

マイクロ波直流変換真空管の開発・設計

松倉真帆， 嶋村耕平， 横田茂¹⁾
福成雅史， 立松芳典²⁾

1) 筑波大学

2) 福井大学 遠赤外領域開発研究センター

- 研究背景

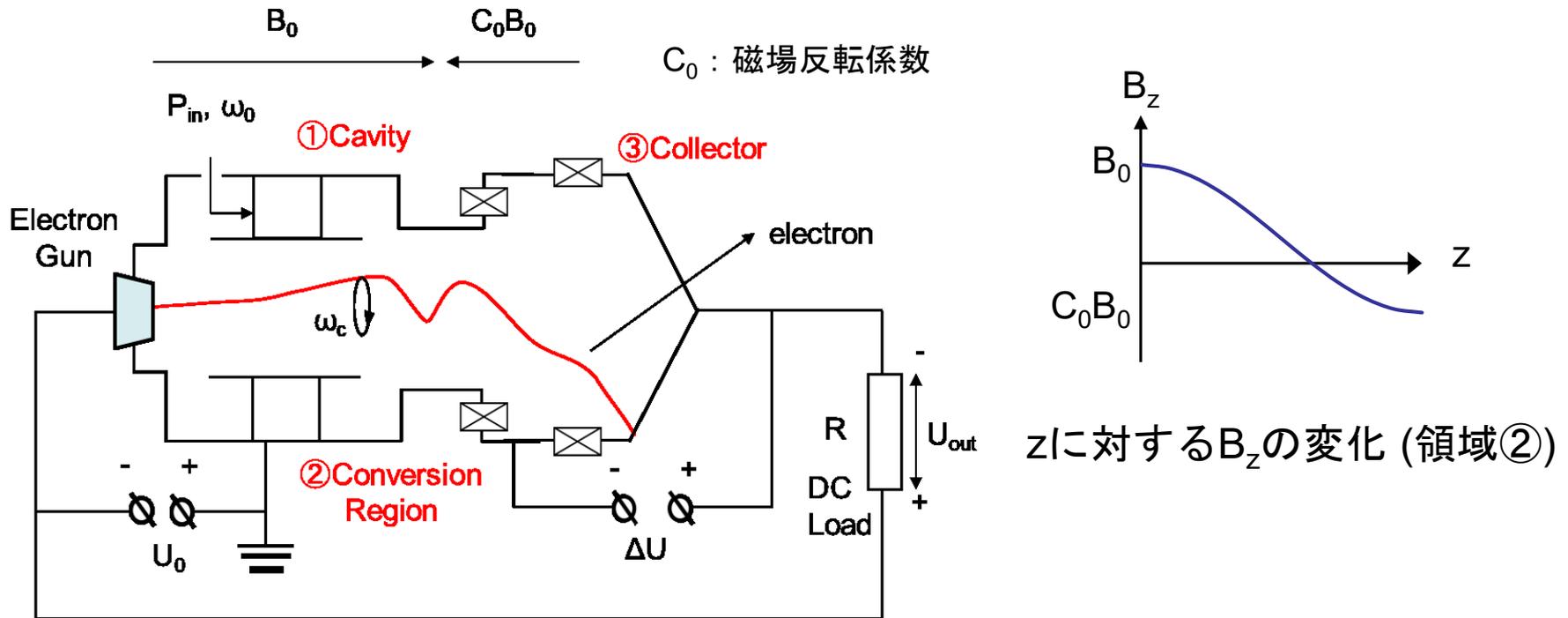
マイクロ波直流変換真空管
変換装置の応用先

- 磁場反転領域の計算

数値計算条件と結果

- まとめ

マイクロ波直流変換真空管の概要



- 3つの領域(相互作用、磁場反転、コレクター)で構成される
- 電子銃とコレクターとの電位差が大きいほど高効率
- 大電力に対して高効率の変換が可能、高周波化が期待できる

マイクロ波直流変換真空管の応用先(小型電動航空機)



農薬散布ドローン(AGRAS MG-1) [1]

本体質量 : 23.5kg
消費電力 : 6.5kW

小型電動スポーツ機 (WATTsUP) [2]

バッテリー電力 : 17kWh × 2個
電動モーター出力 : 85kW
航続時間 : 1時間

- 小型航空機の電力レベル(30kW~40kW)を補うことが可能
- 現状、バッテリー容量の不足によって長距離飛行が不可能
離着陸時、一部を電力供給することでバッテリーへの負担を減らせる

[1] V. Puri, A. Nayyar and L. Raja, Agriculture drones: A modern breakthrough in precision agriculture

[2] <https://www.pipistrel-aircraft.com/wattsup-the-new-2-seat-electric-trainer/>

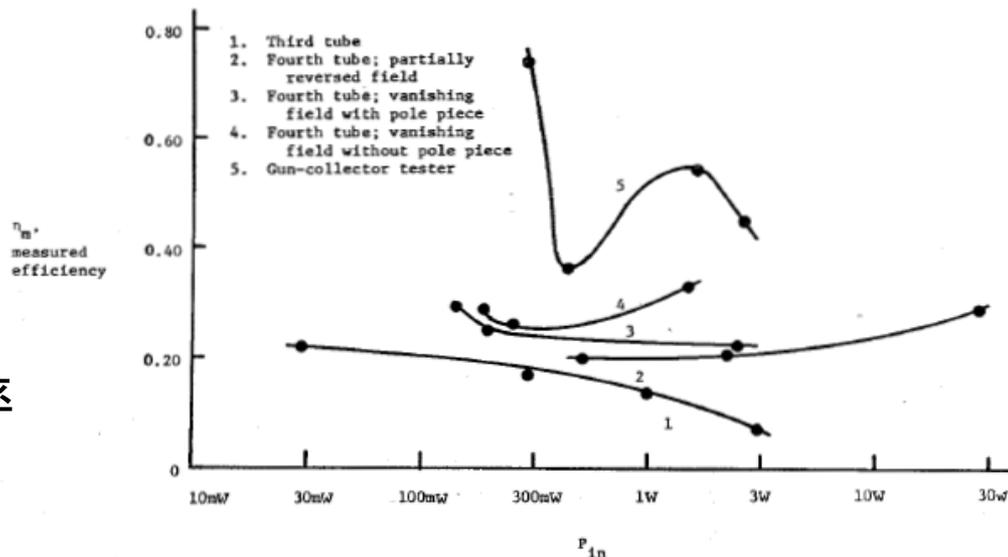
先行研究

Watsonら (1971, 2.45GHz)

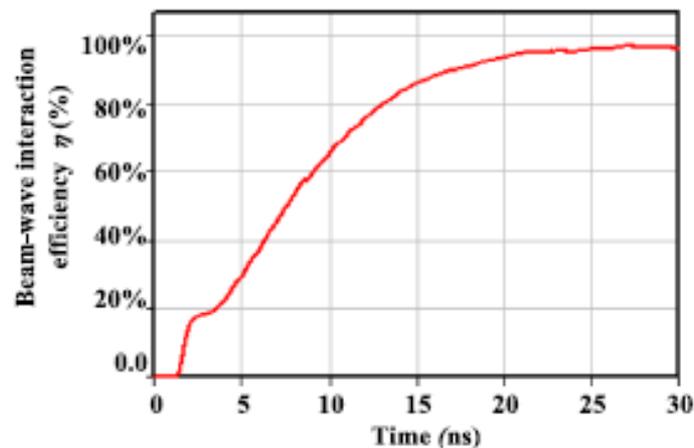
- 磁場反転領域の電子の運動解析
→ $C_0=0$, $C_0=-1$ の2通り
→ 領域中央で急激な変化を仮定
→ $C_0=0$: 領域が長いほど高効率
→ $C_0=-1$: 領域が短いほど高効率
- 磁場条件等を変更して5個試作
→ 最高効率**75%** (300mW入力)
- 詳細な設計が必要

Zhaoら (2017, 2.45GHz)

