

(21) SMART1アレーによる地震波の伝播に関する各種の解析

京都大学大学院 ○ 香川明生

京都大学工学部 山田善一 野田茂

1. まえがき 本研究では、台湾・北東部のLotung (羅東) に設置されたアレー観測「SMART1」(地震計の配置は図1参照)により得られた強震記録を用いて、各種の波動論的考察を試みる。これは、本記録を適用して地中埋設管などの地震応答解析を実施する前段階として、地震動の特性を検討する目的のため、行うものである。具体的には、震源位置や地震波の到来方向およびその伝播速度の決定、さらに異種の波群の識別などを検討している。

2. P波の走時や2乗波形から得られる情報 本解析で用いた地震の特徴は以下の通りである。日時=1981/1/2, 4h51m36.06s, 震源位置=(121°53.78', 24°25.75'), 深度=11.05km, マグニチュードMs=6.9, アレーの位置からの震央距離=約30km, 方位=N153.8°E。

図2は、図1に示す各観測点における最大地動変位のNS成分を示したものである。地動変位が大きくなっている地点は、O1, O2, M1の周辺、すなわち外部リング・アレーのほぼ北部に位置している。図のような挙動を示すのは、表層の沖積層および地下深部の構造の局所的な変化に左右されていることが考えられる。

図3は、アレーの各観測点で記録された地震波の上下動成分に見られる初動部のP波の走時と震央距離の関係を示したものである。走時は、各観測点でのP波の到達時刻(Trigger Timeは既知)と発震時刻の差より求めた。データのばらつきは大きい、線形回帰すると図中の実線ようになる。これより、初動P波の速度を求めると、5.7km/sとなる。アレー近傍の地盤探査の結果より、数km以深のP波速度が3.3km/sであるとわかっている。

震源深さは11kmにある。本結果は、この深さにP波速度が5.7km/s程度である地殻の存在を示唆している。

図4は、伝播する地動変位のNS成分の2乗波を3観測点について比較したものである。このような方法をとったのは、2乗波形が地震波のエネルギーと密接な関係があるので、波の各相や multiple eventの同定に利用できると考えたからである。同様な図がEW成分、UD成分についても描ける。ここでは、震源からアレーの中心C00を結ぶ方向の3地点(O6-C00-O12)を対象とした。同図より、初動部の比較的大きな波形に注目し、その峰の時刻を調べた。その結果より、南端の観測点O6から北端の観測点O12までの地震波の伝播時間t1を計算し、

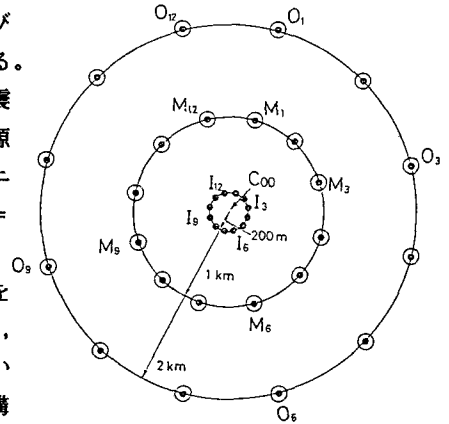


図1 SMART1高密度アレーの配列

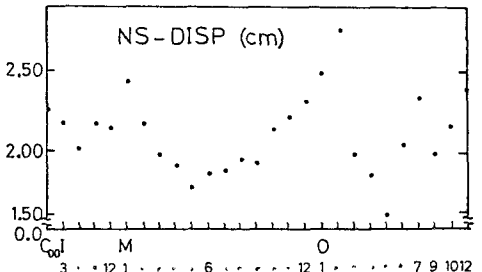


図2 各観測点の最大変位(NS成分)

