

研 究

GPS 衛星電波の電離層通過における位相遅延の研究

川合 栄治*¹、村田 一郎*²、高橋富士信*¹

(平成元年7月21日受理)

THE STUDY ON IONOSPHERIC PHASE DELAY MEASURED
BY THE CARRIER FROM GPS SATELLITE

By

Eiji KAWAI, Ichiro MURATA, and Fujinobu TAKAHASHI

To measure the influences of the ionosphere on satellite communications and precise satellite measurements, it is necessary to observe the total electron content (TEC) through the ionosphere.

This paper describes the results of 2-frequency-carrier-phase delay measurements of radio waves from the Global Positioning System (GPS). The phase difference between the two frequencies (1.6 GHz, 1.2 GHz) is proportional to TEC along the line of sight to the GPS. The measurements were performed at the Earthquake Research Institute of Tokyo University. The precision of this method is shown to be about one thousand times higher than that of the conventional group delay methods.

This method makes it possible to measure even small ionospheric disturbances.

1. はじめに

宇宙と地上間との衛星通信や衛星を利用した精密計測への電離層の影響を測定するためには電離層中の全電子数を地球上の各点で観測する必要がある。本論文では地震研究所で得られた全世界測位システム (GPS) 衛星からの電波 (L バンド 1.6 GHz, および 1.2 GHz) を使用し、搬送波の位相測定法により電離層における 2 周波の伝搬位相遅延の差を高精度に求めることを試みたので報告する。その結果、一般的に行なわれている群遅延法に比較して位相遅延測定法は 2~3 桁精度が高いことが分かった。また、この測定法によれば電離層中の超微小変動が測定できる可能性があることが判明した。本論文の手法だけでは、位相遅延の絶対値は決めることができないがこの手法は全電子数の変動を高精度に測定することを可能にするものである。

1988年10月から1989年3月まで6か月間、科学技術庁の国内留学により東京大学地震研究所に滞在する機会を得た。この留学期間中に地震研究所が実施した GPS に

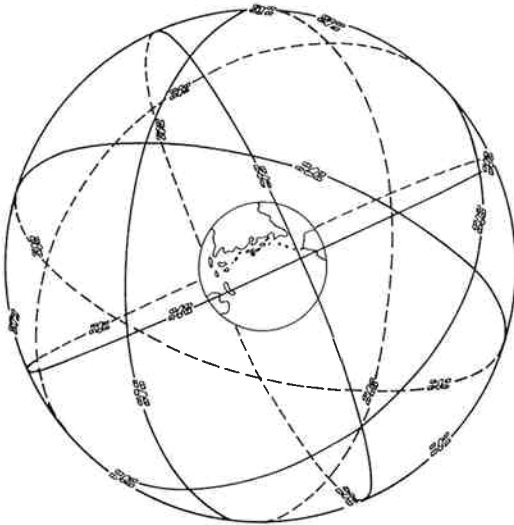
よる地殻変動測定実験と、そのデータ処理に参加してきた。この期間中に、L バンド 2 周波 GPS 受信機による、電離層中の伝搬位相遅延の超高精度測定を行なった。GPS 電波による電離層中の群遅延測定は、しばしば報告⁽¹⁾⁽²⁾されているが、本格的な位相遅延測定は例が少ない。

地震研究所では、GPS による相対測位方式を使用して、南関東地域の地殻変動の測定を実施している。各局から同時に観測できるコモンビューの GPS 衛星を観測して、各局間の距離を求める相対測位は従来の地上測量と比較して精度が高いうえに、測定が容易であるという特徴をもっている。6 軌道上 18 衛星からなる GPS 衛星の軌道配置 (第 1 図参照⁽³⁾) が完成したときには、地殻変動の時間変化を容易に測定できるようになると予想され、地震予知などに役立つものとして大きな期待がかけられている。

