

# PF 直線部増強後の SAD による電磁石制御 と シミュレーション

英語にする暇ありませんでした。済みません……

## 導入

- 2005年3月から9月まで、PFリング直線部増強の為に改造が行われた。
- この発表では、
  - PFリング直線部増強の概要
  - EPICSとSADによる新しい電磁石制御系(WEB&配布物参照)
  - 立ち上げに向けてのSADを使ったシミュレーションと実際の立ち上げについて述べる。

現在までに PF リングは4回改造されている。

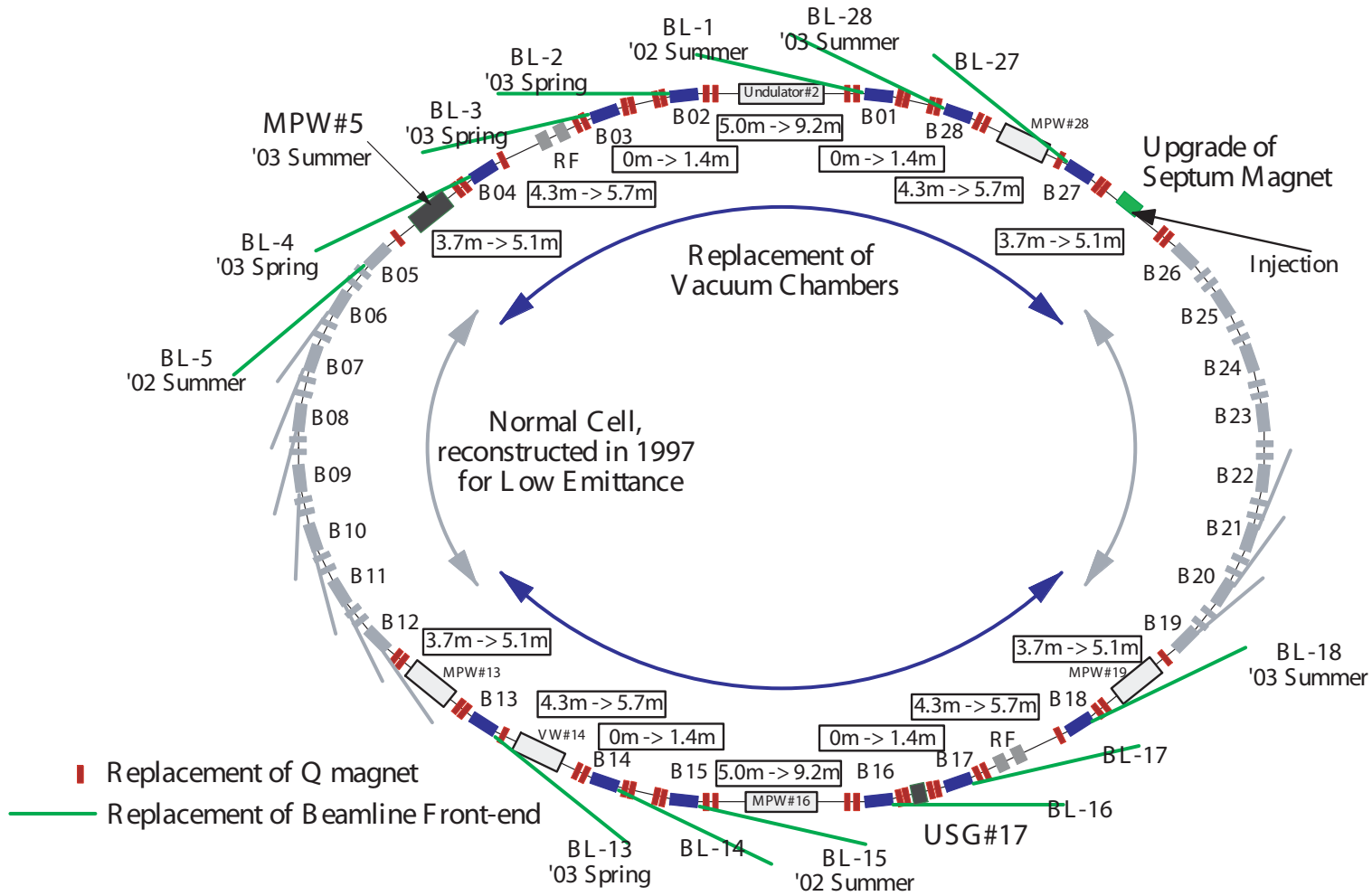
		建設当初	低emittance化 後	高輝度化後	直線部増強後	
エネルギー	E [GeV]	2.5 (3.0)				
周長	C [m]	187.074				
エミッタンス	$\varepsilon_0$ [nm×rad]	459.8	128.2	35.6	35.4	
エネルギー広がり	$\sigma_E/E$	7.29E-04	7.29E-04	7.28E-04	7.29E-04	
Momentum Compaction	$\alpha$	3.98E-02	1.56E-02	6.71E-03	6.56E-03	
ベータatronチューン						
	水平方向	$\nu_x$	5.3	8.5	9.6	9.6
	垂直方向	$\nu_y$	4.2	3.3	4.3	5.3
色収差						
	水平方向	$\xi_x$	-6.6	-14.6	-12.6	-13.4
	垂直方向	$\xi_y$	-4.7	-7.7	-11.3	-15.8
1周のエネルギー損失	$U_0$ [keV/rev.]	398.9	398.9	398.9	399.1	
放射減衰時間						
	水平方向	$\tau_x$ [msec]	7.8	7.8	7.8	7.8
	垂直方向	$\tau_y$ [msec]	7.8	7.8	7.8	7.8
	縦方向	$\tau_z$ [msec]	3.9	3.9	3.9	3.9
周回周波数	$f_{rev}$ [MHz]	1.6				
RF周波数	$f_{RF}$ [MHz]	500.1				
Harmonic Number	h	312.0				
RF電圧	$V_{RF}$ [MV]	1.7 (3GeVは2MV)				
Synchrotron Tune	$\nu_s$	-0.036	-0.023	-0.015	-0.015	
バンチ長	$\sigma_z$ [mm]	23.9	15.0	9.8	9.7	
RF Bucket Height	$(\Delta E/E)_{RF}$ [%]	0.479	0.765	1.167	1.180	

