

Q 48. 時間と空間

測地学の歴史を調べたくて **Q&A42** に出てきた岩手県水沢市の木村記念館に行ったら、古い時計がずいぶん展示してありました。測地学は空間を測るものだと思っていましたが、時間も関係あるのですか。

A48. 測地学に関心を持つとは、感心ですね。測地学は、地球の形・重力やそれらの変化を測る、いわば空間を相手にする学問ですが、時間が関係することもあります。いまでは、カーナビや GPS 携帯電話のスイッチを入れれば、どこにいるかがすぐにわかります (**Q&A22, 23**)。でも、GPS も何もない何世紀も昔、地球上の自分の位置を知るためには、星を観測する必要がありました。たとえば、経度は、太陽・月・星の南中「時刻」(真南にくる時刻)を測って求めていました (**Q&A14**)。

時計の進歩はそのまま、経度を測る精度の進歩とってよいでしょう。正確な時計をつくるうえで大切なのは、なにを用いて一定の周期で時を刻ませるかです。振子の周期を基準にした時計は、17 世紀にオランダの天文学者クリスチャン・ホイヘンスによって発明されました。18 世紀になると海洋国イギリスでは、国が奨励して船の位置を決めるための正確な時計(クロノメーター)づくりを競わせました (**Q&A14**)。19 世紀になると、ドイツでは振子を真空槽に入れて狂いを一日 10 分の 1 秒に抑えたリーフラー式時計が開発され、天文台御用達となりました。わが国には 1989 (明治 32) 年に水沢に設立された緯度観測所に納入され、国立天文台の木村記念館で展示されています。

その後、時の刻みに水晶振動子の振動を利用した水晶(クォーツ)時計を経て、現在は水素メーザー時計 (**Q&A24** 参照) やセシウム原子時計、ルビジウム原子時計などの時代になっています。

原子時計では、原子から放射される電磁波(電波や光などの総称)の周期がきわめて正確であることを利用して、時計の刻みに使います。現在の時間の 1 秒の定義は、「ジオイド上に置かれたセシウム 133 という原子の、ある特定の放射電磁波の周期の 9192631770 倍」とされています。余談ですが、**Q&A8, 9** でお話ししたジオイドが、ここにも現われているのはおもしろいですね。現在では、世界中の二百数十台という原子時計が、パリ近郊の国際度量衡局 BIPM に集められ、その平均から国際原子時 TAI (Temps Atomique International) を決めていきます。

原子時計を基準にすると地球の自転速度の狂いが明らかになってきたことや、TAI を「うるう秒」で調整して地球の回転と折り合いをつけた協定世界時 UTC については、**Q&A43** を参照してください。

古い歴史を持つ天文台には、クロノメーターと併せて、子午線通過を精密に観測するための子午儀とよばれる特殊な望遠鏡がそなえつけられており、それらを使って経度の観測が行なわれていました。ある地点の時刻を定義するためには、そこでの太陽の子午線通過時刻(南中時刻)を正午とすればよいこととなります。しかし、交通網や通信が発達するにしたがって、広がりを持った地域で共通の標準時が定義されるようになりました。ここで、単に時計の刻みが

正確だけでなく、離れた時計同士の時刻をきちんと合わせる（時刻同期）必要がでてきたのです。

時計を運搬して合わせるのは、簡単で実用的な時計合わせの方法ですが、運ぶ途中の衝撃や温度変化などのために、時刻が少し狂ってしまいます。無線通信が発明されてからは、天文台からの報時信号による時計あわせが行なわれるようになりました。わが国では、短波を使った JJY（標準電波）が、2001 年まで日本標準時への時計合わせに、普通に用いられてきました。ただ、短波は電離層（超高層にある電離した気体を多く含む層）に跳ね返りながら伝わりますから、その状態で電波が届く経路や受信電波の強度が変わり、究極の時計あわせには問題がありました。

現在では VLBI (Q&A24) や SLR (Q&A25) などを用いて、遠く離れた 2 点の位置関係を一気に知ることができるようになりました。ですから、時計合わせと子午儀の観測で経度を定める仕事は、測地学の本流から離れてしまいました。しかし、正確な時計と精密な時計合わせの技術はさまざまな分野に応用されており、多くの機関の研究者が取り組んでいます。

