

発泡体の気泡制御とその光学特性

Structure Control and Optical Properties of Plastic Foams

小久保 陽介* 田中 彰* 友松 功* 青垣 智幸* 伊藤 正康*
Yousuke Kokubo Akira Tanaka Isao Tomomatsu Tomoyuki Aogaki Masayasu Ito

概要 マイクロセルラープラスチック (MCP) プロセスは、ミクロンオーダーの気泡を有する発泡体を作るための1つの手段であり、他の発泡法に比べて気泡が微細で、かつ気泡数密度の極めて高い発泡体を容易に作製できるという特長を持つ。本報告書では、MCP プロセスにおける微細気泡制御について紹介し、発泡倍率を保ちつつ気泡のナノ化が実現できることを見る。そして、気泡制御を行うことで発泡体どのような光学特性が現れるのかについて4つの具体例を挙げ、気泡制御技術の有用性とそれらの用途展開について議論する。

1. はじめに

発泡体の研究対象の1つに気泡の微細化技術がある。発泡体の性質は、その内部に含まれる気泡の状態(セルモルフォロジー)によって多様であり、例えば、気泡径が数百 μm の発泡スチロールに代表される発泡体は、緩衝材や断熱材として幅広く利用されている。またディスプレイや照明機器には光源の光を有効に使用するための光反射板が備えられているが、このような用途にも発泡体利用されている。当社の製品であるポリエチレンテレフタレート (PET) 発泡体 (商品名MCPET®) もその1つであり、その平均気泡径は数 μm 程度と極めて微細である¹⁾。一般に、平均気泡径が10 μm 以下の発泡体をマイクロ発泡体 (micro cellular plastics, 略してMCP) と呼ぶ。マイクロ発泡体が有する高い光反射特性はその気泡径の微細な構造によるものであり、気泡の微細化技術によって従来には無い新しい特性が発泡体に付与された一例となっている。こうした背景を考えると、気泡径をより微細化したナノ発泡体に対して、更なる新機能を期待することはごく自然な流れである。当初理論的に予想されたナノ発泡体の性質は機械強度の向上や超断熱性、発泡体の透明化など、実に興味深いものばかりである。これらの事実を検証するため、現在も数多くの研究が続けられており、例えば、ブロック共重合体を利用する方法^{2), 3)}や樹脂中に気泡核剤をナノ分散させる方法⁴⁾、樹脂結晶化を利用して気泡成長を抑制する方法⁵⁾などが試みられている。また最近では紫外線を用いた新しい発泡法による気泡の制御技術も提案されており、ナノ発泡体の光学特性についても議論されている⁶⁾。

これに対し我々は、MCPプロセス (バッチ法) と呼ばれる方法を用いた気泡制御の研究を進めている。MCPプロセスは、

ミクロンオーダーの気泡制御に関して優れた発泡法であるが^{7), 8)}、近年では、一部の樹脂において数十nmオーダーの制御が可能であることが報告されている⁹⁾。特に注目したいのは、ナノ発泡体の気泡密度がマイクロ発泡体に比べて劇的に増加する事実が示された点である。すなわちこれは、気泡の微細化に伴う発泡倍率の低下を気泡数で補える可能性を示唆しており、発泡体の要である発泡倍率を低下させることなく微細化制御を行うという視点からも大変興味深い。本報告ではまず、MCPプロセスの特長とその気泡制御法について紹介し、ナノ発泡体を含めた制御が可能であることを確認する。そして後半部分では発泡体の光学特性に注目し、気泡制御によってどのような特性が現れるかを具体的な4つの事例を挙げて見ていくことにする。

2. MCPプロセスとその特長

2.1 MCPプロセス

まず初めにMCPプロセスの概要について説明する⁷⁾。MCPプロセスは、図1に示すような2つの工程から構成される。第1工程は、発泡剤となる不活性ガス (本報告書では炭酸ガスを使用) を、高圧下で樹脂シートに浸透させる工程である。重量 M の樹脂に対して ΔM のガスが浸透した場合、浸透量を

$$w = \frac{\Delta M}{M} \times 100 \quad (1)$$

によって定義する。浸透量は浸透開始直後から時間と共に増加するが、ある一定時間経過するとそれ以上ガスが入らない飽和状態に達する。これに要した時間を飽和浸透時間、このときの浸透量を飽和浸透量と呼ぶ。マクロに見れば飽和状態はガスが

* 研究開発本部 環境エネルギー研究所

樹脂中に一様分散した平衡状態であり、均一に樹脂を発泡させる目的においては、この状態を目指して浸透を行なうのが一般的である。飽和浸透量や飽和浸透時間は、樹脂の種類やシート厚みによって異なるが、特に結晶状態にある樹脂に関しては、結晶化による樹脂の自由体積の減少やガスの拡散を阻害する効果のために、ガスが入りにくい傾向にある。この状況を改善するため、浸透温度を高温にしてガス浸透を促進する方法も提案されている⁸⁾。

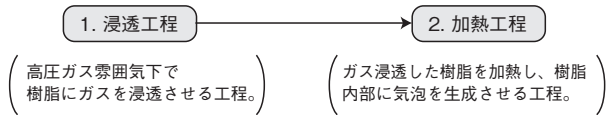


図1 MCPプロセスの発泡手順
Microcellular foaming process.

