

地震時架台等で増幅された機器振動の強震計 ITK002 による測定

AMPLIFIED VIBRATION MEASUREMENT OF INSTRUMENTS ON THE GIRDER AT EARTHQUAKES WITH A SEISMOMETER ITK002

松井佐久夫^{#A)}, 木内淳^{B)}, 甲斐智也^{B)}, 岡安雄一^{C)}, 安積則義^{C)}, 木村洋昭^{C)}

Sakuo Matsui^{#A)}, Jun Kiuchi^{B)}, Tomoya Kai^{B)}, Yuichi Okayasu^{B)}, Noriyoshi Azumi^{C)}, Hiroaki Kimura^{C)}

^{A)}RIKEN, ^{B)}Spring-8 Service Co., Ltd., ^{C)}JASRI

Abstract

Due to the Great East Japan Earthquake, the accelerator facilities suffered great damage. The natural frequency of the girder of KEK Injector Linac is about 3.5Hz, and this coincide with the ground one. Thus the vibration amplitude of the girder became large. The IT seismometer consortium has developed a cheap accelerometer logger ITK002 used GMR(Giant Magneto Resistive effect). The ground vibrations at SPring8 several points measured with these ITK002 at the earthquake. The amplification by the girder was also measured. The frequency characteristic at larger than 1Hz is adequate. Strong magnetic field causes only the shift of acceleration median but the relative values are hardly affected.

1. はじめに

1995年の阪神淡路大震災時 SPring-8 ではまだ床工事中で被害は無かったが、2011年の東日本大震災時に KEK では線型加速器の架台が揺れ機器は大きな被害を受けた[1,2]。KEKB や JPARC でも被害が発生した[3,4]。西日本では近い将来東南海地震の発生が言われている。またいつ動くかよくわからない山崎断層と SPring-8 の距離は 11km と遠くはない。古い大陸であるヨーロッパやアメリカと異なり日本では地震を避けることができない。

地震時、架台による増幅が心配される。架台の振動特性調査に床への砲丸の落下とか大きなハンマーによる床加振テストは行われる。また、架台の各点をハンマーで打撃し固有振動など測定は行われる。しかし実際の地震を模擬できる加振は難しく地震時の測定は貴重である。

また、関西では有感地震は関東より少なく長期間の連続測定が必要である。センサーはたとえば周波数範囲を 2Hz とか 5Hz 以上とかに限るとサーボタイプにくらべ安価であるが 3 チャンネルの ADC とロガーを含めるとそれなりの価格になる。SPring8 も地盤により振動は異なるので架台の上下も含め複数の場所に必要で、“安価”が重要な条件となる。

東京大学地震研究所を中心として、複数の民間企業や研究機関等による産学連携共同研究を実施する IT 強震計コンソーシアム[5]という組織がつくられている。小さな地震時に家屋など身近な場所で測定し弱点を探り耐震対策に役立てるのが目標で、安価な 3 軸の加速度計 ITK002 が開発された。この測定器の周波数特性、測定例と有用さ、特徴を報告する。

2. 地震の被害

2.1 世界の地震分布と加速器

地震は世界中どこでも発生するわけではない。Figure 1 に 100km 以浅でマグニチュード 4.5 以上の地震の震央分布に加速器の施設を重ねた。アメリカ

の西海岸、イタリア、そして日本と台湾を除くと地震の考慮は必要ないことがわかる。架台を設計する際ポンプなど人工の加振源だけを考える多くの施設と同じ設計では地震の被害を受ける可能性がある。

床への固定部分は通常、例えば 0.3 G とかの揺れを想定しボルトの太さなど計算されている。しかし、磁石などはその架台の上に固定されており、振動が連続し、共振すれば加速度、振幅とも大きく増幅される。このような検討はあまりなされていない。

