

# 地震の揺れのリアルタイム予測: 次世代の緊急地震速報を目指して

○干場充之(地震火山研究部)

## 1. はじめに

緊急地震速報における迅速化と震度予測の精度を高めることを目指した、新しい処理手法の研究を紹介する。

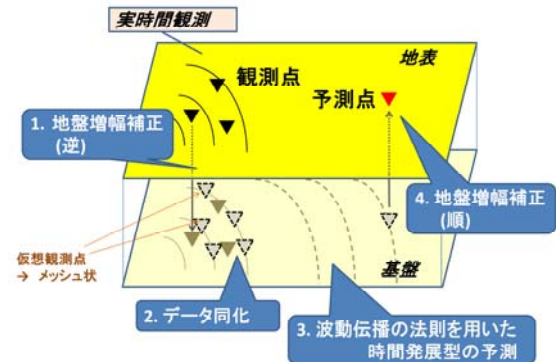
現在の緊急地震速報では、まず、一旦、震源位置とマグニチュード(M)を決め、それらをもとに地震の揺れ(震度)の予測を行っている。いわば、現象の原因を特定し、それによる結果を推定する方法である。このような震源とMに依存する方法では、震源域の広がり効果を取り入れるのは容易ではなく、震源やM推定の誤差が震度予測の誤差に直結し、震源が決まらなると震度予測の段階に入れない弱点がある。また、東北地方太平洋沖地震(M9.0)の余震で経験したように、同時に複数の地震が発生した場合には、震源決定は容易ではない。さらに、この方法では震度予測の精度向上には限界があることが分かってきた。これらの課題に対処するため、震源やMを介さずに(「原因」を特定せずに)、実時間で観測された揺れ(実況値)の分布を利用して、時間発展的に予測する手法を構築している。予測手法そのものに加え、精度向上に有効なデータ同化と、実時間での地盤増幅特性の補正についても触れる。

これらは、現在の緊急地震速報の弱点を克服し、さらに、精度向上と迅速化につながる手法と期待できる。

## 2. 考え方と手法

実時間で波動が伝わってくる様子を把握(リアルタイムモニタリング)できれば、人間は「間もなく揺れる」ことを直観的に予測することができる。そこでは、震源位置とMを求めているわけではなく、刻々と変化する波面の広がり具合(実況値)から未来を予測している。この考え方に則った予測法を組み立てる。

波動現象を支配している物理は波動方程式で記述される。地震の揺れ(地震動)もこの波動方程式に従って伝播していく。一般に波動方程式は、境界条件と、「ある時点での状態」が把握できれば解くことができる(つまり、未来の予測が可能)。地震動の場合、境界条件は速度構造に対応しており、既往の多くの研究から既知と仮定しても良い。よって、実況値を把握(「ある時点での状態」に対応)し、波動伝播を波動方程式に従って先回りで計算することで、揺れの予測が可能である。上記の人間の直観による予測は、この「実況値の把握」から時間発展的に「波動伝播を予測」することに対応しているであ



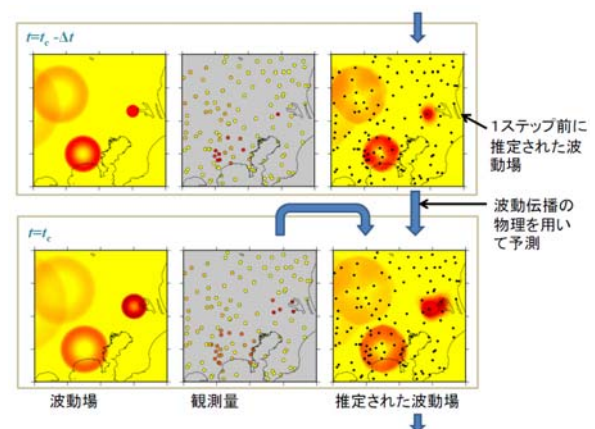
第1図: 提案する予測法における処理の流れ。

ろう。

図1に予測手法の流れを示す。観測された地震の揺れから、①実時間で観測点での地盤増幅特性を補正(逆補正)し、観測点間の地盤の相違を取り除く。②空間上に補間(データ同化)を行い、揺れの詳細な分布の把握(実況値の把握)を行う。③波動伝播の物理に従い、時間発展的に揺れの伝播を予測する。④予測点での地盤増幅特性を考慮(順補正)し、揺れの大きさを予測する、ことを考える。これらを連続的に、かつ、時間を遡ることなく処理する。以下にそれぞれを説明する。

### 2. 1. 実況分布の把握の強化(②データ同化)

提案する予測手法では、詳細な揺れの実況分布の把握が重要であり、よって、密な観測網による実時間監視が必要である。さらに、詳細な実況分布を得るために、データ同化の手法を応用する。データ同化は、時間発展型の予測手法などに



第2図: 揺れ(波動場)実況値の推定の概念。観測量だけでなく、1ステップ前の波動場からの予測値も用いて波動場を推定する(データ同化手法の応用)。これは、地震が同時多発している場合の例。

