

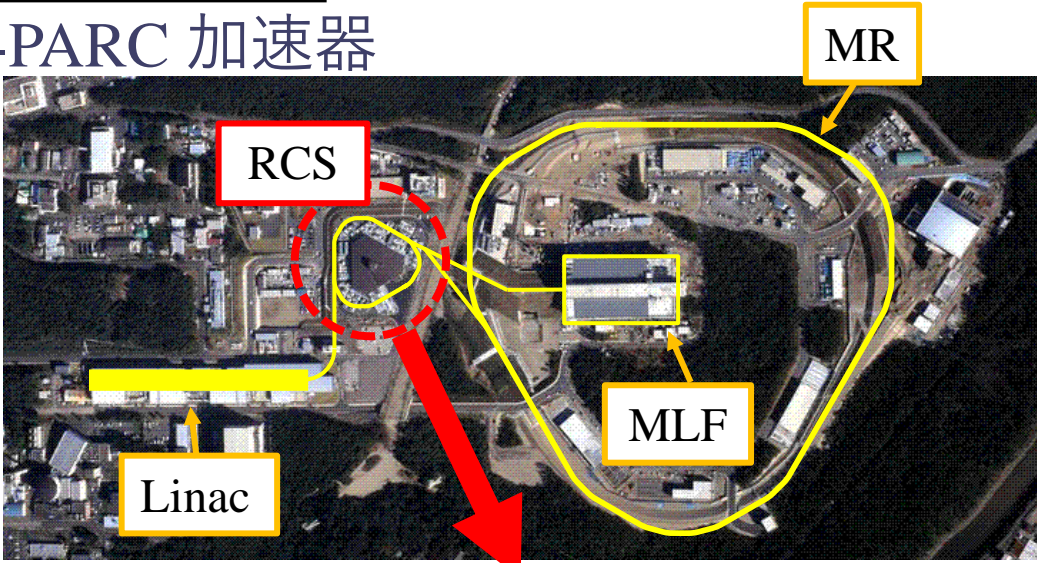
# J-PARC RCSにおけるさらなる大強度化に向けたビーム損失起源の同定と抑制

Identification and compensation of beam loss source 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  
小島邦洸, 原田寛之, サハプラナブ

# はじめに

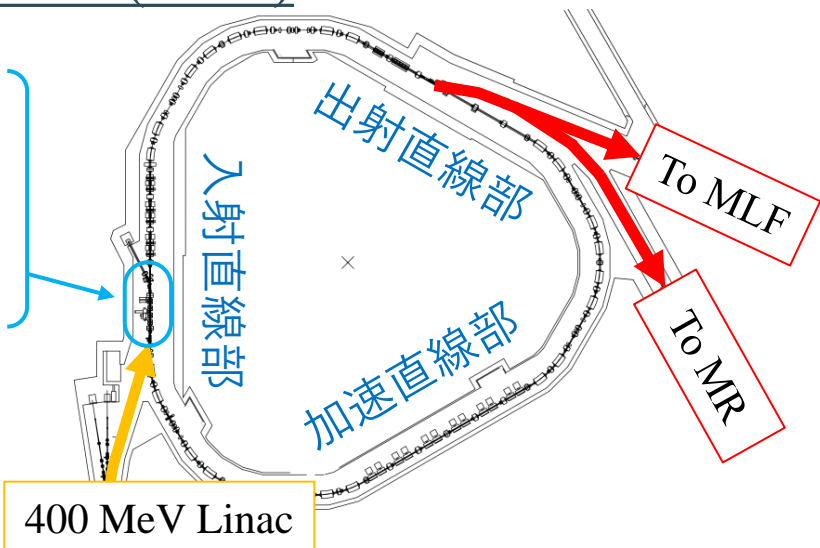
## ◆ J-PARC 加速器



## 3 GeV シンクロトロン(RCS)

負水素イオン  
を陽子に変換  
307回の多重入射で  
大電流ビームを生成

25 Hz の速い繰返しで  
陽子を加速  
400 MeV → 3 GeV



## 2つの行先で要求される ビーム条件が異なる

- 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

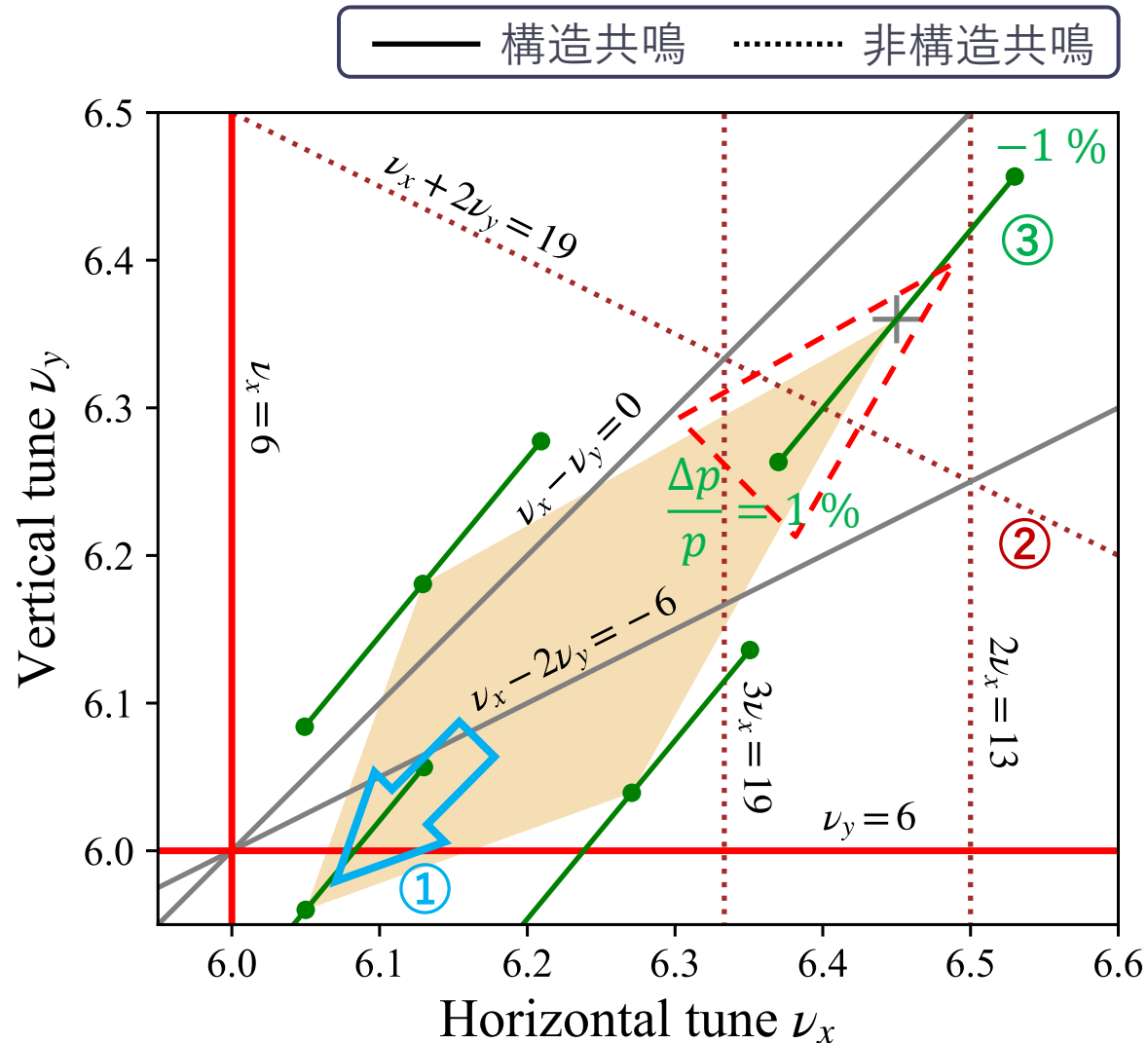
- ◆ 強度, ビームサイズ, 運動量広がり, 等条件の異なるビームを速い繰返しで加速
- ◆ 割合としては僅かなのビームロスでも装置の放射化により運転が制限

