

SuperKEKB 超伝導四極収束電磁石の振動測定装置の開発 DEVELOPMENT OF VIBRATION MEASUREMENT SYSTEM FOR SUPERCONDUCTING QUADROLEPOLE MAGNET IN SuperKEKB

山岡広^{#, A)}, 大内徳人^{A)}, 青木和之^{A)}, Brett Parker^{B)}, Animesh Jain^{C)}
Hiroshi Yamaoka^{#, A)}, Norihito Ohuchi^{A)}, Kazuyuki Aoki^{A)}, Brett Parker^{B)}, Animesh Jain^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Brookhaven National Laboratory

^{C)} Argonne National Laboratory

Abstract

High Energy Acceleration Research Organization (KEK) is proceeding the SuperKEKB project to aim to achieve the world luminosity record of $8 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. To realize this purpose, two superconducting quadrupole magnets (QCSs) are installed at both side of the interaction region as one of solutions. With these two magnets, it can be possible to squeeze the beam size to 50 nm for increasing the luminosity. However, the luminosity has to be lost some percentage according to the vibration of quadrupole magnets which are integrated in the QCS. So, it is important to know their vibration level due to the ground motion. To know the vibration of quadrupole magnets directly is impossible, so it has been developed a vibration measurement system by adopting an induced voltage theory. The measurement system consists of a long CFRP rod attached with pick-up coil at the top of the rod. And, it is important to develop a stage to fix the CFRP rod which should be very quiet against the vibration around less than a few nanometers. So, we have been developed this measurement system, and it can success to keep the vibration level less than 1 nanometer and confirmed to measure induced voltage from the pick-up coil of measurement system. In this report, it describes about development of a vibration measurement system for quadrupole magnets in the QCS.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構つくばキャンパスには、7GeVの電子リングと4GeVの陽電子リングから構成されるSuperKEKB加速器が設置され、KEKB加速器の40倍のピーク luminositiy を目指して衝突調整が行われている[1]。Luminosity向上のためには、ビームのサイズを小さくすると共に運転電流を増加させる事が必要となる。このためビームサイズを絞るための装置が衝突点近傍にあるQCSと呼ばれる最終ビーム集束用超伝導四極電磁石である[2]。QCSはFig. 1に示すように、衝突点を中心に右側と左側にそれぞれ1基ずつ設置され、リングの中心から見て左側のQCSをQC SL、右側のQCSをQC SRと呼んでいる。[2]

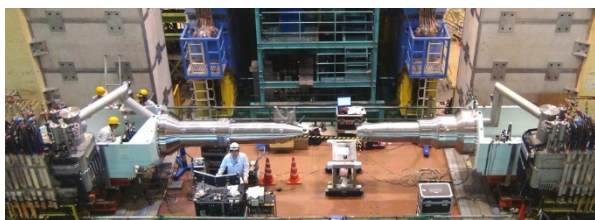


Figure 1: Overview of Superconducting quadrupole magnets (QCS) before BelleII role-in.

Luminosity向上のためには設置されている床面の振動レベルが安定でなければならず、QCSに組み込まれている四極収束電磁石の振動が大きくなるとLuminosity

低下を招いてしまうことになる。このためこれらの四極収束電磁石の振動レベルを知ることが重要になった。Fig.2にQC SLの断面図を示す。ここで知りたい振動の値はQC1LPとQC1LEの相対振動レベル及びQC2LPとQC2LEの相対振動レベルである。

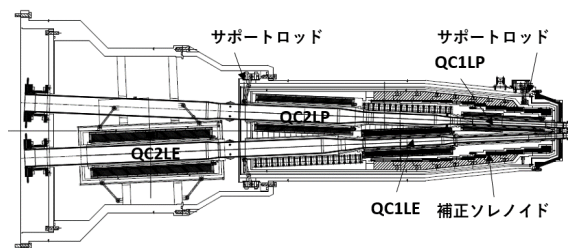


Figure 2: Cross section of QC SL.

