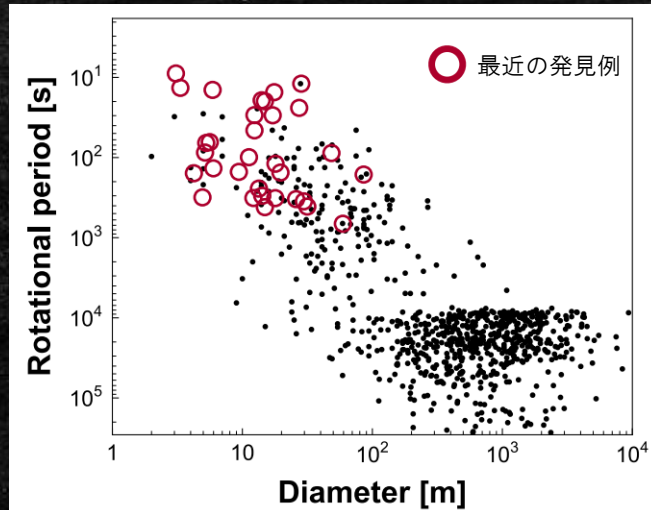


ガウス過程回帰による 小惑星の自転周期の推定

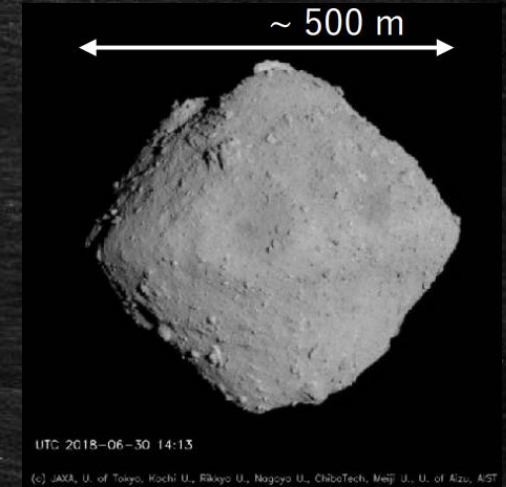
*和田空大,
酒向 重行, 瀧田 怜, 紅山 仁, 津々木 里咲, 倉島 啓斗 (東京大学),
大澤 亮 (国立天文台)

地球接近小惑星(NEO)について

- 地球接近小惑星 (Near-Earth Objects, NEOs)
 - 地球への被害の軽減
 - 地球に近いので探査機によるその場観測が可能
 - 地球に近いので10 m 級の微小小惑星も観測可能
- 最近の研究で高速自転する天体の発見数が増加
 - 周期解析の重要性



Beniyama et al. 2022



地球接近小惑星 (162173)
Ryugu
(クレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大,
名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)

自転周期解析の問題点

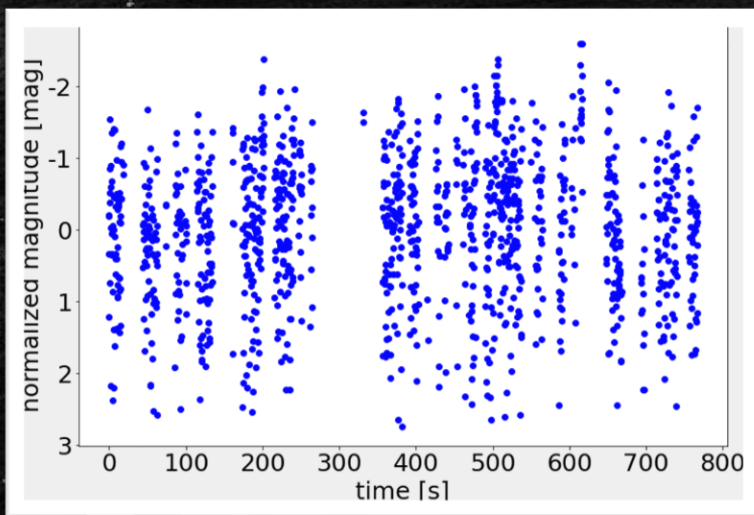
- データの欠損が発生することがある

- 天候、星との重なり、視野移動など

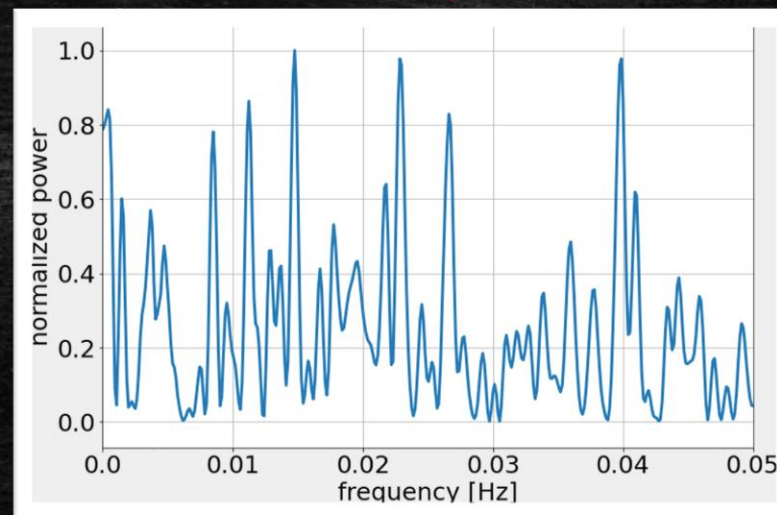
→ 周波数解析での精度に関わる

- ① S/Nの悪さから周波数を確定しづらい
- ② 欠損に周期性があるとエイリアスが出てしまう

正しい周波数は？



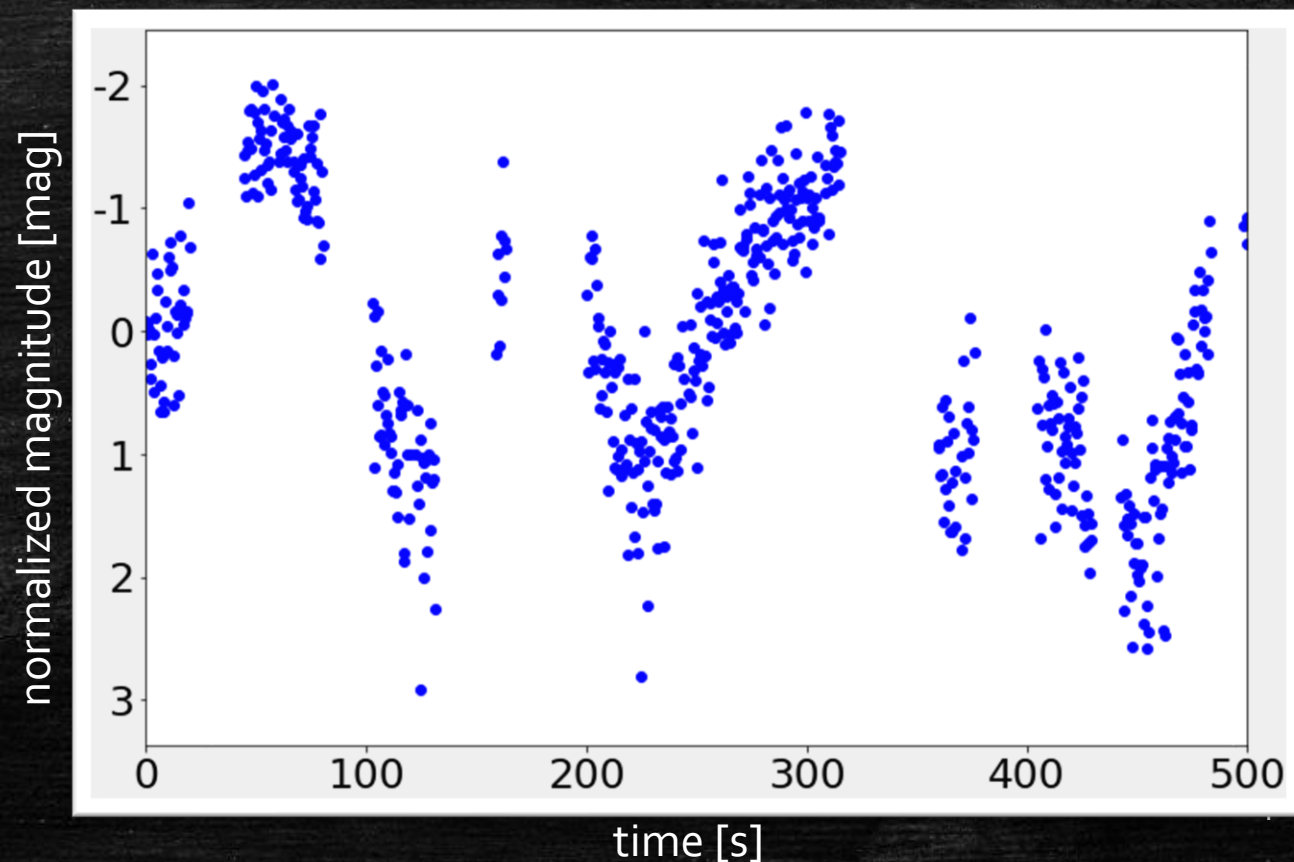
周波数
解析



欠損部分の回帰

- 本研究では**ガウス過程回帰**という手法を用いて光度曲線の回帰を行うことで、これらの問題点の解決を試みた

右図は2020TL14の
光度曲線の一部。

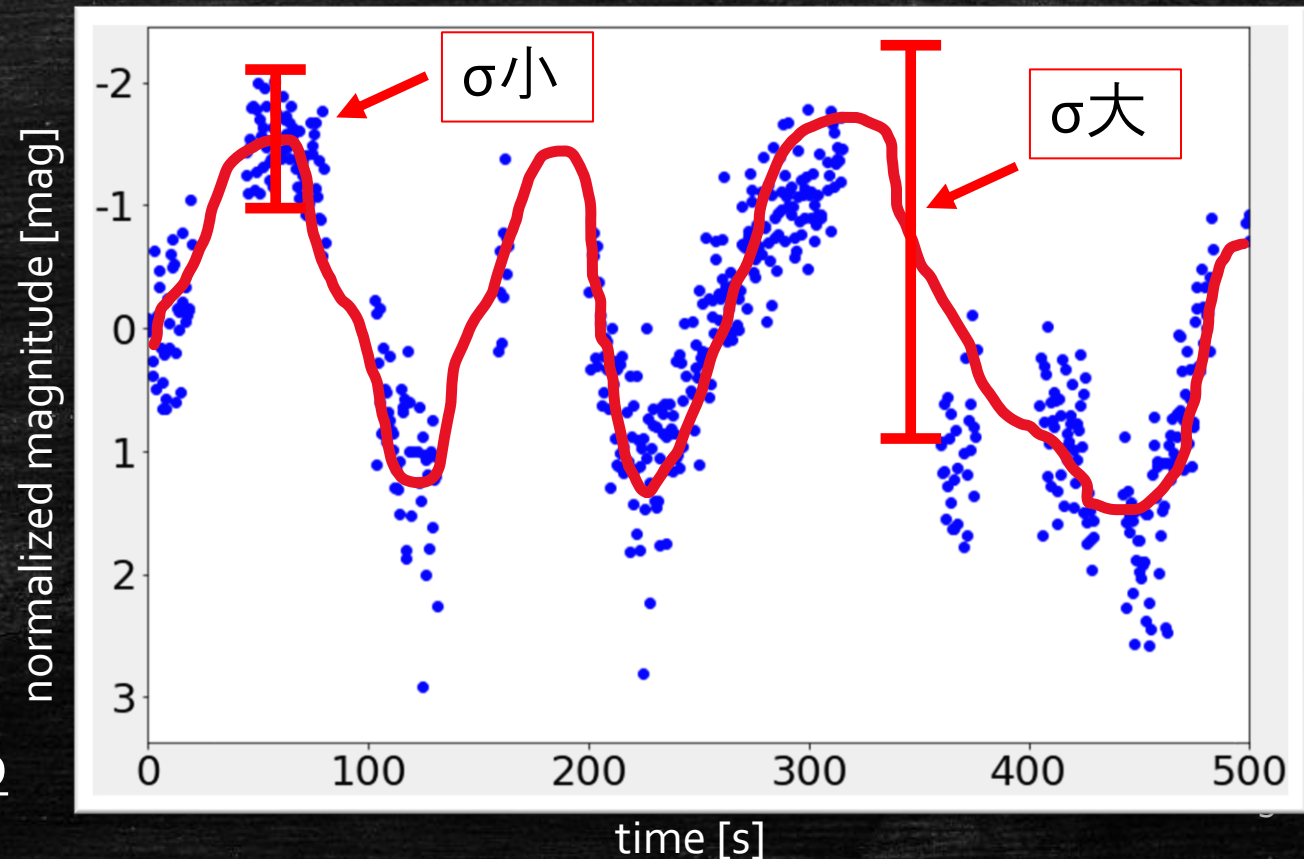


欠損部分の回帰

- 本研究ではガウス過程回帰という手法を用いて光度曲線の回帰を行うことで、これらの問題点の解決を試みた

右図は2020TL14の
光度曲線の一部。
赤線のような回帰曲線
が表示されてほしい。

→誤差付の回帰曲線を
周波数解析にかけられる



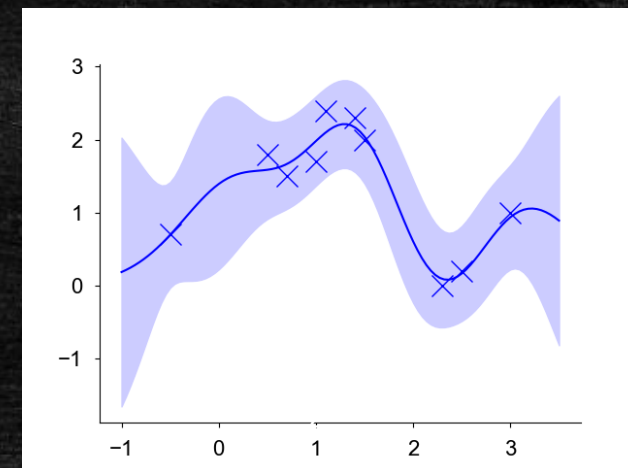
ガウス過程回帰(Gaussian Process Regression, GPR)の導入

- 前頁のように、ガウス過程回帰では不確かさまでわかる!
 - 直感的には "データと近い場所ほど近くにあるだろう" ということ
- 滑らかな曲線で回帰できる
 - 重みを積分していることによる
- 類似度を表現するカーネル関数による回帰
 - ex. RBFカーネル
- ※AGNなどの分野では既にGPRが多数利用されている
 - ex. Duncan et al. 2018
 - NEOでの利用も。 ex. Lindberg et al. 2022

RBFカーネル

$$k(x, x') = \theta_1 \exp(- (x - x')^2 / \theta_2)$$

GPRによる不確かさを含めた回帰の例
<http://chasen.org/~daiti-m/gpbook/>



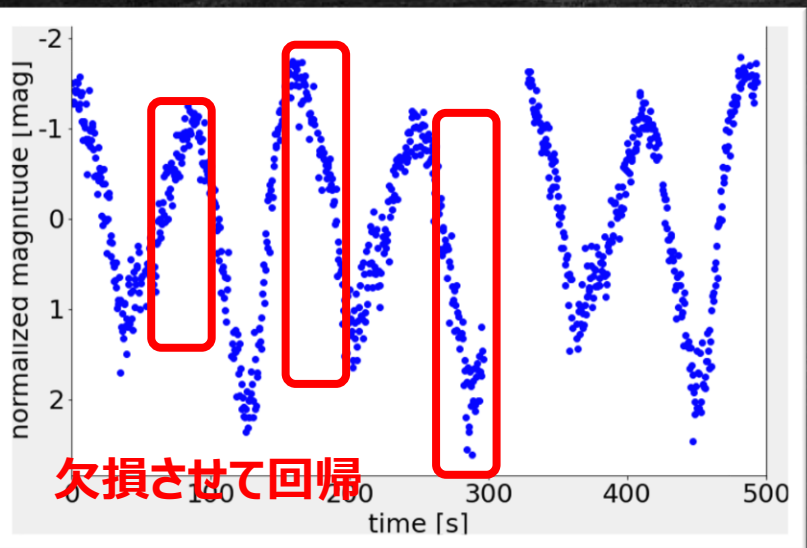
今回GPRの有用性の確認に用いた方法

- データ： Tomo-e Gozenカメラにより取得されたNEOのデータ
 - Beniyama et al. 2022 (本研究では20天体)
- ソルバー： PythonのGPyモジュール
 - <http://github.com/SheffieldML/GPy> (2012).
 - GPyでは勾配法によってハイパーパラメータが最適化される
- GPyで用いたカーネル関数：
 - RBFカーネル
- 周波数解析にはLomb-Scargle法を用いた
 - <https://docs.astropy.org/en/stable/timeseries/lombscargle.html#frequency-grid-spacing>
 - 誤差をinputできる

2020UQ6の光度曲線の一部を欠損させて回帰

- まず、NEOの実測の光度曲線（2020UQ6）の一部を欠損させ、GPRにより再現できるか確認した
 - 2020UQ6のデータは欠損がかなり少ない
- 次頁でその一例を解説

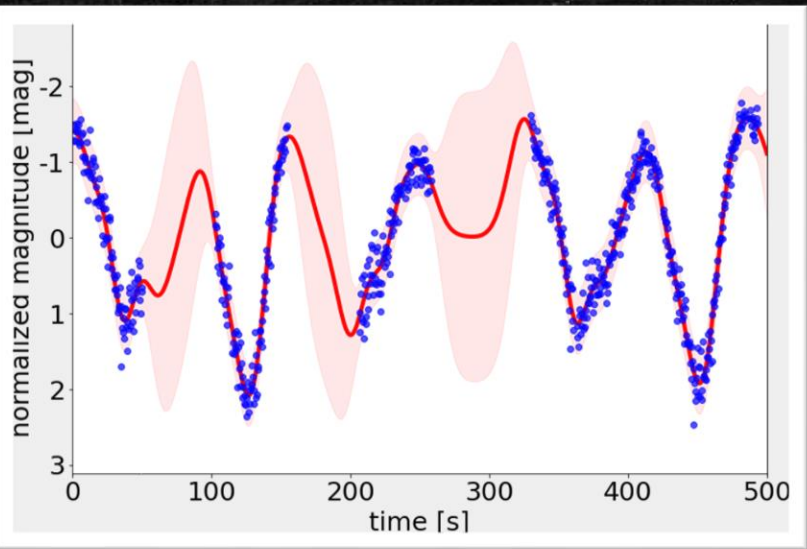
2020UQ6の光度曲線の一部を欠損させて回帰



左上図：
実際の観測データ

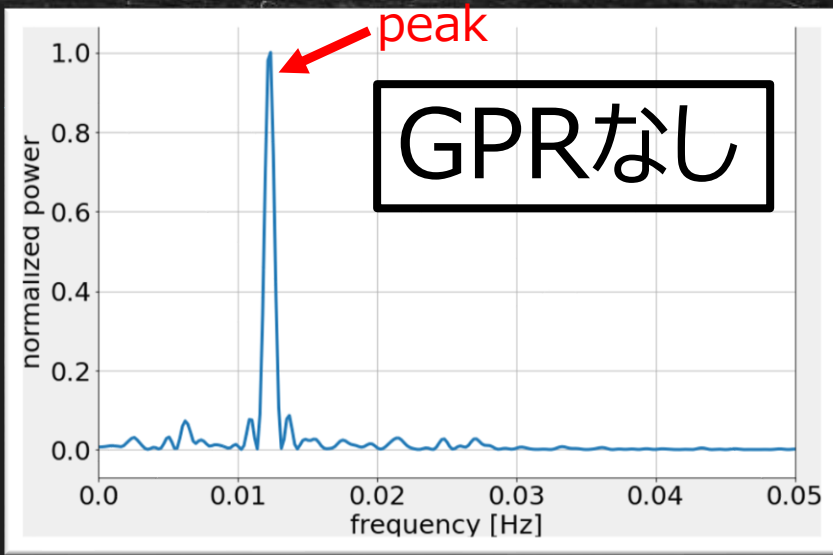
左下図：
欠損させて回帰した
結果

ともに
横軸：時間[s]
縦軸：等級[mag]
(正規化済み)

