

話 題

加速器のビームで捉えた波浪起源の表面波など —電子ビームの振動を追って—

松井 佐久夫*

Beam of Accelerator Detects the Surface Wave Caused by Sea Wave

Sakuo MATSUI*

1. はじめに

加速器 SPring-8 の蓄積リングが精密な歪計として機能できること、その理由と実際にどの程度まで見えるのか報告する。

加速器として電子ビームの安定化は必須の課題であり SPring-8 でも軌道安定化のプロジェクトを立ち上げ電子ビームの振動を調査し抑制に努めてきた。私の担当した機械的な振動として 10~200 Hz の領域では 4 極電磁石の中でのアルミ製の真空チャンバーの振動に起因する部分が多いことがわかり対策もなされてきた¹⁾。さらに 1~10 Hz のところでは 1, 2, 3, 4, … の整数 Hz のピークが現れたり消えたりしている。

さらにゆっくりした 0.2 Hz 付近には波浪起源の表面波による振動が日常的に見られる²⁾。また、突発的な地震によるものは 10 Hz 程度から、周期 250 秒程度までの表面波によるビームの振動がある³⁾。中央制御室にいと人体には感じないがビームが長い間揺れるので遠くの大きな地震からの表面波によりリングの周長が変化していることがわかる。スマトラ地震の際は 1 回来て 3 時間後もう一度地球を回ってきた表面波によるビーム振動も観測された。

もっと長いところでは周期 12 時間程度の潮汐による周長変動がある⁴⁾。歪み率が 10^{-7} ~ 10^{-8} のオーダーなので周期は長いがはっきりと捉えることができ、RF 周波数を 5 分ごとに微調整しビームの安定化をはかっている。周波数補正の原因の中には気圧による周長の変動部分も含まれている可能性がある。歪の測定では気圧は重要なファクターとして知られており、その歪計で経験的な補正を行って気圧の効果を除いてい

る例も聞く。降雨については局所的であり、現在はセンサーをそれによる変動を受けやすい箇所に設置し調査している段階である。

ここではこのようにビーム振動を調べている中で明らかになった波浪起源の日本では脈動と呼ばれている表面波に焦点をあてる⁵⁾。また地震の際におこされる地球の自由振動探索の試みについてふれる。最後に、これらとビーム安定化との関連について考える。

2. 電子ビームの振動

測定するのは BPM で捉える電子ビームの振動である。この報告で用いた BPM は 4 電極のタイプで真空チャンバーに固定されている。ただ、通常の BPM と異なり架台から支持されている点から離れており、チャンバーとともに振動している。その振動も測定したが電子ビームの振動より小さかった。軌道安定化のプロジェクトで電子ビームの振動はかなり低減されたが直接の原因は今でも 4 極電磁石の中でのアルミ製の真空チャンバーの振動である。電磁石は重量がありその振動はさらに小さくその振動による寄与も小さい。チャンバーを振動させる原因はチャンバーを流れる冷却水や、リングの 4 箇所の冷却機械室のポンプであり、現在はその伝播経路の調査や対策の検討を行っている。

さらに低い周波数 1~10 Hz では例えば図 1 のように変化する。10 分のスペクトル平均を 1 本で示すようにして朝 5 時から 10 時までを見ると 9 時少し前で 1, 2, 4, 6…Hz の整数の周波数のピークが消える様子がわかる。整数 Hz で、駆動している機器から発生していると思われるがこのようにその時によりピークが

* 財団法人高輝度光科学研究センター 加速器部門
JAPAN SYNCHROTRON RADIATION RESEARCH INSTITUTE (JASRI)
(E-mail: matsui@spring8.or.jp)

