

**KAGRA Detector Characterization :**  
**KAGRAデータの重力波探索に向けた補助信号間に現れる相  
関した特徴の新しい発見手法の確立**

**2014年10月14日**

**@ DetChar MTG**

**譲原浩貴**

# 目次

## 背景

- LIGO, Virgoで観測されるチャンネル間に相関した信号

## 動機

- KAGRA コミッショニング～観測時における  
雑音同定をサポートする効果的なツールの作成
- 重力波探索時の偽イベント除去

## 相関を調べるための手法

- Pearson 相関係数
- Maximum Information Coefficient

## 開発したモニターツール

- 作成した相関マップ
- 地震計と重力波チャンネルを用いた相関解析結果

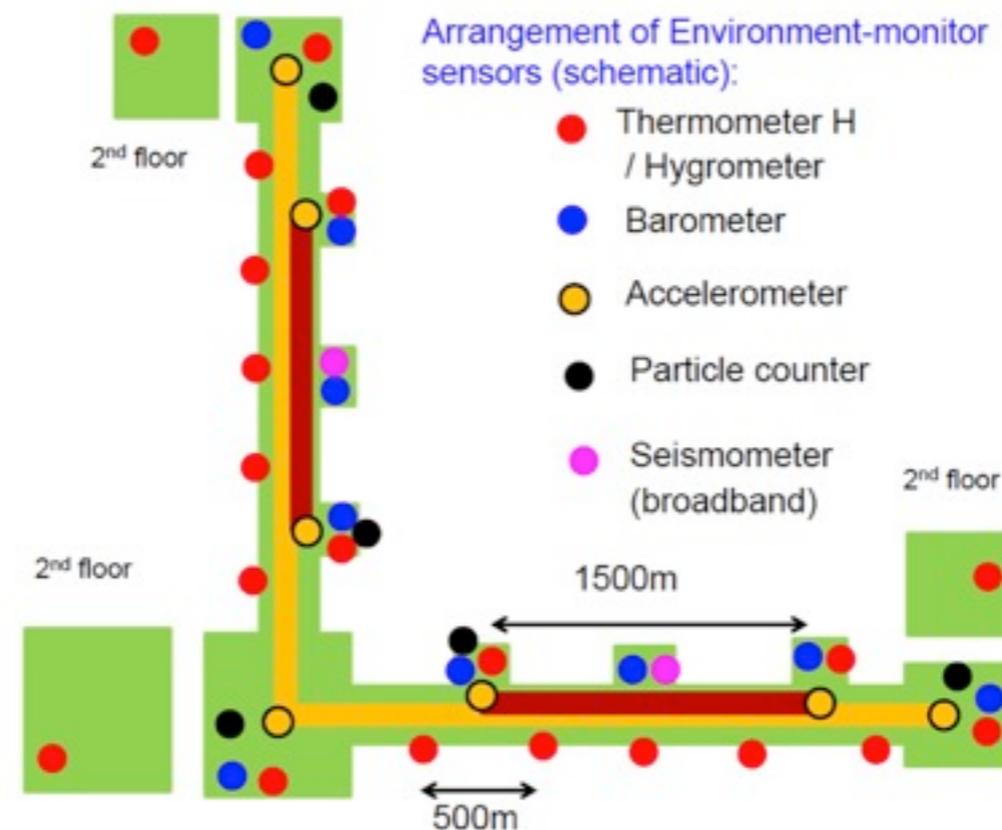
# motivation - 補助信号を用いた相関解析

1万チャンネルもの補助信号から相関を持つ信号を探し出す手法を開発し  
最終的にはノイズ源・混入経路を特定を目指す

- ノイズの性質を明らかにすることでノイズを源を絞り込む
- データ解析パイプラインにより得られた候補イベントについて  
重力波チャンネルと補助信号の相関を取ることで、  
重力波イベントでないことを明らかにし、重力波検出効率を上げる

- ・ 重力波チャンネル  
(主干涉計信号, 重力波に応答がある)
- ・ 補助信号  
(重力波に応答がないセンサー)

外部音響、地面振動、外部磁場  
レーザー強度、温度、他..



Araya (2012)

# 今回用いた相関を調べるための手法

- 以下の2つの手法を用いる

## Pearsonの積率相関係数

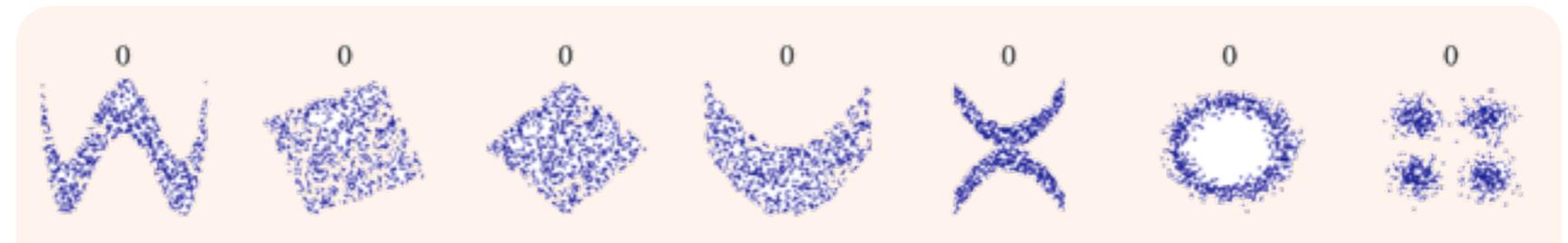
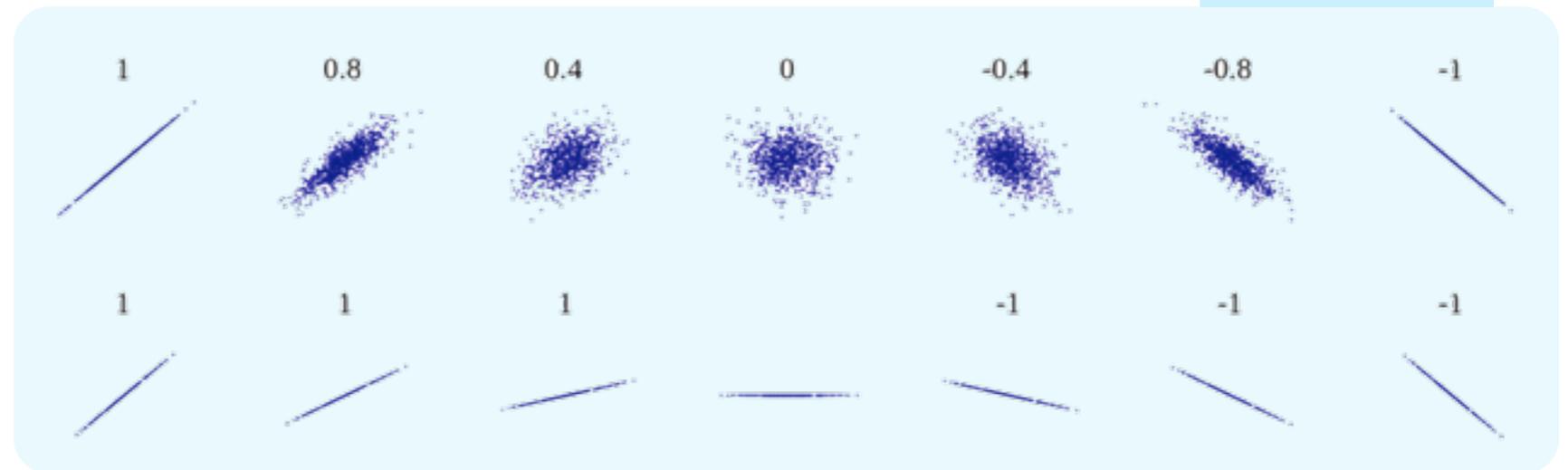
- 線形相関に対して効果的な手法

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

## Maximum Information Coefficient (MIC)

- 散布図の形状  
→ 伝達メカニズム  
の情報を得る

線形相関



非線形相関

# Maximum Information Coefficient (MIC) について

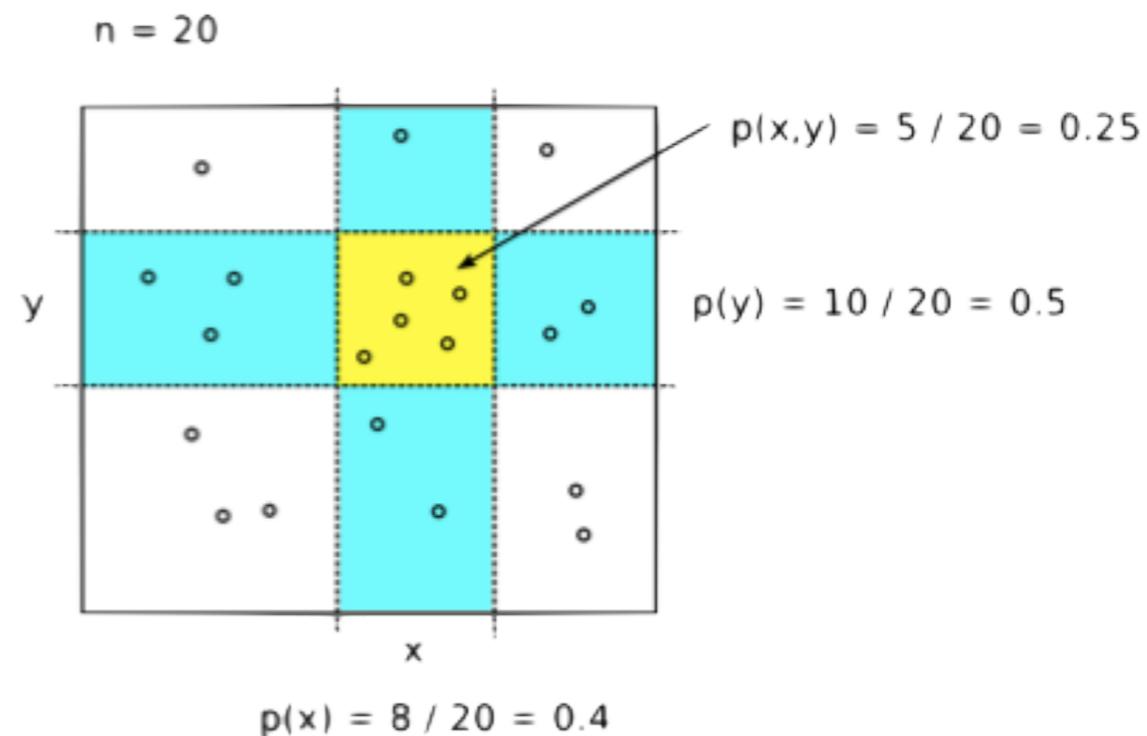
[David N. Reshef, et al. Science 334, 1518 (2011)]

- 十分なサンプル数があれば、さまざまな関連を検出可能  
複数の関係の重ね合わせも可能 (傾きが異なる線形相関の重ね合わせなど)
- 2つのデータに関連があるかどうかを、データをグリッドで分割し相互情報量を用いて定量的に評価

- グリッドの本数

$$n_x = 2, n_y = 2$$

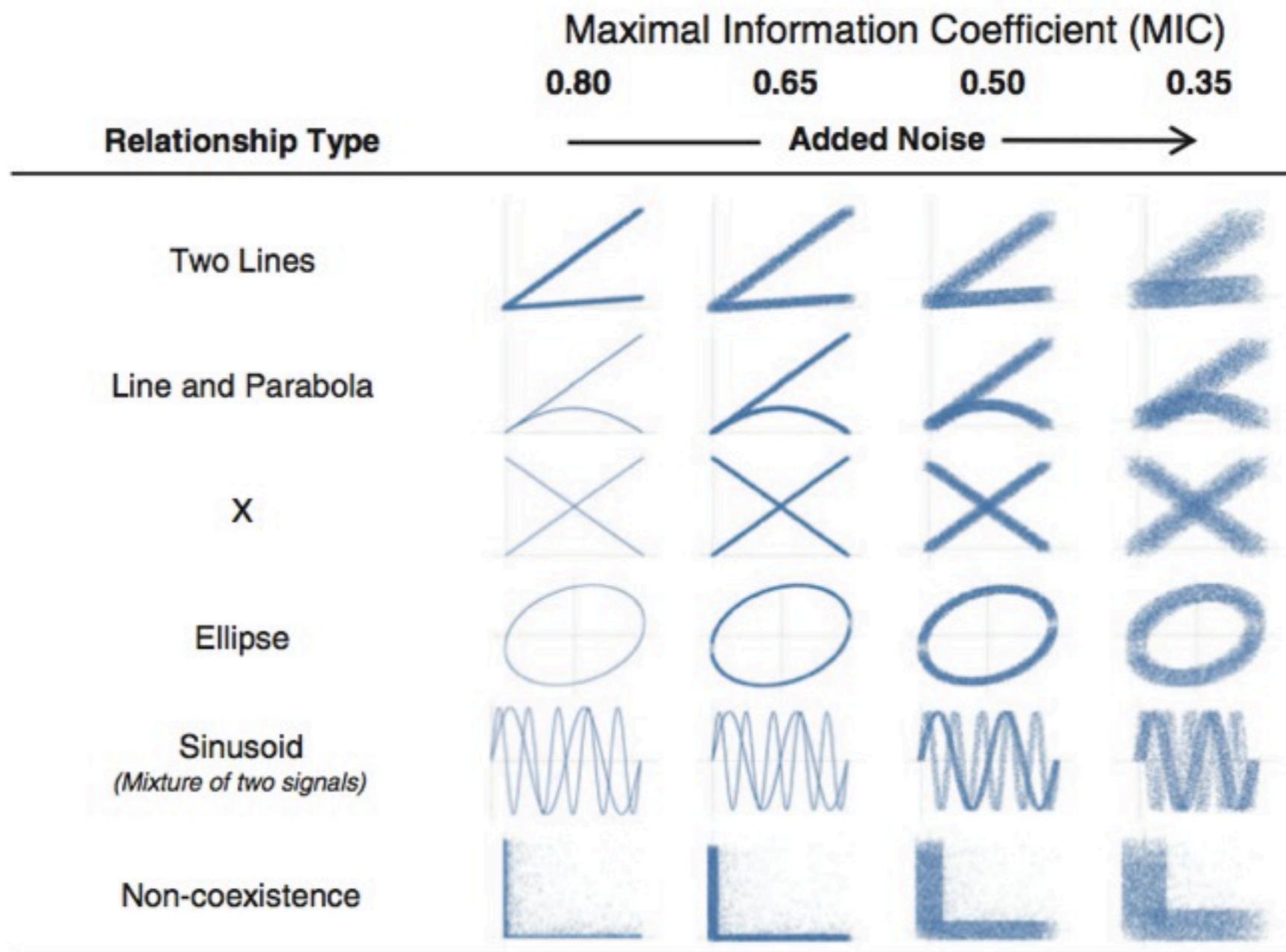
- グリッドの配置



$$p(x,y) \log \left( \frac{p(x,y)}{p(x)p(y)} \right) = 0.25 \log \left( \frac{0.25}{0.4 \times 0.5} \right) \approx 0.056$$

