

平成15年度

卒業論文

太陽フレアによる
GPS測位への影響

課程名	流通情報工学課程
学籍番号	99733
氏名	塚 寿彦
指導教官	安田 明生 教授

目次

第1章 序論

- 1-1 はじめに 1
- 1-2 GPSの概要 2
- 1-3 本研究の目的 3

第2章 測位原理

- 2-1 単独測位 4
 - 2-1-1 測位原理 4
 - 2-1-2 測位演算 5
 - 2-1-3 測位精度 8

第3章 電離層と太陽活動及び電離層遅延

- 3-1 電離層と太陽活動 9
- 3-2 太陽面現象と宇宙環境への影響 11
 - 3-2-1 太陽面爆発 11
 - 3-2-2 太陽フレアの規模 12
 - 3-2-3 磁気あらし 12
- 3-3 電離層遅延 13

第4章 電離層遅延量の推定方法

- 4-1 電離層遅延モデル 15
- 4-2 2周波観測による電離層遅延補正 16

第5章 太陽フレアによるGPS測位への影響

- 5-1 はじめに
- 5-2 実験概要
- 5-3 実験結果
 - 5-3-1 電離層遅延量の推定結果
 - 5-3-2 測位結果
- 5-4 考察

第6章 結論

- 6-1 まとめ

6-2 今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・

謝辞

参考文献

第 1 章

序論

1 - 1 はじめに

GPS (Global Positioning System) とは米国国防総省 (DOD : Department Of Defense) により 1970 年代より開発された高精度衛星測位システムである。GPS 衛星の信号を受信することによって、高い精度で位置や時刻が決定でき、船舶や航空機の航法装置、飛翔体の姿勢検知、車両の位置管理や経路案内、土木工事や水上作業の測量、地殻変動の観測、構造物の歪みや揺れ監視、電離層観測、通信や天体観測の時刻同期など把握できないほど様々な用途で広く利用されている。現時点では、カーナビゲーションシステムへの搭載数が多く、特に日本では世界に類がないほどの普及を見せており、その中での GPS 受信機は最も重要な要素の一つである。また、携帯電話に GPS 受信機を搭載することにより GPS がより一般化され、今後急速に受信機数が伸びていくものと思われる。このように受信環境や使用環境の非常に厳しい都会でも利用される GPS は、従来から使用されてきたオメガ、ロラン、デッカなどの電波航法システムに比べ、格段の性能と信頼性を有していることを示している。従来の海上や航空の様々な電波航法システムは GPS に集約されつつある。

一方、半導体をはじめとする技術革新、製造技術及びコンピュータによるデータ処理技術の進歩に支えられ GPS 受信機は非常に小型化、高性能化し、ナビゲーション用途に加えて位置、速度及び時刻センサとして広範な利用拡大が期待される。現在、高精度化にむけた DGPS や RTK 用各種インフラが進められており応用分野が拡大している。

1-2 GPSの概要

GPS 衛星は図1-1に示すように高度約20000 kmの円軌道を飛行する24個（現在は28個が運用中）の人工衛星からなるシステムであり、傾斜角 55° 軌道間隔 60° の6軌道を回る周回衛星である。周回の周期は12時間弱で、一年で同じ配置に戻るよう推移しているようである。実際には軌道が随時変更されており決まっていはいないが、衛星の軌道は2mの範囲で管理されており、2時間間隔で更新される高い精度を持った軌道情報を対応した衛星が、30秒周期で放送している。

また、GPSではGPSタイムというものが、この時刻のもとに運用されている。各衛星には、セシウム原子時計とルビジウム時計が搭載されており、この

原子時計は地上の官制システムで管理されており、この補正情報を軌道情報とともに衛星が放送している。GPSタイムは一週間で一回りするようになっている。また世界標準時であるUTCが知られているが、UTCとGPSタイムの違いも管理されている。表1-1にGPS衛星の主要緒元を記す。

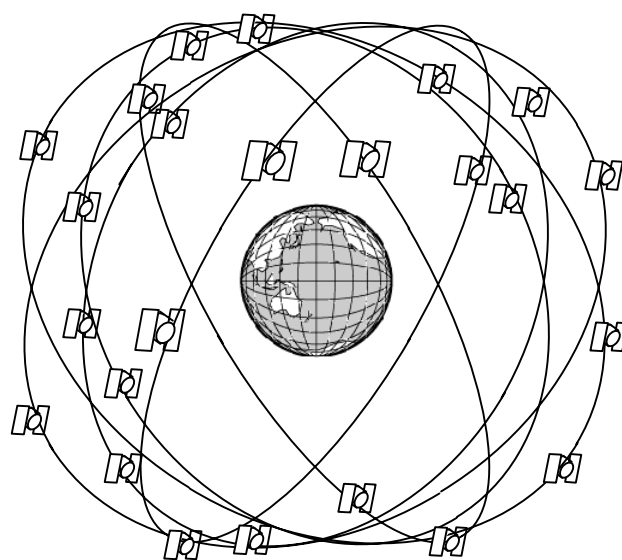


図1.1 衛星軌道面概念図

表 1. 1 GPS 用の人工衛星群の主要

衛星の通称	NAVSTAR/GPS
衛星総数	24 (現在は 28 個が稼動中)
軌道の形	円 (離心率ほぼ 0)
軌道高度	約 20000km
軌道半径	約 26600km
周回周期	約 11 時間 58 分 02 秒
衛星の軌道面	6 面 (1 面に 4 衛星ずつを配置)
軌道傾斜角	55°
測位用電波	
—搬送波周波数	
L1 帯	1,575.42MHz
L2 帯	1,227.6 MHz
—測距信号	
C/A コード	ビット率 : 1.023Mbps L1 で送信 一般用
P コード	ビット率 : 10.23Mbps L1・L2 で送信 非公開

1 - 3 本研究の目的

GPS 測位において、大きな誤差要因の 1 つとして電離層遅延が挙げられる。また電離層の状態は太陽フレアなどの太陽面現象、そしてそれに伴う磁気あらしによって激しく変化する。

本研究の目的は 2003 年 10 月 28 日に起きた大規模な太陽フレアを例にして、太陽フレアの発生が測位結果にどのような影響を及ぼすのかを研究することである。

第2章 測位原理

2-1 単独測位

2-1-1 測位原理

単独測位は、GPS の標準的な利用方法であり、全世界で宇宙、航空、海上、地上（地中と水中は無理であるが）のどこでも、随時、1秒またはそれ以下の時間に現在地を知ることができる技術である。

GPS による測位は、利用者と衛星の距離を測定することによって行う。宇宙空間で位置の分かっている人工衛星三個のそれぞれの位置が分かっているならば測位できる。図2-1のように距離は衛星上の原子時計によって正確なタイミングで発信されている測位用の符号 C/A コードまたは P コードが受信機に到達するまでにどれだけ時間がかかったかを測定して求める。もしも、受信機の時計が衛星の時計と完全に同期していれば、その所要時間（伝搬遅延時間）が分かる。受信機と衛星の時計を完全に同期させることは、ほとんど不可能である。そこでもう一つの衛星が必要となる。受信機の時計によってコードの到達時刻を測定して、形式的に伝搬遅延時間を計算して距離を求める。これによって得られた距離は時間誤差と真の距離との和で、この距離のことを擬似距離という。

測位のために使用するそれぞれの擬似距離にはすべて同一の受信機の時計誤差が含まれている。図2-2で示したように、地峽の中心を原点とした3次元座標（ x 、 y 、 z ）と受信機の時計誤差 Δt の4個の未知

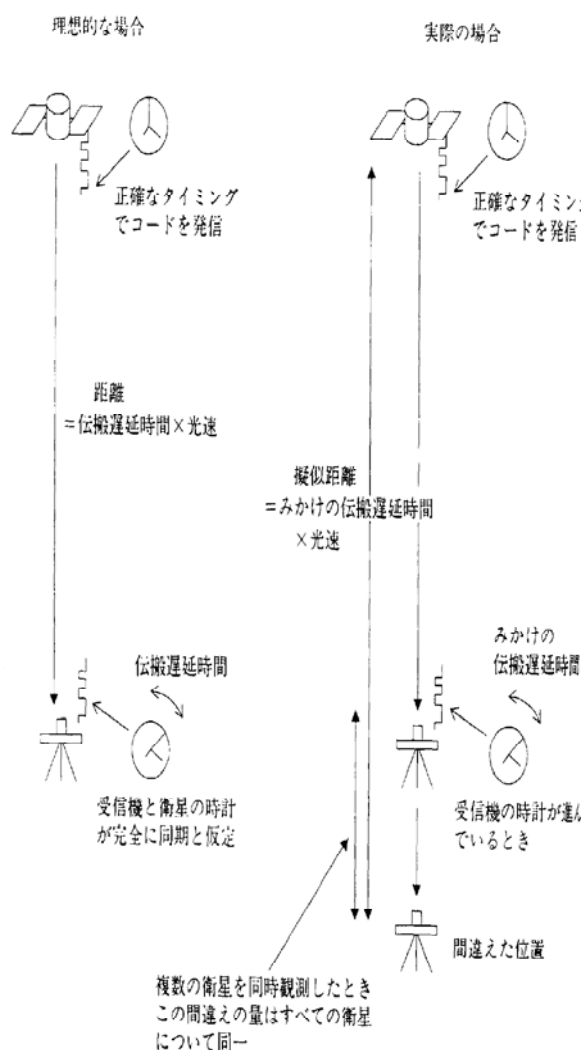


図2.1 コードによる距離測定

数を解くので、4個以上の衛星を同時か、同時と見なせるだけの短時間に測定することが大切である。

また、GPSで求められる高さは、WGS-84測地系であるのに対して、測位演算で出てくるものは3次元直交座標である。

全GPS衛星は原子時計による正確なタイミングで測位用信号を発信
各衛星の位置（と速度および運動方向）は軌道情報により計算可能

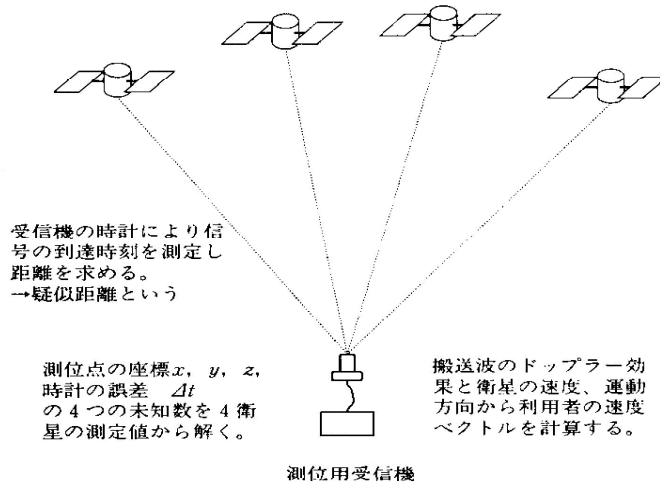


図 2. 2 単独測位

2-1-2 測位演算

単独測位の測位計算は受信機で測定された各衛星との擬似距離をもとにして行う。4個のGPS衛星の位置は、軌道情報から計算される。ここで用いる3次元直交座標系は、地球の中心を原点、地球自転軸に沿って北方向を正方向とするZ軸、グリニッジ子午面と赤道面との交点方向にX軸、これら2軸と右手系をなすようにY軸を選ぶものとする。

この座標系で、アンテナ位置の座標を、 (x_0, y_0, z_0) とする。i番の衛星の位置を (x_i, y_i, z_i) とする。測点とi番目の衛星との距離は、ピタゴラスの定理によって、

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = c \times (\tau_i + \partial\tau) \quad (2.1)$$

ここで τ_i は測定で得られたi番目の衛星の電波伝搬時間であり、 $\partial\tau$ は受信機の時計のずれ（正しい時刻より送れている時を正とする）で c は光の速度であり、この式(2.1)の関係が観測している全ての衛星について成り立つ。また観測点・衛星からの真の距離を r_{0i} とおく。

幾何学的には、 (x_i, y_i, z_i) を中心とした半径が $c \times (\tau_i + \partial\tau)$ の3球面の交点として測点が求められる。

実際上の(2.1)式を解くことは二乗や平方根があり、うまく解くことができない。そこで未知数を近似値と補正量の和であらわし、最小二乗法を使用して解く方法がとられる。

i 番衛星とアンテナ位置との距離 (擬似距離) r_i は、

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (2.2)$$

と表すことが出来る。また、未知数をその近似値と補正量の和で表すと、

$$\begin{aligned} x_n &= x_{n-1} + \Delta x \\ y_n &= y_{n-1} + \Delta y \\ z_n &= z_{n-1} + \Delta z \end{aligned} \quad (2.3)$$

と表すことができ、これを式(2.1)に代入すると、

$$r_i = r_{n,i} + \frac{\partial r_i}{\partial x_i} \times \Delta x + \frac{\partial r_i}{\partial y_i} \times \Delta y + \frac{\partial r_i}{\partial z_i} \times \Delta z + s \quad (2.4)$$

ここで出てくる $\partial r / \partial x$ 、 $\partial r / \partial y$ 、 $\partial r / \partial z$ は、次の式のようになり、それぞれ衛星方向のベクトルの x 、 y 、 z 方向への射影 (方向余弦) となっていることが分かる。

$$\begin{aligned} \partial r / \partial x &= \frac{x - x_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \\ \partial r / \partial y &= \frac{y - y_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \\ \partial r / \partial z &= \frac{z - z_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここで、 $\alpha = \partial r / \partial x$ 、 $\beta = \partial r / \partial y$ 、 $\gamma = \partial r / \partial z$ とおき、 $\Delta r = r_n - r_{n-1}$ とおくと、 i 番目の衛星からの擬似距離の補正量 Δr は

$$\Delta r_i = \alpha \Delta x + \beta \Delta y + \gamma \Delta z + s \quad (2.6)$$

