

長周期地震動評価の広帯域化に向けた検討

岩城麻子（防災科学技術研究所）

1

はじめに

地震ハザード評価のための広帯域地震動計算（概ね0.05～20秒程度）

長周期（低周波数：LF）側と短周期（高周波数：HF）側で別々に計算してから、接続周波数で足し合わせる手法がとられることが多い。

=ハイブリッド合成法

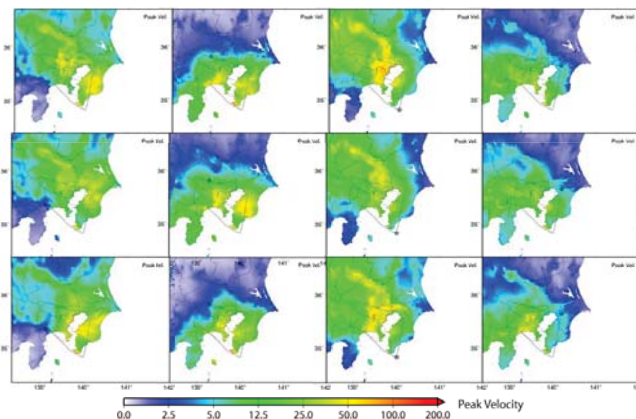
- 低周波数側 (LF)：理論的・決定論的手法 FDM, FEM, etc.
 - 震源過程と3次元的な波動伝播過程（サイト効果含む）を考慮できる
 - 震源・地下構造モデルの精度、計算コスト ⇒ せいぜい1 Hz以下
- 高周波数側 (HF)：半経験的/統計的手法
 - 統計的な地震動特性をもつ波形ができる
 - 特徴的な地震動の特性が反映されず、LF地震動と整合的でないことがある

2

はじめに

➤ 理論計算による低周波数側（LF）の地震動評価の高度化

- 地下構造モデル：J-SHIS、全国一次地下構造モデル、浅部を含む高精度化
- 震源モデル：知見の蓄積、不確実性の考慮
- 計算機環境：多数のシナリオ計算に基づくハザード評価が現実的になりつつある

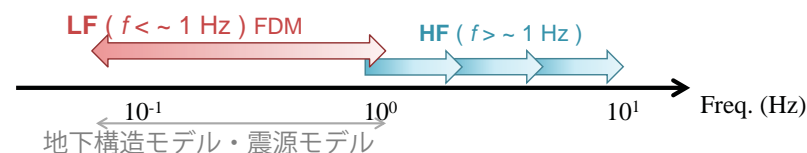


長周期地震動予測地図作成等支援事業
(2012,2013)

3

本研究の目的

約1秒程度まで低周波数地震動が計算されていることを前提とし、それを使って高周波数地震動を合成する方法（岩城・藤原, 2013）



- 観測記録を用いるので観測と整合的な地震動が得られる
- 短波長の地盤モデル、震源モデルを特には必要としない
- （HFの計算には）計算コストかからない

⇒新しい広帯域地震動予測手法として提案することを目指す

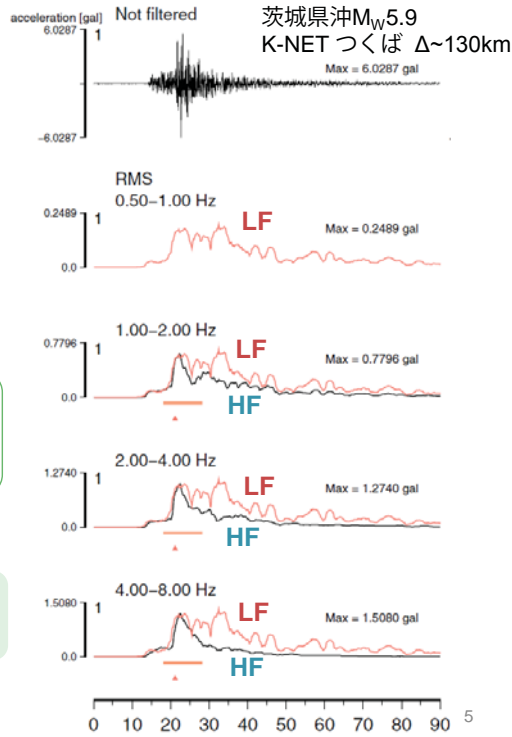
4

加速度エンベロープに着目

- 異なる周波数帯間の加速度エンベロープに着目すると、S波立ち上がり部分までは互いに似た形状をしている
- 形状の違いは主として周波数帯間の**伝播特性**と**サイト特性**の違いに起因していると考えられる

