

# ナノビーム衝突を目指した相対位置計測および制御技術の検討

## FEASIBILITY STUDY ON MEASUREMENT AND CONTROL OF RELATIVE POSITIONING FOR NANO-BEAM COLLISION

松永裕樹<sup>#, A)</sup>, 吉岡宏和<sup>A)</sup>, 高橋良典<sup>A)</sup>, 大澤康伸<sup>B)</sup>, 菅原龍平<sup>B)</sup>, 増澤美佳<sup>B)</sup>, 山岡広<sup>B)</sup>  
Hiroki Matsunaga<sup>#, A)</sup>, Hirokazu Yoshioka<sup>A)</sup>, Yoshinori Takahashi<sup>A)</sup>  
Yasunobu Ohsawa<sup>B)</sup>, Ryuhei Sugahara<sup>B)</sup>, Mika Masuzawa<sup>B)</sup>, Hiroshi Yamaoka<sup>B)</sup>  
<sup>A)</sup> Takenaka Corp. <sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

### Abstract

In the SuperKEKB and future linear collider project (ILC), it is required to measure and control an offset of very small beams with a precision of several nanometers at the interaction point. A relative positioning control has a bunch of technical problems, because it is necessary to measure and control both short-term vibration and long-term offset between the two distant points. This paper is described a feasibility study about a measurement of relative position by a laser interferometer and a positioning control by a Piezo-Stage.

The first part is discussed that the precision of measurement position about a direction of laser radiation is less than or equal to 1 nanometer in frequency region less than 100Hz. The second part is discussed a measurement of relative displacement between two points 10 meter away on substructures located at the interaction point in the SuperKEKB. To compare with difference of acceleration meters for reference, a relative displacement measurement with a precision of several nanometers by a laser interferometer became clear. The final part is discussed a relative positioning control by using a Piezo-Stage between two points 3 meter away on two anti-vibration tables. It is possible to control a relative displacement from several tens of nanometers to two nanometers in frequency region less than 10Hz.

## 1. はじめに

SuperKEKB<sup>[1,2]</sup>では、ピークルミノシティをKEKBの40倍に向上させることを目標としており、ビームサイズ(高さ)は60nm程度に絞り込むことを計画している。更に、ILC計画においてはビームサイズを5nm程度にまで絞り込む計画であるなど、これらの目標を達成するためには、電子・陽電子ビーム間の相対位置ずれをnmオーダーで計測・制御する技術が不可欠である。

電子・陽電子ビームは、最終的に衝突点両側に位置する2台の超伝導電磁石により絞り込まれるため、この超伝導電磁石部分においてビームの相対位置ずれを計測・制御することが効果的である。SuperKEKBを例にとれば、2台の超伝導電磁石間は約10m離れており、特に地盤振動による2点間の鉛直方向の相対位置ずれ振動が計測・制御の対象となる。

加速器施設において、常時発生している振動を計測する試みは古くからなされている<sup>[3~6]</sup>。しかしながら、振動センサを設置した地点のみの振動量を観測しているものがほとんどであり、離れた2点間の地盤振動による相対位置ずれを検出するものではない。また、木村らは水管傾斜計を用いた相対位置ずれを検出する方法<sup>[7]</sup>を提案しているが、振動領域の計測には不向きである。

超伝導電磁石の相対位置制御の既往の技術として、山下らはnmオーダーの位置決め性能を目指した位

置決め基台の開発を行っている<sup>[8,9]</sup>。基台は設置床からの40nm(1Hz)の位置ずれを10~20nmに補正する性能を持っている。しかし、設置床からの相対位置のみが計測・制御可能であり、離れた2点間の相対位置のnmオーダーでの計測・制御はできない。

本稿では、レーザー干渉計を用いた相対位置ずれ検出、及び相対位置制御を行った結果を報告する。レーザー干渉計はレーザー照射軸方向の計測を行うものであるため、レーザー照射軸方向のみを対象とした基礎的な検討を行った。

初めに、1Hz以上の短期的な振動成分を対象として、レーザー干渉計の相対位置ずれ検出精度の確認を行う。次に、SuperKEKBのBelleII測定器ビーム衝突点周辺において、約10m離れた2点間を対象に、レーザー照射軸方向に関する相対位置ずれ振動の計測を実施し、約10mの距離においてもnmオーダーの計測が可能であることを確認する。最後に、3m程度離れた2点間を対象に、ナノポジショニングXYZステージを用いて、レーザー照射軸方向に関するnmオーダーの相対位置制御を行う。

