

## 低放射率膜の光学的特性

## OPTICAL PROPERTIES OF LOW EMISSIVITY FILMS

田澤 真人\*  
Masato TAZAWA吉村 和記\*  
Kazuki YOSHIMURA種村 栄\*  
Sakae TANEMURA

## Abstract

To characterize optical properties of two different low emissivity coatings on soda lime silica glass substrate such as ITO (indium tin oxide) and F doped tin oxide ( $\text{SnO}_2:\text{F}$ ), spectroellipsometric studies were carried out in the visible region (350–700nm) and spectral reflectance and spectral transmittance were measured in the visible and near infrared regions (350–2000nm). The measured ellipsometric parameters and spectrophotometric curves agreed satisfactorily with theoretical ones based on Drude's theory by taking account of a roughed surface thin layer. The optical constants are also shown in the text for data base for building window applications.

For more evaluation, spectral reflectance and spectral transmittance were measured by using FT-IR spectrometer for the wavelength from 2.5 to 25  $\mu\text{m}$ . These spectra are also successfully simulated by Drude's theory except the region in which bumping feature are observed in reflectivity curve.

**Key words** : Low-e grazing, Reflectance, Transmittance, Ellipsometry, Surface roughness, Drude's theory, Dielectric function, Optical constants.

## 1. 緒言

低放射率ガラスは、可視光は透過するが常温の物体が放射する赤外光はよく反射するものである<sup>1), 2)</sup>。最近では、居住性を快適にするために必要な冷暖房負荷を低減する機能を有するために、特にビルディングの省エネルギーの観点からその重要性が認識されつつある<sup>3), 4)</sup>。そこで、低放射率膜が冷暖房負荷に与える影響を、日射に対する透過率、反射率や昼光に対する透過・反射スペクトル、さらには長波長領域の放射率を用いて、適切に評価することが必要となるが、それらのデータを得るためには、以下に述べるような解析を行ない、基礎的な光学特性データを蓄積しておくことが大切である。

こういった低放射率ガラスを得る一つの方法としては、ガラス表面に導電性を有する透明薄膜を作製すればよいが、膜の材料や作製法などによって、光学特性が少しずつ異なっている。ここでは、低放射率ガラスの透明導電性薄膜に、酸化インジウム錫膜 (ITO膜) を使ったものとふっ素をドーピングした酸化錫膜 (Sn

O<sub>2</sub>:F膜) を使ったものに注目し、可視域から赤外域にわたる光学特性を実験的に解析した。

可視域での評価では、エリプソメトリ及び分光光度法を用い、低放射率ガラスの光学的評価ではバルクと異なった屈折率を持つ表面層を考慮する必要があることを述べる。赤外域ではFT-IRで反射率と透過率をBennet-Koehler絶対反射率計で反射率を測定し、さらに可視域での評価を基にしたドルーデ理論による透過率・反射率の計算値とHumphrey-Owenのチャートから決めた屈折率による反射率の計算値を比較した。

## 2. 実験と結果

## 2-1 試料

用いた試料は、ITO膜、SnO<sub>2</sub>:F膜ともにソーダライムシリカガラス上のものである。それぞれ試料A、試料Bとする。両者ともPVDプロセスによって作製されたもので、全体の厚さは、それぞれ、1.15 mmと2.4 mmであった。試料Aはフルウチ化学製で試料Bはフォード自動車製で市販されている。

両試料とも光学的測定の前に表面の汚れを除去するためアセトンで超音波洗浄を行なった。また、試料表面の粗さやピットを調べる目的でSEM像観察を行なった。その写真を図1に示す。両試料とも、膜そのも

原稿受付 平成2年12月12日

\* 会員 名古屋工業技術試験所

(〒462 名古屋市区平手町1-1)

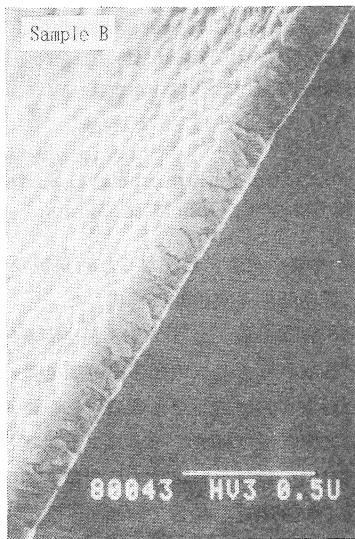
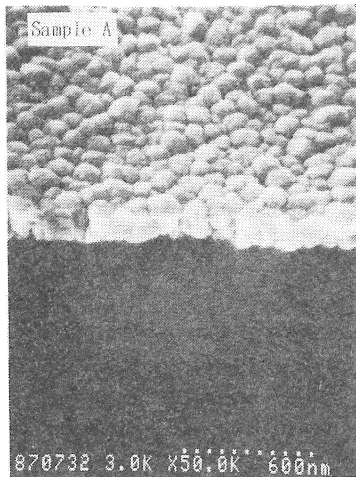


