輪講会での質疑応答

(2012 年 5 月 11 日)

1.1 (p.2) 光学分野ではフェルマーの原理を使うが、電子光学では?

p.231 にあるようにやはり電子光学でもフェルマーの原理を用いる。

1.2 (p.2)(p.15) 式 (1.4) や式 (3.1) は電磁界が時間的に変化しないときの式だが、時間的に変化する場合は?

「基礎電磁気学」[1]p.197 の式 (16.4) のように、ベクトルポテンシャル $\boldsymbol{A}$ を使って、

$$\boldsymbol{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t} \tag{1-1}$$

となる。

1.3 (p.3) 式 (1.10) で、正イオンの時は電荷だけ符号を変えればよいのでは?

正イオン時、電荷の符号と電位の符号の両方を変えると、$\boldsymbol{E}$ の符号が反転するから式 (1.3) は質量と価数と $\boldsymbol{B}$ による影響を除いて電子と同じ式になるから、同じ軌道になる。

$$m\frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2} = -e[\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}] = Ne[-\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}] \tag{1-2}$$

1.4 (p.3) 式 (1.13) では $\phi = \phi_0$ のとき、$v_0 = 0$ を仮定していますか?

式 (1.6) との整合性を考えると yes である。初速度はゼロ。

2.1 (p.9) 式 (2.15) に相対論が入ったときは?

質量 m が相対論を考慮した値。すなわち

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \tag{2-1}$$

と考えればよい。これは均一磁界に入る電子の速度が高速に近づくと、サイクロトロン周波数 w_c が小さくなる事を意味している。式 (2.19) で決まる半径 R も大きくなっていく。$v \to c$ では $R \to \infty$ となる。すなわち電子軌道は曲がらない。

2.2 (p.10) 3 MeV の超高圧電子顕微鏡で地磁気の影響によるビームスポットのずれはどれくらいか?

超高圧電子顕微鏡で $\omega_c = eB/m = eB/m_0(1+2\epsilon\phi) = 1.26\times10^6$ rad/s で、$v \sim c$ なので $R = c/\omega_c = 239$ m である。電子のビームパス長を約 10 m とすると地磁気によるビームスポットのずれ $y_1 = 10^2/(2R) = 0.2$ m となる。

2.3 (p.11) 8 行目で、「$\alpha \ll 1$ のとき z 方向の速度は同じとみてよいから同じ z 面に戻る。」ということは、$\alpha \ll 1$ でないときは同じ z 面に戻らないということか?

Yes.

3.1 (p.18) 式 (3.10) の意味は?

被積分関数は $E_x^2 + E_y^2 + E_z^2$ であり、これに $\varepsilon/2$(ε は誘電率) を乗ずると静電エネルギー密度となる。静電エネルギーが最小ということはテキスト式 (3.10) の $\phi \to \phi + \delta\phi$ に対して変分がゼロを意味し、式 (3.10) となる。

3.2 (p.19) 式 (3.18) の近似式はどこから?

テキスト式 (3.18) は軸上電位を好く近似する半経験的公式。理論的に導出されたものもではない。

3.3 (p.22)(3.28) 式の A_i は面積?

No. 面積ではなくある定数。

3.4 (p.25) 11 行目の m は k のこと?

No. テキストの原文で正しい。

4.1 (p.28) 「r 方向の力が r に比例することが、必要十分条件」は、磁界のみの場合は、式 (4.19) からそうなるが、電界の場合は?また、両方が複合した場合は?

電界の場合は、式 (4.77) で集束することが示されている。また、電界と磁界が複合した場合は、式 (4.19) のような $x'' + px' + qx = 0$ という 2 階線形常微分方程式は、$x = f(z)X(z)$ という変換を行うと $X'' + c(z)X = 0$ の形に変形できる。今の場合、$f(z) = \Phi^{-1/4}$, $c(z) = (3/16)(\Phi'/\Phi)^2 + eB^2/(8m\Phi)$ となるので、$c(z) > 0$ であるから、電界と磁界が両方あっても集束する形になることが言える。

4.2 (p.28) 式 (4.7) は、電界変化が急激なところでも成り立つか?

FE エミッタのように尖ったところ (カド) では電界変化を急峻にできるが、α が小さいところのみを考える範囲で式 (4.7) は成り立つ。平面では急激な電界変化は作れない。

電界変化が急激な領域では、電位あるいは磁位をべき級数展開したとき、高次の項の寄与が急速に増大する。従って近軸と言える範囲が急速に狭くなる。

4.3 (p.30) 式 (4.25) の m_0 は m でしょうか?

ここでは、相対論は問題にしていない。m_0 でも m でも同じ意味。p.4 11 行参照

4.4 (p.31) Q: 式 (4.33) で $\sqrt{\Phi}X'$ の物理的な意味は?

$$\frac{d}{dz}(\sqrt{\Phi}X') + X\left[\frac{\Phi''}{4\sqrt{\Phi}} + \frac{e/m}{8\sqrt{8\sqrt{\Phi}}}\right] = 0 \tag{4-1}$$

$\sqrt{\Phi}X'$ は X 方向の運動量成分に比例する量である。式 (4.49) にも同じ形 $\mathbf{p}X'$ が出てくる。エミッタンス図の縦軸も同じ形になっている。

4.5 (p.32) ガウス結像系とは?