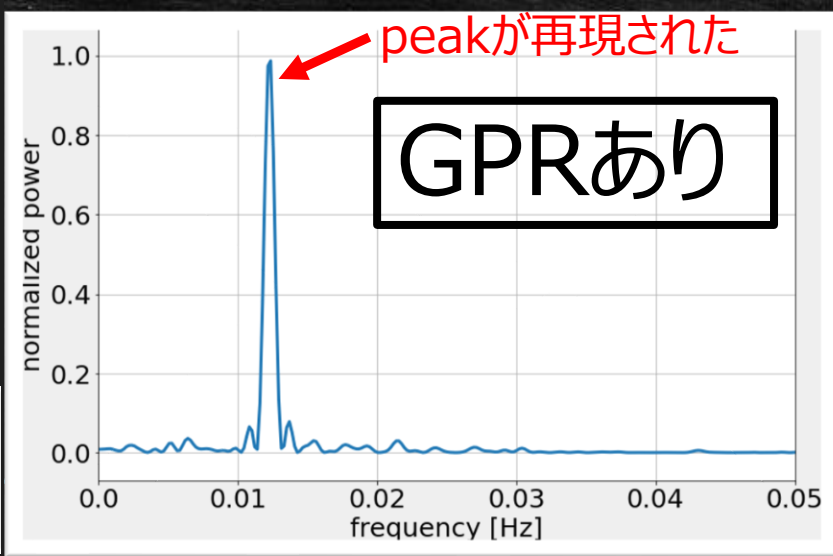


不確かさ込で光度
曲線が再現されて
いる

- confidence 2σ
- regression curve
- data



右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

**同じ周波数で
peakがあらわれた**

※GPRありの場合は
欠損部分にも
点があるため、
その分多数の点で
周波数解析が
行われている

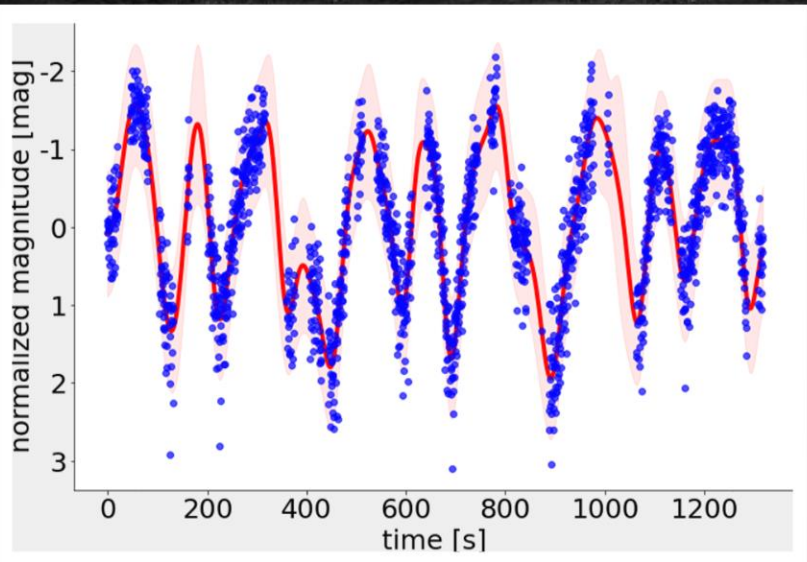
2020UQ6の光度曲線の一部を欠損させて回帰

- NEOの光度曲線をあえて欠損させGPRで回帰した結果
 - (不確かさも含めて)光度曲線を再現
 - 周波数解析でもpeakを再現
- 前頁は一例
 - 合計5パターン試したがどれも同じ周波数のpeakが再現された
- 以上からNEOの光度曲線においてもGPRは有用だと判断

欠損のあるNEOの光度曲線にGPRを適用

- 実際の天体のデータにGPRを適用した
 - 20個の天体で適用した
 - Beniyama et al. 2022
 - 典型的な計算時間は2分
 - 典型的なデータ数は1,000点
- 次頁以降でこのうちの数天体について説明

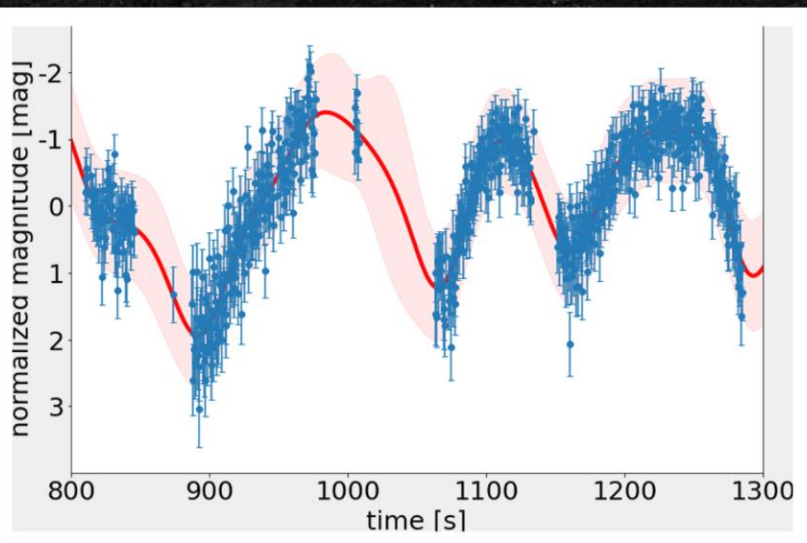
天体2021TL14の場合



左上図：
データと回帰曲線

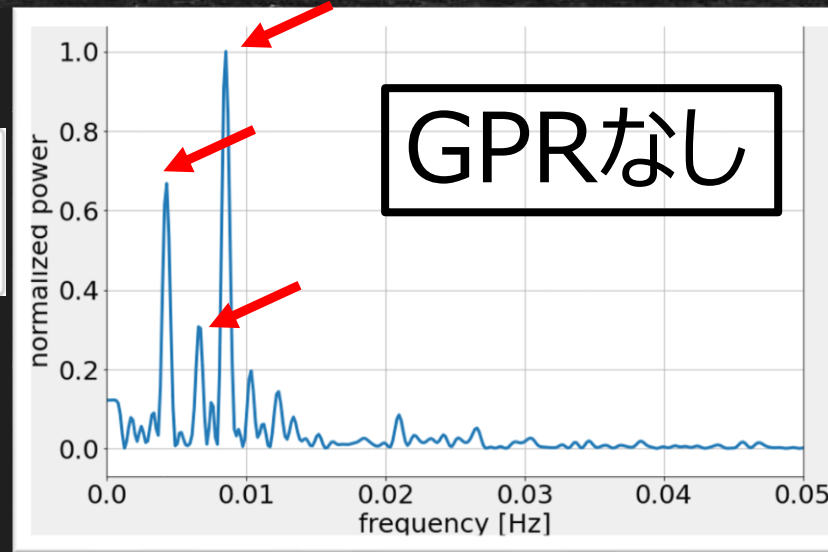
confidence 2 σ
regression curve
data

左下図(※参考)：
観測データの
2 σ 信頼区間を
エラーバーとして
表示した場合
(一部抜き出し)



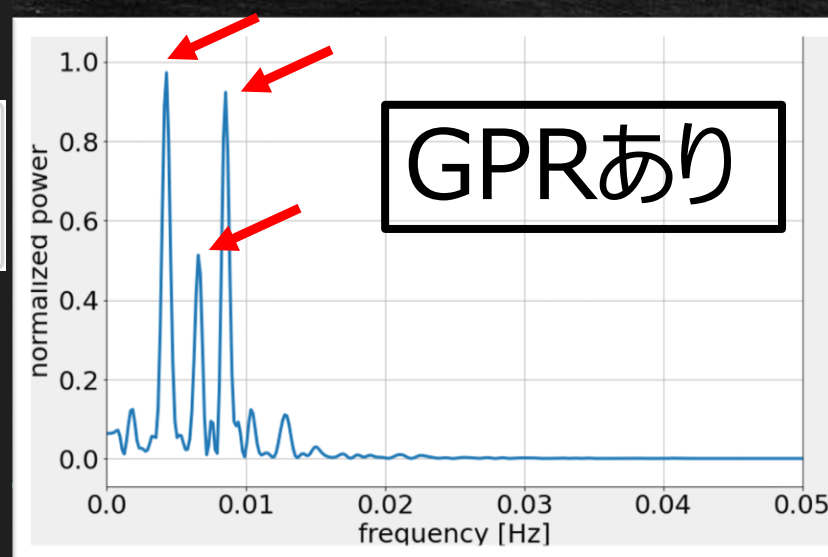
confidence 2 σ
regression curve
data

観測データと
回帰曲線で
2 σ 信頼区間が
対応していることが
確認できる



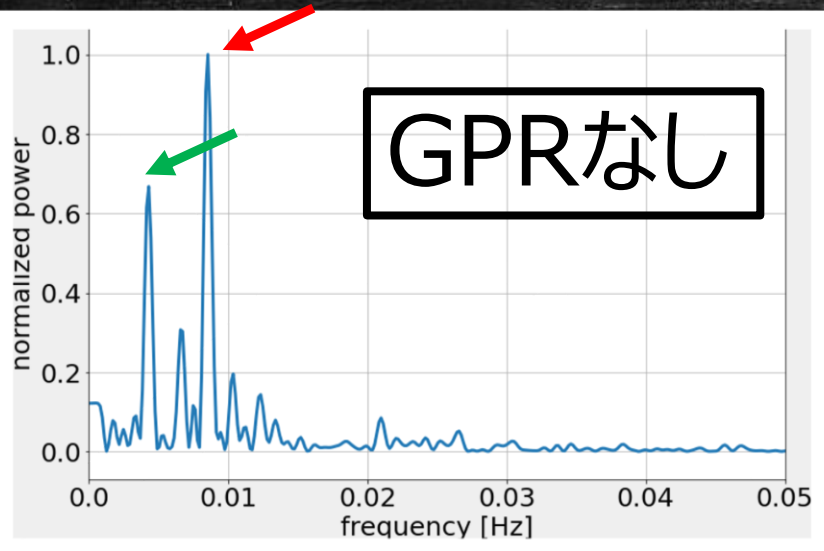
右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram

右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram



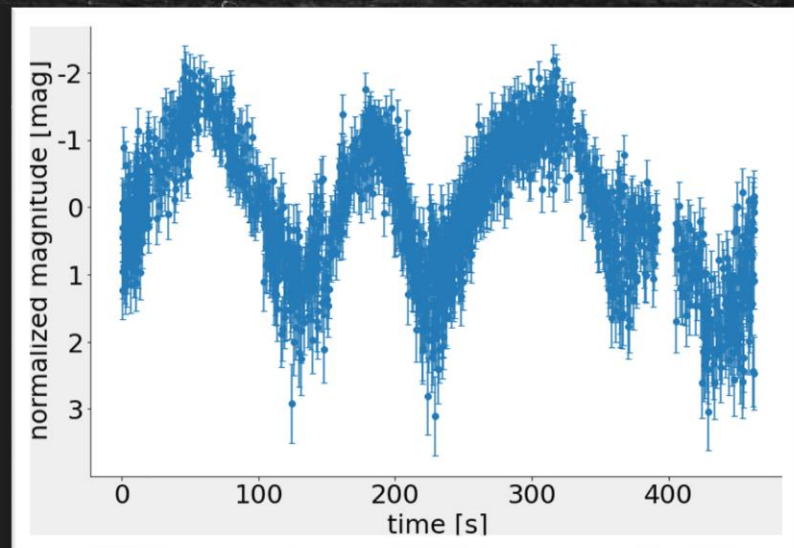
• peakの大小関係
に変化があった
• 0.02Hz~でも
変化あり

天体2021TL14の折り返した光度曲線(発表では省略)



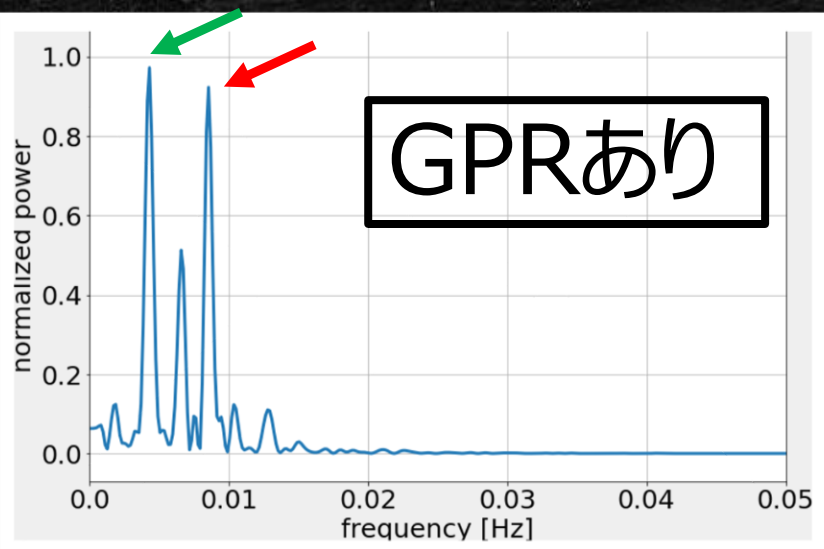
右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram

右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

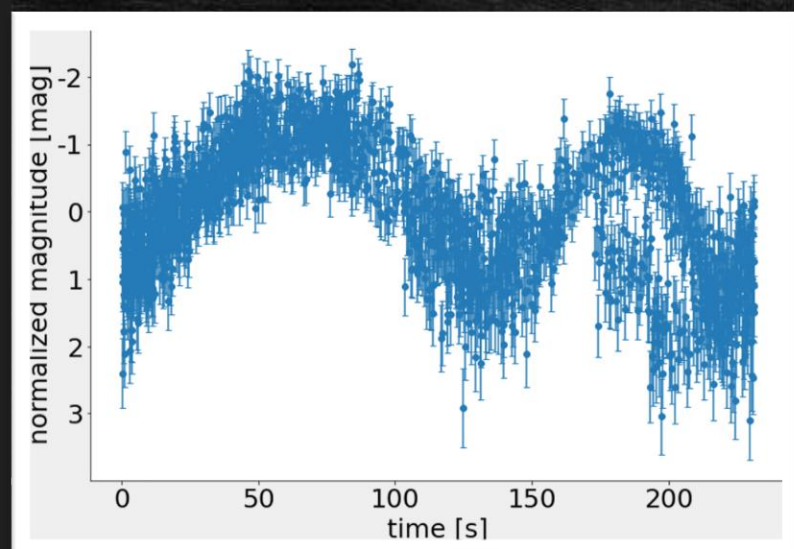


右上図：
← に対応する
波長で折り返した
場合の光度曲線

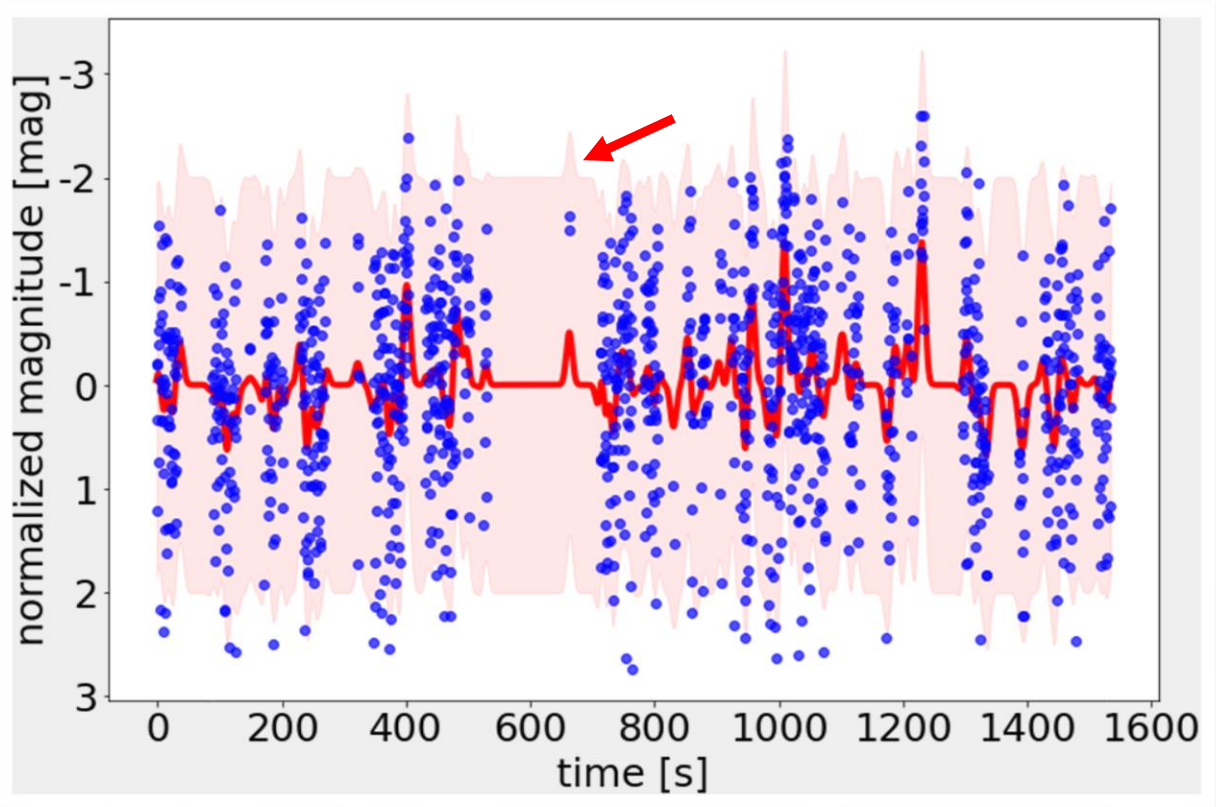
右下図：
← に対応する
波長で折り返した
場合の光度曲線



← と ← のpeak
に注目する



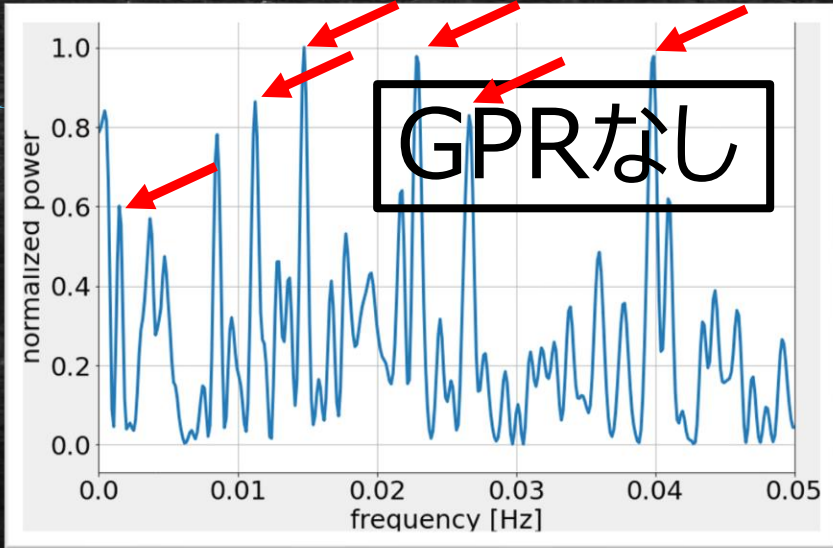
天体2020PW2の場合



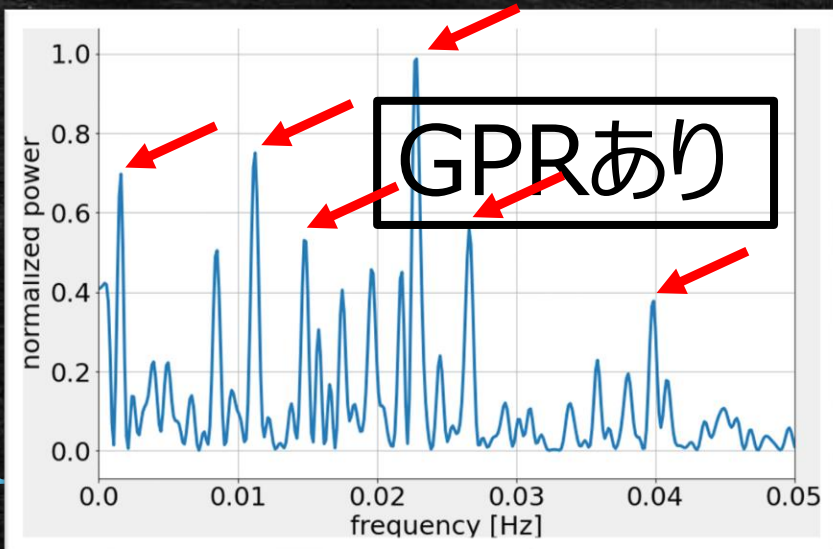
confidence 2 σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

