

ミュオン加速用Lバンド 円盤装荷型加速管の基礎設計

名古屋大学 鷺見一路

飯嶋徹、居波賢二、須江祐貴、四塚麻衣（名大）、
惠郷博文、大谷将士、齊藤直人、三部勉、吉田光宏（KEK）、
近藤恭弘（JAEA、茨大）、竹内佑甫（九大）、
中沢雄河（茨大）、安田浩昌（東大）



MAKE NEW STANDARDS.
東海国立大学機構

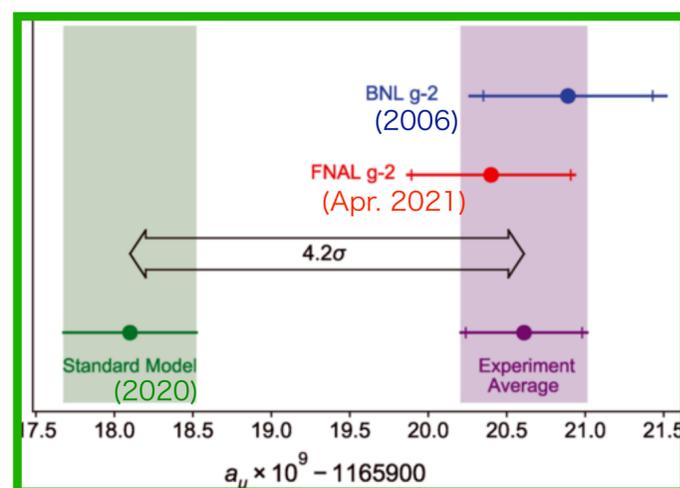


NAGOYA
UNIVERSITY

ミューオン異常磁気能率 $g-2$ ・電気双極子能率EDM

本研究の目的：ミューオン $g-2$ /EDM精密測定のためのミューオン加速実現

- 異常磁気能率($a_\mu = (g_\mu - 2)/2$)



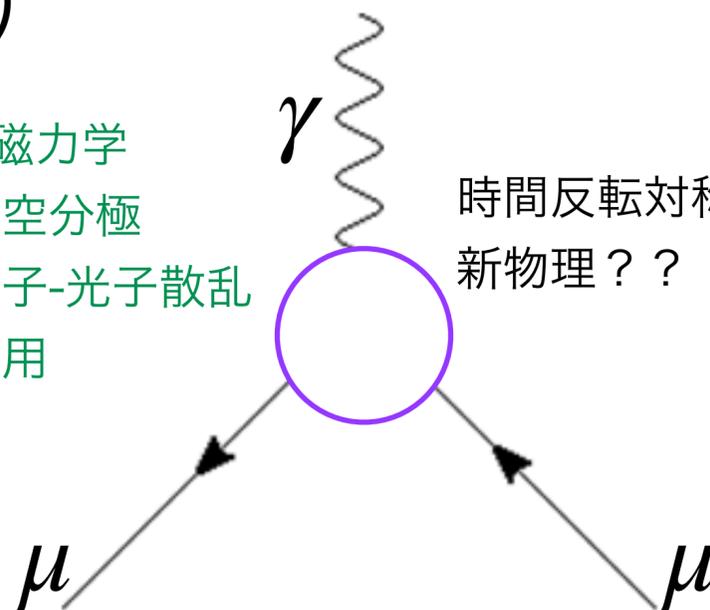
Phys.Rev.Lett. **126**,141801(2021)

標準理論の予想値と実験値に4.2標準偏差の乖離

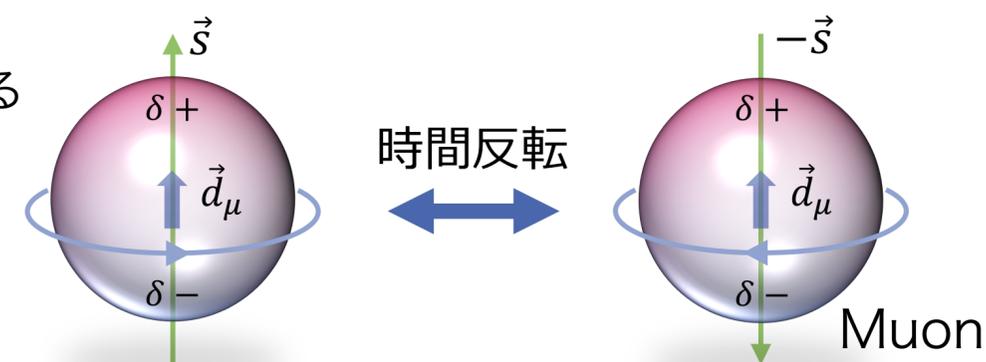
-> 新物理の兆候？

【双極子能率】

(高次)量子電磁力学
+ハドロン真空分極
+ハドロン光子-光子散乱
+電弱相互作用
+新物理??



- 電気双極子能率(\vec{d}_μ)



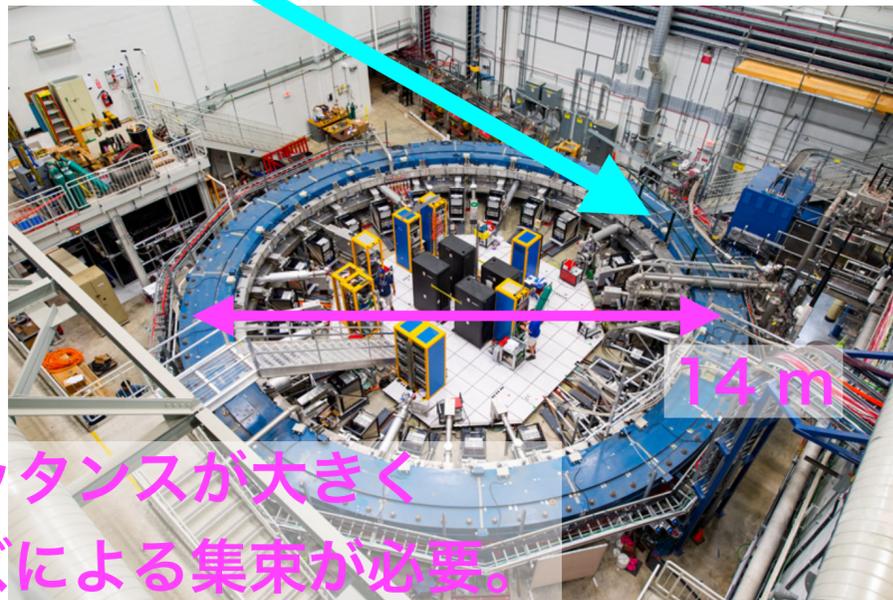
時間反転対称性を破る物理量
新物理が存在するなら観測可能な大きさの
EDMが現れる可能性がある

