

## 最終収束超伝導電磁石(QCS)の振動測定と解析

### VIBRATION MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF THE FINAL FOCUSING SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM(QCS)

山岡広, 大内徳人, 大澤康伸, 増澤美佳, 植木竜一

Hiroshi Yamaoka, Norihito Ohuchi, Yasunobu Ohsawa, Mika Masuzawa, Ryuichi Ueki

High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

The SuperKEKB project which is aiming for 40 times higher luminosity than that of KEKB accelerator is in progress at High Energy Accelerator Research Organization (KEK). One of the method to realize this purpose, two final focusing superconducting quadrupole magnets(QCS) which can be squeeze the vertical beam size to 50nm are required in the interaction region. Installation of those QCS magnets have been already finished and one of it (QCSL) has been finished the performance test. The other one (QCSR) is in progress of field mapping. Because the vibration of the QCS is important issue for achievement of the target luminosity, the vibration measurements were carried out after the installation. Also the vibration level was estimated by FEM calculation based on the measurement floor data.

In this paper, it describes about the results of the vibration measurements of the QCS magnets and the comparison between the measurements and FEM analysis is reported.

#### 1. はじめに

本研究所では、7Gev の電子リングと 4Gev の陽電子リングから構成される周長 3km のドーナツ型衝突型加速器が設置されている。この加速器は KEKB 加速器と呼ばれ、現在、この加速器の更なる性能向上 (40 倍のルミノシティ向上) を目指して改良工事がおこなわれている。この計画が SuperKEKB と呼ばれる[1]。ルミノシティ向上のためには、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 マグネットと呼ばれる最終収束超伝導4極電磁石である。QCS マグネットは Figure 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 マグネットを QCSL、右側の QCS を QCSR とよんでいる。QCS マグネットは QCS サポートフレームと呼ばれる支持フレームに取り付けられ、このフレームが QCS 用移動架台に支持される。

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。また、測定された振動レベルが基準値を超えた場合、何らかの対策を施さなければならぬ。このため、まずはビームラインに QCS が設置されたあとに高精度の振動計をクライオスタット上に置き、振動測定を実施した。また予め FEM 解析を実施し、

