

地中波源から発生する地震波動の特性

Seismic Wave Radiation from Underground Source

大保 直人*・片山 恒雄*

Naoto OHBO and Tsuneo KATAYAMA

1. ま え が き

地震波の特性は、震源、伝播経路、地盤の三つの要素に大きく影響される。最近、地震発生メカニズムに注目し、その発生原因の断層を数理モデルに置換し、これを用いた地震動シミュレーションの研究が行われている。^{1)~3)}なかでも、金森の結果¹⁾は、記録上の短周期成分の波を無視すれば、観測波形ときわめてよい一致がみられ、断層モデルによる地震動シミュレーションの可能性を示唆している。

ところで、地震断層面から生成される波の性質は、地震断層が発生するために必要な外力の特性で決定されると考えられており、各種の力源から生ずる波の特徴を解明した研究⁴⁾は、地震断層モデルと生成波の関係を理解する上で重要である。

ここでは、二次元の半無限地盤内の放射状力源と複双子力源から発生・伝播する地震波動の性状を、著者等がこれまで、地表振源から発生・伝播する波動の解析^{5),6)}に使用した計算法を用いて検討した結果について報告する。

2. 計算モデルの概略

地表に作用する外力から発生・伝播する弾性波動の解析に使用した等価質点系モデル法を、地震波の伝播の解析へ応用するに当たっては、震源機構（地震断層および波源モデル）の理解が必要である。以下に震源機構と計算モデルの概略を述べる。

2.1 地震断層の概略

地震断層はセン型のくいちがいに近いとき、このくいちがいは遠方から見れば1個の複双子力源 (double-couple force) と同等であり、あまり深くない地震については、複双子力源が断層の生成を説明する波源モデルと考えられている。⁷⁾

地震断層は、大きく横ずれ断層と縦ずれ断層に分けられ、さらに前者は左ずれ、右ずれ断層に、後者は正、逆断層に分類される。マグニチュードが7.4以上の浅発地震では断層出現確率は高いが、マグニチュードがこれより小さくなると低くなる。断層を表現するパラメータの値は、地震動の理論曲線と観測値を比較しながら試行錯

誤的に決定される。⁸⁾地震断層の統計的調査をもとに、断層面の長さ L とマグニチュード m 、および断層面のずれ量 d とマグニチュード m の間の関係式などが、多くの研究者により提案されている。以下にその一例を示す。⁹⁾

$$\log L = 0.5m + 3.2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\ln d = 0.585m - 3.473 \dots\dots\dots (2)$$

この関係式は地震発生地域の地下構造の違いなど各種の状況により異なると考えられている。

ところで、震源断層の動態を表現する震源時間関数については、Haskell,¹⁰⁾ Brune,¹¹⁾ Knopoffら¹²⁾ による研究がある。この関数は、断層の破壊の発生から停止までの時間と、断層上の各点が断層ずれの運動に要する時間の二つの断層生成の過程を基本としている。

2.2 波源モデルと地盤モデル

地震断層（セン断層のくいちがい）を生じさせる力源モデルは、複双子力源であると考えられている。ここでは、複双子力源 (double-couple source) および放射状波源 (center of compression or explosion source) を地中に作用させたとき (Fig.1 参照) に発生・伝播する地震波の性状を比較検討することを目的としている。したがって、波源の大きさはきわめて単純にモデル化してある。セン型のくいちがいは double-couple force の作用と等価であるが、この基本的な考え方については文献⁷⁾ を参照されたい。また、波源における外力の時間分布関数は次式で与えた。¹³⁾

$$P(t) = \sin(2\pi t/T) - \sin(4\pi t/T) / 2 \quad 0 < t < T$$

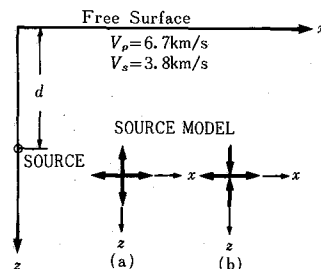


Fig.1 Two-Dimensional Configuration of Half-Space and Source Models: (a) Center of Compression or Explosion Force, (b) Double-Couple Force.

