再帰性反射材料の再帰反射分光係数の測定

専門会員 山中俊夫* 西本昭男* 専門会員 角井嘉美* 専門会員 南 條 基*

Measurement of the Spectral Coefficient of Retroreflection for Retroreflective Materials

Toshio Yamanaka (Fellow Member), Akio Nishimoto, Yoshimi Kakui (Fellow Member),

Motoi Nanjo (Fellow Member)

Life Electronics Research Center

Electrotechnical Laboratory

ABSTRACT

An apparatus has been designed to measure the spectral coefficient of retroreflection of materials used for traffic signs under nighttime geometric conditions.

This paper describes the configuration of the apparatus and its performance, and also gives an estimate of accuracy in the measurement of the spectral coefficient of retroreflection by means of the apparatus.

A small integrating sphere is used to overcome the geometric condition of small observation angle and to eliminate the error due to polarization effect in the optical system. Retroreflected light from the sample is effectively collected by the sphere, and transferred to a double monochromator through an optical fiber bundle.

It is estimated that the accuracy in the spectral coefficient of retroreflection is better than $\pm 1\%$.

The measurement results obtained by the use of the apparatus are presented, where the typical retroreflective materials have been prepared for the international inter comparison measurement conducted by CIE TC-2.19.

KEYWORDS: retroreflection, retroreflector, photometry, colorimetry

1. 緒 言

再帰性反射材料は交通標識用の反射材料等に多く用いられ、特に夜間道路の標識として交通安全に重要な役割を果たしている。これらのレンズ封入型反射材料の光学的特性、すなわち、その反射性能（再帰反射係数）および色の測定法について、筆者らはすでに再帰反射係数の測定方式および再帰反射標準の作成について報告¹⁾し、さらに夜間条件及び昼間条件における色度の分光測光法による測色法について報告した²⁾。国際的にはCIE TC-2.3技術委員会の技術報告書³⁾によって照明観測条件のCIE角度基準系および測定法が示され、これをもとにして国内においては日本工業規格（JIS）JIS Z 9117においてレンズ封入型再帰性反射シートの反射性能の測定法および評価基準が規格化され⁴⁾現在国内において実用されている。

この方式は照明光源による照射によって反射材料面に入射する光束と、観測位置すなわち受光位置における反射材料からの反射光の光束を照度計によって照度として計測し、両者の相対比率から反射性能を求める。（この方法を以後照度測定法と記す）この場

合の照明および受光条件として、照明光源は標準光源A（色温度2856K）であること、受光器（照度計）の分光感度はCIE標準比視感度 $V(\lambda)$ に一致させることが必要である。この条件の不確定さが再帰反射係数の測定の正確さに大きく影響する。

CIE TC-2（第2部会）技術委員会において、従来の照度測定法に代わる新しい測定方法を検討する目的で、1987年にCIE TC-2.19技術委員会「再帰反射分光係数の測定」が設置された。この再帰反射分光係数を用いて再帰反射係数を算定する方法⁵⁾（ここでは以後再帰反射分光係数法と記す）は再帰反射分光係数のみを実測し、照明光源の分光分布および受光器の分光感度は数値によって与え、求めるべき再帰反射係数は数値計算によって算定する。従って従来の方法による照明光源の分光分布および受光器の分光感度に起因する測定誤差を軽減することができる。

CIE TC-2.19技術委員会では再帰反射分光係数の測定法に関し、国際的にその測定技術水準の実態を把握するため、再帰反射分光係数測定の国際相互比較を計画し、各種再帰性反射試料（レンズ封入型、カプセル型、プリズム型）を関連試験研究機関に回送し、相互比較が実施されている。

また、CIE TC-2.36技術委員会では前述の技術報告書の見直しが行われている。

当研究室においても、この再帰反射分光係数法による測定技術

*電子技術総合研究所 大阪ライフエレクトロニクス研究センター

図1 再帰反射に関連する種々の変数
(CIE Publication No.54 1983)

Fig. 1 Typical parameter involved with the effect of retroreflection

の確立をめざし、この方式による精密測定法を検討し、その測定装置を設計、製作した。

本報ではこの測定方式と測定装置の原理、構成および機能について検討した結果を述べ、前記のCIEの再帰反射分光係数の国際相互比較のために準備された反射材料の当所の測定結果について報告する。

2. 再帰反射分光係数の定義と測定原理

図1は前述のCIE技術報告書⁽³⁾による再帰性反射材料測定のための幾何学的配置を示す。光源は車のヘッドライトに、測定用受光器は運転者の目に対応する。照射軸と観測軸とのなす角を観測角 α 、基準軸と照射軸とのなす角を入射角 β で表す。

図1の照明および観測の幾何学的条件において、現在実用されている照度測定方法による再帰性反射材料の反射性能すなわち光度係数 R あるいは再帰反射係数 R' は次式によって定義されている。

$$R = I / E_0 \quad (\text{cd} \cdot \text{lx}^{-1}) \quad (1)$$

$$R' = R / A = I / (E_0 \cdot A) \quad (\text{cd} \cdot \text{lx}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (2)$$

