

原子の振動でスピンの流れ！

図：原子振動によって電子のスピン
の向きが揃った「スピン流」が、「ス
ピン軌道相互作用」が大きい物質で発
生する様子を表す概念図。色付きの球
とそれを貫く矢印が電子とそのスピ
ンの向きを表す。黒球は結晶を構成
する原子。原子振動により、原子の
位置は平衡状態からずれている。実
際には多数の電子が色付きの球と
同様の動きをすることで、スピン
流が生成される。

電子が動くと電流が発生するが、電子がそのスピンの向きを揃えて動くと「スピン流」なる角運動量の流れが生じる。

磁石にスピン流を注入すると、磁石を動かすことなくN極とS極を反転できる。

また、スピン流を特定の物質に流して電流を取り出すこともできる。

今回、私たちは物質中の原子の高速振動がスピン流を誘起することを発見した。

さらに生成されたスピン流から電流が生じることもわかり、スピン流による振動発電現象を見出した。

原子の振動によりスピンの流れるこの新しい現象は、スピンの不思議な性質を明らかにするものである。

電子は「電荷」と自転に相当する角運動量「スピン」を持っている。スピンを持つことで、電子は微小な磁石として振る舞う。スピン間の結合が強いと、物質は多くの電子スピンの同じ方向を向いた強磁性と呼ばれる状態になり、冷蔵庫にくっつく磁石を形成する。

電子が動くと、電荷の移動によって「電流」が発生することはよく知られている。電子はスピンを有しているため、電子が動くことで「スピン流」なるものが生じることがここ 10 年の研究でわかってきた。スピン流とは、逆向きのスピンを持つ電子がそれぞれ逆方向に向かう流れであり（たとえば上向きスピンを持つ電子は右方向に、下向きのスピンを持つ電子は左方向に移動する）、電流が電荷を運ぶのに対し、スピン流は角運動量を運搬する。スピン流を磁石に注入すると N 極と S 極を反転できることが理論、実験両面から実証されている。また、特定の物質にスピン流を流すと電流が発生することもわかってきている。

銅線に電池をつなぐと電流は流れる。一方、ス

ピン流はどのような機構で生成されるのか、その解明が最先端スピントロニクス研究の主要テーマの一つである。これまでに明らかになっている機構は大きく分けて2つあり、それぞれ「スピンホール効果」と「スピンポンピング効果」と呼ばれている。スピンホール効果とは、物質中を流れる電流と直交する方向にスピン流が発生する現象である。スピンホール効果は物質中の電子の波としての特徴を反映して発現するため、特定の物質で大きな効果が発現する。もう一方のスピンポンピング効果では、磁石のN極の向きが時間変化することでスピン流が発生する。

今回、私たちは新たな機構として物質中の原子の高速振動がスピン流を誘起することを発見した。原子を1秒間に1億回以上という非常に速い速度で振動・回転させる表面弾性波を用いて、物質中で発生するスピン流を調べた。その結果電子のスピン向きと運動量の結合度を表す値である「スピン軌道相互作用」が大きい物質（たとえばタングステンや白金など）において原子の高速振動によるスピン流生成を観測した。さらに、生成されたスピン流から電流が生じることもわかり、スピン流を介した一種の振動発電を見出した。電子のスピンと回転運動が結合することは古くから知られているが、スピン軌道相互作用を介して原子の高速振動からスピン流が生成されることは全く予測されておらず、力学的運動とスピンの間に新たな相互作用が存在することを示唆している。マイクロ・ナノ機械を制御するMEMS・NEMS技術（マイクロ・ナノスケールの電気回路と機械部品を1つの基板上に集積した非常に小さな電子デバイスであり、主にセンサーなどに応用されている技術）などの発展に伴い、ナノ構造の力学的運動の制御は年々注目度が高まっている。本研究は、電子のスピンと力学的運動の相互制御の新たな展開を拓き、スピンメカトロニクスと呼ばれる新しい研究分野の形成・発展に寄与するものである。

本研究は, T. Kawada *et al.*, *Science Advances* 7, 9697 (2021) に掲載された。

(2021年1月7日プレスリリース)