## 2. レーザー干渉計

本検討では、nmオーダーの相対位置ずれ検出を行うため、アジレント・テクノロジー製レーザーポジショニングシステム(以下、レーザー干渉計)を採用した。使用した光学機器をTable 1に、計測原理の概要をFigure 1に示す。

レーザー干渉計は、干渉計~可動反射鏡間について照射軸方向の相対位置ずれをnmオーダーで計測可能なレーザー測長システムである。レーザーヘッド

<sup>#</sup> matsunaga.hiroki@takenaka.co.jp

内部では、ゼーマン方式により発振波長を高い安定度で制御し、僅かに異なる周波数  $f_1$ 、 $f_2$  の 2 本のビームを生成して射出する。ビームスプリッタを通過させ、分岐したビームを基準信号 ( $f_2-f_1$ ) として受光する。

分岐したもう一方のビームは干渉計に進み、内部の偏光板により 2 本のビーム  $f_1$ 、 $f_2$  に分岐される。ビーム  $f_1$  は測定対象に設置した反射鏡で反射する際に、測定対象の速度に応じて  $\pm \Delta f_1$  だけ周波数が変化し、ビーム  $f_1 \pm \Delta f_1$  となって干渉計へと戻る。これと、干渉計内部で反射したビーム  $f_2$  とが合流し、測長信号  $(f_2-f_1) \pm \Delta f_1$  として受光する。

その後、アクシスボードにおいて基準信号と測長信号の差分を取り、周波数の変化量  $\pm \Delta f_1$  を変位に変換・積算することで、干渉計～可動反射鏡間の相対位置ずれを計測する。

Table 1: Optical Instruments

光学機器名 (型番)	備考
レーザーヘッド(C5517)	He-Ne レーザ: $\lambda = 633\text{nm}$
リニア干渉計(10702A)	分解能: $\lambda/2$
反射鏡(10703A)	
ビームスプリッタ(10701A)	15% スプリット
アクシスボード(N1225A)	分解能: $\lambda/1024$

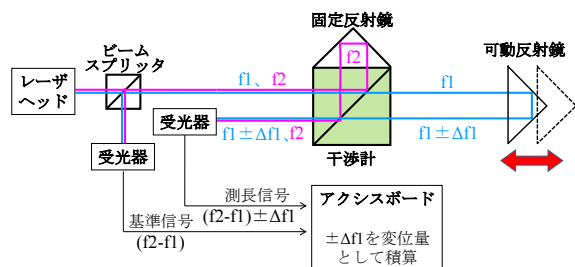


Figure 1: Measurement principal of a laser interferometer.

### 3. レーザー干渉計の相対位置ずれ検出精度の確認

#### 3.1 精度検証用の実験システム

レーザー干渉計の相対位置ずれ検出精度を把握するため、1~100Hz までの振動領域を対象に検証を行う。この振動数範囲全域を nm オーダーで精度検証するために、2 種類の加振装置を用いた。Figure 2 に実験システムを示す。

Figure 2(a) は、ピエゾアクチュエータにより精密位置決めを行う PI ジャパン製ナノポジショニング XYZ ステージ P-562.3CL (以下、ピエゾステージ) を用いたシステムである。ピエゾステージの仕様を Table 2 に示す。クローズドループにおいて 1~10Hz 帯域で 1nm の振幅で加振可能であり、内蔵センサ出力は 0.4nm の分解能を有する。ピエゾステージ上に反射鏡を固定して nm オーダーの加振を行い、内蔵センサ出力値との比較により精度検証を行う。

Figure 2(b) は、エア・ブラウン製低周波加振器 APS113 (以下、低周波加振器) を用いたシステム

である。ただし、低周波加振器のみでは相対位置ずれ計測ができないため、特許機器製サーボ型加速度計 MMI-06X (以下、加速度計) を 2 台用いて、その時刻歴差分を 2 階積分することで 2 点間の相対位置ずれとして評価する。低周波加振器の可動部分に反射鏡と共に加速度計 1 台を固定し、もう 1 台を干渉計と同位置の土間コンクリート上に設置する。本システムでは、ピエゾステージで加振できない 20~100Hz 帯域を対象に精度検証を行う。尚、加速度計による相対位置ずれ検出の分解能については次節で詳述する。

