

I-17 地震波および常時微動波のオービット解析

北大工学部 正員 金子 孝吉

1. まえがき

地震動の三次元的な挙動を知るためには単一成分の地震波の波形解析では不十分で、どうしても三成分を同時に解析する必要がある。それには単独な地震波のスペクトル解析などをよせあつめたものでは間に合わないことがある。そこで三成分の地震波を同時に利用する地震動の軌跡 (Particle Orbits), に着目するようになった^{1), 2)}。しかし、まだその利点を十分に活かした研究が少ないのが現状である。

本報告は地震波の波形解析の手段の一つとして、オービット解析をとりあげ、地震波あるいは常時微動波の持っている性質を立体的に明らかにしながら、基本的な利用方法を示したものである。

2. 地震波のオービット解析

描かれた三成分の地震波 (たとえば NS, EW, UD) の Orbits から、地震動がどのような挙動を示しているかを判断するためには、利用しやすい Orbits 図になるように、原波形を適当に加工しなければならない。

ここでは次のような項目に分けて進めて行くことにする。

1) 三成分地震波記録によるOrbits図の作成, 2) OrbitsのSmoothing, 3) 加速度・速度・変位のOrbits, 4) スペクトル図と卓越波動オービット, 5) 波群のOrbits, 6) Lissajoes 図形と地震波Orbits, 7) 位相変化がOrbits形状に与える影響, であるがこれらのOrbits作図と検討も含めて、ここではオービット解析と呼ぶことにする。使用した地震波は北海道大学理学部にある地震予知観測地域センターの Telemeter System高感度地震計による記録から、次の三種類の速度記録を選んだ (表-1)。

表-1 地震および観測点

地震番号	観測点	地震	M	H km	Δ km
EQ.1	岩内	1981・5・6 えりも沖	3.2	17.0	153
EQ.2	えりも	1978・6・12 宮城県沖	4.2	30.0	375
EQ.3	岩内	1978・6・12 宮城県沖	4.2	30.0	431

1) 三成分地震波記録による Orbits 図

はじめに地震波記録を Digital量に適当な時間間隔 (ここでは0.01秒) でサンプリングし、次に時刻の対応する三成分記録をそれぞれ NS- EW, UD- EW, UD- NS, の直交座標にプロットする。たとえば図-1に示した地震 EQ.1 から作図したOrbitsの一例が図-2である。EQ.1のNS成分の時間軸に示した通り、①, ②, ③の時間間隔、それぞれ5.0, 2.0, 0.5秒間、のOrbitsに対応するものである。①では重なりすぎ、また③のような一波程度では十分に動きをとらえられないこ

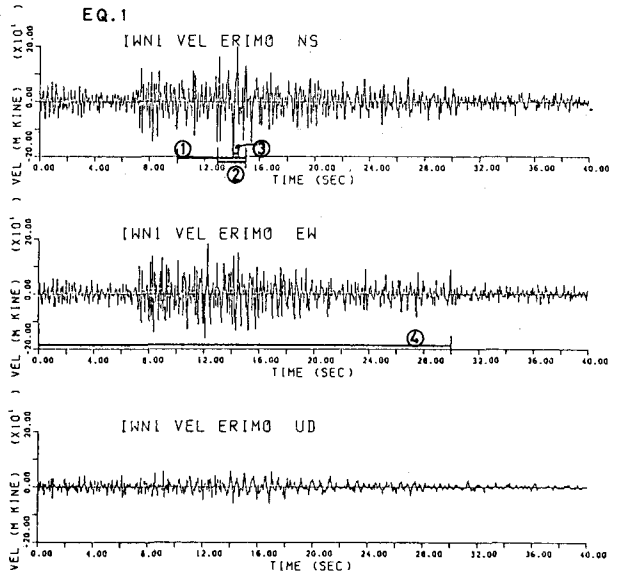


図-1 EQ.1 1981・5・6 えりも沖地震波速度記録

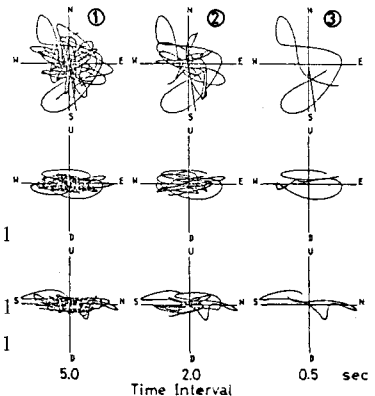


図-2 三成分地震波による Orbits (EQ.1)