## 直線部増強改造の概要

- PFリングは1981年に建設された後、1996年の高輝度化改造により、弧部の4極及び6極電磁石、真空系が更新された。2005年の直線部増強により、建設当初の真空ダクトや4極電磁石を使っていた残りの部分である直線部が改造され、偏向電磁石本体を除くほぼ全ての要素が更新された。
- 建設当初の真空ダクトのボア直径は110mm、4極電磁石の最大磁場勾配はおよそ15T/m、最も長い4極は1mの鉄芯長であった。ボアを70mmまで小さくすることで、4極の最大磁場勾配を30T/mまで高め、鉄芯長を短くした。今回の改造では、鉄芯長30cmと40cmの新しい4極電磁石が合計46台導入された。
- 4極を短くした上で、さらに真空系や診断補正系の配置をぎりぎりまで詰め、既存の直線部の長さをほぼ極限まで長くした。さらに今までスペースがなかった直線部に新しい挿入光源用のスペースが作られた。
- ビーム品質の劣化を抑える為、ビームに対する真空ダクトのインピーダンスを考慮し、ダクトの繋ぎ目(フランジ)やベローズの内側をRF的に滑らかにした。

- リングの約2／3周の電磁石、真空ダクトなどが新しくなった。
- リング4極電磁石電源として、高輝度化以前に製造され、寿命を超えて使われていた12ビット制御のサイリスタ電源が全て廃止され、IGBT方式の新大型電源16台が導入された。
- 電磁石電源制御系にEPICSが導入された。(電磁石の他、RF、真空、新挿入光源の制御系にEPICSが導入された。)
- 電磁石とRFの制御用のGUIは、SAD/Tkを使ったものに更新された。

# 改造部分

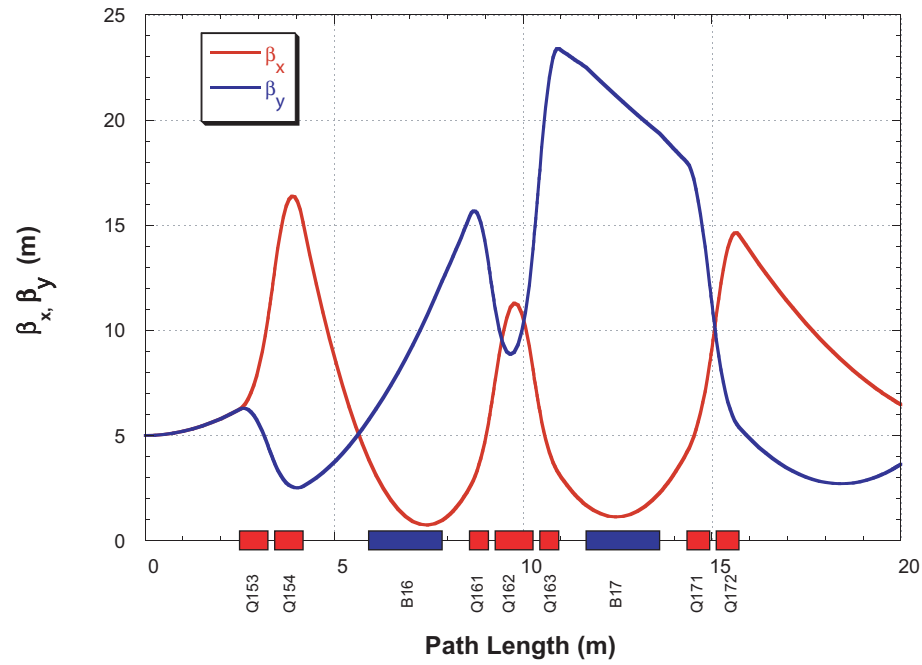


## 直線部の長さ

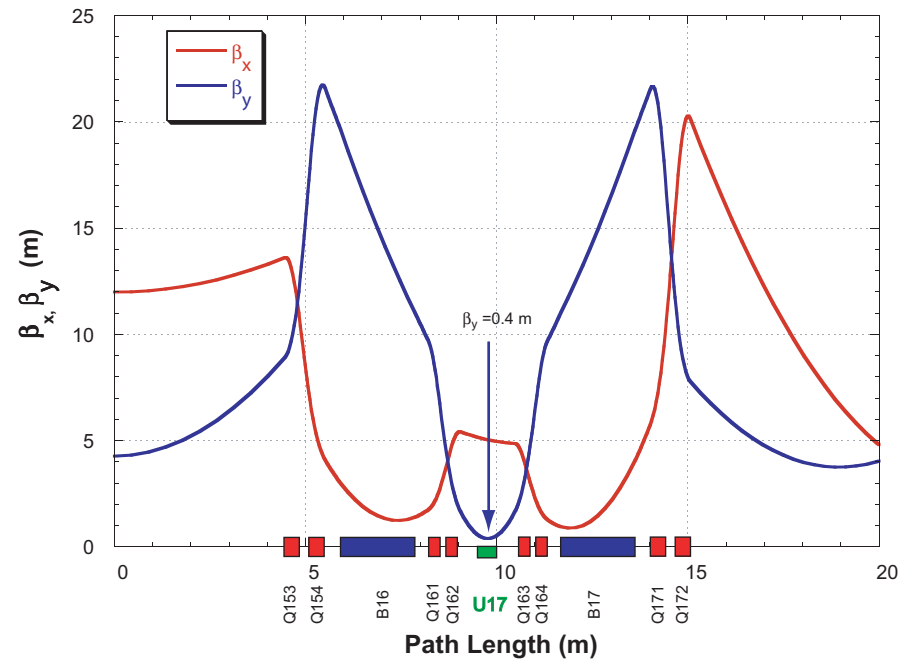
直線部	長さ [m]	beamline (現状)	備考
B01-B02	5.0 → 9.0	BL-2(U)	
B15-B16		BL-16(U/MPW)	
B03-B04	4.3 → 5.7	RF、BL-4(B)	RF空洞
B17-B18		RF、BL-18(B)	
B13-B14		BL-14(VW)	
B27-B28		BL-28 (HU/EMPW)	
B04-B05	3.7 → 5.1	BL-5(MPW)	
B18-B19		BL-19(U)	
B12-B13		BL-13(U/MPW)	
B26-B27		入射点、BL-27(B)	入射点
B02-B03	新規1.4	BL-3(B)	
B16-B17		BL-17(MPU) 建設中	
B14-B15		BL-15(B)	
B28-B01		BL-1(B)	

# 新直線部の例

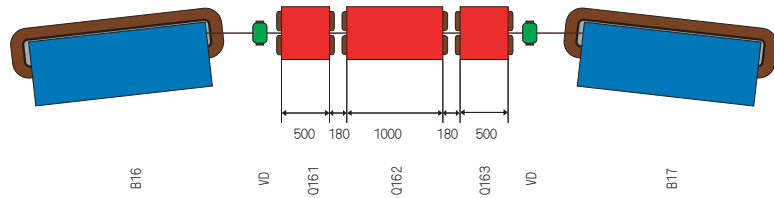
PF-Ring Present Optics



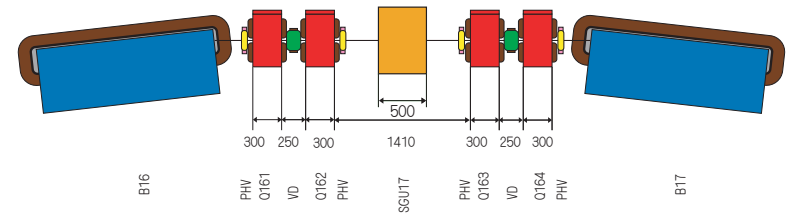
PF-Ring New Optics



(a) Magnet Configuration (Present)