# Maximum Information Coefficient (MIC) で探索できる相関

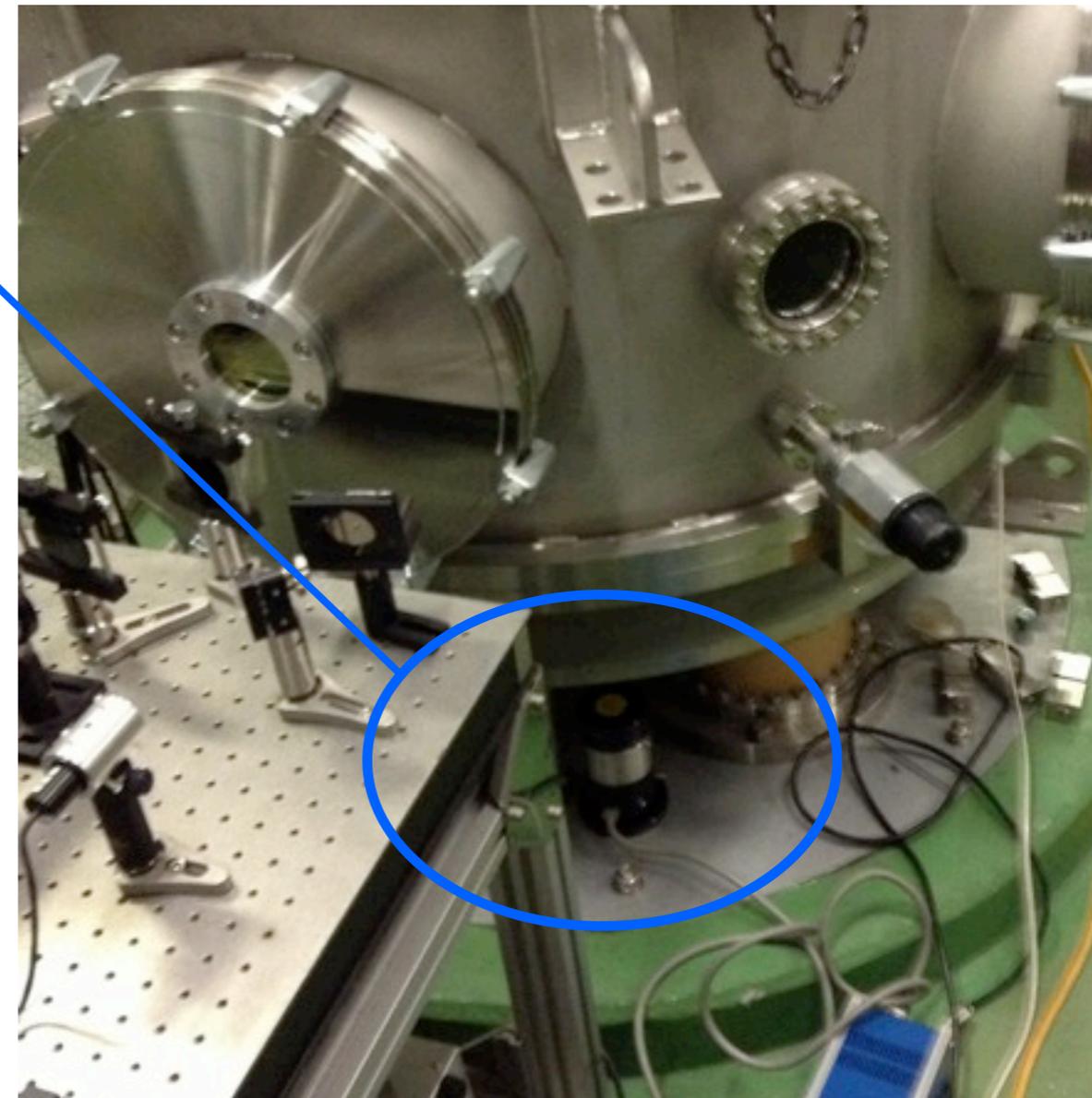
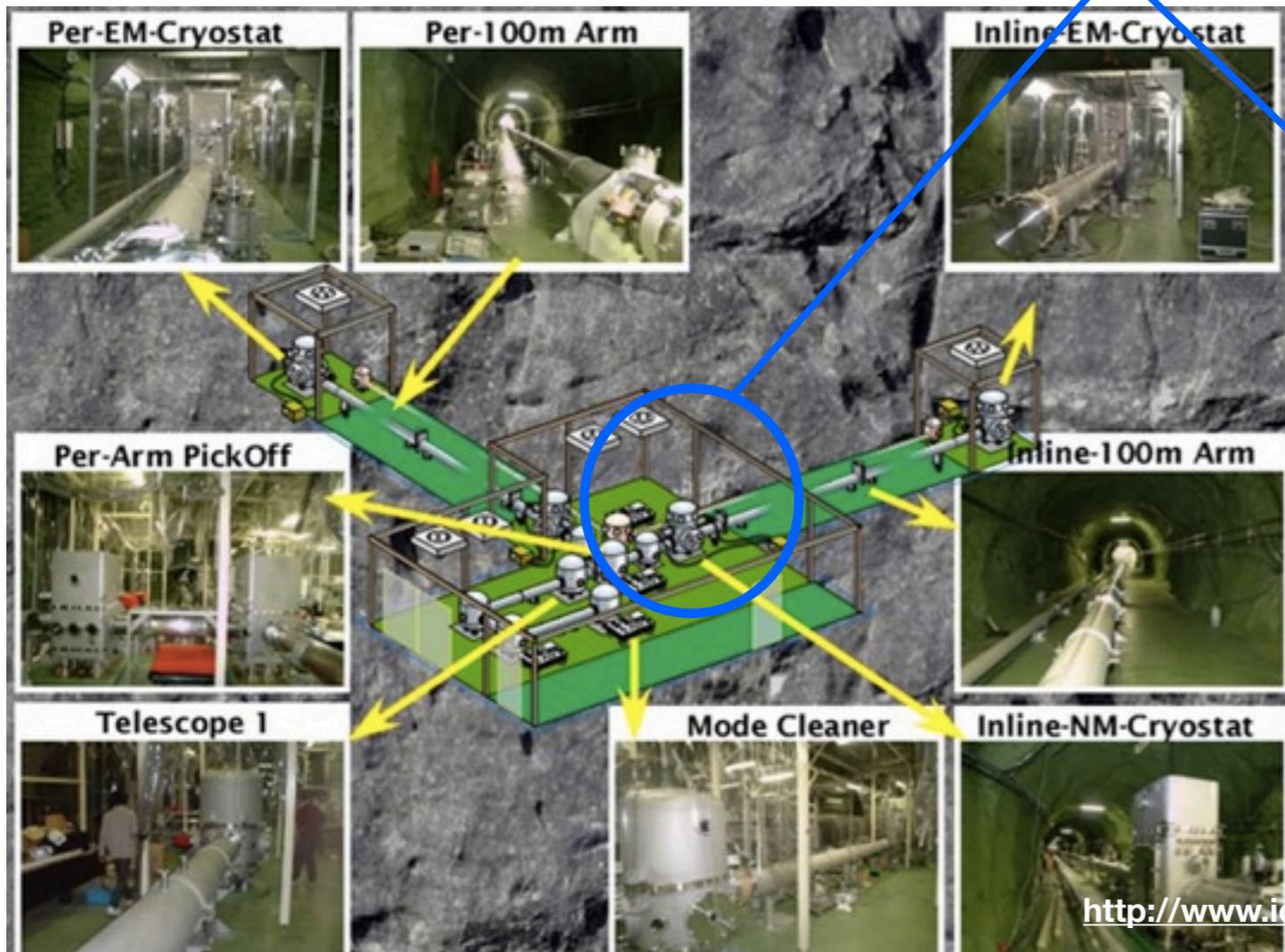
- 線形な相関だけでなく、非線形な相関についても調べることができる



# 実データを用いた相関モニターの動作確認

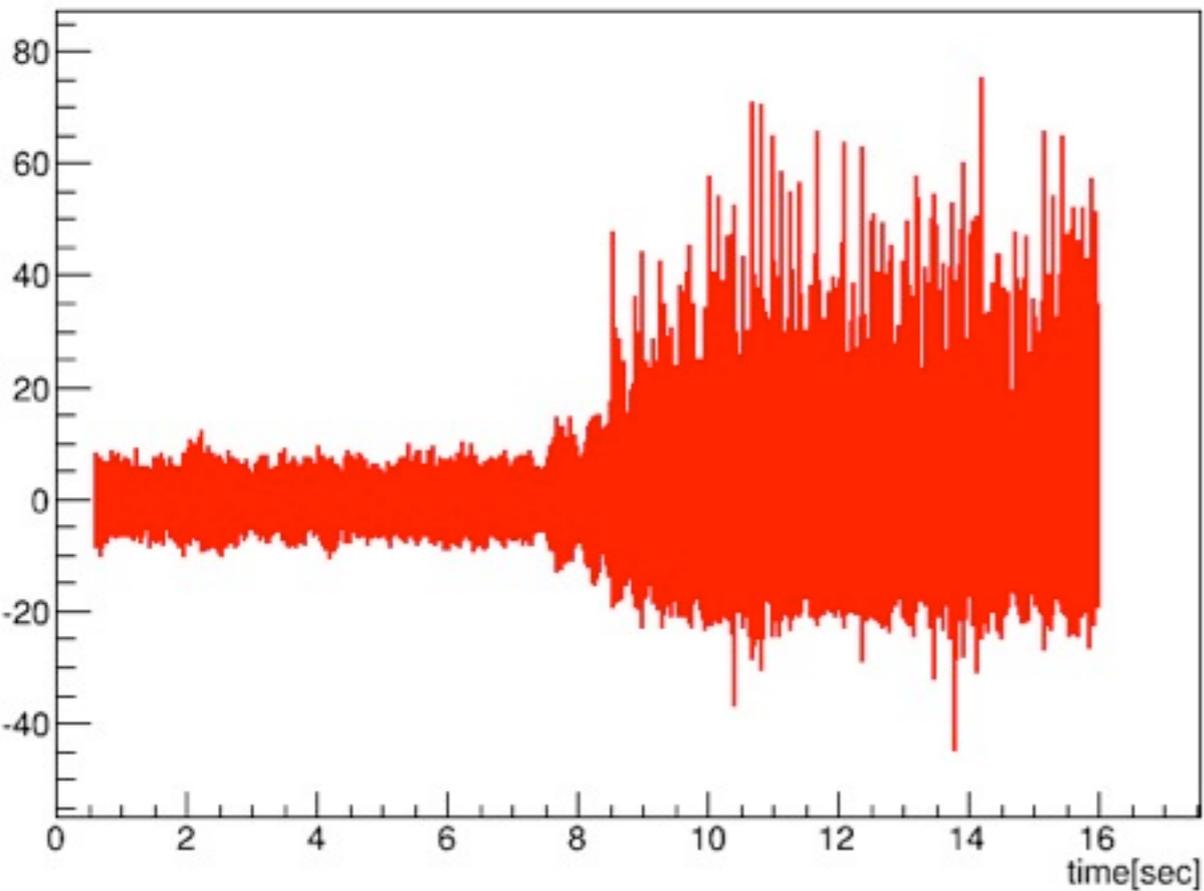
- ・ 2012年9月の重力波channel, 地震計のデータをCLIOにおいて取得
- ・ 重力波チャンネルと加速度計に混入したノイズをモニターツールを用いてデータの相関を調べた

