

GPTによる円柱ビームの計算結果(その2)

山本昌志*

2007年1月30日

概要

第一回目の報告では、ビームの半径とパルス幅の計算が水野さんが示した方法と異なっていました。同じ計算に直しました。

1 計算方法

General Particle Tracer(GPT) を使って、ベンチマークテストで課せられたビームの挙動を計算しました。シミュレーションおよび解析の条件は、可能な限り WEB ページに示されたとおりにしました。まとめると、表1のようになります。

ここでのシミュレーションで重要なことは空間電荷効果の取扱いでしょう。GPT の場合、つぎの3とおりの方法で空間電荷効果を計算できます。

- *2D point-to-circle* マクロパーティクルをリングと考えて、リング間の力を計算する。たぶん、二次元問題ではこれを使うべきだろう。
- *2D point-to-ray* 使ったことがないので、よく分からない。加速が無ければ、これが良いかも???
- *3D point-to-point* 三次元に分布するマクロパーティクルの任意の2つの粒子に働く力を全て計算する。計算時間がかかる。
- *3D particle-in-cell* 三次元のマクロパーティクルの重心系に乗った空間のメッシュに区切り、ポアソン方程式を計算して力を求める。

ここの課題のシミュレーションには、*3D particle-in-cell* を使いました。いずれ、三次元の問題も関わってくる可能性もあることと、多くの粒子数で計算できるからです。また、三次元であれば解析も容易と考えたからです。

しかし、今回の課題のうち、 $\phi = 1\text{mm} \times L = 200\text{mm}$ のような細長いビームには *3D particle-in-cell* は適さない可能性があることが分かりました。計算を行ってみると、 $L = 200\text{mm}$ の計算のとき”No convergence in Poisson solver”とメッセージが出ました。バッチで計算させて、翌朝、このメッセージに気づきました。

空間電荷効果を計算するときのオプションをきっちり指定すれば、細長いビームでもポアソン方程式を収束させることはできると考えています。今回はエラーがあるかもしれませんが、このまま報告させていただきます。

*国立秋田工業高等専門学校 電気情報工学科

表 1: GPT での計算のパラメーターと定義

粒子数	100000 個
初期粒子分布	x, y, z 方向にユニフォーム . $-1.5 \text{ mm} \leq z \leq 1.5 \text{ mm}$. あるは $-100 \text{ mm} \leq z \leq 100 \text{ mm}$
ビーム半径	$2\sigma_x$
パルス幅	$2\sqrt{3}\sigma_z$
ΔE	$\sigma_E / \langle E \rangle$
エミッタンス	$\langle \gamma \rangle \langle \beta \rangle \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$

今後の参考のために, GPT のインプットを以下に示しておきます. 計算結果の解析—エネルギー拡がりやエミッタンス等—等は, GPT の標準のものは使いませんでした. このベンチマークテストの定義に合うように, GPT のトラッキングの結果を解析するプログラム—GDFA—に新たに C 言語で作成したオリジナルな関数を追加しました.

```
#=====
# free space simulation 2007.01.25 yamamoto@akita-nct.jp
#=====
# ----- global parameters -----
MeV = 1.0e+6;
nC = 1.0e-9 ;
ps = 1.0e-12; ns = 1.0e-9 ;
mm = 1.0e-3;

# ----- electron beam -----
N= 100000;
charge = -1*nC;
PulseWidth = 3*mm;
R = 0.5*mm;
E0 = 0.5*MeV;
dE=0.0;

G=1-qe*E0/(me*c*c);
dG=-qe*dE/(me*c*c);

setparticles("beam", N, me, qe, charge);
setzdist("beam", "u", 0, PulseWidth);
setrxydist("beam","u", R/2, R);
setphidist("beam","u", 0, 2*pi);
setGdist("beam","u", G, dG);

# ----- simulation start -----

spacecharge3Dmesh("BoundaryOpen");

tout(0*ns,4*ns,0.02*ns);
```

2 計算結果

2.1 ビームの半径

図 1-4 に初期のパルス幅が 3 [mm] , 図 5-8 に初期のパルス幅が 200 [mm] のパンチの半径を示します . ビームの半径 r は , 標準偏差の 2 倍です . 横軸の z は , パンチの重心の z 方向ポジションです .

