

SuperKEKB 超伝導四極電磁石での振動測定装置開発の現状

DEVELOPMENT STATUS OF VIBRATION MEASUREMENT SYSTEM FOR SUPERKEKB SUPERCONDUCTING QUADRUPOLE MAGNETS

山岡広#, 大内徳人

Hiroshi Yamaoka#, Norihito Ohuchi

High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The SuperKEKB project which aim to achieve 40 times higher luminosity than that of the KEKB has been in progress and the beam commissioning with the final focus system has been carried out beam commissioning in High Energy Accelerator Research Organization (KEK). One of the methods to realize this purpose, strong superconducting quadrupole magnets (QCS) are installed in the both sides of the interaction region. Because the QCS magnet has an ability to squeeze beam size to 50nm. The vibration of the QCS is an important issue from the viewpoint of increasing the luminosity, it should know the vibration level at QCS because of the 50 nm beam size at IP. The vibrations on the cryostats have been already measured, however the quadrupole magnets installed in the QCS cryostats haven't been measured yet. Therefore, we are developing the device of vibration measurement system for the superconducting quadrupole magnets, and carrying out R&D. In this paper, the status of R&D is described.

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、7 GeV の電子リングと 4 GeV の陽電子リングから構成される周長 3 km の円型衝突型加速器が設置されている。この加速器は SuperKEKB 加速器と呼ばれ、現在 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]。Luminositiy 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。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4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 基ずつ設置される。リングの中心から見て左側の QCS を QCSL、右側の QCS を QCSR とよんでいる。

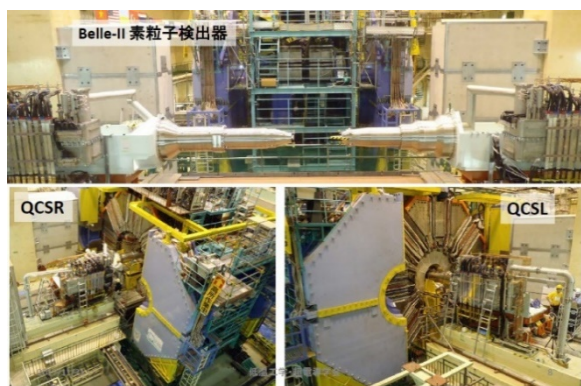


Figure 1: Overview of the superconducting quadrupole magnet (QCS).

ルミノシティ向上のために QCS の振動レベルを知る事は非常に重要なことである。このため、まずビームライン上に QCS が設置されたあと、高精度の振動計をクライオ

yamaokah@post.kek.jp

スタット上に置き、振動測定を実施した。また予め FEM 解析を実施し、QCS の振動レベルを予測し、実測値と比較した[3]。

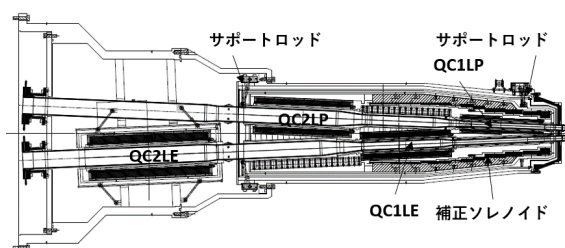


Figure 2: Cross section of QCS.

しかし、本来振動の値を知りたい場所は QCS に組み込まれている 8 台の超伝導四極電磁石(QC1LP/RP, QC1LE/RE, QC2LP/RP, QC2LE/RE)である。四極電磁石は Fig. 2 に示すようにクライオスタットからサポートロッドにより吊り下げられている。このため、QCS クライオスタット上での振動が四極電磁石の振動レベルとはならない。そこでピックアップコイルを先端につけたロッドを超伝導 4 極磁場のあるビームパイプに差し込んで磁場振動を直接測定することにより四極電磁石の振動レベルを測定することを考えた。

