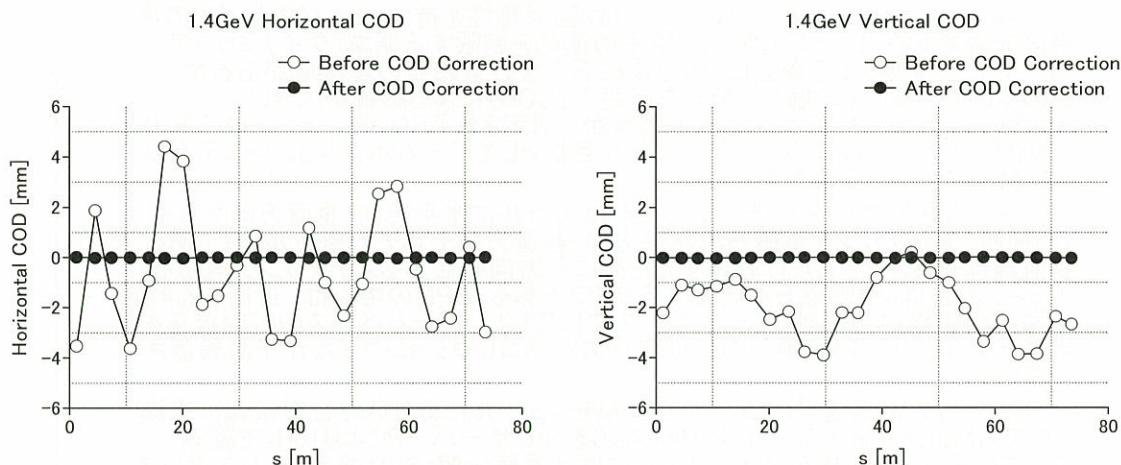


SAGA Light Source 電子蓄積リングの ビームポジションモニタシステムと軌道補正システム

岩崎 能尊¹、高林 雄一¹、江田 茂¹、吉田 勝英¹、富増 多喜夫¹、大垣 英明¹

¹九州シンクロトロン光研究センター、²京都大学エネルギー理工学研究所

SAGA Light Source 電子蓄積リングは 8 回対称のコンパクトリングであり、各セルに 3 箇所、合計 24 箇所のボタン電極型ビームポジションモニタ (BPM) を設置している。各 BPM からの信号を Bergoz 社 BPM モジュールにより位置情報に変換し、PC サーバにより複数のクライアントからビームポジションをモニタしている。PC サーバとクライアント間通信には Windows 上での EPICS 環境である ActivexCA を用いている [1][2]。BPM のモニタ精度は数 μm である。電磁石のアライメント誤差等による電子軌道の変形 (COD) を補正するために、蓄積リングには各セル水平・垂直各 5 台、合計 80 台のステアリング電磁石を設置している。COD 補正のアルゴリズムと手法にはいくつかの方法があるが、当センターでは実測により取得した Response Matrix を用いてグローバル COD 補正を行っている。実測により取得した Response Matrix による COD の補正手法は、ステアリング電磁石強さと閉軌道変形量の線形性のみを前提とするため、4 極電磁石の実効的な強さが不確なコミッショニング初期からの COD 補正が可能であった。入射ビームは振幅の大きなベータトロン振動をするため、入射の高効率化には入射時からの COD 補正が重要であり、エミッタスの厳しい動作点では COD 補正により入射効率の大きな改善があった。BPM の中心はビームを用いた方法により 4 極電磁石磁場中心に校正した [3]。現在、4 極電磁石磁場中心に対して $20 \mu\text{m}$ 以下の精度で COD 補正を行っている。



[1] Kay-Uwe Kasemir, <http://lansce.lanl.gov/lansce8/Epics/ActiveXCAserver/default.htm>

[2] H.Ohgaki, Y.Iwasaki, S.Koda, Y.Takabayashi, T.Tomimasu, K.Yoshida, H.Toyokawa "PC-Labview Based Control System in SAGA-LS", Proc. of the PAC2005,Knoxville(2005)"

[3] 岩崎 能尊、高林 雄一、江田 茂、吉田 勝英、富増 多喜夫、大垣 英明
"SAGA Light Source における Beam Based BPM Alignment\"", Proc. of 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan(2006) "

