

# 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）

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.)

緊急地震速報は震源付近の観測点でのP波の到達時刻と振幅より、震源の位置と発震時刻を推定し、離れた点でのS波到達時刻を推定する。しかし、ほぼ同時発生の複数の地震や深い地震では、適切に動作しない。このような場合には、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提案されている（e.g., 干場, 2011）。

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  $G = \delta(t - t_0 - R/c)/R$  ( $R \equiv |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|$ )) 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（図1a）。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）を用いて、 $U$ のみを観測データとして用いる形式とする（e.g., Schneider, 1978; Yilmaz, 2001）。 $f$ - $k$ マイグレーションなどの他の手法に比べて、周波数解析などを経ずに観測波形データを直接モデルスペースへ投影するので、地震学ではレーザ関数や散乱係数分布などで最も広く適用されてきた。ただし、各観測点から球面上に投影していくので、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、空間分解能が悪くなってしまう。

これに対して、緊急地震速報への応用の場合、地表面を2次的に伝搬する初期段階の時点での波面 $S$ を用いるので、波面上の波動場 $U$ だけでなく、隣接する複数点のアレイ観測の解析手法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 $\partial U/\partial n$ も用いた自然なグリーン関数を適用することができる（図1b）。さらに、これまでの $U$ 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。

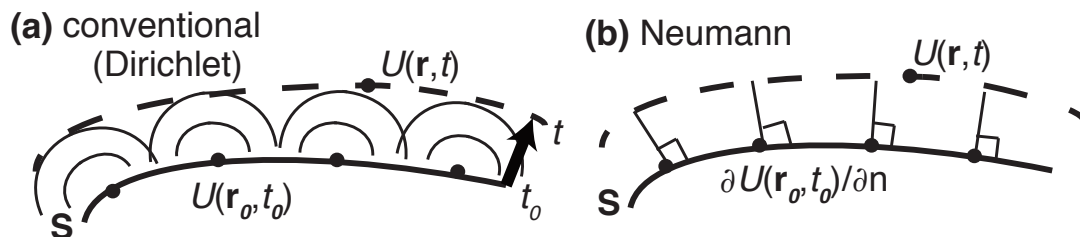


図1：波面を外挿するKirchhoffマイグレーションの概念図。(a)従来の波動場のみを用いる手法、(b)見かけ速度も含めた波面の法線方向の成分も用いる新しい手法

また、反射地震法など異なり、未来の波動場を予測する点は既知の面 $S$ から大きくは離れていない場合が実用上では多く、遠地近似でなく上式を直接適用すべき状況も多い。つまり、 $\partial U/\partial n$ も用いた形式でないと正しい結果が得られない可能性がある。そこで、一つの散乱体のある均質媒質に対して、上の手法の効果を調べた(図2)。観測点分布が十分に均質な場合は外挿した波面はもちろん従来の波動場 $U$ のみを用いても、精度よく再現できるが、実際の観測のように分布に偏りがあると、波面が十分に復元できない領域ができてしまう。到来方向の情報を用いれば、そのような場合である程度の改善が見られた。

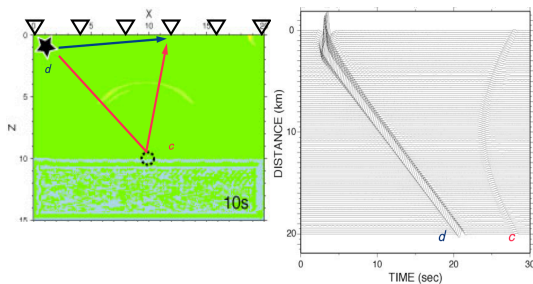
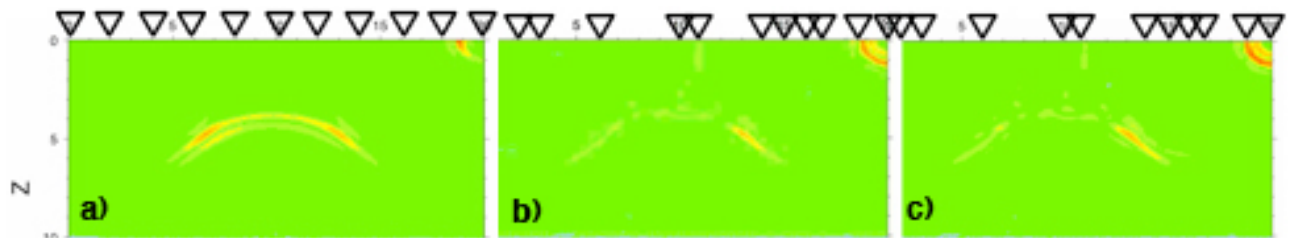


図2：二次元SH波で均質媒質(速度1km/sとする)に一つの散乱体があるモデルでの合成波形。下図は11観測点(▽)の散乱波 $c$ から波動場を外挿した結果(10秒後)：(a)均質な観測点分布で従来の $U$ のみを用いた場合、(b)観測点分布に偏りがある場合、(c)到来方向のみに波動場を外挿した場合。(c)はわずかながらであるが、(b)より改善されている。



緊急地震速報では、P波もS波も浅い地震では3次元よりも2次的に地表面を広がっていくので、過去の地震観測波形から「見かけ速度」の2次元分布を予め求め、これを均質媒質での2次元グリーン関数に適用すればよい。見かけ速度は震源の深さによって大きく異なり(図3の浅い地震ではP波は5.4km/s、深い地震は震央距離100km以上では6.7 km/s)、地域性もあるので、初期段階の波面の見かけ速度を大まかに計測して、逆にグリーン関数に組み入れる。さらに、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くことで、この波面外挿法とあわせて、ある程度はS波の到達時刻を予測できる可能性がある点は重要である(マイグレーションだけではP波の波面しか求まらない)。

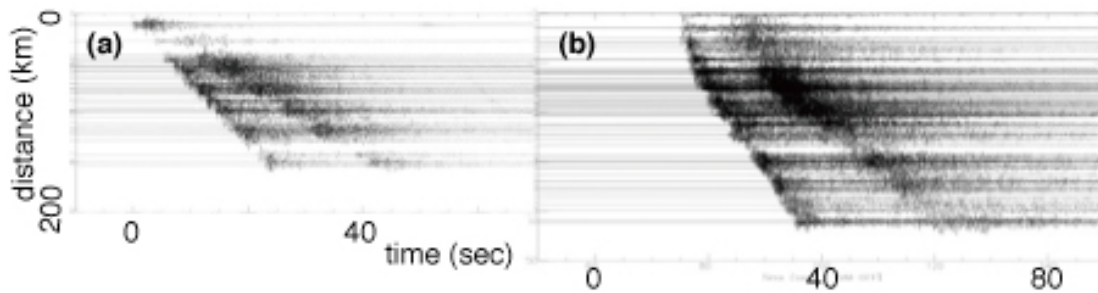


図3：Hi-net上下成分の震央距離毎の波形記録例 (a) 長野県北部の深10kmの浅い地震(2012/7/10)、(b) 東京湾の深さ100kmの地震(2012/7/3)。P, S波の見かけ速度とP-S時間が大きく異なる。

<引用文献> ・干場, 地震学会秋季大会予稿集, B22-06, 2011.

- Schneider, *Geophysics*, **43**, 49-76, 1978.
- Yilmaz, *Seismic Data Analysis*, 2nd ed., Soc. Expl. Geophys., pp. 2027, 2001.