

GPS による汎用時刻保持装置の開発

早水 勉[†], 相馬 充, 下代博之[‡], 橋口 隆[†]

(2001年4月2日受理)

Development of a New Device for Precise Timing

Tsutomu HAYAMIZU,[†] Mitsuru SÔMA, Hiroyuki GESHIRO,[‡] and Takashi HASHIGUCHI[†]

Abstract

The Japanese shortwave time signals JJY were 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. According to the GPS receiver manual, this device has an accuracy better than 500 nano-seconds, and our tests show that it usually has an accuracy better than 200 nano-seconds.

1. 概要

正確な時刻を知るために、天体観測では利用価値の高かった短波 JJY が 2001 年 3 月 31 日で廃止となった。野外の観測においても 10 msec 以内の精度で時刻を知ることができた短波 JJY に代わりうる時刻保持法として、筆者らは GPS (Global Positioning System) を利用した「GHS (Geshiro-Hayamizu-Sôma) 時計」を開発した。この装置の利用によれば、わずかなコストで UTC (協定世界時) ±500 nsec という高精度の時刻保持装置

が製作可能となる。

なお、短波 JJY に代わって、1999 年 6 月 10 日より長波 JJY が運用されている。標準電波が短波局から長波局に切り替わるのは、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こと、長波の報時による電波時計が開発されていることなどが挙げられる。しかしながら、筆者らの実測によると市販されている電波時計は 0.1~0.3 秒ほど遅れのあるのが普通で、遅れの幅も安定していないため、星食観測をはじめ精密な時刻精度を要求される目的には使用できない。

表 1. 代表的な時刻保持法の比較。

		時刻精度 (対 UTC)	携帯性	安定性	備考
NTT 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, 10 MHz)		~10 ミリ秒 (伝播遅延)	○	△	2001. 3. 31 廃止
長波 JJY (40 kHz)		~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		500 ナノ秒以内	○	○	GPS システムを時刻保持に応用した装置

[†] せんだい宇宙館 (Sendai Space Hall)

[‡] 生石高原天文台 (Oishikogen Astronomical Observatory)

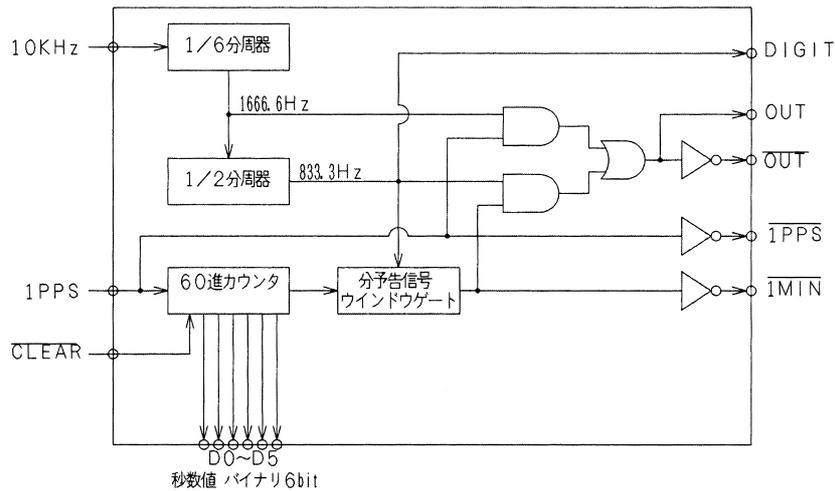
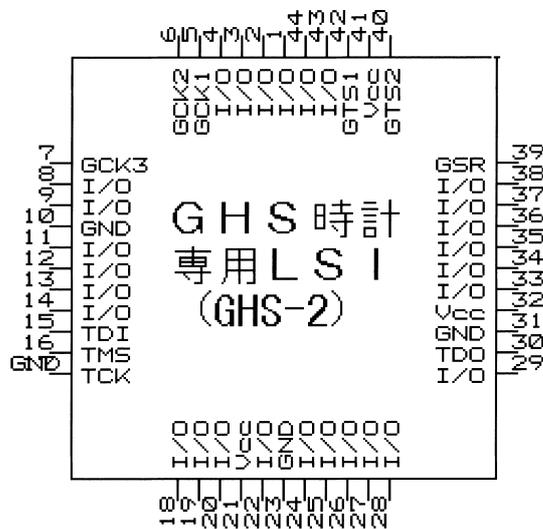


図1. 専用 LSI「GHS-2」内部ブロック図.



