

# KEKB入射器における微小床面変動とATL則の検証

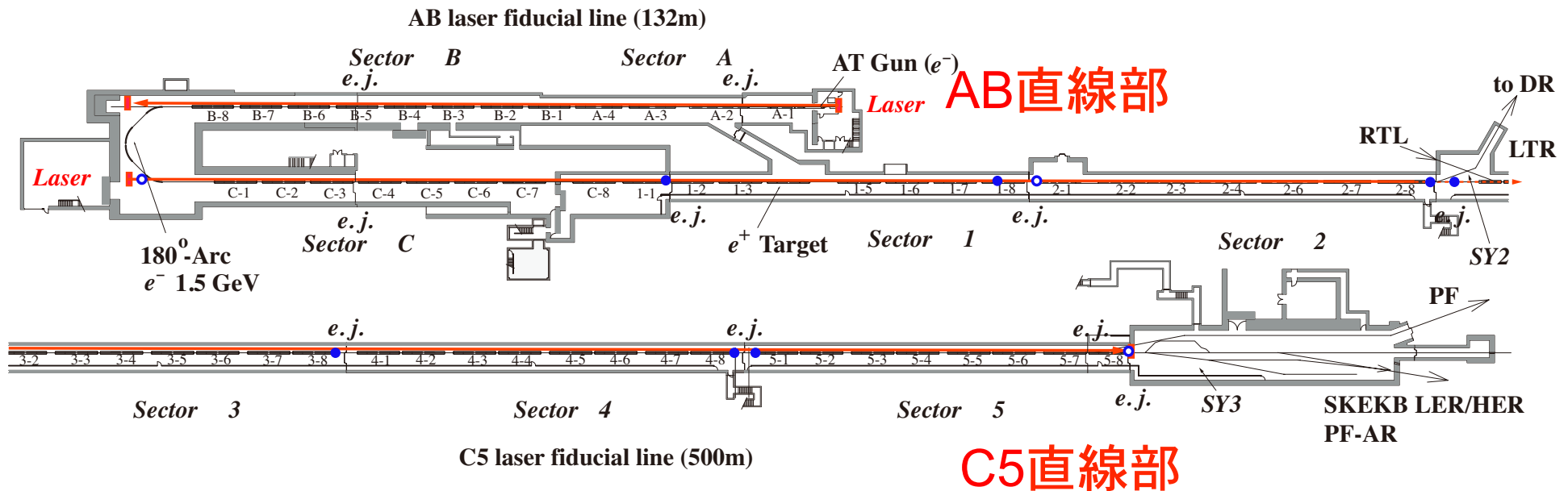
諏訪田 剛  
KEK加速器研究施設

# 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.
- 2016 7/Jan. から複数台の加速ユニット(又は床面)変位の連続観測を開始.
- 初期アライメント後の床面変位が時間とともに増大していることが判明.
- 地盤拡散に基づく地面変動による床面変位の非周期的成分(ATL則)の時空発展の定量的評価とその検証を行う

# KEKB入射器ビームラインとレーザーアライメント

- 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.

# 自動QPD設置

Table 1: Summary table in the locations of the remote-controllable QPDs and expansion joints (*e.j.*) along the injector linac from the laser source

QPD	<i>e.j.</i>	$L$ [m]
REF1UA		1.74
	C3D	44.31
11DA		106.11
	11D	106.72
1814DA		177.04
	1814D	178.39
21UA		180.17
28G6DA		259.07
	28G6D	259.64
28REFUA		263.32
38DA		339.58
	38G5U	341.60
48DA		419.08
	48G5U	421.11
51UA		423.65
	57G7U	498.01
584D		499.94

- C5ラインにおけるQPDと建屋継目の光源からの距離 ( $L$  [m])

- 基準QPD 28REFUA  
→ 継目からの距離  $\Delta L$  [m]  $\sim 3.6$  m

- その他QPD  
→ 継目からの距離  $\Delta L$  [m]  $< 2$  m



基準QPD

# 入射器トンネルの床面変動とATL則の検証

## 1. 狙い

- 入射器トンネル床面の非周期的増大成分(ATL則)の時空発展を定量化しておくことは重要
  - 入射器トンネル(浅い地下5.65m, 建屋と一体構造)における入射器アライメントの基本情報となる