(b) Magnet Configuration (New)







改造前



改造後

## SAD を通じた EPICS による制御

- 電磁石の制御系に EPICS が導入された。
- VME の CPU モジュール4枚を新しく導入したのみで、CAMAC、VME の I/F ボードはそのまま既存のものを使った。ソフトウェア予算はなし。

## 旧制御系

大型電源(リングのB、Q、SX) : PC(Windows NT) + オリジナル CAMAC Bit I/O

小型電源(ステアリング他) : VME-CPU(HP-RT) + 川重製 I/F ボード

HP 製 Workstation から Fortran のプログラムを通じて制御。通信プログラムは大型電源については制御担当者自作、小型電源は川重製。

GUI は VAPS。特定のサーバ以外では動作せず、改変も非常に困難。

## 新制御系

大型電源 : VME-CPU(VxWorks & EPICS) + オリジナル CAMAC Bit I/O

小型電源 : VME-CPU(Linux & EPICS) + 川重製 I/F ボード

どの端末からも制御可能。GUI は SAD、Python、MEDM で製作。改変は容易。

## EPICS の特徴

- レコードを通じて制御を行う。
- ネットワーク上のどの端末からもレコードを実行することができる。
- 詳細は WEB 掲載(多少配布)の詳細版を参照。
  
- SAD 内の記述は、CaPut[“record”]、CaGet[“record”]、CaMonitor[“record”]などと書くだけ。
- レコードを管理する IOC (機器と直結した制御用のコンピュータ) がどこにあるかは関係ない。
- 値をレコードにしておくことで、機器同士の連携などが非常に容易である。
- Linux の PC を使えば、ハードウェア費用は安価であり、ソフトウェアに関してはほとんど無料である。

## SAD を使っていること

- PF はK値制御でなく、電流値制御にしてある。K値と電流の変換は SAD で行う。(励磁曲線を読み込み、Spline で補完して値を求める。加減速の際の各エネルギーに対する電流値の算出も SAD で行う。)
- 応答行列を使ったオプティクスの測定。(ステアリングのレスポンスから、オプティクスを求める。繰り返し計算、設定、測定で4極の実際のK値を推定しながらオプティクスを設計値にあわせる。)
- 据付データの解析、設計軌道の算出。(SMART は自分を原点とした局所座標系で見える範囲の電磁石の座標を求める。それを繋げて1周にする計算は SAD で行った。設計座標の計算と、据付基準(Bとモニユメント)の測定座標の重ね合わせも SAD で行った。)
- 計算による応答行列、測定した応答行列を使った COD 補正。
- カップリング(垂直方向の分散関数の歪み)の補正。
- 局所バンプ。
- 入射パラメータ(キッカーセプタムの電流値)の計算。
- EPICS レコードデータベースの書き出し。(電磁石の名前を変えながら、同じレコードを繰り返しファイルに書き出す。)

## 改造後のリング立ち上げに必要な条件

- リングのエネルギーが LINAC からのビームのエネルギーに一致していること。
  - BT は変えてない、リングのBも変えていない。BT 通ればエネルギーは正しい。
- キッカーセプタムのタイミングがビームと同期していること。
  - 特にキッカー(1周しか蹴らない)。
- 入射のタイミングと RF の位相が同期していること。
  - セパトリスの外側では蓄積しない。
- 強烈なビーム不安定性がないこと。
- 入射ビームがダイナミックアパーチャ、フィジカルアパーチャの内側に入ること。
  - $COD + \text{入射振動} < \text{物理口径} < \text{力学口径}$

