

平成 1 7 年度

卒業論文

題目 : 高精度単独測位ソフトウェアの評価と開発

課程名 : 流通情報工学課程

学籍番号 : 2 0 0 2 7 4 3

氏名 : 毛利 悠美子

指導教官 : 安田 明生 教授

目次

第一章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究の目的.....	1
第二章 GPS 単独測位原理.....	3
2.1 GPS 概要	
2.2 単独測位原理.....	5
2.2.1 測位原理	
2.2.2 計算方法	
2.3 単独測位の測位誤差.....	10
第三章 高精度測位概要.....	12
3.1 衛星暦.....	12
3.1.1 精密衛星軌道	
3.1.2 内挿アルゴリズム	
3.2 衛星時計.....	13
3.2.1 精密衛星時計	
3.2.2 内挿アルゴリズム	
3.3 電離層モデル.....	15
3.3.1 全地球電離層マップ	
3.3.2 内挿アルゴリズム	
3.4 対流圏モデル.....	19
3.5 まとめ.....	20
第四章 測位実験と考察.....	21
4.1 実験.....	21
4.1.1 実験方法	
4.1.2 実験結果1 (全国での測位結果)	
4.1.3 実験結果2 (1週間の測位結果)	
4.1.4 実験結果3 (半年間の測位結果)	
4.2 考察.....	34
4.2.1 測位アンテナの位置	
4.2.2 電離層マップ	
4.2.3 仰角・方位角マスク	
4.3 まとめ.....	41
第五章 結論.....	42
5.1 総括.....	42
5.2 今後の課題.....	43

第一章 序論

1.1 研究背景

GPS は地球の周回軌道を回る 24 個の GPS 衛星から発信されるデータを用いて、受信機と GPS 衛星の位置関係を測定し、位置決定を行うシステムである。2000 年に衛星側の時計誤差の付加が廃止され、約 100 メートル台であった単独測位の精度は 10 メートル台へと向上した。しかしながら、1 周波単独測位の精度は数メートルから数 10 メートルの誤差があるのが現状である。これでは GPS を用いたナビゲーションシステムはおろか、精密さが要求される測量分野では使い物にならない。

測量ほど正確さを求められないようなナビゲーションシステムの場合でも GPS 受信機 1 台では 1 メートル程度の正確な位置の特定は難しい。そのため、衛星からのデータとは別に DGPS 用の補正データを常に受信し 2 つのデータを合わせて測位を行っている。現在は無線 LAN や携帯の電波などを用いて補正データの送信を行っているが、これらの電波は送信できる範囲が限定されており電波が届かない場所での精度は保障されない。また、受信機を 2 つ使用することで空間特性などの誤差要因を除くことは可能であるが、単独測位に比べて手間もコストもかかる。

そこで、精密単独測位の可能性が取り上げられるようになってきた。現在、様々な機関が精密な全地球電離層マップや精密軌道データ、精密衛星時計などを配布しており、単独測位に使用するデータは従来のもより高精度なものが揃っている。これらを用いれば補正データを常に受信することもなく、単独測位自体の高精度化を行えるのである。

1.2 研究の目的

本研究の目的は単独測位の高精度化を行うことである。比較的一般的な 1 周波受信機を用いた単独測位の測位精度を上げ、受信機単独での測位結果の向上を図る。今回は高精度測位のために作成したソフトウェアを評価する。主な改良点は以下の通りである。

G P S 精密衛星軌道の利用による衛星位置誤差の削減
通常だと衛星から放送される軌道情報を用いて測位計算を行うが、放送暦の誤差は測位誤差の要因となる。本研究では放送暦が変わって、G P S 衛星精密軌道情報を使用している S P 3 フォーマットを測位計算に使用する。I G S の提供する S P 3 フォーマットの軌道情報は、15 分間隔で衛星の 3 次元位置が記述されており、従来と比べ大幅に誤差が減少した。

G P S 精密衛星時計の利用による衛星時計誤差の削減

衛星時計データは航法メッセージの中に含まれており、衛星軌道と同様の問題を抱えている。本研究ではG P S 衛星精密時計補正データを用いることで、その問題を解決する。I G S の提供するR I N E XフォーマットとS P 3フォーマットのデータを使用することにより、時計誤差を減少させた。

全地球電離層マップの利用による電離層誤差の削減

電離層遅延量は、従来の単独測位の場合、経験的なモデルから算出されていた。電波は電離層を通過する際に屈折率が周波数に依存する特性があるため、2周波を用いれば正確に推定することも可能である。しかし今回は1周波しか使用できないため、C O D E の提供するI O N E Xフォーマットの全地球電離層マップを用いることで電離層遅延量の推定を行い、電離層誤差を減少させた。

気象データによる対流圏遅延誤差の削減

対流圏による測位誤差は通常モデルを使用して推定可能であるが、低仰角では大きな誤差要因となることがある。対流圏遅延は周波数に依存しないため、気象観測値から対流圏天頂遅延量を推定する。今回、最も精度が高いと言われているマッピング関数を使用することにより、対流圏誤差を減少させた。

評価は通常の単独測位と、このソフトウェアを使用し、高精度単独測位の誤差補正方法を用いた場合の測位結果を比較することで行う。以下の解析実験を行い、結果にも続き議論する。

全国でのG P S 単独測位

日本は国土が緯度経度方向に広がっているため、全国での測位を行い、高緯度地域から低緯度地域まで地域によって測位精度傾向に違いがないか調査する。今回は国土地理院が配布する電子基準点の全国8箇所での測位結果を示し、考察する。

同地点複数日でのG P S 単独測位

日時や季節によって測位精度傾向に違いがないか調査するため、同地点における9月24日から30日までの1週間の測位と、4月から9月までの半年間(1ヶ月間隔、毎25日)の測位も行い、測位結果を示し、考察する。

第二章 GPS 単独測位原理

2.1 GPS 概要

GPS とは Global Positioning System (全地球測位システム) の略称で、人工衛星を利用した測位システムである。1973 年に米国国防省 DoD (Department of Defence) により開発が指揮されたこのシステムは、W.Wooden による詳しい定義では

「GPS は DoD が地球上ならびにその近辺どこにでも、共通の基準形に基づく正確な位置と速度と時間を連続的に決定したいという軍の要望を満たすために開発した全天候型、宇宙配備の航法システムである」(参考文献 1 pp13 より引用)

とあるように、そもそもは軍事利用が目的であった。1974 年 7 月に最初の NAVSTAR (Navigation System with Time and Ranging) 衛星が打ち上げられ、実質完全運用状態になったのは 1993 年 12 月ごろである。この時点で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。本来が軍事用であるため、民間利用が行われるようになってからもしばらくはその精度は制限されていた。

しかし、2000 年 5 月 2 日以降 SA (Selective Availability) と呼ばれる衛星の時計誤差を引き起こし精度を劣化させる操作を廃止、それまで測位精度は単独測位で水平方向で約 100m だったものが、数 10 から数 m にまで飛躍的に向上し、通常でも 30m 程度の精度が保障されている。そのような経緯もあって、現在では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。また、SA の解除や、受信機、アンテナ等の周辺機器の進歩もありその測位精度は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現在ロシア連邦が運用している GLONASS (Global Navigation Satellite System) 欧州が開発を行っている GALILEO があり、我が国でも日本本土及び豪州大陸上を 8 の字型に周回する準天頂衛星の運用が計画されている。

表 2.1 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 2.1 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。衛星軌道は実際には随時変更されており完全には決定していない。衛星は約 11 時間 58 分 2 秒 (0.5 恒星日) で軌道を 1 周し、1 年で同じ配置に戻るよう制御されているようである。

表 2 . 1 GPS 衛星の主要緒元

衛星数	4機 × 6軌道 = 24機
軌道半径	約26,561m
周回周期	約11時間58分2秒 約0.5恒星時
軌道傾斜角	55°
設計寿命	7.5年
搬送波周波数	L1 = 1,575.42MHz (154 × 10.23MHz) L2 = 1,227.6MHz (120 × 10.23MHz)
コードの種類	ゴールド符号
測地系	WGS-84

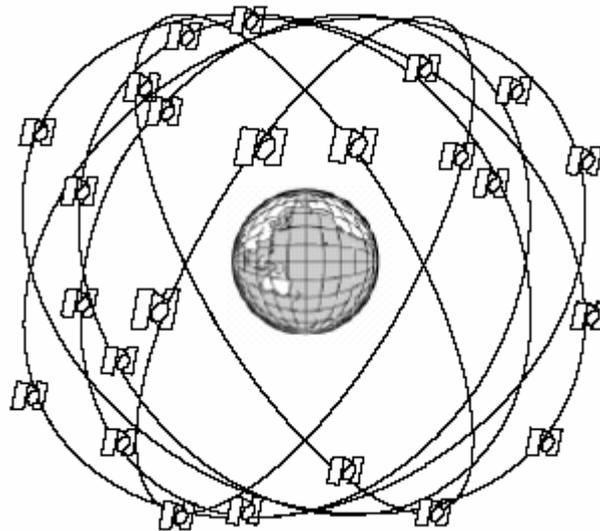


図 2 . 1 GPS 衛星軌道概念

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(2005年3月)では、29機のGPS衛星が使用可能である。衛星の軌道は2mの範囲で地上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 I / 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はGPSTIMEというも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管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。GPSTIMEは1週間で1回りするようにになっている。また世界標準時であるUTCとGPSTIMEの違いも管理されている。GPSTIMEは世界標準時の日曜深夜0時からカウントが始まるため、日本時間に換算すると9時間のずれがある。

