

# 伝熱学で青い蝶

機械システム工学科

山田 純

## はじめに

20年あまり前になるが、若い人や大学生のなかで羽毛の中綿をもつダウンジャケットが流行したことがある。軽くて暖かいという機能性が、高かったと言われるファッション性よりも流行を後押ししたようである。当時大学1年であった私が、その暖かさの理由を考えていたかどうかは覚えてないが、数年後、大学院でその詳細な理由を研究することになる。

私が現在研究を行っている分野は、熱工学という機械工学の一分野である。基礎となる学問は、熱力学と伝熱学である。私は、大学院以来、後者の伝熱学をベースに研究を行っている……と思っていた。そんな私が、先週、契約室（大学の物品購入部署）に購入を依頼したのは、モルフォ蝶と呼ばれる青い蝶（図1）の標本である。本稿では、研究紹介を通じて、伝熱学の研究を行っているはずの私が、何故、青い蝶を買おうとしているのか、についてお話をさせていただきたいと思う。まず始めに私の大学院時代の研究についてお話しする。このころの研究経験が、現在のすべての研究の基礎になっている。

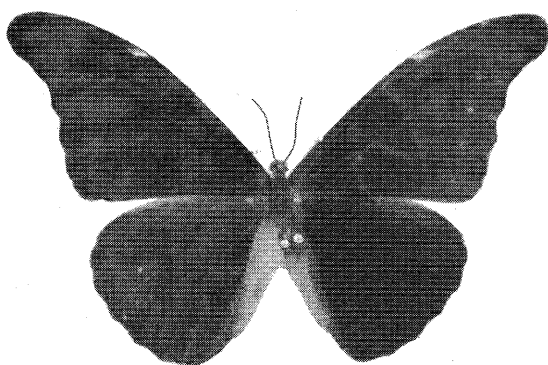


図1 Morpho rhetenor

## 繊維集合体内のふく射伝播<sup>(1)-(3)</sup>

先に述べたジャケットや布団の中綿、あるいは、住居壁のすき間などに見られるガラス繊維は、断熱を目的として入れられている。これらの繊維がどのように機能して伝熱を抑制（断熱）するかを簡単に述べておく。図2は、高温と低温の壁面間で起こる伝熱の様子を示している。熱は、空気、あるいは、壁面間に充填された物質（この例では繊維）を介して高温から低温へ伝わる。これを熱伝導と呼ぶ。また、高温壁側で暖められた空気が、低温壁側に流動することで伝わる熱もある。これを対流熱伝達と呼ぶ。そして、両壁面から放射されたふく射（可視光や赤外線などを含む電磁波のこと）による伝熱がある。高温壁から放射されるふく射のエネルギーが、低温壁のそれよりも大きく、この差で結果的に熱が伝わる。

先に述べた繊維は、この中の対流熱伝達を抑えるために充填されている。繊維が空気の流動を抑制するわけである。壁面の温度、その他の条件にも依るが、繊維を入れない場合に比較して、60~80%の伝熱を抑えることができる。したがって、残りは、動