2.2 振動の成長

Figure 2 に地盤が振動した場合、架台振動の減衰率 ζ 、外部振動数 ω と固有振動数 ω_0 の比、伝達率 T を示した。通常、設計時には ω_0 を高く（いわゆる剛構造）共振を避け T が 1 より大きくならないようにする。一方グラフのピークになる ω_0 を下げいわゆる柔構造にして T を下げることもできる。この場合 ω が ω_0 より大きい場合、 ζ が小さいほど T は小さくなる。しかし ω_0 に近いと T が逆に大きくなる。Figure 3 に振動の回数と増幅率を示す。 $\zeta=0.01$ なら最終的に 50 倍になるがわずかに 3 回の振動（3Hz なら 1 秒）でも 8 倍になることがわかる。

2.3 地震の被害

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災で KEK の線型加速器の板ばね構造で振動を吸収していた加速ユニットが座屈するなど大きな被害を受けた[1]。KEK 入射器から南東 3km にある防災科学技術研究所の加速度データを示す。[Figure 4]。

2.4 架台の共振

防災研の南北方向の加速度を 20 秒ずつ 10 秒ずらしながら Hanning 窓でフーリエ変換し 3 次元のグラフにしたものを Figure 5 に示す。加速度振幅が最大付近のスペクトルは図のように 2 と 3Hz にピークが認められる。図中左上は加速度（黒塗は 20 秒）で

matsui@spring8.or.jp

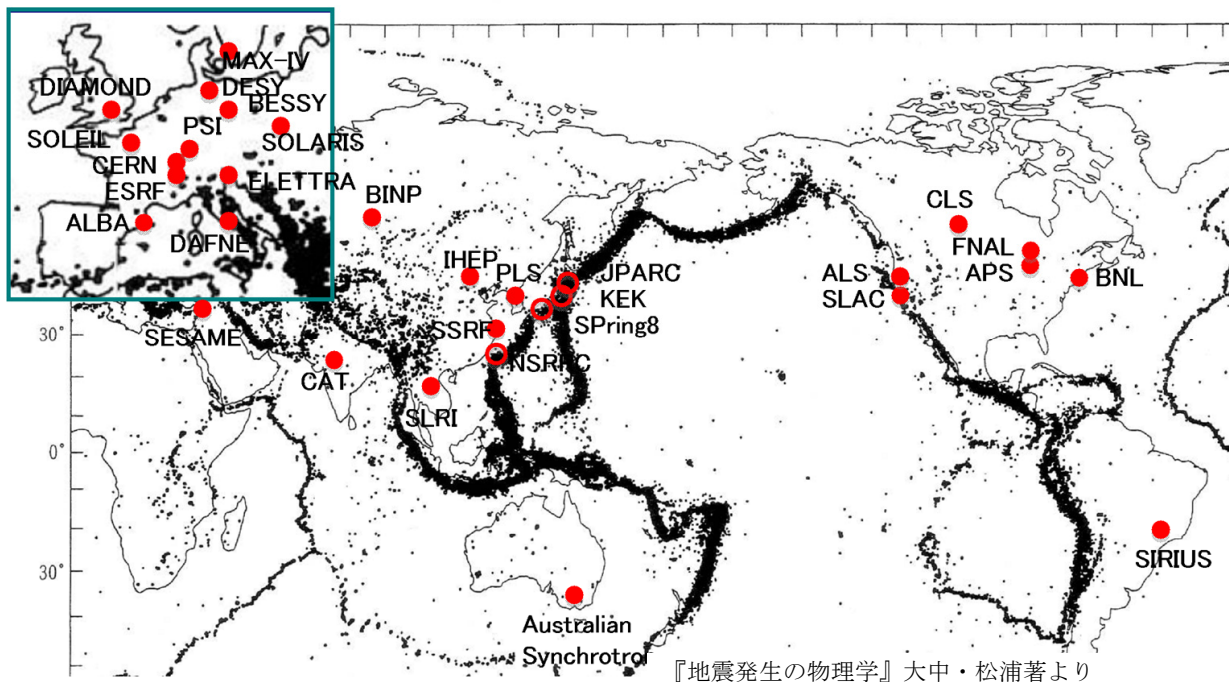


Figure 1: Earthquake epicenters with Magnitude>4.5 and accelerator facilities in the world.

