

浅間山構造探査データにみる地震波の多重散乱・モード変換

山本 希・佐藤 春夫(東北大・理)

はじめに

火山は地殻において最も不均質性の強い場のひとつであり、その不均質の様相・成因を理解することは活火山における各種プロセスの解明の一つの手がかりになると考えられる。一方、不均質媒質中においては、地震波はその伝播過程において散乱の影響を強く受けることとなる。特に火山体のような強い不均質場においては多重散乱の効果が地震波エネルギー伝播を大きく支配することとなり、火山における地震波エネルギー伝播のモデリングには拡散モデルがこれまで広く適用されてきた (e.g., Shimizu and Ueki, 1984, Wegler et al, 2001, 2003)。しかしながら、これらの研究においては単一モード(主に S 波)の拡散モデルが用いられることが多く、P・S 両モードの寄与やモード間の変換などは十分には考慮されてこなかった。その一つの要因としては、複数モードの伝播・拡散の時空間的様相を捉えるに足る観測が欠如していたことが挙げられる。

本研究では、2006 年に実施された浅間山構造探査計画によって得られた稠密観測データを用いて地震波動エネルギー伝播の時空間的特長を明らかにし P・S 両モードの多重散乱・モード変換について検討した結果を報告する。

データ・解析

日本有数の活火山である浅間山では 2004 年に中規模噴火が発生し、この噴火に伴うマグマの動きが地震および GPS 観測により明らかにされてきた (e.g., Takeo et al, 2006)。さらに 2006 年 10 月にはマグマ移動と地下構造の関係を明らかにするために人工震源を用いた構造探査が実施された。この構造探査では、屈折法解析を主な目的に 50-150m 間隔で臨時観測点(2Hz 地震計・大半が上下動)が南北十字状に配置され、周囲 5 ヶ所におけるダイナマイト発破(薬量 250-300 kg・深度約 60m)による地震波の記録を行った。

これらの人工地震探査の記録の特徴の一つに直達 P 波に続く強いコーダ波の存在が挙げられる。このコーダ波は数十秒にわたる継続時間を持ち、火山体内部における多重散乱の卓越が示唆される。さらに、稠密観測網によって捉えられた各時刻における地震波エネルギーの空間分布は二つの傾きを持った特長的なパターンを示した (図 1)。このようなパターンは、人工震源が主に P 波を励起しているにも関わらず、伝播経路上(特に震源近傍)において P 波から変換された S 波が多重散乱によって伝播・拡散していることを示すものである。

そこで本研究では、モード変換を考慮した P・S 波の多重等方散乱を輻射伝達理論に基づき計算し、エネルギー伝播の時空間分布から散乱パラメータの推定を行った。具体的には、まず各観測波形に 8-16Hz の線形位相フィルタを施し、P 波初動以前のノイズレベル・発破からの経過時間 50 秒以降のコーダ波レベルを用いて振幅正規化を行い、0.1 秒長の時間窓ごとのエネルギーを算出した。次に、伝播初期段階($t = 1.0-1.5$ 秒)におけるエネルギー空間分布を説明する媒質速度(v_p)・等方散乱係数(g_{pp} , g_{ps} , g_{ss})を輻射伝達理論に基づくエネルギー分布のフォワード計算を通してグリッドサーチにより求めた。ここでは単純化のため地表の効果は無視し、無限媒質中における P 波震源からのエネルギー伝播を用いた。また、火山のような強い不均質場における散乱においては、散乱波における近地項の寄与なども考慮すべきと考えられるが、10Hz 前後の波動に関しては平均自由行程が 200m 程度以上であれば近地項の影響は小さいことが 3 次元差分法などによる数値実験により確認できたため、ここでは Sato (1984)によるモード変換を含む多重等方散乱の解析解を用いた。

結果・議論

エネルギーの時空間分布から推定された P-S 散乱・S-S 散乱の散乱係数(g_{ps} , g_{ss})は P-P 散乱(g_{pp})のそれぞれ約 2.5 倍・3 倍であり、S 波の平均自由行程は 8-16Hz 帯において約 1km であった。これは一般的な地殻における平均自由行程よりオーダーで短く、火山浅部の短波長不均質を反映したものとみることが出来る。

一方、上記散乱パラメータは伝播初期($t = 1.0-1.5$ 秒)におけるエネルギー分布を用いて推定したものであるが、その推定値を用いて長経過時間におけるエネルギー分布を求めると、各時刻において観測値とモデル値の間に距離に依らずほぼ一定のオフセットが見られた (図 1)。これは、伝播初期段階を用いたフィッティングの際には

無視することができた内部減衰・窓効果といった散乱減衰以外の減衰がコーダ波後部では卓越してくるためであり、エネルギー分布のモデル化を伝播初期・後期において行うことでこれらの異なる減衰メカニズムを独立して推定できることを示唆する。