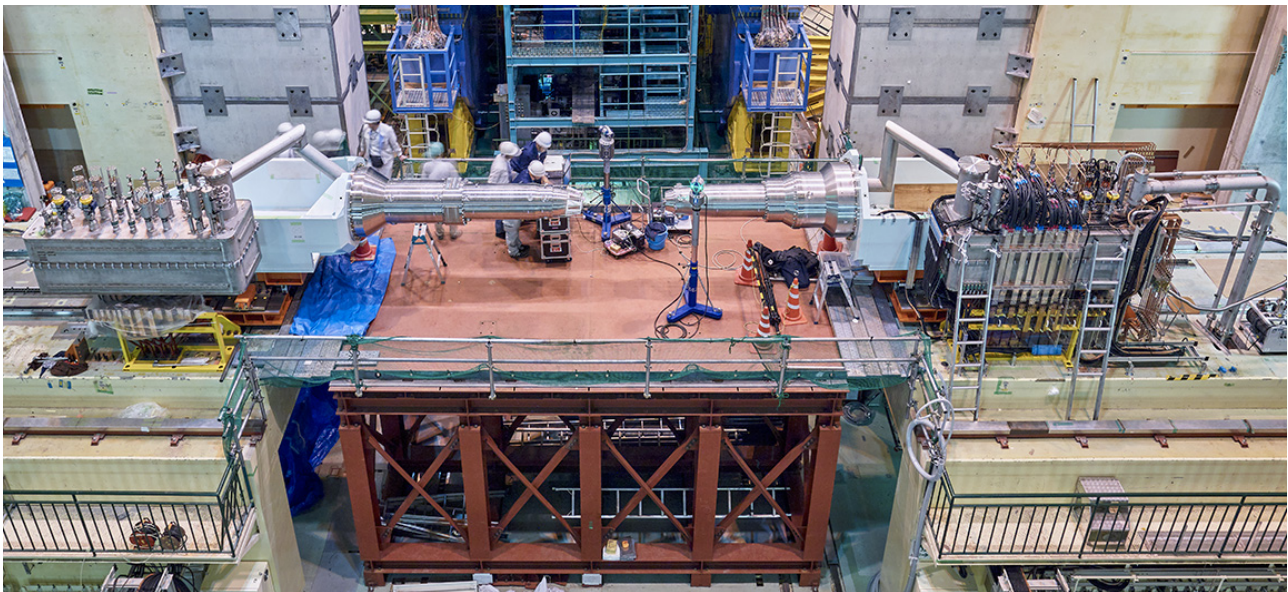


Figure 1: Overview of the final focusing superconducting quadrupole magnets after the installation in the IR region. The right-hand side magnet shows so called QCSL and the left-hand side magnet shows QCSR.

# yamaokah@post.kek.jp

QCS の振動レベルを予測し、実測値と比較した。この際、FEM 解析では実際に実験室床面で測定されたデータを

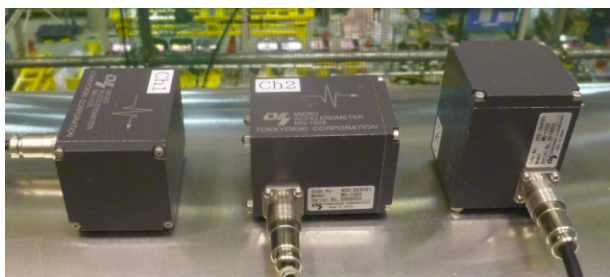


Figure 2: Applied high precision accelerometer.

入力値として用いた。

## 2 QCSL の振動測定

### 2.1 振動計

振動レベルが小さいことからサーボ式の高精度振動計 (Figure 2) が用いられた。スペックは以下の通りである。

- 型式:サーボ型加速度計(MR-06X)
- メーカー:特許機器(株)
- 測定領域:DC~400Hz
- 感度:1gal/1V
- 外形寸法(W×D×H):40×40×55.5mm

### 2.2 QCSL の振動測定

Figure 3 に示すように、QCSL のクライオスタット上に 3 個の加速度計を 3 方向に置き、床面にも相関をとるために 3 個の加速度計を 3 方向に置いた。測定周波数レンジは 250Hz の 8192 分割である。測定時間は 5 分間。データは 2 回積分して加速度から変位のパワースペクトラム密度及び積分振幅に変換した。

測定結果を Figure 4 に示す。上段はクライオスタット上と床面で測定された 3 方向のパワースペクトラム密度で下段はそれらの積分振幅である。上段では大きく 3 つのピークが測定された。1 つは水平方向に 0.3Hz 付近のピーク、2 つめは縦方向に 3Hz 付近のピーク、そして 25Hz 付近の大きなピークである。最初の 0.3Hz、3Hz は朝夕と関東ロータリー層の固有値で床面と一緒に振動している。3 つめの 25Hz 付近のピークは床面は振動せず QCSL だけに振動ピークがあることから QCSL の固有値と考えられる。

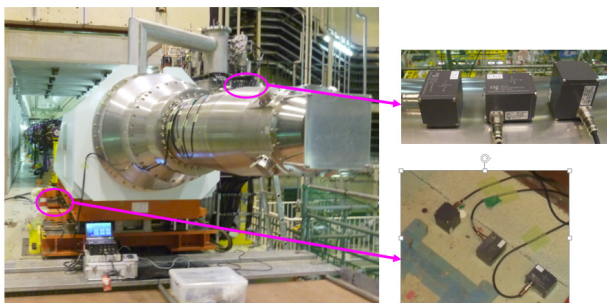


Figure 3: Set-up configuration of the vibration measurement for the QCSL magnet.