図1 低放射率膜の電子顕微鏡写真

のは柱状の多結晶の形態をしており、柱状結晶が、約 100 nm の最大半径で比較的滑らかな下地ガラス上に緻密に成長している。これらの写真から見積もった粗表面層の厚さと緻密な導電膜層の厚さは、試料Aの場合それぞれ約 50 nm と約 200 nm、試料Bの場合、約 30 nm と約 200 nm であった。

## 2.2 可視・近赤外領域での測定と解析

### 2.2.1 分光光度計

まず、分光反射率、及び分光透過率の測定を行なった。使用した分光光度計は日立製作所製 U-3400 であり、測定波長領域は 200 nm - 2000 nm、入射角は測定を容易にするために 12° とした。図2の□と○で反

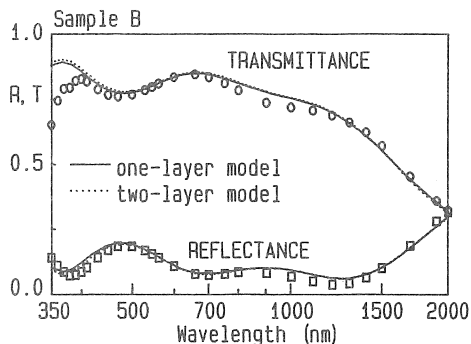
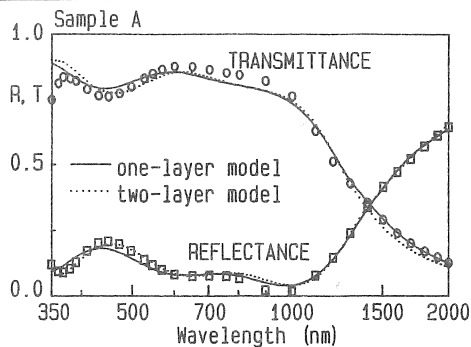


図2 透過・反射スペクトルの測定値と計算値

射・透過スペクトルの測定値を 350 nm - 2000 nm の範囲で示す。両試料とも可視領域で透過率が高く、近赤外域では反射率が高くなっている。約 380 nm 以下の短波長域で透過率が急激に落ちているが、これはITOやSnO<sub>2</sub>:Fが半導体であり、この領域で基礎吸収が起こっているためである。

以上の実験で得られた透過・反射スペクトルを表わす理論式を得るために、ガラス基板上の透明導電膜にドルーデの式を適用する。必要なパラメータは透過・反射スペクトルを計算し、実験値と比較し、実験値と計算値の最小二乗を取ることによって求めた。

ドルーデの理論によれば、金属のように自由キャリアが物質の光学定数を支配している場合、物質の複素誘電率  $\epsilon$  は次式で表わされる振動数の関数として与えられる<sup>5)</sup>。

$$\epsilon = \epsilon_1 + j\epsilon_2 \quad (1)$$

$\epsilon_1$  と  $\epsilon_2$  はそれぞれ

$$\epsilon_1 = \epsilon_c - (\omega_p^2 \tau^2) / (1 + \omega^2 \tau^2) \quad (1a)$$

$$\epsilon_2 = (\omega_p^2 \tau) / \{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)\} \quad (1b)$$

ここで、j は虚数単位、 $\epsilon_c$  は振動数無限大での誘電率でこの波長領域では実数でかつ一定とみなせる。 $\tau$  は自由キャリアの緩和時間で、振動数に無関係に一定であると仮定する。 $\omega_p$  はプラズマ振動数である。上

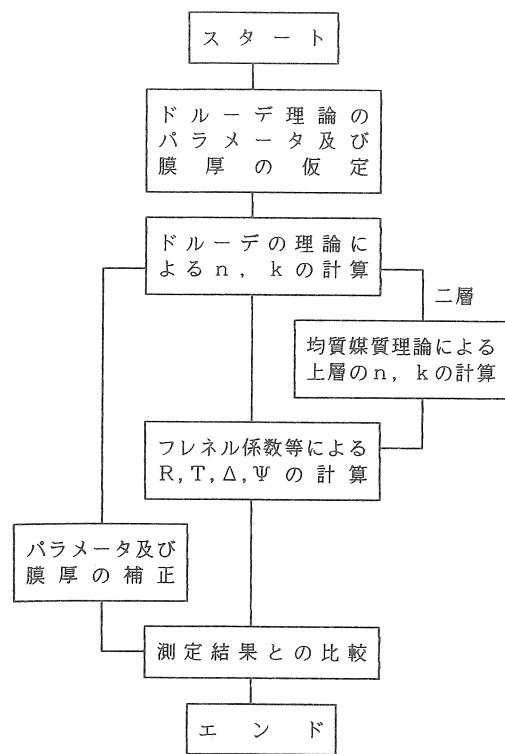


図3 最小自乗法のフローチャート

式を、プラズマエネルギー  $E_p = \hbar \omega_p$ 、緩和エネルギー  $E_c = \hbar / \tau$ 、および  $E = \hbar \omega$  を用いて書きなおせば、

