

平成 16 年度

卒業論文

DGPS 補正情報に関する研究

東京海洋大学

商船システム工学課程 航海学コース

学籍番号 2001514

氏名 五味泰斗

指導教官 安田明生 教授

Abstract

Study of DGPS Pseudorange Correction Data

Yasuto GOMI

Supervisor: Akio YASUDA

Student ID 2001514

Navigation Course on Mercantile Marine System Engineering,
Laboratory of Communication Engineering,
Tokyo University of Marine Science and Technology

The Global Positioning System (GPS) is a satellite-based navigation and positioning system, pioneered in the United States of America. Although this system had been used for military purpose of U.S and key allies, in recent years, have built an important social infrastructure for the general public to provide position information: car navigation, a cell-phone, a vessel, and precise survey. In response to these uses, various GPS receivers were developed by manufacturer, and have sprang up on the market. This paper is intended as an investigation of diverse GPS receiver's performance and characteristic. Then, we evaluated their performance with the following methods.

At a reference station in Differential GPS (DGPS); that is a positioning procedure uses two receivers, a rover station at an unknown location and an above at a fixed location; correction data that based on the differences between its actual ranges and observed pseudoranges must be computed and transmitted. By way of exception, in middle and more baselines, data at reference can't correct about the ionospheric or tropospheric delay. Japan Coast Guard (JCG) provides DGPS correction data service for the public that is overlapped with the middle-wave beacon used for the vessel direction finding. We created pseudorange correction (PRC) data using two GPS receivers, and did an experiment of PRC comparison and DGPS positioning. GPS receivers with investigation were OEM4 from NovAtel as a surveying dual-frequency receiver and GT80 from FURUNO Electric Co. as an inexpensive single-frequency receiver. The DGPS positioning results were obtained, and we confirmed accuracy and reliability of these three different correction data. It is found that positioning results and some standard deviations were not all that much difference in these correction data. These results lead to the conclusion that GT80's correction data has high accuracy and DGPS correction data service transmitted by JCG possesses higher reliability on the basis of OEM4's positioning result.

We compared point positioning with carrier-smoothed pseudorange results both OEM4 and GT80. Changing the smoothed-time enable to demonstrate how the carrier-smoothing for each GPS receiver is effective. OEM4's positioning results showed that the carrier-smoothing is non-effective because of its original high accuracy without smoothing. However GT80's significantly improved with carrier-smoothing. It seems reasonable to suppose that GT80 is more available receiver for. On the another conclusion, we see that optimum smoothing-time is on 100 to 500 seconds.

目次

第1章 序論

1.1	はじめに	1
1.2	GPS の概要	2
1.3	研究の目的と背景	3

第2章 GPS/DGPS 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	測位精度と誤差要因	7
2.2	DGPS 測位	9
2.2.1	測位原理	9
2.2.2	測位位置補正方式	9
2.2.3	擬似距離補正方式	10

第3章 DGPS 補正情報について

3.1	補正情報伝送形式	11
3.2	海上保安庁の DGPS システム	12
3.3	RTCM 標準規格の概要	13

第4章 キャリアスムージング

4.1	キャリアスムージングとは	15
4.2	原理	16
4.2.1	ハッチフィルタ	16
4.2.2	カルマンフィルタ	17
4.3	実験及び結果	20
4.3.1	はじめに	20
4.3.2	電離層遅延の1次式による近似モデル	20
4.3.3	実験概要	20
4.3.4	実験結果	21
4.3.4.1	ハッチフィルタを用いたキャリアスムージング	21

4.3.4.2	カルマンフィルタを用いたキャリアスムージング	28
4.4	考察	35

第5章 補正值比較/DGPS 測位実験

5.1	はじめに	36
5.2	補正值算出法	36
5.3	海上保安庁の DGPS 補正データ	38
5.4	実験概要	40
5.5	実験結果	42
5.5.1	DGPS 測位実験	42
5.5.2	補正值比較実験	48
5.6	考察	51

第6章 結論

6.1	まとめ	52
6.2	今後の課題	53

謝辞

参考文献

第 1 章

序論

1.1 はじめに

GPS(Global Positioning System)は、人工衛星による 3 次元位置決定のためのシステムである。DOD(Department of Defense)米国国防総省により、地球上で 24 時間測位が可能なシステムを求め 1973 年に開発が始められ、1974 年 7 月に最初の NAVSTAR(Navigation System with Time and Ranging)衛星が打ち上げられ、1993 年 12 月に正式運用開始宣言がなされた。しかし、この時点で衛星は試験段階のブロックと呼ばれる実験機を含めて 24 衛星以上で配置されていた。ブロックと呼ばれる実用機に全衛星が代わり、本格的な完成が達成されたのは 1995 年である。

2000 年 5 月 2 日 13 時 (JST)まで SA(Selective Availability)と呼ばれる測位精度を劣化させる操作がなされていた。その精度は単独測位では水平方向で約 100m であった。測位精度を上げるために種々の補正システムが世界中で運用されている。現在 GPS 測位の測位精度は SA が解除され、受信機、アンテナ等の周辺機器の進歩により大幅に改善されている。

GPS と類似している衛星航法システムには旧ソ連が開発し、現在ロシア連邦が運用している GLONASS(Global Navigation Satellite System)がある。また欧州が開発を行っている GALILEO があり、我が国においても準天頂衛星の運用が計画されている。

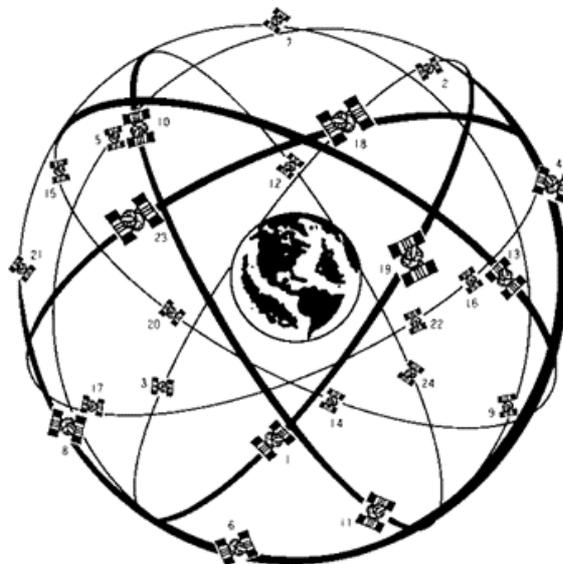


図 1-1 GPS 衛星軌道概念図

1.2 GPS の概要

表 1-1 に GPS 衛星の主要緒元を記す。GPS 衛星は高度約 20,000km の軌道を図 1-1 の GPS 衛星軌道概念図が示すように周回している。軌道面は赤道からの傾斜角 55° と各軌道間隔 60° の全てで 6 軌道ある。各軌道に 4 機の衛星が設置されており、計 24 衛星で運用するとされている。軌道上には予備衛星が 1 機配置できるようになっており、現在 (2004 年 7 月) では、29 機の GPS 衛星が使用可能である。各衛星は約 11 時間 58 分 2 秒 (約 $1/2$ 恒星日) で軌道を 1 周し、一年で同じ配置に戻るよう制御されているようである。実際には衛星軌道は随時変更されており完全には決定していない。衛星の軌道は 2m の範囲で地上のモニター局で管理されており、2 時間間隔で更新される高い精度の軌道情報 (Ephemeris) を 30 秒周期で対応した衛星が放送している。GPS 衛星 (ブロック / A) の設計寿命は 7.5 年とされている。各衛星は 10.23MHz の基準発信機を搭載しており、154 倍の $L1 = 1575.42\text{MHz}$ と 120 倍の $L2 = 1227.6\text{MHz}$ の 2 周波の右旋円偏波を全地球に向けて送信している。信号は全衛星同一の周波数を用いて C/A コードと P コードとともに衛星ごとに異なるゴールド符号と呼ばれる擬似ランダム雑音 (PRN : Pseudo Random Noise) で BPSK (Bi-Phase Shift Key; 2 相位相変調) 変調されている。具体的に GPS 衛星からコードに載せられて送信されるデータは、衛星軌道情報 (Ephemeris)、衛星時計の補正值、電離層補正パラメータ、全衛星の位置情報 (almanac) 等である。

また、GPS では GPS タイムというものがああり、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いる。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 GPS 衛星主要緒元

衛星数	4機 × 6軌道
衛星設計寿命	7.5年
軌道半径	約 26,561m
軌道高度	約 20,000km
周回周期	0.5 恒星日 (約 11 時間 58 分 02 秒)
軌道傾斜角	55°
搬送波周波数	L1 帯 1,575.42MHz (154 × 10.23MHz) L2 帯 1,227.6MHz (120 × 10.23MHz)
測距信号	C/A code L1 で送信、民間用に開放 P code L1, L2 で送信、非公開

1.3 研究の目的と背景

以前から GPS 受信機が、船舶や自動車などに搭載されている位置決定システムだということを知っていたが、日常生活においてはその詳細な原理、現状などは知る由もなかった。その後ある船舶に乗船する機会があり、初めて GPS 受信機を使用し、その有用性を学ぶことができた。受信機も数多くの種類があり、測量用などの高価なものから、カーナビに使われるようなもの、一般ユーザのための安価なものなどがあることを知った。本研究の背景は、様々な受信機の性能評価を自ら行い、その受信機がどのようなメリットやデメリットを有しているのか理解したいという原点に基づいている。性能評価の方法には以下の2つを主に選んだ。

1つ目は、DGPS 測位において補正情報の伝送は不可欠であるが、その補正情報を複数の受信機を用い作成することである。当然各受信機の補正情報は異なるわけで、これらを比較してみた。また、海上保安庁が行っている DGPS 補正情報サービスを利用し補正情報を取得し、同時に比較してみることにした。各補正情報を得た後、DGPS 測位を行いどの程度の測位結果が得られたのか調査した。これにより海上保安庁の DGPS システムについて理解を深め、DGPS 補正情報サービスの精度を検証した。

2つ目は、擬似距離のノイズを低減させるキャリアスムージングの効果を受信機間で比較してみることである。スムージングタイムを変化させることで、多くの異なる状況を作り測位結果にて調査した。一般的なハッチフィルタだけでなく、幅広く応用の効くカルマンフィルタによるスムージング方法を熟考し勉強することは、今後につながる重要な目的でもある。

以上より、受信機の特性を調査するため実験および解析を行った。

第 2 章

GPS/DGPS 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、地峡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 t の 4 個の未知数を解くので、4 個以上の衛星を同時か、同時とみなせるだけの短時間に測定

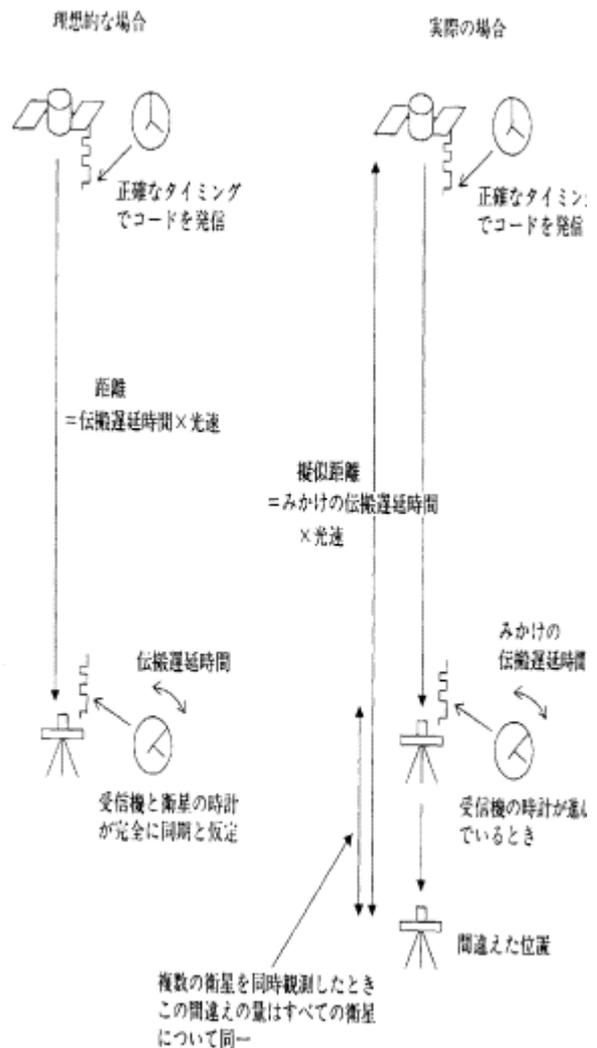


図 2-1 コードによる距離測定

することが重要である

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。

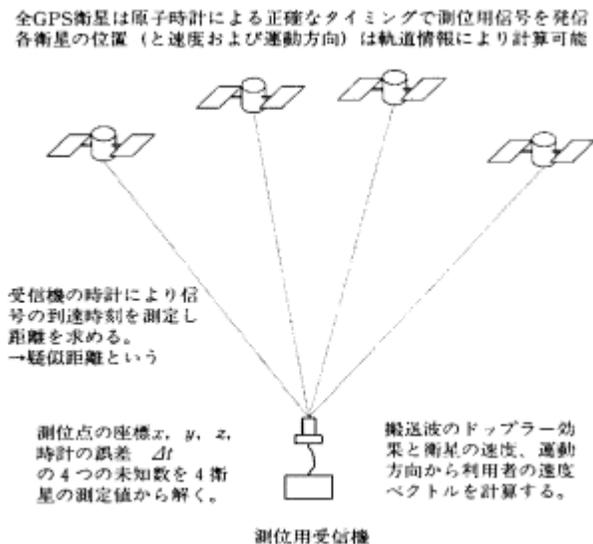


図 2-2 単独測位

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疑似距離をもとに行う。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、地球の中心を軸に沿って北原点、地球自方向を正方向とするZ軸、グリニ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、 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_n - \mathbf{r}_{n-1}$ とおくと、 i 番目の衛星からの擬似距離の補正量 r 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。

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

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 r_i として、式 (2.7) に代入して x 、 y 、 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 r_i を用いて新しい x 、 y 、 z 、と s を求めるという作業を繰り返すことにより、 x 、 y 、 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) の式の両辺に転地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 x 、 y 、 z 、 s を求めることができる。

2.1.3 測位精度と誤差要因

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（電離層、対流圏、反射信号等）、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作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。

GPS測位における主な誤差要因として電離層が挙げられる。電離層とは、高層大気圏において気体分子が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領域のことで、高度100km以上に現れるスプラディック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。

大気の屈折率が約1.0003と1よりやや大きい値となる為、対流圏による伝播遅延が生じる。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。

マルチパスという反射波による誤差も生じる。マルチパスは直接波と周囲の構造物や海面や地形の起伏などからの反射波がアンテナから入射し、信号を擾乱することによって発生し、真の相関のピーク検出を妨害する。これは大きな反射物が近くにある場合の固定局で顕著に現れ、時として 15m もの誤差を生じることがある。送信波は右旋波であるが、必ずしも理想的反射しないため、右旋波用のアンテナにも混入すると考えられる。DGPS等基準局を必要とする測位では、特にマルチパスによる誤差がないようにアンテナの設置を決める必要がある。またアンテナをチョークリング上に載せることで地面からの反射波の影響を削減できる。最近ではマルチパス軽減のために「narrow-correlator」受信機が存在する。

他にも受信機内部の様々な要因によって測定誤差が生じる。こうした影響は温度による影響を受けやすいことから、受信機の熱雑音(thermal noise)と呼ばれることがある。また、受信アンテナと受信機本体を接続する高周波ケーブルについては、品質の良いものを使用して最小限の長さにしたほうが良い。受信機内部の測定誤差は、高度な処理回路を採用している受信機でも 0.5m 程度生じるといわれている。

2.2 DGPS 測位

大気や電離層による誤差は衛星の仰角が極端に低くなれば同じ地域では概略同じである。そして、衛星信号の誤差も同じである。このような性質を利用して精度を高めるのが DGPS(Differential GPS)測位である。

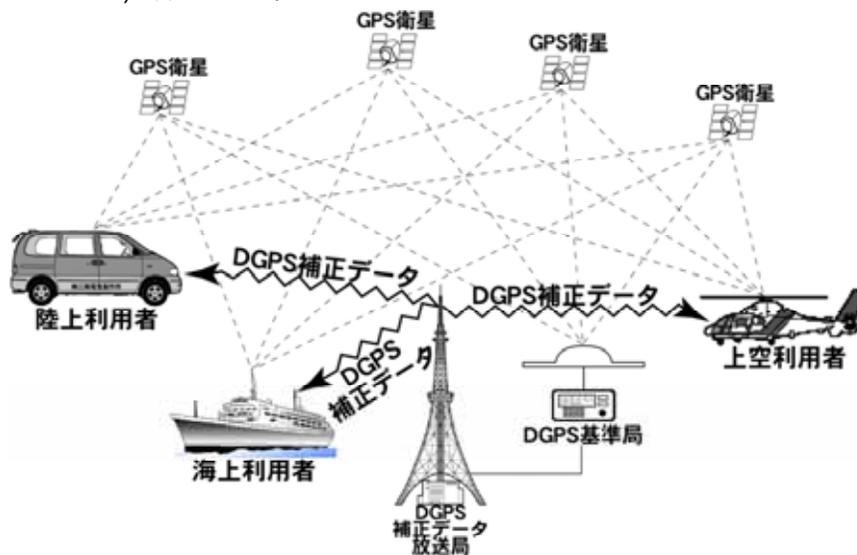


図 2-3 DGPS 測位原理

2.2.1 測位原理

DGPS は予め位置が正確に分かっている固定基準局(refernce station)で測位誤差を求め、それによってユーザー局での測位結果を補正して精度を改善するものである。その精度は2メートル程度で、条件がよければ1メートル以内の測位精度となる。ただし、DGPS 測位では基準局とユーザー局において大気や電離層等の遅延量を同じと仮定しているため両地点間の最大距離は数 100km から数 1000km までであり、それ以上になると精度が低下するので注意が必要となる。また、基準局からの補正データを伝送する必要があるためその伝送方法と距離が測位精度に影響することとなる。その点については、次章で述べることとする。

ここではその補正データとは何か。以下に DGPS 測位で利用されている 2 種類の補正方式について述べる。

2.2.2 測位位置補正方式

この方式は、正確に分かっている基準局の位置と、同地点で単独測位により出力された位置を比較することによって、位置の補正值(緯度、経度、高さもしくは三次元直交座標系の xyz 座標)を算出し、ユーザー局の測位結果にこの補正值を適用するものである。

この方式は次に述べる擬似距離補正方式と比較して、基準局からユーザー局へ伝送するデータ量は格段に少なくすむ。しかし、基準局とユーザー局とでまったく同じ衛星の組み合わせで測位を実行していなければ、補正結果が大幅に減少してしまうのが最大の欠点である。即ち、ユーザー側で使用した衛星の番号を含めた測位結果を何らかの方法(インターネット回線等)で基準局へ送り補正を行い、再びユーザー局へ伝送するといったようなことが必要となる。

2.2.3 擬似距離補正方式

この方式は、基準局で受信している衛星までの真の距離と、ユーザーが実際に測定した擬似距離を比較することによって、衛星ごとの擬似距離補正值、及びその変化率を算出してユーザー局に伝送する。ユーザー局では受信機で測定された擬似距離に、この補正值を適用して測位するものである。

前述した測位位置補正方式と異なり、基準局で擬似距離補正データが得られた衛星であれば、ユーザー局ではどんな衛星の組み合わせを測位に使用しても良いという柔軟性がある。この方式は世界標準として幅広く利用されていて、この研究で述べる DGPS の方式は全てこの擬似距離補正方式を用いている。

第 3 章

DGPS 補正情報について

DGPS では必ず、既知の点である基準局から未知点である移動局へ補正情報を伝送しなければならない。その伝送手段として様々なものが提案され、また実行されている。この章では伝送手段を述べ、さらにはそのシステムや規格の詳細まで言及することとする。

3.1 補正情報伝送形式

DGPS の補正情報の伝送手段とその特徴を以下に示す。

人力による運搬

データを CD-R やフラッシュメモリを用いて、基準局から未知点へ持っていくというもの。実時間性はない。

携帯無線機や特定省電力無線機の利用

デジタル伝送が可能であるが、到達距離が短いという短所がある。

電話回線や専用無線回線の利用

モデムを介したインターネット回線でデータを伝送するものと、専用の無線回線を使用する方法。欧州の一部地域では無線回線のサービスが行われている。

船舶用方向探知ビーコン電波への重畳

船舶が方向探知をするために使用中波ビーコンの電波に DGPS 補正情報を重畳させるというもの。専用の受信機があれば、誰でも補正データを取得できる。各国で運用しており、日本では海上保安庁のシステムが稼働中。実時間性に長けているが、電波の到達距離で最大距離が制約される。

通信衛星、航海衛星の利用

船舶用 DGPS に商業ベースで運用中、インマルサット(Inmarsat)で利用。欧州、アジア、米国の主に海域で利用可能。

FM(frequency modulation)放送への重畳

各国で運用中。日本でもカーナビゲーション用に一部運用している。

現在、世界的に普及している伝送方式は の3つである。いずれも各種電波に重畳させ補正情報を放送するサービスとして運用されている。特に本研究では、 の海上保安庁が中波ビーコンに補正情報を重畳させるサービスに着目し、5章においてそれに伴う実験を行った。

3.2 海上保安庁の DGPS システム

米国、欧州、日本の海上保安庁等では周波数 300kHz 付近の船舶用中波ビーコン電波への重畳して DGPS 補正データ情報サービスが行われている。多くの場合このビーコン送信局は灯台に併設されているため、海上利用が原則である。この電波は海岸に近い陸上でも十分に受信できまた数 100km のサービスエリアがあり、利用性は高い。専用の受信機を用いデータを取得する。

日本の海上保安庁は、船舶の安全を確保するため平成 7 年 12 月から釧崎と大王崎のビーコン局から送信されている中波に重畳して DGPS 補正データを放送するサービスが試験的に開始された。現在(2005 年 2 月)では全国 27ヶ所の DGPS 局と 1ヶ所の DGPS センター局を配置して運用されている。