両システムについて、レーザーヘッド、ビームスプリッタ、干渉計、及び加振装置は全て土間コンクリート上に設置し、外乱の影響を受けにくいよう計測区間を 0.15m という至近距離に設定した。

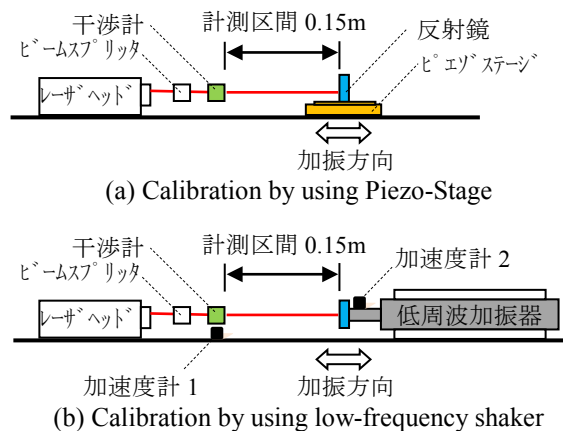


Figure 2: Experimental systems for accuracy verification.

Table 2: Specifications of Piezo-Stage

ストローク	:200 $\mu\text{m}$ (XYZ 方向)
静電容量センサ(内蔵)	:アナログ出力分解能 0.4nm
クローズドループ分解能	:1nm

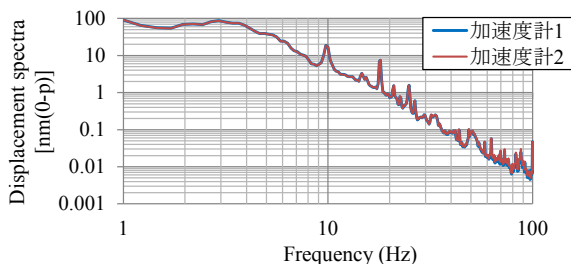
#### 3.3 加速度計差分による相対位置ずれ検出の分解能の確認

加速度計 2 台の差分を用いた相対位置ずれ検出の分解能を確認するため、土間コンクリート上に加速度計 2 台を約 0.1m 離して同一方向に設置した。剛体挙動を示すと考えられるこの 2 点について、水平方向の微動測定を 3 分程度実施した。Table 3 に示すパラメータの FFT 分析を行い、周波数ベースでの評価を行った。Figure 3 に結果を示す。

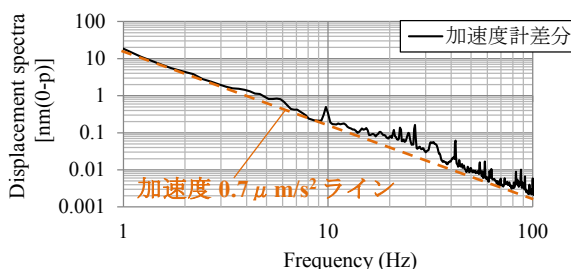
Figure 3(a)は、各加速度計のフーリエ振幅スペクトルを 2 階積分したものを示している。Figure 3(b)は、加速度計 2 台の時刻歴差分のフーリエ振幅スペクトルを 2 階積分したものを示している。Figure 3(a)より、低振動数領域において微動レベルで 100nm 近い振動量であった。それらの差分を取った Figure 3(b)では、ある一定の加速度のライン (0.7  $\mu\text{m/s}^2$ ) に近い値を示しており、これが加速度計 2 台の差分による相対位置検出の分解能と考えられる。

Table 3: FFT Parameters

サンプリング	:256Hz
ウィンドウ幅	:4096 点
窓関数	:ハニングウィンドウ
オーバーラップ	:75%
平均方法	:加算平均



(a) Results of each individual acceleration meter



(b) Results of difference between two acceleration meters

Figure 3: Resolution of relative displacement measurement by using two acceleration meters.

