

総論：スピントロニクスとは

～ナノテクノロジーが拓いた新しいパラダイム～

東京農工大学 佐藤 勝 昭*

1. はじめに

「スピントロニクス」は、「エレクトロニクス」と「マグネティクス」という独立に発展してきた2つの分野のあいだに橋をかけ、融合することで、新たな機能を生み出した。たとえば、従来、電気と磁気の間の変換にはアンペールの法則とファラデーの電磁誘導則を利用するためコイルが使われたが、スピントロニクスによりコイル無しに電気と磁気の変換が行えるようになったのである

2. 磁性と電子輸送

磁性と電子輸送の融合の基礎研究は1950年代から始まっており、理論的考察も行われていた。たとえば、Niのキュリー温度直下で電気抵抗の温度係数が増大する現象は、Fertらによってスピン2流体モデルとスピン散乱で説明されていた¹⁾。パーマロイなど強磁性体のAMR（異方性磁気抵抗効果）や異常ホール効果も1950年代から知られていた²⁾。

また、CdCr₂Se₄やEuSに代表される磁性半導体において伝導電子と局在スピンの相互作用によってもたらされる負の磁気抵抗効果や、吸収端が自発磁化に依存して低エネルギー側に移行する現象などが注目されたが、動作温度の低さから研究は衰退した。1980年代にGaMnAsなどIII-V族ベースの磁性半導体が登場したが、基礎研究にとどまっている³⁾。

3. 巨大磁気抵抗効果（GMR）の登場

スピントロニクスにおけるブレークスルーはナノテクノロジーの進展によりもたらされた。

Grünbergらのグループは、非常に薄い非磁性金

属Cr層をFe層ではさんだFe/Cr（8Å）/Feの構造において、Feの2層の磁化がCr層を通して反平行に結合していることを磁気プリルアン散乱分光法によって見出した⁴⁾。この実験結果を受けてFertのグループは、図1に示すようなFeとCrからなる人工格子を作製し、磁界の印加によって電気抵抗値が50%も変化する現象を発見し、巨大抵抗効果（以下、GMR）と名付けた。1988年のことである⁵⁾。ほぼ同時にGrünbergも三層膜でGMRを見出した⁶⁾。この現象は、非磁性層で隔てられた2つの磁性層の磁化が反平行のときに強い外部磁界を加えると磁化の向きがそろい、界面でのスピン散乱が減ることにより抵抗が下がると説明された。詳細は本特集の三輪氏の解説を参照されたい。

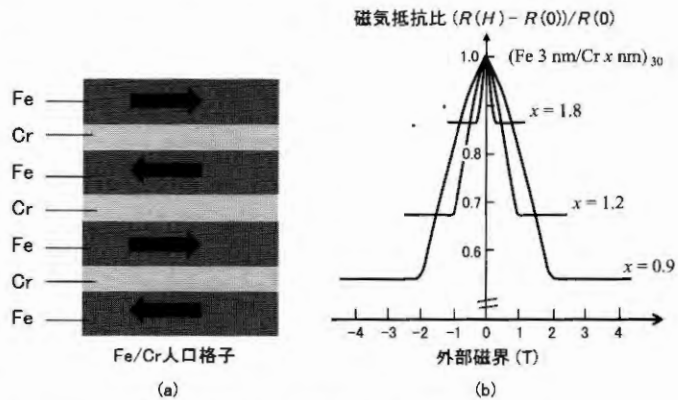


図1 Fe/Cr人工格子の巨大磁気抵抗効果

Fertらが見出したGMRは、2Tもの強い磁界を印加しないと大きな抵抗変化が得られず、センサとしては使えない。この問題を解決したのがIBMのParkinらであった⁷⁾。彼らは、図2(a)に示すようなパーマロイ/銅/パーマロイ/鉄マンガンのサンドイッチ構造を作り、スピンバルブと名付けた。

