

Optics関係のStudyについて

第2回 cERL mini workshop

2015年7月30日（木）

4号館2階輪講室

加速器第7研究系

島田 美帆

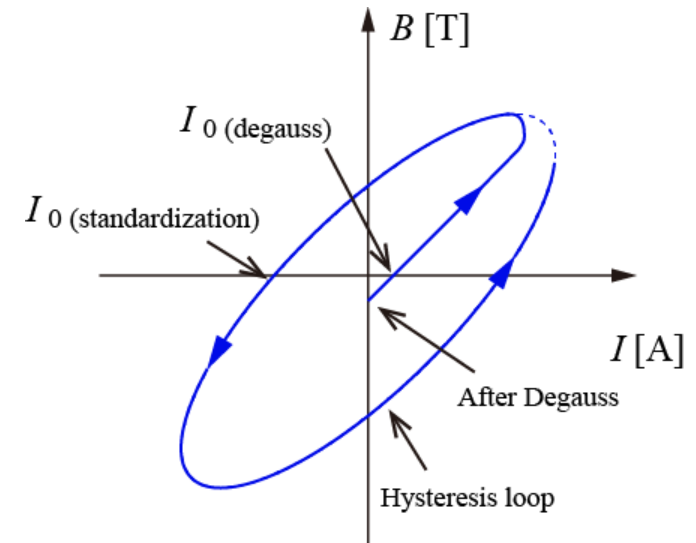
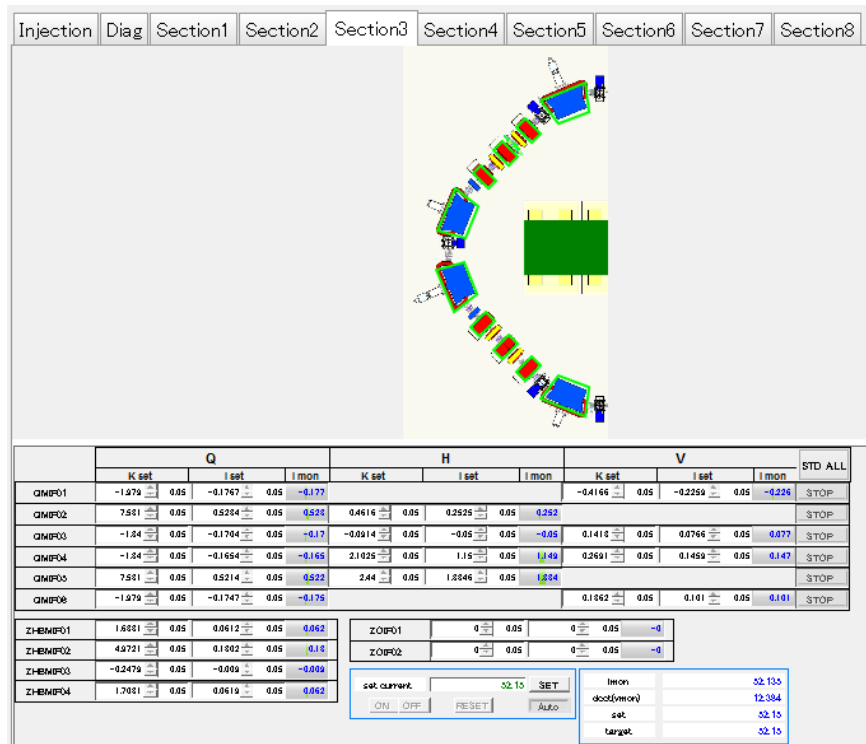
はじめに

20 MeV周回ビームのオプティクスマッチングを行うための 基礎的なビームスタディ

1. 電磁石消磁・標準化、残留磁場のオフセット
2. 電磁石応答測定、ItoK値測定
3. rmsビームサイズの計算および測定値との比較
4. バックトレースのビームマッチング
5. 分散関数に関するビームスタディ

1.電磁石消磁・標準化

電磁石標準化と残留磁場の相殺

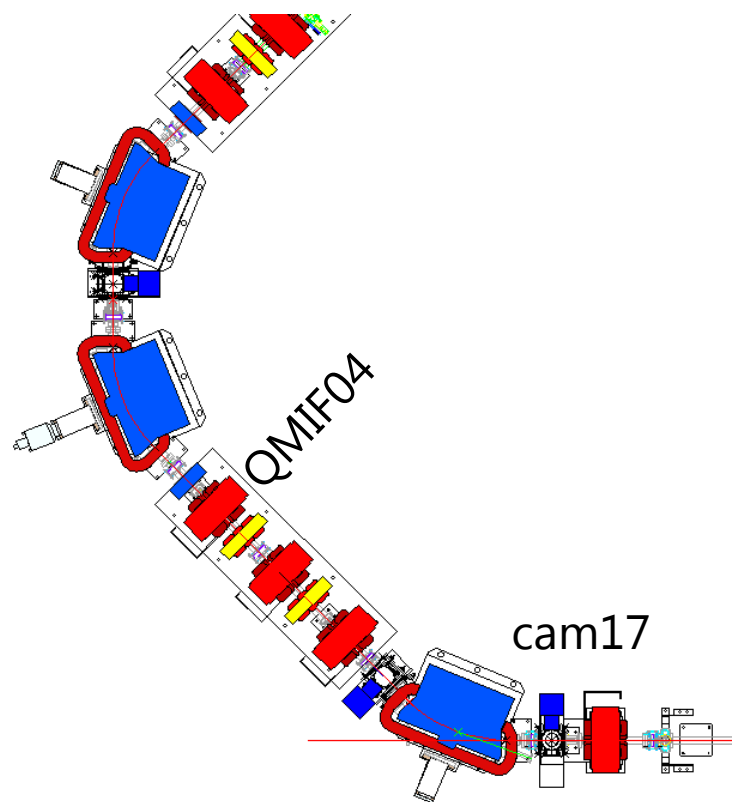


- 125MeVに対応するように準備し認め、20MeV運転でヒステリシスや残留磁場が発生した。
- 電磁石標準化のボタンをItoKのパネルに実装。
- 最終的に設定する前に-5A→+5Aのループを3周する。
- K値=0の場合、残留磁場を相殺するだけの電流が流れる。

2.電磁石応答測定、ItoK値測定

BMIF04の転送行列の測定

- ZH(V)QMIF04とcam17のR12とR34の測定
 - 間のQMIF04,05,06はK=0に設定して標準化。
 - 誤って、ZHBMIF04を励磁してしまった。（あまり影響はないはず）

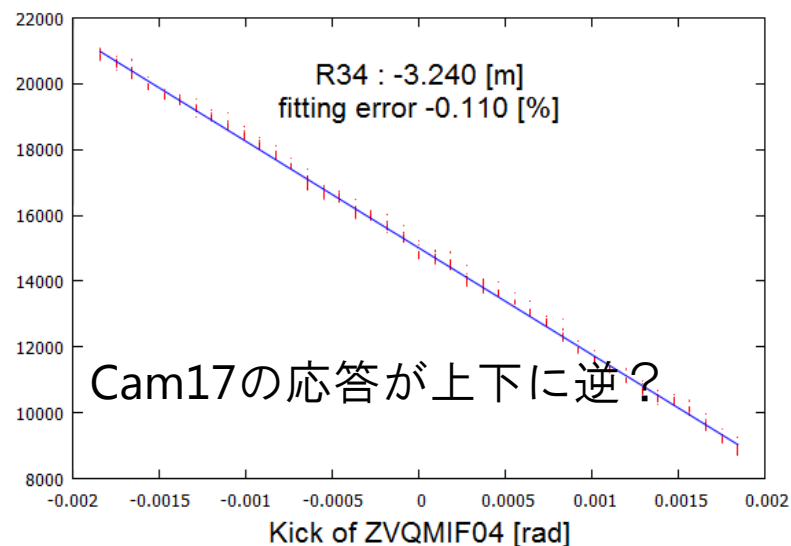
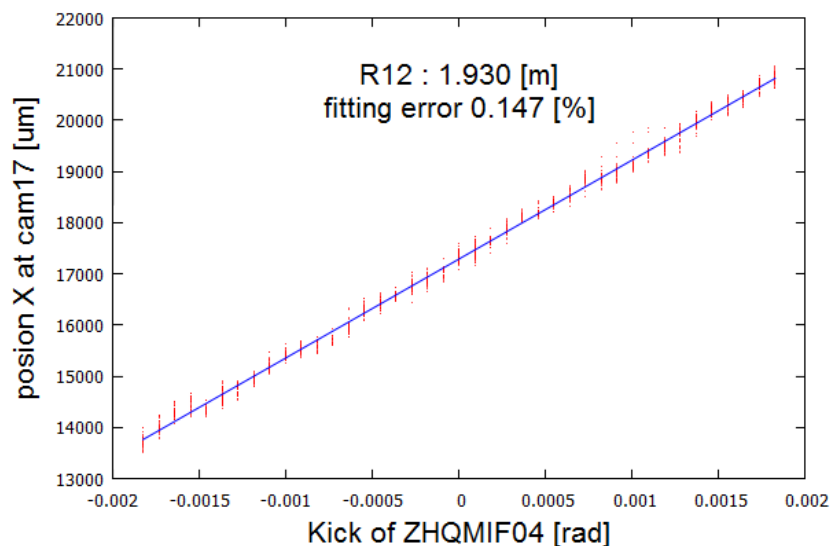


測定値と設計値の比較

- BMIF04のR12とR34の測定値と設計値の比較

- 誤差が数%あり、想定より大きい。
- 他のstudy (ItoK値study) の結果を見ると、水平方向のステアリングのキック力がわずかに小さい。
- Cam17の上下の応答が逆のようである。
- ベンドを挟まない直線部 (ZH(V)QMIL03-cam21、Feb.2014) の測定では2~3%の誤差があった。
- 全周のSingle Kick測定で大きなエラーの原因になるかもしれない→BPMの測定誤差以下なので、
- スクリーンによるステアリングキックの再測定希望

