

## LED 照明ノーツ 27

## レンズを使う 14

## &lt;ダブレットレンズで色収差を除去するための硝子の選択&gt;

これまで、色収差の発生、或いはその除去のための条件等を解説させていただいた。今回はこうした理論を応用して、良く存在する凸凹の貼り合わせレンズ、ダブレットレンズにおける色収差の除去、そしてその時の硝子の選択方法について説明させていただきたい。

## 1. 再び色収差とは

色収差とは光の波長により、光の通過する硝子の屈折率が変わり、光線の曲がり方が変化してしまい、波長による光線進行方向の分離、つまり色の分離が起きてしまうことである。この事情は屈折角と、屈折率によって表現される、屈折率の異なる硝子、空気の境界面における光の屈折を表わす、スネルの屈折則、

$$n \sin \theta = n' \sin \theta' \quad - (1)$$

からも容易に理解できる。たとえば、下記図 2（硝子表と呼ばれたりするが）に収録されている OHARA 硝子の S—NPH2 という硝子は OHARA カタログによれば、d 線として焦点距離測定に多く用いられる波長 587.56（nm・ナノメートル）では屈折率 1.92286 であるが、十分可視領域にある F 線 486.13nm では 1.958 である。

ここで、(1) 式における入射角度を  $45^\circ$  とすれば、空気からこの角度で S—NPH2 に入射したとすれば、 $n=1$ 、 $\theta=45^\circ$  で(1)式より d 線の場合は屈折角  $\theta'=21.58^\circ$ 、F 線の場合は  $21.17^\circ$  である。 $0.4^\circ$  も屈折角度が異なることとなる。これは 100mm 先の平面上で約 0.7mm ほど光線の到着位置がずれることを意味する。十分肉眼で観察できる。

## 2. 色消しのための整理

### 2.1 全体のパワーについて

色収差除去の話のためには、直接には色収差とは関係ない様に見える、事柄も整理しておく必要がある。まず、レンズのパワー、屈折力について考えよう。

レンズ全系のパワー(焦点距離の逆数)は

$$\varphi = \varphi_1 h_1 + \varphi_2 h_2 + \cdots + \varphi_k h_k \quad - (2)$$

として各面のパワー、光線通過高さの積の和として表せた。 $h$  はレンズ各面を光線が通過する入射点の光軸から垂直に測った距離、高さである。各面における光線通過高さとパワーの積の和によって全系のパワーが決まる。

全体と、各面における焦点距離をもって表現すれば(2)式は、

$$\frac{1}{f} = \frac{h_1}{f_1} + \frac{h_2}{f_2} + \cdots + \frac{h_k}{f_k} \quad - (3)$$

となる。レンズの各面を非常に薄い独立したレンズと考えれば、(3)式はそれらのレンズにおける  $h$  と  $f$  により、全体の焦点距離が決まると考えることもできる。

### 2.2 色消し条件

すでに本連載で述べた、焦点距離(近軸像点)の色消し条件である。

$$\frac{1}{f_1 \nu_1} + \frac{1}{f_2 \nu_2} = 0 \quad - (4)$$

ここでは焦点距離  $f_1, f_2$  の二つのレンズが密着している場合を想定している。その時の色収差の発生しやすさ(実際にはその逆数であるが)の目安となるアッベ数が  $\nu_1, \nu_2$  である。

### 3. ダブレットでの硝子の選択

結局上記の(3)(4)式の条件を基に、ダブレットレンズの硝子を検討するわけであるが、硝子には多くの種類がある。図 2 には縦軸に屈折率  $n$ 、横軸にアッベ数  $v$  をとり、その座標内に多くの光学ガラス、硝材が存在している。縦軸の屈折率  $n$  は上になるほど値が上昇し光を曲げる力は強くなる。レンズの曲率半径を  $r$  として、その面の屈折力  $\phi$  は、空気と、屈折率  $n$  の媒質(硝子)の境界面において、

$$\phi = \frac{n-1}{r} \quad - (5)$$

で表わされるが、同じ屈折力を狙うのであれば、高屈折率の硝子が使えれば、明らかに(5)式の分母は大きくてよい。つまり、緩い曲率半径の面が使える。球面収差の発生のところでも述べさせていただいたが、直ちに収差は減少する。出来れば屈折率の高い硝子、硝子表の上部の硝子(北の方)を使いたい。

