

# compact ERLにおける 加速器モデルの改良

第16回 高輝度・高周波電子銃研究会  
2019年11月22日(金) 9時30分～9時50分  
高エネルギー加速器研究機構・つくばキャンパス  
2号館大会議室

宮島 司<sup>1,2</sup>

- 1, 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器理論グループ
- 2, 総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学専攻



# 話の流れ

- はじめに ～今回の報告内容を考えるきっかけ～
- 加速器のモデル(模型)と現実の加速器のずれと補正
- compact ERLでのモデル改良の例
  - 500 kV 高輝度光陰極DC電子銃500 kV
  - 入射器のモデル改良
- まとめ

# はじめに

- 第5回IFMIF研究会のときに、下崎さんから頂いたメールより
  - 今回の研究会のテーマは、「ビームダイナミクスと超伝導加速器技術」でビームダイナミクスの方のテーマは「計測からシミュレーションへのフィードバック」です。
  - 下崎の経験上(普遍的なものとも思いますが)、最初はシミュレーションに基づいてビーム運転用の設計値を作りますが、**実機でのビーム調整結果は必ずしもシミュレーション結果を再現しません。**
  - **いかにして、測定結果からシミュレーションコードへフィードバックをかけ、シミュレーションから新たなビーム運転用の設計値を作るのか、**というのが今回の研究会のテーマとなっております。
- 私も非常に共感する話題だった
  - シミュレーションで使う「モデル(模型)」と現実の加速器との「**ずれ**」をどのように**測定し**、どのように**補正し**、さらにどのように**モデル・設計条件を改良するか**
  - このことが、加速器を運転するときにもいつも気になること
  - 未だ模索しながらの話題になるが、これまでに考えて実践してきたことを紹介する
  - (私も他の加速器の経験談を聞いてフィードバックをかけたい)

# 加速器のモデル(模型)

- 加速器モデル(模型)の役割: 加速器のビーム(荷電粒子集団)の**ビームダイナミクスを理解し、適切な輸送条件を設計するために必要**
- 今回の出発点
  - 荷電粒子集団: 古典的な**点電荷の集まり**とする (見たい現象・スケールで表現の仕方は変わる、重心運動、エンベロープ、分布等)、N個の粒子集団
  - 加速器中では、荷電粒子集団が**電磁場( $E, B$ )あるいは電磁ポテンシャル( $\phi, A$ )の中で運動**
  - シミュレーション: このような条件での、荷電粒子集団の時間発展を追うこと

時間発展の記述 (N個の粒子の運動方程式と電磁場の時間発展方程式)

$$\frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = q_i(\mathbf{E}(\mathbf{r}_i, t) + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}(\mathbf{r}_i, t)) \quad i = 1 \sim N$$

それぞれの加速器の特長はどこに現れるか?

⇒ 荷電粒子が通過する領域の**電磁場( $E, B$ )に現れる**

- 加速器のモデル
  - この場合、電磁場( $E, B$ )の分布あるいはその変化をどのように記述するかということに相当
  - モデルと現実のずれ: **モデルと現実の電磁場分布と変化がずれていることに対応**
- 時間発展のずれの原因
  - モデルが現実の物理を含んでいない (航跡場、散乱、空間電荷効果、非線形効果等)
  - **モデルと現実の電磁場分布のずれ (製作誤差、設置誤差、予期せぬ電磁場源の存在等)**

# 加速器のモデル化

- 現実の加速器のあらゆる物理を取り込めたモデルがあればよい（そのシミュレーションで現象を理解できたかは置いておいて...）
- その上で全粒子の位置・運動量の時間発展がわかればよい
- しかし、あらゆる物理を取り込もうとすると、計算量・時間が現実的ではなくなってくる
- 一方で、我々が扱う場合には、支配的な物理のみをまずは取り込む、分布を平均した量（重心位置、ビームサイズ等）などを用いる方が便利なことも多い
- ⇒ 見たい現象・スケールでビーム表現の仕方・モデル化は変わる
  
- 高エネルギービームの場合 ( $\beta=1$ の近似OKのとき)
  - 粒子間相互作用のない単粒子集団として近似できる
  - ビームエンベロープ(CSパラメタ、 $\alpha$ ,  $\beta$ )で運動を記述するのが便利
  - 加速器の特長はどこに入るか？ ⇒ 転送行列
  - ただし、集団効果や非線形効果などが重要となってくる場合もあり、その場合には適切な物理を導入する必要がある
  
- 低エネルギービームの場合 ( $\beta < 1$ の場合)
  - 粒子間相互作用(空間電荷効果)が支配的になってくる
  - 射影エミッタンスが不変量でなくなり、一つのエンベロープでの記述では足りない
  - 電磁場分布(加速器の特長)の下での時間発展方程式を解くことになる

# 初期値問題と境界値問題

- 初期値問題
  - ある初期条件から出発して、その時間発展を追う
  - 線形加速器のオプティクス・個々の粒子の運動、シンクロトロン内の個々の粒子の運動等
- 境界値問題
  - 与えられた境界条件(付帯的な制限)を満たすような解を求める
  - シンクロトロンの線形オプティクス(周期境界)、加速空洞内の電磁場、電磁石の静磁場等
- 今回はlinacを対象として初期値問題を考える (cERLの例と繋げるため)
- 次の2つが重要となる
  - ① 初期値が正しく現実を反映しているか? (粒子生成点の条件、linac途中からの時間発展を考える場合には、区間入口の初期CSパラメタ( $\alpha, \beta$ )や位相空間分布)
  - ② モデルが時間発展を正しく表現しているか? (初期位置から求めたい位置までの電磁場分布やその変化を正しく取り込めているか?)
- 現実とモデルでずれがあるとき
  - ②が正しい場合(時間発展が適切にモデル化できている場合)には、①の条件(初期値)がずれていることになる
  - しかしながら、多くの場合は②にもずれがあるので、結局両方を修正していくことになる

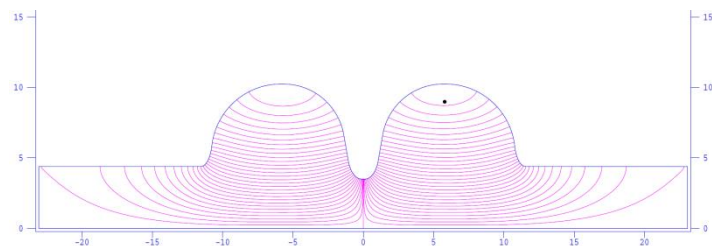
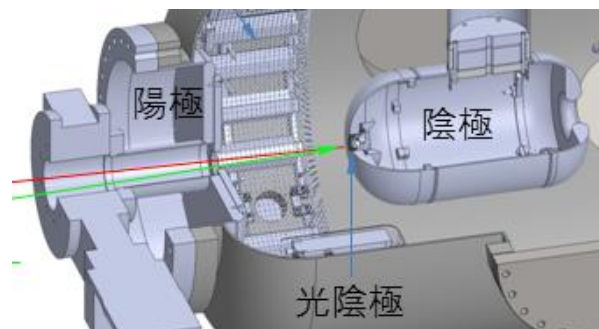
# どのようにずれを調べるか？

## ① 初期値が正しく現実を反映しているか？

- 最終的には粒子発生点における初期値を定めることが重要となる
- 時間発展を区間毎に考えて、その入口における初期値を考える場合も多い
- 方法： 区間入口のビーム測定(重心位置・角度の測定、空間・運動量分布の測定、waist-scan法等)によってある程度定めることができる

## ② モデルが時間発展を正しく表現しているか？

- 時間発展を区間毎に考えて、その区間のモデルを検証することができる
- 方法： 対象とする区間において、初期条件(位置、角度、エネルギー等)を変えたときの、区間出口における応答を測定し、モデルと比較する
- 例えば、電子銃のカソード面から出口までとか、超伝導空洞の入口から出口までとか



## compact ERL (cERL)の場合

1. シングルキック応答測定(単粒子とみなせる条件の下で、初期条件(入射位置・角度、エネルギー・位相等)を変えたときの出口における応答を測定)することで、ある区間の時間発展モデルを調べる
2. その上で、初期値(ビームの分布)を測定して、ビーム集団の時間発展を調べている

区間毎

「単粒子」⇒「集団」の手順

# ずれの補正

- 2つのアプローチが考えられる

- ① 現実の加速器を理想のモデルに近づける方向
- ② モデルを現実の加速器に近づける方向

- ①現実の加速器を理想のモデルに近づける方向

- 現実の加速器を構成する機器に対しては、**機能による制限、予算による制限によって制約を受けるため、実現が難しい場合が多い**
- 例：超伝導加速空洞内の電磁場を理想的な円筒対称分布にしたい ⇒ 入力カプラやHOMカプラを配置するとどうしても対称性が破れてしまう
- 区間分けして考えた場合は、下流の区間の入口で、初期値が合っていれば良いとも考えることができる（その上流区間で設計の初期条件になるように合わせ込めばよい）
- 軌道補正はこの考えで行けるが、空間電荷効果を含んだ集団（射影エミッタンスの時間発展、ハローの成長等）を考えたときには、一部の初期値しか合わせ込めないことも多い

