

法定停電による SuperKEKB 停止時のビーム衝突点近傍の振動環境調査

VIBRATION ENVIRONMENT IN THE VICINITY OF BEAM COLLISION POINT IN SUPERKEKB DUE TO LEGAL POWER OUTAGE

松永裕樹^{#, A)}, 松下仁士^{A)}, 井上竜太^{A)}, 下河内隆文^{A)},
吉岡正和^{B)}, 佐貫智行^{B)}, 小貫勲子^{B)}, 早野仁司^{C)}, 坪川恒也^{D)}

Hiroki Matsunaga^{#, A)}, Hitoshi Matsushita^{A)}, Ryota Inoue^{A)}, Takafumi Shimogouchi^{A)},
Masakazu Yoshioka^{B)}, Tomoyuki Sanuki^{B)}, Tokiko Onuki^{B)}, Hitoshi Hayano^{C)}, Tsuneya Tsubokawa^{D)}

^{A)} Takenaka Corp., ^{B)} Tohoku University, ^{C)} High Energy Accelerator Research Organization, ^{D)} Shin-ei Keisoku

Abstract

In the SuperKEKB, it is observed that a predominant frequency of ground vibrations are at 3Hz and a vertical relative displacement between two points 10 meters away on both sides of the beam collision point is several tens of nanometers. Effects of the vibration on beam collisions has been discussed because it is necessary to reduce the beam diameter to 50 nanometers in the SuperKEKB, but then the vibration source has not yet been fully defined. Since it's generally understood that the vibration source is vehicular traffics on a main street adjacent to the site of KEK, the vibration in a stop state of all equipment in the SuperKEKB under favor of a legal power outage is measured. This paper is described the vibration caused by vehicular traffics and equipment sequentially operated after a power restoration.

A vertical relative displacement measurement is carried out using two accelerometers which are placed on two points 10 meters away on the forth basement level in the TSUKUBA building. The vertical relative displacement at 3Hz is from 5 to 10 nanometers during midnight in a stop state of all equipment, gradually increases with the growth in traffic volume from dawn and is finally up to 45 nanometers during daytime. On the other hand, the vertical relative displacement in the frequency region more than 20Hz gradually increases caused by equipment sequentially operated after the power restoration. From the above, we confirm that the vibration at 3Hz is caused by vehicular traffics.

1. はじめに

SuperKEKB ビーム衝突点近傍では 3Hz 付近で卓越する鉛直方向の地盤振動が観測されており[1, 2]、ビーム衝突点の両側約 10m 離れた 2 点間の鉛直相対振動は数十 nm 程度であることを確認している[3]。SuperKEKB ではビームサイズを高さ(鉛直方向)50nm に絞り込むことから、鉛直振動がビーム衝突に与える影響について議論されてきているが、振動源やその振動特性については明確に特定されていない。

振動源として最も有力なのは、KEK の敷地に隣接する学園東大通りの車両交通であった。一方で、車両交通以外の振動源として、常時稼働している諸設備による振動影響の可能性も考えられた。以上のことから、複数の振動源の影響を切り分けて評価するため、KEK が法定検査のため停電となる期間を利用して、全設備が停止した状態においてビーム衝突点近傍の振動測定を実施した。

本稿では、全設備停止時の車両交通の振動影響、及び復電後に順次稼働させる冷凍機や空調機等の設備の振動影響について把握した結果について報告する。

2. 測定概要

2.1 測定日時

本振動測定は 2017 年 8 月 5 日(土)~7 日(月)に KEK 筑波実験棟地下 4 階にて実施、その間停電となっ

たのは 8 月 5 日 0 時~18 時の間と 8 月 6 日 8 時 30 分~17 時 30 分の間であった。Figure 1 に 3 日間の測定スケジュールを示す。尚、8 月 5 日の復電時には SuperKEKB の全設備が停止状態であった。

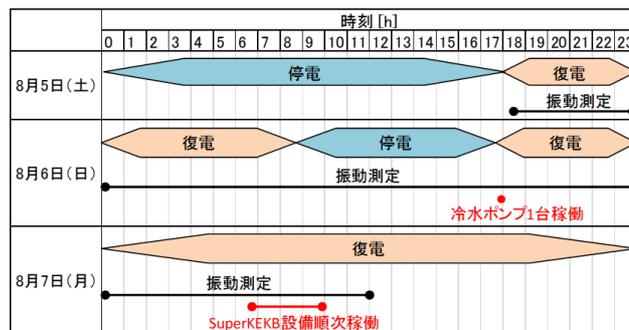


Figure 1: Measurement schedule.

