

SPring-8 蓄積リングの 200Hz 以下のビーム振動をおこす冷却施設の振動源とその伝播経路

松井佐久夫、依田哲彦、大石真也、米原博人、妻木孝治、田中均

高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都1丁目1-1-1

概要

真空チャンパーと電磁石への冷却水をそれぞれのバルブで止め、ビーム振動の主たる原因であるチャンパーの振動を測定し、チャンパーや電磁石に流れる冷却水の寄与と床から架台を通し増幅される振動の寄与を見積もった。垂直方向の 30~60Hz では床からの寄与が半分以上あった。冷却機械室から±30m 付近の大きな垂直方向床振動は、冷却機械室からの床の伝播と考えられるが、それ以遠については、加速器収納部（壁厚 1m、高さ 5m 幅 6m）の天井の冷却配管等が、収納部躯体を振動させその約 10 分の 1 の振幅で床面を振動させていることが今回の収納部床と天井での加振測定等ではっきりした。

はじめに

放射光の施設では全周に光のビームラインをつくることもありビームの安定性が要求される[1,2,3]。SPring8 においても軌道安定化のプロジェクトをつくりさまざまな周波数領域での安定化に取り組んできた。数~200Hz では 4 極電磁石中のアルミ製真空チャンパーの振動がつくる磁場によりビームが振動していたことがわかった[4]。

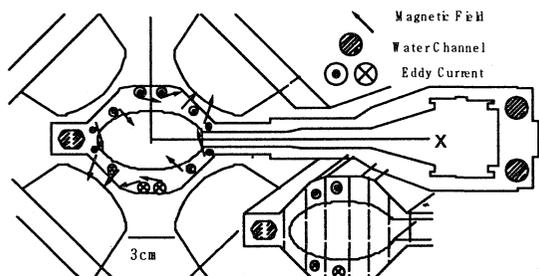


図 1. 4 極磁場中の真空チャンパーに誘起される電流

チャンパーが上下に振幅 d で振動（角速度 ω ）すれば 4 極磁場（強さ g ）のため電流ループ（実抵抗 R 、インダクタンス L ）ができソレノイド型の磁場 B'_x ができる。

$$B'_x = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2}} g d \sin(\omega t) \quad (1)$$

前の因子を除けばこれは 4 極磁石の振動と等しい。この因子は R と ωL の比で決まるが、SPring8 蓄積リングのアルミ製チャンパーの場合アルミが厚いため、30Hz で 0.6、100Hz で 0.85 という程度の値となり磁石とチャンパーで振動が大きいほうが問題となる。電磁石は重く振動はチャンパーに比べ 1 桁~2 桁小さいのでチャンパーの振動対策として図 2、Q3 下流のサポートなどの固定、バルブの交換、流量の調整などがはかられた。

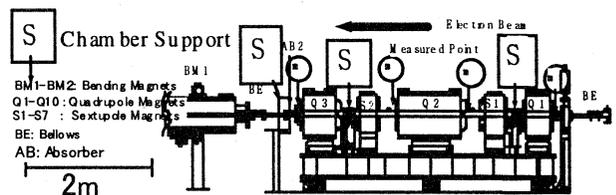


図 2. 架台上の電磁石、チャンパーとそのサポートの例

その結果、垂直方向の 40Hz 付近のピークは実際のビーム振動も計算値も数分の 1 に減少した。(1) から計算した COD 値は、スペクトルの形、絶対値とも測定値に近く推測が妥当なものであることを示した。

チャンパーの振動の原因はその中を流れる冷却水と架台の振動の 2 つがある。架台の振動は床からのものと磁石の冷却水による磁石の振動からの寄与がある。これらを見積もるため、収納部の壁のバルブ（出入両方）でチャンパーへと磁石への水を 4 通りで止めチャンパーの振動を測定し、ビーム振動に換算した。（振動計：東京測振（株）VSE-15D 速度出力 全周 132 架台中 19 架台 位置：図 2）。図 3 はその垂直方向で、Vac:full Mag:full と Vac:0 Mag:full の差がチャンパーを流れる水の影響、Vac:0 Mag:0 が床から伝わりチャンパーを振動させている部分である。120Hz 以上では冷却水の寄与が大きいが、40~60Hz では床からくる部分が半分以上占める。磁石の冷却水の影響は水平方向 45Hz 付近にわずか認められた。計算値は測定のない Q4 部分の寄与が含まれていないが、図のように実際のビーム振動（2003 年 9 月）との一致は良い。

