

BIDO version 2.0

BIDO とは？

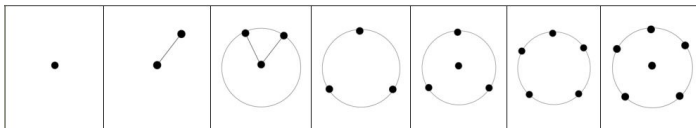
BIDO は微動の円形アレイデータから表面波特性を同定するための解析プログラムです。



左：全部で6個の地震計による半径30cmの微動（アレイ＝複数の地震計による同時観測のことです）。右：乗用車に左の地震計のセットを含む記録システム一式を積んで、移動しながら観測をしている様子（手法の有効利用のための1アプローチを参照）（引用文献[6]）。

BIDO が想定するアレイ形状

バージョンアップにより、単点観測（地震計1個、下図一番左）やハドルテスト（複数の地震計を同一地点において機材特性の均一度をチェックするテスト）も適用できるようになりました。また地震計2台による直線アレイや3台によるL型アレイなどの変形アレイにも対応しました（下図左から2、3番目）。ただ、地震計数や記録成分（上下動／水平動／3成分）によって解析できる内容が変わってくるので、いちいち対応を考えながら解析作業を進めるのは面倒（付録の対応表を参照）。そこで本プログラムでは、地震計の位置と記録の成分を記述するファイルを書き換えるだけでプログラムが解析できる内容を判別して自動的に解析を進めるようになっています。



目次

1. はじめに.	3
2. 想定ユーザ.	3
3. 使い方.	3
4. ソフトの技術的内容とインストール方法.	3
5. プログラムの内容とアルゴリズム.	4
6. デモデータによるプログラムの実行例.	7
6-1 アレイデータ解析のデモ.	7
A6-1-1 微動波形の合成 (Synthetic data の詳細)	27
A6-1-2 質問事項に関する詳しい説明.	29
A6-1-3 seism ファイル.	31
A6-1-4 segment ファイル.	31
A6-1-5 出力ファイル群 (RESULT フォルダの中身)	32
A6-1-6 出力ファイル群 (RESULT/ave フォルダの中身)	33
A6-1-7 出力ファイル群 (個別の数字フォルダの中身)	33
A6-1-8 手法の有効利用のための1アプローチ.	35
A6-1-9 パラメータ設定のコツ.	35
6-2 ハドルテストのデモ.	35
A6-2-1 出力ファイル群 (RESULT/ave フォルダの中身：ハドルテストのケース)	39
文献	40
付録1 アレイ形状と解析内容.	41
付録2 実行ログ.	43

1. はじめに

BIDO は微動アレイ探索のために公開している解析ツールで、微動の円形アレイデータを解析して表層地盤を伝搬する表面波の特性を同定するためのソフトです。(旧)東京理科大・篠崎研究室を中心とするグループ(篠崎祐三(元)教授・多田卓博士・長と大学院生たちによる共同研究)による研究開発の成果(引用文献[1, 3, 4, 5])を長がプログラム化しました。ラブ波の位相速度(引用文献[5])やSN比(引用文献[3, 8])、レーリー波の水平・鉛直動の振幅比(R/V スペクトル)(引用文献[2])、レーリー波とラブ波のパワーの比(引用文献[5, 7])などを同定するための円形アレイデータ解析ツールとなっています。

微動アレイ探索

地面は、産業活動や自然の波浪や風などによって常に揺れています。もちろん体に感じないほどの小さな揺れで、微動計(高感度な地震計)を置いてやっとわかる程度のものです。この小さな揺れは微動(ランダムノイズ)と呼ばれています。地面に複数の微動計を同時に置いた観測を微動アレイ観測といいます。微動アレイ観測によって表面波の位相速度(レーリー波、ラブ波と呼ばれる波の伝搬速度)が分かり、それをもとに地盤特性(速度構造)を推定することができます。微動アレイ観測から地下構造推定までの一連の流れを、私たちは微動アレイ探索と呼んでいます。

SPAC 法

微動探索法の位相速度の解析法の1つです。位相速度の解析法には、大きく分けて Capon 法(FK 法とも呼ばれる)と Spatial Autocorrelation 法(空間自己相関法、SPAC 法)の2種類があります。空間自己相関法は安芸敬一により 1957 年に、Capon 法は J. Capon により 1969 年に、それぞれ発表されました。その意味では空間自己相関法のほうがクラシックな方法ですが、微動探索法としての実用化は北海道大学の岡田廣らのグループ(論文としては 1983~200?)や東京大学の工藤一嘉らのグループの活動を待たなければなりません。空間自己相関法が SPAC 法という愛称?で呼ばれるようになったのも彼らの活動以降です。

SPAC 法には微動アレイを円形にしなければならないという厳しい制約(デメリット)がありますが、アレイサイズに対してけっこう長い波長の波を解析できるという特徴(メリット)があります。また円形アレイを構成する地震計の数は少なくできて、究極的には中心点と円周上の一点でも良い!というアイデアもでてきました。私たちもこのアイデアの理論的枠組み作りを志しました(引用文献[9])。

2. 想定ユーザ

微動探索の専門知識を持つ一般の技術者や微動探索とかアレイ解析法に関わる研究者などを想定しています(プログラムは誰にでも使えますが、結果を適切に解釈して地盤特性を推定するためには専門知識が必要です)。

3. 使い方

- 1) 微動波形データを地震計ごとのファイルとして適当なフォルダにまとめて入れておきます。
 - 2) プログラムを起動するといくつかのパラメータを聞かれますので、適当な値を入力すれば自動処理して分析結果を描画してくれます。それらの結果はデータフォルダの下の結果出力用フォルダ(自動生成)に収納されます。
- 詳しくは、「6. デモデータによるプログラムの実行例」をご覧ください。

4. ソフトの技術的内容とインストール方法

このソフトはフォートランで書かれたいくつかのコアプログラム(コンパイラは gfortran)を B シェルでつないで一連の処理を実行します。したがって、PC に gfortran を含む開発環境をインストールし

ておく必要があります。Linux (Ubuntu24) と Mac (Apple M1 Pro) で動作確認済です。次の手順でインストールしてください。

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 BIDO2.02g.zip
```

これにより、BIDO2.02g 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 BIDO2.02g
./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 BIDO2.02g/src の下におく。
- iii) 次のコマンドでパッチをあてる。次の手順です。

```
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い場合は別途インストールしてください。

5. プログラムの内容とアルゴリズム

●プログラムの内容

bin インストール時に実行ファイルが入るディレクトリです。

demo デモデータが入っています。

run.sh プログラム起動用の B シェルスクリプトです。

script フォートランプログラムを連結するための B シェルスクリプトが入っています。

src フォートランプログラムが入っています。

●アルゴリズム

以下に、全体の流れと個々の手順を説明します。括弧内は関係するBシェルスクリプトとフォートランプログラムのファイル名です。

全体の流れ(script/circle.sh)

- ① 利用可能なデータ部分を抽出する。
- ② 円周データを方位平均する（①の結果はここでは特に用いていない）
- ③ ①、②の結果を用いてスペクトルを推定する。
- ④ スペクトル比・位相速度・NS比等を推定する。
- ⑤ セグメントクラスター数だけ③、④の処理を繰り返す。
- ⑥ ④の結果を用いて平均、標準偏差を計算する。
- ⑦ ⑥の結果を描画する。

① セグメントの自動抽出(script/mksegment.sh, src/evalrms.F, src/segment.F)

以下の手順でセグメントを抽出します。

- 1) 全地震計の全成分についてそれぞれ以下の作業を実行する。

- ・オリジナルの波形データから線形トレンドを差し引いて RMS を計算する（この値を RMS_{all} とする）。
 - ・オリジナルの波形データをセグメント長で分割したデータ各部分（各部分は半分ずつ重なり合うようにする）について、線形トレンドを差し引き、RMS 値を計算する。各 RMS 値を RMS_{all} で規格化する（ RMS_{seg} とする）。
- 2) 全地震計の全成分の RMS_{seg} について、0.1 刻みで RMS_{seg} のヒストグラムを作る。このヒストグラムから最頻値を同定する。
 - 3) 全地震計の全成分の RMS_{seg} が同時に最頻値になるデータセグメントを利用可能なセグメントとみなして segment ファイルに書き込む。

② 円周データの方角平均(script/mkcircle*.sh, src/mkcrcl*.F)

本プログラムで採用する手法はすべて円周上の記録を重みつき方位平均することから始まります。重みつき方位平均は、円周沿いのフーリエ級数展開におけるフーリエ係数の計算に対応します。本プログラムではデフォルトで 0、1 次のフーリエ係数を計算するようになっています。円周沿いの地震計配置は理論的には不等間隔にも対応しており、CCA 法では実際の適用性も検討済みです（引用文献[1]）。しかしすべての方法で適用性を詳細に検討したわけではありませんので、できるだけ等間隔のアレイを用いることをお勧めします（特にクロススペクトル密度を用いる方法の適用性には不安が残ります）。

③ スペクトルの推定 (script/estspec*.sh, src/estspec.F)

本プログラムでは、セグメントごとにトレンドを除去して cos 型のテーパー（テーパー率 0.5（Carter et al, 1973））をかけたあと、FFT による生スペクトルのセグメント平均とスペクトルの平滑化の両方を用いてスペクトルを推定します（Bendat & Piersol, 1971）。生スペクトルを Parzen window で平滑化した後、セグメント平均を実施しています。セグメント平均の際のセグメント長、セグメント数はそれぞれプログラムの起動時のダイアログ “Duration of data segments for the evaluation of spectra”、“Number of data segments over which averages are taken. Enter

0 or a very large number if you wish to use all segments simultaneously”で与えられます。Parzen window による平滑化のバンド幅は “Band width of the Parzen spectral window” というダイアログで与えられます。

④ スペクトル比の計算 (script/specratio*.sh)

上の手順で推定されたスペクトル密度を用いて、分母が0になる場合のみ除外して単純に比をとっています。いろいろな種類のスペクトル比が引用文献[2、5]の定式によって位相速度に結び付けられます。SPAC 法の自己相関係数も引用文献[2]の定式に従ってスペクトル比により定義されていますのでご注意ください（通常の実務では、SPAC 係数は中心点と円周上の点の複素コヒーレンスを取った上で方位平均することにより計算される）。なおこの問題は後に BIDO3.0 で解消しており、同マニュアルに詳述していますので、そちらも併せてご確認ください。

H/V スペクトルの計算

Version 1.2.2 から、三成分データの場合 seism ファイルの先頭に書かれた 1 点の H/V スペクトルを推定する機能を追加しました（H/V は水平成分と鉛直成分のパワースペクトルの比、水平成分のパワーは NS 成分と EW 成分のパワーの和で定義）。したがって seism ファイルに記述された総観測点数がたとえ 1 点であっても（アレイデータでなくても）、3 成分あれば H/V スペクトルの計算はなされます。計算終了後、対数平均と標準偏差が描画されます。

位相速度の計算 (script/spec2pv*.sh, src/sctr2pv.F)

定式化にしたがってスペクトル比をベッセル関数で表した上で、2 分法と割線分割法の組み合わせによる求解法 (Shampine & Watts, 1970) でベッセル関数の引数である rk （半径 \times 波数）を、 $[0, rk_{\max}]$ の範囲で探索します。 rk_{\max} は関数値の最初の極大あるいは極小（または最大、最小）に対応します。得られた rk から位相速度 $c = 2\pi f / k$ （ f は周波数）を計算します。

⑤ セグメントクラスター数だけ③、④の処理を繰り返す。

⑥ 平均・標準偏差 (script/mkave.sh, src/calave.F)

セグメント数（セグメント平均法でスペクトルを推定する際に平均化に用いるセグメントの数。またはプログラム開始時のダイアログ “Number of data segments over which averages are taken. Enter 0 or a very large number if you wish to use all segments simultaneously” で入力する整数値）が

（segment ファイルに記載された全セグメント数）>（セグメント数）

を満たすならば、与えられた波形データから複数のスペクトルを推定できることになります。ここで、

（セグメントクラスター数）＝（segment ファイルに記載された全セグメント数）÷（セグメント数）

と定義すると、スペクトルやそれに派生して計算できるスペクトル比、位相速度などは、セグメントクラスター数だけ推定値が存在することになります（割り切れない分は切り捨てます）。よって、本プログラムではこれらの推定値から平均値や標準偏差を計算しています。

プログラムの実行時はデータフォルダの下に RESULT/（数字）のフォルダが生成されますが、この数字は各セグメントクラスターを表していて、これらの数字フォルダの下には対応する解析結果が入ってい

ます。RESULT/ave フォルダの下に、これらの数字フォルダの解析結果を統計処理したファイルが入っています。

なお src/PARAM.h に記載されている NROBUST4AVERAGE_INC よりもセグメントクラスター数が多い場合に限り、「外れ値 (outlier)」を除外する目的で統計処理から最大値と最小値が除外されます。ディフォルトでは NROBUST4AVERAGE_INC は 8 と設定されています。また、解析結果の種類によって単純平均 (算術平均) と対数平均を使い分けています。対数平均をとるのは AmpRV_R.d、nsr.d、nsrlim_cca.d、nsrlim_cca.lwapx.d、powratio_R2L.d というような、比の平均です。

Bendat, J. S., and A. G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures: John Wiley & Sons, 1971.

Carter, G. C., C. H. Knapp, and A. H. Nuttall, 1973, Estimation of the magnitude-squared coherence function via overlapped Fast Fourier Transform processing: IEEE Transactions on Audio Electroacoustics, **AU-21**, 337-344.

Shampine, L. F., and H. A. Watts, FZERO, a root-solving code, Report SC-TM-70-631, Sandia Laboratories, 1970.

6. デモデータによるプログラムの実行例

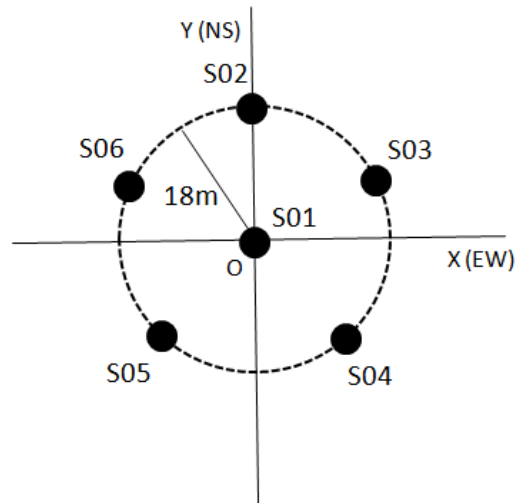
6-1 アレイデータ解析のデモ

アレイ観測を想定してデモ用に人工的に合成したデータを用いてプログラムの実行方法を示します。
まず解凍ソフトで BID02.02g.tgz を展開して BID02.02g の下に移動してみてください。次のファイル類が入っているのが分かると思います。



```
BID02.02g — -bash — 80x24
% cd BID02.02g
% ls
bin/      demo/    run.sh*  script/  src/
% 
```

フォルダ demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6 にはデモ解析用の synthetic data が入っています。その中の Info というフォルダは synthetic data に関する情報を含んでいます。SOx.d というファイルが6つありますが、これらはそれぞれ SO1~SO6 という名前の6台の地震計を下図のように配置して得られた微動波形データです。とはいってもこれらはデモストレーションのために数値的に合成した synthetic data です。サンプリング時間間隔 0.01 秒で5分間、3成分観測を実施したと想定して合成しました。微動波形の合成にあたっての詳細は **A6-1-1** をご覧ください。



S01.d を適当なエディターで開くと次のようになっていることが分かると思います。

S01.d			
0.0000000	116.90619	-1.7364730	-4.7712809
0.10000000E-01	40.600748	13.537028	-2.0313038
0.20000000E-01	-6.0965721	-2.4021474	-3.6907361
0.30000000E-01	105.72248	6.2703868	-3.1465809
0.40000000E-01	-42.428279	2.1187407	9.8228115
0.50000000E-01	121.58191	-1.8389905	3.2986986
0.60000000E-01	-23.414278	8.2946100	2.3139989

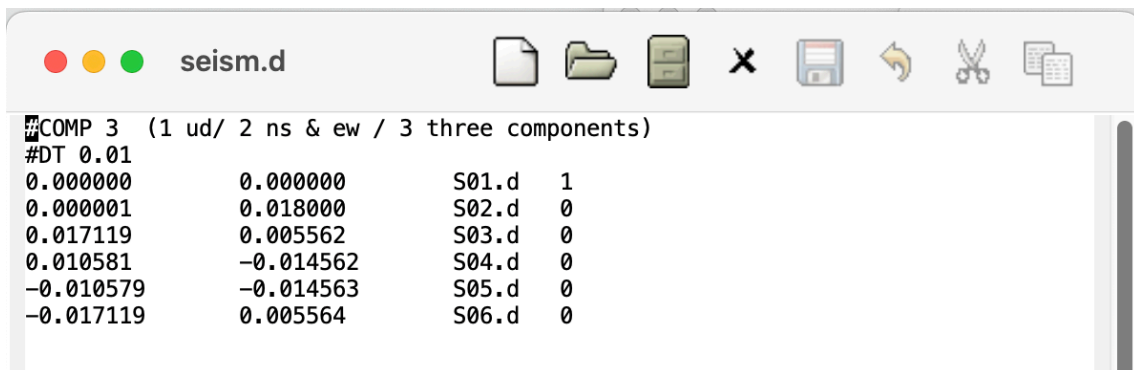
一番左側が時間、右側へ順に鉛直（z）、EW（x）、NS（y）成分の振幅です。

ご自分の観測データを解析する場合も、3成分の場合は同様に4列で羅列するフォーマットにしてください。水平2成分のデータの場合は鉛直成分を0で埋めるなど、適当にダミーデータを入れて同様のフォーマットにしてください。一方、鉛直成分しか観測していない場合は、時間、鉛直成分の2列を羅列するようにお願いします（3成分と同じように4列あっても良いのですが、特にダミーデータを入れる必要はないということ）。

ところで、本プログラムの解析法は等時間間隔で波形をサンプリングすることを前提としています。よって、波形開始時刻とサンプリング時間間隔が与えられる限り、本来、時間の列は不要のはずですが（実際のアレイデータ処理では波形開始時刻も不要）。なので、微動アレイを解析したことのある方ならば、「1行目はどうして必要なのかな？」と思われたことでしょう。実は1列目の時間の並びはダミーで、実際は読み込んでいません（したがって、実は1列目にどんな数字が入っていても、解析結果に影響しないのです）。このような列を入れてあるのは、単に、私が観測データを確認するときの描画ツールのフォーマットが時間と振幅の並びを必要としたためです（描画して確認した波形をそのまま解析に用いるのが効率的だったということです）。なお、すぐ後で述べるように、サンプリング時間間隔は seism.d というファイル（seism ファイル）で与えます。