GPS からの送信電波は、電離層を通過する際に電離したプラズマによる伝搬遅延を受ける。電離層中の全電子数は太陽黒点と強い相関を持っていることが知られている。1987年頃までは、太陽の活動が比較的低下している時期であったため、L バンド (1.6 GHz) の伝搬遅延

*1 標準測定部 周波数・時刻比較研究室

*2 東京大学地震研究所



第1図 GPS衛星の軌道

は 20 ns 程度と小さかった。一方、1988年後半以降、太陽活動度は極大期に向かっており、電離層による影響も、最大 100 ns 近くまで大きくなってきている。しかも、今太陽活動サイクルは、史上最大の活動を示す兆候が観測されて⁽⁴⁾おり、GPS 測地法など電波を利用した精密測位等に、大きな影響を与えることが予想される。

GPS を利用した相対測位では、従来の地上測量の精度の壁であった、 10^{-6} を超える基線測定精度が、可能となってきている。このような高精度測位では、測位誤差の原因となる電離層の補正を正確に行なうことが必要である。GPS では、L1 と L2 の 2 周波を受信することで補正はできる。また、この伝搬遅延量を知ることにより電離層全電子数の測定が可能となる。GPS 衛星からの送信コード信号を利用して電離層群遅延を求めることが行われている⁽¹⁾⁽²⁾が、この報告では、GPS 衛星からの 2 周波の搬送波の位相を使用して電離層の伝搬位相遅延をより高精度に求めることを試みた。

2. 電離層の影響と測定原理

電離層を通過に伴う電波の位相遅延時間は以下の式⁽⁵⁾によって表すことができる。

$$\Delta t_p = -1.3436 \times 10^{-7} \times \frac{Ne}{f^2} \quad \dots\dots(1)$$

Δt_p : 位相遅延時間 s

Ne : 全電子数 m^{-2}

f : 受信周波数 Hz

一方、電離層通過に伴う群遅延 Δt_g は次の(1)'式で与えられる⁽⁵⁾。電離層プラズマ中における群遅延と位相遅延は符号が反対で絶対値は等しいという特徴を持つ。

$$\Delta t_g = 1.3436 \times 10^{-7} \times \frac{Ne}{f^2} \quad \dots\dots(1)'$$

全電子数 Ne は、観測局の位置 (緯度、経度、地磁気緯度等)、地方時、季節、太陽活動度等に依存しており、複雑に変化する。中緯度では、太陽活動極小期夜間で $2 \times 10^{16} m^{-2}$ 程度、太陽活動極大期の昼間で $100 \times 10^{16} m^{-2}$ と、大きく変化⁽⁶⁾する。これに対応して、L1 波 (1.57542 GHz) の位相遅延は、極小期の夜間の天頂方向では 0.5 ns、極大期の昼間、仰角 30 度では、100 ns 程度になる。従って、より高精度な GPS 利用においては、電離層遅延を正確に補正することが必須となっている。

L1 波 (1.57542 GHz) での位相遅延 Δt_1 と L2 波 (1.2276 GHz) での位相遅延 Δt_2 を測定することができれば、(1)式を使用して

