

4.3 ミリ秒パルサーの高精度タイミング観測

花土 ゆう子^{*1} 渋谷 靖久^{*1} 細川 瑞彦^{*2}関戸 衛^{*3} 今江 理人^{*1}

4.3 Millisecond Pulsar Timing Observations at CRL

By

Yuko HANADO, Yasuhisa SHIBUYA, Mizuhiko HOSOKAWA,
Mamoru SEKIDO, and Michito IMAE

Millisecond pulsars are attractive for use as future reference clocks because of their highly stable pulse timing. Communications Research Laboratory (CRL) aims to apply millisecond pulsars to the construction of a new time scale, and has developed a millisecond pulsar observation system using the 34-m antenna at Kashima Space Research Center. This system uses an acousto-optic spectrometer (AOS) for wide-band observation and a special digital processor for the numerous pulse integration tasks in real-time. Using this system, we started in November 1997 weekly observations of PSR1937+21 using the 34-m antenna in the S-band. The residuals of pulse phases over two years show some drift, and more precise timing analysis is required. Current observation precision is $2.9\mu s$ for one day's observation, which shows that the 34-m antenna's performance is sufficient for the highly precise timing measurement for the quite weak pulse signals of millisecond pulsars.

[キーワード] 時間標準, ミリ秒パルサー, AOS

Time standard, Millisecond pulsar, Acousto-optic spectrometer (AOS)

1. はじめに

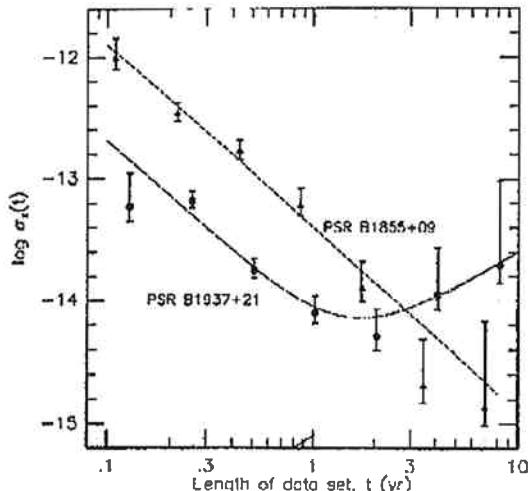
パルサーとは規則正しい周期で光や電波が明滅して見える天体である。その正体は高速自転する中性子星であり、自転軸とずれた磁極からビーム状の電磁波を放射しているため、自転に合わせて周期的なパルスが観測されると考えられている。パルス周期（自転周期）が数ミリ秒のパルサーをミリ秒パルサーと呼ぶ。ミリ秒パルサーのパルス周期は、長期にわたりきわめて安定である。第1図は二つのミリ秒パルサーの周波数安定度を示したものであるが^[1]、PSR1855+09の周波数安定度は 10^{-15} に届こうとしており、これは原子時計に匹敵する安定度である。

この性質により、ミリ秒パルサーの時系への応用、周波数標準としての利用が期待されるようになった。地球の自転から時を定義したように、パルサーのパルス周期から定義する時系をパルサー時系と呼ぶ。パルサー時系には、寿命が半永久的に長いこと、地球の運動や重力から解放された時系の基準となることなど、他の時系にはないメリットがある。ただしパルサー自身のメカニズムが完全に解明されておらずそれ自身が一次標準としては利用できることや、ゆらぎの原因となる事象すべての正確なモデル構築がまだ難しいことなどから、原子時と組み合わせて長期安定な時系を構築する方法が検討されており、実現にむけて研究が進められている^{[2][3][4]}。他にも、太陽系の動きを高精度に反映することから各種惑星歴の比較検証を利用する^[1]、VLBI観測から決定した位置とタイミング観測から求めた位置とを比べることにより、異なる座標系の比較を行う^[5]、伝搬路における重

*1 標準計測部 時空計測研究室

*2 標準計測部 原子標準研究室

*3 鹿島宇宙通信センター 宇宙電波応用研究室



第1図 ミリ秒パルサー PSR1937+21, PSR1855+09における周波数安定度[1]. アレシボ 305m アンテナでの観測結果.