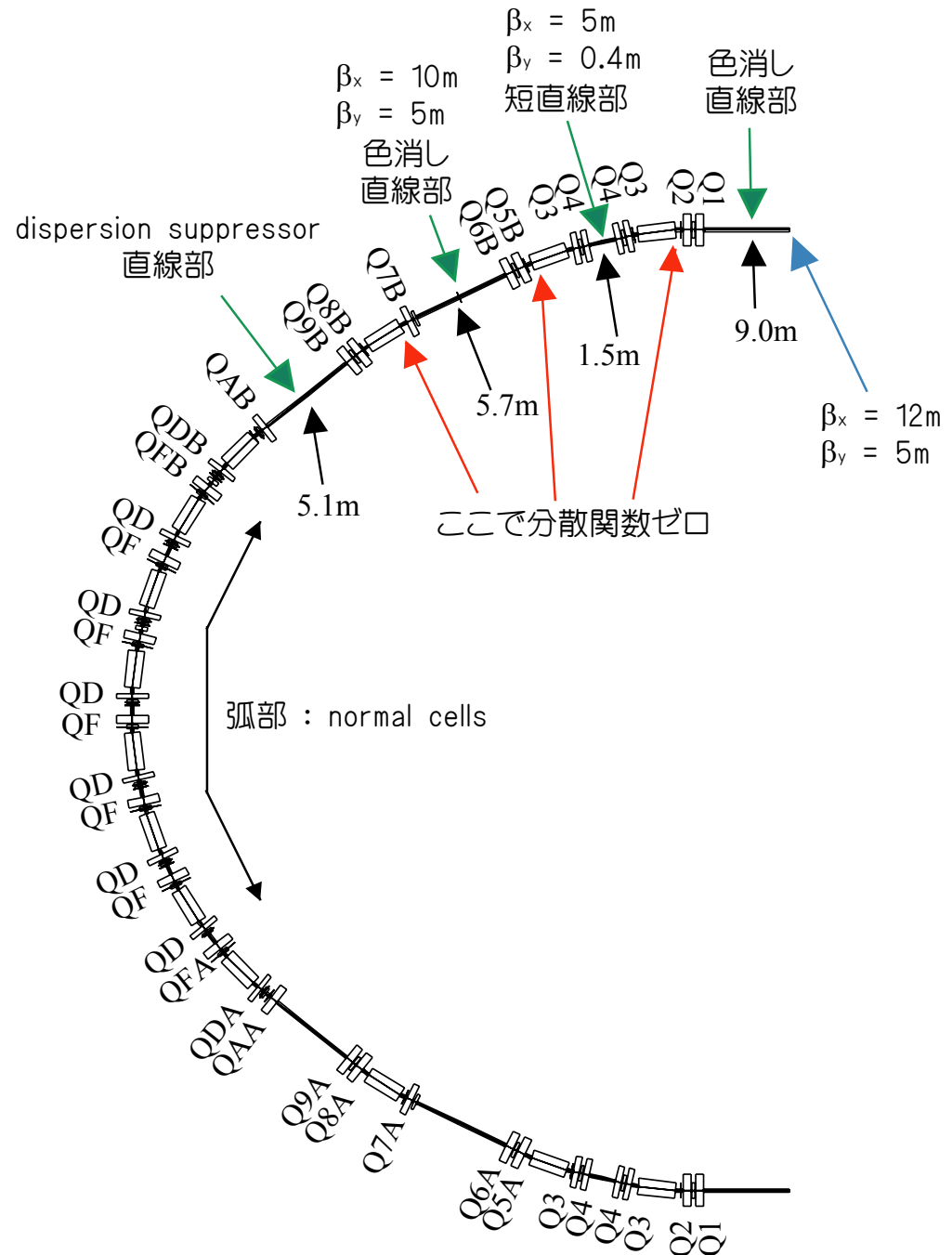
## 直線部増強後の立ち上げに向けての SAD による計算

- オプティクス設計 (直線部のベータの値や分散関数などのマッチング)。
- ダイナミックアパーチャを計算し、ベータatronチューンを決定。
- 誤差を入れ、影響を調べる。据え付け誤差に対する COD の大きさの見積もり。
- COD が大きい場合に入射ビームがどこで失われるかの推定。

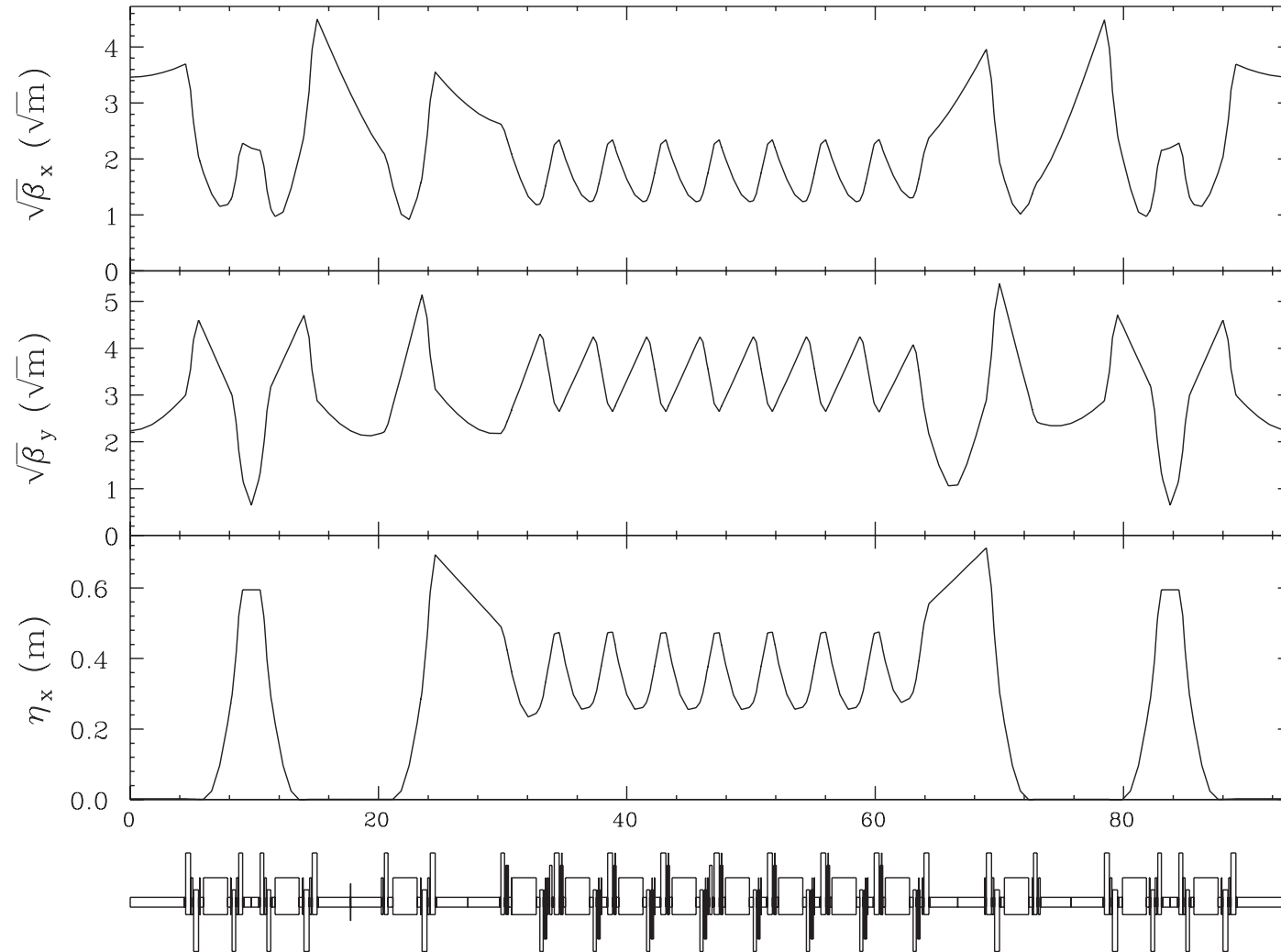
オプティクス設計、運転チューン設計、誤差の影響、入射ビームのアパーチャなど、ほぼ全て小林幸則氏による非常に周到な計算である。

# オプティクス設計

- リング半周の図を示す。
- マッチングの条件は右の通り。
- チューンについては、弧部の QF、QD で主にマッチングを行う。
- 南北直線部(Q1-Q1 間)よりマッチングを始め、cell で計算した弧部と繋ぐ。仕上げに dispersion suppressor の部分でチューンを調整する。
- 直線部の自由度が非常に大きく、初期条件をうまく取るか、計算範囲を徐々に広げていくような方法を取らないと、マッチングが収束しない。