端子 No.	端子名称	略号	入/出力	機能
6	クリア	CLEAR	入力	[L]で1分パルスのカウントをクリアします
7	10kHzパルス	10kHz	入力	GPS(ジュピター)からの10kHz入力用
9	1秒パルス	1PPS	入力	GPS(ジュピター)からの1PPS入力用
18	1分パルス	1MIN	出力	分子信号期間中[L]を出力します
20	1秒パルス	1PPS	出力	1PPSの反転信号出力用
22	JJY 負出力	OUT	出力	疑似JJY信号を[L]で出力します
28	JJY 正出力	OUT	出力	疑似JJY信号を[H]で出力します
33	Bit 0	D0	出力	秒の値のバイナリ出力(1)
35	Bit 1	D1	出力	秒の値のバイナリ出力(2)
37	Bit 2	D2	出力	秒の値のバイナリ出力(4)
39	Bit 3	D3	出力	秒の値のバイナリ出力(8)
40	Bit 4	D4	出力	秒の値のバイナリ出力(16)
42	Bit 5	D5	出力	秒の値のバイナリ出力(32)
44	Disit	Disit	出力	秒表示LEDスキャン用クロック
10,23,31	グラント*	GND	-	GND
21,32,41	電源	Vcc	-	+5V

図2. GHS 時計専用 LSI「GHS-2」のピンレイアウト.

GHS 時計は、時刻精度のほかにも、安定性や拡張性の面でも優れた特徴がある。この装置については、日本天文学会年会やアマチュア天文家の会合など^{1)~4)}で紹介し

たところ、その特徴が広く認識され、すでに海上保安庁水路部など星食観測の分野を中心に、多くの観測者に採用されている。

出力信号のタイミングチャート

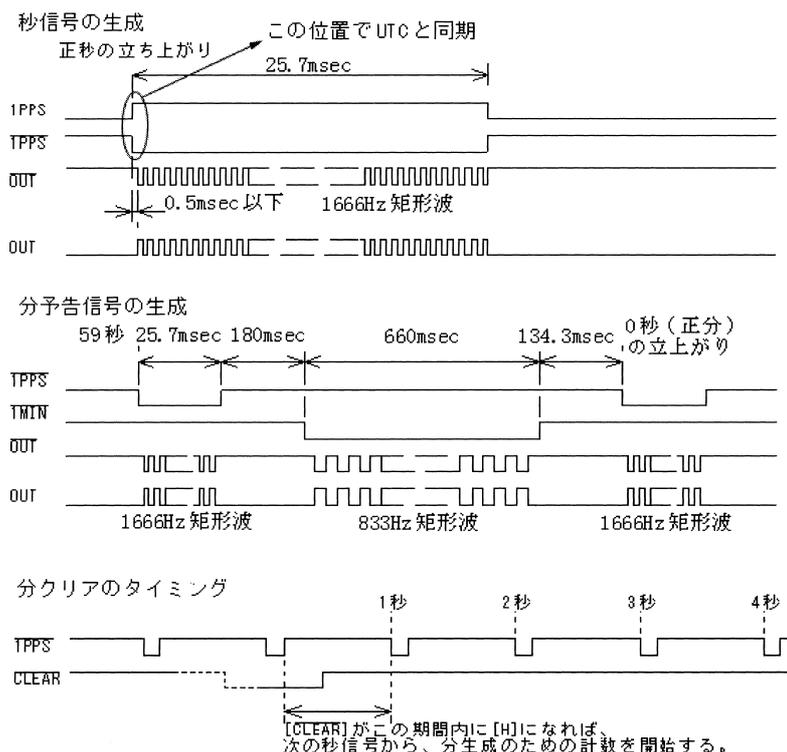


図 3. GHS 時計専用 LSI 「GHS-2」のタイミングチャート。

表 2. GPS 受信機「ジュピター」のピンレイアウト。

ピン番号	信号名	ピン番号	信号名
1	GND	6	SD1 (-)
2	BACK-UP	7	RD1 (-)
3	SD2 (-)	8	TM-1PPS
4	RD2 (-)	9	TM-10 kHz
5	+5V	10	RESERVE

11, 12 ピンは OPEN のまま使用

2. システムの構成

(1) 本システム開発の目的

星食の観測は、眼視によるものでは通常 0.4 秒前後の誤差があり、熟練観測者でも 0.1~0.2 秒程度の誤差は免れない。ビデオによる観測によれば、個人差もなく、ビデオのフレームレートの 1/30 秒の精度で現象の時刻を求めることができる。近年では、廉価で高感度な天文用 CCD ビデオカメラも市販されており、アマチュア観測者からもビデオによる観測報告が数多く寄せられるようになってきた。

