

平成 15 年度

卒業論文

反射板の違いによるマルチパスへの影響と
周囲の環境が測位に与える影響

課程： 流通情報工学課程

学籍番号： 2000714

氏名： 片上 哲士

指導教官名： 安田 明生 教授

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 研究の目的と背景	2
1.3 GPSの概要	3
第2章 測位原理	5
2.1 単独測位	5
2.2 DGPS測位	9
2.2.1 測位位置補正方式	9
2.2.2 擬似距離補正方式	10
第3章 コードマルチパス誤差	11
3.1 コードマルチパス誤差	10
3.2 マルチパス以外の主な誤差要因	12
3.3 搬送波位相とコードを利用したコードマルチパス推定法	13
第4章 静止測位におけるマルチパス	16
4.1 静止測位実験の概要	16
4.2 新2号館での実験	18
4.2.1 新2号館での実験概要	18
4.2.2 新2号館での実験結果	18
4.2.3 新2号館での実験考察	20
4.3 静止測位実験の実験結果	21
4.4 静止測位実験の考察	26
第5章 移動体測位におけるマルチパス	27
5.1 移動体測位実験の概要	27
5.2 移動体測位実験の実験結果と考察	29
5.2.1 丸の内コース①	29
5.2.2 丸の内コース②	32
第6章 まとめ	36
6.1 まとめ	36
6.2 今後の課題	37
謝辞	38
参考文献	39

第1章 序論

1. 1 はじめに

GPS (Global Positioning System) とはアメリカが開発した人工衛星による位置決定のためのシステムである。当初、人工衛星航法システム NNSS (Navy Navigation Satellite System) が開発され、軍事目的にのみ利用されていたがやがて一部民間にも開放されるようになった。このシステムの改良発展型が GPS である。GPS は上空 20000km を周回する専用の衛星を用いて測位を行うため、測位に必要な 4 機以上の GPS 衛星の直接波を受信できる所であれば、地球上の何処にいてもどんな時間であっても測位ができる。また、GPS 衛星から一方的に送られてくる信号だけで測位ができるため、誰もが GPS 測位を行うことが可能である。1993 年 12 月に試験衛星を用いた状態で完全運用が開始され 2 年後には実用機のみによる運用が可能となった。しかし、当初はあくまでも軍事目的で開発されているため、SA (selective availability) と呼ばれる測位精度を人為的に劣化させる操作を行っていた。そのため単独測位における精度はせいぜい 100m 程度であった。2000 年 5 月に SA は解除され測位精度も大幅に向上し 30m 程度になった。この頃には GPS も一般的に認知され、それを使用する人々も増えてきた。今ではカーナビゲーションを代表とする GPS を利用した製品が身の回りにも登場し、利便性に優れているため幅広い人々に利用されている。今後、GPS 受信機の小型化、高性能化が進めば、GPS 内臓の携帯電話の普及や地形の測量などさまざまな分野で利用されることは間違えない。EU でもガリレオという同様のシステムが開発されており、測位制度の大幅な向上が期待されている。

1. 2 研究の目的と背景

GPS 測位における誤差要因として、主に衛星の時計誤差、衛星の軌道情報誤差、電離層遅延、対流圏遅延、マルチパス、受信機の熱雑音、整数値バイアスなどがある。しかし、これら要因の多くはディファレンシャル GPS の技術などで除去することができる。ただ、マルチパスと受信機の熱雑音による誤差はディファレンシャル GPS によって取り除くことができない。その上、マルチパスによる誤差は数十mになることもまれではない。

本研究では静止測位により反射材の違いがマルチパス誤差へ与える影響を調査する。また移動体を使った測位を行い、可視衛星数の変化やマルチパス波の変化など、周囲の環境が測位結果に与える影響を調査する。

1. 3 GPS の概要

GPS は主に地上制御部分、人工衛星部分、地上利用者部分から構成されている。GPS 測位において最も重要な役割を果たしている GPS 衛星にはハイテク機器が数多く搭載されている。

中でも衛星に搭載されているセシウム等の原子時計は安定度 10^{-13} もの精度を誇っている。これは衛星から送信された電波が受信機で受信されるまでの時間から距離を求める GPS 測位において、時間を非常に正確に扱わなくてはならないからである。また、GPSTIME という GPS 測位に使用する専用の時間も用意されている。GPSTIME は世界標準時の日曜の午前 0 時を 0 秒とし、週初めからの通し秒数である。しかし、閏秒の関係で現在は GPSTIME のほうが 13 秒早い。

衛星は高度約 20000km を 11 時間 58 分 02 秒の公転周期で公転している。公転面は傾斜角が 55 度で軌道間隔が 60 度である。一つの公転面には 4 衛星ずつ配置されており、地球のどの位置においても 24 時間、3 次元の測位が可能となっている。実際には軌道情報は随時変更されているが、2m 以内の範囲で随時管理されており、2 時間ごとに更新される高い精度をもった軌道情報が各衛星から 12.5 分の間隔で送信されている。図 1. 3. 1 は衛星配置の様子を表したものである。

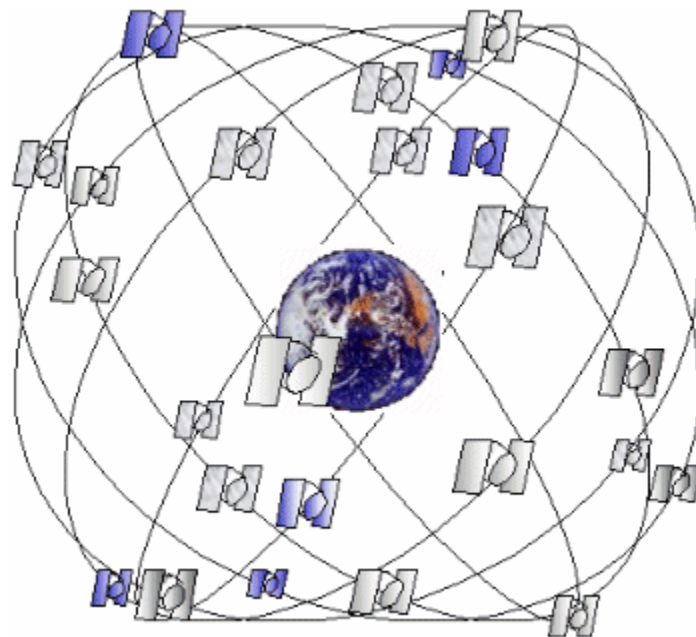


図 1. 3. 1 衛星配置の様子

衛星から送信される電波には周波数 1575.42MHz の L1 帯と周波数 1227.6MHz の L2 帯がある。L1 帯には一般に開放されている C/A コードと軍事用の P コードが、L2 帯には P コードが乗せられている。電波は全 GPS 衛星が同じ周波数で送信しているが衛星ごとに異なる擬似ランダム雑音で変調されているので個々の

衛星を区別することができる。

利用者部分では GPS アンテナと専用の GPS 受信機を使って測位を行う。衛星から送られてくる信号は衛星ごとに変調されているため、受信機にはそれぞれの衛星のコードパターンが内蔵されており、それにより復調し航法メッセージを得るのである。そのためコードパターンの公開されていない P コードは復調できないため、軍事用に利用できるのである。

以下に GPS 衛星についての概要を示す。

表 1. 3. 1 GPS の概要

衛星総数	24 個（予備衛星を含めると 28 個利用可）	
軌道の形	円	
軌道高度	約 20000km	
周回周期	約 11 時間 58 分 02 秒（0.5 恒星日）	
衛星の軌道面	6 面（1 面に 4 衛星ずつ配置）	
軌道傾斜角	55°	
基準発振器（10.23MHz）	セシウム原子発信機 安定度 10^{-13}	
使用周波数	L1 搬送波	1575.42MHz（10.23MHz×154）
	L2 搬送波	1227.6MHz（10.23MHz×120）
衛星の設計寿命	7.5 年	

第2章 測位原理

2.1 単独測位

GPS 衛星は搭載している原子時計の示す時刻と軌道要素を電波に乗せて送信する。送信された電波は約 0.7 秒後には利用者によって受信される。その受信された電波の中には、GPS 衛星が電波を送信した時の時間が含まれている。よって利用者は受信した時刻の GPSTIME との比較で伝搬時間を求めることができる。電波は光速と同じ速さであるため、光速と伝搬時間の積により衛星と利用者間の距離を測定することができる。しかし、GPS 衛星に搭載している時計に比べ、受信機で使用する時計の精度は 10^{-8} と低い為、測定した距離には受信機の時計誤差が含まれている。衛星 i と受信機との距離の測定値は、真の距離でないため擬似距離といい $r_i(\text{m})$ とする。擬似距離は、真の距離 $\rho_i(\text{m})$ に受信機の時計誤差 $\delta(\text{s})$ が加わったものである。 $s = c\delta$ とすると擬似距離は

$$r_i = \rho_i + c\delta = \rho_i + s \quad (2.1)$$

となる。GPS 衛星と受信機との間の真の距離 ρ_i は受信機位置を (x, y, z) とし、衛星 i の位置を (x_i, y_i, z_i) とすると

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (2.2)$$

と表すことができる。よって受信機の位置を求めるには次の連立方程式を解けばよい。

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} + s \\ r_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} + s \\ \vdots \\ r_N = \sqrt{(x_N - x)^2 + (y_N - y)^2 + (z_N - z)^2} + s \end{cases} \quad (2.3)$$

3次元の位置を決めるには3個の未知数が存在する為、3機以上の衛星が確保できれば良いことになるが、受信機の時計誤差 s も未知数として扱う為、未知数の合計が4個になり、これを解くには最低4つの方程式、つまり4機以上の衛星が必要となる。

連立方程式(2.3)のそれぞれの式は2乗すると球面を表す式になる。よって、幾何学的に見て受信機位置 (x, y, z) はこれらの球面の交点となることが考えられる。擬似距離が真の距離であるならば、4つの球面は1点で交わるはずであるが、擬似距離に

は受信機の時計誤差による誤差 s が存在しているので1点で交わることはない。図2.

1. 1のように、 s の値を変化させると1点で交わり、受信機位置を測定することができる。5衛星以上ある場合は4つの未知数に5つの方程式が存在する為、解を1つに絞り込むことができない。そこで、最小二乗法を使用して受信機位置 (x, y, z) と各球面との距離の二乗和が最小になる解を見つけ出す。

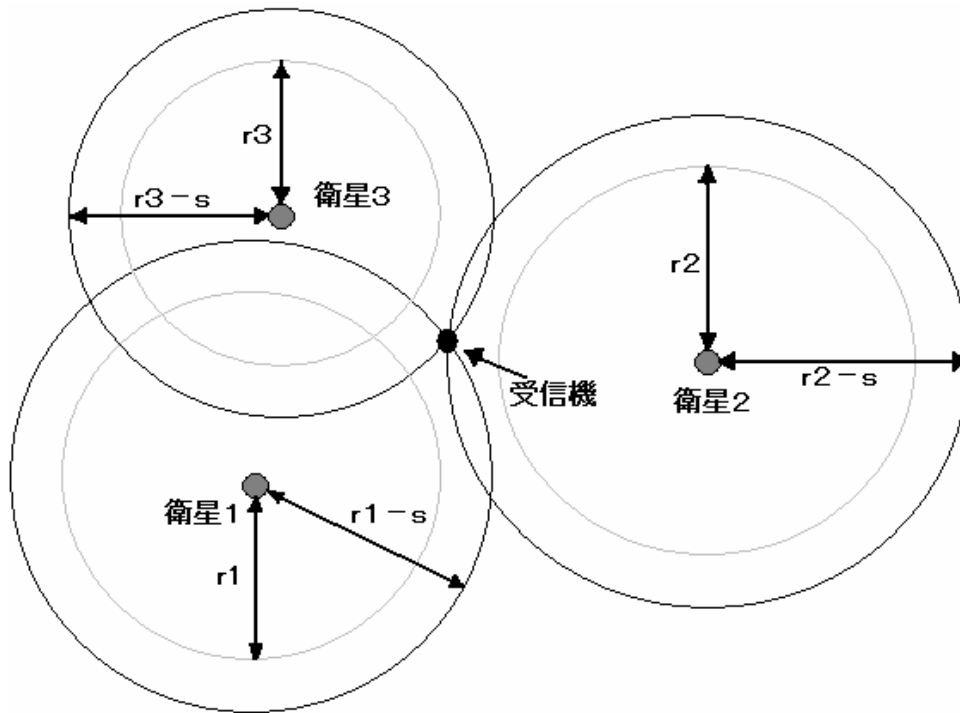


図2. 1. 1 測位イメージ

最小二乗法を用いて方程式を解く為、 x, y, z, s について、適当な初期値 x^0, y^0, z^0, s^0 を用意します。 x^0, y^0, z^0, s^0 とした時に擬似距離として測定されるべき値を計算すると

$$\begin{cases} r_1^0 = \sqrt{(x_1 - x^0)^2 + (y_1 - y^0)^2 + (z_1 - z^0)^2} + s^0 \\ r_2^0 = \sqrt{(x_2 - x^0)^2 + (y_2 - y^0)^2 + (z_2 - z^0)^2} + s^0 \\ \vdots \\ r_N^0 = \sqrt{(x_N - x^0)^2 + (y_N - y^0)^2 + (z_N - z^0)^2} + s^0 \end{cases} \quad (2.4)$$

となる。これと実際に測定された擬似距離 r_i の残差 $\Delta r_i = r_i - r_i^0$ を求めて

x^0, y^0, z^0, s^0 を残差に相当する分だけ修正すれば、正しい解が得られるので、 r_i の

x, y, z, s による偏微分

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial r_i}{\partial x} = \frac{-(x_i - x)}{r_i} \\ \frac{\partial r_i}{\partial y} = \frac{-(y_i - y)}{r_i} \\ \frac{\partial r_i}{\partial z} = \frac{-(z_i - z)}{r_i} \\ \frac{\partial r_i}{\partial s} = 1 \end{array} \right. \quad (2.5)$$