2. パッシブ防振台の設計

ピックアップコイルとロッドを取り付けるための台はできるだけ外部からの振動を抑えた防振台でなければならない。このため受動的防振技術を取り入れた防振台を考案した。外部からの振動に対する応答は1次固有振動数に向かってだんだんと拡大していき共振点で最大となるが、この共振点を過ぎると振動レベルは減衰して入力値より小さくなる。この原理を応用し、1次固有振動数を低く抑えた防振台を製作した。具体的には、Fig. 3 に示すように1枚の板を折り返した台を作り、その間にアルファゲ

ルを挟んで固有振動数を下げた構造にした。

Figure 3 に計算モデルを示す。このモデルではロッドを比強度の高い CFRP 製にし、板の折り返しをつけたサポート台を減衰定数の高い D2052 製とした。各層の間にはアルファゲルが定義してある。この条件で振動解析を実施した。

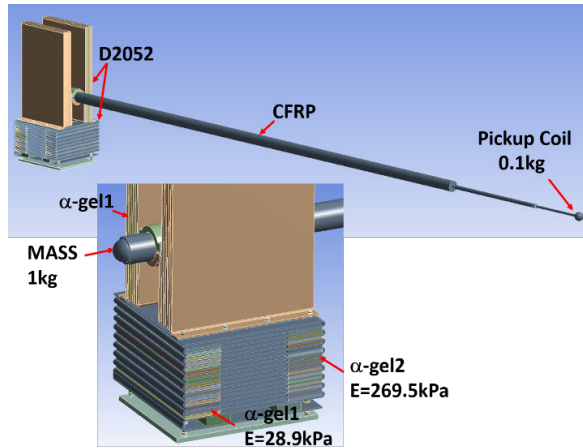


Figure 3: FEM model of vibration measurement system.

Figure 4 がロッド先端でのパワースペクトラム密度を計算したグラフである。青線が床面での垂直方向の入力値で、赤線と緑色の線が減衰定数を 0.5% と 6% にしたときの応答値である。周波数が約 30 Hz 位から応答値が入力値より低くなっているのが分かる。

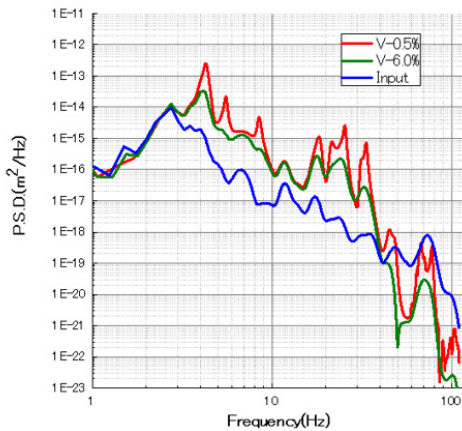


Figure 4: Calculation results of P.S.D..

3. 試作機での試験

3.1 1号機での試験

試作 1 号機(2017 年バージョン)のフルセットアップ形状を Fig. 5 に示す。ロッドを支える折り返し台はステンレス製である。水平方向折り返した台の上に垂直方向に折り返した台が接続されていてそこに CFRP ロッドが接続されている。ロッドの先端にはピックアップコイルが取り付けられている。装置全体は石定盤の上に置いたアクティブ除振テーブルの上に載せられていて振動特性が測定された。アクティブ除振テーブルは 100 Hz 以下の振動をピ

エゾアクチュエーターにより減衰することができる。

Figure 6 に示すように、アクティブ除振台をオン時には積分振幅の大きさは 10 Hz のところで石定盤上で 20 nm に対し架台上では約 1 nm にまで減衰した。ピックアップコイルの先端の変位はレーザーで測定されたが積分振幅値は 10 Hz のところで約 3 nm であった。

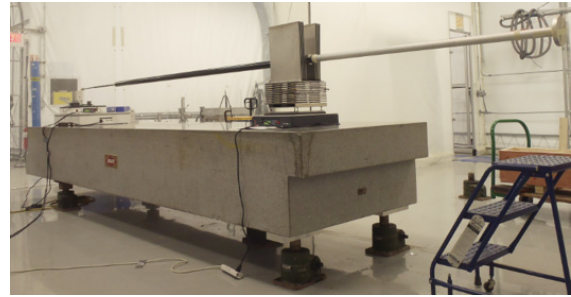


Figure 5: Set-up configuration of the first trial vibration measurement system (2017 version).

