



1.6セル光陰極高周波電子銃における 0モードのビーム特性への影響

2014/8/10

京都大学エネルギー理工学研究所

犬飼元晴、増田開、全炳俊、村田智哉、野儀武志、梶村勇輔、

S.Suphakul、吉田恭平、K.Torgasin、

H.Negm、紀井俊輝、長崎百伸、大垣英明

目次

→ 1 はじめに

1.1 背景

1.2 目的

2 研究手法

2.1 概要

2.2 固有モード解析

2.3 等価回路モデル

2.4 粒子軌道解析

3 解析結果

3.1 レーザー入射位相

3.2 計算精度

3.3 ビームローディング効果がない場合

3.4 ビームローディング効果がある場合

4 まとめ

背景



光陰極高周波電子銃において用いられる光源レーザーが高繰り返しのものとなってきた。
そこで、ビームローディング効果による 0モード の励振および、それにともなうビーム特性への影響が懸念される。



- 0モードはどの程度励起されるのか？
- ビーム特性は程度変化するのか？

目的



1.6セルの光陰極高周波電子銃において、高繰り返しの励起用レーザーを用いてマルチバンチ運転する場合、0モードがどの程度励起されるのか、およびそれによってビーム特性はどの程度変化するかを評価する。

目次

1 はじめに

1.1 背景

1.2 目的

→ 2 研究手法

2.1 全体の流れ

2.2 固有モード解析

2.3 等価回路モデル

2.4 粒子軌道解析

3 解析結果

3.1 レーザー入射位相

3.2 計算精度

3.3 ビームローディング効果がない場合

3.4 ビームローディング効果がある場合

4 まとめ

手法の概要

解析対象： BNL/SLAC/UCLA型1.6セル光陰極高周波電子銃

二次元軸対称メッシュ作成



固有モード解析

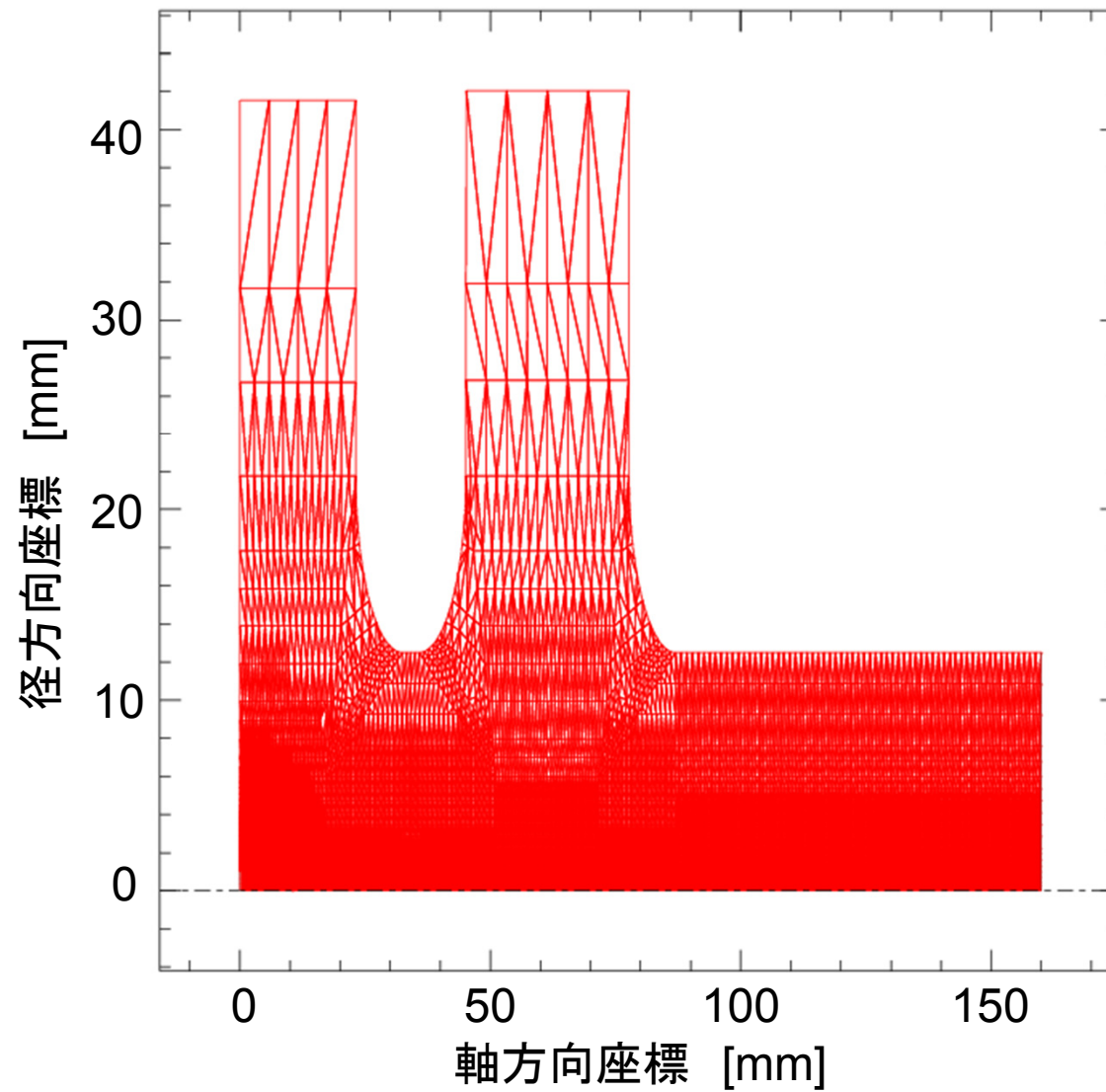


等価回路モデル化