力場や星間物質の微少影響を検出する高精度なプローブとして利用する、など、さまざまな研究テーマへの応用も期待されている。パルサー時系の詳細については文献[6]を参照されたい。

海外でも、アレシボ（ペルトリコ）の305mアンテナを始め、ナンセイ（93m鏡相当：仏）、ジョドレルバンク（76m鏡：英）、グリーンバンク（43m鏡：米）、パークス（64m鏡：豪）、エフェルスバーグ（100m鏡：独）、カリバージン（64m鏡：ロシア）等数多くの観測局でミリ秒パルサー観測が行われている。しかし天文分野の研究が主流であり、周波数標準としてのアプローチを行っている研究者はまだ数少ないのが現状である。当所では鹿島宇宙通信センターに34mアンテナが建設されたのを機に、1989年よりパルサー関連の研究を開始した。タイミング精度などに関する理論的研究^[7]、ロシア等との共同研究によるパルサーVLBI観測^[8]、及びミリ秒パルサーテイミング計測、の3つの柱で研究を進めている。タイミング計測については、観測システムの独自開発からスタートした。これは、極端に微弱なパルスタイミングを高精度に計測する技術の開発である。上記のような大口径アンテナに比べ口径が小さく条件の厳しい34mアンテナだが、「92年には試験観測システム(270kHz×16チャンネルのフィルタバンク方式、受信帯域幅4MHz)により、約18μsの測定精度でミリ秒パルサーPSR1937+21の観測に成功し、34mアンテナでのミリ秒パルサー観測の可能性を示した^[9]。その後システムの改良を行い、「97年には受信可能帯域幅200MHzの新システムを完成了。他局で多く採用されているフィルタバンクに代わり、パルサー観測システムとしては他に類を見ない音響光学型分光器AOS(acousto-optic spectrometer)を導入したのが特徴である。また専用

のデータ処理プロセッサを開発することによりリアルタイム長時間積分も実現した。このようなシステム改善の結果、PSR1937+21の観測日毎の観測精度は $2.9\mu s$ にまで向上した。アレシボ305mアンテナ（観測精度200ns）に比べて1/100のアンテナ面積でこの精度を実現した意義は大きい。技術開発という観点から見ると、高精度タイミング計測システムの開発は、周波数標準に対する精密計測技術・時刻比較技術・34mアンテナによる天体観測技術など、CRLがこれまで培ってきたさまざまな技術を結合し発展させるものであり、当所における研究の役割は重要である。'97年秋からは、このシステムを用いて毎週1回の定常観測を開始しており、国内では唯一のミリ秒パルサー連続観測局としてデータ蓄積を行っている。

本稿では、当所で開発した観測システムの概要及び連続観測の現状について紹介する。

2. 観測システム

2.1 パルサー信号の特色

システムの説明に先立ち、タイミング計測において考慮すべきパルサー信号の性質を以下に挙げる。

(A) 信号強度が弱い（フラックス密度が小さい）。

ミリ秒パルサーの場合信号強度は特に弱い。北天で最も強度の強いミリ秒パルサー PSR1937+21 の場合でも、フラックス密度 $\langle S \rangle$ は約 3mJy (2.2GHz 帯での換算値^[11], Jy: ジャンスキー: $1\text{Jy} = 10^{-26}\text{W m}^{-2}\text{Hz}^{-1}$) であり、これは VLBI の電波源として用いられるクエーサーの 1000 分の 1 程度の強度である。

(B) 信号強度が周波数のほぼ 2 乗に反比例する。例えば PSR1937+21 の強度は以下の式で表される^[11]。

ここで、 f = 観測周波数 (GHz), $S(f) = f$ でのフラックス密度 (mJy), $S(1\text{GHz}) = 1\text{GHz}$ でのフラックス密度 (mJy), である。低い周波数帯の方が信号強度が強く観測には有利であるが、低周波数帯では次の(C)の影響によるパルス波形のなまりが問題となる。

(C) 星間電離媒質による分散のため、パルス到着時刻に周波数に応じたずれが生じる。

パルサー信号はその伝搬の際、電離媒質による分散により次式のような遅延を被る^[12]。

$$dt_{PM}(f) = 4.15 \times 10^3 \times DM \times f^{-2}(s) \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで、 f = 観測周波数 (MHz), DM = Dispersion Measure (pc/cm^3 , pc: パーセク: $1\text{pc} = 3.08 \times 10^{13}\text{km}$) = 観測方向における単位面積あたりの総電子数, である。

周波数の高い成分は早く、低い成分は遅く到着する。つまり広帯域でパルサー信号を受信すると、遅延量の異なりから波形になまりが生じる。分散によるパルス幅の広がりは、式(2)の変形から以下のように計算できる^[12]。

$$\Delta t = 8.3 \times 10^3 \times DM \times f^{-3} \times B(s) \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここで、 B = 帯域幅 (MHz) である。受信帯域幅が同じ場合、低周波帯の信号ほどパルス幅の広がりが大きくなる。