となり、4 衛星分の 4 個の方程式ができる。

$$\begin{pmatrix} \Delta r_1 \\ \Delta r_2 \\ \Delta r_3 \\ \Delta r_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \alpha_4 & \beta_4 & \gamma_4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ s \end{pmatrix} \cdot \dots \cdot \dots \quad (2.7)$$

具体的な計算の求め方は、最初に x_0, y_0, z_0 を式 (2. 2) に代入し近似距離 r_i を求める。実測された 4 衛星に対する擬似距離の差を Δr_i として、式 (2. 7) に代入して $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 、と s を求める。これらの値から初期値である x_0, y_0, z_0 にそれぞれ加え新しい初期値 x_0, y_0, z_0 を作成する。作成した初期値を式 (2-2) に代入し新しい近似距離 r_i を求め、新しい擬似距離との差 Δr_i を用いて新しい $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 、と s を求めるという作業を繰り返すことにより、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 、は 0 に収束し、これらが充分小さな値になった時点で計算を打ち切る。この時の初期値 x_0, y_0, z_0 を求められたアンテナ位置とする。また s は一定値に収束する。

また、実際の計算では、衛星が 4 個ではなく 4 個以上見えているので、(2. 7) の式の両辺に転置行列をかければよい。仮に n 個の衛星が見えているとすると、

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_n & \beta_n & \gamma_n & 1 \end{pmatrix} \quad \delta R = \begin{pmatrix} \Delta r_1 \\ \Delta r_2 \\ \Delta r_3 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta r_n \end{pmatrix} \quad \delta X = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ s \end{pmatrix}$$

$$\delta R = A \cdot \delta X$$

となる。両辺に A の転置行列を掛けると、

$$A^T \cdot \delta R = A^T \cdot A \cdot \delta X \quad (2.8)$$

となる。次に両辺に A と A の転置行列をかけた行列の逆行列をかけると、

$$\delta X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot \delta R \quad (2.9)$$

となり補正量 Δx 、 Δy 、 Δz 、 s を求めることができる。

2-1-3 測位精度

単独測位の精度を決める要因は衛星信号の精度、衛星の配置、電波伝搬路、C/Aコード位相の測定精度、測位演算の精度などである。通常は最初の3項目の影響が大きく、以下の項目はあまり影響しない。衛星信号の精度はUTC2000年5月2日4時まで、米国国防総省によるSAという利用制限措置により抑制されていた。

SAとは「Selective Availability: 選択利用性」の略で、一般に解放されているL1帯、C/Aコードによる測位の精度を人為的に劣化させる操作であり、これにより空が開けた場所であっても時間帯によっては65~100メートル程度の測位精度であった。しかし、2000年5月1日の大統領声明の後にはその精度は6~10メートルまでに改善された。ただし、電波伝搬を遮断するような障害物によって受信できない衛星があると、見かけ上衛星の配置が悪くなって、市街地などではこれ以上の数値となることがあるので注意が必要である。

電波伝搬路による誤差は、大気、電離層、反射信号によるものがある。水平線に近い低仰角衛星の電波は、地球の大気(対流圏、電離層)の中を長い距離通過してくるために、伝搬誤差(遅延量)が大きくなりがちである。大気による遅延量は時間変動が少ないが、特に仰角5度付近から急激に増加し、遅延量は50メートルを越える事もある。受信機でこれを補償するが、それなりの誤差を見込まなくてはならないのでマスク角を調整する必要がある。電離層については後に述べる。

第3章

電離層と太陽活動及び電離層遅延

3-1 電離層と太陽活動

地球の表面は大気で覆われている。その密度は地表付近で約 1 kg/m^3 で、上空へ行くほど希薄になる。500 kmの高度では 10^{-12} 程度に減少する。地上からの高さが100 km弱のところから数100 kmの、非常に希薄な大気層が、太陽からの紫外線やX線により電離した状態になっている領域を電離層 (ionosphere) という。電離層は高さ領域によって自由電子の生成・減少の比率の異なる、D領域 (70~100km付近)、E領域 (100~150km)、F1領域 (150~200km)、F2領域 (200km以上) に分けられる。低い周波数 (波長の長い) の電波ほど下の層で反射される。一般に短波と呼ばれる波長が10 m~100 m位の電波は、F1層またはF2層で反射されるため、遠くまで送信することができる。これよりも高い周波数 (波長の短い) の電波は、電離層では反射されないため、そのまま突き抜け宇宙空間まで出ていく。このため、人工衛星との通信には超短波 (VHF, very high frequency) や極超短波 (UHF, ultra high frequency) を用いる必要がある。GPSに関係してくるのはF2層であり、高度300km付近に電子密度のピークをもつ。またこのほかに非定常的にE領域の狭い高度範囲に高い電子密度層が現れることがあり、スプラディックE層 (sporadic E layer) と呼ばれている。

電離層は、希薄な大気分子が太陽からの紫外線によって電子とイオンに解離している領域であり、質量が小さくて外界の電界によって振り回されやすい電子が、電波の伝搬に影響を与える。電離層内の電子密度は、簡単に言えば太陽から輻射される紫外線の強さと、そのあたり具合に左右される。あたり具合は、地球上の場所と、太陽の高度、つまり季節と地方時が関係する。紫外線は太陽活動によって大幅に変動する。この紫外線は太陽全面から輻射されるのではなく、黒点の周辺から強く発生する。黒点は太陽の表面にしみのように現れるが、きわめて激しい太陽ガスの攪乱場所となっている。ここでは、太陽面爆発

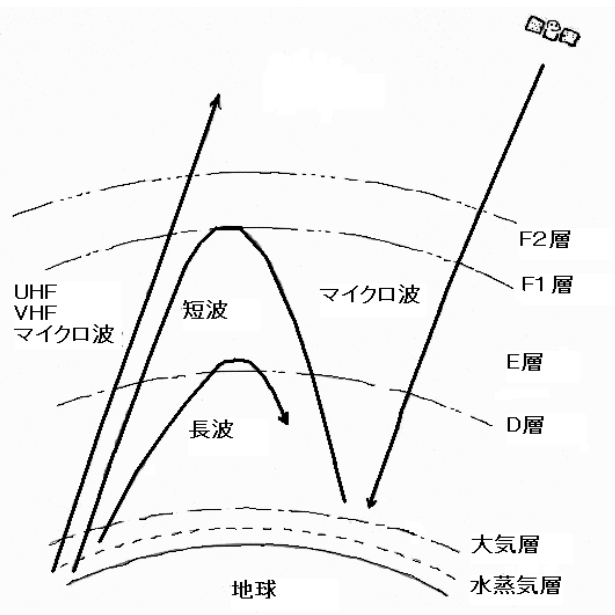


図3.1 電離層での電波の反射

(太陽フレアやコロナガス噴出など)などの異常現象が発生する。そのために太陽の活動度の変化による黒点の増減に密接に関連して、電離層の消長が見られる。

このようなことから、太陽活動の変化による黒点の増減に関連して電離層の変化を考えることができる。太陽のウォルフ黒点数(太陽黒点を統一的に表す指標となる)の変化から、太陽活動が約11年の周期を持っていることを見て取れる。

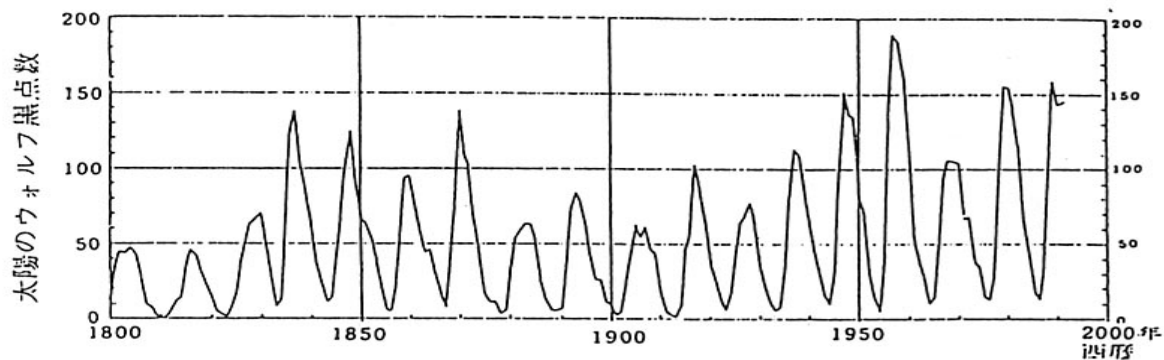


図3. 2 太陽のウォルフ黒点数

3-2 太陽面現象と宇宙環境への影響

地球周辺の宇宙環境は、太陽から常に放出されている電磁波と太陽風によってその基本的な構造が決められている。また、太陽は時折突発的にエネルギーを放出（太陽面爆発）して、宇宙環境に大きな変動を起こす。太陽フレアやコロナガス噴出（CME：coronal mass ejection）などの太陽面爆発やそれに伴って起こる磁気あらしといった現象は、宇宙空間のプラズマ環境、放射線環境さらに電離層や超高層大気を激しく変動させる。ここでは太陽面現象とその影響について簡単に説明する。

3-2-1 太陽面爆発

太陽フレアやCMEといった太陽面現象は、黒点の近傍で起こる太陽大気中の磁場が変形することによって蓄えられた磁気エネルギーが爆発的に解放される現象である。この太陽フレアやCMEの宇宙環境への影響は直接的なものと、磁気あらしといった磁気圏の物理過程を経由する間接的なものとに分けて考えられる。（図3. 3）

太陽フレアにより放出されるX線の強度は静穏時に比べ100倍から1000倍にも達する。このとき、D層では電離が異常に進み、短波電波の吸収が起こる（デリンジャー現象）。また、太陽フレアに伴って太陽大気中で高エネルギー粒子が発生する。フレアの発生時にはCMEが時間的に重なって発生することが多く、そのCMEによって飛び出したプラズマ（イオンと電子で構成される気体）の塊がプラズマ雲となり地球に到達して磁気あらしを引き起こす原因となる。このプラズマ雲による磁気圏への影響は太陽風の速度（通常は400km～500km/sの速度をもつ）に依存しており、大きな太陽フレアが発生した時にはCMEによるプラズマ雲が地球へ及ぶまでに2～3日程度かかると言われている。

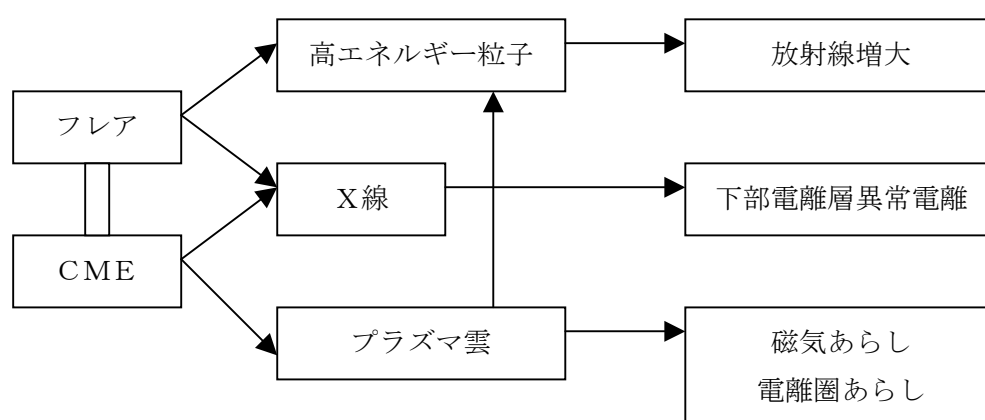


図3. 3 太陽面現象の宇宙環境への影響

3-2-2 太陽フレアの規模

太陽フレアの規模を表すものとして、太陽フレアにより放射された X 線の強度を表す「X 線クラス」と、太陽表面（光球と呼ばれる）の上層の彩層にある水素原子が出す輝線である H α 線の観測から定義されている「光学重要度」がある。以下にその規模の指標について簡単に述べる。

X線クラス：アメリカの気象衛星 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) によって常時モニターされている波長 1 ~ 8 Å の X 線の強度観測によって、強い順（強度が 10 倍増大する毎）に X、M、C の 3 クラスに分類される。静穏時ではその強度は 10^{-7} [W/m²] 程度だが、大きなフレアが発生したときには 10^{-5} (M クラス) から 10^{-4} (X クラス) まで増加する。X クラスのフレアでは、地球全体に電波障害をもたらす。

光学重要度：フレアの重要度は H α 線で観測されるフレアの面積を太陽面の 100 万分の 1 を単位として測った値を基準にして下表のように定義され、最も小さい S クラスのフレアに始まり、小さいほうから大きくなる順に 1 から 4 までの重要度に分類されている。さらに重要度のあとにフレアの明るさの特徴を表し、明るい (B=brilliant)、普通 (N=normal)、暗い (F=faint) の 3 段階に分類されている。

表 3. 1 太陽フレアの規模の指標、X 線クラス、光学重要度

X 線の強度	クラス	面積(太陽面の 100 万分 1)	重要度
10^{-6} (W/m ²)	C	< 100	s
10^{-5} (W/m ²)	M	100~250	1
		250~600	2
10^{-4} (W/m ²)	X	600~1200	3
		> 1200	4