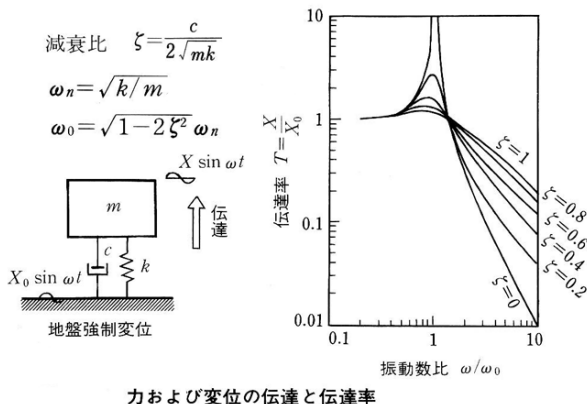


Figure 2: Frequency versus transmission ratio[6].

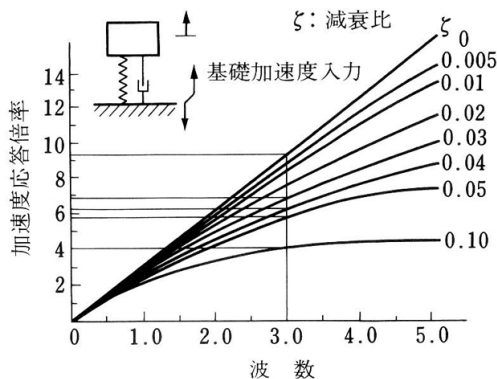


Figure 3: Response versus cycle number[7].

10 秒程度大きな振幅で継続している。また、文献 [1]に床と加速ユニット標準架台のビーム軸水平方向の振動(変位)のパワースペクトルが記載されており架台には 3.5Hz にピークが認められる。3km 離れており地盤も同じではないが、榎本氏も指摘されて

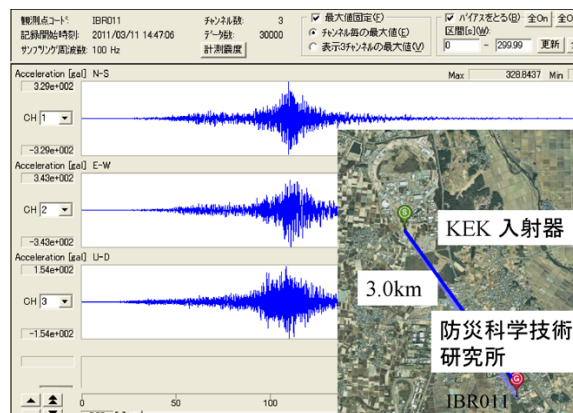


Figure 4: Acceleration for 300 sec at NIED.

いるように地盤の振動と共振したため大きな被害につながったと推測される。

2.5 地盤の卓越振動数

地盤も架台と同様、固有振動をもっておりそこで増幅される。2004 年菅原氏らと KEK と SPring8 サイトで地盤振動を測定した[8]。KEK では 3Hz にピークが認められ、例えば垂直方向では昼間は夜間より PSD(Power Spectral Density)で一桁大きかった。一般に地盤の卓越振動数としてローム層では 3Hz が知られている[9]。4 種類に分類した例を Table 1 に示す。

Table 1: Ground Type and Dominant Frequency

地盤種別と地盤周期	
第 I 種 岩盤・硬質礫層	$T_0=0.1\text{sec}$ ($f_0=10\text{Hz}$)
第 II 種 砂礫層・ローム層	$T_0=0.3\text{sec}$ ($f_0=3\text{Hz}$)
第 III 種 I、II 種以外	$T_0=0.6\text{sec}$ ($f_0=1.3\text{Hz}$)
第 IV 種 沖積層・埋立て	$T_0=1.0\text{sec}$ ($f_0=10\text{Hz}$)