2.2 システム設計方針

観測システムの目的は、2.1.のような性質を持つ信号のパルスタイミングを高精度に測定することである。具体的にはまずノイズの中からパルス波形を検出し、そのピークからパルス到着時刻を決定する。システム感度に依存するパルス到着時刻の測定誤差 σ_t は、最小二乗法による推定から次式のように導き出される^[13]。

$$\sigma_t = \frac{W^{3/2} \cdot T_{sys}}{(B \cdot T \cdot P)^{1/2} \cdot \langle S \rangle \cdot G} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここで、 W = 観測パルスの半値幅(s)、 P = パルス周期(s)、 T_{sys} = システム雑音温度(K)、 $\langle S \rangle$ = パルスの平均フラックス密度(Jy)、 B = 受信帯域幅(Hz)、 G = アンテナゲイン(K/Jy)、 T = 積分時間(s)、である。

34m アンテナはアレシボやナンセイに比べると口径がかなり小さい (G が小) ため、受信帯域幅 B と積分時間 T の拡大が当所のシステムの必須条件である。また数 $10\ \mu\text{s}$ 幅のパルス波形が再現できる時間分解能が必要である。

2.3 CRL の観測システムの特色

システム設計における基本方針：①広帯域受信，②長時間積分，③高時間分解能，の実現のため，①と③に関しては AOS と高速 CCD カメラの導入，②に関しては専用プロセッサの開発が必要となった。以下に導入の経緯と各装置の特色を説明する。

観測帯域幅拡大については、IF 帯域の全幅受信を目指した。観測周波数帯としては 2GHz 帯 (2150–2350 MHz) を使用するので最大 200MHz 帯域での受信が可能となる。このような広帯域では分散遅延によるパルスのなまり (2.1.(C)) が大きな問題となるため、広帯域信号を狭帯域チャネルに分割し各チャネルの遅延を補正したのち合成する方法を探った。この場合受信パルス幅の広がりは、1 チャネルの帯域幅で生ずる遅延量程度ですむ。2GHz 帯でのパルスなまりを $10\ \mu s$ 程度 (時間分解能程度) に抑えるためには、式(3)より 1 チャンネルあたり 200kHz 程度の帯域に分割する必要がある。周波数分割においてはフィルタバンク方式を採用している観測局が多いが、200MHz/200kHz=1000 個のフィルタを並べるのは現実的ではないため、効率よい周波数分割の道

第1表 CRLにおけるミリ秒パルサータイミング計測システム諸元

アンテナ	
口径	34m ϕ
観測周波数	2.2GHz
システム雑音温度	71K
アンテナゲイン	0.426K/Jy
信号処理部 (AOS 含む)	
帯域分割法	AOS
受信帯域幅	200MHz(50MHz × 4 ユニット)
周波数分解能	200kHz
	50MHz/256ch
サンプリング数	100/周期
時間分解能	～16μs (最小約 13μs)
アベレージングプロセッサ	
A/D 変換	8bit
パルス加算	最大 2^{24} 回

具として AOS^[14]を導入した。

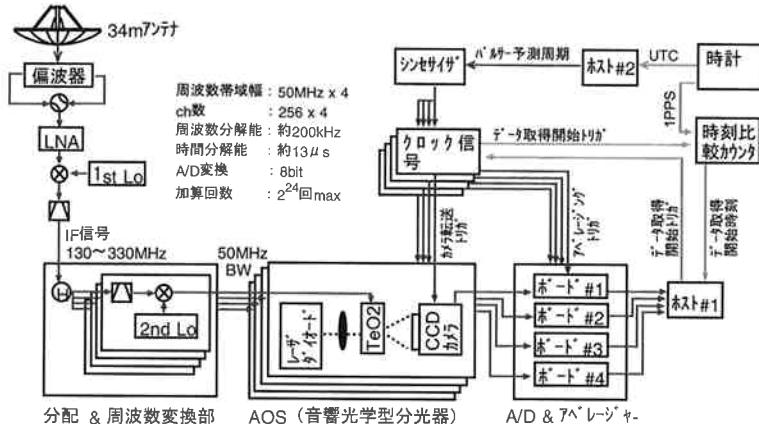
AOS とは、音響光学素子にレーザー光と電気信号を入力すると入力電気信号の周波数に応じた角度でレーザー光が回折する、という原理を利用した周波数分割器である。電気信号の強度変動も回折光の強度変動として取り出すことができる。回折光は CCD カメラにより電気信号として取り出される。各 CCD 素子が狭帯域チャネルに相当することになる。導入した AOS では、数 cm サイズの音響光学素子 1 個で 50MHz 帯域を 256 チャネルに分割できるため、コンパクトなシステムが実現した。