X 線クラス

光学重要度

3-2-3 磁気あらし

太陽フレアや CME の発生によって太陽から放出されたプラズマ雲が、太陽風の中を衝撃波を伴って伝搬し、地球の磁気圏に衝突することで磁気あらしを発生させる。磁気あらしは電離層と超高層大気に大きな変化をもたらす、電離層は磁気圏から伝わった電場の影響でプラズマの分布を大きく変える。また、電離層を流れる電流のジュール加熱によって超高層大気が暖められ、全体が膨張したり、世界的な規模で循環が起きる。超高層大気の膨張は電離層には電子密度を高める効果を及ぼし、電離層の反射に依存している長・短波通信の使用可能周波数を下げる。また超高層大気の膨張は、この領域を飛ぶ人工衛星の大気による摩擦を強め、軌道を低下させるので、人工衛星の寿命には磁気あらしが大きな影響を及ぼしている。このような磁気あらしの効果をまとめて電離圏あらし (ionospheric storm) と呼んでいる。太陽フレアによる影響のうち最も顕著なものがこの磁気あらしなどの地球磁気圏擾乱であり、以下に磁気あらし、電離圏あらしが宇宙環境に与える影響を示す。

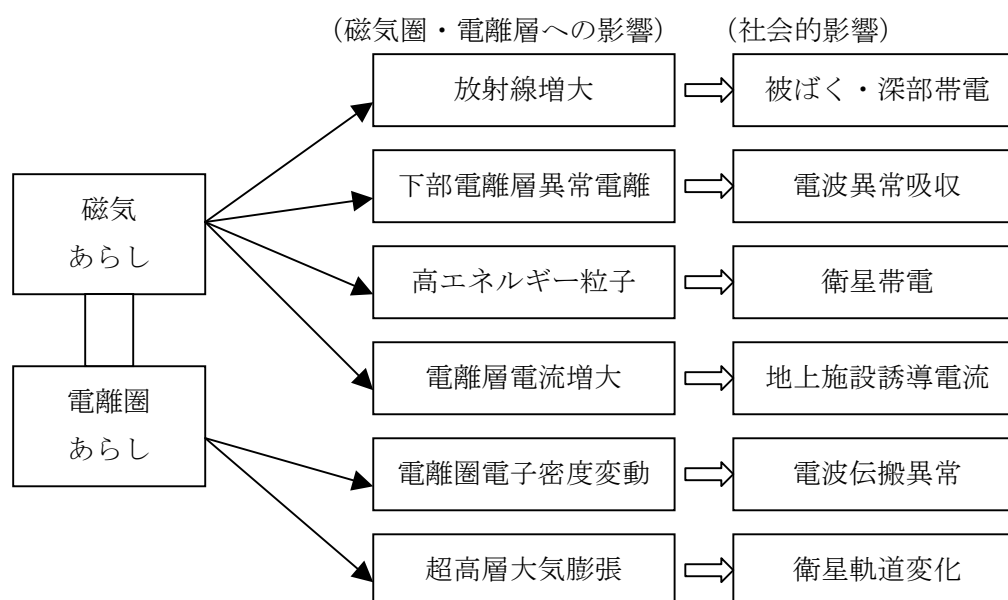


図 3. 5 磁気あらし・電離圏あらしによる宇宙環境への影響

3-3 電離層遅延

GPSで使用されているのはマイクロ波 (micro wave) である。波長を表す式は以下のようになる。

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.1)$$

ただし、

λ : 波長

v : 波の伝わる速度

f : 周波数

とする。光や電波の場合には、 v は約 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ であるので、GPS衛星のL1帯の周波数 $f = \text{約} 1.6 \text{ GHz}$ を代入すると λ は 19 cm となる。

電離媒質中に電磁波が入射すると、その電界により電子が動かされ、見かけの屈折率は

$$n = \sqrt{1 - \frac{Ne^2}{m\epsilon_0\omega^2}} \quad (3.2)$$

となる。ただし

ϵ_0 : 真空中の誘電率

N : 電子密度

e : 電子の電荷

m : 電子の質量

ω : 電磁波の角周波数

とする。電磁波の電離媒質中の群速度は、

$$v_g = nc = \sqrt{1 - \frac{Ne^2}{m\epsilon_0\omega^2}} \times c \quad (3.3)$$

c : 光速

となる。平方根内の第2項は1以下の正の数なので、電離媒質中においては速度が遅くなる。GPS衛星から受信点までの伝搬経路はほとんどの部分で電離層を通過し、電離層内での群速度減少は経路全体で積算され伝搬遅延となる。電離層では屈折率が周波数によって異なるため、GPSの2周波数(L1、L2)の電波が受ける遅延は互いに異なる。

第4章

電離層遅延量推定方法の違いによる 測位結果比較

4-1 クロブッチャーモデル

電離層の影響は、太陽活動の盛んな時期には単独測位の精度でも無視できない大きさである。電波信号の伝搬速度の問題は、コードを使用する単独測位では遅くなる方向、つまり擬似距離を真値よりも長く測ってしまう方向に作用する一方、軍用の2周波型単独測位受信機は、L1帯とL2帯の遅延量の差による補正ができるが、L1帯だけの一般の単独測位ではそれができない。よって、低価格、小型の一般用受信機では以下に述べる電離相補性モデルにより電離層遅延量の推定が行われる。

GPS衛星から送られてくる航法メッセージの中にL1帯だけによる単独測位のための電離層補正のためのパラメータが入っていて、測位計算のときこれによって測定された擬似距離に補正を加えるようになっている。この補正パラメータは次のような考え方に基づいている。

- 太陽活動による電離層の盛衰はパラメータの数値全体で調整
- 観測地の地方時、地磁気緯度によって電離層の地域による違いを調整
- 電離層の日変化を単純な形で模擬して昼夜の変化にあわせる。

模擬的な電離層の日変化は地方時14時に極大を合わせたコサイン曲線の上半分と5nsの一定値を組み合わせたモデルとなっている。このコサイン曲線の振幅Aと周期T/2の値はその磁気緯度の電離層の電子密度の極大に合うような値が航法メッセージで送られてくる。地磁気緯度を Φ_m として、

$$\begin{aligned} A &= \alpha_0 + \alpha_1 \Phi_m + \alpha_2 \Phi_m^2 + \alpha_3 \Phi_m^3 \\ T &= \beta_0 + \beta_1 \Phi_m + \beta_2 \Phi_m^2 + \beta_3 \Phi_m^3 \end{aligned}$$

の α_i と β_i の合計8個の航法メッセージから与えられる。これら各係数は少なくとも6日に1回は更新されることになっている。これらの係数は、当然、電離層の予報値であって、この性質から考えてもそれほど正確なものではない。これにより天頂における電離層遅延 τD は、

$$\begin{aligned} \tau D &= 5 \text{ ns} && (|T - 50400| \geq T/4) && (\text{夜間}) \\ \tau D &= 5 \text{ ns} + A \cdot \cos \{(t - 14 \text{ h}) / T\} && (|T - 50400| < T/4) && (\text{昼間}) \end{aligned}$$

で計算できる。この値は天頂方向での電離層遅延なので、観測地点の遅延量を計算するには

観測地点から見た衛星の仰角に合わせて遅延増加率という係数をモデルと併せて使用する必要がある。

図4-1に、クロブッチャーモデルと遅延増加率の概念図を示す。

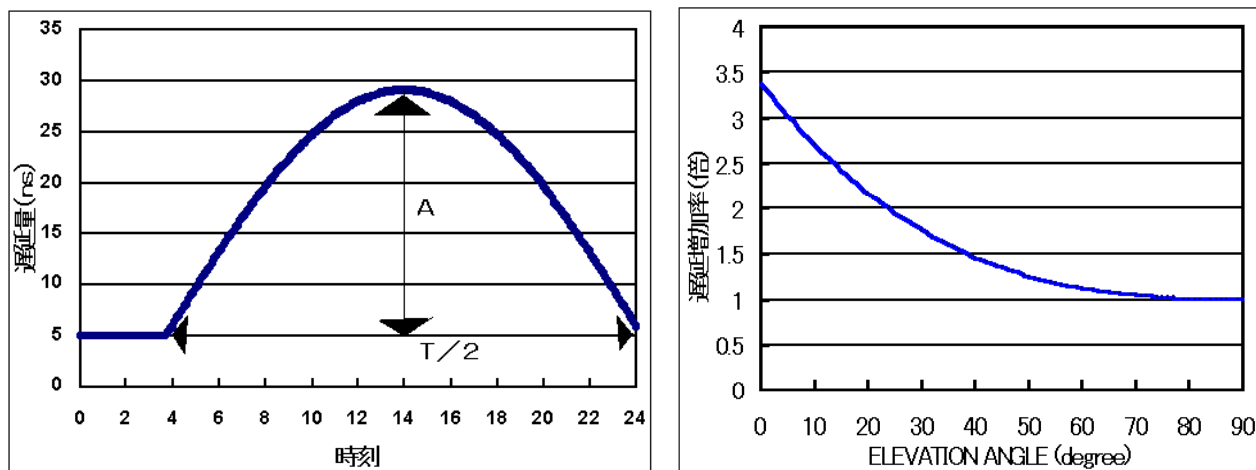


図4. 1 電離層遅延モデル、遅延増加率概念図

4-2 2周波観測による電離層遅延補正

これに対して、2周波型の受信機では実測により補正を行う。GPSでは電離層中でのマイクロ波が分散を示すことを利用してその補正を行えるように、2つの周波数の電波、L1及びL2が送信されている。地上の観測点ではこの2つの電波を受信すれば電離層による伝搬遅延の差が求められる。2周波観測による電離層遅延補正の計算の流れは以下のようになる。

電離層中におけるマイクロ波の群速度の遅延 τ_{GD} (s)は、

$$\tau_{GD} = \frac{X}{f^2} \quad (4.8)$$

と表せる。ここで、

- X : 電離層の臨界周波数および電波の通過していく距離で決まる量
- f : 搬送波の周波数 (Hz)

である。L1波、L2波の両者の遅延の差 $\delta\tau_{GD}$ は、

$$\begin{aligned}\delta\tau_{GD} &= \tau_{GD(L2)} - \tau_{GD(L1)} = X \left(\frac{1}{f_{L2}^2} - \frac{1}{f_{L1}^2} \right) \\ &= \tau_{GD(L1)} \left(\frac{1}{f_{L2}^2} - \frac{1}{f_{L1}^2} \right) \quad (4.9)\end{aligned}$$

となる。ここで、

f_{L1} , f_{L2} : L1とL2の周波数(Hz)

である。 f_{L1} と f_{L2} は既知であるので、 $\delta\tau$ を測ることにより $\tau_{GD(L1)}$ を求めることができる。よって電離層遅延量 $Iono_{\rho}$ は次式のようになる。

$$\begin{aligned}Iono_{\rho} &= \frac{f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} \times (R_{L2} - R_{L1}) \\ &= 1.547277 \times (R_{L2} - R_{L1}) \quad (4.10)\end{aligned}$$

ここで、

R_{L1} , R_{L2} : 電離層遅延を補正する前のL1帯およびL2帯のコードから測定した擬似距離

である。

しかし、(4.10)式による電離層遅延量には値は正確なものに近いがノイズがあるためにスムージングが必要である。そこで、L1帯およびL2帯の搬送波位相による衛星からの距離を用いて(4.10)式を書き換える。

L1帯およびL2帯の搬送波位相のサイクル数を C_{PL1} 、 C_{PL2} とすると、衛星からの距離 Φ_{L1} と Φ_{L2} は次のようになる。

$$\Phi_{L1} = C_{PL1} \times \frac{c}{f_{L1}}$$

$$\Phi_{L2} = C_{PL2} \times \frac{c}{f_{L2}}$$

この2つの式を用いて搬送波位相による電離層遅延は、次式のようになる。

$$Iono_{\rho} = \frac{f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} \times (\Phi_{L1} - \Phi_{L2}) \quad (4.11)$$

(4.11)式は傾向は正確であるがバイアスがある。そのため(4.10)式を用いてバイアスを決定する。その決定方法を以下に述べる。

- ① サイクルスリップの起こっていないインターバルを求める。
- ② (4.10)式から(4.11)式を時刻ごとに引き、その値をストックする。
- ③ ②でストックした値の平均を求め、バイアスを決定する。
- ④ ③で決定したバイアスを(4.11)式に足し、電離層遅延推定量とする。

しかし、実際の測位においてはどうしても搬送波を連続的に追尾できないためにサイクルスリップを起こしてしまう衛星がある。そこで、サイクルスリップが起こるまで②の作業を行い、そのインターバルでのバイアスを決定するという方法を行った。以上に示した推定方法の概念図を図4-2に示す。

