



合成樹脂の光學的應用

中 村 日 色

アメリカの雑誌を見ると、カメラの各部に合成樹脂が種々利用されているのがわかる。しかしそれは大抵 body の部分だけでレンズは従来の無機光學ガラス製である、樹脂ガラスを使った最高級レンズは現在までできていないけれども、合成樹脂ならではという光學部品も相當あつて各方面に利用されている。

1 ま え が き

光學材料として要求される性質即ち透明、均質、光學常数の不変性、耐久度等を比較した場合樹脂ガラス*と無機ガラスは、一長一短であるとはいえ全體として見ると樹脂ガラスの方がむしろ劣っている。しかし無機ガラスの到底及び得ない大きな特色……成形の容易なこと……は従来手磨き以外に製法のなかつた特殊の光學部品の大量生産を可能にさせた。非球面レンズはその一例で、樹脂ガラスでなければ實用的に生産できない分野である。このような用途のほかさらに一般的な光學材料として“樹脂ガラスを使つて最高級レンズは作れないだろうか。”現在の樹脂ガラスの性質を検討して見るとこの間に對しては殘念ながらまだ否定的な解答しか與えられぬようである。

樹脂ガラス以外の合成樹脂も光學的に利用されている場合があるが、これもふくめて合成樹脂の光學材料としての性質、特色を述べそれがどのようにしてそれぞれの用途に生かされているかを以下簡単に述べて見よう。

2 光學材料としての合成樹脂

(i) 光學的に用いられる樹脂の種類

かつて合成樹脂の種類が少なかつたころには石炭酸系の樹脂を「有機ガラス」とよんだこともあつたが、現在レンズやプリズム等を作る材料として用いられているの

* 普通の「無機ガラス」に對して合成樹脂中の透明體を「有機ガラス」とよんでもよいが「有機ガラス」という言葉は習慣上特定の樹脂（例えばアクリル樹脂）を指していることがあるので、本文では合成樹脂中の透明な光學材料を総稱して「樹脂ガラス」とよぶことにした。

はアクリル、ビニール、スチロール系等のもので、その中でも優れた光學的性質をもち實用されているのは、メチルメタクリレート及びスチロールの重合體である。これらの樹脂の單量體は常溫で無色透明の液體であるが或時間適當な溫度に加熱するか、あるいは紫外線を照射すると次第に重合が進んで、最後に無色透明の固體重合物が得られこれが光學材料として用いられる。

従来もつとも廣く用いられてきたのはメチルメタクリレート重合體即ちポリメチルメタクリレートであるが、近年これにかわつて次第にシクロヘキシルメタクリレートが使用されるようになった。(1) すなわちメチルメタクリレートの單量體の沸點は 103°C で、加熱重合を行う場合往々にして發泡し不均質の原因となりやすいのであるが、このシクロヘキシルメタクリレートは、沸點が 210°C であるためその懸念は非常に少い。しかも重合の際の體積收縮率はメチルメタクリレートの 22% に對して 12.5% と約半分であるので、型の中に鑄込んで成形する場合などには非常に都合がよいのである。この他にも 3-エチルシリコールメタクリレート、芳香族ジアミン（例えばフルニレンジアミン）、メチルメタクリレートと各種エステルとの共重合物等が特殊の性質を持つ光學的材料として報告されている。

(ii) 機械的及び熱的性質

第1表にメチルメタクリレートおよびスチロール重合體の諸性質を、廣く用いられる光學ガラス BK 7 (硼

第1表 樹脂ガラスと光學ガラスの諸性質

		ポリメチル メタクリ レート	クラウン ガラス (BK7)	ポリスチ ロール	フリント ガラス (F 5)
比重		1.18~1.20	2.53	1.05~1.08	3.47
硬度	Mohs	2~2.5	7	2~2.5	5
抗張力	kg/mm ²	4.2~7	3.3~7.2	2~7	3.3~7.2
熱膨脹 係數	×10 ⁻⁶	80~90	7.75	60~80	8.41
變態點	°C	54	544	81	450
軟化點	°C	80~115	595	78~80	476

