輪講会での質疑応答 (2011 年 3 月 27 日追加修正分のみ)

(2012 年 2 月 20 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.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。

3.1 (p.22)(3.28) **式の A_i は面積?**

No. 面積ではなくある定数。

3.2 (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.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。

4.2 (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

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

とし、式 (4.61) から出る。

4.3 (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。

4.4 (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。

4.5 (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。

4.6 (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。

4.7 (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。

4.8 (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。

4.9 (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。

4.10 (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。

4.11 (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) **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。

5.2 (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。

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

yes.

5.4 (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。

5.5 (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?

5.6 (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。

5.7 (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。

5.8 (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。

5.9 (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。

5.10 (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。

5.11 (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。

6.1 (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。

6.2 (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。

6.3 (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。

6.4 (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。

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

6.5 (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。

6.6 (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。

6.7 (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。

6.8 (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。

6.9 (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.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。

7.3 (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。

7.4 (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。

7.5 (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。

7.6 (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。

7.7 (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.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。

8.2 (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。

8.3 (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。

8.4 (p.128) 式 (8.31) の r_c は何?

陰極でのビーム半径。図 8.18 参照。

9.1 (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.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。

10.2 (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)

10.3 (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.

10.4 (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。

10.5　(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。

10.6　(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.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。

11.3　(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。

11.4　(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。

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.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、

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

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

16.1　(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。

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.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。

17.3　(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。

17.4　(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)