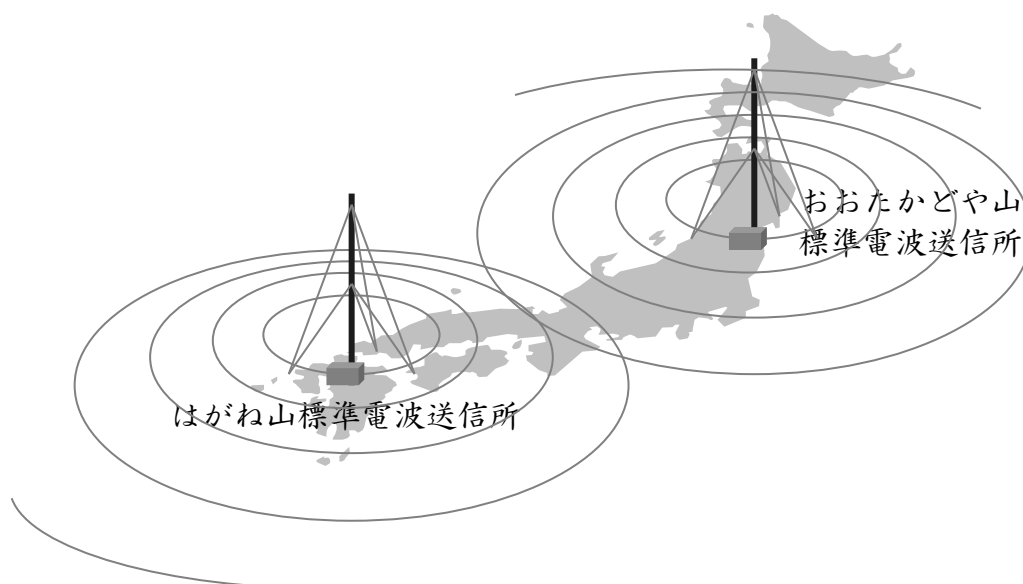


図 48-1 情報通信研究機構が運用する長波の標準電波送信所。ここから発射された電波信号で自動的に時計合わせをするのが電波時計

現在、手軽で高精度な時計合わせは、GPS と長波標準電波の受信でしょう。カーナビに使われる GPS 衛星の信号は、時計合わせにも使えます。GPS 衛星の信号から、自分の位置だけではなくて、受信機に内蔵された時計のずれがわかるからです。数年前から短波の JJY にかわって、通信総合研究所（現在の情報通信研究機構）から、長波帯の標準電波（波長数 km の電波、日本国内程度なら安定して伝播する）で時刻情報が定期的な供給されるようになりました。日本の標準電波送信所は、福島県の「おおたかどや山」（周波数 40 キロヘルツ）と佐賀県の「はがね山」（周波数 60 キロヘルツ）にあります（図 48-1）。そこから

送られた電波を受信して、時計が自分で時刻を日本標準時に合わせる「電波時計」はすっかりおなじみになりました。

「時間と空間」というと、相対性理論を思い浮かべる物理学の好きな読者もいると思います。精度を追求する現代の測地学では、相対論的な効果が問題となる場合がしばしばあります。

SLR のデータ解析では、宇宙空間を飛び交うレーザパルスの往復時間を計算するのにローレンツ収縮（物体は運動方向へ縮むという、特殊相対論から説明される現象）を考慮します。また、VLBI ではクエーサー（準星）からの電波が太陽のそばを通過するときに、その重力の影響で電波が曲がる一般相対論の効果を計算に入れる必要があります。また、一般相対論によると、時計の刻みは時計の置かれた場所の位置エネルギーによってわずかに変わります。同じ時計でも、地上に置いた場合と、はるか上空にある場合で時の刻み方が変わるので。地表の 2 万 km 上空を飛ぶ GPS 衛星に積まれた原子時計は、この効果をあらかじめ考慮しており、地上で動作するときの周波数を低めに調整してあります（もっともその割合は 100 億分の 4 程度ですが）。そうすると打ち上げられた軌道上では、きっちり地球上の時計と刻みが一致するのです。

相対論という、よほど特殊な条件のもとでようやくその効果が見える「机上の空論」だと思われがちですが、カーナビの衛星にも応用されている、生活に密着した理論なのでした。 (H)