

# フォトカソードRF電子銃ライナックにおける PARMELAを用いたシミュレーション



阪大産研 ○菅晃一、  
楊金峰、近藤孝文、吉田陽一

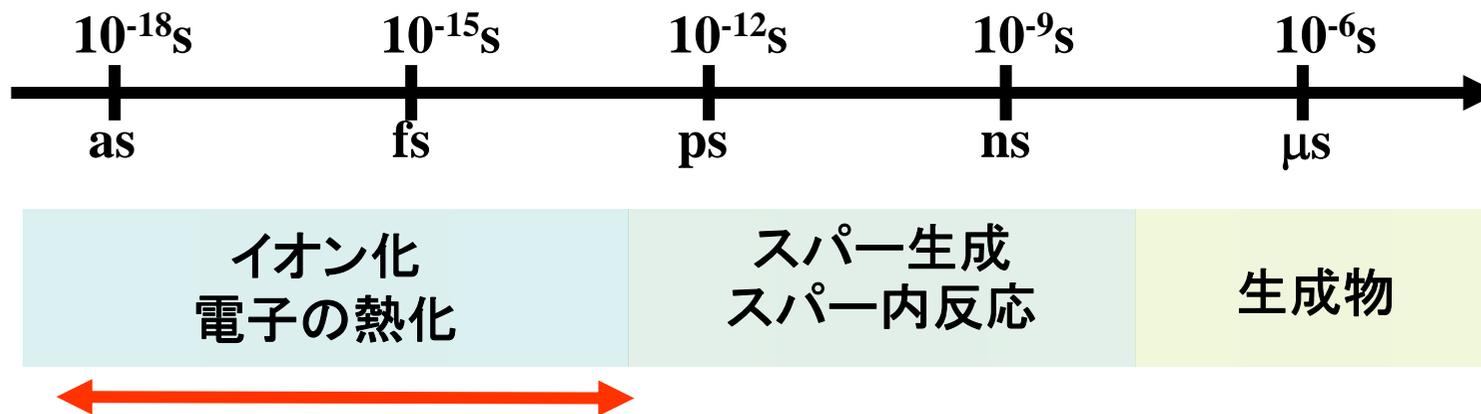
2006年12月7、8日  
高輝度電子銃シミュレーション研究会  
@京都大学

# 概要

1. シミュレーションの目的
  - シミュレーションの目的
  - フォトカソードRF電子銃ライナックの構成
2. シミュレーションのについて
  - PARMELAのバージョン
  - S-C meshの決定法
3. フェムト秒電子バンチ発生シミュレーション
  - パルス圧縮の代数的計算
  - パルス圧縮のシミュレーション
4. まとめ

# 1.シミュレーションの目的

# シミュレーションの目的



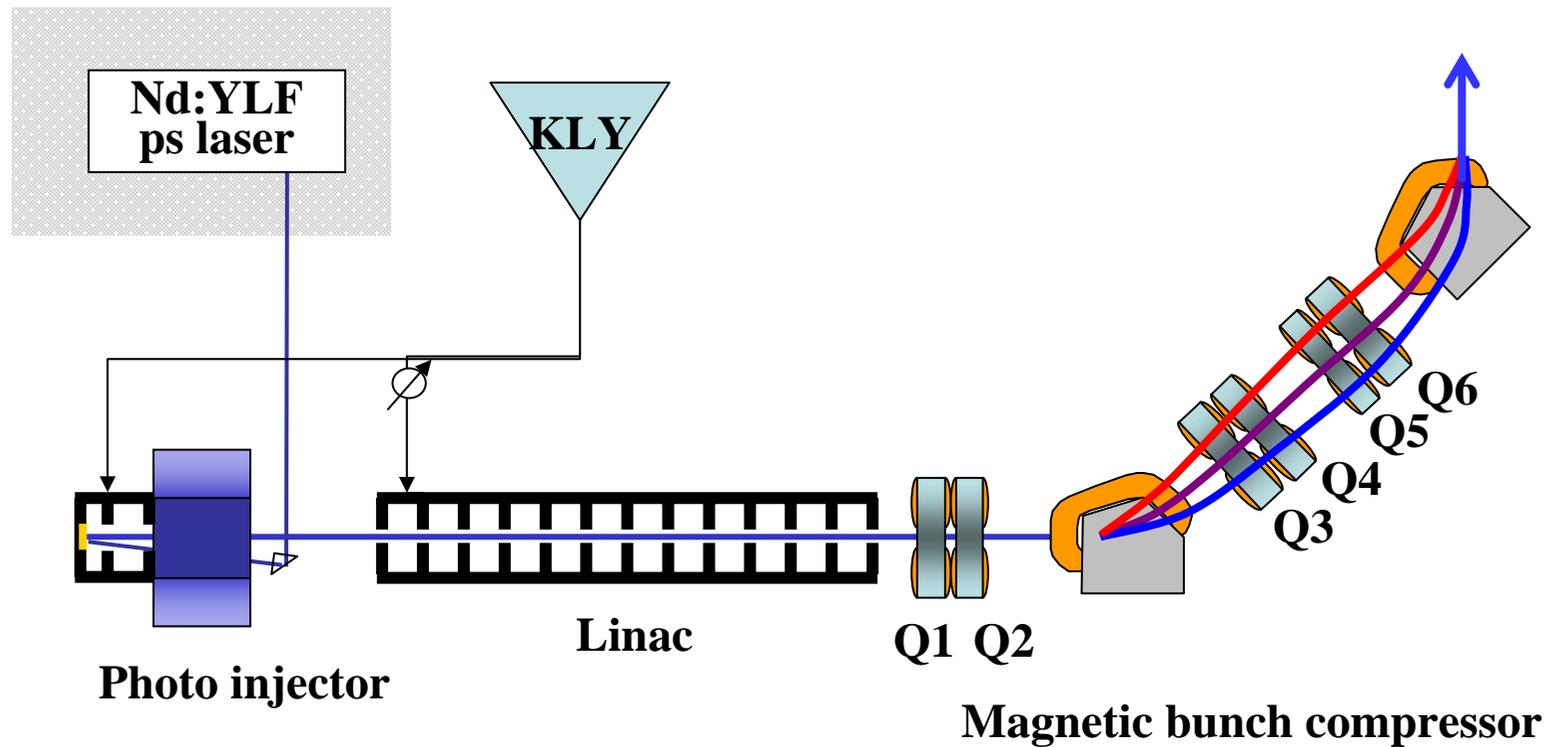
## フェムト秒パルスラジオリシスによる 超高速反応の解明

現在98フェムト秒の電子線パルス発生に成功しているが、  
パルスラジオリシスの時間分解能向上のために、  
さらにパルス幅の短い電子パルスを発生する必要がある。



