

12-3 波動場の把握に基づく地震動の予測 —地震動即時予測の次世代への考察— Real-time prediction of ground motion based on estimation of wavefield: for next generation of earthquake early warning

干場充之 (気象研究所)

Mitsuyuki Hoshiba (Meteorological Research Institute)

1. はじめに

地震動即時予測は、2007年から気象庁が緊急地震速報の業務を始めるなど、地震減災に結びつく新しい技術として期待されている。緊急地震速報は、2011年の東北地方太平洋沖地震では、東北地方に対しては想定通りの速さで警報を発し、所定の効果を発揮したといえよう。一方で、広い震源域への対応が不十分なため関東地方には警報を発することができなかった。また、広範囲にわたる非常に活発な余震活動のため、ほぼ同時に発生した複数の小地震を適切に分離できず1つの大地震として処理し、その結果、過大な警報を発することが相次いだ。さらに、2013年8月には、海底地震計の不具合により過大な震度を予想した。これらの課題を根本的に解決し、さらに精度向上と迅速性を高める新しい手法を構築している。

2. 予測手法

現在の緊急地震速報では、震源位置とマグニチュード(M)を即時に推定(以下、「震源とMの即時推定」)し、それをを用いて、各地の地震動の強さを予測している。一方、提案する方法では、震源位置やMを求めることなく、地震動が伝わってくる様子をリアルタイムで把握することにより、未来の地震動分布を予測しようという考え方である。つまり、地震動の実況分布を正確に把握し、それから波動伝播をシミュレートすることで未来を予測するものである。これは、微分方程式の解法という観点から見ると、「地震動の実況分布」という初期値を、「波動伝播の法則」という支配方程式に代入することに相当する。

提案する方法では、地震動の実況分布を正確に把握することが鍵となる。そこで、実況分布の把握には、天気予報などで使われているデータ同化の技術を応用する(第1図)。ここでは、現在($t=t_c$)の状況をなるべく正確に把握するために、現在の観測値ばかりでなく、1時間ステップ前($t_c-\Delta t$)の状況から波動伝播の物理(波動伝播のシミュレーション)を用いて現在の状況を推測した推測値も用いる。実際の観測値と推測値を融合させて実況分布を推定する。観測点がない場所においても、過去のデータから波動伝播の物理を用いた外挿により、地震動の強さを推定する(つまり、空間的には内挿、時間的には外挿をしている)。このようにすることで、現在(t_c)の観測値ばかりでなく、過去すべての観測値を用いて、揺れの実況分布を把握することにつながり、正確な実況分布の把握が可能となる。一方、第1図の右側の流れに注目すると、波動伝播のシミュレーションの中に実際のデータを取り込んでいる、と見ることができる。実際の観測データをシミュレーションの中に同化させている、と言える。

実況分布が正確に把握できたならば、次の段階は未来の予測である。当然、未来の観測データを用いることはできない。したがって、波動伝播の物理のみを用いて、逐次、地震動の分布を推定することになる。つまり、データ同化で推定した実況値を初期値として、波動伝播のシミュレーションを行うことで、10秒後や20秒後などの未来の地震動分布を予測するものである。

波動伝播のシミュレーションとしては、差分法や境界積分方程式法などが知られているが、これらは厳密であるものの計算が重い（時間を要する）。即時予測の問題では、計算の速度は極めて重要である（少なくとも、実時間の経過よりも早く計算が行える必要がある）。そこで、今回は、輻射伝達理論を用いることにする。輻射伝達理論は波線理論的な考えに基づき高周波近似を用いた波動伝播の計算手法であり、近似を用いるものの比較的軽く計算することが可能である。また、“震度”の予測を考える場合には、この高周波近似が十分成り立つと考えられる。なお、輻射伝達理論の計算には、地震動の伝播方向の情報が必要であるが、データ同化の中で、地震動の振幅に加えて伝播方向も同時に推定することを行う。

3. 適用例

現実の観測データに上記手法を適用し地震動の伝播を見るためには、各観測点での観測値に地盤増幅特性を補正し、地盤特性に相違のない状態にすることが好ましい。地盤増幅特性は周波数に依存するが、即時予測の目的からすると、この周波数依存性のある補正をリアルタイムで行う必要がある。そこで、Hoshiba (2013)¹⁾の方法で補正を行い、さらに、功刀・他(2008)²⁾の考えに則り震度をリアルタイムで求めることを考える。この震度に相当する振幅の値を、 $I=2 \log A+0.94$ (I と A はそれぞれ震度と加速度振幅)から求め、それを入力としてデータ同化を行う。今回は、1秒毎にデータ同化を行った ($\Delta t=1$ 秒)。