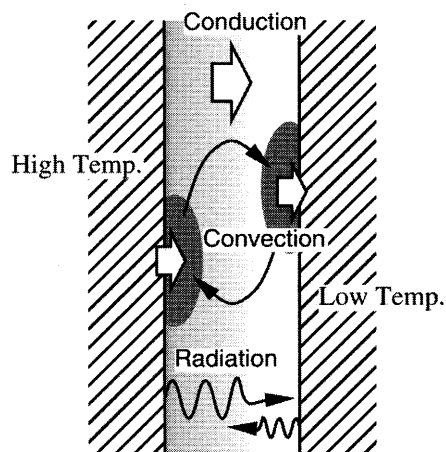


図2 Heat transfer between two walls

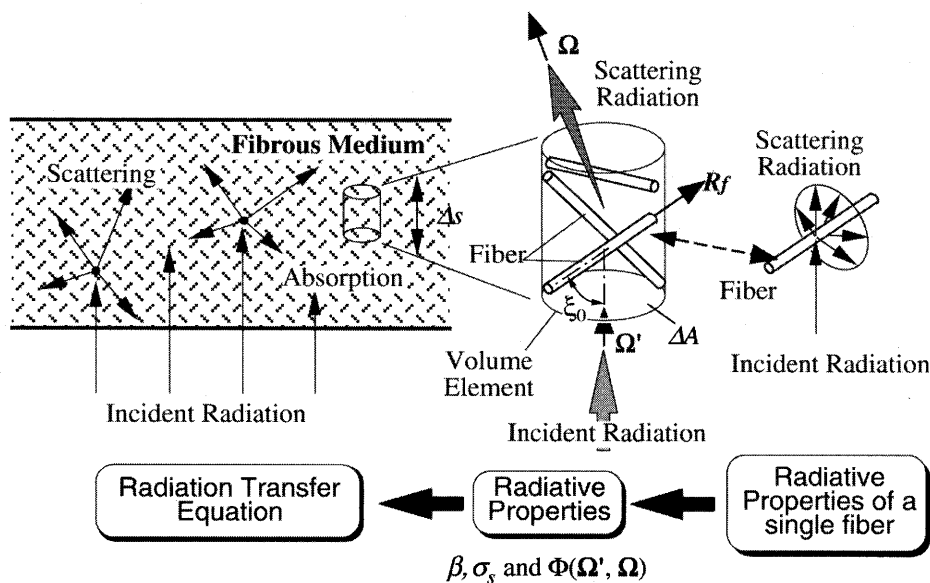


図3 Pseudo-continuous models for radiative transfer of fibrous media

かない空気や繊維を介する熱伝導と、ふく射による伝熱で、これらは同じような割合である。私の研究は、後者のふく射伝熱の詳細を調べることにあった。割と地味な研究であるが、もし、総ての熱機器の断熱性能を数%向上できれば、世界のエネルギー消費の数%を低減できることになる（飛躍しすぎか）。そんなふうに考えると重要な研究とは言える。

図3はこの研究成果の一部で、繊維集合体のふく射伝熱に及ぼす諸因子の影響を明らかにするためのモデルである。いくつかの面倒な方程式を解く必要はあるが、これにより、例えばふく射伝熱に与える繊維の径や素材（複素屈折率）、繊維配向などの影響を知ることができる。本稿の最初に紹介したダウンジャケットの暖かさの秘密は、主に羽毛繊維の細さにあることが明らかになっている。

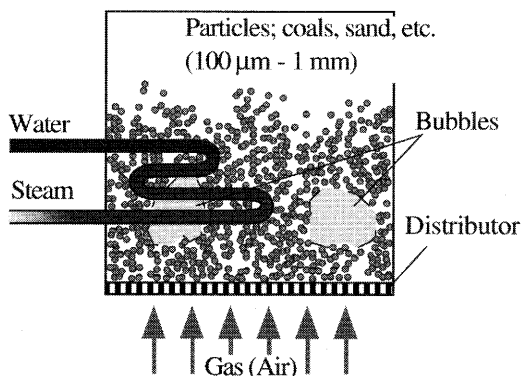


図4 Fluidized bed heat exchanger

### 流動層熱交換器<sup>(4)-(7)</sup>

図4は、ごみ焼却炉などに用いられる流動層の概念図を示している。砂などの微粒子をごみと同時に浮遊燃焼させることで、燃焼熱の効率的回収をはかった焼却炉である。効率的な熱回収が可能となるのは、添加微粒子が高温の燃焼ガスで暖められた後、熱回収用の冷却管（伝熱管）に衝突して、粒子自身の熱を伝えるからである。また、通常、気体はほとんどふく射を放射しないが、燃焼ガスで加熱された粒子は強いふく射を放射するので、粒子—伝熱面

