



星食から生まれた GHS 時計

早水 勉

〈せんだい宇宙館 〒895-0005 鹿児島県川内市永利町 2133-6〉

e-mail: uchukan@bronze.ocn.ne.jp

下代 博之

〈生石高原天文台 〒643-0131 和歌山県有田郡金屋町大字生石 803〉

相馬 充

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: somamt@cc.nao.ac.jp

星食はビデオによる観測が普及しつつあり、アマチュアでも高精度の成果を得られるようになってきた。一方で、2001年3月末をもって短波 JJY が廃止される。私たちは、ビデオ精度を満足させる時刻保持手段として、GPS を利用して短波ラジオ並の低コストで簡単に工作できる「GHS 時計」を考案した。この装置は、天文用途としての優れた特徴を有しているため、星食観測にとどまらない広範な分野への応用を期待できる。

1. 星食を観測しよう

1998年から1999年にかけては、アルデバランとレグルスが月に食される期間に当たり、珍しい一等星の食が集中してみられた(図1)。

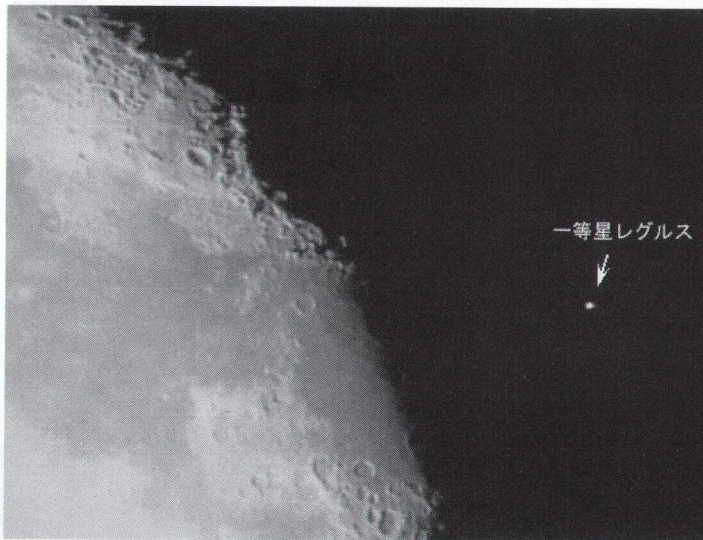


図1 1999.1.5 レグルスの食出現の瞬間：写真

新聞紙上でも紹介されたのでご記憶の読者も多いと思うが、この絶好の星食シーズンに、相馬と星食のメーリングリスト JOIN (Japan Occultation Information Network) により、全国の天文ファンに対して一等星食のビデオ観測のキャンペーンがなされた。その結果、3回の現象において全国から延べ74件もの観測をお寄せ頂いた^{1), 2)}。

1.1. 星食観測の意義

星食や接食は、かつては月の運動や地球の自転のふらつきを知るために観測されていた。月の重心の位置が極めて精密に求められるようになった現在では、主には月縁の測量に、また研究者によっては恒星の固有運動データの検証³⁾や、過去の日食のデータを利用することによる太陽直径の経時変化の研究にも応用されている。