## 2. 線形回帰分析とモデル化

- 時系列データを時間の比例傾向成分, 周期関数と非周期成分(統計的変動、ATL則成分)の振幅和で記述
  - 周期成分と非周期成分の分離

## 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
  - ATL則の検証、時空発展の定量的評価

# ATL則とは?

- 地殻のランダムな拡散運動 (古典的ブラウン運動)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、

1.  $\langle dz^2 \rangle$ : 2点間変位  $dz$  の分散平均
2. ATL則

$$\langle dz^2 \rangle = AT^\alpha L^\beta, \alpha \sim 1, \beta \sim 1$$

- $T$  依存性: 古典的ブラウン運動
  - $L$  依存性: 気圧? (A. Sery), フラクタル? (V. Shiltsev)
3.  $A$ : 比例係数、 $A \sim 10^{(1 \pm 1)} \text{ nm}^2/\text{s/m}$
  4. 広範囲なスケールでよく成立:
    - 空間スケール: 1m ~ 10km
    - 時間スケール: 分 ~ 年

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

# 時系列データの回帰分析

## 1. 回帰分析

- 線形回帰モデル(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

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

- AIC(赤池情報基準)が最小となるように次数 $m$ を決める
  - $l(\theta)$ : 対数尤度、 $k$ : 自由パラメータ数 ( $m+1$ )
  - 対数尤度と自由パラメータ数の和を最小にする次数 $m$

$$AIC = -2l(\hat{\theta}) + 2k, \quad \hat{\theta} = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_m)$$

$$l(\hat{\theta}) = -N \log(2\pi\sigma_m^2) / 2 - N / 2$$

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

北川源四郎, 時系列解析入門 (岩波書店, 2005)

# 線形回帰モデル

## 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
  - 非周期的(拡散的): 地盤の拡散現象に基づく地面変動 (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、 $a, b_k, c_k, d$ : 回帰係数

$$z[n] = a + \sum_{k=1}^m b_k \sin[2\pi kn / T_0] + \sum_{k=1}^l c_k \cos[2\pi kn / T_0] + d \cdot n + \varepsilon[n]$$

オフセット

周期関数による変動成分

時間比例傾向成分

測定量(変位)