とはすぐに判断できる。したがって②の2.0秒ぐらいが適当な時間と思われる。また図-3は図-1のEW成分の時間軸に太線④で代表したように、P波部からS波主要動部を含む水平30秒間のOrbitsを3列に10秒づつ示したものである。振幅は最大値を基準にした相対的なものであり、以後すべてこの Normalize した振幅で表わすことにする。図中には入射の意味で震源方向から矢印をつけた。このようにOrbitsが描かれるわけであるが、これでは振幅の変化と若干の方向性、形状特性を知る程度である。

2) オービットのスムージング

地震波には観測時の計測器やA/D変換時における Noiseが含まれていることが多い。たとえその Noiseが除かれても主体的でない不必要なOrbitsを削除しなければならないことがある。ここでは図-4に示すような補正Filterを周波数領域で用いることによって、Orbitsの Smoothingを行なった。F1とF2、F3とF4の間は余弦波を使用する。なお図-4のような補正Filterがすべてではない。さて図-5は地震EQ.2のNS成分であるが原波形に(

$$R = \frac{\text{周波数補正Filter通過後の最大振幅}}{\text{原波形の最大振幅}}$$

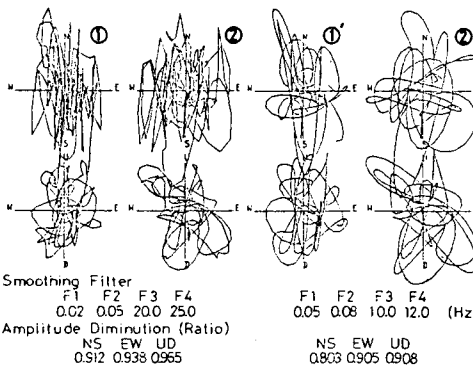


図-6 Smoothing 前後の Orbits

なる振幅比を考え、振幅の減率Rとすれば、図-6の下に示すような値になる。

3) 加速度・速度・変位のオービット

補正Filterは時間領域で荷重移動平均法などの方法で用いることができるが、一般には周波数領域で使用する場合が多い。その周波

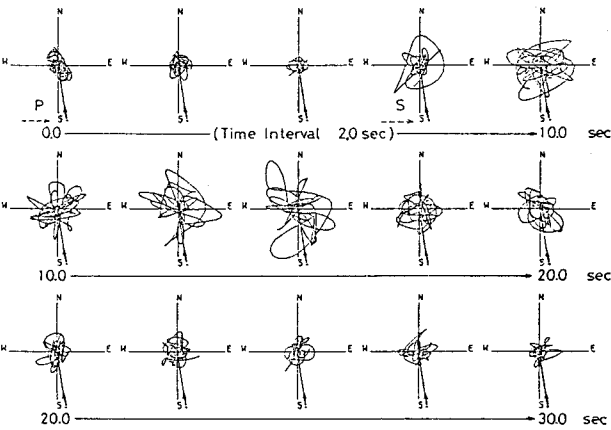


図-3 P,S 主要動部の水平動 Orbits (EQ.1 4)

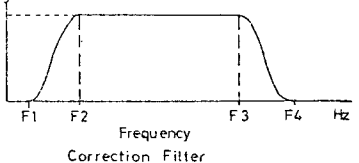


図-4 周波数補正 Filter
(F=0.05,0.08,10.0,12.0Hz)

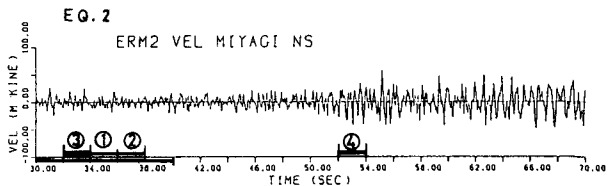


図-5 EQ.2 宮城県沖地震 NS 成分(えりも)

