

加速器基盤の微変動及び微振動

竹田 繁^{A)}、松本 浩^{A)}、松井佐久夫^{B)}、吉岡宏和^{C)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大徳 1-1

^{B)} 高輝度光科学研究センターSPring-8

〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

^{C)} 竹中工務店技術研究所

〒270-1395 千葉県印西市大塚 1 丁目 5 番地 1

概要

高輝度、低エミッタンスを目指す次世代加速器の精密アライメントでは微弱地盤変動は無視できなくなる。地盤変動で良く知られた地球潮汐は、地盤を一樣な弾性体と仮定した場合、1 km につき 100 μm 程度の変位となるが、実際の地盤は一樣な弾性体ではないため、地下水、大気圧、日射、海洋潮汐や波浪等の影響で2桁以上大きな変動を示す場合がある。この地盤固有の変動は地球潮汐のようなコヒーレントな変動と異なり複雑な周波数特性を示す。ATLモデルに関連した実験結果によると、この変動が地球潮汐による変位に加算され、しかも変動のパラメータ A は地盤毎に異なり、この値が大きい場所では、現在一般的に行われている静的なアライメント方式では加速器のアライメントに支障を来たす。動的なアライメント機構を視野に入れた、地盤変動や地盤振動の調査研究について報告する。

1. はじめに

卓越スペクトラムを除いたスペクトラム密度関数 $P(f)$ は、地盤振動や地盤変動を含めた経験則として、

$$P(f) = \frac{k}{f^2(f_0^2 + f^2)}$$

として表せる^[1]。 f_0 (=0.01~0.1Hz) より高い周波数では $P(f)$ が $1/f^4$ に比例して減少する、これを仮に地盤振動域と呼ぶ。一方 f_0 より小さな周波数領域では、 $P(f)$ は $1/f^2$ に比例して減少する、これを仮に地盤変動域と呼ぶ。地盤振動域に入るものには通常地震、カルチャーノイズ、波浪がある。この内、地震波と波浪は加速器のベータatron波長程度の距離では位置相関の良い振動となるが、カルチャーノイズは一般に位置相関がない。地振動では、所謂スローアースクエークとかマイクロアースクエークに関する、周期、頻度と振幅(体感地震よりも大きな場合がある)、及び継続時間には注意が必要である。何故なら、衝突ビームの振動によるビームのずれ違いやエミッタンスの増大に関与する恐れがあり、制御も複雑になるからである。

一方地盤変動領域に入るものには、地球潮汐や海洋潮汐、大気潮汐、気圧、地下水位、日射の影響、

プレートテクトニクス、地下深部の活動といったものが入る。この内、潮汐は長距離に及ぶ位置相関のある現象なので、一般にはにならないが、これらの振幅が 10~100 μm/km であること、及び加速器基盤に強く依存し、変動の残渣成分が残る場合がある。この残渣成分はアライメントの変動となり、エミッタンスを増大させる原因になる。日射による地表面の歪は、アライメントの日較差となって現れる可能性がある。地殻変動にはその過去の歪を開放するためにドリフトする成分がある。以上の他に、ブラウン運動のような変動を示す成分があり、ATLモデルという経験則に分類される。この変動は、加速器のアライメントに関係し、エミッタンスの増大に関与する。ATLはいわゆる設置誤差(静的なランダム分布)とは異なり、時間的に変動する関数となる^[2]。

2. 地盤振動域

最近、Spring8の構内で詳細に調査した結果を中心に議論を進める。常時微動の小さな硬岩地帯における地盤振動調査では、地震波、波浪、カルチャーノイズといった主要成分が明確に分離され、各成分の振幅が評価し易いということが期待される。これにより、新たに加速器や実験装置を設置する場合の耐振動対策を立て易くなる。又一般に、スペクトラム密度関数 $P(f)$ の f_0 が高い方 (~0.1Hz) になる傾向がある為、振動調査だけで、大略 ATL 値が算出できる。今回の調査で得られた ATL 値は表 1 に示すように 0.8nm²/sec/m であった。

2.1 調査方式

地盤振動域の常時微動調査に使用される振動計は加速度計又は速度計が一般的である。以下に示すデータはストレックアイゼン社の STS-2 広帯域三軸速度計を 3 台使い同時計測した結果である。計測場所は Spring8 構内にある地上建物内で、その床は岩着を意図して施工されている。測定点は、建物の長手方向に沿って、壁面から 2.8m の直線上に 5 点設け、各点を P1~P5 と名前を付けた。各点の距離は、P1 から順に 8.5、9.2、7.8 及び 8.3m である。建物内には、長手方向に走行する大型天井クレーンが設置されている。振動計の三軸は建物長手方向を X 軸、その床面内直角方向を Y 軸、床に鉛直方向を Z 軸と設定した。