$$\epsilon_1 = \epsilon_c - E_p^2 / (E^2 + E_c^2) \quad (1c)$$

$$\epsilon_2 = E_c E_p^2 / \{E(E^2 + E_c^2)\} \quad (1d)$$

となり、求めるべきパラメータは  $E_p$ 、 $E_c$ 、 $\epsilon_c$  の三つである。

これらのパラメータに膜厚 (T) を未知数として加え、これらの値を変え図2の波長領域のうち基礎吸収の影響のない400 nmから2000 nmにおける測定曲線に最も一致する反射率及び透過率を与えるパラメータの組をコンピュータを用いて最小自乗法で探索した。図3に最小自乗法の計算のフローチャートを示す。この計算では空気/導電膜の境界及び導電膜/下地ガラスの境界での反射率・透過率をスネルの法則とフレネル係数から求め、特性行列を用い、膜全体のコヒーレントな干渉を考慮したエネルギー反射率・透過率を求めた。さらに下地のガラス基板/空気境界での反射・透過の試料全体に対するインコヒーレントな影響を考慮し、E. Elizarde & F. Rueda<sup>6)</sup>に従って、試料全体の反射率と透過率を計算した。その結果、試料Aについては、 $E_p = 1.94\text{eV}$ 、 $E_c = 0.15\text{eV}$ 、 $\epsilon_c = 3.97$ 、 $T = 178.2$

nm、及び試料Bについては、 $E_p = 1.48\text{eV}$ 、 $E_c = 0.22\text{eV}$ 、 $\epsilon_c = 4.01$ 、 $T = 188.8$  nmが最適値として得られた。これらのパラメータの値を用いて計算した反射率及び透過率の値を図2の実線で示す。計算点は測定曲線とよく一致しており、試料A、Bの光学的性質はドルーデの式でよく表されることがわかる。ただし、短波長域での透過率のずれは、半導体の基礎吸収によるものであり、この際その領域での不一致についてはこれ以上立ち入らない。

### 2.2.2 エリプソメトリ

エリプソメトリは同一光路にある2つの振動成分を使う干渉法であるため光路の乱れがなく、通常の干渉計に比べて、精度、感度共に非常に優れている<sup>7)</sup>。

光が等方透明な媒質1 (通常は空気) から媒質2 (一般的には吸収体) へある角度で入射すると、反射の法則にしたがって反射光を生ずる。その際、入射面内の成分 (p-成分) とそれに垂直な成分 (s-成分) ではそれぞれ異なった振幅の変化と位相のずれが生じる。試料表面でのp-成分の振幅反射率を  $r_p$ 、位相のずれを  $\delta_p$  とし、s-成分の振幅反射率を  $r_s$ 、位相のずれを  $\delta_s$  とすると、この試料表面のp-成分及びs-成分に対する複素振幅反射率は、それぞれ

$$R_p = r_p \exp(i\delta_p) \quad (2a)$$

$$R_s = r_s \exp(i\delta_s) \quad (2b)$$

と表すことができる。

この両式の比  $\rho = R_p / R_s$  が試料表面の複素振幅反射率比であり、

$$r_p / r_s = \tan \Psi,$$

$$\delta_p - \delta_s = \Delta$$

とにおいて、

$$\rho = R_p / R_s = \tan \Psi \exp(i\Delta) \quad (3)$$

と記述することが多い。すなわち、 $\tan \Psi$  は試料表面におけるp、s成分の振幅反射率を表し、 $\Delta$  はp、s成分の反射による位相差を表す。この $\Psi$ と $\Delta$ は入射光と反射光の偏光状態をエリプソメータで測定することによって得られる。

今回用いたエリプソメータはルドルフ社製S2000型自動分光エリプソメータであり、測定波長域は、350 nmから700 nm、入射角は70°で測定を行なった。S2000型自動分光エリプソメータは回転偏光子型である。この装置は反射光のp成分とs成分との相対位相差 ( $\Delta$ ) の正負を明確にしたり、ポアンカレ球の赤道付近での測定誤差を低減するために、検光子と検出器の間にコンベンサーを必要に応じて自動的に挿入することができる。図4に試料A及びBの楕円偏光パラメータの測定値 ( $\Delta$ 、 $\Psi$ ) を□と○で示す。なお

