

KEKB入射器における遅いトンネル床面変動の動的観測

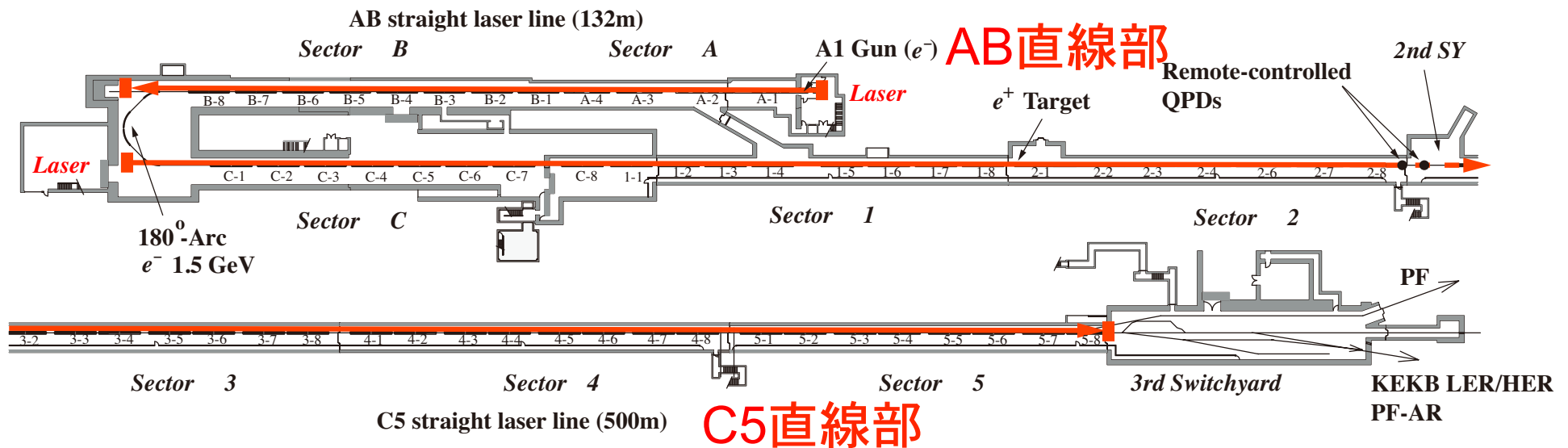
諏訪田 剛
KEK加速器研究施設

はじめに

- 入射器では、次期計画SuperKEKBに向けた入射器増強と高度化が進行中. 高精度アライメントもその一つ.
- 2015年1月レーザーアライメントを基本とする初期アライメントを全加速ユニットについて終了.
- しかし、初期アライメント後の加速ユニットの変位が時間とともに増大していることが判明.
- 加速ユニット変位の静的計測から動的計測への移行と入射器全体の動的変位の監視が肝要.
- 2015 5/Jan. – 1/Julyまでの約半年間、入射器トンネルで加速ユニット変位の連続観測を実施.

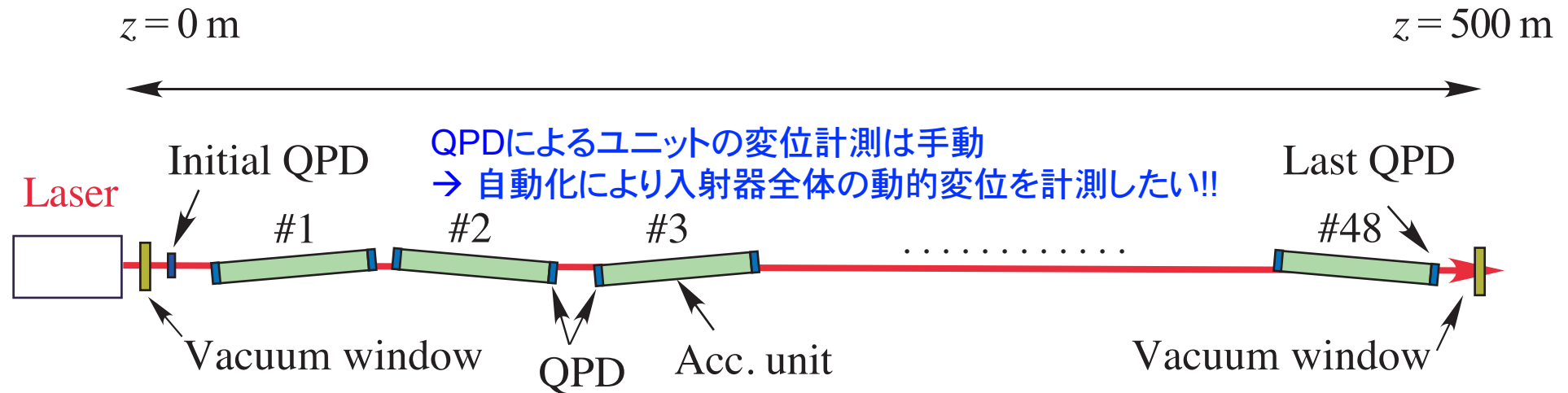
KEKB入射器ビームライン

- 2本の長直線部からなる電子陽電子入射器(総長600m)
- AB直線部 100m、C5直線部 500m
- 各直線部の最上流にはレーザー(He-Ne)を設置し 独立したレーザーアライメントが可能



M.~Akemoto, et al., "The KEKB injector linac", Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A002.