を用いる。 x^0, y^0, z^0, s^0 の変化量を $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta s$ と置くと、

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta r_1 = \frac{\partial r_1}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial r_1}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial r_1}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial r_1}{\partial s} \Delta s \\ \Delta r_2 = \frac{\partial r_2}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial r_2}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial r_2}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial r_2}{\partial s} \Delta s \\ \vdots \\ \Delta r_N = \frac{\partial r_N}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial r_N}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial r_N}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial r_N}{\partial s} \Delta s \end{array} \right. \quad (2.6)$$

という連立方程式が得られる。 Δr_i は分かっているので、この連立方程式を $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta s$ について解けばよい。得られた $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta s$ により、初期値を更新する。

$$\left\{ \begin{array}{l} x^1 = x^0 + \Delta x \\ y^1 = y^0 + \Delta y \\ z^1 = z^0 + \Delta z \\ s^1 = s^0 + \Delta s \end{array} \right. \quad (2.7)$$

初期値を x^1, y^1, z^1, s^1 に更新して、式 (2.4) に戻り $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta s$ が十分に小さくなるまで繰り返し計算する。通常は数回程度の繰り返しで正しい解に収束する。以上の手順で受信機の位置および時計誤差を測定することができる。しかし、式 (2.6) の方程式を解くことは非常に難しい為、行列を利用することで計算しやすくする。方程式を行列で表わす為、ベクトル $\vec{\Delta x} = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \Delta s]^T$ 、 $\vec{\Delta r} = [\Delta r_1 \ \Delta r_2 \ \dots \ \Delta r_N]^T$ を利用すると式 (2.6) の方程式は

$$G\vec{\Delta x} = \vec{\Delta r} \quad (2.8)$$

と簡単に書くことができる。 G は観測行列で

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial x} & \frac{\partial r_1}{\partial y} & \frac{\partial r_1}{\partial z} & \frac{\partial r_1}{\partial s} \\ \frac{\partial r_2}{\partial x} & \frac{\partial r_2}{\partial y} & \frac{\partial r_2}{\partial z} & \frac{\partial r_2}{\partial s} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_N}{\partial x} & \frac{\partial r_N}{\partial y} & \frac{\partial r_N}{\partial z} & \frac{\partial r_N}{\partial s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(x_1 - x)}{r_1} & \frac{-(y_1 - y)}{r_1} & \frac{-(z_1 - z)}{r_1} & 1 \\ \frac{-(x_2 - x)}{r_2} & \frac{-(y_2 - y)}{r_2} & \frac{-(z_2 - z)}{r_2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{-(x_N - x)}{r_N} & \frac{-(y_N - y)}{r_N} & \frac{-(z_N - z)}{r_N} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

である。式 (2.8) の連立方程式の解は、方程式が 4 つであれば正方行列となるので G の逆行列が簡単に求められる。

$$\Delta \bar{x} = G^{-1} \Delta \bar{r} \quad (2.10)$$

方程式が 5 つ以上ある場合は最小二乗法を用いて解く。

$$\Delta \bar{x} = (G^T G)^{-1} G^T \Delta \bar{r} \quad (2.11)$$

式 (2.8) から式 (2.11) を数回繰り返すことで次第に 0 に収束していく。式 (2.7) を使用して、この値が十分に小さくなるまで計算すれば x, y, z, s を求めることができる。

2. 2 DGPS 測位

DGPS (differential GPS) とは、GPS 測位における測位精度向上のために行われる相対測位の一つであり、単独測位では 30m 程度である精度が数 m 程度にまで向上する。その方法は固定基準点（既に緯度経度などの正確な位置が決まっている点）と未知利用点で同時に単独測位を行い、基準点における測位誤差から補正データを求め、何らかの方法で未知利用点に伝達する。未知利用点で伝達された補正データを使い補正することで、基準点と未知利用点共通の誤差要因である衛星の軌道情報誤差や時計誤差による誤差、電離層遅延、対流圏遅延による誤差などを取り除くことができる。しかし、基準点と未知利用点の距離が離れすぎると電離層、対流圏による遅延量が異なってくるため、基準点が数 100 km から数 1000km 以内にある必要がある。補正データの伝達方法は FM 放送を使ったものが主流でカーナビゲーション等でも多く利用されている。ほかに中波ビーコンを使ったものや携帯電話などを使ったものもある。また DGPS にはいくつかの補正方式があり、次に説明する測位位置補正方式と擬似距離補正方式がある。

2. 2. 1 測位位置補正方式

この方式は、固定基準点で行った単独測位結果とその地点の正確な位置座標を比較して、緯度、経度、高さ方向の誤差を算出しこれを補正值とする。未知利用点で行った単独測位結果にこの補正值を適用することにより補正する。しかし、使用衛星が異なると単独測位結果が異なり補正值の値も変わるため、基準局と未知利用点で同じ衛星を利用していない場合は必ずしも測位精度が向上するとは限らない。最適な補正を行うには、何らかの方法（インターネット回線等）で未知利用点において測位に利用する衛星を基準点に連絡し、その衛星のみを使った測位の補正データを未知利用点に返してやる必要がある。以下に補正值算出のための式を示す。

$$\Phi d = \Phi a - (\Phi g - \Phi n) \quad (2. 2. 1)$$

Φd : 利用点の DGPS 測位緯度 or 経度 or 高さ

Φa : 利用点の単独測位緯度 or 経度 or 高さ

Φg : 基準点の単独測位緯度 or 経度 or 高さ

Φn : 基準点の既知緯度 or 経度 or 高さ

2. 2. 2 擬似距離補正方式

この方式は、固定基準点で個々の衛星までの擬似距離を求め、真の距離と擬似距離の差や擬似距離の変化率を用いて補正を行う方式である。ユーザーが実際に測定した擬似距離に補正值を適用することで個々の衛星からの擬似距離を補正することが出来る。この方式の良いところは測位位置補正方式と違い、基準局とユーザーで使用する衛星が違っていても最適な補正が出来るという柔軟性がある。また、基準局からユーザーへの補正值の伝送だけですむので世界標準として幅広く利用がされている。以下に補正值算出のための式を示す。

$$PRC_c(t) = PRC(t_0) + PRC(t_0) \times (t - t_0)$$

$$PR(t) = PRM(t) + PRC_c(t)$$

t_0 : 前の時刻

t : 現在の DGPS 測位時刻

$PR(t)$: 時刻 t に測位に利用される擬似距離

$PRM(t)$: 時刻 t に利用者局で観測された擬似距離測定値

$PRC_c(t)$: 時刻 t に利用者局で適用される擬似距離測定値計算値

$PRC(t_0)$: 基準局で求められた時刻 t_0 の擬似距離補正值

$RRC(t_0)$: 基準局で求められた時刻 t_0 の距離変化率補正值

第3章 コードマルチパス誤差

3.1 コードマルチパス誤差

マルチパスとはその名のとおり複数の経路という事である。高度約 20000km にある GPS 衛星から送信された電波は、約 0.07 秒後には GPS 受信用アンテナによって受信されているわけだが、その経路には何にも反射せずに直接入ってくるものや、建物や大地に反射して入ってくるものがある。直接入ってくるものを一般的に直接波と言ひ、反射して入ってくるものをマルチパス波と言う。

直接波のコードや位相をマルチパス波が干渉することで、直接波の信号波形が乱され、測距誤差が生じる。この測距誤差のことをマルチパス誤差という。マルチパス誤差の大きさは、マルチパス波の信号強度や直接波との位相の関係などで大きく変わる。金属板などの電波を反射しやすい物体に衛星からの電波が反射した場合、マルチパス波の影響は大きくなり、直接波のコードとマルチパス波のコードの区別がつきにくくなり擬似距離測定誤差につながる。直接波の位相とマルチパス波の位相が反対の状態でも干渉したり、位相が同じ状態でも干渉したりすることにより、受信信号強度の大幅な変化をもたらし、位相のずれを起こしたり、サイクルスリップの原因になったりするなど、マルチパス波による測距精度の低下は GPS 測位の重大な問題の一つになっている。

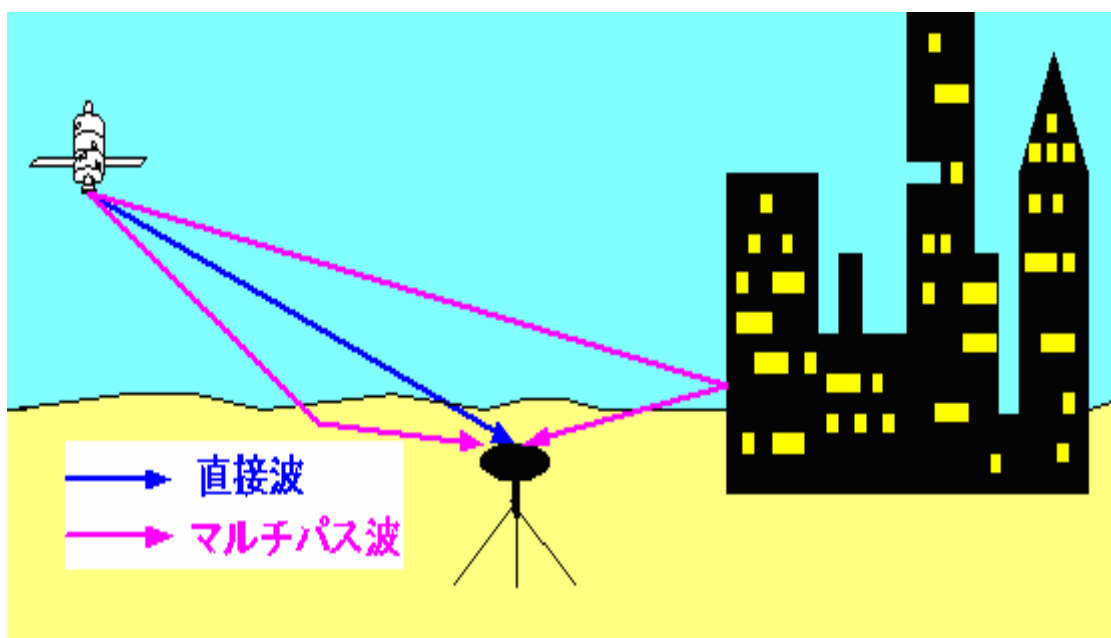


図 3. 1. 1 マルチパス波の様子

3. 2 マルチパス以外の主な誤差要因

衛星の軌道誤差

GPS 受信機は、GPS 衛星と受信機との距離を測定し、測位計算を行っている。その為、測位には GPS 衛星の位置情報が必要になる。GPS 衛星の軌道情報は正確に予測されており、放送軌道暦が航法メッセージとして放送されている。放送直後は 3 次元のどの方向に対しても 1.5m 以内の誤差であるが時間の経過と共に大きくなり、現在の水準ではどうしても数 m から 10m 程度の誤差を避けることが出来ない。事後に別途計算される精密軌道暦は公称精度が 5 cm であるがリアルタイムでないためカーナビ等では使用できない。

GPS 衛星の時計誤差

GPS 衛星には時計同期用の正確の発振器として、セシウム原子時計が搭載されている。セシウム発振器の精度は 10^{-13} 程度といわれている。これは約 30 万年に一秒しかずれないと言う非常に正確なものである。一日の間に生じる時刻誤差が 10^{-8} 程度であるので無視できそうに見えるが、電波は毎秒約 30 万 km の速さで伝わるので、一日あたり約 3 m の誤差が生じる計算となる。誤差の補正の為、GPS 衛星の時計誤差の補正情報が航法メッセージとして放送されている。

電離層遅延

高層大気圏では気体分子が X 線や紫外線などの影響で電離し、自由電子の密度が高いプラズマ状になっている。こうした領域を電離層といい、高度 100km 以上に現れるスポンディック E 層、それより高い高度に発生する F 層が GPS 測位に影響する。電離層の状態は太陽活動の活発さや季節、時刻、場所といった要素で変化する為、GPS 測位に対する影響も刻々と変化する。GPS が使用するマイクロ波帯では、電離層の屈折率が電子密度と電波の周波数によって変化することにより、進行速度が遅くなることで誤差が生じる。天頂方向では 5~100ns 程度の遅れであるが、距離に直すと 1.5~30m 実際より長く測られることになる。

対流圏遅延

大気の屈折率が約 1.0003 と 1 よりやや大きい値となる為に生じる遅延で大気濃度が濃い地表付近で大きくなる。大気分子の影響によるものである為、大気圧、水上気圧、絶対温度などの気象条件や GPS 受信機の高度などから遅延量を推定することができる。対流圏遅延の補正を行った場合、誤差は 0.5m 程度以下に抑えられるが、仰角の低い衛星は大気中を通る距離が長い為、天頂方向に比べ数倍の誤差となる。

3. 3 搬送波位相とコードを利用したコードマルチパス推定法

搬送波位相とコードを利用してコードマルチパス誤差を推定することができる。これはコードの1チップの長さが293mであるのに対し、搬送波位相の波長が0.19mと非常に小さいため、搬送波位相が受けるマルチパス誤差が最大でも4.8cm以内となることを利用したものである。以下の手順でコードマルチパス誤差以外の誤差要因を取り除くことで、コードのマルチパス誤差を推定することができる。

