

# ヘッドアップディスプレイ

セントラル硝子（株）テクニカルセンター 牧田 研介

## Head-up display

Kensuke Makita

Central Glass Co., Ltd.

Technical center

### 1. はじめに

ヘッドアップディスプレイ (HUD) は、一般航空機の離着陸時の滑走路への誘導案内や一瞬の判断を要求される戦闘機ではレーダー上の敵機影などを、視野前方に設けた透明な特殊スクリーン上に前方の景色と重畳して映しだし、飛行の安全性と瞬時の視認性など高めることを目的として開発された船空機用の表示システムである。このシステムでは、パイロットが前方の景色に視線を据えたまま、頭を動かさずに種々のフライト情報の確認が行えるためその名がつけられている。

最近この HUD が、前を見たまま各種の情報を確認できるという点から、車を運転する際の安全性向上につながるとして自動車業界の興味を引くようになってきており、コンパクトなシステムとして自動車に搭載するための多くの試みがなされている。

これらのシステムでは、車速度などのドライビング情報を、

- ①ウインドシールド（フロントガラス）の車内側表面に形成したスクリーン上に表示する。
- ②インストルメンタルパネル上に小さなスクリーンを立てその表面に表示する。

という2通りの方法が提案されているが、現在では衝突時などの運転者保護の観点から、前者の方法が多く指向されている。

日産自動車（株）、関東精器（株）と当社は、共同で①の方法によるコンパクトな HUD を開発し、現在このシステムは、'88 シルビア、'89 マキシマという実商業生産車に世界で初めて搭載されている<sup>1)2)</sup>。

本稿では、この HUD の概要と、当社が担当したコンバイナーと呼ばれるウインドシールドに直接形成した特殊な透明スクリーンの作製について報告する。

### 2. HUD コンバイナー

HUD の概要を Fig. 1 に示す。光学系は高輝度の蛍光表示管 (VFT)、反射鏡およびウインドシールドの表面に形成されたコンバイナーと呼ばれる選択反射スクリーンからなっている。コンバイナー付きウインドシールドを Fig. 2(a) に示す、中

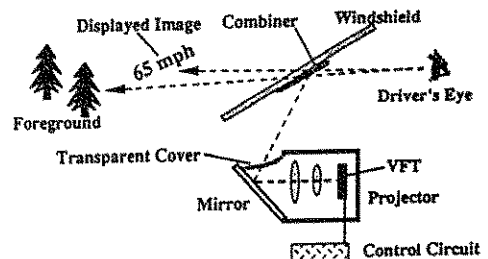


Fig. 1 Optical system of HUD

中央の白く反射した部分がコンバイナーである。また Fig. 2(b)には、実際に車速度が表示された様子を示す(矢印先端部の25の表示)。

ウインドシールド上のコンバイナーの位置は、運転者がコンバイナー上に表示された車速度などのドライビング情報を確認する際に、視線を前方の景色から移動させる必要がないように設計されている。

HUDが実際に走っている自動車の表示システムとして機能するためには、コンバイナーは、

- ①垂直入射の可視光透過率が70%以上なければならない。
- ②530 nmにピークを持つ選択反射性を示し、その反射ピークの高さは25%以上なければならない。
- ③ガラスと同等かそれ以上の耐久性を持たなければならない。

