

固体物理の中で欠陥は一つのジャンルを占め、点欠陥や線欠陥である転位などが研究対象となっている。液晶中にも欠陥は存在するが液晶中には固体結晶には見られない転傾と呼ばれる欠陥構造 (defect structure) があり、逆に点欠陥や転位は重要性の低い存在である。液晶中の欠陥構造は、偏光顕微鏡下で観察される様々な文様の形成に関わっている。層構造のある Sm 相と異方的液体の N 相では欠陥構造が異なっており、それが両者の組織の違いをもたらしている。欠陥に関する知識は組織観察に欠かせないものの一つである。

1 欠陥

液体や気体にはこの章で取り上げる意味での欠陥構造は存在しない。もちろん、液体や気体には成分や密度の揺らぎがあるのだけれども、どの程度以上偏ったら欠陥になるかを一意的には定められない。それらは欠陥とは定義できないのである*¹。

一方、結晶において、本来原子があるべきところの原子が欠如しているようなものは、一意的に欠陥として定義できる。何故なら、結晶の並進対称性より、格子点のところに原子は存在すべきであり、その欠如は並進対称性の乱れであるからである。格子点の欠如は不連続変化であり、有無の判断に恣意性はない。

この章で取り扱う欠陥とは対称性の乱れとして発現するものであり、液体や気体のように任意の角度の回転・任意の距離の並進対称性を持っている系では、対称性の乱れとしての欠陥は存在しない。

1.1 点欠陥・線欠陥・面欠陥

格子点における原子の欠如は、その格子点に局在したもので、空孔 (vacancy) と呼ばれる点欠陥の一種である。欠陥には、この他、線欠陥 (line defect) と面欠陥 (area(planar, plane) defect) がある。

液晶の中で、N相や SmA 相、SmC 相など液体性のある相には通常の結晶に存在するような意味での点欠陥は存在しない。SmA 相には 1 次元秩序構造は存在するが、2 次元

*¹ ガラスの中で、特に均一性が要求されるものに光学ガラスがある。光学ガラスはレンズやプリズムの原料となるガラスで、密度や成分の揺らぎがあると屈折率に変化が生じるために光学系の性能が低下してしまう。光学ガラス製造時に攪拌が悪かったりすると、内部に不均一が生じる。このような状態が内包されたガラスを平面に研磨し透過像を観察すると、画像が歪むことから、内部に不均一があることがわかる。このような状態は、脈理と呼ばれ、工学的な意味で欠陥である。工学的な意味でと記したのは、どの程度の屈折率の揺らぎまで許容できるかは光学硝子の用途により異なるもので、脈理というのは決して一意的に定義出来る物ではない。

液体なので、一つの層の内部にある分子を1ヶ引き抜いたとしても、それは液体状態の乱れであって、格子点欠陥にはならない。Cry相のように3次元周期構造を持つ異方的柔粘性結晶のな元Sm相では点欠陥は原理的には存在する*²。

結晶軸の異なる結晶界面(結晶粒界:grain boundary)は面欠陥となる。これらの界面をはさんで結晶軸の方位に整合性がないために、格子の乱れた状態が出現する。界面での格子の状態を子細に検討すれば、面としての乱れがあるというより、線欠陥の集合体として記述する方が正しいのかもしれないが、伝統的に結晶界面は面欠陥として扱われている。

N相には面欠陥は存在しない。これは、配向ベクトルが異なる2つのドメインの合体時に界面で配向ベクトルは連続的に変化して不連続な状態を緩和させてしまうからである。一方、Sm相では、SmA相やSmC相などの液体に近い相でも、1次元結晶としての性質故にドメイン(結晶)界面が出現する。

線欠陥には転位・転傾・ディスプレーションの3種類がある。転位は並進対称性、転傾は回転対称性、ディスプレーションはらせん対称性の乱れである。以下、これら3種の欠陥についての説明を行う。

2 転位 (Dislocation)

転位は並進対称性の乱れによる欠陥である。図1に四角の穴の開いた板に転位を作る様子を示す。板をある部分で切断し、1周期分だけずらすと元のように重なる。穴の中央まで描けば、その部分で格子が1マスと2マスが無理につながっているような図とはなるが、その部分を抜いてしまうと、欠陥の有無は分りにくくなる。しかしながら、この場合でも、マスを同じ数だけ移動して一回りする経路(バーガーズ回路:英語)を考えると、転位を含まない経路では元の点に戻るのに対して、転位を含むと、ずれが生じるので、経路の中に転位が存在するかを明確に判断出来る。図2に示すように、一回りしたときの出発点との差をバーガーズベクトル(英語)と呼び、転位強度を示すパラメータとなる。

図では1層分しか四角を描いていないが、この四角は上下に伸びており、転位も点ではなく線として上下に伸びている。転位は線欠陥であり、線が結晶中で他の欠陥と接したりすることなく途切れることはない。転位線とバーガーズベクトルが垂直な転位を刃状(じんじょう)転位(edge dislocation)、平行な転位をらせん転位(screw dislocation)と呼ぶ(図3)。

