

Christopher Marley

Chris Wood

菱田 真史

比江島 俊浩

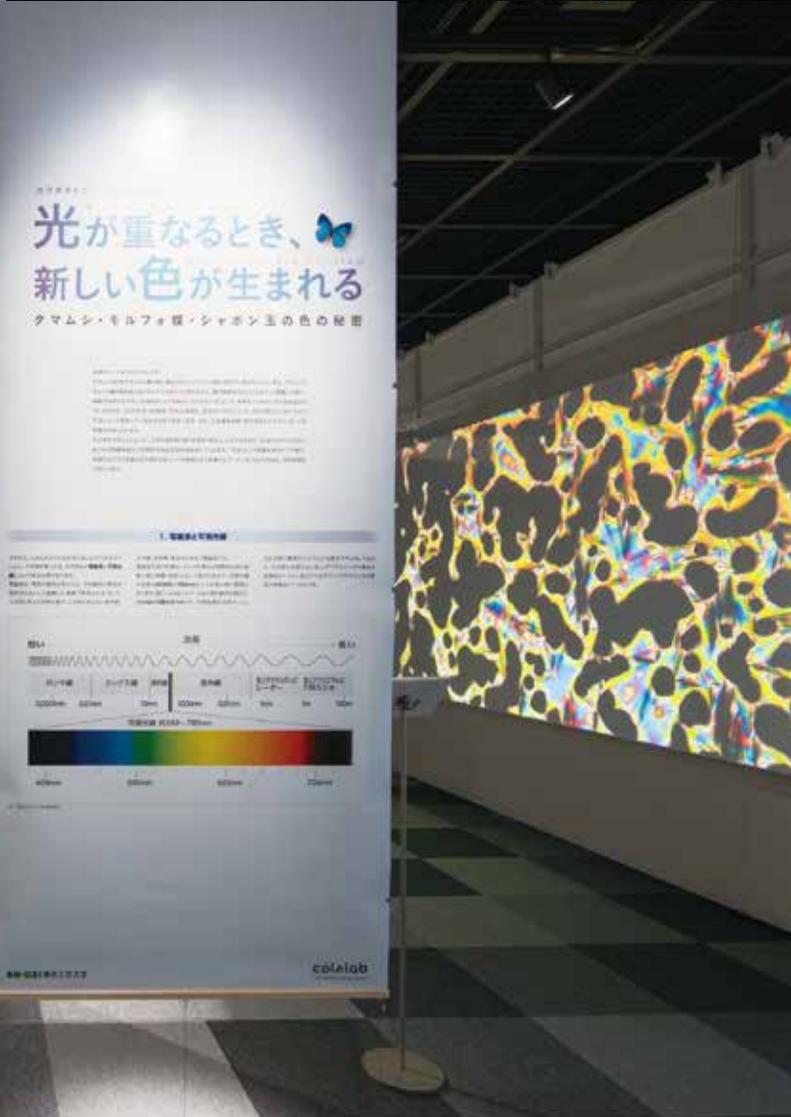
【同時開催】Color Research Lab.  
写真プリントの高質感再現システムの研究  
ライティングドーム内のCMYキューブ  
ブルーノ・タウト設計の大ジードリンク・ブリッツの色彩復元模型  
顔の表情認識を用いた人の感情における色の表現  
高強度カラーコンクリート  
LN結晶を用いた多色ホログラム動画像表示素子の開発  
電子ペーパーで写真をつくる

カラボギャラリー第6回企画展

When Lights Overlap,

# 光が重なるとき、 新しい色が生まれる

タマムシ・モルフォ蝶・シャボン玉の色の秘密



光が重なるとき、  
新しい色生まれる  
タマムシ・モルフォ蝶・シャボン玉の色の秘密  
2020.9.25(水)~10(日) 4.23(日)

主催者  
ColoLab

協賛  
東京大学

協力  
東京大学

お問い合わせ  
03-5452-1111

cololab  
gallery

# 光が重なるとき、 新しい色生まれる

タマムシ・モルフォ蝶・シャボン玉の色の秘密

光の干渉現象

光の干渉とは、二つの光の波が重なるときの現象で、波の山と谷が重なると暗い色、波の山と山が重なると明るい色が生じます。

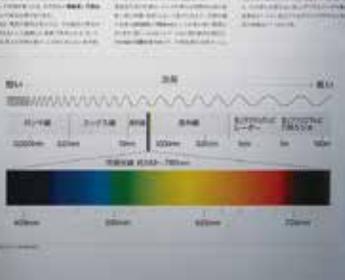
光の干渉現象は、タマムシの翅やモルフォ蝶の翅、シャボン玉の表面などで観察できます。

光の干渉現象は、光の波長によって色が変わります。

光の干渉現象は、光の波長によって色が変わります。

光の干渉現象は、光の波長によって色が変わります。

## 1. 光の干渉現象

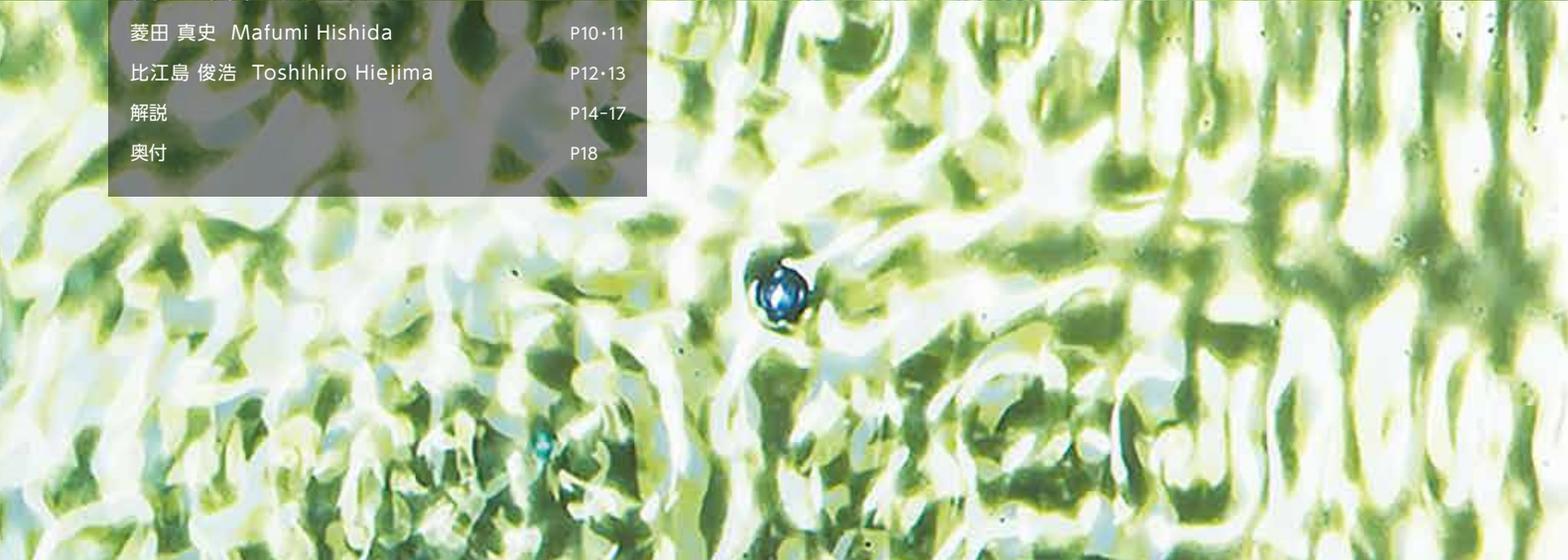






## CONTENTS

ごあいさつ	P5
クリストファー・マーレー Christopher Marley	P6-7
クリス・ウッド Chris Wood	P8-9
菱田 真史 Mafumi Hishida	P10-11
比江島 俊浩 Toshihiro Hiejima	P12-13
解説	P14-17
奥付	P18



# ごあいさつ

東京工芸大学の原点は、1923年(大正12年)に創設された、我が国で最初の写真専門の高等教育機関「小西写真専門学校」です。当時最先端メディアであった写真の技術者・研究者を養成するために創設され、写真技術(テクノロジー)と写真表現(アート)との融合を目指す極めて先駆的な学校でした。現在の本学は、工学部と芸術学部という二つの学部を擁するユニークな構成の総合大学へと発展していますが、それは「工・芸融合」という創設以来継承される本学の精神を体現しているのです。