第2図に、東北地方太平洋沖地震に適用した場合を示す。すべての地盤を仮想的に東京大手町の地盤と同じになるように補正している(青木・干場, 2014)³⁾。右側のパネルには、130, 140, 150秒の時点での、地盤増幅特性補正後の震度、データ同化を用いて推定した実況分布、10秒予測、20秒予測を示す。また、左側のパネルには、東京大手町での震度の実測値と、5秒予測、10秒予測、20秒予測を示す。例えば、右側のパネルに示すように、130秒の時点では、北関東に強い地震動が見られ、それが20秒後には大手町に来るだろう、と予想しており、実際、150秒の時点で大手町は大きく揺れている。しかし、左側のパネルに示すように、130秒の時点の20秒予測は、150秒の時点の実測と比較すると、震度にして0.5程度過大である。これが、140秒の時点の10秒予測、さらに5秒予測になるに従い、精度よく予測している様子が分かる。これは、「1週間後の天気予報の精度は低い、明日の天気予報ならばよく当たる」ということと似たイメージで、通常、遠い未来の予測よりも近い未来の予測精度が高い。このように、従来の「震源とMの即時推定」による手法では扱いが難しかった”巨大地震の震源域の拡がり”の課題にも対応可能である。

4. さいごに

地震動即時予測では、予測と実測とを逐次比較し修正を施すことができるので、本来、震源とMのみによる予測よりもはるかに精度を高くすることができる。最後に、従来の「震源とMの即時推定」に基づく方法と、今回提案する方法を改めて比較する（第3図）。

「震源とMの即時推定」による方法は、まず、過去から現在までの情報を用いて“最も古い過去の状態”を推定し、最も古い過去から予測を開始すること、に相当する。一方、今回の提案の方法では、“現在の状態”を推定し、現在から予測を開始する。

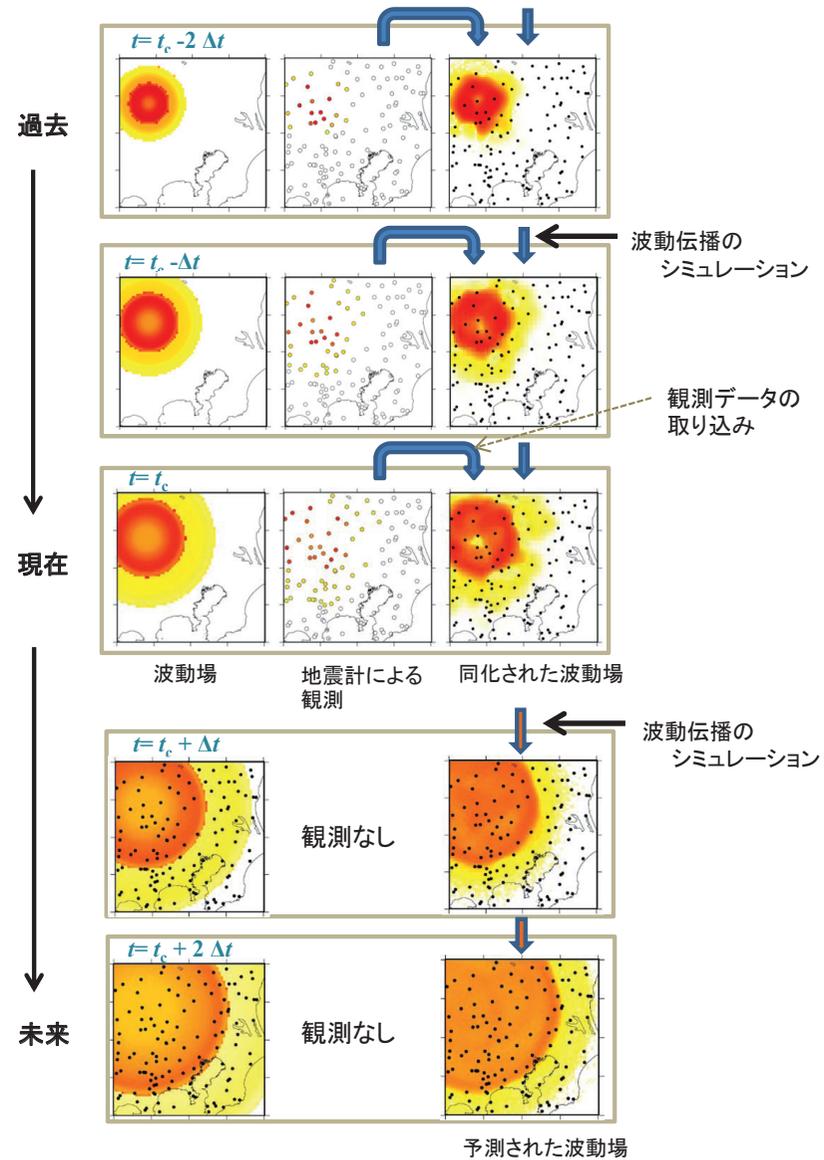
さらに、「震源とMの即時推定」の方法では、地震動の時空間分布を有限個のパラメータ（通常は、緯度、経度、深さ、震源時、Mの5個のパラメータ）に一旦圧縮した後に、再び、時空間分布を推定するものと言えるが、圧縮によって失われた情報では、詳細な地震動の時空間分布を再現しきれない。よって、“現在の状態”を再現することができない。つまり、“現在の状態”ですら正確に予測することは難しい。一方、今回の方法では、現在の観測データを取り込んで、“現在の状態”をなるべく正確に推定した後に予測に入る、という考え方である。