レーザーアライメントの原理 – 二段構え –

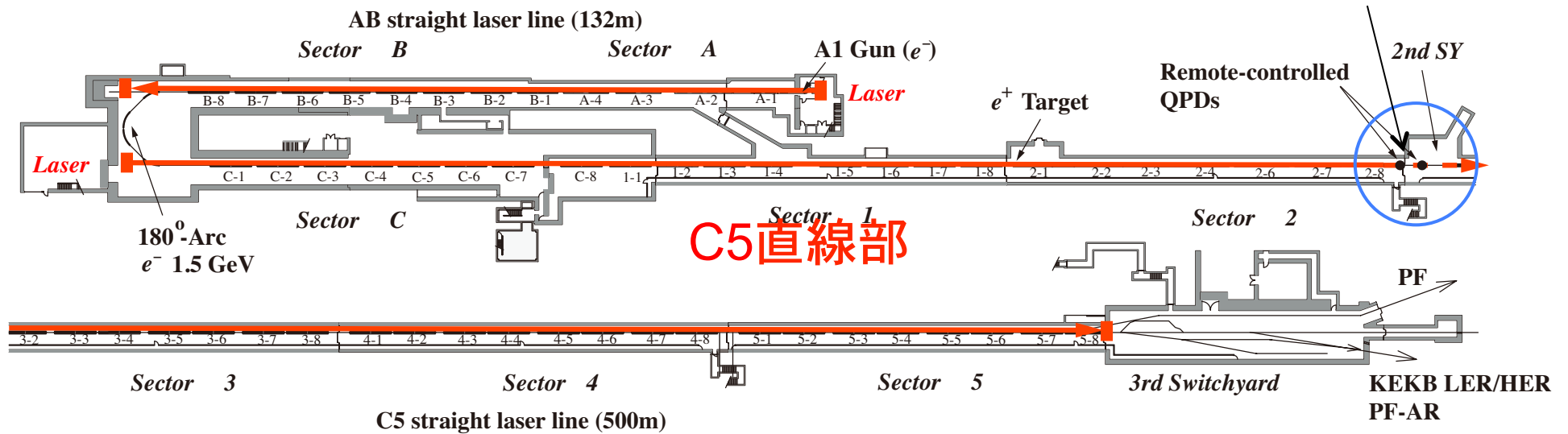


- レーザー光軸はFB制御により高安定化に成功!!
- 長基線レーザーアライメント(精度 $\sigma \approx 100 \mu\text{m}$)
レーザー光軸に沿って加速ユニットを直線上に並べる
- 加速ユニット内アライメント(精度 $\sigma \approx 50 \mu\text{m}$)
加速ユニット内に配列した加速管/Q電磁石をレーザートラッカー計測により直線上に並べる

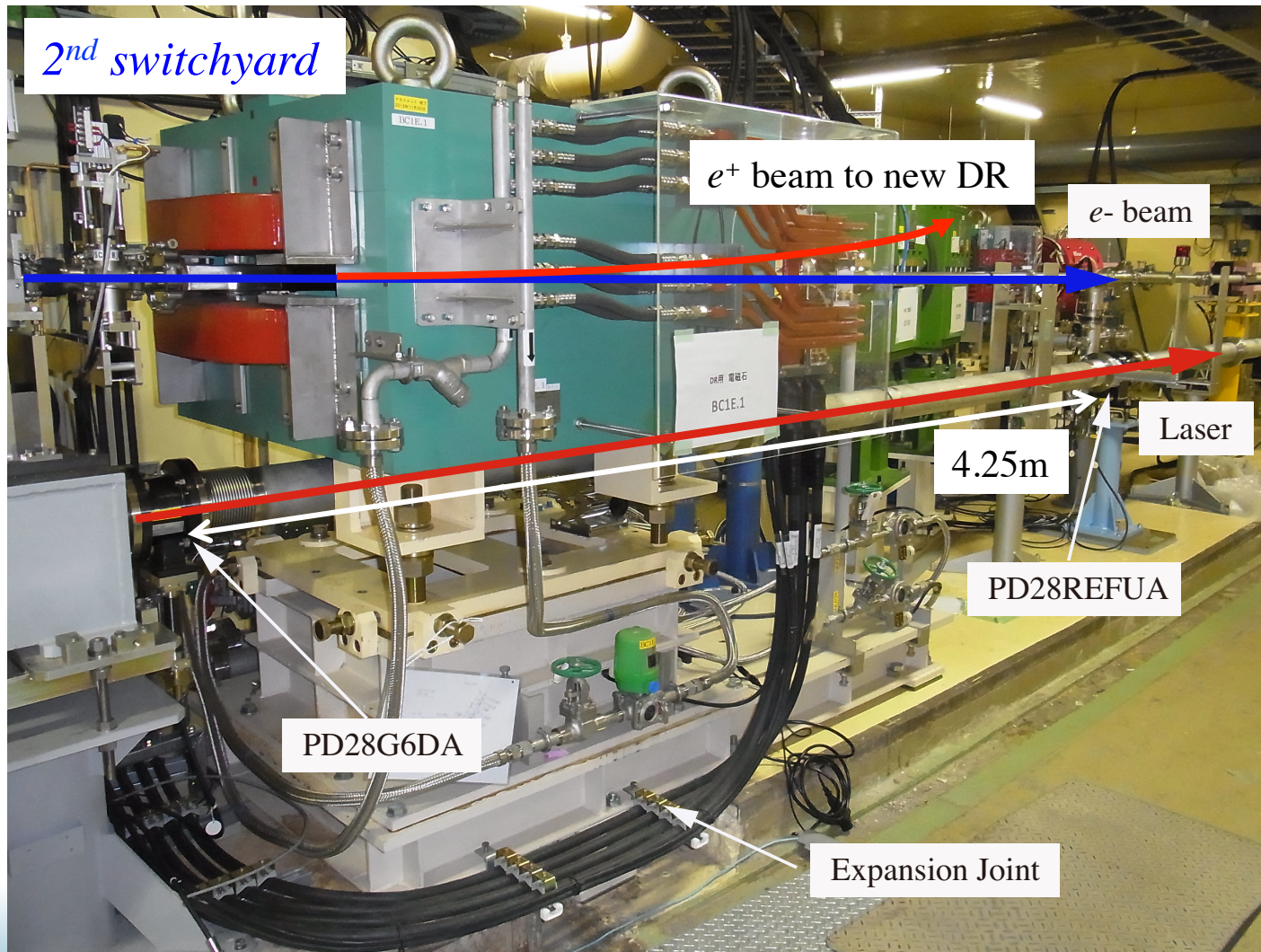
諏訪田剛, 日本加速器学会誌「加速器」10 (4) 2013, p.1.

