

GPSと相対論効果

いつも大家の蒨蓄披露に感心させられている熊さんはGPSには相対性理論が関わっていることを知りました。大家の知らないことを見つけたと思い一泡吹かそうと、すまして聞き手にまわります。

(熊)

アインシュタインの相対性理論が正しいことはGPSでも証明されていると聞いたんだが解説してくれるかい。GPSとは全地球測位システムのことでカーナビで利用しているのはご承知のとおりと思うがね。

(大家)

ああいいよ。GPSと相対論の関係は世の中で誤解されているので熊さんだけでなく、世の中の人に説明したいと兼ねてより考えていたところだ。理論物理学者もGPSに詳しくない人は誤解しているかもしれないよ。

(熊)

理論物理学者も誤解しているとは大きく出たね。それではここに大栗博司著の「重力とは何か」にもGPSが出てくるから、これを引き合いに解説して貰おうじゃないか。大栗博司はまだ50才そこそこなのにカリフォルニア工科大学の教授であることに加えて、この大学の理論物理学研究所の初代所長も勤めている。また東京大学のカブリ数物連携宇宙研究機構の主任研究員もされている。

(大家)

そうなんだ。現在自他ともに認める日本でトップクラスの学者の一人だろうね。日本が期待する最先端の科学者であることは間違いない方だ。熊さんが持っている本にはGPSと相対論についてどう書いてあるのかい。素人向けに書いた本だから易しく書いてあるだろう。

(熊)

まずはしがきの中で9頁に「実はアインシュタインの相対論がなければGPSで距離を正確に測定することは出来なかったはずです。」とある。GPSによる高精度はアインシュタインの相対論のおかげだと言っていることに間違いないだろう。

(大家)

そうだね。この記述を見る限り大栗先生も誤解しているとは思えないんだ。しがきでなく本文ではどのようなになっているのかい。

(熊)

124頁から126頁にかけて次のように書いてある。全部引用するのもなんだから要点を書くね。

- 1) 空間の3次元と時間の1次元、つまり縦、横、高さ、時間の4つの情報で位置決めが出来る。このためGPSの4機以上の衛星から電波を受ける必要があること。
- 2) GPSの精度を上げるには「時計」が合っている必要があること。そのため、GPSの衛星には3万年に1秒しか狂わない原子時計が搭載されていること。
- 3) どんなに正確な原子時計も相対論効果から逃れることはできないので、それを考慮に入れて時計を補正しなければ、地上とのあいだに誤差が生じてしまうこと。

どうだい、ここまでは。

(大家)

このとおりだね。ここまでは良いのだよ。

(熊)

じゃあ、どこに誤解があるって言うのかな。相対論がなくても良かったというなら、地上との間に誤差を生じても良かったということかい。

(大家)

そういうことだな。続きはどのように書いてある。

(熊)

GPS衛星は高度2万kmを高速で飛んでいるので、特殊相対論効果によって1日に7マイクロ秒遅れること。

高度2万kmでは地上より重力が小さいので一般相対論効果によって1日に46マイクロ秒進むこと。

従って、1日あたり39マイクロ秒進む。1日に39マイクロ秒ということは光速を乗じると12kmの誤差ということになる。

(大家)

その通りだね。GPSの衛星に搭載された原子時計は地上に置いた同じ原子時計に比べて1日あたり39マイクロ秒進むということは相対論の教えるところだ。39マイクロ秒に光速の30万km/秒を乗じると12kmということになる。

(熊)

おかしくないだろう。次に「人工衛星と地上の時計が合うように設定してあるので、実用に耐えるものになっているのです。」と書いてある。どうやって合うように設定するのかは書いてないけど。

(大家)

実はこのとおりなんだ。人工衛星に積まれた原子時計には電磁場を加えて39マイクロ秒遅れるようにしていると日本の「みちびき」関係者から聞いたことがある。

(熊)

じゃあ実際に相対論効果を補正しているから、GPSの精度が保たれていることで間違いないではないか。

(大家)

今となってはGPSに使われる衛星に積まれる原子時計はすべて相対論の補正をしなくてはならないことは事実だよ。しかし、相対論の効果を始めから無視しても現在のGPSと同じ精度が実現できることは間違いない。補正したものや補正しないものが混じっては駄目だけどね。必要なことはGPSの衛星に積まれた時計がすべて同じ時刻を刻むことが大事なのだ。

(熊)

どうしてかな。

(大家)

それはね。測位の方式を振り返って貰えば判る。受信機は4機以上の衛星からの電波を受ける必要があった。4つの情報が必要ということは空間3次元と時間の1次元を決めるために必要な

んだ。距離の3変数と時間誤差の1変数を連立方程式を解いて決定しているのがGPSによる測位だよ。

時間誤差で1番大きいのは受信機の時計の誤差だ。受信機に原子時計を使わなくて安価で小型の水晶時計を使えることがGPS成功の鍵だったと言っても良いだろう。水晶時計の誤差はどのくらいかな。

(熊)

水晶腕時計の宣伝によると一月で0.5秒くらいだったかな。

(大家)

そんなものだろう。1日に直しても誤差は10ミリ秒のオーダーだよ。原子時計の相対論効果による進と比べれば桁違いに大きい。相対論効果による時間誤差は水晶時計の誤差に含まれているとみなせば、相対論効果による補正は始めから無視して良かったのさ。

(熊)

なるほどね。相対論効果を考えなくても現状のGPSと精度は変わらない筈だね。GPSを考えた人は気が付かなかったのだろうか。

(大家)

気がついてはいたと思うよ。宇宙開発の歴史を考えると、GPSの前は米国海軍のトランシット衛星だった。最初の人工衛星が上がって数年もしないうちに、電波を発信する人工衛星が灯台の代わりになると気が付いた。このことから始まったので、原子時計を最初に搭載した衛星は地上と出来るだけ同じにしたかったのだろう。

GPSがアインシュタインの相対論を実証したというのは言えないだろうね。今となっては相対論補正をしないGPS衛星を打ち上げて本当に誤差が大きくて使いものにならなくなるなんてことは試せないからね。

(了)