

# ATF の最終収束試験における 微小ビームサイズの達成

2013. 8. 3.

久保浄、奥木敏行 (KEK)

ATF Collaboration

# ATF (Accelerator Test Facility) at KEK

主にリニアコライダーの加速器の開発研究のための電子加速器

- リニアコライダーの入射器、ダンピングリングの試験設備として設計された
- 低エミッタンスビームの生成に成功( $\varepsilon_y \sim 4 \text{ pm}$ ,  $\gamma\varepsilon_y \sim 10 \text{ nm}$ )
- 加速器を構成する様々な機器のR&D のためにも使用されてきた
- ATF2
  - ATF を拡張して、リニアコライダーの最終収束の試験を行う。
  - Goal 1: **極小ビームサイズに収束する  $\sim 40 \text{ nm}$**
  - Goal 2: 安定な軌道, 収束点 ( 仮想衝突点、IP ) で  $\sim 2 \text{ nm}$

今回の報告

# Accelerator Test Facility (ATF) at KEK

Focal Point

IP; ~40 nm beam

Extraction Line

Final Focus Test Line

先端加速器試験棟

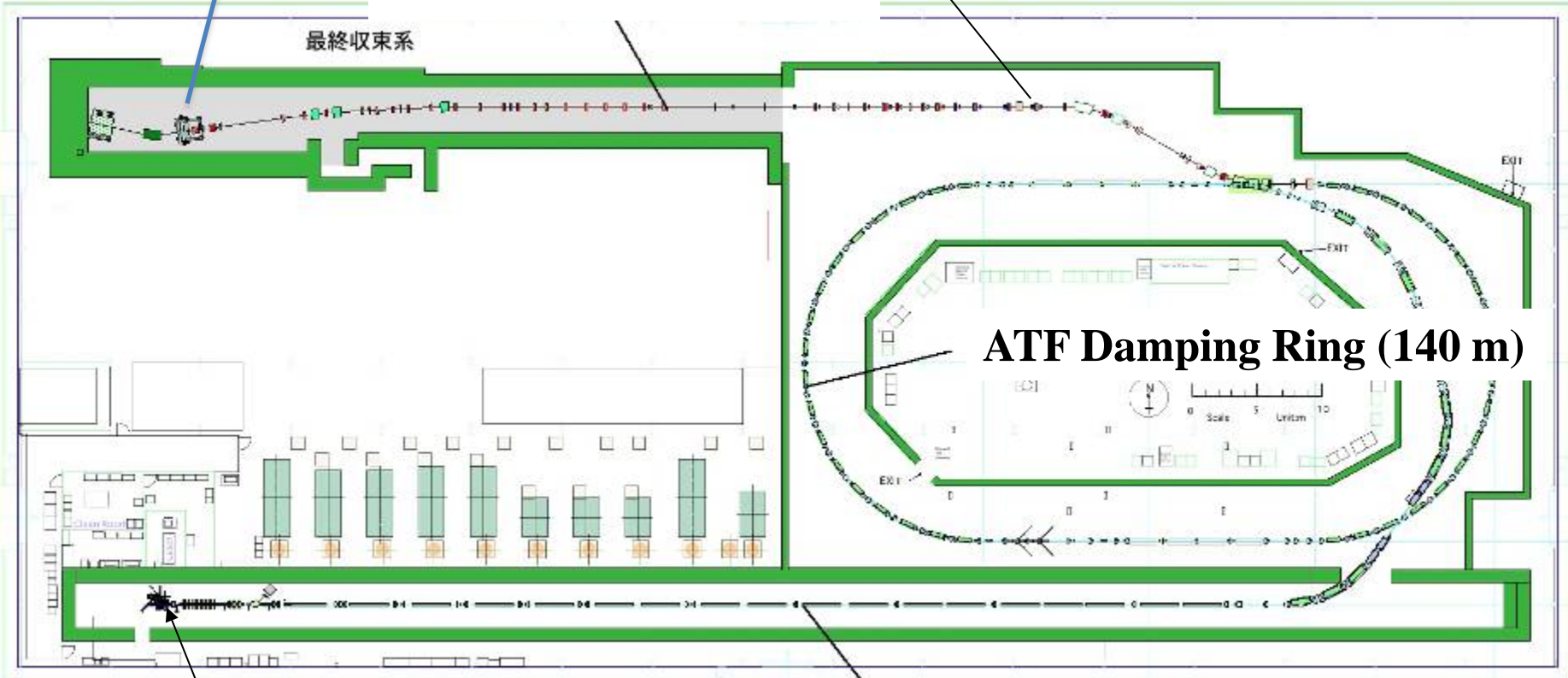


Photo-cathode RF Gun

ATF Linac (1.3 GeV)

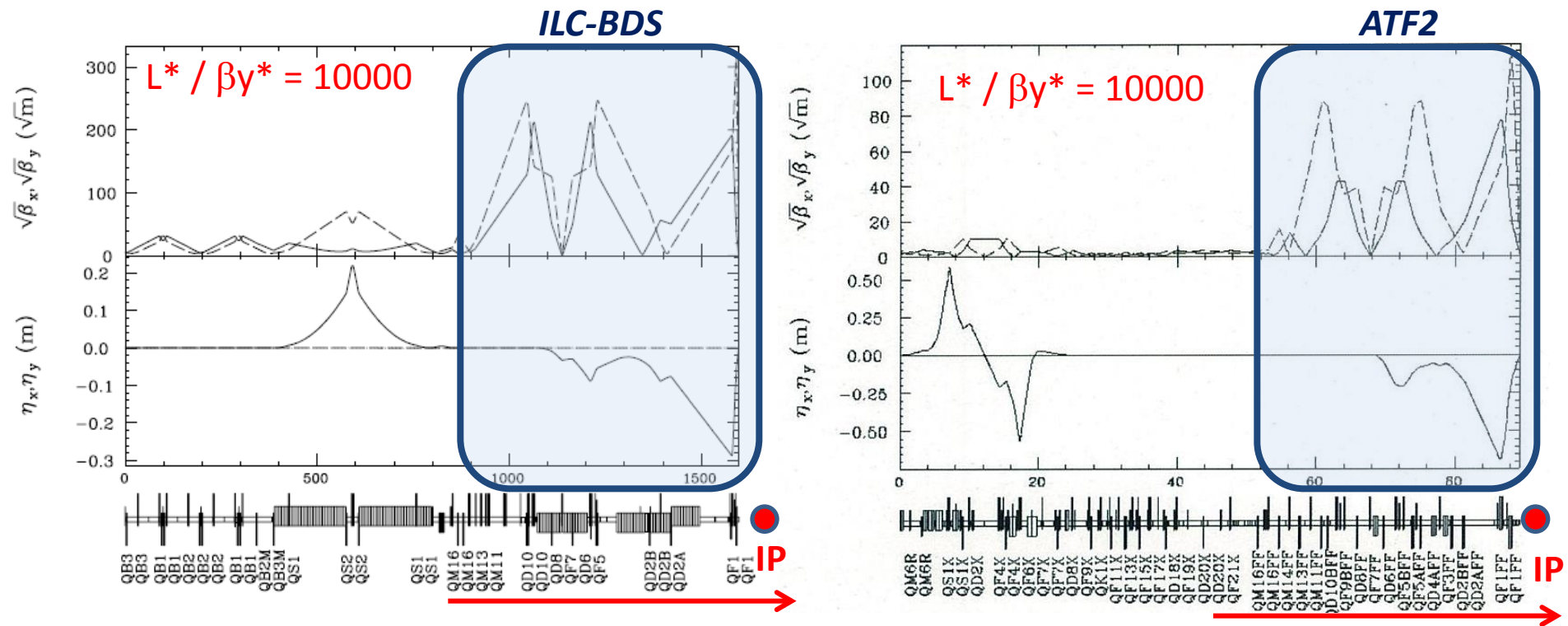
ATF2は デザイン、建設、運転の全てを国際協力に進めてきた

## ATF Main Institutes



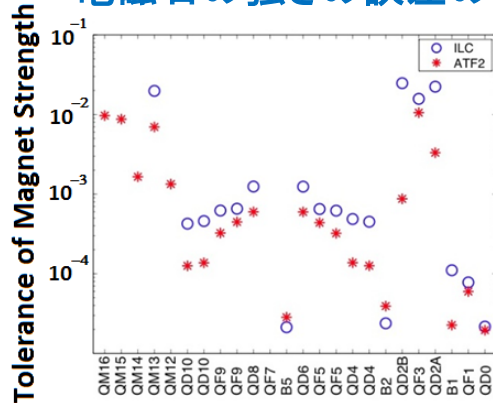
# ATF2 Beam Lineの特徴: ILC 最終収束系のPrototype