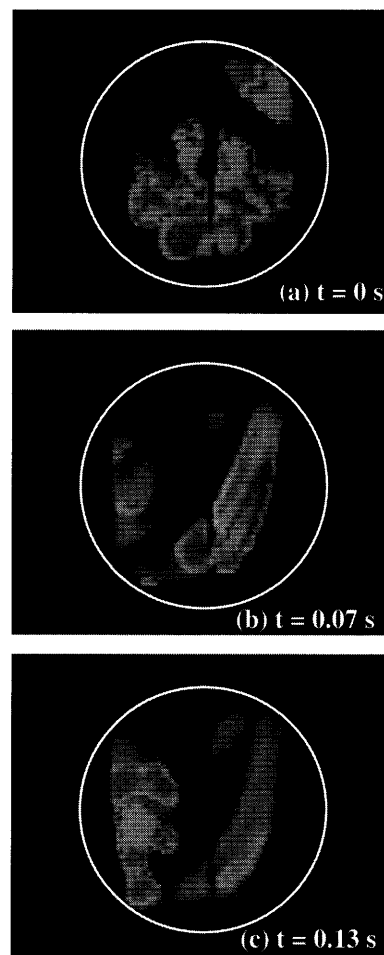


図5 Distribution of radiation energy emitted by the fluidizing particles

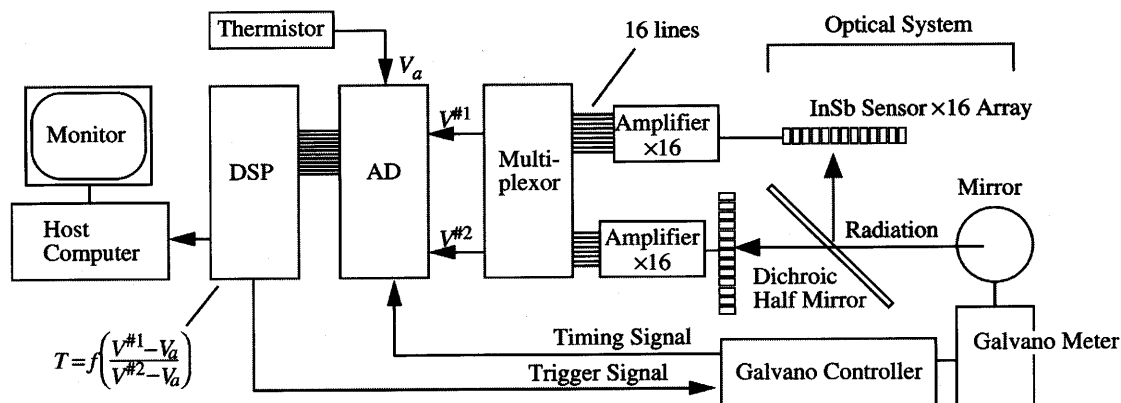


図6 Thermal imaging system applying two-color thermometry

間でのふく射熱交換が促進されるからである。これまでの研究では、焼却炉の設計指針や効率的なオペレーションのための指針（例えば、熱回収に有効な粒子仕様、流動方法）を与えるモデルの開発を目標に、詳細な伝熱解析を行ってきた。その一つを紹介しておく。

図5は、燃焼ガス（実験では電氣的に加熱されたガス）により加熱された粒子が伝熱面（熱回収用冷却管表面に相当）に向けて放射するふく射エネルギーを示している。暗い部分は、伝熱面に接触して冷却された粒子が放射する弱いふく射、明るい部分が、高温の粒子から放射される強いふく射を表している。この画像は、流動層外側より赤外線カメラで撮影されたもので、先のモデル開発に活かされている。

さて、これまで述べた二つの研究は、おもに細い繊維や微粒子のふく射性質が伝熱に与える影響を調べたもので、熱工学分野の定番的研究と言える。この細い繊維や微粒子のふく射性質に関する研究経験が、今現在の研究に活かされている。それについては後に述べることとし、現在も行っているもう一つの定番的（と思われる）研究を紹介しておく。

## 2色放射温度計の原理を利用した赤外線温度画像化装置<sup>(8)</sup>

近年、温度を可視化するためのカメラが広く利用されるようになってきている。物体から放射される赤外線の強度は、物体温度を反映している。このカメラはその赤外線の強度を計測し、それを温度に換算して表示する装置である。ただし、物体から放射される赤外線の強度は、物体温度だけでなく、物体の放射率（物体固有の、赤外線の放射し易さを与える物

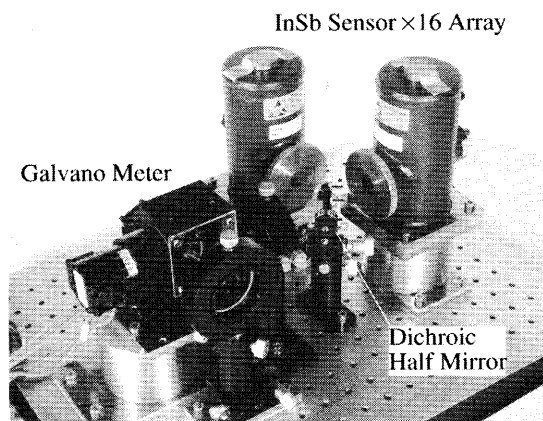


図7 Configuration of the thermal imaging system

性値)に依存する。したがって、この放射率データがないと放射強度から温度を換算できない。赤外線カメラメーカーは、さまざまな物質についておおよその放射率データを提供しているが、十分とは言えない。なぜなら、放射率は環境に影響を受けやすく、温度を観察したい物体そのものの放射率が得られることはほとんどないからである。すなわち、赤外線カメラは実際のところ正しい温度を表示している、とは言えない。

ところで、鉄板や石などを常温から千度近くまで加熱していくと、初めは赤く、その後、温度の上昇とともに白っぽく変化していくのを見たことはないだろうか？これは、ふく射強度の波長（スペクトル）分布が、温度の上昇とともに短波長側に移動していく（Wien 変移則）ためである。詳しいことは、省略するが、簡単に言えば、「色を見ると温度がわかる」ことになる。

物体が低温（常温  $+ \alpha$ ）であれば、目に見えるふく射（可視光）を放射しないので、その色を知るすべはない。しかし、低温の物体でも、赤外線領域では検知可能なふく射を放射している。したがって、

赤外線領域で色（ふく射強度の波長分布）を見てやれば、温度を知ることができる（2色放射温度計の原理）。この方法では、ある合理的な仮定のもと、放射率のデータなしに温度を知ることができる。この研究では、この原理を利用した温度画像化装置の開発を行っている。そのシステムの概略図と、現在製作中のシステムの外観を、それぞれ、図6と図7に示しておく。このシステムは2組の赤外線アレイセンサー（InSb）を備えており、物体から放射されるふく射を、手前の Dichroic Half Mirror で2つの波長領域に分解した後計測する。物体温度はその2組の計測データをもとに、少々複雑な演算処理を通じて算出され、最終的にモニター上に表示される、予定である。現在、Digital Signal Processor で統合制御されるシステムの開発を行っている。

### エバネッセント波を利用した壁面近接場における流体計測<sup>(9)</sup>

これまで述べてきたようなふく射の研究を行っている、ふく射（光）計測に関する経験を積む。この研究はそんな経験をもとに始まったもので、壁面極近傍（壁面近接場）の流体速度の計測を目指したものである。