ともあれ、データがこのようなに並んでいる限り、データの種別は速度でも加速度でも（単位が何であっても）OKで、数値の書式（指数型、浮動小数点型など）も問いません。数値間のセパレータも、空白、タブ、カンマのいずれかであればOKです。データファイル名のつけ方にも特にきまりはありません（拡張子の*.d もなくても構いません）。このように地震計ごとに個別のデータファイルをつくったら、それらをまとめて1つのフォルダに置いて下さい。また、すべてのデータファイルの波形の開始時刻を0に統一して下さい。

同じフォルダには、seism.d というファイルがあります。これを開くと次のように書かれています。



1 行目は解析に用いる成分を表す数字、2 行目は波形記録のサンプリング時間間隔です（#COMP、#DT はおまじないのようなもので、省略はできません）。3 行目以降は x、y 座標（km）、データファイル名、中心点かどうかの ID（中心なら 1、円周上なら 0）です。seism.d はファイル名の変更は不可です。また観測データと同じフォルダの下に置かなければいけません。ただし、このファイルは必ずしも予め準備しなくても構いません。データフォルダにこのファイルがない場合は、プログラムが必要情報を尋ねて自動的に生成するようになっています。

なおこの例では x、y 座標はアレイの中心点を原点としていますが、必ずしもそうする必要はありません。プログラムは円周上に配置された最初の 3 点の情報を用いてアレイ解析に必要な情報すなわち中心点の位置と半径を計算する仕様としています。更に、それ以外の点がきちんと中心点や円周上にあるかをチェックするようにしています。なお円周上の点は必ずしも等間隔である必要はありませんが（理論は引用文献[2]）、精度を保つためには、できるだけ等間隔のアレイを展開するようにして下さい。円周上に配置されていない点（半径方向の誤差）については、補正理論がないのでデフォルトで 5% までの誤差を許容して円周上にあるとみなすことにしています。

BIDO2.0 ではハドルテスト（地震計を一箇所に並べて機器特性の一致度を確認するテスト）も実施できるようになりました（6-3 ハドルテストのデモを参照）。ハドルテストをしたい場合、すべてのデータ点に同一の x、y 座標を入れて下さい。その場合の解析内容は以下の説明とは違って、パワースペクトル密度、振幅 2 乗コヒーレンス、位相差が計算されることになります。

seism.d の説明はまとめて A6-1-3 に書いておきますのでご確認ください。

それではデータセットの確認がすんだところで分析を実行してみましょう。ターミナルを立ち上げて「run.sh」と打ち込んでリターンキーをおすと、次のように表示されます。

```
BIDO2.02g — run.sh — 82x28

% run.sh
*****
                      BIDO2.0

This is a program package for the automatic analysis of microtremor data
obtained with a circular array of seismic sensors.
usage: 1) run.sh [return key]
       2) run.sh paramfile [return key]
       (paramfile will be created automatically by running this file)

                      (C) 2025 AIST All Rights Reserved.
*****

Before the analysis, you have to have all necessary input data files,
each one containing waveform records from a single sensor
and having a simple four-column or two-column format as follows:
      time [s]      z(UD)      x(EW)      y(NS)
or
      time [s]      z(UD)
(A space, a tab, or a comma may be used as a separator.)
There is no rule for naming the input data files, except that
all of them should be placed in a single directory. The number
of the input data files should be equal to the number of
seismic sensors in your microtremor array.
Put dummy (alphanumeric) data to fill the vacant column of z
if your data have horizontal (x and y) components only.
Are you ready? [y/n] (Type "n" to exit the program.)

```

上の画面以下、ここでは基本的に「y」かリターンキーを打ち込んでみて下さい（デフォルトパラメータを使う）。最終的に次のような画面に到達すると思います。

```
BIDO2.02g — run.sh — 82x28
0.000001      0.018000      S02.d  0
0.017119      0.005562      S03.d  0
0.010581      -0.014562      S04.d  0
-0.010579      -0.014563      S05.d  0
-0.017119      0.005564      S06.d  0
-----citation ends here-----
Do you want to use this file as it is? [y/n]
(Type "n" to create a new seismfile interactively.)
y

#####
Data directory name: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6

<Execution parameters>
Analyses using spectral densities (e.g. calculate properties of surface waves) 1
* Automatically select data portions to be used                               1
* Delete temporary data                                                         0
Plot analysis results                                                           1

<Basic parameters>
Segment duration:                      10.24 [s]
Number of segments for averaging: 10
Parzen window band width:              0.3 [Hz]
#####
Double-check the above parameters.
Are you sure to start running the program now? [y/n] (Type "n" to input the parameters again.)
```

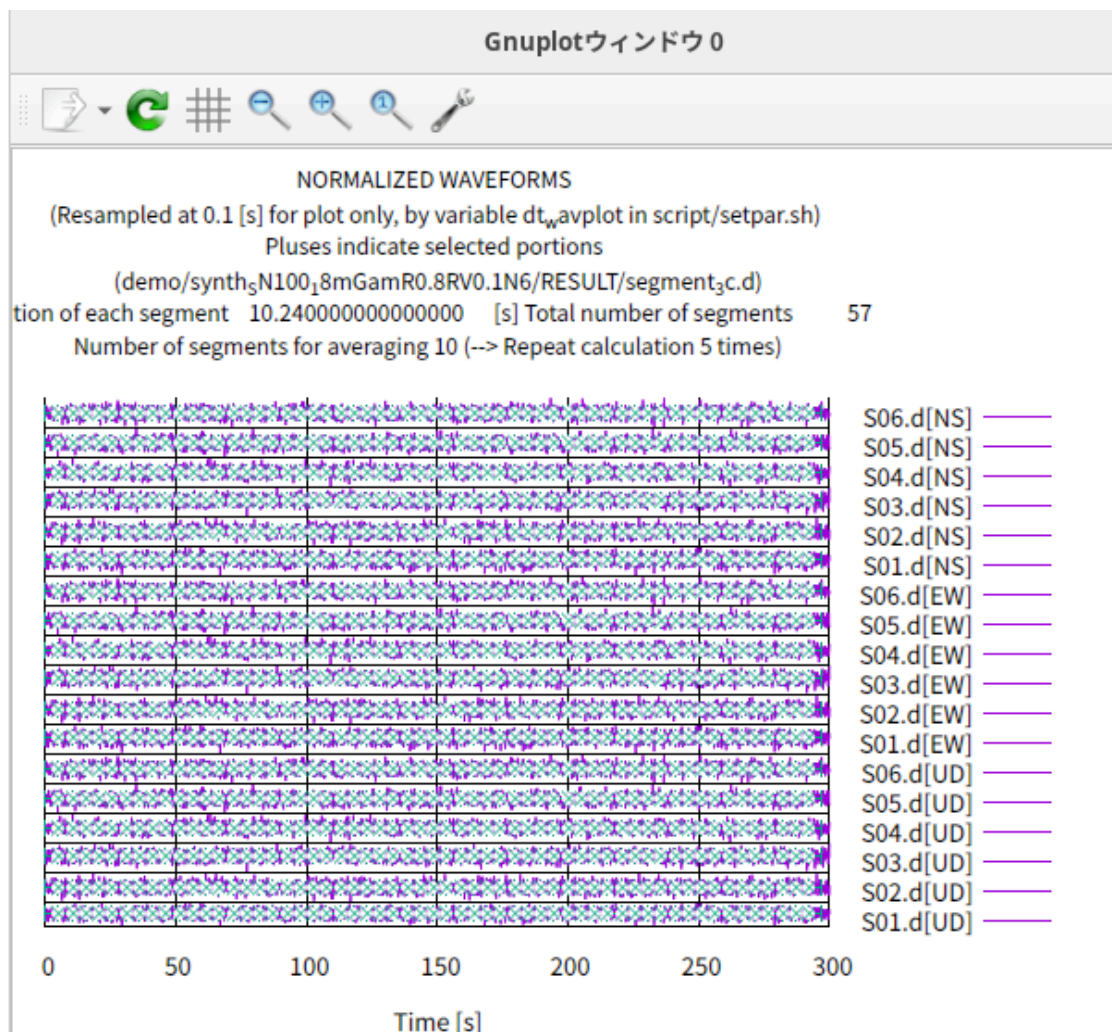
「###・・・」の行に挟まれた部分に、入力したパラメータが示されていることが分かります。
ご自分の観測データを解析する場合は、質問事項に関する詳しい説明(A6-1-2)や、パラメータ設定の
コツ(A6-1-9)にも目を通して置いて下さい。
というわけで、「y」と打ち込んでみましょう。

```
BIDO2.02g - tee - run.sh - 81x40
Are you sure to start running the program now? [y/n] (Type "n" to input the parameters again.)
y
<SETPAR>
-----
Array geometry: centered 6-station array.
Array radius: 18. [m]
Number of sensors at the center: 1
Number of sensors around the circle: 5
Data: all three components
-----
Power spectral densities will be estimated.
horizontal-to-vertical spectral ratios will be estimated.
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by SPAC).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by CCA).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by ncCCA).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by H0).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by H1).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by V).
Noise-to-signal ratios in the vertical component will be estimated.
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by CCA+R).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by SPAC+R).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by SPAC-R).
Love wave phase velocities will be estimated (by CCA+L).
Love wave phase velocities will be estimated (by SPAC+R).
Love wave phase velocities will be estimated (by SPAC-R).
H/V power partition ratios of the Rayleigh waves will be estimated.
Rayleigh-to-Love power partition ratios will be estimated.
Noise-to-signal ratios in the horizontal components will be estimated.

Do you really want to start running the program? [y/n]
<MKSEGMENT>
File named demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/segment_3c.d already exists.
The option "automatic selection of data portions" on.
The file demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/segment_3c.d will be overwritten.
Are you sure to proceed? [y/n]
(Type "n" to exit. Restart the program run.sh and set the option "automatic selection of data portions" off.)
```

するとこのように、現在のアレイジオメトリで解析を実行した時の解析内容が羅列されます。ここで「y」と打ちこめば、あとは自動処理で分析してくれます。

分析開始からしばらくすると、スペクトル推定のデータ処理の前に、波形記録とスペクトル解析にどの部分を使うかという情報が描画されます（下図。波形が紫、スペクトル解析に用いられる部分が緑のブラスマークで図示されている）。



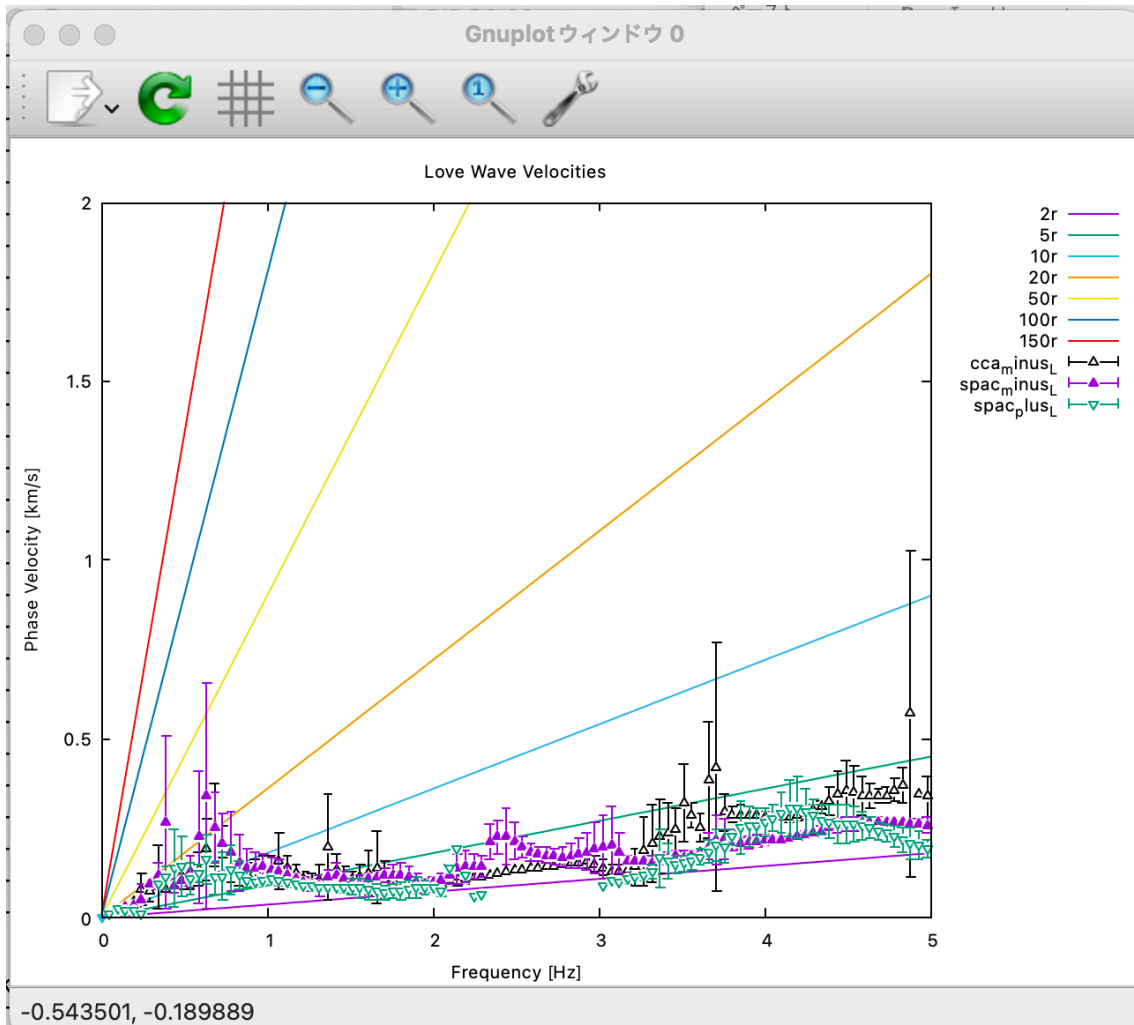
ダイアログ用の端末画面に戻ってリターンキーを押すと、この描画が消えてスペクトル解析に移ります。
 解析の実行ログは付録2に示すような感じです。このログはデータファイルを置いてあるフォルダに自動生成されます。

分析が終わると、

- ラブ波の位相速度、
- レーリー波の位相速度、
- レーリー波の R/V スペクトル、
- レーリー波の R/V スペクトルと H/V スペクトルの比較、
- 水平動に占めるレーリー波のパワーの割合、
- NS 比（SN比の逆数）、
- H/V スペクトル、
- パワースペクトル密度、

が表示されます。それではそれぞれ見ていきましょう。

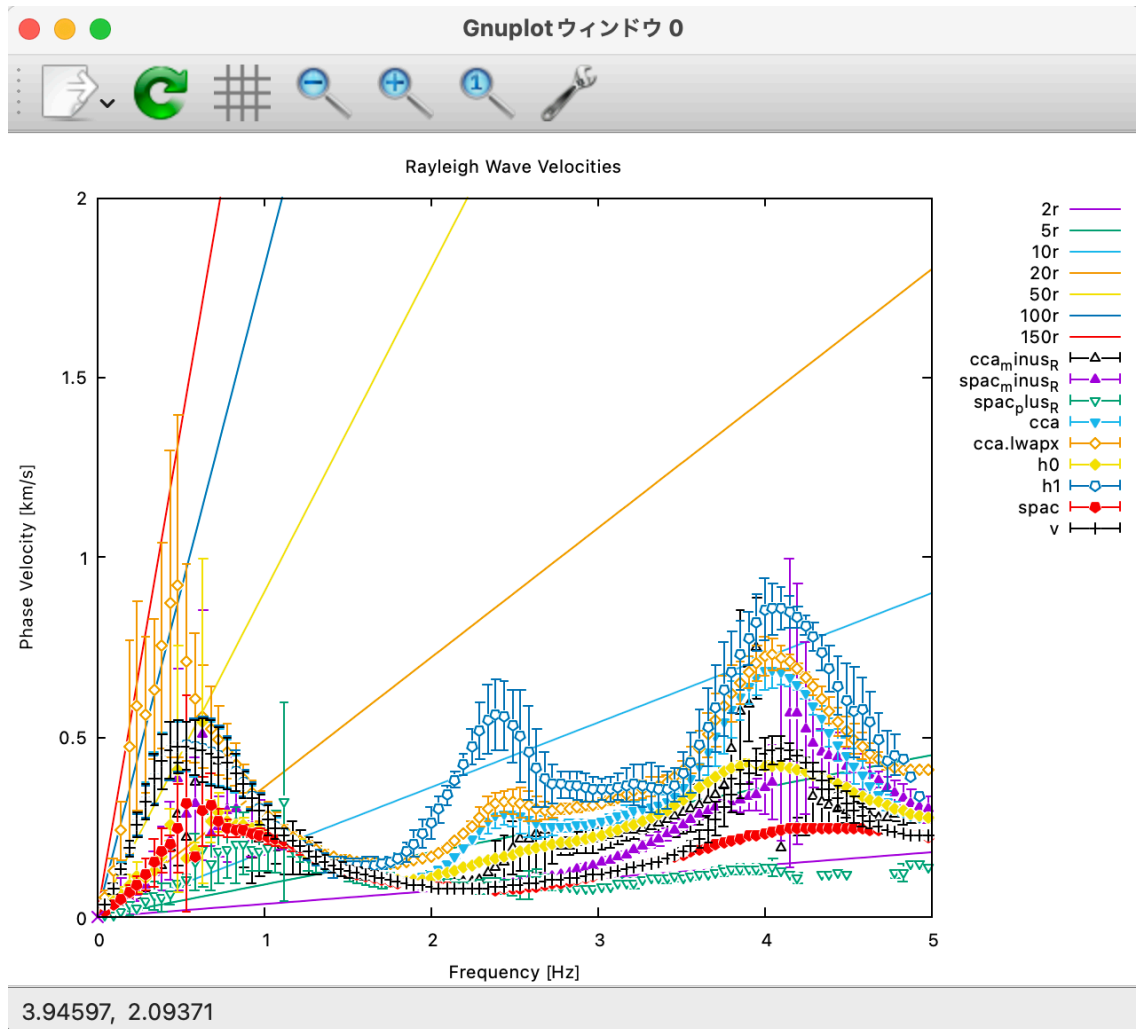
- ① ラブ波の位相速度がエラーバー（標準偏差）付きのデータ点で示されています。横軸は周波数、縦軸は位相速度です。



CCA-L、SPAC-L、SPAC+L 法という方法で解析した3つの結果が同時に示されています。原点から放射状に広がる直線は、アレイ半径 r の2倍、5倍、・・・といった波長（参考値）です。1–2 Hz 程度の帯域で、与えたラブ波の位相速度（A6-1-1 参照）が再現されているように見えます。

