提供：
株式会社オプティカルソリューションズ
〒101-0032
東京都千代田区岩本町 2-16-2（F ビル 6 階）
TEL：03-5833-1332　FAX：03-3865-3318
http://www.osc-japan.com/
e-mail:info@osc-japan.com

光学設計ノーツ　36　(ver,1.0)
部分的コヒーレント結像の考え方　6

部分的にコヒーレントな照明領域での照明系の収差の影響

株式会社タイコ
牛山善太

今回も部分的にコヒーレントな照明、結像について考えさせていただきたい。インコヒーレントな領域での照明形の収差について考えた前回の続きとなり、今回は部分的にコヒーレントな照明光学系の性質について考えさせていただきたい。

１．照明光学系による部分的コヒーレント照明

図１（前回と同様）にある様に光軸に対して回転対称な系を考える。

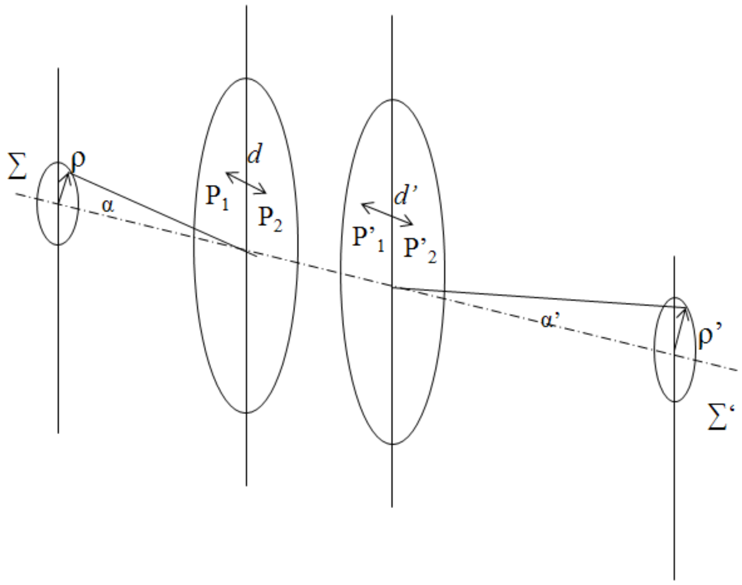

図１　部分的にコヒーレントな照明光学系射出瞳による光源像、

本連載前回と同じように半径ρの円盤光源Σの半径ρ’の像Σ’が光学系Lにより得られている。この時、開口絞り面上の点を通過する光線の、入射瞳、射出瞳座標上における対応点を P_1、P'_1、そしてもう一組 P_2,P'_2 とする。本連載前回、(35-19)と(35-20)式、（像面上のこの照明光学系による点光源像におけるエアリーディスク半径を r'_A として）

照明光学系の射出瞳全体がコビーレントな状態、

$$\rho' \le 0.13 r'_A \qquad (35\text{-}19)$$

とインコヒーレントな状態、

$$\rho' \rangle\rangle 0.13 r'_A \qquad (35\text{-}20)$$

の中間の状態では部分的なコヒーレントの状態となる。像面上のコヒーレンスは複素コヒーレンス度 μ_{12} により記述されなければならない。前回、(35-20)式が成り立つインコヒーレントな場合には像面上(照明面上)の複素コヒーレンス度は照明系の収差に依存しないことが分かった。今回はより一般的な部分的コヒーレントな状態においての、この事柄について検討しよう。

さて、射出瞳から像面上の点 Q''_1 までの光波の伝播を、$\Lambda 1$ を P'_1 における傾斜係数としてホイヘンス-フレネル回折の考え方から、

$$U(S, Q''_1) = \int_A U(S, P'_1) \frac{\exp(i\bar{k}s_1)}{s_1} \Lambda_1 dP'_1 \qquad (1)$$

と表すことが出来るので、本連載 34 回における Hopkins の公式(34-11)式、

$$J_{12}(Q'_1, Q'_2) = \int_\sigma U(S, Q'_1) U^*(S, Q'_2) dS \qquad (34\text{-}11)$$

より(1)式は、

$$J_{12}(Q''_1, Q''_2) = \int_S \iint_A U(S, P'_1) U^*(S, P'_2) \frac{\exp\{i\bar{k}(s_1 - s_2)\}}{s_1 s_2} \Lambda_1 \Lambda^*{}_2 dP'_1 dP'_2 dS \qquad (2)$$