自動QPD2台の設置

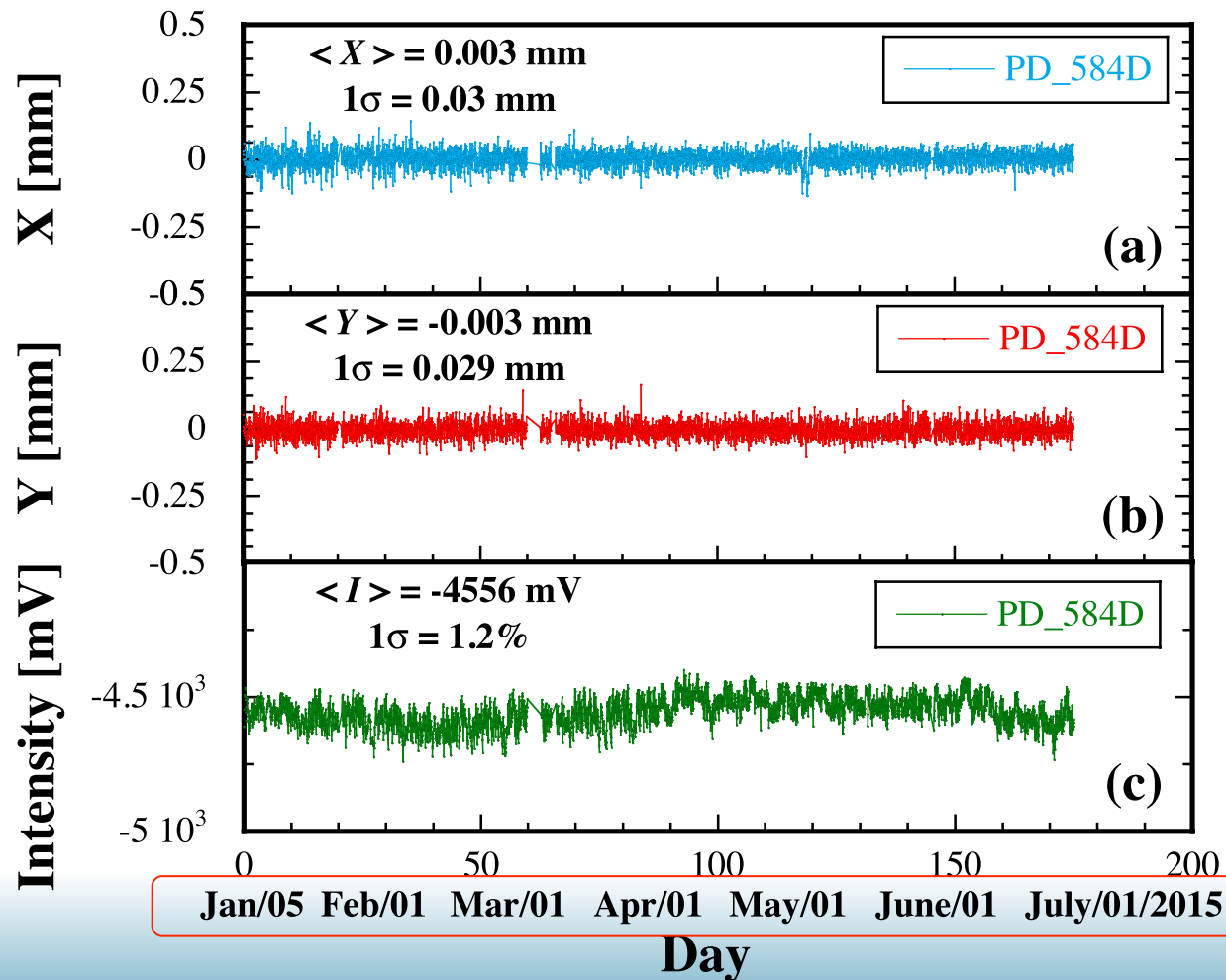
入射器中央(第2SY)の建屋継目を挟んだ上下流に自動QPD2台設置



入射器中央に設置した2台の自動QPD

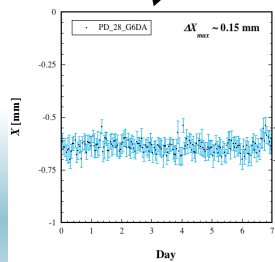
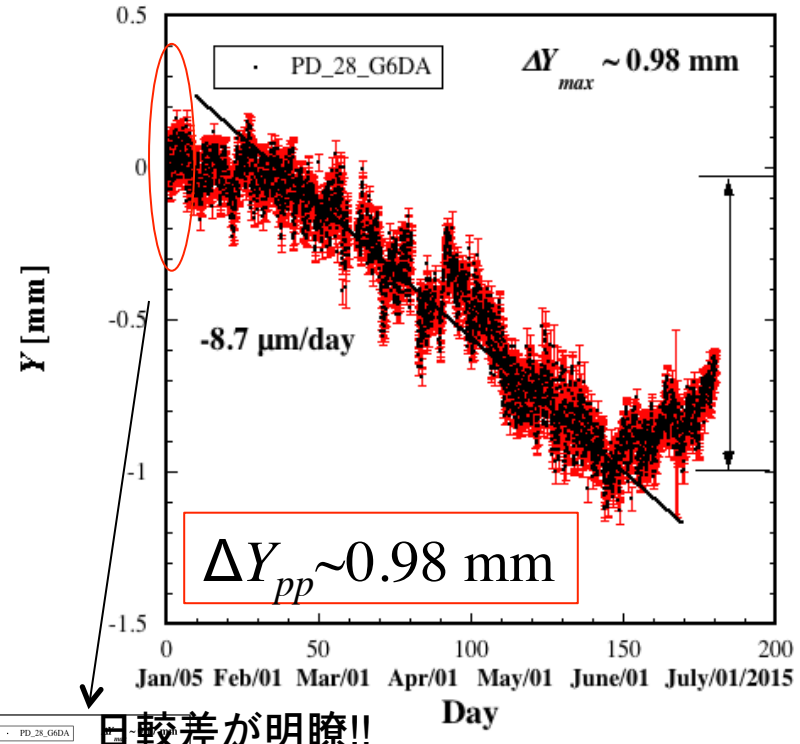