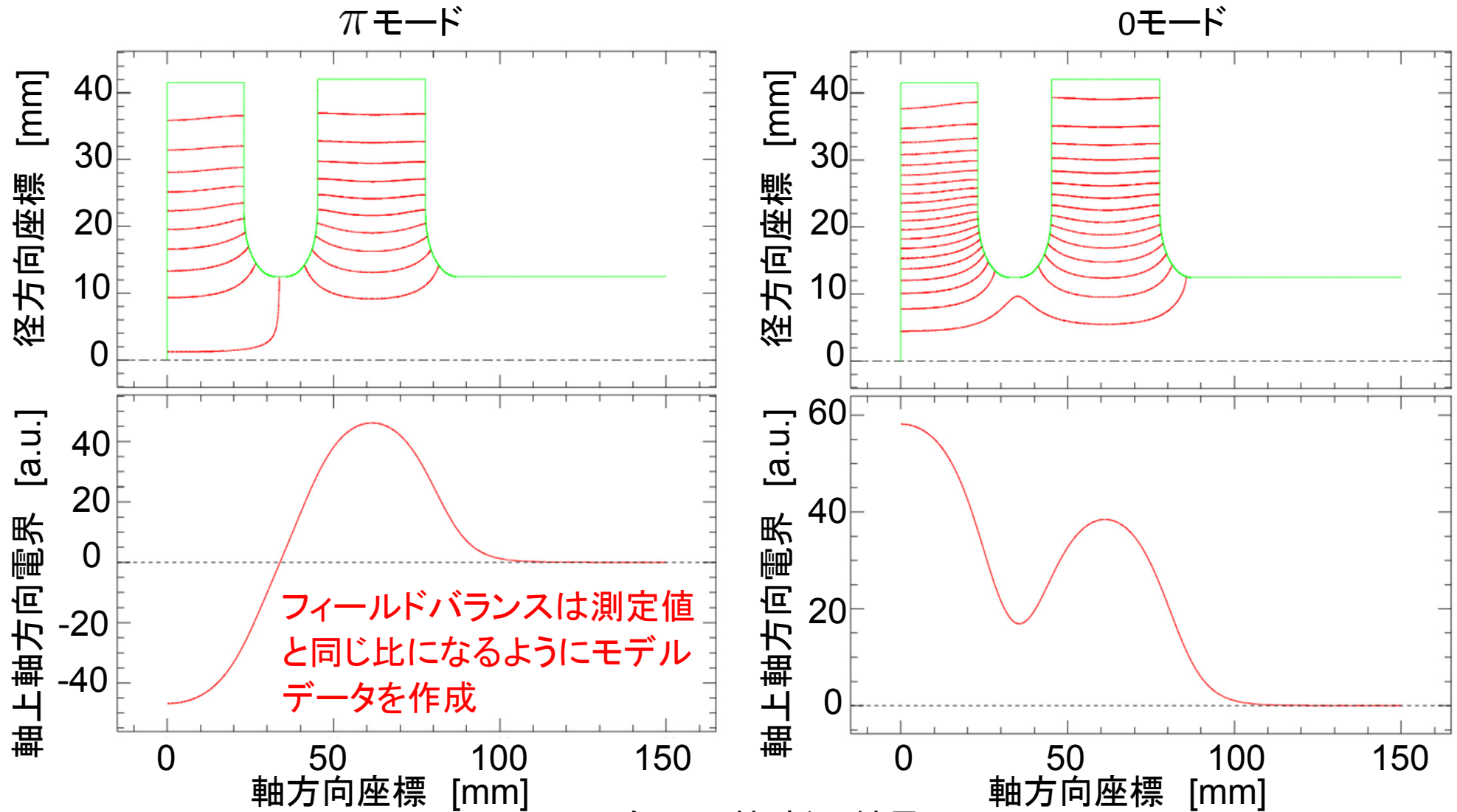
粒子軌道解析

2次元軸対称モデル



粒子軌道解析に用いる二次元軸対称モデル

固有モード解析

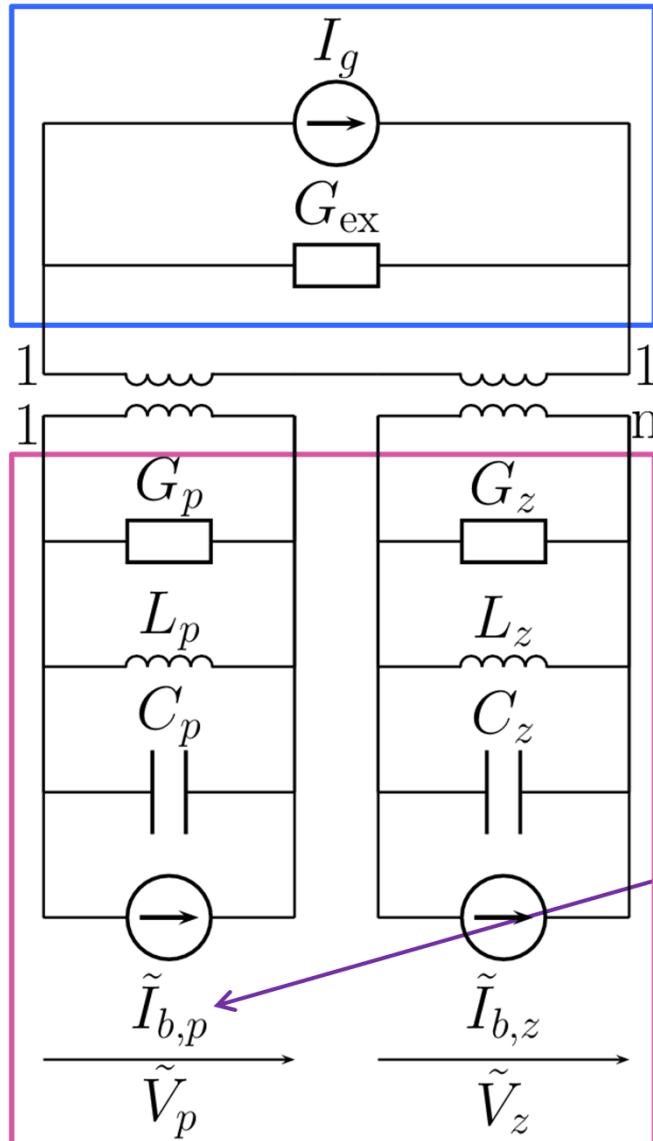


固有モード解析の結果

KUEMS によって固有モード解析を行う。

ここでは、2次元軸対称モデルに対して有限要素法を適用し、固有値問題を解く。

等価回路モデル



高周波電源

π モードおよび0モードのカップリング係数 β_p 、 β_z を用いて

$$G_{\text{ex}} = \beta_p G_p = \frac{1}{n^2} \beta_z G_z \quad \text{として}$$

$$n^2 = \frac{\beta_z G_z}{\beta_p G_p}$$

ビームローディング電流

$$i_{b,p}(t) = -\frac{1}{\epsilon_0} \int_{\Omega} \overset{\text{電流密度分布}}{\tilde{\mathbf{J}}_b(t)} \cdot \underset{\text{電界の固有モード}}{\tilde{\mathbf{E}}_p} dV$$

のフェーザ表示

π モード

0モード

共振空洞

0モード等価電圧

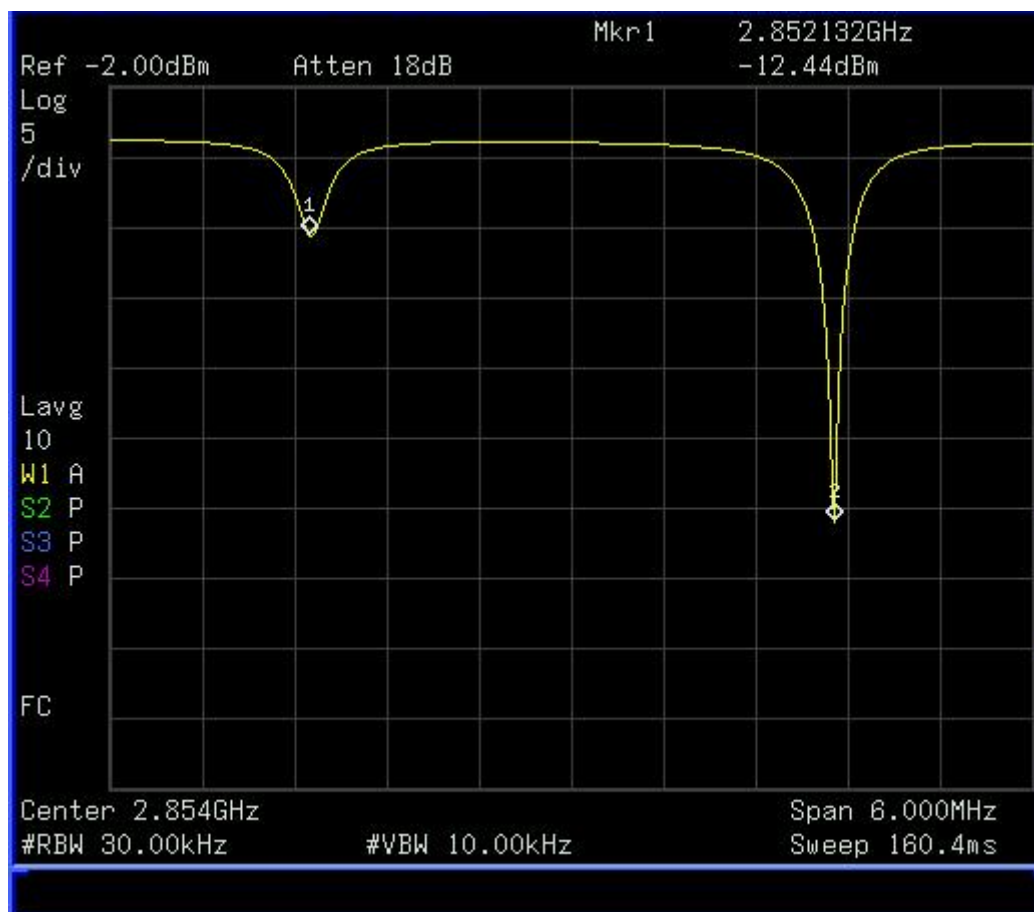
等価回路より、 \tilde{V}_z は次の式で与えられる。

$$\tilde{V}_z = \frac{\left\{ G_p + j \left(\omega C_p - \frac{1}{\omega L_p} \right) \right\} \tilde{V}_p + \tilde{I}_{b,p} - n \tilde{I}_{b,z}}{G_z + j \left(\omega C_z - \frac{1}{\omega L_z} \right)} \frac{1}{n}$$

