

波動場のリアルタイム把握による地震動予測

-次世代の緊急地震速報を目指して-

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。東北地方太平洋沖地震では、東北地方が強震動に襲われる前に緊急地震速報を発表したものの、関東地方では震度を過小に予測した。これは巨大地震の震源域の広がりによるものであろう。一方、本震後しばらくの間、広域で発生した余震を適切に分離できず、震度を過大に予測することが続いた。震源と M に依存する現在の方法では、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、震源自体が決まらない場合は震度予測の段階に入れない。このような問題に対処するため、(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、緊急地震速報での地震動を予測する方法を提案する。この方法は、現時点までの波動場から未来の波動場を予測する考えである。

この考えでは、地震動 (震度) の予測は、途中まで伝播してきている波の情報から、伝播していく先の波動場を推定することに相当する。これまでも、例えば、前線観測点の地震動を用いる考え (Kuyuk and Motosaka, 2009 など) や近傍観測点の情報を用いるという考え (神定・他, 2010) があったが、これらの考え方を取り込みながら、緊急地震速報における新しい震度予測の方法を波動伝播に則り考察する。なお、地盤の増幅特性は事前に評価可能という立場で議論を進める。

2. 考え方

人間が波動伝播の様子をみて次の瞬間を直観的に予測するのは、1つには、ホイヘンスの定理を、また、もう1つには波面の広がりを頭の中で整理し考察しているのであろう。これを基に構築する。

揺れを予測したい地点 (P) を取り囲む閉空間を考えその表面を S とすると、 S 内で新たな輻射 (つまり、地震の発生) がなければ、 P での波動は、キルヒホッフ積分 (表現定理) で表される。高周波の場合には、

$$u(\mathbf{P}, t) \approx \int \frac{1}{v(\mathbf{r})} (\cos \theta + \cos \theta') G(|\mathbf{r} - \mathbf{P}|, t) * \dot{u}(\mathbf{r}, t) dS \quad (1)$$

で近似できる (キルヒホッフ (ホイヘンス) フレネル積分)。ここで、* はたたみこみ積分、 G はグリーン関数、 v は波の速度、 \mathbf{r} は S 上の点、 θ' は S 上の法線が \mathbf{P} への方向となす角である (図1)。よって、 S 上の波動場 (u の時間微分) とその伝播方向 (θ) が観測できれば、 P における波動を正確に予測できる。猶予

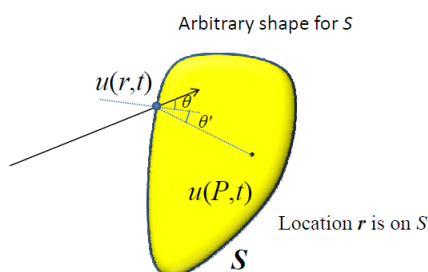


図1. キルヒホッフ (ホイヘンス) フレネル積分。

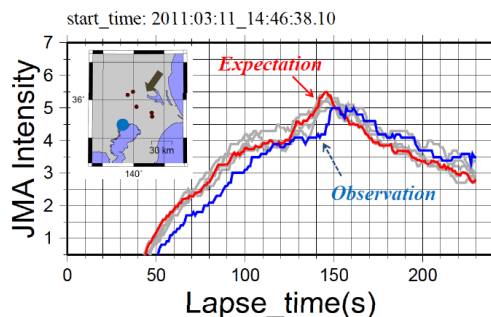


図2. 波の伝播してくる方向の観測点のデータを用いて行った震度予測の例 (東北地方太平洋沖地震)。灰色線は前線観測点 (伝播方向に 30-50km) での観測された震度。地図中の矢印は仮定した波の伝播方向 (北から 35 度)。この図では、観測点の増幅率の補正は未適用。

時間は S の大きさに依存し、大きな猶予時間は大きな S に対応し、短い猶予時間は小さな S に対応する。

(1) は、 S の外側での状況によらず成り立つものである。つまり、輻射の位置（つまり、震源の位置）や大きさ (M)、また、それがいくつ存在するか（複数連発地震）や、輻射の偏り（ディレクティビティ）、輻射の広さ（震源域の広がり）ということとは無関係である。よって、原理的に複数連発地震や震源域の広がりに対応するものである。なお、(1) に寄与するのは、高周波になるほど、 r での回折する角度の小さい場合に限られるようになり、 S 全体を考える必要は必ずしもなくなってくる。