このビデオの精度を活かすには、時刻保持の手段の検討が不可欠であるが、事実上これまで短波 JJY の受信がもっとも有効なものであった。(表 1)

2001 年 3 月末日の短波 JJY の廃止以降は、安価で精度の高い時刻保持手段が見当たらない。短波 JJY に代わって、1999 年 6 月 10 日より発振周波数 40 kHz で

長波 JJY が運用されているが、現状では精度の高い受信機は市販されていない。商品化されている電波時計の受信回路では、40 kHz の長波帯で雑音と信号の選択度を向上するために水晶振動子を使用した極めて帯域の狭いフィルターを使用している。このため、断続的な搬送波を受信した場合にフィルターの応答遅れが生じ、その後の検波回路の遅延などを含め 10~110 msec の信号遅延が生じる。実際、マルマングリニッジアームという電波時計で我々が実測した結果 (1 等星食のビデオ観測キャンペーン⁵⁾ で、ある観測者がこの電波時計を使用したため、その観測者の協力を得てその誤差を検定した) では標準電波を受け取って時刻修正した直後でも約 0.3 sec の遅れが認められた。また、カシオ計算機(株)の技術者から得た情報でも、同社の電波時計では種類によらず電波受信の直後で最大 0.2 sec の遅れがある (さらに同社の電波腕時計では電波を受信しない午前 4 時から翌日の午前 2 時までの 22 時間に積算される誤差を含めると、誤差が 0.5 sec を超えることもあり、電波の受信に失敗すれば誤差はさらに増大する) ということである。このように、長波標準電波を利用して高精度の時刻信号を得るのは非常に困難であると言える。

新しい時刻保持手段の開発にあたっては、短波 JJY の時報精度を目標としたが、GPS の利用により、結果として原子時計にも匹敵する精度の時計装置が開発された。また、野外におけるアマチュアの利用が前提となるため、安価に制作できて持ち運びの容易であることも重要な要素である。

