

平成 30 年度
卒業論文

かにパルサーにおける巨大電波パルスの 6GHz 帯 8GHz 帯
同時観測

2019 年 3 月 28 日

茨城大学 理学部理学科 物理学コース 4 年
学籍番号 15S2032Y

前田 龍哉

概要

パルサーにおけるパルス放射は、パルサーの自転周期の間隔で放射を観測することができる。しかし、パルサーの放射機構は解明されていない。これらを解明するために、パルサーのパルス放射の中に現れる一際強度の大きいパルス放射である巨大電波パルス (GRP) に注目し、観測を行った。GRP の観測は、同タイミングで複数の周波数帯にて同時に行った。様々な周波数帯で観測を行うことで、パルサー近傍のプラズマ密度構造に迫ることができる可能性があり、プラズマ密度構造が解明されれば、パルサーにおいてどのように粒子が加速されているかに迫り、パルス放射の放射機構の解明につながる。

多周波数での観測の結果、GRP のタイミングとパルサーの自転位相の関係には特徴が見られた。かにパルサーの場合、GRP のタイミングは 2 つのパルサーの自転位相に集中することが判明した。集中したそれぞれの位相を Main Pulse、Inter Pulse と呼び区別し、GRP のこの 2 つの位相に対するの分布を調べると、4GHz 帯では MP も IP も確認することができたが、8GHz 帯では、MP の分布が見られなくなることが確認された。6GHz 帯はこの遷移帯にあると考えられるが、6GHz 帯のかにパルサーの観測は乏しく、これらの分布は調べられていない。本研究では、6GHz 帯と 8GHz 帯の観測データから、GRP のタイミングとパルサーの自転位相の関係を求め、MP と IP の分布を調べ、6GHz における特徴を調査した。

目次

1	研究背景	4
1.1	かにパルサーの巨大電波パルスについて	4
1.2	先行研究	6
1.3	研究目的	8
2	観測・解析	8
2.1	観測データ	8
2.2	解析手法	8
3	結果	11
3.1	11月8日	12
3.2	11月9日	14
3.3	11月10日	15
4	考察	16
5	まとめ・今後の展望	18
6	謝辞	18
7	付録1 conf ファイル	21
8	付録2 プログラムソース	22

1 研究背景

1.1 かにパルサーの巨大電波パルスについて

かにパルサーは、1054 年に起こった超新星爆発の結果誕生した中性子星である。1968 年に超新星残骸の中で発見され、かに星雲の中央部に位置している。かにパルサーは約 33 ms で自転しており、自転周期の間隔で電磁波を放射している。かにパルサーは、膨大なエネルギーを放出しているため、少しずつ自転速度が遅くなってる。かにパルサーには、自転周期の間隔で放出される電磁波に一際強度の大きい放射が確認される。これを、巨大電波パルス (GRP: Giant radio pulse) と呼ぶ。通常のパルスの放射は、ノイズに埋もれてしまうことが多く観測が難しいが、GRP はノイズに埋もれることなく観測することができる。しかし、この GRP の放射機構は未解明である。GRP の放射機構の解明のための有力な手段が、多周波数での同時観測することである。

1.1.1 プラズマ中の波の伝達

GRP の放射機構の解明のために、なぜ多周波数の観測が有効である理由は、パルサーから出てくるパルス波はパルサーと観測者との間にある低温プラズマ状態にある星間媒質の影響を受けるからである。電磁波が、プラズマ中を伝搬すると、電磁波の周波数に依存して伝達時間に遅延が生じる。

星間媒質 (ISM) 中の電子の運動を考える。ここでは、簡単のために電場の向きに沿った 1 次元系を考え、その原点に置かれている電子を考える。電子の運動方程式は、

$$m_e \dot{v} = eE$$

で表される。ここで、 m_e は電子の質量、 $\dot{v}$ は電子の加速度である。ここで、電場 E は

$$E = E_0 \exp(ikx - i\omega t)$$

で表されるとすると、 $x = 0$ での運動方程式は、

$$m_e \dot{v} = eE_0 \exp(-i\omega t)$$

となる。これを、 v について解くと、

$$v = \int_0^t \dot{v} = -\frac{eE_0}{i\omega t} \exp(-i\omega t)$$

と表される。

また、オームの法則は、

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

と書ける。ここで、 σ は ISM 中の伝導率である。1 次元系を考えると電流密度 J は、

$$J = en_e v$$

で表される。これにより、オームの法則を、 σ について解くと、

$$\sigma = \frac{J}{E} = \frac{en_e v}{E}$$

となる。ここで、電場 E は、

$$E = E_0 \exp(-i\omega t)$$

速度 v は、

$$v = -\frac{eE_0}{i\omega m_e} \exp(-i\omega t)$$

で表されるので σ は、

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{J}{E} \\ &= \frac{en_e \left(-\frac{eE_0}{i\omega m_e} \right) \exp(-i\omega t)}{E_0 \exp(-i\omega t)} \\ &= en_e \left(-\frac{e}{i\omega m_e} \right) \\ &= i \left(\frac{e^2 n_e}{\omega m_e} \right) \end{aligned}$$

の結果を得る。Maxwell 方程式の、

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} &= \frac{4\pi \vec{J}}{c} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{aligned}$$

2 式から、プラズマ中の群速度を求める。今回は 1 次元系を考える。また、ISM は完全な真空中に近いので、 $\vec{D} \approx \vec{E}$ 、 $\vec{B} \approx \vec{H}$ と考える。

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} &\rightarrow ik \\ \frac{\partial}{\partial t} &\rightarrow -i\omega \end{aligned}$$

で表せるので、先に挙げた Maxwell 方程式は、

$$\begin{aligned} ikE &= \frac{i\omega H}{c} \\ -ikH &= \frac{4\pi\sigma E}{c} - \frac{i\omega E}{c} \end{aligned}$$

と書き直すことができる。この 2 式より波数 k を求める。

$$-ikH = -ik \left(\frac{ckE}{\omega} \right) = \frac{4\pi\sigma E}{c} - \frac{i\omega E}{c}$$

以上から、

$$k^2 = \left(\frac{ckE}{c} \right)^2 \left(1 + i \frac{4\pi\sigma}{\omega} \right)$$

となる。ここで、さきほどもとめた σ とプラズマ周波数を用いて変換する。プラズマ周波数は、

$$\nu_p \equiv \left(\frac{e^2 n_e}{\pi m_e} \right)$$

で定義される。これらを用いて変換すると、

$$k^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \left(1 - \frac{\nu_p^2}{\nu^2}\right)$$