SAGA Light Source

電子蓄積リング軌道補正システム

岩崎 能尊a, 高林 雄一a, 江田 茂a,
吉田 勝英a, 富増 多喜夫a, 大垣 英明b

a九州シンクロトロン光研究センター,
b京都大学エネルギー理工学研究所

SAGA Light Source / Kyusyu Synchrotron Light Research Center

ビームポジションモニタと軌道補正システムの概要

SAGA Light Source電子蓄積リングは8回対称性を持つコンパクトサイズの高輝度光源である。ビーム力学的に電子の運動を制限する領域(ダイナミックアパーチャー)を狭くする要因には6極電磁石を含む電磁石の多極成があるが、SAGA Light Sourceの場合、閉軌道の歪み(COD)による影響が大きい。 $\pm 0.2\text{mm}$ 以下の電磁石アライメント精度から想定されるCODを、 $\pm 1\text{mrad}$ 以下のキック量で、 $\pm 0.5\text{mm}$ 以下に抑えることを目標としてビームポジションシステムおよび軌道補正システムを設計した。

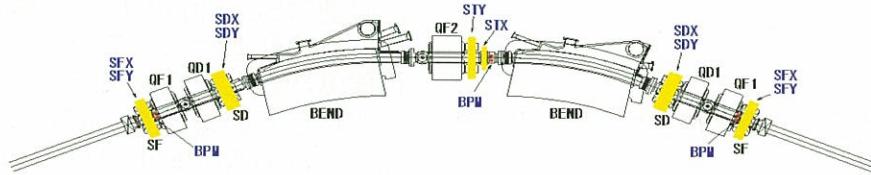
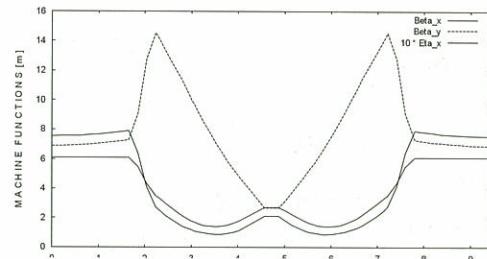
ボタン電極型ポジションモニタ(BPM)は各セルに水平方向・垂直方向それぞれ3箇所、ステアリング電磁石は水平方向・垂直方向それぞれ各セル5台である。長直線部長さをできるだけ確保するために各方向40台あるステアリング電磁石のうち、32台は6極電磁石に内蔵するタイプである。BPMの中心は、近接する4極電磁石の磁場中心に対しビームベースに校正した。ビームベースのBPM校正を可能とするため、各4極電磁石には定格の2%のコレクションコイルが予め設置されている。

BPMからの電気信号はBergoz社BPMモジュールに取り込み位置情報に変換したのちNational Instruments社16bitADCを介しサーバーPCより10Hzで読み取っている。CODの補正アルゴリズムには特異値分解(SVD)を用い、レスポンス行列は実測により直接取得している。サーバーPCとクライアントPC間の通信にはWindowsマシーン上で稼動するEPICS(ActiveXCA)を採用した。電源の制御にはYOKOGAWA PLCを使用している。

上記のシステムにより、SAGA Light Sourceでは基準軌道に対し $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下の誤差でCOD補正が可能である。

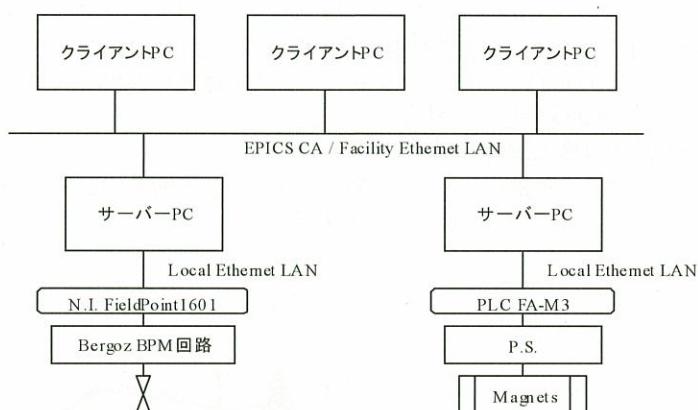
BPMおよび電磁石配置

name	type	length
L1	Drift Space	1.47 m
SF	Focusing Sextupole, HVCM	0.1 m
L2	Drift Space, BPM	0.085 m
QF1	Focusing Quadrupole	0.2 m
L3	Drift Space	0.18 m
QD1	Defocusing Quadrupole	0.2 m
L4	Drift Space	0.085 m
SD	Defocusing Sextupole, HVCM	0.14 m
BEND	Dipole (Edge Focusing)	1.257 m (22.5°)
L5	Drift Space, ICE	0.55 m
QF2	Focusing Quadrupole	0.3 m
L5	Drift Space, HVCM, BPM	0.55 m



