

## GPS測位へ及ぼす

## 電離層、対流圏による伝搬遅延効果

DX アンテナ(株) GPS事業部

千田 克志

## はじめに

通常、GPS測位にもたらされる誤差要因として考えられるのは、衛星測位誤差（GPS衛星の実際の位置からのズレ）、衛星に搭載されている時計の誤差、受信機に搭載されている時計の誤差、電離層および対流圏によってもたらされる伝搬遅延誤差、等が挙げられる。これらのうち、衛星・受信機に搭載されている時計の誤差がもたらす測位誤差については、GPS搬送波位相データを取得することでそれぞれの二重位相差を計算し、その効果を打ち消すことができる（本誌9号参照）。このため、これまでは衛星測位誤差により、計算上、各衛星と地上観測点を結んでできるそれぞれの幾何学的な配置をくるわせることが、地上GPS測位をする上での最大の誤差要因であった。しかし、この状況はIGS（国際GPS地球力学機構）が世界の数百箇所（日本ではつくば観測点、うすだ観測点の2点）にGPS固定点を設置し、全球的に各衛星位置を数cmレベルまで精確に求められるようになったことで、劇的に変化する。いまでは衛星位置の測位誤差が、地上観測点位置の測位誤差に与える影響は、数mm以内であると考えられている。

以上のような経緯から現在、GPS測位の最大の誤差要因として考えられているのが、電離層および対流圏によってもたらされる伝搬遅延誤差なのである。

## 1. 電離層、対流圏遅延とは

光の屈折をあらわす一例として、水の底に沈んだ物体は視線と一直線の先にはなく、少しずれた位置に存在しているといった現象をご存知の方は多いと

思われる。これは空気と水の境界面で光が屈折し、実際の位置とは異なった個所に、あたかもその対象が存在するかのような像をつくりだすことで生じる。このように伝搬経路上の媒質が異なる場合、その境界面で屈折現象が起こる。

GPS電波にも同様の現象が存在する。上空2万メートルに位置するGPS衛星から地上にむけて発せられたGPS電波は、まず電離層に到達する。この時点で、それまでの伝搬経路上の媒質に変化が生じたことで、電波が屈折する。そのため、直線的に進んだ電波よりも到達時刻が遅くなる（速度減衰による遅延）。また、同時に電離層内で電波の進む速度はそれまでの速度と比べて減衰する（幾何学的な遅延）。これらをまとめて「電離層遅延」と呼ぶ。

次に、電波は電離層を抜けて対流圏に入る。遅延量は異なるが、この時点でも同様に電波の屈折、速度の減衰といった現象が生じる。これらをまとめて「対流圏遅延」と呼ぶ。

これらの遅延量は次のような特徴を持っている。  
(1) 地上観測点から見て、低い仰角の衛星からのGPS電波ほど、遅延効果は大きい（図-1参照）。なぜなら、真上から水面下の物体を見たときに、実際と現実の像のズレは存在しないのと同様に、天頂遅延量は幾何学的な減衰を生じないからである。また、伝搬経路も低仰角からの電波に比較して短いため、速度の減衰による効果も小さくなる。

(2) 対流圏遅延には、乾燥大気に起因する静水圧遅延量と、湿潤大気に起因する湿潤遅延量の2種類が存在する。対流圏遅延量は全体で2m以上にも達するが、内訳をみると静水圧遅延量がその約90%を占め

