



金属人工格子を基軸とした先進磁性材料開発と新展開*

高 梨 弘 毅**

1. はじめに

金属人工格子とは、異種金属をナノメートルスケールで積層した人工物質である。1970年代末頃から、米国そして日本が中心となり、主に磁性や超伝導の観点から研究が進められた。筆者が書いた最初の論文⁽¹⁾は Fe/V 人工格子の界面磁性に関する研究であった。大学院学生であった当時、東京大学物性研究所の安岡弘志先生のもとで核磁気共鳴(NMR)を用いた物性研究に従事していた筆者は、京都大学化学研究所の新庄輝也先生のグループで作製された Fe/V 人工格子の⁵¹V 核の NMR スペクトルから、界面の急峻性や原子配列などを推察した⁽²⁾。安岡研究室では金属人工格子の研究は主流ではなかったが、新奇な人工物質であるということに魅力を感じ、安岡先生からテーマの一つとして紹介されたときに、自ら手を挙げて取り組み始めたことを覚えている。その後、東北大学金属材料研究所に職を得たが、それも金属人工格子の研究を通して藤森啓安先生と知己を得たことによる。

金属人工格子の研究はスピントロニクスという新たな分野を生み、21世紀に入りスピントロニクスは大きく成長した。そしてスピントロニクスの発展の中で、今また金属人工格子の新たな有用性が注目されている。筆者が学生時代に金属人工格子の研究を始めたとき、その後40年にもわたり金属人工格子に関わることになるとは予想だにせず、ある種の感慨を覚える。

本稿では、筆者のこれまでの成果を示しつつ、金属人工格子の研究の流れと最近のトピックスをまとめてみよう。

2. 層間交換結合と巨大磁気抵抗効果

金属人工格子は、当初磁性や超伝導の観点で基礎的な研究が進められたが、実用に供するような新しい機能性はなかなか出て来なかった。しかし、1985年に P. F. Carcia らにより Co/Pd 人工格子で界面磁気異方性にに基づく垂直磁化の発現が報告された⁽³⁾。これは磁気記録媒体への応用という観点で注目され、さまざまな組合せの金属人工格子の垂直磁気異方性が研究されるようになった。さらに1986年には P. Grünberg らによって Fe/Cr 人工格子で Cr 層を挟んだ Fe 層間の反強磁性交換結合が発見された⁽⁴⁾。この発見は、磁気構造を人工的に制御できることを示したという意味できわめて重要である。P. Grünberg らはブリュアン光散乱と呼ばれる手法を用いた精緻な実験でこれを証明したが、当初は真偽を疑う者も多かった。革命的な発見が容易には受け入れられない一つの例かもしれない。しかし、1988年に A. Fert らによって Fe/Cr 人工格子の巨大磁気抵抗効果(GMR)が発見され⁽⁵⁾、続いて1989年には P. Grünberg らにより Fe/Cr/Fe 三層構造膜でも同様の現象が報告された⁽⁶⁾。そして GMR が磁化の反強磁性配列から強磁性配列に移行する際に起こる抵抗変化であることが分かると、多くの研究者がさまざまな金属人工格子で反強磁性交換結合と GMR の研究を行うようになり、金属人工格子は新しい機能性材料としての地位を確立することになった。よく知られているように GMR はスピナルバルブという形でハードディスクドライブ(HDD)の読み取りヘッドとして1998年に実用化を果たした。また、スピニ依存伝導という新たな研究分野が生まれ、その後のスピント

* 2023年3月8日、日本金属学会第172回春期講演大会にて講演。

** 日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター センター長(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2-4) Creation of Advanced Magnetic Materials Based on Metallic Superlattices and New Development; Koki Takahashi (Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki)

Keywords: *metallic superlattices, spintronics, perpendicular magnetic anisotropy, interlayer exchange coupling, giant magnetoresistance (GMR), spin orbitronics, antiferromagnetic spintronics, spin caloritronics, spin Hall effect, anomalous Nernst effect*