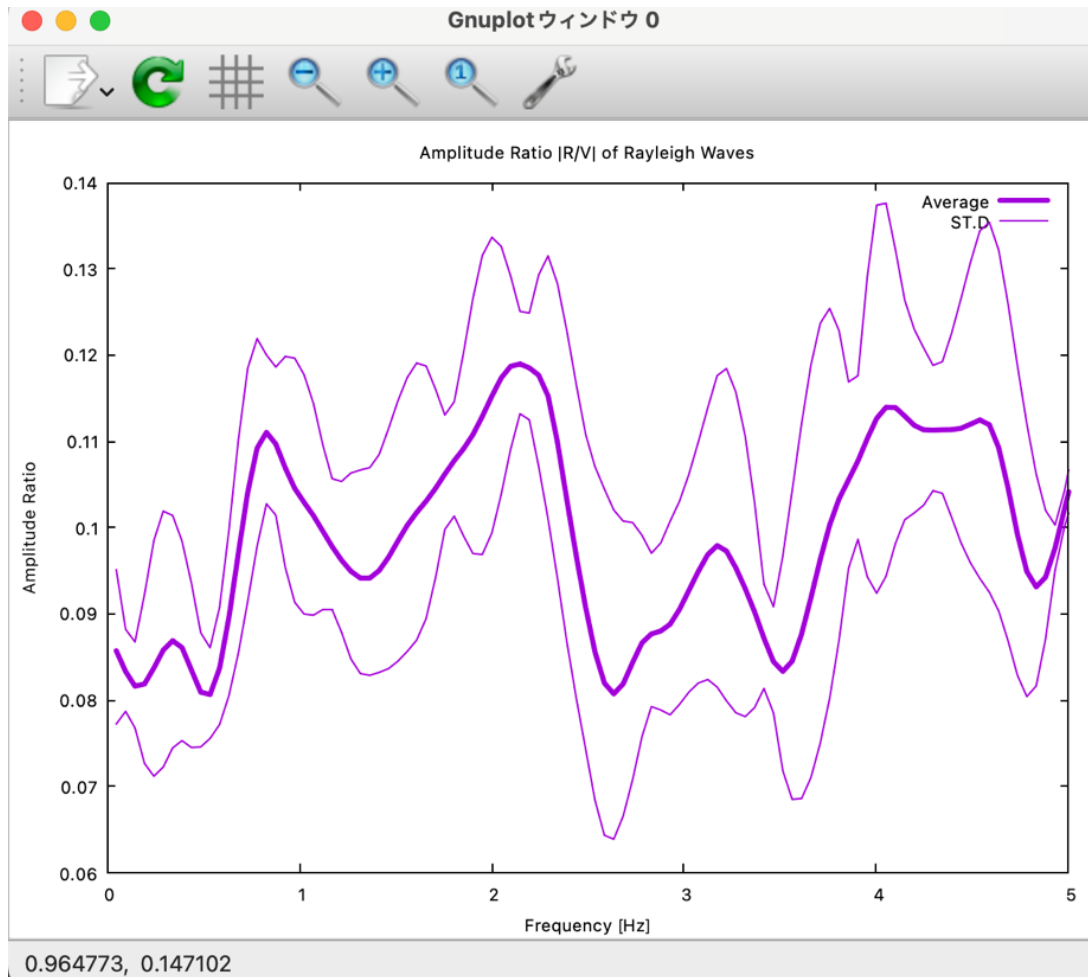
ところで上のグラフでは、プロットする位相速度の範囲（最大値）は自動調整されています。ご自分で調整したい（固定的に与える）場合、`script/setpar.sh` の `ymax_for_gnuplot` というパラメータのコメントアウトを外し（行頭の#を消す）、適当な数値（位相速度 [km/s]）を与えて下さい。同様に、周波数の範囲（最大値）をご自分で与えたい場合は `script/setpar.sh` の `xmax_for_gnuplot` というパラメータのコメントアウトを外し（行頭の#を消す）、適当な数値（周波数[Hz]）を与えて下さい。

- ② ターミナルにもどってリターンキーをおしてください。今度は次のような図が描画されます。これはレーリー波の位相速度の解析結果です。



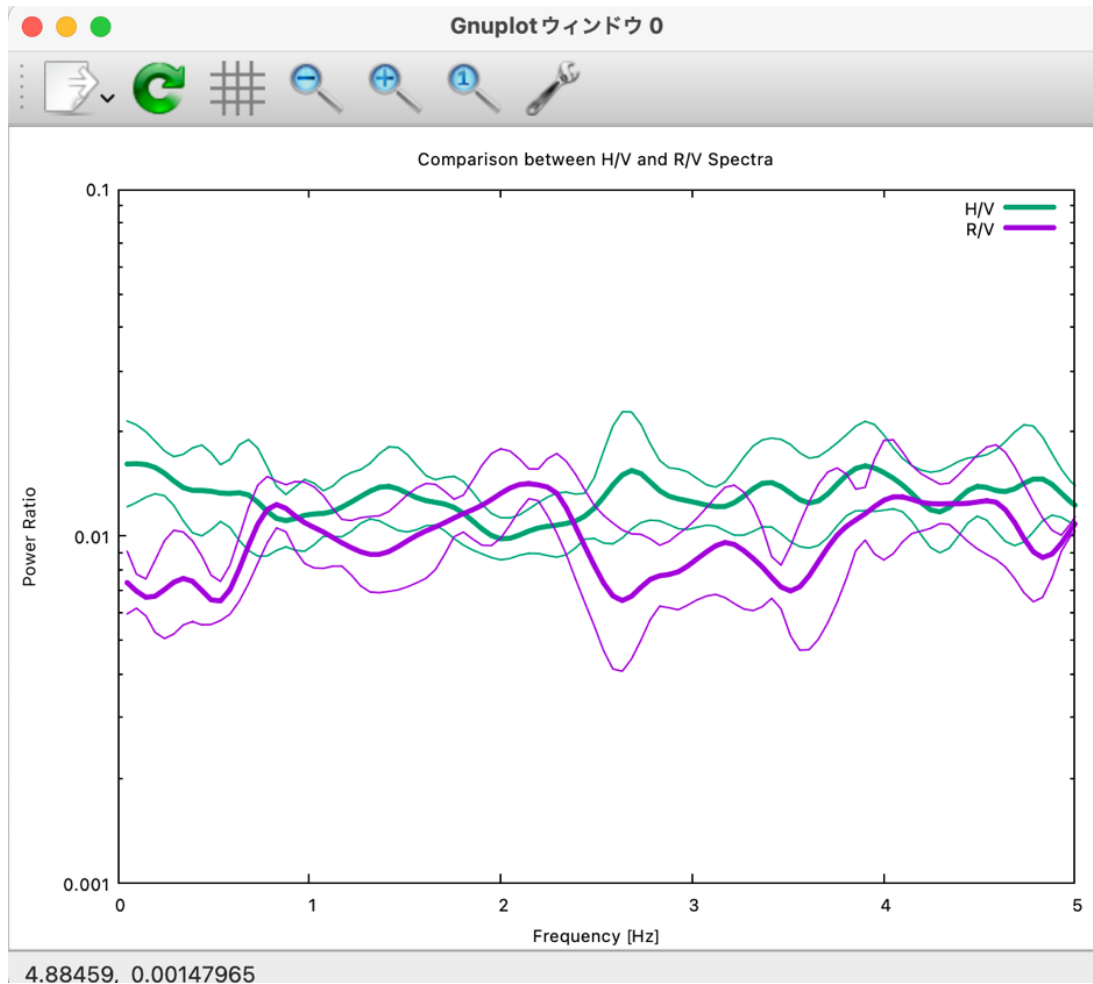
水平動の解析結果としてCCA-R、SPAC-R、SPAC+R法、鉛直動の解析結果としてCCA、nc-CCA（CCA-lwapxと表記されています）、H0、H1、V法の解析結果が同時にプロットされています。0.5－2Hz程度の帯域で、与えたレーリー波の位相速度（A6-1-1参照）が再現されているように見えます。

- ③ またターミナルに戻ってリターンキーをおすと、今度はラーリー波の R/V スペクトル（水平動と鉛直動の振幅比）（太実線は平均値、細線は標準偏差）が表示されます。



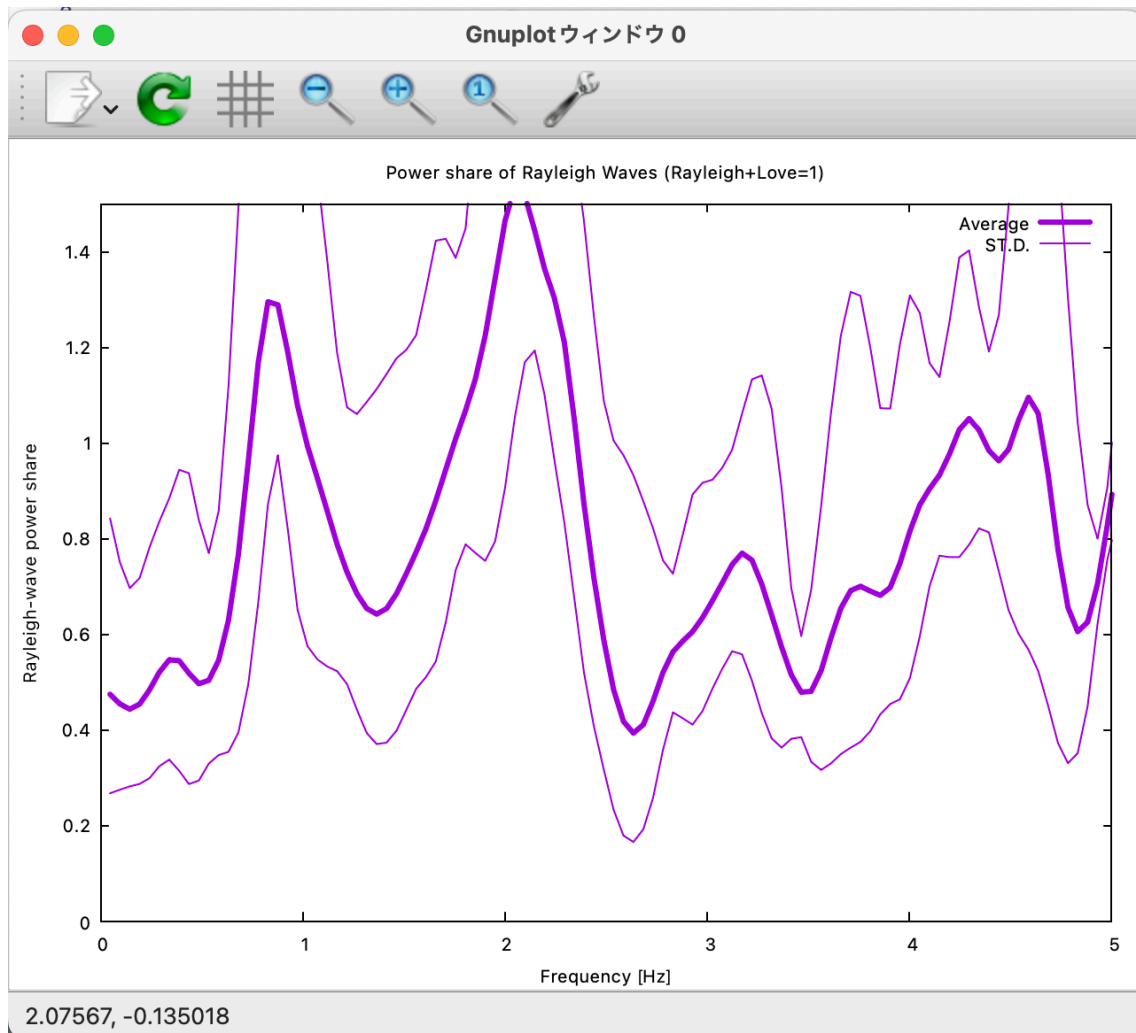
Synthetic data の計算時は R/V スペクトルを周波数にかかわらず 0.1 としました（A6-1-1 参照）。
解析結果は大外れではないですが少し不安定ですね。

- ④ またリターンキーをおすと、レーリー波の R/V スペクトルと H/V スペクトルの比較が表示されます。このグラフでは R/V スペクトルもパワースペクトルの比として表示されています（ラディアル成分と鉛直成分の振幅比ではない）のでご注意ください。③で述べた通り振幅比としての R/V は 0.1 ですから、パワー比はその2乗で 0.01 となります。与えた R/V と H/V はそれぞれ 0.01、0.0125 ですから、この解析結果はその相違を表現していると言えるかもしれません。



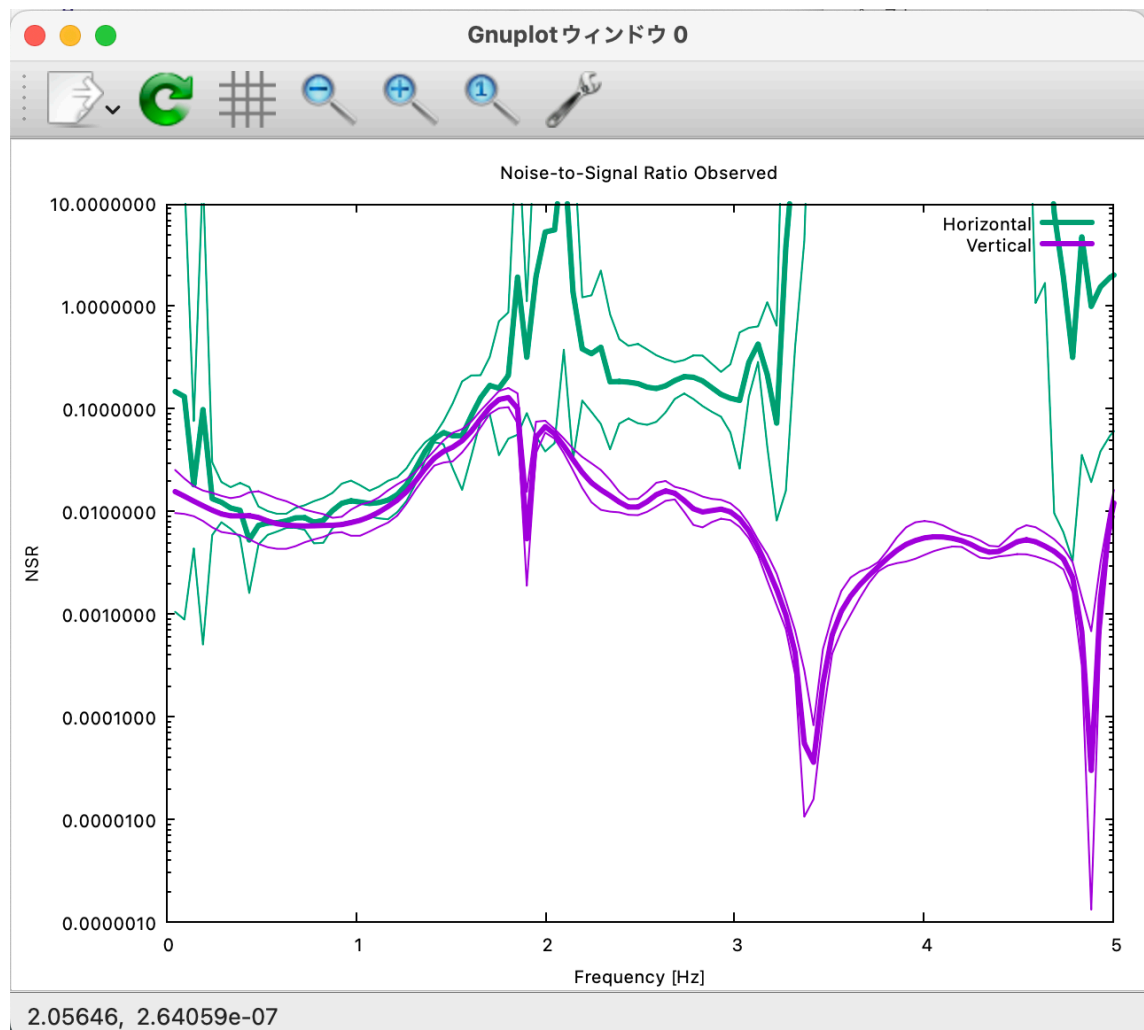
- ⑤ またリターンキーをおすと、今度は水平動に占めるレーリー波のパワーの割合 γ_R が表示されます（ γ_R は水平動のパワーを1とした場合のレーリー波のパワーの割合として定義されます。同様にしてラブ波のパワーの割合を γ_L とすると、 $\gamma_R + \gamma_L = 1$ となります）。

Synthetic data には $\gamma_R=0.8$ を与えました（A6-1-1 参照）。この結果も大外れではないですが少々不安定です。データが短いせいかもしれません。

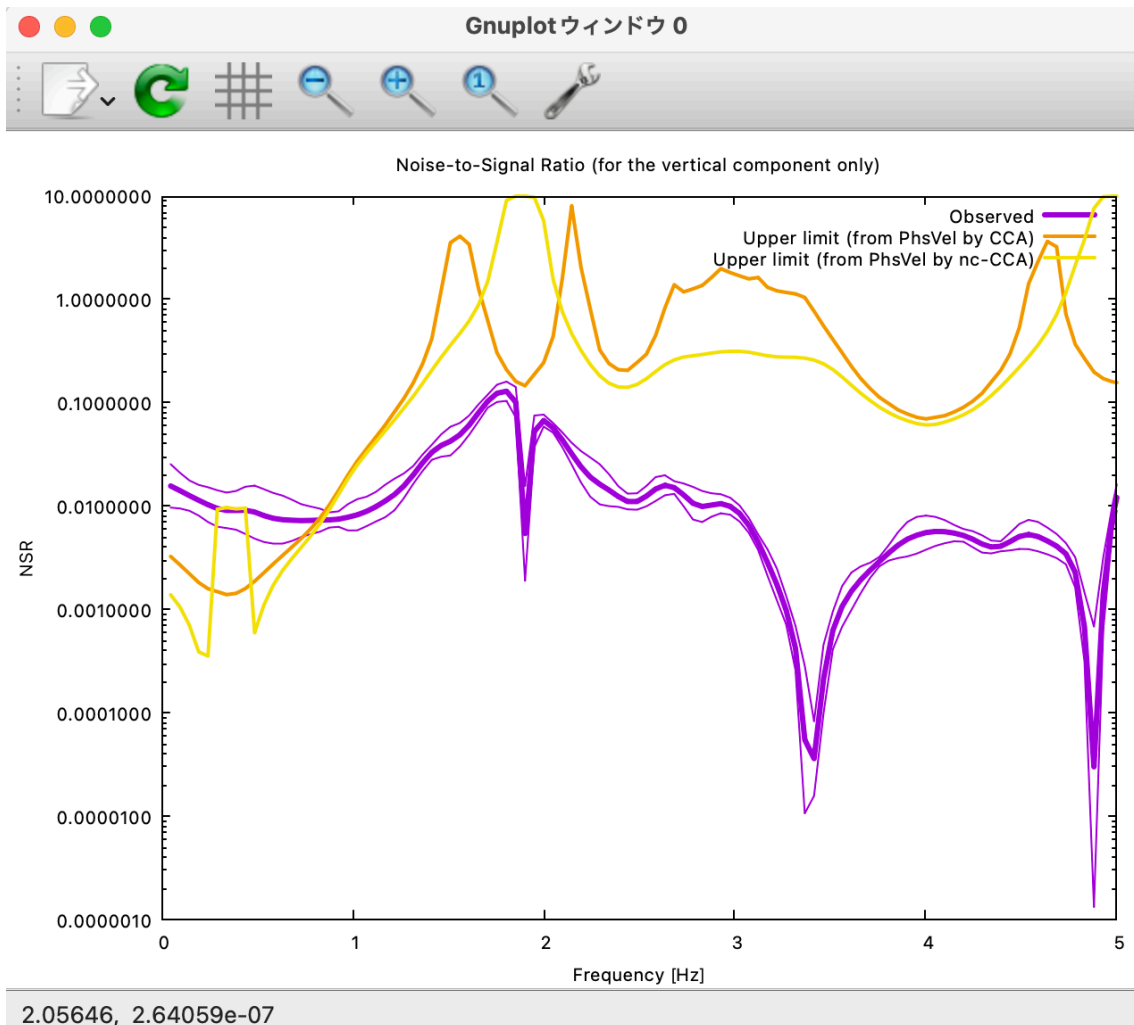


- ⑥ またリターンキーをおすと、水平動のNS比（SN比の逆数、インコヒーレントノイズのパワーとシグナルのパワーの比）（緑線）と鉛直動のNS比（紫線）が示されます。

