

## BIDO version 3.0

BIDO3.0 は BIDO2.0 の改変版です。BIDO2.0 では円周上のクロススペクトル密度が重み付け平均されます(注 1)。その際、微動強度の均質性を仮定しており、分析結果は機器の応答や設置条件のわずかな違いに敏感となります。BIDO3.0 はクロススペクトルの代わりに複素コヒーレンス(注 2)を使用することで安定化を図ることにしました。ただし、そのことにより、BIDO3.0 は鉛直成分のみしか処理しないという制限がつくようになりました(つまり BIDO3.0 は鉛直成分の SPAC, CCA, および nc-CCA 方法のみ適用可)。この変更点を除き、使用方法と解析手順は BIDO2.0 と同一です。BIDO2.0 のマニュアルが適用されます。

インストールは BIDO2.0 の場合と同様です。PC に gfortran を含む開発環境をインストールしてください。その上で以下の手順を取って下さい。Linux (Ubuntu24) と Mac (Apple M1 Pro) で動作確認済です。

1) ターミナルを開いてダウンロード(DL)したアーカイブを展開して下さい。次のコマンドです。

```
unzip BIDO3.0g.zip
```

これにより、BIDO3.0g というフォルダ(ディレクトリ)ができていると思います。ここで、

```
cd BIDO3.0g  
. CHMOD.sh [Hit Return Key]
```

としてください。2 行目はピリオドと半角スペースのあとに「CHMOD.sh」です。このアーカイブのすべてのファイルは実行権限がありませんので、これによりシェルスクリプトに実行権限を与えます。

2) この段階ではフォートランのサブルーチンプログラムが1つ不足しています。大崎総合研究所の HP から FAST.f をダウンロードして以下の手順でパッチ(単精度から倍精度に修正, 改行コードの変換)をあててください。

- i) <http://www.ohsaki.co.jp/activity/download/index.html> にアクセスして FAST.f をダウンロードする。
- ii) ダウンロードした FAST.f を BIDO3.0g /src の下におく。
- iii) 次のコマンドでパッチをあてる。

```
cd src  
AutoConvFAST.sh [Hit Return Key]
```

これで OK です. FAST.fの内容が修正されているはずですが. 具体的には, 41-43 行目に以下の文言が入っていれば正常にパッチが当てられています.

```
C -----  
C  A PATCHED DOUBLE-PRECISION VERSION FOR BIDO  
C -----
```

3) 以下のスクリプトを実行してプログラムをコンパイルしてください.

Install.sh [Hit Return Key]

お使いの PC のスペックによっては配列変数の大きさを小さくするためにこれを実行する前に PARAM.h, PARAM\_PREPRO.h,を編集する必要があるかもしれません.

4) BIDO では解析結果の描画に **gnuplot** (フリー) を用いています (<http://www.gnuplot.info>). お使いの PC にインストールされていなければ別途インストールしてください.

動作チェックのために,

```
run.sh demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N4/param.sh
```

とタイプしてみてください.

デモ用のデータは BIDO2.0 同梱のものと同じです. BIDO2.0 の場合と同様に Figure 1 のような結果が得られると思います. 詳細は BIDO2.0 のマニュアルをご確認下さい.

プログラムの一般的な利用法は以下の通りです.

1) run.sh [return key]

2) run.sh paramfile [return key]

(paramfile will be created automatically by running this file)

入力データとして, 一台のセンサーの微動波形データを以下のような4列もしくは2列のデータを含む1つのファイルとして準備して下さい. :

```
time [s]  z(UD)  x(EW)  y(NS)
```

or

```
time [s]  z(UD)
```

(スペース区切りコンマ区切りのどちらでも可)

これらの波形データファイルは1つのディレクトリに入れてあれば特にファイル名の制限はありません. 波形データファイルの数は微動アレイを構成するセンサー数と同じでなければなりません.

