

# Vibration Results of SACLA Accelerator Structures fixed Girders on the Ground Floor

Sakuo Matsui,<sup>A)</sup> Hiroaki Kimura<sup>A, B)</sup>, Noriyoshi Azumi<sup>A)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>A)</sup>, Toru Hara<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN, 1-1-1, Kouto, Sayo, Sayo, Hyogo, 679-5148

<sup>B)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute, 1-1-1, Kouto, Sayo, Sayo, Hyogo, 679-5198

## Abstract

The girders for SACLA accelerator structures were put on the flat concrete floor to reduce the vibration without shim plates. The flat floor was made with the grindstone. The measured vibration amplitudes (rms value) of the accelerator structures were less than  $0.3 \mu\text{m}$  in the transverse horizontal and vertical directions. These values are about one order smaller than the tolerance. The measured vibration amplitude of Quadrupole magnets were  $0.02 \mu\text{m}$  in the horizontal direction and  $0.005 \mu\text{m}$  in the vertical. The tolerance of Quadrupole magnets vibration is  $0.9 \mu\text{m}$ .

## 研削面上設置架台による SACLA 加速管などの振動結果

### 1. はじめに

SACLA 加速器で良質なレーザー発振のためには加速管や電磁石の振動は許容値以内でなければならない。Sバンド(8本)、Cバンド加速管(128本)の振動の許容値はビーム軸方向は  $20 \mu\text{m}(\sigma)$ と大きい。ビーム軸垂直方向は、8GeVのところで振動による軌道変位をビームサイズの10%以内にするためには加速管端部で、隣との位相の相関がない場合、振動振幅を  $2.3 \mu\text{m}(\sigma)$ 以下に抑える必要がある。ただしエネルギーの小さいほど影響は大きくSバンドだけで3割弱の寄与がある。逆位相だとキックが増幅され許容値は  $1.6 \mu\text{m}$ と小さくなる。また、加速管8本ごとなどの、Q電磁石の振動の許容値は同様に考えると  $0.9 \mu\text{m}(\sigma)$ である。

リニアコライダー等で考えられてきた、より安定な架台のひとつとして面タッチを実現するため床を研削しシムなしで固定する方法がある。SACLAでも加速器の大部分を占めるCバンド加速管用の試験架台を製作しこの方法を試験し実機でも採用した。

### 2. テストスタンドでの測定

2008年頃はまだ正規の場所ではなく別の建物に加速管やsledを組んでいろいろなテストを行い、加速管の振動についてもいろいろな測定を行った。

#### 2.1 測定器

センサーは(株)東京測振製 速度出力 VSE15D 1mm/s 1V出力 8個、測定器は小野測器製 多チャンネルFFT Graduo 8ch 24bitを用いた。

#### 2.2 架台のみ固定の振動試験

架台の天板が水平になるよう弓形形状の厚さ  $0.3\text{--}0.5\text{mm}$ 程度のステンレス板(シム)を用いて4つのボルトで塗装面上に固定したもの(図1左)、(株)原マシナリー製のコンクリート研削装置を用い、水平で平坦度  $1\text{m}$  四方  $\pm 0.03\text{mm}$ 程度の研削面上

に固定したもの(図1右)、さらに架台内に砂を満たしたものを用意した。床上、架台天板上、それぞれ水平X、Z方向、垂直方向、計6個のセンサーを設置し、ハンマーなどで床や架台天板を加振した。



図1. 架台の固定部 左: シム板、右: 研削面

図2に架台天板を水平に加振したときの各成分の振動波形を示す。明らかに研削面での減衰が速く、床への伝播も大きいことがわかる。包絡線の減衰時間はシム使用で  $0.2$ 秒、研削面でも  $0.012$ 秒と一桁以上の差があった。(図3)

