

# Alternate Periodic Structure空洞による ILC陽電子源の設計研究

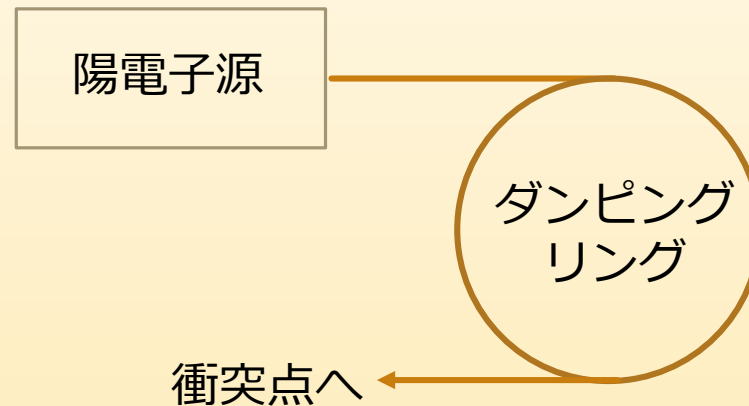
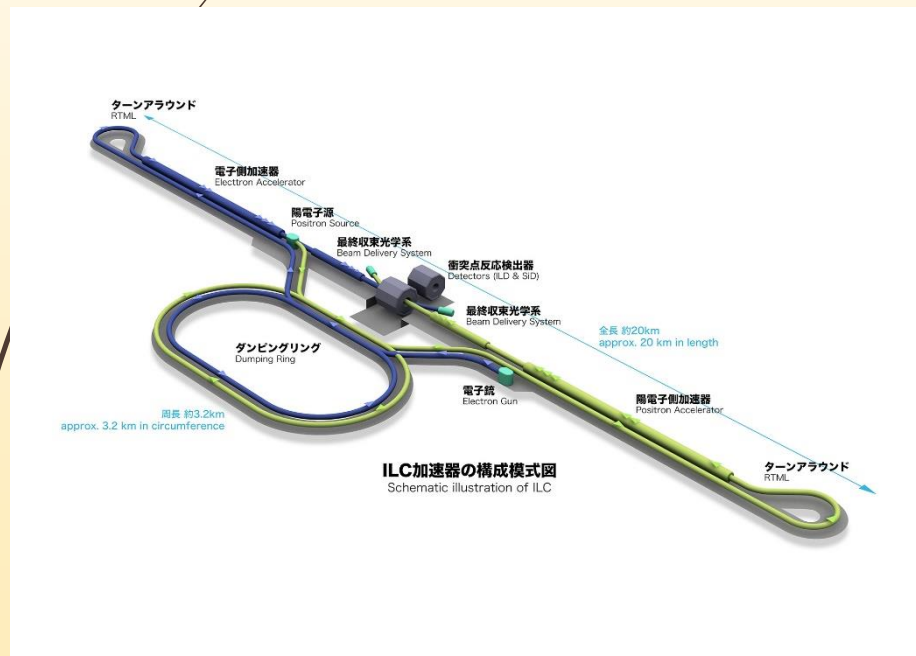
広島大学先進理工系科学研究科

加速器物理学研究室

金野舜

# ILC(International Linear Collider)

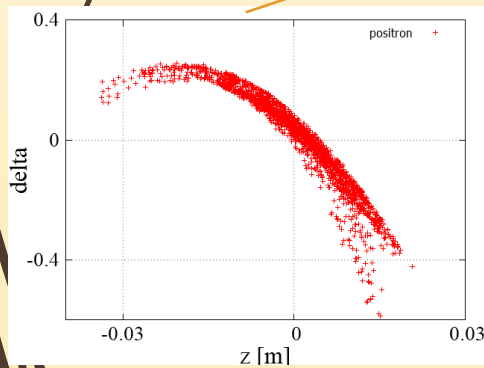
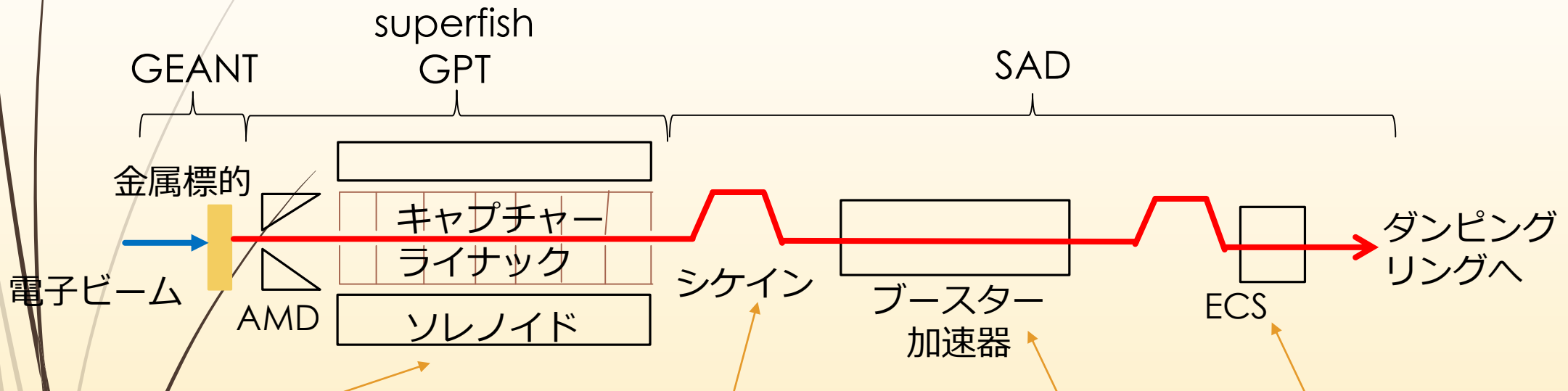
- 重心エネルギーが250GeVから1TeVの電子陽電子衝突型線形加速器
- 岩手県の北上山地に建設予定。
- ヒッグス粒子の詳細研究や超対称性粒子を含む新たな粒子の発見が期待されている。
- 衝突点を通過した粒子は再利用できないため大量の電子、陽電子が必要。



