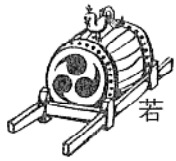


# 金属人工格子をつくる



若 者

鎌 田 康 寛\*

## Making of the Metallic Artificial Superlattice

**Key Words** : MBE, superlattice, thin film, multilayer, magnetism

### はじめに

私はこの3月に9年間在籍しました名古屋大学を卒業し、4月から大阪大学大学院工学研究科マテリアル科学の助手に赴任しました。

現在、私は分子線エピタキシー(MBE)法を用いた、磁性金属人工格子の作製と磁氣的・電氣的性質の評価に関する研究を行っております。人工格子とは、人工的に設計、生成された構造を持つ物質のことを指します。人工格子を作製するということは、建築家が自由な発想で設計図を描き建築物を作り出すように、ナノレベルの大きさの構造物を人工的に設計し作製するわけです。実験を通して、自然界に存在しない物質を自分自身で設計し作り出していることが実感できますので、“ものづくり”が大好きな私にとって、現在携わっている研究は非常に面白いものだと感じています。今回の執筆内容は自由であると聞きましたので、全く私事になりますが、まず、現在の研究テーマにたどり着いたいきさつを振り返ると同時に、学生時代に行った研究を紹介したいと思います。そして、現在

の研究内容について触れ、これからの研究の展望を述べたいと思います。

### 2. 学部生時代

大学の学部・学科を選択するにあたって、前述のように“ものづくり”に興味があることに加え、自然科学の最も基本的なところを学びたいという思いから、名古屋大学工学部応用物理学科に入学しました。この学科は、物性に関係したテーマを扱う様々な研究室から構成されており、対象としては金属や半導体等の無機物から高分子や生体組織まで、多岐に渡ります。その中で、私は学部の講義を通して、いろいろな固体物性が電子論できれいに説明できることに驚き、4年進級時には金属電子論が専門の水谷宇一郎教授の研究室に所属することになりました。

水谷研では金属のアモルファス・準結晶の電子物性と構造評価を中心に研究が進められており、卒論テーマとして“(Er, Ho)-(Ru, Co, Ni)系アモルファス合金の低温比熱と原子構造について”を与えて頂きました。当時、小型冷凍機の蓄冷材として、 $\text{Er}_3\text{Ni}$ などの希土類-遷移金属合金が低温で熱容量が大きいことから有用であることが報告されていました。小型冷凍機は超伝導磁石の冷却に使用できる装置で、例えばリニアモーターカーの実用化にも必要になるものです。卒研の目的は、蓄冷材としてさらに特性の良い合金系を見いだすと共に、アモルファス化したときの特性変化を調べることでした。研究の結果、Er-Ru系において磁気相転位に

\* Yasuhiro KAMADA  
1969年12月1日生  
1997年名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻修了  
現在、大阪大学大学院工学研究科マテリアル科学専攻、助手、工学博士、磁性薄膜  
TEL 06-879-7488  
FAX 06-879-7522  
E-Mail kamada@mat.eng.osaka-u.ac.jp



よる大きな比熱が観察され、アモルファス化することで大きな比熱を持つ温度範囲が広がることがわかりました。卒研では研究の進め方の基本を教わりましたが、希土類金属を扱い勉強したことも現在の研究に大変役立っています。

卒研ではたくさんの方々にお世話になりましたが、当時の水谷研の助手の古谷野有先生(現筑波大)の存在がその後の進路を大きく決めることになりました。古谷野先生は磁性材料がご専門で、博士課程では磁性金属多層膜の研究をなさっていました。古谷野先生のお話から、超高真空中で磁性金属を交互蒸着(多層膜化)する手法により、原子レベルでの構造制御が可能であることや磁氣的性質が大きく変わることなどを知りました。是非、原子レベルのものづくりを行いたいと考え、大学院では量子工学専攻(兼・材料機能工学)の松井正顕教授のご指導を頂くことになりました。

なお、古谷野先生は別の意味でも私のその後を決めた恩人です。恥ずかしい話ですが、徹夜続きのまま私は卒論発表前夜に帰宅し、そのまま熟睡してしまいました。発表直前に下宿まで車で迎えに来て下さった方が古谷野先生でした。

### 3. 大学院生時代

松井先生の研究室では、磁性薄膜、高温超伝導体、永久磁石、磁気温熱療法(患部に針状の磁性体を入れ、高周波による発熱作用によりガン細胞を熱死させる)材料等の様々な磁性材料に関係した研究が進められていましたが、私は希望通り、MBE装置を用いた磁性金属人工格子の作製を行うことになりました。

超高真空中( $\sim 10^{-11}$  Torr台)で金属を蒸発させることで、金属原子を非常にゆっくりと積層させることができ、原子層オーダーの厚さで膜厚が制御された高品位な人工格子の作製が可能となります。このとき、下地の基板を適当に選ぶことで様々な結晶の成長方位を制御することができます。また、ある場合には結晶構造自体をも制御することが可能になります。これは重要なことですが、半導体のような共有結合と異なり、金属はお互いが金属結合で結ばれているため、かなり下地の影響を受けやすいことによ