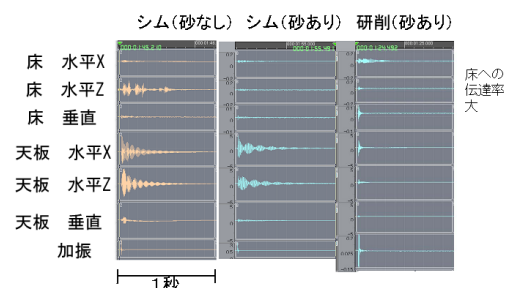


図2. 架台天板の水平加振時の床、架台の振動。

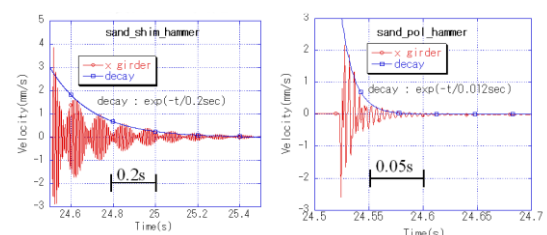


図3 減衰時間 左: シム使用 右: 研削面

### 2.3 架台つばの剛性

架台つばのところが弱いのか、シムがよくないのか調べるために図 4 のようにツバの上に垂直方向に、架台上に水平方向にセンサーを置き測定した。図 5

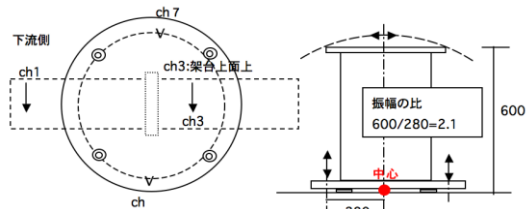


図 4. シム板架台とセンサーの位置。

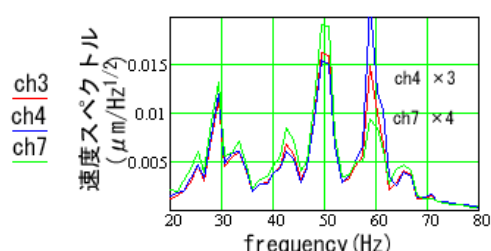


図 5. 架台つばのところの上下と天板の水平振動。

に ch4 (青) は 3 倍、ch7 (緑) は 4 倍してプロットし ch3(赤)と比べている。振幅の比は 2 倍よりやや大きい位相をみても回転していることがわかり、またボルトの上での振幅も ch4,7 と同程度であったことから厚さ 25mm のツバの剛性はかなりあり、シム板のところがバネになっていることがわかった。

### 2.4 振動源と伝搬経路

さらに冷却系、sled など設置配管された。(図 6) 導波管にも冷却用のパイプが上面に溶接され加速管両端の側面にフランジ固定されている。加速管用の冷却水配管は主にステンレス製で、加速管の両端に上下 2 方向から入と出の配管がある。

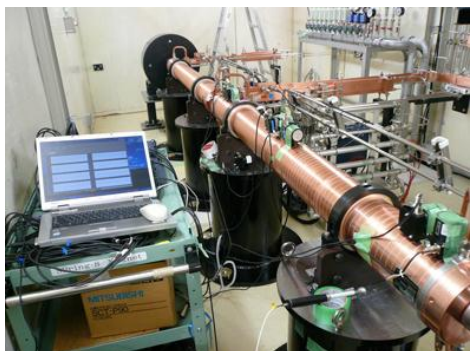


図 6. テストスタンドでの振動測定。

加速管内用冷却水を止めても加速管の振動はあまりへらず、sled への冷却水も止めると大幅に減少した。これは加速管に流れる水による振動自体より外からの伝播が主であることを示している。

伝播経路は 1) 床から架台を通して、2) 導波管(両端) 3) 冷却水配管(両端)と 3 通りの経路が考えられる。sled は壁に固定されているが冷却水配管は加速管用と共通に固定されている部分があり、

そこから振動が伝播してくる。振動源を特定するために加振試験を行った。

床、加速管の両端部の導波管、冷却水用配管をそれぞれ加振してフーリエスペクトルを、実際のところから床からの伝播はわずかとわかったが、導波管と冷却水用配管はどちらも端部に固定されており、加振スペクトルでの区別は難しかった。いずれにする加速管の振動は両端につながっている機械的なパイプを伝播してきているのが主と考えられたので実機では冷却水配管はできるだけ床や壁などしっかりしたものに固定する、sled と加速管への配管のサポートはできるだけ別にするなどこころがけた。

