

## BROADBAND GROUND MOTION

Shigeru Takeda

Accelerator Laboratory, KEK High Energy Accelerator Research Organization  
 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801 Japan

### Abstract

The power spectrum density and coherence function for slow ground motions give very important information for the construction of the large scale accelerators. Dominant part of the ground motion in the low frequency range ( $f < 0.1$  Hz) is usually related to the *ATL* model using the integrated power spectrum density. As a result of our long term and wide area observations on the ground motions, we have obtained new information on the ground motion. The coherency of the ground motion changes as a function of detailed geological condition even though the value of *A* is not so different between each other. We will present detailed discussion including this new information.

## 地盤の広帯域振動と変動

### 1. はじめに

従来は各種加速器の建設を行う場合当然のように、その加速器建設の関係者が検討する項目の一つに機器を収納する建物やトンネルとそれらの不等沈下がある。これは日頃身の回りで、一般建造物に関連して見聞きする事柄であり、直感的にも理解し易い現象だからと言える。

一方加速器が大型化し、高精度化するにつれて、機器のアライメント、ビーム運転の精密調整、ビームロスの低減といったことに関連して、不等沈下だけを考えた検討では済まなくなり、建設前の基盤の綿密な調査が必要不可欠な項目となってきた。この調査に基づいた的確な機器収納の為に構築物設計が必須だと言われるようになって十数年経っているが、相変わらず不適合で、大雑把な静的地質調査とその結果を利用した構築物の設計施工が行われている。加速器を設計する者はその設計精度に設置精度が如何に関わるかを検討し、その精度を如何にして実現可能な方式で維持して行くかを詳細に詰めて設置方式、調整方式を検討しなければならない。この事はトンネル基盤の静的地質ばかりではなく動的地質に深く関連して来る。少なくとも日本の現存加速器や建設進行中の加速器の大部分はこのような配慮に欠けているのが現状である。

地盤の動的調査と機器のアライメント方式検討の2項目は表裏一体の重点項目であるが、ここでは前者に絞って話しを進める。

### 2. 振動及び変動

地盤あるいは基盤の振動や変動をどのような機器を使って計測し、その結果をどのような解析手段を使って解析するか、その解析結果を如何に解釈するかと言った事について順に述べて行く事にする。

#### 2.1 計測機器

加速器が許容するアライメント・エラーを十分に上回る精度の計測機器を選定する事になる。一般的には地震計、水管傾斜計、レーザー測量機器、最近では土木建築で使う道糸を電氣的に計測する装置が開発されているので目的に合ったものを選び易くなっている。地震計ではストレッカイゼン社のSTS-2複数台を高精度振動計測に使用して位置相関を取ることが世界的に行われている。STS-2は計測可能周波数レンジが0.00833~50Hz、クリップレベルが1.3(cm/sec)という3軸速度計である。また複数種ある水管傾斜計から環境と目的に合わせて選択し加速器のベータatron波長を考慮して設置することになるがその際補助機器として電気計測可能なレベルを使うこともある。

#### 2.2 解析手段

時系列データとして得られた計測データをより一般的に見通しの良い方法で解析する為に使われる手段としては自己相関関数や相互相関関数を使って解析する方法がある。我々はこれら時空間での解析手段の代わりに、それぞれをフーリエ変換することにより得られるパワースペクトラム密度関数、コヒーレンスと位相差関数を求める方式を採用する。この事は後で述べる加速器のアライメント・エラーに直接結び付けての議論をし易くするからである。