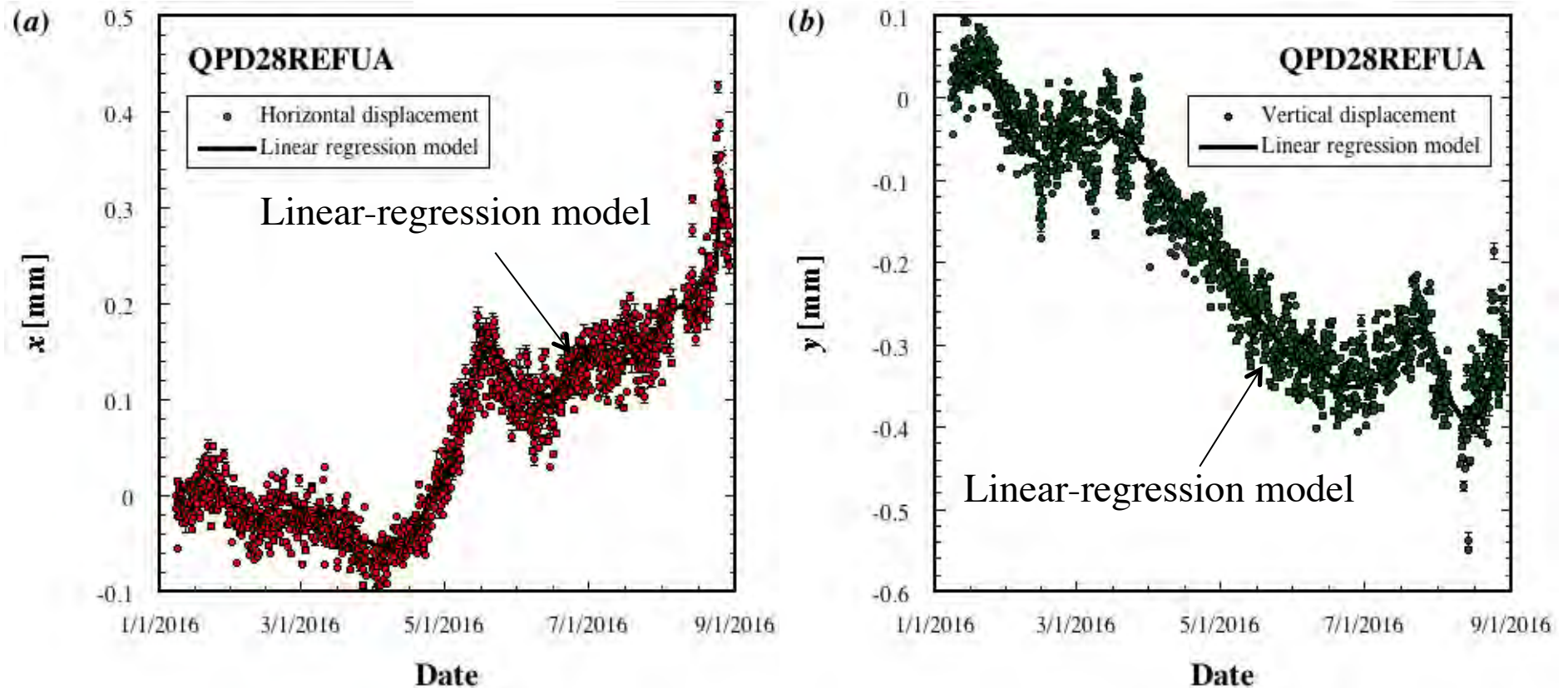
統計変動+  
ATL則変動

北川源四郎, 時系列解析入門 (岩波書店, 2005)



# 時系列データと回帰分析

基準QPD28REFUA, 2016. 07 Jan. – 26 Aug.