さらに、推定された散乱・減衰パラメータを用いて直達 P 波振幅を求めた結果、その初動振幅の距離依存性は観測結果と良い一致を示した (図 2)。これはエネルギー分布から推定した媒質パラメータが多重散乱波のみならず直達波をも説明できる安定した推定量であることを示すと言える。また、推定パラメータを用いた場合、直達波振幅に対する散乱減衰の寄与は大きく、従来直達波振幅・パルス幅の距離依存などを用いて推定されてきた火山浅部における減衰が散乱減衰に主に支配されている可能性があることが明らかとなった。

まとめ

浅間山における人工地震構造探査の稠密観測データを用いて、火山浅部におけるモード変換・多重散乱の様相を捉え、そのエネルギー時空間分布から輻射伝達理論を用いて散乱パラメータの推定を行った。推定されたS波平均自由行程は8-16Hz帯において約1kmと短く、不均質性の強い火山体における地震波動伝播においてモード変換と強い多重散乱が重要なファクタであり、地震波伝播モデリング・波動解析において不可欠な要素であることを示した。今後散乱・内部減衰パラメータの空間分布などを明らかにすることで、大局的速度構造とは異なる視点からの火山浅部構造・マグマ活動への寄与を検討していきたい。

謝辞： 本研究には火山体構造探査計画によるデータを使用させていただきました。関係各位に御礼申し上げます。

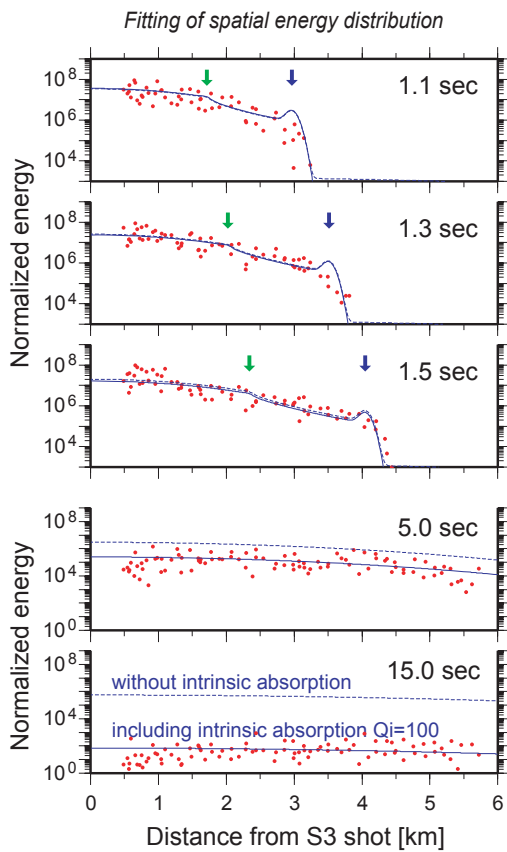


図1: 山頂近傍における発破記録から求めたエネルギー時空間分布 (赤丸)と輻射伝達理論に基づくフィッティングによってモデル化した時空間分布 (青線)。フィッティングは伝播初期段階($t = 1.0-1.5$ 秒)の記録を用いて行った。青・緑矢印は直達P,S波のフロントを示す。

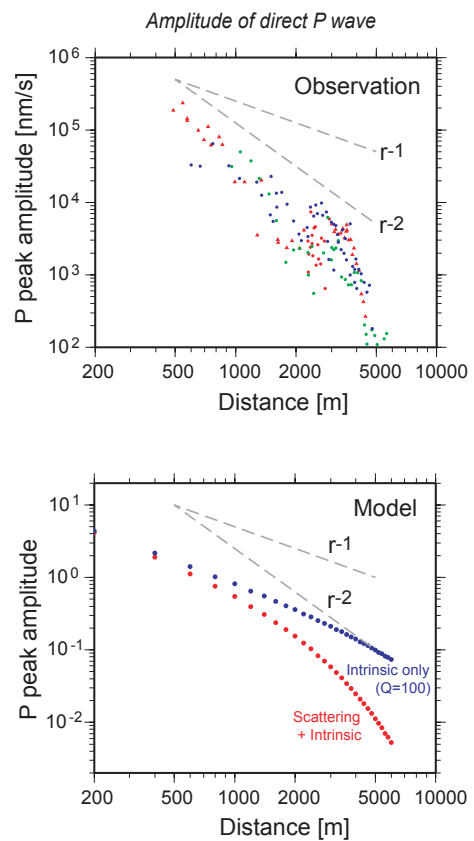


図2: 直達P波振幅の距離依存性。観測された初動振幅は発破からの方位(上図の各色シンボル)によらず距離の約-2乗の距離依存を示した。走時が短いためこの依存性は内部減衰のみで説明することは困難であるが、推定された散乱係数を用い散乱減衰を考慮することでよく説明できる(下図)。