2.2 測定場所

筑波実験棟の周辺地図を Figure 2 に示す。東側の敷地境界が大通りに接しており、大通りから測定点(地下 4 階)までの水平距離は 150m 程度であった。

次に、筑波実験棟の代表的な平面として 1 階平面図を Figure 3 に示す。Belle II 測定器の近傍は立入り禁止であったため、ビームラインから水平方向に約 30m 離れた位置の地下 4 階の土間コンクリート上で振動測定を実施した。また、建物北東側の 1 階、2 階に機械室があり、振動源となる設備から測定点までの水平距離はおおよそ 40~50m であった。

[#] matsunaga.hiroki@takenaka.co.jp

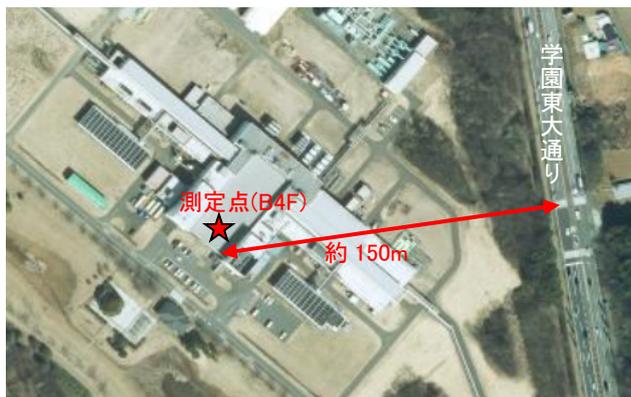


Figure 2: Map around TSUKUBA building.
(<https://map.yahoo.co.jp/>)

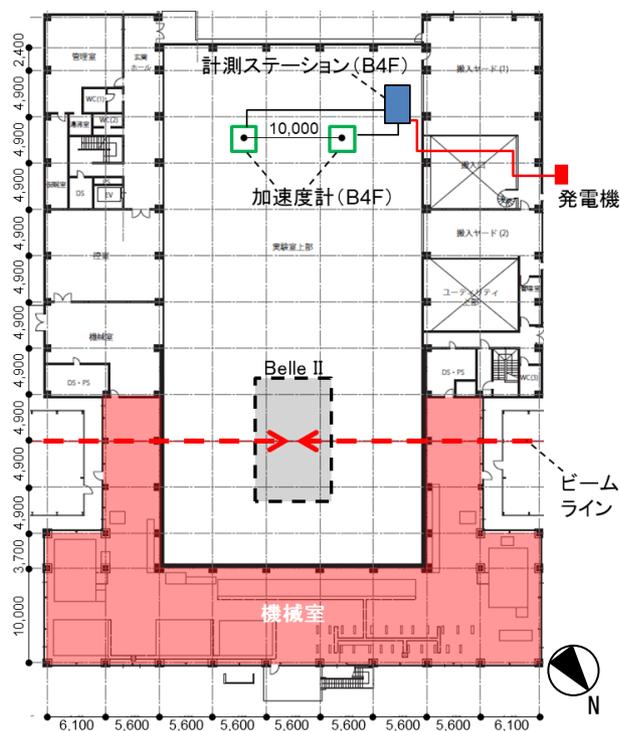


Figure 3: Plan of 1F floor TSUKUBA building.

2.3 測定方法

振動測定は特許機器製サーボ型加速度計 MMI-06X (以下、加速度計)を用いて行った。Figure 3 に示す 10m 離れた 2 点に、加速度計を鉛直方向に 1 台ずつ設置し、その時刻歴差分を 2 階積分することで 2 点間の鉛直相対位置ずれとして評価した。これは、SuperKEKB のビーム衝突において、衝突点両側に位置する 2 台の超伝導電磁石間のインコヒーレントな振動が、主なエラー要因になると考えられるためである。また、超伝導電磁石間の距離を想定して加速度計間の距離を 10m とした。

尚、加速度計は測定範囲 0.1~400Hz、分解能はカタログ値で $1 \mu\text{m/s}^2$ となっており、実測して確認した分解能は 1~100Hz の範囲で $0.7\sim 1.5 \mu\text{m/s}^2$ であった[4]。また、