- ②モデルを現実の加速器に近づける方向

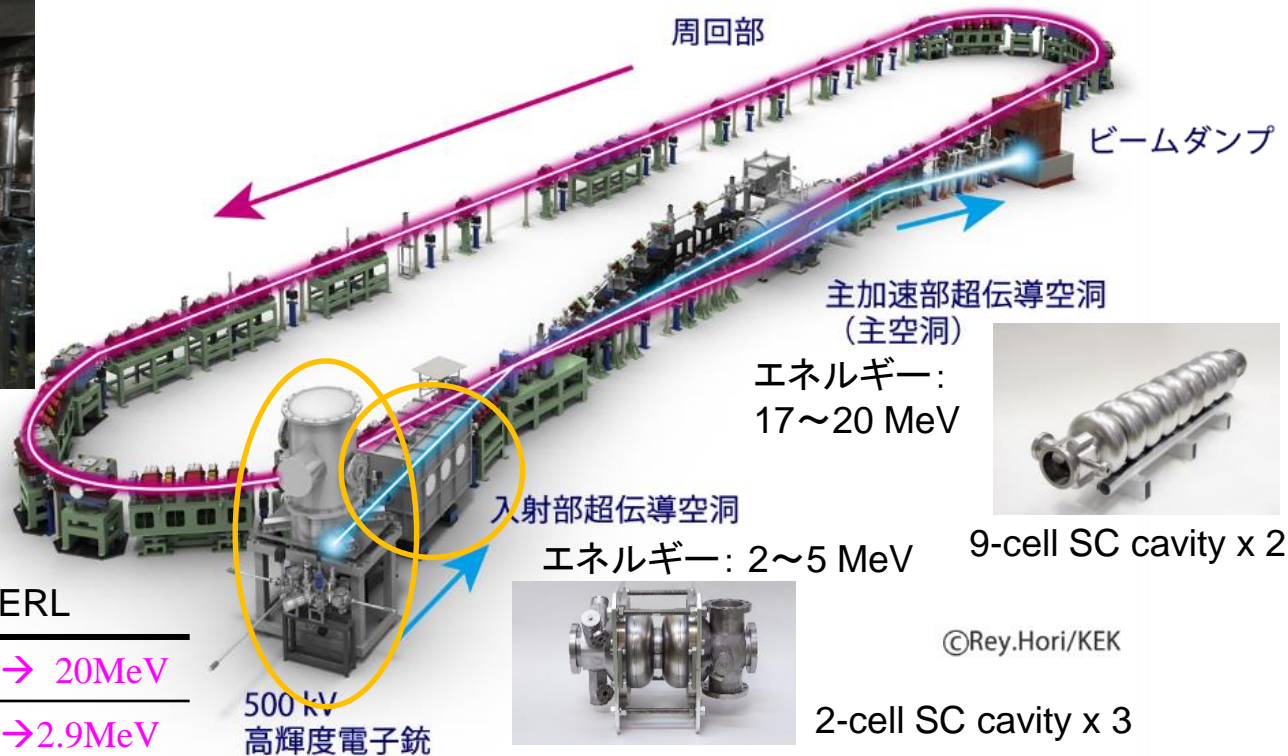
- **設計時の理想的な条件とは異なるため、ビーム性能が制限を受けるかもしれない**
- 例：ある区間における転送行列が現実からずれている ⇒ シングルキック応答測定の結果をモデルに反映させ転送行列を修正
- 現実の加速器のすべてのずれ（誤差）をモデルに取り込むのは難しい（誤差の原因が時間とともに変化する場合とか）
- 現実の装置を、より正確にモデルに取り込む（超伝導空洞のカプラの影響をモデルに取り込む等）

cERLの場合 { 誤差磁場の除去、軌道や線形オプティクス修正は①で対応  
明らかにモデルで取りこぼした効果や、集団効果については②も実施



# compact ERL (cERL)

- 荷電粒子: 電子
- 加速器の形状: エネルギー回収型線形加速器、平均電流: 1 mA (実証済み)



Design parameters of the cERL

Nominal beam energy	35 MeV → 20MeV
Nominal Injector energy	5 MeV → 2.9MeV
Beam current	10 mA (initial goal) 100mA (final)
Normalized emittance	0.1 – 1 mm·mrad
Bunch length (bunch compressed)	1-3ps (usual) 100fs (short bunch)

今回紹介する例: ビームダイナミクスの測定・補正  
1. 500 kV高輝度電子銃

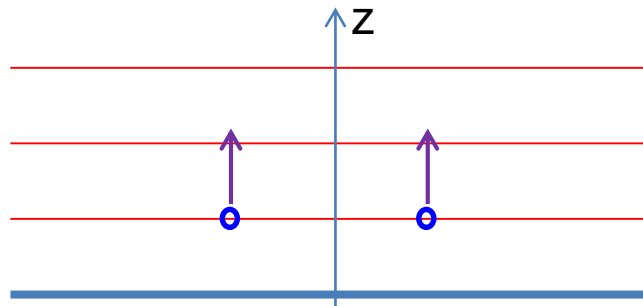
# 1. 500 kV高輝度DC電子銃

## compact ERL (cERL)の場合の補正

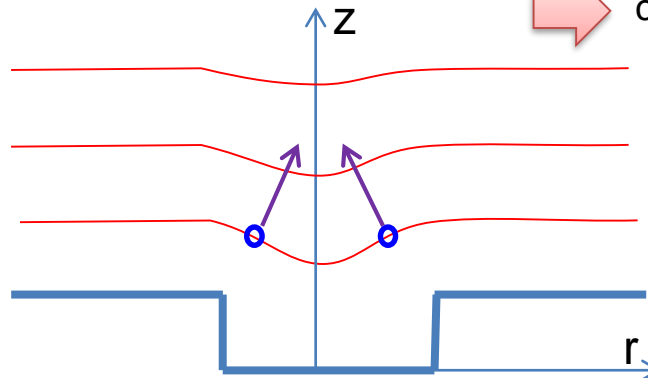
1. シングルキック応答測定(単粒子とみなせる条件の下で、初期条件を変えたときの出口における応答を測定)することで、ある区間の時間発展モデルを調べる
2. その上で、初期値(ビームの分布)を測定して、ビーム集団の時間発展を調べている

- DC電子銃のビームダイナミクス
  - 電極形状により電子ビームに収束あるいは発散力を与えることができる
- 電子銃での収束・発散力の起源
  - 電極形状に起因する静電場の分布

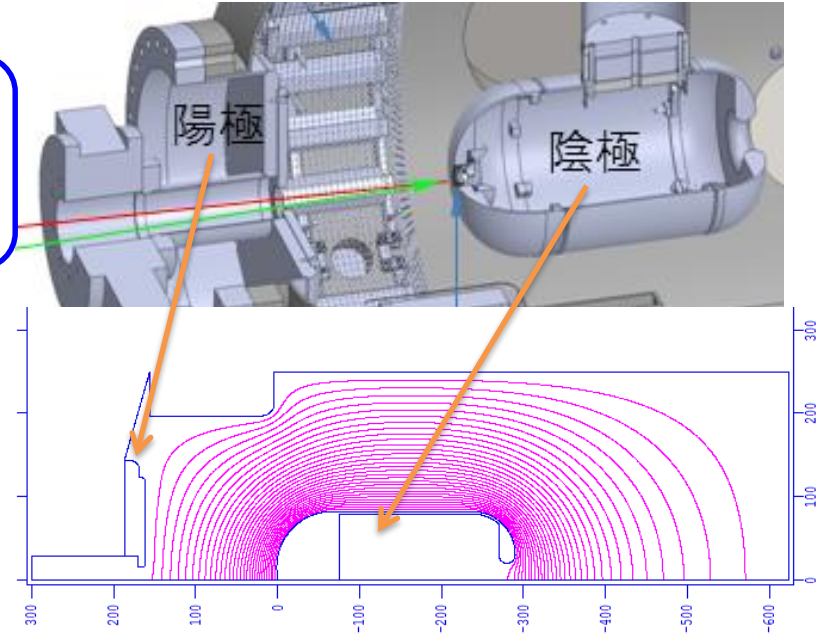
(1) 完全に平板の場合  
等電位面も陰極に対して平行でr方向の電場成分はなし(収束・発散力なし)



(2) 陰極面に凹みがある場合  
中心部分で電場が歪み、r方向の電場成分(収束力)が生じる

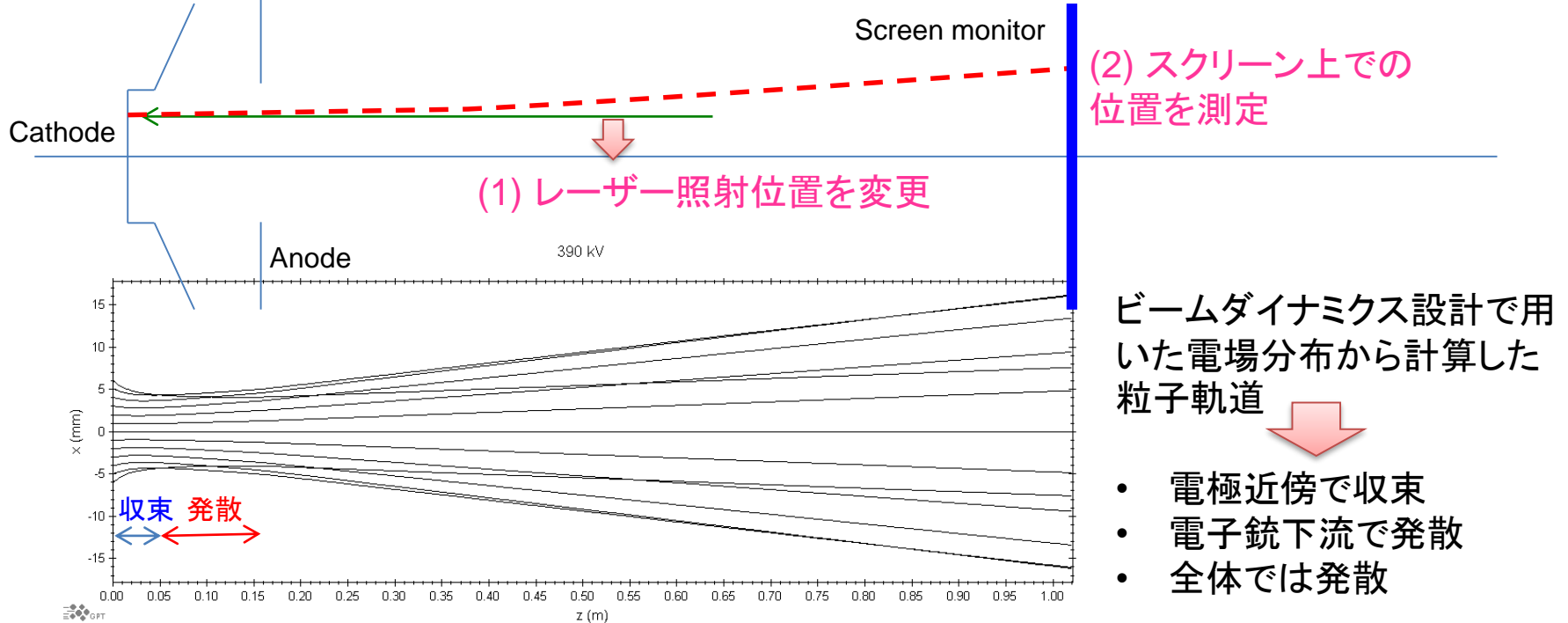


cERLの電子銃はこの形状



# 第一段階： シングルキック応答測定

- 単粒子とみなせる条件： バンチ当たりの電荷量を下げて空間電荷効果が効かない条件で、スクリーン上のビーム重心位置を測定
- 初期条件の変え方(シングルキックの与え方)： カソード面のレーザー照射位置(ビームの初期位置)を変更
- カソード面のレーザー照射位置を変えながら、下流のスクリーン上でのビーム位置の変化を測定