$$\Delta t_2 - \Delta t_1 = 3.50 \times 10^{-26} Ne(s) \quad \dots\dots(2)$$

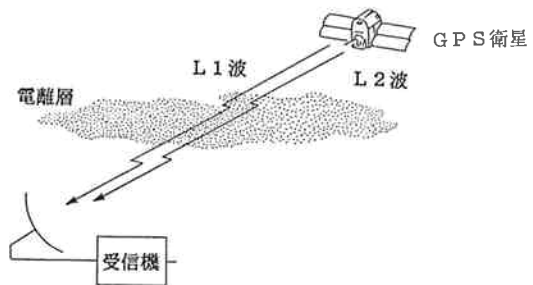
となるので全電子数 Ne は

$$Ne = 2.86 \times 10^{25} (\Delta t_2 - \Delta t_1) \quad \dots\dots(3)$$

のように求めることができる。しかも、L1 波と L2 波の差を取ることで、受信機の時計に起因する誤差を打ち消すことができる。

3. 測定システム

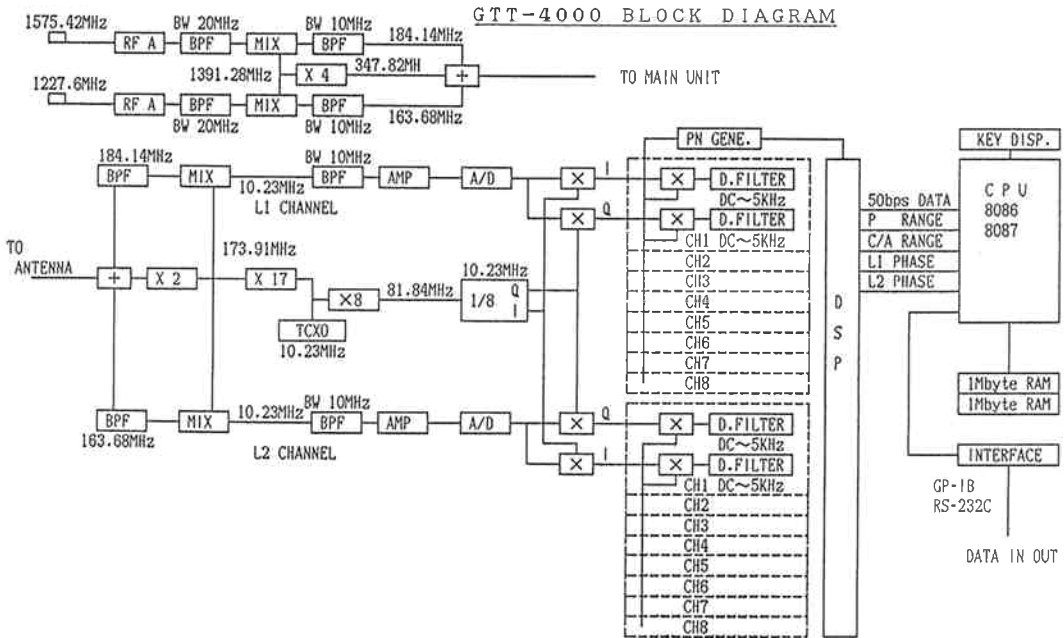
第2図のように GPS 衛星から発射された L1 波と L2 波の電波はほぼ同一の経路を通過して電離層の全電子数に応じた位相遅延を受ける。これを地震研究所 (東京都文京区) で 2 周波 GPS 受信機を用いて測定した。使用したソニー社製の受信機 GTT-4000 からは第1表のようなデータが 2~60 秒毎に周期的に出力される。本論文の測定では 30 秒毎のデータを使用した。第3図に受信



第2図 GPS衛星の電波と電離層

第1表 GPS 2周波受信機から得られるデータ

L1 波 (1.57542 GHz)	L2 波 (1.2276 GHz)
C/A code, 搬送波位相 ϕ , ϕ の変化率	P code, 搬送波位相 ϕ , ϕ の変化率



第3図 SONY 2周波 GPS 受信機のブロックダイアグラム

第2表 SONY 2周波 GPS 受信機 GTT-4000

Receiver type	L1 C/A : 4 channels L2 P : 4 channels
Operation mode	Interferometry (post process) Static positioning (real time)
Accuracy	Carrier phase ; L1 : 0.05 rad rms L2 : 0.05 rad rms PN code phase ; P : 5 ns rms C/A : 20 ns rms
Computer	CPU : 8086, 8087, Z 80 × 2
External memory	Two 256 Kbyte memory card
Interface	IEEE-488 (GPIB), RS-232 C
Display	LCD (40 characters × 4 lines)
Antenna	Flat disc type, omnidirectional Maximum gain : 5 dBi Gain for 15 degrees elevation : -3 dBi
Downconverter	Input : 1575.42 ± 10 and 1227.60 ± 10 MHz IF : 184.14 and 163.68 MHz Conversion gain : 50 dB minimum Noise figure : better than 2.5 dB Image rejection : 36 dB minimum