解析においては、 \tilde{V}_p を一定値に固定する。

回路定数

各回路定数は測定結果から得た共振周波数、Q値、シャントインピーダンスより決定。



スペアナによる測定波形

粒子軌道解析

KUBLAI によって粒子軌道解析を行う。

ここでは、2次元軸対称モデルにおいて有限要素法を適用し、電子についての相対論的運動方程式を解く。

空洞の電磁界は固有モード解析および等価回路より計算する。以下のパラメータを用いて行った。

π モード等価電圧 \tilde{V}_p	-j6.0 MV
モード間隔	3.4 MHz
1 バンチあたりの最大電荷量	1.0 nC
運転周波数 f	2856 MHz
レーザースポットの直径 (フラット)	2.0 mm
レーザー照射繰り返し周波数	2856 MHz
レーザーのパルス幅 (ガウシアン、FWHM)	10 ps

なお、これより示す結果は全て電子銃出口におけるものである。

目次

1 はじめに

1.1 背景

1.2 目的

2 研究手法

2.1 全体の流れ

2.2 固有モード解析

2.3 等価回路モデル

2.4 粒子軌道解析

→ 3 解析結果

3.1 レーザー入射位相

3.2 計算精度

3.3 ビームローディング効果がない場合

3.4 ビームローディング効果がある場合

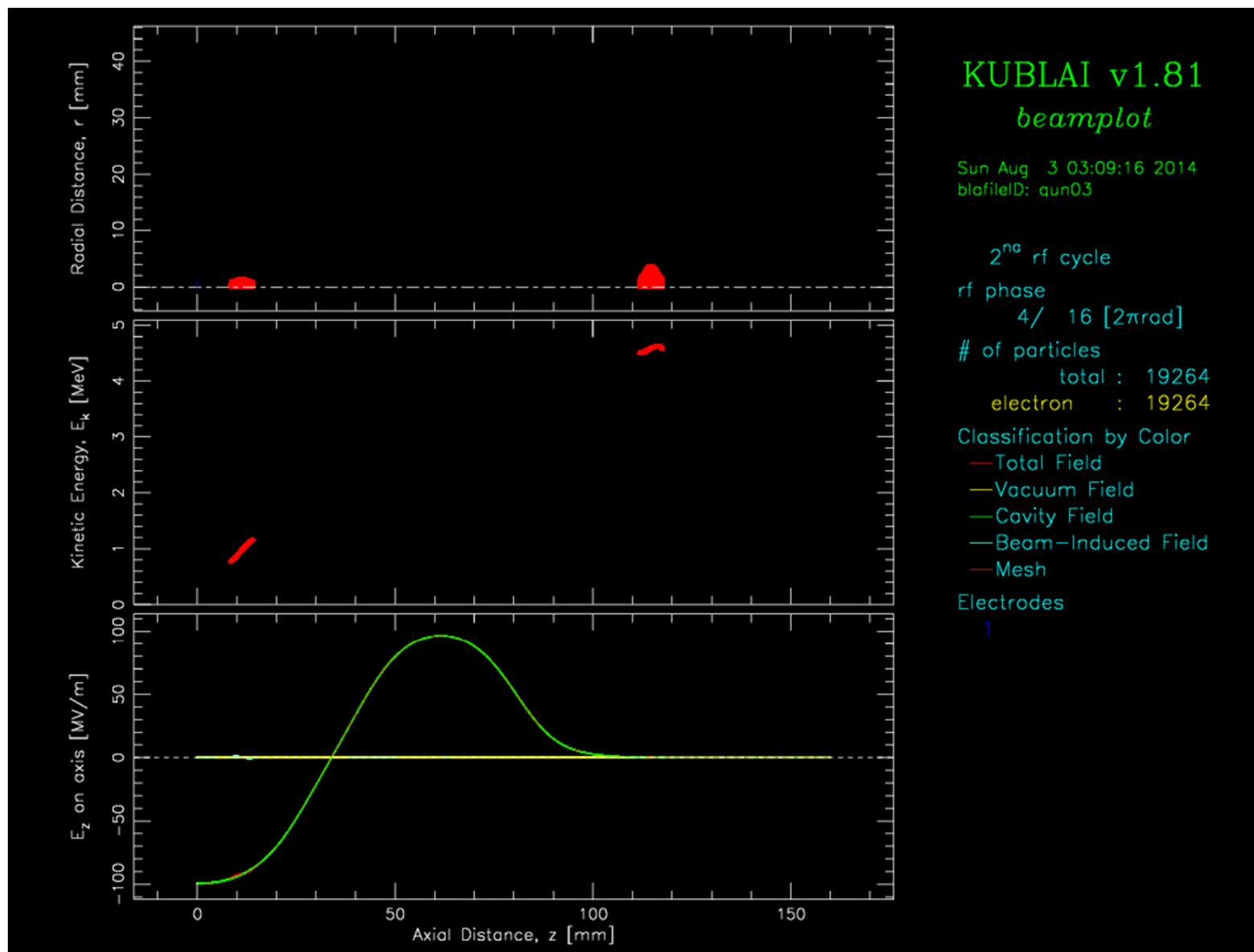
4 まとめ

粒子軌道解析

粒子の
径方向分布

運動エネルギー

軸上軸方向電界

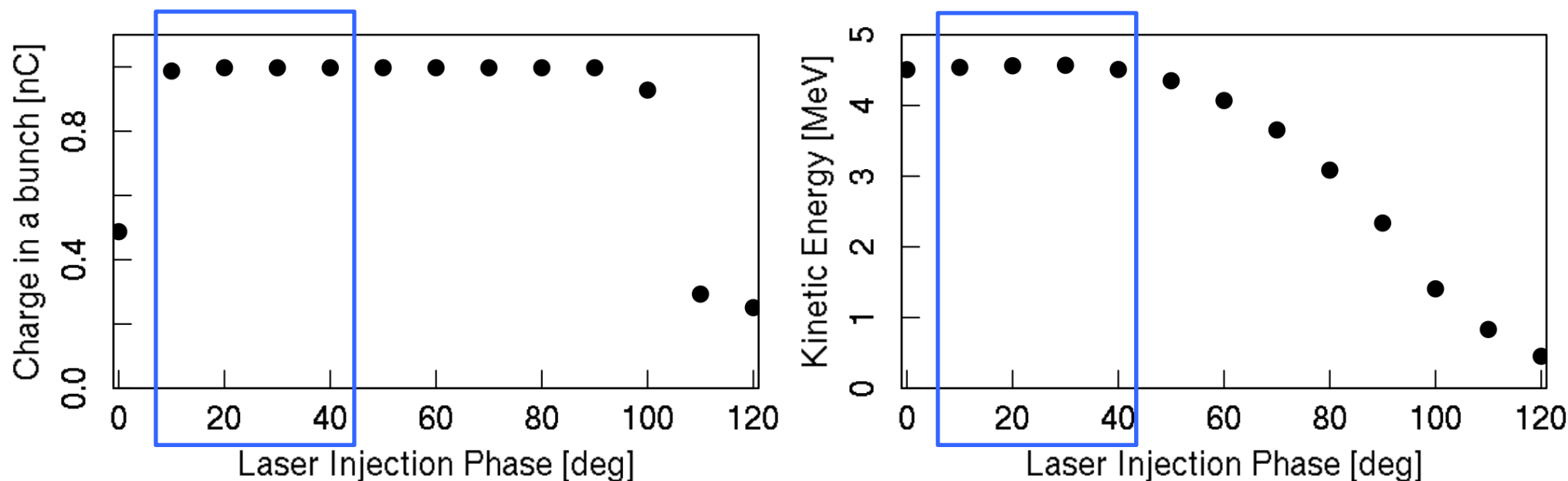


軸方向座標

レーザー入射位相

陰極における軸方向複素電界が正の純虚数となる点を 0° としてレーザー入射位相を定義。

レーザー入射位相に対する1バンチ中の電荷量と電子ビームの平均運動エネルギーを以下に示す。(0モードは無視した)



10°~40°の範囲について検証を行うこととした。

粒子軌道解析 (ビームローディング効果なし)