*東京大学生産技術研究所 第5部

研 究 速 報

Fig. 1 に二次元半無限弾性地盤モデルと波源モデルを示す。地盤モデルの弾性波速度としては、地震学で基盤の速度と考えられている値 ($V_p=6.7 \text{ km/s}$, $V_s=3.8 \text{ km/s}$) を用いた。¹⁴⁾ 地盤は、0.5 km のメッシュで分割し、計算の時間ステップは $\Delta t=0.07462 \text{ s}$ とした。波源の深さは 5, 10 および 20 km の 3 種類を考え、時間分布関数の周期は $T=2 \text{ sec}$ とした。

3. 計 算 結 果

二つの波源モデルから発生・伝播する地震波の性状を比較するために、ある計算ステップでの各格子点の変位の大きさと方向をベクトルの表示した図 (伝播パターン図)、および地表の変位振動波形を用いて検討する。

Fig. 2 は、深さ 20 km にある放射状波源から発生した地震波の主要成分の伝播パターン図を 50 ステップ (50

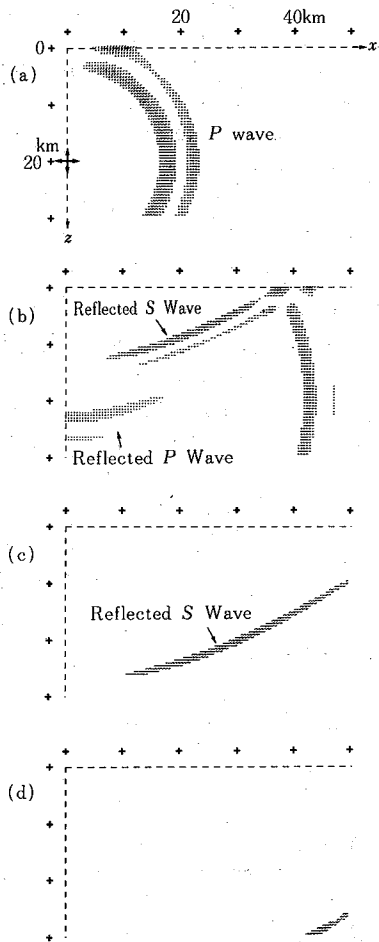


Fig. 2 Radiated Wave from Center of Compression Source ($d=20 \text{ km}$): (a) $50\Delta t (=3.731 \text{ sec})$, (b) $100\Delta t (=7.462 \text{ sec})$, (c) $150\Delta t (=11.193 \text{ sec})$, and (d) $200\Delta t (=14.924 \text{ sec})$.

$\Delta t=3.731 \text{ sec}$) 間隔で 200 ステップまで示したものである。この波源からは波の放射方向に振動する P 波が卓越して発生し、この性状は理論的に求められた radiation pattern と一致している。地表境界に入射した P 波からは、反射 P 波、S 波の発生がみられ、さらにその振幅は波面の拡がりとともに減衰している。

Fig. 3 は、深さ 20 km にある複双子波源から発生した地震波の伝播性状を示したものである。力の作用方向と約 45 度をなす方向に卓越する S 波の発生がみられ、S 波発生時の波源の特徴をよく表現している。S 波が地表に入射し、そこからの反射波の発生、および地表に沿って伝播する P 波の発生もみられる (Fig. 3(c) 参照)。後者の結果は、Ray Theory で定性的に説明できる。

