

直下型地震（内陸活断層地震）の入力地震動評価

田中 清和

Evaluation of Ground Motion of Near-fault Inland Earthquake

Kiyokazu Tanaka

Abstract

For application to the ground motion evaluation of near-fault inland earthquakes, the source characteristics of the stochastic Green's function method are improved; the method is used for short period evaluations in a hybrid method that combines methods for long and short periods. Using the stochastic Green's function method, the predicted ground motion may be underestimated in the nodal direction of the theoretical radiation pattern. Therefore, the frequency dependence and radiation distribution of the S-wave radiation pattern are investigated using ground motion records, and a radiation characteristics model is proposed. When the proposed model is applied to the ground motion prediction of the Uemachi fault zone, it is confirmed that the evaluation method is improved and can avoid underestimations.

概要

直下型地震のうち内陸活断層地震の地震動評価に適用することを念頭に、短周期領域の半経験的手法と長周期領域の理論的手法を組み合わせたハイブリッド手法において短周期評価に用いられる統計的波形合成法の震源特性を改良した。統計的波形合成法では、地震波の理論放射パターンが節になる方向で過小評価となる恐れがあるため、観測記録に基づいてS波放射特性の周波数依存性と放射パターンを評価した。評価結果の低周波数域の放射パターン分布では節となる方向で振幅0にならない特性を示すことから、低周波数での理論放射係数に下限値を導入する放射特性モデルを提案した。提案モデルの適用例として上町断層帯の地震動予測を実施したところ、従来モデルに比べて過小評価を回避するように改良されたことを確認できた。

1. はじめに

「直下型地震」は、一般的には都市部などの直下で発生する地震で大きな被害をもたらすものを指す用語として用いられることが多い。従って、直下型地震の地震タイプが内陸の活断層で発生する地震であるかプレート境界で発生する海溝型地震であるかの区別は本来無い。一方、このような直下型地震の入力地震動評価では、震源から評価地点までの距離が近いために、震源特性の影響が比較的大きくなるものと考えられる。

建物の耐震設計においては、建設地点に固有の地盤増幅特性や特定の地震による地震動特性をもつ地震波(サイト波)が必要に応じて入力地震動として考慮される。その際に、内陸活断層地震については、地震発生の再現期間が数千年と長く相対的に発生確率が低いことから、建築基準法で規定される「極めて稀に発生する地震動」としては採用されない場合も多く、採用されても余裕度検討用(いわゆるレベル3^{例えば2)})の地震動とされるというのが実状と思われる。しかし、最近5年間の主な被害地震を見ると、2016年熊本地震、2016年鳥取県中部の地震、2018年大阪府北部の地震、2018年北海道胆振東部地震、のように内陸活断層地震が多く発生しており、その地震動評価技術を改良・向上させることは重要である。

そこで本論では、直下型地震のうち内陸活断層地震の入力地震動評価に適用することを念頭に、短周期領域の

半経験的手法と長周期領域の理論的手法を組み合わせたハイブリッド法において短周期領域の評価に用いられる統計的波形合成法の震源特性について検討する。統計的波形合成法では、地震波の放射特性(震源からの射出方向によって地震動の強弱が異なる特性)を考慮する場合に予測地震動振幅が過小評価となる恐れがあるとの課題がある。そこで、近年多発している内陸活断層地震の観測記録を用いて放射特性を評価し、その分析結果に基づいた提案モデルを導入し、これを改良する。また、提案モデルを適用した具体的事例として上町断層帯を対象とした予測シミュレーション結果を示す。

2. 地震動評価法

短周期から長周期までの広帯域の地震動成分を含む地震動予測には、短周期評価が得意な半経験的手法と長周期評価が得意な理論的手法による地震動を合成するハイブリッド法が、比較的良好に利用される。その場合、半経験的手法としては経験的波形合成法(経験的グリーン関数法)や統計的波形合成法(統計的グリーン関数法)が用いられ、理論的手法としては有限差分法、有限要素法、波数積分法、等が用いられる。

本論における内陸活断層地震の地震動評価には、このハイブリッド法を用いることとし、短周期領域の半経験的手法には統計的波形合成法を、長周期領域の理論的

法には三次元有限差分法を適用する。

ハイブリッド法における短周期地震動と長周期地震動の合成は、それぞれの計算手法の精度範囲とスペクトル振幅の整合性を勘案して接続周期を設定し、時刻歴で足し合わせることで実施する。接続周期はそれぞれの計算ケースによるが、概ね1~5秒程度の範囲で設定されることとなる。従って、中間的な周期、例えば中低層建物で重要な周期1秒前後での地震動振幅の評価結果には、短周期領域の地震動評価に用いられる統計的波形合成法による評価結果が大きく影響する。統計的波形合成法では、震源断層を細分割した小断層(要素断層)による評価地点での地震動(要素地震波)を統計的な震源特性・伝播特性・サイト地盤増幅特性を考慮して算定し、これをグリーン関数(統計的グリーン関数)として断層面全体に相当する

