

地震動の大きさを、なぜ「スペクトル」で表わすのか

橋本真佐男（若狭ネット）

1. 機器の固有周期

原発耐震性を議論するときに、機器の「固有周期」という言葉が出てきます。例えば北陸電力志賀1号について表1のような数値が見られます。

また次の表2には関電の原発の主要建屋・機器の固有周期が示されています。

ここでこの「固有周期」の意味を周期運動するブランコを例として考えてみます。

1) ブランコの固有周期

ブランコの鎖が長いとユラユラゆっくり揺れ（固有周期が長い）、短いとセカセカ小刻みに揺れます（固有周期が短い）。

例えば、図1、図2に描かれている鎖の長さが1mと1.8mのブランコの固有周期を考えてみます。

$$\text{ブランコの固有周期 } T \text{ は } T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

(sec) (l は「鎖の長さ(m)」、 g は重力加速度で9.8(m/sec²))で表されますから、公園などでよく見かける鎖の長さ約1.8mのブランコの固有周期は約2.7秒で、もし鎖の長さを1mにすると約2.0秒となります。

表1 北陸電力志賀1号機の主な安全上重要な施設の固有周期

施設名称	固有周期 (秒)
原子炉建屋	0.201, 0.203
原子炉圧力容器	0.086
燃料集合体	0.198, 0.199
主蒸気管	0.153
給水管	0.064
残留熱除去ポンプ	0.033
残留熱除去系配管	0.136

出典：能登半島地震を踏まえた志賀原子力発電所の耐震安全性確認に係る報告について
 2007.4.19 北陸電力株式会社、9ページ

図1
 長さが1メートルのブランコ
 固有周期は約2.0秒

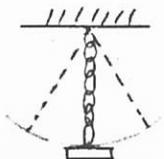


図2
 長さが1.8メートルのブランコ
 固有周期は約2.7秒

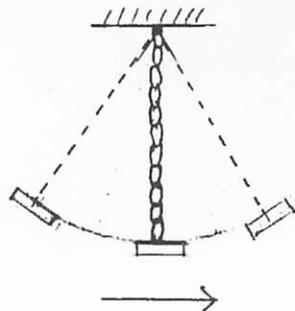


表 2 美浜・大飯・高浜原発の主要建屋・機器の固有周期（秒）

対象施設（項目）	美浜発電所			高浜発電所			大飯発電所	
	1号機	2号機	3号機	1号機	2号機	3・4号機	1・2号機	3・4号機
①原子炉容器（支持構造物）	0.055	0.063	0.065	0.065	0.065	0.052	0.083	0.055
②蒸気発生器（支持構造物）	0.116	0.116	0.141	0.120	0.125	0.063	0.095	0.07
③炉内構造物（炉心そう）	0.055	0.063	0.065	0.065	0.065	0.052	0.083	0.055
④一次冷却材管（本体）	0.116	0.116	0.141	0.120	0.125	0.063	0.095	0.07
⑤余熱除去ポンプ（基礎ボルト）	0.05 以下							
⑥余熱除去配管（本体）	0.203	0.122	0.102	0.079	0.083	0.082	0.192	0.09
⑦原子炉格納容器（本体）	0.125	0.125	0.179	0.179	0.179	0.160	0.109	0.223
⑧原子炉建屋（外部遮へい建屋）	0.244	0.234	0.273	0.284	0.284	0.206	0.183	0.223
⑨制御棒挿入経路の機器								
制御棒駆動装置	0.135	0.154	0.218	0.227	0.227	0.065	0.063	0.065
ガイドチューブ	0.055	0.063	0.065	0.065	0.065	0.036	0.083	0.036
燃料集集体	0.286	0.370	0.345	0.345	0.345	0.323	0.323	0.263
挿入時間（許容値）	0.66	0.66	0.64	0.64	0.64	0.64	-	0.55

出典：関西電力株式会社「柏崎刈羽原子力発電所で観測されたデータを基に行う美浜発電所、高浜発電所及び大飯発電所における概略影響検討結果報告書」（平成 19 年 9 月 20 日）

