

40 pC でのビーム調整・エミッタンス測定

第105回ERL検討会
2017年4月12日(水)14時から16時
PF研究棟2階会議室

報告： 宮島 司

概要

- 2017年3月に、cERLで最大バンチ電荷60 pCを目指した生成・輸送試験を実施した
- ここでは、運転全体の経過と、診断ラインにおけるエミッタンス測定結果、高バンチ電荷における課題について報告する

目次

1. cERLの現状の整理(おさらい)と今期の運転目的
2. 当初運転案
3. 実際の運転経過
4. Slit-scanによるエミッタンス測定結果
5. 今期の課題
6. まとめ

- 目次

1. cERLの現状の整理(おさらい)と今期の運転目的
2. 当初運転案
3. 実際の運転経過
4. Slit-scanによるエミッタンス測定結果
5. 今期の課題
6. まとめ

現状の整理1

2016年11月30日
CERL建設打ち合わせ資料

- ERLの特徴
 - CW運転による高輝度・短バンチ長・大電流ビームの供給
- 想定される応用先の一つが、ERLの放射光源利用であり、これが最も大きな目標であった(2016年3月末までは)
- 光源利用時の最終目標:
 - 10 mA (7.7 pC/bunch), 0.1 mm mrad
 - 100 mA (77 pC/bunch), < 1 mm mrad
- 2016年度に入ってから、ERLの光源利用という目的は正式に取り下げられた ⇒ 平均 100 mA という目標がなくなる
- 現状の整理
 - 放射光利用時の目標から、他の目標への転換を図る必要がある
 - ERLの特徴を活かした応用先: CW-FEL光源 (EUV, X線)、THz光源、 γ 線光源、モリブデン-99生成、・・・(抜けがあるかも) ⇒ **大平均電流を使った応用先は結構ある**
 - cERLの運転条件の現状: 最大平均ビーム電流 1 mA ⇒ **平均電流を上げた試験は今回はできない(バンチ電荷は上げて大丈夫)**
 - 2016年3月までの運転でやり残したこと: 7.7 pC/bunchでの設計エミッタンスへの到達、電子銃 500 kVでの総合運転

現状の整理2

2016年11月30日
cERL建設打ち合わせ資料

- 大規模な応用先としては、CW-FEL光源用加速器というのがある
- これらに対して、cERLは規模は小さい(エネルギーは低い)が、前段部分(入射器+主空洞数段分)に対する試験を行うことが可能
- ERLは線形加速器であり、基本的に上流の影響が下流に伝播していくため、前段部分での検証が重要

- EUV-FEL前段部分の目標
 - バンチ電荷 60 pC (運動エネルギー 10.5 MeV)
 - 規格化エミッタンス $\varepsilon_{x,y} \sim 0.8$ mm-mrad (合流部下流)
 - エネルギー拡がり $\delta_E \sim 0.2$ %
 - バンチ長 $\sigma_z \sim 1.3$ ps
 - エネルギー回収するので、合流部を通す(合流部でエミッタンスがどうしても増える)

- CW-XFEL前段部分の目標(LCLS-IIの目標から推定)
 - バンチ電荷 100 / 300 pC (運動エネルギー 10.5 MeV)
 - 規格化エミッタンス $\varepsilon_{x,y} \sim 0.45/0.7$ mm-mrad (直線上)
 - バンチ長 $\sigma_z \sim 3$ ps
 - エネルギー回収しないので、合流部なし(その分エミッタンスを下げる必要あり)

- バンチ電荷を上げて、低エミッタンスと短バンチ長を実証していくのが一つの方向性

cERLにおける高バンチ運転の現状

- cERLで周回させた高バンチ電荷: 7.7 pC/bunch
- このときの規格化エミッタンス

2016年11月30日
cERL建設打ち合わせ資料

ϵ_x / ϵ_y [um]

2015年までのエミッタンス測定結果

四極電磁石を用いた
Waist-scan法で測定

➤ 微小電荷 (< 0.05 pC/bunch)

	主空洞前	主空洞後	第1アーク後	LCS前
2014/6/13	0.15/0.14	0.14/0.12	0.14/0.14	0.13/0.15
2015/2/17	---	---	0.24/0.25	---
2015/2/19	---	---	---	0.17/0.19

➤ 中電荷 (0.5 pC/bunch)

2015/3/25	---	---	0.32/0.28	0.41/0.30
-----------	-----	-----	-----------	-----------

➤ 高電荷 (7.7 pC/bunch)

2014/6/19	---	---	42/15	---
2014/6/20	---	2.9/2.4	5.8/4.6	---
2015/6/15	---	1.9/2.4	4.5/4.5	---

2016年3月のエミッタンス測定結果

	主空洞前	主空洞後	南直線部
5.3 pC	1.0 0.66	2.7 ± 0.21 1.0 ± 0.071	
7.7 pC	- 0.9	1.8 ± 0.40 1.02 ± 0.33	1.5 ± 0.082 1.1 ± 0.058

上段: ϵ_x (mm mrad)
下段: ϵ_y (mm mrad)

2015年の運転に比べてかなり低減したが、まだ設計値(0.45 mm mrad)よりは大きい

今期の目標設定

- 「cERLにおける大バンチ電荷での低エミッタンス運転」とする
- いきなり300 pC/bunchとかではなくて、EUV-FELで想定される60 pC/bunchをまずは生成・輸送したい(60 pC/bunchというのは、ERL放射光利用100 mA時のバンチ電荷77 pC/bunchとほぼ同じ)
- 具体的な目標はどうか？(現実を置いておいた理想案)
 - バンチ電荷: 60 pC/bunch(実際にはレーザーパワー、QEによっては変更あり)
 - ビームエネルギー: 10 MeV
 - エミッタンス: ~ 0.8 mm mrad
 - バンチ長: 1 ps
 - エネルギー広がり: ~ 0.2 %
- Q. これをcERLの手持ちの機器で実証できるか？
- A. できない・・・
 - 入射エネルギー: 最大 5 MeV 程度と半分
 - 調整項目が少ない: (入射器空洞#2, #3の独立な調整(Eacc, 位相)ができない、初期レーザーパルス長をどこまで伸ばせる?)
 - 代わりに、現状のcERLでバンチ電荷60 pC/bunch, エネルギー 5 MeV でどこまでエミッタンスが下がるかを計算中(測定しやすいのはエミッタンスなので、バンチ長は 3 ps以上にしてエミッタンスを下げる輸送条件にする予定)

- 目次

1. cERLの現状の整理(おさらい)と今期の運転目的
2. 当初運転案
3. 実際の運転経過
4. Slit-scanによるエミッタンス測定結果
5. 今期の課題
6. まとめ

2017年3月の運転案

2017年2月3日
ERL検討会資料

- とりあえず、60 pC/bunchを輸送する運転案を考える
- 基本方針：
 - エネルギー回収運転はしない(その分入射器のエネルギーを上げる)
 - 前半に入射器診断ラインに輸送、後半に主空洞を通して南直線部でのビーム評価
- 電子銃単体運転(2/27, 2/28)
 - どこまでバンチ電荷を出せるか? ⇒ 総合運転の輸送条件設計にフィードバック
 - SL1を使ったソレノイドスキャン ⇒ モデルの修正
- cERL総合運転(3/13-3/31, 3週間)
 - 入射器診断ライン輸送試験(1週間): 合流部なしでバンチ長、エミッタンスを評価する、モデル修正
 - 合流部調整(3日間?): 合流部を通して、主空洞前でのエミッタンスを低減する調整
 - 主空洞調整(1日間): 位相調整、軌道調整
 - 周回部輸送調整(1日間): 南直線部までの軌道・オプティクス調整
 - 残り1週間: 他の項目を入れるか(エネルギー回収運転をする?) あるいは、バンチ電荷を変えた輸送とか

実験手順案1

2017年2月3日
ERL検討会資料

- 電子銃単独

- 
- 2/27 – 500 kVの電子銃収束作用測定(低バンチ電荷、レーザー照射位置の
2/28 スキャン)
 - ソレノイドスキャン(低バンチ電荷～最大60 pC)、初期レーザー直径、
初期バンチ長モデルの修正
 - 円筒対称性を確保するための軌道調整(最大60 pC) cam1, cam2で
プロフィールが円筒になるように

実験手順案2

2017年2月3日
ERL検討会資料

• 入射器(診断ライン)

- 3/13(月) {
 - 5 MeV 加速調整(低バンチ電荷、振幅、位相調整、合流部cam8まで、バンチャーはOFF)
- 3/14(火) {
 - 入射器空洞の軌道応答測定(低バンチ電荷、#1, #2-3単体運転、シングルキック応答+HOM応答測定)
 - 診断ライン輸送調整(低バンチ電荷、軌道・オプティクス調整)
 - 偏向空洞によるバンチ長測定系の立ち上げ
 - レーザーパルス伸長(ここからスタック開始)
 - バンチャー空洞調整(低バンチ電荷、振幅・位相調整、レーザー位相調整)
- 3/15(水) {
 - バンチ電荷増強(ここから空間電荷あり)
 - 入射器空洞の詳細な軌道調整(最大60 pC)
 - 診断ライン輸送調整(最大60 pC、軌道・オプティクス調整)
- 3/16(木) {
 - エミッタンス応答測定(最大60 pC、空洞の振幅・位相、ソレノイド)
- 3/17(金) {
 - バンチ長応答測定(最大60 pC、空洞の振幅・位相、ソレノイド)
- 3/17(金) {
 - エミッタンス・バンチ長応答測定結果から輸送路の再調整(エミッタンス・バンチ長を設計条件へ)

実験手順案3

2017年2月3日
ERL検討会資料

• 周回部輸送

- 3/20(月) {
 - 合流部軌道調整(低バンチ電荷)
 - 合流部・主空洞前後のオプティクス調整(低バンチ電荷)
 - 第一アークまでの軌道・オプティクス調整(低バンチ電荷)
 - 主空洞調整(低バンチ電荷、振幅、位相調整)
- 3/21(火) {
 - バンチ電荷増強(ここから空間電荷効果あり)
- 3/22(水) {
 - 合流部・主空洞前後の軌道・オプティクス調整(最大60 pC)
- 3/23(木) {
 - 北直線部の軌道・オプティクス調整(最大60 pC)
 - 第一アークの軌道・オプティクス調整(最大60 pC)
 - エネルギー広がり測定(最大60 pC)
 - 南直線部の軌道・オプティクス調整(最大60 pC)
- 3/24(金) {
 - 南北直線部におけるエミッタンス測定(Q-scan法)
 - 南北直線部におけるエミッタンス応答測定(何をスキャンするかは検討中・・・)

ここまでの調整で、南直線部までの輸送条件は確立する見込み

3/27(月)、3/28(火)は南直線部を使った試験が可能(なはず)

想定されるビーム条件(設計条件に到達した場合は、60 pC, 1.5 mm mrad, 4 ps)

実験手順案4

2017年2月3日
ERL検討会資料

- 60 pC輸送試験の残り
 - 3/22(水)までの実験結果から、モデルの修正、最適化計算の再実施を行う
 - 残りの3日程度で再調整を行いたい
 - バンチャー・入射器空洞の再調整
 - 合流部・主空洞までのオプティクス再調整

- 目次

1. cERLの現状の整理(おさらい)と今期の運転目的
2. 当初運転案
3. 実際の運転経過
4. Slit-scanによるエミッタンス測定結果
5. 今期の課題
6. まとめ

実際の運転経過

- 各機器の運転条件を確認しながら運転パラメタを決めていった
 - 電子銃加速電圧、入射器加速電場、バンチ電荷、主空洞加速電圧
- 実際に運転可能な条件を確認したあとに、設計輸送条件にフィードバックして、輸送条件を定めた
- 当初設計(フィードバック前)
 - 電子銃: 500 kV
 - 入射器: 5.34 MeV
 - 最大バンチ電荷: 60 pC
- 実際の運転(フィードバック後)
 - 電子銃: 450 kV
 - 入射器: 5.12 MeV
 - 最大バンチ電荷: 40 pC
- 各機器の運転条件が定まるたびに、モデルを用いた設計輸送条件を調整(今回は布袋さんが実施)
- 最終的な運転パラメタを定めた(詳細な輸送条件については、布袋さんの報告を参照)



