

これまでの研究経緯

商学部准教授 石坂元一

今年度より商学部商学科へ赴任してまいりました。主な担当科目は「リスクマネジメント論（損害保険論）」です。熊本市に生まれ、熊本高校を卒業後、一橋大学商学部へ進み、そのまま大学院商学研究科を修了し、研究生を1年間、助手を1年間、京都学園大学経営学部にて4年間勤め、九州へ戻ってきました。若輩浅学の身ゆえ、研究生生活を振り返るほど蓄積はありませんが、機会をいただきましたので、雑話としてこれまでの研究経緯を記したいと思います。

思い返しますと、大学生の頃には自分が大学の教員となり、研究活動を行い、しかも保険関連の講義を行っている姿など全く想像しておりませんでした。大学3年生から始まるゼミナール選びの段になり、それまであまり深く考えていなかったこともあり、とりあえず人気のあったゼミを受けてみようとして経営学や保険論のゼミに応募してみました。結果は選ばれずでした。どうしようかと迷っているところに、「数学に良い先生がいるよ」との先輩のアドバイスを受け、確率論専門の藤田岳彦助教授（当時）の研究室の門を叩くことにしました。中学・高校と計算や数学が好きではありましたが、ついていけるのか不安も大きかった覚えがあります。ゼミでは、主に確率論入門と微分方程式のテキストおよび問題演習に取り組んでおりました。また、指導教官の薦めで『デリバティブ入門』（ジョン・ハル原著）という本も読むことになりました。ここ15～20年で、「デリバティブ（金融派生商品、その価値が他の資産価値に依存して決まる商品で、先物、オプション、スワップなどが代表的商品）」や「金融工学」という用語も随分一般的になり、専門・一般図書も増え、文系・理系を問わず「数理ファイナンス論」「金融工学」「デリバティブ論」の科目が学部・大学院で設置されているようですが、当時はまだ証券論・金融論等の中の一節として紹介されるに過ぎない位置付けでした。その本を読み進めていくうちに、デリ

バティブの理論価格の導出には自分が学んでいる以上の高度な確率の知識が必要だということと、実際の取引には複雑なルールがありそうだということが分かってきました。前者に興味を持ったことも一因となり、指導教官の許可を得て、大学院へ進学することにしました。

ここで、数理ファイナンス（Mathematical Finance）／金融工学（Financial Engineering）について話しておきます。両者は“不確実性”を意識してファイナンス市場の現象を分析する分野で、線引きは非常に曖昧です。敢えて区別するならば、数理ファイナンスは確率論をベースに数理モデルを構築し金融商品の理論価格やヘッジ比率を導出する（理論的）；金融工学はORや数値計算を駆使して最適な投資戦略を求める（実務的）、というイメージになるかと思われまふ。一般には両者を含む形（広義）で金融工学と呼ばれていますが、各々好き好きに使用されているようにも見受けられます。あまりこだわることないのですが、私自身の専門は上記の意味で数理ファイナンスに近いので、以降「数理ファイナンス」という語を用いることにします。数理ファイナンスの目的としては、デリバティブの価格評価・投資の決定・リスクの測定が挙げられます。ここでデリバティブの価格評価に焦点を当ててみますと、研究の発端は1900年 Bachelier による論文「投機の理論」とされています。当時評価されることはありませんでしたが、現在では彼の名前を冠した数理ファイナンスの国際大会「バシュリエ世界大会」が2年に一度各国で開催されています。研究加速のスタートとされるのは、Black と Scholes によって発表されたオプション価格式（1973年）です。オプションとは“ある資産をある価格で売買する権利”のことで、彼らは（確率1で儲けるチャンスはないという）無裁定の考え方のもとでオプション価格式を導出しました。Scholes とこの公式の正しさを証明し