- 同程度の電磁石の設置位置誤差、振動誤差等が要求される。
- 同程度の Natural Chromaticity ( $\sim 10000$ )。
- 同じビーム調整技術でビーム調整を行う。

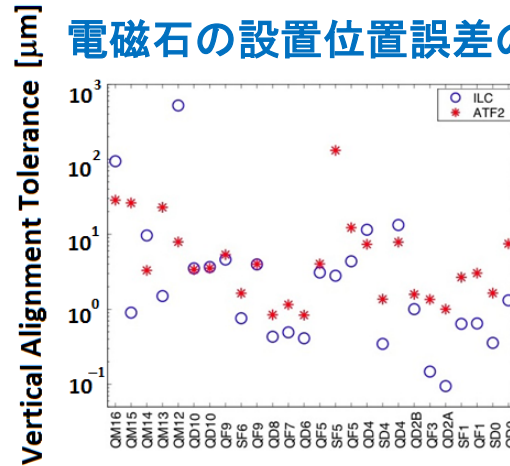


# ILC と ATF2 の電磁石の許容値の比較

## 電磁石の強さの誤差の許容値



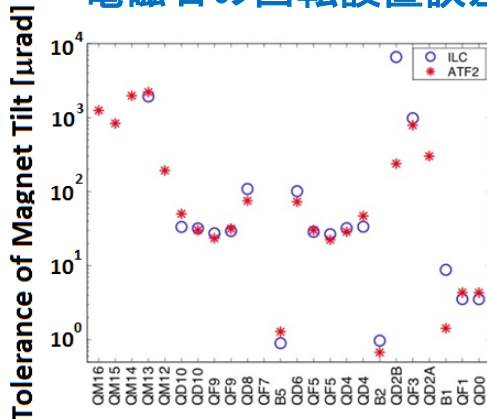
## 電磁石の設置位置誤差の許容値



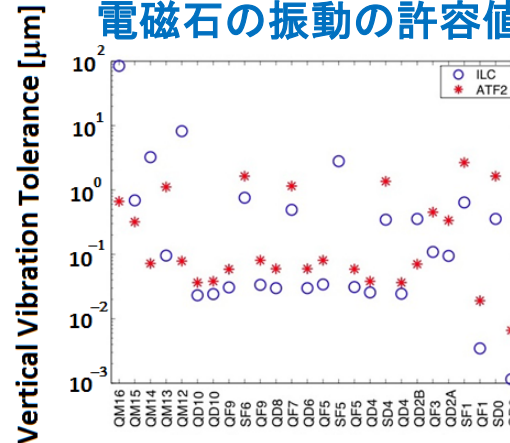
横軸は電磁石の名前

ILCとATF2の電磁石は同じ役割、名前である。

## 電磁石の回転設置誤差の許容値

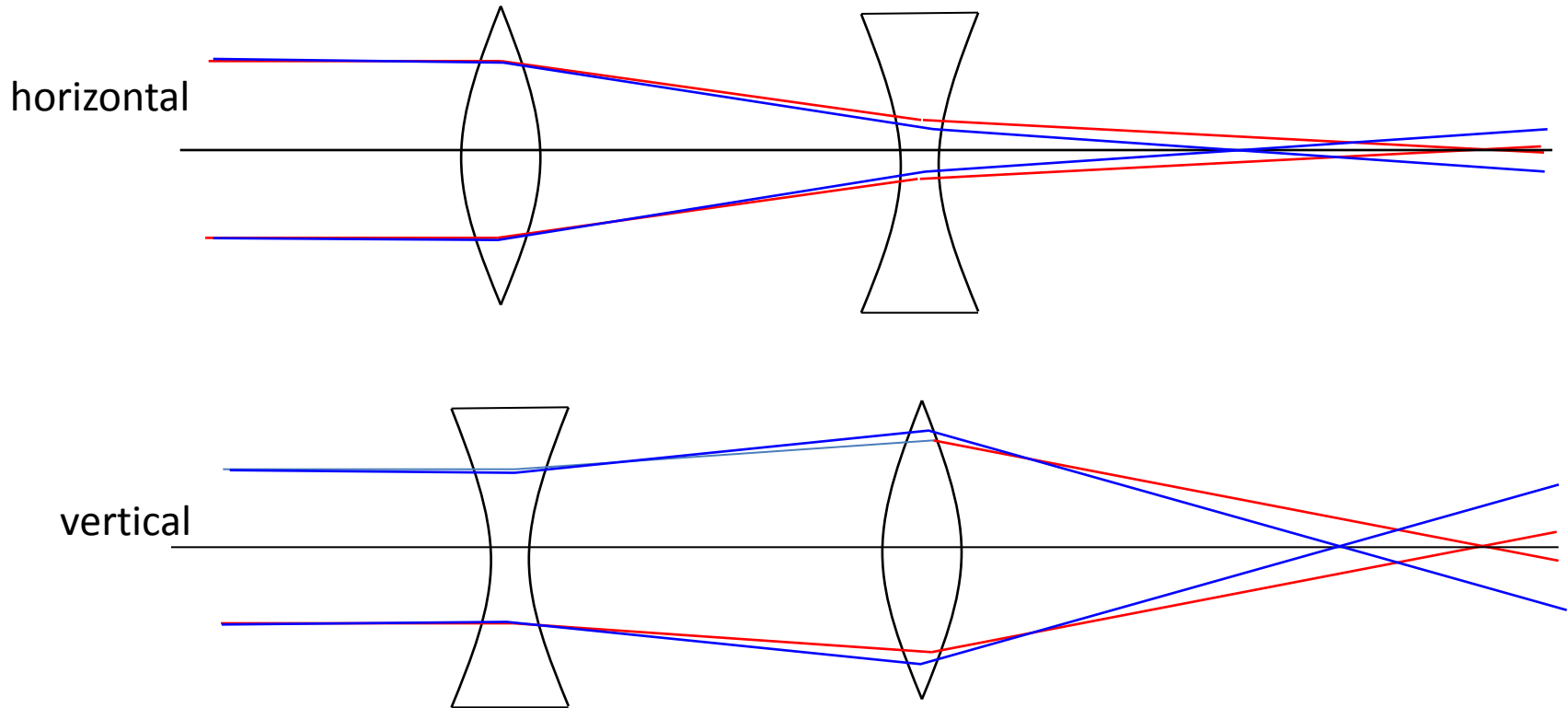


## 電磁石の振動の許容値



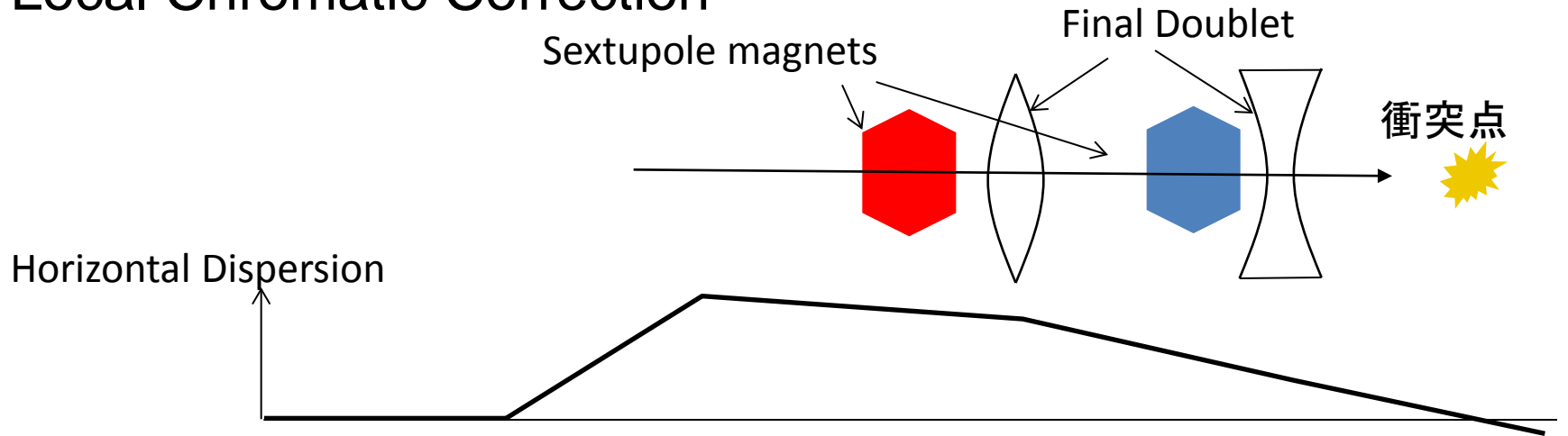
ILCとATF2の電磁石の許容誤差はほぼ同じである。

# 最終収束でのChromatic Aberration

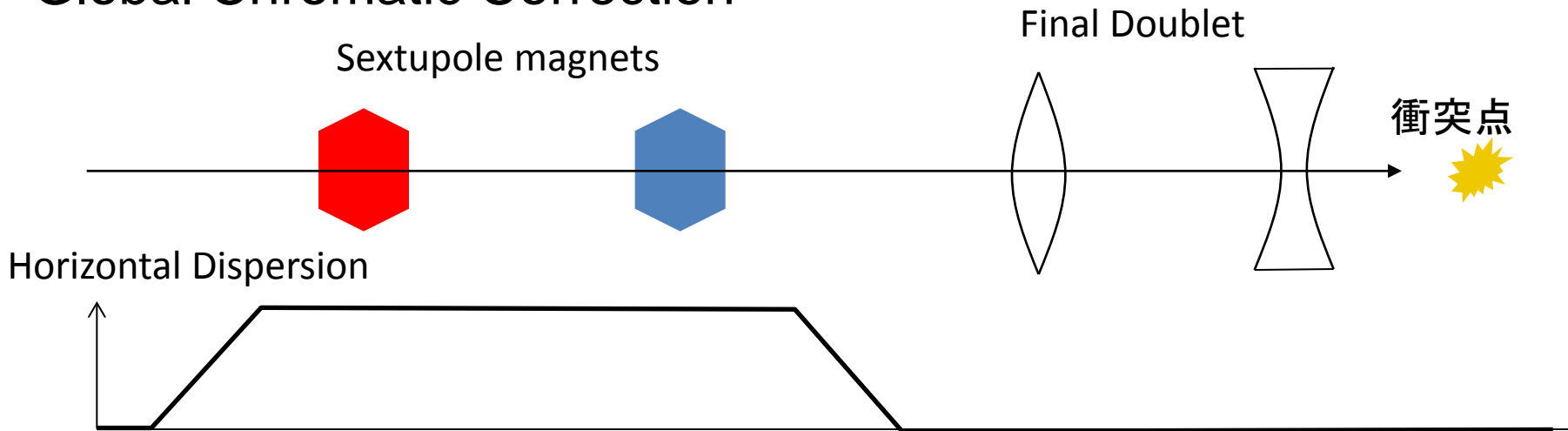


ビーム内電子のエネルギーの違いにより、焦点がずれる。  