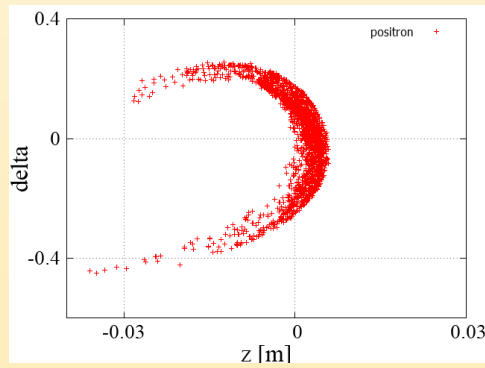
本研究では陽電子源の設計を行った。

# 電子ビーム駆動方式陽電子源の構成

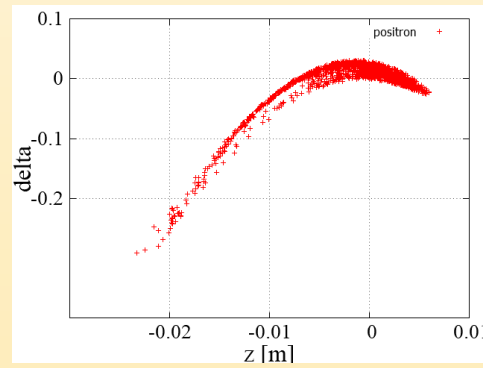
- 陽電子生成方法として電子ビーム駆動方式を採用。
- 陽電子のほかに電子も生成されてしまうため、ビームローディング電流が大きくなる。



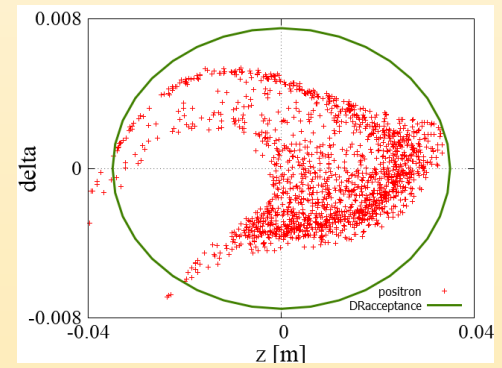
キャプチャーライナック



シケイン



ブースター加速器



ECS

# 捕獲陽電子とDRアクセプタンス

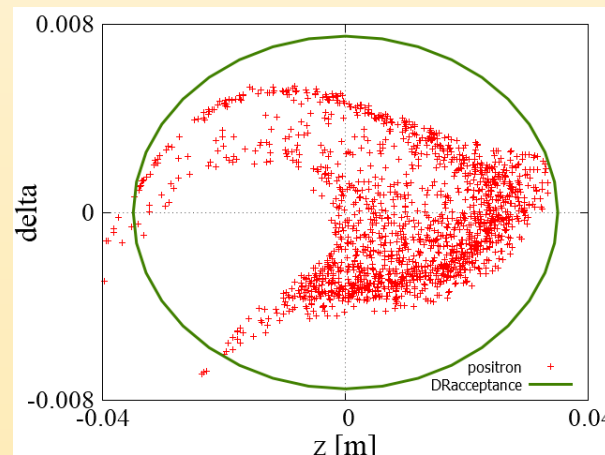
- ECS通過後、以下の条件を満たす陽電子がDRにおいて周回可能。

$$\left(\frac{z}{0.035}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{0.0075}\right)^2 < 1$$

