

地震動アレー観測記録への 回転スペクトル解析法の適用性について

千葉 利晃*, 木村 純三**

ABSTRACT

Rotary spectral analysis is carried out using earthquake motions recorded by a dense seismometer array. It is shown that the rotary spectral analysis is useful for the determination of the setting error of seismometer. This study also demonstrated that the rotary spectral analysis is available for the determination of the spatial variation of seismic motions.

Keywords: rotary spectrum, earthquake acceleration, array observation

1. まえがき

大規模構造物や地中構造物の地震時の安全性の評価を行うには、入力地震動の空間変動特性の把握が重要となる。このため地震動の観測に関しても、従来のような地表の1地点における観測から得られた地震波では地震動の空間変動特性を把握することができないため、地表や地中の広がりをもった複数地点に地震計を配置し、地震動を同時に記録する地震動のアレー観測が、各地で行われている。

近年建設されるようになった大規模建築や瀬戸大橋のような長大橋、さらに沈埋トンネルや埋設管などの地中構造物では、構造物の各部に入力する地震動に波形の違いや位相差を考慮する必要も生ずるようになってきた。また石油タンクや超高層ビルなどの長周期構造物に対しては、地震動のやや長周期成分が問題となり、表面波などの特性の解明が必要となる。このような背景から、地震動を構成する各種の実体波・表面波の波群の識別や分離、あるいは、これらの波の伝播特性や空間変動特性を調べるために、多点同時観測すなわちアレー観測が行われている。

典型的なアレー観測は地表面におかれた平面アレー観測であり、これは主として水平方向への波動伝播や地形・地盤による地震動の違いなどを調べるために設置される。東京大学生産技術研究所では、1982年から千葉実験所構内において、地震時の地盤ひずみの観測を主たる目的として、3次元高密度アレー観測を実施している。

本研究は、この東京大学生産技術研究所の千葉実験所構内において行われている3次元高密度アレー観測により観測された地震動データを用いて、回転スペクトル解析を行うことにより、地震動の伝播特性や空間変動特性などを把握することができるか否かを検討したものである。

回転スペクトルは、地震動の軌跡を楕円の形状と楕円の長軸の傾きで表現するものであるが、従来2次元平面に表示していたため、地震動の軌跡をとらえにくい面があった¹⁾。しかしながら、この回転スペクトルは各周波数成分の軌跡が時間とともにどのように変化していくかを詳細に検討することができるといった長所がある。したがって、本研究では回転スペクトルを3次元的に表示し、より解釈し易い形で表現することを試みるとともに、上述の地震動の空間変動特性の把握を試みたものである。

* 土木工学科

** 構造技研(株)、前福山大学大学院生(土木工学専攻)

2. 回転スペクトル

震源の方向あるいは地震動の特性を調べるために、その軌跡の振る舞いを調べることは広く行われている。この軌跡は一般に2成分の記録をもとにして、その軌跡を直交2軸の平面上にプロットして表す。しかしながら、時刻の最初から最後まで軌跡を1つの図上に描くと、軌跡の時間的変化はとらえにくくなる。そこで、地震動のある時間区間に分けてその区間内での軌跡を描くのが普通である。また、各周波数成分波の軌跡を求めるには、マルチフィルター法等を用いて各周波数成分波に分解し、その軌跡を求めるのが一般的であろう²⁾⁻⁴⁾。しかしながら、この方法は軌跡図が多くなりすぎるため、各周波数成分波の軌跡が時間とともにどのように変化するかを検討するには不適當である。このように上記のような軌跡の表現法は、運動の形態を視察できるという大きな特徴はあるが、利用しにくい点もまた多い。

森田・浜口⁵⁾はこの軌跡の情報をGonella⁶⁾の提案した回転スペクトルを利用して表現し、P波およびS波の自動検出を試みている。この回転スペクトルは2成分の時系列を複素平面で表現し、その位相差を楕円の形状で表現したものである。