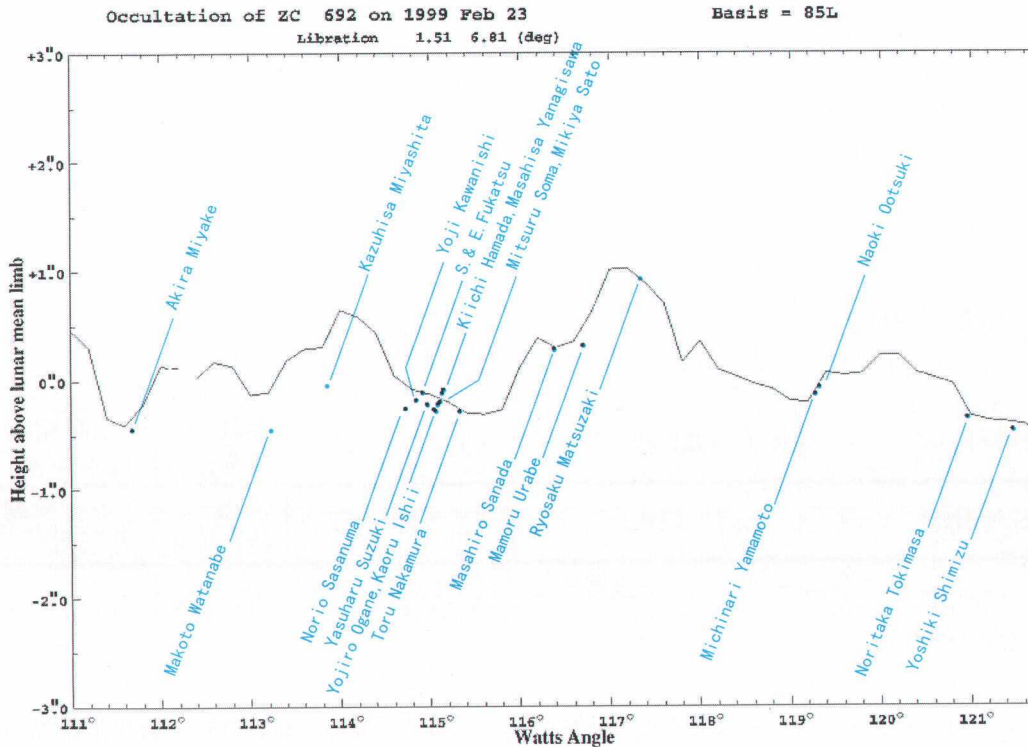


図2 アルデバラン食（1999年2月23日）から得られた月縁図。青点がビデオ観測により得られた月縁。氏名は観測者、折れ線は Watts の月縁図である。ビデオ観測による精度は、 ± 0.02 秒角という高精度であり、この図では点のサイズに収まってしまう。この月縁図からは特に Watts 角 115° 付近の複雑な地形が浮かび上がった。

*ビデオ解析は早水、整約は相馬による。

星食や接食は単に観察するだけでも楽しいものである。不変とも思える宇宙の、微かな息吹を感じることで数少ない天文現象とも言えるだろう。天文学は一般の方々の参加が求められる数少ない学問のひとつだろうが、なかでも、星食、接食は観測の数が多いほど歓迎される。アマチュアの観測が、プロの研究の成果に直結する魅力があるのだ。

1.2. 星食観測のトレンド～ビデオ観測

星食の観測は、肉眼によるものでは通常 0.4 秒程度の誤差があるものとされている。しかし、これがビデオによる観測であれば個人差も無く 1/30 秒の精度で現象の時刻を求めることが出来ることと

なり、精度が飛躍的に向上する。この精度は、月縁地形を 30 m の精度で決定することに相当し、これはかつての月探査衛星クレメンタインの測定精度をも上回る。¹⁾

図2は冒頭で述べた一等星食観測キャンペーンの中で、1999年2月23日のアルデバラン食から得られた成果の一部である。その他の詳細な成果については、せんだい宇宙館のホームページ (<http://www2.synapse.ne.jp/uchukan/data/occultshort.html>) に掲載されている^{2), 4)}。

このようなキャンペーンによる啓蒙とともに、廉価で高感度の天文用 CCD ビデオカメラの普及を背景として、星食のビデオ観測は急速に増加しつつ



表 1 代表的な時刻保持法一覧

		時刻精度(対 UTC)	可搬性	安定性	備 考
電話時報	固定電話	約 0.03 秒	×	○	連続 10 分のみ利用可能
	携帯,PHS	約 0.2 秒前後	○	×	遅れが大きく高精度の時刻保持には不向き
短波 JJY (5,8,10MHz)		~10 ミリ秒(伝播遅延)	○	△	2001.3.31 廃止予定
長波 JJY (40kHz)		~10 ミリ秒(伝播遅延)	1999.6.10 より運用開始 現状では精度のよい安価な受信機がない		
電波時計		0.1 ~ 0.5 秒	○	×	遅れが大きく高精度の時刻保持には不向き
GHS 時計		1 μ 秒 以内	○	○	GPS システムを時刻保持に応用した装置

ある。次回の一等星の星食は、2005 年のアンタレス食まで起らないが、星食観測の価値は暗い恒星でも変りはないので、ぜひ多くの天文ファンに勧めたい。「星食を観測しよう！」