従って

$$J_{12}\left(Q_1'', Q_2''\right) = \iint_A J_{12}\left(P_1', P_2'\right) \frac{\exp\left\{i\bar{k}\left(s_1 - s_2\right)\right\}}{s_1 s_2} \Lambda_1 \Lambda^*{}_2 dP_1' dP_2' \qquad (3)$$

ここで、本連載 32 回(32-11)式、

$$\mu_{12} = \frac{J_{12}}{\sqrt{J_{11} J_{22}}} \qquad (32\text{-}11)$$

から

$$\mu_{12}\left(Q_1'', Q_2''\right) = \frac{J_{12}\left(Q_1'', Q_2''\right)}{\sqrt{J_{11} J_{22}}}$$

(3)式より、

$$= \frac{1}{\sqrt{J_{11} J_{22}}} \iint_A J_{12}\left(P_1', P_2'\right) \frac{\exp\left\{i\bar{k}\left(s_1 - s_2\right)\right\}}{s_1 s_2} \Lambda_1 \Lambda^*{}_2 dP_1' dP_2'$$

また、さらに(32-11)式の関係を利用して

$$= \frac{1}{\sqrt{J_{11} J_{22}}} \iint_A \sqrt{I\left(P_1'\right) I\left(P_2'\right)} \mu_{12}\left(P_1', P_2'\right) \frac{\exp\left\{i\bar{k}\left(s_1 - s_2\right)\right\}}{s_1 s_2} \Lambda_1 \Lambda^*{}_2 dP_1' dP_2'$$

そしてさらに、本連載前回の(35-12)式、

$$\mu_{12}\left(P_1', P_2'\right) = \left\{\frac{2 J_1\left(v'\right)}{v'}\right\} \exp\left\{i\left(\varphi_1 - \varphi_2\right)\right\} \qquad (35\text{-}12)$$

より、

$$\mu_{12}\left(Q_1'',Q_2''\right)=\frac{1}{\sqrt{I\left(Q_1''\right)I\left(Q_2''\right)}}\iint_A\sqrt{I\left(P_1'\right)I\left(P_2'\right)}\frac{2J_1\left(v'\right)}{v'}\frac{\exp i\left\{\varphi_1-\varphi_2+\bar{k}\left(s_1-s_2\right)\right\}}{s_1s_2}\Lambda_1\Lambda^*{}_2dP_1'dP_2' \qquad (4)$$

となる。

ここで、瞳中心から光源像への見込み半角α'を用い、光源面上の点 P_1 と P_2 の像面上におけるにおけるこれらの点の共役点 P'_1,P'_2 の間隔を d'として、

$$v'=\frac{2\pi n'}{\bar{\lambda}_0}d'\sin\alpha' \qquad (8)$$

であり、像界の屈折率をｎ'を用いて真空中の中心波長 $\bar{\lambda}_0$ を用いて表記してある。

さてここで、本連載前回考えた Hopkins の公式の以下の形、

$$\mu_{12}\left(P_1',P_2'\right)=\frac{K_1K_2^*}{\left|K_1\right|\left|K_2\right|}\frac{1}{\sqrt{I\left(P_1\right)}\sqrt{I\left(P_2\right)}}\int_\Sigma U\left(S,P_1\right)U^*\left(S,P_2\right)dS$$

を考えるとき、この式における入射瞳、射出瞳間の透過関数 K_1,K_2 の位相の変化が(4)式における φ_1,φ_2 で表され、これら透過関数の位相項が(４)式に含まれていることにより、複素コヒーレンス度が照明系の収差に影響されることが分かる。なお、強度 $I(Q''_1)$は、(４)式において Q''_2 を Q''_1 に置き換え、$\mu_{12}(Q''_1,Q''_1)$＝１なる関係より(４)式から計算できる。$I(Q''_2)$についても全く同様である。

２． 参考文献

1) M.Born & E.Wolf : **光学の原理III、第 7 版／草川徹訳 (東海大学出版会,2005)**

2) **小瀬輝次：フーリエ結像論 (共立出版社、東京、１９７９)**

3) **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）**

４) Emil Wolf：Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light (Cambridge University Press,Cambridge,2007)