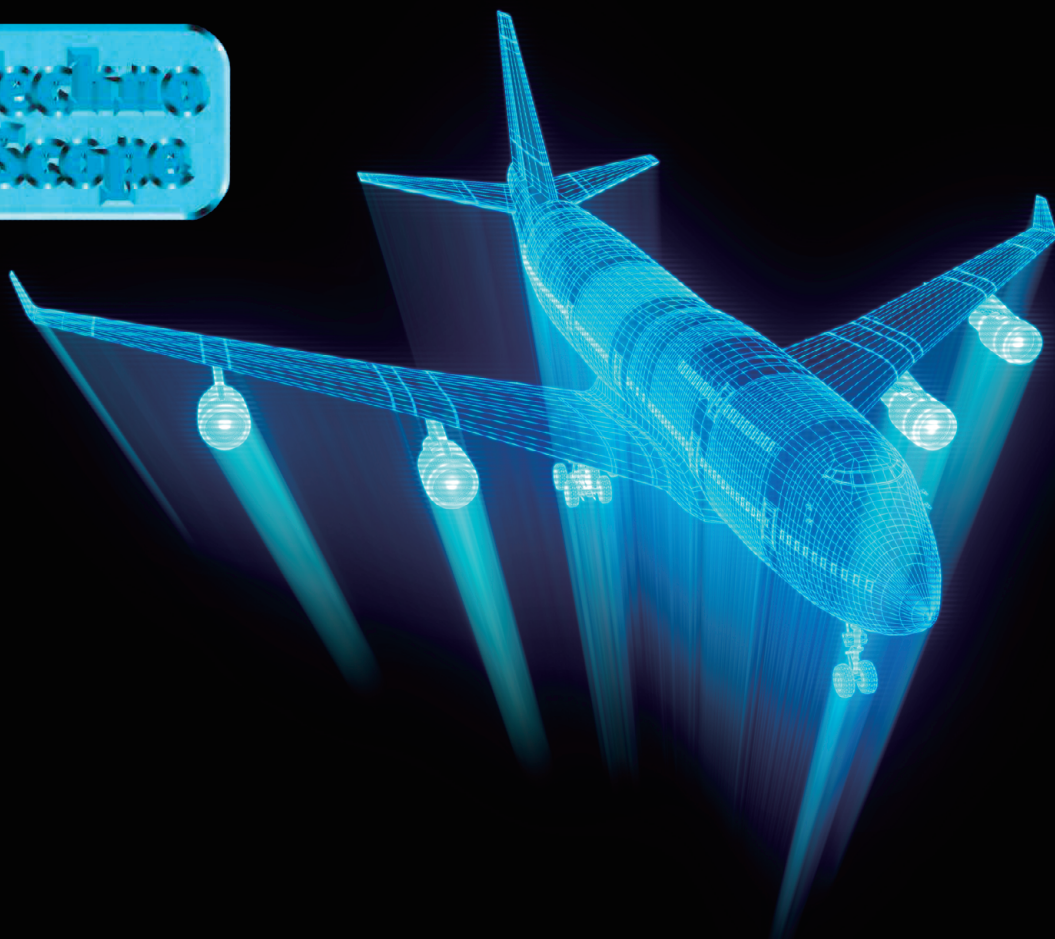




極超音速を計測する

学際研究が推し進める、空気力学の最先端

空気力学の最先端のひとつである「極超音速の流れ」という分野を調べてみると、その発展には空気力学とは全く違う分野の技術が大きく貢献していることがわかる。

異分野の技術がどうかかわってくるのか。今回は極超音速環境での圧力計測最新技術を紹介する。

空気力学の最先端とは？

流体現象には未だにはっきり分らないことが多い、と最先端の研究者は言う。ただし、空気力学と聞いて身近に連想できる乗用車やF1レーサーなどの話ではない。

現在、流体の世界で最先端というと、乱流の研究や、極限状態での流れ、ミクロン単位の微小な流れの研究などが挙げられる。乱流というのは、瞬間瞬間で流れの相が大きく変わる極めて複雑な流れのことで、この例は日常生活の中にもたくさん見つかる。例えば、水道の蛇口をひねった時、最初は一本にまとまったきれいな流れだが、ある水量を超えると突然、飛沫を飛ばす乱雑な流れに代る。この状態が乱流だ。極限状態の流れというと、極端な高速、高温、低温の状態での流れや、真空中に近い空間での流れがある。ミクロン単位の流れの研究は、マイクロマシンの研究が進むとともにその必要性がクローズアップされて来た。微小なマシンに対して、それを取り囲む微小な周囲の流体の流れは大きな影響を与えることになるからである。