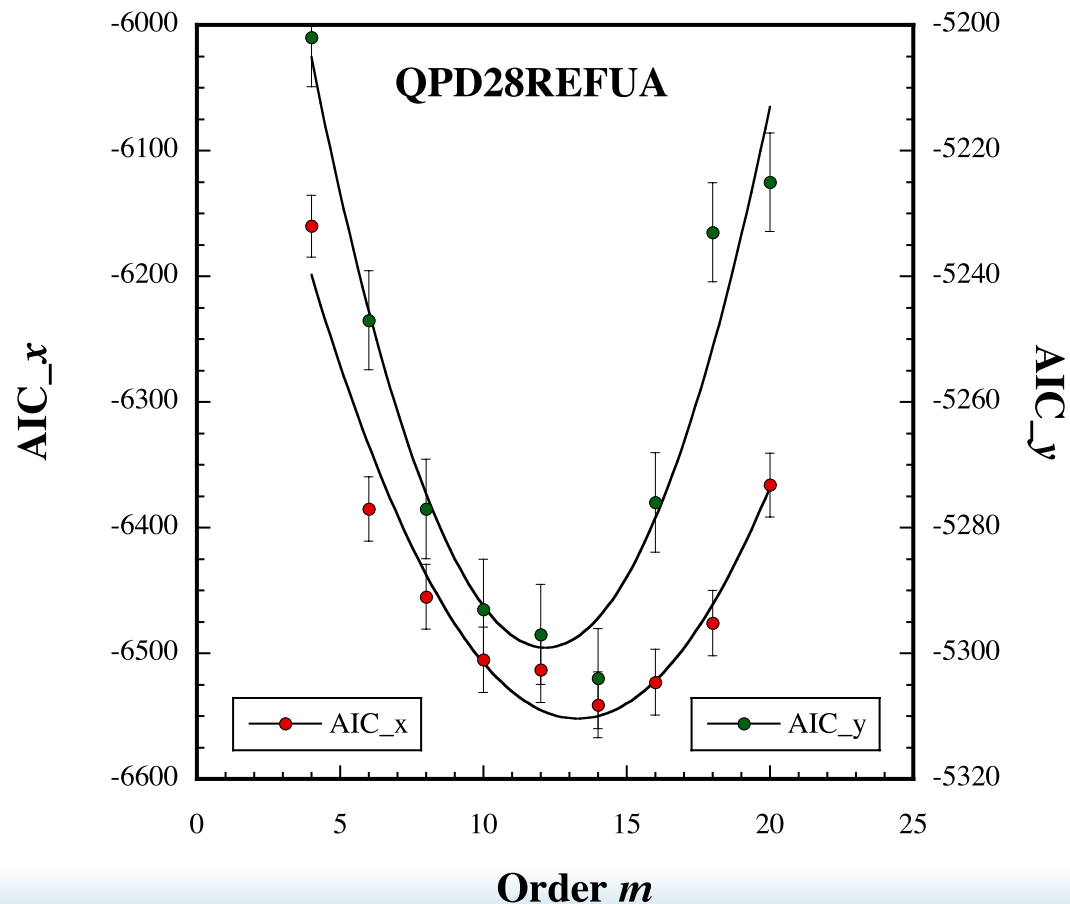


Horizontal (x)

Vertical (y)

約8ヶ月間の連続測定、4時間毎定時、データ点数1364/QPD

# 基本周期とARモデル次数 $m$ の決定



基準QPD28REFUA:  
基本周期

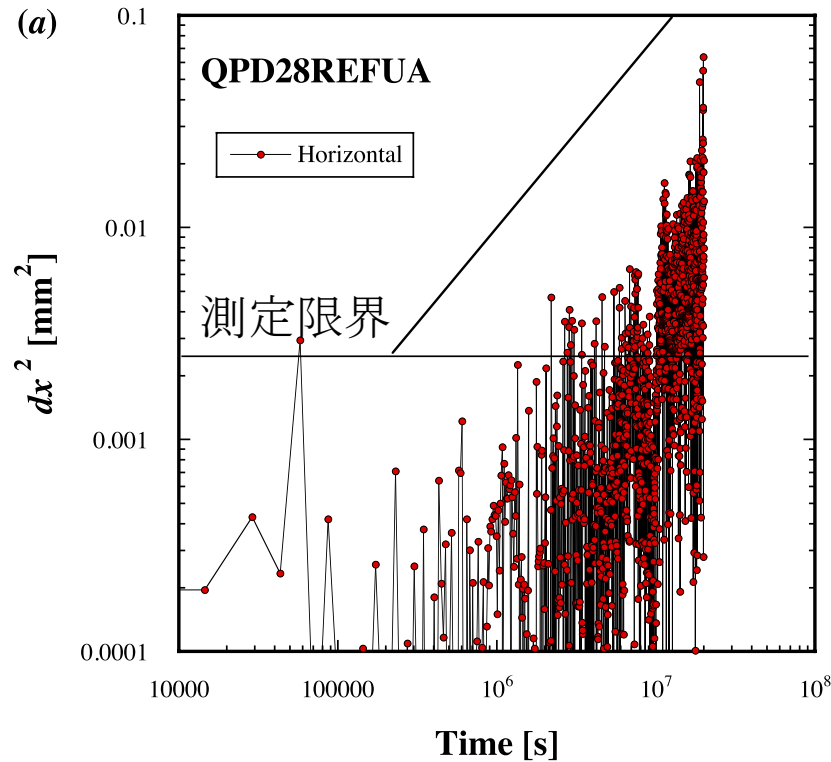
$$T_0 = 1 \text{ y} = 3.1536 \times 10^7 \text{ s}$$