において、疑似的に観測点密度を増やす技法で気象の数値予報や海洋の分野で広く用いられている。現時点での揺れの分布(実況)を推定するために、現時点での実際の観測値ばかりでなく、1ステップ過去に推定された揺れの状態から予測された分布も用いる。これを、逐次、連続的に行うことにより、過去のすべての観測値を使い、実況値を把握することにつながる。図2には、その流れを示す。

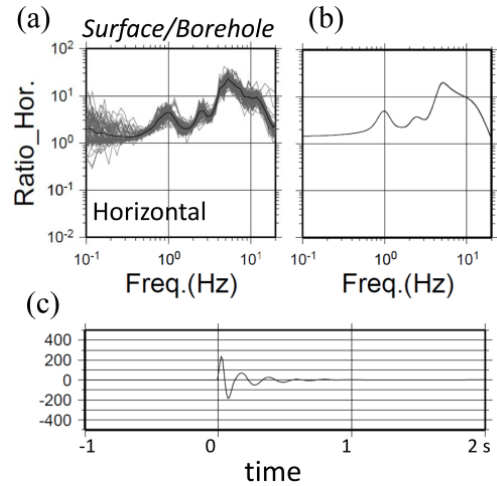
## 2. 2. 時間発展的な予測(③揺れの伝播予測)

時間発展的に波動伝播を予測する手法として、ここでは、境界積分方程式法(Kirchhoff積分)を提案する。その方法では、予測点を取り囲む多くの観測点で、地震の揺れを実時間で監視し、その揺れの状況に予測点までの伝播特性を加味して、予測点での揺れを予測する。定性的にはホイヘンスの原理(観測された波面上に2次的な仮想波源を並べ、そこから2次的な波を仮想的に発することで、未来の波面の位置を推定する)に相当する。

なお、同様な考え方は、例えば、音響学の分野で波面合成法として応用されている。そこでは、映画館内でも、撮影現場と同じように音が聞こること(臨場感)を目指し、音波の再現性が考察されている(サラウンド音響)。

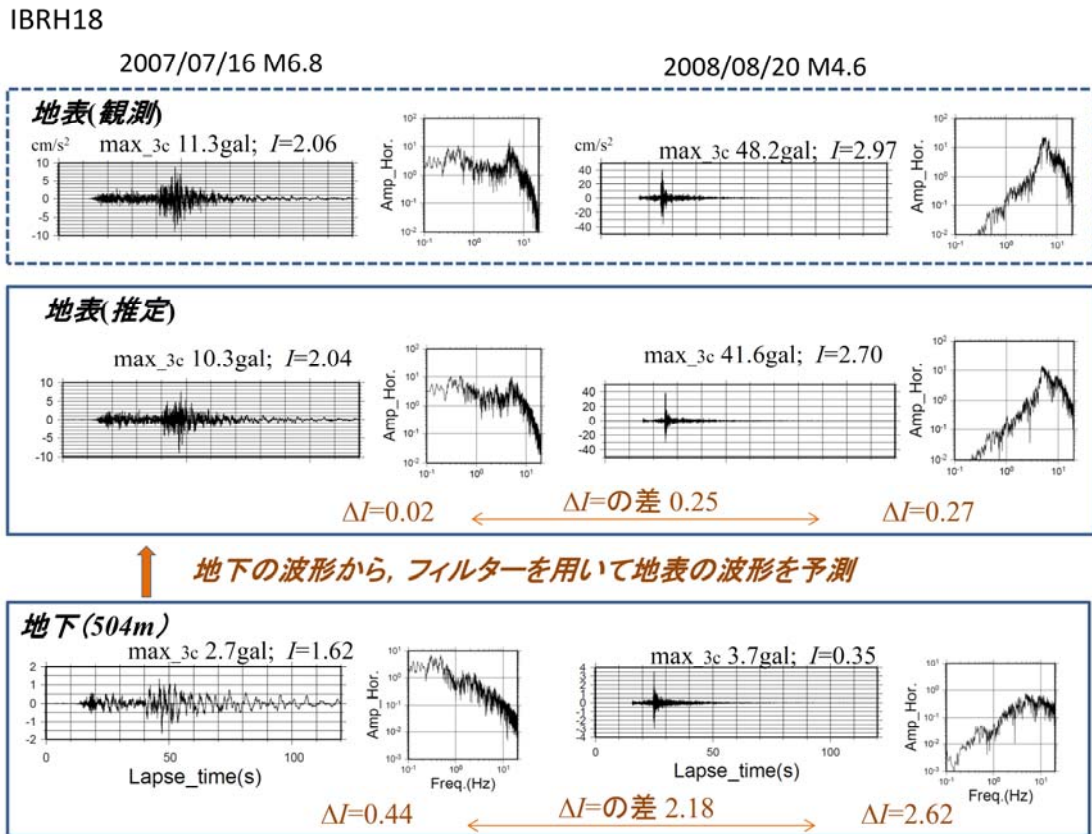
## 2. 3. 実時間での地盤増幅特性補正(①および④)