データの測定誤差が大きく、回帰曲線が0に近づいてしまう部分が大きくなった



右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram

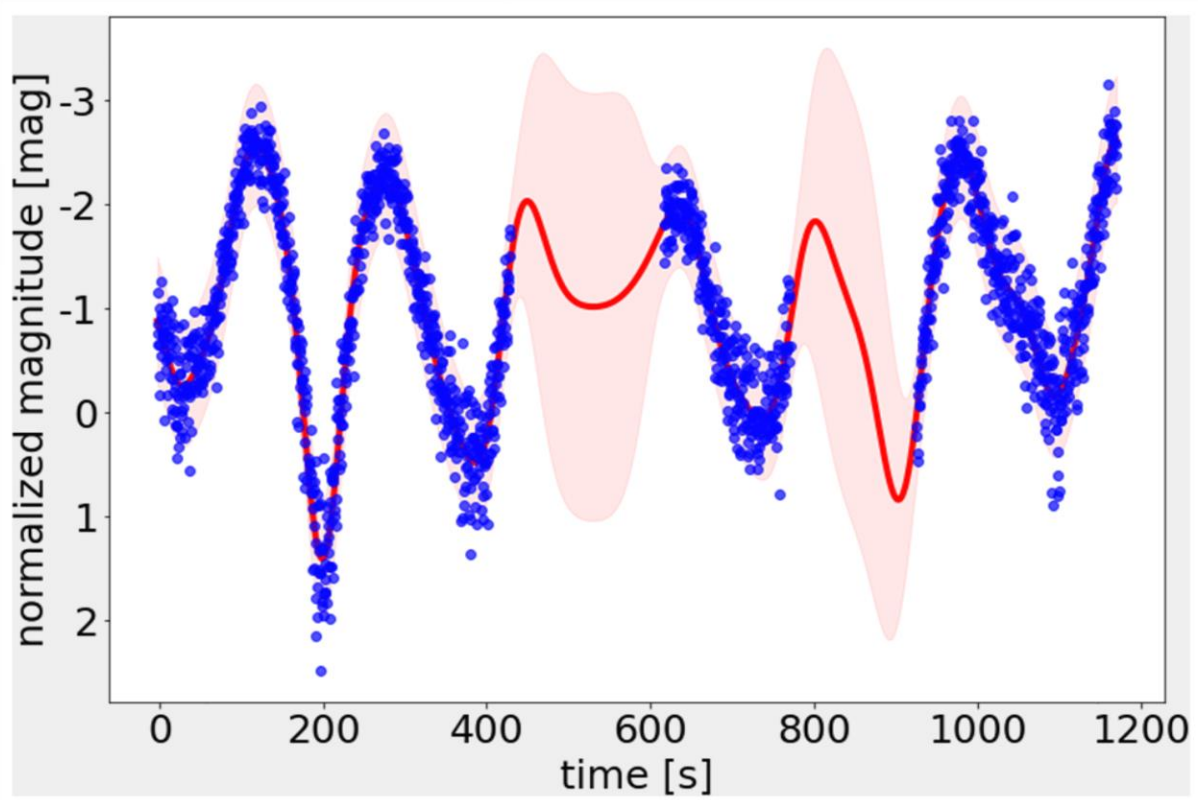


右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

・かなり異なる
periodogramが
得られた
・周波数の候補が
減ったとは言えない

今回はあまり効果
的ではなかった。

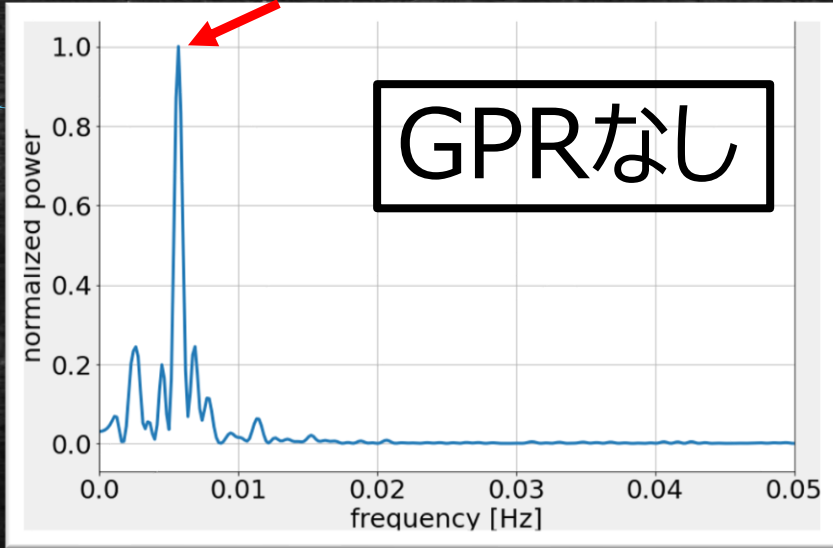
天体2020VZ6の場合



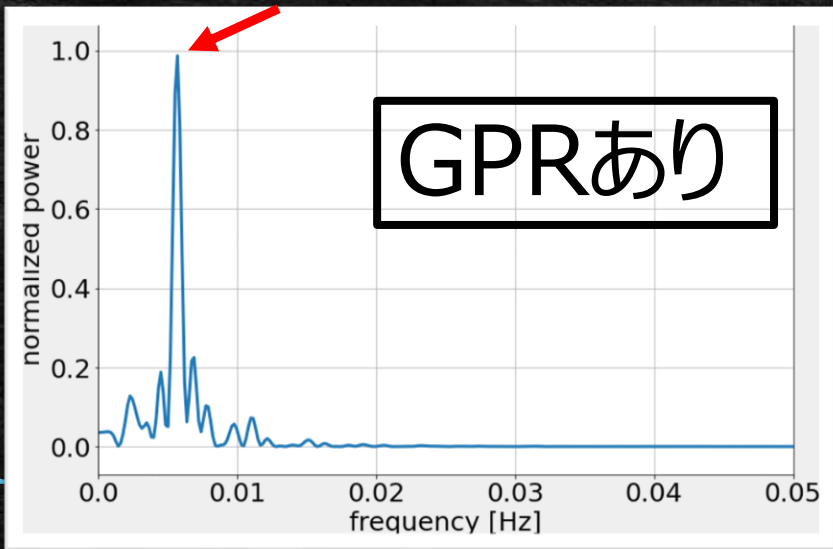
confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

今回は観測データの欠損が少ない



右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

・もとの周波数解析
の精度が良かったため
ほぼ変化なし

GPRを用いた周波数解析の利点・難点

利点

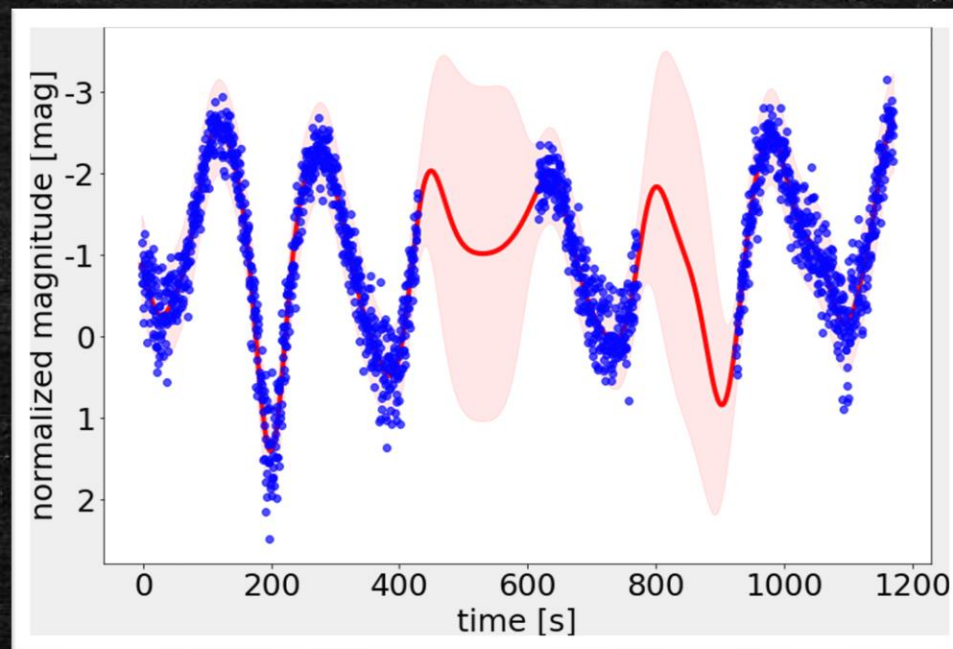
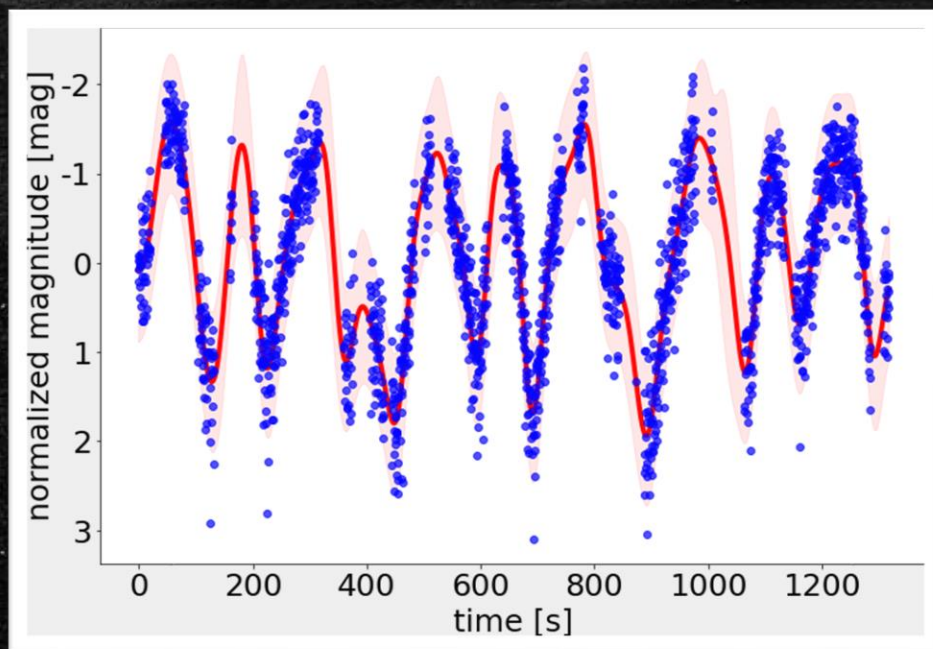
- データのみの解析結果を、より補強する結果が得られることがある
- データのみの解析結果で周波数の候補が複数ある場合、この候補を減らしたり、その信頼度を変化させることがある
- エイリアスの除去がされる可能性がある
 - あえて周期的にマスクしたデータでは確認できた

難点

- 今回は見つかっていない
 - 計算時間も少ない
- 懸念点として、今回はRBFカーネルを使ったがほかのカーネルの方が適切かもしれない

今後の課題

- 観測点の間の幅が大きすぎたときの対応
 - 回帰曲線が限りなく0に近づくものの改善
- 他のカーネル関数を使った場合の比較

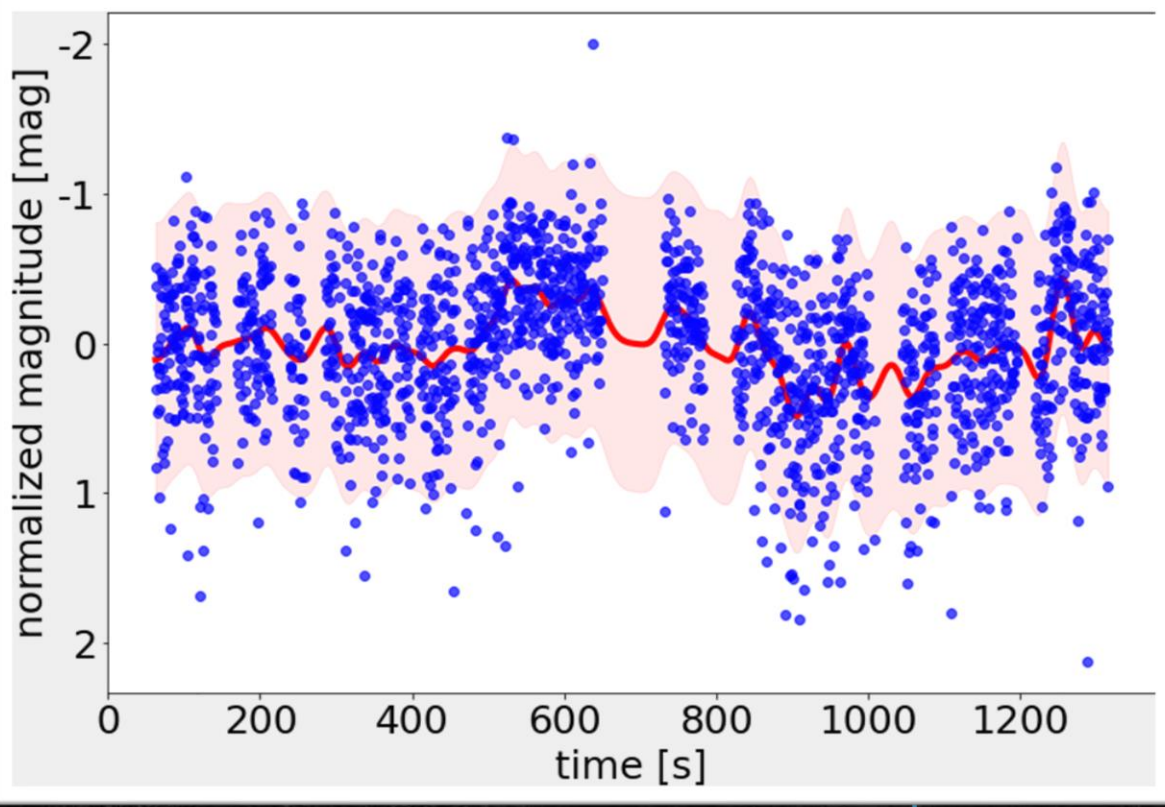


まとめ

- NEOの周期解析が重要性を増しているなか、データの欠損による精度の低さを補う試みをした
- 不確かさも含めた回帰曲線を得る方法として、GPRという手法を用いた
- 欠損の少ない実測の光度曲線により、NEOにおけるGPRの有用性を確認した（S/N改善・エイリアス除去）
- 欠損のある光度曲線に対しGPRを適用したところ、精度の改善ができた場合、効果的でない場合、ほぼ変わらなかった場合があった
- 今後は別の天体でも同様に回帰分析をしたり、他のカーネル関数ではどうなるか試したい