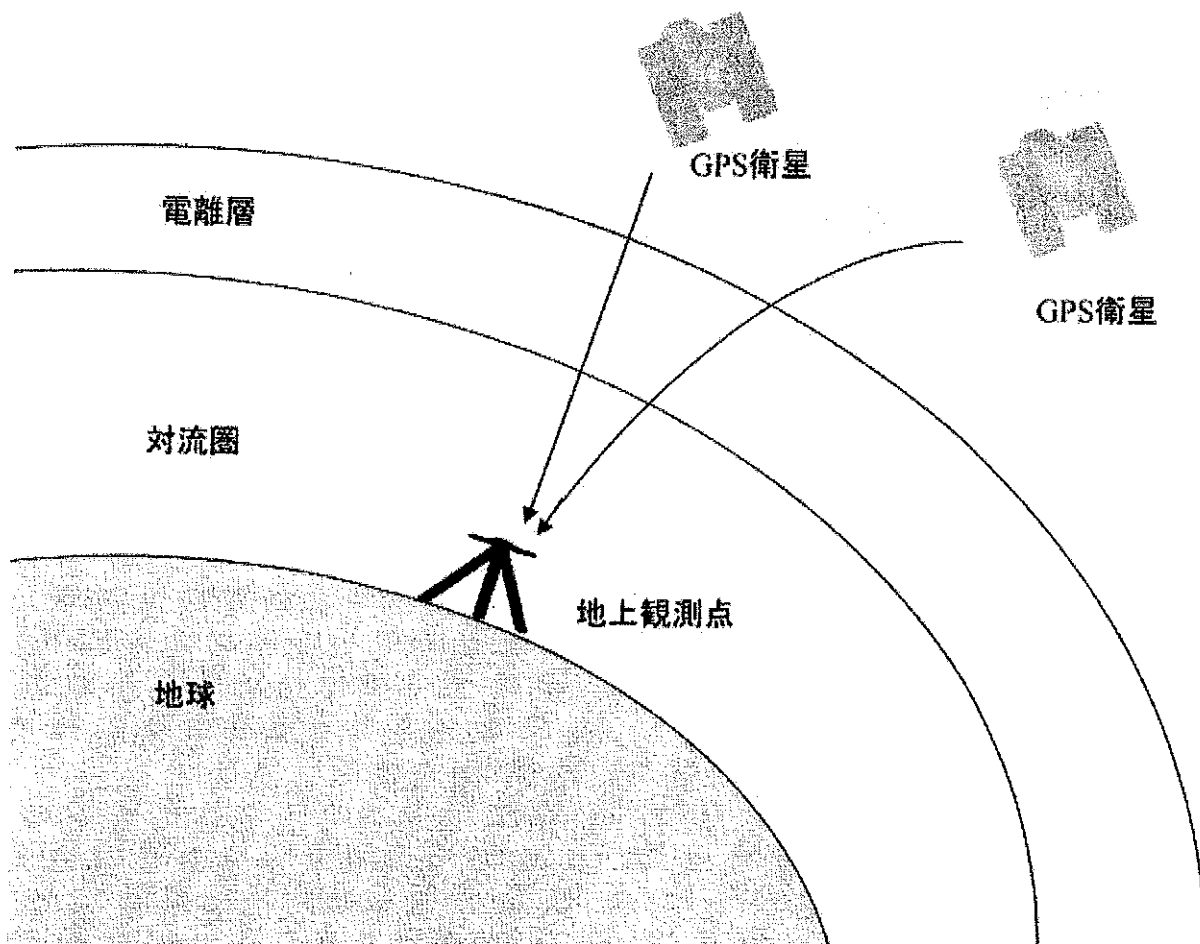


図-1 電離層、対流圏遅延の概念図

上空2万メートルにあるGPS衛星から送信される電波は、伝搬経路上に存在する電離層と対流圏にて屈折、伝搬速度の減衰によって遅延する。ただし天頂方向から伝搬する電波には、伝搬経路の湾曲による遅延が存在しない。

る。

## 2. 電離層、対流圏遅延量の推定

通常、電離層や対流圏による遅延効果は、次のようにして推定、除去する対策が取られている。

- (1) 電離層遅延効果については、その遅延時間が周波数に依存して変化することに着目し、L1波、L2波の2周波を計測して、搬送波位相の線形結合を計算することで、推定し除去することが可能である。
- (2) 対流圏遅延量のうち、静水圧遅延量は気圧に依存して変化する量であることがわかっている。そこで、地上観測点の気圧を計測することで厳密な値を求めることができるが、一般には通常大気(1気圧、摂氏15度)を仮定したモデルをつくり、静水圧遅延量の値を推定している。
- (3) 湿潤遅延量について、各衛星方向の遅延量を天頂方向に投影し、どの程度の遅延効果が想定されるか、仮想モデルを立てて初期値を導き出し、その値

を用いて天頂遅延量を統計学的に推定する。そのため大気遅延量は、地上観測点を頂点とし、観測で設定したカットオフ仰角以上に基づいた円錐形の器内に存在する大気遅延量の平均値を推定していると考えられる(図-2参照)。一般に対流圏では、大気を一様な層構造と仮定した仮想モデルを用いる。しかし、たとえば大気中の水蒸気はその時々々の状況、地形効果などさまざまな要因で、複雑な振る舞いを示すことが知られている。とくに日本のような複雑な地形をしているところでは、なおさらモデル化しにくい状況となっている。そのため、厳密には一様な成層構造の大気モデルであらわしきれないことによって、天頂遅延量の推定に誤差が生じることも考えられる。

- (4) 静止精密測量等で基地局・移動局の2点が近接したところであれば、各衛星の視線方向に存在する遅延量を同一のものとみなすことができるため、2重位相差を計算することで、その遅延量をキャンセ