ほとんどの影響は最後の発散・収束磁石 (Final Doublet) から  
→ Horizontal Dispersion のある場所に6極磁石を置いて補正

# Local Chromatic Correction

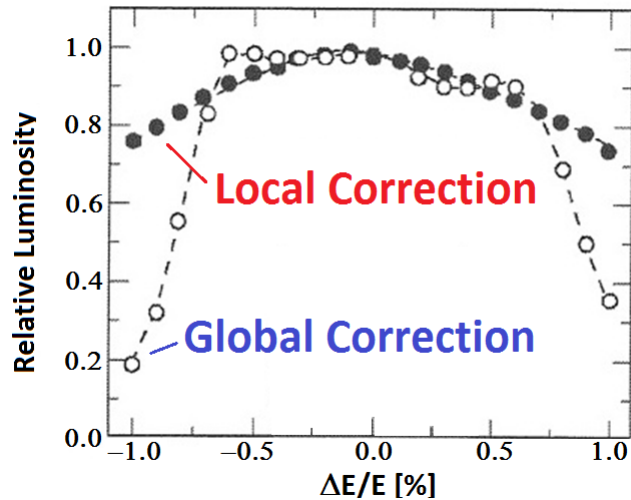


# Global Chromatic Correction

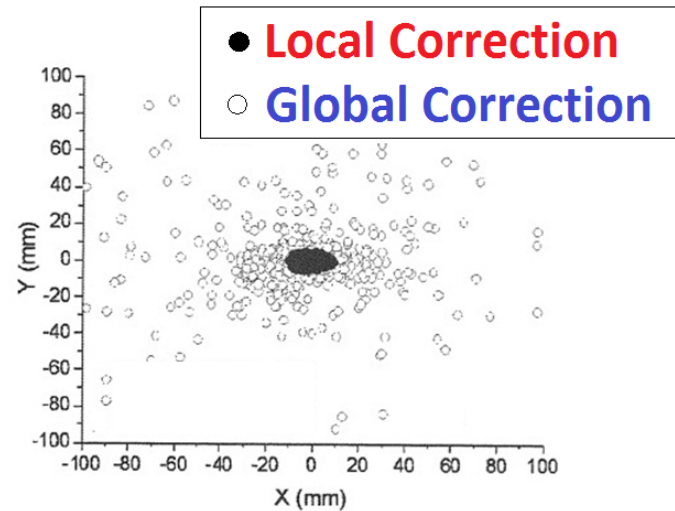




# Local Correction Global Correction の比較



**Local Correction** の方が  
Energy Acceptance が大きい。



**Local Correction** の方が  
Tail の拡がりが少ない

設計通りに補正できれば、Local Correction の方が性能が良い。

# Local Chromaticity Correction の特徴

## 利点

- ビームラインを短くできる。
- エネルギーの許容値が大きい。
- ビーム tail が少ない

## しかし、調整が複雑

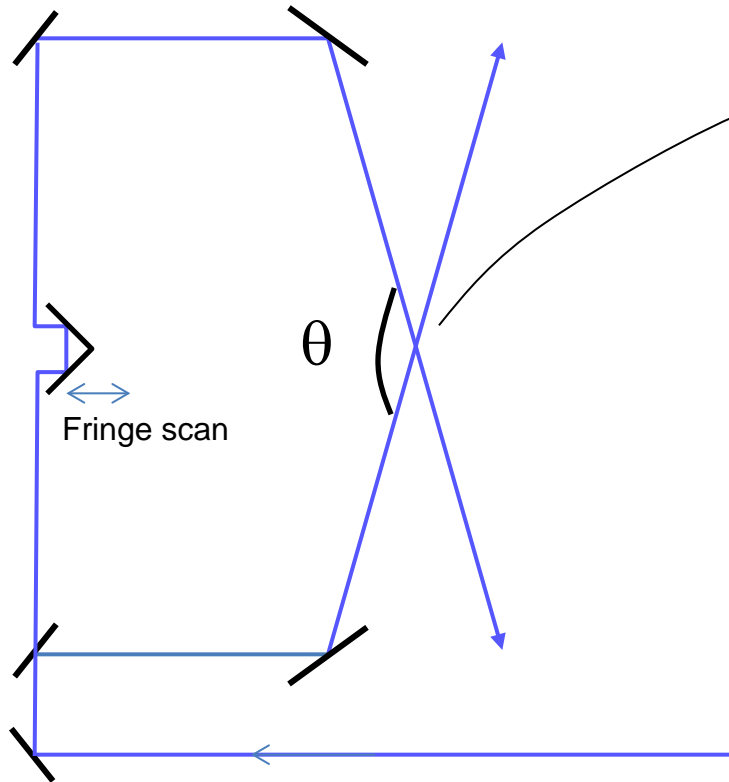
- 同じ6極磁石が水平、垂直両方向に効く
- 衝突点で水平角度 dispersion がある