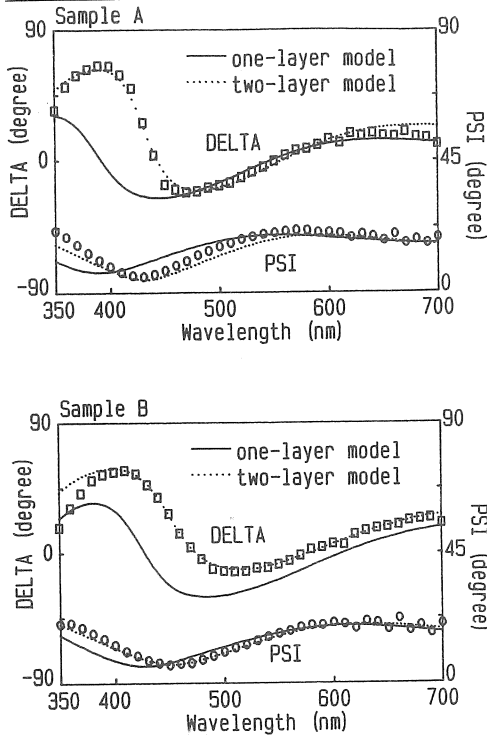


図4 楕円偏光パラメータの測定値と計算値

ガラスの裏面からの反射光の影響を除くために、サンプルの裏面に1°及び3°のウェッジ角を持ったBK-7ガラスの基板を屈折率1.53のレンズ用接着剤を用いて装着した。ソーダライムガラス<sup>8)</sup>とBK-7ガラスの屈折率は測定波長領域では0.5%の誤差で等しく、470 nm付近では接着剤の屈折率1.53に等しい。したがって、接着剤とガラスの界面での反射も屈折率の差の最も大きい700 nmでも0.2%程度であり、この屈折率の差による反射率は、透明導電膜による反射の3%程度である。これは最大でも $\Delta$ の測定値に約1.7°の誤差を与えるだけであり、この程度の誤差は以下の解析では問題にならない。従って測定値の解析の際にはガラス裏面からの反射光の影響は無視できる。

先に、分光光度計の測定と解析によりITO膜とSnO<sub>2</sub>:F膜の解析にドルーデの理論が十分適用できることを示した。このことは誘電関数の関数形がドルーデの式で表現できることを示している。従って、透過率・反射率の解析と同様に、エリプソメータで測定した楕円偏光パラメータの解析にもドルーデの式を適用する。しかしながら、楕円偏光パラメータの方が、透過・反射スペクトルよりも表面に関して多くの情報を持っていることはよく知られており<sup>9)</sup>、そのため、この測定値を解析する際にはサンプルの表面を含んだ

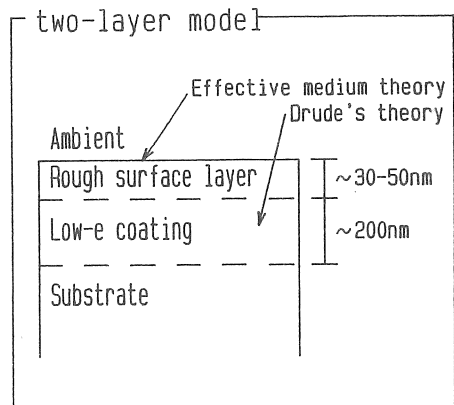
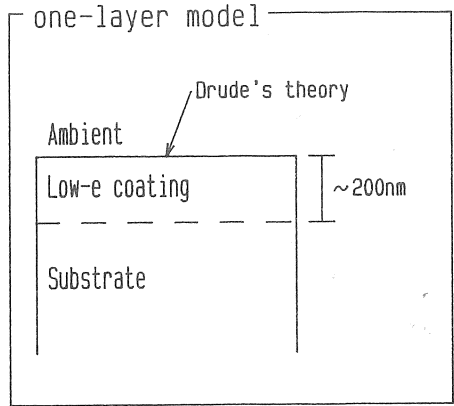


図5 単層モデルと二層モデルの説明図

光学的なモデルの仮定がより重要となる。ここでは、まず最も簡単なモデルとして、前節での反射率・透過率の解析で仮定したモデルと同様に空気/透明導電膜/ガラスといった一層を含むモデル(単層モデル)をまず仮定する(図5)。前節で求めたドルーデの理論における3つのパラメータ及び膜厚を用いて、楕円偏光パラメータ( $\Delta$ ,  $\Psi$ )を計算し、測定値と比較した。その結果を図4の実線に示す。計算値と測定値は大きくずれており、単層モデルでは不十分であることが示唆される。

そこで、空気/表面層/透明導電膜/ガラスといった二層を含むモデル(二層モデル)を仮定した(図5)。ここで考えた表面層とは、透明導電膜の粗表面層のことであり、透明導電膜と空気との混合層が存在するとした。この二層モデルを使って計算するには、新しく導入した表面層の誘電率を知ることが必要であるが、空気との混合層であるので均質媒質理論を用い、透明導電膜の誘電率をもとにして決めることにした。なお、この粗表面層の存在は2.1 試料で述べたよう

に、図1に示したSEM写真でも確認することができる。均質媒質理論を使った二層モデルでは、単層モデルの時の4つのパラメータに加えて、粗表面層の厚さ ( $T_s$ )、粗表面相におけるITOもしくは $\text{SnO}_2$ :Fの充填率 ( $F$ )の2つを新たに考慮しなければならない。

