

# 地震波散乱研究の知見を緊急地震速報へ

干場充之 (気象研究所)

Application of knowledge of seismic wave scattering to Earthquake Early Warning

Mitsuyuki Hoshiba (Meteorological Res. Inst.)

## 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次の瞬間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。そこで、波動伝播や地震波散乱の知見を取り込むことにより、緊急地震速報における新しい震度予測の方法を探る。

## 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。なお、地盤増幅度は事前に評価可能と仮定する。

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、

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

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、 $\theta'$  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 ( $\theta$ ) が既知であれば、 $P$  における波動を正確に予測できる。猶予時間は  $S$  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、 $\mathbf{r}$  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

本手法の考え方をういた地震動予測の例を示す。ここでは、グリーン関数として、 $G(r, t) = \delta(t - r/v) / 4\pi r$  を用いた。図2は、東方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。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。

#### 4. 地震波散乱研究の知見

(1)式で、地震波伝播方向がほぼ同じ(たとえば、 $\theta \doteq 0$ )で、回折があまり強くない( $\theta' \doteq 0$ )の状況では、周波数領域で、

$$U(\mathbf{P}, \omega) \approx -2ik \int G(|\mathbf{r} - \mathbf{P}|, \omega) \cdot U(\mathbf{r}, \omega) dS \quad (2)$$

と近似できる。これは、Hoshiya(2000)で、パラボリック近似と Phase Screen 法により、不均質構造中を伝播する波を計算した時に用いた

$$U(x + \Delta x, y, z, \omega) = -2ik \int G(\Delta x, \omega) \cdot U(x, y, z, \omega) d\Sigma$$

とよく似ている(ここで、 $\Sigma$ はy-z平面)。パラボリック近似や Phase Screen 法が、緊急地震速報の地震動予測に応用できるであろう。

また、図2では、グリーン関数として、 $G(x, t) = \delta(t - x/v) / 4\pi r$ を用いた。しかし、 $|\mathbf{r} - \mathbf{P}|$ が大きい時には、振幅のピークの時間が遅れることが知られている。このピークの遅れについては、Saito et al.(2002)で、不均質構造の統計的パラメータから予測されるグリーン関数が求められている。また、干渉法でグリーン関数を求めることも検討されている。これを使えば、地震動の最大値の出現時間の予測がより正確になるものと期待できる。

さらに、(1)に則った地震動予測では、 $u$ の空間分布とともに波の伝播方向( $\theta$ )に依存する。アレイ解析等の応用が期待される。

#### 5. おわりに

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。これまでに得られた地震波散乱の考え方を取り入れることにより、より正確な震度予測に結びつけていきたい。

謝辞：防災科研 KiK-net, K-NET, 気象庁検知網のデータを使用しました。

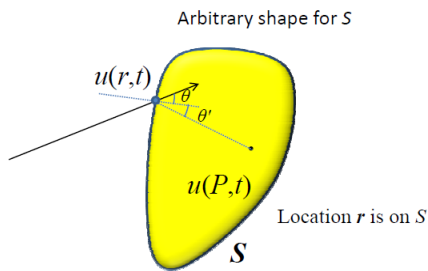


図1. キルヒホッフ(ホイヘンス)フレネル積分

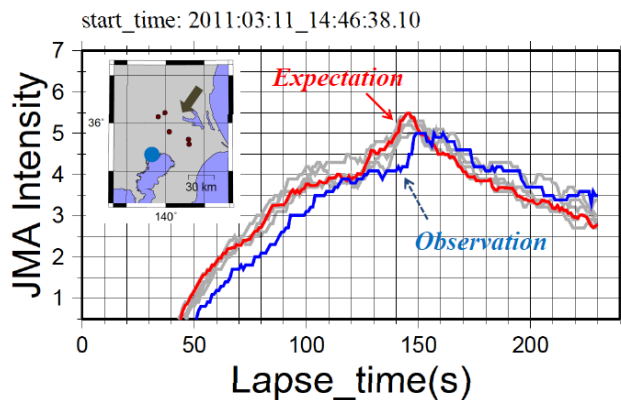


図2. 波の伝播してくる方向の観測点のデータを用いて行った震度予測の例。地図中の矢印は仮定した波の伝播方向(北から35度)。この図では、観測点の増幅率の補正は未適用。