続く第2工程は、ガスが浸透した樹脂を高圧容器から取り出し、常圧下で加熱を行う工程である。樹脂シート内部のガスは、この急激な加熱によって熱力学的に不安定な状態となる。実際に気泡が生成されるのは、系の温度が樹脂のガラス転移点(T_g)近傍に達した時であると考えられている。ただし樹脂は、浸透したガスによって可塑化されているため T_g が降下した状態にある¹⁰⁾。降下の割合は浸透量とともに大きくなることから、仕上がりの良い発泡体を得るには、そのときの浸透量に見合った適切な加熱温度 T_f を選択する必要がある。

発泡体を特徴付ける基本的な量には、元の樹脂の密度 ρ_0 と発泡後の密度 ρ_f の比として与えられる発泡倍率

$$\alpha = \frac{\rho_0}{\rho_f} \times 100 \quad (2)$$

や気泡径 R 、次式で定義される気泡核数 n がある。

$$n = \alpha N^{3/2} \quad (3)$$

ただし N は、発泡体の断面観察から求まる単位面積当たりの気泡数であり、(3)式においては、これを3/2乗することで単位体積当たりの気泡数に換算している。一般に、マイクロ発泡体に含まれる1 cm³当たりの気泡核数は10⁹個のオーダーであり、この数値からもMCPプロセスで作られる発泡体の気泡数の多さを読み取ることができる。

2.2 MCPプロセスの特長と気泡径の制御

ここでは、ポリカーボネート(PC)樹脂を例にとり、ナノ発泡体を含めた気泡制御がMCPプロセスにより可能であることを示す。

厚み1 mmのPCシート(EC105 住友ベークライト社製)に浸透量6.6 wt%から18.4 wt%の範囲でガスを浸透させ、それぞれのサンプルを加熱することで発泡体を作製した。なお加熱温度に関しては、発泡倍率が2倍から3倍になるよう設定を行っ

た。図2は走査型電子顕微鏡(SEM)による各発泡体の断面写真であり、図3には浸透量と気泡径の関係を示す。浸透量が最も少ない6.6 wt%の場合、発泡体の平均気泡径は16 μ m(発泡倍率2.3倍)となる。注目したいのは、ここから浸透量が多くなるにつれて気泡が微細化する点である。浸透量12.5 wt%の場合の平均気泡径が6.9 μ m(発泡倍率2.7倍)、浸透量15.5 wt%の場合には気泡径3.4 μ m(発泡倍率2.5倍)とMCPET並みの気泡径となる。興味深いのは更に浸透量が増えた場合であり、18.4 wt%においては図2gの写真のような平均気泡径150 nm(発泡倍率2.2倍)のナノ発泡体となる。我々の研究によれば、更に高いガス浸透量を実現することもでき、このとき気泡は更に微細化することが分かっている。このように、MCPプロセスにおける発泡体の気泡制御は、樹脂へのガス浸透量の制御により達成することができる。

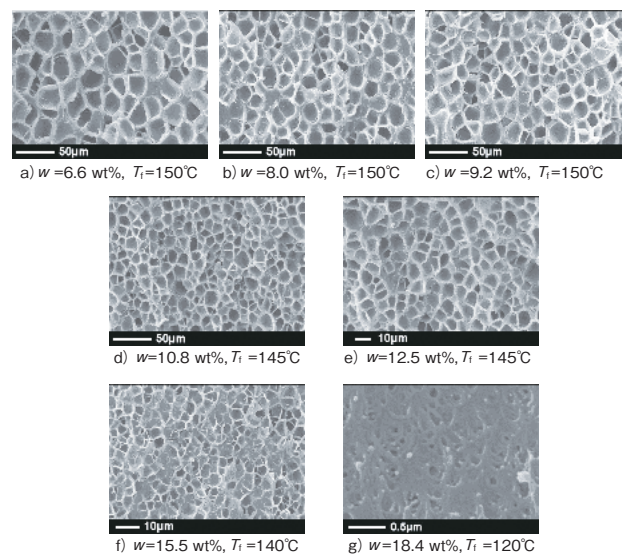


図2 PC発泡体のSEM写真
SEM images of polycarbonate (PC) foams.

