

窓用遮熱フィルムにおけるナノスケール膜厚の水系同時重層塗布技術の開発

— 同時重層流下膜の安定化 —

Simultaneous Multilayer Flow Stabilization of a Nanometer-Scale Multilayer Heat-Shielding Film for Windows

坂田 和彦*
Kazuhiko SAKATA

小西 敬史*
Takashi KONISHI

宮崎 敬*
Takashi MIYAZAKI

千葉 隆人*
Takato CHIBA

要旨

近年、地球温暖化防止技術の一つとして、太陽光、水力、風力といった再生可能エネルギーから高効率で電力を発電する技術、電力を節約する省エネルギー技術が注目されている。省エネルギー技術としては、空調設備の負荷を低減するため、窓を介した屋外から室内、車外から車内への赤外線の入込みを防止する窓用遮熱フィルムが求められている。

窓用遮熱フィルムとしては、金属薄膜をスパッタ成膜したフィルムが使用されているが、金属薄膜をスパッタ成膜したフィルムを窓に貼ると、可視光よりも長い波長の全ての電磁波を遮蔽してしまう。このようなフィルムを窓に貼ると、通信用電磁波さえも遮蔽してしまい、通信機能の障害となる。そこで、可視光と通信用電磁波は透過するが、赤外線を遮蔽する窓用遮熱フィルム（いわゆるバンドストップフィルター）が求められている。

我々は、この窓用遮熱フィルムを、写真用感材の生産で培った水系同時重層塗布技術で作製する事に取り組んだ。窓用遮熱フィルムは、従来の写真用感材に対して、薄膜多層の系であるため、同時重層塗布の際に、同時重層流下膜が不安定化して、流下に伴い流下膜に乱れが発生する。我々は、この問題に対して、シミュレーションで同時重層流下膜の速度分布を計算し、安定性の指標となるパラメーターを探索し、実験結果と対比し、その結果を基に塗布装置の設計を行った。

本稿では、上記検討結果について、化学工学会第47回秋季大会で発表したもので、その内容を紹介する。

Abstract

Recent efforts to prevent global warming have taken two paths: the high-efficiency generation of electricity from renewable energy sources (solar, wind, hydro, etc.) and electrical-energy saving technologies.

To save the energy expended by air conditioners in vehicles and structures, heat-shielding window films prevent the entry of infrared rays. Metal sputtered heat-shielding window films transmit visible light, but block the longer infrared wavelengths. Unfortunately, metal sputtered films also block the electromagnetic waves of such communication devices as cell phones.

What is needed is the band-stop filter provided by a film that blocks infrared light, but not visible light or the electromagnetic waves of communication devices. Such a film requires simultaneous multi-layer coating, and we found success with a water-based, multi-layer coating technology developed for photographic film.

Our heat-shielding window film is much thinner and more highly layered than photographic film, and the flow of its simultaneous multi-layer coating is easily disturbed. But we gained index parameters allowing multi-layer flow stability by simulating the flow's velocity distribution.

Presented here are the simulated results and physical observations that led to the design of a viable multi-layer coating system for heat-shielding window films that allow interference-free communication.

*アドバンストレイヤー事業本部 生産技術センター

1 はじめに

我々は、可視光と通信用電磁波は通過するが、赤外線を遮蔽する窓用遮熱フィルムを、写真用感材の生産で培った水系同時重層塗布技術により作製する事に取り組んだ。窓用遮熱フィルムは、従来の写真用感材に対し、単層の膜厚が薄く、同時重層数が多い、いわゆる薄膜多層という特徴を持つ。薄膜多層化に伴い、同時重層流下膜の液々界面が不安定化して波立ち、流下膜に乱れが発生し、この乱れが流下に伴って増幅する問題が発生する。Fig. 1 に、この乱れが発生している同時重層流下膜の写真を示す。液は、右から左に流下しているが、流下膜に乱れが発生し、下流に行くに従い、乱れは増幅している。このような乱れが発生すると、塗布膜には巾方向の段ムラとして現れ、品質的に問題となる。

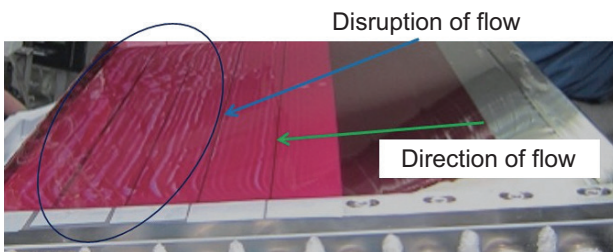


Fig. 1 Disturbance of simultaneous multi-layer flow.