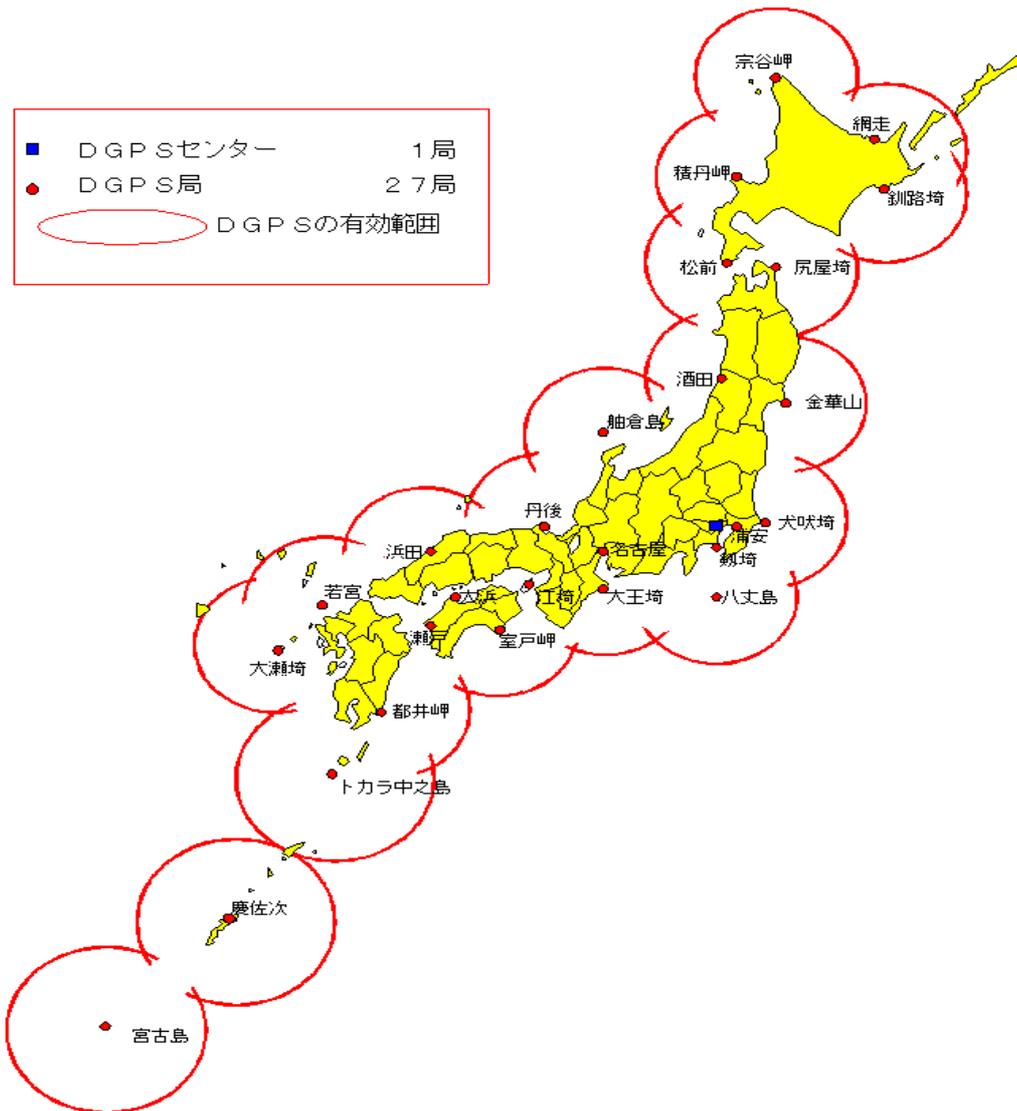


図 3-1 海上保安庁の DGPS システム

船舶用方向探知ビーコンの使用中波帯の伝搬特性として、地上波伝搬と電離層伝搬の2つがある。昼間の電離層伝搬は、著しく減衰が大きいため地上波による伝搬が主である。しかし夜間は、E層とF層の反射が利用できる。従って夜間、空間波(電離層伝搬による)と地上波が同時に到達する300km近辺では、著しいフェージングが生じることが考えられる。ゆえに、昼と夜で利用エリアが変化したり、特に夜間は同一周波帯を使用している他の中波ビーコン局との混信が発生する等の問題がある。

他にもDGPS補正データをFM放送電波に乗せて伝送することが実施されている。利用者は普通のFM受信機に付加装置を取り付けるか、初めから付加装置のついている受信機等によって基準局の補正データを取得できる。このサービスは、全国7ヶ所の基準局で求められた補正データをJFN系列放送局当のFM多重放送により提供している。

DGPS補正データを伝送するとき、限られた小規模の実験ならばそのグループだけの適当なデータ形式を決定し使用すればよいが、多くの利用者を対象にサービスを考えると共通規格を作成する必要がある。このような規格には、米国海上無線技術協会(RTCM: Radio Technical Commission for Maritime Service)の中の第104委員会(SC-104: Special Committee No.104)で勧告しているものがある。これをしばしばRTCM規格と呼び、世界的にも広く受け入れられている。

3.3 RTCM 標準規格の概要

現在、RTCM SC-104規格には、ver2までが規定されている。RTCM SC-104規格は、多岐にわたる利用を想定して、60種類以上のメッセージタイプを規定している。メッセージタイプとはデータの内容を示すもので、具体的に言えば擬似距離の補正量や基準局の座標値である。このタイプの中には、GPS測量の実時間キネマティック測位(RTK、real time kinematic)に関するものまで含んでいる。

表3-1にメッセージタイプとその内容の概略を示す。しかしほとんどの規格が暫定であり、これから変更されうるものであるが、実用上は問題ない。

また、FM音声多重放送を利用したDGPS補正データ放送では、データフォーマットが中波ビーコンとは異なりDARC規格という方式で放送されている。

表 3-1 RTCM SC-104 規格のメッセージタイプの概要

メッセージタイプ	現状	内容
1	確定	DGPS補正量(擬似距離とその時間変化の補正量)
2	確定	デルタDGPS補正量(新旧の軌道情報等の中の違いの補正)
3	確定	基準局のパラメータ(基準局のWGS-84による3次元座標)
4	暫定	測量(搬送波位相用であったが使用されなかった)
5	廃止	衛星のヘルス(ヘルスの情報と基準局での衛星電波のSN比等)
6	確定	空白
7	確定	ビーコン暦(DGPS併設の海上ビーコン局の位置、周波数等)
8	暫定	擬似衛星の暦(擬似GPS衛星の電波の発射時刻等)
9	確定	限定DGPS補正量(1と同じで、使用する衛星だけの情報に限定)
10	保留	PコードのDGPS補正量
11	保留	C/Aコード、L1、L2補正量
12	保留	擬似衛星パラメータ
13	暫定	地上送信局パラメータ
14	保留	測量用予備
15	保留	電離層、対流圏メッセージ
16	確定	特別メッセージ(アスキーコードで最大90字)
17	暫定	軌道情報、アルマナック
18	暫定	搬送波位相(生データ)
19	暫定	擬似距離(生データ)
20	暫定	RTK搬送波位相補正
21	暫定	RTK擬似距離補正
22 ~ 58	—	未定
59	暫定	専用メッセージ(運営責任者からの通報)
60 ~ 63	保留	未定

第 4 章

キャリアスムージング

4.1 キャリアスムージングとは

GPS 開発において、擬似距離の精度を高めるために搬送波位相を利用することが試みられてきた。最近では、これが一般的にキャリアスムージング (Carrier-Smoothing) という名称で様々な受信機に使用されている。

受信機で観測された擬似距離の特徴として、距離の分解能が低いためその精度が悪く、ノイズを多く含んでしまうことが挙げられる。C/A コードや P コードなどの測位に用いられるコード擬似距離の分解能はそれぞれ 300m、30m となる。それに対し、L1、L2 帯の搬送波の波長はそれぞれ約 19cm、24cm であるから、コードによる距離測定に比べ分解能は非常に高く精度も格段に良くなる。ただし、位相観測には不確定性というバイアス成分 (一般的にこのバイアスをアンビギュイティと呼んでいる。) があることに注意が必要である。搬送波の時間変化の差分は擬似距離のそれよりも精度が高く、衛星とアンテナの距離変化にほぼ等しい。この搬送波差分を擬似距離の変化に適用すれば、ノイズの少ない擬似距離を理論的に得ることができる。

つまり、キャリアスムージングとは不確定性は無いがノイズを含むコード擬似距離に、バイアスを持つものの精度の高い搬送波位相の特性をうまく利用して、精度の高い擬似距離を取得することである。これによって、コード測位における精度改善が期待できる。以下の図 4-1 にキャリアスムージングの例を示す。

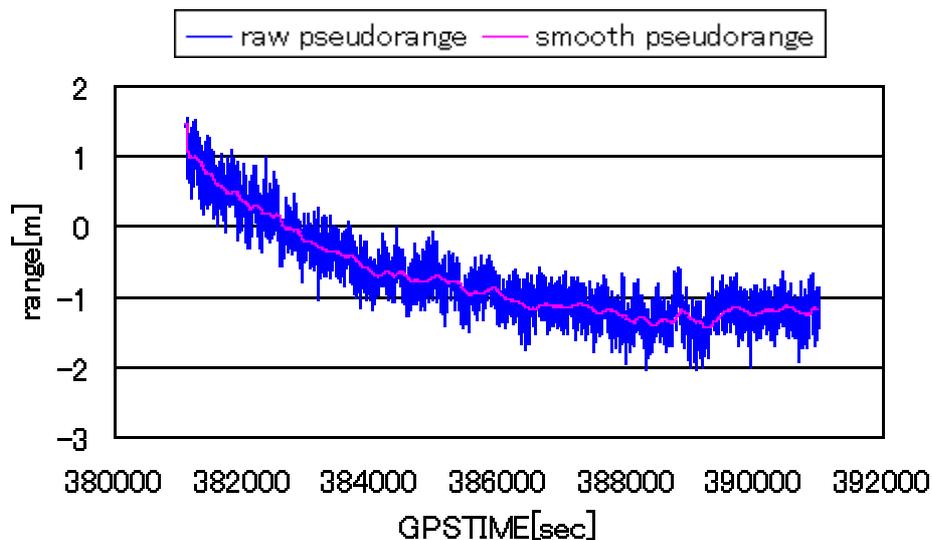


図 4-1 キャリアスムージングの例

4.2 原理

4.2.1 ハッチフィルタ

ハッチフィルタを用いたキャリアスムージングは、擬似距離に搬送波の差分を適用するという最も容易な概念で成り立っている。以下にスムージングされた擬似距離取得の計算方法を示す。

$$S_i = \frac{\rho_i + (M - 1)\{S_{i-1} + (\phi_i - \phi_{i-1})\}}{M} \quad (4-1)$$

- ここで、 S : キャリアスムージング後の擬似距離 (m)
 ρ : キャリアスムージング前の擬似距離 (m)
 ϕ : 搬送波位相 (m)
 M : 平均化定数 (sec)

を表し、添字でエポックと呼ばれる GPS 観測データの取得間隔を示している。今後、この章において 1 エポックは 1 秒として扱うこととする。

$i=1$ のとき、 $S_1 = \rho_1$ となる。スムージングされていない擬似距離がそのまま適用され変化は起こらない。

$i=2$ のとき、 $S_2 = \frac{\rho_2}{2} + \frac{\{\rho_1 + (\phi_2 - \phi_1)\}}{2}$ となる。この意味するところは、1 エポック前の擬似距離に搬送波の差分を加えたものと今現在得られた擬似距離とを、それぞれ半分ずつ用い平滑化した擬似距離を得ているということである。

$i=3$ のとき、1 エポック前に搬送波差分を加えた擬似距離は $\frac{2}{3}$ 、今期得られた擬似距離は $\frac{1}{3}$ の平均化定数を持って、 S_3 に適用されている。

このように M で指定された時間まで重みを変化させ、 M を過ぎたら重みを固定してスムージングを繰り返していく。

表 4-1 ハッチフィルタにおける重みの変化

エポック数	ρ_i	$\rho_{i-1} + (\phi_i - \phi_{i-1})$
$i=1$	1	0
$i=2$	0.5	0.5
$i=3$	0.333	0.666
...
$i=100$	0.01	0.99
$i=101$	0.01	0.99
...

表 4-1 にエポックごとの重みの変化を示した。1 エポックは 1 秒で $M=100$ とし、各重み係数がエポックごとに変化しそれぞれ ρ_i 、 $\rho_{i-1} + (\phi_i - \phi_{i-1})$ に掛かってくる。今期取得した擬似距離に加わる重みは徐々に減少していくのに対し、1 エポック前の擬似距離と搬送波差分との和に加わる重みは次第に増加していくことがわかる。また、 $i=100$ 以降は重みは固定されて変わらないこともわかる。

4.2.2 カルマンフィルタ

カルマンフィルタは、あるシステムにおける実観測特性より求めた誤差分散を与えモデル化することで最適なフィードバックカルマンゲインをリアルタイムで得ることができる。この逐次推定アルゴリズムを用いたフィルタは、現在様々な分野で幅広く活用されている。ここでは線形差分方程式を扱う離散型のカルマンフィルタについて述べる。以下の図 4-2 にカルマンフィルタのブロック図を示す。

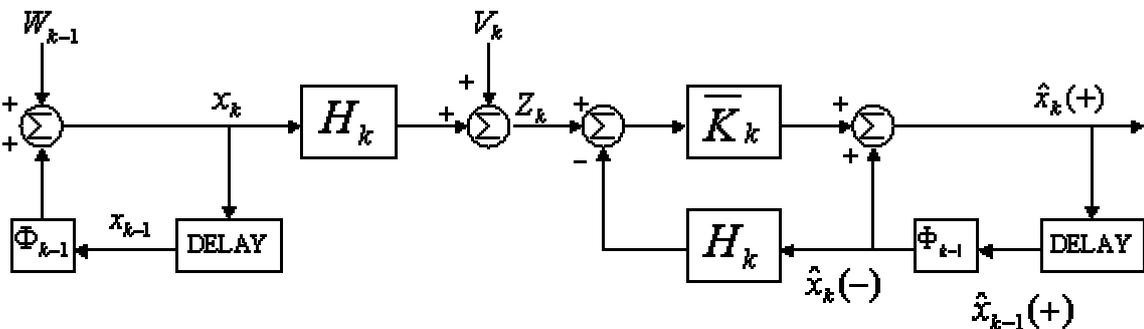


図 4-2 カルマンフィルタのブロック図

ここで、 \bar{K} : カルマンゲイン H : 観測行列
 Φ : 状態変遷行列 W : プロセス雑音
 V : 観測雑音 Z : 観測方程式
 x : 状態方程式 $\hat{x}(+)$: 事後推定状態方程式
 $\hat{x}(-)$: 事前推定状態方程式

と表す。 k は離散時間を示している。状態方程式、観測方程式はそれぞれ、

$$x_k = \Phi_{k-1} x_{k-1} + W_{k-1} \quad (4-2)$$

$$Z_k = H_k x_k + V_k \quad (4-3)$$

のように定義され、観測雑音 V とプロセス雑音 W の共分散行列をそれぞれ R 、 Q と表す。

次にカルマンゲインの計算を以下の式によって示す。 P は状態方程式における推定誤差の分散共分散行列である。 P の誤差分散によりフィルタリングの特性が変化し、調整することができる。

$$K_k = P_k H^T (H P_k H^T + R)^{-1} \quad (4-4)$$

これにより、事後推定状態方程式 $\hat{x}(+)$ は次式のようになる。

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + \bar{K}_k \{Z_k - H_k \hat{x}_k(-)\} \quad (4-5)$$

実観測で得られた Z_k と予測観測 $H_k \hat{x}_k(-)$ との差を、カルマンゲインによってどの程度事前に推定された状態方程式にフィードバックするか決定している。

キャリアスムージングとは擬似距離に精密な搬送波の差分を適用し、ノイズを低減させるものであった。以下にカルマンフィルタを用いたキャリアスムージングについて述べる。擬似距離、搬送波をそれぞれ

$$\rho_{L1} = \rho^* + \varepsilon_{\rho_{L1}} \quad (4-6)$$

$$\phi_{L1} = \rho^* + N + \varepsilon_{\phi_{L1}} \quad (4-7) \quad \text{と表す。}$$

ここで、 ρ^* : スムージングされた擬似距離 N : アンビギュイティ

$\varepsilon_{\rho_{L1}}$: 擬似距離観測誤差 $\varepsilon_{\phi_{L1}}$: 搬送波観測誤差

である。(4-6)(4-7)より、観測方程式 Z は行列を用いて次式で表すことができる。

$$Z = H \cdot X + R \quad (4-8)$$

ただし各行列は、 $Z = \begin{bmatrix} \rho_{L1} \\ \phi_{L1} \end{bmatrix}$ 、 $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 、 $X = \begin{bmatrix} \rho^* \\ N \end{bmatrix}$ 、 $R = \begin{bmatrix} \varepsilon_{\rho_{L1}} \\ \varepsilon_{\phi_{L1}} \end{bmatrix}$ 、 $\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 、と定義

され、プロセス雑音 Q については定義しなかった。 R には仰角依存の誤差を用い、そのまま P の分散共分散行列とした。

(4-6)、(4-7)の $\varepsilon_{\rho_{L1}}$ 、 $\varepsilon_{\phi_{L1}}$ には、大きな誤差要因である電離層遅延量も含まれている。

このままではカルマンゲインを決定する際、電離層遅延によって正しい値からはずれてしまうことから、事前推定値にプロセス雑音に変わる補正が必要となる。以下に電離層遅延量の補正方法を示す。1 エポックの電離層遅延量の変化量 ΔI は次式で表せる。

$$\Delta I_k = 2 \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \{(\phi_{L2,k} - \phi_{L2,k-1}) - (\phi_{L1,k} - \phi_{L1,k-1})\} \quad (4-9)$$

ただし、 f_{L1} : L1 帯搬送波の周波数 f_{L2} : L2 帯搬送波周波数

であり、添え字の k はエポックを示している。この ΔI を用いて(4-2)に次のような予測値をプラスしてやれば良い。

$$X_k = \Phi_{k-1} X_{k-1} + \begin{bmatrix} \Delta\phi_{L1,k} - \Delta I_k \\ \Delta I_k \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

ここで、 $\Delta\phi_{L1}$ は L1 帯搬送波の差分を表す。

カルマンフィルタでは、カルマンゲインが収束する平均化定数を指定しその時間まで更新し、その後固定するというを行っている。同様にハッチフィルタでも、カルマンゲインに相当する重みを平均化定数まで更新し、後に固定している。ユーザーはその観測特性にあったスムージングをするため、平均化定数を様々に変化させている。一般的にユーザーは、この操作を「何秒間スムージングをかける」といった表現をしている。

以上より、カルマンフィルタを用いたスムージングの流れは図 4-3 のようになる。

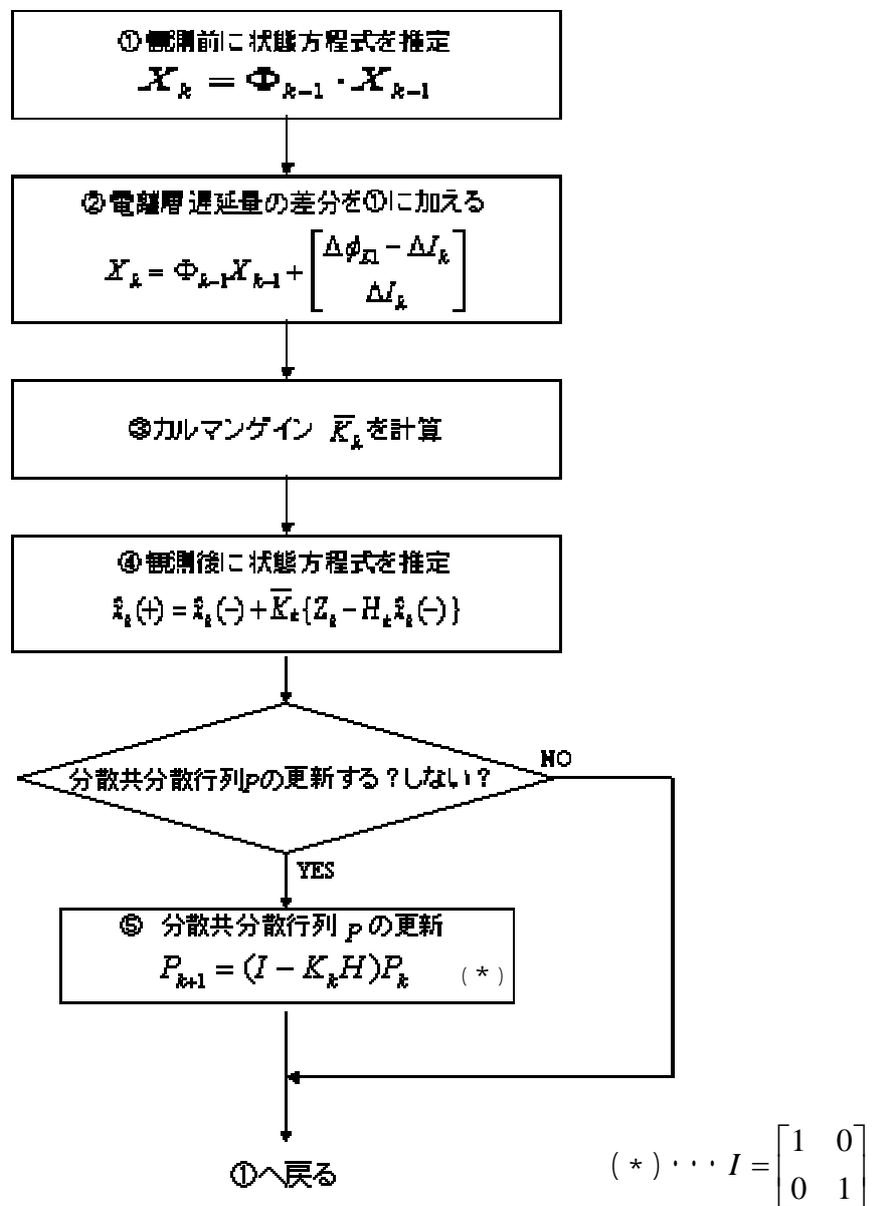


図 4-3 カルマンフィルタを用いたキャリアスムージングのフローチャート

4.3 実験及び結果

4.3.1 はじめに

キャリアスムージングは、擬似距離のノイズを低減するものである。上記 4.2 ではハッチフィルタとカルマンフィルタを用いたスムージング法について述べた。その際、スムージングは何秒間も掛け続けることはせずに、平均化定数まで重みやゲインを収束させてフィルタリングを行っている。本実験では、どの程度の時間スムージングを掛けるのが適当であるのか、スムージングの時間を様々に変更させ調査を行った。また、現在 GPS 受信機によってはデフォルトでスムージングが掛かっていたり、何らかの補正が加えられていたりする。ゆえに、各受信機によってスムージングの効果は変わってくるはずである。これを利用して受信機の特性を調査することも目的の 1 つとした。

4.3.2 電離層遅延の 1 次式による近似モデル

本実験で使用する受信機は測量用 2 周波受信機である NovAtel 社製の OEM4 と、比較的安価な 1 周波受信機である古野電気社製の GT80 の 2 台である。ここで、カルマンフィルタを用いたキャリアスムージングに 1 つ問題が生じる。(4-9) 式で表した電離層遅延量の差分 ΔI は 2 周波を利用して計算できるものなので、図 4-3 の ΔI を行えず GT80 受信機に適用することができない。そこで、今回は電離層遅延量を 1 次式で近似することで ΔI を求めた。尚今回は、近似式の記述は割愛させて頂くことにした。

4.3.3 実験概要

本実験で使用したデータは OEM4 と GT80 の 2 台の受信機で取得し、2004 年 11 月 04 日 19:00 から同日 21:00 まで約 3 時間のものである。衛星のマスク角は 10° とし、データ形式は RINEX で統一させ単独測位を行った。両受信機にキャリアスムージングを 0 ~ 3000 秒の間で掛け比較し、また受信機間でも比較を行い、どの程度測位結果に影響が出るのか調べることにする。

