

# 薄膜とその應用

久 保 田 廣

光の波長くらいの薄い膜は、正確な厚さに硝子の上へつけるとフィルター、半透明鏡等になり大きな用途がある。それではこのような薄い膜をどうしたら正しく所望の厚さにつけることができるであろうか。色の理論的取扱により初めて見出された方法を述べ、あわせて薄膜の用途を紹介する。

## 1. 緒 言

薄い膜とか厚い膜とかいつでも相対的問題であるがここで薄膜というのは光の波長程度、すなわち  $10^{-4}$  mm 内外の光學的に薄い透明な膜のことであると思つていただきたい。このような薄い膜を太陽にかざすと美しい色を呈する。これは光の干渉によるものでシャボン玉や水上の油の薄膜ですでに御承知のことと思うがこの色を干渉色といつている。膜の厚さによつて干渉により弱められたり強められたりする波長が異なるので、白色光の組成比が變り着色して見えるのである。この色は昔から良く知られており膜の厚

第 1 表

厚 さ	色
0.114 $\mu$	薄暮の灰色
0.148	むぎわら黄色
0.168	帯 褐 黄 色

さの目安として用いられたもので、古くはニュートンの「光學」にも記述がある程である。第 1 表はこの色について

Newton の與えた表であるが色を名稱で表しており、例えば薄暮の灰色といつてもどのような色かあいまいである。

ところが最近薄膜の應用がいちじるしく發達し、色による膜厚の測定ということが重要になつてきた。\*そこで

\*膜厚の測定には“くりかえし反射干渉法”（表紙説明参照）もすぐれているが、これは膜を種々處理したり、顯微鏡下で單色光で見る必要があるので、工場等には向かない。何等の處理もせず太陽光または電燈の光で見てもすぐわかるという點で色による測定は廣く用いられている。

筆者等は最近の色彩論をとり入れて色と厚さの關係を定量的に表すことを試みている。その成果の一部を薄膜の應用例と共に述べて見よう。

## 2. 薄膜の應用例

### (a) 反射防止膜

光學的に薄い膜が實用に供された初めは歴史的にいうとレンズの反射防止膜である。光の波長の  $1/4$  の厚さの膜をレンズまたはプリズムの面へつけてやると反射光がいちじるしく減り、このための光の損失や重複反射による幽霊像 (ghost) をふせくことができる。これは膜の上面(空気に接する面)と膜の下面(硝子に接する面)からの反射光がたがいに干渉するが、膜厚が  $1/4$  波長であるので兩者の位相差が  $1/2$  波長になり消し合い、結局反射光が弱くなりそれだけ透過光が大になるのである。最近の光學機械のほとんどすべてにほどこされている「コーテッド處理」というのは、この反射防止膜をつけることをいつているのである。理論によると反射防止が完全であるためには膜の屈折率  $n$  は硝子の屈折率  $N$  に對し  $n^2=N$  でなければならないが、 $N=1.5$  とすれば  $n=1.225$  となり、このような低屈折率のものはないのでこれに近い弗化物、 $MgF_2$  や氷晶石 ( $3NaF \cdot AlF_3$ ) が多く用いられている。

### (b) 反射増加膜・半透明鏡

反射防止の原理を逆に用い、 $1/2$  波長またはこれに相當する厚さの膜をつけ、膜の上下兩面からの反射光の位

第 3 卷

11 月 號

目 次

第 11 號

## 目 録

金屬住宅ができるまで.....	19
金屬住宅の内と外.....	20
研 究	
薄膜とその應用.....	久 保 田 廣... 1
マイクロ波の給電線.....	森 脇 義 博... 5
蒸気爆碎.....	森 脇 義 博 井 源 禎 夫... 9
氣流の燃焼.....	井 出 條 二 生... 14
IV 型金屬住宅の試作.....	水 町 長 生... 14
不純なアルミニウムの陽極酸化被膜.....	星 野 昌 一... 21
.....	西 川 精 一... 25

