

スペクトルインバージョンに基づく強震動予測手法に関する研究  
A study on the strong motion prediction method based on the characteristics estimated by  
generalized inversion technique

○仲野健一・川瀬博・松島信一

○Kenichi NAKANO, Hiroshi KAWASE, Shinichi MATSUSHIMA

A method which capable to predict strong motions precisely at a given site has been a demand from the engineering community. However, the information of the characteristics of source, pass, and site factors on the strong motions at an arbitrary site is limited. First, analysis to investigate the properties of the factors mentioned above based on generalized inversion technique is performed, then analysis of not only spectral amplitude but also phase spectra is conducted. Next, a procedure for predicting strong motions at an arbitrary site is proposed. Finally, the proposed method is confirmed by the maximum aftershock ( $M_w7.8$ ) of the 2011 Tohoku earthquake.

### 1. はじめに

強震動予測においては、震源、伝播経路、サイト特性の3つの特性（強震動特性）を適切に設定することが重要である。しかしながら、これらの特性は極めて複雑であり、フォワード的に設定することは依然として難しい。日本における地震活動の高まりから、建築評定時のサイト波策定<sup>1)</sup>だけでなく、都市防災計画においては面的かつ適切な強震動予測の需要が高まっている。特に、事前情報が得られていない任意地点における精度の高い予測手法の開発が急務である。

そこで、本研究では、強震記録から経験的に得られる強震動特性に基づき、フーリエスペクトルの振幅情報だけでなく位相情報も考慮した、任意地点に適用可能な強震動予測手法を提案する。

### 2. スペクトルインバージョンによる強震動特性の評価

強震動特性の評価には Andrews<sup>2)</sup>が定式化したスペクトルインバージョン (Generalized Inversion Technique ; GIT)を用いる。フーリエ振幅スペクトルについては式(1), (2), フーリエ位相スペクトルについては、群遅延時間の線形性を仮定し<sup>3)</sup>, 式(3)~(5)で群遅延時間として各特性を分離する。なお群遅延時間の平均値と分散値は独立に扱う<sup>1),4)</sup>。

$$\log_{10}O_{ij}(f) = \log_{10}S_i(f) - n_{i(i)} \cdot \log_{10}X_{ij} + \sum_k b_{i(i)k} \cdot X_{ijk} + \log_{10}G_j(f) \quad (1)$$

$$X_{ij} = \sum_k X_{ijk} \quad (2)$$

$$\mu_i(f) = \mu_i^{Source}(f) + \sum_k \mu_{i(i)k}^{pass}(f) \cdot X_{ijk}^{1.9} + \mu_j^{Site}(f) \quad (3)$$

$$\sigma_i(f) = \sigma_i^{Source}(f) + \sum_k \sigma_{i(i)k}^{pass}(f) \cdot X_{ijk}^{1.9} + \sigma_j^{Site}(f) \quad (4)$$

ただし、 $O_{ij}$ は地震*i*における地点*j*の観測記録、 $S$ と $G$ は震源特性とサイト特性である。また、 $X$ は震源距離、 $\mu$ と $\sigma$ は群遅延時間の平均値と分散値である。解析条件等の詳細は既往研究<sup>5)</sup>を参照されたい。

### 3. 強震動予測手法の提案

まず式(5)と(6)から震源特性を、 $X^{-\alpha}$ と $Q$ を考慮して伝播特性を求める。次にS波サイト特性と全波サイト特性の比を空間補間モデルで求め、それをS波サイト特性に乘以対象地点のサイト特性とする。そして群遅延時間から得られる位相<sup>6)</sup>を組み合わせて要素波形とし、式(7)で合成波形を得る。

$$S_{ij}(f) = \frac{R_{\theta\theta_{ij}}(f) \cdot P_{RTIS} \cdot F_S}{4\pi\rho V_S^3} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Source} \cdot V_S^{Source}}{\rho_{SB} \cdot V_{SB}}} \cdot H_i(f) \quad (5)$$

$$H_i(f) = \frac{M_0}{1 + (f/f_{c1})^2} \cdot \frac{\omega^2}{1 + (f/f_{max1})^{p_n}} \quad (6)$$

$$U_j(f) = \sum_{i=1}^N \alpha(f) \cdot S_{ij}(f) \cdot P_{ij}(f) \cdot G_j(f) \cdot \exp\left[i\left(2\pi f t_{ij} - \phi_{ij}(f)\right)\right] \quad (7)$$