$$AIC_{\min-x, y} @ m = 14$$

$$\rightarrow T_0 / m \geq 26 \text{ days}$$

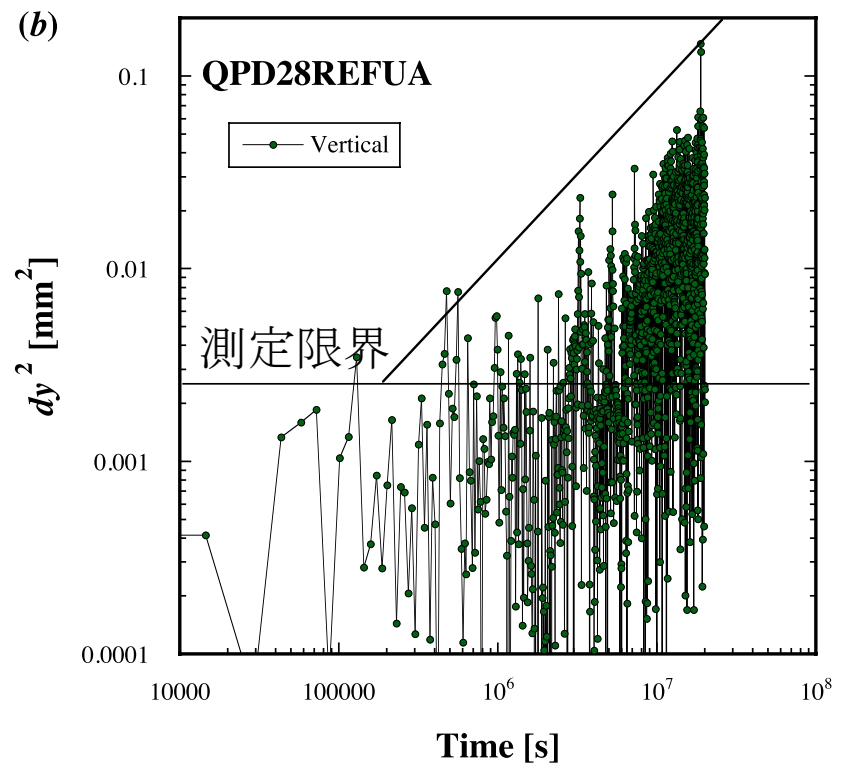
# 残差二乗の時間発展

基準QPD28REFUA



Horizontal ( $x$ )