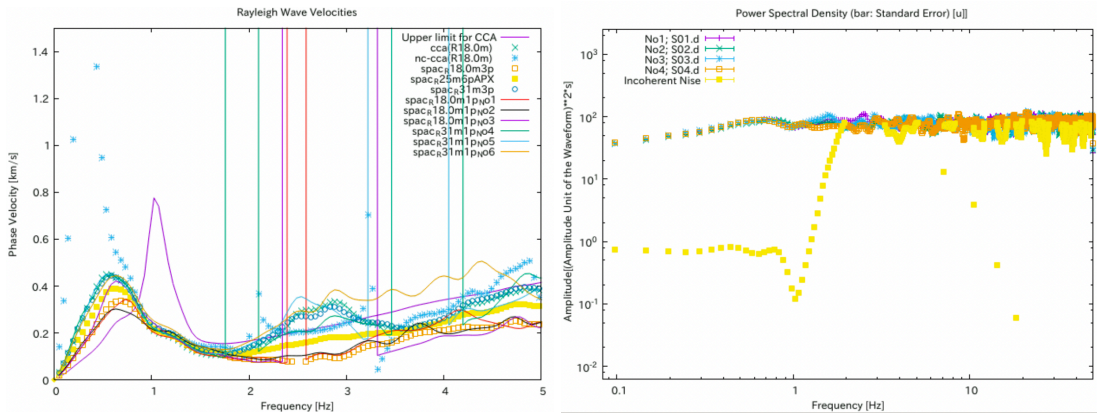
データ処理が終わったら, BIDO2.0 の場合と同様に, すべての解析結果はデータフォルダの下に **RESULT** というディレクトリに格納されます (このディレクトリは自動生成されます). 解析結果を含むファイルの名前が BIDO2.0 の時から変更されていますのでご注意ください (Appendix 1-1). すべての解析結果は **ave** (average の略) というディレクトリに格納されています (Appendix 1-2). このディレクトリの下にファイルは 1, 2 のような数

字名のディレクトリ下に格納された解析結果(HDD 容量をセーブするために計算後に削除されます)を統計処理したものです。数字名のディレクトリには統計処理される解析結果だけでなく、通常は詳細な分析を行わない限り使用されないさまざまな入力ファイルと入力量ファイルも含まれます(Appendix 1-3)。

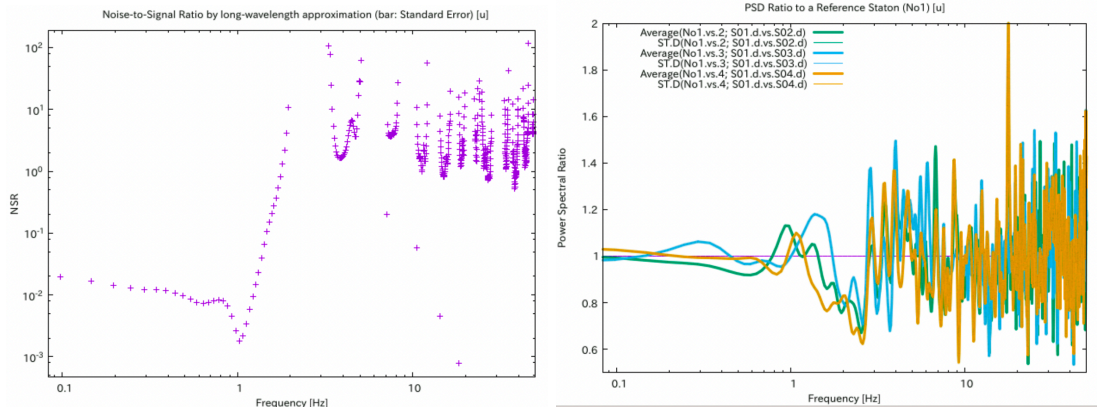
(注 1) BIDO2.0 で円周上のクロススペクトル密度が重み付き平均されるのは、これが円形アレイデータ処理に関する一般理論(Cho et al., 2006)を実証、研究するために開発したデータ処理コードそのものだったからです(この理論は SPAC 法を特殊なケースとして包含している)。研究・開発目的だったため、このコードのデータ処理の流れが複素コヒーレンスの計算には適していませんでした。その結果、SPAC 手法における SPAC 係数は、BIDO2.0 では Aki(1957)の式をそのまま用いて、実用的に良く用いられている複素コヒーレンスではなく、スペクトル比として定義されているのです(BIDO2.0 のマニュアルの 5-4 節を参照)。