以下、ごく簡単に回転スペクトルを説明する。詳細については参考文献 [1,6,7] を参照して頂きたい。回転スペクトルは楕円の形状を示す $C_R(\omega, j)$ および楕円の長軸方向を示す角度 $\phi(\omega, j)$ の2つのパラメータにより表現されている。この2つの回転スペクトルのパラメータ $C_R(\omega, j)$ および $\phi(\omega, j)$ は非定常相互スペクトル $S_{pq}(\omega, j)$ を用いて次のように表せる¹⁾。

$$C_{R \cdot pq}(\omega, j) = - \frac{2 \operatorname{Im} S_{pq}(\omega, j)}{S_{pp}(\omega, j) + S_{qq}(\omega, j)} \quad (1)$$

$$2 \phi_{pq}(\omega, j) = \tan^{-1} \frac{2 \operatorname{Re} S_{pq}(\omega, j)}{S_{pp}(\omega, j) - S_{qq}(\omega, j)} \quad (2)$$

非定常相互スペクトル $S_{pq}(\omega, j)$ はどのような方法を用いて計算してもよいが、本研究においては参考文献 [8, 9] を参照し、非定常時系列モデルの係数を用いて求めている。式(1)および式(2)は軌跡の情報すなわち楕円の形状と長軸の傾きの2つの情報が、非定常相互スペクトルを介して非定常時系列モデルの係数より表現されることを示している。

$C_R(\omega, j)$ は楕円の形状を示すパラメータであるが、 $C_R(\omega, j)$ が正のときには反時計方向の回転を示し、負の場合には時計方向の回転をあらわす。また、 $C_R(\omega, j)$ は $-1 \leq C_R(\omega, j) \leq 1$ の値をとり $C_R(\omega, j) = \pm 1.0$ で真円となり $C_R(\omega, j) = 0$ のときには直線となる。 $\phi(\omega, j)$ は楕円の長軸の傾きを示すもので $0 \sim \pi$ の値をとる。これらの動きを模式的に示したものが図-1である。

上記2式より、 $C_R(\omega, j)$ および $\phi(\omega, j)$ を角周波数 ω および時刻 j を座標軸として、今迄に示してきたスペクトルと同様に3次元表示すれば、各周波数成分波の軌跡が時間とともにどのように変化して行くかが読みとれる。したがって、この2つのパラメータ $C_R(\omega, j)$ および $\phi(\omega, j)$ は地震波動の特性を検討していく上で大きな利用価値があろう。

3. 数値解析例および考察

3.1 解析データ¹⁰⁾

今回解析に使用した地震動記録は東京大学生産技術研究所の千葉実験所構内におけるアレー観測記録であ

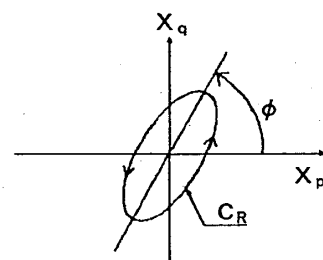
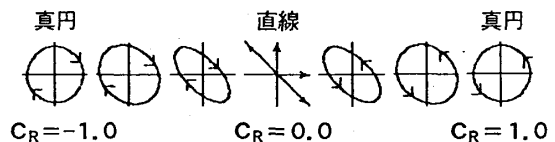


図-1 $C_R(\omega, j)$ および $\phi(\omega, j)$ の模式図

る。地震計が設置されているボーリング孔の一部を図-2に、それらのボーリング孔における地震計の埋設深度を表-1に示す。またボーリング孔C0の周りには、非常に高密度に地震計が設置されている。C1からC4のボーリング孔はC0からそれぞれ5mの距離にあり、P1からP4の各ボーリング孔はC0から15mの距離に位置している。各地点で水平2成分、垂直1成分の合計3成分の地震動を観測記録している。

千葉実験所は東経140度6分37秒、北緯35度37分17秒に位置している。その地盤構造は、比較的単純ではば成層構造を成している。地表から深さ5mまでは、N値10以下の関東ローム層に被われており、このローム層の下には、厚さ2-4mでN値10以下の砂質粘土が存在する。さらにその下は、N値20-30の洪積砂層が所々にN値の小さな粘土層を挟んで続いている。また千葉アレー全体としての地下水位は5m以深となっているが、C0地点では約13m以深となっている。

今回、解析に使用した加速度記録は1987年12月17日に発生した千葉県東方沖地震の際に観測された加速度記録である。解析に使用した観測点は図-2に示したC0、P1、P2、P3、P4（図中の●で示した地点）地点の地表面(-1m)、およびC0地点においては深さ方向5、10、20、40mの地点である。この地震の諸元を表-2に示し、GL-1mおよびGL-10mにおける加速度波形を参考までに図-3および図-4に示しておく。ただし、全継続時間の内、0~24秒間のみを示したものであり、実際の解析には、1~21秒のデータ(時間刻み $\Delta t=0.02$ 秒)を使用して以降の解析を行っている。