2022年12月19日受理[doi:10.2320/materia.62.301]

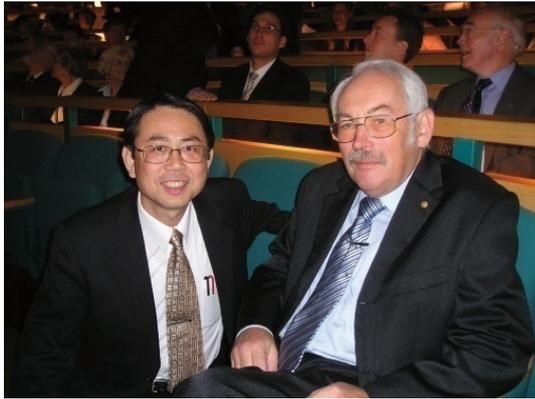


図1 ノーベル物理学賞受賞講演前の P. Grünberg 博士。(2007年12月8日ストックホルムにて。左は筆者。)(オンラインカラー)

ロニクスの原点となった。GMRの発見に貢献した P. Grünberg と A. Fert は2007年にノーベル物理学賞を受賞した。P. Grünberg 博士と公私ともに交流が深かった筆者は、ノーベル賞授賞式や関連行事に招かれ、貴重な経験をさせていただいた(図1)。

GMRの発見が米国や日本ではなく、P. Grünberg(ドイツ)および A. Fert(フランス)という、金属人工格子研究としては後発である欧州の研究者によってなされたことは示唆的であるが、金属人工格子の成膜・評価について豊富な技術と経験を有する日本は、その後層間交換結合や GMR の研究の発展に大きく貢献したことは明らかである⁽⁷⁾。

3. 単原子交互積層人工格子と規則合金

金属人工格子の層間交換結合や GMR の研究が全盛を極めていた1990年代前半、筆者もそれらの研究にいそしんだが⁽⁸⁾⁽⁹⁾、一方で別の観点から金属人工格子の研究を進められないかと考えた。そもそも機能性材料の宝庫として規則合金に興味を持っていた筆者は、金属人工格子の積層構造の極限は単原子層の交互積層で、それはまさに規則合金であるという着想から、規則合金の人工合成に着手した。筆者が所属していた東北大学金属材料研究所藤森研究室では、薄膜作製の手法は専らスパッタ法であったが、初めて超高真空蒸着(MBE)装置を導入し、膜厚の精密制御による単原子層の交互積層に取り組んだ。実際に、図2に示すように、格子不整合の小さい Fe と Au の組合せで[001]方向に単原子層を交互に積層し、エピタキシャル成長させ、L1₀型の FeAu 規則合金を合成することに成功した⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。Fe と Au の熱平衡状態図は包晶型で、いかなる中間層も存在しないので、L1₀型 FeAu 規則合金はまさに人工的によってのみ合成できる新物質である。L1₀型 FeAu 規則合金は[001]を容易軸とする強い結晶磁気異方性を有し、その薄膜は垂直磁化を示した。さらに、Fe 層および Au 層の層厚を単原子層から少しずつずらしていくと、図3に示すように垂直磁気異方性エネルギーが単原子層周期で振動的に振る舞うことが分かり、物性も単