更にアクティブ除振台を重ねて 2 段にすると減衰性能が向上することがわかったが、パッシブ防振台の重量がテーブルの許容積載量をオーバーしたため、これ以上の試験はできなかった。

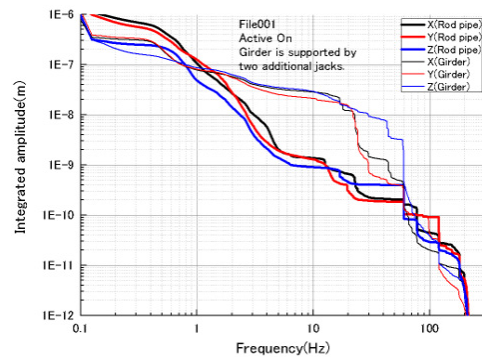


Figure 6: Measured integrated amplitudes in case of active isolation table is turned on.

3.2 2号機での試験

2 号機(2018 バージョン)は 1 号機の反省を踏まえて軽量化を図った。垂直の折り返し板を省いて、水平部の総数を減らした。このことにより、アクティブ除振台を 2 段重ねた状態でも試験が可能になった。フルシステムでの試験形状を Fig. 7 に示す。

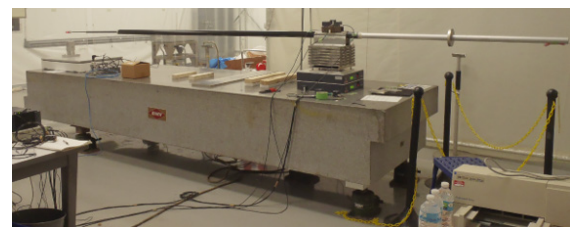


Figure 7: Set-up configuration of second trial vibration measurement system (2018 version).

試験結果であるが、アクティブ除振台が 1 台のときにその上に測定システムをセットアップした状態では積分

振幅はロッド取り付け部の所で約 1 nm(@10Hz)であった。しかし、今回は重量軽減によりアクティブ除振台を2台重ねてその上にシステムをセットアップすることができるため、積分振幅の軽減が期待できた。結果としてアクティブ除振台を2段重ねることにより 10 Hz で約 0.4 nm に減少した(Fig. 8)。

しかし、レーザーでロッド先端のプロープの振動振幅を測定してみると垂直方向で 12 nm(@10 Hz)、水平方向で 11 nm(@10 Hz)という結果になり、1号機で測定された 3 nm(@10 Hz)より悪い結果となった。

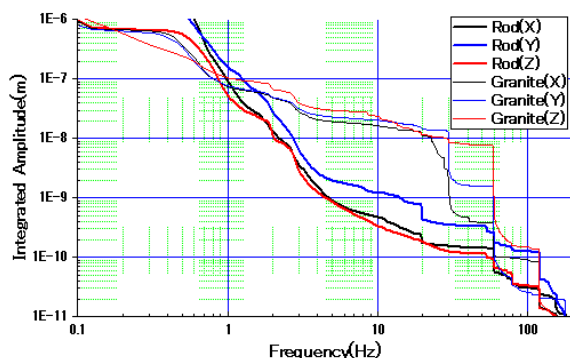


Figure 8: Integrated amplitudes at second trial system in case of double active isolation tables are turned on.

4. CFRP ロッドの寸法最適化

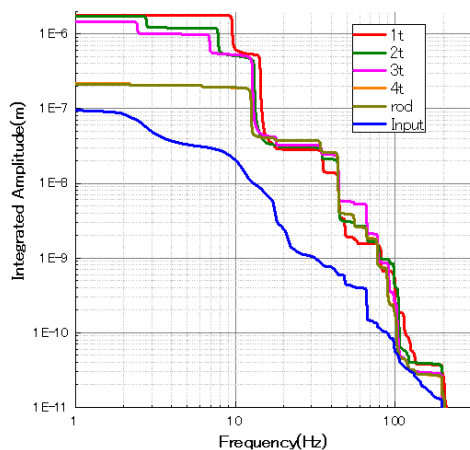


Figure 9: Calculation results of integrated amplitude.

