

## 光学設計ノート

光学設計ノート 14 (ver. 1.0)  
波面収差について 2

株式会社 タイコ  
牛山善太

前回に引き続き波面収差についての基本的な考え方について述べさせて頂く。なお、式、図番号は前回からの通し番号とする。

### 2. 参照球面の取り方による波面収差の変化

ここで、参照球面の曲率半径の取り方によって、波面収差量がどのように変化するか考えてみよう。図4において、 $P'_0$ は理想像点、 $S$ は理想像点を中心とする半径  $r$  の参照球面である。

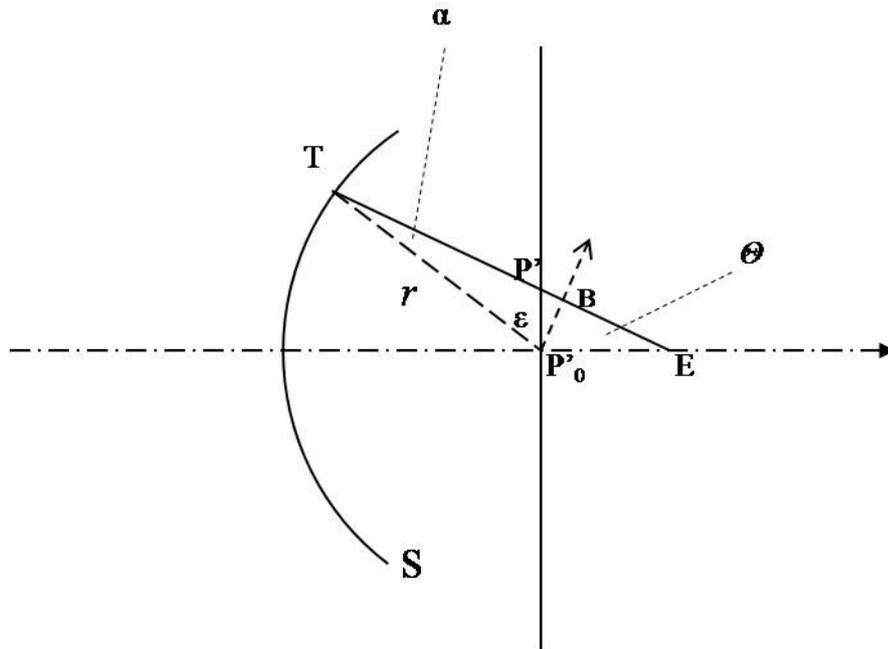


図4 参照球面から像点までの光路長

$P'_0$ の共役物点から射出して参照球面上の点  $T$  を通過する光線の像面上の通過点を  $P'$ 、光軸上の通過点を  $E$  とし、 $P'$ 、 $P'_0$  の距離、つまり横収差量を  $\epsilon$  とする。さらに、光線と光軸の為す角度を  $\theta$ 、線分  $TP'_0$  と光線の為す角度を  $\alpha$  とし、 $P'_0$  から光線に下した垂線の交点を  $B$  とする。また、像界の屈折率は簡便のため 1 とする。ここで、 $T$  から  $P'$  までの距離、