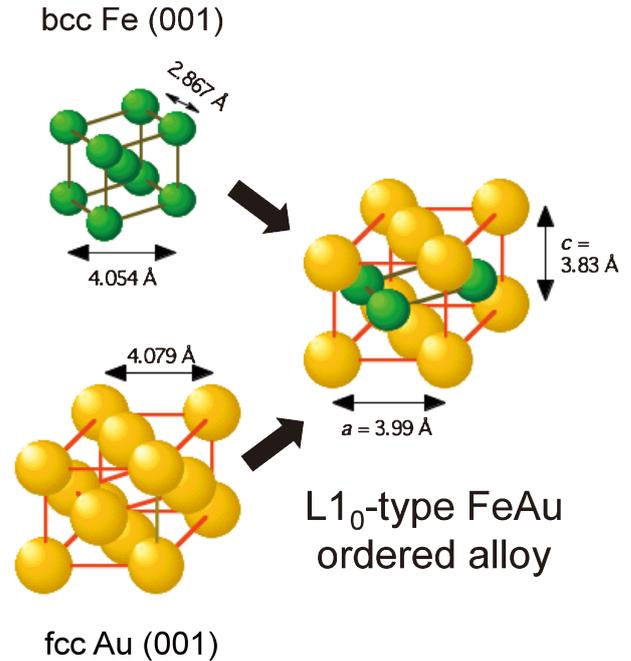


図2 bcc Fe(001)単原子層と fcc Au(001)単原子層の交互積層によって L1₀型 FeAu 規則合金が作製される模式図⁽¹¹⁾。(オンラインカラー)

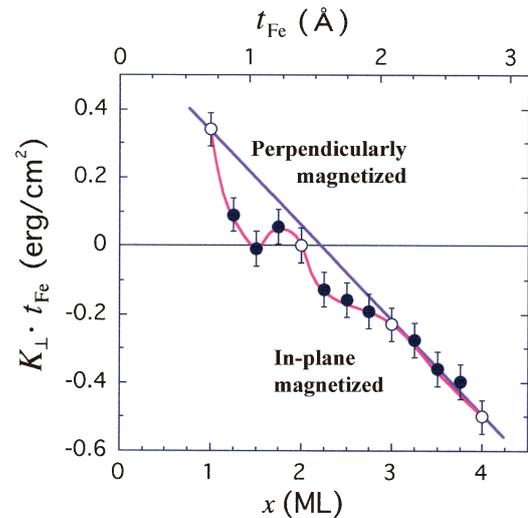


図3 Fe(x ML)/Au(x ML)人工格子(ML: monatomic layer)における垂直磁気異方性エネルギーの層厚(x)依存性⁽¹²⁾。K_⊥は単位体積当たりの実効的な垂直磁気異方性エネルギー、t_{Fe}はFe層厚である。(オンラインカラー)

原子層単位で制御できることが示された⁽¹²⁾。また、Fe と Au の組合せのみならず、熱平衡状態図では全率固溶だが規則相は存在しない Co と Ru でも、単原子交互積層により B₁型の CoRu 規則合金が合成され、人工的な反強磁性体であることが示唆された⁽¹³⁾。

単原子交互積層法は熱平衡状態図には存在しない人工的な規則合金の合成に有用であるだけでなく、熱平衡状態で安定に存在する規則合金の合成にも適用できる。実際に、規則化のために通常高温プロセスを必要とする L1₀型 FePt 規則合

金において、Fe と Pt の単原子交互積層によって低温で規則相を得ることに成功した⁽¹⁴⁾。また、規則不規則変態温度が低いために自然界では鉄隕石中にしか存在しない L1₀ 型 FeNi 規則合金においても、Fe と Ni の単原子交互積層によって規則相を得ることができた⁽¹⁵⁾。

単原子交互積層法は、エピタキシャル成長によって純良な単結晶を得られること、成膜条件の調整によって規則度や歪みを制御できることなどの利点があり、基礎研究には向いているが、スループットが悪く応用には向いていない。後述するように、筆者のグループは L1₀ 型 FePt 規則合金や種々のホイスラー合金薄膜を用いたスピントロニクス研究に長く取り組んできたが、その多くはスパッタ法による多元同時蒸着であることを断っておく。また、L1₀ 型 FeNi 規則合金は非希土類磁石としての応用が期待されるが、そのためには粉末の合成が必須である。最近ではデンソーが中心となり窒化脱窒素による L1₀-FeNi 粉末合成法が開発され⁽¹⁶⁾、実用化に向けた研究が進められている。その場合も、単原子交互積層法による L1₀-FeNi 単結晶薄膜の基礎データが有効に活用されている。