ここで E_0 は基準中心における入射光の法線照度(lx)、 I は入射角 β 、観測角 α において観測者の位置から試料を観測する方向の光度(cd)である。また、 A は観測される試料の面積(m^2)である。

次に、本報の再帰反射分光係数法の測定原理図を図2に示す。先ず同図(A)における照明および観測の幾何学的条件において、照明光源(a)によって照射された試料(b)からの反射放射束の一部を受光装置(c)の一定面積の開孔部への放射束として受入れ、分光測定装置(e)によって分光測定値を求め、それを $m_r(\lambda)$ とする。次に同図(B)のように受光装置を試料位置に移動し、照明光源の照射による試料面法線方向の入射放射束を同じ開口部で受け入れ、同様に分光測定し、その分光測定値を $m_i(\lambda)$ とする。

再帰反射分光係数法による光度分光係数 $R(\lambda)$ または再帰反射分光係数 $R'(\lambda)$ は次式によって定義される。

$$R(\lambda) = m_r(\lambda) \cdot d^2 / m_i(\lambda) \quad (3)$$

$$R'(\lambda) = m_r(\lambda) \cdot d^2 / m_i(\lambda) \cdot A \quad (4)$$

ここで d は図2に示す測光距離(m)であり、また A は試料の面積(m^2)である。

この分光光度係数 $R(\lambda)$ あるいは再帰反射分光係数 $R'(\lambda)$ の実測値から、それぞれ光度係数 R または再帰反射係数 R' を次式の計

図2 再帰反射分光係数測定の手順
a) 照明光源 b) 再帰性反射試料 c) 受光装置
d) 分光測定装置(分光器)

Fig. 2 Procedure of measurement of the spectral coefficient of retroreflection

a) light source b) retroreflector c) photoreceiver
e) spectrophotometer

算によって求める。

$$R = \frac{\int_{\lambda} R(\lambda) \cdot P_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} P_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (\text{cd} \cdot \text{lx}^{-1}) \quad (5)$$

$$R' = \frac{\int_{\lambda} R'(\lambda) \cdot P_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} P_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (\text{cd} \cdot \text{lx}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (6)$$

ここで $P_A(\lambda)$ は照明光源の分光分布でCIE標準の光 A 、 $V(\lambda)$ はCIE標準比視感度と規定されている。

3. 測定装置の構成と機能

3.1 測定装置の構成

本報の測定装置は図3に示すように試料を照明する照射装置(S)、試料回転台(SR)、受光装置(R)、分光測定装置(M)および測定器(D.V)と計算機(CPU)等を含むデータ処理装置(D)

から構成される。

図3の照明および観測条件(α , β)において照明光源装置によって照射された試料の反射光は受光装置開口面に入射し、受光装置、積分球(K)、光学ファイバー(F)を経て分光測定装置の分光器入射スリットに導かれ、所定の波長範囲について分光測光される。

試料回転台は測定試料を垂直に保持し、水平回転することによ

図3 再帰反射分光係数測定装置の構成図

Fig. 3 Configuration of spectrophotometric retroreflectometer system

り入射角 β を設定する。回転円板上には角度目盛が彫刻され、入射角の角度設定精度は $\pm 0.1^\circ$ である。

観測角 α は受光装置開口面と試料位置との距離すなわち測光距離を d (m)とし、照射装置開口中心と受光装置開口中心との距離を h (m)とすると、 $\alpha = \tan^{-1}(h/d)$ で示される。

CIEの前述の国際相互比較の観測条件として観測角は $20'$ とされている。これは測光距離12.100mとすると光源および受光部それぞれの中心間の距離が約70mmにすぎないことを意味する。このため光源開口、受光開口、分光器等の現実の大きさからくる空間的制約がありこれらの構造については工夫が必要となる。本装置では次節に述べる受光装置、小型積分球、分光器との接続に光学ファイバーを用いコンパクトに構成した。

観測角の実際の設定は次のような方法で行う。試料面中心と照明光源装置の開口面中心を通して、トランシットおよびレーザ光によって光軸を設定する。次に図3に示す位置に補助光学ベンチ(v)をその光軸に対し垂直に設置する。受光装置開口面は補助光学ベンチ上を移動し、その開口面中心と光軸と一致させ、その位置を受光開口面の基準位置とする。その基準位置から光学ベンチ上を移動する距離 h は光学ベンチの副尺付の目盛によって $\pm 0.5\text{mm}$ が設定可能であり、従って、測定距離 d が12.100mでは観測角 α の角度設定精度は $\pm 0.2'$ である。

分光測定装置はグレーティング加分散型ダブルモノクロメーターを用い、分光測光は380nmから780nmの波長範囲で波長幅一定の条件で行った。受光器は光電子増倍管を用い、測定範囲における受光器出力の直線性は0.2%以内である。