壁面極近傍の流れは、流体が物体におよぼす抵抗や、流体—壁面間の熱、物質移動に強い影響を及ぼすことが知られている。その構造の解明は、流体機器の高効率化にとどまらず、伝熱促進や反応促進、蒸発や凝縮の促進・制御に極めて重要な課題の一つである。そのため、多くの研究者により壁面に近い領域での流体計測が試みられてきた。しかし、これまでのところ壁面より10 $\mu\text{m}$ 以下の計測は実現されていない。

この研究では、壁面上1 $\mu\text{m}$ 以下の領域における流速計測をめざした、エバネッセント波ドップラー流速計を提案し、その実現に向けた計測システムの開発を行っている。まず、このエバネッセント波について簡単に説明しておく。図8に示す黒い（あるいは白い）線で示す波のように、誘電体（例えば、ガラス）内部を伝播する電磁波がその表面（あるいは低屈折率媒体との界面。ここでは壁面と呼ぶことにする）で全反射する際に、壁面極近傍に生じる電磁波のことである。この波は壁面に沿って伝播し、その波面は壁面に垂直である。また、波の強さは壁面に垂直な方向に指数関数的に減衰し、通常、壁面

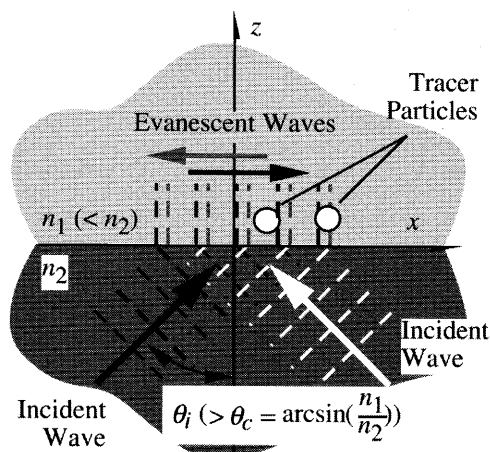


図8 Evanescent waves and their interference

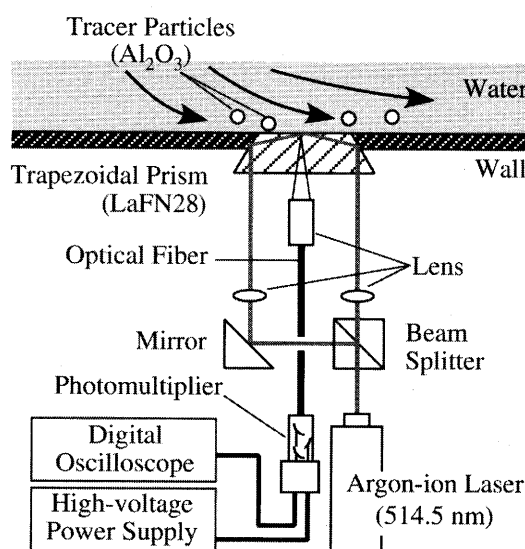


図9 Schematic diagram of Experimental setup

上波長程度の厚みまでしか存在しない。本研究で提案するエバネッセント波ドップラー流速計は、レーザードップラー流速計（LDV）の検査用レーザー光の代わりに、エバネッセント波を利用するものである。以下にその原理を示す。

図8に示すように、誘電体表面上に互いに反対方向に進行するエバネッセント波を生じさせると、表面の極薄い領域（壁面近接場）にエバネッセント波同士の干渉縞（定在波）を形成させることができる。もし、この定在波中を、流体とともに流れるトレーサ粒子が通過すれば、粒子は干渉縞の明るい部分（定在波中の電界の強い部分）で強い散乱光を生じるので、明滅するように見える。この明滅の周波数は粒子の速度と縞間隔（定在波の波長）によって決まる。すなわち、明滅の周波数を計測すれば、通常のLDVと同様、その領域、すなわち壁面近接場で

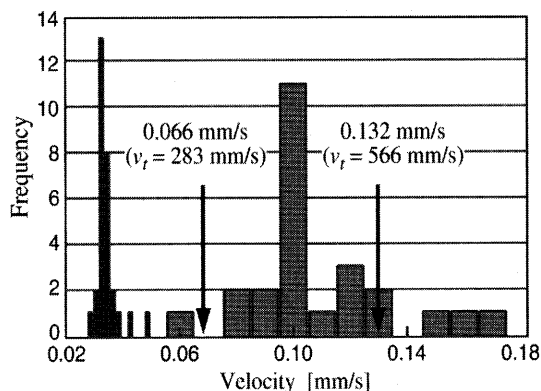


図10 Frequency distributions for measured velocities

の流速が計測できることになる。

この原理に基づき構築した計測システムを図9に示す。光源にはArイオンレーザーを、また、エバネッセント波を発生させる誘電体には台形プリズムを用いている。レーザービームはビームスプリッターで2つのビームに分けられた後、プリズム背面よりその内部に導かれる。図9に示すように、2本のレーザービームはプリズム側面で反射した後、台形短辺上で交叉し、エバネッセント波同士の干渉縞を生じさせる。トレーサ粒子がこの定在波を通過する際に発生する散乱光は、台形プリズムを通して後方の光電子増倍管で検出され、周波数フィルタを通してノイズを除去した後、デジタルオシロスコープにより記録される。