$$(F=0.08,0.10,10.0,12.0\text{ Hz})$$

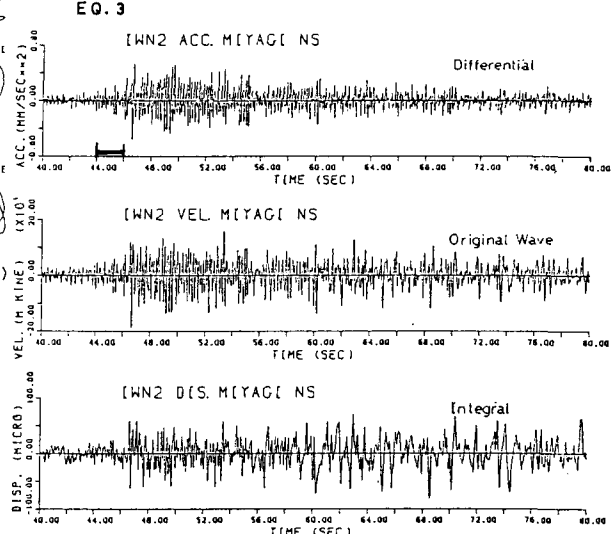


図-7 EQ.3 微分・積分された地震波

数領域で微分あるいは積分を行えば、計算しやすい場合があるからである。そこで速度記録の微分および積分を行ない、その一例を図-7に示した。上から加速度、速度、変位のNS成分である。これは地震計の周波数特性外の低域および高域の補正Filterを使用したものである。図-8は加速度波の時間軸に太線で代表して示した2秒間のOrbitsである。その下にはFilterの周波数と通減率を示してあるが、図の2でみるように卓越する周波数に合わせてFilterをしぼった場合はOrbitsの形状はほとんど一致していることが判る。ただ、対応する時刻が矢印で表わしてあるようにずれており位相差がみられる。

これによって一般に言われているように、主体的な地震動は加速度、速度、変位の量によらず同一の挙動を示すということが説明できた。しかし、これはあくまで理論的に微分、積分を行なった解析の結果言えることで、実測された加速度波、速度波および変位波によるOrbitsから説明したものではない。

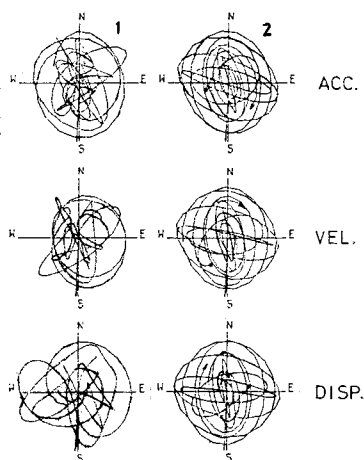


図-8 加速度・速度・変位 Orbits

4) スペクトル図と卓越波動オービット

図-8.2では6.0 Hz近傍の比較的せまい周波数域を残したものであったが、もう少し周波数分析されたOrbitsはどうなっているかを調べてみることにする。図-9は図-5に示した地震EQ.2のP波部の時刻30~40秒の10秒間のPower Spectrumである。図からわかるように最大の卓越周波数は、NS,EW,UDともに異なるものである。すなわちNS-2.9Hz,EW-4.8Hz,UD-0.9Hzである。また全体的な振幅はNS成分が大きいSpectrumになっている。

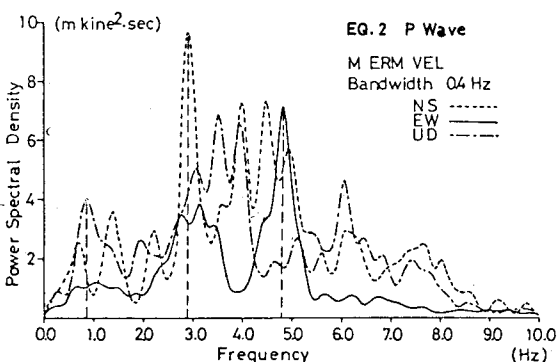


図-9 EQ.2 P波部の Power Spectrum

このSpectrum図を利用すれば、ねらいをつけた周波数域を残して他の周波数を取り除いたFilterを使って、Orbitsを自由に描かすことができよう。

図-10は図-5.③に示した2秒間のOrbitsでFilterをいろいろ変えた場合のものである。1,2,3までは図-9のSpectrumにおいても、ほとんど主要な振幅を有する周波数域であるのに対して、4はEW,5はNS,6はUDが最大になる周波数の近傍を選択したものである。前の3通りは振幅の通減率は0.75以上であるのに比べ4,5,6は大きくて0.4ぐらいである。このことは振幅の通減ではなく、言い換えればRはそれらの周波数域の波動が持っている振幅の配分率に相当するものになろう。加えて言えば4と5のOrbitsを加算すればほぼ3のようなOrbitsになるとも言えよう。