(注 2) BIDO3.0 は、SPAC 法に関わる上記の BIDO2.0 の問題の対処として、SPAC 係数を複素コヒーレンスの実部として定義し結果、SPAC 法にどのような実践的な効果が生じるのかを評価するために開発されました。その結果は、Cho and Iwata(2021), Cho (2022)に詳述していますのでご興味があればぜひご確認ください。

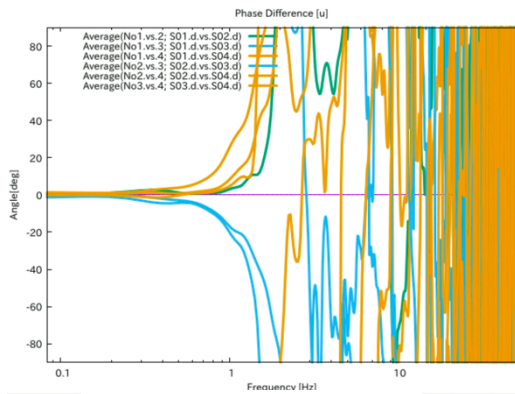
- Aki, K., 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **35**, 415–457.
- Cho, I., 2022, Array-size dependency of the upper limit wavelength normalized by array radius for the spatial autocorrelation method, *Earth, Planets and Space*, **74**, No.75.doi:10.1186/s40623-022-01641-2
- Cho, I. and Nakazawa, T., 2024, Shallow microtremor array survey using miniature and small arrays: Strategy for efficient and feasible dense survey. *Earth and Space Science*, 11, e2023EA003472. doi:10.1029/2023EA003472
- Cho., I. and T. Iwata, 2021, Limits and benefits of the spatial autocorrelation microtremor array method due to the incoherent noise, with special reference to the analysis of long wavelength ranges, *J. Geophys. Res.*, **126**, e2020JB019850, doi:10.1029/2020JB019850
- Cho, I., T. Tada, and Y. Shinozaki, 2006, A generic formulation for microtremor exploration methods using three-component records from a circular array, *Geophys. J. Int.*, **165**, 236-258. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02880.x



(a) Phase Velocities (b) Power Spectral Densities (PSD)



(c) Noise-to-Signal Ratios (d) Power Spectral Ratios



(e) Phase differences

**Figure 1** BIDO3.0 をデモデータに適用して得られた結果. 注意: 約 2 Hz を超える周波数範囲は波長範囲が  $2r$  ( $r$ : アレイ半径) 未満に対応するためパネル(a)の位相速度は 2 Hz を超える周波数範囲は解釈できません. この制限は BIDO における位相速度の算出法に起因します (詳細は BIDO2.0 のマニュアルの 5-4 節を参照).

また, パネル (a) には解析可能な範囲の上限値の推定値(位相速度およびノイズ補正位相速度; nc-CCA と表記)が含まれています. パネル (b) にはインコヒーレントノイズの強度(パワースペクトル密度, PSD)が含まれています. これらの量はパネル (c) に示された NSR に基づいて計算されています. インコヒーレントノイズの PSD は約 1 Hz 未満の周波数範囲でのみ解釈しなければなりません. 詳細は Cho (2022), Cho and Iwata (2021) を参照してください.