QCSクライオスタット自体の振動測定はおこなわれているが[3]、これらの四極収束電磁石はクライオスタット内に組み込まれているため直接振動レベルを測定することは不可能である。このため誘導電圧の原理を応用しCFRPロッドにピックアップコイルを取付けてビームパイプ内にそれを差し込むことで振動レベルを測定することにした。ただしこのロッドを取付けている架台は振動してはいけない。このため振動レベルを数ナノメートル以下に抑えたパッシブ除振台を開発し、さらにそれらをアクティブ除振台に載せることとした。アクティブ除振台の制振範囲は約1Hzから100Hz程度であるが、それ以上の制振はパッシブ除振台が請け負うこととした。測定システムのイメージをFig. 3に示す。

[#] yamaokah@post.kek.jp

2. 振動測定装置の設計

2.1 パッシブ除振台の設計

パッシブ除振の原理は構造物の固有振動数を下げることによって1次モードを過ぎた後に振幅は大きく減衰していくことからその系の伝達係数を1以下に抑える事が出来る。この原理を利用してパッシブ除振台の設計をおこなった。

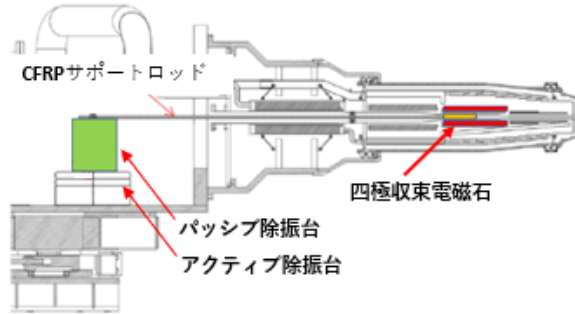
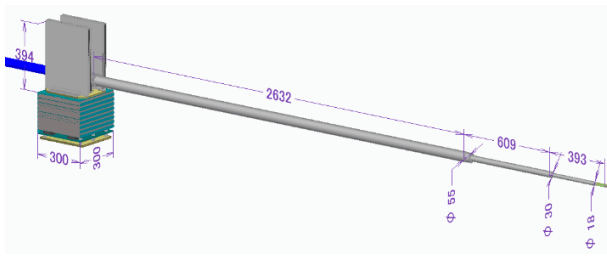
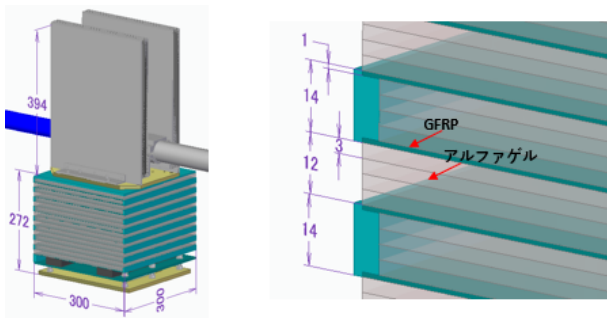


Figure 3: Image of vibration measurement system.

パッシブ除振台は GFRP の薄板とアルファゲルからなる積層構造としている。



(a) Configuration of CFRP rod.

