スピン流はめぐる

松尾　衛

1. 物質中の魔球

テニス、卓球、野球といった球技では、ボールの回転をコントロールすることで生じる様々な変化球が魅力の一つです。空気のような粘性のある流体中を回転しながら移動するボールには、ボールの回転運動と空気の流体運動に依存するマグヌス力と呼ばれる力が働き、変化球が生み出されます。ボールの並進運動だけでなく、自転運動と周囲の流体運動の関係を支配し、ボールの軌道を自在に操った者が試合を制します。こうした球技でみかける変化球のように、回転体の運動というのは不思議なものです。

我々が日常生活で目にするマクロなスケールから転じて、物質中のマイクロメートル、ナノメートルといったミクロなスケールの世界の「球技」を考えてみましょう。この世界でのボールとは、電子です。電子はスピンと呼ばれる自転運動に相当する自由度である量子論的な角運動量を持っています。この電子をお望みの目的地に、お望みの軌道を描きながら届けるためには、スピンと周囲との様々な相互作用に関する知識が必要となるでしょう。

このような、物質中におけるスピンに依存する性質を駆使する「球技」が、スピントロニクスとよばれる分野の研究対象であり、そこでの最重要概念の一つが、スピン方向の揃った電子の流れ「スピン流」です[1)]。スピン方向を一斉に揃えた電子の流れを自在に操ることによって、従来の電荷自由度だけを利用してきたエレクトロニクスを超えた新機能発現するデバイス開発といった応用研究も行われています。

この「球技」は様々な物質を舞台に行われます。強磁性金属を舞台とするなら、ボールに相当するのが伝導電子、空気のような粘性流体に相当するのが局在磁化であり、マグヌス力に相当する力は、伝導電子スピンと、伝導電子が伝播する空間に存在する局在磁化との磁気的相互作用です[2)]。プラチナのような非磁性の貴金属中では、伝導電子スピンには、スピン軌道相互作用と呼ばれる力が働き、スピン流を作ることができます[1)]。

舞台は単体物質に限りません。例えば、非磁性金属と強磁性体を貼り合わせた接合系を作ると、その接合界面で強磁性体中の局在磁化と非磁性金属中の伝導電子スピンが磁気的に相互作用することを利用して、非磁性金属中のスピン流を作ることができます[1)]。

多彩な変化球を生み出すために不可欠である空気の粘性は、同時にボールの回転の勢いを失わせてしまう要因にもなります。同様に、せっかく作ったスピン流も、同時に物質中のいろいろな散乱過程によってスピン方向が乱され、散逸してしまいます。一般にナノメートルからマイクロメートル程度流れたら、スピン方向はバラバラになり、スピン流は消失します。スピン流はとても儚い存在と言えるでしょう。スピン流を利用するには舞台

に工夫が必要であり、例えばスピンの向きがバラバラにならない程度のナノスケールのデバイスを作り込みます[3]。

本稿では、スピン流を自在に操るために培われてきた知見の中でも、特に私自身が深く関わってきた非磁性金属中の伝導電子のスピン流の制御法を中心に、これまでスピントロニクス分野であまり語られることの無かった、スピン流と他の基礎物理学分野とのつながりについて紹介します。

2. 小さな磁石と小さなコマ

スピン流制御の具体例に入る前に、電子スピンの持つ二面性について見ていきましょう。電子スピンは、磁性の起源となる小さな磁石としての磁気的性質と同時に、コマのような回転体としての力学的性質を持っています。

1915 年、シュレーディンガー方程式が発見されるよりも 10 年ほど前、当時特許庁に勤めていたアインシュタインは、一般相対論の構築と並行して、鉄の磁性の起源は何かという問題にも取り組んでいました[4]。閉回路を流れる電流はアンペールの法則によって電磁石をつくります。鉄製の永久磁石の中でも同様に、原子核を周回する電子の円電流の作る小さな電磁石たちが同じ向きに揃うことで磁性が発現していると彼は考えました。