3. 応用例

本手法の考え方を示した地震動予測の例を示す。ここでは、グリーン関数として、 $G(r,t)=\delta(t-r/v)/4\pi r$ を用い、また、波動場は深さに寄らず一定 ($u(x,y,z,t)=u(x,y,0,t)$) との仮定を用いた。まず、図2には、東北地方太平洋沖地震での TKY013 (K-NET) での震度を予測したものと、実際の観測結果である。ここでは、波動の伝播方向として図中の矢印の方向を仮定している。仮定した波動伝播方向に 30~50km 離れた観測点を用いることで、おおよそ 9 秒後の震度を予測している。また、震源と前線観測点が極めて近い極端な場合として、図3に 2008 年の岩手宮城内陸地震時の MYG004 での例を示す。この場合は、 u が深さに寄らず一定との仮定を用いたため、やや過大評価となっているが、おおよそ 6~7 秒後の震度を予測している。

さらに、前線観測点と予測点がきわめて近い場合の例として、ボアホールでの観測点を利用した場合が考えられる。ボアホール観測点での深さで S の表面を考え、鉛直下方入射 ($\theta=0$) を考えると、(1) は、

$$u(\mathbf{P},t) \approx u(\mathbf{r}_1,t - \frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{P}|}{v} \cos \theta')$$
(2)

と近似できる (\mathbf{P}, \mathbf{r}_1 は地表とボアホールの観測点の場所)。つまり、地表 (\mathbf{P}) での地震動はボアホール (\mathbf{r}_1) での地震動に単純に走時の補正を加えることで予測できる (実際の応用には、観測点の増幅特性の補正が加わる)。図4に TKYH11 (KiK-net, 深さ 3000m) での例を示す。観測点の増幅特性の補正を加えることでおおよそ 3 秒後の震度を予測している。

4. おわりに

この考え方に則れば、重要なのは、まず事前段階では、 A : 実時間で観測可能な地震動観測点網の整備・増強、 B : 各観測点での地盤増幅度の事前評価、 C : グリーン関数 G の事前評価、であり、予測段階では、 D : 波動場の推定 ($u(x,t)$ の空間補間: 内挿外挿)、 E : 波動の伝播方向 θ (と見かけ速度) の推定、 F : (1) に則った積分の考え方の実行、となる。

震源とマグニチュードから地震動 (震度) を予測するのではなく、リアルタイムの波動場から行うことを提案した。この方法は、途中まで伝播してきている波の情報から、伝播していく先の波動場を推定する方法である。いわば、「揺れの予測には揺れの実況把握から」というのが基本的な考え方である。極端な外れ予測を軽減するには、この様に実際の波動場からの推定を行うことが重要であると思われる。

謝辞: 防災科研 KiK-net, K-NET, 気象庁検知網の波形データ, 気象庁一元化震源データを使用しました。

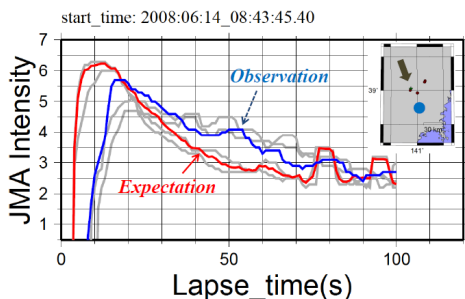


図3. 岩手宮城内陸地震での例。仮定した方向は 340 度。図中の緑星が震央位置。前線観測点は予測点から 20~40km 前方の点。

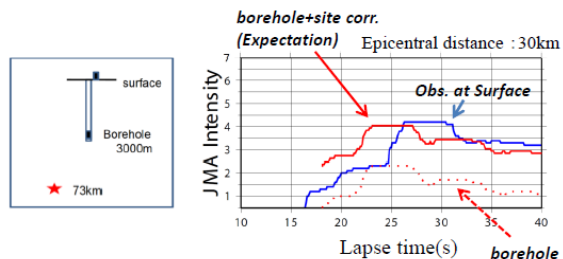


図4. ボアホール (TKYH11, KiK-net, 深さ 3000m) での例 (2005/07/23 M6.0, 深さ 73km, 震央距離 30km)。ボアホールで得られた震度 (点線) に地盤増幅率の 1.75 を加えたものが予測 (赤線)。地表での観測結果が青線。