という要求性能をすべて満足する必要がある。

①の可視光透過率は、ウインドシールドに対する法規制値であり、コンバイナー部分であっても

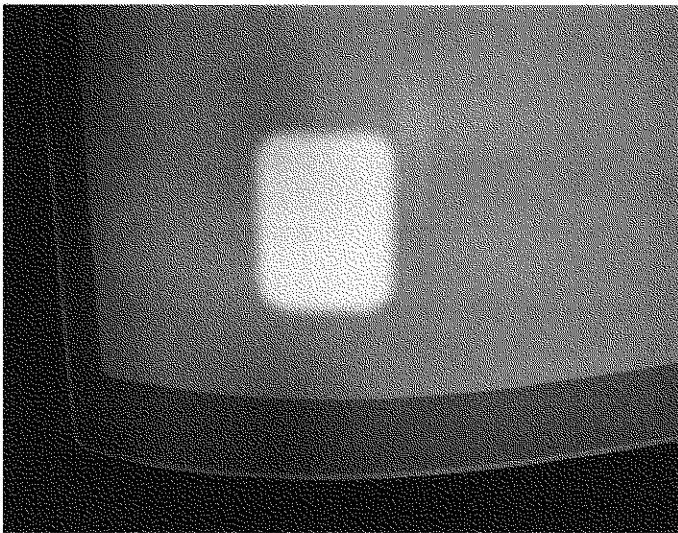


Fig. 2(a) The windshield coated with the combiner



Fig. 2(b) Displayed image of HUD system

この規制を遵守しなければならない。

②は、Fig. 3 に示すように、ドライビング情報を表示するために用いる VFT は発光主波長を 505 nm にもっており (Fig. 3 中 A)、これを人が見た場合には、視感度 (Fig. 中 B: 人の目の感度の波長依存性) で補正した破線で示す 530 nm にピークを持つ発光スペクトルとして感じる<sup>4),6)</sup>。さらに、車外 (前景) が真昼の雪道や真夏の日中の白いビル壁など非常に明るい場合であってもドライビング情報の表示がはっきりと視認できるためには、表示光輝度/(前景光輝度+表示光輝度) で表されるコントラスト比が高くなければならない。これらの 2 つの要素を勘案すると、コンバイナーは 530 nm の波長にピークを持つ高い選択反射性を示す必要がある。

③では、コンバイナーはウインドシールドの内側表面に直接形成されるので、ユーザーが布やクリーナーで払拭したり、あるいは嗜好品や芳香剤を飛散させるなどの一般的な取扱いを考慮すると、耐摩耗性、耐薬品性あるいは耐湿性などの耐久性は、ガラスと同等かそれ以上でなければならない。

### 3. コンバイナーの光学設計

#### 3.1 薄膜の光学的性質<sup>5),6)</sup>

薄膜の光学的特性を計算するときには、多くの場合、薄膜を均質で等方的な平行面とみなしてよい。この場合、膜の光学的振る舞いは、複素屈折率  $\hat{n} = n - iK$  ( $n, K$  を光学定数と呼び、透明体では  $K=0$ ) と膜厚  $d$  が与えられれば一義的に決まる。ところが、均質、等方、平行平面膜と考えた計算では、実測される膜の光学的振る舞いが説明

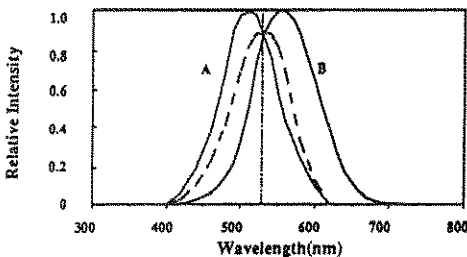


Fig. 3 The luminance of VFT corrected by the sensitivity characteristics of human eyes

できないこともある。このときは、必要に応じて、平面の代わりに粗面を、均質の代わりに不均質を、等方性の代わりに異方性を導入する。

膜が不均質であるというときは、普通次の二つの場合を意味する。すなわち、膜が不連続の場合と、連続であるが屈折率の膜厚方向の位置に依存する場合である。後者の不均質膜の光学的振る舞いは、膜を屈折率がほぼ一定とみなせる薄膜の重なりで近似し、多層膜として計算するのが普通である。

Fig. 4 に示すように、屈折率が膜厚方向の位置の関数として変化しているときは、点線のような多層膜で近似する。多層膜の光学的振る舞いを計算する手法はいくつかあるが、ここでは O. S. Heavens, F. Abélès などが示した合成波行列法を用いる。

$i$  番目と  $j$  番目の層間行列  $M_{ij}$  および  $j$  番目の層内行列  $M_j$  を式 (1), (2) と書く。

$$M_{ij} = \frac{1}{t_{ij}} \begin{bmatrix} 1 & r_{ij} \\ r_{ij} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_j = \begin{bmatrix} \exp(i\phi_j) & 0 \\ 0 & \exp(-i\phi_j) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 $t_{ij}$ ,  $r_{ij}$  はそれぞれフレネルの振幅透過係数、振幅反射係数であり  $\phi_j$  は  $j$  層の位相厚みである。