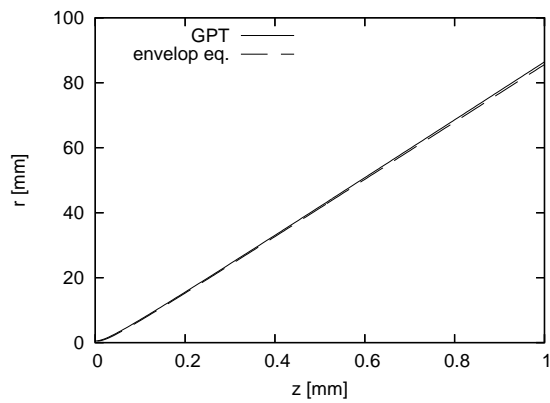


図 1: $L=3$ [mm] $E_0=0.5$ [MeV]

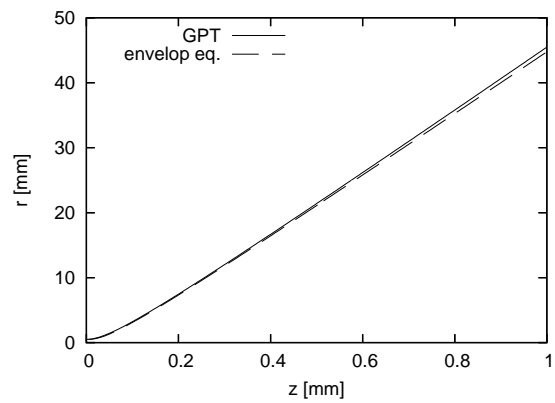


図 2: $L=3$ [mm] $E_0=1.0$ [MeV]

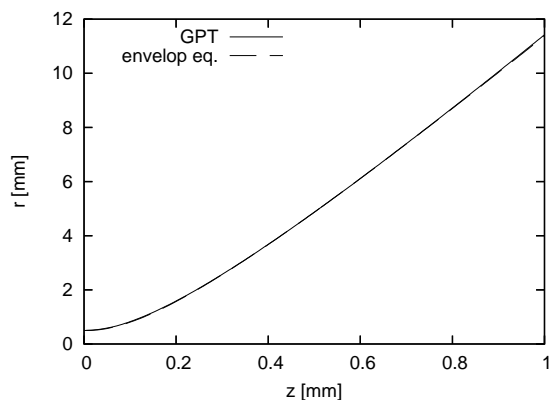


図 3: $L=3$ [mm] $E_0=3.0$ [MeV]

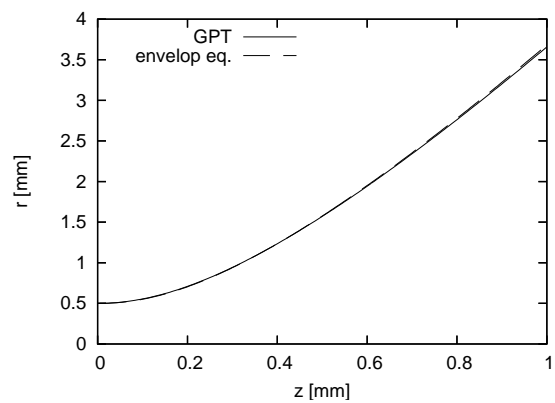
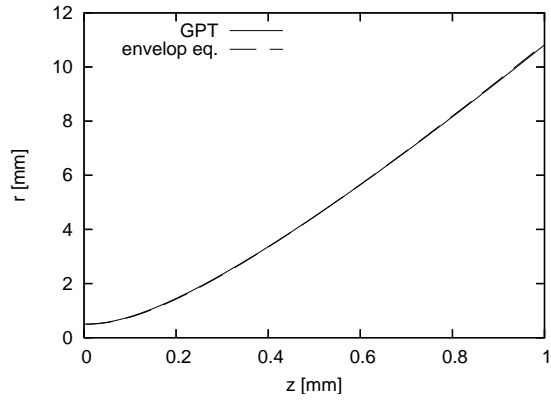
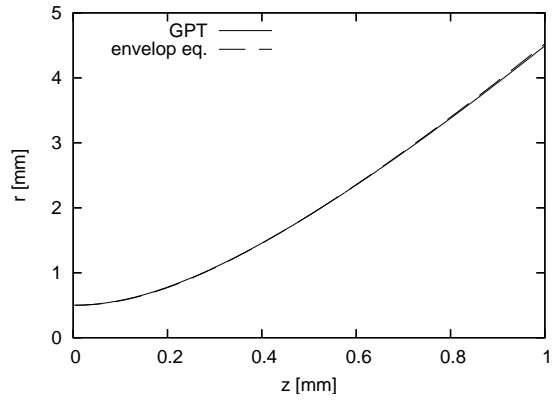