さらに周波数域をSpectrum図のPeakを示すところとせば焦点を合せばどうなるであろうか。

5) 波群のオービット

図-11は図-5の地震EQ.2の時間軸に示してある時刻30秒から40秒までの10秒間のOrbitsであり、Filterの周波数がF=(4.5,4.7,4.9,5.2)の場合のものである。

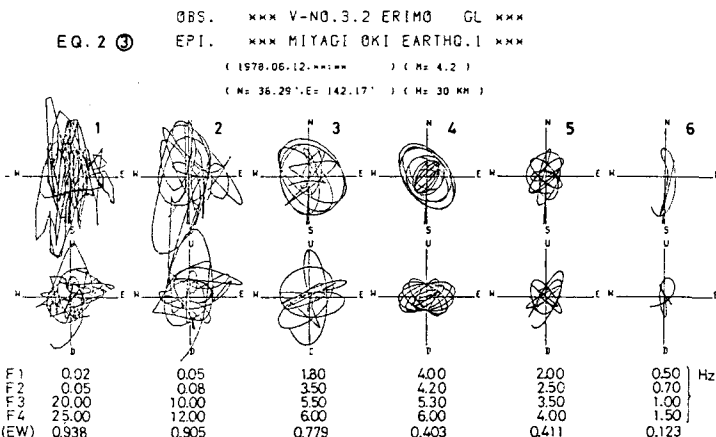


図-10 周波数域の異なる Filter を用いた場合の Orbits

これは図- 9 のSpectrumでみて、EW成分の卓越周波数 4.8Hzに焦点を合わせたものである。

左から右へ 2秒づつ時間が経過しているわけであるが、EW成分の卓越した波群が 1,2番に存在し、3,4では次の優勢な波群が到着するまでの切れ間になっており、Orbitsの形状もきれいな円形から変化していることがわかる。5番目になるとやや次の波群が進んでくるような徴候を示している。

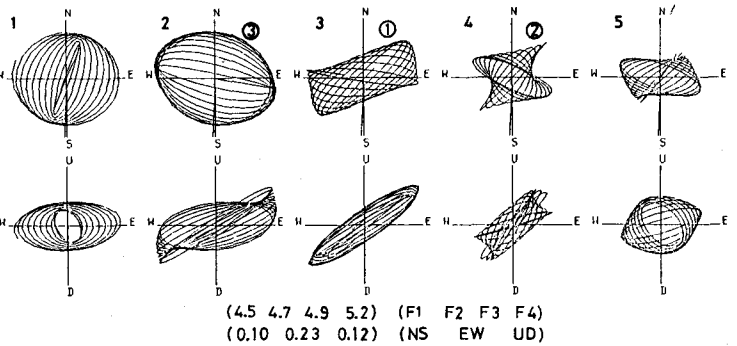


図- 11 波群および波群と波群の切れ間の Orbits (EQ.2)