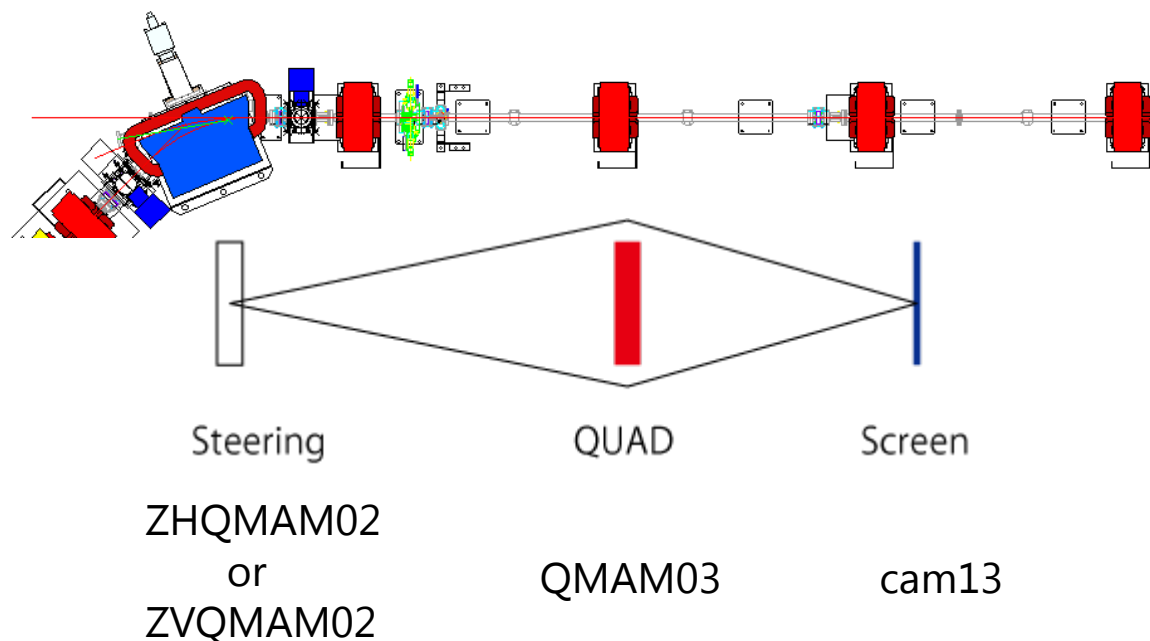
| | 測定値 (fitting誤差) | 設計値 (磁場測定地) | 測定値と設計値の誤差 |
|-----|-----------------|-------------|------------|
| R12 | 1.93 m (0.14%) | 2.00 m | 4% |
| R34 | 3.24 m (0.11%) | 3.34 m | 3% |



ItoK値測定study 1

ビームの応答が2-3%以内の精度で設計値と合っていることを示したい。
(10%の誤差は大きすぎるそうです。)

- 北側直線部のItoK値測定
 - 電磁石の標準化を実施
 - 間のQは残留磁場を打ち消すだけ励磁 ($K=0$, I はnonzero)
 - スクリーン上でビームをまとめるために、上流のopticsを微調整。

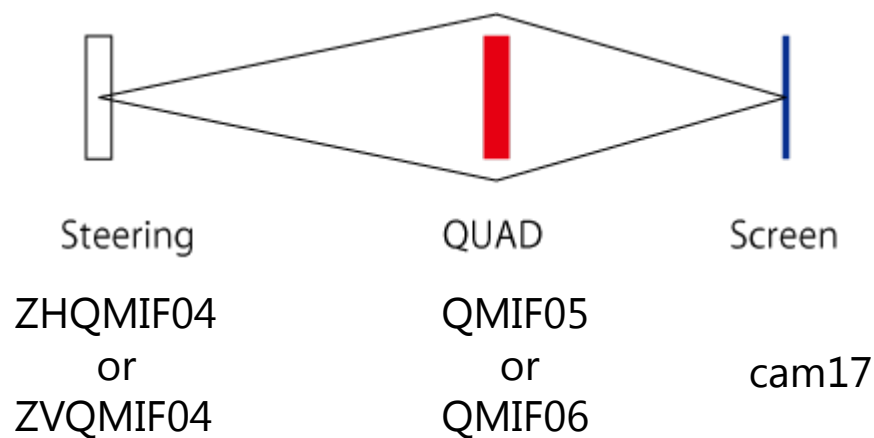


2通りの組み合わせ

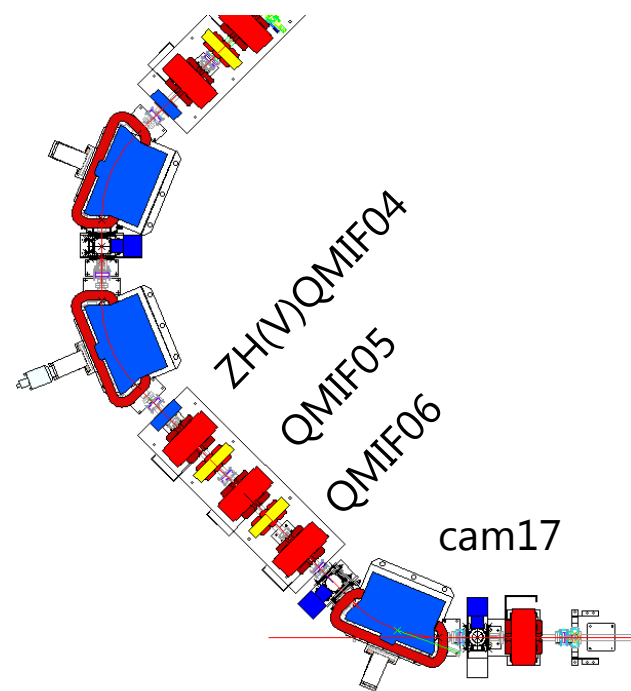
ItoK値測定study 2

• 第1アークのItoK値測定

- 同様に、電磁石の標準化を実施し、ビームをまとめるために、上流のopticsを微調整。
- 4通りの組み合わせで測定
 - QMIF01-06のすべてのデータを取る予定だったが、時間がかかるので一部しか測定しなかった。

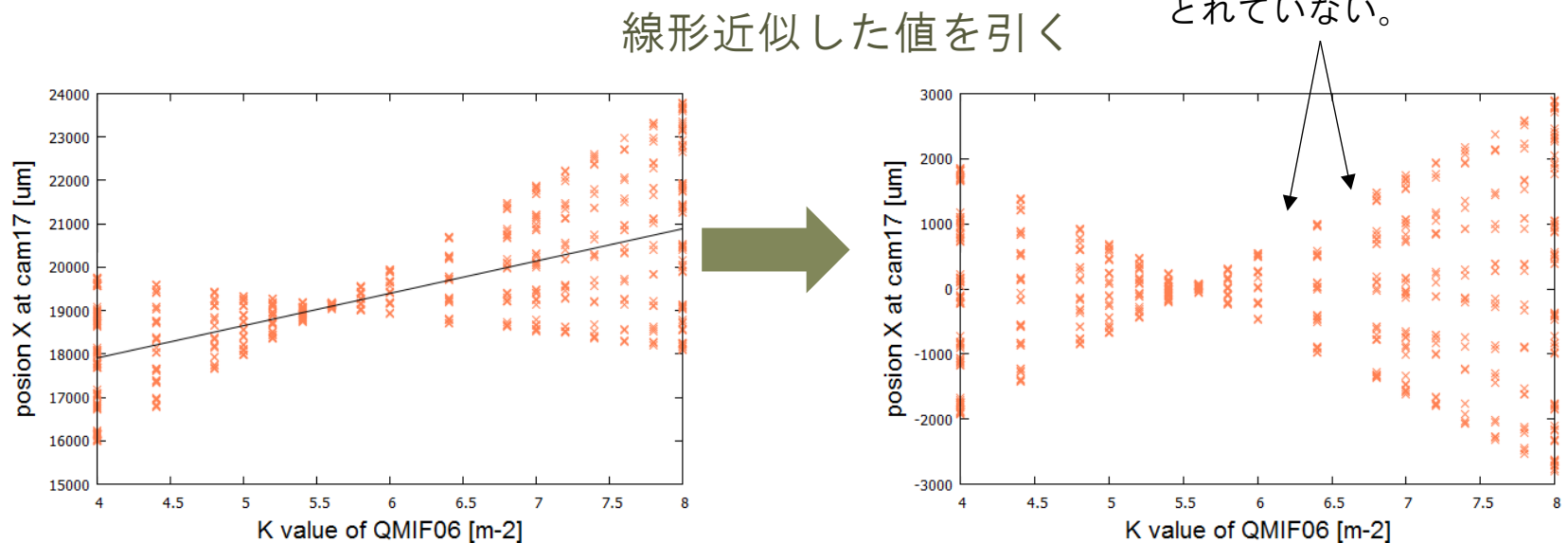


4通りの組み合わせ



データ処理

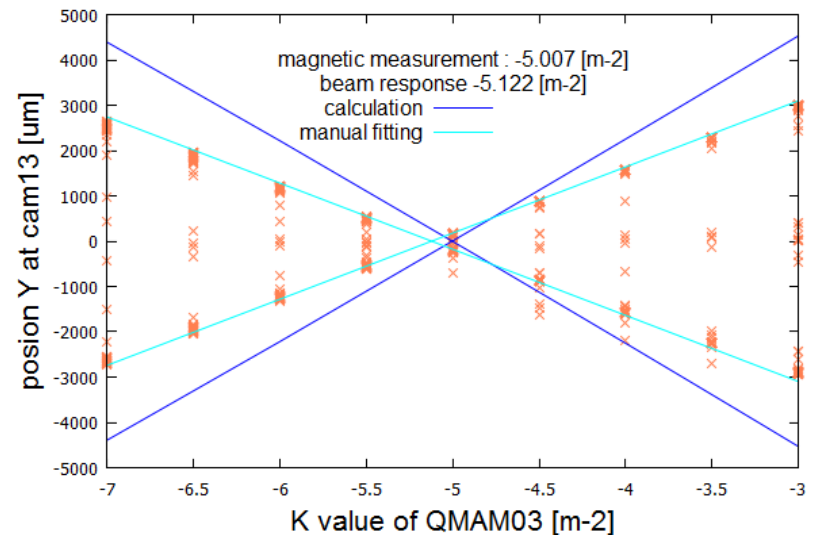
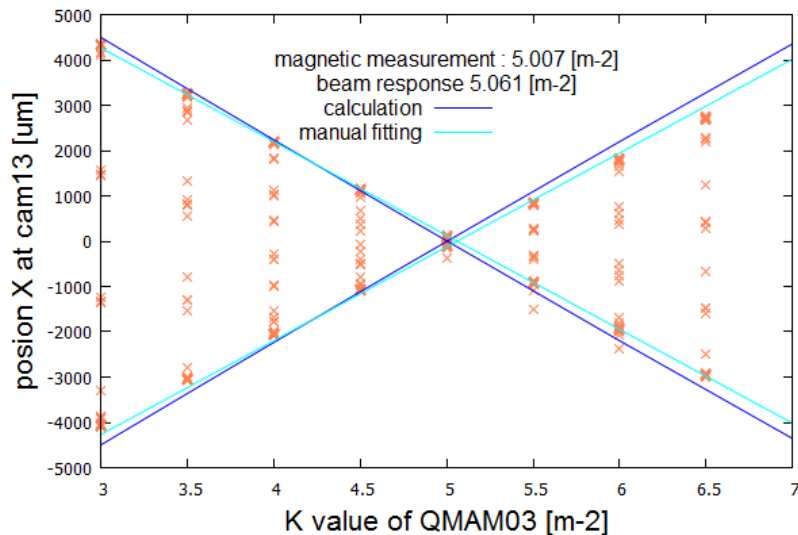
- K値を変えた直後の数点は前のデータは手動で除いた。
 - 前のデータを引きずっているため。
 - ZVQMIF05-QMIF06のデータのみ5点を消去し、他のデータは2点を消去。
 - 測定値にはK値を少しづつ手動で変えながら行った。
- Qの中心を通っていないデータは、線形近似した値を差し引いた。