超短パルス電子線発生を目的としてPARMELAを用いた  
シミュレーションを行った。

# フォトカソードRF電子銃ライナックの構成

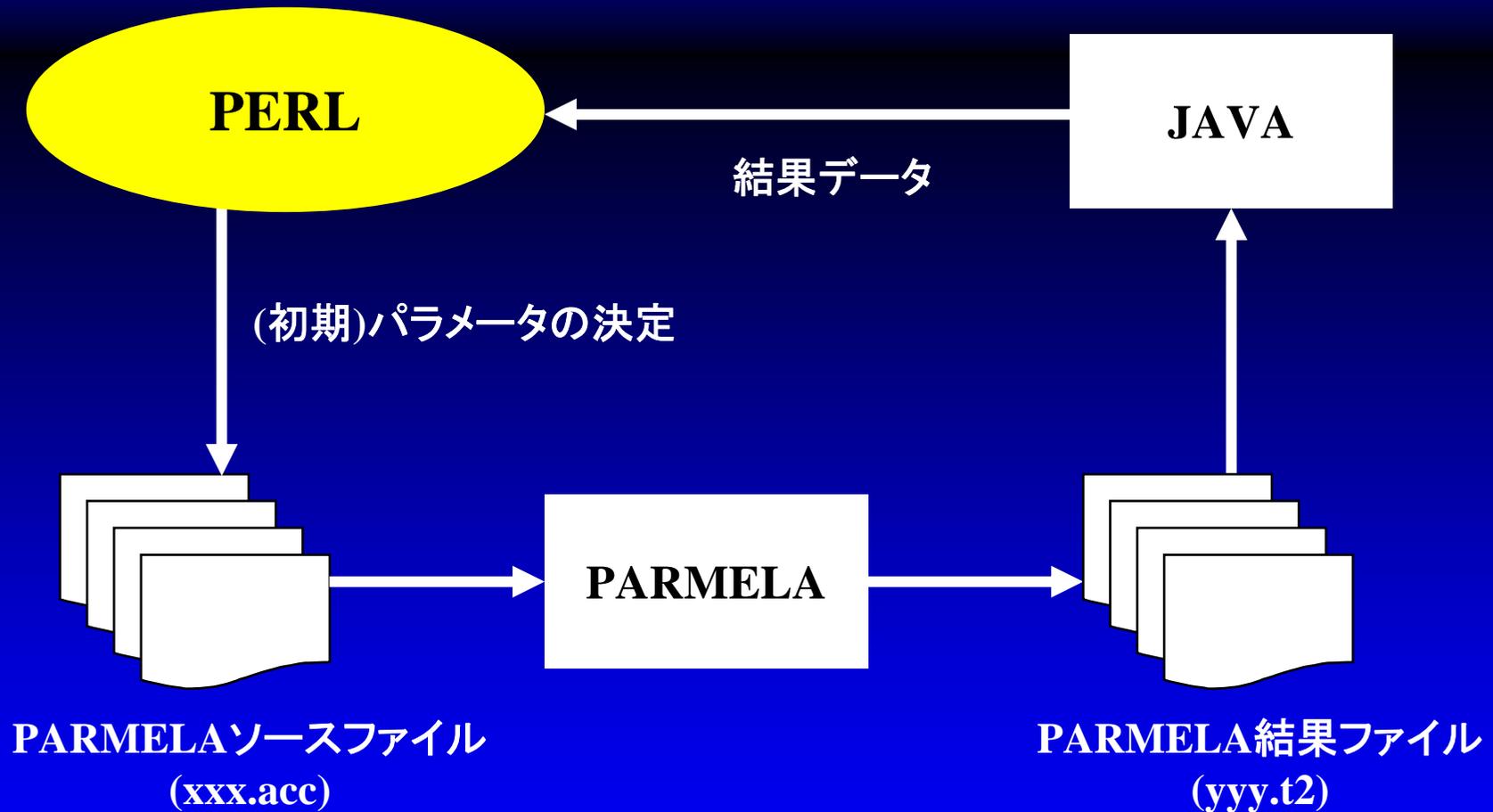


## パラメーター一覧

- 初期パルス波形 ( $s_r, r_{max}, s_{phi}, phi_{max}$ )
- 電子銃加速位相 ( $\phi_g$ )
- 加速管加速位相 ( $\phi_l$ )
- 偏向電磁石磁場 ( $B_{bend}$ )
- 四極電磁石 (Q1-Q6)