$$\gamma A_x + \gamma A_y < 0.07$$

- 楕円の内部に存在する陽電子を捕獲陽電子として、陽電子捕獲率 $\eta$ を次のように定義する。

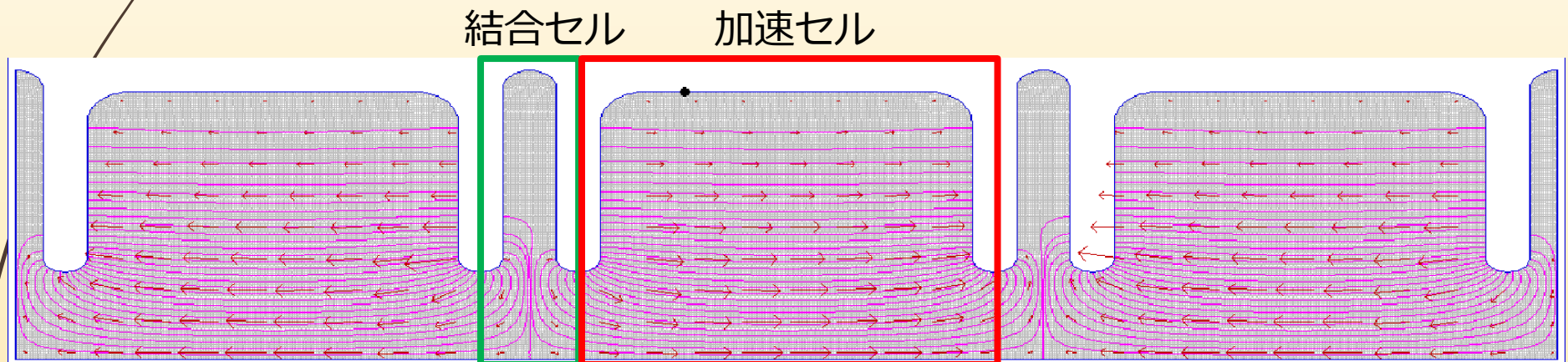
$$\eta = \frac{\text{捕獲陽電子数}}{\text{標的に入射した電子数}}$$



緑の楕円の内部が  
上式の条件を表す。

# Alternate Periodic Structure(APS)空洞

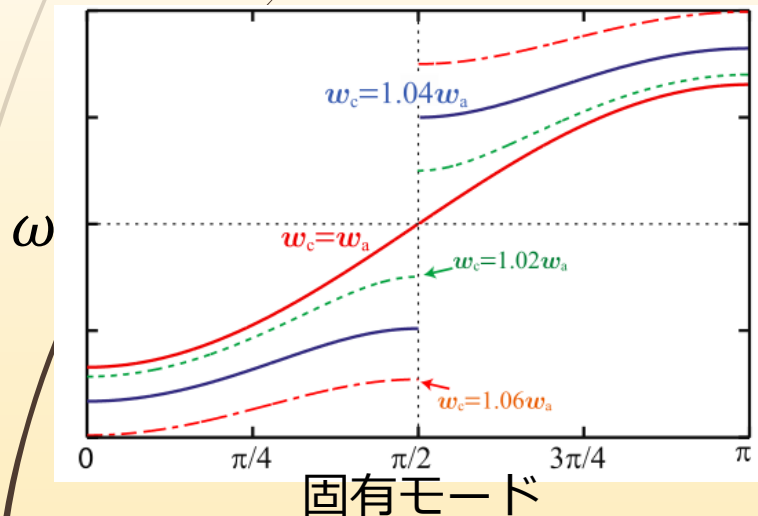
- $\pi/2$ モードの定在波型加速空洞。高い加速勾配、大きいアパーチャーをとることができるので多くの陽電子を捕獲可能。
- 電場があるセル(加速セル)と電場がないセル(結合セル)の倍周期構造をとる。
- 加速セルを長く、結合セルを短くすることで効率的に粒子を加速することができる。
- 加速セル11セル、結合セル10セルで一つの空洞と定義する。