ります。

金属の結晶構造は大きく分けると体心立方格子(bcc)、六方最密格子(hcp)、面心立方格子(fcc)の3種類に分類することができます。どの金属がどの結晶構造をとるかについては、最外殻電子数と結晶構造の対称性からある程度説明できますが、3d磁性遷移金属ではその予想から外れています。これは磁性が結晶構造と密接に関係していることを表しており、反対に、結晶構造を変えてやると磁性が大きく変化することが予想されます。当時、松井研では安定構造がbcc構造であるFeをfcc-Cu上に積層させて、fcc-Feを作製することが試みられていました。そしてfcc化によりFeの磁性が劇的に変化し、さらに格子定数を制御することでfcc-Feの磁性を制御することに成功していました。そのような中、私は安定構造がfcc構造であるNi, Cu及びhcp構造のCoをbcc化することを試み、磁氣的性質を評価し、その中で垂直磁気異方性や巨大磁気抵抗効果について詳しく検討しました。

垂直磁気異方性とは、薄膜の強い反磁界に勝り、磁化が膜面垂直方向に向く現象で、磁気記録媒体の高密度化につながることから、注目を集めています。また、巨大磁気抵抗効果とは磁性層と非磁性層を交互に繰り返した多層膜において、ある膜厚の非磁性層を介して磁性層の磁化が反強磁性的に配列し、磁場を印加して強磁性的な配列にすると、大きな抵抗変化が観察される現象を指します。磁性層間の交換結合やスピン依存散乱のメカニズムに関しての基礎的観点のみならず、超小型の磁気記録用読み出しヘッドとしての応用面からも関心を集めています。私が大学院に進学した頃は、大学、民間企業の研究所とも、巨大磁気抵抗効果の研究に乗り出し始めた時期でした。

さて、前述のNi, Cu, Coのbcc化に話は戻りますが、これらはいずれも自然界には存在しない金属です。これら非平衡な金属を人工的に作り出すために、bcc-Fe(001)とbcc-Cr(001)面上にNi, Cu, Coを積層させた超薄膜や多層膜を作製しました。その結果、3原子層厚のbcc-Ni(体心立方格子)及び、9原子層厚のbcc

-Cuの作製に成功しました。さらに各種磁気測定を行うと同時に、静岡大学の浅田寿生先生との共同研究で第1原理的なバンド計算を行いあわせて検討した結果、Feとの界面でbct-Niの磁気モーメントが増加していることがわかりました。人工格子の磁性を考える上での、また、それをもとに人工格子を設計・開発する上での第1原理計算の有効性を強く感じました。

以上に記しました私の研究は単体金属の結晶構造を人工的に制御しようという試みでしたが、最近では、異種原子を1原子層ずつ交互に積層させ、自然界に存在しない規則合金をつくりだす試みも行われており、垂直磁気異方性が強くなることが報告されています(東北大・高梨先生)。合金系を考えることで組み合わせも多様になり、MBE法による非平衡系金属人工格子の研究は今後も活発に進められると思います。

ところで、文章にまとめますと、“金属人工格子づくり”はさほど難しくないように感じるかも知れませんが、実際は苦勞の連続です。作製上の難しさだけでなく、実験装置のメンテナンス自体も大変です。MBE装置は高融点金属を蒸発させるため千数百度に加熱する部分もあれば、真空度の向上のため液体窒素で冷却する部分もあり、かなり過酷な条件下で使用しています。従って、真空漏れや制御系等のトラブルは頻繁に起こり、その際には修理のため実験が数ヶ月間停止することもありました。実際、修士2年時には装置はほとんど働いていませんでした。そんなこともあって、みんな非常に困り、正月には学生どうして熱田神宮(名古屋市)に一年間のMBE装置の無事を祈願しに行ったりしました。その後も故障は度々あったものの、神だのみの甲斐もあってか、博士課程を無事修了することができました。

#### 4. 現在の研究内容とこれからの展望

4月から、大阪大学大学院工学研究科マテリアル科学の助手となり、山本雅彦教授のもとで、MBE法を用いた磁性金属人工格子の研究を続

けることになりました。赴任から半年が経過したわけですが、現在の研究内容とこれからの展望を述べ、本文を締めたいと思います。

現在のテーマは4つの柱から構成されています。第1は歪みなどの界面構造を評価し、制御しようという試みです。前述の垂直磁気異方性や巨大磁気抵抗効果などの人工格子に特徴的な物性は、人工格子の界面構造と密接に関係しています。現在、3d磁性遷移金属を主な対象とし、人工格子作製中のRHEEDによる連続観察で界面構造を明らかにし、諸物性との関連性を調べています。第2は、希土類金属を含めた人工格子を作製し、その磁氣的・電氣的性質を評価するというテーマです。第1のテーマとの関連性(希土類の磁性は歪みと密接に関係している)からも非常に興味がありますが、希土類金属は反応性が強いので構造制御することが難しく、良質な人工格子の作製報告は少ない状況です。第3は、人工格子の構成元素の複合化によりさらに新しい磁氣的・電氣的性質を発現させようとする試みです。磁性金属と半導体や絶縁体を組み合わせることで、伝導現象を利用した機能に広がりをもたせることができます。例えば従来の半導体デバイスはキャリアーの電荷を利用していますが、これにスピンの自由度が入るわけで、新しいデバイスの開発につながることを期待できます。最後に第4は、微細構造の人工格子の作製とその物性評価に関する研究です。従来の人工格子が2次元膜構造を基本としていたのに対し、膜面内方向の構造制御を行い、細線やドット状の金属人工格子の作製を試みるものです。このような低次元化により、新しい物性の発現が期待できます。

今後どのような方向に展開していくか楽しみなどありますが、これらのMBE法によるナノレベルの“金属人工格子づくり”を通して、新しい現象やそれらを応用した材料、デバイスを発見・開発して行きたいと考えています。最後に本誌への投稿を勧めて下さった、原茂太教授に感謝致します。