珪クラウン) F5 (フリント) と比較して見た。まずこれ等樹脂の比重はガラスの約半分で、光學器械に用いる場合には非常に有利である。さらに樹脂ガラスは普通のガラスにくらべて屈曲性に富み、衝撃に對しても強く割れがたい。加工性もよくて旋盤等で自由に機械工作ができる點はたしかに長所である。一方硬度が低くて疵のつきやすいこと、熱膨脹係数がガラスの約 10 倍であること、變態點、軟化點が低いので餘り高温度では使用できずせいぜい 60°C が使用可能の最高温度である點などはいちじるしい短所であらう。

第2表 光學常數の比較

	屈折率 $n_D(15^\circ\text{C})$	平均分散 $n_F - n_C$	分散率 ν_D	温度 1°C の 上昇に對する 屈折率の 變化
ポリメチルメ タクリレート	1.4899	0.0086	57.0	
ポリシクロヘキシル メタクリレート	1.50705	0.00896	56.6	-0.000125
B K 7	1.51625	0.00806	64.1	+0.000002
ポリスチロール	1.59232	0.01919	30.9	-0.000133
F	1.60328	0.01587	38.0	+0.000003

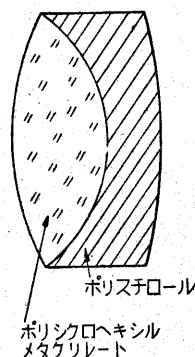
[註] ν_D , n_F , n_C はそれぞれ波長 5893, 4861, 6563 Å に對する屈折率である。なお $\nu_D = (n_D - 1)/(n_F - n_C)$ でポリメチルメタクリレートは筆者の測定値、他は Polaroid Corp. の data である。

(iii) 光學的性質

光學的利用に際してもつとも重要な常數は屈折率である。高級レンズを作る場合には屈折率の値が少く共小數以下 4 桁目までは精確に一定であることを要求されるがこの點樹脂ガラスの屈折率には相當に問題がある。すなわち重合条件によつてできた重合體の屈折率が相當に違つてくることで、メチルメタクリレートについて筆者が研究した結果によれば、成分は同一であつても重合条件が異なるために屈折率が 0.005 程度違つてくることもある。これは到達重合度の相違によるものと思われるが、紫外線照射で重合させると加熱重合よりも均質安定度がよく、屈折率の差も少いものが得られるから、光學的用途に對しては紫外線重合を用うべきであらう。また第2表でわかる通り温度變化によつて屈折率の受ける影響が非常に大きく、光學ガラスの約 50 倍に達し、1°C の上下が小數以下 4 桁目に効いてくるので、これは高級レンズを作るためには致命的な缺點であると思われる。

次に樹脂ガラスだけで収差のない光學系を作るためには、いろいろの屈折率 n_D と分散率 ν との組合わせを有する數種の材料が必要である。簡単な色消しレンズを作るのでも、屈折率及び分散の違つた二種類のガラスを組合わせなければならない。光學ガラスの場合、BK 7 と F5 を用いて色消しレンズが作られているが、表からすぐわかるように n_D が小さくて ν の大きいポリメチルメタクリレートやポリシクロヘキシルメタクリレートは

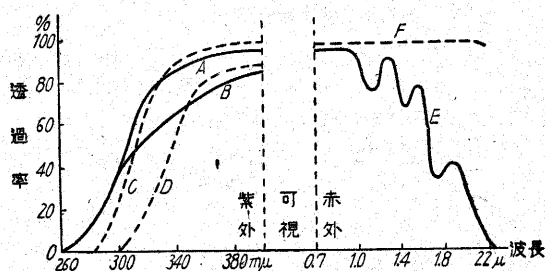
BK7 に相當し、 n_D が大きくて ν の小さいポリスチロールは F5 に相當するからメタクリレートとポリスチロールとを組合わせて色消しレンズを設計することができる。(第1圖)。しかしこの組合わせでは二つの材料の n, ν の値の差が小さいため、レンズの曲率が大きくなつて比較的口徑の小さなレンズにかぎり設計が可能である。また、各種の樹脂ガラスの n_D と ν の値は從來の光學ガラスが持つ n と ν の組合わせと大して違つていないので、樹脂ガラスと光學ガラスの組合わせで、光學ガラスだけでは作れない性能のレンズ系を得ることもいまのところ見込はない。