転位は周囲に歪を伴うため、転位が存在しない状態に比べて過剰エネルギーが生じる。

*² ただし、これまでのところ、これらのSm相における点欠陥を扱った論文にお目にかかったことはない。

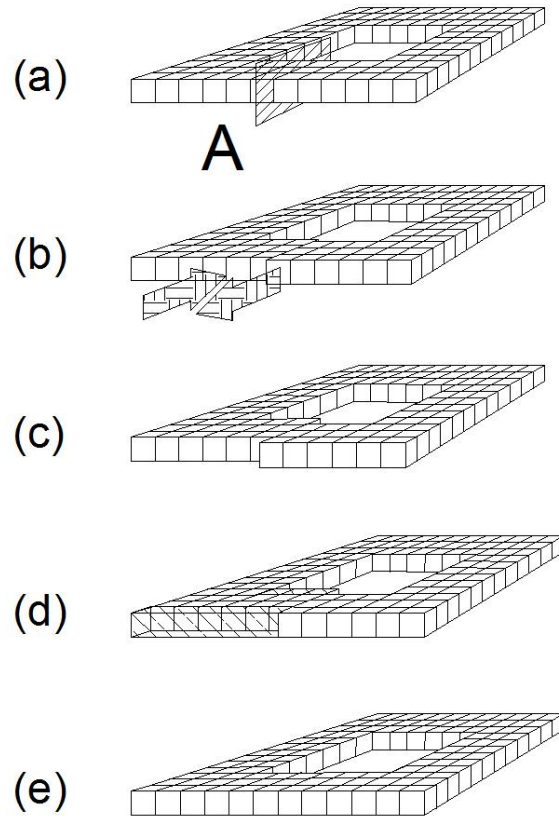


図 1: 転位を作り出すプロセス

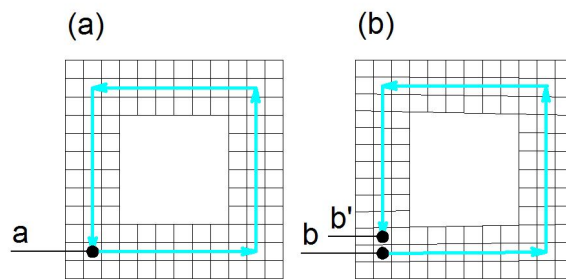


図 2: バーガーズベクトルの定義

通常の3次元結晶における刃状転移とせん転位のエネルギー E_e と E_s は次式で与えられる。

$$E_e = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0}$$

$$E_s = \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0} \quad (1)$$

b はバーガースベクトルの大きさ、 r_0 はコアの半径である。転位のエネルギーは物質のサイズ R に対数依存するが、逆向きの転位があると歪は遠方では相殺するので、サイズが大きくなっても発散することはないだろうと思う。

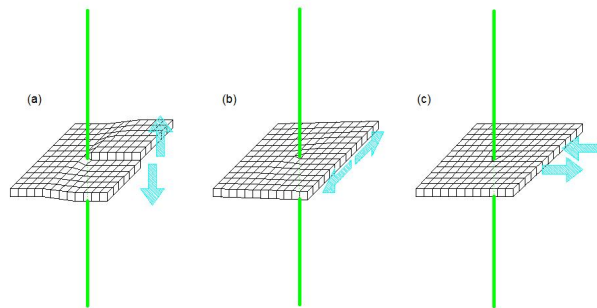


図 3: らせん転位と刃状転位

転位のエネルギーは主に転位線近傍の格子の歪みにより引き起される。転位線より十分に離れた領域では格子の歪みは0に収束するため、転位の歪みエネルギーは物体の大きさには依存せず一定値に収束する。

N相は周期構造を持たないので、転位は存在しない。これに対してSm相には1次元周期構造があるため、転位が存在する。図4にSm相中の刃状転位とらせん転位を示した。3次元結晶では、らせん転位も刃状転位も3方向に存在するが、Sm液晶ではらせん転位は層法線方向に、刃状転位は層に平行な方向にのみ存在する。Sm液晶の層構造の転位の大きさは分子程度サイズ程度であり、光の波長より遙かに小さいスケールであるため光学顕微鏡では観察できない。しかし、転位による歪みが分子の配向変化を引き起こすと、広い領域に影響が広がり偏光顕微鏡でもその存在を確認できるようになることがある^{*3}。

コレステリック液晶は配向ベクトルが1方向に振れた周期構造を持っている。この周期構造は擬似的に層構造と見なすことができ、この擬似的な層の食違いとして転位が存在

^{*3} SmA-SmC 転移近傍で転位が見える論文

する。

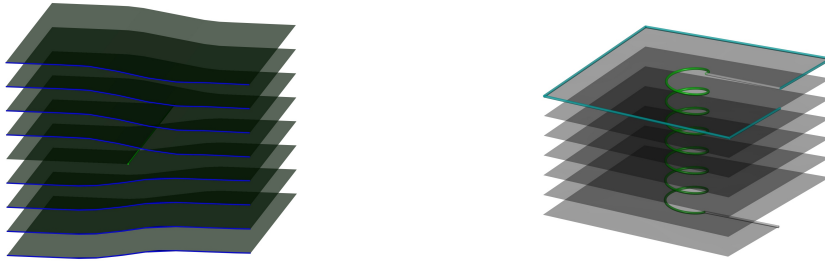


図 4: 層構造を持った系に存在出来る刃状転位 (左) とらせん転位 (右)。らせん転位の上面の線は刃状転位にもなっている。

ヘキサチック層やクリスタル層などの 3 次元的な秩序を持った相では、層内秩序の転位が存在するはずだが、顕微鏡観察対象には小さすぎるため光学的手法では観察できないと思う。また、特には注意は払われていないように思う。

3 転傾 (Disclination)

転傾は回転対称性の乱れによる欠陥である。図 5 に転傾を作る過程を示す。穴の開いた四角い板を切断して、1/4 相当の部品を加えて作った五角形は、局所的には無欠陥だが、元の状態と対称性が異なり、明らかに異なる状態である。