Xアーム フロントミラーチェンバー付近に設置



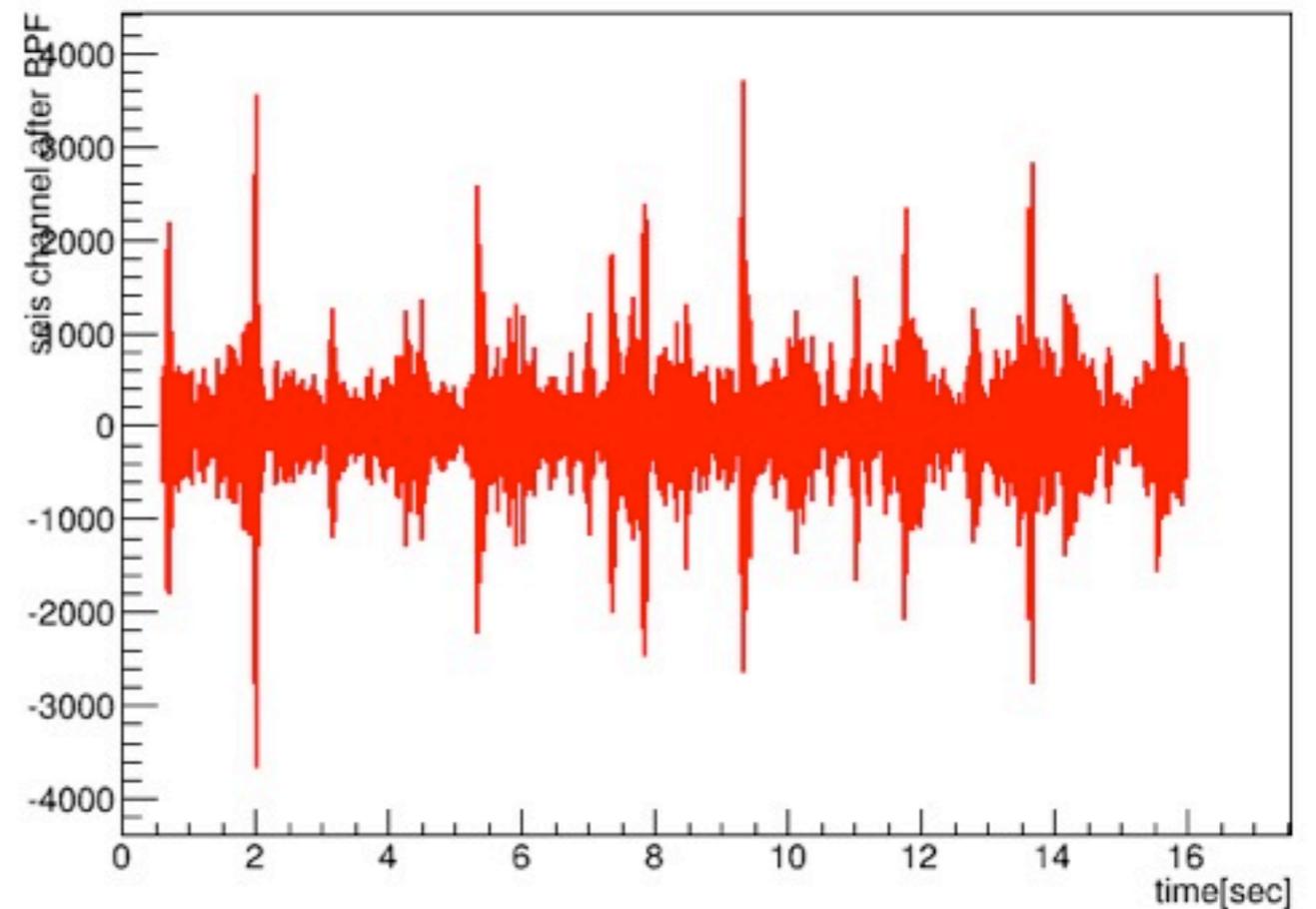
# 解析に用いたある時刻の時系列データ

1034657664



重力波チャンネル

1034657664



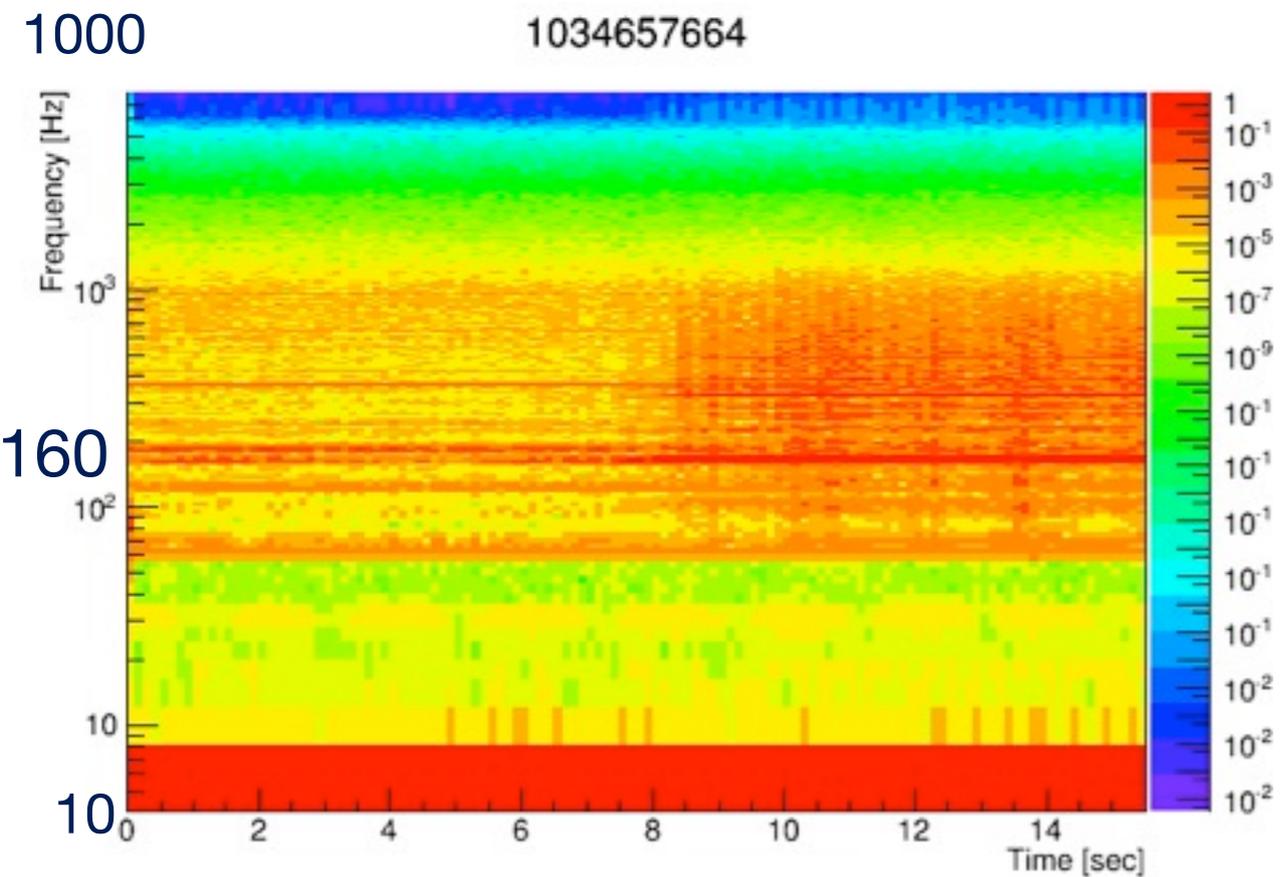
加速度計チャンネル

このままではノイズについて情報を得るのは難しい

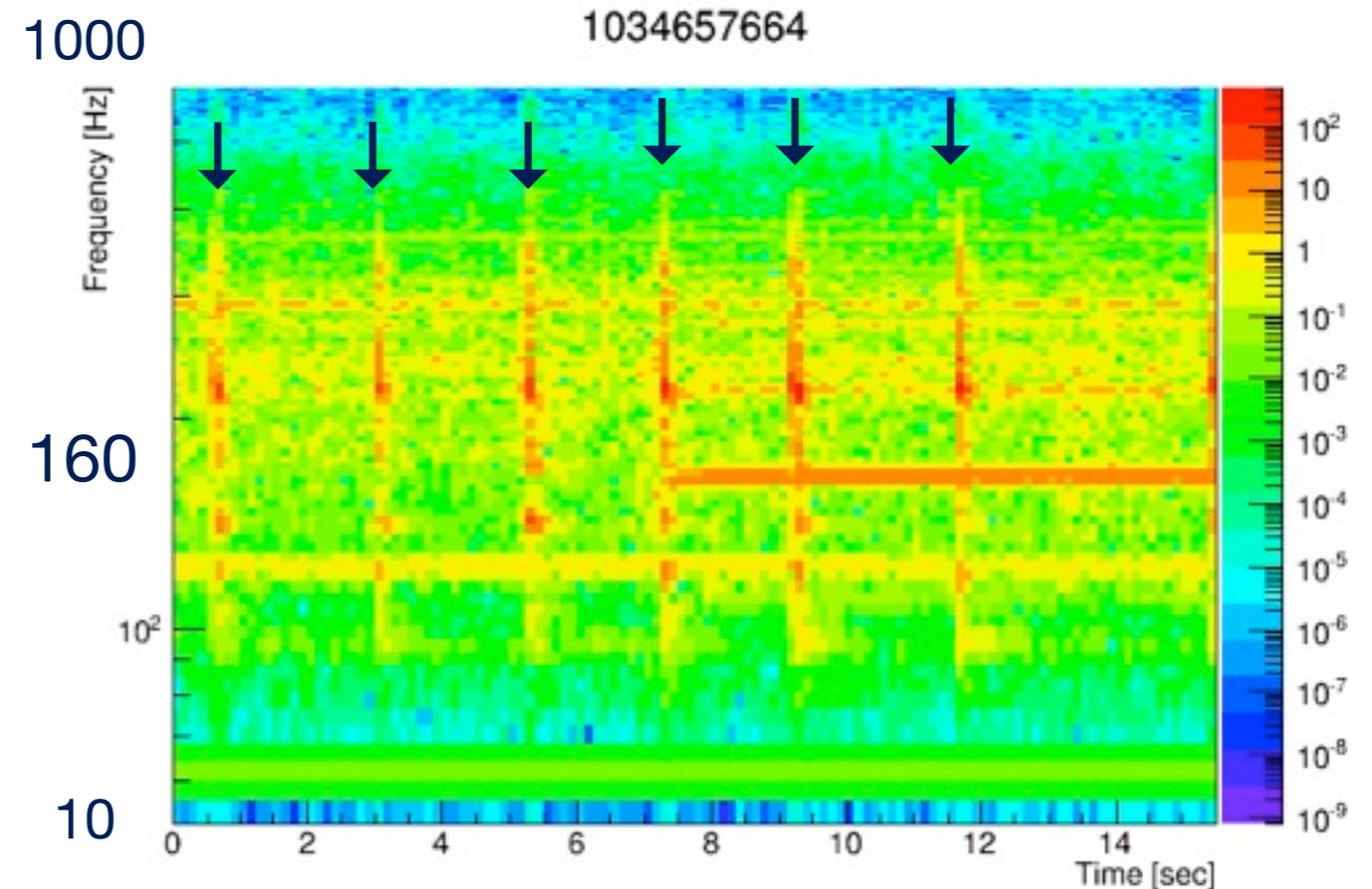
⇒ ショートフーリエ変換を用いてスペクトログラム化

# 相関解析に用いたデータ - スペクトログラム

## 重力波チャンネル

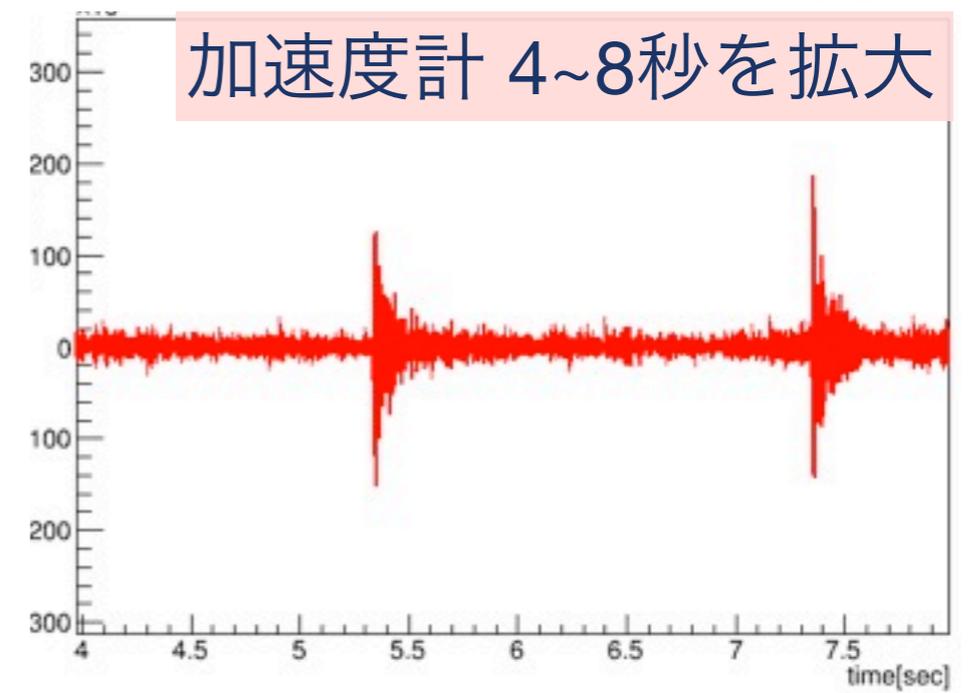


## 加速度計チャンネル



矢印はフロントミラーのチェンバーに  
外乱を与えた  
⇒ 重力波チャンネルにも現れているか？  
開発したモニターと相関を調べる

## 加速度計 4~8秒を拡大

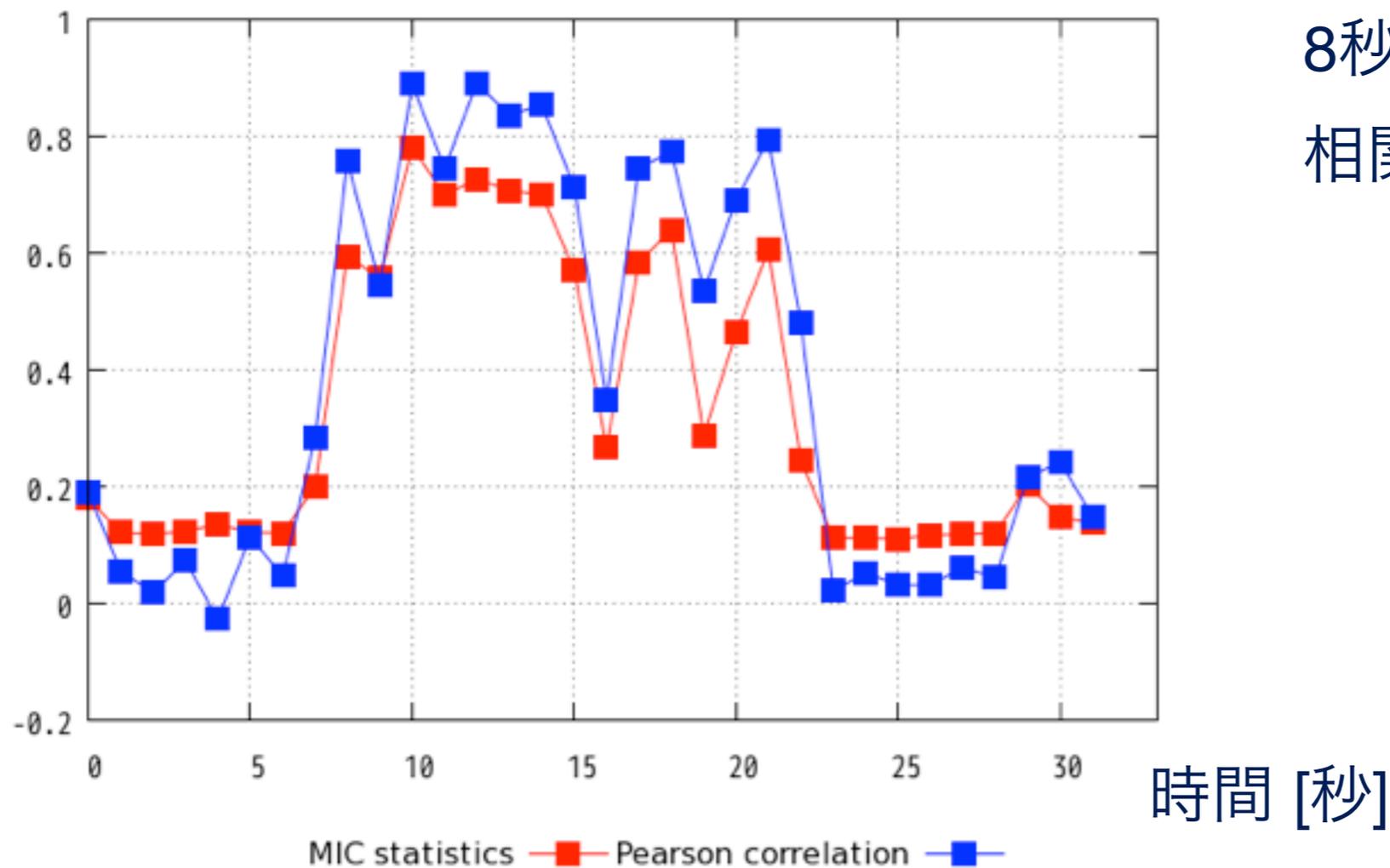


## 2種類の解析手法から得られた相関値の時間変化

外乱付近の32秒のデータを1秒チャンクに区切り、相関解析を行う

見たい信号が含まれるであろう周波数領域のみを取り出すためにバンドパスフィルタに通した (4次,  $f_{low} = 100\text{Hz}$ ,  $f_{high} = 200\text{Hz}$ )

相関値

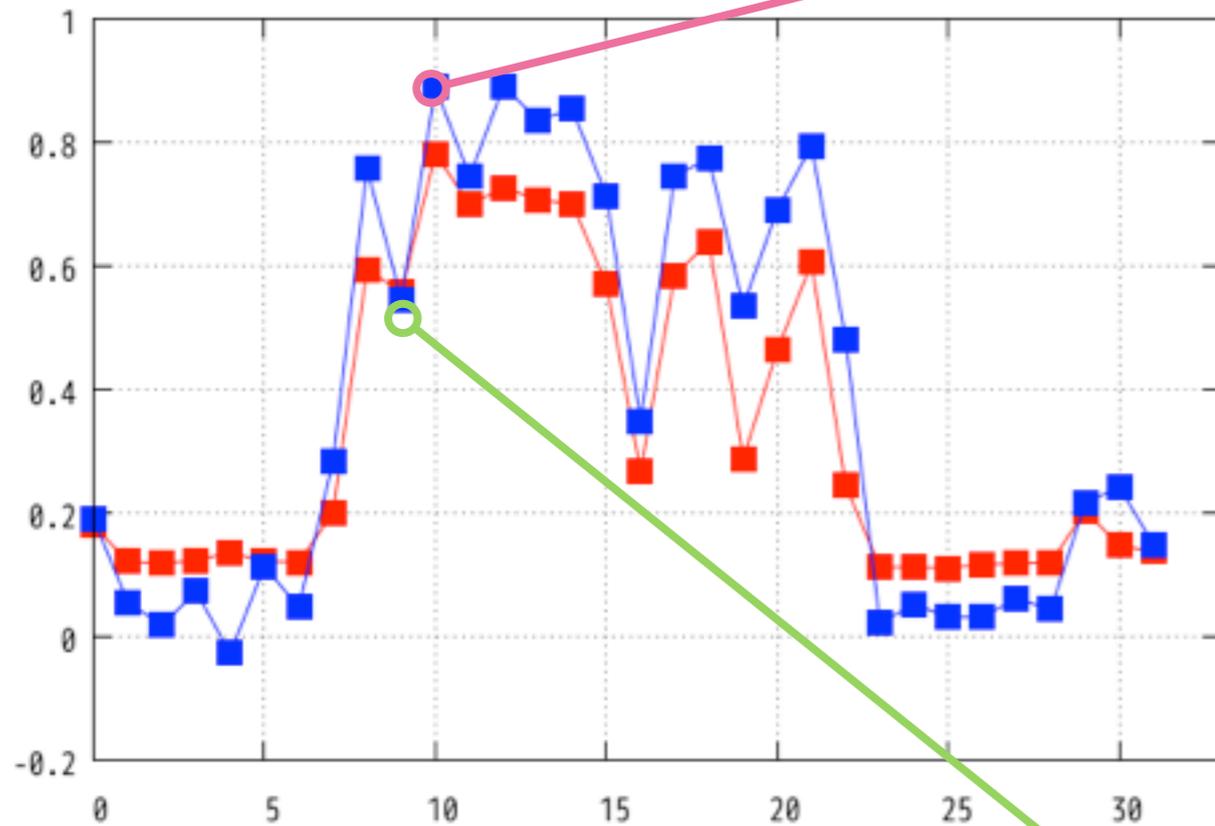


8秒～21秒あたりまで比較的相関値が高い

# 相関値と時系列波形

バンドパスフィルターを通し、標準化した  
4次,  $f_{low} = 100\text{Hz}$ ,  $f_{high} = 200\text{Hz}$

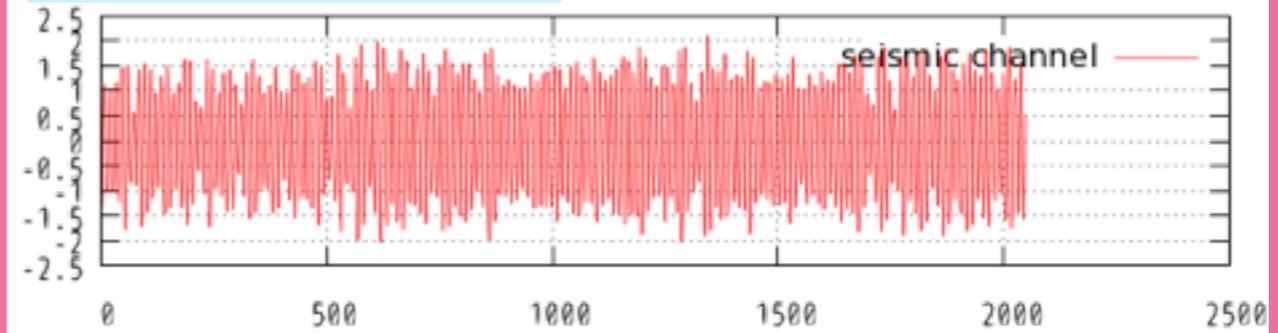
## 相関値



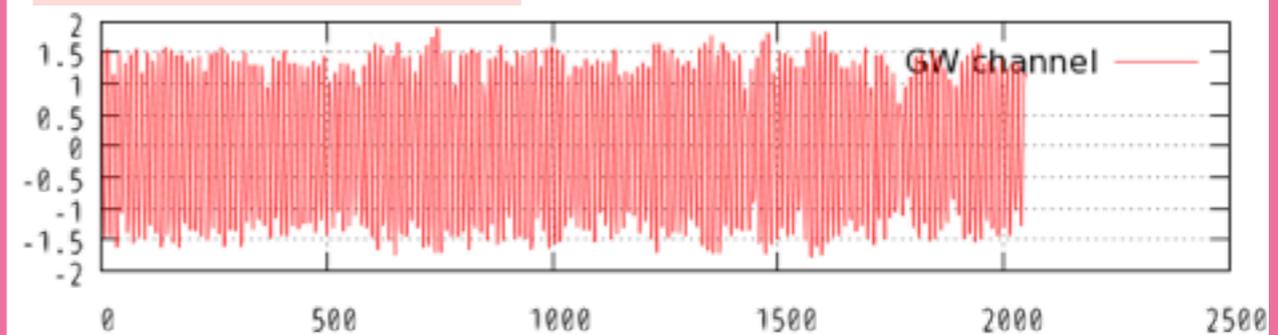
時間 [秒]