となる。ここで、 $\omega = 2\pi\nu$ の関係を使用した。この関係式より、周波数がプラズマ周波数をを超えていないと、波数が複素数となり伝達しなくなることがわかる。プラズマの屈折率は、

$$\mu = \frac{ck}{\omega}$$

で表される。 k に先ほど求めた物を代入すると、

$$\mu = \left(1 - \frac{\nu_p^2}{\nu^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

と書き表せる。ここで、 $\nu_p \ll \nu$ の極限を考えると、

$$\mu \approx 1 - \frac{\nu_p^2}{2\nu^2}$$

となるので、群速度 v_g は、

$$v_g \approx \mu c \approx c \left(1 - \frac{\nu_p^2}{2\nu^2}\right)$$

で表すことができる。パルサーからの放射が観測者までに到達するまでの時間を T とすると、

$$T = \int_0^d \frac{dl}{v_g}$$

で表される。

v_g に先ほど求めたものを代入し展開すると、

$$\begin{aligned} T &= \int_0^d \frac{dl}{c(1 - \frac{\nu_p^2}{2\nu^2})} \\ &\approx \frac{1}{c} \int_0^d \left(1 + \frac{\nu_p^2}{2\nu^2}\right) dl \\ &= \frac{d}{c} + \left(\frac{e^2}{2\pi m_e c}\right) \nu^{-2} \int_0^d n_e dl \end{aligned}$$

となる。最後の項に ν^{-2} があり、周波数に依存することがわかる。また、

$$DM \equiv \int_0^d n_e dl$$

と定義し、Dispersion measure と呼ぶ。

1.2 先行研究

多周波数観測を行っている中で、GRP のタイミングとパルサーの自転位相には、ある特徴を持つことが判明した。Moffett and Hankins (1996) によると、パルスのタイミングとパルサーの自転位相の関係を表した

時、パルスのタイミングは2つの位相に集中することが述べられている。以下に乘せる図は、先行研究において、各周波数におけるパルスプロファイルをプロットしたものである。この図の横軸は、かにパルサーの自転位相を表しており、ほとんどの周波数帯において、ピークが2つあるのが見てとれる。先行研究では、この図の左にあるピークの位相に集中するパルスを Main Pulse(MP) と呼び、右側のものを Inter Pulse(IP) と呼んでいる。その中で 2.7GHz 帯と 8GHz 帯に注目してみる。2.7GHz 帯では IP のピークが見られておらず左側のピーク 1 つのみが見て取ることができる。8GHz 帯では、MP が見られておらず、IP のみが見えていることがわかる。

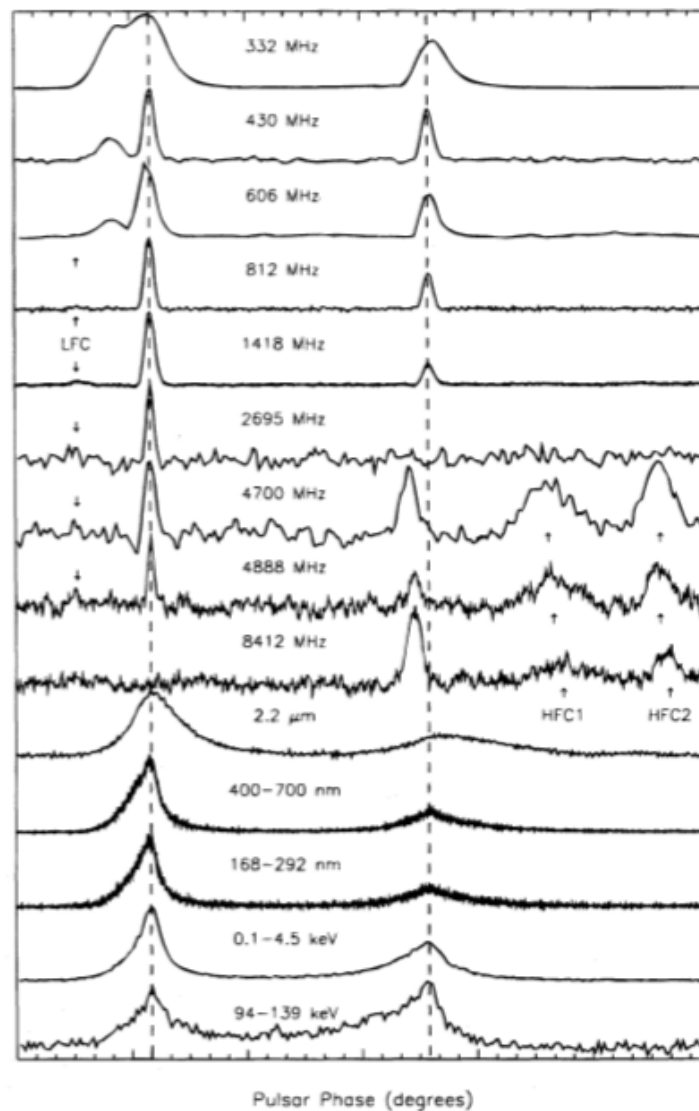


図1 各周波数帯におけるパルスプロファイル

引用元 : DAVID A. MOFFETT and TIMOTHY H. HANKINS[MULTIFREQUENCY RADIO
OBSERVATION OF THE CRAB PULSAR] (1996) Astrophysical Journal, 468, 779-783

1.3 研究目的

先ほどの先行研究で述べたように、8GHz 帯では、MP が見られず IP のみが見られるとされている。4GHz 帯では MP と IP がどちらもみられていることから、その間にある 6GHz 帯はその遷移帯になっているのではないかと考えられる。しかし、6GHz 帯の観測はあまり行われておらず、データが少ない、そこで本研究は、茨城大学が運用する日立 32 m 電波望遠鏡を用いて、かにパルサーを 6GHz 帯と 8GHz 帯で同時に観測を行った。そして、得られたデータの解析から、6GHz 帯の GRP のタイミングとパルサーの自転位相の関係を同時に得られた 8GHz 帯のデータと見比べることで、その特徴を調査することを目的とした。

2 観測・解析

2.1 観測データ

本研究は、日立 32 m 電波望遠鏡にて同時に観測された 6GHz 帯と 8GHz 帯のデータを使用した。観測の周波数幅は、6GHz 帯では、6600 7112MHz で 8GHz 帯では 8192 8704MHz であった。使用したデータを以下の表にまとめておく。11 月 8 日から 10 日までのデータは 10 時間ほどで約 30 分の観測を計 7 回行ったものである。表に載せた観測時間は世界標準時 (UT) の時間である。