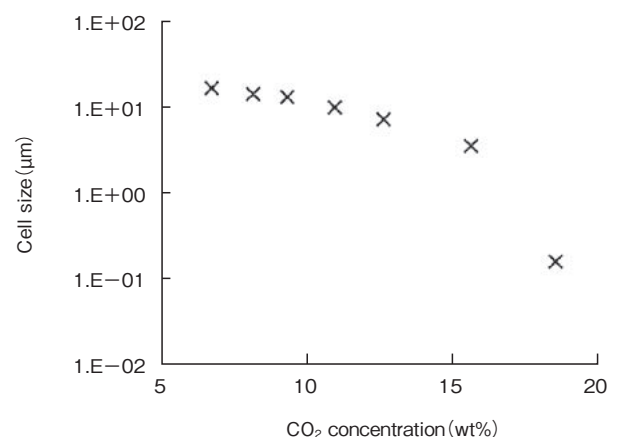


図3 浸透量と気泡径の関係(PC)
A relationship between average cell sizes of PC foams and CO₂ concentration.

ここで、MCPプロセスにおける重要な特徴について触れておこう。図4は、PC発泡体の気泡径 R と気泡核数 n の関係を示したグラフであり、2つの数値の間には次式が成り立つ。

$$n = 10^b R^{-a} \quad (4)$$

ただし、 a と b の値は樹脂の種類による定数であり、今回のPCに対しては $a=3.6$ 、 $b=12.8$ のように選ぶことで実測値を再現する。(4)式は、気泡径が小さくなるにつれて気泡核数が増加するという、MCPプロセスの特長を表している。実際、PCのナノ発泡体に関しては、1 cm³当たりの気泡核数が10¹⁵個のオーダーであり、マイクロ発泡体の10⁹個と比べてその多さは歴然である。MCPプロセスでは、マイクロ発泡体と同程度の発泡倍率を有するナノ発泡体を作ることができるが、これはナノ発泡体の気泡核数の多さによるものと考えられる。

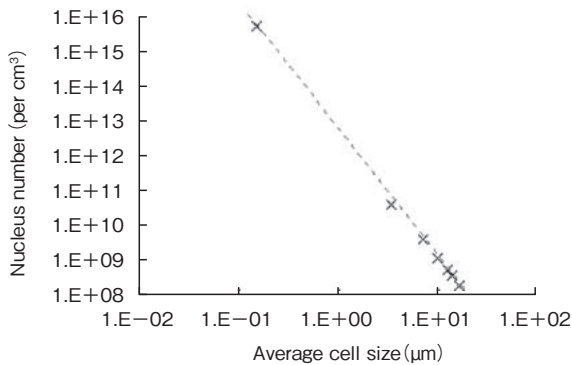


図4 気泡径と気泡核数の関係(PC)
A relationship between nucleus number per 1 cm³ and average cell sizes of PC foams.

3. 発泡体とその光特性

前節では、MCPプロセスにおける発泡体の気泡径が浸透量によって制御できる事実について述べた。ここでは、発泡体の気泡制御を行なうことで実際にどのような光学特性が現れるのかを、具体的な4つの事例を挙げて紹介する。

3.1 マイクロ発泡体の可視光反射特性とMCPET

先に述べたように、マイクロ発泡体の性質の1つとして高い可視光反射特性がある。当社はその優れた特長にいち早く注目し、MCPプロセスを工業的な生産法に発展させてマイクロ発泡体の量産化を実現した¹⁾。現在、こうして生産したマイクロ発泡体はMCPETとして様々な照明用途に利用されている。この節では、当社製品の代表とも言えるMCPETについてその応用例も併せて紹介する。

MCPETはPET樹脂シートのマイクロ発泡体であり、その気泡径は10 μm以下、気泡核数は1 cm³当たり10⁹個以上になる。図5はSEMによるMCPETの断面写真である。また、図6は分光光度計(UV-3101 島津製作所社製)を用いて測定したMCPETの全反射率であり、波長400 nmから700 nmの範囲の可視光に対して平均反射率は99%(硫酸バリウム白色板との相

対値)と極めて高い数値を示す。電飾看板や照明機器の反射板として従来用いられてきた白色銅板に比べ、MCPETは可視光領域の反射率に波長依存性を持たないため、原色を再現した反射光が得られるのも特長である。以上で見られる光学特性は、マイクロ発泡体特有の微細な気泡構造と気泡核数の多さによってもたらされる、多重Mie散乱の効果によるものである。

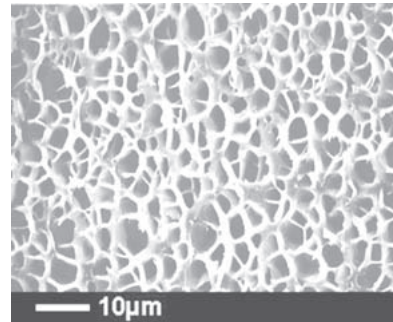


図5 MCPETのSEM写真
SEM image of MCPET.