MIC statistics — Pearson correlation

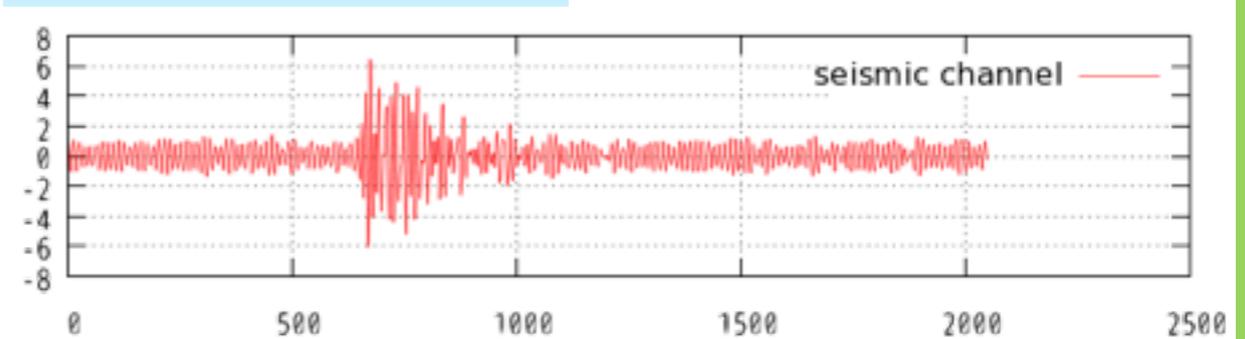
## 加速度計チャンネル



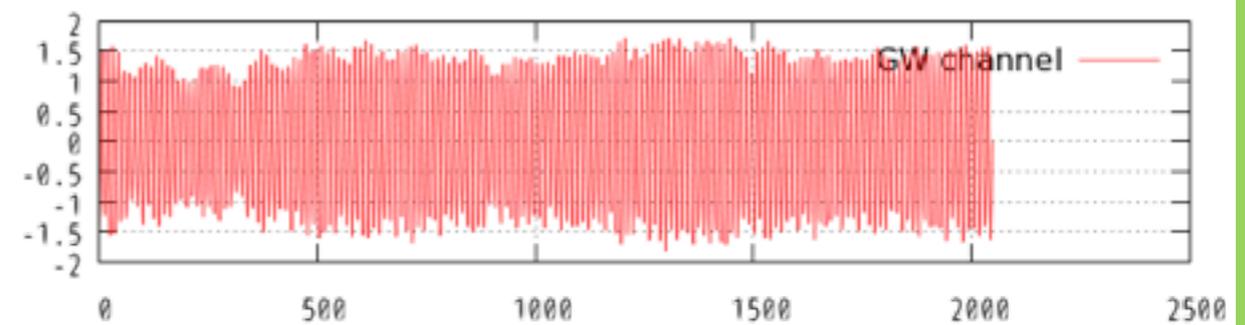
## 重力波チャンネル



## 加速度計チャンネル



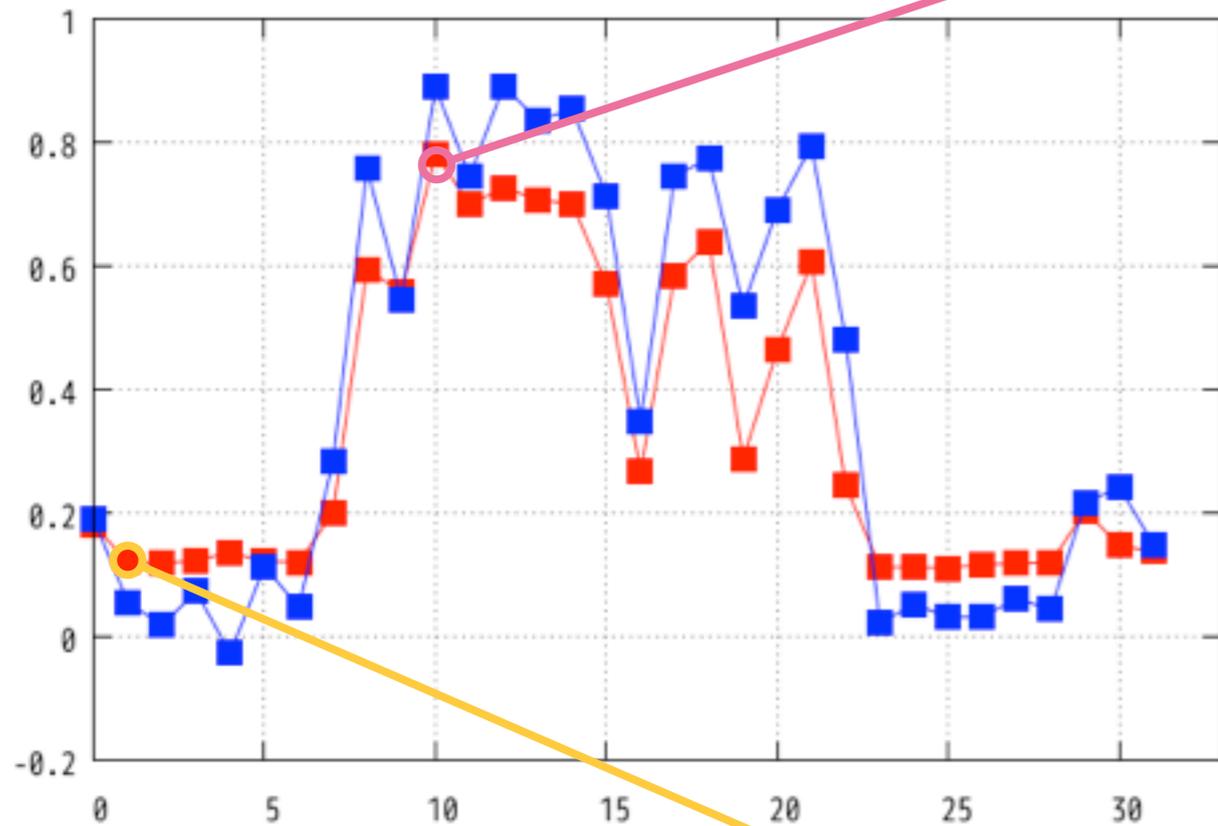
## 重力波チャンネル



# 散布図の時間変化

バンドパスフィルターを通し、標準化した  
4次,  $f_{low} = 100\text{Hz}$ ,  $f_{high} = 200\text{Hz}$

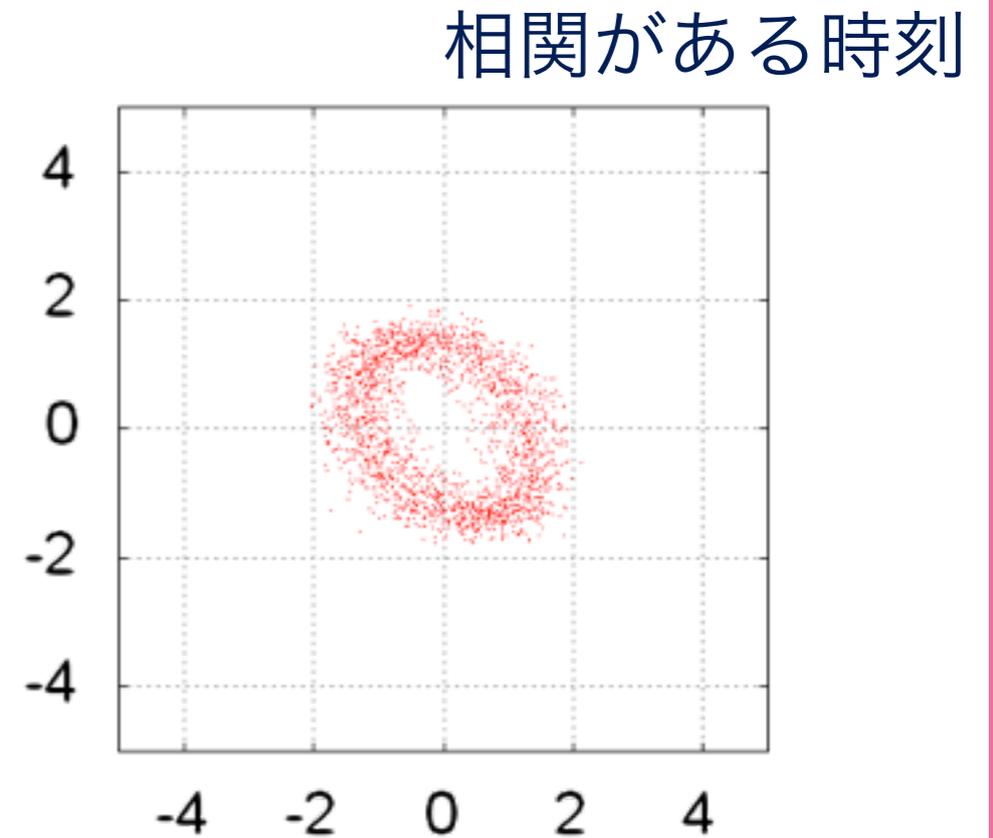
相関値



時間 [秒]

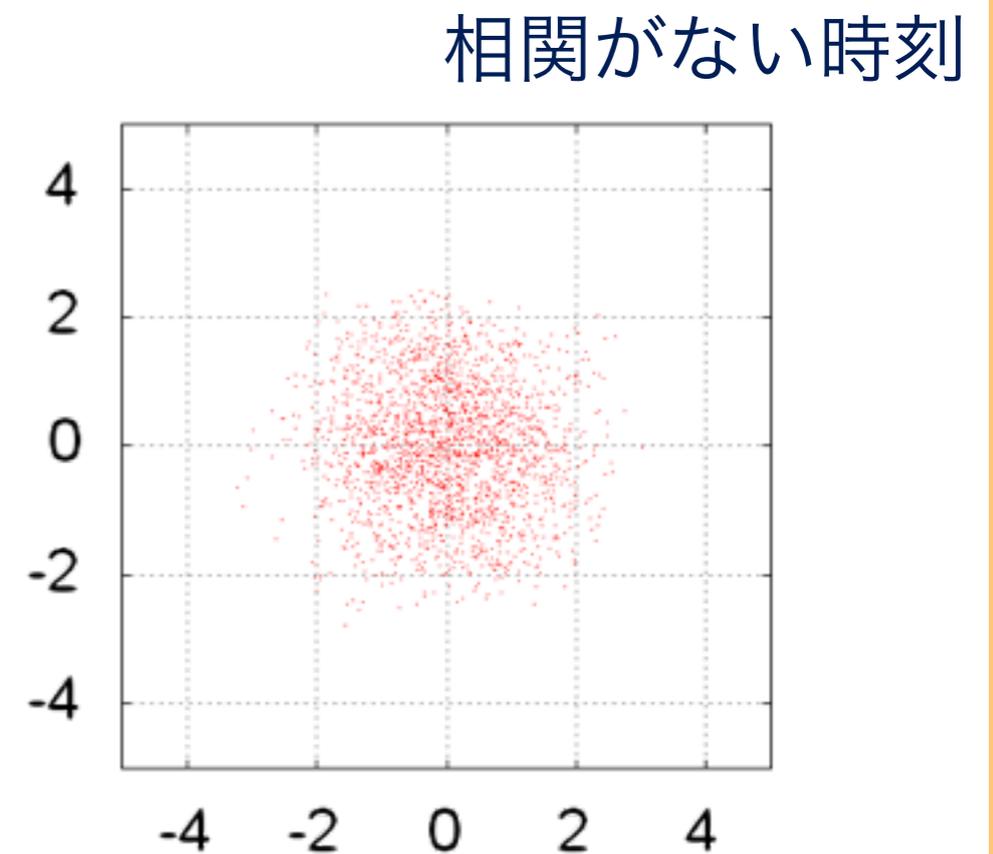
MIC statistics — Pearson correlation

重力波チャンネル



加速度計チャンネル

重力波チャンネル

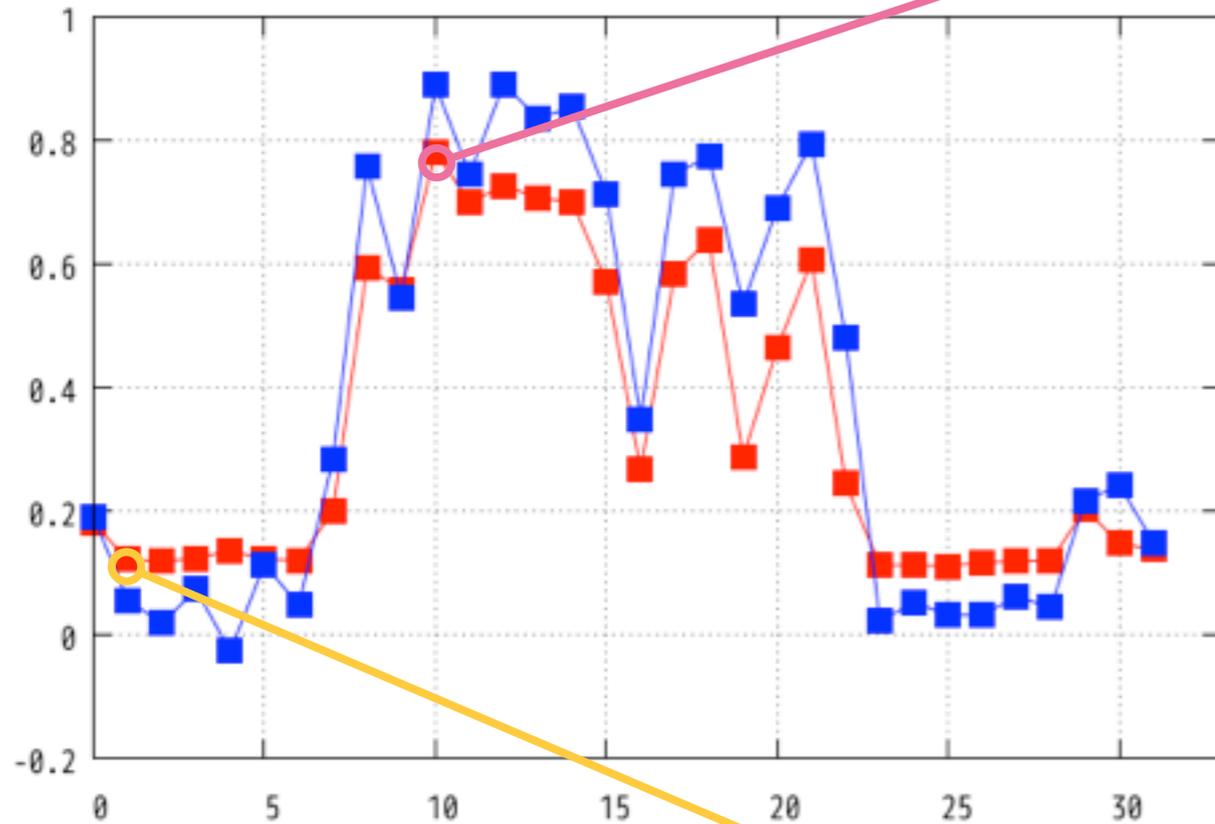


加速度計チャンネル

# 散布図の時間変化 (gifアニメ)

バンドパスフィルターを通し、標準化した  
4次,  $f_{low} = 100\text{Hz}$ ,  $f_{high} = 200\text{Hz}$

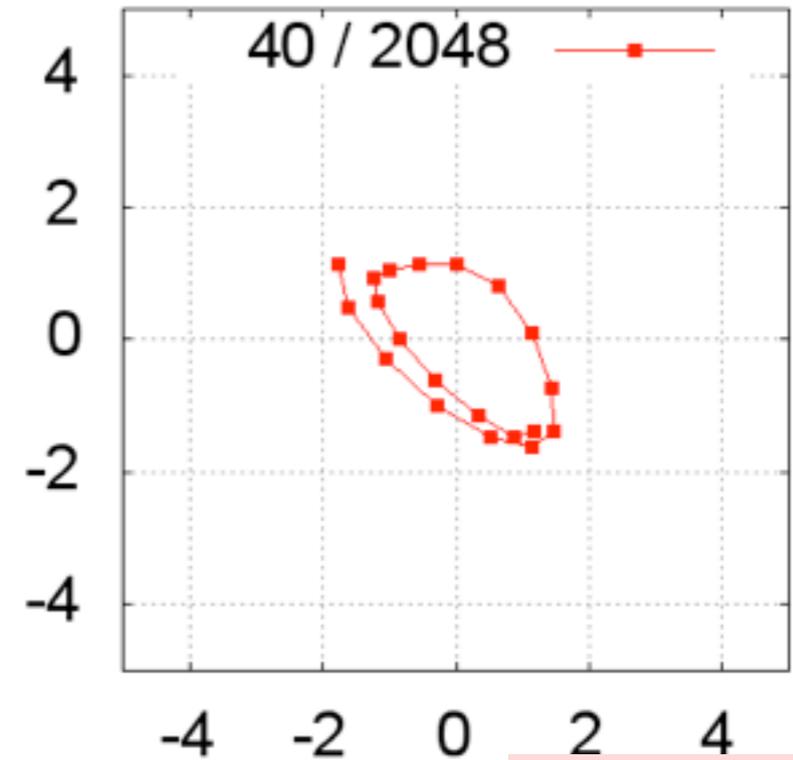
相関値



時間 [秒]