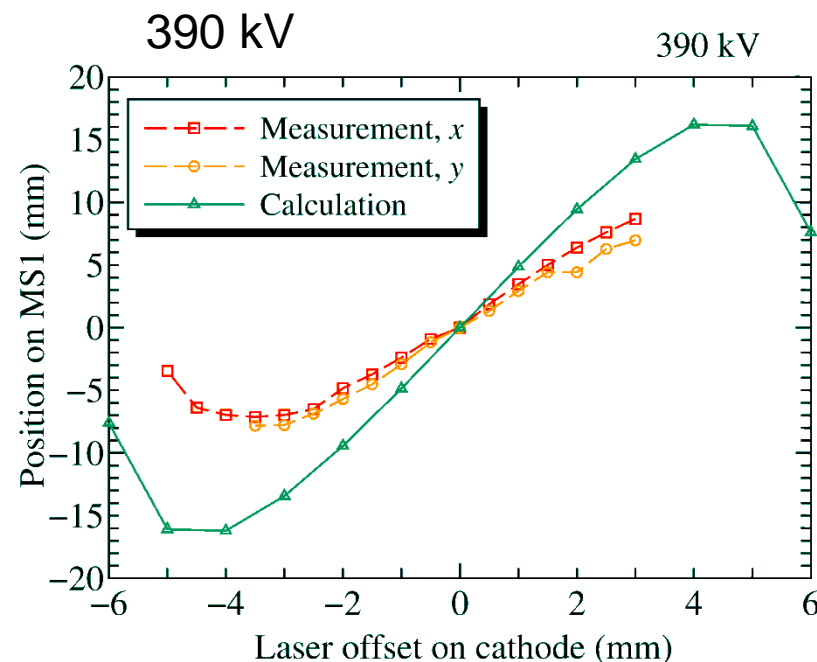
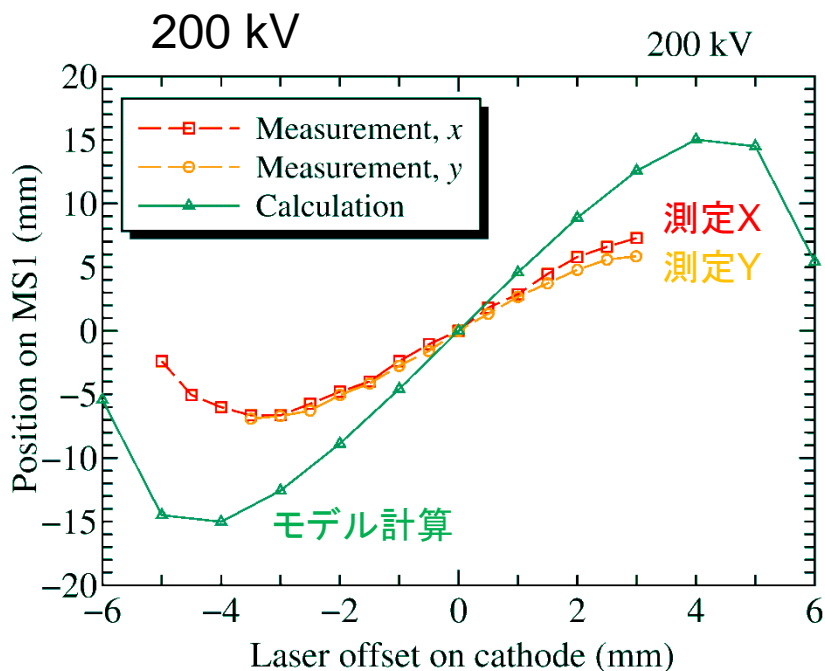
ビームダイナミクス設計で用いた電場分布から計算した粒子軌道

- 電極近傍で収束
- 電子銃下流で発散
- 全体では発散

電子銃電圧を変えて、収束力を測定したモデルとの一致具合はどうか？

# シングルキック応答測定結果

- モデル(理想的な電極形状をもつ)と測定結果で結構ずれがある...



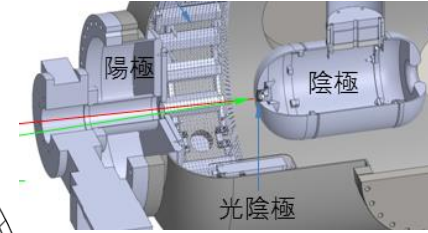
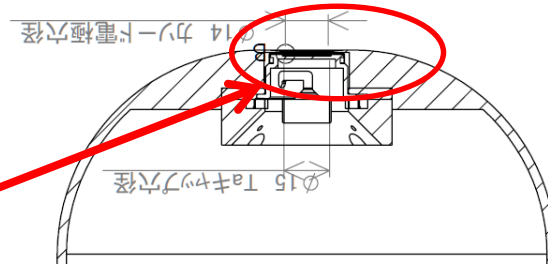
- このときの測定では、水平と垂直方向での応答はほぼ同じであった ⇒ 電極は円筒対称形状
- 2次元モデル(Poisson/Superfish, 円筒対称)でこの結果を再現することを考えた ⇒ 収束力の差は、電場分布に由来しているので、電極形状の影響を検討

さらに運転してわかったこと(現在の課題)

- のちにカソードパックの設置状況によって、水平・垂直での収束力が変わることが判明
- これは、Poisson/Superfishの2D modelでは記述できない
- 現在電子銃3Dモデルを作成することを検討中

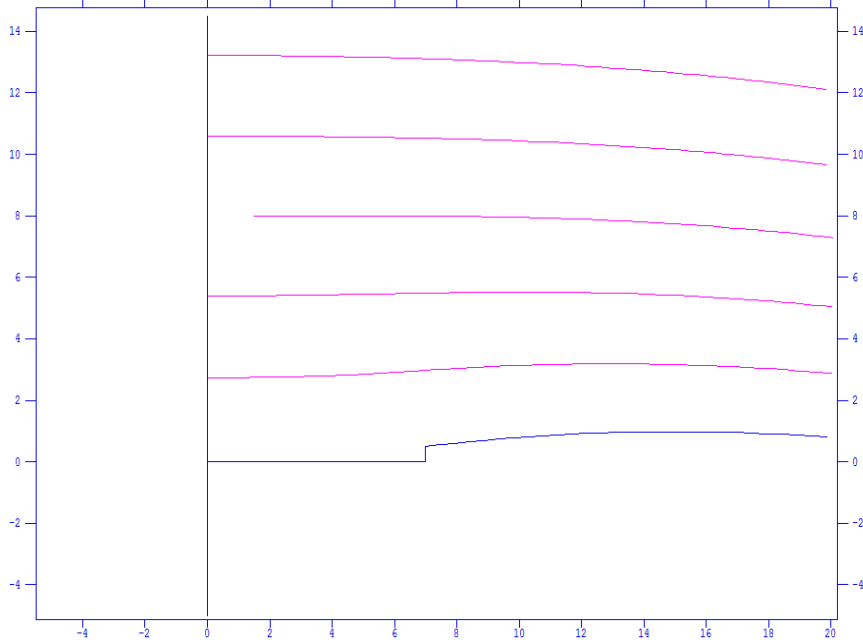
# カソード近傍の電極形状

- カソード近傍のわずかな違いが下流では大きく見える(エネルギーが低いため)
- 電極の構造: 電極と半導体のカソードキャップとの間に**取り外しのための隙間がある**
- いくつかの凹みを計算してみる(凹み = 0.5, 0.9, 1.0, 1.2 mm)



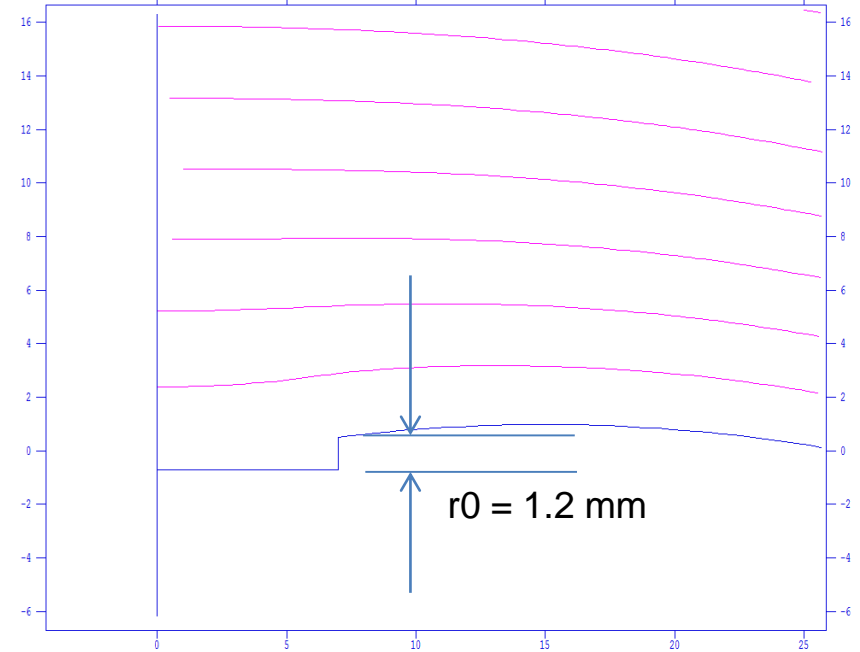
凹み:  $r0 = 0.5$  mm (original)