第1圖 樹脂ガラスの色消しレンズ

(iv) 光線透過率

可視光線の透過率はポリメチルメタクリレートで、92~94%、ポリスチロールで 89% の程度である。光學ガラスは特殊のものをのぞき 95% 以上 99% に達するから樹脂ガラスが特によいとはいえないが、普通の窓ガラスでは 85~90% であるので、ポリメチルメタクリレートはこれにくらべればたしかによりわけである。紫外線および赤外線透過率は、その一例としてポリメチルメタクリレートについて第2圖にその傾向を示した。普通の



第2圖 紫外、赤外透過曲線

- A; ポリメチルメタクリレート
B; 同上 1 月戶外にさらしたもの } 厚さ 2 mm
C; BK 7
D; 窓ガラス
E; ポリメチルメタクリレート } 厚さ 5 mm
F; 光學ガラス

ガラスは赤外 2.2 μ まではほとんど可視光線と同じ位の透過率を有するが、樹脂ガラスは赤外部で高分子特有の吸収帯を示し、厚さ 5mm のポリメチルメタクリレートは 1 μ 以上ですでに相當透過率が減少する。

一方ポリメチルメタクリレートの紫外線透過率は一般に非常によいようにいわれているが、これも可視光線の透過率と同様光學ガラスと比較した場合にはそれほどよいとはいえず、たゞ吸収の最短波長がやゝ短い程度である。しかも紫外線の透過率はいろいろの条件に非常に左右されやすく、⁽²⁾ 例えば重合条件や不純物によつていちじるしく變化するので、人によつて測定値も可成り違つている。また外界の条件によつても變化し圖の曲線Bに示すように1ヶ月戸外にさらしただけでも相當に低下し餘り安定とはいえない。

結局紫外線透過率も鐵分をふくむ窓ガラス等に比較した場合優秀であるというに過ぎず、光學的に紫外線透過物質として用いられる水晶などの代りに樹脂ガラスを用いることはできない。なお他の樹脂の中には醋酸セルローズのように、厚さ 8.7 mm の透過最短波長が 250 μ でポリメチルメタクリレートよりもよいものがある。

3 樹脂ガラスの光學的成形法

一般に熱可塑性の樹脂の成形には單量體を型の中に入れてその中で重合させる方法(casting)と、重合體を加熱液化して型の中え流しこんで成形する方法(molding)が用いられる。ところで、光學的な面はその凸凹が光の波長の數分の一(0.1 μ)以下であることを要求し、この精度を出すためには特殊の考慮が必要である。例えば casting の場合にしても、たゞ一回の鑄込み重合で成形したのではせいぜい虫めがね程度のレンズしかできないので、工程を二つに分けたり、molding と casting を組合わせたりして必要な光學的の面を作っている。

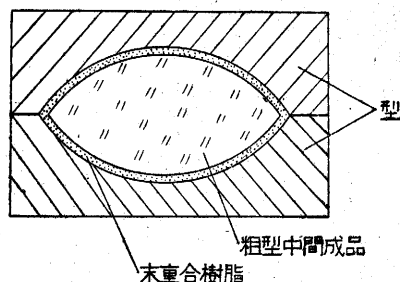
(i) molding による成形法⁽³⁾

この方法は米國で實用化されたものであらかじめ板狀、粒狀、粉狀等に重合させた材料を加熱して液化し、型の中え流し込んで成形する方法で射出成形法といわれている。また重合一步手前の粘度の高いものを用い、これを mold して相當長時間加熱し重合を完結させると同時に成形する方法も成功している。これらの場合材料の重合法や molding の時の溫度分布等に注意すべきはもちろんであるが、型についても充分吟味する必要がある。型の内面はもちろん光學的に仕上げなければならないがその材料の撰擇も大切で、例えば内面にスラッグや炭素の粒が出ているとよいレンズ面はできないので、型材としては 0.05% 以下の炭素をふくむ 47% Ni 鋼をガス放出し内部歪を除いて用いたり、あるいは Cr メッキをほどこす等の處置をしなければならない。

米國では射出成型の専用機械を作り一度に 2~4 個のレンズや時計用ガラスを僅か 7 分間で連續的に大量に成形し、優秀なものはレフレックスカメラのファインダー用レンズとして用いている。