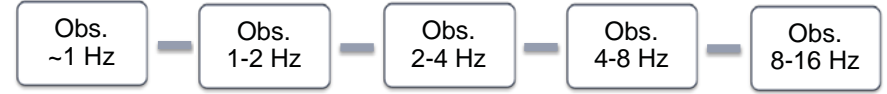
周波数帯間の伝播・サイト特性の経験的な関係性を地点ごとに評価
エンベロープ比関数

↓
低周波数(LF)地震動から
高周波数(HF)地震動を合成

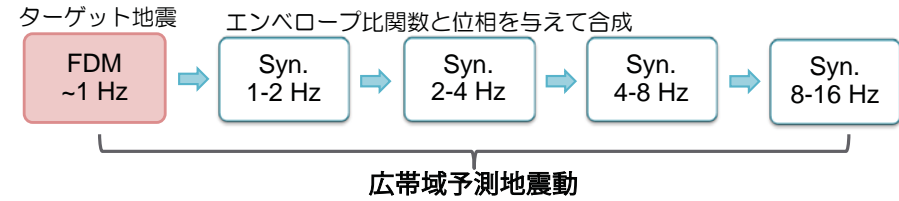
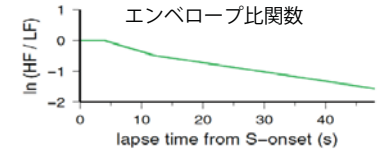


提案手法の概略

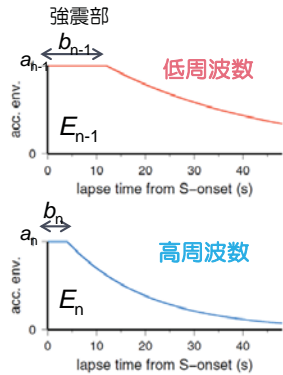
中規模地震の観測記録から経験的な関係式抽出



差分法等で計算した
ターゲット地震の低周波数エンベロープ
~1.0 Hz



エンベロープ比関数 $H_{n,n-1}$



S波立ち上がり部以降のエンベロープを**強震部**と**減衰部**に分けて以下の様にモデル化できると仮定

強震部：振幅一定

減衰部： $E(f; t) = S(f)G(f)R^{-\gamma}A(f; t)$

震源 サイト 幾何減衰 内部減衰

$$A(f; t) = A_0 \exp\left[-\frac{\pi ft}{Q(f)}\right]$$

周波数帯域 $n(n=0, 1, \dots, 4)$
強震継続時間 b_n とする

$$E_n(t) = \begin{cases} a_n & (t \leq b_n) \\ a_n \exp[-c_n(t - b_n)] & (t > b_n) \end{cases}$$

- $n=0$: 0.5 - 1 Hz
- $n=1$: 1 - 2 Hz
- $n=2$: 2 - 4 Hz
- $n=3$: 4 - 8 Hz
- $n=4$: 8 - 16 Hz

↓
LFとHFのエンベロープの比
 $H_{n,n-1} \equiv E_n/E_{n-1}$

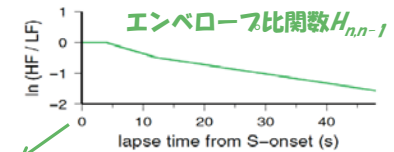
大地震のHF加速度波形の合成

中小地震観測記録から
得られたパラメータ

サイト増幅特性
強震継続時間の差
減衰特性

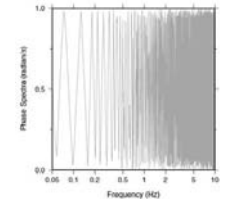
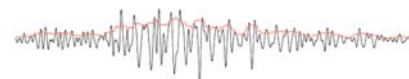
ターゲット地震
(大地震) の情報