運転経過;

http://pfconrg07.kek.jp:8082/trac/cerl/wiki/Internal/opretion_history/2017

実際の運転経過

02.27(Mon)	バンチャーエージング、電子銃単独運転(450, 400 kV)、電子銃収束力測定
02.28(Tue)	バンチャーエージング
03.02(Thu)	電子銃単独運転、低バンチ電荷、電子銃収束力測定、ソレノイドスキャン
03.03(Fri)	電子銃単独運転(450 kV)、最大 60 pC、ソレノイドスキャン
03.13(Mon)	電子銃単独運転(450 kV)、SL1-scan(-60 pC)、入射器空洞INJ#1位相調整
03.14(Tue)	INJ#1加速調整、バンチャー調整・エージング、入射器下流での放電トラブル
03.15(Wed)	INJ#1加速調整(設計6.22 MV/mに下げた)、バンチャー位相調整、INJ#2調整開始
03.16(Thu)	INJ#2位相調整、INJ#2-3間位相差調整、診断ラインへ輸送、INJ#1を用いた時間分布測定、スタッキング調整
03.17(Fri)	INJ#1を用いた時間分布測定(バンチャーなし)、スタッキングしてSL1-scan(40 pC)、INJ#1を用いた時間分布測定(バンチャーあり)、診断ライン偏向空洞試験
03.20(Mon)	入射器空洞、主空洞エージング
03.21(Tue)	診断ラインバンチ長測定、バンチ電荷増強(最大40 pC)、MP0オプティクスマッチング準備
03.22(Wed)	cam5 ND8 を追加(運転開始前)、Diag FC までで電荷量が減る問題の調査、スリットスキャンによるエミッタンス測定
03.23(Thu)	診断ラインまでのビーム減少の確認、エネルギー拡がり測定、MP0 マッチング、Slit-san によるエミッタンス測定
03.24(Fri)	診断ライン/エミッタンス測定(Q-scan)、合流部輸送、主空洞位相調整、cam18 まで調整
03.27(Mon)	主空洞エネルギー測定、40 pC 南直線部まで輸送(MP1, MP2, MP2A)、cam19 まで輸送調整(手動)、cam17 を入れた状態で放射線測定、HOM 信号測定
03.28(Tue)	ビームハロー、THz CTR測定
03.29(Wed)	レーザー分布調整、入射器軌道測定・調整(3空洞)、診断ラインK値測定、診断ラインslit-scan
03.30(Thu)	診断ラインQ-scan、バンチ圧縮とCTRバンチ長測定
03.31(Fri)	バンチ圧縮とCTRバンチ長測定、周回部Q-scan(40 pC)、INJ#1シングルキック応答

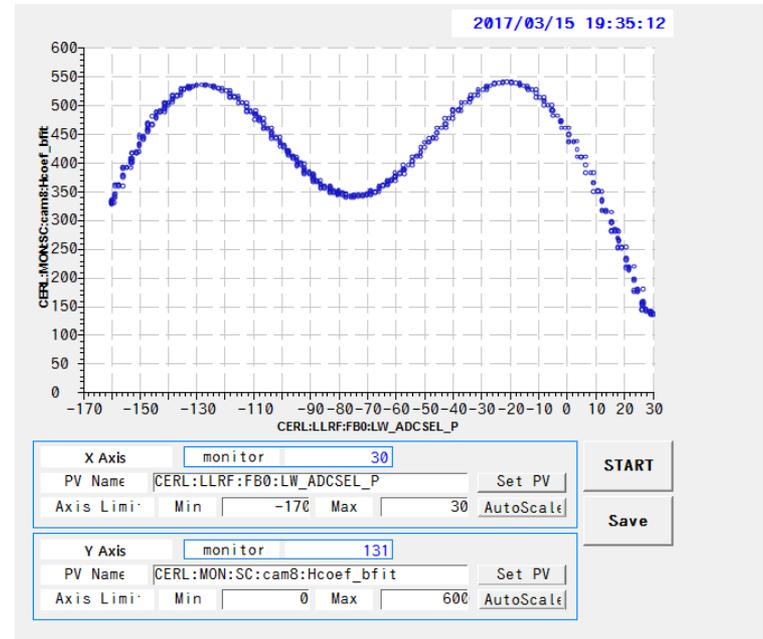
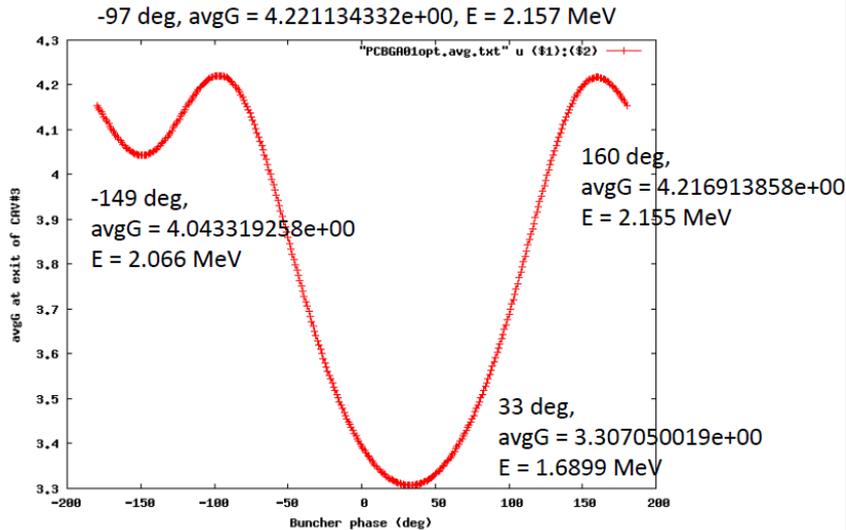
電子銃近傍のモデル修正

- 実際の運転条件を再現するように、電子銃近傍のモデル修正を実施
- 電子銃収束力測定・補正（大崎さん、布袋さんの報告参照）⇒ 2016年3月に比べて、電極モデルを0.4 mm凹ませる必要があった
- 低バンチ電荷のソレノイドスキャン ⇒ レーザー直径($d = 2$ mm)を補正するつもりだったが、低バンチ電荷で広がったプロフィール測定ではノイズが大きく、手法を再検討する必要がある($d = 1$ mmはOKだった)
- レーザーパルススタッキング調整 ⇒ 以前は診断ラインの変更空洞を使っていたが、今回はINJ#1を使用。入射器位相の影響を受けずきちんと測定できるようになった(測定結果は大崎さん、布袋さんの報告参照)
- 高バンチ電荷(40 pC)のソレノイドスキャン ⇒ 測定は行ったが、モデルとの比較はこれから
- 電子銃収束力、初期レーザーパルス長については、確認する手法がほぼ確立した
- バンチ電荷を上げて(40 pC)、空間電荷効果が支配的になったときのモデルとの実験の比較を今後行う

入射器・バンチャーの加速位相調整法の変更

- 輸送条件設計時とほぼ同じ手法で入射器とバンチャーの位相調整を行うように変更した
- 2016年3月までの調整
 - INJ#1の加速位相調整
 - INJ#2の加速位相調整
 - INJ#3の位相調整
 - バンチャーの加速位相調整(最大加速になる位相を探す)
- 2017年3月の調整
 - INJ#1の加速位相調整
 - バンチャーの位相調整(位相とエネルギー変化から、バンチング位相を求める)
 - INJ#2の位相調整
 - INJ#3の位相調整

バンチャー加速位相の調整
2017年3月15日(水)
宮島 司



ほぼモデル通りの応答をえることができた ⇒ 診断ラインのバンチ長測定結果もよく一致

主空洞位相調整

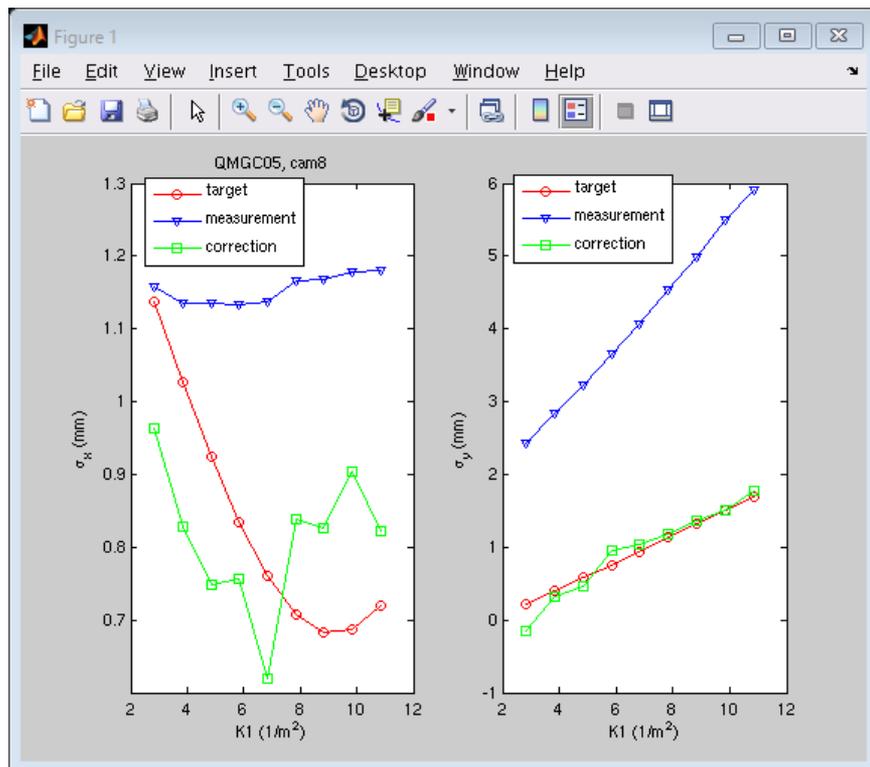
- 低バンチ電荷で、主空洞の位相調整
- 調整後： 全エネルギーEは17.71MeV

Energy Disp (for K value) / Energy Calculator					
	GUN	INJ	CIR		calc
Total Energy E	0.961	5.12	17.71	MeV	100
Kinetic Energy T	0.45	4.609	17.199	MeV	99.489
momentum P (pc)	0.814	5.094	17.703	MeV/c	99.999
P ratio		1 :	3.4749		
gamma	1.8806	10.0196	34.6575		195.6947
beta	0.8469	0.995	0.9996		1

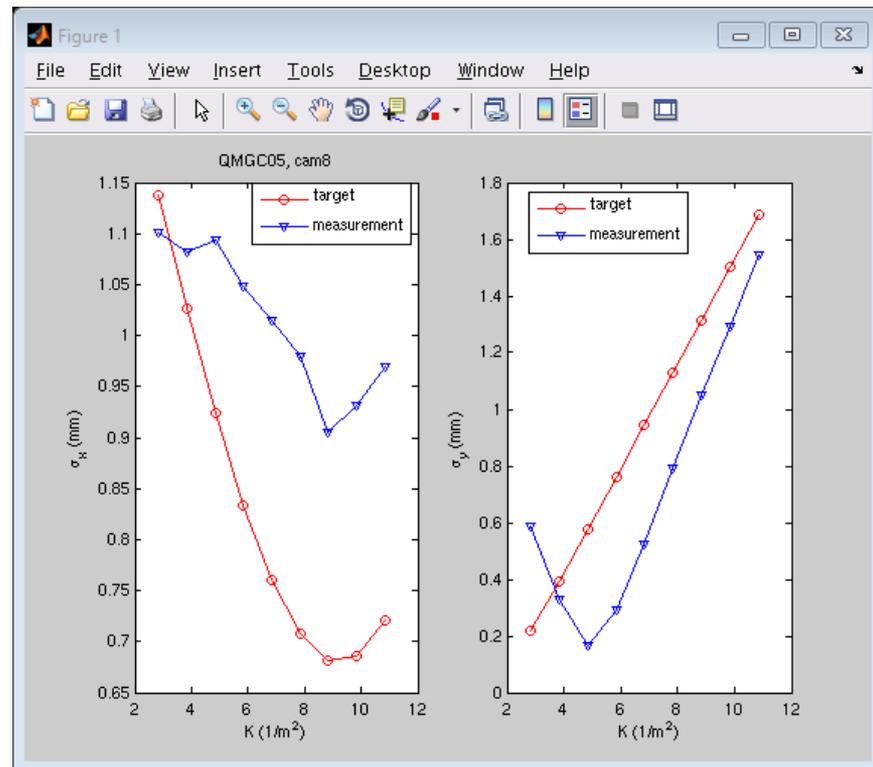
40 pC 周回部輸送

- バンチ電荷 40 pCを周回部に輸送するために、いつもの通りマッチングを実施した(MP1, MP2, MP2A)
- 今回は電磁石の標準化を考慮した測定にプログラムを修正(再現性の向上を狙った)
- ただし、7.7 pCのときのように綺麗に補正できず