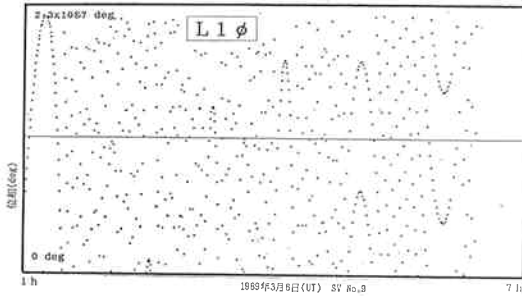
機のブロックダイアグラムを、第2表に受信機の規格を示す。この受信機は無指向性アンテナを用いており、

C/A コードあるいは、P コードによる1点測位の機能や2台以上の受信機と組み合わせて相対測位機能の両方が可能である。本論文では出力されるデータの内のL1波の搬送波位相 ϕ とL2波の搬送波位相 ϕ を使用して電離層位相遅延を求めたものである。

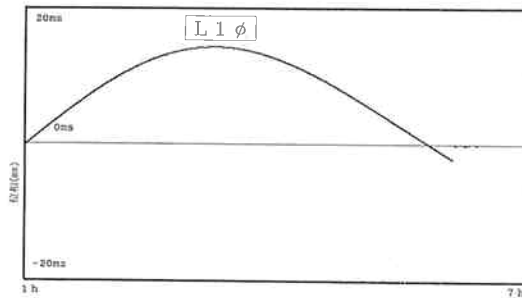
4. 測定結果

第4a図にL1波の位相の測定データを示す。受信機の測定データの表示レンジは、約 2.3×10^7 (deg) である。受信機内ハードウェアにより、この表示レンジまで位相のアンビギュティは除去されている。測定間隔が30秒の場合、位相の変化の激しいところでは、各サンプリング間隔毎にこの表示レンジの2、3倍も変化している。ドットのばらつきは受信機の測定レンジが限られており、レンジのオーバーフローが起きるためである。この位相のレンジオーバーフローを回復して、データの連続性を復元する手法は、次のとおりである。出力データ中の位相の変化率により、位相の不確定性を除去し、位相(角度)を周波数で割って時間単位に変換する。それが第4b図である。同図はL1波であるが、同様なことをL2波でも行ない、その差を取ったものが第5a図である。

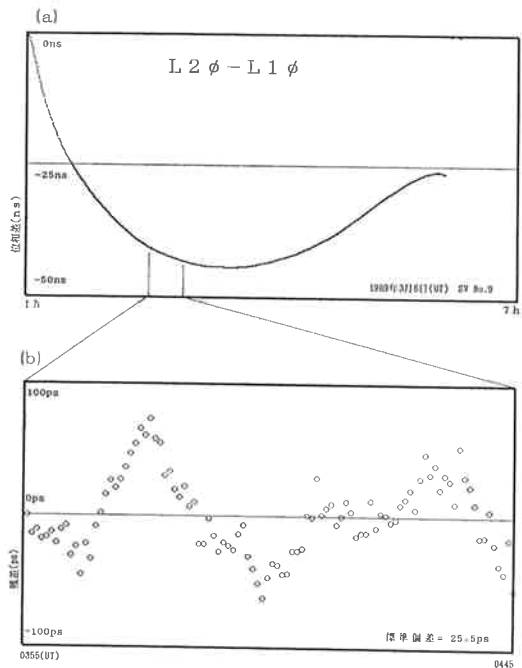
第5a図に、1989年3月6日1h~7h UT (10h~16h JST) に取得したSV No. 9の衛星のL2波の搬送波の位相とL1波の搬送波の位相の差 ($L2\phi - L1\phi$) を、時間で表わしたものの変化を示す。この時、衛星は第6図