2.2 通常の単独測位原理

2.2.1 測位原理

GPS衛星による単独測位は、GPSでもっとも基本的な利用方法であり、単純な原理である。GPSでは、WGS-84座標系により経度、緯度および高さが計算されるようになっている。単独測位を行うために必要なパラメータは2種類しかない。1つ目は、ある時刻の衛星の位置、2つ目は、衛星と衛星信号を受信しているアンテナ(測位位置)間の距離である。特に2つ目のパラメータを擬似距離(pseudo range)と呼ぶ。

ある時刻に1機のGPS衛星の衛星位置と擬似距離が測定されたとする。このとき測位位置は衛星位置を中心とし擬似距離を半径とする球面上に存在することになる。しかしこのままでは球面上のどこに測位位置が存在しているか知ることができない。そこで複数の衛星のパラメータを同時に測定する。各衛星について球面を考えることができる。

測位位置は各衛星とも同位置であるので各球面の交点として求めることができる。具体的には2機の衛星を用い、2つの球面が交わるとその交線は円となる。3機目の衛星の球面を用い、その2機の交線の円と交差する点が測位位置となる。当然この交点は2箇所できることになるが、通常測位位置の概略はわかっていて2箇所の交点のうちどちらが正しい測位位置か知ることは容易であり、このことが問題なることはほとんどない。

以上のことから、原理的には3機のGPS衛星を用いることで測位位置を求めることができることになる。これは数学的に測位位置を表現する3次元座標の成分(x, y, z)の3つの未知数を求めるために、3つの方程式が必要であることに対応している。しかしながら、実際の単独測位を行うとき3機の衛星からできる3つの方程式では測位位置を求めることができない。それは擬似距離の測定に問題があるからである。

擬似距離は、衛星から信号を送信した時刻と測位位置のアンテナがその信号を受信した時刻との時刻差(電波伝搬時間)に光速を乗ずることにより測定する。この測定方法では衛星が搭載している時計と測位位置の受信機内の時計が完全に一致、同期していなければ、正確な距離を求めることができない。衛星が搭載している時計はセシウム原子時計であり、正確な時刻を刻むものの、受信機の時計は精度が悪く、2つの時計は一致または同期していない。

受信機内の時計の誤差は測定した全ての衛星に対して等しいので1つの未知数と考える。3次元座標の成分(x, y, z)の3つの未知数と受信機内の時計の誤差を求めることになるので、実際単独測位を行うためには図2.4のように最低4機の衛星を同時に観測し、4つの方程式を作成する必要がある。

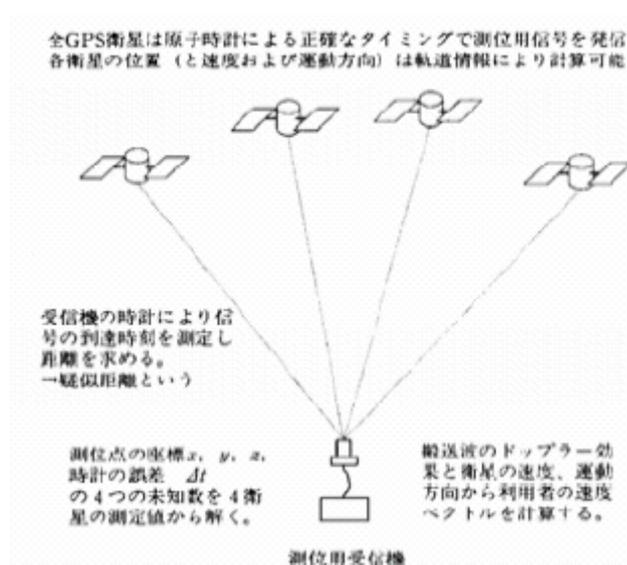


図2.2 単独測位

2.2.2 計算方法

単独測位計算は受信機で測定された各衛星位置と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。位置表現に用いられている 3 次元直行座標系は、ECEF (Earth Centered Earth Fixed) と呼ばれ、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 軸を選ぶものである。

測位を行うために、利用者の位置座標を (x, y, z) とする。また信号を送信した時刻の i 番衛星の位置座標を (x_{si}, y_{si}, z_{si}) とする。衛星-利用者間の正確な距離 s_i は、

$$\rho_{si} = \sqrt{(x_{si} - x)^2 + (y_{si} - y)^2 + (z_{si} - z)^2} \quad (2.1)$$

と表される。単位は m である。しかし測定される擬似距離には受信機の時計誤差 s が s_i に加わっているため、測定された擬似距離 pr_{si} は、

$$pr_{si} = \sqrt{(x_{si} - x)^2 + (y_{si} - y)^2 + (z_{si} - z)^2} + s \quad (2.2)$$

と表される。 i 番衛星の位置 (x_{si}, y_{si}, z_{si}) と擬似距離 pr_{si} は既知であるため、(2.2) 式の未知数は利用者位置座標と時計誤差の 4 つとなる。4 衛星の信号を同時刻に受信し、(2.2) 式を 4 つ以上得ることができれば未知数を解くことが可能である。

(2.2) 式は 2 乗や平方根があるため容易に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、式をその補正量について展開する。さらに補正量を微小であると仮定し、2 次以上の項を無視して式の線形化を行う。

以上により補正量についての連立 1 次方程式となる。未知数の初期値を適当に与え、逐次近似計算法により、補正量が十分小さくなるまで計算を繰り返すことで、未知数を容易に求めることができる。

n 回目の繰り返し計算後の利用者位置座標を (x_n, y_n, z_n) とする。ここで $n(n=0, 1, 2, 3, \dots)$

は計算回数を表し、 $n=0$ は未知数の初期値とする。このときの i 番衛星の近似距離 $r_{n, si}$ は次式のように表される。

$$r_{n,si} = \sqrt{(x_{si} - x_n)^2 + (y_{si} - y_n)^2 + (z_{si} - z_n)^2} \quad (2.3)$$

近似距離 $r_{n,si}$ と実際に測定された擬似距離 pr_{si} に対する残差 $\Delta r_{n,si}$ は、

$$\Delta r_{n,si} = pr_{si} - r_{n,si} \quad (2.4)$$

として求められる。 x_n 、 y_n 、 z_n をこの残差分に相当する分だけ修正すれば、正しい解に近づくことができる。このためには、近似距離 $r_{n,si}$ の x_n 、 y_n 、 z_n による偏微分

$$\frac{\partial r_{si}}{\partial x} = -\frac{x_{si} - x_n}{r_{n,si}}, \quad \frac{\partial r_{si}}{\partial y} = -\frac{y_{si} - y_n}{r_{n,si}}, \quad \frac{\partial r_{si}}{\partial z} = -\frac{z_{si} - z_n}{r_{n,si}} \quad (2.5)$$

を用いる。 x_n 、 y_n 、 z_n の補正量を Δx_n 、 Δy_n 、 Δz_n とすると

$$\Delta r_{n,si} = \frac{\partial r_{si}}{\partial x} \times \Delta x_n + \frac{\partial r_{si}}{\partial y} \times \Delta y_n + \frac{\partial r_{si}}{\partial z} \times \Delta z_n + s \quad (2.6)$$

が得られる。これで連立1次方程式を得られたので、補正量を計算する。求められた補正量を使用して次式のように未知数を更新する。

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n + \Delta x \\ y_{n+1} &= y_n + \Delta y \\ z_{n+1} &= z_n + \Delta z \end{aligned} \quad (2.7)$$

以上の計算を補正量が十分小さくなるまで繰り返し行うことで、利用者位置座標 x 、 y 、 z と、受信機の時計誤差が求められる。

取り扱いを容易にするために、方程式を行列で表現する。

ここで $\Delta r_{n,i} = \alpha_i \Delta x + \beta_i \Delta y + \gamma_i \Delta z + s$ とすると(2.6)式は、

$$\begin{pmatrix} \Delta r_{n,1} \\ \Delta r_{n,2} \\ \Delta r_{n,3} \\ \vdots \\ \Delta r_{n,k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_k & \beta_k & \gamma_k & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ s \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

と表すことができる。ここで

$$\delta R = \begin{pmatrix} \Delta r_{n,1} \\ \Delta r_{n,2} \\ \Delta r_{n,3} \\ \vdots \\ \Delta r_{n,k} \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_k & \beta_k & \gamma_k & 1 \end{pmatrix}, \quad \delta X = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ s \end{pmatrix}$$

とする。

(2.8) 式は、

$$\delta R = G \cdot \delta X \quad (2.9)$$

となる。両辺に G^T の転置行列を掛けると、

$$G^T \cdot \delta R = G^T \cdot G \cdot \delta X \quad (2.10)$$

となる。次に両辺に $(G^T \cdot G)^{-1}$ と G^T の逆行列をかけると、

$$\delta X = (G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot \delta R \quad (2.11)$$

となり補正量 x 、 y 、 z 、 s を求めることができる。

GPS の利用者は、衛星から連続的に発信されている電波を受信し、単独測位や DGPS 測位、RTK GPS 測位などを使用してそれぞれの目的を果たす。このように GPS を使用、研究するにあたり、その測位方法、測位原理を理解する必要がある。ここでは実験に用いた単独測位の測位原理について示す。