こうみてくると、Orbitsは地震波動の波群をつきとめるときに威力を発揮する手段でもあるということがわかってきた。

6) リサーチ図形と地震波オービット

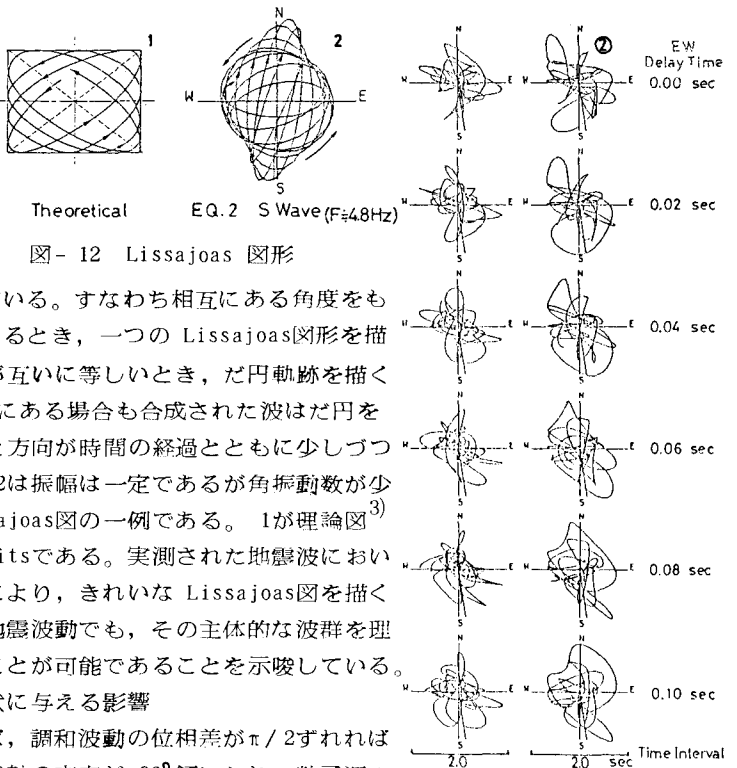


図- 12 Lissajous 図形

図- 11のOrbitsにはそれぞれきれいな Lissajous図形が描かれている。すなわち相互にある角度をもって進行してくる波動が合成されるとき、一つの Lissajous図形を描く¹⁾。調和波動であれば角振動数が互いに等しいとき、だ円軌跡を描く。両振動の角振動数がわずかの差にある場合も合成された波はだ円を描くが、それはだ円の軸の長さや方向が時間の経過とともに少しずつ変化してゆくことになる。図- 12は振幅は一定であるが角振動数が少し異なる波動の合成された Lissajous図の一例である。1が理論図³⁾で 2は地震EQ.2の S波部のOrbitsである。実測された地震波においても卓越した周波数の波の干渉により、きれいな Lissajous図を描く例である。このことはRandomな地震波動でも、その主体的な波群を理論的なOrbits解析と適合させることが可能であることを示唆している。

7) 位相変化がオービット形状に与える影響

Lissajous 図の理論からいえば、調和波動の位相差が $\pi/2$ ずればだ円軌跡でも直線に変わったり、長軸の方向が 90° 傾いたり、粒子運動の方向が逆転したり、という具合に変化するものである。

そこで実地震動のOrbitsでは位相変化がどのように形状変化を生じさせるか調べてみた。

図- 13は地震EQ.1の2秒間とその前の2秒間のOrbitsについて、EW成分のみを図中に示してあるように、0.02秒づつおくらせて、0.1秒おくれになるまでの変化をみたものである。

Delay Time 0.1秒までは周波数でいえば 10Hz 以上であるから、主体的な周波数域外である

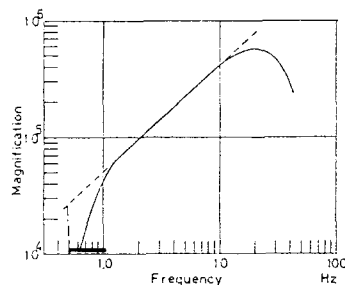


図- 14 速度計の周波数特性

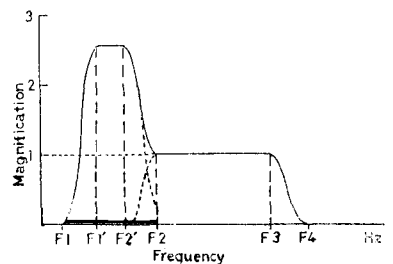


図- 15 計器補正 Filter

図- 13 位相変化が Orbits に与える影響

ため、大まかな形状変化は起きていない。このことはOrbits解析では重要なことで、特に離れた2つの観測点で同一地震の記録を解析するときなどは十分位相差を考慮しなければならないので、この位相変化のOrbitsが利用されるだろう。

3. 観測記録による地震動オービット

地震波動の解析におけるOrbits図の利用とその例を示してきたが、この節では高感度地震計による速度記録から、自然地震と常時微動のOrbits図による比較検討を行ない、基本波動の

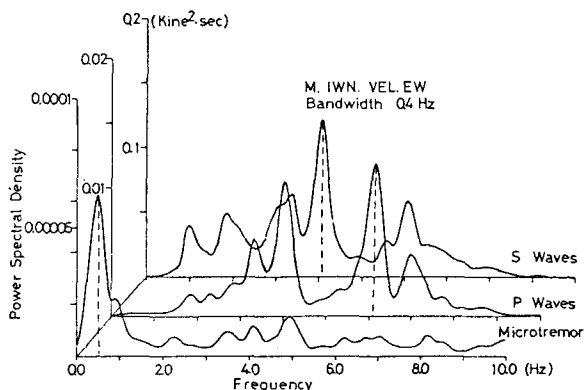


図-16 常時微動波と地震波の Power Spectrum

三次元的な検出を試みた解析例を述べることにする。文献4)にあるように地震予知観測地域センターに収録されている、中小規模の地震は北海道およびその周辺において発生するもので、毎年数百個を越えている。それらの中からできるだけ多くの地震あるいは地震の発生する以前において記録されている常時微動についてOrbits解析を進めているが、ここではOrbits解析法を述べるのが主目的であるからその解析手順の一例を示すにとどめる。地震はEQ.3で、常時微動も同じ日高岩内地点のものを使用した。

