

電子のスピンを駆動力とするナノモーターの提案

物性理論研究部門 加藤 岳生

電子のスピン自体が角運動量であることをいち早く認識したのは、かの有名なアルバート・アインシュタインである。アインシュタインが関わった生涯唯一の実験成果である、アインシュタイン-ド・ハースの論文 [1] によって、電子スピンが物体の角運動量に変換できることが実験的に示された。このようなスピンと力学的な回転運動の変換現象は、一般に磁気回転効果と呼ばれる。最近になって、スピントロニクス分野の研究の進展により、新しい観点から磁気回転効果が見直され、さまざまな研究が行われているところである [2]。

本研究 [3] では、電子の持つスピン(磁性)をうまく使うことで、ナノスケールの物体を効率よく回転させることができるのではないか、という着想に基づき、磁気回転効果による回転運動への変換を電流によって連続的に行う構造を考察した。具体的には図 1(a) に示すようなカーボンナノチューブと強磁性金属を電極とする構造を用いて、電子スピンを駆動力とするナノモーターの提案を行い、その回転駆動機構について理論の構築を行った。例えば、二層カーボンナノチューブと呼ばれる単層カーボンナノチューブの入れ子構造においては、内側と外側のナノチューブはファンデルワールス力によって弱く結合しているため、層間の距離は保ったまま内側のナノチューブだけを容易に動かすことができる。これは、内側のナノチューブを外側のナノチューブを軸受けとした回転子と見なせる。この二層カーボンナノチューブの機械運動の評価は実験 [4]、理論 [5] の両面から研究が行われている。この系と前述の磁気回転効果を組み合わせることで、内側のカーボンナノチューブを回転駆動させよう、というわけである。

図 1(a) に磁化方向の異なる 2 つの強磁性電極とそれらに挟まれた回転子からなるハイブリッド構造を示す。この構造に対して、電極間に電圧を印加すると、一方の電極から偏極した電子スピンのナノ回転子(ナノチューブ)に注入される(図 1(b-1)→(b-2))。注入された電子は回転子内における磁気回転相互作用により、そのスピンの向きを反転させるとともに回転子に角運動量を受け渡す(図 1(b-3))。スピンの向きが反転した電子はその偏極と同じ方向に偏極したもう一方の電極へと抜ける(図 1(b-4)→(b-1))。この

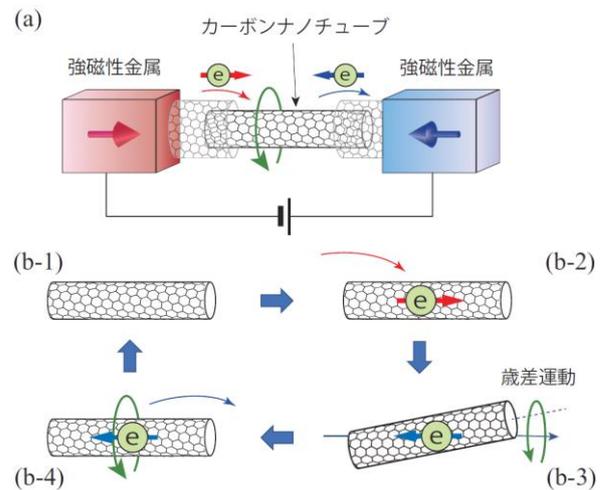


図1 本研究で提案するスピン注入により回転駆動するナノモーターの概略図。(a) カーボンナノチューブと強磁性電極からなる系。(b) スピン反転によって回転が生じるプロセス。

過程を繰り返す事で、回転子は角運動量を注入電子スピンより獲得し、回転運動が誘起されることになる。

ここでのナノ回転子が駆動機構は一見自明のことのように見えるが、ナノ回転子を剛体とみなしてそこに量子力学を適用すると、電子スピンから回転子への角運動量移行が行われるときに図 1(b-3) に示すような回転子の歳差運動を必ず引き起こしてしまうことがわかる。回転子をスムーズに回転させるには、この歳差運動を抑制し、回転軸が回転子の軸と一致した状態(眠りコマ状態、図 1(b-4))へとスムーズに緩和しなくてはならない。そこで歳差運動から眠りコマ回転運動への緩和を引き起こすフォノン熱浴を考え、その緩和と回転速度との関係を詳しく考察した。

回転子を剛体と見なして量子化すると、3 つの量子数 (L, M, k) で指定されるような固有状態が生成される。 L は角運動量の大きさに対応した量子数であり、 M は角運動量の z 成分、 k は回転子の軸の周りの角運動量である。 $M = k$ のとき、回転子の軸が固定された眠りコマ状態になっている(図 2 の挿入図の下図)。一方、 $M \neq k$ のとき、回転子の歳差運動が誘起される(図 2 の挿入図の上図)。回転子を量子力学的に取り扱い、磁気回転結合を丹念に取り扱うと、電子スピンの反転によって生じる回転子の状態