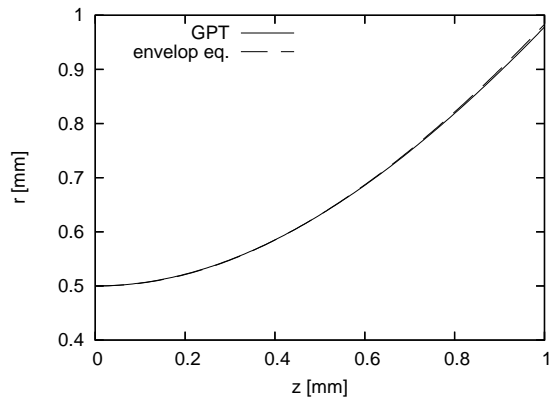
図 4: $L=3$ [mm] $E_0=6.0$ [MeV]



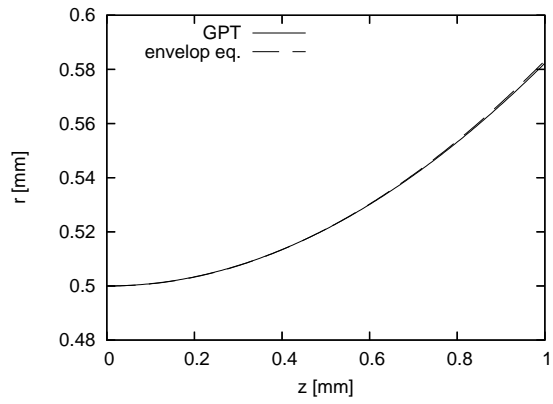
⊗ 5: $L=200$ [mm] $E_0=0.5$ [MeV]



⊗ 6: $L=200$ [mm] $E_0=1.0$ [MeV]



⊗ 7: $L=200$ [mm] $E_0=3.0$ [MeV]



⊗ 8: $L=200$ [mm] $E_0=6.0$ [MeV]

2.2 パルス幅

図 9–12 に初期のパルス幅が 3 [mm] , 図 13–16 に初期のパルス幅が 200 [mm] のパンチ長を示します . パンチ長 L は , z 分布の標準偏差の $2\sqrt{3}$ 倍の値です . 横軸は z は , パンチの重心の z 方向ポジションです .

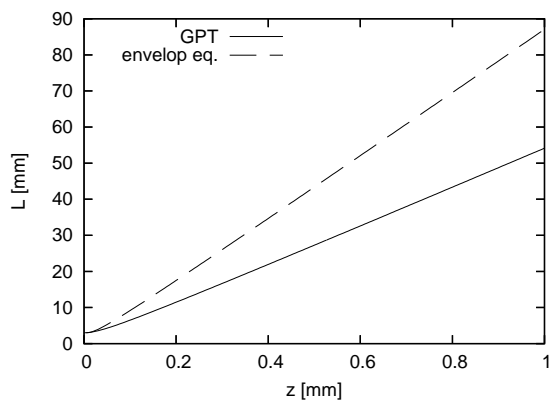


図 9: $L=3$ [mm] $E_0=0.5$ [MeV]