L1帯擬似距離、L1帯搬送波位相、L2帯搬送波位相の観測量はそれぞれ(3.1)、(3.2)、(3.3)式で表される。

$$P1 = D + Ctr - Cts + Dt + I1 + URE + HW + MP1 \quad (3.1)$$

$$L1 = D + Ctr - Cts + Dt + I1 + URE + HW + mp1 + B1 \quad (3.2)$$

$$L2 = D + Ctr - Cts + Dt + I2 + URE + HW + mp2 + B2 \quad (3.3)$$

P1 : L1帯の擬似距離 L1 : L1帯の搬送波位相 L2 : L2帯の搬送波位相

D : 真の距離 Ctr : 受信機の時計誤差 Cts : 衛星の時計誤差

Dt : 対流圏遅延 I : 電離層遅延 URE : 衛星の軌道情報の誤差 HW : 同期誤差

B : 整数値バイアス

MP : 擬似距離におけるマルチパスと受信機の雑音による誤差

mp : 搬送波位相におけるマルチパスと受信機の雑音による誤差

電離層の項は、搬送波位相の波長の伸びにより、擬似距離と搬送波位相で符号が逆転する。また、搬送波位相におけるマルチパスは最大でも4.8cm以内と擬似距離におけるマルチパスに比べ非常に小さいので無視する。それと搬送波位相における受信機による熱雑音誤差も最新の受信機であれば0.1mm以内との事なので(参照文献等)無視する。これらの事を踏まえた上、(3.1)式から(3.2)式を、(3.2)式から(3.3)式を引くと

$$P1 - L1 = 2I1 + MP1 - B1 \quad (3.4)$$

$$L1 - L2 = I2 - I1 + B1 - B2 \quad (3.5)$$

ここでf1 : L1帯周波数、f2 : L2帯周波数と置く。

L1帯周波数は1.57542GHz、L2帯周波数1.22760GHzであることより、

$$\alpha = \frac{I2}{I1} = \left(\frac{f1}{f2} \right)^2 = 1.646944 \quad (3.6)$$

とすると、(3.5)式は、

$$L1 - L2 = I1(\alpha - 1) + B1 - B2 \quad (3.7)$$

$$2I1 = \frac{2}{\alpha - 1} \times (L1 - L2) + 2 \times \frac{(B2 - B1)}{\alpha - 1} \quad (3.8)$$

となり、

$$MP1 - B1 = P1 - L1 - \frac{2}{\alpha - 1} \times (L1 - L2) - \frac{2}{\alpha - 1} \times L2 \quad (3.9)$$

$$MP1 - \left\{ B1 - \frac{2}{\alpha - 1} \times (B2 - B1) \right\} = P1 - \left(\frac{2}{\alpha - 1} + 1 \right) \times L1 + \frac{2}{\alpha - 1} \times L2 \quad (3.10)$$

左辺の{ }内の整数値バイアスの項は、サイクルスリップなどが無い限り一定である。マルチパスによる誤差が0を中心に発生すると仮定すると、整数値バイアスの項は処理することができる。マルチパス誤差を0平均させるには、後処理により(3.10)式のMP1から(3.10)式のMP1の一定時間の平均を引くことにより、(3.10)式の整数値バイアスの項を除去することができ、マルチパス誤差が求まる。よって、

$$MP1 = P1 - \left(\frac{2}{\alpha - 1} + 1 \right) \times L1 + \frac{2}{\alpha - 1} \times L2 \quad (3.11)$$

(3.11)式に(3.6)式を代入すると、

$$MP1 = P1 - 4.0915 \times L1 + 3.0915 \times L2 \quad (3.12)$$

P1、L1、L2はGPS受信機からのデータで得ることができるので、マルチパス誤差であるMP1を(3.12)式から推定することができる。この方法は搬送波位相(carrier)とコード(code)の差を利用してマルチパス誤差を求めることからCC-differenceと呼

ぶ。

CC-difference によって求めた MP1 にはマルチパス誤差の他に受信機による熱雑音誤差も含まれている。図 3. 2. 1 はマルチパス波の影響をほとんど受けていない衛星に対して CC-difference を行い、0 平均して整数値バイアスを除去した値である。よって受信機の熱雑音誤差のみを示したものであると考えられる。マルチパス波が存在しない場合、受信機の熱雑音は非常に小さく、CC-difference からマルチパス誤差を求めるにあたり、受信機の熱雑音誤差は無視することができる。

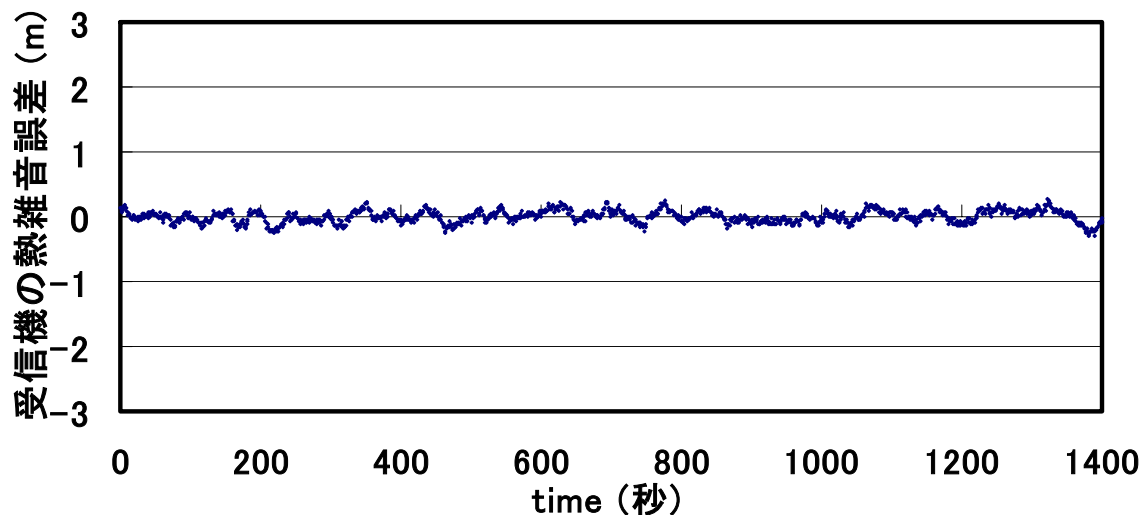


図 3. 2. 1 受信機の熱雑音誤差

図 3. 2. 2 は CC-difference から推定したマルチパス誤差 (青) と、マルチパス誤差を 0 平均して整数値バイアスを除去したマルチパス誤差 (ピンク) である。

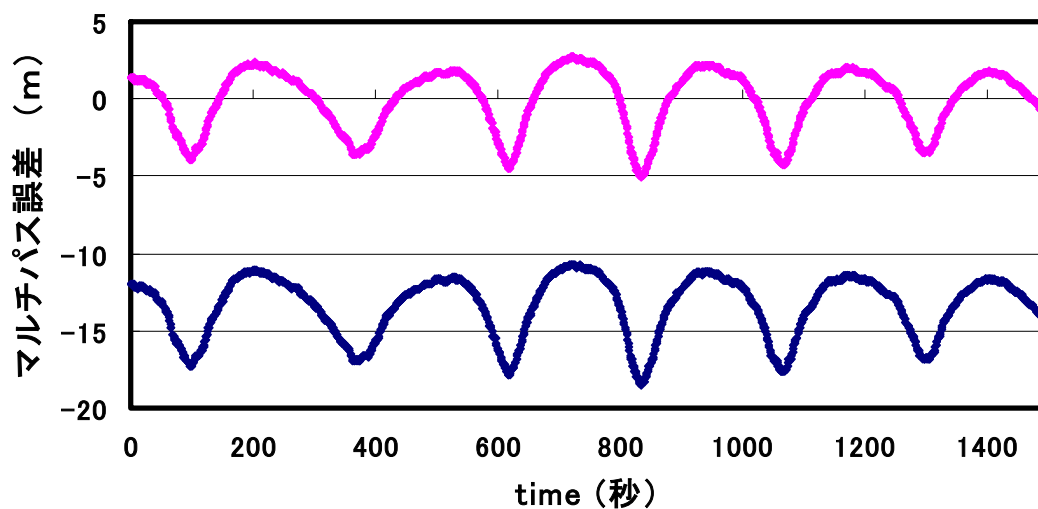


図 3. 2. 2 マルチパス誤差

第4章 静止測位におけるマルチパス

4.1 静止測位実験の概要

静止測位におけるマルチパス誤差測定のために、共同研究棟屋上にGPSアンテナを設置して、データを取得した。今回の実験ではコンクリート壁と金属壁を使い、マルチパス波の発生する環境を作り、反射材の違いにより、マルチパス波の影響がどのように出るか調査した。

マルチパス波の特定は非常に難しいため、コンクリート壁と金属壁の違い以外は、ほぼ同等の環境、衛星配置で、データを取得する必要がある。コンクリート壁は、元々コンクリート壁があるところを利用し、そこへ金属板を設置し、金属壁とすることで同等の環境を作ることができる。また、GPS衛星は先にも述べたとおり、地球を11時間58分02秒の周回周期で回っている。その為、1日目に金属壁でデータ取得を行い、二日目にコンクリート壁でデータを取得する際、3分56秒データ取得時間を早くすることで同等の衛星配置を作ることができる。そこで得られたデータをCC-differenceを利用して解析し、コンクリート壁と金属壁の違いがマルチパス波に与える影響を調査する。

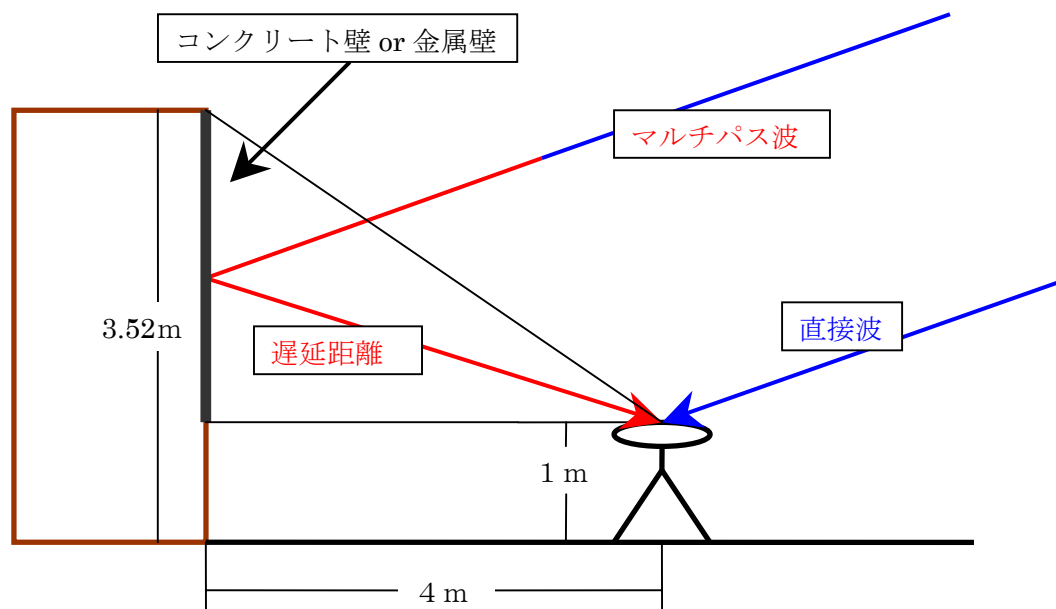


図4.1.1 壁面から反射するマルチパスの状況

実験に使用するコンクリート壁は幅3.75m、高さ3.52mの物で、金属板は幅1.66m、高さ1.72mのものを使用した。また、この壁面は方位角で135°から

315° に伸びた壁面であり 0° が含まれる方を使用した。コンクリート壁と金属壁とでは、壁面の面積に差が生じている。しかし、コンクリート壁の上に金属壁を重ねる為、金属壁の周りにできるコンクリート壁は無視して、金属壁と同じ面積のコンクリート壁を利用したと考えられる。

アンテナの高さは 1 m とし、壁から 4 m のところに設置する。反射板の面積は限られている為、反射板に反射してアンテナに入ってくる電波も限られてくる。そこでシミュレーションを行い、あらかじめデータ取得に使えるような衛星を見つけ出し、それに合わせて実験を行う。



図 4. 1. 2 金属壁実験の様子



図 4. 1. 3 コンクリート壁実験の様子

取得データ

擬似距離 (L1 帯) 搬送波位相 (L1 帯、L2 帯) 衛星位置 C/N₀

使用受信機

ノバテル社製 OEM3 受信機

使用アンテナ

ノバテル社製 GPS600 アンテナ

データ取得間隔および取得時間

1 秒、 2 時間

データ取得開始時間

金属壁 2004 年 1 月 17 日 18 時 30 分 0 秒

コンクリート壁 2004 年 1 月 18 日 18 時 26 分 4 秒

4. 2 新2号館での実験

4. 2. 1 新2号館での実験概要

本実験を実施する前にコンクリート壁と金属壁とで、マルチパス波に与える影響に差が出るかどうか、ノバテル社製 OEM3 受信機を使って実験してみた。

新2号館屋上で、高さ約7m、幅約6m、方位角135度から315度に延びる壁面の0°を含まない方を利用し、壁面中央から5mのところの高さ1mのGPSアンテナを設置して、一秒間隔で約1時間データを取得した。壁面にはコンクリート壁の部分と金属壁の部分が存在しているため、反射する位置によってマルチパス波に影響すると考えた。

4. 2. 2 新2号館での実験結果

壁面とGPSアンテナからの距離、GPSアンテナの高さ、コンクリート壁及び、金属壁の位置、図4. 1. 4の仰角、図4. 1. 5の方位角から壁面に反射してGPSアンテナが受信する電波には、29番衛星のものがあることが計算できる。取得したデータを擬似距離と搬送波位相から求めるCC-differenceで計算すると、図4. 1. 6のようになった。図4. 1. 7は信号強度を示すC/Noの値を示したものである。また計算の結果、コンクリート壁に反射していた時間はデータ取得開始時から約1000秒後まで、金属板に反射していた時間は約1000秒後から約2500秒後であった。