粗表面層の有効誘電率を $\epsilon$ 、第一成分、第二成分の誘電率をそれぞれ $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ とし、 $\epsilon_2$ 媒質の充填率を $F$ とするとMaxwell-Garnettの均質媒質理論により、次式が成立する。

$$(\epsilon - \epsilon_1) / (\epsilon + 2\epsilon_1) = F(\epsilon_1 - \epsilon_2) / (\epsilon_1 + 2\epsilon_2) \quad (4)$$

ただし、この式が成立するためには、2成分の混在による不均一性が入射光の波長に比べて十分小さいことが必要であるが、この場合にはSEM写真でも見られるように粗表面層の粒子径は約50nmであり、測定波長に比べて十分小さく、均質媒質理論が適用可能であることが確認できる。ここでの計算では $\epsilon_1$ を空気の誘電率、 $\epsilon_2$ をITOもしくは $\text{SnO}_2$ :Fの誘電率とし、有効誘電率 $\epsilon$ を求めた。

合計六つのパラメータを決定するにあたり、計算値が透過率・反射率、及び $\Delta$ 、 $\Psi$ の測定値と一致するように、図3に示す二層モデルの経路で最小自乗法を適用した。その結果を図2と4の点線で示す。この時のパラメータは、試料Aでは、 $E_p = 2.05$  eV,  $E_c = 0.13$  eV,  $\epsilon_c = 4.41$ ,  $T = 177.0$  nm,  $F = 0.058$ ,  $T_s = 50.0$  nm, 試料Bでは、 $E_p = 1.50$  eV,  $E_c = 0.21$  eV,  $\epsilon_c = 4.09$ ,  $T = 184.7$  nm,  $F = 0.187$ ,  $T_s = 27.8$  nmであった。前の節で単層モデルを用いて導出したパラメータと二層モデルによるパラメータ、及びそれぞれの場合のプラズマ波長を一括して表1に示す。ドルーデの式(1)にあらわれるパラメータ $E_p$ 、 $E_c$ 、 $\epsilon_c$ は単層モデルでも二層モデルでもほとんど変化がなく、 $\Delta$ 、 $\Psi$ の実験値と計算値とのずれは粗表面層を考慮するだけでほとんど無くすることができる。

また、単層モデルでは分光光度計の測定値と分光エリプソメータの測定値を同時に満足するようなパラメータを決めることは不可能であった。

なお、酸化物透明導電膜中に、ボイドの存在を仮定し、単層モデルで均質媒質理論を用いた計算を行なったが、分光光度計、分光エリプソメータの測定データとともに満足するパラメータを見いだすことができなかった。このことは、酸化物透明導電膜が十分凝縮しているか、仮に透明導電膜中にボイドがあったとしても、その分光エリプソメトリーに対する影響は粗表面層の影響に比べて十分小さいことを意味している。

この種の物質の種々の窓材への応用を考慮して、ド

表1 シミュレーションによって得られた値

モデル	試料A		試料B	
	単層	二層	単層	二層
$E_p$ (eV)	1.94	2.05	1.48	1.50
$E_c$ (eV)	0.15	0.13	0.22	0.21
$\epsilon_c$	3.97	4.41	4.01	4.09
$T$ (nm)	178.2	177.0	188.8	184.7
$F$	—	0.058	—	0.187
$T_s$ (nm)	—	50.0	—	27.8
$\lambda_p$ ( $\mu\text{m}$ )	1.27	1.27	1.68	1.67

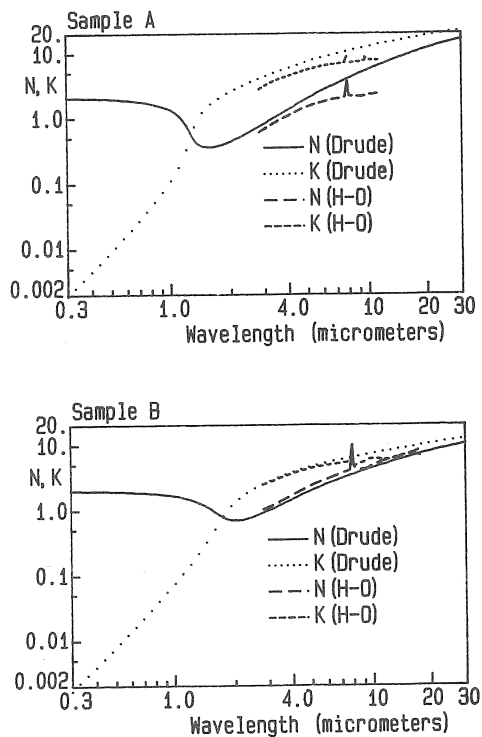


図6 ドルーデの理論及びH-Oチャートによって得られた光学定数

ルーデ理論(式1)から計算で得られた屈折率及び消衰係数を遠赤外領域も含めて図6に示した。パラメータは表1の二層の場合の値を用い、2 $\mu\text{m}$ 以上の赤外領域の値は外挿したものである。