重力波チャンネル

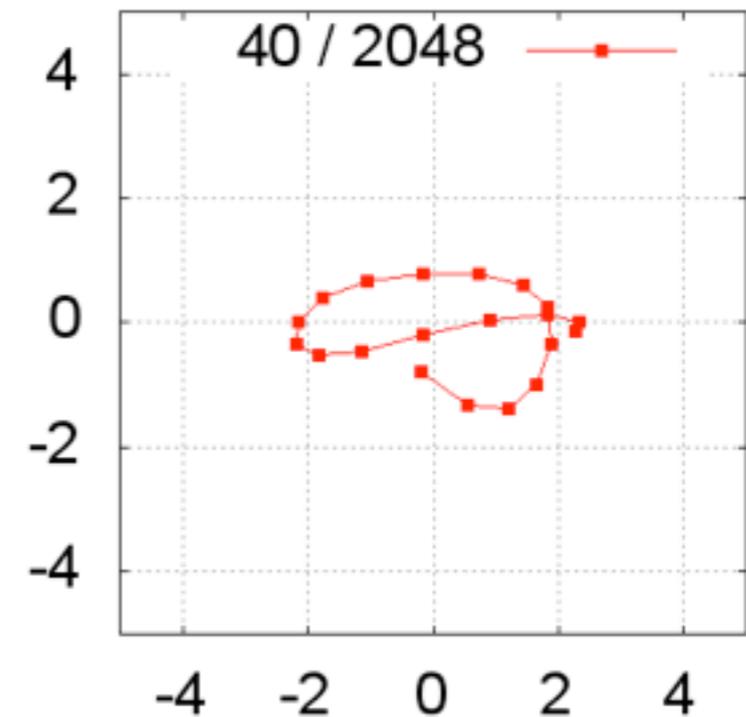
相関がある時刻



加速度計チャンネル

重力波チャンネル

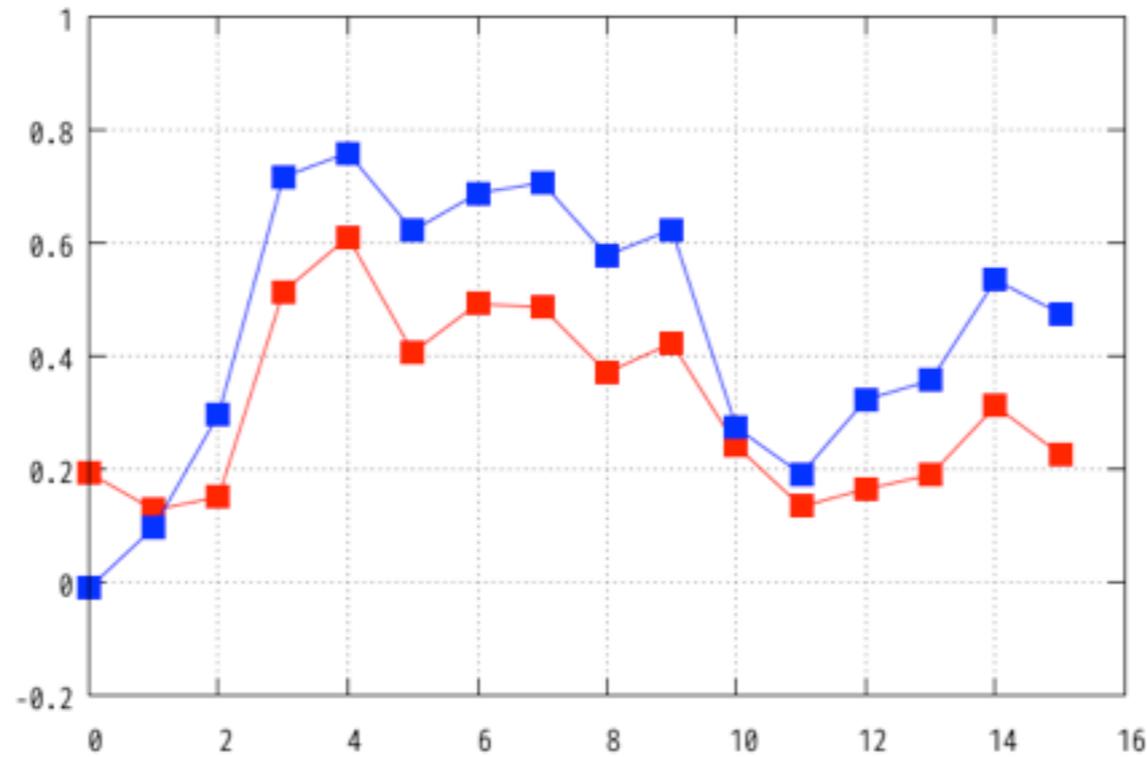
相関がない時刻



加速度計チャンネル

# 別の時刻でも同じ相関が見られた

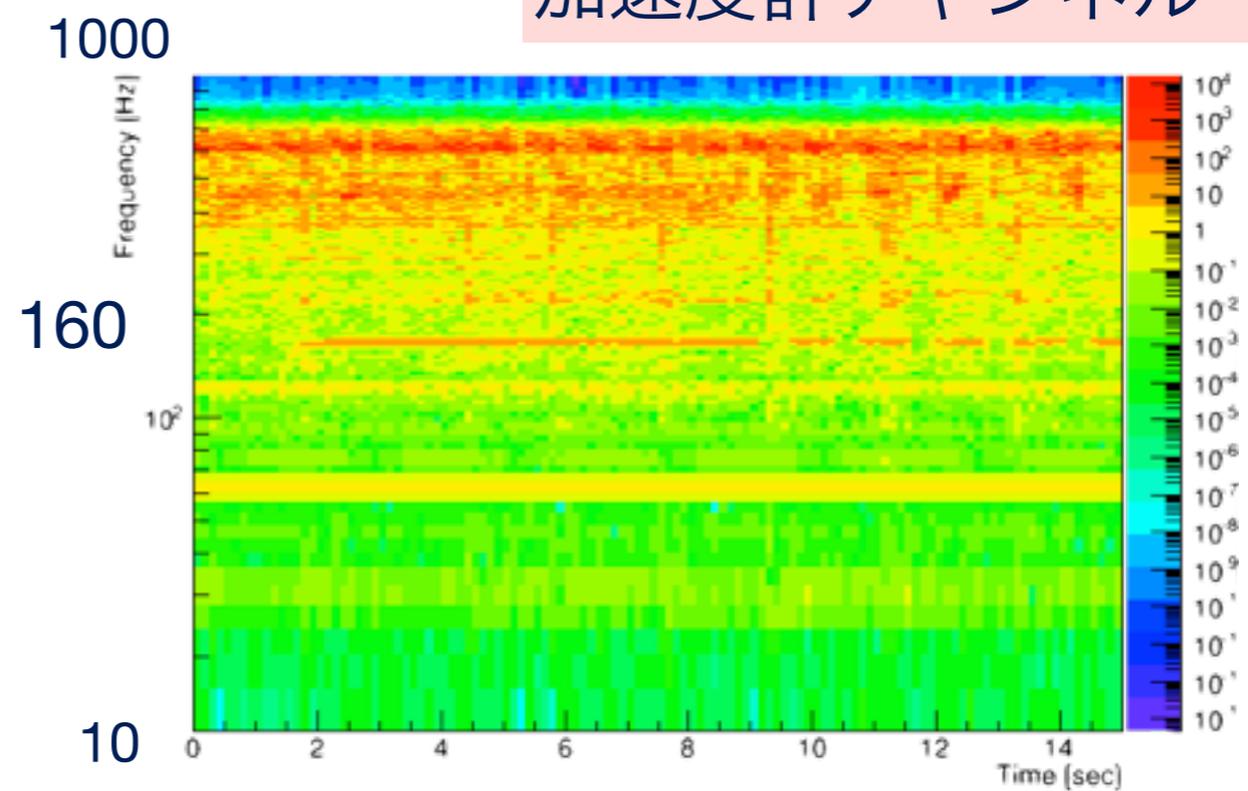
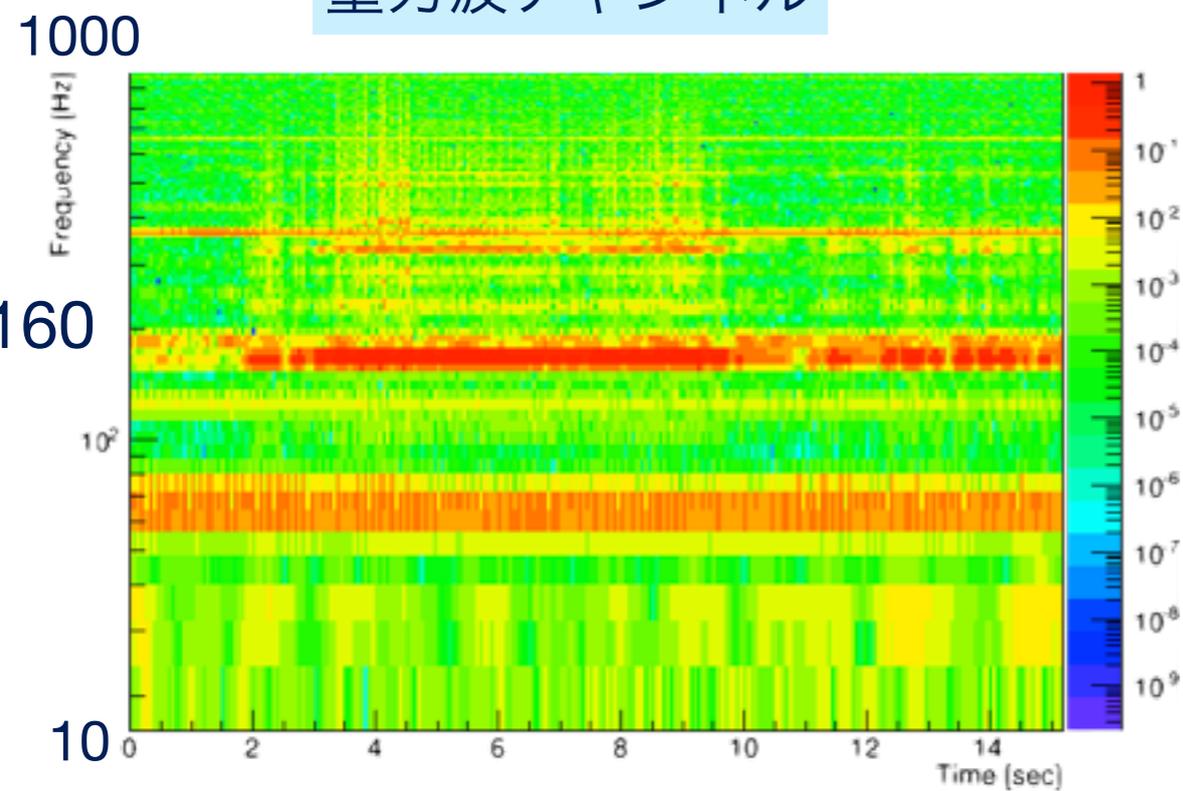
相関値



時間 [秒]