停電時には建物外の地面に発電機を設置し、地下 4 階から地上までコードを延ばして電源を確保した。

3. 測定結果

3.1 8月5日(土) 18時~8月6日(日) 17時30分までの停電時、及び全設備停止時の結果

2 台の加速度計の時刻歴差分を取り、2 階積分した波形を Table 1 に示すパラメータで FFT 分析し、平均的な鉛直相対変位スペクトルを算出した。

8月6日 8時30分~17時30分までの停電時について、Figure 4 に 15 分間の鉛直相対変位で最大レベル、最小レベルのものを重ねて示す。同様に、8月5日 18時~8月6日 8時30分までの全設備停止時(復電時)について Figure 5 に示す。尚、両グラフには参考として加速度計の分解能ラインのカタログ値を表示した。

Table 1: FFT Parameters

サンプリング	:1000Hz
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

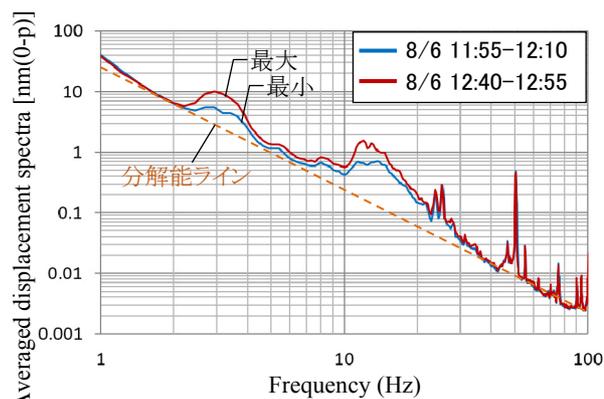


Figure 4: Maximal and minimal level of vertical relative displacement under a power outage.

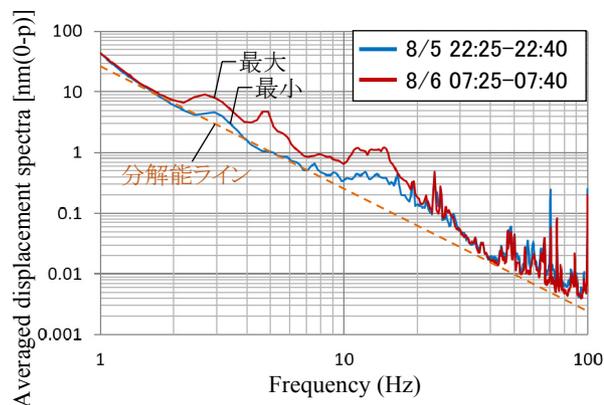


Figure 5: Maximal and minimal level of vertical relative displacement in a stop state of all equipment.

3Hz 付近の振動については、停電時と全設備停止時とで大きな違いは見られず、8月5日22時25分~40分に最小値4.7nm、8月6日12時40分~55分に最大値10.2nmであった。尚、8月6日11時55分~12時10分には昼間にも関わらず5.5nm程度となっているが、日曜であったことから平日とは交通状況が異なっていたことが考えられる。

次に、十数 Hz 周辺で緩やかなピークが見られ、3Hz の振動と相関があるものと思われる。一方、20Hz 以上の振動数領域については、3Hz や十数 Hz の振動と連動していないため、交通振動がほとんど影響しない振動数領域と考えられる。尚、Figure 4 の50Hzに見られるピークは、停電時の電源とした発電機から混入したノイズであることを確認している。

3.2 8月6日(日) 17時30分~24時までの冷水ポンプ1台稼働時の結果

8月6日夕方の復電時には、冷水ポンプが1台のみ稼働し、翌7日の7時までその状態であった。Figure 6に代表的な15分間の鉛直相対変位を3つ重ねて示す。

3~20Hz までの振動量については、Figure 4 や Figure 5 の場合よりも安定しており、車の通行量が少ないことが影響していると思われる。一方で、20Hz 以上の振動数領域については、ほとんど変動は見られないが、冷水ポンプが稼働したことにより Figure 4 や Figure 5 と比較して明らかに振動量が増加している。

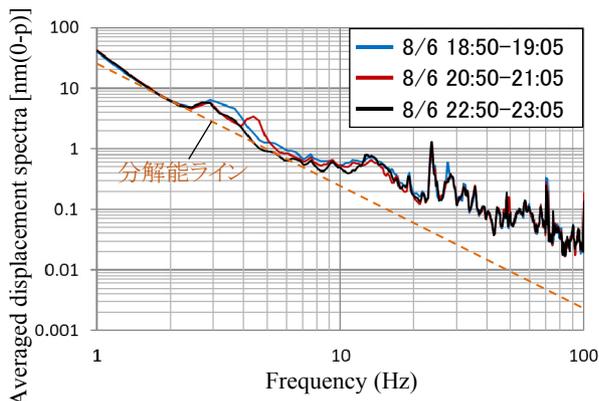


Figure 6: Comparison of 15 minute vertical relative displacements by one cold pump operated on August 6th from 6:50 p.m. to 10:50 p.m.