はじめに、ビームローディング効果がない場合、すなわちシングルバンチ駆動の場合について粒子軌道解析を行った。

このとき、

$$\tilde{V}_z = \frac{\left\{ G_p + j \left(\omega C_p - \frac{1}{\omega L_p} \right) \right\} \tilde{V}_p + \tilde{I}_{b,p} - n \tilde{I}_{b,z}}{G_z + j \left(\omega C_z - \frac{1}{\omega L_z} \right)} \frac{1}{n}$$

$$\tilde{V}_p = -j6.0 \text{ [MV]} \quad \tilde{I}_{b,p} = \tilde{I}_{b,z} = 0$$

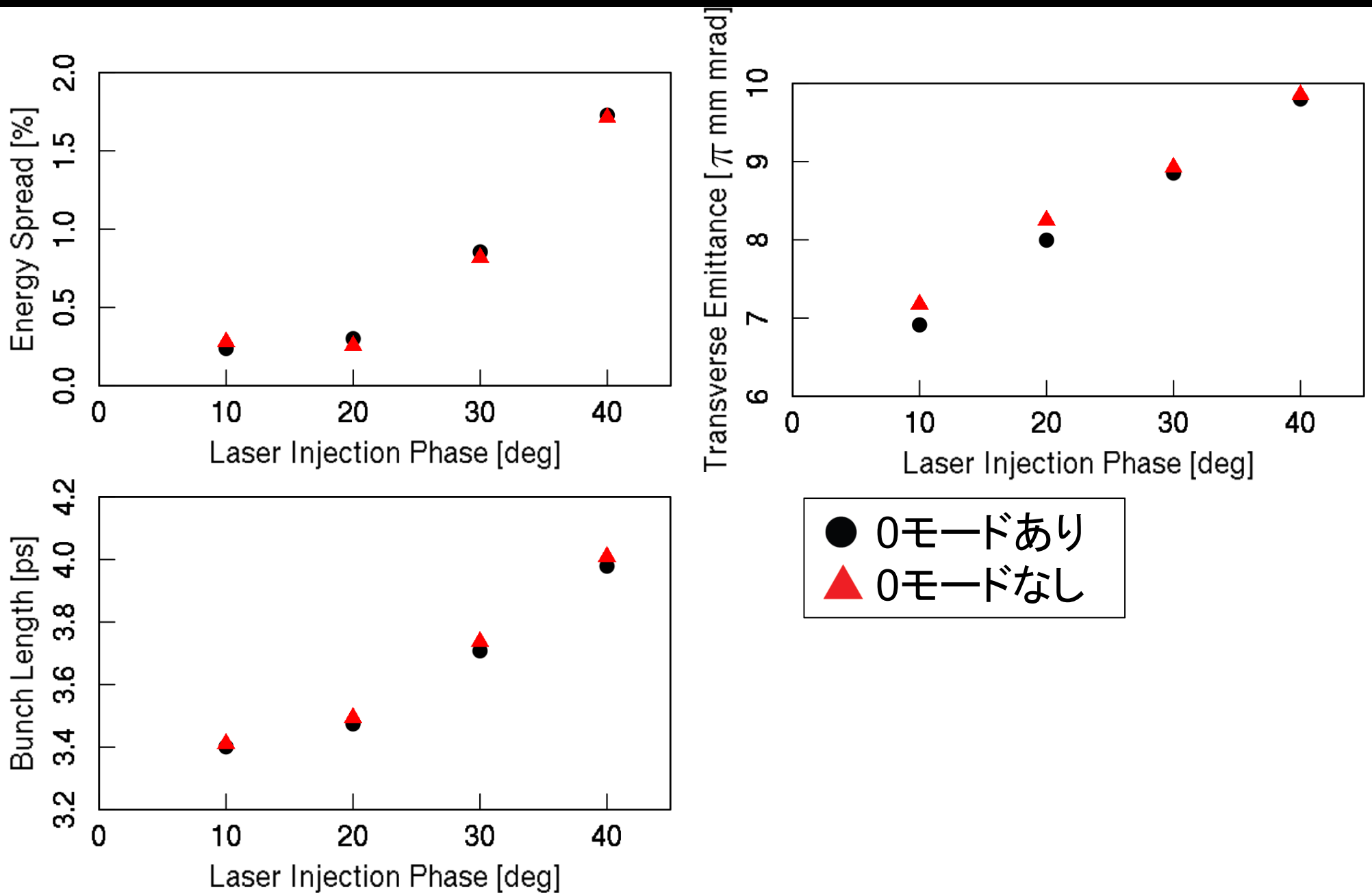
より、 \tilde{V}_z は

波高値: 0.110 MV (\tilde{V}_p に対して1.8%)

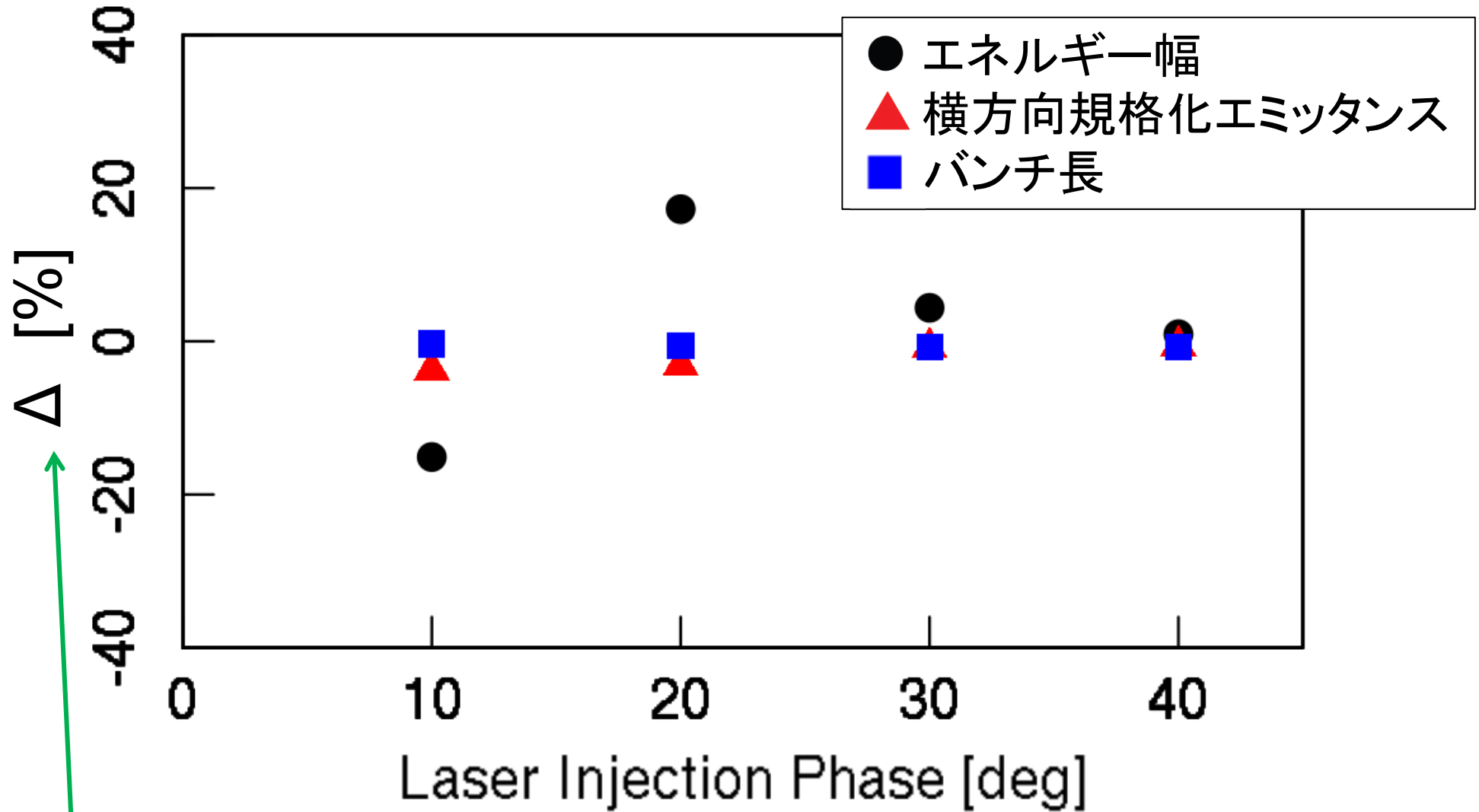
位相: -178.5° (\tilde{V}_p に対して -88.5°)