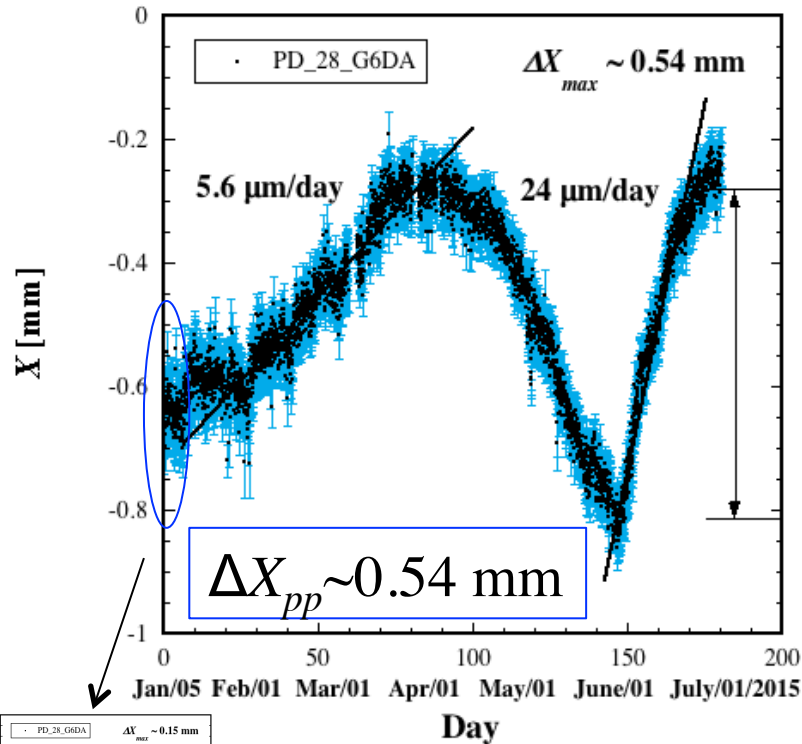


遅いトンネル床面変動の動的観測 :FB制御による光軸安定性@QPD584D

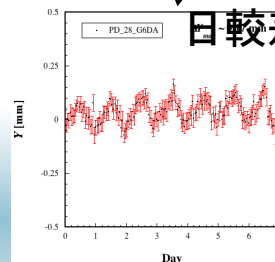


上流QPD (PD_28_G6DA) 時間変位傾向(毎定時収集)