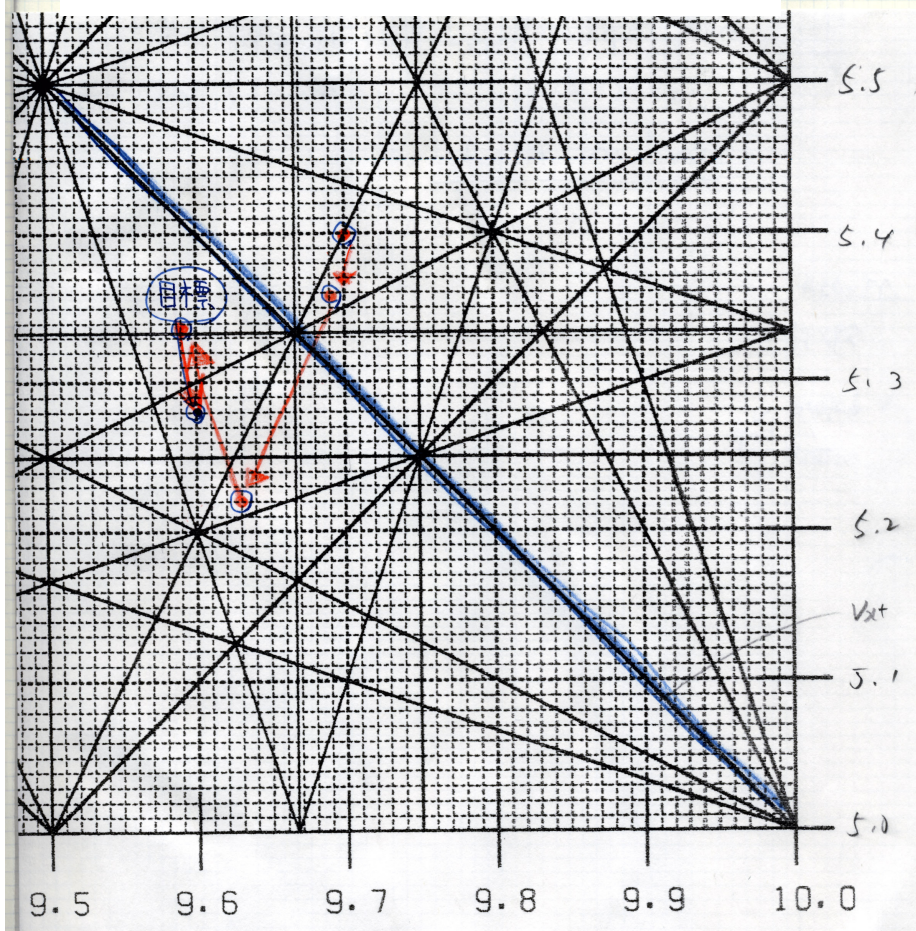
# リング半周のオプティクス





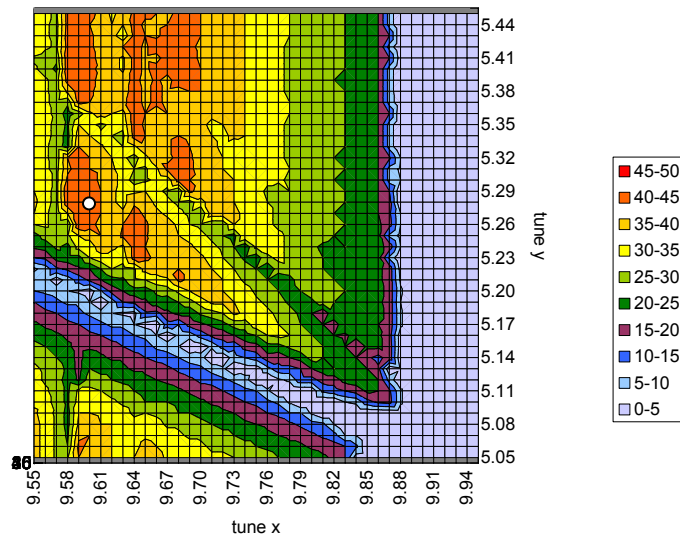
# ダイナミックアパーチャサーベイ

立ち上げ時における実際のチューン

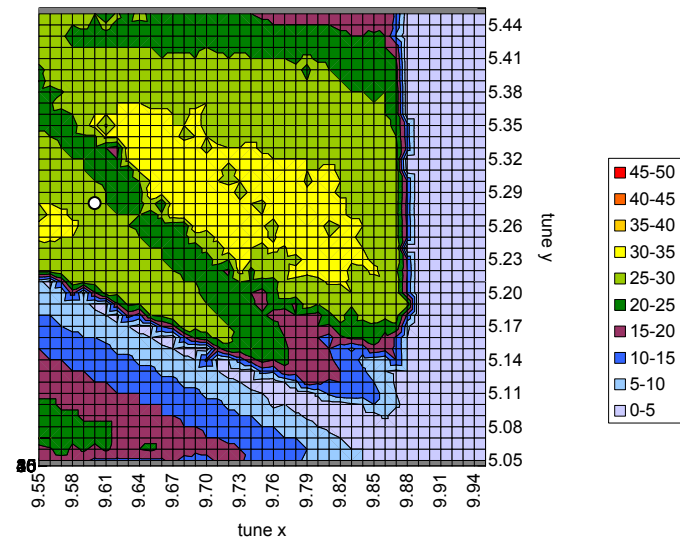


# シミュレーション(誤差あり)

$$DAx DP = (-0.9\% + +0.9\%)/2$$



$$DAy DP = (-0.9\% + +0.9\%)/2$$



$v_x=9.6$ 、 $v_y=5.28$  で運転。

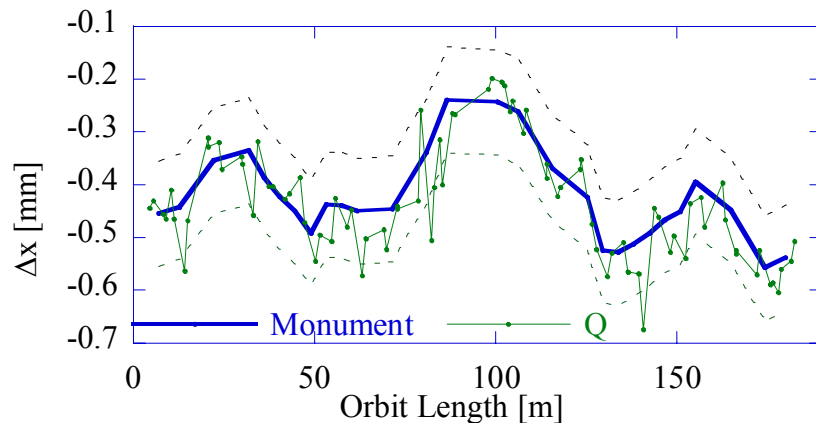
## 誤差の影響

			最大		rms	
			COD [mm]	$\Delta\eta$ [m]	COD [mm]	$\Delta\eta$ [m]
50 $\mu\text{m}$	補正前	水平	1.4815	0.0369	0.4945	0.0114
	補正後		0.6268	0.0138	0.1625	0.0047
	補正前	垂直	5.1222	0.1964	2.2387	0.0782
	補正後		0.0654	0.0293	0.0187	0.0101
100 $\mu\text{m}$	補正前	水平	2.9468	0.1205	0.9885	0.0401
	補正後		1.2561	0.0256	0.3256	0.0089
	補正前	垂直	8.9934	0.4332	3.8828	0.1764
	補正後		0.1291	0.0404	0.0360	0.0144