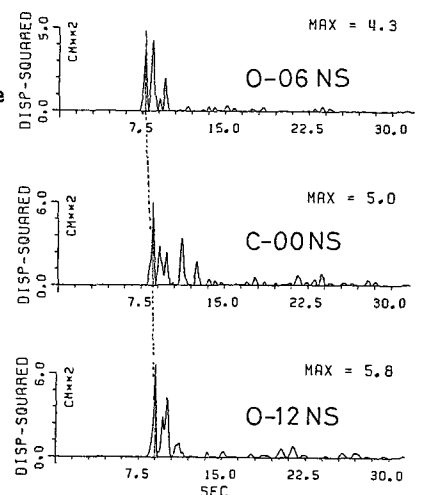


図4 O6-C00-O12観測線上の変位(NS成分)の2乗波

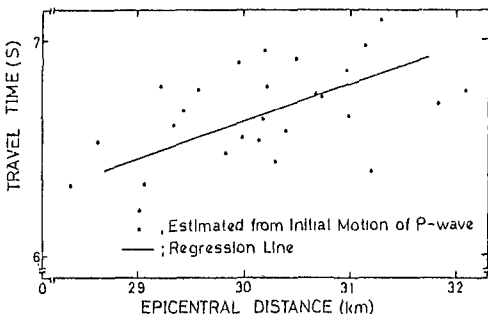


図3 P波初動の走時

波の伝播速度とアレーへの入射方位角を推定した。t1の値は、NS, EW, UD成分についておのおの、1.2, 1.2, 0.97 sとなる。O6 - O12間の距離が4006.5m, t1が1.2sであるから、伝播速度cは3.3km/s、また入射方位角θは約N20°Wとなる。ここで得られたcの値は地盤のP波速度と実によく一致している。また、θの値は震源の方位角N26.2°Wと調和している。このことは、本解析法の有効性を示すものである。

**3. 波の遅度の計算とその利用法** 図5のように、2観測点の記録の同一成分を用いて、2つの波形にcos型のテーパを有するtime windowを掛け、波形を時間上で有限個のブロックに分離する。windowの対応した時間内において、2つの記録の時間軸を時刻の正負の両方向にずらすことにより、相互相関関数が最大となるような時間遅れτを求める。τを2点間の距離で割ることにより、伝播速度の逆数である、遅度が計算できる。windowを時間上で連続的に動かすことにより、相互相関関数と遅度の経時変化が得られる。その結果、波の伝播速度と入射方位角が推定できる。<sup>2)</sup>

図6は、上から、観測点I8とI9における加速度波形(UD成分)から求めた相互相関係数の時間変化、両地点の波形と遅度を示している。ただし、window関数は挿入図(上側から2番目)のように設定し、windowの幅は0.5sとしている。図からわかるように、相関性は一般に低いので、相互相関関数の値が0.5以上となる時刻に対応する遅度について検討した。例えば、3.25, 4, 6, 7.25sのとき、遅度は-0.41, -0.41, -0.37, -0.33(s/km)となる。これより、観測点I6からI9の方向(N62.9W)に、波は2.4~3.0km/s

sの速度で伝播したと推定できる。しかし、S波が伝播したと考えられる時刻から、散乱波が様々な方位から伝播し、急に相互相関の値が小さくかつ遅度が不規則に変化している。そこで、初動部のP波について解析した。その結果I6からI9にはc=2.5km/s(NS成分), 2.3km/s(EW成分), 2.6km/s(UD成分)のP波速度で波が伝播していることがわかった。同様にして、I6からI12の方向(N15.4°W)には、約3km/sのP波が伝播していた。両者の結果をベクトルの的に合成すると、約5.1km/sのP波が方位N36.4°Wに伝播することが推察された。

図7は、図6と同様にして、I8, I9地点における変位波形(NS成分)から求めた結果である。windowの幅は1sとしている。加速度波形から得られた図6の結果と比べて、図7のように2点の変位波に注目すると、一般に相関性は高く、これは波形を目視で確認した結果と調和している。図6と図7における波の遅度の挙動が互いに異なっているのは、大きな特徴である。

**4. 波の軌跡と波群の分離** ここでは、非定常パワースペクトル<sup>3)</sup>を用いて、表面波と実体波の識別を実施したり、Rayleigh波の特徴を活かして、波動軌跡やR×Vの波形を描き、視覚的に地震波群を確認することを試みた。その際、チェビシエフ型等リップルのBand-pass数値フィルター<sup>4)</sup>を適用し、マルチ・フィルタ