2.3 単独測位の測位誤差

GPS 測位における主要な誤差は表に示すように衛星部分、伝送路部分、ユーザー装置部分で発生する。衛星部分の誤差は衛星の軌道要素の誤差と衛星の時計の誤差である。

軌道情報の誤差は実際の衛星の位置と衛星の航法メッセージ中の軌道データにより求めた衛星の位置の差である。通常これらは非常に小さく 3m 以下である。衛星の時計の誤差は衛星のクロック時間と衛星からの航法メッセージ中のデータで記述される時刻との差である。

衛星の信号の同期を取るために、安定度の非常に高い原子時計、主としてセシウム (Cs) 発振器が各衛星に搭載されている。これらは互いに同期を取ること無く、独立に発振しているため、わずかではあるが、ドリフトを生じる。GPS の地上の管制所でこれをモニターし、補正值を求めて、衛星経由で航法メッセージとして送信される。ユーザーはこのデータを解読して信号のタイミングを取る。

表 2.2 GPS 誤差の要因とその大きさ

誤差源	誤差要因	誤差の大きさと種類 (C/A)
衛星部分	衛星の軌道要素	2.1m (バイアス)
	衛星の時計の摂動	2.1m (バイアス)
伝送路部分	電離層遅延	4.0m (バイアス)
	対流圏遅延	0.5m (バイアス)
	マルチパス	1.4m (ランダム)
ユーザー装置部分	受信機での測定誤差	10m (ランダム)
	擬似距離測定雑音	2.7m (ランダム)
	距離量子化雑音	

伝送路部分の誤差は電離層遅延、対流圏遅延とマルチパスがある。電離層遅延は地球を取り巻く電離層中を電波が伝搬する際に発生する群速度遅延で伝送経路上での電子密度の線積分の関数となり、周波数の自乗に反比例する。L 1 帯の周波数電波に対しては、電子密度の高い昼間で 20 ~ 30m、夜間で 3 ~ 6m 程度である。L 1、L 2 の 2 周波を用いることにより電離層遅延の影響を取り除くことができる。

対流圏遅延は大気中を伝搬する電波の伝搬遅延である。真上からの入射に対しては 2~3m 程度、低仰角衛星に対しては 30m 程度で、ほとんど変化がないのでモデル化しやすい。屈折率の変化は低仰角衛星に対して監視局と利用者局の間で 1~3m の遅延差を生じる。マルチパスによる誤差は海面や構造物等からの反射波が直接波に作用して波形を歪ませて擬似距離測定の精度を劣化させる。前の 2 つはバイアス誤差であるのに対して、これはランダム誤差である。

GPS の擬似距離測定精度は受信機のコード同期 (逆拡散) の精度で決まる。コード同期により復調されたコードの立ち上がりで、到達時間を測定するのであるから、含まれる雑音でその精度が決定される。受信機特性により雑音も大きく異なるが、理想的状態に近い受信機が得られるものとするれば、受信機入力 C/N (搬送波対雑音密度、単位周波数当たりの雑音) が大きく影響することになる。

第三章 高精度単独測位

今回の高精度化は通常の単独測位において誤差要因となるものを検証し、その補正を行うことにより実現される。以下に誤差要因とその補正方法を示す。

3.1 衛星暦

3.1.1 精密衛星軌道

衛星から送信される航法メッセージにはエフェメリスが含まれているが、このデータによる衛星位置は2～3m程度の誤差を生む。この誤差要因は、IGS が提供する精密衛星軌道を用いることで高精度化を行う。精密衛星軌道（最終暦）の誤差は数センチ程度なので、衛星位置の不確かさによる測位誤差を低減することが出来る。

IGSとはInternational GPS Serviceの略称であり、邦訳すると国際GPS事業となる。このIGSが全世界に394箇所のGPSステーション、3箇所のデータセンター、数箇所の解析センターおよび数多くの地方解析センターなどを設立し（2006年6月調べ）これらの施設を通して精密衛星軌道を始めとする様々なGPS関連データが提供されている。IGSはいくつかのGPS精密衛星軌道を提供しており、それらはサービスの速度や精度の違いで、Ultra-Rapid（予測）、Ultra-Rapid（実測）、Rapid、Finalの4種類に分けられている。精密衛星軌道はECEF座標系における3次元座標値により、GPS衛星の正確な位置を提供する。これらは全て15分毎に衛星位置を与えられ、rapidでも5cm以下の精度が得られている。具体的な仕様を表3.1に示す。

表3.1 IGS 精密衛星軌道

タイプ	精度	遅延	更新頻度	サンプリング間隔
Ultra-Rapid（予測）	～10cm	リアルタイム	1日4回	15分間
Ultra-Rapid（実測）	< 5cm	3時間	1日4回	15分間
Rapid	< 5cm	17時間	毎日	15分間
Final	< 5cm	13日	毎週	15分間

この4種類の精密衛星軌道には全て、3次元の衛星位置と時計補正データがSP3フォーマットのファイルに表形式で格納され、インターネットを通じて誰にでも入手できるような形で公開されている。衛星位置座標系はECEF座標系の1つ、ITRF2000で、WGS系とcm単位で一致している。このファイルは衛星軌道位置と時計補正情報の他に、衛星の3次元速度と時計の変化率も与えられている。

3.1.2 内挿アルゴリズム

SP3 ファイルには 15 分ごとに衛星軌道情報が格納されている。即位で使う際に、観測エポックに応じた衛星位置を求めなければならない。そのためには式 (3 . 1) に示した多項式内アルゴリズムを用いる。

$$C = A_0 + A_1T + A_2T^2 + \dots + A_N T^N \quad (3 . 1)$$

ただし

C : E C E F 座標 X、Y、Z と時計ゴサ

A_i : 係数 (Neville アルゴリズム)

T : エポック時刻

N : 多項式の次数 (= 11)

E C E F 座標系における内挿を行うときは、11 次多項式 (N = 11) が好ましいといわれている。また、係数 A_i の決定について 32 ビットコンピューターの数値精度の制限により、高次係数が 0 になってしまうため、Neville アルゴリズムという回帰的なアルゴリズムを利用する。

エフェメリスは衛星の位相中心の位置を算出するのに対して、IGS の精密衛星軌道は衛星の質量中心を算出するため、衛星のアンテナの位相中心から受信機までの距離を議事距離としている。そのため測位で使うために位相中心と質量中心の差によって座標転換する必要がある。ただし、Block R の衛星については、位相中心と質量中心が一致しているためこの補正は必要ない。正確に座標転換を行うには、衛星が地球中心に回るときの衛星のアンテナの位置などが重要であるが、ここでは簡単な補正方法として、E C E F 座標系の精密衛星位置の Z 方向の座標値を 1.023 m マイナスする。

3.2 衛星時計

3.2.1 精密衛星時計

従来 GPS 測位では航法メッセージのより衛星時計を補正していたが、航法メッセージ内の時計補正データでは 2 m 程度の誤差が擬似距離に出てしまう。前述の IGS の提供する SP3 ファイルには、精密衛星軌道の他に精密衛星時計補正データも格納されているため、これを利用して高精度化を行う。精密衛星時計を利用すると、時計補正データによる誤差は 3 cm 相当 (0.1 ns) にまで抑えることが出来る。

精密衛星時計はSP3だけでなくRINEXフォーマットでも提供されており、RINEXフォーマットの拡張された時計ファイルでは、5分間隔でサンプリングされたものや30秒間隔でサンプリングされたものも公開されている。精密衛星時計はSP3フォーマットであるため、精密衛星軌道と同様に、Ultra-Rapid(予測)、Ultra-Rapid(実測)、Rapid、Final 4種類存在している。Ultra-Rapidには予測と実測の2種類が存在しているが、時計の変動は衛星位置のように安定していないため、現状、予測の場合は大幅に精度が下がる(約1.5m)。詳細を表3.2に示す。

表3.2 IGS 精密衛星時計

タイプ	精度	遅延	更新頻度	サンプリング間隔
Ultra-Rapid(予測)	~5ns	リアルタイム	1日4回	15分間
Ultra-Rapid(実測)	~0.2ns	3時間	1日4回	15分間
Rapid	0.1ns	17時間	毎日	15分間
Final	< 0.1ns	13日	毎週	15分間

衛星時計の変動は短時間でも予測が難しい変動が起こる。内挿アルゴリズムから任意時刻の正確な時計補正情報を獲得するには、サンプリング間隔が出来るだけ短い精密衛星時計を使用することが必要である。RINEX時計拡張フォーマットは、共通のフォーマットルールに準じて時計データを格納し、インターネットを通じて配布されている。このファイルにはGPS衛星時計以外にも、IGS観測ステーションの時計誤差も含まれている。

3.2.2 内挿アルゴリズム

観測時刻における衛星時計の補正 i には式(3.1)と同じ内挿アルゴリズムを使用する。衛星時計の変動はモデルに依存しないためサンプリング間隔が短いほど補正の精度は向上する。15分間隔のSP3ファイル、5分、30秒間隔のRINEX時計ファイルがあるが、3つのファイルで測位結果を行ったところ、一番間隔の短い30秒間隔のRINEXファイルを使用した場合の擬似距離と15分間隔のSP3ファイルを使用した場合の擬似距離は最大で6cmほどしか変わらない。これは単独測位にそれほど影響はないと言えるので、今回は便宜のため精密軌道情報と一緒にSP3ファイルの精密軌道時計を利用する。