Electrostatic Problem, 500-kV electrodes



凹み:  $r0 = 1.2$  mm

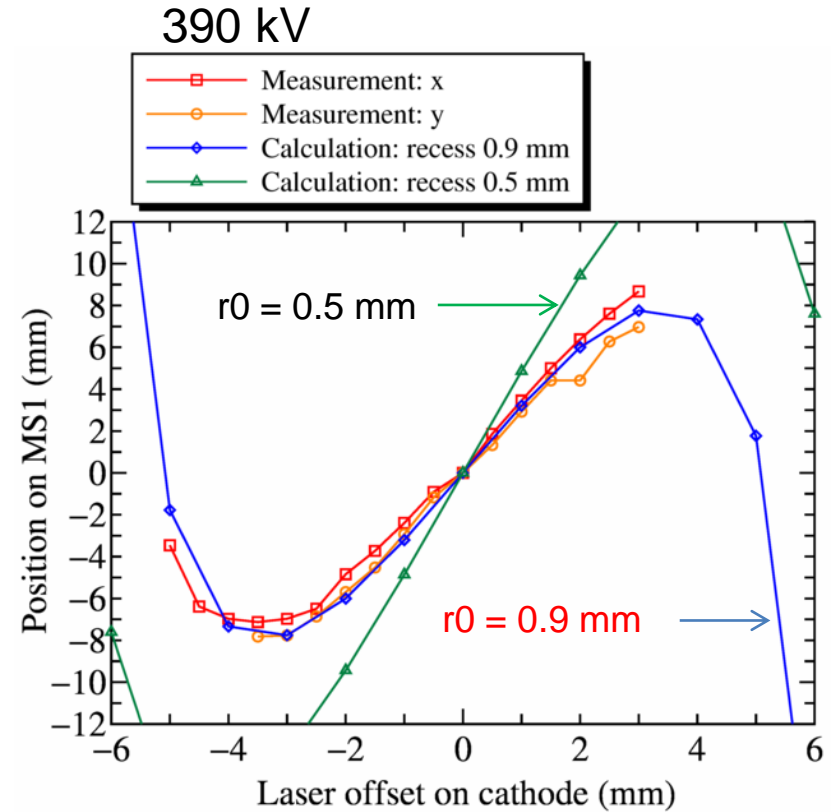
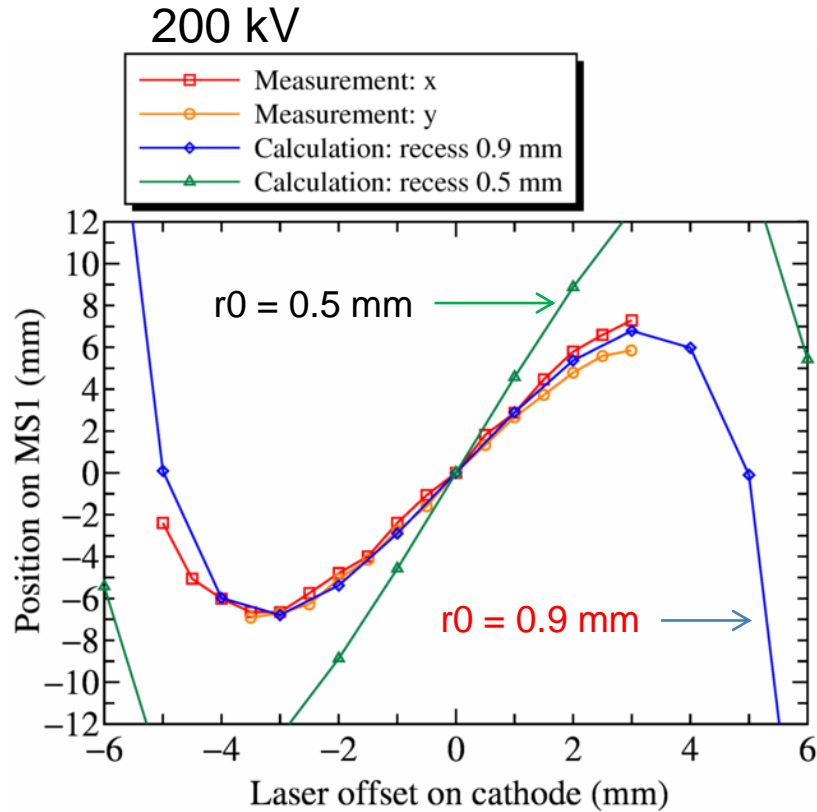
Electrostatic Problem, 500-kV electrodes



モデルの改良 ⇒ シングルキック応答測定結果を最もよく再現する、凹み量を定める

# 電子銃電極形状の補正

- 凹み0.9 mmのときが、最も良く測定結果を再現した  
⇒ これ以降、修正した電子銃モデルを用いてシミュレーションを実施

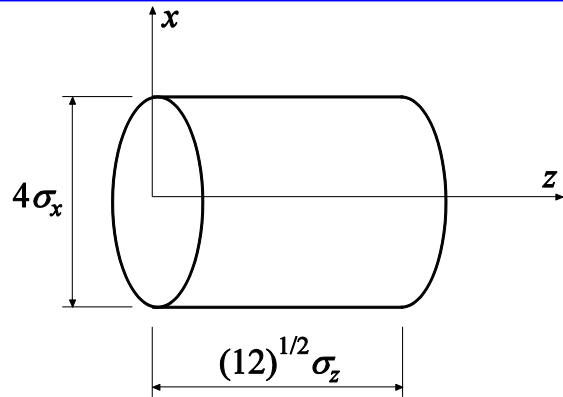


- 第一段階(シングルキック応答測定による時間発展補正)はどうなったか？
  - 凹み0.9 mmモデルでほぼ現実(電子銃区間の時間発展測定の結果)を再現できるようになった
  - しかし、カソードパックの個性によってわずかに凹み量が変わることがその後判明したため、カソード交換後には再測定、モデル修正を行っている

# 第二段階： ビーム分布の初期値

- 単粒子による測定によって、電子銃区間(カソード面から電子銃出口)の時間発展モデルを改良し、現実をある程度再現することはできた
- これで十分か？ ⇒ No
- ビームは、1個の荷電粒子ではなくて分布を持つため、区間入口の分布の初期値を確認し、**モデルにおける初期値**を修正する必要がある

## 励起レーザーの分布 (設計初期に使用:ビア管型モデル)



分布は初期エミッタンスにも影響する

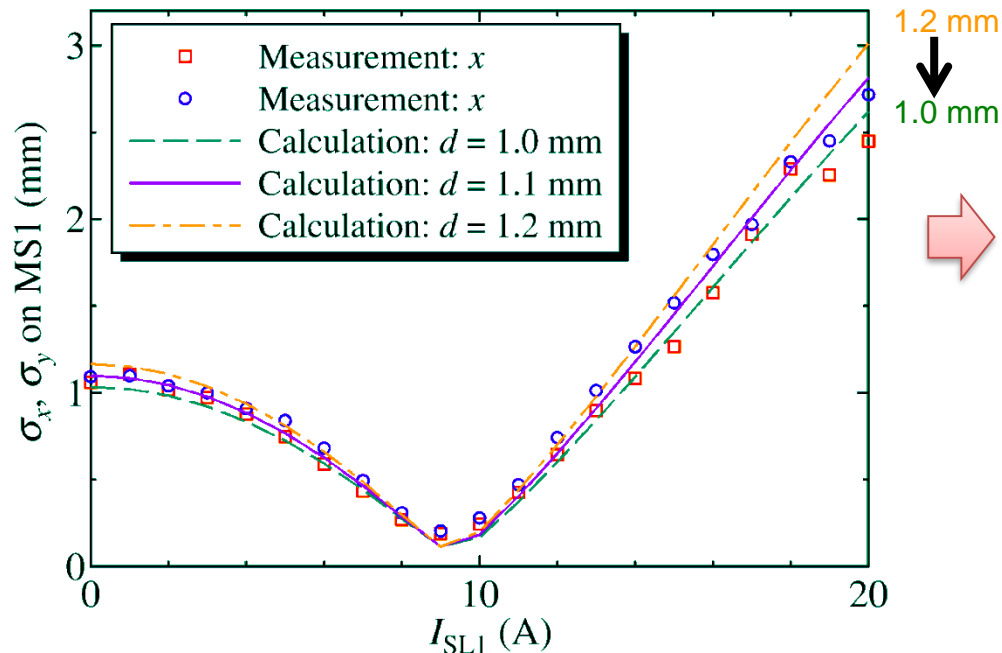
$$\epsilon_n = \frac{d}{4} \sqrt{\frac{k_B T}{mc^2}}$$

- 電子銃区間におけるビーム分布の初期値
  1. 横方向(水平・垂直面内)の初期レーザー分布 (初期レーザー直径)
  2. 時間方向の初期レーザー分布 (レーザーパルス長、時間)
  3. バンチ電荷
- 分布の時間発展はより複雑
  - バンチ電荷が低く、空間電荷効果を見捨てる時には、横方向と時間方向は独立して考えることができる
  - バンチ電荷が上昇すると、横方向・時間方向が**空間電荷効果によって相互に影響し合うため複雑になる**
- 次の段階 ⇒ 低バンチ電荷におけるレーザー初期分布の横方向分布の決定
  - そのあとに、バンチ電荷を上げて、時間方向分布を決めている (理想的には6次元位相空間分布を測定・モデルへ反映したい)
  - しかしながら、空間電荷効果が支配的な場合には、まだ完全にモデルを修正できていない

# モデルの初期横方向分布の補正

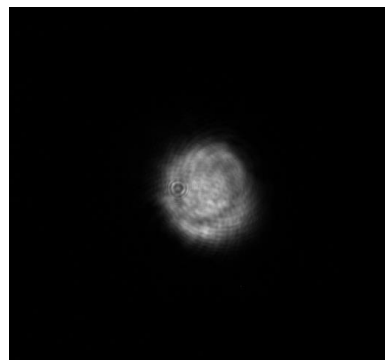
- ソレノイドスキャンを最も良く再現するレーザー分布直径を求めた

$$k_B T = 120 \text{ meV}$$



- $d = 1.1 \text{ mm}$  のときに、最も良く測定結果を再現した  
⇒ この値を初期値として定めた
- 仮想カソード面におけるレーザー初期分布の値ともほぼ一致
- ただし、この値もやはり運転条件に依存するため、加速器立ち上げ時には再確認が必要

仮想カソード面におけるレーザー分布直径の測定結果



Vertical size: 1.09 mm  
Horizontal size: 1.02 mm  
Average size: 1.06 mm

- 電子銃区間は、2段階のモデル補正(1. シングルキック応答測定、2. 集団の初期値測定)によって、加速器モデルの補正を行い、ある程度うまくいっている
- しかし、空間電荷効果を入れたときの再現性や、電子銃電極形状の3次モデル化、ソレノイド磁場歪みの補正などやるべきことはまだ多い

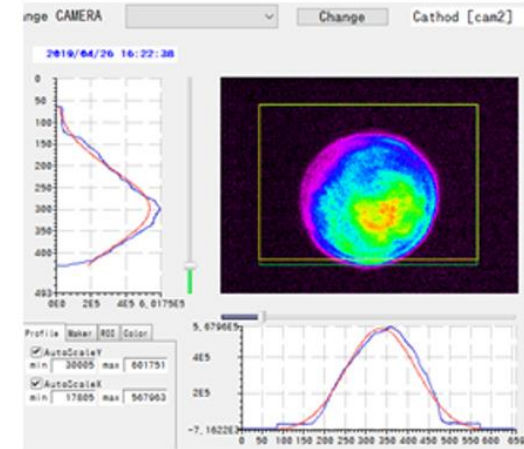
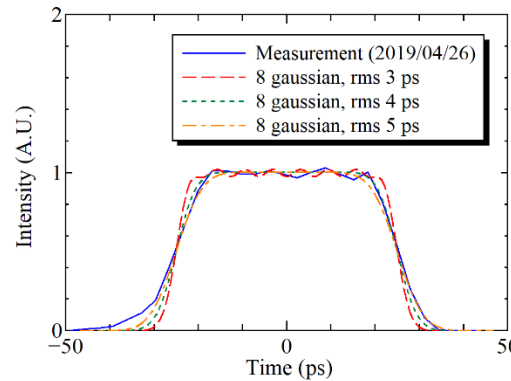
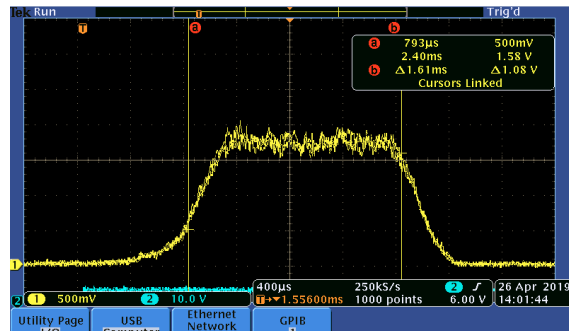