重力波チャンネル

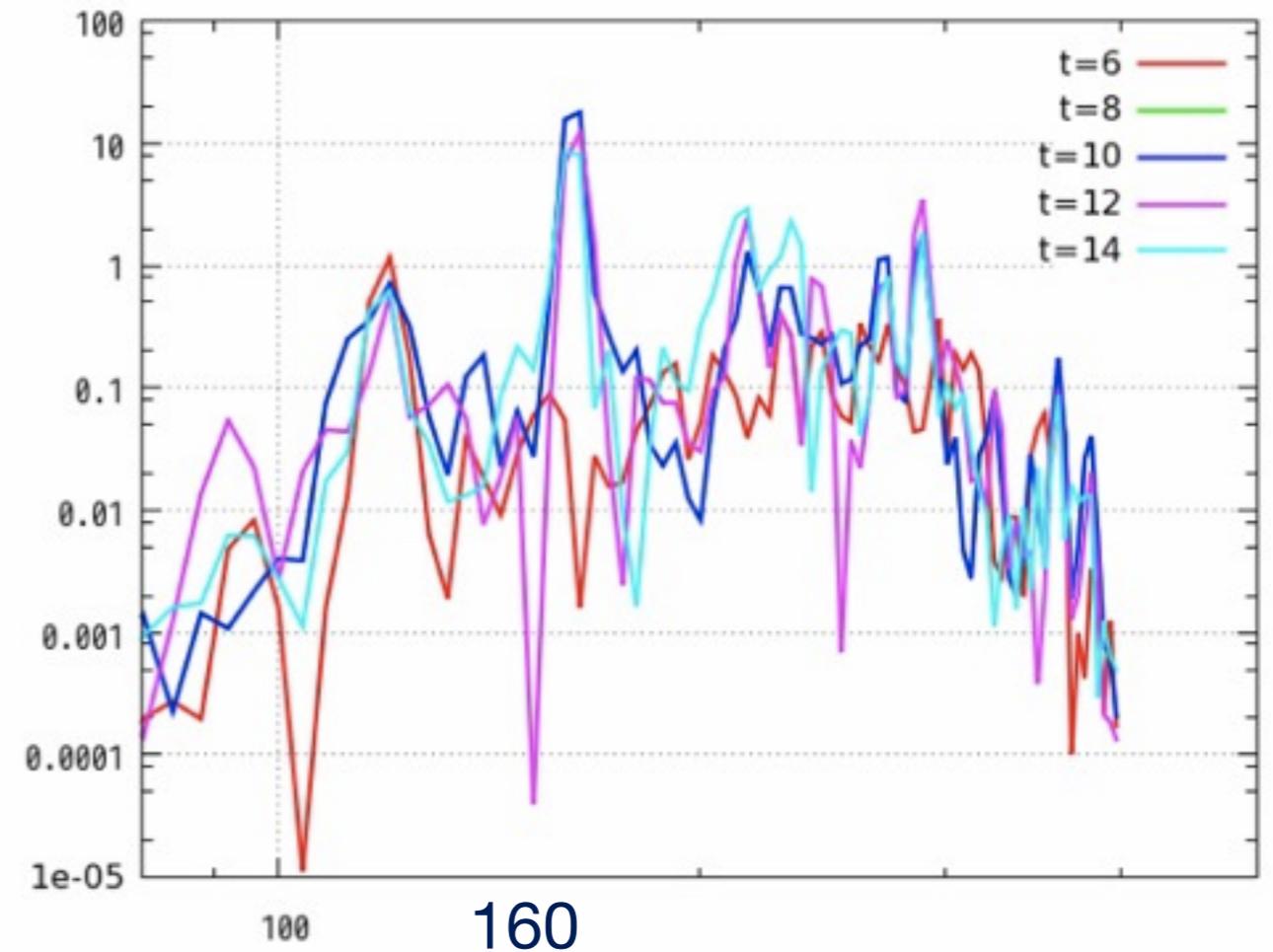
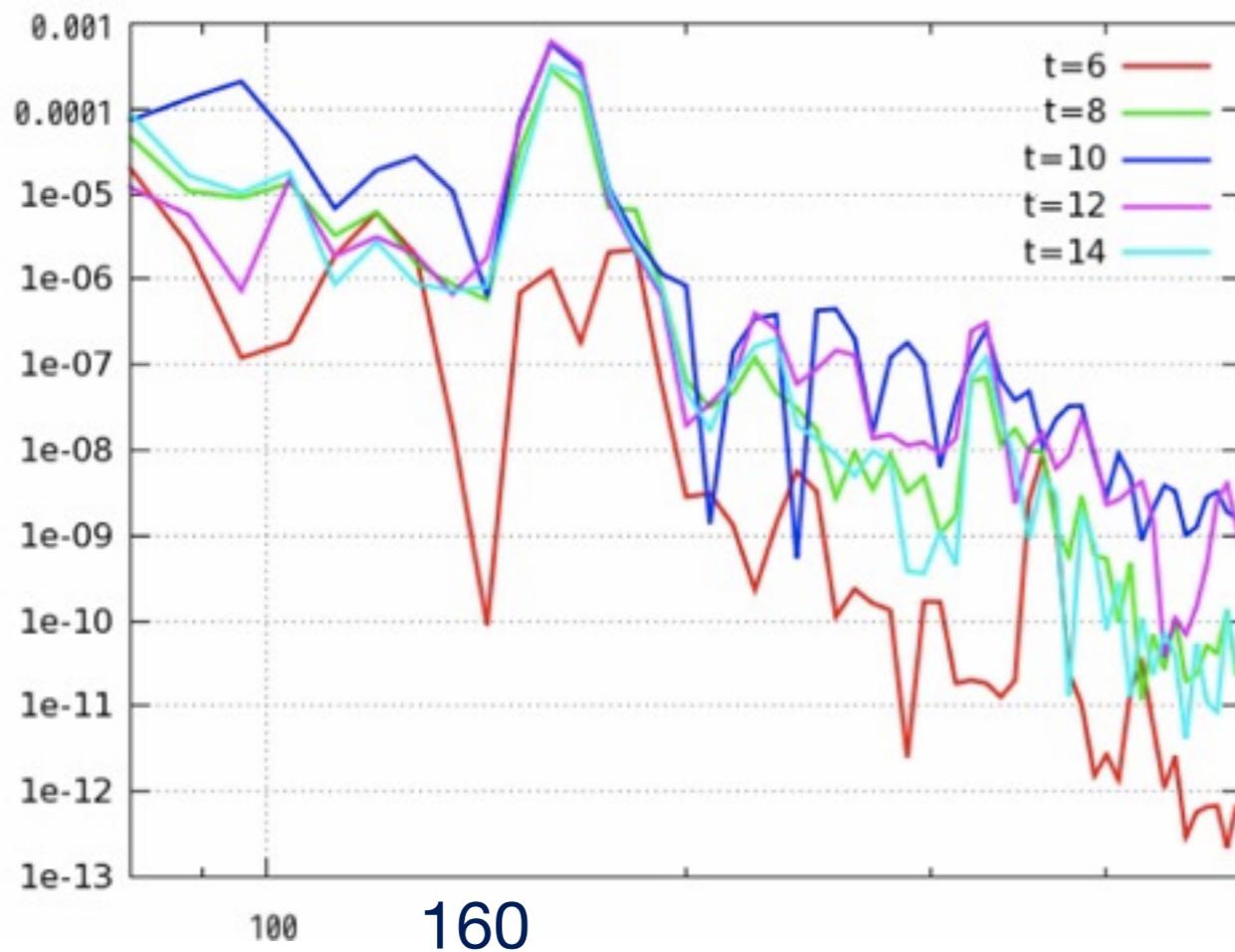
加速度計チャンネル



# 相関が得られた周波数帯域についてのスペクトルの時間変化

重力波チャンネル

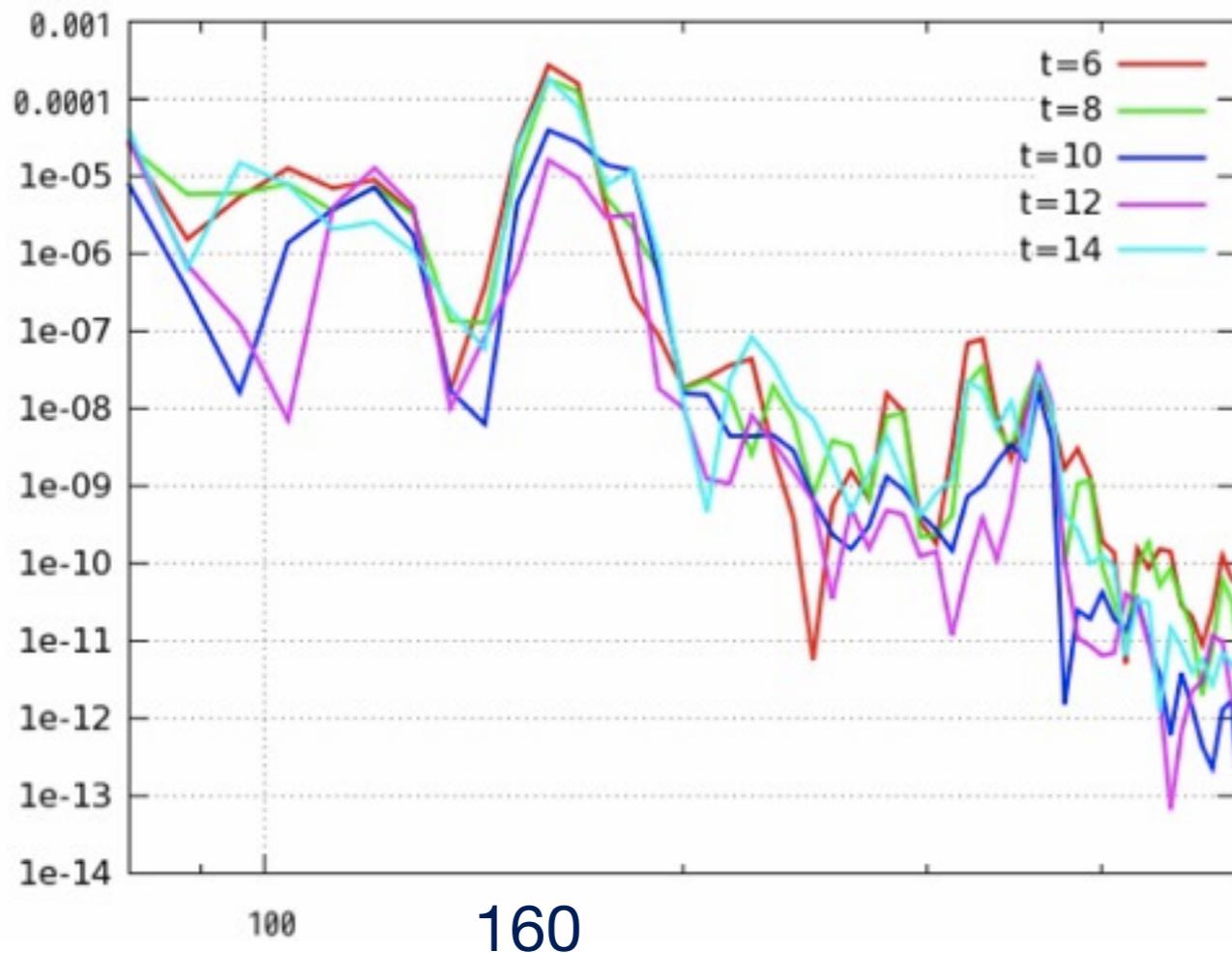
加速度計チャンネル



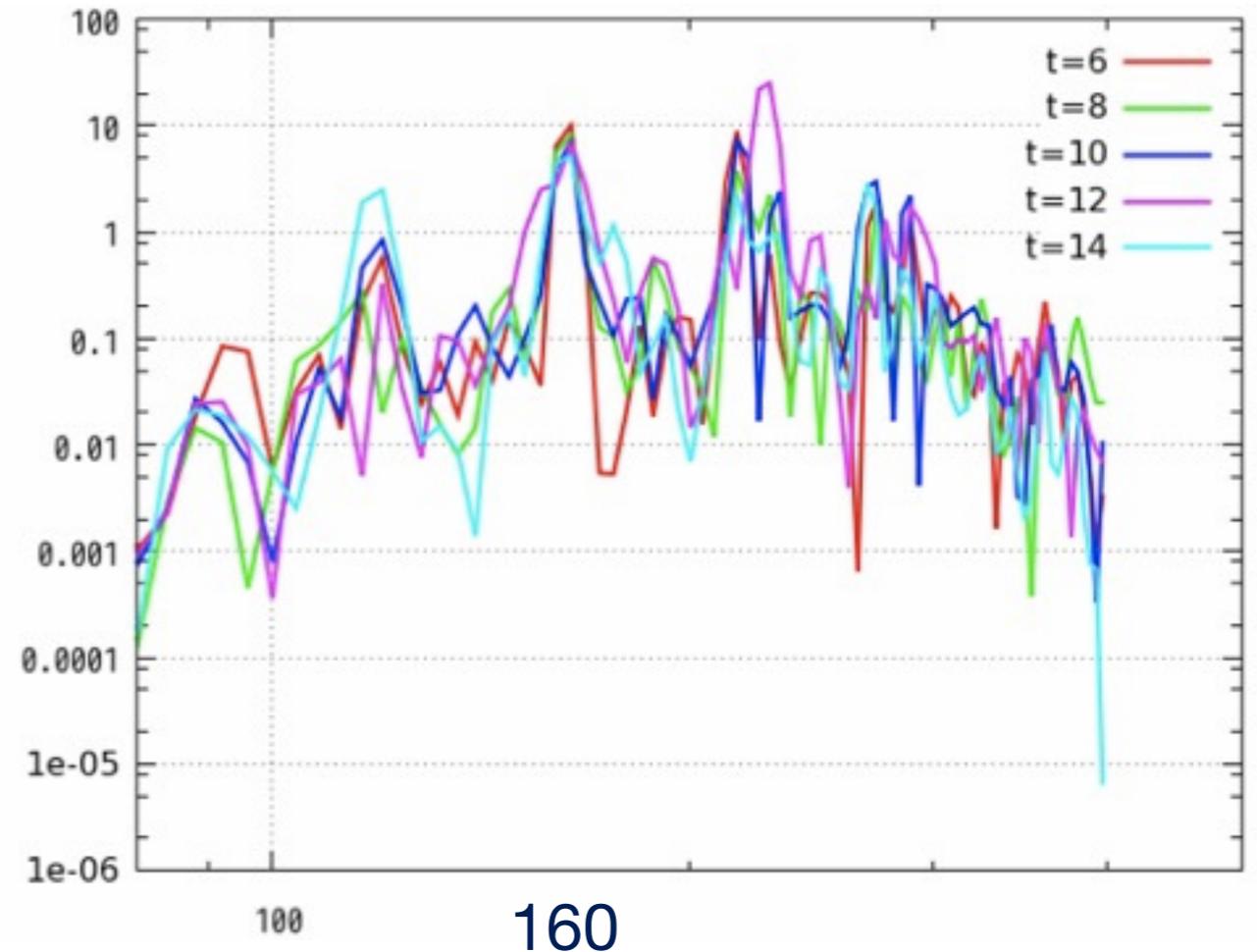
同じ周波数  $f \sim 160\text{Hz}$  に8秒あたりからpeakが出ている  
チャンネル間でこの相関が見えていた

# 相関が得られた周波数帯域についてのスペクトルの時間変化

重力波チャンネル



加速度計チャンネル



同じ周波数  $f \sim 160\text{Hz}$  に peak が出ている  
チャンネル間でこの相関が見えていた  
重力チャンネルのピークは時間とともに減衰しているようにも見える