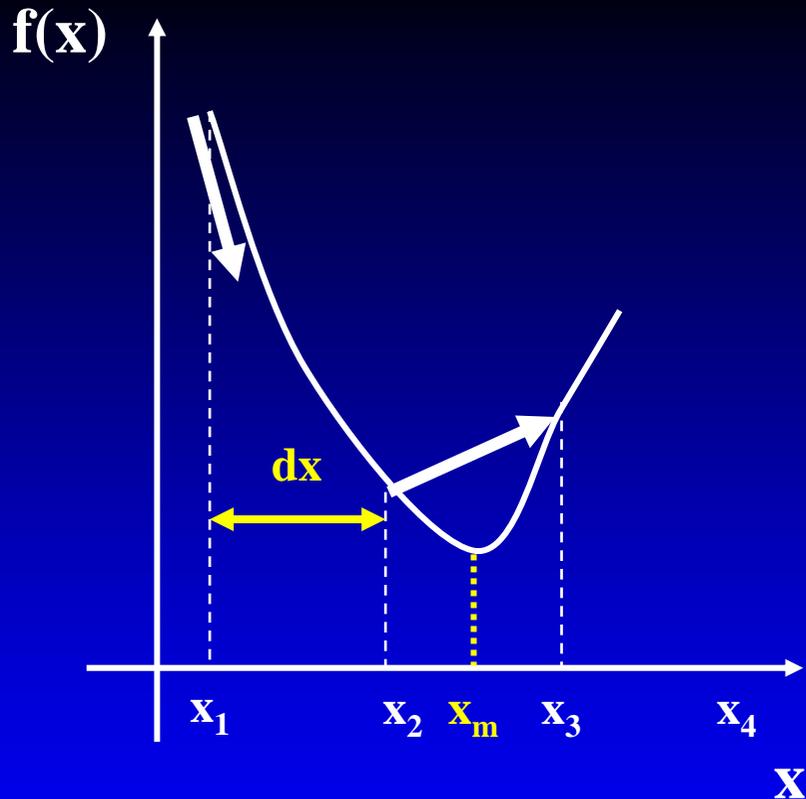
## 2.シミュレーションについて

# パラメータ探索方法



PERLによるパラメータ探索の自動化

# パラメータ探索方法(線形探索)



最小値 $f(x_m)$ を求めるために...