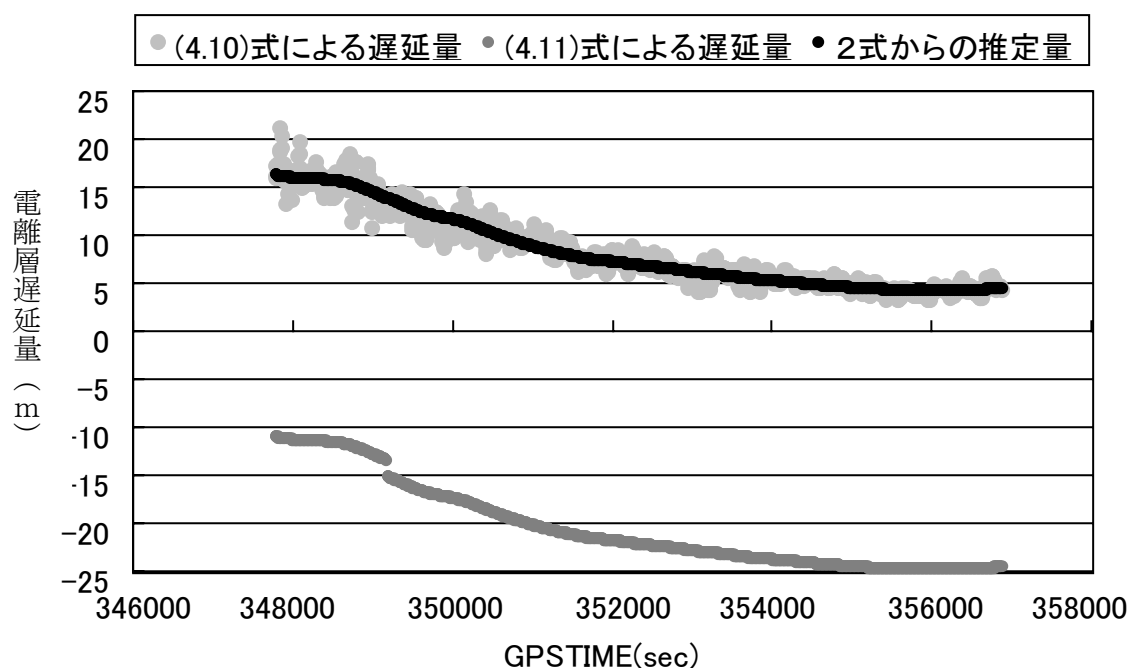


図4-2 2周波の観測データにより求める電離層遅延量

第 5 章

太陽フレアによる GPS 測位への影響

5-1 はじめに

太陽フレアなどの太陽面現象に起因する宇宙環境の擾乱は、放射線による衛星障害、デリゲンジャー現象による船舶航空無線・海外放送の途絶、地磁気あらし・電離圏あらしによる電離層の擾乱などを引き起こすことを3章で述べた。特にGPS測位においては電離層電子密度変動による測位結果への影響があると考えられる。この実験では10月28日16時51分(日本時間)に起きた太陽フレアおよびそれに伴うCMEによる測位結果への影響について調査をした。また今回起きた太陽フレアの規模は、X線クラス：X17.2、重要度：4Bの大規模なフレアであった。このX17.2というX線強度の値は1975年以降で3番目の規模であり、またこのフレアに伴いCMEが発生したことがCRL (Communications Research Laboratory：通信総合研究所)の宇宙環境情報より公開されている。また以下に10月26日から11月3日までのCMEを伴った太陽フレアの発生状況を示す。

表 5. 1 CME を伴う太陽フレアの発生状況

日時 (日本時間)	X線クラス	光学重要度
10月26日14時	X1.2	3B
10月27日2時	X1.2	1N
10月27日16時	M2.7	2F
10月28日16時	X17.2	4B
10月30日5時	X10.0	2B
11月2日7時	M3.2	1N
11月3日10時	X2.7	2B
11月3日8時	X3.9	2F

5-2 実験概要

今回の実験では単独測位方式を用いて、国土地理院が提供している電子基準点の RINEX データを以下に示す概要で取得した。

データの取得場所	緯度	経度
: 千葉県 市川市	35° 40' 31"	141° 35' 53"
: 北海道 稚内市	45° 13' 11"	139° 54' 08"
: 鹿児島県 佐多町	31° 06' 21"	130° 43' 22"
使用した受信機 : TRINBLE 5700		
データ取得日時 : 10月28日9:00 (JST) から		
11月 4日9:00 (JST) までを 30 秒間隔で取得		

またこれらのデータを第4章で述べた「2周波観測による電離層遅延補正」と「クロブッチャーモデル」の2通りの電離層遅延量推定方法を用いて、それぞれの測位結果と電離層遅延量の推定を行った。

5-3 実験結果

5-3-1 電離層遅延推定量の推定結果

以下にそれぞれの方法で推定した衛星毎の電離層遅延量のグラフを示す。

図5. 1~3は市川市、図5. 4~6は稚内市、図5. 7~9は佐多町での各衛星による電離層遅延推定量を示した。また今回比較対象とした1番衛星、15番衛星、20番衛星の千葉県市川市における衛星の観測された時間帯、方位角、仰角を以下に示す。

表5. 2 各衛星の状態

1 番衛星	時間帯	PM0:30~PM5:30	PM9:30~AM2:30
	方位角	325° ~230°	145° ~40°
	仰角	5° ~30°	5° ~40°
15 番衛星	時間帯	AM6:00~AM10:00	PM2:00~PM7:00
	方位角	325° ~235°	150° ~40°
	仰角	5° ~30°	5° ~50°
20 番衛星	時間帯	PM0:00~PM1:30	PM7:00~AM1:00
	方位角	320° ~280°	175° ~50°
	仰角	5° ~10°	5° ~70°

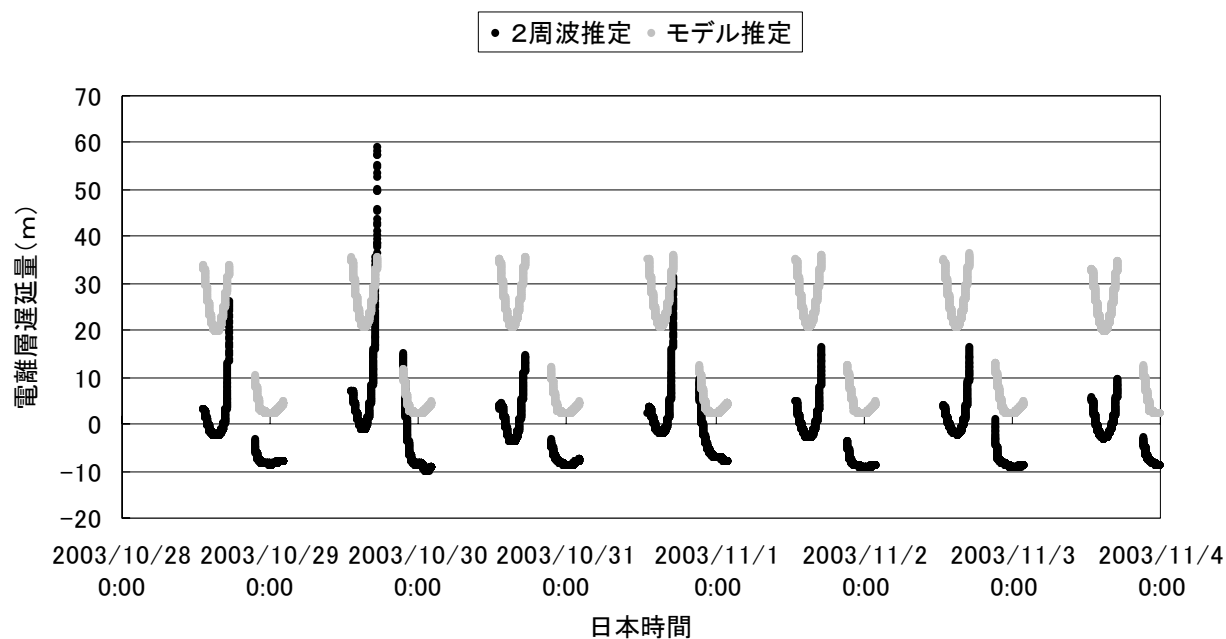


図5. 1 市川市での1番衛星の電離層遅延量

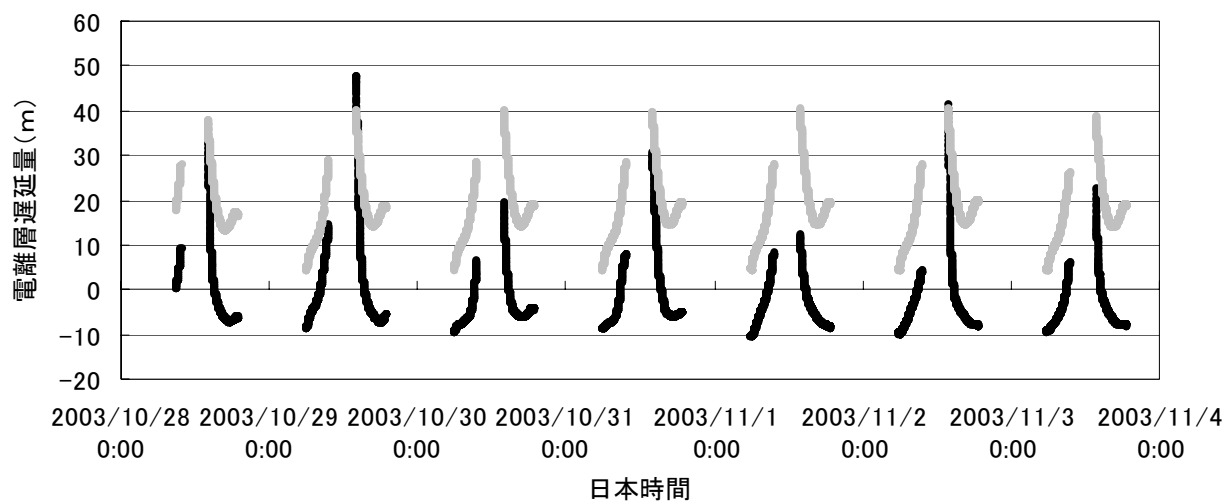


図5. 2 市川市での15番衛星の電離層遅延量

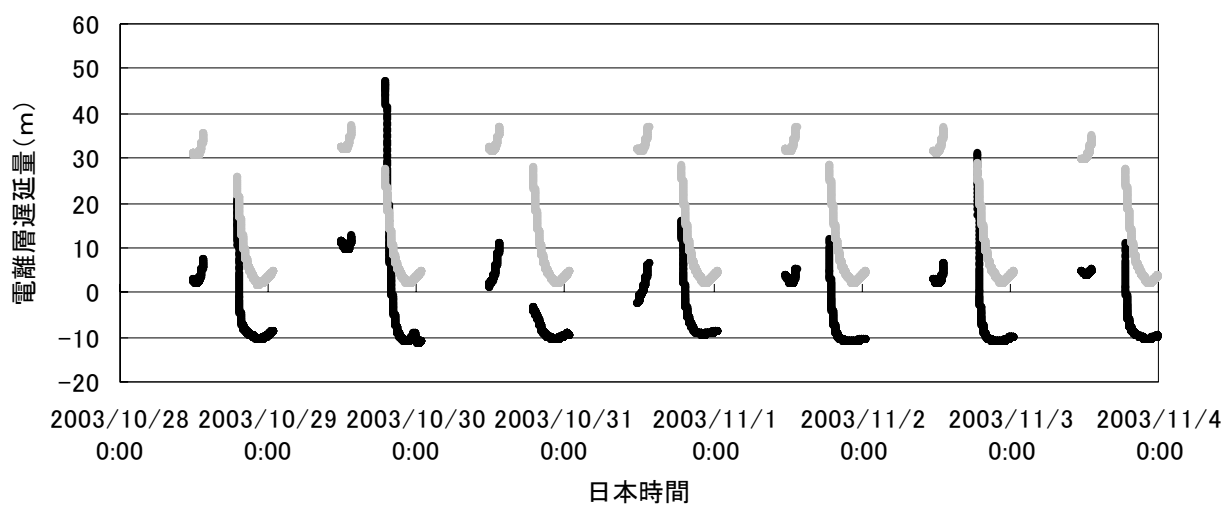


図5. 3 市川市での20番衛星の電離層遅延量

図5. 1に1番衛星の電離層遅延量、図5. 2に15番衛星の電離層遅延量、図5. 3に20番衛星の電離層遅延量を示す。千葉県市川市の電離層遅延量の推定結果では、ほとんどの衛星で29日付近の電離層遅延量が大きく推定される結果となった。またこの傾向は昼間から夕方時間帯に観測される衛星ほど多く見られた。