ミューオン $g-2/EDM$ 精密測定実験 @ J-PARC

- 磁場中を周回するミューオンのスピン回転 = $g-2/EDM$ による歳差運動を測定

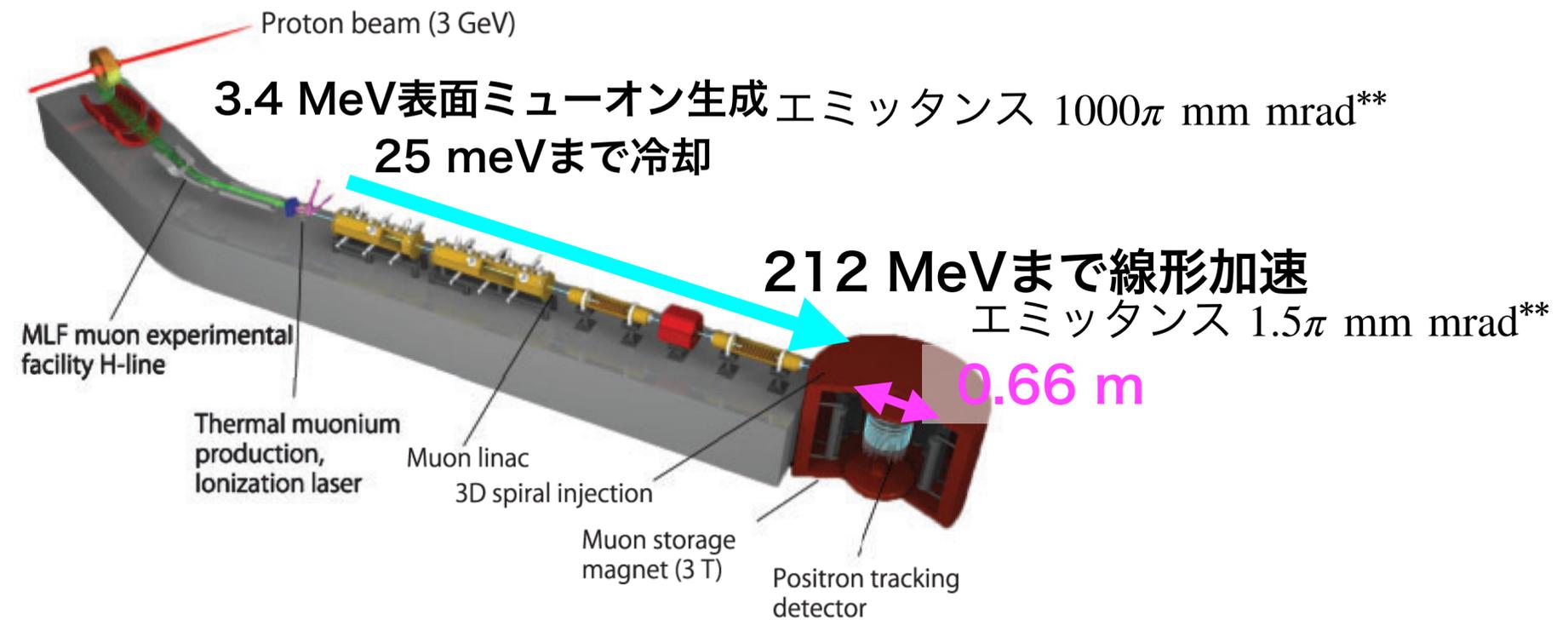
BNL & FNALの実験手法

3.1 GeV/c (decay in flight)
エミッタンス 40π mm mrad*



エミッタンスが大きく
静電レンズによる集束が必要。

J-PARCの実験手法

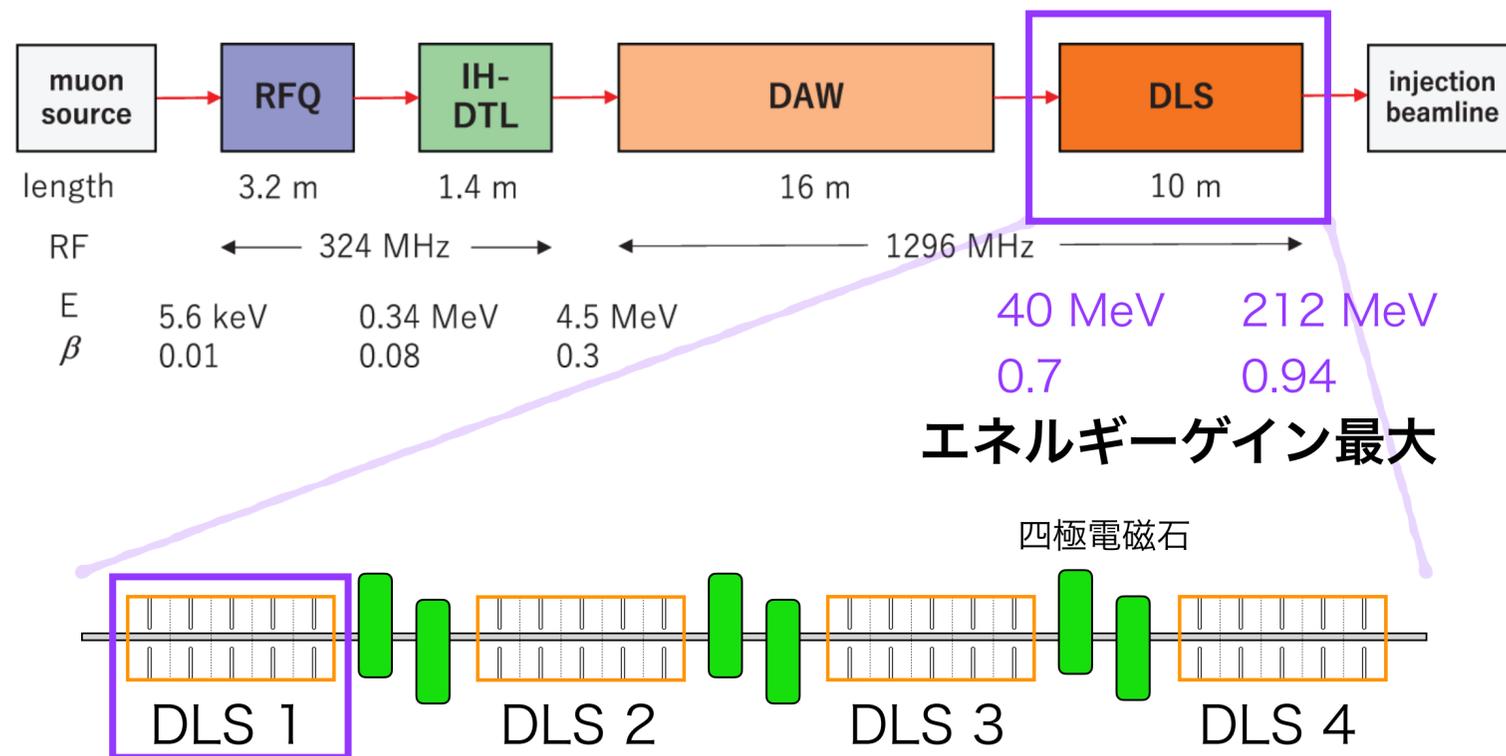


J-PARCの実験は静電集束を用いない全く異なる手法による独立な検証

⇒ ミューオン加速器による低エミッタンスビームの実現が鍵

*95%規格化エミッタンス(FNAL)、**100%規格化エミッタンス

ミュオン線形加速器の構成



Radio Frequency Quadrupole(RFQ)

加速実証試験

“負ミュオンを用いたミュオンRF加速実証試験”, PASJ2018 FROL14

Inter-digital H-mode Drift-Tube Linac(IH-DTL)

加速実証試験準備・実機製作

“APF方式IH-DTLによるミュオン加速実証試験のための診断ビームラインの開発”, PASJ2020 WEPP16

Disk And Washer Coupled Cavity Linac(DAW-CCL)

cold model評価・詳細設計

“ミュオン線形加速器のためのDisk-and-Washer空洞の開発”, PASJ2020 FRO004

Disk Loaded Structure(DLS) (本研究)

ビームダイナミクス設計

“J-PARCにおけるミュオンg-2/EDM精密測定実験用ミュオンリニアックの高ベータセクション”, PASJ2017 TUP036

DLS実機製作に向け、初段DLS(DLS1)について

ビームダイナミクス設計時より詳細に空洞を設計・評価

- ・入力電力
- ・位相ずれ
- ・群速度
- ・加速勾配

関連講演

MOPOA03 大谷将士 “ミュオン加速器”

MOP038 竹内佑甫 “DAW-CCL”

