

KAGRA Detector Characterization:

狭帯域雑音の特徴抽出手法の開発

講演番号：20aSB-12

2014/09/20 日本物理学会2014秋季大会@佐賀大学

浅野光洋、端山和大、神田展行

阪市大理



目次

- **導入**

- 狭帯域雑音とは
- 動機

- **狭帯域雑音の除去**

- 手法の紹介
- 結果

- **検出への影響**

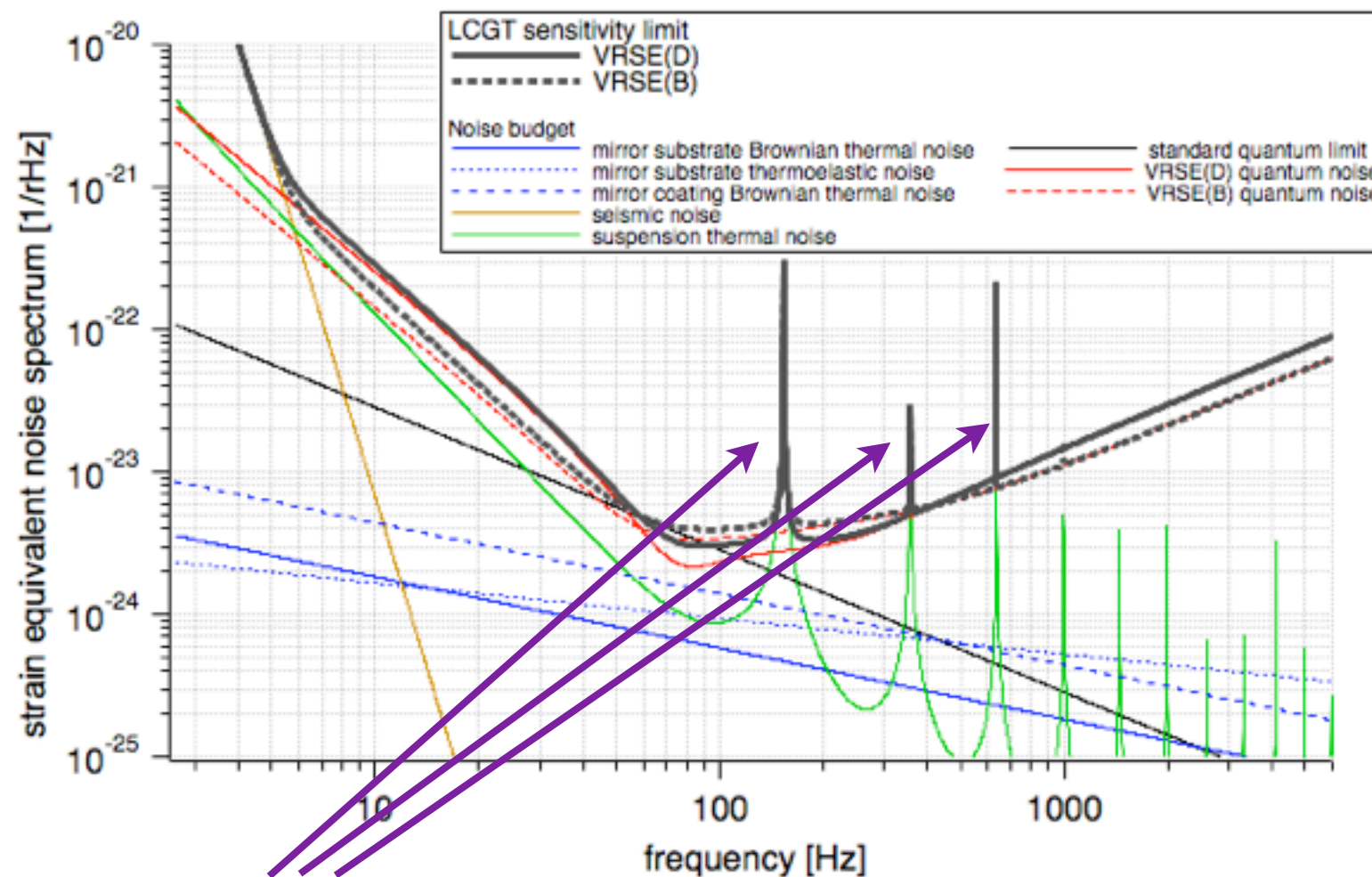
- バースト性重力波解析への影響

- **まとめと今後の課題**

動機

◆狭帯域雑音とは

地上重力波望遠鏡が持つ雑音



地上重力波検出器が持ちうる狭帯域雑音(ラインとも呼ばれる)

- > 電源の雑音や懸架系のワイヤーの弾性振動が原因
- > KAGRAは鏡を4本吊りなので問題となる

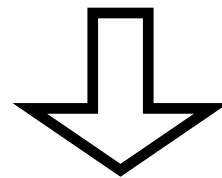
動機

◆KAGRAの問題

- KAGRAの場合、最も感度のいい周波数帯域(100~1kHz)に狭帯域雑音が存在する

◆狭帯域雑音による問題

- 重力波信号と狭帯域雑音が周波数的に重なると検出が困難



- 重力波信号を残しつつ狭帯域雑音を除去することが重要
- どのような狭帯域雑音が除去できるのか明らかにする
- 狭帯域雑音除去による検出への恩恵を明らかにする

狭帯域雑音の除去法

◆LIGOの過去の観測

狭帯域雑音が信号に影響するとき、信号も一緒に抑制していた

◆今回使用する狭帯域雑音の除去法

Soumya D Mohanty (2002) [stacks.iop.org/ CQG/19/1513](https://arxiv.org/abs/2002.03815)

MBLT(Median Based Line Tracker)

この手法を土台として狭帯域雑音の除去をおこなう

< 特徴 >

- transientな信号への影響が少ない
- 狭帯域雑音の変動を追うことが可能
- 時系列上でおこなう
- 狭帯域雑音の中心周波数とQ値に依存

MBLTアルゴリズム

狭帯域雑音の中心周波数とQ値は既知としてMBLTを通す

step1

元の時系列を x とする
ヘテロダインをとって
LFPを通し
実部虚部を得る

$$X + iY = \mathcal{L}(x * Z)$$
$$Z = \exp(-2\pi i f_c t)$$

$\mathcal{L}$: cutoff frequency = f_c のLPF
(LPF : ローパスフィルタ)

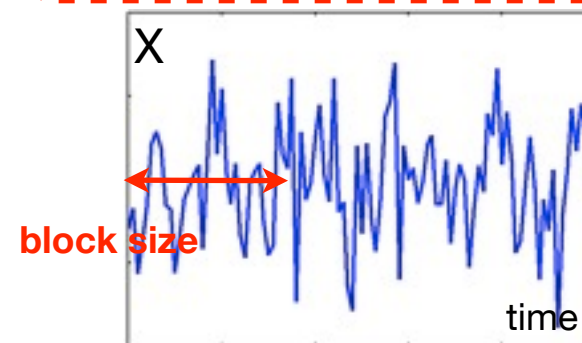
X : 実部
 Y : 虚部

step2

X, Y の median をとる
 $\mathcal{X} = \text{median}(X), \mathcal{Y} = \text{median}(Y)$

median とするときの範囲 : block size

$$\text{blocksize} = \frac{1}{\text{bandwidth}} = \frac{Q}{f_c}$$



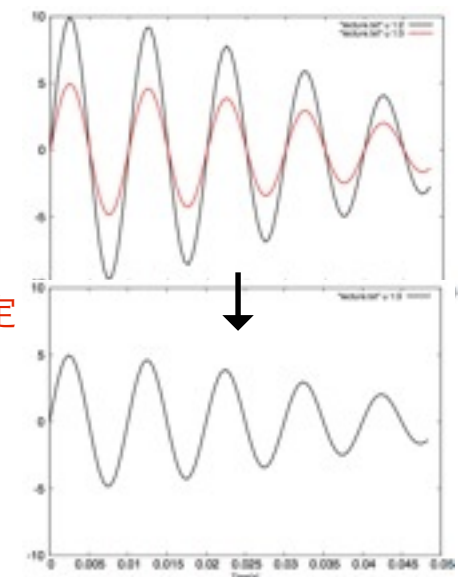
e : 推定した時系列
$$e = \text{Re}((\mathcal{X} + i\mathcal{Y}) * Z^*)$$

step3

$$x - e$$

元の時系列から step2 で
推定した時系列を抜く

単純な例(右図)
黒 : 狭帯域雑音
の時系列
赤 : step2 で推定
した時系列



狭帯域雑音を低減できる

これを繰り返すことで狭帯域雑音を除去する

中心周波数、Q値が重要になる

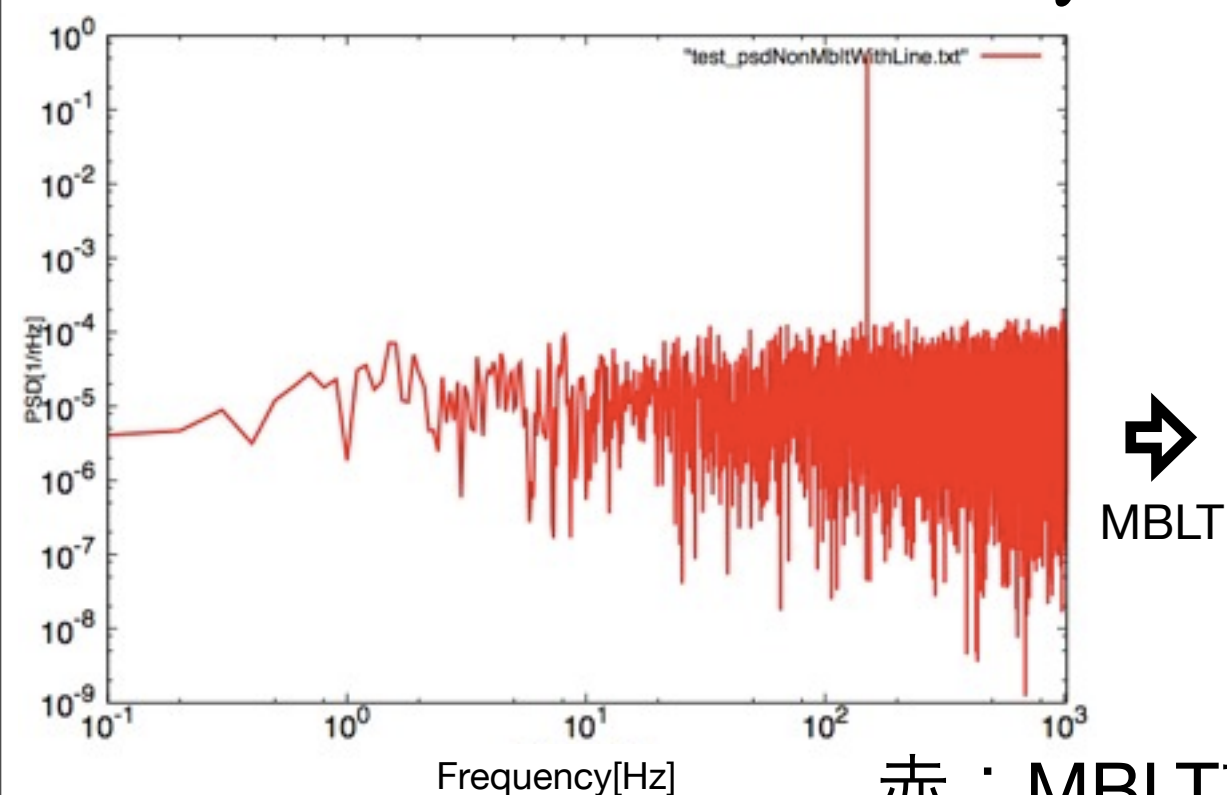
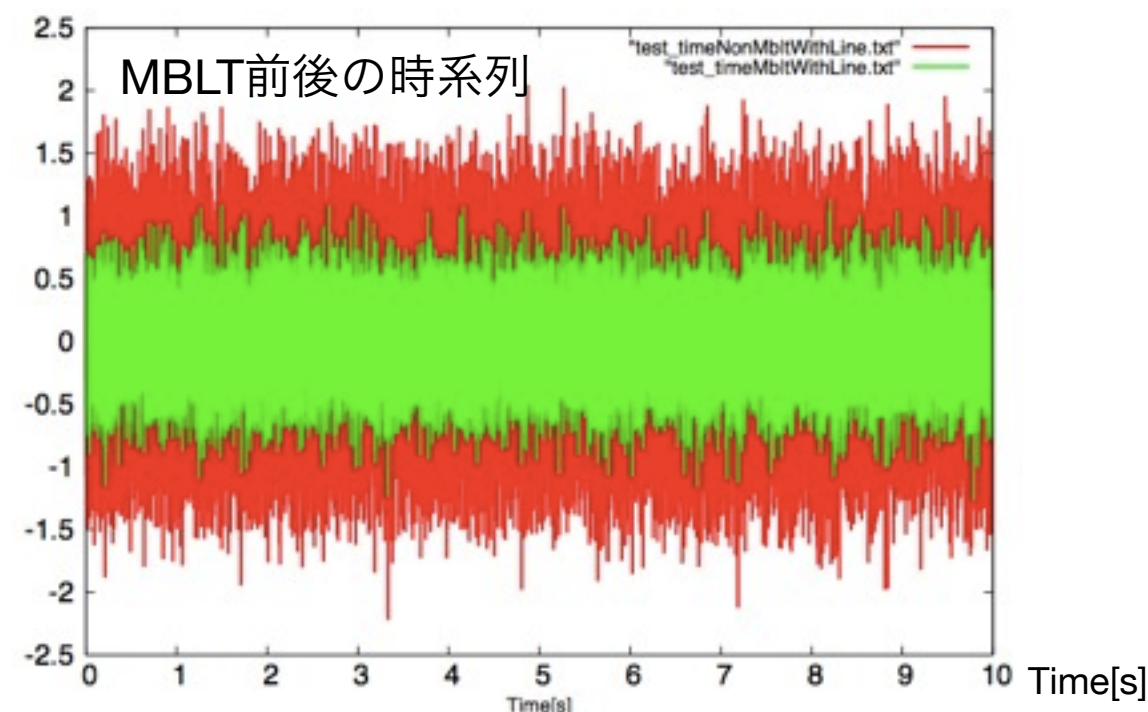
(例 : block size によって median 推定の精度が変わる)

