

財団法人 日本塗料検査協会

技術開発部 清水亮作
前川晶三

1. はじめに

近年、地球温暖化現象やヒートアイランド現象が大きな社会問題となっており、特に大都市でのヒートアイランド対策では既設の建築物等に塗るだけで効果が期待出来る「遮熱塗料」の活用が注目されています。そこで、「遮熱塗料」の性能や特徴を客観的に評価できる試験方法が非常に重要となり、標準化の確立が強く望まれております。現在、「高反射タイプの遮熱塗料」について、その性能の指標となる「塗膜の日射反射率の求め方」を日本塗料工業会を中心にJIS規格化を進めているところです。

「高反射タイプの遮熱塗料」を評価する上で重要になるのが太陽光スペクトル（重係数）です。前回の日塗検ニュース（120号）では、JIS規格（JIS R 3106, JIS A 5759, JIS C 8910）で規定されている太陽光スペクトルがBIRDモデル¹⁾によって決められた事を紹介しました。そして、日塗検でもこのBIRDモデル（SPCTRAL2）を用いて種々のエアマス（太陽位置）における太陽光スペクトルを算出したところ、エアマスの違いが塗膜の日射反射率に影響を与える事を示しました。

今回は、BIRDモデルにエアマス以外のパラメータも幅広く与え、日本で考えられる広い範囲の太陽光スペクトルを算出し、これを使って何種類かの塗膜の日射反射率を求めてみました。また、現時点で整理できていない曖昧な点等についても併せて紹介いたします。

2. BIRDモデルによる太陽光スペクトル

BIRDモデルを簡単に述べると、太陽から照射される光スペクトルが地球の大気を透過する過程で、その大気の状態によってどれだけ減衰して地表に到達するかを示したものです（式1）。詳細は、文献1を参照してください。

前回の日塗検ニュース（120号）では、式1中のD（太陽距離の補正係数）に当たる変数を変動させ、種々の太陽光スペクトルを算出しましたが、今回はこれらの全変数を片っ端から変動させ、全ての組み合わせにおける太陽光スペクトルを求めてみました。いわゆる「モンテカ

$$I_e = H_o \cdot D \cdot Tr \cdot Ta \cdot Tw \cdot To \cdot Tu \dots\dots\dots \text{式1}$$

I_e : 地表に届いた太陽光
 H_o : AMO(大気を透過する前)の太陽光スペクトル
 D : 太陽距離の補正係数
 Tr : レイリー散乱
 Ta : エアロゾル
 Tw : 水蒸気
 To : オゾン
 Tu : その他ガスの透過率

ルロ・シミュレーション(MCM)」と言われている手法です。

表1にBIRDモデルに与えたパラメータを示しました。今回、このパラメータの全ての組み合わせについて太陽光スペクトルを算出し、これより塗膜の日射反射率を求めてみますと、パラメータの組み合わせ総数は約2600万通りにおよび、1つの塗膜について、約2600万通りの日射反射率が算出されます。ここで算出される日射反射率は、0%～100%まで一様に分布した値が得られるとは考えにくく、ある範囲に収まる分布を示すものと考えられます。すなわち、この分布の範囲が「太陽光スペクトルの違いが日射反射率に与える不確かさ（拡張不確かさ）」に相当するものと考えられます。

3. BIRDモデル(EXCEL版)の移植

3.1 プログラムの移植

BIRDモデル(SPCTRAL2)は、NRELのホームページ(HP)²⁾よりExcel版を入手することができます。このExcelシートは大変良く作られており、パラメータを与えると瞬時に対応する太陽光スペクトルを算出してくれます(図1)。

ただし、今回のように2600万通りにもおよぶパラメータを手作業で入力することはとても大変です。また、例えばExcelのマクロ機能を用いたとしても膨大な計算時間が必要となり、実用的ではありません。そこで、計算プログラムをFORTRAN言語で書き直し、パソコンで実行することにしました。なお、今回のようにパラメータの全組み合わせを全て計算する方法は「賢いやり方」とは

