2016年熊本地震の余震記録を用いた高周波経験的グリーンテンソル微分（EGTD）の高精度化への検討

Investigation to estimate high-frequency Empirical Green's tensor derivatives (EGTD) using aftershocks for the 2016 Kumamoto Earthquake

#吉田沙由美・堀家正則（阪神コンサルタンツ）・宮腰研（地域地盤環境研究所）
#Sayumi Yoshida, Masanori Horike (HANSHIN CONSULTANTS Co.,Ltd.), Ken Miyakoshi (GRI)

はじめに

地震動のグリーン関数は，地震動予測等に利用できる重要な情報であるが，現状では1Hz以上の高周波数成分を含むグリーン関数を数値的に推定することは難しい．高周波数成分を含むグリーン関数を作成する方法の１つとして，観測記録を利用する方法がある．Plicka and Zahradnik (1998)は複数の小地震の地震記録を用いて，グリーン関数の空間微分（EGTD）の推定法を提案した．この手法は、伝播経路や地盤のモデル化を必要とせず，また異なるメカニズム解の余震からでも任意のメカニズム解の地震動の計算ができる手法である．

しかし，どの程度の空間範囲にある余震を用いれば，どれくらいの高周波数まで利用できるEGTDが推定できるか明らかになっていない．本研究の目的はこれらの推定条件を明らかにすることである．EGTDの推定には震源パラメータ（走向・傾斜・滑り角・地震モーメント・震源時間関数）を精度良く決定する必要がある．しかしながら，すべての余震の震源パラメータを精度良く求めることは難しい．そこで，遺伝的アルゴリズム（GA）を用いた震源パラメータの精度向上と，それらを用いたEGTDの精度検証を行った．EGTDの推定には，2016年に発生した熊本地震の余震記録を用いて波形の再現を試みた．

解析方法

・グリーン関数の空間導関数（EGTD）の推定方法

Plick and Zahradik(1998)より，複数の地震が狭い範囲で発生した場合，震源域から遠方にある観測点xにおけるグリーン関数は地震によらず共通である．そのため，ある観測点xにおけるm番目の地震の変位U（l成分）は

$$U_l^m(x,f) = M_n^m \cdot G_{ln}(x,f)$$ f:周波数　n: モーメントテンソル成分

と表すことができる．モーメントテンソルは対称性を有し，さらに体積変化が伴わない場合，

$$M_1 = M_{xy}, M_2 = M_{xz}, M_3 = -M_{yz} \quad M_4 = \frac{-2M_{xx} + M_{yy} + M_{zz}}{3}, \quad M_5 = \frac{M_{xx} - 2M_{yy} + M_{zz}}{3}$$

となるため，$l = 1$ 成分を考えると，変位Uは以下のように表現できる．

$$\begin{pmatrix} u_1^1 \\ u_1^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_1^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_1^1 & M_1^1 & \cdot & \cdot & M_n^1 \\ M_1^2 & M_2^2 & \cdot & \cdot & M_n^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ M_1^m & M_2^m & \cdot & \cdot & M_n^m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{11} \\ G_{12} \\ \cdot \\ \cdot \\ G_{1n} \end{pmatrix}$$

観測記録　モーメントテンソル　未知数n=5個

5個以上の地震（余震）が必要

地震のモーメントテンソルは

断層パラメータ（走向・傾斜・滑り角），地震モーメント，震源時間関数

を変数とする関数であるため，これらを精度良く決定する必要がある．

震源位置とモーメントテンソルの推定

１データと震源決定

・期間　2016年5月5日～6月27日
・観測点　臨時余震観測17点(Fig1赤三角)＋Hi-net等の定常観測点(Fig1青三角)
・M2以上の震源を再決定（波形の読み取り＋観測点補正＋hypoDD法）

２モーメントテンソルの推定

2-1　断層パラメータの推定

P波初動の極性が10点以上読み取れた地震を対象にHASH1.2を用いてメカニズム解を推定
→365個の余震の断層パラメータ

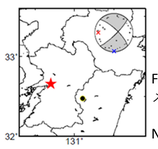

Fig2　推定した震源メカニズム解例（星：震央，黒丸：N.SBAH観測点）

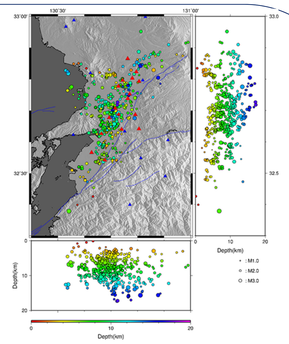

Fig1　震源再決定後の震源分布

2-2　地震モーメントと震源時間関数の推定

〇地震モーメントおよびFcの推定
・観測点：N.SBAH(Fig2黒丸，EGTD推定時も同様の観測点を使用)
・地震モーメントMoおよびコーナー周波数fcの推定手順
1. S波到達時刻0.2秒前から10秒間の波形を抽出
2. 震源スペクトル（変位）がω^{-2}則に従うと仮定し，低周波部でのスペクトル振幅Ω_0およびコーナー周波数fcをグリッドサーチにより推定
3. Moを次式により推定