まず初期値 $x_1$ を定め、 $f(x_{1m})$ を求める。  
 $f'(x_{1m})$ により探索方向を定める。

$x_2 = x_1 + dx$ として $f(x_2)$ を求める。

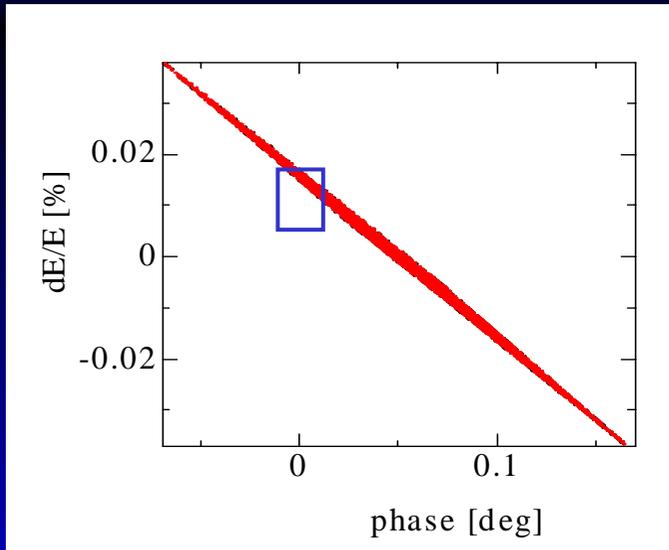
$x_3 = x_2 + dx$ として $f(x_3)$ を求める。

$f(x_2) < f(x_3)$ のため、 $f(x_2)$ が最適値。



$dx$ (刻み幅)を小さくし、  
上記のような手順を繰り返し、  
最小値を求める。

# PARMELAのバージョンについて



加速管出口における  
縦方向位相空間分布

シミュレーション条件

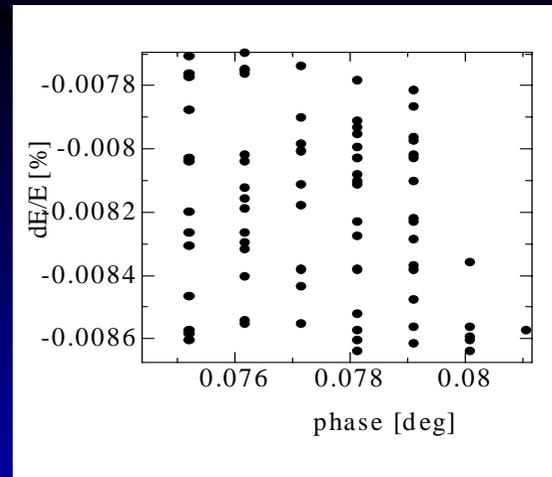
Charge: 1 fC

Initial: 200 fs flat-top

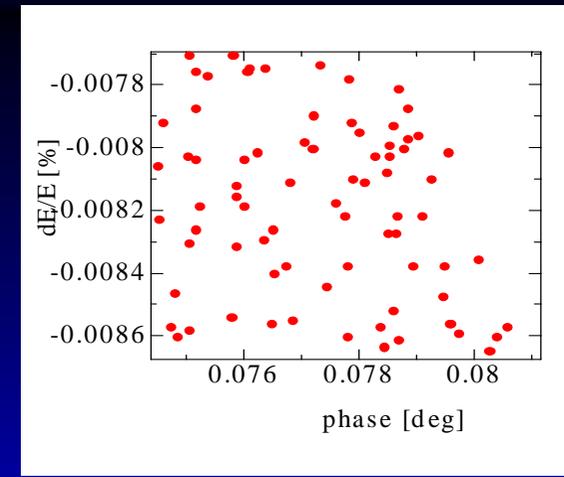
Longitudinal mesh: 10 fs

Gun: 30 degree

Linac: 101 degree



Version-3.30



Version-3.24

Version 3.30では位相プロットが離散的。

離散の間隔:  $0.001 \text{ deg} \doteq 1 \text{ fs}$

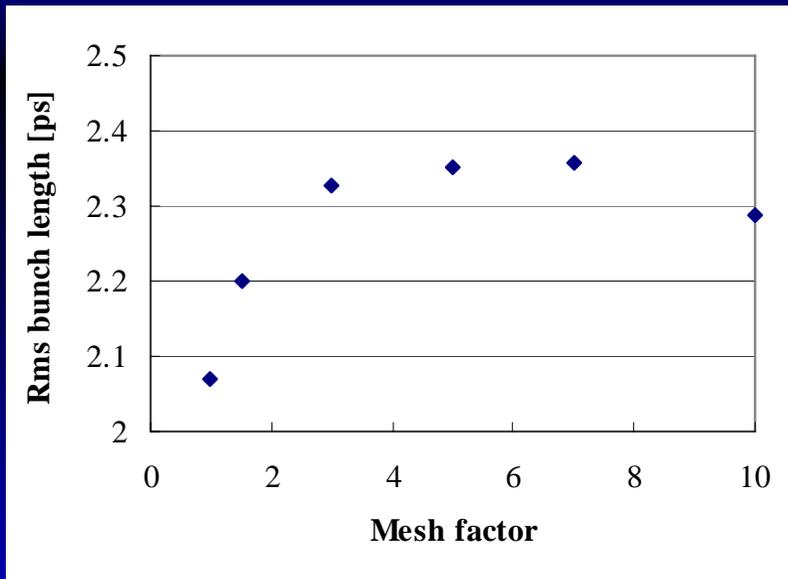


短パルス幅(<1fs)のシミュレーションに問題あり。

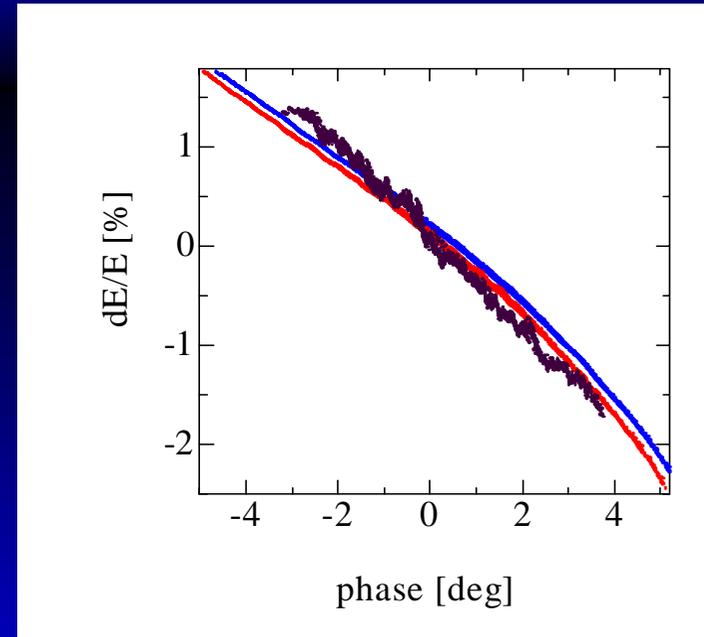


PARMELA Version 3.24を用いた。

# Space charge effect mesh の決定



mesh factorとパルス幅の依存性



- mesh factor=5
- mesh factor=10
- mesh factor=30

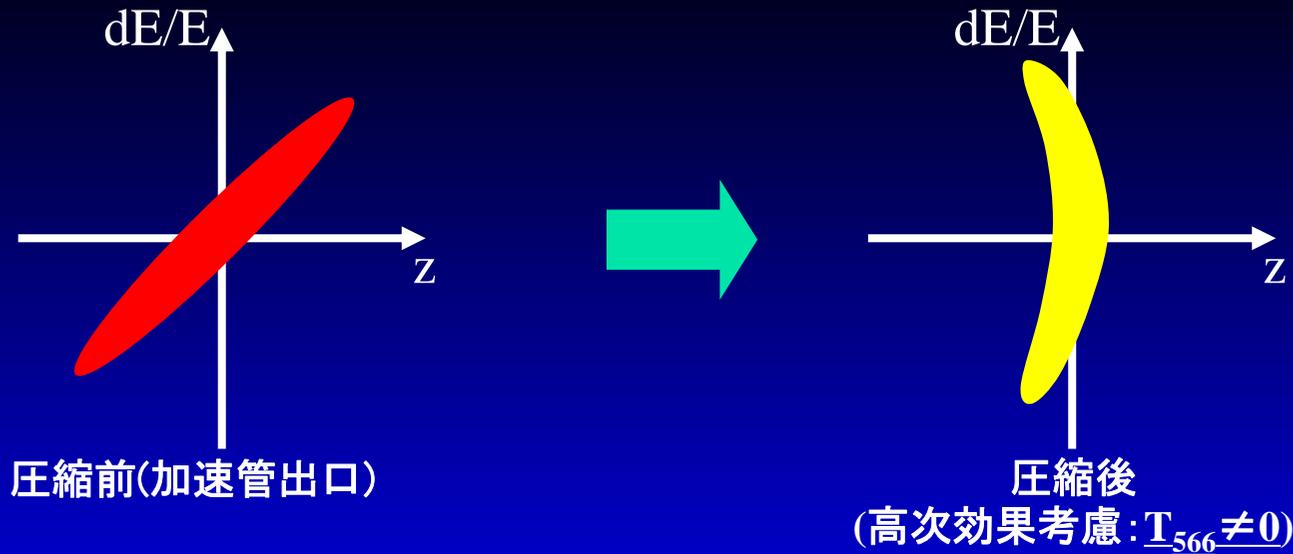
径、軸方向メッシュサイズ  
径方向サイズ=rmsビーム径/mesh factor  
軸方向サイズ=rmsパルス幅/mesh factor

シミュレーション条件  
Charge:500 pC  
Initial: 1ps flat-top  
Gun: 30 degree  
Linac: 291 degree

計算ノイズが出ない、  
ある程度細かいメッシュである  
mesh factor 10 を採用。

### 3. フェムト秒電子バンチ発生 のシミュレーション

# 位相空間分布の変換



$$z_f \approx z_0 + R_{56} \left( \frac{\Delta E}{E} \right) + T_{566} \left( \frac{\Delta E}{E} \right)^2 \quad (1)$$

左式のように、圧縮後の位相空間分布は  
圧縮前の位相空間分布の写像となり、  
Transfer Matrixから得られる  
 $R_{56}$ 、 $T_{566}$ により求めることができる

# 加速管でのエネルギー変調

電子銃でのエネルギー変調を無視できるものとしたとき  
加速管出口でのエネルギーは、

$$E_0 \approx E_i + eV_l \sin(k_s z_0 + \phi_l) \quad (2)$$

$E_i$ : 電子銃出口でのエネルギー(4MeV)

$V_l$ : 加速管の電圧(31MV)

$k_s$ : s-bandRFの波数( $2\pi/\lambda_s$  (rad/mm))

$z$ : パルス中心からのずれ(mm)