下から 9 行目から 6 行目までの「この性質は近軸方程式が 2 階線形であること、および X 軌道と Y 軌道が同じ方程式に従うことによる。この性質を持つ結像形をガウス結像系という。回転対称系はこの性質を持っている。レンズとして回転対称系が主として用いられる最大の理由である。」に関して、

(1)「近軸方程式が 2 階線形であること、および X 軌道と Y 軌道が同じ方程式に従う」は「ガウス結像系」であるための必要十分条件。回転対称系の定義は、p.251 6 行目にもあるように、軸の周りの任意の角度の回転変化に対して同じ特性を示すこと。

近軸に関して式 (4.19)、式 (4.20) が成立すれば、任意の角度の回転ただし時間的に変わらない回転をしても、式 (4.13) から分かるように同じ方程式になる。同じ初期条件であれば同じ方程式を満たせば同じ軌道となる。

(2)「2 階線形でかつ X 軌道と Y 軌道が同じ方程式に従う」は「回転対称系」の必要十分条件であるか？

「回転対称系」なら「2 階線形でかつ X 軌道と Y 軌道が同じ方程式に従う」を満たしているが、逆は正しくない。収差に関して近軸軌道方程式が無電界・無磁界のときと、6 極子、8 極子のときとで同じであることから。

4.6　(p.33) **z_{hi}, z_{h0} の添え字 h の由来は？**

主面のドイツ語が Hauptfläche

4.7　(p.33) **式 (4.42) で $\dfrac{l_0 - f_i}{f_0} < 0$ となることがあるか?**

z_0, z_i はレンズ界の外を仮定しているので、(集束レンズでは) 負になることはない。 発散レンズでは負になる。

4.8　(p.34) **f_0, z_{h0} を導く時に使う関係式は?**

$$\frac{M}{f_0} = G_{\mathrm{I}}'(z_0),\ (z_0 - z_{h0})G_{\mathrm{I}}'(z_0) - G_{\mathrm{I}}(z_0) = -M \tag{4-2}$$

4.9　(p.37) **図 4.8 の像側の図形は楕円 $(-\pi \leq \alpha \leq \pi)$ か？**

ρ が小さいとき近似的に成り立つ。ρ が大きいときは α の絶対値の小さい領域で楕円の一部になる。

4.10　(p.37) **図 4.8 で、倍率を変えた図で同じ z_i になっているが、これは z_i をずらしたのか?また、ズームレンズの様に倍率を変えても z_i がずれない場合なのか?**

レンズの位置は同じ z_i になるように変えたとき、複数のレンズでも同じ考えが成立。

4.11　(p.37) **式 (4.73) の導出において、$X_1 = X_0$ か?**

弱いレンズ仮定で、角度は X_0' から X_1' に変わるけど、位置は変わらないとして、レンズを表す行列を

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ C & 1 \end{pmatrix} \tag{4-3}$$

とし、式 (4.61) から出る。

4.12　(p.40) **G_{IV} 軌道の設定の意味?**

後段にレンズが接続されたとき、考えているレンズの実の像面の代わりに軌道の漸近線が軸と交わるところを虚の像面として定義することで、このときも同じ形のレンズ公式が使えるようになる。

4.13　(p.41) **図 4.11 で焦点距離は像側 f_o の差が $(\Delta\ z_o)^2$ に比例する。つまり、焦点距離は一定と見なせる。しかし、p.40 の 14 行目にあるように、「焦点距離と主面位置が l_i の位置によって変わらないことが前提となる。・・(中略)・・いくつかの場合は物面位置依存性が無く、またあってもわずかである。」にあるように主面位置も変わらないのか?**

主面位置については説明されていない。変わる可能性がある。

4.14　(p.43) **式 (4.94) で、f_i と f_o は一致しているか?**

一致している。$f = f_i = f_o$ である。

4.15　(p.43) **図 4.14 で $\tilde{f}$ が最小になっているが、軌道はどんな形状?**

図 4.18 の $k^2 = 4$ の時のように軸と 2 回交差している。

4.16　(p.44) **鐘型モデルは現実のレンズより裾野が広い。現実のレンズと比べてその特性は?**

分布は磁気飽和しているときの現実レンズに近い。特性は図 5.25~5.27 に示されるように、理想のレンズに近い。現実レンズの形状を理想レンズに近づけるように設計しているとすれば、鐘型モデルは現実レンズに近いモデルになっている。

近軸軌道方程式 (4.19) から明らかなように、レンズ作用は磁界強度の高い領域の寄与が大きく、裾の影響は二次的。このモデルの意義は、収差を含めたレンズ作用が解析的に表現できることと、レンズ公式が物面位置に依存しないこと。後者のために Newton Lens とも言われる。

4.17　(p.46) **図 4.19 に関連して、コンデンサレンズでは L を大きくするが、焦点距離を長くする目的で L が小さいままで励磁電流を弱めたのとは違うか?**

弱励磁より強励磁の方が収差が小さい。L が大きいと軸ずれに対しての許容量がおおきい。結果として有利。

4.18　(p.55) **図 4.30 で、C_{C0} だけが f_i で規格化されている。なぜか?**

薄肉レンズ近似での公式 (4.78) と (5.53) に薄肉レンズ近似したときの値に比を見ると、1/2 だけ異なる。つまりレンズが弱くなれば、この比が 1/2 に漸近する。

4.19　(p.55) **図 4.30 で、C_{S0} は物側か?**

倍率が無限大の時の C_S のこと。p.69 で出てくる。

5.1　(p.63) **「幾何収差は u, u' の高次項」とは?**

式 (3.15) の r の 2 次の項は、近軸であるので、収差には効かない。それ以上の項のことを高次項という。

5.2　(p.63) **回折収差に関して、像面の手前で減速した場合はどうなるか?**

減速の有無に無関係にターゲット到達時のエネルギーで決まる。

5.3　(p.63) **図 5.2 で (X, Y) などは回転している図の方がいいのでは?**

(X, Y) を回転している座標系と見ればこのままでよい。

5.4　(p.64) **式 (5.12) の F とか f などの係数は実数か?**

yes.

5.5　(p.64) **コマ収差に関して。軸調時にレンズ強度を変えたときに図 5.5 のような形にビームが動くが、それはコマ収差?**

絞りの軸ずれが起こっているので強調されて見えている。

5.6　(p.65) **ザイデルの 5 収差や最小錯乱円は光学分野でもある言葉?**

光学の屈折レンズ、回折レンズでも使われる言葉。光学分野での方が先に使われていたのでは?