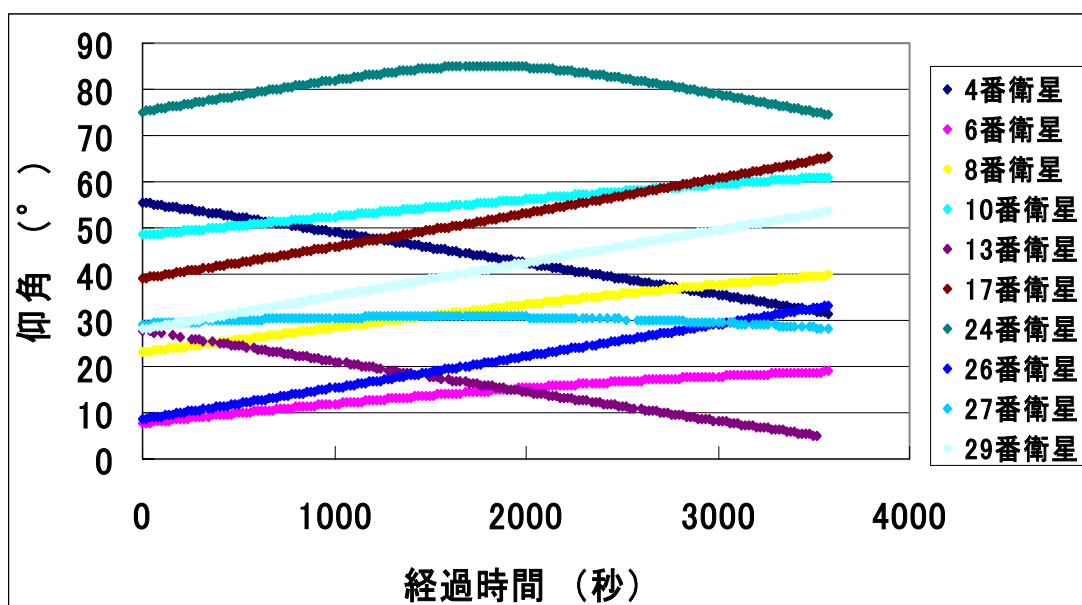


図4. 1. 4 データ取得中の仰角の変化

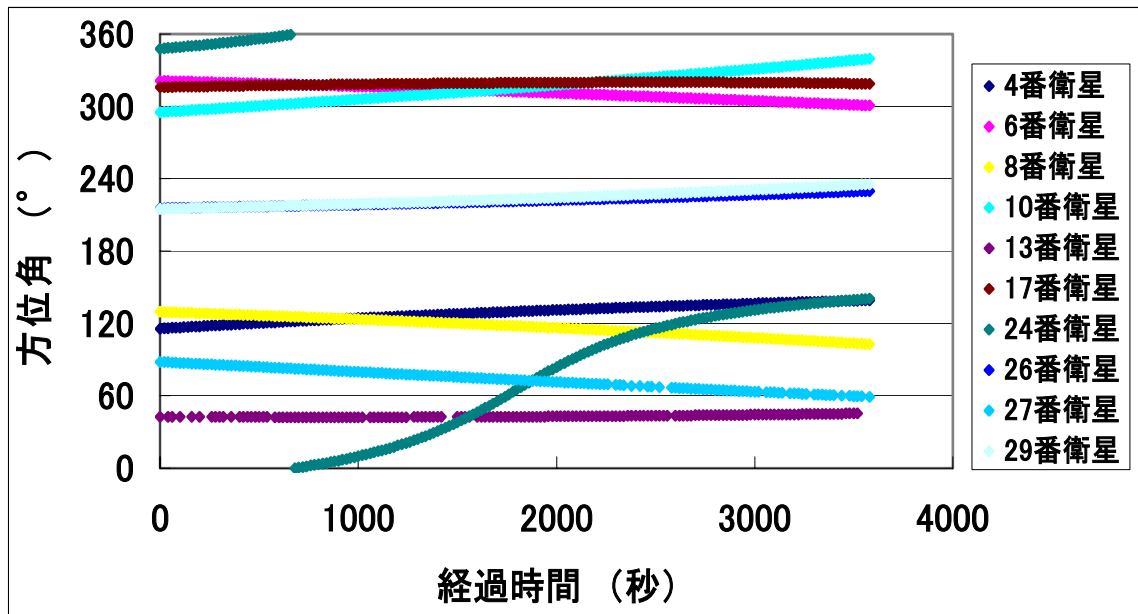


図4. 1. 5 データ取得中の方位角の様子

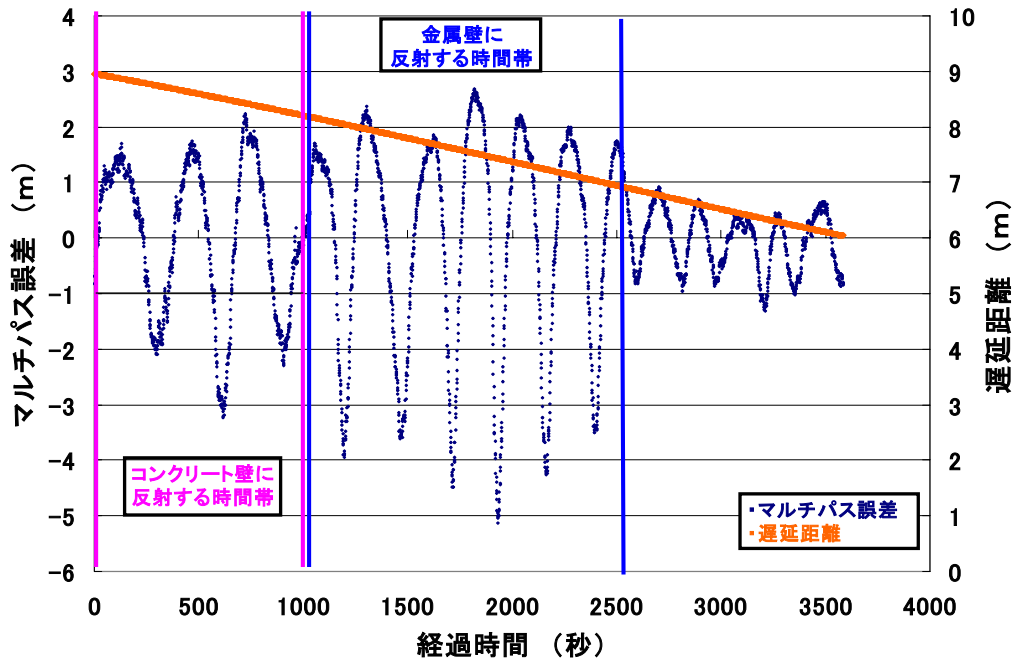


図4. 1. 6 29番衛星の遅延距離シミュレーションとマルチパス誤差

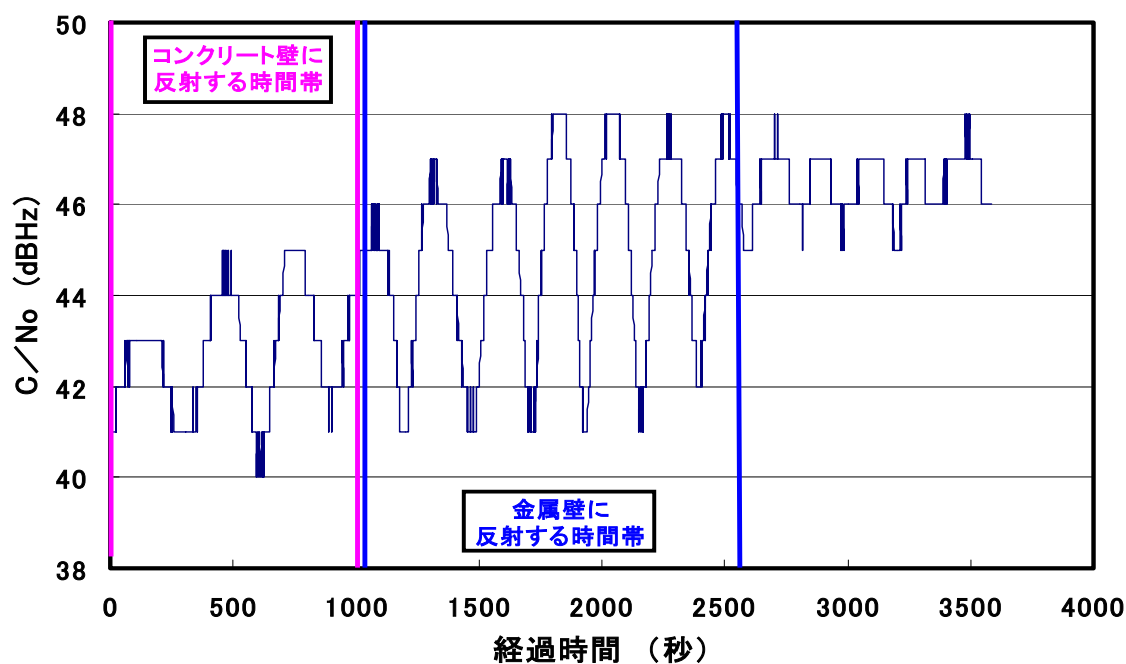


図4. 1. 7 29番衛星のC/No

4. 2. 3 新2号館での実験考察

図4. 1. 6より反射板がコンクリート壁の時と金属壁の時では、マルチパス誤差に影響が出るという結果が得られた。今回の実験は同じ衛星配置でないため、遅延距離の増加によってマルチパス誤差が大きくなったことも考えられる。しかし、仰角、方位角、GPSアンテナの高さ、壁面からの距離、壁面の大きさから求めた遅延距離を示した図4. 1. 6から遅延距離が減少しているにもかかわらず、マルチパス誤差が大きくなっていることがわかる。また、図4. 1. 7のC/Noを見てみても、コンクリート壁と金属壁で振幅の変動量に差が見られ、反射材によりマルチパス誤差に影響すると考えられる。

4. 3 静止測位実験の結果

データ取得時間帯に受信できた衛星のそれぞれの仰角を図4. 2. 1に、方位角を図4. 2. 2に示す。反射壁の大きさや位置、受信アンテナの位置などから、反射壁に反射して電波が受信されるには、仰角が約 15° から約 30° 方位角が約 35° から約 55° である必要があることが分かる。これに当てはまる衛星には1番衛星と20番衛星がある。この2衛星に対してCC-differenceで、マルチパス誤差を計算すると、図4. 2. 3及び、図4. 2. 5のようになった。青色のプロットが17日の実験の金属壁影響を受けたもので、ピンクのプロットは18日の実験のコンクリート壁の影響を受けたものである。また、時間軸はそれぞれのデータ使用開始時からの時間である。図4. 2. 4及び、図4. 2. 6は、マルチパス誤差を示したグラフと同じ時間帯のC/Noを示したグラフである。