表1 BIRD モデル (SPCTRAL2) に与えたパラメータの変動範囲

パラメータ	与えたパラメータの値	パラメータ数	Excel 版の対応セル
試験板の設置角	33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41	9	B4
大気混濁係数	0.19, 0.21, 0.23, 0.25, 0.27, 0.29, 0.31, 0.33, 0.35	9	B9
オングストロームの係数	1.14	1	B10
アルベド	0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50	7	B11
大気オゾン含有量	0.22, 0.24, 0.26, 0.28, 0.30, 0.32, 0.34, 0.36, 0.38	9	B12
気圧	980, 985, 990, 995, 1000, 1005, 1010, 1015, 1020	9	B18
下降水分量	1.00, 1.10, 1.20, 1.30, 1.40, 1.50, 1.60, 1.70, 1.80	9	B14
エアマス	季節 6/9, 6/19, 6/29, 7/9, 7/19, 7/29, 8/8, 8/18, 8/28	9	B19(日付)*1 B5, B6(時刻)
	時刻 10時, 11時, 12時, 13時, 14時, 15時, 16時	7	A28, A30 (緯度・経度)

合計計算回数 : $9 \times 9 \times 1 \times 7 \times 9 \times 9 \times 9 \times 9 \times 7 = 26,040,609$ (約 2,600 万) 回

与えたパラメータは、全て矩形(一様)分布を仮定。

*1... Excel のセル「B19」には、1月1日～12月31日を1～365の数字で入力します。

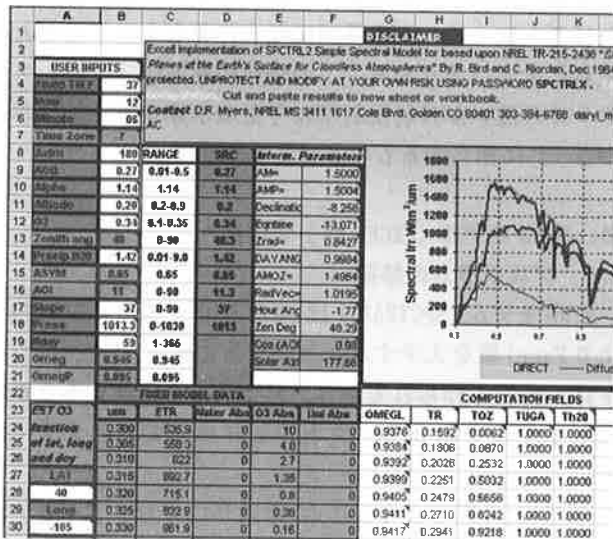


図1 Excel 版の BIRD モデル (SPCTRAL2)
(<http://rredc.nrel.gov/>)

緑色のセルがユーザーよりパラメータ入力可能になっています。詳細は、セルにカーソルを合わせるとコメントが表示されます。

言えません。一般的に MCM では、変化させるパラメータとその値を乱数(及び確立密度関数)を用いて決定し、およそ 100 万通りの計算結果が得られれば十分に信憑性のあるデータが得られると考えられています。100 万回なら、今回の場合でも 1/26 の計算量で同じ成果が得られることになり、大いに活用すべき手法でしょう。ただ、昨今のパソコンは高性能で、この程度の計算はすぐに完了してしまいます。プログラムを考え動作テストしている時間より、全組み合わせを総当りに計算させたほうが遥かに早かったりします。有り難い時代に感謝することとしましょう。

3.2 移植の確認

何種類かのパラメータについて原版である Excel 版と比較したところ、非常に小さい桁(小数点以下 15 桁目等)での差異は認めましたが、十分な精度で合致した計算結果が得られることを確認しました。微小な差異については、コンピュータが 2 進数で演算していることと、Excel と FORTRAN(倍精度実数)