ただし、 $i$ は要素断層番号、 $j$ は計算対象地点、 $R_{\theta\theta_{ij}}$ は理論放射特性、 $P_{RTIS}$ は分配係数で $1/\sqrt{2}$ とし、 $F_S$ は自由地表面の効果で2とした。 $\sqrt{\quad}$ 内は震源層と地震基盤のインピーダンス比である。また、 $t_{ij}$ は破壊開始点から各要素断層までの破壊伝播時間と対象地点までの地震波伝播に要する時間の和である。 $\alpha(f)$ は小地震と大地震のすべりの違いを補正する関数<sup>7)</sup>、 $\phi$ は位相角である。

#### 4. 提案手法の適用性確認

提案手法の適用性を確認するため、2011年東北地方太平洋沖地震の最大余震(茨城県沖:  $M_w$ 7.8)を対象に強震動シミュレーションを実施する。

図1にPGAとPGV、図2に計測震度分布の比較を示す。両者とも観測と計算はよく整合している。図1では地震動予測式<sup>8)</sup>に比べて全体的に振幅値が小さいが、これはGITで評価される応力降下量が小さいという既往の結果を支持するものである<sup>9)</sup>。図3に、東京湾岸サイトでの時刻歴波形(3成分)の比較を示す。波形の振幅及び継続時間ともよく整合していることがわかる。