気象の数値予報では、気圧、気温、風向、風速などの実況値をなるべく正確に把握した後に、支配方程式（大気力学の方程式、熱力学の方程式、等）を用いて未来の状態を予測している。今回の提案の方法は、気象の場合と同じようなイメージで、地震動の強さや伝播方向などの実況値を正確に把握した後、波動伝播の支配方程式に則り、未来の状態を予測するものである。いわば、“揺れの数値予報”に相当するものと言える。

謝辞：解析には、防災科研の K-NET, KiK-net および気象庁震度計の波形データを利用しました。

文献：

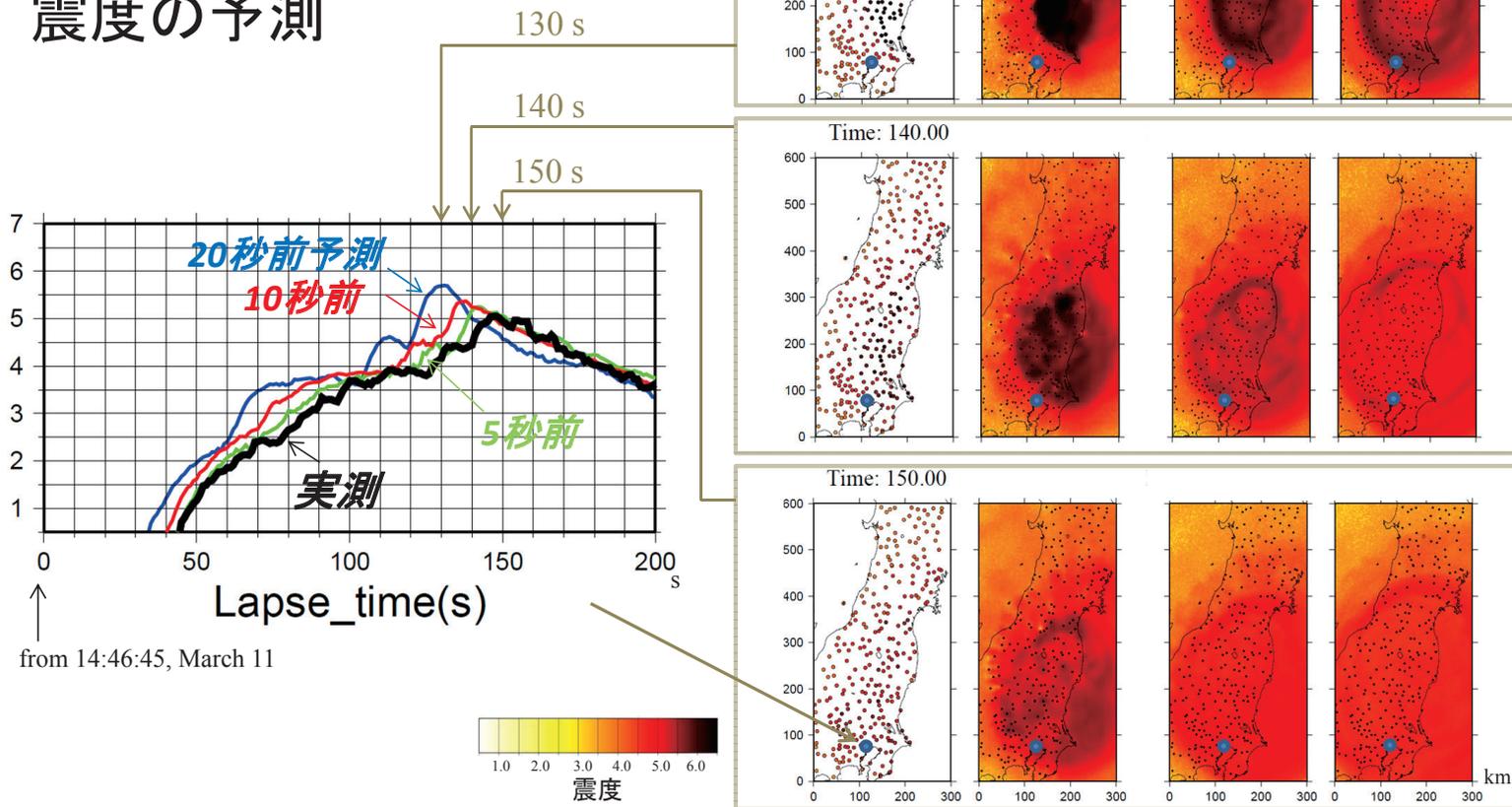
- 1) Hoshiya, M., 2013, Real-time correction of frequency-dependent site amplification factors for application to Earthquake Early Warning, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **103**, 3179-3188
- 2) 功刀卓・青井真・中村洋光・藤原広行・森川信之, 2008, 震度のリアルタイム演算法, *地震* **2**, **60**, 243-252.
- 3) 青木重樹・干場充之, 2014, 相対サイト増幅率の広域評価とリアルタイムサイト補正への適用, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SSS28-05.