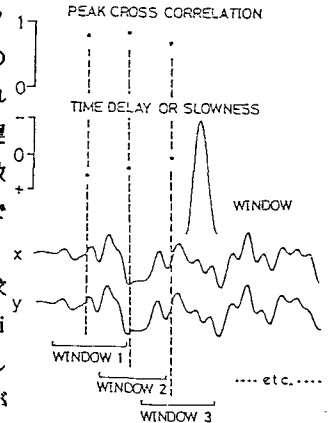


図5 波の遅度を求める概念図

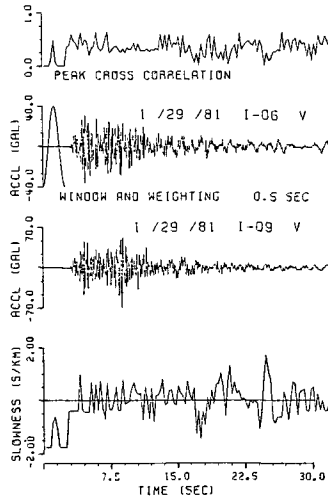


図6 I6とI9の加速度波(UD)から求めた遅度の経時変化

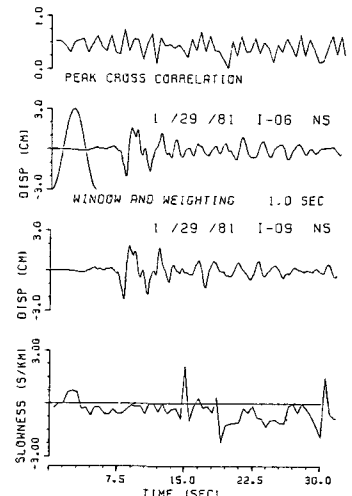


図7 I6とI9の変位波(NS)から求めた遅度の経時変化

による解析をした。

図8には、C00地点における上下動成分の加速度波形の非定常パワースペクトルを描いている。縦軸は注目する波の周波数(0.2~10Hz)を、横軸はその周波数成分に対応するスペクトルの時間的変化を示す。なお周波数によらず、スペクトルの最大値は同一にとっている。同図より、約1 Hz以下の波動の到達時刻が周期によって規則的に変わっており、明らかに波の伝播速度が、周期によって異なる分散性の現象が見られる。1 Hz以下の周波数帯域における波は主として表面波成分、1 Hz以上の波は主として実体波成分より成っていると考えられる。

群速度が極小となる0.6 Hz前後の周波数は非定常スペクトルマップの振幅極大となる部分に比較的良好に対応している。このようなスペクトルの変化現象は、表面波特にRayleigh波の特性とよく合致する。Rayleigh波は、上下動(V)と波の進行方向(R)に対して楕円運動をする性質をもっている。そこで、この性質を利用し、V-R面内における波の軌跡を描いてみた。その際、Band-pass フィルターを用いるが、いわゆるマルチ・フィルターとして任意の周期帯域の波を取りだし、時間的にもいくつかの区間に波を分けて検討した。図9は、O12地点における加速度波のV-R軌跡である。周期帯域は1~2 sとし、13秒を境に2つの時間に区分した。図より、13秒までのV-R曲線は水平方向に扁平であるから、この時間帯の記録は実体波成分が、主に卓越していると考えられる。一方、13秒以降については、楕円運動を示すようになっているので、Rayleigh波の特徴を呈している。他の周期帯域についても調べたが、楕円運動が特に顕著に見られたのはこの周期帯域(1~2s)の波に限られていた。これより、この周期帯域の近傍で、群速度が極小となり、エネルギー的にみて表面波が最も卓越したと考えられる。これは非定常スペクトル(図8)より得られ

