

COD 補正

運転・軌道解析 Gr. 田中 均

1. COD って何？

What is COD ? / リングの軌道 /

COD を作るもの / COD の数式表現と特徴

2. COD とビーム性能

COD の誘起する誤差磁場 / 誤差による性能劣化

3. COD を補正するには

重ね合わせの原理 / 補正に使うパラメータ /

BPM には騙されるな / 補正法いろいろ

4. 良い補正、悪い補正

正しく電子ビームを磁場中心へ導く

/ 光ビーム軸との関係 / 良い補正、悪い補正

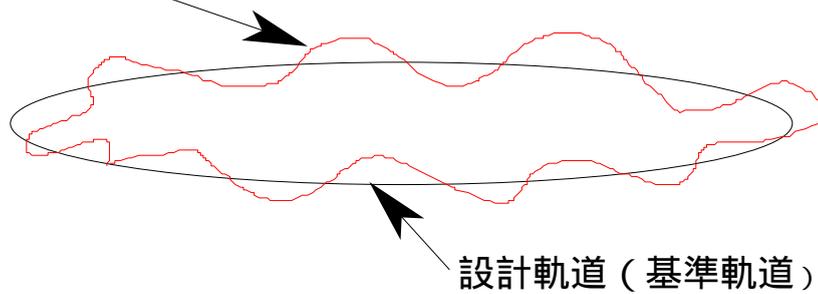
5. 質問コーナー

1.COD って何？

1.1.What is COD？

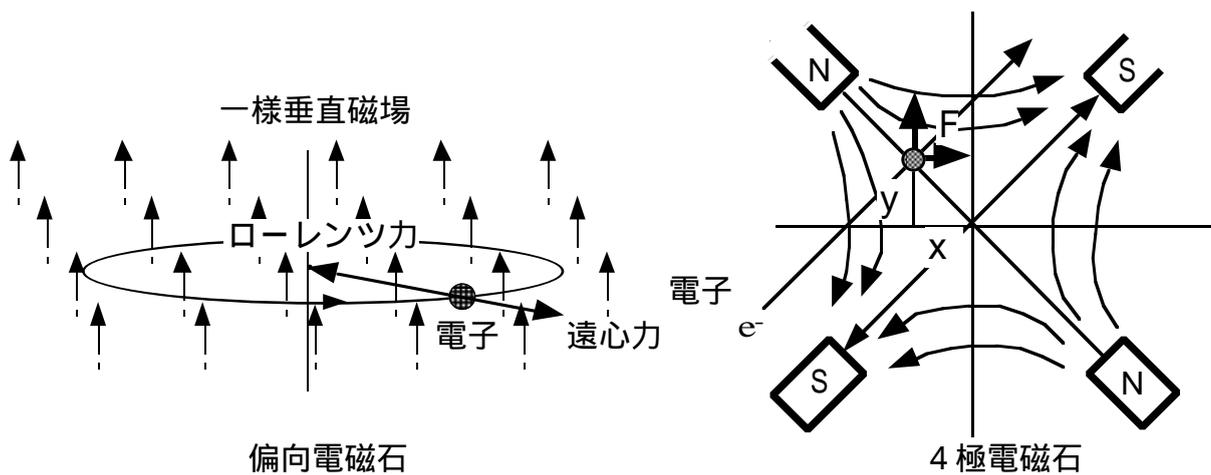
COD = Closed Orbit Distortion

閉軌道の歪み



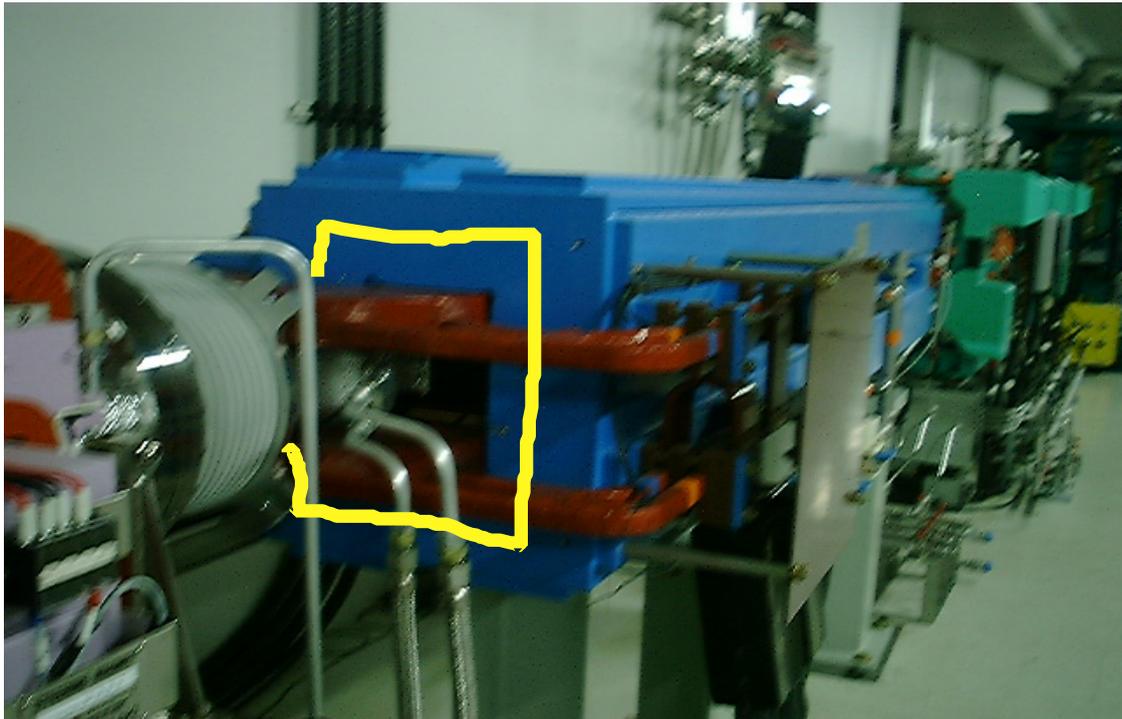