Global Correction は1994年にSLAC のFFTB (Final Focus Test Beam )で 既に試験されている。

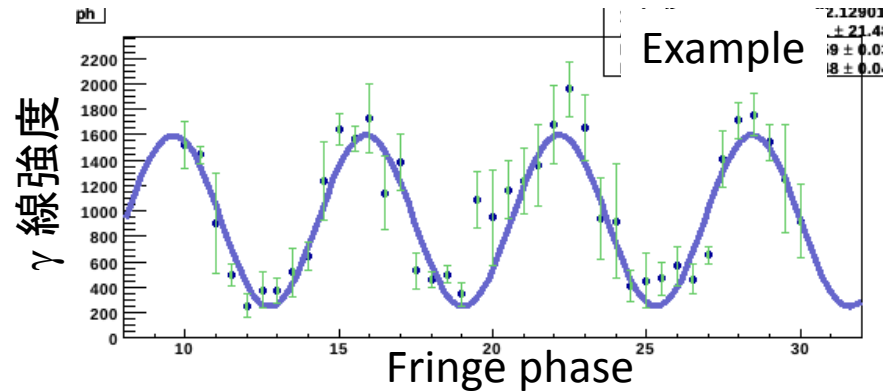
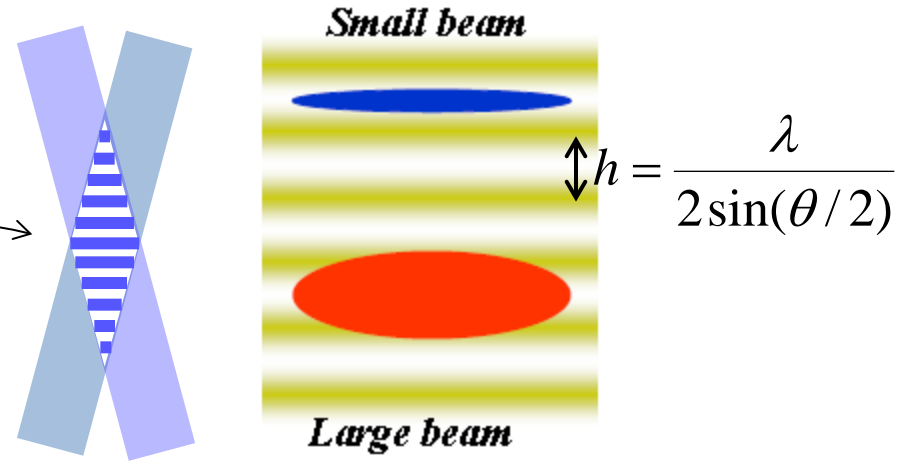
**ATF2 でLocal Correction を試験**

# 焦点でのビームサイズ測定

Shintake-monitor, (IP-BSM)  
Interference of two laser beams



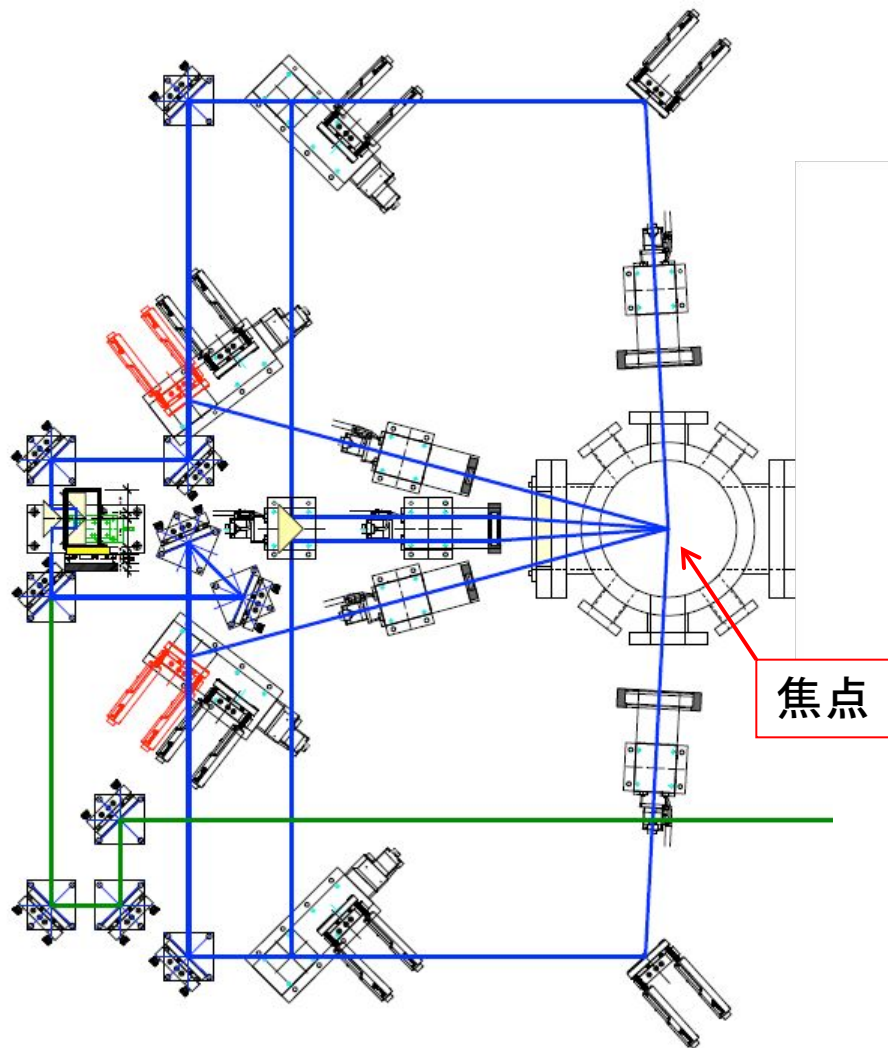
電子ビームとの散乱で発生する  
ガンマ線の量を測定



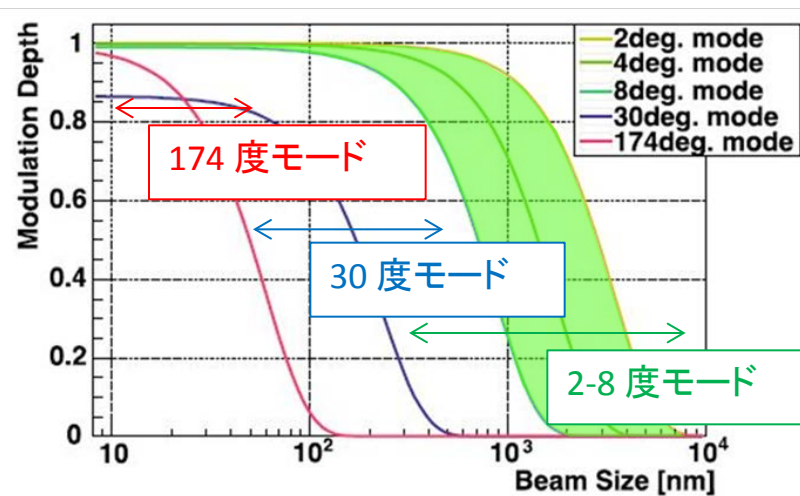
Scan interference fringe position.  
Measure modulation.