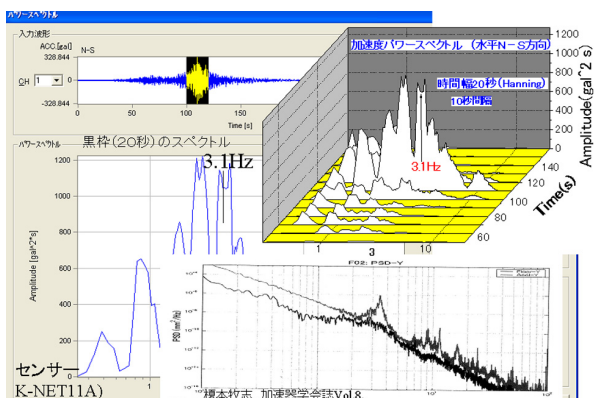


Figure 5: Power spectra of earthquake and the girder unit of KEK Injector Linac.

3. 強震計 ITK002((株)ALAB 製)

3.1 仕様

仕様を Table 2 に示す。加速度センサーとして GMR(巨大磁気抵抗効果)素子を使用している。

Table2 : Specification of ITK002

軸	3 軸
測定レンジ	±2450 Gal
ノイズ	<0.1 Gal
定格電圧	6 V ±10%
消費電力	~3W(~0.5A)
外形	10×14×4cm
重量	~620 g
時刻	NTP 使用
サンプリング	100 Hz
記録	S D カード(16GB 3 ヶ月) 又はイーサネットケーブルで PC に記録 ファイル形式 1 分毎のデータ



Figure 6: A Seismometer ITK002 and GMR element.

3.2 周波数特性

一定の周波数で ITK を載せた台を振動させ位置

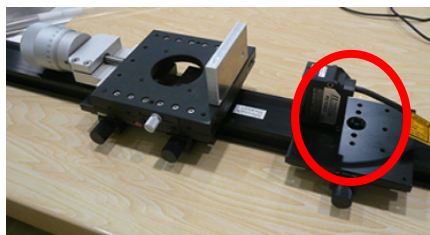


Figure 7: Displacement measurement of the stage with Laser sensor.

はレーザー変位計(キーエンス製)で測定し周波数特性を求めた。電圧-変位の係数 2mm/V は Figure 7 のステージでセンサー(IL-S065)-コントローラー(KZ-U3)からの電圧をデジタルで測定し求めた。

Figure 8 の発振機からパワーアンプを経て振動発生器で垂直方向に加振した。変位の測定は上下方向だけなので水平 2 方向の振動も比較するため ITK の上にサーボタイプの速度・加速度両出力のセンサーを載せている。これらからのアナログ出力は多チャンネル FFT Graduo から PC に入る。一方 ITK は PC に同期しており生データも見ながら



Figure 8: Oscillation arrange for frequency characteristics measurement of vertical direction.

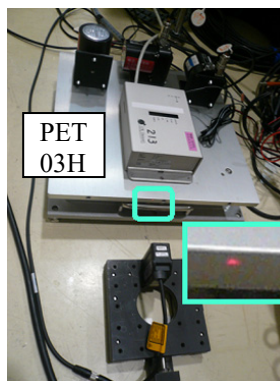


Figure 9: Horizontal excitation.