ミューオン用DLS —特徴と要求性能—

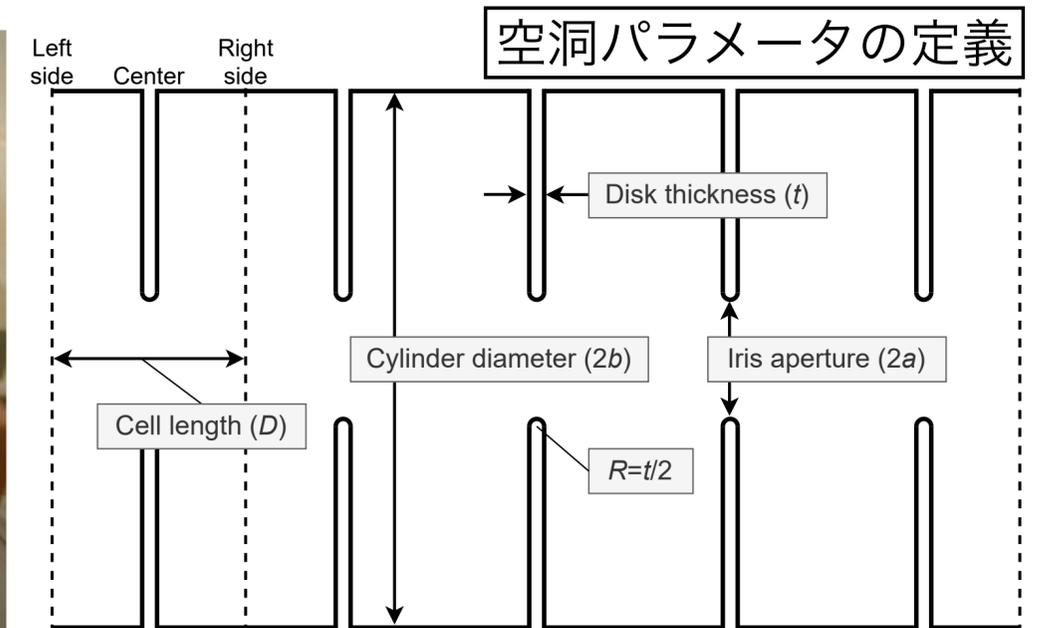
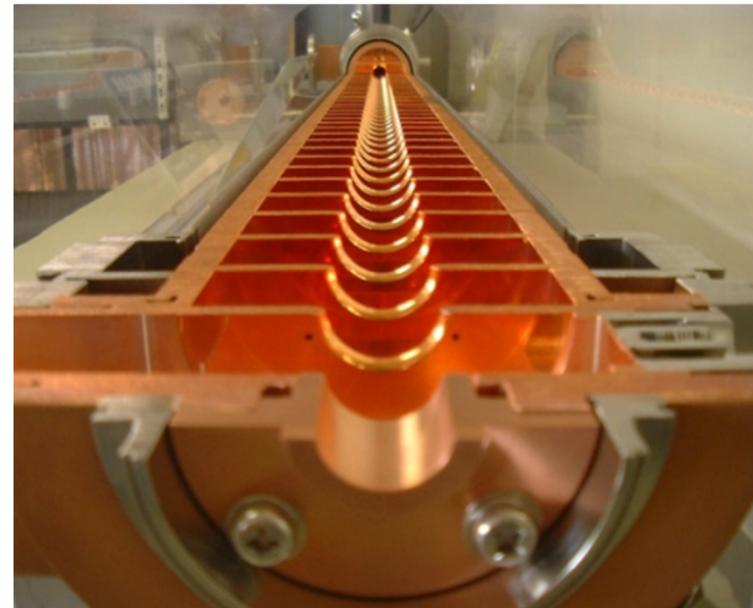
- DLS: 円筒導波管にアイリス付きディスクを装荷した構造
- 加速モード: $TM_{01-2\pi/3}$ モード
- 電子($\beta = 1$)用との違い

ミューオンの速度は $\beta = 0.7$ から 0.94 まで急激に変化するため
速度に合わせたセル長の調整が必要

- セル長 $D = \beta\lambda/3$ 波長 ($\lambda = c/f$)
ただし β は各セルの**加速勾配に依存**する

【線形加速器高速部(DLS)への要求性能】

- 20 MV/mの加速勾配
- 1.5π mm mrad以下の横方向規格化100%エミッタンス
- 0.1%以下の運動量分散(RMS)



【DLS1の条件】

- 運転周波数 $f = 1296$ MHz
- 加速位相 $\phi_s = -10$ deg
- 入力電力40 MW (実際のLバンドクライストロンを参考に)
- 群速度1%以上 (VSWR1.05以下を目標として)

縦方向のアクセプタンス確保のため

本発表の流れ

本発表で述べる達成事項:

- ・ ミューオン用**準定勾配型DLS**の設計手法を確立
- ・ その手法を適用し初段DLS(DLS1)を設計・評価

前半はDLS1の設計を例に設計手法の要所を述べる。

後半は粒子シミュレーションによる設計したDLS1の評価結果。

設計

要所1: (p.7)

- ・ 定勾配を仮定したセル長の表式
- ・ 勾配差1%以下を実現するアイリス径の表式

要所2: (p.8)

- ・ 加速勾配の多項式近似

DLS1設計①: (p.9)

- ・ 加速勾配調整(セル長・アイリス径)

電磁場計算(SUPERFISH) (p.10)

DLS1設計②:

- ・ 周波数調整(シリンダ径)

電磁場分布の取得

粒子シミュレーション(General Particle Tracer(GPT))

位相ずれ・加速勾配(p.12)

エミッタンス・運動量分散・
運動エネルギー(p.13)、
エミッタンス成長・ビームエンベロープ(p.14)

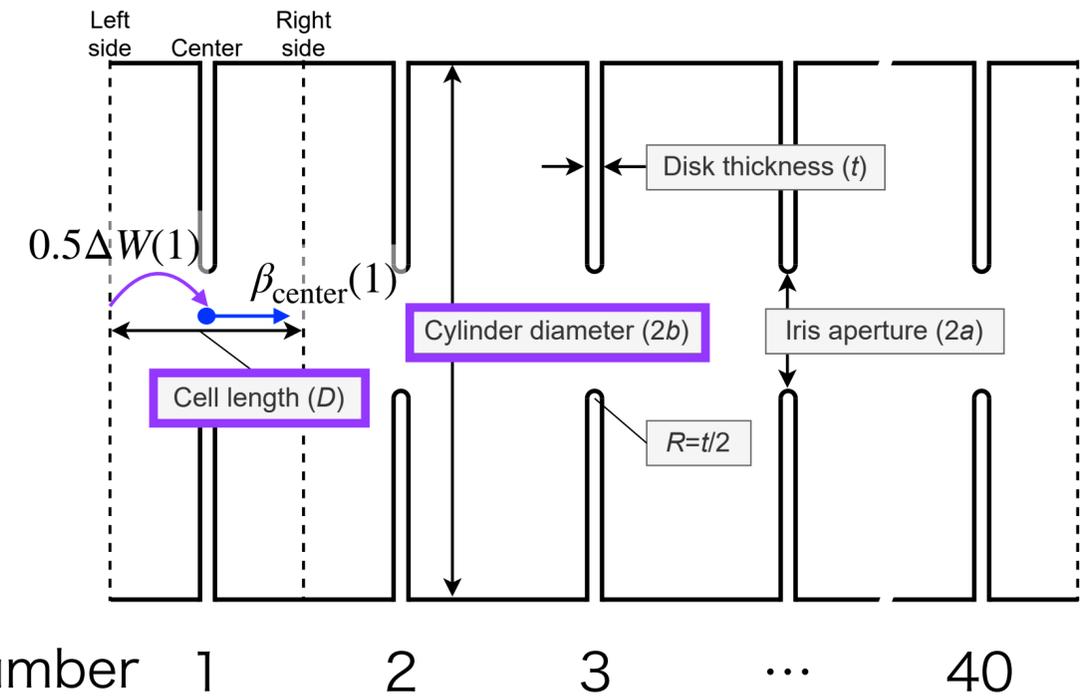
DLS1の条件:

Lバンド、加速位相-10 deg、
入力電力40 MW、群速度1%以上

空洞パラメータに関して

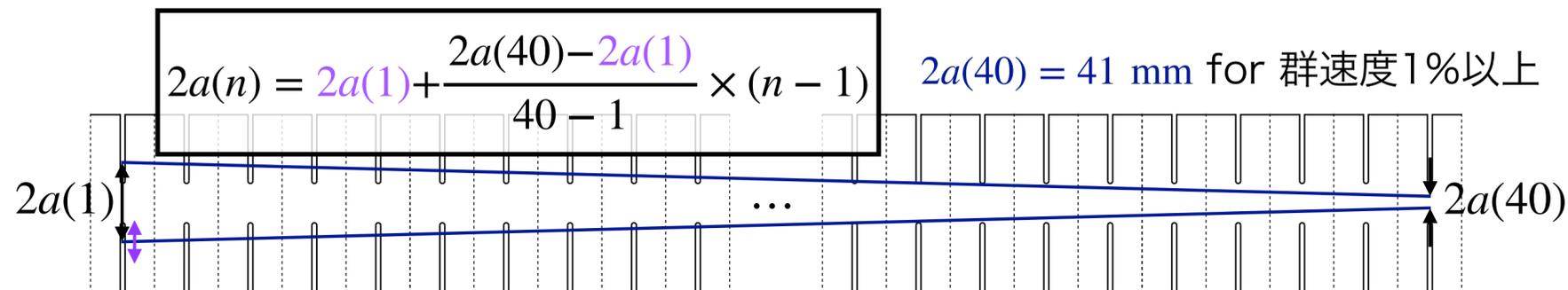
【セル長】 全セルで定勾配(E_0)かつ位相ずれなしと仮定

速度:	$\beta_{\text{center}}(n) = \frac{\sqrt{W_{\text{center}}^2(n) + 2m_{\mu}W_{\text{center}}(n)}}{W_{\text{center}}(n) + m_{\mu}}$
セル長:	$D(n) = \beta_{\text{center}}(n)\lambda/3$
エネルギーゲイン:	$\Delta W(n) = E_0 \cos(-10 \text{ deg})D(n)$
エネルギー(中央):	$W_{\text{center}}(n) = W_{\text{left}}(n) + 0.5\Delta W(n)$



【ディスクアイリス径】 セル数を暫定で40セルとし、 n : cell number 1 2 3 ... 40
 最初と最後のセルでの値を設定し、
 間のセルはセル番号 n の1次関数で決定

(シリンダ内直径は周波数調整の際に決定)
 (ディスク厚は5 mmで固定)



調整する変数は $2a(1)$ と E_0 の2つ。
 定勾配になるように $2a(1)$ を調整し、
 その勾配の値を E_0 に入れば良い。

空洞パラメータ調整時の加速勾配計算手法

・ $2a(1)$ と E_0 の調整は各セルの加速勾配 E_{cell} を確認しながら行う。

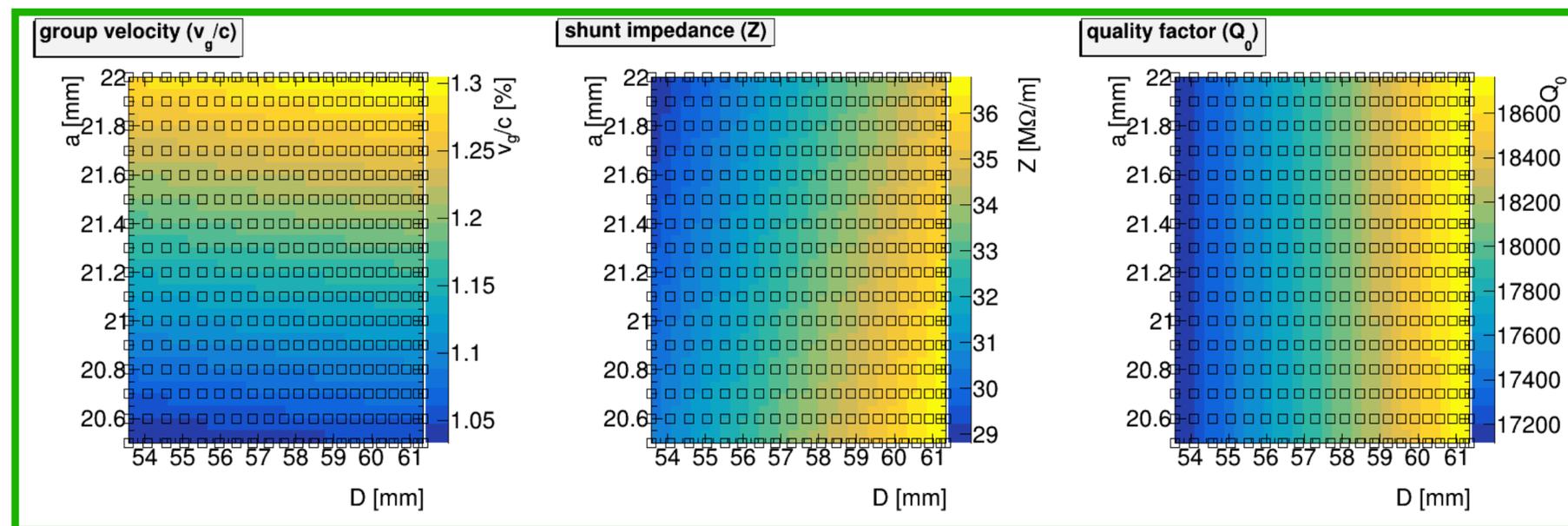
・ 何回も電磁場計算が必要となるため、
 あらかじめ電磁場計算を行って得た各セル長 D とアイリス”半”径 a での
群速度 v_g 、**シャントインピーダンス Z** 、**Q値 Q** の値をフィットし、
 各パラメータの値を表す多項式を取得。

$$F_{m\text{th order polynomial}}(D, a) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^i p_{ij} D^{i-j} a^j$$

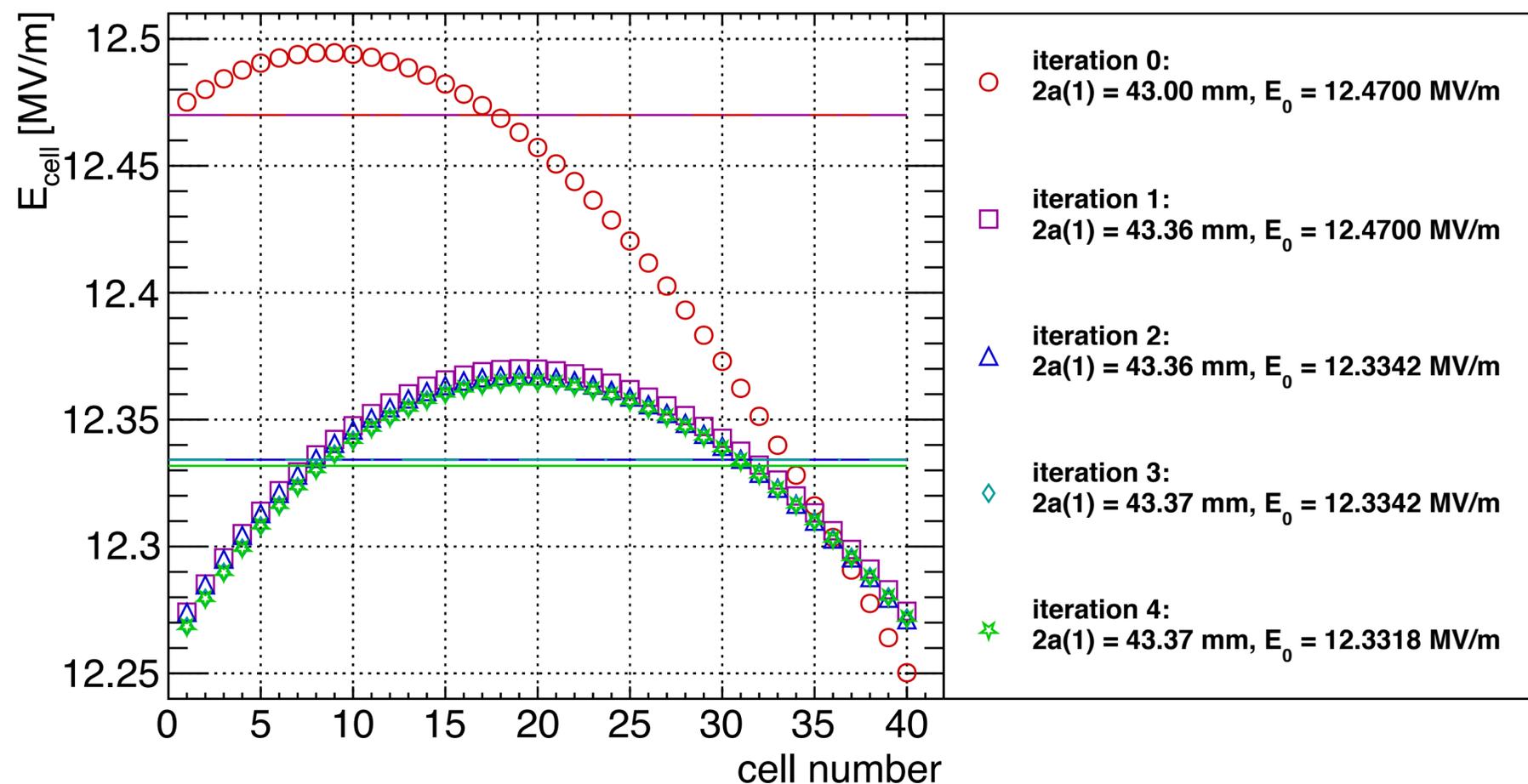
多項式の値は各点の値と 10^{-3} 以下のずれで一致
 これらのパラメータを用いて加速勾配を表す。