4. スピントロニクスの発展

1988年の GMR の発見に続き、1995年には室温で大きなトンネル磁気抵抗効果(TMR)が報告された⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。TMR は HDD の読み取りヘッドのみならず磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)という新たな応用への道も拓いた。一方で、同時期に半導体分野でも独自の発展があり、(In,Mn)As⁽¹⁹⁾ や (Ga,Mn)As⁽²⁰⁾ などの強磁性半導体が発見され、半導体中のスピン制御の問題が注目されるようになった⁽²¹⁾。そして、1990年代末頃には、金属や半導体という物質区分によらず、スピンと伝導に関わる分野をスピントロニクスあるいはスピントロニクスと呼ぶようになった。

21世紀に入り、スピントロニクスは大きく成長した。GMR や TMR に代表されるスピン依存伝導の研究、言い換えれば磁化が電気伝導に与える影響に関する研究だけでなく、逆に電流誘起磁化反転などの電気伝導が磁化に及ぼす影響についても研究されるようになり、磁気特性と伝導特性との相関現象を広く包括する分野として発展した⁽²²⁾。さらに、スピントロニクスの発展の中で、電荷の流れである電流とは独立した概念として、スピン角運動量の流れであるスピン流が注目されるようになり、多くの研究が行われた⁽²³⁾⁽²⁴⁾。

筆者のグループは、スピントロニクスに有用な材料として規則合金に注目し、高い磁気異方性(K_u)を有する L1₀ 型 FePt 規則合金を垂直スピン源として利用した Au 薄膜の巨大スピンホール効果の発見⁽²⁵⁾や高いスピン偏極率(P_S)を有するハーフメタルホイスラー合金を電極とした膜面垂直電型巨大磁気抵抗効果(CPP-GMR)の実現⁽²⁶⁾などの成果を得た。スピントロニクス材料としては、高 K_u 、高 P_S に加え、低い磁気ダンピング定数を示すことが求められ、規則合金は有望な材料として今後もさらなる展開が期待される⁽²⁷⁾。

5. 金属人工格子ルネサンス

最近10年くらいの傾向を見ると、スピントロニクスは新たな展開期を迎えていると思われる。言い換えれば、スピントロニクスの幅がさらに広がり、さまざまな分野が派生している。例えば、軌道の自由度を取り入れ、スピン軌道相互作用を積極的に利用するスピノオービトロニクス⁽²⁸⁾や、反強磁性体のメリットを活かして新たな機能性を発現させる反強磁性スピントロニクス⁽²⁹⁾、さらに電荷とスピンに加え熱との相関を対象としたスピノカロリトロニクス⁽³⁰⁾などである。これらの展開の中で、異種金属界面の特殊性があらためて認識されるようになり、界面の集合体である金属人工格子が再び注目を集めている。金属人工格子はスピントロニクスの新展開を支える重要な材料であり、現在は金属人工格子研究のルネサンス期だといえることができる。

以下に、スピノオービトロニクス、反強磁性スピントロニクス、スピノカロリトロニクスのそれぞれについて、金属人工格子の有用性と最近の筆者らの研究成果を述べる。

(1) スピノオービトロニクス

異種金属の界面では従来考えられていた以上に強いスピン軌道相互作用が働くことが最近では認識されている。スピン軌道相互作用に基づいて電流とスピン流を変換する代表的な現象がスピンホール効果であり、スピン軌道相互作用が起源のスピン流と強磁性体の磁化との間に働くトルクをスピン軌道トルクと呼んでいる。スピンホール効果は基本的にバルクの効果であり、これまで界面の寄与は注目されてこなかったが、スピンホール効果が界面敏感であることを示唆する実験⁽³¹⁾や、スピンホール角が界面で増強される理論計算⁽³²⁾が報告されるようになってきている。界面の集合体である金属人工格子は、界面でのスピン軌道相互作用を系統的に調べるための理想的な材料であり、加えて界面での増強効果を上手く利用すれば、金属人工格子において巨大なスピン軌道トルクの発現も期待できる。