- 相互作用領域の数値計算
- 1050kWのマイクロ波入力
→ 領域出口での電子の電力 : 1005kW
→ 変換効率 : 96%



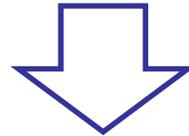
マイクロ波入力電力 P_{in} に対してRF-DC変換効率の結果



エネルギー変換効率

研究目的

- 高効率，大電力入力が可能と考えられているマイクロ波直流変換真空管は研究事例，実機の評価が少ない。
- 特に高周波に向けた研究，磁場反転領域の3次元の詳細な解析が行われていない。



研究目的

最終的に実機を製作して評価することを目的とし、まずは磁場反転領域内の数値計算から磁場分布と効率の関係を得る

アプローチ

- ✓ 自己誘起磁場が与える影響についての検討
- ✓ 3次元PIC法電磁場数値解析と理論計算との比較
- ✓ 磁場反転領域長さや反転係数 C_0 が効率に与える影響

磁場反転領域の磁場

- 印加する軸方向磁場

$$B_z = \frac{B_0}{2} \left(1 + C_0 + (1 - C_0) \cos \left(\frac{z\pi}{L_{\text{con}}} \right) \right)$$

- 半径方向磁場

$$B_r = \frac{B_0}{4} (1 - C_0) \frac{\pi}{L_{\text{con}}} r \sin \left(\frac{z\pi}{L_{\text{con}}} \right)$$

- 磁場反転領域の効率 η_{con}

電位差 U_{out} を大きくするため、
軸方向運動エネルギーを大きくする

$$\eta_{\text{con}} = \frac{\frac{1}{2} m \langle v_z \rangle^2 - \frac{1}{2} m v_{z0}^2}{\frac{1}{2} m v_{\perp 0}^2} = \frac{\langle v_z \rangle^2 - v_{z0}^2}{v_{\perp 0}^2}$$

m : 電子の質量

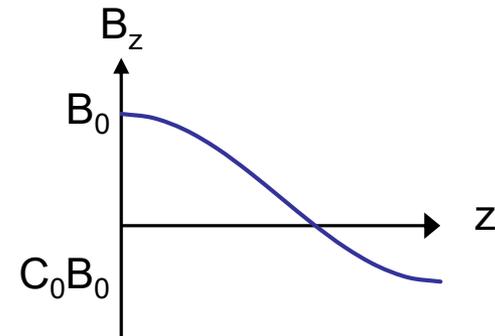
v_{z0} : 軸方向磁場反転領域初速度

$v_{\perp 0}$: 回転方向磁場反転領域初速度

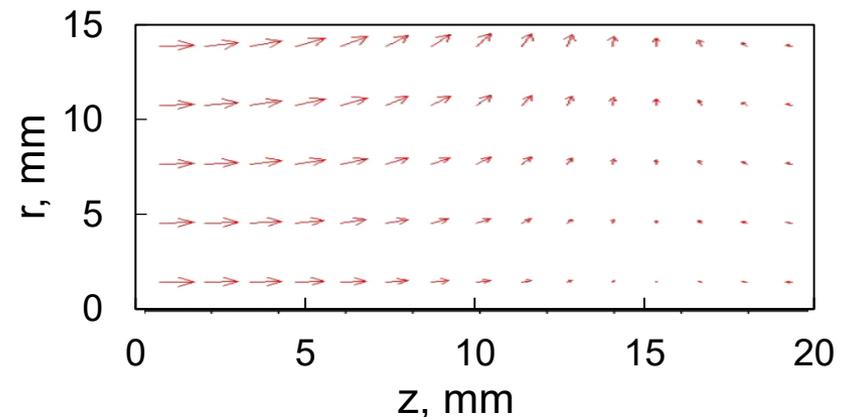
B_0 : 磁場反転領域入口での磁束密度

C_0 : 磁場反転係数

L_{con} : 磁場反転領域長さ



z に対する B_z の変化



B_z, B_r の磁場分布

数値計算の条件

- 支配方程式

電磁場：Maxwell方程式

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, & \nabla \times \mathbf{H} &= \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho, & \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0\end{aligned}$$

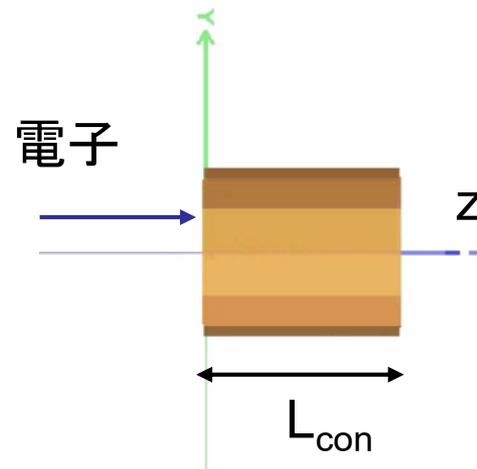
粒子：運動方程式

$$m\ddot{\mathbf{x}} = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

ρ ：電荷密度, m ：電子の質量
 ϵ_0 ：真空中の誘電率, e ：電荷
 μ_0 ：真空中の透磁率

- PIC法による電磁場解析
- 使用したソフト：MAGIC3D
- 数値計算の諸条件

周波数	2.45 GHz
B_0	8.75×10^{-2} T
ビーム電流	0.1 A
加速電圧	1.5 kV
磁場反転領域初速度 v_{z0}	2.3×10^7 m/s