転傾はかつては回位と呼ばれていた^{*4}。しかし、位置が回るのではなく、方位が転じている欠陥であることから転傾という名称が提案され、液晶業界では定着している。

転傾の有無も、転位と同じように周回回路 (ナバロ回路 : 英語) で規定できる (図 6)。ただし、この場合は格子の数ではなく、方位に着目する。方位ベクトルを局所的な格子方向に平行に保ちながら時計回りに回路を一周すると、転傾を含まない回路では、もとと同じ方向になる。しかし、五角形になっているものでは回路を時計回りに一周した後で矢印の向きは反時計回りに 90° 回転する。矢印が回路と同じ方向に回るものを正、逆に回るものを負の転傾とよび、回る角度を転傾の強度とする。

転傾も基本は線欠陥である。ナバロ回路を周回する時に、矢印がナバロ回路の面内で回転するものを楔型転傾 (Wedge Disclination)、面外にねじれて回転するものを捩れ型転傾 (Twist Disclination) と呼ぶ。先ほど、符号を定義したのは楔型転傾で、捩れ型転傾には符号はない。

^{*4} 分野によっては、今でも回位という言葉が使われている。

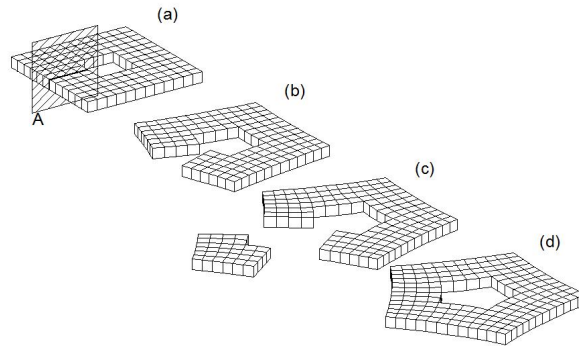


図 5: 転傾を作るプロセス

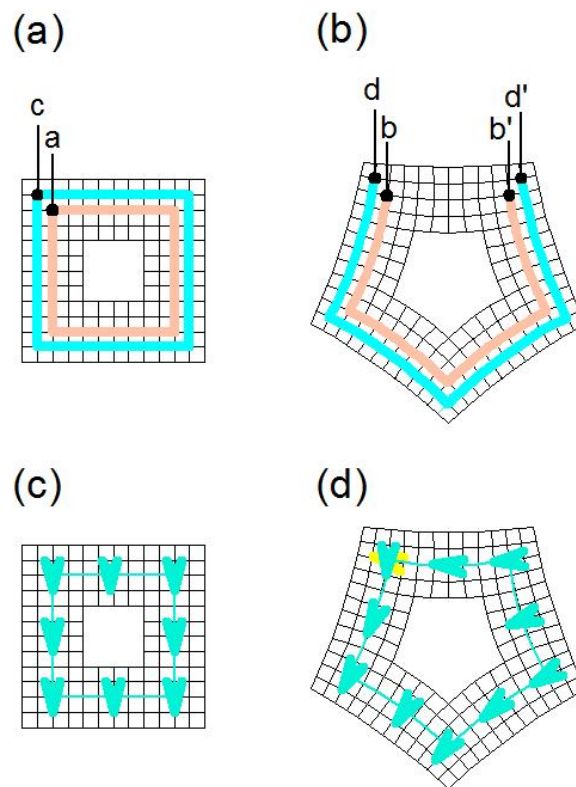


図 6: 転傾の強度。格子に矢印をおいて、矢印の向きを局所的な格子の方位に揃えて領域を周回する。転傾がなければ、周回しても矢印は一切回転しないが、転傾を含んでいれば、矢印は回転する。

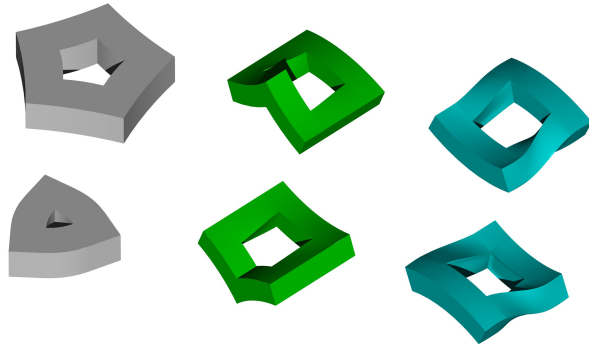


図 7: ねじれ転傾 (左側) と楔転傾 (真中、および右)

転傾の強度は系の対称性の整数倍に限定される。図 8 に示すように、系が 4 回回転対称を持っているなら、転傾の最小強度は 90° ($\pi/2$) であるが、2 回回転対称の系だと、 90° 回転では面欠陥となり転傾とは呼べない。2 回回転対称の系では最低の回転角は 180° (π) となる。

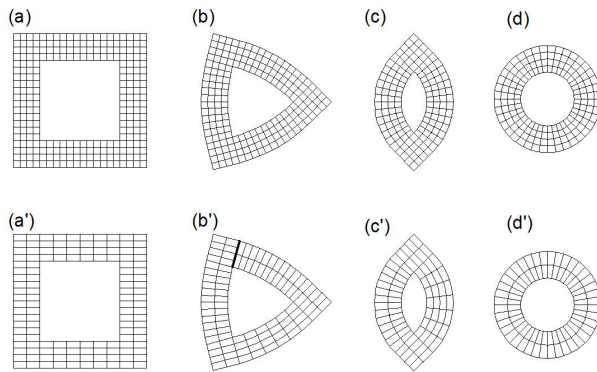


図 8: 系の対象性と存在出来る転傾の強度。上段は 4 回回転対称を持った系で、 90° 、 180° 、 360° の転傾が生じている。下段は 2 回回転対称しか持たない系で、 90° の転傾を作ろうとすると、ブロックの方位が異なる面が生じてしまい、転傾ではなく、面欠陥となる。 180° 、 360° の転傾はこの系の対象性と矛盾せず存在する。