カーブを曲る自動車の動きについて

..... 星 笠 和... 29

## 實驗ノート

小型精溜装置と圓錐底型四ツ口・フラスコ  
..... 永井芳男・青山正壯... 34

## 速 報

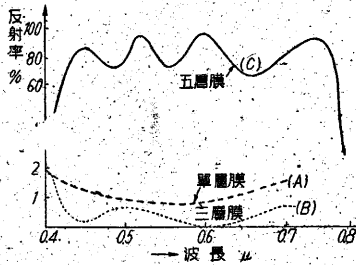
30. ヘキシル・レゾルミンの二、三の新エステル..... 永井・田邊・黒川... 34

31. ベンゾイルナフタレンの二、三の新誘導體..... 永井・田邊・高橋... 35

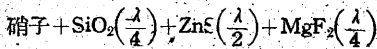
生研ニュース・編集後記..... 36

相差が一波長になるようにすれば干渉でたがいに強め合うから硝子だけの時より反射光が強くなり反射増加膜ができる。これは明るい半透明鏡として用途がある。屈折率が大きい程反射率が大きくてよい半透明鏡が得られるが、現在實用になつているものは  $ZnS(n=2.2\sim 2.4)$ ,  $TiO_2(n=2.6)$  等の厚さ  $1/4$  波長の膜である。これは膜の下面における反射の際屈折率の大きな媒質から小さな媒質へ入るので位相が反轉し、 $1/4$  波長の厚さの膜が加つたと同様になり、結局  $1/2$  波長の厚さの膜としての働きをするのである。

これ等はみなある波長の光についてだけのことで他の波長のことは考えていない。従つて例えば  $MgF_2$  で波長  $0.55 \mu$  (黄色)の光に對し反射防止効果が最大になるようにつけると、分光反射率曲線は第1圖(A)のようになり重および赤の光に對しては残留



反射は相當大きく、從つて反射は紫色透過光はやや黄色ということになる。透過または反射光が無色になるよう各波長についてほぼ等しい反射率を與えるためにはこのような單層の膜では不可で種々の屈折率の膜を二層三層につけるとよい。例えば、 $SiO_2$ ,  $ZnS$  及  $MgF_2$  の三層膜で



のような三層膜は第1圖(B)のような平坦な分光反射曲線となる。

(c) 干渉フィルター

分光反射率曲線をできるだけ平坦にしようという努力と反對に波長に對する選擇性をいちじるしくしてやるとフィルターの働きをするようになる。このようにして作ったフィルターを干渉フィルターという。その例として當研究室で完成した五層膜の干渉フィルターは、第1圖(C)のように可視部では大體一掃なわずかの吸収があるのみであるが、近赤外部を完全に cut する無色の熱線フィルターである。

(d) 干渉偏光器

以上は光が垂直に膜面に入る時だけを考えたのであるが、光が膜面に斜に入るようにすると反射率は入射面内の偏光成分 (p-成分) とこれに垂直な面内の偏光成分 (s-成分) では異なり、とくに前者の反射率が0になる特別な入射角(偏光角)で入射させてやれば完全な偏光を得ることができる。これを干渉偏光器という。干渉の原理によるものであるため可視部ばかりでなく、赤外、紫外

部にも應用し得るものである。

3. 膜厚の正確な測定

これ等の例からも判るようにこれ等のものを作るには  $ZnS$ ,  $MgF_2$  等の膜の  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ , ... あるいは任意の厚さの膜を正確につけなければならない。このような膜は眞空中で蒸着によりつけられているので膜の厚さを知るには干渉色によるより外ない。この色を科學的に嚴密に記すためには昔のような名稱によることを排し座標による記述を必要とするものである。色の座標が決まれば、これがどのような色であるかを知るには種々の方法があるので十分正確な測定ができる。