1) まず速度計は図-14のような周波数特性を持っており、振幅特性が傾き 45° の直線部では、得られた記録の信頼性があるが、その範囲外の周波数域では記録の補正が必要になる。観測された地震動が0.5Hz程度まで低域で必要な場合がある。そのときは図-15のような補正Filterを用いて、低域周波数を勾配 45° にすれば、幾分必要な領域までふやして計器補正を行なうことができる。

2) 次に地震波あるいは常時微動波のSpectrum解析を行なう。図-16の場合、日高岩内地点の常時微動は0.5Hzに卓越したPeak(地球物理学では脈動といわれているもので計器補正をしすぎたものではない)が存在するが、より高周波域では比較的一定したWhite Noiseに近いSpectrumである。宮城県沖地震は震央距離431kmと工学的なMicrozoningの立場ではかなり遠い地震であるが、 $M=4.2$ と小地震であるため、P波とS波のPeakが6.1Hzと4.1Hzで周波数の高いSpectrumになっている。3) そこでこれら常時

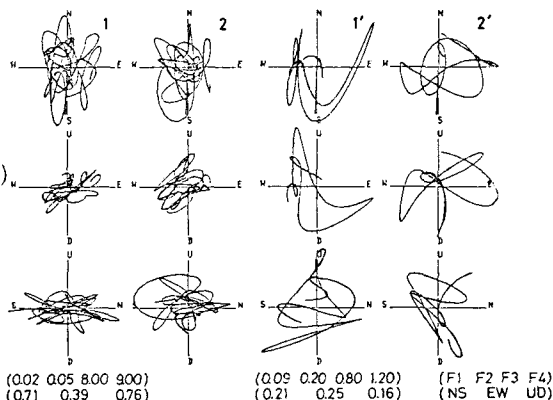


図-17 常時微動の Orbits (岩内地点)

微動、P波、S波のPeak周波数にねらいをつけながら、3者のOrbits図を作成して行く。そのとき前記したような各種のOrbits図での検討を重ねながら進める。4) 図-17、図-18および図-19はそれぞれ常時微動、P波、S波のOrbitsである。図-17は図の下にFilter周波数域と振幅配分率を示したように2通りのFilterを使った例で、数ある中から適当に2秒間のOrbitsを2個選んだものである(1と1', 2と2'が対応する)。どの部分を選んでもNS成分が他の成分よりやや卓越しており、振幅も大きな変動がないものであったが、共通した形状を示すものはみられない。それは卓越するPeakを持つ0.5Hz付近を選んだ1, 2が不規則であることからとも言えよう。

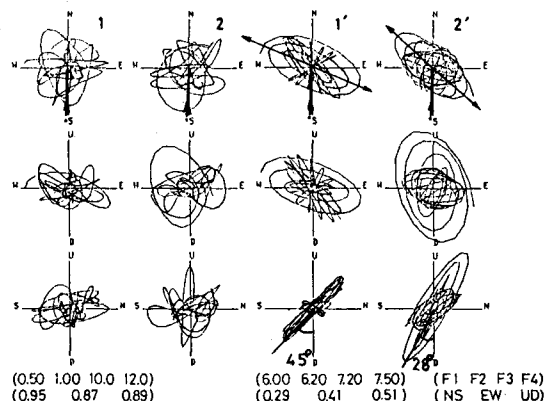


図-18 P, PS 波部の Orbits (EQ.3)

これに対して図-18のP波部では卓越周波数で1', 2'とも規則的なOrbits形状を示すものである。そして地震動に方向性があり、だ円の离心率と長軸の方向を調べることによって、どのような波動であるかが判ってくる。すなわちほぼSからNへ進行してくる波に対して直角に近い方向に優勢な振幅を持ち、鉛直に対し入射角28°~45°できわめて卓越した振幅を有していることに気がつく。これは次にSH波そしてLove波への移行が約束されるものである。

