

ナノハーフメタルの開発に成功

— スピン流伝送の可能性 —

平成19年10月22日
独立行政法人物質・材料研究機構

概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：岸 輝雄）ナノ物質ラボ（ラボ長：室町 英治）新物質発掘グループの室町 英治グループリーダー、山浦 一成主幹研究員は、計算科学センター（センター長：大野 隆央）第一原理反応グループの新井 正男主幹研究員、米国オークリッジ国立研究所（ディレクター：トム・メイスン）強相関電子物質グループのデービット マンデラス・グループリーダーと物性理論グループのサトシ オカモト・グループスタッフと共同で、ナノハーフメタルの開発に成功した。
2. ハーフメタル¹⁾はその特殊な電子状態²⁾に起因する完全スピン分極³⁾のため、スピントロニクス分野での幅広い応用が期待されている。ハーフメタル結晶は理想的にはアップスピン電流⁴⁾だけを通すため、例えばスピン素子やスピンドバイス⁵⁾の開発に役立つと考えられている。より具体的には、高機能なハードディスク用磁気ヘッド、不揮発性磁気メモリ、スピントランジスターの開発に利用できる可能性がある。
3. 今回、山浦らが開発に成功したナノハーフメタルは、従来のハーフメタルにない新規な特徴がある。この新結晶（化学組成： NaV_2O_4 ）は学術的にはポストスピネル⁶⁾と呼ばれ、ナノスケールサイズの鎖を束ねたような構造になっている。これまでの研究から、このナノスケール鎖それぞれがハーフメタル状態になっていると考えられる。このようなナノスケールでの特徴は従来のハーフメタルにはなかった。
また、アップスピン電流を担うナノスケール鎖とダウンスピン電流を担うナノスケール鎖が交互になっているため、従って、アップスピン状態だけでなくダウンスピン状態の電子も分極電流を担っている（スピンナノ分流）。このようなダウンスピン状態の電子が流れるハーフメタルはいままでなかった。つまり、ナノハーフメタルはハーフメタルの単なるダウンスケールではなく、全く異なる状態であり、スピントロニクスマテリアルとしての新しい可能性を提示している。
4. ナノハーフメタルはこれまでのハーフメタルにないナノスケール性、スピンナノ分流、外部磁場安定性（成果の内容参照）を備えている。ナノハーフメタルのスピン伝導状態は本質的に新しく、革新的なスピン素子やスピンドバイス開発に利用できる可能性がある。具体的には、スピンホール素子⁷⁾と組み合わせることによって、これまで難しかったスピン流⁷⁾の伝送に役立つ可能性がある。この技術が実現すれば、革新的次世代デバイスとして期待されているスピンホールデバイス開発⁷⁾に新たな展開を開くことができる。
5. 今回の成果は、米国物理学会の速報誌（フィジカル・レビュー・レター、10月26日号）の注目論文として公開される予定である（10月24日にオンライン版が発行予定）。

研究の背景

元素の電子がもつ固有のスピンは量子化のため“アップスピン”か“ダウンスピン”かのどちらかの状態になっています。金属的伝導を担う集団の伝導電子の場合、そのスピン状態の分布はほぼ50-50%でバランスが取れています。しかしながら、例えば磁石として古くから知られている金属鉄の場合、約67-33%（室温値）で安定になっています。この二つのスピン状態の分布に明瞭な差があるため、スピン磁化が生じ、金属鉄は磁石としての性質を示すと考えられています。

このバランスが100-0%まで理想的にずれた状態をハーフメタル状態と呼んでいます。つまり、伝導電子のスピン状態が1種類（半分）しかない金属的物質という意味です。この状態にある物質は他方のスピン状態の電子を理想的には全く流さないため、スピン・フィルターとしての応用が考えられています。電流からアップスピン状態の電子だけを取り出せるため、高性能なハードディスク用磁気ヘッド、不揮発性磁気メモリ、次世代スピントランジスタ開発に役立つと期待されています。