解析領域：円筒真空管

数値計算における磁場反転係数と領域長さの設定

① 電子の自己誘起磁場による電子の速度に与える影響

静磁場で計算を行った場合と、自己誘起磁場の影響を考慮した場合とで速度の変化を検証する

② 理論計算との比較

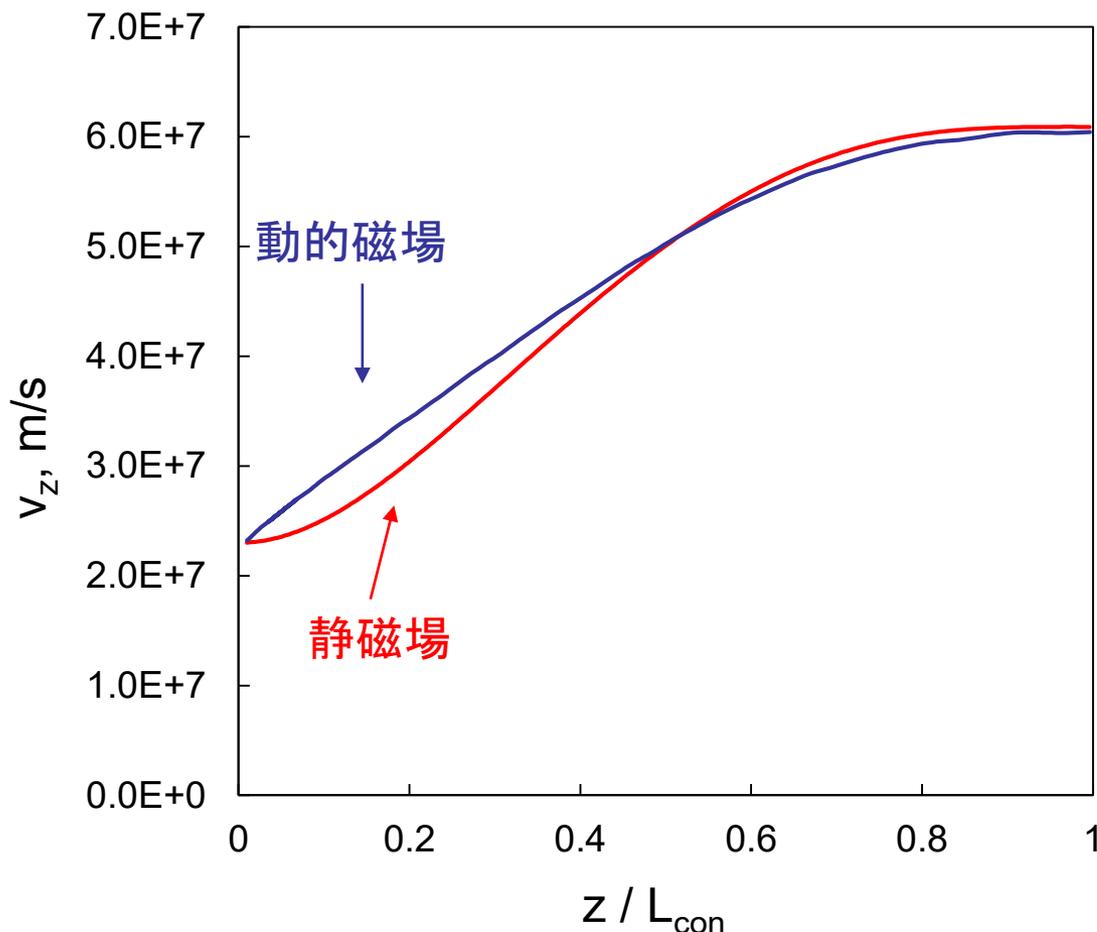
同条件下での角運動量の保存則から算出される軸方向速度と比較を行う

③ 磁場分布と効率の関係

磁場反転係数と領域長さを変化させ、磁場分布によるエネルギー変換の差異を調べる

	磁場反転係数 C_0	領域長さ L_{con} , mm	電磁場
①	-0.2	30.0	静磁場, 自己誘起磁場あり
②	-0.2	30.0	静磁場
③	0.0, -0.2, -0.4, -0.6	20.0, 30.0, 40.0	静磁場

数値計算結果 (①自己誘起磁場を考慮した場合との比較)



電子の軸方向速度と規格化z座標の関係

領域出口 v_z
静磁場 : 6.09×10^7 m/s
自己誘起磁場 : 6.04×10^7 m/s

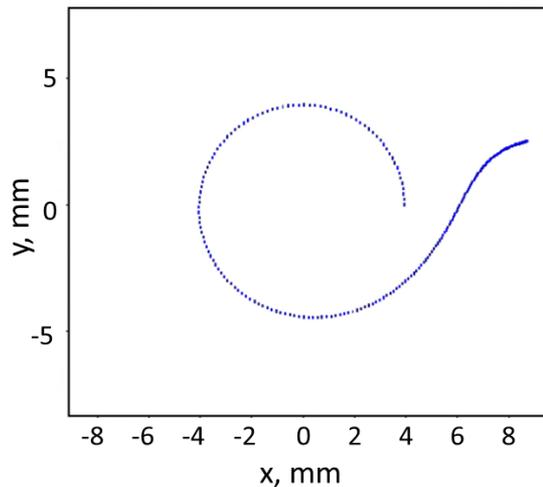
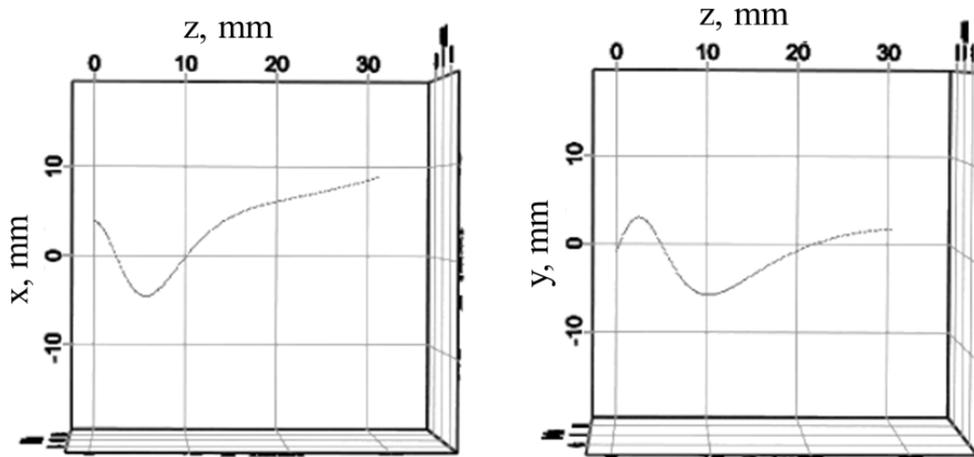
磁場反転領域効率 η_{con}
静磁場 : 90.8%
自己誘起磁場 : 89.2%

$z/L_{con} < 0.4$ ($z < 12$ mm)部分で
差異が大きくなっている

→ 回転運動が優位な部分
で差異が大きい

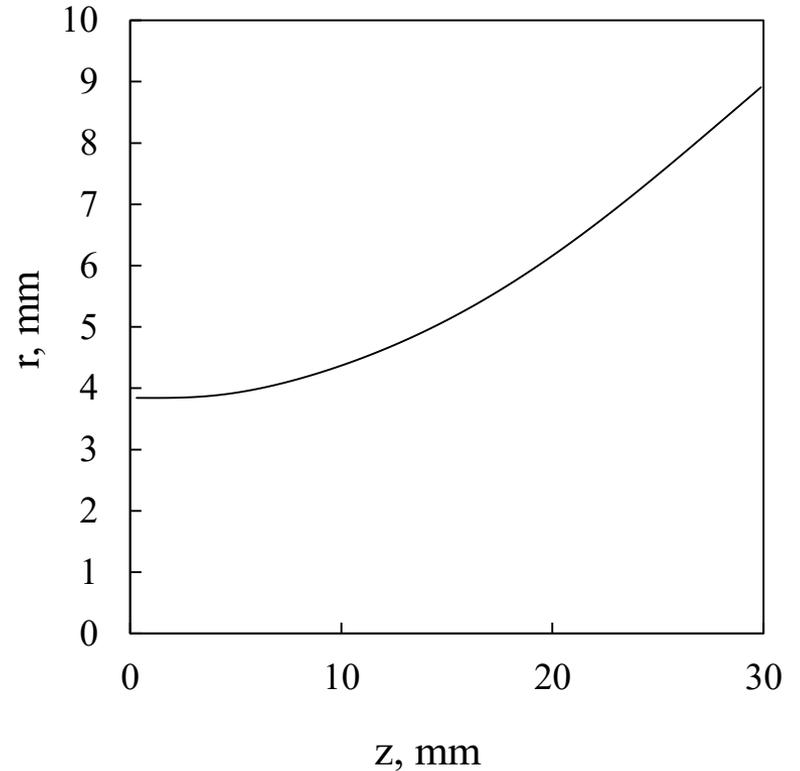
自己誘起磁場を考慮した場合と比較しても
出口部分での大きな差異は見られない

数値計算結果 (電子の挙動)



電子の挙動 (静磁場の場合)