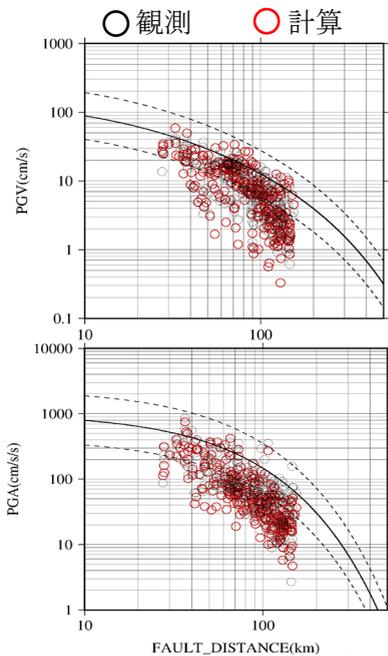


図1 PGAとPGVの比較

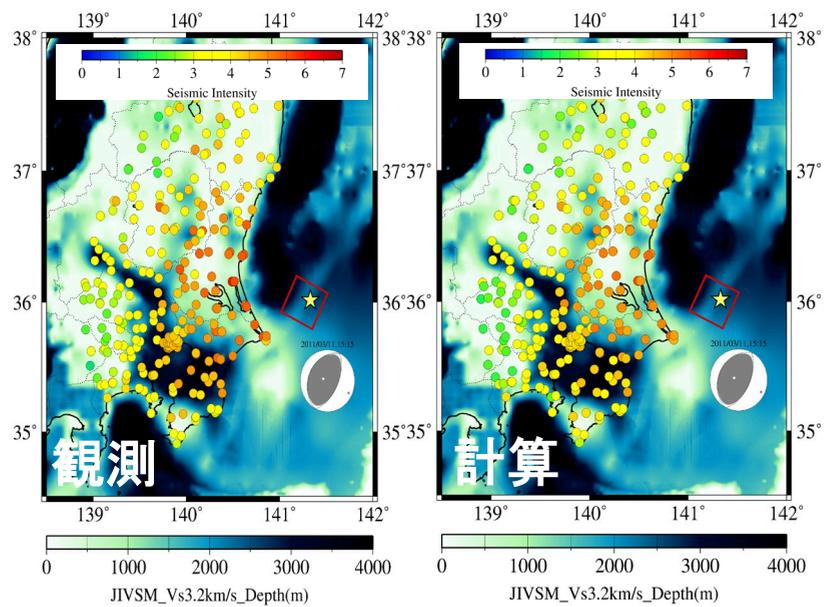


図2 計測震度分布の比較 (JIVSM<sup>10)</sup>の基盤深度を併記)

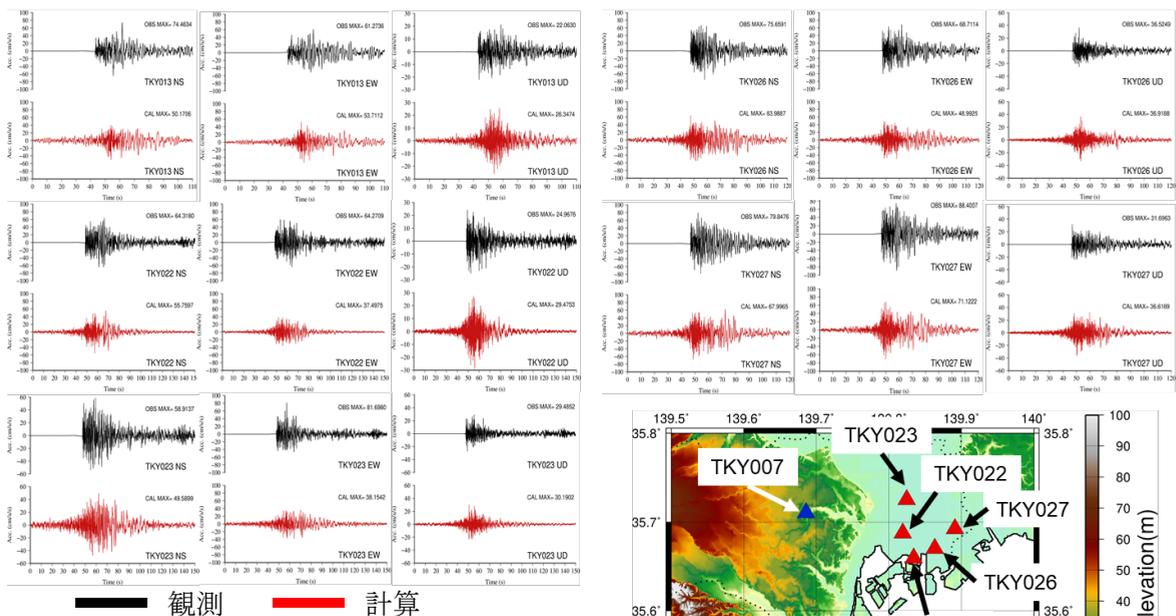


図3 東京湾岸サイトにおける加速度波形の比較 (TKY007を除く)

#### 5. まとめ

本研究では、まずスペクトルインバージョンによって振幅及び位相情報に関する強震動特性を評価した。次いで、先の強震動特性を考慮することで、任意地点に適用可能な新しい強震動予測手法を提案し、茨城県沖の  $M_w$ 7.8の地震の強震動シミュレーションによってその適用性を確認した。

#### 参考文献

- 1)大川ら(2013): 建築研究資料, 2)Andrews (1982): USGS, 3)和泉・勝倉(1983): 日本建築学会構造系論文集, 4)佐藤(2004): 日本建築学会構造系論文集, 5)Nakano and Kawase (2019): EPS, 6)佐藤ら(2010): 日本建築学会構造系論文集, 7)大西・堀家(2004): 日本建築学会構造系論文集, 8)Morikawa and Fujiwara (2013): JDR, 9)東日本大震災合同調査報告 共通編1, 10)地震本部(2012)