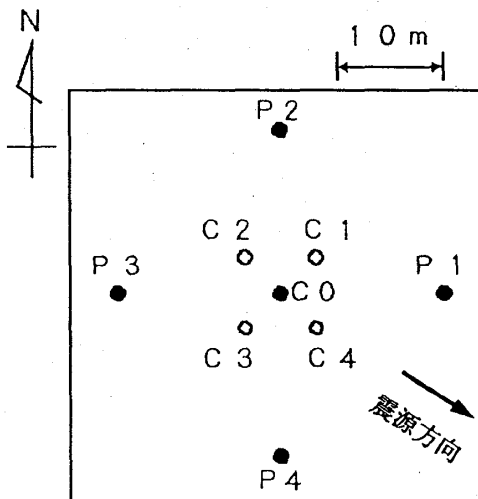


図-2 C0を中心としたアレー観測網

表-1 地震計(○印)の埋設深さ(一部)
(網掛けされた地震計の記録を使用)

Depth (m)	Borehole								
	C0	C1	C2	C3	C4	P1	P2	P3	P4
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	○	○	○	○	○				
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○
20	○					○	○	○	○
40	○								

表-2 千葉県東方沖地震

地震発生年月日	1987年12月17日
地震発生時刻	11時08分16秒
観測時刻	11時08分27秒
震央位置	北緯 35° 22.3' 東経 140° 29.8'
震源深さ	5.8 km
震央距離	4.5 km
最大マグニチュード	M 6.7
最大加速度	EW 213.6 (cm/s ²)
	NS 327.1 (cm/s ²)
	UD 124.8 (cm/s ²)

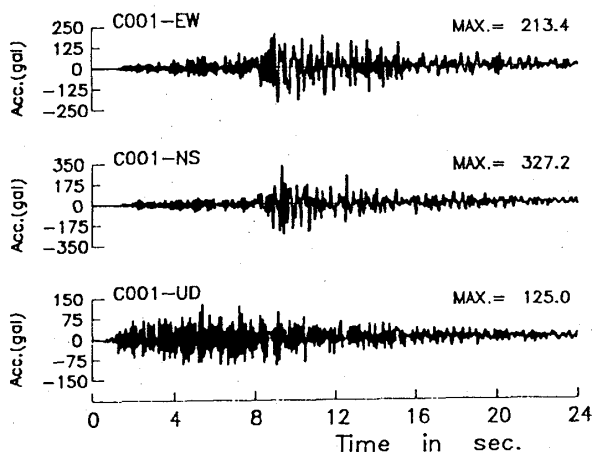


図-3 C0地点, GL-1mにおける加速度波形

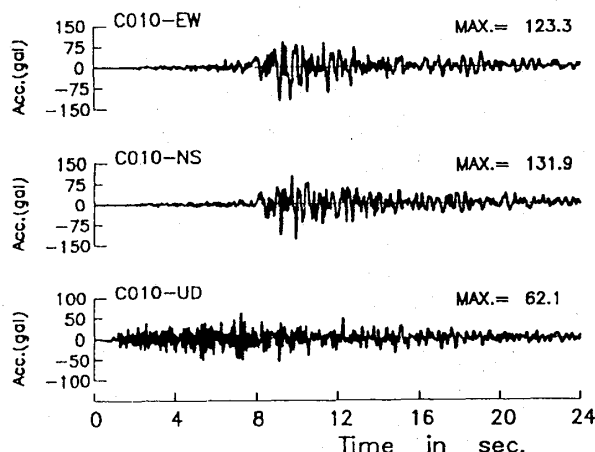


図-4 C0地点, GL-10mにおける加速度波形

3.2 回転スペクトルの表示方法について

参考文献 [1] では回転スペクトルの C_R および ϕ を10等分し、これを数字と文字を用いて表現している。したがって、回転スペクトルから情報を引き出すことは困難であった。ここでは、この回転スペクトルを3次元表示することにより、より理解し易い形で表現することを試みる。解析に用いた加速度波形は水平2成分記録(EW成分、NS成分、C0地点、地下1m)を用いた。