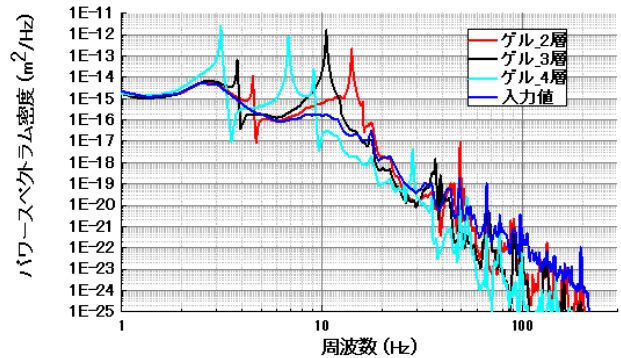


(b) Configuration of passive stage

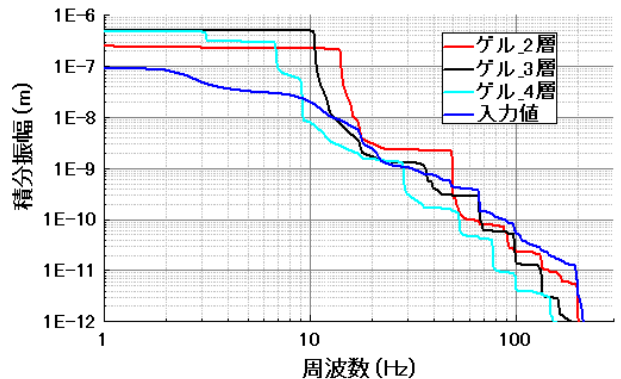
Figure 4: Configuration of vibration measurement system for quadrupole magnet.

既に開発は数年間つづけてきているが[4]、今回、更にアルファゲルと GFRP のヤング率を比べた場合、アルファゲルの方が縦弾性係数が5桁低いことから架台全体の固有振動数を下げるためにアルファゲルの積層数を増やした。この事で架台の固有値を下げることにした。Fig. 4 にパッシブ除振台の構造を示す。

設計では積層数やアルファゲルと GRRP 板の構成を変えたときの固有値を計算すると共に、拘束点に床上で測定された実際の振動を入力し、ロッド先端での応答値を計算し積分振幅を求めそれぞれを比較した。振動の入力方向は鉛直方向である。アルファゲルの縦弾性係数を0.12MPaと定義し、GFRPの縦弾性係数を16GPaとし、CFRP ロッド先端にピックアップコイルのマスとして100gを定義した。解析結果の一例としてアルファゲルの積層数を変化させたときの応答パワースペクトル密度とこれらの値から求めた積分振幅の値を Fig.5 に示す。



(a) Power spectrum density depends on number of layers of alfa-gel.



(b) Integrated Amplitude depends on number of layers of alfa-gel.

Figure 5: Results of random vibration analysis in each case and integrated amplitudes made from power spectrum densities.

Fig. 5(a)の解析結果を見るとアルファゲルの積層数が増えるにしたがって一次モードでの共振周波数が低くなっていくことがわかる。2層のアルファゲルでは1次の固有振動数が15Hz程度であったが、4層のアルファゲルでは3Hz位まで低下している。また、入力値より応答値の方が低くなっていることがわかる。Fig. 5(b)の積分振幅を見てみると積層数2層及び3層では10Hzに於ける積分振幅は数百ナノメートルであると計算されたが、4層のアルファゲルにする事によって10Hzでの積分振幅を10ナノメートル程度に劇的に減少させることが出来た。ま

た応答振幅が入力振幅より小さくなっていて、パッシブ除振の効果が表示されているのがわかる。

2.2 CFRP ロッドの形状最適化

ピックアップコイルを取付けている CFRP ロッドについても最適化がおこなわれた。

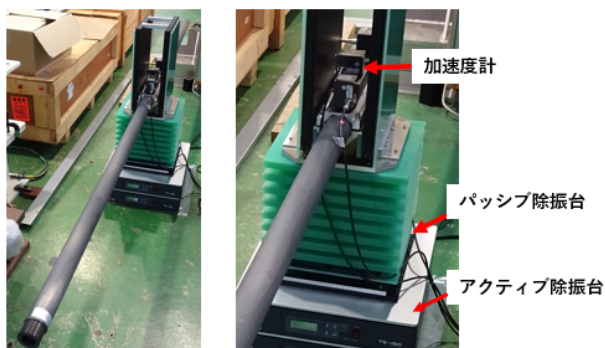


Figure 6: Set-up configuration of passive stage evaluation test.