表 1 使用観測データ

観測回数	11 月 8 日 (UT)	11 月 9 日 (UT)	11 月 10 日 (UT)
1	12:25:00 - 12:53:40	11:35:20 - 12:03:20	12:18:20 - 12:45:20
2	13:57:40 - 14:26:20	13:08:00 - 13:36:00	13:51:00 - 14:18:00
3	15:30:20 - 15:59:00	14:40:40 - 15:08:00	15:23:40 - 15:50:40
4	17:03:00 - 17:31:40	16:13:20 - 16:40:40	16:56:20 - 17:23:20
5	18:35:40 - 19:04:20	17:46:00 - 18:13:20	18:29:00 - 18:56:00
6	20:08:20 - 20:37:00	19:18:40 - 19:46:00	20:01:40 - 20:28:40
7	21:41:00 - 22:09:40	20:51:20 - 21:18:40	21:34:20 - 22:01:20

2.2 解析手法

データの解析には、山口大学の青木貴弘氏より提供していただいた解析ソフト `Pulse_searcher` を使用させて頂いた。解析に使用するパラメータは、各周波数ごとに `conf` ファイルで設定される。付録 1 に 6GHz の `conf` ファイルを載せておく。パラメータの設定後プログラムを走らせるには、`pulse_searcher_interface.sh` のファイルを使用する。このファイルの中身は、以下の内容である。

解析実行ファイル

```
#
# MATLAB Environment
#
# mcr_root = the absolute path of the directory
#where the MATLAB Runtime is installed.
# version = the version of the MATLAB Runtime
mcr_root=/home/USER/pulsar/MATLAB/MATLAB_Runtime
version=v94
export LD_LIBRARY_PATH=${mcr_root}/${version}/runtime/glnxa64:
${mcr_root}/${version}/bin/glnxa64:${mcr_root}/${version}/sys/os/glnxa64:
${mcr_root}/${version}/sys/openssl/lib/glnxa64

#
# EDIT BELOW
#
execut=/home/USER/pulsar/pulse_searcher/application/pulse_searcher
datadir=/mnt/raid/u18002
config=/home/USER/pulsar/crab-6g.conf
band=/home/USER/pulsar/band.txt
outdir=/home/USER/pulsar

${execut} ${datadir}/2018002010000_hit32cr_crab.raw ${config} ${band} ${outdir}
#${execut} ${datadir}/2018002020000_hit32cr_crab.raw ${config} ${band} ${outdir}
#${execut} ${datadir}/2018002030000_hit32cr_crab.raw ${config} ${band} ${outdir}

exit 0
```

実行ファイルの中身で主に変更する項目は、

1. datadir にて解析したいデータのあるディレクトリを指定
2. config にて解析にて使用する conf ファイルの選択
3. outdir にて解析結果を出力するディレクトリを指定
4. 解析するデータの指定

である。1 から 3 については、それぞれの項目でディレクトリまたはファイルが行いたい解析に沿って指定されていれば問題ない。4 の解析するデータの指定は、ファイル名の入力場所は、下の方にある 2018002010000_hit32cr_crab.raw の部分である。データのファイル名は、観測日と観測開始時間を入力する必要がある。(例、観測が 2018 年 11 月 8 日の 12 時 25 分 00 秒開始の場合ファイル名は、20181108_122500_*****.raw となる) ファイル名の冒頭部分は、観測日の年月日を指定している。_を挟

んで次の数字は観測開始時刻を指定している。_を挟んだ*の部分は特に指定はなく、最後のファイルの拡張子は raw 形式になっている。設定ファイルには、3 か所ファイル名を指定できるようになっているが、本研究の解析では、毎回 1 ファイルしか指定しないので、下の二つはコメントアウトして使用している。上にあげていない他の項目は、書かれてあるファイルがその指定先ディレクトリに存在しているかを確認して指定先を決めてあげれば問題はない。これらを選択後、pulse_searcher_interface.sh のファイルのあるディレクトリにて、./pulse_searcher_interface.sh でファイルを実行すれば解析がスタートする。

解析ソフトで GRP 候補が検出されると以下のような図が出力される。

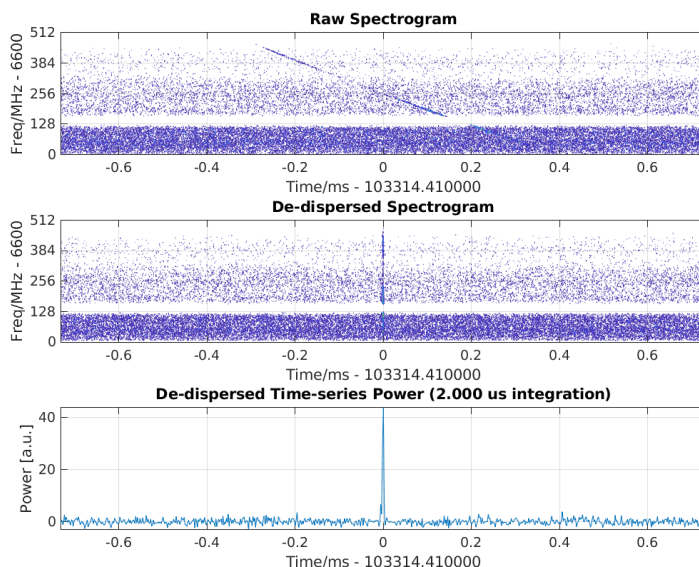


図 2 解析ソフトにて作成されるスペクトル

上段の図は、ダイナミックスペクトルと呼ばれる。縦軸が周波数 横軸が時刻になっており、真ん中に見える薄っすらと斜めに入った線が、パルスの信号である。この図から、高い周波数であるほど、到達時刻が早く周波数が低くなるにつれて時刻が遅くなっていることが確認できる。中段は、周波数に応じて生じた遅延を時間 0s の中心にそろえるように補正を加えたものである。下段は、中段の図を $2\ \mu\text{s}$ 間隔で積分を行い、その区間のパワーに相当する量を導出したものである。縦軸がパワー（任意単位）、横軸が時刻で表している。縦軸の典型的なノイズパワーを単位で測ったパワーに相当するものを、SNR と呼ぶこととする。