# 交差角を変えることで異なるビームサイズに対応

干渉縞の間隔  $h = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)}$



### Dynamic Range



25 nm ~ 6000 nm 測定可能

ビーム調整の進みに応じて交差角を大きくしていく

# ビーム調整： 垂直ビームサイズ調整ノブ

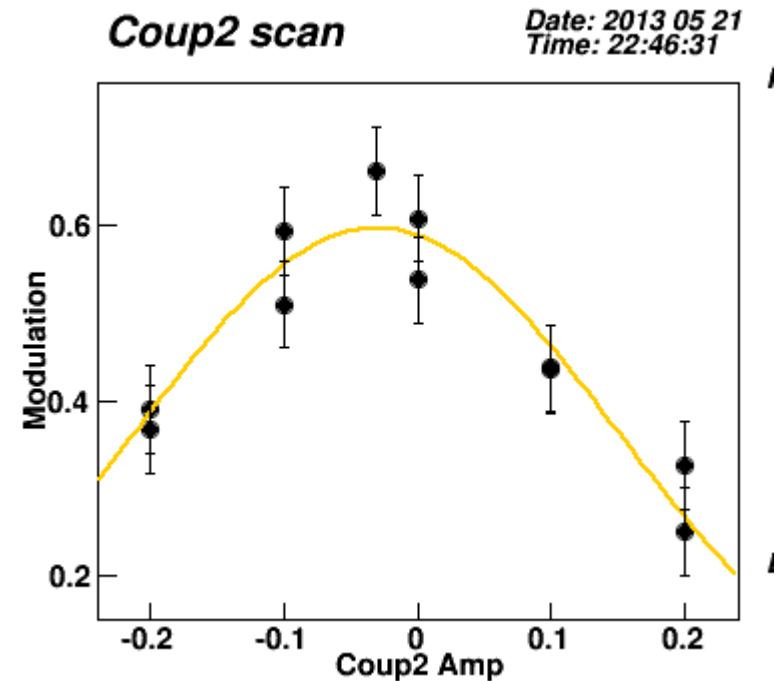
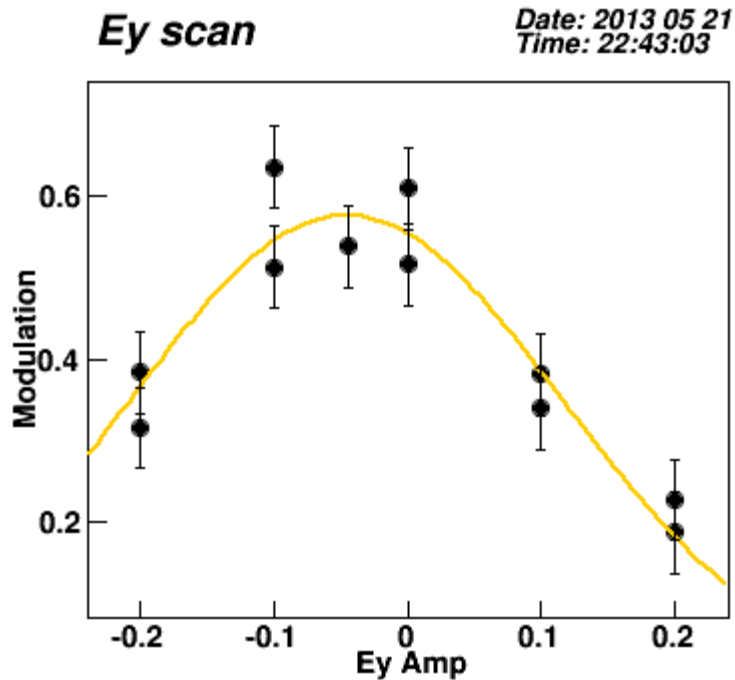
5 sextupole magnets (on movers) : 位置と強さ

4 skew-sextupole corrector magnets : 強さ

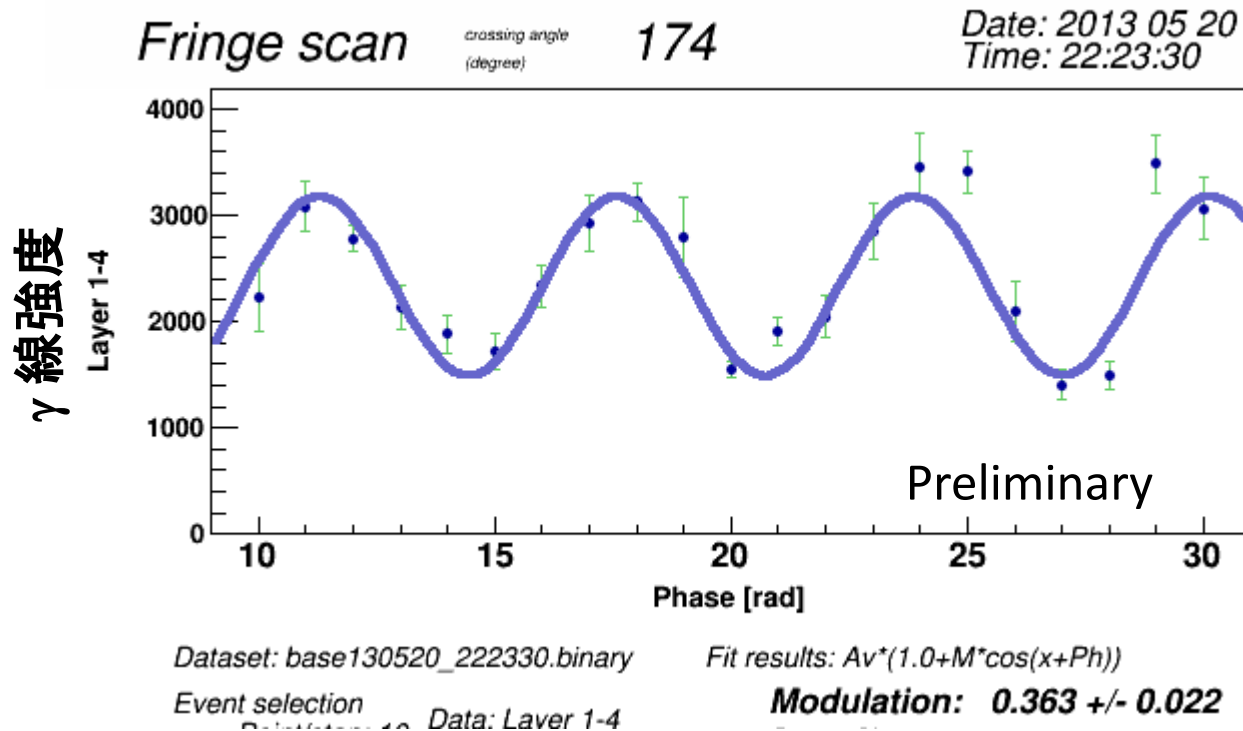
		Corrected coupling
Linear knob (線形オプティクス調整)	Horizontal move of sextupole magnets	$yy'$ (Focal Position)
	Vertical move of sextupole magnets	$Ey$ (Dispersion)
		$x'y$
Non-linear knob	Strength change of sextupole magnets	$x'yy'$
		$Eyy'$
	Strength change of skew sextupole magnets	$xxxy$
		$Exy$
		$EEy$
	$yy'y'$	

# Example of tuning knob scan

調整ノブの値を変え、Modulation を測定 (Modulation 大  $\leftrightarrow$  ビームサイズ小)  
Modulation 最大になるところにセット