MBLT動作確認

動作確認に用いたデータ

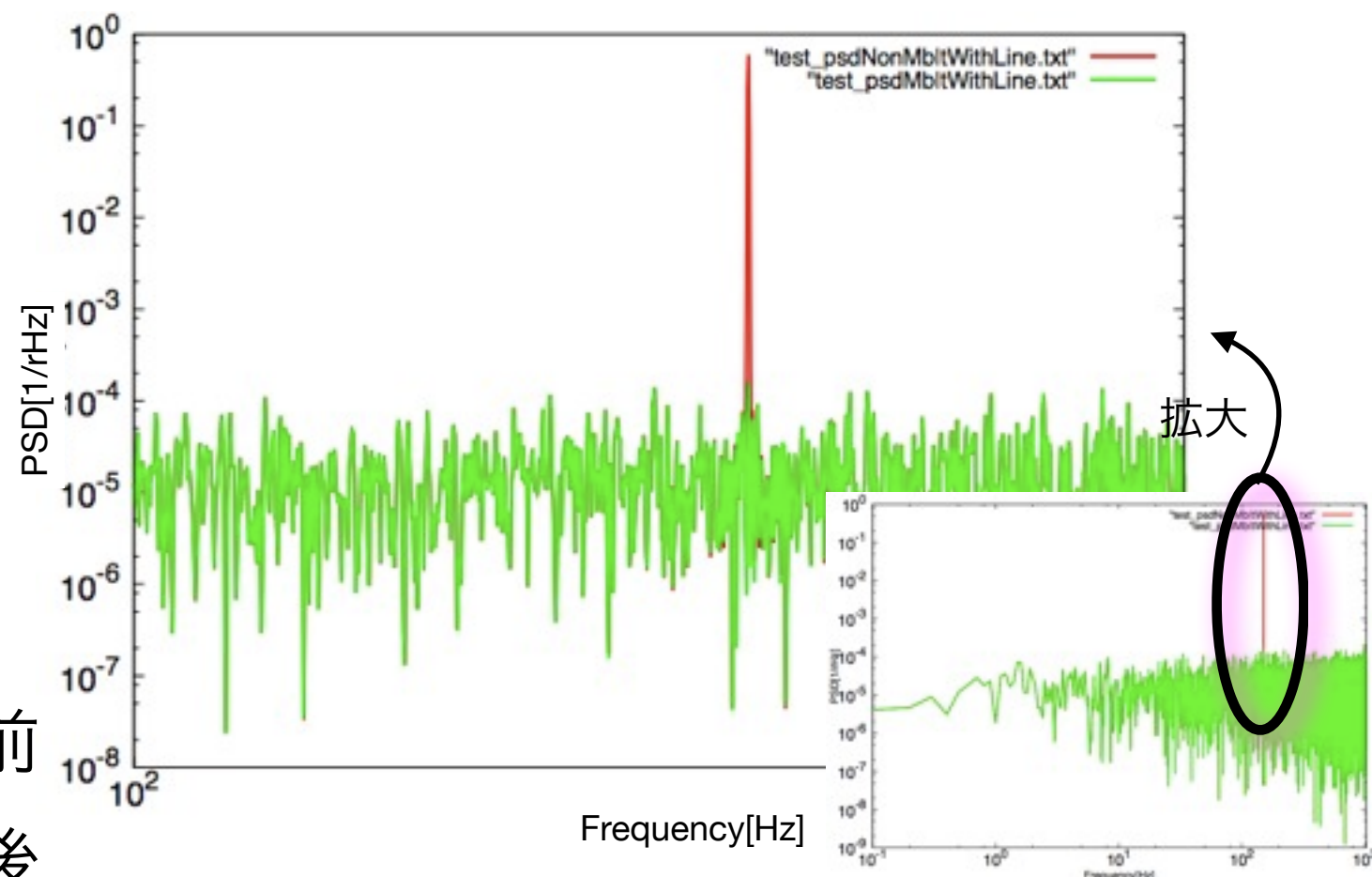
- サンプルングレート = 2048 [Hz]、
時間 = 10 [s] のガウス雑音
- 中心周波数=150[Hz]、Q値=10⁶の
dumped sin波

$$A \sin(2\pi f_0 t) \exp\left[-\frac{2\pi f_0 t}{2Q}\right]$$



⇒
MBLT

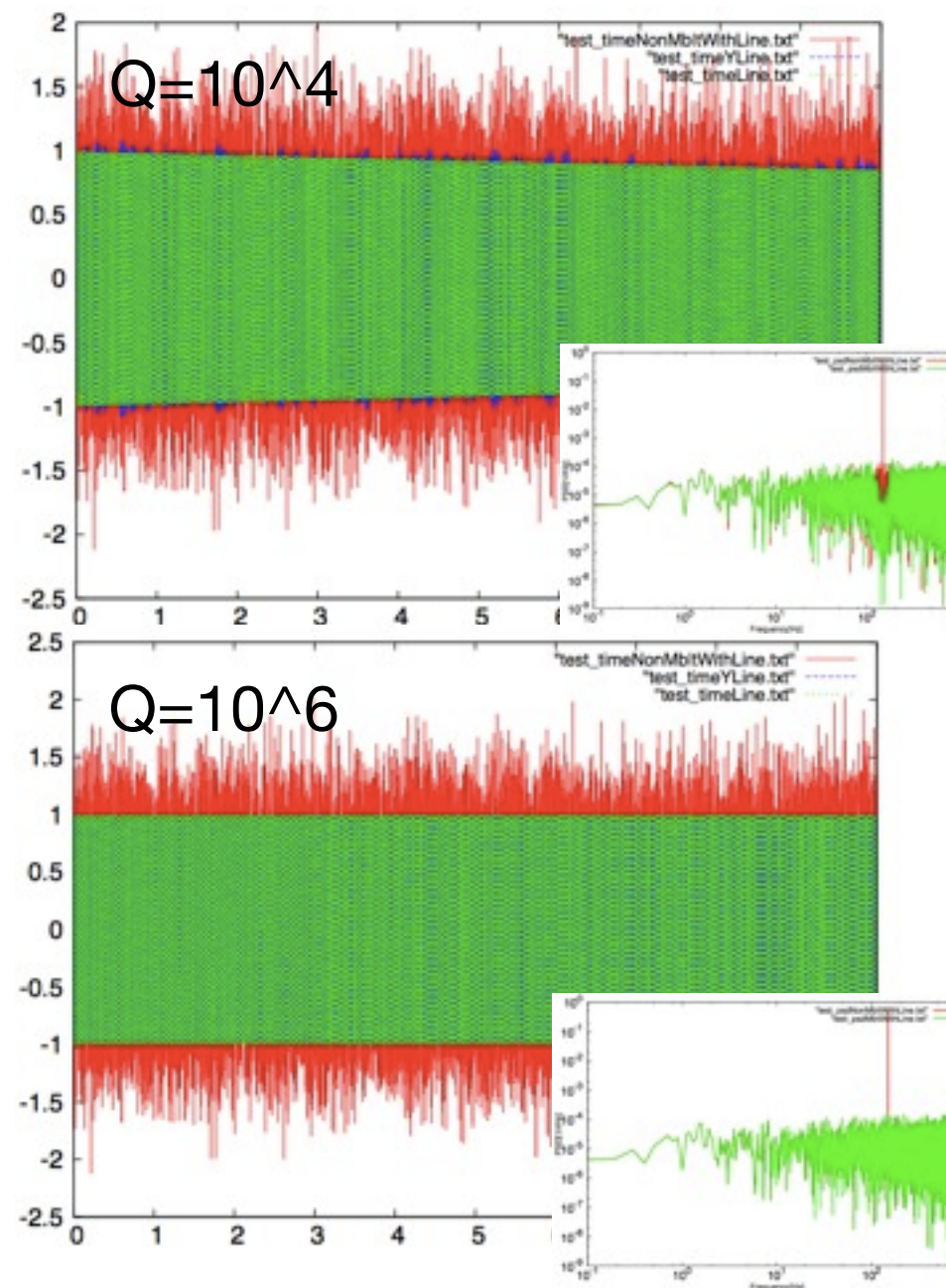
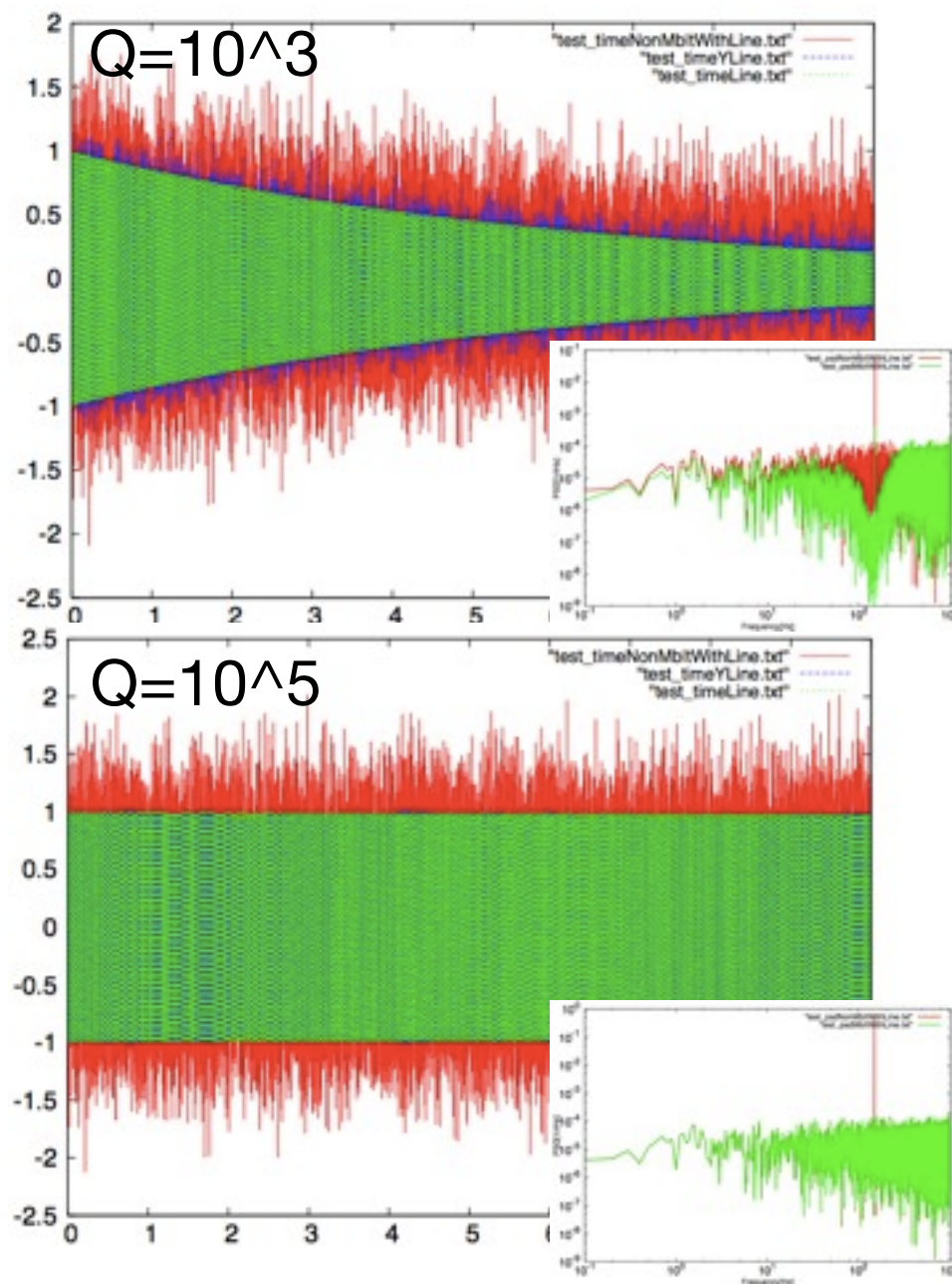
赤：MBLT前
緑：MBLT後