通常の N 相は円筒対称性を持っており $\mathbf{n} = -\mathbf{n}$ なので、ダイレクターに垂直な方向に 2 回回転軸が存在する。このため、転傾の最小強度は π となる。 π 欠陥と呼ばれることも、強度 $1/2$ の欠陥と呼ばれることもある。SmC 相の C 配向ベクトルは 1 回の回転対称性しかないため、C 配向ベクトルの転傾の最小強度は 2π となる。

転傾のエネルギーは転傾のある構造体の大きさに応じて大きくなっていく。これは転位との大きな違いで、このため、通常の結晶程度の弾性定数を持っている物質では、巨視的なスケールでは歪みエネルギーが大きすぎて転傾は存在できない。しかし、結晶でも、ナノサイズ程度の大きさの結晶では転傾は存在することが、電子顕微鏡により確認されている。

液晶に転傾が存在するのは、弾性エネルギーが結晶の 10^{-6} 倍程度で弾性不利益が小さいことと、逆符号の転傾により広域での歪みが低減されるためと考えられる。

3.1 点欠陥の転傾

転傾は通常は線欠陥であるが、例外的に点欠陥となる場合がある。海胆がトゲを全方位に伸ばしているのと同じように、空間の1点から四方八方にダイレクターが広がっている状態を考えよう*⁵。中心の点を通るどのような切断面でダイレクター分布を見ても、プラス 2π の転傾となっている。強度が 2π の転傾は、通常の N 相中では、このような点欠陥としても存在する*⁶。

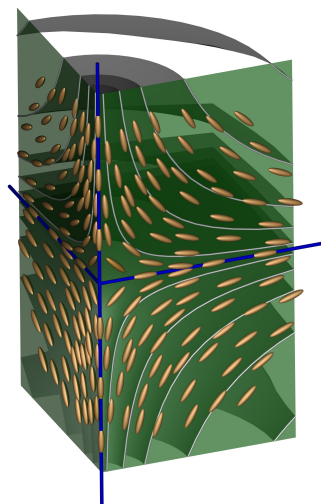


図 9: -2π 点欠陥。層は分子長軸の接平面。

*⁵ 日本人だと海胆だが、欧米人には海胆は馴染みがないらしく、この手の構造はハリネズミ (hedgehog) と呼ばれている。

*⁶ 計算によると、この欠陥は点欠陥ではなく、強度 π の欠陥ループであるらしいのであるけれども、ループが十分に小さくて実験的に識別できなければ、見た目からの識別は不可能である。

放射状形態のプラス転傾の他にマイナスの点欠陥となる転傾も存在する (図 9)。これら 2 つの欠陥の間には引力が働き合体すると対消滅する。

3.2 球体表面の転傾

転傾は物の表面にも存在する。図 10 に立方体とその展開図を示すが、両者を比べてみると、立方体の頂点の部分が平面ではないのは、展開図にある 90 度分の角度欠損のためであることが分る。立方体の頂点は 8 カ所で各々 90 度の角度欠損があるので、全体で $90 \times 8 = 720 = 4\pi$ の角度欠損がある。この数値はトポロジカルに立方体 (というより球) と等価な立体にはすべて当てはまる。正四面体では、頂点は 4 カ所。展開図を考えると 1 カ所の角度欠損は 180 度になる。サッカーボールも、5 角形部分の周囲に角度欠損があり、それを足し合わせると 4π になる。さらに、球体の上に表面に平行に N 相を並べるとを考えると、必ず転傾が発生し、その合計強度は 4π になる。グリセリン中に液晶ドロップレットを作ると転傾が現れるのは必然なのである。

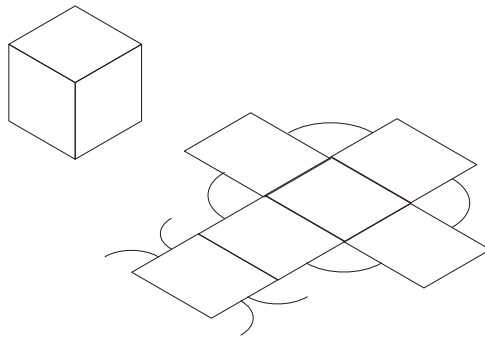


図 10: 表面転傾。展開図から立方体にするときには、展開図で描いた円弧の部分が折りたたまれて隣接面と合致するようになる。それぞれの頂点には、面が 3 つずつしか接していないため、90 度の角度欠損が生じることになる。

4 捩位 (dispiration)

転位と転傾が液晶に出現する主要な線欠陥であるが、線欠陥にはもう一種類「捩位」と呼ばれる欠陥が存在する。捩位は並進と回転が合わさった欠陥で、両者が合わさって

いるので転位と転傾の分離することは出来ない。両者とは異なる欠陥である。

捩位は理論的には存在が提案されていたが、液晶において初めて実存が確認された。捩位が存在しうるのは、 SmC_A のように1層毎にC配向ベクトルの傾き方向が反転する構造で、この系に強度1のらせん転位が存在すると、らせん転位をまたいでC配向ベクトルの傾き方向に齟齬が生じる。このとき、C配向ベクトルの（本来は禁止されている） π 転傾が組合わさると、素直につながるようになる。 π 転傾も強度1のらせん転位も単独には存在出来ないもので、あくまで両者が同時に生じる場合にのみ、欠陥が存在できる。

捩位の転位に相当する構造は顕微鏡では確認出来ないため、見た目は π 転傾と同等になる。 SmC に存在出来ないはずの π 転傾が見つかったら、 SmC_A 相である可能性が考えられる*7。