MP1補正前
(5連QM)



MP1補正後(3回補正を実施)
(5連QM)

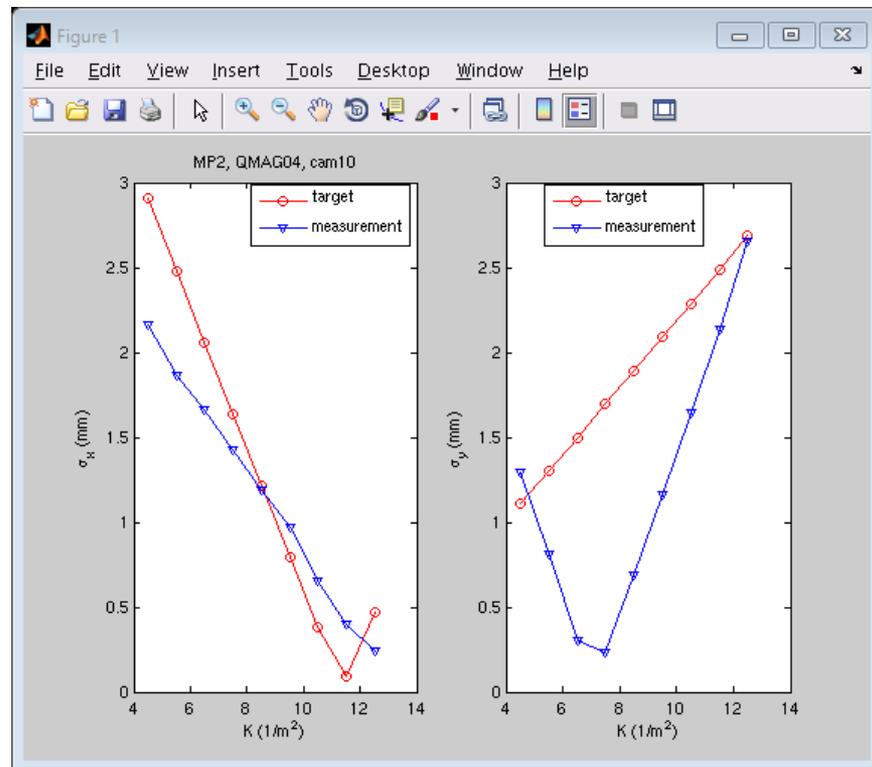
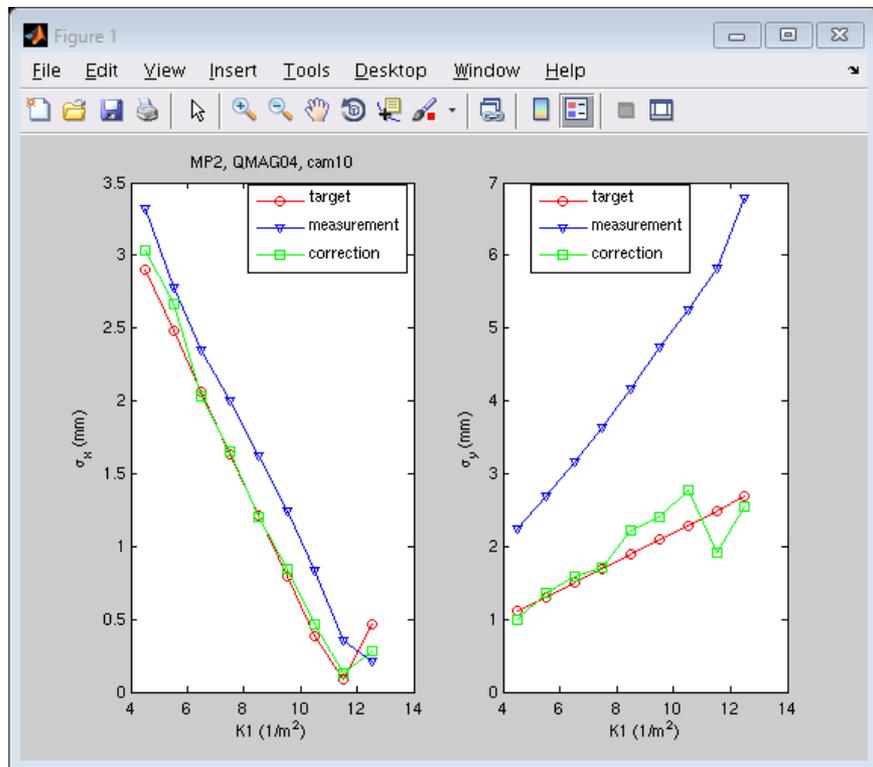


40 pC 周回部輸送

- バンチ電荷 40 pCを周回部に輸送するために、いつもの通りマッチングを実施した(MP1, MP2, MP2A)
- ただし、7.7 pCのときのように綺麗に補正できず

MP2補正前
(主空洞入口)

MP2補正後(3回補正を実施)
(主空洞入口)



40 pC 周回部輸送

- マッチング後に、南直線部cam19まで輸送
- プロファイルの歪みは大きいがとりあえず輸送できた

Screen Log 20170327_191719



補正後のプロファイル
cam10 とかで2山に見える

2山問題もあり、まずは診断ラインできちんとエミッタンスを評価することにした

- 目次

1. cERLの現状の整理(おさらい)と今期の運転目的
2. 当初運転案
3. 実際の運転経過
4. Slit-scanによるエミッタンス測定結果
5. 今期の課題
6. まとめ

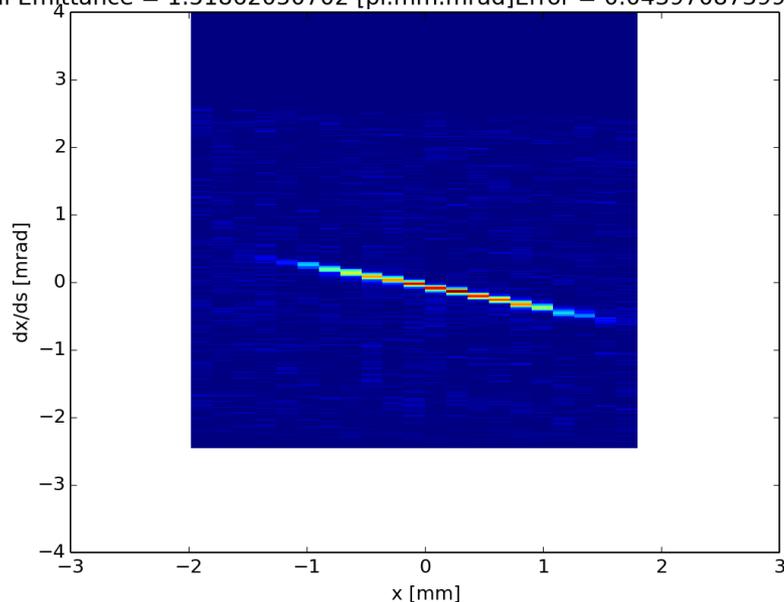
エミッタンス測定

- 測定箇所： 診断ライン (slit-scan, Q-scan)、主空洞手前 (Q-scan)、北直線部 (Q-scan)、南直線部 (Q-scan)
- バンチ電荷： 1, 7.7, 20, 40 pC (主に測定した電荷)
- Slit-scan: 大崎さんの報告を基に紹介
- Q-scan: 島田さんの報告参照
- ここでは、Slit-scanの結果を紹介
- 最初は、slit + cam5で測定 ⇒ 距離が近くて運動量広がりが小さい
- 3/29 に slit + cam6 で測定
- 解析プログラム
 - 今回は、東芝の大崎さんに作成してもらった
 - 最初はいくつかバグ (規格化、スリット移動量、平均を取る位相空間範囲の指定) があり、最終的にある程度信頼できる値になった
 - ただし、一度プログラムを確認する予定 (現在実施途中)
 - 以前の本田さんの方法で、誤差評価も行う

規格化エミッタンス測定結果

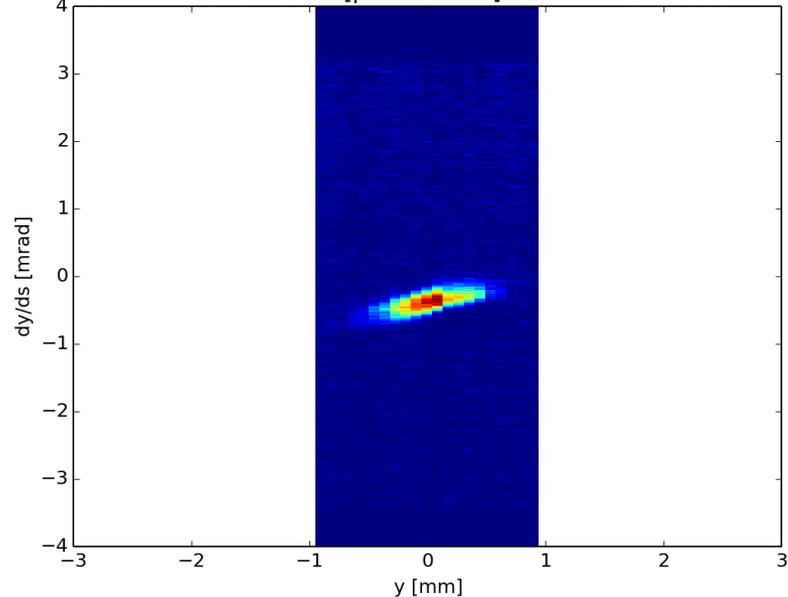
3/29, (1.0pC/bunch)

Horizontal Emittance = 1.51862050702 [pi.mm.mrad] Error = 0.043970873998 [pi.mm.mrad]



X方向 : 1.5 [pi.mm.mrad]

Vertical Emittance = 0.474275779082 [pi.mm.mrad] Error = 0.0200395004824 [pi.mm.mrad]



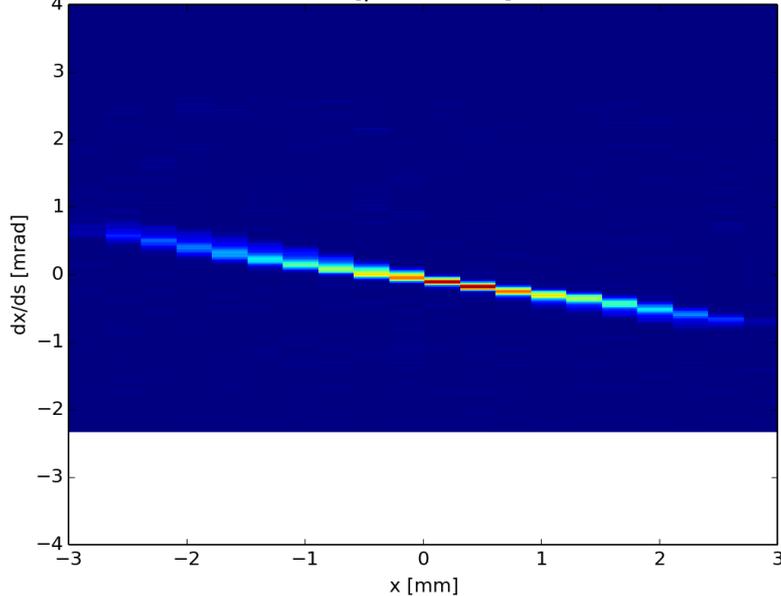
y方向 : 0.47 [pi.mm.mrad]