Synthetic data ではSN比を100と設定しました（A6-1-1 参照）。NS比はSN比の逆数ですから0.01を与えたことになりますが、実際、解析結果も1 Hz以下の低周波数帯域ではその程度の値となっていることが分かります。

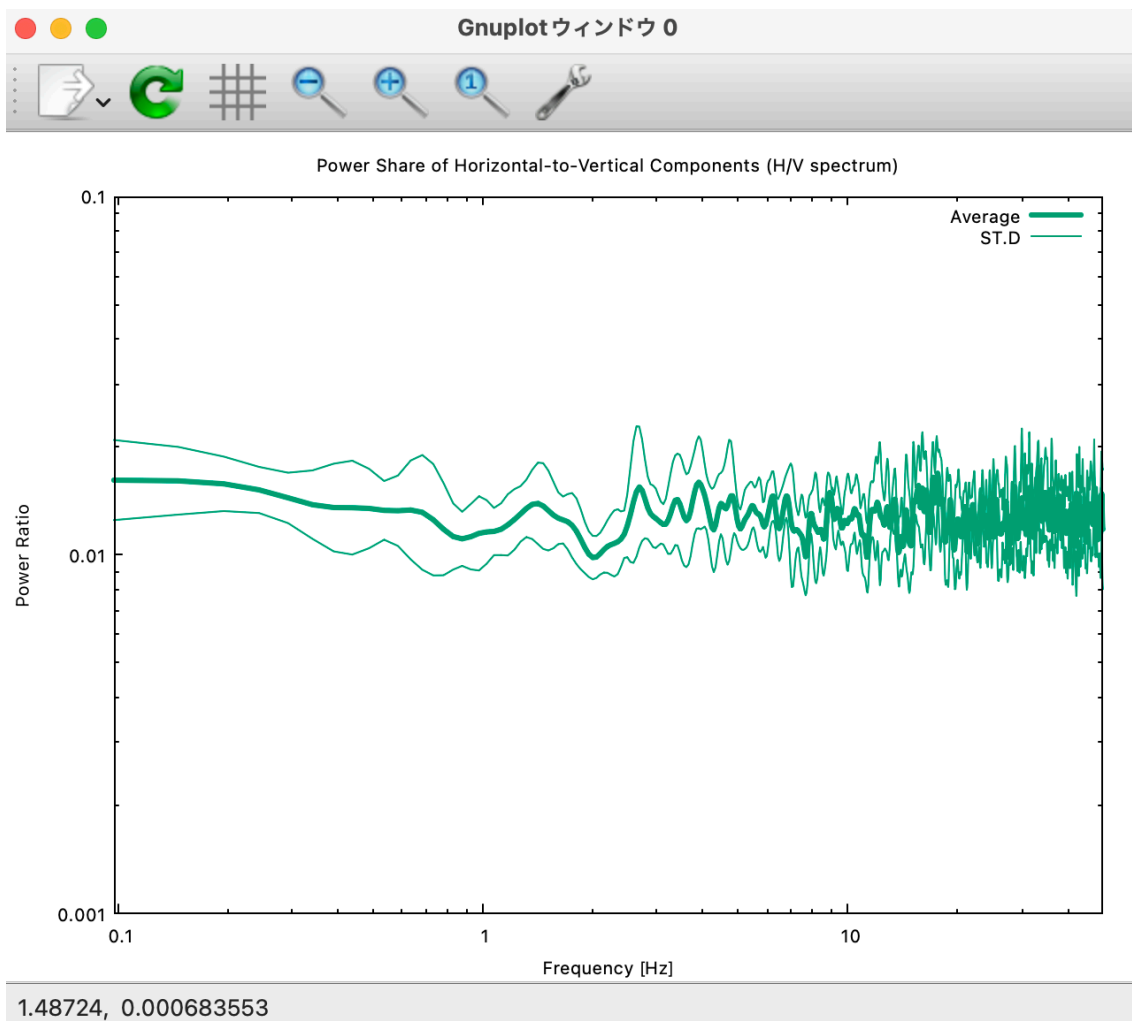


またリターンキーをおすと、鉛直動のNS比（紫線）のみが示されます。ただしオレンジと黄色で示された「Upper limit」という線も同時に示されています。

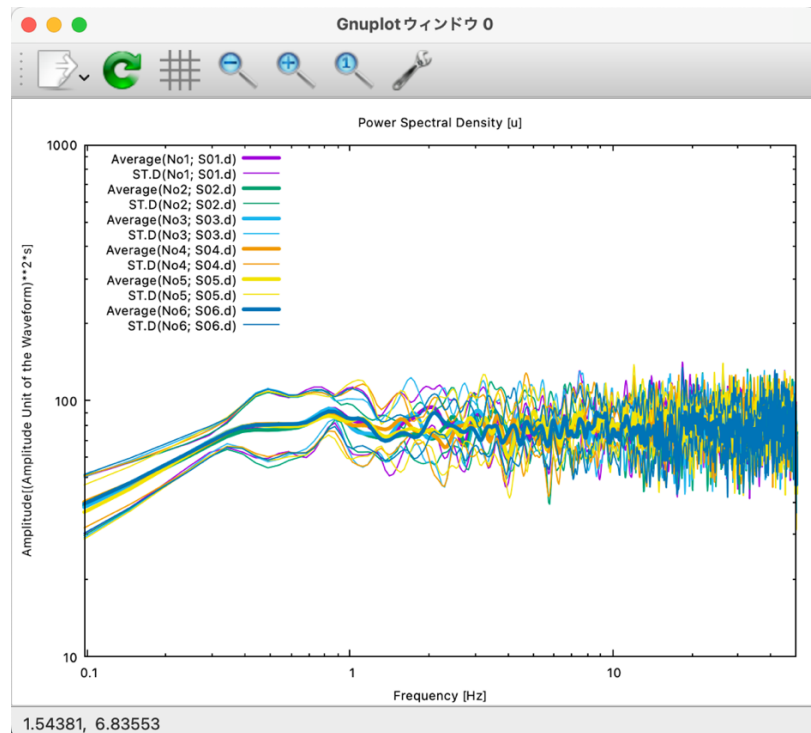


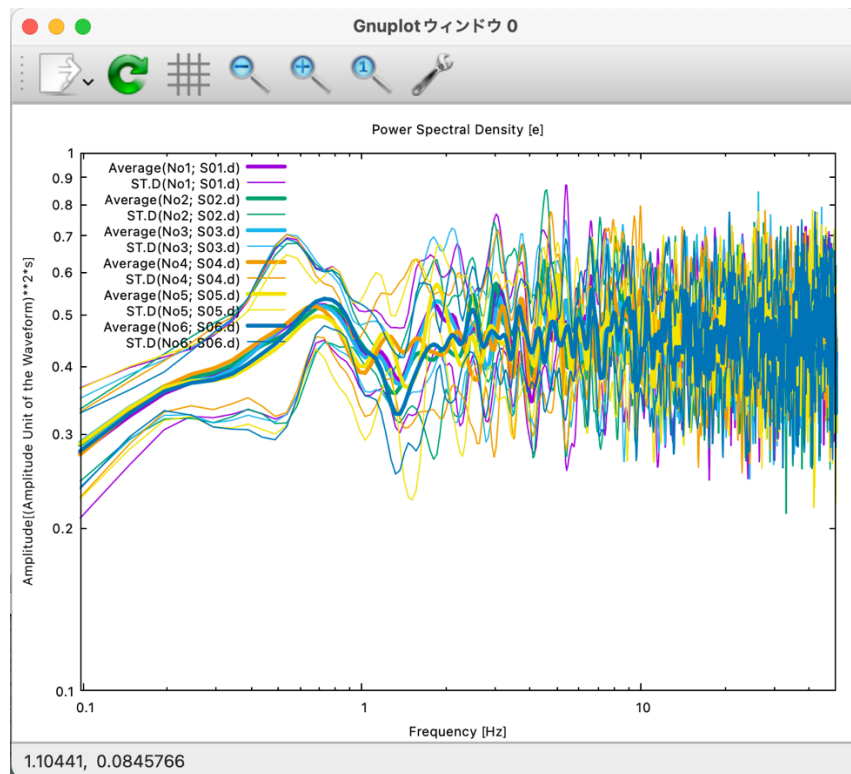
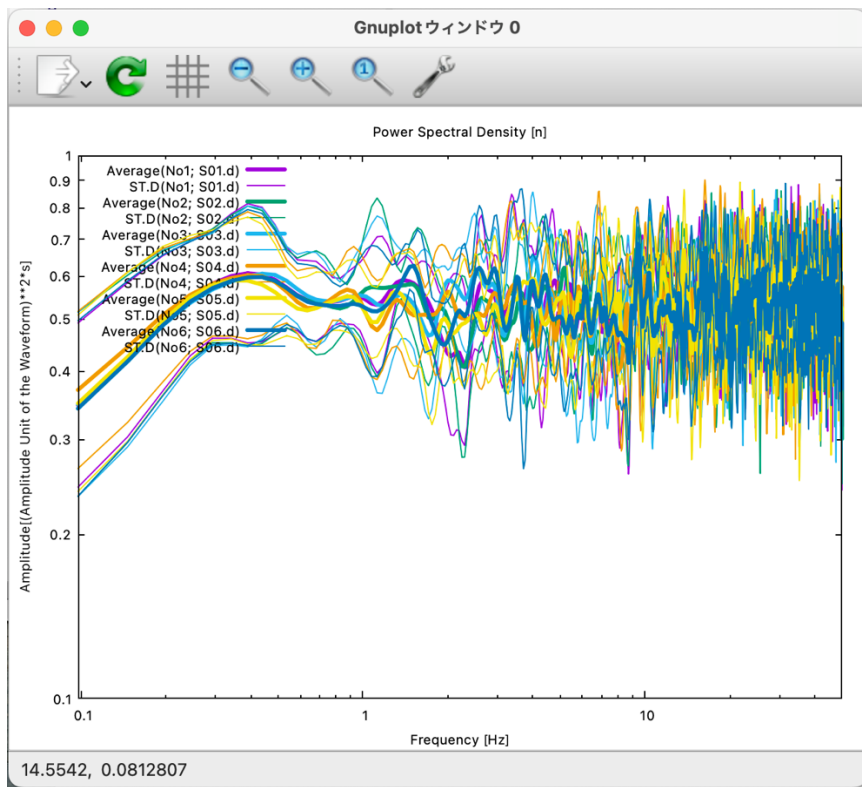
この図でオレンジと黄色の線は、それぞれ CCA 法、nc-CCA 法で同定した位相速度を用いて計算した限界 NS 比です。限界 NS 比とは、CCA 法（nc-CCA 法ではありません）の解析結果の信頼性を診断するための参考値です。観測 NS 比が限界 NS 比を上まわると、CCA 法の解析結果は一般に過小評価されます。この図の場合 0.7 Hz 程度以下で紫 > オレンジ（あるいは紫 > 黄）となっていますから、その帯域では CCA 法の位相速度が過小評価されている可能性が危惧されます。実際、解析結果②の図を見るとそうになっています。一方、nc-CCA 法はノイズによる過小評価を補正する方法です（nc は noise compensated の略）（引用文献[4]）。NS 比の見積もりが正確ならば、解析結果②に見られるようにさらに低周波数の解析性能を伸ばすことができます。

- ⑦ またリターンキーをおすと、再度 H/V スペクトルが表示されます。今度は周波数軸を対数目盛にして、最大周波数まで表示しています。ここでいう最大周波数とは、`script/setpar.sh` の `freqmax_ave` というパラメータで設定された値（このパラメータは計算時間短縮のために設定されているもので、平均値の算出を設定値までしか行わないようにします。デフォルトは 50[Hz]ですので、必要があればご自分で変更して下さい）とナイキスト周波数のうち小さいほうの値のことです。対数表示をやめたい場合は、`script/setpar.sh` の `autologscale x` というパラメータの行頭に # を記入してコメントアウトして下さい。



⑧またリターンキーをおすと、各記録のパワースペクトル密度が表示されます。これも周波数軸は対数目盛で最大周波数まで表示していますのでご注意ください。図の上に示されたタイトルの右端のカッコ（[]）内の u、n、e は上下、南北、東西成分を表しています。凡例の平均、標準偏差の右のカッコ内の数字は seism.d に記述されたデータを上から順に No.1、2、・・・としたものです。間違いのないように、その横に「S01.d」というふうに、データファイル名が付されています。





以上で分析結果の描画は終わりです。ここでリターンキーをおすと描画画面が消えて、ターミナルには、下のように表示されます。

```
BIDO2.02g — -bash • Emacs-arm64-12 — 81x25
created by this script and is found in demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT
. To do this, type cd demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT & gnuplot plot.gn
plt
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/plot.gnplt
qt.qpa.fonts: Populating font family aliases took 56 ms. Replace uses of missing
font family "Sans" with one that exists to avoid this cost.

/Users/cho/Desktop/BIDO_openfile_report_project/work/BIDO2.02g

<mkdelete.sh>
/Users/cho/Desktop/BIDO_openfile_report_project/work/BIDO2.02g
All temporary files preserved.

real    6m29.666s
user    0m16.239s
sys     0m6.818s
% 
```

以上で全解析がおわりました。すべての解析結果は、データフォルダの下に作成される RESULT というフォルダに格納されています。RESULT の中はこのようになっています（各ファイルの内容の説明は 6-1-5 を参照）。

```
RESULT — -bash • Emacs-arm64-12 — 81x25
% ls
1/          dummy
2/          input.mkrcrcle_center.h.d
3/          input.mkrcrcle_center.z.d
4/          input.mkrcrcle_circle.h.d
5/          input.mkrcrcle_circle.z.d
R0r.d       logfile.mkrcrcle_center.h.d
R0r.d.log   logfile.mkrcrcle_center.z.d
R10.d       logfile.mkrcrcle_circle.h.d
R1r.d       logfile.mkrcrcle_circle.z.d
R1r.d.log   message.sh
T0r.d       plot.gnplt
T0r.d.log   plot_wave.gnplt
T10.d       segment_3c.d
T1r.d       segment_3c.d.gnpltdat
T1r.d.log   segment_3c.d.histogram
Z00.d       seism.log
Z0r.d       wavew.d
Z0r.d.log   wavns.d
Z1r.d       wavplot/
Z1r.d.log   wavud.d
ave/
% 
```


ここで、上の描画に用いられたデータファイルはすべて ave というフォルダ（average の略）の中に入っています。ave の中はこうなっています（各ファイルの内容の説明は A6-1-6 を参照）。

```

ave — -bash ▶ Emacs-arm64-12 — 81×17
ave/
% cd ave
% ls
AmpRV_R.d          SD5e_SD5e.d        vel_cca.d
SD1e_SD1e.d        SD5n_SD5n.d        vel_cca.lwapx.d
SD1n_SD1n.d        SD5u_SD5u.d        vel_h0.d
SD1u_SD1u.d        SD6e_SD6e.d        vel_h1.d
SD2e_SD2e.d        SD6n_SD6n.d        vel_spac.d
SD2n_SD2n.d        SD6u_SD6u.d        vel_v.d
SD2u_SD2u.d        ave.info           velh_cca_minus_L.d
SD3e_SD3e.d        nsr.d              velh_cca_minus_R.d
SD3n_SD3n.d        nsr_h.d            velh_spac_minus_L.d
SD3u_SD3u.d        nsrlim_cca.d       velh_spac_minus_R.d
SD4e_SD4e.d        nsrlim_cca.lwapx.d velh_spac_plus_L.d
SD4n_SD4n.d        powratio_R2L.d     velh_spac_plus_R.d
SD4u_SD4u.d        spr_hv.d
%