3.3 8月7日(月) 0時~7時までの冷水ポンプ1台のみ稼働時の結果

8月7日深夜0時以降の冷水ポンプ1台のみ稼働時について、Figure 7, 8に代表的な15分間の鉛直相対変位を重ねて示す。

Figure 7, 8より、時間の経過とともに3Hz 付近の振動量が顕著に増加することが確認できる。これは、休日の深夜から平日(月曜日)の明け方にかけて、トラック等の大型車両や通勤車が増加したことによるものと思われる。

次に、十数 Hz 付近の振動については、3Hz の振動と明確な相関はなさそうだが、ある程度連動して増加することが確認できる。一方で、20Hz 以上の振動数領域に

ついては、終始ほとんど変動は見られず、Figure 6 と比較してもほぼ同じ値を示していると言える。

以上のことから、交通振動は3Hz 付近で顕著に影響すること、及び20Hz 以上の振動数領域ではほとんど影響しないことを確認した。

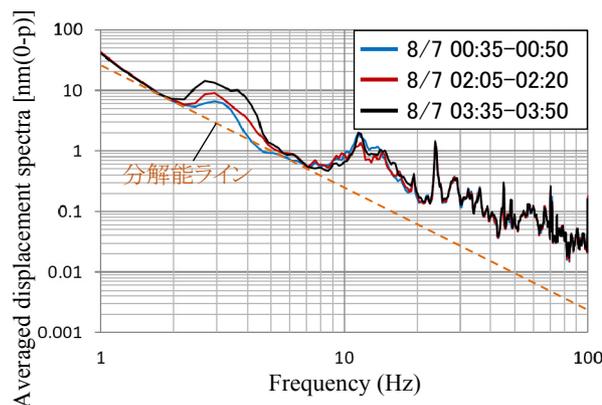


Figure 7: Comparison of 15 minute vertical relative displacements by one cold pump operated on August 7th from 0:35 a.m. to 3:35 a.m.

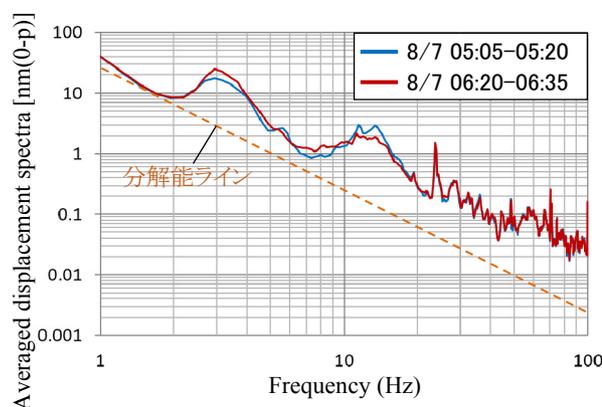


Figure 8: Comparison of 15 minute vertical relative displacements by one cold pump operated on August 7th from 5:05 a.m. to 6:20 a.m.

3.4 8月7日(月) 7時~12時までの設備順次稼働時の結果

8月7日の7時以降に設備が順次稼働し始め、10時前に当日予定していた全設備が稼働した。Table 2に各設備の稼働時間を示す。尚、この日は平日で職員の移動、作業等により外乱が入りやすい環境であったため、以降に示すグラフでは測定時間が15分より短いものでも採用することとした。

次に、Figure 9に全設備稼働前から稼働後まで代表的な5つの鉛直相対変位を重ねて示す。グラフより、20Hz 以上の振動数領域では設備が稼働するごとに顕著に振動が増加していることから、20Hz 以上の振動数領域では設備振動のみ影響することを確認した。

また、全設備稼働後の10時~12時の間で、鉛直相対変位が最大レベルのものと同最小レベルのものを Figure 10に重ねて示す。3Hz 付近に着目すると、最大で

44.8nm、最小で 20nm となっており、交通量の多い時間帯では SuperKEKB におけるビームの縦幅 50nm に匹敵する鉛直相対振動が生じることを確認した。