### 3.4 レーザー干渉計の精度検証結果

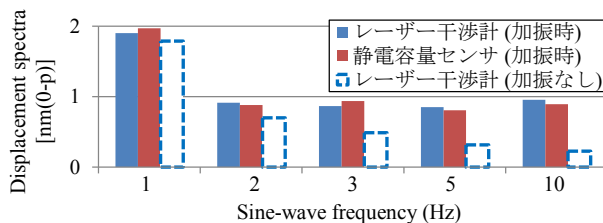
ピエゾステージにより 1, 2, 3, 5, 10Hz の正弦波加振を、低周波加振器により 20, 30, 50, 70, 100Hz の正弦波加振をそれぞれ 1 分間行い、Table 3 に示したパラメータの FFT 分析による周波数ベースで精度検証を行う。

具体的には、各加振振動数の変位スペクトル振幅値を比較し、ピエゾステージ、または低周波加振器の値を正解値とした時のレーザー干渉計の値が±10%以内の値である時に相対位置ずれ検出できているものとした。加振振幅は 5nm 程度から徐々に小さくしていき、相対位置ずれ検出できた最小のケースを抽出した。

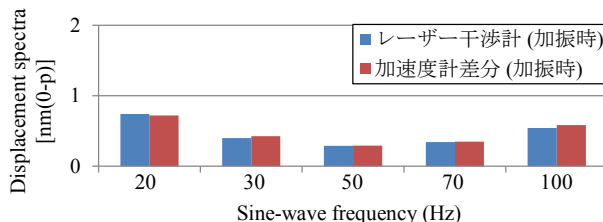
相対位置ずれを検出できた最小値のケースを Figure 4 に示す。横軸に加振振動数、縦軸にの変位スペクトル振幅値を示しており、Figure4(a) には参考値としてピエゾステージ加振を行わない場合のレーザー干渉計の常時微動測定結果について、各振動数の変位スペクトル振幅値を示した。

2Hz 以降の加振結果では、全て 1nm 以下の相対位置ずれを検出できている。1Hz 加振の結果については、ピエゾステージ加振を行わない常時微動時に 1.5nm 以上の振幅で相対振動しているため、約 2nm という結果であったが、S/N 比が取れる状況においては 1nm の相対位置ずれを検出可能と考えられる。

以上より、S/N 比がある状況では、レーザー干渉計により 1Hz 以上の振動数領域について 1nm 以下の相対位置ずれを検出可能であることを確認した。



(a) Comparison with Piezo-Stage displacement spectra



(b) Comparison with low-frequency shaker displacement spectra

Figure 4: Results of accuracy verification.

## 4. 離れた 2 点間の相対位置ずれ検出

### 4.1 計測システム

次に、SuperKEKB の Belle II 測定器ビーム衝突点周辺において、約 10m の 2 点間を対象としてレーザー照射軸方向の相対位置ずれの計測を実施した。Figure 5 に計測点を示す。日光側、大徳側の橋脚上 (B3F レベル) の 2 点間約 10m の距離を対象に計測を行った。

レーザー干渉計については、日光側にレーザーヘッド、ビームスプリッタ、干渉計を設置し、大徳側に反射鏡を設置した。また、参照用に加速度計を日光・大徳側それぞれ X 方向に設置し、加速度計差分との比較から、レーザー干渉計によって nm オーダーレベルの相対位置ずれ検出が可能であることを確認する。

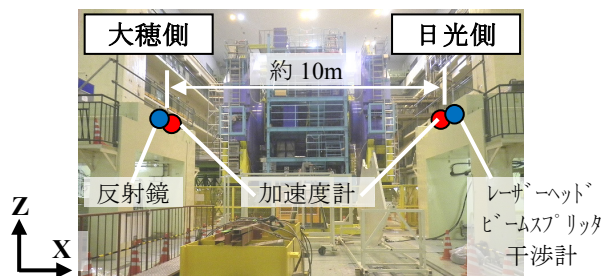


Figure 5: Measurement points around the interaction point.

### 4.2 計測結果

約 10 分間の常時微動測定を実施し、Table 3 に示したパラメータの FFT 分析を行った結果を Figure 6 に示す。3Hz 付近に振幅 20nm 弱のピークがあり、これは地盤振動によるものと考えられる。高振動数側へ行くほど振動量は低くなる傾向にあるが、10Hz



近辺においても 1nm 以上の相対振動量があることが確認できる。

一方、レーザー干渉計の値は加速度計差分と良く一致している。また、加速度計差分の分解能ラインよりも振幅が大きいことから、10m 離れた 2 点間についてレーザー照射軸方向の相対位置ずれを nm オーダーで検出可能であることが確認できる。

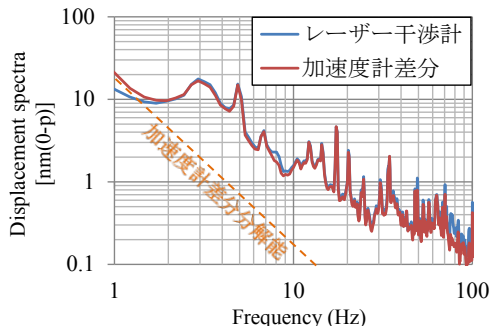


Figure 6: Result of relative displacement measurement at 10m distance about a direction of laser radiation.