大崎「スリットスキャン法を用いたビームエミッタンス測定
エミッタンス再計算(@cam6)」,
エミッタンス測定_cam6_re2.pptx

規格化エミッタンス測定結果

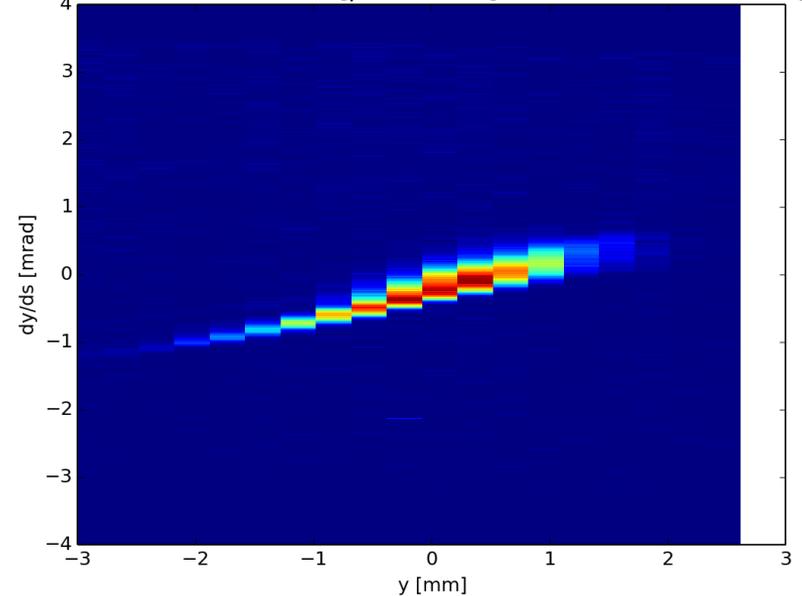
3/29, (7.7pC/bunch)

Horizontal Emittance = 2.37513950549 [pi.mm.mrad] Error = 0.048370380587[pi.mm



X方向 : 2.38[pi.mm.mrad]

Vertical Emittance = 1.55212935226 [pi.mm.mrad] Error = 0.0402164079757[pi.mm



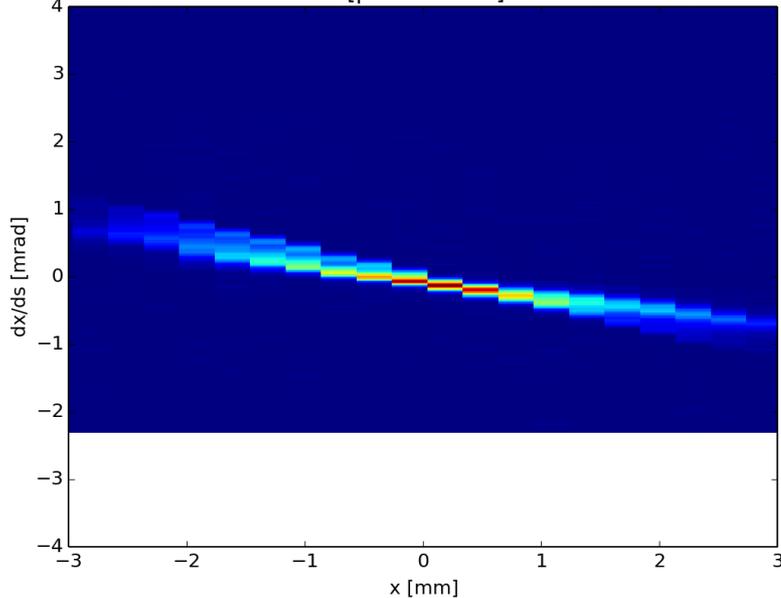
y方向 : 1.55 [pi.mm.mrad]

大崎「スリットスキャン法を用いたビームエミッタンス測定
エミッタンス再計算(@cam6)」,
エミッタンス測定_cam6_re2.pptx

規格化エミッタンス測定結果

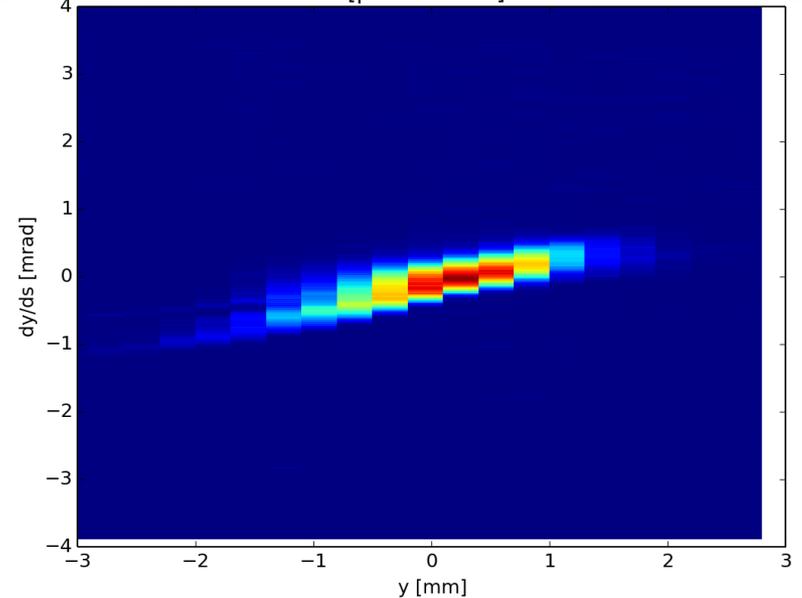
3/29, (20pC/bunch)

Horizontal Emittance = 2.59104009047 [pi.mm.mrad] Error = 0.0450140826463 [pi.mm.mrad]



X方向 : 2.59 [pi.mm.mrad]

Vertical Emittance = 0.942693620991 [pi.mm.mrad] Error = 0.0326223158671 [pi.mm.mrad]



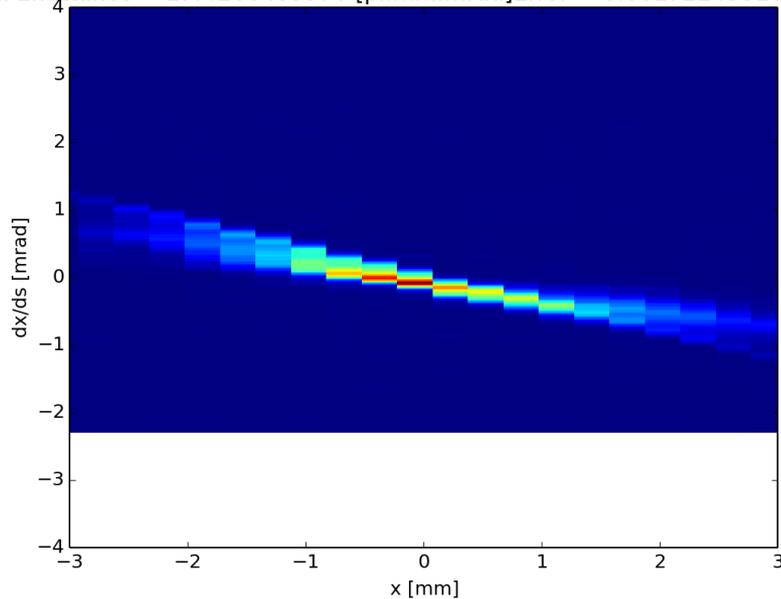
y方向 : 0.94 [pi.mm.mrad]

大崎「スリットスキャン法を用いたビームエミッタンス測定
エミッタンス再計算(@cam6)」,
エミッタンス測定_cam6_re2.pptx

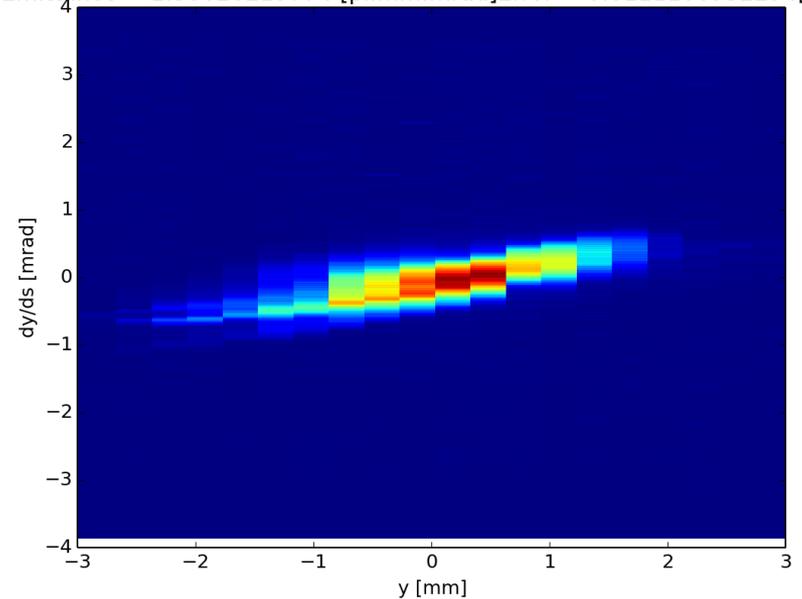
規格化エミッタンス測定結果

3/29, (40pC/bunch)

Horizontal Emittance = 2.44268485576 [pi.mm.mrad] Error = 0.061722433106 [pi.mm.mrad] Vertical Emittance = 1.38628213774 [pi.mm.mrad] Error = 0.0111106932294 [pi.mm.mrad]



X方向 : 2.44 [pi.mm.mrad]



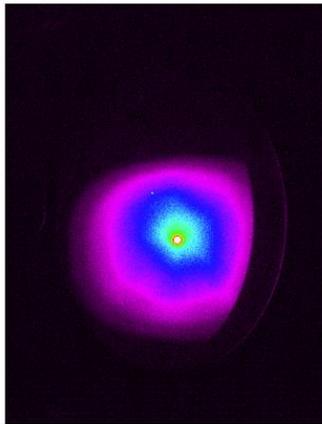
y方向 : 1.39 [pi.mm.mrad]

大崎「スリットスキャン法を用いたビームエミッタンス測定
エミッタンス再計算(@cam6)」,
エミッタンス測定_cam6_re2.pptx

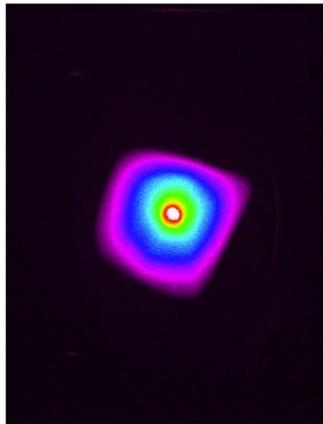
ここまでの測定時のプロフィール

- 40 pCのときのプロフィール
- Cam5の上流に、slitがある

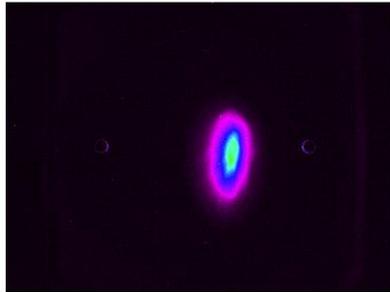
Screen Log 20170329_210059



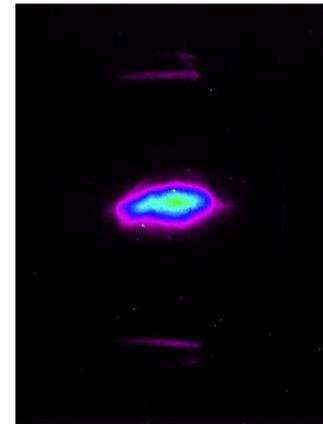
[20170329_210059_cam1.png](#)