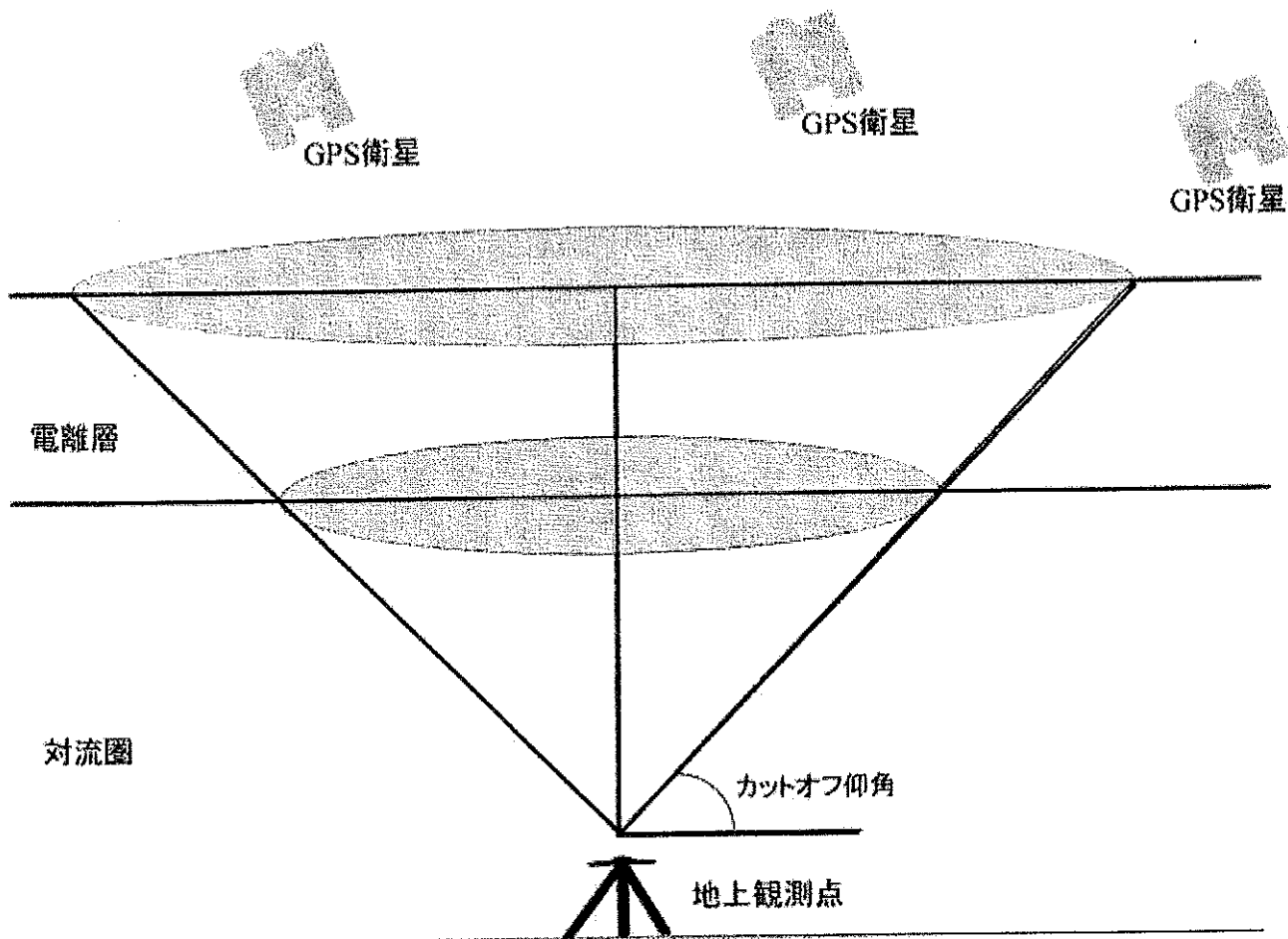


図-2 対流圏、電離層遅延の測定範囲

測位に用いる GPS 衛星配置に偏りがない場合、一般に、観測点天頂方向を中心とし、観測点を頂点とした逆円錐形の器内に存在する電離層、対流圏遅延の平均値を推定していることになる。

ルすることができる。ただし、一般にはこの方法は用いられない。2観測点が近接したところに存在すると、両観測点で受ける衛星信号、衛星仰角ともほぼ等しいものであるため、測位計算を行う上でどちらの観測方程式もほぼ同一のものとなる。その結果、観測方程式が強い相関関係を持ち、計算結果が一意に求められない。そのために通常、各観測点から500km以上離れたところに存在する観測点を参照点として、得られたデータを測位計算に加えている。

(5) 湿潤大気は、伝搬経路上の水蒸気量に依存して変化する量であるため、たとえば水蒸気ラジオメータといった気象観測機器を GPS 観測と同時に用いて、その水蒸気量を推定し、湿潤大気遅延量の補正を行うことが可能である。

### 3. 現状と、これからの取り組み

電離層や対流圏遅延効果は、2周波による計測や、

観測点の気圧を測定することで、その効果の大半を推定、除去することが可能である。しかし対流圏遅延のうち、湿潤大気に起因する湿潤遅延量については、モデル化することが困難であるため、精確な推定値を得ることが困難である。計算上、天頂湿潤遅延量と測位結果は統計的手法を用いて同時に推定されているため、仮りに一方が誤った値を導いた場合、もう一方にその影響が残り、両者が互いに誤差を持つことも考えられる。

日本は地形が複雑に入り組んでいることから大気の仮想的なモデルを構築することも難しく、また一年を通して湿潤な気候帯に位置しているため、これらの遅延量が測位結果にもたらす効果を推定、除去することは現在非常に重要な課題となっている。現在、統計学的に推定する、気象観測機器を用いて補正するといった、さまざまな対策手法が考案され試みられており、われわれは状況に応じてこれらを取捨選択して活用していく必要があると思われる。