## 5. 相対位置制御の基礎的検討

### 5.1 実験システム

次に、離れた 2 点間を対象として、レーザー干渉計とピエゾステージを用いた nm オーダーの相対位置制御の基礎的検討を行う。Figure 7 に実験システムを、Figure 8 に制御ブロックダイアグラムを示す。

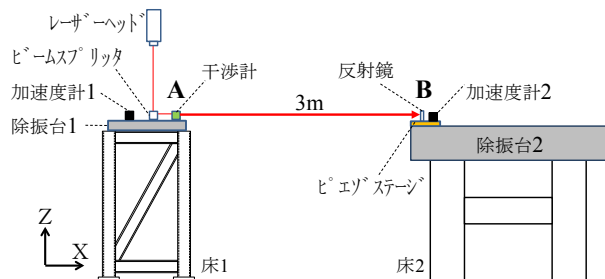


Figure 7: Experimental system of relative positioning control.

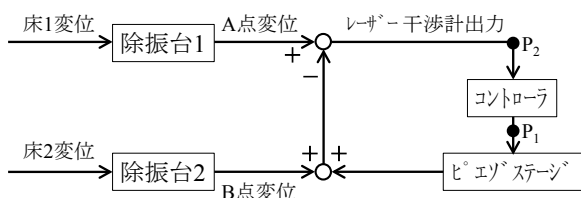


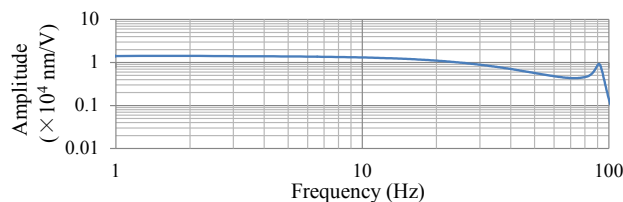
Figure 8: Block diagram of relative positioning control.

SuperKEKB での低振動数領域における相対振動量とほぼ同等にするため、異なる機種 of 2 台のアクティブ除振台上にレーザー干渉計の光学機器、及びピエゾステージを設置した。レーザーヘッドは治具を介して大梁に強固に固定した。反射鏡はピエゾステージ上に固定し、干渉計～反射鏡間 (A 点～B 点間) の距離は 3m とした。

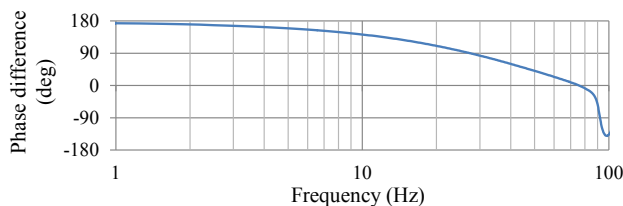
この 3m の区間を制御対象として、X 方向の相対位置ずれをレーザー干渉計で検出し、ピエゾステージによって相対位置制御する (Figure 8 参照)。また、制御結果との比較用に加速度計を、干渉計近傍と反射鏡近傍 (ピエゾステージ上) に 1 台ずつ設置し、その差分により評価することとした。

### 5.2 相対位置制御対象区間の振動特性

相対位置制御対象区間の振動特性を確認するため、Figure 8 の P<sub>1</sub> 点に外乱を入力してピエゾステージを駆動させた時の、レーザー干渉計の出力信号 P<sub>2</sub> 点までの伝達関数を求めた。Figure 9 に振幅と位相差のグラフを示す。この伝達関数を基にオープンループの周波数整形により制御系を構築した。



(a) Amplitude



(b) Phase difference

Figure 9: Transfer function of controlled object.