$$Mo = 4\pi\rho Vs^3\Omega_0 / R_{\theta\phi}$$

ここでρ：密度(2.7g/cm^3)，$R_{\theta\phi}$：ラディエーションパターン係数(0.6)，Vs：S波速度(3.5km/s)

〇震源時間関数：ランプ関数．立ち上がり時間τ：fc=k/τ (k=2/3)

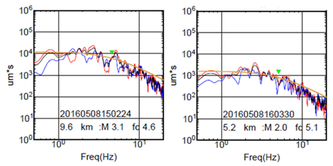

Fig3　余震の震源スペクトル解析例
赤：NS成分　青：EW成分，黒：水平2成分の相乗平均
橙：グリッドサーチ結果，三角（緑）：コーナー周波数

まとめ

2016年に発生した熊本地震の余震記録を用いてグリーン関数の空間微分（EGTD）の推定を試みた．
・EGTD推定のための地震グループ化半径を500m，1000mにした場合，４HzまでのEGTDが高精度で安定して推定できた．
・グループ化半径500mの場合はさらに１０Hzまで高精度に推定できる可能性を示唆する結果となった．
・EGTD推定に用いることが出来る地震数を増やすために遺伝的アルゴリズム（GA）用いてEGTDの推定を行った結果，グループ化半径500m，４Hzは精度良く推定できたが，その他のグループの再現性が悪いためGAの条件等をさらに検討する必要がある．

EGTDの妥当性の確認

・EGTDを推定するために6個以上の余震数となるようグループ化
・各グループのうち1個は検証のために用いるため，EGTD推定には利用しない（検証地震）
・グループ化の範囲は検証地震を中心とする半径500, 1000mの球

EGTDの導出には，観測波形のP波0.2秒前から20秒間の波形を切り出した，4Hz, 10Hzのローパスフィルターを通した．Fig４にEGTD推定に利用した観測地震動（黒実線）とEGTDを用いて再現した地震動（赤実線）の3成分比較例（半径500mグループ）を示す．
また，再現性を相互相関係数で評価した．