例えばルチル型酸化クロム（化学組成： CrO_2 ）、スピネル型酸化鉄（ Fe_3O_4 ）、ペロブスカイト型マンガン酸化物（ $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ）、ダブルペロブスカイト（ $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ ）、ホイスラー合金（ NiMnSb ）などがハーフメタル状態、もしくはそれに近い状態を持つ物質として知られています。これらを利用した新規スピントロニクス素子やデバイスの創製、新規ハーフメタル開発は日本だけでなくアジア、北米、ヨーロッパ地域各国の研究機関、大学等で進められています。

成果の内容

今回開発に成功したナノハーフメタルは、従来のハーフメタルと異なり、100%分極電流が結晶中のナノスケールの鎖を流れるという特徴があります。従って結晶の一方向に偏って電流が流れます。実際に測定した結晶軸に依存した電気伝導度の比は、20倍を超えています。より高精度な測定を行えば、さらに大きくなる可能性があります。このような結晶軸に依存した性質を示すハーフメタルはこれまでになかったものです。これまでの研究から、この異方性はナノスケールでのハーフメタル性によるものと考えています。

通常の銅線などの場合、アップスピン状態の電子とダウンスピン状態の電子が混在して流れています。理想的なハーフメタルではアップスピン状態の電子だけが流れると考えられます（図1参照）。しかしながらナノハーフメタルではアップスピン電流を担うナノスケール鎖とダウンスピン電流を担うナノスケール鎖が交互になっており、アップスピン状態の電子とダウンスピン状態の電子が分かれて流れています（スピンナノ分流）。これは、従来のハーフメタルに見られない全く新しい伝導状態です。つまり、ナノハーフメタルが単にハーフメタルのダウンスケールでないことを意味しています。

結晶中のナノハーフメタル鎖（アップスピン電流）は磁気的には反並行に隣のナノハーフメタル鎖（ダウンスピン電流）と結合しているため（図2参照）、結晶全体ではスピン磁化が打ち消され、磁石としての性質を示しません。従って、外部磁場が存在する環境でも、安定に分極電流が流れると期待できます（外部磁場安定性）。ハーフメタルの外部磁場安定性は、これまで理論的な可能性として知られてきた“反強磁性ハーフメタル”⁸⁾のみが有する特徴の一つでしたが、実験で確認されたことはありませんでした。今回のナノハーフメタルの外部磁場安定性はそれとは厳密には異なりますが、近いものです。

まとめると、ナノハーフメタルの主要な特徴として、ナノスケールでのハーフメタル性、スピンナノ分流（100%分極したアップスピン電流とダウンスピン電流が結晶中で分流する）、

外部磁場安定性を上げることができます。

このナノハーフメタル（化学組成： NaV_2O_4 ）の開発にはNIMSが主体となって高機能化を進めてきた超高圧高温結晶育成装置（図3参照）を使用しました。この装置を使って6万気圧まで原材料を圧縮し、さらに 1700°C で数時間加熱することによって最大で2.5mm程度の長さを持つ高品質結晶を育成しました（図4写真参照）。この新結晶は学術的にはポストスピネルに分類され、図2に示すように紙面に垂直に伸びる鎖状構造を束ねたような結晶構造になっています。

波及効果と今後の展開

今回開発したナノハーフメタルはナノスケール性、スピンナノ分流、外部磁場安定性といったこれまでのハーフメタルにない特徴を備えています。それらを利用した革新的なスピン素子やスピンドバイスの開発が期待できます。具体的には、スピンホール素子⁷⁾と組み合わせることによって、これまで難しかったスピン流⁷⁾伝送に役立つ可能性があります。この技術が具体化すれば、革新的次世代デバイスとして期待されているスピンホールデバイスの開発に新たな展開を開くことができます。

このナノハーフメタルは液体窒素温度（ -196°C ）では十分に動作しますが、室温でも動作できるように、さらにその特性を改善することや、ナノハーフメタルの起源や機構には未知な点が多いため、今後注意深く研究を進める必要があります。

問い合わせ先：

〒305-0047 茨城県つくば市千現1丁目2番地1
独立行政法人物質・材料研究機構
広報室 TEL:029-859-2026

研究内容に関すること：

独立行政法人物質・材料研究機構
ナノ物質ラボ
主幹研究員 山浦 一成（やまうら かずなり）
TEL：029-860-4658
FAX：029-860-4674
E-mail：YAMAURA.Kazunari@nims.go.jp