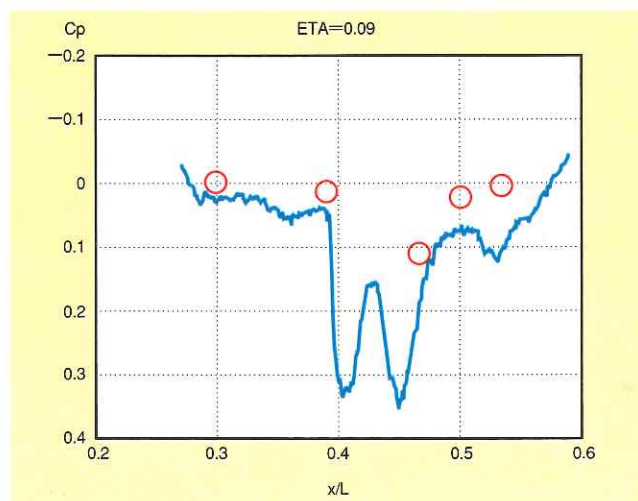
さて、こういった流体の最先端の中でも、今回は、スペースシャトルやロケットを飛ばすのに欠かせない、「極」超音速流れの分野を取り上げる。マッハ数十という、想像を絶する極限状態の研究分野では、今、一体何が起きているのか。

どうやって計測するか、それが問題

一般によく言われている超音速というのは、マッハ1～4程度で、超音速旅客機などのスピードをいう。これを超えてマッハ5以上からマッハ数十になると、「極」超音速と呼ばれる。スペースシャトルやロケットなどが飛ぶ速度がこれにあたる。この速度域での研究には、コンピュータシミュレーションと並んで極超音速風洞が実用化されているが、気体の流れが機体（模型）に加える力を計測する方法については、極超音速風洞は一般の風洞に比べて格段に難しい。

普通、極超音速風洞実験では、正確な縮小模型の表面に直径約1mm程度の孔をいくつもあけ、そこから電気的な圧力センサーによって、模型の表面にかかる風圧を測定する。一点一点にかかる圧力をそれぞれ読み取るわけだ。このやり方には様々な難点がある。

その一番目は、もうお気づきと思うが、圧力を点でしか捕らえられないということだ。どんなにセンサーを密集させても限界がある。そして、模型上で例え数mm間隔にセンサーを配置しても、実際の機体に尺度を直して考えると、その間隔は約15～30倍。数センチから数十センチ間隔ということになる。これでは、局所的に大きな変化が起こることがめずらしくない流体の動きの、重要な部分を捕らえそこねる危険性がある。例えば、実際の実験では全長80cmの模型に対して150個以上ものセンサーを使うが、それでも数には限りがある。模型全面に配置する



これまでの圧力センサーでは計測に限界があった。機器の設置に限界があること、また模型に穴を開けるため、若干の誤差も生じる。しかし状態を面で計測できる感圧塗料を用いればグラフ化も容易である。（グラフの赤丸＝圧力センサーによる数値、グラフ青線＝感圧塗料による数値）

というわけにはいかない。そこで、実験者の判断により、重要な部分にセンサーを多く配置することになる。ところがこの際に、センサーのない部位に大きな力がかかっているそれを見落とす可能性がないとは限らない。センサーを使う限り、点でしか圧力を捕らえられず、それ以外の部分は推測に頼るしかないのである。

二番目の難点は、センサーを埋め込むためにあける孔の影響だ。風洞用の模型というのは、極度の精密さで作られている。実際の機体の図面をそのまま縮小したものと比べて、模型の形が誤差100ミクロン以内でないと流れに影響が出てしまう。そんな正確さでつくられている模型に、1mmもの孔をいくつもあけるのだから影響がゼロというわけではない。

そして三番目は、実験に時間と経費がかかりすぎるという難点だ。模型の制作費だけでも、小さい物で100万円、大きなものになると数千万円になる。センサーの孔を一つあける費用もその数が多いだけにばかにならない。経費の問題だけでなく、センサーを埋め込む作業の繁雑さとそれにかかる時間は、一般人の想像を絶する。ひとつひとつの孔とセンサーを繋ぐ管、センサーに電源を供給する線、センサーの信号を模型の外に出す線、基準圧力をとるために外部からセンサーへと引く管…、実験者は、これらひとつひとつを、きっちりと正確に扱わなければならない。