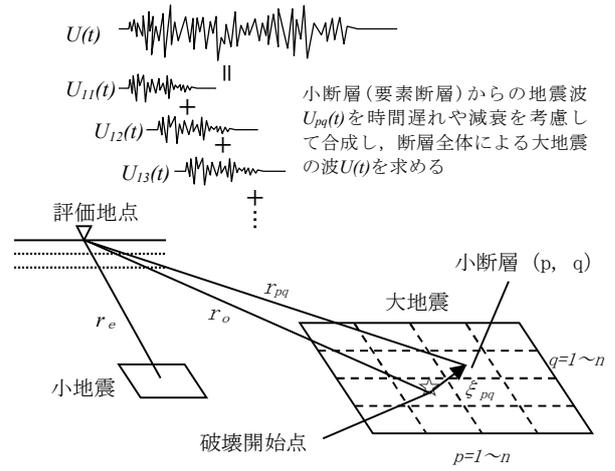


Fig. 1 波形合成法(グリーン関数法)による地震動評価
Ground Motion Evaluation by Green's Function Method

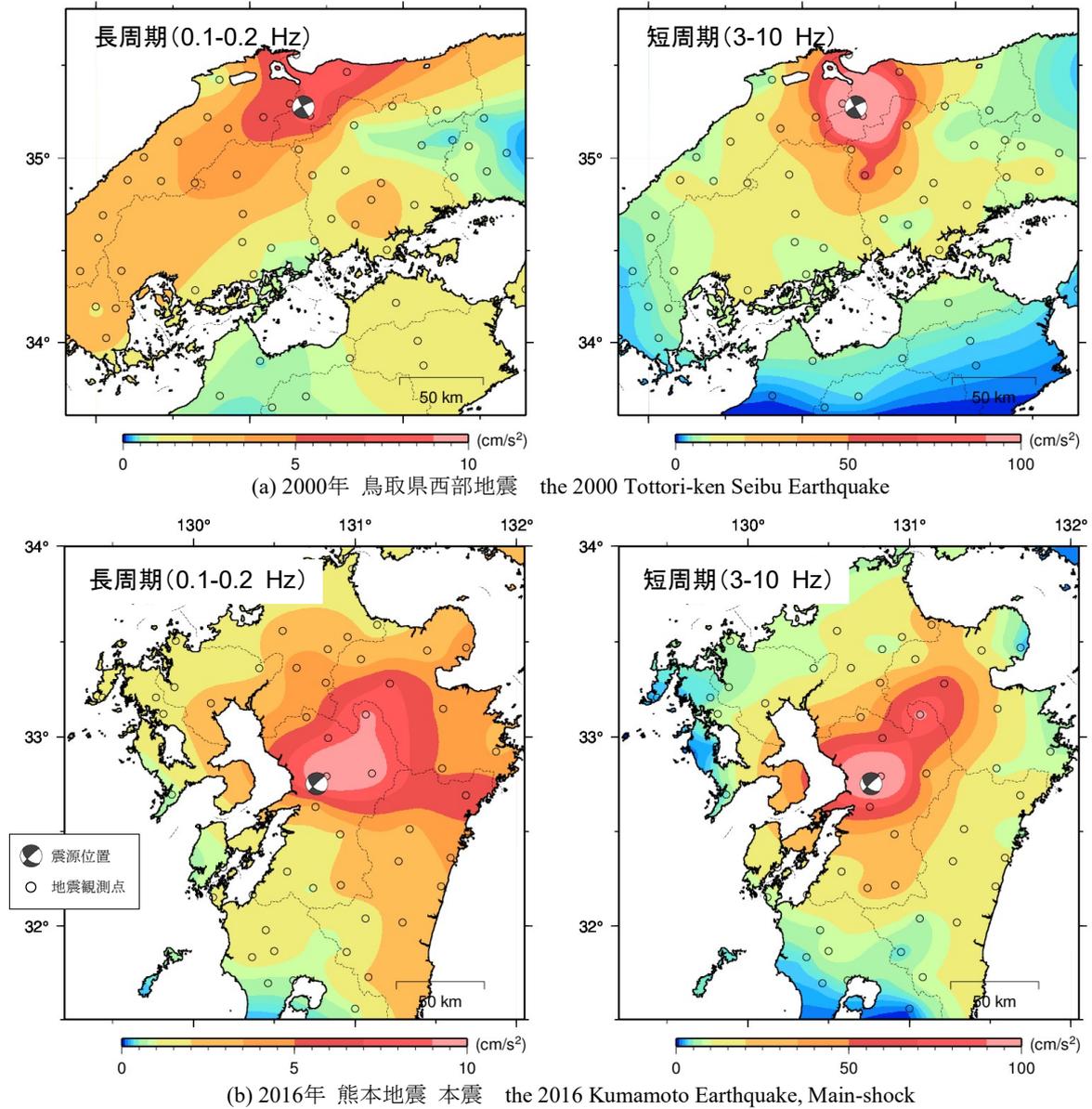


Fig. 2 地震観測記録の最大加速度分布 (KiK-net地中記録, Transverse成分)
Distribution of the Peak Ground Acceleration (Borehole Records of KiK-net. Transverse Component.)