<共鳴>

固有周期と同じ周期、またはこの整数倍の周期でブランコを押すと揺れ幅が大きくなりますが、それ以外の周期でブランコを押しても揺れ幅は大きくありません。ですから左側のブランコに約 2 秒の間隔で力を加えると揺れ幅がどんどん大きくなります。これを共鳴と言います。右側のブランコの場合には、約 2.7 秒おきに力を加えると共鳴が起こります。鎖の長さが同じときには、揺れ幅（振幅）が大きいほど、一番下の位置を通過する時の速さ（速度）が大きくなります（図 3 参照）。

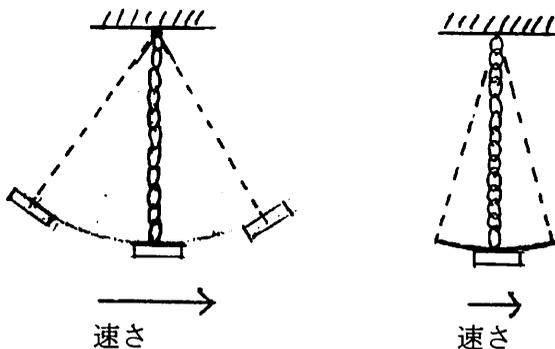


図 3 座席が一番下の位置を通過するときの速さはゆれの幅（振幅）が大きいほど大きい

2) 板状のバネに錘をつけた振り子

板状のバネに錘をつけた図4の様な装置に矢印方向の力を加えると、この板バネは一定の周期（固有周期）で振動します。

図5はこの振り子（振動子）を横から見た図です。板バネの長さが長いほど固有周期は長くなります。図5の右側のものはゆっくり揺れ、左側のものはセカセカと忙しく揺れます。