CFRP の太さはサグを最小化するためにビームパイプに入る大きさの範囲で最大化されなければならない。また、CFRP ロッド内部をピックアップコイルからのリード線が通れるように中空化しなければならない。このため、ランダム応答解析をおこない積分振幅が最小になるような肉厚を求めた。この結果、CFRP ロッド肉厚を 25.5mm にすれば応答振幅を最少に出来る事がわかった。

3. パッシブ除振台の振動性能評価

パッシブ除振台を含めた全体構成を Fig. 6 に示す。CFRP ロッドを取付けたパッシブ除振台全体をアクティブ除振台の上に載せてある。また振動測定による性能評価のために高精度加速度計がパッシブ除振台の上と床面に 3 方向置いてある。この加速度計の解像度は 1mgal、1gal=1V である。このセンサーを用いることによって常時微動の測定をおこなった。

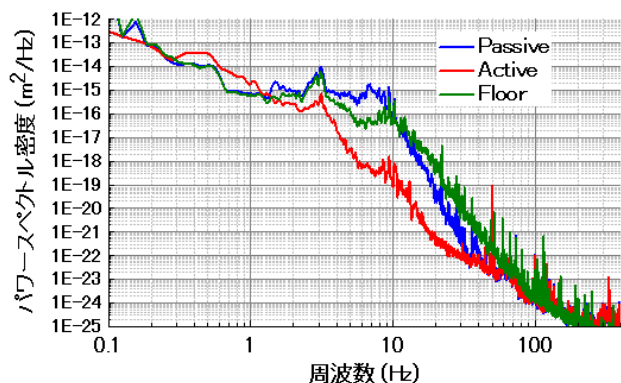


Figure 7: Measurement power spectrum density and integrated amplitude in the vertical direction.

測定にあたっては時間信号を 1024Hz で 3 分間収録し、そのデータを高速フーリエ変換してパワースペクトル密度、積分振幅、コヒーレンシー及び伝達関数を求めた。

高速フーリエ変換のためのブロック数は 8192 個、75% のオーバーラップをかけてデータを切り取り、平均化した。

鉛直方向のパワースペクトル密度を Fig. 7 に示す。測定データを見ると 3Hz 付近にピークがあるのが認められるがこれは地盤の固有値を表している。また、周波数 10Hz を超えるとパッシブ除振に於いて床振動よりも除振台の方の振動レベルが小さくなっている。これは積分振幅のデータでも同じ事が言える。更にアクティブ除振では 10Hz 付近に於いて床面の振動レベルよりも数桁値が小さくなっているのがわかる。

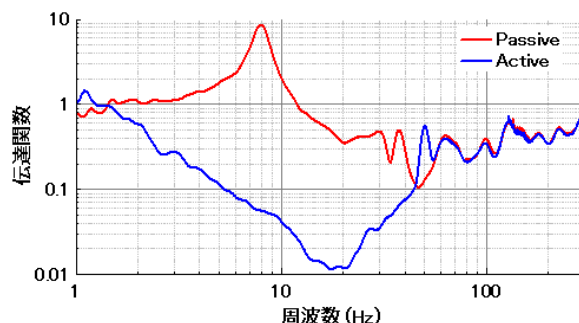


Figure 8: Measurement transmissivity of passive stage.

除振効果をみるために各条件に於ける伝達関数を Fig. 8 に示す。このプロットは床面の振動レベルに対してパッシブ除振台上での振動レベルとの比を計算したものである。伝達関数が 1 の時は床面と除振台上で振動レベルが同じであることを示し、1 よりも値が小さくなると床面よりも架台の振動レベルが小さいことを示す。データはログウィンドウを用いてスムージングをおこなった。その結果、パッシブ除振のみの場合、8Hz にピークが見られこれが 1 次モードでの固有振動数と考えられその後、伝達関数は減衰していき、床面の振動レベルより小さい値である 1 以下となり最少で 0.1 程度まで低下する。アクティブ除振が On の場合、伝達率は更に下がり約 20Hz の周波数のあたりで 1/100 程度まで減衰する。アクティブ除振の効果は 100Hz 程度までであるので、100Hz を過ぎるとパッシブ除振による効果のみとなる。