2. 問題点、短波 JJY から長波 JJY へ

2.1. 恩恵の大きかった短波 JJY

手軽に正確な時報を得る手段として、これまで短波標準電波 JJY を受信することが広く行なわれてきた。短波 JJY には、海外の報時信号の混信や電離層の変化により受信が不安定になるなどの欠点があるが、1/30 秒の時間分解能の得られる星食のビデオ観測では、事実上もっとも有効な時刻保持手段であった(表 1)。短波 JJY の発信精度は 0.1 ミリ秒以内に規制されており、電波の伝播遅延を考慮しても日本国内であれば 10 ミリ秒以内の高精度で受信できる。星食に限らずとも、日食、流星、人工衛星などの観測分野で恩恵を受けたことのある観測者は数限りないだろう。

2.2. 長波 JJY と電波時計の精度

しかしながら、短波 JJY は 2001 年 3 月 31 日をもって廃止される。代わって、1999 年 6 月 10 日より長波 JJY が運用されている⁵⁾。標準電波が短波から長波へ移行するのは世界的な趨勢である。長波の方が電離層の影響を受けにくく精度が安定しているとされ、また、長波の標準時報により自動的に時刻を補正する「電波時計」が開発されているのがその理由である。

長波 JJY の運用開始に時を同じくして「数万年に 1 秒しか狂わない」との宣伝文句で時計メーカー各社より「電波時計」が発売され始めた。しかし、このような表現は誤解を招く恐れが大きい。実測によると、電波時計の表示には常に 0.1 ~ 0.3 秒の遅れがあるのが普通であるため、少なくとも星食観測に使用することは禁物である。精度が高いのは、正しくは長波 JJY の発信精度である。