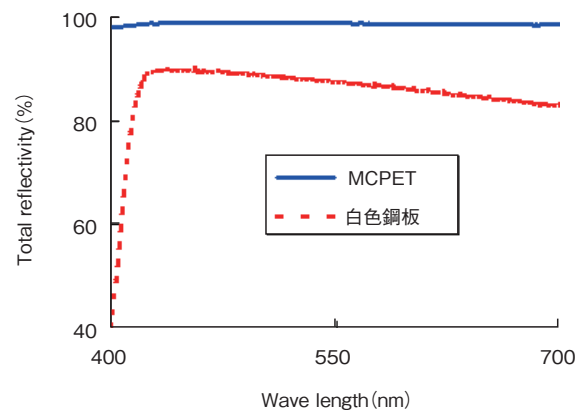


図6 電飾看板用MCPETの全反射率
Comparison of total reflectance relative to a barium sulfate plate between a MCPET reflector (the red broken line) and a steel plate reflector (the blue line), which are used for a sign board.

さて具体的な応用例として、シャーカステン(レントゲン写真を観察するための医療用モニタ)にMCPETを適用した例を紹介しよう。シャーカステン内部には光を効率良く使用するための反射板が備えられている。その反射板として図6で示した白色銅板を用いた場合、シャーカステンの表面照度の平均値はおよそ6600 luxとなる(図7a)。これに対し、白色銅板をMCPETで置き換えるとその照度は10690 luxと大幅に向上する(図7b)。この事からも、MCPETが反射板として優れた性能を有することを確認できる。

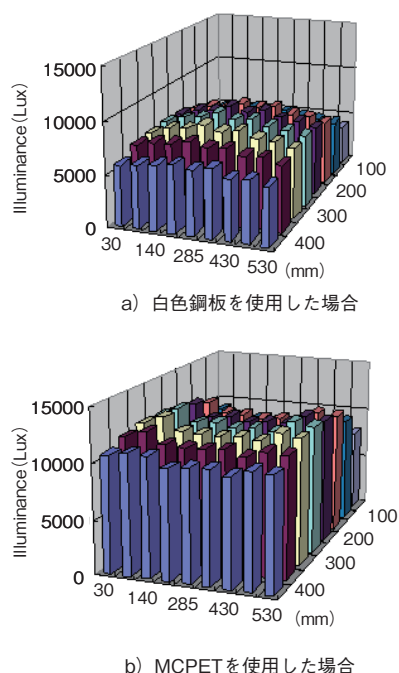


図7 反射板の違いによるシャーカステンへの照度分布
Illuminance on the surface of a schaukasten with a steal reflector (a) and MCPET (b).

近年、MCPETは看板や液晶ディスプレイのバックライト用の反射板のみならず、その成形性の高さから様々な照明分野に展開され始めている。エネルギー効率を見直す動きが高まりつつある現在、照度や輝度を下げることなく電力を減らすことができるMCPETのような技術は重要である。更なる反射率の向上が望めるサブミクロンオーダーでの気泡制御技術を工業的な生産法として確立し、照明分野の高照度化や省エネルギー化に貢献したいと考えている。

3.2 気泡のナノ化制御と熱線の透過

この節では、発泡体の気泡径をナノオーダーまで微細化した場合の光学特性を議論しよう。この目的のため、光を電磁波というより大きな枠組みで捉えることにする。電磁波は時間的に変動する電場と磁場が、互いに誘導することによって空間を伝播する波の1種である。電磁波の性質は波長によって分類できるが、このとき、波長380 nm (青色光) から780 nm (赤色光) の領域の電磁波は可視光に相当する。また、波長800 nmから10 μm 程度の電磁波は赤外線 (熱線) と呼ばれ、物質に吸収されて熱に変換されやすいという性質を持つ。

さて、厚み250 μm のポリエーテルサルフォン (PES) 樹脂シート (スミライト®FS-1300 住友ベークライト社製) のマイクロ発泡体 (平均気泡径1 μm) とナノ発泡体 (平均気泡径100 nm) の特性を比較しよう。図8は、分光光度計 (U-4100 日立ハイテック社製) を用いて測定した400 nmから2000 nmまでの可視光及び近赤外線に対する反射率 (酸化アルミニウム白色板に対する相対値) を表す。マイクロ発泡体に関しては、測定波長領域で (PES固有の吸収を除いて) はほぼ一定値をとっているのに対して、ナノ発泡体に関しては可視光に比べて近赤外線の反射率が低下している。これは近赤外線の波長に比べて発泡体の気泡が十分小さくなった為であり、このような状況の光散乱は