2015 5/Jan.-1/July



Horizontal
 $\Delta X_{pp} \sim 0.15 \text{ mm}$

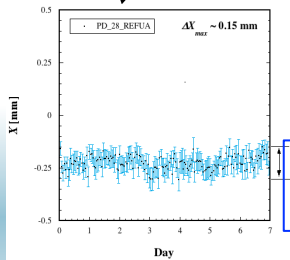
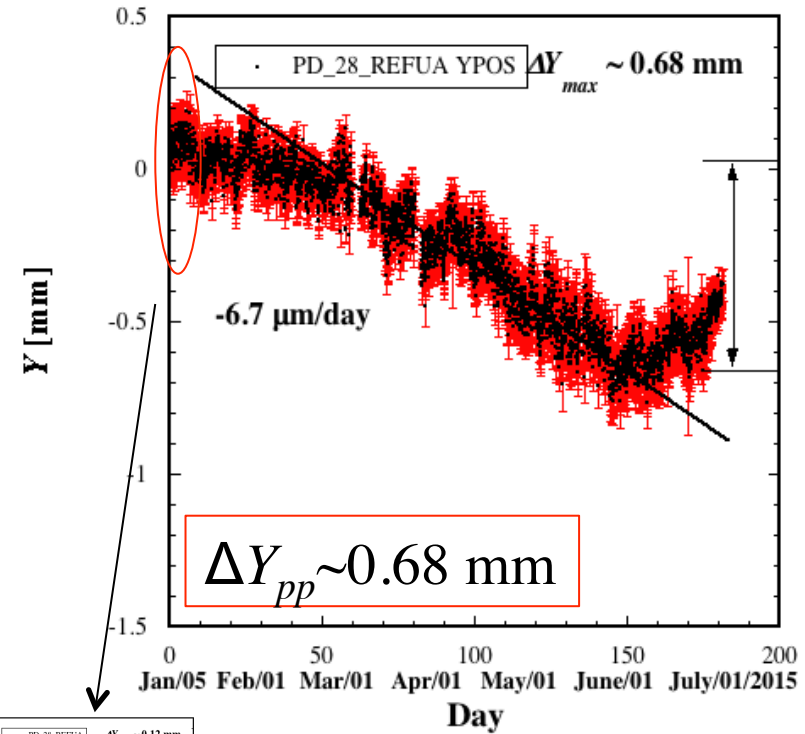
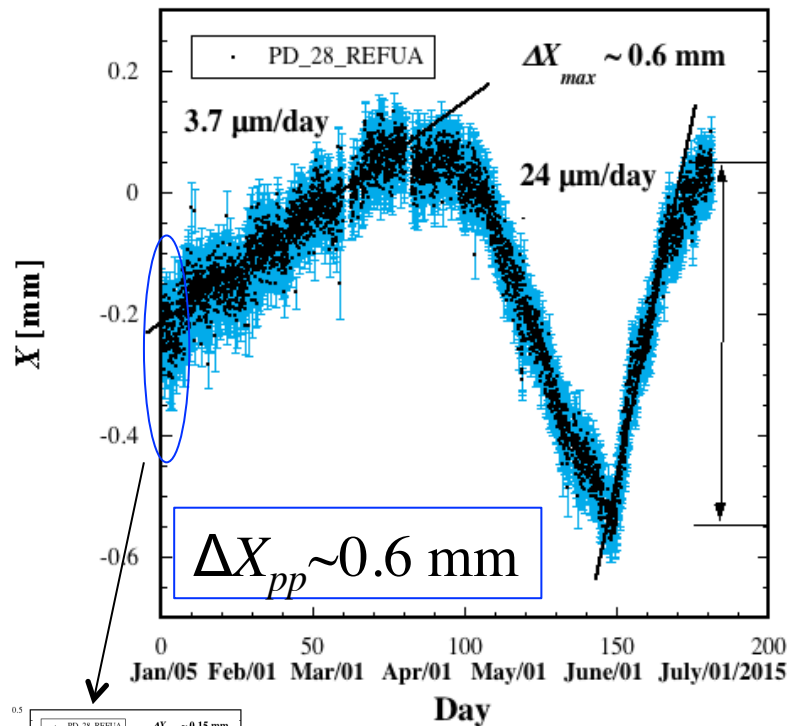


Vertical
 $\Delta Y_{pp} \sim 0.17 \text{ mm}$

日較差が明瞭!!

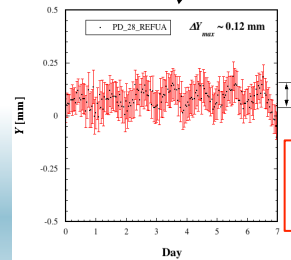
下流QPD (PD_28_REFUA) 時間変位傾向(毎定時収集)

2015 5/Jan.-1/July



Horizontal

$\Delta X_{pp} \sim 0.15 \text{ mm}$



Vertical

$\Delta Y_{pp} \sim 0.12 \text{ mm}$

入射器トンネル床面変動の解析

1. 回帰分析
 - 自己回帰モデル(AR過程)により時系列データを解析
2. モデル化
 - 時系列データを周期関数とATL則に基づく地面変動振幅和で記述
3. ATL則解析
 - 地殻のランダムな拡散運動に基づく地面変動モデルに基づく解析
4. 相関解析
 - 建屋継目を挟んで4.25m離れた2カ所QPD変位の相関解析
5. 周波数解析
 - フーリエ変換に基づく周波数解析
 - ウェーブレット変換に基づく周波数解析
6. 欠損データと不適格データの取扱い