図-5は C_R を表すが、横軸は時間 t (1~21秒) および周波数 f (0~10Hz) であり、縦軸は C_R (-1~+1) である。また、-0.1~0.1までの C_R の値を0.0として表している。このように図示すると、直線に近い運動 ($C_R=0.0$) を示す所ではフラットになり、直線運動を判断し易くなるとともに、 $C_R > 0$ および $C_R < 0$ が判別し易くなるため、時計回りおよび反時計回りの運動をする部分が把握し易くなる。あるいは、図-6および図-7に示すように-1~0までの C_R (図-6) および0~1までの C_R (図-7) のように、 C_R を2つに分けて表示すれば、より把握し易くなる。

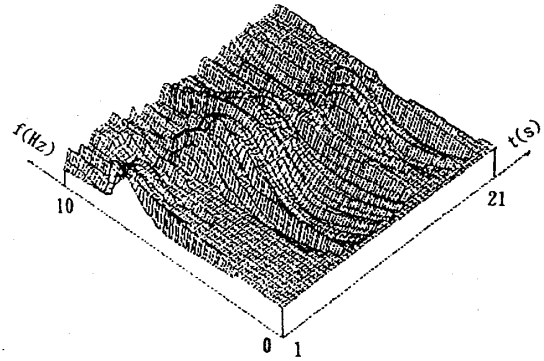


図-5 $C_R(\omega, j)$; $-1 \leq C_R \leq 1$

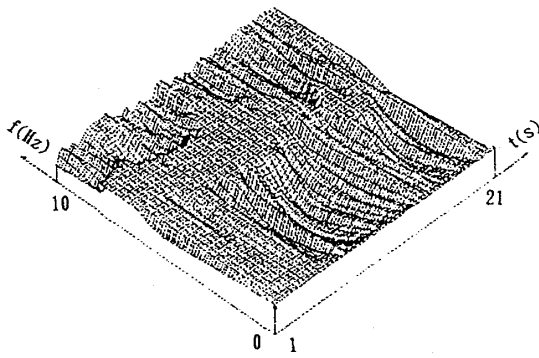


図-6 $C_R(\omega, j)$; $-1 \leq C_R \leq 0$

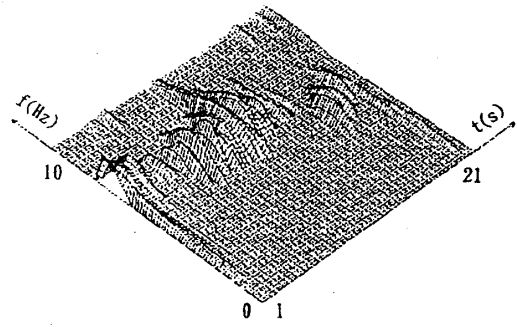


図-7 $C_R(\omega, j)$; $0 \leq C_R \leq 1$

記録波形を震源に平行な軸と垂直な軸に座標変換し、この座標変換後の波形を解析すれば、地震波の動きがより明瞭になる。表-2に示すように、震源の位置は東経 $140^{\circ} 29.8'$ 、北緯 $35^{\circ} 22.3'$ であり、千葉実験所は東経 $140^{\circ} 6' 37''$ 、北緯 $35^{\circ} 37' 17''$ である。したがって、千葉県東方沖地震はS(南)軸より反時計方向に 57° 回転させれば、震源と水平および垂直な直交2軸で、この地震動を表すことができる。このようにし