もしも電子の円電流が磁性の起源であるなら、この小さな電磁石たちは、電子の軌道運動に由来する角運動量を持っています。つまり、一つ一つの小さな磁石たちは、同時にコマのように回転運動しているということです。そこで、磁気を帯びた小さな回転ゴマたちがバラバラな方向を向いている状態と、一斉に揃った方向を向いている状態では、前者で打ち消し合っていた角運動量が、後者では磁性の発現する方向周りに有限の角運動量を持つことになります。そこで、鉄のような永久磁石を天井から糸で吊し、磁場をかける前後を観察すると、角運動量保存則によって、磁場をかけた後で増加した回転ゴマたちの全角運動量を打ち消すように、永久磁石全体が回転運動を始めるでしょう。実際、アインシュタインはドハースとともに、「生涯唯一の実験」と呼ばれる実証実験を行い、磁性が角運動量に起因することを突き止めました。この磁気量変化によって回転運動が生じる現象はアインシュタイン・ドハース効果と呼ばれています。

同時期にこの逆過程に相当する、鉄を回転させると磁気量が変化する現象がバーネットによって発見され、バーネット効果と呼ばれています。バーネットは木製の実験小屋で注意深く磁気遮蔽をしながら、磁性体の回転前後での微弱な磁化の変化を測定し、古典物理学的な電子の軌道角運動量から予想される磁気モーメントの 2 倍の値が測定されることを突き止めました。

3. 磁場勾配とスピン流

1922 年、シュテルンとゲルラッハによって、磁場中を通過させた銀粒子のビームが、磁場勾配に沿って 2 つに分離されることが発見されました。これは、銀粒子中の電子スピンには互いに磁気的な性質が逆の 2 種類の状態（上向きと下向きあるいはアップスピンとダウンスピン）があり、それぞれ磁場勾配に対して平行と反平行方向に力を受けることが分かりました[5]。

ここに登場する、磁場勾配に沿って、アップスピンとダウンスピンが互いに逆方向に進む流れは、スピン流の一種です。アップスピン流れに対して、逆方向のダウンスピンの流れというのは、スピン角運動量の流れとしては、同じなので、この状況ではスピン流が磁場勾配に平行に生成しています (図 1)。

1 つの電子に着目すると、スピン $\mathbf{S}$、磁場 $\mathbf{B}$ とするとき、ゼーマン相互作用と呼ばれるスピンと磁場の相互作用は、$H_Z = -\mathbf{S}\cdot\gamma\mathbf{B}$ と表されます。ここで γ は電子の磁気回転比です。簡単のために、この z 成分だけに着目して勾配を取ると $\mathbf{F} = -\nabla H_Z = S_z\gamma\nabla B_z$ となり、アップスピンとダウンスピンがそれぞれ磁場勾配に平行・反平行に力を受けることが分かります。

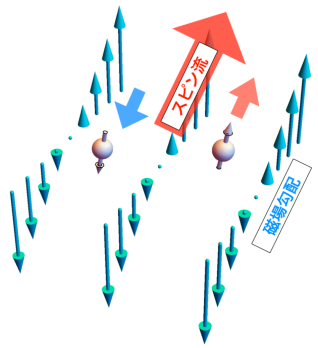

図 1　磁場勾配に沿ってアップスピンとダウンスピンは互いに逆向きに進む。このとき、磁場勾配に沿ってスピン角運動量の流れ、スピン流が生成している。

4. スピン接続

シュテルン・ゲルラッハの実験と同時期に、カルタン (E. Cartan) は、アインシュタインの一般相対論をスピノール場を含むように拡張しました。アインシュタインの一般相対論は、計量を基本量としてリーマン時空上で重力場中や非慣性系におけるベクトル場やテンソル場を記述できます。これを四脚場と呼ばれる幾何学量を基本として、アインシュタイン理論に登場する曲率だけでなく、捩率と呼ばれる時空の捩れを含むリーマン・カルタン時空上に拡張したものがカルタンの理論です[6]。カルタンは理論構築後にアインシュタインに手紙を送ったものの、特に好意的な反応が得られぬまま、後に物理学者が同等の理論形式を再発見してしばらく経過するまで、その理論の存在を忘れ去られていたようです。