合成行列を式 (3) と書くと、

$$\begin{bmatrix} P_1 P_3 \\ P_2 P_4 \end{bmatrix} = M_{12} \cdot M_2 \cdot M_{23} \cdots M_{(m-1)m} \quad (3)$$

多層膜の振幅反射係数  $r$ 、および振幅透過率  $t$  は次式 (4), (5) で与えられる。

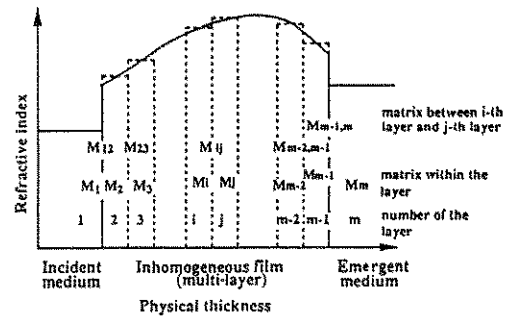


Fig. 4 The multi-layer model for an inhomogeneous film

Table 1 The Fresnel coefficients and the phase thickness

	$r_{ij}$	$t_{ij}$	
S-component	$\frac{Y_1 - Y_j}{Y_1 + Y_j}$	$\frac{2Y_1}{Y_1 + Y_j}$	$Y_j = \cos \theta_j \cdot n_j$ $\phi_j = k_0 \cdot n_j \cdot d_j \cdot \cos \theta_j$
P-component	$\frac{Z_1 - Z_j}{Z_1 + Z_j}$	$\frac{n_j}{n_1} \cdot \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_j}$	$Z_j = \cos \theta_j / n_j$ $\phi_j = k_0 \cdot n_j \cdot d_j \cdot \cos \theta_j$

$$k_0 = 2\pi/\lambda$$

$$\zeta = \sin \theta_1 n_1$$

$$r = \frac{P_2}{P_1} \quad (4)$$

$$t = \frac{1}{P_1} \quad (5)$$

フレネル係数と位相厚みを Table 1 に示す。ここで、 $d_j, \theta_j$  はそれぞれ  $j$  層の幾何学的厚みおよび屈折角で、 $\zeta = \sin \theta_1 \cdot n_1$  は  $j$  によらない不変量である (Snell の法則)。

上式を単層膜 ( $m=3$ ) に適用してみると、式 (6) となり、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} P_1 & P_3 \\ P_2 & P_4 \end{pmatrix} &= \frac{1}{t_{12}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & r_{12} \\ r_{12} & 1 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \exp(i\phi_2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\phi_2) \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{t_{23}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & r_{23} \\ r_{23} & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

次のよく知られた式 (7), (8) が得られる。

$$r = \frac{P_2}{P_1} = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-2i\phi_2)}{1 + r_{12} r_{23} \exp(-2i\phi_2)} \quad (7)$$

$$t = \frac{1}{P_1} = \frac{t_{12} t_{23} \exp(-i\phi_2)}{1 + r_{12} r_{23} \exp(-2i\phi_2)} \quad (8)$$

透過率、反射率はそれぞれ入射エネルギーに対する透過エネルギー、反射エネルギーの比で定義され、 $s$  偏光、 $p$  偏光ともに次式 (9), (10) で計算される。ここで、 $r^*, t^*$  はそれぞれ  $r, t$  の共役複素数である。

$$R = r \cdot r^* \quad (9)$$

$$T = t \cdot t^* \cdot \frac{Y_m}{Y_1} \quad (10)$$

### 3.2 オプティカルシミュレーション

薄膜の光学定数、膜厚を決定するにはかなりの計算を伴うが、現在ではコンピュータで処理されている。多くの場合、計算式を利用して実験結果を処理し、または着目する 2~3 の因子に対して分光曲線を計算すれば充分である。この手順は、