AOS では CCD カメラからの読み出し速度が時間分解能を制限する。ミリ秒パルサータイミング計測においては $10\ \mu s$ 程度の時間分解能が必要であるため、我々は高速なデータ読み出しが可能な CCD カメラを組み合わせることで、AOS をミリ秒パルサー用タイミング計測装置として実用化した。

長時間積分に関しては、待ち受け観測型の大口径固定アンテナに比べ、星のトラッキングが可能な34mアンテナはその利点を活かすことができる。原理的にはパルサー可視時間中連続して積分を行うことも可能である。この場合ミリ秒パルサーにおいてはパルス加算回数が千万回以上に及ぶ、この膨大な加算処理を効率よく行うため、専用プロセッサを新たに開発した。データ取得と演算の並行処理及び演算時のデッドタイムを極力抑える設計により、観測と同時にリアルタイムで積分結果を得ることができる。第1表に当所の観測システムの主要諸元を示す。

2.4 データ取得系

第2図にシステムのブロック図を示す。観測周波数は、強度減衰と分散遅延量とのかねあい(2.1.(B)および(C))より、S-band帯を選んだ。条件としてはL-bandでも



第2図 34mアンテナ S-band系を用いたミリ秒パルサー観測システム

観測が可能だが、混信が多いため観測が困難であった。偏波器は右旋／左旋円偏波のいずれかが選択できるが、観測は右旋で行うこととした。IF信号は周波数変換器でまず 50MHz×4 ユニットに分割され、各ユニットの信号は AOS にてさらに 256ch に分割される。周波数分解能は約 200kHz である。AOS は半導体レーザーを使用しており周波数変動のおそれがあるため、キャリア信号を入力して周波数チェックを随時行う。

AOS からの出力は、アベレージングプロセッサへシリアル転送される。転送はパルサー周期の 1/100 に同期したトリガで実施しており、これがサンプリングの時間分解能となる。アベレージングプロセッサでは、1 ボードが AOS 1 ユニット分の処理を行う。1/100 周期毎に送られてくる 256ch 分のデータは、8bit で A/D 変換されたのちメモリに蓄積され、1 周期毎に同じチャンネル同じ位相のデータが加算されていく。最大で 2²⁴ (約 1600 万) 周期分の加算が可能である。

2.5 タイミング制御系

パルス加算タイミングは、パルサー周期に完全に同期しないなければならない。しかし観測されるパルサー周期は、地球運動等によるドップラーの影響で刻々変化するため、コンピュータ（ホスト #2）でその予測周期を計算しリアルタイムにシンセサイザを制御する。予測周期は、プログラム “TEMPO”（3章参照）により 4 時間毎の値を計算しておき、観測時にはそのデータベースを補間して、リアルタイムの予測値を得ている。予測周期 P に同期した信号は、シンセサイザからクロック信号発生器に供給され、P/100 周期のクロックが転送トリガ（サンプリングトリガ）として AOS へ、周期 P に同期したクロックがアベレージングトリガとしてプロセッサへ送られる。

パルサーフタイミング観測には短期安定度の良い周波数標準が不可欠である。例えばアベレージングトリガの安定度が 10⁻⁹ 程度（通常の水晶発振器程度）しかないと

すると、約 3 時間の積分の間に 10 μs 程度の誤差が生じてしまう。VLBI 観測局でもある 34m アンテナは水素メーザーを有しており、全ての発振器は、水素メーザーの基準信号に位相同期させることにより、10⁻¹³ 程度の短期安定度を保つことができる。

観測開始の時刻は、実験室時計より時分秒を取得し、秒以下の値については、実験室時計の 1pps とデータ取得開始トリガとの時刻差をカウンタで計測する。実験室時計は水素メーザー 1pps のカウントアップで時を刻むため、UTC との時刻差を GPS 受信器によりモニターする必要がある。この時刻差データは、解析時の時刻補正に用いられる。

2.6 観測の流れ

データ取得に関する制御はホスト #1 が担当する。プロセッサへのパラメータ（加算回数など）を設定して観測時刻まで待機、開始時刻になったら PIO ボードからデータ取得開始トリガをプロセッサへ出力する。加算終了後プロセッサのデータを保存する。保存されるデータは、

- ① 加算データ（アベレージャ出力； 1 周期分 100 サンプル × 256ch, 加算回数),
- ② ログファイル（観測制御プログラムで記録、パルサー名、観測周波数など),
- ③ 加算開始時刻（開始トリガと 1PPS との時刻差をカウンターで計測),
- ④ 観測時刻と UTC との時刻差（別個に GPS 受信器で実験室時刻を常時モニター）