設計との比較（北側直線部）

- ビームの応答を設計値と実測値で比較した。
 - 設計値（青線）：ステアリングのキック量とQのItoK値は磁場測定の結果、転送行列は台本通り
 - 実測値（オレンジ）：スクリーンで測定したデータ。測定誤差は不明。1pixelは57.5um。
 - 実測値の近似（水色）：測定結果を目視でfittingしたデータ。
- スクリーンで収束するK値は数%以下の精度で一致している。
 - 垂直方向のステアリングは1.5Aの予定だったが、1.0Aだった模様。
 - 水平方向の誤差は測定誤差以下のようなが、垂直方向は目視でもずれていることがわかる。

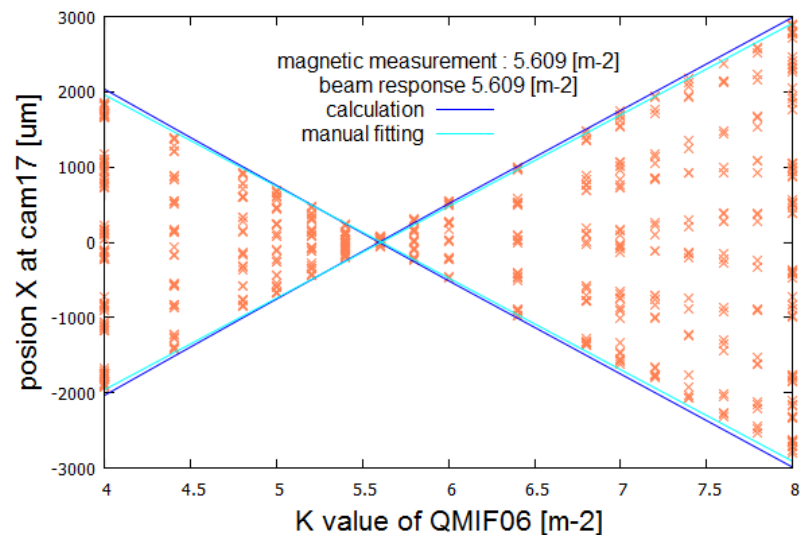
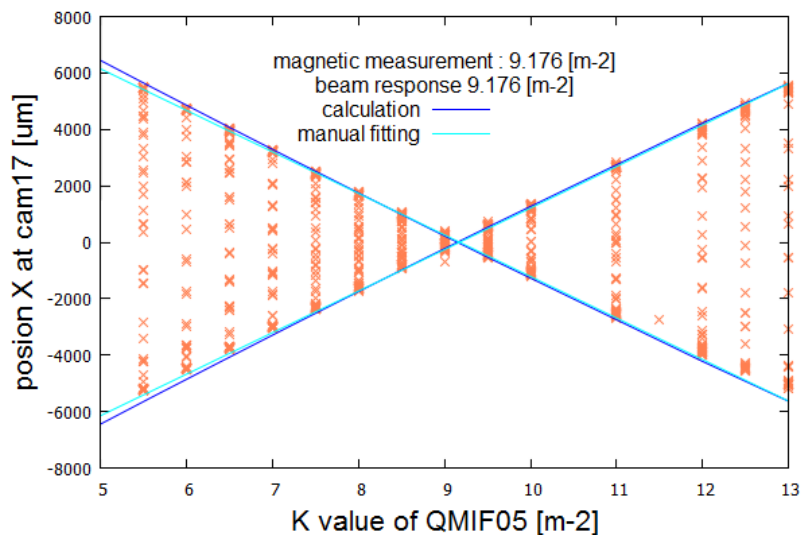
| | 設計値（磁場測定結果+台本による計算） | 実測値 | 誤差 |
|----|------------------------|------------------------|------|
| 水平 | 5.007 m ⁻² | 5.061 m ⁻² | < 1% |
| 垂直 | -5.007 m ⁻² | -5.122 m ⁻² | 2% |



設計値との比較（第1アーク：水平）

- スクリーンで収束するK値は1%以下の精度で一致している。
 - 測定誤差は不明。1pixelは57.7um。
 - 水平方向の実測値は高い精度で設計通りであることがわかる。
 - ItoK値が磁場測定通り、ベンドの転送行列が台本通りであることを意味する。
 - 実際のステアリングのキック量が磁場測定より数%だけ小さい。
 - 偏向電磁石応答の結果と矛盾しない。

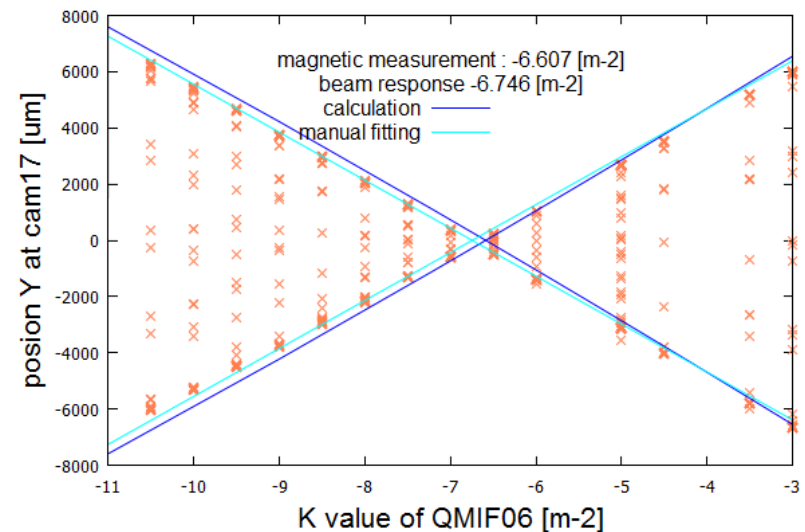
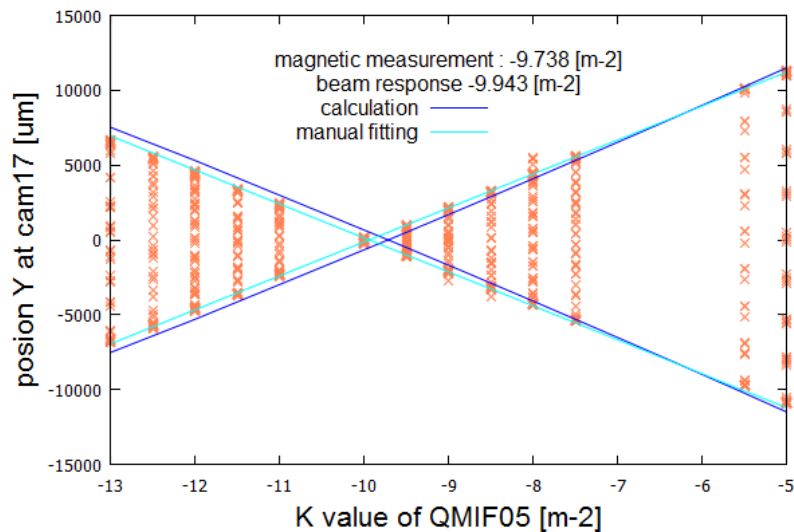
| | 設計値（磁場測定結果+台本による計算） | 実測値 | 誤差 |
|--------|-----------------------|-----------------------|------|
| QMIF05 | 9.176 m ⁻² | 9.176 m ⁻² | < 1% |
| QMIF06 | 5.609 m ⁻² | 5.609 m ⁻² | < 1% |



計算値との比較（第1アーケ：垂直）

- 磁場測定とビーム応答の誤差はどちらもおよそ+2%
 - どちらも磁場測定より垂直方向の収束力が弱い。
 - 北側直線部と同じ傾向がみられるので、誤差原因は45度偏向電磁石ではなくQ自身である可能性が大きい。
 - 水平方向と同じく、ステアリングキック量が数%小さい。

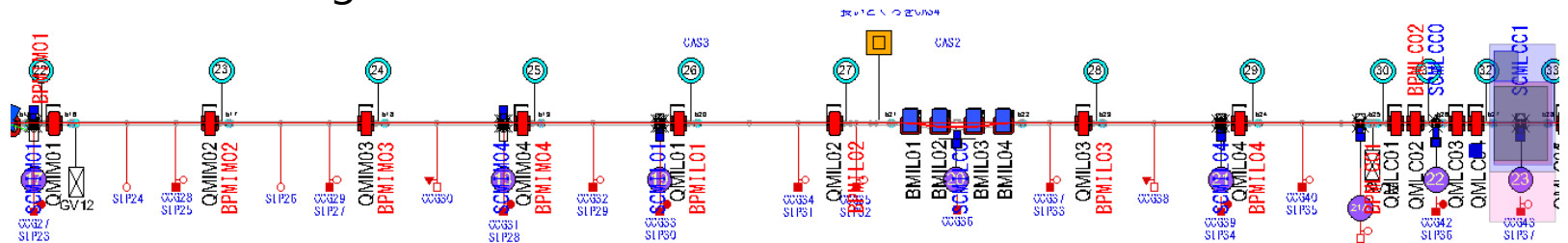
| | 設計値（磁場測定結果+台本による計算） | 実測値 | 誤差 |
|--------|------------------------|------------------------|----|
| QMIF05 | -9.738 m ⁻² | -9.943 m ⁻² | 2% |
| QMIF06 | -6.607 m ⁻² | -6.746 m ⁻² | 2% |



3.Rmsビームサイズの計算と測定値との比較

Study 手順

- 第1 アークまでのopticsを合わせないで実施。
- QMIM01-QMIL04までを消磁。
- QMIM01-QMIL04まで台本のK値を入れる。 (**-20150114.lte、20150217_192942.log)
- この状態でcam21aまでビームのprofileを確認。
- Q scanを4ヶ所で行った。それぞれ、Qの中心軸通し・消磁の後に実施。Q scan実施後にさらに消磁をして、192942.logの値に戻す。
- 実施したQ scan (twiss parameterやエミッタンスが正確に図れそうな組み合わせ)。上流から順番に行った。(しかし、どこかで消磁を忘れたかもしれません。)
 1. QMIM02-cam18
 2. QMIM03-cam19
 3. QMIL03-cam21a
 4. QMIL04-cam21a
- 上記のQ scanが終了した後は全て192942.logの値が入力されている。その状態で、スクリーンのfittingでrmsサイズを測定。

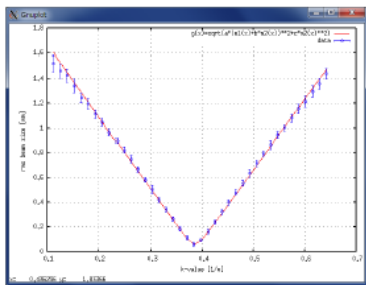


Q scanによるベータ関数・エミッタンス測定

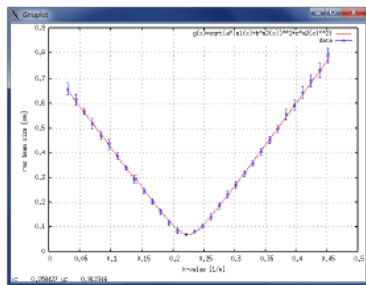
qmim02-cam18

- Beam energy: 20 MeV
- Current offset: -0.011 A
- ItoK: 2.72
- Camera resolution: 57.7 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
- Distance from QM to SCM: 5888 mm
- Fitting result:

- ✓ 水平方向のウエストで分解能以下
 - ✓ そのデータを省いてフィッティングしてもエミッタンスは小さくならない
- $\epsilon_x = 0.478 \mu\text{m}$
 $\beta_x = 77.2 \text{ m}$
 $\alpha_x = -16.8$



$\epsilon_x = 0.420 \mu\text{m}$
 $\beta_x = 88.0 \text{ m}$
 $\alpha_x = -19.7$

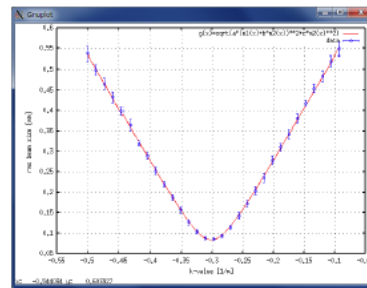


$\epsilon_y = 0.250 \mu\text{m}$
 $\beta_y = 51.9 \text{ m}$
 $\alpha_y = 19.6$

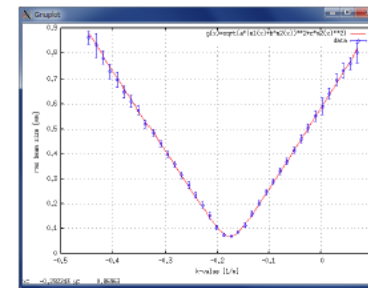
qmim03-cam19

- Beam energy: 20 MeV
- Current offset: -0.009 A
- ItoK: 2.72
- Camera resolution: 58.0 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
- Distance from QM to SCM: 5888 mm
- Fitting result:

- ✓ どちらのデータも分解能以上
- ✓ 今回取ったデータの中では一番用できるか？



$\epsilon_x = 0.237 \mu\text{m}$
 $\beta_x = 33.9 \text{ m}$
 $\alpha_x = 15.2$

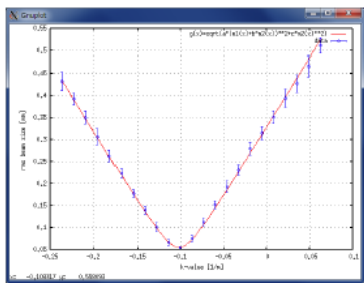


$\epsilon_y = 0.248 \mu\text{m}$
 $\beta_y = 48.2 \text{ m}$
 $\alpha_y = -0.395$

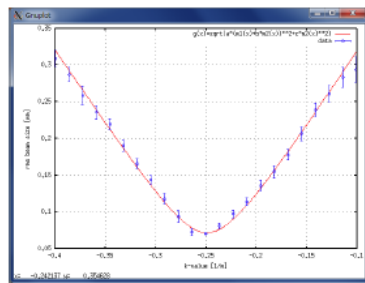
qmim03-cam21a

- Beam energy: 20 MeV
- Current offset: -0.012 A
- ItoK: 2.72
- Camera resolution: 57.3 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
- Distance from QM to SCM: 5548 mm
- Fitting result:

- ✓ 水平方向のウエストで分解能以下
 - ✓ そのデータを省いてフィッティングしてもエミッタンスは小さくならない
- $\epsilon_x = 0.230 \mu\text{m}$
 $\beta_x = 56.0 \text{ m}$
 $\alpha_x = 15.2$



$\epsilon_x = 0.215 \mu\text{m}$
 $\beta_x = 60.5 \text{ m}$
 $\alpha_x = 16.5$

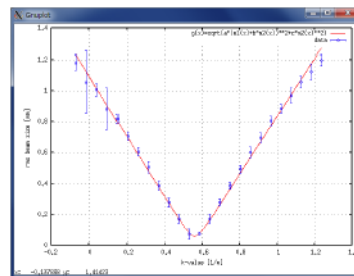


$\epsilon_y = 0.186 \mu\text{m}$
 $\beta_y = 29.1 \text{ m}$
 $\alpha_y = -2.04$

qmim04-cam21a

- Beam energy: 20 MeV
- Current offset: -0.005 A
- ItoK: 2.72
- Camera resolution: 57.3 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
- Distance from QM to SCM: 2349 mm
- Fitting result:

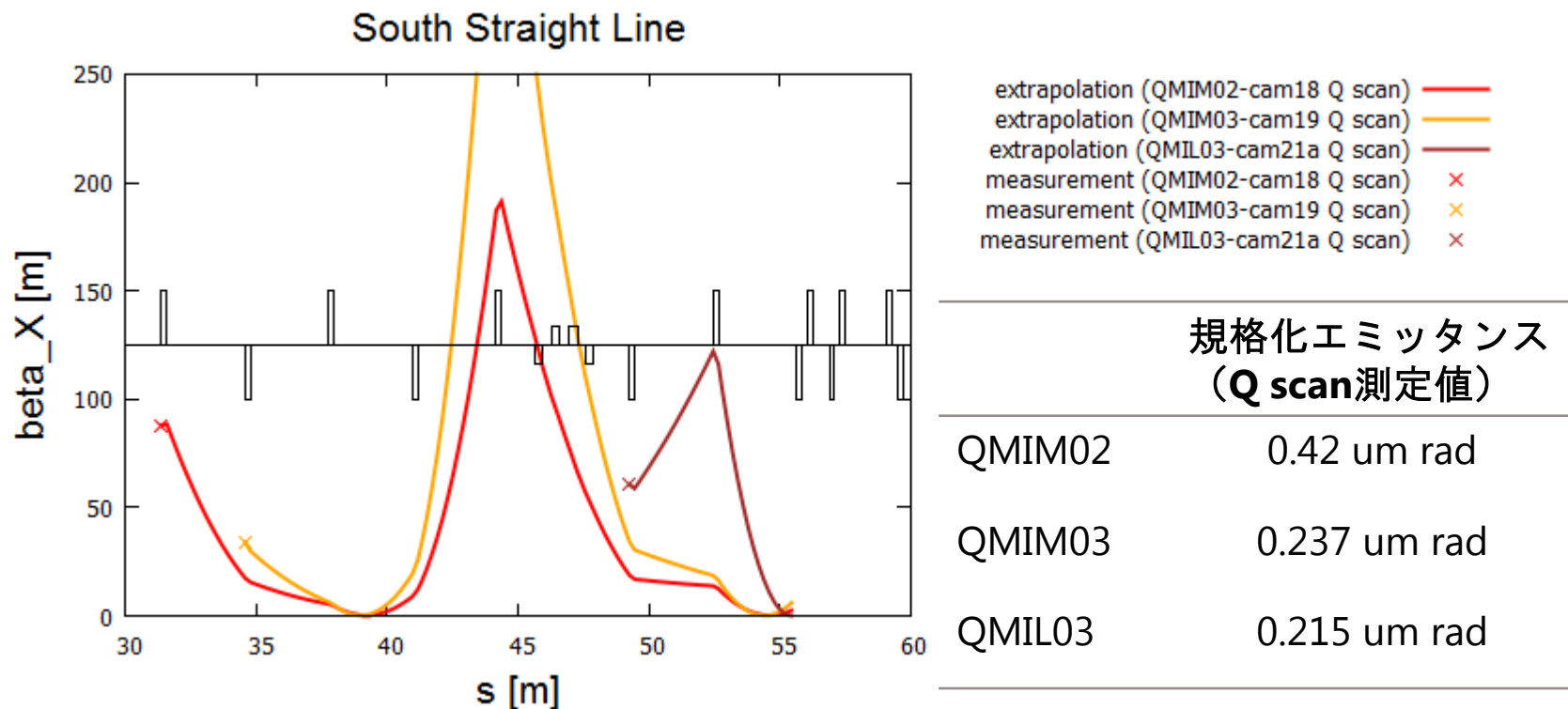
- ✓ 鉛直方向はウエストがはっきりないので水平方向のみ解析
- ✓ ウェストでのビームサイズは分解能以上だがエミッタンスが妙に大きく出る???



$\epsilon_x = 0.774 \mu\text{m}$
 $\beta_x = 32.5 \text{ m}$
 $\alpha_x = 16.8$

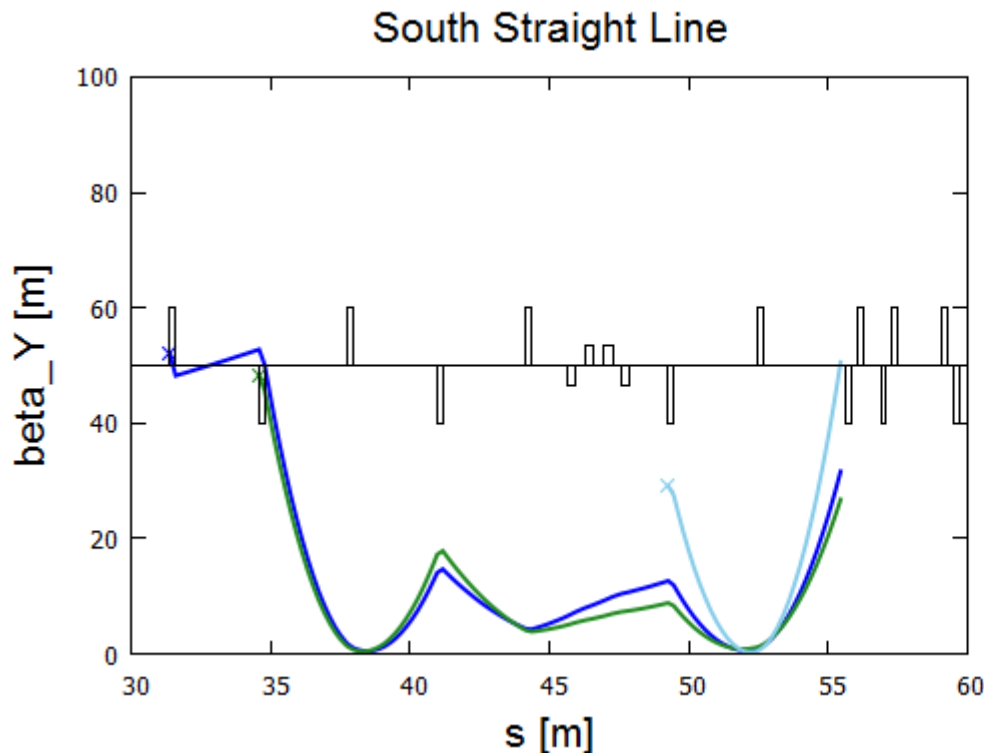
Q scan測定結果による β_x の推定

- Q scanの測定結果を元に、実際のK値から下流のベータ関数を推定。
 - K値は励磁電流から20150217ゼロ補正值.pdf（上田）のOFFSETを引いて導出。
 - QMIM02だけエミッタンス測定値がずれている。
 - QMIM02とQMIL03のQ scanの最小値が1pixel以下なので不正確な可能性もある。
- QMIM02とQMIM03の結果は近いが、QMIL03には大きなずれがある。