この計測法の妥当性を検証するために、既知の流れ（狭いすき間に生じる、線形な速度分布をもつクウェット流れ）について計測を行った。異なる2つの流速分布について得られた結果を図10に示す。図10は頻度分布を示しており、横軸に計測速度、縦軸にその頻度が示されている。頻度の幅が異なるのは、流速の分解能が異なるためで、幅の狭い方の分解能は0.002m/s、広い方のそれは0.01m/sである。なお、この既知の流れでは、理論的に計測点での流速を予測することができる。2つ異なる流れについて予測した流速を同図に↓で示す。図に見られるように、明らかに二つのピークが存在し、計測システムが機能していることは確認できる。しかし、本流速計による計測値は、それぞれの予測値とは大きくかけ離れている。この違いが計測システムの問題であるのか、それとも予測に問題があるのか現時点では明らかとなっていない。これを明らかにすることが、当面の課題である。

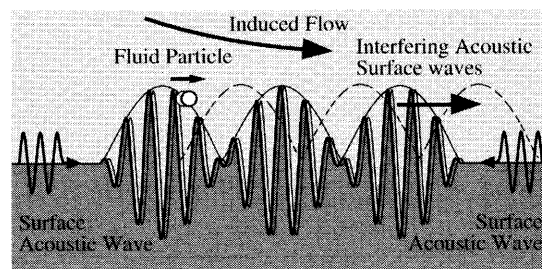


図11 Interaction between interfering surface acoustic waves and fluid flow

### 弾性表面波による流体制御

先の研究では、誘電体表面を伝播するエバネッセント波を利用した。伝播の仕方は異なるが超音波のような弾性波も固体表面を伝播することが知られている。これを弾性表面波（Surface Acoustic Wave, SAW）と呼ぶ。この研究は、先のエバネッセント波を弾性表面波に置き換えたようなものであるが、その目的は違っている。何かを計測するのではなく、弾性表面波の力学的エネルギーで、固体表面上の流体運動の制御を試みている。

弾性表面波の力学的エネルギーを利用して、その表面上の物体の運動を制御しようとした試みは既に存在する。代表的なものに超音波モーターがあり、固体片を移動するために広く利用されている。ただし、この超音波モーターでは、原理的に流体を動かすことはできない。液体運動の制御に関しては、未だ実用化はされていないが、Sanoらの研究がある。弾性表面波が伝播する固体表面に微小液滴を置き、その液滴に支えられた粒子の移動を試みている<sup>(10)</sup>。また、Shiokawaらは液滴自身を移動させる研究も行っている<sup>(11)</sup>が、現状では、十分に運動を制御するには至っていない。

固体表面を弾性表面波が伝播するとき、表面波の振幅に対応する微小な凹凸が固体表面に生じ、それが波とともに移動する。その微小な凹凸が表面に接する液体に何らかの作用を及ぼすことが考えられる。しかし、一般に弾性表面波の伝播速度は速いため、固体表面の変化に液体が追従できない、すなわち、弾性表面波と液体の間に何の相互作用も現れないことも予測される。そこでこの研究では、図11に示すように僅かに振動数の異なる表面弾性波同士を干渉させ、その際生じる「うなり中の遅い波」を利用して、その表面上の液体の流動を制御することを試みている。

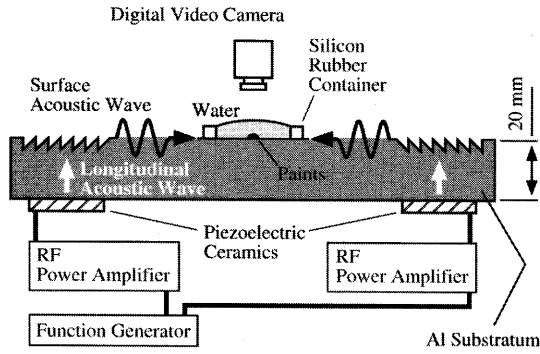


図12 Schematic diagram of experimental setup to control liquid film flow by interference of surface acoustic waves

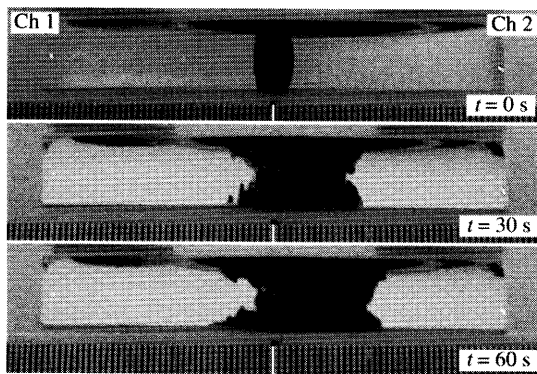


図13 A typical diffusion of paint pigment ( $\delta f_{ch1-ch2}=1.0$  Hz)

