

形状可変な境界としてのシワ（リンクル）構造の展開



大園 拓哉

産業技術総合研究所ナノシステム研究部門†

界面は、多くの現象に物理的境界条件として関わる。例えば、表面の凹凸構造等の形状は、その界面を通過・反射する光の特性や、その表面上に置かれた液体の濡れ現象などに強く影響する。そのため、注目する物理現象と人工パターン等の構造との相関が様々な実験系で調べられてきている。その構造に影響された現象の出力状態、例えば、光の散乱具合や液体の濡れ具合といった状態、を外部からの刺激によってダイナミックに調節できることもある。この場合の動的な調節能は新たな機能となり、工学的応用の観点では特に価値がある。この動的機能の実現のために、例えば、その現象に強く影響する物理的境界条件、すなわち表面凹凸構造自体等、が可変なシステムが利用できる。また、このシステムは様々な物理現象と表面凹凸構造の相関を効率的に評価できる基礎実験のプラットフォームとしての活用も期待できる。そのシステムの典型例としてシワ＝リンクル構造を挙げる。

ここでリンクル構造とは、柔軟で平坦な基板の上に作成された比較的硬い表面薄膜の非破壊的な座屈 (buckling) により発生する表面凹凸構造である。この座屈は弾性力学における非線形変形現象の一つであり、ここでは表面薄膜の面内方向に加えられた圧縮ひずみにより誘発される。その凹凸構造は、サイン波状の滑らかな断面形状を示し、用いる材料の力学特性 (ヤング率等) や表面薄膜の厚みなどに応じた特定の周期を有する。結果としてその表面は凹凸の2次元ストライプパターンを呈する。この周期長はサブ μm 領域でも容易に調整でき、また試料一面にリンクルが自発形成される特徴がある。この構造の理解と応用を目指し、

周期以外にも、“凹凸の深さ” やその“凹凸構造の面内異方性”等の構造の制御に関して研究が進む。それらは、座屈を誘起する面内圧縮ひずみの“大きさ”と“面内異方性”に、それぞれ関わるのが分かってきた。筆者等は、この構造を律する圧縮ひずみが、実験的に容易に可変である点に注目し、凹凸の深さやストライプ方向の異方性の可変性を明らかにしてきた。

この周期的凹凸構造であるリンクルは、多様な現象の物理的境界条件として利用できる。特にこの形状可変性を通じて、その境界条件を変えることができ、以下のように、物理現象の状態制御を可能とする。①光拡散現象：光の波長より十分大きい周期を有するリンクルでは、その表面で透過・反射する光は幾何光学的に拡散される。よって、リンクルの深さを調節すると、光拡散の程度が制御できる。②液体毛管現象：リンクルの溝をオープンな毛細管とみなすと、溝に液体が浸透する毛細管現象の発生条件は溝断面のアスペクト比に関係するので、リンクルの深さによって毛管現象を制御できる。③液晶配向現象：ネマチック液晶は表面凹凸構造の異方性に応じて配向しうるので、リンクルの溝方向の異方性を変化させることで、液晶配向を可逆的に変えられる。④摩擦現象：摩擦力は表面の形状に依存して変わるため、リンクルの形状変化で摩擦力や摩擦状態を調節できる。

以上のように、この形状可変なリンクル構造は、多様な現象に対する可変な物理的境界条件として、その状態を変化・調節するために利用できる。また、これらの現象を元にして新たな科学的発見や応用も期待できる。

—Keywords—

座屈：

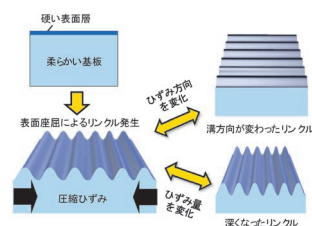
薄い膜・板 (や細長い棒) において面内方向 (もしくは長軸方向) に圧縮力が加わった場合に、力が作用していない方向へたわみ、曲がる現象。膜厚が小さい (薄い) 程に“曲がり”やすく、座屈が起こりやすいことは経験的に感じるのだが、この理由は、一般に微小変形に対して曲げを伴わない圧縮のひずみエネルギーが膜厚の1乗に比例するのに対して、曲げのひずみエネルギーはその3乗に比例するためと、定性的には理解できる。

界面での光拡散：

屈折率の異なる物質間の界面において、光の波長よりかなり大きい構造がある場合、そこに入射した光は、その構造の局所的な傾きに応じて幾何光学的に屈折・反射される。その結果、透過光・反射光は構造の特徴に応じて拡散される。くもりガラスの不透明な状態等はこの現象の典型的な効果である。

毛細管力：

細い管状構造 (や溝構造) の内側の液体が管に沿って浸透 (もしくは後退) する現象においてその液体の運動のために働く力。管の壁面における液体の接触角と管の断面の長さスケールに関係して決まる液体先端の気液界面の平均曲率と、液体の表面エネルギーに応じて、その力の大きさや向きが変わる。ガラス細管中の液体が重力に逆らってある所まで上昇する現象はこの力の効果として有名である。



† 2015年4月より、機能化学研究部門。