**現状** 設計出力である1MW を達成  
ビームロスを 0.1% まで低減

更なる大強度 1.5 MW に向けた  
**ビームロス低減・不安定化の回避が重要**

# ビームロス起源

## ◆ ベータatronチェーンマップ



## 共鳴を避けるよう動作点を調整するだけでは不十分

### 大強度加速器の難しさ

- ① 空間電荷による構造共鳴への抵触
- ② 動作点近傍の非構造共鳴への抵触
- ③ 運動量広がりとクロマティシティによるチューンシフトで共鳴に抵触

1台の加速器でMR, MLFのそれぞれに条件の異なるビームを供給

→ 安定領域の確保が重要

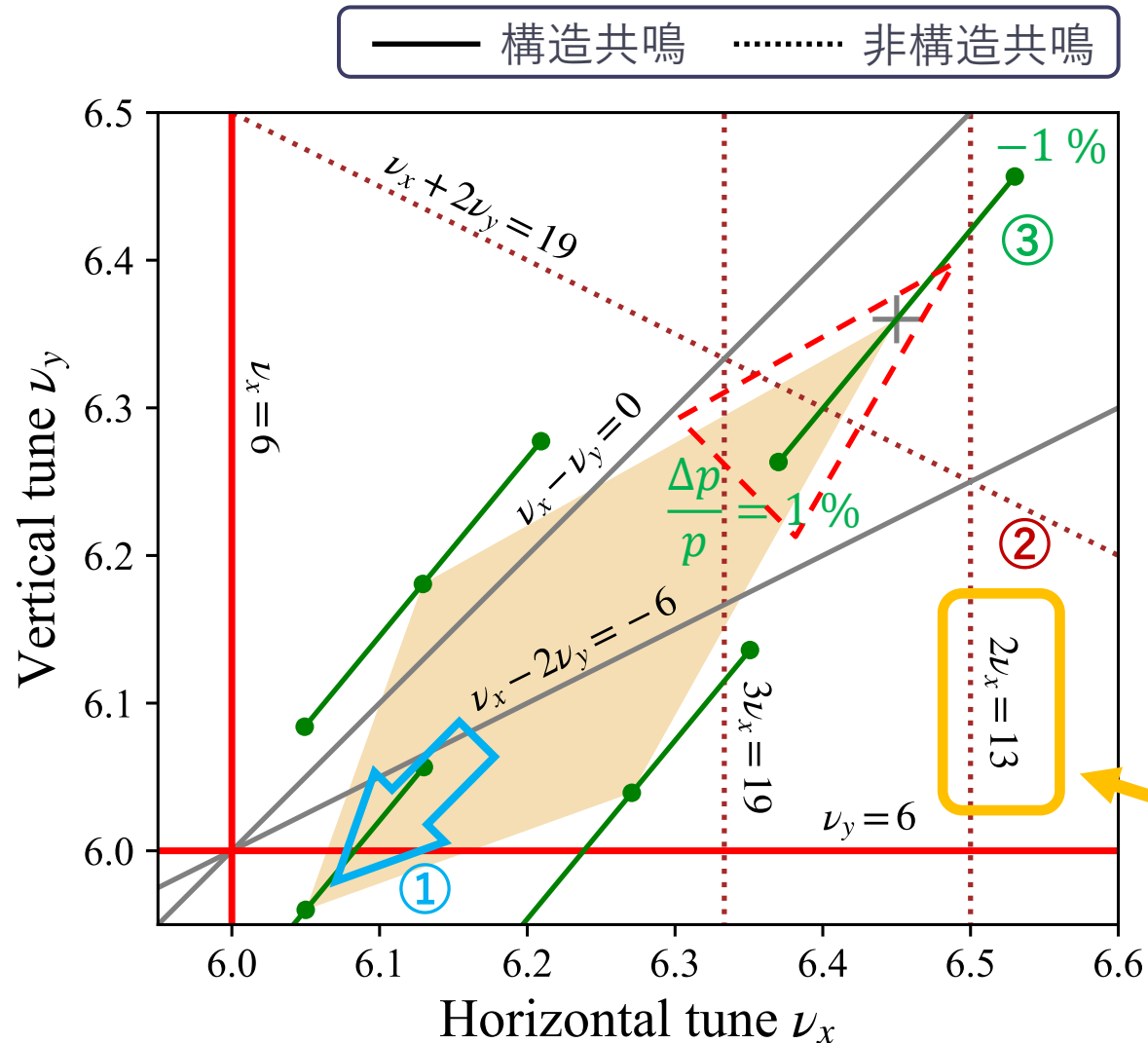
### 本研究の目的

大強度出力に向け安定領域を拡大するためにビームロスに繋がる非構造共鳴を同定し補正

- ✓ ビーム入射時～加速初期のロス低減  
→ **ビーム大強度化 (to MLF)**
- ✓ 動作点を構造共鳴から遠ざける  
→ **ビーム高品質化 (to MR)**

# ビームロス起源

## ◆ ベータatronチェーンマップ



共鳴を避けるよう動作点を調整するだけでは不十分

### 大強度加速器の難しさ

- ① 空間電荷による構造共鳴への抵触
- ② 動作点近傍の非構造共鳴への抵触
- ③ 運動量広がりとクロマティシティによるチューンシフトで共鳴に抵触

1台の加速器でMR, MLFのそれぞれに条件の異なるビームを供給

→ 安定領域の確保が重要

### 本研究の目的

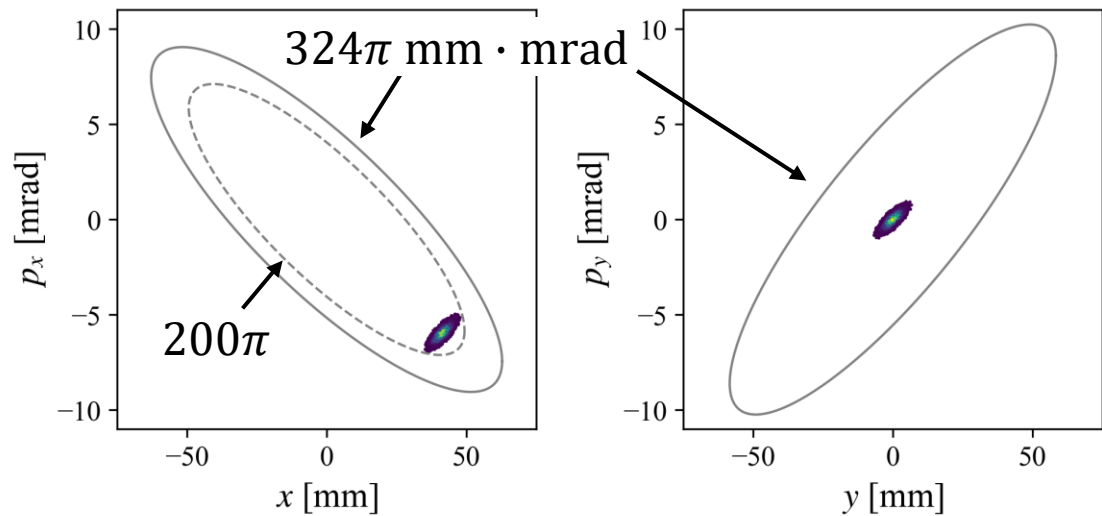
大強度出力に向け安定領域を拡大するためにビームロスに繋がる非構造共鳴を同定し補正

ラティス構造の対称性が崩れると非構造共鳴が励起

**まずは最低次かつ動作点近傍の2次非構造共鳴に着目**

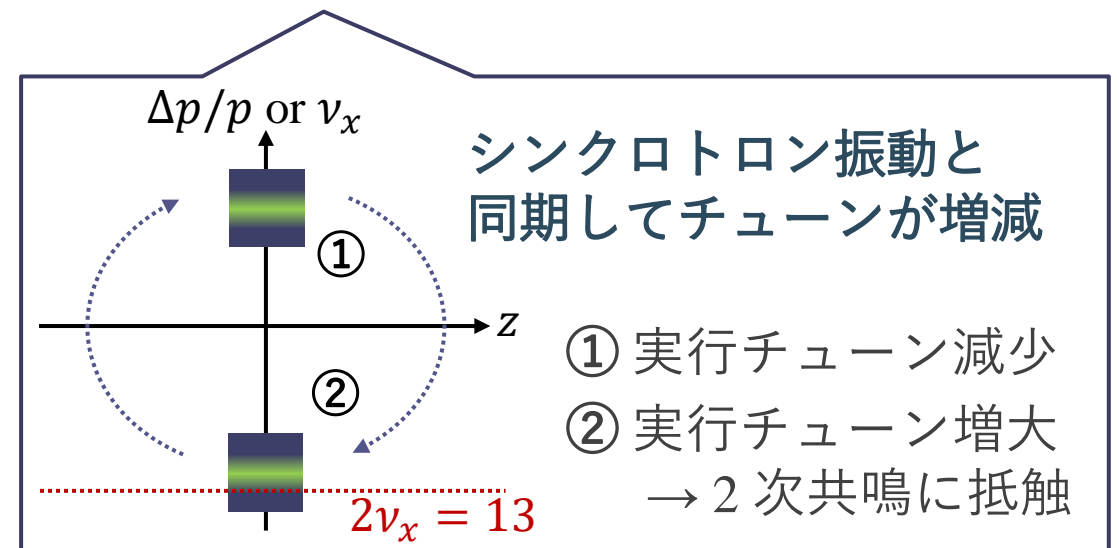
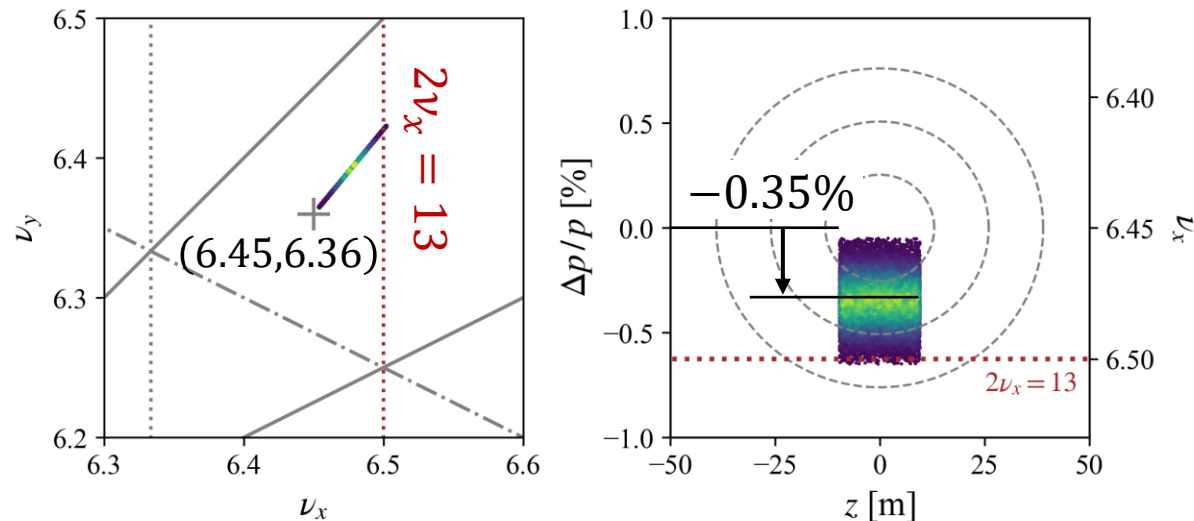
# 2次非構造共鳴の影響評価