以下に示すグラフは各方向の振動のパワースペクトラム密度を最大周波数から最低周波数に向けて積分した結果である。

2.2 鉛直方向の振動

各点の鉛直方向振動を図1に示す。3台の振動計をP1点がオーバーラップする形で測定した結果である。

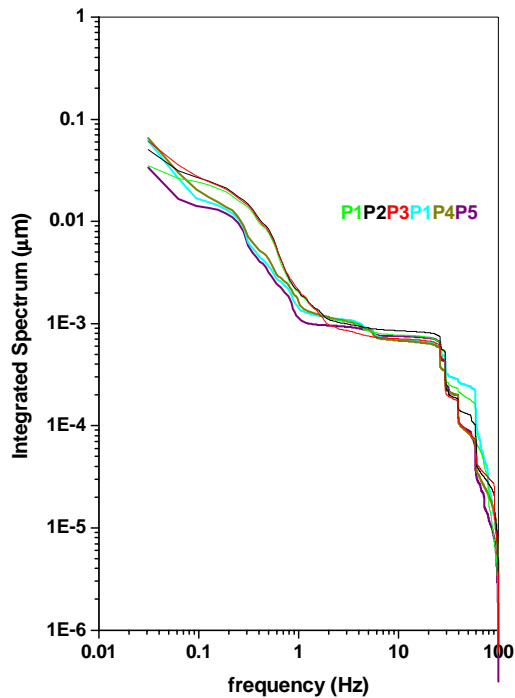


図1：鉛直方向の振動

スペクトラムから、近くで稼動している装置の機械的な振動及び、波浪の影響は出ているが所謂カルチャーノイズは小さいと言える。波浪の領域で2グループに分かれているのは日較差である。

2.3 水平方向の振動

鉛直方向と大きく異なり、水平方向は、図2及び図3に示すように複雑な様相を呈する。図2はX方向のスペクトラム、図3はY方向のスペクトラムで測定時刻は図1と同時である。両方向に共通に測定点から200mほど離れた地点で行われている建設工事に伴う重機からの振動が、建屋端部で大きく観測されている。これを除くと、X方向はばらつきがあるものの、鉛直方向とほぼ同じ形態を示す。これに対して、Y方向は鉛直方向と顕著な差を示している。

