

実時間地震動予測：輻射伝達理論とデータ同化による現状把握

干場充之（気象研究所）

Real-time prediction of earthquake ground motion: estimation of current situation using radiative transfer theory and data assimilation

Mitsuyuki Hoshiya (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る。一方、本震後しばらくの間、広域で発生した余震を適切に震源決定できず、震度を過大に予測することが続いた。このような問題に対処するため、Hoshiya(2013, JGR)では、(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している。この方法は、現時点の状況をなるべく正確に把握し、そこから未来を時間発展的に予測する考えである。

Hoshiya(2013) では、Kirchhoff 積分 (あるいは、Kirchhoff-Fresnel 積分) による方法を提案している。そこでは、波動場の空間微分が必要となるが、高周波地震波の場合には、かなりの高密度観測が必要である。一方、波形の個々の山谷を無視し、エンベロープに注目すれば、高周波地震波の伝播はエネルギーの伝播で近似でき、輻射伝達理論を用いた解析が広く行われている。震度は比較的高周波の波によって決定されるので、輻射伝達理論が適用できるだろう。

さて、「現時点の状況をなるべく正確に把握し、そこから未来を時間発展的に予測する」という考え方は、気象の数値予報などでも用いられており、そこでは、現時点での状況を把握するためにデータ同化手法が使われている。図 1 に示すように、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る分布も用いる。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。

逐次、データ同化を繰り返しながら、なるべく正確に実況値を把握し、その上で、輻射伝達理論によって未来を予測することを考える。輻射伝達理論を用いる場合には、エネルギー密度の方向分布を把握する必要があるが、この方向分布もデータ同化を繰り返すことで推定する。

2. モンテカルロ法

Hoshiya(1991, PEPI)や Yoshimoto(2000, JGR)では、輻射伝達理論の計算をモンテカルロ法によって行っている。そこでは、多数の粒子の動きによってエネルギーの流れを表現し、ある格子におけるエネルギー密度は、その格子内の粒子の数 (つまり、密度) によって表される。今回、このモンテカルロ法を用いた。

1 ステップ前、 $t_c - \Delta t$ 、に場所 $\mathbf{x}(t_c - \Delta t)$ における速度 \mathbf{v} の粒子は、 t_c には、 $\mathbf{x}(t_c - \Delta t) + \mathbf{v} \cdot \Delta t$ に移動する。ここで、 $|\mathbf{v}| = v_0$ で常に同じだが、方向は、 $1 - \exp(-g_0 v_0 \Delta t) \approx g_0 v_0 \Delta t$ の確率で変えるものとする (v_0 , g_0 は地震波速度と散乱係数。今回は等方散乱の仮定を用いた)。このように、 $t_c - \Delta t$ の粒子の状態から、 t_c での状態を予測する (一期先予測)。多数の粒子で同様の手順を行う。 t_c での各格子点での粒子の密度、 $E_{\text{prediction}}(\mathbf{x}, t_c)$ と、実際の観測量、 $E_{\text{observation}}(j, t_c)$ (j は観測点番号) から、 t_c での状況、 $E_{\text{assimilated}}(\mathbf{x}, t_c)$ を推定する。ここで、 $E_{\text{prediction}} > E_{\text{assimilated}}$ の場合には、 $E_{\text{prediction}} - E_{\text{assimilated}}$ に相当する粒子の数を間引く。この場合、格子点内のどの粒子を間引くかはランダムに決める。

一方, $E_{\text{prediction}} < E_{\text{assimilated}}$ の場合には, 格子点内に新たな粒子を発生させる. この場合, 格子点内のどの場所に, どの方向の粒子を発生させるかもランダムに決める. このようにして, t_c における各粒子の場所と方向を与える.

上記の手順を逐次繰り返すことで, 同化を進める. また, 未来の予測は, $E_{\text{observation}}(j, t_c)$ と比較することを省略し, ステップを繰り返すことを行う.

3. 例

図 2 には, 上記の手法により行った例を示す (ここでは, 2 次元での計算を行い, $v_0=3\text{km/s}$, $g_0=0.01\text{km}^{-1}$ を用いている. 地震が多数発生している場合). 左上は, 同化により推定されたエネルギー分布, 右上の 2 つは, 10 秒後と 20 秒後の予測分布である. また, 下は, それぞれの時間の (真の) エネルギー分布を示している. なお, $x=150$, $y=12$ km 付近のエネルギー分布が予測できていないのは, 未来 (6 秒後) に発生する地震による分布のためである (地震発生を予測するのではないため).

4. おわりに

震源とマグニチュードから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. データ同化と輻射伝達理論の手法を用いることにより, より正確な震度予測に結びつけたい.

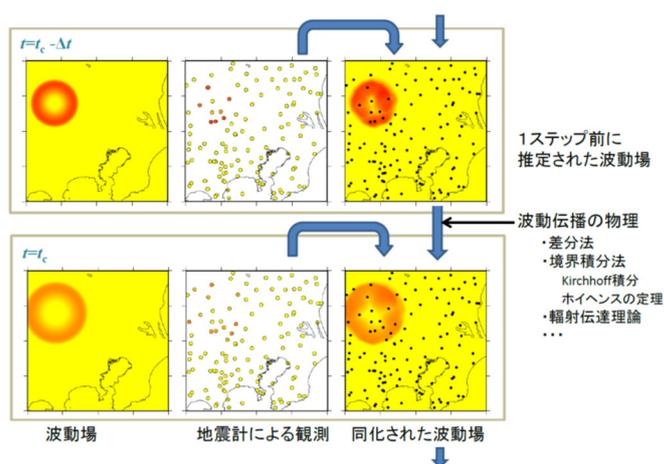


図 1. データ同化を用いた揺れ (波動場) 実況値の推定の概念. 観測量だけでなく, 1 ステップ前の波動場からの予測値も用いて波動場を推定する.

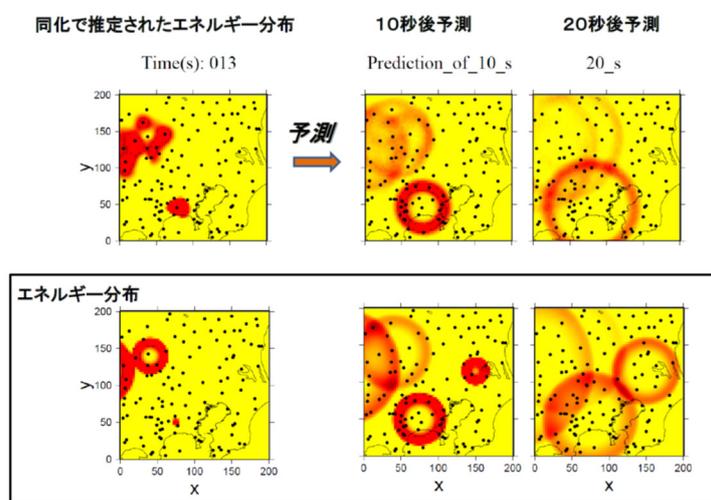


図 2. 予測の例. 左上は, 同化により推定された現時刻 ($t_c=13\text{s}$) でのエネルギー分布, 右上の 2 つは, 10 秒後と 20 秒後の予測分布である. また, 下は, それぞれの時間の (真の) エネルギー分布を示している. この図は, 地震が多数発生している場合の例. なお, $x=150$, $y=12$ km 付近のエネルギー分布は, 6 秒後の未来 ($t=19\text{s}$) に発生する地震によるもの.