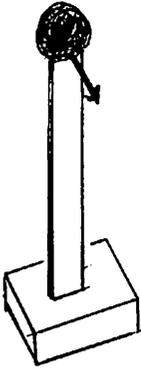


図4 板状のバネに錘をつけた装置

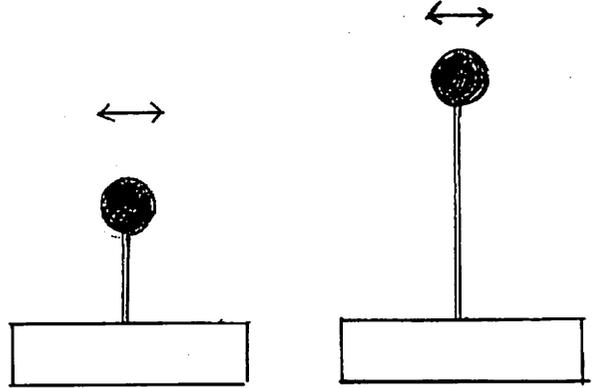


図5 左図の図4の装置を横から見た図

3) 原発機器のモデル

固有周期の違う原発機器を、このような振動子で置き換えて考えることができます。

2. 波の性質

地震波は波ですが、波の性質を簡単なモデルを使って考えてみます。

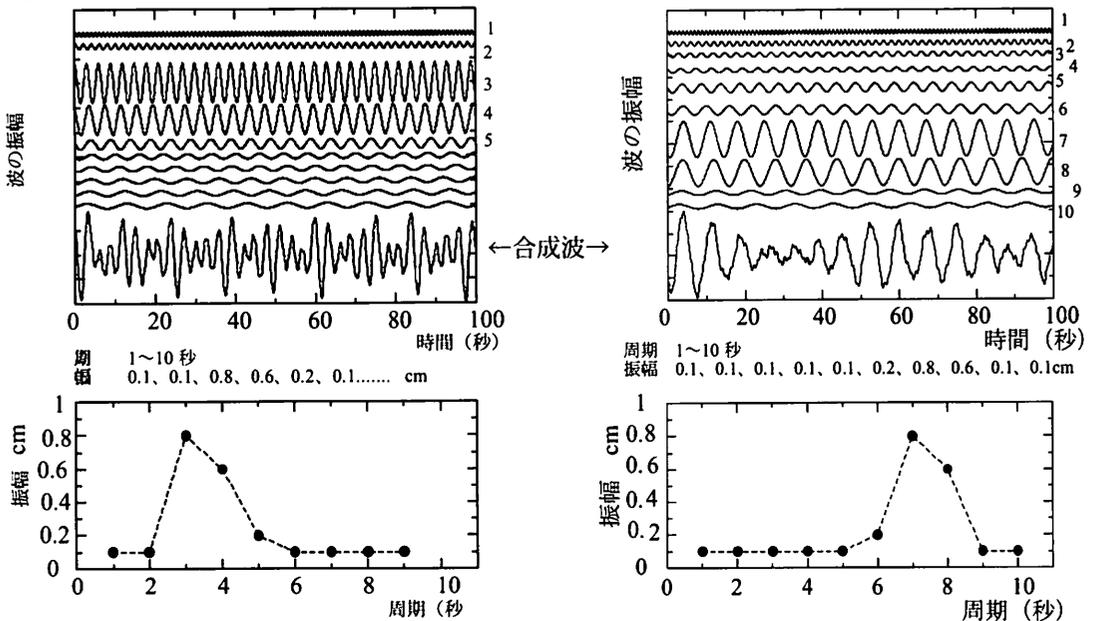


図6 周期と振幅の違う波の重ね合わせ

1) 周期の違う波

図6の上側の左右には、上から順に、周期が1、2、3... 10秒の波が描かれています。1は小刻みに揺れる（短周期の）波で、10はゆっくりと揺れる（長周期の）波です。これらを成分と呼びます。

各成分（波）の上下の幅は振幅です。左上の図では周期3秒と4秒の波の振幅が大きく、右上の図では周期7秒と8秒の波の振幅が大きくなっています。周期と振幅の関係を図にすると図6下側の図のようになります。

2) 波の重ね合わせ

図6上側左の図および右の図で、周期1～10秒の波を重ね合わせると、一番下の図のような波になります。左右の図を比べると、成分の振幅が違くと重ね合わせの結果（合成波）が違っているのが分かります。左の図では短周期成分が多く（卓越し）、右では長周期成分が卓越しています。

このことを逆に考えると、図の一番下にある波（合成波）は、夫々周期1～10秒の成分の波に分解できることとなります。

3) 地震波

実際に観測される地震波は複雑な形をしています。色々な周期と振幅を持った成分に分解できます。

3. 速度応答スペクトルのモデル

図6に示した合成波を地震波のモデルとし、このモデル波による機器の揺れの様子とそれに対応する速度応答スペクトルを模式的に示すと図7のようになります。

1) 図7Aの左右の波は、夫々図7Bのような成分に分解できます。

2) 図7Bの左側では周期3秒の波の振幅が最も大きく、

図7Bの右側では、周期7秒の波の振幅が一番大きくなっています。

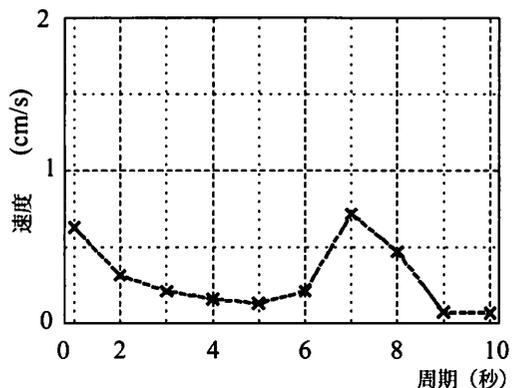
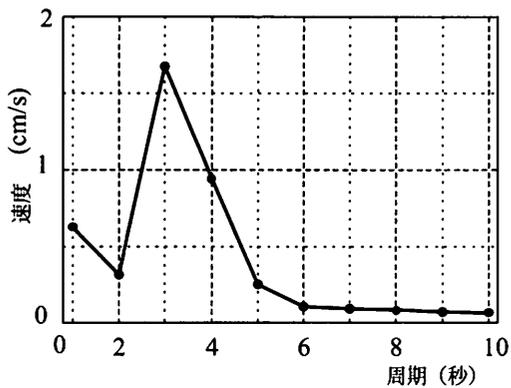
3) 図7Cの振動子の固有周期は左から順に1、2、3... 秒と仮定します。

図7Bの左側では周期3秒の波の振幅が最も大きいので、振動子の共鳴が最も激しく、図7Cの左から3番目の振動子の揺れが最も速くなります。

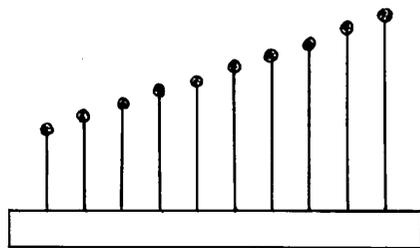
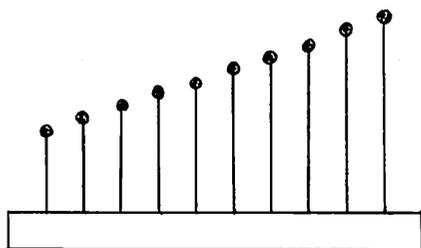
従って、図7Dの図では周期3秒のところにピークが現われます。各振動子の揺れの速さを夫々の固有周期のところにプロットすると図7Dの左側のグラフができます。