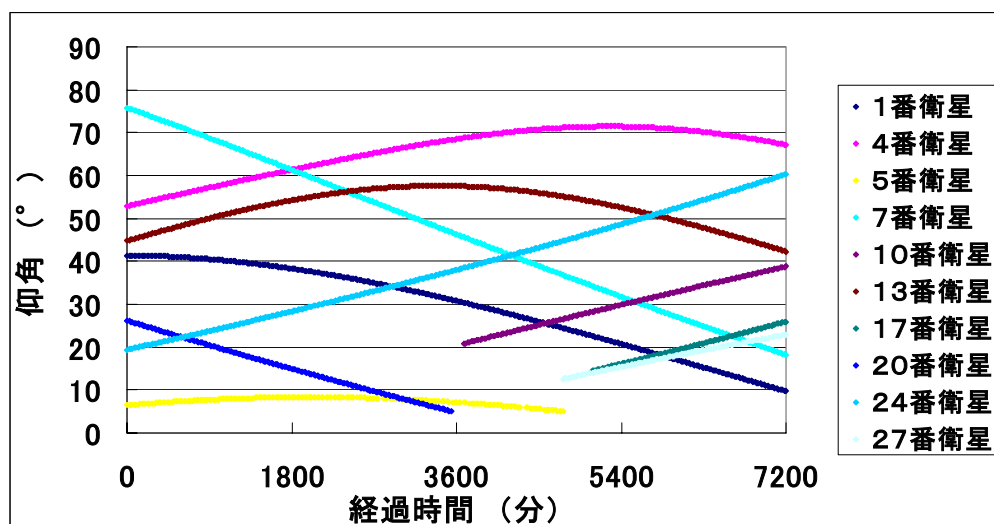


図4. 2. 1 データ取得時の仰角の変化

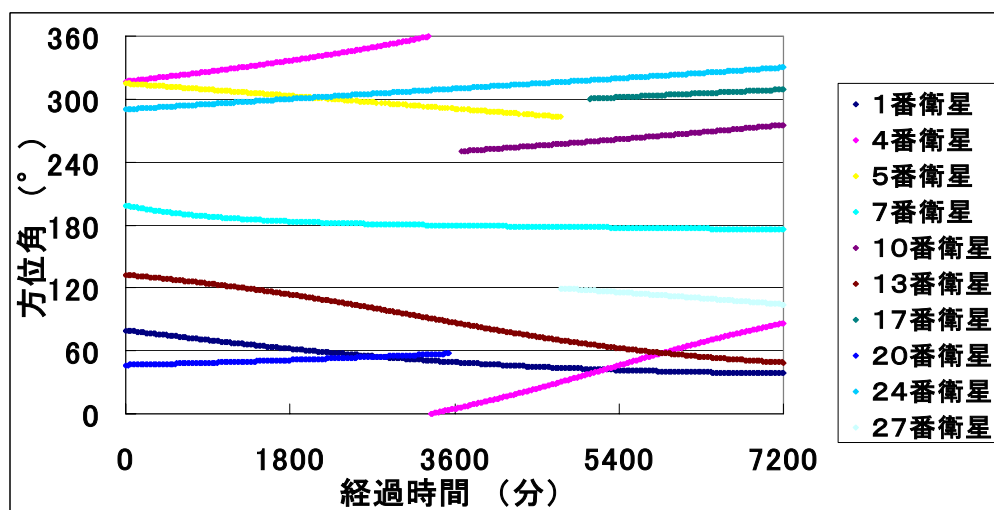


図4. 2. 2 データ取得時の方位角の変化

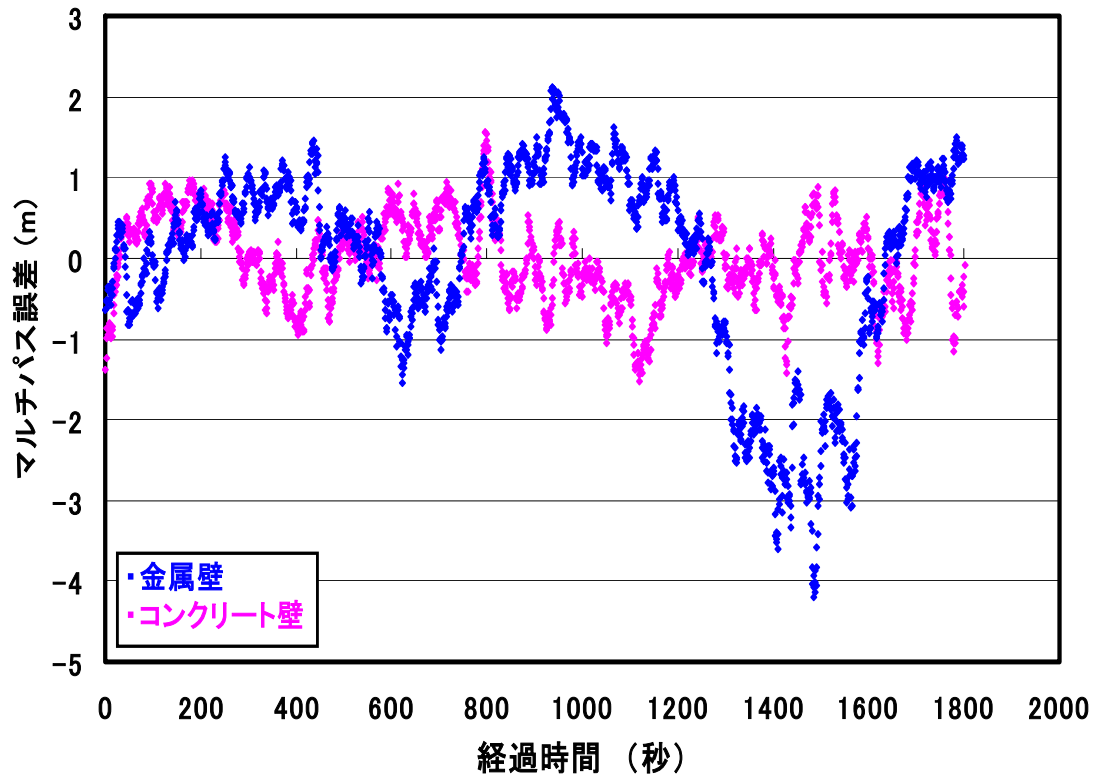


図4. 2. 3 1番衛星のマルチパス

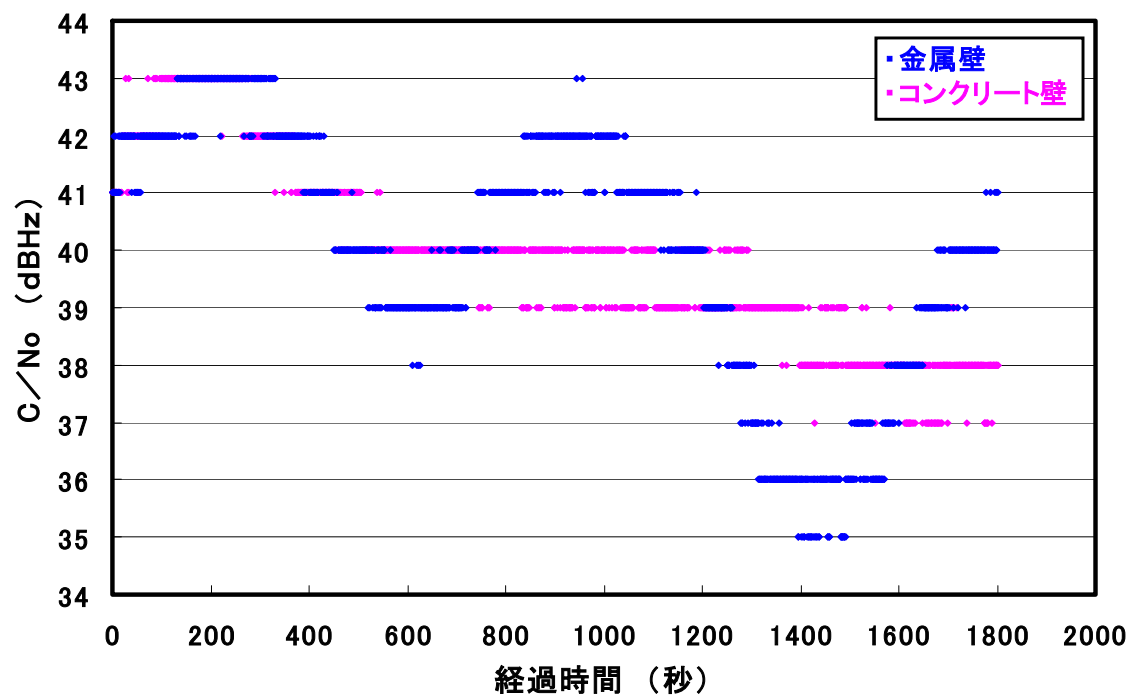


図4. 2. 4 1番衛星のC/N₀

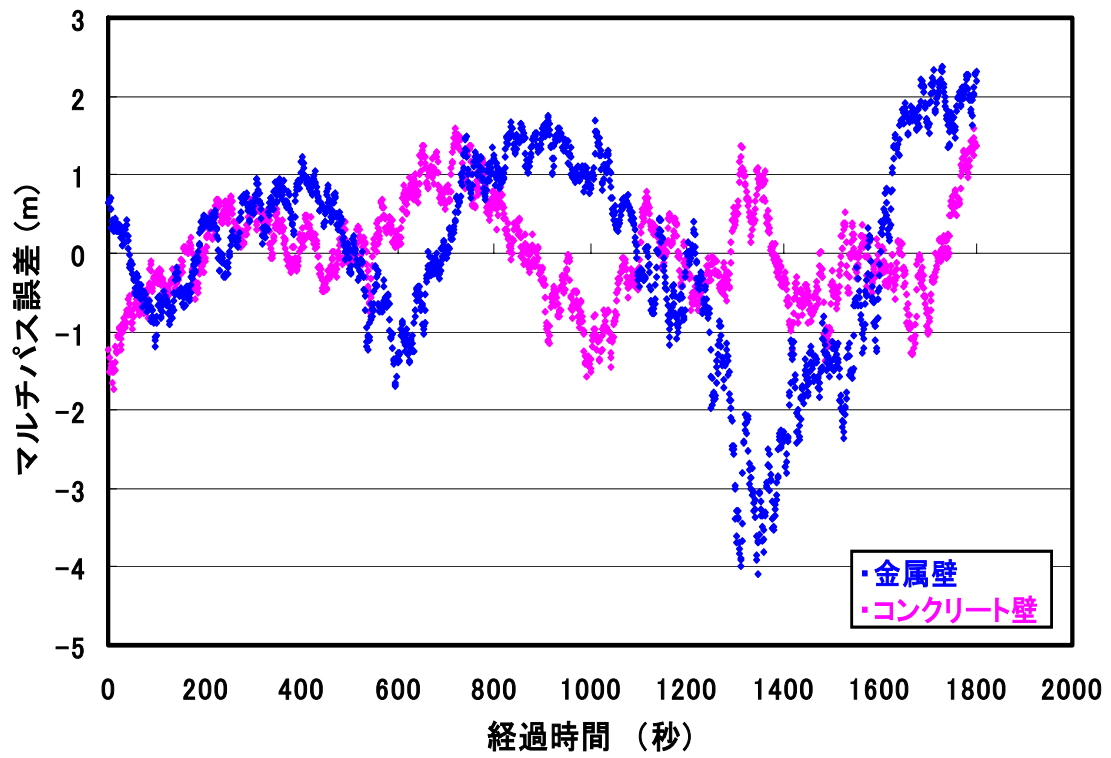


図4. 2. 5 20番衛星のマルチパス誤差

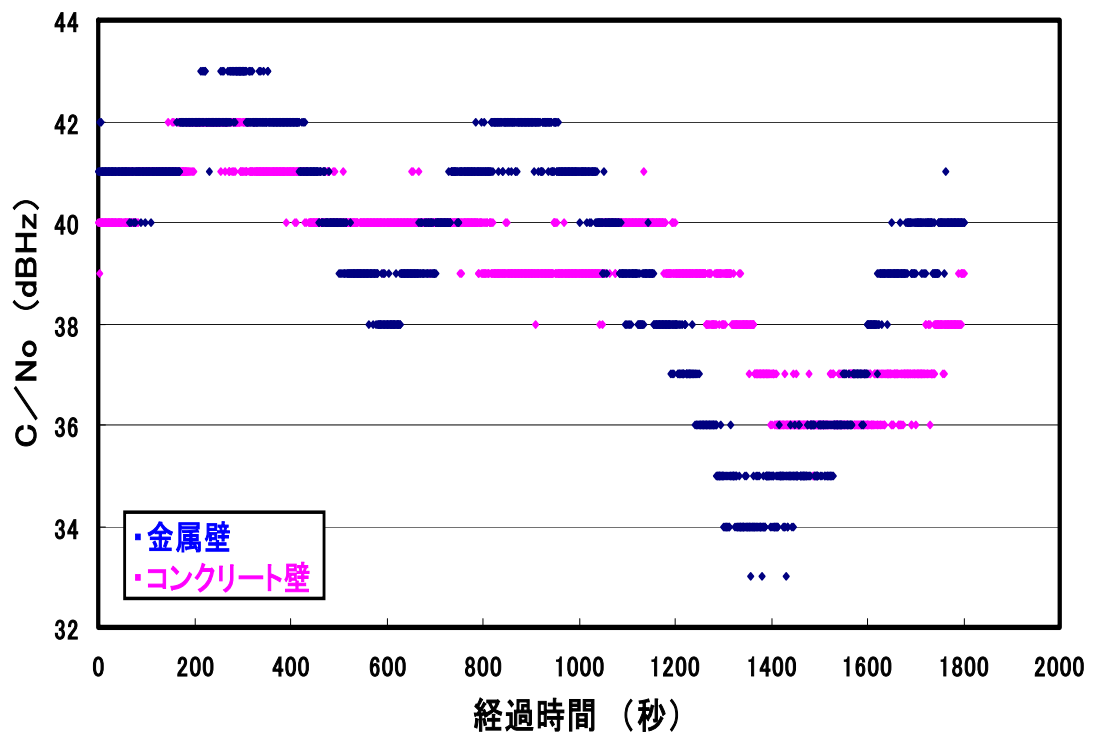


図4. 2. 6 20番衛星のC/N₀

図4. 2. 4と図4. 2. 6で時間の経過と共に C/N_0 の値が低下しているように見えるのは、衛星の仰角の低下により地表や電離層の影響を受けやすくなるからである。

次に示すのはこの実験で、マルチパスの影響をほとんど受けない仰角、方位角にある4番衛星の擬似距離から搬送波位相を引いた CC-difference の値と C/N_0 の値である。