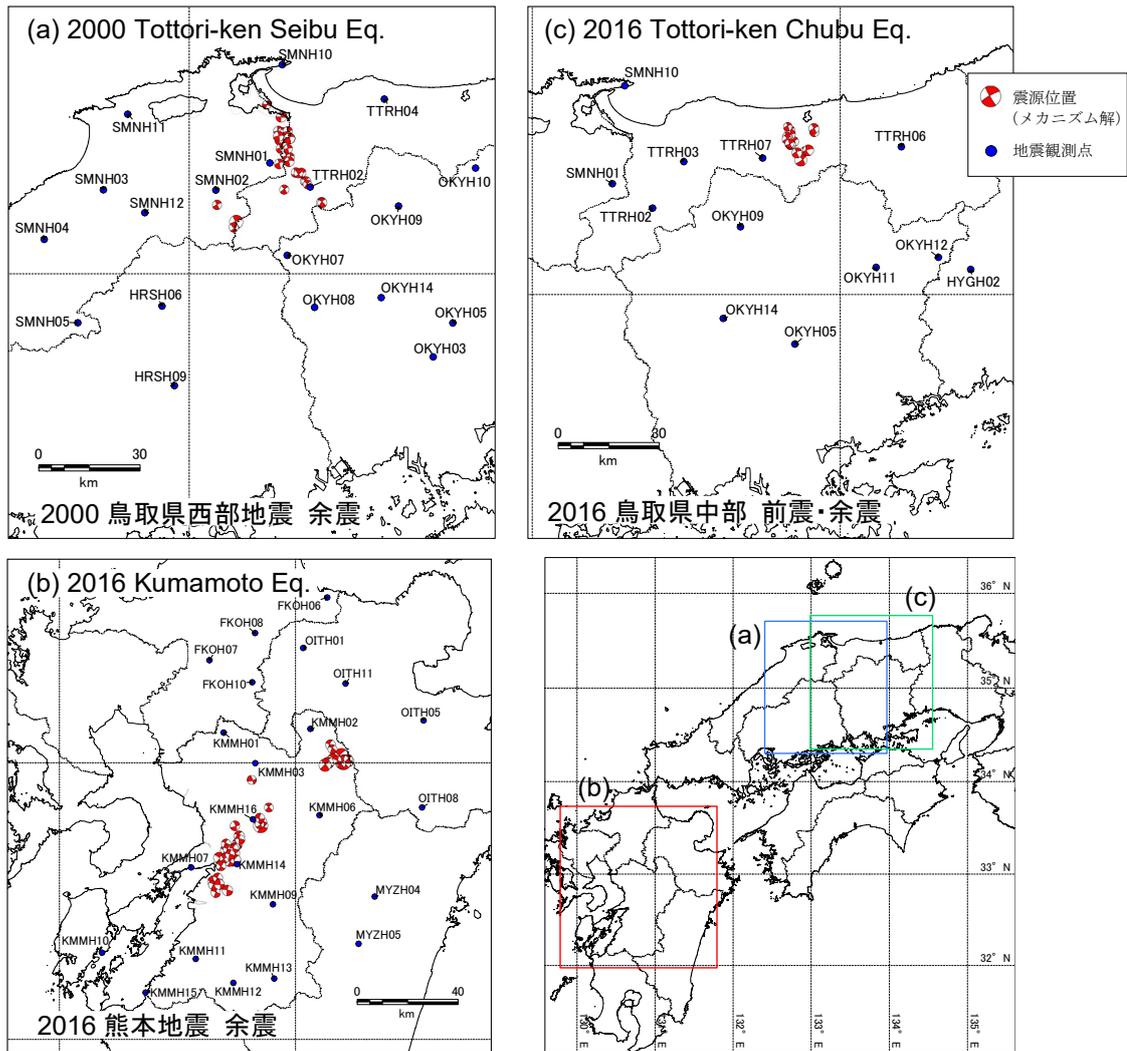


Fig. 3 検討に用いたKiK-net地震観測点と震源の位置 (F-net震源メカニズム解)
Locations of KiK-net Stations and Epicenters (F-net Focal Mechanism Solutions)

ように合成することで地震動を評価する(Fig. 1)。次章では、この統計的波形合成法の振幅項に考慮される地震波放射特性について検討する。

3. 短周期地震動評価(統計的波形合成法)に適用する地震波放射特性の検討

3.1 観測記録に見られる地震波S波放射パターンと計算モデル

地震波放射特性の射出方向による地震波強弱の分布形状を放射パターン(ラディエーションパターン)と呼ぶ。放射パターンは長周期領域から短周期領域になるにつれて明瞭ではなくなり、短周期領域では等方的になることが知られている。

実地震における地震波放射パターンを確認するため、2000年鳥取県西部地震と2016年熊本地震本震の地震観測記録の短周期成分と長周期成分の最大値分布をFig. 2に示す。図には、防災科学技術研究所で観測している

KiK-net観測網による地中記録を使用し、水平2方向成分をRadial方向成分(震源と観測点を結ぶ方向すなわち伝播方向に運動する成分)とTransverse方向成分(Radial方向と直交する方向に運動する成分すなわち横波成分)に方向変換した後に、バンドパスフィルター処理により長周期成分(0.1~0.2Hz)と短周期成分(3~10Hz)の波形を求め、それぞれのTransverse方向成分波形の最大加速度を色分けしてプロットした。Transverse方向成分波の主成分はS波(せん断波)の水平動(すなわちSH波)であり、図は概ねSH波の振幅を示している。震源からの方向による振幅の差違が、長周期に比べて短周期では小さくなっており、放射パターンが周波数の増加すなわち短周期になるにつれて不明瞭になっている性状が見取れる。

統計的波形合成法による強震動予測では、要素地震波のスペクトルの振幅項として地震波放射特性が考慮される。この放射特性として、上述したような現象を反映させるために、低周波数では理論放射、高周波数では等方的となる周波数依存型の放射パターンモデルが使用され

る場合がある。その場合、理論放射パターンとなる低周波域において、地震波の主要動となるS波(SH波とSV波³⁾)の放射パターン係数⁴⁾が0に近くなる射出方向すなわち節が生じる。しかし、実際の地震では地震波の散乱等の影響によりこの節の方向の振幅が完全に0になる訳では無いと推測されることから、地震動予測結果が過小評価となっている恐れがある。