データ処理装置では計算機プログラムによって分光測定装置の波長自動走査、測定波長間隔、測定反復回数、暗電流補正などを

設定し、分光測定操作を自動化した。

3.2 照射装置

3.2.1 装置の構成と機能

再帰反射測定用の照射装置は、試料面上において高照度で、かつ試料面内を均一に照明することが要求される。通常、長距離を隔てた試料の照明方式は平行光方式と投影方式が考えられるが、前者は一般に高照度で、均一な照度を得るには開口が大きく輝度の高い光源(光源面積の小さい)が必要であり、前述の幾何学的制約条件のため実現が難しい。一方後者では優れた照明の均一性が得られるが、照度が低下する。筆者らはこれらの問題を勘案した照射装置の光学系を設計し、試作した。その光学系原理を図4に示す。

図4において光源(S)は小型フィラメント(6×4mm)のハロゲン電球(300W, 24V)を用い、ソケット取り付け部は、フィラメント中心を光軸に一致させるため、上下左右の微動できる構造に設計した。電球の背部に直径60mmの表面アルミ蒸着の凹面反射鏡(M)を配置し、これによって光源の後部から出る光を集光して光源のフィラメント位置に戻し、光源の光束を有効に利用し

図4 照射装置の光学系

M:凹面反射鏡 S:光源 L₁:集光レンズ
H:色温度変換用フィルタ棒 D:視野調節円板
L₂:対物レンズ E:光源開き角調整用開口円板

Fig. 4 Optical system of the projector for illuminating retroreflector
M:concave mirror S:light source L₁:condenser lens H:conversion filter of color temperature D:field stop L₂:object lens E:aperture

た。凹面反射鏡は前後左右の移動および仰ぎ角度を微細に調節できる機能を持ち、次のような調節を行った。

光源から前方に射出する光は集光レンズL₁(直径60mm, 焦点距離100mm)によつて図4の光軸上のa点近傍にフィラメント像を結像するが、その像はフィラメントの光輝部分と暗部とが縦縞状に並置された様相を呈す。一方光源のフィラメント後方から射出した光も上記の反射鏡を経てa点近傍にフィラメント像を結像する。そのとき凹面反射鏡を微調節し、光源の前方からの光によるフィラメント像の暗部の部分に、凹面反射鏡を経た光のフィラメント像の光輝部分の像が位置するように凹面鏡を調節する。このように光源の前方および後方からの光の重ね合わせによってフィラメント像の全体の輝度分布をできる限り均等にし、試料面における照明の均一性を向上させた。

また、この凹面反射鏡の中央部に小孔（直径4mm）を設け、光源のフィラメントの後方から射出される光の一部を照射装置の後方に設置した受光記録装置に入れ、電球の光度の変動および経時変化を監視する。

集光レンズの前方には色温度変換用フィルタを装着するフィルタ枠（H）を取り付け、選定したフィルタの挿入によって照射装置からの照明光の色温度を標準光源A（色温度2856K）に一致するよう調節することができる。

光軸上の集光レンズによるフィラメント結像位置近傍に視野調節円板（D）を設置した。この円板は図4の下部に示すように直径20cmの円板で同心円周上に4種の円孔（直径2、3、4、6mm）を持ち、この円板を回転することにより光軸上において、円孔の大きさを選択することができる。この視野調節円板の円孔開口面を対物レンズL2によって試料面に投影し、試料面の照射領域を決定する。

対物レンズL2は直径40mm、焦点距離150mmのアクロマチックレンズを用いた。その前面には光源開き角調整用の内径35mmの開口円板（E）を装着する。その光源開き角は10°である。照射装置の光源部は空冷し、装置全体は光学ベンチ上に安定に設置した。

3.2.2 試料面の照明の均一性

図4の照射装置の光学系において、視野調節円板をフィラメント結像位置近傍（a点）に置くと試料面上では高照度が得られるが、照明の均一性は劣り、また視野調節円板を結像位置より集光レンズ側に近づけると均一性は改善されるが、試料面照度が低下する。そこでこの視野調節円板の位置を光軸上で微調節し、その時の試料面の照度および照明の均一性を同時に測定し、均一性が約±2%以内になる視野調節円板位置を求めた。

試料面内における照明の均一性の測定は試料面（20×20cm）を9分割し、各部の中心位置の9点の照度を測定した。

図5はその測定結果例を示すもので、各点の数値は平均照度からの偏差(%)を表す。本報の照明光源装置では、測光距離12.100mにおいて照明の均一性は±2%以内であり、平均照度は約110lxである。

3.3 受光装置

本報の受光装置を図6に示す。この装置はレンズ（L）（焦点距離150mm）とアルミ蒸着表面反射鏡（M）からなる受光筒および積分球（K）、光学ファイバー（F）から構成される。

受光開口面（A）には受光開き角調整用の開口円板（内径35mm）を装着する。本報の測光距離すなわち試料基準位置と受光開口面との距離が12.100mであり、従って受光開き角は10°となる。この開口面を通過した放射束はレンズ、反射鏡を経て積分球入射口の中央位置（P）に集光され、そこには倍率が約1/100の縮小試料像を形成する。試料の大きさが20×20cmであり、従ってその縮小試料像の大きさは約2×2mmである。積分球は取り外し可能な構造で、受光筒の射出側部分と積分球の入射口側部分は、機械的に位置再現性が測定値に影響を及ぼさないで容易に取り外すことが可能である。