と計算された。

解析結果 (ビームローディング効果なし)



解析結果 (ビームローディング効果なし)



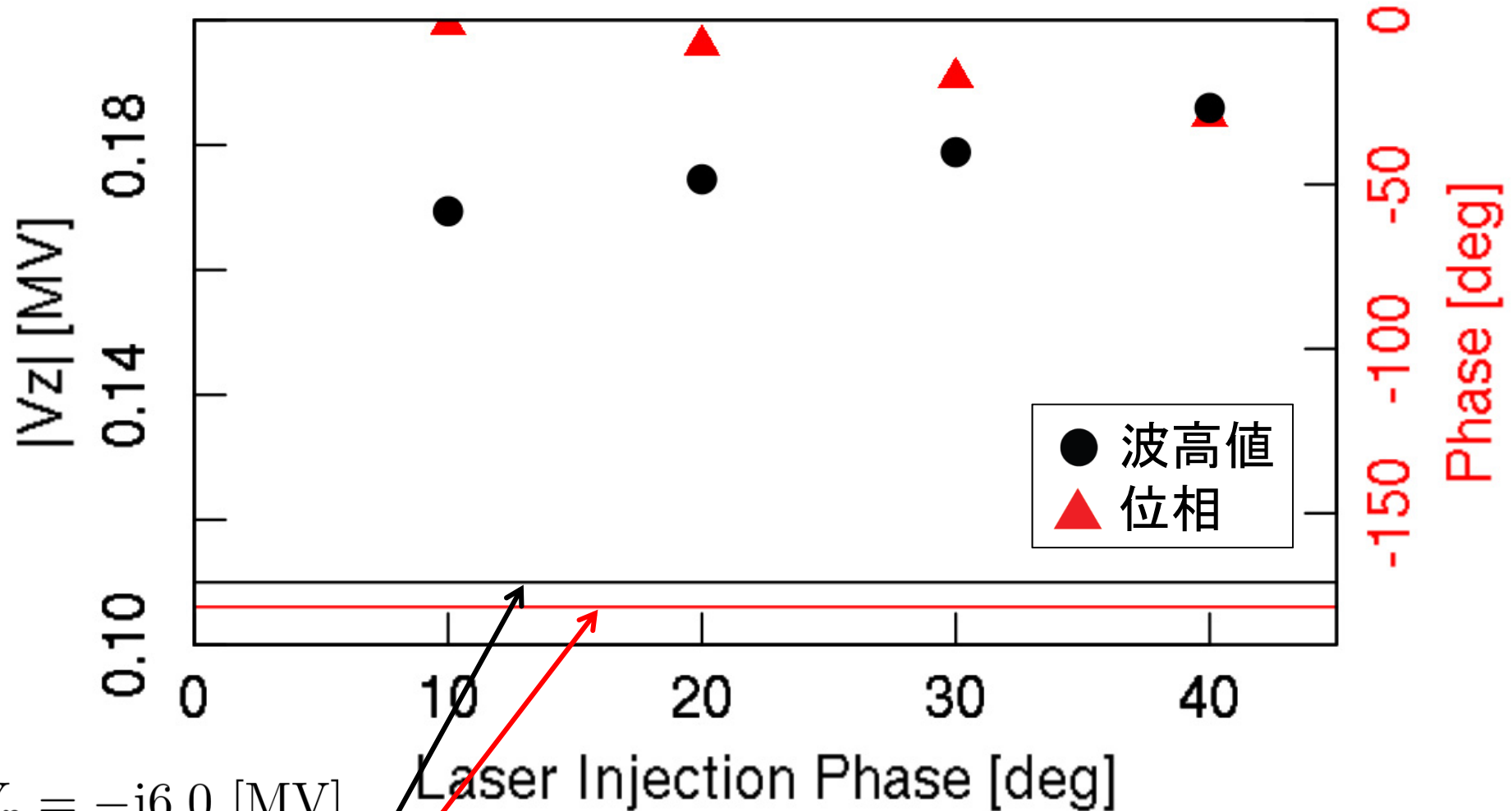
$$\frac{(0\text{モードありの値}) - (0\text{モードなしの値})}{(0\text{モードなしの値})} \times 100 \text{ [%]}$$

次にビームローディング効果がある場合の計算を行った。

\tilde{V}_p を固定し、粒子軌道計算で算出されたビームローディング電流 $\tilde{I}_{b,p}$ 、 $\tilde{I}_{b,z}$ から \tilde{V}_z を繰り返し再計算し、この計算値が収束するまで粒子軌道解析を行った。

$$\tilde{V}_z = \frac{\left\{ G_p + j \left(\omega C_p - \frac{1}{\omega L_p} \right) \right\} \tilde{V}_p + \tilde{I}_{b,p} - n \tilde{I}_{b,z}}{G_z + j \left(\omega C_z - \frac{1}{\omega L_z} \right)} \frac{1}{n}$$

解析結果 (V_z)

