

## GPS を利用した気球実験用高精度時計システムの開発

関本裕太郎<sup>\*1</sup>・釜江 常好<sup>\*1</sup>・高橋 忠幸<sup>\*1</sup>  
田中 光明<sup>\*1</sup>・郡司 修一<sup>\*1</sup>・田村 忠久<sup>\*1</sup>  
宮崎 聡<sup>\*1</sup>・山崎 典子<sup>\*1</sup>・平山 昌治<sup>\*1</sup>  
山上 隆正<sup>\*2</sup>・並木 道義<sup>\*2</sup>・本田 秀之<sup>\*2</sup>  
藤本 真克<sup>\*3</sup>・山崎 利孝<sup>\*3</sup>・松田 浩<sup>\*3</sup>  
能町 正治<sup>\*4</sup>・村上 浩之<sup>\*5</sup>

## Development of High Precision Clock for a Balloon-borne Experiment Using The Global Positioning System

By

Y. Sekimoto, T. Kamae, T. Takahashi, M. Tanaka, S. Gunji, T. Tamura,  
S. Miyazaki, N. Y. Yamasaki, M. Hirayama, T. Yamagami, M. Namiki,  
H. Honda, M. Fujimoto, T. Yamazaki, H. Matsuda,  
M. Nomachi and H. Murakami

**Abstract:** A high precision clock has been developed for a balloon-borne experiment. In order to study a compact object such as a pulsar, we need the time information as well as the energy and the direction. The clock provides the precise time during the experiment with reference to UTC. It consists of a crystal oscillator on board and a rubidium oscillator backed up by GPS (Global Positioning System) receiver for the calibration on the ground.

We have carried out balloon-borne hard X/ $\gamma$  ray observations in Barsil, 1991, with utilizing this clock. By the calibration, the clock operated with

---

\*1 東京大学理学部物理学教室

\*2 宇宙科学研究所

\*3 国立天文台

\*4 高エネルギー物理学研究所

\*5 立教大学理学部

the stability of  $\sim 10^{-12}$  and the accuracy of  $2\mu\text{sec}$  through the observation. It makes it possible to study an astronomical object by some kinds of detectors at the same time.

## 概 要

パルサーなどの高精度の時間情報を必要とする天体を観測するために、気球実験用の高精度時計システムを開発した。このシステムの構成は気球上の小型の高性能水晶時計と地上のルビジウム原子時計と較正のためのGPS (Global Positioning System) 受信器である。ブラジルにおける硬X/γ線観測気球実験で使用した結果、協定世界時との較正精度 $\sim 2\mu\text{sec}$ の性能を得た。かにパルサーの観測からもこのシステムが正しく動作していたことを確かめた。高精度時計システムはパルサーの観測だけでなく、様々な波長での同時観測に有効である。

**重要語** 原子時計, 協定世界時, パルサー, 気球実験, X線

## 1. はじめに

天体の観測には、エネルギースペクトラムの他に方向と時間の情報が必要である。特に、パルサーの観測、γ線のバーストの到来方向を決める実験では高精度の時間情報が要求される。それを得るには、周波数安定度および協定世界時 (UTC<sup>1</sup>) との較正精度が良い時計が必要である。

周波数安定度は  $\frac{\delta f}{f}$  ( $f$ : 周波数  $\delta f$ : 周波数のずれ) で定義される。例えば、周期33 msec のかにパルサーを観察する場合、 $10^4$  sec (約3時間) の観測後において時計の変動がパルス周期の100分の1 (330  $\mu\text{sec}$ ) 以下であれば良いとする。このとき  $3 \times 10^{-8}$  以上の周波数安定度を持つ時計が必要である。

協定世界時との較正精度とはγ線の到達した時刻の正確度である。これを小さくすることにより、他の場所での観測や、他の波長での観測と比較することができる。観測対象にも依るが10  $\mu\text{sec}$  以下であれば充分である。

## 2. 時計システムについて

### 2.1 時計

高精度時計システムは発振器、カウンター、較正装置から成り立つ。周波数安定度は発振器から得られる。ここでは発振器とカウンターをまとめたものを時計と呼ぶ。

発振器の種類を表1に示す<sup>1)</sup>。セシウム発振器は秒の定義になっている原子  $^{133}\text{Cs}$  を使っ

<sup>1</sup>UTC: Coordinated Universal Time, 協定世界時は原子振動に基づく原子時の秒を刻み、地球自転に基づく世界時の時刻との差が一定範囲内にあるように管理された人工的時系である。