## Appendix 1-1 Analysis Results (Folder RESULT)

1, 2, ..., $n$ , ...	Folder containing analysis results relevant to the $n$ th segment cluster
ave	Folder containing data files used in gnuplot plots (files with statistics of the analysis results in folders 1, 2, ...)
array.png	Plot of the array geometry
center.d	Work file to store data to plot array geometry
circle.d	Work file to store data to plot array geometry
dummy	Used in gnuplot plots. A dummy data file that contains nothing
input.mkrcrcle_center.z.d	Input data for the calculation of Fourier coefficients at the center (UD component)
input.mkrcrcle_circle.z.d	Input data for the calculation of Fourier coefficients around the circle (UD component)
logfile.mkrcrcle_center.z.d	Execution log of the program to calculate Fourier coefficients at the center (UD component)
logfile.mkrcrcle_circle.z.d	Execution log of the program to calculate Fourier coefficients around the circle (UD component)
message.sh	Work file that contains messages outputted during execution of the calculations plus a number of parameters
input.chk_seism.d	Work (input) file for a program that checks the coordinates of the array data
plot.gnplt	Macro to activate gnuplot (to plot analysis results)
wave.png	Plot of the waveforms
wavplot	Work directory to store data that are decimated to plot waveform data using gnuplot
plot_array.gnplt	Macro to activate gnuplot (to plot array geometry)
plot_wave.gnplt	Macro to activate gnuplot (to plot waveforms)

segment\_3c.d     Segment file describing which segments were extracted from the three-component measurement data

segment\_3c.d.gnpltdat     Work data file for drawing waveform data using gunplot

segment\_z.d             Segment file describing which segments were extracted from the UD-component measurement data

segment\_z.d.gnpltdat     Work data file for drawing waveform data using gunplot

seism.log                Execution log of the program to examine array geometry

## Appendix 1-2 Analysis Results (Folder RESULT/ave)

**PHASE1u\_2u.d** Phase difference [degree] between two data described in the seismfile, which are assigned the numbers 1, 2, ... from top to bottom (see ave.info involved in the same folder for the correspondence between the number and the data). A mean angle is calculated by the vector sum of the data from all data blocks. The letters e, n and u denote the east-west, north-south, and up-down components, respectively.

**PSDRATIO1u\_2u.d** Power-spectral ratios of two data described in the seismfile, which are assigned the numbers 1, 2, ... from top to bottom (see ave.info involved in the same folder for the correspondence between the number and the data). The letters e, n and u denote the east-west, north-south, and up-down components, respectively.

**SD1u\_SD1u.d** Power-spectral density function. The data described in the seismfile are assigned the numbers 1, 2, ... from top to bottom (see ave.info involved in the same folder for the correspondence between the number and the data). The letters e, n and u denote the east-west, north-south, and up-down components, respectively.

**ave.info** Rough explanation of how the analysis results were averaged

**cmax\_by\_nsr.d** Upper limits of analyzable phase velocities (UD component) determined based on the analysis results of Noise-to-Signal Ratios (NSR)

**nsr\_cca.lwapx.d** NSRs (UD component) calculated based on the long-wavelength approximation of the CCA and SPAC coefficients

**pow\_noise.d, pow\_singal.d** Power-spectral density of the incoherent noise and the coherent signal (UD component), which are estimated by using SD1u\_SD1u.d and nsr\_cca.lwapx.d.

**spr\_cca.d** CCA coefficient.

**spr\_spac\_RXXmYp.d** SPAC coefficient that is defined as the real part of the average complex coherency. “XX” means the radius or the distance between observation points. “Y” means the number of observation-point pairs to be averaged.

**spr\_spac\_RXXmYp.d.img** Imaginary part of the average complex coherency

**spr\_spac\_RXXmYpAPX.d** Approximated SPAC coefficient when the distances between two observation points are not uniform although the differences are small. “XX” means an average distance between observation points. “Y” means the number of observation-point pairs to be averaged (see Appendix 2).

**spr\_hv.d** Ratios of the power of horizontal motion (sum of the two horizontal-component powers) to the power of vertical motion



vel\_cca.d                      Phase velocities of Rayleigh waves according to the CCA method

vel\_nc-cca.d      Phase velocities of Rayleigh waves according to the nc-CCA method

vel\_spac\_RXXmYp.d                      Phase velocities of Rayleigh waves according to the SPAC method (with the definition of the SPAC coefficient as the real part of the average complex coherency)

vel\_spac\_RXXmYpAPX.d                      Phase velocities of Rayleigh waves corresponding to approximated SPAC coefficients (see the explanation of spr\_spac\_RXXmYpAPX.d and Appendix 2).