カルタンの四脚場形式を使うと、後にディラックのアクロバット[5] によって発見されたスピノール場の特殊相対論的方程式であるディラック方程式を、重力場中や非慣性系における一般相対論的な方程式に拡張できます[6]。この一般相対論的ディラック方程式には、スピン接続と呼ばれる、スピンに依存するゲージ場が含まれています。非慣性系における電子スピンに作用する相互作用としては、前述のゼーマン相互作用 H_Z やスピン軌道相互作用という特殊相対論的起源を持つ相互作用だけでなく、スピン接続由来のスピン依存する慣性力が導かれます。特に角速度 $\mathbf{\Omega}$ で回転する系では、スピン回転結合 $H_{\mathrm{SR}} = -\mathbf{S}\cdot\mathbf{\Omega}$ がスピンに働きます。これは、ゼーマン相互作用におけるラーモア周波数 γB を回転の角速度に置き換えたものに等しいので、回転を一種の磁場と見なしたものと解釈できます。回転体中の電子スピンにこのスピン回転結合が働くために、バーネット効果のように回転の角速度があたかも磁場のような役割を担うので回転軸方向にスピンが揃うことが説明されます[7]。

5. 回転勾配とスピン流

回転は磁場と似ているということは、物質中に回転勾配を用意すれば、シュテルン・ゲルラッハの実験と同様にスピン流を作れそうです。そこで私達が考えたのが水銀やガリウム合金のような液体金属の流体中の渦度勾配を用いる方法[8] と、銅などの固体金属薄膜に表面弾性波を注入して引き起こされる回転勾配[9] を用いる方法です。

流体素片や弾性体の格子の速度場を $\mathbf{v}$ とするとき、渦度 $\boldsymbol{\omega} = \nabla\times\mathbf{v}$ は、局所的な回転の角速度に相当する自由度です。こうした渦度のある系において、速度場がゼロになるような非慣性系中の電子の方程式を考えると、電子スピンと渦度は、$H_{\mathrm{SV}} = -\mathbf{S}\cdot\boldsymbol{\omega}/2$ のように相互作用（スピン・渦度結合）します。前述の剛体回転系の場合には $\mathbf{v} = \mathbf{\Omega}\times\mathbf{r}$ を代入すると、$\boldsymbol{\omega} = \nabla\times\mathbf{v} = 2\mathbf{\Omega}$ となるので、スピン・渦度結合はスピン・回転結合を特殊な場合として含むことが分かります。この相互作用を利用して、渦度勾配中では、シュテルン・ゲルラッハの実験で見られたものと類似の効果として、渦度勾配に沿ったスピン流が生成されるというのが直観的な予想になります。

実際、直径が数百マイクロメートル程度の石英管に水銀やガリウム合金のような液体金属流体を封入し、圧力をかけると、内壁面付近との摩擦の影響で、渦度が最大に、管中央付近では最小になり、管中央から壁面に向かって渦度勾配が作られ

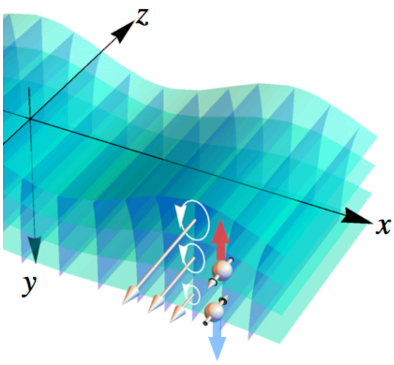

図 2　表面弾性波によって格子の局所回転運動が誘起され、y 方向に沿って渦度勾配が生じ、それに沿ってスピン流が生成される。

ます。この液体金属流体が作る渦度勾配に沿って、スピン流が生成されることが理論・実験の両面から示されています[8)]。

また、銅に表面弾性波と呼ばれる格子の局所変形運動を誘起すると、表面付近の渦度が最大になり、深さ方向に渦度が指数関数的に減衰します (図 2)。この渦度勾配に沿ってスピン流が生成されることが確かめられています[9)]。