$$E_{\text{cell}}(D, a) = \frac{1}{D} \sqrt{\Delta P(v_g(D, a), Q(D, a)) \times Z(D, a) D}$$

1セルあたりの損失電力: $\Delta P \propto \alpha D = \frac{\pi f}{v_g(D, a) Q(D, a)} D$



加速勾配(セル長・アイリス径)調整



平均加速勾配12.3 MV/m、
勾配差1%以下の準定勾配型DLSを得ることができた。
ただし、40 MWかつ群速度1%の条件では20 MV/mを実現できなかった。

初期値:

$$2a(1) = 2a(40) + 2 = 43 \text{ mm},$$

$$E_0 \sim E_{\text{cell}}(1) = 14.47 \text{ MV/m}$$

アイリス径調整:

$$2a(1) = 43 \text{ mm} \rightarrow 43.36 \text{ mm}$$

E₀再設定:

$$E_0 = \sum_{n=1}^{40} E_{\text{cell}}(n)D(n)/(\text{cavity length})$$

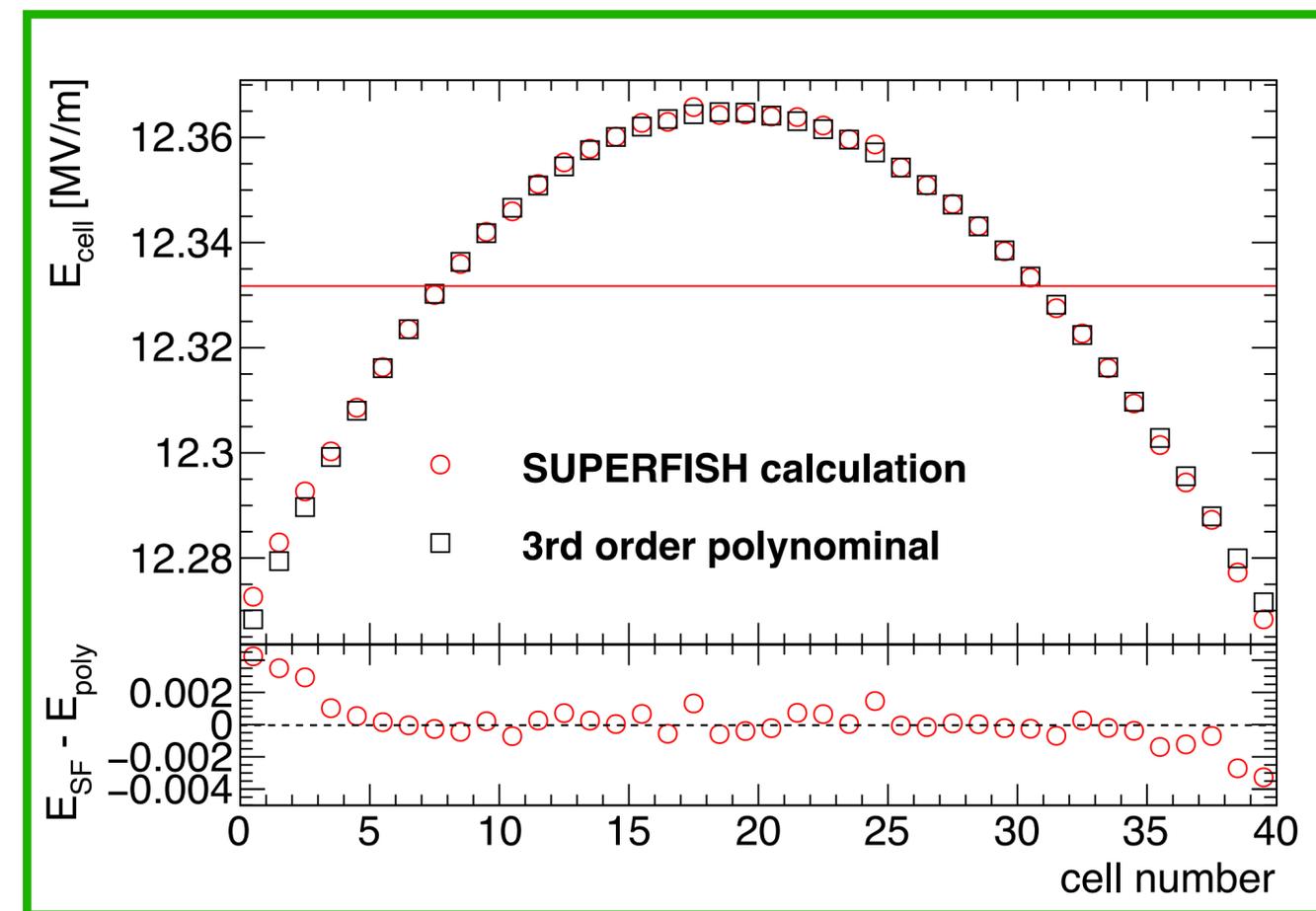
アイリス径微調整:

$$2a(1) = 43.36 \text{ mm} \rightarrow 43.37 \text{ mm}$$

電磁場計算・シリンダ径調整

SUPERFISHを用いた電磁場計算により、
各セルの

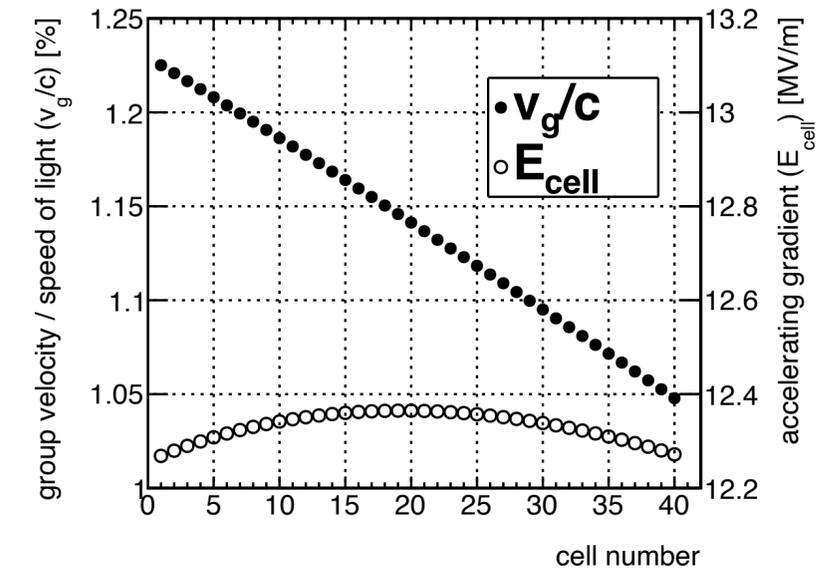
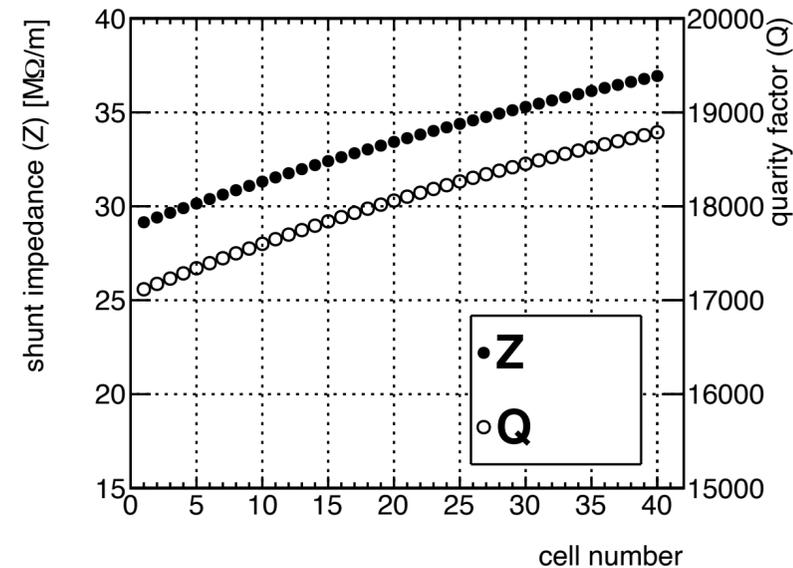
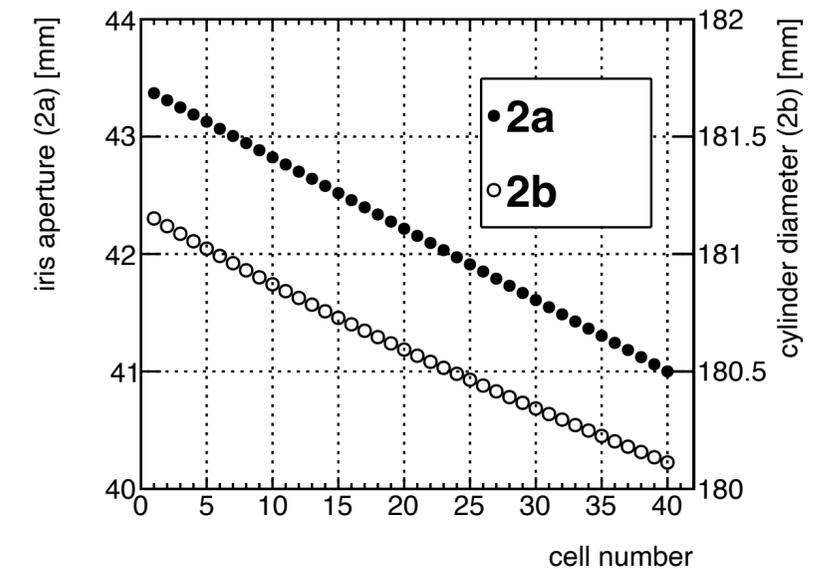
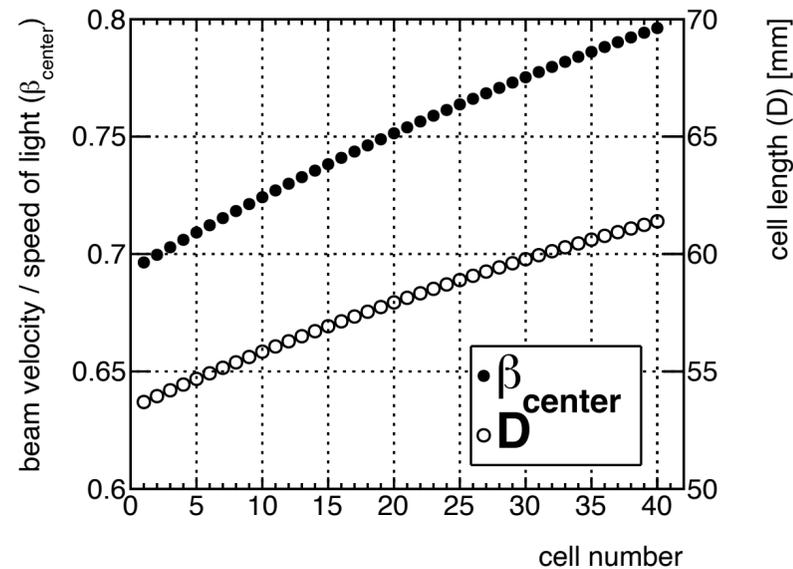
- ・ シリンダ内直径の調整
 - 周波数が1296.00 MHzになるようにセルごとに決定
- ・ 加速勾配 E_{cell} の確認
 - 各セルの加速勾配 E_{cell} については
 v_g, Z, Q の多項式を用いて計算した値と比較
-> 割合で 10^{-3} を超えるずれなし
- ・ 2次元電磁場分布の取得
 - > 粒子シミュレーションで使用



を行なった。

DLS1 設計まとめ

Parameters	Upstream	Downstream
Structure	Disk-loaded traveling-wave quasi-CG type	
Operating frequency (f) [MHz]	1296.0	
Accelerating mode	TM ₀₁ -2 π /3	
Synchronous phase (ϕ_s) [deg]	-10	
Length [m]	2.315	
Number of regular cells	40	
Input RF power [MW]	40	
Accelerating gradient (E_0) [MV/m]	<u>12.3318</u>	
Beam energy [MeV]	41.2446	69.3544
Beam velocity		
Speed of light (β)	<u>0.695</u>	<u>0.797</u>
Cell length (D) [mm]	53.698	61.394
Iris aperture ($2a$) [mm]	<u>43.37</u>	41.00
Cylinder diameter ($2b$) [mm]	181.147	180.126
Disk thickness (t) [mm]	5	
Quality factor (Q)	17116	18788
Shunt impedance (Z) [M Ω /m]	29.15	36.93
Group velocity		
Speed of light (v_g/c) [%]	1.22	1.05
Filling time [ns]	663	
Field attenuation factor (α)	0.0648	0.0690



位相ずれと加速勾配

GPTによる粒子シミュレーション
(General Particle Tracer)