Rayleigh散乱として特徴付けられる。Rayleigh散乱の散乱係数は波長の4乗に反比例するため、反射率に波長依存性が現れるのである。

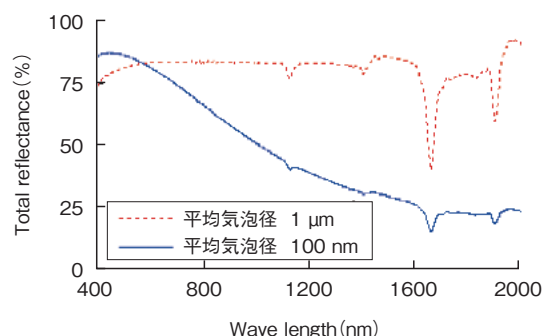
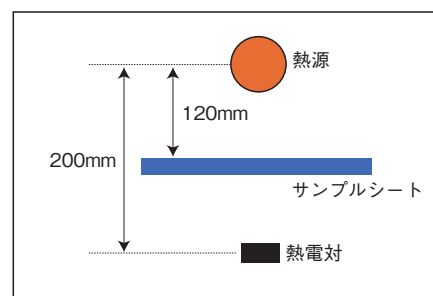


図8 PES発泡体の電磁波反射特性
Total reflectance of a microcellular polyethersulfone (PES) foam (the red broken line) and a nanocellular PES foam (the blue line), relative to an aluminum oxide plate.

ナノ発泡体の赤外線反射率の低下は、すなわち、ナノ発泡体が熱線を通すことを意味している。そこで、図9aのような装置を用いて熱線が透過する様子を調査した。この装置は、熱源と熱電対の間に発泡体を置き、熱源を点灯させた後の温度上昇を測定するというものである。結果、マイクロ発泡体を間に置いた場合には2.7℃のみの温度上昇だったのに対し、ナノ発泡体の場合には12.9℃の大幅な温度上昇が見られた (図9b)。このことから、ナノ発泡体は確かに熱線を透過していることが分かる。



a) 実験装置

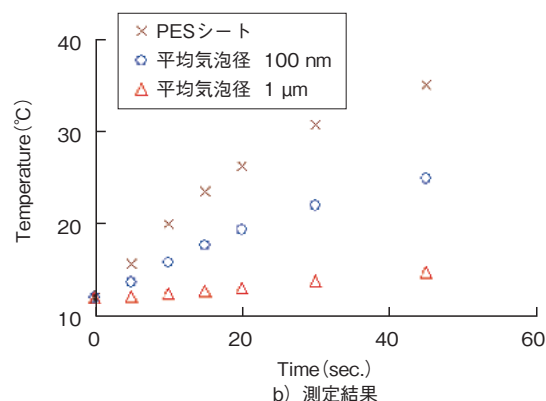


図9 PES発泡体の熱線透過による温度上昇測定
Heat rays transmission and temperature increase.

以上のようなナノ発泡体の性質は、光反射シートの観点から見ても興味深い。通常のマイクロ発泡体は、光と共に赤外線も反射するため、光の反射方向の温度が上昇することは避けられない。ディスプレイなどの密閉空間においては、こうした温度上昇は機器の歪みや劣化を生じさせる原因となり得るため、輝度に寄与する光のみを反射させることが好ましい。これに対し、気泡径を100 nm前後に制御したナノ発泡体を用いることで、マイクロ発泡体よりも高い可視光反射率を実現し、かつ熱に寄与する赤外線を透過させて放熱することが可能となる。ただし、気泡の微細化によって可視光領域さえもRayleigh散乱の領域となるため、反射率に強い波長依存性が残ることに注意が必要である。ナノ発泡体を熱線透過型の反射シートに適用するには、如何に可視光領域の波長依存性を抑えるよう設計できるかが課題となる。

3.3 光の透過性と拡散性の制御

ナノ発泡体のような気泡核数の極めて多い発泡体を得るためには、高い浸透量が重要であった。これとは逆に浸透量を低く抑えることで、数十 μm 程度の気泡が疎な状態で存在する発泡体を得ることができる。こうした発泡体の光学特性を議論するのがこの節の目的である。

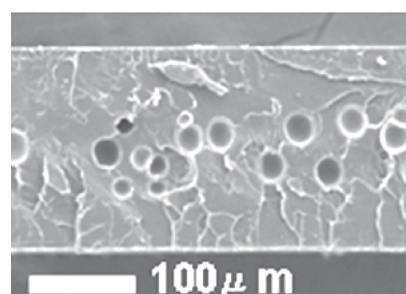
図10に示したSEM写真は、180 μm 厚みのPCシート(PC-2151 帝人化成社製)に5.0 wt%のガスを浸透させ、80℃から120℃の範囲で加熱して発泡を行なったシートの断面写真である。このような条件で作製した発泡体には数十 μm 程度の気泡が疎な状態で存在し、そのためシートは透過型の光拡散性を有する。光の透過性と拡散性の関係はシート内部に作られた気泡の数に左右され、図10aのように気泡が少ない場合には透過性が高く、図10cのように気泡が多い場合には拡散性が強く現れる。このように、発泡温度を調節することで透過する光の量と拡散度合いを制御することが可能である。この状況を明確にするため、シート内部の気泡数を少しずつ変化させた場合の拡散分布の移り変わりの様子を示したのが図11である。水平に置かれたシートに対して下方から光を当て、上方に通り返けた透過光の強度分布を極座標で表している。ただし、すべてのサンプルの強度分布は0°(入射した光が散乱されずに真っ直ぐ通り返ける角度)の値で規格化している。この結果、光がほぼ前方に通り返けるもの(A)から拡散度合いが非常に強いもの(G)まで幅広く、かつ連続的に制御できることが分かる。