センサーが持つこれらの難点を何とか解決する方法が見つかれば、風洞を使った流体研究がずっと効率的になり、正確さも増し、大きな進歩が期待できるのである。

答えは化学にあり

その答えになる可能性として、少し前から研究者の間で「感圧塗料」なるものが注目されていた。感圧塗料とは、紫外線などを当てると発光し、その明るさが空気圧によって変わる

C O L U M N

自動車における空気力学

飛行機などと比べればはるかに遅い速度域で走行する一般自動車にとって、空気力学は速度を追求するためのものではない。むしろ燃費効率や、走行安定性を増すことが重要な課題である。さらに、最近ではエンジンやタイヤからの騒音が小さくなってきたため、バックミラーやドア付近からの空力騒音が相対的にクローズアップされ、これを低減することも大きな課題になっている。

ボディのデザインを決める際に参考となる空力データは、現在のところ風洞実験とコンピュータシミュレーションの二つを併用して計測／算出されているが、コンピュータの速度向上に伴って次第にコンピュータが主体になってきているようである。コンピュータで、ミラーが風を切る音までシミュレートし、実際にスピーカーから音を出すことができるというのは驚きだ。

F1 レーシングカーの空気力学

現代のレーシングカーでは空気力学が欠かせない技術になっている。高速で安定した走行を可能にするには、空気抵抗を小さくするだけでなく、空気の流れでダウンフォースを発生させ、車体を路面に押しつける必要があるからだ。その結果、高いコーナリング性能と加速性能を得ることができ、複雑なカーブの組み合わせとも言えるサーキットを高速で走り抜けることができる。

走行中のF1レーシングカーが受ける空気抵抗は、仮に300km/hで走行しているとし、車体の前面投影面積1.4m²、Cd値（空気抵抗係数）を0.8とした場合、486kgとなる。（この時に生じるダウンフォースは約1トンほど。）この抵抗をさらに空気力学的に詳しく見ると、形状抵抗、干渉抵抗、内部流抵抗、誘導抵抗などの圧力抵抗と、空気そのものの摩擦抵抗が関わっていることがわかる。

形状抵抗は、車体の周りの空気の流れによって車体表面に生じる圧力分布の進行方向成分を合計したものである。

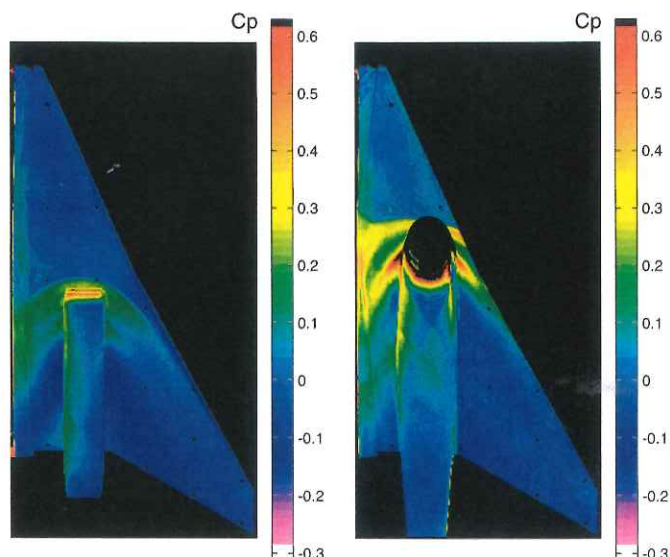
干渉抵抗は2つの物体が接近している場合に起こる抵抗であり、2個の物体が接近しているとそれぞれの物体の抵抗を独立に測定して合計した値より抵抗が大きくなるという性質に基づいている。つまり、干渉抵抗はその増加分と言うことができる。F1レーシングカーのようにタイヤが気流中に露出している場合、フロントタイヤと車体のノーズの間に干渉抵抗が起こりやすい。

内部流抵抗は、冷却や換気のために車体内部に取り入れられた空気による抵抗である。ラジエーターやオイルクーラーには細かいピッチで数多くのフィンが設けられているので、それらの干渉抵抗も含めると内部流抵抗の総和は意外と大きくなる。