# Example of fringe scan



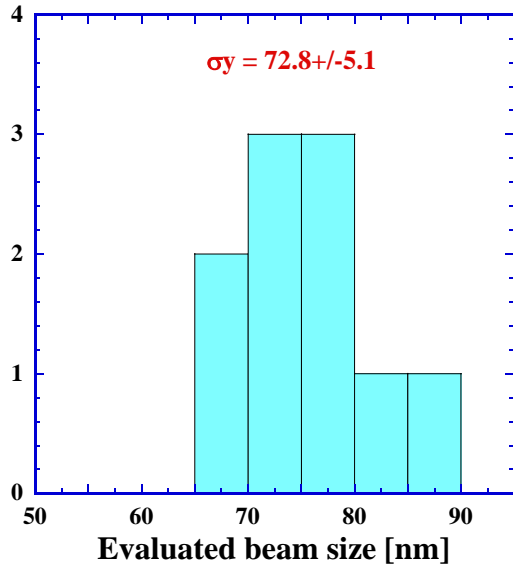
2012年12月初めて IP-BSM 交差角174度でのModulation 確認 (<70 nm)  
その後は常にこのレベルまで調整できるようになった (2013年3月 65nm)

ビーム調整後の10回の連続測定の結果

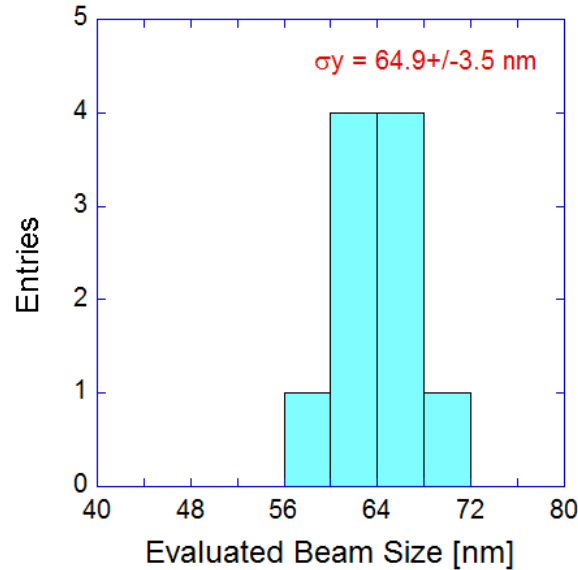
2012年12月

2013年3月

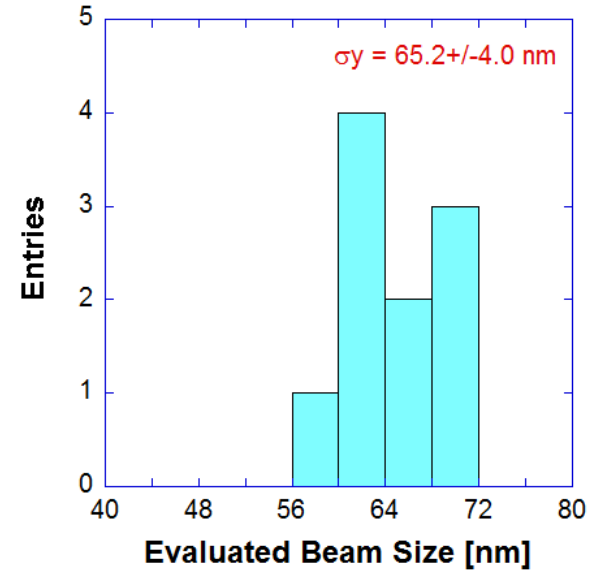
2012/12/21



2013/03/08



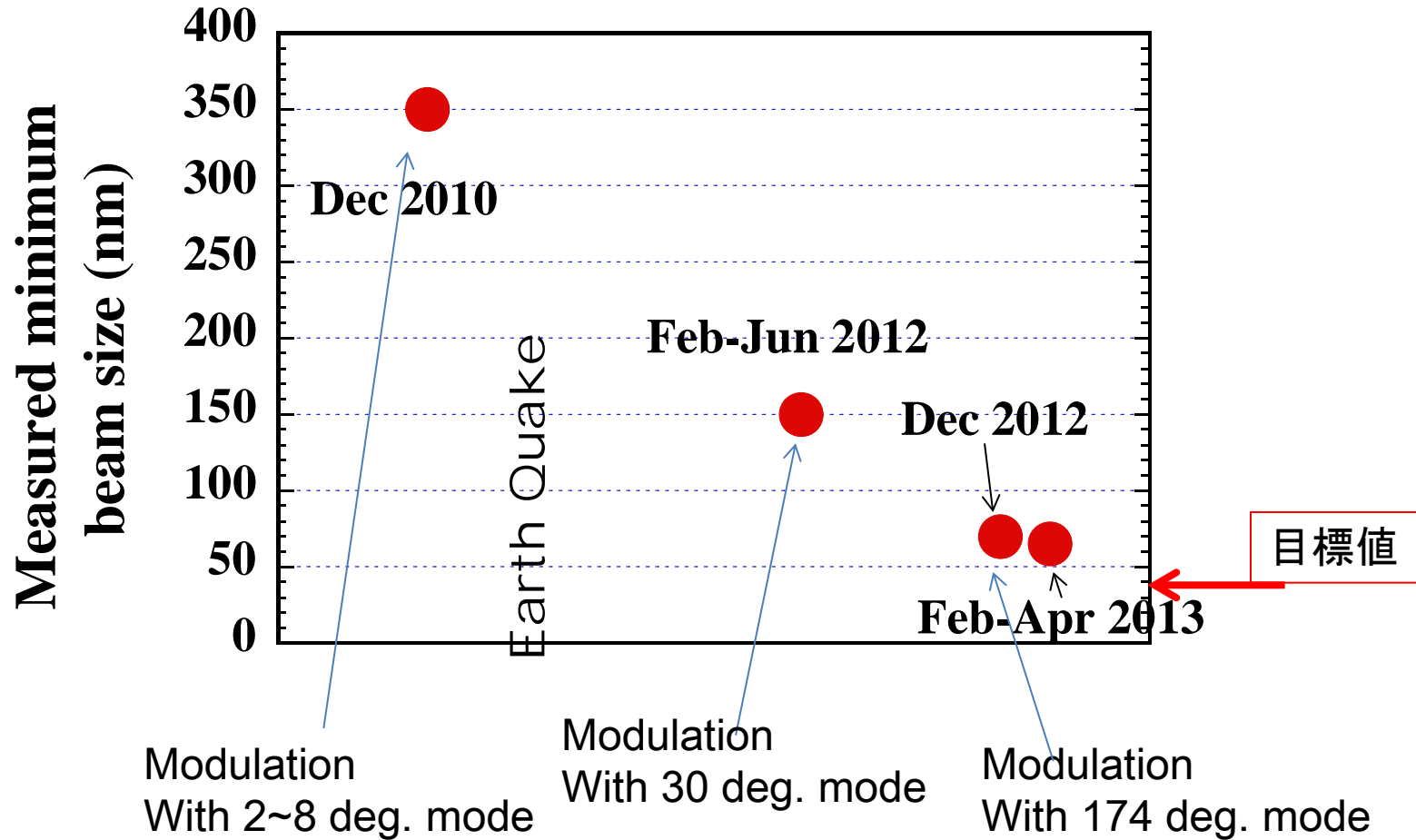
2013/03/14



このヒストグラムはビームサイズモニターの系統誤差を考慮していない。



# History of measured beam size



# 高次極磁場成分への対策

## ( 4 極 ) 磁石の持つ高次極の磁場成分が問題

- 高次成分の影響の少ない optics を採用(焦点での水平ベータ関数大: 磁石の場所でのビームサイズ小)