Q scan測定結果による β_y の推定

- Q scanの測定結果を元に、実際のK値から下流のベータ関数を推定。
 - K値は励磁電流から20150217ゼロ補正值.pdf（上田）のOFFSETを引いて導出。
 - どのQ scanも最小値が1pixel以上であったが、QMIL03だけemittanceの測定値が異なる。
- 3つの結果を比較したところ、QMIM02とQMIM03は整合性があるものの、QMIL03だけずれが大きい。
 - 周長補正シケインの計算に問題があるか、QMIL03のQ scanの結果が原因か。



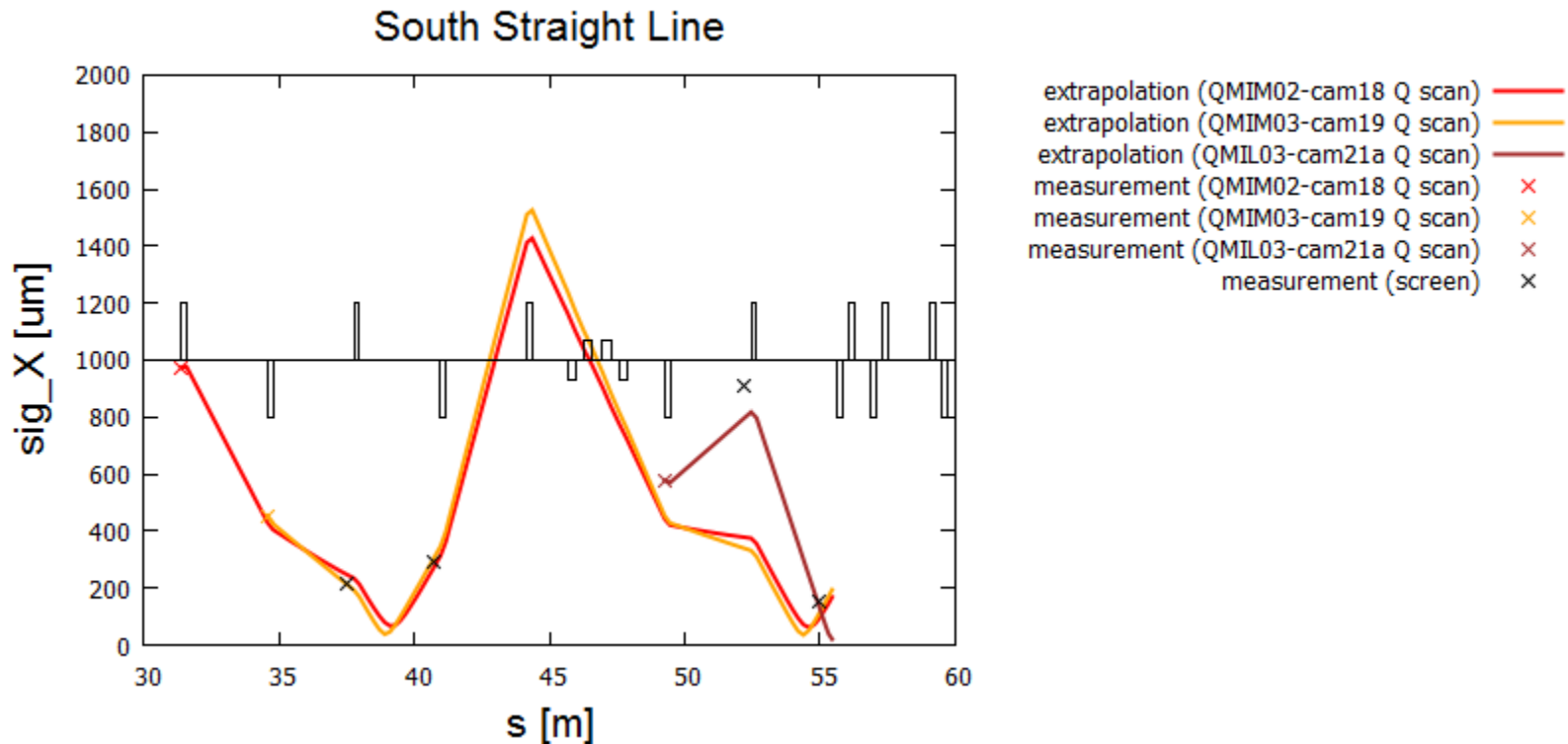
extrapolation (QMIM02-cam18 Q scan) —
extrapolation (QMIM03-cam19 Q scan) —
extrapolation (QMIL03-cam21a Q scan) —
measurement (QMIM02-cam18 Q scan) ×
measurement (QMIM03-cam19 Q scan) ×
measurement (QMIL03-cam21a Q scan) ×

規格化エミッタンス
(Q scan測定値)

| | |
|--------|-------------------------|
| QMIM02 | 0.25 $\mu\text{m rad}$ |
| QMIM03 | 0.248 $\mu\text{m rad}$ |
| QMIL03 | 0.186 $\mu\text{m rad}$ |

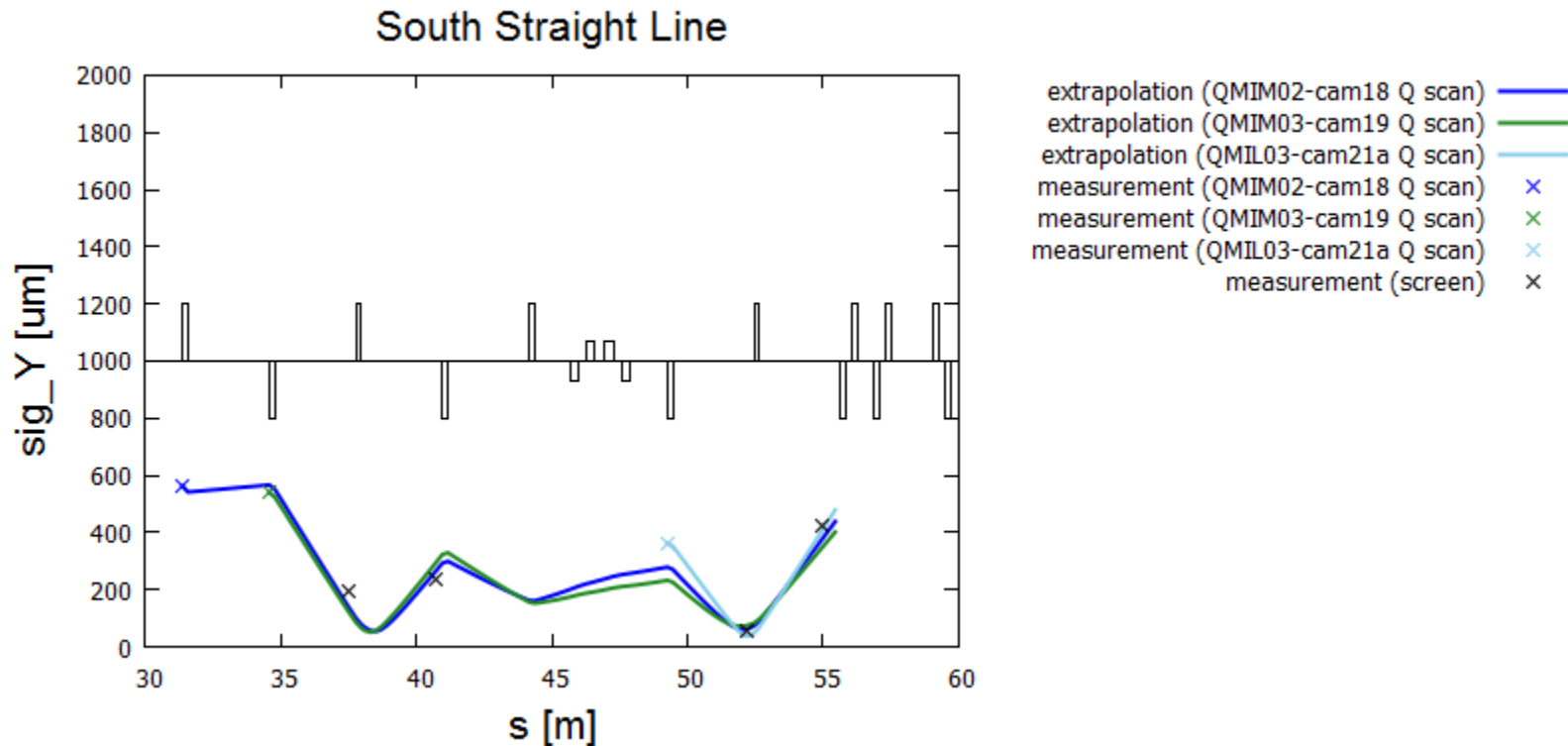
Q scan測定結果による σ_x の推定

- ビームのrmsサイズについて同じように比較した。
 - スクリーンのモニタのfittingの結果も併記した。
- 周長補正シケインの前はよく一致している。
 - QMIM02のQ scanでエミッタンスが違う値が出たことは影響していないのか。
- 周長補正シケイン後はあまり合っていない。
 - QMIL03-cam21aのQ scanとcam21, cam21aの結果に僅かな不一致。消磁忘れたかも。
- 周長補正シケインを挟むと計算と合わなくなる。
 - 周長補正シケインの設定に問題があるのか、それともQMIL03のQ scanが不正確なのか。
 - Cam21だけ合わない。Cam22が一致しているのは偶然か？



Q scan測定結果による σ_y の推定

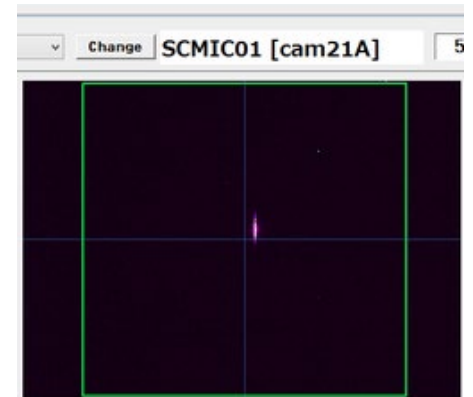
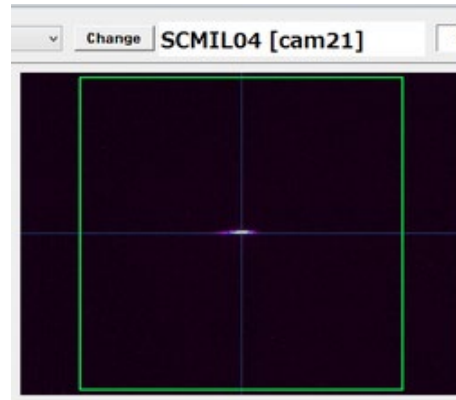
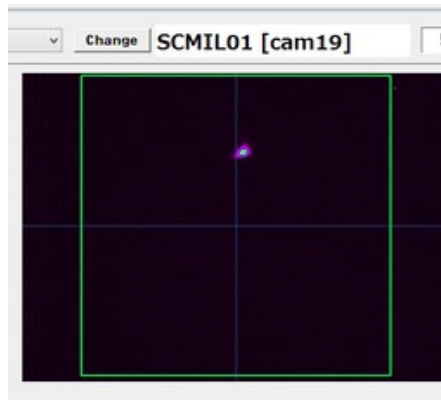
- ビームのrmsサイズについて同じように比較した。
 - スクリーンのモニタのfittingの結果も併記した。
- 周長補正シケインを挟まない場合
 - Q scanとスクリーンの結果は概ね合っている。
- 周長補正シケインを挟んだ場合
 - 上流から推定したrmsサイズとQMIL03-cam21aのQ scanの結果にずれがある。
 - その他は概ね合っている（ように見える）。
 - Cam21のrmsはほぼ1pixelであったため、信用性は低い。
 - 周長補正シケイン後の β_y が合わなかった原因はQMIL03のQ scanが不正確だったためか。