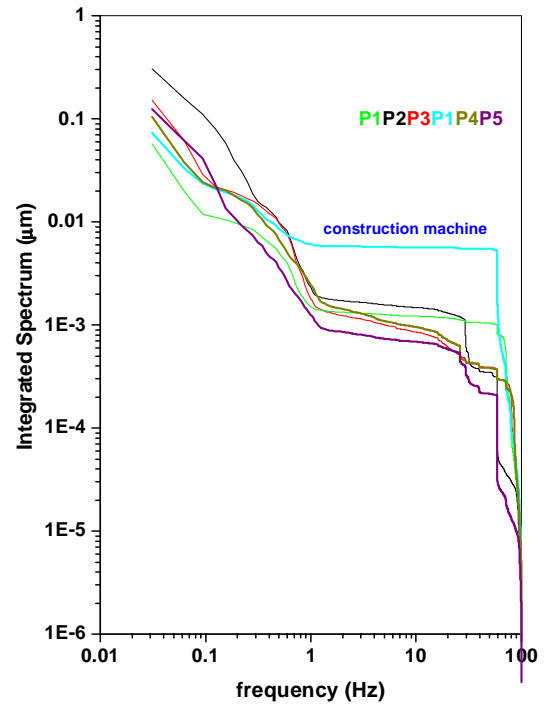


図2：水平X方向（建屋長手方向）の振動

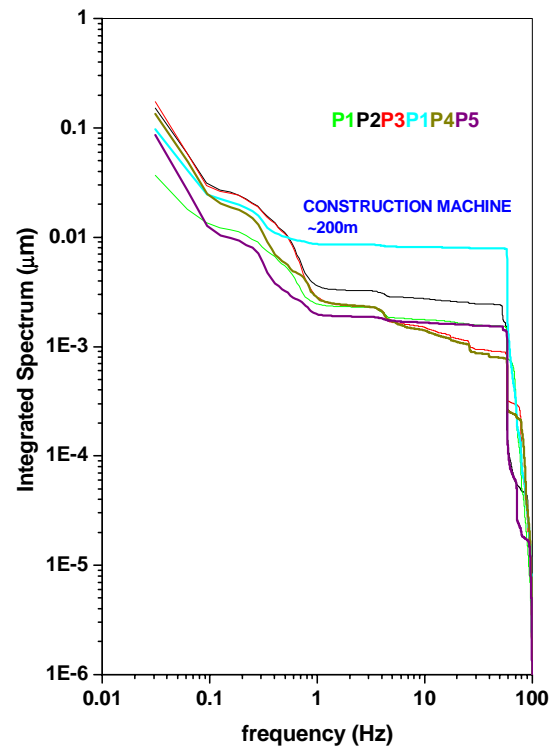


図3：水平Y方向（建屋横断方向）の振動

2.4 カルチャー・ノイズ

カルチャー・ノイズを模擬的に調査する目的で、建屋内に設置されている天井クレーンを走行させた場合の振動測定を行った結果を図4に示す。

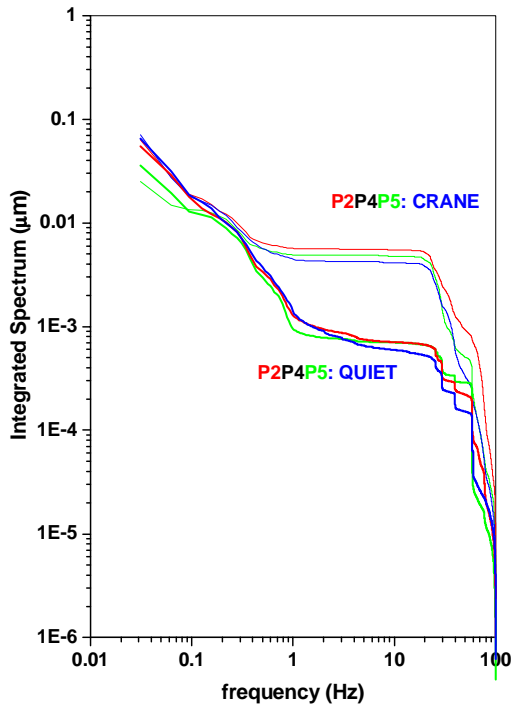


図4：クレーン走行の有無と鉛直方向の振動

0.4Hz～60Hz の周波数帯域でクレーン走行の影響が通常時の約 8 倍、Z 方向の振幅が大きいこと、及び建屋端部の振動が高い周波数で大きくなることが分かるが、これを除けば、測定点間の差はほとんどないと言える。一方、水平方向は若干複雑な様相を呈し、測定点毎に倍率が異なり、建屋端部での倍率が最も大きくなる。

3. 地盤変動域

3.1 ATL

ATLモデルは自己相関関数を使って表現できる^[2]。

$$\Delta y(\tau)^2 = 2\langle y(t)^2 \rangle - 2\langle y(t+\tau)y(t) \rangle = A \cdot L \cdot \tau \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここで、 $\langle X \rangle$ は X のアンサンブル平均である。一方パワースペクトラム関数の定義から、

$$P(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} df \langle y(t+\tau)y(t) \rangle e^{-2\pi if\tau} \quad \text{-----} \quad (2)$$

であるから、(1)式は

$$A \cdot L \cdot \tau = 4 \int_{-\infty}^{+\infty} df P(f) \sin^2(\pi f\tau) \quad \text{-----} \quad (3)$$

ここで、もしもパワースペクトラム関数が周波数の逆 2 乗に比例すると仮定すると、

$$P(f) = \frac{K}{4\pi^2 f^2} \quad \text{-----} \quad (4)$$

この式を使うと式(3)の右辺は、 $K\tau$ となる。従って式(4)は、

$$P(f) = \frac{A \cdot L}{4\pi^2 f^2} \quad \text{-----} \quad (5)$$

となる。

3.2 地盤変動の比較と結論

今回の測定結果から、 f_0 が約 0.1Hz であること、 f_0 以下ではパワースペクトラム関数が周波数の逆 2 乗に比例していることから判断して、ATL の値が計算できる。更に詳細な値は今後続ける長期計測を待たねばならない。これまでに測定された ATL の値と今回の値を含めて、表 1 にまとめた。

表 1：ATL COEFFICIENT in JAPAN

No	Site Name	A (nm ² /m/sec)	Geology of the Place
1	Tunnel of KEKB	4.0E+01	Clay and Gravel
2	Rokkoh-1	3.6E+01	Granite (near Fault)
3	Rokkoh-2	3.3E+01	Granite
4	Miyazaki	1.5E+01	Diorite
5	SPring8	8.0E-01	Granite
6	Kamaishi-1	1.4E-01	Granite (Crack)
7	Kamaishi-2	5.7E-02	Granite
8	Sazare	5.0E-02	Green Schist
9	Esashi-1	5.7E-03	Granite (Floating)
10	Esashi-2	2.0E-03	Granite

ATL 値を評価する場合、注意しなければならないのは、 f_0 の値である。例えば No1 の KEK サイトでは ATL に含めるべきではない日射や降雨による影響が大きい。特に日射による地殻変動は周期性があり、しかも大きな値になる。当然スペクトラムが周波数の逆 2 乗に比例せず、幅を持った卓越スペクトラムになる。この変動を無理やり ATL に含めると、No1 の値は桁違いに大きくなる。勿論、加速器の運転の条件となる、アライメント誤差としては考慮せねばならない変動であり評価が複雑になる。

振動域では、大きさが小さいとは言え、建屋端部における水平方向の振動が大きくなることは注目に値する。詳細な解析が必要となる。

参考文献

- [1] Shigeru Takeda, et al "Slow Drift and Frequency Spectra on Ground Motion", Proceedings of the Third International Work Shop on Accelerator Alignment, Annecy, France, Sept. 28 - Oct. 1, 1993
- [2] Shigeru Takeda, et al "Ground Motion Studies for Large Future Linear Colliders", Proceedings of the PAC97, Particle Accelerator Conference May 12-16 (1997) Vancouver, BC, Canada.