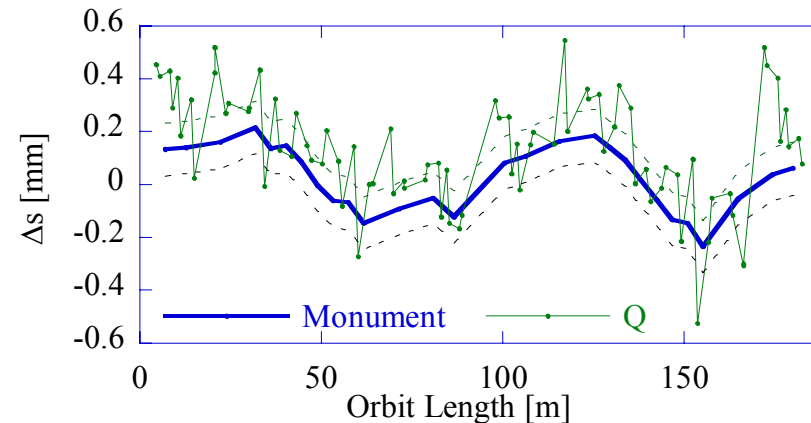
- それぞれは10通りのランダム誤差の平均。誤差はB、Q、SXに付加。
- 据付誤差について、 $\sigma=50\mu\text{m}$ 、 $\sigma=100\mu\text{m}$  の2通り計算。
- 全ての場合、磁場強さの誤差： $\sigma=0.05\%$ 、電磁石の回転誤差： $\sigma=200\mu\text{rad}$ 。
- 立ち上げ時のCODから推測すると、水平は100 $\mu\text{m}$ 相当、垂直は50 $\mu\text{m}$ 相当かと推測される。
- ただし、実際の垂直方向の分散関数の歪みは計算よりも桁で大きい。

## 据付後の測量結果(測定値)

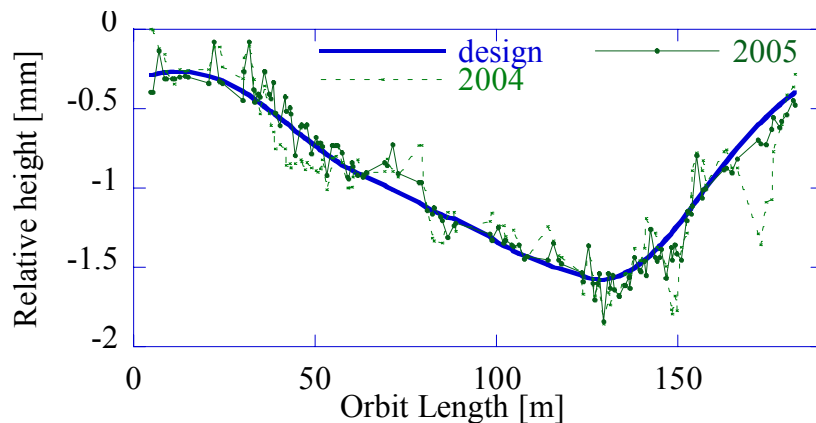
(a) 水平方向のズレ



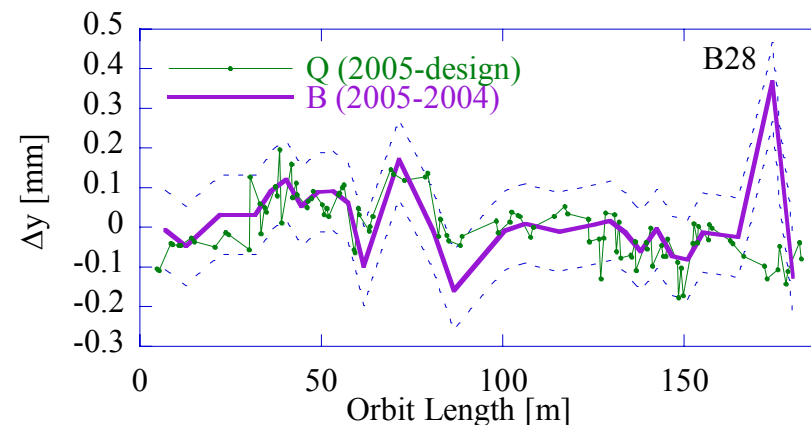
(b) 縦方向のズレ



(c) 相対高さ



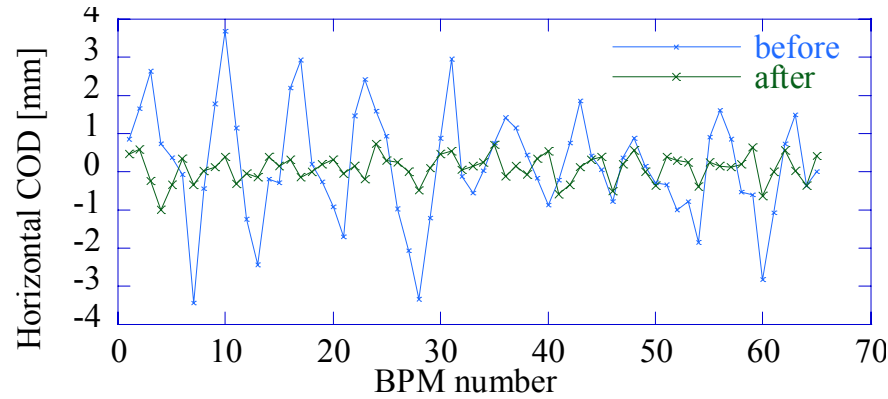
(d) 高さのズレ



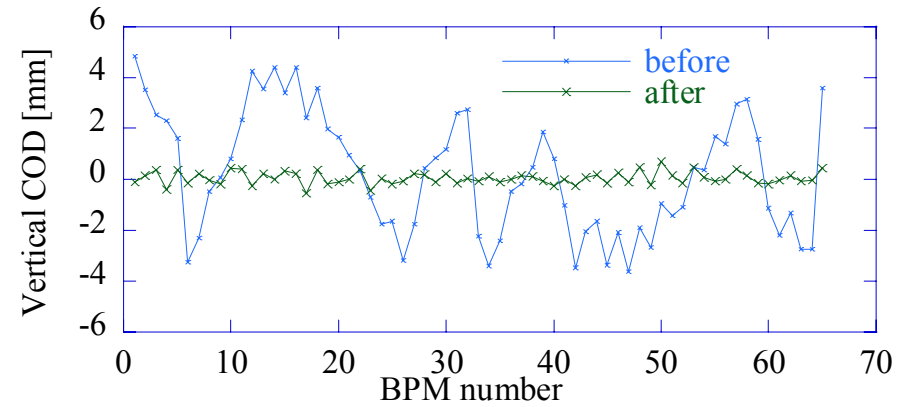
点線は据付基準点(Bと床のモニユメント)から $\pm 100\mu\text{m}$ の誤差を示す。水平と縦方向の波打は季節変化に伴う建物の非一様な伸び縮み、高さ方向は地盤沈下の影響である。入射点付近は建物が歪み易く、B28はID28を一時的に撤去したために持ち上がっている。