3.3 電離層モデル

3.3.1 全地球電離層マップ

電離層とは、地球上約50 kmから1000 kmまでの高さに広がっている電離された気体（自由電子とイオン）の存在する領域である。電離は太陽放射によって引き起こされ、電離層の状態は主として太陽の活動の強さによって決まる。電離層は、異なる高度に存在するいくつかの層により構成されており、各々の層は異なる割合で自由電子の生成や消滅が起こっている。電子密度（1立方mあたりの電子数）のピークは高度250 kmから400 kmの範囲で起こっている。

電離層の物理的な性質は昼と夜の間で大きく変化する。太陽が昇ってくると紫外線は気体分子をイオンや自由電子に分離し始める。地方時で午後2時ごろのピークに至るまで電子密度は上昇し、その後減少し始める。夜にはそれ以上の電離は起こらずイオンや電子は互いに再結合し、自由電子数は減少する。電子密度は昼と夜とでは1桁か2桁の大きさの違いで変化する。また、季節や太陽の11年周期によっても大きな変化が見られる（現在の太陽活動周期は1995年に始まっており、2000年頃にピークをむかえている）。日ごとに太陽活動と地磁気擾乱に依存してかなりの変動が見られることもある。

通常の単独測位では汎用モデルのクロバッチャ（Klobuchar）モデルを使用している。L1の測定値しか使用できない受信機は経験的なモデルを元に電離層遅延量を計算している。このモデルはクロバッチャモデルと呼ばれ、モデルのためのパラメータ値は衛星から放送されている。クロバッチャモデルは、昼間において半余弦関数、夜間を一定量として天頂方向の遅延量を示している。地方時 t における天頂方向の電離層遅延量の推定値 I_z は（3.2）ように与えられる。

$$\frac{I_z}{c} = \begin{cases} A_1 + A_2 \cos\left(\frac{2\pi(t-A_3)}{A_4}\right) & \text{if } |t-A_3| < A_4/4 \\ A_1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2)$$

ただし

A1：夜間の天頂方向の遅延量（ 5×10^{-9} 秒）

A2：昼間に使用する余弦関数の振幅

A3：余弦関数の頂点に対応する位相（地方時で50,400秒または14:00）に固定

A4：余弦関数の周期（72,000秒）

上記のA2、A4は各衛星から航法メッセージとして送信されている。

電離層は緯度 20 度付近で活動が活発になるため、この付近での電離層のモデル化は難しいとされている。しかしクロバッチャモデルではこのような低緯度地域や同じく電離層の活動の活発な極付近、電離層活動の激しい時間帯のモデル化もすべて同じ式で一様に行うため、これらのような激しい条件下ではモデル化をうまく行えない。そこで今回は全地球電離層マップを使用する。このプログラムで使用している電離層マップは、IGS 解析センター CODE (Center for Orbit Determination in Europe) が配布しているものである。

CODE の全地球電離層マップは 450km の上空に自由電子からなる薄い膜 (電離層にあたる) があるとし、その膜上に経度 5° 緯度 2.5° 間隔の 2 次元グリッドを仮定し、グリッドの交点上の垂直電子数を計測して電離層マップのモデルを決定している。垂直電子の値は 2 時間間隔でサンプリングされ、1 日の電子分布は 13 枚の電子分布図より形成される。マップには Predicted、Rapid、Final の 3 種類があり、Final は 3 日で作成される。その一例が図 3 . 1 である。

地球は 1 日でおおよそ 360 度回転しているため、実際の測定値データが更新されない間は 2 次元の全地球電離層マップが地球とともに移動しているとみなし、地球の回転に合わせて値をずらしていく。

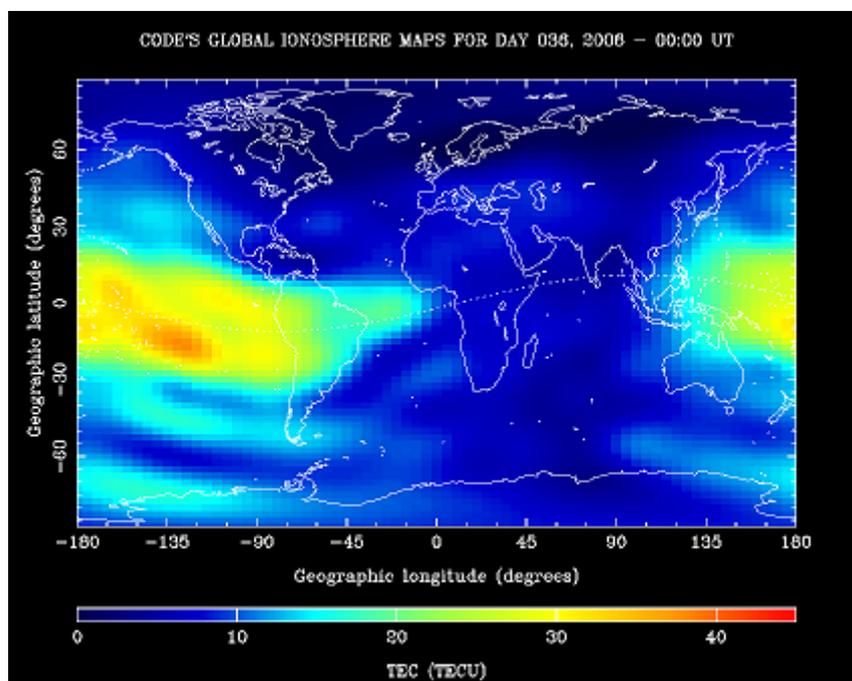


図 3 . 1 全地球電離層マップの例

3.3.2 内挿アルゴリズム

擬似距離測定値における電離層遅延量はGPS信号の伝送経路にある総電指数の関数であり、式(3.3)で与えられる。

$$I_s = 40.3 \times \frac{TEC}{f^2} \quad (3.3)$$

ただし

I_s : 電離層遅延量

TEC : 総電子数

f : 周波数

総電子数とは、受信機から衛星までに伸びている 1 m^2 の断面積を持つチューブの中の電子の総数のことであり、 1 m^2 あたり 10^{16} 個の電子数として定義されるTECユニット(TEUC)を単位として測定される。

式(3.3)を用いて電離層遅延量を推定する際、観測位置における観測時刻の総電子数を求めなければならないが、GIMには2時間ごとのグリッド交点における垂直電子数(VTEC)しか記述されていないので、時間及び空間に対する内挿を行わなければならない。

まず、時間に対する内挿を行う。ある時刻における垂直電子数は前後2つのエポックにより与えられる。つまり、緯度、経度、時刻 t における垂直電子数は次式ようになる。

$$E(\beta, \lambda, t) = \frac{T_{i+1} - t}{T_{i+1} - T_i} E_i(\beta, \lambda'_i) + \frac{t - T_i}{T_{i+1} - T_i} E_{i+1}(\beta, \lambda'_{i+1}) \quad (3.4)$$

ただし

t : 時刻 ($T_i \leq t \leq T_{i+1}$)

λ : 経度 ($\lambda'_i = \lambda + (t - T_i)$)

β : 緯度

T_i, T_{i+1} : GIMの隣接エポック

E_i, E_{i+1} : T_i, T_{i+1} エポックにおける垂直電子数の関数

電離層内の電子量の変化は太陽の位置と相関があるので、時刻 T_i から t へ変化するうちに、GIMは地球に相対的に回転していくと考えられる。したがって、 $\lambda'_i, \lambda'_{i+1}$ は次式のように表される。地球はおよそ1日で360度回転しているので、時間の単位は日とする。

$$\begin{aligned} \lambda'_i &= \lambda + (t - T_i) \times 360 \quad \text{ただし } \lambda'_i > 360 \text{ の場合 } \lambda'_i = \lambda'_i - 360 \\ \lambda'_{i+1} &= \lambda + (T_{i+1} - t) \times 360 \quad \text{ただし } \lambda'_{i+1} > 360 \text{ の場合 } \lambda'_{i+1} = \lambda'_{i+1} - 360 \end{aligned} \quad (3.5)$$

次に、空間に対する内挿を行う。式(3.4)に示すように、エポック T_i 、 T_{i+1} における垂直電子数を計算する必要がある。GIMは2次元マップであるため、平面に対する内挿となり、総電子数は図3.2のように4箇所のグリッド交点により算出される。

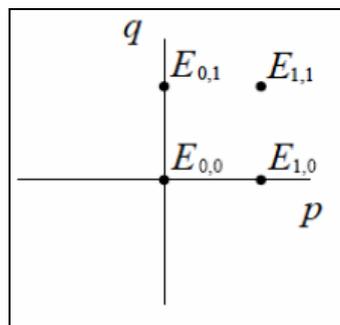


図3.2 平面内挿アルゴリズム

ここで、 $E_{a,b}$ の緯度、経度はそれぞれ a 、 b である。 $E_{0,0}$ は(0, 0)となる。 p 、 q はそれぞれ(0, 0)から(1, 1)までの緯度、経度の距離である。 p 、 q はそれぞれGIMの経度と緯度方向の幅とすると、次式の関係が成り立つ。

$$\lambda = \lambda_0 + p \Delta\lambda, \quad \beta = \beta_0 + q \Delta\beta \quad (3.6)$$

ただし

$$0 < p < 1 \text{ かつ } 0 < q < 1$$

以上より平面内挿アルゴリズムは図3.2と式(3.7)により示される。

$$E(\lambda_0 + p\Delta\lambda, \beta_0 + q\Delta\beta) = (1-p)(1-q)E_{0,0} + p(1-q)E_{1,0} + p(1-q)E_{0,1} + pqE_{1,1} \quad (3.7)$$