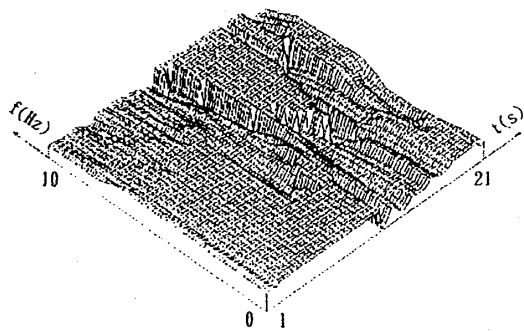


図-8 $\phi(\omega, j)$; $0 \leq \phi \leq \pi/2$

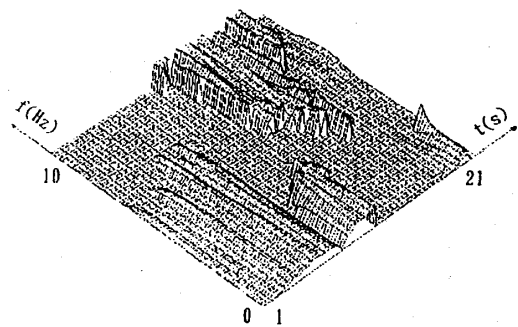


図-9 $\phi(\omega, j)$; $\pi/2 \leq \phi \leq \pi$

て求めた地震加速度記録の回転スペクトル(ϕ)を図-8および図-9に示す。横軸は図-5と同じであり縦軸が楕円の傾き ϕ を表すが、図-8は ϕ の値が $0 \sim \pi/2$ までの図であり、図-9は ϕ の値が $\pi/2 \sim \pi$ までの図である。

これらの図より、約8秒までのp波の部分では7Hzまでの成分波の ϕ は約 $\pi/2$ (震源方向)であり、震源と観測点を結ぶ軸に平行な振動を表していることが分かる。これは粗密波であるp波の動きをよく表現しているといえよう。このように $0 \sim \pi/2$ および $\pi/2 \sim \pi$ の2つに分けて ϕ を表現すれば、 ϕ の変化もよりはっきりしたものになってくる。座標変換を行うと震源方向に平行な動き(P波の縦波)と震源方向に垂直な動き(S波のSH波)などが、より判読し易くなるのが分かる。

より正確に各成分波の軌跡を表現するには、図-10に示すように周波数および時間を区切って図示すれば良い。図-10は震源方向に地震動記録を回転させた加速度記録の0.1~1.5Hz、1~16秒の間の ϕ を表したものである。このようにすればより詳細な軌跡を把握することができよう。

楕円の長軸の傾きを表す ϕ は、 $0 \sim \pi$ の間の数値であり、 0 と π は同じ傾きを表す。この点が ϕ の情報を読みとり難くしている点である。この点を改善するには次のような方法が考えられよう。基準軸が震源方向を向くように座標変換した場合には、主に震源方向に水平かあるいは垂直方向の運動かが問題になる。この

点を把握し易くする1つの方法は、 ϕ の値を $\pi/2$ で折り返す、すなわち、 $\pi/2$ より大きな ϕ は π よりこの ϕ を差し引いた値とすることである。このようにすれば、 ϕ は $0 \sim \pi/2$ の範囲の値を取り、0の時基準軸に水平な動きを示し、 $\pi/2$ で垂直な動きをするので、より地震動の動きを把握し易くなる。ただし、基準軸に水平、垂直のみが強調され、途中の傾きがわからなくなる欠点がある。

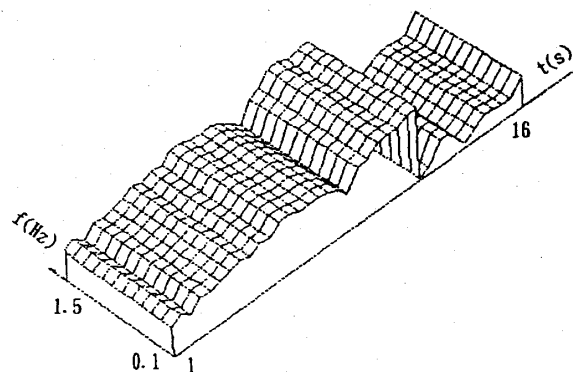


図-10 $\phi(\omega, j); 0 \leq \phi \leq \pi$
0.1~1.5Hz, 1~16秒

3.3 回転スペクトルによる地震計設置誤差の検討

地震計が所定の方角(EW、NS、UD方向)に正しく設置されているか否かは、地震動記録の信頼性上、非常に重要である。特に本研究のように、地震動の軌跡を論ずる場合、その解析精度は地震計の設置方位の正確さに依存するので、その重要性はいうまでもない。

千葉アレー観測においては、地表面(-1m)に設置されている地震計の内5個については再設置を行って設置方位の修正を行っている。その他の地震計(GL-5、-10、-20、-40m)については、再設置が困難なため、次のような2つの方法で検討し、記録波形の補正を行っている¹¹⁾。

- ① 時間領域で2組の波形間の相互相関係数を最大にする。ただし、2地点間の波形の相関が高くなるような時間帯域ならびに振動数帯域を選んで、フィルター波に対して推定を行っている。
- ② 振動数領域で2組の波形間のコヒーレンス関数を最大化する。この方法においても時間帯域を選んで推定を行っている。