```

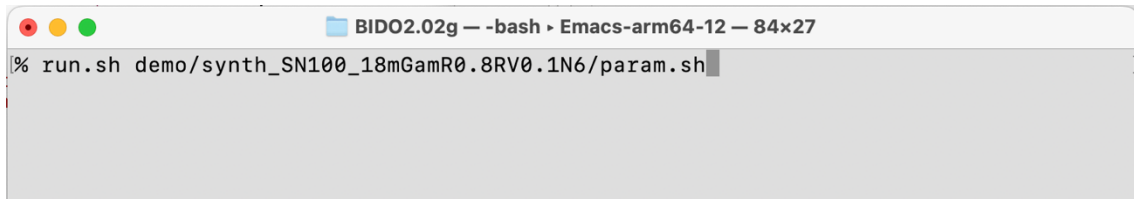
ave フォルダの中にあるファイルは、1、2、・・・という数字名のフォルダに収納されている個別の解析結果を統計処理したものです。数字名フォルダには、ave に入れるべくして統計処理される解析結果以外に、詳細な解析をしない限り用いないようないろいろな解析結果（作業用の一時ファイルやスペクトル比など）も入っています。例えば、1 というフォルダには次のような解析結果が入っています（各ファイル内容の説明は A6-1-7 参照）。

```

1 — -bash ▶ Emacs-arm64-12 — 127×35
% cd ../1
% ls
AmpRV_R.d          SD4e_SD4e.d        Z1r_R1r.d          sprh_spac_minus_R.d
AmpRV_R.d.lint     SD4e_SD4e.d.lint   Z1r_T1r.d          sprh_spac_plus_L.d
R0r_R0r.d          SD4n_SD4n.d        Z1r_Z1r.d          sprh_spac_plus_R.d
R0r_R10.d          SD4n_SD4n.d.lint   coh2.d             vel_cca.d
R0r_R1r.d          SD4u_SD4u.d        infile.estspecc.d  vel_cca.d.lint
R10_R0r.d          SD4u_SD4u.d.lint   infile.estspecc_hv.d vel_cca.lwapx.d
R10_R10.d          SD5e_SD5e.d        infile.estspecc_psd.d vel_cca.lwapx.d.lint
R10_R1r.d          SD5e_SD5e.d.lint   logfile.estspecc.d  vel_h0.d
R10_T0r.d          SD5n_SD5n.d        logfile.estspecc_hv.d vel_h0.d.lint
R10_T10.d          SD5n_SD5n.d.lint   logfile.estspecc_psd.d vel_h1.d
R1r_R0r.d          SD5u_SD5u.d        nsr.d               vel_h1.d.lint
R1r_R1r.d          SD5u_SD5u.d.lint   nsr.h.d            vel_spac.d
R1r_T0r.d          SD6e_SD6e.d        nsr.h.d.lint        vel_spac.d.lint
R1r_T1r.d          SD6e_SD6e.d.lint   nsrlim_cca.d        vel_v.d
SD1e_SD1e.d        SD6n_SD6n.d        nsrlim_cca.d.lint   vel_v.d.lint
SD1e_SD1e.d.lint   SD6n_SD6n.d.lint   nsrlim_cca.lwapx.d  velh_cca_minus_L.d
SD1n_SD1n.d        SD6u_SD6u.d        nsrlim_cca.lwapx.d.lint velh_cca_minus_L.d.lint
SD1n_SD1n.d.lint   SD6u_SD6u.d.lint   pow_noise.d         velh_cca_minus_R.d
SD1u_SD1u.d        T0r_R0r.d          pow_signal.d        velh_cca_minus_R.d.lint
SD1u_SD1u.d.lint   T0r_T0r.d          powratio_R2L.d      velh_spac_minus_L.d
SD2e_SD2e.d        T0r_T10.d          powratio_R2L.d.lint velh_spac_minus_L.d.lint
SD2e_SD2e.d.lint   T0r_T1r.d          spr_cca.d           velh_spac_minus_R.d
SD2n_SD2n.d        T10_R0r.d          spr_h0.d            velh_spac_minus_R.d.lint
SD2n_SD2n.d.lint   T10_T0r.d          spr_h1.d            velh_spac_plus_L.d
SD2u_SD2u.d        T10_T1r.d          spr_hv.d            velh_spac_plus_L.d.lint
SD2u_SD2u.d.lint   T1r_R0r.d          spr_hv.d.lint        velh_spac_plus_R.d
SD3e_SD3e.d        T1r_T0r.d          spr_spac.d           velh_spac_plus_R.d.lint
SD3e_SD3e.d.lint   T1r_T1r.d          spr_v.d             wavew_wavew.d
SD3n_SD3n.d        Z00_Z00.d          sprh_cca_minus_L.d  wavns_wavns.d
SD3n_SD3n.d.lint   Z00_Z0r.d          sprh_cca_minus_R.d  wavud_wavud.d
SD3u_SD3u.d        Z0r_Z00.d          sprh_spac_minus_L.d
SD3u_SD3u.d.lint   Z0r_Z0r.d
%

```

ところで、もとのデータフォルダに戻ると、RESULT という解析結果のフォルダに加えて run.log という実行ログファイル（付録2を参照）と param.sh というパラメータファイルが生成されているのがかかるとおもいます。パラメータファイル（param.sh）は、パラメータを少しだけ変更して解析しなおすときに run.sh の引数として与えると便利です。下の図のような感じです。



```
BIDO2.02g -- -bash - Emacs-arm64-12 - 84x27
[% run.sh demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/param.sh ]
```

入力の際、パス名が長いので入力が面倒だったり誤入力になりがちかもしれませんが、しかしここは補完機能という入力支援がありますのでご安心下さい。補完機能とは、途中までアルファベットを打ち込んでTABキーを押せばその後のスペルを補ってくれる機能です。例えば、

```
run.sh d [TAB]
```

とすると、自動で

```
run.sh demo/
```

としてくれます。その後も同様に補完が効きます。というわけでパラメータファイルの引数付きでrun.shを実行した場合、プログラム開始時のダイアログで今回実行した内容のパラメータをデフォルトとして尋ねてくれます（このように明示的にパラメータが与えられない場合、scriptフォルダの下にあるdefault_param.shを読む仕様になっています）。なお、再解析の際は、RESULTの下に1、2、・・・などの数字名フォルダおよびaveフォルダがあれば自動的に消去されますのでご注意ください。これらのフォルダを消去されたくない場合、再解析前に適当な場所に移動するか名前を変えておく必要があります。

最後に、このサンプルでは中心点ありの3成分アレイデータを用いたことから、

- ラブ波の位相速度、
- レーリー波の位相速度、
- レーリー波のR/Vスペクトル、
- レーリー波のR/VスペクトルとH/Vスペクトルの比較、
- 水平動に占めるレーリー波のパワーの割合、
- NS比（SN比の逆数）、
- H/Vスペクトル、
- パワースペクトル密度、

の解析結果が得られました。しかし一般には、解析内容（および描画内容）はアレイのジオメトリ（円周上に何点あるか、中心点を含むか否か）とデータ波形の成分数（上下動だけか、水平動だけか、3成分あるか）に依存します。試しに、ファイルseism.dを編集して、#COMPの記述を1、2、3と変えたり、中心点の行をコメントアウトしたりしてみてください（seism.dでは、#DTと#COMPの行を除き、行頭に#をつければコメントアウトの意味になります）。付録1の対応表の通り、アレイ形状や記録の成分によって解析内容が異なるはずですが、ただし解析内容はプログラムが自動的に判別しますので、ユーザーはまったく同様な手順で解析を進めればよいようになっています。サンプルとして、フォルダdemo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6にはいくつかのパターンのseismfileが同梱（seism.d.1stationなど）されています。それぞれseism.dという名前に書き換えて再解析をお試し下さい。

A6-1-1 微動波形の合成 (Synthetic data の詳細)

微動の場合は次の条件を満たすとしてこの synthetic data をつくりました。

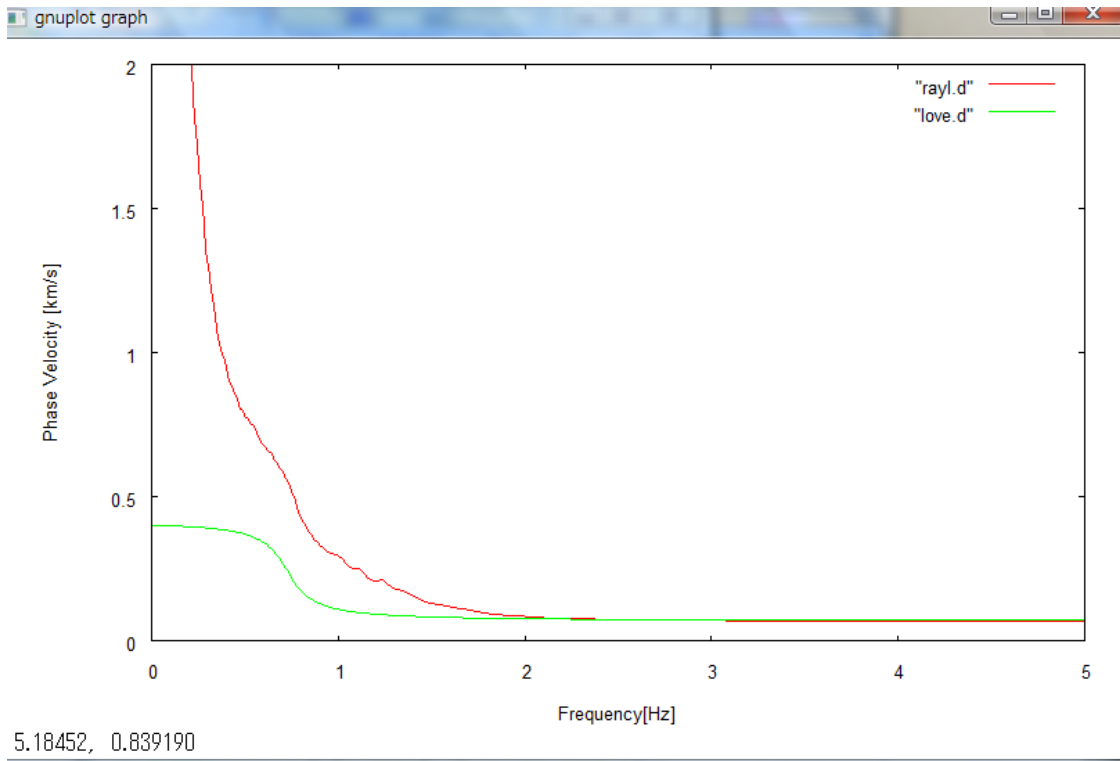
1) 微動の波動場（シグナル）の特徴

- 微動の場合は表面波（レーリー波とラブ波）が卓越する。

- 波は平面波としてアレイに到来する。
- 波動場は時間・空間的に定常である。
- レーリー波とラブ波は互いに無相関である。

2) レーリー波・ラブ波の位相速度

与えたレーリー波、ラブ波の位相速度は次の図のとおりです（それぞれ赤、緑）。



3) レーリー波・ラブ波の到来方向とパワー

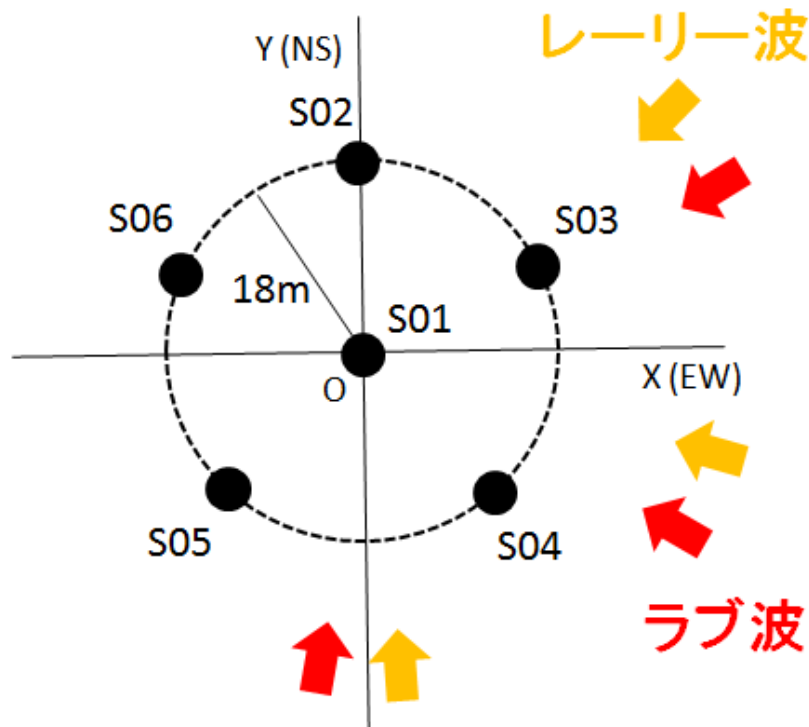
レーリー波、ラブ波を平面波として下の図のようにアレイに入射させました。レーリー波、ラブ波ともにそれぞれ各方向から同一パワーで到来するとしましたが、レーリー波とラブ波はパワーが異なるとしました。具体的には、レーリー波とラブ波のパワー比を4 : 1 としました。またレーリー波の水平動と鉛直動の振幅比（ここでは R/V と呼ぶことにします）は1 : 1 0と設定しました。これらの設定はいずれも周波数によらず一定としました。

4) ノイズ

レーリー波・ラブ波のシグナルには次のような性質を持つインコヒーレント・ノイズを加えました。

- 異なる設置点間のノイズは互いに無相関である。
- 時間的に定常である。
- シグナルと無相関である。

SN 比を UD, NS, EW 成分ともに1 0 0としてノイズのパワーを計算し、レーリー波、ラブ波で構成されるシグナルに加えました。なお本マニュアルにはNS 比という用語が頻出しますが、これはSN 比の逆数のことです。



- ・各波は上図の3方向から到来(パワーの方位依存性なし)
- ・ラーリー波とラブ波のパワー比(水平動)は4:1
- ・ラーリー波の水平動と鉛直動の振幅比は1:10

A6-1-2 質問事項に関する詳しい説明

プログラム開始時のダイアログでは以下のパラメータを尋ねられますので、赤字のコメントを参考にして適当な値をご入力ください。

Data directory name [demo/synth_SN100_18mGamR0.8RVO.1N6] > ←データファイルを置いてあるフォルダ名を入力してください。フォルダのパスは「/」で区切ってください。

* Execution parameters

Do spectral analysis [e.g., Calculate phase velocities and other properties of surface waves]? (y/n=1/0)[1] ←このオプションを1とすればスペクトル解析や位相速度の解析が実行されます。

Automatically select data portions to be used? (y/n=1/0)[1] ←このオプションを1とすれば、スペクトル推定に用いるデータ部分を波形データから自動抽出(自動抽出アルゴリズムの内容はこちら)して segment ファイルが生成されます(segment ファイル名やフォーマットはこちら)。波形のどの部分を解析に用いるかを自分で選びたい場合は segment ファイルを自分で作成してこのオプションを0としてください。

Delete temporary data files? (y/n=1/0)[0] ←このオプションを1とすれば、データ処理実行後に最終的な解析結果と一部の入力ファイル・ログファイルを残して途中生成データをデリートします。0ならばすべての途中生成データを残します。

Plot analysis results? (y/n=1/0)[1] ←このオプションを1とすれば、解析結果が描画されます。

* Basic parameters

以下のパラメータを入力する前に、本プログラムでのスペクトル推定方法およびパラメータ設定のコツを確認しておいて下さい。

Duration of data segments for the evaluation of spectra [s] [10.24] ←スペクトル推定（セグメント平均法）に用いるセグメント長（秒）です。（セグメント長）／（サンプリング時間間隔）で計算されるデータポイント数が2のべき乗とならない場合、FFT 処理時に2のべき乗になるように自動的に0詰めされます（時短のためには2のべき乗になるように値を調整するのが無難です）。

Number of data segments over which averages are taken.

Enter 0 or a very large number if you wish to use

all segments simultaneously [10] ←スペクトル推定（セグメント平均法）に用いるセグメント数（整数値）です。セグメントファイルに記載されている全セグメント数を超えるような大きな整数値か0（ゼロ）が入力された場合、「単一のセグメントでセグメント平均する（実質的にセグメント平均をしないということ）」とみなされます。

Band width of the Parzen spectral window [Hz] [0.3] ←スペクトル推定（平滑化法）に用いるスペクトル（パルゼン）ウインドウの幅[Hz]です。0（ゼロ）が入力された場合は、「ウインドウ幅が0（実質的にスペクトルウインドウを用いないということ）」とみなされます。

* Data file and array geometry

A preexisting seismfile demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1/seism.d

(for the data file names and the array geometry) has been detected. ←アレイのジオメトリ、波形成分、サンプリング時間間隔を(データフォルダ)/seism.dに記載しておいてください。ただしこのファイルが見つからなければ、インタラクティブに質問されて自動的に生成されます。

-----citation begins here-----

#COMP 3 (1 ud/ 2 ns & ew / 3 three components) ←波形の成分を記入してください

（#COMP の後に空白かタブを入れて 1、2、3のいずれかを記入）。

#DT 0.01 ←波形のサンプリング時間間隔を記入してください（#DT の後に空白かタブを入れて数字を記入）。

0.000000 0.000000 S01.d 1 ←左から x 座標 (km)、y 座標 (km)、データファイル名、1 か 0 の整数値（中心点に該当する場合 1）

0.000001 0.018000 S02.d 0

0.017119 0.005562 S03.d 0

0.010581 -0.014562 S04.d 0

-0.010579 -0.014563 S05.d 0

-0.017119 0.005564 S06.d 0

Notes

（※1）行の先頭に「#」をつければコメントアウトになります（#COMP, #DT を除く）。またこれらのデータを羅列する順番は問いません。また、数値には特に書式を設けていません。

（※2）アレイを構成するセンサー数が2個の場合、どちらか一方を中心点、残りの1つを円周上に配置したものと考え、データファイル名の右側の整数を 1 および 0 に振り分けて下さい。

（※3）アレイを構成するセンサーが1個の場合、データファイル名の右側の整数は 0, 1 のどちらでもかまいません(H/V スペクトルのみが計算され、アレイ処理はされません)。

（※4）3 成分記録の場合(COMP 3 の場合)、一番目のデータ行のファイルを用いて H/V スペクトルが計算されます。

A6-1-3 seism ファイル

内容

アレイ形状とデータ成分およびサンプリング時間間隔を記述したファイル。

ファイル名

データフォルダ/RESULT/seism.d

フォーマット

```
#COMP 3 (1 ud/ 2 ns & ew / 3 three components) ←波形の成分を記入してください
(#COMP の後に空白かタブを入れて 1, 2, 3 のいずれかを記入)。
#DT 0.01 ←波形のサンプリング時間間隔を記入してください (#DT の後に空白かタブを入れて数字を
記入)。
0.000000      0.000000      S01.d   1 ←左から x 座標 (km)、y 座標 (km)、データ
ファイル名、1 か 0 の整数値 (中心点に該当する場合 1)
0.000001      0.018000      S02.d   0
0.017119      0.005562      S03.d   0
0.010581      -0.014562     S04.d   0
-0.010579     -0.014563     S05.d   0
-0.017119      0.005564      S06.d   0
```

Notes

- (※1) 行の先頭に「#」をつければコメントアウトになります (#COMP, #DT を除く)。またこれらのデータを羅列する順番は問いません。また、数値には特に書式を設けていません。
 - (※2) アレイを構成するセンサー数が2個の場合、どちらか一方を中心点、残りの1つを円周上に配置したものと考え、データファイル名の右側の整数を 1 および 0 に振り分けて下さい。アレイを構成するセンサー数が3個の場合、円周上に2点と中心点のアレイ記録と考えて SPAC, HO を適用する場合と、3点すべて円周上の記録と考えて CCA を適用する場合の2種類が考えられます。
 - (※3) アレイを構成するセンサーが1個の場合、データファイル名の右側の整数は 0, 1 のどちらでもかまいません(パワースペクトル密度と H/V スペクトルのみが計算され、アレイ処理はされません)。
 - (※4) 3成分記録の場合 (COMP 3 の場合)、一番目のデータ行のファイルを用いて H/V スペクトルが計算されます。
 - (※5) x (y) 座標すべてに同一の値を入れると自動的にハドルテストが実施されるモードとなります。その場合、パワースペクトル密度、振幅 2 乗コヒーレンス、位相差が計算されます。コヒーレンスと位相差は 1 番目のデータに対する値が計算されます。
- e.g. ハドルテストの場合の seismfile の記述例

```
#COMP 3
#DT 0.01
0.000000      0.000000      S01.d   1
0.000000      0.000000      S02.d   0
0.000000      0.000000      S03.d   0
```

A6-1-4 segment ファイル

内容

波形データから抽出すべきセグメント部分を示したファイル。

ファイル名

波形データの成分によりファイル名が異なりますのでご注意ください。

- ・波形データが上下動のみの場合→データフォルダ/RESULT/segment_z.d
- ・波形データが水平動のみの場合→データフォルダ/RESULT/segment_h.d
- ・波形データが3成分ある場合→データフォルダ/RESULT/segment_3c.d

フォーマット

115 ←全セグメント数
10.24 ←セグメント長
0.01 ←波形データのサンプリング時間間隔
0. ←1 番目のセグメントの開始時間
5.12 ←2 番目のセグメントの開始時間
10.24 ←3 番目のセグメントの開始時間
...