ナノ物質ラボ
ラボ長 室町 英治（むろまち えいじ）
TEL：029-860-4607
FAX：029-860-4607
E-mail：MUROMACHI.Eiji@nims.go.jp

用語解説

- 1) **ハーフメタル**：伝導電子のスピンの分極率が100%である結晶のこと（研究の背景参照）。スピントロニクス分野での幅広い応用が期待されている。
- 2) **電子状態**：固体中の電子の集団が構成する様々な状態のこと。または電子構造ともいう。多くの場合、物質を構成する各元素の電荷分布の様子や、電子が占有するエネルギー準位、電子スピンの状態、フェルミ面の状態、原子間の結合の様子などを指す。
- 3) **完全スピン分極**：電子の固有の性質として、スピンの向きがあり、物質全体の磁性を担う。電子スピンは量子化のため、“アップスピン”か、または“ダウンスピン”かのどちらかの状態になっている。便宜上、占有率が高いほうを“アップスピン”と称する。磁性を担う集団電子の全てが“アップスピン”状態にある場合、完全スピン分極という。
- 4) **アップスピン電流**：“アップスピン”状態の伝導電子が担っている電流のこと。通常の金属では、アップスピン状態の電子とダウンスピン状態の電子が混在して流れるため、電荷は流れるが、スピンの向きは乱れている。理想的なハーフメタルではスピンの向きが“アップスピン”にそろった状態で電荷が流れる。
- 5) **スピン素子、スピンドバイス**：従来の電子の電荷のみに着目した素子やデバイス（絶縁体、半導体、金属など）ではなく、電子のスピンの向きにも着目した素子やデバイス。半導体と強磁性体などを組み合わせることにより、さまざまな新機能素子、デバイスの開発が可能になる。
- 6) **ポストスピネル**：主に地球科学分野で用いられる用語で、加圧、加熱によって誘起されるスピネル型構造の次に安定な構造を有する高密度物質を指す。等方的なスピネル型構造と異なり、一次元的な強い構造異方性がある。加圧によらず常圧でもポストスピネル型構造をとる物質は数多く知られている。しかしながら、新結晶 NaV_2O_4 のように金属伝導性を示すものは極めて限られている。これまでのところ、他には NaRh_2O_4 のみが知られている。
- 7) **スピンホール素子**：外部磁場によって結晶中に電場が誘起されることをホール効果という。逆に外部電場によって結晶中にスピン流（磁場）が誘起されることをスピンホール効果という。電場によってスピン流が発生する素子。理想的には、アップスピン電流とダウンスピン電流が同量逆向きに流れるため、電荷の流れは打ち消されるが、スピンは向きをそろえて流れる。見かけ上、電荷の流れを伴わないスピンの流れをスピン流と称する。
- 8) **反強磁性ハーフメタル**：1995年頃にLeukenとGrootによって理論的可能性として提案されたモデル。本質的に自発磁化がないハーフメタル状態のこと。このため、外部磁場中でもアップスピン電流が安定に流れると予想され、スピン走査型トンネル電子顕微鏡の探針として利用できる可能性がある。ナノハーフメタル状態とは異なる。