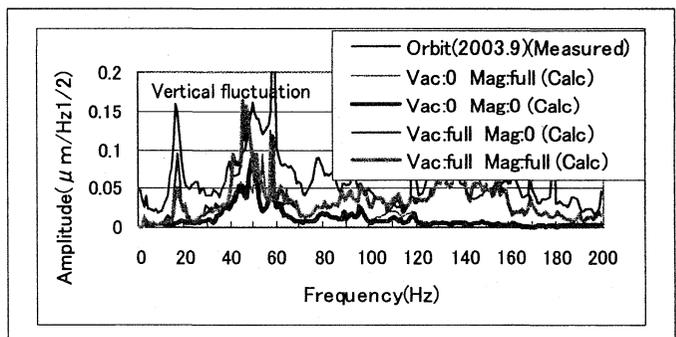


図 3. チャンパーと電磁石への冷却水開閉時のチャンパー振動によるビーム振動の計算値と実測値

対策として、チャンパーや架台の固定以外に床振動そのものを抑える方法もある。寄与が考えられる両側数架台の水を止めてみたが十分には下がらなかった。ポンプから 100m 離れても垂直方向の振動が小さくならない理由として収納部天井の冷却水配管の振動による収納部躯体の振動が考えられたので天井の振動を測定した。

2. 冷却施設

全周へは4箇所の冷却機械室から送られる。一箇所には175KW 29.5回転/秒、インペラ-6枚(脈動周波数: $177\text{Hz}=29.5 \times 6$)など数個のモーターとポンプがある。冷却機械室から出た配管は収納部の天井に乗り、L1(電磁石、真空チャンバー)、L3(実験ホール)、FE(フロントエンド)は、上下流に分岐する。RF用L2(空洞)、L4(クライストロン)、L5(ダミーロード)は冷却機械室から上流側のみ60m程度ある。(図4)

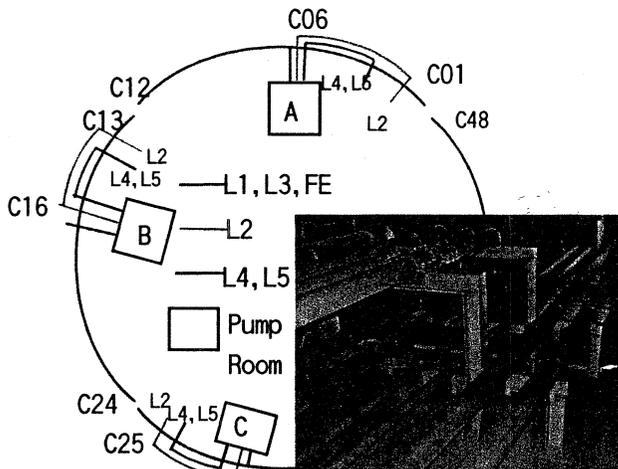


図4. 冷却施設と収納部天井の配管とそのサポート

3 測定結果

3-1 収納部床面(垂直方向振動)

冷却機械室から収納部への床面はゾーンによる差はあるが振動振幅で~2桁小さくなっている。

2001年夏、収納部の架台の端から70cm程通路よりの床面を全周560箇所にわたり測定した。(図5:速度振幅)。冷却機械室付近がやはり強いがその周波数帯はゾーンによりやや異なっている。