ているために周波数の調整が不要であり、周波数安定度も $\sim 10^{-13}$ と大変によい。これは2週間( $10^6$  sec)経った後に数百 nsec 以内の変動である。ルビジウム発振器はセシウム発振器より周波数安定度では劣り、また周波数の調整が必要であるが、小型で使いやすい。安定度 $\sim 10^{-9}$ 以下では水晶発振器が使われる。水晶発振器は様々な種類があり、目的に応じて選ぶことができる。

表1 発振器の種類

	周波数安定度 ( $/10^5$ sec)	特 徴
セシウム発振器	$\sim 10^{-13}$	周波数調整不要, 高価
ルビジウム発振器	$\sim 10^{-11}$	周波数調整要, 小型, 比較的安価
水晶発振器 (高性能)	$\sim 10^{-10}$	軽量, 比較的安価
水晶発振器 (腕時計)	$\sim 10^{-5}$	安価

較正手段には基準となる電波を受信したり、較正された時計を運ぶ方法がある<sup>2)</sup>。代表的なものを表2に示す。Loran-CやOMEGAは時間情報を発信する地上電波局である。これらは主に船舶が複数局から受信しその時間差から測位を行う航法システムで、従来から時計の較正に利用されている<sup>3)</sup>。Loran-Cは特定の地域しか使えず、OMEGAは較正の精度が悪いという欠点を持つ。ポータブルクロックは輸送可能な基準となる時計を運び、他の時計を較正する方法である。較正精度は10 nsと大変良いが輸送による困難から較正を行う頻度が制限される。GPSは、近年注目されている衛星からの電波を利用した測位システムである。

表2 時間の較正手段

	電 波	UTCとの較正精度	利用範囲
Loran-C	地上(100kHz)	数 $\mu$ sec	特定地域
OMEGA	地上(10-14kHz)	数十 $\mu$ sec	全世界
ポータブルクロック	—	10 nsec	輸送による限界
GPS	衛星(1.5GHz)	100nsec	全世界

## 2.2 Global Positioning System

GPS(Global Positioning System)は米国が測位の目的で打ち上げた衛星システムである<sup>4)</sup>。GPS衛星は、より正確な測位をするために高精度かつ安定な時計(セシウム、ルビジウム)を搭載している。完成時には、18個の衛星が地上2万 kmの6個の円軌道に配置され、0.5恒星日周期で地球を周回する。地球上のいかなる場所でも頭上に数個の衛星が存在し、高い精度で緯度、経度、高度及び時刻が得られる。GPS衛星の時計はアメリカの海軍天文台(USNO)が協定世界時との時間差が数 nsec 以内であるように管理している。一般的なGPS受信器は3個以上の衛星からの信号を同時に受信し位置、時刻の情報を得る。ここで得られる精度は受信器の性能で決まり、10 ns から数 $\mu$ secである。

世界各地の時刻を決めている機関—日本では国立天文台—は互いに GPS の時刻を媒介として協定世界時と比較している。近年，船舶や自動車用ナビゲーションシステムの普及により廉価版の GPS 受信器が開発されたため，GPS 時刻システムを手軽に利用できるようになった。

我々は GPS をもちいた時刻較正をおこなうため，古野電気株式会社が試作した GPS 受信器 GN90 を使用し気球実験用高精度時計システムを開発した。GN90 は本来測位のために作られた受信器であり，時間情報を得るためには 3 個以上の衛星の信号を同時に受信する必要がある。時間情報は 1 秒パルスとして出力され，協定世界時との時間較正に用いる。

我々はこの GPS 受信器によって長期間安定して時間・測位情報が得られることを確認するため，1991年9月に国立天文台で GN90 の試験をおこなった（表3）。その結果，1 週間の長期動作試験で時間情報が協定世界時と  $\pm 1 \mu\text{sec}$  の精度で得られることを確認した。さらに南半球でも正しい時間情報が得られる事をリオデジャネイロ天文台<sup>2</sup>で確認を行った。1991年10月18日に試験を行い，1 時間の受信により  $\pm 2 \mu\text{sec}$  の精度で 1 秒パルスが得られた。