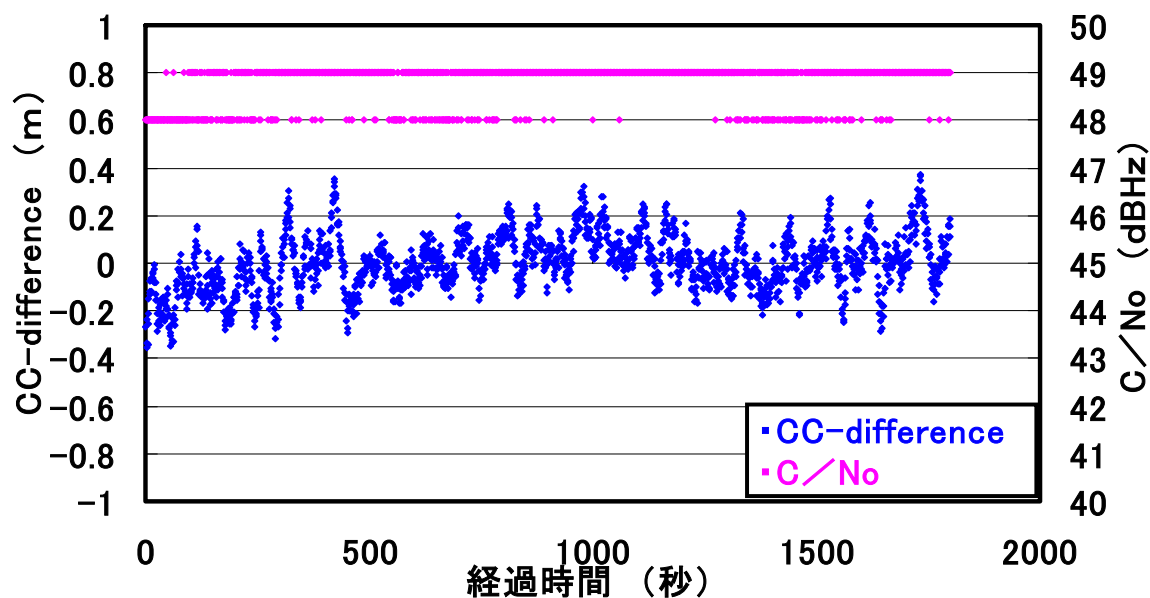


図4. 2. 7 17日1番衛星と同じ時間帯の4番衛星の
CC-difference と C/N_0

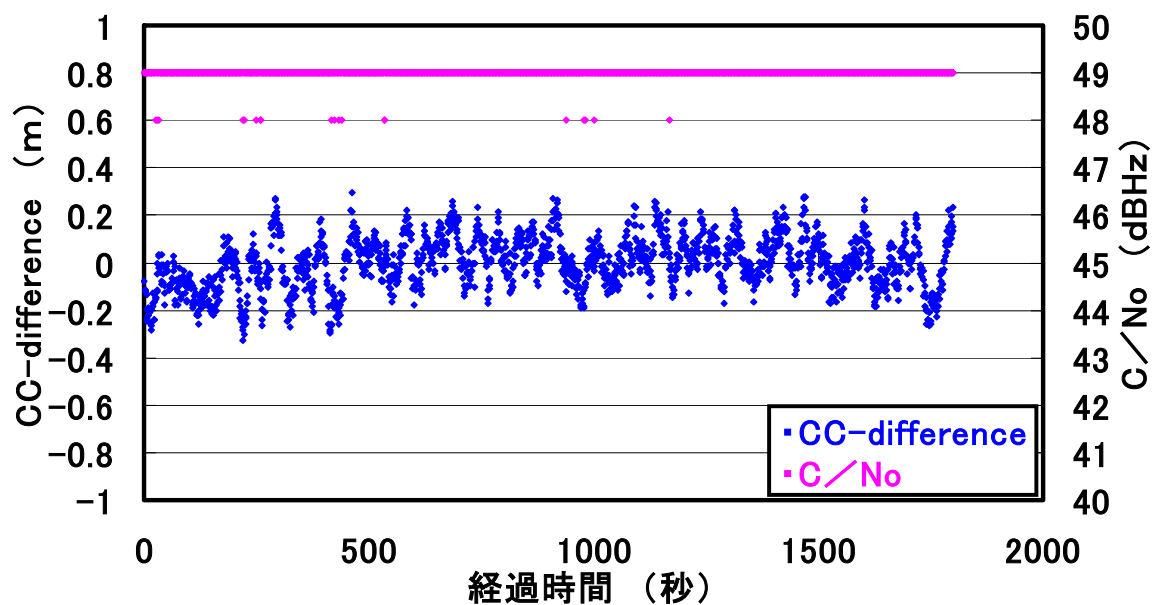


図4. 2. 8 18日1番衛星と同じ時間帯の4番衛星の
CC-difference と C/N_0

図4.2.3と図4.2.5のグラフから1番衛星についても20番衛星についても、反射板が金属壁のほうが、コンクリート壁よりもマルチパス誤差が大きいという結果が得られた。また、C/Noの値も反射板が金属壁のほうが、変化量が大きい。表4.2.1は図4.2.3から図4.2.8の結果の標準偏差をとった値である。

表4.2.1 マルチパス誤差とC/Noの標準偏差

		金属壁	コンクリート壁
マルチパス 誤差 (m)	1番衛星	1.2372	0.5173
	4番衛星	0.1176	0.1098
	20番衛星	1.2884	0.6223
C/No (dBHz)	1番衛星	2.1728	1.5812
	4番衛星	0.4129	0.1022
	20番衛星	2.4443	1.7033

※4番衛星はほとんどマルチパスの影響を受けていない衛星である為、マルチパス誤差というよりは受信機による熱雑音誤差である。

4. 4 静止測位実験の考察

4 番衛星からの電波は反射板による影響を受けない方位角、仰角に位置し、マルチパス波による影響がほとんど存在しないため、CC-difference、C/No ともに安定した値を得ることができた。CC-difference から得られた誤差のほとんどは受信機の熱雑音による誤差であると考えられる。よって、受信機の熱雑音による誤差は OEM3 受信機の場合、大きくても ± 0.3 m ぐらいであると推定できる。それに比べコンクリート壁及び金属壁に反射した電波が GPS アンテナで受信される場合、CC-difference はコンクリート壁で ± 1.5 m、金属壁で ± 3.0 m 以上と受信機の熱雑音のみによる誤差に比べて大きいことからマルチパス誤差が存在しているということが推定できる。また、マルチパス波の影響がほとんどない場合は C/No の値もほぼ一定であることが分かる。

次に、反射材の違いによるマルチパスへの影響があるかないかであるが、図 4. 2. 3 及び図 4. 2. 5 より、青色のプロットで示した金属壁の時のマルチパス誤差の方がコンクリート壁の時と比べて大きく変動していることが見て取れる。また、表 4. 2. 1 を見てもわかるように金属壁の時のマルチパス誤差の標準偏差が 1.2372 と 1.2884 であったのに対し、コンクリート壁の時は 0.5173 と 0.6223 であり、金属壁の方が大きくばらついていることが分かる。よって、グラフや標準偏差から反射材が金属壁の方が、マルチパス誤差に与える影響が大きいと考えられる。

マルチパス波と直接波の干渉によるコードや位相ずれによりマルチパス誤差が発生する。そこで、金属壁とコンクリート壁で、マルチパス誤差へ与える影響がなぜここまで違うのか考えた時、マルチパス波の信号強度の違いが考えられる。マルチパス波と直接波が干渉する時、双方の位相により、信号強度が強くなったり、弱くなったりする。その信号強度を表したのが図 4. 2. 4 及び図 4. 2. 6 の C/No である。遅延距離に応じて双方の位相が逆転するため信号強度はフェージングしている。コンクリート壁に比べ金属壁の方が、大きく変動しているのは、金属壁の方がマルチパス波の電波強度が強いことを示している。よって、電波をよく反射する物質ほどマルチパス波の電波強度が強いのでマルチパス誤差が大きくなると考えられる。

第5章 移動体測位におけるマルチパス

5.1 移動体測位実験の概要

移動体におけるマルチパス測定のために、移動体（自動車）に GPS アンテナ、受信機等を設置してコースを走行しデータを取得する。そして、後処理で短基線 DGPS 測位を行いコースごとの測位結果を調査する。

コースは、後処理で短基線 DGPS 測位を行うため、基準局から数 km 以内のところとし、一周五分から十分のコースを三周する。コースは周りの環境を変えて数種類用意する。データ取得時には移動体にカメラを取り付け、前方と天頂方向を GPS 受信機からの信号で同期して一秒ごとに撮影し、解析時に利用する。

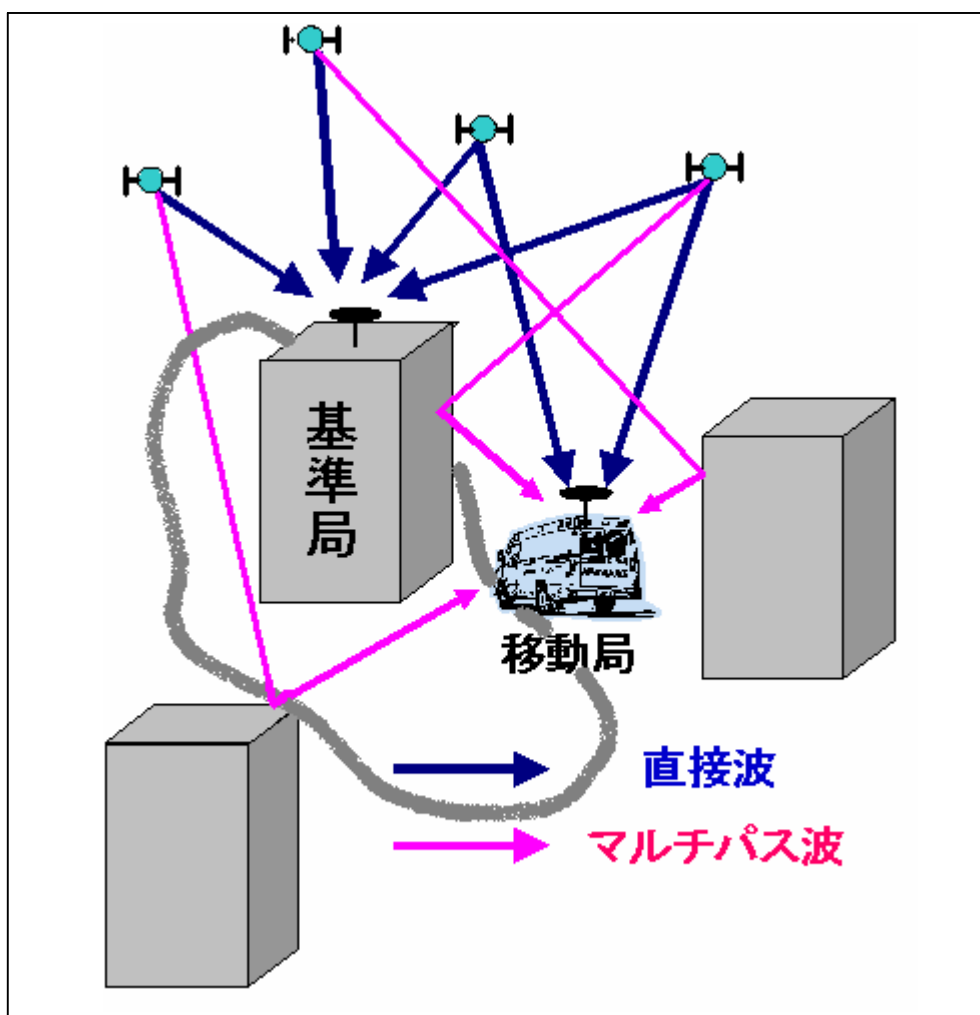


図5.1.1 移動体実験のイメージ

取得データ

擬似距離 (L1 帯、L2 帯) 搬送波位相 (L1 帯、L2 帯) 衛星位置 C/N₀

使用受信機

ノバテル社製 OEM4 受信機

使用アンテナ

ノバテル社製 GPS600 アンテナ

データ取得間隔

1 秒

解析用写真

- ・自動車フロント部に USB 接続式の CCD カメラを設置
- ・自動車のボディー上に魚眼 CCD カメラを設置

GPS 受信機と同期させ、1 秒に 1 コマ

データ取得開始時間

丸の内コース① 2003 年 12 月 23 日

丸の内コース② 2003 年 12 月 23 日

DGPS 測位用データ

移動体実験と平行して航海学科実習棟屋上にて基準局データを取得



図 5. 1. 2 実験に利用した自動車



図 5. 1. 3 実験に利用した機材



図 5. 1. 3 実験の様子

5. 2 移動体測位実験の個々のコースの結果と考察

5. 2. 1 丸の内①コース

次に示す図5. 2. 1及び図5. 2. 2は、2003年12月23日に丸の内①コースを走行した際取得したデータを使って、後処理でDGPS測位を行い、3周分、地図上に赤い点でプロットしたもの及びコース走行中の可視衛星数の変化を示したものである。また、コース上のポイントとなるべき箇所を選び、ポイントごとに調べる。また、図5. 2. 3、図5. 2. 4は可視衛星のそれぞれの仰角と方位角を示している。