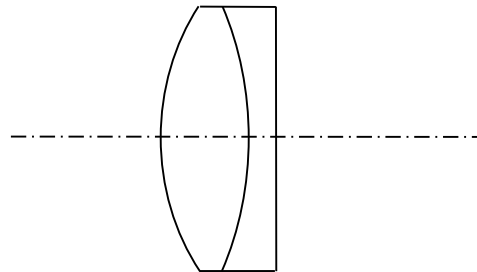


図 1 凸レンズと凹レンズによるダブレットレンズ

図 2 の横軸はアッベ数である。アッベ数の大きい方が左側である。ちょっと向きがおかしいのであるが、アッベ数は色の分散の逆数であるので、結局、硝子表の左側は分散の小さい方向という一般的なことになる。分散が小さければ波長が変化しても色収差は起きにくいのであるから、当然硝子表の左の方(西の方)の硝子を使うのが無難である。ところが、図 2 をよくご覧頂ければ分かるが、西の方には高屈折率の硝子は存在しない。硝子は日本地図のように東北から西南にかけて伸びている。(S-LAHとかS-LALとか高屈折率硝子は新しい硝子であるから、昔はますます日本地図の様なカッコをしていた。)

さて、(3)式を眺めてみると、屈折率、アッペ数共に正の値をとるので、必然的に 2 枚のレンズのうち 1 つは凹(負)レンズである必要がある。両方プラスでは密着系では色はとれない。非常に西の遠方に硝子が存在すればごまかすこともできるが、存在しない。

それでは凸レンズと凹レンズにどのような硝子を使うのか？ということが問題となる。

さて、ここで、全系の屈折力を表す(3)式をみると、レンズ間の距離が問題とならない密着系のタブレットの場合は

$$\varphi = \frac{1}{f} \approx h \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \right) \quad - (6)$$

と考えることができる。ということはもし、このタブレット全体で凸レンズなら、正のレンズであれば、 $f_1$ の方を正レンズとした場合に

$$|f_1| < |f_2| \quad (7)$$

なる関係が要請される。不等号が逆だと負のレンズになってしまう。従って(4)式の 1 次の色消しを達成するためには少なくとも、

$$v_1 > v_2 \quad (8)$$

なる条件を満たす必要がある。図 2 においては正のレンズを、低分散の西の方、負のレンズの相対的に東の方のレンズを用いることを意味する。正レンズの色収差を負のレンズの色収差で打ち消す、という考え方をすれば、(6)式によりパワーが制限される負のレンズに、より大きな分散を与えて正の色を打ち消そうという解釈も成り立つ。低価格の旧硝子における定番的組み合わせ BK7 (正) - F2(負)という組み合わせがある。これらの硝子の横軸方向の距離は、一般的には十分に取りたいので正レンズに使われる硝子、負のレンズに使われる硝子というものが、慣用的に西軍、東軍のように大体、決まってしまう。であるから、設計 data におかしな硝子の使い方、などと中傷されることもあるが、



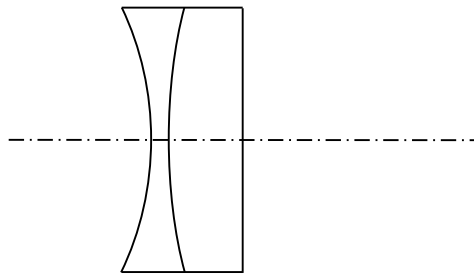


図 3 凹レンズと凸レンズによる負のダブルレットレンズ

#### 参考文献

- [1] 高野栄一: レンズデザインガイド (写真工業出版社、東京、1993)
- [2] 辻内順平: 光学概論 I (朝倉書店、東京、1979)
- [3] 松居吉哉: 結像光学入門 (JOEM、東京7) 1988)
- [4] <http://www.ohara-inc.co.jp/jp/product/optical/opticalglass/data.html>

執筆者: 牛山 善太

博士 (工学)

元東海大学工学部光・画像工学科 (レンズ設計) 非常勤講師

(株)タイコ 代表取締役

(株)オプティカルソリューションズ 顧問

提供:

**株式会社オプティカルソリューションズ**

TEL: 03-5833-1332

Mail: [info@osc-japan.com](mailto:info@osc-japan.com)

Web: <http://www.osc-japan.com>

〒101-0032

東京都千代田区岩本町 2-15-8 MAS 三田ビル 3 階