各データにて検出された GRP 候補だが、中には解析ソフトで誤検出されているものや、明らかにデータに異常があり誤検出しているものもある。データの異常による誤検出は、ダイナミックスペクトルなどを見れば明らかに異常があることを確認できる。そういったものは、作図されるスペクトルを確認し、取り除いている。各データで検出された GRP 候補から、誤検出を取り除いた個数を以下の表にまとめる。

表 2 GRP 候補検出個数

観測日	1 回目		2 回目		3 回目		4 回目		5 回目		6 回目		7 回目	
	6GHz	8GHz	6GHz	8GHz	6GHz	8GHz	6GHz	8GHz	6GHz	8GHz	6GHz	8GHz	6GHz	8GHz
11 月 8 日	0	0	1	3	0	1	3	5	6	1	4	2	6	4
11 月 9 日	1	0	1	0	1	0	2	0	2	0	6	6	10	6
11 月 10 日	5	4	2	1	1	1	4	3	2	1	0	0	2	2

11 月 9 日の 7 回目の観測のように極端に GRP 候補が見つかる時間帯もあれば、まったく発見されないような時間帯も存在する。GRP 候補の検出はこの 3 日間だけ見ると、比較的 5,6,7 回目の観測での検出数が多いように見受けられるが、これだけではあまり特徴を述べるに至る結果ではなかった。解析ソフトでは、GRP 候補の検出は、SNR の値が 7 を超えたものと設定されている。本研究はこのしきい値をそのまま使用して検出された GRP 候補を用いて、自転位相の関係などを調べた。

3 結果

初めに解析ソフトで得られた GRP のタイミングを、それぞれの観測日の 00:00:00 UT から何秒後の形へと変換した。次に観測日、周波数ごとに分けそれぞれで GRP のタイミングとパルサーの自転位相の関係の導出をした。自転位相導出の前に、GRP のタイミング (TOA) は以下の 2 つの補正を加える必要があった。

1. 周波数無限大を基準とした時刻へと変換するための補正
2. GRP のタイミングの TDB への変換

1 つ目は、先述したように 6GHz 帯と 8GHz 帯でそれぞれ周波数に応じた遅延を ISM 中で受けていた点の補正である。受けている遅延は、1.1.2 節のプラズマ中を伝達するのにかかる時間 T の式から求められ、その値は、6GHz 帯で約 5ms ほどであり、8GHz 帯で約 3ms ほどであった。これらの値は、パルスが発生してから、光速で伝搬し、観測者まで到達する時間にプラスされている遅延量である。各周波数の到達時間を統一するには、各周波数ごとの遅延量を到達時間から差し引く必要があった。今回は、1.1.2 節にて得られた計算式から、値を代入し求めた値を使用して補正を行った。

2 つ目は、TDB への変換である。TDB は、太陽系重心を基準にしている時刻である。今回解析で得られたデータの GRP のタイミングは、太陽系内の運動など様々な要因の影響を受けていた。その状態では、パルサーの自転位相を求めても正確なものは求められず誤差が出てしまう。観測時間が延びれば延びるだけ、誤差が大きくなり、今回使用するデータのような 10 時間に渡って観測しているような状況だと、誤差が大きくなりすぎてしまった。そのため、太陽系重心に到達する時刻へと変換しこれらの影響を取り除く必要があった。今回は、寺澤敏夫氏より、鹿島局で UT を TDB へと変換するために使用した、観測日の 00:00:00UT から始まり UT が 1 秒変化するごとにその UT での TDB の値を記入した変換テーブルを頂き、それを用いて、TDB への変換を行った。

これらの補正を加えた到達時刻 (TDB) を求めた後は、それらの値と周期からパルサーの自転位相の関係を求めた。周期は、各観測日の 00:00:00 UT をその観測日の初期周期 P_0 とした。周期 P は、每秒増加していくので、求める周期は、0 時 UT から GRP 候補が検出された時間までの間で初期周期から増加させた周期となる。ここで、11 月 8 日と 11 月 9 日のデータに関しては、周期の毎秒の増加量と初期周期 P_0 は、寺澤敏夫氏より提供された資料より引用させていただいた。11 月 10 日のデータに関しては、8 日と 9 日の値を参考に

推定した周期の増加量と初期周期を求めた。GRP 候補が検出されたタイミングでのかにパルサーの周期を求めたら、その値を用いて、パルサーの自転位相の導出を行った。自転位相は、GRP 候補の観測されたタイミングを、その GRP が起きたタイミングにおけるかにパルサーの周期で割り回転数を求め、得られた回転数の小数部分から求めている。小数部分に 360 をかけることで角度表示し、パルスの発生したタイミングでのパルサーの自転位相を導出した。

これらの計算は、基本的には python にて組み立てた作図用プログラムで行った。付録 2 に使用したプログラムを載せてた。プログラムでは、解析ソフトにて得られる観測開始時間から何秒後に GRP が観測されたかと、観測された GRP の SNR の値 2 つの数値データから、以下に載せる散布図、ヒストグラムを作成できるようにした。作成した散布図を、観測日ごとに示す。