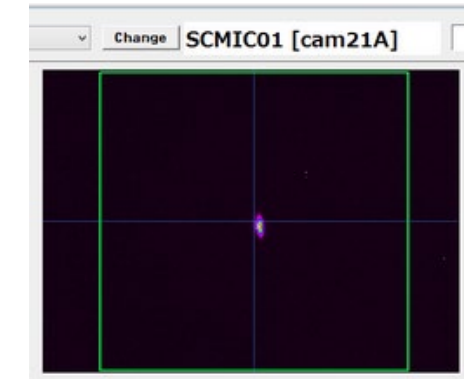
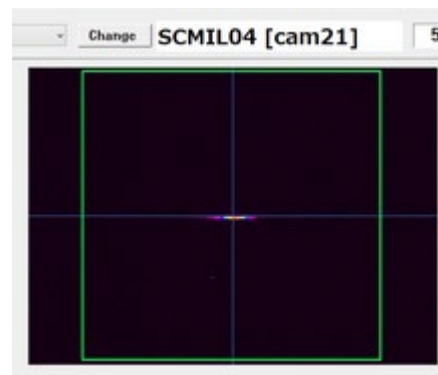
Rmsサイズの変化

- Q scanの前後でスクリーンを撮って比較。少しprofileが異なる。
- どちらも消磁後に測定。条件が異なるのは周長補正シケイン周辺の軌道だけか。軌道の調整方法を確立するほうが先。

Study前



study後



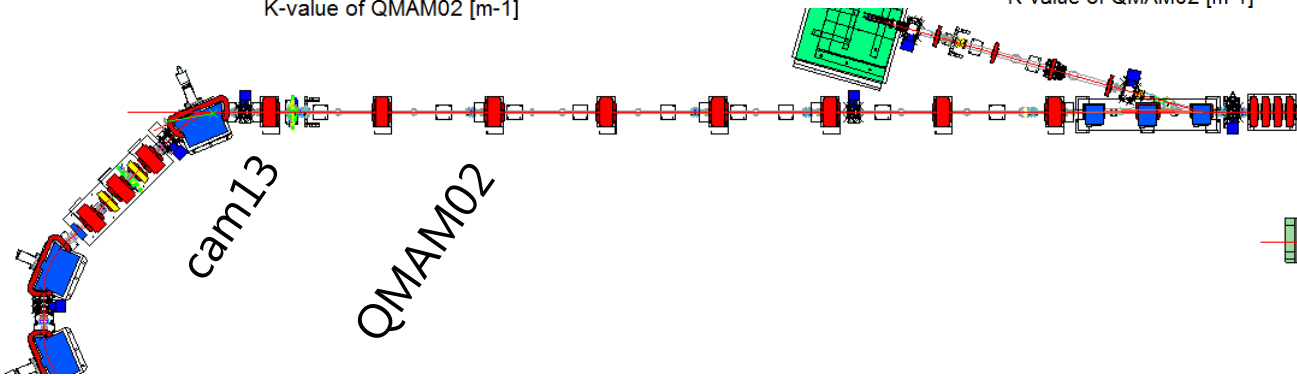
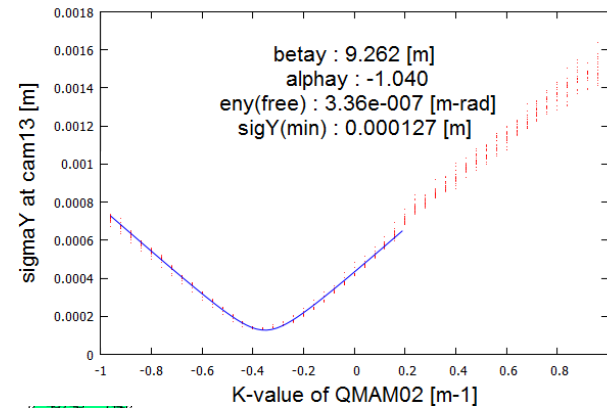
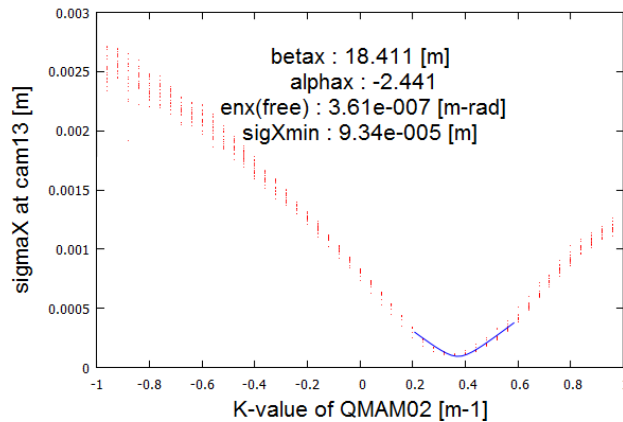
4.バックトレースによるビームマッチング

マッチング手順

- 各直線部
 - Q scanでTwiss parameter測定（電磁石標準化）
 - BackTraceで上流のTwiss parameterを推定
 - マッチング開始
 - elegantによるマッチングが失敗したら、デザイン値を入れて手動調整
 - Optics確定後に電磁石標準化
 - Q scan再測定（Twiss parameter）
- 北側直線部
- 第1アーク分散関数
- 南側上流 ← この途中まで実施
- LCS optics調整
 - ビームサイズを求めるときにエミッタンスを入力すること。
- 第2アーク分散関数
- 減速ビーム調整
- 主ダンプまで輸送できたら、all screen capture

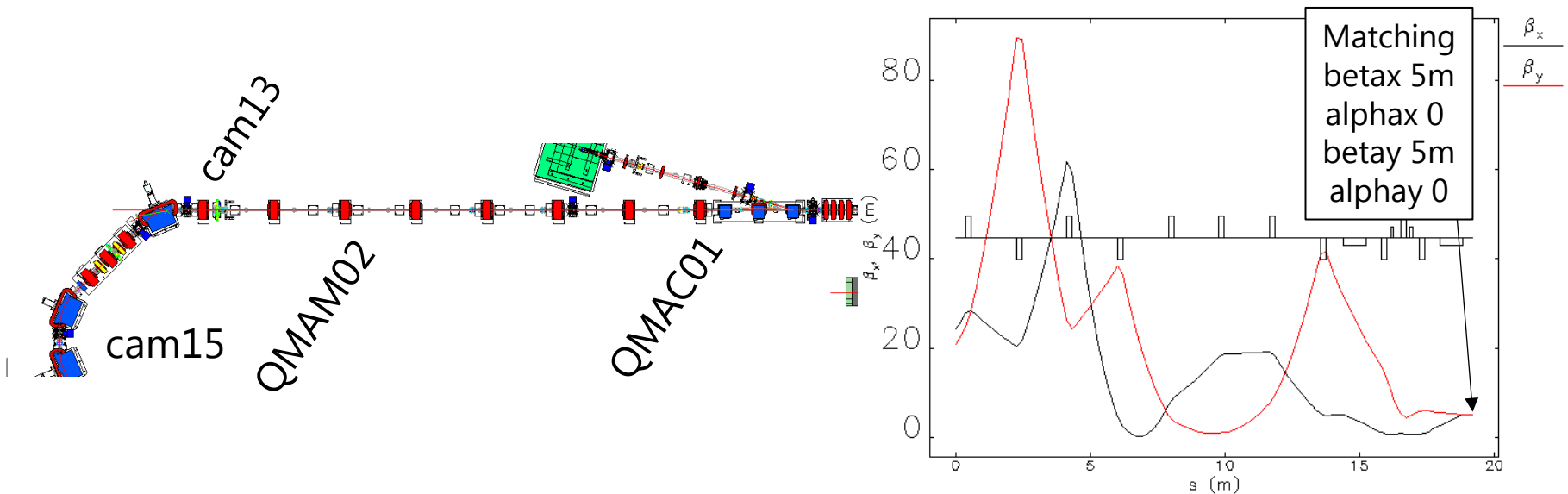
北側直線部BackTraceMatching1

- QMAM02-cam13でQ scan
 - QMAM02直前 : betax 18.4m, alphax -2.44, betay 9.28m, alphay -1.04
 - QMAM03,04は残留磁場を打ち消す分だけ励磁。
 - Q scanの結果のfitting範囲（下図の青線）はスクリーンのGaussianFitがうまくいっている範囲とした。



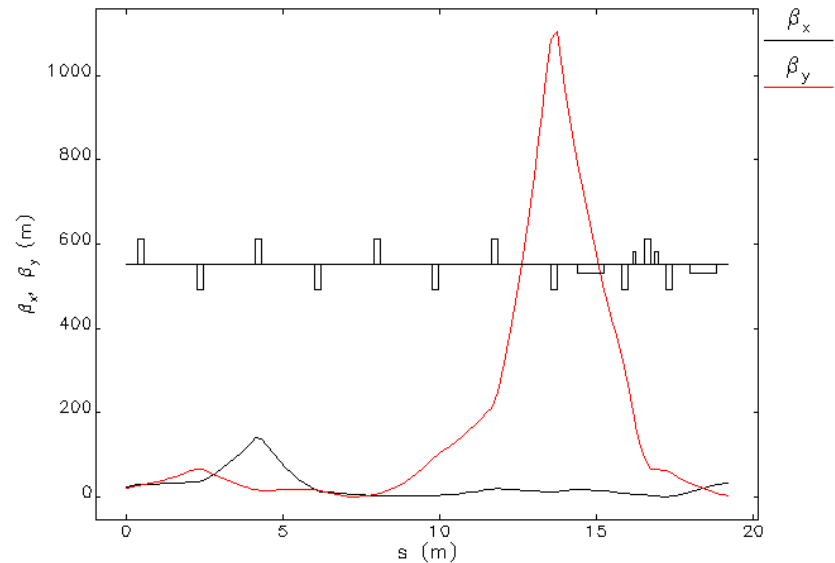
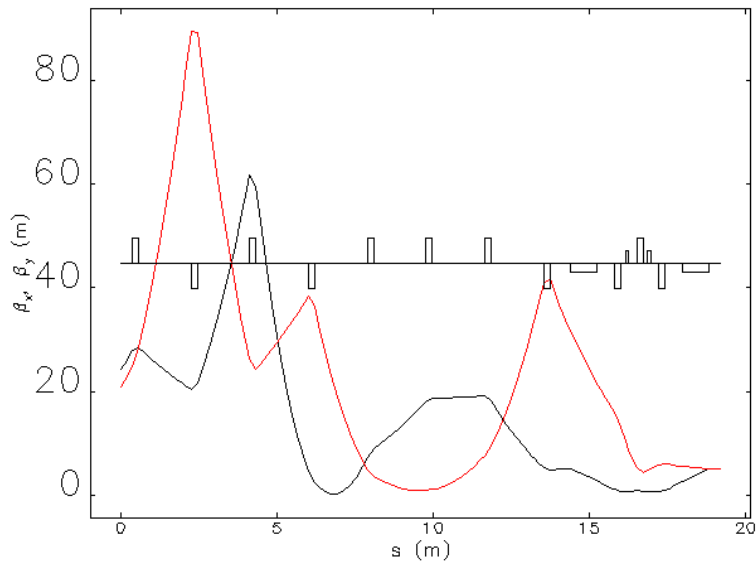
北側直線部BackTraceMatching2

