「ナノ電子光学」追加

(2011 年 4 月 6 日)

前回での正誤表、補足説明には、原本から漏れていた重要事項も入っていました。つまり原文を読み進める上で参考になる式の導出などの補足説明と、本文に入れるべき重要事項が混在していました。そこで、原文に入れるべき重要なを今回新たに「ナノ電子光学」追加として独立させました。

位置	内容
106 ページの参考文献に追加	15) G. H. Jansen, J. Appl. Phys. **84**, 4549 (1998)
150 ページ下 4 行 ~151 ページ 1 行目を入れ替え	偏向収差補正について, すでに次を説明した. (i) 偏向界中心軸に関する対称面の増加による収差項数の低減: 10.3.C 回転不変系 (ii) MOL: 10.3.D これに加えて, この節で次を解説する. (iii) 多極子界の追加: 10.4.A (iv) 集束レンズとの重畳などの配置最適化: 10.4.B (v) 多段偏向器 10.4.C
151 ページ下 3 行目に追加	この $\mathbf{B}_2$ は式 (10.3) で定義され, 式 (3.24) での 6 極子界に対応する.
155 ページの本文最後に 10.4.C として追加	**C. 多段偏向による収差補正** 偏向系を多段に縦属接続することで, 任意の偏向収差を相殺できる. 偏向系が, 10.3.C で説明した回転不変な偏向系と集束系を重畳した場合で説明する. この場合の近軸軌道は, 式 (10.6) と式 (10.7) を一般化して, 偏向界がゼロのときの軌道と, 偏向界が単位強度をもち, 軸上から軸に沿って出た軌道 $\Gamma(z)$ の一次線形結合で表される. 偏向界を二つに分け, その強度をそれぞれ A_1 と A_2 にしたときの偏向軌道は $A_1\Gamma_1(z) + A_2\Gamma_2(z)$ となる. 偏向コマは式 (10.8) のようにターゲット面での軌道偏向に比例し, その収差積分公式の被積分関数には $\Gamma(z)$ を一次形で含む. 従って各偏向界の単位偏向強度に対応するコマ収差係数を K_{1L} と K_{2L} とおくと, 合成偏向系のターゲット面での偏向軌道量 $D(z_s)$ とコマ収差係数 K_L は次となる. $$K_L = A_1K_{1L} + A_2K_{2L}, \quad D(z_s) = A_1\Gamma_1(z) + A_2\Gamma_2(z). \tag{10.26}$$ 予め, Γ_1, Γ_2, K_{1L}, K_{2L} を計算しておき, $D(z_s)$ を一定値に保ち, K_L をゼロにする (A_1, A_2) は一般に存在する. すなわち, コマが補正できる. 非点収差または像面湾曲では収差積分公式の被積分関数に $\Gamma(z)$ とその微分が二次形式で入るために若干複雑になり, 全系の収差係数は A_1 と A_2 の斉次二次式となる. 詳細は文献 12 を参照されたい.
152 ページの参考文献に追加	12) T. Hosokawa, Optik, **56**, 21 (1980); T. Hosokawa, Y.Takeuchi, H. Ohshiba, Optik, **58**, 241 (1981)
190 ページ下 4 行目の前に追加	なお, クロスオーバー面での角度電流強度を用いて, 照射系の陰極の形式に依存しない計算式が導かれている. 詳細は文献 16) 参照.
192 ページの参考文献に追加	16) S. Fujita: Thesis, Meijou Univ. (2006)
246 ページの参考文献に追加	20) S. Fujita: Thesis, Meijou Univ. (2006)
251 ページ式 (16.4) の下に追加	上式はスティグマティック結像の時に成立し、擬似スティグマティック結像の時には成立しない。