の 4 種類である。他、観測時の予測周期計算に用いたデータベースも解析で必要となる。

観測終了後、オフラインで各ユニット各チャンネルの分散遅延を補正して合成する。このとき 1 周期 100 点の刻みで補正量を丸めて粗すぎるので、直線近似により各点間をさらに 10 分割し、1/1000 周期の分解能で遅延補正を行っている。こうして得られた最終波形からピー

ク点を決定し、その位相と開始時刻から、パルス到着時刻を求める。ここまでが一次処理である。解析では、一次処理で得られた各パルス到着時刻をモデル計算で得られた予測値と比較し、残差を求める(3章参照)。

3. 観測結果

3.1 PSR1937+21 のパルス波形

上記システムは'97年に完成し、同年11月よりミリ秒パルサーPSR1937+21の定常観測を実施している。このパルサーは、北天で最も強度が強く、他局での長期観測結果が出ておりシステムチェックに好都合、という点で最初のターゲットに選んだ。観測は毎週1日、パルサーの南中前後4時間の間実施する。約30分の加算を1セッションとし、1時間毎に観測を行う。一日あたり5~8セッションを実施している。観測周波数はS-band(2120-2320MHz)、偏波は右旋で統一した。

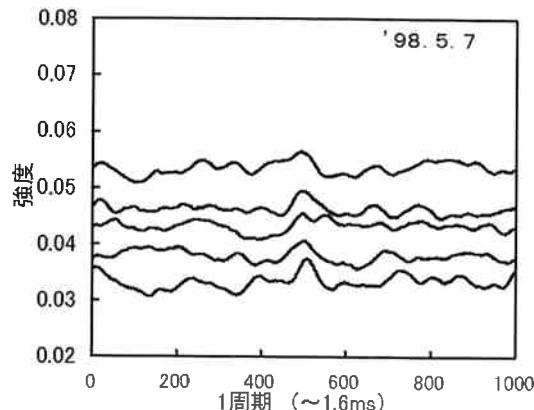
ある観測日におけるパルス波形を第3図に示す。1ユニット256ch(50MHz帯域)分の信号を合成した結果である。S/Nの良い日悪い日を1例ずつ挙げた。観測は同じ条件で実施しているが、日によってS/Nにかなりの違いがある。

3.2 パルスピークの位相変動

観測波形から求めたピーク位相を到着時刻に換算し、予測計算値と比較して残差を求める。予測値計算には、プリンストン大学のパルサーグループが公開している解析プログラム“TEMPO”を使用している。TEMPOは、観測局でのパルス到着時刻を太陽系重心での到着時刻に変換してから、残差計算を行う。変換式は次で表される^{[1][15]}。

$$t_b = t - D/f^2 + (r \cdot n)/c + \Delta c + \Delta E - \Delta S \quad \dots \dots \dots (5)$$

t_b =太陽系重心での到着時刻、 t =観測局における到着時刻、 f =観測周波数、 D =分散定数、 r =太陽系重心から観測局へのベクトル、 n =太陽系重心からパルサー



第3図 PSR1937+21のパルス波形。AOS 1ユニット(50MHz帯域幅)における27分の積分波形。S/Nの良い日・悪い日の1日分の観測例。

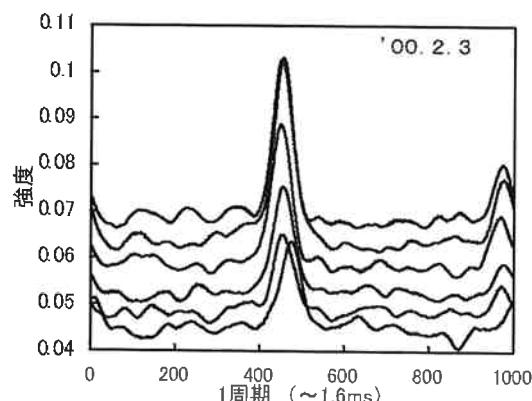
への方向ベクトル、 Δc =実験室時計とレファレンス時系との時刻差、 ΔE =惑星運動による重力赤方偏移(インシュタイン遅延)、 ΔS =伝搬路の重力場による遅延(シャピロ遅延)、である。モデル計算のためには惑星歴が必要となるが、今回の解析ではDE200を使用した。またレファレンス時系としてはUTCを使用した。次に時刻 t_b における太陽系重心での予測パルス位相を計算する。太陽系重心でのパルスタイミングは、パルサーそのものの刻むパルスタイミングとほとんどみなせるので、太陽系重心でのパルス位相は、パルサー自身の自転速度減衰から次のように予測できる^{[1][15]}。