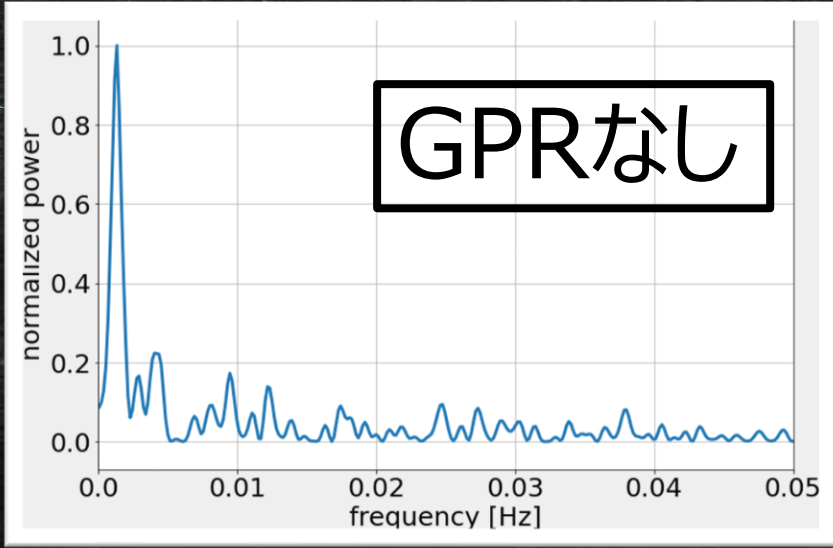
参考：
発表では省略した天体の
回帰結果と周波数解析結果

天体2020VF4の場合

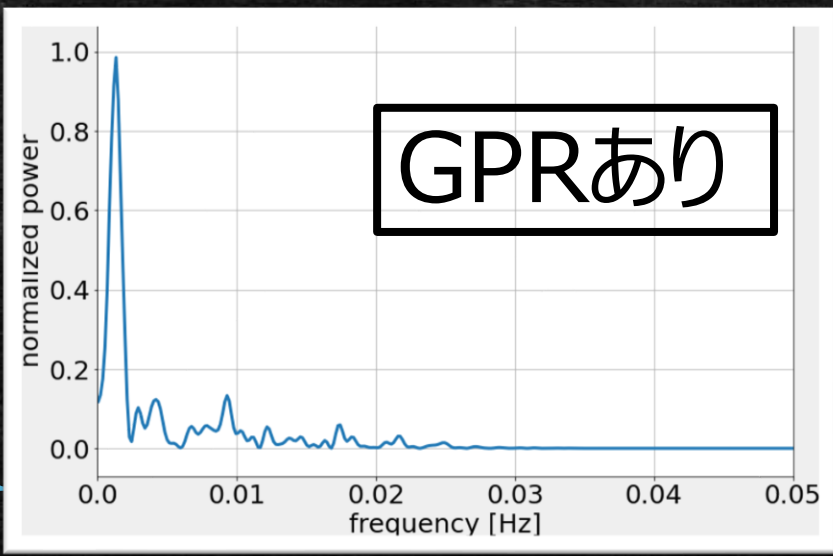


confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

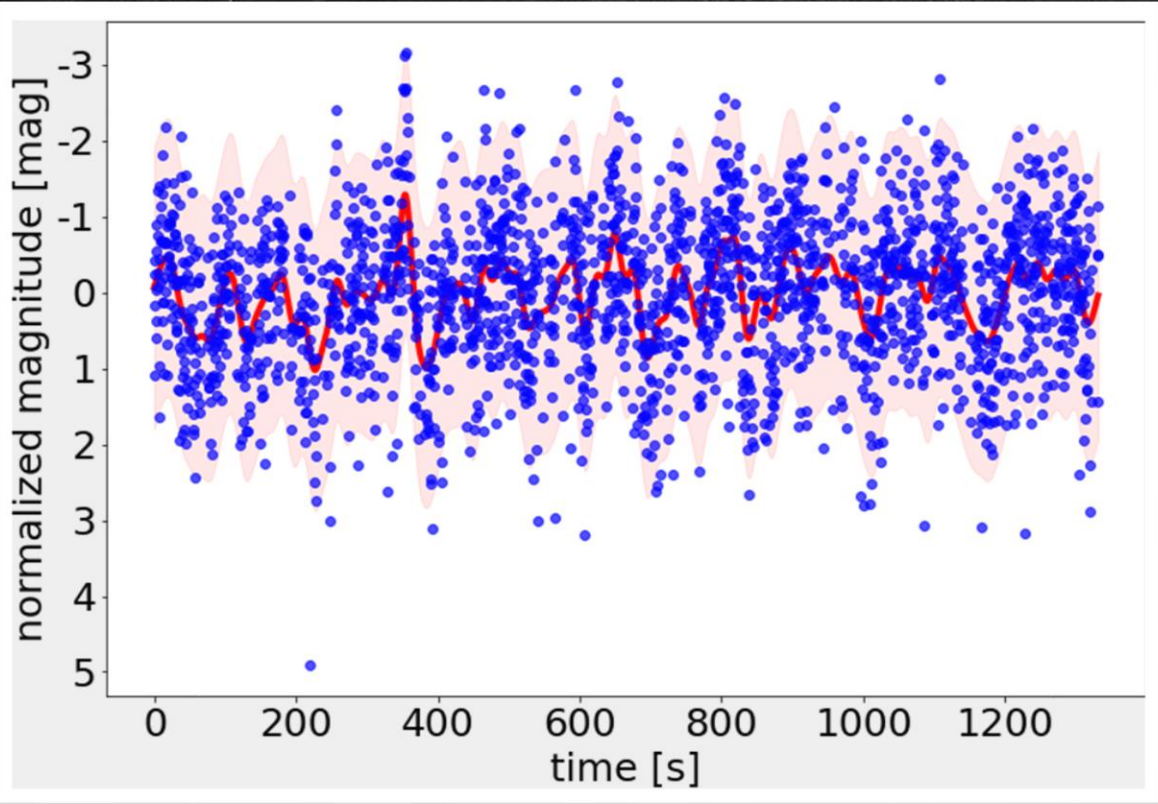


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



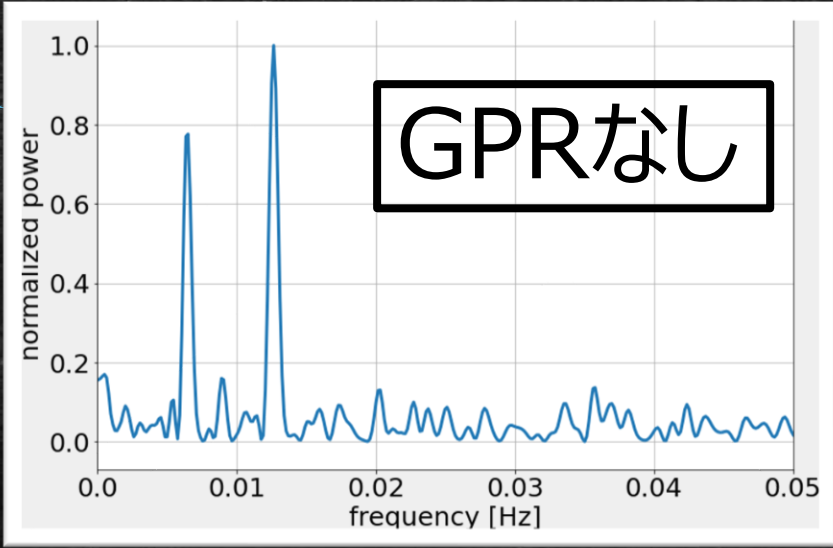
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2020VH5の場合

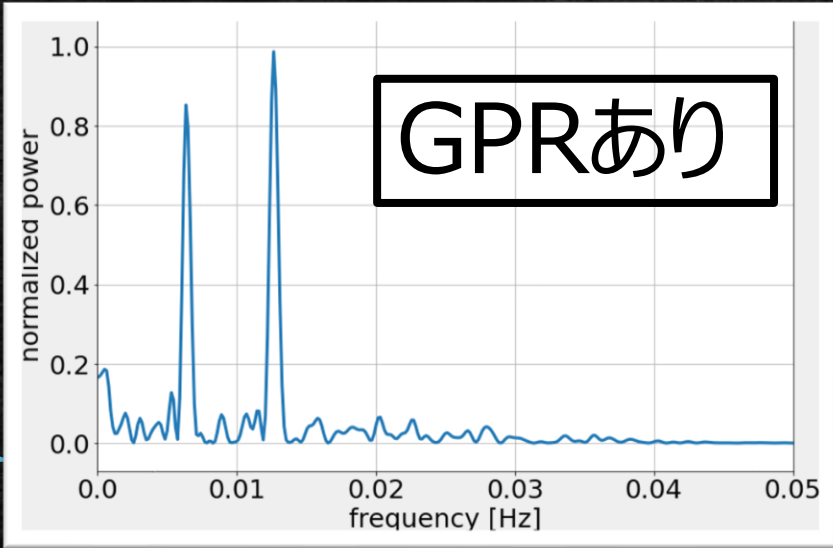


confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

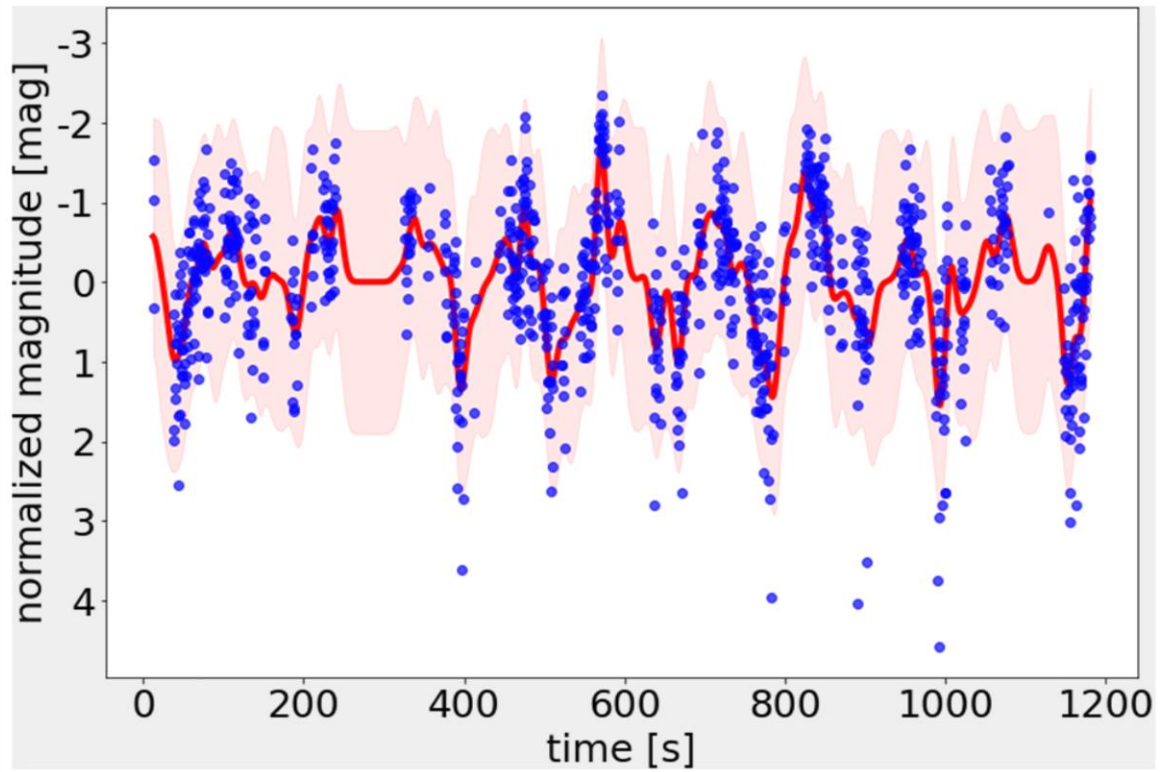


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



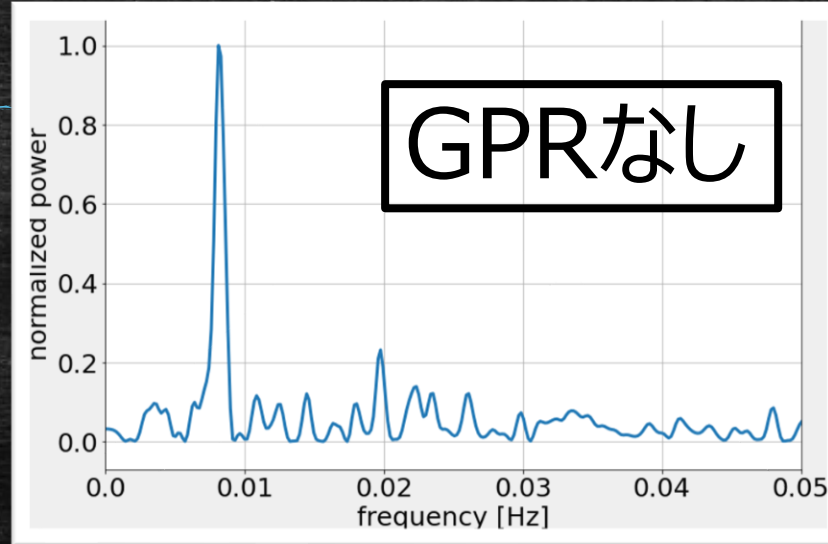
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2020VJ1の場合

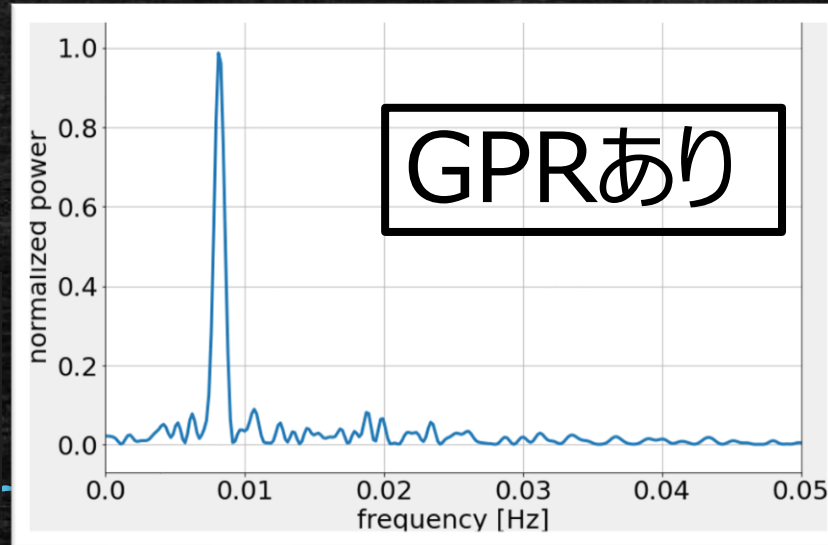


confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

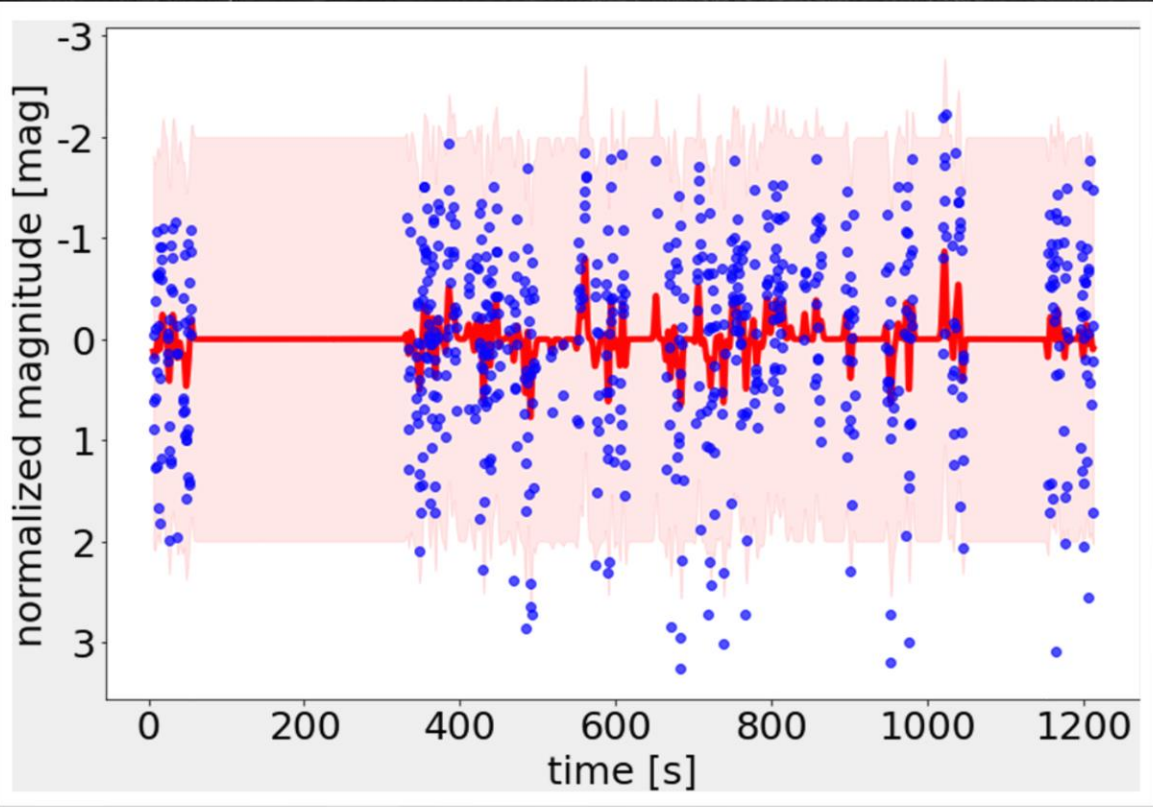


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



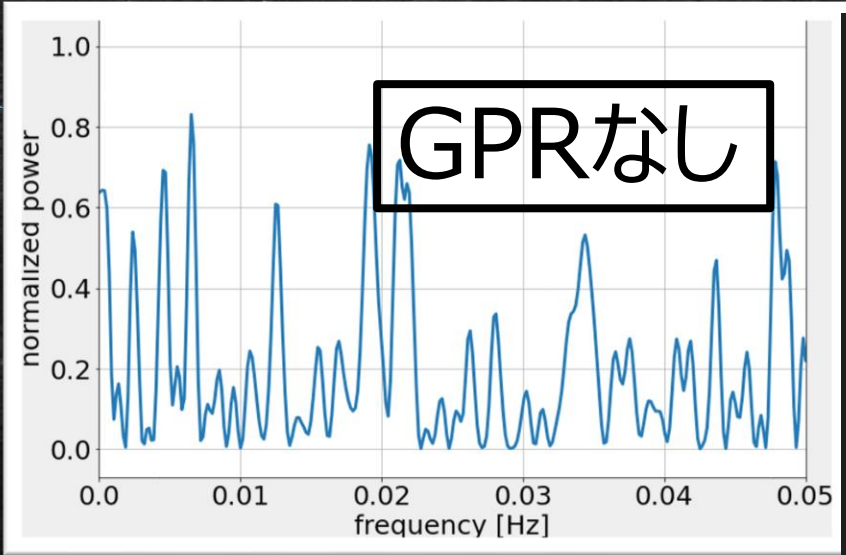
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2020VR1の場合