各セルに3箇所のBPMおよび5台の水平・垂直ステアリング電磁石を設置している。セルをコンパクトにするため、6極電磁石にステアリングを内蔵（0.047T）している。各4極電磁石には定格の2%（メインコイル20ターン/pole 720A、補助コイル30ターン/pole 10A）の補助コイルを設置し個別の磁場補正が可能である（Beam Based BPM Calibrationに必要）。ステアリング電磁石はアナログ制御（2000点）で、ステアリング電源の安定度は実負荷で 1×10^{-4} 台

モニター系および制御系



- BPMモニタ系 : BergozBPMモジュール + N.I.FieldPoint1601FieldPoint(16bitADC)
- 読み取り速度 : 100ms以下
- 電磁石制御系 : YOKOGAWA FA-M3
- メイン電源は16bitデジタル、BMC、QC、STEERINGはアナログ制御（2000点）
- PC間通信 : ActiveXCA(Windows上でEPICS環境)
- サーバーPCはネットワークカードの2枚刺しによりセキュリティを強化している。

グローバルCOD補正の方法

Response Matrix

ステアリング電磁石($1, 2, \dots, j$)により

$\Delta\theta = (\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \dots, \Delta\theta_j)$ のキックをビームに与えたとき、

BPM($1, 2, \dots, i$)で観測される COD の変化 $\Delta\vec{x} = (\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_i)$ は、

行列 R を用いて、

$$\Delta\vec{x} = R\Delta\theta \quad (1) \quad \text{と表すことができる。}$$

R を Response Matrix という。

R の要素 R_{ij} は単位キック $\Delta\theta_j$ による軌道の変化 Δx_i である ($R_{ij} = \frac{\Delta x_i}{\Delta\theta_j}$)

Response Matrix はオプティクスがわかれれば

$$R_{ij} = \sqrt{\beta_i \beta_j} \frac{\cos[\phi_j - \pi\nu]}{\sin \pi\nu}$$

のように計算されるが、

SAGA Light Source では実測により直接取得している。実測による Response Matrix による方法はオプティクスが明らかでないコミッショニング期からの COD 補正が可能である。

グローバル COD 補正

BPM($1, 2, \dots, i$)でビーム軌道が $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_i)$ と観測されるとき、

