

# J-PARC RCS の大強度化に向けた 線形和共鳴の補正研究

Study on the compensation of linear sum resonance  
for further beam power ramp-up in J-PARC RCS

日本原子力研究開発機構 / J-PARCセンター<sup>A</sup>

東北大学<sup>B</sup>

小島邦洸<sup>A</sup>, 原田寛之<sup>A</sup>, 地村幹<sup>A</sup>, 永山晶大<sup>B</sup>, サハプラナブ<sup>A</sup>

# もくじ

## □ 研究背景

## □ チューン掃引実験

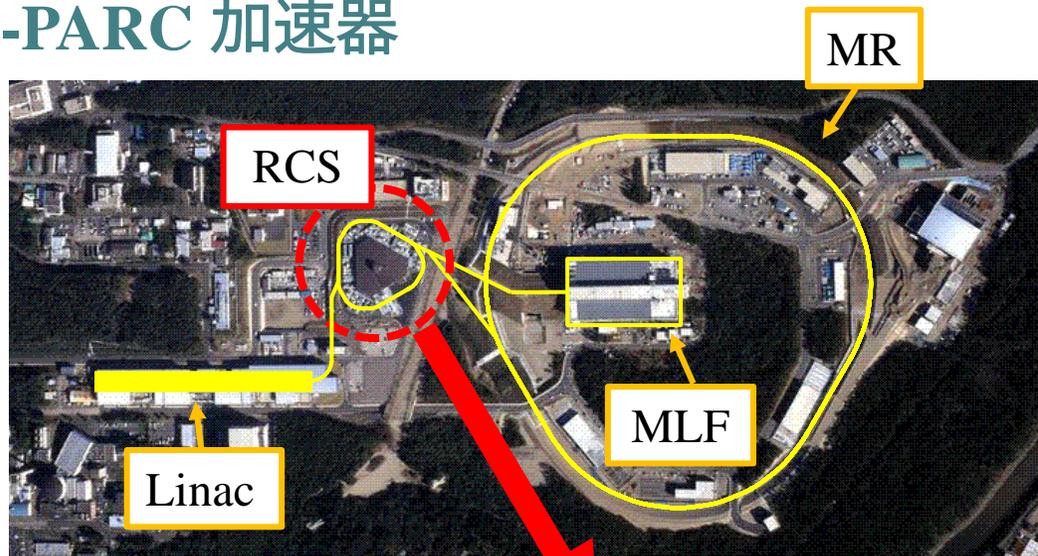
1. 高チューン側におけるビーム損失起源の同定

## □ 線形和共鳴の補正

2. 線形和共鳴補正手法の検討
3. 線形和共鳴補正の効果検証

# 研究背景

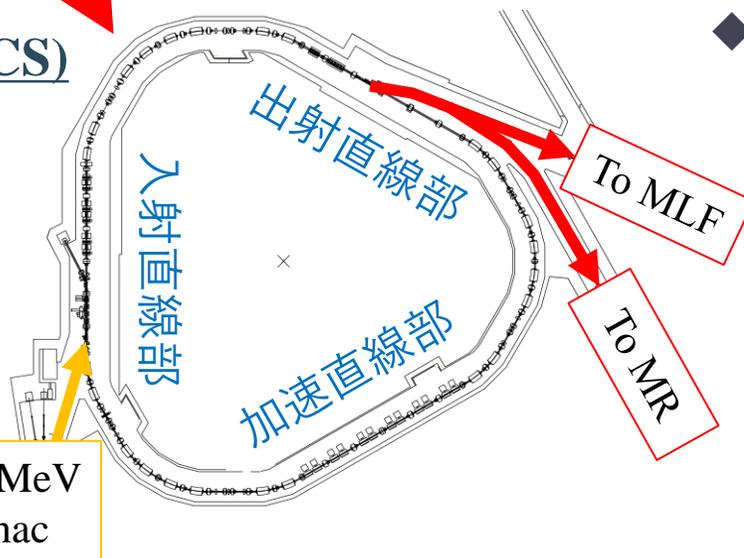
## ◆ J-PARC 加速器



### 3 GeV シンクロトロン (RCS)

- 400 MeV から 3 GeV までビーム加速を 25 Hz で行う
- 荷電変換 ( $H^- \rightarrow P$ ) により 307 回の多重入射で大電流ビームを生成

400 MeV  
Linac



## ◆ 要求されるビーム条件

- 物質・生命科学実験施設 (MLF)  
大きなビームサイズ (入射時  $200\pi$  mm · mrad)
- 主リングシンクロトロン (MR)  
小さなビームサイズ (入射時  $50\pi$  mm · mrad)