2号機での除振特性が1号機と比べて改善されなかったことから1号機の除振設計を再度採用することとした。またCFRPロッドの寸法を見直した。断面寸法は外径50 mm、肉厚5 mmであったが、外径を一定として肉厚を変化させた。つまり断面2次モーメントを変化させて、この時の床振動に対するロッド先端での応答振幅を計算した。

計算結果である積分振幅のグラフをFig. 9示す。床面での振幅(入力値)は10 Hz付近のところで約20 nmであるが、これに対して1tつまりデフォルトの厚み(5 mm)での応答値は約2000 nmと計算され、床面での振幅の100倍拡大されることがわかった。肉厚が2t(5 mm

厚の2倍)及び3tのときの応答積分振幅は若干低くなり、4t及び丸棒の時の応答値は約200 nmとなり床面振幅の10倍の応答積分振幅と計算された。このため、4tの厚みを新しいロッドとして選択した。

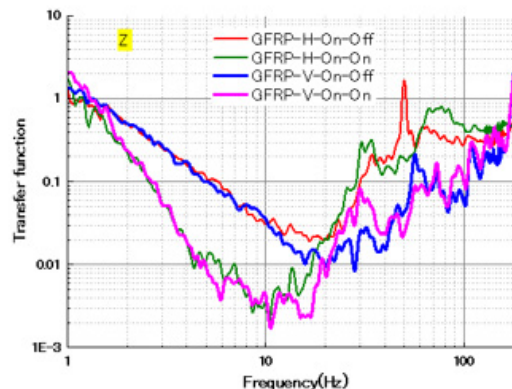


Figure 10: Transfer functions at each condition.

5. 最新版での試験

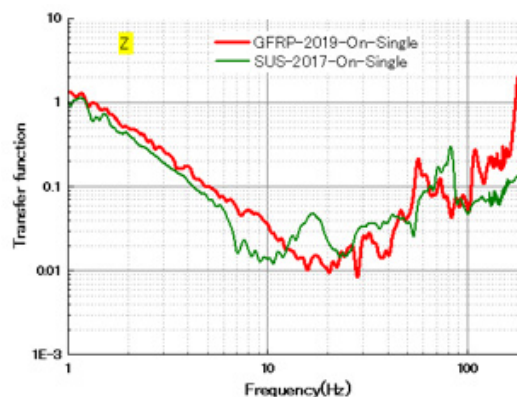


Figure 11: Comparison of transfer function between the 2017 version and the newest version.

最新版の測定システムでは軽量化を図るためにロッドを固定するためのパッシブ防振台をGFRP製とし、また比強度の高いCFRP製の垂直フレーム構造も取り入れた。このため総重量がステンレス製のパッシブ防振台と比べて1/3程度になった。

5.1 パッシブ防振台のみでの振動測定

ロッドを取り付けたフルシステムで試験する前に水平部と垂直部から構成される防振台自身の振動特性試験を行った。試験では、水平折り返し構造防振台のみの振動特性と垂直部構造も含めた防振台での振動特性を比較した。また、ステンレス製で同様の形状である1号機の振動特性との比較も行った。

比較は床面での振動レベルが各測定時に違いが出ることから床面とステージ上での振幅比をとるトランスファーファンクションを求めて評価を行った。このトランスファーファンクションは値が1以上の時は防振台上の振幅が大きく、1以下の場合は床面振幅よりも防振台上の振幅が小さいという意味である。Figure 10にアクティブ除振台を

On にしたときの上下方向のトランスファーファンクションを示す。赤と緑の実線が水平部のみでの防振台でのトランスファーファンクションを示し、青とマジェンタの実線が垂直フレームも取り付けられたときのトランスファーファンクションを示す。両者を比較してみると明らかに垂直フレーム付き防振台の方が約 1 桁値が良いという結果になった。



Figure 12: Set-up configuration of the newest type of vibration measurement system (2019 version).

