

長波標準電波

電波時計の基準信号



標準電波, 電波時計, 日本標準時, 周波数標準



栗原 則幸

1. はじめに

独立行政法人情報通信研究機構（NICT）は、我が国の周波数国家標準に責任を持つ唯一の機関として、周波数標準および日本標準時を定め、それらを長波標準電波として全国に供給している。この電波は、急速な普及を遂げている「電波時計」の基準信号として利用され、最近では日本の市民生活を支える社会基盤の一つとして認知されつつある。長波標準電波の本格運用開始は1999年6月で、NICT（当時の郵政省通信総合研究所）が福島県の大鷹鳥谷山山頂に新設した「おおたかどや山標準電波送信所」が日本初の本格的な送信所である。2001年10月には、「はがね山標準電波送信所（九州長波局）」での運用も開始し、我が国の標準電波送信所複数局運用体制が確立した。高精度な日本標準時と周波数標準を供給する標準電波は、電波時計のみならず、家電製品や“タイムビジネス”，そして高速通信網の高精度同期などへの応用も期待され、一部はそうした企業活動も展開されている。本稿では、我が国における時間・周波数標準の応用例として、電波時計の基準信号となる長波標準電波を取りあげ、標準電波の背景、送信所施設、標準電波供給精度、今後の利用などについて概説する。

2. 時間・周波数標準の概要

時間および周波数は科学技術分野のみならず、現代社会を支える上で重要な役割を果たしているため、その利用を考えた場合、統一がとれている必要がある。このため、科学技術の発達した多くの先進国では、国が高精度な時間・周波数標準を定め運用しているのが一般的である。我が国

くりはら・のりゆき 1982年より郵政省電波研究所でVLBI（超長基線電波干渉計）システム開発に従事し、大陸移動実証実験などの大型プロジェクトに参画。1999年通信総合研究所周波数標準課長、2001年日本標準時グループリーダーを経て、2004年4月より現職の独立行政法人情報通信研究機構広報室長。

でも、NICTが、総務省設置法および独立行政法人情報通信研究機構法に基づき、標準周波数と標準時を設定・維持・供給している。こうした時間および周波数に関するサービスは、国内の計測機器および通信機器メーカーなどの社内標準の校正や、一般市民生活のリズムの基本となっている各放送局の時報、そしてNTT 117の報時サービスの基準として広く利用されている。

時間・周波数の標準業務は、次の3要素で表すことができる。

- ① 標準時, 標準周波数の発生と維持
- ② 標準時, 標準周波数の国際比較
- ③ 標準時, 標準周波数の供給

第1の要素では、国の標準として十分な精度と信頼性を確保した標準時および標準周波数を発生し、それを安定に維持することが要求される。NICTでは、現在15台のセシウム原子周波数標準器を用いて日本標準時および標準周波数を発生している。ちなみに、セシウム原子がある量子遷移する際に吸収または放出する電磁波の周波数を基準として「原子時」が定められている。具体的には、この周波数を9,192,631,770 Hzと定めることにより、1967年に原子時の1秒が定義された。さらに各国の原子時計を国際比較して、世界中の原子時計の安定度を比べ、その安定度によって重みを付けて平均化した国際原子時がつくられている。その後1972年には、国際原子時をもとに地球自転の変化分を「うるう秒」として挿入、あるいは引き抜き補正する協定世界時が定められ、今日に至っている。そうした意味で、日本標準時のさらなる源泉を遡ると協定世界時に^{さかのぼ}辿り着く。図1に、実時間で日本標準時をつくりだすNICTの計測ハードウェアの外観写真を示す。

第2の要素では、国際化が進んだ現代社会においては、各国が維持する標準の間の整合性を確保することが不可欠となる。そこで、国際度量衡局（BIPM: Bureau International des Poids et Mesures⁽¹⁾）をはじめ、各国の標準機関が協力し、GPSや静止通信衛星（TWSTFT: Two Way Satellite Time and Frequency Transfer）などを利



図1 セシウム原子時計を基に日本標準時を生成する装置 (NICT@小金井市)

電波時計の基準となる長波標準電波は、常時この日本標準時と遠隔比較監視されている

用して、高精度に標準時を比較し、前述したような国際原子時 (TAI: International Atomic Time) や協定世界時 (UTC: Coordinated Universal Time) を決定している。NICT は、BIPM から国際精密時刻比較網のアジア太平洋地域のノード局^②と指定され重要な役割を担うとともに、年間を通し UTC と NICT がつくりだす時刻との差を±50 ナノ秒以下に維持している。また、数年以内にはさらに発生・維持にかかわる精度改善を図り、UTC との時刻差を常時±10 ナノ秒以下に向上させる新日本標準時システム構築を進めている。