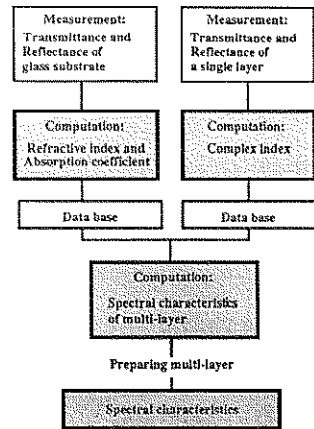


Fig. 5 The flowcharting of simulation program

- (1) 実験で得られた分光特性を用いて、ガラス基板の屈折率、吸収係数を計算する。
- (2) 実験で得られた単層膜の分光特性、膜厚から、単層膜の複素屈折率を計算する。
- (3) (1), (2) でデータベース化された可視光領域の 10 nm 毎の複素屈折率を用い、多層膜の分光特性を計算する。または、必要な分光曲線、用いる膜の屈折率を与えておいて、最小自乗法を用いて多層膜の最適膜厚を決定する。

のようになる。このプログラムのフローチャートを Fig. 5 に示す。このプログラムにより、コンバイナーには、屈折率  $n=2.05$ 、膜厚  $d=2200\text{\AA}$  の単層膜が必要であることがわかった。

Fig. 6 に日産自動車 (株) のシルビアに搭載されているコンバイナー (選択反射膜) の、入射角  $66^\circ$  における分光反射曲線とシミュレーション曲線とを示す。両者はよく一致しており、シミュレーション

ョンの方法が適当であることがわかる。

### 3.3 光学測定

コンバイナーの反射特性は、VFTの表示光の入射光線とウインドシールド表面のコンバイナーに垂直に立てた法線とがなす一定の入射角度に対して保証されなければならない。実際にコンバイナーが搭載されている2車種では、これらは、いずれもプリユースター角度に近い値となっており(シルビア:66°,マキシマ:59.5°),通常の積分球を用いた分光測定器では、S、Pの偏光に分割して光学測定を行わなければならない。しかし自動車のフロントガラスの一部に形成された膜を非破壊で光学測定することは、一般の分光光度計算では非常に困難である。このため実際に量産されているコンバイナーの反射特性は、大塚電子(株)製瞬間マルチ測光システムを用いて測定されている。この機器では、外部光源からの白色光が試料表面で反射され、そのスペクトルが自己走査型の検出端子(マルチフォトダイオードアレイ)で検出されるようになっている。機器の概要をFig.7

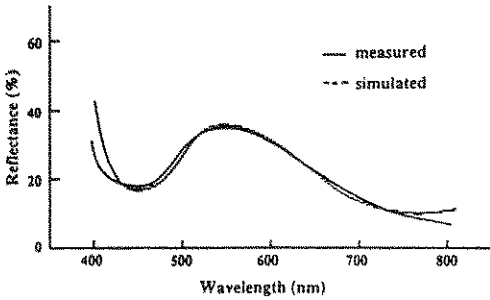


Fig. 6 Reflectance of the combiner

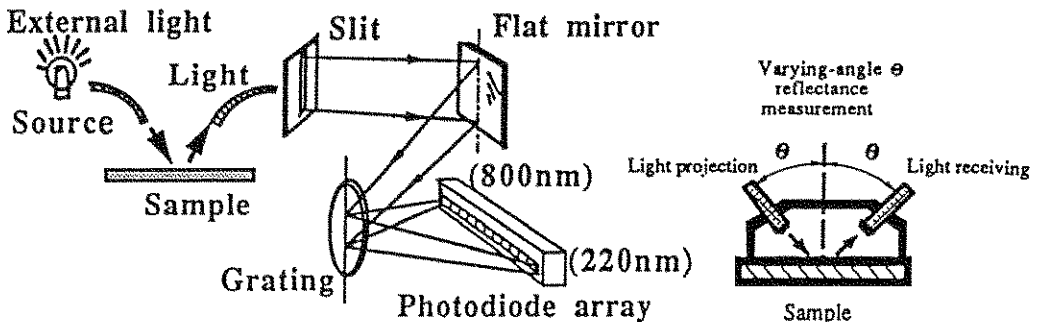


Fig. 7 The principles of measurement

に示す。

## 4. 生産プロセス

### 4.1 ゾルゲル法でのコーティング

コンバイナーの生産プロセスは、基本的には金属アルコキシド溶液を用いたゾルゲル法を利用している。ゾルゲル法では、比較的容易に基板上に化学的、電気的、機械的、光学的機能を付与することができる。生産プロセスを充分検討すれば、低コスト化を図ることができるため、極めて重要な成膜法であるといえる。