(ii) casting による成形法

これは最後の仕上げ工程に casting を用いる方法である。重合の際におこる収縮は前述のように相當に大きいから、一回の casting で光學的な面を作ってしまうことはできない。そこではじめに casting あるいは molding によつて大體の形を作つておけば、次の仕上げ工程は casting で光學的な面を出すことができる。わが國⁽⁴⁾では大體の形を casting によつて得たブロックから機械加工で作つており、英國では⁽⁵⁾ 半重合した樹脂を加壓して型の中え mold し加熱して重合を完結して 0.0025mm の精度のものを作っている。この工程では重合による収縮が可成り大きいから、型は収縮につれて動くように設計する必要がある。この中間成品を燒鈍して歪をのぞいてから精密な型に入れ、その僅かの隙間に未重合の材料を入れ、casting して重合を完結させると、その境目は分らなくなつてしまつてしかも所望の光學的な面が得られる(第3圖)。



第3圖 Casting による仕上げ工程

この場合もつとも大切なことは母體と表面の層の屈折率が完全に一致するようにすることである。このような方法によれば仕上げ工程の casting は重合させる合成樹脂の層がきわめて薄いので内部に歪を起す心配もなく、収縮も問題にならないのでよい結果が得られる。

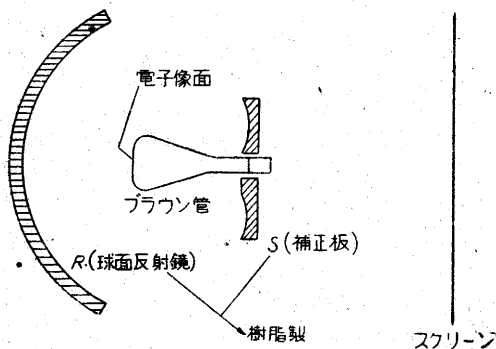
以上いずれの方法にしても、大量生産の場合には無機ガラスの約5工程以上にわたる面倒な加工法にくらべればはるかに簡単である。これは樹脂ガラスを光學材料として使う場合無機ガラスより優れている最大の特徴である。特に型の形は全く自由であるから、任意の曲面も球面や平面と全く同様の手數と精度ででき高次曲面は一個一個時間と手間をかけて手磨きするより他ない無機ガラスとは比較にならぬ利點である。このようにして作られたレンズ等の光學的精度の一例を上げると屈折率の各成品間の差は ± 0.00015 、表面の精度はニュートンリングで1時につき 2~5 本程度に仕上げるができる⁽⁶⁾

4 光學部品への應用例

(i) 非球面レンズ

上述のような方法で相當精密なものができるとはいへまだ高級の光學系に用い得るためには精度が不充分で、一般にはもう一段精度の低いものに用いられている。すなわちレーダー、オシログラフ、スペクトロメーター

の投影用レンズ、各種の拡大鏡、集光装置、高速度カメラ用レンズ、サーチライトや信号用の曲面反射鏡等である。米英兩國で現在さかんに用いられているのはテレビジョンの投影用で、⁽⁷⁾これは完全に實用の域に達しており、プラスチックの特色を利用した代表的な例であろう。すなわち、第4圖のようにブラウン管の螢光面にできた像を反射鏡Rで拡大してスクリーンに投影するので



第4圖 シュミット式テレビジョン投影装置

あるが、この反射鏡はきわめて明るくて（口径比が大）かつ視野が廣くなければならぬ。このような大口徑比で廣視野になると、球面鏡だけでは球面収差が非常に大きく使いものにならなくなるので、これを補正するために補正板（圖S）を挿入したシュミットカメラと同じ原理の投影機が用いられている。

この補正板の曲面は普通四次曲面であるため、ガラスで作るとすれば手磨きしなければならぬので、大量生産は不可能であるがプラスチックを用いれば上述の方法で簡単に作ることができる。精度はやゝ落ちるが実際にプラスチックで作られた投影装置の像は、テレビジョン自身の分解能（像面を scan する線の本数でできる）よりは精度のよい像を作るから、英國 B.B.C. や米國 R.C.A. の家庭用テレビジョンに廣く用いられている。