第3の要素では、国が維持する標準を広く社会に利用してもらうために、必要な精度をもった供給手段を提供することが要求される。NICT では、以下で詳述する長波標準電波を中心に、電話回線・ネットワークなども利用したさまざまな方法を用いて、日本標準時と標準周波数とを社会に供給している。

3. 標準電波の概要

3.1 標準電波の歴史

標準電波は、無線局や放送局への標準周波数供給を目的として1940年1月30日に運用が開始された。その後、1948年8月からは、標準電波に報時信号が重畳されるようになった。この報時信号はテレビ・ラジオの時報やNTT 117サービスの基準として利用され、日本の市民生活に深く広く定着している。その意味で、標準電波は戦後の日本の“時”を半世紀以上にわたって支えてきたと言っても過言ではない。標準電波は、当初短波帯で運用されていた。しかし、短波帯は電離層の状態に強く依存し、受信状態の不安定さ、周波数供給精度不足、混信などの問題が指摘されるようになった。このため、1993年、NICT内



図2 「おたかどや山標準電波送信所」の全景

に標準供給将来方針検討委員会を設置し、利用者アンケートなどを行うなど、短波標準電波を中心とした従来の供給体制が総合的に再検討され、高精度で、かつ、時刻符号供給可能な長波標準電波の実用化などが提案され、標準電波の方向性が示された。その後、1997年度から「おたかどや山標準電波送信所 (福島県)」整備工事を開始し、1999年6月10日「時の記念日」から長波標準電波送信本格運用を開始した。さらに、1999年度から佐賀・福岡両県境界にある羽金山 (はがねやま) に二局目の標準電波送信所整備を開始し、2001年10月1日から本格運用を開始した。図2におたかどや山標準電波送信所の全景を示す。

3.2 二局体制の確立

高い信頼性で運用するためには、運用停止時間を極力短くすること、全国どこでも受信可能であること、常に正しい信号を送信することなどが必須となる。長波標準電波送信所は、システムの重要部分に二重、三重の冗長性を持たせ、また自家発電装置を備えるなど、高い運用信頼性確保を目標としたが、定期保守点検や自然災害などにより、一定の運用停止時間は避けられない。そこで、2001年10月以降の「はがね山標準電波送信所」運用開始により、二局体制が確立され、相互バックアップ運用が可能になり、二局とも同時に運用を停止する確率は非常に小さく、高い信頼性を確保できるようになった。おたかどや山・はがね山標準電波送信所の位置と、その送信電力から計算される予測電界強度を図3に示す。この図で示されるように、おたかどや山標準電波送信所と、はがね山標準電波送信所の両送信所によって、北海道から沖縄を含む全国がカバーされ、電波時計の自動時刻合わせに必要とされる約50 dB $\mu\text{V}/\text{m}$ の電界強度確保が全国で可能と見込めるようになった。しかし、従来方式による理論計算値が、全国各地での受信電界強度実測値と本当に一致するか、否かを検証すること、そして電波時計利用者への情報提供サービスに生かすことを目的に、沖縄本島から北海道稚内市までの全国

31箇所での実測調査を2004年1月から2月にかけて実施した⁽³⁾。計算から得られる受信(合成波)電界強度特性に、移動測定車を用いた実測結果をプロットしたものを図4に示す。さらに、今回の全国調査で得られた実測値を計算プログラムにフィードバックし、改良を加えた新たな電界強度予測法⁽⁴⁾を確立し、これまで無かった年間・昼夜にわたる長波標準電波受信信号全国マップを描くことも可能となった (<http://jyy.nict.go.jp/fs/index.html>)。

3.3 標準電波送信所のシステム構成

図3にも示したように二つの送信所の送信周波数は、40 kHzと60 kHzと異なっているが、これは同一周波数にすると干渉により受信強度が低下する地域が発生することを避けるためである。図5は、長波標準電波送信所のシステム構成図である。原器室のセシウム原子時計の信号は、GPS/GLONASSを仲介とするコモンビュー方式⁽⁵⁾で、NICT本部(東京都小金井市)で作りだす日本標準時と、数ナノ秒以下の精度でタイミングと周波数とが一致するように周波数調整装置(AOG: Auxiliary Output Generator)で調整している。標準電波として発射されるキャリア周波数や時刻符号(タイムコード)は、先の周波数調整装置から出力される5 MHzおよび1 PPS(Pulse Per Second)信号を基に送信信号発生装置で作成し、50 kW