Fig. 4 および 5 に、放射状波源を地下 5 km と 20 km

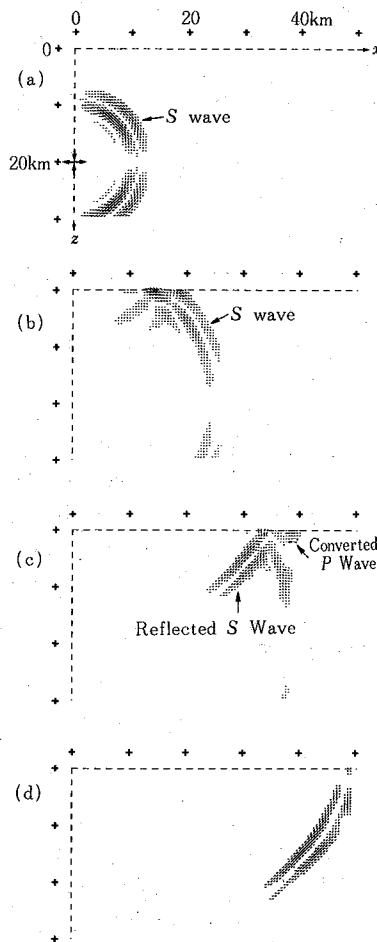


Fig. 3 Radiated Wave from Double-Couple Source ($d=20 \text{ km}$): (a) $50\Delta t (=3.731 \text{ sec})$, (b) $100\Delta t (=7.462 \text{ sec})$, (c) $150\Delta t (=11.193 \text{ sec})$, and (d) $200\Delta t (=14.924 \text{ sec})$.

に作用させたとき、地表で得られた水平変位波形を示した。縦軸の大きさは、各地点での最大変位振幅になっており、他の地点の変位との振幅の比較はできない。放射状波源からは、P波のみが発生することが、これらの波形からも理解できる。しかし、Fig. 4の例では、P波位相の後に振幅は極めて小さいが、これよりかなり遅い位相の波が存在している。これは、P波が地表に入射した後に発生し、地表面に沿って伝わるレイリ波と考えられる。

Figs. 6~8は、複双子波源を地下5, 10および20 kmに作用させたとき地表で得られた水平変位波形を示したものである。この波源からは、P波とS波が発生するが、

波源が5 kmと10 kmの場合 (Figs. 6, 7) には、二つのP波位相が認められる。二番目のP波位相は地表に到達したS波からの転化波に相当する。これは、Fig. 3(c)の伝播パターン図からも確認できる。

Fig. 9に、放射状および複双子波源を地下に作用させたとき、震央距離30 kmの地点で得られる変位の振動軌跡を示した。この図で左側の振動軌跡は、各波源から発生し地表で振動波形として存在する部分を、さらにこの部分に異なる波動成分(たとえば、P波とS波あるいはレイリ波)が存在する場合には、この区間を二つに分割して、その右側に示した。なお、軸の大きさは各時間区

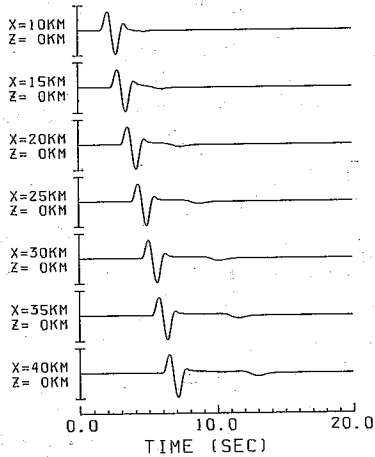


Fig. 4 Horizontal Displacement Time-Histories on Free Surface caused by Center of Compression Source ($d=5$ km).

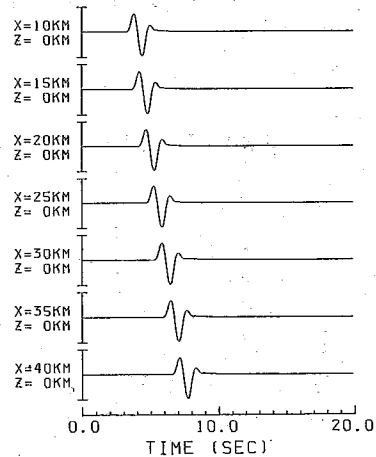


Fig. 5 Horizontal Displacement Time-Histories on Free Surface caused by Center of Compression Source ($d=20$ km).