のように、一行ずつデータを羅列して下さい。数値には特に書式を設けていません（ただし1行目は整数以外不可）。

A6-1-5 出力ファイル群（RESULT フォルダの中身）

1、2、・・・、n、・・・ n 番目のセグメントクラスターに対応する解析結果が入っているフォルダ
ave gnuplot の描画に用いられたデータファイル（1、2、・・・のフォルダ内の解析結果の統計ファイル）が入ったフォルダ

R0r.d 円周上の観測データ radial 成分の 0 次フーリエ係数
R0r.d.log R0r.d を作成するためのプログラムの実行ログ
R10.d 中心点の観測データ radial 成分の 1 次フーリエ係数
R1r.d 円周上の観測データ radial 成分の 1 次フーリエ係数
R1r.d.log R1r.d を作成するためのプログラムの実行ログ
T0r.d 円周上の観測データ tangential 成分の 0 次フーリエ係数
T0r.d.log T0r.d を作成するためのプログラムの実行ログ
T10.d 中心点の観測データ tangential 成分の 1 次フーリエ係数
T1r.d 円周上の観測データ tangential 成分の 1 次フーリエ係数
T1r.d.log T1r.d を作成するためのプログラムの実行ログ
Z00.d 中心点の観測データ UD 成分の 0 次フーリエ係数
Z0r.d 円周上の観測データ UD 成分の 0 次フーリエ係数
Z0r.d.log Z0r.d を作成するためのプログラムの実行ログ
Z1r.d 円周上の観測データ UD 成分の 1 次フーリエ係数
Z1r.d.log Z1r.d を作成するためのプログラムの実行ログ
wavud.d seism ファイルに記載された最初のデータファイルのコピー。H/V スペクトルの推定に用いられる。
wavns.d seism ファイルに記載された最初のデータファイルのコピー。H/V スペクトルの推定に用いられる。
wavew.d seism ファイルに記載された最初のデータファイルのコピー。H/V スペクトルの推定に用いられる。
dummy gnuplot でグラフを書く際に用いる。なにも記述していないダミーデータファイル。
input.mkrcrcle_center.h.d 中心点のフーリエ係数を求める際の入力データ（水平成分）
input.mkrcrcle_center.z.d 中心点のフーリエ係数を求める際の入力データ（UD 成分）
input.mkrcrcle_circle.h.d 円周上のフーリエ係数を求める際の入力データ（水平成分）
input.mkrcrcle_circle.z.d 円周上のフーリエ係数を求める際の入力データ（UD 成分）
logfile.mkrcrcle_center.h.d 中心点のフーリエ係数を求める際のプログラム実行ログファイル（水平成分）
logfile.mkrcrcle_center.z.d 中心点のフーリエ係数を求める際のプログラム実行ログファイル（UD 成分）
logfile.mkrcrcle_circle.h.d 円周上のフーリエ係数を求める際のプログラム実行ログファイル（水平成分）
logfile.mkrcrcle_circle.z.d 円周上のフーリエ係数を求める際のプログラム実行ログファイル（UD 成分）
message.sh 計算を実行する際に出力するメッセージといくつかのパラメータを含む作業ファイル
input.chk_seism.d アレイデータの座標をチェックするプログラム用の作業（入力）ファイル

plot.gnplt	gnuplot を起動する際のマクロ（解析結果用）
wavplot	gnuplot で波形データを描画するために間引いたデータを入れる作業用ディレクトリ
plot_wave.gnplt	gnuplotを起動する際のマクロ（波形用）
segment_3c.d	観測データから抽出したセグメントを記述したセグメントファイル
segment_3c.d.histogram	セグメントの自動抽出に用いたRMS のヒストグラム。
segment_3c.d.gnpltdat	gnuplotで波形データを描画するための作業用データファイル

A6-1-6 出力ファイル群（RESULT/ave フォルダの中身）

AmpRV_R.d	レーリー波の水平動と鉛直動の振幅比（対数平均）
SD1e_SD1e.d	パワースペクトル密度関数（対数平均）。数字は seismfile に記述されたデータを上から順に No.1、2、・・・としたもの。e、n、u は東西、南北、上下成分を表している。
ave.info	解析結果の平均の取り方に関する大雑把な説明
nsr.d	鉛直動のNS比（対数平均）
nsr_h.d	水平動のNS比（対数平均）
nsrlim_cca.d	CCA法の位相速度から計算した限界NS比（相対誤差の許容範囲を5%と設定）（対数平均）
nsrlim_cca.lwapx.d	nc-CCA法の位相速度から計算した限界NS比（相対誤差の許容範囲を5%と設定）（対数平均）
powratio_R2L.d	水平動のパワーに占めるレーリー波のパワーの割合（対数平均）
spr_hv.d	水平動（水平2成分のパワーの和）と鉛直動のパワー比（対数平均）
vel_cca.d	CCA法によるレーリー波の位相速度
vel_cca.lwapx.d	nc-CCA法によるレーリー波の位相速度
vel_h0.d	H0 法によるレーリー波の位相速度
vel_h1.d	H1 法によるレーリー波の位相速度
vel_spac.d	SPAC 法によるレーリー波の位相速度（空間自己相関係数をオリジナルの定義で計算した結果）
vel_v.d	V法によるレーリー波の位相速度
velh_cca_minus_L.d	CCA-L 法によるラブ波の位相速度
velh_cca_minus_R.d	CCA-R法によるレーリー波の位相速度
velh_spac_minus_L.d	SPAC-L 法によるラブ波の位相速度
velh_spac_minus_R.d	SPAC-R法によるレーリー波の位相速度
velh_spac_plus_L.d	SPAC+L 法によるラブ波の位相速度
velh_spac_plus_R.d	SPAC+R法によるレーリー波の位相速度

※以上のデータファイルの1、2、3列には、周波数、セグメントごと解析結果の平均、標準偏差が羅列されています。ただし対数平均（括弧書き）のデータに関しては、1、2、3、4列にそれぞれ周波数、平均、平均－標準偏差、平均＋標準偏差が羅列されています。

A6-1-7 出力ファイル群（個別の数字フォルダの中身）

coh2.d	鉛直動の0次元周データと中心点のデータの振幅2乗コヒーレンス
nsr.d	鉛直動のNS比
nsrlim_cca.d	CCA法の位相速度から計算した限界NS比（相対誤差の許容範囲を5%と設定）
nsrlim_cca.lwapx.d	nc-CCA法の位相速度から計算した限界NS比（相対誤差の許容範囲を5%と設定）
nsr_h.d	水平動のNS比
pow_noise.d	中心点・鉛直動のノイズのパワー
pow_signal.d	中心点・鉛直動のシグナルのパワー

AmpRV_R.d レーリー波の水平動と鉛直動の振幅比
 powratio_R2L.d 水平動のパワーに占めるレーリー波のパワーの割合
 spr_cca.d CCA法によるレーリー波の位相速度同定に用いるスペクトル比
 spr_cca.lwapx.d nc-CCA法によるレーリー波の位相速度同定に用いるスペクトル比
 spr_h0.d H0 法によるレーリー波の位相速度同定に用いるスペクトル比
 spr_h1.d H1 法によるレーリー波の位相速度同定に用いるスペクトル比
 spr_hv.d 水平動（水平2成分のパワーの和）と鉛直動のパワー比
 spr_spac.d SPAC 法によるレーリー波の位相速度同定に用いるスペクトル比（空間自己相関係数をオリジナルの定義で計算した結果）
 spr_v.d V法によるレーリー波の位相速度同定に用いるスペクトル比
 sprh_cca_minus_L.d CCA-L 法によるラブ波の位相速度同定に用いるスペクトル比
 sprh_cca_minus_R.d CCA-R 法によるレーリー波の位相速度同定に用いるスペクトル比
 sprh_spac_minus_L.d SPAC-L 法によるラブ波の位相速度同定に用いるスペクトル比
 sprh_spac_minus_R.d SPAC-R 法によるレーリー波の位相速度同定に用いるスペクトル比
 sprh_spac_plus_L.d SPAC+L 法によるラブ波の位相速度同定に用いるスペクトル比
 sprh_spac_plus_R.d SPAC+R 法によるレーリー波の位相速度同定に用いるスペクトル比

vel_cca.d CCA法によるレーリー波の位相速度
 vel_cca.lwapx.d nc-CCA法によるレーリー波の位相速度
 vel_h0.d H0 法によるレーリー波の位相速度
 vel_h1.d H1 法によるレーリー波の位相速度
 vel_spac.d SPAC 法によるレーリー波の位相速度（空間自己相関係数をオリジナルの定義で計算した結果）
 vel_v.d V法によるレーリー波の位相速度
 velh_cca_minus_L.d CCA-L 法によるラブ波の位相速度
 velh_cca_minus_R.d CCA-R 法によるレーリー波の位相速度
 velh_spac_minus_L.d SPAC-L 法によるラブ波の位相速度
 velh_spac_minus_R.d SPAC-R 法によるレーリー波の位相速度
 velh_spac_plus_L.d SPAC+L 法によるラブ波の位相速度
 velh_spac_plus_R.d SPAC+R 法によるレーリー波の位相速度

*.lint 統計処理に用いるリサンプリングデータ

infile.estspec.d スペクトル推定（アレイ解析）の際の入力データ
 infile.estspec_hv.d スペクトル推定（H/V）の際の入力データ
 infile.estspec_psd.d スペクトル推定（パワースペクトル密度）の際の入力データ
 logfile.estspec.d スペクトル推定（アレイ解析）の際のプログラム実行ログ
 logfile.estspec_hv.d スペクトル推定（H/V）の際のプログラム実行ログ
 logfile.estspec_psd.d スペクトル推定（パワースペクトル密度）の際のプログラム実行ログ

以下はアレイ解析のためのスペクトル推定結果。例えば、Z1r_R1r.d は Z(UD) 成分・1 次・円周データと Radial (R) 成分・0 次・円周データとのクロススペクトル密度を表す。

R0r_R0r.d R0r_R10.d R0r_R1r.d R10_R0r.d R10_R10.d R10_R1r.d R10_T0r.d R10_T10.d
 R1r_R0r.d R1r_R1r.d R1r_T0r.d R1r_T1r.d T0r_R0r.d T0r_T0r.d T0r_T10.d T0r_T1r.d
 T10_R0r.d T10_T0r.d T10_T1r.d T1r_R0r.d T1r_T0r.d T1r_T1r.d Z00_Z00.d Z00_Z0r.d
 Z0r_Z00.d Z0r_Z0r.d Z1r_R1r.d Z1r_T1r.d Z1r_Z1r.d

以下は H/V の推定に用いる一時ファイル（パワースペクトル密度）。例えば、wavew_wavew.d は E/W 成分のパワースペクトル密度を表す。H/V の推定には seismfile で上から一番目に記述されたデータが用いられる。

wavew_wavew.d wavns_wavns.d wavud_wavud.d

以下はパワースペクトル密度の推定結果。例えば、SD1e_SD1e.d は seismfile で上から一番目に記述されたデータの ew 成分のパワースペクトル密度であることを示す。

SD1e_SD1e.d SD1n_SD1n.d SD1u_SD1u.d SD2e_SD2e.d SD2n_SD2n.d SD2u_SD2u.d
 SD3e_SD3e.d SD3n_SD3n.d SD3u_SD3u.d SD4e_SD4e.d SD4n_SD4n.d SD4u_SD4u.d

SD5e_SD5e.d SD5n_SD5n.d SD5u_SD5u.d SD6e_SD6e.d SD6n_SD6n.d SD6u_SD6u.d

A6-1-8 手法の有効利用のための1 アプローチ

微動アレイ周辺にノイズ源があるとSN比が下がりますが、人間の生活や産業活動のある市街地で微動のノイズ源をコントロールすることは困難です。ごくごくサイズの小さい「極小アレイ」を用いる場合はSN比が上がります（手に届く範囲のアレイならば少なくとも観測時（15分程度）にその周辺で静穏な環境を保つことは容易なはずです）。トップページの写真では、半径がわずか30cmのアレイを用いることにより高いSN比が実現された例です。このアレイでは10000を超えるSN比が得られましたが、その結果アレイ半径の500倍を超える波長が解析可能となりました（引用文献[6]）。

A6-1-9 パラメータ設定のコツ

本プログラムで採用した解析方法の特徴の1つは長波長解析性能です。それを生かすための解析パラメータの設定のコツは、着目する周波数帯域を見るために許容されるセグメント長の範囲内でそれをできるだけ短く抑えることです。これは、非定常ノイズに汚染される観測波形から多くのセグメントを抽出するために有効であり、ひいてはスペクトルウィンドウによる平滑化のバンド幅をできる限り狭くすることを可能とします。スペクトルウィンドウはバイアスの原因となり、長波長帯域の解析では特に重要な問題になります（引用文献[3]）。

6-2 ハドルテストのデモ

ハドルテストとは、すべての地震計を同じ位置に並べて同時に記録をとり、記録システムの機器特性の一致度合いを確認するテストです。ハドルデータの解析方法は6-1 アレイデータ解析のデモの場合とまったく同一ですので、初めてBIDOを用いる方はまずそちらをご一読下さい。seism ファイル(A6-1-3)の設定ですべての地震計を同じ位置に設定するだけで、アレイ解析とまったく同様の手順で解析できます。

例えば、ハドルデータ解析用のデモデータをダウンロードしてBIDO2.0のフォルダの下に解凍し、アレイデータの場合と同様な手順で解析してみてください。このデモデータは鳥取大学の野口竜也博士からのご厚意で頂いたもので、Oyo Geospace Corp. の上下動センサー (HS-1 Geophone) 6 台を鳥取大学構内の実験室のコンクリート上に設置し（写真）、アンプ SA16、ローパスフィルター(カットオフ周波数 30Hz)を通してレコーダ es8 で記録したものです。



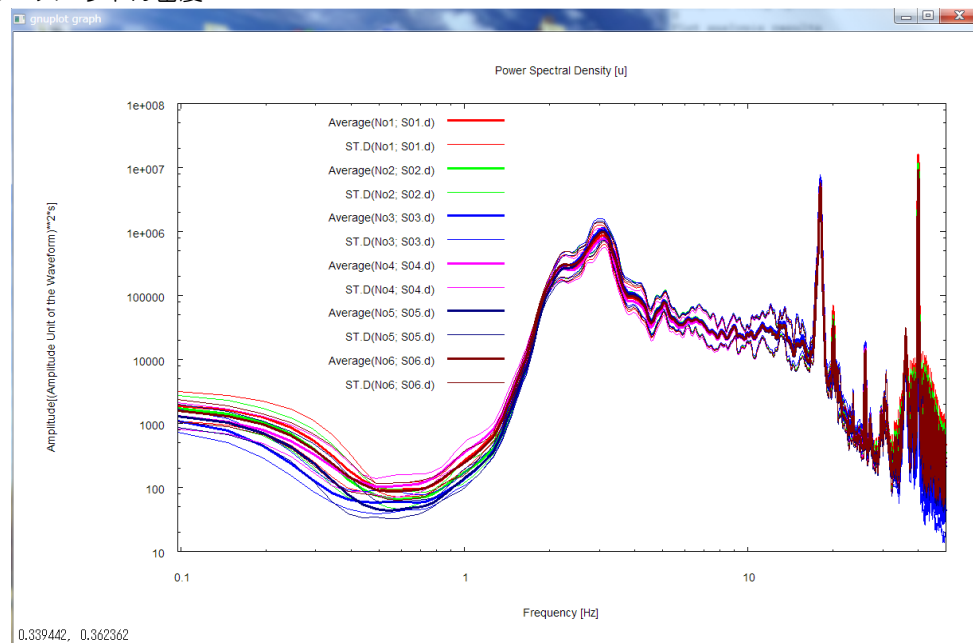
それでは早速、

```
run.sh demo/HDL0001/param.sh [RETURN KEY].
```

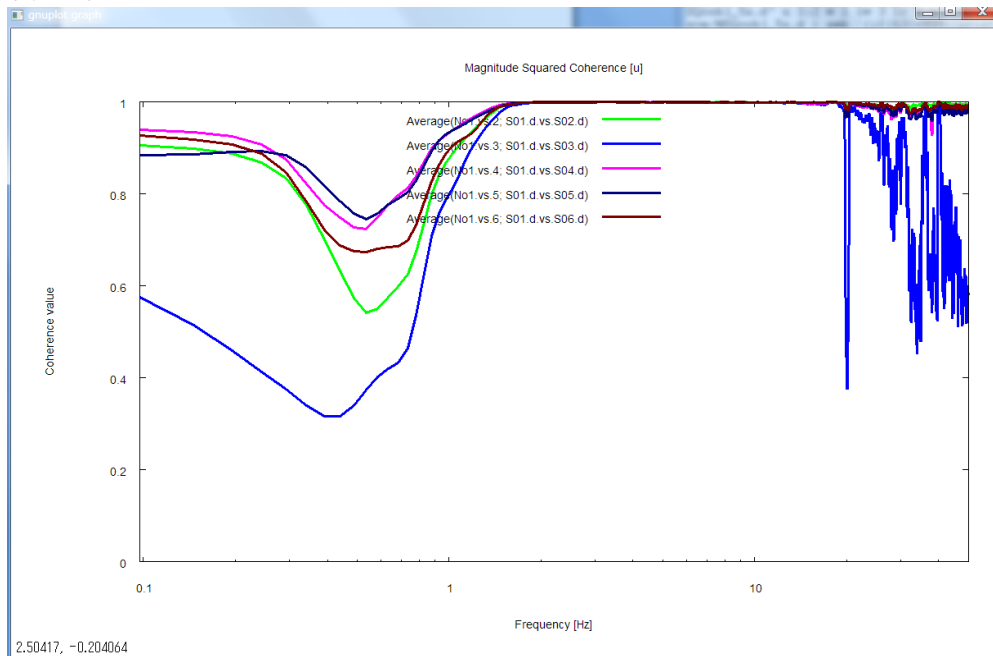
としてデータ解析にうつりましょう。解析結果は、アレイ解析の場合と同様に、データフォルダの下に作成される RESULT というフォルダに格納されます。