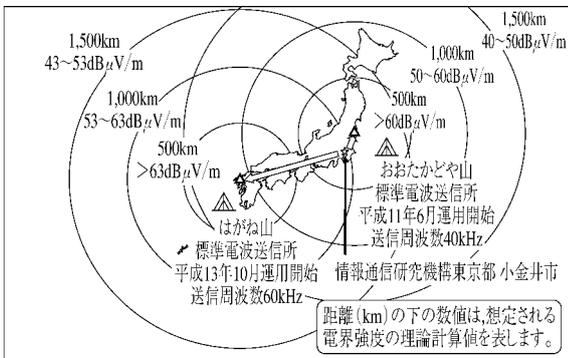


図3 長波標準電波送信所と電界強度計算値

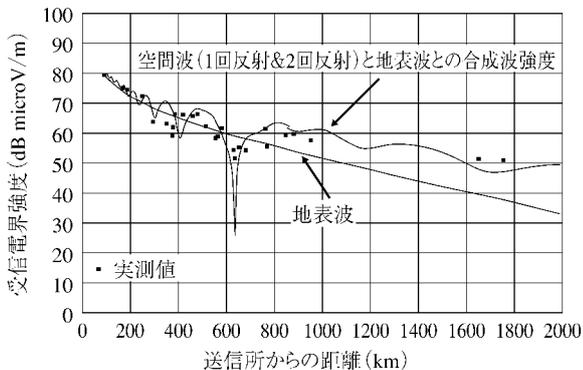


図4 長波標準電波 40 kHz 受信電界強度の距離変化特性(昼間)

送信装置に送られ、整合器経由で空中線から発射される。システムは、信頼性を確保するために、整合器以降を除きすべて2系統(原子時計は3系統)の冗長系を持たせている。さらに、それぞれの送信所には、275 kVA 自家発電装置と4,000リットル地下燃料タンクを備え、商用電源停電時には電源系が自動的に切り替わる機能を持たせ、約1週間の自立送信所運用も可能である。

3.4 タイムコード(時刻符号)

図6に長波標準電波に重畳されるタイムコードを示す。毎正分の時刻(年, 1月1日からの通算日, 時, 分), 曜日, うるう秒情報, パリティ, 停波予告情報などを1分周期で送信している。図6の例は、1999年6月10日14時26分を示している。各秒信号は40 kHz(60 kHz)のキャリアをパルス幅変調してコード化しており、パルス幅0.8秒は2進の0, 0.5秒は2進の1に対応している。そのほかに、正分の位置を示す基準マーカおよびポジションマーカが送出されるが、そのパルス幅は0.2秒である。ポジションマーカP0は、通常(非うるう秒時)は59秒の立ち上がりに対応している。しかし、正のうるう秒時(挿

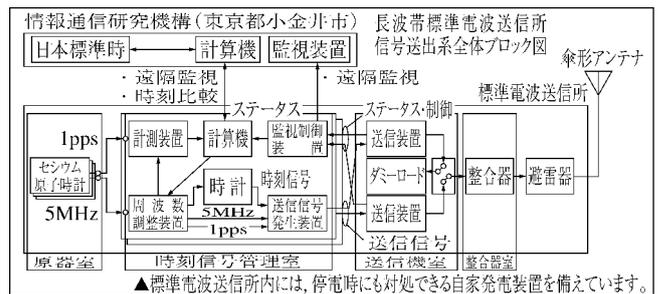


図5 長波標準電波送信所システムブロック図

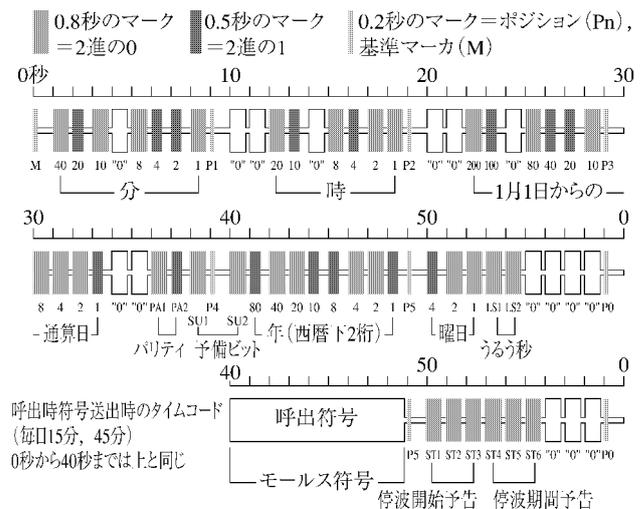


図6 長波標準電波タイムコード

タイムコードは60秒間かけて基準マーカMの位置の時刻を知らせる。上の図では、1996年6月10日(1月1日からの通算日161)木曜日の14時26分を表している。

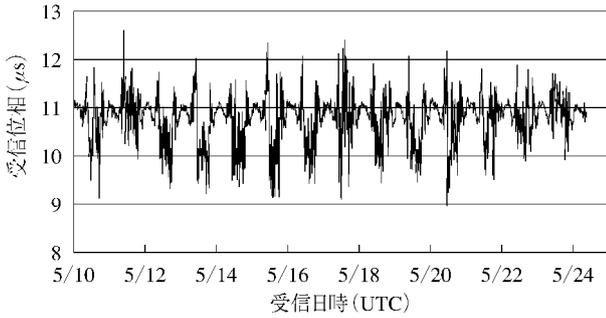


図7 長波標準電波受信時刻変動 (40 kHz)