図12は、液膜の流動制御を試みた実験装置である。弾性表面波の発生には、縦波を弾性表面波にモード変換させる方法<sup>(12)</sup>を用いた。アルミニウム基板の表面にノコギリ刃状の溝を加工し、そこに超音波の縦波を入射させて、弾性表面波に変換する方法である。本実験では、図に示すように、2カ所にノコギリ刃状の溝を対称に加工することで、弾性表面波を対向するように伝播させ、うなりを生じさせた。ノコギリ溝部分に入射させる縦波の超音波は、基板底面に接着させた圧電セラミックに、波形電圧発生装置の出力信号を広帯域高周波電力増幅器で増幅し、印可することで発生させた。使用する周波数は、圧電セラミックの共振周波数に近い1.098MHzを用いた。

弾性表面波が干渉する部分に40mm×6mmの水槽（側壁をシリコンラバーで製作、底面はなく、水は直接アルミニウム基板表面に接している）を備え、その中の水の流動を観察した。液膜の流動状態を定量評価するため、あらかじめ絵の具を水槽内の基板表面に付着させ、溶け出す絵の具の移動をビデオカメラで撮影した。

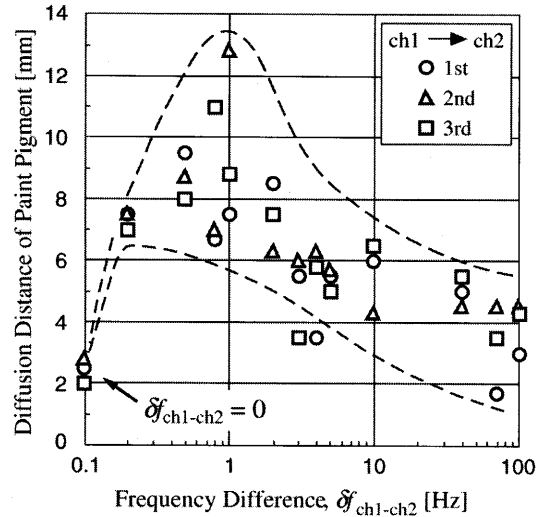


図14 Effect of frequency difference on induced fluid flow (t=60s)

ビデオカメラで可視化された液膜の様子を図13に示す。上から、うなり発生開始時、30秒後、60秒後の映像である。うなりは図の左から右に進行しているが、この図から、うなりの進行方向に絵の具が拡がっていることが分かる。周波数差に対して絵の具の拡がりを比較したものを図14に示す。60秒後の絵の具の拡がりを周波数差に対してプロットしたものである。周波数差が無いとき、絵の具はほとんど拡がっていない。周波数差が大きくなるにつれて絵の具の拡がりは大きくなり、約1.0Hzの時に最大となった後、徐々に小さくなっているのが分かる。周波数差が小さい（1.0Hz以下）ときは、周波数差の増加にともないうなりの伝播速度が増加し、そのうなりに駆動される流動も大きくなると考えられる。しかし、周波数差がさらに大きくなると、液体の流動がうなりの伝播速度に追従できなくなり、流動が起りにくくなったものと考えられる。なお、周波数差が非常に大きいところで絵の具の拡がりが小さいが、これは弾性表面波の干渉を利用しなければ（例えば、一つの弾性表面波が伝播しているだけでは）液膜の流動を引き起こせないことを意味している。現在、このような流動が何故起こるのか、また、緻密な流動制御には何が必要か、について研究を進めている。

### ナノスケールの表面構造制御による光機能性表面の創成（青い蝶に倣って）<sup>(13)</sup>

繊維集合体内のふく射伝播の研究から始めて、そ

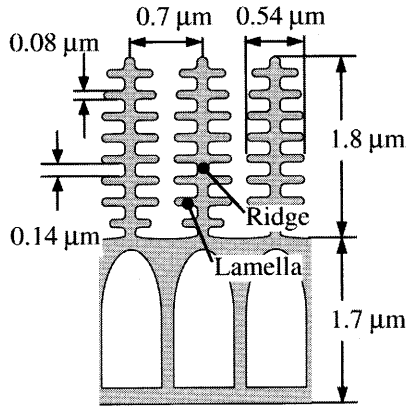


図15 Schematic diagram of scale cross section of Morpho butterfly

のふく射の計測経験を活かして進められてきた研究について述べてきた。一方、最初の研究内容に密接に関連して展開してきた研究がある。

繊維集合体や粒子分散媒体（流動層）におけるふく射伝播の把握には、個々の繊維、粒子のふく射性質（入射ふく射をどう散乱するか、吸収するか、など）の詳細を知る必要がある。これらは、電磁場を支配する Maxwell 方程式を解くことで知ることができる。円形断面の繊維や球形粒子については、解析解が得られており、それを利用して散乱の詳細を知ることができる。しかし、そのような簡単な形状でない繊維や粒子については、自身で Maxwell 方程式を解く必要がある。これまでに自ら製作した数値解析コードを利用して、非円形断面の繊維や非球形粒子のふく射性質を明らかにしてきた<sup>(14)</sup>。ここで紹介する研究は、この数値解析を応用したもので、表面に微細な構造を設けることでこれまでにないふく射（光）機能をもつ表面を創成することを目的としている。