ゾルゲル法でコンバイナーなどの光学薄膜を製作する際には、同法の(1)膜厚コントロールの容易性、(2)屈折率の任意性、(3)高強度の酸化物膜が得られるなどの特徴を活かすことによって、常に安定した品質の製品を得ることができる。ただしこの際には、常に安定した性状のアルコキシド溶液を供給することが必要で、ゾルゲル法を応用したコーティング膜の生産プロセスにおいては、溶液のライフをいかにして長く保つかという工夫が最も重要である。

実際のコンバイナーの生産プロセスでは、独自に開発したオリジナルなアルコキシドと、綿密に選定した希釈溶媒を用いることによって、これらの問題を解決している。

### 4.2 膜組成の決定

前述したように、薄膜の屈折率、膜厚は、オプティカルシミュレーションによって決定されるが、実際にこのスペックを満たす膜を得る必要がある。

複合酸化物、多成分ガラスの屈折率は、およその値を次のようにして見積もることができる。すなわち物質の屈折率と分極率との間には、ローレンツ-ローレンツの関係が成立する(式(11))。誘電率と分極率との間にはクラウジウス-モソッティの式)

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{\rho} = \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{N_a}{M} \cdot \alpha \quad (11)$$

ここで  $n$ : 屈折率  $\rho$ : 密度  $N_a$ : アボガドロ数  
 $M$ : 分子量  $\alpha$ : 分極率

上式の右辺は比屈折率と呼ばれるもので、物質固有の量である。物質が複数の分子から成り、分子間の相互作用が小さいときは、比屈折率は各々の分子について加成性が成立する<sup>7)</sup>。従って、複合酸化物、多成分ガラスなどの密度と比屈折率がわかっていれば、物質の屈折率を見積もることができる(式(12))。

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^m P_i \cdot K_i \quad (12)$$

ここで  $P_i$ : 質量分率  $K_i$ : 比屈折率  
典型的酸化物の比屈折率が E. S. Larsen, H. Ber-  
man によって示されている<sup>8)</sup>。

実際には、複合酸化物の屈折率は式(13)によつて概算される。

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^m \frac{P_i}{n_i} \cdot \frac{n_i^2-1}{n_i^2+2} \cdot \frac{1}{\rho_i} \quad (13)$$

ここで  $n$ : 複合酸化物の屈折率

$n_i$ : 各成分の屈折率

さらに、上式は式(14)のように近似することができる。

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} = \sum_{i=1}^m M_i \frac{n_i^2-1}{n_i^2+2} \quad (14)$$

$M_i$ : 各成分のモル分率

このようにして必要とする屈折率(概算値)をもつ誘電体膜を得ることができる。この後は、実際に薄膜コーティングと膜厚、屈折率の測定を繰り返して、薄膜の組成比を変化させて屈折率の最適化を行えば良い。

実際のコンバイナーは、 $\text{TiO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ の複合酸化物膜を用いている。Fig. 8に、ガラスの曲げ加工温度である  $620^\circ\text{C}$  付近で焼成された  $\text{TiO}_2 \cdot \text{SiO}_2$  膜のモル分率と屈折率との関係を示す。実線が実験値であり、ほぼ加成性が成立している。この結果から、コンバイナーに必要な屈折率  $n=2.05$  の膜は、およそ  $\text{TiO}_2$  と  $\text{SiO}_2$  のモル比が 80:20 のときに得られることがわかる。また図には参考として、Schröder<sup>9)</sup>が示した結果を破線で示す。

膜厚のコントロールについては、次項で述べる。

#### 4.3 ソルゲル法による部分成膜法

生産工程を Fig. 9 に示す。コーティングの概要は以下の(1)~(3)のようである。すなわち、

- (1) 洗浄・乾燥したガラスを成膜装置上にセットし、上方とさらに側面の一方が開口したコーティング容器をウインドシールド用のガラスに密着させる。この容器は、側面の開口部がガラスに密着されて、上部のみが開口した完全な容器となる。
- (2) コーティング容器と連通したリザーブタンクに、アルコキシド溶液を所定のレベルまで供給する。コーティング容器とリザーブタンクは連通管となっているので、リザーブタンクを上昇させると、ガラスの所定位置の表面がアルコキシド溶液で濡らされる。
- (3) コーティングは、リザーブタンクを下げること、すなわち溶液を下げることによつて行われる。

