P 6/63.0-431.014.3.001.4

積分球を用いた反射率測定方式の基礎検討

山陽国策パルプ(株) 竹 内 幸 雄, 稲 留 丈 治

A Note on the Reflectance Measurement
using Integrating Sphere

Sachio Takeuchi and Takeji Inatome

Tokyo Research Laboratory, Sanyo-Kokusaku Pulp Co. Ltd.

Theoretical expressions have been derived for the two methods of the reflectance measurement using the integrating sphere. The one method, in which both a sample sheet and a standard white board are set simultaneously on two different windows of the sphere and illuminated alternatively, gives a correct reflectance value of the sample relative to the standard. The other method, in which a sample sheet and a standard white board are set alternatively to a common window of the sphere, is accompanied with an inherent systematic error.

The amount of error measured by using the better method, increases with the increase of the inner wall reflectance of the sphere and depends also on the reflectances of the sample and the standard.

The maximum error between two methods, attains to 3.8% for 50% reflectance sample in 97% reflectance sphere.

The results were confirmed by experiments and the spectral reflectance of the inner wall of the sphere was also determined experimentally.

1. 緒 言

紙パルプの反射率測定に積分球を用いたものは、かなり広く使われている。しかし、積分球方式にも種々のタイプがあり、必ずしも方式間の定量的関係は明らかにされているとは限らない。そこで以下に基本的な2方式について反射率の比較検討をおこなった。

積分球を用いた反射率測定方式には、試料用と標準板用の2つの窓を設け、試料と標準板を同時に当てがい、交互に入射光をあて射出窓の照度の比 R_A を試料の反射率(標準板に対する)とする方式(A方式)と、1つの窓に試料と標準板を交互に当てがい、各々の場合の射出窓の照度の比 R_B を試料の反射率とする方式(B方式)とがある。一般に前者は分光々度計に、後者は測色計に用いられる傾向にある。この方式の比較を図1に示す。

本報告はこの2つの方式の内、A方式が正しい反射率を示すことを理論的に示し、同時に両方式間の偏差関係式を実証した。

その結果、両方式間の最大偏差は試料反射率50%点において約3.8%差(市販積分球内壁反射率97%と仮定)を示すことが分かった。更に、もし積分球内壁反射率を85%以下にすれば、両方式間の偏差は1.0%以下に出来ることが分かった。

2. 理論的考察

2.1 A方式およびB方式による反射率

球内壁の相互反射による射出窓の拡散照度は次式によって与えられる¹⁾。

$$E = \frac{F \cdot \rho}{S - \int_S \rho \cdot dS} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

E : Indirect illumination of inner wall

F : Incident luminous flux

ρ : Inner wall reflectance of an integrating sphere

S : Inner wall area

Fig. 1 Schematic views of A and B method

Fig. 1 Schematic views of A and B method

これから以下に示す各方式の間接照度の理論式を導くことが出来る。

A方式の場合

試料および標準白板を照射した場合の射出窓の照度 E_P および E_S は,

$$E_P = \frac{F \cdot \rho_P}{S - \rho_P \cdot S_1 - \rho_{S1} \cdot S_2 - \rho' \cdot S_3 - \rho(S - S')} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$E_{S1} = \frac{F \cdot \rho_{S1}}{S - \rho_P \cdot S_1 - \rho_{S1} \cdot S_2 - \rho' \cdot S_3 - \rho(S - S')} \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。ここに

E_P : Indirect illumination of the inner wall
when the light is applied to a sample

E_{S1} : Indirect illumination of the inner wall
when the light is applied to no. 1 standard
white board

F : Incident luminous flux

ρ : Reflectance of the inner wall %

ρ_P : Reflectance of the sample %

ρ_{S1} : Reflectance of no. 1 standard white
board [100%]

ρ_{S2} : Reflectance of no. 2 standard white
board %

ρ' : Reflectance of entrance window
and exit window [10%]