これを速度応答スペクトルと言います。

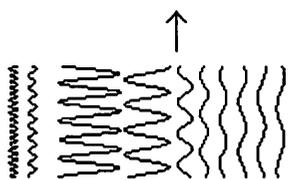
4) 図7Bの右側では、周期7秒の波の振幅が一番大きく、速度応答スペクトルは破線のようになります。



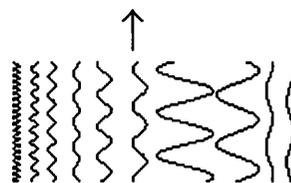
D 速度応答スペクトル



C 機器のモデル



B 地震波の成分



A 地震波



図7 速度応答スペクトルと地震波の関係を表す模式図

4. 普通の見盛りのグラフと対数見盛りのグラフ

速度のスペクトルを普通の見盛りで描いた図が図8の左側です。これを縦軸、横軸ともに対数見盛りで描いた図が右側です。

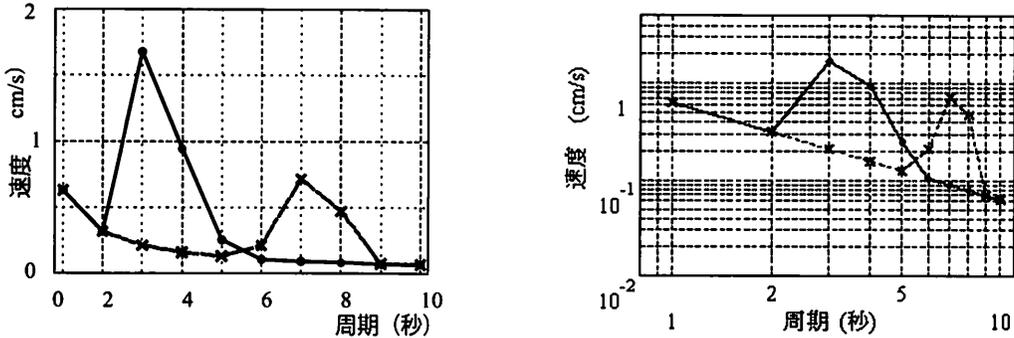


図8 普通の見盛りで描いた図(左)と両軸とも対数見盛りで描いた図(右)

対数見盛りでは、数値が等間隔に並ばないのでグラフの値を読むのがややこしくなります。なお、縦軸の数値 10^{-1} 、 10^{-2} は夫々 0.1、0.01 を表します。原発耐震性の議論のときには、対数見盛りの図がよく出てきます。

5 加速度応答スペクトル

耐震性の議論では、図8のような横軸が周期で縦軸が応答速度のグラフ(周期対応答速度のグラフ)とともに、横軸が周期で縦軸が応答加速度のグラフ(周期対応答加速度のグラフ)も出てきます。