中南米に、金属的な光沢の青い翅をもつ、モルフォ属と分類される蝶（図1）が生息している。その青は極めて鮮やかで、多くの研究者の関心をひき、20世紀の始め頃からその発色原理の研究がなされてきた。その結果、その色が鱗粉表面の微細な構造に依ると考えられるようになってきている<sup>(15)</sup>。

Tabata ら<sup>(16)</sup>によると、モルフォ蝶の鱗粉は図15に示すような複雑な断面構造をもつ。紙面の奥行き方向には変化しない2次元の構造である。この図に示されるように、鱗粉は大きな垂直な突起列（リッジ）と、そこから水平方向に張り出した、小さな突起列（ラメラ）からなっている。この小さな突起の

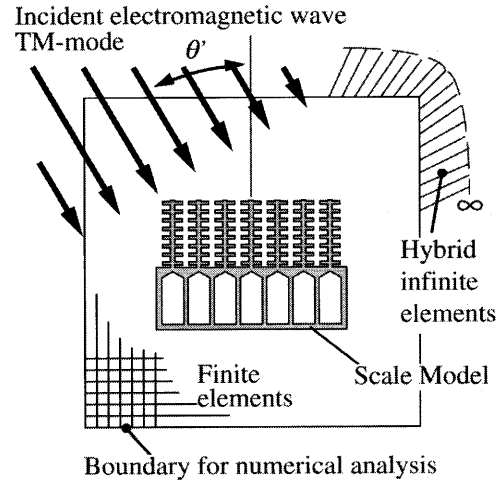
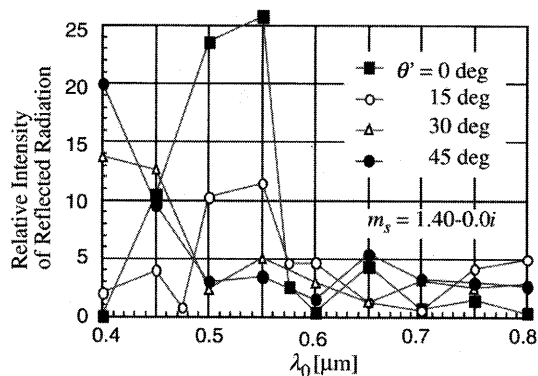


図16 Analytical model for scale of Morpho butterfly

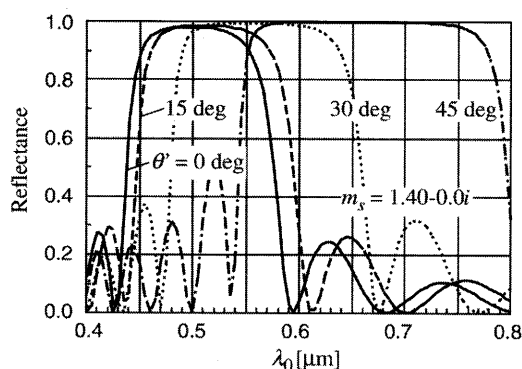
幅と突起間の空隙は、それぞれ、 $0.08\mu\text{m}$ 、 $0.14\mu\text{m}$ と報告されている。当初、この水平に張り出した突起群が多層干渉膜として働くために鱗粉が青に発色すると考えられていた。しかし、近年、その多層干渉膜の効果だけでは、その青の説明ができないと言われるようになってきている。この研究では、この青の発現機構の詳細を解明することを当初の目標としている。

発色機構の解明には、可視域の入射光がこの複雑な構造でどのように散乱（反射）するかを調べればよい。ただし、構造の寸法がナノオーダー（波長オーダー）であること、また、干渉を取り扱う必要から、幾何光学的手法は利用できない。ここでは、細い繊維や微粒子を扱ったときと同様、Maxwell 方程式を直接解く、波動光学的手法でその散乱の詳細を調べている。図16は鱗粉の解析モデルで、この系を支配する Maxwell 方程式を有限要素法により数値的に解いている。解析の詳細には触れないが、本研究により得られた解析結果の一部を示しておく。

図17は、モルフォ蝶鱗粉モデルと単純な1次元多層（15層）薄膜の反射性質の比較を示している。積層される薄膜の厚さは、鱗粉モデルのラメラとその空隙寸法に合わせてある。パラメータは入射光の方向で、横軸は波長、縦軸は（鏡面反射方向の）反射の強さである。図から分かるように、真上（ $\theta' = 0$ ）からの入射光に対しては、鱗粉モデルも1次元多層薄膜も同様に $0.45$ から $0.55\mu\text{m}$ の間で大きな反射を見せる。この辺りの可視光は、青から緑の色をもつ。したがって、両者とも垂直な方向から観察すると青緑に色づいて見えるであろう。入射光の入射角が傾いたとき、両者の結果は大きく異なる。1次元