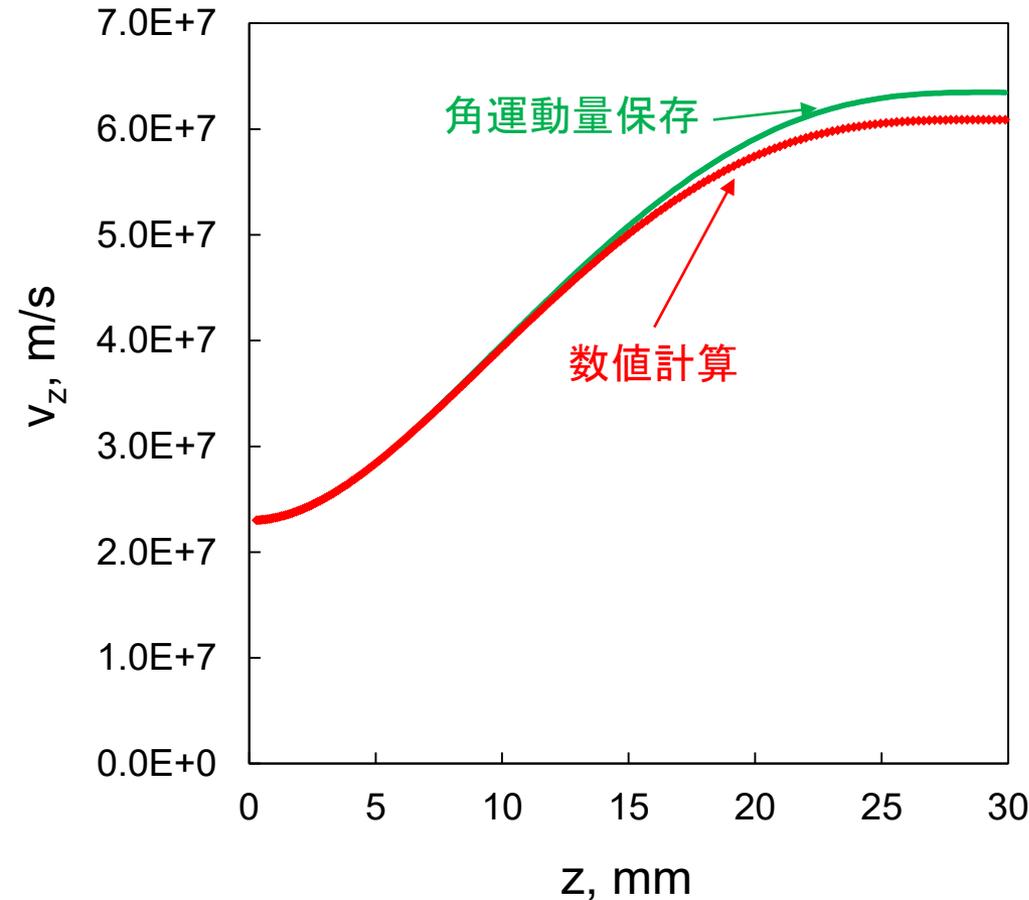
$z < 10\text{mm}$ で回転運動が優位
 $z > 10\text{mm}$ から並進運動が優位



電子半径の変化(静磁場下)

回転運動が優位な部分で
自己誘起磁場の影響が大きい

数値計算結果 (②理論計算との比較_電子の速度)



電子の軸方向速度とz座標の関係

角運動量の保存

軸対称静磁場において成立

$$\frac{d}{dt} (mr^2 \dot{\theta} - erA_{\theta}) = 0$$

$$v_{\perp} = \frac{1}{m} \left\{ \frac{P_0}{r} + \frac{er}{4} B_0 \left[1 + C_0 + (1 - C_0) \cos\left(\frac{z}{L_{con}} \pi\right) \right] \right\}$$

m: 電子の質量、e: 電荷、 L_{con} : 領域長さ
 A_{θ} : ベクトルポテンシャル、
 P_0 : 初期角運動量、 C_0 : 磁場反転係数、

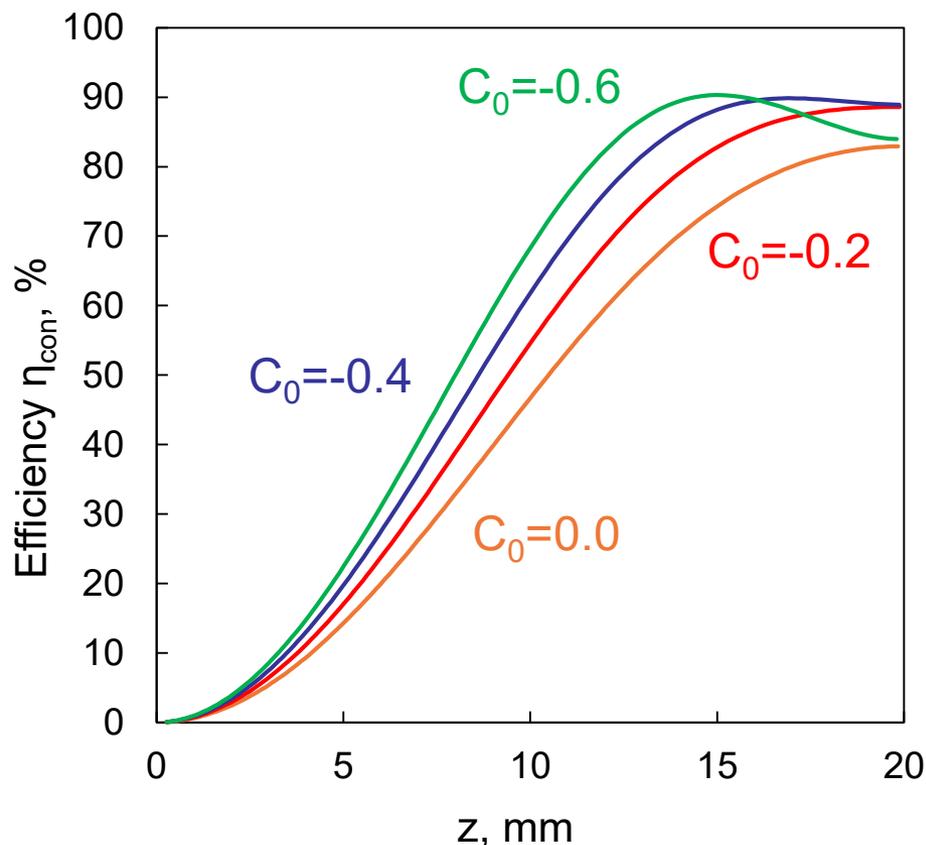
領域出口速度 v_z

数値計算 : 6.1e+7 m/s

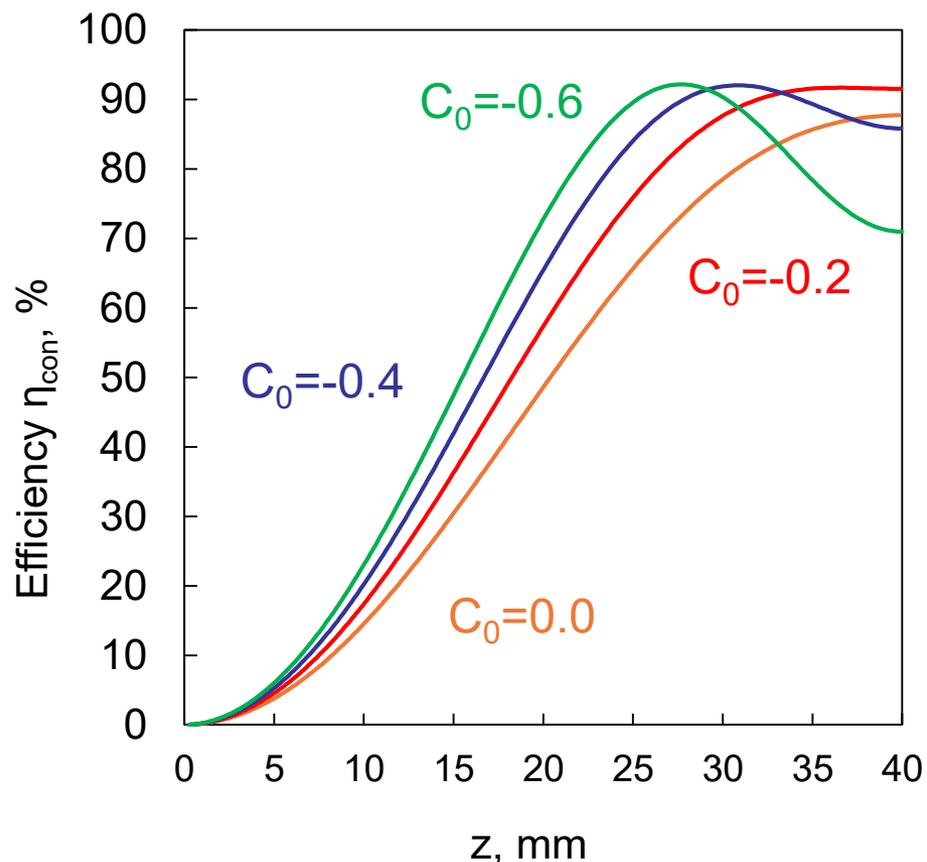
角運動量保存 : 6.3e+7 m/s

角運動量保存を仮定した解析結果と数値計算結果とで概ね一致

数値計算結果 (③領域長さ と磁場分布による効率の違い)