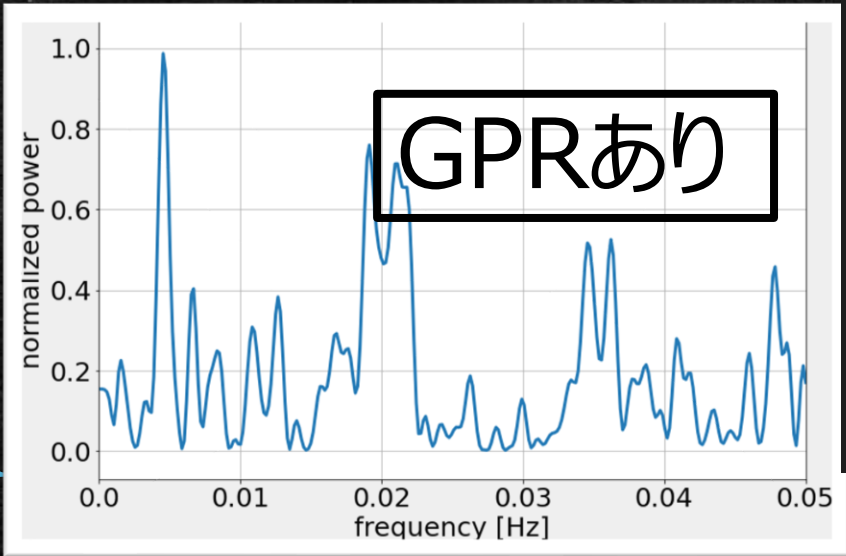


confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

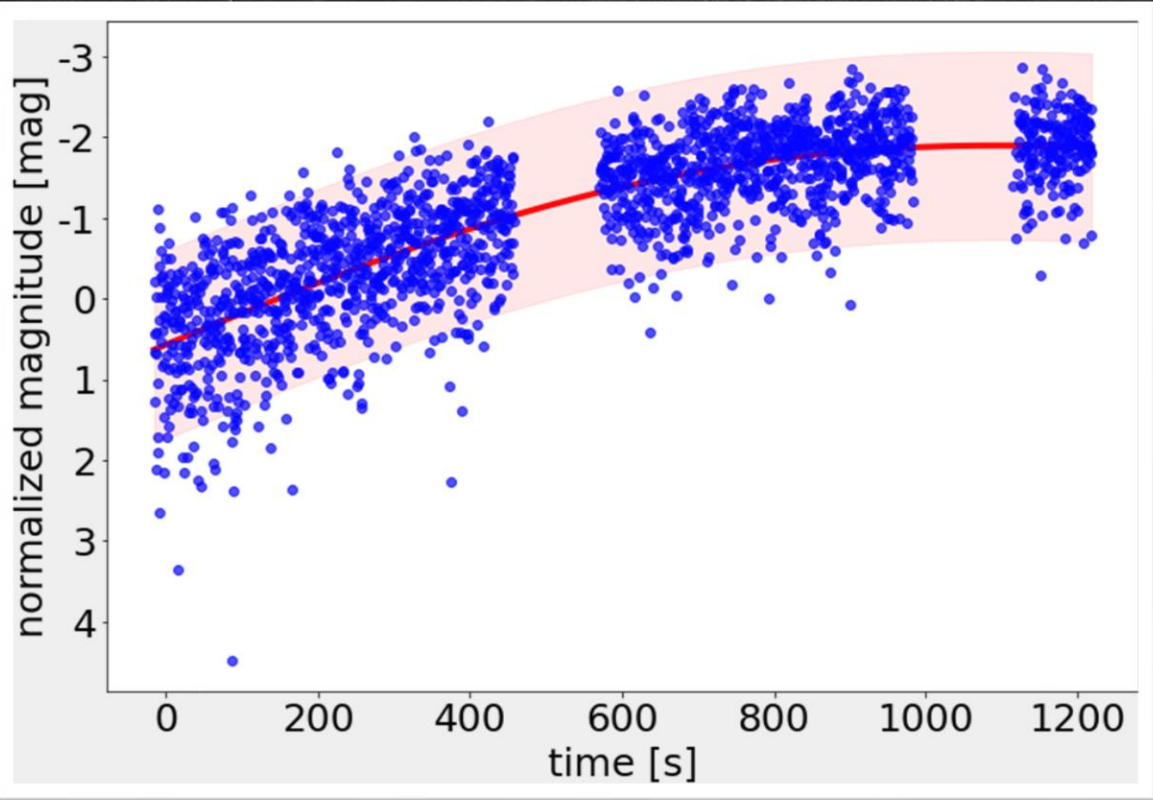


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



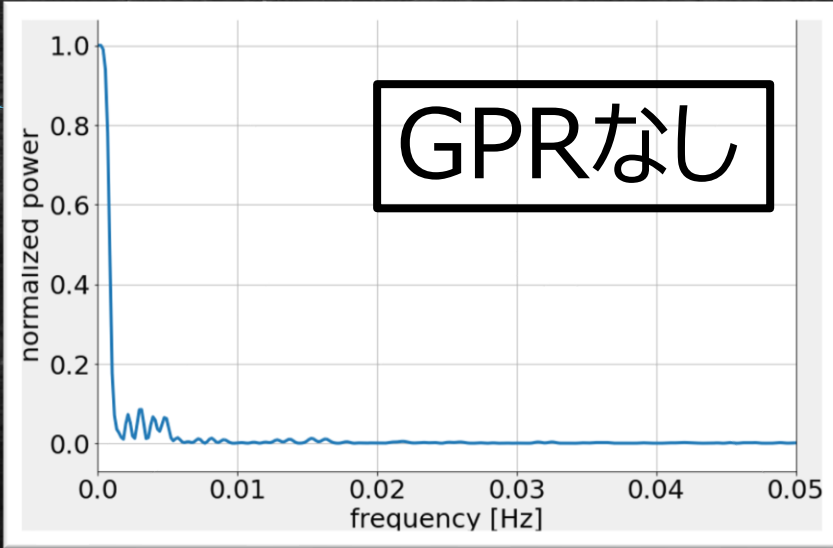
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2020XH1の場合

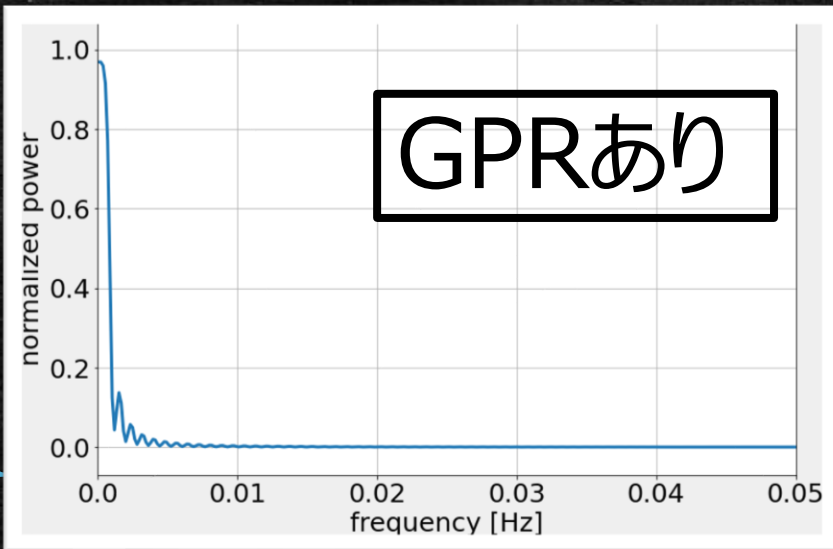


confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

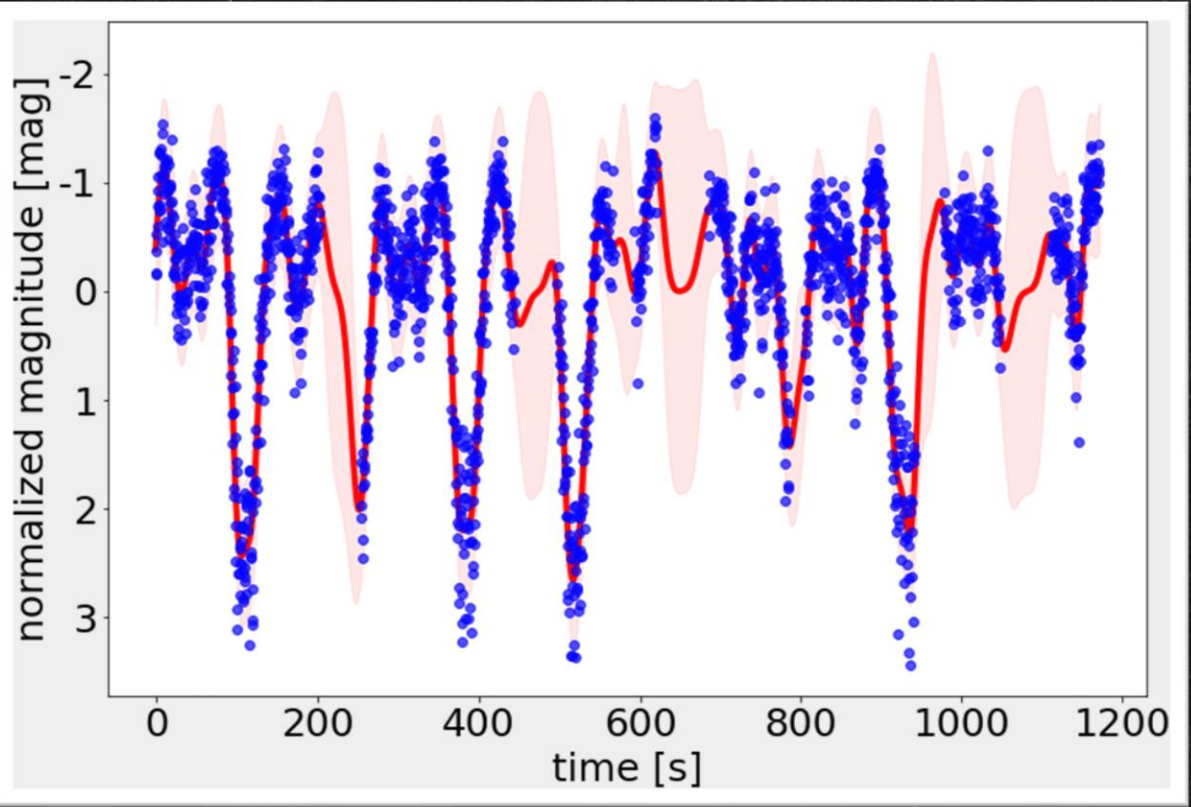


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



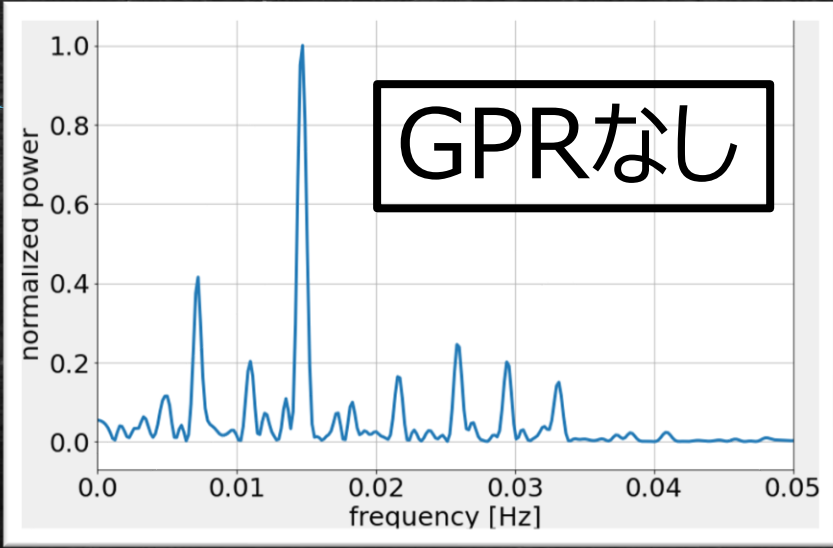
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2020XX3の場合

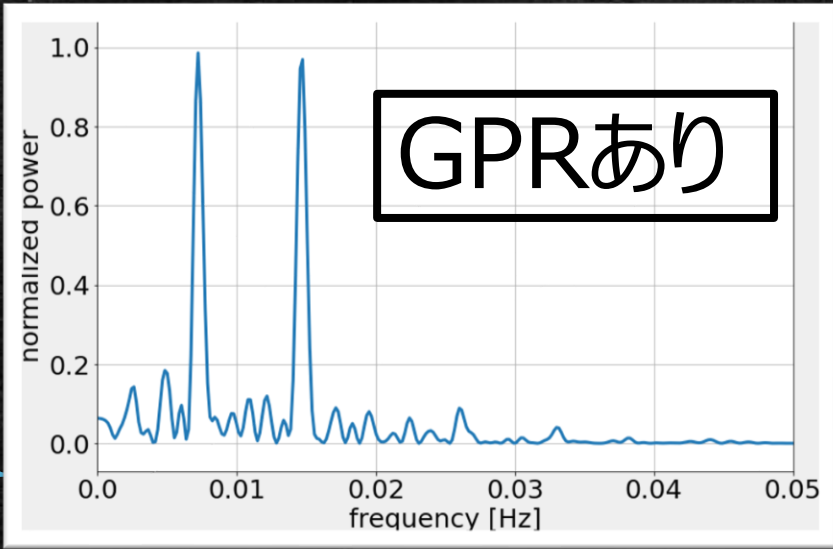


confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

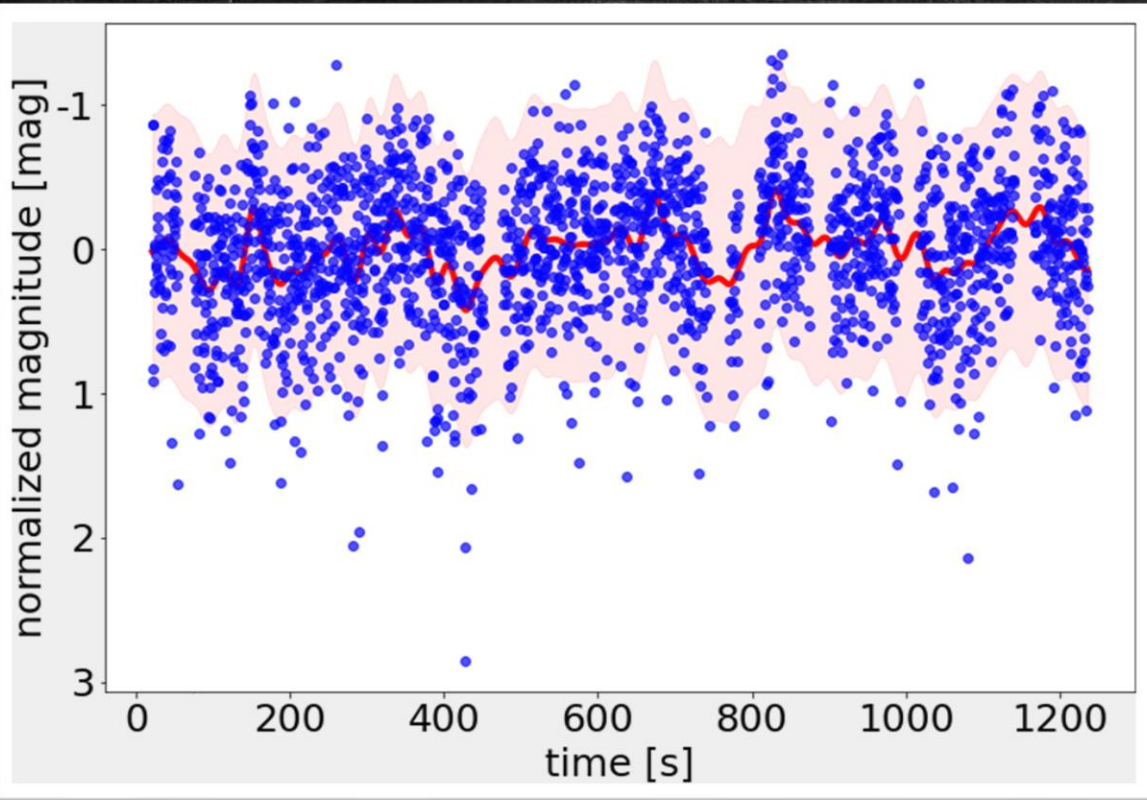


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



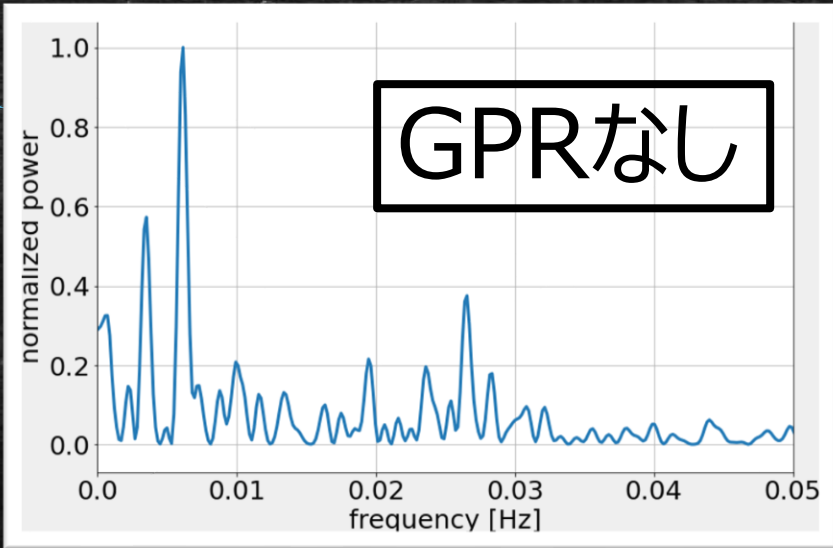
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2020XY4の場合

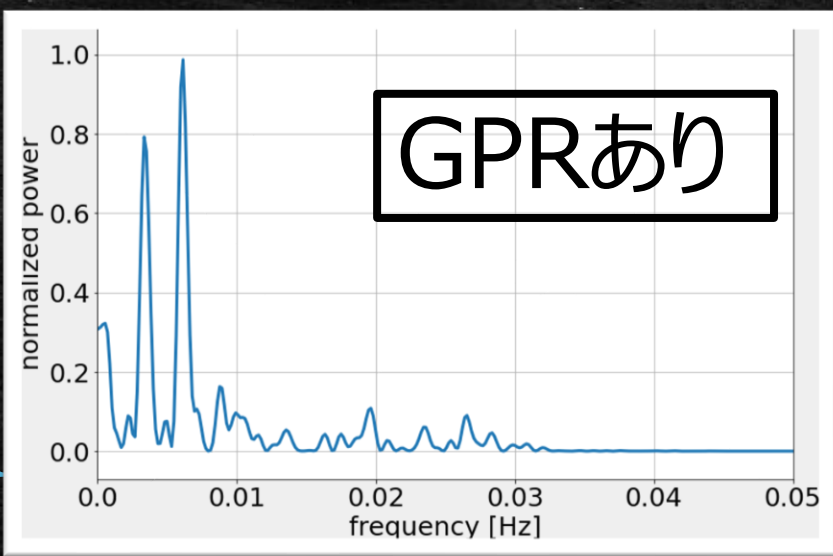


confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

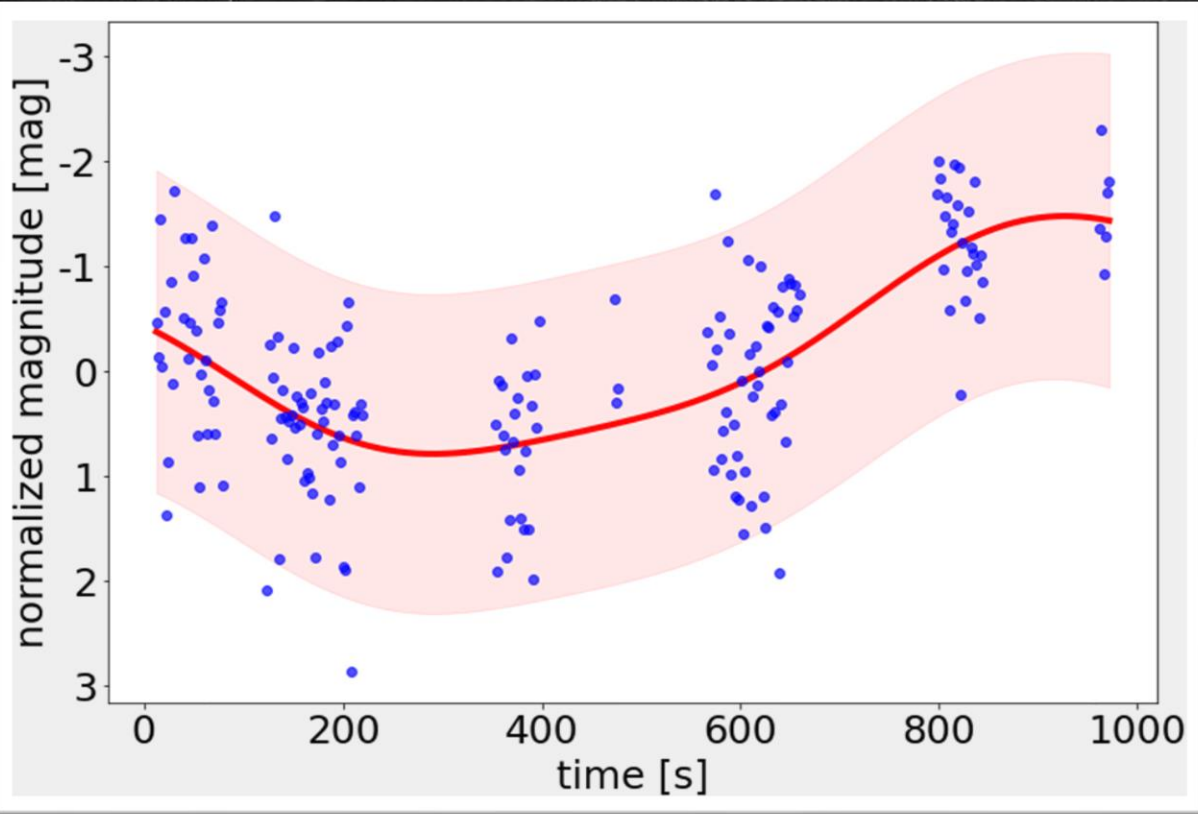


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



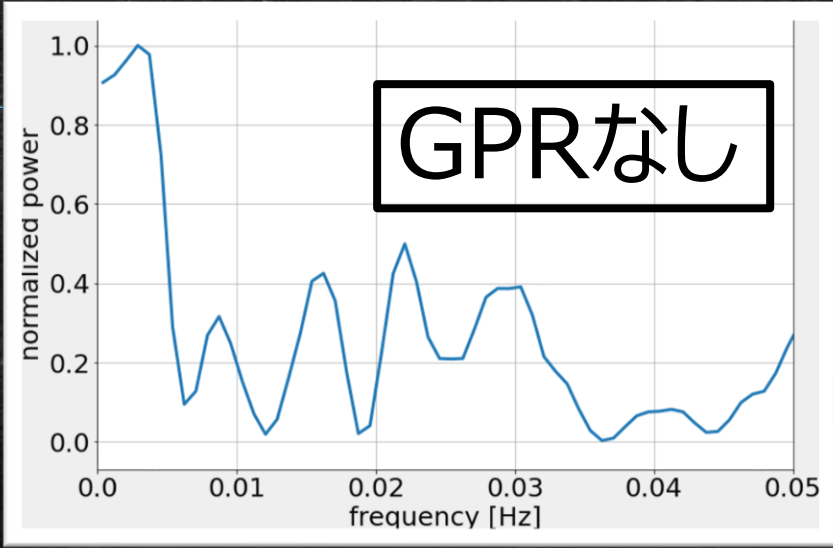
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2020YJ2の場合

