

大人こそ楽しみたいシャボン玉の魅力

テクノシナジー 代表取締役 田所 利康

シャボン玉は、お手軽に楽しめる最もポピュラーな子供遊びの一つです。テレビの科学実験番組や子供向けの理科実験教室などでは、丈夫なシャボン玉や子供がすっぽり入る大きなシャボン玉が登場するのをよく目にします。今回、誰もがよく知るシャボン玉のお話をします。「今さらシャボン玉？」とガツカリしないでください。実は、シャボン玉には、時代時代の超一流科学者達を虜にしたすごい魅力が隠されているのです。ここでは、大人の方にこそ楽しんでもらいたいシャボン玉の色彩や膜の構造について話をさせていただきます。



図1. 景色が映り込んだシャボン玉

1. シャボン玉研究のブームは3回あった¹⁾

薄い液体の膜で形作られた美しい虹色の球体が空中を漂いながら儚く消えていく、そんなシャボン玉の魅力は、多くの科学者の探究心に火を付けてきました。300年以上にわたるシャボン玉研究の歴史では、大きく3回のブームがありました。最初のブームでは、物理学の対象として、シャボン玉の色や形が盛んに研究されました。古くは、気体の法則に名を残すボイルが1660年頃に行った研究です。かのニュートンは、1704年に出版された“Opticks”に、シャボン玉の色に関する精細な観察研究記録を残しています²⁾。また、シャボン玉の色が薄膜の干渉色であることは、イギリスのヤングとフランスのフレネルが明らかにしました。シャボン玉の美しい色が当時の物理学者を研究に駆り立て、やがてそれが波動光学の確立へとつながって行ったのです。

20世紀に入り、第2の研究ブームが訪れます。シャボン膜は、特異な構造を持つ物質系として化学的な研究の対象になりました。フランスのペランは、シャボン膜の色の研究から、シャボン膜が非常に薄い多くの膜でできていて、最も薄い黒い膜は一定の厚さ(約5.5nm)であることを突き止めました。当時、分子はまだ仮説でしか無か

ったのですが、シャボン膜の研究によって分子の存在が実証されたのでした。その頃、イギリスのデュワー（魔法瓶の発明者）は、直径20cmの枠に張ったシャボン膜を清浄な空気で満たした瓶に封じ込め、水の蒸発、衝撃、二酸化炭素の影響から遮断して、シャボン膜を1年以上割らずに保存する実験に成功しています。

その後、1950年代に入って、再びシャボン膜の研究論文が現れるようになります。これが、第3のブームです。化学工業製品として急速に需要が伸びてきた界面活性剤の作用（洗浄、油の乳化、微粉末の分散など）のメカニズム解明に、シャボン玉の膜構造を研究することが不可欠だったからです。さらに、生体組織の基本構造がシャボン膜と類似していることから、分子生物学や生命科学の領域で研究されるようになって行きました。

2. スペクトルで理解するシャボン玉の色

みなさんは、シャボン玉の鮮やかな色が膜の干渉によって作られることをご存じでしょう。シャボン膜表面で反射した光とシャボン膜裏面で反射して膜を往復する光が干渉して、強め合う波長の光が眼に届きます。強め合う波長は膜の厚さで変わるため、シャボン膜の厚さムラが複雑な色彩を生み出します。

台所用洗剤を少し水で薄めて黒い皿に入れ、その液面にシャボン玉を一つ浮かべてみましょう。普通に撮影すると、シャボン玉周囲の空気の流れによって、厚さにムラがあるシャボン膜が流動し、図2(a)のようなシャボン玉ができます。空気の流れを極力抑えたと、図2(b)のような同心円状に色変化するシャボン玉になります。これは、重力によってシャボン液が下へ下へと流動して、てっぺんから徐々に薄くなって行くためです。てっぺんの黒い領域は、黒膜と呼ばれる最も薄いシャボン膜です。