ステアリング電磁石を用いて $\vec{x}' = -\vec{x}$ なる COD を発生させればよい。

必要なステアリング電磁石の強さは、(1) より

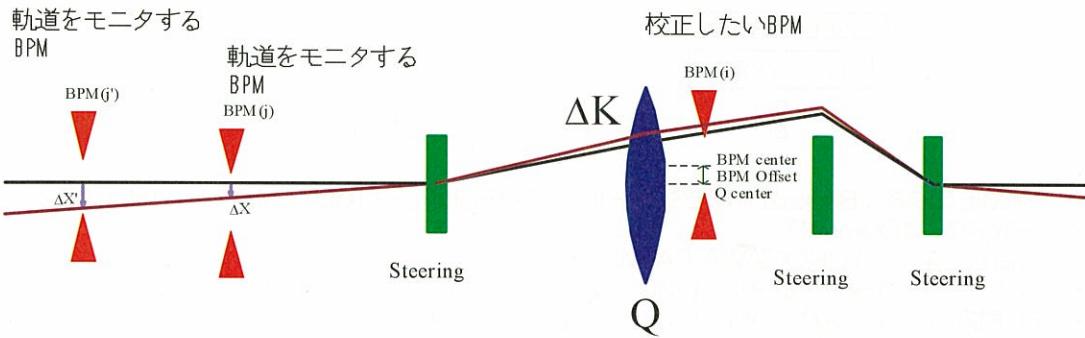
$$\dot{\theta} = -R^{-1}\dot{x}$$

として得られる。逆行列 R^{-1} を求めるのに、固有値分解法 (SVD) を用いる。

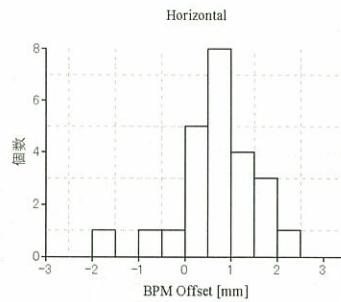
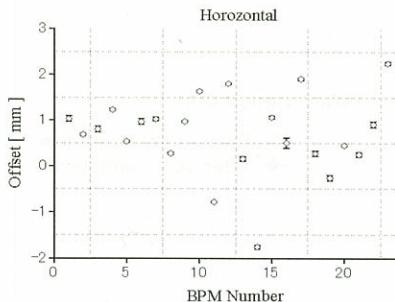
グローバルCODに必要なステアリング電磁石強さは特異値分解 (SDV) により得ている。SVDによる擬似逆行列を求める際に必要なSensitivityは、実際の補正される軌道とステアリング電磁石強度からビームスタディを通して決定している。各方向の Response Matrixは15分程度でオンラインで取得できる。

Beam Based BPM Calibration

- 注目するBPMに±3mm、±2mm、±1mm、0mmのローカルバンプを作成する。
- 近傍の4極電磁石補正コイルを±6%の範囲で6ステップで変化させる。
- 1台のBPMあたりローカルバンプ (7パターン) ×4極電磁石補助コイル (6ステップ) ×24箇所のビーム軌道を取得し解析する。
- $\Delta X / \Delta K = 0$ なる位置が4極電磁石磁場中心である。
- 十分なステアリング強度、4極補正コイル強さを得るため、入射時のエネルギーで行った。
- 一連の動作はソフトウェアにより自動的に行われる。



Beam Based BPM Calibrationの結果

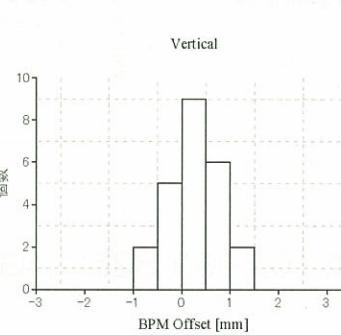
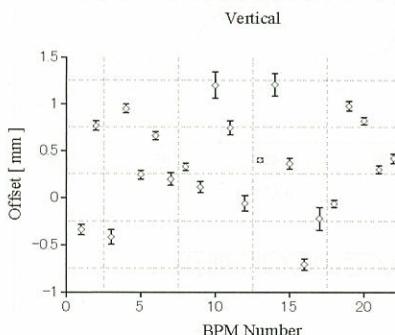