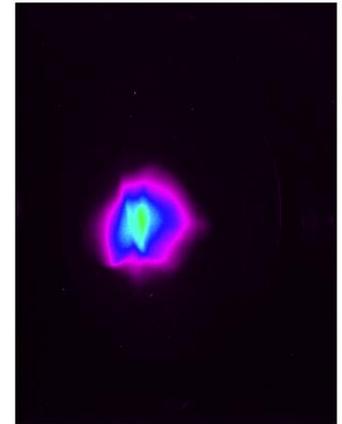
[20170329_210059_cam2.png](#)



[20170329_210059_cam3.png](#)



[20170329_210059_cam5.png](#)



[20170329_210059_cam6.png](#)



Cam5のプロファイル:横長

このあと、cam5のプロファイルを縦長に調整して、40 pCのエミッタンスを測定

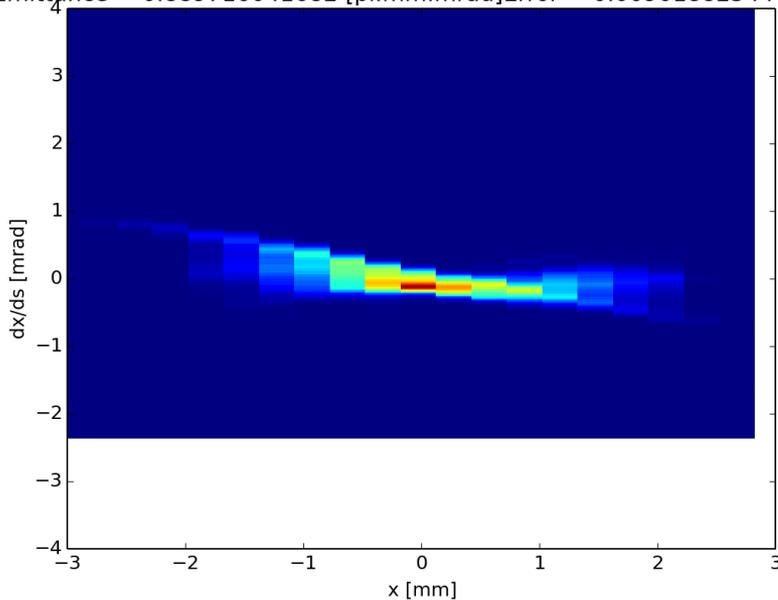
規格化エミッタンス測定結果

3/29, (40pC/bunch)

大崎「スリットスキャン法を用いたビームエミッタンス測定
エミッタンス再計算(@cam6)」,
エミッタンス測定_cam6_re2.pptx

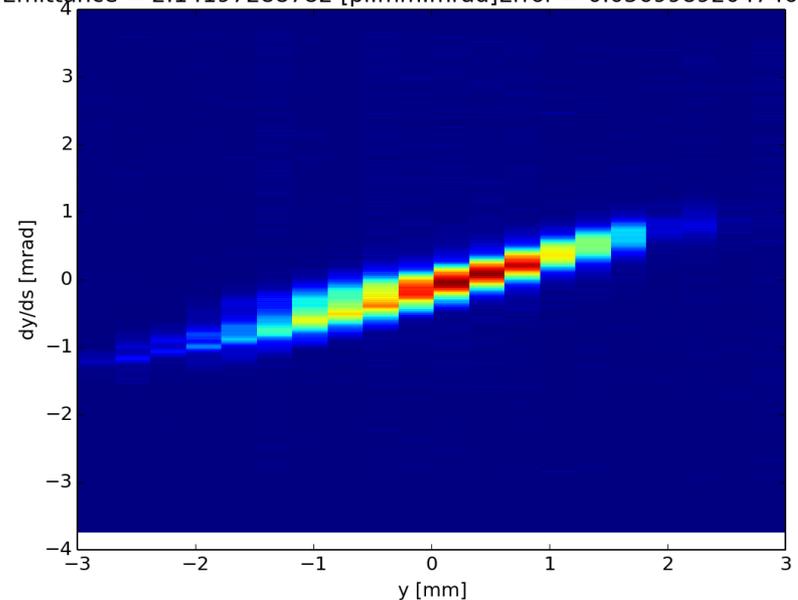
- ・X方向の実空間分布が広がることで、速度空間分布が狭くなり位相空間分布がきれいに撮れていなかった。
- ・QM の K値を変えて速度空間に広がりも持たせエミッタンス再測定。QMGE01 を調整して、cam5 の水平サイズを小さくした(補足:宮島)

total Emittance = 0.889716041682 [pi.mm.mrad]Error = 0.00901882544615[pi.n



X方向 : 0.90 [pi.mm.mrad]

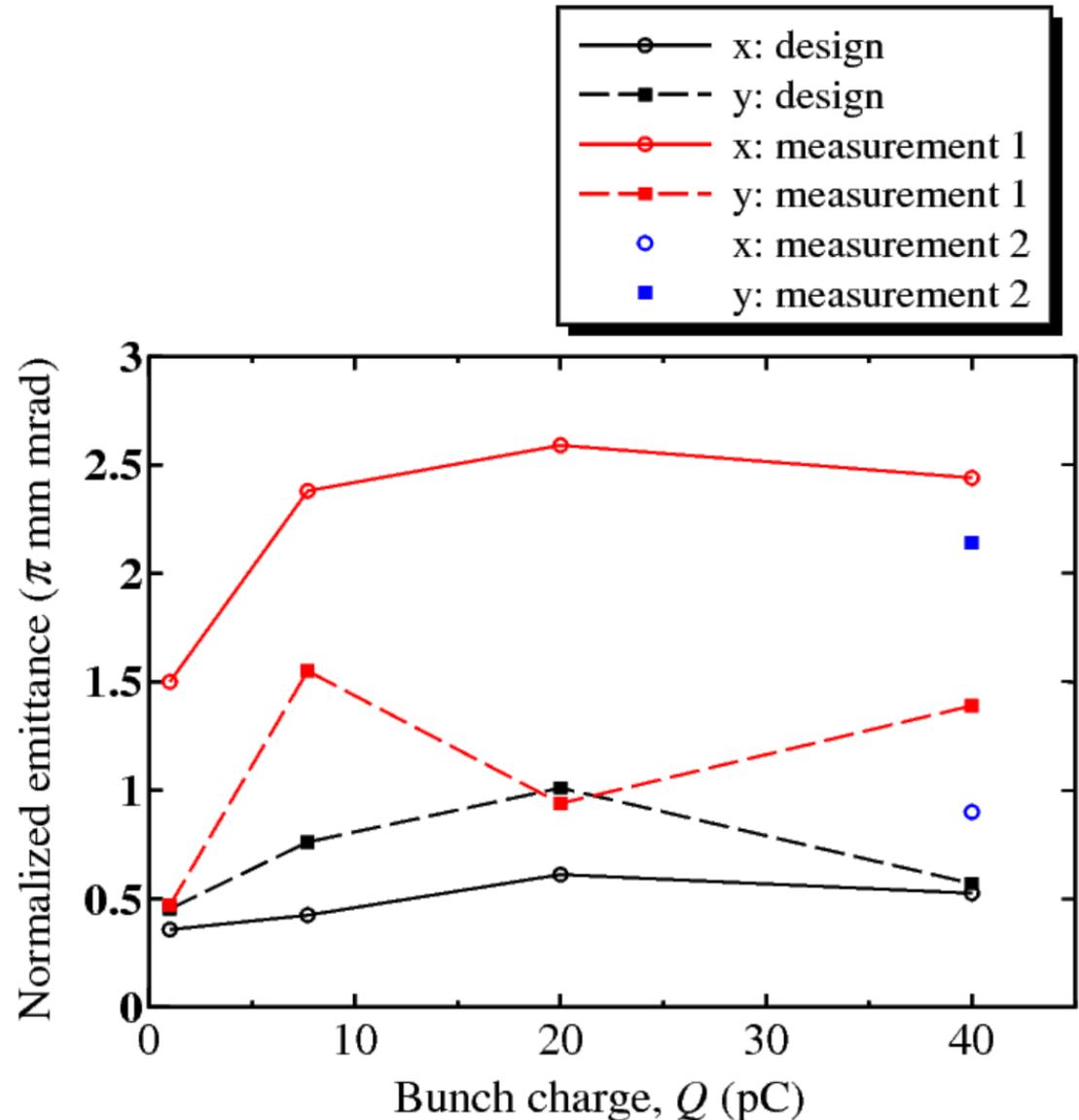
total Emittance = 2.14197288782 [pi.mm.mrad]Error = 0.0569989204746[pi.mm



y方向 : 2.14 [pi.mm.mrad]

Slit-scan測定結果まとめ

- 今回の輸送条件設計と、測定結果をまとめる
- 40 pC では設計に対して、水平方向で5倍、垂直方向で3倍になった
- 0.9 – 2.4 π mm mrad
- 誤差は統計誤差で 0.1 π mm mrad程度(ただし、今後以前と同じ方法で見積る)
- 輸送条件は、必ずしもエミッタンス補償に最適なものに調整しきれておらず、エミッタンスが変化する可能性はある(cam5 でプロファイルがまとまるように手動で調整せざるを得なかった)
- SlitまでのQMを変えて、横長ビームから縦長ビームに変えると、水平エミッタンスが下がった
- モデルを用いて、輸送条件(上流の影響とslitまでのオプティクス)とエミッタンスの関係について今後調査する予定



- 目次

1. cERLの現状の整理(おさらい)と今期の運転目的
2. 当初運転案
3. 実際の運転経過
4. Slit-scanによるエミッタンス測定結果
5. 今期の課題
6. まとめ