4. 振動測定装置全体の振動性能評価

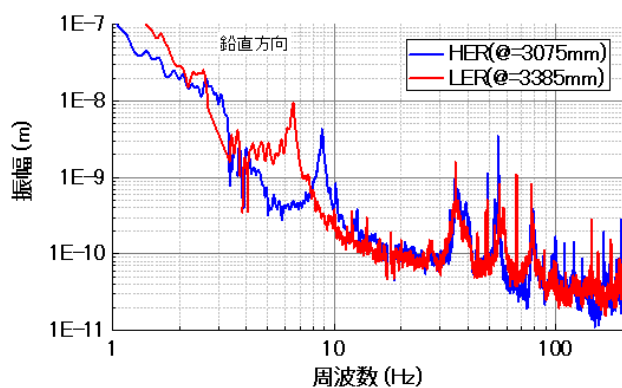


Figure 9: Set-up configuration of vibration measurement system with laser doppler vibrometer.

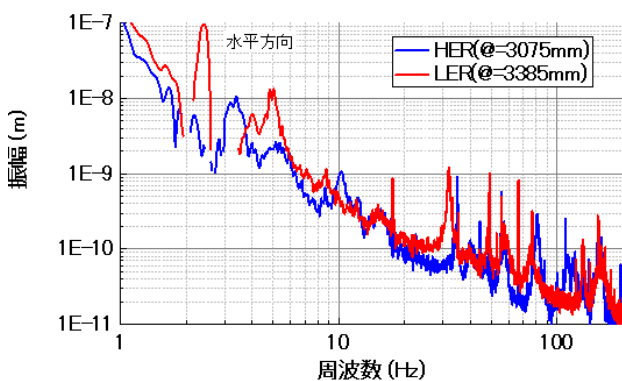
パッシブ除振台での性能評価でパッシブ除振効果が認められたため、装置全体として振動性能評価試験をお

こなった。

試験形状を Fig. 9 に示す。CFRP ロッドをパッシブ除振台に取付け、ピックアップコイルが付いているロッド先端での振動レベルの測定をおこなった。この場所は非常に狭く剛性がないので高精度加速度計は設置できない。このため、非接触のレーザードップラー振動計を用いて振動特性を測定した。分解能は $0.05\mu\text{m}/\text{sec}$ で変位に変換すると $1\text{nm}(@10\text{Hz})$ 、 $0.1\text{nm}(@100\text{Hz})$ である。ただし、レーザードップラー振動計を載せている台自身も振動があってはいけないため、アクティブ除振台上にセットし CFRP ロッド軸方向に自由に動けるようなレール付きの移動架台に取付けることによって任意の位置での振動測定が出来るようにした。水平方向の測定では直接レーザー光を照射して振動レベルを測定することができるが、鉛直方向の振動測定の際はエクステンションを用いてレーザー光を 90 度曲げることによって振動測定をおこなった。



(a) Amplitude at pick-up coil in the vertical direction



(b) Amplitude at pick-up coil in the horizontal direction

Figure 10: Measurement results at pick-up coil with laser doppler vibrometer.

測定結果を Fig. 10(a)及び Fig. 10(b)に示す。Fig. 10(a)では 2 つのプロットがされていて、それぞれ HER ビームラインと LER ビームラインに於けるピックアップコイルの位置を表している。実際には CFRP ロッドの拘束位置を変えてそれぞれ振動測定をおこなった。HER では約 9Hz の所にピークがあり、これが一次モードの固有振動数である。その後振幅は急激に減衰している。10Hz

に於ける振幅は約 0.3 ナノメートルである。一方、LER では全長が約 300mm 長いことから固有振動数も HER と比べて低くなり約 6.5Hz と測定された。10Hz に於ける振幅は 0.2 ナノメートルである。これらの測定値は目標の振動レベルである数ナノメートルより約十分の一の値に抑える事が出来た。