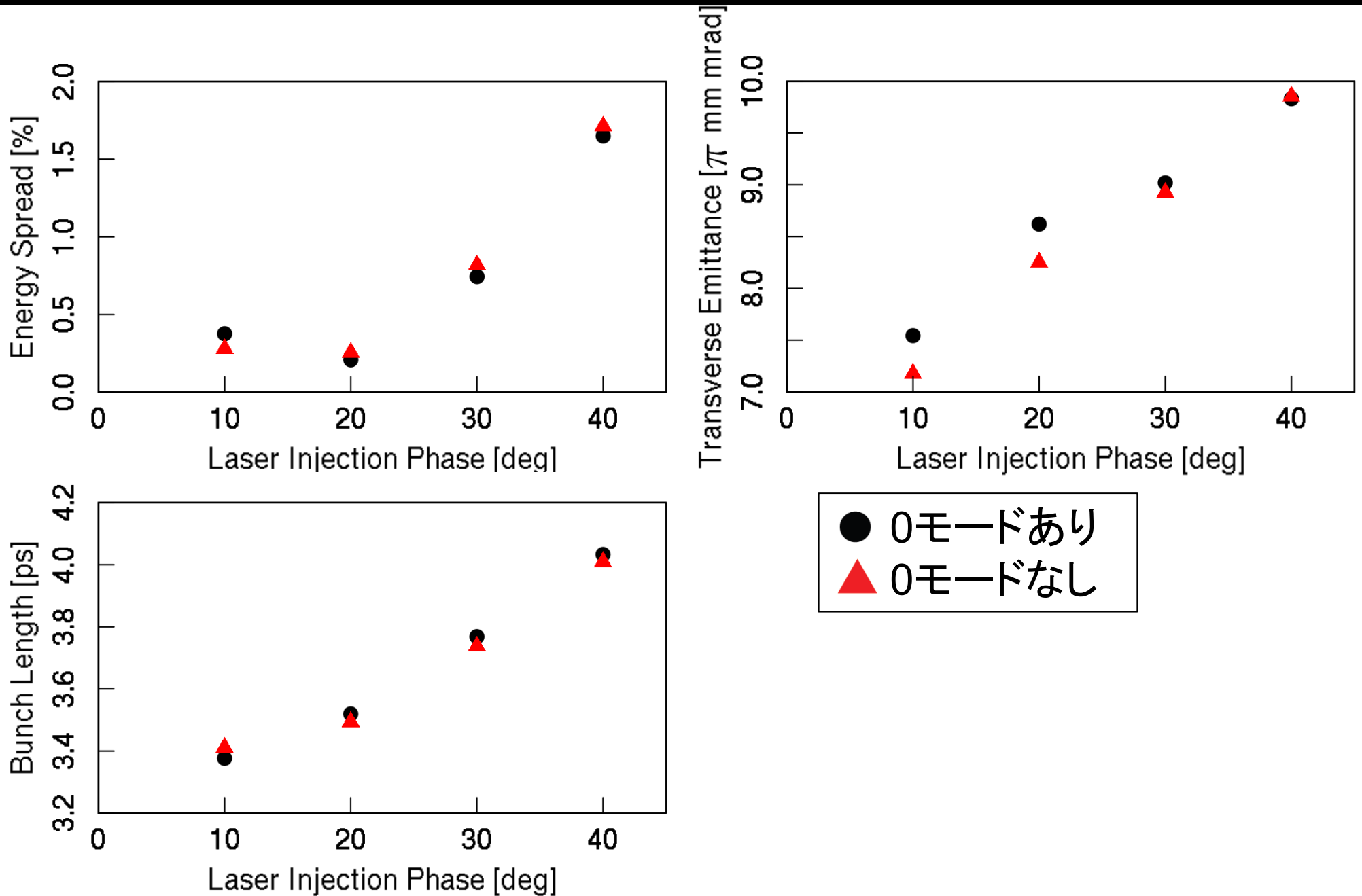


$$\tilde{V}_p = -j6.0 \text{ [MV]}$$

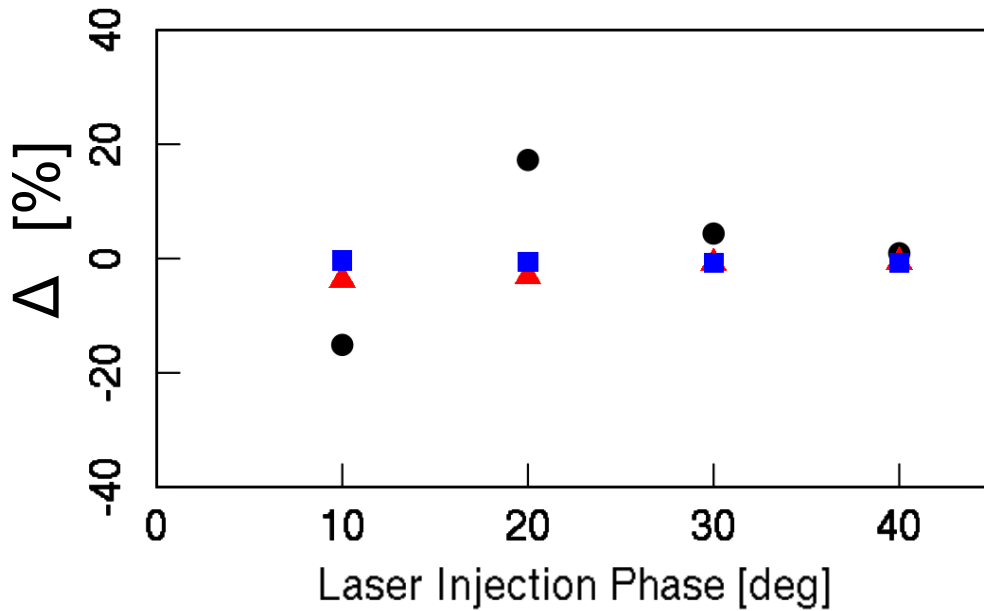
ビームローディングがない場合
 波高値: 0.110 MV
 位相: -178.5°

- ビームローディング効果がない場合と比較すると、より強く励振されており、位相は 180° 近く変化した。
- π モードに対して波高値は約3%、位相は約 $+60^\circ \sim +90^\circ$ 。

解析結果

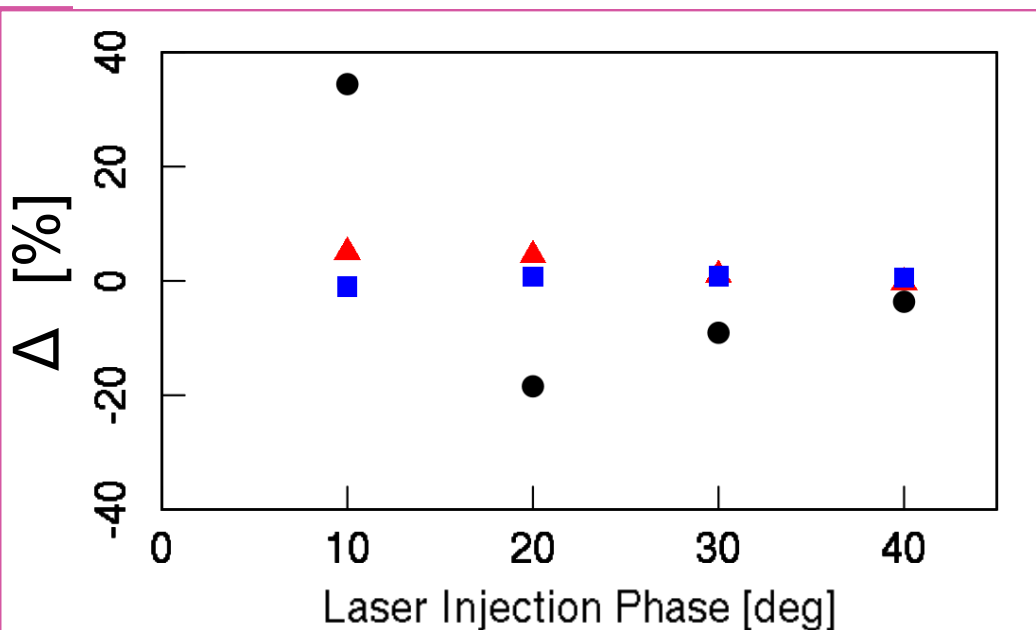


解析結果



ビームローディング効果が**ない**場合

- エネルギー幅
- ▲ 横方向規格化エミッタンス
- バンチ長



ビームローディング効果が**ある**場合

ビームローディング効果がない場合と比較すると、変化の方向が逆になっている。
また、全体的に変化の大きさが増大している。

目次

1 はじめに

1.1 背景

1.2 目的

2 研究手法

2.1 全体の流れ

2.2 固有モード解析

2.3 等価回路モデル

2.4 粒子軌道解析

3 解析結果

3.1 レーザー入射位相

3.2 計算精度

3.3 ビームローディング効果がない場合

3.4 ビームローディング効果がある場合

→ 4 まとめ

まとめ



1. ビームローディング効果により、0モードはより励振され、位相は 180° 近く変化した。 π モードに対して電界強度は約3%、位相は約 $+60^\circ \sim +90^\circ$ であった。
2. 1にともない、各ビーム特性の Δ の大きさは増加し、符号が逆転した。
3. ビームローディング効果がある場合、横方向エミッタンスおよびバンチ長の Δ は5%未満であり、エネルギー幅の Δ は最大34%であった。
4. エネルギー幅の Δ は比較的大きいものの、いずれのビーム特性についてもビームローディング効果によって Δ は大きく変化しなかった。すなわち、マルチバンチ運転の場合も0モードによるビーム特性への影響は大きくない。

回路定数

以下の式より、各回路定数は、
 ω_0 、 Q_0 、 R/Q の3つの値から算出。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

$$Q_0 = \frac{\omega_0 C}{G}$$

$$\frac{R}{Q} = \frac{V^2}{2\omega_0 W} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{\omega_0 C}$$