このように、スピン・渦度結合という、非慣性系特有の相互作用を利用することにより、従来のスピントロニクスでは利用されることのなかった、液体金属やスピン軌道相互作用の小さな銅やアルミニウムのようなごくありふれた金属をスピン流生成源として利用できることが明らかになりました。

スピン接続と呼ばれるゲージ場は、素粒子分野では詳しく調べられていました[10)]。一方、ここでは、スピン輸送の調べるための理論枠組みを従来の慣性系から非慣性系へと拡張することによって現れるスピン接続によって、スピントロニクス分野の材料選択の幅を広げることができるというものです。重力場の研究から生まれたスピン接続が、エネルギースケールが全く異なる磁気デバイス材料開発の基礎研究にも登場するというのは、とても興味深いと思っています。

6. トンネル電流とスピン流

ここまでは非磁性金属単体におけるスピン流についてみてきました。ここからは非磁性金属と強磁性体の接合系を利用したスピン流の生成法を紹介します。非磁性金属中の電子スピンを $\mathbf{s}$、強磁性体中の局在磁化を $\mathbf{S}$ とすると、接合界面付近では、$H_{\rm ex} = \sum_j (J s_j^+ S_j^- + {\rm h.c.})$ という相互作用が働きます。ここで J は電子スピンと局在磁化との相互作用を大きさを表す結合定数であり、$s_j^\pm := s_j^x \pm i s_j^y$、$S_j^\pm := S_j^x \pm i S_j^y$ はそれぞれ界面付近のサイト j における電子スピンと局在磁化の昇降演算子、h.c. は上式第 1 項のエルミート共役項を表しています。界面を通過するスピン流は、単位時間当たりのスピン角運動量に等しく、$I_S := \hbar \sum_j \partial_t n_j^S$ と表せます。ここで、n_j^S はサイト j における伝導電子スピンの数密度です。こうして定義されたスピン流を、上記の界面相互作用を摂動として計算すると、詳細は割愛しますが、「(スピン流) $\propto$ (伝導電子スピンの状態密度) $\times$ (局在磁化の状態密度) $\times$ (伝導電子スピンと局在磁化の分布関数の差)」という形に書くことができます。つまり、界面をはさんで、非磁性金属側、磁性体側それぞれの非平衡状態に差が生まれた場合に限り、スピン流は生成され、非磁性金属・磁性体それぞれに励起可能なスピンの自由度が多いほど、スピン流は大きくなることが分かります。実際、磁性体にマイクロ波を照射したり温度勾配をかけることで、伝導電子スピンと局在磁化の分布関数に差を作ってスピン流が生成されることが知られています[11)]。

実は界面におけるスピン流生成の式は、メゾスコピック系でよく知られているトンネル電流の式と非常によく似ています。二つのリード線 L、R が接合されている系において、電子の生成 (消滅) 演算子をそれぞれ $c_j^\dagger(c_j)$、$d_j^\dagger(d_j)$ とすると、接合部は、$H = \sum_j (V c_j d_j^\dagger + {\rm h.c.})$ と表せます。ここで V は接合面における相互作用の大きさです。このとき、トンネル電流は、サイト j における電子数密度を n_j^C とすると $I_c := -e \sum_j \partial_t n_j^C$ と表せます。非磁性金属/強磁性体の界面相互作用と比較

すると、$c_j^\dagger(c_j) \leftrightarrow s_j^+(s_j^-)$、$d_j^\dagger(d_j) \leftrightarrow S_j^+(S_j^-)$、という対応が読み取れます。実際、トンネル電流に対して「(トンネル電流) $\propto$ (L 上の電子の状態密度) $\times$ (R 上の電子の状態密度) $\times$ (L とRの電子の分布関数の差)」という形がトンネル接合の電流公式としてよく知られており[12]、そのスピン伝導版として、上記のスピン流の式が導かれていました[13]。