## ◆ 入射時の位相空間分布



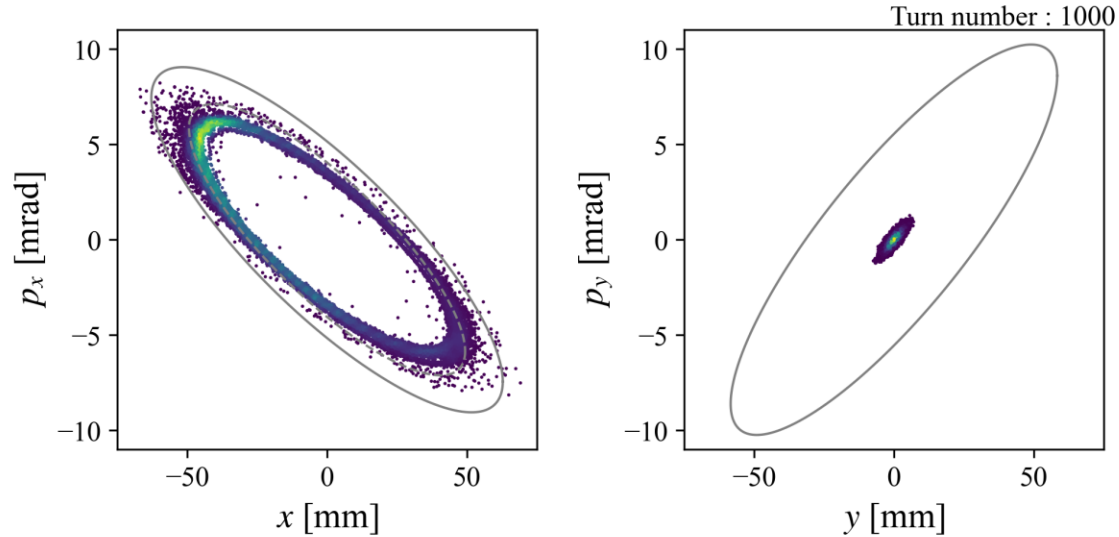
## ◆ ビーム入射条件

- 短パルス, 1 回入射 (1MW 運転時の約 1/3000)  
→ 空間電荷効果を低減し状況を単純化
- 水平方向: 振幅大  $200\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$   
垂直方向: 振幅小  
→ 水平方向の共鳴に対するロスの高める
- 進行方向: 運動量オフセット  $-0.35\%$  (最大 1%)  
→ シンクロトロン振動に同期して 2 次共鳴に抵触



# 2次非構造共鳴の影響評価

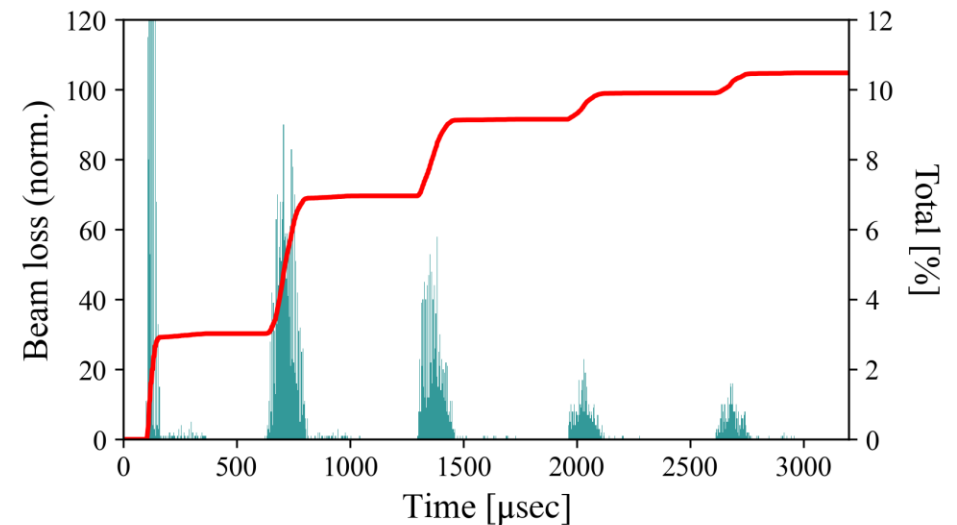
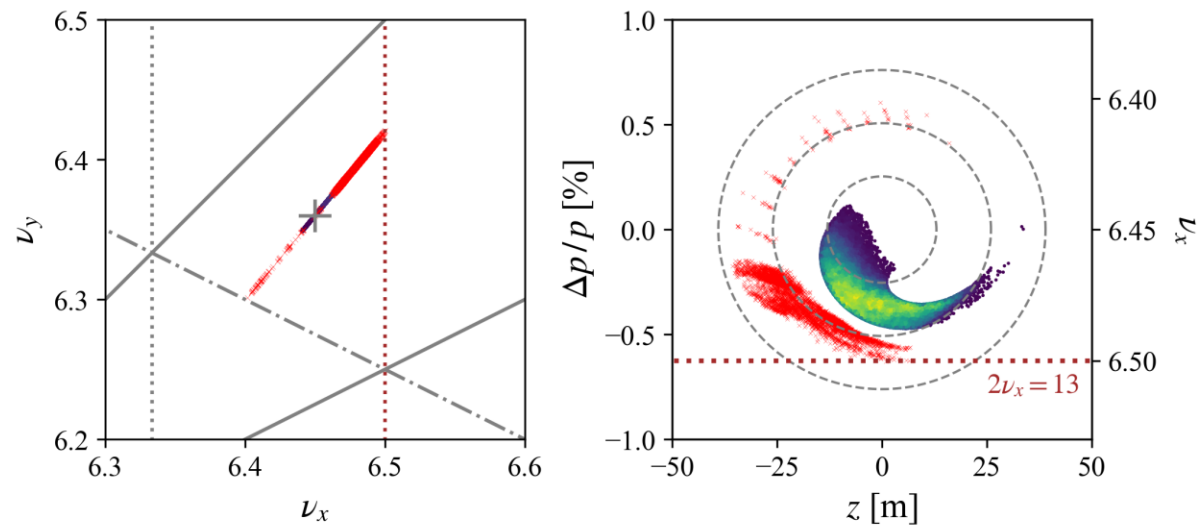
## ◆ シミュレーション



エラー磁場導入箇所：出射電磁石部  
 磁場線形成分の強度： $K_1 = -0.004 \text{ m}^{-1}$   
 (詳細は後ほど)