$$\langle dx^2 \rangle = \langle (x - x_{linfit})^2 \rangle \propto T$$

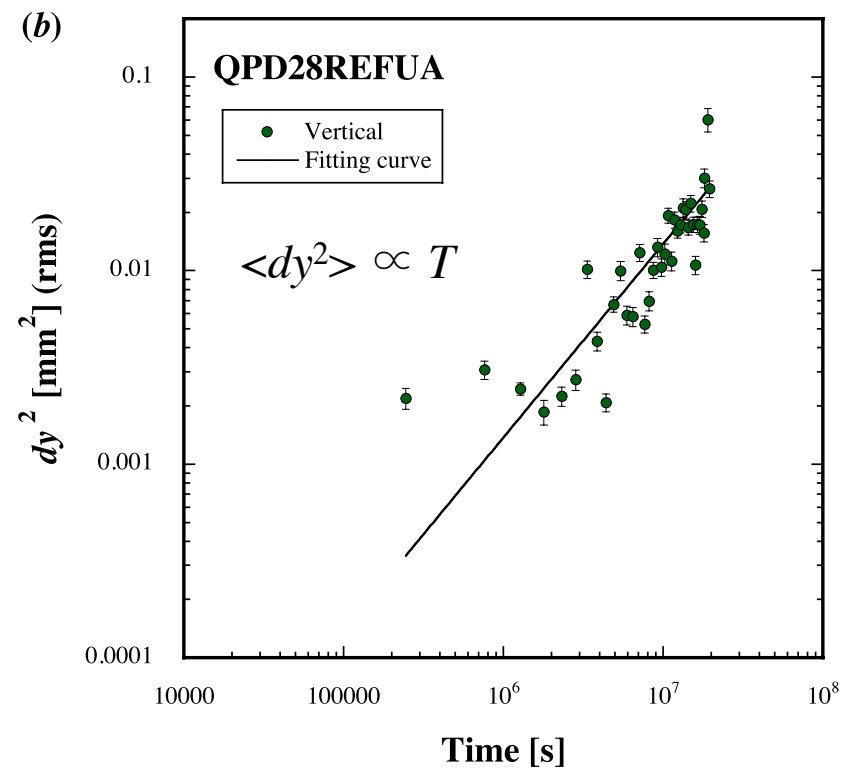
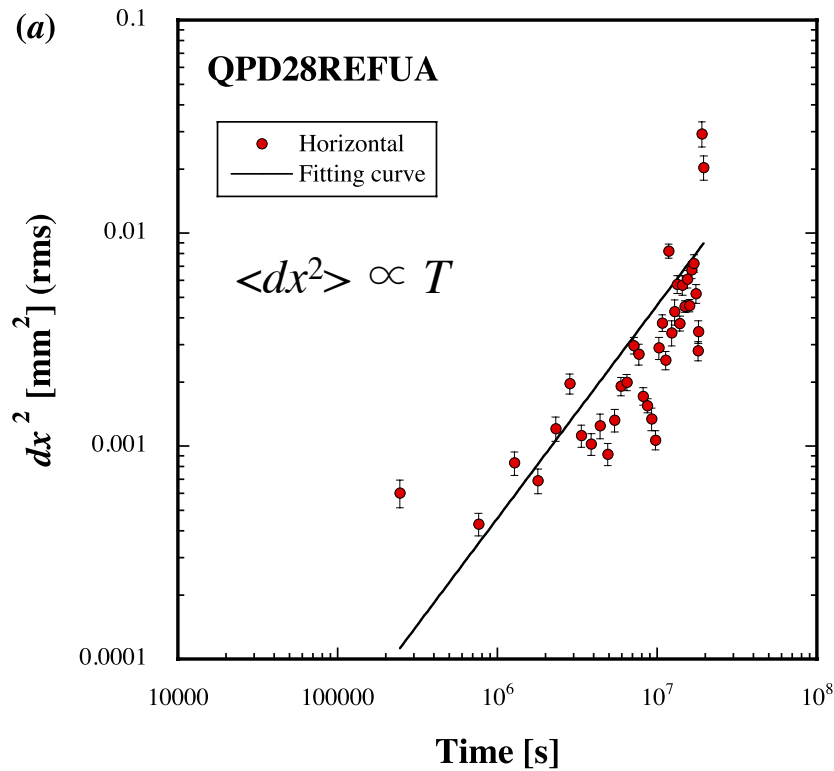