MBLT動作確認

一例として

サンプリングレート=2048[Hz],時間=10[s]のガウス雑音に
中心周波数=150[Hz]、様々なQ値のdumped sin波を注入



時系列

赤：MBLT前

緑：狭帯域雑音

青：推定時系列

スペクトル

赤：MBLT前

緑：MBLT後

動機

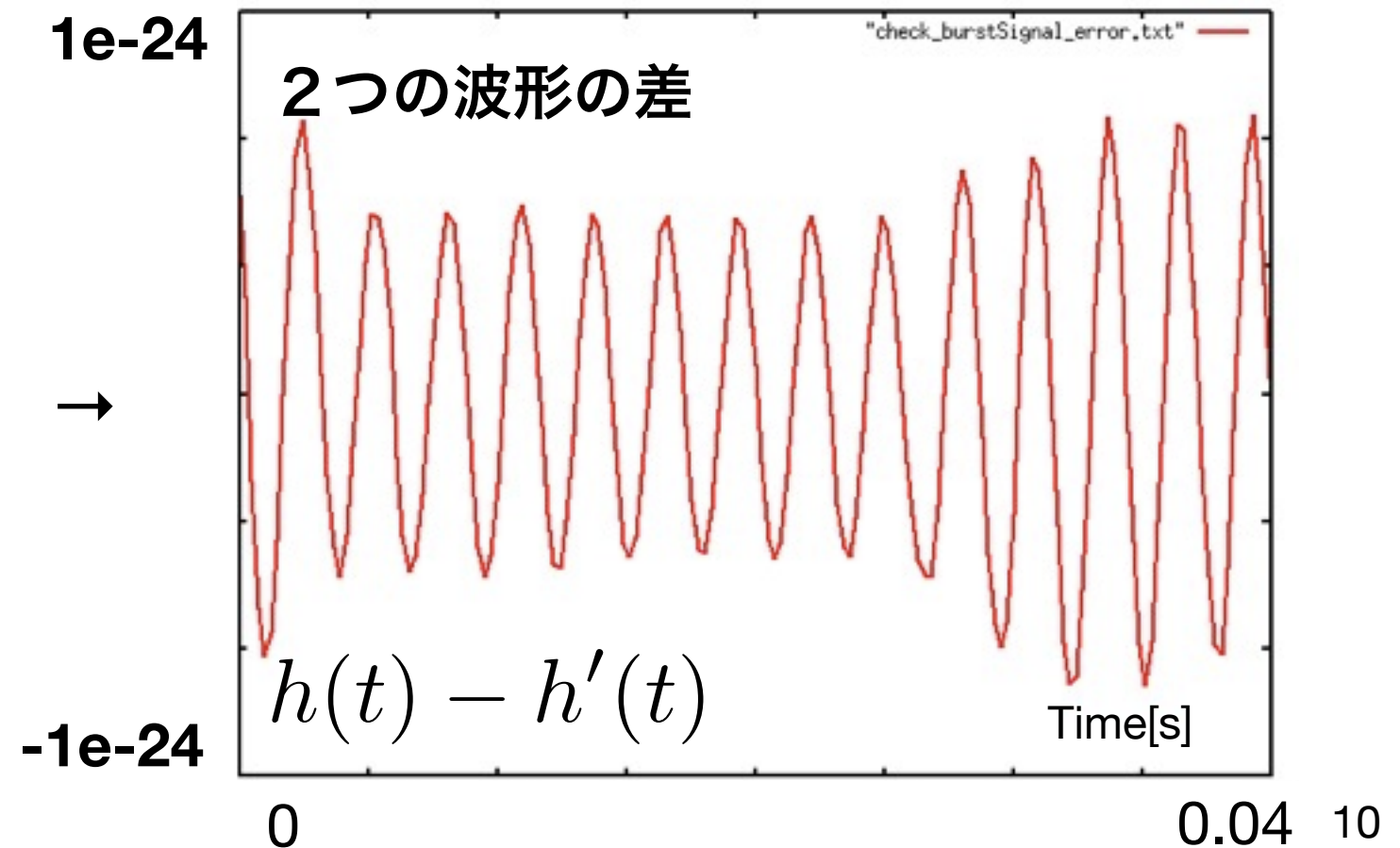
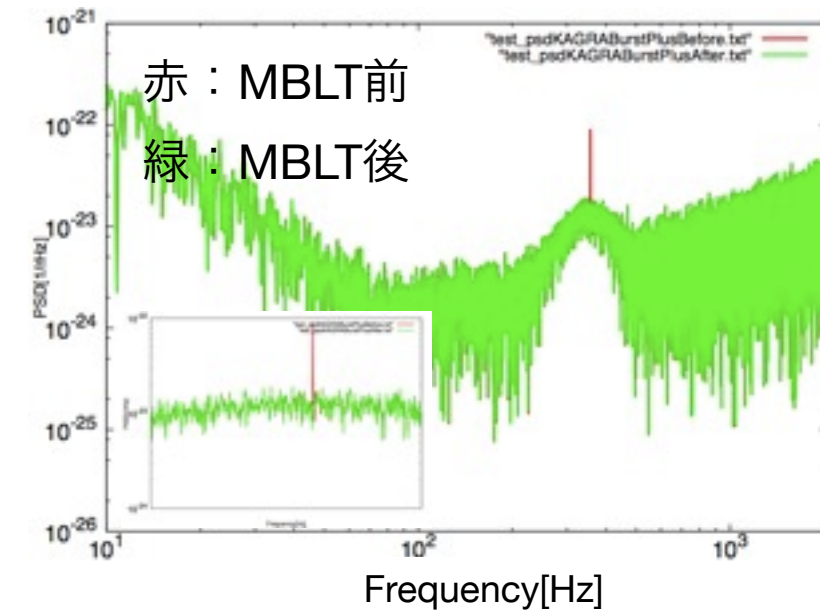
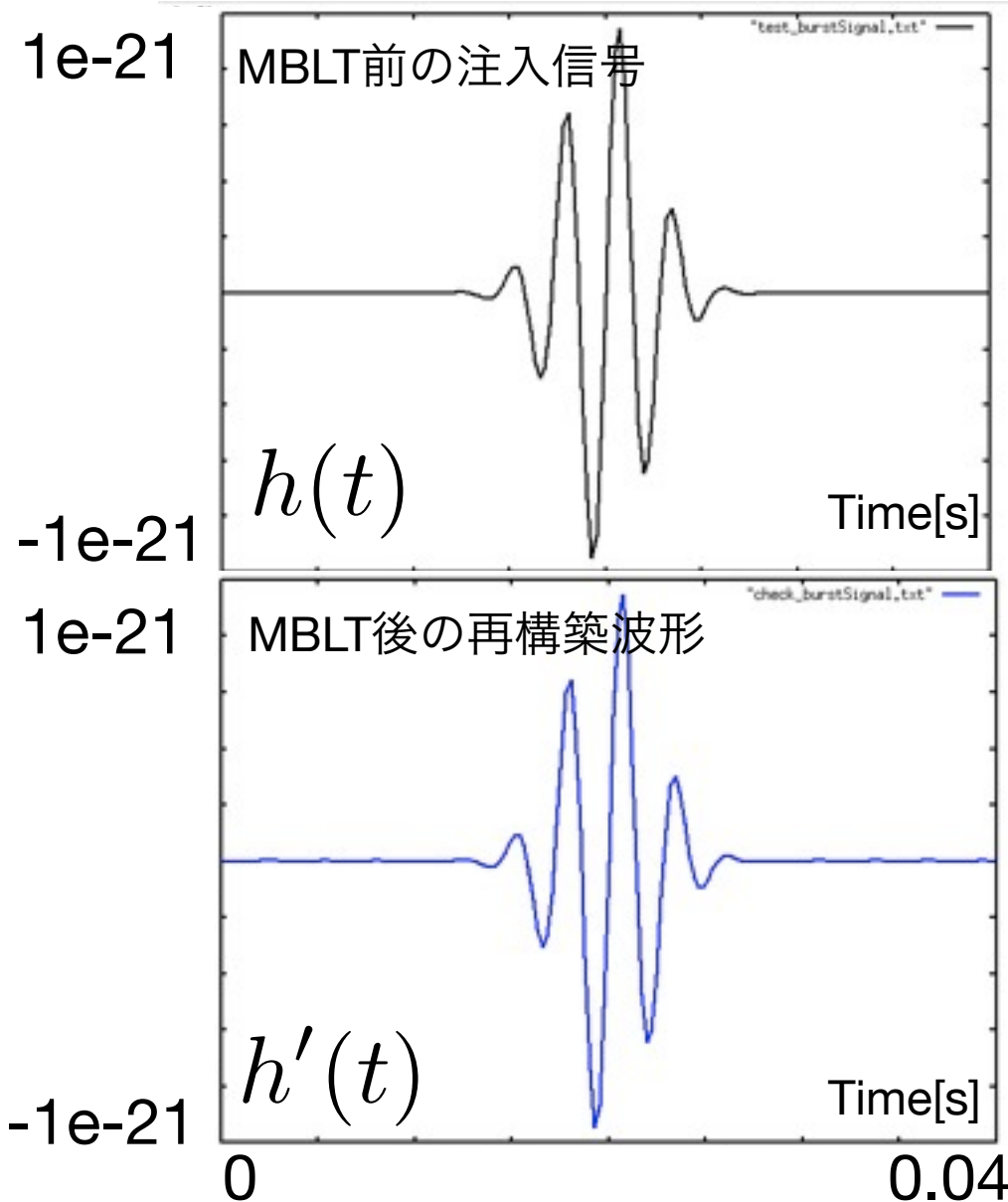
- 重力波信号を残しつつ狭帯域雑音を除去することが重要
- どのような狭帯域雑音が除去できるのか明らかにする
- 狭帯域雑音除去による検出への恩恵を明らかにする