- Matchingの場所：アーク中央（cam15付近）
- QMAM02からアーク中央までのQの数は3つしかない
- 現在の電磁石の設定値からQMAC01の190mm上流のベータ関数を推測：betax 24.2m, alphax -4.67, betay 20.9, alphay -4.83
- マッチングの結果を電磁石の設定に反映



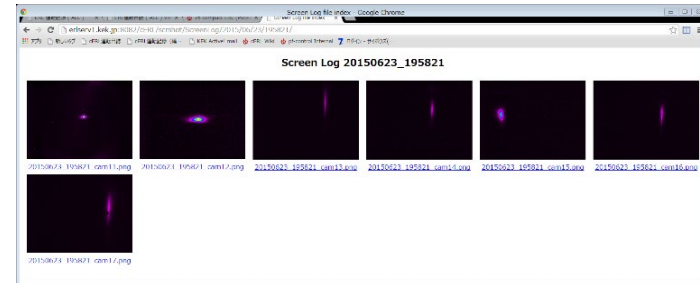
なぜか入力ミス

- 左のopticsの電磁石設定を入力したつもりが全く別の電磁石設定がされていた。
 - 不慣れな手作業が原因と思われるが、具体的な原因は不明。
- SaveRestoreのバグにより一部のデータしか残ってなかった。
 - 電磁石の設定を間違ってしまった件とは関係なし。
 - 10minごとに定期的にとっているlogファイルに正確な情報が記録されていた。（非常に助かりました。）

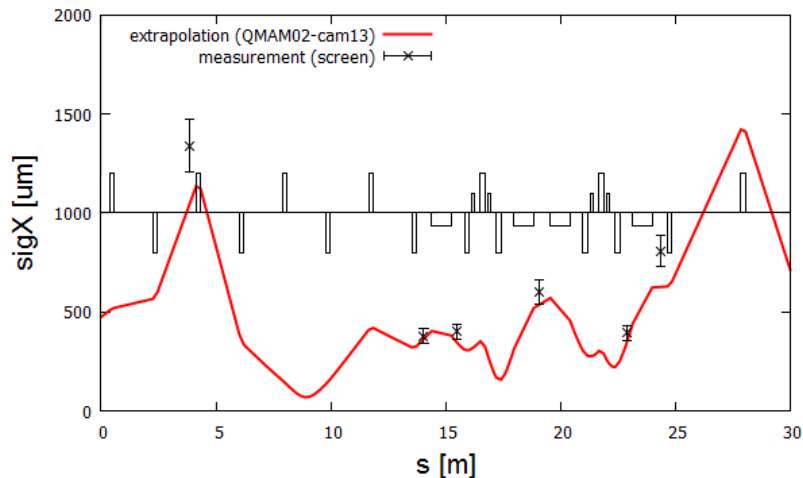


BackTraceの推定値とスクリーンの結果の比較

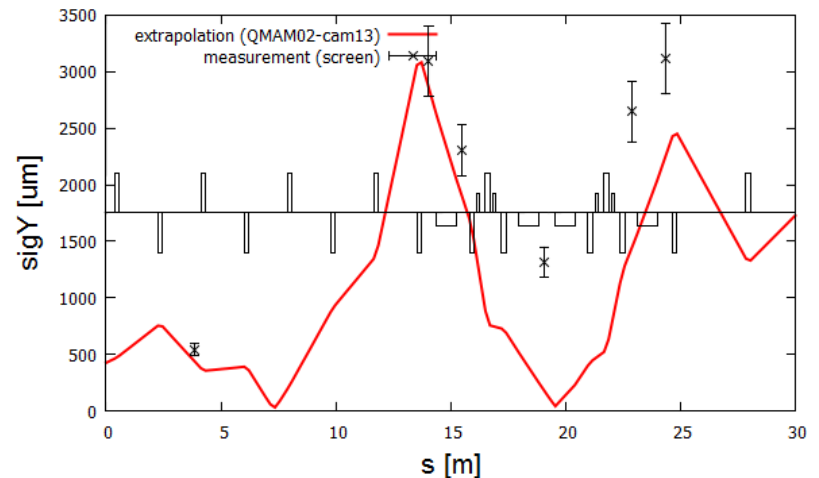
- マッチング後の北側直線部~第1アークのスクリーン
 - cam15（アーク中心）を境に対称的なビームプロファイル
 - 中心通しをしていないQのK値を変えたため中心を通っていない。→中心通しのやり直し
- BackTraceによるrms-sizeの推定値とスクリーンのfittingの結果を比較
 - 20150623_200013.log（スクリーン取得後、分散関数調整前）
 - エネルギー広がりとは $2e-4$ と仮定した。
- 南側直線部（2015年の冬に実施）の結果に比べると、誤差が大きい。
 - 特にアークに入った後の垂直方向の差が著しい。
- 北側直線部では気にならなかったが、南側直線部でビームの形が三角形になるなど、いびつなビーム形状であった。



North Straight Line



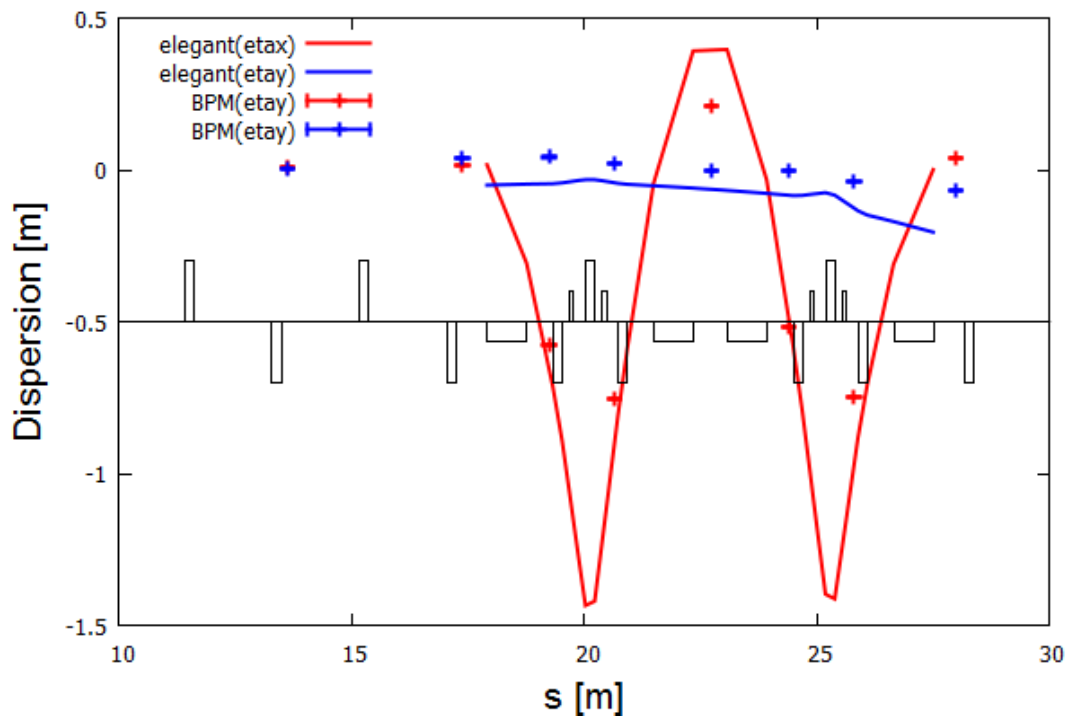
North Straight Line



5.分散関数に関するビームスタディ

分散関数（標準化実施前）

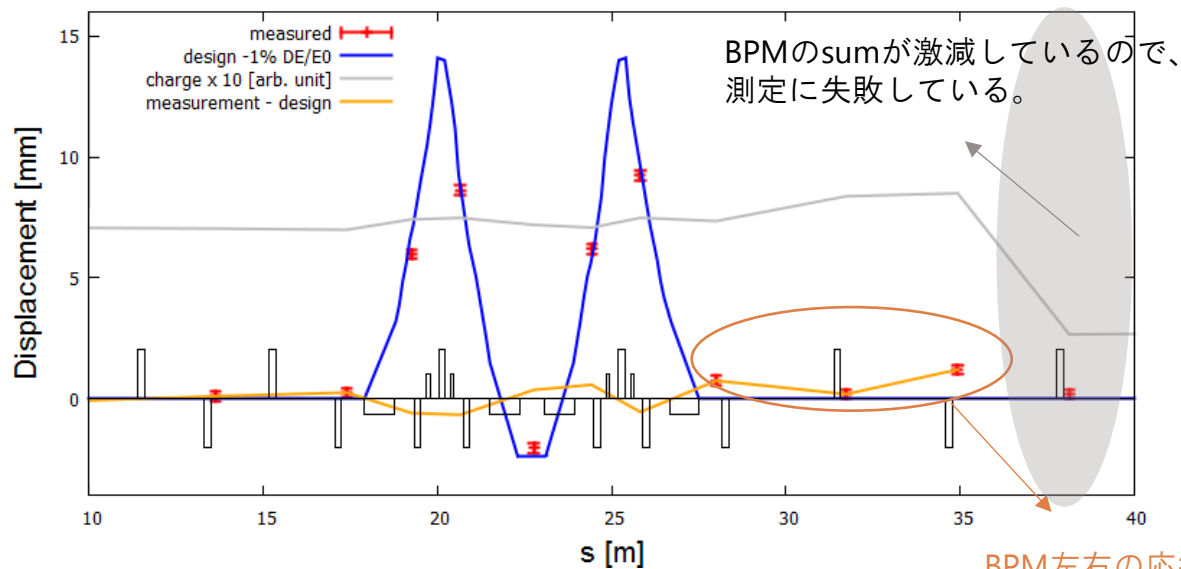
- 電磁石のパラメータ：20140530_212851.log
- Cam13の分散関数
 - Erlコミッション1405278_dispersion.pdfより
- 分散関数測定結果：20140530_170532.raw,plt
- elegantによる計算結果と合わない。
- BPMの測定値に換算すると、およそ2mmのミスマッチ