誘導抵抗は、ダウンフォースの発生に伴う抵抗だ。車体がダウンフォースを発生すると、車体の後方に渦が自然に発生する。この渦のために生ずる抵抗が誘導抵抗となる。

これらの圧力抵抗に加えて、車高の低いF1レーシングカーでは空気の摩擦抵抗の占める割合が大きくなっている。これは、摩擦抵抗が車体の表面を流れる気流の速度勾配に比例することから理由である。車体の底面と地面の間の気流を考えると、車体の底面に接した空気は車体と同じ速度であり、地面に接した空気は静止している。この時、車高が低いと、地面から車体底面に向かって急激に流速が変化することになり、速度勾配が大きくなるのである。

厳しい競技規制の下、空気力学的に効率のいい車を求めて、F1参加チームはウイングやノーズの形状、サスペンション、エンジン内のエアロダイナミクスなどにそれぞれの工夫を凝らしている。参考文献：レーシングカーのエアロダイナミクス（熊野学、グランプリ出版）



感圧塗料の実用化によって風洞内の状態を視覚的に認識することが可能になった。画像はコンピュータによって処理を済ませたもの。

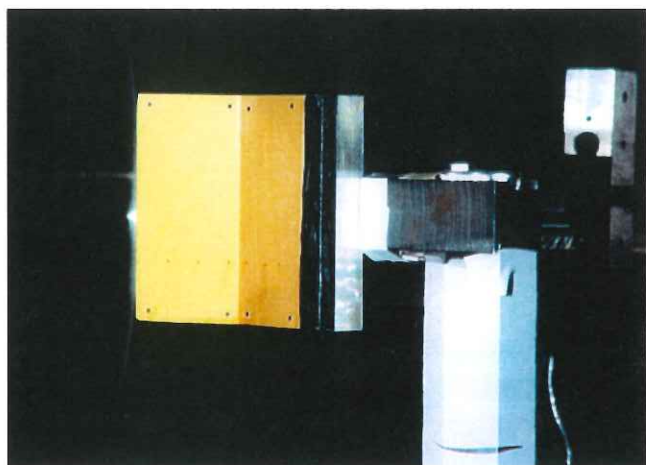
という特別な性質を持った塗料である。これはセンサーの代用になる。つまり、センサーを埋め込む代わりにこの感圧塗料を模型に塗り、風圧をかけた時の光の強弱の変化を計れば、圧力分布が一目でわかるというわけだ。こうなるとセンサー自体が不要になるので内部の配線・配管もいらぬ。孔をあけなくてよい。そしてなにより、圧力分布を面で捕らえることができるので、局所的な変化やピークの値を見落とすことがなくなる。これは画期的なことだ。

ところで、この感圧塗料の正体は何なのか、それを簡単に説明しておこう。正確にいうと感圧塗料は圧力に反応するのではなく、空気中の酸素に反応する。ある波長の光を当てると発光し、周囲に酸素があるとその分光が弱くなるという性質を持った感圧分子（色素）を、高分子ポリマーに混ぜて物体の表面に塗れるようにしたものが、感圧塗料である。感圧分子は光を受けて励起状態となるが、周囲に酸素があると、その酸素にエネルギーを奪われて消光するという仕組みだ。塗料の表面に強い風が当たり、酸素分圧が高くなるとポリマーの中に酸素が多く入り込み、その分、感圧分子の発光は暗くなる。

実際にこの様子を、感圧塗料を利用した風洞実験を行っている研究所で実演していただいた。まず塗料の表面にブラックライトを当てると、赤っぽい金色に光りはじめ、そこに酸素のスプレーを吹きつけると、その部分だけ、まるで液晶画面を指で押した時のように暗くなった。

実際の実験ではこの様子をCCDカメラで撮り、そのデータをコンピュータで画像処理してさらに見やすくするそうである。

実は、感圧分子の存在は古くから化学の分野ではよく知られたことだった。だが、航空分野にそれを利用するという試みは新しく、1990年にワシントン大学が初めて論文を発表して以来、盛んになったものらしい。化学という異分野が空力学



実用化に成功した試験模型。黄色い部分に感圧塗料が用いられている。この部分が変化し、計測が可能になるのである。

の進歩を推し進めているという、いい例ではないだろうか。

極超音速にも感圧塗料を

この感圧塗料、実は、流体研究の最先端である極超音速の世界では使えないものだった。それは次のような理由である。

実験に用いる極超音速風洞内では、空気が相当の高温になる。それは、極超音速風洞では高速の風を作り出すために、圧縮した空気を勢いよく送り出すという方式をとっており、その際の減圧と温度低下によって酸素が液化してしまうのを防ぐために、800℃～900℃まで加熱する必要があるからだ。感圧塗料は、都合の悪いことに温度にも反応するという性質がある。つまり高温で温められ続けると、正確な値が読み取れなくなってしまうのである。