表3 GPS受信器 GN90 (FURUNO) の性能試験

	国立天文台	リオデジャネイロ天文台
位置	三鷹市，東京	リオデジャネイロ，ブラジル
時期	1991年9月	1991年10月18日
時間	1週間	1時間
時間情報	$\pm 1 \mu\text{sec}$	$\pm 2 \mu\text{sec}$
緯度，経度	$\pm 0.3''$	$\pm 1''$

### 3. ブラジルでの時計システム

#### 3.1 気球実験

1991年11月にブラジルで気球による硬 X/γ線の観測実験が2度行なわれた。主な観測対象は超新星残骸中の回転駆動型パルサー（Crab pulsar (33 ms), Vela pulsar (89 ms), PSR1509-58<sup>3</sup> (150 ms)) であった。観測時間は1天体につき3時間で必要な周波数安定度は  $\sim 10^{-8}$  以下である。また1週間ほど離れた2度の放球でパルス成分を連続して解析できることを目標とし，このために協定世界時との較正精度が300  $\mu\text{sec}$ （かにパルサーの周期の100分の1）以下となるようにした。

気球上の硬 X/γ線検出器およびデータ取得システムは硬 X/γ線のエネルギー等の情報と

<sup>2</sup>Depto. SERVIÇO DA HORA, Observatório Nacional Rio de Janeiro, BRASIL. ブラジルの標準時刻を決めている機関である。

<sup>3</sup>コンパス座 (Circinus) にあるパルサー。西暦185年の超新星爆発の残骸 MSH15-52 のなかに X 線で発見された。

共に到達時刻を8mmテープに記録する。また気球関連データとともにPCM<sup>4</sup>で地上にも送信する。地上で受信したデータは地上の高精度時計の時刻とともに記録される。ブラジルで用いた高精度時計システムのブロック図を図1に示す。