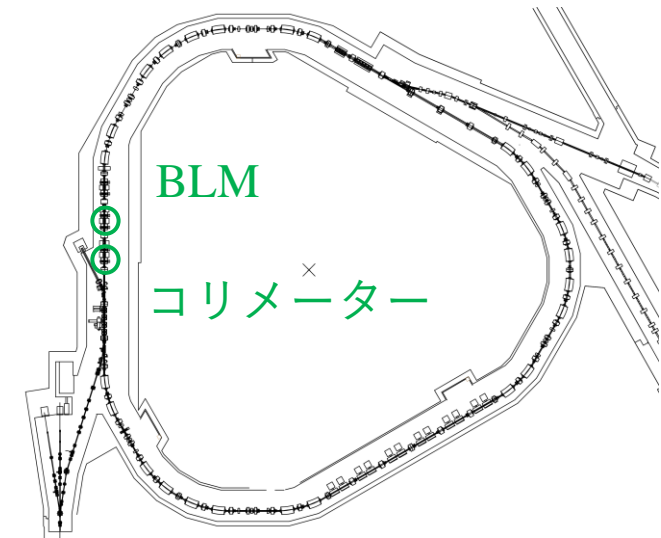
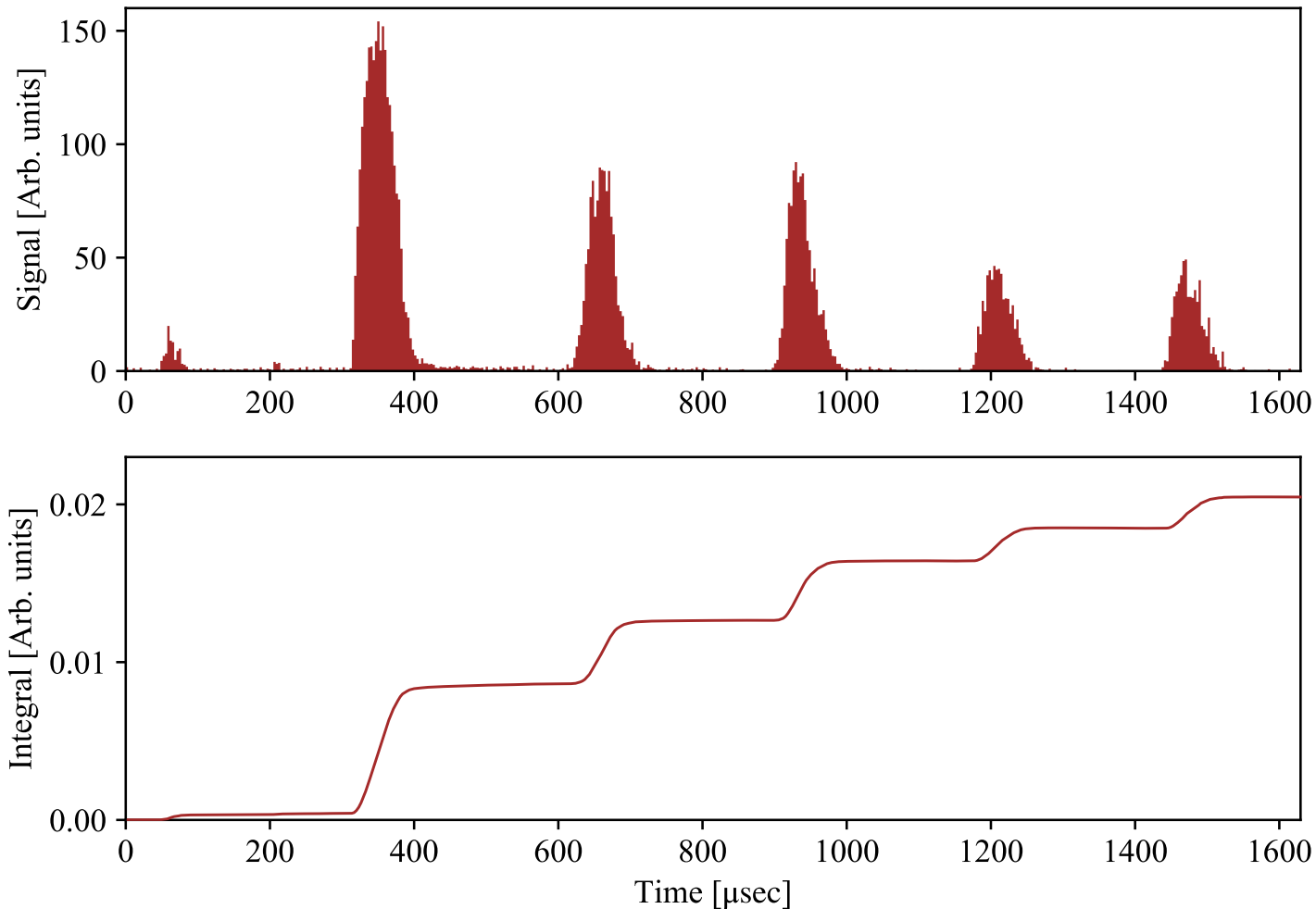
共鳴線に抵触するタイミングで  
ビームロスが増加する

時間応答から2次共鳴の発生を判別可能



# ビーム実験

## ◆ ビームロスモニタ(BLM)の出力波形



シミュレーションと同様に  
特徴的な時間応答を観測

- 2次非構造共鳴への抵触でビームロスが生じていることは明らか
- 非構造共鳴が入射時～加速初期にかけてのビームロスの一因に

# ドライビングターム

## ◆ ハミルトニアン

$$H_1(\phi_x, \phi_y, J_x, J_y; s) = \frac{J_x}{\beta_x} + \frac{J_y}{\beta_y} + \kappa_1(s)\beta_x J_x \cos^2 \phi_x$$

**RCSには構造の対称性を崩すエラー場が存在**

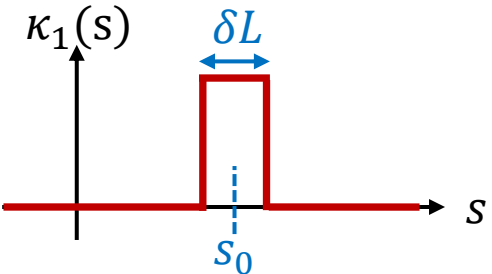
## ◆ ドライビングターム ( $2\nu_x = 13$ )

$$G_{2,0,13} = \frac{1}{4\pi} \oint \beta_x \kappa_1(s) e^{j[2\chi_x(s) - (2\nu_x - 13)\theta]} ds \quad \left( \chi_x(s) \equiv \int_0^s \frac{ds}{\beta_x}, \quad \theta = 2\pi s/L_0 \right)$$

$L_0$  : 周長

$G_{2,0,13}$  が増大  $\rightarrow$  共鳴の励起

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



$$G_{2,0,13} \approx \frac{1}{4\pi} \beta_x(s_0) \overbrace{K_1(\cos \Omega_{2,0,13})}^{\text{実部}} + \overbrace{j \sin \Omega_{2,0,13}}^{\text{虚部}}$$

$$\Omega_{2,0,13} = 2\chi_x(s_0) - (2\nu_x - 13)\theta_0$$

線形場の強さ :  $K_1 = \kappa_1(s_0)\delta L$

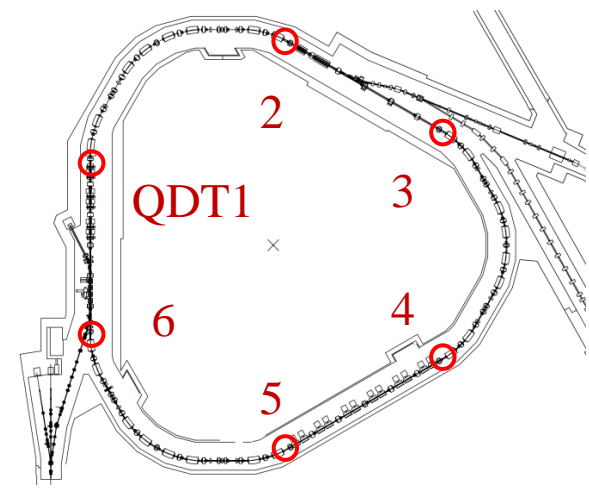
**四極磁場の重畳で  
2次非構造共鳴は  
補正可能**



# 2次共鳴の補正

## ◆ 補正四極電磁石 (QDT)

- RCS 全周に 6 台の QDT が既に備わっている
- QDT は個別に励磁可能で RCS の対称性を操作できる
- 各 QDT について  $G_{2,0,19}$  の複素平面上の方向は全て異なる  
→ **QDT の台数分だけ自由度が確保されている**

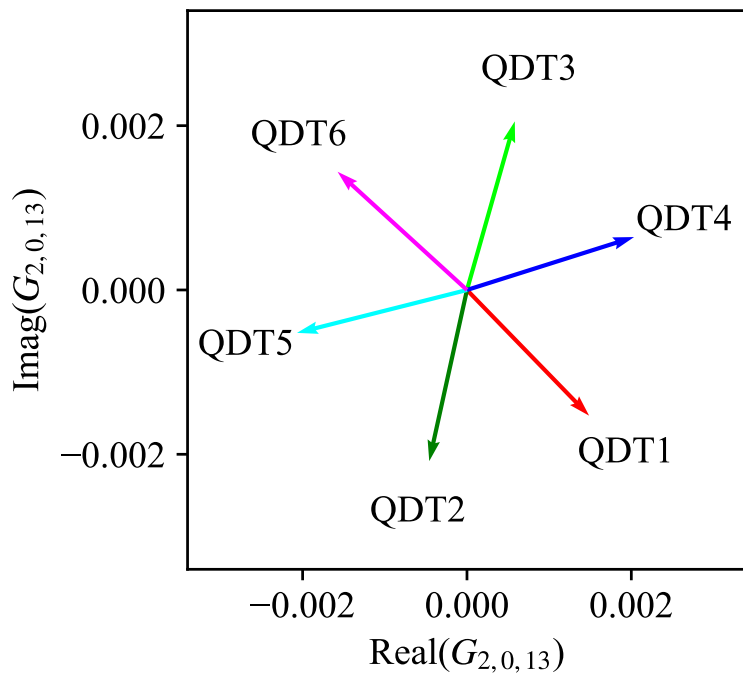


## ◆ ドライビングターム

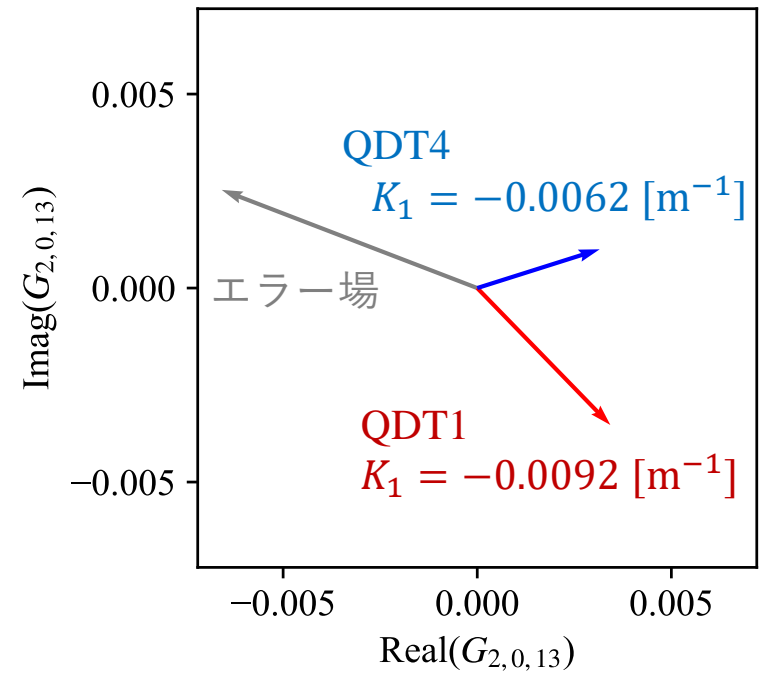
$$G_{2,0,13} \approx \frac{1}{2\pi} \beta_x(s_0) K_1 \times$$

$$\underbrace{(\cos \Omega_{2,0,13})}_{\text{実部 (横軸)}} + j \underbrace{(\sin \Omega_{2,0,13})}_{\text{虚部 (縦軸)}}$$

