

京都大学大学院 学生員 香川明生 京都大学工学部 正員 山田善一
京都大学工学部 正員 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、本記録を適用した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=($121^{\circ} 53.7' 8''$, $24^{\circ} 25.75'$), 深度=11.05km, マグニチュード $M_s=6.9$, アレーの位置からの震央距離=約30km, 方位= $N153.8^{\circ} E$ 。

図2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により、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3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。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 t_1 を計算し、波の伝播速度とアレーへの入射方位角を推定した。 t_1 の値は、NS, EW, UD成分についておのおの、1.2, 1.2, 0.97sとなる。O6-O12間の距離が4006.5m, t_1 が1.2sより、伝播速度 c は 3.3km/s 、また入射方位角 θ は約 $N20^{\circ} W$ 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 $N26.2^{\circ} W$ と調和している。

3. 波の遅度の計算とその利用法 2観測点の記録の同一成分を用いて、2つの波形にcos型のテーパーを有する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。

図4は、上から、観測点I6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。一般に、相関性は低いので、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 $-0.41, -0.41, -0.37, -0.33(\text{s/km})$ とな

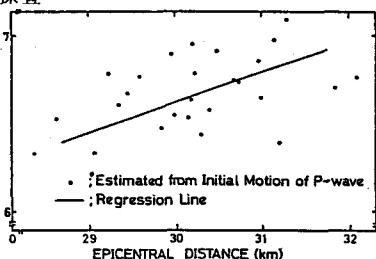
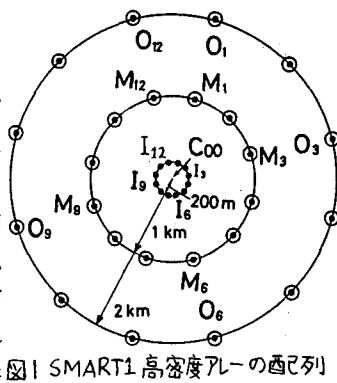


図2 P波初動の走時

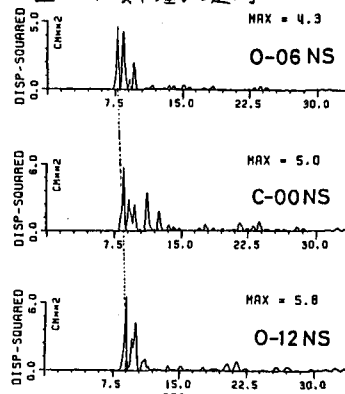


図3 O6-C00-O12観測線上の変位(NS成分)の2乗波

る。これより、観測点 I6 から I9 の方向 ($N62.9^{\circ}W$) に、波は $2.4 \sim 3.0\text{km/s}$ 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 $c=2.5\text{km/s}$ (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 ($N15.4^{\circ}W$) 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 $N36.4^{\circ}W$ に伝播することが推察された。

4. 波の軌跡と波群の分離 ここでは、Rayleigh波の特徴を活かして、波動軌跡や $R \times V$ の波形を描き、表面波と実体波の識別など、視覚的に地震波群を確認した。その際、チェビシェフ型等リップルのBand pass 数値フィルターを適用し、マルチ・フィルターによる解析をした。

図5は、O12地点における加速度波の上下動 (V) と波の進行方向 (R) の軌跡である。周期帯は $1 \sim 2\text{s}$ とし、2つの時間に区分した。図より、13秒までの記録は実体波成分が、それ以降は表面波成分が主に卓越していることがわかる。非定常スペクトルを検討したところ、群速度が極小となる周波数は $0.6 \sim 0.7\text{Hz}$ (周期 = $1.4 \sim 1.7\text{s}$) と推定できた。図中の結果はこの周期帯を含んでおり、エネルギー的にみて表面波が最も卓越したときのOrbit 図である。

次に地震波のNS成分とEW成分の波動軌跡を描くことにより、波の入射方向や主軸を推察することを試みた。図6は、O8地点の記録の12秒間における波に注目し、フィルターの相違を見たものである。これより、南東から北西へ地震波が伝播していることがわかる。振幅がある限られた範囲の方向にのみ増大しているのは、SH波もしくはLove波の影響によるのであろう。

さらに、加速度波形から $R \times V$ の波形を計算し、波の識別を行った。 $R \times V$ 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。図7は、C00地点の $R \times V$ 曲線 (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 $R \times V$ 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、震源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。 $R \times V$ 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。 $2.5 \sim 3\text{s}$ の周期帯の15s以前では、 $R \times V$ 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。

謝辞 最後に、SMART1のアレー観測記録の使用に当っては、UCBのBolt教授および宮崎大学工学部の原田隆典助教授にお世話頂いた。ここに記してお礼を申し上げます。

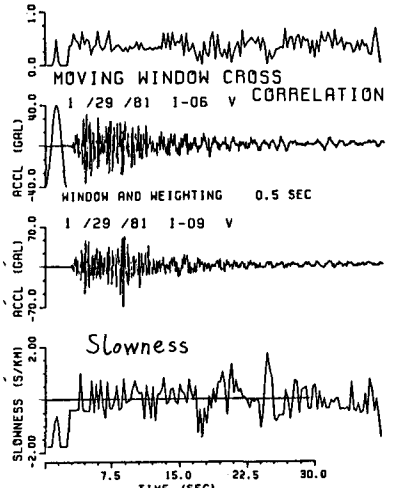


図4 I6とI9の加速度波(UD)から求めた遅度の経時変化

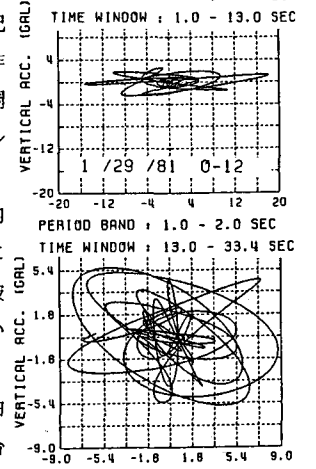


図5 O12地点の加速度波(R,V成分)によるOrbit図

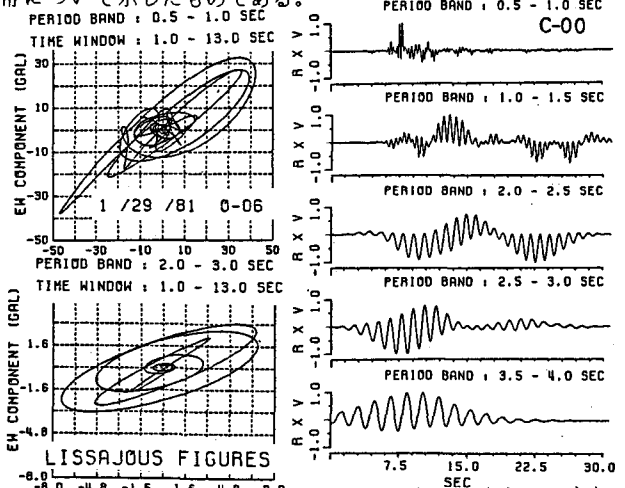


図7 C00地点の加速度波から求めたR x Vの波形

図6 O8地点における水平面内の軌跡