我々は、この問題に対して、シミュレーションで同時重層流下膜の安定性の指標となるパラメーターを探し、実験結果との対比を行い、その結果を基に塗布装置の設計を行ったので、その内容を報告する。

2 窓用遮熱フィルムの特徴

Table 1 に、本検討で作製した窓用遮熱フィルムと写真用感材の層数、膜厚等を比較した表を示す。本検討で作製した窓用遮熱フィルムは、写真用感材に比べ、薄膜多層である事が解る。

Table 1 Comparisons between the heat-shielding film and a conventional photographic film.

	Heat-shielding film	Photographic film
Number of layers	~30 layers	~15 layers
Wet film thickness per layer	2~3 μm	10~15 μm
Dry film thickness per layer	0.1~0.2 μm	1~1.5 μm
Total dry film thickness	3~4 μm	~20 μm

Fig. 2 に我々が作製した窓用遮熱フィルムの断面写真の一例を示す。約3 μmの膜厚の中に赤外線を反射するための誘電多層膜が、約20層積層されている事が解る。

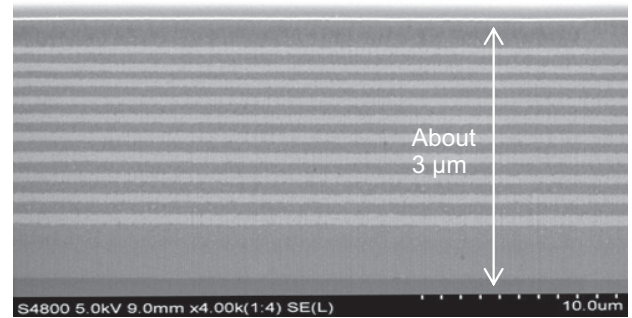


Fig. 2 Cross-section of heat-shielding film. About 20 layers of dielectric, multi-layer film are evenly layered to a thickness of about 3 μm to reflect infrared rays.

3 同時重層塗布方法

Fig. 3 に、一般的な同時重層塗布装置を示す。塗布液は、各バーからスライド面に流出し、スライド面の流下に伴い、他のバーから流出する液上に積層され、同時重層流下膜が形成され、ビードと呼ばれる液溜り部を介し、支持体上に重層塗布膜が形成される。我々は、低屈折率層、高屈折率層を~30層、交互積層した窓用遮熱フィルムを、同時重層塗布で作成する事に取り組んだ。

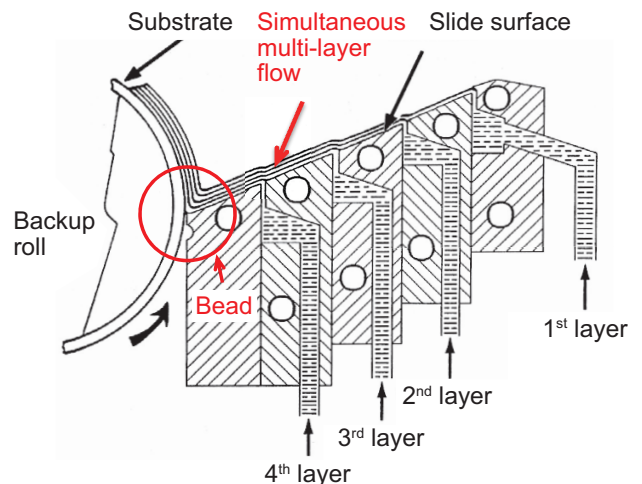


Fig. 3 Apparatus of a general simultaneous multi-layer coating system. In this example, there are only four layers.¹⁾

4 シミュレーション内容

同時重層流下膜は、スライド面上を層流で流下するので、流下速度 u は下記物性値の関数となるため、汎用のシミュレーションソフトで計算可能である。

$$u = G(\rho, \theta, \mu, Q)$$

ρ : 液密度 θ : スライド面角度

μ : 液粘度 Q : 液流量

我々は、有限要素法のシミュレーションソフト (Altair 社製 HyperWorks) を使用し、同時重層流下膜のスライド面上の速度分布のシミュレーションを行った。

シミュレーションで計算した速度分布から、同時重層流下膜の高粘度液側の剪断速度と各バー上の滞留時間の積 F_{ij} 、及び積算値 ΣF_{ij} を各界面について計算し、その最大値を安定性の指標のパラメーターとした。 F_{ij} 、 ΣF_{ij} の定義は、下記で表される。