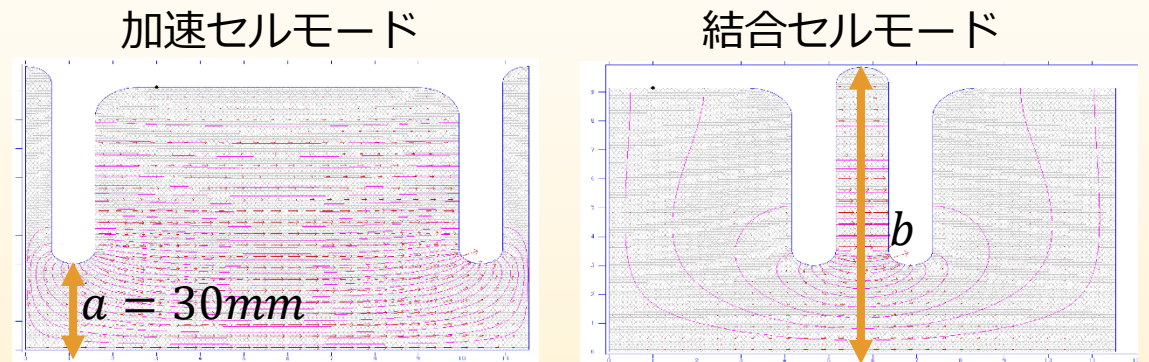
$\pi/2$ モードのAPS空洞。  
図はビームが通過する中心軸の上半分のみを表す。  
赤い矢印は電場ベクトル。

# superfishによるAPS空洞の設計

- superfishを用いてAPS空洞を設計。
- $\pi/2$ モードにおける加速セルと結合セルの周波数を一致させることで群速度が有限の値となり、均一な電場が立つ。



各セルの分散曲線。  
 $\pi/2$ モードでの周波数が各セルで異なる場合、群速度が0となってしまう。



結合セルの高さ( $b$ )を変えることで周波数を調整。

	加速セル	結合セル
共振周波数[MHz]	$1.3 \times 10^3$	$1.3 \times 10^3$
シャントインピーダンス [M $\Omega$ /m]	$5.86 \times 10^1$	$1.91 \times 10^3$
Q値	$2.47 \times 10^4$	$9.06 \times 10^5$
R/Q[ $\Omega$ ]	$1.41 \times 10^2$	$3.00 \times 10^1$

# ビームローディング補償

- シングルセルモデルにおいて、空洞に生じる過渡的状態の電場はRFによる電圧とビームによる電圧を用いて

$$V = V_{RF}(1 - e^{-t/\tau}) - V_{Beam}(1 - e^{-(t-t_b)/\tau})$$

$V_{RF}$ :定常状態におけるRFによる電圧

$V_{Beam}$ :定常状態におけるビームによる電圧

- ビームローディングを抑制する、すなわち、ビームが通過した状態でも電圧が一定となるためには、

$$\frac{dV}{dt} = 0$$

となればよい。

$$\frac{dV}{dt} = V_{RF} \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} - V_{Beam} \frac{1}{\tau} e^{-(t-t_b)/\tau} = 0$$

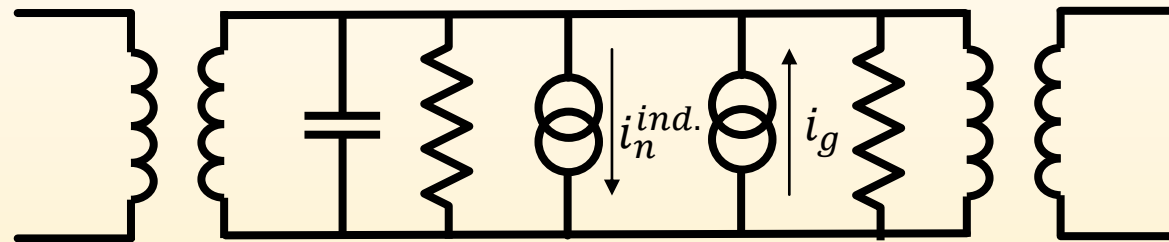
$$e^{t_b/\tau} = \frac{V_{RF}}{V_{Beam}}$$

$$t_b = \tau \ln \frac{V_{RF}}{V_{Beam}}$$



# 等価回路モデルによるマルチセルモデルシミュレーション

- モデルの精度を上げるため、加速管を複数のセルで構成されるマルチセルとして計算を行った。
- マルチセルでの電圧計算には等価回路モデル※を用いた。
- 等価回路モデルの詳細についてはポスター発表WEP035にて説明。



セルを等価回路に置き換えて回路方程式から電圧の微分方程式を求めた。

$$\frac{1}{\omega^2} \frac{d^2 \hat{v}_n}{dt^2} + \frac{1}{\omega} \frac{1 + \beta}{Q_{0n}} \frac{d\hat{v}_n}{dt} + \hat{v}_n = \frac{1}{2} k (\hat{v}_{n-1} + \hat{v}_{n+1}) + \frac{1}{\omega} \frac{d}{dt} (\hat{i}_g - \hat{i}_n^{ind.})$$

$$\hat{v}_n = \frac{v_n}{\sqrt{\omega (R/Q)_n}} \quad \hat{i}_n = \sqrt{L_n} i_n = \sqrt{\frac{(R/Q)_n}{\omega}} i_n$$

$\omega$ : 空洞の共振周波数  
 $\beta$ : カップリングベータ  
 $Q_{0n}$ : Q値  
 $k$ : セルの結合度  
 $\hat{i}_n^{ind.}$ : ビームローディング電流  
 $\hat{i}_g$ : RFによる電流