( $K_1 = -0.004 \text{ m}^{-1}$ )

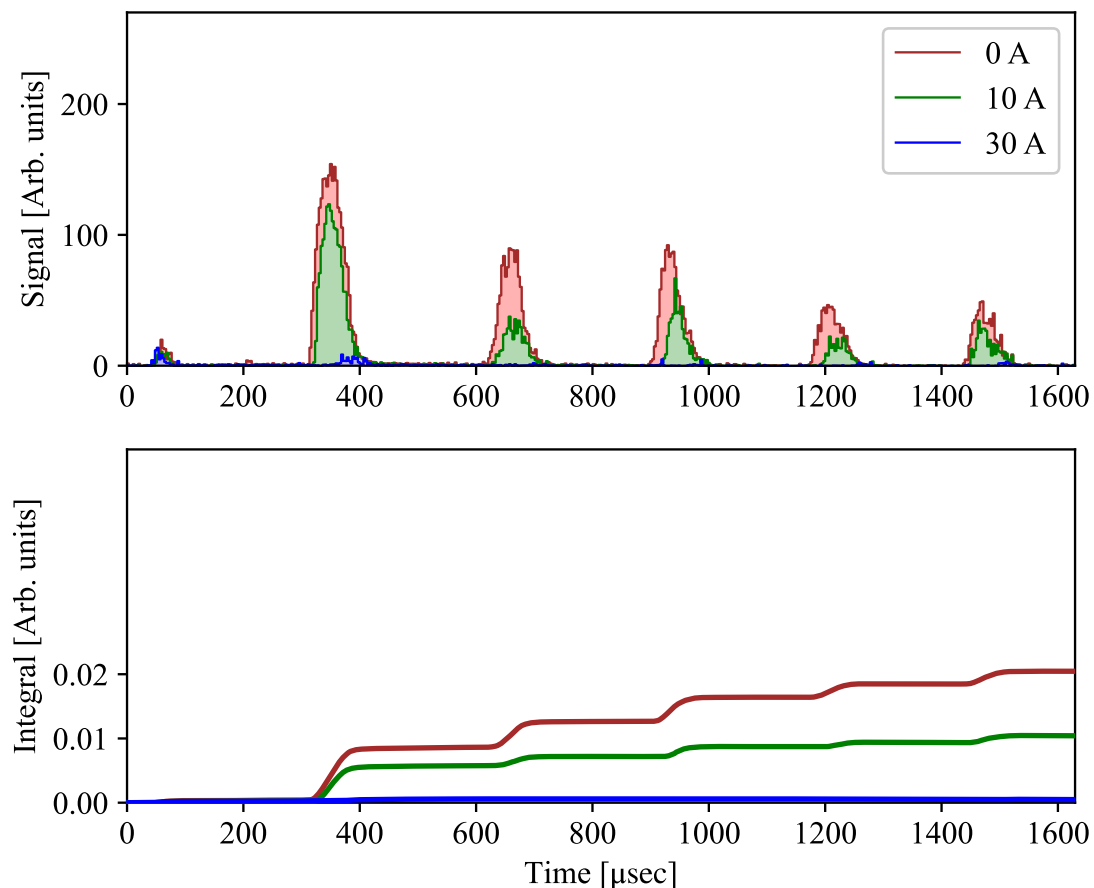


## 共鳴補正の例

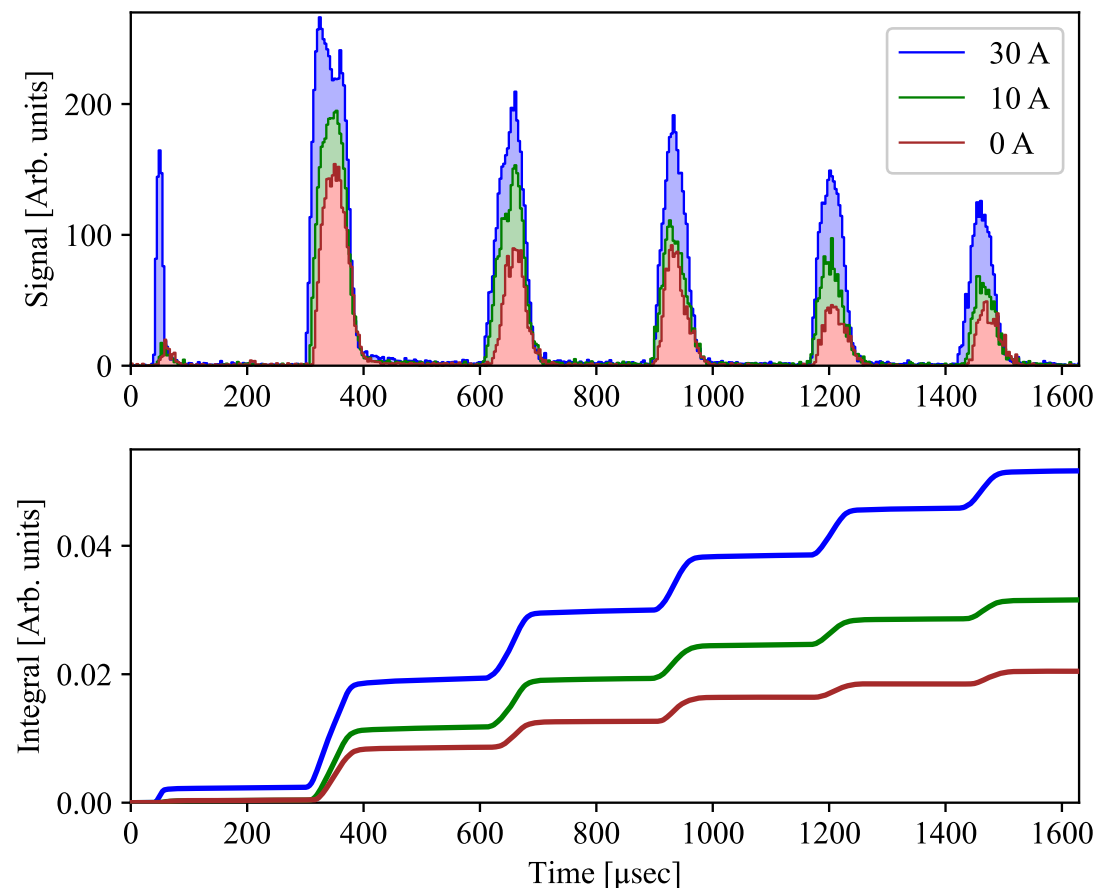


# ビームロスの応答(実験)

## ◆ QDT1の励磁に対する応答



## ◆ QDT6の励磁に対する応答

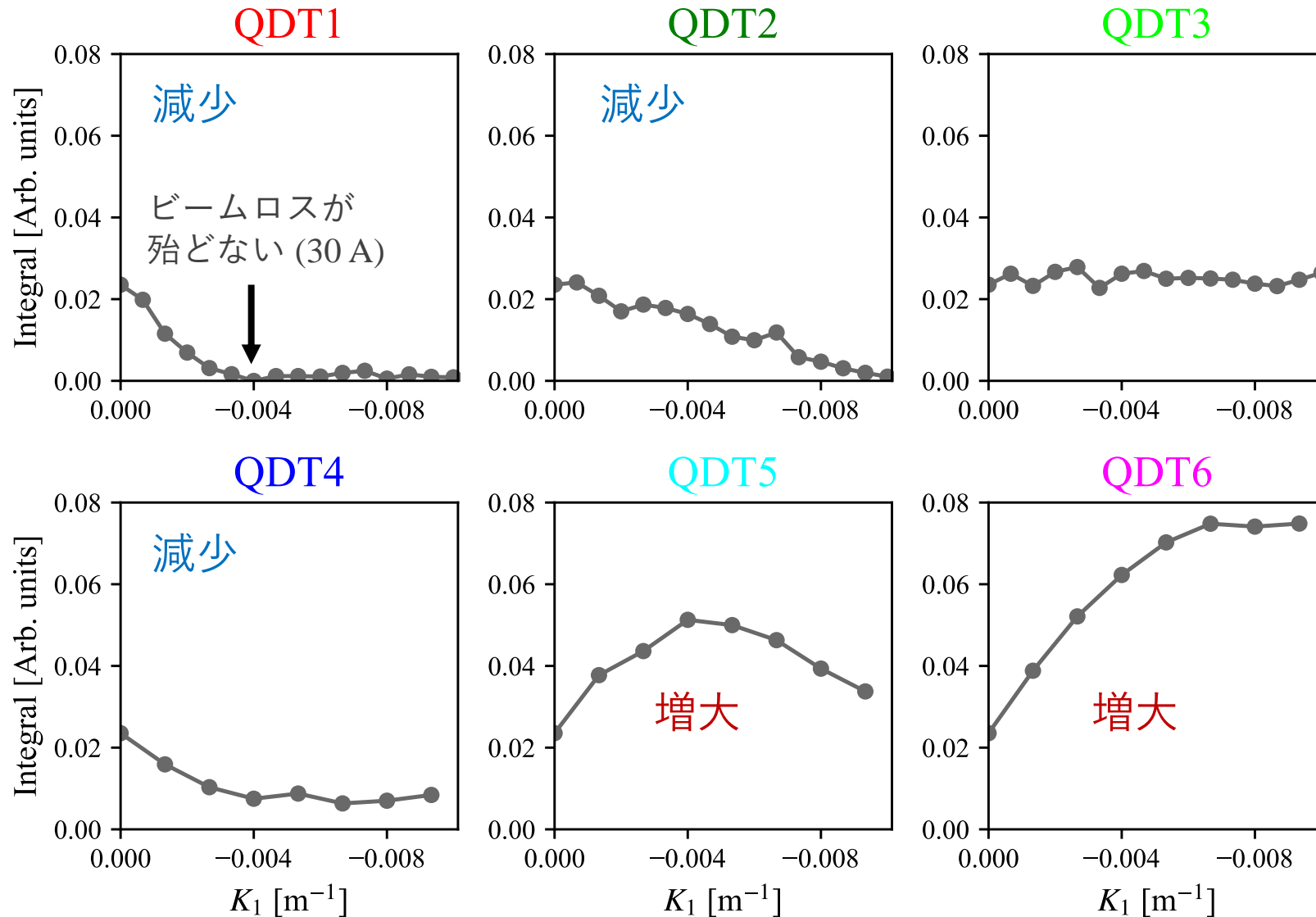


ビームロスが**低減**  
30 A の励磁でロスほぼ 0



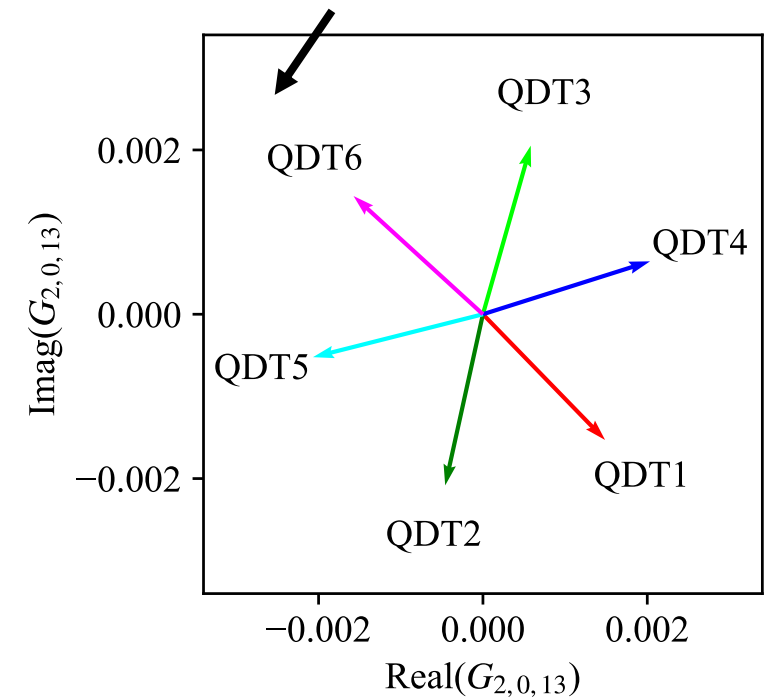