5 液晶中の転位及び転傾のエネルギー

転位や転傾はそれらの欠陥の周囲に配向の乱れを引き起こす。配向が乱れている部分では配向に乱れがない状態に比べて弾性エネルギー分だけエネルギー的に高い状態となる。転位や転傾による過剰エネルギーは欠陥よりある程度以上遠方の領域においては弾性理論に基づいて評価できる。欠陥よりある程度以上遠方と記したのは弾性理論はとなりあう粒子間の変位や配向方向変化が小さくて連続体として物質を扱えることを前提とした議論であり、欠陥核周辺で隣り合う分子間の変位や配向方向変化が大きい状態では前提が満たされていないからである。別の言い方をすれば、核付近の大変形領域では歪みと応力に関して非線型項の寄与が無視できなくなっており、線形の復元力近似が成立していないのである。

このため、欠陥による過剰エネルギーを算出する時には、欠陥からある程度以上離れた連続体近似が成立する領域の変形エネルギーを通常的手法により評価し、連続体近似が成立しない欠陥核近傍のエネルギーを別途、核エネルギーとして加えている。ただし、欠陥核近傍の過剰エネルギーの正確な評価手法は確立していない（と思う）。

*7 もう一つの可能性は2軸性 SmA 。

5.1 SmA 液晶の転位のエネルギー

SmA 相での刃状転移のエネルギーは次式となる*⁸。

$$E_e = \frac{\sqrt{k_{11} B b^2}}{2r_c} + E_c \quad (2)$$

ここで、 B は層圧縮弾性率、 b はバーガーズベクトルの大きさ、 r_c は転移の中心部分の半径、 E_c はその内部のエネルギーである。

Sm 相の層圧縮弾性率は、結晶と同レベルで、 k_{11} 等のダイレクターの変形エネルギーに比べると、6 桁程度は大きい。刃状転移のエネルギーはかなり大きなものとなる。一方、らせん転位については、SmA 相ではコアのエネルギー E_c のみであるとされている。

$$E_s = 0 + E_c \quad (3)$$

5.2 転傾のエネルギー

転傾のエネルギーは 1 弾性定数近似下で

$$E = \pi s^2 \ln(R/r_c) + E_c \quad (4)$$

となり、領域の大きさの対数依存し、転傾強度の 2 乗に比例して大きくなる。このため、コアエネルギー E_c が大きくなければ、強度の大きな転傾は強度の小さな複数の転傾に分れた方がエネルギーが低くなる。

6 転位と等価な変形をもたらす転傾対構造

転位の弾性エネルギーは食い違い量の 2 乗に比例するので、食い違い量が大きな転位は存在しにくいはずであるにも関わらず、Sm 相では、食い違いの大きな刃状転位のような構造がしばしば見られる。このような構造の核部分は実際には転位ではなく、転傾の組みあわせであると考えられる。図 11 に層の食い違いを引き起こす転傾対を示した。ここで生じている変形は基本的に層間隔を変化しないものなので、小さな弾性エネルギーの不利益しか生じない。

*⁸ リファレンス必要

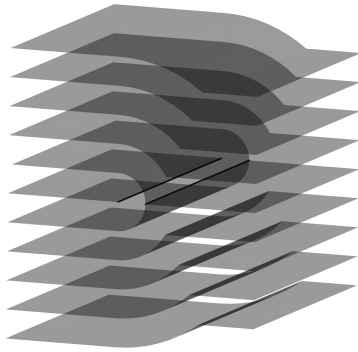


図 11: 刃状転位と同じ層の食い違いを引き起こす転傾対。

7 N 相の欠陥

7.1 1 軸性 N 相における欠陥

N 相は重心の周期構造を持たないため、転位は存在しない。N 相中の欠陥は転傾のみである。通常の N 相は非極性で $n = -n$ であるため、存在できる転傾の最小強度は π である。図 12 に楔型転傾のダイレクター分布を描いた図を示す。この転傾を偏光顕微鏡で観察すると、偏光子の軸に平行または垂直な領域が消光位となり、強度 π の転傾では 2 本の、強度 2π の転傾では 4 本の暗い領域 (brushe) が広がるように見える。暗い領域の数から転傾強度は判別出来るが、それだけでは、転傾の符号は確認できない。顕微鏡のステージを回転すると π 転傾では図 13 のように、 2π 転傾では図 14 のように転傾の符号により、暗い領域の動きが異なるために、正負の区別が出来る。

強度 π の楔型転傾は線欠陥であるが、線がセル断面方向に走っていて点欠陥のように見えることも多い。楔型転傾でもねじれ転傾でも転傾線がセル内を走る場合には、黒い糸状の線に見える。この線は検光子を外しても観察出来る。この糸状の欠陥線が N 相の名前の由来となっている。

転傾のエネルギーは転傾強度の 2 乗の比例するので、強度が 2π 以上の転傾は強度 π の転傾に分裂した方がエネルギーが有利になる。しかし、強度 2π の転傾は N 相中でしばしば見られる。これは、上で触れたように、強度 2π の転傾は点欠陥に緩和するためである。