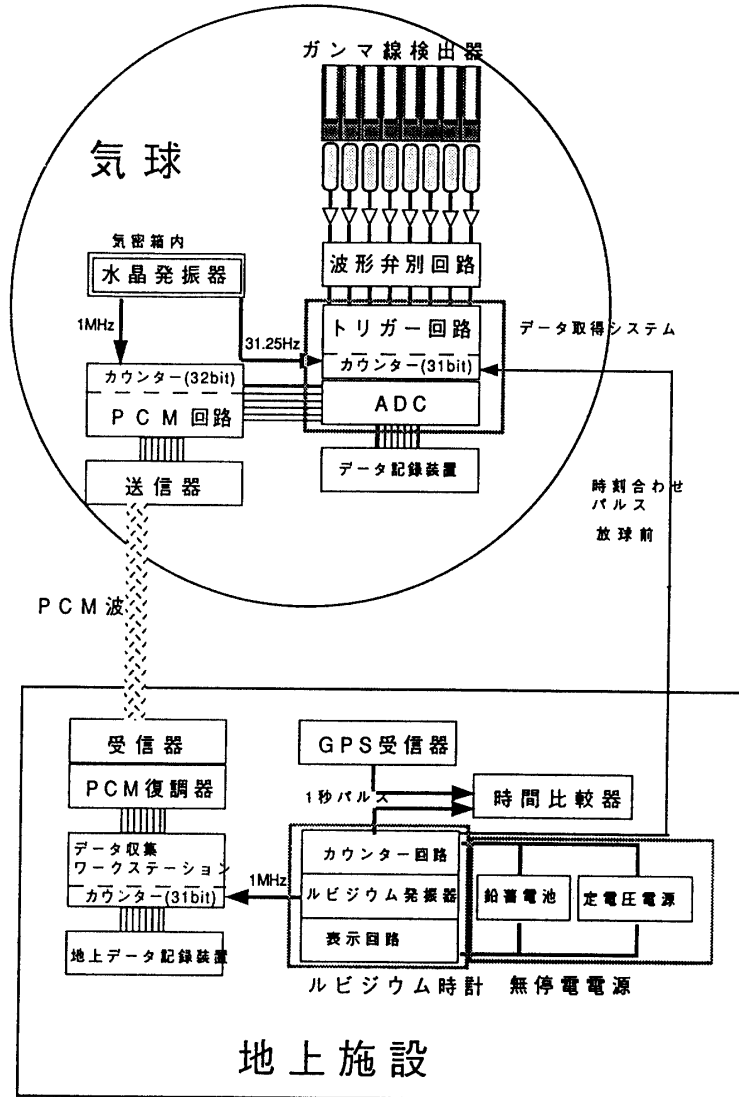


図1 ブラジルでの高精度時計システム

### 3.2 高精度時計システム

気球ゴンドラ上には小型、軽量かつ低消費電力の発振器が必要である。温度コントロール付き水晶発振器を気密箱に入れてゴンドラ内に設置した。仕様を表4に示す。水晶発振器からの1MHzの信号を31.25kHzに分周し、カウンターで積分して時刻を得る。気球上のデータ取得システムは硬X/γ線を検出したとき水晶時計の時刻を保持する。これにより、

<sup>4</sup>Pulse Code Modulation

表4 時計システム構成品の仕様

	水晶発振器	ルビジウム発振器	GPS 受信器
製造会社	日本電波工業	日本電気	古野電機
製品名	NSA0102F	Rb-3200	GN90
周波数	1 MHz (TTL 出力)	10 MHz (正弦波)	—
電源電圧	12 V	24 V	5 V, 12 V
消費電力	5 W	17 W	6 W
重量	0.9kg (気密箱を含む)	1.5 kg	
外形寸法	72(H)×50(W)×50(D)mm	80(H)×92(W)×100(D)mm	35(H)×184(W)×166(D)mm

精度32  $\mu$ sec で個々の硬 X/ $\gamma$  線の到達した時刻を得る。

地上設備には、周波数安定度の高い発振器が必要である。NEC 製ルビジウム発振器 Rb-3200を用いた。ルビジウム発振器からの10 MHz の信号をカウントし、1秒パルスを出力する回路を製作した。地上データ記録システムは気球から送られてきた上空水晶時計の時刻とともに、ルビジウム時計の時刻を記録する。

### 3.3 停電対策

気球実験中の停電対策および周波数安定度の向上のために、ルビジウム時計のための無停電電源を制作した。無停電電源は定電圧電源<sup>5</sup>と鉛蓄電池<sup>6</sup>を並列に組み合わせたもので、通常は商用の交流電源を定電圧電源で直流に変換して電源供給する。鉛蓄電池は浮動状態で定電圧電源に接続されて、常に充電されている。交流電源が停電したときには即時に鉛蓄電池から電力がルビジウム時計に供給される。鉛蓄電池だけで20時間動作するように設計した<sup>7</sup>。ブラジルでは停電が頻発したが<sup>8</sup>、ルビジウム時計は2ヶ月間動作し続けた。

### 3.4 較正方法

ルビジウム時計を協定世界時と較正するには、ルビジウム時計が出力する1秒パルス GPS 受信器からの1秒パルスを比較する。ブラジルでは、アメリカ海軍天文台 (USNO) がGPS 衛星をシステムダウンしていた期間 (11/22-11/24, 11/29-12/1, 1991) を除いて、GPS 受信器から1日20時間程度時間情報を得た。

気球上水晶時計の較正をするには、放球前にルビジウム時計の1秒パルスでカウンターをクリアする。これによって気球上水晶時計は独立に動作する。またルビジウム時計の1秒パルスでガンマ線の擬似信号を発生し、水晶時計が正しく較正されたことを確認する。観測後の解析においてルビジウム時計の周波数安定度や較正精度を用いるために、放球後もルビジウム時計との比較較正を電波を通しておこなう。

気球実験当日の較正の手順をしめす。

<sup>5</sup>METRONIX 社製 MODEL 522B (max 18V, 4.5A)

<sup>6</sup>日本電池製 GS PORTALAC PE12V40A (40 Ah)