次に北海道稚内市での電離層遅延推定量を示す。

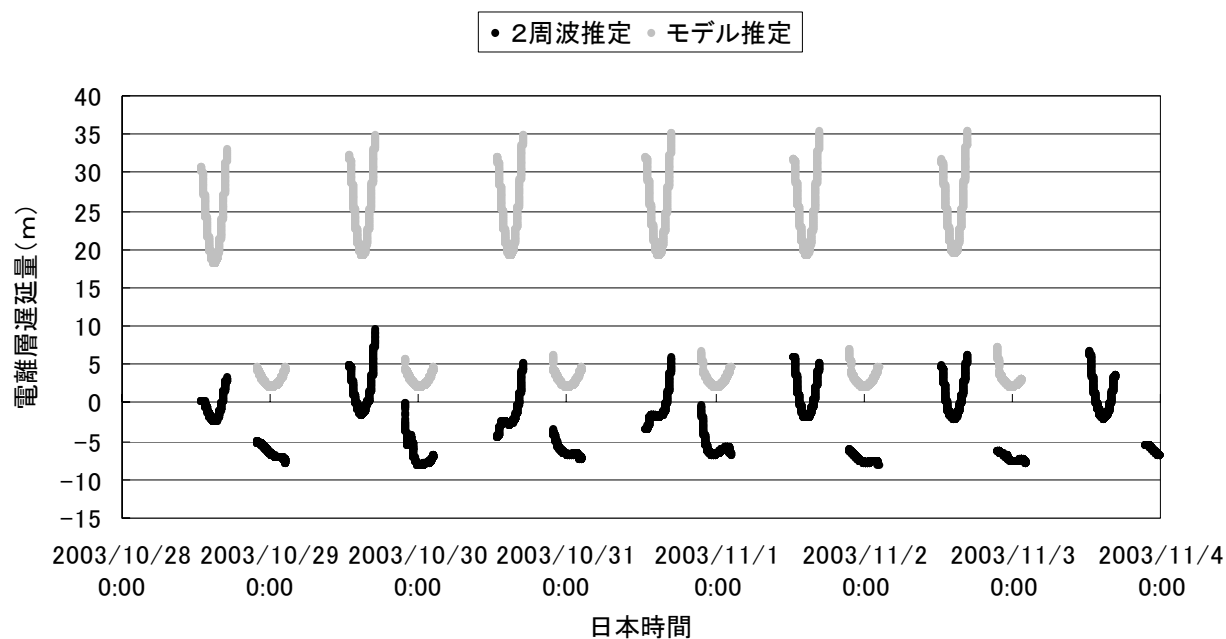


図 5. 4 北海道稚内市での 1 番衛星の電離層遅延量

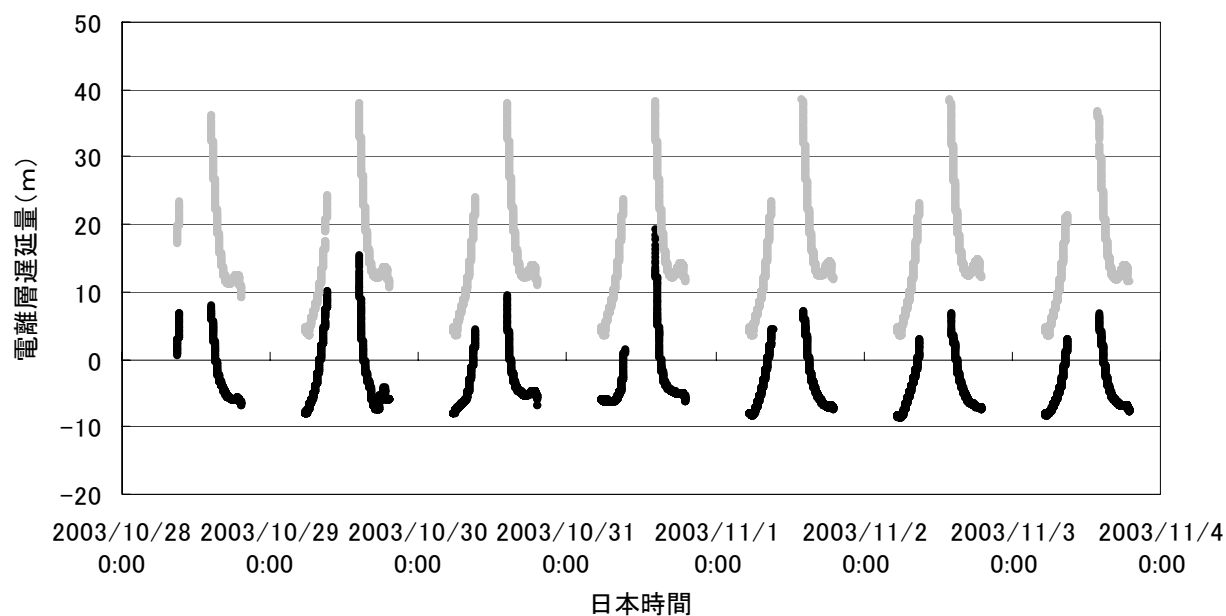


図 5. 5 北海道稚内市での 15 番衛星の電離層遅延量

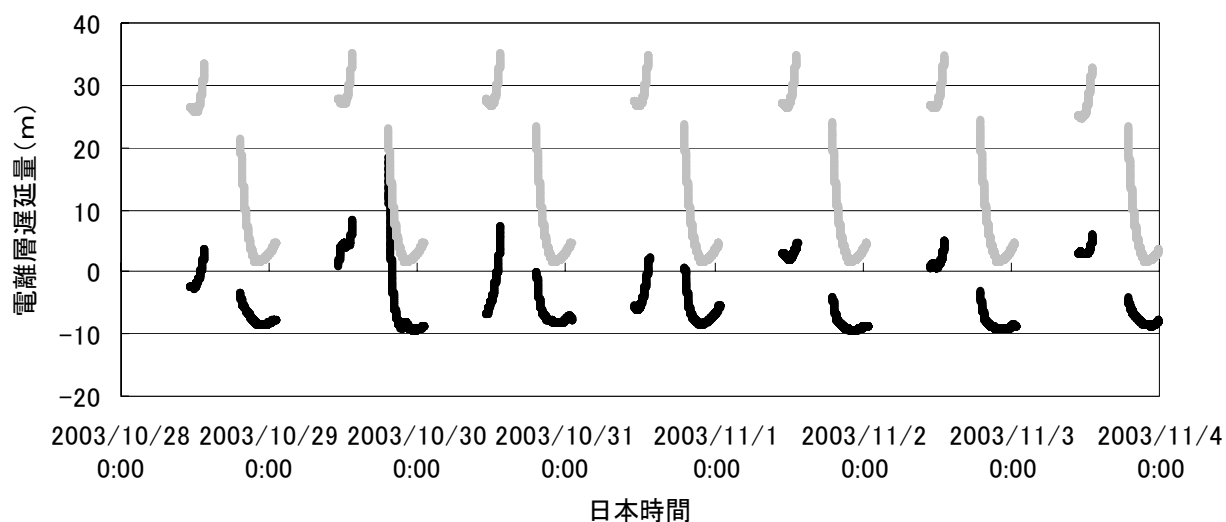


図5. 6 北海道稚内市での20番衛星の電離層遅延量

図5. 4に1番衛星の電離層遅延量、図5. 5に15番衛星の電離層遅延量、図5. 6に20番衛星の電離層遅延量を示す。北海道稚内市での電離層遅延量の推定結果では、市川市の結果に比べて29日付近に電離層遅延量が大きくなる衛星があまり観測されず、1週間を通して同じような推定値となる衛星が多かった。また全体として電離層遅延量が小さく推定されている。

次に鹿児島県佐多町の電離層遅延推定量を示す。

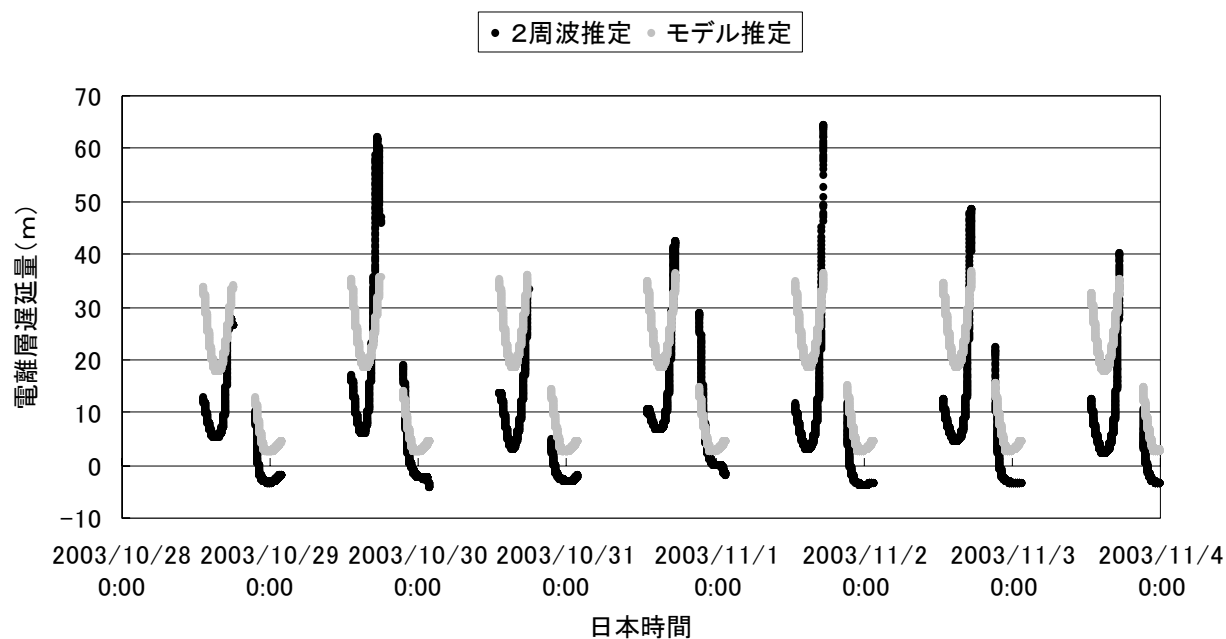


図5. 7 鹿児島県佐多町での1番衛星の電離層遅延量

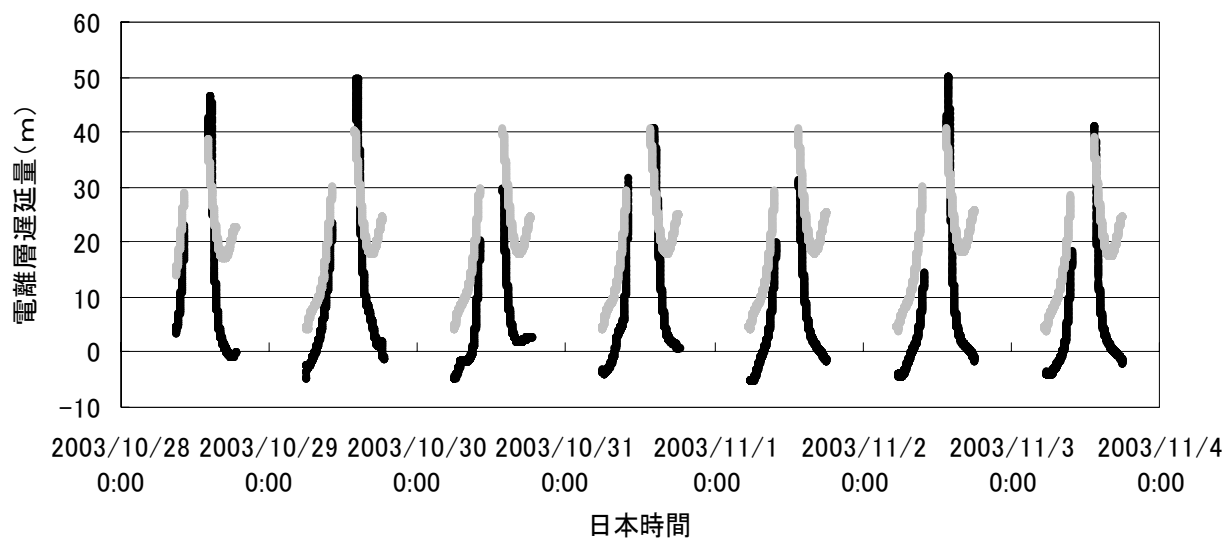


図5. 8 鹿児島県佐多町での15番衛星の電離層遅延量

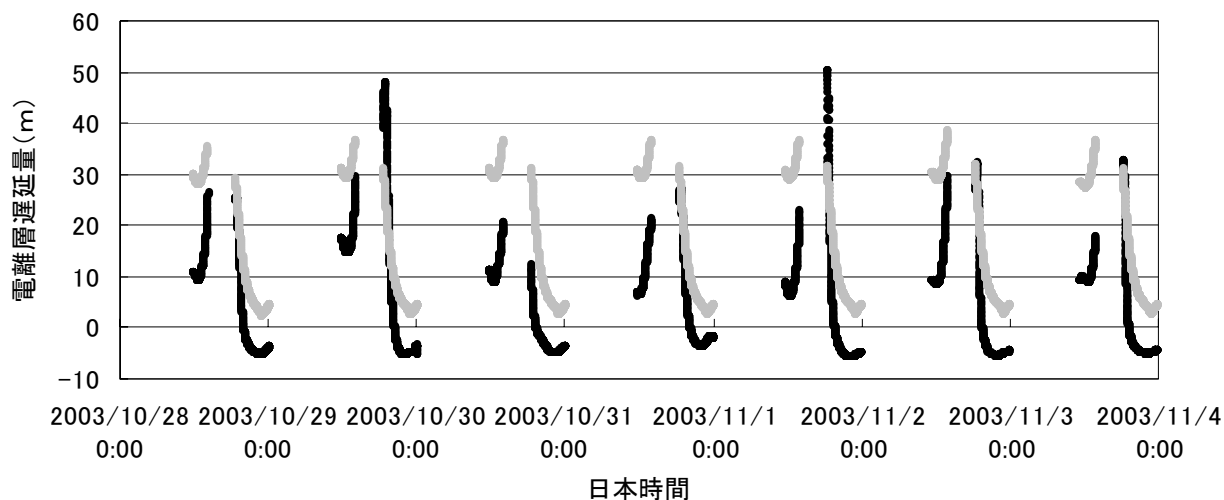


図5. 9 鹿児島県佐多町での20番衛星の電離層遅延量

図5. 1に1番衛星の電離層遅延量、図5. 2に15番衛星の電離層遅延量、図5. 3に20番衛星の電離層遅延量を示す。鹿児島県佐多町の電離層遅延量の推定結果では、全体的に電離層遅延量が大きく推定される衛星が多かった。また29日以外に、11月2日付近でも遅延量が大きく推定される衛星がいくつかあった

5-3-2 測位結果

次に測位結果の比較をする。比較する日付は図 5.1~5.10 の電離層遅延量推定のグラフから特にフレアの影響があったと考えられる 10月29日と、影響が見られなかったといえる 11月1日の測位結果から比較をする。また測位結果に関しては精度の指標として水平方向の 95%誤差範囲の 2 drms、高度方向の 95%誤差範囲も示す。

2周波観測による電離層遅延量補正を行った場合の測位結果(市川市)