反射光の色の座標を出すにはその分光反射率曲線を知り色彩論による計算を行えばよい。筆者等はこの方法により膜厚と色の關係を表すグラフを作り、各方面で利用されているが、これについてはすでに本誌第1巻第2號で述べたことがあるので、ここでは再び述べない。ところがこの方法で干渉色をよく調べて見ると、膜厚の變化に對し色の變化の極めて鋭敏ないわゆる鋭敏色というものがあることが判る。そこでこれを利用すると膜厚の測定が極めて正確にできるようになる。本文ではこの鋭敏色を利用し膜厚を正確に測定することについて述べて見よう。

4. 垂膜入射の時の鋭敏色とその應用

硝子の上へ屈折率  $n$  の膜を  $d$  の厚さにつけた時膜の上下の境の反射率を振幅比で  $B$  及  $C$  とし、上面からの反射光を  $B \sin(\omega t)$  とすれば下面からの反射光は膜を往復するだけ位相がおくれるから、光の波長  $\lambda$  をとすれば垂直入射の時は、

$$C \sin(\omega t + \delta), \text{ ただし } \delta = \frac{2\pi}{\lambda} (2nd) \text{ となる (第2圖).}$$

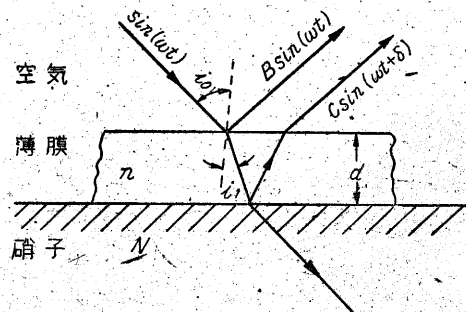
従つて反射光の強度はこの二つの波の干渉したもの

$$R^2 = B^2 + C^2 + 2BC \cos \delta$$

となるが、色を考える時は比だけを考えればよいから

$$R^2 \sim \epsilon + \cos^2(\delta/2) \text{ ただし } \epsilon = \frac{(B-C)^2}{4BC} \dots (1)$$

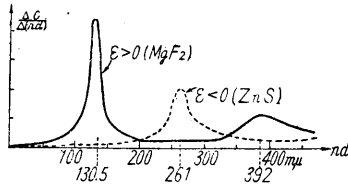
とおける。膜の屈折率が硝子より小であれば(例えば、 $MgF_2$ ) 光は空氣→膜→硝子と入る時、膜の上下の境の



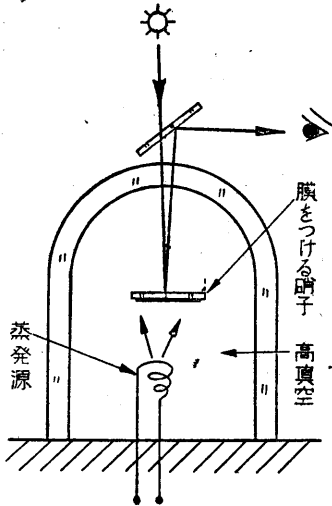
第2圖 光學的薄膜

どれても屈折率の小さい方から大きい方へ通るから、光が膜面に垂直に近く入射するとすればどれても反射の際に位相の變化はなく  $B$  と  $C$  は同符號で従つて  $\varepsilon > 0$  であるが、膜の屈折率が硝子より大であつて(例えば ZnS) 膜の下の鏡の面では光が屈折率の大きい方から小さい方へ通るから、下の鏡の面の反射の際には位相が反轉する。従つて  $B$  及  $C$  は異符號すなわち  $\varepsilon < 0$  である。この  $\varepsilon$  が正か負によつて干涉色と厚さの關係に二種類できる。この二種類を區別するのに本文では簡單のため、 $MgF_2$  の膜、ZnS の膜の場合とよんでおこう。