そこで次節以降では、地震動評価の主対象となる地震波S波の放射特性の周波数依存性と放射パターンについて、内陸活断層地震の地震観測記録を分析した検討結果を示す。また、得られた特性に基づき、周波数依存する放射パターンのモデルを提案する。

3.2 地震観測記録に基づくS波放射パターンの評価

3.2.1 使用データ 検討には、防災科学技術研究所のKiK-net地震観測網における2000年鳥取県西部地震(本震Mw6.6)、2016年熊本地震(本震Mw7.1)および2016年鳥取県中部地震(本震Mw6.2)の余震(と前震)の地中記録を用いた。本件の対象地域では、地中地震計は主に深さ100-200mの硬質な地盤に設置されており、観測記録への地盤増幅の影響は小さいと考えられる。放射パターンを直接的に評価するため、震源が概ね鉛直横ずれ(strike-slip)型の地震の記録を用いることとし、分析対象地震を、F-netによるメカニズム解⁵⁾が提供されている地震の中から、断層傾斜角が概ね65-90度を目安に選択した。また、震源の近傍から中間的な距離での放射特性を対象とするため、観測点が各地震の震源距離60km以内となる観測波形記録データを対象とした。両条件に合致し使用したデータは2000年鳥取県西部地震の11余震の計100記録、2016年熊本地震の44余震の計425記録、2016年鳥取県中部地震の10余震と8前震の計138記録となった。Fig. 3に、分析に用いたKiK-net観測点と震源の位置を示す。

3.2.2 評価方法 Takemura他⁶⁾の方法をS波部分のRadial (R)とTransverse (T)成分のフーリエスペクトル振幅に適用し、0.2~10Hz間での代表周波数(18点)毎の放射パターンの振幅分布を評価した。S波切出し開始位置は直達S波の理論走時⁷⁾の到着時で設定し、切出し継続時間は10秒間とした。切出したRとT成分の波形からフーリエスペクトル振幅を算定し、Hanningウィンドウによる平滑化処理を実施した後に、各振動数でTakemura他⁶⁾が定義した振幅 $A_T = (|T| / (R^2 + T^2)^{1/2})$ を計算して A_T スペクトルを求めた。 A_T はS波水平動中のT成分の振幅を表しており、すなわちSH波の振幅比を概ね表す。代表周波数毎に、各観測点での A_T を断層の走向方向を基準とした方位角の関数として全余震についてプロットすることで、見かけのS波放射パターン(A_T 振幅分布)を得た。

3.2.3 評価結果(周波数依存性と放射パターン分布) Fig. 4に、観測記録から得られた A_T 振幅分布を示す。滑らかな A_T 振幅分布を求めるため、方位角幅10度ずつの移動平均を適用した分布も計算した。Fig. 4中には、SH波をT成分、SV波をR成分として計算した理論的な遠方場

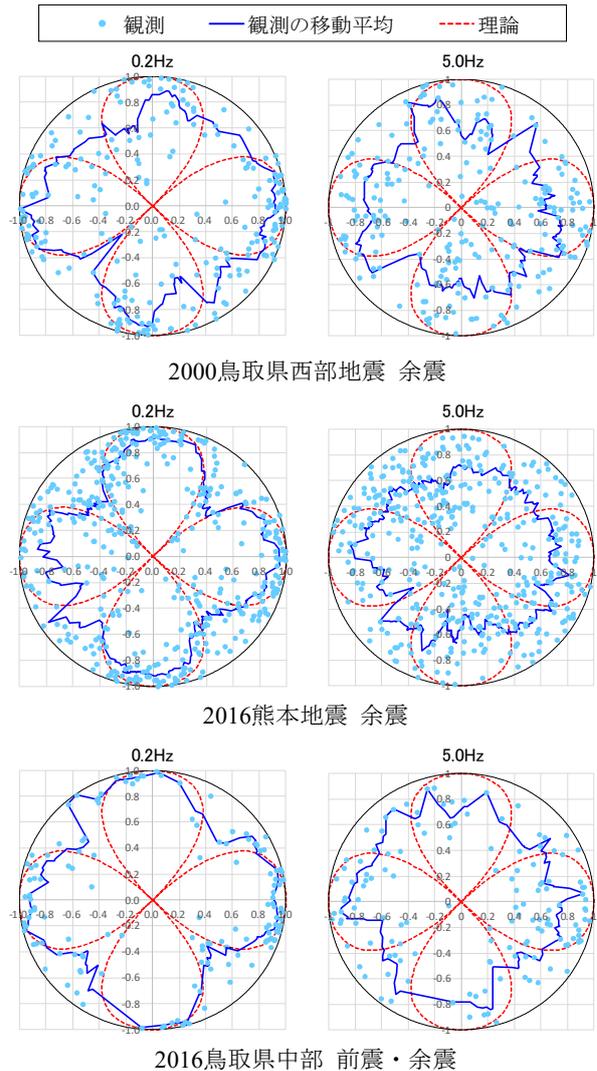


Fig. 4 A_T 振幅の空間分布 (見かけのS波放射パターン)
Distribution of the A_T Amplitude (Apparent S-wave Radiation Pattern)

放射パターンの A_T 分布を併せて示す。理論放射パターンを算定するためのパラメータは、中間的な距離の設定として、断層傾斜角90度、滑り角0度、見上げ角120度とした。

