

# 粒子軌跡を用いたランダム波動の到来方向推定

高木涼太（東北大学）・小原一成・前田拓人・西田究（東京大学）

## はじめに

波動の到来方向の理解は、常時微動やコーダ波の励起についての理解に加え、常時微動やコーダ波への地震波干渉法の適用という観点からも重要である。波動の到来方向推定には、複数観測点での位相差を用いるアレイ解析と、1観測点での粒子軌跡を用いる解析がある。粒子軌跡を用いた到来方向解析では、特にレイリー波に着目して、上下動・水平動の位相差から到来方向を推定する手法が提案されてきた[例えば、Schimmel et al., 2011]。しかし、これまでは一方向のみに伝播するレイリー波を仮定しており、常時微動やコーダ波のように様々な方向に伝播する波の取り扱いが自明ではないように思われる。本研究では、方位方向に分布を持ちランダムに伝播するレイリー波について、上下動・水平動の相互相関関数と波動強度分布の関係を示し、到来方向を推定する方法を提案する。

## 上下・水平相関による到来方向推定法

レイリー波が様々な方向から観測点に入射する場合を考える。1観測点における上下  $u_z$ ・南北  $u_N$ ・東西  $u_E$  成分の振幅スペクトルは、

$$u_z = \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi A(\varphi), \quad u_N = \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi iHA(\varphi)\cos\varphi, \quad u_E = \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi iHA(\varphi)\sin\varphi \quad (1)$$

のように表せる。 $A(\varphi)$  は方位  $\varphi$  に伝播するレイリー波の振幅スペクトル、 $i$  は虚数単位、 $H$  はレイリー波振幅の水平成分・上下成分比 (H/V) である。ここで、地震波干渉法での扱いと同様にランダム波動場を考え、別方向に伝播する波は相関がないと仮定すると、

$$\langle A^*(\varphi)A(\varphi') \rangle = (2\pi)^{-1} \langle |A(\varphi)|^2 \rangle \delta(\varphi - \varphi'), \quad \langle |A(\varphi)|^2 \rangle = a_0 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (a_m \cos m\varphi + b_m \sin m\varphi) \quad (2)$$

と書ける。 $\langle \rangle$  はアンサンブル平均である。一つ目の式が無相関波の仮定、二つ目の式は波動強度の方位分布をフーリエ級数で表したものである。このとき、上下動・水平動の相互相関のアンサンブル平均は、式 (1, 2) を用いて、以下のようなになる。

$$\langle u_z^* u_N \rangle = iH \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi' \langle A^*(\varphi)A(\varphi') \rangle \cos\varphi' = iH (2\pi)^{-1} \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi \langle |A(\varphi)|^2 \rangle \cos\varphi = iHa_1 \quad (3)$$

$$\langle u_z^* u_E \rangle = iH \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi' \langle A^*(\varphi)A(\varphi') \rangle \sin\varphi' = iH (2\pi)^{-1} \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi \langle |A(\varphi)|^2 \rangle \sin\varphi = iHb_1 \quad (4)$$

式 (3, 4) は、1観測点における上下動・水平動の相互相関関数（クロススペクトル）の虚部が、波動強度の方位分布をフーリエ級数で展開した際の1次係数に比例することを意味する。フーリエ級数の1次項は波動強度の強い方向を与えるため、1観測点での上下・水平相関を計算すれば、ランダムに伝播するレイリー波の到来方向を推定することができる。

## Hi-net に適用

以上の方法を日本全国の Hi-net で観測された常時微動データに適用した (図 1)。周期 4-8 秒の常時微動の到来方向は、特に西南日本において、夏に太平洋側から冬には日本海側といった季節変化を示す。周期 2-4 秒では、到来方向が空間的に大きく変化する領域が存在し、これらが糸魚川静岡構造線と中央構造線という大規模な構造境界に対応していることがわかった。構造境界付近の不

均質性の強い地殻構造により、やや短周期の波が散乱あるいは減衰することで常時微動の指向性が弱まるといった伝播特性の影響が考えられる。周期 1-2 秒では、伝播特性の影響が強くなり、到来方向は最寄りの海の方向を向くといった特徴がある。

イベント的なデータについても同様の解析を行った。まず、周波数 2-4 Hz の短周期帯域では、深部低周波微動発生時にその震央方向に到来方向が求まり (図 2)、短周期の波についても 1 点のみから到来方向を推定できることがわかった。また、周期 8-16 秒の長周期コーダ波では、地震発生から 30-90 分において日本全国で東から西に伝播する成分が卓越することを見出した (図 3)。これは、太平洋にトラップされた音波が起源であり、海岸線付近においてレイリー波に変換されたものを陸上で観測していると考えられる。