ところで(1)式を用い干涉色を計算して、これから厚さの變化  $\Delta(nd)$  に対応する干涉色の變化  $\Delta C$  を求めると、その比  $K = \Delta C / \Delta(nd)$  は、色の變化の敏感さを表していることになる。この計算は(二つの偏光板の間へ結晶の薄片を入れた着色偏光の場合の干涉色と全く同様になるのであるが)着色偏光の場合について本誌第3巻第3号に述べてあるのでその結果を今の場合に書きかえて見ると、 $K$  は  $nd$  に對し第3圖のように變化する。これから  $MgF_2$  の膜の場合



第3圖 鋭敏色の感度



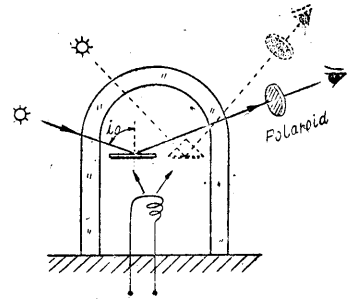
第4圖  $MgF_2$  の  $\lambda_0/4$  及 ZnS の  $\lambda_0/2$  の膜を正確につける方法

ZnS の膜の場合には  $nd = \lambda_0/2, \dots$  の厚さが鋭敏色を興える厚さになつてゐることが判る。すなわちこの厚さの膜は鋭敏色を利用すると正確につけられるのである。従つて (a) で述べた単層反射防止膜 ( $MgF_2$  の  $\lambda_0/4$  の膜) をつけるときは、第4圖のように光を垂直に近く入れてその反射光の色を見ていただけで正確につけられるのである。

5. 斜入射の時の鋭敏色の應用 (I)

ところが第3圖から判るように、ZnS の膜にとつてはこの邊の厚さのところは、色の變化の最も鈍感のところであるので (b) で述べた半透明鏡 (ZnS の厚さ  $1/4$  波長の膜) を作ることや (d) の干涉偏光器中の ZnS 膜を

正確な厚さにつけることは困難である。そのような場合にはどうしたらよかるうか。それは ZnS の膜が  $MgF_2$  の膜と同じ性質の干涉色になるようにすればよいわけである。このため入射角を變えて、 $\varepsilon$  を正にする工夫をして見よう。今光を斜に入射させると反射率は入射面内の偏光に對するものと、これに垂直な面内の偏光に對するものと異つてくる。前者の成分に對する反射率を  $B_p, C_p$  と記し、入射角を次第に大きくして行つた時のこの變化を見て見よう。入射角が大きくなると共に  $B_p$  は減少して行き、ある入射角  $i_a$  (ZnS の場合約  $65^\circ$ ) で  $B_p = 0$  になるところがある。これは膜の上面の偏光角であるが、入射角がこれより大きくなると  $B_p$  の符號が變る。これは偏光角の前後で反射光の  $p$ -成分の位相が反轉するためである。そこでこの  $i_a$  より大きい入射角の時の  $p$ -成分の干涉色を見ると初め  $B, C$  が異符號 (ZnS の膜) であれば同符號になる。すなわち ZnS の膜でも  $\varepsilon > 0$  となるのである。従つてこのような角度で見ていると、 $\lambda_0/4$  の厚さが鋭敏色になるので色を見ながら厚さを正確につけることができる。同じ  $\varepsilon > 0$  でも  $\varepsilon$  が小さい程鋭敏色の感度が大きく  $\varepsilon = 0$  の時が最もよい。今の場合  $n = 2.20, n_2 = 1.50$  とすれば  $i_a \approx 71^\circ$  の時  $\varepsilon = 0$  となるから第5圖のように  $p$ -成分だけを見るために Polaroid を用い、入射角が  $i_a$  になつた時の反射光の色を見ればよい、ただしこの入射角はあまりに大きく、観測に不便であるといつておれば、同圖の點線のように補助プリズムを用いその色を見ていけばよい。