上から*i*番目、下から*j*番目の界面の F_{ij}

$$F_{ij} = \left. \frac{\partial u_{ij}}{\partial y} \right|_{\text{高粘度液}} \times T_{ij} = \left. \frac{\partial u_{ij}}{\partial y} \right|_{\text{高粘度液}} \times \frac{L}{u_{ij}}$$

u: 流下速度 **y:** スライド面上の膜厚
L: 各バーの厚さ **i:** 最上層から数えた界面数
j: 最下層から数えた界面数

F_{ij} の積算値

$$\Sigma F_{ij} = \sum_{j=1}^{n-i} \left(\left. \frac{\partial u_{ij}}{\partial y} \right|_{\text{高粘度液}} \times \frac{L}{u_{ij}} \right)$$

Fig. 4 に同時重層流下膜の剪断速度分布を示す。低屈折率層、高屈折率層の粘度が大きく異なるため、界面における剪断速度値は大きく異なるが、界面の剪断速度の代表値としては、高粘度液側の剪断速度値を使用した。

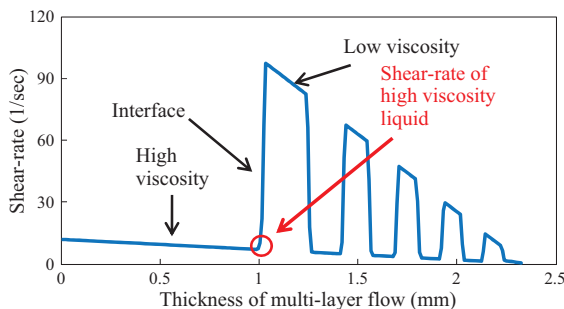


Fig. 4 Shear-rate distribution of our simultaneous multi-layer flow simulation. The example here employs a 10-layer flow.

5 実験結果

低屈折率層の粘度、低屈折率層と高屈折率層の流量をパラメーターとして行った実験結果を Table 2 に示す。

Table 2 Results of simultaneous multi-layer flow down experiment. Used parameters are viscosity of low refractive index layer, flow rate of low refractive index layer, and flow rate of high refractive index layer.

Low refractive index layer		High refractive index layer	Distance of stable flow
Viscosity	Flow rate	Flow rate	
Low	Low	Low	220 mm
Low	High	High	260 mm
High	High	High	320 mm

塗布結果は、安定流下可能距離で比較した。安定流下可能距離の定義は、最上層と上から2番目の層の界面が形成されてから、乱れが発生するまでの距離と定義した。

低粘度/低流量の条件から、低粘度/高流量の条件、高粘度/高流量の条件と段々と安定流下可能な距離が増加していく事が解る。即ち、同時重層可能な層数が増加していくことが解った。

6 実験結果とシミュレーション結果の対比

Fig. 5 にシミュレーション結果と実験結果を対比した結果を示す。各条件において、同時重層流下膜の乱れが発生する ΣF_{ij} の最大値は等しく、 ΣF_{ij} の最大値と実験結果は良く相関し、 ΣF_{ij} の最大値が33~34を超えると同時重層流下膜の乱れが発生する事が解った。

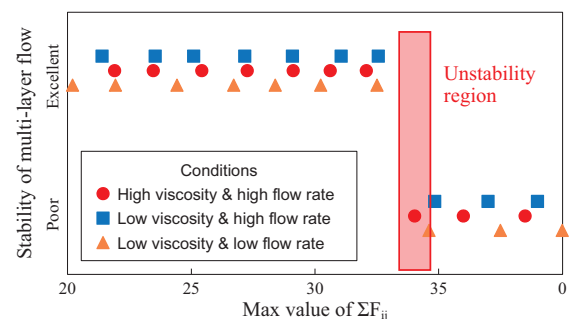


Fig. 5 Simulation and experiment results. The maximum value of ΣF_{ij} is almost equal among the three conditions, and the maximum values of ΣF_{ij} and the experiment results correlate well. When the maximum value of ΣF_{ij} exceeds 33-34, disturbance of the simultaneous multi-layer flow occurs.

7 まとめ

- ・シミュレーション結果から、同時重層流下膜の安定性の指標を探索した結果、各界面の高粘度液側の剪断速度と滞留時間の積の積算値 ΣF_{ij} の最大値が、同時重層流下膜の乱れの発生とよく相関する事が解った。
- ・この検討結果を基に、薄膜多層の系においても同時重層流下膜に乱れが発生しない、窓用遮熱フィルム製作用の塗布装置設計を実施した。

●参考文献

1) T.A.Russell et.al; 米国特許公報 2,761,791 (1956)

●出典

K. Sakata et al; ナノスケール膜厚の水系同時重層塗布の実験的検証, 化学工学会第47回秋季大会 (2015)