### 2.3 赤外領域での測定と解析

#### 2.3.1 FT-IR分光光度計

a. 反射・透過スペクトル

入射角 $13^\circ$ のスペキュラーな反射率を測定するため、日本分光製FT-IR3型を用い、リファレンスミラーは蒸着による膜厚600nmの金薄膜とした。試料の反射率は次式で補正できる。

$$R_s = R_{meas} \times R_{Au} \quad (5)$$

$R_{meas}$ と $R_{Au}$ は試料の反射率の測定値とBennett-Koehler (B-K)型の絶対反射率計で得られたリファレンスミラーの反射率である。透過率は、試料を直径5mmのマスキのついたホルダーをビームに垂直に挿入し測定した。

図7の実線に上式で補正した分光反射率、分光透過率を示す。この波長領域では滑らかではないものの、ドルーデ理論で表わされる金属型の振る舞いをしていいる。8.0から18.2 $\mu\text{m}$ といった比較的長い波長領域で小さなピークが反射スペクトルに現れている。

b. Humphrey-Owenチャートによる屈折率の決定

Humphrey-Owenチャート<sup>10)</sup>(H-Oチャート)は、屈折率と消費係数からp偏光とs偏光の反射率の比( $R_p/R_s$ )を2つの入射角について計算しグラフにまとめたもの(図8)で、反射率比を測定すればこの図

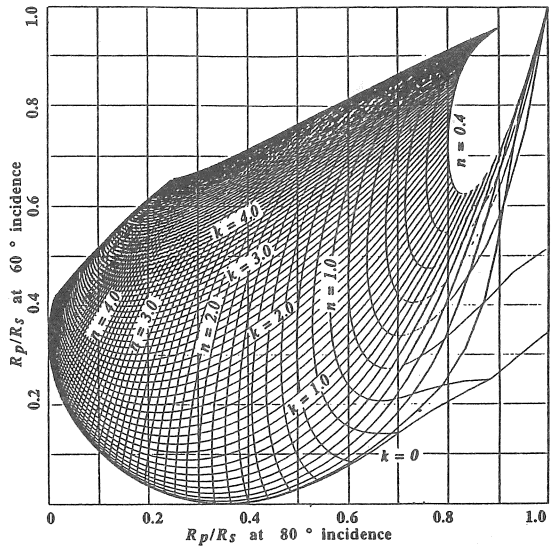


図8 Humphrey-Owenチャート

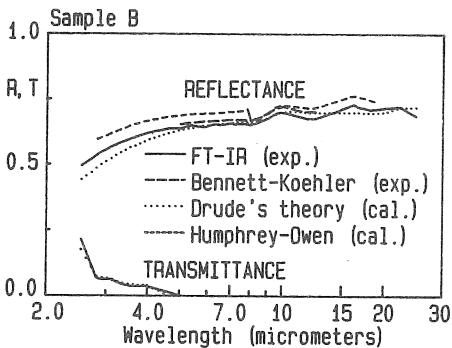
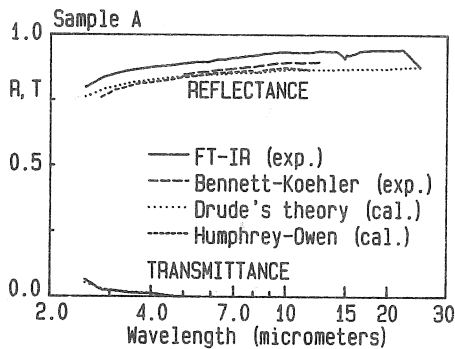
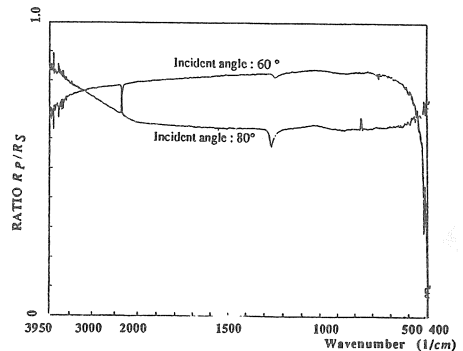