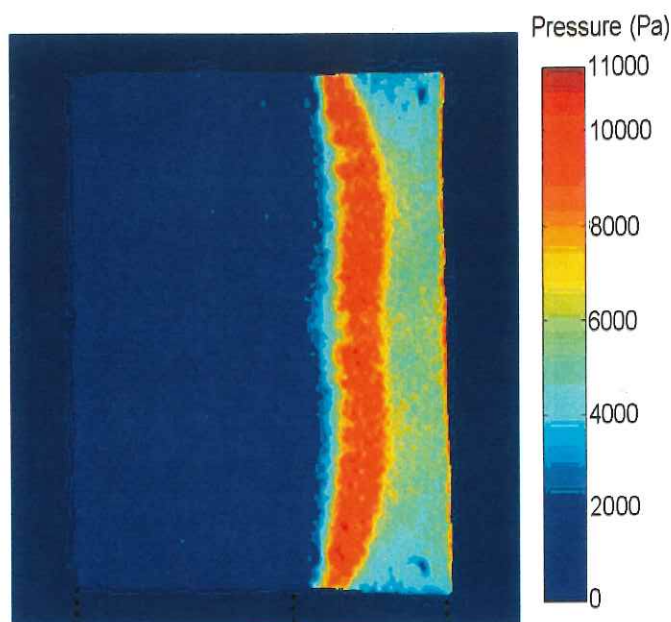
高温の影響をなくしてしまう方法がないことはない。マッハの風をごく瞬間的に（約30/1000秒～50/1000秒）作り出す、衝撃風洞と呼ばれる風洞を使うことだ。これなら模型表面の温度が上がる前に実験は終わってしまう。

ところが、また問題が一つ出てくる。普通の感圧塗料は、そんなに短い時間内には反応してくれないのである。塗料の表面を拡大してみると、厚さ5ミクロン～10ミクロンのポリマーの層の中に感圧分子が散在しているという状態になっていて、表面に吹きつけられた酸素がポリマーの中に浸透、拡散するまでに10分の数秒から1秒近くもかかる。これでは千分の数十秒という瞬間の実験にはとても使えない。

感圧塗料を極超音速の世界で利用するのは無理なのだろうか？

再び、答えは化学にあり

問題に取り組んだ研究者には、解決の糸口は見えていた。ポリマー層が反応時間を遅らせているなら、ポリマーなしで、感圧分子を直接素材の上にのせてしまえばいい。だが問題は、どうやってそれを可能にするかであった。



マッハ10の気流下でも、感圧塗料は計測が可能である。期待される次世代航空機の開発などにおいても活躍が予想される。（下図＝試験模型に気流をあてているところ、上図＝計測されたデータ）

最初のうち、当時模型素材として使われていたステンレスに感圧分子をのせることを考えていたが、ある時点で素材をアルミニウムに切り替えた。そして「アルミニウム酸化被膜」というアイデアをうまく利用することができたのである。

解決策のポイントは、アルミニウム表面を一度化学処理して、多孔質のアルミナ（酸化アルミニウム）の層をつくってやることにあった。これを（－）に帯電させ、（＋）の電荷を持った感圧分子をのせると、両者が引き合って静電的にコーティングできるというわけだ。

こうしてコーティングされた感圧分子は、空気に「むき出し」の状態ですらされることになる。だから千分の数十秒という衝撃風洞の実験でも十分使える反応速度が得られるのである。

試行錯誤と偶然

しかし、自ら「流体屋」と称する研究者にとって、ポリマーや酸化アルミニウムといった化学分野はまったく専門外であ

る。そんな異分野の中に果敢に飛び込み、しかも解答を見つけ出すということは、決して簡単なことではなかった。

まず最初に考えたことは、シリカゲルのような多孔質の物質、ポーラスに感圧色素（分子）を一度吸着させてから、今度はそのポーラスをステンレスの表面につけられないか、ということだった。これなら感圧分子はむき出しになる。ただ、そのポーラスをどうやって表面につけるかという段になって、ポリマーでつけることしか思い浮かばなかった。つまり最初に逆戻り、というわけである。