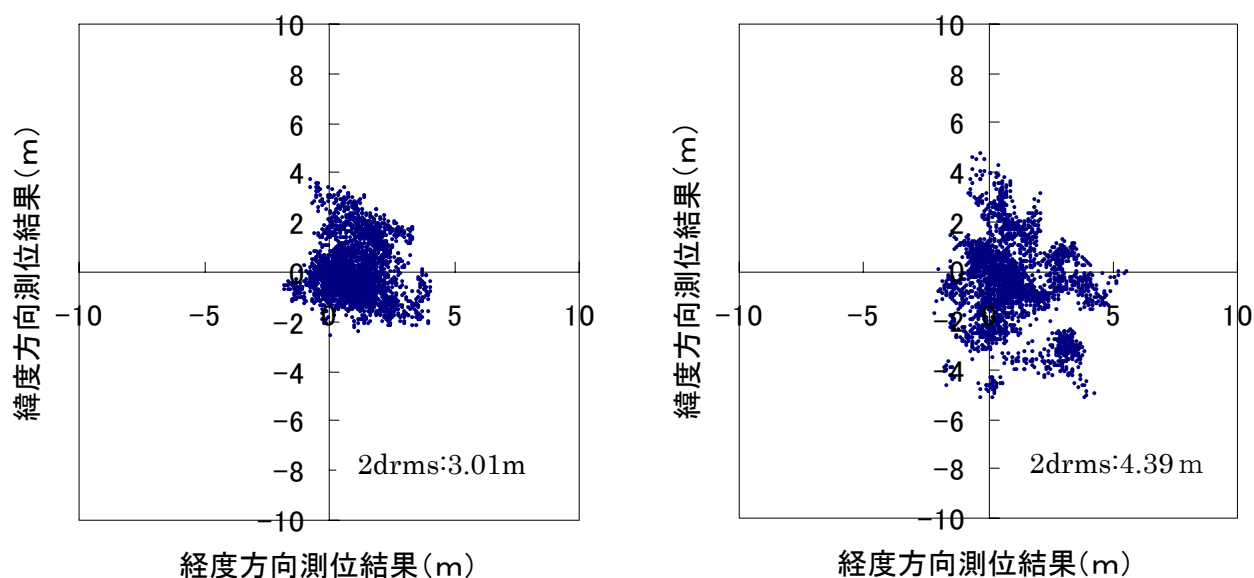


図5.10 10月29日の水平方向測位結果

図5.11 11月1日の水平方向測位結果

• 10月29日 • 11月1日

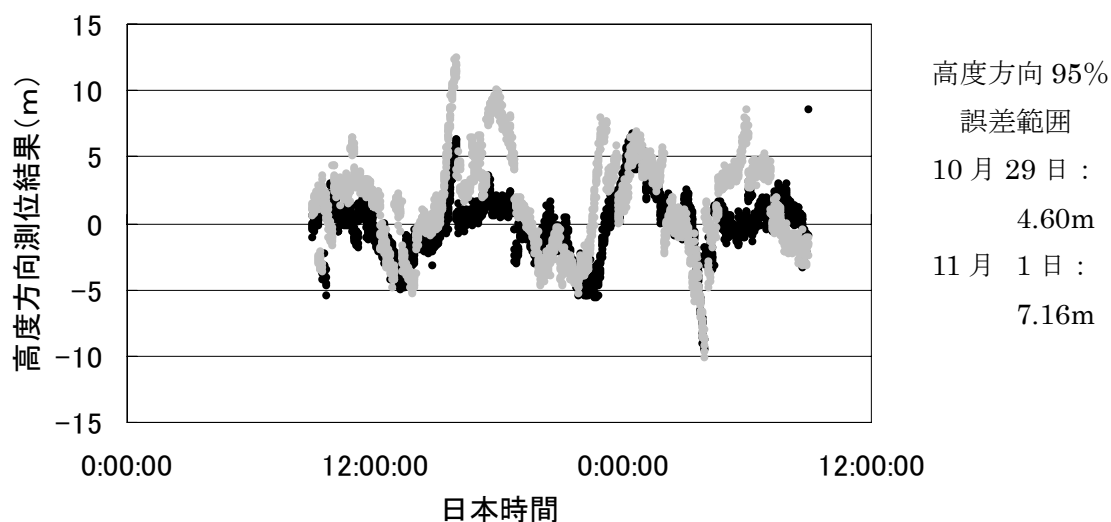


図5.12 10月29日、11月1日の高度方向測位結果

クロブッチャーモデルを用いた場合の測位結果（市川市）

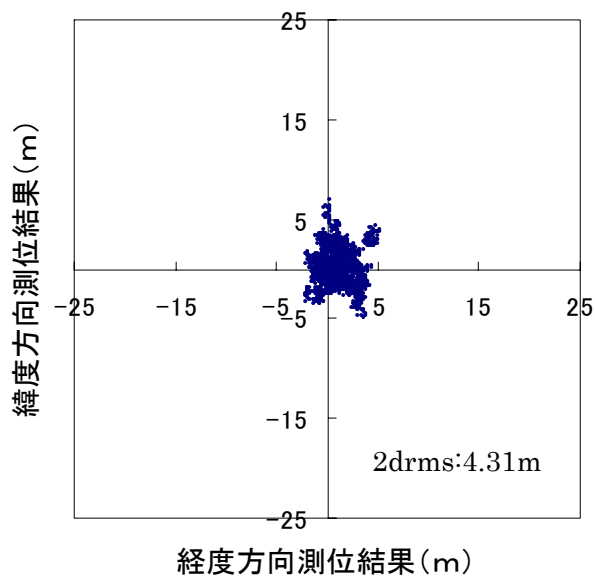
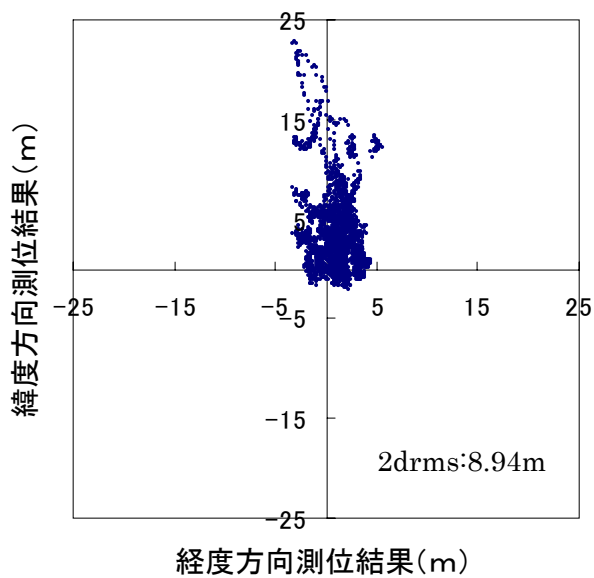


図5.13 10月29日の水平方向測位結果

図5.14 11月1日の水平方向測位結果

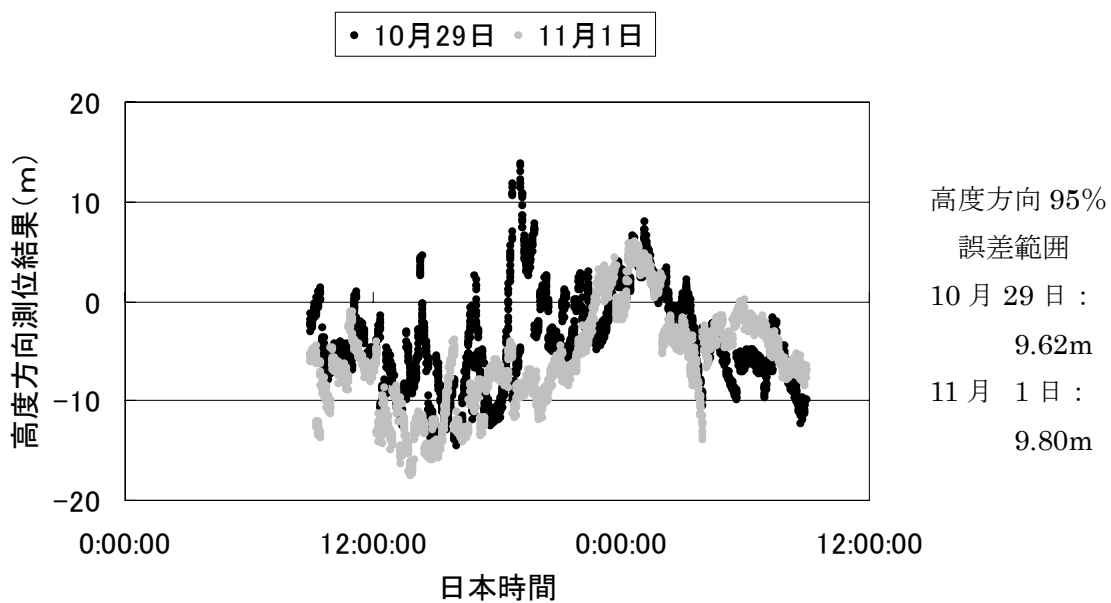


図5.15 10月29日、11月1日の高度方向測位結果

以下に千葉県市川市の1週間分の測位精度を示す。

表5. 3 千葉県市川市の2周波推定での測位精度

	経度方向 r m s (m)	緯度方向 r m s (m)	高度方向 r m s (m)	2 d r m s (m)
1 0 / 2 8	1.577m	1.292m	3.578m	4.077m
1 0 / 2 9	1.001m	1.122m	2.301m	3.008m
1 0 / 3 0	1.211m	1.064m	3.258m	3.224m
1 0 / 3 1	1.346m	1.788m	3.116m	4.475m
1 1 / 1	1.417m	1.675m	3.589m	4.387m
1 1 / 2	1.031m	1.468m	2.811m	3.588m
1 1 / 3	1.762m	2.352m	4.044m	5.877m

表5. 4 千葉県市川市のモデル推定での測位精度

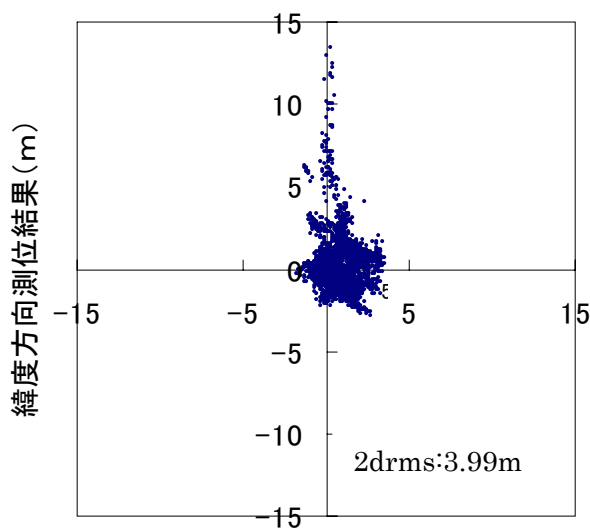
	経度方向 r m s (m)	緯度方向 r m s (m)	高度方向 r m s (m)	2 d r m s (m)
1 0 / 2 8	2.008m	3.789m	4.978m	8.658m
1 0 / 2 9	1.664m	4.147m	4.811m	8.936m
1 0 / 3 0	1.398m	1.791m	5.291m	4.545m
1 0 / 3 1	1.834m	3.721m	6.447m	8.297m
1 1 / 1	1.523m	1.656m	4.902m	4.316m
1 1 / 2	2.226m	2.634m	4.845m	6.087m
1 1 / 3	2.022m	2.306m	6.438m	6.411m

図5. 10～12、及び表5. 3は千葉県市川市での電離層遅延量を2周波観測から推定した場合の測位結果である。これらの結果からは10月29日の測位精度にはあまり差が見られず、太陽フレアによる影響はなかったと言える。

図5. 13～15、及び表5. 4は電離層遅延量の推定をクロブッチャーモデルを用いて行った場合の測位結果である。これらの結果からは29日の測位精度が他の日と比べ低い結果になった。これは太陽フレアによる影響によるものであると考えられる。また2周波による電離層遅延量推定を行った場合の測位結果に比べ、全体的に測位精度は良くない結果となった。

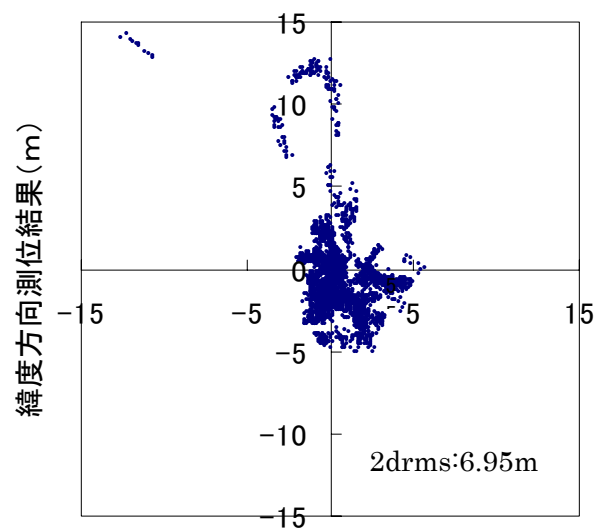
次に北海道稚内市での測位結果を示す。

2周波観測による電離層遅延量補正を行った場合の測位結果(稚内市)



経度方向測位結果 (m)

図5.16 10月29日の水平方向測位結果



経度方向測位結果 (m)