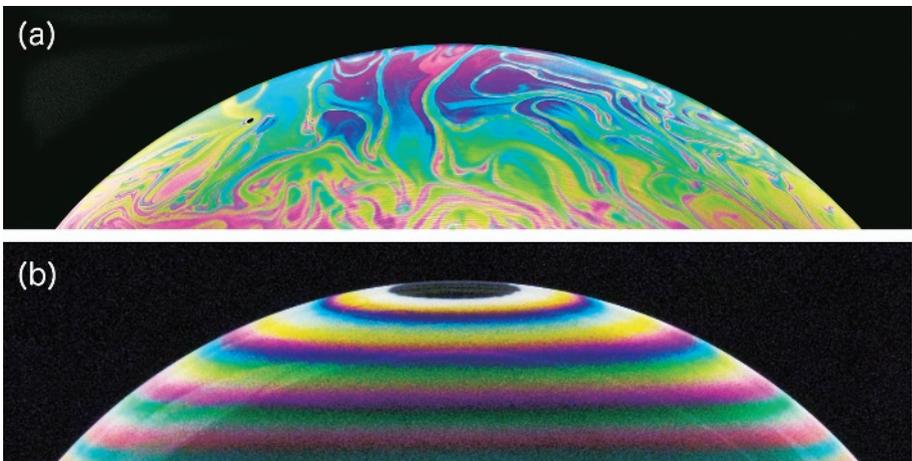


図2. シャボン玉の干渉色

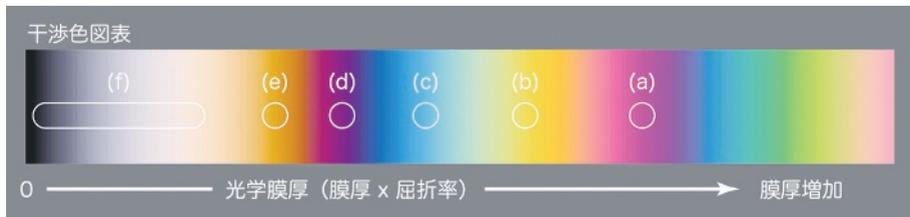


図3. シャボン膜の厚さと干渉色の関係

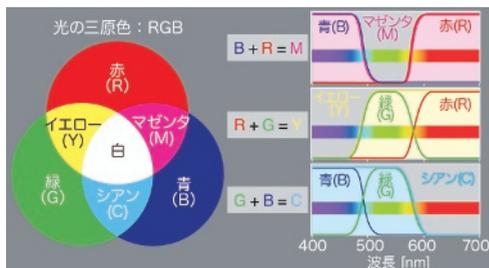


図4. スペクトルで考える加算混合

シャボン膜の厚さと色の関係を考察しましょう。図3に示す干渉色図表は、本来、屈折率異方性を持つフィルムなどの偏光色と屈折率差、膜厚の関係を示す図ですが、薄膜干渉の膜厚に対する色の並び順にそのまま適用できます。図左端の黒が膜厚0で、膜が厚くなるに従って、干渉色は右方向に変化して行きます。このような色の並び順になる理由は、スペクトル(横軸:光の波長、縦軸:光の強度)を使った加算混合によって理解することができます。図4の光の三原色を見てください。例えば、青と赤を足すとマゼンタになりますが、スペクトルで見ると、青(波長:400~500nm)と赤(波長:600~700nm)が足されると、緑(波長:500~600nm)のみが欠落したスペクトルになります。このスペクトル形状がマゼンタで、緑とマゼンタは補色の関係にあります。同様に、図4で、緑+赤=イエロー、青+緑=シアンも、スペクトルの足し算