3.1 11 月 8 日

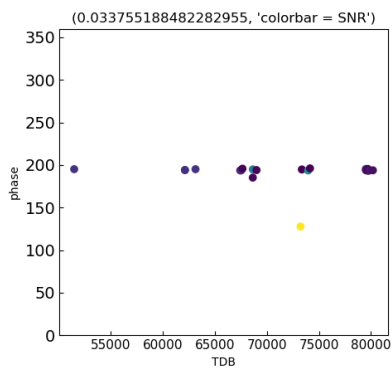


図 3 11 月 8 日 6GHz 帯 時間-自転位相

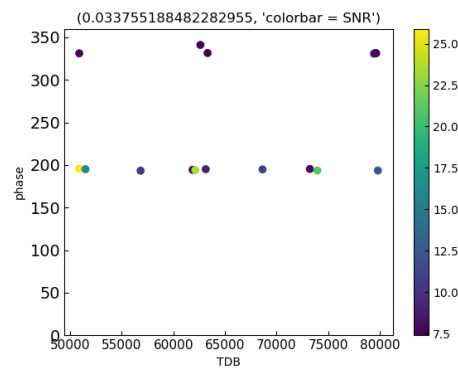


図 4 11 月 8 日 8GHz 帯 時間-自転位相

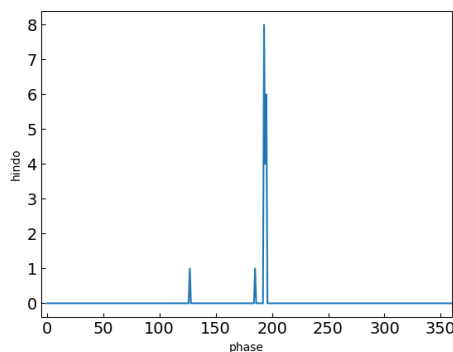


図 5 11 月 8 日 6GHz 帯の自転位相のヒストグラム

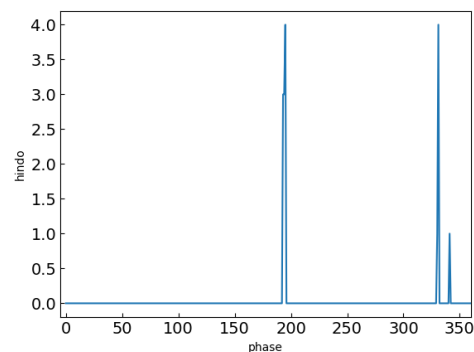


図 6 11 月 8 日 8GHz 帯の自転位相のヒストグラム

最も集中した自転位相は、 195° の辺りであった。8GHz では、 195° 辺りと 330° 辺りの 2 つの自転位相に集中しており、その位相差は約 140° 程度となった。6GHz では 195° 辺りに集中しているのと、 125° の辺り 1 点のみではあるが、集中する可能性があるような分布が見られた。こちらは位相差は、約 80° となっている。

3.2 11月9日

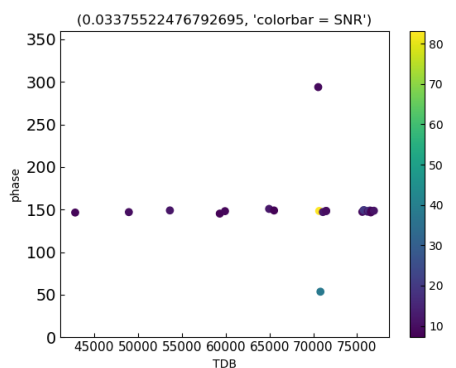


図7 11月9日 6GHz 帯 時間-自転位相

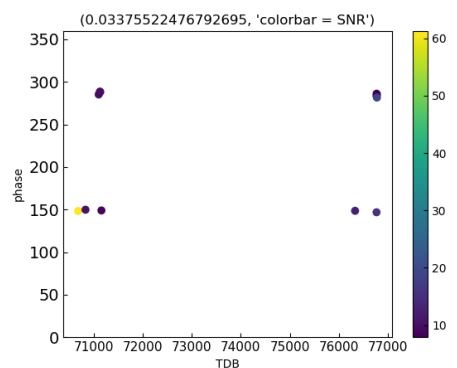


図8 11月9日 8GHz 帯 時間-自転位相

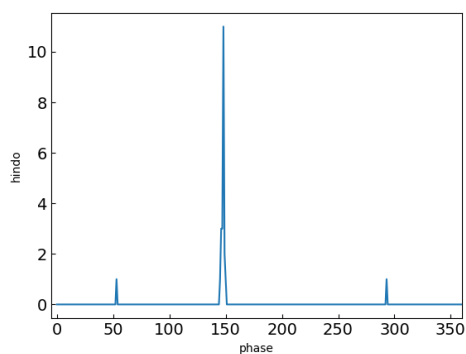


図9 11月9日 6GHz 帯の自転位相のヒストグラム

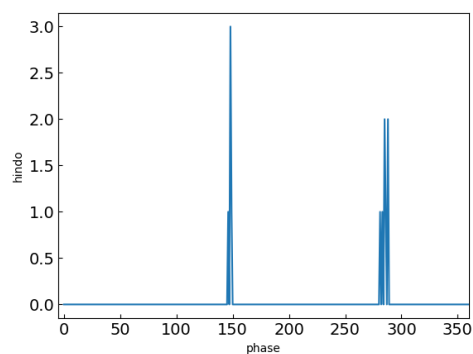


図10 11月9日 8GHz 帯の自転位相のヒストグラム

最も集中した位相は、6GHz、8GHz とともに位相 150° の辺りであった。8GHz では、自転位相 150° 辺りと 290° 辺りに分布が見られ、その位相差は 140° となった。6GHz では、3つの自転位相に分布していて、 60° の辺りと 150° の辺り、 290° 辺りの3つであった。自転位相 150° と 290° はどちらの周波数でも共通で、6GHz にはそれに加えてもう一つの位相に分布している。6GHz の分布の位相差は約 140° と約 90° であった。