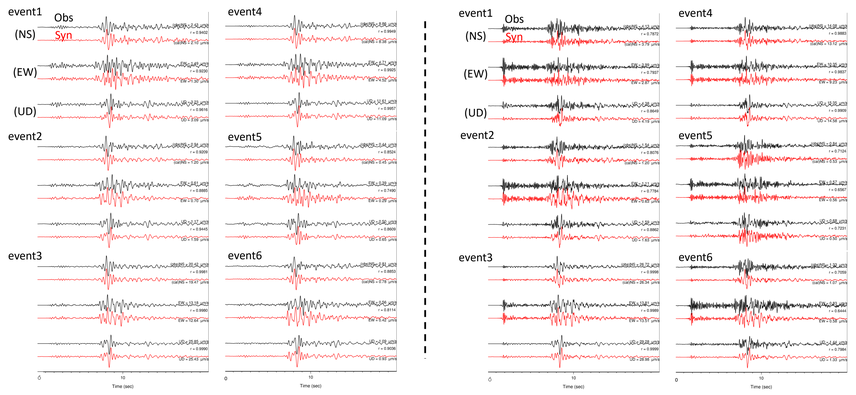

Fig4　EGTD推定に利用した1グループの観測波形（黒実線）と再現波形（赤実線）の比較（速度波形）：左；４Hz，右；１０Hz

検証地震波形の再現

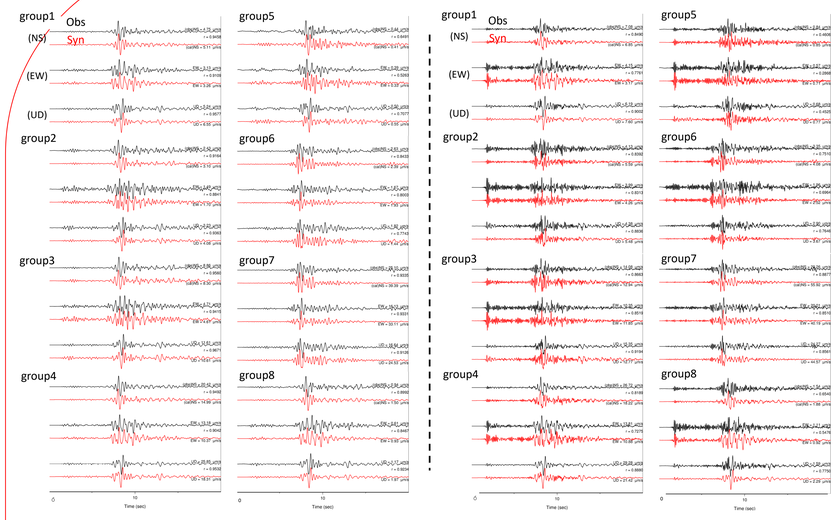

Fig5　検証地震の観測波形（黒実線）と再現波形（赤実線）の比較（速度波形）：左；４Hz，右；１０Hz

推定したEGTDを用いてEGTD推定に利用していないグループ内の余震（検証地震）の観測波形が再現されるかどうか検証を行った．Fig5にEGTD推定に利用していない観測地震動（黒実線）と推定したEGTDを用いて予測した地震動（検証波形）の3成分比較例（半径500mグループ）を示す．
次に，Fig6にすべてのグループの検証波形と観測波形の再現性を相関値で評価した結果を示す．
適用周波数４Hzまでは，相関値がほぼ0.7を超えており，精度良く再現できている．さらに，グループ化半径が小さいほど高精度となる．これはグループ化の範囲の代表的な長さ（直径）に対して考慮している最短波長の比が1000mよりも500mの方が大きいためであると考えられる．
また，グループ化半径500mの場合，適用周波数１０Hzに対しても相関の良い結果が多い．

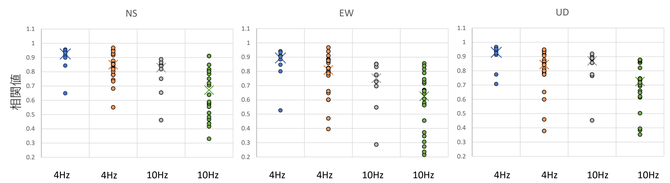

Fig6　適用周波数，グループ化半径毎の観測波形と再現波形の相関値：×印；中央値

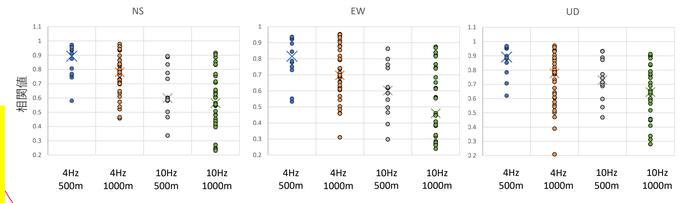

Fig7　震源パラメータ決定精度の悪い地震を用いた，適用周波数・グループ化半径毎の観測波形と再現波形の相関値：×印；中央値

規模の小さい地震のモーメントテンソル推定値，つまり断層パラメータ（走向・傾斜・滑り角），地震モーメント，震源時間関数から成る震源パラメータを一意的に決定することは難しい．これまでの結果は比較的精度良く震源パラメータを推定できた地震を用いてEGTDの推定および検証を行ってきた．そこで，EGTDの推定に利用することができる地震を増やすために，震源パラメータの決定精度が悪い地震に遺伝的アルゴリズム（GA）を用いてEGTDの推定精度を検討した．具体的には観測余震波形に最も良く一致する予測波形を生成する震源パラメータとそれらから得られるEGTDをGAで求めた．

Fig7に適用周波数，グループ化半径ごとの検証地震の観測波形と再現波形の評価（相関値）を示す．グループ化半径500m，４Hzまでのグループは波形の再現性がほぼ良い結果となった．しかし，その他のグループは精度良く震源パラメータが求められたグループ（Fig６）より再現性が悪い結果となった．

これは，ひとつに，GAで解が収束していない（初期乱数の与え方によって一意的にパラメータが算出できていない）可能性が挙げられる．また，各震源パラメータごとの探索範囲が適切に設定できていない可能性も考えられる．さらに，GAを用いていない場合にも該当するが，長周期ノイズが除去できていないことや，規模が小さい余震を用いているため観測波形に長周期成分が不足していることが考えられる．