地震の揺れは、地表付近の地盤を数10~数100m通過す



第3図: (a) IBRH18 での地表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のフィルターの時軸上での応答。

る際に何十倍にも増幅する場合があります、その増幅率は場所により異なる。地盤の良い場所では小さな揺れでも、地盤の悪い場所では大きな揺れとなる。上記の②データ同化を適用する前に、この増幅特性の補正を行い、観測点間の増幅率の相違を取り除いておく必要がある。現在の緊急地震速報で



第4図: IBRH18 の地下(504m)の波形を、図2のフィルターに通し、地表の波形を予測(推定)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。

は、地盤の増幅として、スカラ量1つでの補正を行っているが、通常、地盤増幅特性には周波数依存性がある。精度のよい実時間での揺れの予測を行うためには、この周波数特性を実時間で補正する必要がある。そこで、各観測点での地盤増幅の周波数特性と等価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、震度の算出に大きく関係する0.1~20Hzとする。

図3に、防災科研KiK-netの観測点IBRH18での実時間地盤増幅特性補正(順補正)のフィルターを作成した例を示す。この観測点では、地表とともに地下504mにも地震計が設置されている。図3aは、多くの地震の波形から、地表と地下の波形のスペクトル比を取ったもので、地盤増幅の周波数特性を表す。この観測点では、0.5Hzより低周波では増幅は比較的小さく、5Hz辺りで大きく増幅する。図3aを図3bのように近似し、デジタルフィルターの技法(双一次変換とプリワーピング)を用いてフィルターを作成した。このフィルターの時間軸上での応答を図3cに示す。

図4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。低周波が多く入射する場合(M 6.8の地震の場合)では比較的增加幅が小さく、高周波が多く入

射する場合(M 4.6の場合)では大きい様子が再現できている。また、最大加速度や震度も妥当な推定となっている。

なお、地表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、周波数特性の分母と分子を入れ替え、同様な考え方で作ることができる。

このフィルターの考え方をを用いることで、地盤増幅の周波数特性を実時間で補正することが可能となる。

### 3. 今後に向けて

上記の2節に示した予測手法を用いた一例を図5に示す。観測点と予測点の距離が短い場合である(最も予測が簡単な状況)。予測された震度と実際に観測された震度の分布を示す。図5aは震源とMからの推定で、図5bは地盤増幅特性としてスカラ量を用いた場合、図5cは周波数特性を表すフィルターを用いた場合である。

観測点と予測点の距離が長い場合にも拡張し、現在の緊急地震速報の精度(図5aの状態)から、来年度末には図5bの状態へ、さらに、次期中期計画では、図5cの状態になるように研究を進めていく予定である。ただし、図5cになるには、実時間での波形データ伝送が実現することが前提条件となる。

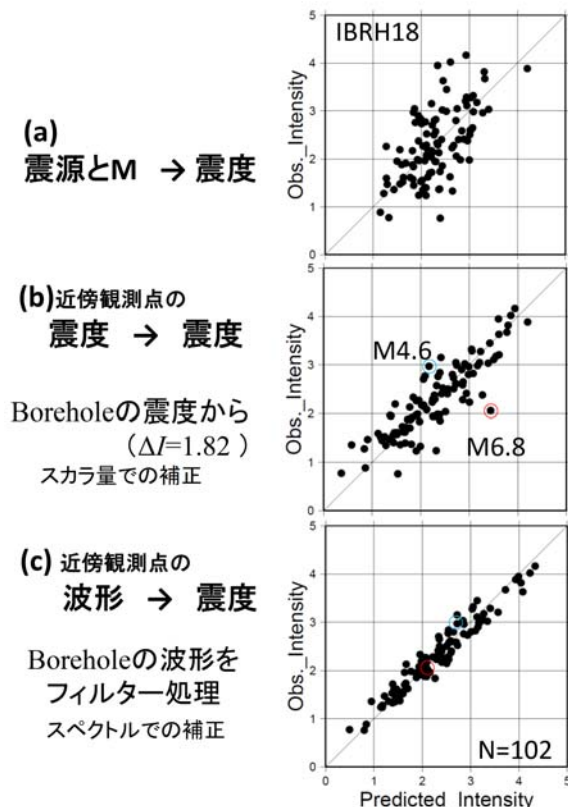


図5. IBRH18 での地表での震度の推定例(横軸:推定、縦軸:観測)。102個の地震の波形を解析した。(a)震源とMから。(b)地下の震度から経験的震度差(スカラ値)を用いて補正、(c)地下の波形から増幅特性を表すフィルター処理により補正し、震度を推定した。

謝辞

(独)防災科学技術研究所KiK-netのデータを使用した。気象研究所海洋研究部からデータ同化について教わった。

※本研究は、重点研究「緊急地震速報高度化のための震度等の予測の信頼性向上技術の開発(平成21-25年度)」として行われた。主任研究者: 干場充之、研究分担者: 青木重樹、林元直樹、菊田晴之(地震火山部)、平野和幸(地震火山部)、山田安之(地震火山部)、大竹和生(地震火山部)