た Merton は1997年にノーベル経済学賞を受賞しています（Black は1995年に亡くなったため、受賞には至りませんでした）。また、この公式の導出過程で不可欠な伊藤の公式をはじめ、確率解析の研究も数理ファイナンスに大きく寄与してきました。1979年に Harrison と Kreps によって数理ファイナンスの基本的概念が整備されて以降、さらに産学での研究が盛んになりました。研究潮流としては、80年代はさまざまな金融商品の価格評価、90年代後半より信用リスクの評価、近年はリスク・メジャーにあるように見えます。研究者は理工系出身者および経済系出身者が交じり、関係科目は前述のようにさまざまな学部・大学院で展開されています。

さて、私の話に戻りますと、修士課程では信用リスクをテーマに選択しました。信用リスクは、契約相手方の債務不履行（デフォルト）により被る損失の可能性、と定義されるものです。並行して確率論・確率過程論の勉強も進め、信用リスクを内包する社債の理論価格に関して既存研究のレビュー+ の修士論文を作成しました。その後、博士後期課程へ進学してからも信用リスクを主テーマに据えて研究することにしました。社債の理論価格導出に関しては、企業価値の変動プロセスをベースとする構造型モデルと、デフォルトを外生的に与える誘導型モデルの2つのアプローチがあり、私は前者の構造型モデルを研究対象としておりました。当時の構造型モデルの典型は、企業価値がある水準まで下がった時点デフォルト時刻と定義するものでした。そこで拡張を試みて、例えば企業価値がある水準以下に滞在する時間を考慮したり、一定時間内である水準に回復することを考慮したりして、デフォルト時刻を定義し、その下で社債の理論価格を（closed-form で）導出しました。現象面をじっくり見つめる余裕はあまりなく、むしろ計算に四苦八苦していた感がありました。

博士課程在籍時には、都心に新しく設置された社会人向けの大学院研究科（国際企業戦略研究科）に週2回TAとして勤めておりました。午後6時前から9時半頃まで数学およびファイナンスに関する質問に対応する仕事ですが、講義内での不明点、課題、試験に向けての学習など割と多くの来訪がありました。その場で対処できる問題もあれば、汗をかきながら「次回まで待ってください」と解けない問題も

あり、自分にとって非常に良い勉強になったと思います。また、隣接他分野および他大学の研究者との交流が深まっていったのもこの時期でした。ある日、保険専門の同輩から一緒に勉強会をしないかと誘われて、これを契機に一から保険の勉強・研究を始めました。進めていくうちに、デリバティブと保険の類似点・相違点が見えてきました。類似点としては、両者ともに条件付請求権であること、確率の計算を多用すること等々；相違点としては、対象としているリスクの質が異なること、（数理ファイナンスでは典型的な）複製の概念が保険には適用できないこと等々です。とりわけ相違点は私にとって興味深く、現在でも保険研究の際の軸になっています。海外のリスクマネジメント論の主テキストには、確率・統計やデリバティブの章が設けられているということもあり、『保険とリスクマネジメント』（ハリントン＝ニーハウス原著）の翻訳にも携わり、保険分野と縁深くなっていきました。

職に就いてから、研究の対象は保険分野と海運分野に向いております。いずれも、数理ファイナンスの典型的な枠組みがそのまま適用できるわけではなく、一工夫必要な分野だと認識しております。保険では、生命保険リスクの証券化をテーマに取り組んだこともあります。金融商品の価格評価では、複製や無裁定を礎としていますが、生命保険リスク（人々の生死）を複製することはできません。この点をどう対処して適正な価格評価を行うかに興味を持ちました。こういった問題と関連して、現在は保険特有の負債をどのように評価し、企業価値を測定するかといった観点から研究を進めております。教育面でも保険と関わるが増えてきており、学生保険ゼミナール（RIS）大会においてゼミ生に報告を行わせたり、アクチュアリー（保険数理人）資格試験指導に携わったりしてきました。一方、海運では、運賃デリバティブの価格評価モデルに取り組んでおります。具体的には、海運市場独特の取引形態やサービスの貯蔵不可能性に着目したモデルを構築し、分析を行っております。この研究については、基本的に共同研究の形で進めています。