第4 a 図 GPS 衛星からの電波の位相測定データ



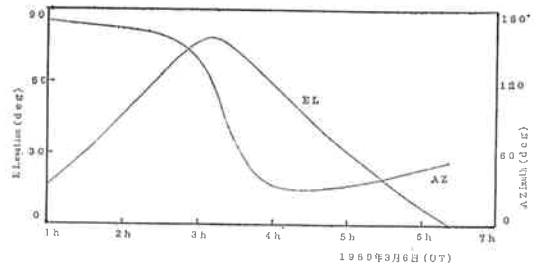
第4 b 図 位相の不確定性を除去して連続にしたもの



第5 a 図 GPS 衛星の L1 波と L2 波の位相差

b 図 50分間 100 個の位相差データを 2 次式で最小二乗近似したときの残差

に示すような軌道を飛翔していた。仰角上昇に伴う電離層効果の減少により第 5a 図の遅延差 (L2 φ-L1 φ) が減少している様子が現われている。第 5b 図に、3 時 55 分



第6 図 衛星の軌跡

からの 50 分間 100 個の位相差データを二次式で最小二乗近似したときの残差を示す。このデータの標準偏差は 25.5 ps であった。以下の 5. 検討で示すように、この測定精度は、従来の測定精度を、大幅に改善するものとなっている。同図に見られる全電子数のゆらぎは、これまで測定することが困難であった電離層の超微小変動を与えていると推定される。

5. 検 討

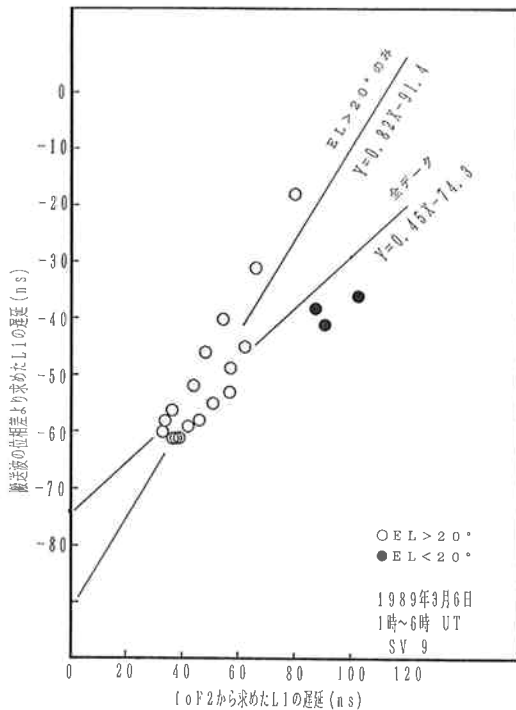
無指向性のアンテナで C/A コードを受信する方法による電離層群遅延測定精度は、6~20 ns⁽¹⁾程度であり、指向性を持つアンテナで、P コードを用いた方法による、やはり群遅延測定精度は 1 ns⁽²⁾である。これらと比較して、今回の位相遅延測定法は 2~3 桁精度が高い。

一方、第 5a 図で、縦軸の 0 点は、受信開始時点における (L2 φ-L1 φ) をゼロとしたものであり、プロットされているのはこの点からの差、つまり、“真の位相差 + バイアス”である。このバイアスは、受信機が信号にロックするタイミングが違いため、各観測毎に違ったものになり、絶対値を決めることができない。つまり、本論文の手法だけでは位相遅延の絶対量を高精度に決めることはできなかった。

そこで、以下に述べる、Klobuchar et al. の AFCRL モデル⁽⁷⁾から推定した遅延時間と比較することにより、今回の測定値の妥当性を検討した (第 7 図)。前述の 0 点を仮のゼロ点とし、(3)式を使って、全電子数を求め、これをもう一度(1)式に代入し、L1 波における遅延に換算した。また、このときの観測と同時刻の通信総合研究所 (東京都小金井市) における foF2 (電離層 F2 層の臨界周波数) の観測から、(4)式に示すような Klobuchar et al. の AFCRL モデルの換算式を使用して、全電子数を求めた。この換算式は次のとおりである。