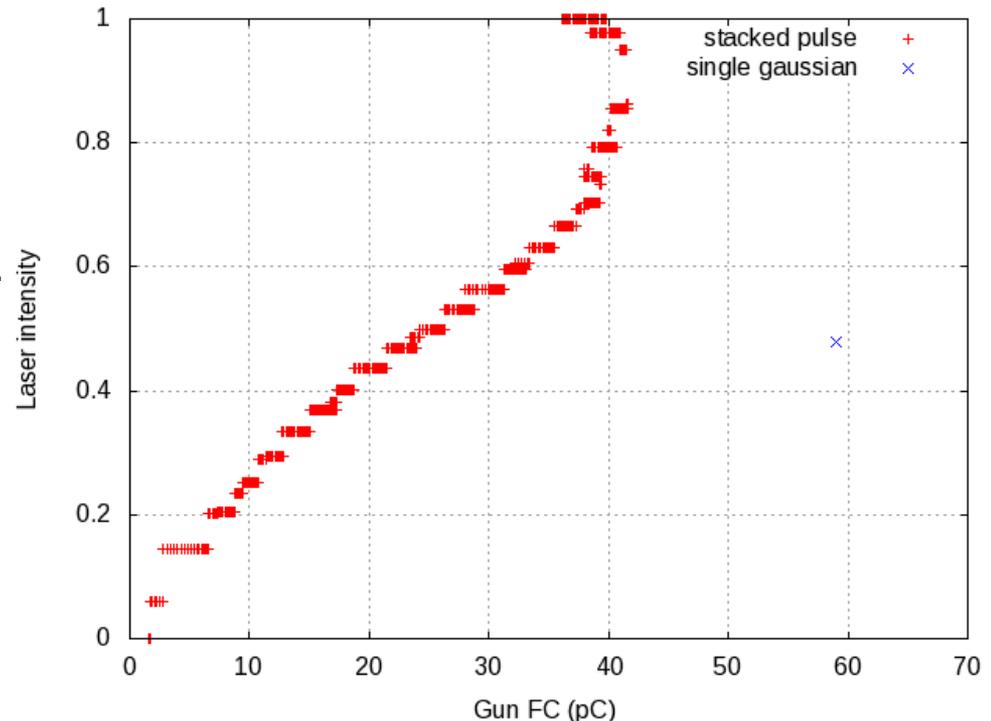
今期の課題

- 60 pC 生成 ⇒ パルススタッキング前は60 pC出せたが、スタッキング後は 40 pC 前後が最大バンチ電荷(QEは3%程度)、スタッキングでレーザー出力が低下
- 電子銃電圧 ⇒ 暗電流が増加するため、450 kV に抑えた(ダミーではなくて光陰極を挿入した状態で電圧をかけられるようになることが必要)
- 電子銃収束力 ⇒ 2016年3月の運転時から変化、モデルでは0.4 mm カソードが凹んだ状態で実験を再現、カソードパックの個性を確認する必要あり
- 入射器の加速電場 ⇒ INJ#1 6.9 MV/m(モニター値)では入射器下流で放電が発生、6.5 MV/m に下げると放電はなくなった
- 主空洞加速電場 ⇒ 冷凍機のキャパシティ80m3/hから余裕をもって運転するために、ML1 5.0MV, ML2 7.5MVで運転(周回エネルギー 17.5 MeV)
- バンチ電荷の減少 ⇒ Diag FC まで輸送すると、バンチ電荷が減少しているように見える(電荷の波形も変化する)
- 入射器空洞下流のマッチング ⇒ 40 pC 輸送条件でマッチングを行ったが、応答がきれいに取れず収束しなかった(プロファイルが2山に見える場合がある)
- パルススタッキング ⇒ よく見ると時間分布に亀裂がある。これが2山の原因になるか？
- 入射器空洞による収束力の非対称性 ⇒ 7.7 pC までは5連QMでマッチングを取っていたが、今回は対応できなかった。シングルキック応答をモデルに反映させて5連QMでの補正量を減らしたい
- Cam1におけるプロファイルの歪み ⇒ 7.7 pC では改善できていたが、40 pC にすると四角に歪む。空芯ステアリングによる影響ではないことを確認。4/19 の電子銃単独運転でまずは低バンチ電荷のシングルキック応答で原因を切り分けていく

60 pC 生成

- パルススタックする前は、60 pC 生成できていたが、パルススタックすると 40 pC 付近までしか出せなくなった
- パルススタック用の複屈折結晶を通したときに、レーザー出力が落ちたか？
- 対策：横方向分布の一様性を犠牲にして、ピンホール中央部に集光するようにする(3/31に実施)、QEを上げる

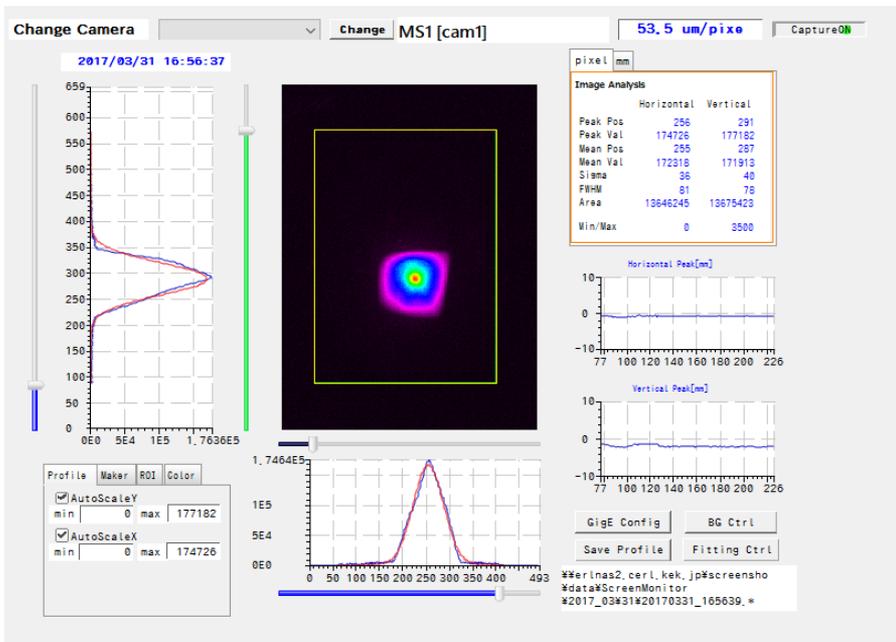
- QEが同じと仮定する
- スタック前：48 % で 60 pC \Rightarrow 0.8 %/pC
- スタック後：100 % で 40 pC \Rightarrow 2.5 %/pC
- $0.8 / 2.5 = 0.32 \Rightarrow$ スタック後にレーザー出力が元の32 % に落ちたことになる



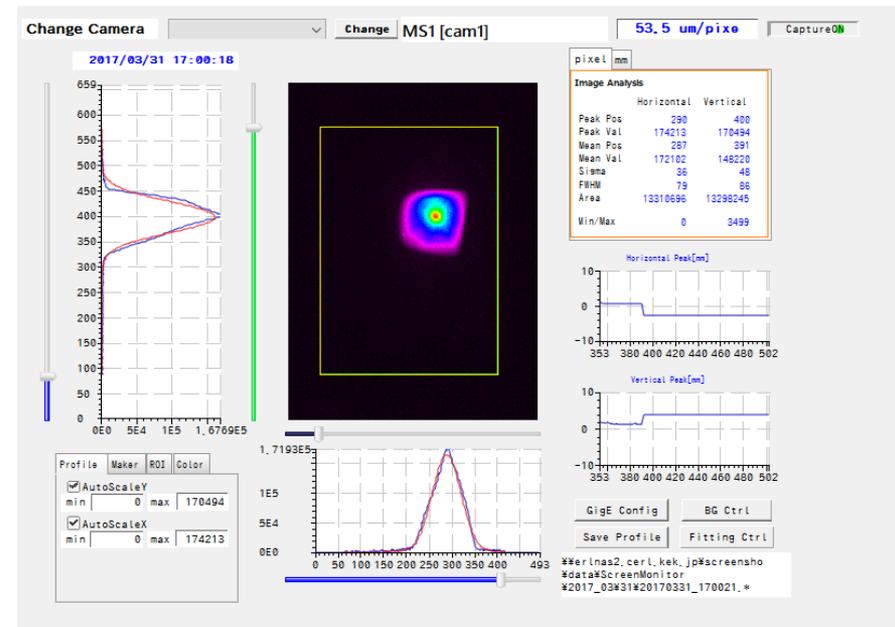
高バンチ電荷でのプロファイルの歪み

- 2016年3月のバンチ電荷7.7 pC 運転ではある程度解消できていたが、40 pC(スタックあり)にしたところ四角に歪む問題が再発した
- 軌道補正用空芯ステアリングの磁場の影響と考えていたが、そうではないことを確認した
- 今後、電子銃単独運転で原因を追究していく(何かの誤差磁場?、レーザーミラーのウェーク?、初期分布の一様性?)

ステアリング磁場あり(通常設定)



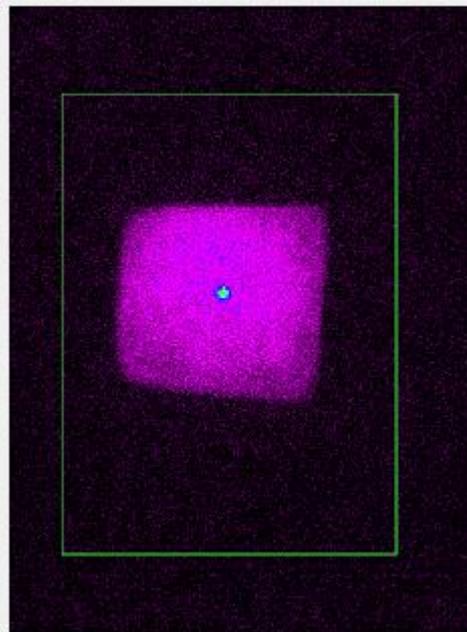
ステアリング磁場ゼロ



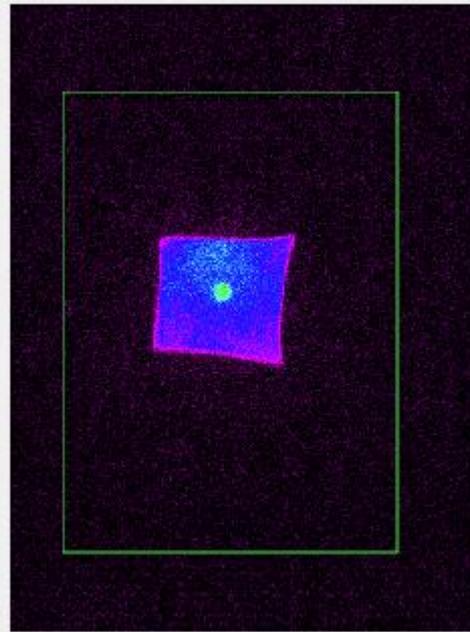
60 pC, スタックなしのプロファイル

- バンチ電荷密度が極めて高い場合
- 60 pC, 3 ps gaussianの場合のcam1のプロファイル(ステアリングは少しあり、バンチャーなし)
- 四角が、オーバーフォーカスで4つ角の星になる ⇒ 何かで切られているか？(レーザーミラーが一番ビームに近い)
- SL1 9.6, 10, 11, 11.6 A