5.7　(p.65) **コマ収差では、$e^{2j\phi_a}$ の項があるから ϕ_a を 0 から 2π まで変えると、2 回転する?**

yes。

5.8　(p.67) **下 7 行目で、「 特定の収差を消す」　に関して、歪曲収差 E が 0 になっても e は 0 になっていない。しかし、式 (5.12) で歪曲収差の係数は $E + je$ であるから、特定の収差を消すというのはどういうことか?**

E, e, C, c, F の個々の係数が消える絞り位置があるということ。

5.9　(p.67) **絞り径を大きくしたら収差が 0 になるところがあるか?**

絞りは軸に近いものだけをとる働きがあるので、その条件をはずすと収差は増える。

5.10　(p.68) **上から 4 行目の「出射角を制限」の意味は**?

図 5.8 で左に光源があってそこから出射しているビームの開き角を制限しているという意味。レンズに対して入射するビームでもある。

5.11　(p.68) **式 (5.21) の絞り面位置依存性はある**?

テキスト式 (5.21) で、

$$C_s = \frac{B}{(h_0')^3} = \text{一定？} \tag{5-1}$$

最下行で、「上記のことから」とあるが、これは絞り面の位置が変わっても上式が一定、すなわち B は絞り面の位置に依存しないことを意味しているわけではなく、式 (16.7) に示されているように B は $w_a^2 \bar{w}_a$ の係数に依存するから絞り面の位置に依存する。B には絞り面位置依存性がある。ただしゼロにはならない。

5.12　(p.75) **式 (5.39) は絞りをどこにおいたときの式か**?

焦点面においたとき。

5.13　(p.75) **式 (5.39) において、C_c の符号は負でいいか**?

yes. 式 (5.39) において、C_M や C_R は絞りを焦点面においたときの式。

式 (5.43) や式 (5.53) では C_c の符号は負であるが、図 5.18(a) や式 (5.44) は正であるので、C_c の符号が正なのか負なのかはっきりしないようだが、p.282 の 10 行目を参照すると、「色収差係数の定義は負符号を含むが、収差補正分野では、この負符号を外して議論することが慣習であり、この章ではそれに従う。」とある。

5.14　(p.77) **式 (5.48) では r_s を最小錯乱円にとらないのですか**?

ここではオーダーを考えているので係数 1/4 は省いている。式 (12.23) では 1/4 を入れた式にしている。最小錯乱円を取った方がよい。

5.15　(p.77) **図 5.20 では Bd^2 が k^2 に対して増加している。なぜか**?

C_s は k^2 に対して増加するが、式 (5.21) より $B = C_s/(h_o')^3$ の関係があり、式 (5.17) を式 (5.45) でわった式になる。

5.16　(p.78) **式 (5.53) は C_c、では $\tilde{C}_c$ は**?

Hawkes-Kasper "Principal of electron optics" Vol.1 [4] の 26.2 節を参照。文献の変数のまま引用すると次になる。積分範囲が $-\infty$ から ∞ となる。

$$C_c = \hat{\phi}^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\gamma(3 + 2\epsilon\phi'^2)H^2}{8\hat{\phi}^{5/2}} \tag{5-2}$$

5.17　(p.86) **式 (5.72) の係数 a_{10}や a_{01} の意味は**?

式 (5.72) の係数 a_{10}や a_{01} などの添え字は x や y の次数を示しているだけ。a は係数という意味で式 (3.22) とは直接関係がない。

5.18　(p.86) **式 (5.75) の下の数値例では $M = 1$ とおいているのか**?

No. ΔU_i は像面だから数値例に M は要らない。式 (5.16) より $d_a = \Delta z^{\mathrm{III}} - \Delta z^{\mathrm{II}}$。

6.1　(p.91) **式 (6.2) に入っている仮定は**?

式 (6.2) では空間電荷による Φ の変化は 0 とおいている。つまり、Φ'やΦ'' は空間電荷があってもなくても同じと仮定している。従って、陰極近傍では空間電荷によって Φ'やΦ'' が変わるので、式 (6.2) は誤差が大きい。

6.2　(p.94) **R と R_0と R^* の変数の意味**?

- Z: 軸上距離の規格化変数
- R: ビーム半径で Z の関数
- R_0: $Z = 0$ での R
- Φ も Z の関数
- $R = R^* \Phi^{-1/4}$

6.3　(p.94) **入射条件は軸に平行か**?

$R' = 0$ より、平行と考えられる。

6.4　(p.94) **式 (6.13b) や式 (6.13c) の電界分布は可能か**?

上に凸や下に凸のモデル化。例えばバイポテンシャルレンズで口径が違う電極を使ったとき。

6.5　(p.96) **楕円ビームとはどんなモデル**?

非点のあるビーム、4 極子を通ったビームなど。

6.6　(p.97) **2–3 行目の、「ビーム径の増大は円形断面のそれの 1/5 である。」とは**?

文章どおりで、楕円ビームの時はビーム径の増大比が、円形断面のときより 1/5 に押さえられるということ。楕円ビームの形は変わらない。

6.7　(p.97) **上から 16 行目　断面の積分が 1 になるようにとは**?

次の積分値が 1 になるようにする。

$$\frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} [a + b(r/r_0)^2 + c(r/r_0)^4] 2\pi r dr \tag{6-1}$$

6.8　(p.99) **式 (6.27) の意味は**?

式 (6.27) は $r' = 0$ とするために必要な条件。もし、$\mathbf{B}$ が強すぎたらビームが波打つ。p.100 に記述されている。

6.9　(p.99) **図 6.7(c) の様な系は昔から有る**?

yes。進行波管など 1950 年代からある。

6.10　(p.99) **陰極を磁界に浸すのは特許は切れている**?