つまり光線に沿った、参照球面から収差を持った像点までの距離、を  $x$  と置けば、

$$\cos \alpha = \frac{x + \varepsilon \sin \theta}{r}$$

$$x = r \cos \alpha - \varepsilon \sin \theta \quad (5)$$

となる。さらに、ここで図 5 にある様に、参照球面  $S$  が  $S'$  に、曲率半径が  $L$  増して変化したとする。

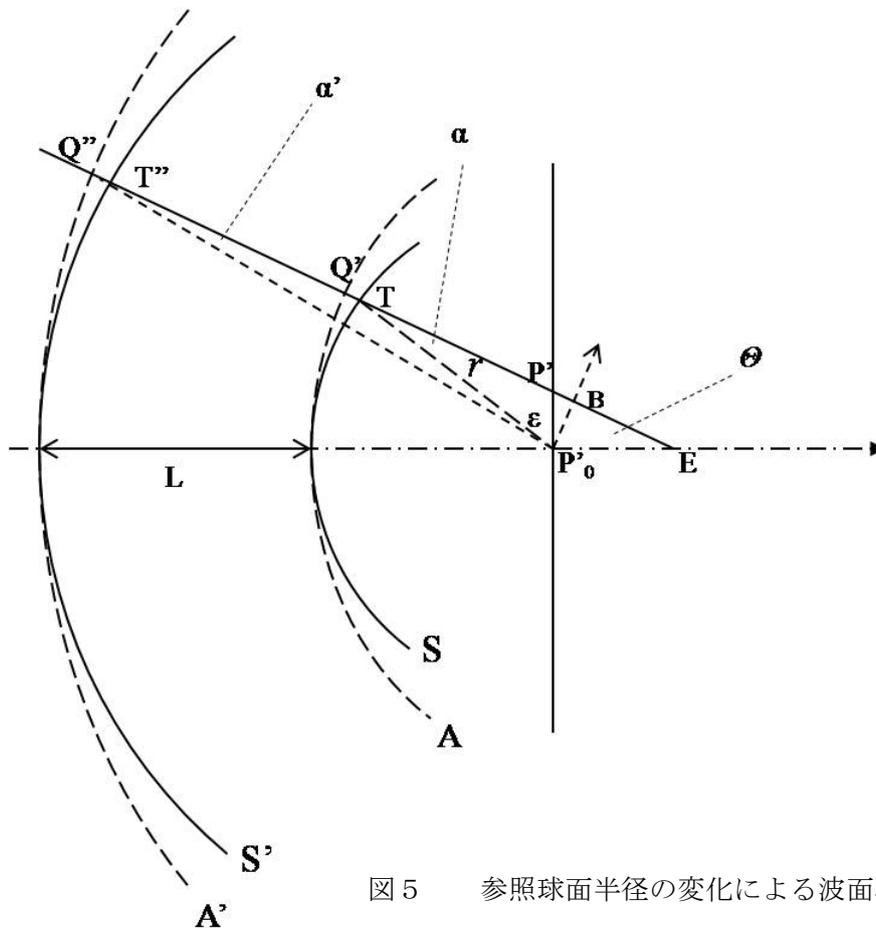


図 5 参照球面半径の変化による波面収差の変化

$A, A'$  はそれぞれの参照球面に光軸上で接する実波面である。光線は  $A', S', A$  上のそれぞれ  $Q', T', Q$  点を通る。従って、 $Q' T$  の距離  $W$ 、 $Q' T'$  の距離  $W'$  は参照球面が  $S$  の場合、 $S'$  の場合の光線に沿って測った波面収差量と言う事になる。ここで、 $T'$  から  $P'$  までの距離を  $x'$  と置けば、それぞれ実波面上の点  $Q', Q$  の距離は  $L$  に等しいので

$$x' = L - W' + W + x$$

よって

$$W' = L + W + x - x'$$

(5)式より

$$W' = L + W + r \cos \alpha - \varepsilon \sin \theta - x'$$

さらに(5)式の場合と同様に考えて

$$W' = L + W + r \cos \alpha - \varepsilon \sin \theta - \{(r + L) \cos \alpha' - \varepsilon \sin \theta\}$$

$$W' = W + L(1 - \cos \alpha') + r(\cos \alpha - \cos \alpha') \quad (6)$$

となり、この式が波面収差の変化量を表す。

参照球面半径が大きくなれば  $\alpha > \alpha'$  なので、(6)式右辺第3項は  $-r$  を最小とする負の値をとる。また、 $r$  が大きくなれば、 $\alpha$  と  $\alpha'$  の差が小さくなり絶対値は小さくなる。さらに第2項について  $\cos$  の2次近似を行なえば

$$\frac{L\alpha'^2}{2}$$

となる。この項も  $L$  の増大に対して ( $1/L$  と  $\alpha$  は比例関係にあると看做せる様になるので、) 減少していく項である。

ここで、前回(2)式

$$\Delta E = Q'T \frac{\alpha^2}{2} \quad (2)$$

を考えれば、この式における  $Q'T$  に  $W'$  を代入すれば ( $\alpha$  も上記の  $\alpha'$  に置き換えられる)、参照球面半径を大きくしていった場合の、前回における2つの波面収差の定義の誤差  $\Delta E$  を検討することが出来る。そして、ここまでの考察により(2)式において  $L$  の増加に伴い、 $\alpha$  は減少し、 $Q'T$  は増大しないので、参照球面半径を大きくすれば  $\Delta E$  は減少する事が分かる。