強度が 2π より大きな転傾が見られることはほとんどない。等方相からの転移直下など

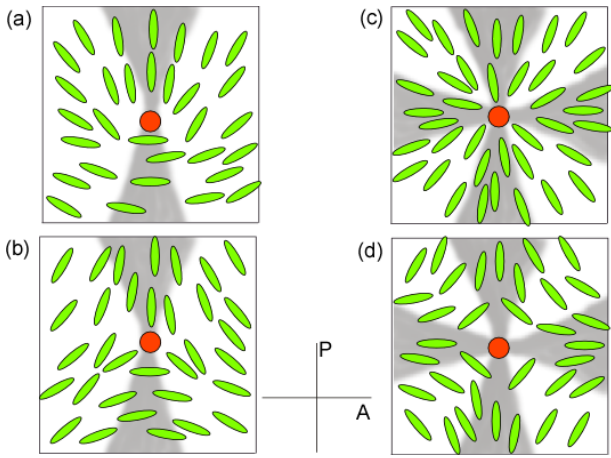


図 12: N 相の楔型転傾。

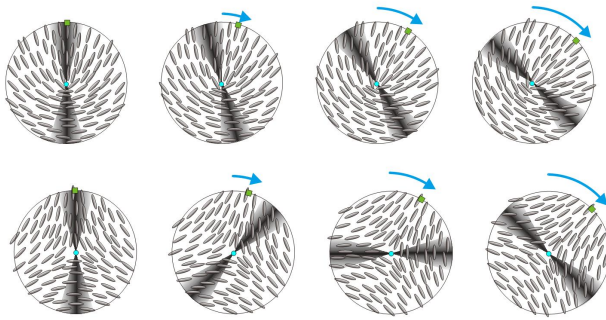


図 13: N 相の π 楔型転傾を回転したときの動き。

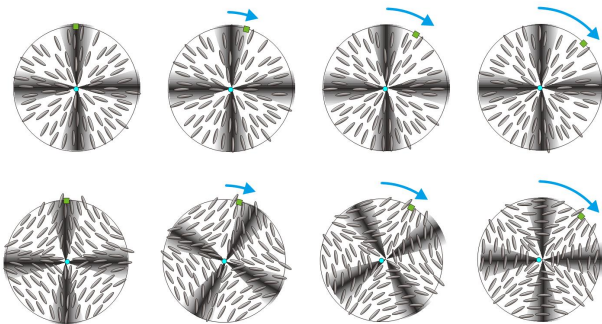


図 14: N 相の 2π 楔型転傾を回転したときの動き。

で、まれに6本以上のくらい領域が集まった点が見られることがあるが、安定には存在しない。

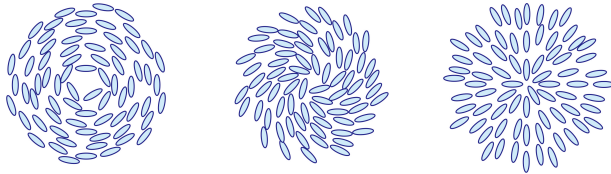


図 15: N 相の 2π 楔型転傾のダイレクターの転傾に対する角度による形状の違い。

図 15 に強度が 2π の正の転傾を示す。図中のダイレクター分布の違いは、弾性定数の違いによるもので、実際の正の転傾がどのようなものに近いかは、物質により異なるはずである。ただし、強度が 2π の転傾に関しては、弾性定数比がどのようになっていようと、見た目は変わらない。逆に、これ以外の転傾は弾性定数比が異なると、図 16 に適当に示したように、偏光顕微鏡下での見た目に変化しうる。

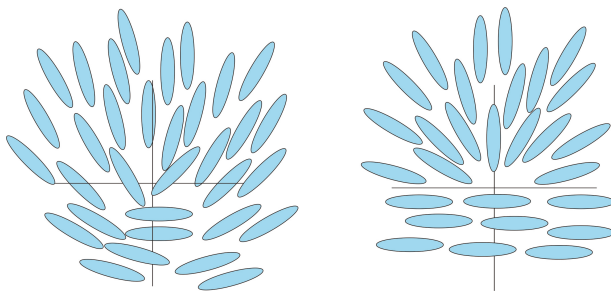


図 16: N 相のスプレイとベンドの弾性定数の違いによる転傾形状の違いの想像図。左はスプレイとベンドの弾性定数が同程度の場合。右はベンドの弾性定数がスプレイより遙かに大きい場合。この場合はベンド変形は殆ど生ぜず、スプレイだけとなると想像される。この場合、一方の暗い領域は大きく広がるはずである。

7.2 1軸性極性 N 相における欠陥

極性 N 相では $n \neq -n$ で、 180° の回転対称性が存在しないので、転傾の最低強度は $360^\circ (2\pi)$ となる。ただし、極性の度合いが弱い場合には強度が π 転傾も存在しうるということが示唆されている*⁹。

極性 N 相では自発スプレイ変形が生じる可能性があり、自発スプレイ変形があると、セ

*⁹ 可能ならリファレンス

ル厚方向でダイレクターの射影成分に分布が生じてしまい、いわゆるシュリーレン組織が観察しにくくなることも考えられる。

極性の程度が弱くない極性 N 相では、等方相からの出現後のドメインの成長に困難がある印象を持っている。現在知られている極性 N 相は高分子系のもので、粘性が高いことも影響している可能性はあるが、それでも、ドメインが育たずに小さなドメインの集合体のような組織に陥りがちであるように思う。

7.3 2 軸性 N 相における点欠陥の非存在

2 軸性ネマチックでは、放射状の点欠陥は存在出来ないため、強度 2π の転傾は 2 本の強度 π の転傾に分解してしまい、4 本ブラシの転傾は見られなくなるとの主張があり、2 軸性 N 相のスクリーニング手段として考えられている。

8 Sm 相における欠陥

Sm 相は層構造があるため、N 相とは異なり転位も存在する。ただ、転位の大きさは分子スケールであるため、通常は偏光顕微鏡では観察出来ない。顕微鏡で観察される欠陥はフォーカルコニックと呼ばれる円錐曲線の組合せ構造である。

8.1 転位

層構造の転位は図 4 に示してある。図では、はっきりとは見づらいが、転位を挟むと層の傾きが変化する。

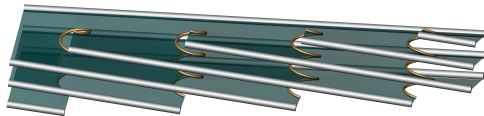


図 17: らせん転位の集合体による層の傾き。

図 17 にらせん転位の集合による層の方向変化の様子を示した。TGB*相では、このような構造により、相の傾きが断続的に変化してねじれ構造を形成しているとされている。

