窓ガラス用太陽エネルギー制御多層膜の最適設計 (赤外域の反射率向上のための検討)

Optimum Design of Optical Multilayer Coatings on Windowpane for Solar Energy Control (A Study on Improving the Reflectance at Infrared Range)

○ 近 久 慎 一 郎 (信州大院)

正 中 村 正 行 (信州大学)

Shinichiro CHIKAHISA, Graduate School of Science and Technology, Shinshu University,
4-17-1 Wakasato, Nagano, 380-8553

Masayuki NAKAMURA, Faculty of Engineering, Shinshu University, ditto

Key Words: Optimum Design, Optical Multilayer Coatings, Solar Energy, Windowpane, Infrared Rays

1. はじめに

室内の熱エネルギーは窓などの開口部からの出入りが大きい。夏は熱の流入の48%が、冬は熱の流出の71%が開口部からである。この熱エネルギーの流入は太陽光からの直射日光に依存する。そこで、開口部である窓のガラス材に光学多層膜を成膜することで、夏季は熱エネルギーを反射させ、冬季は熱エネルギーを透過させるように太陽光の制御を行うことができれば、太陽エネルギーの有効利用につながる。

本研究では住宅用窓ガラスにおける夏冬兼用の熱エネルギー制御多層膜の構造を見出すことを目的とする。これまで夏冬兼用の機能を持つ多層膜の設計値を求めるために、設計仕様に関する検討⁽¹⁾や使用する薄膜材料の屈折率に関する検討⁽²⁾を行ってきた。これらの検討から、要求される機能を達成するには層数を増やす必要があることが分かった。さらに、複数の入射角による検討とともに、成膜するガラス面の構造に関する検討を行った結果、ガラスの両面に均等な層数の膜を成膜する方法が、設計仕様に近い結果が得られることが分かった。

光学多層膜は、各層の膜厚と屈折率を設定することで、光を反射、透過、吸収させる機能を持たせることができる。反射防止膜、干渉フィルター、液晶プロジェクターや太陽電池などその用途は多岐に渡る。一方、多層膜のコーティングには層数の制限やコーティング材料など膜構造に関する制約がある。これらの制約条件のもとで、目標の機能を得る膜構造を設計することは明示的な定式化ができず、設計値を得ることが困難である。また、設計仕様は希望であるために、これを満たす膜構造があるとは限らない。したがって、仕様をできる限り満足するような最適設計が重要となる。

ここでは複数の入射角に対する最適設計を行う上で、夏季における赤外域の反射率の向上を目指した検討の結果を示す。

2. 太陽エネルギー制御多層膜の設計仕様

2-1 エネルギー制御パネルの一例 Fig.1 に示す住宅用の窓ガラスにおける太陽光のスペクトル制御を考える。夏季は室内への赤外線熱エネルギーの透過を抑え、冬季は赤外線熱エネルギーを透過させる。さらに、年間を通じて可視光を透過させる必要がある。

2-2 太陽光スペクトル 窓ガラスには太陽からの直射光と周囲環境からの輻射光が入射する。直射日光は季節と緯度により入射角が変化する。また、太陽光スペクトルは可視域

にピーク(450~500nm)を持つ分布を有する。地上に到達する太陽光の波長は300nm~5,000nmとされている。また、太陽光の持つエネルギーのうち90%近くが波長380nm~2,000nmの間に含まれている⁽³⁾。一部、特定のスペクトルの光は地上に達する前に大気によって吸収される。したがって、取り扱う波長域については、可視域を380~780nm、赤外域を780~2,000nmとする。

2-3 太陽高度と入射角 多層膜の分光特性は光の入射角に依存する。太陽高度の季節変化によって多層膜に入射する太陽光の入射角度が異なることを利用すれば、夏季と冬季で分光特性の異なる制御が行える可能性がある。

東京付近(北緯35°)の南中高度は、夏至77.8°、冬至31.0°である。真南に向けたガラス面に対する入射角の変化をFig.2に示す。これより入射角度を夏季は75°冬季は35°と設定し、赤外線の制御を行う。加えて、窓ガラス越しに外の景色を見る場合の代表的な入射角度0°(垂直入射)のときの可視光制御を行う。