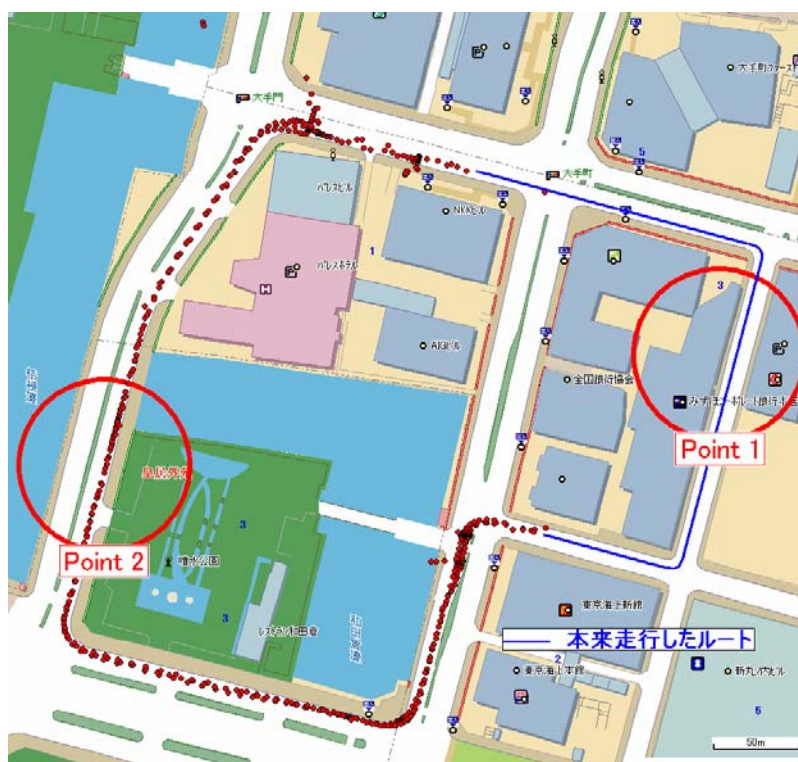


図5. 2. 1 DGPS 測位結果

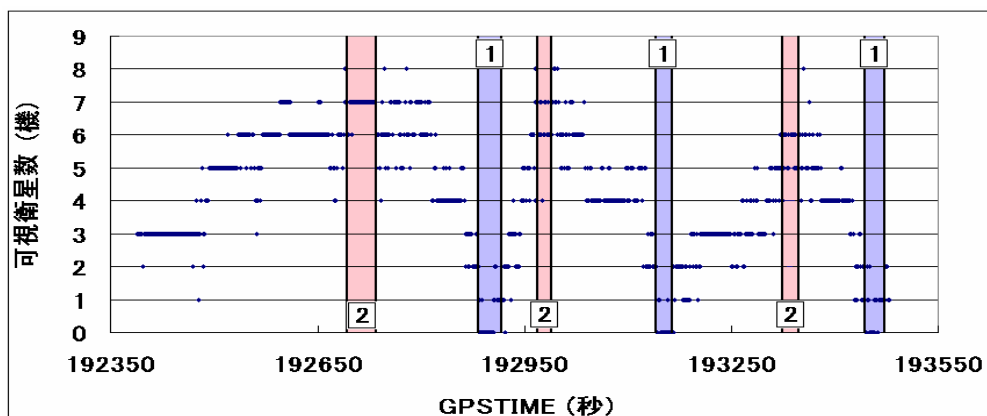


図5. 2. 2 可視衛星数の変化

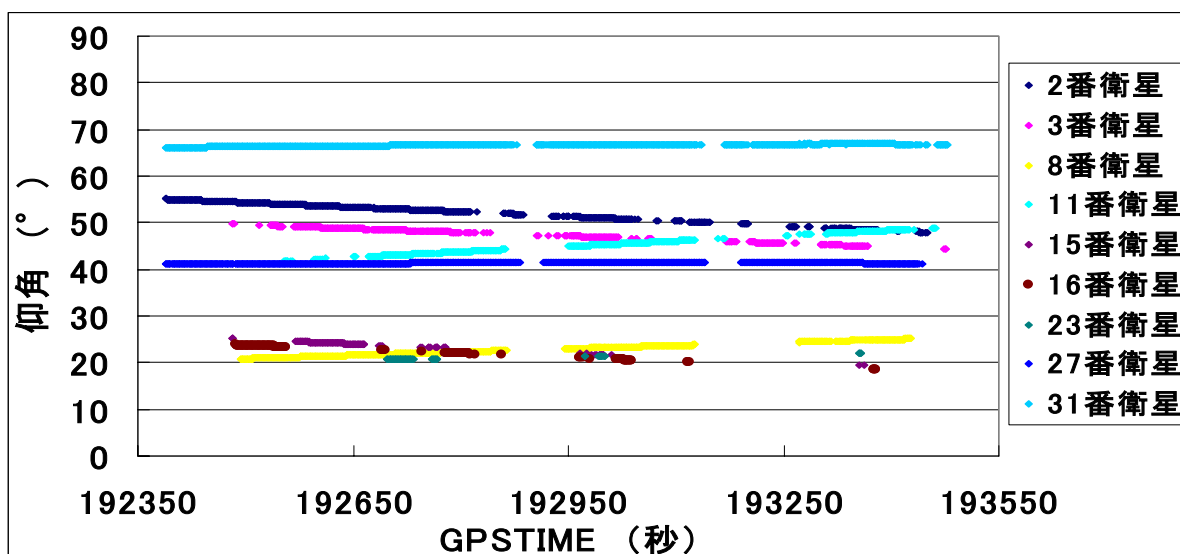


図5. 2. 3 可視衛星の仰角の様子

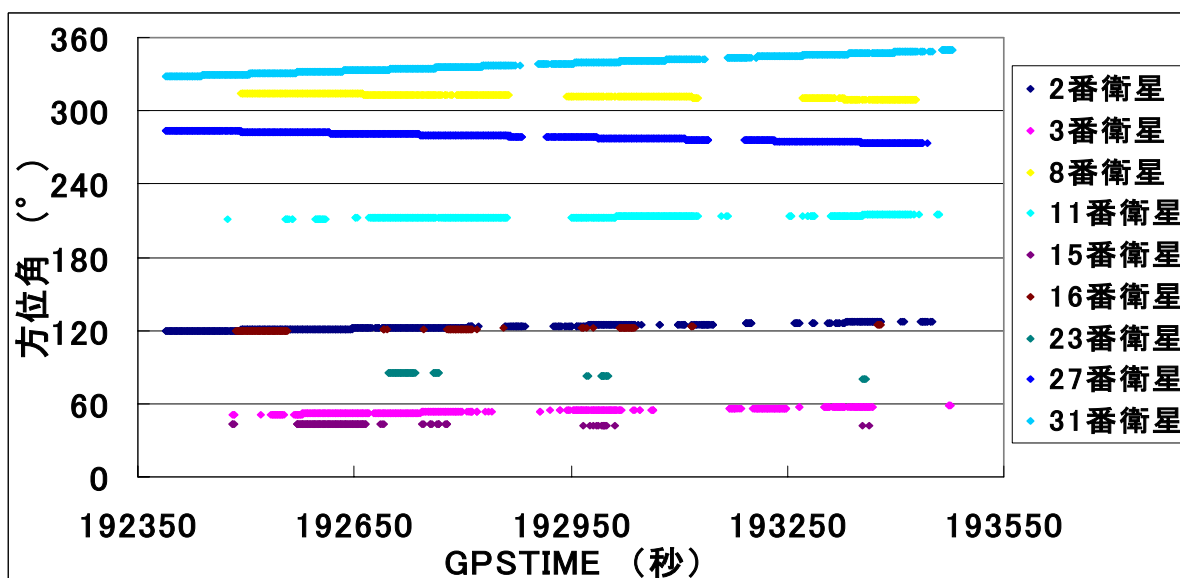


図5. 2. 2 可視衛星の方位角の様子

次に Point1 周辺における拡大図と可視衛星数を示す。また、写真は Point1 周辺の進行方向前方及び、天頂方向の様子を写したものである。



図5. 2. 5 Point1 拡大図

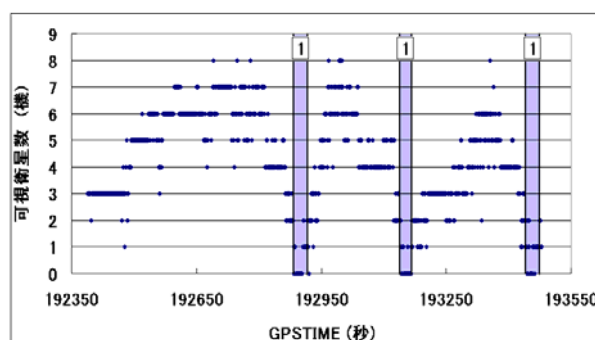


図5. 2. 6 Point1 周辺の可視衛星数

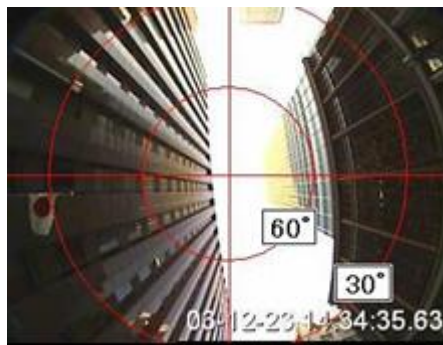


図 5. 2. 7 Point1 周辺の前方の様子 図 5. 2. 8 Point1 周辺の上空の様子

Point1 周辺の拡大図である図 5. 2. 5 から分かるように、全く測位することができなかつた。単独測位において測位に必要なとする衛星数は 4 機以上であるが、図 5. 2. 6 より Point1 周辺で確保できる衛星は 1、2 機である。中には全く衛星を確保できない時間も存在した。図 5. 2. 7 と図 5. 2. 8 の写真から周辺の環境を調べてみると Point1 では非常に高いビル群であるため、上空の大部分はビルの影で隠れてしまっている。そのために、測位に必要な衛星数の確保が困難で測位不能であったのだと考えられる。

次に Point 2 周辺における拡大図と可視衛星数を示す。また、写真は Point 2 周辺の進行方向前方及び、天頂方向の様子を写したものである。

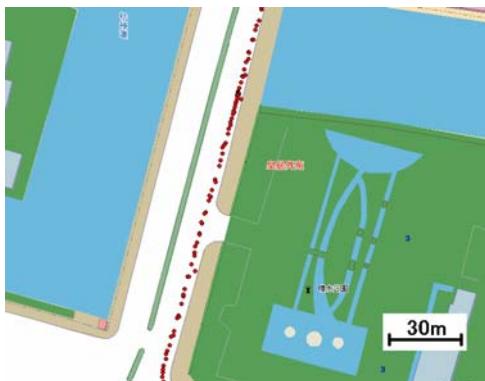


図 5. 2. 9 Point 2 拡大図

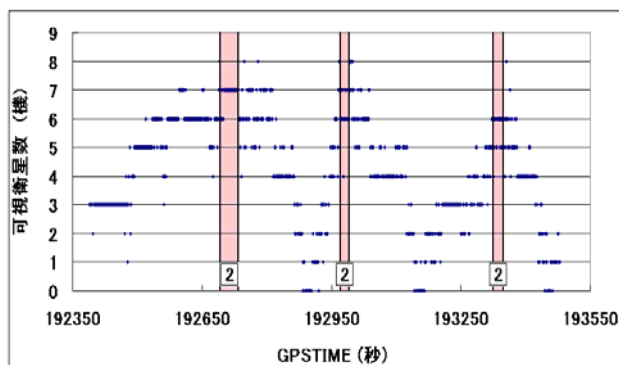


図 5. 2. 10 Point 2 周辺の可視衛星数



図 5. 2. 11 Point 2 周辺の前方の様子



図 5. 2. 12 Point 2 周辺の上空の様子

Point 2 周辺の拡大図である図 5. 2. 9 から分かるように、毎秒測位することができた。図 5. 2. 10 より Point 2 周辺での衛星数も 5 機から 7 機と単独測位において必要とする 4 衛星以上確保することが出来ている。図 5. 2. 11 と図 5. 2. 12 の写真から周辺の環境を調べてみると、Point 2 は広い道路やその周りにある広い公園によって非常に上空の開けた場所であることが分かる。そのために、測位に必要な衛星数の確保が出来、図 5. 2. 9 を見る限り、測位誤差の小さな測位が出来たものと考えられる。

5. 2. 2 丸の内②コース

次に示す図 5. 2. 11 及び図 5. 2. 12 は、2003 年 12 月 23 日に丸の内②コースを走行した際取得したデータを使って、後処理で DGPS 測位を行い、3 周分、地図上に赤い点でプロットしたものと及びコース走行中の可視衛星数の変化を示したものである。また、コース上のポイントとなるべき箇所を選び、ポイントごとに調べる。また、図 5. 2. 13、図 5. 2. 14 は可視衛星のそれぞれの仰角と方位角を示している。