第5圖  $MgF_2$  の  $\lambda_0/2$  または ZnS の  $\lambda_0/4$  の膜を正確につける方法 (ただし  $i_0$  はそれぞれの場合  $56^\circ$  または  $71^\circ$ ) 點線は補助プリズムを用いた時  $i_0 \approx 45^\circ$  になる。

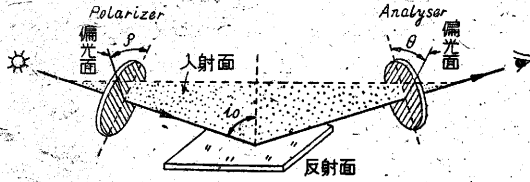
$MgF_2$  の膜も同様、膜の上面の偏光角 ( $i_a \approx 52^\circ$ ) より大きい入射角では  $B_p$  の符號が變るがさらに入射角が大きくなり、下面の偏光角 ( $i_b \approx 77^\circ$ ) より大きくなると  $C_p$  の符號も變るのでこの中間の入射角 (約  $56^\circ$ ) で  $p$ -成分を観測すれば  $B, C$  は異符號となり、 $\lambda_0/2$  が鋭敏色となるから (c) で述べた多層膜の第二層や (d) の干涉偏光器の膜を正確につけることができる。 $s$ -成分については  $B_s, C_s$  は、符號を變えないからこのようなうまいことはできない。

6. 斜入射の時の鋭敏色の利用 (II)

ところがこの方法を利用しようとする困つた問題が

\*  $\lambda = 520\mu$

起こる。それはこのように斜に見ると光に膜の中を斜に通るから、B光とC光の位相差は、 $2\pi(2nd)/\lambda$  ではなく  $\frac{2\pi}{\lambda}(2nd)\cos i_1$  に減少することである。ただし  $i_1$  は膜中へ屈折角(第2圖参照)。従つて干渉色を見て  $\lambda_0/4$  の厚さにつけても實は  $\frac{\lambda_0}{4} \frac{1}{\cos i_1}$  の厚さについてことになる。これをふせぐためには、 $i_0$  はできるだけ0、すなわち垂直入射に近くしないといけない。ところがp成分の干渉色だけ見ていたのでは  $i_0$  は前述のように大きな角になってしまうのでp成分とs成分の混つた



第6圖 Polaroids と入射面の角

ものの干渉色を見て見よう。このために今迄のように自然光を入射させたのでは無意味であるから、もう一つ Polaroid を用いこれを反射面の前へおき 偏光を入射させて見よう。これを Polarizer と名付け、反射後通る Polaroid を Analyzer と名付けよう。今 Polarizer と Analyzer の偏光面が入射面に對しそれぞれ  $\rho, \theta$  の角をなしているとすれば(第6圖)この場合膜の上の境の面で反射された光の振幅は、

$$B' = \cos \rho \cos \theta B_p + \sin \rho \sin \theta B_s \dots (2)$$

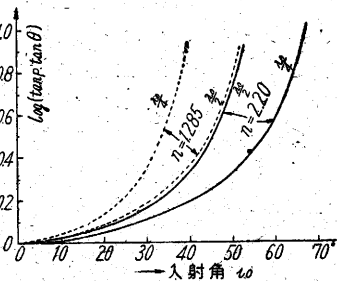
であり、下の境の面で反射された光の振幅は

$$C' = \cos \rho \cos \theta C_p + \sin \rho \sin \theta C_s \dots (3)$$

となる。ただし  $B_s, C_s$  は、膜の上および下の境の面における s-成分に對する反射率である。この  $B', C'$  が今までの  $B, C$  と同様の役を果たすことになるので、 $\rho, \theta$  を適當に組合わせると小さい入射角でも  $B'$  と  $C'$  の符號を任意になし得るのである。最大感度の鋭敏色を得るためには、 $\epsilon=0$  または  $-1$ 、これは(1)から明なように  $B' = +C'$  または  $-C'$  であるから(2),(3)を用い、

$$\tan \rho \tan \theta = -\frac{B_p \pm C_p}{B_s \pm C_s}$$

を得る。右邊は入射角が決まれば決まる量であり、第7圖に  $n=1.285$  および  $n=2.20$  の場合について示してある。(ただし楕號は  $\epsilon=0$  すなわち coat する膜が  $\lambda_0/4$  である時