出たり消えたりしている領域でこれは分散のあるなしにかかわらず、また、水平、垂直両成分に見られる。

3. 波浪起源の表面波によるビーム振動

3.1 測定系

地盤の振動は周期 100 秒程度まで測定できる STS2 (ストレックアイゼン社) をリングのトンネルの外の通路に置き上下、東西、南北の 3 成分の出力を ADC (小野測器製 Graduo 24 bit 8 ch) で測定、同時に BPM からの信号もその場所から通路にある測定器に入り光信号として測定室に送られそこで電気信号に戻されこれも ADC に接続した (図 2)。BPM は分散の

あるところとないところの両方、かつ水平と垂直、計 5 ch を使用した。これにより地盤の振動も電子ビームの振動も同時に AD 変換され PC に記録される。

高精度な測定を可能にする基礎には 508 MHz の RF 周波数の安定度がある。現在 10^{-12} でコントロールされておりモニターの最終桁は 0.0001 Hz である。

3.2 表面波による周長変化

1 Hz 以下のゆっくりとしたところ、0.2 Hz 付近に波浪起源の表面波による振動が見られる。冬の日本海や台風の際は荒れるので、その波が沿岸部で弾性波をつくり地表面を秒速 3 km 程度で播磨にもやってくる。周期が長いのであまり減衰せず内陸深くまで伝わると言われている。海で風が強くなると周期は長いほうに移動しさらに倍の周期のところにもピークができる。レーリー波と呼ばれているもので、水の波と同様に地上のある一点で見ると進行方向にとった鉛直面内で楕円運動をする (図 3)。波長は 15 km 程度とリングの直径 0.4 km にくらべ長いが、それでも地表面の変位は場所により異なるためリングは楕円に変形する。表面波の進行方向に x 軸をとり x 方向のみ半径が $(1 + e)$ 倍になったとしたときの楕円の周長は、ほぼ $(1 + e/2)$ 倍となる蓄積リングの半径 r (220 m)、波数 k 、楕円運動の半径 a 、角速度 ω 、時刻 t を用いると周長の変化 ΔC は