平成28年度に私立大学研究ブランディング事業に採択されたことを契機として、色の国際科学芸術研究センターが設立されました。本センターは、本学のルーツである写真、印刷、光学といった学問分野

に根差し、今日の工学部と芸術学部の二つの学部に通ずる全学的な研究テーマとして「色」を取り上げた、国内の大学で唯一の「色」の国際的な研究拠点です。

col.labギャラリー(カラボギャラリー)は、「色」について楽しく学ぶことができる公開施設であり、「色」の研究成果を、写真、映像、拡張現実、プロジェクションマッピング、CG等の最新のメディアアートの手法によって情報発信する、「工・芸融合」を推進する本学ならではの取り組みと言えるでしょう。

色の国際科学芸術研究センターの活動を通して、未来を創造する科学と芸術の発展に資すること目指してまいりますので、これからの本学の取り組みにどうぞご期待ください。

学長 吉野 弘章

## カラボギャラリー 第6回企画展に向けて

タマムシから発せられる虹色の輝きは、玉虫厨子を代表とする調度品に使われ古くから人々を魅了してきました。また、モルフォ蝶の翅が持つ深い青は、19世紀のイギリスのヴィクトリア女王をも虜にしたと言われていました。

これらの不思議で魅力的な色彩はどのようにして作り出されているのでしょうか。実は、タマムシやモルフォ蝶の翅自体に色が付いているわけではありません。翅の微細な凹凸に光が当たって複雑に反射し、複数の波長の光が互いを強めあったり弱めあった

りすることによって、本来そこにはない色が生み出されているのです。この光が持つ性質は「干渉」と呼ばれ、昆虫だけでなくシャボン玉や宝石など、他にも光の干渉によって発色しているものが多く存在します。また、立体像を記録・表示するホログラフィも、この原理を利用しています。

カラボギャラリー第6回企画展では、この光の干渉を利用した様々なアート作品と、その仕組みをご紹介します。光の不思議な性質によって紡ぎ出される色彩の神秘をご体験ください。

本展ディレクター 芸術学部インタラクティブメディア学科教授 野口 靖 工学部工学科建築コース教授 義江 龍一郎



### カラボのVI (ビジュアル・アイデンティティ)

私立大学研究ブランディング事業における色の国際科学芸術研究センター及びギャラリーのロゴタイプとアイコンマークを制作した。ネーミングはCOLORとLABORATORYを合体した「col.lab」カラボと読む。本事業では、工学部と芸術学部の連携、海外の大学との連携、地域との連携等もめざしているため、「col.lab」には「collaboration」の意味も込めている。中央の黒丸を光の三原色であるRGB(レッド、グリーン、ブルー)をイメージし、あえて東京工芸大学

のVIカラーの青色と黄色に差し替えてRYB(レッド、イエロー、ブルー)でアイコン化している。

人間の5感のうち視覚は最大の感覚。脳の約6~8割が視覚に情報を支配されている。視覚における色の感じ方は人それぞれ、目と脳の相関関係によって異なり、複数の人間が同じ色感覚を共有しているわけではない。色は不思議で魅力的な存在である。

グラフィックデザイナー 廣村 正彰

## Aesthetica Mosaic

## Limited Cerulean Genesis

## Damselfly Wash on Graphite

協力: Pheromone Asia

私の考えでは、芸術と生命科学の違いはほとんどない。それは音楽からダンスを引き離そうとするようなものだ。アートの目的は、私たちの美的感性を高め、美しさを体験する能力を磨き、私たちが接触する生命システムに共感し、全体的または部分的に配置された要素との相互作用から喜びや刺激を引き出すことである。自然はどのように違うのか? 私たちは自然と共に、その中で踊る。自然の美学は私たちが移動するリズムである。

構造色の原理については、P17の「6. 構造色とは」をご覧ください。

### profile

クリストファー・マーレーは、ロサンゼルスで生まれ、太平洋岸北西部で育ったアメリカ人アーティストで自然主義者である。18歳で彼は家を出て、アートとデザインを学びながらファッションのキャリアを追求する数十か国に10年以上住んでいた。

マーレーの作品は、世界中の500を超えるギャラリーや特別展示で展示されていて、これらの個展は、社会のさまざまな分野にまたがっている。ドレクセル大学自然科学アカデミー、ヒューストン自然科学博物館、WMODA、オレゴン科学産業博物館、クイーンズ博物館、スタンフォード美術館などの博物館、およびベルドルフグッドマンなどでは、すべて個展を開催している。



Limited Cerulean Genesis (部分)



Aesthetica Mosaic(左) / Limited Cerulean Genesis(中央) / Damselfly Wash on Graphite(右)



## Interference

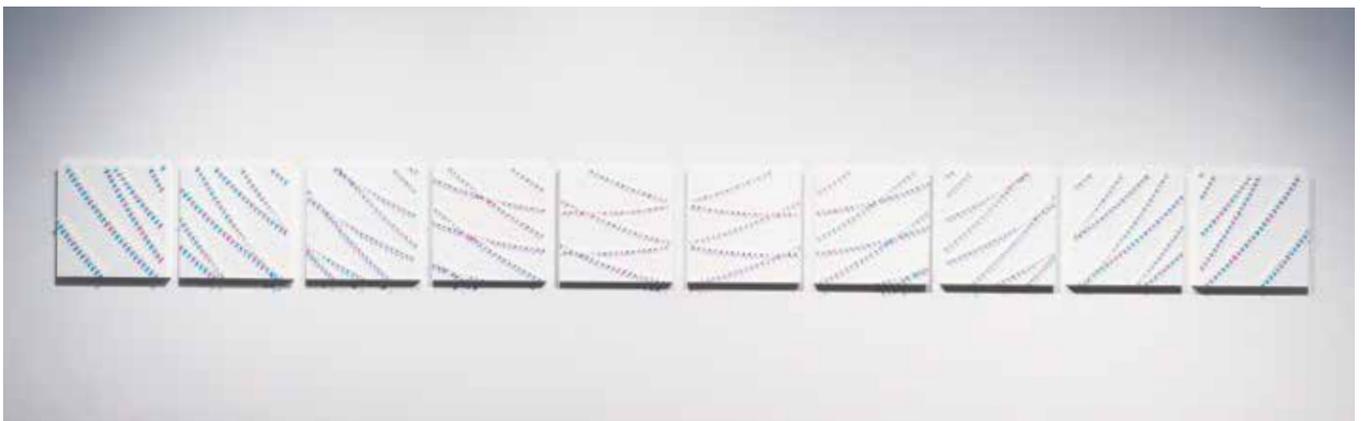
クリス・ウッドが探求する媒体は「光」である。彼女は、ハイテクとローテクのさまざまな光学素材を使用して、自然界のはかない瞬間を垣間見ることができる光のパターンを作り出している。彼女の彫刻は、配置された環境に応じて動的パターンを作成するシンプルなレイアウトによって形作られていて偶然性を秩序立たせ、私たちに「見る」という経験を再考させる。

クリスは、元々はNASAによって開発されたダイクロイックと呼ばれる材料をよく使用する。ダイクロイックは無色の素材で、光の波長をフィルタリングして反射し、さまざまな虹色の影や投影を生成する。

ダイクロイックの原理については、P17の「7. ダイクロイックミラーの仕組み」をご覧ください。

### profile

クリス・ウッドは80年代半ばにミドルセックス大学で家具デザインを学び、ロイヤル・カレッジ・オブ・アートでガラスを学び、光と空間を扱う建築的規模のプロジェクトに取り組んだ。クリスはギャラリー展覧会のための革新的なインスタレーションを制作し、英国中および国際的に広く展示をおこなっている。彼女の作品は、上海ガラス美術館だけでなく、多くのプライベートコレクションにも展示されている。