以上、①、②による推定の基準となる波形にはC0地点(GL-1m)の波形を用いている。この結果、最大 55.6° という大きな回転角の補正を行っている地震計もある。このように、データベース内の地震動波形は、アレー観測網で観測されたものを直接保存しているのではなく、各地震計ごとに生じている設置誤差の補正を行ったのちに保存されている。

ところで、非定常回転スペクトルは、地震動の軌跡を楕円で近似し、その形状および回転方向と楕円の長軸の方向を表すものである。したがって、地震計の設置誤差を検討するにはこの回転スペクトル解析は非常に都合の良い方法と思われる。したがって、ここではC0地点に埋設されている5つの地震計(GL-1、-5、-10、-20、-40m)の記録波形の回転スペクトルを求め、設置方位の補正が正しく行われているか否かの検討を行うことにする。ただし今回の解析は、正確な方位補正を行うことを目的としたものではなく、方位補正に回転スペクトルが利用できるか否かの検討を行うことを目的としているため、地震計の鉛直方向誤差については検討を行わず、水平方向のみ検討することにする。したがって、水平2成分による回転スペクトルにより求められた、楕円の形状と回転方向を示すパラメーター C_R および楕円の長軸の傾きを表す ϕ の内、特に ϕ の動きを調べることにより、その補正が正しく行えているかどうかを検討する。

以下、山崎と同じく¹¹⁾、1~16秒の記録を用い、また $f = 0.1 \sim 1.5\text{Hz}$ の周波数成分波を用いてより詳細に地震計の設置誤差の検討を行うことにする。基準地点は設置方位が正しいと認められるC0(GL -1m)地点とする。すなわち、C0(GL -1m)の波形と最も近似した動きをするように地震計の方位(地震記録の軸)を決めている。したがって、C0(GL -1m)とほぼ同一の動きを他の地点の記録が示せば、方位の補正が正確に行われていることになる。

図-11および図-12に地下1mと10mでの記録波形(EW, NS)の ϕ を示す。横軸は時間(1~16秒)および周波数(0.1~1.5Hz)であり、縦軸が ϕ ($0 \sim \pi$)を示している。これらの図を見ると、C0地点(GL -1m)では6秒あたりから急激に角度が0に変わっているものの、角度が0と π は同じ長軸の傾きを表すから、地下10mの ϕ の動きと同じと見なしてよい。したがって、地表面(-1m)および地下5m地点もほぼ同一の ϕ を示しているといえよう。しかしながら、11秒以降は相違が見られる。これは、地震動の主要動部に近いためであろう。図は省略するが、深さ方向1m, 5m, 10m, 20m, 40mの総てにおいて、ほぼ同一の ϕ を示しているため、地震計の補正は正しく行っているものと思われる。