$\phi_l$ : 加速管の位相(rad)

$z$ 方向の位相空間分布は上式の展開により、

$$\frac{\Delta E}{E}(z_0) \approx \frac{-eV_l k_s \sin \phi_l}{E} z_0 + \frac{-eV_l k_s^2 \cos \phi_l}{2E} z_0^2 \quad (3)$$

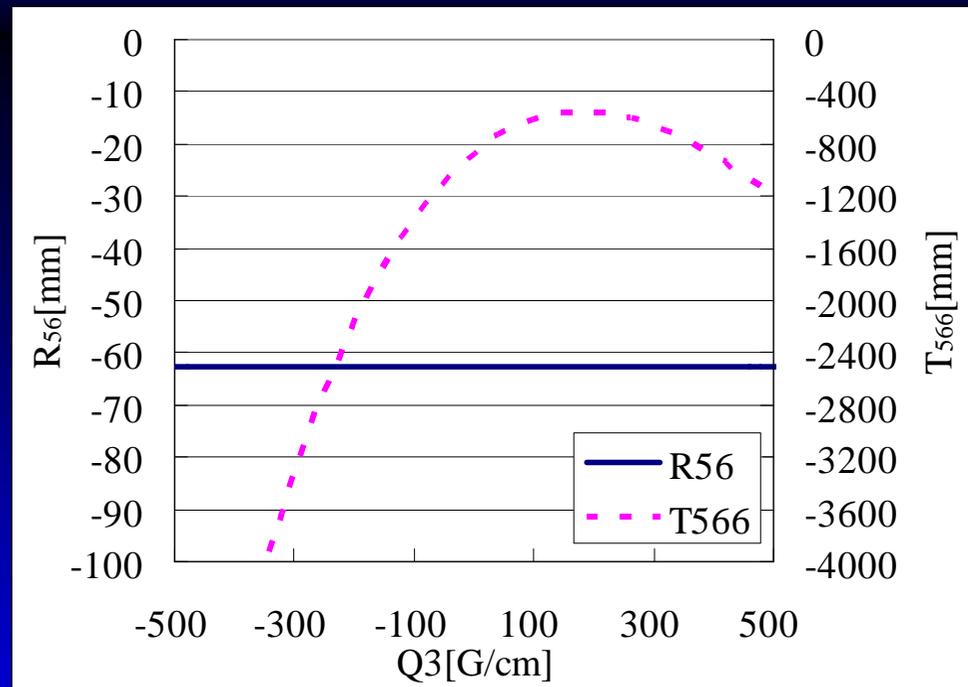
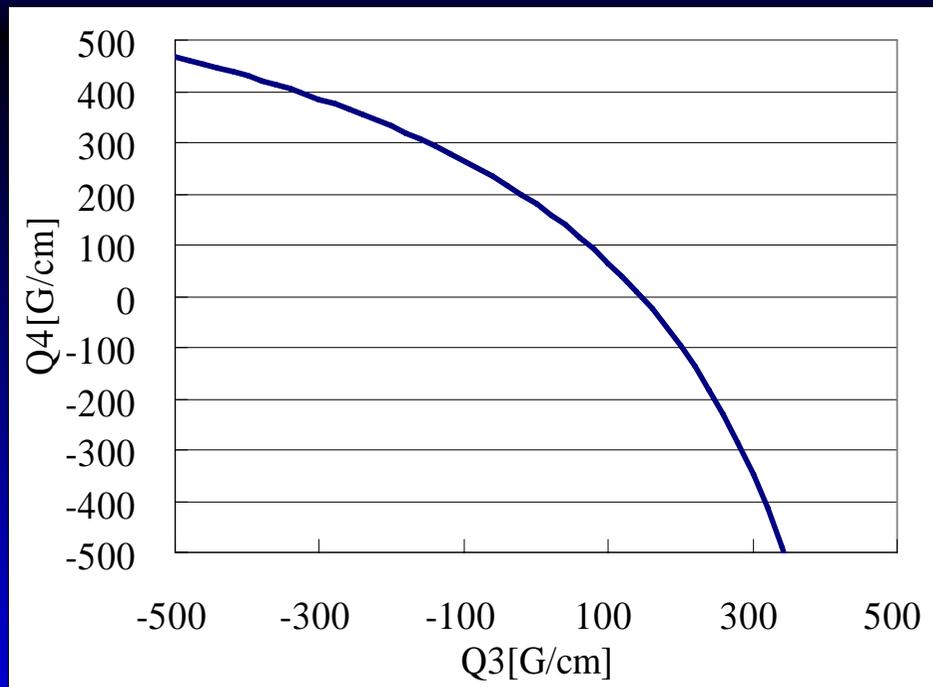
と表すことができる。

(1)、(3)式より

$$z_f \approx \left( 1 + \frac{-eV_l k_s \sin \phi_l}{E} R_{56} \right) z_0 + \left( \frac{-eV_l k_s^2 \cos \phi_l}{2E} R_{56} + \left( \frac{-eV_l k_s \sin \phi_l}{2E} \right)^2 T_{566} \right) z_0^2$$