$$TEC = 1.24 \times 10^{18} (foF2)^2$$

$$\left\{ 261 + 26 \sin \left\{ \frac{(h-9)\pi}{12} \right\} \right\}$$



第7図 2つの方法により求めた伝搬遅延時間の相関

$$+ K \sin\left\{\frac{(D-60)\pi}{183}\right\} \dots\dots(4)$$

ここで h は地方時, D は年通日である. また, K として,

- $K = 73(06 \sim 19h \text{ LT})$
- $K = 36(05h \text{ 及び } 20h \text{ LT})$
- $K = 0(21h \sim 04h \text{ LT}).$

これを(1)式に代入し, $L1$ 波における遅延時間に換算した. 本論文の手法による搬送波の位相差を使用して計算された $L1$ 波の遅延を縦軸に, $foF2$ の観測から換算した全電子数を使用して $L1$ 波の遅延を計算し, 衛星方向の遅延にしたものを横軸にプロットしたものが第7図である. つまり, 第7図は両者の相関関係を示す. $foF2$ の変化の少ない時間帯のデータを選択したので, 遅延時間の増減はおもに, 衛星仰角によるものと考えられる. $foF2$ の測定が15分毎なので, GPS による結果も15分間隔で同図にプロットした. プロットしたその全データを直線近似すると, $Y = 0.45X - 74$ になり, 傾きが1にならない. しかし, GPS の観測データを仰角20度以上のデータを使用して近似すると, その式は $Y = 0.82X - 91$ とかなり1に近づく. これらの結果は AFC RL の式がこのケースでは十分に良好なモデルとなっていないことや方位角依存性を持つことを意味している.

6. ま と め

本論文の成果により, GPS の搬送波の位相差から求める位相遅延測定法は, GPS の P コードや C/A コード信号による群遅延測定法に比較して, 2~3桁精度が高いことが分かった. この測定法によれば, これまで測定が困難であった, 電離層全電子数の超微小変動の直接測定の可能性が与えられ, 全電子数の微小変動をより高精度に測定することを可能にする. 宇宙と地上間との衛星通信が世界中で行なわれ, また衛星を利用した精密計測が広範に行なわれる状況の中で, 今期太陽活動度の急速な増大に伴う電離層の影響が, 様々な障害, 誤差要因として注目されてきている. 本研究はこうした影響を高精度に測定することを可能とするものである.

謝 辞

本研究は科学技術庁の国内留学制度の機会に行なわれた. 国内留学においては, 東京大学地震研究所の測地研究室のスタッフの方々や, その他の関連の方々に, 大変お世話になった. また, 国内留学の機会を与えて頂いた科学技術庁, 通信総合研究所の関係者の方々に深く感謝します. また, GPS 衛星の軌道を求めるために, 東大大学院の綿田辰吾氏の作成したソフトウェアを使用させて頂いた. また, 電離層の $foF2$ データは情報管理部の皆越情報管理課長より提供して頂いた. ここに記して謝意を表すものである.

参 考 文 献

- (1) 山崎, 松田, 福島, 久保, 小熊, “2周波 GPS 受信機を用いた電離層遅延量の測定”, GPS ワークショップ1989.
- (2) 今江, 三木, 川合, 森川, 浦塚, 山崎, 高橋, “GPS 2周波相関方式電離層遅延時間測定装置の開発と受信結果”, GPS ワークショップ1989.
- (3) 日本測地学会, GPS, 社団法人日本測量協会, 1986
- (4) 通信総合研究所電波擾乱予報テレホンサービス TEL 0423-21-4949 等.
- (5) David Wells et al., Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates, 1986.
- (6) Minakoshi H., “Total Electron Content in the Asian Mid-latitude Region and Its Effect in Earth-Space Propagation”, Proc. of ISAP '85, 1985.
- (7) 新野賢爾, “電離層全電子数”, 電波季, 太陽地球環境予報特集号, 25, 134, p371, 1979, 7.