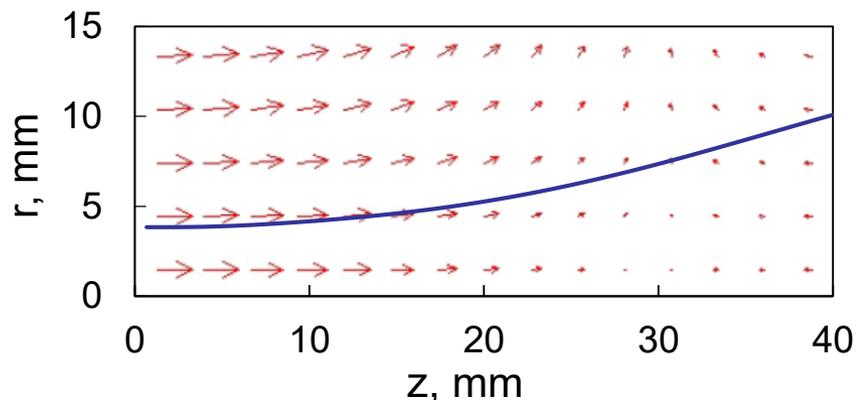
C_0 を変化させた時の効率の変化
($L_{con} = 20.0$ mm)



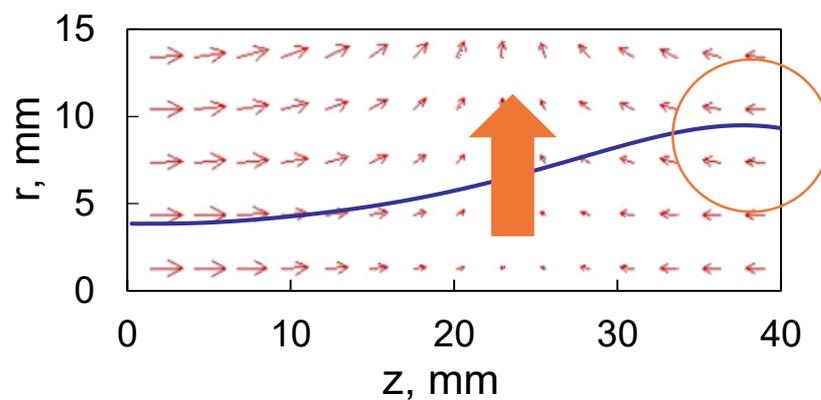
C_0 を変化させた時の効率の変化
($L_{con} = 40.0$ mm)

- 領域が長くなる程 C_0 による影響が出やすくなる
- C_0 が負の方向に大きくなる程、ピーク速度は高くなる
- 最も変換効率が高い \rightarrow 91.5% ($C_0 = -0.2$, 40.0 mm)

考察 (電子の軌道と磁場分布の関係)



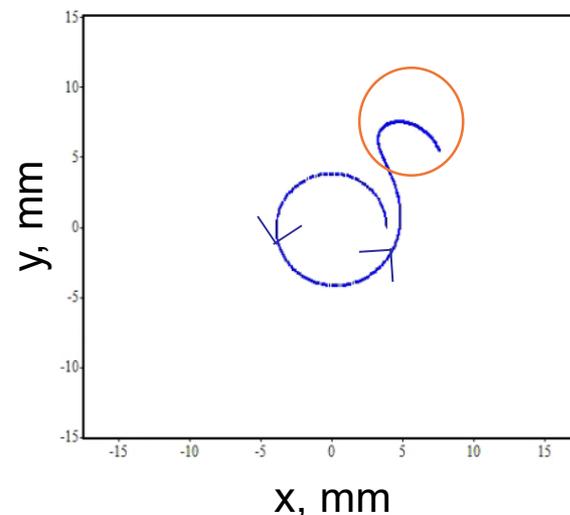
電子の回転半径と磁場分布
($L_{\text{con}}=40.0\text{mm}$, $C_0=-0.2$)



電子の回転半径と磁場分布
($L_{\text{con}}=40.0\text{mm}$, $C_0=-0.6$)

$$B_r = \frac{B_0}{4} (1 - C_0) \frac{\pi}{L_{\text{con}}} r \sin\left(\frac{z\pi}{L_{\text{con}}}\right)$$

- C_0 が負の方向に大きいと大きな B_r がかかる
 - 速度変化が大きく、途中で逆回転に
 - ローレンツ力が逆向きに働く
 - v_z が減速する



電子の軌道 ($C_0=-0.6$)

まとめ

研究目的

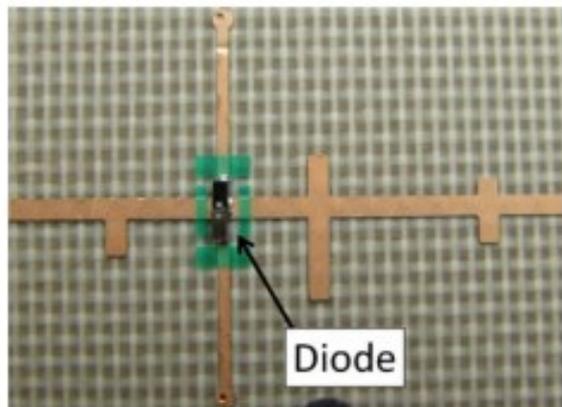
最終的に実機を製作して評価することを目的とし、まずは磁場反転領域内の数値計算から磁場分布と効率の関係を得る

- ✓ 電子の運動が背景磁場に及ぼす影響を考慮するため、電子の軸方向速度の変化を比較した。その結果、自己誘起磁場の影響が強くなると考えられる回転運動が優位な部分においてのみ速度の差異が大きくなることを確認した。
- ✓ 磁場反転領域の数値解析と理論計算との一致を確認した。
- ✓ 反転係数 C_0 が0, -0.2, -0.4, -0.6の各場合に対して、反転領域長さを20.0mm, 30.0mm, 40.0mmと変化させた。その結果、 $C_0=-0.2$, 40.0mmの時が最も回転方向運動エネルギーから軸方向運動エネルギーへの変化が大きく、91.5%のエネルギー変換効率となった。
- ✓ 今後はマイクロ波と電子ビームとの相互作用領域の設計を行う

Appendix

現在の半導体整流回路

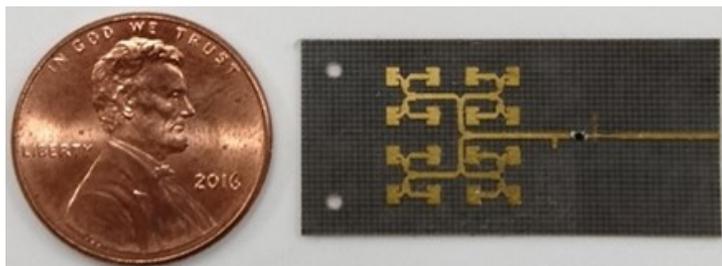
Shinohara (24GHz)



整流効率 : 65.6%

DC出力電力 : 133mW

Hatakeyama (94GHz)