次に、シートの光拡散性を利用して、液晶ディスプレイのバックライト部材である拡散板としての適用を検討した。直下型バックライトは、光源である複数の冷陰極管(CCFL)が等間隔に設置された構造になっており、このままではディスプレイ上に輝度ムラと呼ばれる明暗が生じてしまう。そこで、光源の光をできるだけ拡散させて輝度ムラを解消するのが拡散板の役目である。今回の検討では、拡散度合いが拡散板に近い図11におけるBのタイプの発泡体を選択した。

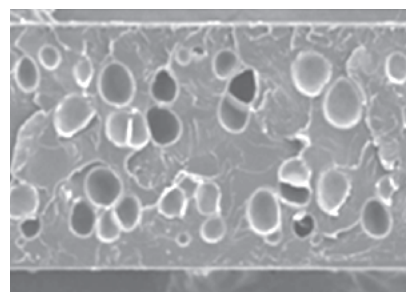
さて、20インチ液晶テレビの直下型バックライトに発泡体を固定し、さらに光学シート(拡散フィルムとプリズムシート)を乗せた状態で画面正面から見た場合の輝度分布を測定した。図12aは、輝度分布を等温図のような形式で表現したもので、画面左側には現行品の拡散板を使用した場合の輝度分布が、画面右側には発泡体を使用した場合の輝度分布がそれぞれ示して

ある(発泡体は図の点線部分に固定されている)。また、図12a内の2本の矢印ABとCD上の輝度分布をグラフで示したものが図12bである。発泡体の拡散板としての性能を評価するため、図12bの輝度分布から求まる平均輝度と輝度ムラ(標準偏差)を求めて現行品との比較を行なった。結果を(平均輝度 $\pm$ 輝度ムラ)の形で表すと、現行品(6424 ± 239) cd/m^2 に対して発泡体は(6223 ± 195) cd/m^2 であった。

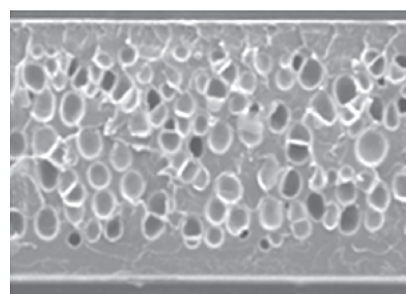
以上の結果から、発泡体を用いた場合の平均輝度は現行品に比べて若干低い値となったものの、拡散板としての役割を十分果たしていることが分かる。問題は、現行品と同じ輝度を持つ発泡体を用いた場合の輝度ムラが現行品に比べて低減されるかである。今回のように気泡で光散乱を行なう方法は、微粒子を用いる方法に比べて光吸収が抑えられることを考えれば、発泡体の気泡を制御することで光の透過性と拡散性を同時に向上できる可能性は十分ある。これについては今後の課題である。



a) $w=5.0$ wt%, $T_f=80^\circ\text{C}$



b) $w=5.0$ wt%, $T_f=110^\circ\text{C}$



c) $w=5.0$ wt%, $T_f=120^\circ\text{C}$

図10 PC発泡体のSEM写真
SEM images of PC foams.

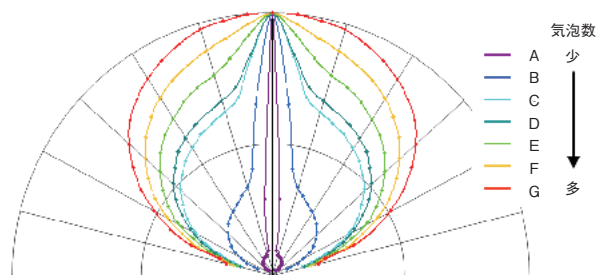


図11 PC発泡体の透過光の角度分布
Angular distributions of transmitted light through PC foams.

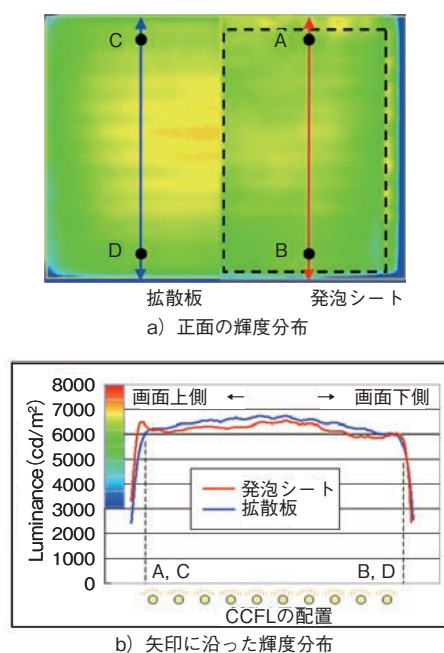


図12 液晶テレビを用いた輝度測定
Surface luminance of a liquid crystal television using a foamed sheet as light diffuser.