震源スペクトル比 S_n/S_{n-1}
低周波数の強震継続時間

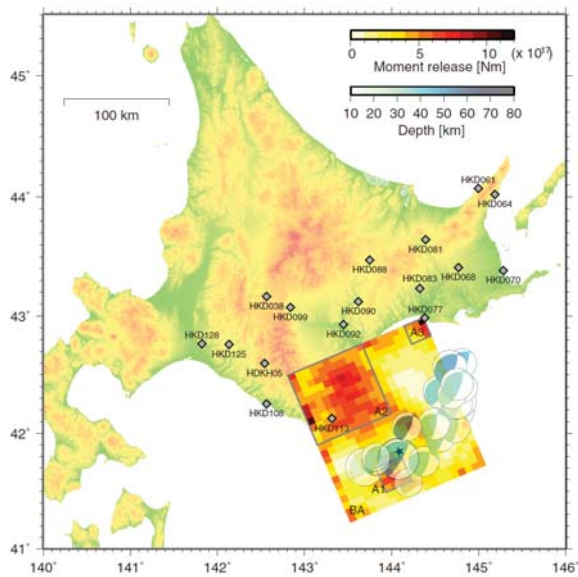


$$U_n(t) = \tilde{E}_0(t) \prod_{k=1}^n \tilde{H}_{k,k-1}(t) r_n(t) \quad (n = 1, 2, 3, 4)$$

ターゲット地震の
低周波数加速度エンベロープ



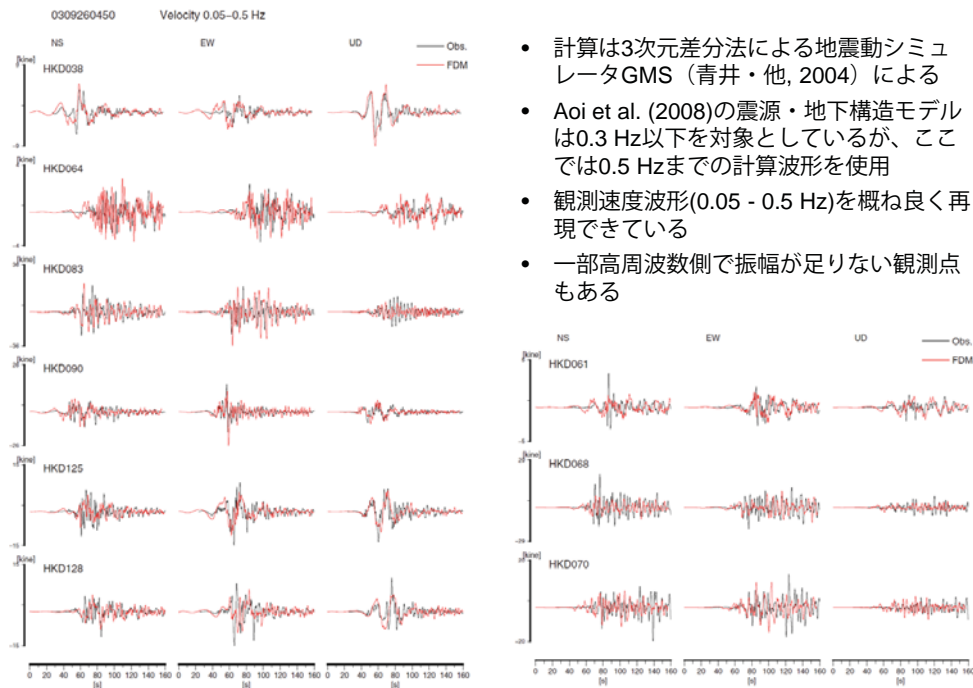
2003年十勝沖地震(M_w 8.3)への適用



- 震源モデルと地下構造モデル Aoi et al. (2008, JGR) に基づき、3次元差分法で**低周波数(LF)**地震動計算
- 20個の余震($5.5 < M_w < 6.6$)の地表強震観測記録を用いてエンベロープ比関数を作成
- 高周波数(HF)**地震動の合成
 - すべりの大きい領域 (アスペリティA1, A2, A3) とその他の領域 (背景領域) に分けてLF地震動を計算
 - それぞれを別々に広帯域化し、最後に波形を足し合わせる

9

3次元差分法による**低周波数(LF)**地震動



- 計算は3次元差分法による地震動シミュレータGMS (青井・他, 2004) による
- Aoi et al. (2008)の震源・地下構造モデルは0.3 Hz以下を対象としているが、ここでは0.5 Hzまでの計算波形を使用
- 観測速度波形(0.05 - 0.5 Hz)を概ね良く再現できている
- 一部高周波数側で振幅が足りない観測点もある