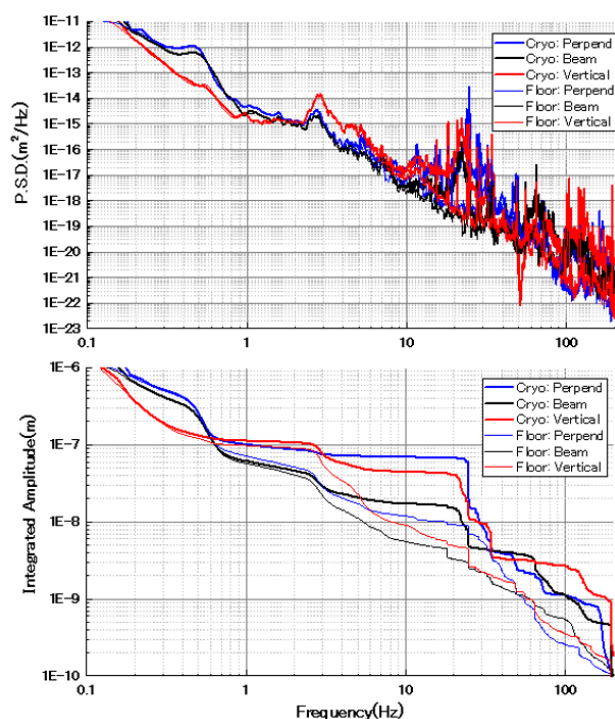


Figure 4: Results of vibration measurement of the QCSL magnet.

下段の積分振幅では、床面の振幅は 10Hz 以上では、約 10nm ぐらいであるが、クライオスタットの軸方向で約 20nm、垂直方向で約 50nm そして水平方向で約 70nm であった。

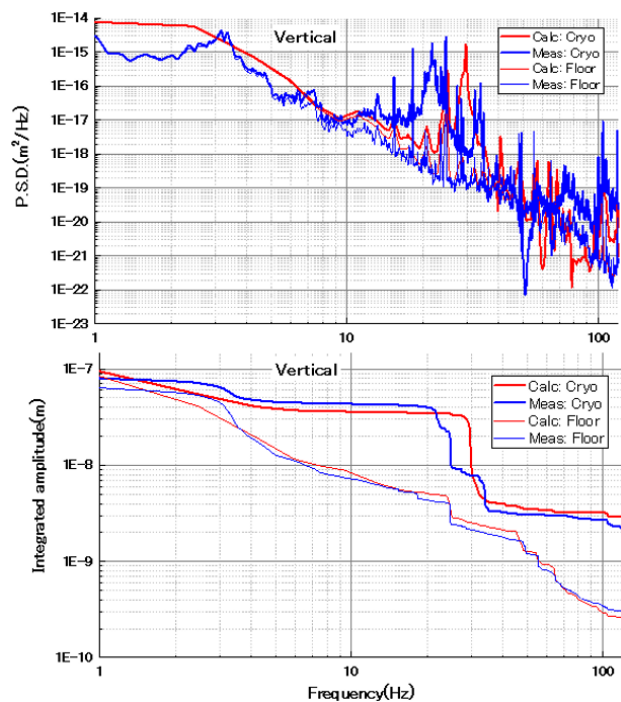


Figure 5: Comparison results between the measurement and the FEM analysis in the vertical direction.