1980 年台に R. Speidel らが検討。特許は切れている。磁界界浸型陰極は FE のとき有効で、熱陰極では有効ではない。

6.11　(p.100) **中空円筒ビームは実用化されているか**?

パービアンスをあげるために中空円筒ビームにする。MIG(Magnetron Injection Gun) として 1960 年代に研究されていた。今後使われる可能性がある。

6.12　(p.102) **式 (6.35) で相対論補正はどこに入る**?

相対論効果は文献 4), [5] 参照のこと。

6.13　(p.103) **式 (6.38) の S_i の意味は**?

入射面からターゲット面と光学的に共役な面 (像面) までの長さを L で除したもの。

7.1　(p.109) **式 (7.10) を考える際にエアリーパターンは考えているか**?

no.

7.2　(p.110) 式 (7.15) の意味は?

式 (7.13) から

$$\frac{dN}{dtdxdy} = \frac{fdxdydz}{dtdxdy}d\boldsymbol{v} = f\frac{dz}{dt}\boldsymbol{v} = f\dot{z}d\boldsymbol{v} \tag{7-1}$$

よって

$$dJ = \frac{-edN}{dtdxdy} = -ef\dot{z}d\boldsymbol{v} \tag{7-2}$$

7.3　(p.114) 式 (7.41) で絞りを十分効かせるとは?

焦点面では G 軌道は 0 になるので、焦点面に微小な絞りを置くと、x, y 方向に初速度をもった軌道は絞りで遮断されることになる。

7.4　(p.115) 式 (7.48) $r = 0$ とは?

図 7.7 でいうと上から来た軌道と下から来た軌道が軸上で交わるので、電流密度が発散する。実際には回転対称なので、有限の大きさをもった円環状ビームが軸上で一点に集まることに対応する。図形の中心に火線ができる。

7.5　(p.115) 図 7.6 で階段状とは?

式 (7.48) で解が 3 つから 1 つに切り替わるところでおこる。

7.6　(p.115) 図 7.7 でクロスオーバー面は図 7.6 では?

パラメータが-0.75 の時のカーブである。最小錯乱円の位置である。

7.7　(p.116) 図 7.8 $\xi = +1$ のとき点になっている。どういう状況?

b_1, b_2 は式 (5.74) から非点に対応。球面収差がゼロになることに対応。

7.8　(p.115) 火線 (caustics) は収差がないときは?

火線は収差が発生原因なので、収差がないときはでない。

8.1　(p.119) 式 (8.3) は収差のあるときにも成立するのか?すなわち、エミッタンスは収差があるときにも保存されるのか?

yes. 式 (4.35) は近軸不変量の式であるから、2 階線系微分方程式の性質から出ているが、リウビルの定理より、位相空間の体積 $d\boldsymbol{p}d\boldsymbol{q}$ は保存される。これはエミッタンスの面積に相当するので、結局面積を表している式 (8.3) は常に成立すると考えられる。すなわちエミッタンスは収差があるときにも保存される。

8.2　(p.120) アクセプタンスの縦軸横軸をエネルギーと位置でとることはあるか?

検出器に入る時の電圧と角度を使った図をアクセプタンス図と呼ぶことがある。昔 SEM の電位コントラスト理論を構築する際に我々が導入し、それが検出器関連で利用されている。

8.3　(p.121) 下から 5 行目で、「上記のことから」の上記とは何を指す?

軌道の傾斜角 α は軸上電位 Φ の 2 分の 1 乗に反比例することから、式 (8.6) で α の 2 乗分の 1 は軸上電位 Φ に比例する。つまり、$\alpha^2 \propto \Phi^{-1}$ のこと。

8.4　(p.121) 式 (8.13) に関連して、電圧を下げると輝度が下がるので (利用できる電子数の観点で) 不利か?

輝度が下がるということは、同じ電子数なら角度が広がるということ。広がった角度の電子も利用できるのであれば一概に不利とは言えない。しかし、絞りで開き角を制限するときは輝度の高い方が電子数が多くなるので有利。

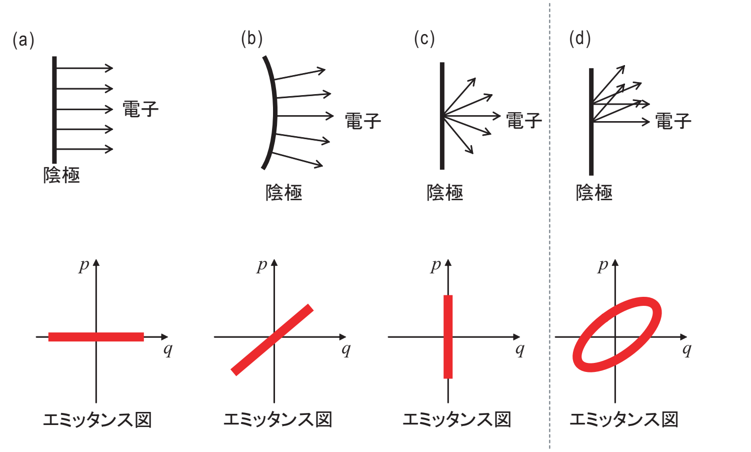

図 1　$\epsilon^* = 0$ 初速度分布がないとは? (a)∼(c) のとき $\epsilon^* = 0$、(d) のとき $\epsilon^* \neq 0$。(a)∼(c) では電子は陰極から電界に引っ張られて、互いに交わらずに走る。

8.5　(p.123) 図 8.11(a) のエミッタンス図が交差しているのはなぜか?

実際にはエミッタンスは交差しない。全ての収差を考えたときエミッタンスは交差しない。

図 8.11(a) では軸上位置が違った面の図形を重ねて画いてあるだけで、見かけ上のもの。

8.6　(p.123) 式 (8.25) は初速度分布のある点光源の時にも成り立つか?

点光源のエミッタンスは 0 だから、$\varepsilon \to 0$ とすれば良い。

8.7　(p.123) 式 (8.27) の左辺の分母 R_0 はいらないのでは?