またメゾスコピック系の研究では、電気伝導に伴う揺らぎの微視的機構が精力的に調べられています[7]。その類推から最近我々は、二層膜接合系におけるスピン流の揺らぎの微視的理論を作り、スピン流の揺らぎから有用な情報が得られることを示しました[14]。これは以下に述べるような、メゾスコピック系の物理とスピントロニクス分野との交流を深めるための第一歩を目指したものでもあります。

上述の通り、本来メゾスコピック系の物理とスピントロニクスは、ナノスケールにおける非平衡ダイナミクスを扱う観点から、極めて相性の良いはずなのです。ところが、特に室温動作を目標とする次世代電子技術としてのスピントロニクス研究の一部は、メゾスコピック系で培われた理論枠組みとは全く異なる独自路線を進み、両者の意思疎通が困難となっていました。スピントロニクスでは、実験主導でスピンを媒介とする多様な現象が発見され、磁性材料研究開発が急速に発達しました。材料開発の現場では、例えば様々な入力に対して得られる出力がどの程度得られるかといった性能評価の指標が大切です。スピントロニクスでも古典的直観に基づいた評価式が重宝されてきました。微視的に正当化されていない様々な評価式に溢れる文献は、従来の非平衡物性に関わる研究者の新規参入を阻み、交流が妨げられてきました。

一方、近年実験手法は飛躍的に進展し、原子数層レベルのナノ構造を作り込んだり、実験条件を自在に制御しながら基礎物性値を精密に測定可能になってきました。こうしたナノ構造制御技術、測定手法の進展に伴い、古典的直観によって導かれた従来の枠組みでは理解できない現象が見つかり、非平衡量子多体系の微視的理論に基づく解析が必要となってきました。

今後は、スピントロニクス側がメゾスコピック系の物理で培われた手法を駆使し、両者が互いに交流し刺激し合うことで非平衡物性研究としてのスピン流の理解が進んでいくと考えています。

7. エネルギー階層を超えて

スピントロニクスの観点からは、シュテルン・ゲルラッハの実験に登場する銀イオンが、磁場勾配によってアップスピンとダウンスピンに分裂する際の飛跡は、銀イオンをキャリアとするスピン流だと考えられるのでした。実は他にも意外なところにスピン流が登場します。

磁性体の量子論的性質を調べるためには、加速器を用いて、スピン偏極した中性子ビームを資料に照射し、そのビームが散乱されたあとのスピンの散らばり具合をみるのが有用です。ここで登場するスピン偏極中性子ビームは、我々の観点からは、中性子をキャリアとするスピン流の一種といえます。従って、この中性子スピン流と磁性体との相互作用は、非平衡量子多体系を解析する手法が役に立つ典型的な系だと考えられます。

2017 年の夏、ブルックヘブン国立研究所にある重イオン衝突加速器 (RHIC) の実験で観測された、クォーク・グルオン多体系という超高エネルギー現象における、渦度とスピン流に関する興味深い結果が報告されました[15]。RHIC では金のような大きな原子番号の原子核同士を衝突させることで、超高温高密度状態中にクォークとグルオンのプラズマを作ります。生成されたクォークとグルオンのプラズマは瞬時に冷却され、ハドロン粒子となって飛び散ったものを、検出器で詳しく調べます。今回の報告[15] では、金原子核同士のかすり衝突によって、衝突部に巨大な渦度 (なんと約 $10^{22}\,\mathrm{s}^{-1}$。おそらく地上で観測された最も速い回転運動) が生じ、クォークやグルオンたちが巨大な渦度との相互作用によってスピン方向が揃った

結果、スピン偏極したハドロン粒子たちが観測されました。これは、クォーク・グルオン多体系におけるバーネット効果であり、スピン偏極して飛び散ったハドロン粒子たちは、スピン流の一種といえます。実際、この論文の導入部では、前述の液体金属流体の渦度勾配によるスピン流生成[8] が取り上げられており、スピントロニクス分野で実現された渦度とスピンの相互作用がもたらす現象が、クォーク・グルオン多体系という超高エネルギー現象でも発現するという驚きの事実が述べられています。