Table 2: Times when Each Equipment is Operated

① 冷水ポンプ	7時1分頃
② 温水ポンプ(2台)	7時12分頃、7時29分頃
③ 冷凍機	7時46分頃
④ 空調機	9時10分頃
⑤ ポンプ	9時22分頃
⑥ 空調機	9時28分頃
⑦ 冷水ポンプ	9時47分頃
⑧ ポンプ	9時54分頃

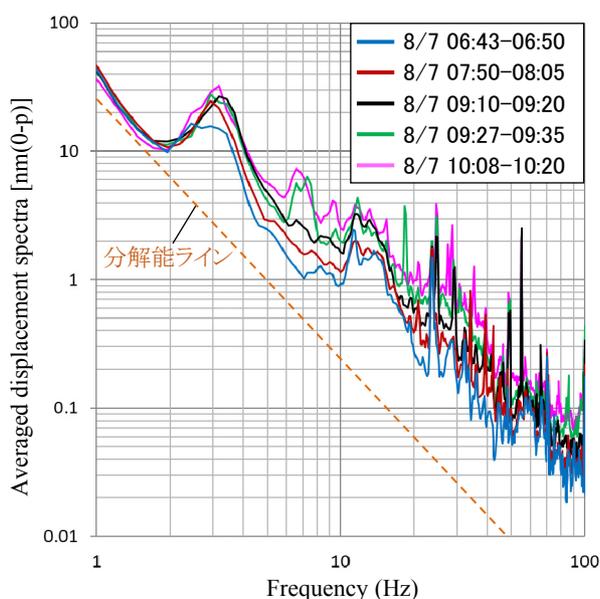


Figure 9: Comparison of vertical relative displacements by equipment sequentially operated on August 7th from 6:43 a.m. to 10:08 a.m.

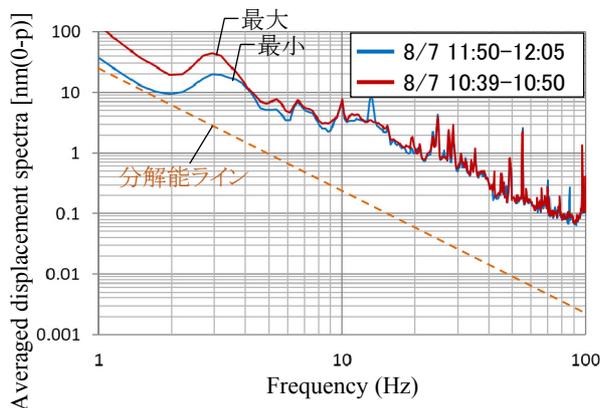


Figure 10: Maximal and minimal level of vertical relative displacement after all equipment operated.

4. まとめ

本稿では、KEK 筑波実験棟地下 4 階において全設備停止状態、及び復電後の設備稼働状態での振動測定を実施した。10m 離れた 2 点間の鉛直相対振動を指標に評価を行い、車両交通、及び設備稼働時の振動影響を明確に把握した。

3Hz 付近の振動は車両交通由来であり、最小で 4.7nm、最大で 44.8nm と 9 倍以上も変動することを確認した。また、車両交通による振動は 20Hz 以上の振動数領域にはほとんど影響しないことも確認した。一方で、設備稼働時の振動については、主に 20Hz 以上の振動数領域で影響することを確認した。

謝辞

本測定を実施するにあたり、法定検査のための停電時の施設内での振動測定の許可をいただくため、KEK の増澤美佳教授、足立一郎准教授には多大なるご尽力をいただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] M. Masuzawa *et al.*, “VIBRATION MEASUREMENTS IN THE KEKB TUNNEL”, IWAA2004, CERN, Geneva, Oct.4-7, 2004. 9pp.
- [2] R.Sugahara *et al.*, "Ground Motion Measurement and Vibration Suppression at KEK", KEK-PREPRINT-2005-.77, Nov 2005. 13pp.
- [3] H.Matsunaga *et al.*, “FEASIBILITY STUDY ON MEASUREMENT AND CONTROL OF RELATIVE POSITIONING FOR NANO-BEAM COLLISION”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug.9-11, 2010, pp.307-311.
- [4] H.Matsunaga *et al.*, “Measurement and Control of Relative Positioning for Nano-beam Collision”, 第 16 回高エネ研メカ・ワークショップ報告集, 2015, pp.1-5.