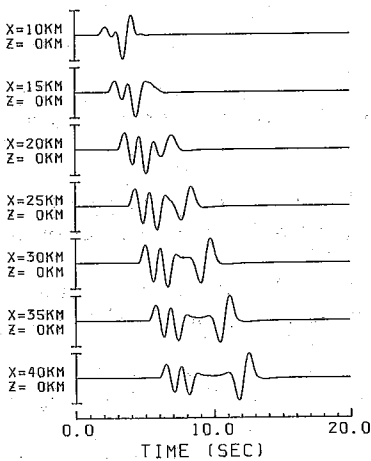


Fig. 6 Horizontal Displacement Time-Histories on Free Surface caused by Double-Couple Source ($d=5$ km).

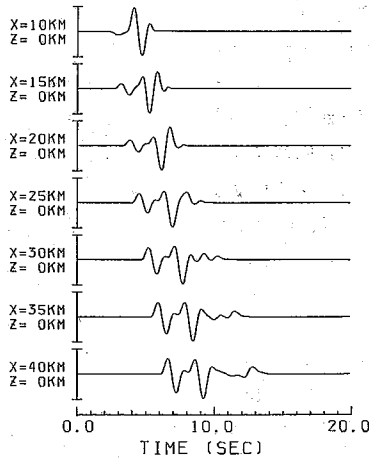


Fig. 7 Horizontal Displacement Time-Histories on Free Surface caused by Double-Couple Source ($d=10$ km).

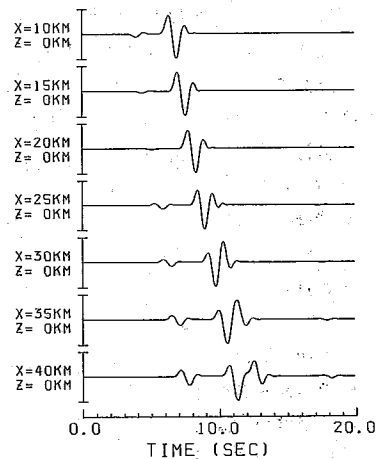


Fig. 8 Horizontal Displacement Time-Histories on Free Surface caused by Double-Couple Source ($d=20$ km).

研究速報

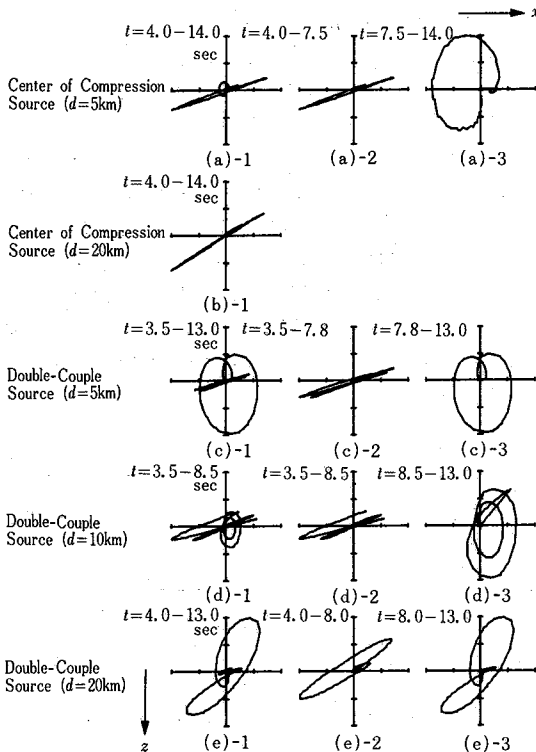


Fig. 9 Particle Motions on the Free Surface at $x=30$ km for Various Source Models.