(ii) フィルターへの應用

合成樹脂をフィルターに應用する場合に有利と考えられる點は二つある。一つは有機染料を自由に使うことができるので従來のフィルターにくらべて吸収特性のよいものが得られる可能性が大きいことで、もう一つはメタクリル樹脂のような合成樹脂に直接染料を入れて重合させ色ガラスフィルターに相當するものを作れば、割れたりにはがれたりする心配がなく安全であることである。いま迄合成樹脂を利用して実際に作られたフィルターにも例えば赤外線透過用のフィルターのように、染色した樹脂を二枚のガラス板の間にはさんで用いているものとプラスチックの中に染料を入れてそれ自體をフィルターとして用いている各種の可視領域フィルターとがある⁽⁸⁾。可視光線を遮つて赤外線だけを通すフィルターは、戦時中米國でさかんに研究されたのであるが、アゾ染料をアルコールに可溶な形に變えて適當な樹脂（尿素・フォル

ムアルデヒド樹脂に 30~70% のアルキッド樹脂を加えたもの等）に溶かしてガラス板の間にはさみ、熱処理すると丈夫なフィルターができる。

染料の濃度や種類を變えて各種のフィルターが作られ波長 0.4~1.0 μ の間で非常に急な透過曲線を持つ性能のよいものが作られている。また 1 μ では透過率が僅か 1% 以下であるが 1 μ 以上で急に透過率が増して 2 μ 以上で 70% 以上を透過するフィルターも報告されているがこれ等はいずれも有機染料を使用した結果従来よりもよい性能のものが得られるようになったのである。可視領域のフィルターについても同様で、染料の撰擇度が増した結果特殊な吸収、透過特性を持つフィルターもできるはずで、在來のフィルターを二枚重ねて得られるような特性を一板の樹脂製フィルターに持たせることも可能となつている。紫外線透過用フィルターを除いて、適當な染料とその臺になる合成樹脂を組合わせて丈夫で安全な、しかも特性のよい各種のフィルターが今後いろいろ製作されるであろう。

(iii) 回折格子の複製⁽⁹⁾

メチルメタクリレートを容器の中で重合させると、その容器の内面の凸凹をきわめて忠實に再現する性質がある。この性質を利用して廻折格子のレプリカを取ることができる。廻折格子は 1mm に 600~1200 本位の等間隔の平行な溝をガラスや特殊の合金の面に刻んだものであるが、このように細い規則的な溝を刻むのは容易なことではない。優秀な格子を刻む機械はごく少くして従來廻折格子は貴重品に屬していたが、2-(ii) で説明した方法によつて原型をいためることなく、原型とほとんど同じ性能のレプリカが容易に得られるようになった。またこの表面の性状の再現性は電子顯微鏡的にも正確であるので、電子顯微鏡の試料を作る場合にあまねく利用されているのは周知の通りである。その他にもこの性質は光學器械用の微細目盛の複製等に利用されている。

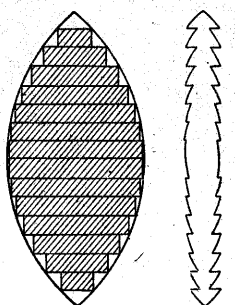
(iv) 偏光板

セルロース系のプラスチックは機械的に引張つてやると、光學的に異方體となり、偏光板の作用をすることは古くから知られている。セロファンは偏光性については研究も相當あつて、その數量的な測定も行われている。同様の性質は醋酸ビニールの薄い膜についても見られるし、その他の合成樹脂の中でも分子配列が鎖状のものはその重合過程に適當な操作をしたり、あるいは成形の時に特殊な方法を行つて分子の鎖を一定方向に配列させることができれば、機械的な歪を與えないでもそのままで偏光板の働きをするものが得られるであろう。

(v) 特殊な形の透明體

本誌3月号に紹介された圓錐レンズもその一例である。その他、圓筒レンズや光學機械中に用いる複雑な形のプリズム等は、合成樹脂を用いると製作の容易なな

が多い。また、フレネルレンズとよばれる焦点距離が短かくて非常に大きな、しかも薄いレンズも容易に作る事ができる。第5圖の左に示すようなレンズを分割して考えると、レンズの集光性は同圖右のようにしても全く同じであることがわかる。こうすればレンズの重量を軽減することができるので、燈臺用などにはこの形式のレンズが昔から用いられていたが、無機ガラス製ではその製作は非常に困難であつた。しかし合成樹脂を利用すれば成形が容易だから厚さも薄くし、レンズ帯を細くすることもでき