$$\Delta C = \pi r k a \cos(\omega t)$$

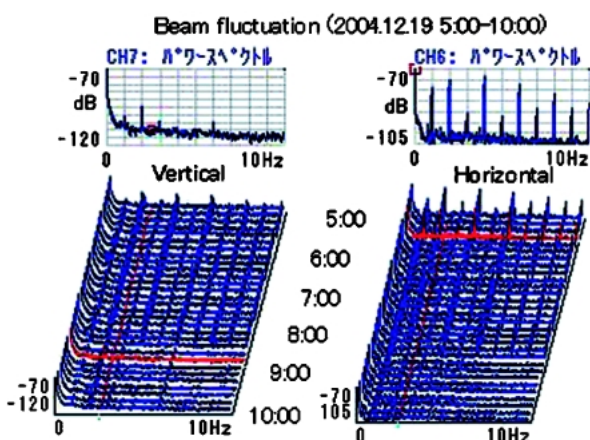


図 1 1~10 Hz のビーム振動スペクトルの変化。

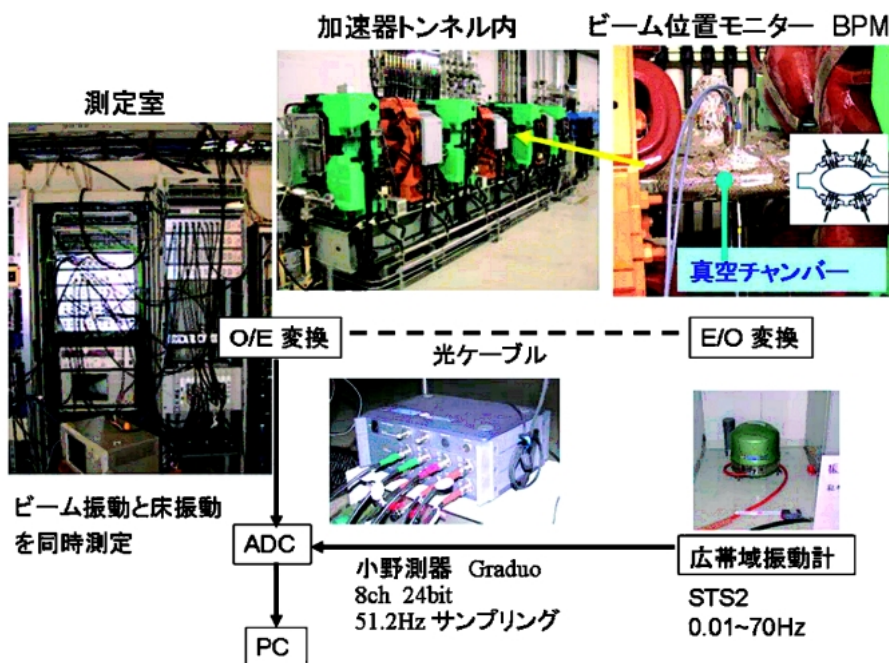


図 2 ビームの振動と地盤振動の同時測定系。

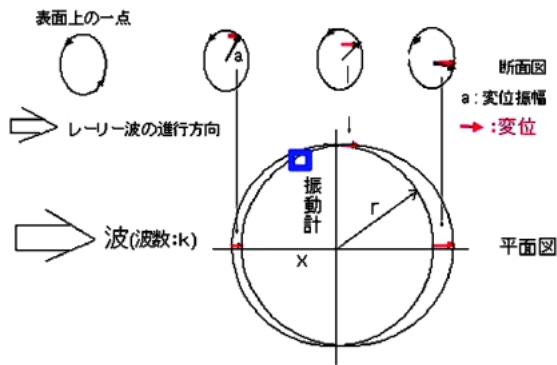


図3 表面波によるリング周長の変化。

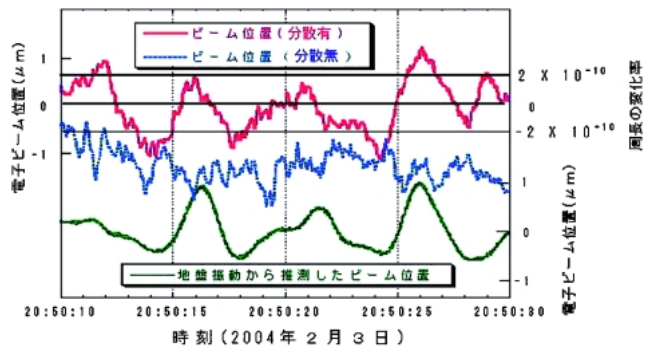


図4 実際のビーム振動と地盤振動からの推定振動との比較。

となる。

3.3 周長変化によるビーム位置変化

振動計の位置を x とすると振動計の水平方向速度出力 v は

$$v = a\omega \cos(\omega t - kx)$$

と表され、 x は最大 200 m であり kx は小さいので無視できる。

リングのパラメーターである momentum compaction factor α (1.46×10^{-4}), 分散 (dispersion) D (0.4 m) を用いさらに地面の振動の速度 v を用いると、ビームの位置変化 ΔBP は

$$\Delta BP = \frac{1}{2} \frac{D}{\alpha} \frac{k}{\omega} a\omega \cos(\omega t) = \frac{1}{2} \frac{D}{\alpha} \frac{k}{\omega} v$$

従って ΔBP のフェイズは振動計の水平方向速度出力 v と一致することになる。具体的な数値としては、表面波の速度 $= \omega/k = 3000$ m/s を用いると

$$\begin{aligned} \Delta BP &= \frac{1}{2} \frac{0.4 \text{ m}}{1.46 \times 10^{-4}} \frac{v}{3000 \text{ m/s}} \\ &= 0.46 \text{ s} \times v \end{aligned}$$