#### 2.3 解析結果の解釈

パワースペクトラム密度関数を求めてまず調べることは、卓越スペクトラムを取り除いた残りのスペクトラムが示す傾向を押さえることである。この傾向は経験的に<sup>[1]</sup>、

$$P(f) = \frac{k}{f^2(f_0^2 + f^2)} \quad (1)$$

と書き表すことが出来る。 $P(f)$  は $m^2/Hz$ という単位

で表されるパワースペクトラム（密度関数）、 $K$ は計測地に依存した定数、 $f$ はHz単位の振動・変動の周波数を表す。定数 $f_0$ は地盤・基盤の性質に依存して変化し、通常、0.1Hz～0.01Hzの範囲に入る<sup>[1]</sup>。多くのデータから、 $f_0$ が0.1Hz近辺の値を示す処は静かな硬岩地帯が含まれる。一方 $f_0$ が0.01Hz近辺の値を示す処は地盤ノイズが高い軟弱地盤地帯が含まれる。

$f_0$ が0.1Hz近辺で、 $f \ll f_0$ の地域に対してはV. Parkhomchuk等がATLモデルという経験則を提唱した<sup>[2]</sup>。このモデルではある2点間の距離を $L$ 、その2点で地盤変動を計測した時間を $T$ とすると各点で計測される変位間の二乗平均誤差 $\sigma^2$ は $\sigma^2 = ATL$ という簡単な式で表せるといふものである。定数 $A$ は計測地域の地盤に依存した値である。

ATLモデルを地盤変動の自己相関関数から解き直した山本の計算を以下に示す<sup>[3]</sup>。時刻 $t$ における地盤変位量 $y(t)$ と時間 $\tau$ だけずらした変位量 $y(t+\tau)$ を使うと自己相関関数は $\langle y(t+\tau)y(t) \rangle$ と書ける。ここで、 $\langle X \rangle$ は母集団平均を表す。従って、

$$\Delta y(\tau)^2 = 2 \langle y(t)^2 \rangle - 2 \langle y(t+\tau)y(t) \rangle = A \cdot L \cdot \tau. \quad (2)$$

と書ける。

パワースペクトラム密度関数の定義式

$$P(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \langle y(t+\tau)y(t) \rangle e^{-2\pi i f \tau} d\tau, \quad (3)$$

を使うと、式(2)は、

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

となる。もしもパワースペクトラムが $f^{-2}$ に比例すると仮定すると（式(1)で、 $f \ll f_0$ の場合）、式(4)の右辺は、

$$4 \int_{-\infty}^{\infty} P(f) \sin^2(\pi f \tau) df = K \cdot \tau. \quad (5)$$

となる。従ってATLモデルは、

$$P(f) = \frac{A \cdot L}{4\pi^2 f^2}. \quad (6)$$

と書けることになる。現実の地盤変動計測ではあるカットオフ周波数 $1/\tau_{\max}$ が存在する為、パワースペクトラムとしては、

$$P(f) = \frac{K}{4\pi^2 f^2 + (1/\tau_{\max})^2}, \quad (7)$$

となるので、式(4)は、

$$4 \int_{-\infty}^{\infty} P(f) \sin^2(\pi f \tau) df = K \tau_{\max} (1 - e^{-\tau/\tau_{\max}}). \quad (8)$$

となる。言い換えると、ATLモデルは

$$\Delta y(\tau)^2 = A \cdot L \cdot \tau_{\max} (1 - e^{-\tau/\tau_{\max}}). \quad (9)$$

という形になる。

この様にして得られた計測位置の二乗平均誤差は加速器のアライメント・エラーと直接結び付けて検討できるので、加速器が要求する設置精度と絡めて土木工事のあり方、加速器アライメント方式のあり方を検討する上で重要なパラメーターとなる。さらに詳細な検討をする為には、例えばベータトロン波

長の距離を挟んだ何点かの間で、位置相互相関関数あるいはそのフーリエ変換として得られるコヒーレンス関数や位相差関数を求めると良い。

### 3. 実験結果と解釈

#### 3.1 地盤とA値

今までに国内で計測されたA値と地盤の関係を、Table-1に示した。

Table-1: ATL coefficient in Japan

No	Site Name	A (nm <sup>2</sup> /m/sec)	Geology of the Site
0	Tunnel of J-PARC	1.3E+03	Clay, Gravel and Soft Rock
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 and Water)
7	Kamaishi-2	5.7E-02	Granite
8	Sazare	5.0E-02	Green Schist
9	Esashi-1	5.7E-03	Granite (Floating Stone)
10	Esashi-2	2.0E-03	Granite