クォークやグルオンのプラズマ状態というのは、ビッグバン直後の初期宇宙にも実現されていると考えられており、精力的に研究されています。そうした最先端の研究現場に、スピンと渦度の相互作用に関する現象が登場するということは、ひょっとすると、初期宇宙においてもスピン接続とスピン流の物理が深く関わっているのではないかと、ワクワクしています。

8. スピン流のこれから

これまで見てきたように、磁性の起源とは何かという 100 年以上前の問いに答えるためには、マクロな回転と微視的な回転との相互作用の研究が重要でした。アインシュタインらの研究した磁気回転効果を微視的に扱うには、非慣性系や重力場中におけるスピノール場を記述する枠組みである、カルタンの四脚場形式が不可欠です。これは、「曲がった時空における場の量子論」として定式化されており[16]、主に高エネルギー現象において研究されてきましたが、この枠組みがスピン流の研究にも有用であることが分かってきました。

スピン流というのは一般に電流と違って散逸を伴う流れであり、その微視的計算には、非平衡グリーン関数法など、非平衡量子多体系の様々な理論枠組みを駆使する必要があります。特にメゾスコピック系の物理で培われた強力な手法[12] が、今後ナノ構造を作り込んだスピントロニクス分野の研究でも生かされると考えられます。

一方、スピン流はエネルギー階層を超えて様々な形態で出現します。今後は、高エネルギー物理側の研究者がスピントロニクス分野に参入したり、スピントロニクス側の研究者が高エネルギー現象の研究に参入するといった交流も盛んになると考えられます。

本稿をご覧になった学生さんには、所属分野にとらわれることなく、曲がった時空における場の量子論[16] や非平衡量子多体系の様々な理論枠組み[12] を積極的に学んでいただきたいと思っています。そうして、今後活発となると思われるスピントロニクス、メゾスコピック系の物理、高エネルギー物理、宇宙物理をまたいだ、「スピン輸送現象」をキーワードとする分野間横断型の研究交流の場に参入して下さることを強く願っています。

参考文献

1) S. Maekawa et al. ed., *Spin Current 2nd edition* (Oxford University Press, Oxford, 2017).
2) 多々良源『スピントロニクス理論の基礎』（培風館, 2009）.
3) 特殊な物質中では散逸しないスピン流を作ることができます。野村健太郎『トポロジカル絶縁体・超伝導体』（丸善出版, 2016）を参照のこと.
4) P. ガリソン『理論家を虜にした実験』日経サイエンス 2004 年 12 月号.
5) 朝永振一郎『スピンはめぐる』（みすず書房, 2008）.
6) F. W. Hehl et al., Rev. Mod. Phys. **48**, 393 (1976).
7) M. Matsuo et aol, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 011011 (2017); M. Imai et al., Appl. Phys. Lett. **113**, 052402 (2018).
8) R. Takashi et al., Nat. Phys. 12, 52 (2016); M. Matsuo et al., Phys. Rev. B **97**, 020401(R) (2017).
9) M. Matsuo et al.,, Phys. Rev. B **87**, 180402(R) (2013);D. Kobayashi et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 077202 (2017).
10) 藤井保憲『超重力理論入門』(産業図書, 2005).
11) S. Mizukami et al., Jpn. J. Appl. Phys. 40, 580 (2001); K. Uchida et al., Nature **445**, 778 (2008).
12) A.M. ザゴスキン（樺沢宇紀訳）『多体系の量子論』(丸善プラネット, 2012).
13) J. König and J. Martinek, Phys. Rev. Lett. **90**, 166602 (2003).
14) M. Matsuo et al., Phys. Rev. Lett. **120**, 037201 (2018).
15) The STAR Collaboration, Nature **548**, 62 (2017).
16) N. D. Birrell and P. C. W. Davies, *Quantum Fields in Curved Space* (Cambridge, 1984).

（まつお・まもる，中国科学院大学カブリ理論科学研究所）