## Flux

共同制作：橋本 次郎

「液晶」とは液体と結晶の中間の状態のことを言う。特殊な顕微鏡で液晶を観察すると、光の偏光に起因した鮮やかな色が観察される。本作品では、0.1℃程度の温度のわずかな揺らぎの影響によって液晶状態と液体状態を転移し流動する様を映し出している。空気の流れや人の息の影響など、日常では感じることはないほんのわずかな環境の揺らぎ(Fluctuation/Flux)のもつ美しさをダイナミックに表した作品である。

## At the Moment

物質が光の波長と同等の大きさの秩序構造を持つとき、そこで反射した光は強く干渉し、「構造色」と呼ばれる鮮やかな色が観察される。本作品では、液晶を用いて水中に柔らかな秩序構造を形成させることで「構造色」を見せている。この秩序構造は柔らかいため、外的な要因で構造が変化し、「構造色」の色や見え方も変化する。すなわち、その場所、その時、一瞬一瞬ごとに異なる表情を見せる。自らの存在する場所と現在について改めて気づかせてくれる作品である。

構造色の原理については、P17の「6. 構造色とは」をご覧ください。

## profile

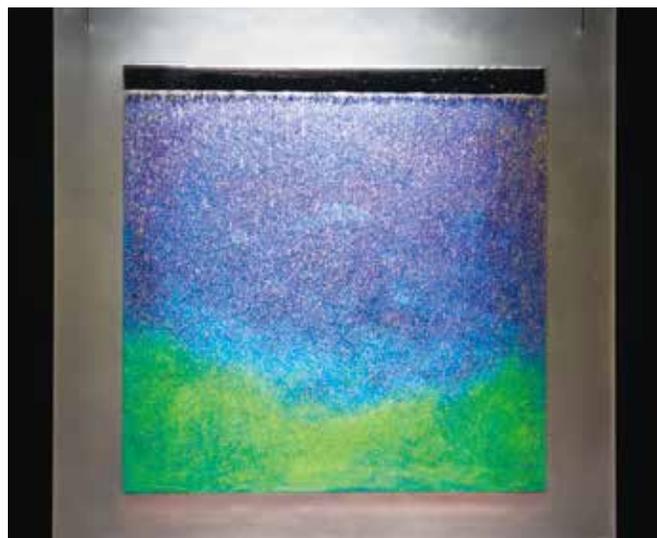
2009年京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻修了、博士(理学)。京都大学物質・細胞統合システム拠点・特定研究員を経て2011年より筑波大学数理物質系・助教。専門は液体やゲルなど柔らかい物質に関する物理学および化学。2015年頃より科学とアートの協奏を目指した作品制作を行っている。主な展示に、茨城県北芸術祭(2016)、六本木アートナイト(2017)、BIWAKOビエンナーレ(2018)など。

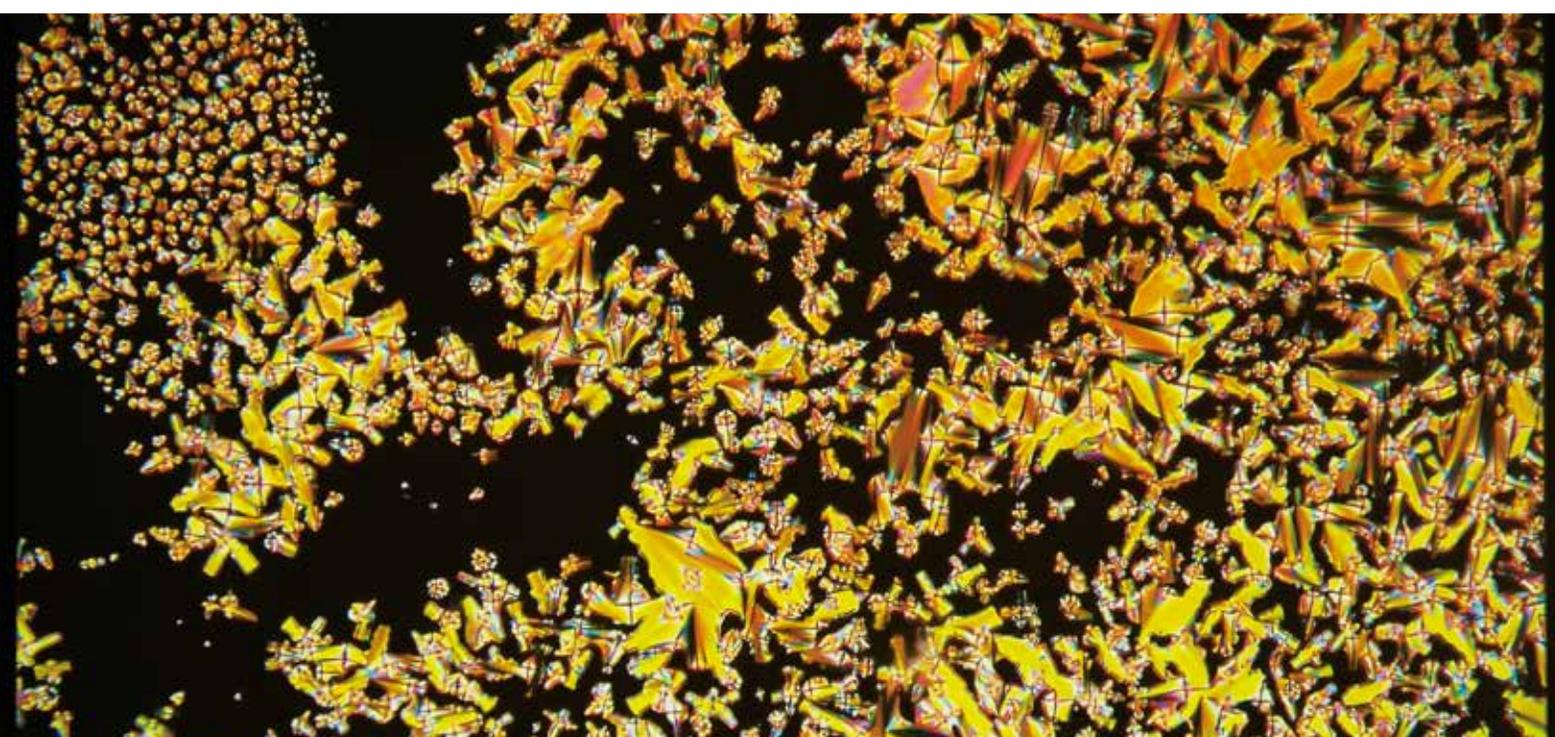
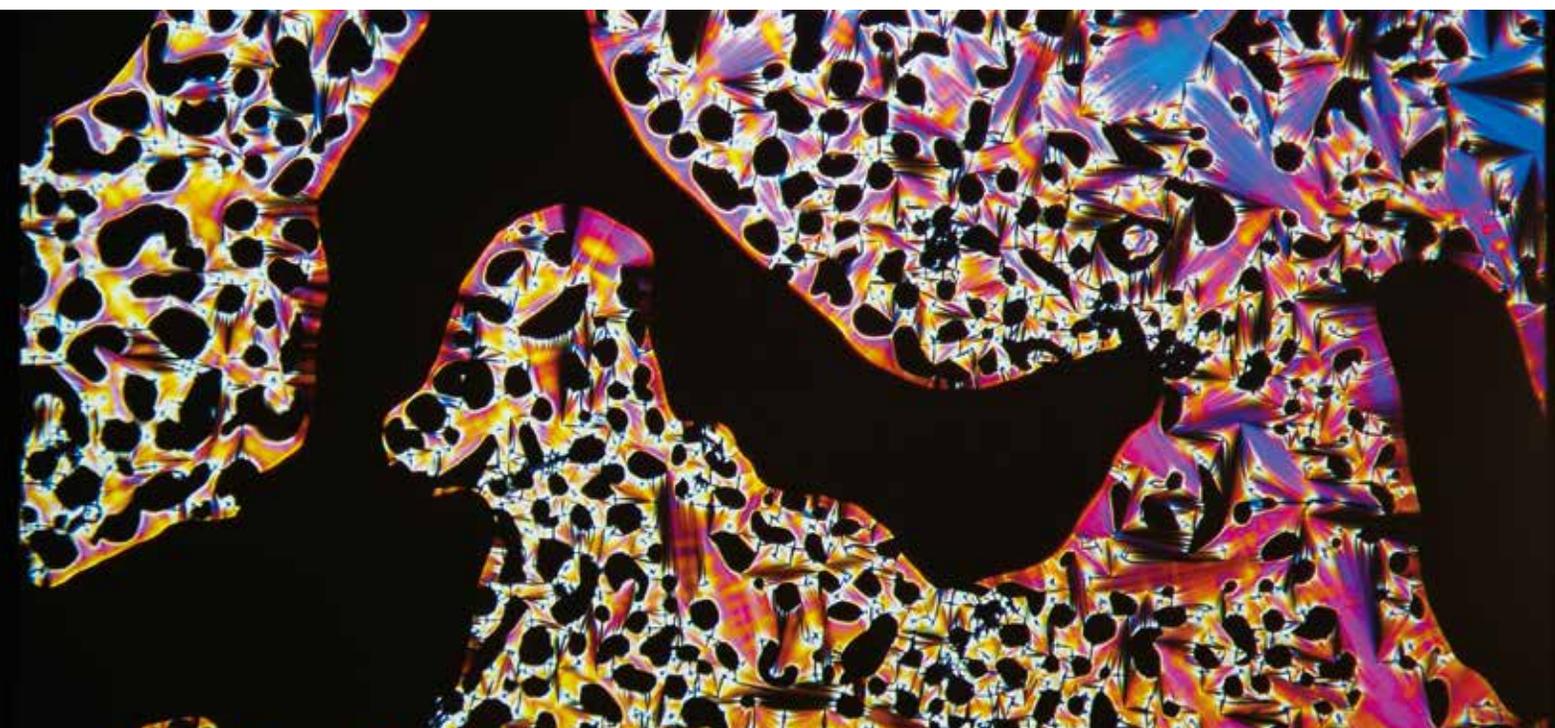
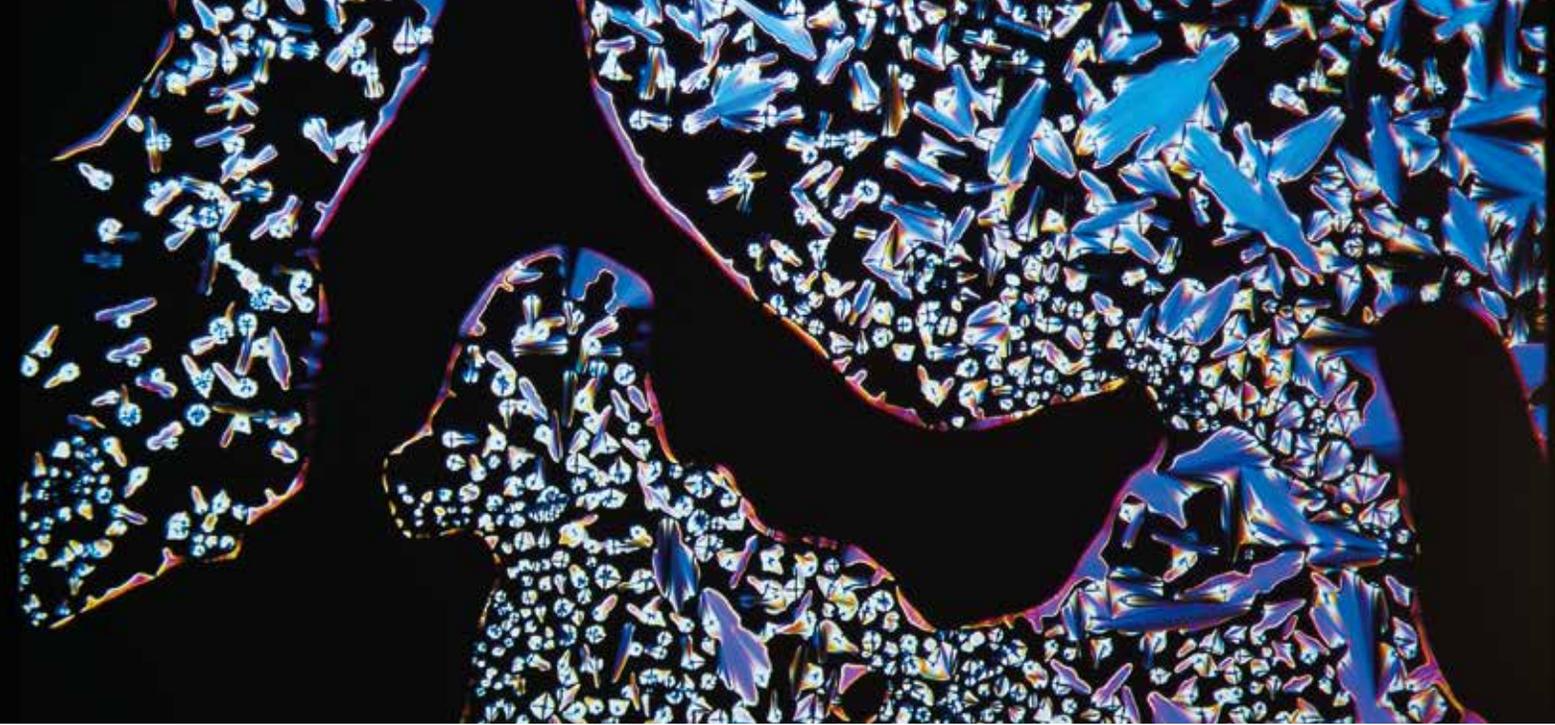