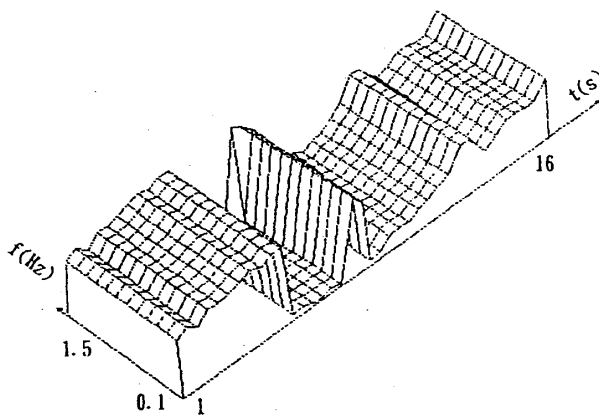


図-11 $\phi(\omega, j)$; GL -1m, $0 \leq \phi \leq \pi$
0.1~1.5Hz, 1~16秒

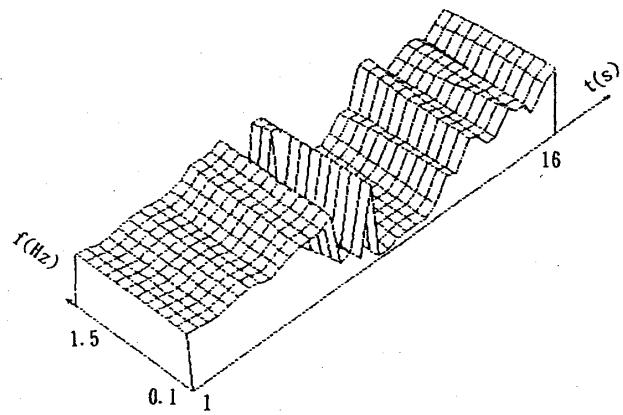


図-12 $\phi(\omega, j)$; GL -10m, $0 \leq \phi \leq \pi$
0.1~1.5Hz, 1~16秒

このように、回転スペクトル(特に楕円の長軸の傾き ϕ)を利用して、簡単に最適な補正角が見い出せようである。ただし、最適な補正角を見出すには、C0(GL -1m)地点の基準となる波形の成分波(低周波成分が適当)の ϕ の値と、できるだけ似た角度 ϕ を持つように補正すべき地点の波形を回転させることによって決める必要がある。また地震計設置後に、正確な方位に設置できているか否かの判断を行う際、回転スペクトルを利用すれば、ほぼ正確に良否の判断をすることができる。

このように、回転スペクトルは地震動の軌跡を周波数、時間を2軸にし、詳細に見ることができただけでなく、視覚的にも判断し易いため、地震計の設置誤差の推定にも応用可能である。

3.4 回転スペクトルによる地震動の空間変動特性と震源方向の検討

回転スペクトルは地震動の空間変動特性の把握に威力を発揮しよう。本研究においては、平面的な変動特性のみについて検討する。なお、用いた加速度記録は図-2および表-1に示すGL -1mの5地点(C0, P1, P2, P3, P4)における記録である。

楕円の長軸の傾きを表す $\phi(\omega, j)$ の図は省略するが、周波数帯域が1~2Hzおよび周波数帯域5.0~6.5Hzで、時間が1~21秒の間の $\phi(\omega, j)$ より、3秒付近の動きを示したものがそれぞれ図-13および図-14である。1~2Hzの周波数成分波の動きは震源方向に平行な動きを示すとともに、各地点ともほぼ同一の振動を示している。3秒付近は地震の初動部(P波)であり、P波が縦波であることと良く一致している。また、 $\phi(\omega, j)$ の図(省略)からは、S波到着後は、震源方向に垂直な動きをすることが多くなり、横波(SH波)が到着したことも読み取れる。一方、周波数帯域が5.0~6.5Hzの振動数領域になると、図-14に示すように、観測点によって空間的に大きくばらつくようになる。

今回は周波数の帯域を限定し、限られた成分波のみについて述べた。また、回転スペクトルの内、楕円の

長軸の傾き ϕ のみを見てきたが、楕円の形状および回転方向を示す C_R をも同時に考察すればより詳細な情報を得ることができよう。このように、回転スペクトルによって地震動の空間的な変動を容易に把握することが可能である。