このデバイスは、非磁性層の銅層を、外部磁界で磁化が変化するフリー層と、外部磁界で磁化が変化

* さとう かつあき 名誉教授

しないピン層の2つのパーマロイ層で挟む構造となっている。ピン層には鉄マンガという反強磁性体が堆積されており界面に働く交換結合により磁化方向が固定され、フリー層のみがわずかな磁界で反転できるのである。

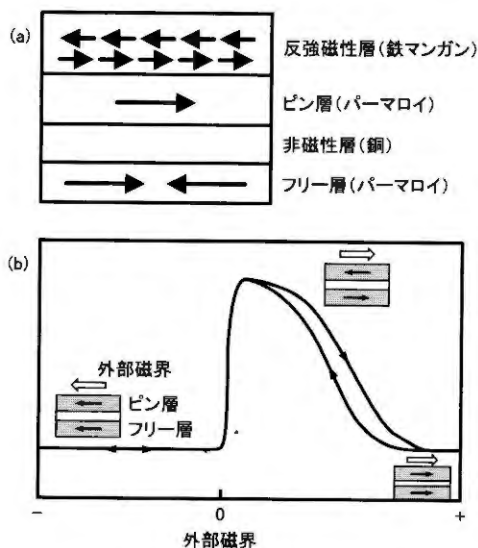
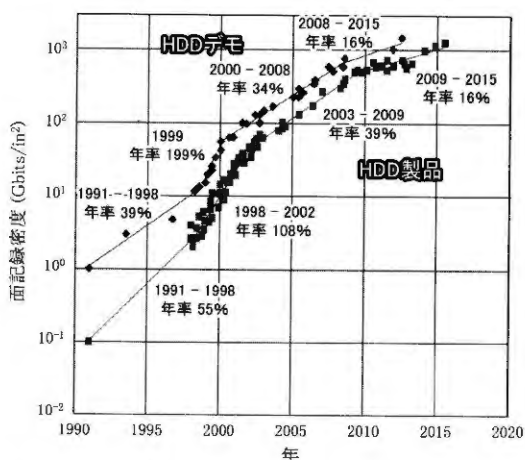


図2 スピンバルブの原理と動作

図3は、ハードディスク（以下、HDD）の面記録密度の推移を表すグラフである。面記録密度を上げるために記録ビットのサイズをどんどん縮小してきたが、媒体からの洩れ磁場が弱くなって、1990年前半になるとコイルでは十分な電気信号が取り出せなくなって、高密度の限界が見え始めてきた。

そこに登場したのが、スピンバルブを用いた読み出しヘッドである。これによって弱い洩れ磁界でも



出所) Hai Li (CMU)の学位論文にもとづき作図

図3 ハードディスクの面記録密度の推移

磁気媒体に記録された磁気情報を高感度で電気信号に変換できるようになった。図3のHDDデモのグラフに示すように1991-1998の期間には、HDDの面記録密度の伸びは年率39%程度しかなかったものが、1999年には年率199%という急上昇を示したのである。GMRの登場によって、私たちは磁気情報をコイルによらず電気信号に変換する手段を手に入れたのである。

FertとGrünbergは、HDDの記録密度向上のきっかけとなったGMRを発見したことが評価され、2007年のノーベル物理学賞を授賞した。

4. 室温でのトンネル磁気抵抗(TMR)の発見

次いで、宮崎ら⁸⁾ およびMooderaら⁹⁾ は、独立に室温におけるトンネル磁気抵抗効果（以下、TMR）を発見した。磁気トンネル接合素子（以下、MTJ）とは、図4(a)に示すように2枚の強磁性電極で極めて薄い絶縁層を挟んだトンネル接合である。TMRは、層に垂直方向の電気伝導が、両強磁性層の磁化が平行か反平行かで異なる現象である。

この現象は、1980年代から知られており、先駆的な研究も行われていた¹⁰⁾。しかし当時の技術ではトンネル障壁層の制御が難しく、再現性のよいデータが得られていなかった。宮崎らは成膜技術を改良して、平坦でピンホールの少ない良質のAl-O絶縁層の作製に成功し室温でのTMR観測につながった。