Flux(左) / At the Moment(右)



At the Moment(部分)





## 光と音の干渉が生み出すサウンドイメージ

制作協力：佐藤 光希、小泉 賢太 展示協力：野口 靖

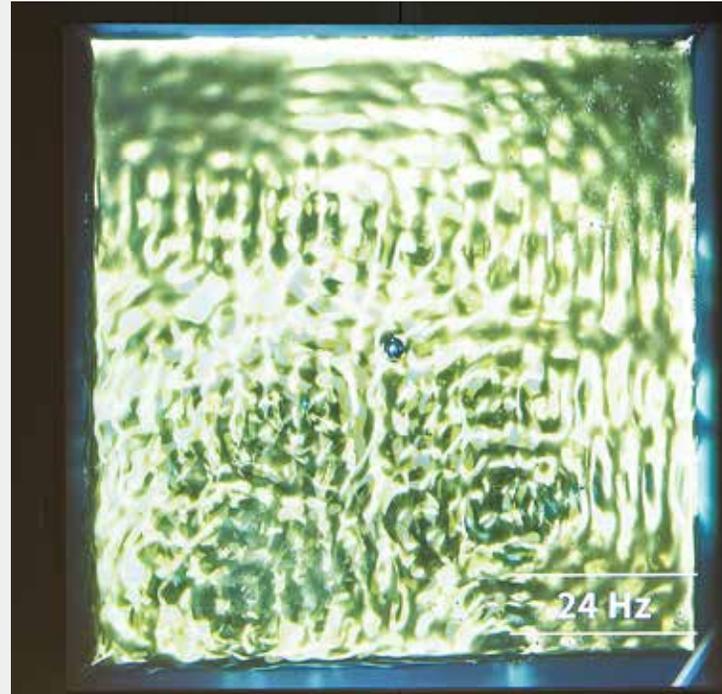
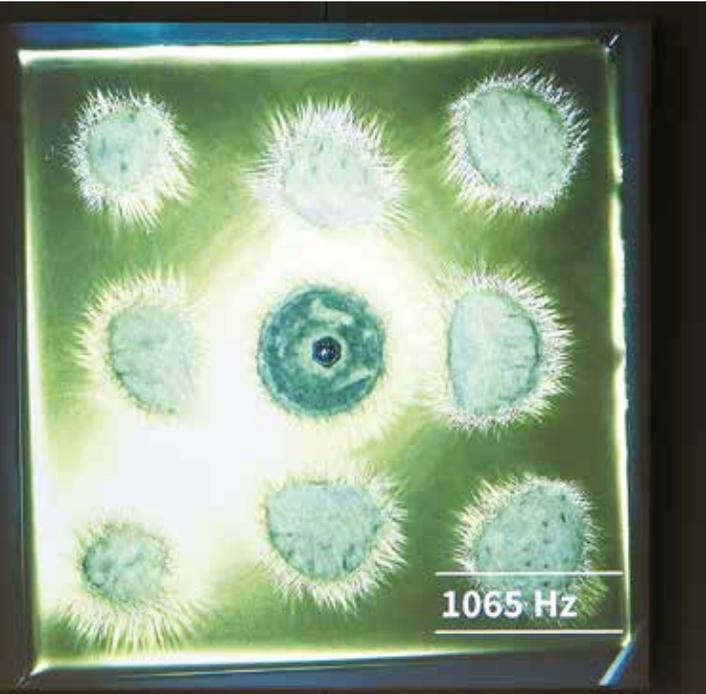
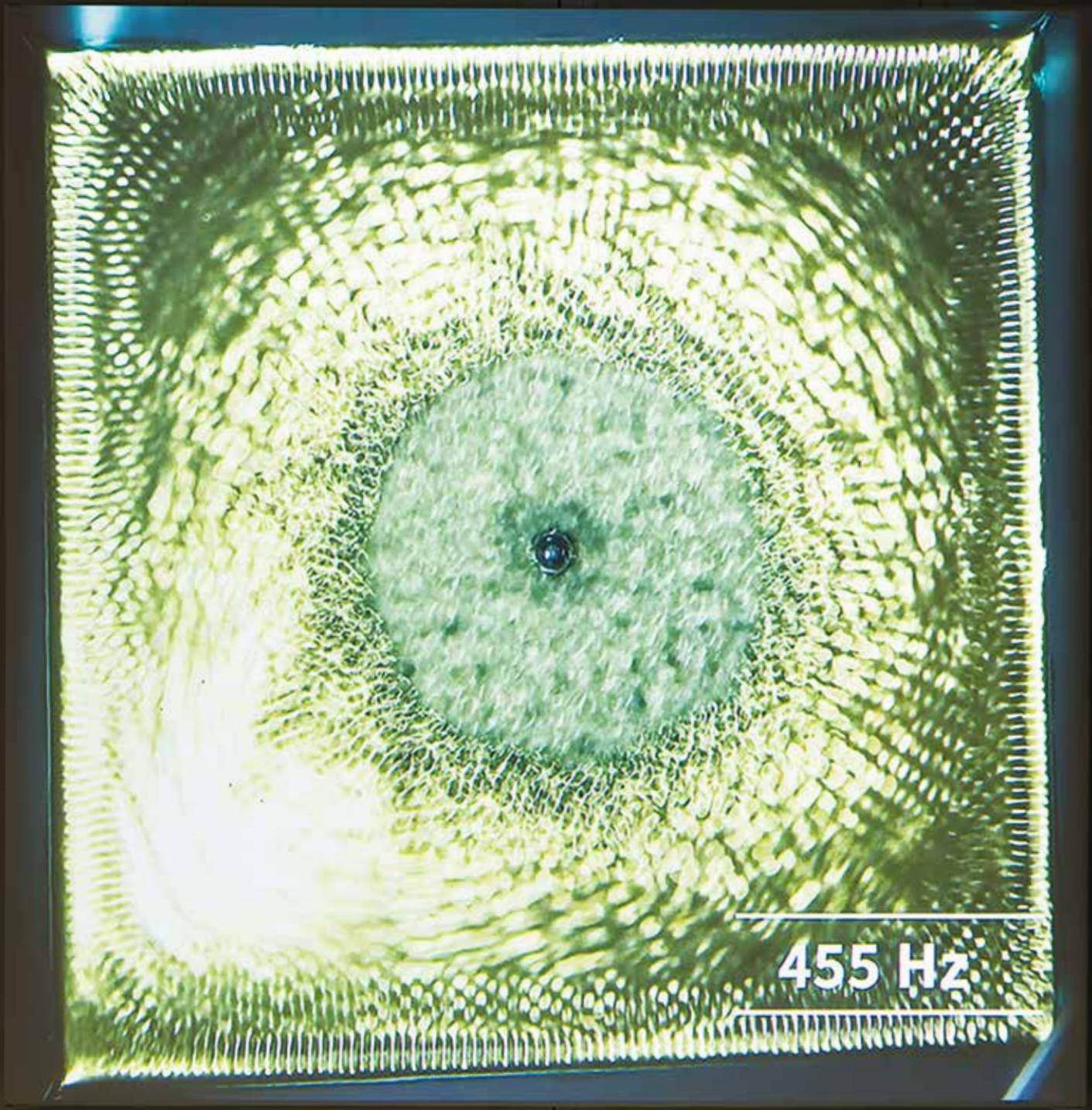
構造色とは、光の波長程度の微細な構造によって光の干渉や回折、屈折などによって特定の波長が反射する現象のことである。モルフォ蝶やタマムシの翅の美しい色調はまさに構造色によるものだ。一方、クラドニ図形とは、音の干渉によって生じる幾何学模様のことを意味している。今回、私たちは、構造色の示す光の干渉とクラドニ図形に現れる音の干渉によって生み出されるサウンドイメージを紹介する。

構造色の原理については、P17の「6. 構造色とは」をご覧ください。

### profile

1996年総合研究大学院大学数物科学研究科構造分子科学専攻修了、博士(理学)、日本学術振興会特別研究員を経て、東京工芸大学工学部工業化学科に専任講師として着任、現在、工学部工学科教授。専門は、新しい光・電子物性を発現する有機・高分子材料の分子設計と物性評価である。2016年ごろから構造色材料を使った小・中・高校生向けの理科教材の制作とアート作品の作成に携わっている。





# When Lights Overlap, 光が重なるとき、 New Colors Are Created 新しい色が生まれる



タマムシ・モルフォ蝶・シャボン玉の色の秘密

## 解説

ここでは、本展のテーマである「光の干渉」に関連した用語の光学的な原理について解説しています。タマムシやモルフォ蝶の発色の原理である構造色、シャボン玉や宝石の色、さらにはホログラフィなどもこの光の干渉による現象です。少し専門的な内容になりますが、本展をご覧になって干渉という現象を楽しんでいただけたら、さらにその奥に潜む原理についても興味を持っていただけると嬉しいです。

### 1. 電磁波と可視光線

そもそも、人はどのように色を感じることができるのでしょうか。その謎を解くには、まず初めに**電磁波**と**可視光線**について知る必要があります。

電磁波は、電気が磁気を発生させ、その磁気が電気を発生させるという連続した現象で形作られる「波」で、人の目に見える可視光線や、人の目に見えない紫外線・赤外線・放射線・電波などは全て電磁波です。

電磁波の波の性質は、それぞれ異なる周期的な波の振動と進む距

離(波長)によって表されますが、可視光線の波長は**約380~780nm**という非常に狭い範囲にあります(図1)。nmはナノメートルと読む長さの単位で、**1nmは10億分の1m**です。可視光線の波長が、こんなにも狭い範囲だということは意外ですね。ちなみに、人の目には見えない地上デジタルテレビの電波の波長は0.1~1m、地上アナログテレビやFMラジオの電波の波長は1~10mです。