試作 1 号機の防振台部分と比較した場合のトランスファーファンクションを Fig. 11 に示す。赤の実線が最新版の防振台でのトランスファーファンクションで、緑の実線が試作 1 号機でのトランスファーファンクションである。両者を比較してみると双方に大きな差がないのがわかる。

5.2 フルシステムでの振動測定

フルシステムにしたときの試験形状を Fig. 12 に示す。

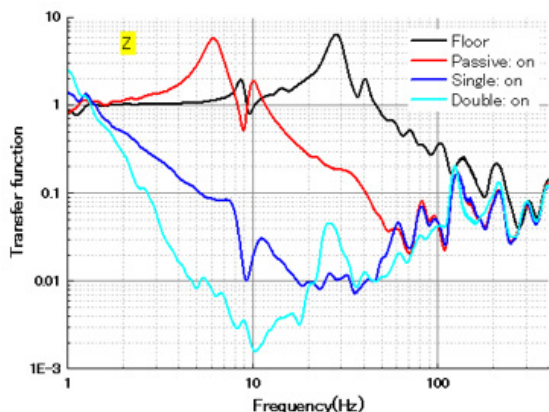


Figure 13: Transfer functions in each set-up configuration.

各条件を変えたときの鉛直方向の試験結果を Fig. 13 に示す。図中の凡例はシステムを床に直に置いたとき、2 重化されたアクティブ防振テーブルのパッシブ除振機能を On にしたとき、1 台だけアクティブ除振機能を On にしたとき、そして両方のアクティブ除振機能を On にしたときのトランスファーファンクションである。結果としてトランスファーファンクションは徐々に小さくなっていき、アクティブ除振機能を 2 つとも On にしたときに最小になった。

1 号機と 2 号機との比較であるが、1 号機と 2 号機では Fig. 14 に示すようにトランスファーファンクションに大きな違いは無かったが、最新版と比較すると高周波数領域では(特に 100 Hz 以上)では最新版の方がトランスファーファンクションが一桁小さいという結果になった。

レーザーを用いたロッド先端での振幅の測定はこの秋に予定されている。

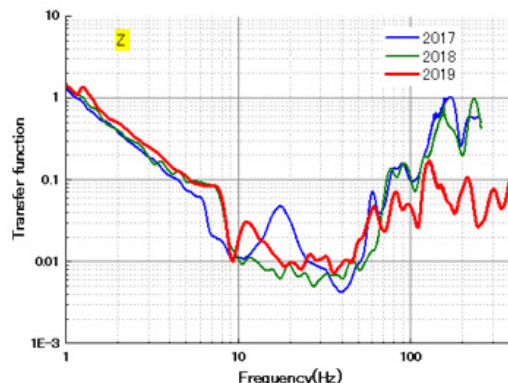


Figure 14: Transfer functions in three types of vibration measurement system.

6. まとめ

常時微動に対する超伝導 4 極電磁石の振動測定装置の R&D ステータスについて報告した。原理としては CFRP ロッドの先にピックアップコイルを取り付け、4 極磁場振動により発生するピックアップコイルの電圧の変化を読むことで振動を測定しようとするものである。このため、装置自身の振動はできるだけ低く抑えなければならない。サポートステージの設計として固有振動数を低く抑えて振幅を低く抑えるパッシブな除振台を設計・製作し、振動特性を測定した。1 号機ではステンレス製の水平部折り返し板と垂直方向折り返し板から成る防振台を製作し、ピックアップコイル部で 3 nm の変位に抑えることができた。しかし、重量が重すぎることから重量軽減化を図った 2 号機を設計・製作した。2 号機では垂直方向折り返し板を省くと共に水平部折り返し板の総数を減らした。しかし測定結果としてピックアップコイルでの振幅が 12 nm となり、1 号機には及ばなかった。

最新版では材質を GFRP にして更なる軽量化を行い、垂直方向折り返し板も復活させた。振動特性を測定したところ結果は良好であるが、この秋に更なる測定(ピックアップコイル部での振幅測定等)をおこなう予定である。

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] 山岡広: 第 12 回加速器学会年会プロシーディング(2015), THP137.