1.2.リングの軌道

偏向電磁石の作る電子の道筋のうち、4極、6極電磁石の磁場中心をとるもの。

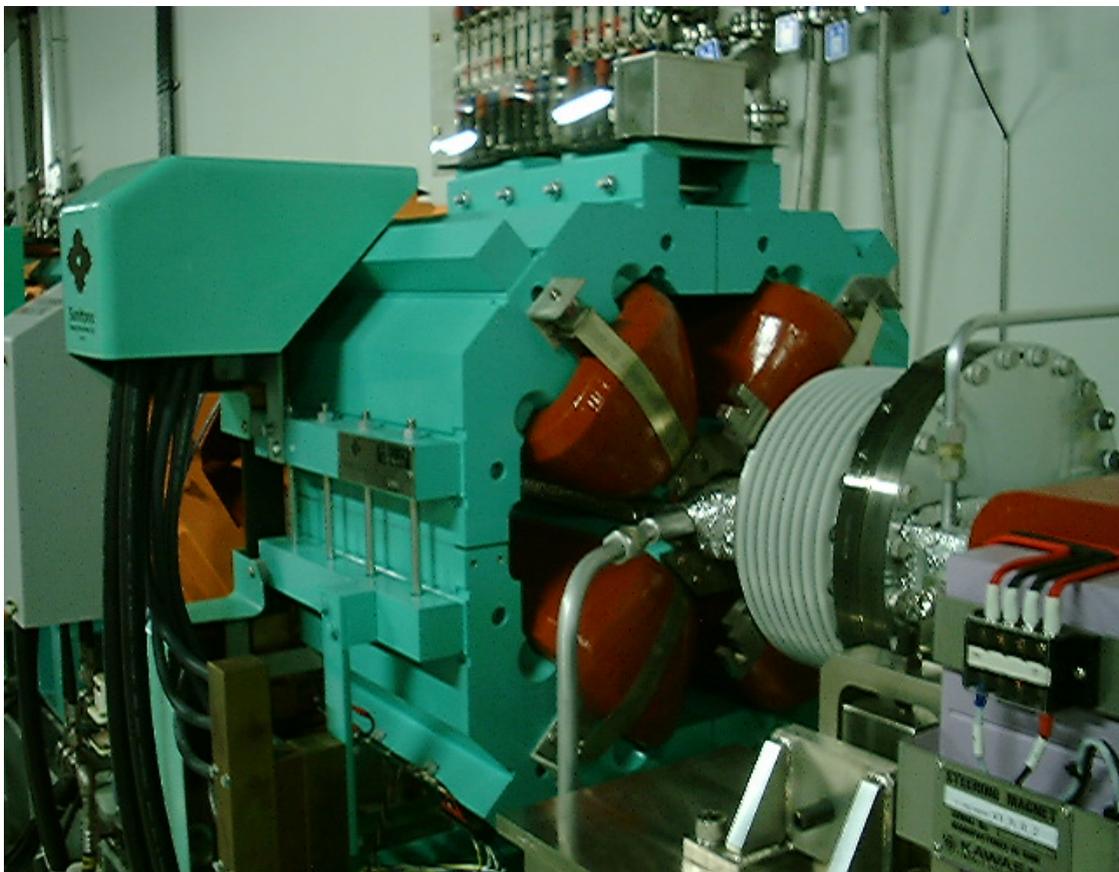


Lorentz Equation を思い出そう

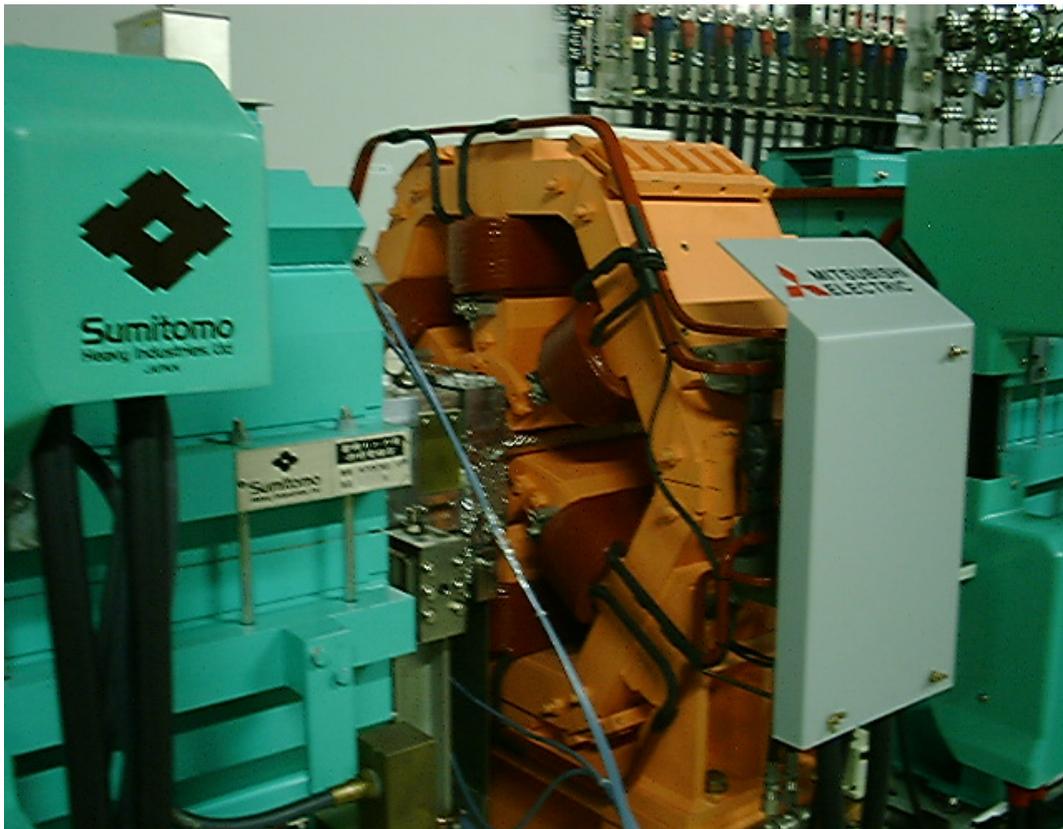
$$\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}$$