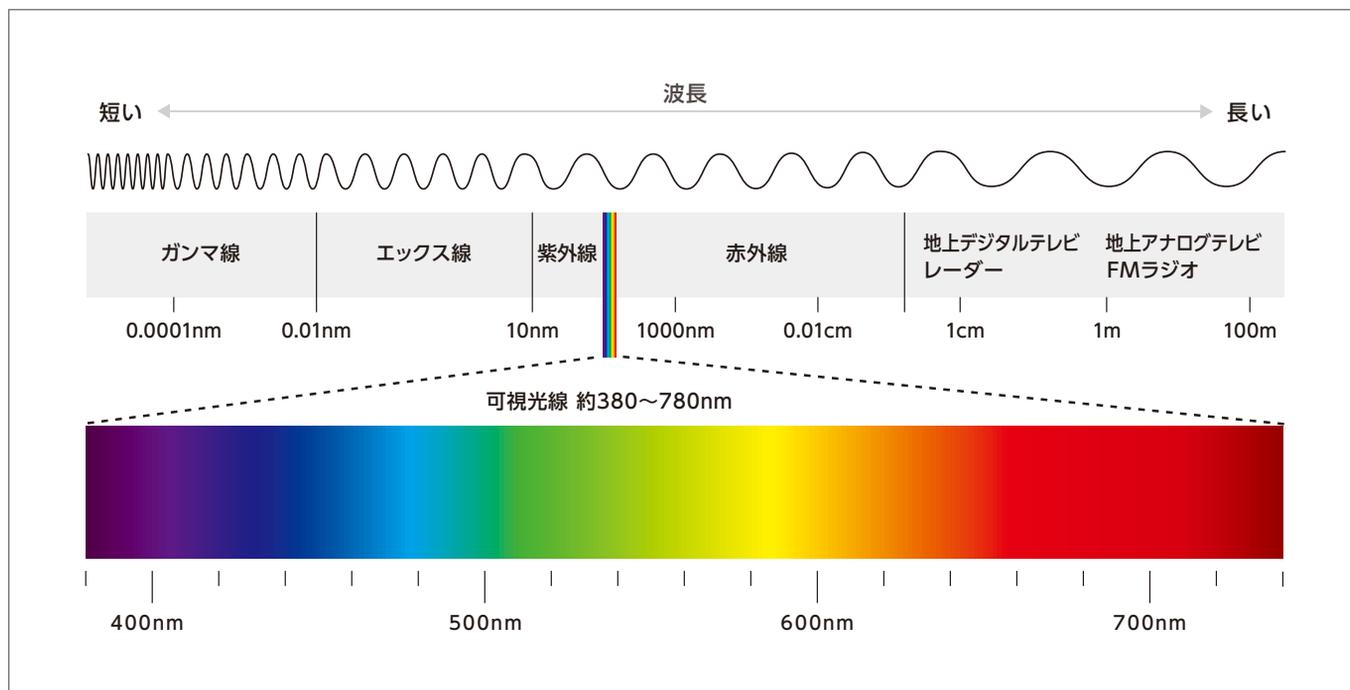


図1 電磁波の波長と可視光線の範囲

## 2. 光の干渉

光は電磁波であり**波の性質**を持っています。光の波の山と山が重なると、強め合って光の波の振幅は大きくなります。そうすると光は

明るくなります。一方、光の山と谷が重なると、打ち消しあって光は暗くなってしまいます(図2)。こうした現象を「**光の干渉**」といいます。

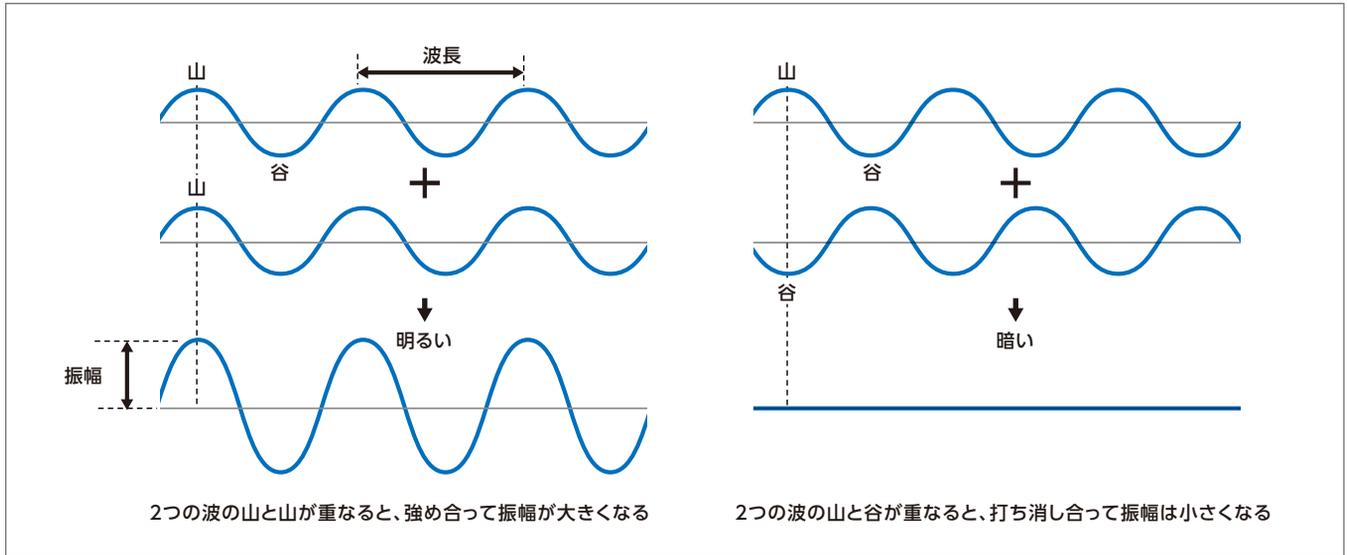


図2 光の干渉

## 3. 光の屈折

空気中を進んでいる光が水やガラスに入射すると、光の一部はその境界面で反射します。図3左図のように、境界面に垂直に立てた法線と入射光との角度を**入射角**といい、法線と反射光との角度を**反射角**といいます。**入射角=反射角**です。入射光の残りの一部は水やガラスの中に入り**屈折**して進んでいきます。法線と屈折光との角度を**屈折角**といい、図では屈折角の方が入射角より小さくなっています。では、なぜ光はこのように屈折するのでしょうか。それは、**水やガラスの中では光の速さが空気中の光の速さより遅くなる**ためです。図3右図のように2本の光線を考えます。この2本の**光線に直角な面を波面**といいます。左の光線が境界面のA点に入射した時、右の光線はまだB点の位置にいます。右の光線がB点からD点まで進む間に、左の光線はA点からC点まで進みます。水やガラスの中では、空気中より光の速さが遅くなるので、AC間の距離は、BD間の距離より短くなります。そして**2本の光線に対して直角な波面の向きも変わり光は曲がる**のです。2本の光線の上に車の両輪が乗っていると考えるとイメージしやすいかもしれません。左のタイヤがA点から水の中に入ると左の

タイヤの回転は右のタイヤの回転より遅くなりますね。そうすると車は図のようにカーブして曲がっていきますね。

物質の中の光の速さと真空中の光の速さの比率を、その物質の「**絶対屈折率**」といいます。

式で書くと、

$$\text{物質の絶対屈折率} = \frac{\text{真空中の光の速さ}}{\text{物質の中の光の速さ}}$$

「絶対」を省略することが多いので、ここからは単に「**屈折率**」と呼ぶことにします。真空中の光の速さは宇宙の中で一番速いので、物質の屈折率は1より大きくなります。たとえば、水の中の光の速さは、真空中の光の速さの約1.3分の1なので、水の屈折率は約1.3です。ガラスの屈折率は約1.5です。空気中の光の速さは、真空中の光の速さとほとんど同じなので、空気の屈折率は1.0とみなすことができます。

また、**光の速さ=光の振動数(1秒あたりの波の個数)×光の波長**ですが、光の振動数は異なる物質の中でも変わらないので、光の速さが変わるといことは、光の波長が変わるといことも意味しています。**水やガラスの中では、光の波長が短くなるのです。**