(注) No. 0はEPAC2006で発表された論文:MOPCH120, "Ground Motion Study and Related Effects on the J-PARC", EPAC2006, Edinburgh; その他のデータは参考文献[3]を参照

この表で注目しなければならないのはNo. 6とNo. 7及びNo. 9とNo. 10という組み合わせである。

#### 3.2 トンネル構築法及び環境とA値

Table-1でNo. 6とNo. 7あるいはNo. 9とNo. 10は全て花崗岩を削り貫いて構築されたトンネルであるが得られたA値には可也の差が認められる。まず前者組み合わせと後者のそれとはトンネルの構築方法に大きな差がある。前者はスローブラッシング方式でトンネルを掘削したのに対して、後者は完全な機械掘削でトンネルを掘削している。両者間のA値の大きな差は測定場所に起因するのではなくて、掘削方式の違いに因ると考えられる<sup>[4]</sup>。地山を傷めない様なトンネル構築方式が加速器にとっては好ましい方式だと言える。

次に着目しなければならないのは、前者組み合わせ内及び後者組み合わせ内で見られる差異である。これらの差異の原因を解明するには長期の調査実験が必要だったが、前者の差異は岩体に工地上生じた亀裂とその亀裂への水の侵入作用がA値を悪くしていたということが図-1と図-2から明らかである。一方後者の差異は図-3から判断できる。後者は大きなブロック化した岩塊上にセンサーが乗っていた結果生じたものと言える。ここに示した例は相互相関（コヒーレンスと位相差）を詳細に調べることや本来観測に掛かるはずの地球潮汐が顕著に観測され

ないという実験事実を詳細に調査した結果判明した事実である。

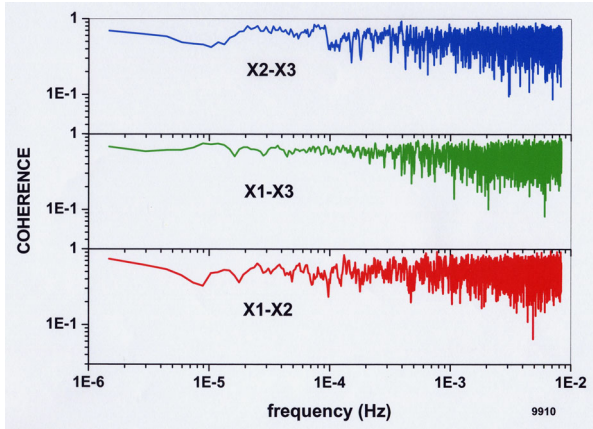


図-1：掘削時に生じた岩体内の亀裂に水が浸入した結果17m間隔で設置されたセンサー間のコヒーレンスが悪化した例

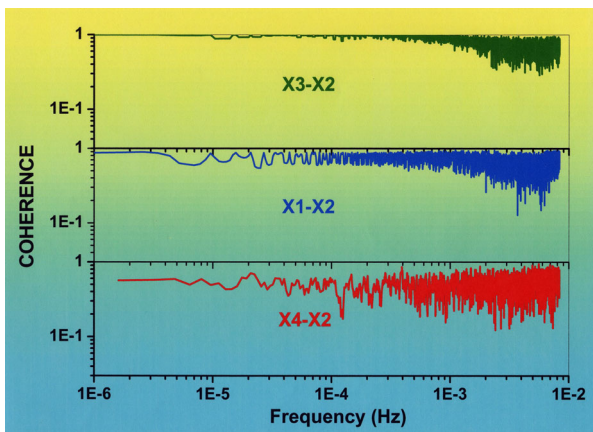


図-2：亀裂内を流れる水の動態を調べ、その結果から判断して明らかに流れの上流となる部分にダムを設置し、水の流れを止めた結果各センサー間でのコヒーレンスが改善された例