を用いて、
ビーム軸上に位置し理想的な運動量の
1ミューオンについて

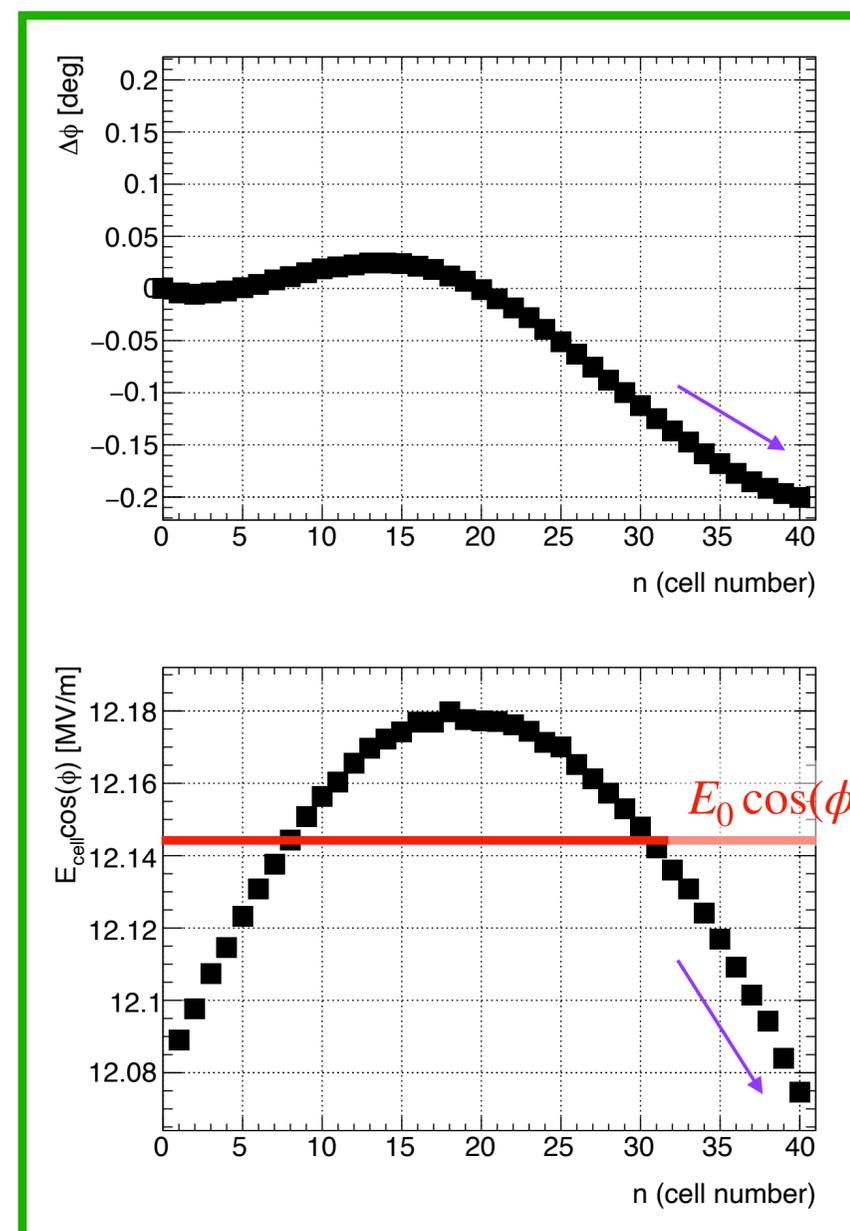
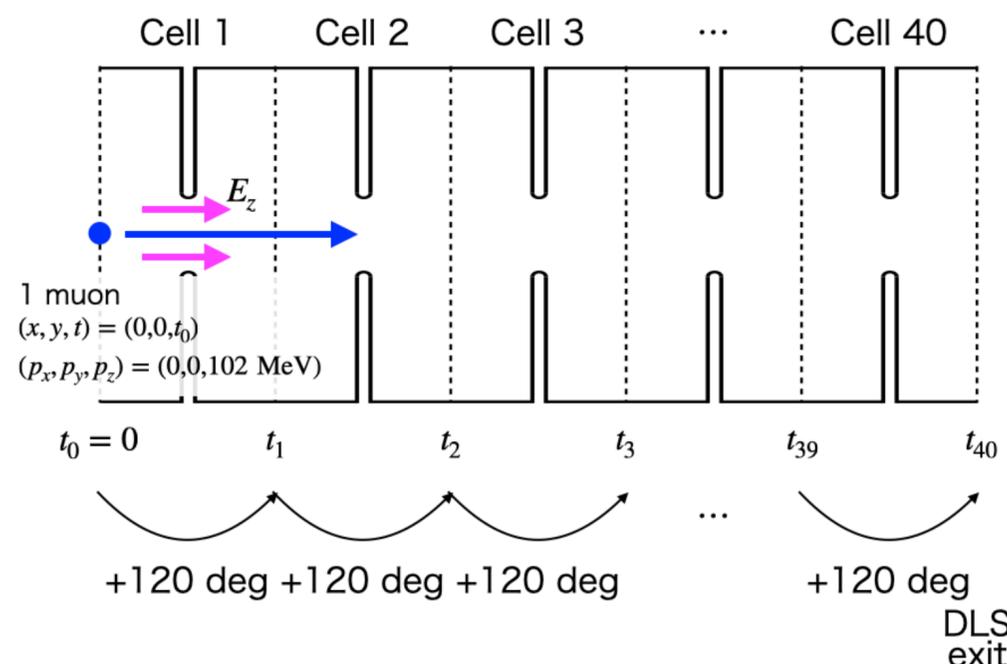
- 位相ずれ
 $\Delta\phi \equiv \phi_n - \phi_s = 360ft_n - 120n$

- 平均加速勾配

$$E_{\text{cell}}(n)\cos(\phi(n)) = \frac{1}{D(n)} \int_0^{D(n)} E_z(z) dz$$

を評価した。

位相ずれはDLS1出口で-0.2 deg程度
加速勾配は位相ずれの影響で下流の方が僅かに低下しているが、
概ね想定通りの加速勾配をビームにかけていることが示された。



エミッタンス・運動量分散・運動エネルギー

• DAW-CCLまで+マッチングセクションを経た粒子分布を用いたシミュレーションの結果

• DLS1出口での

• 規格化RMSエミッタンス

$$6\epsilon_{x,\text{norm,rms}} = 1.88\pi \text{ mm mrad}$$

$$6\epsilon_{y,\text{norm,rms}} = 1.39\pi \text{ mm mrad}$$

高速部出口での要求:
 $\approx 1.5\pi \text{ mm mrad}$
 (100%)

• 運動量分散(RMS)

