

Through the Looking-Glass : 物質科学と Chirality

Keyword: chirality

Chirality という用語は自然科学の幅広い分野に現れるが、発音する際にはキラリティと言ったりカイリティと言ったりする。化学者は前者、物理学者は後者を用いる傾向が強い。発音の違いは本質的でないはずなのだが、こと chirality に関しては異なる分野の様々な文脈に即して語られてきた経緯がある。ここでは chirality という表記で通すことにして、物質科学の立場からその意味を整理してみる。

1. Chirality の定義

Chirality は螺旋構造と密接に結びついている。¹⁾ 螺旋構造は並進と回転を結びつけて互いに転換する働きを持つ。ゲーテは「自然界は螺旋的傾向を持つ」と言ったそうである。自然現象に潜む豊かな活力を探って止まなかったゲーテの感性は「幾何学的対称性とダイナミクスの関係」という現代物理学の深淵を射抜いているように思える。螺旋といえば「左と右」の概念規定から始めなくてはならないのだが、この問題を論じた最初期の人には哲学者カントである。彼は人間が左右を認識する根拠（方向定位の問題）について18世紀初めに議論し、結局人間は自分の身体を通してのみ左右を認識できるのだと結論した。左右の概念は身体性と不分離だというわけである。

Chirality の概念が自然科学として現れるのは19世紀に入ってからのものである。ビオ、アラゴらによる水晶の旋光性^{*1} [図1(a)] 研究を経て、パスツールは酒石酸アンモニウムナトリウム塩を旋光によって左右結晶に分離することで分子の鏡像という概念に辿り着いた。もっとも、この時点ではまだ chirality という語は存在していなかった。このキーワードの命名者はウィリアム・トムソン（ケルビン卿）である。彼は「自身とその鏡像が重ならない形態」に対して、ギリシャ語で「掌」を意味する $\chi\epsilon\rho$ から chirality という語を作り出した。これは左右の掌の形態 (handedness)

そのものであり、対称性の観点で考えると「空間反転 (パリティ) P 対称性が破れた形態」ということである。例えば分子や結晶が chirality を持つ、ということはそれらの対称性を特徴づける群 (点群) の対称操作として純粋回転だけが含まれるということである。

ところで磁場中で偏光面が回転するファラデー効果は、自然光学活性と違って幾何学的 chirality とは無関係である。この点を正しく捉えるには、幾何だけでなくダイナミクスを考慮する必要がある。そこで、ケルビンと同じくグラスゴー大学で長く教鞭をとったローレンス・バロンは、ケルビンから100年ほど後になって chirality の再定義を試みた。¹⁾

ここでは P だけでなく、純粋回転 R と時間反転 T の組み合わせ RT が重要な役割を果たす。結論として、バロンは「真の chirality」の定義として「 P を破るが RT は破らない」という条件を与えた。左右円偏光や電子、素粒子の helicity はこの対称性を持つので chiral である [図1(b)]。これによって、幾何学的、静的な handedness と動的な helicity が (定義のうえで) 統合されたのである。この、バロンによる chirality の定義は chiral と名のつく様々な現象を整理する上で大変役立つ。

2. Chirality と電磁場 : 旋光の原理

Chirality の本質はその発見の端緒となった旋光性の原理に込められている。螺旋軌道上を自由に動ける電子に直線偏光が入射するとしよう [図1(c)]。偏光方向が螺旋軸に平行だとすると、振動電場は螺旋軸に沿って電子を変位させる (電気分極 P が発生) と同時に螺旋軸に垂直な面内の回転運動を引き起こす。回転に伴う電流は螺旋軸に沿う変動磁場 (\dot{M}) を生み出す。ここで、磁場が時間変化することが本質的に重要である。時間変化する磁場はファラデーの法則によって $\nabla \times P$ 型の誘導電場を生み出すだろう。この誘導電場は、入射した光の電場とは異なる向きを持つ電場を生み出す。その結果、透過光の電場の向きが回転するのである。