### 2.5 加速管の架台への固定

加速管 1 本を 2 台の架台つまり 2 カ所で固定するが、その固定部の材質をステンレスのバンドとアルミでテストした。sled、加速管に冷却水を流しセンサーは加速管上に計 8 個設置し測定した。差が見られなかったので幅 38mm 厚さ 0.6mm のステンレス板を用いることにした。

## 3. 振動振幅の推定

### 3.1 経緯

試験した架台(鋼管直径 41 cm、ボルト間隔 56 cm) から実機では小型にし(同 32 cm、29 cm)、また床の研磨度もコストや時間から粗いものでも問題ないかの答えが必要になった。冷却水も配管もない状態で実際時の振動を推定した。

### 3.2 モデル

インパルスハンマーにより架台天板に加振力  $F_0$  が時間  $\Delta t$  だけ作用する場合のモデルは(図 7)

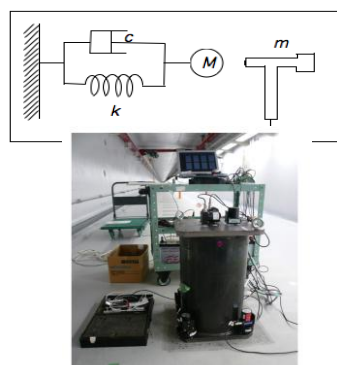


図 7. 天板を加振する場合のモデル。

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \Delta t \delta(t) \quad \text{または} \quad M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

ここで減衰比  $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{Mk}}$  を使い、 $x_{1p}$  を以前の鋼管架台の変位、 $x_{2p}$  を新しい架台での変位とすると

$$x_{1p}(t) = F_1 \Delta t_1 \frac{M_1}{\omega_1 \sqrt{1-\zeta_1^2}} e^{-\zeta_1 \omega_1 t} \sin(\omega_1 \sqrt{1-\zeta_1^2} t)$$

$x_{2p}$  も同様に表される<sup>11)</sup>。 $\omega_n$  は n 番目の固有振動の角速度である。減衰のカーブは時定数  $\tau=1/(\zeta \omega)$  を用いると  $\exp(-\zeta \omega t) = \exp(-\frac{t}{\tau})$  と表される。時間  $\tau$  経つと振幅は  $1/e=1/2.7=37\%$  になる。

実際には速度出力を測定しており  $t \sim 0$  に近い部分で振幅を比べる。また今回のような場合は減衰比  $\zeta < 0.1$  なので速度出力の振幅だけで比較すると

$$\frac{|\dot{x}_{2p}(t)|}{|\dot{x}_{1p}(t)|} = \frac{F_{2o} \Delta t_2 M_1}{F_{1o} \Delta t_1 M_2} \quad \text{従って、} \quad \frac{M_1}{M_2} = \frac{|\dot{x}_{2p}(t)| F_{1o} \Delta t_1}{|\dot{x}_{1p}(t)| F_{2o} \Delta t_2}$$

### 3.3 加速管を設置した場合の振動

減衰のある連続加振の場合は

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_o \sin \omega t$$

$$x = X \sin(\omega t + \alpha)$$

と置く。この場合の  $M$  は加速管も含めた質量になり、架台単独の場合と異なるがその状況は以前の架台でも同様なので振幅だけに注目すると

$$X = \frac{F_o}{M \sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta \omega_n \omega)^2}}$$

新しい架台での加速管を取り付けた場合の固有振動数はわからないが問題になる振動数は固有振動数に近いあたりなので  $(\omega_n^2 - \omega^2)$  の項は無視でき、また加速管を振動させる外力  $F_o$  は実機のトンネルの中でもテストスタンドの場合と同様と考えると

$$X_1 = \frac{F_o}{M_1} \frac{1}{2\zeta_1 \omega_n \omega} \quad X_2 = \frac{F_o}{M_2} \frac{1}{2\zeta_2 \omega_n \omega}$$

$$\text{ここから} \quad \frac{X_2}{X_1} = \frac{M_1 \zeta_1 \omega_n}{M_2 \zeta_2 \omega_n}$$