- 最後の水平収束 4 極磁石を交換

小口径、高次極磁場誤差大 → 大口径、高次極磁場小

## 6 極磁石コイルの問題

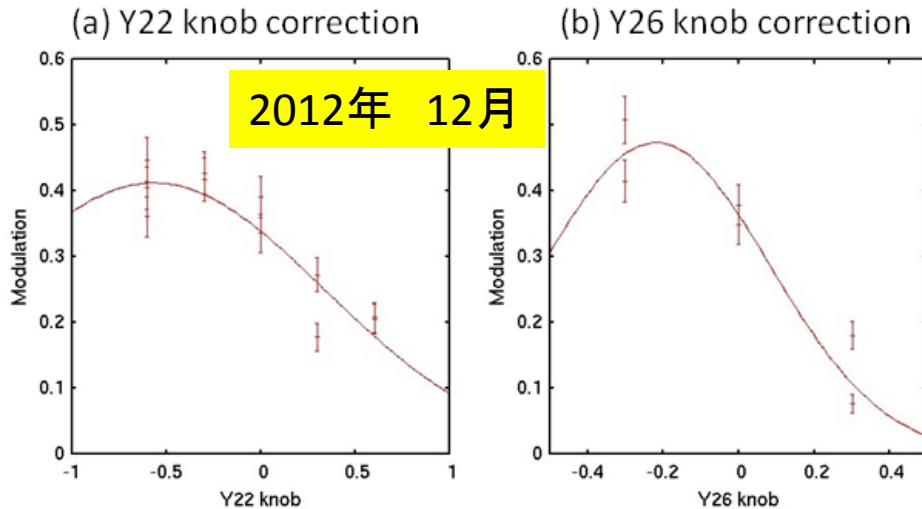
- 高次極の補正磁石を追加 (skew sextupoles)

→これを使用した実験結果とシミュレーションの比較により、1つの6極磁石に問題があることが判明。

→1つのコイルの admittance の異常を確認、磁石を入れ替え

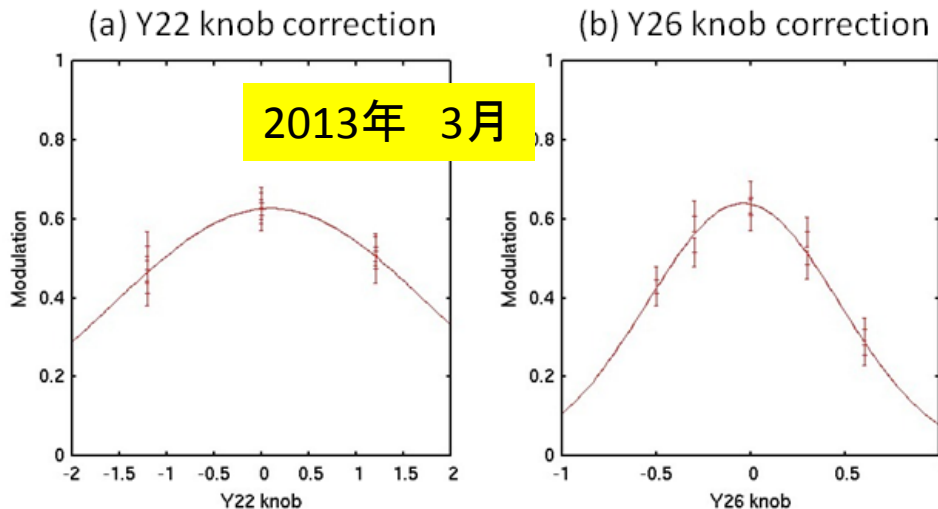
# Skew 6極磁石を用いた調整

調整ノブの値を変え、Modulation をプロット。 Modulation 大  $\leftrightarrow$  ビームサイズ小



Skew 6極磁石を強くしないと  
ビームサイズが小さくならな  
かった。  
これは計算と矛盾する。

6極磁石の1個のコイルの不  
具合を発見、入れ替え。



Skew 6極磁石ほぼゼロで  
ビームサイズが最小。  
計算と一致。

# Intensity dependence

バンチ当たりの電荷を下げないとサイズが小さくならない  
(強いintensity dependenceがある)

最終収束ラインでのTransverse Wakefieldが疑われる

- ILCと比べ、
    - 低いエネルギー (1.3 GeV vs. 250 GeV)
    - 長いバンチ長 (7-9 mm vs. 0.3 mm)
  - ILCと同様に、大きなベータ関数
- } 全てtransverse wakefieldの  
影響を大きくする要因

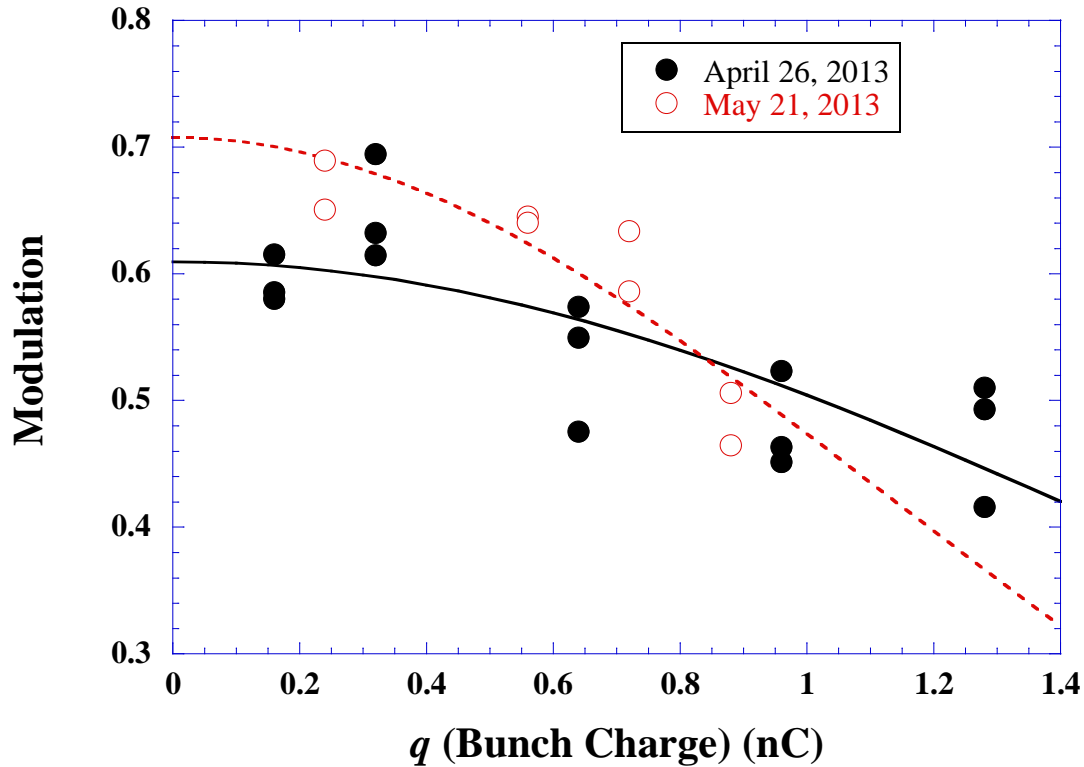
Wakefieldの影響の実験的な調査

ベータ関数の大きな場所でのwakefield sourceをなるべく取り除く

他の可能性が全くないわけではない

(intra-beam scattering + Chromatic aberration, Geometrical aberration)