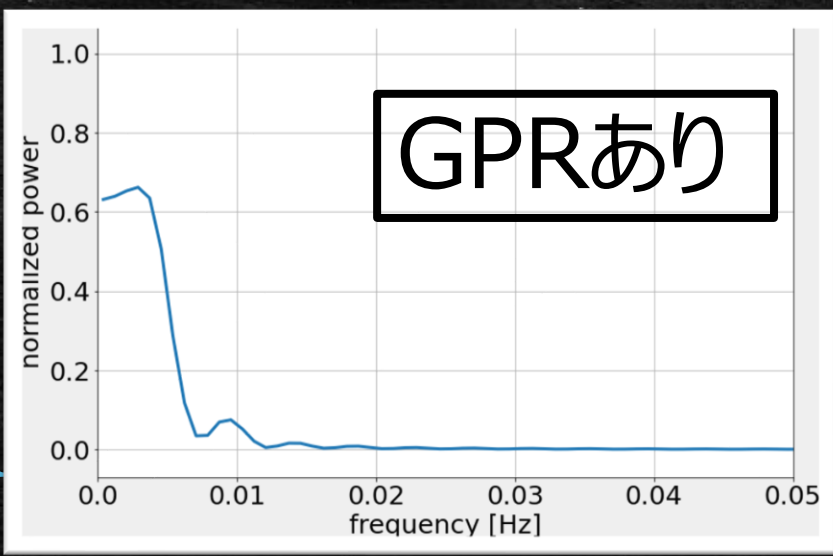


confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

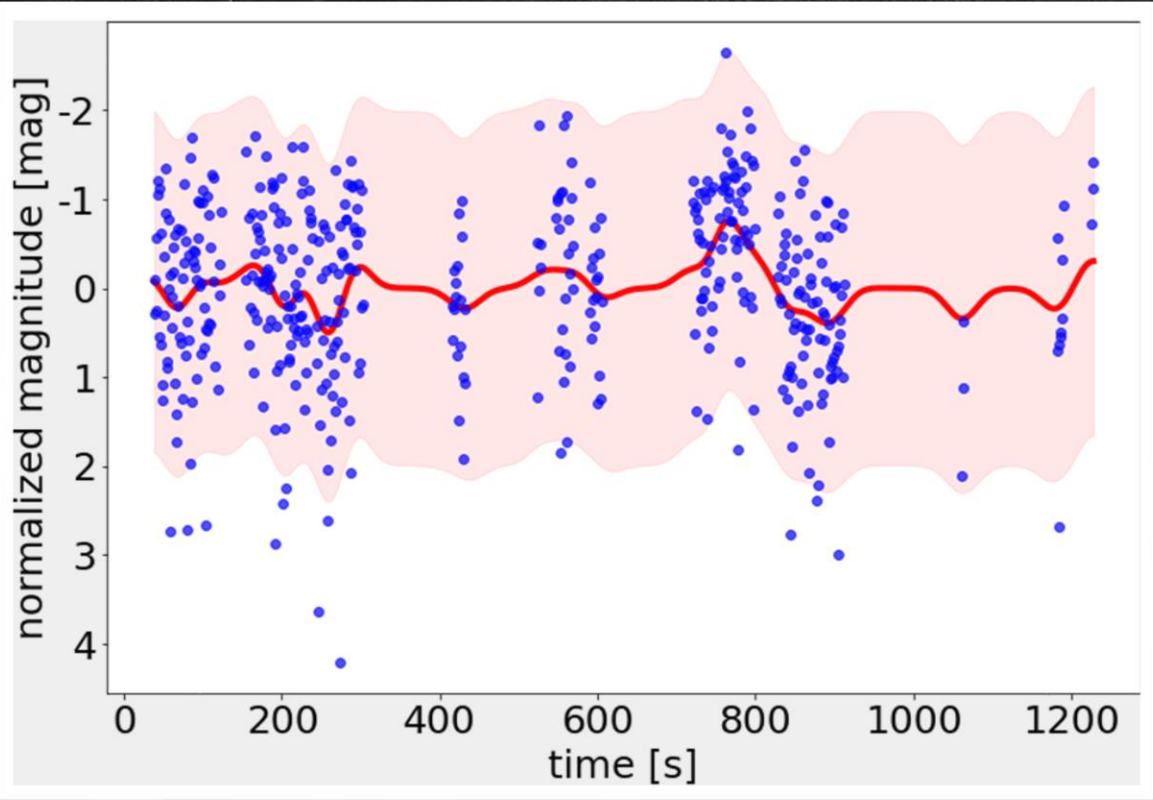


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



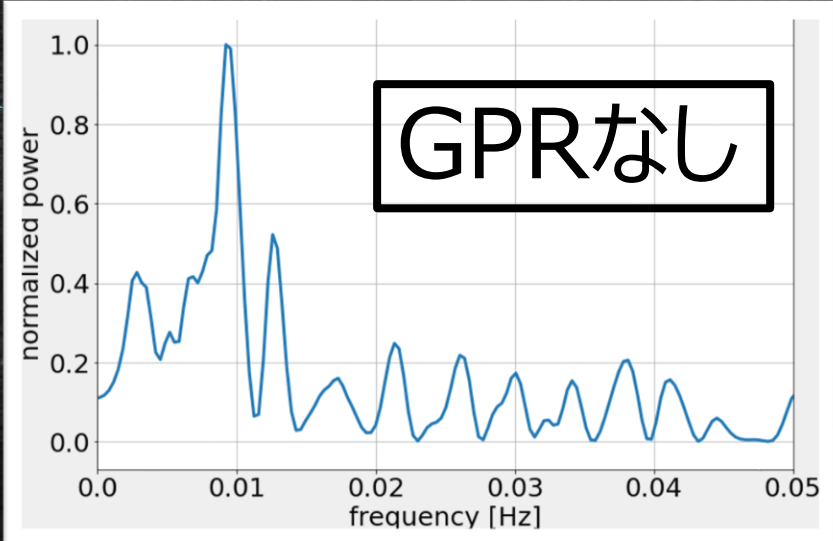
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2021AT5の場合

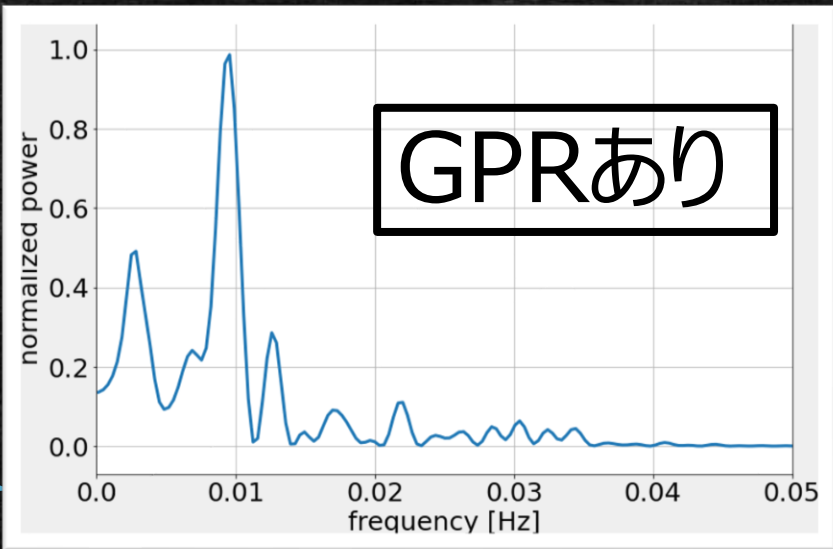


confidence 2 σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

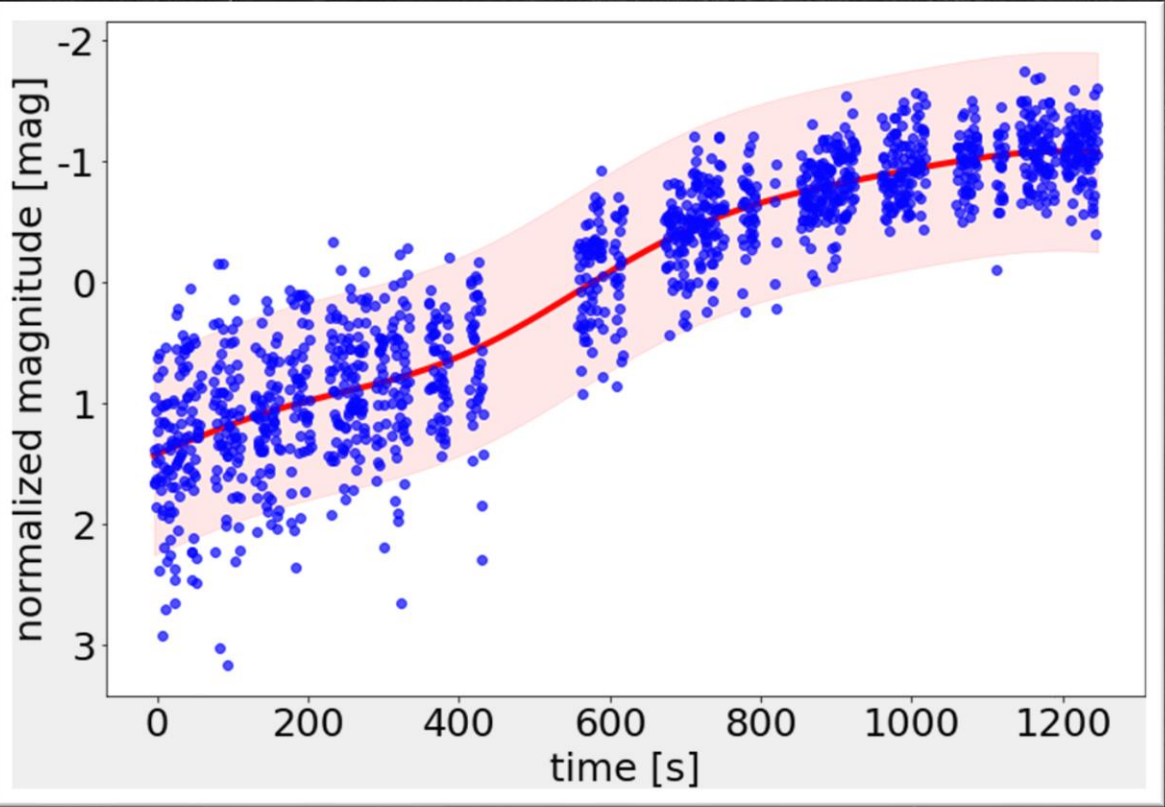


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



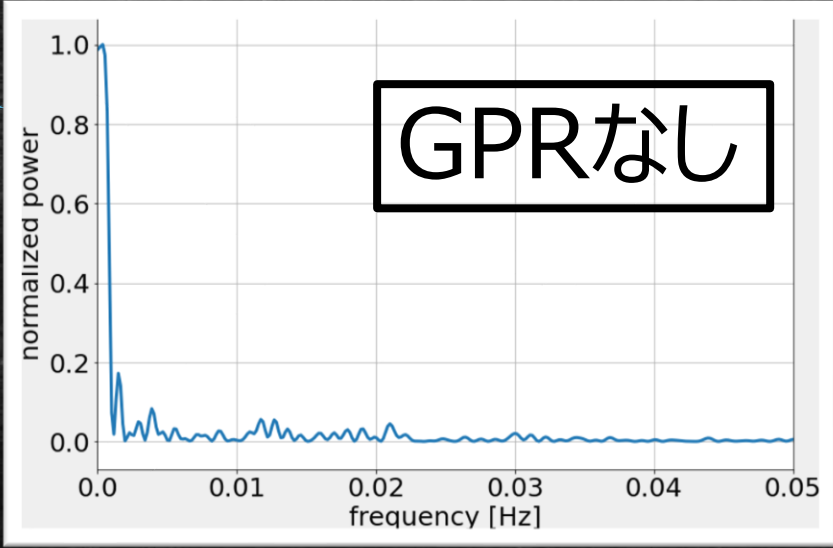
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2021BCの場合