次にチャレンジしたのは真空蒸着*だ。感圧分子を溶かした溶液を熱して一度気化させ、その上にステンレス片をかざすと、ステンレス片の表面で冷えた分子がきれいにつくという寸法である。さて結果はというと実験に使ったステンレス片は見事なほどきれいにコーティングされていた。ところが、紫外線を当てても光らない。そこで光らなかつた感圧色素（分子）をもう一度溶媒に溶かしてみた。すると、ちゃんと光り始めたのだ。

これは後に、濃度消光という現象が原因であるとわかった。感圧分子は密度が高過ぎるとエネルギーが周囲の分子間でやりとりされてしまい、光を出さない性質があるのだ。

静電的にコーティングするという最終的な答えを見つけるきっかけになったのは、アルミサッシだった。大学の公開講座を受けに行ったところ、アルミニウム表面を陽極酸化させ、そのうえに色素をのせるという方法が普段家庭でも見かけるアルミサッシに利用されていることを知ったのである。その時以来、「陽極酸化*」という言葉が、開発のキーワードとなった。化学に関する基礎的な知識を学ぶために、初学者向けの書籍や果ては高校生が書き上げためっきに関する論文まで読み、研究を続けた。

そしてようやく陽極酸化のアイデアを試すことができたのは2年後。素材をステンレスからアルミニウムに替え、表面を陽極酸化したアルミニウムに静電的に感圧分子をコーティングする。アルミニウム片を感圧分子の溶液に漬け、電圧をかけ、待つこと20分。結果は見事に失敗だった。コーティングは成功したが、光らないのである。しかしこの原因は、幸運なことによりすぐ解決した。電圧をかけた時間が長過ぎて、コーティングの密度が濃くなりすぎ、前述した濃度消光を起こしていたせいだ。電圧をかける時間を減らすだけで、全ての問題は解決した。

21世紀は、異分野が手をつなぐ時代

空力学の最先端で感圧塗料が担うこれからの役割を考えてみても、また、極超音速の流れの研究に感圧塗料（分子）を使うことを可能にした陽極酸化というアイデアを見ても、化学…、特に機能性化学の分野が空力学の分野に大きく貢献していることがわかる。

空力学に貢献しているのは何も化学だけではない。感圧塗

料を利用する極超音速の風洞実験を例に上げても、機能性化学の他に二つの先端的科学分野が深く関わっている。ひとつは、感圧塗料の光をカメラで捕らえる際に重要になってくる光電子工学。もうひとつはカメラで捕らえたデータをコンピュータで処理し、可視化するための画像情報解析の分野である

次の目標は、ステンレス

感圧塗料のコーティング法には、改善の余地がまだたくさんある。その一つが、素材とのマッチングだ。

アルミニウムの陽極酸化を基本にした前述の方法では、アルミニウム以外の素材にコーティングすることはできない。ところが、風洞模型としてアルミニウムは、決して理想的とはいえないのである。

超音速レベルの風洞だと、模型といえども非常に大きな力がかかる。例えば翼などには、1トンを越える力がかかることもある。そんな時、アルミニウムでは耐えきれず変形してしまう。

現在、模型素材として最も優れているのは、オーステナイト系のステンレスである。これは強度も十分で、温度変化にも強い。

アルミニウム陽極酸化という解答を見つけた研究者が今考えていることは、何とかステンレスに感圧分子を直接コーティングできないか、ということだ。ステンレスの表面を一度何かで処理すればうまくいくのではないかと、というおぼろげな期待はあるそうである。ひとつ、鉄鋼業界の知識を活かして、うまく解決できないものだろうか？

*物理蒸着では色素分子の配向や積層状態のコントロールが極めて難しく、濃度消光（自己消光）が容易に起きる。また、複雑な形状の模型表面に均一な蒸着膜をつくるのは難しい。これに対し、酸化皮膜を用いる方法なら、色素の溶液に模型を浸すだけで比較的制御された分子膜を作ることができ、さらに酸化皮膜表面に分布する微細孔は色素分子のスペーサーとして働き、濃度消光が起こるのを防ぐことができる。

[取材協力・資料提供：科学技術庁航空宇宙技術研究所]

お詫びと訂正

本誌Vol.5No.9TechnoScopeP.627図1に誤りがありました。謹んでお詫び申し上げますとともに、下記のように訂正させていただきます。