## まとめ

ランダムに伝播するレイリー波について、上下動・水平動の相互相関関数の虚部が波動強度の方位分布の 1 次係数に比例することを示し、1 観測点のみからランダム波動の到来方向を推定する方法を提案した。この手法を Hi-net データに適用し、0.25-16 秒の広い周期帯において、常時微動やコーダ波などの到来方向を推定できることを示した。

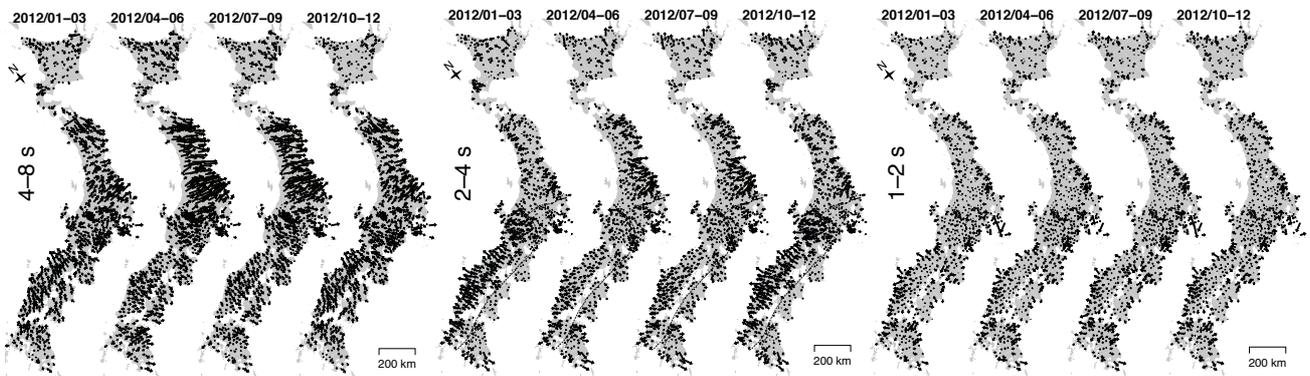


図 1. 常時微動の到来方向。矢印の方向と色は到来方向，長さは指向性の強さを示す。

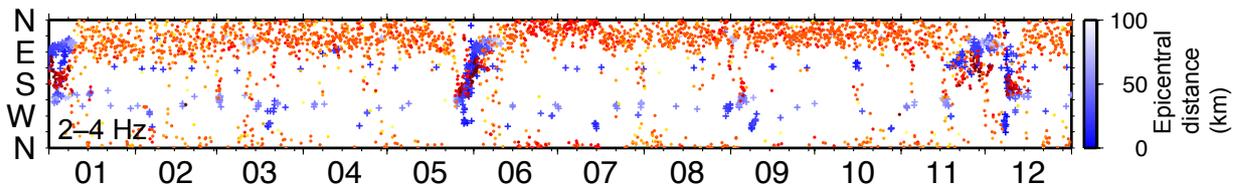


図 2. N.OOZH 観測点 (四国西部) における到来方向の時間変化 (2012 年 1 年間)。丸の濃さは指向性の強さ，青は Obara et al. [2010]の方法で決定された深部低周波微動震央方向。

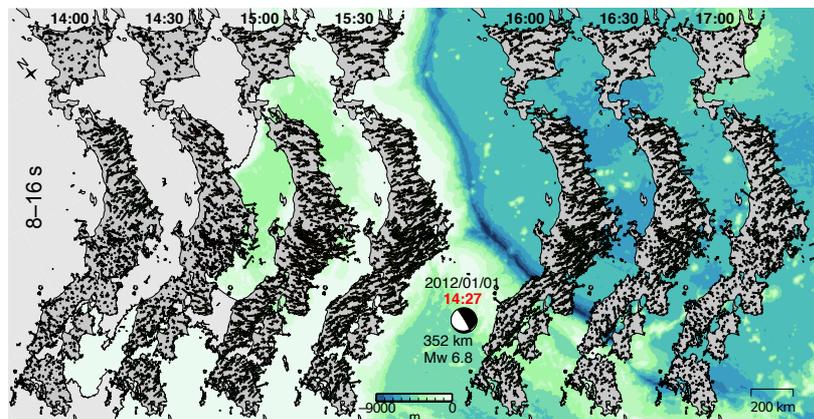


図 3. 長周期コーダ波の到来方向。