バースト性重力波を残しつつ狭帯域雑音を除去できるか？

burst性重力波の解析への影響

◆KAGRAのシミュレーションデータ

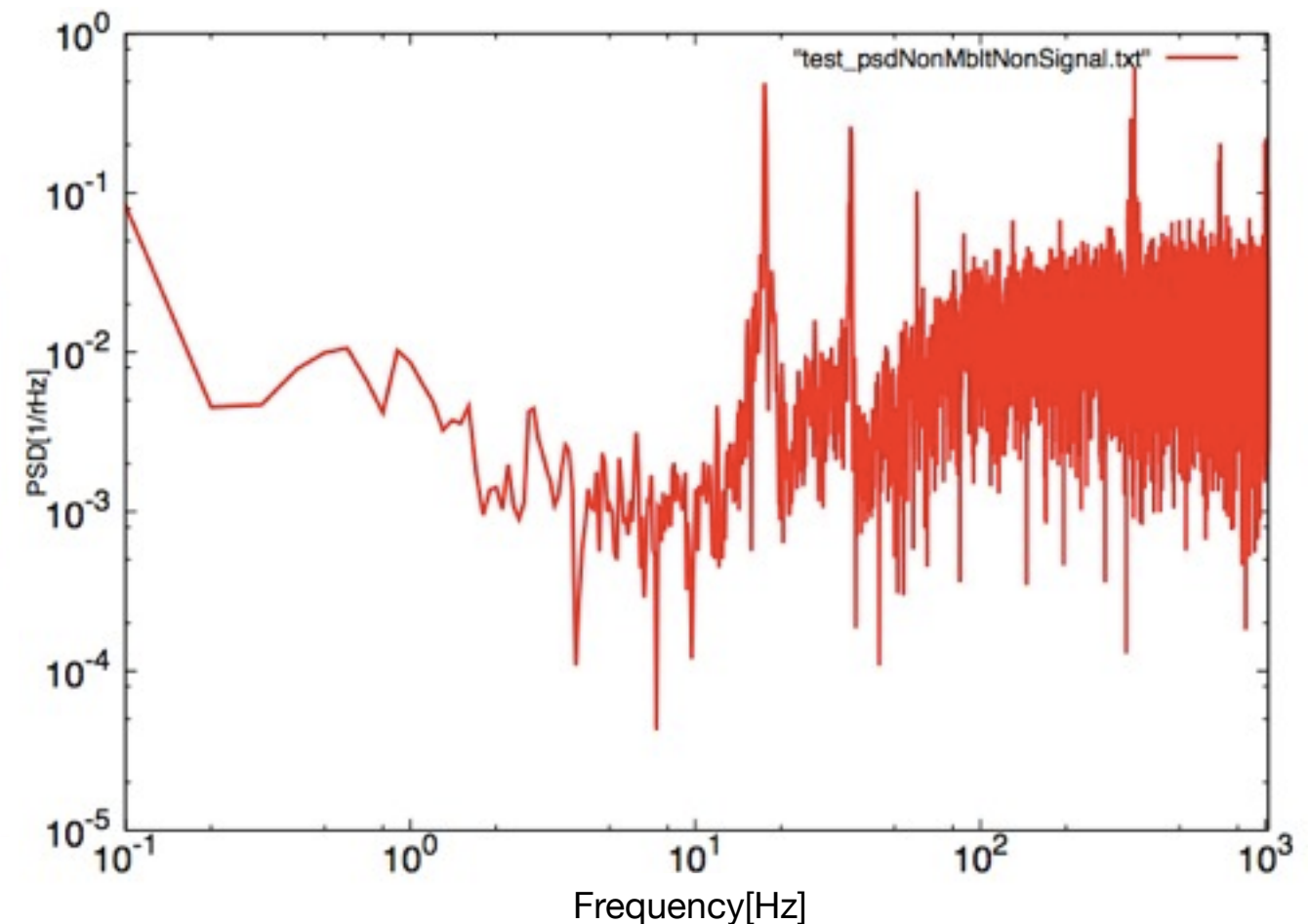
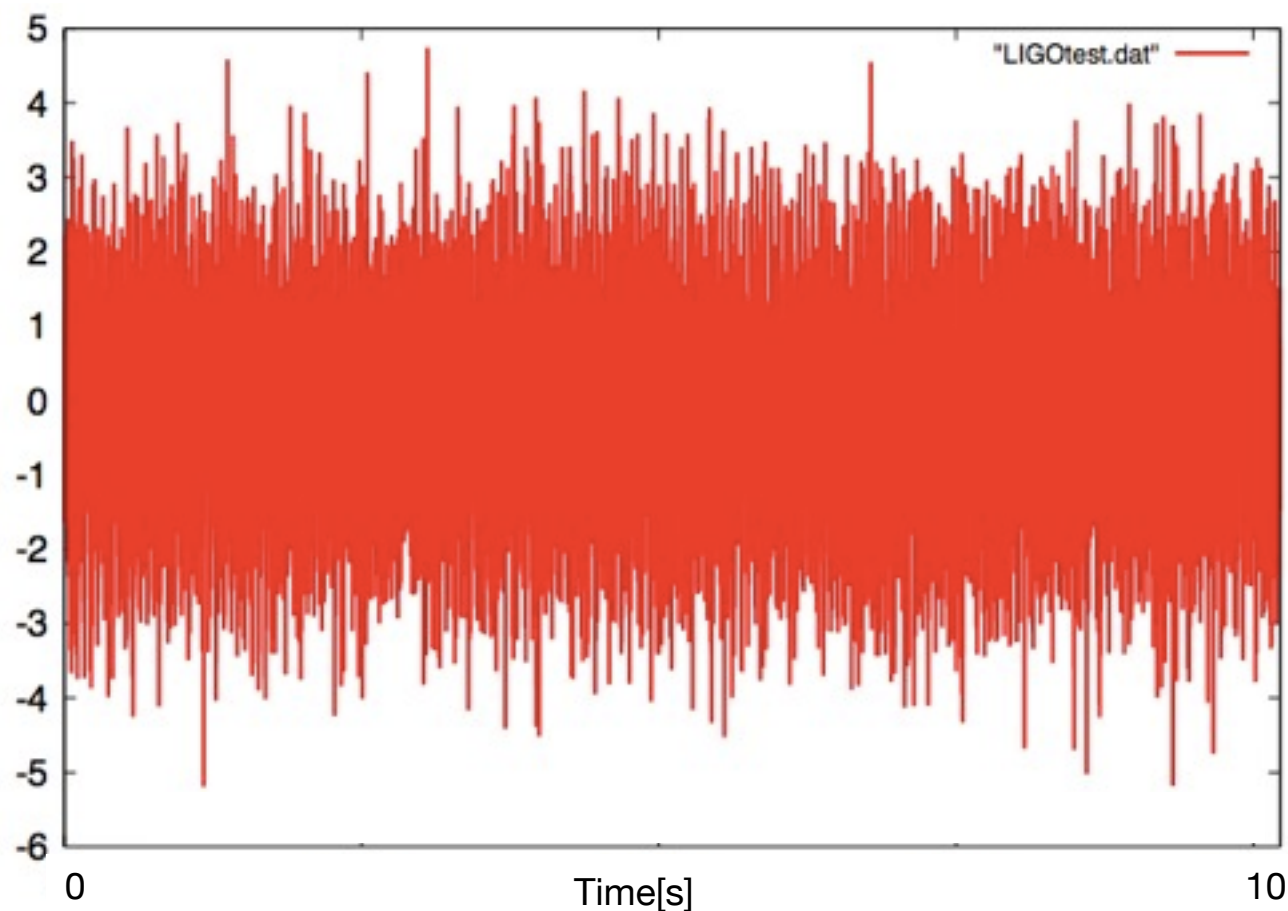
- KAGRAデータに狭帯域雑音と信号を注入しMBLT
- 狭帯域雑音と信号の中心周波数は同じ
- 信号も一緒に除去していかないかの確認



実データに対して

◆LIGOデータ (LIGO S5(H1) data) $T=10[s], fs=2048[Hz]$

LIGOデータを狭帯域雑音以外コンディショニングしたもの
時系列
スペクトル



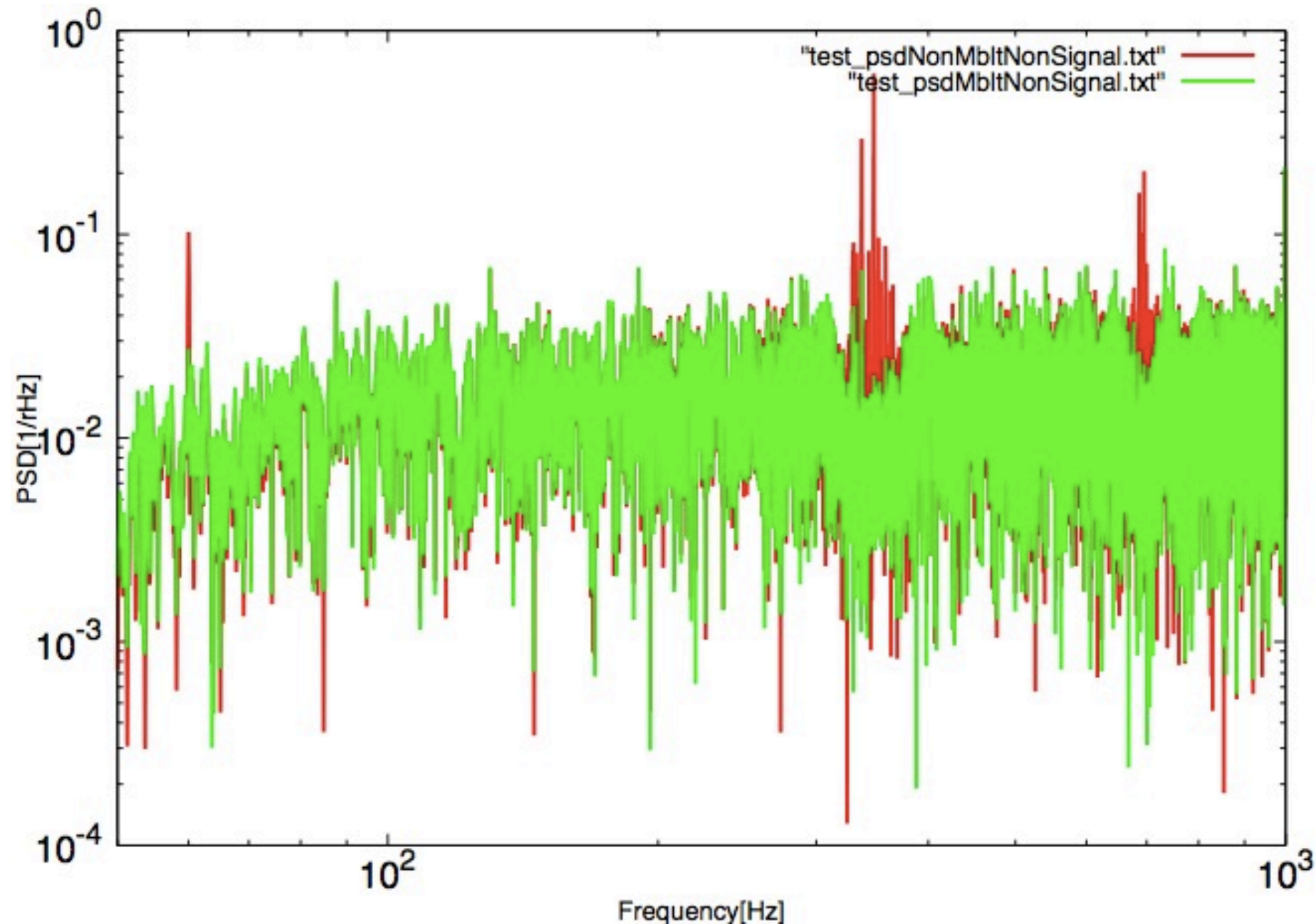
17,35,60,337,345,695Hzに狭帯域雑音が存在

Acknowledgement

This research has made use of data, software and/or web tools obtained from the LIGO Open Science Center (<https://losc.ligo.org>), a service of LIGO Laboratory and the LIGO Scientific Collaboration. LIGO is funded by the United States National Science Foundation.
S5: <http://dx.doi.org/10.7935/K5WD3XHR>

実データに対して

◆LIGOデータに対して (LIGO S5(H1) data)



実データに対しても動作し、ある程度の狭帯域雑音を除去、低減できそう

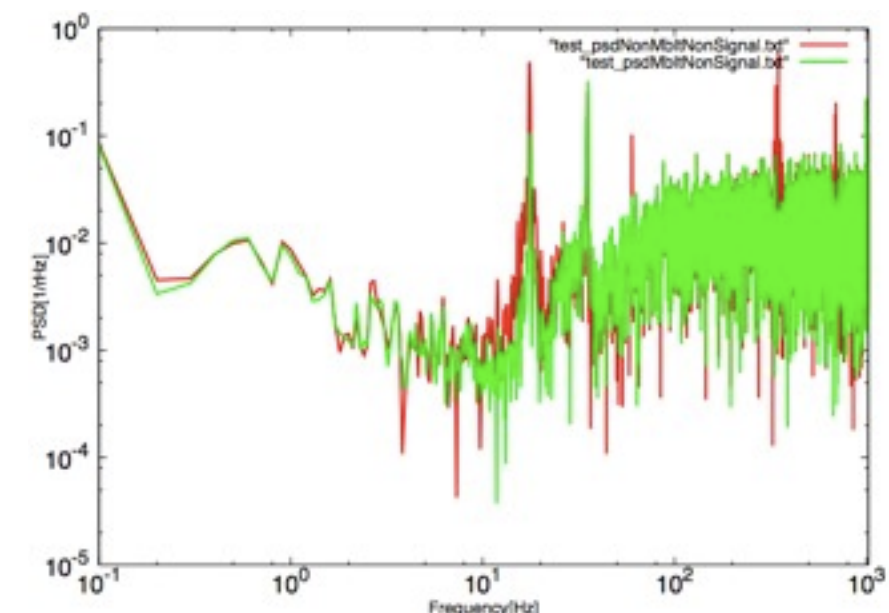
まとめと今後の課題

まとめ

- KAGRA Detcharグループとして、MBLTを実装した
- 狭帯域雑音除去においてHigh Qは有利であることがわかった
- バースト信号を削ることなく狭帯域雑音を除去できそう
- 実データでもうまくいきそう