# 補正前後の COD、分散関数の歪み、ステアリングの蹴り角 (測定値)

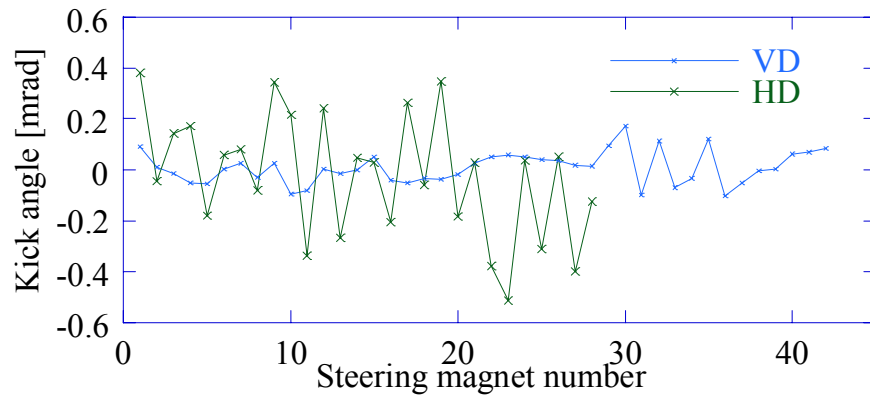
(a) 水平 COD



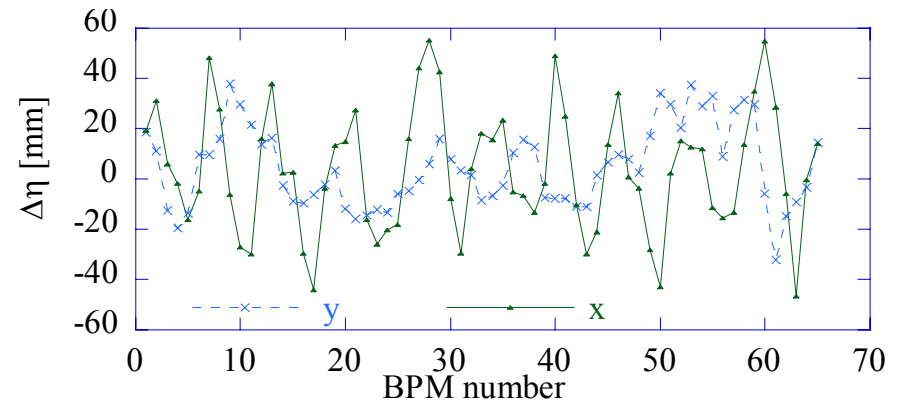
(b) 垂直 COD



(c) ステアリングの蹴り角



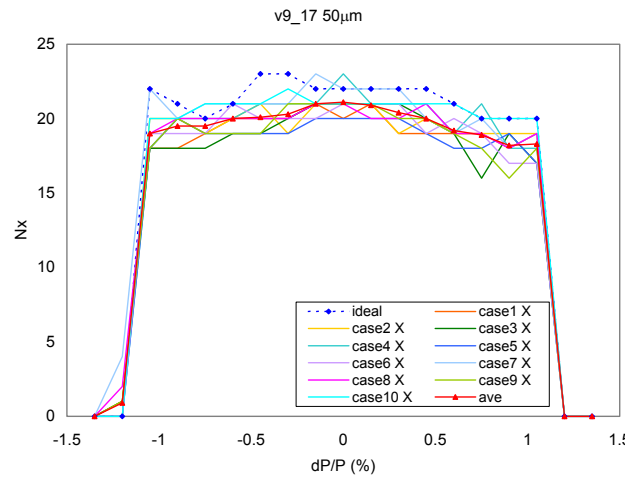
(d) 分散関数の歪み



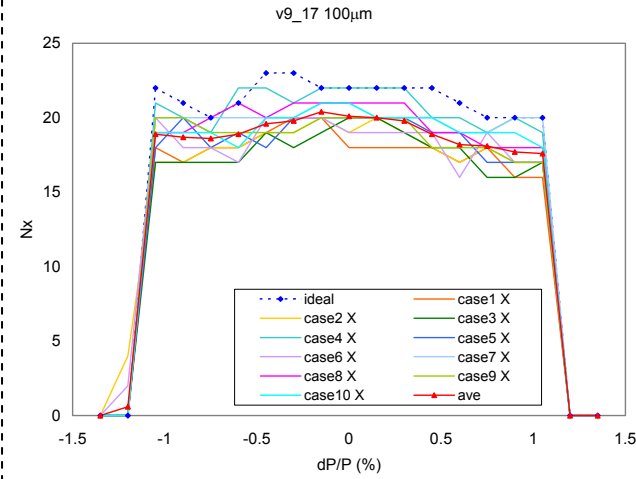
# ダイナミックアパーチャに与える誤差の影響

水平方向

据付誤差  $\sigma=50\mu\text{m}$

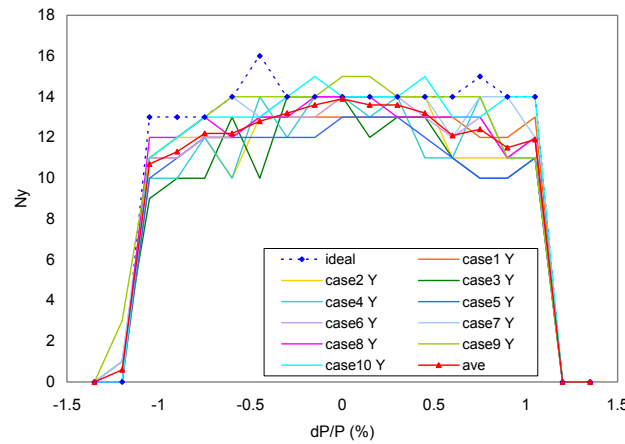


据付誤差  $\sigma=100\mu\text{m}$

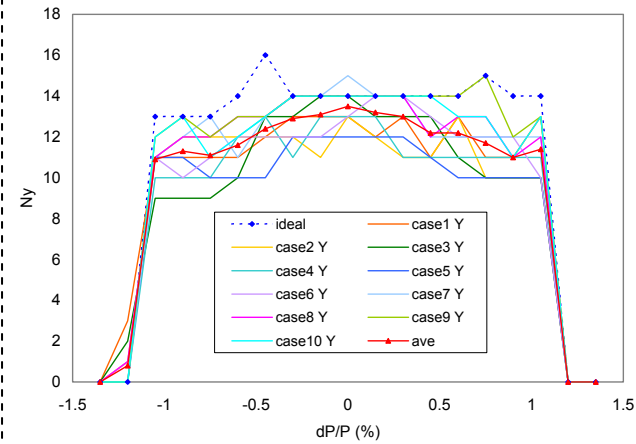


垂直方向

v9\_17 50μm



v9\_17 100μm



- 磁場強さの誤差 :  $\sigma=0.05\%$ 、電磁石の回転誤差 :  $\sigma=200\mu\text{rad}$ 。
- この大きさの誤差があっても、ダイナミックアパーチャは狭くならない。