長波 JJY の受信には、現状では精度の高い受信機は市販されていない。これは、搬送波 40kHz という特殊な周波数帯では、応答性のよいフィルタ

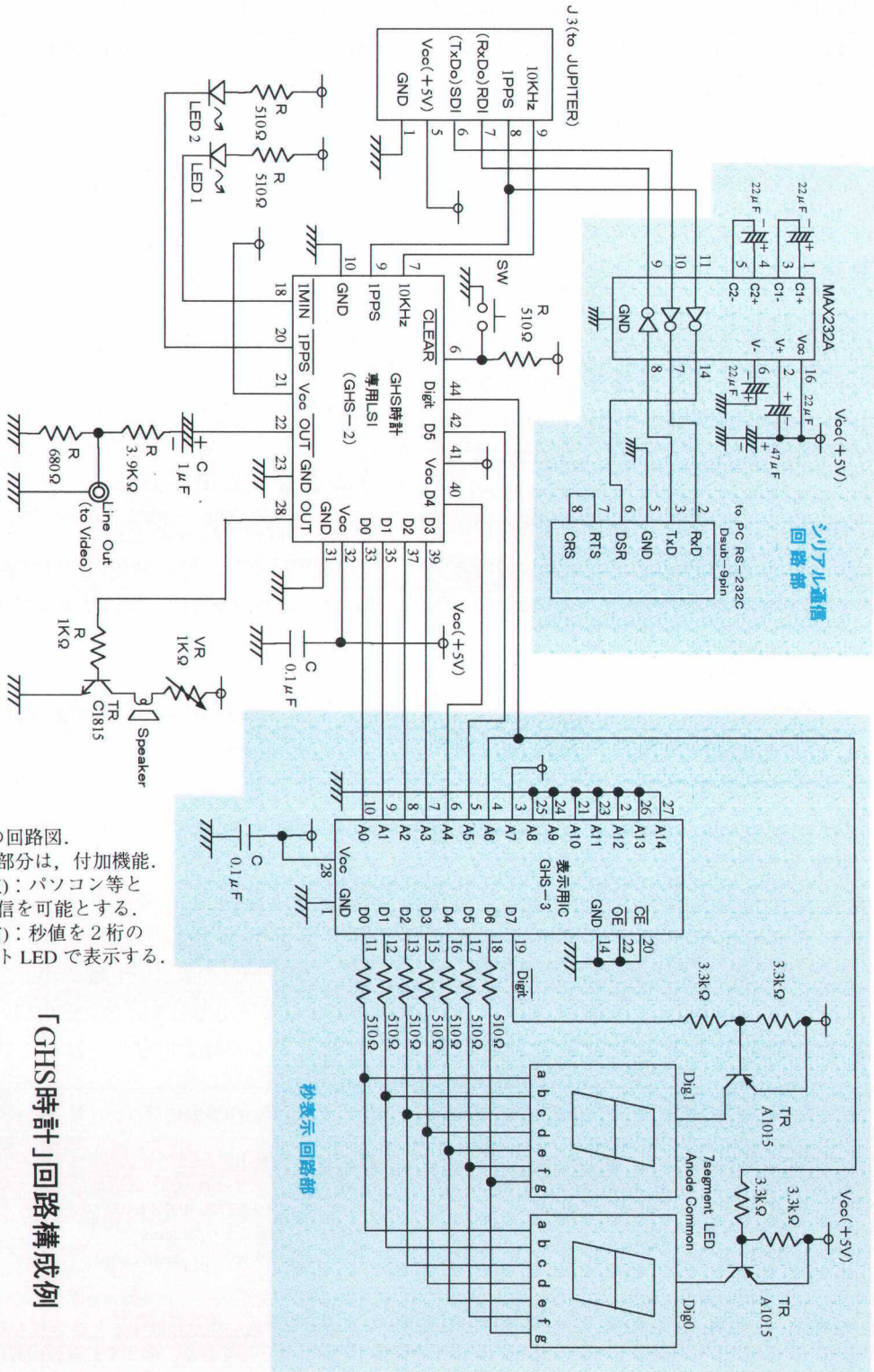


図3 GHS時計の回路図。
 青い網掛け部分は、付加機能。
 網掛け部(左)：パソコン等とシリアル通信を可能とする。
 網掛け部(右)：秒値を2桁の7セグメントLEDで表示する。

「GHS時計」回路構成例

ーを開発することが困難なためである。水晶振動子による同調だと、物理的に10～100ミリ秒程度の信号遅延は避けられないだろう。

このような理由から、長波JJYを利用して高精度の時刻保持を行なうことは非常に困難であると言える。ビデオによる観測が普及する中で、標準電波が短波から長波へ移行することは、私たち星食観測者にとって大きな問題であった。

3. GHS 時計

この問題を背景として、星食観測者の発想から誕生したのがGHS (Geshiro-Hayamizu-Sōma) 時計である⁶⁾。GHS 時計は、短波ラジオ並に低コストでフットワークがよく、原子時計並に高精度である。詳しくは後述するが、多くの優れた特徴を理由として、海上保安庁水路部など星食観測の分野を中心に、すでに多くの観測者が採用している。

3.1. GHS 時計の誕生

カーナビでお馴染みのGPS (Global Positioning System) は、元来測位を目的としたシステムであるが、測位計算の過程でUTC (協定世界時) に極めて正確に一致した時刻同期信号 (1PPS) を生成する。GPS 受信機の中には、この1PPS 信号を外部に出力しているものがあって、これを天文用途の時計に応用したものがGHS 時計である。ここでは、市販のGPS 受信機の中から安価で携帯性に優れた(株)SPA の「ジュピター」を採用した。

GHS 時計の製作には、「ジュピター」からの信号

を加工して、LED 信号や音声信号を生成する回路が必要であるが、この回路はPLD (Programmable Logic Device) 技術により1チップの専用LSI に収められた(下代)。この専用LSI の本稿執筆時点での最新バージョン名は「GHS-2」である。GHS 時計のもっとも基本的な構成は、GPS 受信機「ジュピター」と専用LSI 「GHS-2」および少量の外付け部品で製作可能である。

本稿では、これに秒値の表示と、パソコン等とのシリアル通信機能を付加したモデルを紹介する。秒表示用の回路も下代により「GHS-3」としてIC化されている。

3.2. 製作例と使用方法

GHS 時計の回路図を(図3)に示す。このうち、青の網掛け部分は付加価値の部分であり、これがなくとも報時ラジオ的な動作を実現できる。この回路図には示されていないが、電源としてDC 5V の安定化電源を用意する必要がある。GHS 時計の使用がカーバッテリーの利用であれば、DC/DC コンバータ (IN:DC12V/OUT:DC5V)、家庭用交流電源が使用可能なら、スイッチングレギュレータ等の安定化電源を使うと良い。電力はアプリケーションの規模にもよるが、5W もあれば十分であろう。乾電池による駆動は、受信機「ジュピター」の消費電力が大きいためお勧めできない。