で実数の扱い方が異なるためだと考えられます。

移植には大きなミス等はないものと考えています。

3.3 モンテカルロ・シミュレーションの留意点

言うまでもありませんが、計算の原理や手法が正しいものであっても、そこに代入するデータやパラメータが誤っていた場合、その計算結果は信頼できません。

ここで、重要なお断りがあります。大変恐縮ながら、表 1 に示しましたパラメータの変動範囲は現在勉強中のものであり、実在する太陽光スペクトルに対する妥当性について十分に検証されたものではありません。今回算出した約 2600 万個の太陽光スペクトルの中には、我々の世界に実在しないものが含まれている場合や、逆に実在するものを見逃している可能性もあり得ます。更に、BIRD モデルでは「雲のない快晴」を条件としたモデルであることにも留意しなければなりません。

4. 結果および考察

今回用いた塗膜(4種類)の分光反射率を図 2 に示しました。塗膜 A, B が高反射タイプの塗膜で、塗膜 C,

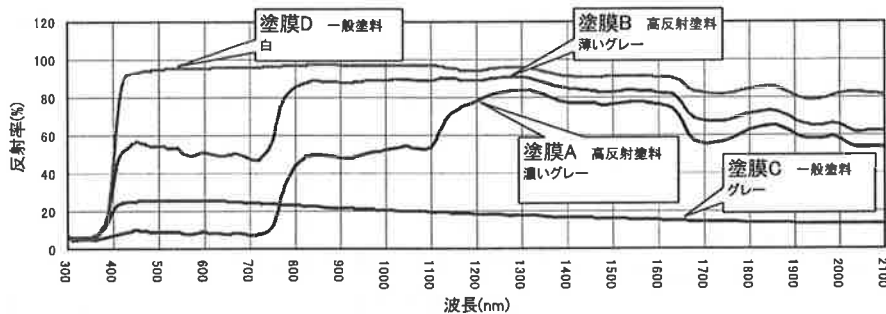


図2 検討に用いた塗料（4種類）（A, B: 高反射塗料, C, D: 一般塗料）

Dが一般塗料を塗った塗膜です。これらの塗膜に上記MCMで求めた約2600万個の太陽光スペクトルを乗じて日射反射率を算出します。当然のごとく、約2600万個の日射反射率が算出されることになります。この計算では、太陽光スペクトルを変化させ塗膜の分光反射率には同じ値を用いています。よって、算出される日射反射率の違いは、太陽光スペクトルの違いから生じるものと言えます。