さらに参照球面半径を無限大にすれば  $\cos \alpha' = 1$  であり(6)式は

$$W' = W + r(\cos \alpha - 1) \quad (7)$$

或いは

$$W = W' - r(\cos \alpha - 1) \quad (8)$$

となる。

### 3. 波面収差の計算方法

一般的に、コンピュータ上では波面収差は実際には光線追跡を行い、その光線が、無収差の点、一般的には絞りの中心を通過する主光線の像面到達点を中心とする、任意の半径の参照球面に達するまでの光路長を得ることにより計算される。参照球面曲率中心を通過する主光線

に沿って光路長が基準となり、その値との差が波面収差となる。

この計算手法とは別に以下のやり方も可能である。

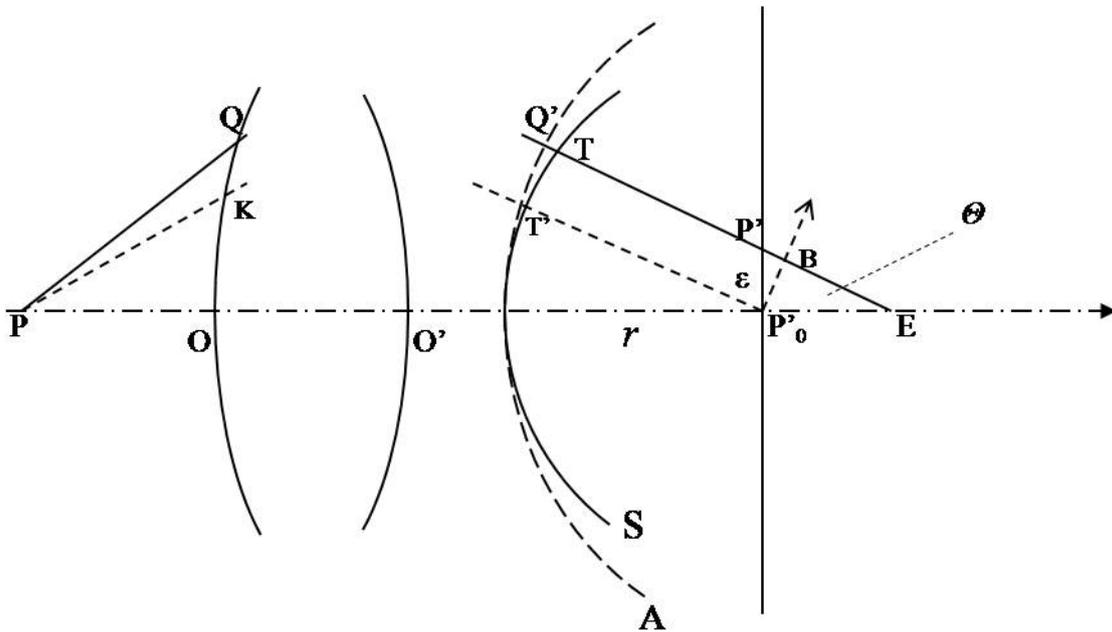


図6 波面収差の計算方法

図6にあるのは図5と同じ光線、P-Q-Q'-T-P'-Eである。実波面、参照球面A,Sも同様である。Bも同様にP'0から下した光線への垂線の交点である。ここで、波面収差Wは[]が光路長を表すとして、

