

(4) Kirchhoff-Neumann型マイグレーション：新しい波面外挿法を用いた緊急地震速報の改良  
 蓬田 清・佐藤 明日花（北大・理） yomo@mail.sci.hokudai.ac.jp

(4) Kirchhoff-Neumann migration: Improvement of the early earthquake warning system  
 by a new wave-field extrapolation approach

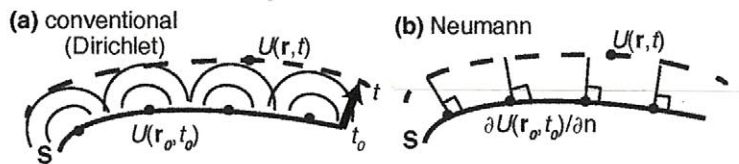
Kiyoshi Yomogida and Asuka Sato (Graduate School of Science, Hokkaido Univ.)

震源の位置と発震時刻をまず推定する従来の緊急地震速報が正しく動作しない場合（例：複数の地震が同時発生、深発地震）を想定し、震源情報を求めずに観測された複数点より得られた波面を反射地震法のKirchhoffマイグレーションを応用して未来の時刻へと外挿し、到来時刻を推定する方法が既に提案されている（e.g., Hoshiba, 2013）。Kirchhoffマイグレーションは、以下の表現定理を用いて波面 $S$ における時刻 $t_0$ の波動場 $U$ の積分から、位置 $\mathbf{r}$ での未来の時刻 $t$ の $U$ を推定する：

$$U(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi} \int dt \iint_S d\mathbf{r}_0 \left[ G(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}_0, t_0) \frac{\partial U(\mathbf{r}_0, t_0)}{\partial n} - \frac{\partial G(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}_0, t_0)}{\partial n} U(\mathbf{r}_0, t_0) \right]$$

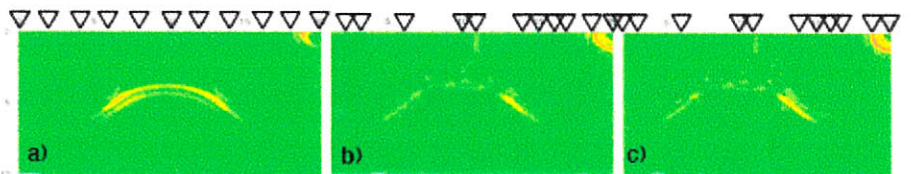
ここで  $n$  は波面 $S$ の法線方向、 $G$  はグリーン関数（速度 $c$ の3次元均質媒質なら距離 $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|$ として、 $G = \delta(t - t_0 - R/c) / R$ ）である。反射地震法では地表面でゼロとなるグリーン関数を用いることで（例：鏡像）右辺第2項のみとなり、観測される波形記録 $U$ のみを用いる（下図a）。あるいは、波動場が既知の面 $S$ と観測点 $\mathbf{r}$ が大きく離れているという遠地近似（波長に比べてこの距離が十分に長い高周波近似と同等）でも、 $U$ のみを用いる形式となる。観測波形データを直接モデル空間へ投影するだけでよく、地震学ではレーンバー関数や散乱係数分布などで幅広く適用されてきた。ただし、各観測点から球面状に投影するため、観測する面 $S$ 上にかなり密に観測データ $U$ が得られないと、空間分解能が低下する。

これに対して、緊急地震速報への応用では、発生初期段階での2次元的に地表面を伝搬する波面 $S$ を用いるので、波動場 $U$ だけでなく、隣接する複数点のアレイ観測の解析により



伝搬の見かけ速度・方向も測定が可能である。すなわち上式右辺第1項の $\partial U / \partial n$ も含めた自然な形式を適用できる（上図b）。 $U$ のみの手法に比べて、波面 $S$ 上の値がまばらでも、未来の波動場をより精度よくマイグレーション（外挿と読み替えてよい）できる点が、実用的には極めて重要である。

比較として、一つの散乱体が存在する均質媒質での合成波形について、上の手法の効果を調べた（下図）。観測点分布が十分に一樣な場合(a)、外挿した波面は従来の波動場 $U$ だけで精度よく再現できるが、実際のように分布が偏ると(b)、波面が十分に復元できない。到来方向の情報を用いれば(c)、ある程度の改善が見られた。



緊急地震速報では、P波もS波も浅い地震では2次元的に地表面を広がっていくので、3次元速度構造を細かく考慮せずとも、過去の観測波形から「見かけ速度」の空間分布を予め求めておき、この速度による簡略化した2次元グリーン関数を用いれば、実用的には十分であろう。見かけ速度 $c$  (km/s) は震源の深さによって大きく異なる上に、地域性も大きい（下図で横軸は深さ $d$  (km)）。そこで、初期段階で速度の大まかな観測値から逆に震源の深さを推定し、これをグリーン関数に組み入れて波動場の外挿を計算することが適当である。みかけ速度・方向の推定には誤差が伴うが、外挿する際に波線ではなくこの誤差の有限な幅を持つビーム（e.g., ガウシアンビーム）を用いれば、まばらなデータでもより安定した結果が得られる。

ただし、このような波面外挿・マイグレーションだけではP波の波面しか求まらない。震央距離と震源の深さの関数としてのP-S継続時間を事前に経験的に求めておけば、S波の到達時刻をある程度は予測できる可能性がある。