4.3.4 実験結果

4.3.4.1 ハッチフィルタを用いたキャリアスムージング

以下図 4-4～図 4-17 にハッチフィルタを用いてキャリアスムージングを行い、その単独測位結果を示す。図はそれぞれ左に水平方向の測位結果、右に高さ方向の測位結果を表している。

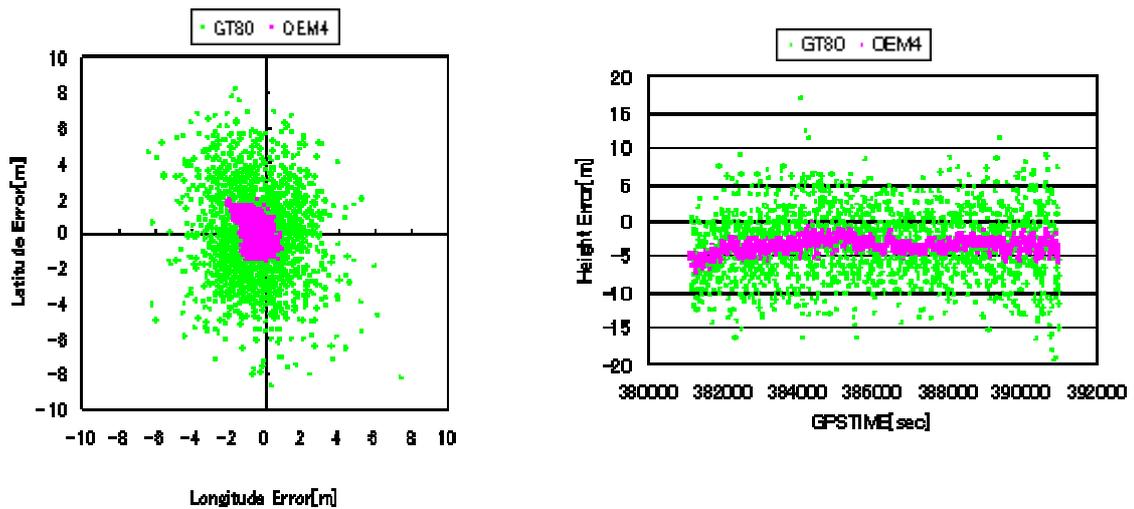


図 4-4 スムージングをかけていない測位結果

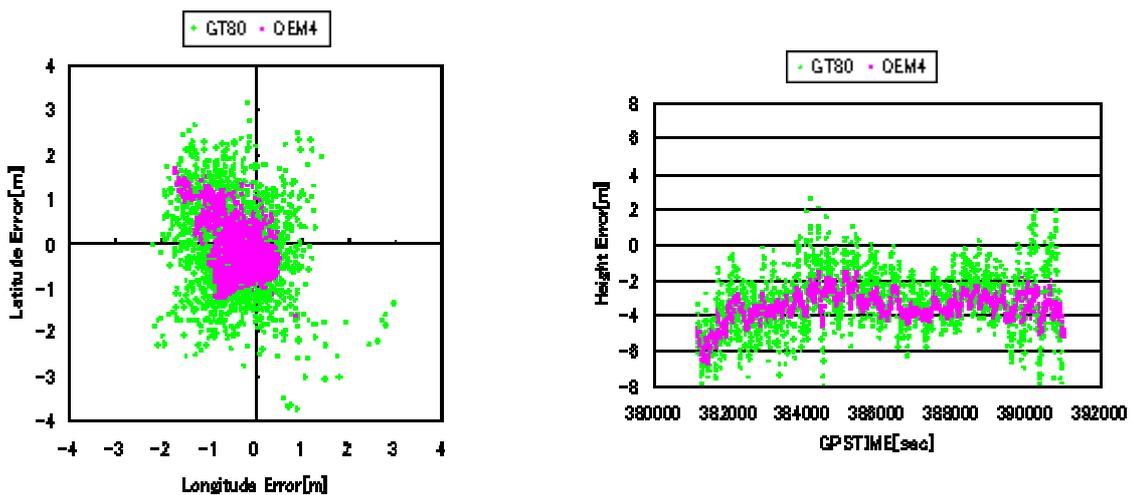


図 4-5 10 秒スムージングをかけた測位結果

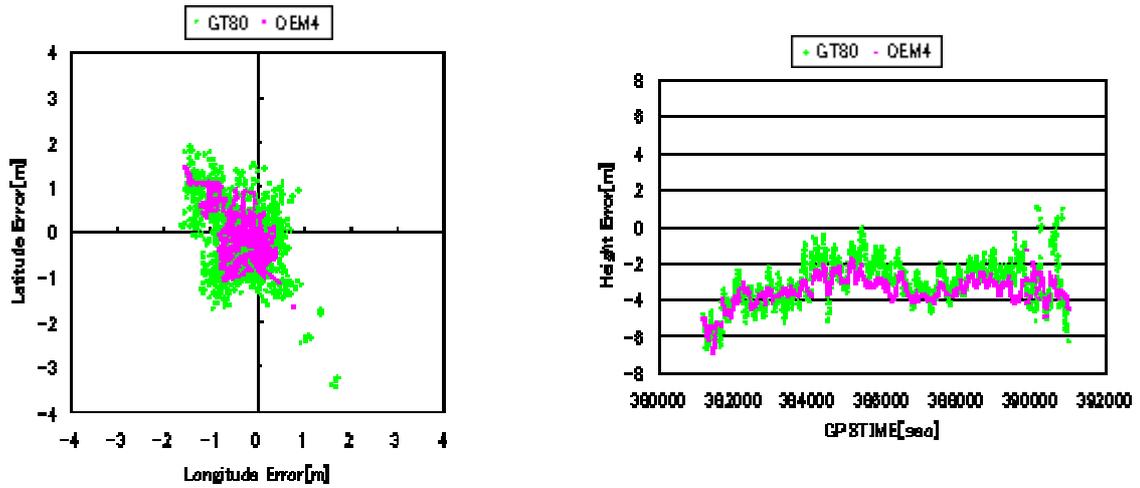


図 4-6 50 秒スムージングをかけた測位結果

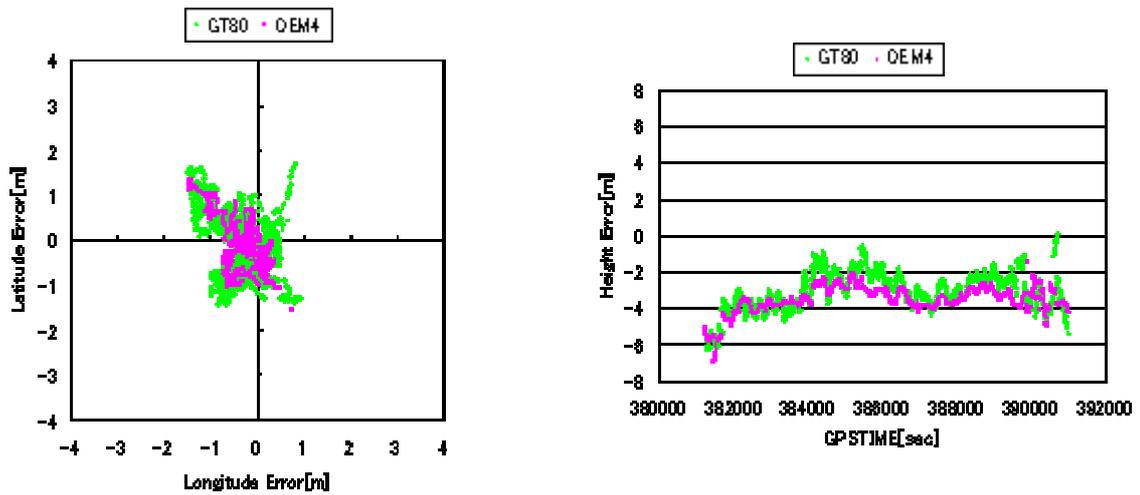


図 4-7 100 秒スムージングをかけた測位結果

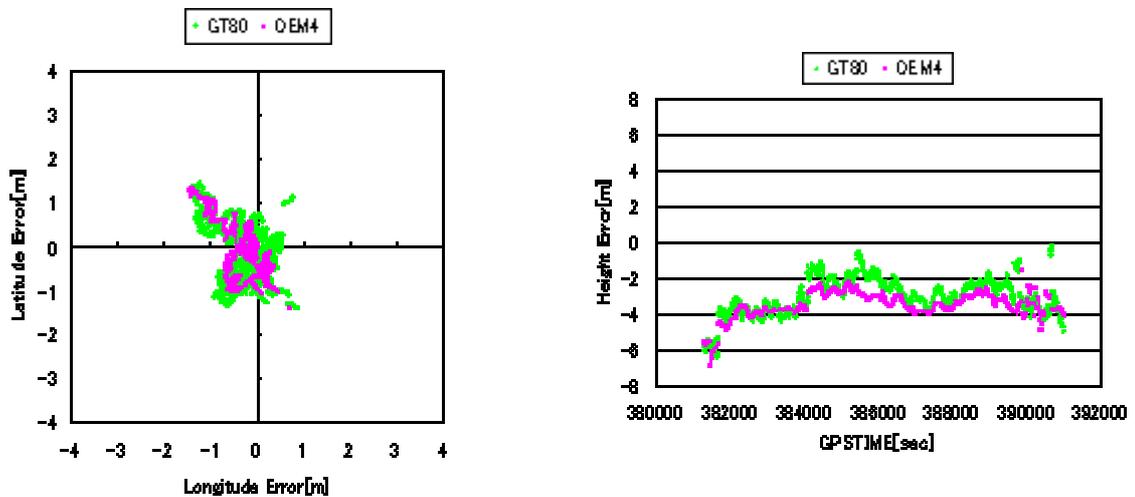


図 4-8 150 秒スムージングをかけた測位結果

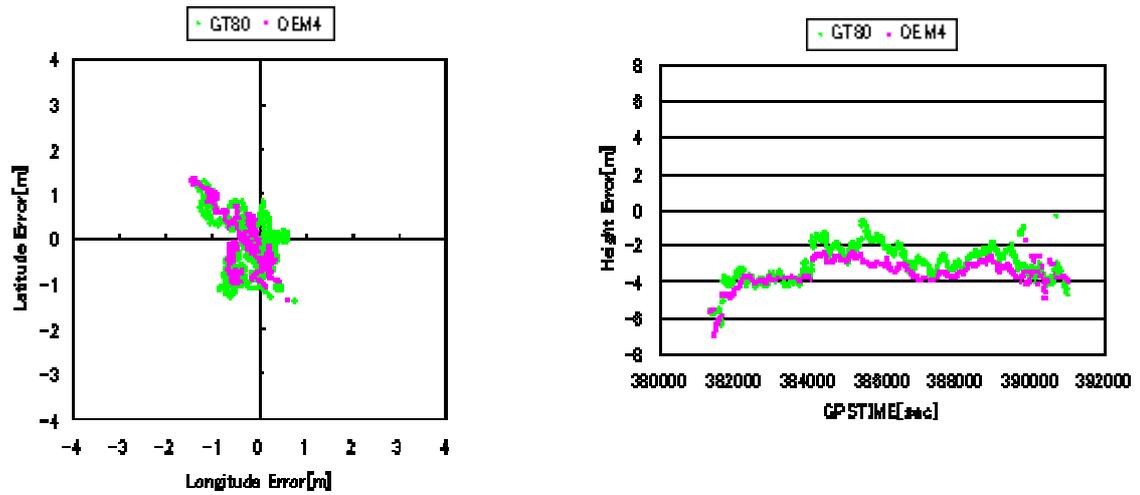


図 4-9 200 秒スムージングをかけた測位結果

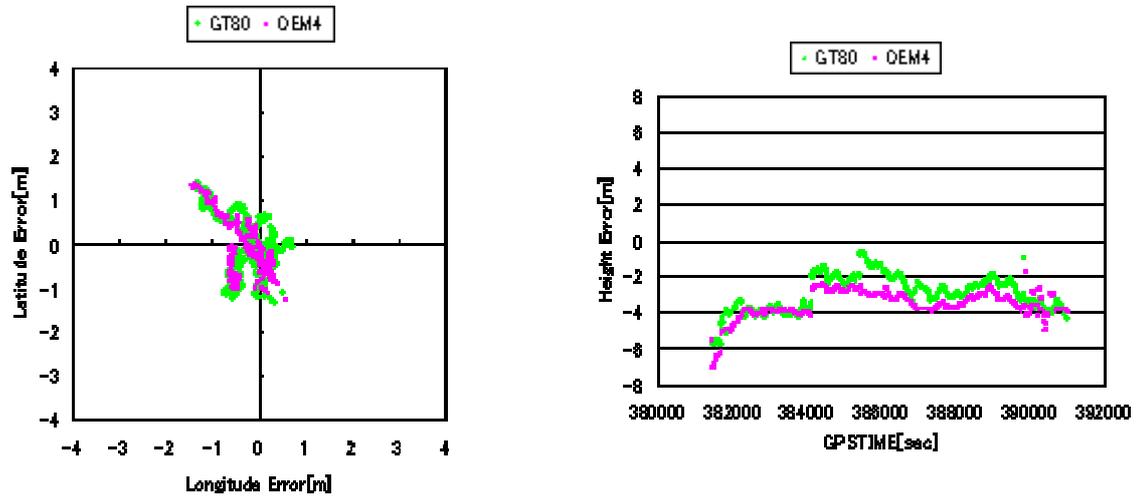


図 4-10 300 秒スムージングをかけた測位結果

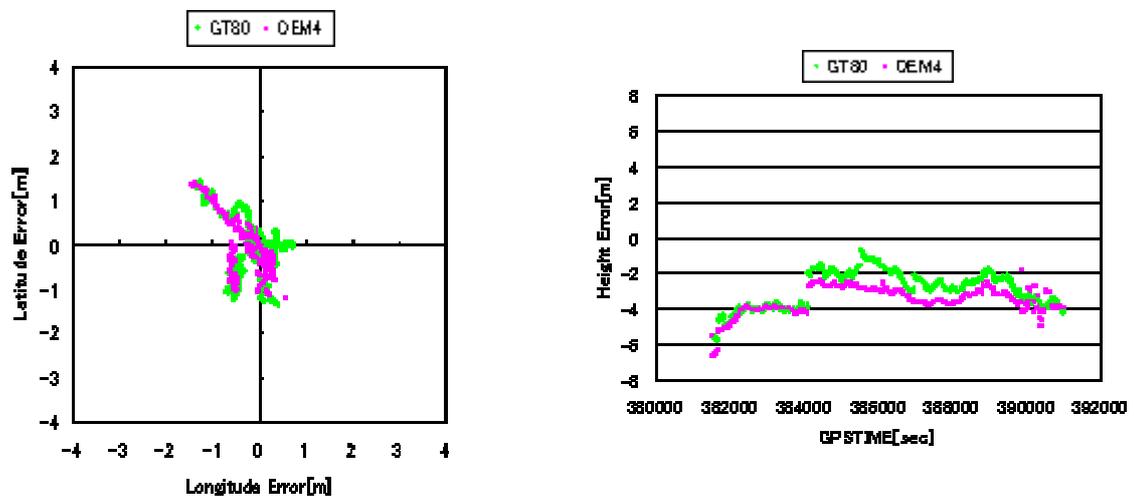


図 4-11 400 秒スムージングをかけた測位結果

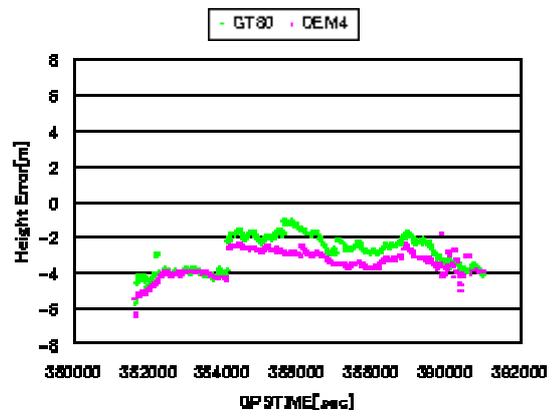
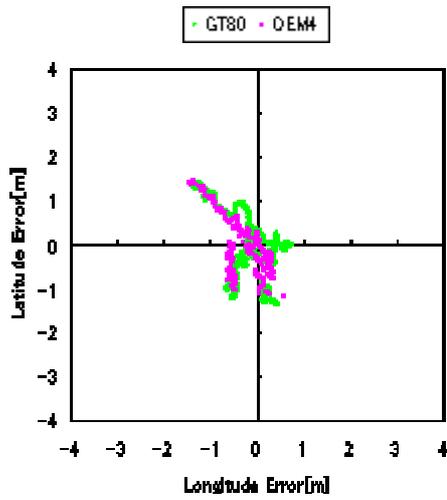


図 4-12 500 秒スムージングをかけた測位結果

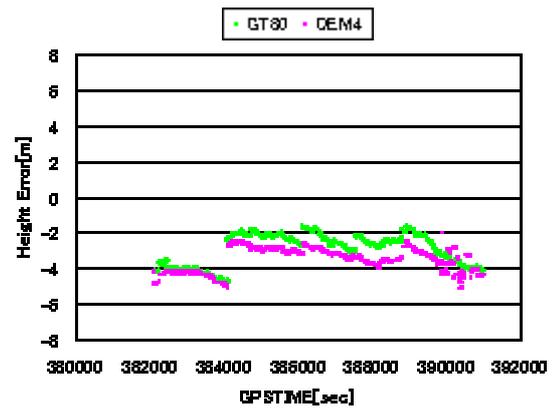
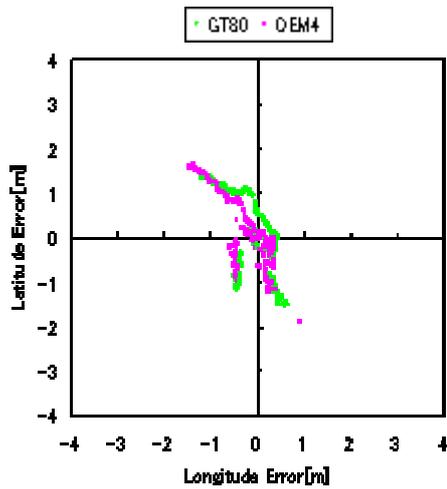


図 4-13 1000 秒スムージングをかけた測位結果

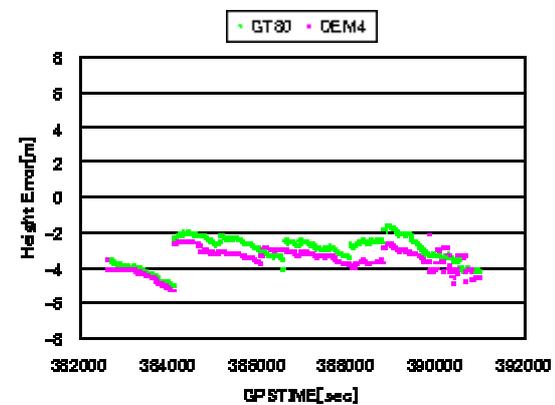
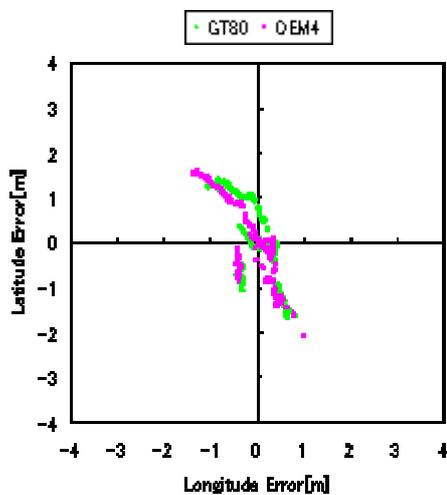


図 4-14 1500 秒スムージングをかけた測位結果

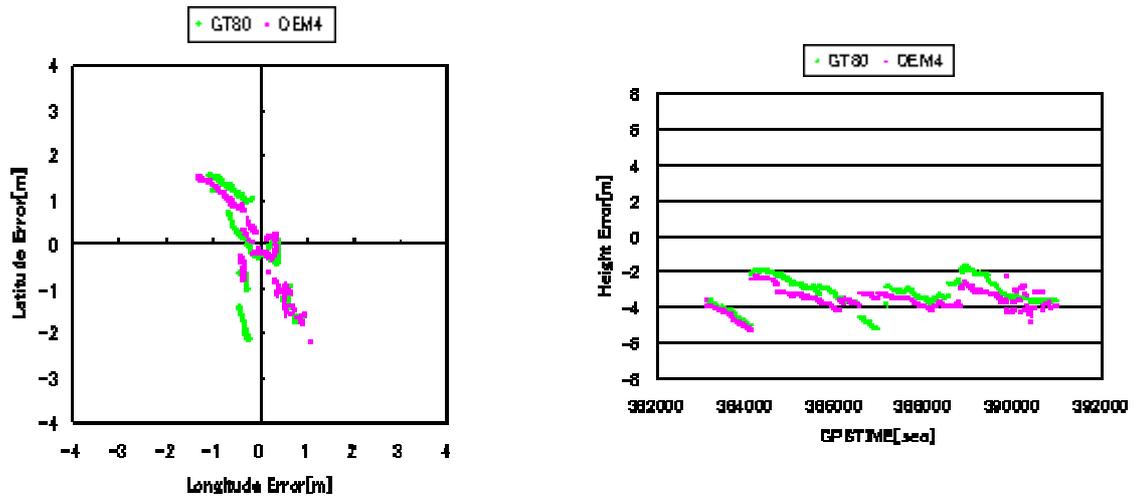


図 4-15 2000 秒スムージングをかけた測位結果

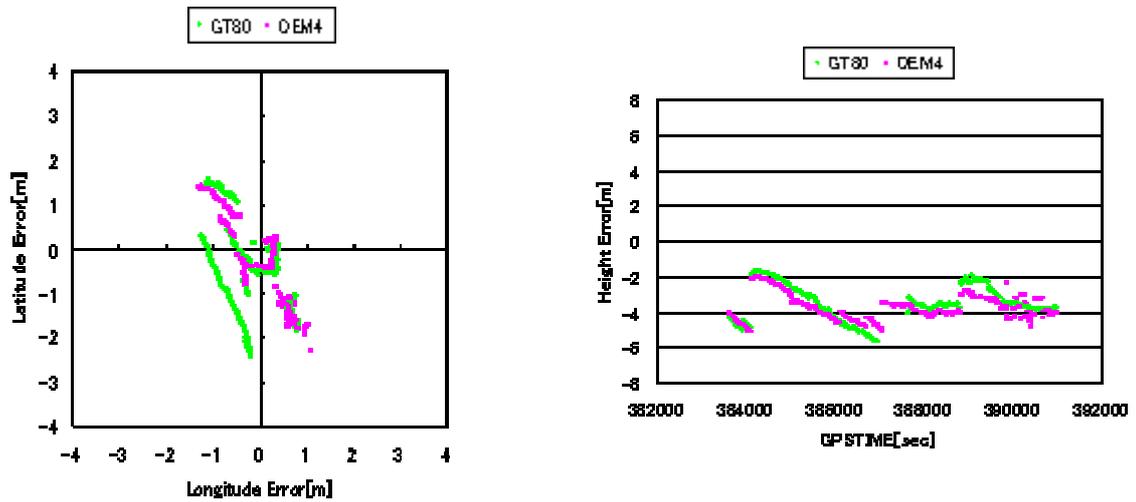


図 4-16 2500 秒スムージングをかけた測位結果

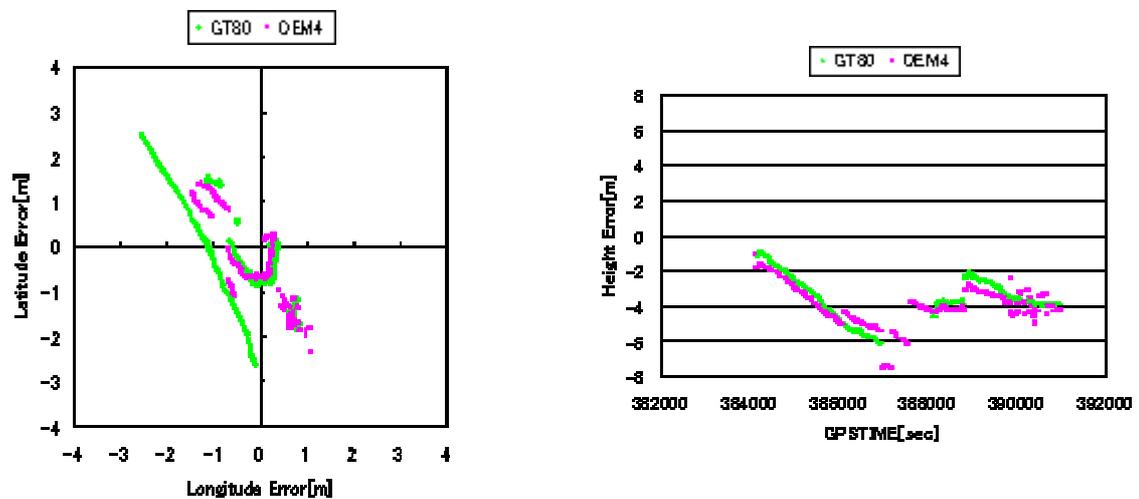


図 4-17 3000 秒スムージングをかけた測位結果

次に、表 4-2、4-3 に各測位結果における標準偏差 ならびに $2drms$ を示す。

表 4-2 GT80 測位結果における標準偏差

M	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{3D}	$2drms$
0	1.737	2.573	4.530	3.483	6.209
10	0.683	0.991	1.678	1.826	2.408
50	0.532	0.733	1.249	1.588	1.811
100	0.494	0.664	1.070	1.539	1.655
150	0.480	0.645	1.027	1.515	1.608
200	0.472	0.636	0.998	1.499	1.585
300	0.490	0.675	0.990	1.492	1.669
400	0.484	0.692	1.019	1.493	1.689
500	0.476	0.710	0.963	1.478	1.709
1000	0.459	0.801	0.887	1.510	1.847
1500	0.474	0.873	0.787	1.567	1.987
2000	0.538	0.960	1.337	1.839	2.200
2500	0.608	0.969	2.183	2.323	2.287
3000	0.781	1.038	2.848	2.761	2.598