TMRの動作は、図4(b)に示すように、金属強磁性体のスピン偏極バンド構造を使って説明される。強磁性金属のバンド構造では、フェルミ面における状態密度（以下、DOS）が上向きスピンと下向きスピントで異なり、両電極の磁化が平行だとDOSの大きなスピンバンド間の電子移動により低抵抗になるが、反平行ではDOSの大きなバンドと小さなバンドの間の移動のため高抵抗になる。

TMRのさらなる発展のきっかけになったのは、理論による予測であった。Butlerら¹¹⁾ およびMathonら¹²⁾ はトンネル障壁をMgO単結晶とすることで、コヒーレントなトンネリングが生じ、1,000%におよぶTMR比が出現すると予測した。

多くの機関が試みたがよい結果をもたらさなかったが、湯浅ら^{13,14)} およびParkinら¹⁵⁾ は、注意深いMgO障壁層の形成技術を確認してMTJを作製、出力の大幅な改善をもたらした。

プロトタイプのMTJはMBE法で作製されたが、その後量産性を備えたスパッタ装置でCoFeB/MgO/

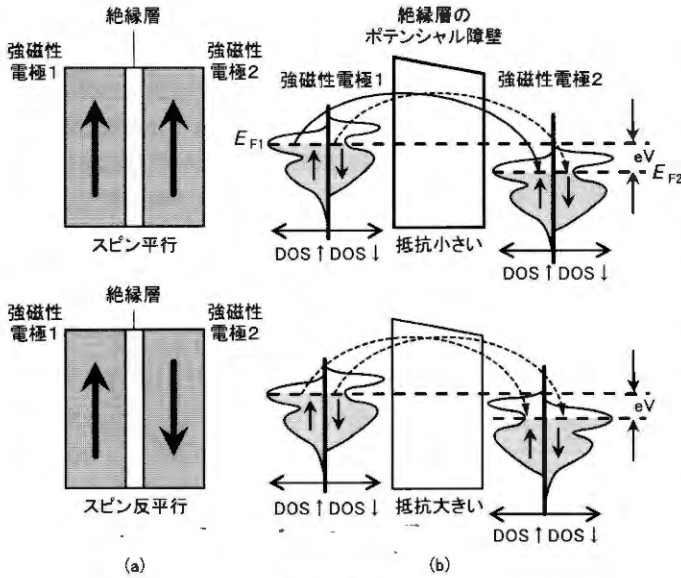


図4 TMRの原理

CoFeBのMTJを成膜できるようになり、現在では、HDDの磁気ヘッド用のセンサのほとんどに使われている。これらの経緯については、本特集の湯浅氏の解説を参照されたい。

5. MRAMの登場

TMRの発見は、新たな不揮発性メモリ素子である磁気ランダムアクセスメモリ（以下、MRAM）を生むきっかけとなった。MRAMは、図5に示すようにTMR素子を用いたMTJと半導体CMOSが組み合わされた構造となっている。

直交する2つの書き込み線（ビット線とワード線）に電流を流し、得られた磁界が反転磁界 H_k を超え

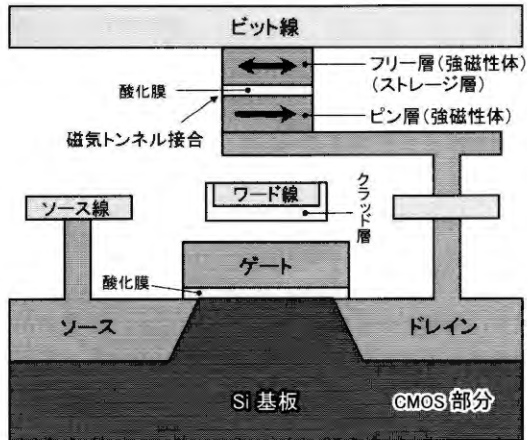


図5 MRAMの構成を表す図

ると、磁気状態を書き換えることができる。フリー層に記録された情報を読み出すには、図のCMOS部分にあるゲートに電圧を印加してトランジスタをオンにすると、磁気トンネル接合の3層構造を貫くように電流が流れる。このとき、電気抵抗が高い状態（ピン層とフリー層の磁化が反平行）、あるいは、電気抵抗が低い状態（両層の磁化が平行）のどちらかが出現する。この電気抵抗の違いを、データの違いとして読み出す。