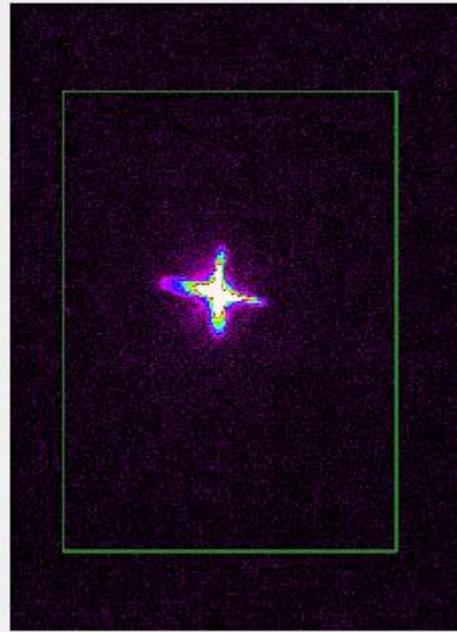
SL1 = 9.6 A



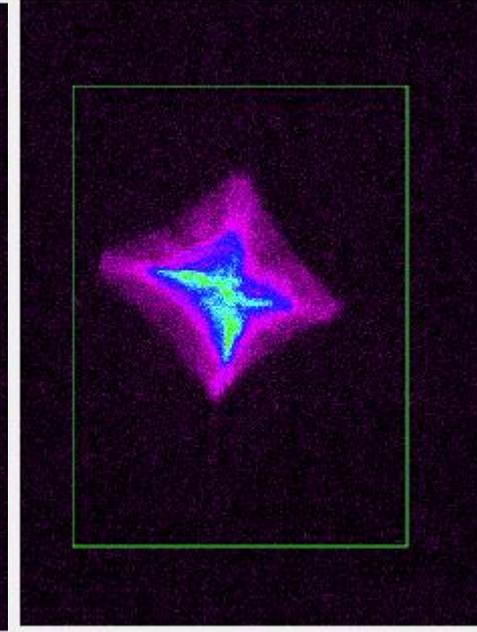
SL1 = 10 A



SL1 = 11 A

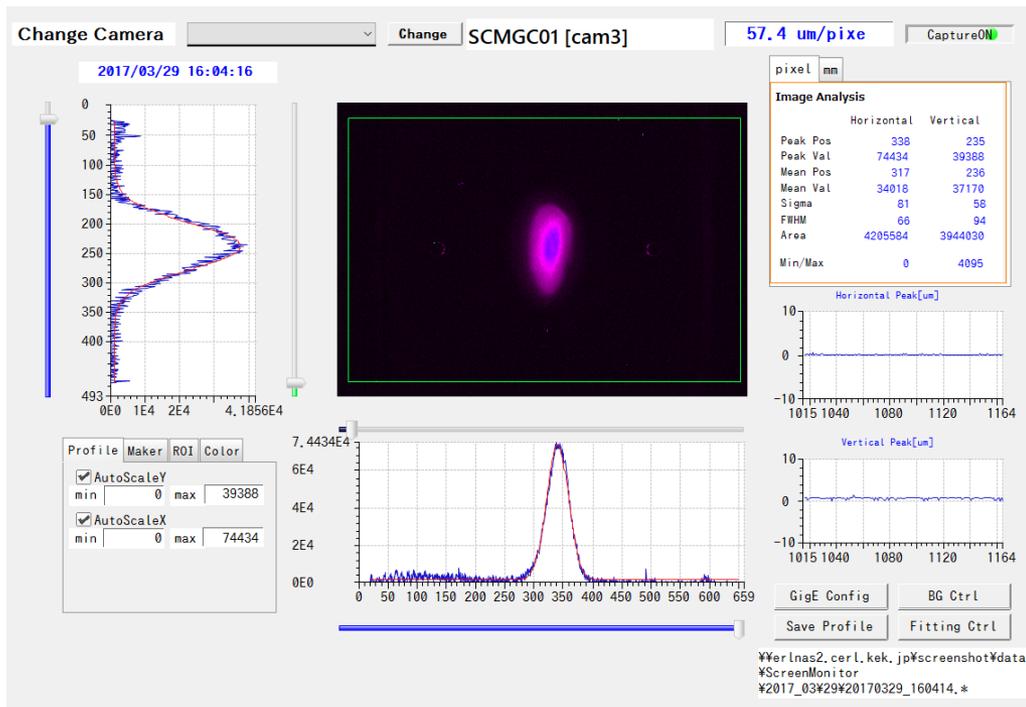


SL1 = 11.6 A



入射器空洞のシングルキック応答測定

- バンチ電荷40 pCでの入射器下流のオプティクスマッチングで、オプティクスを補正しきれなかった(QMAG01を水平収束にしていた影響もあり)
- 今後のことを考えて、入射器空洞により水平・垂直収束の非対称をきちんと測定して、モデルに反映し、補正量を減らしたい
- そのための基礎データとして、シングルキック応答を測定(INJ#1のみ、3空洞全部)



Cam3(入射器空洞直後)
40 pC/bunch

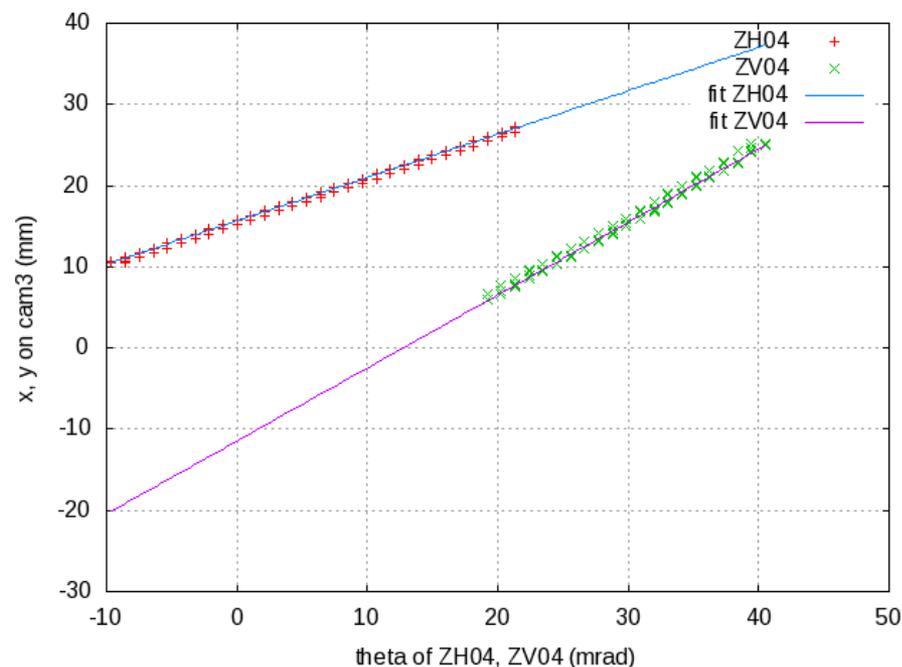
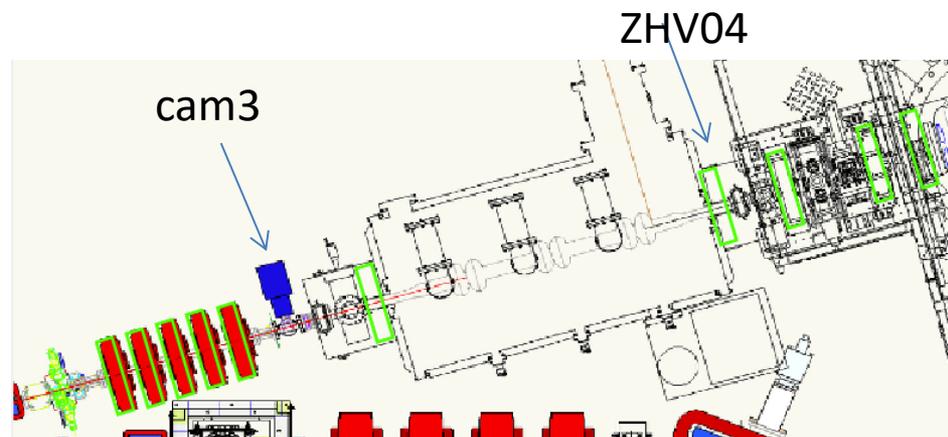
プロフィールが縦長になる

縦横比:

$38.06 / 19.87 = 1.915$ 倍

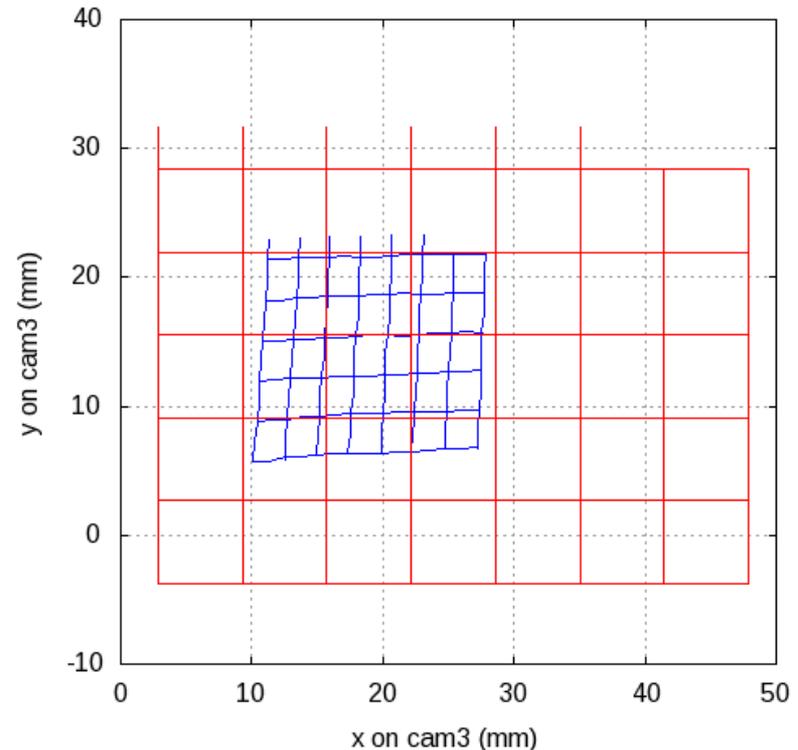
入射器3空洞加速のときの応答

- 今回40 pC輸送用に設定した、入射器加速条件でシングルキック応答を測定
- ZHV04を変えたときの、cam3上の位置変化を測定
- 測定結果
 - 同じZH04とZV04を同じ角度だけ蹴っても、垂直方向の方が $0.898704/0.534352 = 1.6818$ だけcam3上で多く移動する
 - 入射器入口で円筒なビームが、cam3では1.68倍垂直方向に長くなることを意味している
 - キック角に対して、線形に反応している
- ビームサイズの比(1.9倍)に近いが、少し小さい。空間電荷の影響、入射空洞に入るときのプロファイルも考慮した方が良いか？



INJ#1のシングルキック応答

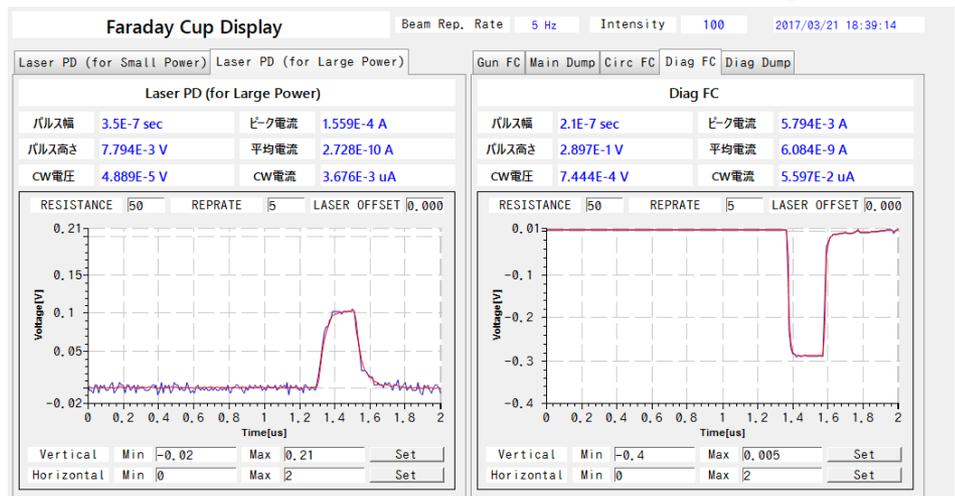
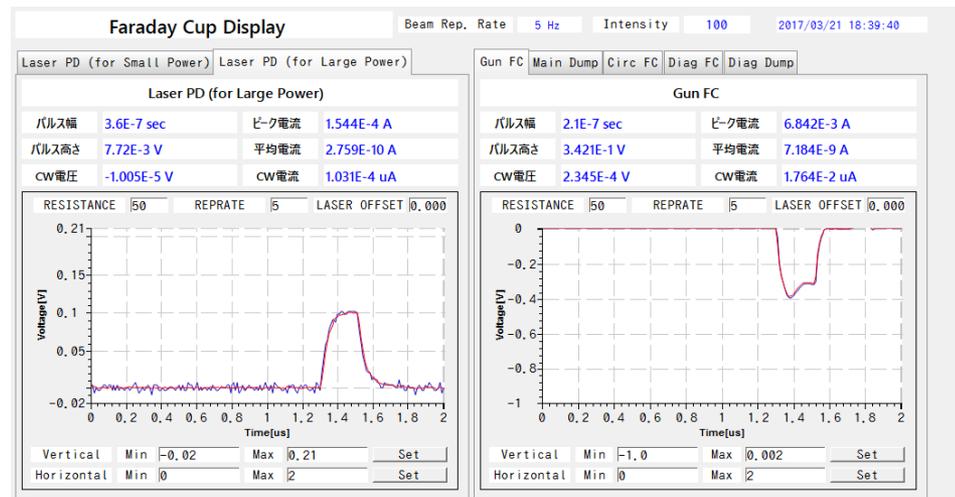
- INJ#1のみ最大加速位相のときのシングルキック応答を測定
- ついでにマッピングを実施
- 赤線: 空洞すべてデチューン (ZHV04からcam3までドリフト)
- 青線: INJ#1のみ最大加速位相
- マッピング結果
 - 水平・垂直方向ともに、INJ#1によって収束作用が働く。水平方向の方が収束力が大きく (垂直の収束力が弱い) ため、縦長になる
 - 水平・垂直で収束力は異なるが、マップ自体が大きく歪んでいるわけではなさそう