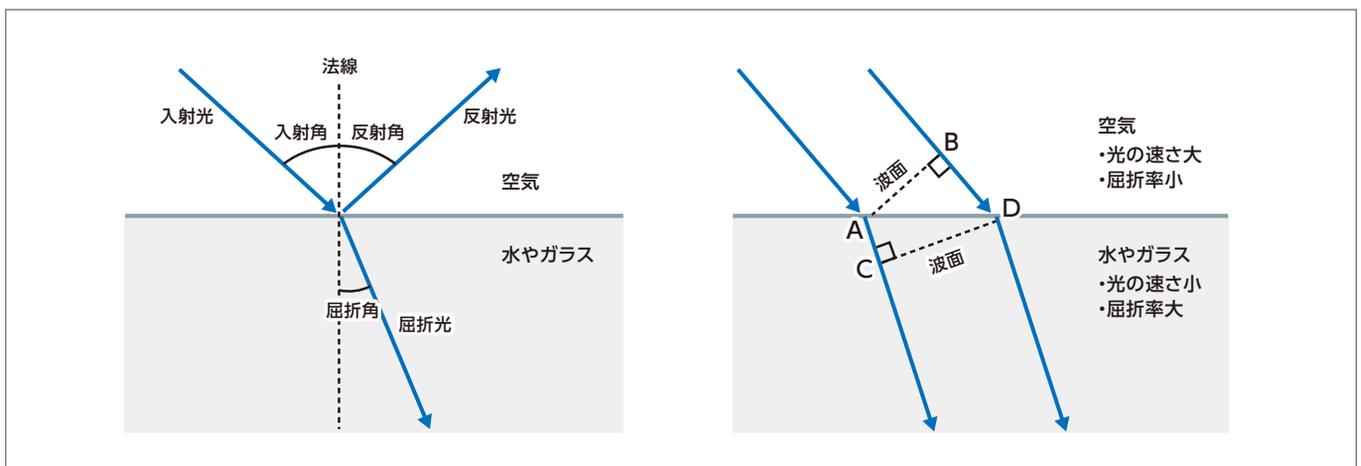


図3 光の屈折

#### 4. 光の自由端反射と固定端反射

屈折率が大きい物質から小さい物質に光が入射すると、その境界で光は**自由端反射**します(図4)。自由端反射では、**入射波と反射波の振動の方向が同じ**となります。たとえば、図4のように境界面で波の山の部分が入射した時には、反射波も境界面で山となります。この時には入射波の山と反射波の山が重なり合って**境界面での山はよりいっそう高くなります**。逆に境界面で谷の部分が入射した時には、反射波も境界面で谷となり、この時には入射波の谷と反射波の谷が重なり合って境界面での谷はよりいっそう深くなります。様々な時間帯の入射波と反射波が重なり合うと、一番下のような定在波が生じていることになり、**境界面は大きく振動する「腹」となり、その1/4波長となりでは、全く動かない「節」**の場所が生じます。

一方、屈折率が小さい物質から大きい物質に光が入射すると、その

境界で光は**固定端反射**します(図5)。**固定端反射では、入射波と反射波の振動の方向が逆**となります。たとえば、図5左図のように境界面で波の山の部分が入射する瞬間には、**反射波は境界面で谷**となります。この時間では入射波の山と反射波の谷が重なり合って**境界面での振幅はゼロ**となります。また、この時間では、境界面だけではなく、すべての場所で入射波と反射波が打ち消し合うので、3段目の図のようにすべての場所で振幅がゼロとなっています。しかし図5右図のように波が入射する瞬間には、境界面から1/4波長となりで入射波の山と反射波の山が重なり合って振幅が大きくなっています。様々な時間帯の入射波と反射波が重なり合うと、一番下のような定在波が生じていることになり、**境界面は全く動かない「節」となり、その1/4波長となりでは、大きく振動する「腹」**の場所が生じます。

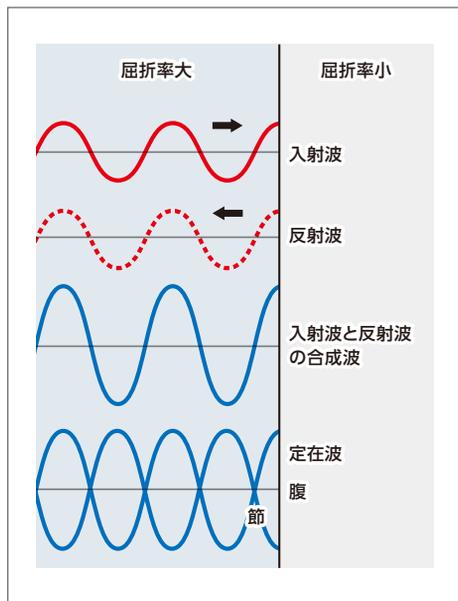


図4 自由端反射

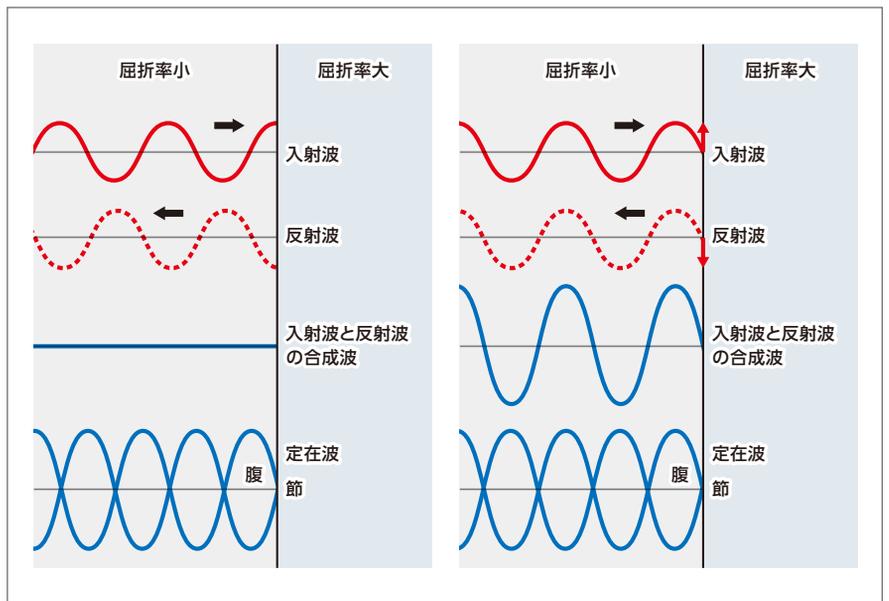


図5 固定端反射

#### 5. シャボン玉の色

私たちがシャボン玉を見ているときには、**2種類の光**が眼の中に入ってきます。ひとつは**シャボン玉の表面で反射した光**、もうひとつは**シャボン玉の薄い膜の中に入り膜の裏側で反射してくる光**です。この2つの光の山と山がちょうど重なると強め合って光は明るくなります。シャボン玉に当たる可視光線は、紫から赤色までさまざま波長の光を含んでいますが、2つの光の干渉によって強められ明るくなっ

て眼に入ってきた波長の光の色を、人はその色だと認識します(図6)。シャボン玉は風や重力によって膜の厚さが場所によって変わります。また風に乗って動いていれば見る角度も変わります。それによって眼に入ってくる強め合う光の波長がさまざまに変わるので、シャボン玉はいろいろな色-虹色に見えるのです(図7)。

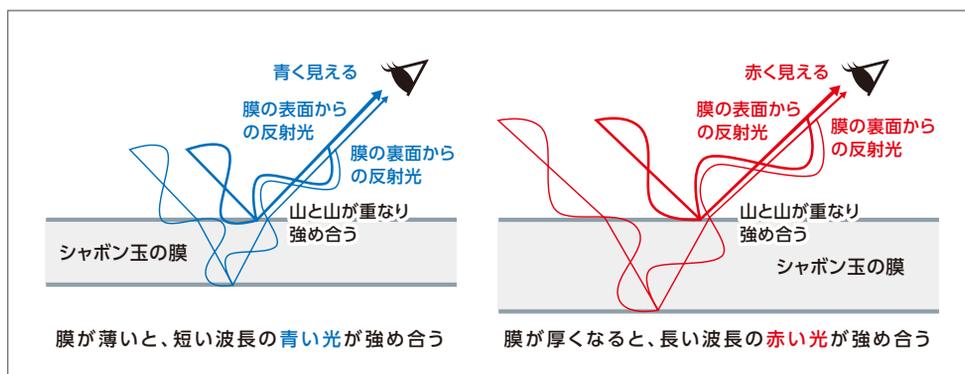


図6 シャボン玉の表面からの反射光と裏面からの反射光の干渉



図7 虹色のシャボン玉

## 6. 構造色とは

自然界に生息する昆虫の中には、進化の過程でそれ自身に色がついてなくても、可視光の波長よりも細かい紋様（構造）を形作ることによって、金属光沢を帯びた美しい色彩を呈することがあります。この色彩のことを**構造色**と呼びます。構造色の特徴の1つは、**見る角度によって色調が変化して見える点**にあります。水たまりの油膜やシャボン玉の色も構造色の1種です。