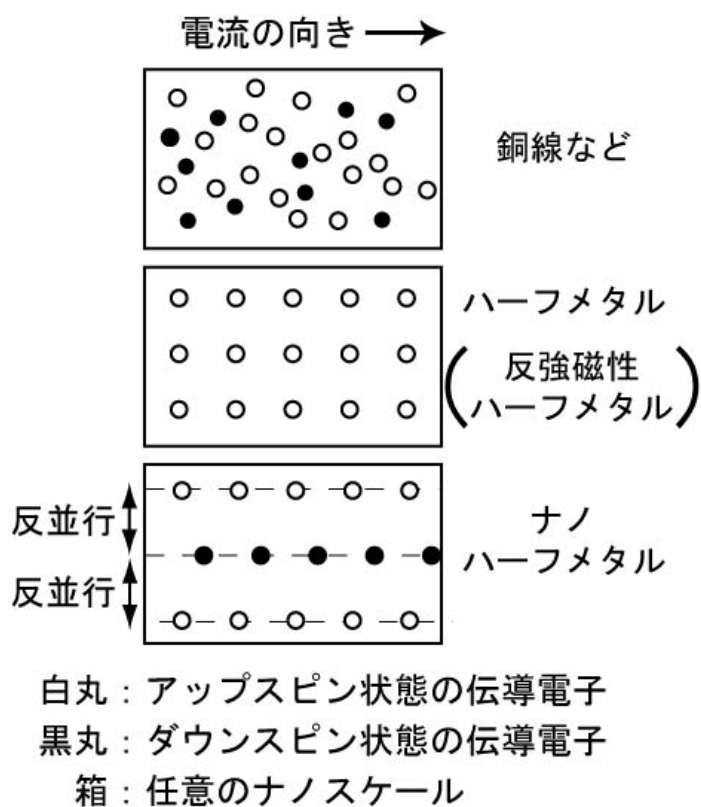


図1 ナノハーフメタルの概念図。

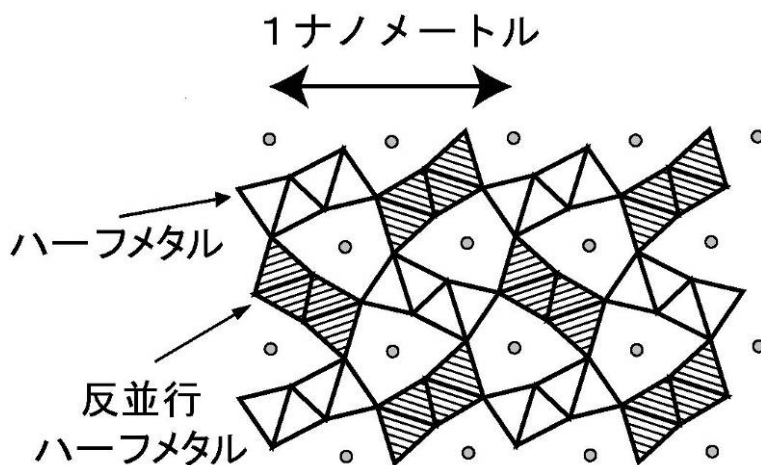


図2 ナノハーフメタル (化学組成: NaV_2O_4) の結晶構造の模式図。図中の各多面体 (白抜きと斜線を施したものは紙面に垂直に伸びる鎖状の構造単位を示す。丸はナトリウム元素 (Na)。白抜きと斜線で分けしたハーフメタル鎖は磁氣的に互いに反並行に結合している。



図3 本研究で使用した超高温高压結晶育成装置の概観

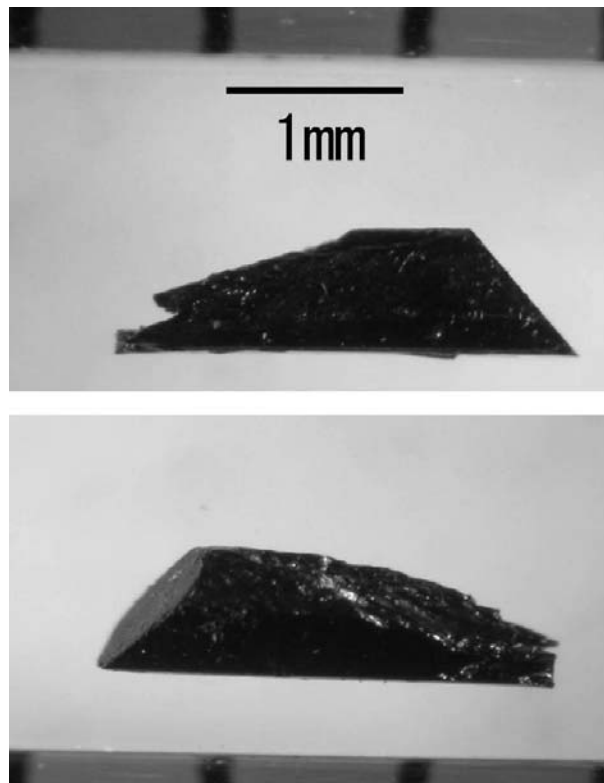


図4 ナノハーブメタルの結晶。上下とも同一結晶の写真。