\* In the above data files, the frequency, the mean value through all data blocks (i.e., corresponding to alphanumeric directories), the standard deviation and the number of data blocks are laid out in the first, second, third and fourth columns, respectively. The “mean” means an arithmetic mean if not specified. The standard error is calculated by (the third column)/sqrt(the fourth column)



### Appendix 1-3 Analysis Results (Folder with alphanumeric names)

infile.estspec.d	Input data for the estimation of spectra (array analysis)
infile.estspec_hv.d	Input data for the estimation of spectra (H/V)
infile.estspec_psd.d	Input data for the estimation of spectra (power spectral densities)
logfile.estspec.d	Execution log of the program to estimate spectra (array analysis)
logfile.estspec_hv.d	Execution log of the program to estimate spectra (H/V)
logfile.estspec_psd.d	Execution log of the program to estimate spectra (power spectral densities)
seism_coh.log	Logfile describing the exact value of the radius (distance) expression in the SPAC file (e.g., “XXm” of either spr_spac_RXXmYp.d or vel_spac_RXXmYp.d). The first and the second rows correspond to “XXm” and the exact value, respectively. The ninth row represents “_RXXmYp”.
seism_spacapx.log	Logfile describing the approximation condition: “radius_id” is the ID used for the file name; “radius_ave”, “radius_std”, “radius_cv”, “radius_n” are an average radius, standard deviation, coefficient of variations, the number of radiuses averaged.

## Appendix 2 Approximated SPAC coefficient when the distances between two observation points are not uniform

Assume that we want to apply the SPAC method but the distances between observation points are not uniform. In this case, an azimuthal average of the SPAC coefficients cannot be calculated in an ordinary sense. However, provided that the differences in the distances are small and the microtremor wavefield is close to isotropic, the azimuthal average of the  $N$  SPAC coefficients  $\rho(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_i(f)$  can be modeled as the zeroth order Bessel function of the first kind, of which argument is the product of an average distance  $r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i$  and the wavenumber  $k(f)$ . i.e.,

$$\rho(f) = J_0[rk(f)].$$

The above equation makes the estimation of phase velocities more robust than the estimation based on the data from a two-point array only.

(Explanation)

When the microtremor wavefield is close to isotropic, the  $i$ -th SPAC coefficient can be approximated as

$$\rho_i(f) = J_0(r_i k(f)). \quad (1)$$

An average distance between two observation points  $r$  and the perturbation from the average value  $\Delta r_i$  are represented as

$$r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i, \Delta r_i = r_i - r. \quad (2)$$

An average SPAC coefficient is represented as

$$\rho(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_i(f). \quad (3)$$

Substituting equations (1) and (2) into (3), we have

$$\rho(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N J_0[(r + \Delta r_i)k(f)]. \quad (4)$$

Taking the Taylor expansion of the Bessel function  $J_0[(r + \Delta r_i)k(f)]$  around  $r$  and ignoring the terms higher than the second term, by assuming  $\Delta r_i$  is small, we have

$$J_0[(r + \Delta r_i)k(f)] = J_0[rk(f)] - k(f)J_1[rk(f)]\Delta r_i. \quad (5)$$

Substituting equation (5) into (4) yields

$$\begin{aligned}
\rho(f) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [J_0[rk(f)] - k(f)J_1[rk(f)]\Delta r_i] \\
&= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N J_0[rk(f)] + \frac{k(f)J_1[rk(f)]}{N} \sum_{i=1}^N \Delta r_i \\
&= J_0[rk(f)]. \quad (6)
\end{aligned}$$

Thus, we can obtain

$$\rho(f) = J_0[rk(f)],$$

where,

$$\begin{cases} \rho(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_i(f), \\ r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i. \end{cases}$$