# その他の加速器モデルの改良

- 空間電荷効果の弱い低バンチ電荷ではある程度モデルで現実を再現できるようになってきたが、空間電荷効果が支配的な高バンチ電荷 (60 pC) では、まだモデルと現実のずれが大きい ⇒ モデル改良を続けている

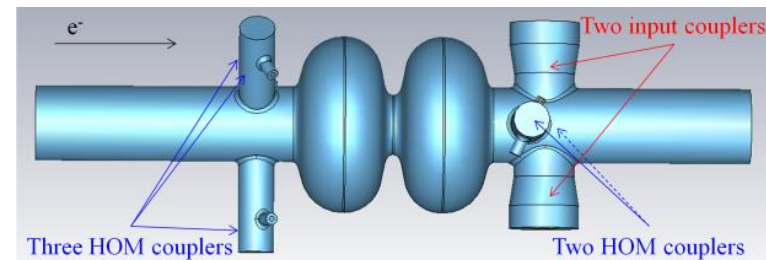
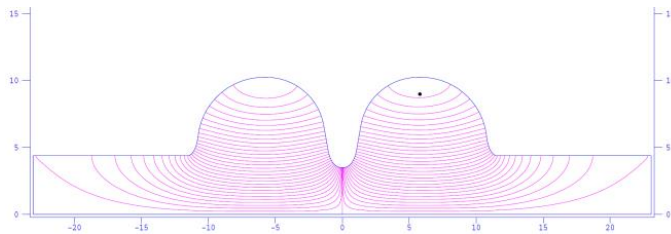
## 初期レーザー分布 (カソード面上における初期電子分布)

- 横方向分布: 一様円筒分布 ⇒ 測定されたXY面上のレーザー分布
- 時間方向分布: 矩形分布 ⇒ 測定された時間方向分布



## 入射空洞モデル

- 2D model (Poisson/Superfish) ⇒ 3D model with input and HOM couplers (CST)



## 四極電磁石

- Hard edge model (GPT original) ⇒ New model with fringe field.

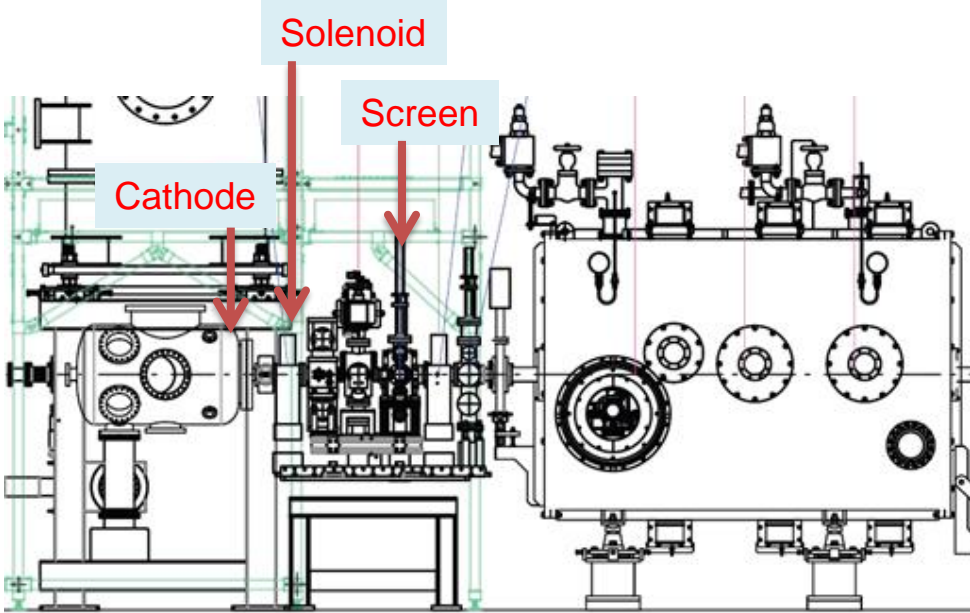
# まとめ

- (あたり前なことしか言っていないような気もするが) 加速器のモデル(模型)と現実の加速器のずれと補正について、cERLで実施してきたことを紹介した
- モデルと現実のずれは、電磁場分布のずれ、あるいは必要となる物理がモデルに入っていないこと、が主要な原因となる
- cERLはlinacなので、区間分けした初期値問題として、その区間の時間発展の測定・モデル補正、ビーム分布に対する初期値の測定・補正の2段階で実施している
- 電子銃を例として、測定・モデル補正について紹介した
  
- その他cERLにおいて実施しているモデル改良
  - 超伝導加速空洞のモデル修正
  - 周回部における線形オプティクス補正、軌道補正(シングルキック応答測定)
  - 周回部区間における横方向分布初期値の測定・補正
  - 残留磁場の低減 (CCG真空計の漏れ磁場の遮蔽、ソレノイド内磁場歪みの補正の試み等)  
⇒ 現実をモデル(理想的な条件)に近づける方向
- ただし、空間電荷効果等の集団効果についてはまだ未解決な部分もあり、今後も継続した測定・モデル補正が必要となる
  
- これまでやっていること
  - モデル作成 ⇒ 輸送条件の設計 ⇒ 実際の加速器に設定 ⇒ ずれの補正 ⇒ 補正しきれないのでモデルを修正 ⇒ 輸送条件の再設計 ⇒ 実際の加速器で試験 ⇒ ...

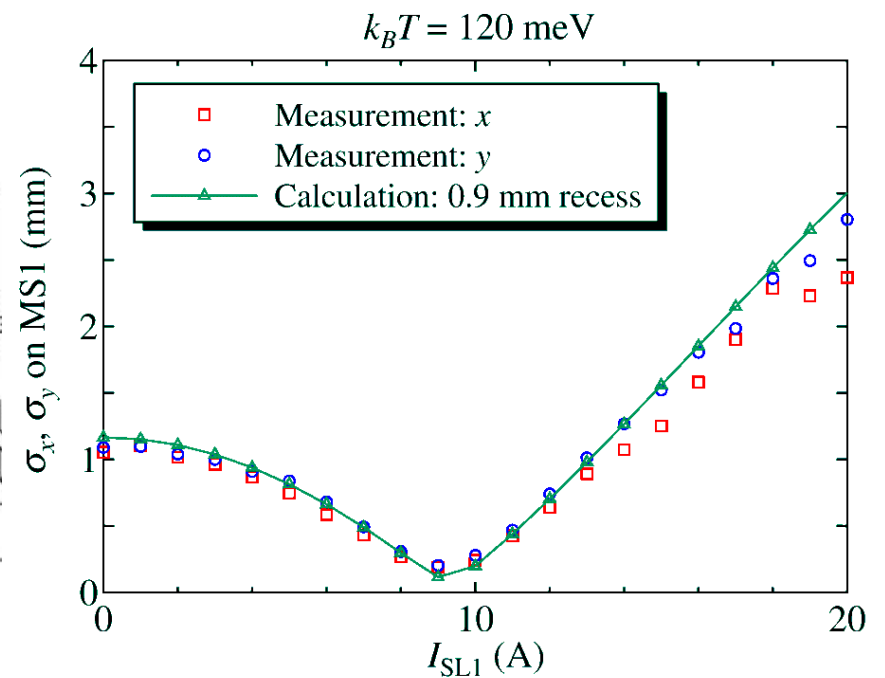
# Backup slides

# 初期横方向分布の測定（低バンチ電荷）

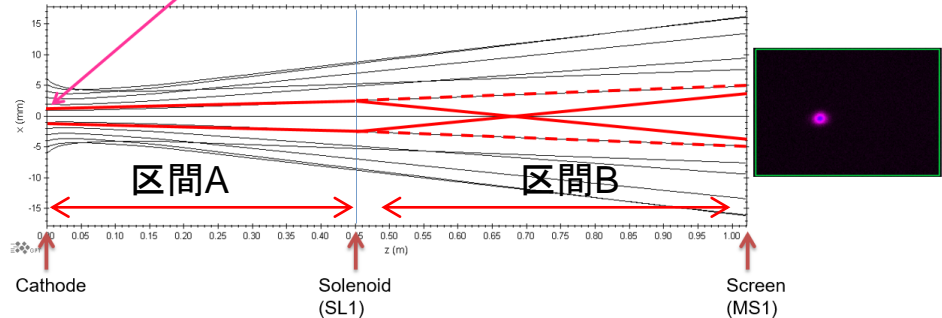
- 電子銃出口下流に設置されたソレノイド電磁石を変えながら、ビームサイズの変化を測定（ソレノイドスキャン）
- 時間発展はシングルキック応答測定で補正されている(Aの区間)ので、(Bの区間の)分布の初期値の測定・推定をすることになる



## 測定結果とモデル計算(凹み0.9 mm電極)



Initial transverse beam size depends on initial laser spot size.