積分球は球内面照度を高めるため特に小型の内径25mmのものをを用い、入射口と射出口は直径5.2mmである。球内面は白色硫酸バリウムを塗布した。尚この積分球の球効率 η は次式で表される。⁶⁾⁷⁾

$$\eta = f \cdot \rho_w / (1 - \rho_w (1 - 2f)) \quad (7)$$

ここでfは球内全面積に対する射出口面積すなわち入射口面積

図5 照明試料面の照度の均一性
単位 (%)

Fig. 5 Uniformity of illumination at the plane of the retroreflector

図6 受光装置の光学系

A : 開口部 L : レンズ P : 焦点距離
K : 積分球 F : 光学繊維

Fig. 6 Optical system of the device for receiving the radiant flux
A : aperture L : lens M : mirror P : focused point
K : integrating sphere F : optical fiber

の比である。球内面の反射率 ρ_w を98%とし、上記の諸条件を用いて計算した結果、球効率は約0.25を示した。

光学ファイバーはコア径200 μ m、320芯を用い、外形12mmの可燃管に覆われた長さ1mのものをを用いた。光学ファイバーへの入射部分の先端は積分球の射出口に装着され、一方の射出部分の先端は分光器入口スリットの形状に合わせて2×10mmの縦型のスリット形状とし分光器の入口スリット前面に装着した。

4. 測定方法と測定精度

CIE TC—2.19技術委員会において再帰反射分光係数測定の国

際相互比較が実施され、筆者らも本報の測定装置を用いて、回送された各種再帰性反射材料の再帰反射分光係数の測定を実施した。ここではその測定試料の内容および国際相互比較の測定条件、本報の装置による測定方法と測定精度について述べる。

4.1 国際相互比較用再帰性反射材料

CIE TC-2.19技術委員会より送付された再帰性反射材料はレンズ封入型、カプセル型、プリズム型の3種類である。レンズ封入型およびカプセル型の反射材料の色は白色(W)、赤色(R)、オレンジ色(YR)、黄色(Y)、緑色(G)、青色(B)茶色(BR)の7色で、プリズム型は茶色を除く6色である。試料の形状はアルミ板上に反射シートが貼り付けられたパネル状(厚さ約2mm)で、大きさは20×20cmである。

さらに非再帰性反射材料として同一形状の拡散白色塗料を塗布した白色試料板および半光沢の黒色塗料を塗布した黒色試料板各1個が含まれる。以上の合計22個の試料が再帰性反射分光係数相互比較測定用試料として木箱に収納され、各国試験研究機関に送付された。

4.2 国際相互比較測定用試料の測定条件

CIE TC-2.19技術委員会より提示された再帰反射分光係数相互比較の測定条件および本報における測定条件を表1に示す。

4.3 測定方法と測定精度

4.3.1 測定方法

図3の測定装置の光学系配置において、照明光源装置の開口面中心と試料回転台上の試料面中心を通る光軸をトランシットを用いて設定した。照明光源装置は試料面の照度と均一性を考慮した視野調節板の最適位置を前述の方法で設定し、試料面の照度と照明均一性を測定した。

測定方法は次の3つの手順から構成される。
手順1) まず、測定原理の図2(B)に示すように受光装置を試料台側に設置し、受光装置開口面の中心を試料台に設置する試料面の基準中心に一致するように設定する。照明光源装置の光源を

点灯し、受光装置開口面に入射した光が積分球の入射口面の中心位置に電球のフィラメント像として正確に結像することを確認する。積分球に入射した光は光学ファイバを経て分光測定装置に入り波長範囲380nmから780nmについて、10nm等間隔で分光測光する。その分光測定値が4)式の $m_l(\lambda)$ である。測定は2反復しその平均値を用いた。

手順2) 次に受光装置を図2(A)のように照明光源側の位置に移動し、試料回転台には測定試料を設置する。試料面基準中心が光軸に一致していることを確認し、回転台を調節して入射角 β を設定する。観測角 α は受光装置開口面の位置を図3のように補助光学ベンチ上で調節し設定する。照明光源装置によって照射された試料の反射光は受光開口面に入射し、積分球入射口面の中心に正確に試料像として結像することを確認する。積分球に入射した光は手順1)と同様に分光測光する。その分光測定値が4)式の $m_r(\lambda)$ である。測定は2反復しその平均値を用いた。

手順3) 最後に手順1)の測定を繰返す。以上の手順1), 2) 3)を含めて1系列の測定とする。

これらの1系列測定によるそれぞれの分光測定値から6)式によって再帰反射分光係数 $R'(\lambda)$ を算出した。

4.3.2 測定の再現性

測定の主な変動要因は測定中の光源の光度変動、受光器の時間的感度変化および受光装置の試料回転台および照明光源装置への移動時における受光光学系の設定の再現性などが考えられる。