今後の課題

- 近い周波数に複数の狭帯域雑音がある場合の対策
 - > KAGRAは4本吊りなので問題となる
- 除去できない狭帯域雑音を減らしていく



END

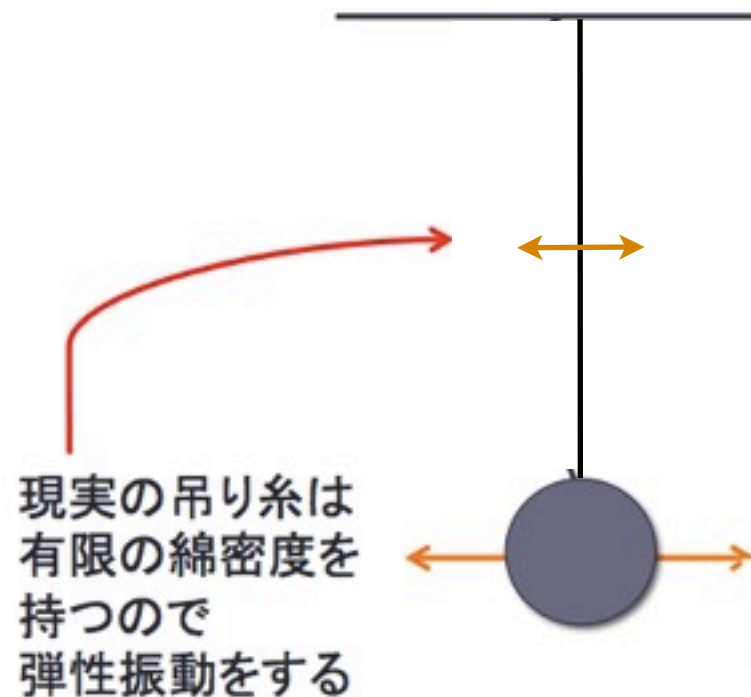
Back Ups

狭帯域雑音源

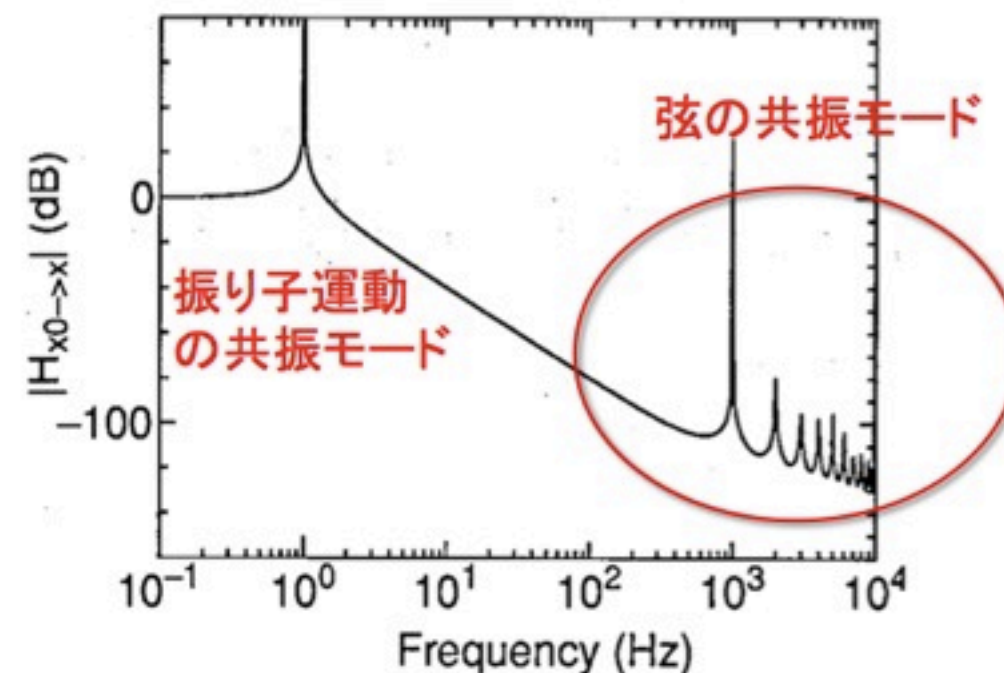
◆熱によるワイヤーの弾性振動

- >重力波望遠鏡では鏡をワイヤーで吊るす
- >共振モードによって励起されるようなノイズ(ライン)が存在する
- >KAGRAは4本のワイヤーで鏡を吊るすので問題となる

・例：吊り糸の弾性振動



振り子の支点の振動に対する伝達関数



$$H_{x0 \rightarrow x}(\omega) = \frac{1}{\cos(\omega l/v) - (v\omega/g)\sin(\omega l/v)}$$

橋詰さんのスライドを参照

Line removal

◆今までの狭帯域雑音の除去法

notch filter :

ラインが存在する周波数をがっぽりけずってしまうので信号をうまいこと残すことができない

Kalman filter :

物理量が必要になってくるため難しい -> ラインの変動を追うことができない

A standard method for removing unwanted line noise is the use of time domain *notch filters* [1] which have (ideally) nulls in their transfer functions at the line frequencies. The disadvantage is that the signal-to-noise ratio of a transient will also be reduced. The reduction depends on the bandwidth of the transient and also the location of the notches relative to the shape of the transient spectrum.

Other line removal methods, such as the Kalman filter [2], CLRT [3] and cross-channel regression [4, 5], first *estimate* the time series of the line to be removed and then subtract it from the data. The estimation is based on a *model* of the line evolution and, hence, only applies to a subset of lines. Thus, [2] applies to *violin resonances* whereas [3–5] work for the power line and its harmonics. Besides this, these models do not explicitly take the effect of transients into account which implies that these methods will in turn affect transients.

表記

2. The median based line tracker

We fix some notations first. Given a time series $\bar{a}$, let $a(n)$ be its n th sample and given two time series $\bar{a}$ and $\bar{b}$, let $\bar{a}(*)\bar{b}$ be a time series $\bar{c}$ such that $c(n) = a(n)b(n)$.

ラインの中心周波数

Let $\bar{x}$ be the *time series* from which lines have to be removed. Let $F = \{f_m\}$, $m = 1, \dots, M$, be the carrier frequencies of the lines that are to be removed and $B = \{b_m\}$, $m = 1, \dots, M$, be the bandwidths around the carrier frequencies that are allowed to be disturbed (after line removal). In the following, we will assume the sampling frequency of a time series to be 1 Hz without any loss of generality.

ラインのバンド幅

ラインのcarrier frequencyとbandwidthは既知とする

2.1. Algorithm

The algorithm works by successively refining the estimate of each line in F through several stages (say, stages 1 to P). Let the estimate in stage k of a line at frequency f_j be $\bar{e}_j^{(k)}$. To obtain the estimate $\bar{e}_j^{(k)}$, the original time series $\bar{x}$ is first modified by subtracting an auxiliary time series $\bar{s}_j^{(k)}$. Let the modified time series be denoted by $\bar{x}_j^{(k)} = \bar{x} - \bar{s}_j^{(k)}$. We explain below how $\bar{s}_j^{(k)}$ and $\bar{e}_j^{(k)}$ are obtained.

ライン除去前の時系列

f_j をもつラインの時系列

自身以外をさっ引いた時系列

$$\bar{s}_j^{(k)} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^M \bar{e}_m^{(k-1)}$$

$\bar{e}_j^{(k)}$ を求めて、元の時系列からその和を引いてやればいい

MBLT

$\bar{e}_j^{(k)}$ の求め方

- (i) Heterodyne $\bar{x}_j^{(k)}$ at the carrier frequency f_j . This produces two time series, which we denote by $\bar{X}_j^{(k)}$ and $\bar{Y}_j^{(k)}$, that are obtained as follows:

$$\bar{X}_j^{(k)} + i\bar{Y}_j^{(k)} = \mathcal{L} \left(\bar{x}_j^{(k)} (*) \bar{Q}_j \right) \quad \begin{array}{l} \text{自身の周波数のsin,cos波とヘテロダインとって} \\ \text{low pass filterを通す。} \end{array} \quad (3)$$

$$\bar{Q}_j(n) = \exp(-2\pi i f_j n) \quad \text{そのRe,ImをX,Yとする。} \quad (4)$$

where $\mathcal{L}$ denotes a low pass filter with a cut-off frequency of f_j .

- (ii) Apply a *running median* to both quadratures to obtain the time series $\bar{\mathcal{X}}_j^{(k)}$ and $\bar{\mathcal{Y}}_j^{(k)}$. The running median $\bar{\mathcal{V}}$ of a time series $\bar{V}$ is obtained as XとYのmedianをとる

$$\bar{\mathcal{V}}(n) = \text{median}(\{V(r)\}) \quad r = n - m_0, \dots, n + m_0 \quad (5)$$

where m_0 is a fixed number. We call $2m_0$ the *blocksize* for the running median. The blocksize for $\bar{e}_j^{(k)}$ is set to $1/b_j$. median取るときのブロックサイズ

- (iii) The line estimate $\bar{e}_j^{(k)}$ is obtained by modulating a carrier at f_j with the two quadratures $\bar{\mathcal{X}}_j^{(k)}$ and $\bar{\mathcal{Y}}_j^{(k)}$

$$\bar{e}_j^{(k)} = \text{Re} \left(\left(\bar{\mathcal{X}}_j^{(k)} + i\bar{\mathcal{Y}}_j^{(k)} \right) (*) \bar{Q}_j^* \right). \quad \begin{array}{l} \text{この手法で各ラインの時系列データを} \\ \text{求めることができる。} \end{array} \quad (6)$$

The basic idea behind the above algorithm is to estimate a line *after* removing the influence of other strong lines. Removal of other lines is done by subtracting the auxiliary time series $\bar{s}_i^{(k)}$. The successive stages simply refine this process further. The use of a median for estimation instead of a mean makes the estimate more robust against transients as we show later.

最後に、元の時系列から各ラインの時系列を引いてやればOK

Results

3. Results

The results presented here should be treated as preliminary. We have used a short (20 s) stretch of data (the IFO-DMRO channel) from the November 1994 run of the Caltech 40 m prototype interferometer [8]. For these results, $F = \{30.718, 39.6, 41.1, 42.6, 52.2, 58.85, 70.00, 79.5, 109.4, 120.0, 139.6, 180.0, 197.82, 209.385, 210.82, 240.0, 246.0, 263.783, 279.155, 300.0, 349.0, 360.0, 418.76, 420.0, 479.95, 488.55, 499.95, 540.0, 558.38, 571.6, 578.66, 581.075, 582.55, 583.77, 594.183, 595.27, 595.914, 597.8, 599.05, 599.921, 605.5, 660, 720, 780, 840, 900\}$, $b_i \leq 1.0$ Hz except for $f_i = 70.0$ Hz where $b_i = 12.0$ Hz and the number of stages used was three. The data were down sampled to a sampling frequency of 2 kHz because of memory limitations on the machine running this code.

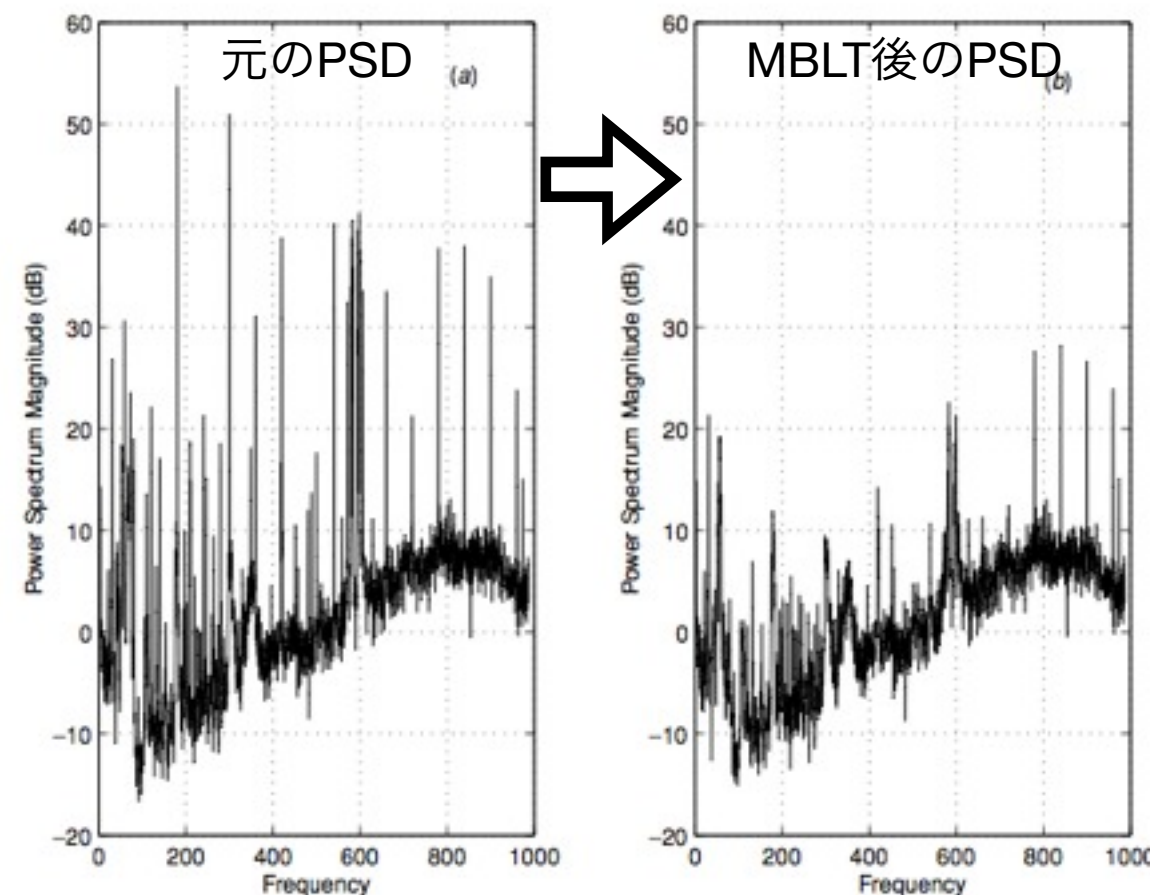


Figure 1. The PSD of (a) the original time series $\tilde{x}$ and (b) the final residual after line removal.