# まとめ

- ・ LIGO, Virgoで線形・非線形な相関を持つ信号が数多く観測、ノイズ源を特定できていないものが検出器の感度を制限している

相関解析の情報を用いて、これらのノイズ源を絞り込む

重力波のデータ解析では偽イベントを除去し、検出効率を向上させる

- ・ KAGRAでもコミッショニング～観測の段階でグリッチの同定が重要となるだろう  
線形・非線形のどちらの相関も発見できるようにするために

## Pearson相関係数

## Maximum Information Coefficient(MIC)

を組み込んだモニターツールを開発した

非線形相関の検出までカバーしたモニターツールは**世界初**である

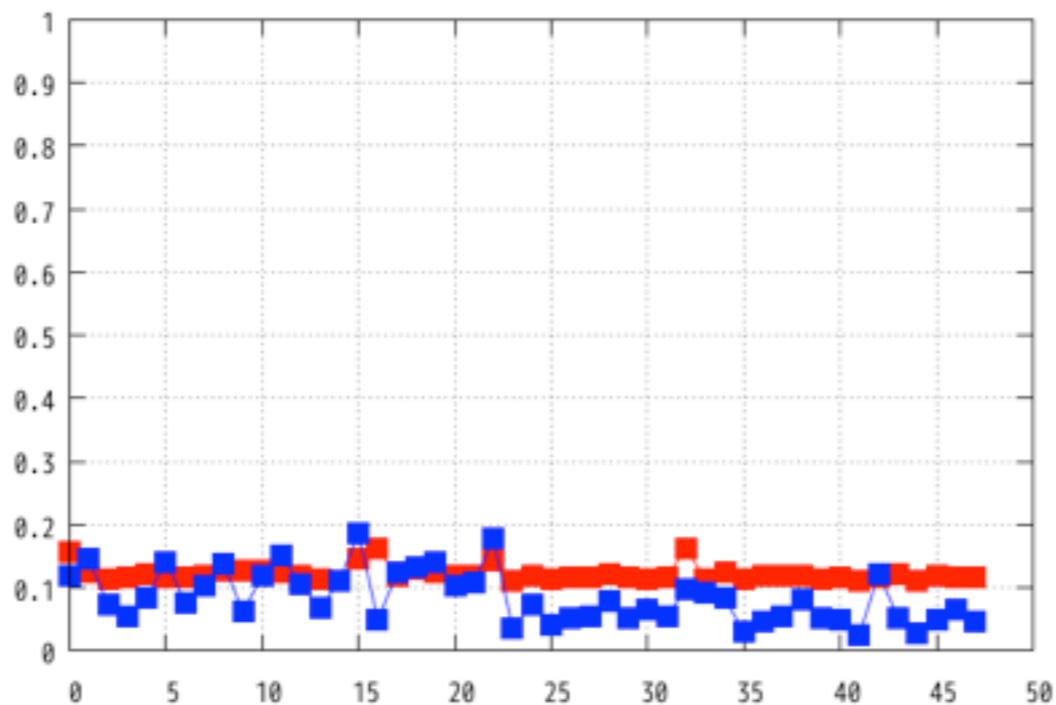
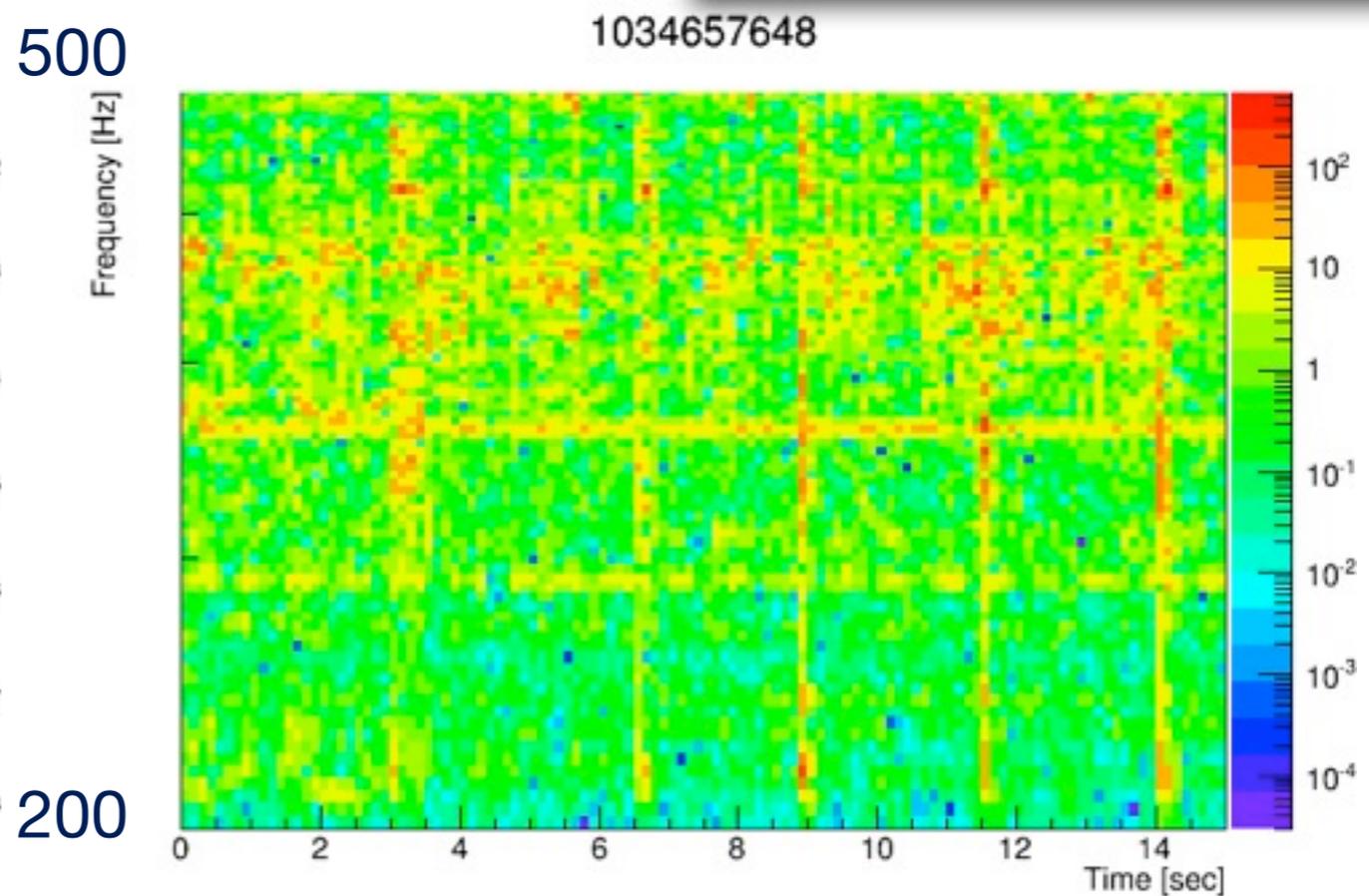
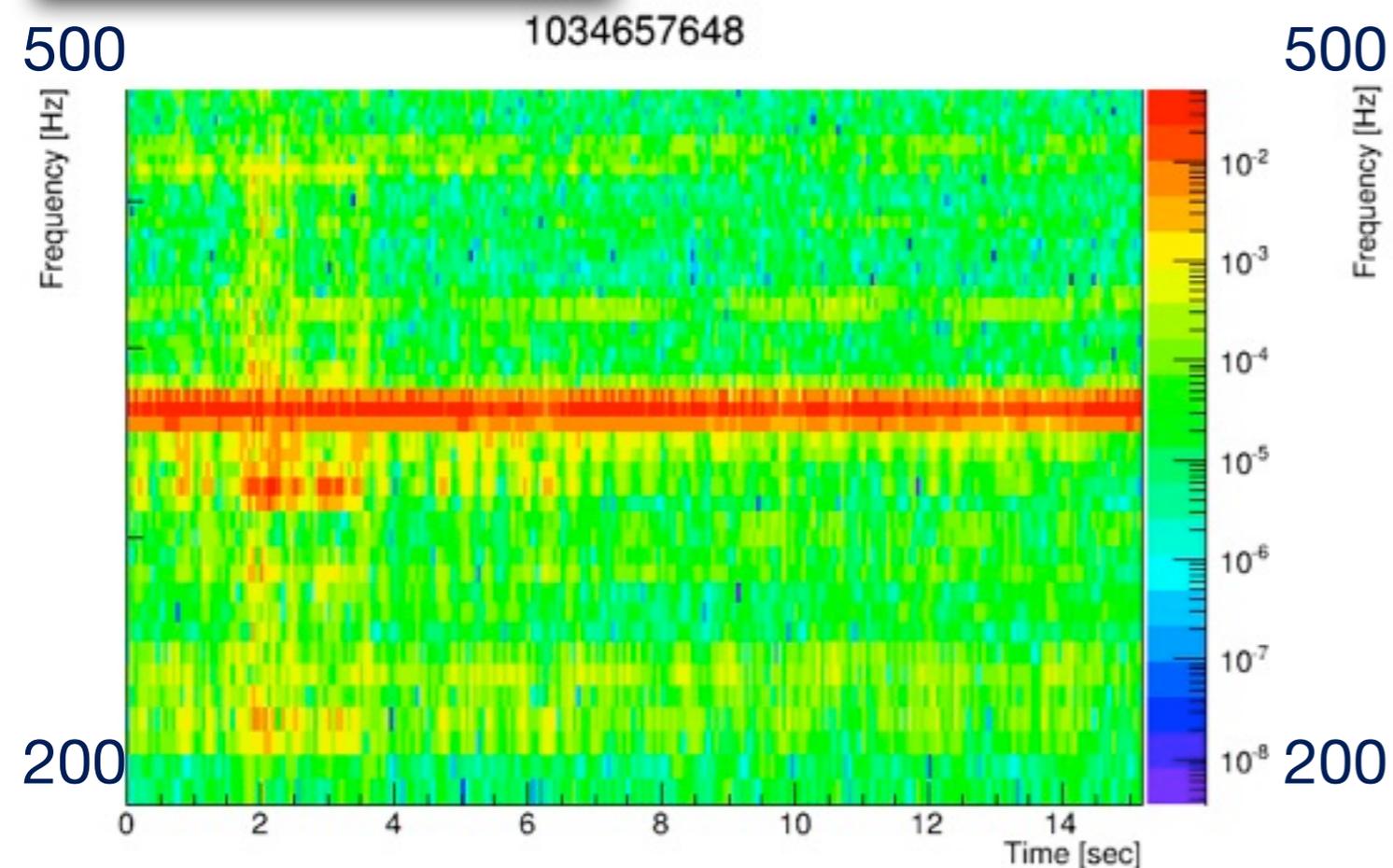
- ・ 地震計と重力波チャンネルのCLIOでの実データに相関解析を行った  
2つのチャンネルにある相関を発見した、開発した相関モニターの動作確認を行えた



# インジェクションした信号からは相関が見られなかった

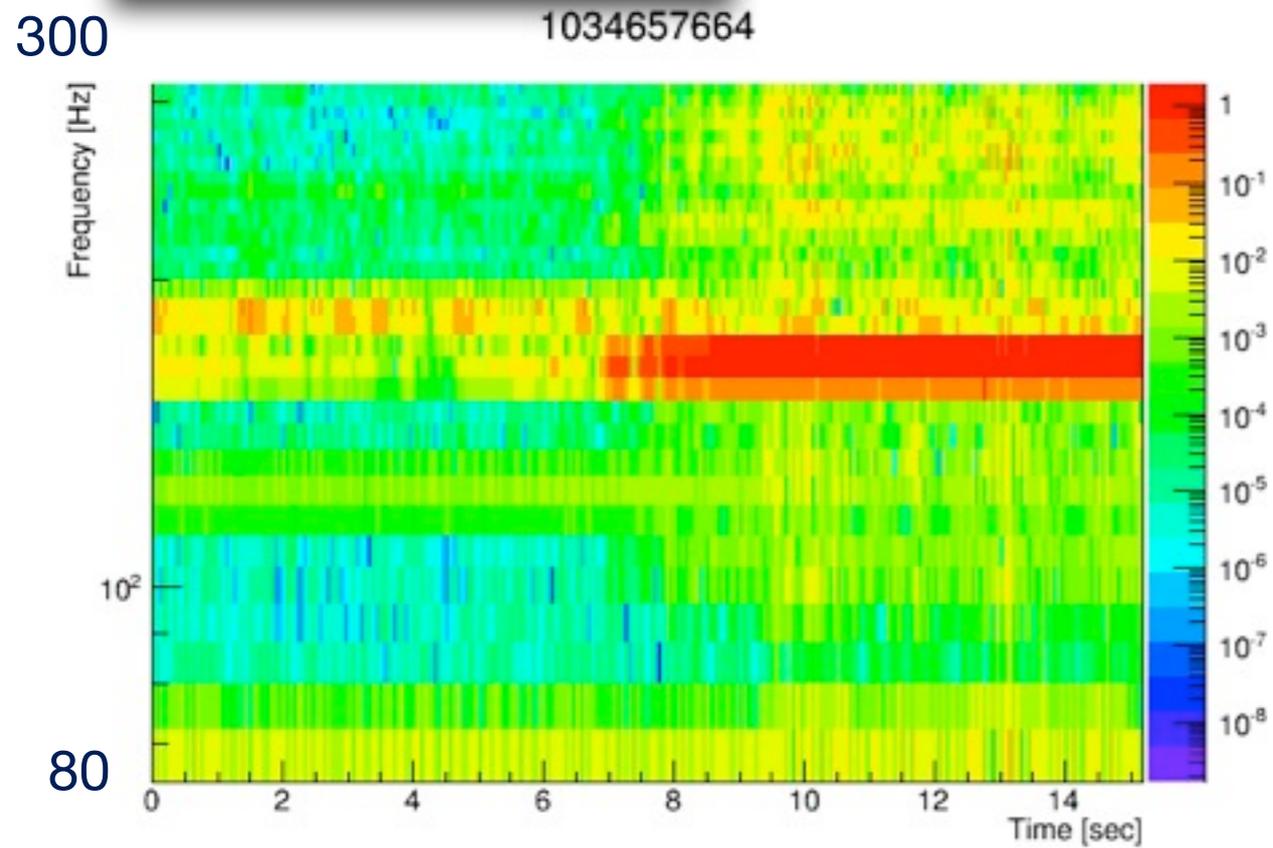
重力波チャンネル

加速度計チャンネル

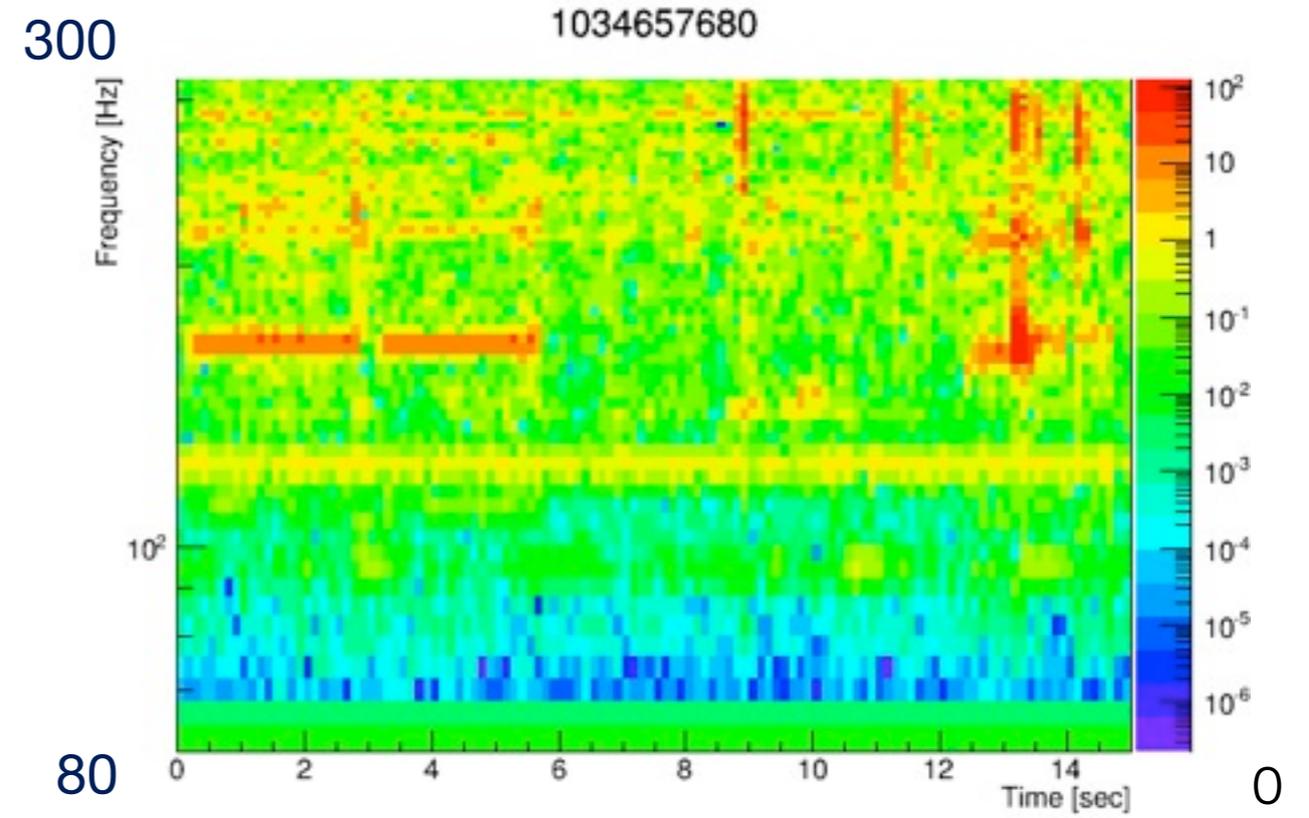
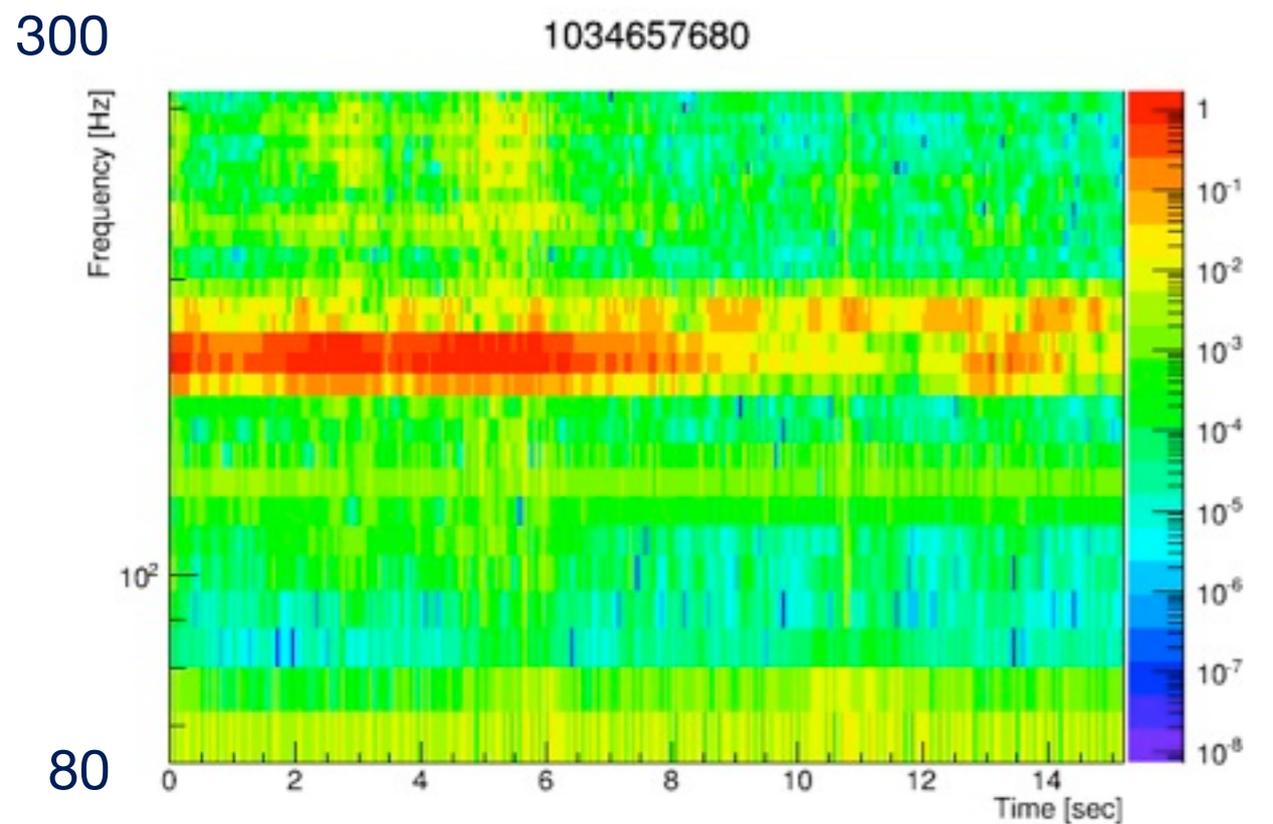
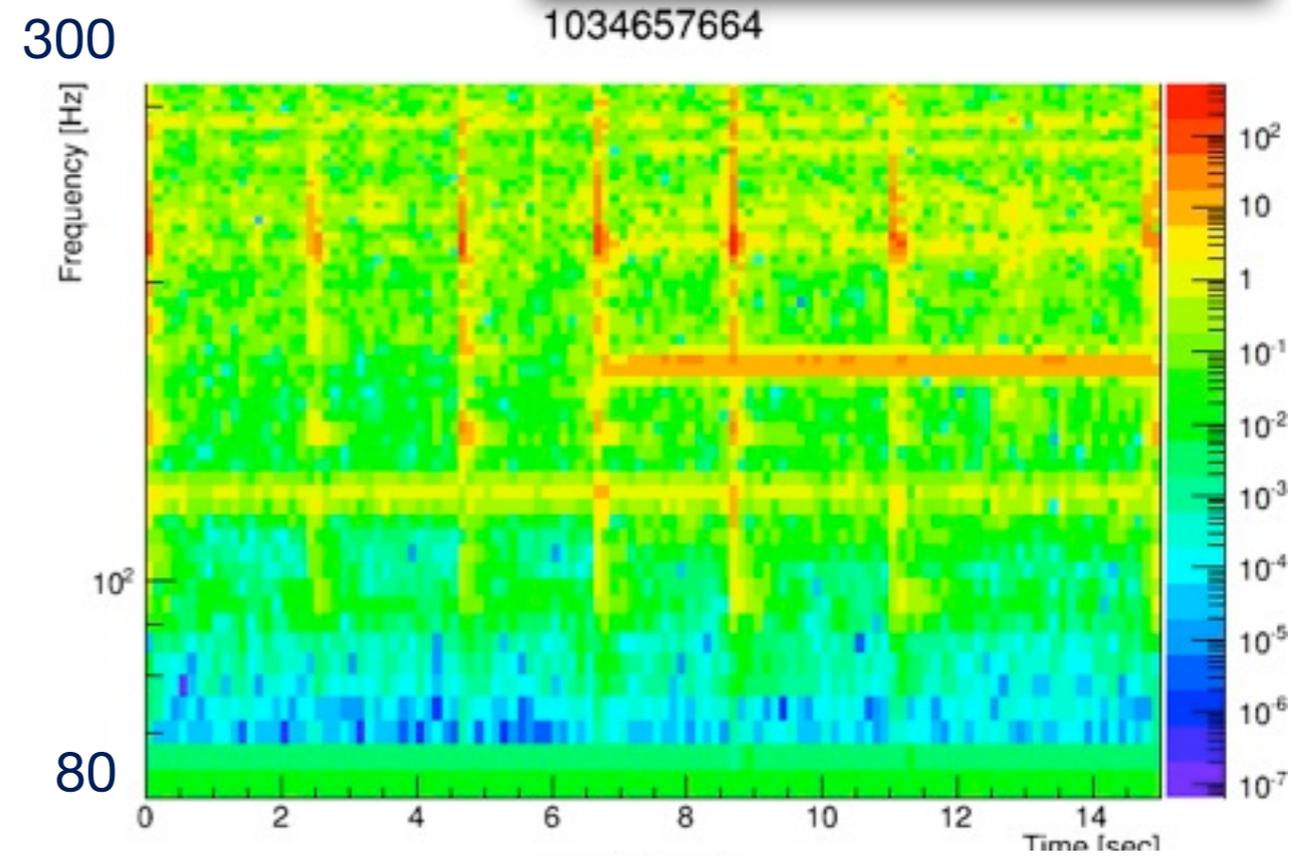