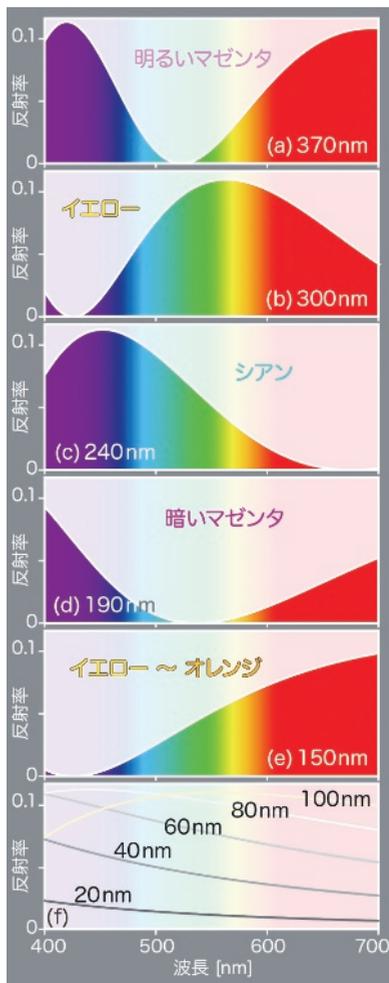


図5. シャボン膜の厚さで変わる反射率スペクトルの形と色

で確認してみてください。いずれの場合も、足された結果のスペクトルは、その補色が欠落したスペクトルになります。

さて、図5に示すシャボン膜の厚さに依存した干渉スペクトルを見て行きましょう。(a)膜厚370nmでは、青と赤のスペクトルが足され明るいマゼンタ(図3(a))になります。同様に、(b)膜厚300nmでは、緑と赤のスペクトルが足されイエロー(図3(b))、(c)膜厚240nmでは、青と緑のスペクトルが足されシアン(図3(c))、(d)膜厚190nmでは、青と赤のスペクトルが足され暗いマゼンタ(図3(d))、(e)膜厚150nmでは、緑と赤のスペクトルが足されイエロー～オレンジ(図3(e))に見えます。更に膜厚が薄くなると図5(f)に示すように、可視領域全体で反射率が下がって行きますので、図3(f)のように、白 → グレー → 黒 と変化して行きます。図3に示したシャボン膜の厚さによって異なる色は、このように、干渉スペクトルの強め合う色の足し算によって作られているわけです。

3. 実は単純ではないシャボン膜の構造^{1), 3)}

「シャボン膜は非常に薄い膜が積層したもの」と聞いても、あまりピンときませんね。それは、私たちが普段目にするシャボン玉では、シャボン膜の積層を見るのが困難だからです。シャボン膜の積層を観察するにはちょっとした工夫が必要です。まず、風や重力によるシャボン膜の流動を極力無くすることが重要です。5円玉のような穴の開いた平板の穴部分にシャボン膜を水平に張ることで、重力によるシャボン膜の流動を抑えることができます。さらに、シャボン膜の積層はミクロな構造なので、水平に張ったシャボン膜を顕微鏡で観察します。

水平に張ったシャボン膜の顕微鏡写真(表紙)をご覧ください。図3と見比べれば、左下の黒い領域が最も膜厚が薄く、右下のバステルカラーの領域が最も厚いことが分かります。膜厚が薄いモノトーンの領域で顕著に見られるモザイク状の濃淡は、シャボン膜が積層している層数の違いによって生じています。つまり、モザイク状の濃淡を分ける境界は、シャボン膜の単位層1層分(約5.5nm)の段差なのです。よく見ると、シャボン膜の膜厚が厚いピンクの辺りまで段差を確認できます。

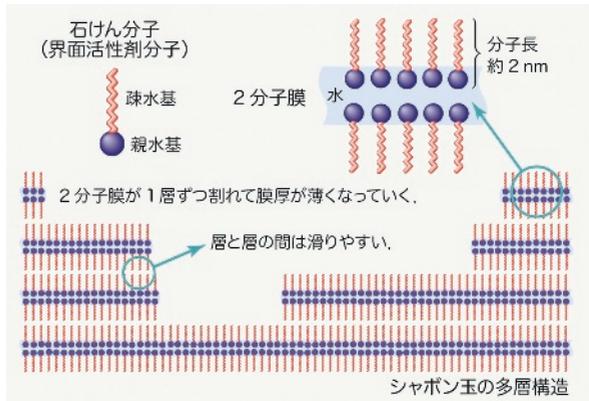


図6. シャボン膜の構造

1914年当時のペランは、表紙の写真に似たシャボン膜の顕微鏡観察を行い、最も薄い黒膜から最初の紫(図3(d)付近)に至るまでに厚さが異なる38段階の膜があることを見いだしました。彼は、紫の膜厚を210nmと推定し、同じ厚さの膜が積層していると仮定して、 $210\text{nm} \div 38\text{層} = 5.5\text{nm}$ が黒膜の厚さであると結論づけました。

後に、この黒膜は、シャボン液に使われる石けん分子によって形成された2分子膜であることが判明します。石けん分子は、水となじむ親水基と水となじまない疎水基(親油基)を持つ界面活性剤分子(両親媒性分子)です。黒膜は、図6のように、親水基を水に浸け疎水基を外に向けた石けん分子が水の層の両面に隙間なく並んだ2分子膜構造をしています。石けん分子の長さは約2nm、2分子膜の厚さは5~6nmで、ペランの研究と一致します。一見、単純に見えるシャボン膜は、実は、石けんの2分子膜が数多く積層した構造をしているのです。ちなみに、顕微鏡下のシャボン膜に軽く風を当てると、シャボン膜のモザイク模様が容易に移動することから、2分子膜と2分子膜の間は非常に滑りやすいことが分かります。

4. シャボン玉の映り込みを楽しもう

最後に、シャボン玉に映り込む像について考えてみましょう。図1のシャボン玉には家が映り込んでいますが、どのように映り込んでいるのか分かりますか？基本的には、シャボン玉は球面ミラーのようなものですから、魚眼レンズに似た像になるはずですが、実際は、上下反転した感じの像になっています。その理屈は以外と簡単なのですが、シャボン玉を美しく撮影するためのヒントになりますので解説しておきます。