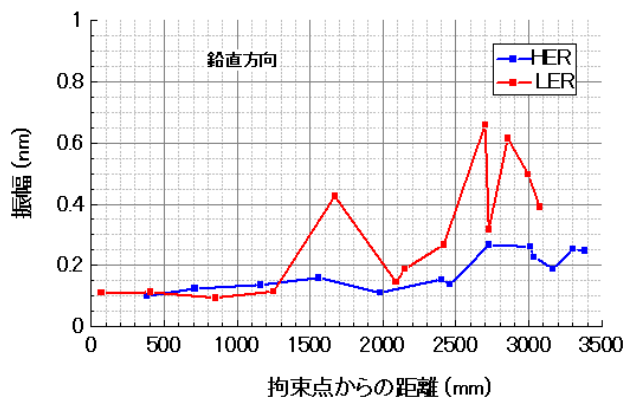


Figure 11: Measurement of amplitude at CFRP rod in each direction.

水平方向の測定結果についても同様の結果になった。HER での一次モードの固有振動数は約 10Hz と測定され、LER では約 9Hz と測定された。

10Hz に於ける振幅も 1 ナノメートル以下となった。これらはレーザードップラー振動計の 10Hz に於ける感度 1 ナノメートル以下である。

CFRP ロッドの各点に於ける振幅の測定をおこなった。10Hz での振幅の測定結果を Fig. 11 に示す。各点での測定値を見ると片持ち梁の変形のように先端に行くにしたがって振幅が大きくなる傾向にある。ただし測定データはスムーズに変化していない部分があるが、これらの測定値は全てレーザードップラー振動計の感度 1 ナノメートル以下であるためと考えられる。水平方向の測定でも同様の結果で全て 1 ナノメートル以下と測定された。

5. 永久四極磁石を用いた誘導電圧測定

磁場環境中でピックアップコイルを強制的に振動させその時に発生した誘導電圧測定をおこなった。このため piezoアクチュエータを用いた加振台を製作した。

加振信号はデータロガーでサイン波を生成し、加振台に信号を送って加振した。製作した加振台のテーブルの大きさは $450\text{mm} \times 450\text{mm}$ の大きさである。piezoアクチュエータは、ストロークが最大 20 ミクロンで剛性は $32\text{N}/\mu\text{m}$ の物を選定した。

加振試験では振動測定システムをアクティブ除振台の上にセットし、ピックアップコイルが接続されている CFRP ロッド先端を永久四極磁石内に挿入した。永久四極磁石は piezo式加振台上に置いてあり、こちらを加振することによって誘導電圧を発生させた。試験のためのセットアップの写真を Fig.12 に示す。

加振試験では 10Hz 、 30Hz 、 100Hz 及び 300Hz のサイン波でそれぞれ加振し、加振の大きさは piezoアクチュエータに送る電圧で調整した。加速度計を永久四極磁石の上にセットし、この加速度を FFT し振幅に変換する

ことでピックアップコイルからの誘導電圧と振幅の関係を測定した。

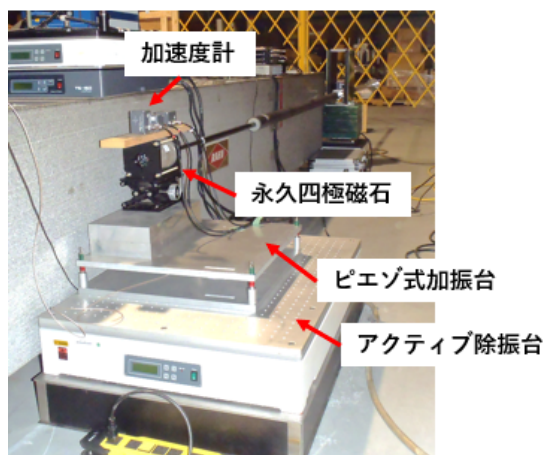


Figure 12: Set-up configuration for measurement of inductive voltage from vibration measurement system.