川田 拓弥

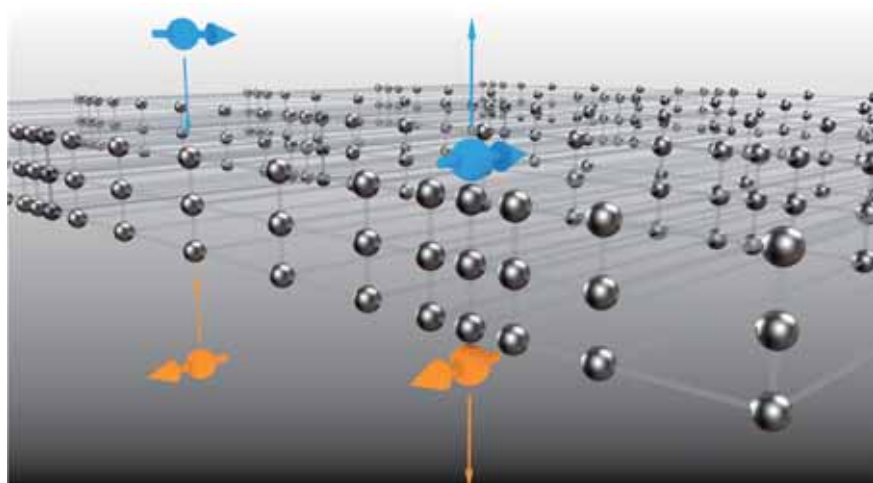
(物理学専攻 博士課程2年生)

河口 真志

(物理学専攻 助教)

林 将光

(物理学専攻 准教授)



CASE 2

電子顕微鏡で解き明かす、
結晶のはじまり

結晶は、原子や分子が規則正しく配列している固体である。

雪の結晶、食塩の結晶など日常生活において見かける光り輝く固体は、

いつの時代もわれわれの興味を惹きつけてやまない。

それでは、結晶はどのようにして形作られたのであろうか。

結晶のはじまりはどのような形をしているのだろうか。

これらの素朴な疑問は、原子分解能透過電子顕微鏡で撮影するスローモーション映像によって明らかにすることができる。

われわれは、結晶の赤ちゃんと呼ぶべき結晶核の誕生と結晶として成長する過程の全容を捉えることに成功した。

分子の振る舞いを垣間見るためには、創意工夫が必要になる。カーボンナノチューブ (CNT) は内側に分子を入れたり、外側に分子を取り付けることができるため、分子観察のための適切な材料である。この特性を巧みに活用し、2007 年、われわれは原子分解能透過電子顕微鏡 (TEM) で有機分子の動的挙動を初めて撮影した。単分子・実時間・原子分解能を兼ね備えた SMART-EM と名付けた方法論であり、分子世界で起こる現象をスローモーション映像として記録できる。今回、われわれの生活に身近な塩化ナトリウム (NaCl) を研究対象とし、円錐型 CNT 内部で結晶核が誕生する様子を記録することに成功した。

図 1a が撮影したスローモーション映像の概要である。極小サイズ試験管内の先端に分子が集合し (i-iv)、結晶の核が誕生し (v-vi)、結晶核が結晶として成長する様子が観察された (vi-viii)。152 秒の間に同じ容器の中で結晶化過程が 9 回繰り返され、現象の全容を把握する鍵になった。図 1b として、実際の TEM 像と研究の全体像を示した。線に見える構造が円錐型 CNT の壁であ

り、赤色の点線で囲った部分が NaCl 集合体に対応している。不定形な構造の NaCl 集合体が (5.00 秒)、幅 4 原子、高さ 6 原子の周期構造を有する NaCl 結晶核 (5.04 秒) に変換された。その間実に 0.04 秒であり、結晶核が誕生した瞬間である (図 1a, v-vi に対応)。実際には、観測した結晶核の奥行き方向にも原子は連なっており、計 96 個からなる直方体とみられる。塩素とナトリウムが 48 個ずつで結晶核を形成した状態である。CNT の先端部に 1 ナノメートル (10 億分の 1 メートル) 程度の NaCl 結晶核が、同じ大きさで 9 回再現性良く繰り返されて出現したことは実に興味深い。このような形成過程を経て誕生した結晶核が起点になり、次第にサイズが大きくなり (vi-viii)、最終的にはわれわれが目にするサイズの光り輝く結晶に成長していくのである。

結晶化は、初等教育過程の理科の実験でも取り扱われるありふれた現象である。しかし、結晶化は微小な時間・空間スケールで起こる現象であるため、その詳細な機構は謎に包まれていた。2021 年、原子分解能電子顕微鏡を用いて、分子一つ一つの構造や形状の時間変化を原子分解能で追跡する分析手法 (SMART-EM 法) による結晶化現象のスローモーション映像取得に成功し、分子レベルでの現象の詳細が明らかになった。また、NaCl の結晶は誕生した瞬間から四角い形をしており、本研究によって驚きをもって受け入れられたに違いない。原子や分子のその場観察研究の更なる発展により、今後われわれの想像を超えた新しい科学が解き明かされていくだろう。

本研究成果は T. Nakamuro *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **143**, 1763 (2021) に掲載され、特に重要な成果として JACS Spotlights に選ばれた。

(2021 年 1 月 22 日プレスリリース)

図: NaCl 結晶化研究。a) 観察結果の模式図。b) TEM により、結晶化の全体像を明らかにできる。四角形 NaCl 結晶の写真を右下部に示した。