表 4-3 OEM4 測位結果における標準偏差

M	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{3D}	$2drms$
0	0.480	0.637	0.961	1.695	1.596
10	0.440	0.587	0.812	1.655	1.468
50	0.418	0.569	0.754	1.642	1.412
100	0.410	0.565	0.737	1.640	1.396
150	0.411	0.574	0.738	1.644	1.411
200	0.414	0.584	0.746	1.651	1.432
300	0.424	0.608	0.766	1.667	1.482
400	0.436	0.628	0.742	1.670	1.529
500	0.447	0.647	0.708	1.671	1.573
1000	0.483	0.735	0.665	1.711	1.760
1500	0.512	0.828	0.632	1.748	1.948
2000	0.573	0.934	0.589	1.786	2.191
2500	0.624	0.984	0.718	1.858	2.330
3000	0.707	1.026	1.183	2.024	2.493

但し、 σ_x : 経度方向標準偏差

σ_y : 緯度方向標準偏差

σ_z : 高さ方向標準偏差

σ_{3D} : 3次元方向標準偏差 である。

図 4-18、4-19 に標準偏差の変化を表すグラフを示す。

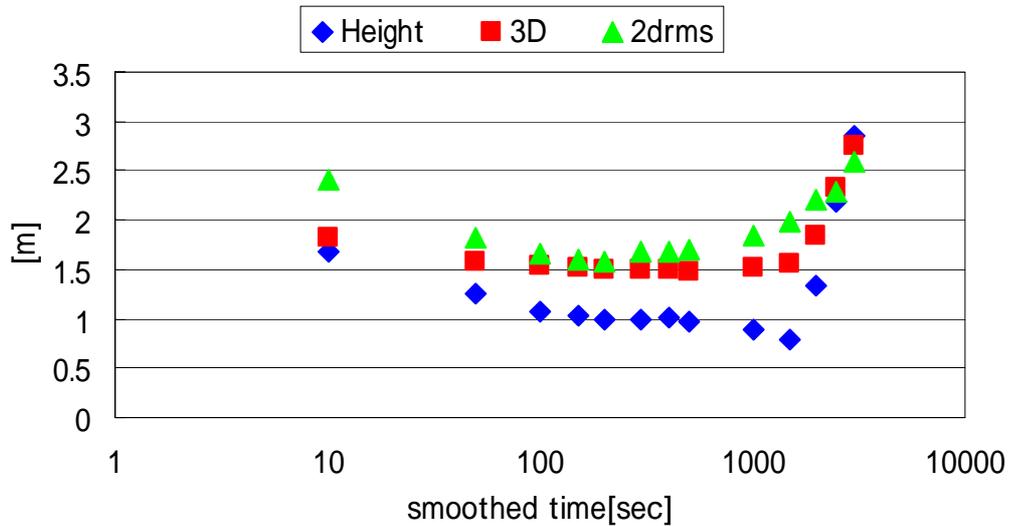


図 4-18 GT80 測位結果の標準偏差

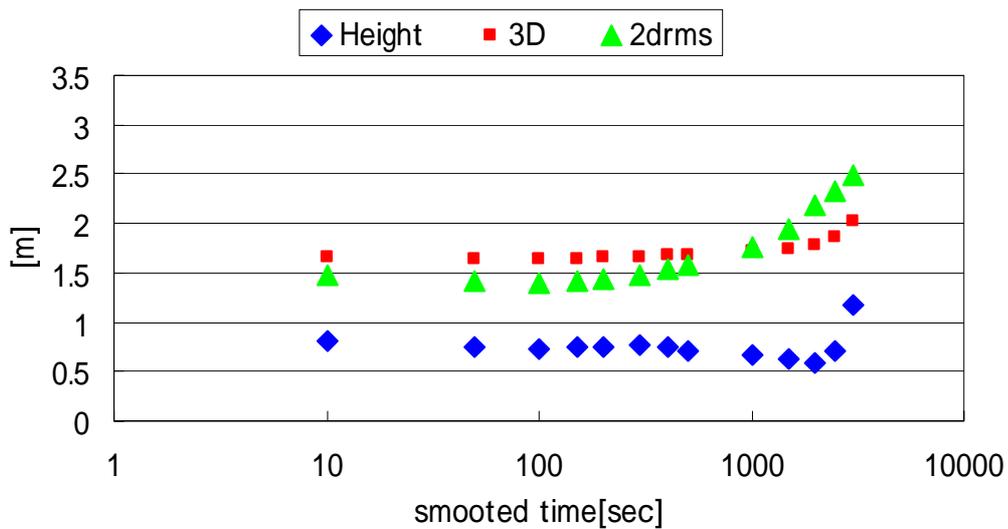


図 4-19 OEM4 測位結果の標準偏差

GT80 においては、 $M=0$ のときこそ $\sigma_z=4.53$ 、 $\sigma_{3D}=3.483$ 、 $2drms=6.209$ と非常に悪い結果となっているが、 $M=200$ のときには $\sigma_z=0.998$ 、 $\sigma_{3D}=1.499$ 、 $2drms=1.585$ と OEM4 と比べても大差ないほどに測位精度が改善されていることがわかる。また、 $M=1000$ を越えたあたりから高さ方向の測位結果に見てとれるように発散が起こり、測位精度が次第に悪くなっている。

OEM4 においては、 $M=1000$ までは概ね良好な測位結果が得られていたが、やはり $M=1000$ を過ぎると、測位精度の劣化が見られた。 $2drms$ は、 $M=100$ のとき最も良く $1.396[m]$ となった。

4.3.4.2 カルマンフィルタを用いたキャリアスムージング

以下図 4-20 ~ 図 4-17 にカルマンフィルタを用いてキャリアスムージングを行い、その単独測位結果を示す。図はそれぞれ左に水平方向の測位結果、右に高さ方向の測位結果を表している。