観測記録の A_T 分布は、低周波数で理論放射パターンと同様の四葉型形状となり、高周波数では等方的形状となる特性を示しており、低周波数から高周波数になるにつれて放射パターンの形状が崩れていく周波数依存性が確認できる。また、低周波数域(例えば0.2Hz)では、四葉型の節となる方向で必ずしも理論と同様の振幅0に近い値とはならず、最小でも0.2程度の振幅があり、移動平均値では概ね0.4から0.6程度の振幅となる特性を示している。

周波数依存性を定量的に評価するために、Takemura他⁶⁾と同様に、観測 A_T 分布と理論的 A_T 分布の相関係数 r を算定した(Fig. 5)。加えて、理論振幅で重み付け($W(\phi_i)$)した観測 A_T と理論 A_T の誤差の二乗平均平方根 err_w を、振幅間の一致度の評価指標となるmisfit値として求め(式(1),

Fig. 6), 低周波数の理論放射から高周波数の等方的放射パターンへの遷移周波数範囲を判断した。

$$err_w = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{W(\varphi_i) (A_{Tobs}(\varphi_i) - A_{Ttheory}(\varphi_i))\}^2} \quad (1)$$

ここで、 $A_{Tobs}(\varphi_i)$ は観測 A_T 振幅、 $A_{Ttheory}(\varphi_i)$ は理論 A_T 振幅、 φ は震源から観測点への方角、 $W(\varphi_i)$ は重み、 N は各代表周波数での A_T 値の数である。等方放射($T=R$ となる場合)の A_T ($=0.7071$)と理論 A_T とのmisfit値は $err_w=0.19$ となることから、移動平均 A_T のmisfit値がおよそ0.2以上で等方型になる閾値とした。また、Takemura他⁶⁾の相関係数の周波数変化の検討結果を参考にして、相関係数 $r=0.3$ を理論放射パターンが崩れ始める閾値と考えた。

これらの条件から総合的に判断すると、遷移周波数範囲は、2000年鳥取県西部地震余震では0.7または1Hz~4Hz、鳥取県中部地震余震では1Hz~2または3Hzと判断される。熊本地震余震では0.8Hz~0.9Hzと判断されるが、 A_T 分布形状は0.8Hz以下でも四葉型形状をはっきりとは示しておらず、遷移周波数範囲は明瞭ではない。検討エリアによる遷移周波数の差は、周波数依存性が地域性をもつことを示唆しており、地下深部地盤・地殻の不均質性の違いによる地震波の散乱程度の差が要因となっている可能性がある。

3.3 S波放射パターンの提案モデル

低周波数域での観測 A_T 分布は節となる方向で振幅0にはならない特性を示した。そこで、低周波数での理論放射パターンから高周波数での等方的放射パターンへ遷移する周波数依存型のS波放射パターンモデル(例えば⁸⁾)において、低周波数での理論放射パターン係数(絶対値)に下限値を導入することを提案する。

具体的な下限値としては、SH波の放射係数について、観測 A_T の0.2Hzでの下限値(移動平均で概ね0.4~0.6)とSH波の節方向のSV波理論振幅(0.43)から見積もると、0.19~0.32程度となる。SV波放射係数の下限値は観測 A_T から見積もることはできないが、例えば、Boore and Boatwright⁹⁾による中間距離または近傍での平均値(0.20 or 0.32)を用いるのが実用的な選択と考えられる。Fig. 7に、下限値を導入したSH, SV放射パターンと A_T 分布の例を示す。提案の A_T 分布は、観測の0.2Hzでの移動平均 A_T 分布と良い対応を示している。

4. 適用例：上町断層帯地震の地震動予測

4.1 地震動予測の概要(ハイブリッド法)

地震波放射特性の提案モデルを適用した活断層地震の地震動評価の例として、上町断層帯による地震を対象とした地震動予測をハイブリッド法にて実施した。

4.1.1 震源モデル 震源モデルは、大阪府¹⁰⁾が被害想定のために評価した上町断層帯の断層破壊ケースの

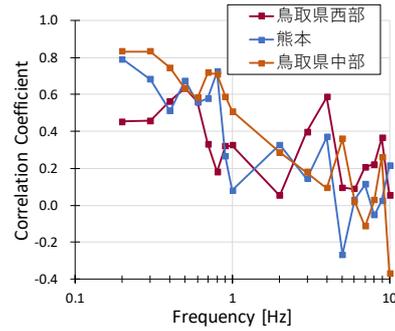


Fig. 5 観測 A_T 振幅(移動平均)と理論 A_T 振幅の相関係数
Correlation Coefficient r between the Observed A_T Distribution (Moving Average) and the Theoretical A_T Distribution

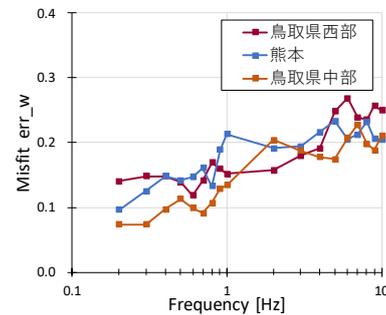


Fig. 6 観測 A_T 振幅(移動平均)と理論 A_T 振幅のmisfit値
Misfit Value err_w between the Observed A_T Distribution (Moving Average) and the Theoretical A_T Distribution