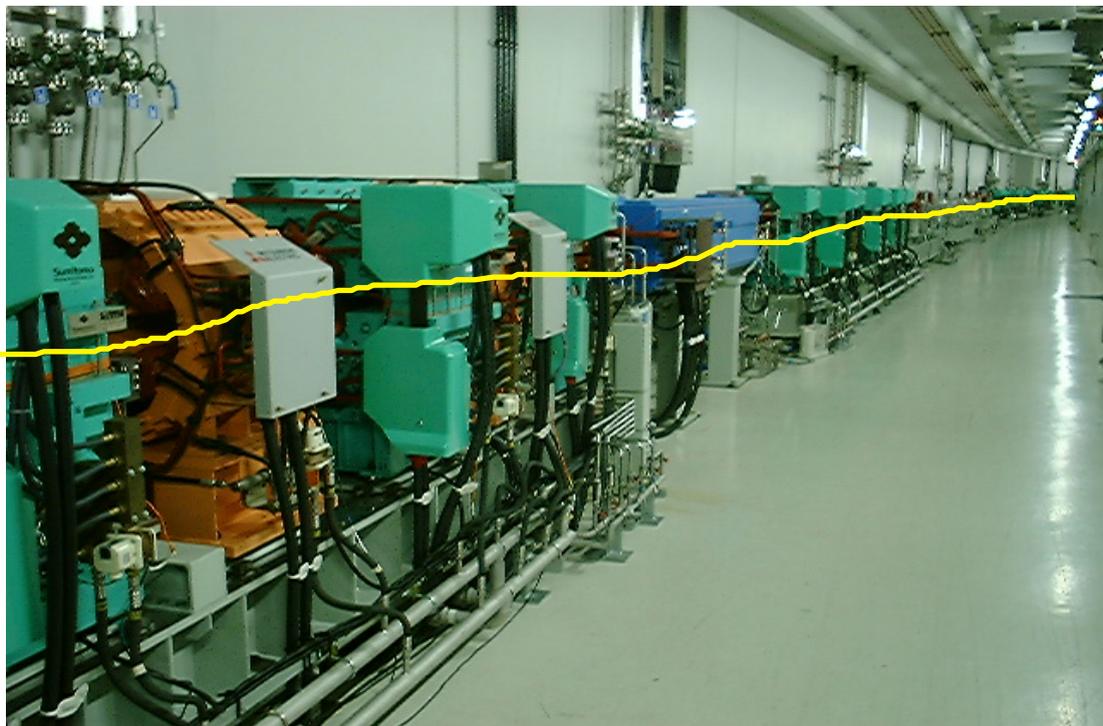
偏向電磁石



4極電磁石



6 極電磁石



電子の軌道

1.3.COD を作るもの

電子ビームをけ飛ばすもの

---> 余分な磁場 (悪者)

原因は

- ・ 電磁石の製作精度
- ・ 磁場の安定度 <--- 受電電圧、DCCT
- ・ 電磁石の据え付け誤差
 - 磁石の振動 <--- 自動車、TGV、大地微振動
 - 磁石位置の変化 <--- 温度、湿度、地盤
- ・ 地磁気
- ・ 潮汐によるリング周長の変化
- ・ 地球の丸み
- ・ 重力の違い
- ・ モーター類の磁気ノイズ
- ・ チェンバーなどの残留磁場