### 挑戦的な加速器

- ◆ 強度, ビームサイズ, 運動量広がり, 等条件の異なるビームを速い繰返しで加速
- ◆ 割合としては僅かなのビーム損失でも装置の放射化により運転が制限

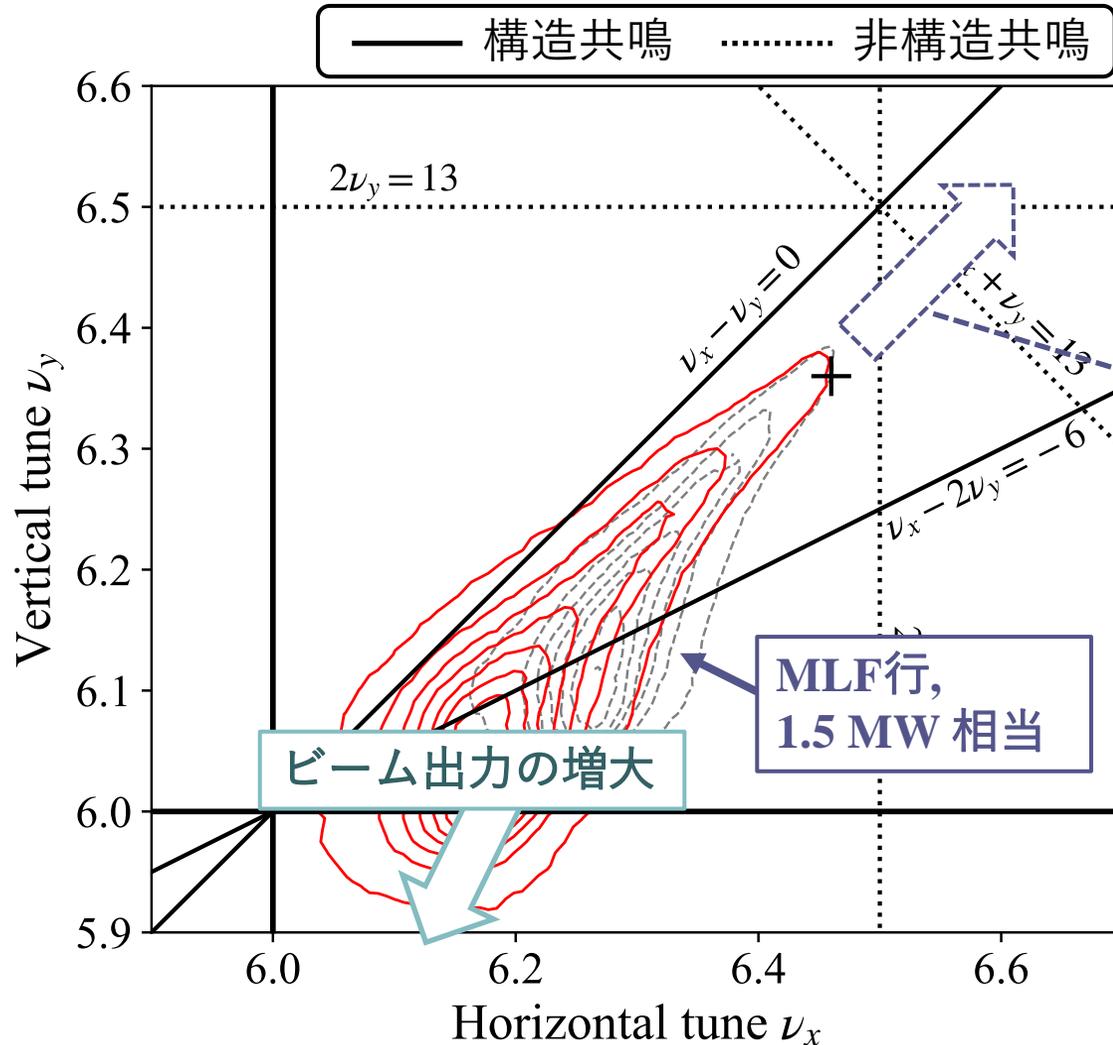
### 現状

設計出力である 1 MW を達成  
ビーム損失を 0.1% まで低減

**更なる大強度 1.5 MW に向け  
より一層のビーム損失低減・  
不安定化の回避が求められる**

# ビーム損失起源

## ◆ ベータatron チューンマップ



## ◆ 安定領域を狭める要因

- ① クロマティシティと運動量広がり及び空間電荷力によるチューンスプレッド
- ② 動作点近傍の非構造共鳴の励起

## ◆ 1.5 MW に向けて

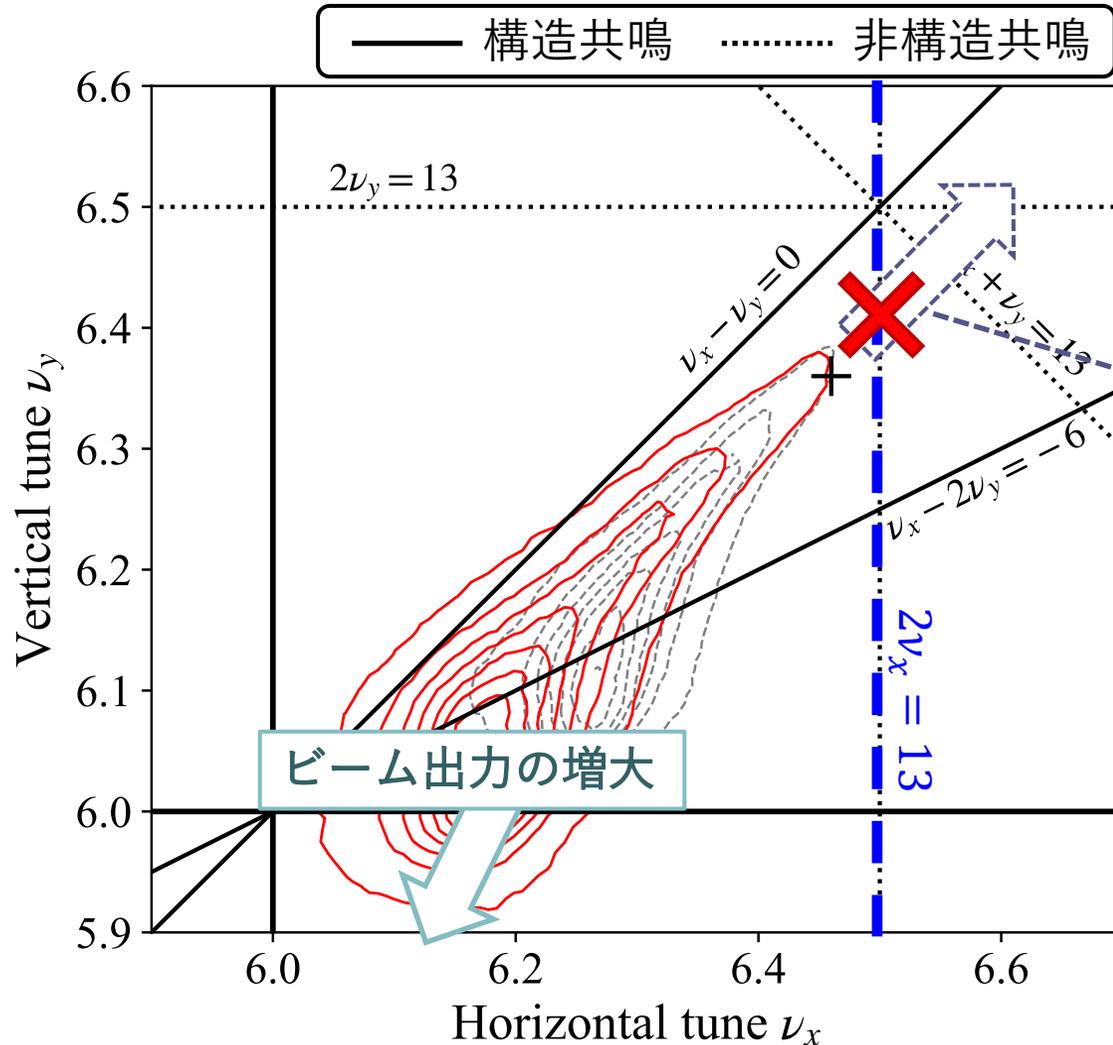
動作点を高チューン側に移動させ  
 構造共鳴の影響を緩和したい



動作点を動かせばビームロスが増大  
 現状では安定領域が不足

# ビーム損失起源

## ◆ ベータatron チューンマップ

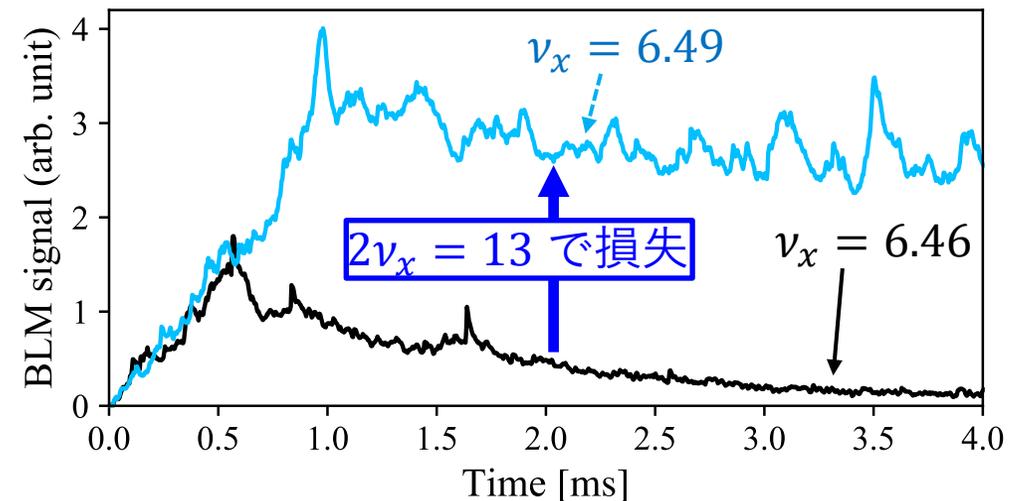


## ◆ 安定領域を狭める要因

- ① クロマティシティと運動量広がり及び空間電荷力によるチューンスプレッド
- ② 動作点近傍の非構造共鳴の励起

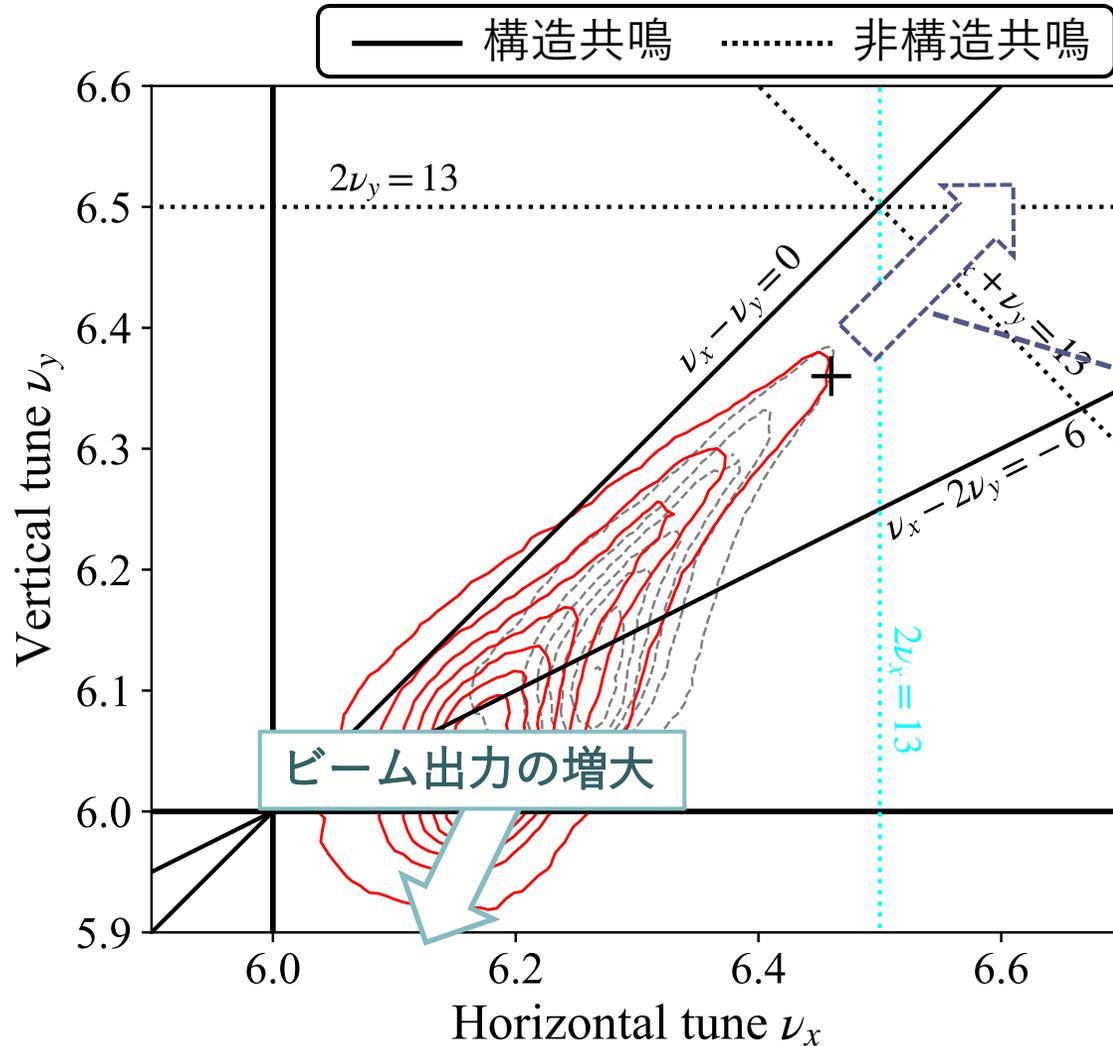
## ◆ 1.5 MW に向けて

動作点を高チューン側に移動させ  