筆者らは、Pd/Co/Pt の 3 層構造を用いて、界面磁気異方性とスピン軌道トルクとの相関を見出した⁽³³⁾。

(2) 反強磁性スピントロニクス

中間層を介して 2 つの強磁性層が反強磁性的に交換結合した金属人工格子は、層厚によって交換結合の強さや磁気構造の周期を任意に制御できるので、バルクの反強磁性体に比べて、反強磁性スピントロニクスにおける研究に有利である。筆者らは反強磁性交換結合人工格子におけるスピン軌道トルクによる磁化反転挙動について系統的な研究を進めている。そのための材料研究として、反強磁性交換結合と大きなスピンホール効果という 2 つの性質を併せ持つ中間層材料の探索を行ったので、ここで紹介したい。

Fe/Cr 人工格子に加え、強磁性層間に反強磁性交換結合が働く人工格子として、Co/Cu および Co/Ir 人工格子が知

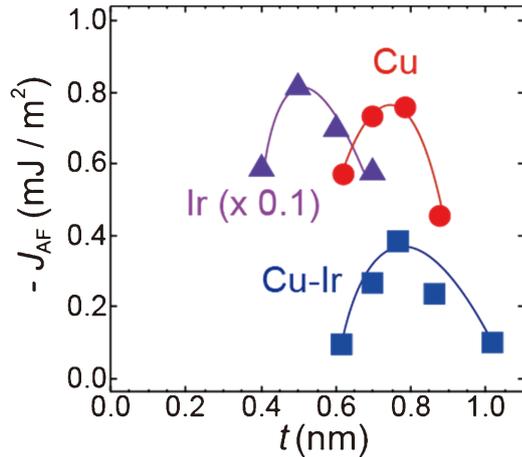


図4 Co/Cu₉₅Ir₅/Co, Co/Ir/Co および Co/Cu/Co 三層構造膜の反強磁性交換結合定数 J_{AF} の中間層層厚依存性⁽³⁷⁾. (オンラインカラー)

られている⁽³⁴⁾. しかし, Cu のスピホール効果はほとんどゼロであり, Ir の場合も小さく, スピホール効果の大きさを示す指標であるスピホール角 θ_{SH} は 1% 程度である⁽³⁵⁾. ところが, Cu に Ir をドーピングすると θ_{SH} が増大することが報告されている⁽³⁶⁾. そこで, 筆者らは Cu-Ir 合金の反強磁性交換結合とスピホール効果について系統的な研究を行った. 図4に, Co/Cu₉₅Ir₅/Co 三層構造膜の反強磁性交換結合の Cu₉₅Ir₅ 層厚依存性を, Cu 層および Ir 層の場合と比較して示す⁽³⁷⁾. 反強磁性交換結合の大きさ J_{AF} は, 磁化曲線の飽和する磁場 H_s から次の式を用いて求められる.