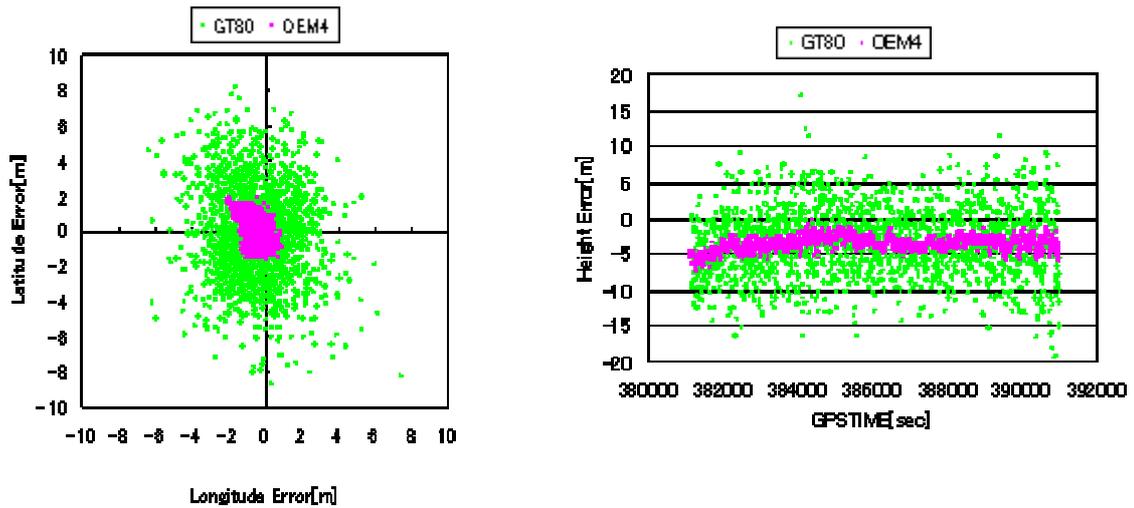


図 4-20 スムージングをかけていない測位結果

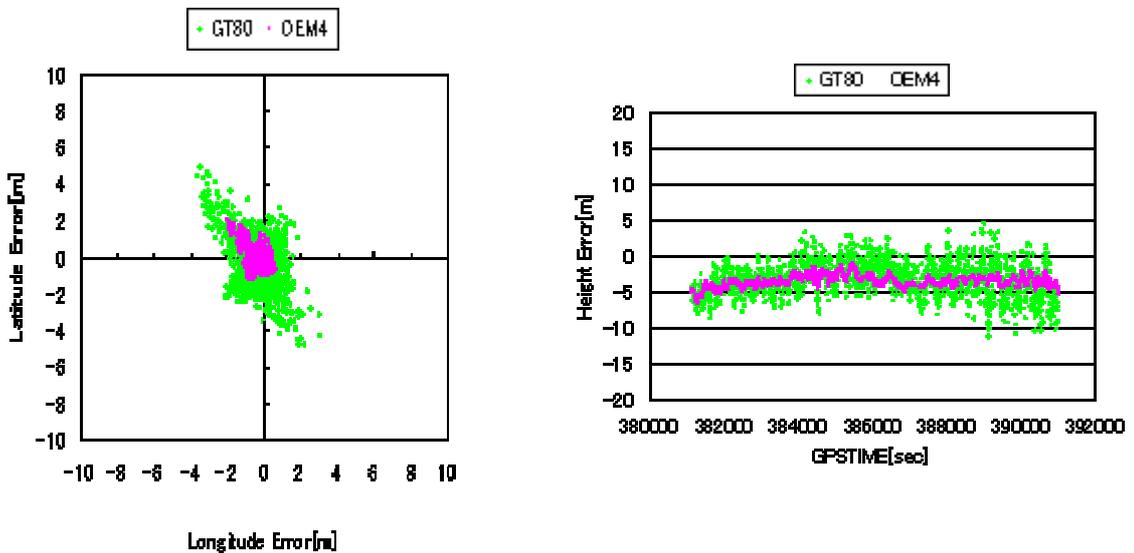


図 4-21 10 秒スムージングをかけた測位結果

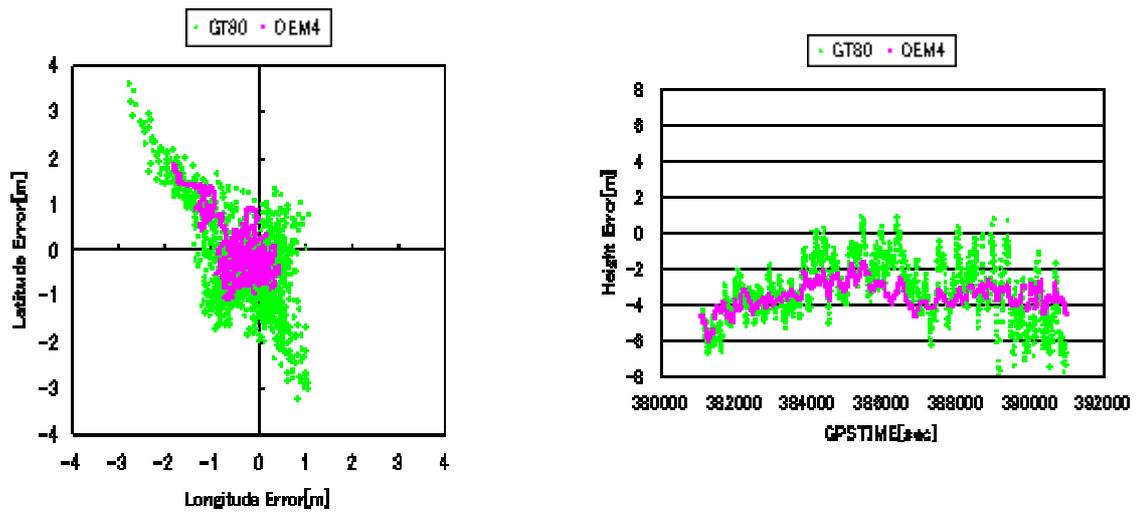


図 4-20 50 秒スムージングをかけた測位結果

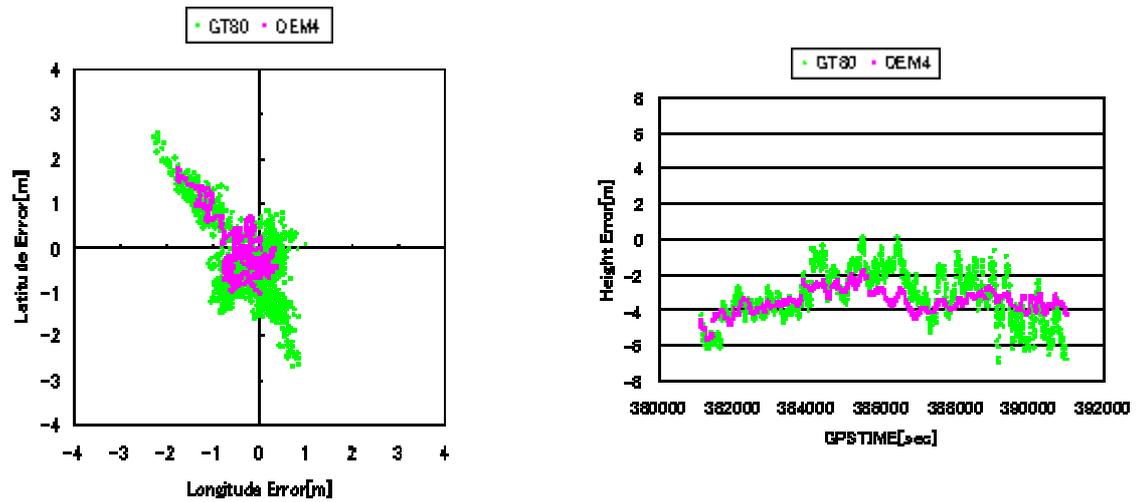


図 4-21 100 秒スムージングをかけた測位結果

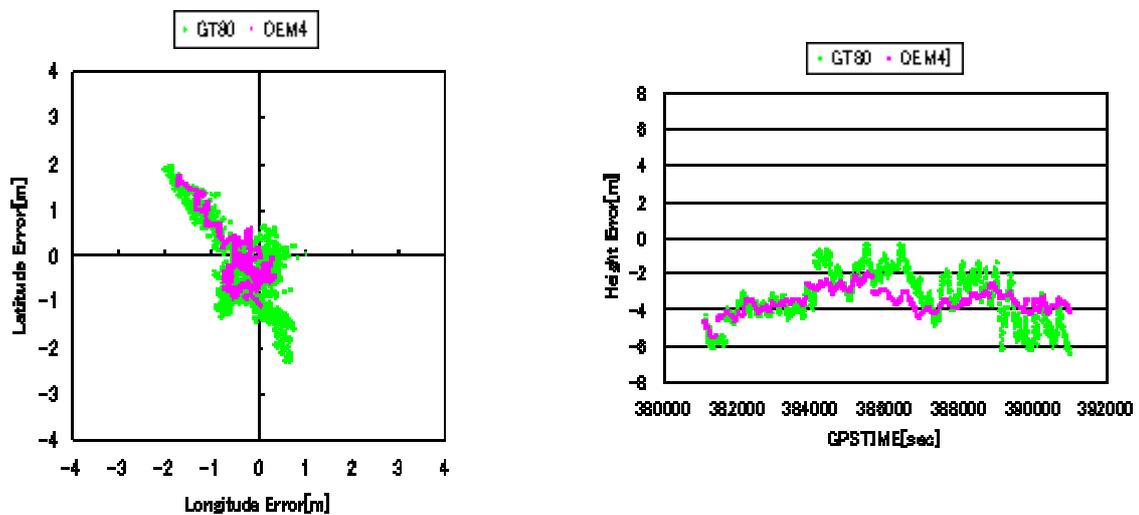


図 4-22 150 秒スムージングをかけた測位結果

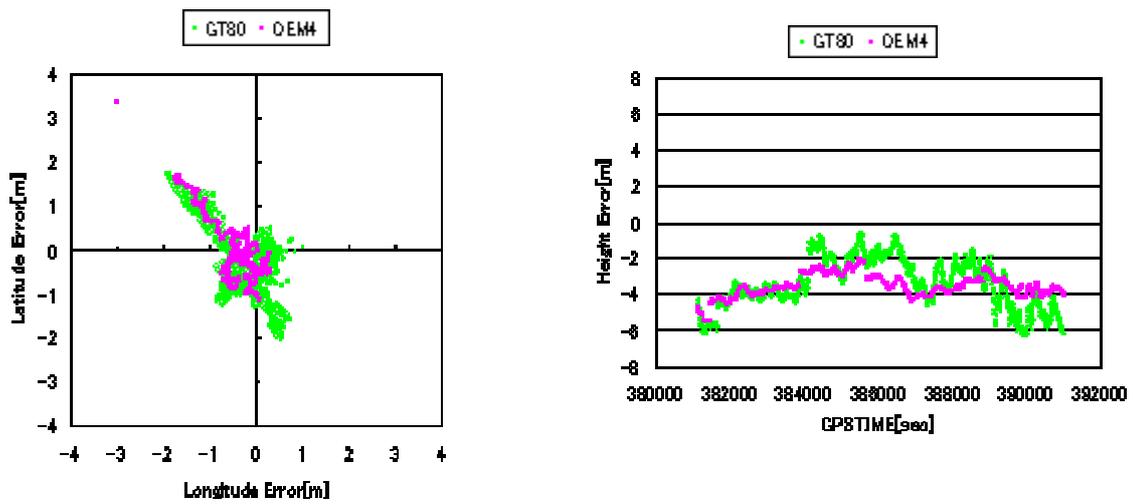


図 4-23 200 秒スムージングをかけた測位結果

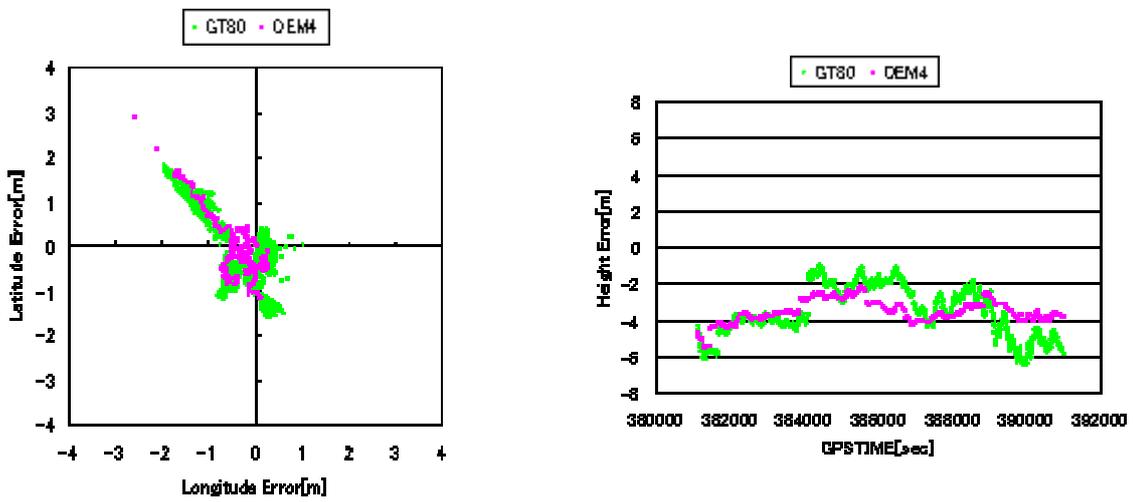


図 4-24 300 秒スムージングをかけた測位結果

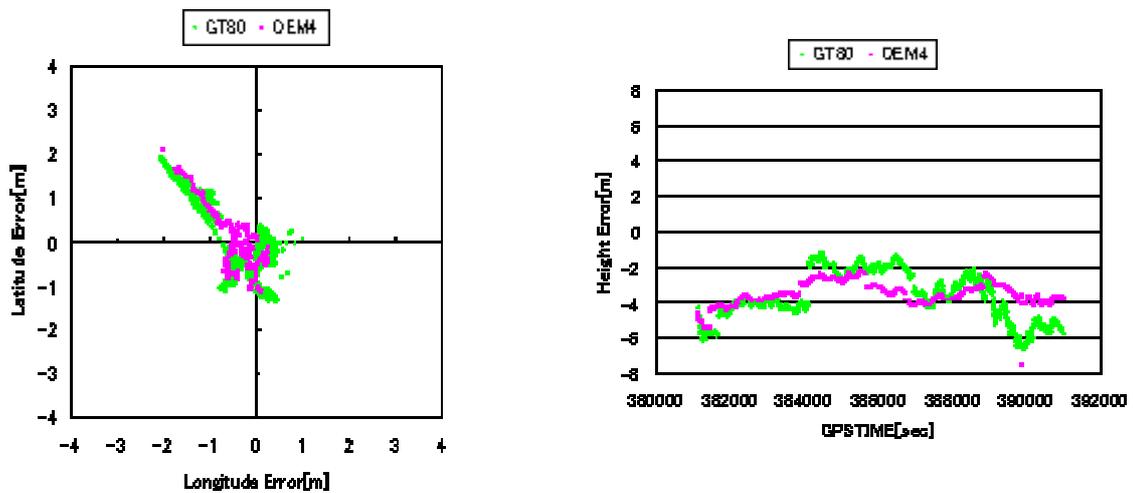


図 4-25 400 秒スムージングをかけた測位結果

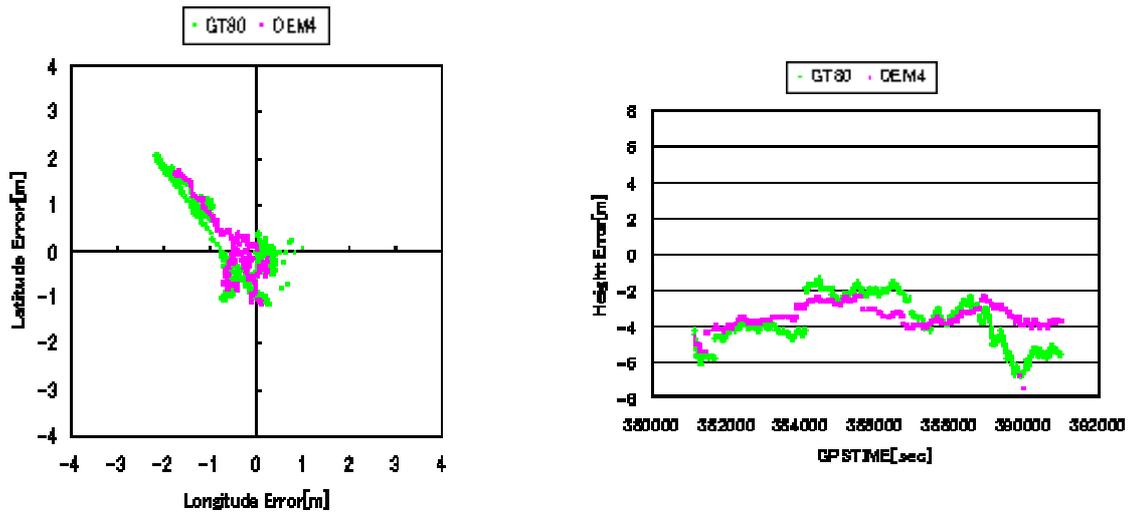


図 4-26 500 秒スムージングをかけた測位結果

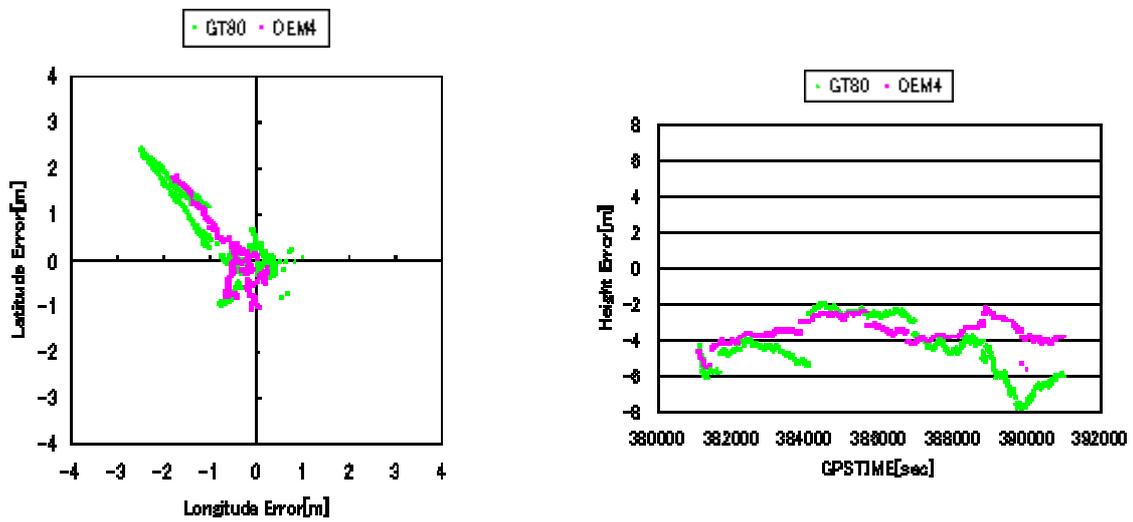


図 4-27 1000 秒スムージングをかけた測位結果

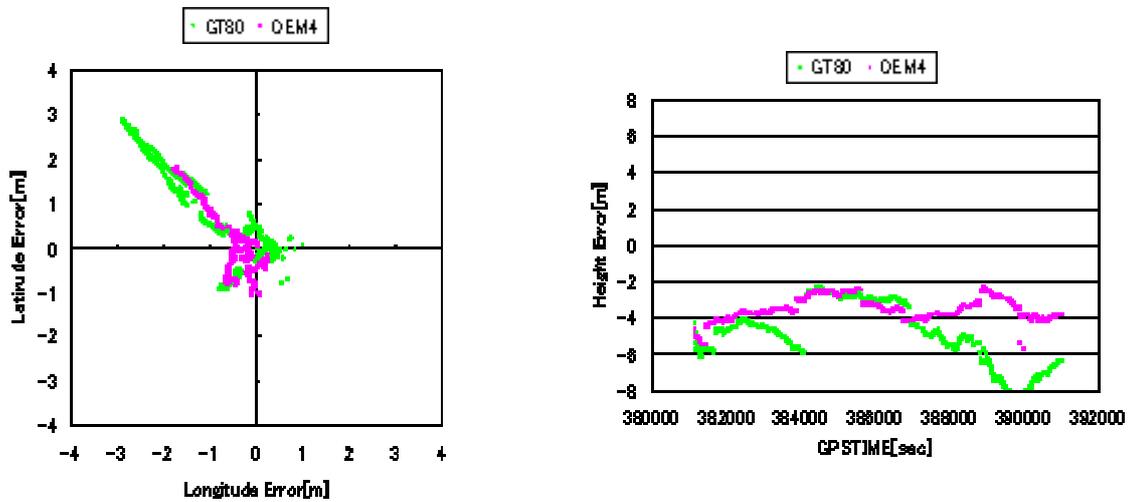


図 4-28 1500 秒スムージングをかけた測位結果

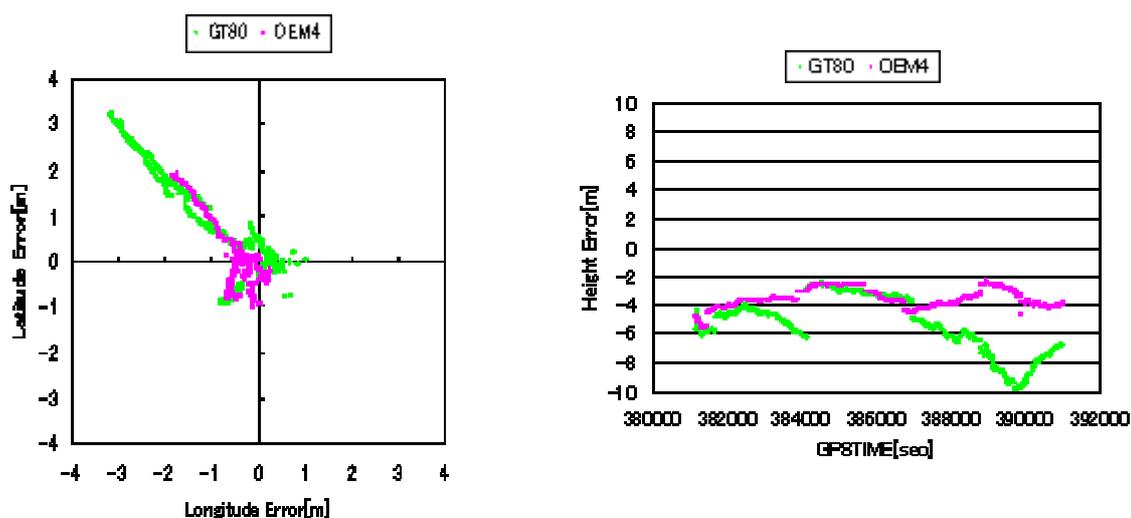


図 4-29 2000 秒スムージングをかけた測位結果

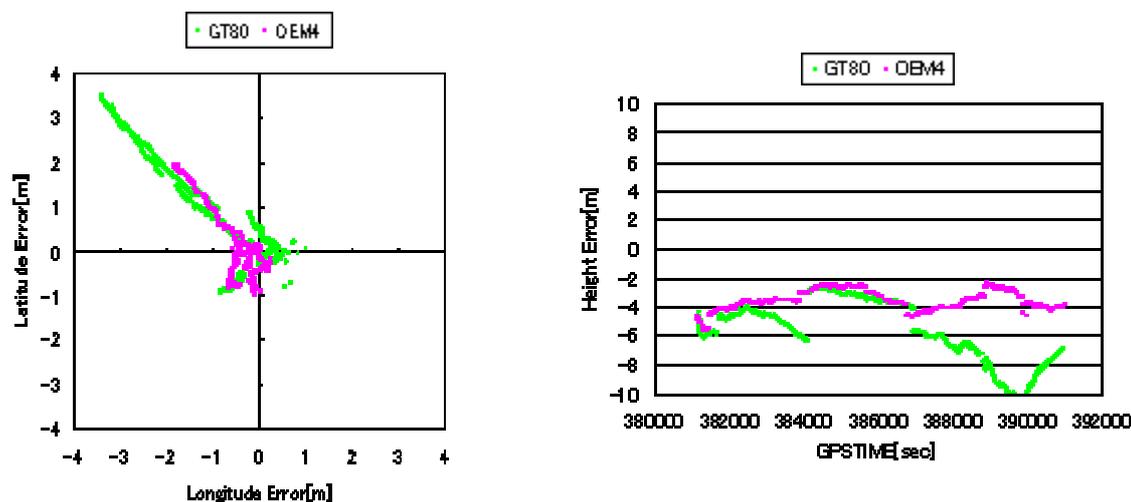


図 4-30 2500 秒スムージングをかけた測位結果

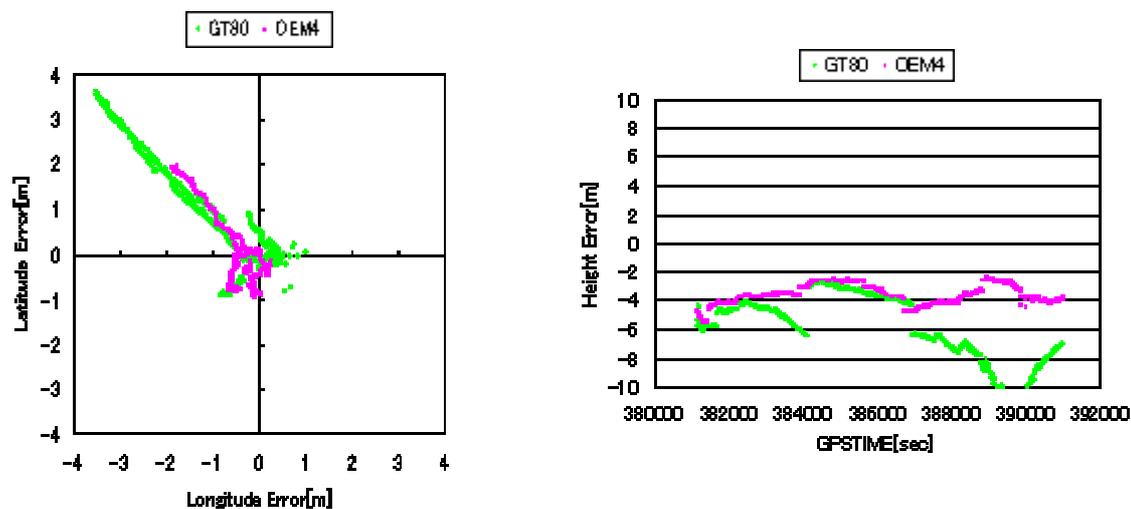


図 4-31 3000 秒スムージングをかけた測位結果

次に、表 4-2、4-3 に各測位結果における標準偏差 ならびに $2drms$ を示す。

表 4-4 GT80 測位結果における標準偏差

M	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{3D}	$2drms$
0	1.737	2.573	4.530	3.483	6.209
10	0.859	1.208	2.337	2.115	3.176
50	0.650	0.880	1.692	1.805	2.187
100	0.592	0.773	1.479	1.737	1.948
150	0.578	0.735	1.404	1.733	1.869
200	0.577	0.719	1.377	1.749	1.843
300	0.592	0.721	1.369	1.804	1.866
400	0.613	0.734	1.380	1.868	1.914
500	0.638	0.753	1.398	1.936	1.973
1000	0.763	0.857	1.516	2.272	2.295
1500	0.890	0.981	1.712	2.580	2.649
2000	0.993	1.086	1.941	2.838	2.944
2500	1.059	1.152	2.145	3.033	3.129
3000	1.093	1.184	2.316	3.172	3.223

表 4-5 OEM4 測位結果における標準偏差

M	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{3D}	$2drms$
0	0.481	0.637	0.961	1.695	1.596
10	0.496	0.641	0.811	1.670	1.622
50	0.472	0.618	0.720	1.651	1.555
100	0.461	0.610	0.671	1.641	1.529
150	0.457	0.611	0.648	1.637	1.526
200	0.457	0.615	0.639	1.636	1.533
300	0.461	0.625	0.631	1.635	1.553
400	0.465	0.634	0.628	1.635	1.573
500	0.468	0.643	0.625	1.635	1.590
1000	0.474	0.672	0.627	1.638	1.643
1500	0.474	0.672	0.630	1.639	1.644
2000	0.479	0.700	0.658	1.654	1.697
2500	0.484	0.713	0.670	1.663	1.723
3000	0.491	0.730	0.686	1.676	1.761

但し、M は平均化定数、つまりキャリアスムージングをかけている時間のことである。

図 4-32、4-33 に標準偏差の変化を表すグラフを示す。

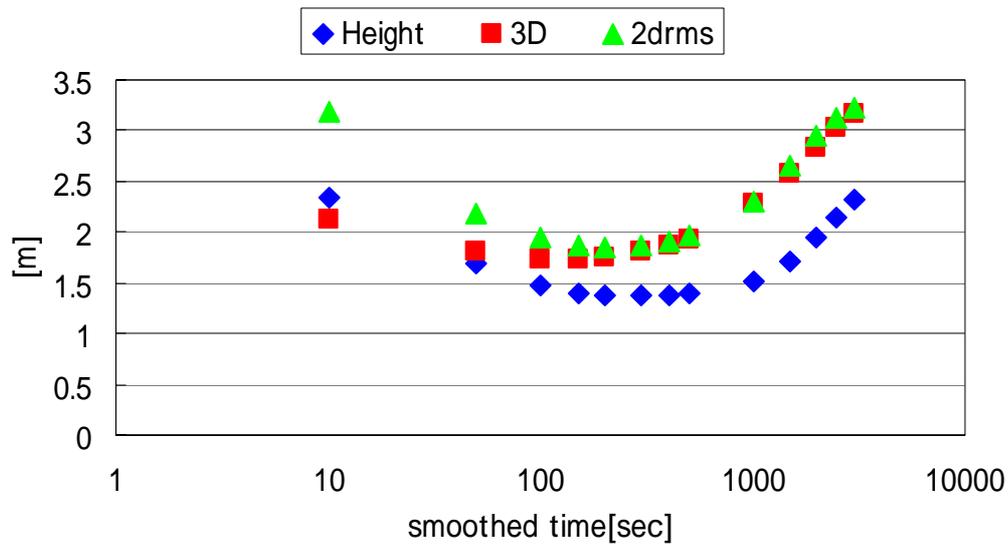


図 4-32 GT80 測位結果の標準偏差

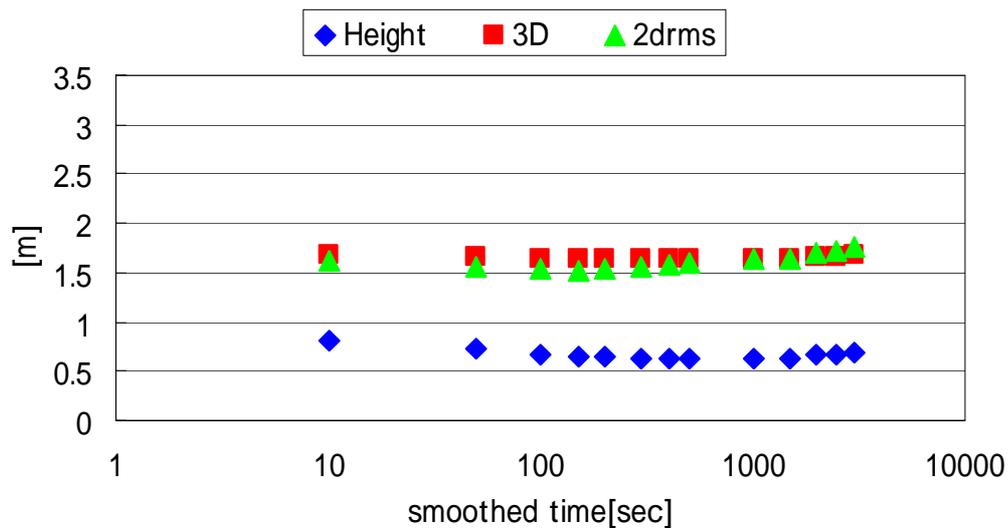


図 4-33 OEM4 測位結果の標準偏差

GT80 においては、M=200 になるまで測位精度が改善され 2drms は 1.843[m]を示した。ハッチフィルタと同様 M=1000 を過ぎると測位精度は劣化し、その劣化はハッチフィルタのものよりも大きかった。しかし、総合的に見るとハッチフィルタの方が、測位精度が改善されていることがわかる。

OEM4 においては、スムージングを何秒かけるかということに関わらず測位精度は安定していた。最も良い 2drms は M=150 のとき、1.526[m]であった。また、ハッチフィルタと比べても総合的に測位精度は良好であった

4.4 考察

ハッチフィルタとカルマンフィルタの測位結果を標準偏差の値で評価し、また各フィルタにおける最適なスムージングタイムは何秒であるのかを 2 台の受信機別に評価する。GT80 において、カルマンフィルタよりもハッチフィルタを用いた測位結果のほうが精度が高く、2drms では 0.26m、高さ方向の標準偏差で 0.59m の差があった。OEM4 においても、ハッチフィルタを用いた方が測位結果が良く、2drms で 0.13m、高さ方向の標準偏差で 0.03m の差があった。OEM4 を使用した測位結果は 2 つのフィルタによる測位結果の差は少なくなったが、これには L2 帯の搬送波を利用したカルマンフィルタを用いることができた、スムージングをかけていない測位結果が元々非常に良いなどの理由が考えられる。いずれの受信機でもハッチフィルタの方が測位結果が良かったが、カルマンフィルタにプロセス雑音をプラスしてやることや、より良い事前状態推定を行うことで測位結果をまだまだ改善できるものと思われる。ハッチフィルタのスムージングタイムは 3 次元方向の標準偏差より、GT80 で 500 秒、OEM4 で 100 秒くらいが最も適していると思われる。カルマンフィルタのスムージングタイムは同じく、GT80 で 150 秒、OEM4 で 500 秒程度であった。また、カルマンフィルタを用いた OEM4 の標準偏差だけは、他の場合スムージングタイムが 1000 秒を越えたあたりから測位結果が劣化するのに対し、何秒スムージングをかけてもあまり変わらなかった。

次に、GT80 と OEM4 の測位結果を標準偏差の値より評価し、受信機の特性を評価した。GT80 はスムージングをかけていない測位結果は 2drms で 6.21m、高さ方向の標準偏差で 4.53m となった。これにハッチフィルタを用い 100 秒スムージングをかけると、2drms は 1.65m、高さ方向の標準偏差は 1.07m と大幅に測位結果が良くなり、スムージングによる効果がとても高いことがわかる。それに比べ OEM4 はスムージングをかけなくても 2drms は 1.59m、高さ方向の標準偏差は 0.96m と非常に良い。これに同じく 100 秒スムージングをかけると、2drms は 1.39m、高さ方向の標準偏差は 0.73m と若干でしか良好にならなかった。最も良い測位結果は、GT80 では 500 秒スムージングをかけて、2drms が 1.71m、3 次元方向の標準偏差が 1.48m となり、OEM4 では 100 秒スムージングをかけて、2drms が 1.40m、3 次元方向の標準偏差が 1.64m となり、大きな差は見られなかった。GT80 については、スムージングをかけることにより測位結果が改善され、スムージング効果の高い受信機であるといえる。また OEM4 は元の測位結果が良いことから、単独測位だけならあまりスムージングをする必要のない受信機なのではないかと考えた。

第 5 章

補正值比較 / DGPS 測位実験

5.1 はじめに

DGPS 測位は第 2 章でも述べたように、基準局と移動局で共通誤差を相殺して測位精度を改善する測位方法であった。単独測位と比較して SA の影響を取り除くことが最大の長所であったが、SA の解除によって、以前のような DGPS の優位性は大きく低下した。しかしほとんど単独測位と同じ測位アルゴリズムで単独測位よりも高精度な測位結果を得られていることは事実であり、様々な利用分野が存在している。

補正データの伝送時間に遅れがないと仮定すると、DGPS 測位による相殺効果は基線長が短いほど高いとされている。基線長が長くなると、共通誤差である衛星軌道誤差、電離層伝搬遅延、対流圏伝搬遅延が共通でなくなり測位精度の改善ができないためであるからである。

擬似距離補正方式では、基準局で求めた真の距離と測定した擬似距離を比較して、衛星ごとの擬似距離補正値を算出して移動局に伝送する。移動局では受信機で測定された擬似距離に、この補正値を適用して測位を行っている。

海上保安庁では、ユーザー向けに DGPS 補正情報を提供するサービスを行っており、その伝送手段は船舶用方向探知のための中波ビーコンに重畳させて送るというものであった。

本章では、2 台の受信機で自ら擬似距離の補正値を作成し、海上保安庁の放送する中波ビーコンの補正値を専用の受信機で取得した。これら 3 つの補正値を比較検討し、さらには DGPS 測位を行い精度評価を行う。

5.2 補正值算出法

今回の実験について、どのように擬似距離の補正値を算出し、またどのような共通誤差を相殺できるのか詳細を述べる。

一般的に擬似距離 r を式で

$$r_n = \rho_n + c(\delta t_{r,n} - \delta t^s) + I_n + T_n + \varepsilon_n \quad (5-1)$$

と表す。ここで ρ_n (geometrical distance) は衛星-利用者間の正確な距離 (m) である。C は光速 (m/s)、 δt_u (receiver clock bias) は受信機の時計誤差 (s)、 δt^s (satellite clock

bias)は衛星時計誤差 (s)、I(ionospheric delay)は電離層遅延量 (m)、T(tropospheric delay)は対流圏遅延量 (m)、 ϵ_n はマルチパス等のその他の誤差である。添え字の n は基準局、移動局側の違いを表す。