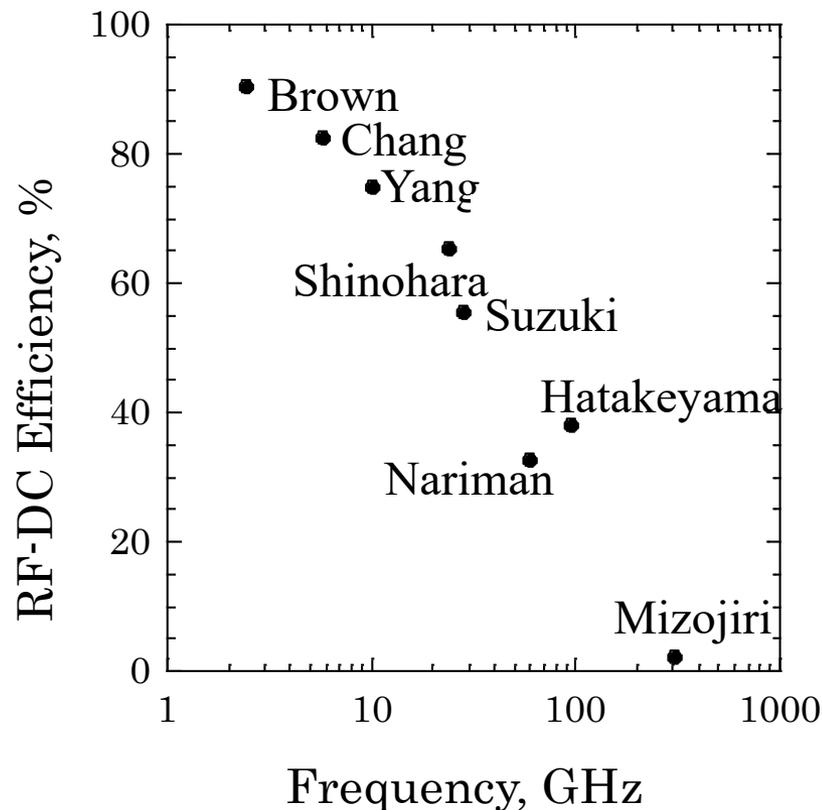


整流効率 : 47%

DC出力電力 : 48.9mW

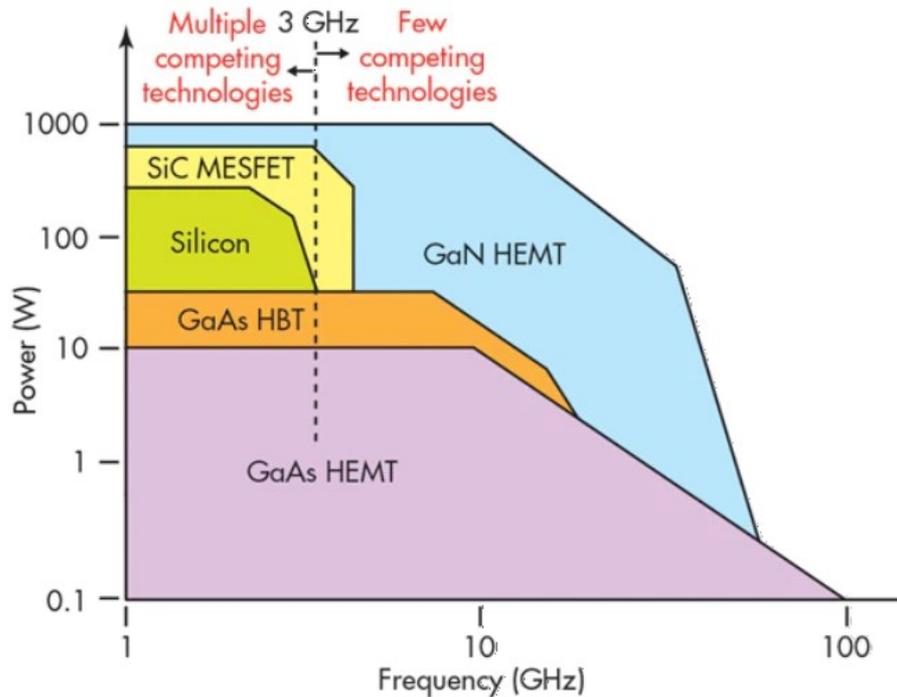
$$\eta = 1 - e^{-\tau^2}, \quad \left(\tau^2 = \frac{A_t A_r}{\lambda^2 d^2} \right)$$

η : ビーム収集効率, A_t : 送電アンテナの面積,
 A_r : 受電アンテナの面積, λ : 波長, d : 送電距離



周波数が高いと整流効率が低下
ダイオードの特性に起因

半導体整流回路の課題



半導体ダイオードの周波数と
使用電力の関係 [2]

イオードのRC時定数

$$RC = \frac{2V_B}{\mu E_c^2}$$

高周波用ダイオード

- RC時定数を小さくする必要がある

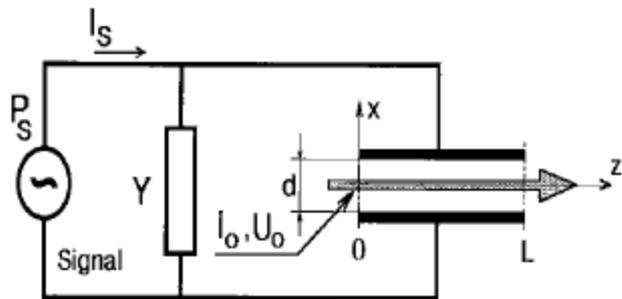
イオード効率

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \omega^2 (RC)^2}$$

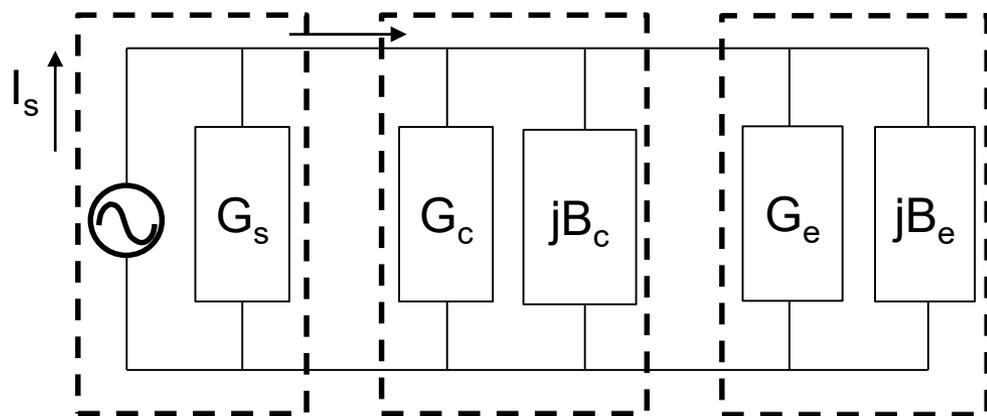
R : 半導体の直列抵抗, C : 接合容量
V_B : ブレークダウン電圧, μ : 電子移動度
E_c : 絶縁破壊電界, ω : 動作各周波数

- 同一のRC時定数に対しては高周波になるほどダイオード効率が下がる
- ブレークダウン電圧を上げようとするするとRC時定数も大きくなる。

共振器部分の等価回路



共振角周波数： $\omega = \omega_c$



External
MW generator

MW cavity

Electron
beam

$$\beta_e = \frac{\omega}{v_{z0}}, \quad \beta = \frac{\omega_c}{v_{z0}}, \quad \theta = \frac{(\beta_e - \beta)L_{eff}}{2}$$

$$G_0 = \frac{1}{8} \frac{I_0}{U_0} \left(\frac{L_{eff}}{d} \right)^2, \quad L_{eff} = \frac{2}{\pi} L_{cav} \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{L}{L_{cav}} \right)$$

$$G_e = G_0 \left(\frac{\sin \theta}{\theta} \right)^2, \quad B_e = -2G_0 \frac{2\theta - \sin 2\theta}{(2\theta)^2}$$

L_{eff} : cavity gapの有効長さ

L : cavity gapの長さ

L_{cav} : cavity 長さ

d : 平板間距離

($L \leq L_{cav}$)

ω 、 ω_c : 入射信号、サイクロ
トロン角周波数

ここで、共鳴時には $\omega \rightarrow \omega_c$ になる。すなわち $\theta \rightarrow 0$ である
この時、 $G_e \sim G_0$ 、 $B_e \sim 0$ となる。

エネルギー変換効率の導出

外部generatorから電子ビームの回転エネルギーへのエネルギー変換効率 η_{cav}

$$\eta_{cav} = \frac{\frac{G_s}{|Y_{all}|} I_s V_s}{\frac{1}{2} I_s V_s} \times \frac{\frac{G_e}{|Y_{all}|} I_s V_s}{\frac{1}{2} I_s V_s} = \frac{4G_s G_e}{|Y_{all}|^2}$$