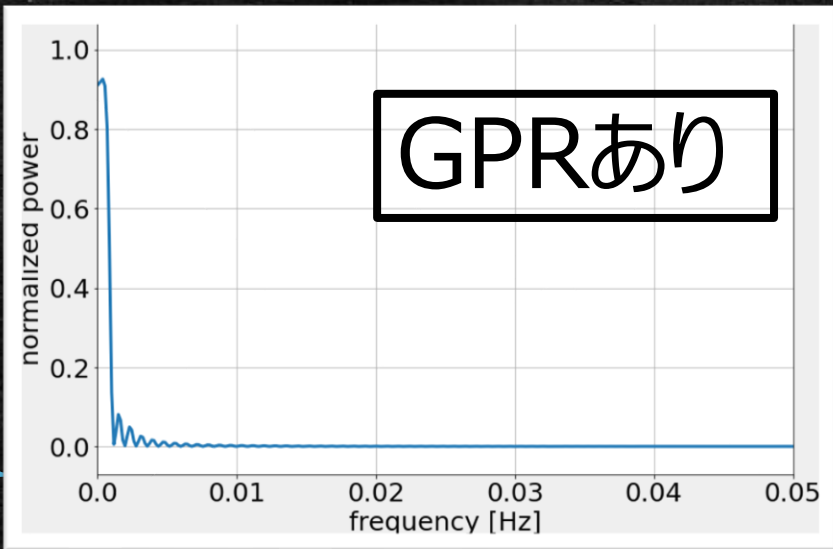


confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

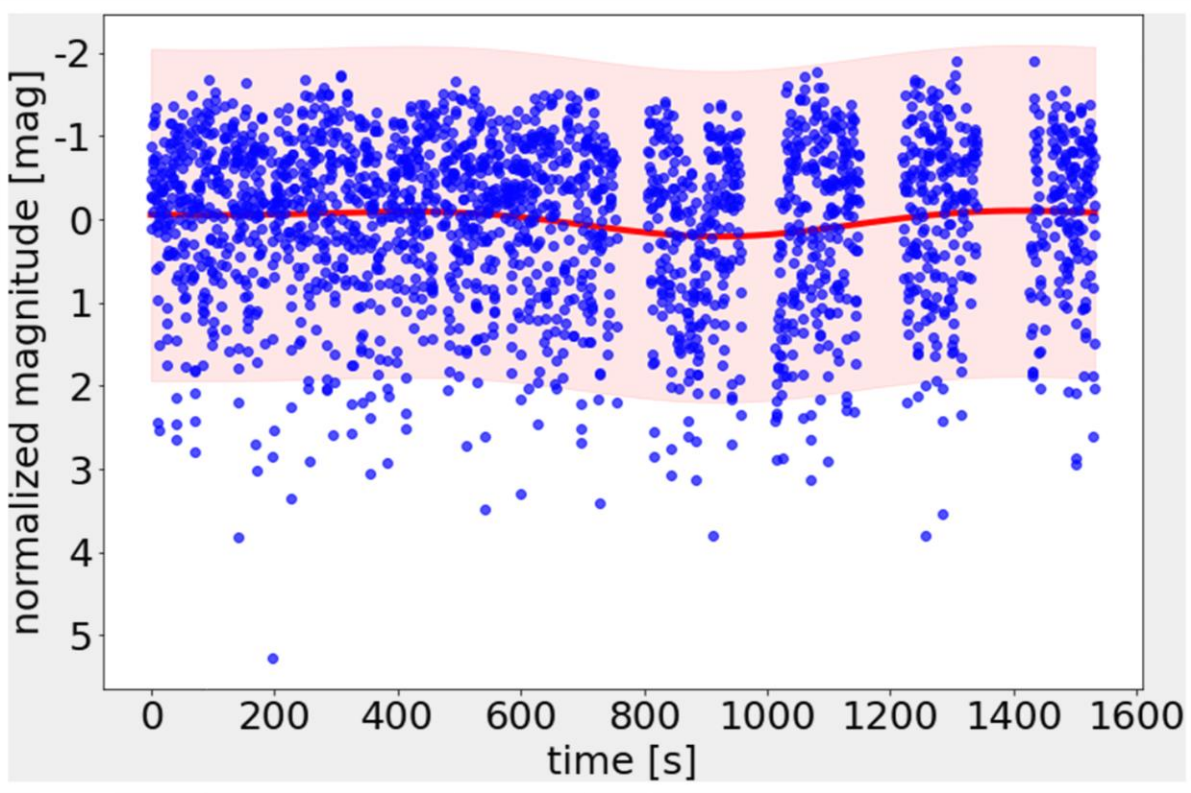


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram

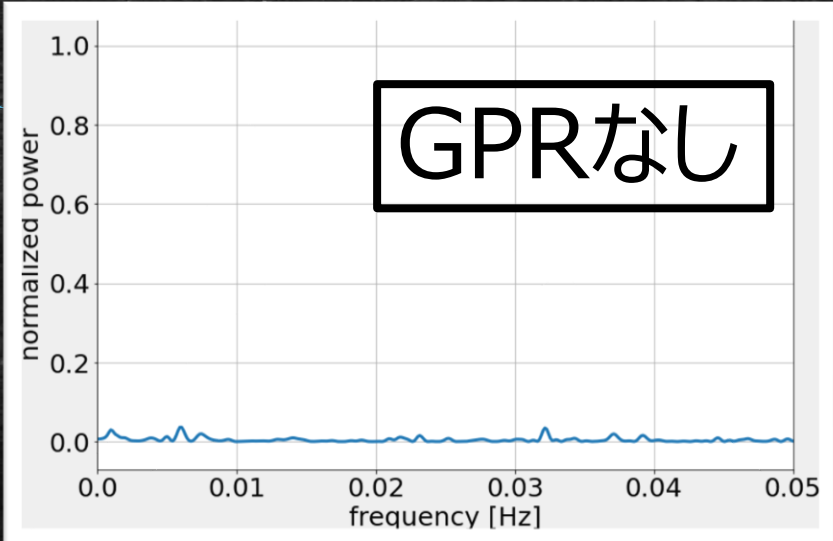


右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

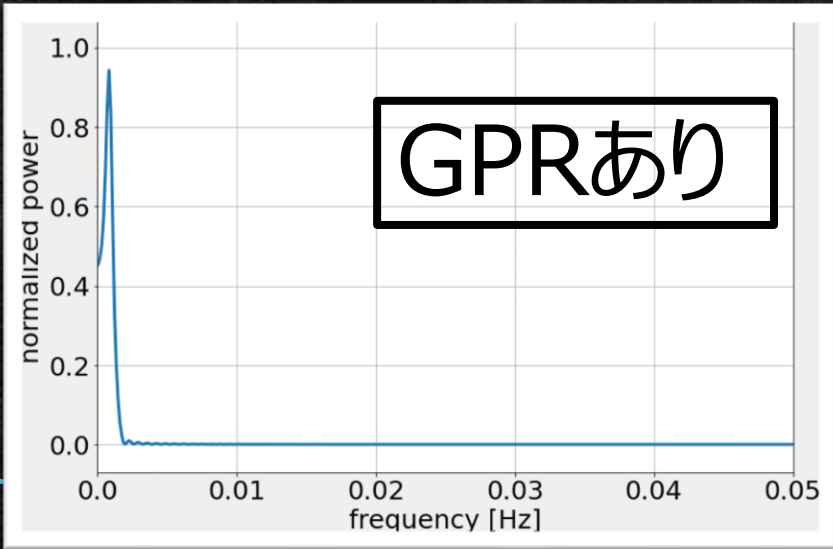
天体2021CA6の場合



左上図：
データと回帰曲線

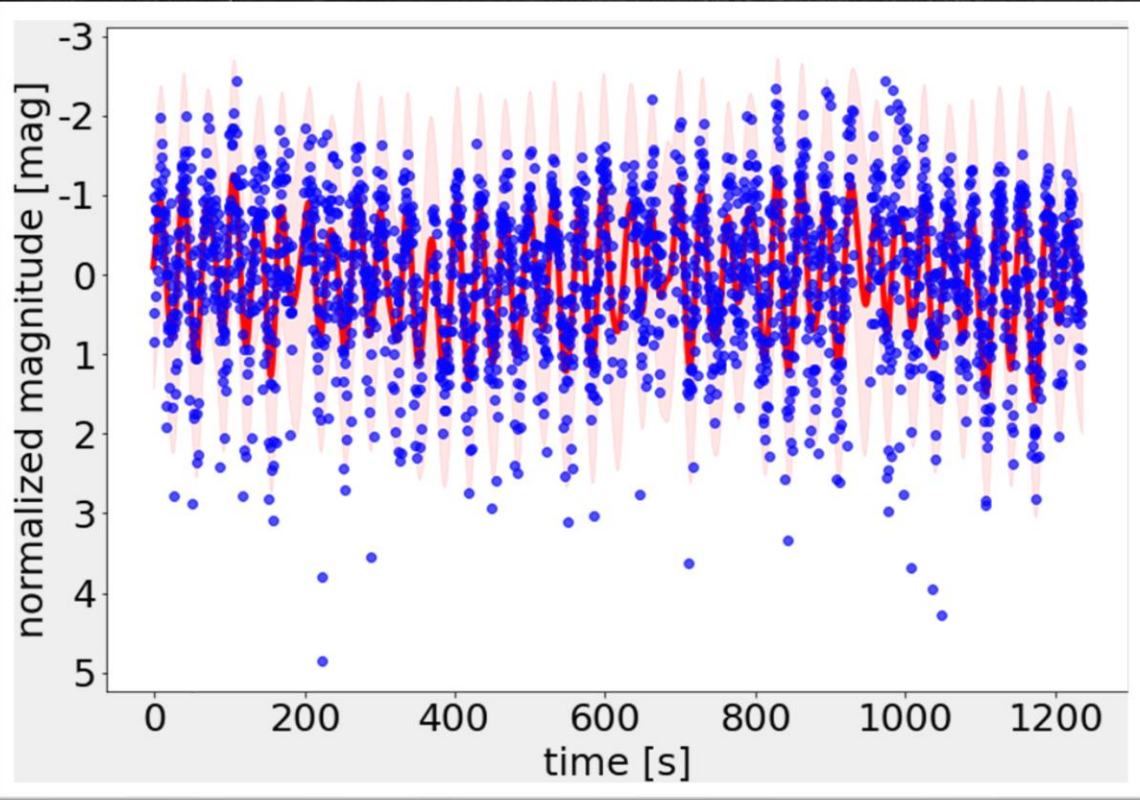


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



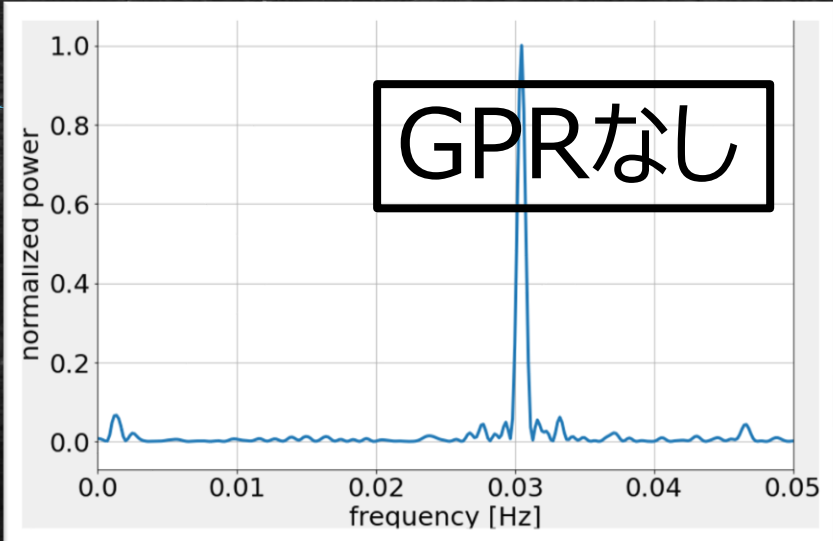
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2021JB6の場合

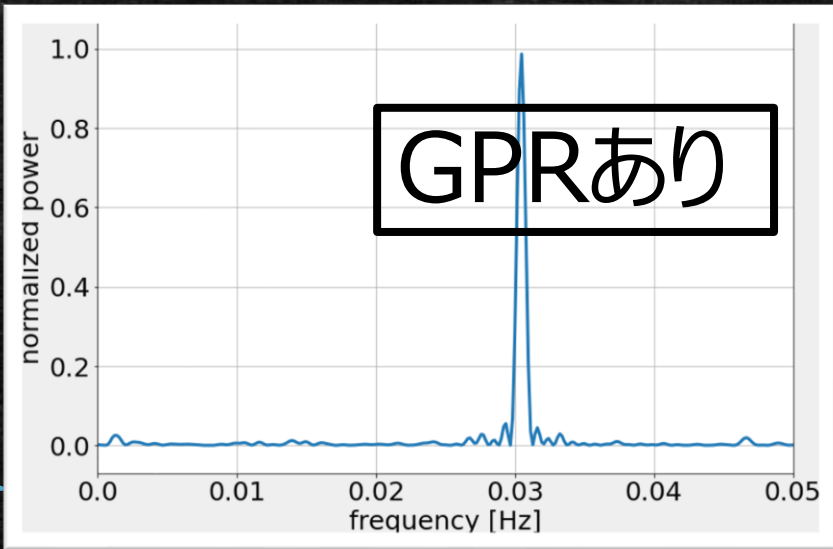


confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

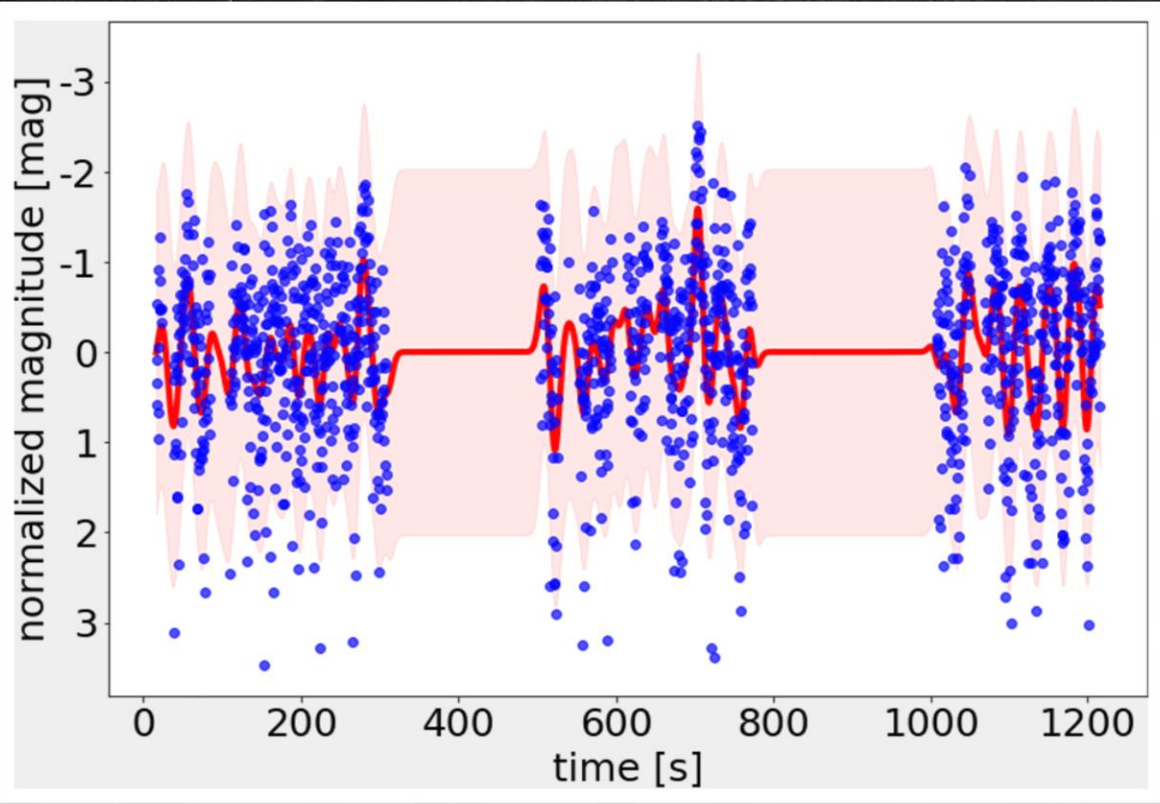


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



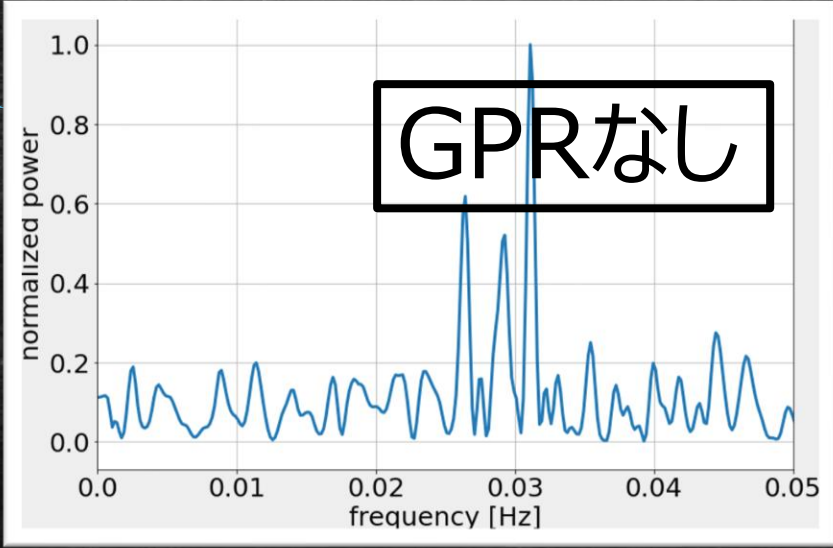
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2021KN2の場合

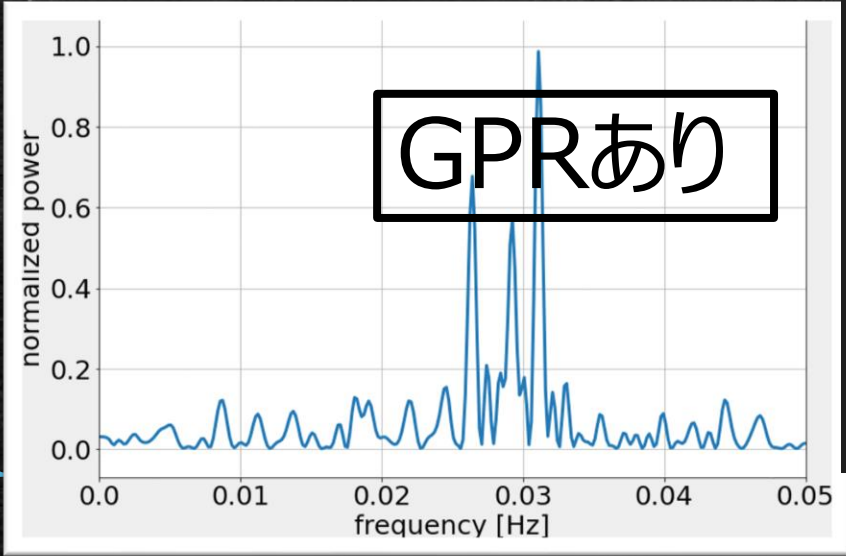


confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

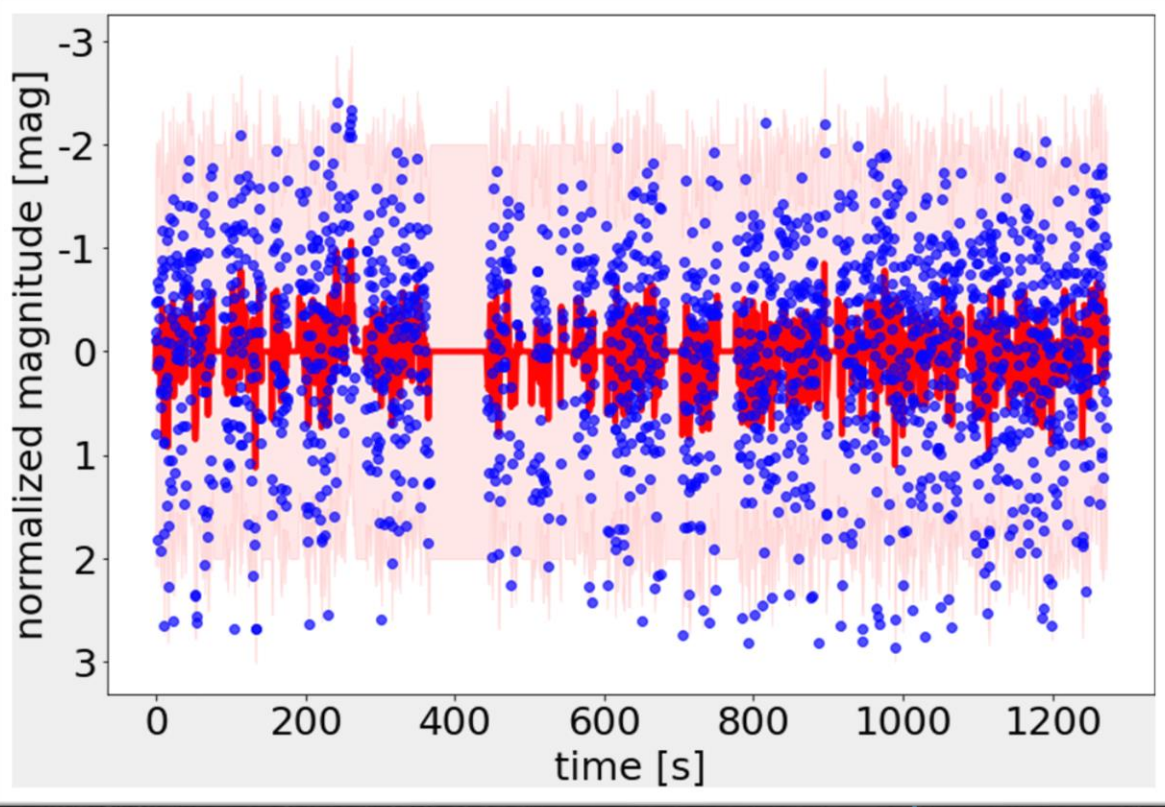


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



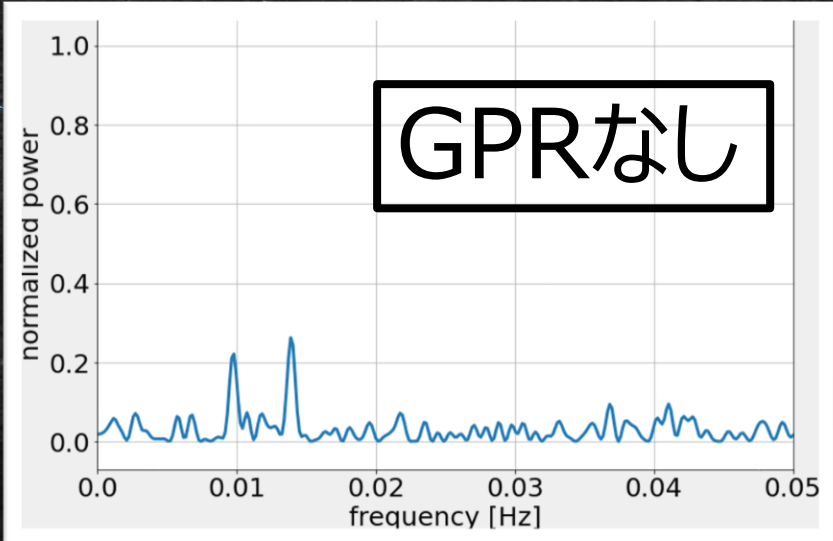
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2021KQ2の場合