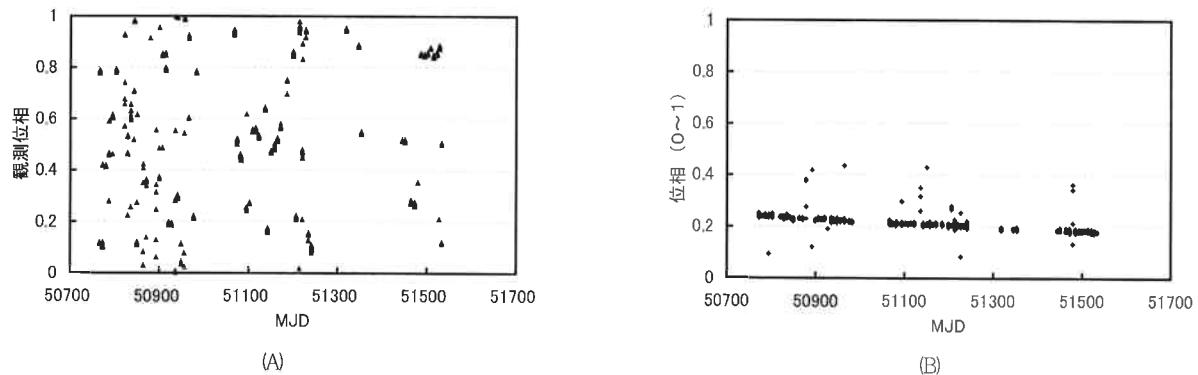
$$\phi(T) = \phi_0 + \nu T + 1/2\nu T^2, \quad T = t_b - t_0 \quad \dots \dots \dots (6)$$

T =太陽系重心におけるあるエポック t_0 からの経過時間、 ϕ_0 =エポックにおける位相($T=0$ での位相)、 ν =回転周波数、である。 t_b は各パルスが太陽系重心に到着した時刻(のはず)なので、 $\phi(T)$ は常に一定(t_0 を適当に選ぶことにより0)になるはずである。しかし実際には、観測値 t から求めた t_b は誤差を含み、またモデル計算(2)式(3)式が正確でない場合はこれも誤差の要因となるため、 $\phi(T)$ は完全に0にはならない。これらが残差として現れる。

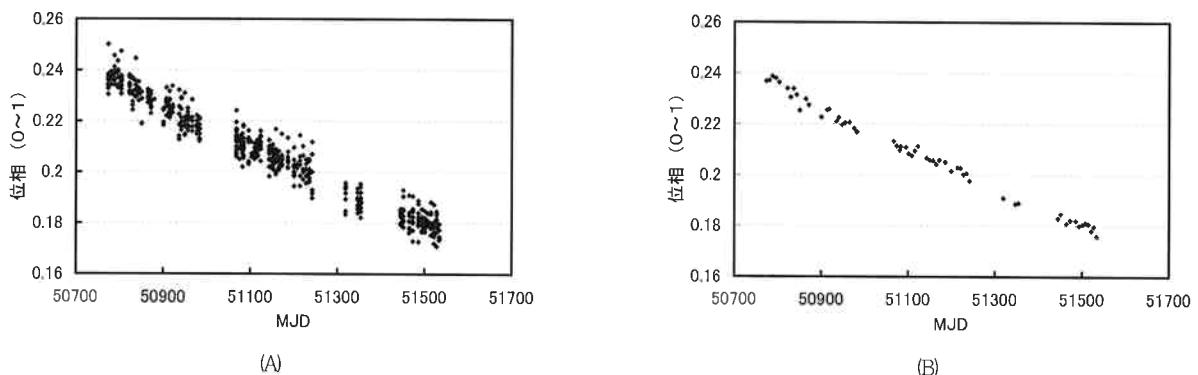
第4図に'97年11月~'99年12月の観測による位相変動を示す。今回は1ユニット(50MHzBW)27分積分で得られた結果を使用した。残り3ユニットのデータは不具合により欠損期間があったりしたため合成していない。第4図(A)は各観測波形より得られたピーク位相である。観測開始時刻は任意なので観測位相はばらついている。この各値から予測位相をキャンセルした(第4図(B))。位相残差はほぼ一定となり、予測計算がほぼ観測位相をトレースできていることがわかる。