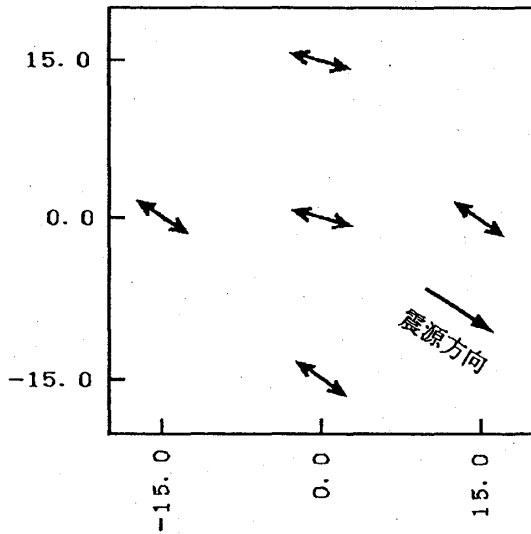


図-13 $\phi(\omega, j)$; GL-1m, $0 \leq \phi \leq \pi$
1~2Hz, 3秒付近

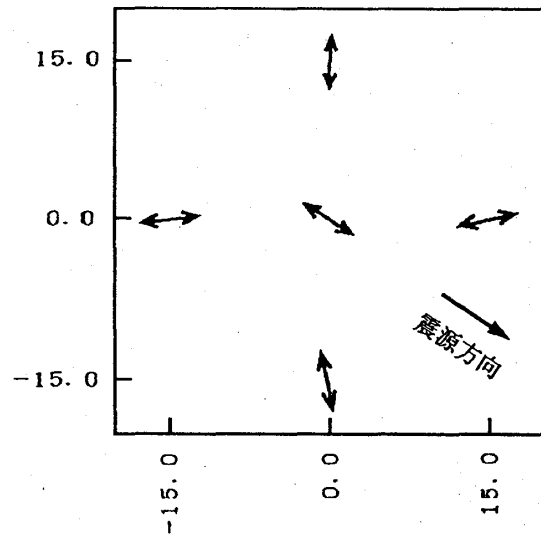


図-14 $\phi(\omega, j)$; GL-1m, $0 \leq \phi \leq \pi$
5.0~6.5Hz, 3秒付近

4. あとがき

千葉県東方沖地震の際に記録された地震動加速度のアレー観測記録を用いて回転スペクトル解析を行った。データベースに保存されているデータはすべて地震計の設置誤差の補正を行ってあるものであるが、回転スペクトルにより求められる楕円の長軸の傾きを示す $\phi(\omega, j)$ により、この補正が正しく行っているかどうかを検証できた。逆に、地震計を設置した際、その地震計が正しく設置されているか否かをこの回転スペクトルより検証できるとともに、もし正しく設置されていない場合には、地震動記録の補正を行う座標軸の回転角を推定できることを示している。

また、回転スペクトルにより各周波数成分波の動きを把握することができるので、広い範囲での地盤の動きが把握できる。長大化した土木構造物の設計時には地震動の3次元的な特性の把握が必要であるが、この地盤の動きの把握に回転スペクトル解析は有効であろう。

今回の解析は回転スペクトルを3次元表示することにより、回転スペクトルをより容易に理解できるようにすることと、アレー観測記録を用いて地震動の空間変動特性の把握ができるか否かの検討を行ったものであり、水平2成分のみを用いて解析を行っている。上下動成分をも用いて垂直面内の地震動の軌跡を追求すれば、参考文献[1]で行っているレイリー波の到着時刻の同定、多重震源の同定なども、より簡単に行えよう。また、加速度記録でなく変位波形を用いれば、広範囲な地盤の変位が把握でき、埋設管などのように地盤ひずみが重要となる構造物の解析にも応用できよう。これら地震動の特性解析は今後研究を行うつもりである。

[謝辞]

貴重なデータを使用させて頂いた東京大学生産技術研究所の片山恒雄教授に深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 千葉利晃 「地震動の非定常回転スペクトル特性」, 土木学会論文集, 第356号/I-3, 1985年4月, pp. 499~506

- 2) 小林啓美, 佐間野隆憲, 山内正教 「地震動の水平面内における方向性について」, 第4回日本地震工学シンポジウム, 1975年11月, pp.217~224
- 3) 金子考吉, 渡辺昇 「地震動軌跡図からみた自然地震と常時微動」, 第16回地震工学研究発表会, 土木学会, 1981年7月, pp.9~12
- 4) 田中典明, 吉田裕, 野村卓史 「地震動の地動軌跡に関する一考察」, 土木学会年次学術講演会概要集, 第1部門, 1980年9月, pp.372~373
- 5) 森田裕一, 浜口博之 「2次元自己回帰過程によるS波初動の自動検測」, 地震, 第34巻, 1981年, pp.223~240
- 6) Gonella, J., "A Rotary-component Method for Analysing Meteorological and Oceanographic Vector Time Series", Deep-Sea Research, Vol.19, 1972年, pp.833~846
- 7) 日野幹雄 「スペクトル解析」, 朝倉書店, 1977年
- 8) Hoshiya, M. and Chiba, T., "Simulation Methods of Multi-dimensional Nonstationary Stochastic Processes by Time Domain Models", 土木学会論文報告集, 第296号, 1980年4月, pp.369~376
- 9) 千葉利晃 「多次元非定常ARMAモデルの同定とスペクトル解析」, 土木学会論文報告集, 第338号, 1983年10月, pp.11~19
- 10) 片山恒雄, 山崎文雄 「生研セミナーテキスト—地震動のアレー観測とデータベース—」, 生産技術研究奨励会, 1990年7月
- 11) 山崎文雄, 鹿林, 片山恒雄 「アレー観測における地震計の設置誤差の評価」, 土木学会論文集, No. 432/I-16, 1991.7, pp.231-240