位置	内容
253 ページ 10 行目の下に追加	ここで特性関数式 (16.1) の各項において m を次で定義する． $$m=\lvert(\alpha+\gamma+\eta)-(\beta+\delta+\varepsilon)\rvert=\lvert 2(\alpha+\gamma+\eta)-n\rvert \qquad (16.8)$$ m がゼロであれば任意の角度で光軸の回りに座標回転させても，この項は値を変えない．これを回転対称項という．m がゼロでなければ，角度 $2\pi/m$ だけ座標軸を回転させると，その項は元の値に戻る．この項を m 重項と呼ぶ．
264 ページ最下行「対応している．」の次に挿入	ただし係数 m_{11}/f_i^3 などを，改めて m_{11} などとおく．この $\boldsymbol{M}_2$ によって，収差を近軸値に取り込む．
267 ページ 12 行目の次に追加	上記とは全く異なった解析方法が提案されている [20]．図 16.3(a) のように陰極面で定義した $(\xi, u=\sin\alpha)$ と，無電界領域での任意の面での $(\eta,\ v=\sin\beta)$ の漸近値として定義したクロスオーバー面での $(\eta_c,\ v=\sin\beta)$ とを対応させ，その間に式 (15.18) を適用して次を導いている． $$\eta_c=f\sqrt{\Phi_0/\Phi_1}u-C_{sg}(\xi/f)^3,\ v(\xi,u)=-\xi/f+mu$$ ここで，$f, m=1/M$ は通常の近軸軌道方程式の軸上電位に初期エネルギーを含めて計算できる．また球面収差係数 C_{sg} も収差積分公式から計算する． この方法で計算した結果と，直接の軌道追跡によるものとは，図 16.3(b) のように実用上十分な精度で一致する． 注：Fig.16.3(a),(b) は Fig.2-3(a),(b) を簡略化
271 ページ 18 行目以降を ${}_5D_1$ に変更	(18 行目) ${}_3D_1$ を ${}_5D_1$ に (21 行目) $[x_0]=(0,x_0,0,0)$ を $[x_0]=(0,x_0,0,0,0,0)$ にする．
271 ページ 22 行目から 272 ページ 9 行目まで差替	式 (16.65) を 4 次ルンゲ・クッタ公式で積分する．これは，1 階常微分方程式を $$\frac{dx}{dz}=f(x,z)$$ としたとき，出発点での x_0 から，到達点の x_1 は，刻み幅を h として $$x_1=x_0+\frac{h}{6}(k_1+2k_2+2k_3+k_4).$$ $$\text{ここで，}\quad k_1=f(x_0,z_0),\quad k_2=f(x_0+hk_1/2,z_0+h/2),$$ $$k_3=f(x_0+hk_2/2,z_0+h/2),\quad k_4=f(x_0+hk_3,z_0+h).$$ 上式を ${}_5D_1$ の表現式に直し，式 (16.53) と演算規則を用いて計算する．式 (16.57) から $[x_0]=(0,x_0,0,0,0,0)$，$[x_0]^2=(0,0,x_0^2,0,0,0)$，$\cdots$，$[x_0]^5=(0,0,0,0,0,x_0^5)$ である．$[k_1]$ などは h^3 まで計算する．$f(x,z)=x^2$ であるから $$[k_1]=[x_0]^2,$$ $$[k_2]=[x_0+k_1h/2]^2=[x_0]^2+[k_1][x_0]h+[x_0]^4h^2/4=[x_0]^2+[x_0]^3h+[x_0]^4h^2/4,$$ $$[k_3]=[x_0+k_2h/2]^2=[x_0]^2+[x_0]^3h+[x_0]^4h^2(5/4)+[x_0]^5h^3(3/4)$$ $$[k_4]=[x_0]^2+2h[x_0]^3+3h^2[x_0]^4+(9/2)h^3[x_0]^5,$$ $$[x_1]=[x_0]+\frac{h}{6}([k_1]+2[k_2]+2[k_3]+[k_4])=[x_0]+[x_0]^2h+[x_0]^3h^2+[x_0]^4h^3+[x_0]^5h^4$$ $$=(0,x_0,x_0^2h,x_0^3h^2,x_0^4h^3,x_0^5h^4).$$ $h=z$ とおくと式 (16.65) のべき展開と一致する． 高次収差計算には，電位 (磁位) の軸方向高階微分が必要であり，電 (磁) 荷重畳法が長所を発揮できる．