次に、移動局側での擬似距離補正を式で表す。

$$\rho'(t) = \rho(t) + PRC(t_0) + RRC(t_0) \times (t - t_0) \quad (5-2)$$

ここで t (s) は観測時刻、 t_0 (s) は補正データの算出時刻、 ρ (m) は利用者側で補正された擬似距離、 ρ' (m) は利用者側で測定された擬似距離 (m) である。PRC (m) は擬似距離補正值 (pseudorange-correction)、RRC (m/s) は擬似距離補正值の変化率である。補正データの算出時刻と観測時刻との時刻差が大きいと相殺効果が減少する。

(5-1)式において、 $n=1$ を基準局、 $n=2$ を移動局と仮定する。このとき基準局での真の距離は r_1 となり、基準局で作成される擬似距離補正值 PRC は、 $r_1 - \rho_1$ で表されて

$$PRC = -[c(\delta t_{r,1} - \delta t^s) + I_1 + T_1 + \epsilon_1] \quad (5-3)$$

となる。移動局では PRC を同衛星から測定された擬似距離 r_2 に加える。補正された擬似距離 r' は、

$$\begin{aligned} r'_2 &= r_2 + PRC \\ &= r_2 + c(\delta t_{r,2} - \delta t^s) + I_2 + T_2 + \epsilon_2 - [c(\delta t_{r,1} - \delta t^s) + I_1 + T_1 + \epsilon_1] \\ &= r_2 + c(\delta t_{r,2} - \delta t_{r,1}) + (I_2 - I_1) + (T_2 - T_1) + (\epsilon_2 - \epsilon_1) \end{aligned} \quad (5-4)$$

と表される。(5-4)式から衛星時計誤差 δt^s が消えていることがわかる。衛星時計誤差の項は基線長にかかわらず消去できる。また理想的な短基線長の場合、 $I_1 = I_2$ 、 $T_1 = T_2$ となり、電離層遅延の項、対流圏遅延の項が消去され、

$$r'_2 = \rho_2 + c(\delta t_{u,2} - \delta t_{u,1}) + (\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (5-5)$$

として利用者側の擬似距離は補正される。(5-5)式中の誤差項は受信機時計の誤差、マルチパス等のノイズ誤差の項しかない。受信機時計の誤差は単独測位計算の未知数の1つとして算出される

ので誤差を消去でき、DGPS 測位結果にはマルチパス等のノイズ誤差の影響しか受けない。しかしこれは理想的な場合のときである。例えば基準局の ρ_1 が衛星位置の誤差により誤って算出され、 r_1 から消去しきれない場合がある。基線長が長くなることにより、(5-4)式の電離層、対流圏遅延の項が消去されずに残ることで測位精度の劣化が起こる。

5.3 海上保安庁の DGPS 補正データ

全国の各 DGPS 局から RTCM 規格にて放送されている DGPS 補正データを実際に GR-80 中波ビーコン受信機で受信する実験を行った。

取得日時 : 2004 年 10 月 05 日 21:00 から同 06 日 09:00 まで約 12 時間

海上保安庁浦安 DGPS 局の放送する RTCM 規格の補正データを、東京海洋大学第 4 実験棟屋上で毎秒取得した。

このデータを用い補正データの放送内容を確認する。

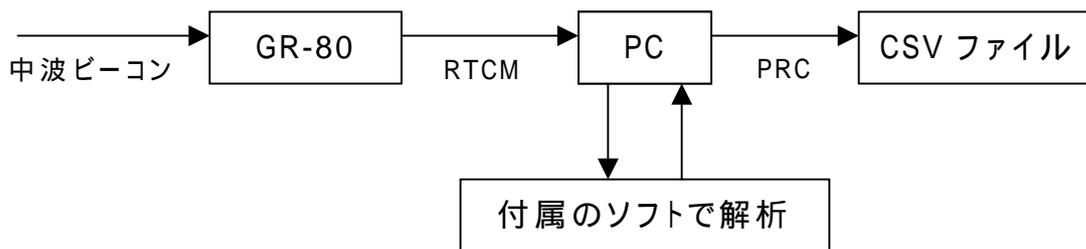


図 5-1 DGPS 補正データ取得の流れ

図 5-1 に DGPS 補正データの取得の流れを示す。中波ビーコンで受信した RTCM 規格の補正データはバイナリであるため、付属のソフトウェアを用いてエクセルの CSV ファイルに変換した。このとき CSV に変換されたのは、表 3-1 で記載したメッセージタイプ 1 の擬似距離補正量の時間変化を考慮していないもの、つまり(5-3)式の PRC である。

図 5-2 に各衛星の仰角を、図 5-3 に各衛星の PRC の変動を示す。衛星は配置の良さそうなものを無作為に 5 機選んだ。どの衛星も仰角の変動とともに PRC も変化していることがわかる。また、図 5-4 には 31 番衛星の PRC を示し、図 5-5 にその拡大図を示す。海上保安庁の PRC は、3 秒毎に量子化し新たな値を得ていることが見てわかる。

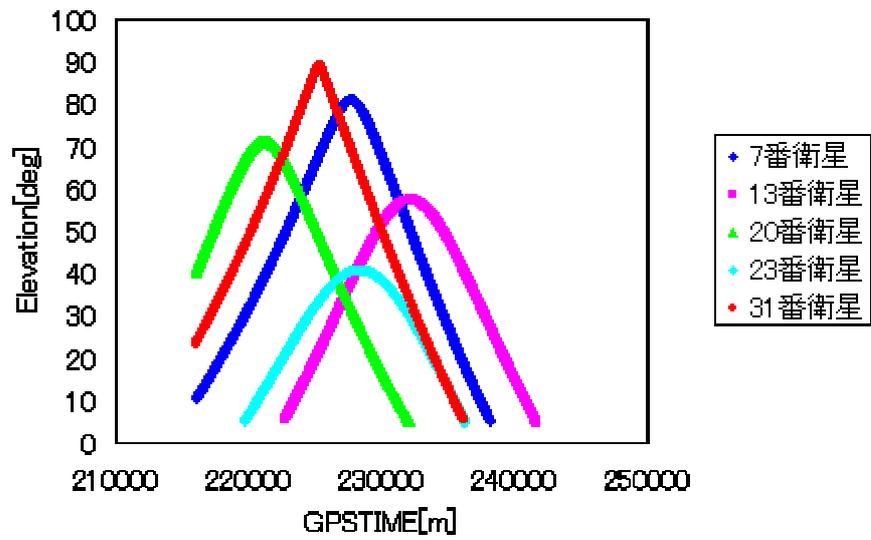


図 5-2 各衛星の仰角

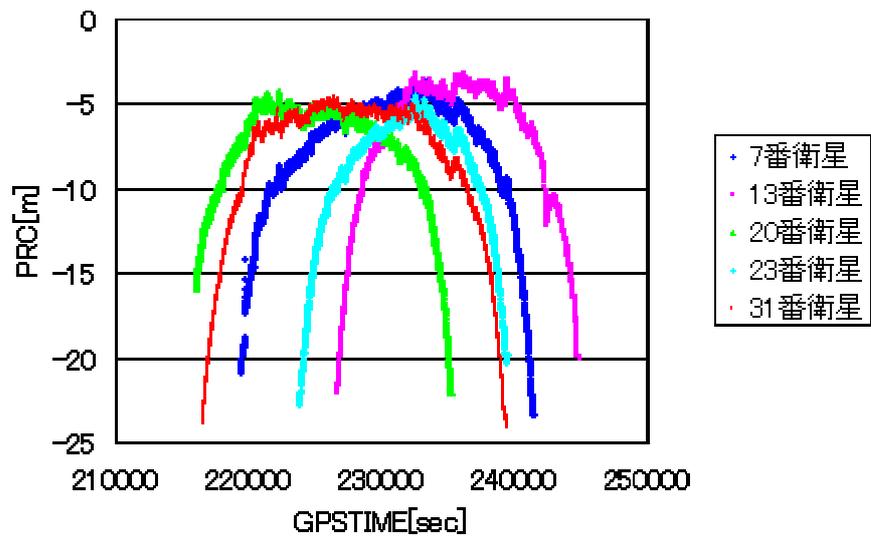


図 5-3 各衛星の擬似距離補正值の

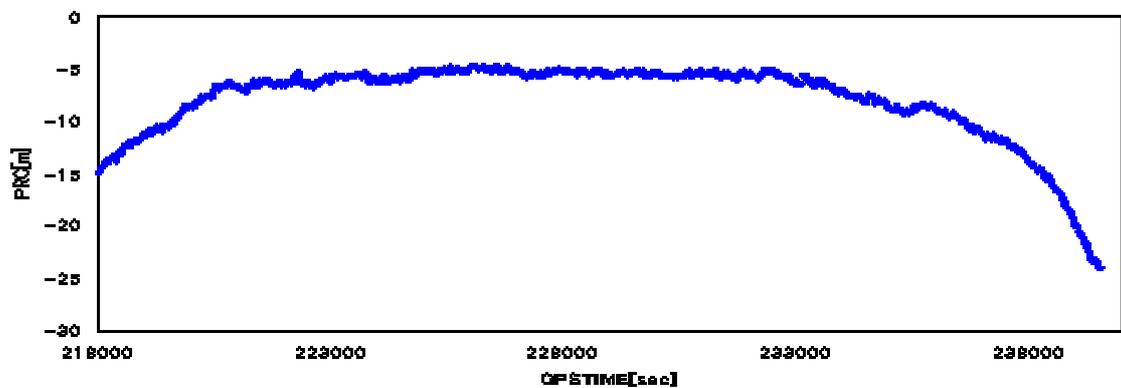


図 5-4 31 番衛星の擬似距離補正值

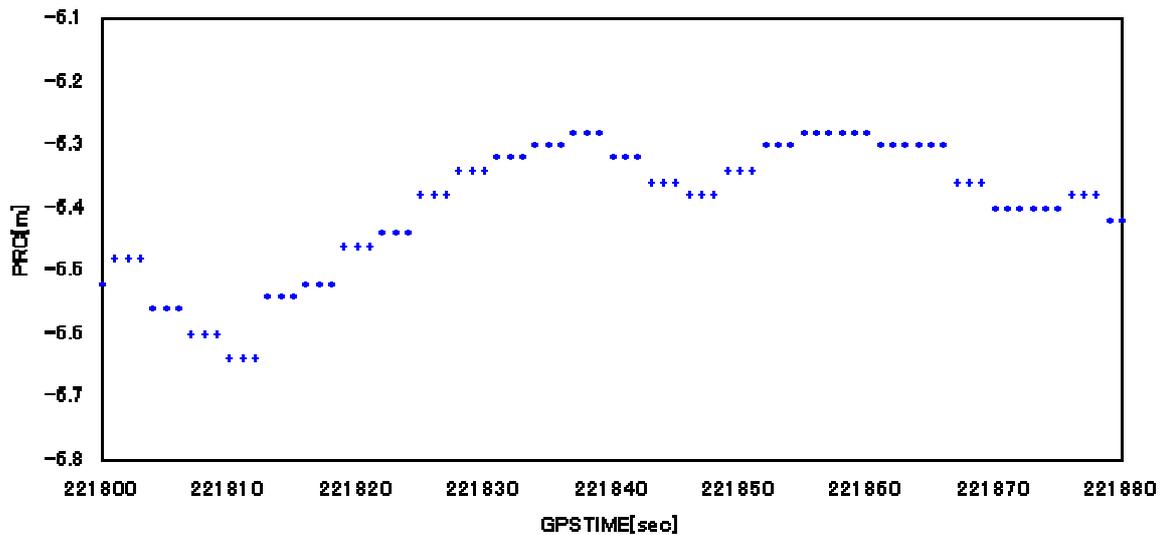


図 5-5 (図 5-4)の拡大図

5.4 実験概要

以下のように2つの実験を行った。

浦安を基準局とする DGPS 測位実験 …(5.5.1)

基準局 : 浦安 …… NovAtel 社製 OEM4、古野電気社製 GT80

受信機を2台使用し浦安で3つの補正值を作成する。使用した受信機は、測量用2周波受信機である NovAtel 社製 OEM4 と、比較的安価な1周波受信機である古野電気社製 GT80 の2台である。アンテナはマルチパスやノイズの影響をできるだけ減らすために測量用の NovAtel 社製 GPS700 を使用した。両受信機とも擬似距離のノイズを低減させるためキャリアスムージングを 200 秒かけてある。浦安では、海上保安庁の DGPS 局がありここで補正值などを RTCM 規格というフォーマットにして中波ビーコンで放送している。

移動局 : 東京海洋大学第4実験棟屋上 …… NovAtel 社製 OEM4

キャリアスムージングは 20 秒とした。また中波で発信される浦安の補正值を古野電気社製 GR-80 ビーコン受信機で取得した。

取得日時 : 2004 年 10 月 30 日 16:30 から同日 19:30 までの約 3 時間

データは毎秒取得し、全て後処理で解析を行った。基線長は約 10km で、測位に使用した衛星のマスク角は 10° である。データは全て RINEX 形式で統一した OEM4、

GT80、中波ビーコンの3種類の補正值を比較し、それらを用いて DGPS 測位を行い結果を比較する。これにより、海上保安庁の DGPS 補正情報の精度を検証する。以下の図 5-6 に実験機器の構成図を示す。

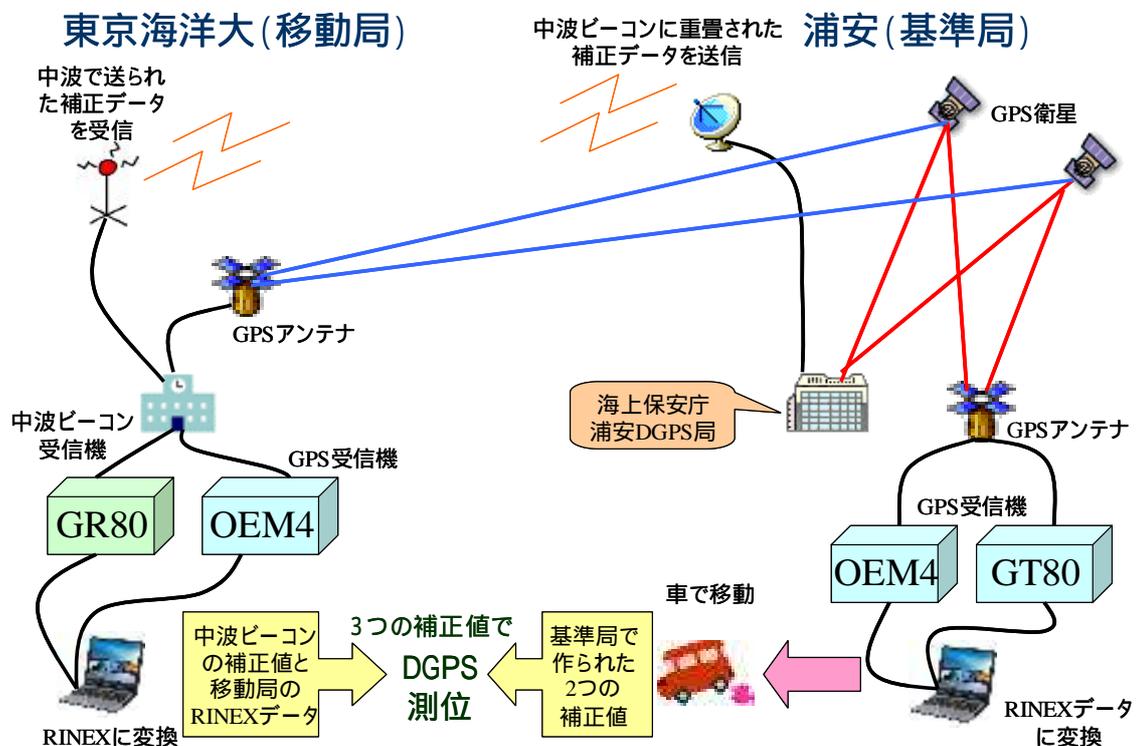


図 5-6 実験 の機器構成図

補正值比較実験 … (5.5.2)

東京海洋大学において NovAtel 社製 OEM4 と古野電気社製 GT80 さら古野電気社製 GR-80 ビーコン受信機を用いて 3 種類の補正值を毎秒取得。

取得日時 : 2004 年 11 月 04 日 19:00 から同日 21:00 まで約 3 時間

浦安がマルチパス等のノイズを受けやすい環境であったため、より好環境で補正值比較のためだけの補足的な実験を行った。以下の図 5-7 に実験機器の構成図を示す。

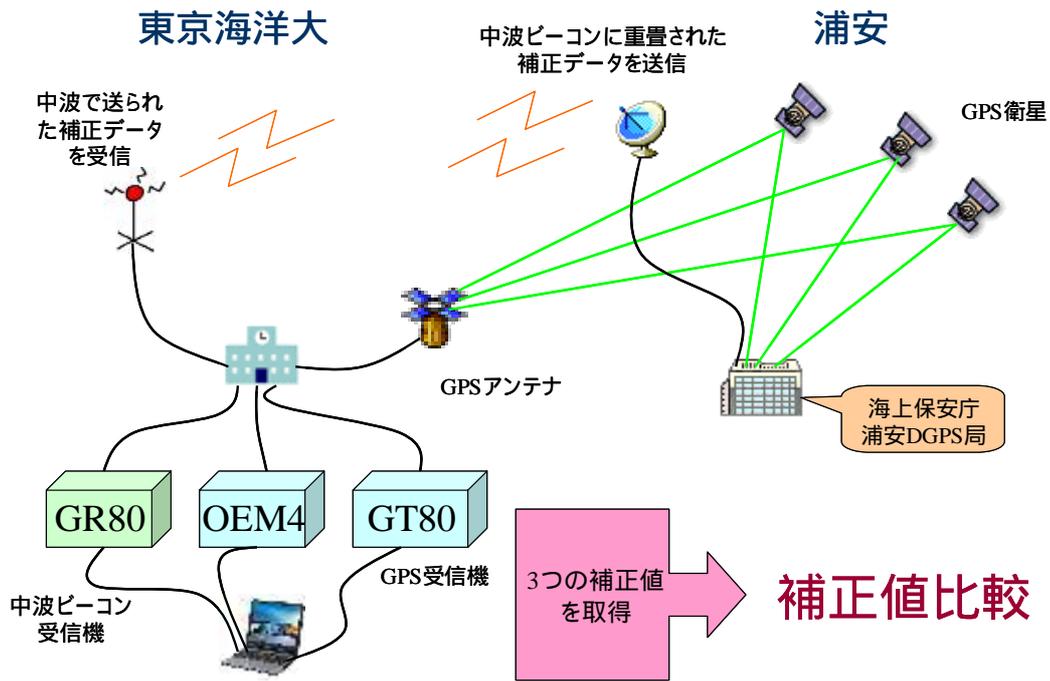


図 5-7 実験 の機器構成図

5.5 実験結果

5.5.1 DGPS 測位実験

図 5-8 に衛星の仰角の変化を示す。また図 5-9 から図 5-17 まで DGPS 測位に使用した主な衛星 9 機の各 3 種類の PRC(擬似距離補正值)を示す。