ビームロスが**増大**  
2 次非構造共鳴を更に励起

# ビームロス応答の比較



エラー場が生む  $G_{2,0,13}$  の方向は QDT6 に近い

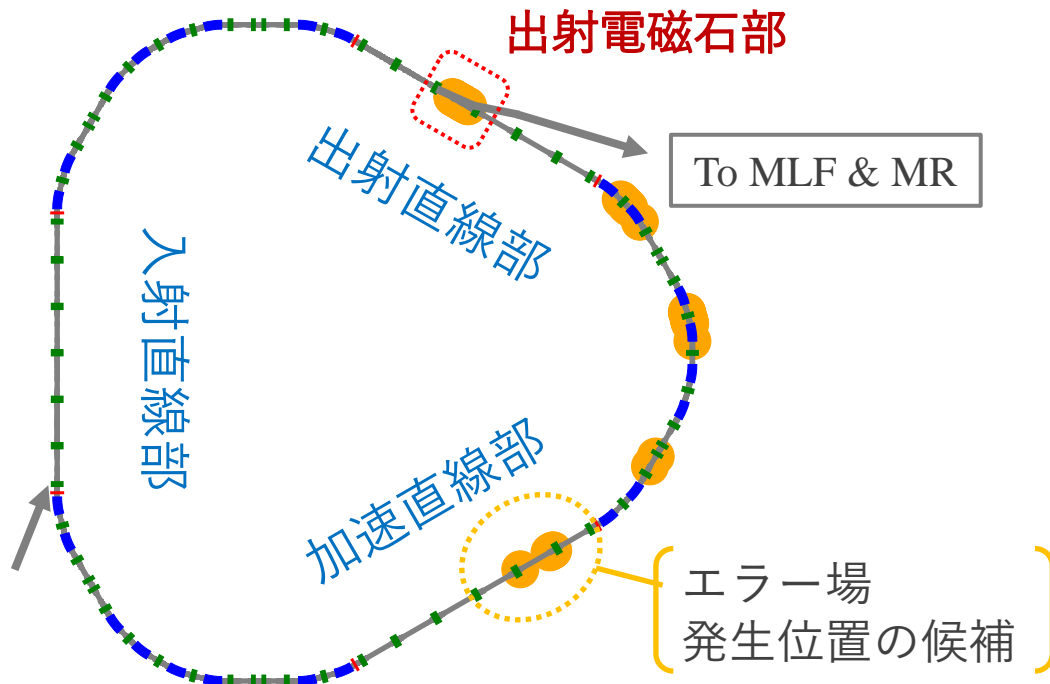
エラー場が生む  $G_{2,0,13}$  の予想位置



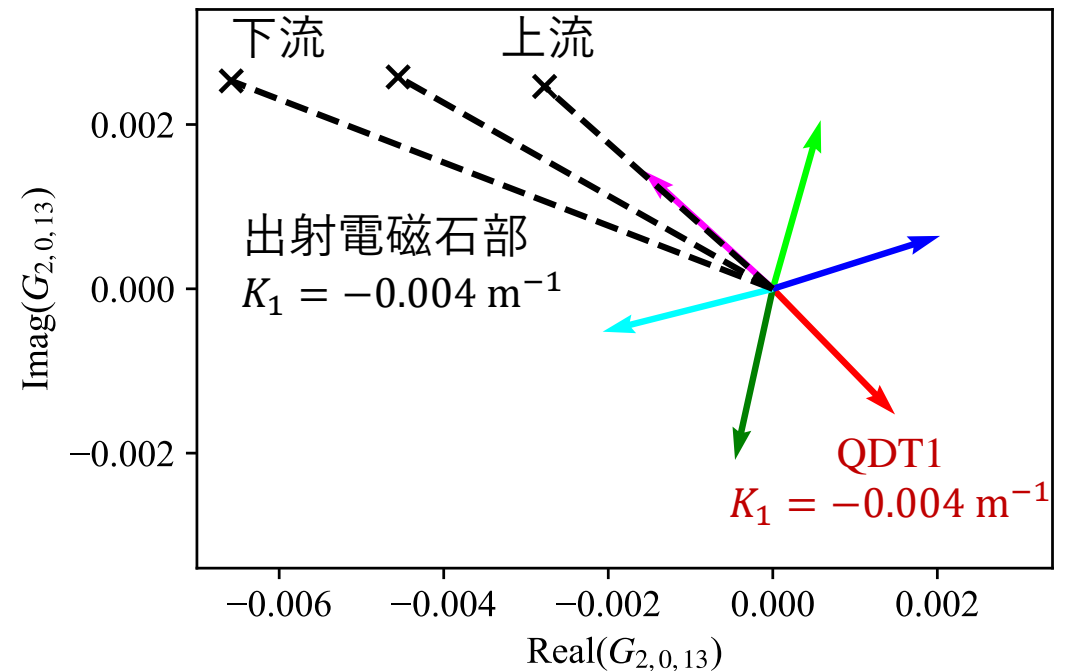
# エラー場の同定

- 条件 1 : エラー場の強度は QDT1 を 30 A で励磁して補正できる程度  
 条件 2 : 実験のビームロス応答と矛盾しない (例 : QDT6 を励磁 → 共鳴励起)