(a) Reflection by the scale model



(b) Reflection by the multi-layered-thin-film

図17 Reflection Characteristics of the scale and multi-layered-thin-film

多層薄膜では、斜め入射に対して強め合う干渉を起こす波長が長くなるため、反射光のピークが長波長側にシフトしている。このことは「1次元多層薄膜は緑から黄色、橙色に変化していく」ことを意味している。一方、鱗粉モデルでは、斜め入射に対して、反射の強くなる波長域が短波長側にシフトしている、すなわち、青い波長のふく射を強く反射するようになる。このことは、鱗粉モデルは見る角度を変えても青く、あるいは、青から紫に見えることを意味している。現在のところ、実際のモルフォ蝶鱗粉の反射性質を実測し、解析結果と比較したわけではないので正確なことは言えないが、手元にあるモルフォ蝶の標本を見るかぎり、同様な傾向をもっており、この数値解析結果は鱗粉の反射性質を良く表しているように見える。

モルフォ蝶の青の発現機構の解明には、今少し時間が必要であるが、少なくとも解析モデルと同様な断面の構造を作ることができれば、1次元多層干渉膜とは異なり、垂直上方からの入射する光だけでなく、斜めから入射する光に対しても青く見える表面を創れるはずである。また、色の発現という目的だけに捕らわれず、表面構造を工夫することで、さ

まざまなふく射機能（例えば特定の波長の赤外線だけを放射するなど）をもつ表面の創成に役立てることが出来るかもしれない。本研究は、そのような可能性を垣間見たといったところか。

## まとめ

以上がこれまでに私が行ってきた研究の概要である。伝熱学の研究で蝶を扱っているのも、細い繊維の散乱を扱っていたためである。また、それぞれの研究に関連が無いようにも見えるが、赤外線カメラや色の研究も含めて、総ての研究で波（電磁波、超音波）を扱っていることがわかっていただけたと思う。今後も電磁波や超音波にかぎらず「波」をキーワードとして研究を広げていきたい。

## 参考文献

- (1) 山田純, 黒崎晏夫, 散乱光の強度分布測定による繊維素材の複素屈折率の推定, 日本機械学会論文集 (B編) Vol. 57, No. 541, pp. 3213-3219, 1991
- (2) 山田純, 黒崎晏夫, 配向を考慮した繊維集合体のふく射伝播モデルとその評価, 日本機械学会論文集 (B編) Vol. 58, No. 555, pp. 3393-3400, 1992
- (3) Jun YAMADA and Yasuo KUROSAKI, Radiative Characteristics of Fibers with a Large Size Parameter, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, No. 6, pp. 981-991, 2000
- (4) Jun YAMADA, Yasuo KUROSAKI, Isao SATOH and Kazuhiko SHIMADA, Radiation Heat Exchange between a Fluidized Bed and Heated Surface Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 11, No. 2, pp. 135-142, 1995
- (5) 山田純, 黒崎晏夫, 森川知之, 流動層の伝熱面近傍における流動粒子群が放射するふく射, 日本機械学会論文集 (B編) Vol. 62, No. 593, pp. 234-240, 1996
- (6) 山田純, 長原則尚, 佐藤勲, 黒崎晏夫, 固気流動層における粒子-伝熱面接触時の非定常熱伝導 (流動粒子温度の可視化), 日本機械学会論文集 (B編) Vol. 66, No. 648, pp. 2141-2149, 2000
- (7) Jun YAMADA, Yasuo KUROSAKI, Takanori NAGAI, Radiation Heat Transfer Between Fluidizing Particles and Heat Transfer Surface in a Fluidized Bed, Transaction of the



- ASME, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 123, No. 3, pp. 458–465, 2001
- (8) 山田純, 村瀬徹, 黒崎晏夫, 2色放射温度計の原理を利用した赤外線温度画像化システム, 日本機械学会論文集 (B編) Vol. 67, No. 656, pp. 1027–1034, 2001
- (9) Jun YAMADA, Evanescent Wave Doppler Velocimetry for a Wall's near Field, *Applied Physics Letters*, Vol. 75, No. 12, pp. 1805–1806, 1999
- (10) A. Sano, Y. Matsui and S. Shiokawa, New Manipulator Based on Surface Acoustic Wave Streaming, *Japan Journal of Applied Physics*, Vol. 37, Pt. 1, No. 5B, 1998
- (11) S. Shiokawa, Y. Matsui and T. Ueda, Liquid Streaming and Droplet Formation Caused by Leaky Rayleigh Waves, *Ultrasonic Symposium*, pp. 643–646, 1989
- (12) R. F. Humphryes and E. A. Ash, Acoustic bulk surface wave transducer, *Electronics Letters*, Vol. 5, pp. 175–176, May 1969
- (13) 山田純, 飯田洋己, モルフォ蝶鱗粉のふく射性質に関する数値解析, *Thermal Science and Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 39–45, 2002
- (14) Jun YAMADA, Radiative Properties of Fibers with Non-Circular Cross Sectional Shapes, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol. 73, pp. 261–272, 2002
- (15) 木下修一, 吉岡伸也, モルフォチョウの翅の美しさの秘密, *現代化学*, No. 3778, pp. 25–30, Aug. 2002
- (16) H. Tabata, et al., Microstructures and Optical Properties of Scales of Butterfly Wings, *Optical Review*, Vol. 3, No. 2, pp. 139–145, 1996