### 5.3 制御結果

制御無しの場合、有りの場合について、それぞれ常時微動測定を 3 分程度実施した。レーザー干渉計と加速度計差分について、Table 3 に示したパラメータの FFT 分析を行った結果を Figure 10 に示す。尚、Figure 10 両グラフの 50Hz にあるパルス状の値は電気ノイズによるものである。

制御無しの場合の Figure 10(a)では、2Hz 前後の領域で数十 nm の相対位置ずれが生じている。また、グラフ中に示す加速度計差分分解能ラインよりも振幅が大きいことから、レーザー干渉計と加速度計差分の値は良く一致している。

制御有りの Figure 10(b)では、レーザー干渉計の値より 1~100Hz 全域に亘って 2nm 以下に相対位置制御できていることが確認できる。一方、加速度計差分の値はグラフ中に示す加速度計差分分解能ライン近辺までしか計測できないため、6~7Hz 程度までレーザー干渉計の値と乖離する結果となっている。また、本制御実験では測定区間 3m という条件であるが、3.4 節で示した至近距離での計測精度と同等の性能を有していることから、レーザー干渉計の計測精度が距離にほとんど依存しないことを確認した。

以上より、離れた 2 点間を対象として、nm オーダーの相対位置制御が原理的に可能であることを確認した。

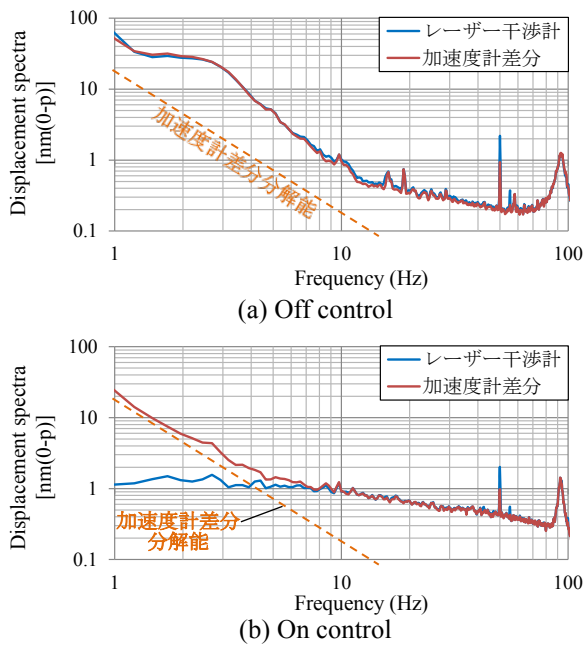


Figure 10: Controlled results during microtremor measurement.

## 6. まとめ

本稿では、1Hz 以上の短期的な振動成分を対象として、レーザー干渉計の相対位置検出精度の確認、及び約 10m 離れた 2 点間のレーザー照射軸方向の相対位置ずれ検出を行い、nm オーダーで検出可能であることを確認した。更に、約 3m 離れた 2 点間を対象として nm オーダーの相対位置制御が原理的に可能であることを確認した。

しかし、レーザー干渉計ではレーザー照射軸方向のみしか計測できないため、離れた 2 点間の鉛直方向の相対位置ずれを計測するための改良検討や、固定治具・地盤等の長期変動の考慮など課題が多い。

今後、これらの課題を解決し、10m 程度離れた 2 点間の鉛直方向の相対位置ずれを nm オーダーで検出・制御する技術の開発を目指す。

## 参考文献

- [1] K. Oide et al., Proc. of PAC'09, M03RAI01 (2009).
- [2] M. Masuzawa, Proc. of IPAC'10, FRXBMH01 (2010).
- [3] M. Masuzawa et al., "VIBRATION ISSUES FOR SUPERKEKB", Proc. of 11th IWAA, DESY, Sep. 11-17, 2010.
- [4] M. Masuzawa et al., "FLOOR LEVEL MOTION OBSERVED IN THE KEKB TUNNEL.", KEK-PREPRINT-2003-97, Dec 2003. 5pp.
- [5] R. Sugahara et al., "Ground Motion Measurement and Vibration Suppression at KEK", KEK-PREPRINT-2005-77, Nov 2005. 13pp.
- [6] S. Matsui., "FLOOR VIBRATION OF ACCELERATOR TUNNEL AT XFEL/SPring-8.", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, Ibaraki, Japan, p.140-142., 2009.

- [7] H. Kimura et al., "Alignment Reference and Subsidence of Floor at XFEL", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug.4-6, 2010.
- [8] S. Yamashita et al., "次世代加速器素粒子物理実験のための新しいナノメーター振動制御システムの実証研究", 科学研究費助成事業, 2004-2006.
- [9] Y. Morita, "リニアコライダー加速器のためのピエゾアクチュエーターを用いた振動制御システムの開発", 東京大学修士論文, 2007.1.