構造共鳴の影響を緩和したい



# ビーム損失起源

## ◆ ベータatronチューンマップ

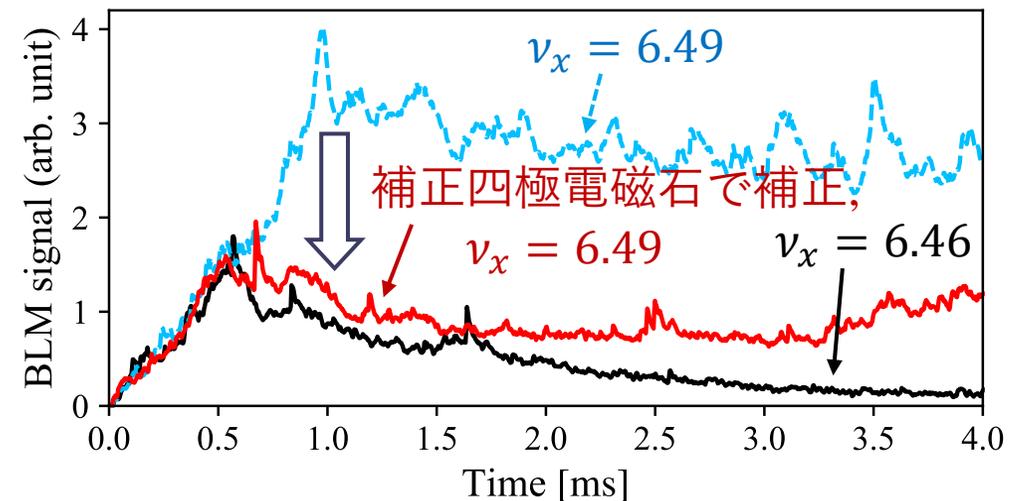


## ◆ 安定領域を狭める要因

- ① クロマティシティと運動量広がり及び空間電荷力によるチューンスプレッド
- ② 動作点近傍の非構造共鳴の励起

## ◆ 1.5 MW に向けて

動作点を高チューン側に移動させ  
構造共鳴の影響を緩和したい





# もくじ

## □ 研究背景

## □ チューン掃引実験

1. 高チューン側におけるビーム損失起源の同定

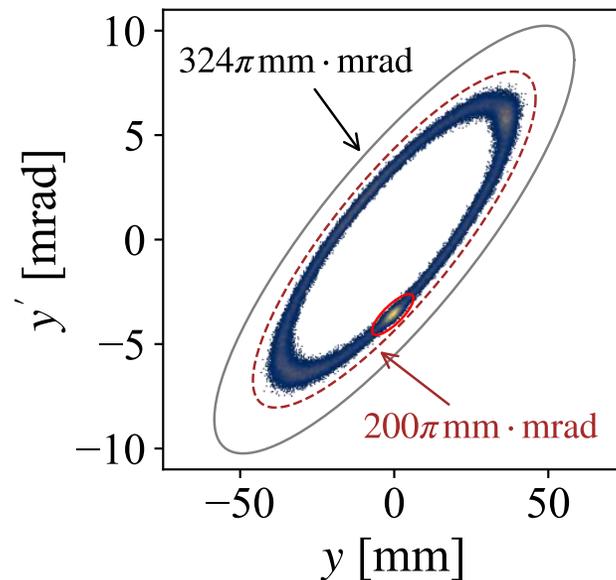
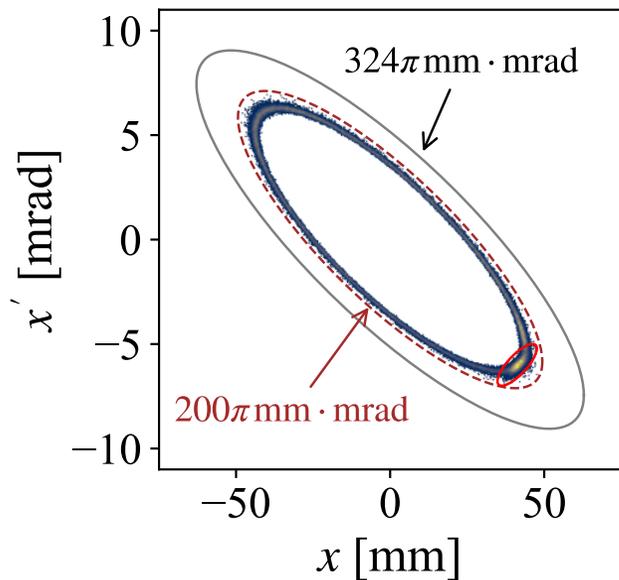
## □ 線形和共鳴の補正

2. 線形和共鳴補正手法の検討
3. 線形和共鳴補正の効果検証

# チューン掃引実験

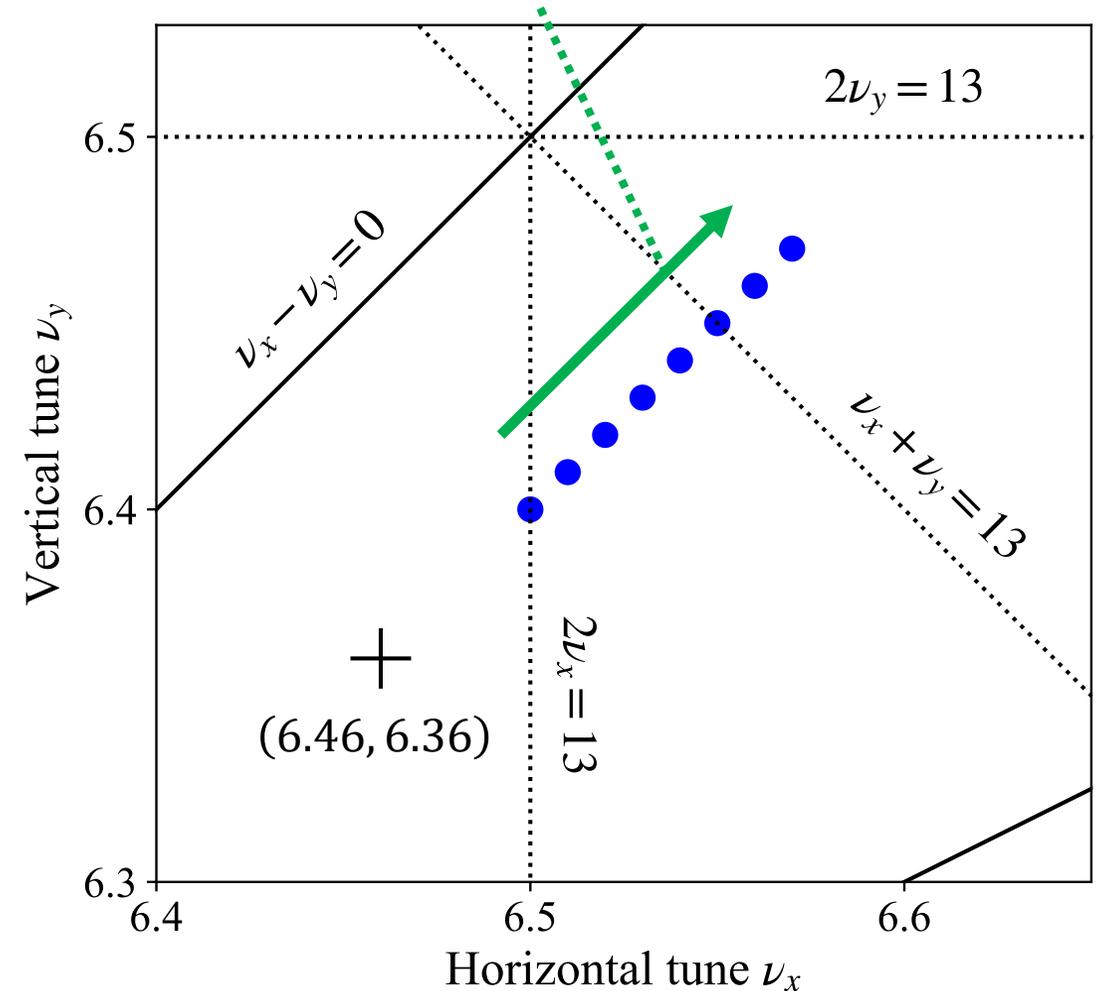
## □ ビーム条件

- 短パルス, 30 回入射 (1 MW 運転時の約 1/200)  
→ 空間電荷力を低減し状況を簡単化
- 水平方向・垂直方向:  
振幅大 (ペイントエリア:  $200\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ )  
→ 水平方向の共鳴に対するロスの感度を高める
- 進行方向: 振幅小 → チューンシフトを低減