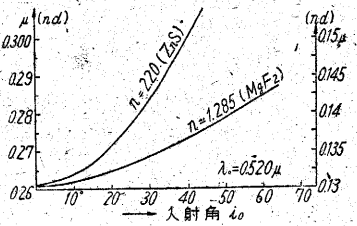
第7圖 入射角と  $(\tan \rho : \tan \theta)$  の關係

正、 $\epsilon=-1$  すなわち  $\lambda_0/2$  の時負になるからこれに相當して曲線も二つある)。次に膜厚 ( $nd$ ) を縦軸に、入射

角  $i_0$  を横軸として、

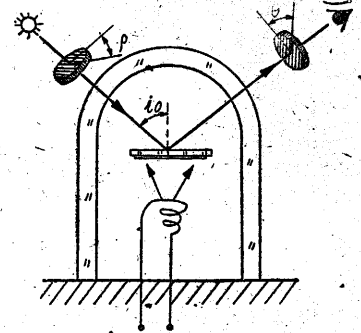
$$(2nd)\cos i_1 = \frac{\lambda_0}{2}$$

および  $\lambda_0/4$  の曲線が第8圖に示してある。ただし  $\lambda_0'$  の時は右側の  $\lambda_0/4$  の時は左側の目盛りで ( $nd$ ) を読むも



第8圖  $(n_2)/\cos i_1$  が  $\lambda_0/2$  または  $\lambda_0/4$  を與える入射角

のとする、この二つの圖を用い所望の厚さ ( $nd$ ) の正確な膜を作るにはまず第8圖から所望の厚さ ( $nd$ ) が見掛け上  $\lambda_0/4$  または  $\lambda_0/2$  になる入射角  $i_0$  を求め、次に第7圖からこの  $i_0$  に相當する  $\tan \rho \cdot \tan \theta$  を求めれば  $\rho$  と  $\theta$  の組合せが決るから、第9圖のようにして



第9圖 小さい  $i_0$  で膜厚を正確につける方法

Analyzer, Polarizer の角をそれぞれ上述の  $\rho, \theta$  にして干渉色を見れば所望の色が鋭敏色になっているから、正確につることができるのである。(b)における ZnS の膜、(c)の干渉フィルター、(d)の干渉偏光器の各層の膜はこのようにして所望のものを正確につけることができるのである。

### 7. 概 括

光の波長程度のうすい透明な膜は、干渉により光を弱めたり強めたりする性質があるので、これを用い干渉フィルター、干渉偏光器、反射防止膜、半透明鏡等ができる。ところがこれ等のものをつける場合、膜の厚さを真空中で正確に測定しつゝ、つけなければならない。このため色彩論を用い膜厚と干渉色の關係を明かにしたが、本文ではその中特に鋭敏色を利用し膜厚を正確につける方法を述べた。これ等の結果は現在當研究室や諸會社で用いられているものである。任意の膜厚を正確につけるには、この外に光源 (のエネルギー分布) を變える方法があるが、未だ實用にはなっていない。本論では I.C.I の C-光源 (平均白光に最も近い) を用いるとして論じた。なほ本論の詳細に關しては著者の下記報告を参照されたい。(1951·8·21 受)

### 文 献

2 についで、日本物理學會誌第五卷第五號(昭 25, 9)  
 3. " Journ. Phys. Soc. Japan., Jan. 1950.  
 4. " Journ. Opt. Soc. Am., Aug. 1951.  
 5 および 6 " " " " " Jan. 1951