

# 非慣性系のスピントロニクス



松尾 衛†

日本原子力研究開発機構先端  
基礎研究センター  
matsuo.mamoru@jaea.go.jp



齊藤 英治†

東北大学金属材料研究所  
eizi@imr.tohoku.ac.jp



前川 禎通†

日本原子力研究開発機構先端  
基礎研究センター  
maekawa.sadamichi@jaea.go.jp

スピントロニクスにおける中心概念の一つがスピン角運動量の流れ「スピン流」である。保存流である電流に対して、非保存流であるスピン流は物質中の様々な散乱過程によってスピン偏極方向が乱され、ナノスケールで減衰してしまうため、その生成制御は困難である。

近年の微細加工技術の進展に伴い、固体中にナノ構造を作り込むことによってスピン流の制御が可能となり、スピン流を媒介とする様々な物性現象が精力的に研究されるようになった。特に物質中の様々な角運動量とスピン角運動量の相互変換機構という観点からスピン流を包括的に取り扱うという機運が高まってきた。これまでに電磁場の運ぶ角運動量、電子の軌道運動に伴う角運動量、磁性体の磁気ダイナミクスに伴う磁気角運動量といった角運動量と電子スピンの相互変換機構が扱われてきたが、我々にとって最も身近であるはずの、巨視的回転運動に伴う力学的角運動量と電子スピンの相互変換については研究されてこなかった。

回転運動する物質は非慣性系なので、その物質中の電子スピンの性質を知るには非慣性系のスピンの働く慣性力を知る必要がある。非慣性系の基礎理論は、曲がった時空で記述されるが、ベクトル場やテンソル場が計量を基本量とするリーマン時空で記述されていたのに対し、スピノール場の一種である電子には四脚場を基本量とするカルタン時空が必要となり、重力や慣性力とスピンの相互作用がスピン接続で表現される。そこから「量子版コリオリ力」とも言うべきスピン・回転結合やスピン・渦度結合といったスピン依存する慣性力が導か

れる。この相互作用を通じて、物質の巨視的回転運動に伴う力学的角運動量とスピン角運動量との相互変換が実現される。

ここでは巨視的運動として、(i) 剛体回転運動、(ii) 弾性変形運動、(iii) 流体運動を対象にし、力学的角運動量からスピン角運動量への変換機構によってもたらされるスピン制御およびスピン流生成法を理論と実験の両面から紹介する。(i) 剛体回転系で発現するスピン・回転結合は、角速度に比例する有効磁場によるゼーマン相互作用とみなすことができ、この有効磁場方向にスピンは揃うため磁性体は磁化する。特に、常磁性状態にある Gd, Tb, Dy といった金属の磁化による漏れ磁場測定から  $g$  因子を決定する実験を示す。さらに、数 kHz で高速回転する回転子を用いた核磁気共鳴実験によってこの有効磁場を直接測定する実験結果を示す。また Pt のようにスピン軌道相互作用の大きな物質を磁場中で回転させることで発現するスピン軌道相互作用を用いたスピン流生成機構を示す。(ii) 表面弾性波(レイリー波)が伝播する弾性体では、結晶格子が至るところで局所的な回転運動が誘起され、渦度勾配が生じる。このとき、スピン・渦度結合を通じて、渦度勾配に沿った方向にスピン流が生成することを理論的に示す。(iii) 細管に封入した水銀やガリウム合金のような液体金属に圧力をかけて流体運動を駆動すると、管の中央から壁面に向かって渦度勾配が生じる。この渦度勾配に沿ってスピン流が生成する。このスピン流は液体金属中のスピン軌道相互作用を通じて散乱され、管の長さ方向への電圧に変換される。この理論予言に基づいた実験結果を示す。

## —Keywords—

### 四脚場 (vierbein) :

曲がった時空の各点に局所ミンコフスキー時空を定めるための基本量。対象とする時空の次元に応じて、3次元時空であれば三脚場 (dreibein)、4次元時空であれば四脚場、一般には多脚場 (vielbein) と呼ばれる。四脚場の双一次形式として計量が与えられるため、計量の「平方根」が四脚場とみなせる。ディラックはクライン・ゴールドン方程式の「平方根」をとることによってディラック方程式を発見したが、これは一般にスピノルの双一次形式はテンソルになるため、テンソルの「平方根」がスピノルとみなせることが背景にある。同様に、曲がった時空におけるディラック方程式を「発見」するには、計量を含んだクライン・ゴールドン方程式の「平方根」をとる必要がある。その過程で計量の「平方根」である四脚場が現れる。

### カルタン時空 (またはリーマン・カルタン時空) :

四脚場によって時空の各点に局所ミンコフスキー時空が導入された時空であり、重力場および慣性力場中のスピノルの記述が可能となる。アインシュタインの一般相対論の記述は計量、アファイン接続、曲率といった幾何学量が定義されたリーマン時空が用いられた。これに対してカルタン時空では、上記に加えて四脚場、スピン接続、振率 (torsion) といった幾何学量が定義される。

† JST-ERATO 齊藤スピン整流プロジェクト