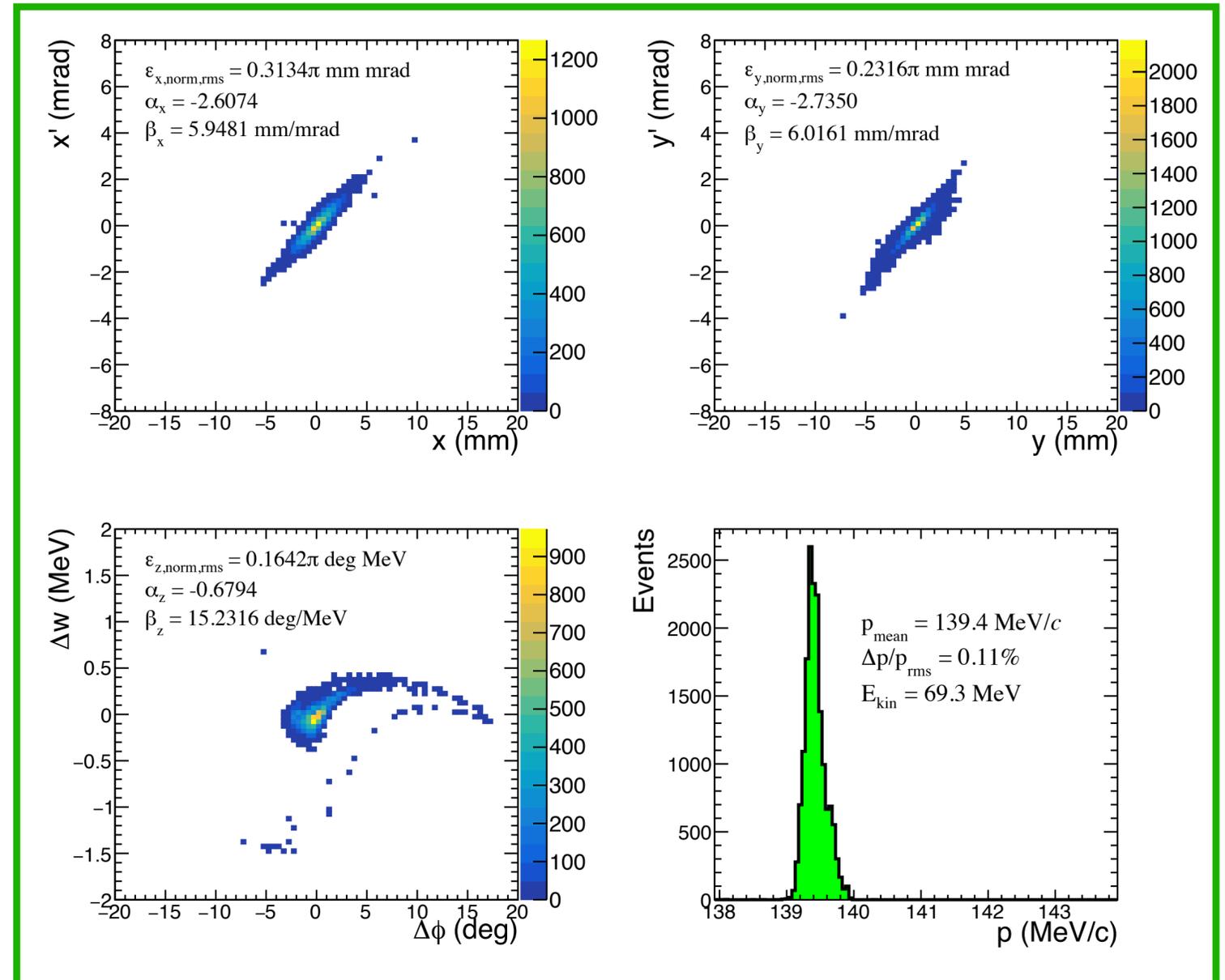
$$\Delta p/p = 0.11\%$$

$\approx 0.1\%$

• 平均運動エネルギー

69.28 MeV ~ 69.35 MeV(想定)

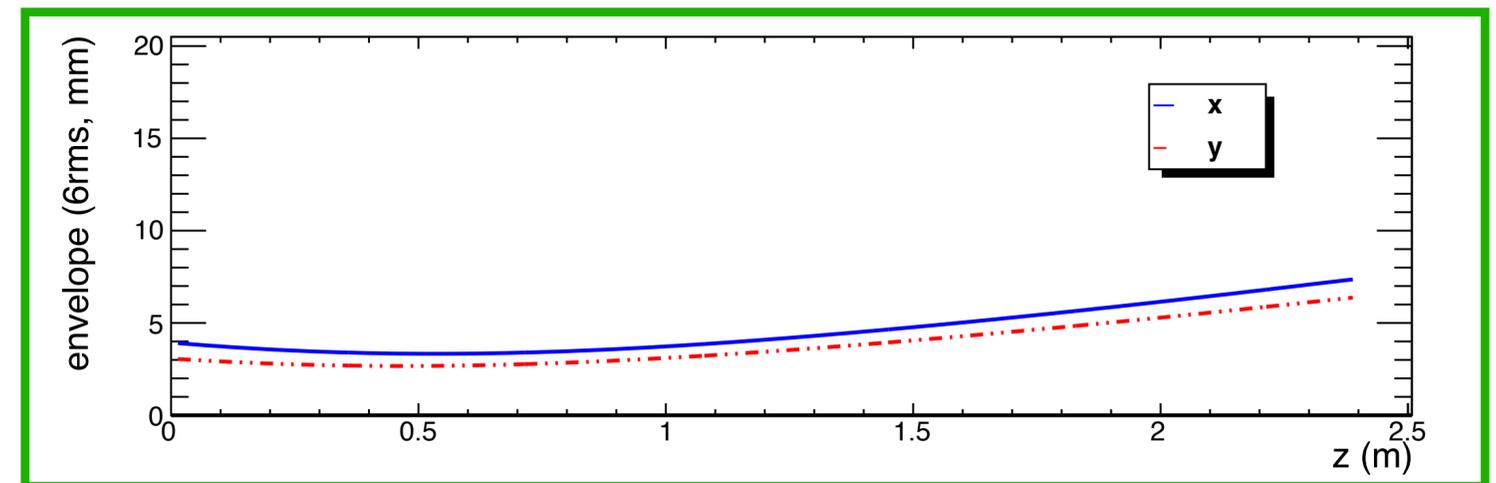
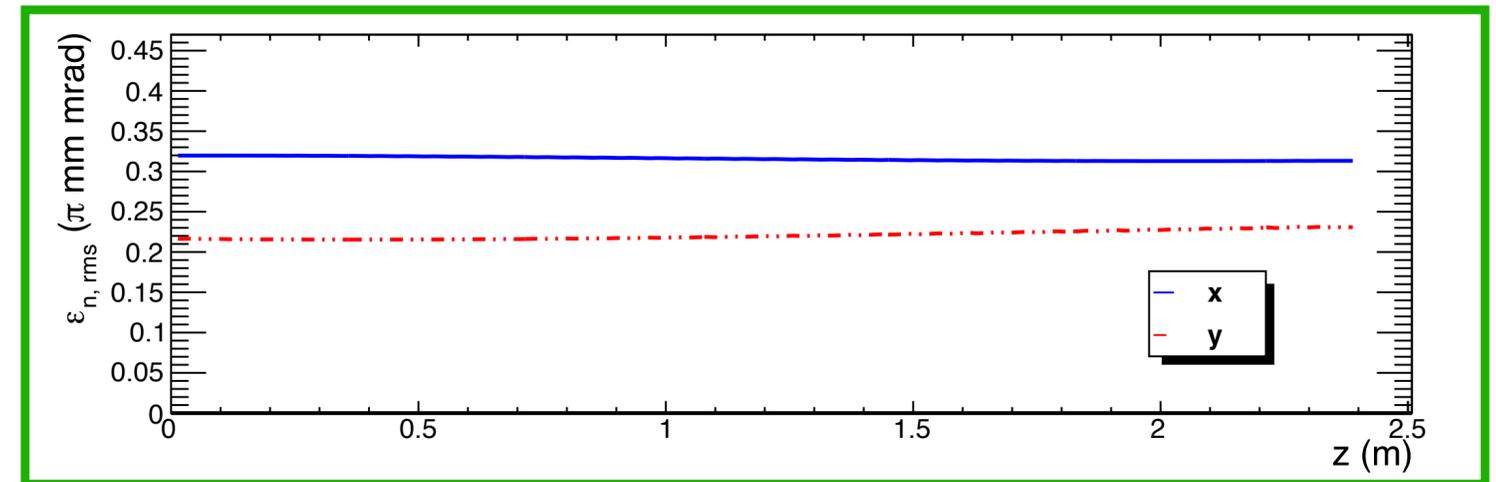
想定と0.1 MeV以下のずれで一致



エミッタンス成長・ビームエンベロープ

進行方向(z軸)について、各位置での

- ・ エミッタンス成長
規格化RMSエミッタンスの増加は見られない
- ・ ビームエンベロープ
各方向のビーム分布の6RMS
RF発散力による広がりが見えるが、
最小アイリス径 $a(40) = 20.5$ mmより十分小さい



- ・ エミッタンスと運動量分散が要求を概ね満たしていること
 - ・ 想定通りの運動エネルギーまで加速できたこと
 - ・ 十分なアクセプタンスを確保できたこと
- を示した。

まとめと展望

- J-PARC muon g-2/EDM 精密測定実験のためのミュオン加速器開発を行なっている。
- セル長を速度に合わせて調整したミュオン用準定勾配型DLSの設計手法を確立し、初段DLSの設計を行なった。
 - 条件：入力電力40 MW、群速度1%以上(～ディスクアイリス径41 mm以上)
 - 結果：平均加速勾配12.3 MV/m、勾配差1%以内
- GPTによる粒子シミュレーションで設計した空洞を評価した。
 - 位相ずれが初段DLS出口で-0.2 deg程度、想定通りの加速勾配
 - 要求を概ね満たす横方向規格化エミッタンスと運動量分散、設計通りの加速
 - 十分小さいエミッタンス成長とビームサイズ
- 展望
 - **今回確立した手法を用いた加速勾配向上に向けたミュオン用SバンドDLSの設計**
 - 3次元電磁場解析コードを用いたカプラーセルの設計