S : Inner wall area 615.8 cm²

S_1 : Measurement window area A_1 3.7 cm²

S_2 : Comparison window area A_2 3.7 cm²

S_3 : Entrance window and exit window
area 4.7 cm²

S' : $S_1 + S_2 + S_3$ 12.1 cm²

従って試料の反射率は,

$$R_A = \left(\frac{E_P}{E_{S1}} \right)_A = \frac{\rho_P}{\rho_{S1}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

である。従ってこの方式では(4)式により, 測定された射出窓の照度比は試料の正しい反射率を示すことが分かる。

B方式の場合

同様に, 比較窓には一定反射率 ρ_{S2} の反射板をあてておき(窓が1箇の場合は $\rho_{S2} = \rho$), 測定窓に試料を当てた場合の照度を E_P とし, 標準白板を当てた場合の照度を E_{S1} とすれば,

$$E_P = \frac{F \cdot \rho_P}{S - \rho_P \cdot S_1 - \rho_{S2} \cdot S_2 - \rho' \cdot S_3 - \rho(S - S')} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$E_{S1} = \frac{F \cdot \rho_{S1}}{S - \rho_{S1} \cdot S_1 - \rho_{S2} \cdot S_2 - \rho' \cdot S_3 - \rho(S - S')} \quad \dots\dots\dots(6)$$

従って, 両照度の比すなわちB方式による反射率は,

$$R_B = \left(\frac{E_P}{E_{S1}} \right)_B = \frac{\rho_P}{\rho_{S1}} \cdot \frac{S - \rho_{S1} \cdot S_1 - \rho_{S2} \cdot S_2 - \rho' \cdot S_3 - \rho(S - S')}{S - \rho_P \cdot S_1 - \rho_{S2} \cdot S_2 - \rho' \cdot S_3 - \rho(S - S')} \quad \dots\dots\dots(7)$$

となり, B方式では試料の正しい反射率 ρ_P/ρ_{S1} を示さない。

2.2 A方式とB方式間の反射率の偏差関係式

2.1 に示したA方式およびB方式の反射率の比は(4)式および(7)式より,

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{S - \rho_P \cdot S_1 - \rho_{S2} \cdot S_2 - \rho' \cdot S_3 - \rho(S - S')}{S - \rho_{S1} \cdot S_1 - \rho_{S2} \cdot S_2 - \rho' \cdot S_3 - \rho(S - S')} \quad \dots\dots\dots(8)$$

両反射率の差は,

$$\Delta_{B-A} = R_B - R_A = \left(\frac{\rho_P}{\rho_{S1}} \right) \cdot \left\{ \frac{S - \rho_{S1} \cdot S_1 - \rho_{S2} \cdot S_2 - \rho' \cdot S_3 - \rho(S - S')}{S - \rho_P \cdot S_1 - \rho_{S2} \cdot S_2 - \rho' \cdot S_3 - \rho(S - S')} \right\}$$

$$-1 \} \dots\dots\dots(9)$$

となる。

3. 実験方法

3.1 測定器と実験方法

実験には、積分球を備えた Perkin-Elmer-139 spectro-photometer (図2) を用いた。この積分球では試料と標準板は常に積分球の内壁を構成しており、ターレットによって交互に入射光に照射される位置にもって来ることが出来る。

また、試料の分光反射率の測定およびフィルターの透過率の測定には Hitachi self-recording spectro-photometer (EPR-II) を用いた。

測定としては、A方式の場合、まず比較窓 A_2 に試料を、測定窓 A_1 に標準白板を当て、標準白板を入射光で照射した場合の光電流の値で、ターレットで試料と標準白板を交換し試料を照射したときの光電流の値を除いたものを試料のA方式による反射率とした。B方式の場合は、あらかじめ準備した2板目の標準白板を比較窓 A_2 にセットしておき、測定窓 A_1 にA方式と同じ標準白板を当てた場合の光電流で、標準白板を測定窓 A_1 より取外し試料と交換した場合の光電流の値を除いたものを試料のB方式による反射率とした。