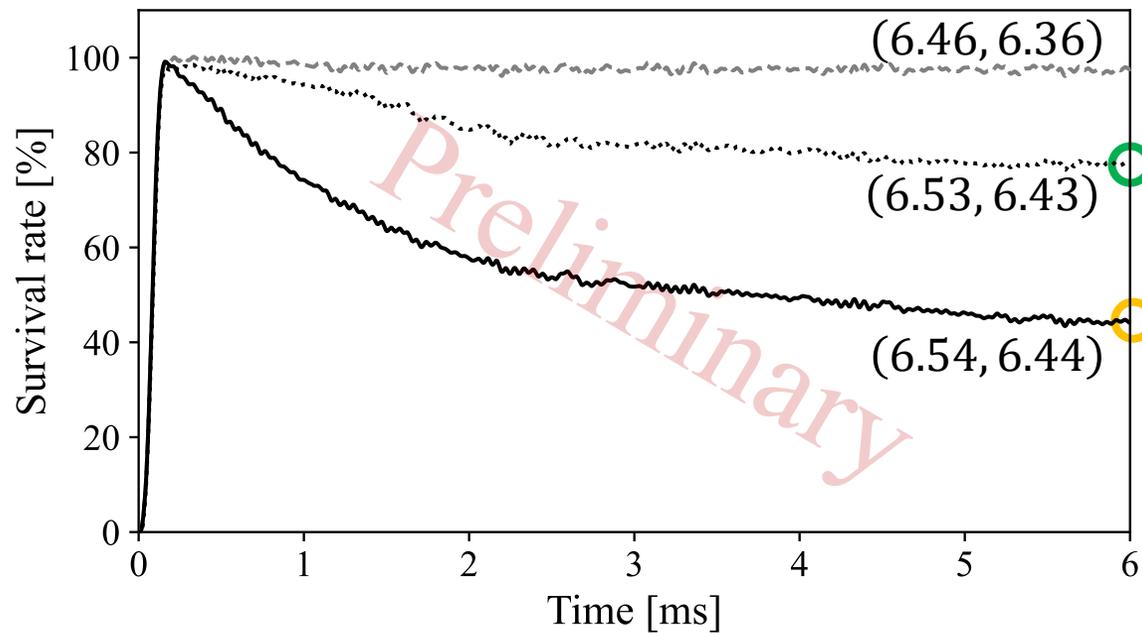
## □ 動作点

構造共鳴から遠ざかる方向へ掃引

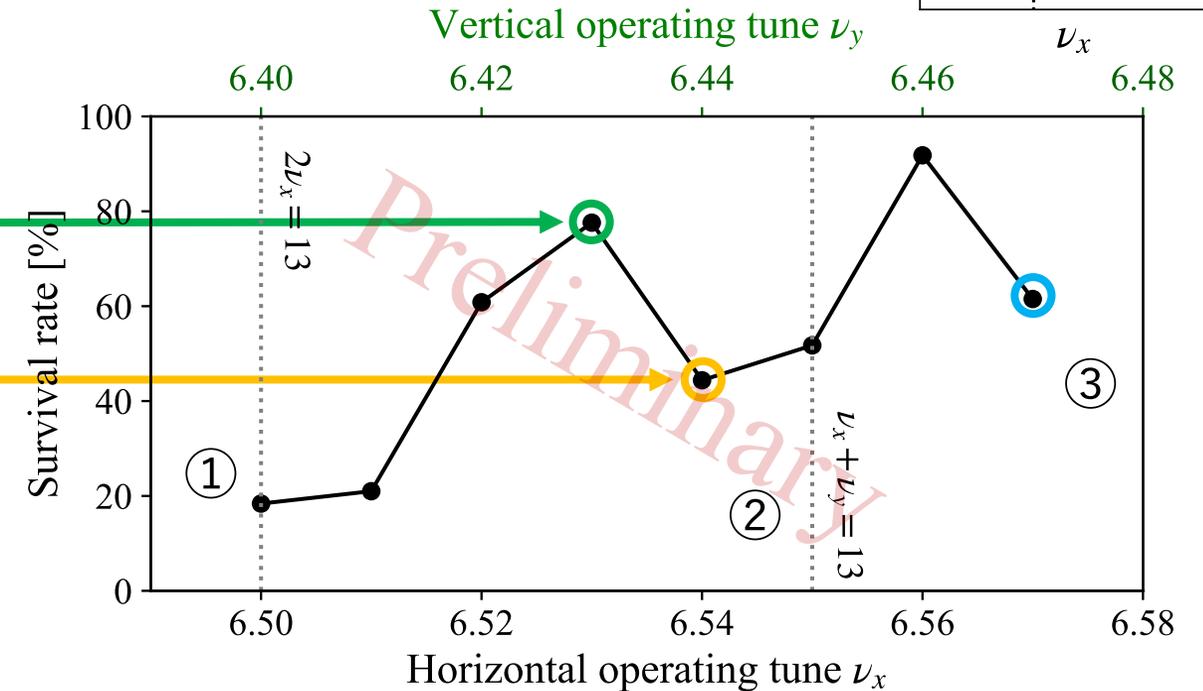


# ビーム損失起源の同定

## □ ビーム生存率の時間応答



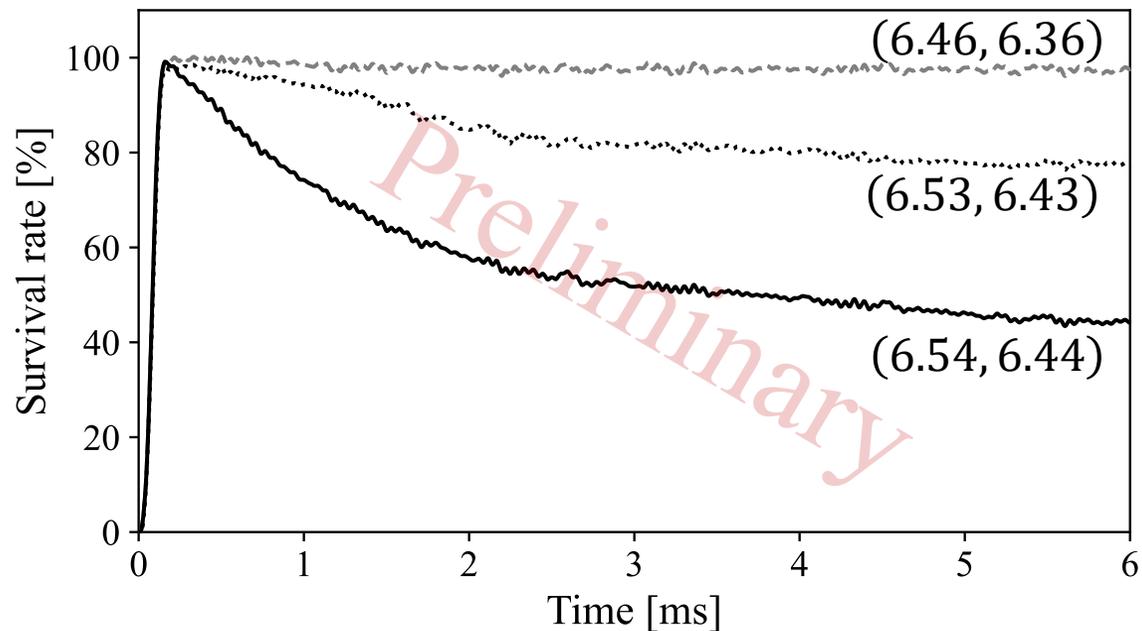
## □ ビーム生存率の動作点応答



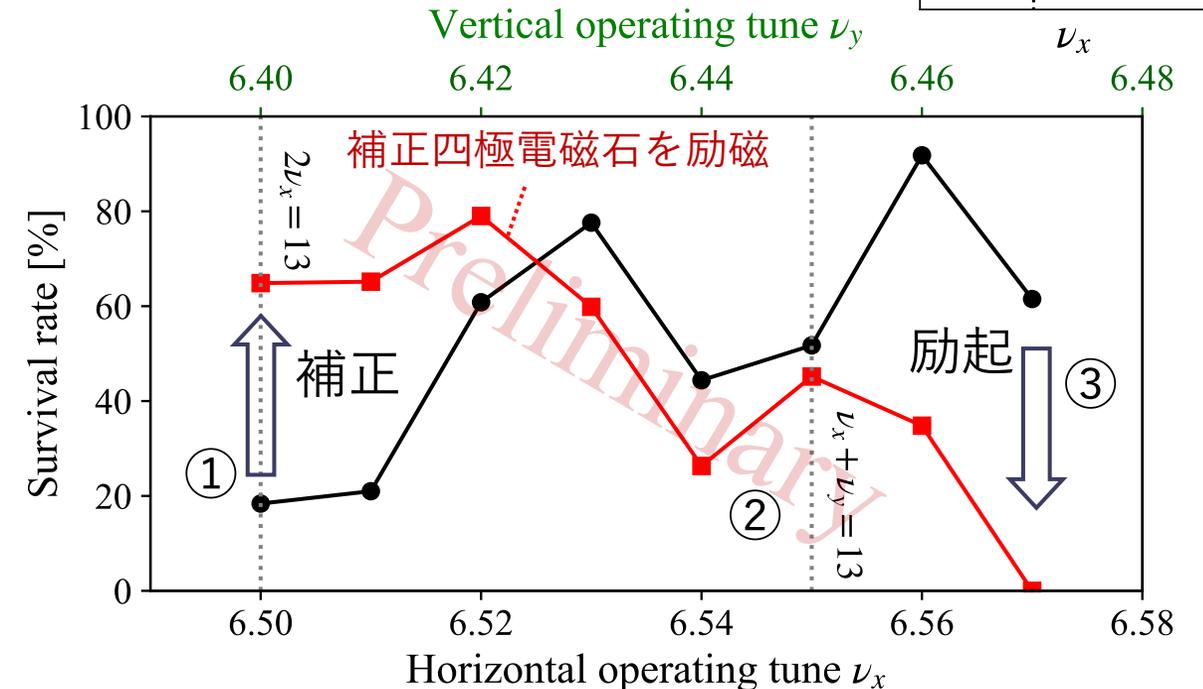
- ◆ ビーム損失起源 {
- ① 水平方向の半整数共鳴:  $2\nu_x = 13$  → 補正四極電磁石で補正可能
  - ②
  - ③

# ビーム損失起源の同定

## □ ビーム生存率の時間応答



## □ ビーム生存率の動作点応答



## ◆ ビーム損失起源

- ① 水平方向の半整数共鳴 :  $2\nu_x = 13$
- ② 線形和共鳴 :  $\nu_x + \nu_y = 13$
- ③ 鉛直方向の半整数共鳴 :  $2\nu_y = 13$

→ 補正四極電磁石で補正可能

→ ② が ③ よりも現行の動作点に近い

→ 線形和共鳴が安定領域を狭めている

# もくじ

## □ 研究背景

## □ チューン掃引実験

1. 高チューン側におけるビーム損失起源の同定

## □ 線形和共鳴の補正

2. 線形和共鳴補正手法の検討
3. 線形和共鳴補正の効果検証

# 線形和共鳴

## ◆ ハミルトニアン

$$H(\phi_x, \phi_y, J_x, J_y; s) = \frac{J_x}{\beta_x} + \frac{J_y}{\beta_y} + 2\kappa_1^{\text{skew}}(s) \sqrt{\beta_x \beta_y J_x J_y} \cos \phi_x \cos \phi_y$$

構造の対称性を崩す  
歪み(skew)四極場

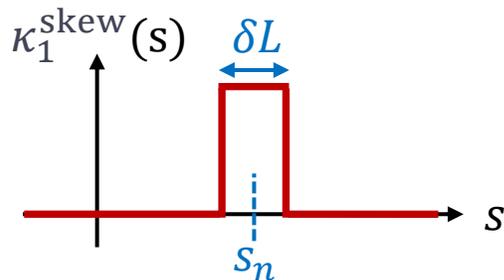