# 等価回路モデルとシングルセルモデルの比較

- 等価回路モデルで計算される電圧と、シングルセルモデルで計算される電圧を定量的に比較した。

RFだけを入力した場合の比較

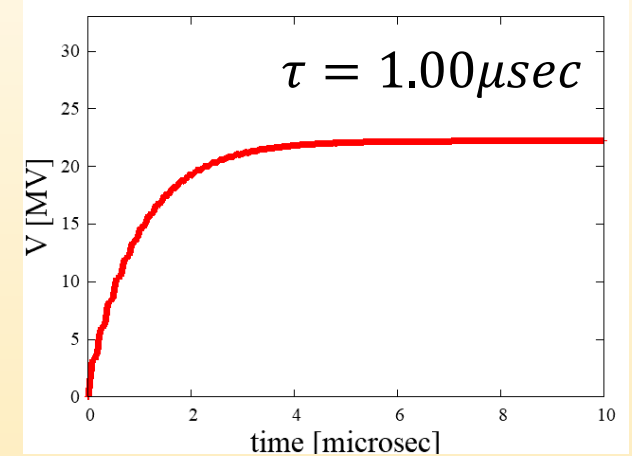
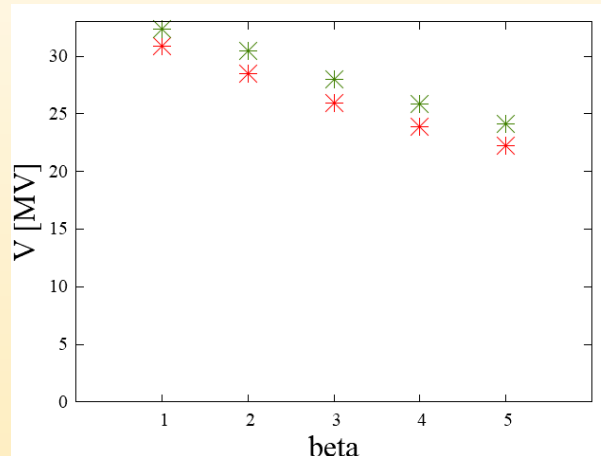
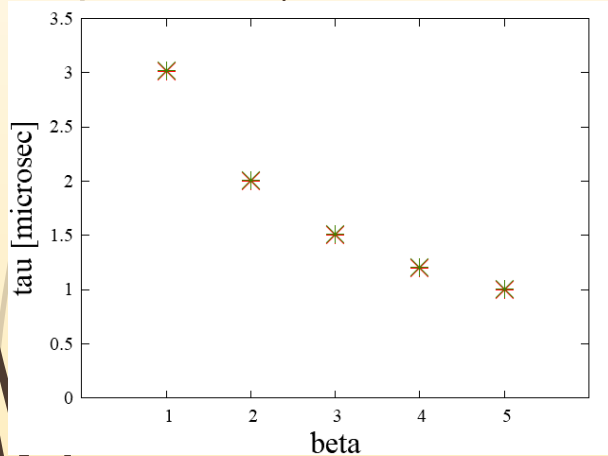
シングルセルモデルでは、

$$V = \frac{2\sqrt{\beta P_0 L r_s}}{1 + \beta}$$

$$\tau = \frac{2Q_0}{\omega(1 + \beta)}$$

$P_0$ [MV]	$L$ [m]	$r_s$ [M $\Omega$ /m]
22.5	1.25	37.3

$Q_0$	$\omega$ [rad/s]
$2.47 \times 10^4$	$8.17 \times 10^9$



時定数の $\beta$ 依存性の比較

電圧の $\beta$ 依存性の比較

等価回路モデルで計算した電圧の時間依存性( $\beta = 5$ )