## PFリングでアパーチャの狭い場所

水平方向 :  $\pm 21\text{mm}$  VW14 (垂直超伝導ウィグラー)  
+26mm セプタム内壁  
• 18mm (立ち上げ中はないが、) ビームスクレーパ

垂直方向 :  $\pm 7.5\text{mm}$  ID 16  
 $\pm 10.0\text{mm}$  ID 5  
 $\pm 12.0\text{mm}$  ID 2、ID13、ID19、ID28

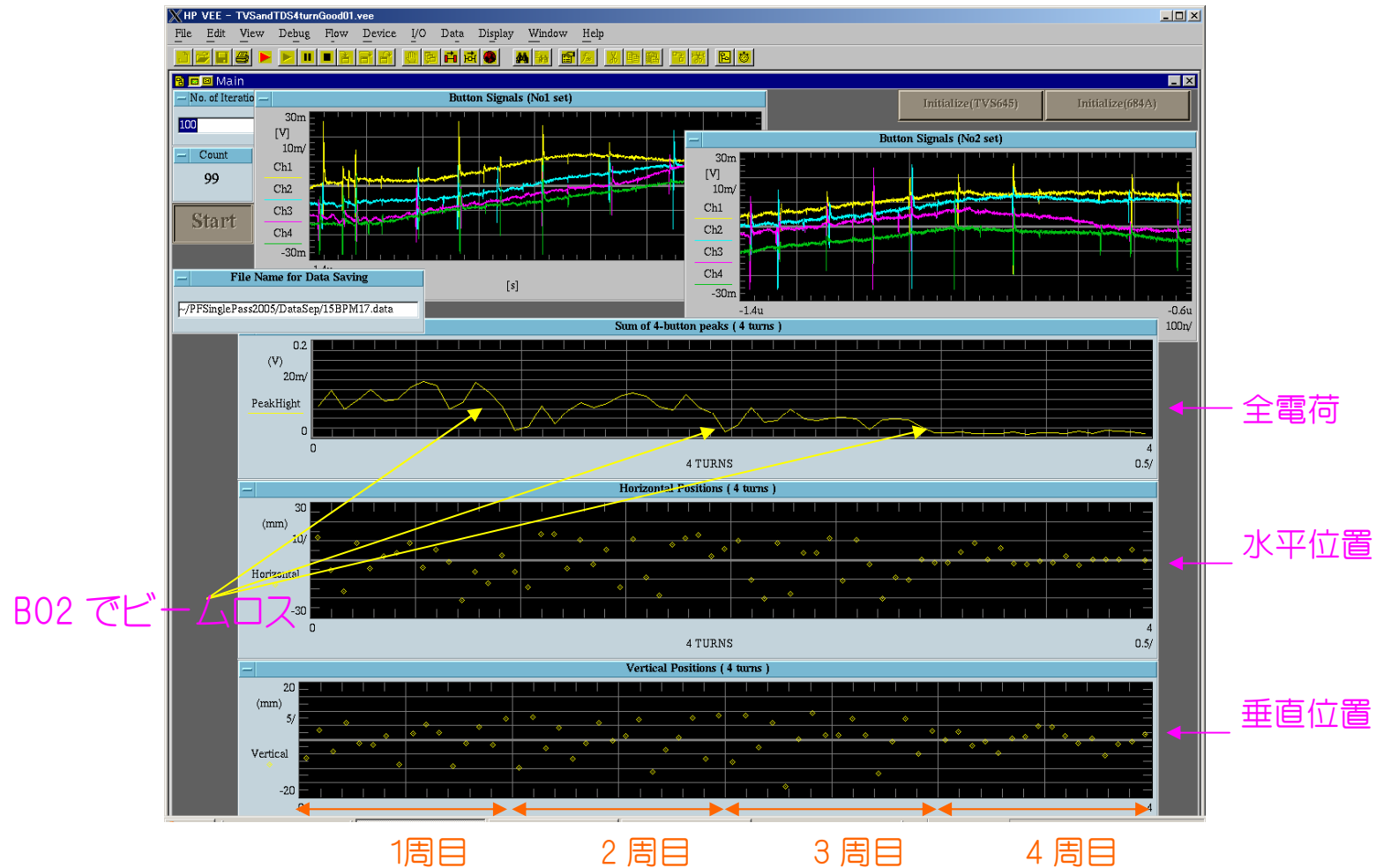
## 直線部の4極のダクトのアパーチャ

水平方向 :  $\pm 20\text{mm}$

垂直方向 :  $\pm 19\text{mm}$

水平方向は VW14、垂直方向は ID16 が最も狭い。シミュレーションの結果も、ビームロスがここで起こることを示唆している。

# 実際の立ち上げ時のビームロス



結局、ID02 内に FEL 用の鏡が入ったままになっていて、ビームを妨げていた。放射線測定結果と SAD によるシミュレーション(ここで落とすはずはないという結果)が真空を開けてチェックする際の決め手となった。立ち上げ4日目の午後に障害物撤去、5日の午後から再開、再開後4時間でビーム蓄積。

## 結論

- PF では、2005 年に直線部増強改造が行われた。
  - 改造後は制御に EPICS が導入され、SAD から直接制御することが可能になった。
  - GUI は SAD と Python が半々程度である。立ち上げ時の即席パネルはほとんど全て SAD であった。(誰が作るかに大いに依存。)
  - 立ち上げのために小林さんが非常に周到にシミュレーションを行った。
  - 周到なシミュレーションにより、早期に障害物が発見でき、立ち上げはスムーズであった。
- 
- K 値と電流値の変換、据付測量結果の解析、オプティクスなどの測定結果の解析など、SAD でなくとも出来る計算も、便利で利用しやすい SAD を多用している。(誰がやるかに大いに依存。)