この値を KEKB 加速器時代での QCS マグネットと比



較すると、KEKB 用 QCS マグネットの 1 次固有値は 11Hz、10Hz 以上での積分振幅は約 270nm であった。したがって、固有値で約 2.5 倍剛構造になり、このことから積分振幅も 1/4 以上小さくなった。この理由は SuperKEKB 用 QCS マグネットの場合、まず床面の固定部から QCS マグネットまでの高さが KEBK 加速器の時は 2330mm であったが、SuperKEKB では 1530mm と背が低くなり、また支持架台の剛性を向上させた事、そして QCS マグネットを支持している架台の数が少なくなった事である。

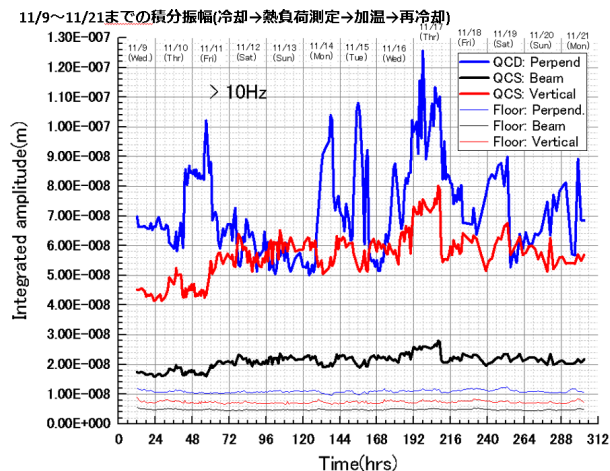


Figure 6: Trend of the integrated amplitude due to the effect of cooling test.

### 2.3 FEM 解析との比較

FEM 解析と測定値を比較した。解析における入力値は床面で測定された値を用いた。また、解析では減衰定数を定義しなければならないが、ここでは 0.5% を入力値とした。垂直方向の解析値と測定値を Figure 5 に示す。解析では 1 次の固有値が 30Hz にあるのでそこが 1 次の固有値になっている。測定値の 1 次固有モードは 25Hz なので解析と比べて 5Hz 低いところに固有値がある。高次モードではピークも大きさも一致しない。しかし、積分振幅はほぼ 1 次モードの値で決まってしまう。

積分振幅の比較では床面の積分振幅は一致させているのでほぼ同じ値である。QCSL での積分振幅を比べた場合、1 次モード以下では解析値が 40nm、測定値が 50nm となり、ほぼ同じ値になった。

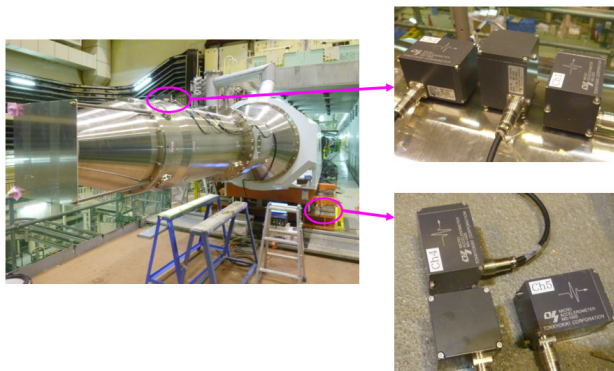


Figure 7: Set-up configuration of the vibration measurement for the QCSR magnet.

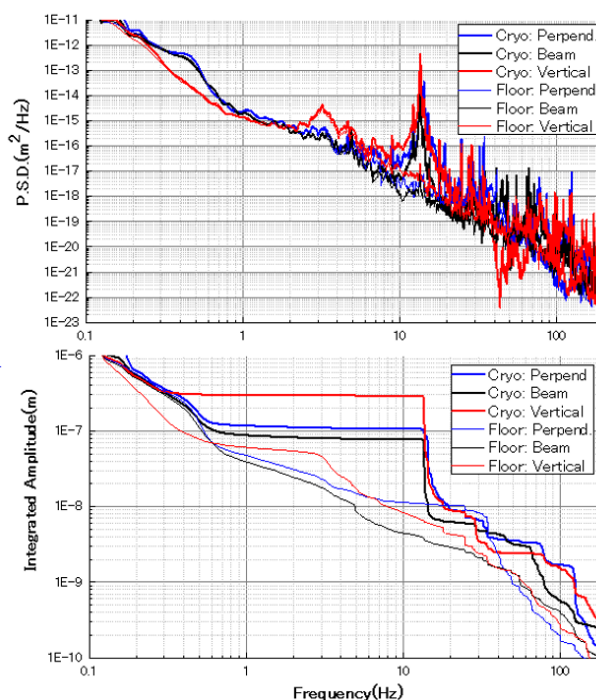


Figure 8: Results of vibration measurement of the QCSR magnet.