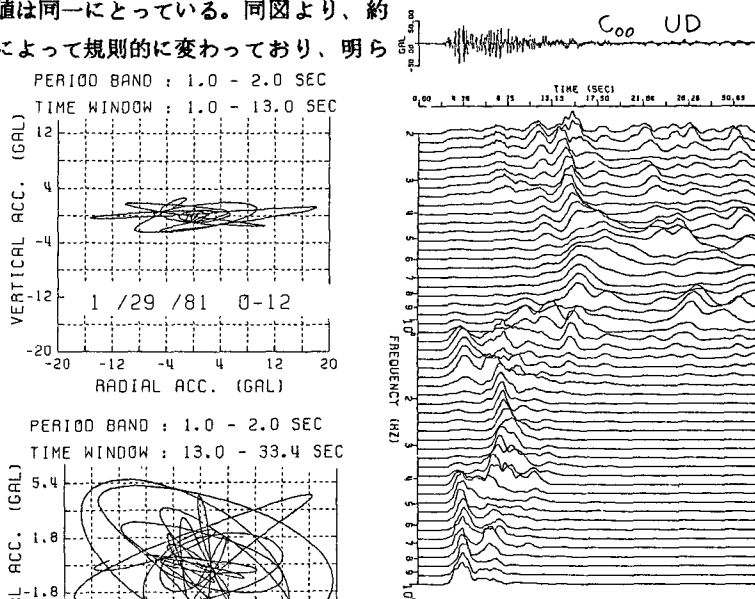
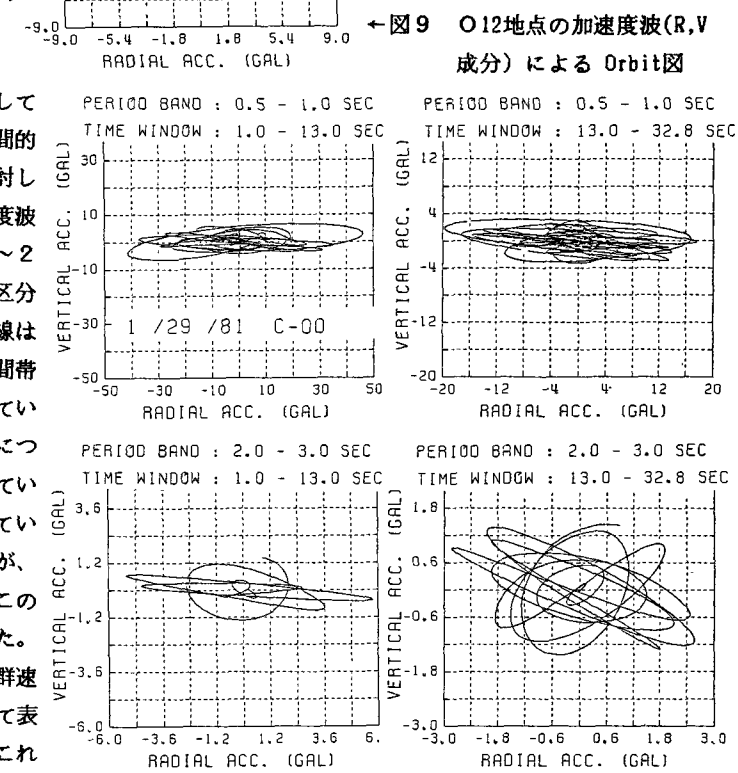


図8 C00地点のUD成分に対する非定常スペクトル



← 図9 O12地点の加速度波(R,V成分)による Orbit図

図10 2つの周期帯における、C00地点の加速度波(R,V成分)による Orbit図

た結果とよく一致している。

同様に、図10は、C00地点のV-R軌跡図で、周期帯域は0.5~1sと2~3sとし、13秒前後の時間に波を区分して示した。波の継続時間によらず、短周期帯域(0.5~1s)では実体波成分、長周期帯域(2~3s)では表面波成分が主に卓越していることが推察される。

次に、ある観測点におけるNS方向とEW方向の水平面内でのParticle orbit

を描くため、水平2成分の加速度記録を合成した。これより、地震波の入射方向や地震動の主軸を推察することを試みた。図11は、O8地点の記録の最初の12秒間における波に注目し、Band-pass フィルターを用いて、2つの周期帯域(0.5~1sと2~3s)における波動軌跡を描いたものである。いずれも、ほぼ北東-南西方向に楕円を描いている。振幅は水平面内のある限られた範囲の方向にのみ増大し、その方向とはほぼ直交する方向にはそれほど増大していない。これは、SH波もしくはLove波の影響と考えられ、地震波が南東から北西へ伝ったことがわかる。

さらに、加速度波形からR×Vの波形を計算し、波の識別を行った。R×V曲線は、P波入射の場合は常に正、SV波入射の場合は常に負、Rayleigh波の場合は零線のまわりを振動するという性質をもつ。<sup>5)</sup>