間での最大振幅になっている。

放射状波源 (Fig. 9 (a), (b)) では、波の伝播方向に振動する P 波が卓越している。波源が浅くなると、成分的には小さいが、地表に沿って伝わるレイリ波の存在 (Fig. 9 (a)-3) が認められる。一方、複双子波源の場合を見ると、20 km の場合 (Fig. 9 (e)) は S 波と断定できる振動軌跡ではないが、それに近い性状がみられる。波源が浅くなるにしたがい、レイリ波の発達がみられ、特に波源の深さが 5 km (Fig. 9 (c)-3) では、明瞭なレイリ波が存在しその成分は極めて大きい。このレイリ波の発達は、波源の深さと震央距離に関係し、波源の深さが大きい場合でも、震央距離が大きくなればレイリ波が認められる。

4. あとがき

本報告では、これまで著者等が波動伝播解析で用いた計算手法を二次元の断層モデルへ応用して、半無限地盤内の単純な波源モデルから発生する地震波の伝播の計算を行い、以下の結果を得た。

- 1) 波源から発生する弾性波の radiation pattern

は、理論解に一致し、その性状は波源の種類に支配される。

- 2) レイリ波の発生は波源の位置と種類に関係し、波源が浅い場合は、波源の種類に関係なく震央近くから発生する。一方波源が深くなると、複双子波源では震央から離れた地点で確認できるが、放射状波源では震央から離れてもレイリ波の発生を確認することは困難である。

- 3) 地表への P 波と S 波の入射に対して、前者からは反射 P 波と S 波が発生し、後者では地表に沿って伝播する P 波の発生が顕著である。

(1983 年 8 月 24 日受理)

参考文献

- 1) Kanamori, H.: Determination of Effective Tectonic Stress Associated with Earthquake Faulting. The Tottori Earthquake of 1943, Phys. Earth Planet. Interiors, Vol. 5, 1972, 426-434
- 2) 井上涼介・藤野陽三・松原勝己・伯野元彦: 断層震源モデルを適用した周期 10 秒前後の地震動評価の試み, 土木学会論文報告集, Vol. 317, 1982, 47-60
- 3) 田中貞二・吉沢静代・坂上実・大沢胖: 前・余震の記録から本震地動の加速度波形特性を推定する一方法, Proc. of the 6th Japan Earthq. Eng. Symp., 1982, 73-80
- 4) 地震探鉱実験グループ: 地震波の生成・伝播に関する実験, 1976, 12-19
- 5) 大保直人・片山恒雄: 弾性波の発生・伝播に関する計算手法の比較, 生産研究, 第 32 巻, 第 12 号, 1980, 40-43
- 6) 大保直人・片山恒雄: 二層地盤内の波動伝播性状に関する数値実験例, 生産研究, 第 34 巻, 第 4 号, 1982, 24-27
- 7) 丸山卓男: 断層地震の波源モデル, 関東大地震 50 周年論文集, 1973, 147-165
- 8) 笠原慶一: 地震の力学, 鹿島出版会, 1983.
- 9) 大塚道男: 地震のマグニチュードと地表にあらわれる断層について, 地震, 第 2 輯, Vol.18, 1965, 1-8
- 10) Haskell, N. A.: Total Energy and Energy Spectral Density of Elastic Wave Radiation from Propagating Faults, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 54, 1964, 1811-1841
- 11) Brune, J.N.: Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes, J. Geophys. Res., Vol. 75, 1970, 4997-5009
- 12) Knopoff, L. & Gilbert, F.: Radiation from a Strike-Slip Fault, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 49, 1959, 163-178
- 13) 佐藤泰夫・仁田原正道: 枠組モデルによる弾性波伝播の数値実験, 鹿児島大学理学部紀要 (地学・生物学), 第 13 号, 1980, 105-120
- 14) 瀬尾和夫: 地下深部の地盤構造が地表の地震動に及ぼす影響, 東京工業大学博士論文, 1981