今後
これらの測定結果を基にして、
モデルとの比較、モデルの修正を行う

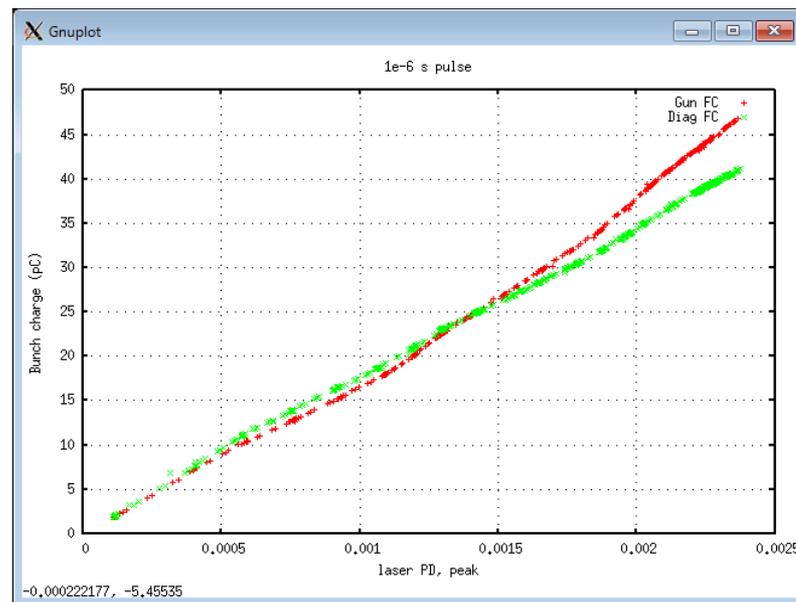
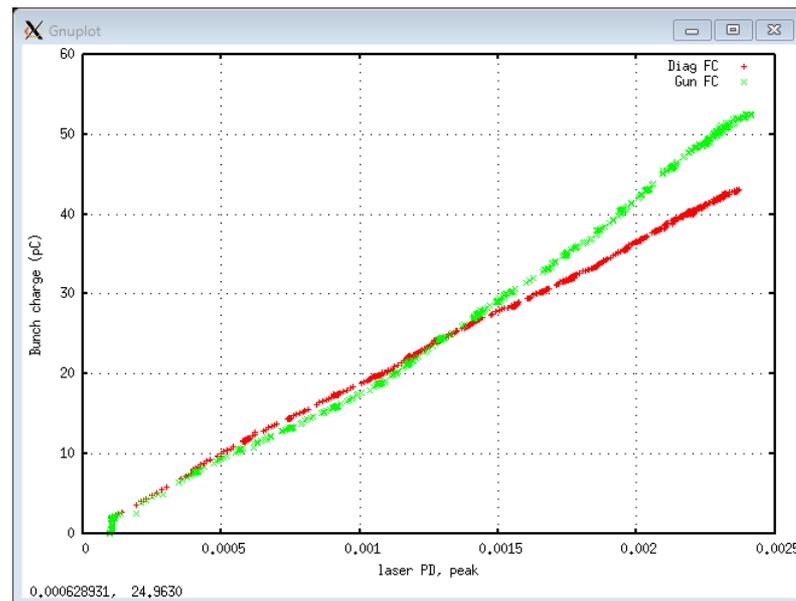
バンチ電荷の測定の課題

- Gun FC と Diag FC の比較
 - Diag FC だときれいな矩形に見えるのに、Gun FC だとパルスの先頭が高くなっているように見える
 - Gun FC 42 pC
 - Diag FC 36 pC
- ロスモニタで確認したが、1割程度になるような損失は見られなかった ⇒ 原因は何か？（測定系？波形を積分したらどうなる？）
- 波形が異なるのも気になる



Gun FC, Diag FCの比較

- レーザー出力を上げながら、それぞれの到達電荷量を測定した
- Diag FCの方が線形性があるように見える
- Gun FCでは20 pC以降で線形関係を上回る電荷量が出ているように見える
 - 上図: マクロパルス幅 200 ns
 - 下図: マクロパルス幅 1 μ s
 - (注: 上図と下図で色が異なっています...)
- 正確な電荷量を測定するために、これについても今後対策が必要
 - 本当に増えるか?
 - 波形の問題か?
 - 損失しているか?



レーザー出力を上げたときの影響

- 7.7 pC でレーザーシャッターオフ
- オフの状態でも、なんか中心にビームがいることを確認した

高バンチ電荷用にレーザー出力を上げたときシャッターを開けていないが、cam1を見ると、明らかに迷光が見えるようになった。

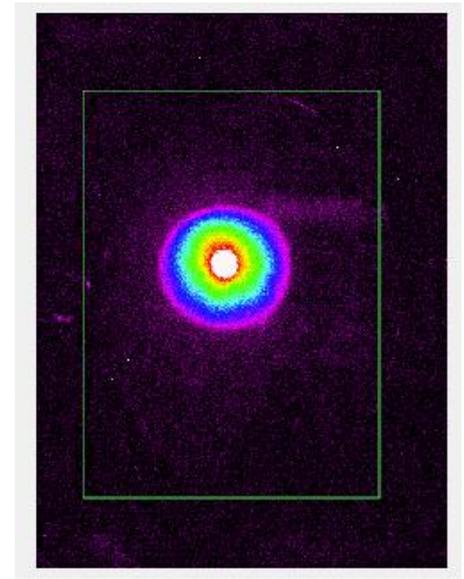
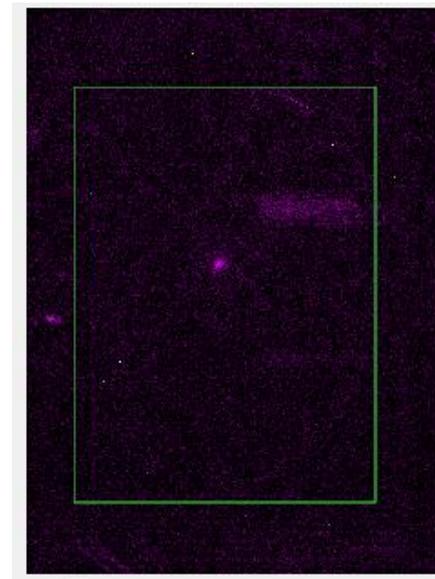
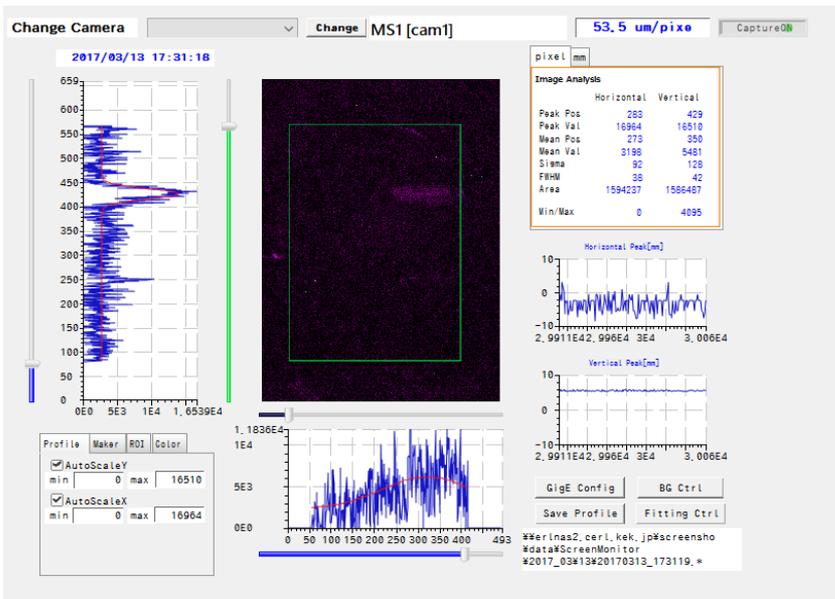
変更前は真っ暗だった

⇒ cam1で見える構造は、どういう経路かわからないが、レーザーの出力に依存していることがわかった(3/13, 17:32)

7.7 pC でレーザーシャッターオフ
オフの状態でも、なんか中心にビームがいることを確認した。

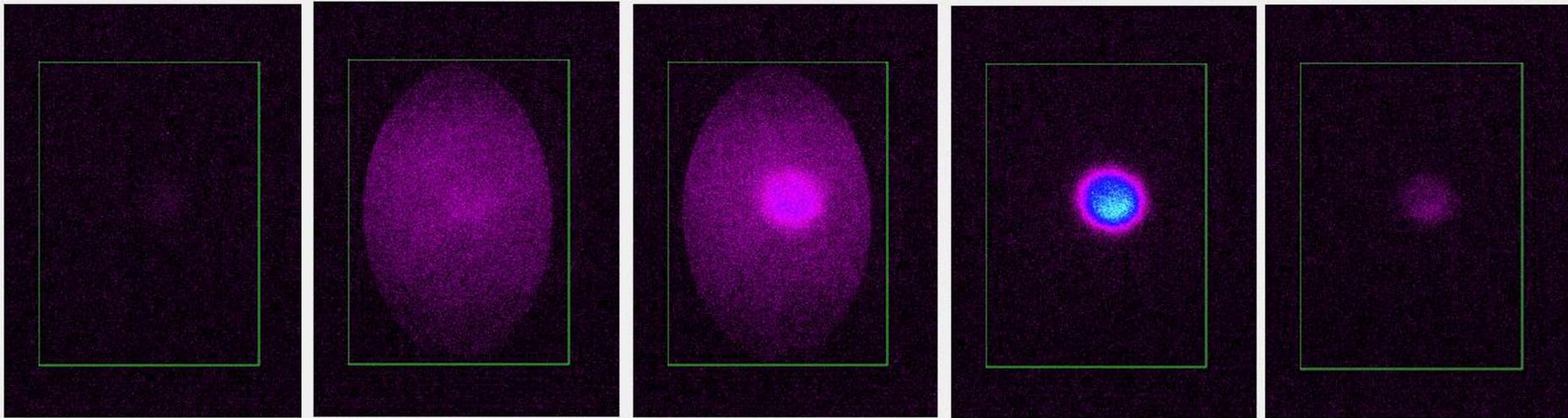
シャッター閉

シャッター開



カメラのdelayの影響

- cam1のdelayを変えながら、プロフィールを確認
- integration time : 10 (10 μ sなので、200 nsは十分に中に入っている)
- SL1 zeroの場合(7.7 pCだと広がるのが正解)
 - delay 1682 us \Rightarrow ビームはいない(下図の左から)
 - delay 1683 us \Rightarrow 広がったビームが見える
 - delay 1686 us \Rightarrow 中心にコアが見え始める
 - delay 1693 us \Rightarrow コアのみになる(広がったビームはいなくなる)
 - delay 1750 us \Rightarrow コアが薄くなるが、まだ見えている



delay 1683 us のプロフィールが、本当のプロファイルと思われる。
それ以降は、リングングによる電荷量が減った部分が見えていると思われる。
この後は、delay 1683 usで行った \Rightarrow 本当は何が起きているのか？

- 目次

1. cERLの現状の整理(おさらい)と今期の運転目的
2. 当初運転案
3. 実際の運転経過
4. Slit-scanによるエミッタンス測定結果
5. 今期の課題
6. まとめ

まとめ

- 2017年3月の運転では、最大バンチ電荷60 pCを目標に、可能な運転条件でのエミッタンス低減・バンチ圧縮の試験を行った
- 実際には、最大バンチ電荷 40 pC での試験となった
- 診断ラインにおけるslit-scan測定によるエミッタンスは、0.9 – 2.4 pi mm mrad と測定された(誤差評価はまだ途中) ⇒ 設計より2倍から5倍程度に悪化
- 診断ラインにおけるバンチ長は、ほぼモデルの通りとなった(布袋さんの報告) ⇒ 今回からモデルによる輸送条件設計時と同じ方法で位相調整を試みたがこれがうまく働いた
- 診断ラインにおけるエネルギー広がり測定については、基本的に分散のある位置でのビームサイズ測定になるため、元のベータatron関数を最小化する条件を簡単に作る手順をまとめる必要がある
- 周回部へ向けた輸送路調整では、ある程度プロファイルをまとめて輸送できる条件は作れたが、エミッタンスを低減する調整はまだ不十分(入射器モデルの修正、2山問題解消によるマッチング精度の向上)