図5.17 11月1日の水平方向測位結果

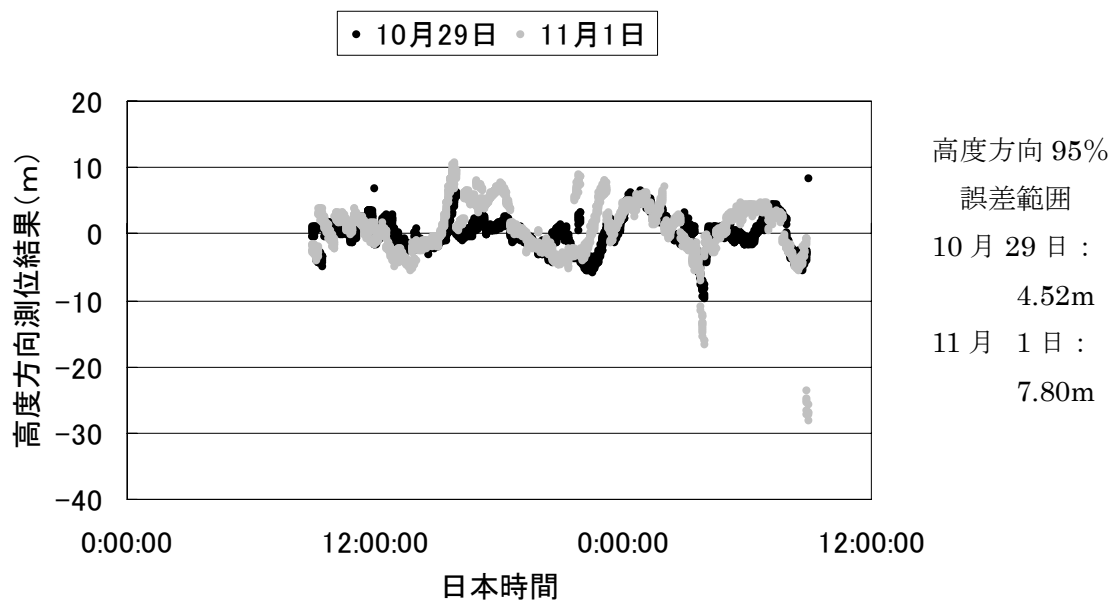


図5.18 10月29日、11月1日の高度方向測位結果

クロブッチャーモデルを用いた場合の測位結果 (稚内市)

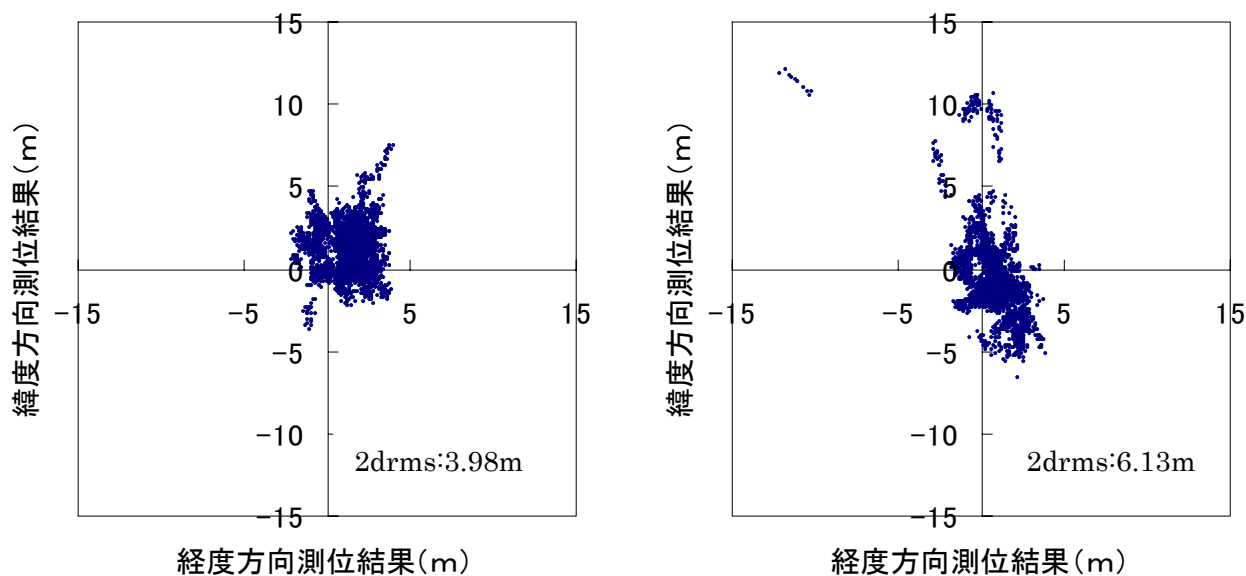


図5. 19 10月29日の水平方向測位結果

図5. 20 11月1日の水平方向測位結果

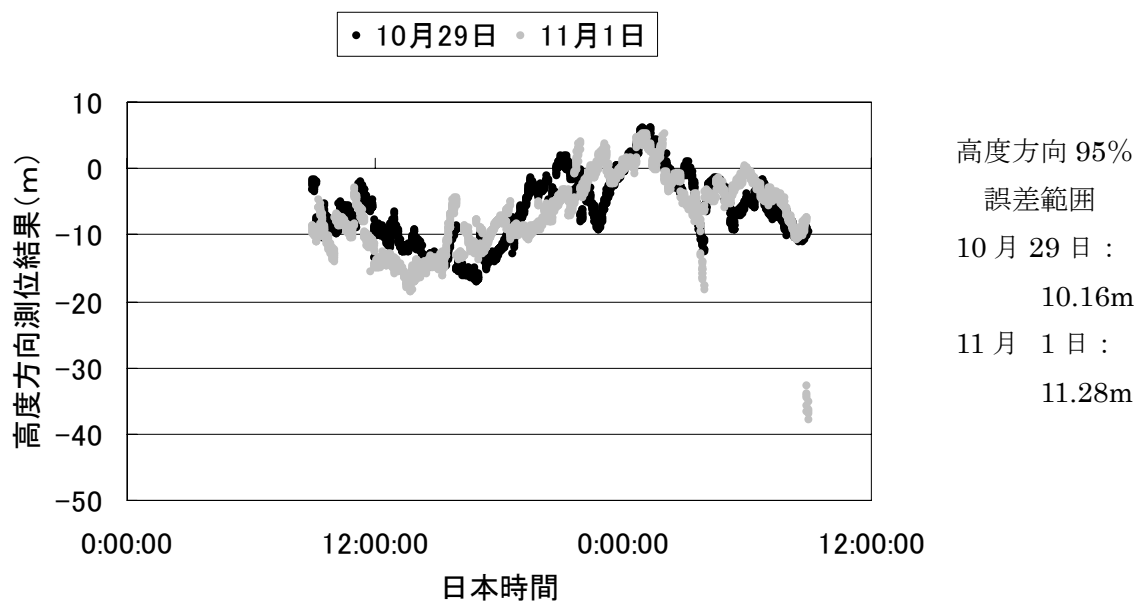


図5. 21 10月29日、11月1日の高度方向測位結果

次に北海道稚内市の1週間分の測位結果を示す。

	経度方向 r m s (m)	緯度方向 r m s (m)	高度方向 r m s (m)	2 d r m s (m)
10 / 28	1.481m	1.495m	3.415m	4.209m
10 / 29	0.967m	1.746m	2.464m	3.991m
10 / 30	1.080m	3.278m	3.512m	6.902m
10 / 31	1.319m	3.310m	3.658m	7.126m
11 / 1	1.622m	3.076m	3.900m	6.954m
11 / 2	1.462m	2.107m	3.459m	5.129m
11 / 3	1.863m	2.657m	4.147m	6.491m

表5. 5 北海道稚内市の2周波推定での測位精度

	経度方向 r m s (m)	緯度方向 r m s (m)	高度方向 r m s (m)	2 d r m s (m)
10 / 28	1.445m	1.594m	6.021m	4.304m
10 / 29	1.255m	1.545m	5.082m	3.982m
10 / 30	1.469m	3.065m	6.621m	6.798m
10 / 31	1.313m	2.933m	7.387m	6.427m
11 / 1	1.360m	2.746m	5.648m	6.129m
11 / 2	1.618m	2.005m	5.453m	5.154m
11 / 3	2.229m	2.352m	6.392m	6.482m

表5. 6 北海道稚内市のモデル推定での測位精度

図5. 16～18、及び表5. 5は北海道稚内市での電離層遅延量を2周波観測から推定した場合の測位結果である。これらの結果からは10月29日の測位精度にはあまり差が見られず、太陽フレアによる影響はなかったと言える。

図5. 19～21、及び表5. 6は電離層遅延量の推定をクロブッチャーモデルを用いて行った場合の測位結果である。これらの結果からも測位精度にはあまり差が見られず、太陽フレアによる影響はなかったと言える。また稚内市の測位結果では、2周波による電離層遅延量の推定を行った場合の測位結果と比べて、高度方向ではクロブッチャーモデルによる測位精度の劣化は見られたが、水平方向では差が見られなかった。

次に鹿児島県佐多町での測位結果を示す。

2周波観測による電離層遅延量補正を行った場合の測位結果（佐多町）

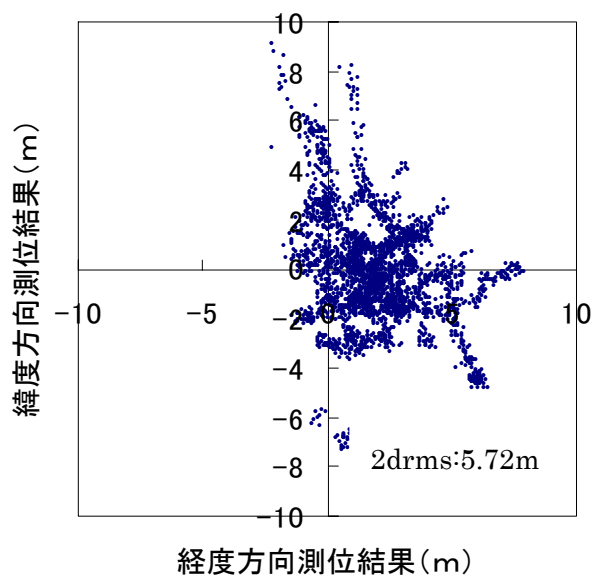
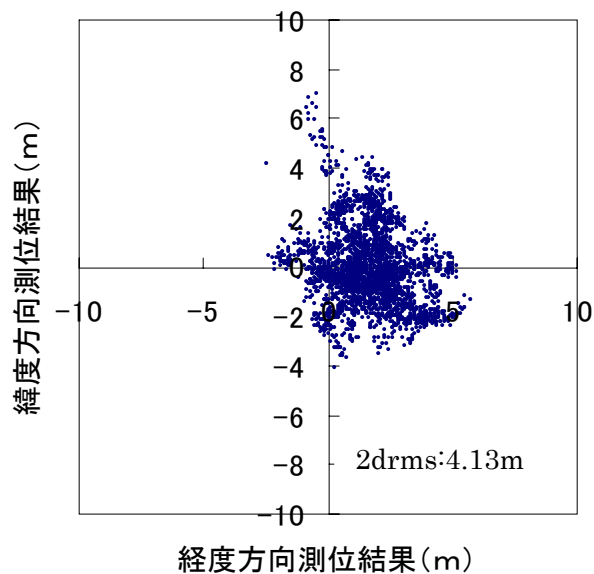


図5. 22 10月29日の水平方向測位結果

図5. 23 11月1日の水平方向測位結果

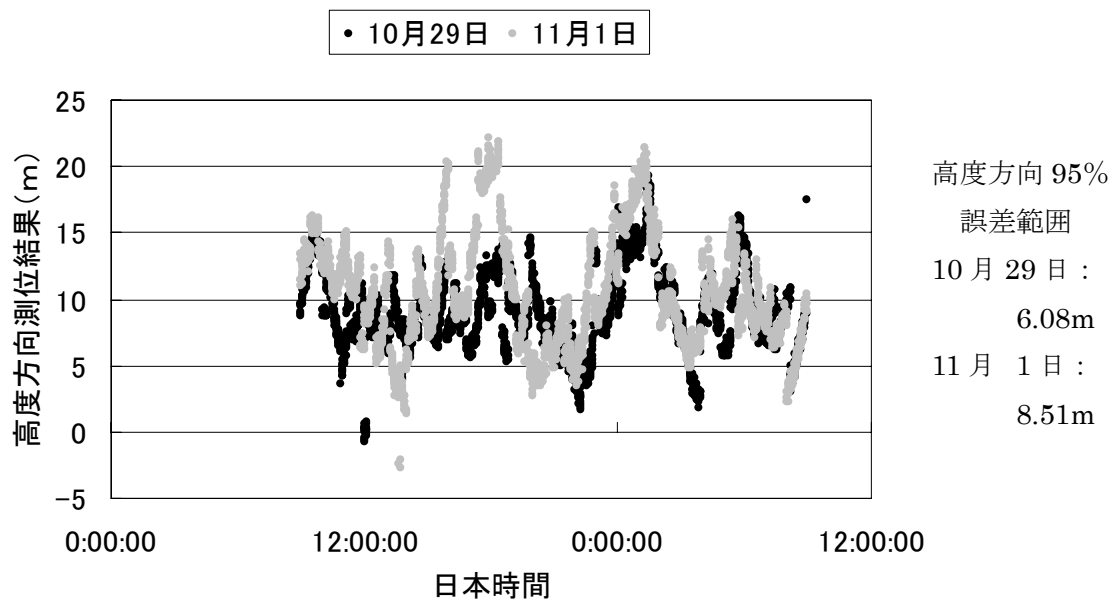


図5. 24 10月29日、11月1日の高度方向測位結果

クローブチャーモデルを用いた場合の測位結果 (佐多町)