一連の式でGIMより垂直電子数を求めたが、図3.3のようにGPS信号は必ずしも基準点に対し垂直に進入してくるわけではない。従って、GPS信号伝播経路にあるすべての電子数(傾斜電子数)を計算するために、マッピング関数が利用される。

$$TEC_{slant} = \frac{1}{\cos z'} E_v, \quad \sin z' = \frac{R}{R_0 + H} \sin z \quad (3.8)$$

ただし

- z, z' : 図に示された角度
- R : 受信機の地心距離
- R_0 : 地球平均半径(6371km)
- H : 仮想電離層の高さ(450km)

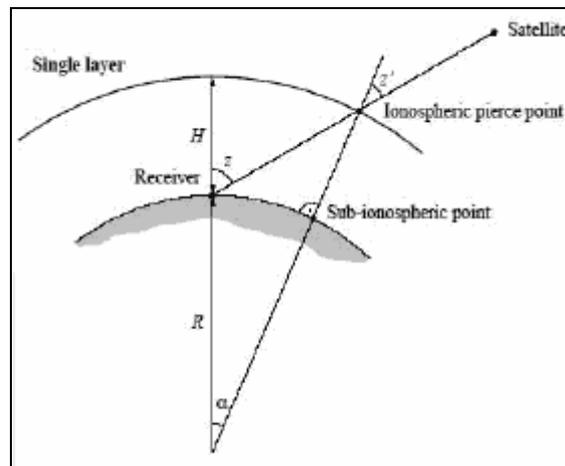


図 3.3 電離層遅延

傾斜電子数が既知であるなら、式(3.3)により衛星ごとの電離層遅延を推定することができる。L1帯における電離層遅延は次式のようになる。

$$I_{LLP} = 40.3 \times \frac{TEC_{slant}}{f_{L1}^2} \quad (3.9)$$

3.4 対流圏モデル

GPS信号は、乾燥空気及び水蒸気から構成される地球大気の下層部分によって屈折され、対流圏遅延効果が現れる。対流圏は電離層と異なりGPS信号に対して分散性を持たないため、屈折率は信号の周波数には依存しない。

対流圏遅延は衛星の仰角と測位点の位置に依存するものだけではなく、大気圧、温度、湿度、水蒸気分圧などにも左右される。つまり、信号の伝搬経路に沿った圧力、温度、湿度

の情報からその経路に沿った屈折率と対流圏の遅延量を正確に決定することができる。従来の簡単な対流圏モデルは、平均気象条件に基づいた対流圏天頂遅延によって与えられており、精度と計算の便利性を考慮しこのモデルを用いていた。しかし、このモデルではサブメートル単位の精度を得ることはできないので、今回は実際に測定した気象パラメータを使用した対流圏モデルを使用することとする。

対流圏遅延を推定するためには、気温、気圧、水蒸気分圧の値が必要である。このうち水蒸気分圧は湿度から計算できるため、実際に必要なのは気温、気圧、湿度の3種類である。これらのデータはGPSでの観測と同時に測定出来れば理想的であるが、現状では難しいため、IGSが配布している気象データを使用する。IGSは世界中に384箇所の観測ステーションを展開しており、RINEXフォーマットの気象データをインターネットで配布している。RINEXファイルには、ファイル共通のヘッダ部に気象データタイプが記述され、データ部では気象データとエポックが1行ずつ出力されている。

3.5 まとめ

本章では、GPS単独測位の高精度化を行いサブメートル単位の精度を得るために、従来の単独測位における誤差要因の誤差補正方法にそれぞれ改良を加えた。加えた改良は次の通りである。

表 3.3 通常単独測位と高精度単独測位の補正方法相違点

誤差要因	通常の単独測位	高精度単独測位
衛星軌道	航法暦と観測ファイルの読み込み	IGS 精密衛星軌道 (Final)、 電離層 MAP (Final)、観測ファイルの読み込み
衛星時計	衛星位置を航法暦より計算	上記データより内挿し 衛星位置を算出
電離層遅延	汎用モデルを利用して 電離層遅延量の算出	全地球電離層 MAP を利用して 電離層遅延量の算出
対流圏遅延	汎用モデルを利用して 対流圏遅延量の算出	RINEXフォーマット気象データを利用して 対流圏遅延量の算出

第四章 実験・考察・評価

4.1 実験

4.1.1 実験方法

今回の実験は生データを使い、第三章の補正に基づいて高精度単独測位を行った場合と、通常の単独測位の手法を用いた場合のデータを比較するものとする。

生データは、国土地理院が提供する電子基準点データを利用する。電子基準点とは、日本国内全国約 1,200 ヶ所に設置された GPS 連続観測点である。基準点は、衛星からの電波を受信するアンテナ、GPS 受信機、通信用機器等が格納されている固定点である。今回の基準点で使用している受信機とアンテナの仕様は表 4.1 の通りである。

表 4.1 受信機器とデータの概要

受信機	TRIMBLE 5700
アンテナ	TRM29659.00
時間	00:00:00 ~ 23:59:30
エポック間隔	30 秒

表 4.2 電子基準点の位置情報

場所		稚内	天童	横浜	名古屋
ECFF 座標	X	-3522845.2602	-3858268.2211	-3965108.3611	-3815369.1996
	Y	2777143.9796	3195685.7034	3368163.1188	3562149.3985
	Z	4518959.0511	3934436.1734	3677469.4918	3653212.2148
緯度		45.4030	38.3310	35.4365	35.1684
経度		141.7504	140.3661	139.6537	136.9658
高度		74.6536	166.2249	70.5416	95.7995

場所		明石	広島	宮崎	石垣島 2
ECFF 座標	X	-3711084.2379	-3610242.9288	-3593669.5572	-3266006.0479
	Y	3715529.5298	3832689.0904	4066183.0731	4810720.6206
	Z	3607831.7922	3587857.4006	3340302.0349	2612546.8051
緯度		34.6697	34.4504	31.7860	24.3389
経度		134.9657	133.2881	131.4701	124.1726
高度		66.4738	172.6266	38.2586	46.8034

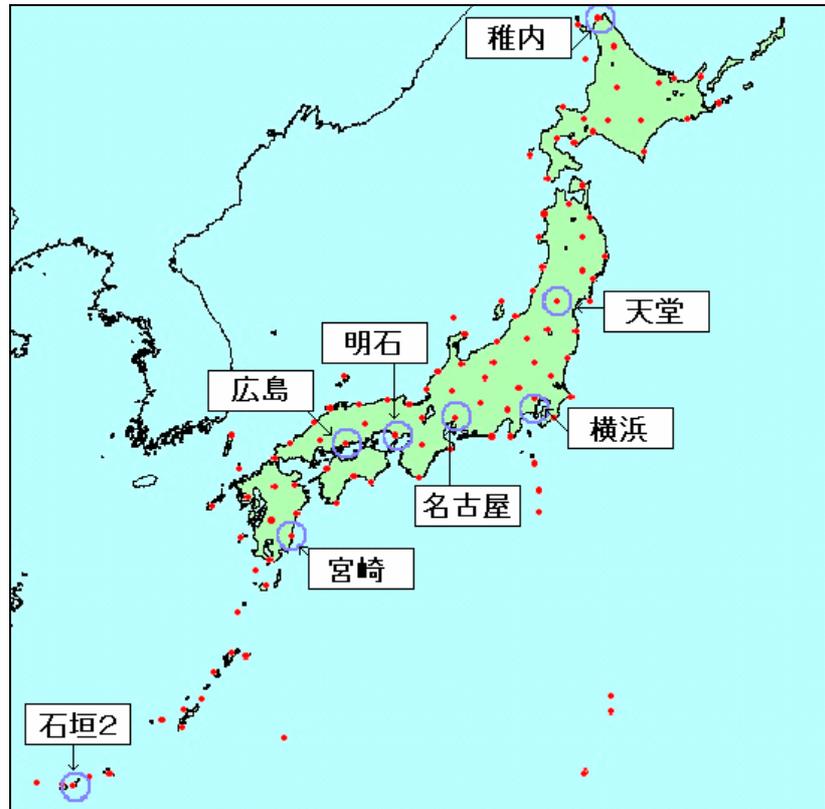


図4.1 電子基準点の地図上の位置情報

実験には電子基準点での観測データをまとめてダウンロードして用いた。使用した各地の基準点の位置を表4.2と図4.1に示す。

4.1.2 実験結果1(全国での測位結果)

表4.3は通常の単独測位及び高精度単独測位における各基準点の測位誤差の平均値と標準偏差である。また、図4.2は、表4.3に示した電子基準点での2005年9月25日の測位結果である。

稚内、天堂、横浜、名古屋、明石、広島では、水平方向の測位誤差は全体的に数値が通常測位の半分程度になっており、水平精度は1mをきっている。図4.2からも補正が上手く行われ、精度が向上していることがわかる。また、高度方向の誤差はどの場所でも1m程度の精度がある。