MBLT詳細

◆詳細アルゴリズム

元の時系列は $x(t)$

- ① 元の時系列から自身以外のラインを引く j : 何番目のラインか(1~M) e_j : 各ラインの時系列

$$x_j^{(k)}(t) = x(t) - s_j^{(k)}(t) \quad s_j^{(k)}(t) = \sum_{\substack{m \neq j \\ m=1}}^M e_m^{(k-1)}(t)$$

- ② ①のヘテロダインを取ってLPF(Low Path Filter)を通す $\mathcal{L}$: cutoff frequency = f_j のLPF

$$X_j^{(k)} + iY_j^{(k)} = \mathcal{L}(x_j^{(k)}(t)(*)Q_j(t)) \quad Q_j(t) = \exp(-2\pi i f_j(t))$$

- ③ Re,Imそれぞれmedianを取る **(とる範囲は1/bandwidth)**

$$\mathcal{X}_j^{(k)} = \text{median}(X_j^{(k)}) \quad \mathcal{Y}_j^{(k)} = \text{median}(Y_j^{(k)})$$

- ④ 各ラインの時系列は以下の式で求まる

$$e_j^{(k)}(t) = \text{Re} \left((\mathcal{X}_j^{(k)} + i\mathcal{Y}_j^{(k)}) (*) Q_j^*(t) \right)$$

- ⑤ 最後に元の時系列から各ラインの時系列を引けばOK

- ⑥ ①～⑤をk回繰り返して精度を上げていく

transient 耐性

medianとmeanのtransient耐性の比較

transientな信号に対して

->meanは影響されやすい

->**medianは影響されにくい！**

medianやmeanを取ってから除去するので、
そこにtransientが含まれていたら
一緒に除去されてしまう。

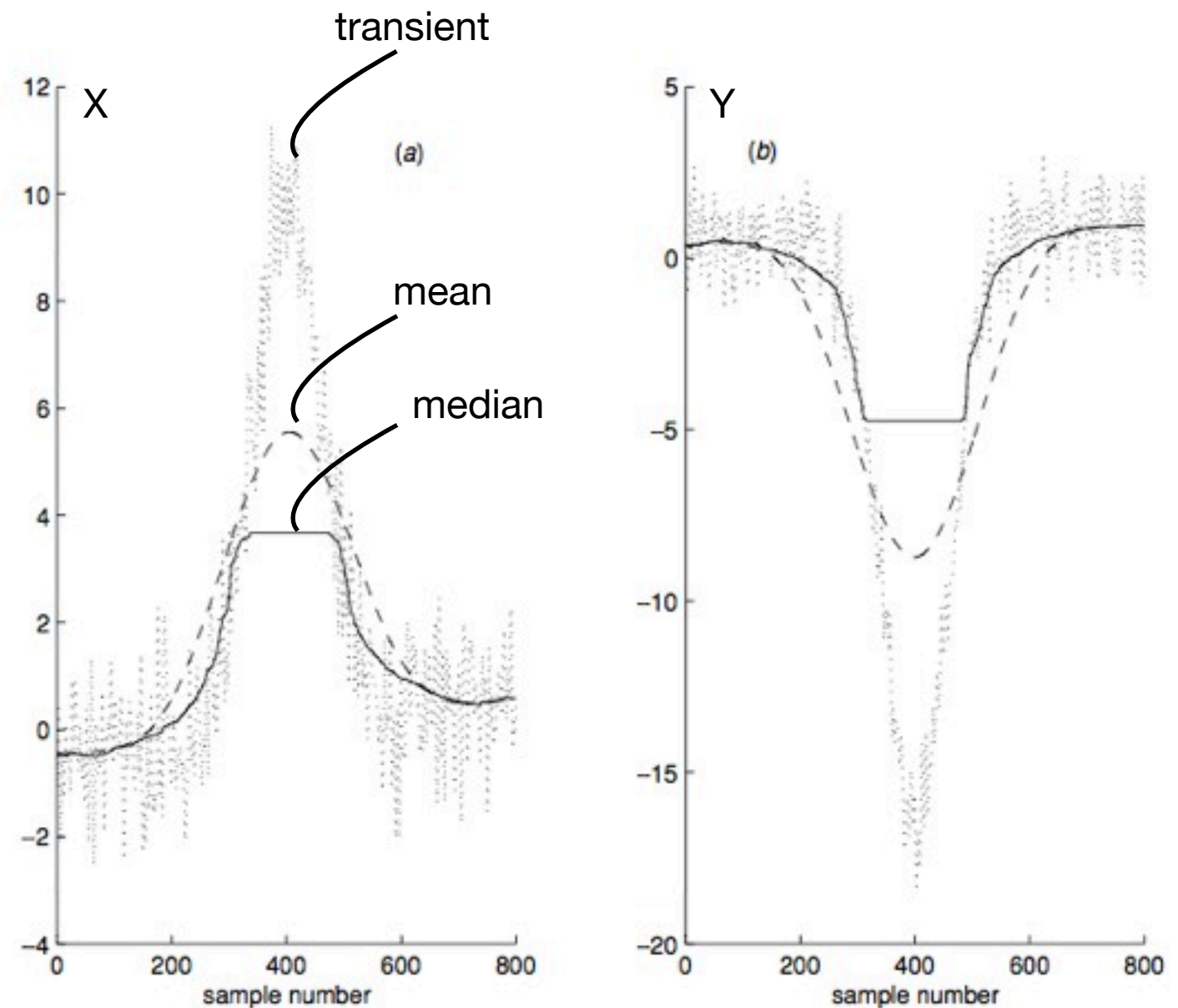


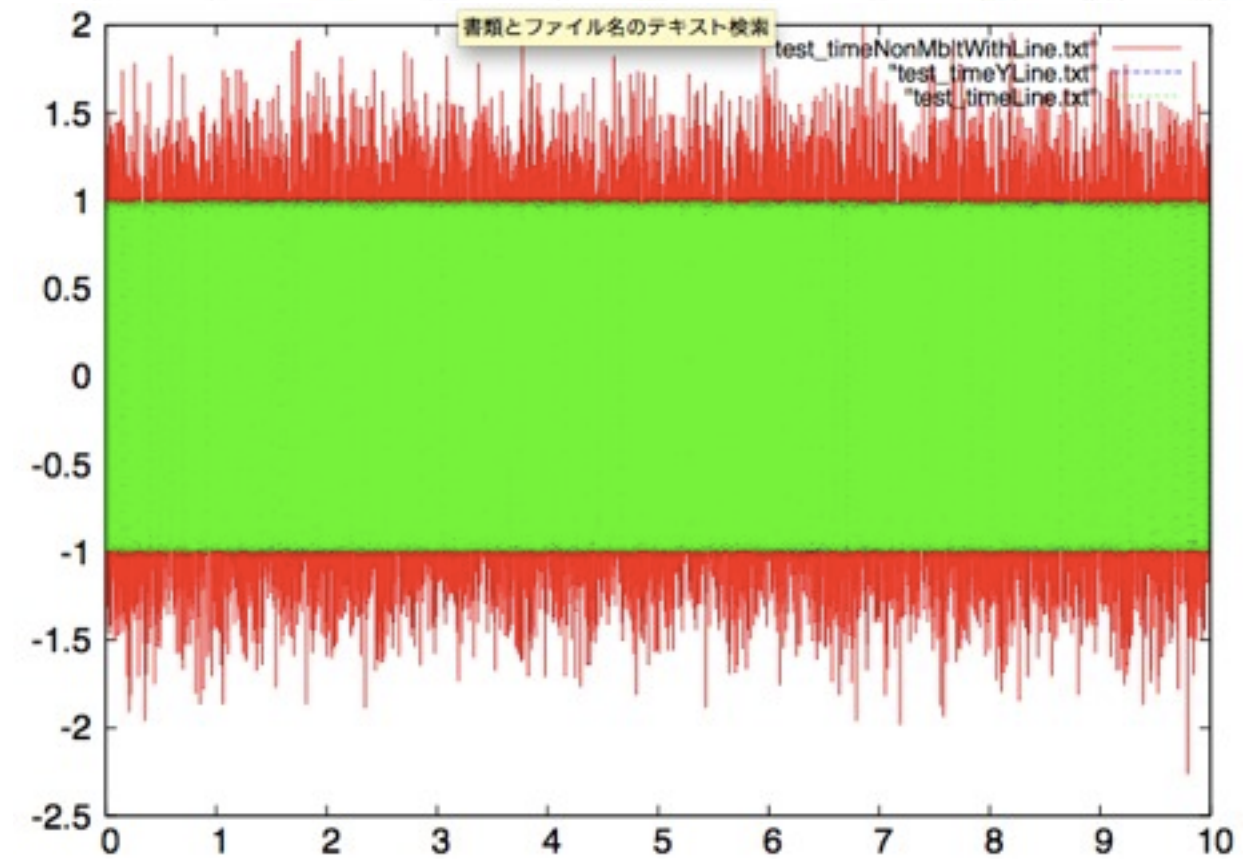
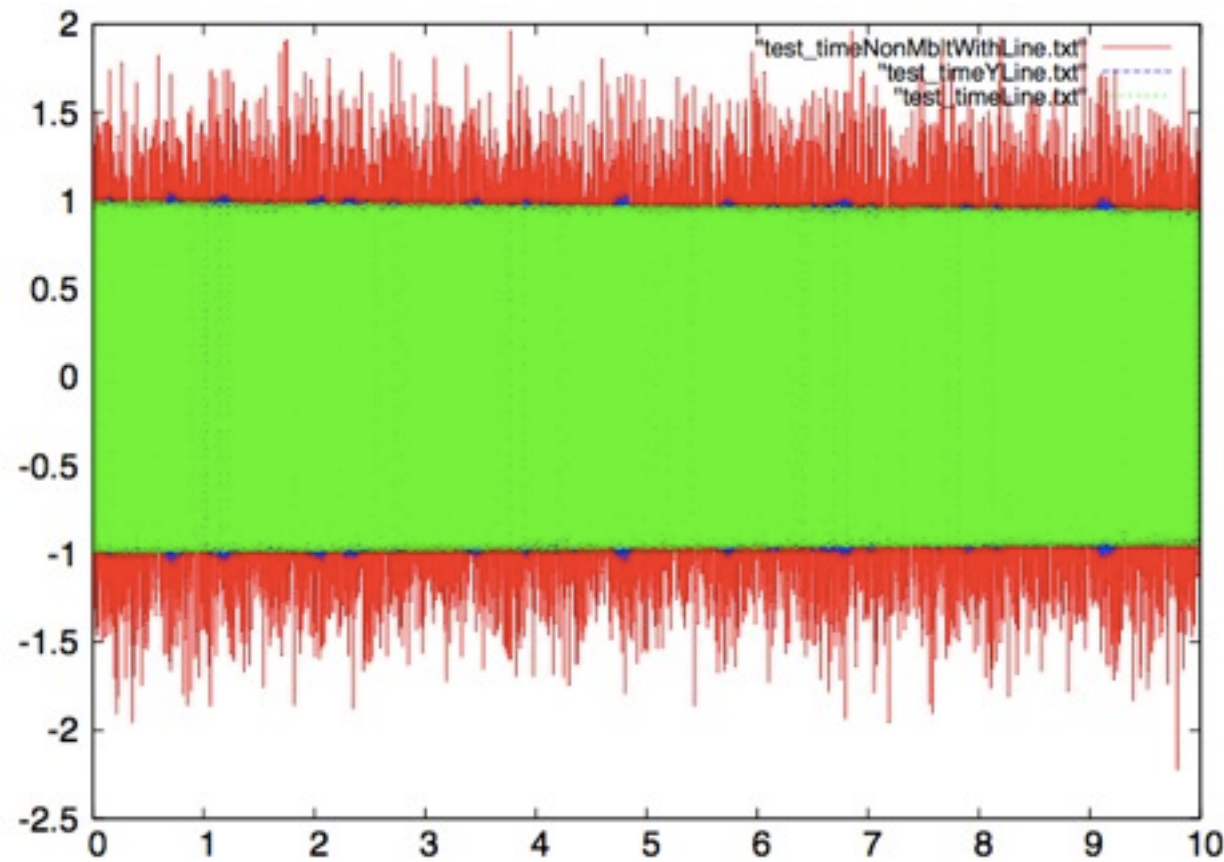
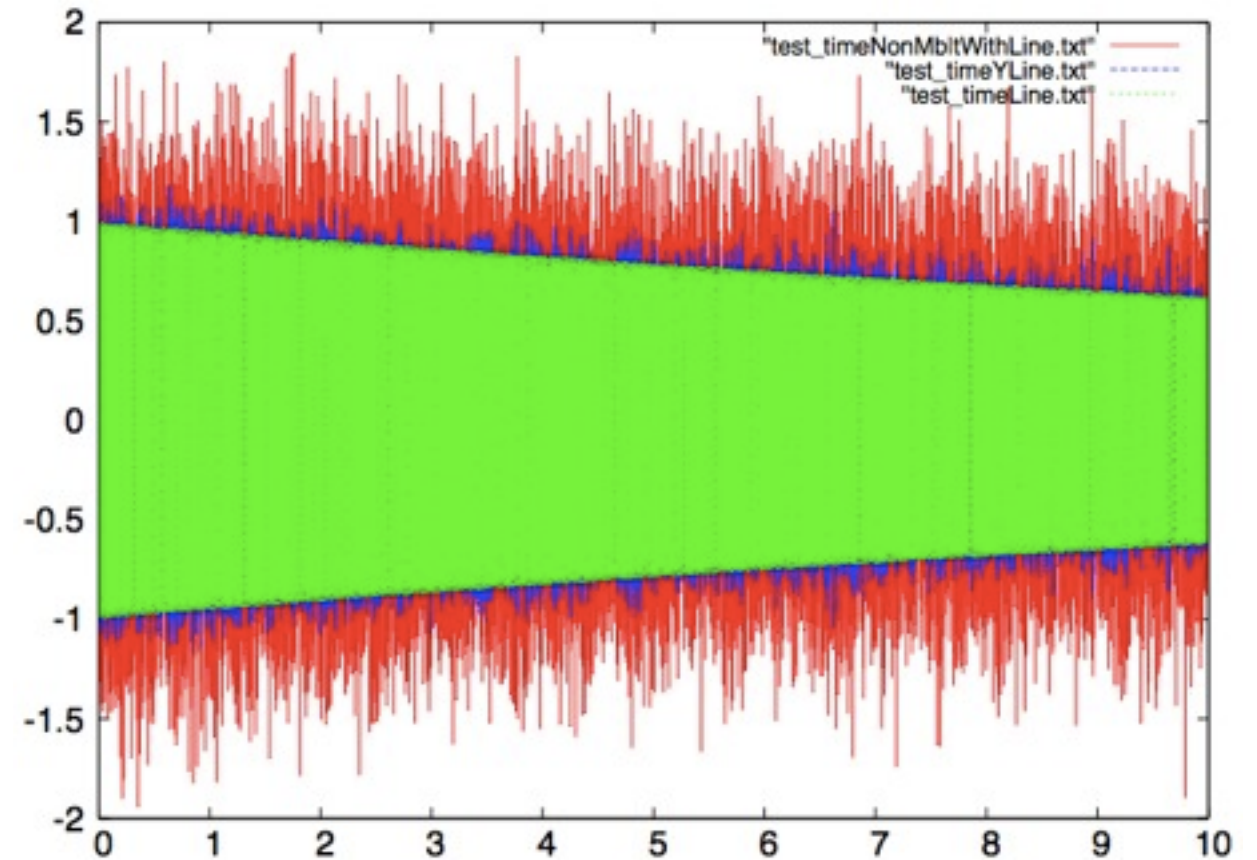
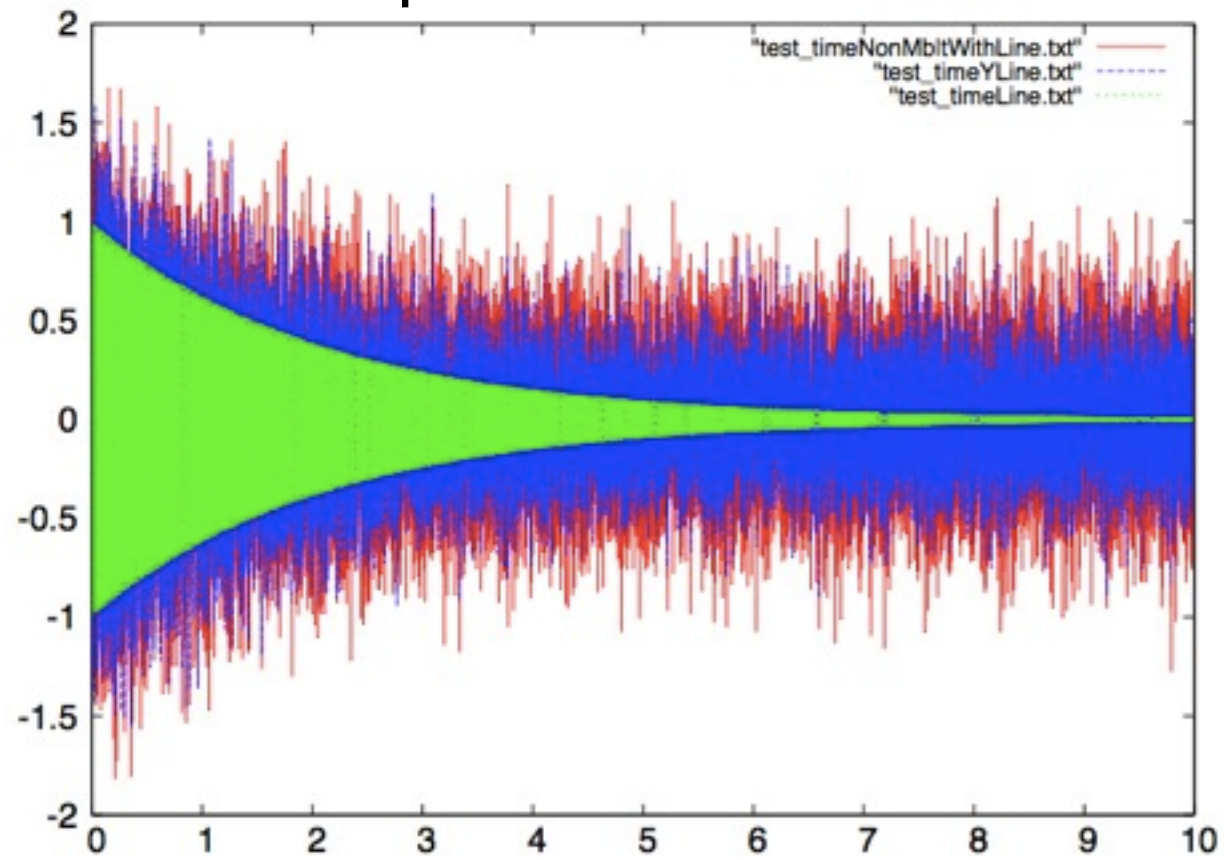
Figure 3. Effect on a transient. (a) The $\bar{X}$ quadrature, (b) $\bar{Y}$ quadrature. In both figures, the faint dotted lines are the quadrature components, the dashed line shows the running mean estimate and the solid line shows the running median estimate.