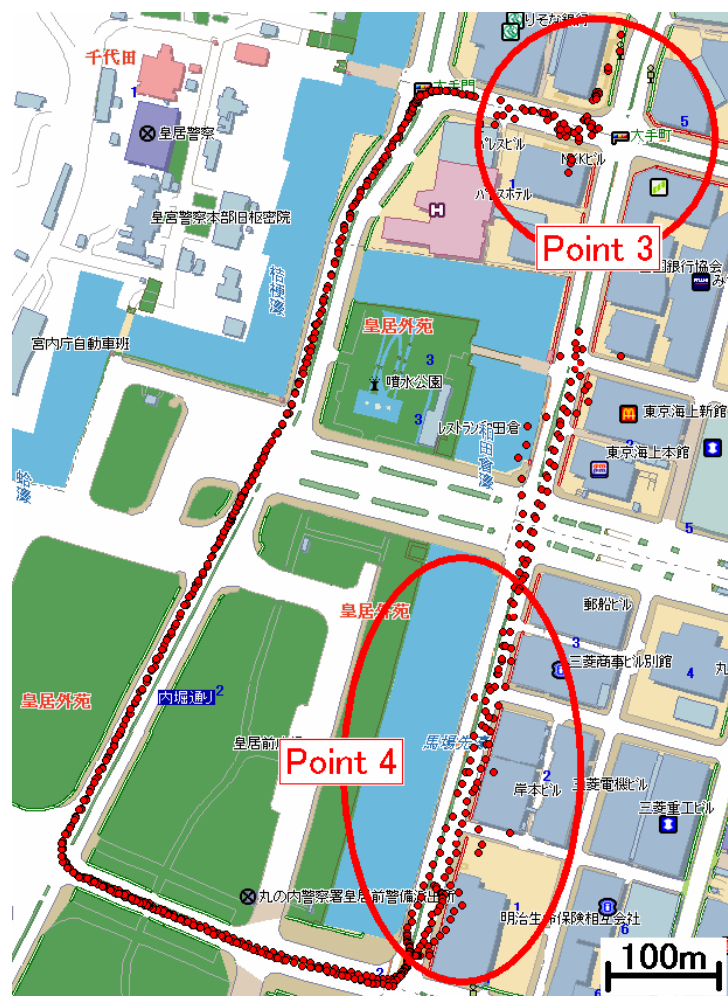


図 5. 2. 11 DGPS 測位結果

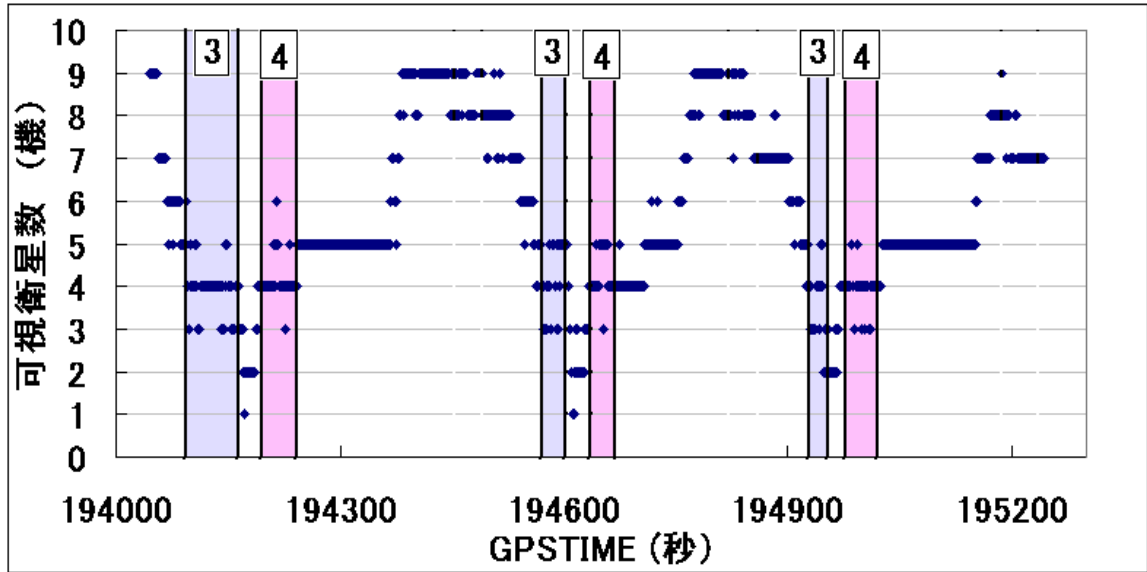


図 5. 2. 12 可視衛星数の変化

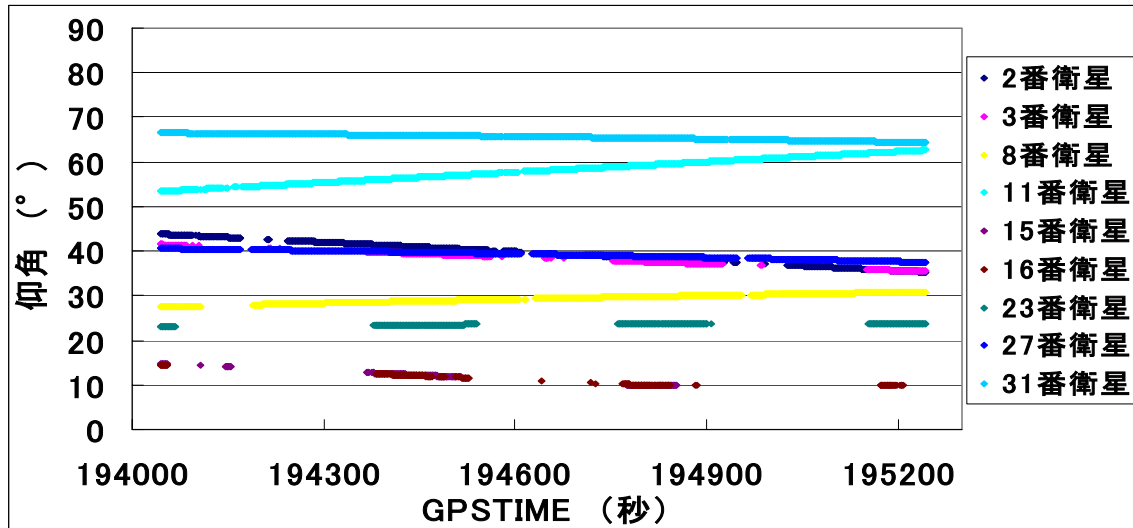


図 5. 2. 13 可視衛星の仰角の様子

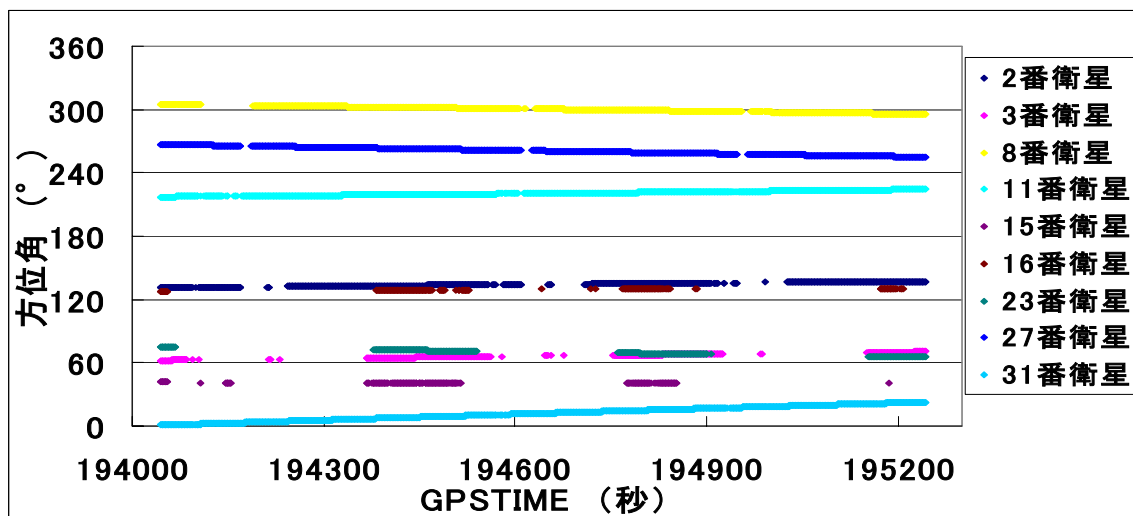


図 5. 2. 14 可視衛星の方位角の様子

次に Point3 周辺における拡大図と 31 番衛星の C/No の値を示す。また、写真は Point 3 周辺の進行方向前方及び、天頂方向の様子を写したものである。

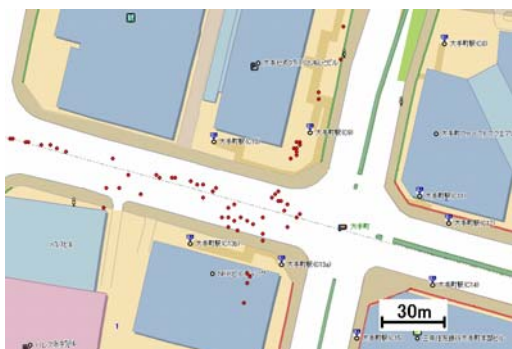


図 5. 2. 15 Point 3 拡大図

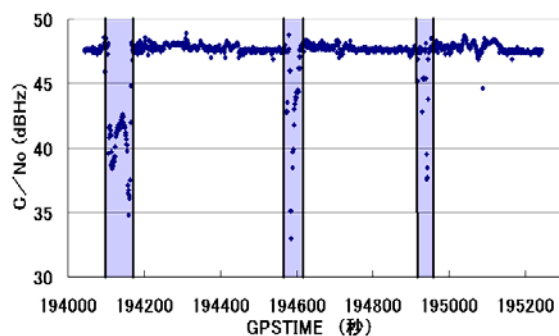


図 5. 2. 16 Point 3 周辺の 31 番衛星の C/No



図 5. 2. 17 Point 3 周辺の前方の様子

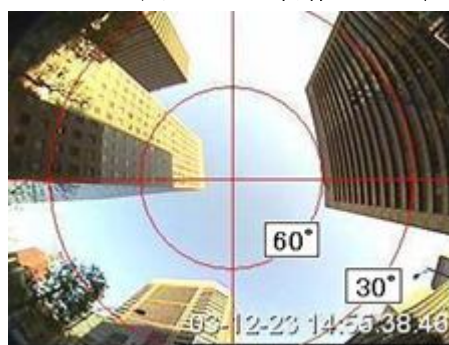


図 5. 2. 18 Point 3 周辺の上空の様子

Point3 は大きな交差点付近で信号待ちをしている時間が大半であった。図 5. 2. 15 から信号待ちをしている辺りで、大きな測位誤差が発生していることがわかる。このような大きな測位誤差が発生する要因として、マルチパス波の影響や衛星配置が悪い等が考えられる。Point3 でこのような大きな誤差が生じたのは、図 5. 2. 16 の C/No からマルチパス波によると推測できる。しかし、これほど極端な C/No の劣化はまれである為、受信した電波に直接波が存在せず、マルチパス波のみ受信したことも考えられる。

次に Point 4 周辺における拡大図と水平方向の精度低下率を示す HDOP の値を示す。HDOP の値は大きいほど精度が低い。また、写真は Point 4 周辺の進行方向前方及び、天頂方向の様子を写したものである。



図 5. 2. 19 Point 4 拡大図

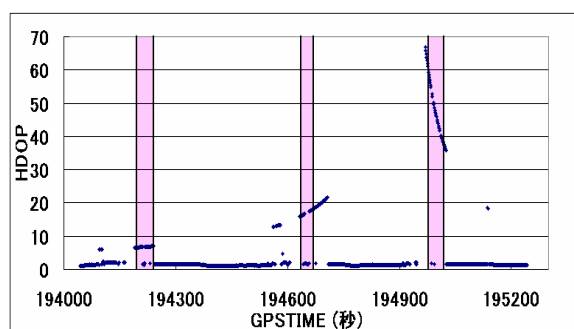


図 5. 2. 20 Point 4 周辺の HDOP

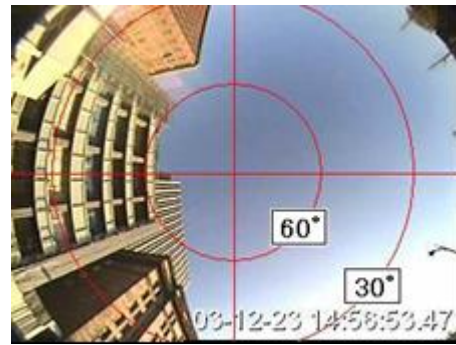


図 5. 2. 21 Point 4 周辺の前方の様子 図 5. 2. 22 Point 4 周辺の上空の様子

Point4 は片側がビルの影になっており、もう片側が開けた環境になっているところである。片側が開けているため測位に必要な 4 衛星以上の衛星を確保できているが、図 5. 2. 19 を見る限り、大きな測位誤差が存在している。水平方向の精度低下率を示す図 5. 2. 20 の HDOP の値を見てみると、Point4 周辺においてその値が特になくなっていることが分かる。これは確保した衛星の配置が、開けた方の一方に片寄っているため、測位精度が低下して、大きな誤差が発生したものと考えられる。

第6章 まとめ

6.1 まとめ

静止測位実験では予想通りではあるが、金属壁の方が反射板である時に、マルチパス誤差が大きくなるという結果が得られた。今回の実験で使用した金属壁は、戸棚の扉を使用した為に、どのような物質の構成によって作られているのか分からなかった。どのような物質か特定できれば、反射係数などが分かり、反射率とマルチパス誤差の関係を調べることができるのだが、今回の実験ではそこまで至ることは出来なかった。しかし、金属とコンクリートでは、金属の方が、反射率が高いのは明らかであり、その分マルチパス波の強度が増したと言って間違えない。強度の強いマルチパス波が直接波と干渉することで直接波の波形は大きく変形することになる。図4.2.4や図4.2.6の C/N_0 のグラフからもマルチパス波と直接波が干渉することで、位相が等しい時に C/N_0 の値が大きくなり、位相が逆の時に C/N_0 の値が小さくなっていることが考えられる。また、コンクリート壁の方が金属壁に比べて変動が小さいのはマルチパス波の強度が弱いからである。図4.2.3や図4.2.5のようにコンクリート壁の方が、マルチパス誤差が小さいのはその為である。以上より、反射する物質によってマルチパス波の強度が異なり、反射しやすいものほどマルチパス波の強度が高まるので、マルチパス誤差が大きくなると言える。

移動体実験では周囲の環境によりいろいろな形で測位に影響を与えていることが分かった。基本的に上空の開けているところでは大きな測位誤差は見られなかった。しかし、ビル街周辺では大きな測位誤差があったり、測位できないところがあったりした。大きく分けて3つの原因が存在した。1つは可視衛星不足である。周囲が高層ビルによって囲まれているところや狭い道路では、上空の大半が周囲の建物の影となってしまう為に、測位に必要な4機以上の衛星が確保できず測位できないことがしばしばある。2つ目はマルチパス誤差による測位精度の低下である。今回実験に使用した丸の内の様なビル街は測位に必要な衛星を充分確保することが難しい。その為、4機ないし5機の衛星を使用して測位することが多かった。その確保した衛星の C/N_0 を見てみると、マルチパス波の影響を受けているものが数多く存在する。ビル街はもともとマルチパスの影響を受けやすいところではあるが、測位に使用した衛星の大半がマルチパスの影響を受けていた場合も存在し、移動体測位に置いてもマルチパス波による誤差が大きいことがわかった。3つ目は衛星配置による測位精度の低下である。高層ビルの近くを通過する時など、上空の一部分以外、ほとんどが建物の影になる場合がある。ポイント4が良い例で、衛星を4機以上確保しているが一部に片寄った配置になっている為に測位精度が著しく低下しているのである。以上より、周囲に環境の違いで、測位誤差の原因にもいろいろ存在することが分かった。

6. 2 今後の課題

今回の静止実験で使用した反射板は、金属壁とコンクリート壁の漠然とした2種類のみであった。現実には、この他にもいろいろな物質によってマルチパスが発生している。街中に存在するビルにはガラスが多く利用され、ガラスでない部分もコンクリートそのものではなく何らかの物質でコーティングされているものが多く存在している。看板にしても金属の表面をペンキで塗っているわけであり、布やビニール製の看板など良く見かける。そこでアルミや鉄、銅、コンクリート、タイル、レンガ、ガラス、木材、布、ビニールなど種類を増やして実験する必要があると思う。また、GPSで使用するマイクロ波に対する反射係数を詳しく調べることで、反射係数とマルチパス誤差との関係が明白になり、この実験に存在価値が大きくなると考えられるので実験していきたい。

また、移動体実験での実験でマルチパス波の影響で大きな測位誤差が生じることが確認できた。今後はマルチパスの影響を強く受けている衛星を使用しないようにしたり、CC-differenceなどを用いてマルチパス波による測距誤差を補正したりしてマルチパス波による測位精度の低下を軽減していきたい。

謝辞

本研究及び卒論作成において、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。

GPSの基礎や測位用プログラムから卒業研究まで様々な助言、ご指導を頂きました久保信明助手に深く感謝致します。

実験データを提供して頂きました新衛生ビジネス株式会社の前田裕昭氏に深く感謝致します。

データ取得などでお世話になりましたGNSSの浅子正浩氏に深く感謝致します。

データの取得や解析方法、プログラム作成など本当に毎日毎日ご指導して下さいった大学院生の鈴木崇史氏に心より感謝致します。

最後になりましたがGPSをはじめ、様々な質問に答えて頂きました情報通信工学研究室の皆様心より感謝致します。

参考文献

久保 信明 「定点測位におけるコードマルチパス誤差の削減について」
電子情報通信学会 2001年

土屋 淳・辻 宏道 「新・GPS 測量の基礎」 日本測量協会 2002年

坂井 丈泰 「GPS 技術入門」 東京電機大学出版局 2003年