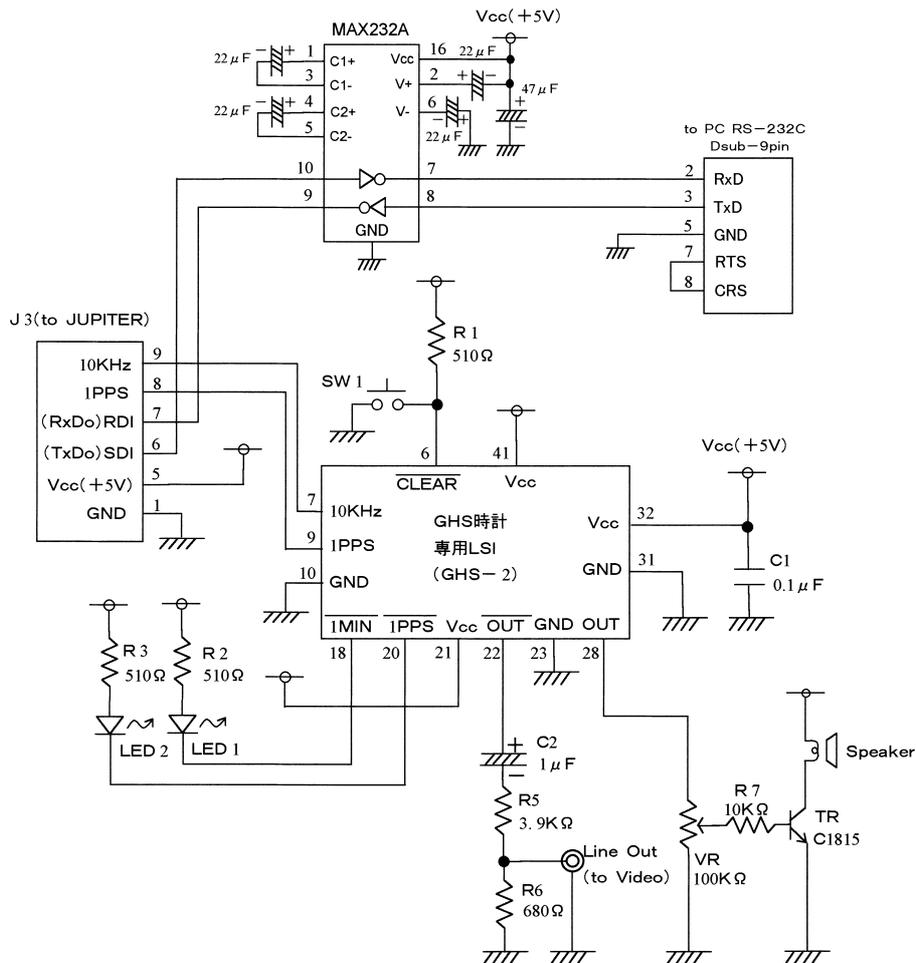


図 4. 報時ラジオ的な構成例回路図。

(2) 専用 LSI の開発

市販の GPS 受信機の中には、UTC に同期した 1 PPS (Pulse Per Second) 信号を出力するものがある。そのような受信機の中から安価で携帯性に優れた(株)SPA「ジュピター」を採用し、これと新規に開発された専用 LSI とを組み合わせることによる、汎用の時計装置を考案した。専用 LSI は、下代の開発した PLD (Programmable Logic Device) で、本稿執筆時点での最新バージョンの名称は「GHS-2」である。GPS 受信機「ジュピター」と専用 LSI 「GHS-2」を組み合わせることで製作される時計装置を「GHS 時計」と呼ぶ。

採用した民生用 GPS 受信機は高性能で安価であるが、観測者が容易に使用するにはインターフェイス回路を自作する必要があった。筆者らは多くの星食観測者の意見に基づき、次のような仕様の LSI の開発をめざした。

1. 1 チップで JJY 近似の発信音を発生できること。
2. 信号遅延時間を最小とすること。
3. 秒の値を LED で表示可能なこと。
4. 外付け部品を最小とすること。
5. 眼視またはビデオ観測用とし、必要以上に高機能としないこと。

以上の仕様を満足する LSI を少量、安価で実現するた

め、米国 ZILINX 社の XC9536 In-System Programmable CPLD を使用して回路を設計した。同社の資料によるとこの素子の最高クロック周波数は、125 MHz で信号遅延時間はピン-ピン間 5 nsec となっている。LSI の内部ブロック図、ピンレイアウトおよび信号タイミングは、図 1~3 に示す。また、GPS 受信機「ジュピター」のピンレイアウトを表 2 に示す。

(3) 基本的な構成

GHS 時計は、製作者の工夫しだいで様々な構成が可能であるが、ここでは報時ラジオ的な構成例を図 4~6 に示す。

図 4 中には、GPS 受信機からの時刻に関する情報が含まれるシリアルデータを取得可能とするための、インターフェイス (MAX232A) も含まれているが、パソコンとの接続を考えない場合は不要である。

(4) システムの特徴

このシステムの最大の特徴は、

1. 極めて経済的なコストで、
2. 極めて高精度の時報を

得られる点である。これまでも GPS を利用した時計装置は存在したが、数十万~数百万円ものコストを要し、

移動観測での利用も困難であった。GHS 時計にかかるコストのほとんどは、GPS 受信機「ジュピター」であり、極めて安価で、原子時計並みに高精度に UTC と同期した時刻信号を得られる。

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、正分のタイミングの教示や閏秒の対応も自動的に実行させることも可能である。

3. 精度について

(1) 時刻精度

GHS 時計によって得られる時刻精度は、GPS 受信機の 1 PPS 信号の精度に依存する。GPS 受信機「ジュピター」の仕様書⁶⁾によれば、対 UTC \pm 500 nsec の精度を有するというのである。この精度を確認するため、国立天文台（三鷹）の旧天文保時室にある Hewlett Packard 社製の GPS 時刻同期受信機 HP 58503A と比較したところ、100 回平均の測定値は 43.34, 128.75, 92.61, 89.83, 88.57 nsec などとなった（いずれも GHS 時計が進んでいた）。各測定における測定値のばらつきは数ナノ秒程度である。HP 58503A の時刻誤差については、その仕様書に

Time Accuracy:< 110 nanoseconds (95% probabil-

ity) with SA when properly installed and calibrated とある。このことから、HP 58503A の誤差およびアンテナケーブルや受信機内遅延時間を考慮しても、GHS 時計の時刻信号はかなりの確率で 200 nsec 以内で合っていると考えられる。

(2) 短波時報との比較

表 3 に示すように、JJY に代表される電波報時による時刻保持には、発信局から受信地までの電波の伝播時間による遅れは免れないが、GPS では複数の衛星からの情報を受信機内で解析することにより、受信機そのものが高度に較正された時計となる。