以上、思い出話のようになってしまいましたが、色々な縁で現在に至っていることを再確認できました。今後ともよろしく願いいたします。

スピントロニクスと私

理学部准教授 眞 砂 卓 史

この4月に理学部物理科学科に赴任いたしました。私の専門分野は大元が磁性物理で、これに半導体とナノテクノロジーが組み合わさり、現在はスピントロニクスです。「スピントロニクス」とはスピンとエレクトロニクスをあわせた造語で、10年ほど前から使われ始めました。日本ではスピニクスやスピンエレクトロニクスと呼ばれたこともありましたが、最近ではスピントロニクスで落ち着いてきたようです。今回は私自身の研究をこのスピントロニクス分野の発展と重ねながら振り返ってみたいと思います。

エレクトロニクスは電子の「電荷」の性質を利用した研究・産業分野で、電流や電子の蓄積を利用した様々な電子機器に応用されています。一方、電子の「スピン」の性質を利用したものは主に磁石です。磁性体に磁場を加えると電気抵抗が変化する現象（磁気抵抗効果）も知られていましたが、その効果は非常に小さく、スピンの電気伝導への寄与は大きくないと考えられていました。それが、強磁性体と非磁性体を数原子層の厚さで交互に積み重ねた金属多層膜で、桁違いの大きさの磁気抵抗効果が報告され、スピンと電気伝導の関連性が大きく注目されたのです。これが1988年の巨大磁気抵抗効果（GMR）の発見で、2007年にはノーベル賞も受賞しました。このように、スピンをもった電子・電流が引き起こす現象の研究分野が、スピントロニクスです。

私がまだ学生で研究を始めた頃（1995年頃）は、磁性多層膜フィーバーで、GMRに関してより大きな磁気抵抗を示す物質の探索や、薄膜や界面の研究が精力的に進められている時期でした。一方私は、強磁性寸前の非磁性金属Pdを強磁性金属Niに近接させると、界面ではPdに強磁性が誘起されるのではないかという界面磁性の研究をしていました。研究室では多層膜は作れる環境になく、Ni微粒子にPd薄膜を化学的にコートした試料を用いていた

ため、系統的・定量的な評価は難しいものでした。博士課程から、つくばの物質工学工業技術研究所（現在は統合され産業技術総合研究所）に滞在して実験する機会に恵まれ、磁性多層膜に発展させた研究を始めることができました。材料の工夫などにより、一定の成果を得ることはできましたが、学会ではGMR そのもののセッションとその関連分野のセッションではずいぶん温度差を感じ、もっと直球勝負の研究をしたいと思ったものです。

この時期に半導体分野でも、半導体にスピンを取り入れようという動きが大きくなっていました。主にⅢ - V族の半導体の作製に磁性元素を添加することにより半導体自身を強磁性にするもので、1995年に初めて強磁性半導体が報告されました。しかし、低温でしか強磁性にならないことから、いかにその温度を上げるかが問題でした。また、1990年のスピン電界効果トランジスタの提案に端を発して、半導体に鉄薄膜などの強磁性体を組み合わせて、そこからスピンの偏った電子を注入して制御しよう、様々な実験が行われていました。このあたりの研究が、スピンを持った電子を制御するという観点で、はじめてスピントロニクスと呼ばれるようになったと思います。その後、磁性金属分野のGMRやトンネル磁気抵抗効果（TMR）もスピンをもった電流の制御なので、金属スピントロニクスと呼ばれるようになり、半導体関連分野はそれに対比して半導体スピントロニクスとも呼ばれるようになりました。

博士課程修了後、縁あってお隣の融合領域研究所のアトムテクノロジー研究体（JRCAT）という原子分子操作プロジェクトのPDとなり、強磁性金属から半導体へのスピン注入の研究テーマに取り組むことになりました。ここから磁性体に加え、半導体との2足のわらじを履くことになったわけです。また、微細加工による素子作りも欠かせなくなりました。