ハドルテストの描画内容は、

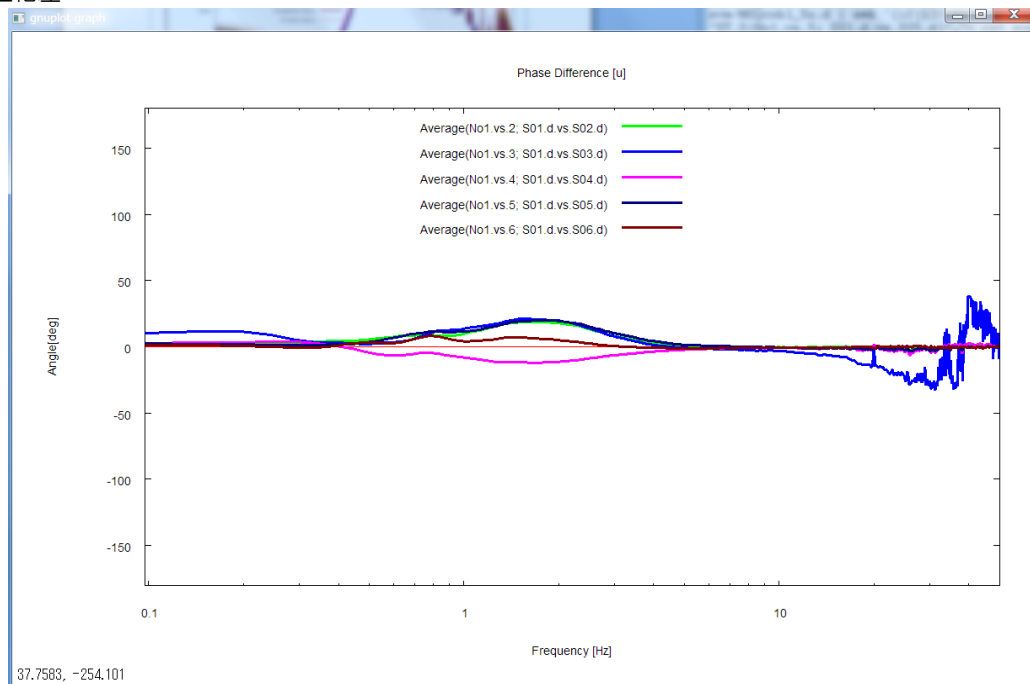
- パワースペクトル密度



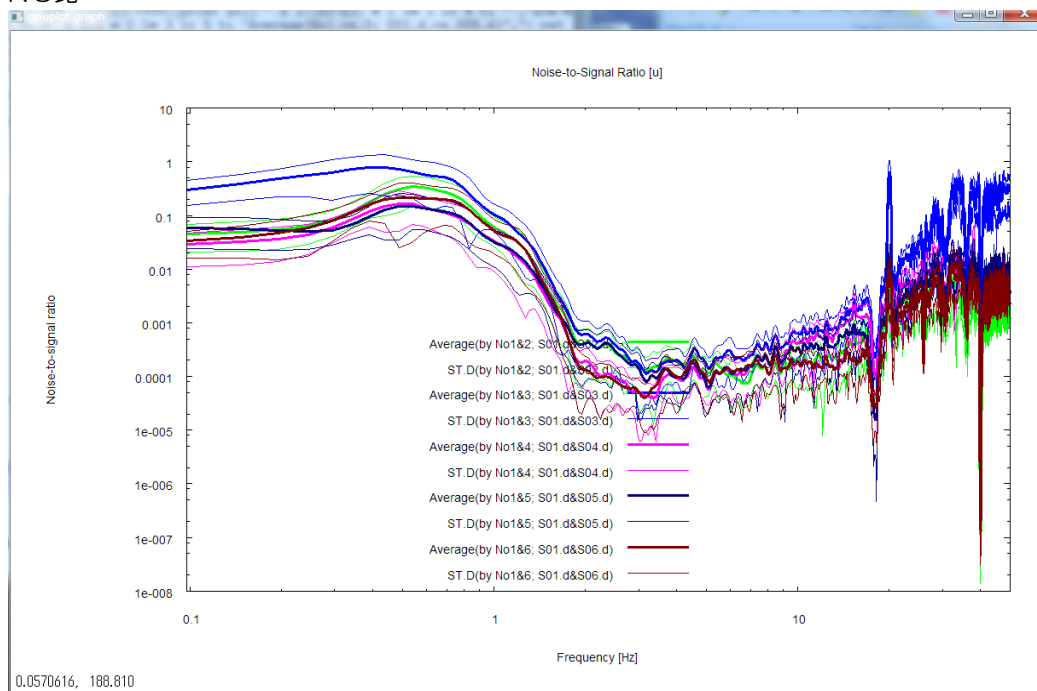
- 振幅2乗コヒーレンス



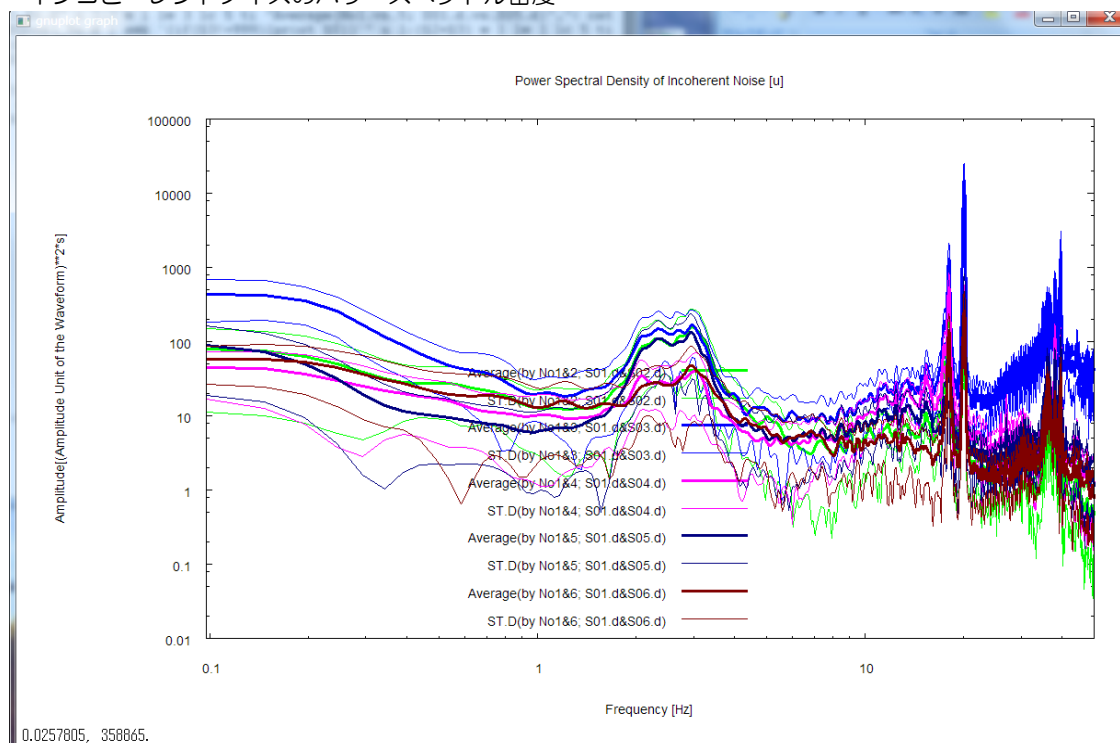
• 位相差



• NS比



・インコヒーレントノイズのパワースペクトル密度



となります。

すべての描画内容は周波数軸を対数目盛にして最大周波数まで表示しています。ここでいう最大周波数とは、script/setpar.sh の freqmax_ave というパラメータで設定された値（デフォルトで 50 [Hz]、ご自分で変更可です）とナイキスト周波数のうち小さいほうの値のことです。また対数表示をやめたい場合は、script/setpar.sh の autologscale_x というパラメータの行頭に#を記入してコメントアウトして下さい。

振幅 2 乗コヒーレンスや位相差の凡例は、Average(by No1.vs. 2; S01.d.vs. S02.d) というふうに表示されています。これは、記録番号 1 と 2 の間のコヒーレンス、位相差（1 に対して 2 の位相が進んでいる場合を正）、またそれを用いて計算した NS 比やノイズのパワーの平均値という意味です。記録番号 1 とは seismfile の先頭に書かれたデータに対応します。seismfile のデータ降順に記録番号 2、3、... となります。グラフの凡例の「by No1. vs. 2」の部分が記録番号 1、2 であることを示しています。間違いないように、その横に「S01.d. vs. S02.d」というふうに、データファイル名も付しています。ave フォルダの ave.info には記録番号とファイル名の対応表が記述されていますので、そちらもご確認下さい。ST.D は標準偏差（Standard Deviation）を意味しています。上の解析結果より、記録番号 3（S03.d の記録；青線）のみコヒーレンスが低く、他の記録に対して位相差が大きいことが分かります。

振幅 2 乗コヒーレンスの推定や物理的意味については Bendat and Piersol (1971) や Carter et al. (1973) が参考となります。NS 比は振幅 2 乗コヒーレンス (coh^2) を式：

$$S/N = (\text{シグナルのパワー}) / (\text{ノイズのパワー}) = \sqrt{\text{coh}^2} / \{1 - \sqrt{\text{coh}^2}\}$$

(Carter et al., 1973) に代入して SN 比を計算し、その逆数を取りました。ノイズのパワースペクトルは、記録のパワースペクトルに NS 比を乗じることにより算出しました。

これらの描画データは、アレイ解析の場合と同様に、RESULT/ave というフォルダに入っています。描画データのファイル名と内容を A6-2-1 にリストアップしておきましたので参考にして下さい。そのうちの 1 つに、DIFINSTRES1_2e.d という名前のファイルがあります。このファイル名は Differences in instrumental response の略です。内容は、記録番号 1 に対する記録番号 2 の振幅比と位相差が、

周波数 F [Hz] 振幅比 R [無次元] 位相差 P [°]

というように周波数ごとに列挙されています。

Bendat, J. S., and A. G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures: John Wiley & Sons, 1971.

Carter, G. C., C. H. Knapp, and A. H. Nuttall, 1973, Estimation of the magnitude-squared coherence function via overlapped Fast Fourier Transform processing: IEEE Transactions on Audio Electroacoustics, AU-21, 337-34.

A6-2-1 出力ファイル群 (RESULT/ave フォルダの中身)

ave.info	解析結果の平均の取り方に関する大雑把な説明およびこのフォルダに格納されているファイル名の番号 (例えば, MSQcoh1_2e.d の 1 や 2) とデータファイルとの対応表が記述されている。
MSQcoh1_2e.d	振幅 2 乗コヒーレンス。1_2 は地震計 1 と 2 の間のコヒーレンス、e は東西成分の意味。
MSQcoh1_2n.d	振幅 2 乗コヒーレンス。1_2 は地震計 1 と 2 の間のコヒーレンス、n は南北成分の意味。
MSQcoh1_2u.d	振幅 2 乗コヒーレンス。1_2 は地震計 1 と 2 の間のコヒーレンス、u は上下成分の意味。
NSR1_2e.d	NS 比。1_2 は地震計 1 と 2 の間のコヒーレンスから計算したという意味。 e は東西成分を表す。(対数平均)
NSR1_2n.d	NS 比。1_2 は地震計 1 と 2 の間のコヒーレンスから計算したという意味。 n は南北成分を表す。(対数平均)
NSR1_2u.d	NS 比。1_2 は地震計 1 と 2 の間のコヒーレンスから計算したという意味。 u は上下成分を表す。(対数平均)
PHASE1_2e.d	位相差。1_2 は地震計 1 と 2 の間のクロススペクトルから計算したという意味。 e は東西成分を表す。
PHASE1_2n.d	位相差。1_2 は地震計 1 と 2 の間のクロススペクトルから計算したという意味。 n は南北成分を表す。
PHASE1_2u.d	位相差。1_2 は地震計 1 と 2 の間のクロススペクトルから計算したという意味。 u は上下成分を表す。
PSD_NOISE1_2e.d	インコヒーレントノイズ (電気ノイズ) のパワースペクトル密度。1_2 は地震計 1 と 2 の間のコヒーレンスから計算したという意味。e は東西成分を表す。(対数平均)
PSD_NOISE1_2n.d	インコヒーレントノイズ (電気ノイズ) のパワースペクトル密度。1_2 は地震計 1 と 2 の間のコヒーレンスから計算したという意味。n は南北成分を表す。(対数平均)
PSD_NOISE1_2u.d	インコヒーレントノイズ (電気ノイズ) のパワースペクトル密度。1_2 は地震計 1 と 2 の間のコヒーレンスから計算したという意味。u は上下成分を表す。(対数平均)
SD1e_SD1e.d	波形記録のパワースペクトル密度。1 は地震計番号、e は東西成分を表す。(対数平均)
AMPRATIO1_2e.d	地震計 1 と 2 の記録のパワースペクトル密度の比。e は東西成分の意味 (対数平均)。
AMPRATIO1_2n.d	地震計 1 と 2 の記録のパワースペクトル密度の比。n は南北成分の意味 (対数平均)。
AMPRATIO1_2u.d	地震計 1 と 2 の記録のパワースペクトル密度の比。u は上下成分の意味 (対数平均)。
DIFINSTRES1_2e.d	ファイル名は Difference in instrumental response の略。PHASE1_2e.d と AMPRATIO1_2e.d のデータを 2 列並べたもの。機器応答特性の相違の補正に利用可能。e は東西成分の意味。
DIFINSTRES1_2n.d	ファイル名は Difference in instrumental response の略。PHASE1_2n.d と AMPRATIO1_2n.d のデータを 2 列並べたもの。機器応答特性の相違の補正に利用可能。n は南北成分の意味。
DIFINSTRES1_2u.d	ファイル名は Difference in instrumental response の略。PHASE1_2u.d と AMPRATIO1_2u.d のデータを 2 列並べたもの。機器応答特性の相違の補正に利用可能。u は上下成分の意味。

※以上のデータファイルの1、2、3列には、周波数、セグメントごと解析結果の平均、標準偏差が羅列されています。ただし対数平均（括弧書き）のデータに関しては、1、2、3、4列にそれぞれ周波数、平均、平均－標準偏差、平均＋標準偏差が羅列されています。

※位相差は、記録間のクロススペクトルの算術平均の実部と虚部をそれぞれ x 成分、 y 成分とするベクトルとみた時の x 軸とベクトルの挟角を示しています。

文献


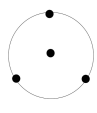
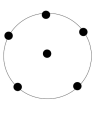
- [1] Cho, I., T. Tada, and Y. Shinozaki, 2004, A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms, *Geophysics*, 69, 1535-1551.
- [2] Cho, I., T. Tada, and Y. Shinozaki, 2006, A generic formulation for microtremor exploration methods using three-component records from a circular array, *Geophys. J. Int.*, 165, 236-258.
- [3] Cho, I., T. Tada, and Y. Shinozaki, 2006, Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records, *J. Geophys. Res.*, 111, B09315, doi:10.1029/2005JB004235.
- [4] Tada, T., I. Cho, and Y. Shinozaki, 2007, Beyond the SPAC method: exploiting the wealth of circular-array methods for microtremor exploration, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97, 2080-2095, doi:10.1785/0120070058.
- [5] Tada, T., I. Cho, and Y. Shinozaki, 2009, New circular-array microtremor techniques to infer Love-wave phase velocities, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99, 2912-2926, doi:10.1785/0120090014.
- [6] 長郁夫, 多田卓, 篠崎祐三, 2008, 極小アレイによる新しい微動探査法: 浅部地盤平均S波速度の簡便推定, *物理探査*, 61, 457-468.
- [7] Tada, T., I. Cho, and Y. Shinozaki, 2010, New horizons in the utility of horizontal-motion microtremors, Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology.
- [8] Tada, T., 2010, Calculating noise-to-signal ratios in the horizontal-motion components of circular-array microtremor data, *unpublished manuscript*. (included in this archive with a file name of Tada(2010).pdf)
- [9] Cho, I., T. Tada, and Y. Shinozaki, 2008, Assessing the applicability of the spatial autocorrelation method: A theoretical approach, *J. Geophys. Res.*, 113, B06307, doi:10.1029/2007JB005245.