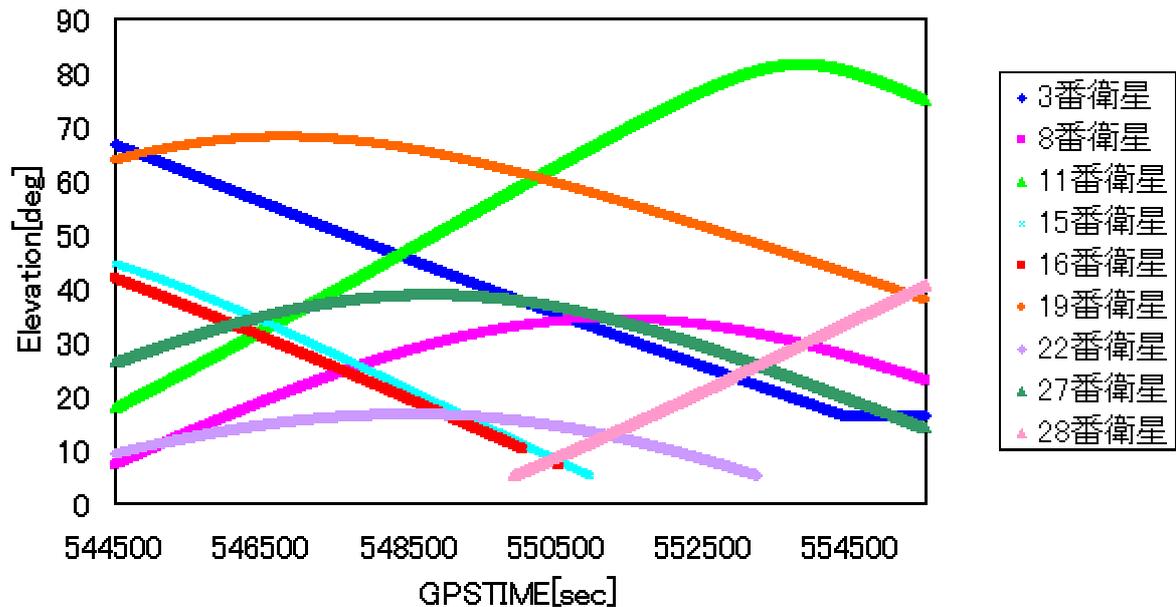


図 5-8 各衛星の仰角

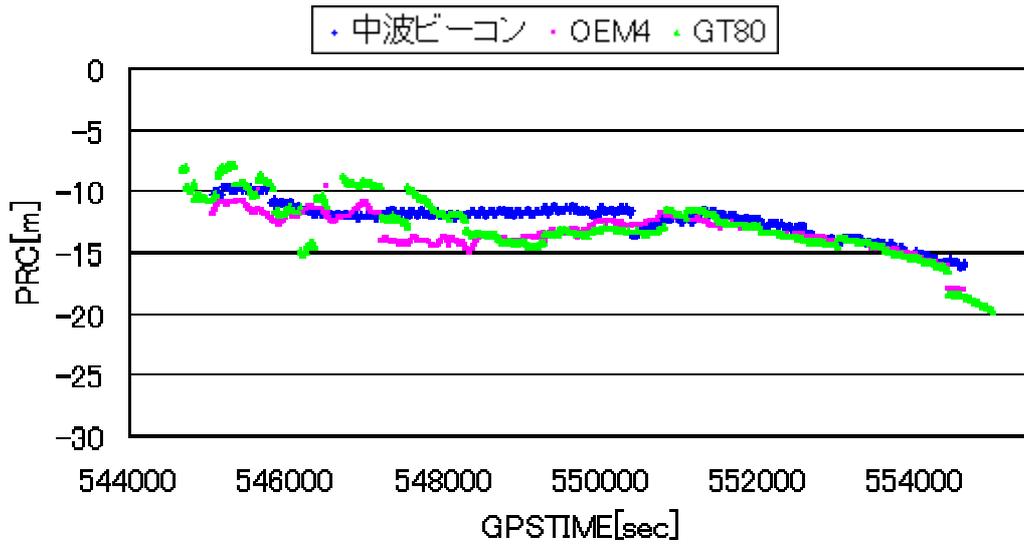


図 5-9 3 番衛星の PRC

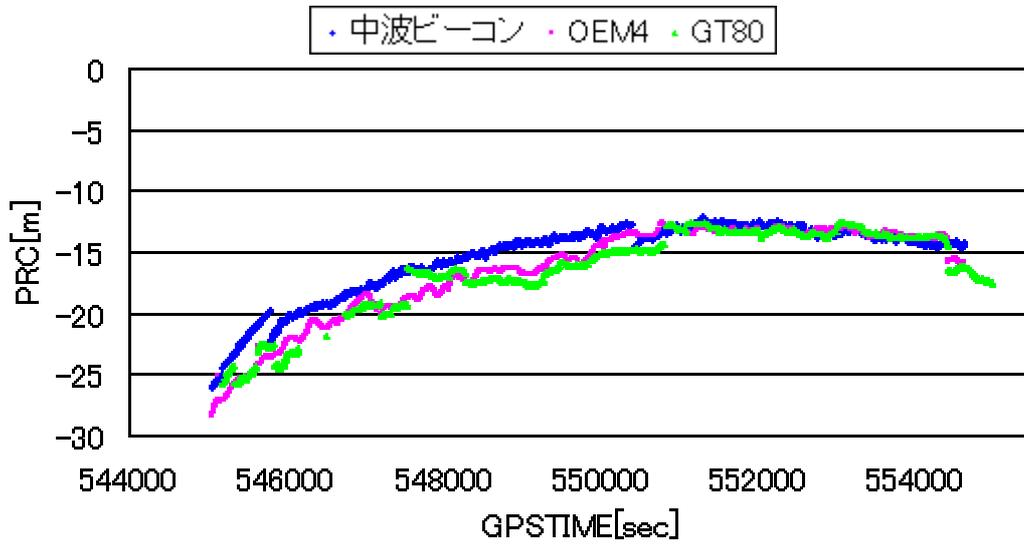


図 5-10 8 番衛星の PRC

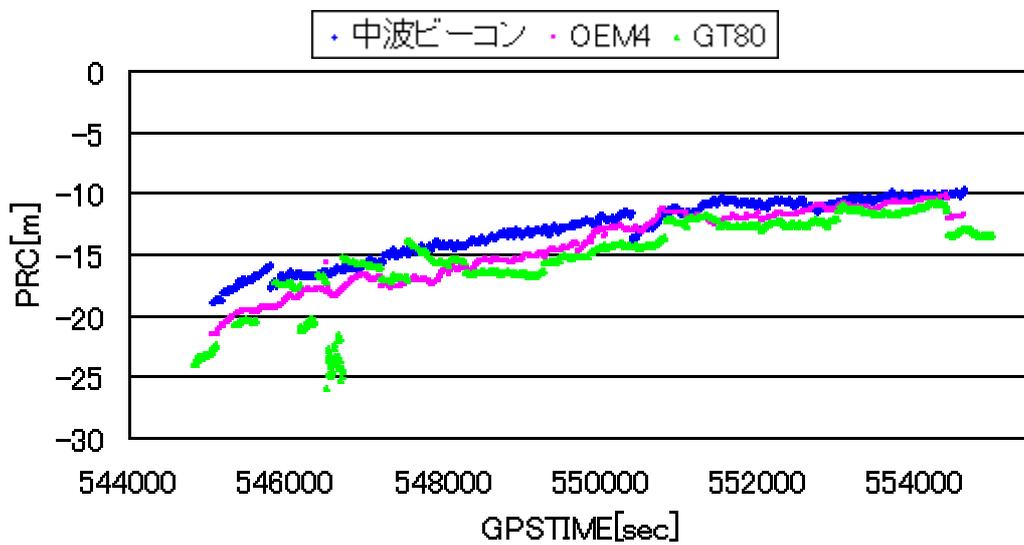


図 5-11 11 番衛星の PRC

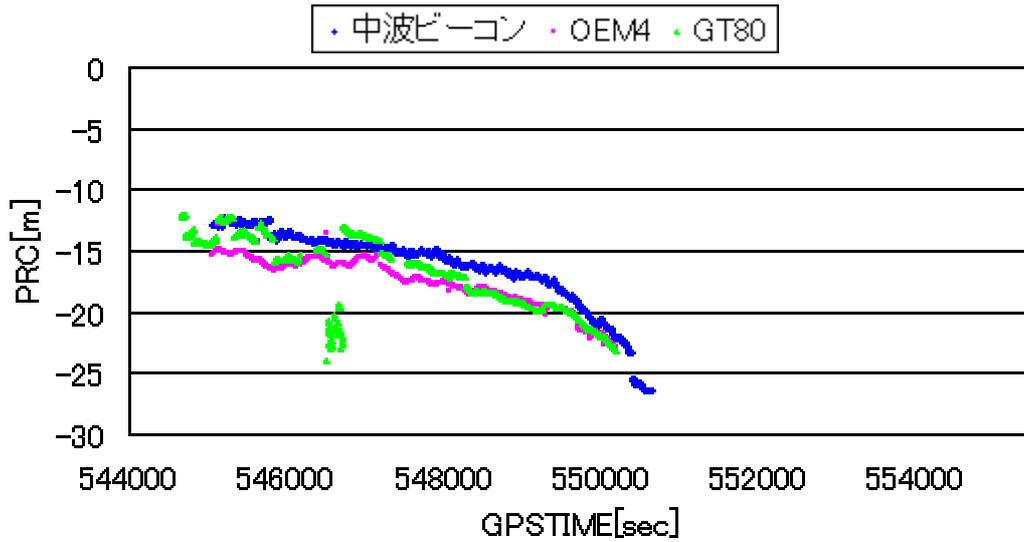


図 5-12 15 番衛星の PRC

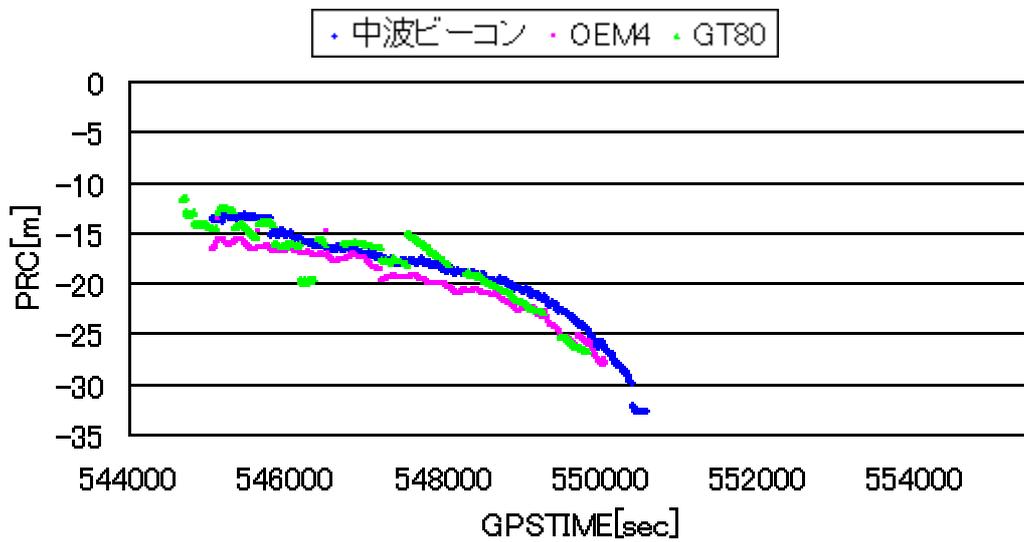


図 5-13 16 番衛星の PRC

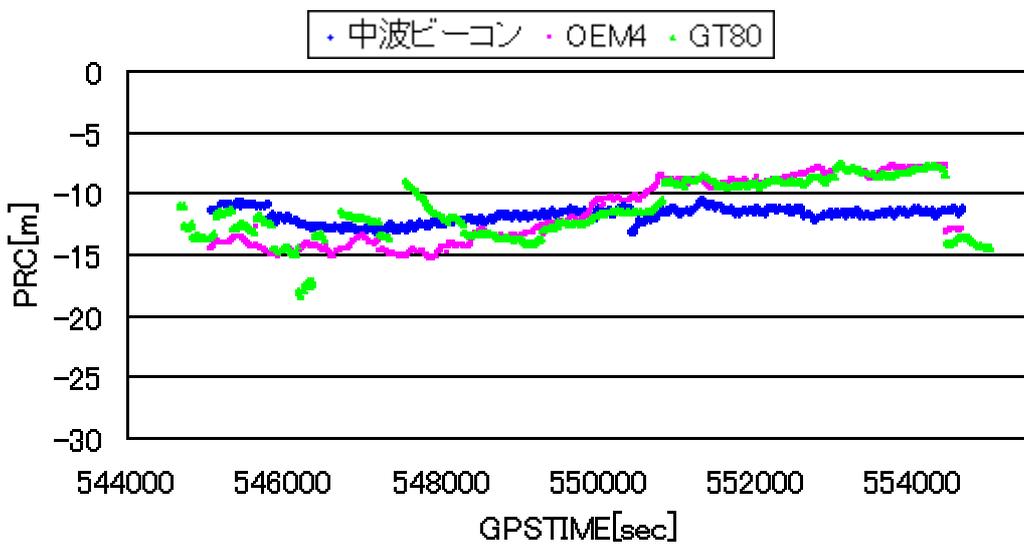


図 5-14 19 番衛星の PRC

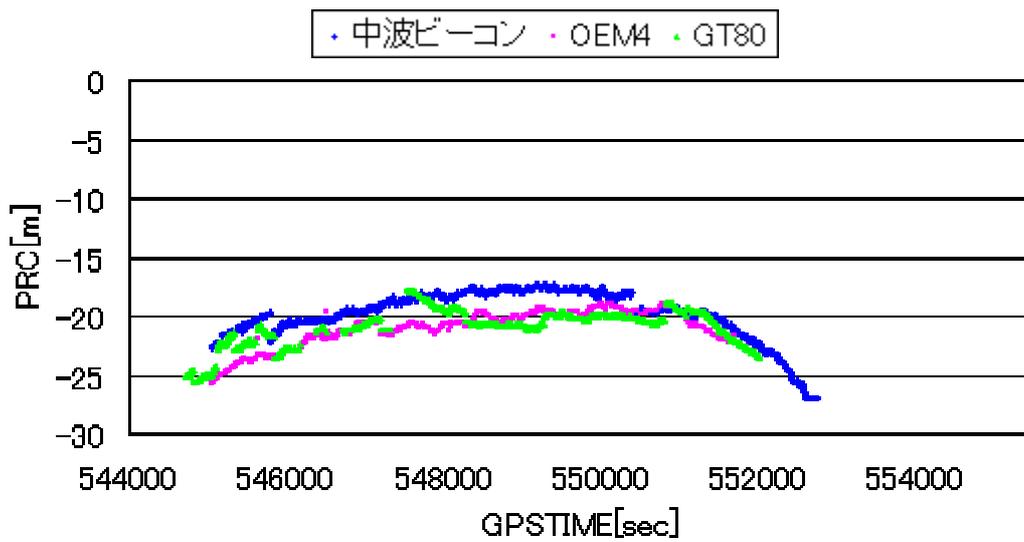


図 5-15 22 番衛星の PRC

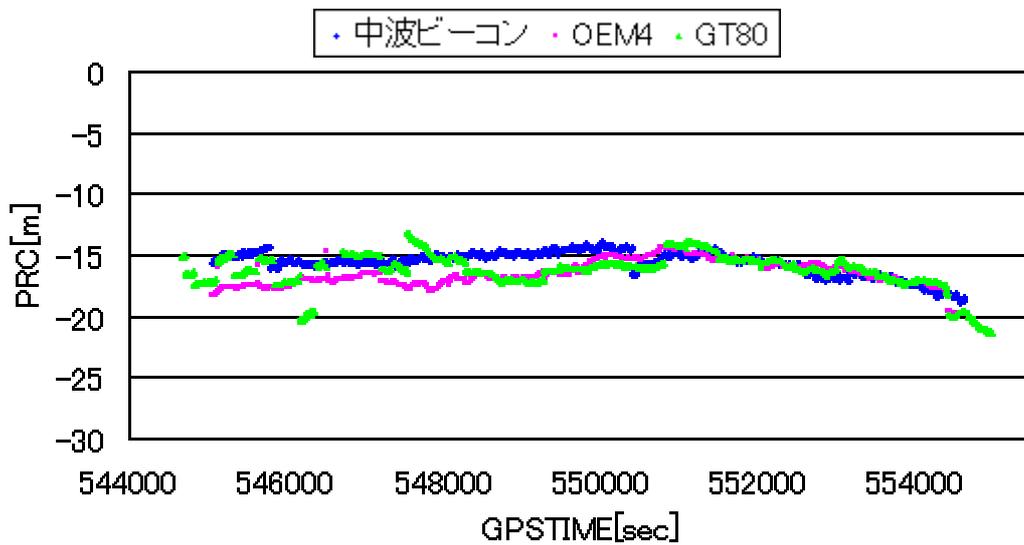


図 5-16 27 番衛星の PRC

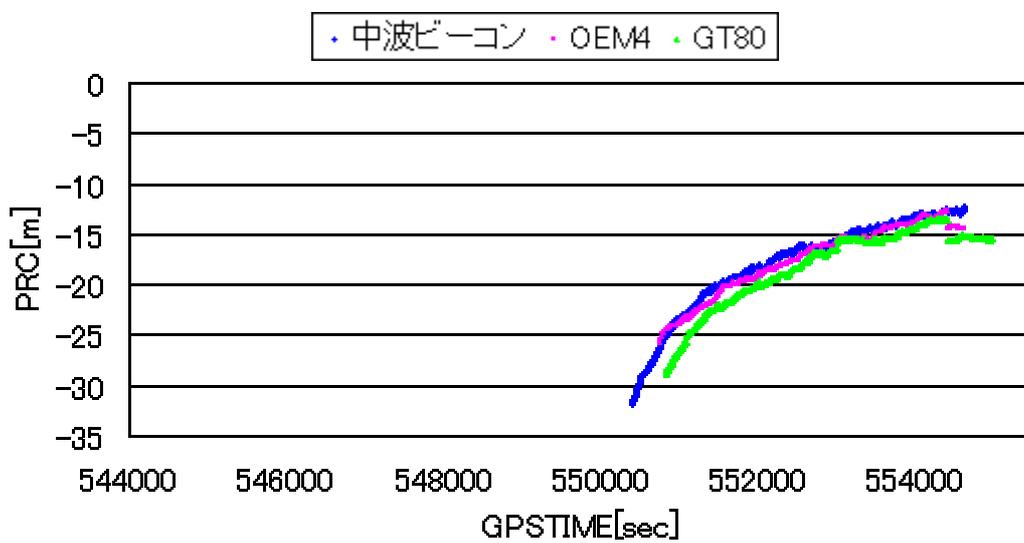


図 5-17 28 番衛星の PRC

中波ビーコン、OEM4、GT80 の PRC を比較すると、いずれの PRC も同じ傾向で変動していることがわかる。エフェメリス更新による衛星位置の変化以外に、GT80 や OEM4 には PRC の大きな変動で飛びが生じている。これは受信機時計の誤差により変動しているものと思われる。

次にこれらの PRC を用いて行った DGPS 測位結果を図 5-18 から図 5-20 に示す。

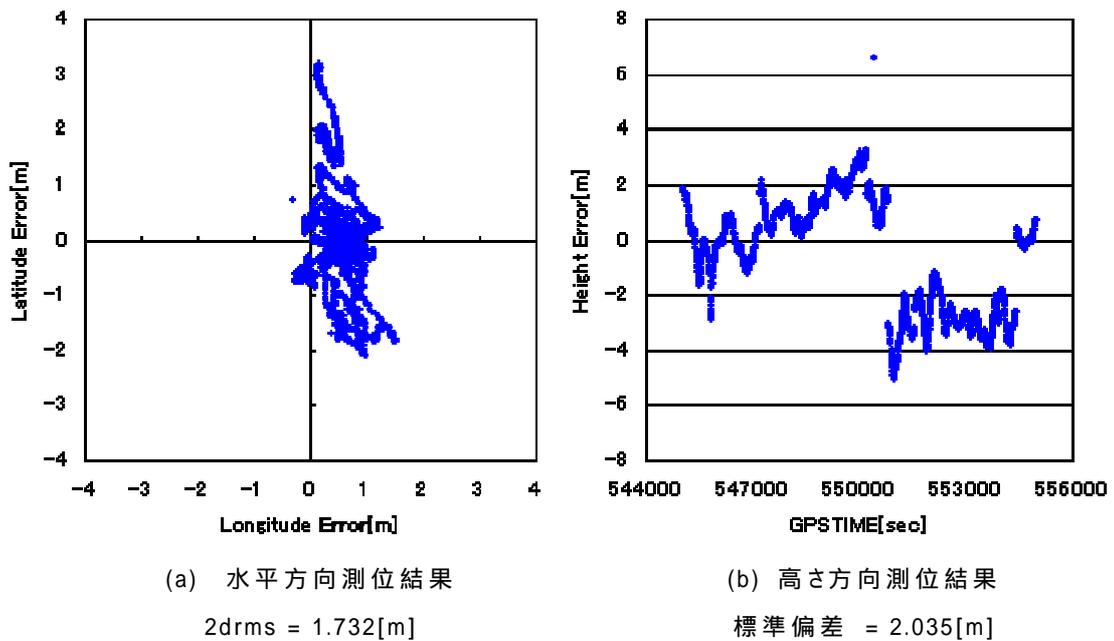


図 5-18 中波ビーコンの PRC による DGPS 測位

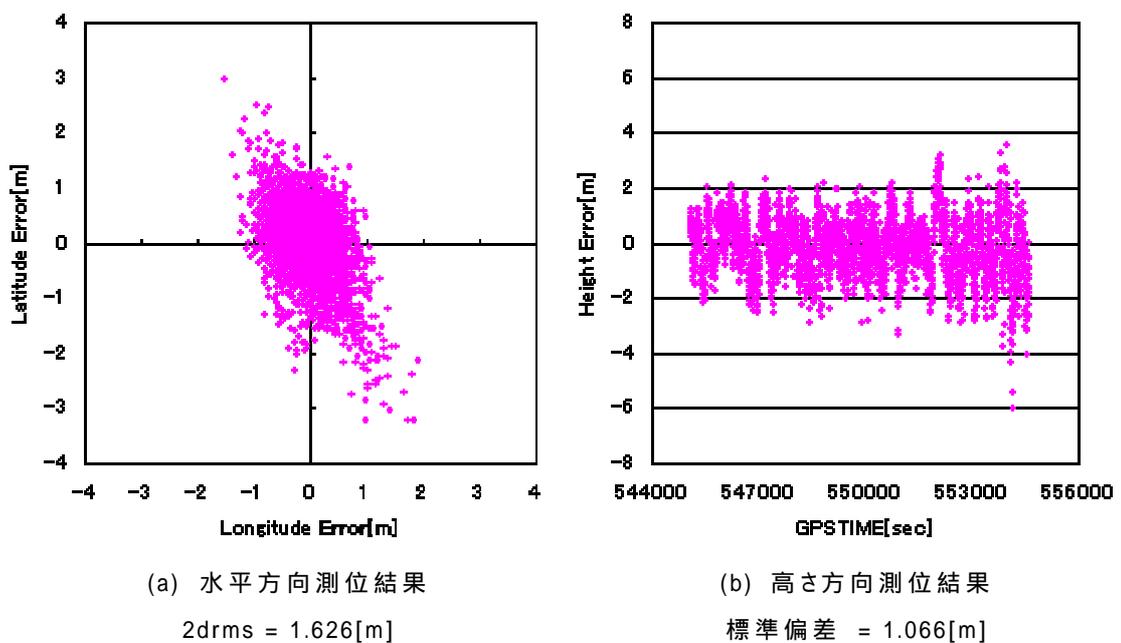
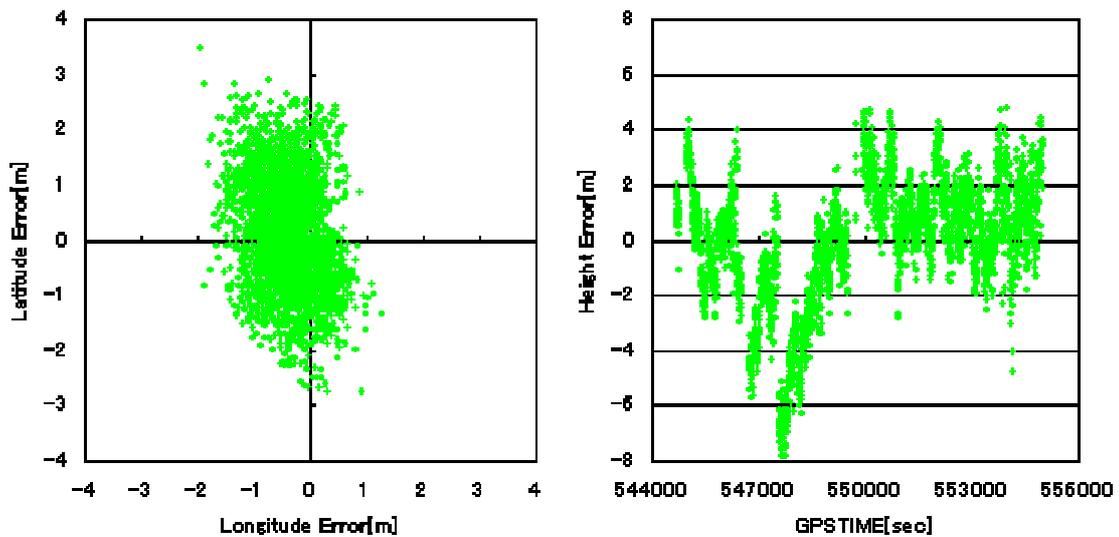


図 5-19 OEM4 の PRC による DGPS 測位



(a) 水平方向測位結果

2drms = 2.212[m]

(b) 高さ方向測位結果

標準偏差 = 2.309[m]

図 5-20 GT80 の PRC による DGPS 測位

表 5-1 に各方向の測位結果の誤差の平均値を、表 5-2 に標準偏差と 2drms を示す。

表 5-1 各方向の測位誤差平均値

	Longitude[m]	Latitude[m]	Height[m]
中波ビーコン	0.507	-0.051	-0.551
OEM4	-0.047	0.028	-0.148
GT80	-0.401	0.132	-0.057

表 5-2 各方向の標準偏差

	Longitude[m]	Latitude[m]	Height[m]	2drms[m]
中波ビーコン	0.316	0.807	2.035	1.732
OEM4	0.426	0.692	1.066	1.626
GT80	0.476	0.998	2.309	2.212

測位結果に大幅な違いは見られなかった。OEM4 の精度が一番高く、その後に中波ビーコン、GT80 が続くという結果になった。GT80 については、安価な受信機として使用したが、補正值比較、DGPS 測位において他と遜色ない結果が得られた。また、中波ビーコンの DGPS 測位結果には他の 2 つに対しノイズの少ない形で現れていることも特徴のひとつであった。