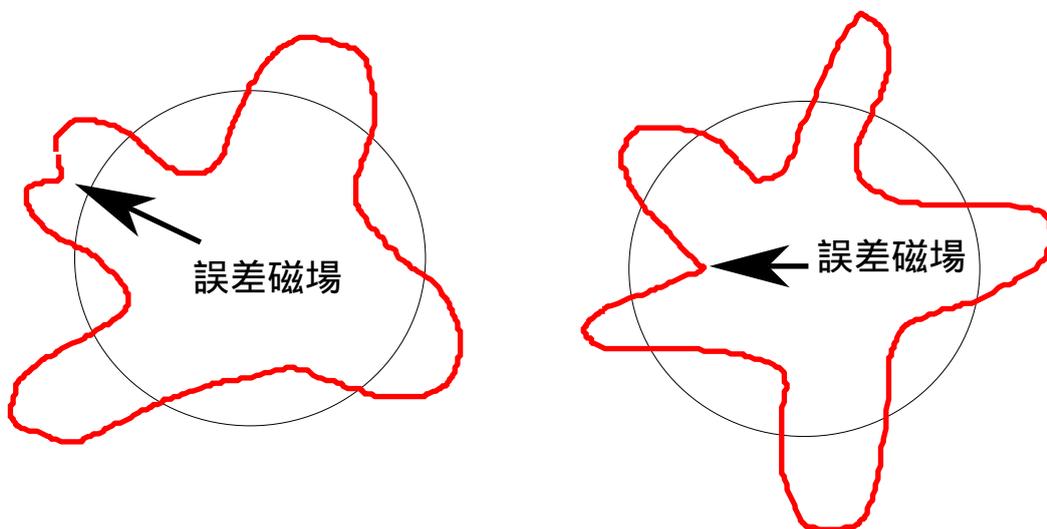
1.4.COD の数式表現と特徴

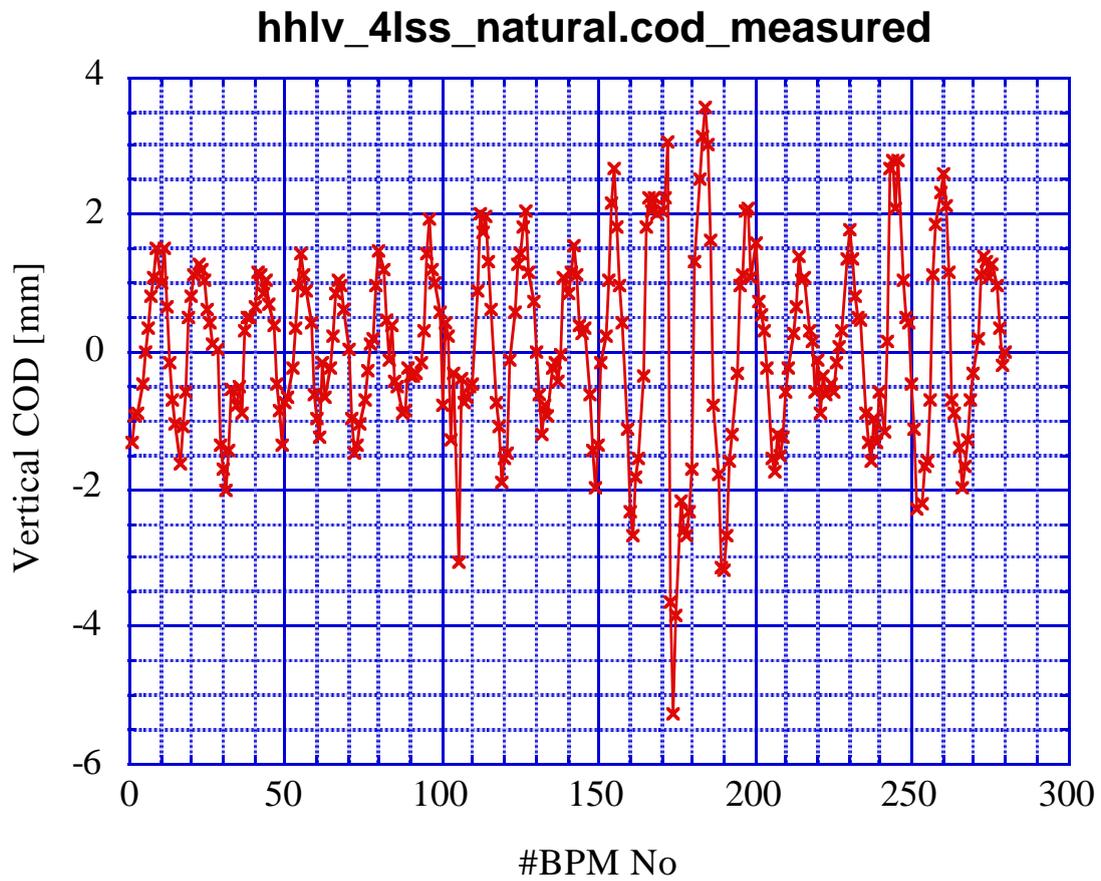
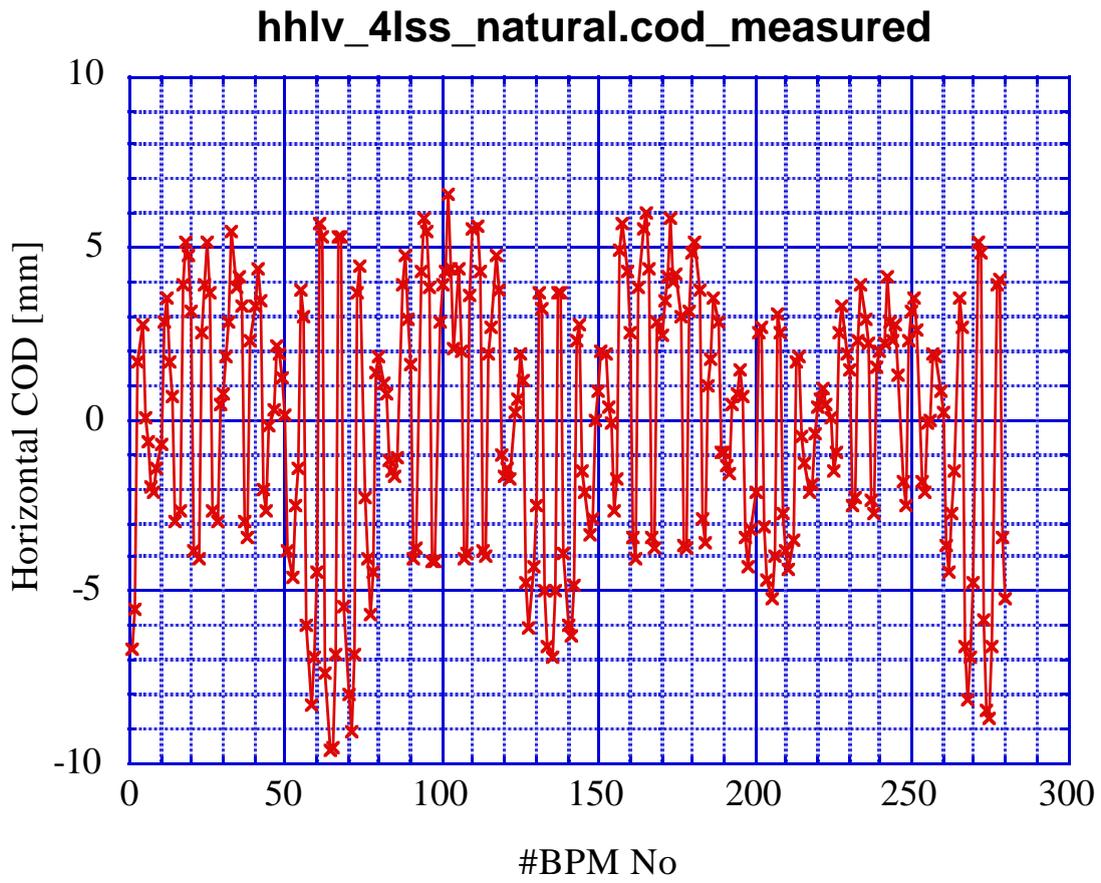
$$\text{COD}_z(s) = \sqrt{b_z(s)} \int_c d\hat{s} \frac{DB(\hat{s})}{Br} \sqrt{b_z(\hat{s})} \cos (|\mathbf{f}(s) - \mathbf{f}(\hat{s})| - pn_z)$$