MRAMは、アドレスアクセスタイムが10 ns台、サイクルタイムが20 ns台とDRAMの5倍程度でSRAM並みの高速な読み書きが可能である。また、フラッシュメモリの10分の1程度の低消費電力、高集積性が可能などの長所があり、SRAM（高速アクセス性）、DRAM（高集積性）、フラッシュメモリ（不揮発性）のすべての機能をカバーする「ユニバーサルメモリ」としての応用が期待されている。

しかし、電流で磁界を発生させている限りは高集積性が難しいという欠点がある。この問題を解決したのが次に述べるスピン移行トルク（以下、STT）である。

6. STTの応用

1996年、新たなスピントロニクスの分野としてスピン注入磁化反転のアイデアがSlonczewski¹⁶⁾ およびBerger¹⁷⁾ によって提案され、実験的に検証された。図6に示すように、強磁性電極FM1からスピン偏極した電流を、傾いた磁化をもつ対極強磁性電極FM2に注入すると、注入された電子のスピンの向きに傾けられるときの反作用として、スピン角運動量のトルクが対極電極の磁化に移行して、それがきっかけで磁化反転をもたらすのである。

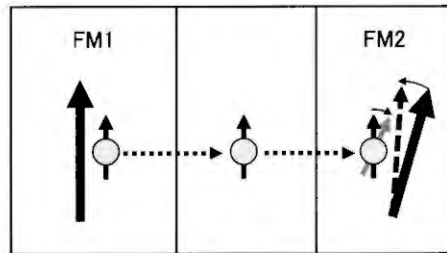


図6 スピン移行トルクの説明図

これを STT という。

開発当初は 10^8 A/cm^2 という大電流密度を必要としたので、実用は無理であろうと言われたが、現在では CoFeB/MgO/CoFeB 垂直磁化の TMR 素子を用いて実用可能な 10^6 A/cm^2 台の電流密度にまで低減することができるようになった¹⁸⁾。かくして、ついに人類は、コイルによらずに、電気を磁気に変換することに成功したのである。

STT を使うと、MTJ に電流を流すだけで磁化反転できるので、微細化すれば電流密度も小さくできる。高集積化することが可能になった。図 7 に示すように、メモリーセルサイズが $0.2 \mu\text{m}$ より小さくなると従来型の MRAM より書き込み電流を下げる可以降低。STT を用いた MRAM は STT-MRAM と呼ばれ、256 Mbit および 1 Mbit の STT-MRAM が市販されている¹⁹⁾。