次にGHS 時計の取扱い手順について述べる。(手順1) 参照用として、およそ0.2秒以内の精度で合っている時計を用意しておく。これは、NTT

GHS 時計製作のための専用LSI 「GHS-2」、秒表示用IC 「GHS-3」および、GPS 受信機「ジュピター」の入手先は以下の通り。

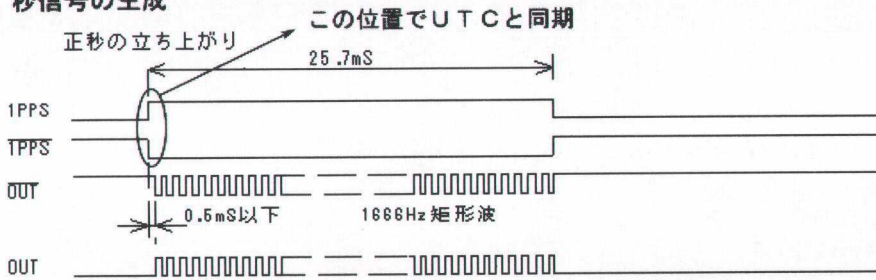
■ 「GHS 時計」専用LSI (GHS-2)、表示用IC (GHS-3)
 下代組機工 下代博之 〒641-0005 和歌山市田尻 520-25
 FAX: 0734-94-0959 E-mail: geshiro@skyblue.ocn.ne.jp
 頒布価格: GHS-2 / ¥1,500~
 GHS-3 / ¥1,000~
 (送料別 ¥120~)

■ GPS 受信機「ジュピター」
 (株)SPA 〒141-0032 東京都品川区大崎 3-6-31,501
 TEL:03-5759-2570 FAX:03-5759-2577
 E-mail: gps@spa-japan.co.jp
 URL: http://www.spa-japan.co.jp/

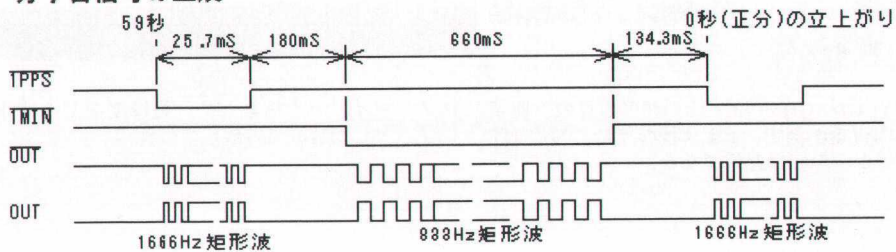
なお、「ジュピター」の実売価格は約2万円である。その他の部品は汎用のものであるから、入手のためには電子部品を取り扱う販売店に相談するとよいだろう。(図3)の回路をすべて採用しても、必要なコストの大部分はGPS 受信機「ジュピター」であり、全体でも3万円程度の低コストで製作可能である。