まとめると、螺旋構造によって P が $\nabla \times P$ と結びつくのである。Chirality が電場の捻じれ (非局所的な応答) を引き起こすといってもよい。これらの結合は、自由エネルギーの中に $P \cdot \nabla \times P$ という形で現れるだろう。この結合項は、本来左右という2値的な (ブーリアン) ラベルである chirality の強度を連続変数として定量化する尺度と解釈できる。これに対して、後で見る磁性体におけるスピンの chirality は $M \cdot \nabla \times M$ の形を持つ。これらの結合項はいずれ

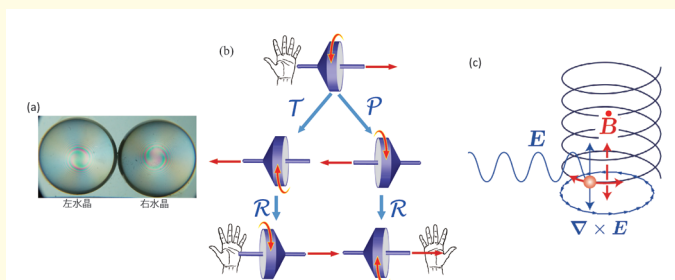


図1 (a) 右水晶, 左水晶を通過した偏光の回転 (著者撮影), (b) Helicity はバロン流の chirality を持つ (RT は破らないが P は破る), (c) 螺旋軌道上を動く電子と旋光性の原理。

も P を破るが RT を破らない。つまり真の chirality を持つ。^{*2}

以上の観察から、 $\chi = (\epsilon_0/2)\mathbf{E} \cdot \nabla \times \mathbf{E} + (1/2\mu_0)\mathbf{B} \cdot \nabla \times \mathbf{B}$ という量を (真空) 電磁場の chirality 密度と解釈する発想が生まれる。実際に、マックスウェル方程式から χ とこれに伴う保存カレントが構成できることは半世紀以上に指摘されている。²⁾ 最近になって、「chiral プラズモニクス」の分野で χ が電磁場の chirality の尺度として使われ始めていることを指摘しておく。

旋光性を量子論的に扱くと、その応答係数はミクロな電気双極子モーメント \mathbf{p} と磁気双極子モーメント \mathbf{m} の内積 $\mathbf{p} \cdot \mathbf{m}$ に比例する。対応する行列要素は $\langle a | p_i | b \rangle \langle b | m_i | a \rangle$ ($i=x, y, z$) であるが、 \mathbf{p} は P のもとで符号反転する極性ベクトルであり、 \mathbf{m} は符号反転しない軸性ベクトルである。このため状態 $|a\rangle, |b\rangle$ がパリティで指定される (つまり系が P 対称性を持つ) や否やこの行列要素は消える。つまり系が chirality を持つ場合のみ生き残る。こうして量子論のレベルに chirality が顔を出すのである。

3. Helicity と Chirality

物理学にはもうひとつの chirality、つまり「相対論的量子論における chirality」がある。しかしこれは「バロン流の chirality」(つまり光の helicity) とは別物である。ここで言う chirality は時空次元が偶数の場合に構成できるディラック行列から作られる演算子 (Γ 行列) の固有値 ± 1 として定義される。これを chirality と呼ぶ理由は、質量ゼロの極限で Γ が helicity 演算子^{*3} と一致し、 Γ の固有状態が右・左の helicity を持つ粒子 (Weyl 粒子) になるからである。この helicity (しばしば螺旋度と訳される) はバロン流の chirality に他ならない (このあたりでそろそろ言葉遊びのようになってくる)。

電弱相互作用の理論では、電子と核内クォークとの間に電子ヘリシティに依存する弱中性カレント相互作用が働く。この相互作用が引き起こす微弱な光学活性効果を検出する試みも進んでいる。³⁾