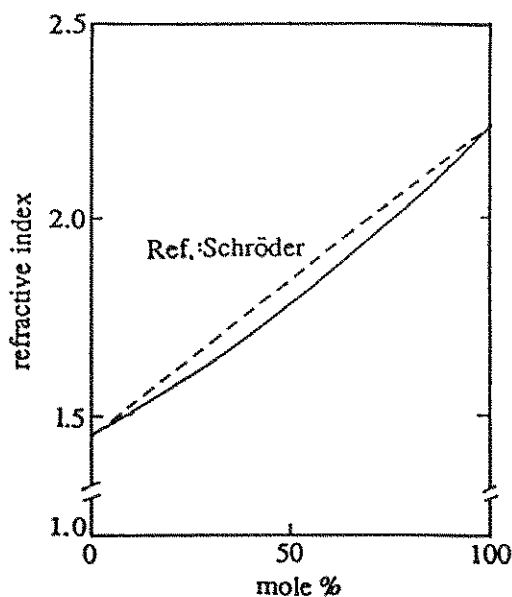


Fig. 8 The refractive index of  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  films as a function of the molar proportion of  $\text{TiO}_2$ .

て行うことができる。被コーティング物を固定した状態で溶液を下げるので、通常のディッピングとは逆の方法になるが、同じ成膜効果が得られる。

コーティング膜の厚み  $d$  は、溶液濃度、粘度、成膜速度（液面の下降速度）の関数である。コンバイナーの量産において、これらの関係は経験的に式 (15), (16), (17) で表すことができる。

$$d = K \cdot C^{4/5} (\eta V)^{7/12} \quad (15)$$

$$C = C_0 + AX \quad (16)$$

$$\eta = \eta_0 + BX \quad (17)$$

ここで、 $C_0, \eta_0$  は、それぞれ溶液の初期濃度、初期粘度であり、 $A, B$  はそれぞれ溶液の濃度増加率、粘度増加率であり、 $X$  はコーティング処理回数である。

次いでコーティングされた薄膜は、グラデーションと呼ばれるぼかし模様が周辺に施されたコンバイナー形状にパターンニングされる。

この方法は、当社がゾルゲル膜のパターンニング法として新規に開発したもので、現在この方法によって自由な直線・曲線模様、種々の図柄あるいは 50 線/インチの網点分解模様などを、基板上