光源はハロゲン白熱電球を直流電源装置により電流一定に調節して点灯した。測定全波長範囲の測定所要時間は約5分で、その間の光源の光度の変動は約0.3%以内であった。また長時間点灯による光度の継時変化は図4の照明光源装置後部の受光記録装置によって監視した。

受光器の時間的感度の変化は1系列の測定中、すなわち手順1), 2), 3)(各2反復)の測定において、1~2%の単調変化が認められる場合もあったが、再帰反射分光係数の算出において受光器感度の時間的変化の補正を考慮して、手順1)と手順3)の測定平均値を用い、4)式の $R'(\lambda)$ を計算した。

測定精度に影響する最も大きい成因は、受光装置の移動による測定光学系の設定の再現性が予想される。そこで確実な再現性を得るため、装置の移動、設定毎に次のような方法を用いた。

図6の受光装置光学系において積分球を取り外し、受光筒射出口面に拡散性の透過スクリーンを装着する。そのスクリーン面の光軸上の位置は積分球の入射口面と一致させる。測定試料の反射光は受光筒を経てこのスクリーン面上に約2×2mmの試料像を結像する。その像の中心がこのスクリーン面の中心の十字刻印した位置、すなわち積分球入射口面の中心に厳密に一致するように受光筒を調整する。その後積分球を取り付け測定の状態にする。積分球の入射開口面の大きさは直径5.2mmであり、試料像は完全にこの面内に入り、試料像による光は損失なく正確に積分球内に入射する。今、プリズム型白色試料($\alpha=0.33^\circ$, $\beta=-5^\circ$)について、受光装置の移動後のこの方法による光学系再設定の測定値再現性を実験的に検証した。図7は4回の測定値の再現性を平均値からの偏差で示す。その偏差は約±0.3%を示した。

5. 各種再帰性反射材料の測定結果

5.1 再帰反射分光係数と色度

各種再帰性反射材料の国際相互比較用試料をCIE TC-2.19技

表1 再帰反射分光係数国際相互比較の測定条件		
Table 1 Measurement conditions of international inter comparison measurement		
	C I E T C - 2 . 1 9 技術委員会の測定条件	本報の測定条件
観測角	$\alpha = 20^\circ$ または 0.33°	$\alpha = 0.33^\circ$
入射角	$\beta 1 = -5^\circ$ $\beta 2 = 0^\circ$	$\beta 1 = -5^\circ$ $\beta 2 = 0^\circ$
回転角	$\varepsilon = 0^\circ$	$\varepsilon = 0^\circ$
光源 開き角	10' 以下	10'
受光 開き角	10' 以下	10'
試料面照度の均一性	±2 % 以内	±2 % 以内
試験距離	10 ~ 15 m	12.100 m
測定波長範囲	380 ~ 780 nm	380 ~ 780 nm
測定波長間隔	10 nm 等間隔	10 nm 等間隔
測定波長幅	最大10 nm	3 nm

術委員会の指定の測定条件により前述の測定方法に従って再帰反射分光係数の2回の繰り返し測定を実施した。

図8、図9および図10はレンズ封入型、カプセル型、およびプリズム型のそれぞれ各色反射材料に対し、観測角 $\alpha=0.33^\circ$ 、入射角 $\beta=-5^\circ$ 、回転角（鉛直面に垂直な軸についての試料の回転） $\epsilon=0^\circ$ の測定条件における再帰反射分光係数（W：白色、R：赤色、YR：オレンジ色、G：緑色、B：青色、BR：ブラウン色（レンズ封入型、カプセル型のみ））の測定結果を示す。これは測定方法の1系列すなわち手順1), 2), 3)の測定値の読みから、測定距離 $d=12.100\text{m}$ 、試料面積 $A=0.04\text{m}^2$ として4)式によって計算された値である。同図の実線および点線は1系列測定の線

図7 受光装置移動による測定値再現性
Fig. 7 Repeatability of the measured value by replace of the photoreceiver

り直し測定による再帰反射分光係数の比較を示す。

図11はプリズム型反射材料の白色、赤色、緑色、青色試料について2回の繰り返し測定による再帰反射分光係数の再現性、すなわち1回の測定による $R_1'(\lambda)$ と2回目のそれを $R_2'(\lambda)$ としたときのそれらの差の平均値 $R'(\lambda)$ に対する比を各色について示す。各反射材料の分光測定値（4式の $m_r(\lambda)$ ）が非常に小さい値の場合を除いて、その再現性は各色について約1.0%（ ± 0.5 ）の範囲内にある。他のレンズ封入型、カプセル型の各色反射材料についてもほぼ同様な結果を示したが、レンズ封入型白色試料、各型の黄色試料については、測定波長領域の一部分において約1.5~2.0%の再現性の範囲を示した。

各型の再帰反射分光係数は、レンズ封入型、カプセル型、プリズム型の順に大きく、例えば白色試料の場合（560nmにおいて）レンズ封入型の値と比較するとカプセル型、プリズム型はそれぞれ約2.4倍、および8.2倍であった。

