

地震波速度変化に対するコーダ波走時の感度カーネル  
Sensitivity kernels of coda-wave travel times to seismic velocity changes

○中原 恒  
○Hisashi NAKAHARA

We have derived analytical expressions for the sensitivity kernels of coda-wave travel times to seismic velocity changes based on the 3D scalar single isotropic scattering model. The sensitivity kernels show two peaks at a source and a receiver, which is similar to the previous studies using different scattering models. The two peaks seem more pronounced for later lapse times, which is probably due to a fact that contribution of the two single scattering paths crossing the location of velocity change becomes small with time. The sensitivity kernels derived in this study enables an easy evaluation of the effect particularly for body waves from deeper earthquakes. (105 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。コーダ波が卓越する短周期帯域においては、地震波散乱モデルに基づいて感度カーネルの計算が行われ、これまでにいくつかのモデルが提案されている。本研究では、実体波（3次元）の1次等方散乱モデルに基づいた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. 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、以下の式により、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（たとえば、Pacheco and Snieder, 2006）：

$$\delta t(t) = \int_V K(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_g, \mathbf{x}, t) \delta S(\mathbf{x}) dV(\mathbf{x}). \quad (1)$$

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  $K$  が感度カーネルであり、以下のように書ける：

$$K(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_g, \mathbf{x}, t) = \frac{\int_0^t I(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}, t') I(\mathbf{x}, \mathbf{x}_g, t - t') dt'}{I(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_g, t)}. \quad (2)$$

ここで、 $I$  はエネルギー密度を表し、本研究では3次元スカラー波の1次等方散乱モデル（Sato, 1977）に基づき計算する。Fig.1のように、震源と観測点を焦点とする回転楕円座標系を用いて、具体的に次のように求めることができる：

$$K(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_g, \mathbf{x}, t) = \frac{1}{2\pi h^2 \left\{ \left( \frac{v_0 t}{2h} \right)^2 - 1 \right\}} \left[ \frac{2h}{v_0 t} \log \left| \frac{1 + \frac{v_0 t}{2h}}{1 - \frac{v_0 t}{2h}} \right| \right] \frac{1}{\left( \frac{v_0 t}{2h} \right)^2 - \left( \frac{2x}{v_0 t} \right)^2} \left( \frac{r_s}{s} + \frac{r_g}{g} \right). \quad (3)$$

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。〔 〕内はSato (1977)の  $K$  関数である。この表現には散乱の強さを表すパラメー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。  $h=1000\text{m}$ ,  $t=1\text{s}$ ,  $v_0=3000\text{m/s}$  として、 $z=0$  の面上で計算した結果をFig.2に示す。縦軸は対

数表示している。感度カーネルは、散乱シェル内で値をもち、特に震源と観測点付近に鋭いピークをもつ。これは、波動振幅の幾何減衰と、波動は震源と観測点とを必ず通過しなければならないという幾何学的制約とによるためと考えられる。

次にFig.3のような状況を考える。1辺が3000mの立方体において地震波速度が0.5%低下した場合に、星印の震源に対してR1,R2の観測点で、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計算した結果がFig.4である。速度変化が空間一様ではないため、走時変化は震源経過時刻に単純に比例するわけではない。より詳しく結果を見てみると、直達波が速度変化域を通過しないR1では走時変化がゆっくりと立ち上がるのに対し、直達波が速度変化域を通過するR2では、走時変化が鋭く立ち上がることが分かる。

### 3. まとめ

本研究では、実体波（3次元）の1次等方散乱モデルに基づき、感度カーネルを導出した。その結果、感度カーネルは散乱シェル内で値をもち、特に震源と観測点において鋭いピークをもつことが分かった。今回導出したカーネルは解析的に表現できる点がメリットである。また、表面波が感度をもたない深い部分の変化を実体波により検出する場合に有用であろう。

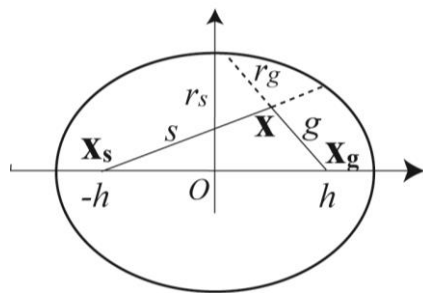


Fig.1 Setup of the model.

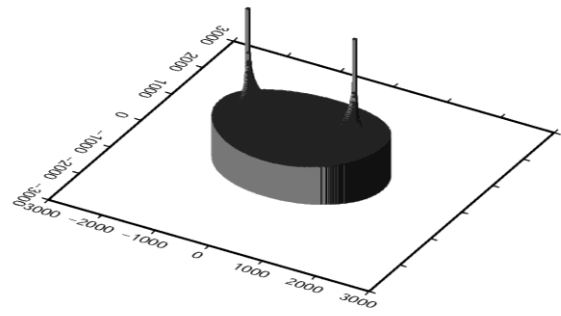


Fig.2 Sensitivity kernel on  $z=0$  calculated for  $h=1000$ m,  $t=1$ s, and  $v_0=3000$ m/s.

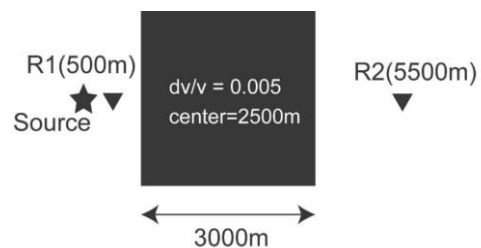


Fig.3 Configuration of source, receiver, and the region of velocity change.

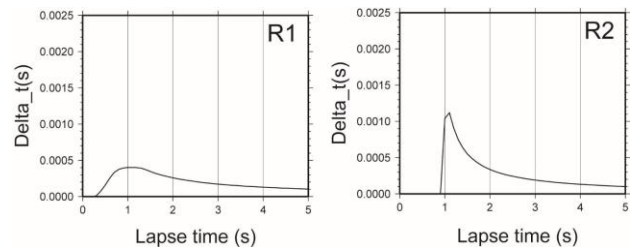


Fig. 4 Coda-wave travel time changes expected at receivers R1 and R2.