第5圖 フレネルレンズ

る。Eastman Kodak Co. ではポリスチロール、メタクリレートその他鹽化ビニールや醋酸纖維を用いて1 cm に80~120本のレンズ帯を持つ薄いフレネルレンズ、(sheet plastic lens) を作り、レフレックスカメラの焦点面に利用して畫面の明るさを中央部で250%、周縁部で100%増加することに成功したとのことである。(10)

(vi) レンズ接合劑

従来複合レンズの接合劑に次の組成の混合物

α ブチルメタクリレートとデエチレングリコール

1:1の混合物.....100%

過酸化ベンゾイル.....3%

デビニールベンゼンとエチルビニールベンゼン

3:1の混合物.....1.5%

を70°Cで16分熱したものはゼラチン状で、これがバルサムの代りに接合劑として用いられるとのことである。これがバルサムにくらべてどんな點がよいのかは明らかでないが、他にも樹脂の接合劑で光學的な接合劑として用い得るものがあると思われる。

(vii) 光學機械の十字線

實驗室等で望遠鏡の十字線を張る場合に蜘蛛の糸など

を用いるが、これはなかなか面倒である。ポリスチロールの濃厚な溶液を一端を引き伸ばしたガラス管中に入れ小さな穴から出る液を伸ばしてやると比較的容易に太さ3μ程度の細い線が得られ、かなり丈夫なので光學機械の十字線に利用される。

5 む す び

以上合成樹脂のいろいろの光學的用途について解説した。その中には樹脂ガラスでなくては、實際上製造できないようなものもいくつかある。しかしそれは結局特殊な光學的用途に過ぎない。樹脂ガラスの利用範圍がこのよう光學ガラスでは不可能な範圍にかぎられるとしても、その價值は決して小さなものではなく、今後ますます各種の方面に利用されるであろうが、さらに一般的な光學材料として、光學ガラスに代つて最高級光學部品に使用できないだろうか。このためにはかつてアップが顕微鏡の見えをよくするために性質の異つたガラスを探し求め、試作されたガラスが次々に變色するのに屈せず、遂に安定な所望のガラスを作り上げた如く、これと同じような努力が樹脂ガラスについて、これからなされねばならない。合成樹脂が現在の特殊用途の範圍を脱して、最高級光學部品の領域に進出するか否かは今後に残された問題である。

なお終りに本文を書くに際しいろいろ御指導して下さい久保田教授、文献等の御世話をいただいた竹村民三氏に厚く御禮申上げる。

参 考 文 献

- (1) Modern Plastics, Jan. 116, 1946; J.O.S.A., 36, 349, 1946
- (2) Trans. Farad. Soc., 34, 1239, 1938; J.O.S.A., 29, 291, 1939
- (3) Modern Plastics, July, 85, 1949
- (4) 久保田・竹村, 應物學會講演, 昭和22年6月
- (5) Modern Plastics, Oct. 107, 1947
- (6) J.O.S.A., 36, 349, 1946
- (7) Nature 160, 99, 1947; J.O.S.A., 36, 352, 1946
- (8) J.O.S.A., 36, 569, 1946; Kunststoffe 30, 267, 1940
- (9) 久保田・谷田部, 應用物理 16, 123
- (10) J.O.S.A., 38, 1104, 1948; 雜誌 Life, Feb. 28, 1949

次 號 豫 告 (12 月 號)

“ 輸 送 ” 特 集 號

論 說

交通の調整.....沼田政矩

特 集

自動車輸送と道路構造.....星 埜 和

トラックの輸送能力.....平 尾 收

操重設備の問題.....赤 木 英 一

溶銑の運搬について.....金松 森下 九郎
御茶の水驛の交通.....沼田 幸雄
終端設備の問題.....石 谷 政矩
輸出包装の諸問題.....菅 谷 榮
空氣輸送と水輸送.....東 畑 道
その他 技術史ノート, 生研ニュース等.....渡 邊 郎仁