観測誤差の大きなデータを除き第4図を拡大したところ、長期的なトレンドが明らかになった(第5図(A))。これはまだ予測計算が完全に正確ではないことを示して

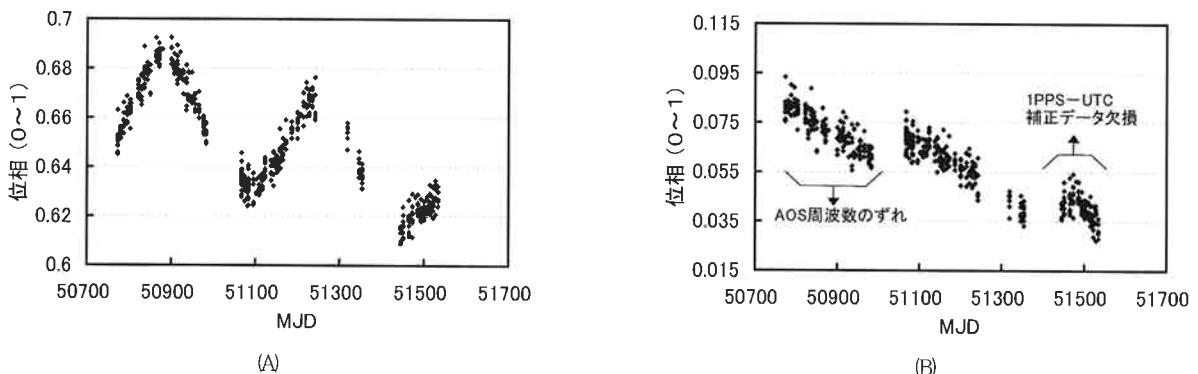




第4図 (A) PSR1937+21の観測ピーク位相。観測開始時刻は任意であるため、観測日毎にピーク位相はばらついている。(B) 予測位相キャンセル後の位相残差。残差はほぼ一定値に収束。予測計算が観測位相をほぼトレースしている。



第5図 (A) 第4図(B)の拡大図。27分積分波形のピーク位相変動。1次トレンド除去後の標準偏差 $6.6 \mu s$ 。
(B) 観測日毎の平均位相によるプロット。2.5~4時間積分後のピーク位相変動に相当。1次トレンド除去後の標準偏差 $2.9 \mu s$ 。



第6図 (A) 惑星歴 DE405 を用いて解析した場合の位相残差。DE200 を用いて計算した結果(第5図)に比べ大きな年周変動が生じる。(B) 観測時刻・周波数の校正が不十分な場合の見かけ上の位相変動。

いる。1次トレンドを除去した後の標準偏差は $6.6 \mu s$ となった。次に各観測日毎の平均位相をプロットしてみる(第5図(B))。これは積分時間を5~8倍延長した場合の位相変動に相当する。標準偏差は $2.9 \mu s$ となり、27分積分の結果と比べ約ルート5倍改善された。当初の期待どおり長期積分の効果が直接現れていることがわかる。

試みに、計算の途中で参照する惑星歴を代えるとどのような影響があるか計算してみた。図4(B)、第5図(A)(B)

の解析においては、惑星歴 DE200 を用いた解析で得られたパルサー位置 (TEMPO添付値) を計算の初期値とし、解析で参照する惑星歴も DE200 を使用していた。ここで、計算の初期値は変更せず、解析で参照する惑星歴だけを DE200 から DE405 に変更して予測計算を行ったところ、かなり大きな年周変動が現れた(第6図(A))。これは、計算の初期値と参照する惑星歴の組み合わせが適当でないため当然生じる結果ではあるが、解析の条件

によってはこのように大きく異なる結果を生じることがわかる。

また第6図(B)は、観測時刻の補正やAOSの周波数校正に誤差が残っていた場合の例である。2カ所の大きな位相変動のため一見年周変動があるように見えるが、この変動は観測条件の補正を正確に行ったところ消滅した。位相変動の解析においては、観測条件及び予測計算条件を注意深く扱わなければならないことがわかる。

4. ま と め

CRLでは、ミリ秒パルサーの時系への応用を目指して、34mアンテナを用いた独自の観測システムを開発し、'97年よりミリ秒パルサーPSR1937+21の定常観測を実施している。タイミング観測精度は、27分積分のデータによれば約 $6.6\mu s$ 、1観測日のデータ(2.5~4時間積分に相当)によれば約 $2.9\mu s$ の値が得られている。信号強度が極端に微弱なミリ秒パルサーの観測は100m級アンテナが主流であり、34mアンテナはミリ秒パルサー観測局としては最小クラスといえる。しかし広帯域受信に対応したバックエンドと、トラッキングのメリットを活かした長時間積分により口径のハンディを補い、このクラスのアンテナでもミリ秒パルサー観測が可能であることを示すことができた。アレシボ305mでの観測精度は約200nsであり、これに比べれば観測誤差は約10倍となるが、アンテナ面積が約100倍小さいことを考慮すれば、当所のシステムは十分な性能を発揮していると言える。国内においては、ミリ秒パルサーの連続観測を実施している唯一のアンテナでもあり、その果たす役割は大きい。