従って 予測される振動振幅  $X_2$  は減衰の時定数  $\tau$  を用いて

$$X_2 = \frac{M_1 \zeta_1 \omega_n}{M_2 \zeta_2 \omega_n} X_1 = \frac{|\dot{x}_{2p}(t)| F_{1o} \Delta t_1 \zeta_1 \omega_n}{|\dot{x}_{1p}(t)| F_{2o} \Delta t_2 \zeta_2 \omega_n} X_1 = \frac{|\dot{x}_{2p}(t)| F_{1o} \Delta t_1 \tau_2}{|\dot{x}_{1p}(t)| F_{2o} \Delta t_2 \tau_1} X_1$$

と書ける。ただし、加速管を取り付けるので  $M$  は大きくなり、固有振動数も下がるが  $M1/M2$  や振動数の比があまりかわらないと仮定している。

テストスタンド室での測定で  $x$  方向の架台上と加速管の振幅はほぼ同じという結果が出ている。またテストスタンド室での架台の条件は 4 本とも異なるが加速管 2 本とも振幅に大きな差はなく (rms :  $0.2 \sim 0.3 \mu m$  振動数  $\sim 50\text{Hz}$ )  $0.25 \mu m$  として計算する。

### 3.4 推定結果

架台単独でのハンマーによる天板加振時の水平方向の振動の時間変化から最初速度、ハンマー加振の加速度、減衰時間、固有振動数を読み取った。

インパルスハンマー 0.22V/kgf Gain:10 使用  
推定の基準には 2 台ともほぼ同じ条件にあったシム

(砂あり) 使用架台  $x$  方向の振動を使った。研削が上仕上げ、超荒仕上げ、試験用仕上げの 3 種類の面にそれぞれ新しい架台を設置し水平の  $X$ 、 $Z$  2 方向から加振してパラメータを計算し、それぞれの架台に加速管を設置した場合の振動振幅を推定した。

(表 1 の赤字)  $0.2 \mu m$  弱の値で、研削の度合いによる差はあまり見られなかった。

表 1 : 新架台での加速管水平方向振動振幅の推定

新しい架台 (研削程度)	速度振幅 (mm/s)		ハンマ質量 (g)		ハンマ出力 (V)		$\Delta t$ (秒)		減衰時間 $\tau$ (秒)		振幅 ( $\mu m$ )		固有振動 (Hz)
	(旧)	(新)	(旧)	(新)	(旧)	(新)	(旧)	(新)	(旧)	(新)	基準 $X_1$	推定 $X_2$	
上仕上げ z	3.9	1.97	220	380	2.6	0.88	0.002	0.004	0.07	0.024	0.25	0.04	130
上仕上げ x	3.9	4.4	220	380	2.6	0.73	0.002	0.004	0.07	0.042	0.25	0.17	68
超荒仕上げ z	3.9	2.2	220	380	2.6	0.75	0.002	0.004	0.07	0.056	0.25	0.11	197
超荒仕上げ x	3.9	2.3	220	380	2.6	0.8	0.002	0.004	0.07	0.075	0.25	0.15	196
試験用仕上げ z	3.9	1.4	220	380	2.6	0.8	0.002	0.004	0.07	0.045	0.25	0.05	208
試験用仕上げ x	3.9	2.3	220	380	2.6	0.8	0.002	0.004	0.07	0.047	0.25	0.09	230

(旧) : 旧架台 (新) : 新しい架台

### 3.5 実測値

2010 年になり、冷却水も規程の流量が流れるようになったので水平  $X$  方向の振動を測定した。推定と同じ  $0.1 \sim 0.2 \mu m$  程度であった。(5.2, 5.4 参照)

## 4. 床面の研削

### 4.1 研削の荒さ

使う砥石により面の粗さは、仕上げ、荒、超荒と段階があり、かかる時間も異なる。3つの架台の振動テストでは差がみられなかったので一番荒い段階を試した。図 8 のように研削方向に沿って  $0.02\text{mm}$  の隙間ゲージが入るところもあった。そこで架台を設置する前に、感圧紙を接する面に置き、研削面と