ディメンションを考えると必要。

8.8　(p.127) 1 行目で、「$\varepsilon^* = 0$ 初速度分布がない」とは?

電界に垂直な方向にしか電子が出ていない状況。すなわち各場所から出ている電子は平行か交差せず拡がるように出ているとき。図 1 を参照。

8.9　(p.128) 式 (8.31) の r_c は何?

陰極でのビーム半径。図 8.18 参照。

8.10　(p.129) 式 (8.32) で、第 2 項の m は m^2 ではないか?

式 (8.16) で $q_0 = G,\ p_0 = H, A = r_c,\ B = v_c$ とすると、$q = r_cG + v_cH$ となり、$R^2 = r_c^2G^2 + v_c^2H^2$ であり、v_c に $(v_c)_{max} = \sqrt{2kT/m}$ を代入する。

変換行列として、

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G & \frac{H}{m} \\ C & D \end{pmatrix} \tag{8-1}$$

ととる。すなわち、

$$\begin{pmatrix} q \\ p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}\begin{pmatrix} q_0 \\ p_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G & \frac{H}{m} \\ C & D \end{pmatrix}\begin{pmatrix} r_c \\ v_c \end{pmatrix} \tag{8-2}$$

と、式 (8.32) になる。拘束条件は $AD-BC=1$ なので $C,\ D$ の取り方で条件を満たすことができる。

9.1 (p.131) **下から 11 行目で、「式 (3.19) を多重極展開すると、$m=2$ が基本成分 となる。$\phi=\pi/2$ で電位が等量逆符号になるので、高調波成分は m の奇数倍項が残る。従って、$m=2\times3=6$ すなわち 12 極子界が最低次高調波成分となる。」となっている部分で、アンダーラインを付けた箇所の意味は?**

図 9.1(a) の場合、電極電位が $\varphi=0,\pi$ で正、$\varphi=\pi/2,3\pi/2$ で負であるから、電位変化の最低次は 2 である。

多極子界に偶数次数、例えば $m=4$ が残れば $\varphi=\pi,3\pi/2$ で正となり、図 9.1(a) と合わなくなる。

9.2 (p.132) **式 (9.3) や式 (9.4) の $\mathbf{E},\ \mathbf{B}$ は?**

$a_{20}=\dfrac{\mathbf{E}(z)}{2}$ や $a_{11}=-\mathbf{B}(z)$ に対する $\mathbf{E},\ \mathbf{B}$ は任意定数と見ればよく、これと電極電位 V_1 と磁極磁位とを関係づければ式 (9.7) となる。

10.1 (p.142) **式 (10.2) や (10.3) において $\ddot{z}=\frac{e}{m}\boldsymbol{E}_0'(z)y$ や $\boldsymbol{B}_0'(z)$ は 2 次微少量?**

$x,\ y,\ x',\ y'$ は 1 次微少量とみなすのが近軸仮定。$\boldsymbol{E}_0'(z)$ や $\boldsymbol{B}_0'(z)$ は落とすことができない。z 方向には変化しうる。

10.2 (p.142) **5 行目にある多重極展開というのは $m=1$ が基本成分で、つぎの高調波成分が $m=3$ とは?**

図 10.3 で、$x=\cos\theta,\ y=\sin\theta$ とおくと、電位は $\theta=0,\pi$ でゼロ、$\pi/2$ で正、$3\pi/2$ で負となるから、基本成分が $m=1$ で奇数次成分だけで表現できる。

10.3 (p.144) **周波数が高くなるときは、走行時間効果のため感度低下し、加速電圧が高くなると相対論の項も入ってくる?**

yes.

10.4 (p.144) **下から 4 行目、磁界偏向の場合で、コイルの NI を $\cos\varphi$ に比例させると均一偏向界に近いとあるが、トロイダルコアに巻いた場合は?**

$\cos\varphi$ に比例するのは磁性体が無いときで、コアがあるときは均一偏向磁界とは言えない。

10.5 (p.145) **表 10.2 で $\dot{z}$ は一定と考える?**

x 方向は一様とみなす。

10.6 (p.149) **MOL を使いたいときはどんなときか?**

「垂直照射が可能」が電子ビーム露光などの実用上で最大の利点。

レンズ中心に偏向軌道を通し収差を減らしたいとき。また、収差が低くく照射角が広くとれ、電流密度を高められる。電子線縮小転写装置や CD-SEM などへ応用の例がある。(特開平 11-339708 ニコン、K. Abe et al (トプコン、東芝), Proc. SPIE, **5752** (2005) 1200–1208、K. Kimura et al, Proc. LSI Testing Symposium 2002, (2002) 207–210、K. Abe et al, Proc. LSI Testing Symposium 2003, (2003) 43–47 など)

10.7 (p.149) **式 (10.21) で、回転対称磁位は元のレンズで作っても良いか?**

yes.

10.8 (p.150) **式 (10.26) で、像のボケはどの項から?**

歪み以外はボケに寄与する。

10.9 (p.153) **17 行目、「蛍光面の手前で中心軌道を横切ることになる」は「蛍光面の手前で R の軌道は中心軌道を横切ることになる」の意味?**

図 10.17 で G の軌道が中心軌道。R および B の軌道が蛍光面の手前で G の軌道を横切ることを意味している。すなわち、「蛍光面の手前で R と B の軌道が中心軌道 G を横切ることになる」

10.10 (p.153) **図 10.18 の矩形穴電極は 1 枚の電極?全面が同じ電圧?**

yes.