$$J_{AF} = (-1/2)\mu_0 t_{Co} M_s H_s \quad (1)^\dagger$$

ここで, μ_0 は真空の透磁率, t_{Co} は Co 層厚, M_s は Co 層の飽和磁化である. 層間交換結合の中間層厚依存性は通常 1 nm 程度の周期で振動的な振る舞いを示すが⁽³⁴⁾, 図4はその第一ピーク近傍のみのデータである. Cu₉₅Ir₅ 層を中間層としたときの J_{AF} は Cu 層や Ir 層の場合に比較して小さいが, 0.8 nm 近傍で明瞭な反強磁性交換結合を示す. また Harmonic Hall 測定(ホール電圧の高調波成分解析)から θ_{SH} を評価すると約 3% という値が得られ, Cu や Ir に比べて増大していることが確認された⁽³⁷⁾. さらに, 筆者らは Cu-Ir の全組成領域での θ_{SH} の評価を行った⁽³⁸⁾. 熱平衡状態図では Cu-Ir は非固溶系であり, Cu 側および Ir 側双方で固溶限は小さいが, スパッタ法を用いて強制固溶体薄膜を作製した. 図5に示すように, コンビナトリアル手法を用いて, 組成傾斜膜のスピネルチェ効果に基づく熱イメージングを行ったところ, 25 at% Ir 近傍で極大を示すことが分かった. スピネルチェ効果はスピホール効果に比例して変化するので, 図5はスピホール効果のイメージングと同等と考えて良い⁽³⁹⁾. そこで, Harmonic Hall 測定により 25 at% Ir 近傍での θ_{SH} を定量的に評価すると 6.3% という大きな値で

[†] 本式は三層構造膜の場合であり, 周期構造を有する人工格子の場合は $(-1/2)$ の因子が $(-1/4)$ となる.

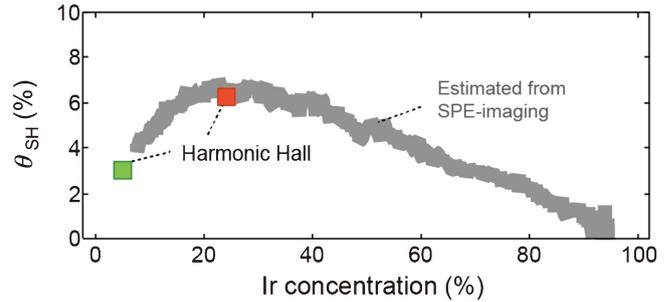


図5 スピネルチェ効果(SPE)による熱イメージングを用いて評価した Cu-Ir 合金のスピホール効果の組成依存性⁽³⁸⁾. (オンラインカラー)

あり, 非平衡の Cu-Ir 強制固溶体が大きなスピホール効果を示す材料であることが分かった.

(3) スピカロリトロニクス

スピカロリトロニクスが注目を集めるようになったのは 2008 年のスピゼーベック効果の発見⁽⁴⁰⁾ からであるが, 磁気に関わる熱電現象の研究には長い歴史がある. 筆者らは, 古くから知られる磁気熱電現象の一つである異常ネルンスト効果に注目した⁽⁴¹⁾. 異常ネルンスト効果は, 強磁性体に温度勾配 (∇T) を印加すると, 自発磁化 (M) と ∇T の外積方向に電場 (E_{ANE}) が生じる現象である. このとき, E_{ANE} は

$$E_{ANE} = S_{ANE} (\nabla T \times M / |M|) \quad (2)$$

と書ける. S_{ANE} はネルンスト係数あるいは横ゼーベック係数と呼ばれ, 異常ネルンスト効果の大きさを表す指標である. 筆者らは, 強磁性の Fe あるいは Ni と非磁性の Pt や Cu などを組み合わせたさまざまな金属人工格子の S_{ANE} を評価し, 積層化することにより S_{ANE} が増大することを発見した⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾. 最近では, 強磁性物質自体が大きな S_{ANE} を示すことが報告されている Co₂MnGa を人工格子化することも試み, Co₂MnGa 層と窒化 Al 層との人工格子を形成することで, 多結晶で成長した Co₂MnGa でも大きな異常ネルンスト効果が発現することもわかってきた⁽⁴⁴⁾. 金属人工格子における異常ネルンスト効果増大のメカニズムはまだ明らかではないが, ナノスケールでの積層化が異常ネルンスト効果の増大に有効であると言うことはできよう.