3.4 クレイズ状の空隙と光透過率の入射角依存性

ここまでの議論では、発泡体の気泡が球形であることを前提に話を進めてきた。我々の研究によれば、MCPプロセスを利用することで球形とは異なるクレイズ状の空隙を作ることも可能である。本節では、その形状と光学特性について報告する。

クレイズ状の空隙を有するシート（以下、クレイズシート）の作製には、高い浸透量と樹脂の T_g よりも十分低い加熱温度が鍵となる。3.2節で取り扱ったPESシート（ $T_g = 223^\circ\text{C}$ ）の場合、浸透量20 wt%のサンプルを 90°C で加熱することによりクレイズシートを得ることができる。クレイズ状のひび割れの様子を図13aに示す。空隙の幅はおよそ300 nm程度であり、シート正面から見ると複数の空隙から成るブロック状の塊が幾重にも重なったような形態をしている。また図13bはシート断面の写真であるが、シート中央部に光を強く散乱する領域を確認することができる。このことから、クレイズ状の空隙はこの部分に集中して存在しているものと推測できる。

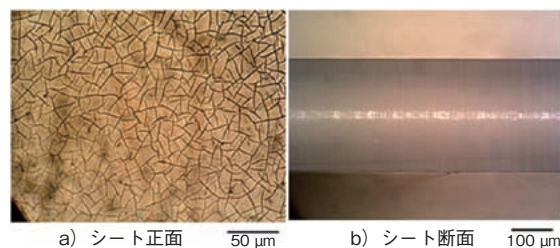


図13 クレイズシートの光学顕微鏡写真（左はシート正面、右はシート断面の写真）
Photographs of a crazed sheet (PES), the surface view (a) and the cross-section view (b).

クレイズシートの光学特性は特徴的である。これを見るために、瞬間マルチ分光計（MCPD-1000 大塚電子社製）を用いて実施した2つの評価結果を紹介する。1つ目の評価方法を図14aに示す。シートに対する光の入射角 θ をそれぞれ 30° と 45° 、 60° に固定し、受光器側の角度 ϕ を変化させたときの580 nm波長光の透過率を測定する。ただし、ここでの透過率は光源と受光器の間に何も設置せず、かつ $\theta = \phi$ とした場合の光強度を100%として計算している。結果は図14bで与えられるが、これより $\phi = \theta$ と $\phi = -\theta$ の2箇所に透過光のピークが現れることが確認できる。このうち $\phi = \theta$ のピークはシートをそのまま透過した光によるものだが、一方の $\phi = -\theta$ のピークは通常のシートには現れないクレイズシート特有のものである。

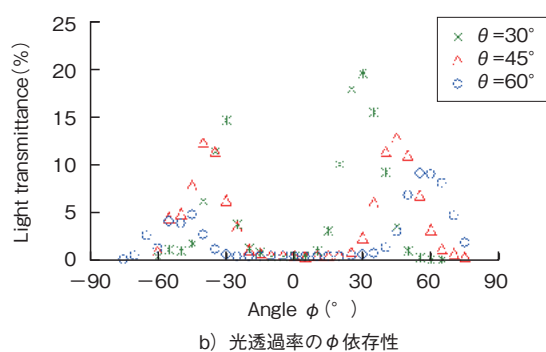
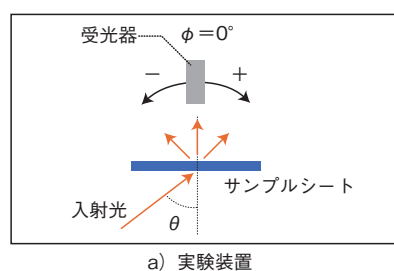


図14 クレイズシートにおける透過光の ϕ 依存性
Detector angle ϕ dependence of light transmission on crazed sheets.

2つ目の評価方法を図15aに示す。今度は光源と受光器を一直線上に固定し、サンプルシートの角度 θ を変化させた場合の580 nm波長光の透過率を測定する。透過率の定義は先と同様である。結果を図15bに示す。垂直入射（ $\theta = 0^\circ$ ）の透過率が70%と高い数値であるのに対し、 $\theta = 30^\circ$ 以上では透過率が30%