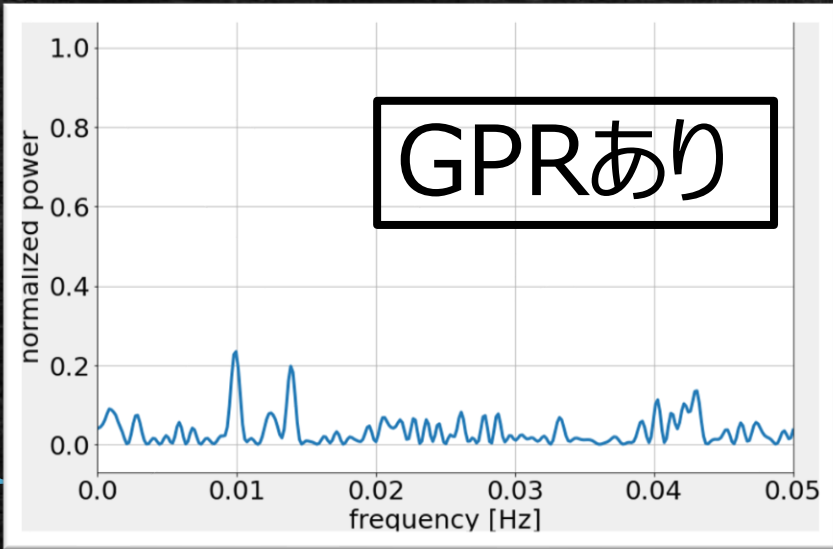


confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

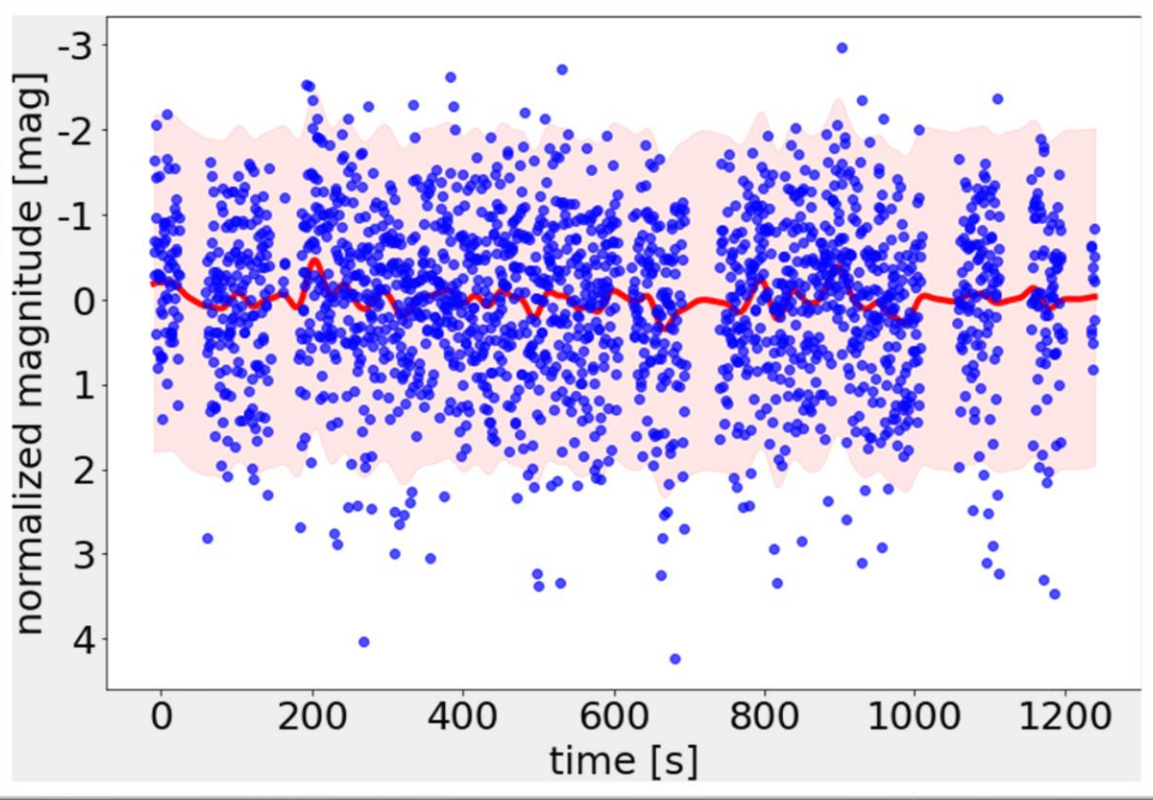


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



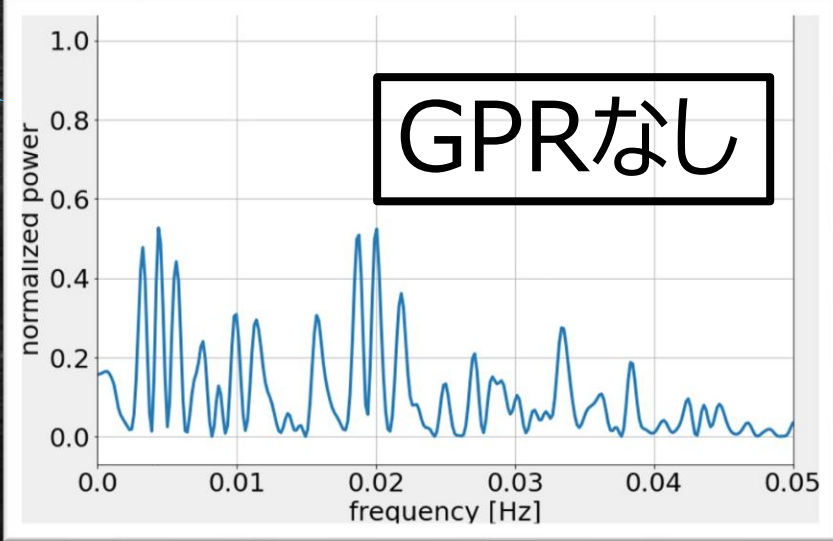
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2021RB1の場合

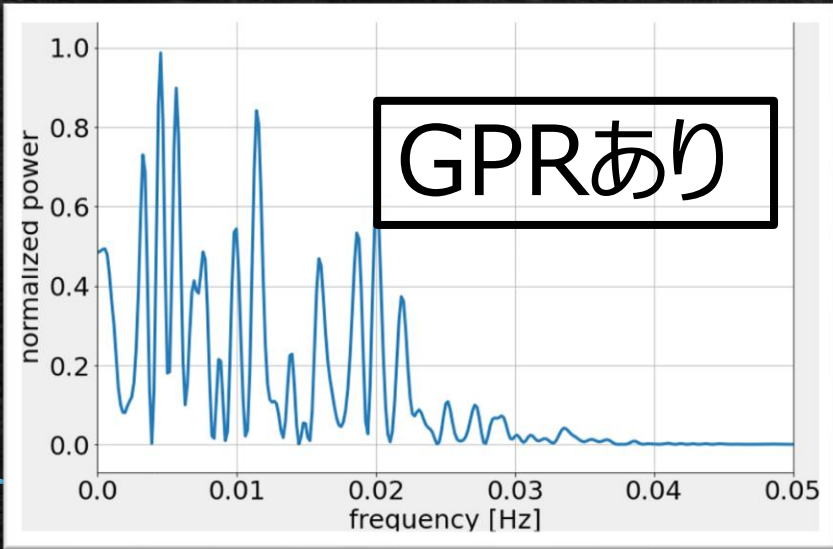


confidence 2 σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

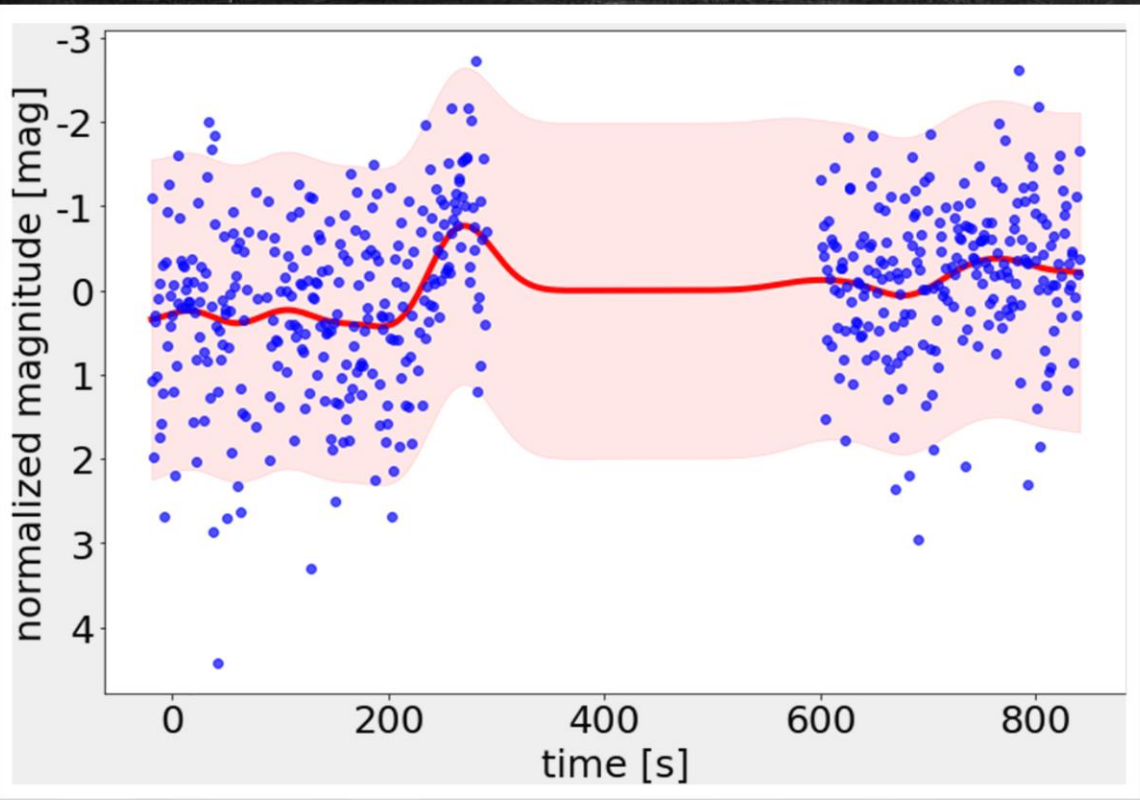


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



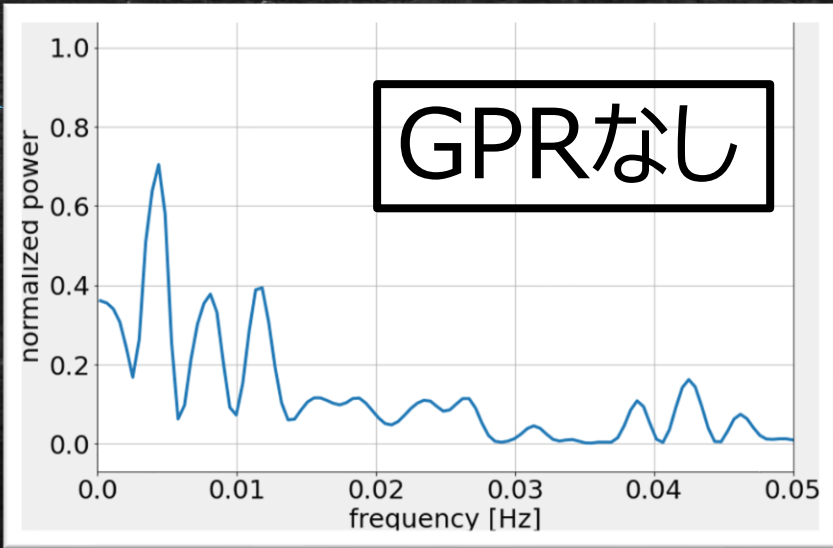
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2021RX5の場合

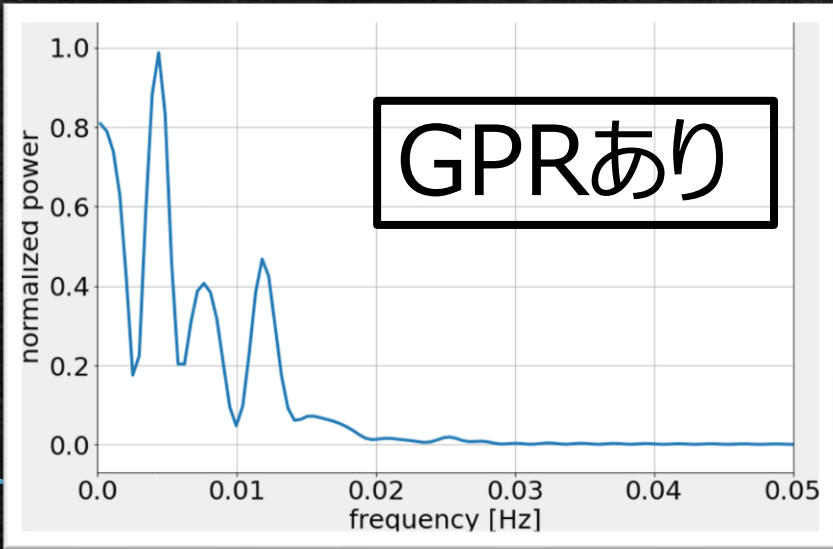


confidence 2σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線

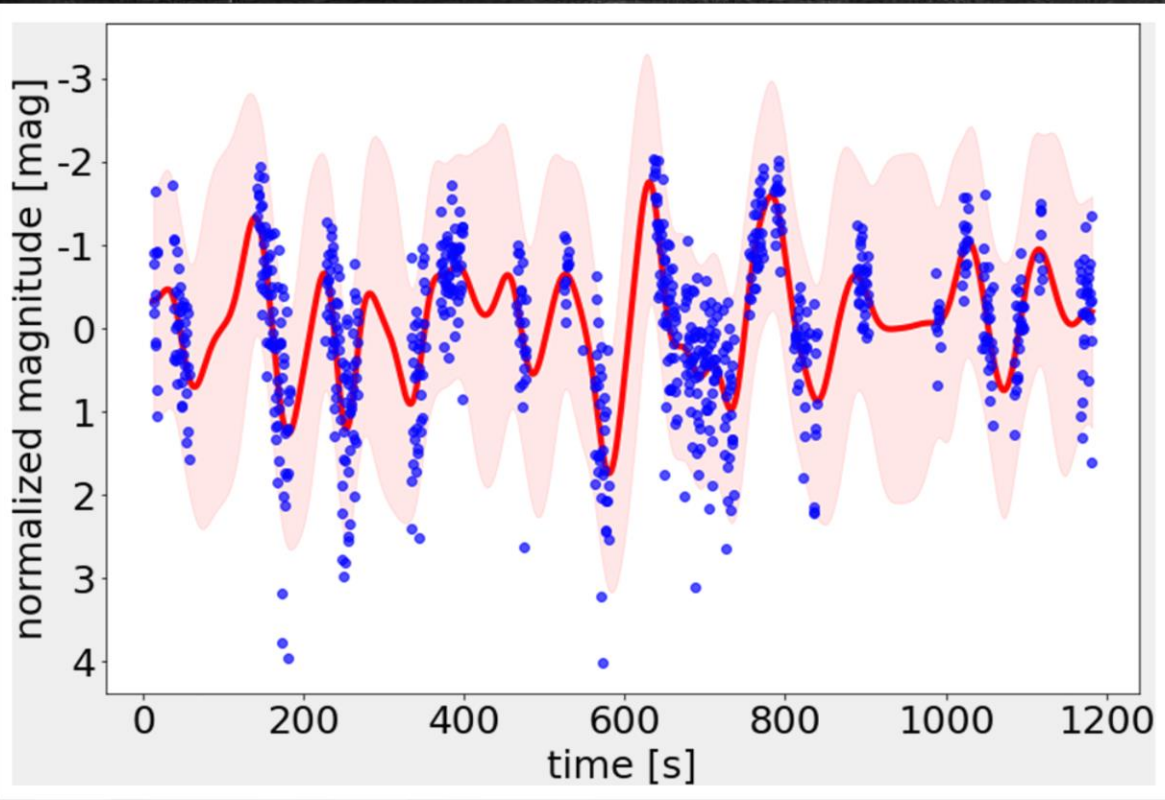


右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



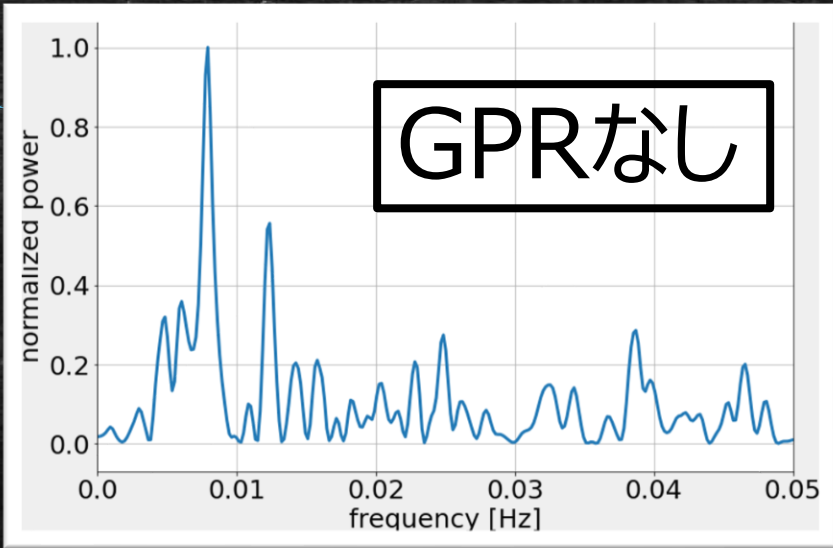
右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram

天体2021TG1の場合

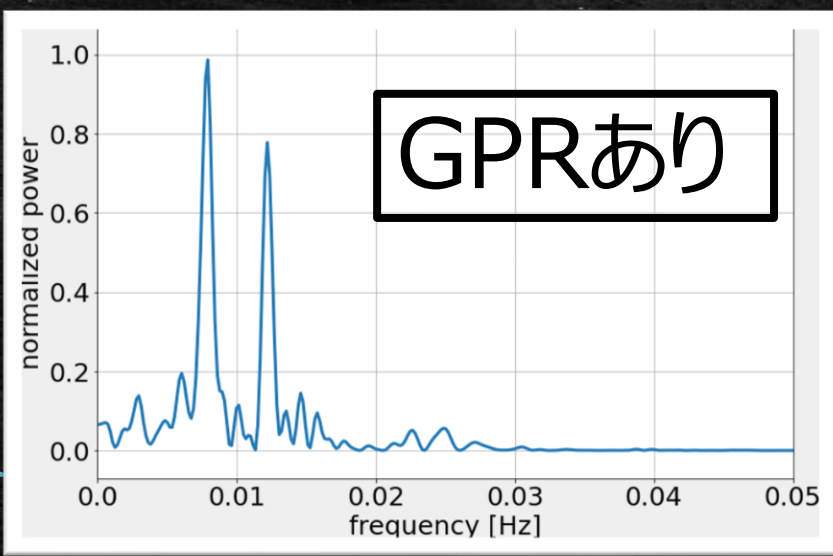


confidence 2 σ
regression curve
data

左上図：
データと回帰曲線



右上図：
GPRなしの
(実際のデータの)
periodogram



右下図：
GPRを使った
回帰曲線の
periodogram