入射器トンネル床面変動の解析： 回帰分析

1. 回帰分析

- 自己回帰モデル(AR過程)により時系列データを解析
- m次ARモデル
 - $z[n]$:目的変数、 $z[n-k]$:過去変数、 $\varepsilon[n]$:予測誤差、 a_k :回帰係数

$$z[n] = \sum_{k=1}^m a_k z[n-k] + \varepsilon[n]$$

- 予測誤差の自乗和が最小となるよう最小自乗法により次数mを決める
 - χ^2 :規格化分散値、 N :時系列データ数、

$$\hat{\chi}^2 = \sum_{n=1}^N \frac{1}{N} \left(z[n] - \sum_{k=1}^m a_k z[n-k] \right)^2$$

北川源四郎, 時系列解析入門 (岩波書店, 2005)

入射器トンネル床面変動の解析： モデル化

1. モデル化

- 地面変動要因
 - 周期的: 外気温、日照、気圧、地下水変位、海洋潮汐、波浪等
 - 拡散的: 地盤の拡散現象(ATL則)
- 時系列データを周期関数とATL則に基づく地面変動振幅和で記述
 - $z[n]$: 目的変数、 $\varepsilon[n]$: 予測誤差、 a_k, b_k : 回帰係数

$$z[n] = \sum_{n=1}^N \left[\sum_{k=1}^m (a_k \sin[k\omega n] + b_k \cos[k\omega n]) + c + d\sqrt{n} + \varepsilon[n] \right]$$

周期関数による変動成分

ATL則変動成分

誤差変動

北川源四郎, 時系列解析入門 (岩波書店, 2005)

入射器トンネル床面変動の解析: ATL則

1. ATL則

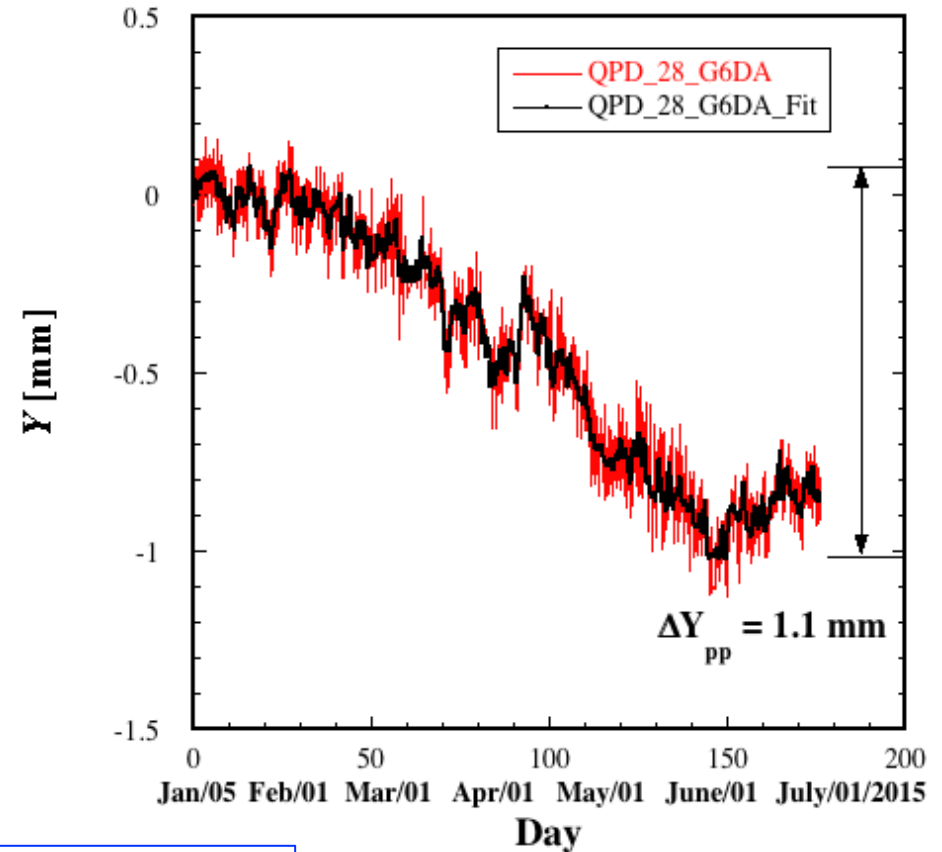
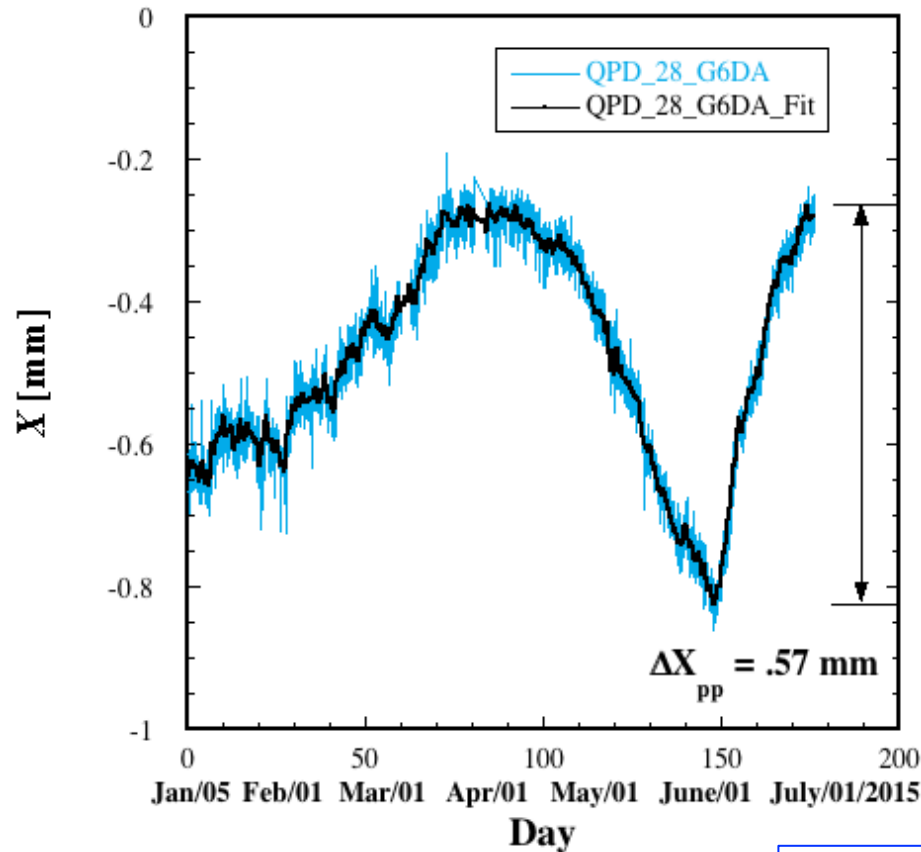
- 地殻のランダムな拡散運動に基づく地面変動のモデル
- L : 任意に離れた2点間距離、 T : 任意の時刻からの経過時間、
- $\langle dz^2 \rangle$: 2点間変位 dz の2乗平均、
- A : 比例係数、 $A \sim 10^{(-5 \pm 1)} \mu\text{m}^2/\text{s}/\text{m}$ 、 $\langle dz^2 \rangle = ATL$
- 空間スケール $1\text{m} \sim 10\text{km}$ 、時間スケール 分 \sim 年の範囲でよく成立することが検証済み。