## ◆ ドライビングターム ( $\nu_x + \nu_y = 13$ )

$$\Delta G_{1,1,13} \approx \frac{1}{2\pi} \oint \sqrt{\beta_x(s)\beta_y(s)} \kappa_1^{\text{skew}}(s) e^{j[\chi_x + \chi_y - (\nu_x + \nu_y - 13)\theta]} ds$$

$$\begin{cases} L_0 : \text{周長} \\ \chi_{x(y)}(s) = \int_0^s \frac{ds'}{\beta_{x(y)}(s')} \\ \theta = 2\pi s/L \end{cases}$$

$$|\Delta G_{1,1,13}| = 0 \rightarrow \text{共鳴は発生せず}$$

$\kappa_1^{\text{skew}}(s)$  は狭い範囲でしか  
有意な値を持たないと仮定



$$\Delta G_{1,1,13} \approx \frac{1}{2\pi} \sum_n \sqrt{\beta_x(s_n)\beta_y(s_n)} K_{1,n}^{\text{skew}} (\cos \Omega_n + j \sin \Omega_n)$$

$$\Omega_n = \chi_x(s_n) + \chi_y(s_n) - 2\pi(\nu_x + \nu_y - 13)s_n/L$$

$$\text{歪み四極場の強さ} : K_{1,n}^{\text{skew}} = \kappa_1^{\text{skew}}(s_n)\delta L$$

→ 歪み四極場の重畳で線形和共鳴は補正可能

# 六極場による“歪み四極場”の重畳

〔 RCS に歪み (skew) 四極電磁石は備わっていない → 六極場に着目 〕

## ◆ 六極場のベクトルポテンシャル

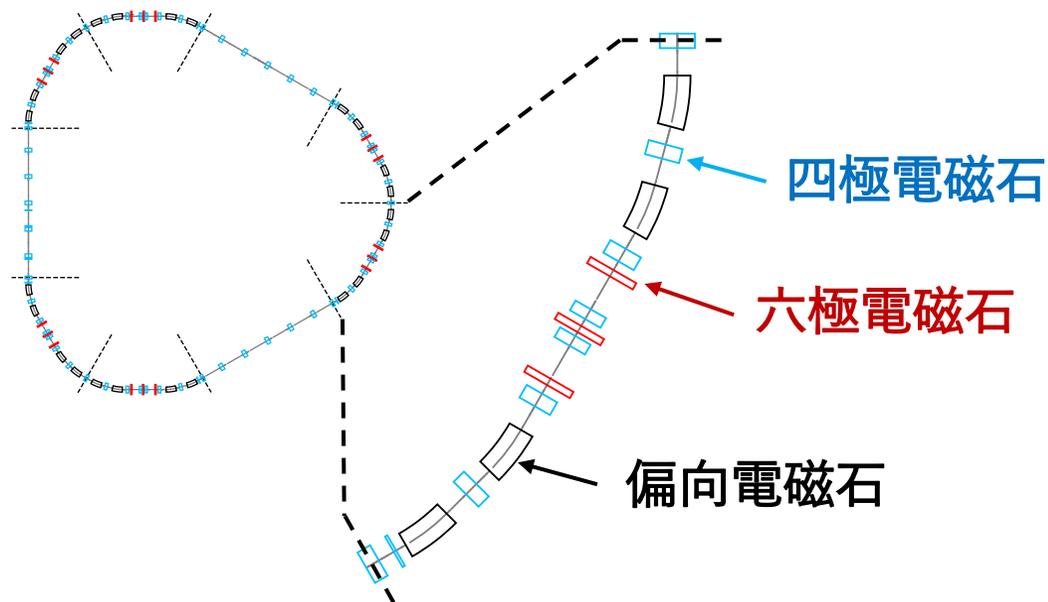
六極場の強さ： $K_2$

$$A_3 = -\frac{B\rho K_2}{6L}[x^3 - 3x(y + \Delta y)^2] \approx -\frac{B\rho K_2}{6L}(x^3 - 3xy^2) + \frac{K_2 B\rho \Delta y}{L}(xy)$$