図7 種々の方法で得られた赤外領域の反射・透過スペクトル  
exp.: 実験値、cal.: 計算値

Sample A



Sample B

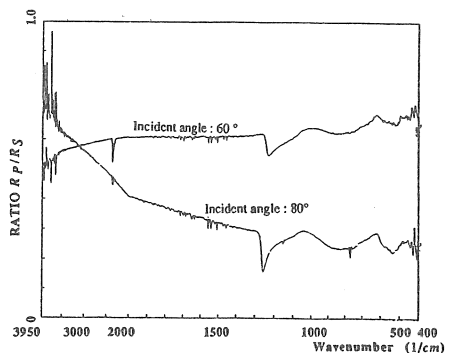


図9 赤外領域における反射率比

表2 H-Oチャートから得た赤外領域での光学定数

波数 (1/cm)	試料A		試料B	
	n	k	n	k
3549	0.60	2.71	1.02	2.45
3226	0.71	3.22	1.14	2.72
2823	0.89	3.88	1.40	3.19
2500	1.06	4.37	1.66	3.59
2178	1.30	5.01	2.06	4.07
2016	1.43	5.38	2.31	4.31
1855	1.55	5.73	2.58	4.56
1694	1.68	6.13	2.88	4.77
1532	1.85	6.57	3.27	5.01
1411	1.92	6.76	3.63	5.23
1331	1.99	6.96	3.86	5.35
1300* <sup>1</sup>	2.05	7.08		
1289* <sup>2</sup>			4.04	5.45
1269* <sup>1</sup>	3.41	9.00		
1265	3.65	9.28	8.57	5.37
1258* <sup>2</sup>			10.06	4.25
1250	2.36	7.35	7.20	5.27
1242* <sup>1</sup>	2.13	6.92		
1235* <sup>2</sup>			4.47	4.63
1169	2.09	7.24	4.10	5.02
1089	2.05	7.32	4.18	5.45
1049	2.13	7.52	4.36	5.80
1046* <sup>2</sup>			4.34	5.80
1038* <sup>1</sup>	2.12	7.52		
1034* <sup>1</sup>	2.51	8.47		
1022* <sup>2</sup>			4.59	5.99
1008	2.22	7.72	4.70	6.02
860* <sup>1</sup>	2.29	7.60		
856* <sup>1</sup>	2.13	7.26		
826* <sup>3</sup>			5.98	5.95
822* <sup>3</sup>			5.85	5.92
617* <sup>3</sup>			7.36	7.46
536* <sup>3</sup>			8.96	6.31

\*<sup>1</sup> 試料Aの反射率比(図9)で極大・極小が現われる波数

\*<sup>2</sup> 試料Bの反射率比(図9)で極大・極小が現われる波数

\*<sup>3</sup> 試料AでH-Oチャートからn, kを決めることは困難な波数

を用いて屈折率、消費係数を得ることができる。

H-Oチャートを用いて屈折率を得るために、日本分光製PR-41s反射率計を上記のFT-IRに取り付け、入射角60°と80°でp偏光とs偏光を入射させたときのエネルギー反射率R<sub>p</sub>とR<sub>s</sub>を測定した。偏光子はワイヤグリッドを用いた。その際、偏光状態に依存した特性による誤差を除くために、上のリファレンスミラーをそれぞれの入射角に設定し、それぞれの偏光状態にして測定した。この時、各入射角でのR<sub>p</sub>とR<sub>s</sub>の比は次のように補正される。

$$R_p/R_s = (R_p/R_s)_{\text{meas}} \times (R_p/R_s)_{A_0} \quad (6)$$

実際に測定した反射率比(R<sub>p</sub>/R<sub>s</sub>)<sub>meas</sub>を、図9に示す。装置の光路中のCO<sub>2</sub>や水蒸気などによるスパイク状ノイズが見られるが、図7の場合よりもはっきりした凹凸が見られる。

上式によって補正し、H-Oチャートを用いて得られた屈折率と消費係数を表2に示す。ここでの波長は上式の(R<sub>p</sub>/R<sub>s</sub>)<sub>A<sub>0</sub></sub>を金の屈折率の表<sup>11)</sup>から計算したのでその時の波長から取ったものである。可視・近赤外領域での測定とドルーデの理論から決めた光学定数と比較するために、H-Oチャートから得た光学定数も図6に示した。試料Bでは両者の光学定数の一致は比較的よいが、試料Aでは特に長波長領域において系統的な不一致が目立つ。また、8μm付近に実測値に基づくH-Oチャートからの光学定数ではピークが見られるが、ドルーデ理論からはもちろんこうしたピークは得られない。これらのことは可視・近赤外領域でパラメータを決めたドルーデの式の適用限界を示すものである。

次式を用いて、屈折率から垂直入射の場合の反射率を求めることができる。

$$R = [(n-1)^2 + k^2] / [(n+1)^2 + k^2] \quad (7)$$

計算結果を図7の短破線で示す。

### 2.3.2 B-K型絶対反射率計<sup>12)</sup>

用いた絶対反射率計の光学系と性能の詳細は既に報告してある<sup>13)</sup>ので、ここでは述べないが、測定波長は0.35から14.5μmで平均の入射角は試料の法線方向から5°である。測定結果を図7の長破線で示す。

### 2.3.3 各種実験値と計算値の比較

上記、2.2節の表面層を考慮して得られたパラメータによるドルーデの理論から計算した反射・透過スペクトルを図7の点線で示した。この波長領域での透過率は主に下地ガラスの光学定数で決まっているので透過率の実験値と計算値の一致は極めてよい。

FT-IRによって測定した反射率とドルーデ理論による計算値との不一致は試料Aでは3%から7%であり、試料Bでは2%から5%であった。試料Bでは反射率の凹凸部分を除いて、4μmから15μmの領域で比較的よい一致が見られた。この波長領域は装置が最もよい性能を発揮する領域でもある。H-Oチャートから得られた屈折率から計算した反射率とドルーデ理論に基づき計算された反射率を比較すると、試料Aでは0.4%から2.6%の誤差でよく一致しているが、試料Bでは9%から1%の不一致が見られ、H-Oチャートによる屈折率から計算した反射率の方が大きい、この不一致は波長とともに減少する。B-K型の絶