と簡単な表式となる。

実際には水面と異なり進行方向に対し水平面内で横方向に振動するラブ波と言われる振動も加わる。進行方向に対し横方向のずれは周長には2次でしかかかないので周長の変化と相関が強いのはレーザー波である。そのため地盤の上下方向の振動との相関が最も強い。図4の緑色の“地盤振動から推測したビーム位置”は上の計算から地盤の上下振動を1/4周期遅らせて20秒間プロットしたもので、位相、振幅とも実際の分散のあるところのBPM“ビーム位置(分散有)”とよく一致しており、分散のないところでは推測どおり相関はほとんど見られない。

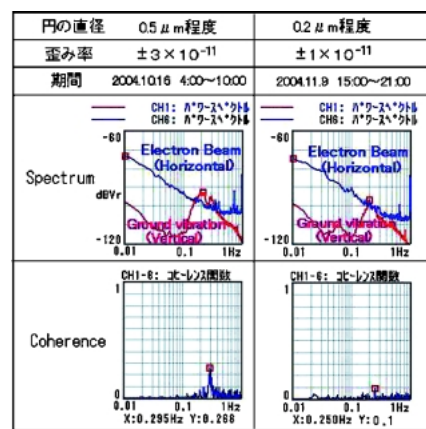


図5 表面波が小さいときのビームとの coherence.

3.4 ビーム振動で見える地盤振動の大きさ

海は荒れたり穏やかだったりし伝わってくる表面波の大きさも変化する。台風は別にするともこれまでの観測では冬の日本海が荒れた時で SPring8 地表面で直径 10 μm 程度の円運動が最も大きかった。このような時にはビームのスペクトルにもはっきり見えるが波が穏やかな場合を図5に示す。上段は電子ビーム(青)と上下方向地盤振動(赤)のスペクトルで、下段はこれらの coherence である。左のように円運動の直径にして 0.5 μm (歪率: $\pm 3 \times 10^{-11}$) 程度までなら相関が測定できているが、右のように直径 0.2 μm (歪率: $\pm 1 \times 10^{-11}$) 程度ではよく見えない。ただ、この歪率 10^{-11} はオーダーとしてはずいぶん小さい。

3.5 表面波の到来方向と速度

リングの3箇所に振動計を設置し波の到来方向と速度とビーム振動を測定した例を示す。振動計の場所が 400 m 程度しか離れていないので3つの出力の時間的ずれは小さいが、時刻合わせはGPSを用い精度は 10 μsec 程度なので、到来方向と速度を周波数ごとにおおむね推定できた(図6)。UD, EW, NSは地盤