外部generatorからのエネルギーが負荷を通じる形で伝搬してきて、
その中で電子ビームの回転エネルギーに変換されるエネルギーの効率

最もエネルギーが効率よく送れる条件：

$$Y_s = (Y_c + Y_e)^* \Leftrightarrow G_s = G_c + G_e - j(B_c + B_e)$$

すなわち、 $G_s = G_c + G_e$ かつ $B_c + B_e = 0$ である。この時、 $Y_{all} = 2G_s$

$$\eta_{cav} = \frac{G_e}{G_s} = \frac{G_e}{G_c + G_e} = 1 - \frac{G_c}{G_c + G_e} = 1 - \frac{G_c}{G_s}$$

$$\text{Unloaded Q : } Q_{c,0} = \frac{1}{\omega_0} \cdot \frac{1}{L_c} \cdot \frac{1}{G_c}$$

$$\text{External Q : } Q_{c,load} = \frac{1}{\omega_0} \cdot \frac{1}{L_c} \cdot \frac{1}{G_s}$$

以上のことから、 $\eta_{cav} = 1 - Q_{c,load}/Q_{c,0}$ とわかる。共鳴時には、 $G_e = G_0$ になるから、

$$\eta_{cav} = 1 - \frac{G_c}{G_c + G_0}$$

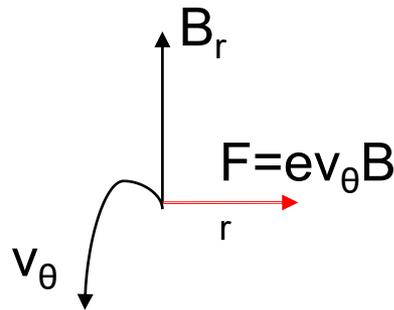
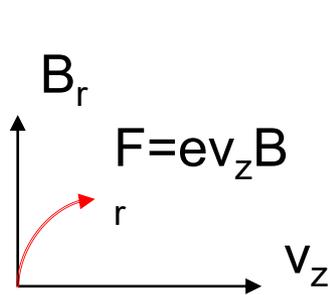
共振器のQ値がわかれば効率の算出が可能

CWCの磁場反転領域

- ・ CWCの周りにzに依存したBzを印加。
ガウスの磁場の法則 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ より、半径方向の磁場Bx、Byが生じる。領域内($z_1 < z < z_2$)の磁場は以下で表される。

$$\mathbf{B} = \left(-\frac{x}{2} \frac{dB_z}{dz}, -\frac{y}{2} \frac{dB_z}{dz}, B_z \right), B_z = \frac{B_0}{2} \left[1 + C_0 + (1 - C_0) \cdot \cos\left\{ \pi \frac{(z - z_1)}{(z_2 - z_1)} \right\} \right]$$

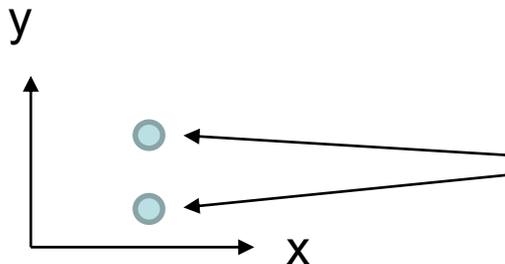
- ・ 基本的に電界がないから運動エネルギーは保存される $\rightarrow v_z$ と v_θ の変換



v_z と v_θ のエネルギー変換

v_z と B_r による v_θ の減速

v_θ と B_r による v_z の加速



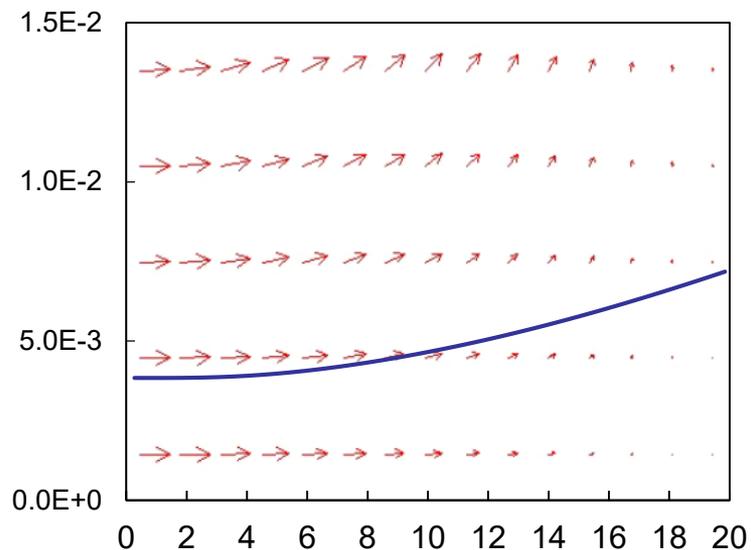
x-y平面内で B_r の大きさが異なる

\rightarrow 電子の v_z と v_θ のエネルギー変換が異なる

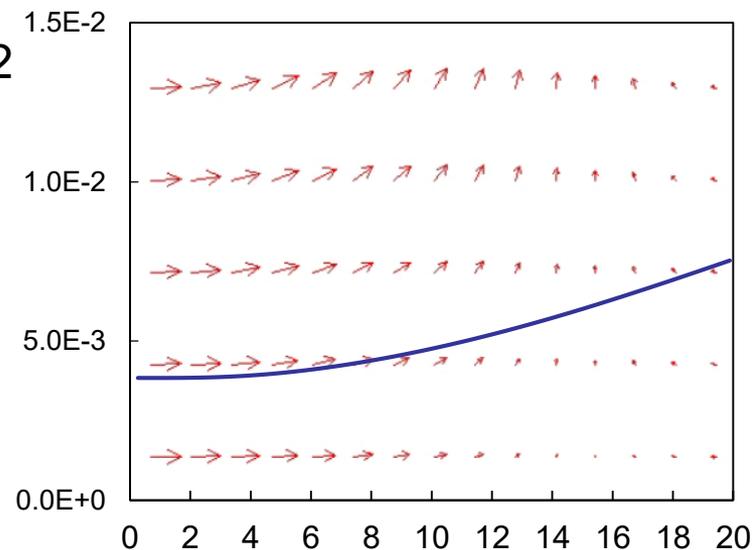
\rightarrow z軸方向速度の分散が生じる

考察 (電子の回転半径と磁場分布, 20.0mm)