また、各色反射材料の再帰反射分光係数 $R'(\lambda)$ からそれぞれのCIE1931XYZ表色系の色度 x, y を8)式から算出することができる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \sum_{380}^{780} P(\lambda) R'(\lambda) \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} \Delta \lambda \quad (8)$$

$$X = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad Y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

ここで $R'(\lambda)$ は各試料の再帰反射分光係数、 $P(\lambda)$ は照明光源の分光分布、 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ はCIE1931等色関数である。

図12にレンズ封入型（●印）、カプセル型（○印）プリズム型（□印）のそれぞれ図9、図10、図11の実線で示す再帰反射分光係数から、標準の光Aの照明による各色反射材料の色度を計算した結

図8 レンズ封入型再帰性反射シートの再帰反射分光係数
Fig. 8 Spectral coefficient of retroreflection of enclosed type retroreflectors

図9 カプセル型再帰性反射シートの再帰反射分光係数
Fig. 9 Spectral coefficient of retroreflection of encapsulated type retroreflectors

図10 プリズム型再帰性反射シートの再帰反射分光係数
Fig. 10 Spectral coefficient of retroreflection of prismatic type retroreflectors

図11 プリズム型再帰反射分光係数測定値の再現性
(W:●, R:○, G:×, B:□)

Fig.11 Reproduction of spectral coefficient of retroreflection of prismatic type

果を CIE1931色度座標上に示す。

5.2 再帰反射係数の算定

各種反射材料の再帰反射分光係数 $R'(\lambda)$ の値から照明光源として標準の光A, 受光器の分光感度を CIE 標準比視感度 $V(\lambda)$ として, 6) 式によって再帰反射係数を算定した。表2にレンズ封入型, カプセル型, プリズム型の2回の測定から得られた計算結果の平均値と2回の測定値の平均値からの偏差を()内に示す。

ここで6) 式に示されるように $R'(\lambda)$ の実測値にもとずいて任意の照明光源の分光分布および任意の受光器の分光感度分布に対して光度係数あるいは再帰反射係数が求められる。今, 夜間の自動車の実際のヘッドライトをハロゲン電球(色温度3200K)とし, 運転者の眼の分光感度すなわち受光器の分光感度を $V(\lambda)$ とした時の再帰反射係数を計算した結果を表2の右欄に示す。ただしこの数値は6) 式の照明光源が標準の光Aの場合の再帰反射係数の値を基準にしてその比率で示した。

このようにレンズ封入型反射材料について, 光源が標準の光Aと3200Kの場合の反射性能を比較すると, 白色試料, 黄色試料では反射性能の差異は殆ど認められないが, 赤色, 緑色試料では数%, 青色試料では10%以上の大きい差を示した。

また6) 式において $V(\lambda)$ の代わりに種々の観測者の分光感度たとえば色覚異常者の比視感度を想定して計算し, 色覚異常者の反射材料に対する相対的な反射性能を推測することができる。

6. 考 察

6.1 照度測定法による結果との比較

本報の再帰反射分光係数の測定に用いた同一反射材料に対し, 照度測定法によって再帰反射係数を測定し, その結果と本報の再帰反射分光係数法によるそれと比較した。

測定条件は入射角 $\beta = -5^\circ$, 観測角 $\alpha = 0.33^\circ$ 回転角 $\epsilon = 0^\circ$ で測定距離 $d = 12.100$ (m), 光源開き角 $10'$, 受光開き角 $8'$ である。

測定試料はレンズ封入型(7色), カプセル型(7色), プリズム型(6色)である。

照度測定法による試料は標準光源Aによって照射する必要がある。そのため図4の照射装置の(H)の位置に色温度変換用フィルタを挿入し, 照射光の色温度を標準光源Aに調節した。照度測定に用いた照度計の受光器はシリコン素子で開口面直径29mm, その前面に視感度補正フィルタおよび白色拡散板を装着した。視感

図12 各色再帰性反射シートの色度

●: レンズ封入型, ○: カプセル型, □: プリズム型

Fig.12 Chromaticity of various retroreflectors

表2 各種再帰性反射材料の再帰反射係数 ($\text{cd} \cdot \text{lx} \cdot \text{m}^{-2}$)

Table 2 Coefficient of retroreflection of various retroreflectors

	enclosed type	encapsulated type	prismatic type	enclosed type(3200k)
w (白)	98.3(±0.2)	237.6(±1.1)	822.4(±1.3)	0.99
R (赤)	27.9(0.0)	49.9(0.0)	176.1(1.0)	0.94
Y R (オレンジ)	30.7(0.0)	89.6(0.1)	396.3(0.0)	0.95
Y (黄)	75.2(0.8)	165.2(1.3)	655.2(4.0)	0.98
G (緑)	11.1(0.0)	44.9(0.2)	78.1(0.4)	1.07
B (青)	5.6(0.0)	24.4(0.1)	51.2(0.1)	1.13
B R (茶)	5.5(0.0)	11.6(0.0)		1.15

度補正フィルタおよび拡散板を含む受光器の総合分光感度 $S(\lambda)$ を図13に示す。同図実線で示す CIE 標準比視感度 $V(\lambda)$ からわずかにずれている。