3.3 11月10日

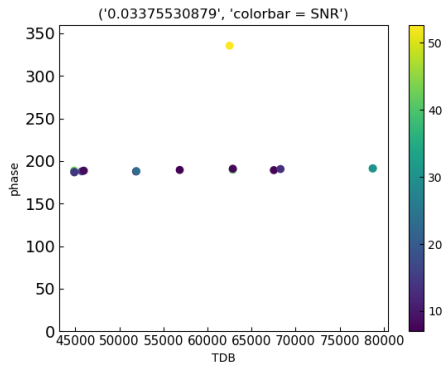


図 11 11月10日 6GHz 帯 時間-自転位相

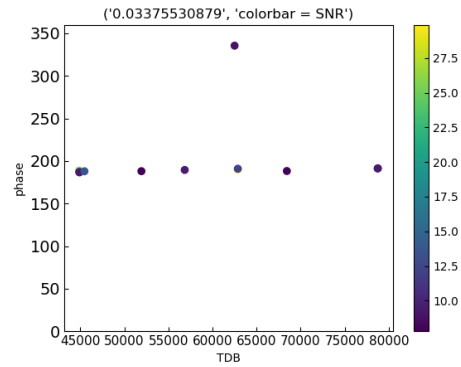


図 12 11月10日 8GHz 帯 時間-自転位相

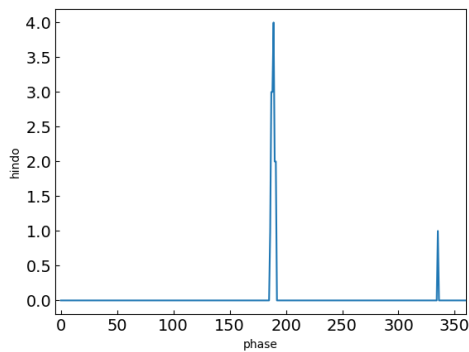


図 13 11月10日 6GHz 帯の自転位相のヒストグラム

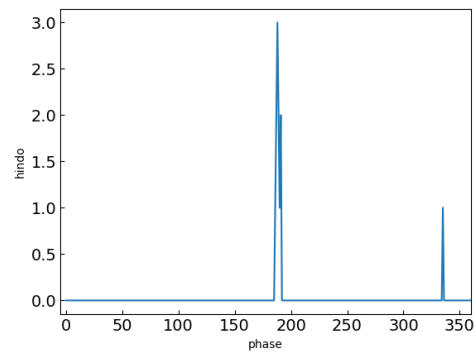


図 14 11月10日 8GHz 帯の自転位相のヒストグラム

最も集中した位相は、6GHz、8GHz とともに 190° 辺りであった。どちらの周波数でも 2 つの自転位相に集中する分布が見られ、 190° 辺りの他に、 330° 辺りの分布するような結果となった。この結果では、6GHz では 8GHz とほぼ同じ分布が見られ、8GHz では見られない自転位相に分布する様子は見受けられなかった。

11月8日から9日までの結果をまとめると、8GHz では3日間とも、位相差は 140° 程度で2つの自転位相に集中する様子が見られた。6GHz ではそれぞれの観測日によって、分布の違いが見られた。8日では、2つの自転位相への集中が見られたが、その位相差は約 80° であった。9日では、3つの自転位相に対して分布し、その位相差は約 140° と 80° であった。10日は、ほとんど8GHz と同じような分布が見られた。これらから、今回の結果と先行研究の結果を見比べながら、考察を行っていく。

4 考察

先行研究では、大きく以下の2点が指摘されていた。

1. 8GHz 帯では、MP が見出されず、IP のみが見られる。
2. MP と IP の関係は、式 $IP \approx MP + 140^\circ$ で分布している。

これらを踏まえて考えると、今回の結果では矛盾が生じていることがわかる。1つ目の、「8GHz 帯では、MP が見出されず IP のみが見られる」と先行研究では述べられているが、8GHz 帯では2つの位相の成分が見られており IP のみが見られるという点に対して矛盾が見られる。また、8GHz 帯で支配的なものを IP と捉えて考えると、 $MP \approx IP + 140^\circ$ になると考えられ、その場合、先行研究と食い違う。そのため今回の結果から得られる 8GHz の MP と IP の特徴は、MP も IP もどちらも見られ、MP の方が支配的である分布になっていると考える方が自然であり、先行研究とは異なる結果を得た。今回は3日間のデータしか解析を行っていないので、全体的にサンプル数が少ない。先行研究に矛盾した 8GHz に関しては、さらに検証が必要である。

また、今回の解析では、SNR の値が7を超えたものを検出している。この7という値は、エラー検出を避けるために比較的高い値が設定されている。そのため、ある程度 GRP の検出が制限を受けている。この7というしきい値を下げることで、同じ観測データでも検出数を増やすことができる。国立天文台の寺澤 敏夫氏より、寺澤氏が 8GHz の観測データに対して似たよう解析を行った時、

1. IP では、SNR の値が低いものが多いが GRP 検出数が多い
2. MP では、SNR の値が高いものが多いが GRP 検出数が少ない

という2点が見られたとコメントを頂いた。寺澤氏は SNR のしきい値を7を下回る値で設定している。このコメントとも照らし合わせて考えると、IP に集中する GRP は、SNR の値が7を超えるものが少なく、検出のタイミングで排除されている可能性があり、その場合、しきい値を下げることで先行研究で言われている 8GHz 帯では IP の方が支配的であるという点は同じ結果を得ることができる可能性があると考えられる。

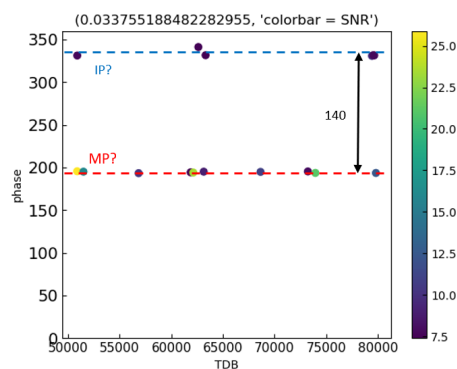


図 15 11月8日 8GHz 考察

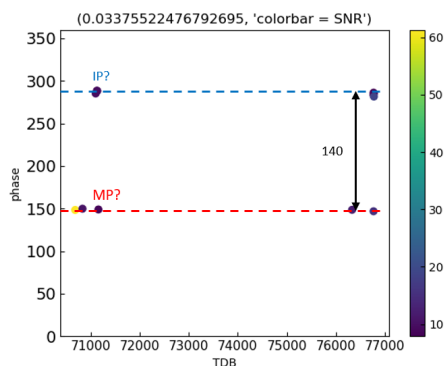


図 16 11月9日 8GHz 考察

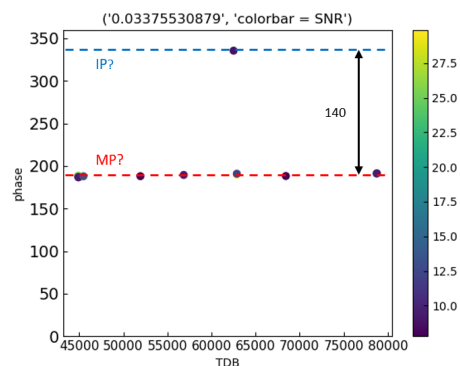


図 17 11月10日 8GHz 考察

8GHz では、先行研究に矛盾しているが、今回の結果から得られた「8GHz では、MP も IP もどちらも見られ MP の方が支配的」という考察をもとに 6GHz の MP と IP の分布を考察していく。6GHz では、最も集中した位相は 8GHz と同じ位相なので、支配的なものは MP であると考えられる。また、6GHz では MP と IP の他に、3 つ目の自転位相が見られた。6GHz でも MP と IP は、位相差が 140° であるのに対して、6GHz だけで見られた 3 つ目の位相は、11月8日では、MP - 90° 辺りで、11月9日では、MP - 80° 辺りであった。先に述べた先行研究のパルスプロファイルの図から考えると、自転位相が 90° 辺りなら、図の HFC 2 に近づくので HFC の部分が見られているのかと考えられるが、 80° の位相のずれだと、HFC の位相から離れてしまい、その位相の辺りにはパルスが見られていない。HFC の部分が見られていると考えられるが、もしかしたら MP と IP 以外の 3 つ目の集中する位相が 6GHz では見られているの可能性も考えられる。これについても、サンプル数を増やした更なる検証が必要である。