高周波数(HF)地震動の合成

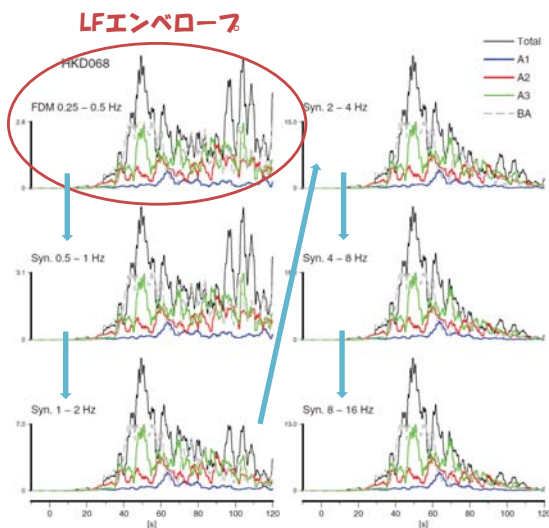
➤ 余震観測記録からエンベロープ比関数を作成

- S波到着時刻から120秒間を対象
- メカニズムの補正はしていない
- 0.5-1, 1-2, 2-4, 4-8, 8-16 Hz

- ターゲット地震 (本震) の各アスペリティ・背景領域ごとに、円形クラック断層における ω^2 のコーナー周波数を仮定
→震源スペクトル比 S_n/S_{n-1}

➤ HF波形の合成

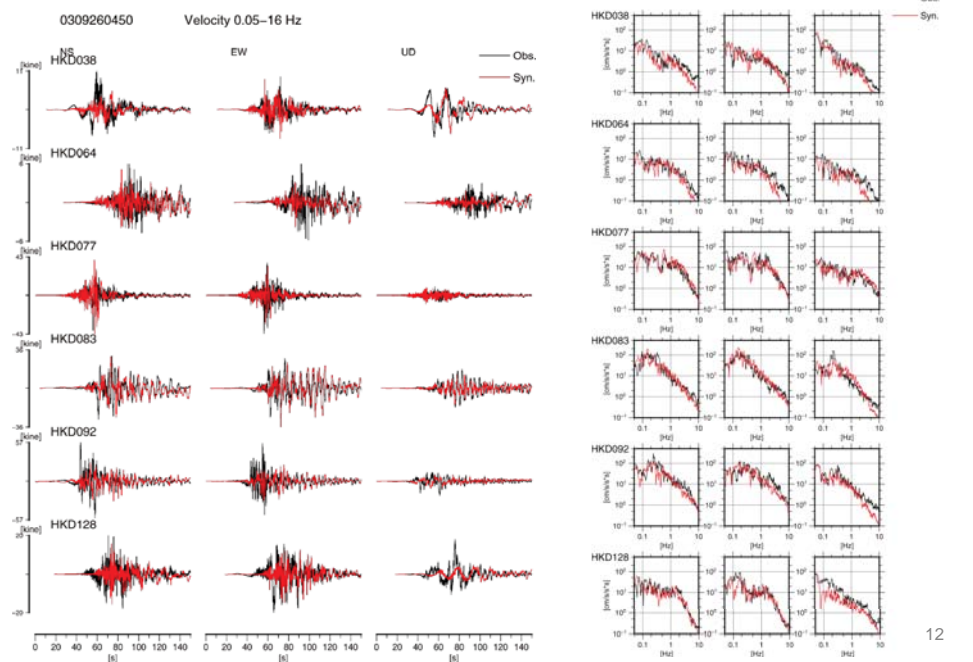
- LF加速度エンベロープにエンベロープ比関数を順次掛け合わせる
- 位相: 0.5-0.6Hzの間でなめらかにつながる乱数を選択