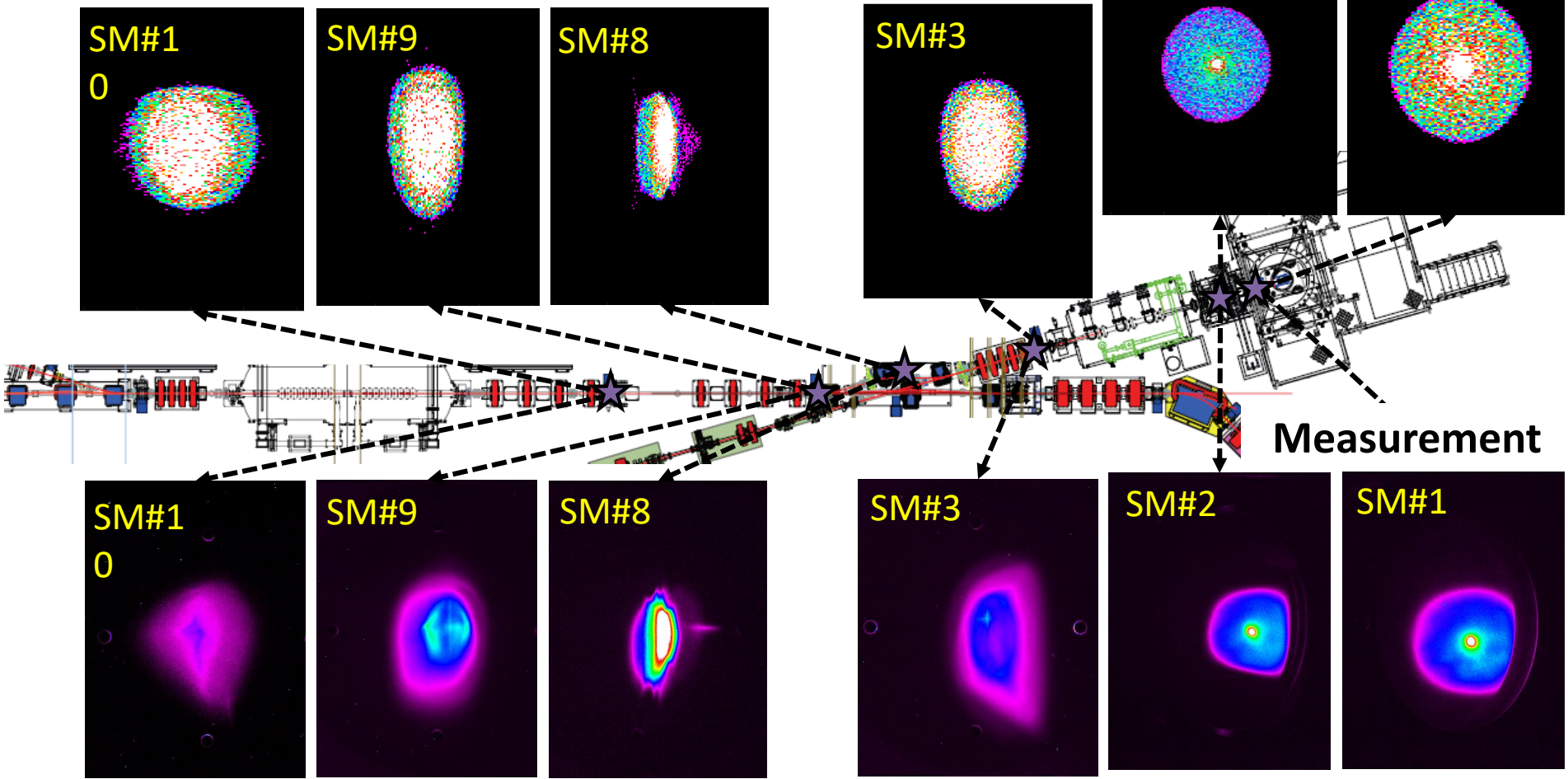


- 凹みを補正したモデルでソレノイドスキャン結果をある程度再現した
- が、少しずれが残っているので補正(初期レーザー直径を自由変数とする)

# Beam profiles after optics tuning

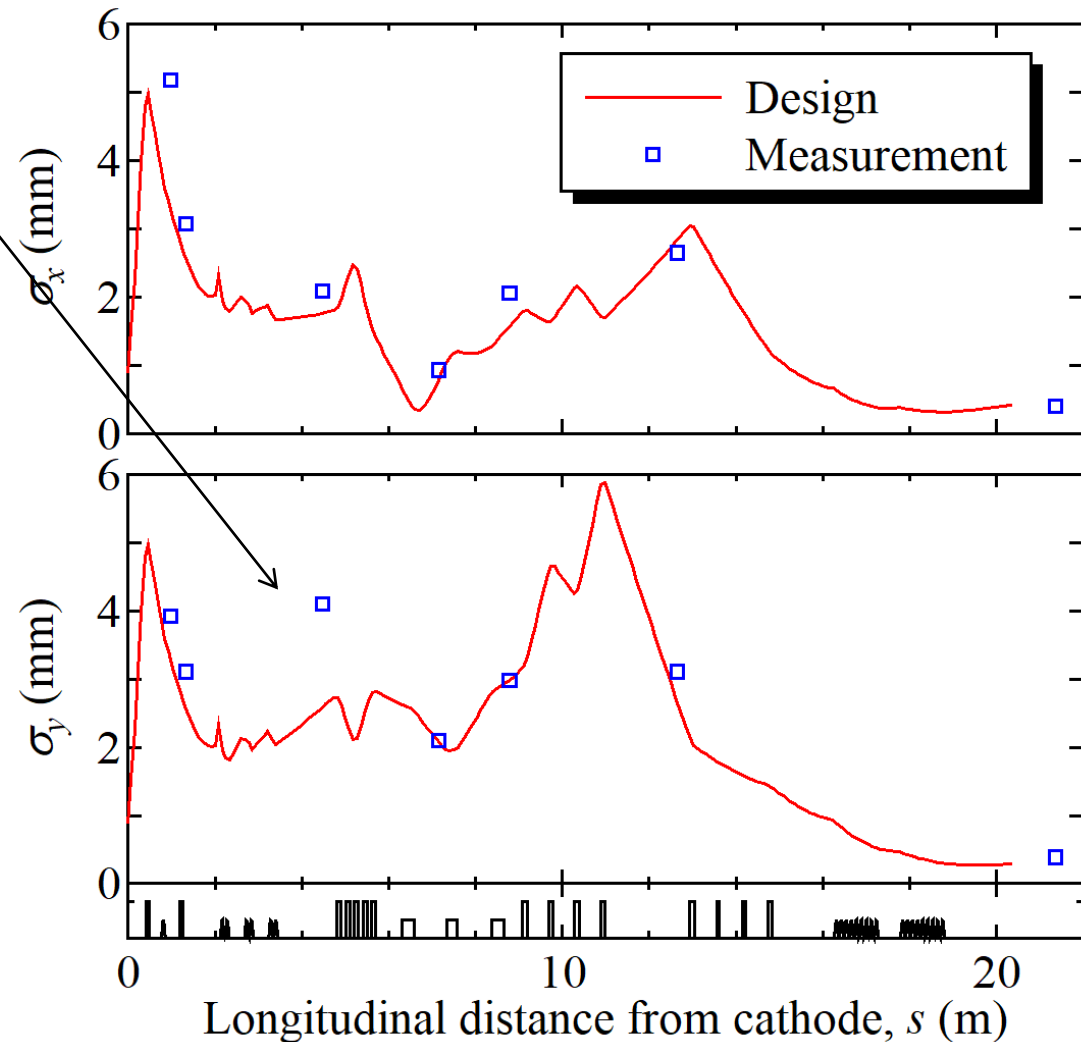
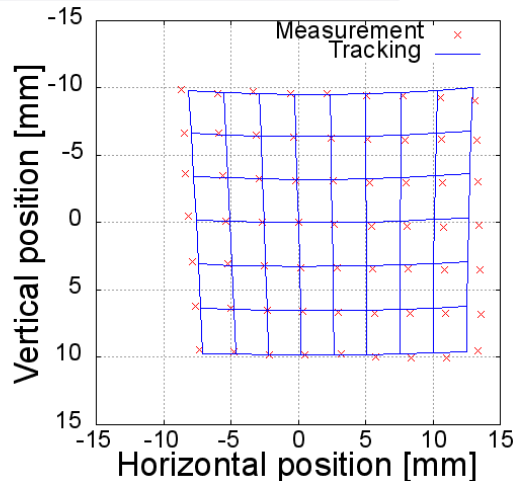
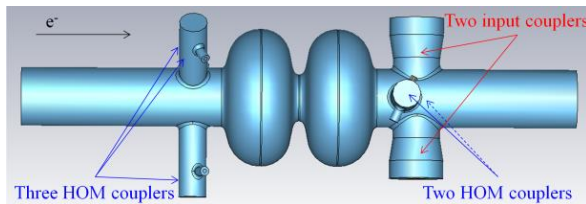
by courtesy of O. Tanaka

## Simulation with longitudinal halo



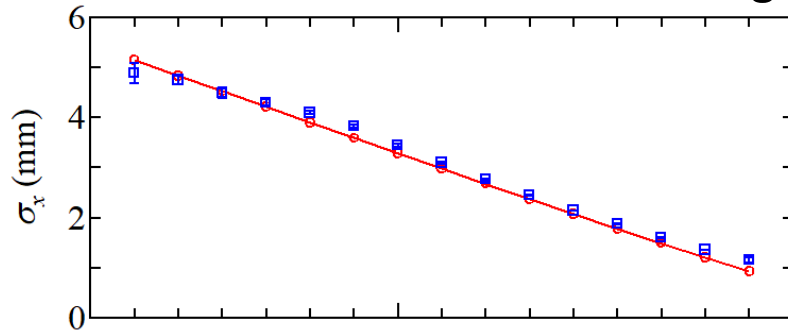
# Measured beam sizes in injector

- The measured beam sizes well agreed with the design beam sizes except for the exit of injector.
  - At the exit of injector, the measured vertical beam size is larger than the design.
  - The beam size at the exit of injector is sensitive to the injection position and angle.
- ⇒ next study topic



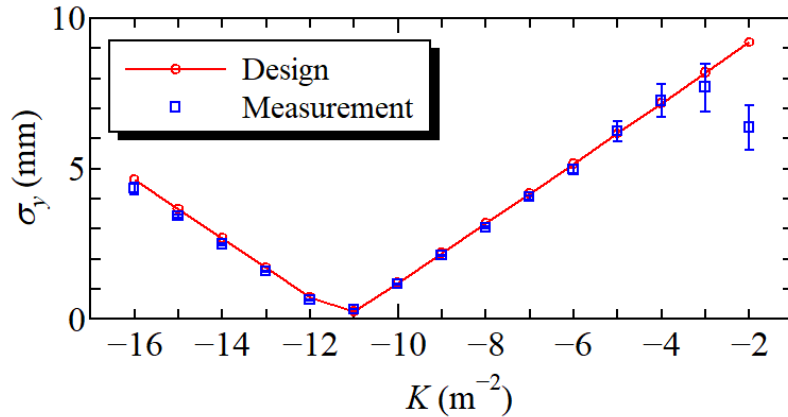
# Emittance for Main Linac and recirculation loop

- From Q-scan result at Matching point 2 (MP2), we calculate transverse emittance.