STT-MRAM の最近の展開については、本特集の湯浅氏の解説を参照されたい。

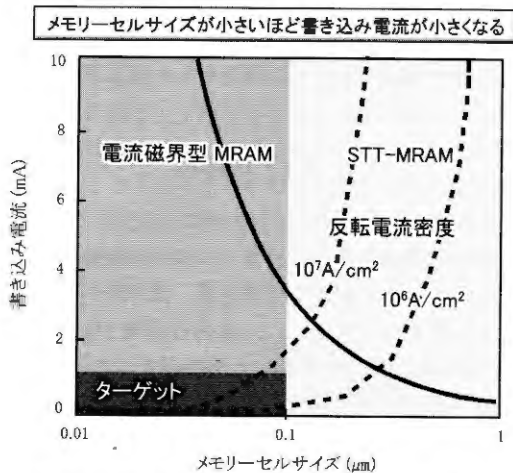


図 7 STT-MRAM のメモリーセルサイズと書き込み電流の関係

7. STT の動的解析とスピントルク発振素子

伝導電子のもつわずかなスピントルクだけで、相手の磁性体の磁気モーメントを反転することができるのは、磁気モーメントが歳差運動をする力を使うからである。

図 8 に示すように、磁性体の磁気モーメント M は、外部磁場 H_{eff} を加えるとその外積 $M \times H_{\text{eff}}$ で表さ

れるトルクを受けて歳差運動を始める。そして、 $M \times dM/dt$ に比例するダンピングトルクを受けて、回転しながら次第に磁界方向に傾いていく。STT がダンピングトルクより大きくなると歳差運動が増幅され、ついには反転してしまう。このように歳差運動の助けを借りて反転するので少ない電流での磁化反転が可能となるのである。

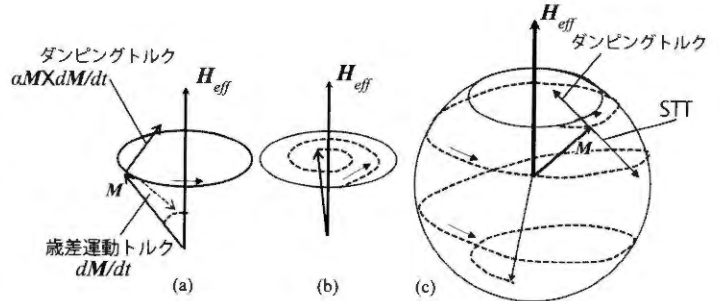


図 8 スピン移行トルクと歳差運動

もし、この磁気モーメントが、ダンピングトルクを丁度打ち消すような STT を伝導電子スピンから受け取ると、歳差運動はいつまでも続く。これがスピントルク発振素子（以下、STO）の原理である。

素子の抵抗は GMR 効果を通じて、歳差運動の振動数で振動するので一定電流を流すと、素子の電圧がこの振動数で変化する。シンプルな構造で高周波の発振器を作ることが出来る。図 9 は（国研）産業技術総合研究所が開発した MTJ を用いた磁気渦型 STO である²⁰⁾。

STO は、HDD のさらなる記録密度向上のために研究されているマイクロ波アシスト磁気記録（MAMR）用の発振器として期待されている。

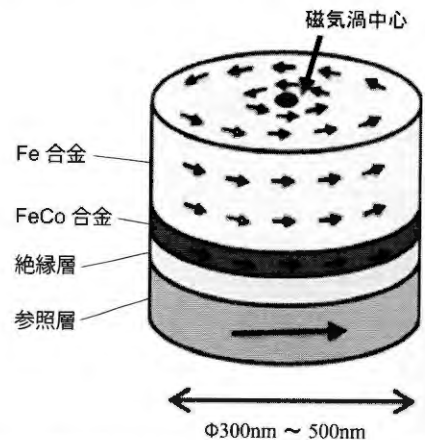


図 9 磁気渦型スピントルク発振素子の模式図

8. スピン流がスピントロニクスを変える

8.1 スピン流とは²¹⁾

図10に示すように、強磁性体と非磁性体の接合を考え、強磁性体から非磁性体に向かって電子を流すとして、↑スピンの電子が強磁性体から非磁性体へ移動すると、界面付近では↑スピンの数と↓スピンの数がアンバランスになり $J_s = J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$ で定義されるスピン流が生じる。非磁性体の中では本来↑スピンと↓スピンの電子の数は等しいはずなので、やがてこの流れは消滅する。スピン流が $1/e$ になる距離をスピン拡散長といい λ_s と表す。 λ_s は $100\text{ nm} \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ という短い距離なので、微細加工技術が進展する以前にはスピン流 J_s は電磁気学では考慮する必要がなかった。スピン注入があると非磁性体には磁性体との界面にスピン蓄積が起きている。