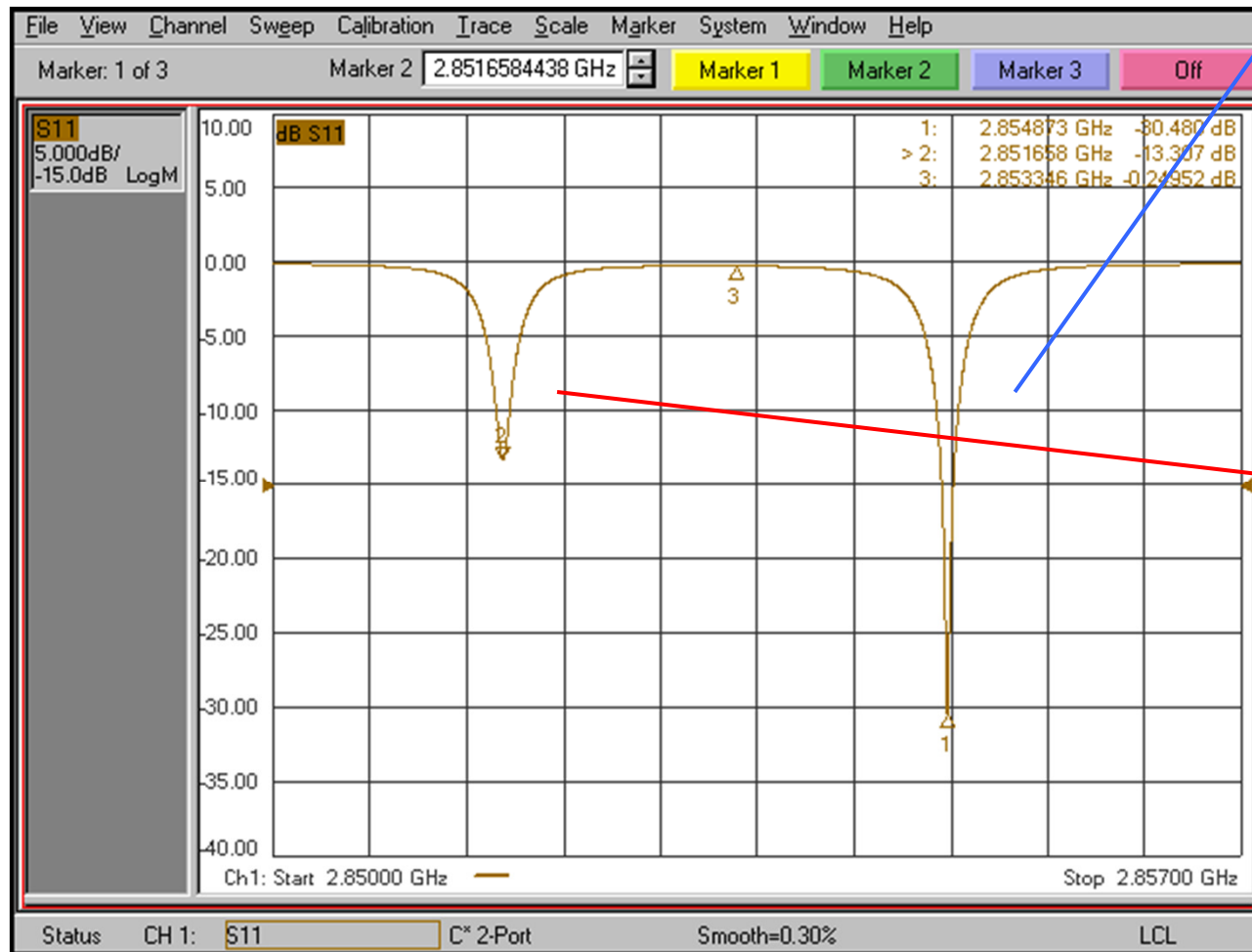
Q_0 と ω_0 は測定データから。

R/Q は固有モード解析から。

ω_0 および Q_0



以下の測定結果より ω_0 と Q_0 が求められる。



$\frac{1}{4}$ mode:

$$f_0 = 2854.873 \text{ [MHz]}$$
$$\rightarrow \omega_0 = 1793769 \text{ [Mrad/s]}$$
$$Q_0 = 11995$$
$$\beta = 1.0617$$

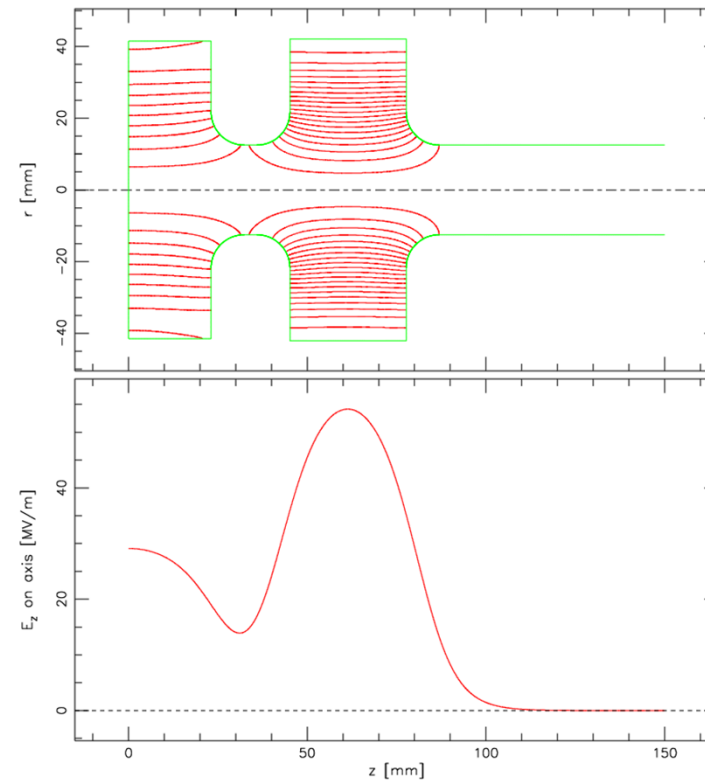
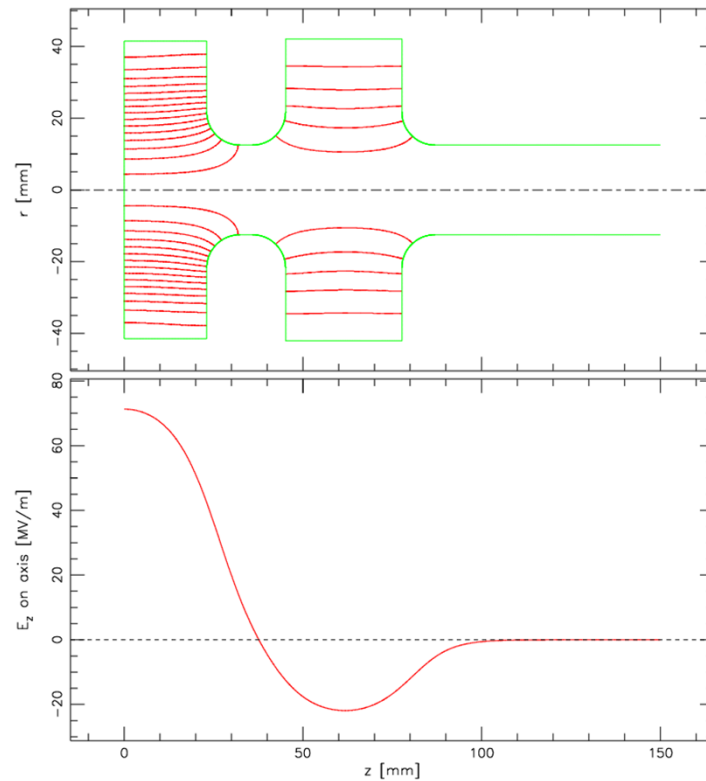
0 mode:

$$f_0 = 2851.658 \text{ [MHz]}$$
$$\rightarrow \omega_0 = 1791749 \text{ [Mrad/s]}$$
$$Q_0 = 18517$$
$$\beta = 1.5513$$