GHS 時計と短波 JJY を代表とする短波報時との、オシロスコープによる精度の比較を図 7 と図 8 に示す。短波報時の受信はいずれも市販の短波ラジオ (Sony ICF-SW7600GS) によるものである。図 7 は短波 JJY との比較、図 8 は中国の報時信号 BPM との比較を示す。図 7 から、短波 JJY は GHS 時計の正秒出力に対し約 4 msec の遅れと測定される。観測地（鹿児島県川内市）と短波 JJY の送信局（茨城県三和町）間は大円距離でちょうど 1,000 km であり、これを光速 (3×10^5 km/sec) で除すると 3.3 msec となる。観測値の 4 msec はこれより若干長い。これは受信機内遅延のほか、短波が電離層と地表の間で反射しながら到達していることによる遅延が影響しているためと考えられる。

また、図 8 より BPM は GHS 時計正秒に対し、12 msec の進みと測定されるが、BPM は、UTC に対して



図 5. GHS 時計.

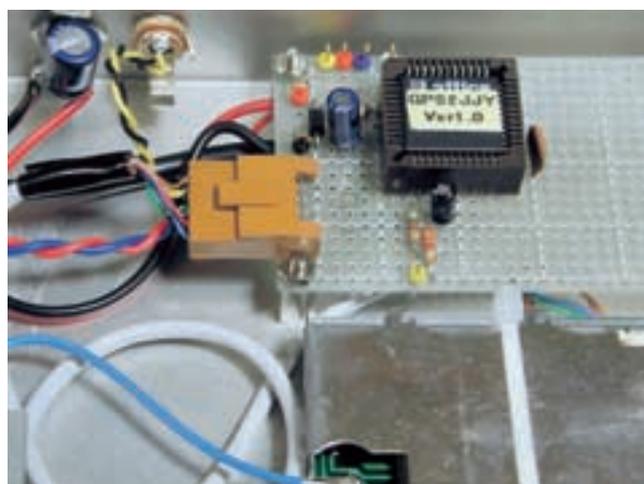


図 6. GHS 時計専用 LSI 周辺.

表 3. 短波報時信号.

送信局		観測地	大円距離	大円距離 ÷ 光速	基準時報	伝播遅れ観測値	測定方法
呼出符号	所在地						
JJY (短波)	茨城県三和町	鹿児島県	1,001 km	3.3 ms	GPS	4 ms	オシロスコープ
BPM	中国 Pucheng	鹿児島県	1,959 km	6.5 ms	GPS	8 ms	オシロスコープ
WWVH	米国 Kauai	東京	6,000 km	20 ms	短波 JJY	約 20 ms	ビデオより解析
WWV	米国 Fort-Collins	東京	9,300 km	31 ms	短波 JJY	30~40 ms	ビデオより解析

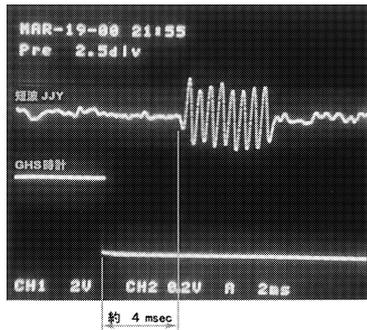


図 7. 短波 JJY と GHS 時計の精度比較.

20 msec 早いタイミングで発信されている⁷⁾ので、実際の遅延時間は、 $20\text{ msec} - 12\text{ msec} = 8\text{ msec}$ 程度である。この場合も受信機内遅延と電波の伝播遅延を考慮すると観測値とよく一致する結果となる(表 3)。

4. 応用分野

GHS 時計は短波 JJY の代替を目的として開発したが、短波報時にはない優れた特徴により、さらに広範な分野での利用が期待できる。

GPS は、元来観測地の位置情報を取得することを目的としているため、経緯度をはじめとして、高度、移動速度、などの豊富な情報を得ることができる。これらは、シリアルポートを通じてパソコンなどで解析することが可能である。

2000 年 5 月には、米国政府により故意に位置精度を劣化させる情報 S/A (Selective Availability) が解除された。これにより GPS 受信機「ジュピター」においては、真の経緯度から 10 m 以内の精度の経緯度値を得られることが実測されている。