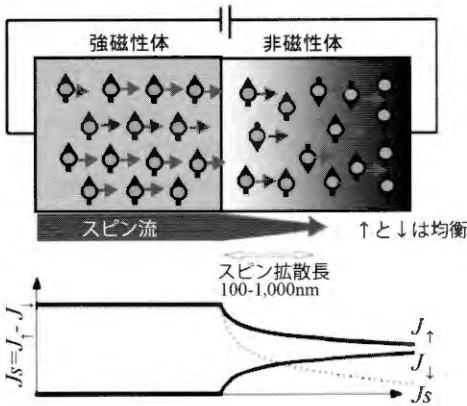


図10 電流が運ぶスピン流

一方、図11に示すように、↑スピンの電子が右方向に進み↓スピンの電子が左方向に進むとすれば、電荷の流れとしての電流は流れませんが、スピンだけを見ると、↑スピンは右側に、↓スピンは左側に流れるので、 $J_s = J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$ で定義されるスピン流は右に向かって流れる。このように電流を伴わないスピンの流れを純スピン流と呼ぶ。トポロジカル絶縁体の表面では、このような純スピン流が存在する。

8.2 スピンホール効果・逆スピンホール効果

スピン流の性質を端的に表しているのがスピンホール効果である。通常ホール効果は磁界下に置かれたキャリアがローレンツ力で電流に垂直な方向に曲げられる効果であるが、スピンホール効果は図12に示すように、Ptなどスピン軌道相互作用の大きな導体に電流を流すだけで、電流に垂直の方向にス

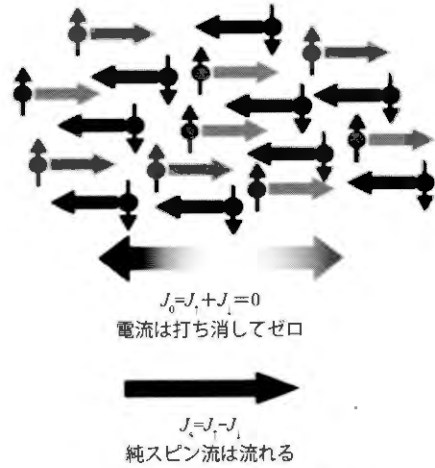


図11 電流を伴わないスピン流

ピン流を生じる効果である。スピンホール効果は1971年に Dyakonov ら²²⁾ によって提案され、2003年に村上ら²³⁾ が n-GaAs において理論的に予言した。

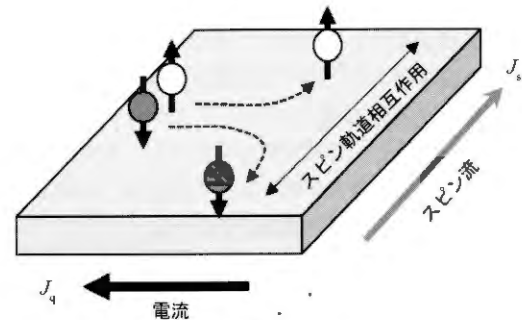


図12 スピンホール効果

一方、スピンホール効果とは逆に、Ptなどスピン軌道相互作用の大きな導体にスピン流を流すと、垂直方向に電界が生じることが齊藤ら²⁴⁾ により発見され、逆スピンホール効果と名付けられた。図13に示すように x 方向にスピン流 J_s があると、↑スピン