図 8. 研削機 (左) と研削面と架台底面の隙間。

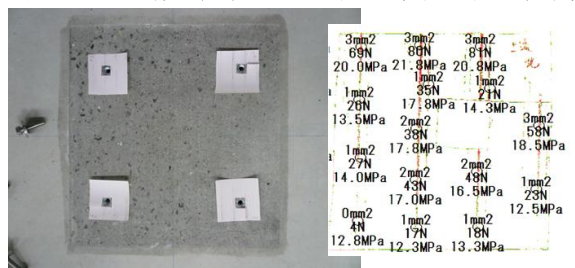


図 9. 左 : 架台を外した後の感圧紙 右 : 解析例。

架台底面の接触の様子を調べた。規定の  $35\text{N} \cdot \text{m}$  のトルクで締めた跡、外してみると図 9 (左) のように  $25\text{mm}$  ほどの間隔で線状に接触していることがわかった。この感圧紙を分析し圧力とその付近の力を

示したのが図 9 (右) で大きな圧力のところは 20Mpa に達している。面の仕上げ度を上げて線幅こそ太くはなかったが 25mm の間隔は変わらず、完全な面タッチには至らなかった。全面で当たらずとも線状に接し、その領域が一定の拡がりを持つことで架台が倒れるような力を受けたときに底が固い面として抵抗すると考えた。このようなことから実機では一番荒い段階「超荒」でとどめることにした。

## 5. 実機の振動

### 5.1 Cバンド加速管

鋼管架台はすべて研削面の上にシムは使わず固定された。冷却水配管、導波管の加速管へのつなぎの部分、架台の写真を図 10 に示す。

図 10. Cバンド加速管用架台。



### 5.2 振動振幅

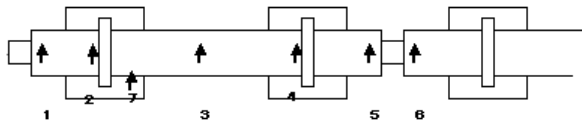


図 11. センサーの配置図。(7ch は架台上)

図 11 のようにセンサーを設置し、冷却水を定格で通水した状態で測定した。振動は大きくなったり小さくなったり、またほぼコモンモードでゆれる 1 Hz 以下のゆっくりした周波数成分を除くため一旦フーリエ変換し、2 Hz 以上のところで逆変換した。

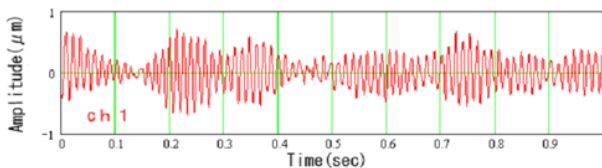


図 12. ch1 での水平方向の変位。

図 12 は水平方向の例である。これらから rms 値を計算した。(表 2)

表 2. 図 10 の位置の振動振幅(μ m)。

	1ch	2ch	3ch	4ch	5ch	6ch	7ch
x	0.19	0.15	0.14	0.14	0.21	0.23	0.08
vertical	0.03	0.01	0.08	0.01	0.03	0.03	0.01
z	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.12	0.03

### 5.3 架台とサポート部の振動

水平 X 方向ではサスのバンドのところ(ch2, 4)では両端より少しは小さいが完全に節になっているわけではなく架台ごと揺れていることがわかる。しかし、垂直方向はバンドのところ節になっていることがわかり、サポートのない加速管中央(ch3)が最も大きな振動をしていることがわかる。