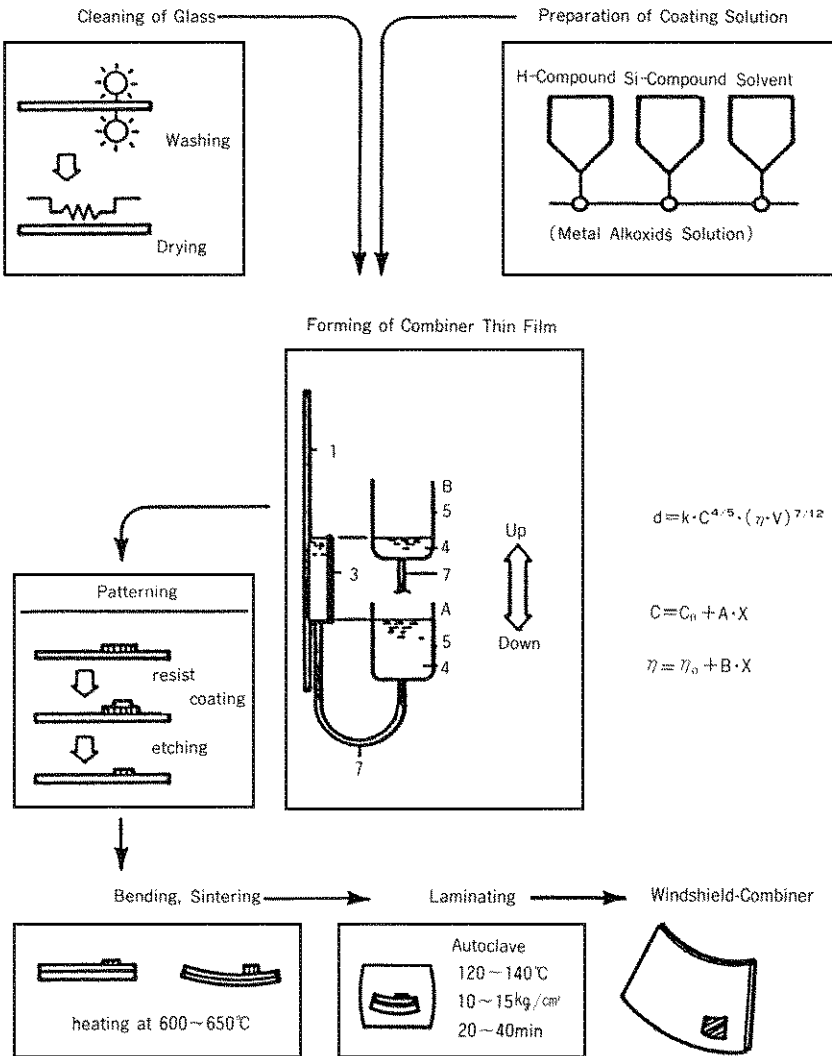


Fig. 9 Process of manufacturing for a windshield with the combiner

に酸化物膜で描くことができる。基板より充分大きな屈折率を持つ薄膜を選べば、薄膜干渉によって美しく着色した模様を描くことができる。Fig. 10 に、ゾルゲル法でガラス基板上に描いた種々の模様例を示す。

次に、コンバイナー付きのガラスは、自動車用の曲面ウインドシールドガラスとするために高温

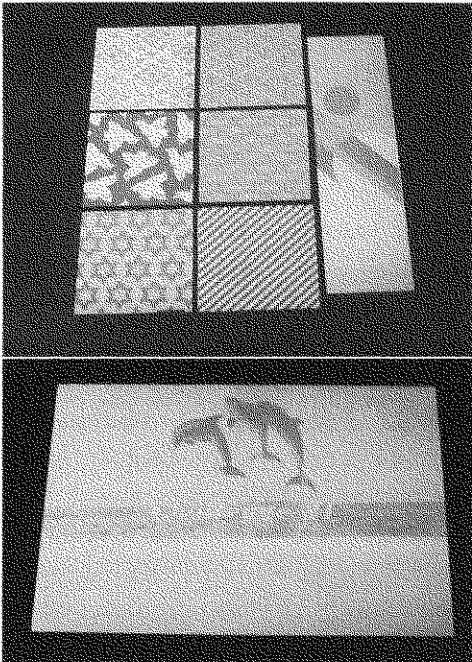


Fig. 10 Transparent ornaments made by sol-gel method

で曲げ加工されるが、前もって成膜されたコーティング膜も同時に焼成され、ガラス表面で強固な酸化物膜となる。

このコンバイナーの生産工程は、ガラスのハンドリングの容易性、高生産性、低コストといった特徴を持ち、併せて自動車用の厳しい耐久性能仕様を満足することができる。Table 2 に、ANSI(米国工業規格) Z 26.1 および JIS RS 2311 に基づいた耐摩耗性、耐薬品などをはじめとした十数項目におよぶコンバイナーの耐久試験結果を示すが、コンバイナーは、これらの項目をすべて満足している。

## 5. おわりに

本稿で概説した自動車 HUD 用コンバイナーは薄膜の多重干渉を利用したタイプのものであるが、最近では次世代コンバイナーとして、航空機などで用いられているものと同じホログラムが盛んに研究されている。これは波長選択性や可視光透過性がより優れた回折格子タイプのものであり、自動車に実装される日も近いとおもわれる。また表示情報は、今のところは車速度のみであるが、将来は種々の警報や道路情報あるいは目的地までのマップなども表示され、多機能化・多色化が進み、自動車以外の分野においても新しい車両運行システムのディスプレイとして、広く定着していくものとおもわれる。

