

コーダ波のデコリレーションの近似ベクトル感度カーネル：2次元1次散乱の場合

中原 恒（東北大・理）

1. はじめに

地震波干渉法やコーダ波干渉法に基づき、地震や火山噴火などに伴う構造の時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。地震波速度変化に対するコーダ波の走時変化の感度カーネルについては、近似的ながらもベクトル波のモデリングが始まったところである（中原・江本, 2016）。一方で、散乱構造の変化に対するコーダ波のデコリレーション（相関係数を1から引いたもの）変化の感度カーネルについては、まだスカラー波のモデル化にとどまっているのが現状である（例えば, Planes et al., 2014; Margerin et al., 2016）。そこで本研究では、中原・江本（2016）が走時変化に対して行ったのと同様の2次元1次散乱モデルと波線理論的な振動エネルギーの射影に基づき、デコリレーション変化の近似ベクトル感度カーネルの導出を行ったので、その結果について報告する。

2. 感度カーネルの導出

干渉法などで得られた観測記録について、震源経過時刻 t におけるコーダ波の波群のデコリレーションが dC の場合、その変化とある場所 \mathbf{x} における散乱係数の変化 $\delta g(\mathbf{x})$ とを、感度カーネル K を介して関係づけることができる（たとえば, Margerin et al. 2016）：

$$\langle dc \rangle(t) = \int_A K(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_g, \mathbf{x}, t) \frac{\delta g(\mathbf{x})}{g_0} dA(\mathbf{x}). \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_g$ は、それぞれ震源と観測点の位置、 g_0 は変化前の散乱係数、 dA は微小空間要素（2次元の場合は面積）をあらわす。感度カーネルは、震源経過時刻 t に到達するコーダ波のすべての波群のうち、散乱係数が変化した領域で散乱された波群の寄与の割合を表すものと解釈できる。この考えにもとづき、各波群の重みとしてエネルギー密度 w_c を用いて、デコリレーションは近似的に以下のように記述できる。

$$\langle dc \rangle(t) \approx \frac{\int_A dA(\mathbf{x}) \delta g(\mathbf{x}) w_c(\mathbf{x}, t)}{2 \int_A dA(\mathbf{x}) g_0 w_c(\mathbf{x}, t)} \quad (2)$$

本研究では2次元問題を扱い、エネルギー密度の計算にはスカラー波の1次等方散乱モデル（Kopnichev, 1977）を用いて計算する。ただし、スカラー波に対する多重散乱まで含めた感度カーネルの計算はすでに Margerin et al. (2016) により行われている。これに対して、本研究では、1次散乱に対して近似的にはあるがベクトル波への拡張を行う点が新しい。ポイントは、ベクトル波の成分への分解を行う際には、エネルギー粒子の進行方向と振動方向を考え、振動方向を水平成分と鉛直成分に分解するというものである。これは地震波速度変化の場合に中原・江本（2016）が用いたのと同じである。P波かS波のどちらか一つだけしか扱えないという制約はあるものの、従来のスカラー波の等方1次散乱モデルを少し拡張するだけで、感度カーネルを成分ごとに解析的に導出できる。以下に示すのはP波に対する x （水平）成分と y （鉛直）成分の感度カーネルである。

$$K_{gx}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_g, \mathbf{x}, t) = \frac{\left(1 - \frac{x}{h}\right)^2 \sqrt{\left(\frac{v_o t}{2h}\right)^2 - 1} \delta\left(\varepsilon - \left(\frac{v_o t}{2h}\right)\right)}{4\pi h^4 \left\{\left(\frac{v_o t}{2h}\right) - \sqrt{\left(\frac{v_o t}{2h}\right)^2 - 1}\right\} \left[\left(\frac{v_o t}{2h}\right) - \left(\frac{2x}{v_o t}\right)\right]^3 \left[\left(\frac{v_o t}{2h}\right) + \left(\frac{2x}{v_o t}\right)\right]} \quad (3)$$