表 4 . 3 測位誤差の平均値と標準偏差

	稚内		天童		横浜		名古屋	
	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位
水平精度	1.85	0.60	1.92	0.79	1.99	0.69	2.00	0.71
標準偏差 緯度	1.14	0.29	1.35	0.43	1.39	0.41	1.43	0.42
標準偏差 経度	1.45	0.53	1.37	0.66	1.42	0.55	1.40	0.58
緯度真値からのずれ	0.78	0.06	0.80	0.02	0.75	-0.02	0.73	-0.08
経度真値からのずれ	0.93	0.04	0.60	0.02	0.80	-0.29	0.72	-0.34
高度精度	2.73	0.95	2.89	1.00	3.11	0.96	3.21	0.95
高度真値からのずれ	-0.51	-0.48	-0.26	-0.92	0.20	-0.50	0.34	-0.40
高度平均	74.15	74.17	165.97	165.31	70.74	70.04	96.13	95.40

	明石		広島		宮崎		石垣島2	
	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位
水平精度	2.06	0.68	2.55	0.68	2.37	1.01	3.11	1.69
標準偏差 緯度	1.41	0.39	1.62	0.39	1.38	0.53	1.32	0.59
標準偏差 経度	1.50	0.55	1.96	0.55	1.93	0.86	2.82	1.58
緯度真値からのずれ	0.76	-0.05	0.94	0.02	0.76	0.16	0.18	-0.17
経度真値からのずれ	0.88	-0.44	0.67	-0.47	1.46	-0.42	3.00	0.64
高度精度	3.21	0.93	3.26	0.94	4.24	2.01	3.28	1.58
高度真値からのずれ	0.26	-0.46	0.11	-0.86	0.91	0.01	1.58	0.25
高度平均	66.73	66.02	172.73	171.77	39.17	38.27	48.38	47.05

しかし、宮崎と石垣島では水平精度が悪く 1 m 以上になっている。また、高度精度も 2 m 前後と補正があまり行えていない。この 2 箇所では通常測位でのばらつきも多く、高度方向の図 4 . 3 b を見ると、ところどころ誤差が補正できていないことがわかる。このことより、宮崎、石垣島 2 は高精度測位プログラムを用いて解析しても、精度があまり向上していないと言える。さらに、宮崎よりも石垣島 2 の方がより精度が悪いことがわかった。

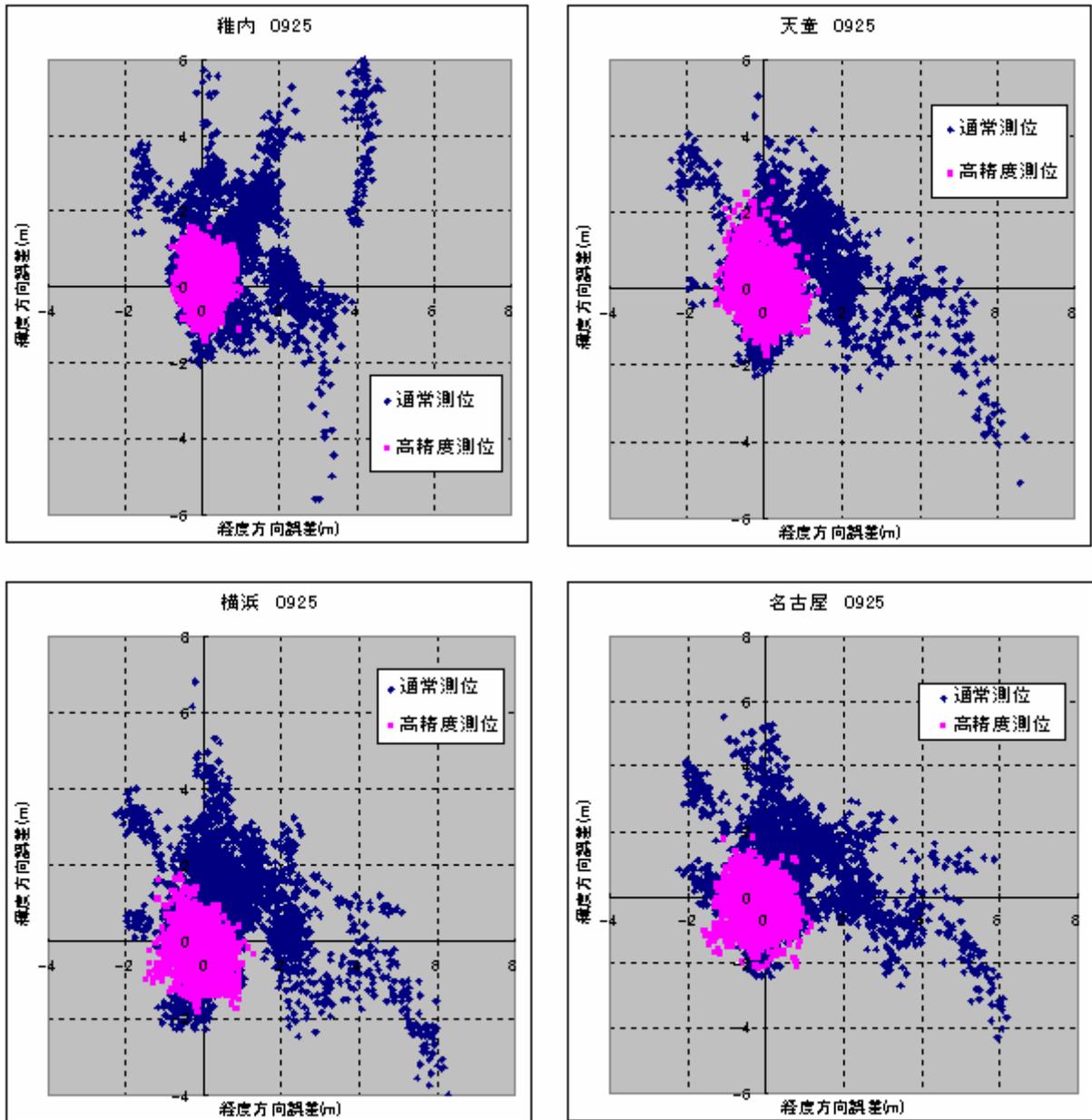


図4.2a 水平方向での測位結果の比較（稚内・天童・横浜・名古屋）

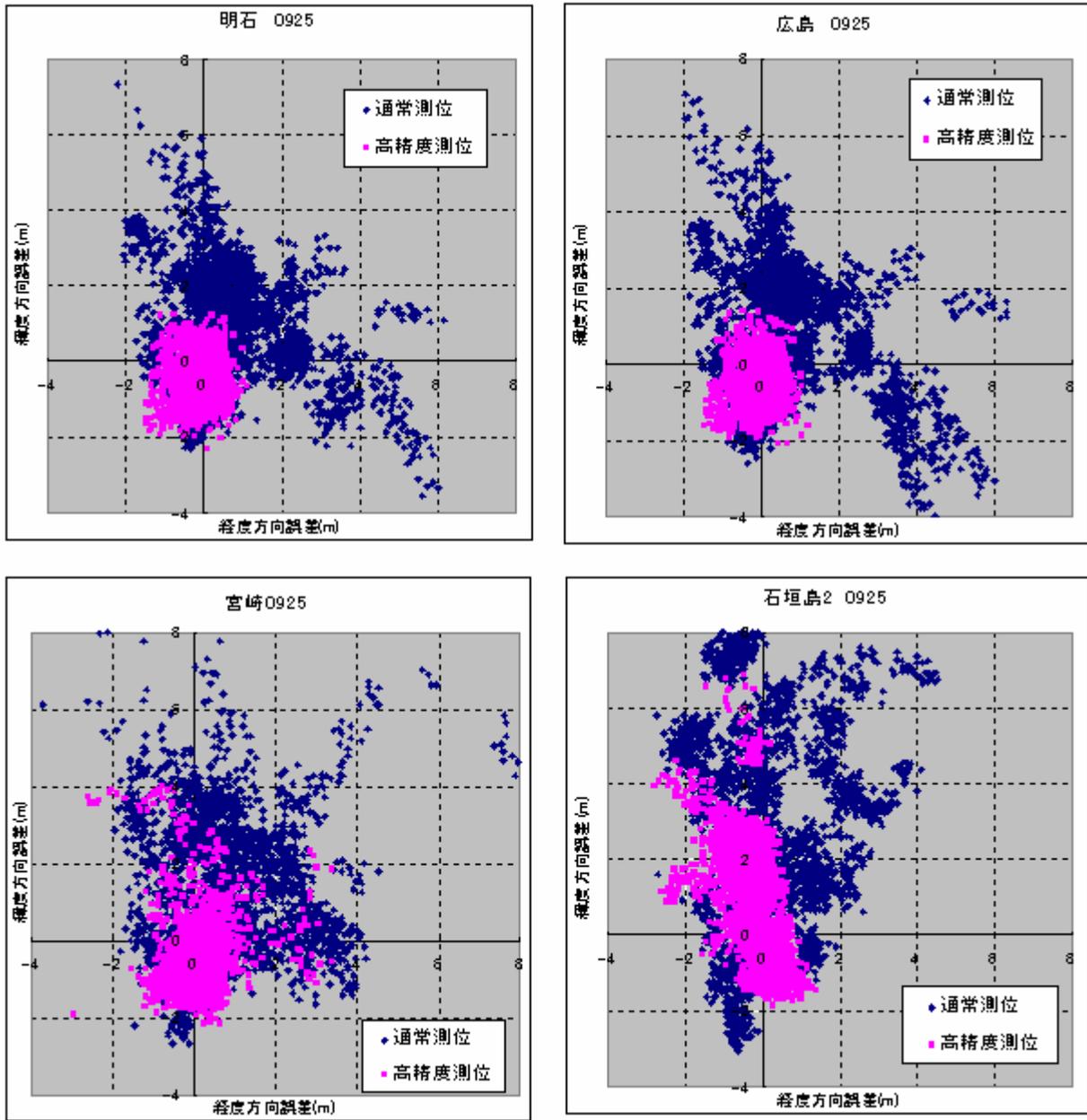


図4.2b 水平方向での測位結果の比較(明石・広島・宮崎・石垣島2)