一例として 10Hz のサイン波を用いた時のピックアップコイルからの誘導電圧と振幅との関係の試験結果を Fig. 13 に示す。10Hz でのサイン波で加振したときの結果を見ると、加振量としては最大約 1.4 ミクロンまでの範囲で変化し、それに対して誘導電圧は 6mV 程度発生していた。変化としては直線的に変化し、理論値と比較すると約 2%~4%弱の差であるので、測定値は理論値とよく合っていると考えられる。

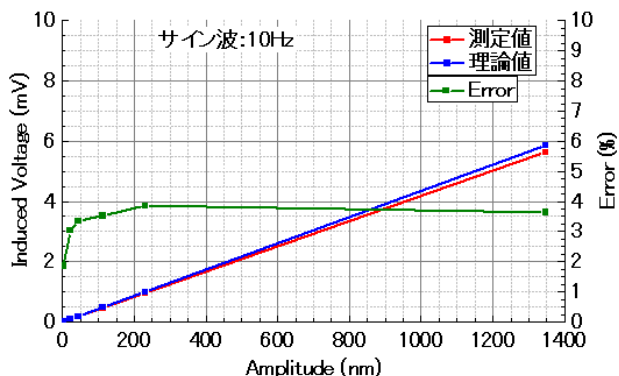


Figure 13: Results of shaking test for induced voltage measurement from vibration measurement system

一方、100Hz 加振のデータを見ると 10Hz 加振の時と比べると振幅の値が小さくなっている。これは振幅は周波数の 2 乗で減衰するためである。結果、振幅は最大 27

ナノメートル程度変化しているのに対して誘導電圧は約 1.2mV 出力である。10Hz 加振の時と比べると振幅の値が小さくなるため、理論値との差は大きくなり、約 22%程度となる。

6. まとめ

定常時の床振動による超伝導四極収束電磁石(QCS)の内部に組み込まれている四極磁石の振動はルミノシティに大きく関係し、その振動レベルを知ることは重要なことである。このため、誘導電圧の原理を応用した磁場振動測定装置を開発してきた。この開発にはパッシブ除振台の開発が重要で多くの R&D 機を製作し試験した。

この結果、4 層のアルファゲルを 2mmGFRP シートで挟んだサンドイッチ形状の架台を用いることで伝達関数を最少 1/10 程度まで減少させ、更にアクティブ除振台も用いることで 1/100 程度まで減少させることが出来た。ピックアップコイル部での振動レベルを測定すると目標レベルの数ナノメートル以下に対してその約 1/10 の振幅に抑える事が出来た。

永久四極磁石内にピックアップコイル差し込み、ピエゾアクチュエータを用いた加振台で加振した誘導電圧の測定では 10Hz 加振時には理論値と 4%弱程度の誤差であったが、100Hz 加振の時では誤差が大きくなった。

今後、低振動磁場測定システムの開発では十分な低振動架台が開発されたが、ピエゾ式加振台を用いた誘導電圧の測定では未だ測定値と理論値との差が大きい事からその原因と改善が必要とされる。ことため、試験を更に続けていくつもりである。

謝辞

パッシブ除振台の製作にあたりましては、本所機械工学センターの協力により製作されました。数年に渡り幾種類も迅速かつ丁寧に製作頂き、深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] H. Koiso, K. Akai and K. Oide, "Design Progress and Construction Status of SuperKEKB", TUPPR006, Proceedings of IPAC12, New Orleans, USA, May 20-25, 2012.
- [2] 大内徳人, 日本加速器学会誌「加速器」Vol. 15, No.4 (2018) pp.253-pp.262.
- [3] H. Yamaoka *et al.*, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, TUP141.
- [4] H. Yamaoka *et al.*, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, THPH024.