応答加速度と応答速度の間には

$$\text{応答加速度} = 2 \times 3.14 \times \text{応答速度} \div \text{周期}$$

の関係があります。この式を使って、図8(周期対応答速度のグラフ)から図9(周期対応答加速度のグラフ)を描くことができます。

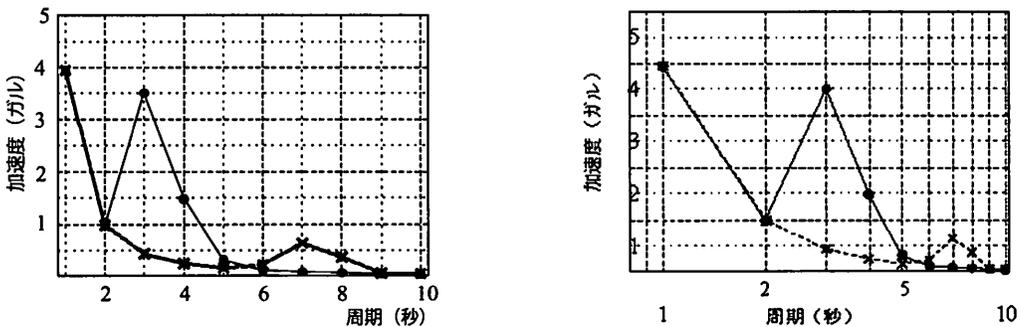


図9 加速度応答スペクトル 加速度の単位はガル (cm / s^2)
 左側の図の横軸は通常の見盛り 右側の図の横軸は対数見盛り

6 速度応答スペクトルと加速度応答スペクトルの観測例

例1 能登半島地震の余震、M5.3、震央距離 28km、
KiK-net 志賀地下観測点のデータ (図 10)

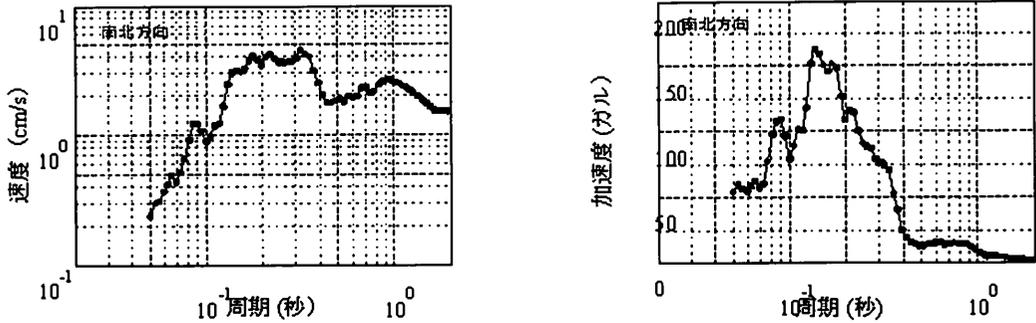


図 10 南北方向の速度応答スペクトル (左) と加速度応答スペクトル (右)

図 8 のモデルのスペクトルでは数値を分かりやすくするために、周期の範囲が 1 秒から 10 秒の図になっています。一方、実際に観測された速度応答スペクトルの周期範囲は広いのですが、図 10 では 0.05 秒から 2 秒の範囲を表しています。原発耐震性の議論では一般に周期の範囲が 0.02 秒から 2 秒の図が使われます。

例2 新潟県中越地震の余震、M6.5、震央距離 22km、
KiK-net 川西地下観測点のデータ (図 11)

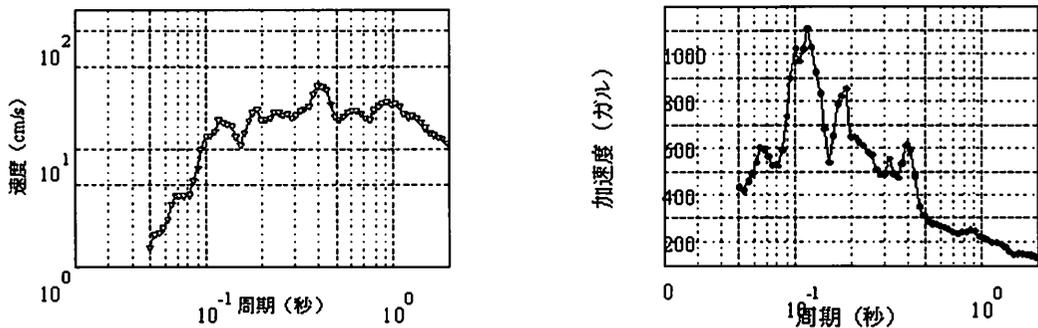


図 11 東西方向の速度応答スペクトル (左) と加速度応答スペクトル (右)

7 大崎スペクトル

これまでの原発耐震設計では、想定地震による速度応答スペクトルを大崎の方法によって予想しています。これは地震規模 (マグニチュード、M) と震央距離が仮定されれば簡単に計算されます。

図 12 の左側に、一例として M6.5、震央距離 22km の場合の速度応答スペクトル（大崎スペクトル）が描かれています。右側の図は、左側の速度応答スペクトルに対応する加速度応答スペクトルです。左側の図である周期の応答速度を読み取り、上で述べた関係式を使って応答加速度を計算しプロットして行くと右側の図が描けます。