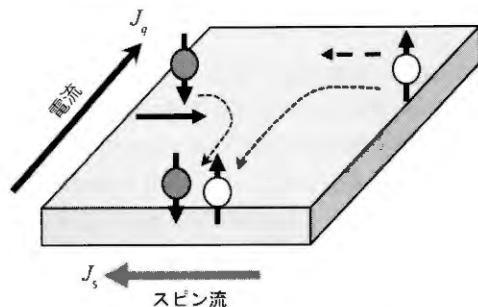


図13 逆スピンホール効果

は左に、 \downarrow スピンは右に曲げられる。その結果、スピン流と垂直方向に電流 J_s が生じる。

非局所配置でのスピン流の検出、熱スピン流によるスピンゼーベック効果など、スピン流の検出にこの逆スピンホール効果が果たした役割は大きい。

スピン流、および、逆スピンホール効果の詳細は本特集の吉川・齊藤氏による解説を参照されたい。

8.3 スピンゼーベック効果

強磁性体に温度勾配をつけると熱流によるスピン流が生じる。このスピン流をPtなどスピン軌道相互作用の大きな金属に注入すると、逆スピンホール効果によって電圧に変換できる。これをスピンゼーベック効果と呼ぶ。内田らは、図14に示すように、温度勾配をつけたパーマロイにPt電極を付けることによって、この効果の観測に成功した²⁶⁾。

強磁性体としては、パーマロイなどの金属だけでなく、磁性ガーネットのような絶縁性の磁性体でも観測される²⁶⁾。この場合のスピン流は、電子スピンの流れではなく、磁性原子の局在スピンの振動が波として伝播するスピン波スピン流であると考えられる。

さらにスピンゼーベック効果の逆効果であるスピネルチェ効果も発見され、「スピнкаロリティクス」という新しい学問分野が拓かれた。スピン流のもたらす熱電現象の基礎と応用の詳細は、本特集の吉川・齊藤氏の解説を参照されたい。

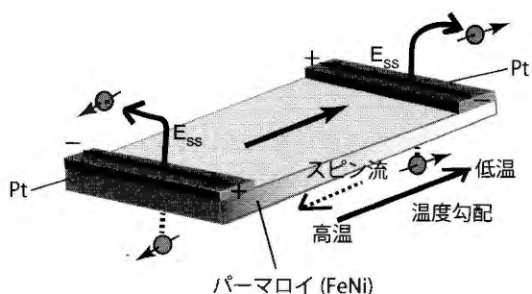


図14 スピンゼーベック効果

8.4 スピンの整流性とスピンメカニクス

電流は時間を反転すると逆方向に流れるが、スピン流は時間反転対称性がないので変わらない。物質のランダムな運動をスピン流として一方向に整えれば、外部から大きなエネルギーを加えることなく、別のエネルギーに変換したり、情報処理したりできるようになる。

齊藤らは、MEMSにスピン流を取り入れたデバ

イスの設計にも着手した。メカニクスとスピンとの融合であることから、既存のスピン트로ニクスをさらに広げた「スピンメカニクス」と呼べる新たな研究領域を創造している。齊藤らは液体金属を流すだけで電気エネルギーを取り出せるという、驚くべき現象を発見した。数百 μm の細い管に液体金属を流すと、管の壁付近で液体金属中に渦運動ができる。この渦が磁界として働いてスピン流が生成され、100 nVの電気信号が得られた²⁷⁾。

9. このほかのスピン트로ニクスの話題

9.1 ダイヤモンド・スピン트로ニクス

ダイヤモンドにおける炭素空孔 (V) と窒素原子 (N) で構成されたNV-中心は、ダイヤモンドの広いバンドギャップにより深い欠陥準位を形成しているため、室温で動作する有望な量子情報デバイスとして注目を集めている。水口は、NV-中心が5 qubitの操作を可能にするために結合する方法だけでなく、ダイヤモンドのp-i-n接合で構成される特別設計のLEDを使用して、室温動作する単一光子源を実現する方法を見出した²⁸⁾。

ダイヤモンド中の電子スピンは、数十nm程度の局所領域に閉じ込めることが可能であり、磁界や電界や温度を高い精度で検出できることから、ナノスケールの物質構造や生体構造を高精度でイメージングできるとされる量子センサへの応用が期待されている。