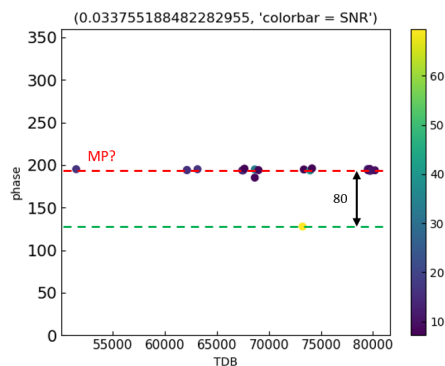


図 18 11月8日 6GHz 考察

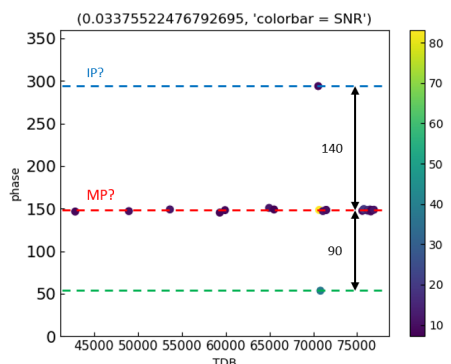


図 19 11月9日 6GHz 考察

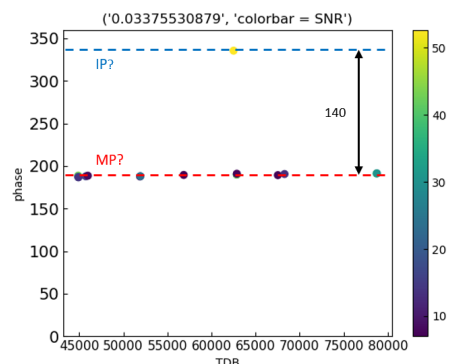


図 20 11月10日 6GHz 考察

5 まとめ・今後の展望

本研究では、11月8日から10日の3日間のかにパルサーのデータを使い解析を行った。使用した観測データの観測周波数は6GHz帯と8GHz帯で同時に観測されたものを使用し、6GHzのMPとIPの分布について8GHzの結果と見比べながら、その特徴を調査することが目的であった。解析の結果、6GHzの評価のために、8GHzのMPとIPの分布を調べたところ、MPとIPどちらも観測され、MPの方が支配的であるという結果を得た。この結果は、先行研究でいわれている「8GHzでは、MPは見出されずIPのみを見ることができる」という点に対して矛盾をしている。3日間を通してこの傾向が見られた。これについては、更なる検証が必要である。また、今回得られた結果をもとに本来の目的である6GHzのMPとIPの分布の特徴について考えると、6GHzでは8GHzと同様にMPとIPどちらも見られMPの方が支配的であると考えられる。また、8日と9日では、MPとIPの自転位相以外にも分布しそうな傾向が見てとれた。よって、6GHzでは、MPとIPどちらも見られMPが支配的であるかつ、MPとIP以外の3つ目の集中する自転位相を勾わせる結果となった。

今後は、先行研究に対して矛盾してしまった8GHzのサンプル数を増加、SNRのしきい値を下げGRP検出にかけている制限を弱めるなど、8GHzでのMPとIPの分布について更なる検証を行うと同時に、今回の研究では、TDBの変化を寺澤 敏夫氏より提供して頂いた鹿島の変換テーブルを用いたので、これをTEMPO2などのソフトを使い日立局での変換テーブルの作成を行い、より正確なGRPのタイミングと自転位相の関係を求め6GHzでのMPとIPの分布について議論を進めていくことが必要であると考えている。

6 謝辞

この論文を書くにあたって、指導教員である百瀬 宗武教授始め米倉 覚則教授の茨城大学の教授の皆様並びに茨城大学電波天文観測研究室の皆様には、パルサーに関する基礎的な知識や研究の進め方などの様々なご指導を頂きました。特に米倉 覚則教授には、解析PCのセッティングや外部の研究者の方とのやり取りなどを行って頂き、大変助かりました。山口大学の青木 貴弘氏には、パルサーの解析ソフトPulse_sercherの提供して頂き、かつ茨城大学にてパルサーの観測データの解析を行うことができるように様々なご助言を頂きました。国立天文台の寺澤 敏夫氏には、現在のパルサー解析の意義や解析の手法、解析に必要なデータの提供、私

が解析した結果に対するご意見・ご指導を頂き、この研究を進めるにあたってお力添えを頂きました。茨城大学の百瀬 宗武教授、米倉 覚則教授、山口大学の青木 貴弘氏、国立天文台の寺澤 敏夫氏を始めとする皆様に支えて頂いたことで、今回の研究をこの論文にまとめるに至りました。この場をかりて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 三上 諒 (東京大学・宇宙線研究所) 「 2013 年 7 月に観測された Crab パルサー 巨大電波パルスに関する考察 」 SKA-Japan ワークショップ 2015 (国立天文台、2015 年 3 月 3 日-5 日)
http://ska-jp.org/ws2015/SKA-JP/talks/20150304_Mikami.pdf
- [2] 国立天文台 「茨城局 ー茨城大学/国立天文台」
http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/network/ant_ibaraki.html
- [3] 寺澤 敏夫 「PulsarDataAnalysisVer3」 (発行年不明)
- [4] Intranet Jodrell Bank Centre for Astrophysics School of Physics and Astronomy 「JODRELL BANK CRAB PULSAR MONTHLY EPHEMERIS」
<http://www.jb.man.ac.uk/research/pulsar/crab.html> (最終閲覧日 2019 年 2 月 27 日)
- [5] DAVID A. MOFFETT and TIMOTHY H. HANKINS [MULTIFREQUENCY RADIO OBSERVATION OF THE CRAB PULSAR] (1996) Astrophysical Journal, 468, 779-783
- [6] Felix AHARONIAN et al. [Hitomi X-ray studies of giant radio pulses from the Crab pulsar] (2018) Publ. Astron. Soc. Japan 70 (2), 15 ,118