Z 方向の振動は加速管のどこでもほぼ同じで架台(ch7)はやや小さいことがわかる。

### 5.4 振幅まとめ

図 13 に床(緑)、架台(青)、加速管(赤)それぞれ 7 箇所、各 3 成分の振動振幅を示す。

床と架台の振動の差は水平方向で大きく、垂直方向で小さいことがわかる。これは架台の構造と床との接している面に大きく依存していると思われる。

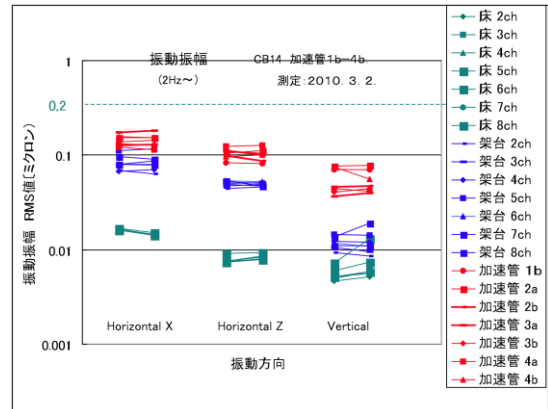


図 13. 床、架台、加速管の振動振幅まとめ。

### 5.5 各振動のスペクトルと位相

#### 5.5.1 水平 X 方向

加速管の中央(ch3)と両端(ch1, ch5)での振動(速度)スペクトルと位相差を図 14 に示す。

70-80Hz、125Hz 前後、固有振動付近に幅 10Hz 程度の比較的幅広いピークがあり、80Hz では加速管が全体として同じ方向に振動するモードで 125Hz 前後についてはサポート付近が節になるモードで 1 と 3 で逆位相になっている。回転機などから想定される 30Hz 弱の整数倍の狭いピークはみられない

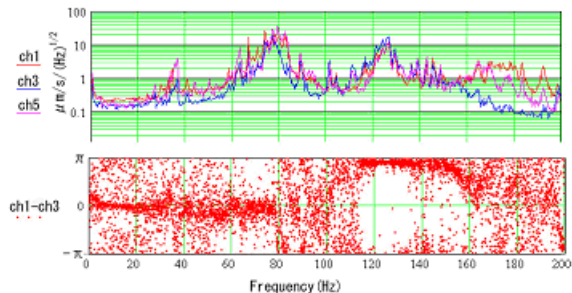


図 14. 水平方向の振動スペクトルと位相差。

#### 5.5.2 垂直方向

X 方向にくらべサポート部分の固定がしっかりしているようで管全体で上下するモードはあまりなく、サポート部を節に凹凸の形に振動するモードが主である。(ch1-ch3 や ch3-ch5 で位相は $\pi$ ずれている) そのため周波数は高くなり 125Hz とか 135Hz 付近に固有振動が見られる。

#### 5.5.3. 隣の加速管との位相差

加速管の振動によるキックは隣の加速管と同相であればキャンセルするが逆相では強めあう向きにな

る。図 15 上段は水平方向、下段は垂直方向の位相差である。水平は 80Hz 付近で反転したり、125Hz 付近では逆位相が少し見られる。垂直方向は場所により少し相関が見られるところもあるが常にということはないようである。

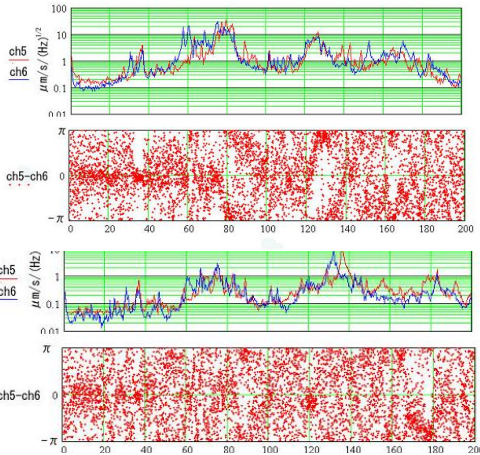


図 15. 隣の加速管のスペクトルと位相差。上段：水平方向 下段：垂直方向

### 5.6 Q 電磁石とその架台の振動

加速管とつながっている状態で図 16 のように床、架台上、Q 電磁石上を測定した。この架台には振動源となる冷却水配管がない。角鋼管架台の上に 5cm ほどの 4 本の M16 のボルトで石定盤を支えており、振動の増幅も考えられたが振幅は許容値  $0.9 \mu\text{m}$  より一桁以上小さく問題はなかった。(表 3)