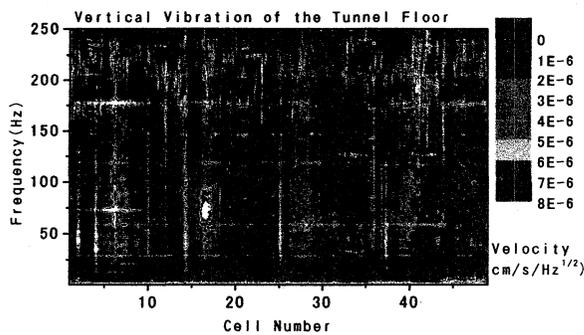


図5. 収納部全周の床の垂直方向振動スペクトル

収納部天井の配管の多いポンプ室から上流側がやや大きいように見える。床下が抜けているRF導波管の地下ピット部は40Hz付近の振動が大きい。

3-2 収納部天井

収納部天井3.0mおきに4個のセンサーを設置し収納部天井の振動を測定した。(図6)水平X方向(リング動径方向)振動で約2セル(60m)離れた点での位相遅れから

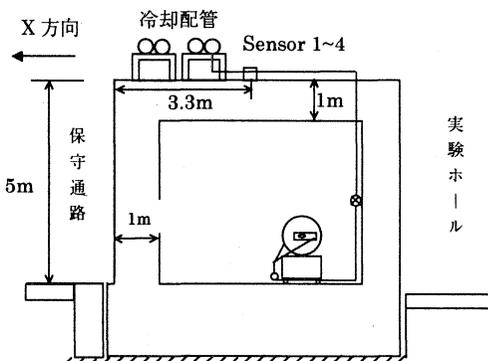


図6. 収納部断面、冷却水配管と天井の振動計の位置

図7のように、伝播が逆転する所がわかる。冷却水はC24-25でUターンするが図のC21-23の右上がり振動

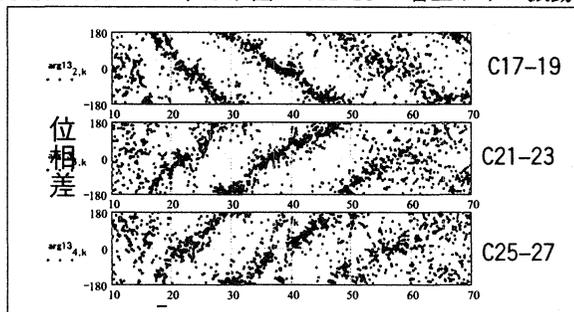


図7. 収納部天井2点(距離60m)のX方向振動の位相差

源がより下流にあること、強度分布の極小点がUターン点と異なることからX方向の振動は冷却水と共に進んでいないことを示している。位相差から計算した進行速度は水中の音速3000m/sより遅く25-80Hzで1200m/sだった。

X方向は100m離れていても位相遅れが明らかなのに対し垂直方向ははっきりせず、震源が分布しているように見える。配管サポートから天井躯体への振動伝播が考えられるので加速度センサー(LION社製:LS10C)1個でサポー

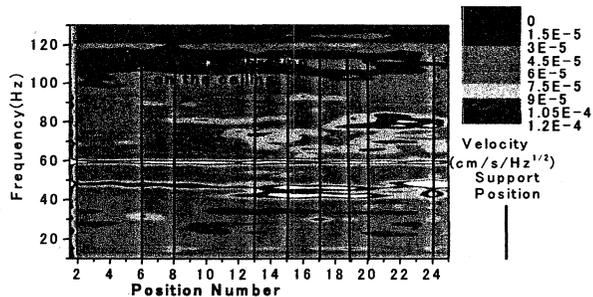


図8. 収納部天井上面の50cmおき25点の垂直方向振動

トのすぐ側も含め直線上に16m25点、垂直方向振動を測定した。(図8)サポート(縦の実線)から振動がしみだすように広がっているように見えるところがある。

3-3 天井と床面同時測定

7箇所中5箇所天井と収納部床面のX方向スペクトルは大きさの5~10倍の差はあるが良く似た形を示した(床面振幅:5倍)。coherencyは15Hzと20Hz前後で天井と床が同位相でゆれている。(1は同位相、-1は逆位相)

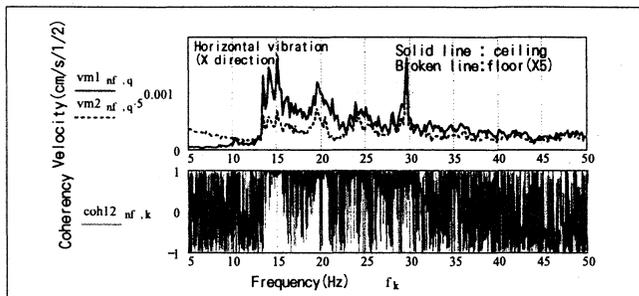


図9. 天井と床面の X 方向振動スペクトルと coherency

垂直方向も床の振動を数~10 倍すると天井のスペクトルに似る。(振動計:STS 2、ADC:小野測器(株)Graduo)。coherency は40Hz 付近を境に同相から逆相に転じていた。