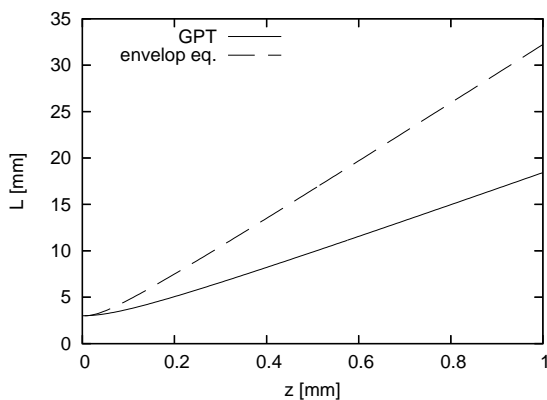


図 10: $L=3$ [mm] $E_0=1.0$ [MeV]

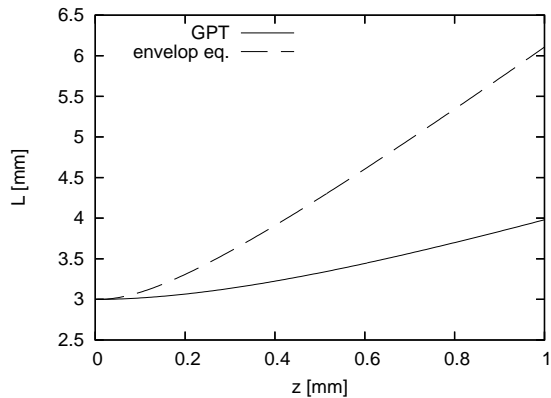


図 11: $L=3$ [mm] $E_0=3.0$ [MeV]

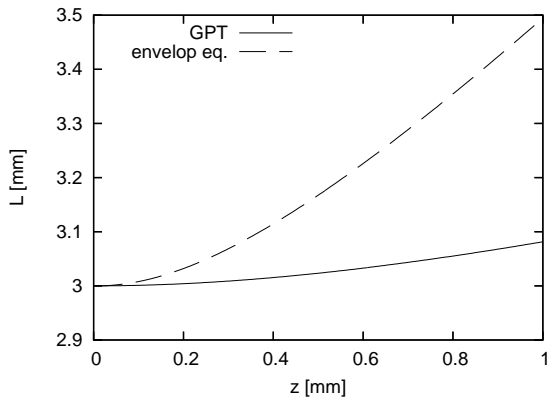
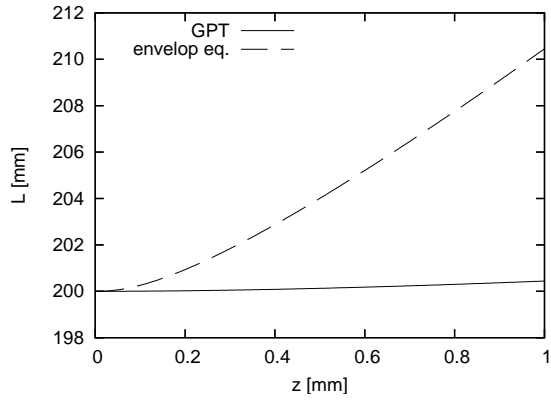
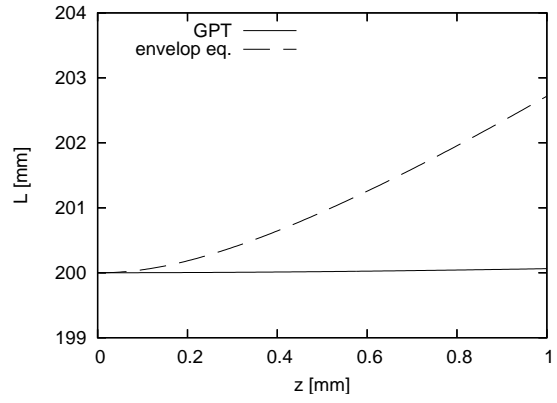


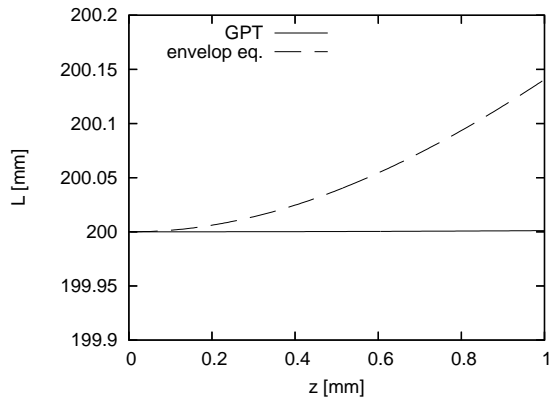
図 12: $L=3$ [mm] $E_0=6.0$ [MeV]