高次効果を補正するためには第2項を小さくする必要がある。

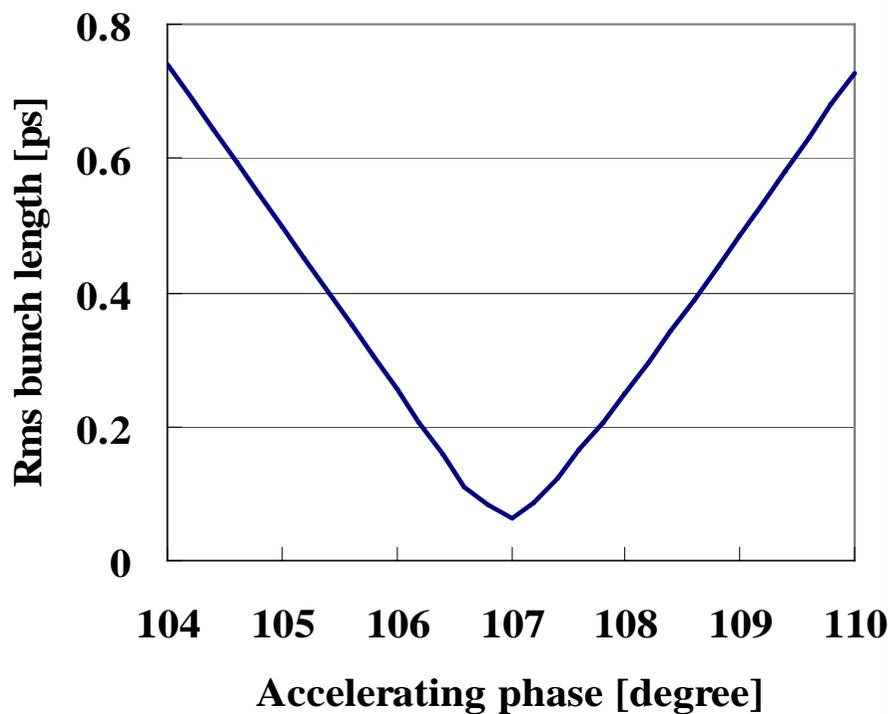
# $R_{56}$ 、 $T_{566}$ の計算 (TRANSPORTコード)



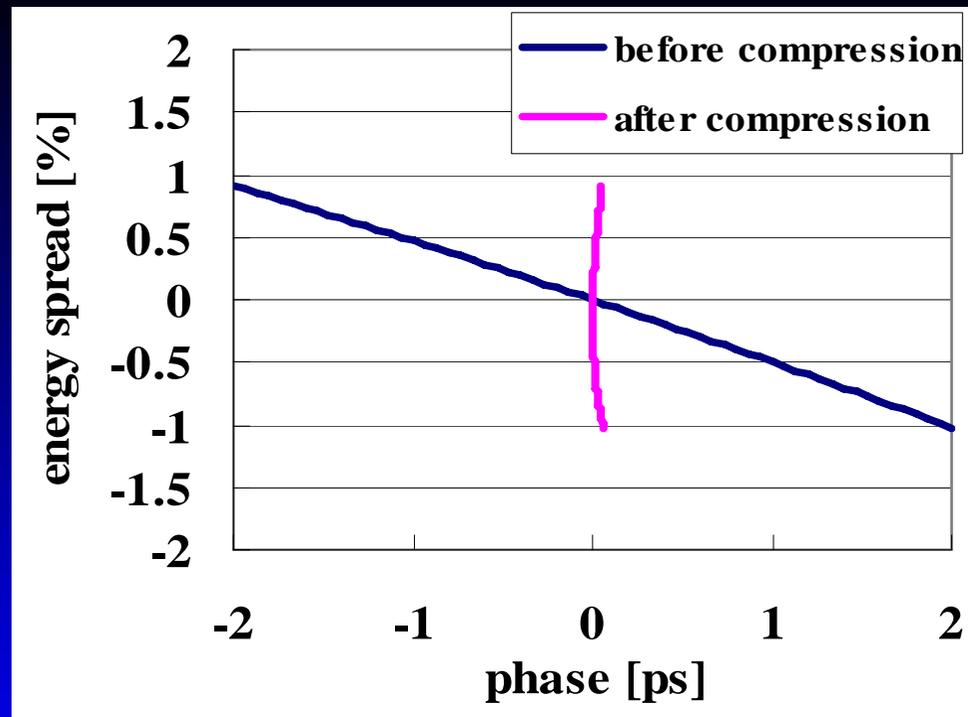
軌道の対称性から $Q3=Q6$ 、 $Q4=Q5$ とし、achromatic( $R_{16}=R_{26}=0$ )を満たすときの  
(左) $Q3$ と $Q4$ の磁場強度 (右) $R_{56}$ と $T_{566}$

- achromaticを満たすとき $R_{56}$ は一定(-62.6mm)となる。
- $Q3$ の磁場強度を変えると、 $R_{56}$ とは一定であるのに対し、 $T_{566}$ は変化し、 $Q3=180$ G/cm、 $Q4=-60$ G/cmのとき、 $T_{566}=-550$ mmと最大値をとる。

# 磁場中高次効果の影響



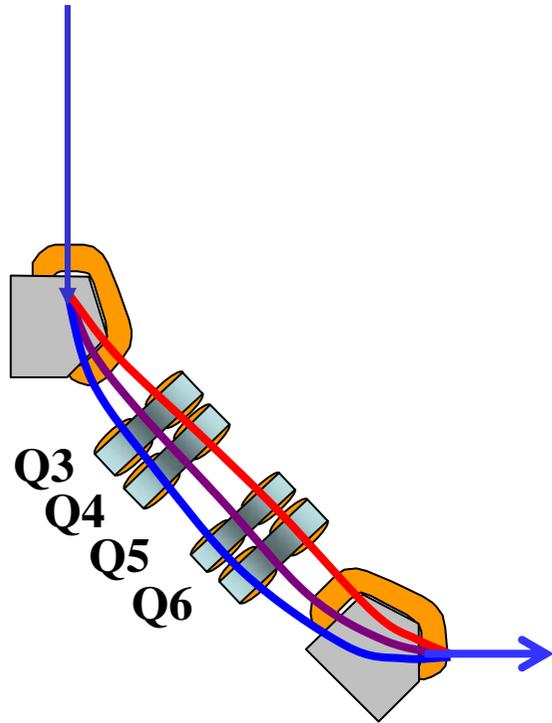
圧縮後パルス幅と加速位相の依存性



圧縮前、圧縮後の位相空間分布

加速位相により圧縮パルス幅は変化し、  
高次効果の補正を確認した。

# PARMELAによる計算手順



**Magnetic bunch compressor**

電子銃の加速位相設定



加速管の加速位相設定



Q3設定  
Q4の初期値を決める



Q4を線形探索によりachromaticとする  
(エミッタンス最小)