10.11 (p.155) **2 行目、角度大とは?**

(a) に比べてレンズを通過する時の角度が大きいということ。

10.12 (p.154) **図 10.19(c) は (b) とどこが違う?**

2 段の偏向器の偏向方向が異なっている。

11.1 (p.158) **変数 d と S の意味は?**

ビーム幅が d、スリット幅が S である。

11.2 (p.158) **下 5 行で、「通常はスリットを源の像面におく」とあるが、図 11.1 の QQ' 面か?それとも QQ" 面か?**

11.3.H 節を参照。QQ' 面に垂直。Q' がある運動量の電子が集まる点。

11.3 (p.164) **界面の形を 4 極子以外、曲線にしたら高次の収差項を消せる?**

適切に選べば消せる可能性がある。§11.3D 参照。

11.4 (p.164) **$\psi=-\boldsymbol{B}_0(z+yz\tan\alpha)$ は 4 極子の式 (9.4) と等価ということであるが、実際の分布はどうなっているか?**

図 2 参照。$y-z$ 平面に 4 極子。第 1 象限と第 3 象限に N 極。第 2 象限と第 4 象限に S 極を配置する。x 方向の長さは $y\tan\alpha$ に比例。

11.5 (p.168) **7 行目、「方向集束性をもつ」はどこから言える?**

式 (11.37a) の行列表示から軌道方程式を考えると x 方向には集束する形になっている。

11.6 (p.170) **式 (11.46) の第 1 式中の y_3?**

座標の取り方は図 11.16 のように、軸に垂直に $\bar{y}$ 偏向基準軌道に垂直に y ととっている。したがって、y_3 は $\bar{z}=\bar{z}_3$ のときの x 軸に垂直にとられた y 座標の値。

11.7 (p.171) **4 行目の $\partial y/\partial y_0=0$ の意味は?**

平行ビームを集束させるということ。

11.8 (p.171) **点源を中心に置くのは?**

減速電極に垂直に電子を入射させるため。斜めになると垂直成分の速度が減るので分光の誤差になる。

12.1 (p.182) **V_d の意味は?**

$V_d=V_g-V_c$ であり、ドライブ電圧と呼ばれる。

12.2 (p.190) **図 12.23 の計算条件は?**

熱電子銃では輝度を一定として計算。一方、FE 電子銃では $dI/d\Omega$ を一定として計算。

14.1 (p.218) **5 行目 幾何平均とは?**

相乗平均の別名。$a>0,\ b>0$ のとき、$\sqrt{ab}$ のこと。

14.2 (p.223) **(14.31) の第 2 式の意味?**

式 (14.30) を式 (14.29) に代入し、τ を一次微少量としてべき級数展開し、一次項をとったもの。

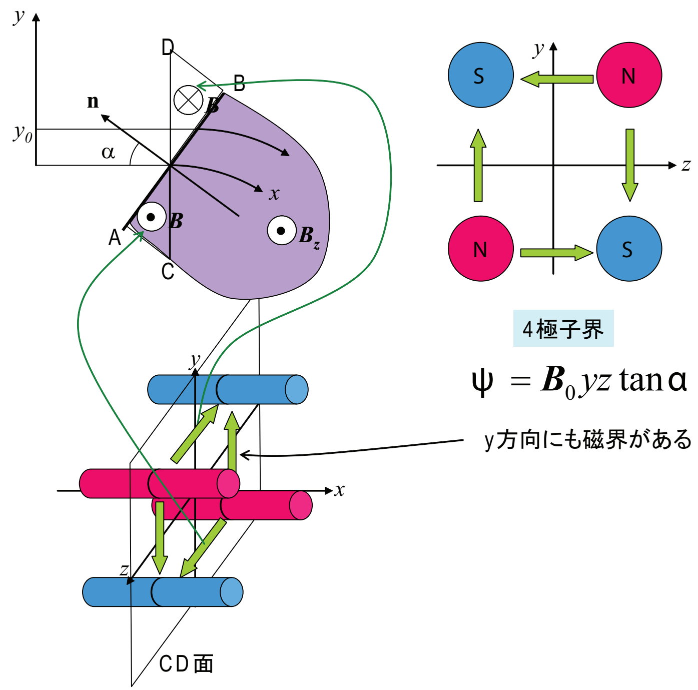

図 2　テキスト図 11.10 の拡張。斜入射プリズムの場合 4 極子界が重畳される。

14.3　(p.224) (14.33) 式の運動方程式で、$\dfrac{e(\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{v})}{c^2}\boldsymbol{v}$ はどうして付加されているのでしょうか?

運動方程式は式 (1.11)。左辺は

$$\frac{d\boldsymbol{p}}{dt} = \boldsymbol{v}\frac{d}{dt}\left(\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\right) + \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \boldsymbol{v}\frac{dm}{dt} + m\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}, \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \tag{14-1}$$

式 (1.13) の両辺の微分をとると

$$d\left(\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\right) = ed\phi = -e\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{v}dt. \tag{14-2}$$

これを上式に代入すれば式 (14.33) となる。

詳細には、(14-2) は、式 (1.13)

$$mc^2 - m_0c^2 = e(\phi - \phi_0) \tag{14-3}$$

の両辺を t で微分すると

$$c^2\frac{dm}{dt} = e\frac{d\phi}{dt} = \frac{d\phi}{d\boldsymbol{r}}\frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = -e\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{v}, \quad \therefore \frac{dm}{dt} = -\frac{e\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{v}}{c^2} \tag{14-4}$$

これを上式 (14-1) に代入すると、

$$-\frac{e\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{v}}{c^2}\boldsymbol{v} + m\frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = -e(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}) \tag{14-5}$$

$$m\frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = m\frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2} = \frac{e\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{v}}{c^2}\boldsymbol{v} - e(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}) \tag{14-6}$$

15.1　(p.234) 式 (15.31)$gdz \to dz$?