未満にまで低下している。すなわち、クレイズシートは正面からは見えやすく、斜めからは見えにくいという、いわゆる視野角選択性を有することが分かる。

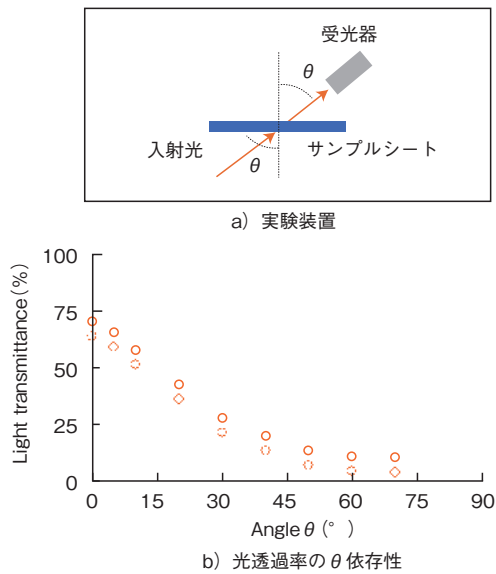


図15 クレイズシートにおける透過光の θ 依存性
Incident light angle θ dependence of light transmission on a crazed sheet.

以上のような光の振る舞いを理解するためには、クレイズシートの空隙が2次元的で、かつ複数の空隙がシート平面に対して垂直な方向に並んだ図16のようなモデルを考えるとよい。このとき、図14bで見られた $\phi = -\theta$ のピークは、入射光が空隙の面上で全反射された為に現れたものと考えられる。また視野角選択性に関しては、 $\theta = 0^\circ$ の入射光が空隙の長手方向と一致するため散乱されにくいに対し、 $\theta \neq 0^\circ$ の入射光に対しては空隙と樹脂の多層構造となるため光は散乱されやすい。この結果、図15b)のような透過率の入射角依存性が現れるのだと思われる。なぜこのような構造をとるのかについては現在究明に努めており、空隙の方向を制御するといった視点からも研究を進めている。気泡形状を制御する技術は気泡径の制御同様に難しい課題であるが、今回のクレイズ状の空隙を制御できるようになれば、発泡体を利用して更に幅広い光特性制御が可能になるものと思われる。

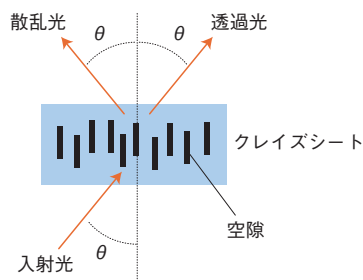


図16 予想されるクレイズシート内部の空隙の構造
An internal structure model of a crazed sheet predicted from optical properties.

4. おわりに

本報告書では、MCPプロセスを利用した発泡体の気泡制御について紹介し、気泡制御を行なうことでどのような光学特性が現れるかを議論した。気泡の微細制御に関しては樹脂への浸透量が本質的であり、高い浸透量を達成することで気泡がナノ化することを確認した。また、ポリカーボネートシートを用いた実験では、発泡倍率2倍以上のナノ発泡体が得られる事実を示すことができた。これは、気泡の微細化に伴う発泡倍率の低下を1 cm³当たり10¹⁵個のオーダーという劇的な数の気泡が補った結果であると考えている。

一方光学特性に関しては、気泡制御を行なうことで光の反射率の向上や熱線の透過、光の透過拡散性などの機能が現れることを説明し、それらの用途展開についても議論を行なった。また、MCPプロセスによってクレイズ状の空隙を持つシートが得られることに触れ、その特徴的な光学特性についても紹介した。球形以外の空隙がMCPプロセスで作れる事実は気泡の形状制御に繋がる可能性があり、引き続き研究を行なっている。

現在の当社における気泡制御の研究の主流は、更なる気泡の微細化と高発泡倍率化の方向へ向かっている。特に、当初予想された透明発泡体や超断熱発泡体に対しては大きな興味を持っている。更なる気泡制御技術の向上によって、発泡体をより広い分野に送り出せるよう努力していく所存である。

参考文献

- 1) 株本昭, 伊藤正康, 中山清, 岡田光範, 吉田尚樹: 成形加工 '06 (2006), xxxi.
- 2) 瀧健太郎, 薬谷友祐, 大塚哲央, 大嶋正裕: 成形加工 '06 (2006), 111.
- 3) L. Li, T. Nemoto, K. Sugiyama and H. Yokoyama : Macromolecules, 39 (2006), 4746.
- 4) Y. Ito, M. Yamashita and M. Okamoto : Macromol. Mater. Eng., 291 (2006), 773.
- 5) Y. Fukasawa, J. Chen and H. Saito : J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys., 46 (2008), 843.
- 6) 高田知行, 小島淳也, 清水夕子, 神野文夫: 成形加工, 19 (2007), 228.
- 7) J. E. Martini : M. Thesis in Mechanical Engineering, M. I. T., January, (1981).
- 8) J. S. Colton and N. P. Suh : Polym. Eng. Sci., 27 (1987), 485.
- 9) B. Krause, P. Munuklu, N. F. A. van der Vegt and M. Wessling : Macromolecules, 34 (2001), 8792.
- 10) T. S. Chow : Macromolecules, 13 (1980), 362.