図7に示すように、実は、シャボン玉の上半分は手前の凸面、下半分は奥の凹面による映り込みをしています。そのため、シャボン玉の映り込みは上下回転対称の像になるわけです。撮影者は、シャボン玉に映し込ませたい明るい被写体を背にして、シャボン玉の背後は暗い背景になるような撮影場所を選びます。背景を暗くして明るい景色を映り込ませると、シャボン玉の映り込みや干渉色を鮮やかに撮影することができます。シャボン玉の上半分では、手前の凸面に反射する明るい景色に比べて奥の凹面に反射する地面は暗いので、明るい景色がカメラに写ります。下半分も同様に、手前の凸面に反射する暗い地面は写らず、奥の凹面に反射する明るい景

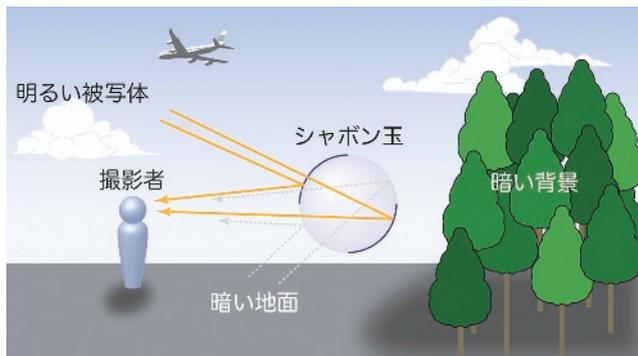


図7. シャボン玉の映り込み

色が写ります。その結果、上下回転対称になった明るい景色が撮影されるのです。図8(a)は、図7で説明した撮影条件で、ステンレス製半球ミラーに写る景色を撮影した写真です。図8(b)は、図8(a)を180°回転させた画像と元の図8

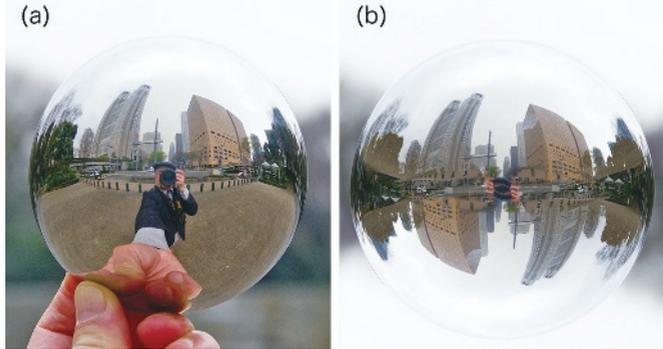


図8. 半球ミラーを使ったシャボン玉の写り込み像の再現

(a)を、画像処理ソフトの「比較(明)」(2つの画像の同じ場所の明るさを比較して明るい方を選ぶ画像合成モード)で合成した画像で、シャボン玉の映り込みをよく再現しています。フィラデルフィアで活躍する写真家トム・ストーム(Thomas J. Storm)氏は、こうしたシャボン玉の映り込みを素敵なアート作品として発表しています。図8のように、シャボン玉の野外撮影に半球ミラーやアクリルボールを持って行くと、映り込みが美しいシャボン玉を撮影する助けになるかも知れません。

今回、シャボン玉のこぼれ話を2、3紹介しました。紙面の都合から、シャボン玉研究の歴史について多くは触れられませんでした。ご興味がある方は、文献1)をご一読ください。奥深いシャボン玉研究の歴史をお楽しみ頂けること請け合いです(残念ながら絶版のため、中古で入手してください)。

- 1)立花太郎著:『しゃぼん玉 その黒い膜の秘密』, 自然選書, 中央公論社(2002).
- 2)アイザック・ニュートン著, 島尾永康翻訳:『光学』, 岩波書店(1983).
- 3)大津元一監修, 田所利康著:『イラストレイテッド光の実験』, 朝倉書店(2016).

著者紹介 田所 利康(たどころ としやす)



1957年、東京都八王子市生まれ。立教大学理学部物理学科卒。博士(工学)。2004年より有限会社テクノ・シナジー代表取締役。分光計測システムの開発などを手がける。主な著書は、『光学入門』, 朝倉書店(2008)、『イラストレイテッド光の科学』, 朝倉書店(2014)、『イラストレイテッド光の実験』, 朝倉書店(2016)。Jazzとビールとカメラ好き。今はまっているのは、カワセミ撮影。