### 2.4 QCSL 冷却の影響

QCSL の冷却試験時に QCSL の振動の変化を測定した。Figure 6 に 10Hz 以上での積分振幅を示す。結果を見ると垂直方向は約 50~60nm 程度で冷却の影響をあまり受けないが、水平方向は冷却ガスの影響を受けて 50~100nm まで変化している。

## 3 QCSR の振動測定

### 3.1 QCSR の振動

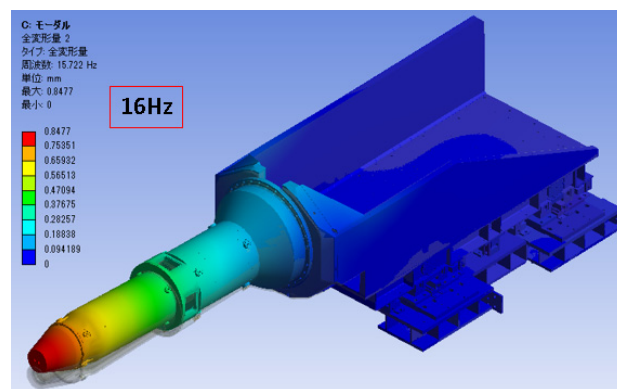


Figure 9: The first mode of mode shape and resonant frequency of the QCSR magnet.

QCSR の振動測定に於いても Figure 7 に示す通り、QCSR クライオスタット上に 3 個の高精度振動計を先端から約 700mm の所に 3 方向に載せ、床面にも同様に振動計をセットした。

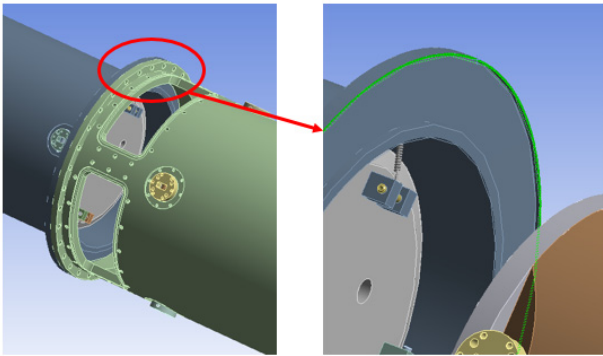


Figure 10: FEM model which simulate bolt connection structure.

測定結果を Figure 8 に示す。上段が変位に変換したパワースペクトラム密度で下段が積分振幅である。測定結果から 1 次モードの固有振動数は 14Hz で積分振幅は水平方向が 10Hz 以上で約 100nm、垂直方向が 300nm であった。

### 3.2 FEM 解析

固有値解析結果を Figure 9 に示す。解析では 3DCAD からモデルを読み込み拘束条件を定義して解析をおこなった。

解析結果は 1 次の固有振動数が 16Hz と測定値の 14Hz に近い値になったが、垂直方向の積分振幅が約 100nm と計算され、約 1/3 しかならなかった。

この原因について考察してみる。QCSR クライオスタットは前方クライオスタットと後方クライオスタットから構成されており、両者はボルトで拘束されている。Figure 9 に示されている FEM 解析モデルでは前方と後方クライオスタットは一体となっており、溶接接続されている状態である。したがって実際にはボルトで固定されているのでそこで剛性が低下していると考えられる。

そこで FEM モデルで 'ボルト構造' を模擬して解析をおこなった。方法として、前方クライオスタットと後方クライオスタットは M16 のボルト 32 本で接続され、P.C.D.660 で配置されている。このときの断面二次モーメントを計算し、等価な接触面積を計算した (Figure 10 の緑色部分)。つまり前方と後方クライオスタットはこの部分だけで接触していると定義し、FEM 解析をおこなった。