測定方法は試料位置における入射光の法線照度 E_0 (lx) を測定し, 次に所定の入射, 観測条件 (α, β) において受光位置における照度 E_0 (lx) を測定する。この結果から2) 式を $R' = E_r \cdot d^2 / (E_0 \cdot A)$ と書換え再帰反射係数を算定した。なお d (m) は測定距離, A は試料の面積 (m^2) である。再帰反射係数の測定は2回の反復測定を行い, その再現性は約±0.7%である。

照度測定において受光器の分光感度が CIE 標準比視感度 $V(\lambda)$ に一致していない場合, 大きい測光誤差を生じることがある。そこで9) 式に示す視感度補正係数 k を乗じて測定値を補正した。

$$K = \frac{\int_{\lambda} P_A(\lambda) \cdot R'(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} P_A(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (9)$$

$$\bullet \frac{\int_{\lambda} P_A(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} P_A(\lambda) \cdot R'(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}$$

ここで $P_A(\lambda)$ は照度計校正用光源の分光分布, 試料を照射す

図13 照度測定法に用いた受光器の分光感度

Fig. 13 Spectral sensitivity of a detector for the illuminance meter

る光源の分光分布で、共に標準光源A（色温度2856 K）であり、またS（λ）は受光器の分光感度である。

9）式による視感度補正係数Kの計算結果を各色について、レンズ封入型、カプセル型、プリズム型試料の平均値で示すと、白色試料では1.0013、黄色で0.9993、青色で0.9996で比較的小さく、それに対し赤色は0.9570、オレンジ色は0.9830、緑色は1.0297と大きい値を示した。

図14はそれぞれレンズ封入型、カプセル型、プリズム型の各色反射材料（W：白、R：赤、YR：オレンジ、Y：黄、G：緑、B：青、BR：茶色）に対し本報の再帰反射分光係数から算定した再帰反射係数と照度測定法によって求めたそれとの差の前者の値に対する比として示す。

レンズ封入型、カプセル型、プリズム型について、反射材料の色によって若干異なるが、その差は全色平均値でそれぞれ1.4%、1.2%、1.7%であった。また各色に対する差（%）の値は白色試料の場合全ての型の反射材料について1%以下で非常に小さく、赤色、オレンジ色、緑色が比較的大きい値を示した。

6.2 各種再帰性反射材料の偏光特性

再帰性反射材料の偏光特性が測定値に及ぼす影響が考えられる。ここでは本装置を用い各型反射材料の偏光特性について検討した。

まず、照明光源（ハロゲン電球）の照射光の偏光特性を検討するため、図2（B）の測定原理の測定配置において、受光装置前面に偏光子を取り付け、照明光源による入射光の入射面に対し垂直な方向（P方向）の分光測定値（ i_p ）とそれより90°回転した方向（S方向）の測定値（ i_s ）から10）式により分光的な偏光度を求めた。

$$P_o(\lambda) = \frac{i_p(\lambda) - i_s(\lambda)}{i_p(\lambda) + i_s(\lambda)} \quad (10)$$

その結果を図15（○）に示す。図のようにハロゲン電球の照明光源の入射光による偏光度は平均して約7.5%、波長依存性は殆ど見られない。

次に図2（A）の測定配置（ $\alpha = 0.33^\circ$ 、 $\beta = -5^\circ$ ）において試

図14 再帰反射分光係数法と照度測定法による測定結果の比較

Fig. 14 Comparison of the coefficient of retroreflection between spectrophotometry and illuminance measurement

料回転台に白色拡散板を置き、その反射光を受光器前面の偏光子を通して、同様に $i_p(\lambda)$ 、 $i_s(\lambda)$ を測定した。その偏光度の結果を図15（●）に示す。測定値が非常に小さくなるため各波長についてその変動が大きいのが平均的に偏光度はほぼ零に近似する。本装置では再帰性反射材料および測定系の偏光特性が測定値に及ぼす影響を排除するため図4に示すように受光装置に積分球を用いたが、この図の結果からも本報の測定装置系では偏光効果が測定値に及ぼす影響の無い事を確認した。

再帰性反射材料としてレンズ封入型とカプセル型は同様な光学的素子の構造を持つもので、その内からレンズ封入型を試料として選び、それとプリズム型の2種についてそれぞれ偏光度を測定した。図15のレンズ封入型の測定結果（□）では偏光度は平均的に約6.8%で、照明光源の入射光の偏光度に非常に近い値を示し、反射材料の偏光の影響の非常に小さいことを示す。それに対しプリズム型では波長に依存して非常に大きい偏光度を示した。これらの結果から再帰性反射材料の測定において、特にプリズム型反射材料の測定については偏光特性による効果を十分に考慮した測定装置が必要であることを示した。

7. 結 言

各種再帰性反射材料の再帰反射係数の測定に対し、再帰反射分光係数法に用いる測定装置を新しく設計試作し、その機能および測定精度について検討した。この測定装置を用いCIE TC-2.19技術委員会の各種再帰性反射材料による再帰反射分光係数測定の国際相互比較テストを実施した。本報の要点を次に示す。