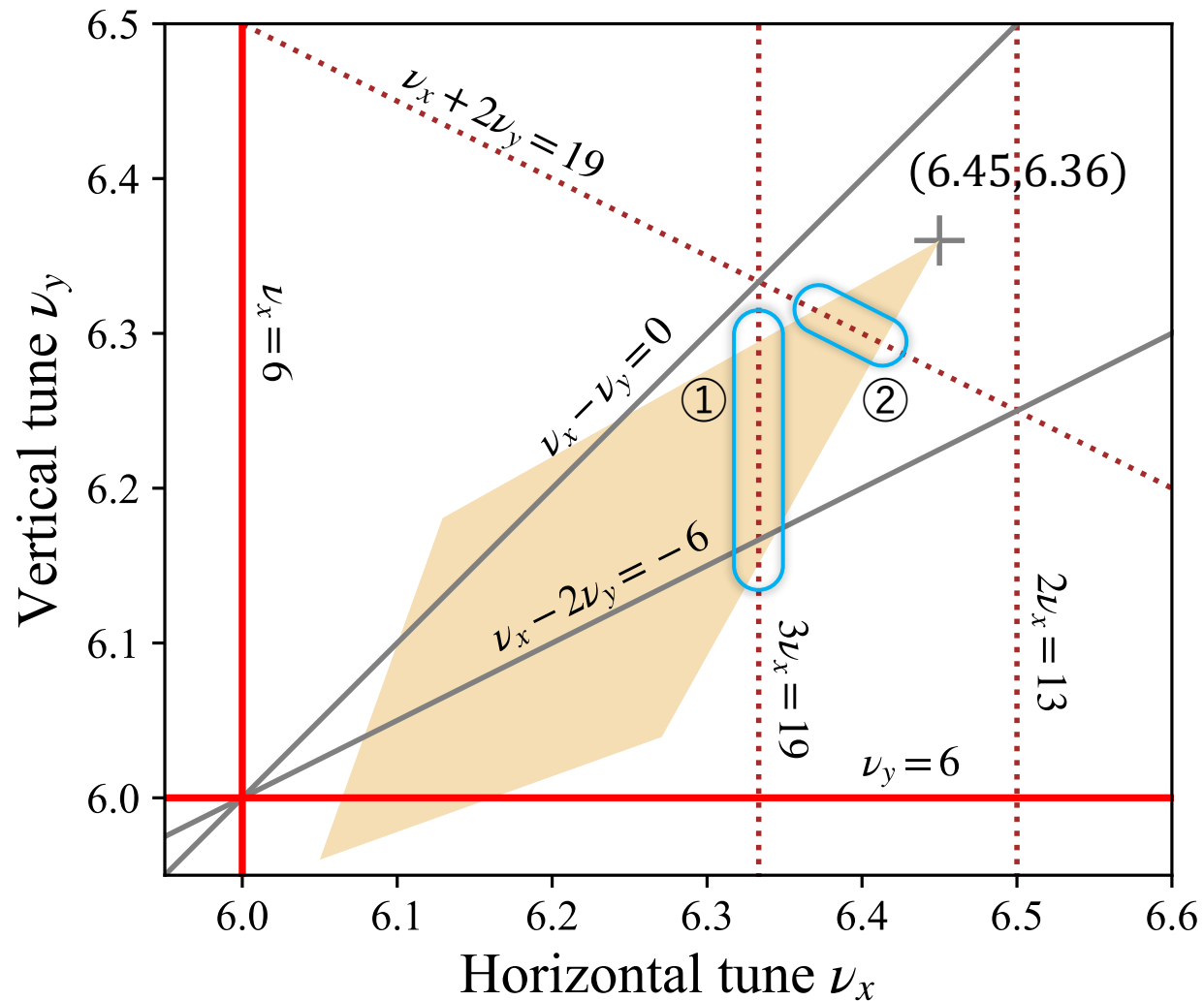
## エラー場の発生位置を調査



出射電磁石の漏れ磁場が  
 エラー場の発生源である可能性が高い  
 → **OFF** にすることで検証可能



# 3次非構造共鳴の励起



QDT1 を 30 A で励磁し  
2次非構造共鳴を補正

→ 1 MW 試験時のビームロス  
 が 1~2 割程度増大



別の非構造共鳴が励起された  
可能性がある

- 例) ①  $3\nu_x = 19$   
 ②  $\nu_x + 2\nu_y = 19$

→ ビームへの影響の評価と  
 補正手法を検討

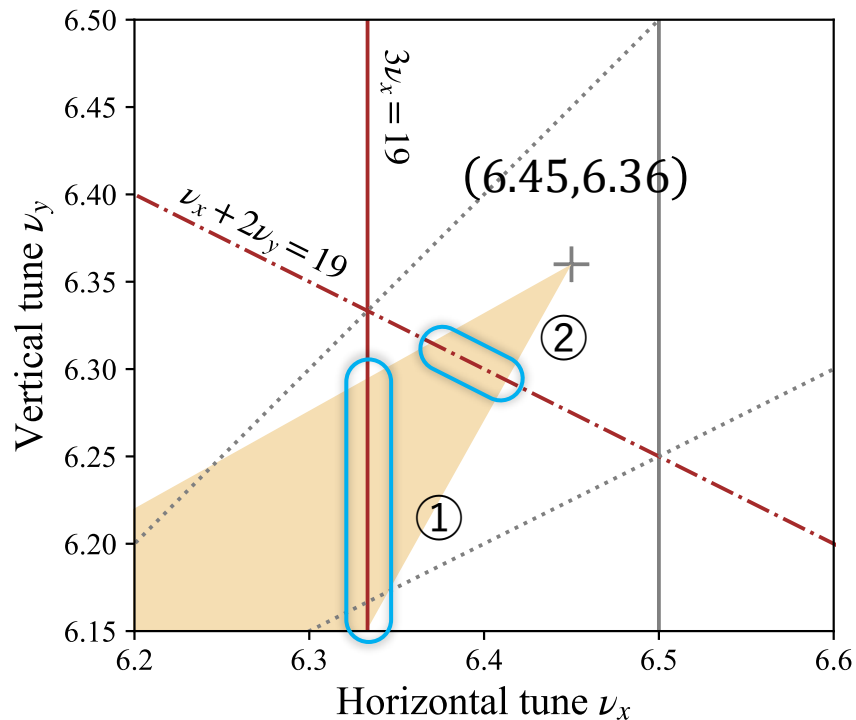
# 3次共鳴のドライビングターム

## ◆Hamiltonian

エラー場&補正場で位相進みとベータ関数変化： $\beta_x, \beta_y, \phi_x, \phi_y \rightarrow \hat{\beta}_x, \hat{\beta}_y, \hat{\phi}_x, \hat{\phi}_y$

$$H_2(\hat{\phi}_x, \hat{\phi}_y, J_x, J_y; s) = \frac{J_x}{\hat{\beta}_x} + \frac{J_y}{\hat{\beta}_y} + \frac{\sqrt{2}\kappa_2(s)}{3} \left[ (J_x \hat{\beta}_x)^{\frac{3}{2}} \cos^3 \hat{\phi}_x - 3 (J_x \hat{\beta}_x)^{\frac{1}{2}} J_y \hat{\beta}_y \cos \hat{\phi}_x \cos^2 \hat{\phi}_y \right]$$

6極磁場：6極電磁石+2極電磁石



①  $3\nu_x = 19$

6極磁場の強さ： $K_{2,n} = \kappa_2(s_n)\delta L_n$

$$G_{3,0,19} \approx \frac{1}{12\sqrt{2}\pi} \sum_n \hat{\beta}_x^{3/2}(s_n) K_{2,n} (\cos \Omega_{3,0,19}^n + j \sin \Omega_{3,0,19}^n)$$

$$\Omega_{3,0,19}^n = 3\hat{\chi}_x(s_n) - (3\nu_x - 19)\theta_n$$

②  $\nu_x + 2\nu_y = 19$

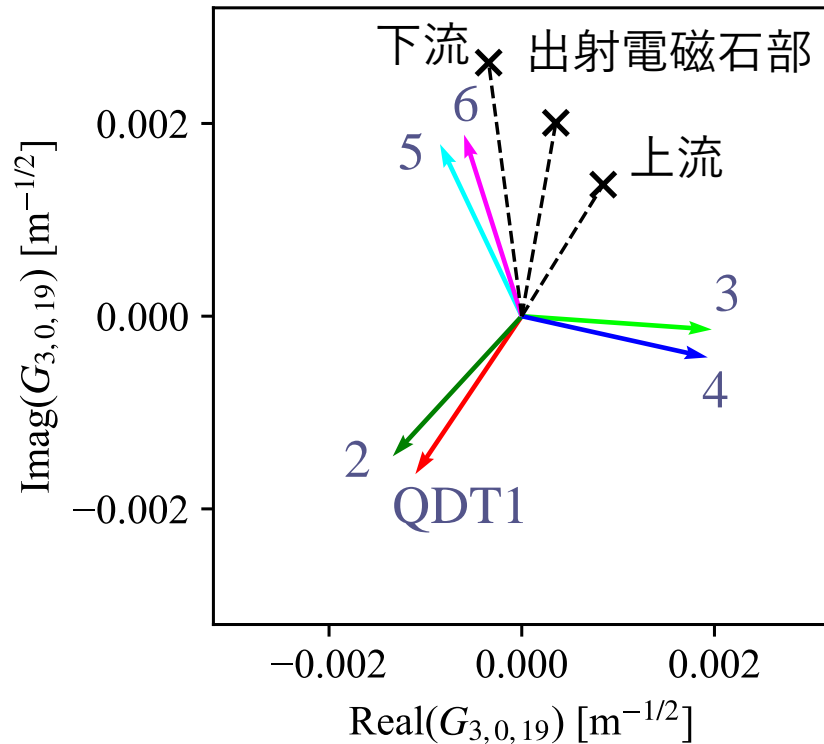
$$G_{1,2,19} \approx \frac{1}{4\sqrt{2}\pi} \sum_n \hat{\beta}_x^{1/2}(s_n) \hat{\beta}_y(s_n) K_{2,n} (\cos \Omega_{1,2,19}^n + j \sin \Omega_{1,2,19}^n)$$

$$\Omega_{1,2,19}^n = \hat{\chi}_x(s_n) + 2\hat{\chi}_y(s_n) - (\nu_x + 2\nu_y - 19)\theta_n$$