第1図 データ同化を用いた波動場の推定から予測への流れ.
 Fig.1 Flow from estimation of wavefield using data-assimilation to prediction of ground motion

東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.0; 2011/03/11)

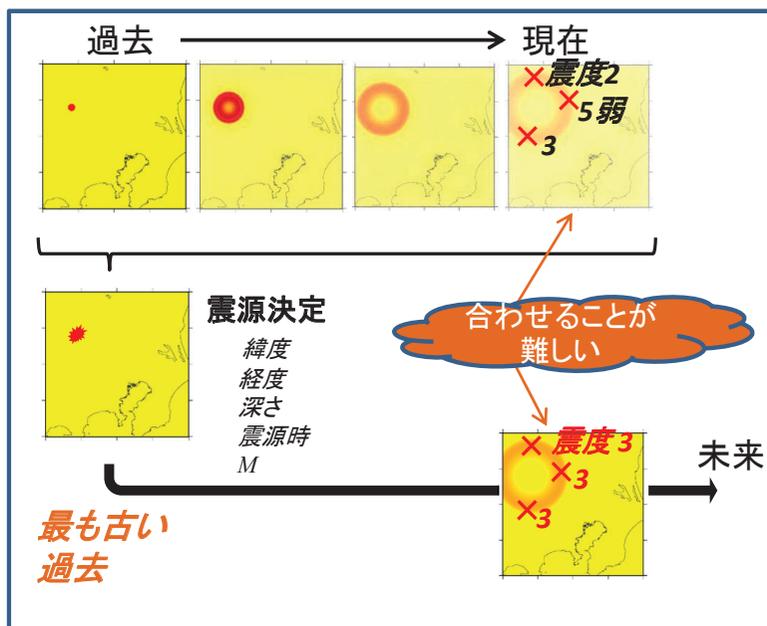
東京大手町での 震度の予測



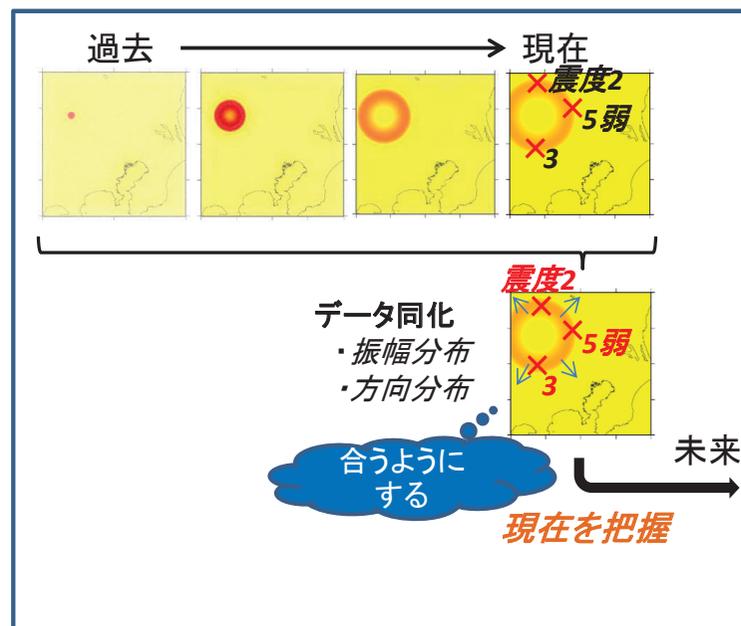
第2図 東北地方太平洋沖地震時の東京大手町の震度予測の例。

Fig.2 Example of prediction of seismic intensity at Ohte-machi, Tokyo, during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

震源, Mによる方法



提案する方法



第3図 「震源とMの即時推定」による方法と提案する方法の比較.

Fig.3 Comparison of the proposed method with conventional one based of hypocenter and M