特徴

- ・ リング一周で周期性を持つ
- ・ 誤差磁場 (COD のソース) の場所で不連続
- ・ 振動数 (軌道のうねりの山の数) はチューンの整数
- ・ 山の高さはその場所のベータ関数のルートに比例
- ・ うねりはベータatron振動の位相進みで伝搬

！！位相項の pn_z は周期条件を満たすために必要
各自で確認してみよう！！





2. COD とビーム性能

2.1. COD の誘起する誤差磁場

COD は非線形電磁石と組合わさってさらなる誤差磁場を生み出します。

非線形電磁石 (6 極、8 極、10 極.....)

----> ビームの振幅の 2 乗以上に比例して磁場が変化

$$\begin{aligned}
 F &= a x^3 \rightarrow a (x - x_{\text{cod}})^3 \\
 &= a (x^3 + \underbrace{3x x_{\text{cod}}^2}_{4 \text{ 極成分}} + \underbrace{3x_{\text{cod}} x^2}_{6 \text{ 極成分}} + \underbrace{x_{\text{cod}}^3}_{2 \text{ 極成分}})
 \end{aligned}$$

2.2. 誤差磁場による性能劣化

このように生み出された誤差磁場は、多くの場合、設計時に考えていた位相関係やベータatron関数、ディスパージョン関数の最適化を崩し、ビーム性能を劣化させます。

例えば、

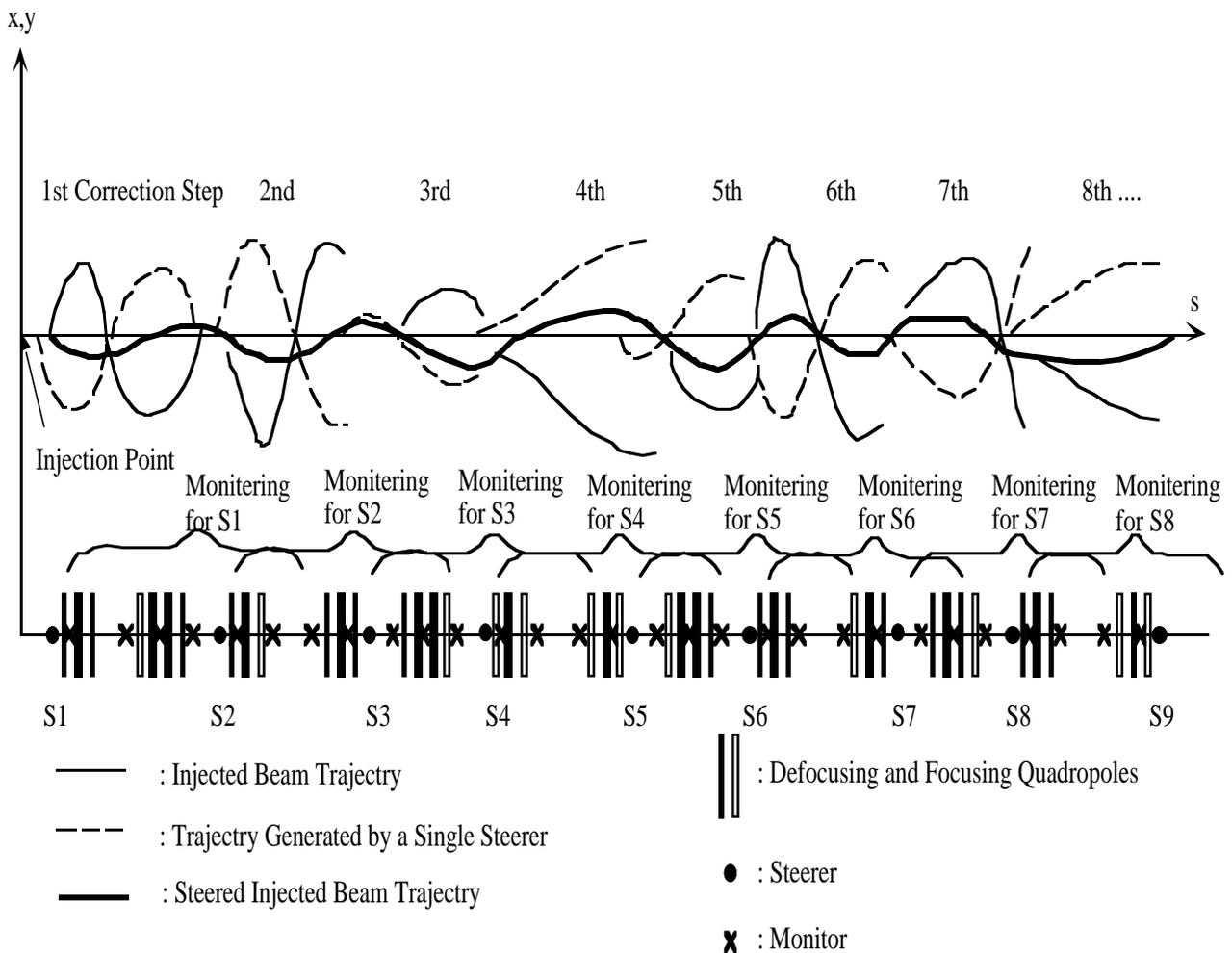
- ・ ビーム寿命の低下
- ・ エミッタンスの増加
- ・ 光源点でのビームサイズのずれ
- ・ 入射効率の低下