$$W = [PQQ'TP'B] - [POO'P'_0] \quad (9)$$

として計算することが出来る。以下に、この値がこれまで考えてきた波面収差Q'Tの値の近似になっていることを示す。

ここで、像界でその光路が光線Q'TBと平行になっているような無収差の理想的光線P-K-T'-P'0を補助的に考える。この場合当然、

$$[POO'P'_0] = [PKT'P'_0] \quad (10)$$

である。ここでの実光線は収差を伴っているので、線分BP'0は平面波の一部を形成しているわけでは無い。光路長が一致しているのは、

$$[PQQ'] = [PKT']$$

の部分においてである。ここで、Q'、T'に於いてそれぞれ接する、波面、参照球面への接平面を考えると、これら2平面に囲まれた領域では、或いはそれ以降も2つの光路は並行であっ

て、もし図7における誤差  $\delta$  が無視できれば(9)式に含まれる光路差は[Q' T]と一致する。

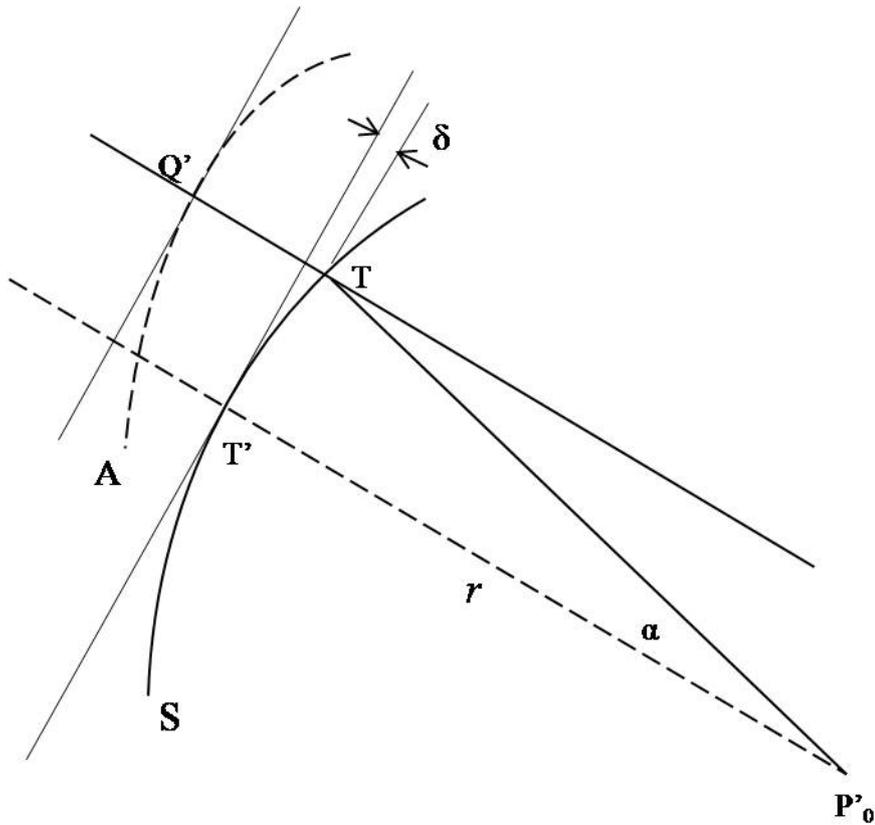


図7 波面収差の計算における誤差

さてここで、この誤差  $\delta$  について検討してみれば、やはり図7より

$$\delta = r - r \cos \alpha \quad (11)$$

となり、(8)式の二つの波面収差の差の部分と一致する。つまり(9)式の波面収差の計算手法は参照球面が無窮遠にあるとした場合のものであることが分かる。

#### 参考文献

- 1) 草川 徹: レンズ設計者のための波面光学(東海大学出版、東京、1976)
- 2) 渋谷真人・大木裕史: 回折と結像の光学(朝倉書店、東京、2005)
- 3) 辻内順平: 光学概論 I (朝倉書店、東京、1979)
- 4) 早水良定: 光機器の光学(日本オプトメカトロニクス協会、1995)
- 5) 牛山善太: 波動光学エンジニアリングの基礎(オプトロニクス社、東京、2005)