分散関数測定

- 分散関数測定値とデザイン値の比較を行う。
 - 標準化を取り入れてから最初のstudy
 - 非線形性の確認も行う。(エネルギーアクセプタンスが符号($\pm 0.2\text{MV}$)によって異なることがあったため。)
- 軌道・optics調整
 - 北側直線部(QMAM03,04)と南側直線部(QMIM01-04)は $K=0$ に設定、アーク内(QMIF01-06)はデザイン値に設定。
 - 第1アークのBMIFとQMIFのステアリングはゼロに設定。
 - 2か所のみ励磁。ZHBMIF04は 0.007A , ZVQMIF01は -0.14A 。
 - その次の日のCW運転(6/4)で、ダンプリンの中心を通すためにダンブシケインを調整する必要があった(因果関係不明)。
 - Cam18以降のビームはぼやけて見えなかったが、測定を実施した。
- 分散関数の測定：通常と同じ
 - 周回エネルギー-1%の軌道と通常の軌道の差分で測定、エネルギーはML2を -0.2MV に設定して実施。主空洞前の分散関数は含まない。
 - BPM測定(211052.plt、測定誤差 $200\mu\text{m}$ 、積算時間およそ 1min)
- デザイン値とほぼ同じ。測定値とデザイン値の差(オレンジ)は、大きい箇所でおおよそ 1mm の差

推定エネルギー
アクセプタンス：2.3%
分散関数最大 1.5m 、
ダクト幅 $\pm 3.5\text{cm}$
(あくまでも推定)



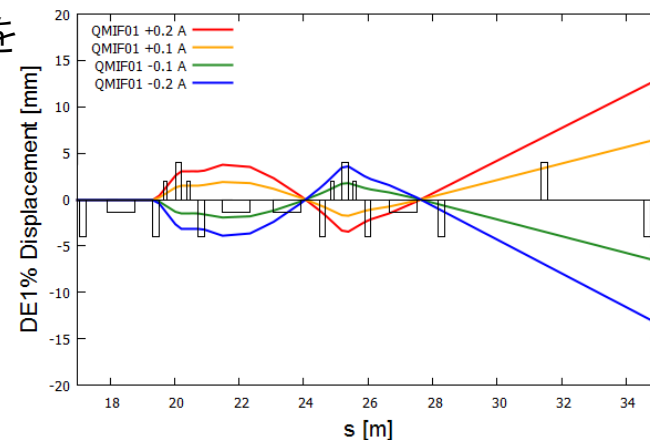
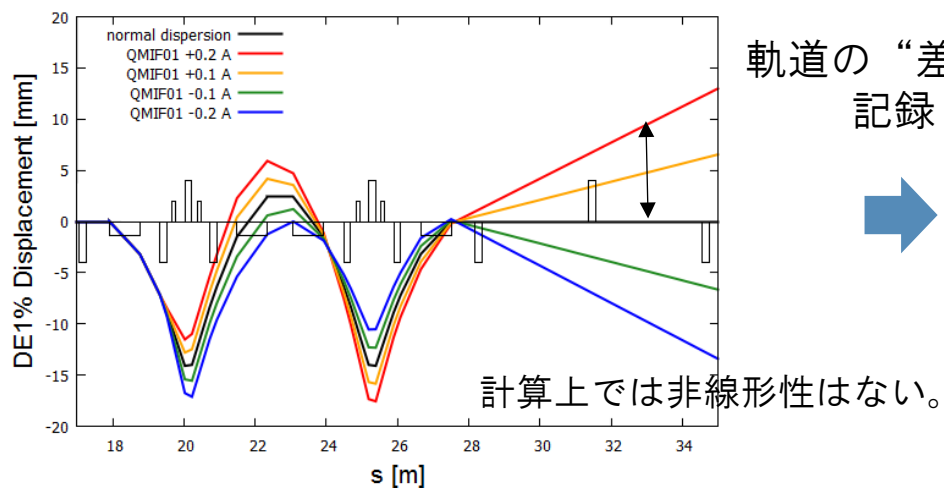
BPM左右の応答が逆

分散関数のQ応答測定

- 分散関数のQ応答の測定
 - 基準軌道をML2 -0.2MVに設定。
 - QMIF01-06をそれぞれ変えたときの軌道変化を調べる。

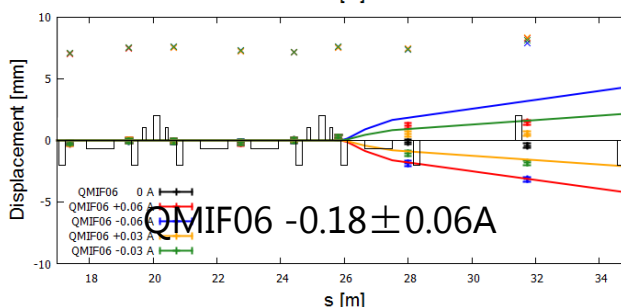
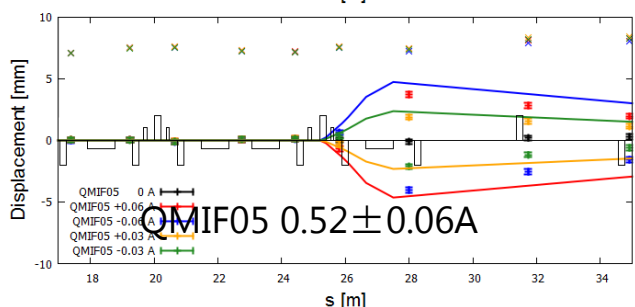
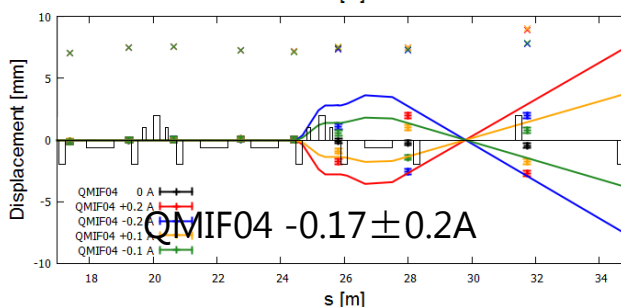
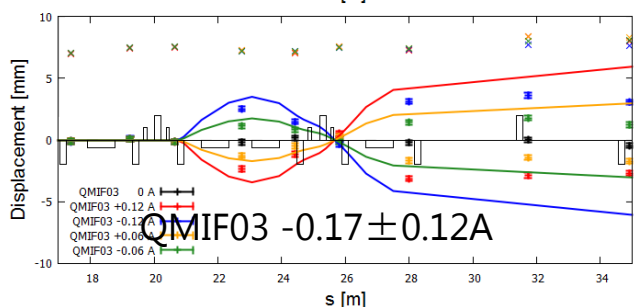
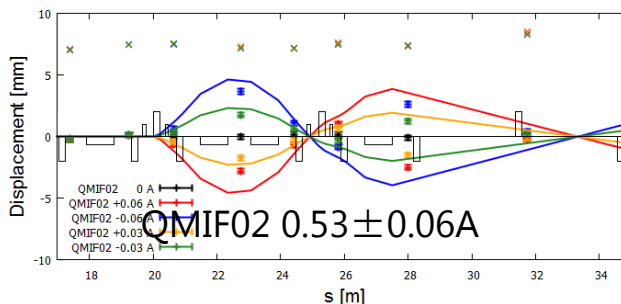
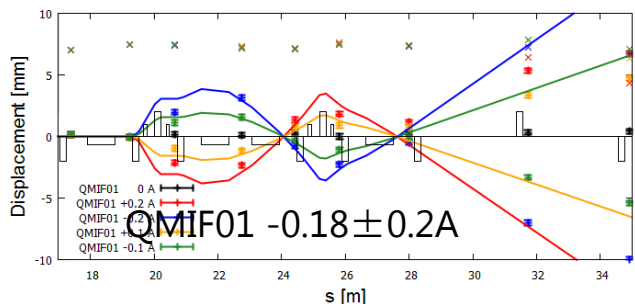
1. 各Qの分散関数の応答測定

- ML2 ± 0 MVでTempRefを測定した後、 ± 0.2 MV, ± 0.1 MV, 0 MVの5通りをBPMで測定。
- ML2で-0.2MVに設定し、TempRefとする。
 - QMIF01: 0A, ± 0.1 A, ± 0.2 A
 - QMIF02: 0A, ± 0.03 A, ± 0.06 A
 - QMIF03: 0A, ± 0.06 A, ± 0.12 A
 - QMIF04: 0A, ± 0.1 A, ± 0.2 A
 - QMIF05: 0A, ± 0.03 A, ± 0.06 A
 - QMIF06: 0A, ± 0.03 A, ± 0.06 A



BPM応答計算値と実験結果の比較

- 南側直線部でBPMの符号が反転している原因は判明し、対処済み。
- 全体的にBPMの応答が設計よりも小さい。
 - QMIF05,06のItoK値はほぼ磁場測定通りであったため、原因不明である。
 - 分散関数の測定では、デザインとBPMの測定値に±1mm程度の誤差がありそうである。
 - BPM sum信号 (x) が下がっている点は測定信頼性が少ない。
- 強い非線形性は見えない。
 - QMIF02、QMIF06に少し見られる。QMIF01南側直線部なども線形でないが、sum信号が低く測定できていない可能性が高い。
 - ±0.2MVでアクセプタンスが変わったのは、非線形効果ではなく中心軌道が水平方向にずれていたことも原因の一つ。



実線：計算値
エラーバー付きのドット：
BPM測定値
クロス (x)：BPM sum信号

次回のstudy案

- 同様の測定をスクリーンで行う。
- 第1アークのsingle Kickの測定
- 非線形性の原因究明

まとめ

1. 電磁石消磁・標準化、残留磁場のオフセット
 - ヒステリシスがなくなり、オプティクスの調整で再現性が高くなった。
 - 残留磁場をキャンセルするようにItoK値にオフセットを導入し、計算と測定値が一致するようになった。
2. 電磁石応答測定、ItoK値測定
 - 45度偏向電磁石の転送行列は数%以下の誤差で設計通りであった。
 - 四曲電磁石のItoK値の精度は、水平で測定誤差以下、垂直で2%であった。
 - ステアリングのキックが磁場測定より数%小さいと思われる。
3. rmsビームサイズの計算および測定値との比較
 - 南側直線部で実施。
 - Q scanで測定したベータ関数とエミッタンスから下流のrmsビームサイズを計算
 - 計算値とスクリーンモニタの測定値を比較したところ、周長補正シケインを挟まなければ一致することがわかった。
4. バックトレースのビームマッチング
 - 北側直線部から第1アークにかけて実施
 - Q scanの結果から上流のベータ関数を推定（バックトレース）。
 - 上流のベータ関数からマッチングを実施。計算結果とスクリーンの測定値を比較。
5. 分散関数に関するビームスタディ
 - 1%だけエネルギーを変えて、BPMで測定を実施
 - 標準化を導入して、計算と測定値が一致するようになった。