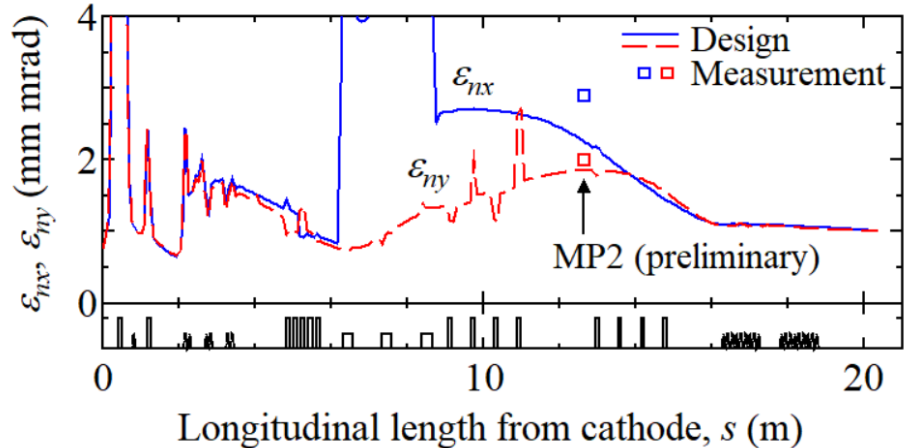
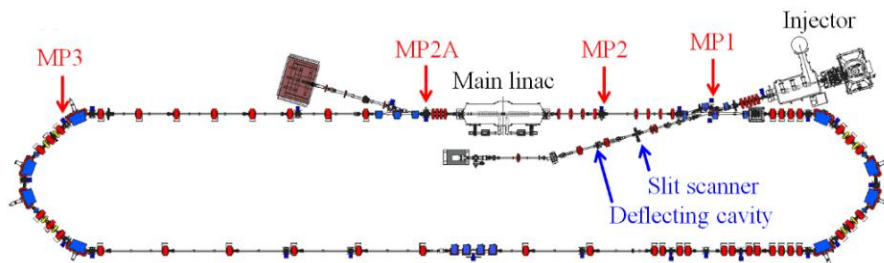
Horizontal emittance at MP2  
(Preliminary result)

- Design:  $2.26 \pi$  mm mrad
- Measured:  $2.89 \pi$  mm mrad



Vertical emittance at MP2  
(Preliminary result)

- Design:  $1.86 \pi$  mm mrad
- Measured:  $1.99 \pi$  mm mrad



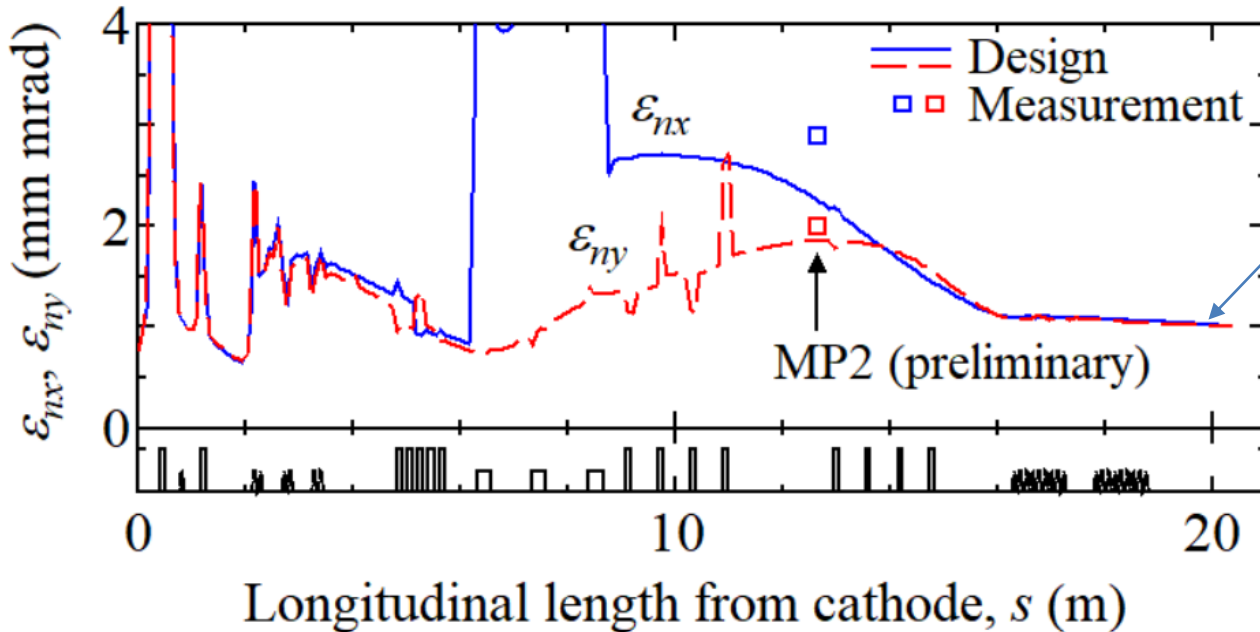
The vertical emittance is good.

The difference of horizontal emittance still remains, but not so large.

# Cam11 エミッタンス補償

- 2019年10月の運転で、主空洞直下流のエミッタンスをcam11で測定した(エミッタンス補償が成り立っているか確認するため)
- しかし、合流部出口で大きくなったエミッタンスを主空洞出口までに小さくする設計条件だが、これがなりたっていないと思われる

2019年6月の結果



Cam11 で小さくなるのが設計条件だが、この条件にできていない

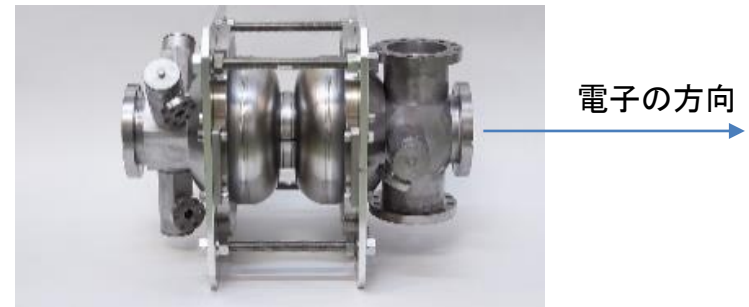
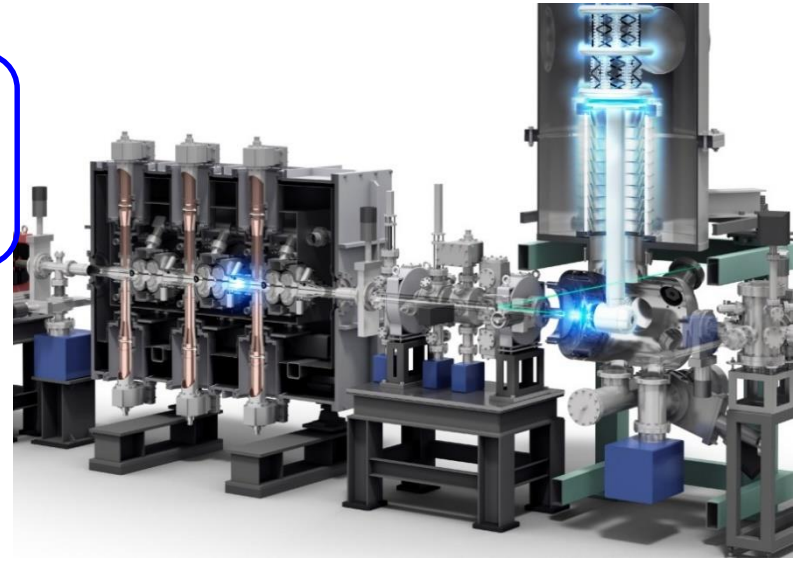
○やりたいこと  
そもそも合流部出口でエミッタンスが増えない輸送条件を作れないか？



## 2. 入射部超伝導加速空洞

### compact ERL (cERL)の場合の補正

1. シングルキック応答測定(単粒子とみなせる条件の下で、初期条件を変えたときの出口における応答を測定)することで、ある区間の時間発展モデルを調べる
  2. その上で、初期値(ビームの分布)を測定して、ビーム集団の時間発展を調べている
- 入射超伝導空洞のビームダイナミクスに対する影響
    - 電子の速度が遅いため、そもそも加速時の位相スリップの効果をきちんと考慮する必要がある(転送行列の修正 ⇒ 2018年ビーム物理研究会で紹介)
    - さらにエネルギーが低いため、電磁場の歪みの効果が顕著に見える
  - 入射超伝導空洞の電磁場歪みの起源
    - 入力・HOMカプラー(布袋貴大氏、2018年加速器学会年会)
  - 横方向のダイナミクス: シングルキック応答測定によって、入射超伝導区間(入口から出口)の時間発展モデルの修正
  - 縦方向(時間方向)のダイナミクス: 初期値を入射タイミング(入射時刻)として、応答測定を行い、時間・エネルギーのダイナミクスのモデルを修正



# 入射超伝導空洞のモデル

- 課題： 入射超伝導空洞に円形ビームを入射しても縦長で出てくる...
- 2017年運転まで： 2次元モデル(Poisson/Superfish)、カプラーなしのモデル(円筒対称)
  - プロファイルの歪み(エンベロープ)は下流の四極電磁石で補正していた

2-cell空洞1台のみで加速した時の、空洞出口のプロファイル

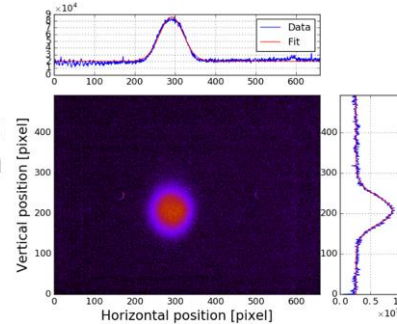
- 加速なしではほぼ円形
- 加速すると縦長楕円

RF off  
⇒ 円形

$$\sigma_x = 1.7 \text{ mm}$$

$$\sigma_y = 1.9 \text{ mm}$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_x} = 1.1$$