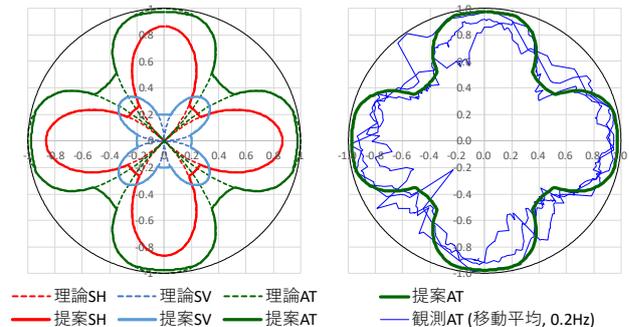


Fig. 7 提案モデルのSH, SV放射パターンと A_T 振幅 (SH下限値0.32, SV下限値0.2の場合)
Proposed Radiation Pattern (with Lower Limit of 0.32 for SH-wave, 0.2 for SV-wave) and Its A_T Distribution

うちから「破壊ケース33(ケースA)」を対象に選定した。震源設定の詳細については、大阪府被害想定報告書¹⁰⁾に掲載された震源パラメータを参照した。同資料に記載されていない詳細不明な震源パラメータについて、断層配置・位置は大阪府被害想定報告書¹⁰⁾の掲載図から読み取り、アスペリティ等の設定は関連文献¹¹⁾の掲載値や「強震動予測レシピ¹²⁾」を参考にして設定した。ま

た、断層タイプが逆断層であることから滑り角90度の縦ずれ断層を仮定した。想定震源モデルの位置と形状をFig. 8に、主要な震源パラメータをTable. 1に示す。

4.1.2 地盤構造モデル 地盤構造については、産総研が公開する大阪堆積盆地の三次元地盤構造モデル(堀川ほか¹³⁾)に基づくこととし、その堆積層を5層構造に置き換えて用いた。堆積盆地外の領域については堆積地盤を省略して岩盤が露頭しているとしてモデル化した。地下構造モデルの基盤深度分布をFig. 8中に、地盤定数をTable 2に示す。

4.1.3 長周期地震動の計算条件 地殻から工学的基盤($V_s 500\text{m/s}$)までの深部地盤の三次元不整形構造を三次元有限差分法^{14), 15)}でモデル化して、堆積盆地構造による影響を含めた長周期地震動波形を求めた。解析モデル化範囲は、大阪湾を含めた大阪堆積盆地全体を囲むおよそ東西98km×南北89km×深さ33kmの領域とした。解析時間刻みを0.0045秒、差分メッシュ間隔を水平125m、上下50m~300mとして、最小S波速度 $V_s 500\text{m/s}$ の層において周期1.25秒以上の帯域で計算精度が確保されるようにした。震源断層は、2km四方の要素断層に分割し、各要素断層を点震源としてモデル化した。各点震源の震源時間関数については、中村・宮武¹⁶⁾によるすべり速度時間関数をモーメントレート関数として適用した。

4.1.4 短周期地震動の計算条件 評価サイト直下の

地震基盤における地震動を統計的波形合成法によって算定し、求めた地震基盤波(水平動)を一次元平行成層地盤に鉛直入射して解放工学的基盤面での地震波を算定した。統計的波形合成法には壇ほか¹⁷⁾の手法を採用し、地震基盤における要素断層波の包絡形はBoore¹⁸⁾による経時特性を使用した。

放射特性係数の周波数依存性には、香川⁸⁾による低周波数での理論放射から高周波数での等方的放射へ振動数増加に伴って線形に遷移する数式モデル(式(2))を採用した。

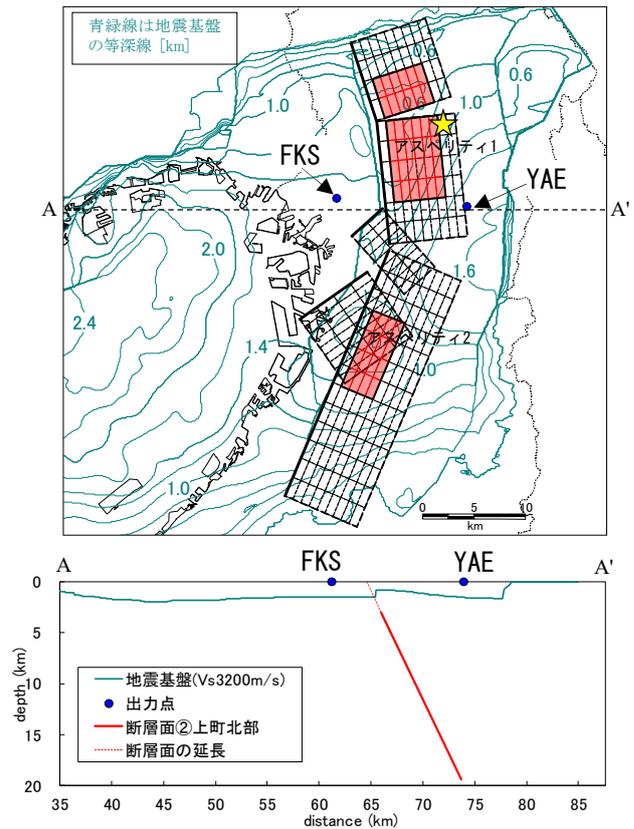


Fig. 8 上町断層帯地震の想定震源モデル (大阪府2007の想定ケース33(ケースA)に基づき設定) Fault Model of the Uemachi Fault Zone Earthquake (Osaka Prefecture Government 2007 Model)