# Intensity Dependence



Modulation

$$= |\cos \theta| \exp\left(-\frac{2\pi^2 \sigma_y^2}{h^2}\right)$$

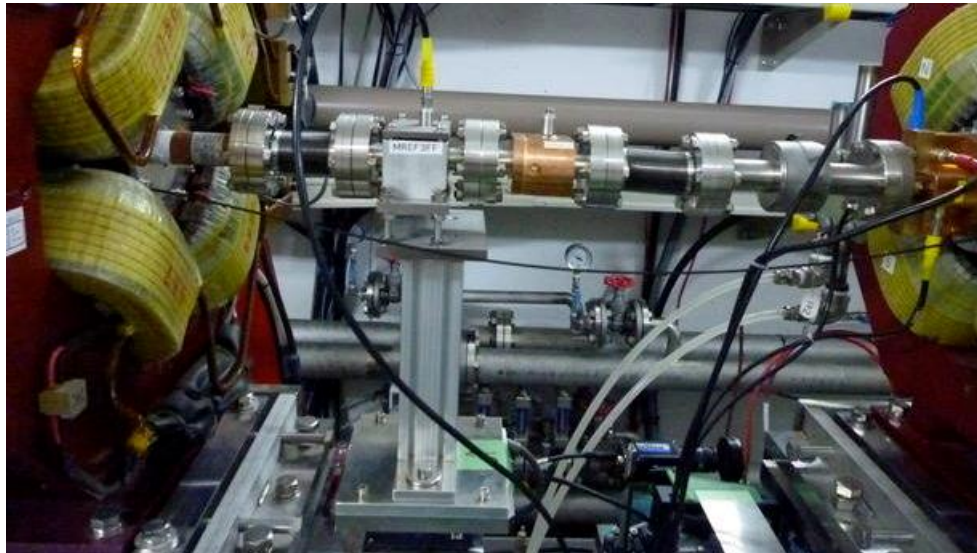
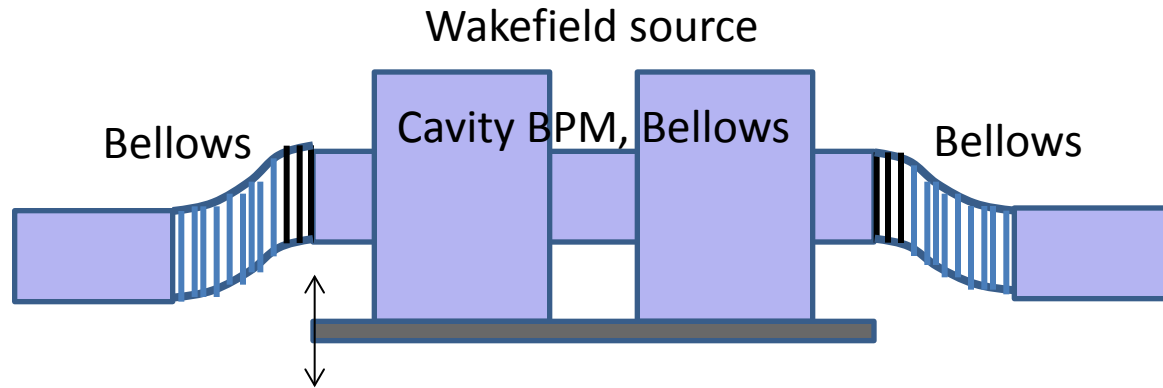
$(\theta = 30^\circ)$

Fitted lines:  $\sigma_y^2 = \sigma_{y,0}^2 + w^2 q^2$

$w = 100 \text{ nm/nC}, 140 \text{ nm/nC}$

Damping Ring での intra-beam scattering などでは説明できない

# Wakefield source on mover



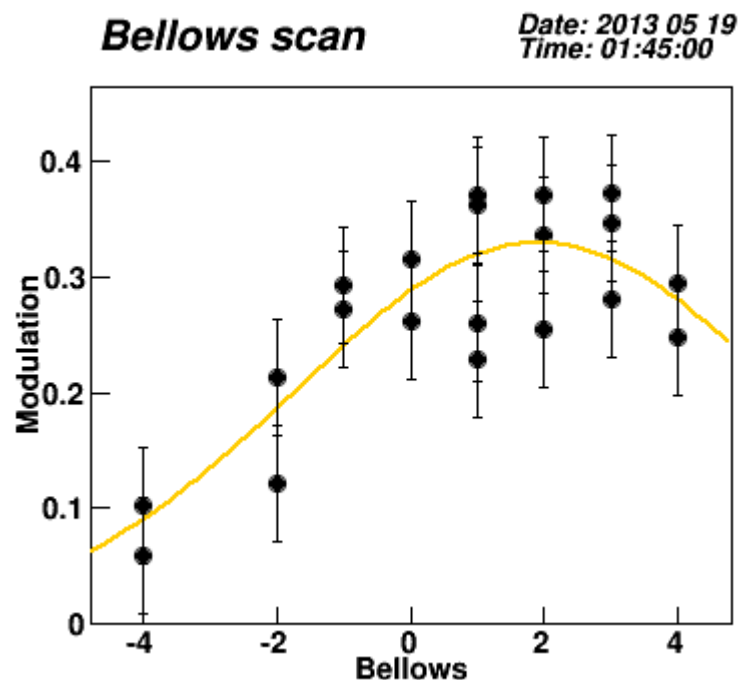
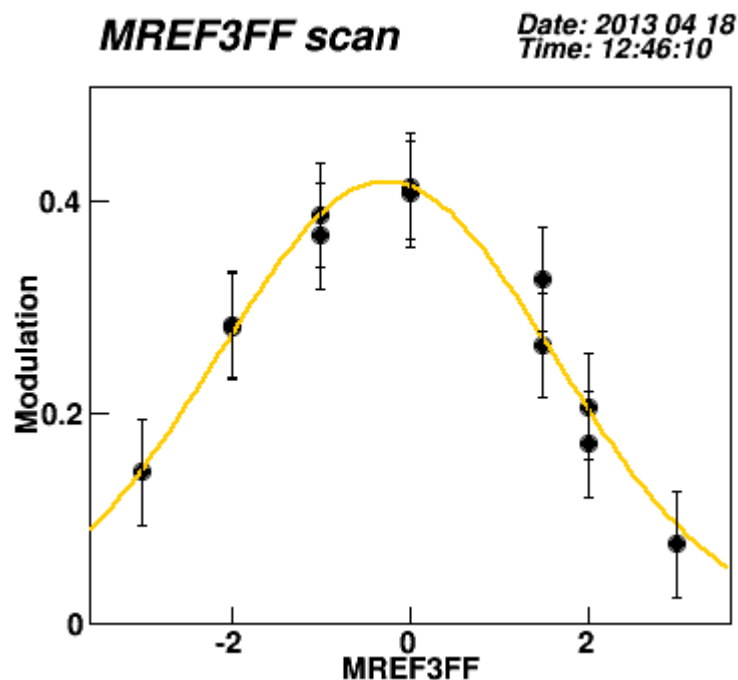
- Wakefield の影響の調査のため。
- 他の場所でのWakefeild の効果をCancel することも期待できる。

# IP-BSM Monitor modulation vs. Position of wakefield source on mover

Cavity BPM

Reference cavity

Bellows without shield



ビームサイズへの影響は、計算よりも1.5~2倍大きいようである。  
(ファクター2以内では合っている。)

# Shield of Bellows

最終収束ラインではほとんどの磁石がmover 上にあり、位置の微調整が可能。  
→ 磁石の両側に bellows がある。



Terunuma

2013 年5月、ほとんどの bellows にシールドを差し込んだ。  
はっきりした効果はこれまでのところ確認できていない。



## 設計ビームサイズになっていない、考えられる理由

- 非線形磁場
    - 調整ノブで対応できていないもの
      - 調整ノブが不完全？
      - 6極磁場成分よりも高次の効果？
  - Wake field
  - Beam position jitter
  - ビームサイズモニターの系統誤差
- } 見かけのビームサイズ増大

上のどれもが重要かもしれない。

データ解析、シミュレーション等進行中。

秋からの実験でさらに調査したい。

# まとめ

- ILC と同様の最終収束方式で、70 nm 以下のビームサイズを達成、確認した（2012年 12月）。
- その後、65 nm 程度のビームサイズを繰り返し確認。ビーム調整方法をほぼ確立した。
- 高次極磁場成分（誤差）への対策により、ビームサイズ増大を抑えることができた。
- 残る問題
  - 設計ビームサイズ(37 nm)まで到達していない
    - まだ多くの原因が考えられる。今後明らかにしたい。
  - 強い intensity dependence（おそらく wake field が原因）
    - 原因の特定、低減策をさらに検討中。