R/Q



固有モード解析の結果



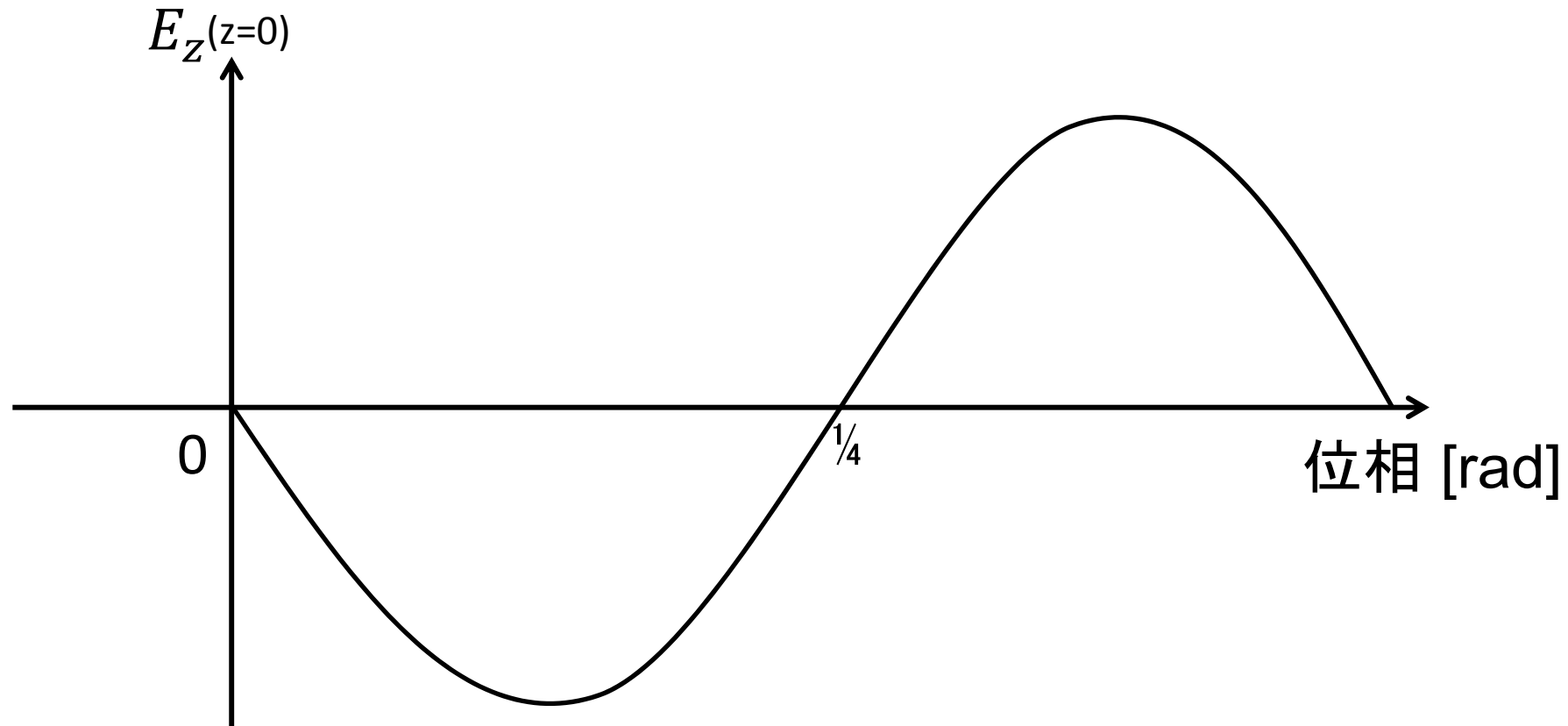
R/Q

$\frac{1}{4}$ mode: 179.180 [Ω]

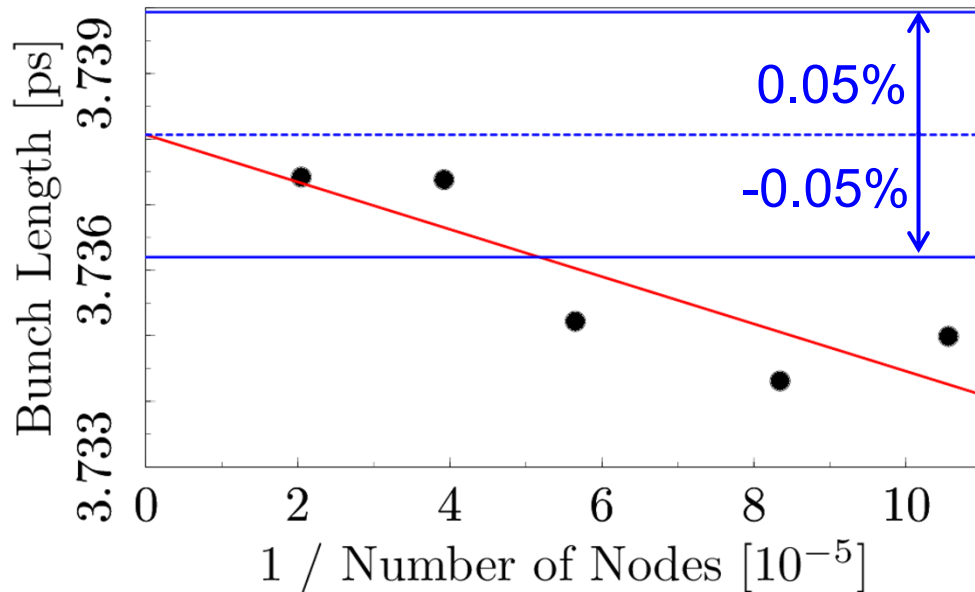
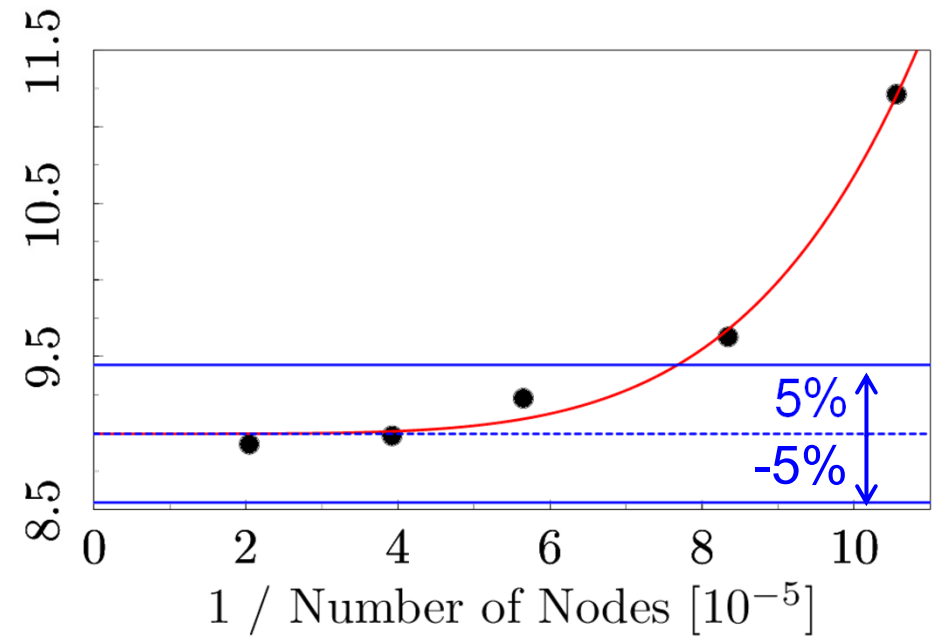
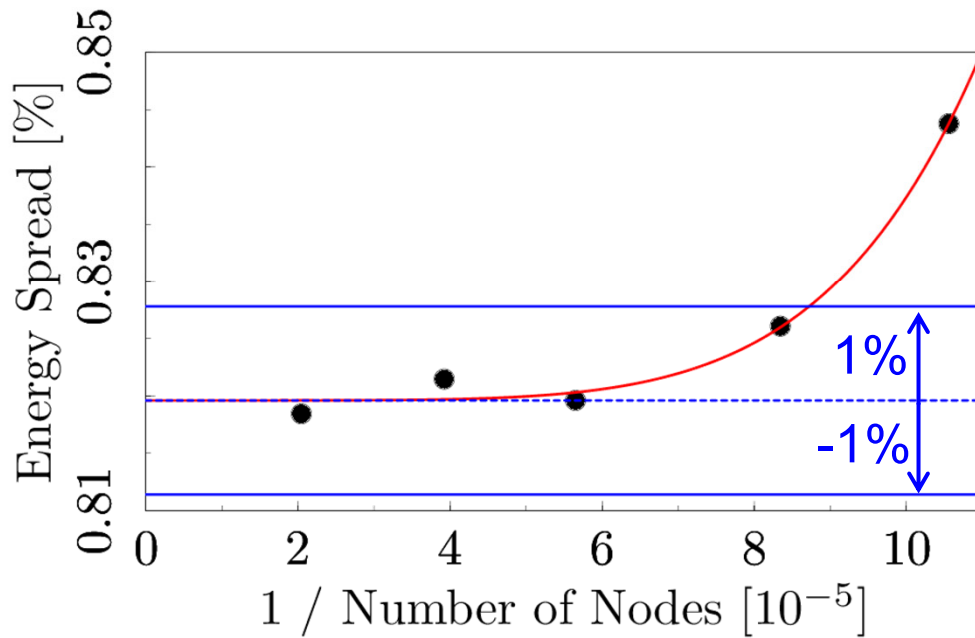
0 mode: 235.355 [Ω]

位相の基準

本研究では、位相の基準を陰極におけるモードの軸方向電界とし、その複素電圧が正の純虚数となる点を 0° と定義する。



解析の精度 (ノード数)



解析の精度 (時間刻み幅)