異常ネルンスト効果を利用した熱電素子の性能は, ゼーベック効果の場合と同様に, 以下の無次元性能指数 ZT によって表される.

$$ZT = S_{ANE}^2 \cdot (\sigma_x / \kappa_z) \cdot T \quad (3)$$

ここでは, M の方向を y 軸とし, z 軸方向に ∇T を印加する場合を想定しているので, E_{ANE} は x 軸方向に発生する. したがって, κ_z は z 方向の熱伝導率, σ_x は x 方向の電気伝導率である. ゼーベック効果では熱伝導率と電気伝導率の方向が同一であるので, 式(3)における電気伝導率は σ_z となるが, 異常ネルンスト効果の場合は両者が直交しているため, σ_z ではなく σ_x となっていることに注意されたい. 通常の熱電素子では, 実用上 $ZT > 1$ が望ましいといわれているが,

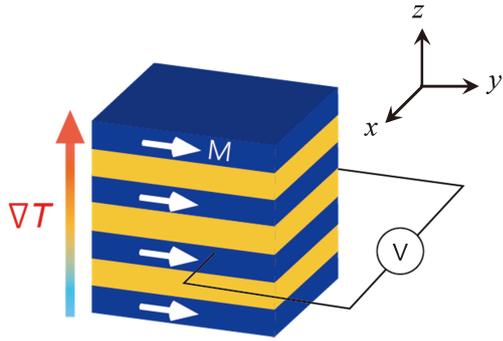


図6 金属人工格子の異常ネルンスト効果を利用した熱電素子の模式図⁽⁴⁵⁾。(オンラインカラー)

一般的な強磁性金属・合金で ZT は 10^{-3} 以下であり、きわめて小さい。 ZT の向上には、まずは S_{ANE} を増大させることが必須である。 ZT は S_{ANE} の二乗に依存するので、 S_{ANE} を数倍にすれば ZT は一桁向上する。一方で、電気伝導率と熱伝導率の間には、一般にはヴィーデマン・フランツの法則が成り立つので、 ZT が σ_x/κ_x に比例するゼーベック効果では常にその制限を受けるが、 ZT が σ_x/κ_x に比例する異常ネルンスト効果では、構造的に異方的な物質を用いることによって、ヴィーデマン・フランツの法則の制限を超えることが可能である。実際に、構造的に異方性を有する金属人工格子の場合、図6のように、膜面垂直 (z 方向) に ∇T を印加し、膜面内 (x 方向) で電圧を測定する配置にすれば、 σ_x を犠牲にせず κ_x のみを抑えることができ、 σ_x/κ_x の増大によってさらなる ZT の向上が期待できる⁽⁴⁵⁾。

6. ま と め

1980年代後半から1990年代前半の金属人工格子の研究はスピントロニクスの起源であり、そのときに盛んに研究された界面磁気異方性や層間交換結合、巨大磁気抵抗効果が現在のスピントロニクス研究の基礎となっている。金属人工格子は、私にとっても研究の原点である。約30年の時を経て、今また界面におけるスピン軌道相互作用や層間交換結合などの問題がホットトピックとなり、金属人工格子が格好の研究の舞台を提供していることは、きわめて興味深い。

金属人工格子という新物質・新材料の研究からスピントロニクスという分野が生まれた。新物質・新材料の研究が新しい物理現象の発見をもたらし、さらに新規な応用につながった事例は数多く、材料研究はまさに科学技術におけるブレイクスルーの源泉であると感じている。日本金属学会は我が国最大の材料研究コミュニティである。現在、我が国の研究力の相対的な低下が危惧されているが、本学会に所属する若い研究者の皆さんが、ブレイクスルーとなる成果を続々と発信していくことを願っている。

本稿で紹介した筆者の研究成果の多くは、東北大学金属材料研究所磁性材料科学研究部門で得られたものであり、過去及

び現在における当該部門の所属教員、ポスドク、学生、および共同研究者全員に感謝したい。特に、現准教授である関剛齋博士には、本稿の作成にもご協力いただいた。また、5節で紹介した研究の多くは、科研費・基盤研究(S)(JP18H05246)「金属人工格子ルネサンス」の支援のもとで行われた。