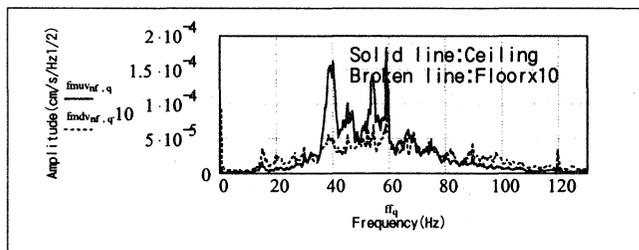


図10. 天井と床面の垂直方向振動スペクトルの例

天井で跳んだ時(加振)の振幅とスペクトル、通常時の位相のずれを図11に示す。跳んで行なう加振により共

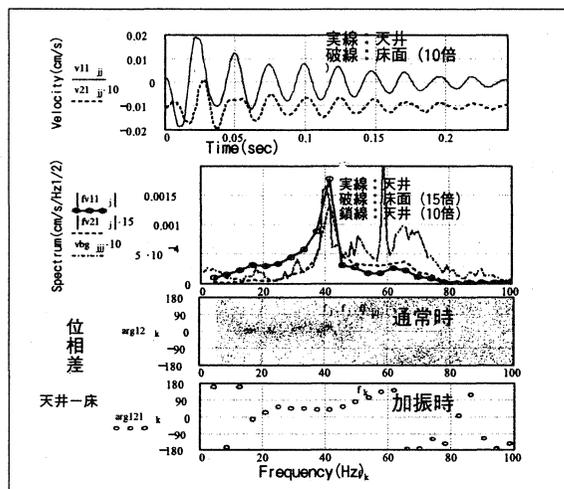


図11. 天井で跳んだ時のスペクトルと位相差

振に近い周波数4 1Hz 付近が強く励起される。共振周波数を越えると逆位相になるのはばねでつながれた二つの物体の振動と同じである。40-50Hz では通常時でも加振時でも天井に対し床の位相が遅れており天井の方からの加振と推測できる。天井-床の振動は天井の加振と似ている。

4 考察

天井の垂直方向のパワースペクトルを 1/100 にし振動の強い周波数領域で積分した値と床面のを比べたのが図12である。ポンプの付近は別にするとよく一致している。

天井上面でのサポートからの振動のしみだし、天井-床での加振時の位相、図12の強度分布から垂直方向の床振動には天井の加振の寄与が大きいと考えられる。もちろ

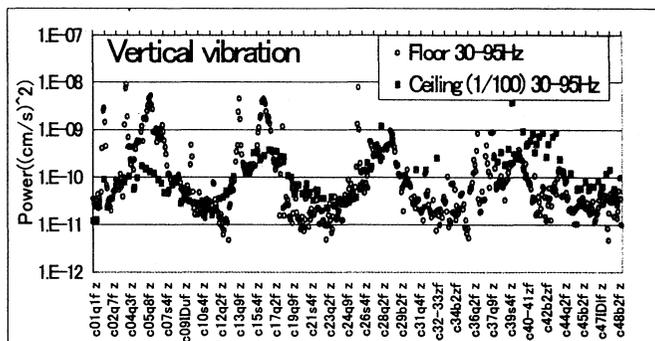


図12 収納部全周の天井と床の垂直方向振動のパワー分布

ん収納部には振動するフロントエンドなどもあるが、床を同じように跳んで加振してもその天井はほとんど振動しなかった。変位は力に比例するが振動のエネルギーは振幅の2乗に比例するので、硬いと振動のエネルギーは移りにくい。柔らかい天井の方が振動エネルギーは移りやすく、その重量(壁も含めると1 m当たり40t)と構造から、床を揺らしていると推測できる。又、天井の共振周波数もチャンバーの振動ピーク40-60Hzと重なり増幅しやすい。

冷却機械室に近いところの収納部では、床又はその下の岩の伝播と考えられる。Bゾーンではスペクトルも似ていた。冷却機械室からの収納部上の配管及び冷却水経路で躯体が振動するのなら、まず天井で受けるので固有振動の40-60Hz 付近がもっと強く出ると考えられる。

X方向については構造的にゆれ易く、振幅が天井-床で数倍でかつ同位相なので15-20Hz では収納部コンクリートの最下部を基点にゆれているように見える。床からのチャンバー振動の18Hz 付近のピークの原因と考えられる。ただ、この低い周波数を除けば、収納部で離れた点での振動の相関はみられなかった。

5 結論

真空チャンバーの振動の原因はそこを流れる冷却水によるものと、床から架台を通して増幅され伝わってくる2つが大きく、磁石の振動が架台を揺らしチャンバーを揺らす寄与は水平方向45Hz 付近にわずかある。

床の垂直方向振動は冷却機械室に近い±1セル(±30m)程度は冷却機械室から床を通して伝わってくる振動が主であるが、それ以外では収納部天井の冷却水配管のサポートからの振動の寄与が大きいと考えられる。

対策としてはチャンバー、架台の固定、冷却水配管サポートへの振動吸収材による改善などがあげられる。

SES(スプリングエイトサービス(株))の方には長期間に及ぶ測定をしていただいた。謝意を表したい。

参考文献

- [1] K.Huke: Jpn. J. Appl. Phys. 26(1987)285.
- [2] K.Haga, et al.; Proc. 6th Int. Workshop on Accelerator Alignment, Grenoble, 1999 (ESRF, Grenoble,2000).
- [3] L.Zhang, et al: Proc. 2001 Particle Accelerator Conf., Chicago, 2001 (IEEE, 2001)p1465
- [4] S.Matsui, et al., Jpn. Appl. Phys. Vol.42 (2003) pp.L338
- [5] K.Tsumaki and N.Kumagai: Proc. 2001 Particle Accelerator Conf., Chicago, 2001 (IEEE, 2001) p1482.