PC に 1 分毎蓄えられる。水平方向の設定は Figure 9 である。ただ、いずれも数 Hz 以下では滑らかな動きができず加速度の波形は複雑になった。

Figure 10 に水平振動の例を示す。赤は台の変位、緑は変位から換算した加速度、青は ITK で測定された値で、計算値とよくあっている。

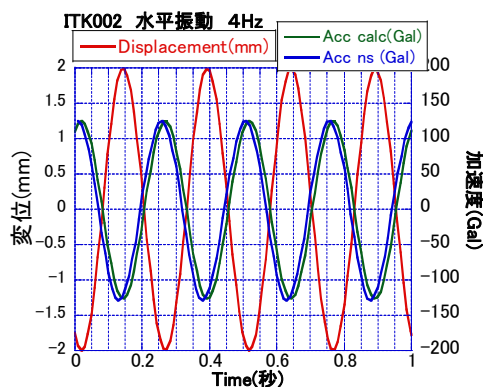


Figure 10: Measured and calculated acceleration results at horizontal 4 Hz oscillation.

周波数を変えて変位から推測される加速度を基準に実際の測定値の大きさとの比をプロットしたのが水平方向 Figure 11 と垂直方向 Figure 12 である。1Hz 程度までは 1 から大きくはずれていない。

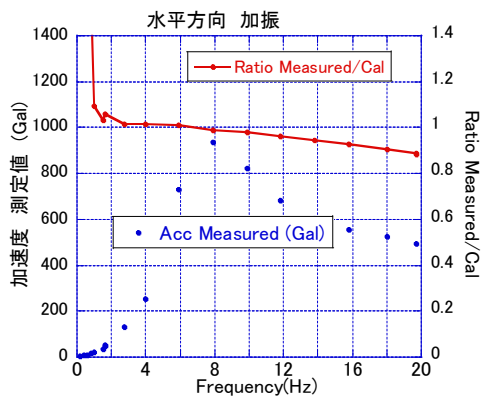


Figure 11: Response curves in the horizontal direction.

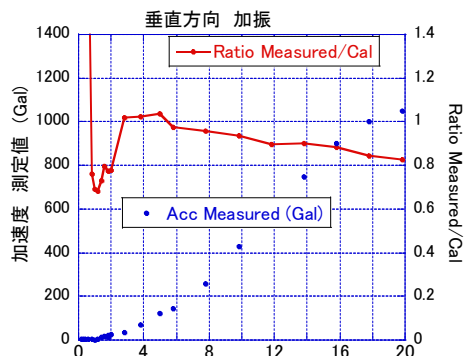


Figure 12: Vertical response function.

3.3 地震時の測定

2013 年に兵庫県南部で発生したマグニチュード 4 の地震の例を Figure 13 に示す。

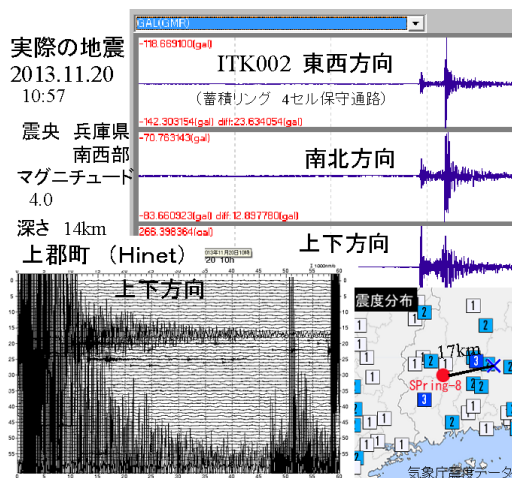


Figure 13: Earthquake at November 20 in 2013 17km far from SPring8.