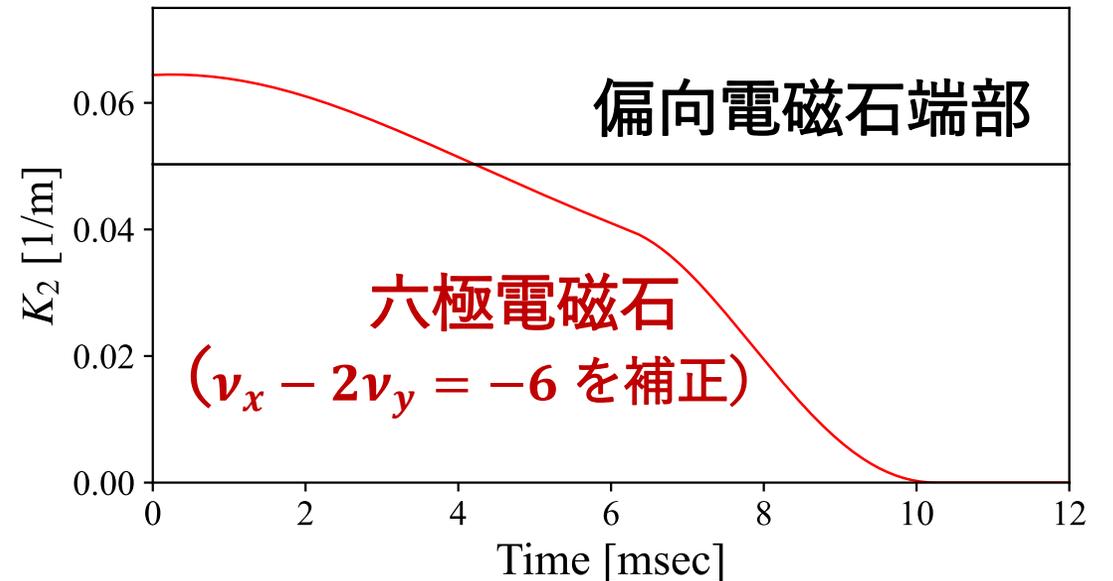
実効的な歪み四極場  
強度： $K_1^{\text{skew}} = K_2 \Delta y$

→ 六極場中にローカルバンブ軌道を形成することで歪み四極場を重畳可能

## □ アーク部の電磁石配置

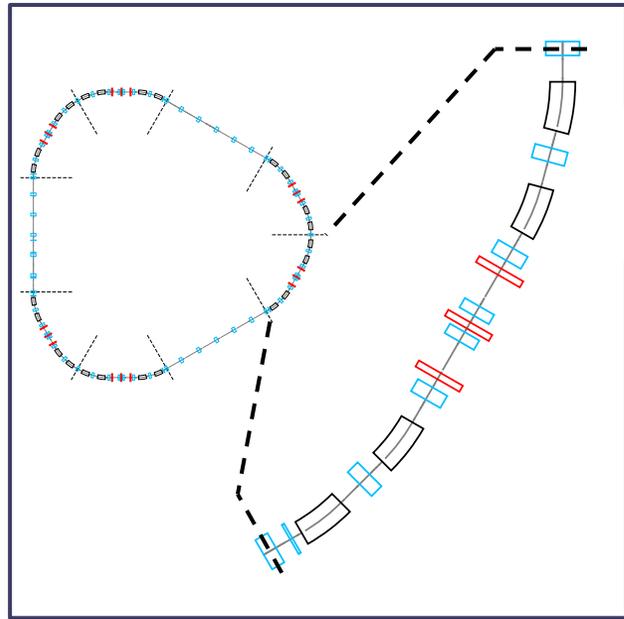


## □ 六極場成分

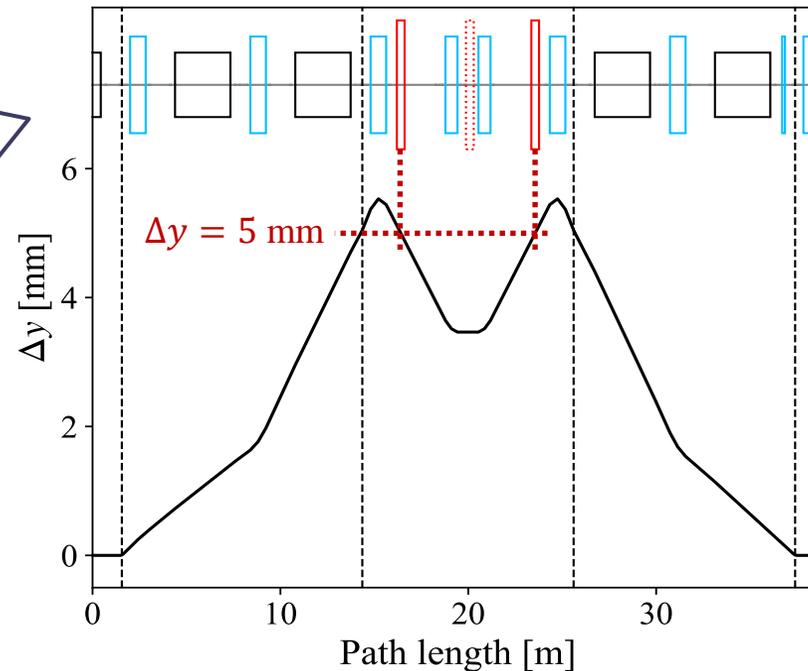


# ローカルバンブ軌道の形成

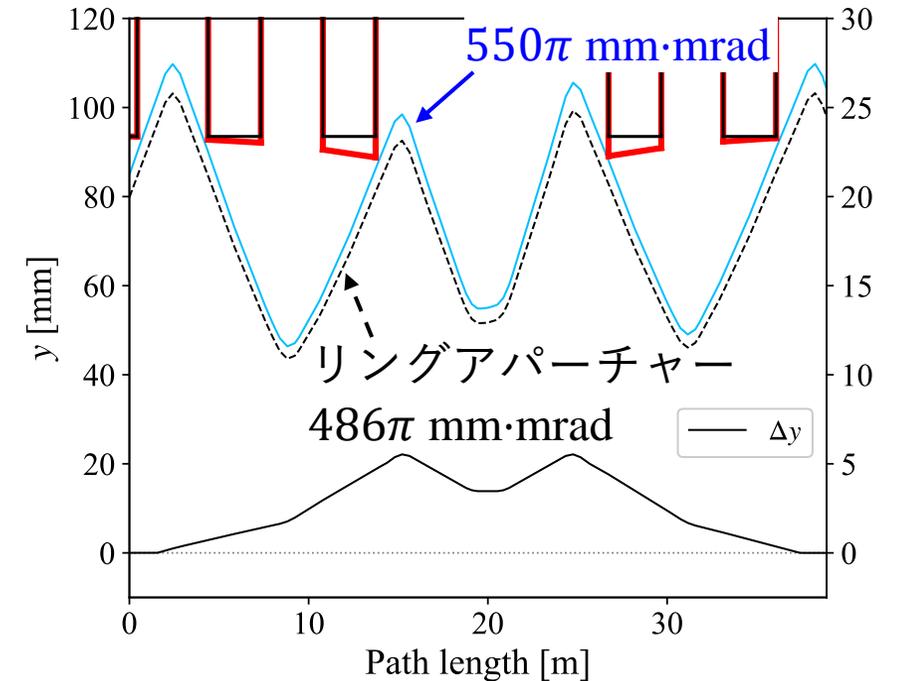
- ◆ ローカルバンブ軌道形成の指標
- 六極場中で鉛直方向に形成
  - 十分なアパーチャーを確保