3. COD を補正するには

3.1.重ね合わせの原理

先ほどの COD の式から、エラーソースに対し線形であるから重ね合わせが成り立つことが分かる。

---> この意味を説明せよ



Trajectory を重ね合わせで補正するイメージ

3.2.補正に使うパラメータ

CODの補正法には2つの方式があり、どちらにするかで使用するパラメータが異なります。

(1) モデルに基づく補正

この場合は、CODの数式表現をそのまま使用して補正するので、以下のパラメータが必要です。

- ・ 全BPM及びステアリングでのベータトロン関数
- ・ 全BPM及びステアリングでの位相進み
- ・ リングのベータトロンチューン

SPring-8では、リングモデルを計算機上に構築しており、上記パラメータを全てのプログラムが共有できる構成になっています。

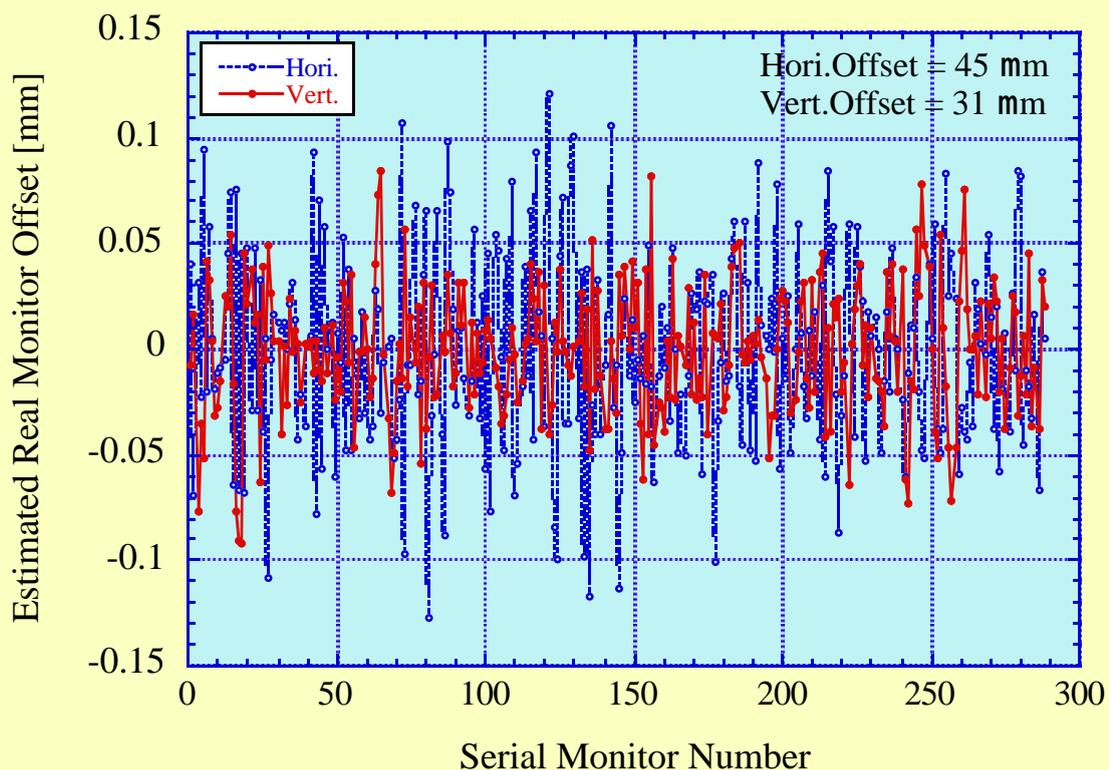
(2) モデルフリーな補正

この場合は、ビーム応答関数を直接測定し、ある種の正規化を行って使用します。その他のパラメータは不要です。但し、リングの状態が変化した場合には、ビーム応答関数を再度取り直す必要があります。

3.3.BPM には騙されるな

格言：BPM を無闇に信ずるべからず
間違っても ESRF のまねはしないこと！！

対策は、BPM のノイズは高い周波数成分を持つので、
本物の周波数帯を極力下げ、Low-pass filtering をかける。



SPring-8 で実際に使用されている BPM の Offset

3.4.補正法いろいろ

・基本的に非常に多変数の線形連立方程式を解くという問題です。

例えば、

- ・ Harmonics 法 (COD を周波数分解して任意の周波数について補正)
- ・ 最適ステアリング法 (COD を小さくするのにもっとも効果的なステアリングを効果のある順に選んできて補正)
- ・ 単なる最小自乗法 (とっても危険 : 重みをうまく使いましょう)
- ・ 固有値分解法 (NS 安東さんの **Favorite** --> ??)
- ・ Local Bump Chain 法 (SLS のフィードバックで似たものを使うらしい)

4. 良い補正、悪い補正

4.1.正しく電子ビームを磁場中心へ導く

これ以上に表現できません。正しく導けた場合には

---->

- ・ ベータatron関数などが設計値に近づく
- ・ チューンも設計値に近づく
- ・ 水平、垂直ディスパージョンもに近づく
- ・ 4極、6極電磁石の値を変えても軌道が変わらない
- ・ 光軸が設計通りの場所にある？

4.2.光ビーム軸との関係

これはユーザー運転中にもっとも注意しなくてはいけないこと！！

COD補正に利用している280台のBPMは、直接光軸を監視していないことに気づいていましたか？

---> この理由を述べよ

4.3. 良い補正、悪い補正

少し哲学的ではあるが、

良い補正の条件：

- ・ 無闇に BPM に従って補正しない
- ・ 裏のとれた補正？（色々なパラメータが設計値と矛盾しないこと）
- ・ 強いステアリング電磁石をなるべく使用しない（通常のユーザー運転中であれば、 < 0.01 ）

悪い補正でありがちなこと：

- ・ 無闇に BPM に従ってしまう
- ・ BPM で測定された COD が小さくなること以外考えない
- ・ 強いステアリング電磁石を使用しても疑問を感じないで補正

5. 質問コーナー

- ・COD 補正 GUI の見方、意味
- ・立ち上げ調整の内容
- ・マルチバンチ filling がいっぱいあるのはどない？
- ・入射後の調整はなににとるんか？
- ・COD 補正はどこで良しとするか？どれは悪いか？