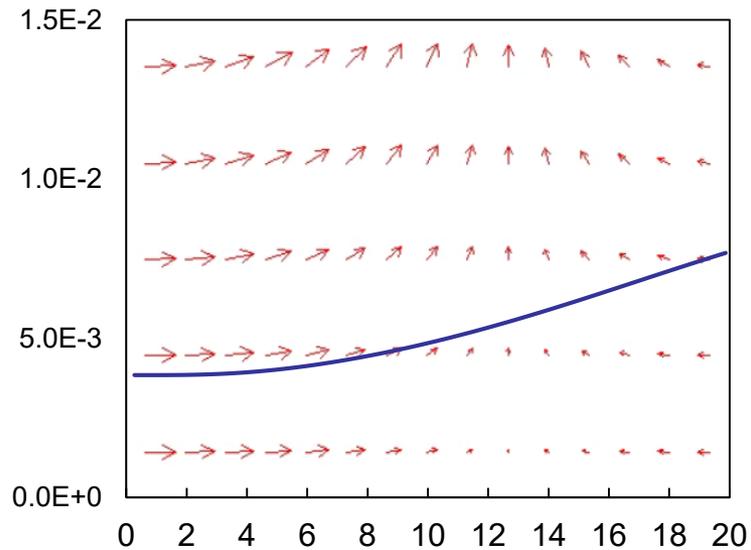
$C_0=0.0$



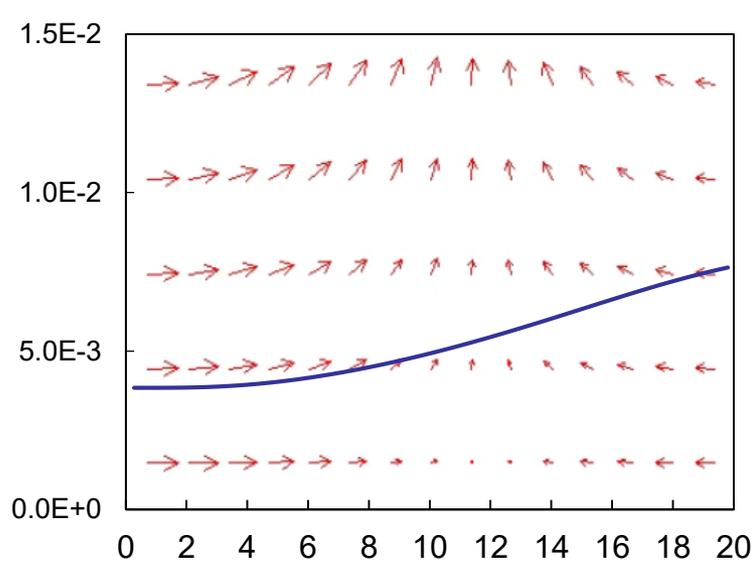
$C_0=-0.2$



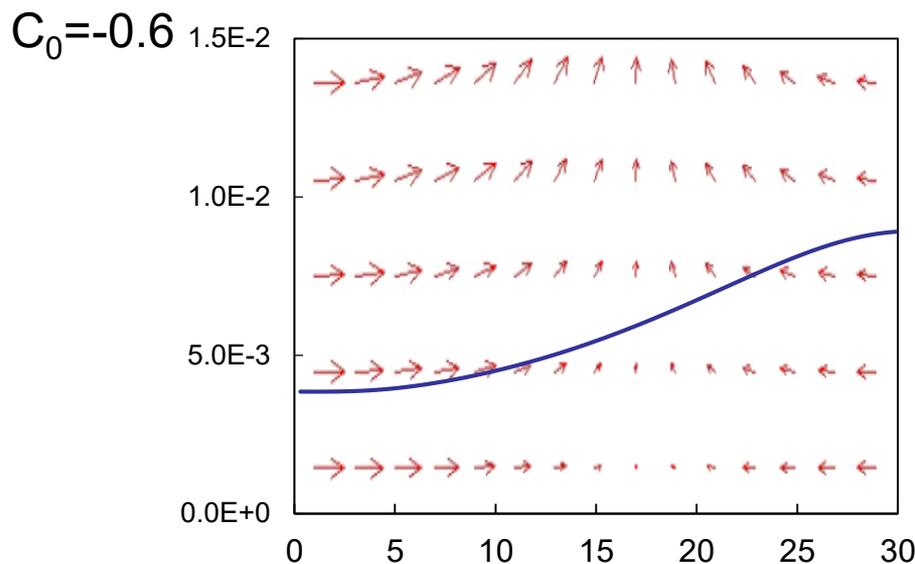
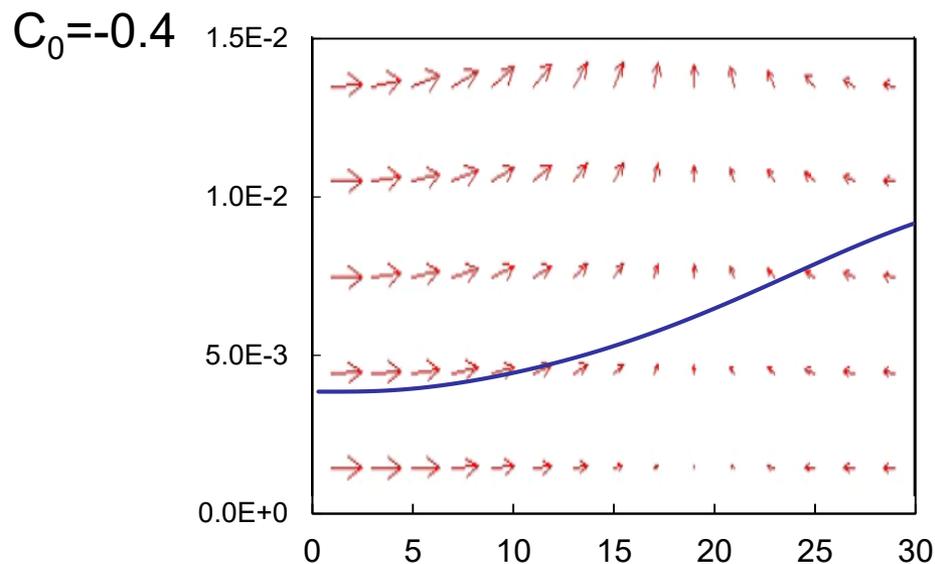
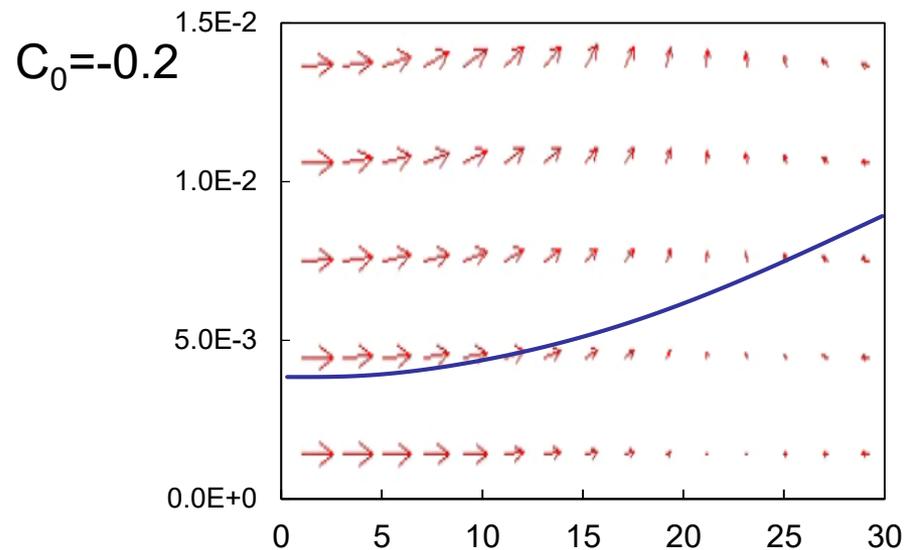
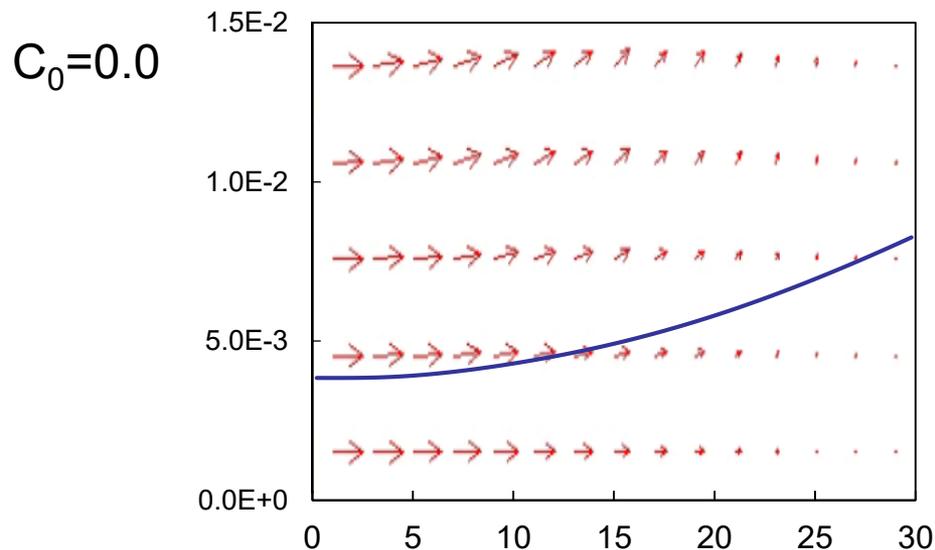
$C_0=-0.4$



$C_0=-0.6$



考察 (電子の回転半径と磁場分布, 30.0mm)



考察 (電子の回転半径と磁場分布, 40.0mm)