<sup>7</sup>1回の放球で気球の飛揚している時間はおおよそ15時間である。

<sup>8</sup>平均すれば、1週間に1度、2時間程度停電する。

放球日前	GPS 受信器からの1秒パルスとルビジウム時計からの1秒パルスの時間差を測定し、ルビジウム時計を協定世界時で較正する。 放球後も較正は常時おこなわれている。
放球8時間前	硬 X/γ線検出器と同時に気球上水晶発振器の電源を投入する。
放球7時間前	気球上水晶発振器の周波数安定度が $\sim 10^{-9}$ に安定するのを確認する。
放球6時間前	ルビジウム時計の1秒パルスで気球上水晶発振器のカウンターをクリアーする。きりの良い時刻（例えば、18:00:00.000000）におこなう。 これにより硬 X/γ線の到達時刻を直接記録するゴンドラ上の水晶時計が協定世界時に較正される。
放球後	気球上水晶発振時計の時刻を電波で地上に送り、ルビジウム時計との差を随時モニターする。

## 4. 結果

### 4.1 地上ルビジウム時計の較正結果

地上ルビジウム時計を GPS をもちいて較正した結果を図2に示す。この図から、ルビジウム時計は安定度 $2.5 \times 10^{-11}$ で動作し、協定世界時との較正精度は $2 \mu\text{sec}$ が得られることが示された。

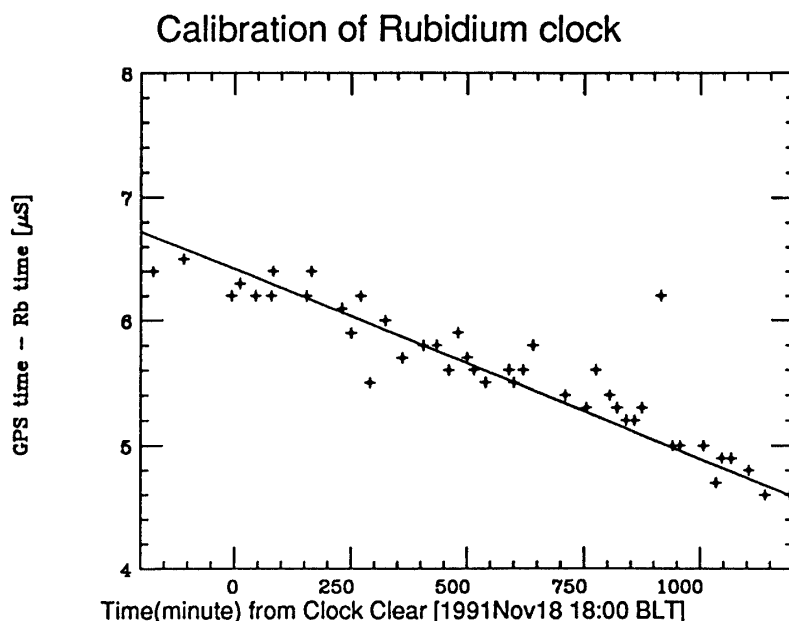


図2 第一回放球日の地上ルビジウム時計の較正。GPS 受信器からの1秒パルスとルビジウム時計からの1秒パルスの時間差をあらわしている。直線の傾きは周波数安定度 $2.5 \times 10^{-11}$ を示す。

### 4.2 上空水晶時計の較正結果

上空水晶時計の時刻は PCM 信号で地上に送られる。この時刻と地上ルビジウム時計の時刻との単純な比較結果を図3に示す。上空水晶時計の時刻には気球と地上受信点までの距離だけの遅れが含まれている。