- ✱ : 等価回路モデル
- ✱ : シングルセルモデル

# 等価回路モデルとシングルセルモデルの比較

ビームだけを入力した場合の比較

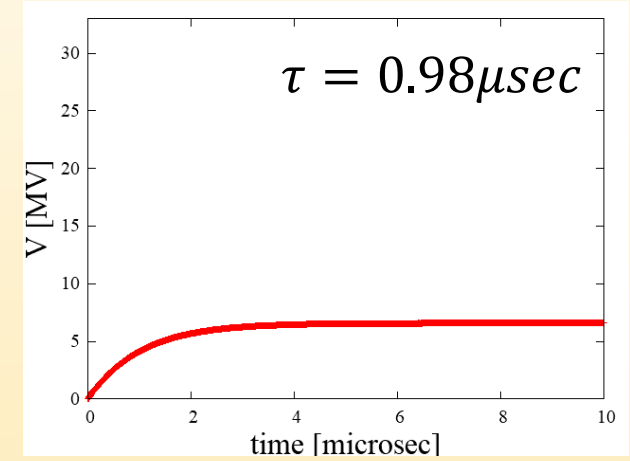
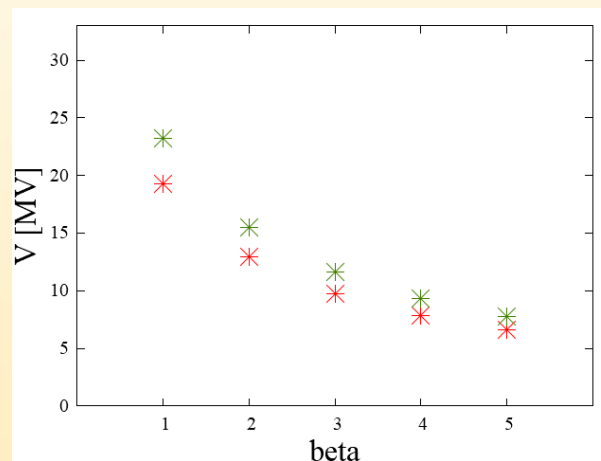
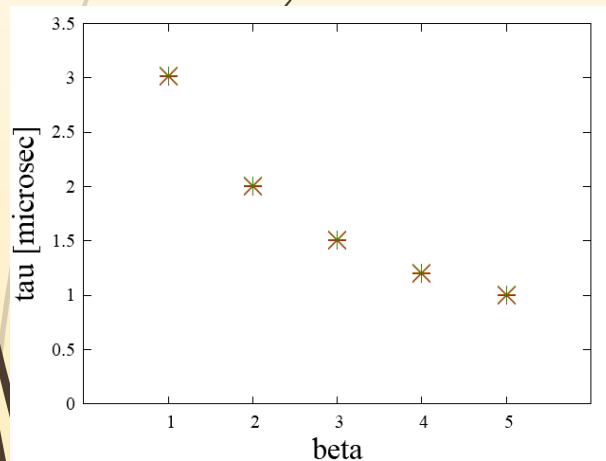
シングルセルモデルでは、

$$V = \frac{Lr_s I}{1 + \beta}$$

$$\tau = \frac{2Q_0}{\omega(1 + \beta)}$$

I[A]	L[m]	r <sub>s</sub> [MΩm/m]
1.0	1.25	37.3

Q <sub>0</sub>	ω[rad/s]
2.47 × 10 <sup>4</sup>	8.17 × 10 <sup>9</sup>



時定数のβ依存性の比較

電圧のβ依存性の比較

等価回路モデルで計算した電圧の時間依存性(β = 5)

- ✱ : 等価回路モデル
- ✱ : シングルセルモデル

# 等価回路モデルとシングルセルモデルの比較

- シングルセルでのビームローディング補償を等価回路モデルでも行った。

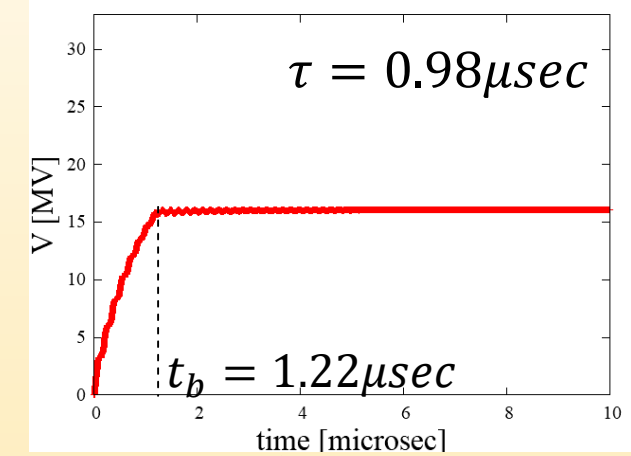
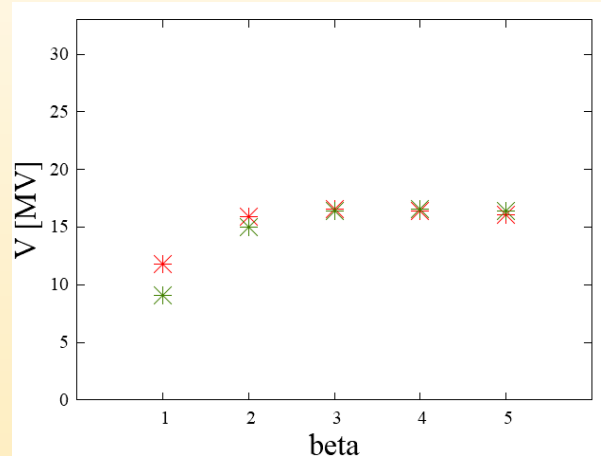
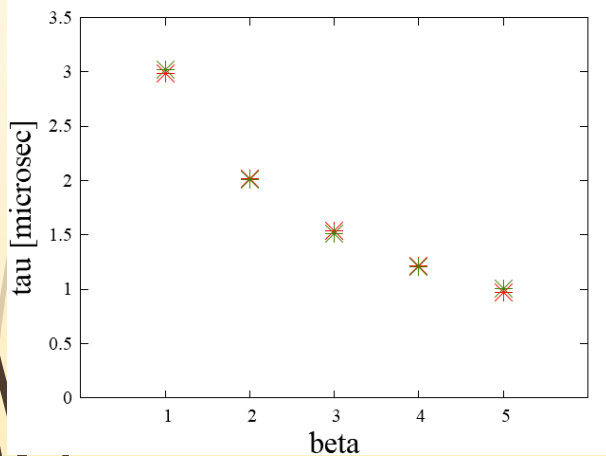
RFとビーム両方入力した場合の比較