エネルギースケールを変えて固体電子に眼を転じよう。固体中のディラック粒子は物性物理学の広範な領域で重要な役割を果たす。⁴⁾ 相対論的 Dirac 粒子が時空対称性の産物であったのとは異なり、固体中の Dirac 粒子はバンド構造の産物である。代表例は空間 2 次元のグラフェンシートだ。時空次元が奇数である場合、相対論的場の理論としては Γ が構成できず Weyl 電子は作り得ない。ところが離散的な六角格子上の 2 バンド系であるグラフェンでは Weyl 電子が現れる。離散格子構造と物質の多様性によって chirality が復活するといってもよいだろう。

4. スピン軌道相互作用と Chiral 凝縮相

磁性、超伝導、超流動、強誘電、液晶といったマクロ凝縮相がベクトル的な秩序パラメータを持つ場合、それらが螺旋配向した chiral 凝縮相 (コヒーレントな位相秩序状態) が実現すると期待できる。その好例が chiral 螺旋磁気構造だ。⁵⁾ この構造は隣接スピンの外積 (ベクトルスピン chirality) $\mathbf{C} = \mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j$ で特徴づけられる。 \mathbf{C} は P -odd, T -even である。^{*4} 元来結晶空間とは独立のスピノル空間に棲息する電子スピンの結晶の chirality を「見せる」仕掛けがスピン軌道相互作用である。スピン軌道相互作用を介して結晶の chirality がスピンを振る力 (ジャロシンスキー・守谷相互作用) に転写されるのである。これがランダウ理論に顔を出すトリフシツ不変量と呼ばれるものが現れる。この不変量は強誘電、液晶、磁性、超伝導を横断して遍在する。

さらに磁場によってスピンの振じれを解く過程で非線形の位相欠陥構造が現れてトポロジカル不変量と結びつく。こうして chirality を持つトポロジカルなソリトン、ドメインウォール、ストリング、ボルテックス、スキルミオンといった様々な欠陥が現れてデバイス機能を発現すると期待されている。

スピン軌道相互作用⁶⁾ はディラック方程式がローレンツ群のスピノル表現に基づくことの非相対論的な反映として現れるのであり、これが helicity を通して幾何学的 chirality と直結することは自然である。

以上のように、chirality は素粒子、原子核、原子・分子、固体電子とこれらの凝縮相という物質科学の異なる階層をシームレスに繋ぐキーワードである。バロン流の chirality と相対論的 chirality が helicity の概念を介して繋がる様子を整理していくだけでもいろいろと新しい問題が出てくるように思われる。

参考文献

- 1) 歴史を含むレビューとして L. D. Barron: Chirality **24** (2012) 879.
- 2) D. M. Lipkin: J. Math. Phys. **5** (1964) 696; arXiv: 1007.3352.
- 3) B. Darquie, et al.: Chirality **22** (2010) 870; arXiv: 1007.3352.
- 4) 固体物理 **45** (2010) 一特集号: Dirac 電子系の固体物理.
- 5) J. Kishine and A. S. Ovchinnikov: Solid State Phys. **66** (2015) 1.
- 6) スピン軌道相互作用を巡る最近の話題については、柳瀬陽一、播磨尚朝: 固体物理 **47** (2012) 101.

岸根順一郎[†] (放送大学 kishine@ouj.ac.jp)

(2015年6月30日原稿受付)

^{*1} Chiral な物質中で光の偏光面が回転する現象。

^{*2} これに対して、電気磁気 (ME) 結合 $\mathbf{P} \cdot \mathbf{M}$ は P も TR も破るので chiral ではない。この項の出現には T の破れ (磁気秩序) が必要となる。

^{*3} 運動量 $\hat{\mathbf{p}}$ 方向へのスピン σ の射影。

^{*4} これに対してスピンからなるスカラースピン chirality $\chi = \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \times \mathbf{S}_k$ は P -odd, T -odd である。これは χ が仮想磁場 (ベリー曲率) と同一視できる事実と整合している。 χ が凝縮した状態は chiral スピン液体と呼ばれるが、これはバロン流に言うところの chiral ではない。

[†] 著者が編集委員の場合、会誌編集委員会では別の委員を担当編集委員に選び、記事の審査の公正さを保つという内規に従っております。