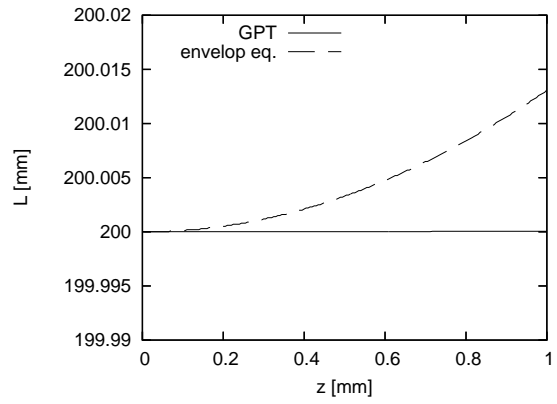
⊠ 13: $L=200$ [mm] $E_0=0.5$ [MeV]



⊠ 14: $L=200$ [mm] $E_0=1.0$ [MeV]



⊠ 15: $L=200$ [mm] $E_0=3.0$ [MeV]



⊠ 16: $L=200$ [mm] $E_0=6.0$ [MeV]

2.3 エネルギー幅

エネルギー幅は，水野さんが示された定義にしたがっています．水野さんの結果の単位がパーセントとなっていたので，平均のエネルギーで割った

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{100}{\langle E \rangle} \times \sqrt{\frac{\sum_n^N (E_n - \langle E \rangle)^2}{N}} \quad (1)$$

としました．

結果は，以下の図のとおりです． $L=3$ [mm] の場合は，水野さんの結果とよく一致しています．しかし， $L=200$ [mm] の場合は全く異なります．ポアソン方程式が収束していないことが原因か？

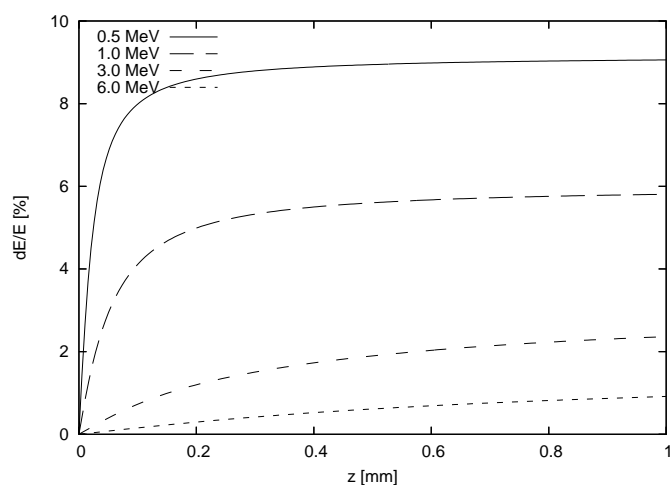


図 17: $L=3$ [mm] のときのエネルギー広がり σ_E/E .

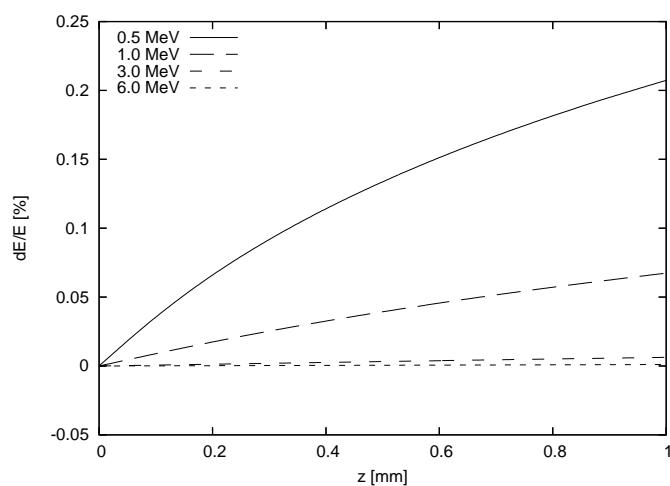


図 18: $L=200$ [mm] のときのエネルギー広がり σ_E/E .