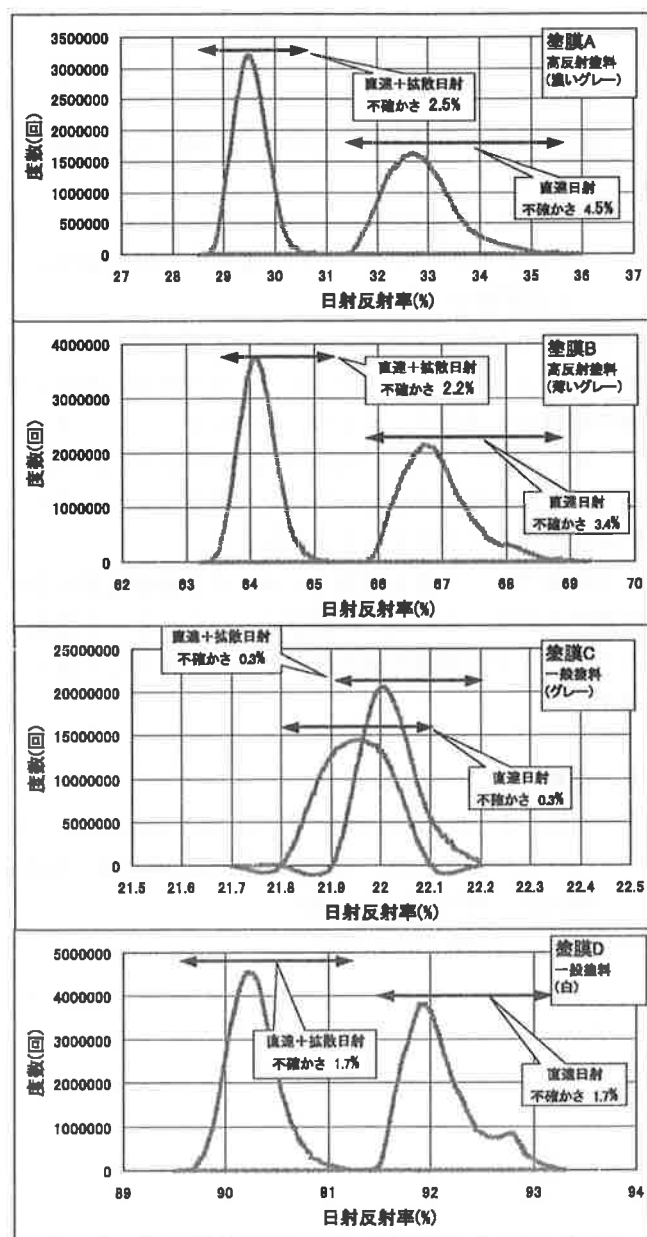


図3 モンテカルロ・シミュレーションで得られた約2600万個の太陽光スペクトルから算出した塗膜の日射反射率と算出された度数

この様にして算出した日射反射率を横軸に取り、求めた日射反射率の度数（同じ日射反射率の値が何回求めたか）を縦軸に示したグラフを図3に示しました。ここで興味深いのは、変動させたBIRDモデルのパラメータ（9種類）は、全て矩形分布を仮定して入力（表1）しましたが、図3を見ると求めた日射反射率は概ね正規分布を示す傾向が得られました。このことは、BIRDモデルのパラメータには日射反射率に対しより大きな影響を与えるものと、そうでないものがあることが考えられます。すなわち、不確かさで言う感度係数がそれぞれのパラメータで異なっている事が示唆されます。

不確かさを吟味する場合、感度係数は必須の情報になります。感度係数は、算出式が比較的単純である場合、その式を偏微分することで容易に知ることができますが、今回のBIRDモデルの場合、比較的簡単な計算とは言え代数的に偏微分することは容易ではありません。そこで、感度係数についてもシミュレーションで求める事になりますが、この場合、求めたい変数以外を固定することで可能になります（ただし、交互作用が無い場合）。すなわち、変化させた値に対する出力量の変化の割合（傾き）を求め、これを全ての変数に対して行うのです。これも興味深い課題ですが、本題である「日射反射率」から大きく脱線してしまいそうです。今後、「日射反射率測定の不確かさ」に関して吟味する必要があると思いますので、今回は割愛させていただきます。

さて、図3より、直達日射のみを考慮した場合（JIS R 3106の方法）と（直達+拡散）日射を考慮した場合を比較すると、直達日射のみを考慮した方が何%か高い日射反射率を与えることが判ります。これは、重係数（放射強度を波長で積分し、合計が1000になるように規格化した値）を比較すると、直達日射のほうが塗膜にとってより重要な波長領域（波長550nm以上の領域）で高い値を示しているためです（図4）。このことは、よく理解し、広く説明していかなければ混乱を与えてしま

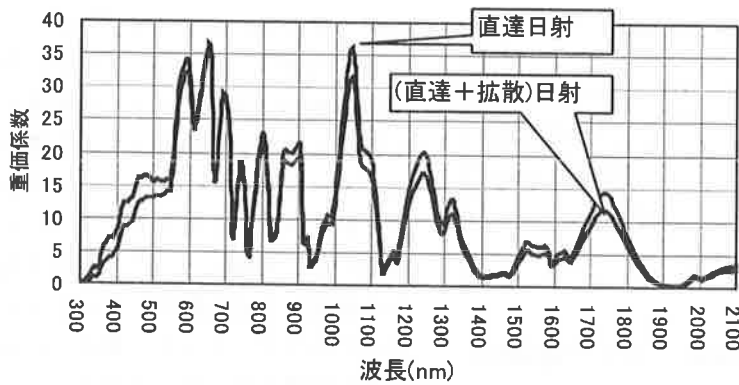


図4 直達日射と(直達+拡散)日射の重係数の比較
(重係数は合計1000に規格化)