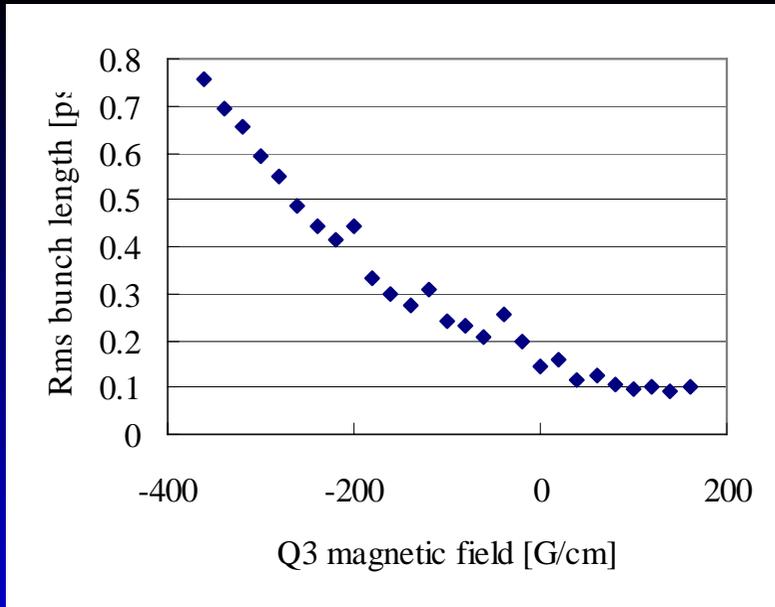
Q3最適化



加速管の位相変化させる

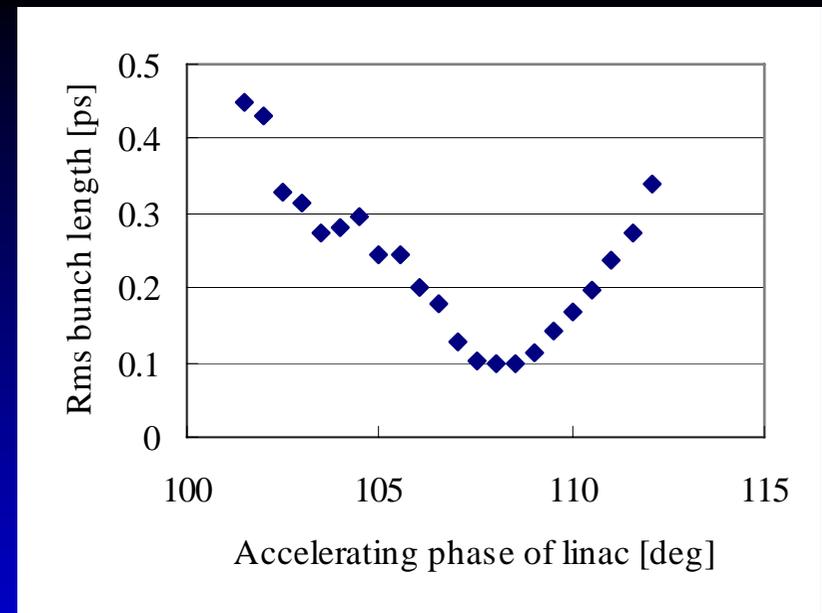


# パルス圧縮パラメータの最適化(加速管以降)



achromaticを満たすときの  
四極電磁石Q3の磁場強度とパルス幅の関係

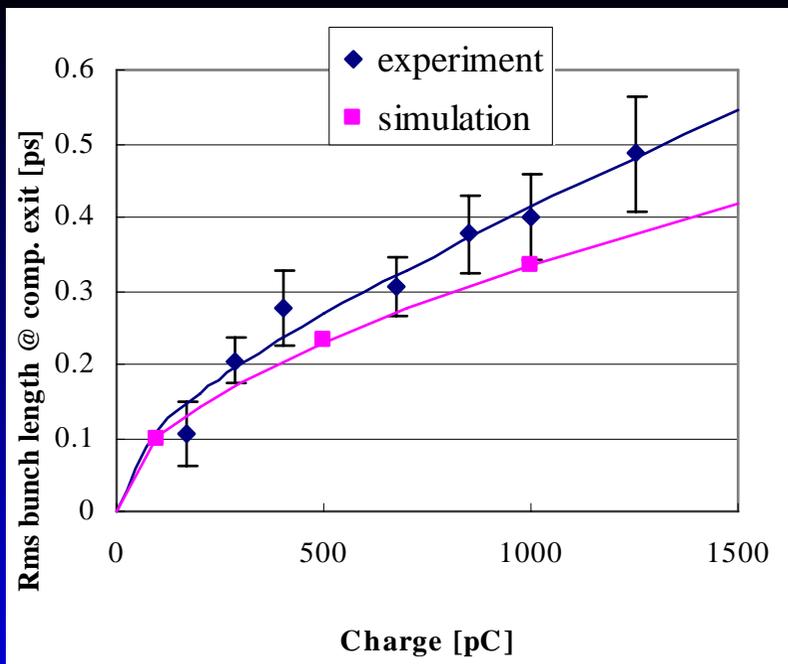
高次効果 $T_{566}$ の変化によりパルス幅は最小となる。



Q3、Q4を最適化したときの  
加速位相とパルス幅の関係

Q3、Q4を最適化した後に、加速位相の最適化が行われた。

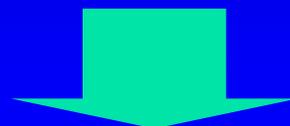
# パルス圧縮の計算



$$\sigma_z = \sqrt{aQ^2 + bQ}$$

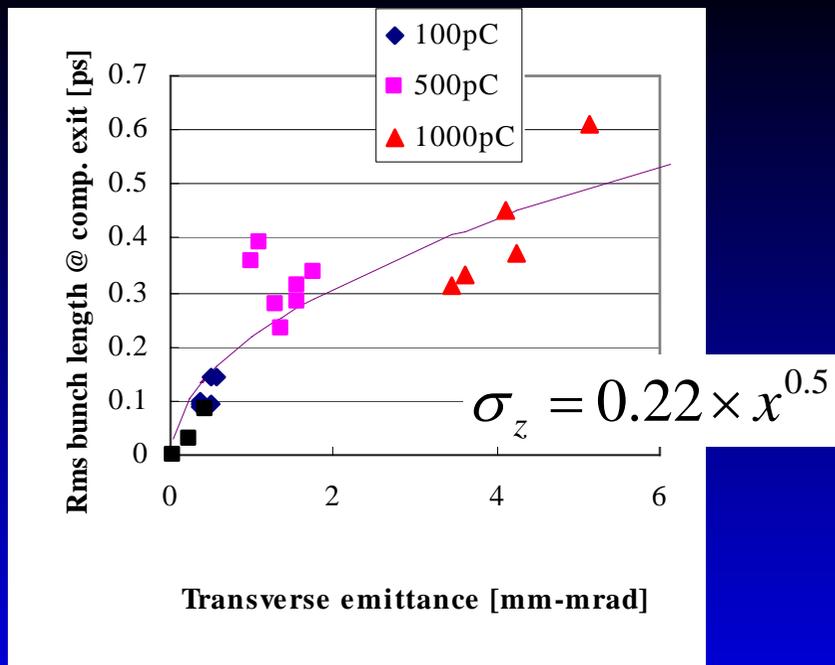
上式によりフィッティングを行った。  
また第1項は空間電荷効果  
第2項は空間電荷効果による軸方向エミッタンスにより  
表すことができると考えられる。

電子銃での加速位相が30°のときの、  
電荷量とパルス幅の関係

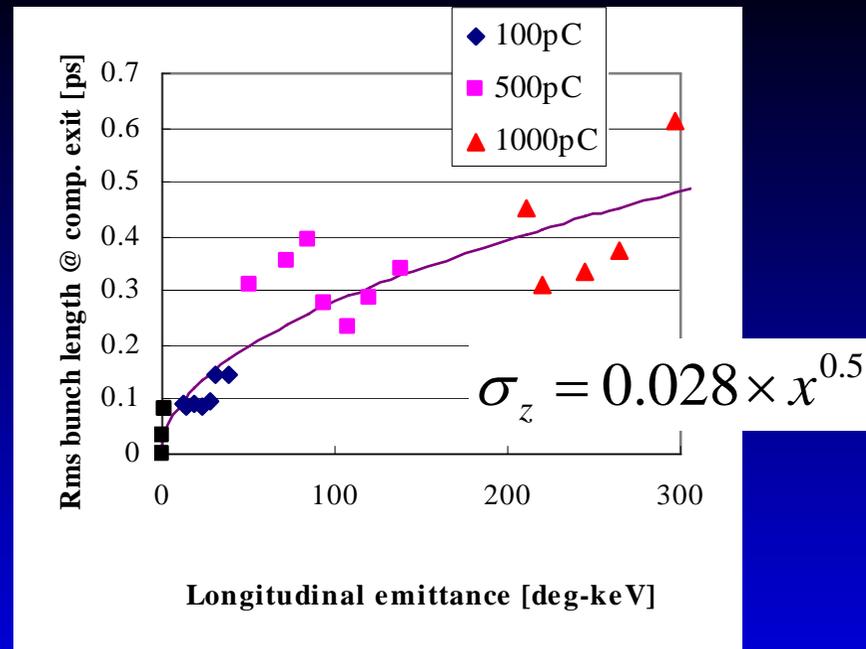


ビーム特性と圧縮後パルス幅の相関をしらべた。

