~ah566/>を参照されたい。

黒はっきりさせる姿勢ではなく、グレーな妥協点を見出せるような「大人な」対応も日英に共通する強みであろう。こうした恵まれた環境を最大限に生かして、日本をはじめ各国の留学生を広範に受け入れ、日英共同研究などを通じて多少なりとも両者と他国との理解に寄与し、研究のみならず人格形成の面でも貢献できればと考えている。

PhD は運転免許のようなものである。自分で研究を計画・遂行し、その成果を批判的に評価し、学会発表・論文公開などを通じて世に問うことができる、という証明書であると考えている。日本とは異なり英国では企業研究者を含めて PhD を求める場面が多い。これは 1 年で取得可能な修士号の英国での価値の相対的な低さに依るところもあるであろうが、自立した計画立案・遂行能力を求められている面もあるからではないだろうか。英国王立協会の調べでは理科系 PhD 取得者の 8 割近くは企業に就職するとのことで、大学に残るのは 4%にも満たないそうである。従って英国においては実用化に近い研究テーマで PhD 課程の学生を育成することが求められている。こうした需要に応えられるような学生を今後も育成していきたいと考えている。

3、英国の大学が置かれている状況

英国の大学も 2012 年の学費値上げ以来、日本の大学同様に親による負担が増大し、オープンキャンパスへの親(時には祖父母も)の参加や進路選択への親の関与が増えている。そのため学習意欲に欠ける学生が増えているように感じられる。これは大学教育の大衆化の結果と考えられ(英国の進学率も 50%を越えている)、我々教員にとっては水からの雇用確保と学生の学力低下の狭間での悩ましい問題である。さらに就職を前にしたモラトリアムという意識で博士課程に進学する学生も現れ始めており、大学院教育の大衆化も日本と同様に始まっている。理科系においては大学生の大学院進学率は英国においても 4 割に達し、単位人口当たりの PhD 取得者数は日本の 5 倍以上にのぼる。このような状況下では、博士課程の教育面での充実と上述したような社会需要への応答が求められることになるだろう。従来、修士課程を重視せず博士課程は自己責任としてきた英国でも、3 年半～4 年以内での PhD 取得や審査の厳格化などが政府から要求され、貴族の趣味のような形で始まった研究が岐路に立たされている。EU からの離脱など多くの不確定要因を含めて、英国の GDP の約 3%を生み出すサービス産業としての大学教育は多くの課題に直面している。

それでも英語圏という優位性もあってか、英国では国際的な学会・出版活動を主導している。例えば、欧州の大手出版社では経営陣の多くに英国人が配置されており、大学ランキング(Times Higher Education など)や評価(大学研究評価制度、REF: Research Excellence Framework など)に大きな影響を与える指標やデータベースに深く関わっている。私個人としても雑誌 4 誌ほどの編集に携わっており、Institute of Electrical and Electronics Engineers

(IEEE) Magnetics Society の Secretary/Treasurer として国際会議の運営などにも関与している。優秀であっても引込み思案になりがちな日本人と比較すると、英国人は自己評価が高すぎるように見受けられることもあるが、社会貢献という点では学会活動などは極めて重要であり、今後も積極的に優秀な若手の発掘などに取り組むべきであろう。また英国を中心に導入が進んでいる大学ランキングや評価が日本をはじめ各国大学にも影響を与えており、その評価指標としての社会貢献などの重要性は今後も増大するものと見込まれる。

4、今後の展望

PhD の指導教官であった Bland 先生は残念ながら 2007 年暮れに亡くなった。留学生の方が家に帰る機会が少ないから良く研究する、と言い続けて多くの留学生を受け入れてくださり、多国籍な研究環境を整えてくださったことは忘れがたい。2006 年の京都での国際会議の帰路に Bland 先生御夫妻を箱根の温泉にお連れし、最初は嫌がっていた露天風呂にも翌朝 1 人で入られるほど気に入っていただけて、カラオケも閉店までマイクを離さなかったりするほど楽しんでいただけたことは良い思い出である。彼は学生 20 名、ポスドク 10 名ほどという巨大なグループを率いていたので、御健在であれば多くの成果を残されたはずである。その足元にも及ばないが、せめて多国籍な研究環境を提供し、その研究の DNA を引き継いでいけたら幸いである。Bland 研究室で出会った同僚達とは今でも定期的な交流があり、なかでも研究を続けている友人達とは共同研究なども継続して進めている。最近の内向き志向と言われる日本人学生にも、日本語が通じる英国留学先として私の研究室を数多く利用してもらっており、英国スピントロニクス研究ハブの 1 つとして成果を残していきたいと考えている。



私の研究室メンバーとヨークにて。前列右から 2 番目が筆者。