出力信号のタイミングチャート

秒信号の生成



分予告信号の生成



分クリアのタイミング

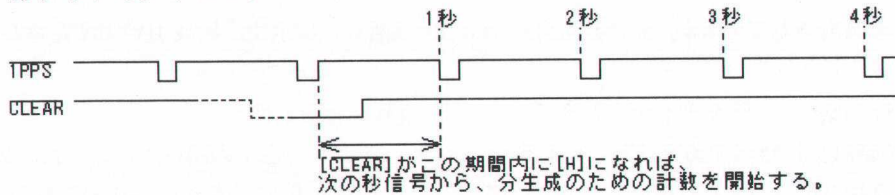


図4 専用LSI「GHS-2」のタイミングチャート

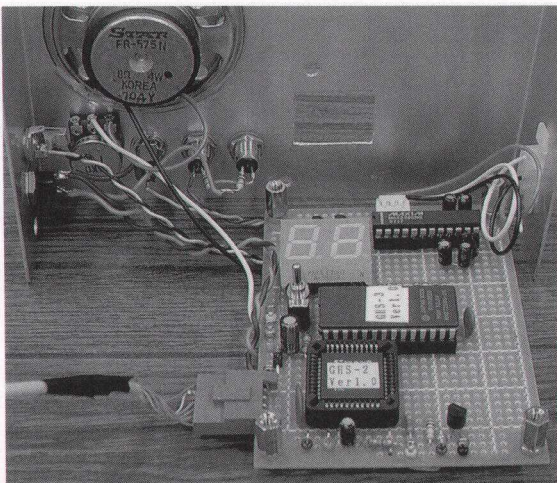


図5 GHS 時計回路部：写真

の117時報なら十分であるが、屋外の場合は携帯電話の117時報や電波時計でも良い。

(手順2) GPS アンテナを空の開けたところに設置して電源を投入する。ジュピターは測位状態に無くても秒信号を発するが、電源投入直後は当然UTCと同期していない。もし、手順1で用意した時計と同期しているように見えても厳密には同期していない可能性があるため、電源を再投入して、眼や耳で確実にズレが分かるようにする。

(手順3) ジュピターが測位状態になると、その直後からUTCと同期した秒信号を発するようになる。これは、手順1で用意した時計を参照するこ

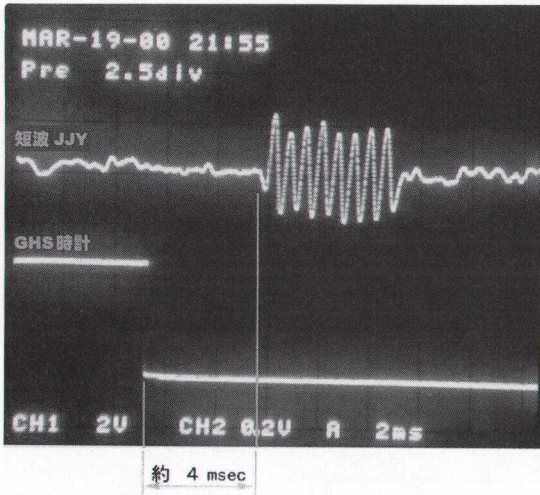


図6 短波 JJY(上)と GHS 時計(下)の精度の比較。鹿児島県川内市での測定。4 ミリ秒の差は、短波 JJY の送信局からの伝播遅延である。

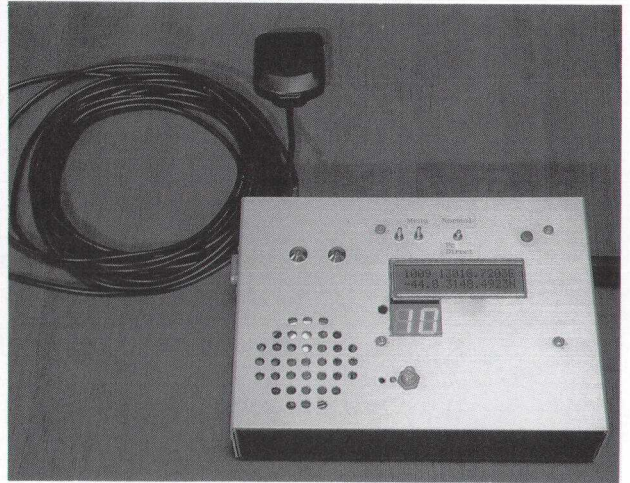


図7 マイコンを搭載して、経緯度などの情報の表示も可能とした装置(外観)：写真

とで同期したことが確認できる。通常は電源投入後 10 分以内で同期するが、確認できない場合はアンテナが正しく接続されているか、また、電源の消耗はないかをチェックしたい。

(手順4) 最後に正分の秒針を押しボタンスイッチにより「GHS 時計」に教示する。一旦この状態になると、うるう秒が挿入(または削除)されない限り、UTC に 1μ 秒もの高精度に同期(測位中)した正しい秒値を示す。受信状態が一時的に悪くなくても、受信機内部のクォーツによる発振により保持される。