# エミッタンスによるパルス幅の変化



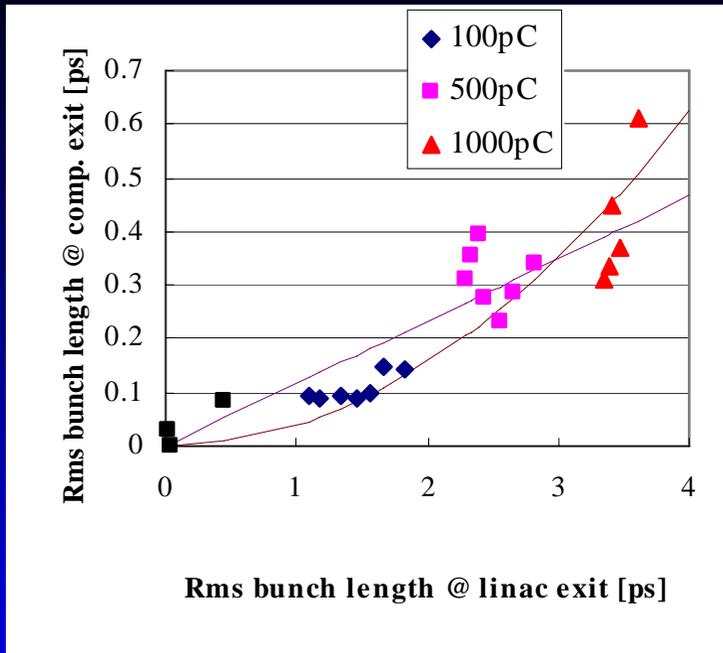
径方向エミッタンスとパルス幅の関係



軸方向エミッタンスとパルス幅の関係

軸方向、径方向エミッタンス共に圧縮後のパルス幅と相関がある。  
短パルスに圧縮するためには径、軸方向共に低エミッタンスが望まれる。

# 圧縮前後のパルス幅の変化



線形近似  $\sigma_z = 0.12 \times x$

2次近似  $\sigma_z = 0.039 \times x^2$

圧縮前後のパルス幅の関係

高電荷量になると線形近似から外れている。  
電荷量が高くなると圧縮率が低くなる(高次効果)?

# 5. まとめ

# まとめ

- フォトカソードRF電子銃ライナックにおけるPARMELAを用いたシミュレーションを行った。
  - PARMELAシミュレーションの自動化を行い、S-C meshサイズとrmsパルス幅の比は0.1になるようにした。
  - 磁気パルス圧縮器出口までのビームダイナミクスの計算を行った。
    - 磁気パルス圧縮器における高次効果の補正を検討した。
    - 圧縮パルス幅と電荷量の依存性は実験結果、シミュレーションともに同じような傾向を得ることができた。
    - 短パルスに圧縮を行うためにはエミッタンスの低減が必要である。
    - 圧縮率は一定ではなく、高電荷量になると高次効果により圧縮率は低くなる。