水平方向

平均値 : +0.7mm

最大値 : +2.2mm

水平方向プラス側のオフセットはBPMが設置された真空槽が4極磁場中心に対してリング内側にある方向。



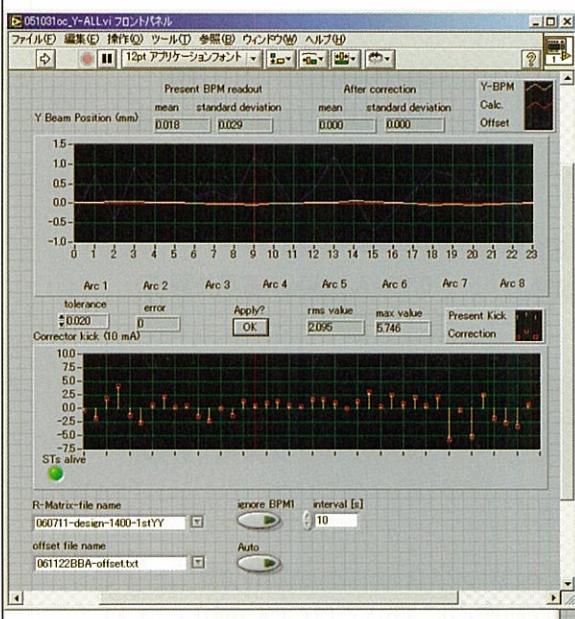
垂直方向

平均値 : +0.3mm

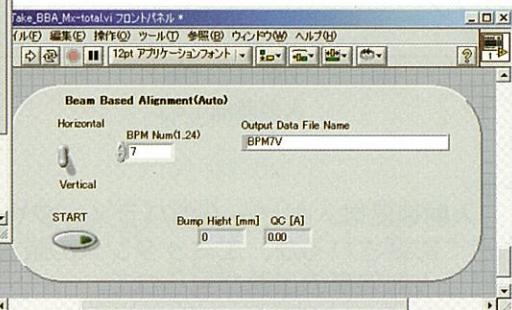
最大値 : +1.2mm

垂直方向プラス側のオフセットはBPMが設置された真空槽が4極磁場中心に対して下側にある方向。

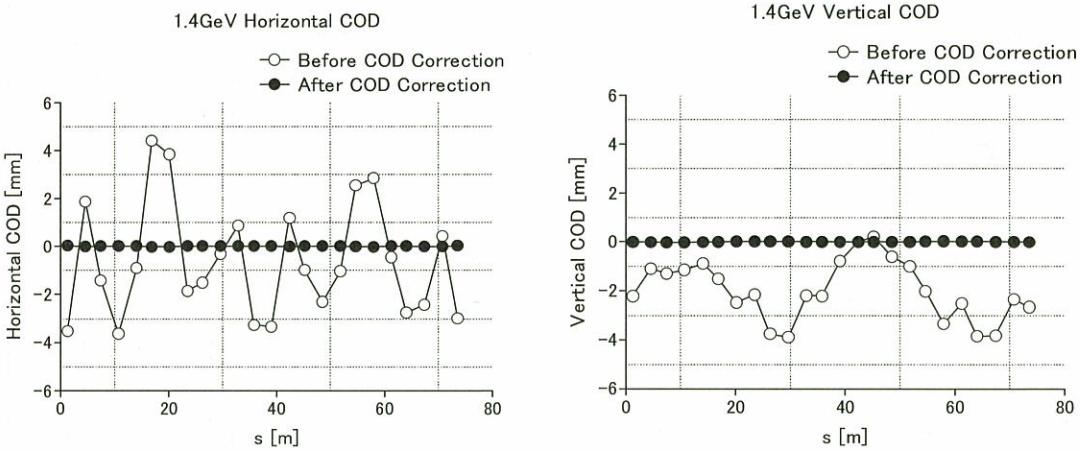
ソフトウェア



BPMモニタプログラム、COD補正プログラム、Beam Base BPM Calibrationプログラム、電源制御系プログラム等はPC-LabviewによりIn-Houseで製作。

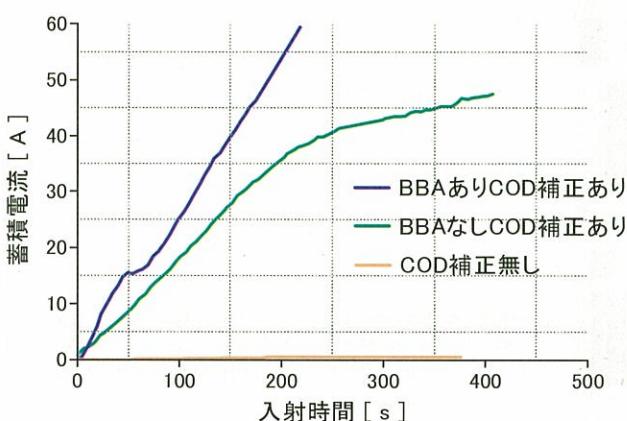


COD Correctionの結果



デザイン動作点 (5.796,1.825) 1.4GeVでのCOD補正

COD Correctionによる入射速度の向上例



COD補正なしでの入射速度:

0.003mA/s(0.5mA蓄積で評価)

BPMの校正なしでCOD補正をした
入射速度:

0.19mA/s(30mA蓄積で評価)

BPMの校正をしたCOD補正をした
入射速度:

0.27mA/s(60mA蓄積で評価)

入射速度は入射ビームのパラメータや入射系マグネットの最適化等によって
大きく影響されるが、エミッタансの厳しい動作点においてはCOD補正により
大幅な入射効率の改善が見られた。

Summary

各セル3台のBPMおよび5台のステアリング電磁石を用い、グローバルCOD補正を行っている。4極電磁石磁場中心に対して校正したBPM規準軌道に対し、 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下の精度で補正が可能である。エミッタансの厳しい動作点では入射時からのCOD補正により入射効率が改善される。

現在、1.4GeV加速後に規準軌道に対しCOD補正を行っているが、ビーム貯蔵中のフィードバックは行っていない。BPMのドリフト抑制が今後の課題である。