

# 波動伝播に基づく実時間地震動予測を目指して

## —データ同化と実時間サイト補正による時間発展型の予測—

干場充之（気象研究所）

### 1. はじめに：

現在、気象庁の緊急地震速報では、まず、一旦、震源位置とマグニチュード ( $M$ ) を決め、それらをもとに地震動（震度）予測を行っている。このような震源と  $M$  に依存する方法では、震源域の広がり効果を取り入れるのは容易ではなく、震源や  $M$  推定の誤差が震度予測の誤差に直結し、また、震源が決まらなると震度予測の段階に入れない弱点がある。さらに、東北地方太平洋沖地震の余震で経験したように、同時に複数の地震が発生した場合には、震源決定は容易ではない。この課題に対処するため、震源や  $M$  を介さずに、波動場のリアルタイムモニタリングを利用して、時間発展的に予測することが提案されている（たとえば、干場, 2011 など: 昨年の研究会）。今回は、この時間発展型の予測手法で有効なデータ同化と、実時間でのサイト増幅特性の補正を紹介する。

### 2. 時間発展型予測とデータ同化

一般に、波動場は初期値と境界条件が与えられれば未来を予測することが可能である。初期値として、必ずしも震源時の状態である必要はない。そこで、現時点 ( $t=t_c$ ) での波動場を初期値として  $\Delta t$  後の波動場を予測すること、つまり、 $u(\mathbf{x}, t_c + \Delta t) = \mathcal{H}(u(\mathbf{x}, t_c))$  を考える。ここで、 $u(\mathbf{x}, t)$  は、場所  $\mathbf{x}$  での時刻  $t$  の波動、 $\mathcal{H}$  は予測演算子である。 $\mathcal{H}$  として、例えば、差分法その他、干場(2011)は Kirchhoff-Fresnel 積分による境界積分方程式法を時間軸上で行うことを提案している。

この時間発展型の予測手法では、現時点での波動場の分布の把握が重要であり、よって、密な観測網によるリアルタイムモニタリングが必要である。データ同化は、時間発展型の予測手法において、疑似的に観測点密度を増やすテクニックで天気予報や海洋の分野で広く用いられている。 $t_c$  での波動場を求める際に、 $\mathbf{x}_1$  の場所での実際の観測値、 $u(\mathbf{x}_1, t_c)$ 、とともに、 $t_c - \Delta t$  の波動場から  $t_c$  での波動場を予測した結果、 $H(u(\mathbf{x}, t_c - \Delta t))$ 、も用いる。つまり、実際の観測値を予測モデルに取り込むことを行う。これを、逐次、連続的に行うことにより、過去 ( $t < t_c$ ) のすべての観測値を予測に用いることにつながる。

### 3. 実時間サイト補正

この時間発展型の予測手法を地震動予測に応用する際に課題となるのが、サイトの増幅特性の補正である。リアルタイムでの地震動予測を行うためには、サイト補正を実時間で行う必要がある。そこで、サイト増幅特性を表す causal なフィルターを考え、時間軸上で処理することを行う。なお、今回考える周波数帯は、震度の予測を意識して、0.1~20Hz とする。

これらのデータ同化と実時間サイト補正による実時間地震動予測の流れを図 1a, b に示す。

図 2 に、防災科研 KiK-net の IBRH18 での実時間サイト補正（順補正）のフィルターを作成した例を示す。図 2a は、多くの地震の波形から、地上と地下（504m）のスペクトル比を取ったもので、サイト増幅の周波数特性を表す。このサイト増幅特性を表す causal なフィルターとして、ここでは、

$$F(s) = G_0 \prod_{n=1}^N \left( \frac{\omega_{2n}}{\omega_{1n}} \right) \cdot \frac{s + \omega_{1n}}{s + \omega_{2n}} \cdot \prod_{m=1}^M \left( \frac{\omega_{2m}}{\omega_{1m}} \right)^2 \cdot \frac{s^2 + 2h_{1m}\omega_{1m}s + \omega_{1m}^2}{s^2 + 2h_{2m}\omega_{2m}s + \omega_{2m}^2} \quad (1)$$