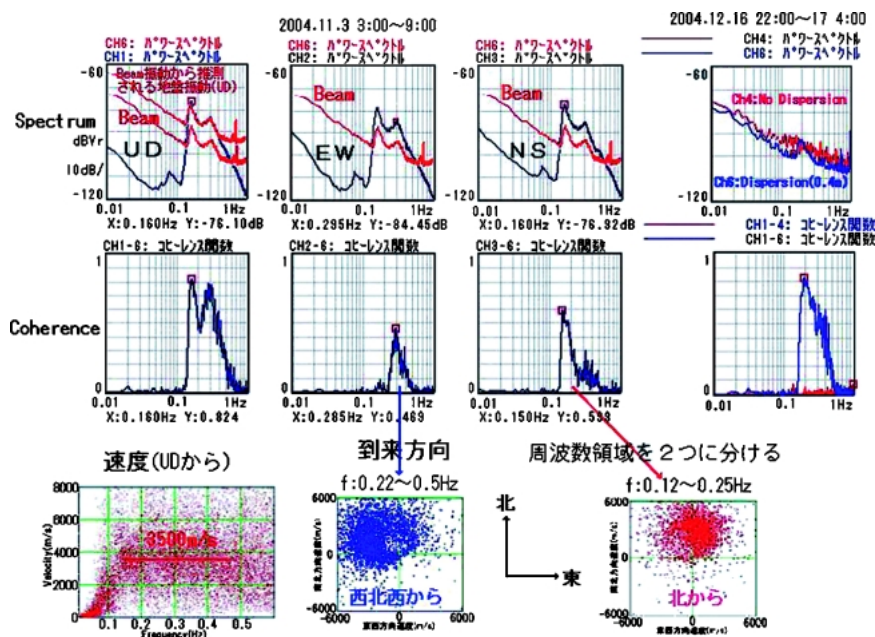


図6 2方向から表面波が到来した場合のビーム振動と地盤振動の例。

振動のスペクトルで、coherenceはdispersionのあるところのBeam(ch6)との相関を示している。

EWとNSで相関の周波数帯が異なっていることがわかる。3つの振動計による速度と到来方向をプロットしたものが最下段にあるが、速度は3000~4000 m/sで周波数の高いほう(0.22~0.5 Hz)は西から、周波数の低いほう(0.12~0.25 Hz)は北から到来していることがわかる。つまり電子ビームのスペクトルにある2つのピークはそれぞれ北部からと西部から来ていることがわかる。北から波が来る場合、3.2の描像からもビーム振動と相関があるのは南北方向の振動と考えられ、実際の測定結果ともよく一致している。

最上段左端の図にはビーム振動から3.3の式で推測される地盤振動のスペクトルも示したが0.13~0.4 Hzで良く一致していることがわかる。また右端の2つの図は別の時期で、分散の有る無しのところのビーム振動とそれぞれの地盤振動とのcoherenceを示した。分散のないところのビーム振動は地盤との相関を全く示していない。

数秒の間ではRF周波数は固定されており従って周長も固定されている。偏向電磁石の磁場も短時間では高い安定度を持っている。その条件で地盤が伸縮するとビームは自らのエネルギーを変え周長が変わらない軌道を取り、分散のあるところで位置が変化する。

以上のことから表面波により3.2~3.3のように周長変化する推測は妥当と考えられる。

4. 地球の自由振動の探索の試み

大きな地震の際、地球はハンマーで打たれたように種々のモードで振動する。球形のまま膨張・収縮する ${}_0S_0$ モード(周期1230秒)やフットボール型、ねじれるタイプなどで、周期は最大 ${}_0S_2$ モードの3230秒以下球関数で表現される多くのモードがある。

スマトラ地震の際は蓄積リング内周道路沿いにある地下160mの傾斜計による1週間近い測定で多くのモードのピークが観測されたが電子ビームでは記録時間が短く解析は困難であった。2003年9月26日北海道十勝沖マグニチュード8.0の地震の前後3.5日でビーム位置にRF周波数の補正を加え、周波数が変化しなかったとしたビーム位置(図7左下)を3時間ごとにフーリエ変換し、グラフに示した(図7)。地下160mの坂田式3成分歪計の出力も同様にフーリエ変換し右側に示した。右下のグラフは小さな地震が起きた時がわかるように、この期間の東西方向の傾斜計のデータを示した。左右の色グラフから同じ時期に同じ周波数でピークが観測されれば自由振動である可能性があり、周期数百秒の自由振動が見えているようにもとれるが、はっきりしてはいない。今後coherenceをとるとか、他のところでなされているように潮汐成分をBAYTAP-Gを用いて除き、バンドパスフィルターをかける解析なども試みる予定である。