Table 1 上町断層帯地震の震源パラメータ Source Parameters of the Uemachi Fault Zone Earthquake

	パラメータ	設定値	
巨視的震源特性	断層全体長さL	58 km	
	断層幅W	18 km	
	断層面積S	1044 km ²	
	走向角str	N23~342°E	
	傾斜角dip	65°	
	断層上端深さ	3 km	
	総地震モーメントM0	5.17E+19 N*m	
	モーメントマグニチュードMw	7.08	
	平均すべり量D	1.44 m	
微視的震源特性	アスペリティ (強震動生成域) 1	地震モーメントM0a	1.59E+19 N*m
		面積Sa	144 km ²
		平均すべり量Da	3.21 m
	アスペリティ (強震動生成域) 2	実効応力 $\Delta\sigma_a$	16.9 MPa
		地震モーメントM0a	0.47E+19 N*m
		面積Sa	64 km ²
	背景領域	平均すべり量Da	2.14 m
		実効応力 $\Delta\sigma_a$	16.9 MPa
		地震モーメントM0b	3.12E+19 N*m
面積Sb		836 km ²	
その他の特性	平均すべり量Db	1.09 m	
	実効応力 $\Delta\sigma_b$	3.8 MPa	
	断層タイプ	逆断層	
	高周波遮断振動数 f_{max}	6 Hz	
破壊伝播速度 V_r	2.52 km/s		

※大阪府の地震被害想定(大阪府2007)における想定地震「上町断層帯地震ケース33(=上町断層帯地震A)」のパラメータを参照して設定。

Table 2 大阪堆積盆地構造モデルの地盤定数 Layer Parameters of the Osaka Basin Structure Model

Layer	Depth [km]	Vp [km/s]	Vs [km/s]	Density [t/m ³]	Q value
堆積層 1	0~0.6	1.8	0.50	1.8	50
堆積層 2	0~0.8	1.9	0.65	2.0	65
堆積層 3	0~1.0	2.2	0.80	2.1	80
堆積層 4	0~1.6	2.3	0.95	2.1	95
堆積層 5	0~2.6	2.5	1.10	2.1	110
基盤	0~5.0	5.4	3.20	2.7	320
上部地殻	~20	6.0	3.46	2.7	600
下部地殻	—	6.7	3.87	2.8	700

$$R_{\theta\phi}(f_i) = \frac{(\log(f_2) - \log(f))R_{\theta\phi 0} + (\log(f) - \log(f_1))R_{\theta\phi m}}{\log(f_2) - \log(f_1)} \quad (2)$$

ここで、 $R_{\theta\phi 0}$ は理論放射パターン係数⁴⁾、 $R_{\theta\phi m}$ は高周波数域での等方放射として平均化された放射パターン係数、 f_1 と f_2 は理論的放射から等方的放射への遷移周波数帯である。高周波数域での等方的放射パターン係数は、S波の全震源球面での平均値⁹⁾である0.63を水平2成分の二乗平方根と考えると、 $2^{1/2}$ で除した値(0.445)¹⁹⁾を適用した。理論放射から等方的放射への遷移周波数域は3~6Hz²⁰⁾に設定した。提案モデル適用の場合の放射パターン係数の下限値については、3章の検討結果に基づきSH波放射係数で0.32、SV波放射係数で0.2に設定した。

4.1.5 ハイブリッド法の接続周期 短周期地震動と長周期地震動の足し合わせの際の接続周期域について、周期1.6~2秒に設定した。

4.2 計算結果

地震波放射パターン係数に提案モデルを適用して下限値を導入した場合と、適用しない場合(従来モデル)のそれぞれについて、YAE地点とFKS地点で算定した地震動の擬似速度応答スペクトル(減衰5%)をFig. 9に示す。

FKS地点の地震動計算結果では提案モデル適用の場合と従来モデル適用の場合で大きな差違は出ていない。一方、YAE地点では周期0.3秒から2秒弱の周期範囲でNS成分地震波に差違が生じている。従来モデル適用の場合に比べて提案モデル適用の場合の方が最大で1.5倍ほどスペクトル振幅が増大する結果となっており、放射パターンの節方向に位置することによる過小評価を回避するように改良できていると判断される。

なお、3章の検討で対象とした地震は横ずれ(strike-slip)型であったのに対し、本検討の上町断層帯地震は縦ずれ(dip-slip)型の震源となっており、3章の検討結果に基づく放射パターン係数の下限値をそのまま適用することの妥当性については検討の余地がある。

5. まとめ

直下型地震のうち内陸活断層地震の地震動評価に適用することを念頭に、短周期領域の半経験的手法と長周期領域の理論的手法を組み合わせたハイブリッド法において短周期領域の評価に用いられる統計的波形合成法の震源特性について検討した。検討結果を以下に示す。

- 1) 短周期領域の評価に用いる統計的波形合成法では、地震波の理論放射パターンが節になる方向で過小評価となる恐れがあるため、観測記録に基づいてS波放射特性の周波数依存性と放射パターンについて検討し、低周波数での理論放射パターン係数に下限値を導入する放射特性モデルを提案した。
- 2) 提案モデルの適用例として上町断層帯の地震動予測を実施したところ、従来モデルに比べて過小評