今回紹介したゾルゲル法 HUD では、扱った材

Table 2 Results of durability test

Test items	Procedures	Results
Heat resistance	keep 2 hrs. in boiling water	No change was recognized
Light resistance	irradiate with 750 watts UV lamp for 2 weeks	No change was recognized
Humidity test	keep 2 weeks in high humidity of 50°C/95%RH	No change was recognized
Acid resistance	immerse in 1% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> for 30 min	No change was recognized
Alkali resistance	immerse in 1% NaOH for 24 hrs.	No change was recognized
Gasoline resistance	immerse in regular gasoline for 24 hrs.	No change was recognized
Heat cycle	90°C/4hrs.~ -40°C/1.5hrs. for 10 cycles	No change was recognized
Weathering test	Sunshine Weather Meter for 2000 hrs.	No change was recognized
Abrasion test	Taber abrasion test ; 100 revolutions on combiner surface	Haze ; less than 4%



料は特に新規なものではないが、ニューガラス作製方法の応用のひとつとして、その特徴を活かした新商品開発を行うことができたことは非常に意義深いと感じている。ゾルゲル法に関わらずニューガラスの多くの分野において、材料組成そのものの開発ばかりではなく、作製方法を活かした用途開発を行っていくことも今後重要な課題になると考える。

#### 参考文献

- 1) S. Okabayashi and Masao Sakata et al., "Development of Practical Heads-up Display for Production Vehicle Application" SPIE International Congress and Exposition 890559 Feb./March 1989
- 2) S. Okabayashi, M. Sakata, M. Furukawa and T. Hatada, "How Head-up Display Recognition of Object in Foreground in Automobile Use" SPIE International Congress August 1989, 1168 Current Developments in Optical Engineering and Commercial Optics, 283-295
- 3) 辻内順平, 光学概論 I, pp. 62-73, 朝倉書店, 1979
- 4) 大場信英ら, 光学的測定ハンドブック, pp. 427-438 朝倉書店
- 5) O. S. Heavens, Optical Properties of Thin Solid Films, PP. 46-95, Dover, New York, 1955
- 6) 山口, 高橋ら, 薄膜ハンドブック, 日本学術振興会薄膜第 131 委員会編集, pp. 797-827, オーム社, 1983
- 7) 宮内克己, 戸田堯三, オプトセラミックス, セラミックスサイエンスシリーズ 3, pp. 1-8, 技報堂, 1984
- 8) E. S. Larsen and H. Beaman, The Microscopical Detemmination of Nonopaque Minerals 2nd ed., p. 848, Geodesical Survey Bull., 1934
- 9) H. Schröder, "Oxide Layers Deposited from Organic Solution", Physics of Thin Films, Vol. 5, 87, pp. 87-141, 1969

#### 〔筆者紹介〕



牧田 研介 (まきた けんすけ)  
 昭和 50 年 名古屋工業大学窯業  
 工学科卒業  
 同 年 セントラル硝子(株)  
 入社, 現在テクニカル  
 センター主任技術員

#### Abstract

The head-up display system (HUD) has been developed for the windshield of Nissan Motor's passenger car, '88 model of Silvia (240SX) and '89 model of Maxima. HUD consists of a projector with high brightness VFT and a combiner which is a light-selective reflective film applied on the surface of the windshield. The system provides nice display legibility of speed in a threedigit reading at the position more than one meter far from driver's eye even under the bright sunlight. In this report, we present the optical properties and manufacturing process of the advanced combiner.

The combiner has to have high transmittance as well as high reflectance so that a driver can see both foreground object and display reading at the same time. The optical design for the combiner is based on the concepts: (a) Visible light transmittance has to be 70% or more in accordance with a legal requirement, and (b) taking both peak wavelengths of VFT and sensitivity characteristics of human eyes into consideration, 530nm of wave length is chosen as a reflective light.

The combiner consists of a dielectric thin layer of  $TiO_2$ - $SiO_2$  system. Its basic structure is decided by simulation with matrix method of the resultant waves. The coating film is applied on the restricted area of the forth surface of laminated windshield by newly developed sol-gel printing process using a metal alkoxide solution with a relatively long storage life.