式 (15.31) では g が消えているのは、回転対称系ですから、式 (15.29) を代入するとき $gdz \to dz$ に戻して考えているから。

15.2　(p.234) 下から 3 行目の式に抜け?

$$x'A_x + y'A_y = -x'g\frac{\partial}{\partial y}\int\phi dz - y'g\frac{\partial}{\partial x}\int\phi dz \tag{15-1}$$

$$= -x'(1-\kappa x)\left(\int\Phi_1dz + 2x\int\Phi_2dz\right) + 2yy'(1-\kappa x)\int\Phi_2dz \tag{15-2}$$

$$= -x'(1-\kappa x)\left(\int\Phi_1dz + 2x\int\Phi_2dz\right) + 2yy'\int\Phi_2dz \tag{15-3}$$

(15-2) において、$yy'\kappa x$ の項は 3 次項なので、(15-3) では省略されている。また、(15-3) には省略されていないが、$x'\kappa x^2$ 項も 3 次項になるので省略して良い。

15.3　(p.237) 2 行目の「→ は部分積分による変換」?

$$-\mathbf{P}^{-1}\mathbf{P}'X^*X*' = -\frac{1}{2}\frac{\mathbf{P}'}{\mathbf{P}}(X^{*2})' = -\frac{1}{2}\left(\frac{\mathbf{P}'}{\mathbf{P}}(X^{*2})\right)' + \frac{1}{2}\left(\frac{\mathbf{P}'}{\mathbf{P}}\right)'(X^{*2}) \tag{15-4}$$

であるが、右辺の第 1 項は全微分で変分の積分の外に出るから消せる。p.235 の 1 行目から 7 行目までを参照。

15.4　(p.239) 式 (15.53) で、左辺第 1 項が $\frac{d}{dz}(\mathbf{P}X'^{\mathrm{I}}) - \Gamma_x X^{\mathrm{I}}$ となっていますが、$X'^{(2)}$や $X^{(2)}$ の項ではないのはなぜか?

式 (15.53) の上の式の左辺に式 (15.39) を代入する。

$$\frac{\partial F^{(2)}}{\partial X'} = \mathbf{P}X' = \mathbf{P}(X'^{(2)} + X'^{I}), \quad \frac{\partial F^{(2)}}{\partial X} = -\Gamma_X X = -\Gamma_X(X^{(2)} + X^{I}) \tag{15-5}$$

$X^{(2)}$ に関する項は近軸方程式によってゼロ。よって式 (15.53) の左辺が残る。

15.5　(p.243) 「流通面」とは?

流通面は current plane の訳。現在問題にしている面のこと。

15.6　(p.243) 式 (15.77) の上の式で F^0 は?

$$\frac{\partial F^0}{\partial X'} = \frac{X'\sqrt{\Phi^*}}{(1 + X'^2 + Y'^2)^{1/2}} \tag{15-6}$$

において、回転対称系なので $F^0 = \sqrt{\Phi^*}\sqrt{1 + X'^2 + Y'^2}$ である。

16.1 (p.257) **組合せ収差の次数が式 (15.85) から $2(n-1)$ になる?**

上から 5 行目、組合せ収差の次数が式 (15.85) から $2(n-1)$ になるのはなぜ?

r^{I} が n 次、$\partial F^{\mathrm{I}}/\partial r'$ が $(n-1)$ 次、この積を X で微分するから $n\times(n-1)-1=2(n-1)$ 次。

16.2 (p.260) **式 (16.18) で、$U_0\to U_0e^{j\phi}$ の置換に対して不変?**

式 (16.18) で、$U_0\to U_0e^{j\phi}$ の置換に対して不変ということは、単なる座標回転であり $U_o\to U_oe^{j\phi}$ ということ。

$U_0'\bar{U}_0\to U_0'\bar{U}_0'+j\phi'(U_0\bar{U}_0'-U_0'\bar{U}_0)+U_0\bar{U}_0(\phi')^2$ で、$\bar{U}_0U_0'\to(\cos\phi+\phi'\sin\phi)\bar{U}_0U_0'-j(\sin\phi+\phi'\cos\phi)\bar{U}_0U_0'$ と考えるわけではない。

16.3 (p.260) **式 (16.19) の係数 (2000) などは何に対するべきの係数を表しているのでしょうか?**

$r,\ s,\ u,\ v$ のべきを表現している。

16.4 (p.261) **式 (16.23) で s の項が無いが 0 なのか?**

no. s は式 (16.18) と同じ。

16.5 (p.271) **式 (16.65) の下の「x_0 に関するテイラー展開を ${}_3D_1$ で計算する。x の初期値は x_0 であるから、x を x_0 でテイラー展開すると次式のように $x_0=0$ の時の値は 0 である。」という部分の意味は？**

「x_0 のゼロ次項が無い」という意味である。

16.6 (p.269, p.271) **$[x]$ の定義はどうなるのでしょうか?**

$[f(x)]$ の定義は式 (16.50) で $[f(x)]=(f(x),f'(x))$ と与えられているときにその変数である x に対して式 (16.54) で、

$$[x]=x+d_1,\ d_1=(0,1) \tag{16-1}$$

となっています。

同じく、式 (16.55) で $f(x)$ の ${}_nD_1$ を $[f(x)]$ で表し、

$$[f(x)]=(f(x),f'(x),\cdots,(1/k)!f^{(k)}(x),\cdots,(1/n!)f^{(n)}(x)) \tag{16-2}$$

となっていますが、p.271 の式 (16.65) の 4 行下では、

$$[x_0]=(0,x_0,0,0,0,0) \tag{16-3}$$

となっています。式 (16.55) で、x_0 は関数 $x(z)$ の $z=0$ の時の値 $x(0)=x_0$ と与えています。式 (16.50) で $f(x)=x$ とおいたときには、$[f(x)]=[x]=(x,dx/dx)=(x,1)=x+(0,1)=x+d_1$ となるので、(16-1) と合いますが、式 (16.55) の定義を使ったときには、$[f(x)]=[x]=(x,dx/dx,(1/2!)d^2x/dx^2,(1/3!)d^3x/dx^3,\cdots,(1/n!)d^nx/dx^n)=(x,1,0,\cdots,0)$ となり、(16-3) と合わないようですが、変数 x に対して、$[x]$ の定義はどうなるのでしょうか?