なぜ4本吊りなの？

冷却面積が増えて鏡を冷却しやすいから

また、タングステンワイヤーじゃなく、サファイアファイバーだから

300Hz dumped sin波

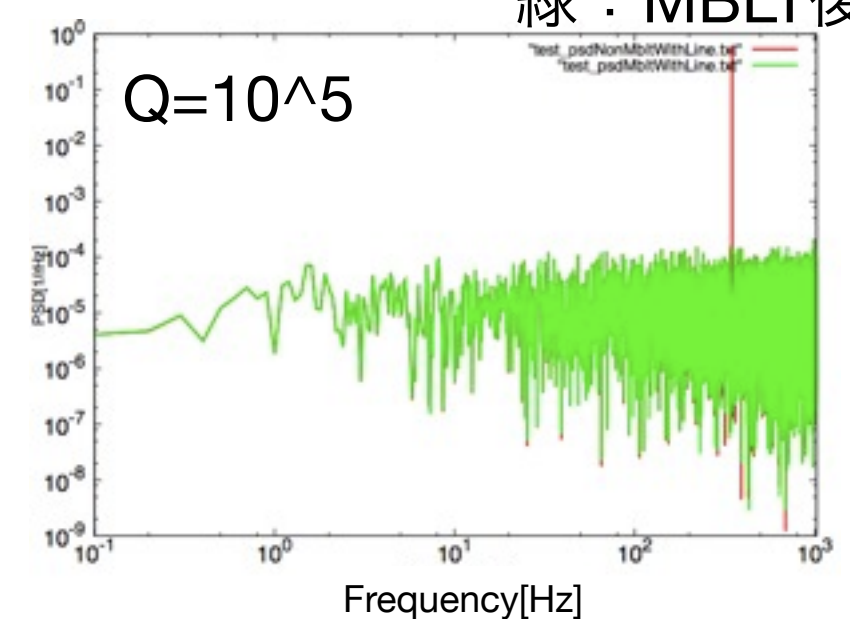
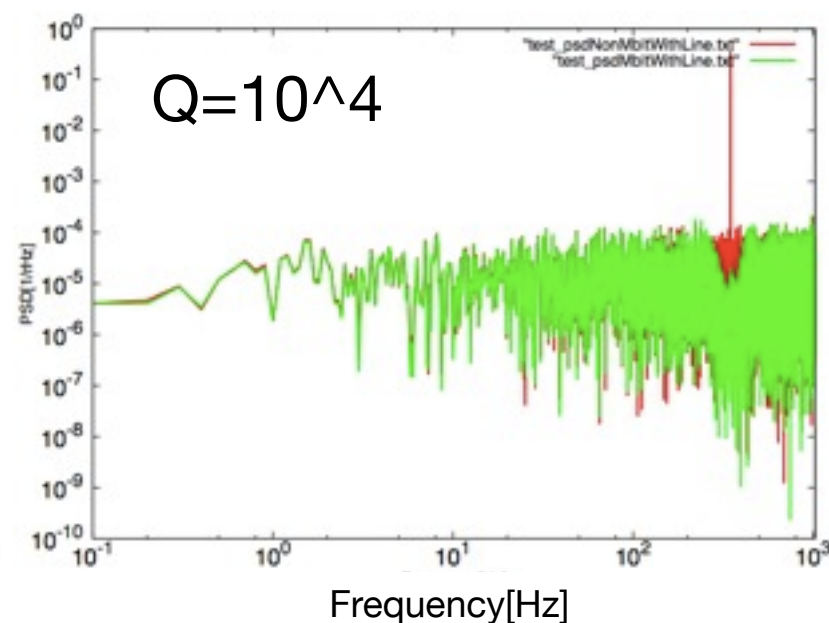
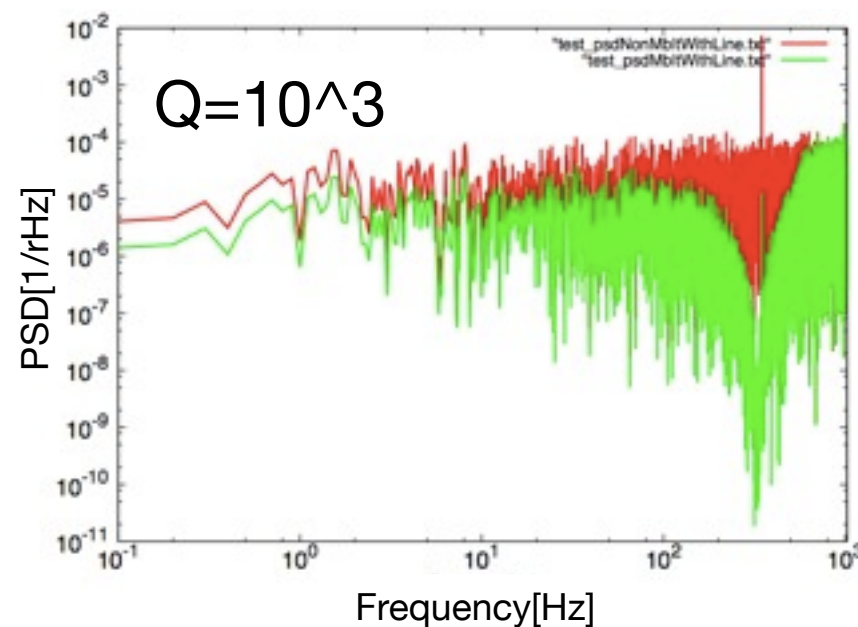