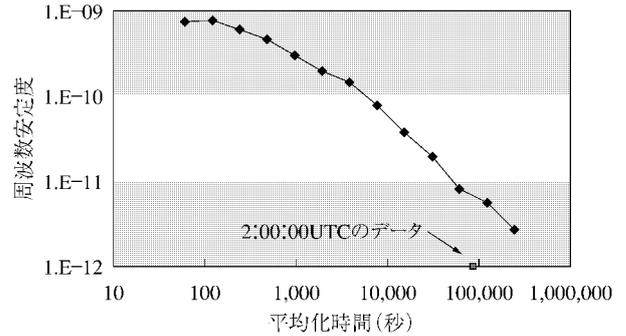


図8 長波標準電波受信周波数安定度

入)では、60秒の立ち上がり(このとき59秒は2進の0とする)に対応する。また、負のうろう秒時(削除)では、58秒の立ち上がりに対応している。

標準電波は周波数標準源としても利用されるため、パルス信号の振幅レベルは100%と10%に切り替わるようにし、常に40 kHz(あるいは60 kHz)のキャリアが継続するように工夫している。

4. 供給精度

NICT 小金井本部では、長波送信所から発射される標準電波信号を常時受信し、その受信時刻変動測定結果をホームページに掲載・公表している (<http://jy.nict.go.jp/Pub/jy40.html>)。図7に2002年5月10日~24日の受信結果を示す。受信時刻の変動には、明瞭な日周変動が見てとれる。しかし、その変動幅は、ほぼ $\pm 1.5 \mu$ 秒以内に収まっている。特に、昼間は比較的安定しており、この受信時間帯の変動幅は、 $\pm 0.3 \mu$ 秒以内である。図8は、図7のデータから計算した受信周波数の安定度を示す。平均化時間1日での周波数安定度は、約 1×10^{-11} と計算されるが、昼間の安定した時間帯では 1×10^{-12} というさらに1桁優れた周波数安定度が得られることが明らかとなった。図の例は2:00:00 UTC(日本時間11:00:00)のデータから得られる周波数安定度(平均化時間1日)を示している。

5. 標準電波の利用

2001年1月末、長波標準電波を利用した電波時計国内販売台数は約200万台であった。その後、時刻を自動修正する新機能などが話題となり、併せて販売価格の低廉化傾向が電波時計普及を今も加速させている。2005年4月の

推計では、国内販売台数2,000万台を突破したとされ、従前には無かった数百億円規模の新しい電波時計市場が新たに創出された。電波時計のほかに、タクシー料金計・タイムレコーダ・パソコンなどの内部時計管理、地震・気象観測機器の時刻管理、道路標識の点滅同期制御、一部JR駅ホームの掲示時計などにも長波標準電波は利用されている。

一方、精密周波数基準源としての利用も進み、複数の大手受信機メーカーから長波標準電波利用高安定基準発振器や、長波時刻同期受信機が市販されている。さらに、今後は家電製品内蔵時計への応用をはじめ、国家時刻標準機関(NICT)とのトレーサビリティを確保する手段としての長波標準電波利用も検討されている。

こうした背景の中、日本標準時・周波数国家標準に責務を有するNICTの役割はさらに重要性を増すものと思われる。今後も国民生活の安全の確保および質の向上、そして我が国の国際競争力の強化維持に向け、単なる供給サービスに留まることなく、先端科学技術分野を切り開く研究開発をさらに進めたい。

(平成17年6月20日受付)

文献

- (1) BIPM Web サイト, <http://www.bipm.org/en/bipm/>
- (2) BIPM Web サイト, <http://www.bipm.org/en/scientific/tai/tai.html>
- (3) 栗原則幸・大塚敦・今村國康・高橋幸雄・若井登:「冬季における長波標準電波強度の全国マップ」, 信学会, 信学技報, AP 2004-195, pp 29-34 (2004-12)
- (4) 若井登・栗原則幸・大塚敦・今村國康:「長中波電界強度計算法」, 信学会, 信学技報, AP 2003-271, pp 35-40 (2004-2)
- (5) D. W. Allan and C. Thomas: "Technical Directives for Standardization of GPS Time Receiver Software (International Reports)", Metrologia, 31, pp. 69-79 (1994)