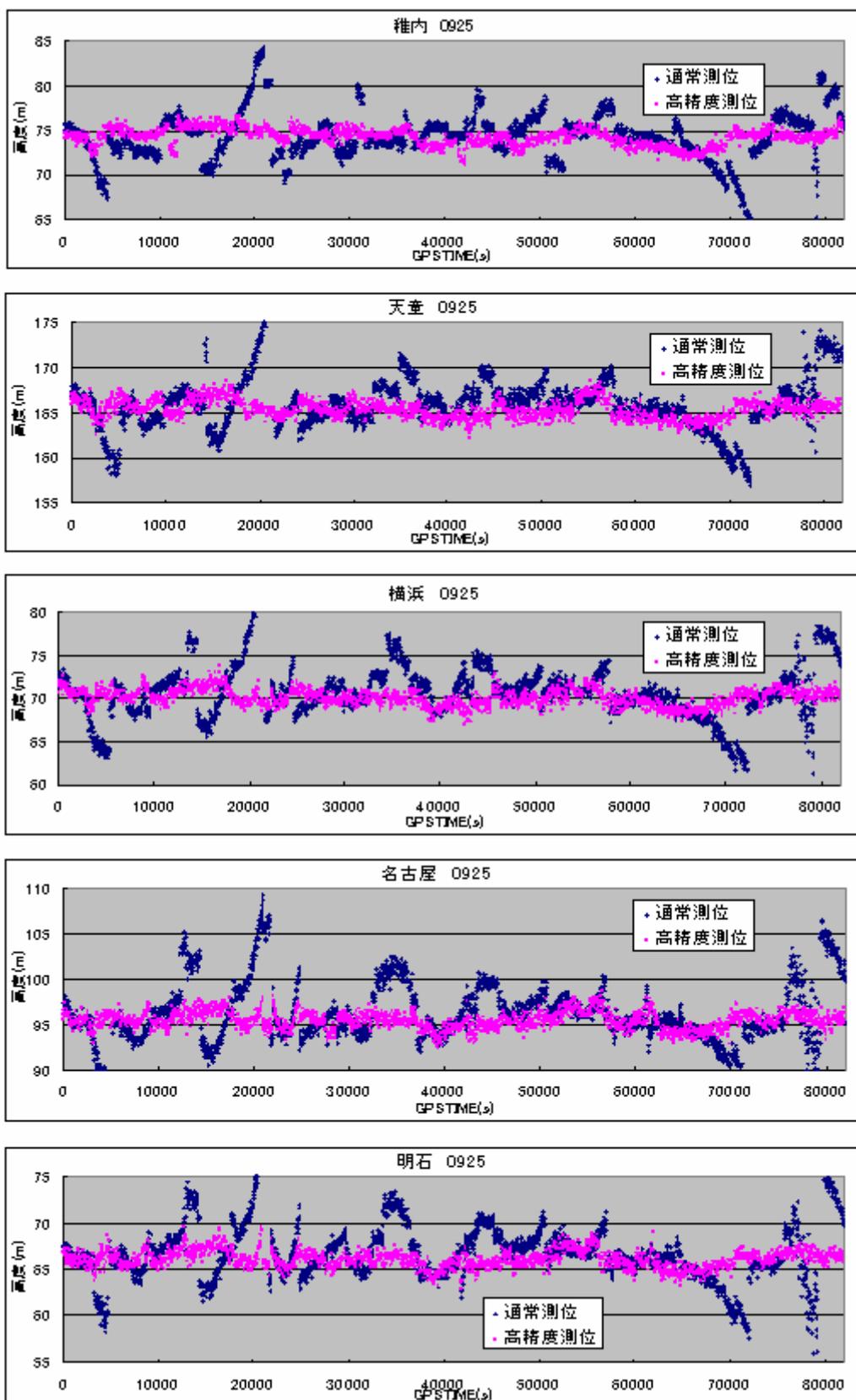


図4. 3 a 高度方向での測位結果の比較 (稚内・天童・横浜・名古屋・明石)

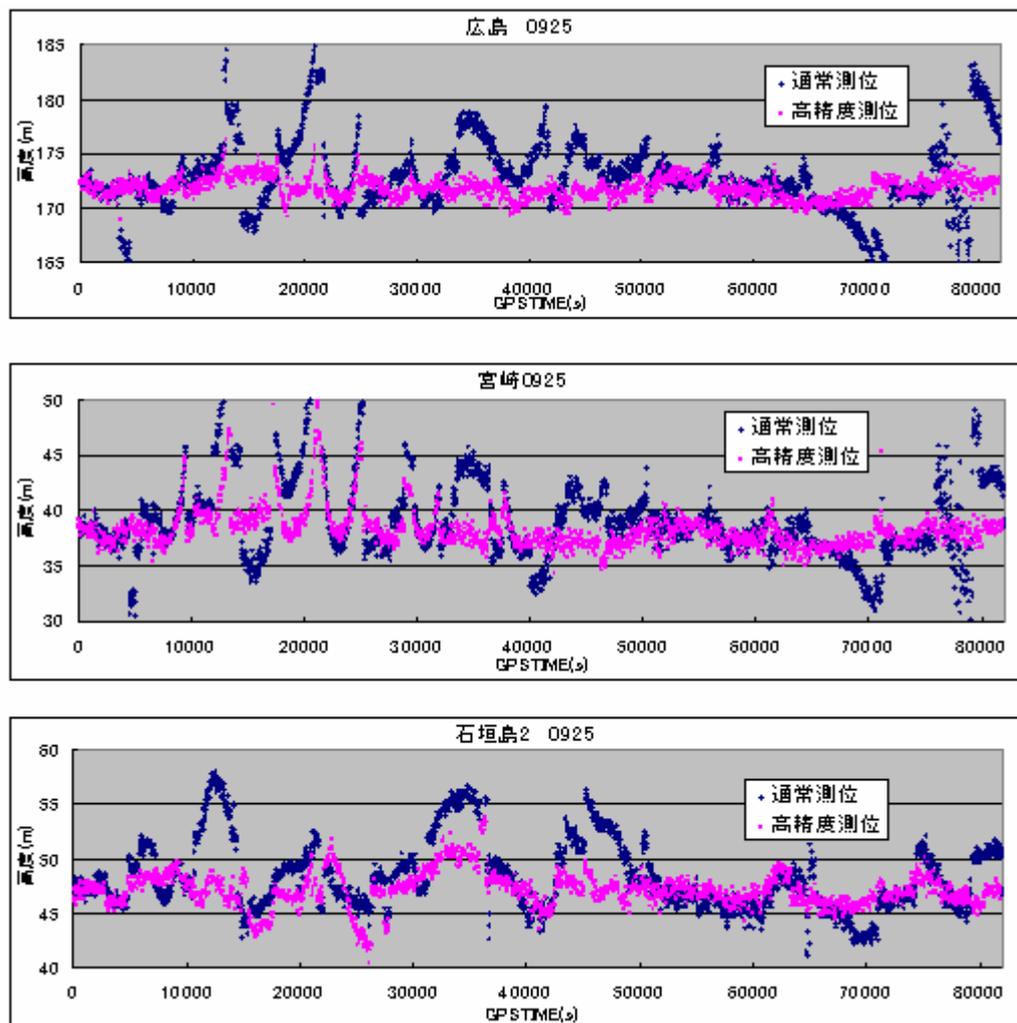


図4.3b 高度方向の測位結果の比較（広島・宮崎・石垣島2）

4.1.3 実験結果2(1週間の測位結果)

次に表4.4と図4.4に2005年9月24日～30日の1週間の横浜での測位結果を示す。どの日も水平精度で1m以下、高度精度も1m前後と精度が向上していることがわかる。横浜だけでなく、他の場所でも同様の傾向が見られた。

4.1.1で実験を行った9月25日かぎりではなく、1週間を通して精度が向上しているため、高精度化が常に出来ていると言える。

表4.4 9月24日から30日の横浜の測位結果

	9月24日		9月25日		9月26日		9月27日	
	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位
水平精度	2.48	0.67	1.99	0.69	2.36	0.70	2.48	0.67
標準偏差 緯度	1.23	0.35	1.39	0.41	1.50	0.38	1.23	0.35
標準偏差 経度	2.15	0.56	1.42	0.55	1.82	0.59	2.15	0.56
緯度真値からのずれ	0.21	0.01	0.75	-0.02	0.40	0.05	0.21	0.01
経度真値からのずれ	0.91	-0.25	0.80	-0.29	0.71	-0.25	0.91	-0.25
高度精度	4.09	0.91	3.11	0.96	3.63	1.10	4.09	0.91
高度真値からのずれ	-0.06	-0.26	0.20	-0.50	1.34	-0.26	-0.06	-0.26
高度平均	70.48	70.28	70.74	70.04	71.88	70.28	70.48	70.28