の形のもので近似させる。ここで、 $\omega_{1n}$ ,  $\omega_{2n}$ ,  $\omega_{1m}$ ,  $\omega_{2m}$  はフィルターの周波数特性を、 $h_{1m}$ ,  $h_{2m}$  は減衰特性を表す変数である。図 2a を図 2b のように近似し、双一次変換とプリワーピングを用いて IIR-フィルターを作成した。このフィルターのインパルス応答を図 2c に示す。

図 3 には、地下の波形をこのフィルターを通して、地上の波形の再現を試みた例を示す。低周波は比較的増幅が小さく、高周波は大きい様子が再現できている。

なお、地上の波形から地下の波形を再現する逆補正のフィルターは、(1) の分母と分子を入れ替えることで作ることができる。

### 4. おわりに

Causal なフィルターを用いることで、サイト増幅の周波数特性を実時間で補正することを紹介した。単純なスカラー量での補正（たとえば、PGA 比や震度差など）に比べて精度よく補正することが可能となる（図 4）。実時間で補正した波形を、データ同化を用いた時間発展型の予測手法に入力することで、実時間での地震動予測につなげる。

謝辞：防災科研 KiK-net のデータ、および気象庁一元化震源ファイルを使用した。

干場充之,2011, 地震波散乱研究の知見を緊急地震速報へ, 2011年地震研究所研究会「リソスフェアの短波長不均質性のイメージングとモニタリングに関する研究の高度化—地殻活動領域の構造特性の時空間変化の解明に向けて—」

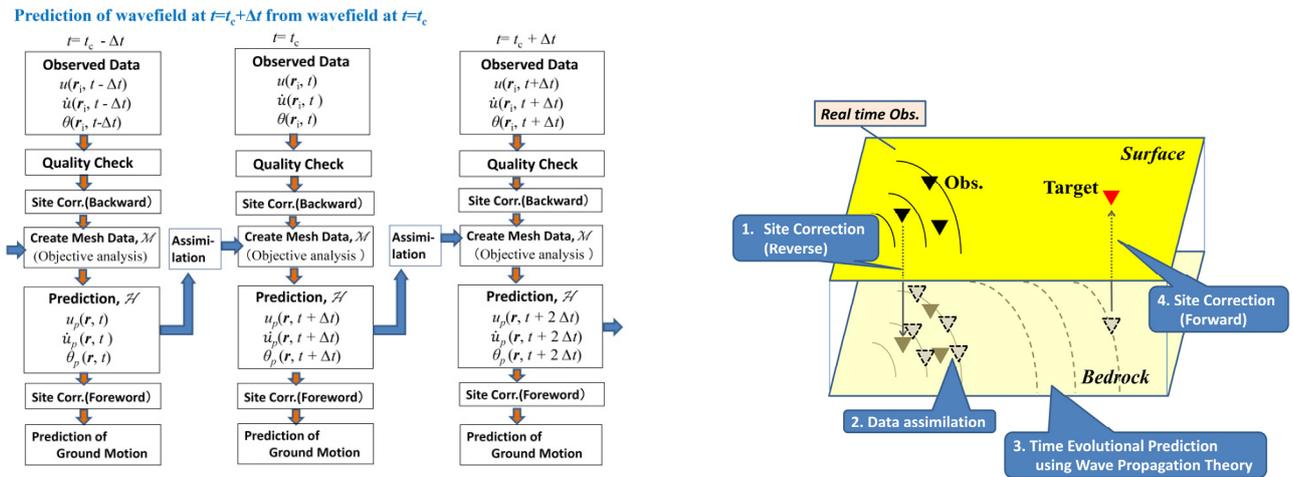


図1. 実時間地震動予測の処理の流れの概念図.