モルフォ蝶（図8）には**上層鱗**と**下層鱗**と呼ばれる2種類の薄い膜の

鱗粉が互い違いに並んで翅を覆っています（図9）。上層鱗も下層鱗も青く光りますが、**光り方は下層鱗の方が強い**ことがわかります（図10）。更に、拡大すると、鱗粉には**リッジ**という細かい筋があることがわかります（図11）。



図8  
モルフォ蝶

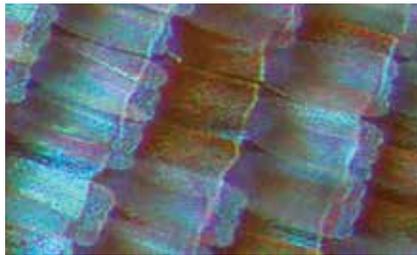


図9 2種類の鱗粉

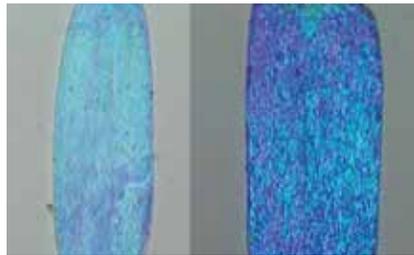


図10 上層鱗と下層鱗

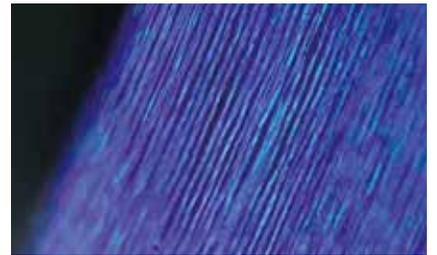


図11 リッジ

図12は上層鱗と下層鱗が交互に並んでいる様子を電子顕微鏡で観察したものです。なお、上層鱗にも下層鱗と同じリッジが1.5ミクロン程度間隔で観察できますが、下層鱗のリッジはより密に並んでいて、その間隔は0.7ミクロン程度です。この**リッジの密度が高い**ため、**下層鱗が強い青色**に見えます。

参考 構造色研究会ホームページ

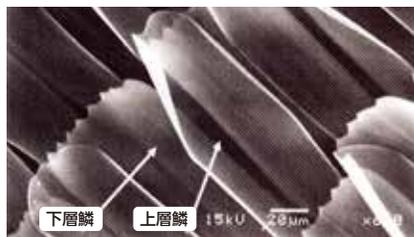


図12 上層鱗と下層鱗

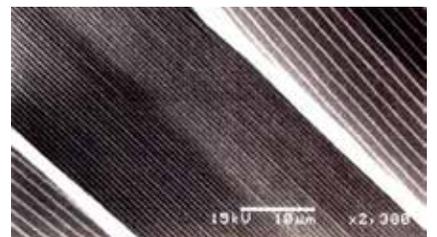


図13 上層鱗と下層鱗の拡大写真。下層鱗のリッジの密度が高いことが観察できる。

## 7. ダイクロイックミラーの仕組み

ダイクロイックミラーは、**薄膜による光の干渉を利用して、特定の波長領域の光を反射し、残りの波長領域の光を透過する光学ミラー**で、ガラスなどの表面に屈折率が異なる透明な薄膜が何10層も真空蒸着されています。ダイクロイックミラーの表面には、**屈折率の大きい薄膜と小さい薄膜が交互に積層されています**（図14）。

「3. 光の屈折」で説明したように、屈折率の大きい物体の中では光の速さは遅くなり波長は短くなります。また「4. 光の自由端反射と固定端反射」で説明したように、屈折率が小さい物質から大きい物質への境界では**固定端反射**し、入射波と反射波の振動の方向が逆になります。これを**位相が反転**するといいます。一方、屈折率が大きい物質から小さい物質への境界では**自由端反射**し、入射波と反射波の振動の方向は同じとなります。これを**同位相**といいます。ひとつひとつの**薄膜の厚み**をある**特定の光の波長の1/4**になるようにすれば、**薄膜の各層の境界からの反射波の位相がすべて同じになります**。空気中の光の波長を $\lambda$ とすれば、各薄膜の層の厚さを、「 $1/4\lambda \div \text{その層の屈折率}$ 」とすればよいのです。図14の例では、境界①～⑥からの反射光の山の位置、谷の位置がすべて一致しています。つまり、すべて同位相の反射光になっているのです。そのためその波長の反射光は強め合って明るくなります。それが目に入ってくると、人はその波長の光の色だと認識します。最初の層で反射しきれず透過してしまった光は次の層で反射させ、それでも透過してしまった光はまた次の層で反射させ、さらにこれを何10層も繰り返すことによって、その特定の波長の光の反射率を100%近くにまで高めることができます。

ダイクロイックは、元々は、アメリカ航空宇宙局(NASA)が開発したものです。宇宙船の機器を宇宙線から保護し、人間の目を太陽光から保護するためでしたが、その後、蛍光灯顕微鏡、LCDプロジェクター、3D映画など、狭い波長帯域の光を選択的に必要とする機器に利用されています。またステンドグラスの窓や宝石、ガラスアートなどにも用いられています。ダイクロイックを反射、透過する光の波長は光の入射角によって変化するため、見る角度によって玉虫のように色が変わって見えます。

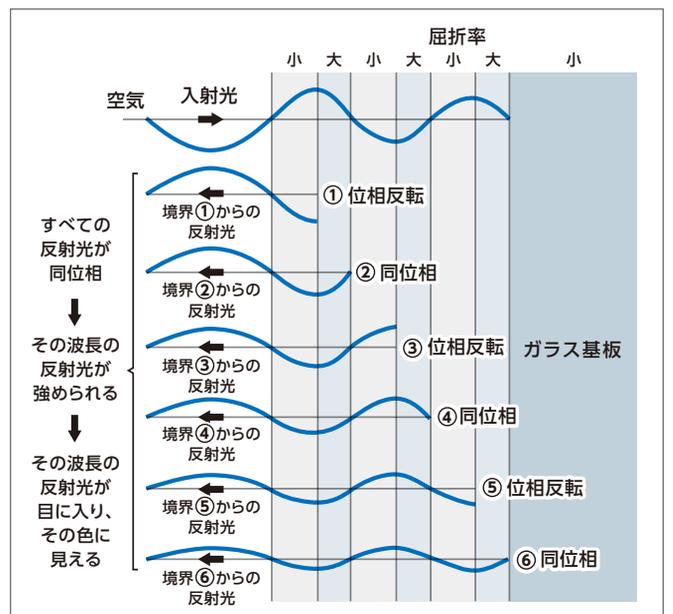


図14 ダイクロイックミラーの仕組み



カラボギャラリー第6回企画展

When Lights Overlap,  
**光が重なるとき、**  
New Colors Are Created  
**新しい色が生まれる**



タマムシ・モルフォ蝶・シャボン玉の色の秘密

会期：2020年9月25日(金)～2021年4月23日(金)  
会場：東京工芸大学厚木キャンパス12号館2階カラボギャラリー  
公式サイト：<http://www.color.t-kougei.ac.jp/gallery/>  
主催：東京工芸大学  
運営：色の国際科学芸術研究センター

企画展出品作家

クリストファー・マーレー  
クリス・ウッド  
菱田 真史  
比江島 俊浩

同時開催：カラー・リサーチ・ラボ

写真プリントの高質感再現システムの研究(代表：東 吉彦)  
ライティングドーム内のCMYキューブ(代表：内田 孝幸)  
ブルーノ・タウト設計の大ジードルンク・ブリッツの色彩復元模型(海老澤 模奈人)  
顔の表情認識を用いた人の感情における色の表現(代表：姜 有宣)  
高強度カラーコンクリート(陣内 浩)  
LN結晶を用いた多色ホログラム動画表示素子の開発(代表：陳 軍)  
電子ペーパーで写真をつくる(代表：常安 翔太)

展覧会ディレクション：野口靖・義江龍一郎  
展覧会アートディレクション・デザイン：川村貞知・長岡真子  
展覧会内装：HIGURE 17-15 cas株式会社

パンフレット監修：野口靖・義江龍一郎  
パンフレットデザイン：川村貞知・長岡真子

発行者：東京工芸大学(代表)  
〒243-0297 神奈川県厚木市飯山1583 TEL：046-242-4111  
発行日：2021年1月