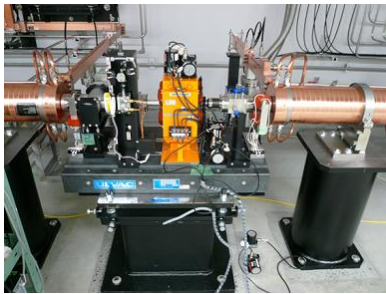


図 16. Q 電磁石の振動測定。

表 3. Q 電磁石と架台の振動振幅 ( $\mu\text{m}$ )。

	Qmag			Qmag girder			floor		
	X	Z	Vertical	X	Z	Vertical	X	Z	Vertical
cb 13	0.024	0.020	0.005	0.019	0.012	0.006			
cb 14	0.026	0.025	0.006	0.021	0.014	0.007	0.016	0.009	0.006

### 5.7 全加速管の振動測定

S バンドから C バンドの最後まで振動を測定している様子を図 17 に結果を図 18 に示す。各加速管の両端部で水平と垂直方向にセンサーを固定し 10 秒間測定し、振幅の rms 値を求めた。水平方向は大きいところでも  $0.3 \mu\text{m}$  以内、垂直方向は S バンドでは水平方向よりやや小さいが C バンドでは大きくても  $0.1 \mu\text{m}$  以内であった。架台の固定が悪い場合大

きな振動が発生する可能性があるが、この結果からは特に問題は無いように見える。

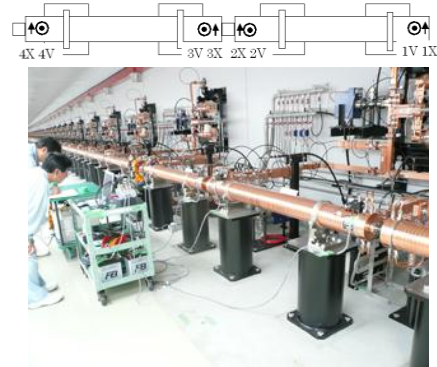


図 17. 加速管の振動を測定している様子。

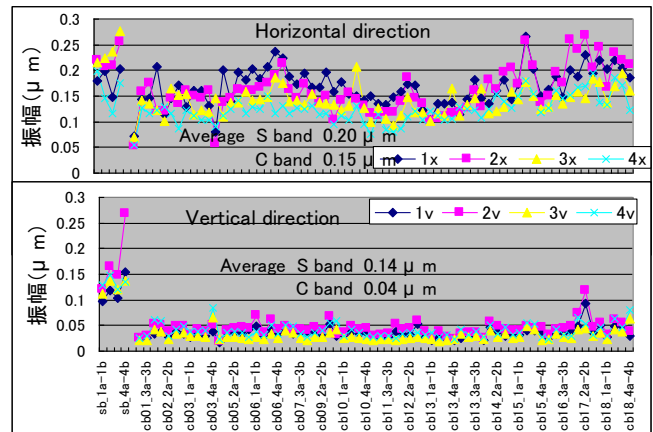


図 18. 加速器棟全加速管の両端の振動振幅。上段：水平方向、下段：垂直方向

## 6. まとめ

SACLA 加速管、Q 電磁石用架台の床への固定にシムを使うのではなく、床を研削しその上に直接することで面タッチに近い状況を作り、結果として許容値より一桁小さい振動振幅を実現した。

隣の加速管との位相に強い相関も見られずキックの増幅も心配なかった。

研削面を感圧紙で調べると研削方向に沿って 2-3 cm 間隔で線上でのみ接しているだけで完全な面タッチでなくても十分な効果があることがわかった。

光源棟では Q 電磁石と BPM 用に研削面上の石基台 ( $60 \times 60 \times 74\text{cm}$ 、 $\sim 750\text{kg}$ ) を用いている。石基台による床の振動の増幅は、水平方向は 80Hz 付近から少し見られ 120Hz 付近で 5db 程度、垂直方向は増幅は見られなかった。

R&D から実機に移る時に架台などに変更があったが加振試験の結果を使って振動振幅を推定し、実際ともよく一致した。

測定にはスプリングエイトサービス (株) の山下雅史氏、塚本宜史氏にお世話になりました。謝意を表します。

## 参考文献

[1] 『振動工学通論』 (永井正夫他著 p47) 産業図書。