3.3. GHS 時計の特長

ここまで断片的に述べてきたが、GHS 時計の特長を整理しておこう。

(1) 安い！簡単！

初歩的な電子工作の知識で製作可能であり、コストもおおよそ3万円程度と短波ラジオ並。

(2) 高精度！

GPS では、受信機そのものが高度に校正された時計となる。相馬による検定では、対 UTC \pm

1μ 秒の精度が確認されている。参考のため、オシロスコープによる短波 JJY との精度の比較を(図6)に示す。短波 JJY に代表される電波報時では、電波の伝播遅延による誤差は免れない。

(3) 高い安定性！

アンテナを空の開けたところに設置する限り、電離層の影響もなく、電波の受信はまず確実である。また、極めて S/N の高い安定した信号を取得できる。

(4) 携帯性！

DC 5 V 単電源で動作しコンパクトに製作できるため、移動観測にも便利である。

(5) 高い拡張性！

専用 LSI 「GHS-2」は、汎用性を重視した設計である。パルス(TTL レベル)信号、音声信号を備えており、ユーザーの意図による拡張性が高い。

以上、GHS 時計は、(表1)のどの時刻保持手段よりも高精度であり、優れた特長を有している。

このシステムの欠点は、電源投入時に初回のみ正分のタイミングを教示してやる必要のあること

と、閏秒の挿入（または削除）に対応していないこと、また GPS の利用であることからアンテナを空の開けた場所に設置する必要のあることが挙げられる。しかしながら、シリアルデータを解析できるマイコンやパソコンと組み合わせるシステムに拡張すれば、正分のセットや閏秒の対応も自動的に実行させることも可能である。（図 7）は、マイコンを搭載して、経緯度などの測位データも表示可能としたものである。

せんだい宇宙館のホームページには、GHS 時計に関する新たな情報を適宜更新して公開しているので参照されたい。

4. 応用分野

2000 年 5 月には、米国政府により故意に GPS の測位精度を劣化させる情報 S/A (Selective Availability) が解除された。この効果は甚大であり、「ジュピター」を含む多くの GPS 受信機で経緯度情報が 10 m 以内の誤差で得られることが実測されている。正確な時刻情報と位置情報は天体観測にはつきものであるから、さらに GHS 時計の利用価値は大きくなった。

GHS 時計は、星食観測の時刻保持を目的として考案されたものであるが、その他の目的にも拡張されている。近年では、冷却 CCD カメラ等をパソコンで時刻を管理することも広く行なわれているが、GHS 時計を併用し 0.2 秒以内の誤差でパソコンの時計を管理するためのソフトウェア「Satk (さとくん)」も開発された。「Satk」は、開発者の瀬戸口貴司氏(東亜天文学会)のご厚意により、せんだい宇宙館のホームページ上でフリーウェアとして公開されている。GHS 時計と「Satk」によれば、放送局にも劣らない時刻管理装置が、ポケットマネー並みの極めて低コストで実現できるので是非試して頂きたい。

GHS 時計は、他にもさまざまな用途での応用が期待される。我々の理解を超えた分野でも広く活用頂ければ有り難い。

記事中でも述べたが、GHS 時計は星食観測者の多くの議論の末に産まれたものである。また、瀬戸口貴司氏には GHS 時計との親和性の良い優れたソフトウェアを開発頂いた。この誌面をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 相馬 充, 早水 勉 1999 日本天文学会春季年会講演予稿集 J03a
- 2) 相馬 充, 早水 勉 1999 日本天文学会秋季年会講演予稿集 L15a
- 3) Sôma, M. 2000, IAU Coll. 180, 115-119.
- 4) <http://www2.synapse.ne.jp/uchukan/>
- 5) <http://jjy.crl.go.jp/>
- 6) 早水 勉, 相馬 充, 下代博之, 橋口 隆, 2000, 国立天文台報, 5

GHS Clock, a new device for precise timing

Tsutomu HAYAMIZU

Sendai Space Hall, Kagoshima

Hiroyuki GESHIRO

Oishikogen Astronomical Observatory, Wakayama

Mitsuru SÔMA

National Astronomical Observatory of Japan

Abstract: The Japanese shortwave time signals JJY will be shut down on 2001 March 31st. Astronomers who have been using JJY are seeking alternative methods for precise timing. We designed equipment, called the GHS Clock, that can be used with inexpensive GPS receivers to produce both an LED flash and a pip sound at the beginning of each second. Tests show that this device is accurate to about a microsecond.