う懸念があります。前回の日塗検ニュース(120号)でも「(直達+拡散)日射で考えた方がより有意義である」と述べましたが、今後、日塗検では「(直達+拡散)日射」の太陽光スペクトルを用いていきたいと考えております。この方針は、現在作成しているJIS規格(案)にも提案いたしました。ところが、現在までに広く採用されているJIS R 3106による方法(例えば、東京都のクールルーフ推進事業)は、「直達日射」のみを考慮した条件となっており、(直達+拡散)日射よりも何%か高い日射反射率を示します。同じ日射反射率でも、日射の条件が異なる試験結果は直接比較することができません。

次に、太陽光スペクトルを変化させた場合の日射反射率の算出度数ですが、算出された日射反射率が全て収まる範囲(100%信頼範囲)が拡張不確かさに相当するものと考えられます。この不確かさが大きい(幅が広い)ということは、太陽光スペクトルが変われば塗膜の日射反射率も変化してしまうことになります。今回、4種類(高反射タイプ2種類、一般塗料2種類)の塗膜について検討しましたが、この結果だけをみると高反射タイプの不確かさが大きくなる傾向を示しました。ただし、この傾向を合理的に説明するには至りませんでした。1つの仮定として、一般塗料の分光反射率は広い波長域にわたって大きな変化が無くピーク・ディップ(山・谷)が少ないために、太陽光スペクトルが波長方向に変動したとしても日射反射率の計算結果には影響が出にくいことが考えられます(強度方向の変動に対しては影響が出る)。

また、高反射タイプの塗膜について、直達日射のみを考慮した場合と(直達+拡散)日射を考慮した場合の不確かさを比較すると、(直達+拡散)日射のほうが明らかに小さくなる傾向を示しましたが、一般塗料では大きな違いは見られません。BIRDモデルにおいて、同じ太

陽光スペクトル中の直達日射成分と拡散日射成分が大きく異なる傾向を持つことは考えにくく、この理由も現在のところ理解するには至っておりません。今後、更に検討を続けたいと思います。

ところで、ここで更に1つの疑問が発生しました。図3を良く見ると、概ね正規分布に見える曲線も左右対称ではありません。中心に対し、±で信頼幅が異なっているのです。さらに、塗膜Dのようにピークが2つあるものも見受けられます。このようなデータの不確かさ解析について、どう進めれば良いのでしょうか。現時点では、良く解らないため、更に検討を進める予定です。

5. おわりに

高反射塗料(塗膜)の日射反射率の測定方法を確立するにあたり、

「太陽光(重係数)って変化しないの?」

「変化するとしたら、それが塗膜の日射反射率に与える影響は?」

との素朴な疑問を明確にしようと、MCM等の新しい手法を取り入れて検討してみました。その結果、新たに理解や勉強が必要なデータが次々と明らかになってきました。今回ご紹介した現象等は些細な事かもしれませんが、地道に理解を深める事も「優れた試験方法」を開発するためには重要になると信じております。

日塗検では、今後も塗料メーカーや学術研究者の意見を聞きながら、この新しい塗料について、より有意義で人々の役に立つ試験方法の開発を目指し努力してまいります。

6. 文献

- 1) BIRD, R. E. Hulstrom, R. L. and Lewis, L. J. Terrestrial solar spectral data sheets. Solar Energy, 30(6)(1983) 563.
- 2) <http://rredc.nrel.gov/>