# 相関が見られたそれぞれのチャンネルのスペクトログラム

重力波チャンネル



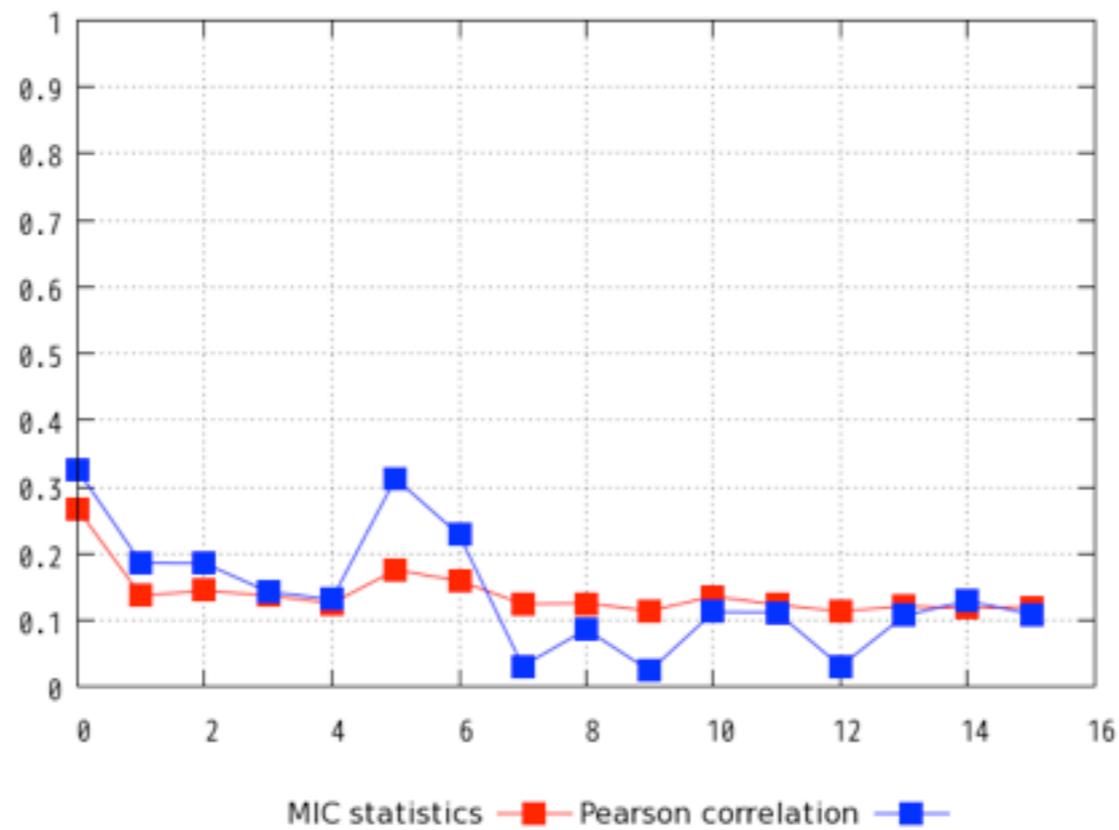
加速度計チャンネル



# 同じ周波数帯域でも相関が見られないデータ

相関値

f\_low = 100Hz  
f\_high = 200Hz  
の帯域について



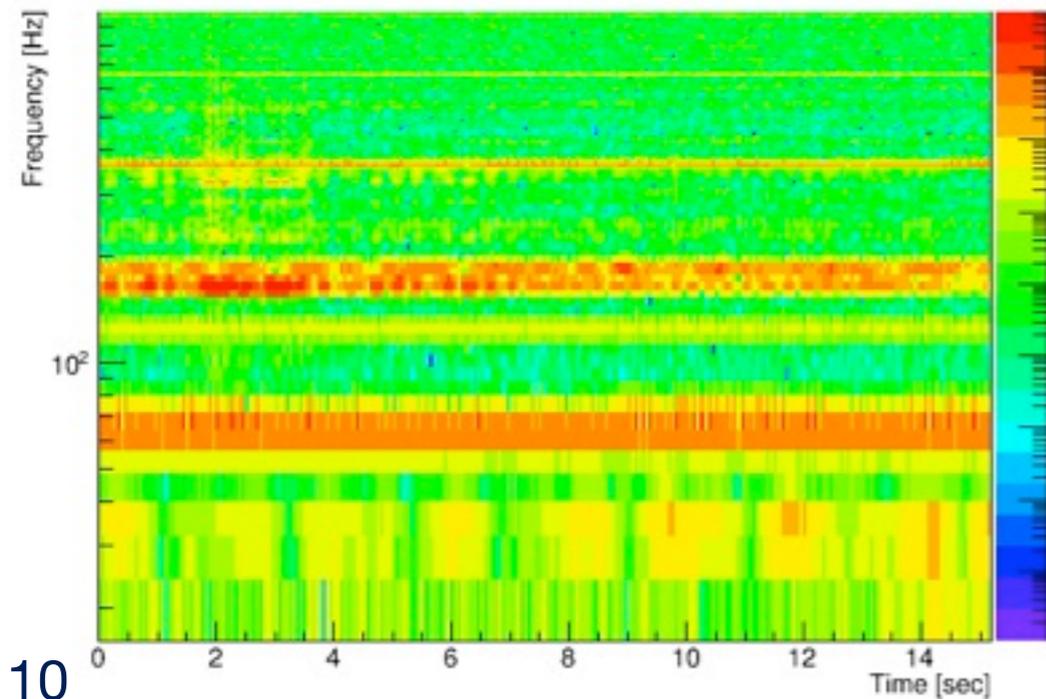
時間 [秒]

加速度計チャンネル

重力波チャンネル

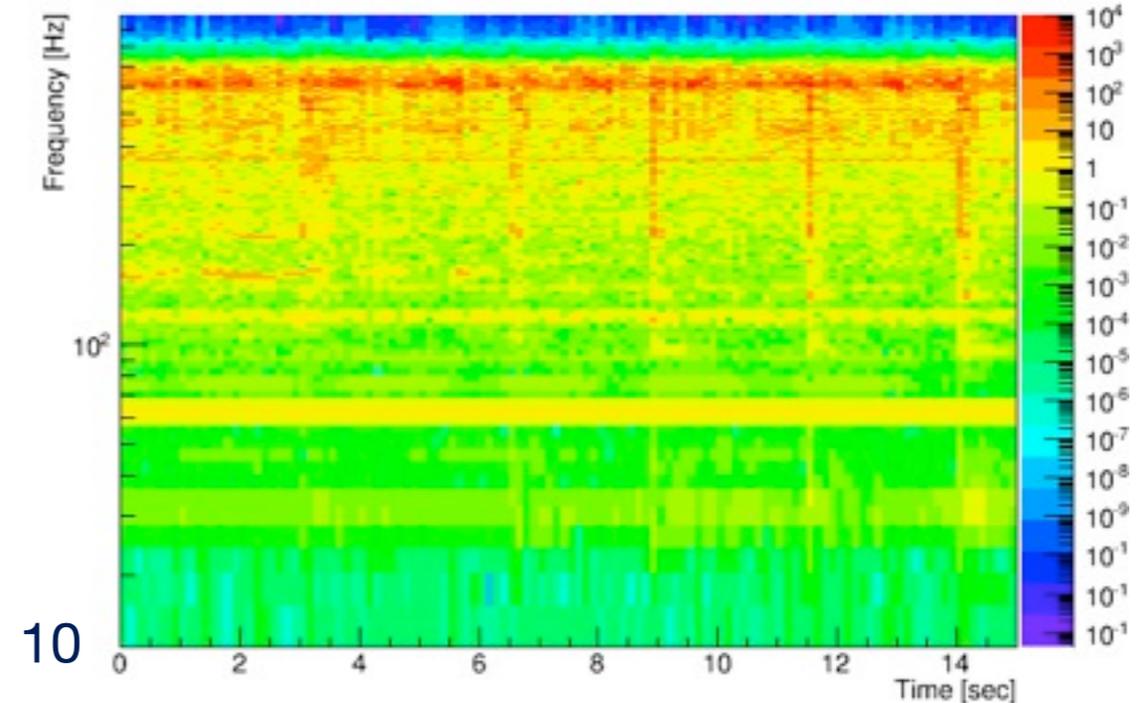
1000

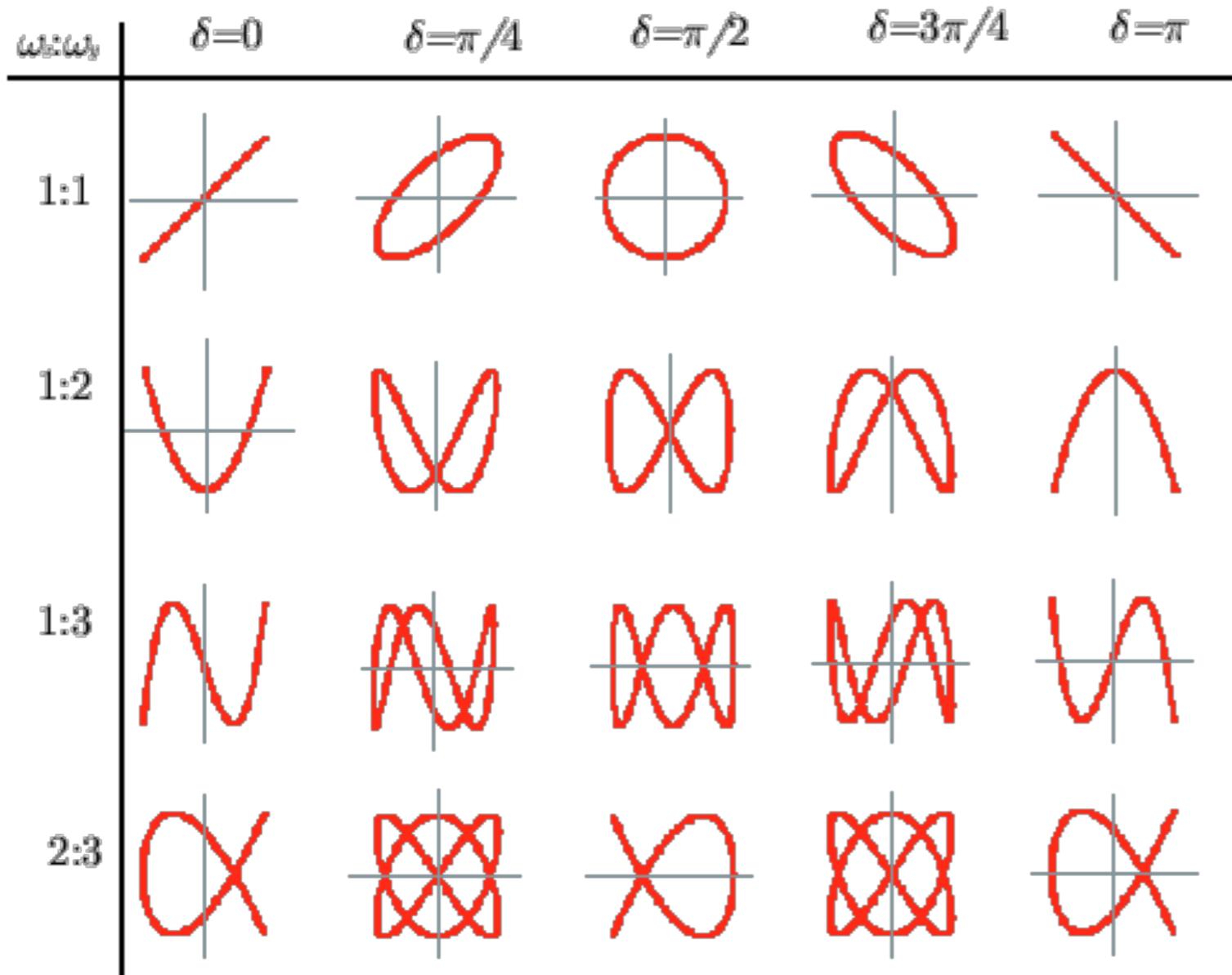
1034657648



1000

1034657648





$$x = \sin(\omega_1 t)$$

$$y = \sin(\omega_2 t + \delta)$$

time shiftを行う  
 = 異なる $\delta$ について見られる

今回はtime shiftを行うと  
 Pearsonでも見えるが  
 必ずしも見えるわけではない