5.5.2 補正值比較実験

図 5-21 から図 5-28 まで主な衛星 8 つの PRC を示す。

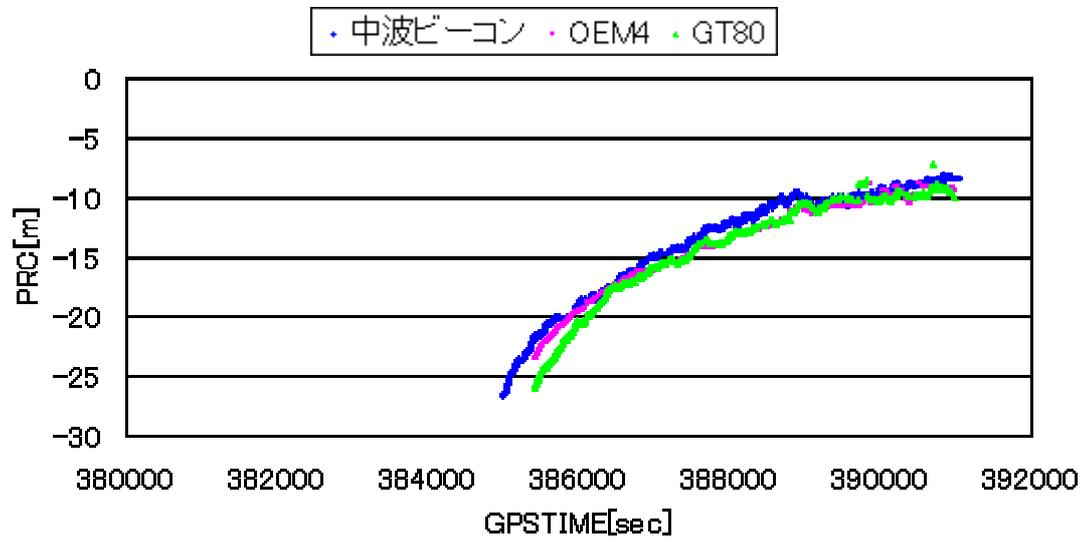


図 5-21 4 番衛星の PRC

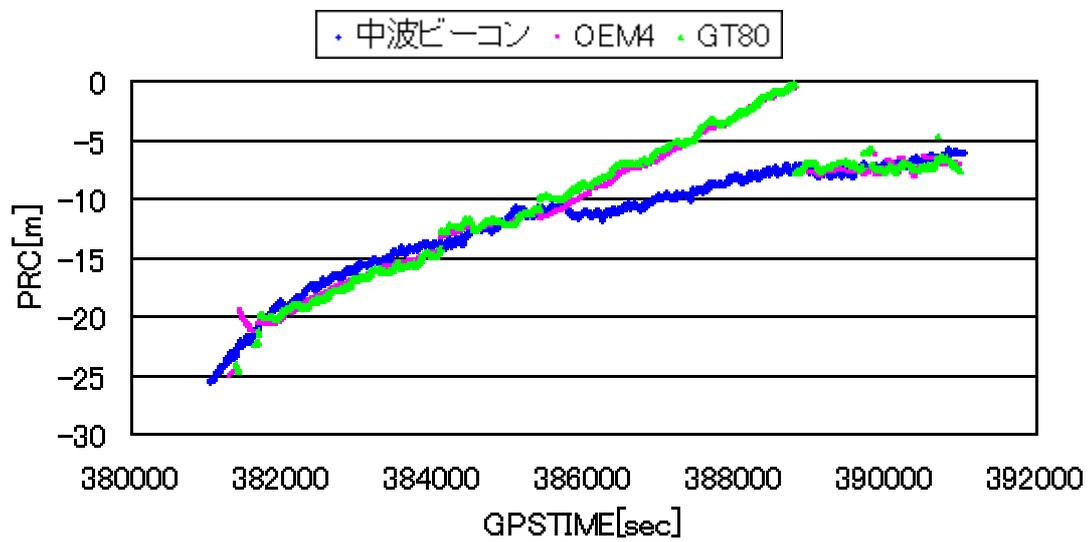


図 5-22 7 番衛星の PRC

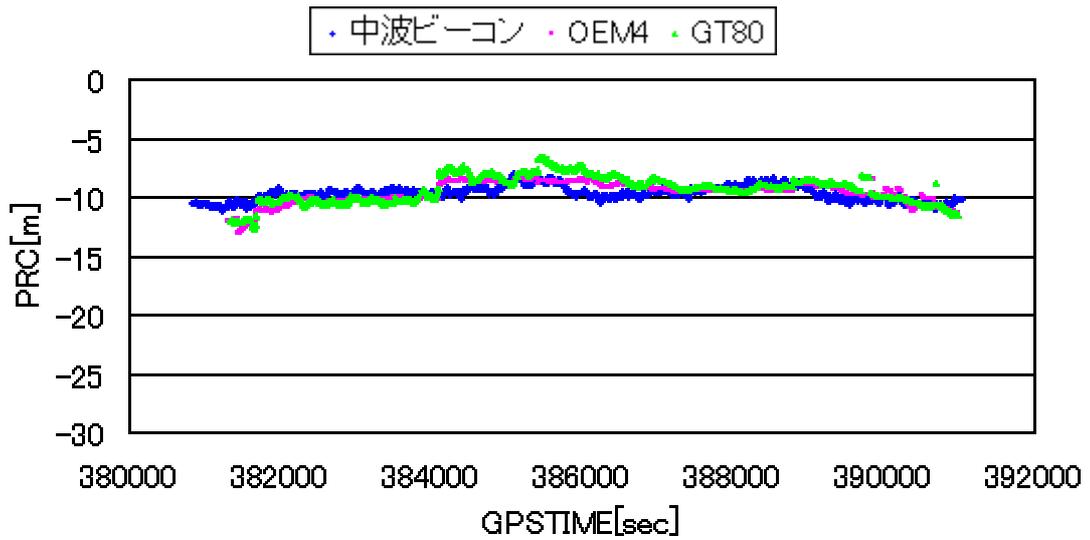


図 5-23 11 番衛星の PRC

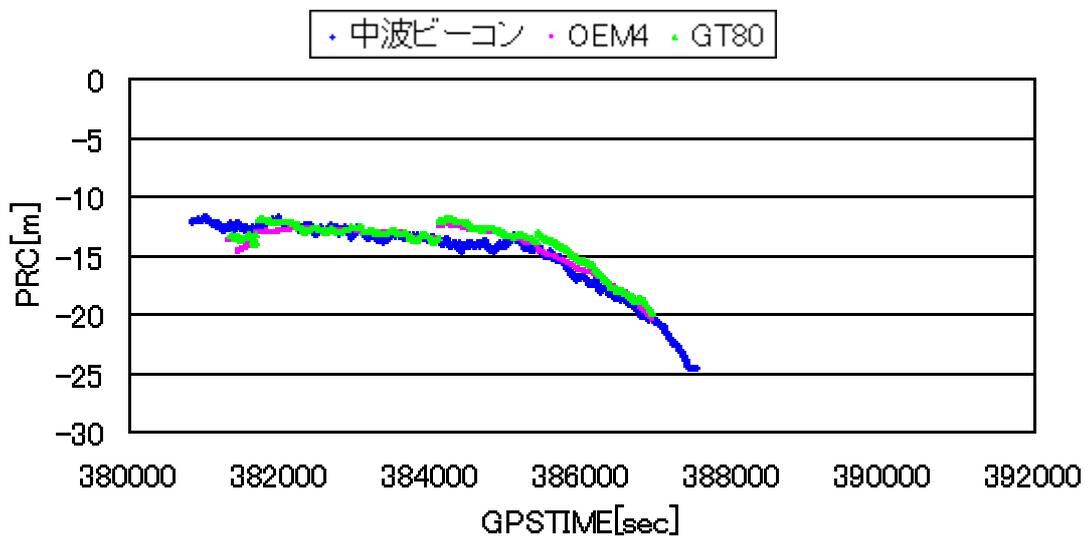


図 5-24 19 番衛星の PRC

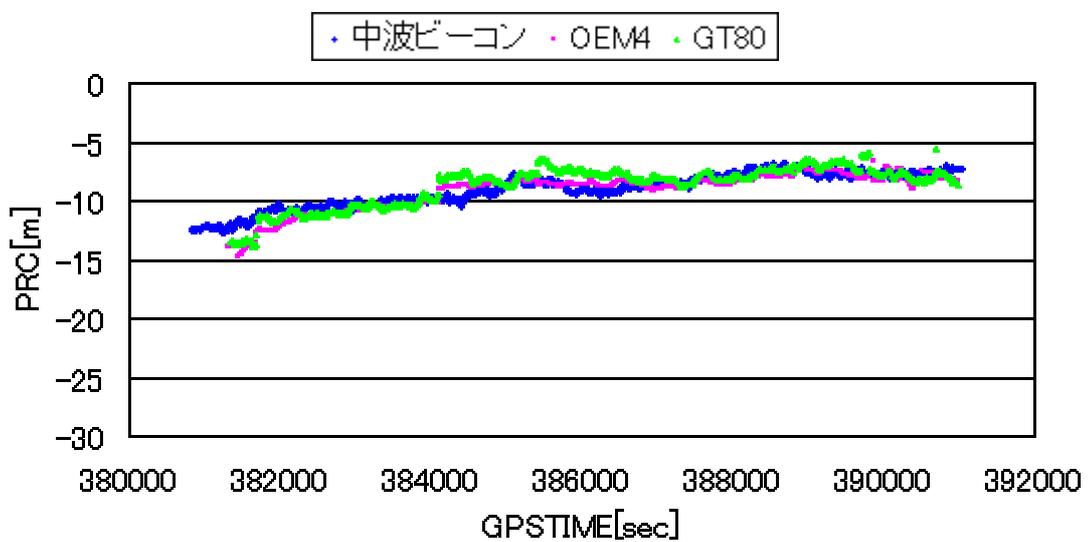


図 5-25 20 番衛星の PRC

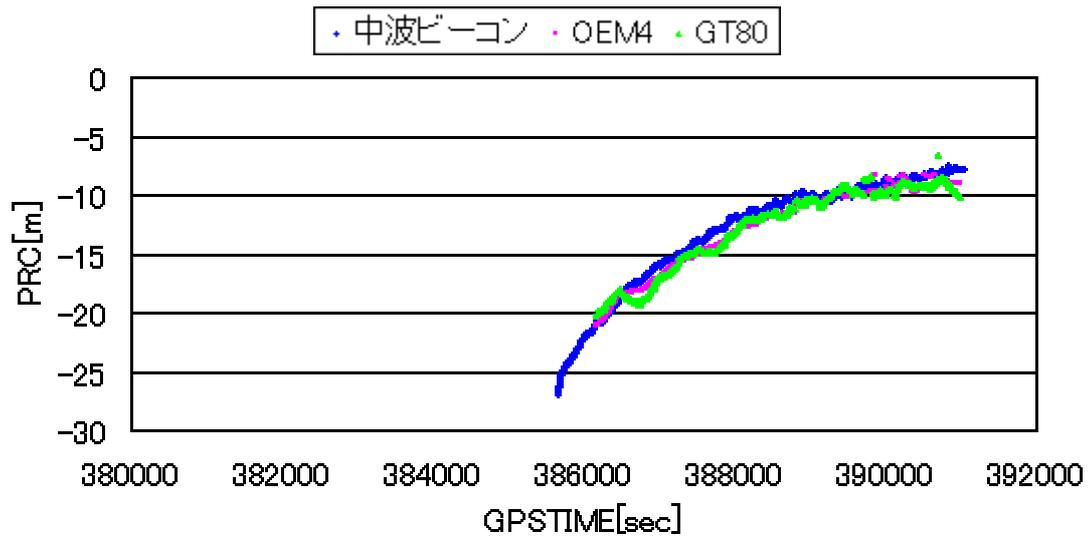


図 5-26 23 番衛星の PRC

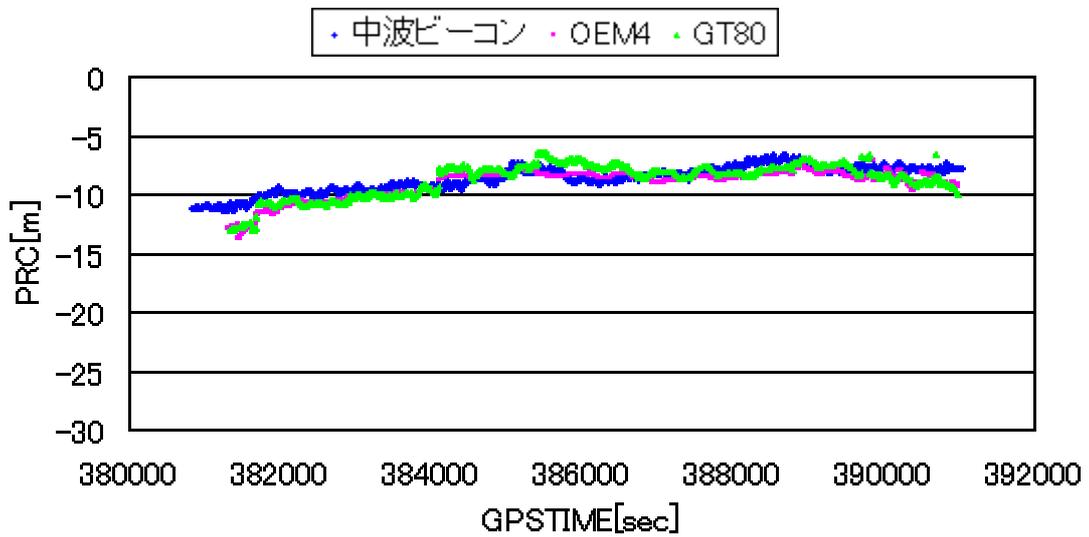


図 5-27 28 番衛星の PRC

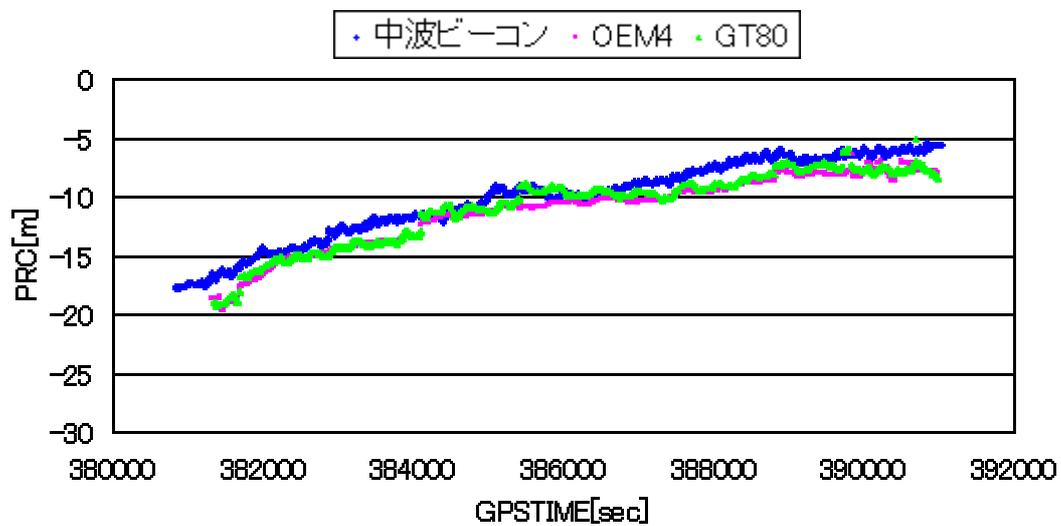


図 5-28 31 番衛星の PRC

と の補正值比較実験より、 の GT80、OEM4 の PRC は大きな変動が飛びが数えられるほどに減少していることがわかる。つまり、浦安での受信状況は屋上などの好環境な場所のそれとは違い、悪かったものと思われる。尚、GPSTIME で 388800 秒にエフェメリスの更新による衛星位置の変化が起きている。これによる影響を図 5-22 の 7 番衛星の PRC は大きく受けていることがわかる。

5.6 考察

補正值比較において、精度を判断する明確な基準はないがここでは DGPS 測位結果の一番良かった測量用受信機 OEM4 のものを基準とする。 の実験では受信機時計の誤差により GT80、OEM4 の PRC に変動が見られたが、3 つの補正值とも似たような傾向を示している。特徴としては

- (a) 中波ビーコンに比べると GT80、OEM4 は PRC が飛んでいることがある。
- (b) 両受信機とも同じようなところで PRC が飛んでいる。
- (c) 中波ビーコンも PRC の飛ぶことがあるが、これは両受信機とは異なる時間で起きている。

の3つが考えられる。(a)(b)については、同じアンテナからデータを取得し、同じプログラムで(5-3)式の算出法で導き出されたものなので当然である。また OEM4 よりも GT80 の方が、何度も PRC の大きな変動が生じ、値が飛んでいた。(c)については、海上保安庁のほうで補正データをどのように算出しているのかわからないが、おそらく算出法の違いによるものだと考えられる。 の実験でエフェメリスの更新を確認でき、両受信機の PRC は大きく変動したが、同更新時刻においても中波ビーコンの PRC に大きな変動は見られなかった。海上保安庁の補正データ算出法では、別の時間帯に衛星位置を更新しているものと考えられる。いずれにしろ3つの PRC は、測位結果の一番良かった OEM4 の PRC と比較してみても他 2 つの PRC と大きな差は見られず、DGPS 測位を行うのに問題のない精度をもっているものと考えられる。

DGPS 測位結果比較において、3つの PRC を用いた DGPS 測位に大きな違いは見られなかった。誤差平均値、標準偏差の値ともに OEM4 の精度が一番高かった。基線長約 10km で海上保安庁の放送する PRC を用いて、 $2drms=1.7m$ で測位することができたので、精度が数 m といわれる DGPS では十分な結果となった。

この実験より3つの PRC は、精度の高い信頼性のあるものだと思われる。ゆえに、海上保安庁の DGPS 補正情報は高精度であると考えられる。

第 6 章

結論

6.1 まとめ

ここでは、第 4 章のキャリアスムージングそして第 5 章の補正值比較 / DGPS 測位実験において研究の目的がどのように達成されたのか、所見の一端も含めて要約することとする。

第 4 章のキャリアスムージングの実験では、スムージングによって測位精度は向上することが確認できた。特に OEM4 のような測量用の受信機では大きな違いを見つけることはできなかったが、GT80 ではスムージングの効果が一目でわかり受信機による違いを実感できた。最適なスムージング時間はフィルタの特性にもよるが、100 秒未満ではノイズがまだ低減されておらず、1000 秒を超えると測位結果が劣化してしまうことより、一般的に 100 秒から 500 秒かければ十分な効果が期待でき測位結果も向上できる。

第 5 章の補正值比較実験では、海上保安庁の放送する中波ビーコンの補正值と、GT80、OEM4 で作成した補正值とを比較した。海上保安庁の PRC は、2 台の受信機で作成した PRC とは異なり、補正值算出法の違いではないかと考えた。GT80 と OEM4 の PRC は同じ算出法で求めているためか、値の飛んでしまうところなど似ている箇所が多かった。GT80 は、 と の異なる実験において、PRC の値が飛んでしまうことが多くなったという結果より環境変化の影響を受けやすい受信機なのではないかと推察した。いずれにしろ、3 つの PRC は同じ傾向で変動していくことが確認できた。

同じく 3 つの PRC を用いた DGPS 測位実験では、測位結果に大きな違いは見られなかったことがわかった。これら 3 つの測位結果の中で、一体何を基準に精度検証をすれば良いか不透明なところがあるが、ここでは第 5 章のように測位結果の一番良かった測量用受信機である OEM4 を基準と考えた。測量用受信機 OEM4 を基準にしても、1 周波受信機である GT80 は見劣りしない測位結果を得ることができ安価な受信機としての性能の高さを誇っている。中波ビーコンの DGPS 測位結果も同様であり、海上保安庁の DGPS 補正情報伝送サービスは信頼性のあるものといえるだろう。

まとめるならば以下のようなになる。GT80 は安価な受信機ではあるものの、キャリアスムージングをかければ測位精度は大幅に向上し、DGPS 測位を行うための PRC も高い精度のものを作成できるが、マルチパス波など周囲環境の影響を受けやすい受信機である。OEM4 は測量用の受信機として、スムージングをかけなくとも良い測位結果を求めることができ、PRC を用いた DGPS 測位結果でも最も良い精度を上げ非常に性能の高い受信機である。海上保安庁の DGPS 補正情報サービスは、DGPS 測位結果を OEM4 と比較してみても、高精度の伝送サービスである。また、キャリアスムージングは一般的に 100 秒

から 500 秒かけるのが適当である。

6.2 今後の課題

キャリアスムージングにおいては、カルマンフィルタを用いたものがハッチフィルタを用いたものより測位結果が劣っていたが、これを改良し測位結果を改善していきたい。特に、L1 帯のみで電離層遅延量差分を推定するカルマンフィルタのアルゴリズムを開発し、測位精度を向上させていきたい。また 1000 秒以上スムージングをかけると測位結果が劣化する傾向があったが、この原因を勉強することが必要である。

補正值比較においては、中波ビーコンによって伝送される PRC はどのような受信機でどんな算出法を用いているのか調査してみることで、より理解を深めていきたい。2 台の受信機で求めた PRC には、エフェメリスによる衛星位置の更新以外に値が飛んでいることがあった。この原因は受信機の時計誤差により生じているものだと思うのだが、不明なところもあるためさらに調査を進めることとする。DGPS 補正情報の伝送サービスは、海上保安庁によって中波ビーコンで伝送されるものの他に、FM 放送に重畳されているものもある。これら 2 つを PRC を比較検討してみることは、本研究では行えなかった課題の1つである。

DGPS 測位においては、今回の実験では基線長(浦安～東京海洋大越中島キャンパス)の短いものであり、この基線長をさらに長くしどの程度の測位結果が得られるのか調査することも必要である。

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。

本研究はもちろんのこと、日々様々な助言、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、研究方針からプログラミング、発表まで終始格別のご厚情にあずかり、まことにありがたく深謝致します。データ取得だけでなく、GPS について様々なことを学ばせて頂き、本当にありがとうございました。

同じく大学院生の鈴木崇史氏、近藤俊一郎氏には、研究や日常生活において何かとお世話になり、心から感謝しております。

最後に色々な質問に答えて頂いた大学院生の吉田将司氏を含め、情報通信工学研究室の皆様にも心から感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 土屋淳・辻宏道 「新・GPS 測量の基礎」 日本測量協会 2002
- [2] 土屋淳・辻宏道 「新訂版やさしい GPS 測量」 日本測量協会 1997
- [3] 富永貴樹 「長基線 DGPS 測位における電離層遅延の影響」 東京商船大学卒業論文 2002
- [4] 岡本伸也 「長基線 DGPS 測位および干渉測位の測位精度に関する研究」 東京商船大学修士論文 2003
- [5] Greg Welch, Gary Bishop “An introduction to the Kalman Filter,” Department of Computer Science University of North Carolina, 2004
- [6] Todd Walter, “The Effects of Large Ionospheric Gradients on Single Frequency Airborne Smoothing Filter for WAAS and LAAS,” Stanford University, 2004