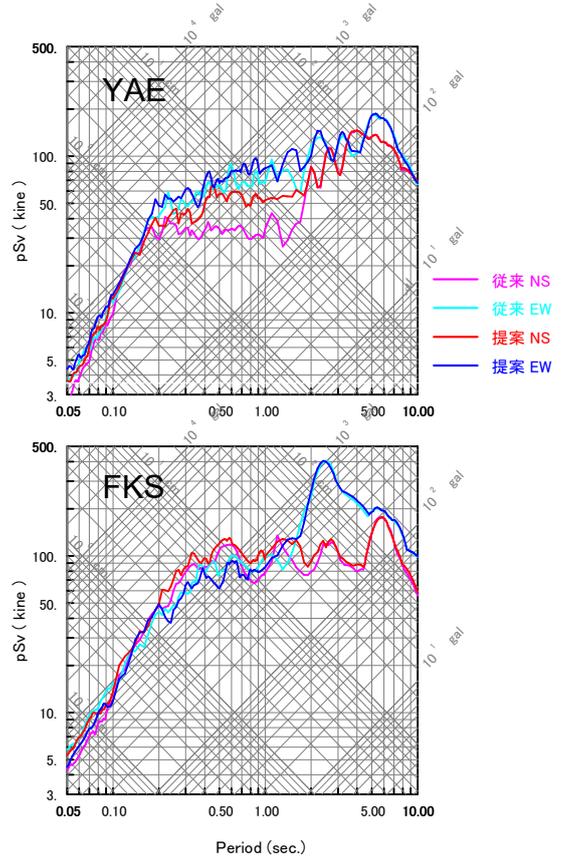


Fig. 9 上町断層帯地震の予測地震動の擬似速度応答スペクトル(減衰5%、ハイブリッド法)
Pseudo-velocity Response Spectra of Calculated Ground Motion of the Uemachi Fault Zone Earthquake (Hybrid Method)

価を回避するように改良されたことを確認できた。

- 3) 但し、提案モデルに用いる放射パターンの下限値には断層ずれ型との対応に検討の余地があると考えられることから、今後も改良を実施し、直下型地震の入力地震動評価の精度を向上させていく予定である。

なお、提案モデルについては内陸活断層に限らずプレート境界地震にも適用可能と考えられるが、検討に使用した地震データが内陸活断層地震だけであるため、適用に当たっては注意を要する。

謝辞

本検討を実施するに当たり、防災科学技術研究所のKiK-net地震観測記録データとF-netのメカニズム解を使用させて頂きました。一部の図の作成にはGMTを使用しています。また、地震動計算では、大阪大学大学院・川辺秀憲先生からご提供頂いた差分法プログラムを改良して使用しています。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁, “よくある質問集 地震について”, 知識・解説, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/faq/faq7.html>, (参照 2020-06-03)
- 2) 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会：大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針 2015年, 2章 設計用地震動, 2015.2
- 3) 佐藤泰夫: 弾性波動論, (3.6 P波とS波, SV波とSH波), 岩波書店, pp. 35-38, 1978.3
- 4) Aki, K. and P. G. Richards: Quantitative Seismology, Theory and Methods (Vol. I, Chap. 4, Section 4.5), W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1980.
- 5) 福山英一, 石田瑞穂, Douglas S. Dreger, 川井啓廉: オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定, 地震第2輯, 第51巻, pp. 149-156, 1998.
- 6) Takemura, S., Furumura, T. and Saito, T.: Distortion of the apparent S-wave radiation pattern in the high-frequency wavefield: Tottori-Ken Seibu, Japan, earthquake of 2000., Geophys. J. Int., 178, pp. 950-961, 2009.
- 7) 宇津徳治ほか編: 地震の事典 第2版, 3.3 走時曲線と地震波速度の分布, 朝倉書店, pp. 90-96, 2001.7
- 8) 香川敬生: ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域への拡張, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第2号, pp. 21-32, 2004.
- 9) Boore, D. M. and Boatwright, J.: Average body-wave radiation coefficients, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 74, No. 5, pp. 1615-1621., 1984.10
- 10) 大阪府: 大阪府自然災害総合防災対策検討(地震被害想定)報告書, II ハザードの想定, 2. 地震動, 平成19年3月, 2007.3
- 11) 羽田浩二: 各予測地震動の地震学的位置付け, 日本建築学会近畿支部シンポジウム 大阪を襲う内陸地震に対して建物をどう耐震設計すればよいか?, pp. 19-24, 2008.
- 12) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 付録3 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」) 平成21年12月21日改訂, 「全国地震動予測地図—地図を見て私の街の揺れを知る—」技術報告書(2009), 2009.7
- 13) 堀川晴央, 他: 断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の3次元地盤構造モデル, 活断層・古地震研究報告, No. 3, pp. 225-259, 2003.
- 14) Pitarka, A.: 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 89, No. 1, pp. 54-68, 1999.2
- 15) Graves, R. W.: Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences., Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 86, No. 4, pp. 1091-1106, 1996.8
- 16) 中村洋光, 宮武隆: 断層強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, 地震第2輯, 第53巻, 第1号, pp. 1-9, 2000.
- 17) 壇一男, 他: 統計的グリーン関数法による1923年関東地震(Mjma7.9)の広域強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, No. 530, pp. 53-62, 2000.4
- 18) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 73, pp. 1865-1894, 1983.
- 19) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 4.5節 強震動計算方法, 4章 震源断層を特定した地震動予測地図, 「全国地震動予測地図—地図を見て 私の街の揺れを知る—」技術報告書(2009), 2009.7
- 20) 佐藤智美: Kik-net強震記録に基づく鳥取県西部地震とその余震のラディエーションパターン及びfmaxの評価, 日本建築学会構造系論文集, No. 556, pp. 25-34, 2002.6