8.2 フォーカルコニック

Sm 液晶の層圧縮弾性率はダイレクターの変形の弾性率よりも 6 桁程度大きいとされている。このため、顕微鏡で観察可能な分子レベルに比べると巨視的な変形は基本的に層間隔を変えないような形態となる。層間隔を変えない最も単純な変形は同心球で、この場合は中心が特異点となる。この構造はネマチックの強度が 2π の正の点欠陥と同じダイレクター配置となる。欠陥が点ではなく直線となる構造として、図 18 に示すような同心円筒と同心円錐が考えられる。ただし、これらの構造は実際の Sm 相中ではあまり見られない気がする。

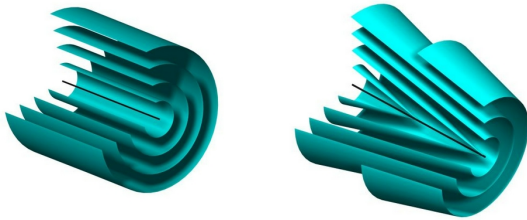


図 18: 層厚の変化を伴わない層変形の例。同心体の中心となる部分を除いては、層の厚みは不変のままである。

実際の Sm 相で頻繁に見られる構造は同心円筒や同心円錐がループを描いた構造で円錐曲線の組合せとなることからフォーカルコニックと呼ばれている。図 19 に同心円等をループにしたフォーカルコニックを示す。ループは強度 2π の転傾線でループの中心部分には強度がマイナスの 2π の点転傾が存在し、欠陥全体としては、強度がプラス 2π の点欠陥となっている。ループの中心を垂直に通る直線は層の折れ曲りは伴うが、転移や転傾という意味では欠陥線ではない。

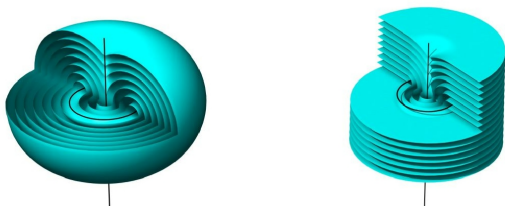


図 19: ドーナツ状の欠陥。転傾線は円を描いており、その中心にマイナス符号の 2π 楔型転傾が存在する。

図 19 左の欠陥は全体として強度が 2π の点欠陥であるために、均一に配向した Sm 相

中には存在出来ない。しかし、ループの外側が円筒ではなく、そのまま平板となった図 19 右のような構造なら、一様に配向した Sm 構造中に欠陥として存在しうる。この構造ではループは強度が π の線欠陥で全体として強度 2π の点欠陥となるが、中心部に存在する強度 -2π の点欠陥と相殺して全体の強度は 0 となっている。

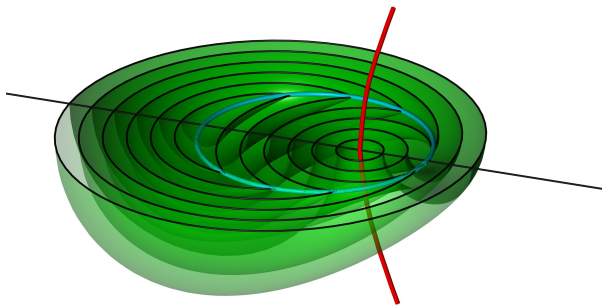


図 20: 楕円と双曲線のフォーカルコニック。これが、もっとも典型的に存在するもの。

元の構造が円筒ではなく円錐の場合には図 20 に示すように、ループは楕円となり、楕円の焦点を通る線も直線ではなく双曲線となる。楕円は転傾ループであるが、双曲線は楕円の面との交点が点欠陥の構造となっている。

さらに、極限では、2本の放物線が組合わさる構造も考えられる。この場合は、互いに点欠陥を持つ構造となっている。

8.3 フォーカルコニックの弾性エネルギー

フォーカルコニックの弾性エネルギーは以下のように求められている^{*10}。

$$E \cong \pi k_{11}(1 - e^2)p \ln(a/r_c) \quad (5)$$

ただし、 e : 離心率、 p : 周長、 a : 長軸の長さである。離心率 e は円で 0 であるために、円と直線のフォーカルコニックはエネルギー的に不利とされている。もっとも、この議論からすると、放物線のフォーカルコニックが $e = 1$ なので、エネルギー的に最も有利となるが、放物線のフォーカルコニックのエネルギーは f を放物面の焦点距離、 R を試料半径と

^{*10} この式はどう考えても、全体として転傾強度 2π の点欠陥となっているフォーカルコニックのエネルギーだ。外側が平になっているもののエネルギーはもうすこし低いだろうと思う。

して、

$$E \cong \frac{\pi k_{11}}{8} f \left(\frac{R}{f}\right)^4 \ln\left(\frac{R^2}{4fr_c}\right) \quad (6)$$

で、楕円よりも不利で、 $R < 3f$ でないと存在しにくいとされている。放物線の場合には周長や長軸長が伸びる効果があるわけだが、放物線の場合は線は欠陥線ではないので、少し不思議なところはある。

9 c ダイレクターの欠陥

SmC 液晶では分子長軸が層法線から傾いており、その層面への射影を C ダイレクターと呼ぶ。C ダイレクターは n ダイレクターとは異なり、 $c \neq -c$ である*¹¹。このため、転傾の最低強度は 2π となり、層が基板に平行な SmC セルでは 4 本ブラシの転傾が観察される。この転傾は点欠陥ではなく線欠陥であり、転傾線は Sm 層に垂直な方向に伸びている。