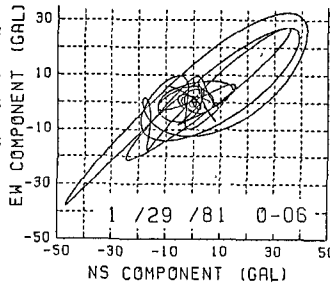
そこで、図12は、C00地点のR×V曲線(R×Vの最大値で正規化)の経時変化を、5つの周期帯について示したものである。2.5s以下の周期においては、ほぼ全観測期間にわたってR×Vがまず負となり、次に正となり、さらに負と繰り返している。これは、零線から観測点までの距離が遠く、反射・屈折を繰り返した散乱波が出現し、P波、SV波が混同して到着したものと考えられる。R×Vの負の期間ではその波動軌跡も水平方向に扁平となっていたので、これらの成分はSV波であると考えられる。2.5~3sの周期帯の15s以前では、R×Vが零線を中心に振動している。その軌跡は円形に近い進行逆方向の回転をする楕円であった。これはRayleigh波あるいは疑似Rayleigh波を意味する。図より、長周期成分ほど早く到着しているのが特徴である。

5. あとがき 本研究では、「SMART1」アレー強震観測記録に種々の解析法を適用して、地震波の到来方向や伝播速度などを求め、波群の識別などを行った。地震動に関する多次元的検討を定量的に加え、本手法の有効性と其の妥当性を明らかにした。各種の解析結果はほぼ調和しており、波の特性を抽出することができた。

謝辞； 「SMART1」アレー強震記録の使用に当たっては、UCBのBolt教授および宮崎大学工学部の原田隆典助教授に、また、非定常パワースペクトルの計算に当たっては、京都大学工学部の亀田弘行助教授および同・杉戸真太助手にお世話頂いた。ここに記してお礼を申し上げます。

参考文献 1) Bolt, B.A., Loh, C.H., Penzien, J., Tsai, Y.B. and Yeh, Y.T. ; Report No. UCB/EERC-82/13, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, August 1982. 2) Spudich, P. and Cranswick, E. ; B.S.S.A., Vol.74, No.8, pp. 2083-2114, December 1984. 3) 亀田 弘行 ; 土木学会論文報告集, 第235号, pp. 55-62, 1975年3月. 4) 齊藤 正徳 ; 物理探鉱, 第31巻, 第4号, pp. 112-135, 昭和53年8月. 5) Sutton, G.H. and Pomeroy, P.W. ; J. Geophys. Res., Vol.68, No.9, pp. 2791-2815, May 1963.

PERIOD BAND : 0.5 - 1.0 SEC  
TIME WINDOW : 1.0 - 13.0 SEC



PERIOD BAND : 2.0 - 3.0 SEC  
TIME WINDOW : 1.0 - 13.0 SEC

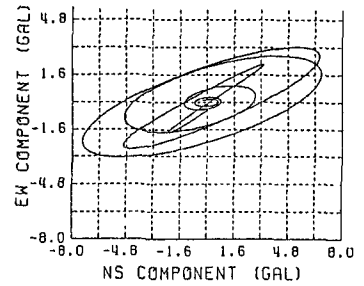


図11 O8における水平面内の軌跡

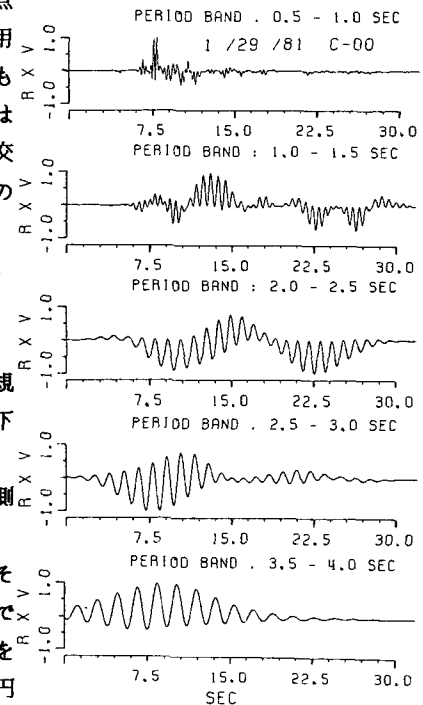


図12 C00地点の加速度波から求めたR×Vの波形