

地震波速度変化に対するコーダ波走時の近似ベクトル感度カーネル  
Approximate Vector Sensitivity Kernels of Coda-Wave Travel Times to Seismic Velocity Changes

○中原 恒・江本賢太郎

○Hisashi NAKAHARA, and Kentaro EMOTO

We have derived approximate vector sensitivity kernels of coda-wave travel times to seismic velocity changes based on the 2D scalar single isotropic scattering model. The sensitivity kernels are different from different components. The two peaks of the kernels at a source and a receiver shows azimuthal dependence, which is different from the previous scalar sensitivity kernels. The kernels are found to be zero for specific paths that are different from different components. The sensitivity kernels derived in this study have analytical expressions, and clarify how to use seismograms on the different components in coda-wave interferometry. (95 words).

### 1. はじめに

近年、地震波干渉法やコーダ波干渉法に基づき、コーダ波を用いて地震や火山噴火などに伴う地下の地震波速度変化が検出されている。その空間分布を調べるには、感度カーネルを考慮したトモグラフィを行う必要があるが、これまでの定式化はすべてスカラー波のもので、ベクトル波である地震波の特に異なる成分の取り扱いが理論的にはよく分からないのが現状である。そこで本研究では、ベクトル化への第1ステップとして、2次元スカラー1次等方散乱モデルに基づき、近似的なベクトル感度カーネルを新たに導出したので、その結果について報告する。

### 2. 近似ベクトル感度カーネルの導出

干渉法で得られた観測記録について、震源経過時刻  $t$  における波群の到達時刻が  $\delta t$  だけ変化した場合、その変化をある場所の地震波速度の逆数であるスローネスの変化率  $\delta S(\mathbf{x})$  と関係づけることができる (Pacheco and Snieder (2006) のスカラー波の場合をベクトル波に拡張) :

$$\langle \delta t_c \rangle(t) = \int_A K_c(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_g, \mathbf{x}, t) \delta S(\mathbf{x}) dA(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_g$  は震源と観測点の位置、 $\mathbf{x} = (x, y, z)$  は地震波速度が変化した場所である。また  $K_c$  は  $c$  成分の感度カーネルであり、以下のように書ける :

$$\langle \delta t_c \rangle(t) = \frac{\int_A dA(\mathbf{x}) \{ \delta t_s(\mathbf{x}) + \delta t_g(\mathbf{x}) \} w_c(\mathbf{x}, t)}{\int_A dA(\mathbf{x}) w_c(\mathbf{x}, t)} \quad (2)$$

ここで、 $w_c$  は  $c$  成分のエネルギー密度を表し、本研究では2次元スカラー波の1次等方散乱モデル (Kopnichev, 1977) に基づき、さらに波線理論的に振動エネルギーを直交2成分に射影するという仮定を用いて計算する。Fig.1のように、震源と観測点とを焦点とする楕円座標系を用いて、P波の場合には  $x$  成分、 $y$  成分に対してそれぞれ次のように求めることができる :

$$K_x(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_g, \mathbf{x}, t) = \frac{1}{2\pi h \left( \frac{v_o t}{2h} \right) \left\{ \left( \frac{v_o t}{2h} \right) - \sqrt{\left( \frac{v_o t}{2h} \right)^2 - 1} \right\} \left\{ \left( \frac{v_o t}{2h} \right)^2 - 1 \right\}} \quad (3)$$

$$\times \left[ \frac{\left( 1 - \frac{x_{bs}}{h} \right)^2 \frac{r_s}{s} + \left( 1 - \frac{x_{bg}}{h} \right)^2 \frac{r_g}{g}}{\left[ \left( \frac{v_o t}{2h} \right)^2 - \left( \frac{2x_{bs}}{v_o t} \right)^2 \right] \left[ \left( \frac{v_o t}{2h} \right)^2 - \left( \frac{2x_{bg}}{v_o t} \right)^2 \right]} \right]$$

$$K_y(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_g, \mathbf{x}, t) = \frac{1}{2\pi h \left\{ \left( \frac{v_o t}{2h} \right) - \sqrt{\left( \frac{v_o t}{2h} \right)^2 - 1} \right\} \left\{ \left( \frac{v_o t}{2h} \right)^2 - 1 \right\}} \quad (4)$$

$$\times \left[ \frac{\left( \frac{y_{bs}}{h} \right)^2 \frac{r_s}{s} + \left( \frac{y_{bg}}{h} \right)^2 \frac{r_g}{g}}{\left[ \left( \frac{v_o t}{2h} \right)^2 - \left( \frac{2x_{bs}}{v_o t} \right)^2 \right] \left[ \left( \frac{v_o t}{2h} \right)^2 - \left( \frac{2x_{bg}}{v_o t} \right)^2 \right]} \right]$$