9.1 釘表記法

SmC 液晶のダイレクター表記には釘表記が用いられることが多い。釘表記は、2 次元面でダイレクターの紙面に対する方向も示せるやり方である。

図 21 に釘表記を矢印表記と併せて示した。図では層は紙面に垂直に存在する。矢印表記は、その場所での c ダイレクター方向を単純に示すやり方である。釘表記はダイレクター方向を紙面に投影した線として示し、そのままでは、どちら側が手前か分からないので、手前の方に釘の頭を印としてつける表記法である。この図は SmC 相で描いているため、射影した成分の長さは大きくは変化していないが、ネマチック相で同じ表記をすると、分子が紙面に垂直になった場所では釘は点となる。

9.2 フォーカルコニックとのカップリング

円と直線のフォーカルコニック構造がある場合の c ダイレクター配置を考えると、中心のマイナス 2π の点欠陥のところで、c ダイレクターも不整合を起すことが分る。SmC 相ではフォーカルコニック毎に c ダイレクターの転傾が出現する。

*¹¹ だからといって c ダイレクターの方向には極性はない。

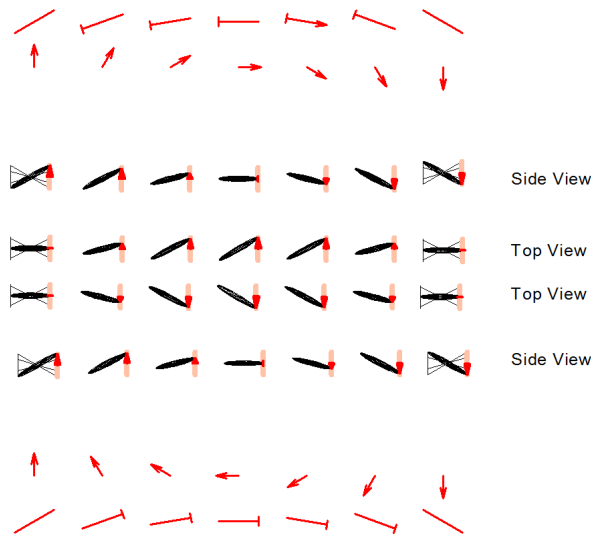


図 21: c ダイレクターの釘表記と矢印表記。

9.3 転位とのカップリング

9.4 ディスプレーション

10 シェブロン境界

SmA 液晶の水平配向セル（層がガラス界面に垂直）が何らかの理由により層厚が薄い方向に変化すると、変化前の層数を同じ構造では保てなくなる。層厚の変化に対処するには、層の方向はそのままで層数を増やすか、層数は一定のままで層を傾けて傾く前の層法線方向に対する実質的な層厚を不変に保つ必要がある。

層厚の変化は SmA 相から SmC 相への変化で必然的に生じることであるが、多くの Sm 相では、層の傾きにより実効的な層厚を保つようにしている。この時、層が単純に傾くのなら、どちらかの界面で、層のずれを引き起す必要があるが、それは避けたいと見えて、結果的には、層の組替えはせずに、層をくの字型に曲げて事を済ませている。このような構造は世間的にはシェブロン構造と呼ばれている。

素直な水平配向セルではシェブロンの折れ曲り方向には任意性がある。このため、セルの中で部分的に逆方向に折れ曲る領域が出現し、両方の境界には欠陥が生じる。

シェブロンの頭がぶつかった場所では幅の広い欠陥構造が見られる。この領域では層が斜めに接触しており、逆向きに傾く層の間には刃状転位が存在する必要がある。しかし、

バーガーズベクトルが大きくなると、刃状転位のエネルギーは転傾対に比べて高いために、構造が転傾対へと変化し、その結果顕微鏡で容易に確認できるような構造となっていることが考えられる。

シェブロンが逆向きに接する場所でも傾きが逆の層が接触するのだけれども、こちらで刃状転位を伴った境界を作るには、新に層を作り出す必要がある。そのコストが高いためか、逆向きに接する側では斜めの線に逃げて、幅の広い線を作りたがらない。

シェブロンが横面で接する部位では、層の傾きを繋ぐためには、ラセン転移が必要となる。現在、世間に出ているモデルではらせん転位を考えずに、ブックシェルフ構造で接続するという、提案がされているが、この構造となるためには、層の組替え等、かなりの作業があり、個人的にはあり得ない構造と考えている。

ブックシェルフ構造があり得ないと考えるもう一つの理由は幅の広い欠陥部分にあるはずのフォーカルコニック構造の終端処理が困難になるからである。前に触れたようにフォーカルコニックには転傾線が走っており、これはループを描くか表面などで終るかしなければならない。幅の広い欠陥の末端で上下に繋がるという図を考えられるかは確認していないが、それよりは、そのまま側面に繋がる则认为の方が自然である。

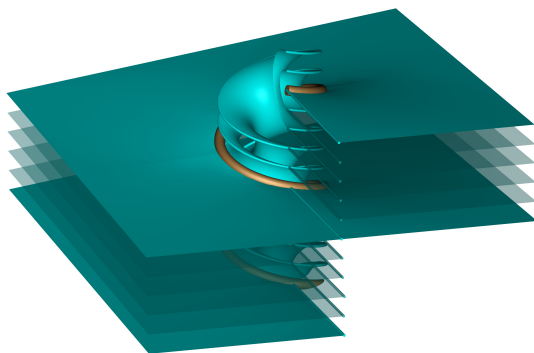


図 22: ラセンフォーカルコニック

ただし、幅広い部分が刃状転位ではなく、フォーカルコニック対になっていると主張するならば、らせん転位の部分も転位ではなくフォーカルコニック構造を考えなければならない。そのような構造は一般には認知されていないが図 22 のような構造を考えることは可能で、このようなものがジグザグ欠陥の本体であると個人的には考えている。