シングルセルモデルでは、

$$V = \frac{2\sqrt{\beta P_0 L r_s}}{1 + \beta} - \frac{L r_s I}{1 + \beta}$$

$$\tau = \frac{2Q_0}{\omega(1 + \beta)}$$

$P_0$ [MV]	$I$ [A]	$L$ [m]	$r_s$ [M $\Omega$ m/m]
22.5	1.0	1.25	37.3
$Q_0$		$\omega$ [rad/s]	
$2.47 \times 10^4$		$8.17 \times 10^9$	



時定数の $\beta$ 依存性の比較

電圧の $\beta$ 依存性の比較

- ✱ : 等価回路モデル
- ✱ : シングルセルモデル

等価回路モデルで計算した電圧の時間依存性 ( $\beta = 5$ )

$t_b \leq t \leq 4\mu\text{sec}$   
 における標準偏差 $\sigma$ を規格化すると

$$\frac{\sigma}{\bar{V}} = \frac{0.07}{15.97} = 4.38 \times 10^{-3}$$

# ビームローディングを含めた粒子トラッキング

- superfishで設計したAPS空洞のパラメータを用いてキャプチャーライナックを通過する粒子のトラッキングをGPTを用いて行った。
- 空洞に発生する電圧は次のように表される。

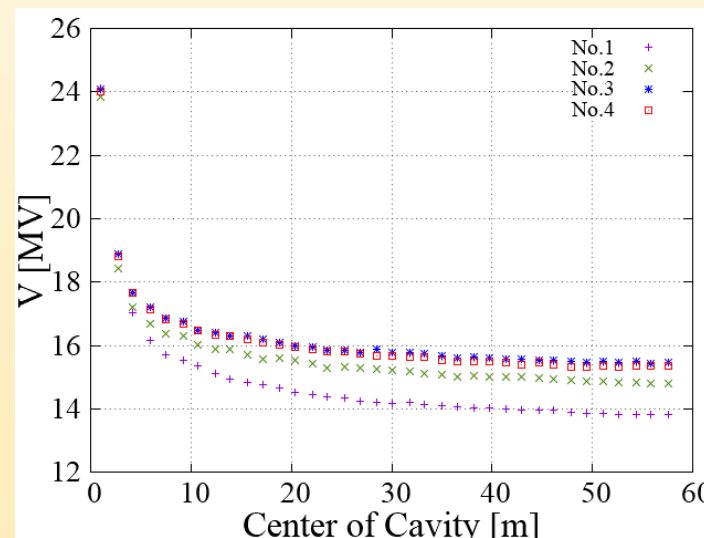
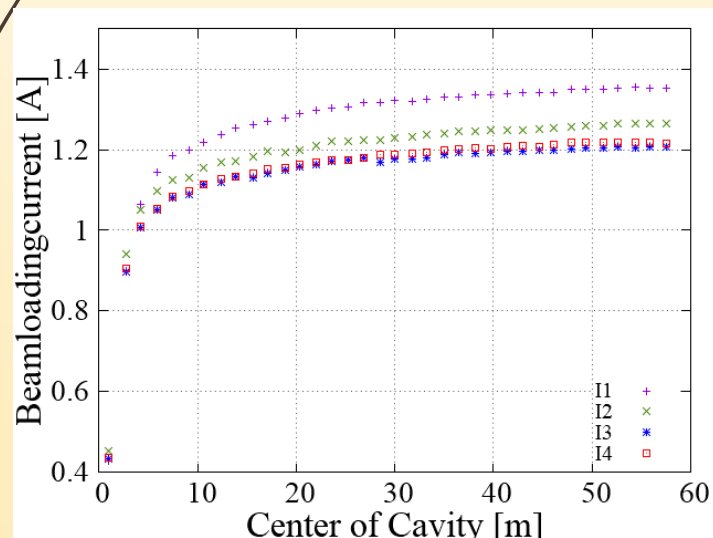
$$V = V_{cav} \sin(\omega t + \varphi) - cI \sin(\omega t + \theta)$$