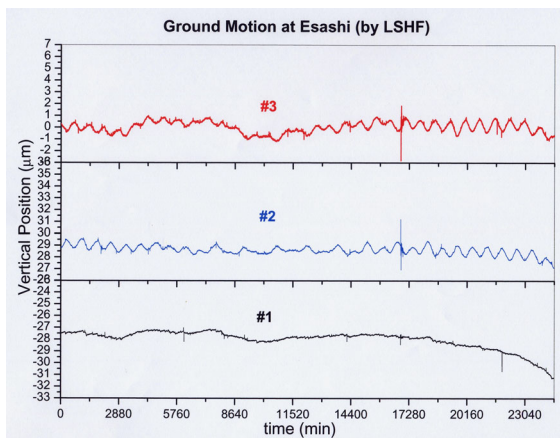


図-3：14m間隔で設置されたセンサーの一つが地球潮汐という明確な現象を捉えていない

### 3.3 加速器建設サイトの選定

加速器建設の為にサイトを選定するに当たっては、まずその場所での振動を計測し、そのパワースペクトラムを式(1)に当てはめて加速器の要求精度に適合できるかどうかを検討する。例えば図-4のような結果を得た場合、更に詳細な測定を必要とするかどうかはATLモデルのA値が求められるかどうかで判断する。

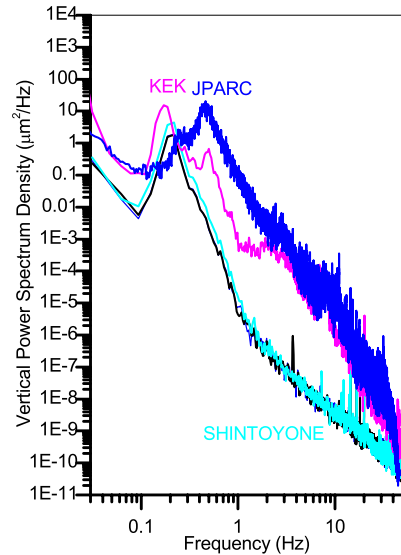


図-4：STS-2を使った振動計測結果の例。KEK及びJ-PARCの計測結果<sup>[5]</sup>はこの結果だけでA値を求めるのは危険であることを示している。

## 4. まとめ

過去においては加速器運転開始後に加速器要素のアライメントに問題があると分かってから変動計測を開始するというのが大勢だった。しかしこれから建設される大型で高精度の加速器に関しては、予め加速器が寄って立つ足下が如何なる性質を持つかを知り、加速器の要求精度を満たす為には、どのような基盤にどうゆう工法でトンネルを構築し、その床面にどのような方式で加速器を設置するかを、加速器の運転サイクルと再アライメントの方式及び時期までも含めて総合的に検討することが必須となる。

## 参考文献

- [1] S. Takeda, et al., "Slow Drift and Frequency Spectra on Ground Motion", Proc. 3<sup>rd</sup> IWAA, Annecy, 1993.
- [2] V. Parkhomchuk et al. "Slow Ground Motion and Operation of Large Colliders", Part. Accel. **46**(1994)241.,
- [3] N. Yamamoto and S. Takeda, "Geology and Slow Ground Motion Studies in KEK", 22<sup>nd</sup> Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Ground Motion in Future Accelerators, Nov. 6-9, 2000, SLAC.
- [4] S. takeda, et al., "Slow Ground Motion and Large Future Accelerator", EPAC96, Sitges, 1996.
- [5] S. Takeda, et al., "Ground Motion Study and the Related Effects on the J-PARC", EPAC2006, Edinburgh, 2006.