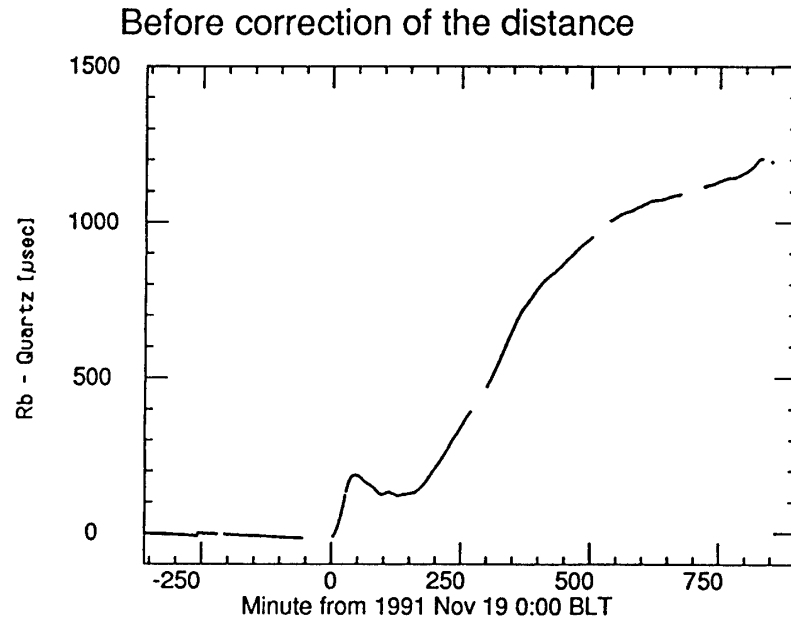


図3 上空水晶時計の時刻と地上ルビジウム時計の時刻の比較. 時計の安定性によるものに距離による遅れの時間が加わっている.

測距から得られた気球の距離<sup>9</sup>をもちいて補正をしたものを図4に示す. これにより上空水晶時計は $2 \times 10^{-9}$ の安定度で動作していたことが得られる.

気球上に $2 \times 10^{-11}$ の時計を搭載すれば, 放球後5時間後に100 mの精度で気球と地上受信

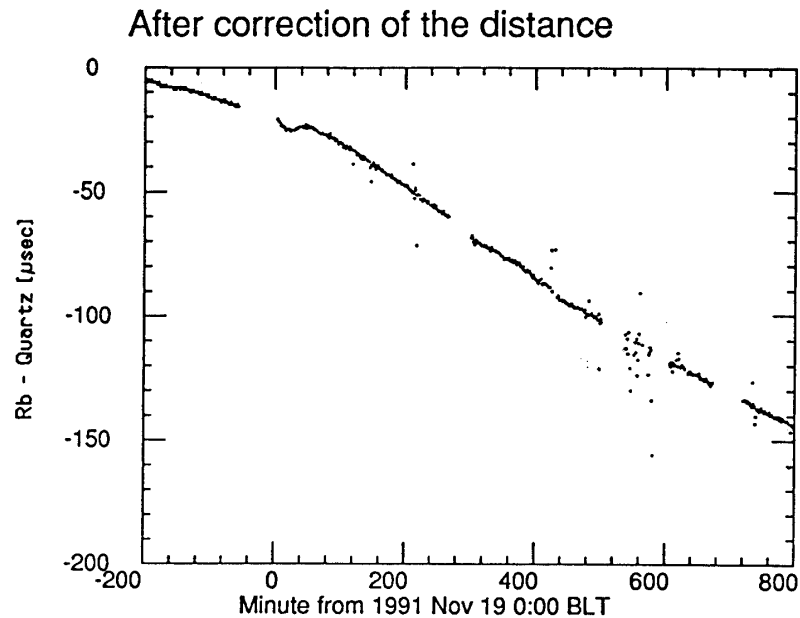


図4 上空水晶時計の時刻と地上ルビジウム時計の時刻の比較. 気球の距離を考慮してある. 上空水晶時計は安定度 $2 \times 10^{-9}$ で動作していた.

<sup>9</sup>測定精度300 m



点との距離が得られる<sup>10</sup>.

#### 4.3 かにパルサーの観測

1991年11月19日に第一回放球を行い、かにパルサーを5:30 (UTC) から6:30までおよそ1時間にわたり観測した。残念ながら、方向制御に失敗し本来の20%の検出効率での観測であったが、時計システムとデータ取得システムを合わせての較正試験としては十分な結果が得られた。

かにパルサーはラジオ波からガンマ線に至るまで観測されており、全ての波長でパルス波形の位相が一致している<sup>5)</sup>。電波により常時観測されているため、ガンマ線検出器の時計の較正に用いられる。

検出器で得られたガンマ線の到達時刻を地球中心での時刻に変換したのちに、太陽系の質量中心での到達時刻に変換する。図5に電波で得られたパルス周期で畳み込んだときのパルス波形を示す。電波から予想される第一パルスの位置は図中の矢印で示されており、硬X/γ線で得られたパルス波形の第一パルスの中心と一致する。