$\varphi$ :RFの初期位相  
 $\theta$ :ビームの位相

RFによる加速電圧

ビームによる減速電圧

- 空洞に生じる電圧を、再帰的に計算した。

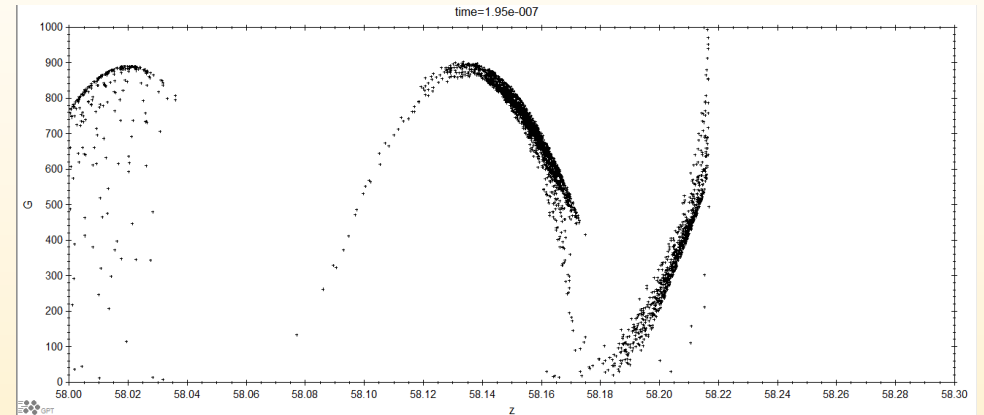
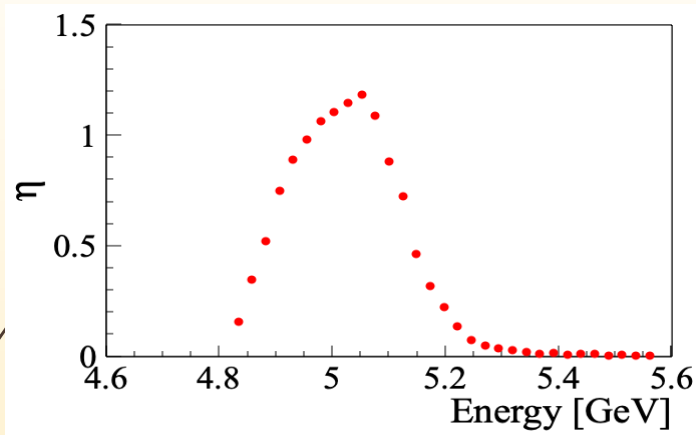


# 陽電子捕獲率の評価

- $\eta$ をブースター出口での陽電子バンチのエネルギーの関数とすると、

$$\Delta\eta = \frac{\partial\eta}{\partial E} \Delta E \quad \Delta E = \frac{\sigma}{\sqrt{36\bar{V}}} \bar{E}$$

$\bar{V}$ : 空洞の電圧の平均値  
 $\bar{E}$ : 陽電子バンチのエネルギーの平均値  
 加速管の本数は36本



$\eta$ のエネルギー依存性。  
 5.05GeVから5.2GeVの範囲を  
 直線に近似すると、傾きは

$$\frac{\partial\eta}{\partial E} = \frac{0.2 - 1.2}{5.20 - 5.05} = -6.7 [GeV^{-1}]$$

よって、

$$\Delta\eta = -6.7 \times \frac{0.07}{\sqrt{36} \times 15.97} \times 368 \times 10^{-3} = -0.002$$

$\eta = 1.2 - 0.002$ より、影響は限定的。

キャプチャーライナック出口での  
陽電子の位相空間分布。

$$\bar{E} = 368\text{MeV}$$

## まとめ

- ILCの陽電子源について設計を行った。
- 電子ビーム駆動方式ではビームローディング電流が大きくなるため、その補償が課題となっている。
- より効率よく陽電子をキャプチャーするために、高い加速勾配、大きいアパーチャーを持つAPS空洞を採用。
- 等価回路モデルを用いることで空洞の電圧の過渡的状态を調べることができ、ビームローディング補償の計算が可能。
- ビームを通過させる時間を調整することでビームローディング補償が可能であり、 $\eta = 1.2 - 0.002$ より、その影響は小さい。
- バンチのギャップを含んだビームローディング補償についてはポスター発表MOP031(栗木さん)で発表。

### 参考文献

※ANALYSIS OF THE TRANSIENT RESPONSE IN PERIODIC STRUCTURE  
BASED ON A COUPLED-RESONATOR MODEL(T.Shintake 1999)