9.2 ニューロモルフィックスピン트로ニクス

ソサエティ5.0時代を迎え、人工知能（以下、AI）システムが飛躍的な進展を遂げたが、現在のAI技術を支える深層学習などニューラルネットワーク演算は、潤沢な計算機資源と電力消費が必要なサーバ上で行われており、IoT機器やモバイル端末などエッジ側でのAI処理のためには、省電力で高速な新たなアーキテクチャーが要求されている。この困難な課題に対し、ヒトの脳でのニューロンとシナプスによる情報処理を模倣したニューロモルフィック・コンピューティングが期待されている。ナノ磁性体やスピントルク発振器を用いたリザーバ・コンピューティング、スピン波を用いた機械学習など、多くの取り組みが行われており²⁹⁾、今後の進展が期待されている。

10. おわりに

スピントロニクス特集にあたり、最新の展開については特集の各論に譲り、本稿ではこの分野の歴史的な進展の経緯を中心に解説した。筆者は、昨年、電気学会誌のスピントロニクス特集でも同趣旨の解説³⁰⁾を書いたので、かなりの部分が重複してしまった点、お許しいただきたい。

この解説がスピントロニクスの分野になじみのない読者にとって導入の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) A. Fert and I.A. Campbell: Phys. Rev. Lett. **21**, 1190 (1968).
- 2) R. Karplus and J. M. Luttinger: Phys. Rev. **95**, 1154 (1954).
- 3) K. Sato: Crystal growth and characterization of magnetic semiconductors, "Advances in Crystal Growth Research", eds. Ki. Sato et al. Elsevier p. 303 (2001).
- 4) P. Grünberg, et al.: Phys. Rev. Lett. **57**, 2442 (1986).
- 5) M.N. Baibich, et al.: Phys. Rev. Lett. **61**, 2472 (1988).
- 6) G. Binasch, et al.: Phys. Rev. B **39**, 4828 (1989).
- 7) B. Dieny, et al.: J. Appl. Phys. **69**, 4774 (1991).
- 8) T. Miyazaki and N. Tezuka: J. Magn. Magn. Mater. **139**, L231 (1995).
- 9) J.S. Moodera, et al.: Phys. Rev. Lett. **24**, 3273 (1995).
- 10) S. Maekawa, et al.: IEEE Trans. Magn. **MAG-18**, 707 (1982).
- 11) W. H. Butler et al., Phys. Rev. B **63**, 054416 (2001).
- 12) J. Mathon and A. Umeski, Phys. Rev. B **63**, 220403R (2001).
- 13) S. Yuasa, et al.: Jpn. J. Appl. Phys. **43**, L558 (2004).
- 14) S Yuasa, et al.: Nature Mater. **3**, 868 (2004).
- 15) S.S. P. Parkin, et al.: Nature Mater. **3**, 862 (2004).
- 16) J. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mater. **159**, L1 (1996).
- 17) L. Berger: Phys. Rev. B **54**, 9353 (1996).
- 18) S. Ikeda et al.: Nature Mater. **9**, 721 (2010).
- 19) <https://www.everspin.com/spin-transfer-torque-mram-products>
- 20) https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2016/pr20161216/pr20161216.html
- 21) 齊藤英治・村上修一：「スピン流とトポロジカル絶縁体」(共立出版、2014).
- 22) M.I. Dyakonov et al.: JETP Lett. **13**, 467 (1971).
- 23) S. Murakami et al.; Science **301**, 1348 (2003).
- 24) E. Saitoh et al.: Appl. Phys. Lett. **88**, 182509 (2006).
- 25) K. Uchida et al.: Nature **455**, 778 (2008).
- 26) K. Uchida et al.: Appl. Phys. Lett. **97**, 172505 (2010).
- 27) R. Takahashi et al.: Nature Phys. **12**, 52 (2016).
- 28) N. Mizuochi: "Spintronics for Next Generation Innovative Devices" eds. K. Sato and E. Saitoh, Wiley, Chap. 12, p. 227 (2015).
- 29) 特集「ニューロデバイスの最前線」日本磁気学会誌(まぐね) **14**, 312 (2020).
- 30) 佐藤勝昭：電気学会誌 **139**, 589 (2019).