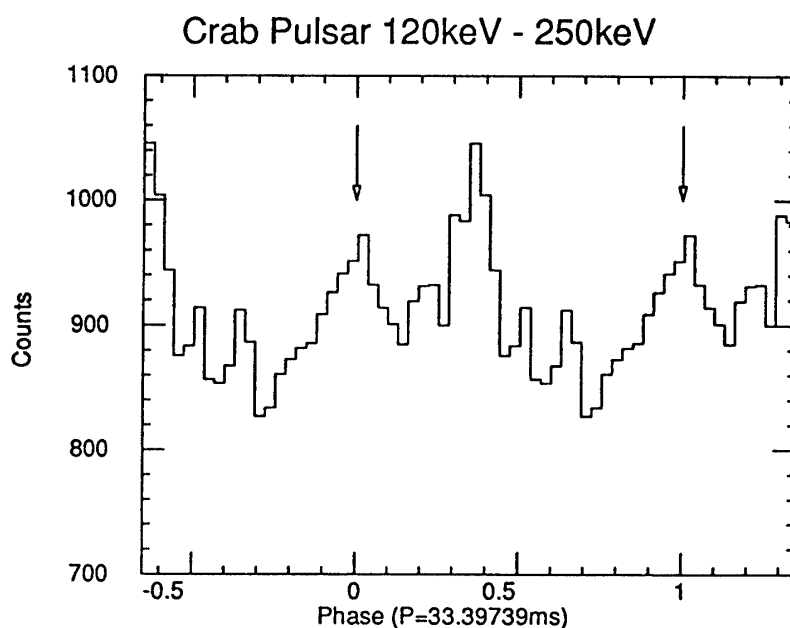


図5 1991年11月19日5:30-6:30 (UTC) に気球実験で得られたかにパルサーのパルス波形。電波でのかにパルサーの第一パルスの位相が矢印で示されている。

## 5. まとめ

1991年ブラジルにおける気球実験で得られた高精度時計システムの性能を以下に示す。

**周波数安定度：**放球の前後2ヶ月の間、ルビジウム時計は周波数を調整することにより、周波数安定度は $2 \times 10^{-11}$ と安定していた。ルビジウム時計による較正によって、気球上

<sup>10</sup>通常、気球は時速50 km/sec で飛揚する

水晶時計が気球飛揚中、周波数安定度  $2 \times 10^{-9}$  で動作していたことが確認された。後のデータ解析では、ルビジウム時計の周波数安定度で時刻が決定できる。

**較正の精度：**ブラジルにおける気球実験では、硬 X/γ線の到達時刻が協定世界時と  $32 \mu\text{sec}$  の精度で記録された。気球上水晶時計は協定世界時と  $2 \mu\text{sec}$  の較正精度をもつため今後、データ取得システムを改造することにより協定世界時と  $2 \mu\text{sec}$  の較正精度で時刻が得られる。

このような高精度時計システムを使うことにより、パルサーの観測でパルス成分を検出するだけでなく他の波長のパルス成分との位相の差を調べることができる。また、今回のブラジルにおける気球実験ではなしえなかったが、宇宙で起こる物理現象を様々な波長で同時に観測するときに有効である。

### 謝辞

この高精度時計システムのブラジルでの較正で協力していただいた、リオデジャネイロ天文台の Paulo Mourilhe Silva 氏、ブラジル宇宙物理学研究所の Joao Braga 氏に感謝します。時計システムの作製に関して協力いただいた古野電気株式会社の角谷一明氏、日本電気株式会社の奥脇勤氏に感謝します。

### 参考文献

- [1] Application Note 52-1, "FUNDAMENTALS OF TIME AND FREQUENCY STANDARDS", Hewlett Packard
- [2] Application Note 52-2, "TIME KEEPING AND FREQUENCY CALIBRATION", Hewlett Packard
- [3] 松田 浩, 藤原 清, 藤本真克, "ロランC電波を使った時刻精度  $10 \mu\text{s}$  の時計の製作", 東京天文台報, 第20巻, 第1冊
- [4] 日本測地学会, "GPS—人工衛星による精密測位システム—", 1986, 日本測量協会
- [5] A. G. Lyne and F. Graham-Smith, "Pulsar Astronomy", 1990, Cambridge University Press