位置	内容
298 ページ 1–9 行目差替	配置 II と係数の定義により, 上式は反対称である. 非点収差・像面湾曲の二重項についても, 演習問題 17.10（追加）で示すように証明できる. なお, 軸上色収差, 開口収差, 非点収差・像面湾曲の二重項は G_x^2, G_y^2, H_x^2, H_y^2 のみを含むから, 配置 II に対して座標を軸の回りに $\pi/2$ だけ回転させても値は変わらず, 実効的に 4 回転反対称性をもつ. 16.1.C の $[N=4]$ で示したように, この場合には二重項は存在しない. 色収差に対しては $n=2$ であるから式 (16.6) を適用すると $\alpha+\gamma=1$ となり, これを上記で訂正した式 (16.8) に代入すると $m=0$ となるから, やはり二重項はゼロとなる.
298 ページ 11 行目行末に追加	4 極子系の開口収差・非点収差と像面湾曲の二重項が消せるから, 8 極子系によって対物レンズの対応する収差を消せる. コマと歪みについては 4 極子系で発生しないから 8 極子で補正可能である. 軸上色収差は 17.2.B の方法で補正可能であり, 倍率色収差に関しては 4 極子系で発生しないから図 5.19 の方法が適用可能である. これで色収差と全 3 次幾何収差が補正可能である.
299 ページ最下行の「含まない.」の次に追加	具体的に作ると $\bar{w}_a^2GH^2\int w_0w_aGH^2dz$, $\bar{w}_0\bar{w}_aG^2H\int w_a^2H^3dz$, $\bar{w}_a^2H^3\int w_0w_aG^2Hdz$, $\bar{w}_0\bar{w}_aGH^2\int w_a^2GH^2dz$ （これは回転対称項であり 16.1E の記述と一致する. ）
301 ページ 13 行目行末に追加	2 次項の $(0011)w_a\bar{w}_a$ は近軸軌道の w_aH_x に対応する.
308 ページ 4 行目の次に演習問題追加	**17.10** 4 極子の特性関数の非点収差・像面湾曲の二重項を抜き出せ.
308 ページの最後に文献追加	21) N. Dellby 他: J. Electron Microsc. **50**, 177 (2001)

330 ページ 11–13 行目差替

$$\frac{\partial}{\partial y}\mathrm{Im}(\bar{u}^N)=\left(\frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial}{\partial u}+\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}\frac{\partial}{\partial\bar{u}}\right)\frac{u^N-\bar{u}^N}{2j}=\frac{N}{2}\left(u^{N-1}+\bar{u}^{N-1}\right),$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\mathrm{Im}(\bar{u}^N)=\frac{N}{2j}\left(u^{N-1}-\bar{u}^{N-1}\right).$$

$$\left(-x'\frac{\partial}{\partial y}+y'\frac{\partial}{\partial x}\right)\mathrm{Im}(\bar{\mathrm{u}}^{\mathrm{N}})=-\frac{u'+\bar{u}'}{2}\frac{N}{2}\left(u^{N-1}+\bar{u}^{N-1}\right)+\frac{u'-\bar{u}'}{2j}\frac{N}{2j}\left(u^{N-1}-\bar{u}^{N-1}\right)$$
$$=-\frac{N}{2}\left(u'u^{N-1}+\bar{u}'\bar{u}^{N-1}\right)=-\mathrm{Re}(\bar{u}^N)'.$$

$$\text{したがって},\ x'A_x+y'A_y=-\mathrm{Re}(\bar{u}^N)'\int\Psi_N dz=-\left(\mathrm{Re}(\bar{u}^N)\int\Psi_N dz\right)+\mathrm{Re}(\bar{u}^N)\Psi_N.$$

右辺初項の積分の下限ではゼロ, 上限の像面で X_a での偏微分をとると $NH(Z_i)\bar{u}^{N-1}$ となり, 寄与はゼロである.

332 ページ演習問題 17.10 の解答を追加

17.10 $x^4\pm y^4$, x^2y^2 から次のようにして二重項を抜き出す. $16x^2y^2=16(x_0G_x+x_aH_x)^2(y_0G_y+y_aH_y)^2=16(x_0^2G_x^2+2x_0x_aG_xH_x+x_a^2H_x^2)\times(y_0^2G_y^2+2y_0y_aG_yH_y+y_a^2H_y^2)$. 非点収差と像面湾曲に対応して x_0, y_0 の二次式を抜き出すと $16(x_0^2y_a^2G_x^2H_y^2+x_a^2y_0^2H_x^2G_y^2+4x_0y_0x_ay_aG_xG_yH_xH_y)=-(w_0+\bar{w})^2(w_a-\bar{w}_a)^2G_x^2H_y^2-(w_a+\bar{w})^2(w_0-\bar{w}_a)^2G_y^2H_x^2-4(w_0+\bar{w}_0)(w_0-\bar{w}_0)\times(w_a+\bar{w}_a)(w_a-\bar{w}_a)G_xG_yH_xH_y$. 二重項を抜き出すと $-2\{w_0\bar{w}_0(w_a^2+\bar{w}_a^2)-w_a\bar{w}_a(w_0^2+\bar{w}_0^2)\}(G_x^2H_y^2-G_y^2H_x^2)$. A_{s2} を乗じたものは反対称.
同じく $(8/3)(x^4\pm y^4)\to 2\{w_0\bar{w}_0(w_a^2+\bar{w}_a^2)+w_a\bar{w}_a(w_0^2+\bar{w}_0^2)\}(G_x^2H_x^2\mp G_y^2H_y^2)$
開口収差のときと同様に, この二重項は反対称.