MBLT動作確認

様々なQ値を持つライン(dumped sin波)を入れてどこまでのラインなら除去できるか確認。

赤：MBLT前

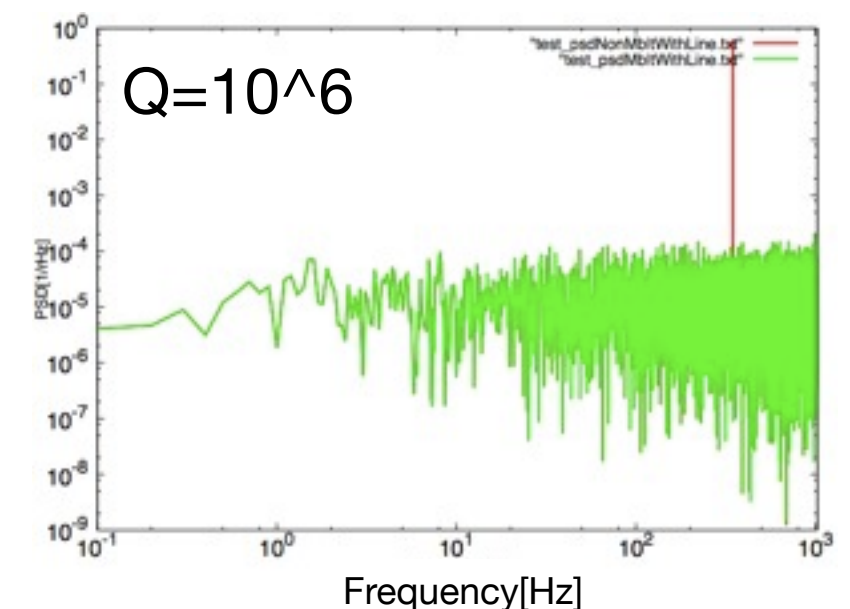
緑：MBLT後



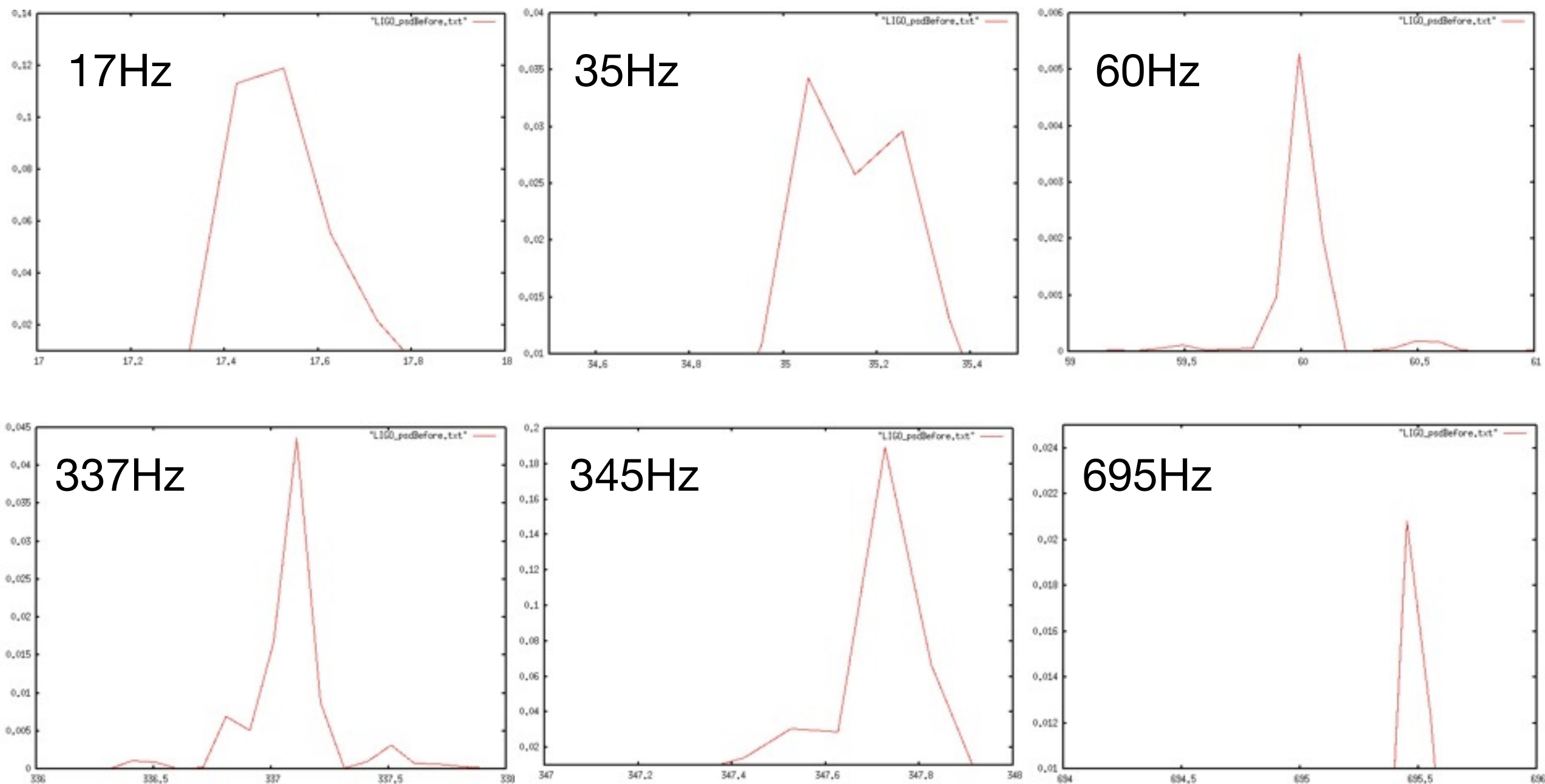
一例として

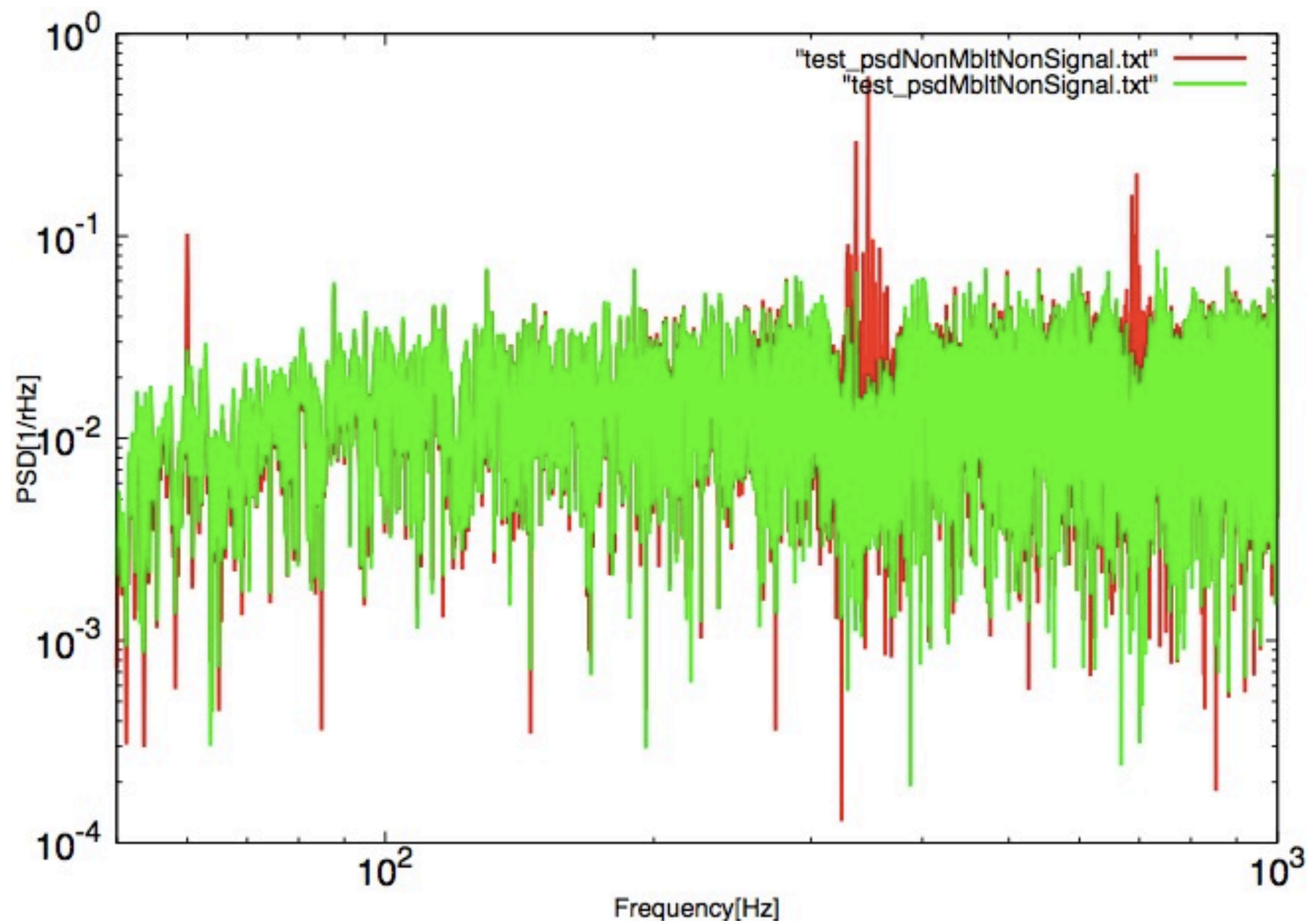
- サンプリングレート=2048[Hz], 時間=10[s]のガウス雑音
- 中心周波数=345[Hz]、dumped sin波を注入

他にも、データ長や中心周波数を変えているいろいろやるべし



実データ詳細スペクトル

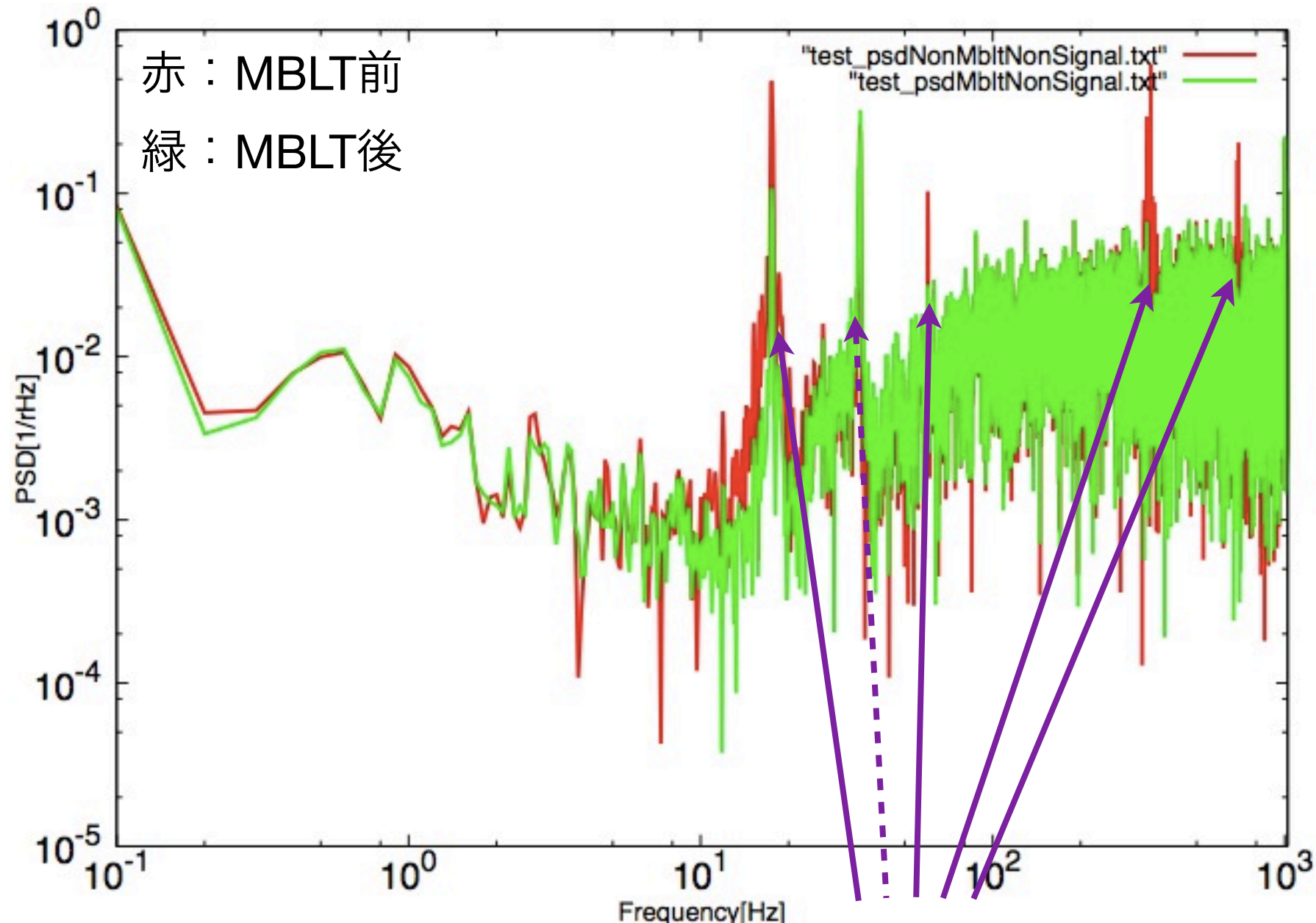




実データに対して

◆LIGOデータに対して (LIGO S5(H1) data)

17,35,60,345,695Hzの狭帯域雑音に対してMBLTを通した。



実データに対しても動作し、ある程度の狭帯域雑音を除去、低減できそう

まとめと今後の課題

まとめ

- KAGRA Detcharグループとして、MBLTを実装した
- 狭帯域雑音除去においてHigh Qは有利であることがわかった
- バースト信号を削ることなく狭帯域雑音を除去できそう
- 実データでもうまくいきそう

今後の課題

- 近い周波数に複数の狭帯域雑音がある場合の対策
 - > KAGRAは4本吊りなので問題となる
- 除去できない狭帯域雑音を減らしていく