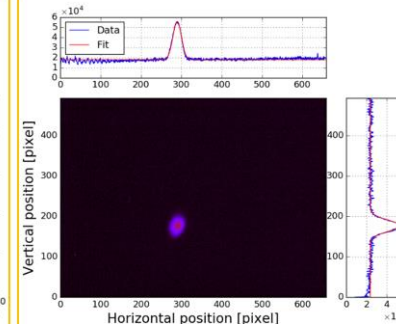


RF on  
⇒ 楕円形

$$\sigma_x = 0.6 \text{ mm}$$

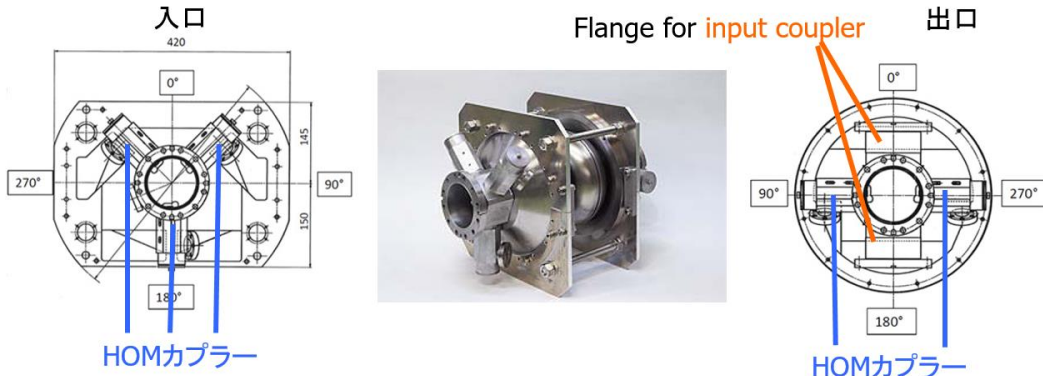
$$\sigma_y = 0.8 \text{ mm}$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_x} = 1.3$$



布袋貴大, 2018年加速器学会年会

- しかし、高バンチ電荷では空間電荷効果による射影エミッタンスの変化を同時に制御するのが難しくなってきた ⇒ より正確に時間発展を記述するモデルが必要
- 今回： 3次元モデル (CST) 電磁場の歪みをモデルに取り込む

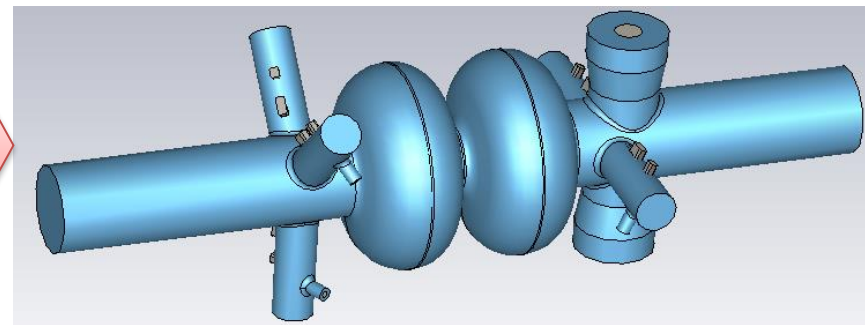
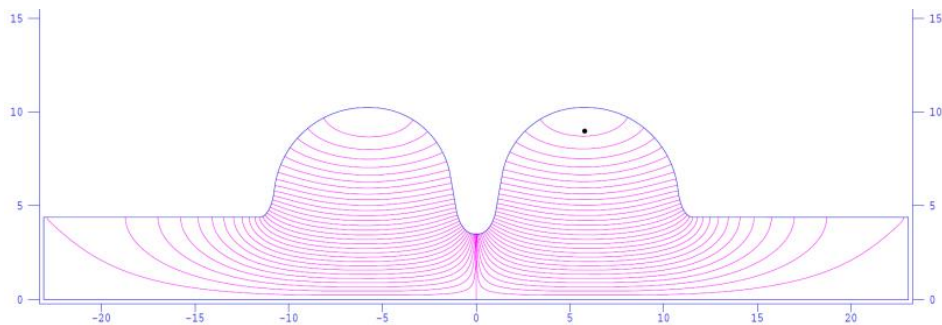


## 現実の2-cell 空洞

- 入口に出口にカプラーが配置される
- 特に、入射側(エネルギーが低い側=影響が大きい側)に、複雑な形状のカプラーが配置される

# カプラー付きの3次元モデルの導入

- 2-cell空洞前後のカプラー付きの3次元モデルに変更

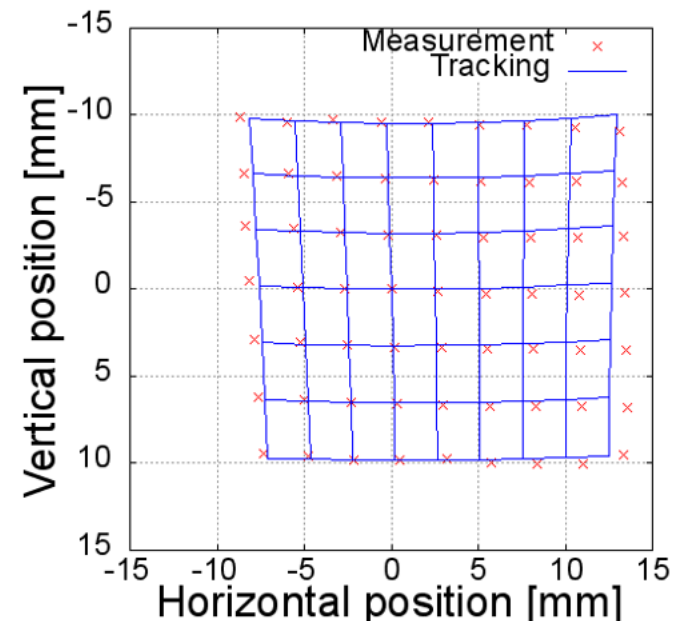


- シングルキック応答測定

- 区間: 入射空洞入口から出口(ステアリング電磁石~スクリーン)、1空洞で加速
- 単粒子とみなせる条件: バンチ当たりの電荷量を下げて空間電荷効果が効かない条件で測定
- 初期条件の変え方(シングルキックの与え方): 空洞入口上流に配置された、ステアリング電磁石の蹴り角を変更

水平・垂直に同じ蹴り角を与えたときのビームの移動量(3Dモデル計算)

Model	$\Delta x$ [m/rad]	$\Delta y$ [m/rad]	$\Delta y/\Delta x$
3Dモデル	1.02	1.32	1.29



布袋貴大, 2018年加速器学会年会

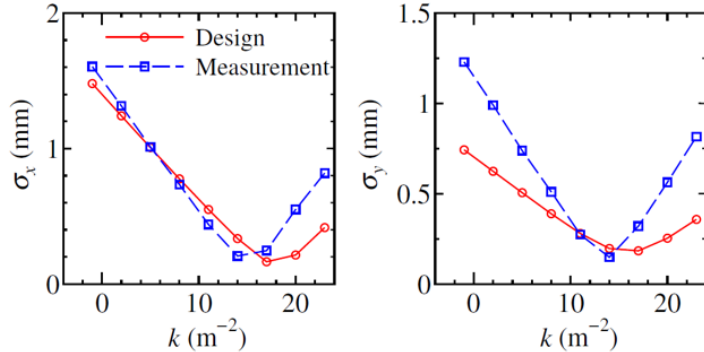
- 3Dモデルで水平・垂直方向の軌道変化量の差を再現
- 3Dモデルで、シングルキック応答の測定結果をある程度再現できるようになった

# 入射空洞下流のビームダイナミクスへの影響

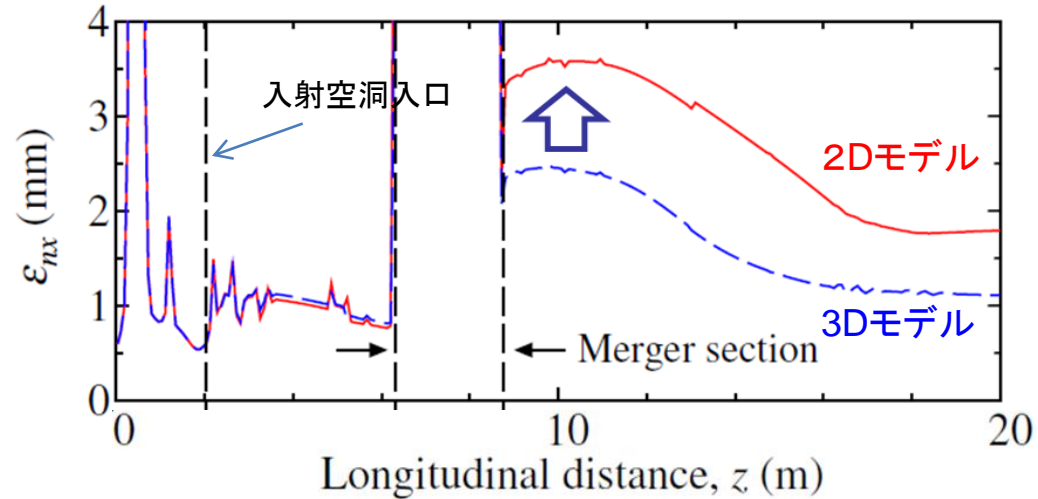
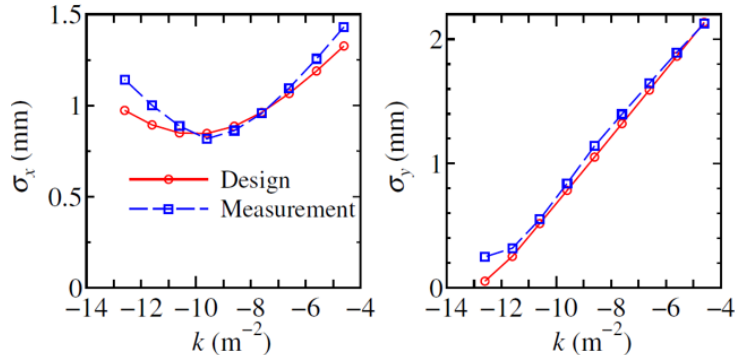
- 3Dモデルで最適化した条件で、2Dモデルに置き換えた場合 ⇒ モデル計算でも、射影エミッタンスの時間変化が大きく変化

## 四極電磁石によるwaist-scan法による測定

(1) 0.5 pC, 2016 (2Dモデルで設計)



(2) 60 pC, 2018 (3Dモデルで設計)



## 電子銃から主空洞出口までのビーム輸送

- 変更前:** 2Dモデルで設計し、設計と現実のずれを下流の四極電磁石で補正  
⇒ しかし、オプティクスを補正しきれず
- 変更後:** 3Dモデルで設計して補正  
⇒ 補正後に設計条件に近づくようになった  
⇒ 周回部の射影エミッタンスの測定値 (40 pC)  
⇒ 9.2 mm mrad ⇒ 3.6 mm mrad に減少

- 2次元モデルによる設計から、3次元モデルによる設計に置き換えたところ、下流におけるダイナミクスの再現性が向上、射影エミッタンスも低減した
- ただし、ビームダイナミクスの補正・理解はまだ不十分なので、今後も一つ一つ測定・モデル改良を継続する必要がある