□ ローカルバンブ軌道



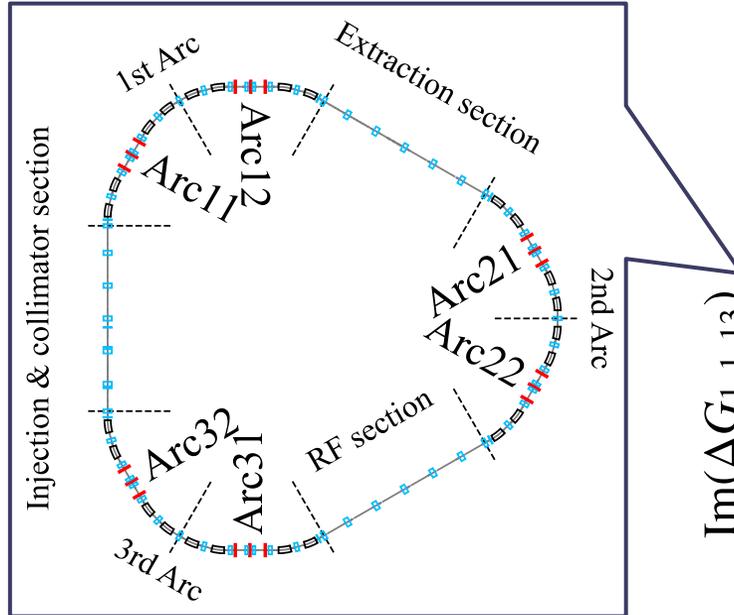
□ アパーチャーへの影響



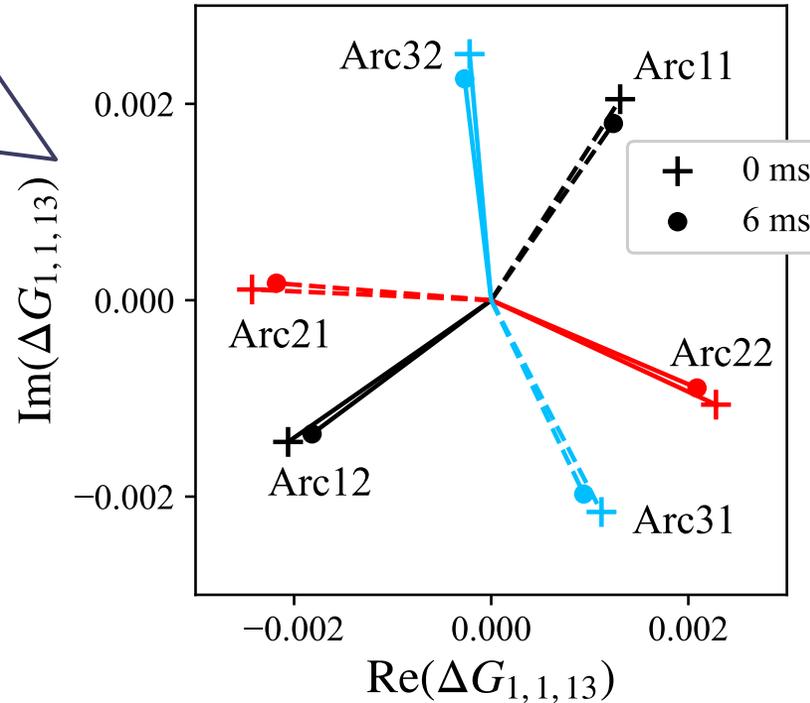
- 4台のステアリング電磁石を用いて六極・偏向電磁石を跨ぐローカルバンブ軌道を形成
- $\Delta y$  が 5 mm 程度であればアパーチャーは殆ど減少しない

→ **線形和共鳴の補正に適用できるローカルバンブ軌道を形成可能**

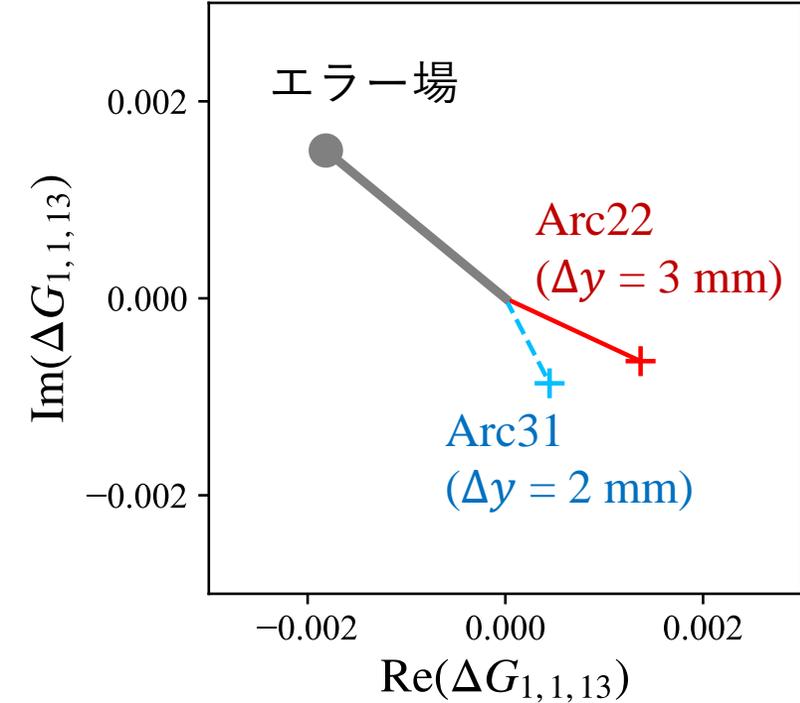
# 線形和共鳴の補正



## □ ドライビングターム



## ◆ 共鳴補正の例



$$\Delta G_{1,1,13} \approx \frac{1}{2\pi} \sum_n \sqrt{\beta_x(s_n)\beta_y(s_n)} \times K_{1,n}^{\text{skew}} (\underbrace{\cos \Omega_n}_{\text{実部 (横軸)}} + j \underbrace{\sin \Omega_n}_{\text{虚部 (縦軸)}})$$