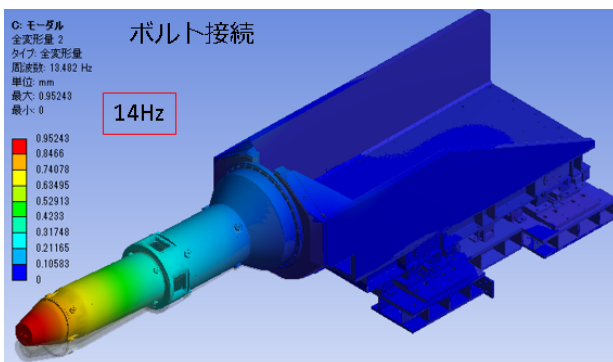


Figure 11: The first mode of mode shape and resonant frequency assumed to be bolts connection of the QCSR cryostat.

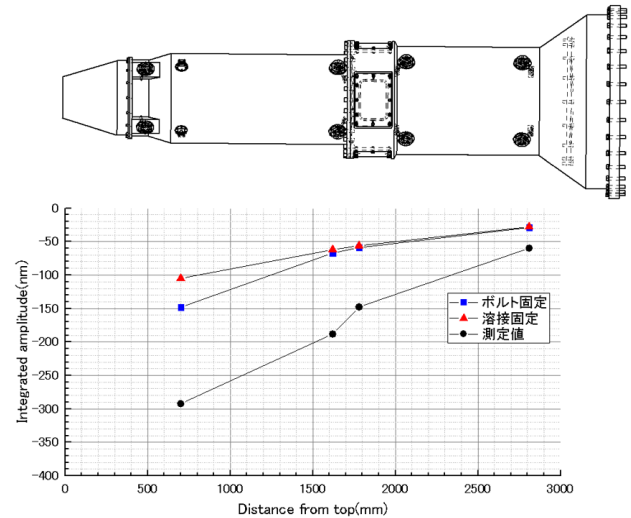


Figure 12: Integrated amplitude in each position.

### 3.3 FEM 解析結果

前方クライオスタットと後方クライオスタットがボルト接続であると仮定したときのモーダル解析結果の 1 次モードを Figure 11 に示す。固有振動数は 14Hz で垂直方向の振動と計算され、測定値と一致した。

一方、床振動に対する QCSR の応答計算であるが、結果を Figure 12 に示す。結果は QCSR の各点での 10Hz 以上の垂直方向の積分振幅を表している。3 つのケース (溶接接続、ボルト接続、測定値) をプロットしたが、溶接接続では測定値に対して 1/3 程度しかないが、ボルト接続の場合で測定値の約半分の値となった。

## 4 まとめ

最終収束超伝導電磁石 (QCS) の振動測定をおこない、FEM 解析と比較した。

QCSL では固有値は 25Hz と測定され、FEM 解析結果の 30Hz より若干低い値となった。積分振幅では垂直方向の測定値で 50nm (>10Hz)、FEM 解析で 40nm (>10Hz) で双方大差ない結果になった。また、KEKB 加速器のときの成分振幅と比べて 1/4 程度と大幅に積分振幅が小さくなった。これは SuperKEKB における支持架台や QCSL マグネット自身の剛性が大きく向上したためと考えられる。

QCSR の振動測定であるが、測定した結果、垂直方向で 300nm (>10Hz) であることがわかり、FEM 解析の 3 倍くらいの大きさであった。QCSR 構造について検討してみると、構造が前方クライオスタットと後方クライオスタットがあり、互いにボルト接続されていることがわかった。この部分で剛性低下を招いているのではないかと考えられるが、それでも測定値と解析値で 2 倍の開きがある。さらに検討が必要と思われる。

## 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.