Table 1: 入射器トンネルにおける拡散係数

QPD	Horizontal		Vertical		units
	$\hat{\chi}^2$	A_x	$\hat{\chi}^2$	A_y	
上流	0.39	19 ± 1	2.3	110 ± 5	$[\text{nm}^2/\text{m}/\text{s}]$
下流	0.45	6.5 ± 0.3	0.47	57 ± 3	$[\text{nm}^2/\text{m}/\text{s}]$

V. Shiltsev, Phys. Rev. Lett. 104, 238501 (2010).

入射器トンネル床面変動の解析: 回帰分析(PD_28_G6DA)

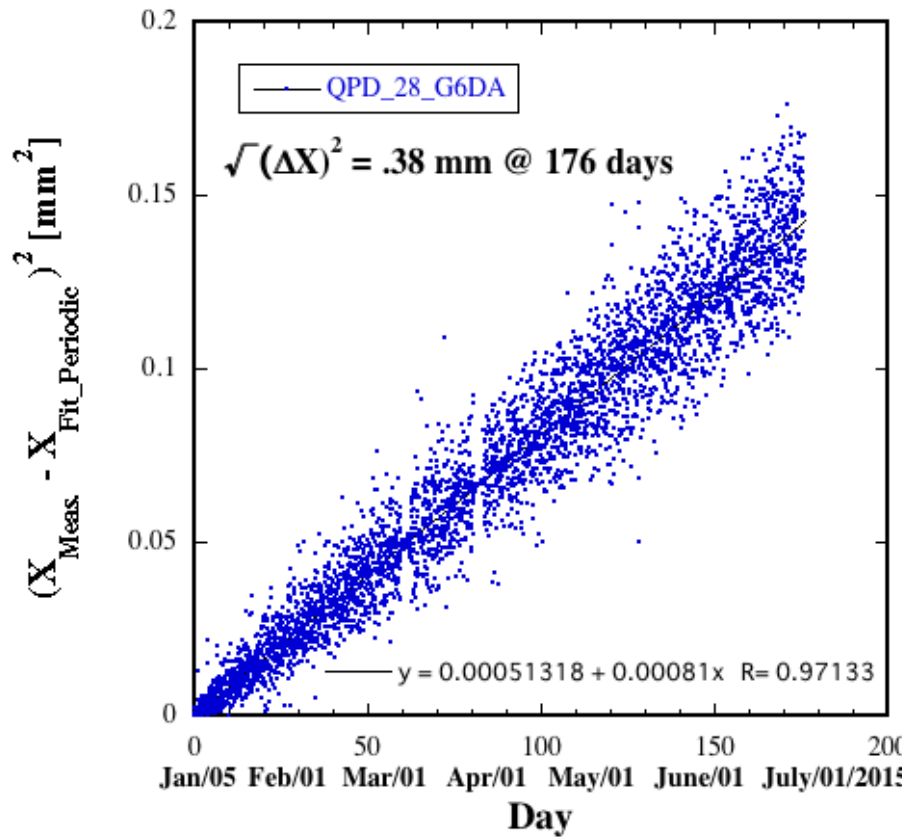


Horizontal

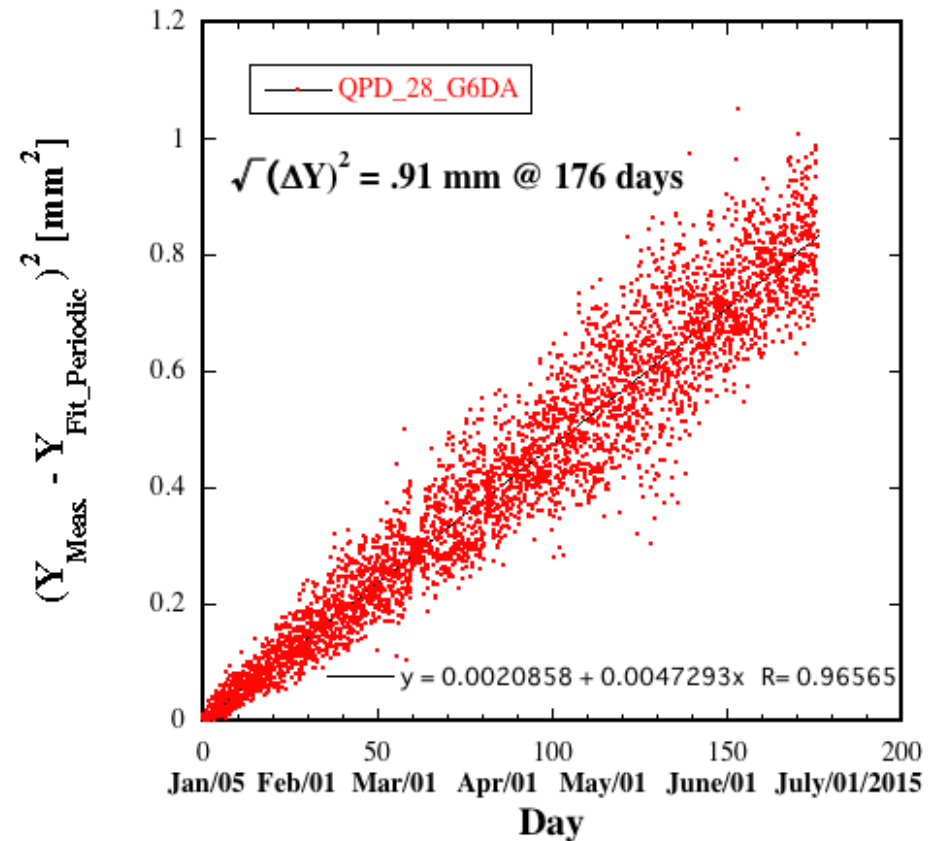
基本周期 $T_0 = 4200$ h
モデル次数 $m = 160$

Vertical

入射器トンネル床面変動の解析: ATL側成分の解析 (QPD_28_G6DA)



QPD_28_G6DA_X



QPD_28_G6DA_Y

遅いトンネル床面変動の動的観測 : 変動成分解析のまとめ

Table 2: 入射器 SY2 における床面変動成分の大きさ

変動成分	QPD28G6DA		QPD28REFUA		units
	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	
全体	0.57	1.1	0.63	0.80	[mm]
周期的	0.65	0.64	0.69	0.50	[mm]