2.4 エミッタンス

エミッタンスの定義も水野さんの計算と同じ

$$\varepsilon_x = \langle \gamma \rangle \langle \beta \rangle \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2} \quad (2)$$

のとおりです。ただし、 $x' = \beta_x / \beta_z$ としています。

これもまた、 $L=3$ [mm] のときは、水野さんの計算とよく一致してます。いっぽう、 $L=200$ [mm] の場合は全く異なります。これもまた、ポアソン方程式の収束が悪いからかもしれません。

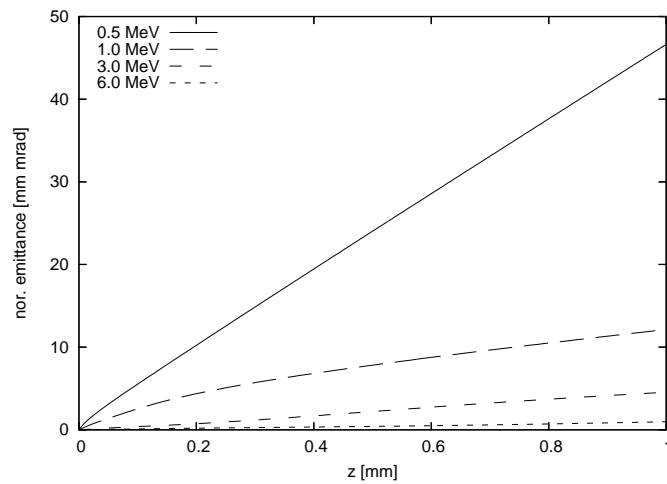


図 19: $L=3$ [mm] のときのエミッタンスの変化。

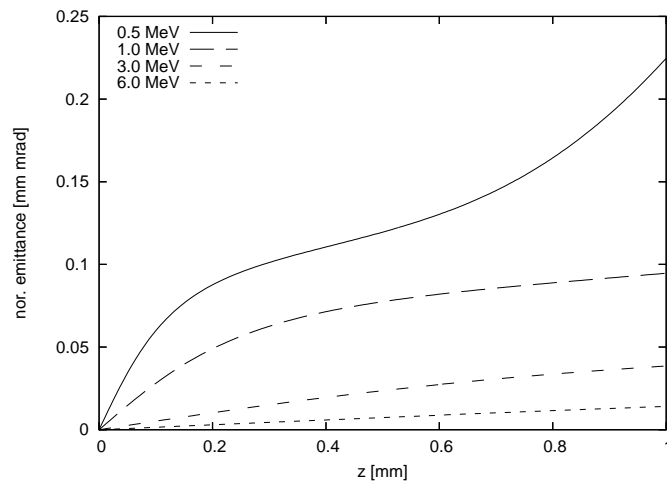


図 20: $L=200$ [mm] のときのエミッタンスの変化。

3 まとめ

結果が揃っており、また同じ定義を使っているので、水野さんの計算結果—エンベロープ方程式ではない—との比較を表2に示します。定量的な評価になっていませんが、ご容赦願います。

表 2: 水野さんの計算結果との比較

パラメーター	L=3[mm]	L=200[mm]
ビーム半径	一致している。	一致している。
パルス幅	一致している	比較できない。
エネルギー拡がり	一致している。	かなり異なる。
エミッタンス	一致している	かなり異なる。

この計算を進める過程で気になったことをメモしておきます。

- エンベロープ方程式は、本当に正確なのか？ 導出過程をながめると、ここでシミュレーションしたビームとかなり異なるように思えますが—いかがでしょうか？
- 細長いビームの場合、GPT ではポアソン方程式が収束しない場合がある。正直、これにはびっくりしましたが、なんとか改善しなくてはならないと考えています。ここでの $L=200$ [mm] の GPT の結果は怪しいかもしれません。
- エミッタンスの定義をそろえることは大事。GPT に元々備わっているエミッタンスの定義とここでのエミッタンスの定義がちょっと異なる。低エネルギーではその差が顕著に現れる。