その通り図-19には支配的な水平動に対して上下動が姿を消してしまった。そればかりではなくだ円の振幅減衰はあるものの長軸がP波部では比較的最長い間一定方向を保っているのに対し、S波部では長軸方向が刻々変って行く様子がみられる。これは周波数が変化してゆく分散現象と考えられ、S波から表面波への移行過程があるいは表面波が形成されていることを示すものである。これは図-16のような平面的なSpectrumでは説明できない。5) 図-20はS波部のEW成分の到着時刻Power Spectrum図であるが、4Hz付近でPeakが周波数1m35sの低い方へ移行して行く様子が判る。従来このようなMoving

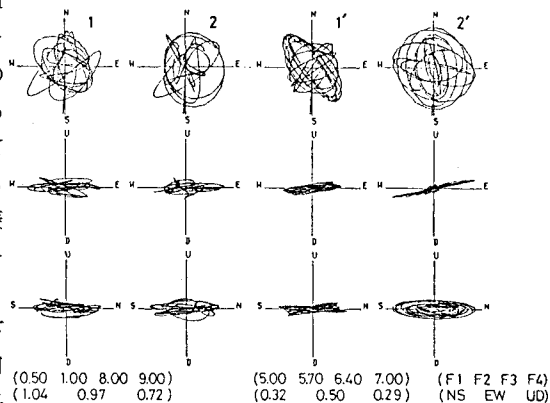


図-19 S波部のOrbits (EQ.3)

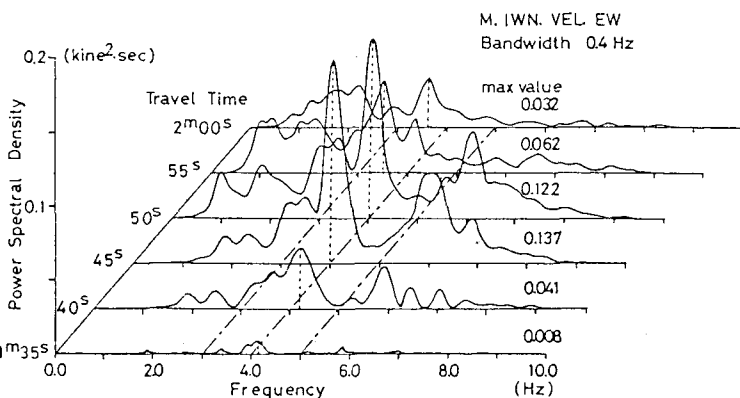


図-20 地震波のTravel Time Power Spectrum

Window Spectrumなどで考察してきた分散性基本波動の検出をOrbits解析により三次元的に進めることができるというわけである。

4. あとがき

Orbits解析はRandomな地震波を立体的にとらえる波形解析の有力な手段であるが、ここで進めてきたOrbits解析の結果次のようなことが言える。1) 一つの座標に描かすOrbitの時間は5~10周期程度が適当で、工学的に重要な短周期の地震波動に対しては2秒間程度になる。2) Smoothingにおける振幅の逓減率は少なくとも0.8以上におさえなければならないが、Noiseの除去においては当てはまらない。3) 理論的に得た加速度、速度、変位相互の変換による結果では三者のOrbits形状は一致し、位相が半周期ずれる。これには実測3記録によるCheckが課題としてのこる。4) Spectrum図を利用し、Peak周波数にねらいをつけたOrbits解析を行えば基本的な波動およびそれらの波群の検出が行なえる。この場合Smoothingでの逓減率は振幅配分率なる見方が必要になる。5) Moving Window Spectrumなどとの協力で、三次元的な地震波群の検出が行なえる。

謝辞 最後に本研究の進行にあたり、多大の御助言をいただいた北大工学部教授渡辺 昇博士に深謝の意を表します。また北大理学部地震予知観測地域センターの高波鉄夫助手の御教授に感謝致します。

なおこの研究は文部省科学研究費(一般研究C)の補助を受けて進めたものである。

参考文献

- 1) 金子・渡辺：地震動のSV波動特性の研究，土木学会論文報告集，1979・9，
- 2) 小林・佐間野・山内：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論文集，1975・11，
- 3) 西村源六郎：振動工学，誠文堂新光社，1969，
- 4) 北大理学部：地震観測センター速報，第1号～第7号，1977・4～1981・3