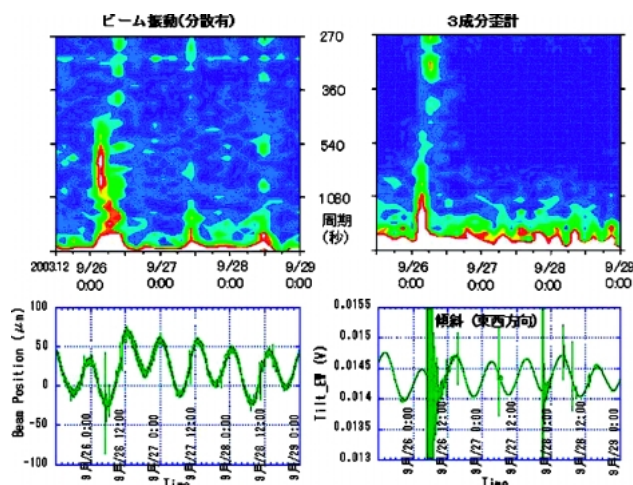


図7 地震の際のビームと地下の歪計出力のスペクトルの時間変化の比較。

5. 今 後

このような結果は加速器 SPring-8 のビームの安定性の到達度を示している。その一方で、地球物理で使われているものに比べ大きなスケールである点に有利さをもつ歪計としても有用ではないかと考えられる。通常の地下埋設タイプで直径 10 cm 程度（深さ方向には短いものも 4 m 程度の長いものもある）、横穴設置タイプでは長いもので 100 m あるが日本でも数が少ない。現在は周長の変化しか測定できないが長さは 1436 m と通常のタイプにくらべかなり大きい。また、周波数と磁場の安定度も優れている。リング内周側に埋設している地下 160 m 地下の歪計と比較しながら解析をすることができ国内でも比較的数量の小さな歪計のもっている局所的な影響の検討ができるのではないかと考えている。

今回は一つの BPM しか用いていないが、最近回路が更新された多数の BPM システム⁶⁾を使えば S/N 比も向上する。また、偏向電磁石の磁場の安定化も必須なので NMR を用いた測定や電流安定度のさらなる向上、加えて収納部内部の温度の安定化が課題となろう。例えばトンネル内の 100 V の空調ファンの電源電圧の 3~4 V の変化が、ある電磁石の表面では 0.02 °C の変化になるなど細かい変動をもたらしていることがわかってきた。このようなことから最近トンネル

内全周 1436 m にわたり 10 m おきに白金センサーを取り付け分解能 0.001°C で測定できるシステムを整備した。また、挿入光源のギャップ駆動に伴う周長への影響の検討も今後の課題である。このような安定化などによりも長周期の周長変動の測定が期待できる。周期数時間、歪率 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ が測定できるようになれば、まだまだ観測されたことのない地球の内核の振動に関する貴重なデータを得ることができるのも夢ではなくなるかもしれない。地球の自由振動の観測の延長上にあるテーマである。

現在測定できているのは周長の変動だけである。さらに方向もわかるようになれば 3.5 のように表面波の到来方向と比較でき、歪の異方性の議論も可能になる。蓄積リングで方向性を持った歪を測定するのは今後の課題である。

このように加速器そのものの性能の向上が歪測定器としての性能の向上にもつながっている。安定度の向上はさらに自然環境からくる不安定な要素、日射や風、長期の変動を精密に調べられることにつながり、より安定度が要求される次の世代の加速器にとって重要な知見を得ることにつながっていくと考えている。

謝辞

この仕事は勲高輝度光科学研究センターの伊達伸氏と議論しながら進めてきたものであり、また軌道安定化プロジェクトでの励ましや RF 補正データの提供など同センターの田中均氏にお世話になりました。さらに京都大学防災研究所の川崎一朗教授には地球物理にかかわる示唆も含めさまざまなことを教えていただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) S. Matsui, M. Oishi, H. Tanaka, T. Yorita, K. Tsumaki, N. Kumagai and T. Nakazato: Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) pp. L338.
- 2) S. Kedar and F. H. Webb, SCIENCE, 307, 682 (2005).
- 3) 熊谷教孝, Isotope News, 545, 13 (1999).
- 4) S. Date and N. Kumagai, Nucl. Instr. and Meth. A421, 417 (1999).
- 5) 松井佐久夫, 科学 Vol. 76 No 2, p135 (2006), 岩波書店.
- 6) 佐々木茂樹, 藤田貴弘, 加速器 Vol. 3 No. 4, 本号 (2006).