$[x_0]$ は式 (16.65) の下の式にあるように、x のテイラー展開微分ではなく、その初期値 x_0 でのテイラー展開である。

式 (16.50) の x は座標変数ではなく、一般の変数である。

本来目的とする展開は式 (16.42) です。混同しないように。

17.1 (p.273) **式 (17.1) にはベクトルポテンシャルが入っているが、磁界が与えられたときベクトルポテンシャルは一義的に決まらない。それでは波長が一義的には決まらないことになるが?**

確かにそうである。しかし実際の問題、例えば試料面の一点 Q から散乱された円レンズ面で別々の二点 P_1 と P_2 を通り、像面 P に結像される場合、電子波の光路長あるいは電子波の位相 φ_1 と φ_2 の差の磁界による寄与は、ベクトルポテンシャルの任意性に無関係に、二つの経路で囲まれる面 S を通過する磁束 ϕ_m で決まる。実際に、

$$\begin{aligned}\varphi_2-\varphi_1&=2\pi\left(\int_Q^{P_2}\boldsymbol{k}\cdot d\boldsymbol{s}+\int_{P_2}^{P}\boldsymbol{k}\cdot d\boldsymbol{s}-\int_Q^{P_1}\boldsymbol{k}\cdot d\boldsymbol{s}-\int_{P_1}^{P}\boldsymbol{k}\cdot d\boldsymbol{s}\right)\\&=\frac{2\pi}{h}\oint(m\boldsymbol{v}-e\boldsymbol{A})\cdot d\boldsymbol{s}=\frac{2\pi}{h}\left(\oint(m\boldsymbol{v}\cdot d\boldsymbol{s}-e\int_S(\nabla\times\boldsymbol{A})\cdot\boldsymbol{n}\,dS\right).\end{aligned} \tag{17-1}$$

ここで面 S に垂直な単位ベクトルを $\boldsymbol{n}$ として Stokes の定理を適用した。$\nabla\times\boldsymbol{A}=\boldsymbol{B}$ であるから、上式第二項は、ベクトルポテンシャルの任意性とは無関係に $-(2\pi e/h)\phi_m$ に等しい。

さて、磁界円レンズのベクトルポテンシャルとして式 (15.31) を満たすものは軸上でゼロである。そこで、軸上の位相あるいは光路長を式 (17.5) で計算し、それ以外は式 (17.5) の方法で一義的に計算できる。

17.2 (p.279) **$\Delta z^*=1.19$ の選び方?**

CTF の変動が余り大きくならないという基準で選ばれている。$\Delta z^*=1.20$ の時の方が $B(q^*)=0$ となる q^* の値は大きくなるが、ここでは一例として。

17.3 (p.281) **図 17.8 で $K_c(q^*)$ を描いているが、$C_s=0$ なら $q^*=0$ となって意味がないのでは?**

図 17.8 の $K_c(q^*)$ は $C_s=1$ mm の時の K_c の値を示している。

17.4 (p.287) **下から 14 行目で、±5 %, 0.5 nm が可能であるとは?**

電圧が ±5 % 変動しても、色収差によるボケが 0.5 nm 以下であるということ。

17.5 (p.297) **式 (17.32) の $(1/4)(w_a^2+\bar{w}_a^2)\{A_s(H_x^2-H_y^2)+A_a(H_x^2+H_y^2)\}$ が二重項になるのでしょうか?**

w_a^2 は w_a の位相が $0\to\pi$ 変わるとき、$0\to\pi$ 変わり、0 とπ の位置が対称になるから。

17.6 (p.297) **式 (17.32) で二重項が $(1/4)(w_a^3\bar{w}_a+w_a\bar{w}_a^3)\{A_{s1}(H_x^4-H_y^4)+A_a(H_x^4+H_y^4)$ となっていますが、どうしてでしょうか?**

$w_a^3\bar{w}_a$ も w_a の位相が $0\to\pi$ 変わるとき、$0\to\pi$ 変わるので、0 とπ の位置が対称になるから。

17.7 (p.297)(p.332) **演習 17.10 の解答で、二重項が $-2\{w_0\bar{w}_0(w_a^2+\bar{w}_a^2)-w_a\bar{w}_a(w_0^2+\bar{w}_0^2)\}$ となっていますが、どうしてでしょうか?**

$w_0^2,\bar{w}_0^2$ が二重項。

17.8 (p.300) **式 (17.39) で (3000) や (1200) は?**

(3000) などは収差に寄与しない。

17.9 (p.301) **収差の名前の付け方?**

収差の名称について、式 (17.40) の第 3 項、軸上コマは原点から一方向に伸びる収差であることからその名前となった。第 2 項と第 4 項は、2 重非点収差や 3 重非点収差は、非点で式 (16.8) によりそれぞれ $m=2,\ m=3$ に対応することからその名前が付いた。第 1 項の、偏向は w_a によらないズレなのでその名が付いた。

参考文献

[1] 裏　克己, 基礎電磁気学, 共立出版 (1997)
[2] 裏　克己, 進行波管の動作理論に関する研究, 学位論文 (1961) 付録 B
[3] W. Glaser, Elecktronen-Ionen Physik, Handbuch d. Physik, XXXIII, Springer (1956)
[4] P. W. Hawkes and E. Kasper, "Principal of electron optics" Vol. 1, Academic Press, London (1989)
[5] G. H. Jansen, Adv. Electronics and Electron Physics, Suppl, **21**, Chap. 11, Academic Press, London (1989)
[6] 森口繁一, 宇田川銈久, 一松信, 岩波数学公式 I, 岩波書店 (1992)
[7] 森口繁一, 宇田川銈久, 一松信, 岩波数学公式 II, 岩波書店 (1992)
[8] 森口繁一, 宇田川銈久, 一松信, 岩波数学公式 III, 岩波書店 (1991)