1. 再帰性反射材料の測定に用いる照明光源装置は試料面上の高照度および照明の均一性が要求される。本装置では新設計の照明光学系によって測光距離12.100mにおいて試料面平均照度約110lx、照明の均一性±2%以内の結果を得、従来の照明装置1）（平均照度20lx、均一性約±5%）と比較して性能が向上した。
2. 本装置主要部の受光装置に特に積分球方式を採用した。これによって受光系において試料からの反射光を効率よく集光し、また再帰性反射材料および測定系の偏光特性が測定値に及ぼす影響を除去した。この方法による測定値の高精度の再現性を確認し、

図15 各種反射材料の偏光度の比較

Fig. 15 Comparison of polarization of various retroreflectors

積分球方式を用いる再帰反射分光係数の測定方法および測定装置の基準的仕様を確立した。

3. 本装置を用い CIE TC-2.19 技術委員会による再帰反射分光係数の国際相互比較に準備された試料の測定を実施し、その測定結果を示した。その結果では本装置を用いる各種反射材料の測定値の再現性は約 ±1% 以内であることを示した。

4. 本報の再帰反射分光係数測定の同一反射材料に対し照度測定法によって再帰反射係数を測定し、その測定値を視感度補正係数によって補正した。その結果と本報の再帰反射分光係数法（照明光源は標準の光 A、受光器の分光感度 $V(\lambda)$ ）によるそれと比較した。両者の再帰反射係数の比較結果では各型について全色平均値で約 ±2% の範囲で一致した。

5. 本装置を用いレンズ封入型とプリズム型反射材料の偏光の測定値に及ぼす影響を検討した。その結果レンズ封入型では殆ど偏光の影響は認められないが、プリズム型ではかなり大きい偏光の影響があり、プリズム型反射材料の測定については偏光の影響を充分考慮した測定装置が必要であることを示した。

最後に本研究に対し終始ご熱心にご指導および御討論頂いた近畿大学栗岡豊教授、当環境エレクトロニクス研究室湊秀幸主任研究官に厚く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 古川匡他：交通標識用反射材料の標準作成，照学誌67—10，PP.534—539（昭58）
- (2) 山中俊夫：レンズ封入型再帰性反射材料の色の測定 一昼間条件と夜間条件一 照学誌，78—2，PP.58—65（平成6）
- (3) CIE Publication NO.54 Retroreflection Definition and Measurement (1983)
- (4) JIS Z 9117 「保安用反射シート及びテープ」，日本規格協会，（1984）
- (5) Rennilson J. J. : Definition, Measurement, and Use of the Spectral Coefficient of Retroreflection Color Research and

Application 7—4 PP.315—318(1982)

- (6) 湊 秀幸 他：けい光材料の分光測光および測色における偏光の影響，照学誌，64—4，PP.196—204（昭55）
- (7) Goebel. D. G : Generalized Integrating Spher Theory Applied Optics 6 PP.125—128(1967)

（受付日1994年3月7日／採録日1994年4月7日）

やまなか としお
山中 俊夫（専門会員）

昭和8年4月14生まれ，昭和31年 大阪府立大学（工業短期大学部）卒業，通商産業省工業技術院電子技術総合研究所（旧電気試験所大阪支所）に入所。

現在，同所大阪ライフエレクトロニクス研究センター主任研究官。その間，色彩の基礎的物理計測，心理的知覚色の色対比・色順応などの色彩感覚数量化の研究。その後，生理光学的研究として視覚誘発脳波による色覚研究，光学材料の精密計測法の研究などに従事。

電子技術総合研究所・研究業績賞，日本照明委員会照明賞，照明学会関西支部賞など受賞。日本色彩学会副会長，理事，照明学会編集委員，文献小委員会主査（関西），関西支部評議員など歴任。日本色彩学会，日本照明委員会，日本視覚学会会員，大阪芸術大学非常勤講師（色彩学）。

にしもと あきお
西本 昭男（非会員）

昭和14年7月11生まれ，昭和41年3月京都工芸繊維大学工業短期大学部卒業，通商産業省工業技術院電子技術総合研究所（旧電気試験所大阪支所）に入所。現在同大阪ライフエレクトロニクス研究センター主任研究官。

水域の汚濁監視技術，光学精密計測，浮遊生物の自動計測などの研究に従事。電子情報通信学会会員。

かくい よしみ
角井 嘉美（専門会員）

昭和18年9月16生まれ，昭和41年3月大阪市立大学工学部応用物理学科卒業，昭和43年3月同大学院工学研究科修士課程修了。同年4月電気試験所（現電子技術総合研究所）入所。放射線量計測，高速分光測光技術，環境レーザ計測技術の研究開発に従事。

なんじょう もとい
南條 基（専門会員）

昭和13年3月1生まれ，昭和35年3月大阪大学工学部電気工学科卒業，昭和41年電気試験所（現電子技術総合研究所）入所，工学博士。光放射計測とその応用の研究に従事。現在，同所大阪ライフエレクトロニクス研究センター長。