$$K_{gy}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_g, \mathbf{x}, t) = \frac{y^2 \sqrt{\left(\frac{v_0 t}{2h}\right)^2 - 1} \delta\left(\varepsilon - \left(\frac{v_0 t}{2h}\right)\right)}{4\pi h^4 \left\{ \left(\frac{v_0 t}{2h}\right) - \sqrt{\left(\frac{v_0 t}{2h}\right)^2 - 1} \right\} \left[\left(\frac{v_0 t}{2h}\right) - \left(\frac{2x}{v_0 t}\right) \right]^3 \left[\left(\frac{v_0 t}{2h}\right) + \left(\frac{2x}{v_0 t}\right) \right]} \quad (4)$$

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 は図1に示すように定義される。この式に基づき具体的な計算を行った。 $h=1000\text{m}$ 、 $t=1.0\text{s}$ 、 $v_0=6000\text{m/s}$ として計算した結果を図2に示す。感度カーネルは、1次散乱なので散乱殻上のみ感度をもつ。また、水平成分と鉛直成分とは感度カーネルの表現が異なり、特に感度がゼロになる場所が存在し、それらの場所は成分ごとに異なることが分かった。またそれに応じて、地震波散乱特性の空間変化に対して、コーダ波のデコリレーション変化の震源経過時間依存性も水平成分と上下成分では異なることが分かった。これらは従来のスカラー波の枠組みでは扱えなかったことで、本研究によるベクトル波への拡張による大きな成果である。

3. まとめ

本研究では、2次元1次等方散乱モデルに基づき、デコリレーション変化の近似ベクトル感度カーネルを新たに導出した。その結果、スカラー波の感度カーネルとは異なるベクトル波の感度カーネルの特徴が明らかになった。今回導出したカーネルは解析的に表現できる点の一つのメリットである。今回の定式化は一つの波のモードの卓越を仮定した簡単なものであるが、並行して、ベクトル波へのより厳密な拡張も順次進めていく必要がある。

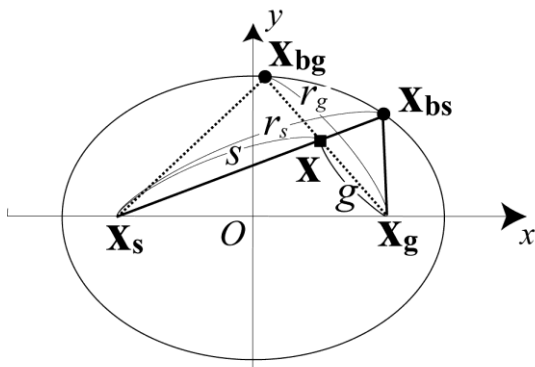


図1. 空間配置.

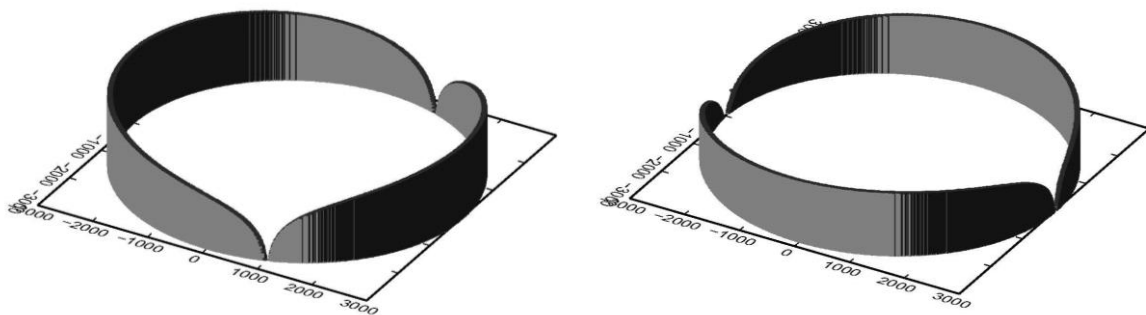


図2. 感度カーネルの計算例. (左) x成分, (右) y成分.

カーネルがゼロになる経路が存在し、それらは成分ごとに異なる。