Fig.1 Example of solar spectrum control

Fig.2 Incident angle from sun to windowpane surface

3. 設計例

3-1 エネルギー制御パネルの一例 著者らが開発した光学多層膜最適設計システム⁽⁴⁾を用いて、上述の設計仕様に基づいたエネルギー制御多層膜の設計例を示す。ここで用いた最適設計システムは、データベースに保存されているコーティング材料の屈折率、膜厚および層数の組合せを考え、各種の制約条件を考慮して分光特性などの設計仕様を満足するような最適な組合せを求める組合せ最適化問題を解くことで設計解を得るものである。最適化の手法には遺伝的アルゴリズムを用いている。

ガラスに成膜する多層膜の最大層数を、6層(外側3層、内側3層)と10層(外側5層、内側5層)の2つの場合について検討する。入射媒質と透過媒質は空気(屈折率 $n=1.0$)、ガラス材はBK7 ($n=1.52$)とし、コーティング材料は SiO_2 ($n=1.46$)、 Al_2O_3 ($n=1.65$)、 Ta_2O_5 ($n=2.05$)、 TiO_2 ($n=2.24$)、 ZrO_2 ($n=2.04$)、 HfO_2 ($n=1.99$)、 ZnO_2 ($n=2.16$)の7種類から選択するものと仮定する。

入射角度は75°と35°の場合に熱線制御を、0°の場合に可視光制御を行う。夏季(75°)の場合の反射率を向上させるために、それぞれの入射角に対して重みをつける。入射角度は $\theta=75^\circ$, 35° , 0° に対して3つの角度の重み係数を1:1:1, 2:1:1, 3:1:1, ..., 10:1:1の10通りに設定して設計を行った。完全に設計仕様と一致すると1.0となるような達成率を定義し、設計仕様をどれだけ満たしているかを評価する。

3-2 設計結果 75°の重み係数を大きくしていくと、6層の場合も、10層の場合も75°のときの反射率が向上していくが、それに伴い35°と0°のときの反射率も向上してしまい、全体としては徐々に達成率の平均が下がる。

35°と0°のときの反射率をある程度抑えつつ、75°のときの反射率を向上させるため、目標値に10%, 20%, 30%の幅を設定した場合を考える。目標値に10%の幅を持たせた場合の達成率の平均は、重み係数の75°の部分を大きくしていくと、横ばいから徐々に下がるが、20%, 30%の場合は少し上がってから下がる。また、75°の達成率は向上しているので全体としては達成率が変わらなくても、75°(夏)の赤外線の反射率は向上させることができた。

今回の検討では、重み係数の比を75°, 35°, 0°に対して、3:1:1とした時に平均の達成率が最も高かった。また、6:1:1のときに大幅な変化が見られ3:1:1のときと同程度の達成率となった。この2つを比較すると、3:1:1のときは35°, 0°の達成率が高い。6:1:1のときは達成率が平均では少し3:1:1の場合に劣るが、75°の達成率がかなり向上している。したがって、重み係数の比を6:1:1にした場合に有効な結果が得られたことがわかる。Fig.3(a)~(c)に10層で重み係数の比が1:1:1, 3:1:1, 6:1:1の場合についてのs偏光とp偏光の平均の分光反射率を示す。

4. おわりに

本研究では、窓ガラスにおける夏冬兼用の太陽エネルギー制御を行う多層膜を設計する上で、夏の赤外線反射率を向上させるために、角度による重み付けに関する検討を行った。光学多層膜最適設計システムを用いて最適設計を行い、入射角度75°, 35°, 0°に対して重み係数を変化させることで夏季の反射率向上を目指した。その結果、重み係数を適切に設定することで、冬季の反射率と可視光の反射率の上昇をある程度抑ええたまま、夏季の反射率を向上させることができた。

Fig.3 Spectral reflectance at each incident angle for three kinds of weighting factor

参考文献

- (1) 中村正行・唐澤光幸・小林憲令・小林光征, 太陽エネルギー制御多層膜の最適設計 (設計仕様について), 日本機械学会2001年度年次大会講演論文集, Vol.V, No.01-1, (2001), pp.47-48.
- (2) 中村正行・大石大典, 太陽エネルギー制御多層膜の最適設計 (薄膜材料の選定に関する検討), 日本機械学会北陸信越支部第40期総会・講演会講演論文集, No.037-1, (2003), pp.131-132.
- (3) Muhammad Iqbal, An Introduction to Solar Radiation, (1983), Academic Press.
- (4) 中村正行, Excel VBAによる光学多層膜シミュレーション技術と最適設計, 技術情報協会, (2002).