ATL 則	0.38	0.91	0.23	0.66	[mm]

* 半年間に及ぶ測定変位、全体 ΔX_{pp} , 周期的 ΔX_{pp} , ATL則 $\sqrt{\langle \Delta X^2 \rangle}$

+ 日較差: $\Delta Y_{pp} \sim 0.17$ mm@上流, $\Delta Y_{pp} \sim 0.12$ mm@下流

→ 初期アライメント要請値を遥かに越える動的変動が明らかに!

まとめ

- 現在入射器では、次期計画SuperKEKBに向けた入射器増強とその高度化が佳境.
- 高精度レーザーアライメントシステムを基本とする初期アライメントを終了.
- 初期アライメント後の半年間にわたるトンネル床面の動的変動はアライメント要請値を越えてしまうことが判明 (入射器中央で $\Delta X \sim 0.6$ mm, $\Delta Y \sim 1$ mm).
- 今後は自動QPDを増設し入射器全体にわたる動的変動を計測し、ビーム基準アライメントの可能性を探る.

関連ポスター発表

1. 榎本等、“床変動の常時モニターを目指すレーザーPDを用いた自動計測機器の開発” (WEP136)
2. 田中等、“KEKB入射線形加速器トンネル床変動の測定(2)” (WEP137)
3. 諏訪田等、“KEKB入射器における長基線レーザーアライメントシステムを利用したトンネル床面変動の動的測定システムの開発” (WEP138)
4. 市川等、“KEK電子陽電子入射器におけるアライメントレーザーフィードバックシステムの改良” (WEP134)
5. 牛本等、“ Super KEKB に向けた電子陽電子入射器のアライメント状況(2)” (WEP135)