11

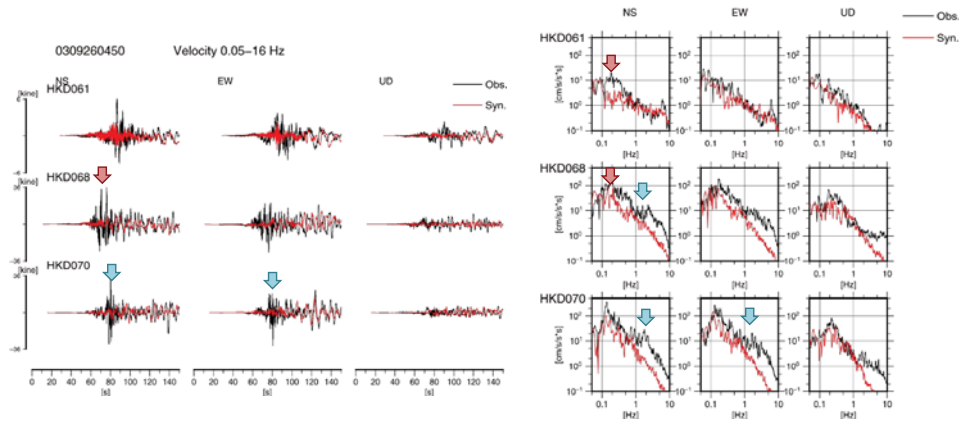
広帯域地震動 (観測・合成)

広帯域(0.05-16 Hz)速度波形・スペクトルレベルは観測を概ねよく再現している



12

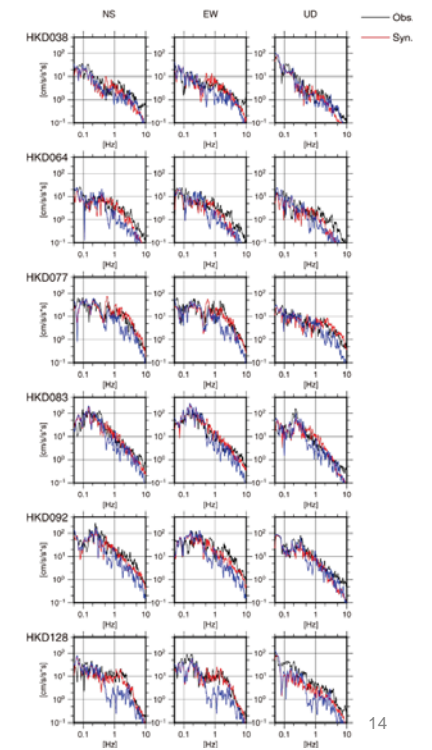
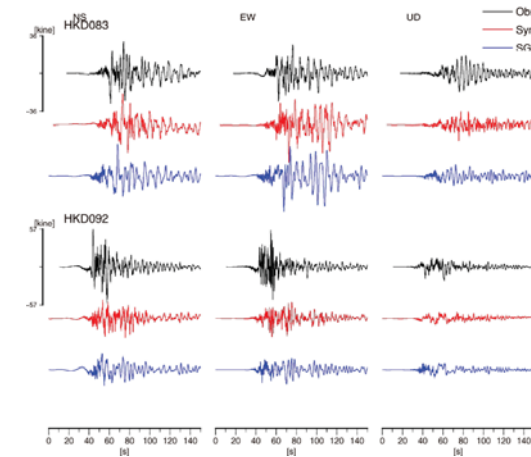
広帯域地震動（観測・合成）



- 低周波数(LF)地震動で再現性の良くない観測点 ⇒HFでも良くない
- LFでの再現性は悪くなかったが、HFの波を再現できていない
 - ⇒ サイト特性や伝播経路特性の影響は線形の範囲では経験式で考慮されているはずなので、震源特性の影響と考えられる。

13

統計的グリーン関数法(SGM)によるハイブリッド法との比較



14

まとめと今後の課題

- 周波数帯域間の加速度エンベロープ特性の関係性を利用した高周波数地震動合成手法を、M8クラスの地震に適用する方法を検討した
- 3次元差分法による低周波数地震動シミュレーション ($f < 0.5\text{Hz}$) と組み合わせて、2003年十勝沖地震の広帯域地震動シミュレーションを行った。
 - 差分法で0.5Hzまでよく再現されている観測点では、広帯域($< 16\text{Hz}$)でも波形を概ねよく再現できた。
 - 一部観測点では低周波数帯域では見られないパルスが高周波数帯域では観測されており、それを再現することができなかった。
 - ⇒ 周波数依存性を持つ震源モデルには対応できていない
- 現時点での手法の適用範囲
 - 震源距離：数十km以上～200km程度以内
 - 地震規模：M7, M8クラス
 - ターゲット地震の近くで中小地震記録が得られている
- 今後の課題
 - 予測問題におけるLF地震動の不確実性 (+ パラメータのバラツキ)
 - 震源距離の短い観測点での地震動
 - (周波数依存性を持つ震源モデル)

15