- 同様なローカルバンプ軌道を6箇所形成可能
- 各箇所ドライビングタームの方向異なる

→ 共鳴補正に必要な自由度を確保

# もくじ

## □ 研究背景

## □ チューン掃引実験

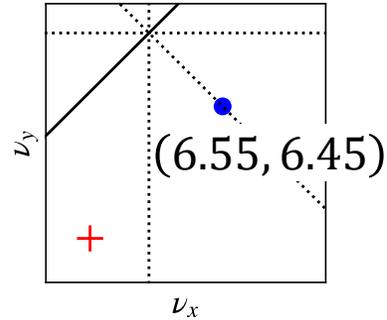
1. 高チューン側におけるビーム損失起源の同定

## □ 線形和共鳴の補正

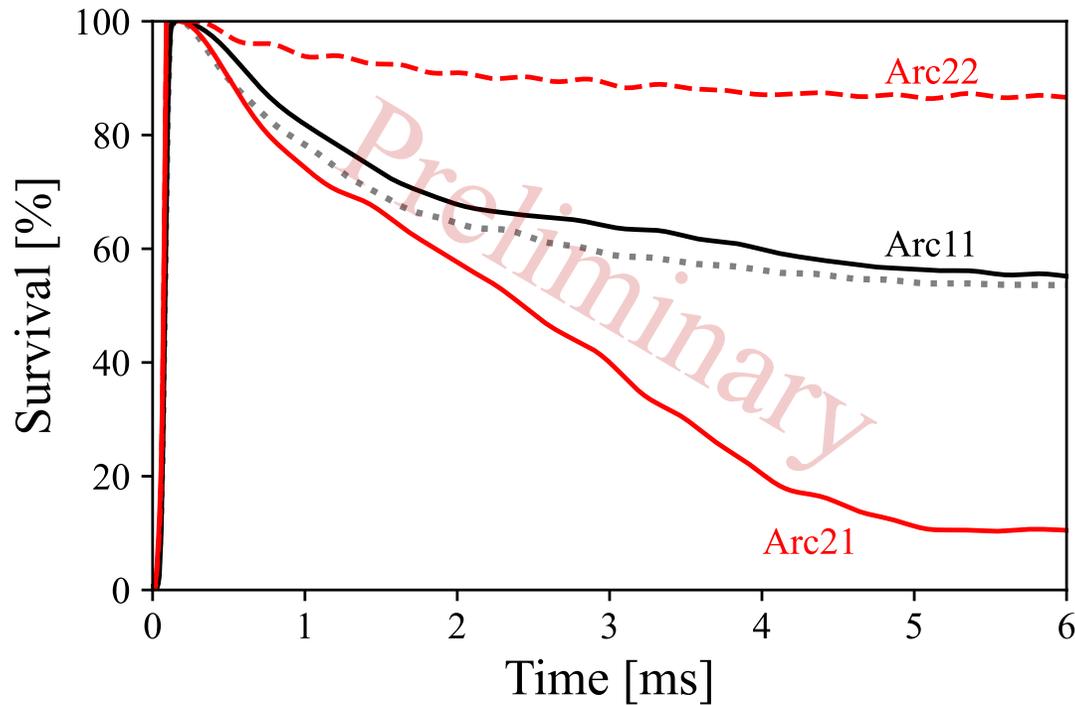
2. 線形和共鳴補正手法の検討
3. 線形和共鳴補正の効果検証

# 線形和共鳴補正の効果検証

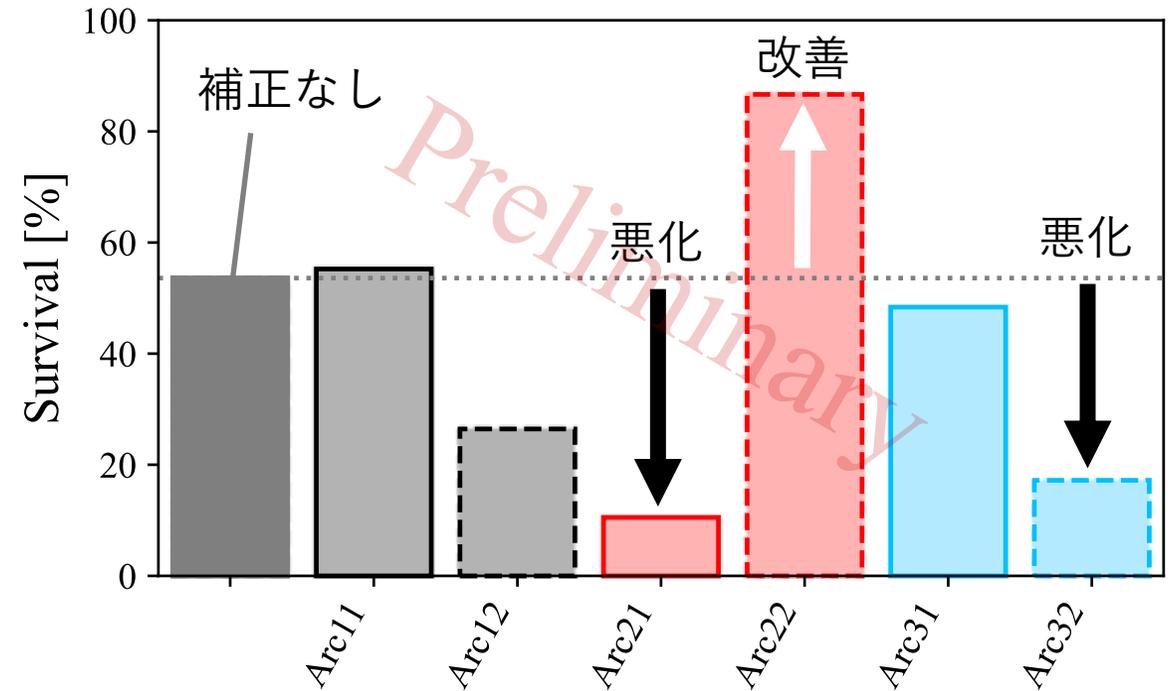
- ◆ ローカルバンブ軌道
  - Arc11, 12, 21, 22, 31, 32 の 1 箇所ずつ形成
  - 六極電磁石の位置で  $\Delta y = 5 \text{ mm}$



## □ ビーム生存率の時間応答



## □ ビーム生存率の動作点応答

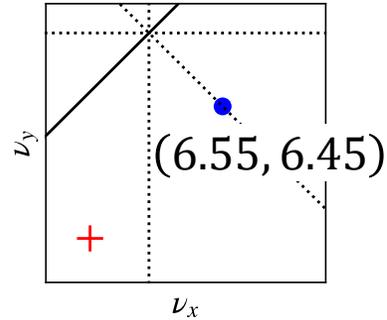


➤ 共鳴補正の効果をビーム試験で実証

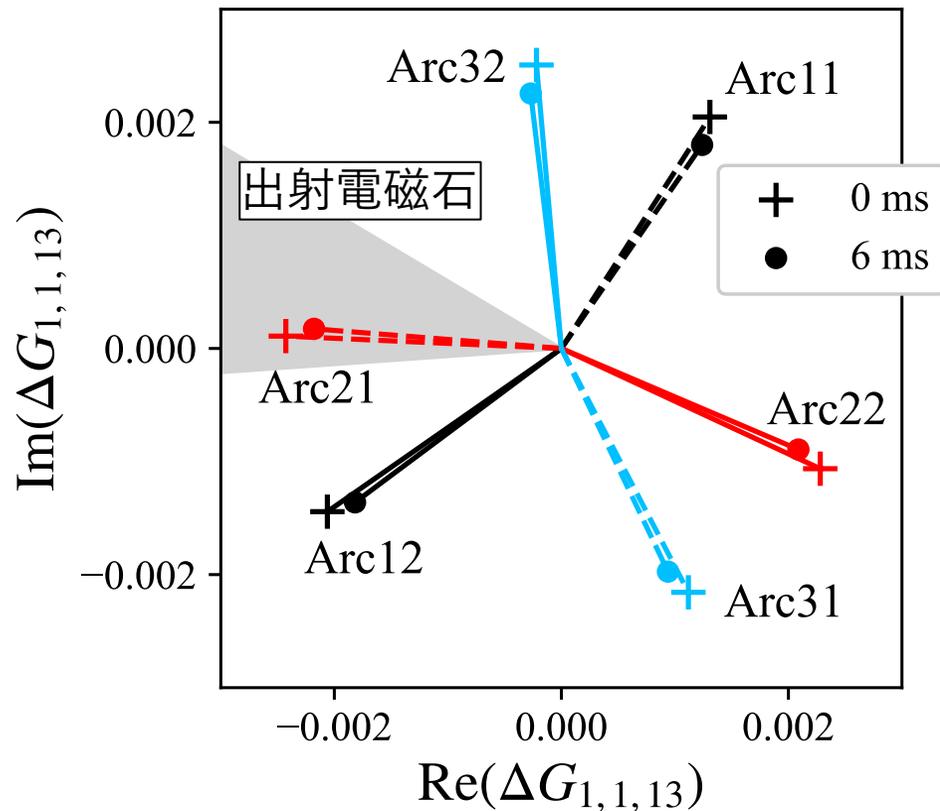
# 線形和共鳴補正の効果検証

## ◆ ローカルバンブ軌道

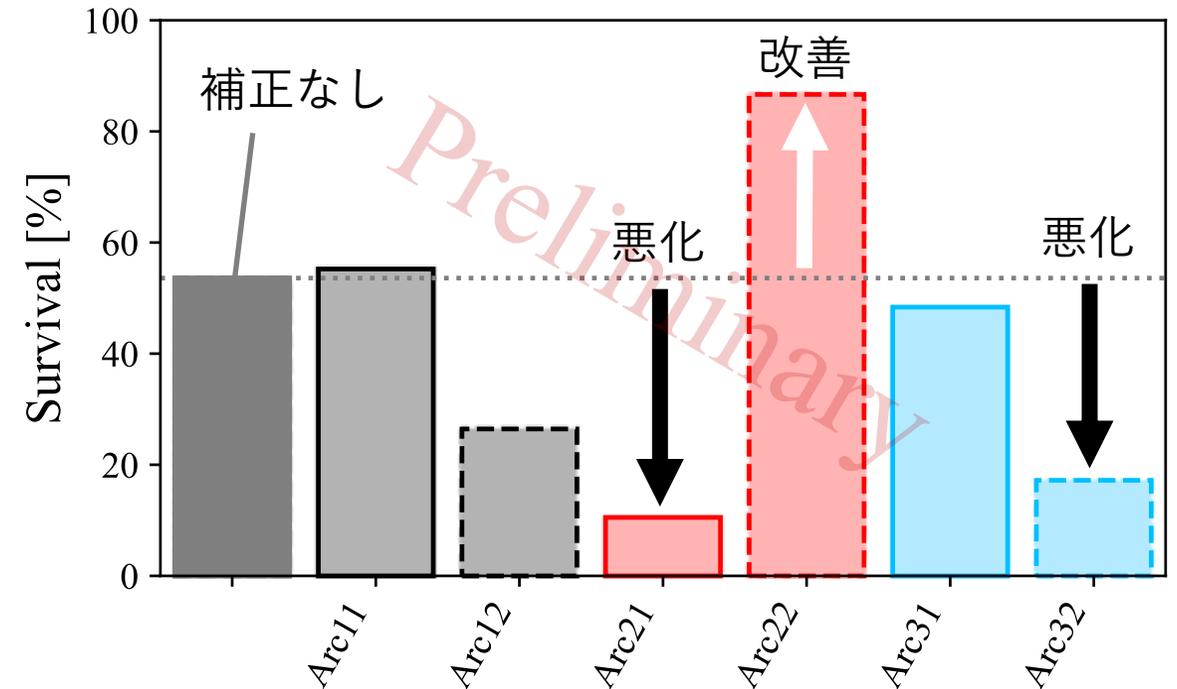
- Arc11, 12, 21, 22, 31, 32 の 1 箇所ずつ形成
- 六極電磁石の位置で  $\Delta y = 5 \text{ mm}$



## □ ドライビングターム



## □ ビーム生存率の動作点応答



- 共鳴補正の効果をビーム試験で実証
- エラー場の発生地点を限定 (出射電磁石か?)

# まとめ

**目的：** RCS の設計出力を超える 1.5 MW 大強度運転に向けた高チューン側への安定領域を拡充

## □ チューン掃引実験

1. 高チューン側におけるビーム損失起源の同定  
→ 鉛直方向の半整数共鳴、線形和共鳴の励起を確認

## □ 線形和共鳴の補正

2. 線形和共鳴補正手法の検討  
→ 六極場中のローカルバンプ軌道形成による線形和共鳴の補正手法を構築
3. 線形和共鳴補正の効果検証  
→ ビーム損失低減を実証し、ドライビングタームからエラー場発生源を限定

---

**今後の予定：** エラー場発生源を確定させ時間変化も考慮した補正状況を構築  
利用運転時と同じ大強度ビームに対しても補正の効果を実証