付録1

アレイ形状と解析内容

BIDO が想定するアレイ形状

BIDO のアレイ解析理論は円形アレイ（円周上にすきまなくセンサーを配置する）を地面に設置する仮定を基礎としていますが、では実際には円周上に何個のセンサーを配置すれば良いか、また中心点にセンサーを配置するかなどが問題となります。結論を述べると、BIDO は円周上に0、1、2、3、5個のセンサーを配置するアレイを想定しています。中心点にもセンサーを配置すると最大6個のセンサーを用いたアレイとなります。アレイのジオメトリや記録の成分によって解析できる内容が異なります。

アレイ形状								
地震計（総数）		1	2	3	3	4	5	6
中心		1	1	1	0	1	0	1
円周		0	1	2	3	3	5	5
鉛直動のみ	位相速度解析（レーリー波）	なし	SPAC	SPAC H0	CCA	SPAC CCA nc-CCA H0,H1,V	CCA	SPAC CCA nc-CCA H0,H1,V
	位相速度解析（ラブ波）	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	その他	PSD	PSD	PSD	PSD	PSD NSR(V)	PSD	PSD NSR(V)
水平動のみ	位相速度解析（レーリー波）	なし	なし	なし	CCA-R	CCA-R SPAC-R SPAC+R	CCA-R	CCA-R SPAC-R SPAC+R
	位相速度解析（ラブ波）	なし	なし	なし	CCA-L	CCA-L SPAC-L SPAC+L	CCA-L	CCA-L SPAC-L SPAC+L
	その他	PSD	PSD	PSD	PSD	PSD NSR(H)	PSD	PSD NSR(H)
3成分	位相速度解析（レーリー波）	なし	SPAC	SPAC H0	CCA CCA-R	SPAC CCA nc-CCA H0,H1,V CCA-R SPAC-R SPAC+R	CCA CCA-R	SPAC CCA nc-CCA H0,H1,V CCA-R SPAC-R SPAC+R
	位相速度解析（ラブ波）	なし	なし	なし	CCA-L	CCA-L SPAC-L SPAC+L	CCA-L	CCA-L SPAC-L SPAC+L
	その他	PSD H/V	PSD H/V	PSD H/V	PSD H/V	PSD H/V R/V,R/L NSR(V) NSR(H)	PSD H/V	PSD H/V R/V,R/L NSR(V) NSR(H)

(脚注)

・SPAC 空間自己相関法 (一般には水平動にも適用可だがここでは「鉛直動からレーリー波の位相速度を解析する手法」とした)

- ・CCA 鉛直動からレーリー波の位相速度を解析する手法 (引用文献[1、3])
- ・H0,H1,V, nc-CCA 鉛直動からレーリー波の位相速度を解析する手法 (引用文献[4])
- ・CCA-R, SPAC-R, SPAC+R 水平動からレーリー波の位相速度を解析する手法 (引用文献[5])
- ・CCA-L, SPAC-L, SPAC+L 水平動からラブ波の位相速度を解析する手法 (引用文献[5])
- ・P S D パワースペクトル密度
- ・H/V H/Vスペクトル (水平動のパワーと鉛直動のパワー比)
- ・NSR (V) 鉛直成分のNS比 (引用文献[3])
- ・NSR (H) 水平成分のNS比 (引用文献[8])
- ・R/V レーリー波の水平動と鉛直動の振幅比 (※/パワー比ではありません) (引用文献[2])
- ・R/L レーリー波とラブ波のパワー比 (引用文献[5、7])

上の表の通り、BIDO はアレイデータのみでなく単点観測データや2点による線状アレイ、3点によるL型アレイで得られるデータの解析にも対応しています (なお複数の地震計を同一地点に配置してのハドルテストにも対応しています)。開発当初は円形アレイデータの解析を想定していましたが、実際の観測現場 (特に市街地) では設置が容易なように簡単なアレイ形状が望まれますし、上下動の解析では線状アレイやL型アレイも適用できるケースが多々あることが分かってきているので、後になって BIDO にも取り入れることにしました。なお表の左から3、4列目はどちらも地震計3個で構成されるアレイですが、1つを円形アレイの中心点に配置されているとみなすか、すべて円周上に配置されているとみなすかによって適用できる手法が異なることになります。

しかし、円周上のセンサー数が多いほど精度が高く、安定した解析結果が得られることは言うまでもありません。小アレイ (半径 10m以下) の場合はできるだけ表の最右端に示されるような6点アレイを設置することを推奨します。特に半径 1 m前後の極小アレイ (扉ページの写真) では6点アレイは高精度というだけでなく効率の点でも有効と期待されます (A6-1-8「手法の有効利用のための1アプローチ」参照)。

水平動のアレイ解析に関する注意

水平動のアレイ解析は現段階では基礎研究のレベルです。円周上に5個、中心に1個を配置したアレイでラブ波等を解析できることは分かっていますが (引用文献[5、7])、円周上に3個のセンサーを配置したアレイではどの程度解析結果を信頼できるかは明らかにされていません。BIDO は円周上に3個のセンサーを配置したアレイであっても水平動を解析できる仕様になっていますが、主に開発者向けであり、解析結果の解釈には相当に慎重を期する必要があります。また円周上に5個のセンサーを配置した場合であってもSN比が低い (ノイズが大きい) 場合、解析結果の信頼性がかなり下がるので注意が必要です。残念ながら、現在のところ水平動についてはSN比の推定値から解析結果の信頼性を評価する理論的根拠は確立されていません。

「円形」アレイからの逸脱について

円周上に3個以上のセンサーを配置する円形アレイでは、円周上の点は必ずしも等間隔である必要はありませんが (引用文献[2])、精度を保つためにはできるだけ等間隔のアレイを展開したいところです。円周上に配置されていない点 (半径方向の誤差) については補正理論がないので、デフォルトで5% (プログラムの再コンパイルにより変更可) までの誤差を許容して円周上にあるとみなすことにしています。

付録2

実行ログ

```
OS Darwin
paramfile:./param.sh
segment_duration=10.24
smoothband=0.3
nseg_segave=10
idmksegment=1
idcalc=1
idgnplt=1
delete_level=0
<SETPAR>
-----
Array geometry: centered 6-station array.
Array radius: 18. [m]
Number of sensors at the center: 1
Number of sensors around the circle: 5
Data: all three components
-----
Power spectral densities will be estimated.
horizontal-to-vertical spectral ratios will be estimated.
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by SPAC).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by CCA).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by ncCCA).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by H0).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by H1).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by V).
Noise-to-signal ratios in the vertical component will be estimated.
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by CCA+R).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by SPAC+R).
Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by SPAC-R).
Love wave phase velocities will be estimated (by CCA+L).
Love wave phase velocities will be estimated (by SPAC+R).
Love wave phase velocities will be estimated (by SPAC-R).
H/V power partition ratios of the Rayleigh waves will be estimated.
Rayleigh-to-Love power partition ratios will be estimated.
Noise-to-signal ratios in the horizontal components will be estimated.

Do you really want to start running the program? [y/n]
<MKSEGMENT>
File named demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/segment_3c.d already exists.
The option "automatic selection of data portions" on.
The file demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/segment_3c.d will be overwritten.
Are you sure to proceed? [y/n]
(Type "n" to exit. Restart the program run.sh and set the option "automatic selection of data portions" off.)
Output demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/segment_3c.d
[Segments with RMS values between 1.000000 and 1.200000 are selected]
NOTE: 57 segments have been selected.

<mkgnplt_wave.sh>
NOTE: This script uses a program gnuplot to plot the waveforms. You can manually plot the same figures later, using a gnuplot macro,
plot_wave.gnplt, which was created by this script and is found in demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT. To do this, type cd
demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT & gnuplot plot_wave.gnplt
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/plot_wave.gnplt
/Users/cho/Desktop/BIDO_openfile_report_project/work/BIDO2.02g
<MKCIRCLE>
seismfile: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/seism.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/Z0r.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/Z1r.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/Z00.d
<MKCIRCLE_H>
seismfile: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/seism.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/R0r.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/R1r.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/T0r.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/T1r.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/R10.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/T10.d
<MKWAV3C>
seismfile: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/seism.d
demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/S01.d used to estimate horizontal-to-vertical spectral ratios
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/wavud.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/wavew.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/wavns.d

* Preexisting directori(es) detected (created in a previous calculation?):
demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1 demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/2
demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/3 demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/4
demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/5 demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave
NOTE: These directories are removed to proceed with the current analysis.

<CPWAV>
```

Copying original waveforms to a temporary diirectory demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav to estimate the power spectral densities.

Step 1 (Total 5)

<SETPAR>

 Array geometry: centered 6-station array.
 Array radius: 18. [m]
 Number of sensors at the center: 1
 Number of sensors around the circle: 5
 Data: all three components

Power spectral densities will be estimated.
 horizontal-to-vertical spectral ratios will be estimated.
 Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by SPAC).
 Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by CCA).
 Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by ncCCA).
 Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by H0).
 Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by H1).
 Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by V).
 Noise-to-signal ratios in the vertical component will be estimated.
 Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by CCA+R).
 Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by SPAC+R).
 Rayleigh wave phase velocities will be estimated (by SPAC-R).
 Love wave phase velocities will be estimated (by CCA+L).
 Love wave phase velocities will be estimated (by SPAC+R).
 Love wave phase velocities will be estimated (by SPAC-R).
 H/V power partition ratios of the Rayleigh waves will be estimated.
 Rayleigh-to-Love power partition ratios will be estimated.
 Noise-to-signal ratios in the horizontal components will be estimated.

<ESTSPEC>

NOICE=idrimag=1, read columns 1-3

[column 1: time; 2: real part; 3: imaginary part]

OUTPUT DIR: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1

No. of Seismograms: 9

DATAFILE 1) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/R10.d

DATAFILE 2) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/R0r.d

DATAFILE 3) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/R1r.d

DATAFILE 4) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/T10.d

DATAFILE 5) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/T0r.d

DATAFILE 6) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/T1r.d

DATAFILE 7) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/Z00.d

DATAFILE 8) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/Z0r.d

DATAFILE 9) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/Z1r.d

Cross-spectral density calculations (1:yes; 2: no)

| 1 2 3 4 5 6 7 8 9

 1| 1 1 1 1 1 1 0 0 0
 2| 1 1 1 0 0 0 0 0 0
 3| 0 1 1 0 1 1 0 0 0
 4| 0 1 0 0 1 1 0 0 0
 5| 0 1 0 1 1 1 0 0 0
 6| 0 1 0 0 1 1 0 0 0
 7| 0 0 0 0 0 0 1 1 0
 8| 0 0 0 0 0 0 1 1 0
 9| 0 0 1 0 0 1 0 0 1

No. of segments: 10

Data segment duration: 10.240 s

dt : 0.010 s

Total duration (zero-padded): 20.480s (2048 pts)

Ratio of data length to total length (zero-padded): 0.500

(Power reduction is corrected based on this value)

Frequency interval:0.488E-01 Hz

Nyquist frequency : 50.0 Hz

Use data window [Hanning window with taper rate: 0.500 (512 pts)]

Type of tapering window : Hanning

kappa_b : 1.8

Ratio of tapered power to raw power: 0.37

(Power reduction is corrected based on this value)

Overlapping ratio of adjacent segments: 0.50

Use spectral window [Parzen window with band width: 0.30000 Hz (Total 7 pts; 3.1 pts effective)]

Resulting degree of freedom : 32.5

Equivalent number of segments: 16.3

(the effects of cos taper & zero-padding considered)

OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/R10_R10.d

OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/R10_R0r.d

OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/R10_R1r.d

OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/R10_T10.d

OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/R10_T0r.d

OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/R0r_R10.d

OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/R0r_R0r.d

OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/R0r_R1r.d

```

OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/R1r_R0r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/R1r_R1r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/R1r_T0r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/R1r_T1r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/T10_R0r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/T10_T0r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/T10_T1r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/T0r_R0r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/T0r_T10.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/T0r_T0r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/T0r_T1r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/T1r_R0r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/T1r_T0r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/T1r_T1r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/Z00_Z00.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/Z00_Z0r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/Z0r_Z00.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/Z0r_Z0r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/Z1r_R1r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/Z1r_T1r.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/Z1r_Z1r.d
<ESTSPEC>
NOICE:ldrimag= 0 read only columns 1 and 2
No other columns are read
OUTPUT DIR: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1
No. of Seismograms: 3
DATAFILE 1) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/wavud.d
DATAFILE 2) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/wavew.d
DATAFILE 3) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/wavns.d

Cross-spectral density calculations (1:yes; 2:no)
| 1 2 3
-----
1| 1 0 0
2| 0 1 0
3| 0 0 1

No. of segments: 10
Data segment duration: 10.240 s
dt : 0.010 s
Total duration (zero-padded): 20.480s ( 2048 pts)
Ratio of data length to total length (zero-padded): 0.500
(Power reduction is corrected based on this value)
Frequency interval:0.488E-01 Hz
Nyquist frequency : 50.0 Hz
Use data window [Hanning window with taper rate: 0.500 ( 512 pts)]
Type of tapering window : Hanning
kappa_b : 1.8
Ratio of tapered power to raw power: 0.37
(Power reduction is corrected based on this value)
Overlapping ratio of adjacent segments: 0.50
Use spectral window [Parzen window with band width: 0.30000 Hz (Total 7 pts; 3.1 pts effective)]
Resulting degree of freedom : 32.5
Equivalent number of segments: 16.3
(the effects of cos taper & zero-padding considered)
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/wavud_wavud.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/wavew_wavew.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/wavns_wavns.d
<ESTSPEC>
NOICE:ldrimag= 0 read only columns 1 and 2
No other columns are read
OUTPUT DIR: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1
No. of Seismograms: 18
DATAFILE 1) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD1u.d
DATAFILE 2) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD2u.d
DATAFILE 3) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD3u.d
DATAFILE 4) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD4u.d
DATAFILE 5) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD5u.d
DATAFILE 6) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD6u.d
DATAFILE 7) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD1n.d
DATAFILE 8) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD2n.d
DATAFILE 9) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD3n.d
DATAFILE 10) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD4n.d
DATAFILE 11) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD5n.d
DATAFILE 12) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD6n.d
DATAFILE 13) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD1e.d
DATAFILE 14) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD2e.d
DATAFILE 15) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD3e.d
DATAFILE 16) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD4e.d
DATAFILE 17) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD5e.d
DATAFILE 18) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/cpwav/SD6e.d

Cross-spectral density calculations (1:yes; 2:no)
| 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

```

```

-----
1| 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
2| 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
3| 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
4| 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
5| 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
6| 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
7| 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
8| 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
9| 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10| 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
11| 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
12| 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
13| 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0
14| 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
15| 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
16| 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
17| 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
18| 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1

```

```

No. of segments: 10
Data segment duration: 10.240 s
dt : 0.010 s
Total duration (zero-padded): 20.480s ( 2048 pts)
Ratio of data length to total length (zero-padded): 0.500
(Power reduction is corrected based on this value)
Frequency interval: 0.488E-01 Hz
Nyquist frequency: 50.0 Hz
Use data window [Hanning window with taper rate: 0.500 ( 512 pts)]
Type of tapering window : Hanning
kappa_b : 1.8
Ratio of tapered power to raw power: 0.37
(Power reduction is corrected based on this value)
Overlapping ratio of adjacent segments: 0.50
Use spectral window [Parzen window with band width: 0.30000 Hz (Total 7 pts; 3.1 pts effective)]
Resulting degree of freedom : 32.5
Equivalent number of segments: 16.3
(the effects of cos taper & zero-padding considered)
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD1u_SD1u.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD2u_SD2u.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD3u_SD3u.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD4u_SD4u.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD5u_SD5u.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD6u_SD6u.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD1n_SD1n.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD2n_SD2n.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD3n_SD3n.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD4n_SD4n.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD5n_SD5n.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD6n_SD6n.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD1e_SD1e.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD2e_SD2e.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD3e_SD3e.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD4e_SD4e.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD5e_SD5e.d
OUTPUT (CSD): demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/SD6e_SD6e.d
<SPECRATIO>
OUTPUT (for CCA) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/spr_cca.d
OUTPUT (for SPAC) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/spr_spac.d
OUTPUT (for H0) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/spr_h0.d
OUTPUT (for MSC) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/coh2.d
Array radius: 0.018000 [km][from demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/Z0r.d.log]
OUTPUT (for NSR_Z) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/nsr.d
OUTPUT (for signal power) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/pow_signal.d
OUTPUT (for noise power) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/pow_noise.d
OUTPUT (for H1) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/spr_h1.d
OUTPUT (for V) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/spr_v.d
<SPECRATIO for horizontal components>
OUTPUT (for CCA-L) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/sprh_cca_minus_L.d
OUTPUT (for CCA-R) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/sprh_cca_minus_R.d
OUTPUT (for R/V) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/AmpRV_R.d
OUTPUT (for SPAC-L) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/sprh_spac_minus_L.d
OUTPUT (for SPAC+L) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/sprh_spac_plus_L.d
OUTPUT (for SPAC-R) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/sprh_spac_minus_R.d
OUTPUT (for SPAC+R) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/sprh_spac_plus_R.d
OUTPUT (for R/(R+L)) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/powratio_R2L.d
OUTPUT (for NSR_H) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/nsr_h.d
<SPECRATIO HV>
OUTPUT (for HV spectral ratio) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/spr_hv.d
<SPEC2PV>
Array radius: 0.018000 [km][from demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/Z0r.d.log]
OUTPUT (for CCA) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/vel_cca.d
OUTPUT (for SPAC) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/vel_spac.d
OUTPUT (for H0) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/vel_h0.d

```

```

OUTPUT (for H1) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/vel_h1.d
OUTPUT (for V) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/vel_v.d
OUTPUT (for nc-CCA) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/vel_cca.lwapx.d
OUTPUT (for NSR limit by CCA) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/nsrlim_cca.d
OUTPUT (for NSR limit by nc-CCA) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/nsrlim_cca.lwapx.d
<SPEC2PV for horizontal components>
Array radius: 0.018000 [km][from demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/R0r.d.log]
OUTPUT (for CCA-L) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/velh_cca_minus_L.d
OUTPUT (for CCA-R) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/velh_cca_minus_R.d
OUTPUT (for SPAC-L) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/velh_spac_minus_L.d
OUTPUT (for SPAC+L) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/velh_spac_plus_L.d
OUTPUT (for SPAC-R) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/velh_spac_minus_R.d
OUTPUT (for SPAC+R) demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/1/velh_spac_plus_R.d

### Step 2 (Total 5) ###

. . . (省略) . . .

Averaging over 5 segment clusters...
For the sake of robustness, the maximum and minimum values (plus non-numbers (ex. NaN)) are eliminated from the averaging process
when the number of segment clusters exceeds NROBUST4AVERAGE_INC (defined in the file PARAM.h). Read the file
demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/ave.info for details.

OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/vel_cca.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/vel_cca.lwapx.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/vel_h0.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/vel_h1.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/vel_spac.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/vel_v.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/velh_cca_minus_L.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/velh_cca_minus_R.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/velh_spac_minus_L.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/velh_spac_minus_R.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/velh_spac_plus_L.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/velh_spac_plus_R.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/AmpRV_R.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/powratio_R2L.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/nsr.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/nsr_h.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/nsrlim_cca.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/nsrlim_cca.lwapx.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/spr_hv.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD1e_SD1e.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD1n_SD1n.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD1u_SD1u.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD2e_SD2e.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD2n_SD2n.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD2u_SD2u.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD3e_SD3e.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD3n_SD3n.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD3u_SD3u.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD4e_SD4e.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD4n_SD4n.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD4u_SD4u.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD5e_SD5e.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD5n_SD5n.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD5u_SD5u.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD6e_SD6e.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD6n_SD6n.d
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/ave/SD6u_SD6u.d

<mkgnp1t.sh>
NOTE: This script uses a program gnp1t to plot the analysis results (all analysis results are contained in
demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT). You can manually plot the same figures later, using a gnp1t macro, plot.gnp1t,
which was created by this script and is found in demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT. To do this, type cd
demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT & gnp1t plot.gnp1t
OUTPUT: demo/synth_SN100_18mGamR0.8RV0.1N6/RESULT/plot.gnp1t
/Users/cho/Desktop/BIDO_openfile_report_project/work/BIDO2.02g

<mkdelete.sh>
/Users/cho/Desktop/BIDO_openfile_report_project/work/BIDO2.02g
All temporary files preserved.

```