Vertical ( $y$ )

$$\langle dy^2 \rangle = \langle (y - y_{linfit})^2 \rangle \propto T$$

# 残差二乗分散(rms)の時間発展

基準QPD28REFUA



Horizontal (x)

Vertical (y)

# 残差二乗分散(rms)の時間発展

## 基準QPD28REFUA

Table 2: Proportional constants ( $AL$ , rms) of the ATL law obtained for QPD28REFUA.

QPD	$A_x L / 10^3$	$A_y L / 10^3$	Units
28REFUA	$0.46 \pm 0.06$	$1.4 \pm 0.2$	$[\text{nm}^2/\text{s}]$

Table 3: Proportional constants ( $A$ , rms) of the ATL law obtained for QPD28REFUA.

QPD	$A_x$	$A_y$	Units
28REFUA	$0.9 \pm 0.1$	$2.6 \pm 0.2$	$[\text{nm}^2/\text{m}/\text{s}]$

比例係数Aの算出

$L_1$ : 光源から基準QPDまでの距離

$$L_1 = 263.3\text{m}$$

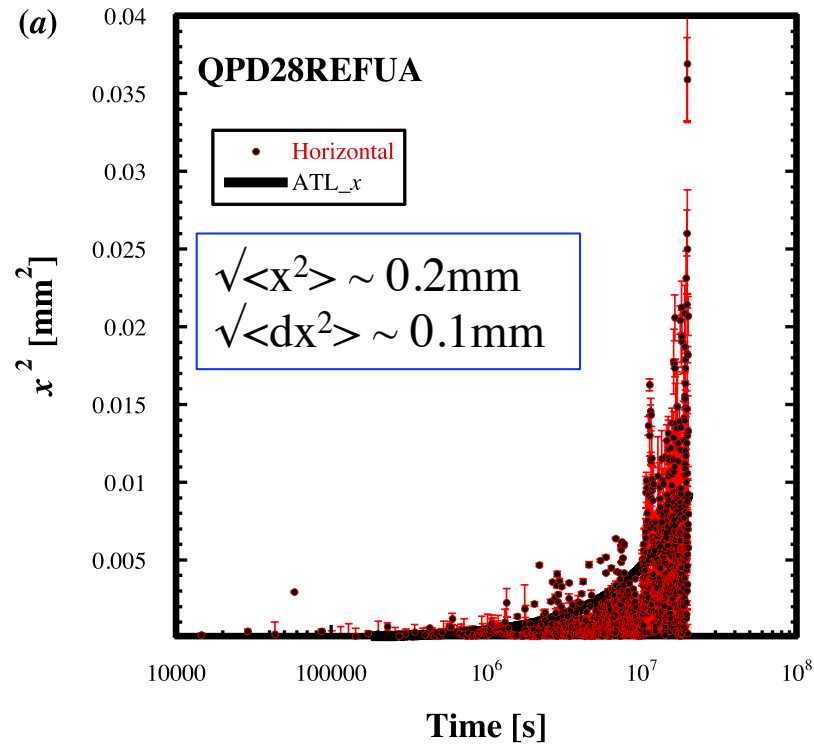
$L$ : 光軸全長、 $L = 500\text{m}$

光軸のATL効果を入れたATL則

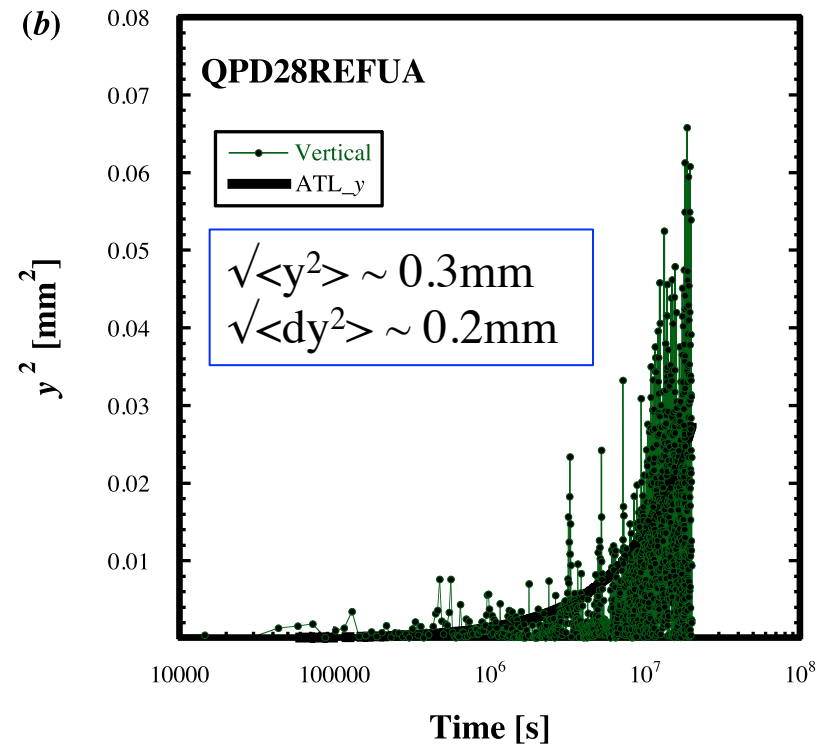
$$\langle dz^2 \rangle = \langle dz_1^2 \rangle + (L_1 / L) \langle dz_2^2 \rangle = 2ATL_1$$

# 残差二乗の時間発展

基準QPD28REFUA



Horizontal (x)



Vertical (y)

# まとめ

- 約8ヶ月に渡る連続観測結果を解析, 基準QPD28REFUAによる床面変動の時間発展が直接的に検証された.
- 残念ながら空間的發展を検証することはできなかった.  
→ 建屋継目の効果によるものと考えている. まだ解析に工夫の余地あり (続きは加速器学会誌に投稿中).
- 非周期成分の寄与は小さくなく、入射器アライメントにも影響する可能性あり.
- 今後は自動QPDを増設しデータ点を逐次増やす予定.  
→ 建屋継目からの設置位置を変えた系統的評価が必要