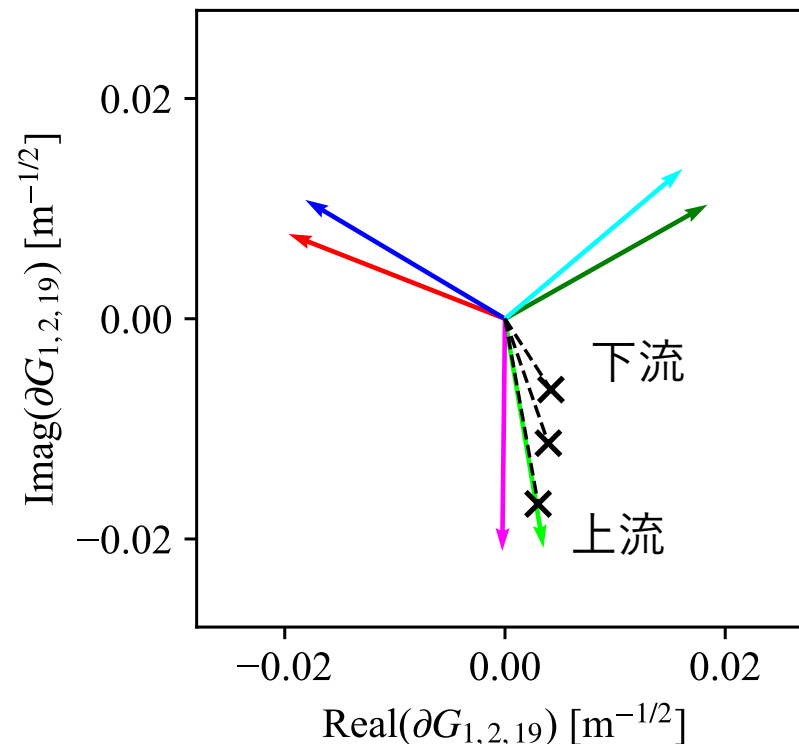
# 3次共鳴の補正

$$\left[ \begin{array}{l}
 \textcircled{1} \quad 3\nu_x = 19 \qquad G_{3,0,19} \approx \frac{1}{12\sqrt{2}\pi} \sum_n \hat{\beta}_x^{3/2}(s_n) K_{2,n} \left( \underbrace{\cos \Omega_{3,0,19}^n}_{\text{実部(横軸)}} + \underbrace{j \sin \Omega_{3,0,19}^n}_{\text{虚部(縦軸)}} \right) \\
 \textcircled{2} \quad \nu_x + 2\nu_y = 19 \qquad G_{1,2,19} \approx \frac{1}{4\sqrt{2}\pi} \sum_n \hat{\beta}_x^{1/2}(s_n) \hat{\beta}_y(s_n) K_{2,n} \left( \underbrace{\cos \Omega_{1,2,19}^n}_{\text{実部(横軸)}} + \underbrace{j \sin \Omega_{1,2,19}^n}_{\text{虚部(縦軸)}} \right)
 \end{array} \right]$$

①  $3\nu_x = 19$



②  $\nu_x + 2\nu_y = 19$



- 6台のQDTについて複素平面上の  $G_{3,0,19}, G_{1,2,19}$  の方向が全て異なる
- QDTが2台あれば非構造共鳴を1つ補正可能



6台のQDTを用いれば関連する3本の非構造共鳴を補正できるだけのパラメータ自由度がある

# 共鳴の同時補正

## ◆ 残差二乗和

$$R^2 = \left| \frac{G_{2,0,13}^{\text{sum}}}{G_{2,0,13}^{\text{initial}}} \right|^2 w_{2,0,13} + \left| \frac{G_{3,0,19}^{\text{sum}}}{G_{3,0,19}^{\text{initial}}} \right|^2 w_{3,0,19} + \left| \frac{G_{1,2,19}^{\text{sum}}}{G_{1,2,19}^{\text{initial}}} \right|^2 w_{1,2,19}$$

$$\text{重み} : (w_{2,0,13}, w_{3,0,19}, w_{1,2,19}) = (1, 0.01, 0.1)$$

## ◆ 同時補正

### エラー場の例

発生位置 : 出射電磁石近傍 (上流)

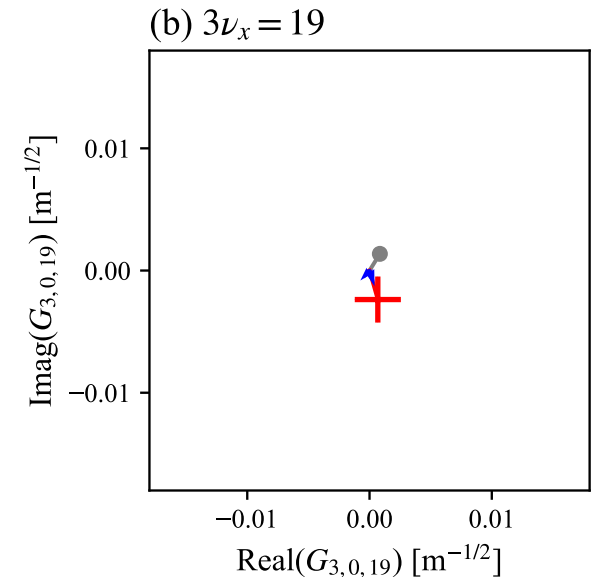
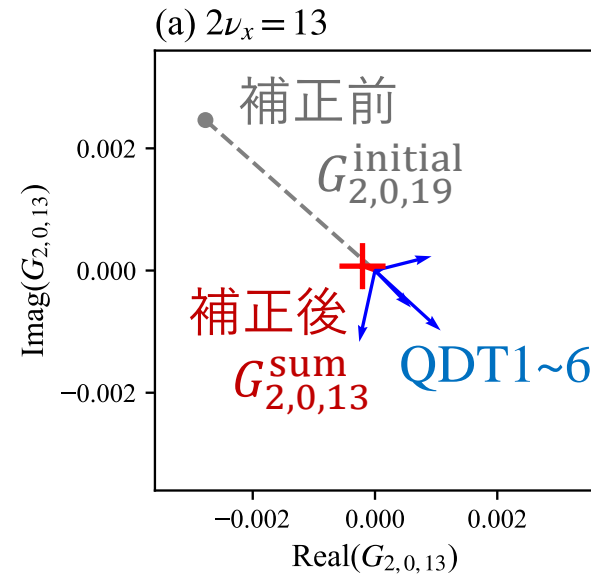
強度 :  $K_1 = -0.004 \text{ m}^{-1}$

6台の QDT を用いた

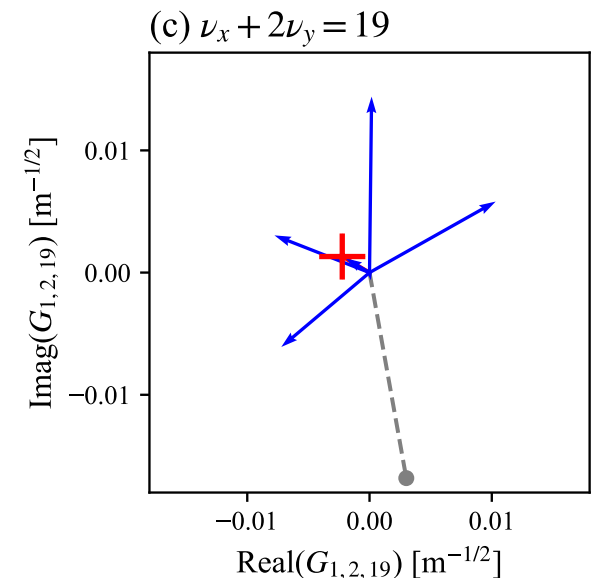
励磁電流 80 A 以下での補正を検討

$R^2$  を最小化するように QDT の励磁量を決定

- 既存の電源で実現可能
- ドライビングタームをビームロスに寄与しない程度までの補正に成功



QDT	電流 [A]
1	11.9
2	16.8
3	0.9
4	3.3
5	-13.4
6	-20.5





# まとめ

## 目的

RCS におけるビーム大強度化に向け動作点近傍の安定領域拡大を目指す。このためにビームロスの原因となる共鳴を同定し、その補正手法を確立する。

- ビームロスの起源として2次非構造共鳴が存在することを確認
  - ✓ QDT の励磁で2次非構造共鳴は補正可能であることを実証
  - ✓ エラー場が出射電磁石の漏れ磁場である可能性が高いと判明
- 大強度運転時のビームロス低減に向け共鳴の同時補正を検討
  - ✓ 既存の装置を用いて2,3次の非構造共鳴を同時に補正可能な補正場強度の決定手法を計算機上で確立

## 今後の予定

- 出射電磁石の電源を OFF にして2次共鳴の励起を検証
- 非構造共鳴を補正し1 MW運転時のビームロスを低減, 大強度化に繋ぐ