ここで、 $h$ は震源—観測点間距離の半分、 $v_0$ は背景

媒質の地震波速度である。また、 $r_s, r_g, s, g$ はFig.1に示すように定義される。この表現には散乱の強さを表すパラメタは陽には入っていない。この式に基づき具体的な計算を行った。 $h=1000\text{m}$ ,  $t=0.5\text{s}$ ,  $v_0=6000\text{m/s}$ として、 $xy$ 平面上で計算した結果をFig.2(a)に $x$ 成分、Fig.2(b)に $y$ 成分を示す。対数スケールで色付けしており、値が大きいほど黒色に近い。感度カーネルは、散乱シェル内で値をもち、特に震源（星印）と観測点（三角印）付近に鋭いピークをもつが、その形状は成分ごとに異なる形である。 $x$ 成分では $x$ 軸方向に沿って値が大きくなっているが、これは震源からこの方向に出たP波は、観測点で $x$ 成分のみの振動成分をもつからである。一方、 $y$ 成分では、震源で斜め方向、観測点で $y$ 方向にピークを持つことが分かる。これもこの方向に出たP波が観測点で $y$ 成分のみの振動成分をもつからである。一方、値がゼロになる場所も存在し、それが成分ごとに異なることもわかる。例えば、 $x$ 成分では観測点の上下方向の2か所で値が小さいが、この場所では点線で示す波線により観測点ではP波が $x$ 成分の振幅を持たない（ $y$ 成分の振幅のみとなる）からである。一方、 $y$ 成分では、 $x$ 軸に沿って振幅がゼロとなるが、これも点線で示す波線では観測点で $y$ 成分の振幅を持たない（ $x$ 成分の振幅のみとなる）からである。このように、成分ごとに異なる感度を持つことを、近似的にはあるが、はじめて理論的に示したことが本研究の意義である。

これらのカーネルを用いて、ある領域で生じた地震波速度変化に対して、観測点でどのようなコーダ波の走時変化が期待されるかを、(1)に基づいて、震源経過時刻ごとに2成分に対して計算できることになる。具体的な結果と差分計算に基づく数値計算との比較については講演で紹介する予定である。

### 3. まとめ

本研究では、2次元スカラー波の1次等方散乱モデルと波線理論的なエネルギーの射影に基づいて、近似的なベクトル波感度カーネルを導出した。その結果、感度カーネルは成分ごとに異なること、震源と観測点の鋭いピークは強い方位依存性を持つこと、振幅がゼロになる場所があることなどが分かった。今回導出したカーネルは、等方震源、等方散乱、無変換散乱などの仮定に基づくが、解

析的に表現できる点がメリットである。

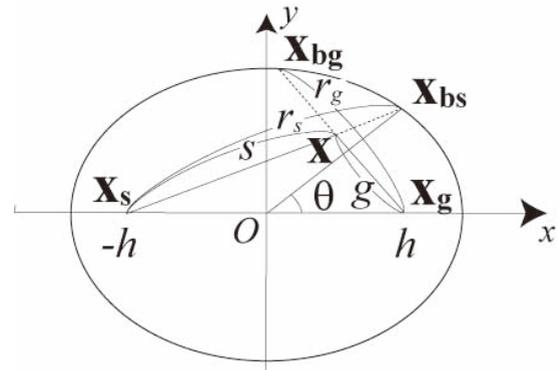


Fig.1 Setup of the model.

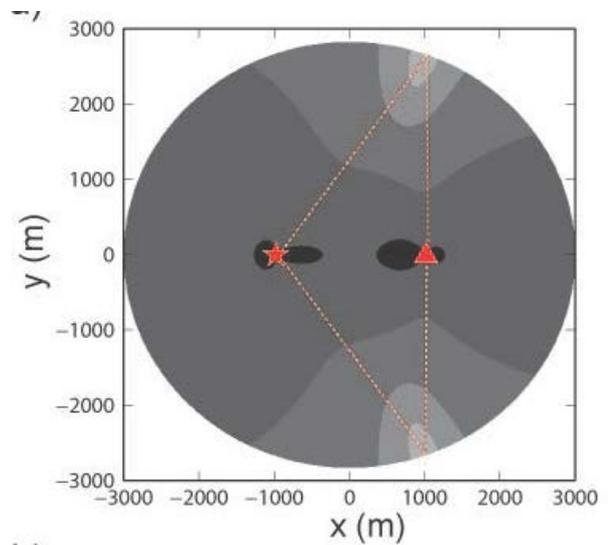


Fig.2 The x-component sensitivity kernel calculated for  $h=1000\text{m}$ ,  $t=0.5\text{s}$ , and  $v_0=6000\text{m/s}$ .

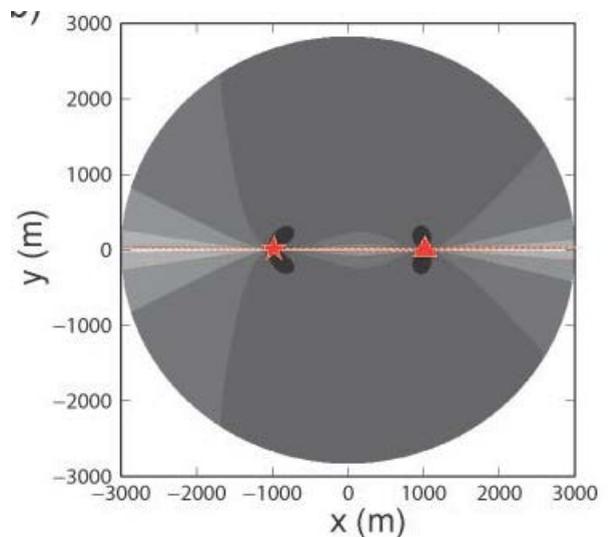


Fig. 3 The y-component sensitivity kernel calculated for  $h=1000\text{m}$ ,  $t=0.5\text{s}$ , and  $v_0=6000\text{m/s}$ .