3.4 地盤の違いと振動

横波のピークの時刻を中心に±2 秒間の加速度の波形を Hanning 窓をかけてフーリエ変換した結果を Figure 14 に示す。各スペクトルが得られた SPring8 サイトの場所も示している。3Hz にピークがある濃

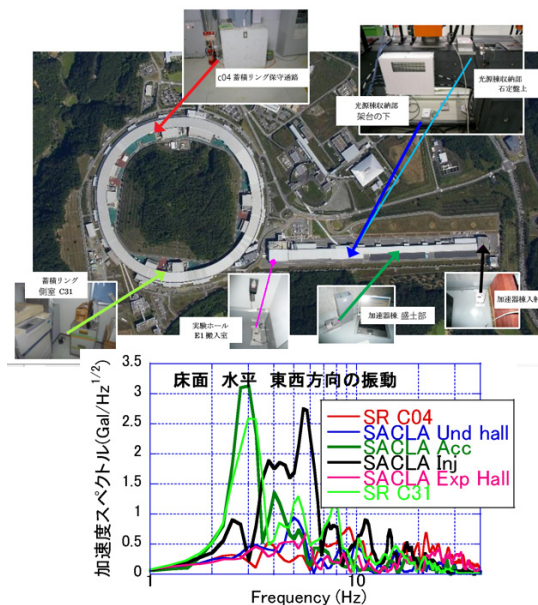


Figure 14: The acceleration spectra on the floors in SPring8 site at the earthquake November 20 in 2013.

い緑の SACLA Acc は深さ 50 m の硬い岩まで杭が打ってある埋立地である。SACLA Inj は埋め立てが浅い場所なので周波数はやや高く 5~6Hz にピークがある。STS で測定すると深さに応じて連続的に 3~7Hz と変化する固有振動数が認められた[8]。

3.5 架台による振動の増幅

SACLA 光源棟で 4 極電磁石を載せている石の架台がありターンバックル方式で床に固定している。この架台の上下で地震時の増幅が測定できた。

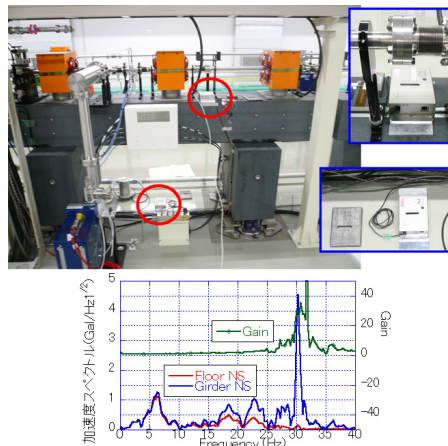


Figure 15: Amplification on the girder.

Figure 15 で赤は床面、青は架台上の加速度のスペクトルで緑はその比を示している。ビーム軸に対して直角の水平方向が揺れやすいと推測できる通り 30Hz 付近の固有振動周辺で床の振動の 30 倍程度になっていることがわかる。

3.6 停電に備える

大きな地震では普通停電になるので余震なども記録するためバッテリーを接続している。9Ah 程度のシールバッテリーを用いてスタンバイ充電電圧が出る AC アダプターを使用すれば停電後でも 1 日程度は記録できる。Figure 16 に AC アダプターを外してから電圧の降下のグラフを示しているがほぼ 1 日後の 8:57、4.6 V くらいまで特に問題のない値で記録できていることがわかった。バッテリーのスタンバイ電圧は電源の仕様 $6\text{V} \pm 10\%$ をやや上回るが測定できている。また図中上下成分の幅 0.15Gal の中にノイズレベルが十分納まっている様子が見られる。

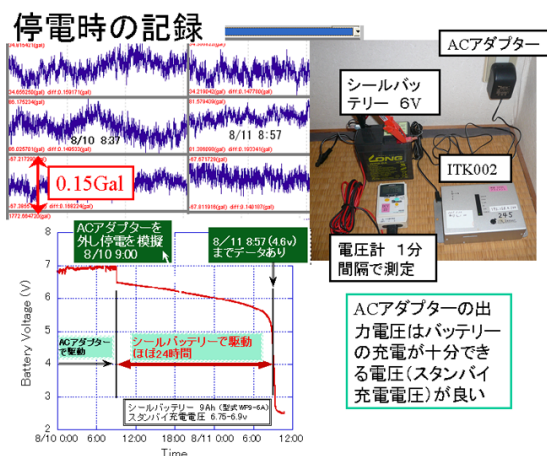


Figure 16 : Battery support for the power stop.