GHS 時計の特徴を活かした応用分野を以下に示す。

(1) 星食、接食のビデオ観測

星食や接食をビデオにより観測すると、ビデオレートの $1/30\text{ sec}$ の時間分解能で解析が可能となる。このような目的での時刻保持には GHS 時計の利用が最適であり、既に多くの観測者が採用している。特に接食の観測では、移動観測が主体となるため利用価値が高い。観測値の経緯度データも同時に取得できる。

(2) パソコン利用機器の時刻管理

近年では、冷却 CCD カメラ等のパソコンで時刻を管理する分野も増している。市販のパソコンに標準的に備わっている OS を介した時計は時刻表示のふらつきが大きく、わずか数分の間に 500 msec を超える誤差が観測されることも珍しくない。GHS 時計のシリアルポートから時刻情報を取得し、専用のソフトウェアを用意することで、30 msec 程度の誤差で常に UTC に一致した時刻管理が可能となる。

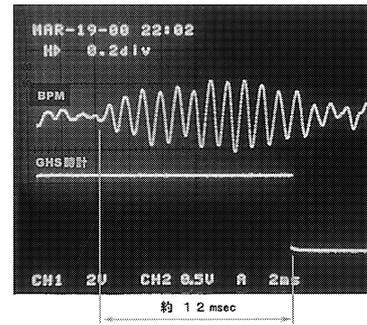


図 8. BPM と GHS 時計の精度比較.

専用のソフトウェアとしては、「Satk」[§]が開発され、フリーウェアとして公開されている。

(3) その他

本装置は、流星観測、日食観測、人工衛星観測などの分野では、携帯性や時刻精度の特徴から有効に活用できる。特に日食観測の場合、経緯度情報を取得すれば最適な観測ポイントの選定にも有益である。

なお、測地系については、国内において永らく使用されてきた日本測地系から、世界測地系へ移行される予定である^{§)}。世界測地系への移行により、日本を含む地球全体を共通の座標系で表現できることとなる。しかしながら、移行期間には双方の座標系が混在するための混乱が懸念されるため、観測の際の経緯度情報がどの測地系によるものが、常に意識する必要がある。

付録

1. 本装置に関する情報は、せんだい宇宙館のホームページ

URL: <http://www2.synapse.ne.jp/uchukan/>
に新たな情報を適宜更新して公開している。

2. GPS 受信機「ジュピター」と専用 LSI「GHS-2」の供給元は以下のとおり。

■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: spa@akihabara.co.jp

URL: <http://www.akihabara.co.jp/spa/jupiter.html>

■「GHS 時計」専用 LSI (GHS-2)

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

[§] Satk: 瀬戸口貴司(東亜天文学会)により、GPS を利用したパソコンの時刻管理を目的として開発されたフリーウェア。せんだい宇宙館のホームページ上で公開されている。(2000. 7. 3)

謝辞

GHS 時計の開発は、星食観測者のニーズと発想が原点となり考案された。特に星食のメーリングリスト JOIN (Japanese Occultation Information Network) においては、貴重なご意見や情報をいただいていた。また、瀬戸口貴司氏 (東亜天文学会) には、GHS 時計に適したソフトウェアの開発に尽力いただいた。ここに深く感謝申し上げます。

GHS 時計の精度測定に当たっては、国立天文台の山崎利孝、佐藤克久、松田 浩、鈴木駿策、岩下 光の各氏にご協力いただいた。感謝申し上げます。

カシオ計算機(株)時計事業部の熊井久雄氏には、同社の電波時計の時刻精度に関する情報を提供いただいたことに感謝する。

GHS 時計はプロからアマチュアまで幅広く利用いただけるよう、普及しやすいシステムたることを目的として考案した。この開発が多くの天文家に利用いただければ、それ以上の喜びはない。

参考文献

- 1) 早水 勉, 下代博之, 相馬 充: 日本天文学会春季年会講演予稿集, V27b (2000).
- 2) 下代博之: 全国の天体観測施設の会集録, 14 (2000).
- 3) 早水 勉: 東亜天文学会, 天界, 81, 445-459 (2000).
- 4) 早水 勉, 下代博之, 相馬 充: 天文月報, 93, 720-727 (2000).
- 5) 相馬 充, 早水 勉: 国立天文台報, 5, 29-41 (2001).
- 6) (株) SPA: ジュピター商品仕様書 (2000).
- 7) Bureau International des Poids et Mesures: *Annual Report of the BIPM Time Section*, 11, 117-131 (1999).
- 8) 国土交通省国土地理院: GSI テクノニュース第 102 号, 1 (2001).