対反射率計による測定値と二種の計算値の一致は比較的良好だが、FT-IRによる測定値と比較すると、試料AではFT-IRの方が大きな値を示し、試料Bではその逆の傾向を示す。試料Bのピークの位置についてはよく一致している。

### 3. 結論

ソーダ石灰ガラス上のITOとSnO<sub>2</sub>:Fといった代表的な低放射率膜について、可視・近赤外領域は分光光度計及び分光エリプソメータを用いて、赤外領域はFT-IRとB-K型の絶対反射率計を用いて光学的性質の評価を行なった。

その結果、可視・近赤外領域においては、分光光度計では明確に検出できない粗表面層の存在を分光エリプソメータによって確認することができた。このことはエリプソメトリーの表面感受性がフォトメトリに比べて非常に高いことを示しており、ここで対象とした光学素子の詳細な評価のためにはエリプソメータによる測定が不可欠であることを示唆する。また、分光光度計による測定値と分光エリプソメータによる測定値から、低放射率膜の光学定数をドルーデの式を用いて決めることができた。その結果、分光光度計による測定値だけで得られたドルーデの式におけるパラメータ及び膜厚は、分光エリプソメータによる測定値を用いて補正しても大きな変化は見られなかった。

また、赤外領域では、不純物やドーバントによると思われる8.0から18.2 μmでの反射スペクトルの凹凸を除いて、ドルーデ理論でシミュレートできるような金属的な振る舞いをする。赤外での測定法の評価については次のような比較が可能である。1) FT-IRによって測定、補正した反射率と、絶対反射率計で測定した反射率の比較、2) FT-IRで測定した反射率とドルーデ理論を基礎とした反射率及びH-Oチャートを基礎にした反射率の比較、3) FT-IRで測定した透過率とドルーデ理論から導いた透過率の比較。これらから可視・近赤外領域で求めたパラメータによるドルーデ理論の赤外領域への適用が妥当であるが、反射スペクトルの小さな凹凸についてはドルーデ理論では説明できず、H-Oチャートを基礎にした解析が必要であると結論できる。

### 文献

- (1) 吉田貞史、篠木藤敏、大畑豊、スパッタリングによるIn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜を用いた選択透過膜、電子技術総合研究所彙報, 44(1980), 88-97.
- (2) 篠木藤敏、吉田貞史、大畑豊、高周波反応性スパッタリングによるSn-doped In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜の光学的性質、電子技術総合研究所彙報, 44(1980), 109-114.
- (3) 宿谷昌則、昼光照明の現状と課題、太陽エネルギー, 15-6(1989), 32-39.
- (4) 宿谷昌則、新しい窓システムと建築環境調整、Live Energy, 30(1990), 12-17.
- (5) 山口重雄、光物性ハンドブック(1984), 329, 朝倉書店、東京
- (6) E. Elizalde and F. Rueda, ON THE DETERMINATION OF THE OPTICAL CONSTANTS  $n(\lambda)$  AND  $k(\lambda)$  OF THIN SUPPORTED FILMS, Thin Solid Films, 122(1984), 45-57.
- (7) 工藤清勝、佐藤教男、岡本剛、偏光解析装置の試作とその腐食研究への応用、北海道大学工学部研究報告, 47(1968) 141-169.
- (8) M. Rubin, OPTICAL PROPERTIES OF SODA LIME SILICA GLASSES, Solar Energy Materials, 12(1985) 275-288.
- (9) D. E. Aspnes and J. B. Theeten, Investigation of effective-medium models of microscopic surface roughness by spectroscopic ellipsometry, PHYSICAL REVIEW B, 20-8(1979), 3292-3302.
- (10) H. E. Bennett and W. F. Koehler, Precision Measurement of Absolute Specular Reflectance with Minimized Systematic Errors, J. of Opt. Soc. America, 50(1960), 1-6.
- (11) D. W. Lynch and W. R. Hunter, Comments on the Optical Constants of Metals and an Introduction to the Data for Several Metals, Handbook of Optical Constants of Solids, ed. by E. D. Palik, Academic Press, New York, 1985, 286-295.
- (12) S. P. F. Humphrey-Owen, Comparison of Reflection Methods for Measuring Optical Constants without Polarimetric Analysis, and Proposal for New Methods based on the Brewster Angle, Proc. Phys. Soc. (London), 77(1961), 949.
- (13) S. Tanemura, M. Sando, A. Fujii, K. Yoshimura, M. Midorikawa, and K. Fujimoto, Normal Spectral Emittance of Silicon-Nitride Ceramics, Proc. of 7th Japan Symposium on Thermophysical Properties, 1986, 119-122.