3.7 外部磁場による影響

GMR 素子を使用しているため磁場の影響が懸念された。そこで Figure 17 のように垂直方向に振動し

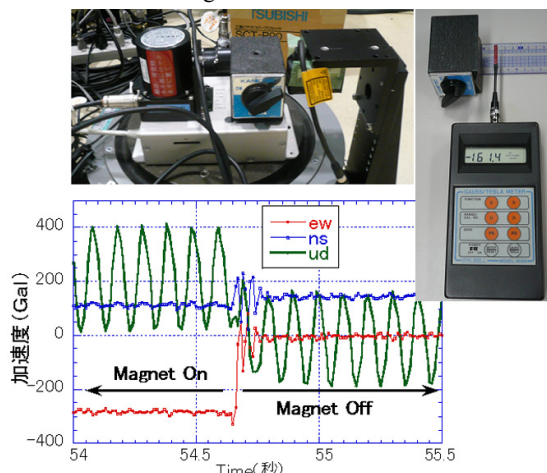


Figure 17 : DC magnetic field on the GMR elements moves only the acceleration median.

ている時マグネットベースをセンサーの上 20mm に置き ON-OFF して影響を測定した。ベース面から 20 mm 付近の磁場は ON で 150~170 G 程度 OFF では 1~2 G を示した。

グラフは On から Off への切替え時の ITK の 3 成分の加速度で p-p の値はあまり変わっていなかった。ただ加速度の中央の値がシフトしていることがわかる。実際には磁場がなくてもオフセットが少し入っているのであまり問題にはならないと思われる。offset の量はマグネットベースの磁場の向きと GMR 素子の関係で 3 成分で 50~300Gal と差があった。

4. まとめ

- 1) 地震時に増幅されやすいのでその地盤の固有振動数を把握しておく。
 - 2) 地震の振動数は通常の機械的な振動数より低い → 振幅が大きくなりやすい → 振幅は減衰定数に反比例するので固有振動数が低い架台など、減衰を効かせることが大切。
 - 3) ITK002 強震計で地震時、床の振動が架台上で増幅される様子、また地盤の違いによる差も測定できた。
 - 4) 1Hz 以上の領域では変位から計算した加速度と実測値に大きな差はなかった。
 - 5) バッテリーを繋ぐことで地震時の停電には 1 日とかば記録できる。
 - 6) 100 G 程度の DC 磁場なら中央値のシフトが生じるが加速度の相対値はあまり変わらなかった。
 - 7) コンパクトな振動の記録計で電圧も 6 V と用意しやすい。ただ、理由は不明であるが加速器の内部での使用など故障も発生する。(電源ラインにはパルス防止のコアをつけている)
- 現在、壊れにくい測定器が開発されている。(型式 IoLAM-02 オムロン製でイーグローバレッジ (株) より販売)

謝辞

地震時の各地の加速度のデータは防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net のデータベースからダウンロードしました。また、簡易なパワースペクトル計算も利用しました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 榎本収志, "加速器", 8, 2, 2011, p81-85."
- [2] K. Suzuki *et al.*, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan); http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/oral/TUMH09.pdf
- [3] 小野正明, "加速器", 8, 2, 2011, p65-73."
- [4] 小関忠他, "加速器", 8, 2, 2011, p74-80.
- [5] <http://www.weic.eri.u-tokyo.ac.jp/ITKyoshin/consortium/>
- [6] 井上善雄他, "振動の考え方・とらえ方", p125, オーム社, 1998.
- [7] 田中基八郎他, "振動をみる", p125, オーム社, 1998.
- [8] 菅原龍平他, KEK Report 2003-12.
- [9] 櫛田裕, "環境振動工学入門", p163, 理工図書, 1997.
- [10] S. Matsui, Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj6/papers/wpcca01.pdf