3.2 試料

測定に用いた試料は以下の通りである。

- Sample No. 1 Fine paper 54.2 gr/m² (eight sheets backed by a black cloth)
- Sample No. 2 Fine paper 54.2 gr/m² (four sheets backed by a black cloth)
- Sample No. 3 Fine paper 54.2 gr/m² (two sheets backed by a black cloth)
- Sample No. 4 Fine paper 54.2 gr/m² + Black paper (back side)
- Sample No. 5 Tracing paper 61.4 gr/m² (four sheets backed by a black cloth)
- Sample No. 6 Tracing paper 61.4 gr/m² (two sheets backed by a black cloth)
- Sample No. 7 Tracing paper 61.4 gr/m² + Black paper (back side)
- Sample No. 8 Tissue paper 25.2 gr/m² + Black paper (back side)

Fig. 2 Perkin-Elmer-139 Spectro Photometer

Fig. 3 Reflectance deviation by difference (B-A)

Sample No. 9 Black paper 134.1 gr/m²

4. 実験および考察

理論式を検証するため以下の実験を行った。

4.1 偏差関係理論式とその実験結果

種々の反射率の試料に対する Δ_{B-A} の測定結果を図3に示す。B方式の誤差すなわち偏差値は積分球内壁反射率 ρ に依存する。実線は積分球内壁反射率 $\rho=97, 90$ および 84.9% に対する理論値である。積分球内壁反射率約 97% の場合に偏差値の最高は試料反射率 50% で -3.8% となるが、内壁反射率 84.9% のときは -1.0% である。赤色光に対する 50% 試料の実測偏差値は -1.2% で、積分球内面反射率が赤色光に対し約 90% になっていることを示している。このように使用した積分球が汚れているため、次項に示すように積分球内壁の分光反射率特性を実験的に求め、測定時に光

Fig. 4 Ratio of reflectances for A and B method

源に青フィルター（主波長 $\lambda=457$ nm）あるいは赤フィルター（主波長 $\lambda=680$ nm）をかけ試料の分光反射率を測定し、A方式とB方式との偏差値を求め、同時に計算値をそれぞれについて求めた。

図3に示すように偏差値の実験値と理論値はよく一致している。偏差比は図4に示してある。

4.2 積分球内壁の分光反射率特性

積分球内壁の分光反射率特性を求めるために、測定窓 A_1 に標準白板1を当て比較窓 A_2 に種々の反射率の試料を当て、射出窓の試料の変化による照度変化を（標準白板2を比較窓に当てた場合を基準100%として）求めた。この場合に、図2の積分球にスペクトロフォトメーターを接続し分光特性を求めた。

この場合(8)式は、

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{S - \rho_{P1} \cdot S_1 - \rho_{S21} \cdot S_2 - \rho_{i1}' \cdot S_3 - \rho_i(S - S')}{S - \rho_{S14} \cdot S_1 - \rho_{S21} \cdot S_2 - \rho_{i1}' \cdot S_3 - \rho_i(S - S')} \quad \dots\dots\dots(9)$$

となり、 ρ はすべて波長 λ の関数となる。

この偏差比は上記の実験のプロットで求め $\rho_{i1}' =$ 一定とすれば積分球の分光反射率 ρ_i のみが未知数となるから、 R_A/R_B の $R_A=0$ に対する外挿値（図5）から(9)式によって ρ_i を求めた。

得られた積分球分光反射率 ρ_i を図6に示す。

5. 結 論

積分球を用いた反射率測定方式について、理論的および実験的検討を行い以下の事が明らかとなった。

Fig. 5 Relation between $(R_A/R_B)_\lambda$ and spectral reflectance

Fig. 6 Inner wall spectral reflectance of the integrating sphere

- 1) A方式が正しい試料反射率を示す。
- 2) B方式の誤差は積分球内壁反射率に依存し、内壁反射率97%の場合最大偏差3.8%、85%の場合は約1%であることが分かった。
- 3) 積分球内壁の分光反射率特性を求めることが出来た。

終りに当って、本基礎検討は東大教授桑原五郎先生による御指導であることを報告し、感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 伊藤義雄：照明計算，p. 153～156（1964）
（受理 54. 6. 7）