7 付録1 conf ファイル

6GHz 解析用 設定 conf ファイル

```
# Set Dispersion Measure.
# In the program, there is a loop such as for(dm = min; dm <= max; dm += step).
survey_DM_pc_per_cm3_min 56.7450
survey_DM_pc_per_cm3_max 56.7450
survey_DM_pc_per_cm3_step 56.7450

# Set FFT Window Width in milli-second.
fft_width_ms_desired 30
# Set Width of Short Time Fourier Transform in mili-second,
# relating to a data size transferred to a GPU at once.
# e.g., 10 ms
stft_width_ms_desired 100
# Set Integration Time in micro-second.
# e.g., 2 us. If 0 then no integration.
integration_time_us_desired 2
# Set Signal-to-Noise Ratio Threshold for Pulse Detection.
snr_threshold 7
# Set File for Band Calibration.
bandchar_file ~/ymg32cr_band.txt
# Set Observation Parameters.
sampling_freq_MHz 1024
# 1024 mega-sample/s
adc_RF_min_MHz 6600
# Minimum RF/MHz of the A/D converted band; e.g., 6600 or 8192.
eff_RF_min_MHz 6606
# Minimum RF/MHz of the effective band for analysis; e.g., 6606 or 8198.
eff_RF_max_MHz 7106
# Maximum RF/MHz of the effective band for analysis; e.g., 7106 or 8698.
band_inverted true
# 'true' when inverted by Higher Order Sampling, or 'false'
datum_size_bit 2
data_format ADS1K # Linear1B, ADS1K (= ADS3KP_VSISEL11 via OCTAVIA)
use_gpu true # true or false
save_images true # true or false
partition_width_byte 256000000 # Data size/B loaded from a file at once.
```

8 付録2 プログラムソース

作図用 python プログラム

```
import scipy.fftpack
import numpy as np
import matplotlib as mpl
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.transforms as tr
import sys
import math
import time
import os.path
import scipy.optimize as optimization

def main():

    #UT=>TDB 変換テーブル読み込み
    fnameTDB = "./2018312_KsmS_DE430NEW2_TDB.txt"    #312 それ以外
    fnameTDB = "./2018313_KsmS_DE430NEW2_TDB.txt"    #313 314
    TDBtime = np.loadtxt(fnameTDB,usecols=(0), unpack = True,dtype='float')
    #ATDBtime = TDBtime + 5.27851    #314
    ATDBtime = TDBtime                #312,313

    #print('what day?(DOY)')                #それ以外
    #DAY = input('(ex=>270)')                #
    #ATDBtime = TDBtime + 5.27851*(312-float(DAY))    #

    #使用するデータ読み込み
    fname = "./3138GTDB.csv"
    #GRP のタイミングを time の配列へ    SNR の値を snr の配列へ
    time,snr=np.loadtxt(fname,usecols=(0,1),delimiter=",",unpack=True,dtype='float')
    nmax = time.size
```

作図用 python プログラム続き

```
A = np.linspace(0,0,nmax)          #
B = np.linspace(0,0,nmax)          #計算用
phase = np.linspace(0,0,nmax)      #
T = np.linspace(0,0,nmax)          #
TT = np.linspace(0,0,nmax)         #

hindo = np.linspace(0,0,361)       #ヒストグラム用

#print('nu0?')                      #
#nu0 = input ('nu0(Hz) =>')         #ジョドレルバンク
                                    #データベース用
#print('nudot0?')                   #
#nudot0 = input('nudot0 (10-10) =>') #
                                    #

#nudot0 = -368659.58380*10**(-15)    #変更パラメータ
#nu0 = 29.6250752836077              #312
#tJPL = 0.0182224

nudot0 = -368658.79033*10**(-15)    #変更パラメータ
nu0 = 29.6250434377248              #313
#tJPL = 0.0138900

#nudot0 = -368658.99685*10**(-15)    #変更パラメータ
#nu0 =29.6250115918419              #314 推測値

#nudot0 = -(36865.58380 - 0.20653*(312-float(DAY)))*10**(-15) #推測値

#観測開始が 00:00:00UT から何秒後かを計算する
#print('Observation start time? (UT)') #観測開始時間
#hour = input('Hour?')                #何時?
#minute = input('Minute?')            #何分?
#seconds = input('Seconds?')           #何秒?

#basetime = float(hour)*60*60 + float(minute)*60 +float(seconds)

#basetime = 44700 #312
basetime = 41720 #313
#basetime = 44300 #314
```

作図用 python プログラム続き

```
#周波数無限大を基準に
#Gdtime = 0.00500875071397061      #6GHz
Gdtime = 0.00329885498551298      #8GHz

P0 = 1/nu0          #周波数=>周期
#nu0 = 1/float(P0)   #314 専用パラメータ

#初期周期が分かっておらず周期の探索がいるもの
#print('P0?')          #
#P0 = input('(ex. p=0.0337552247679270)=>') #

#nu0 = 1/float(P0)          #周期探索をしたもの

#Main pulse の位相を 0 にそろえる場合
#FP = -(nu0*tJPL+0.5*nudot0*tJPL**2)

for n in range(nmax):
    #UT=>TDB 変換
    UTtime = time[n] +basetime-Gdtime      #
    INTtime = int(UTtime)                  #
    T[n] = ATDBtime[INTtime]                #
    Ptime = (UTtime-INTtime)*(ATDBtime[INTtime+1]-ATDBtime[INTtime]) #
    TT[n] =T[n] + Ptime                    #

    #自転位相導出
    #A [n] = FP + nu0*time[n]+0.5*nudot0*(time[n])**2      #
    A [n] = nu0*TT[n]+0.5*nudot0*(TT[n])**2                #
    B [n] = int(A[n])                                       #
    phase [n] = (A[n]-B[n])*360                             #

    #ヒストグラム作成
    iphase = int(phase[n])          #
    if (iphase>=0) and (iphase<=360): hindo[iphase]+=1      #
    #
    #
hindopeak=-1; iphaseAt=-1          #
for iphase in range(361):          #
    if hindo[iphase] > hindopeak:   #
        hindopeak=hindo[iphase]; iphaseAt=iphase           #
```

作図用 python プログラム 続き

```
print(phase) #導出した自転位相出力

#散布図出力
plt.scatter(TT,phase, c=snr)
plt.xlabel('TDB')
plt.ylabel('phase')
#xticks = np.arange(0,40000,5000)
plt.tick_params(axis='x',labelsize=11)
plt.tick_params(axis='y',labelsize=14)
plt.ylim([0,360])
plt.title ((P0,'colorbar = SNR'))
plt.colorbar()
plt.show()

#ヒストグラム出力
plt.plot(hindo)
plt.xlim(-5,360)
plt.tick_params(axis='both',labelsize=14)
plt.xlabel('phase')
plt.ylabel('hindo')
plt.show()

if __name__ == '__main__':
    main()
```