文 献

- (1) K. Takanashi, H. Yasuoka, K. Kawaguchi, N. Hosoi and T. Shinjo: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **51**(1982), 3743.
- (2) K. Takanashi, H. Yasuoka, K. Kawaguchi, N. Hosoi and T. Shinjo: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **53**(1984), 4315.
- (3) P. F. Carcia, A. D. Meinhaldt and A. Suna: *Appl. Phys. Lett.*, **47**(1985), 178.
- (4) P. Grünberg, R. Schreiber, Y. Pang, M. B. Brodsky and H. Sowers: *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 2442.
- (5) M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich and J. Chazelas: *Phys. Rev. Lett.*, **61**(1988), 2472.
- (6) G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach and W. Zinn: *Phys. Rev. B*, **39**(1989), 4828.
- (7) 著書として、藤森啓安・新庄輝也・山本良一・前川禎通・松井正顕編：一新素材を拓く—金属人工格子，アグネ技術センター(1995)。
- (8) 当時の解説として、高梨弘毅，藤森啓安：固体物理，**28**(1993)，637。
- (9) 解説として、P. A. Grünberg, T. Miyazaki and K. Takanashi: *FED Journal*, **9**(1998), 32.
- (10) K. Takanashi, S. Mitani, M. Sano and H. Fujimori, H. Nakajima and A. Osawa: *Appl. Phys. Lett.*, **67**(1995), 1016.
- (11) 高梨弘毅，三谷誠司，藤森啓安，中嶋英雄：まてりあ，**35**(1996)，1204-1207。
- (12) K. Takanashi, S. Mitani, K. Himi and H. Fujimori: *Appl. Phys. Lett.*, **72**(1998), 737.
- (13) K. Himi, K. Takanashi, M. Yamaguchi, D. H. Ping, K. Hono, S. Mitani and H. Fujimori: *Appl. Phys. Lett.*, **78**(2001), 1436.
- (14) T. Shima, T. Moriguchi, S. Mitani and K. Takanashi: *Appl. Phys. Lett.*, **80**(2002), 288.
- (15) As a review, K. Takanashi, M. Mizuguchi, T. Kojima and T. Tashiro: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **50**(2017), 483002.
- (16) S. Goto, H. Kura, E. Watanabe, Y. Hayashi, H. Yanagihara, Y. Shimada, M. Mizuguchi, K. Takanashi and E. Kita: *Sci. Rep.*, **7**(2017), 13216.
- (17) T. Miyazaki and N. Tezuka: *J. Magn. Magn. Mater.*, **139**(1995), L231.
- (18) J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong and R. Meservey: *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995), 3273.
- (19) H. Ohno, H. Munekata, T. Penney, S. von Molnár and L. L. Chang: *Phys. Rev. Lett.*, **68**(1992), 2664.
- (20) H. Ohno, A. Shen, F. Matsukura, A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye: *Appl. Phys. Lett.*, **69**(1996), 363.
- (21) 解説として、大野英男，松倉文礼，大野裕三：応用物理，**70**(2001)，265。
- (22) 著書として、高梨弘毅監修：スピントロニクスの基礎と材料・応用技術の最前線，シーエムシー出版(2009)。
- (23) 解説として、高梨弘毅：応用物理，**77**(2008)，255。
- (24) 著書として、Eds. S. Maekawa, S. O. Valenzuela, E. Saitoh, T. Kimura: *Spin Current*, Oxford University Press, (2015)。
- (25) T. Seki, Y. Hasegawa, S. Mitani, S. Takahashi, H. Imamura, S. Maekawa, J. Nitta and K. Takanashi: *Nature Mater.*, **7**(2008), 125.
- (26) T. Iwase, Y. Sakuraba, S. Bosu, K. Saito, S. Mitani and K. Takanashi: *Appl. Phys. Exp.*, **2**(2009), 063003.
- (27) 最近の成果を集めた解説として、高梨弘毅，関剛齋，窪田崇秀，伊藤啓太：機能材料，**38**(2018)，48。