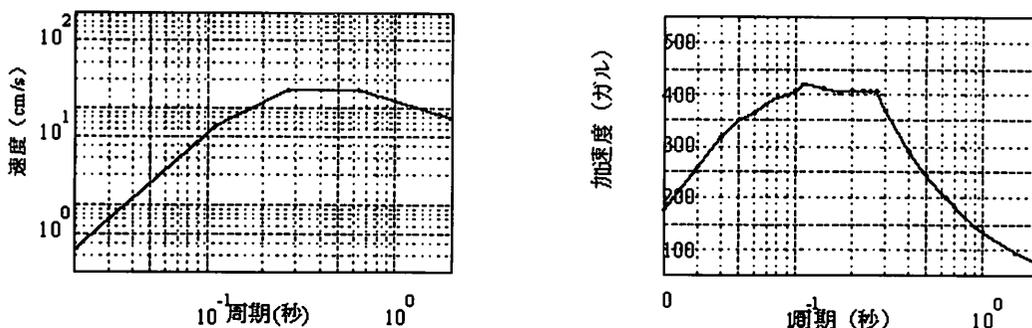


図 12 M6.5、震央距離 22km の場合の大崎スペクトル（左：応答速度、右：応答加速度）

8 観測スペクトルと大崎スペクトルの比較例

図 13 は実測のスペクトルと大崎スペクトルを比較したものです。実測のデータは図 11 に示したものです。

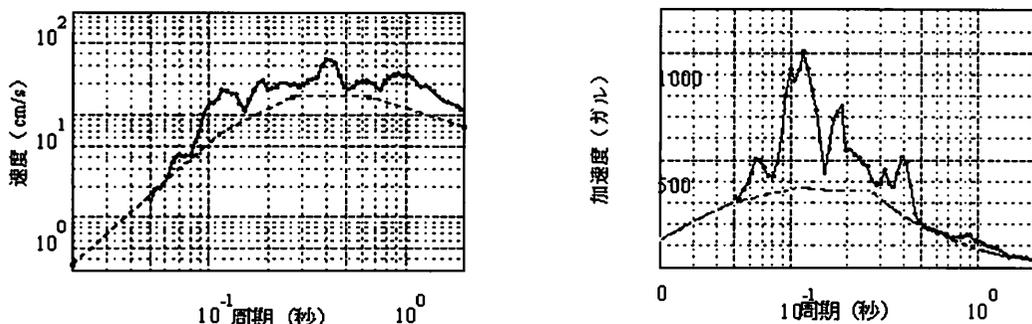


図 13 KiK-net 川西地下観測点の観測スペクトル（実線：中越地震余震、M6.5、震央距離 22km、東西方向）と大崎スペクトル（破線）

左側の図は速度対周期のグラフで、両軸とも対数目盛りになっています。破線が大崎スペクトルで、実線が観測されたスペクトルです。周期が 0.07 秒よりも長い領域では予想（大崎スペクトル）より実測が大きくなっています。

図 13 の左側の図では、予想値と実測値の差は一見大きくないように見えますが、次の図 14 に示すように、図 13 の縦軸を通常の日盛りで表すと、この差が大きいことがよく分かります。例えば周期 0.12 秒付近では実測値は予想値の約 3 倍になっています。周期約 0.3 秒では 2 倍強です。

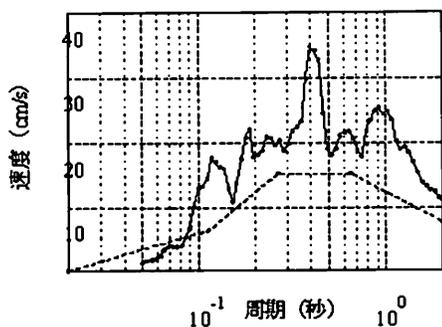


図 14 縦軸を通常目盛りで表した観測スペクトル（実線）と大崎スペクトル（破線）
データは図 13 と同じ

図 13 の右側の図は加速度の予想値と実測値を比較した図です。この場合も縦軸が通常目盛りになっているので、予想値と実測値の差が明瞭です。周期が約 0.1 秒～0.3 秒の間では、予想加速度は約 350 ガルですが、観測された加速度は周期によっては約 1000 ガルに達しています。

図 13 は実測値と予想値（大崎スペクトル）の比較の一例ですが、実測が予想を大幅に越える例は決して少なくありません。