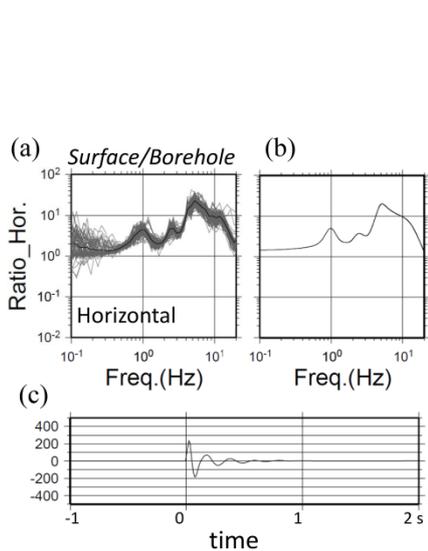


図2. a: IBRH18での地上と地下のスペクトル比(水平動), b: aを近似したフィルター, c: bのフィルターのインパルス応答.

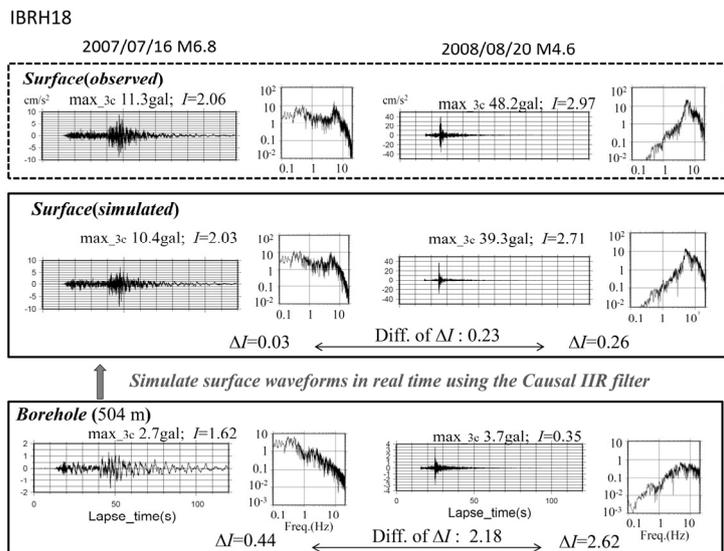


図3. IBRH18の地下(504m)の波形に, 図2のフィルターを掛け, 地表の波形を再現した. 2007/07/16 M6.8(中越沖地震)と2008/08/20 M4.6での例. max\_3Cは3成分合成の最大加速度, Iは震度を示す.

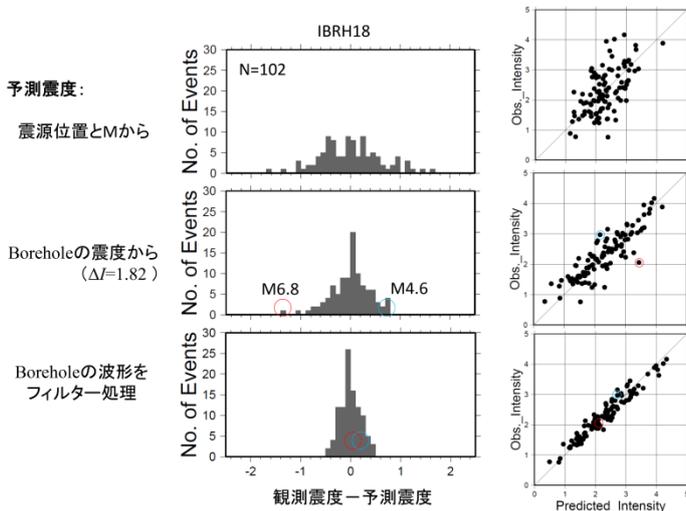


図4. IBRH18での地上での震度の予測例. 上: 震源とMから. 中: 地下の震度から経験的震度差を補正, 下: 地下の波形から増幅特性を表すフィルター処理により補正