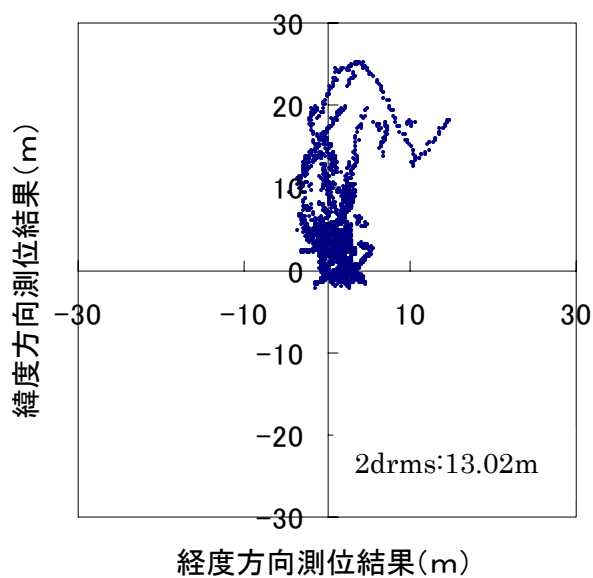


図5. 25 10月29日の水平方向測位結果

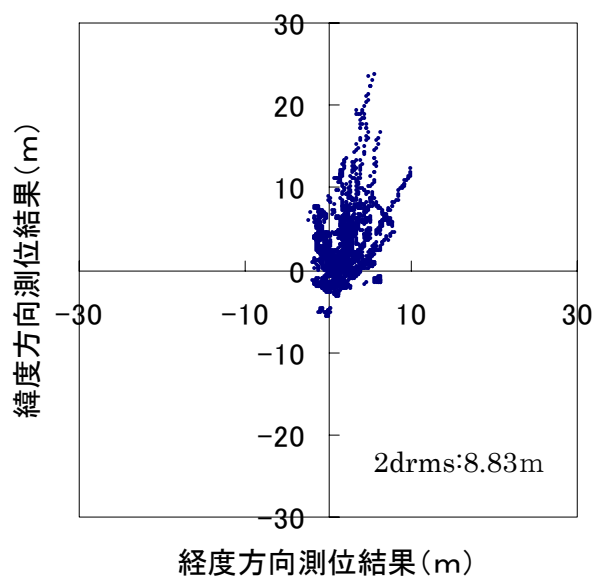


図5. 26 11月1日の水平方向測位結果

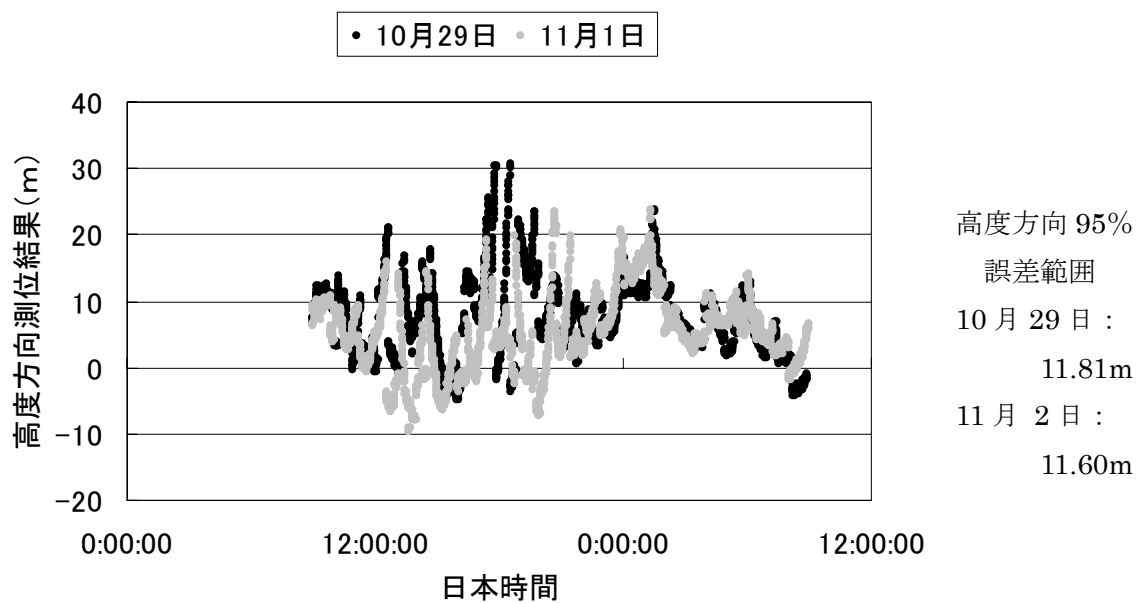


図5. 27 10月29日、11月1日の高度方向測位結果

以下に鹿児島県佐多町の1週間分の測位結果を示す。

表5. 7 鹿児島県佐多町の2周波推定での測位精度

	経度方向 r m s (m)	緯度方向 r m s (m)	高度方向 r m s (m)	2 d r m s (m)
1 0 / 2 8	1.979m	1.683m	4.273m	5.195m
1 0 / 2 9	1.371m	1.541m	3.041m	4.349m
1 0 / 3 0	1.667m	1.397m	3.044m	4.349m
1 0 / 3 1	1.563m	2.138m	4.090m	5.296m
1 1 / 1	1.833m	2.196m	4.256m	5.721m
1 1 / 2	1.800m	2.207m	3.668m	5.696m
1 1 / 3	1.975m	2.477m	4.337m	6.336m

表5. 8 鹿児島県佐多町のモデル推定での測位精度

	経度方向 r m s (m)	緯度方向 r m s (m)	高度方向 r m s (m)	2 d r m s (m)
1 0 / 2 8	2.083m	6.311m	5.166m	13.291m
1 0 / 2 9	2.374m	6.059m	5.911m	13.015m
1 0 / 3 0	1.668m	2.429m	5.366m	5.893m
1 0 / 3 1	2.036m	5.148m	6.618m	11.068m
1 1 / 1	2.059m	3.903m	5.801m	8.825m
1 1 / 2	2.032m	4.580m	6.262m	10.020m
1 1 / 3	2.096m	3.163m	6.923m	7.589m

図5. 22~24、及び表5. 7は鹿児島県佐多町での電離層遅延量を2周波観測から推定した場合の測位結果である。これらの結果からは測位精度にはあまり差が見られず、太陽フレアによる測位結果への影響はなかったと言える。また市川市や稚内市の測位結果と比べても、測位精度に大きな差はなかったと言える。

図5. 25~27、及び表5. 8は電離層遅延量の推定にクロブッチャーモデルを用いて行った場合の測位結果である。これらの結果では、市川市や稚内市の測位結果と比べて全体的に測位精度が低かった。

5-4 考察

図5. 1から図5. 9の2周波観測による電離層遅延量の推定結果から、観測地点によりさまざまな結果が見られた。

まず図5. 1から図5. 3の千葉県市川市での電離層遅延量推定結果では、ほとんどの衛星に関して10月29日の遅延量が他の日と比べて大きな値となった。この結果はフレアに伴うCMEによる磁気あらしの影響により、電離層の電子密度が大きく変化したためであると考えられる。また磁気あらしによる影響は、昼間から夕方時間帯に観測された衛星ではより大きな影響が見られた。これは電離層の電子密度の状態は太陽から放射される紫外線の強さに依存しているために、太陽の見える時間帯では紫外線の放射による電離が夜間に比べ、より活発に行われるためであるとだと考えられる。そのほかにも衛星の位置（方位角・仰角）でも遅延量に差があり、観測地から南方向に衛星があるときでは特に遅延量が大きく推定された。これは磁気あらしによる電離層への影響が、赤道に近づくにつれて大きくなるため、南方向にある衛星から来る電波が電子密度の高い電離層を通過するため、電離層遅延量が大きくなるためであると考えられる。

次に図5. 4から図5. 6の北海道稚内市の電離層遅延量推定結果では、10月29日で遅延量が大きく推定された衛星はほとんどなく、また千葉県市川市での結果と比べると全体的に遅延量が小さく推定されていた。これらの結果は、比較的緯度の高い地域では太陽活動による電子密度の変動の影響を受けづらいために、全体的に遅延量の推定値が低く、太陽面現象やそれに伴う磁気あらしなどの影響が表れづらいために、このような結果になったと考えられる。

図5. 7から図5. 9の鹿児島県佐多町の電離層遅延量推定結果からは、全体的に大きな遅延量を示す衛星が多かった。また29日以外にも推定値の大きい日がいくつか見られた。これは、北海道、千葉県に比べ鹿児島は最も緯度が低く赤道に近いために、磁気あらしによる電離層の電子密度変動の影響を受けやすく、29日以外に発生している太陽フレアの影響を受けているためにこのような結果になったと考えられる。

また、クロブッチャーモデルを用いた場合では、遅延量の推定結果に日ごとの変化がほとんど見られない。これは、クロブッチャーモデルはあくまで予報値であるため、その性質上正確なものではなく、特にフレアなどの急激な宇宙環境の変動に対しては全く対応することができないためである。

次に測位結果について観測地点ごとに考察をする。

図5. 10～図5. 12の千葉県市川市での2周波観測による電離層遅延量推定を行った測位結果では、2周波観測による電離層遅延量の推定がある程度正確にできていたために、フレアによる影響は見られなかったと言える。図5. 13～図5. 15のクロブッチャーモデルを用いて電離層遅延量の推定を行った測位結果では、フレアによる電離層への影響があったと思われる29日の測位精度が他の日と比べ低い結果となった。この結果はクロブッチャーモデルでは前述したとおり、フレアによる電離層への影響が推定されていないためにこ

のような測位結果になったと考えられる。

図5.16～図5.21に示した北海道稚内市の測位結果では、2周波観測による電離層遅延量の推定を用いた測位結果と、クロブッチャーモデルを用いた測位結果では測位精度に差はほとんど見られなかった。これは緯度の高い北海道では磁気あらしによる電離層への影響をほとんど受けなかったためであると考えられる。

図5.22～図5.27に示した鹿児島県佐多町の測位結果では、2周波観測による推定をした測位結果とクロブッチャーモデルを用いた測位結果では、測位精度に大きな違いが見られた。これは2周波観測による電離層遅延量の推定では、太陽フレアによる遅延量への影響がある程度正確に推定できているのに対し、クロブッチャーモデルではこの影響が全く考慮されていないと言えるためにこのような結果になったと考えられる。

第6章

結論

6-1 結論

図5.1から図5.9の電離層遅延量の推定結果から、太陽フレア及びそれに伴うCMEによる磁気あらしによる電離層の擾乱現象をみることができた。また太陽フレアによるCME発生時のプラズマ雲が地球の磁気圏に到達するまで通常2～3日かかるのに対して、今回の太陽フレアでは、磁気あらしによる電離層の擾乱現象が太陽フレアの発生から20時間程度で起こっていることから、フレアの規模が通常より大きく、太陽風は通常の2倍以上の速度をもっていたと考えられる。

また各観測地点における電離層遅延推定量については、千葉県市川市と鹿児島県佐多町での推定結果からは、10月29日の遅延量がほかの日と比べ大きく推定されていることから今回の太陽フレアによる電離層への影響を見ることができた。しかし北海道稚内市での遅延量の推定結果ではその影響がほとんど見られなかったと言ってよい。これらの結果は、太陽活動による電離層電子密度の変動は低緯度地域になるほどより大きいという傾向を持っているためである。またこの傾向から、太陽面現象などの磁気あらしの影響も低緯度地域ほどその影響が出やすいためである。これらのことから、太陽活動による電離層の盛衰や宇宙環境の変化による電離層への影響を調べるには、低緯度地域の方がその特徴が表れやすいために適しているということがわかった。

2周波観測による電離層遅延量の推定を行った場合の測位結果では、どの観測地からの結果でも、太陽フレアによる磁気あらしの起こった10月29日に測位精度の劣化が見られなかった。これらの結果は2周波観測による電離層遅延量の推定はほぼ正確に行われているためである。よって2周波型の単独測位受信機を用いた場合では、磁気あらしによる測位結果への影響はほとんど出ないと言える。

一方、クロブッチャーモデルを用いて電離層遅延量の推定を行った場合では、観測地点によってさまざまな結果を見ることができた。まず千葉県市川市での測位結果では、太陽フレアによる電離層への影響が見られた29日の測位精度が特に低かった。そして千葉県より高緯度にある北海道稚内市での測位結果では、磁気あらしによる電離層への影響が見られなかったため、測位精度としては2周波観測による遅延量の推定を行った場合とあまり差のないものとなった。鹿児島県佐多町の測位結果では29日の測位精度も低かったが、それに関らず全体的に測位精度は悪かったと言える。これは第5章でも述べたが29日以外に発生した太陽フレアの影響があったためであり、これらの結果から、クロブッチャーモデルを用いた場合の太陽フレアによる測位結果への影響は、観測地点が低緯度になるほど大きく、その影

響を補正することができないクロブッチャーモデルでは測位精度が落ちてしまうことがわかった。

6-2 今後の課題

今回の実験では2周波観測による電離層補正を行った測位結果では電離層遅延量の推定が正確に出来ていたため測位結果には太陽フレアによる影響があまり見られなかった。しかしクロブッチャーモデルを用いた場合では電離層の擾乱現象による電波の伝搬異常による測位への影響を補正することができなかったため、測位結果の精度は良いものとならなかった。よって今回用いたクロブッチャーモデル以外の電離層モデルを使用した場合、測位結果にどのような違いが出てくるかを調べてみることを今後の課題として挙げられる。

謝辞

本研究及び本論文作成にあたり、あらゆる面で多大なご指導を頂きました安田明生教授に厚く御礼申し上げます。

また本研究にあたり、様々な助言、ご指導を頂きました久保信明助手にも心より感謝致します。

大学院生の富永貴樹氏には、本論文作成等日々様々なご指導を頂き心より深謝いたします。

最後に色々な質問に答えて頂きました吉田将司氏、情報通信工学研究室の皆様、学部生の片上哲士氏には心から感謝の意を表します。

参考文献

- 土屋淳・辻宏道 「新・GPS 測定の基礎」 日本測量協会、2002年
恩藤忠典・丸橋克英 「宇宙環境科学」 2000年
富永貴樹 「長基線 DGPS 測位における電離層遅延の影響」
卒業論文、2002年