今後の課題は、パラメータフィッティングによる残差トレンドの解消とパルサーパラメータの精密決定である。最小二乗法により位相残差が最小になるようパルサーパラメータを決めなおしていく。観測結果及び予測計算モデルが正しければ、各パラメータにおいて妥当な収束値が得られると同時に、位相残差における長期トレンドも解消するはずである。

解析の際の惑星歴をDE405に入れ替えたことにより、位相変動に大きな変化が現れた。この位相変動が消滅するようにパルサー位置を決め直してやれば、DE405に基づいたパルサー位置が求められる。第5図(A)及び第6図(A)の結果から、DE200によるパルサー位置とDE405によるパルサー位置とはかなり異なることが予想される。これらを比較検討することは惑星歴の検証につながるであろう。VLBIで得られた位置との比較も興味深い。今後の研究課題である。34mアンテナはVLBI観測局としても実績があり、パルサーについてもロシアやカナダとのVLBI観測を数年前より実施している。同じアンテナでタイミング観測とVLBI観測の双方を実施でき

るメリットを活かしていきたい。

謝 詞

本システムの開発及び観測に際し多くの助言とご協力をいただきました、鹿島宇宙通信センター宇宙電波応用研究室の皆様に深く感謝申し上げます。またコスモリサーチ株式会社の関係各位にはアベレージングプロセッサの開発において、野川通信機製作所の土田氏にはAOS関連装置の開発において、多大なご尽力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) V. H. Kaspi, J. H. Taylor and M. F. Ryba, "High-precision timing of millisecond pulsars. III. Long-term monitoring of PSRs B1855+09 and B 1937+21", *Astrophys. J.*, 428, pp.713-728, 1994.
- (2) B. Guinot and G. Petit, "Atomic time and the Rotation of Pulsars," *Astron. Astrophys.*, 248, pp.292-296, 1991.
- (3) R. S. Foster and D. N. Matsakis, "Application of Millisecond Pulsar Timing to the Long-Term Stability of Clock Ensembles", *Proceedings of the 27th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning*, pp.311, 1995.
- (4) G. Petit and P. Tavella, "Pulsars and Time Scales", *Astron. Astrophys.*, 308, pp.290-298, 1996.
- (5) N. Bartel, J. F. Chandler, M. I. Ratner, I. I. Shapiro, R. Pan, and R. J. Cappallo, "Toward a frame Tie Via Millisecond Pulsar VLBI", *Astron. J.*, 112, No.4, pp.1690-1696, 1996
- (6) 細川瑞彦, "8.1 パルサー時系:解説", *通信総研季*, 45, 1/2, pp.117-125, March/June, 1999.
- (7) M. Hosokawa, K. Ohnishi, and T. Fukushima, "Uncertainty of pulsar time scale due to the gravitational time delay of intervening stars and MACHOs", *Astron. Astrophys.*, 351, pp.393-397, 1999.
- (8) M. Sekido, M. Imae, Y. Hanado, Y. P. Ilyasov, V. Oreshko, A. E. Rodin, S. Hama, J. Nakajima, E. Kawai, Y. Koyama, T. kondo, N. Kurihara, and M. Hosokawa, "Astrometric VLBI observations of PSR0329+54", *Publ. Astron. Soc. Japan*, 51, pp.595-601, 1999.
- (9) Y. Hanado, H. Kiuchi, A. Kaneko, and M. Imae, "Millisecond pulsar observation at CRL", *J. Commun. Res. Lab.*, 40, No.2, pp.55-62, July 1993.

- (10) 花土ゆう子, 今江理人, 関戸衛, 細川瑞彦, “8.2 パルサー時系の観測システムの開発”, 通信総研季, 45, 1/2, pp.127-135, March/June, 1999.
- (11) R. S. Foster, L. Fairhead, and D. C. Backer, “A spectral study of four millisecond pulsars”, *Astrophys. J.*, 378, pp.687-695, 1991.
- (12) A. G. Lyne and F. Graham-Smith, “Pulsar astronomy”, pp.28, Cambridge University Press, 1990.
- (13) R. S. Foster and D. C. Backer, “Constructing a pulsar timing array”, *Astrophys. J.*, 361, pp.300-308, 1990.
- (14) 赤羽賢司, 海部宣男, 田原博人, 「宇宙電波天文学」, pp.337-340, 共立出版, 1988.
- (15) J. H. Taylor and J. M. Weisberg, “Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar 1913+16”, *Astrophys. J.*, 345, pp.434-450, 1989.