このテーマは、「半導体にスピンを注入できるか」ということを実証するという、半導体スピントロニクス分野ではまさに直球勝負の研究で、さらに「きちんと実験すれば、必ずできるだろう」と楽観視されていたこともあり、どこの研究機関が一番乗りかという研究テーマでした。これはスピン電界効果トランジスタ実現のための重要な要素技術なので、基礎・応用両面から注目されていました。しかし、目標だけが先走り、実験装置がまだ準備されていない状況でしたので、勉強もかねてそれに役に立ちそうな周辺の実験や、装置立ち上げを2年ぐらいやっていました。この間、海外勢はすでに実験を開始していたにもかかわらず、どこも結果が出ず、理論的には普通のやり方では原理的に無理であるとの提案があったりと、私自身は半分傍観者のように成り行きを眺めていました。自分の本流の実験はあまり進まなかったものの、スピン検出の実験や、他の研究をしている方とのディスカッション、理論家の方からのレクチャーなど、この研究グループで得るものは非常に大きく充実していました。一方で、微細加工による素子作りは、作製条件探索の苦労の過程が全く成果にならない辛さも痛感しました。薄膜試料など材料自体の研究では、作製条件探索自体でも系統的に結果がまとめられるのに対し、微細加工は形ができるところまでは当たり前で、それが測定できてはじめて話がはじまります。何段階ものステップを経て素子が完成するので、最終段階で失敗すると本当にへこみました。3年目になると、やっと本格的な実験ができるようになり、実験開始が遅かったにも関わらず、他グループにほとんど遅れることなく成果にも恵まれました。強磁性金属と半導体の間にトンネル障壁を挿入した構造で、室温でのスピン注入実現はこれが初めてでした。(低温では少し他のグループに先を越されたのが残念でしたが。)このおかげで、産業技術総合研究所の研究員に採用され、さらにこの研究を進めることになりました。

半導体へのスピン注入が成功したので、今度は半導体2次元電子系への注入(スピン電界効果トランジスタには本当はこれが必要)を目指そうと、この実験に早くから取り組んでいたオランダのフローニンゲン大学の教授に国際会議の時に相談し、客員研究員として1年間滞在させていただく機会を得まし

た。ここでは、装置は一応そろってはいるものの、骨董品のような装置も多く、よくこれで華々しい成果を上げているものだと感心すると同時に、やはり研究はアイデアが一番であると再認識しました。また、物理に対する姿勢も、基礎的な部分や考え方を非常に重視しており、ヨーロッパの研究の強さを垣間見た気がしました。私自身の成果はというと、うまくいかないというネガティブな結果しか残せませんでした。ここでの経験は現在の研究活動にも非常に生かされていると感じています。

帰国後は、通常の半導体へのスピン注入効率向上に加え、新たなテーマも少しずつ始めました。金属スピントロニクスの分野では、2004年にトンネル障壁をアモルファス Al_2O_3 から単結晶 MgO に変えることにより、TMRの飛躍的な向上が示されました。これによって MgO -TMR 研究がブームになり、また単結晶であることからトンネル効果そのものの理解も大きく進みました。ちょうど私がPDを採用できたこともあり、トンネル障壁に MgO を用いたスピン注入素子の研究を始めたところ、スピン注入効率の大幅な向上に成功しました。(ただ、これも残念ながら他のグループに一步先を超されてしまいました。)このころに、かねてから考えていた教育機関への転出が決まり、その後いくつかの成果をまとめてこの研究には一区切りつけることにしました。

着任した山口東京理科大学では、ある程度の微細加工が可能であったこと、これまでの人脈や新たな方々との出会いから、実験装置や実験試料にも恵まれたことなどから、思いの他スムーズに研究を始めることができました。また、オランダ留学時代に感じた「研究はアイデア次第」というのが本当に役に立ちました。産業技術総合研究所で新しく始めていた実験の結果が出始めていたことや、研究室の学生がずいぶん頑張ってくれたこともあり、まったく新しい研究テーマに取り組み始めたにも関わらず、成果も途切れることなく出すことができました。そして、今年から福岡大学での研究開始です。またゼロからの研究室構築は大変な作業ですが、新しいものを組み上げていく楽しみもあります。福大から世界をあっと言わせる成果が出せればと、日々アイデアを練っています。