	9月28日		9月29日		9月30日	
	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位
水平精度	2.09	0.70	2.23	0.65	1.73	0.65
標準偏差 緯度	1.10	0.35	1.13	0.33	1.14	0.37
標準偏差 経度	1.78	0.61	1.92	0.56	1.31	0.54
緯度真値からのずれ	0.60	0.19	-0.58	0.06	0.04	0.08
経度真値からのずれ	1.41	-0.21	1.03	-0.15	0.84	-0.23
高度精度	3.07	1.11	3.88	1.10	3.20	0.89
高度真値からのずれ	-0.74	-0.28	-0.76	-0.35	-1.26	-0.54
高度平均	69.80	70.26	69.78	70.19	69.28	70.00

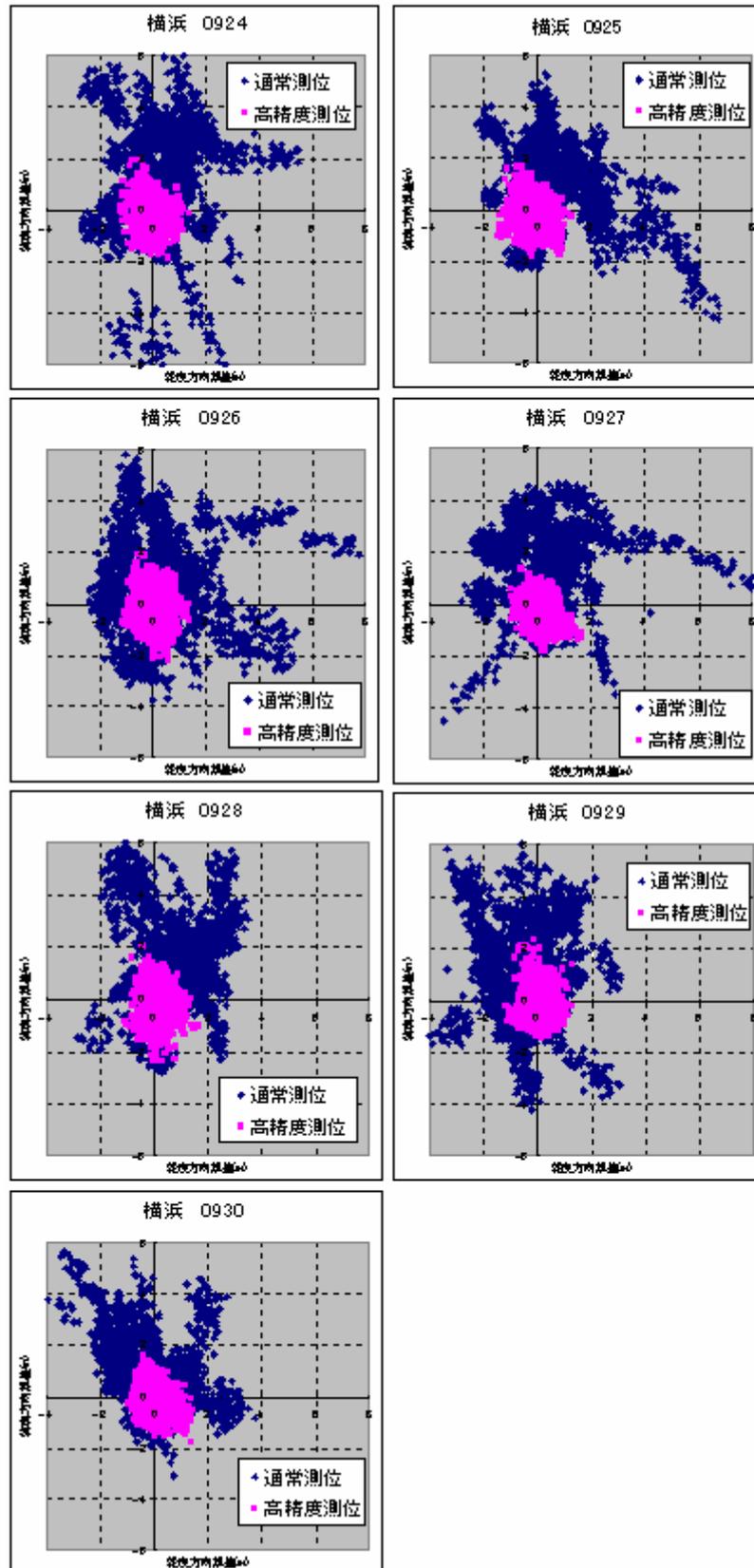


図4.4a 横浜での水平方向での測位結果の比較(09/24~09/30)

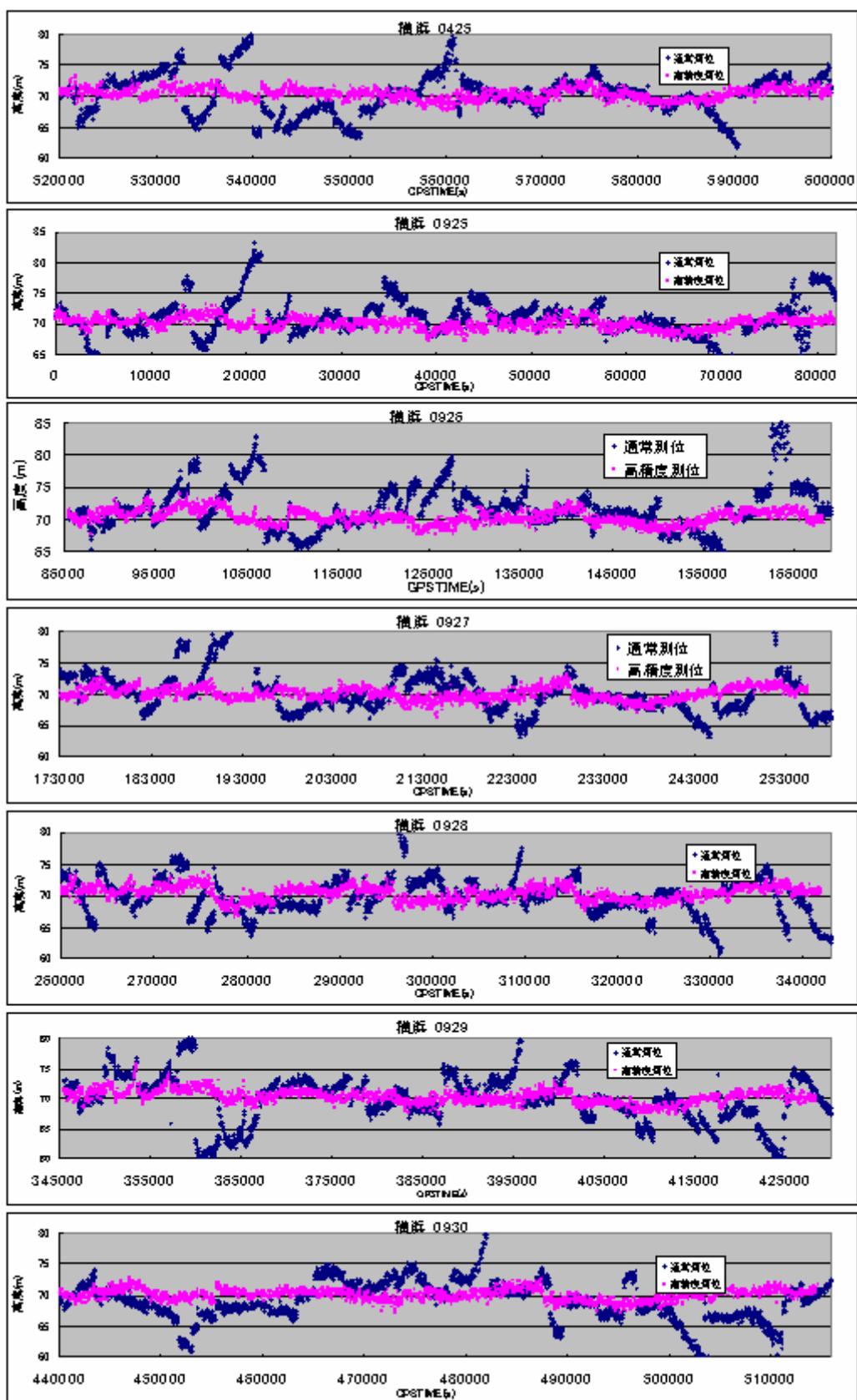


図4.4b 横浜での高度方向での測位結果の比較(09/24~09/30)

4.1.4 実験結果3(半年間の測位結果)

表4.5は、横浜での2005年04/25～09/25の半年間(毎25日ごと)の測位結果である。どの月も水平精度で1m以下、高度精度も1m前後、と精度が向上していることがわかる。横浜だけでなく、他の場所でも同様の傾向が見られた。

また、電離層は太陽の影響を大きく受けるため、通常の単独測位だと7、8月の夏場には大きな誤差が出るが、高精度測位の場合はきちんと補正が行われていることがわかる。この結果から、プログラムは季節を問わず使用することが出来ると言える。

表 4.5 横浜での測位誤差の平均値と標準偏差

	4月25日		5月25日		6月25日	
	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位
水平精度	2.80	0.92	5.32	0.75	2.45	0.66
標準偏差 緯度	1.54	0.41	1.87	0.40	1.82	0.32
標準偏差 経度	2.35	0.82	4.98	0.63	1.63	0.57
緯度真値からのずれ	-0.03	-0.20	0.12	-0.11	-0.16	-0.05
経度真値からのずれ	0.79	-0.01	1.49	-0.17	0.43	-0.32
高度精度	3.93	1.42	4.59	0.89	4.21	0.84
高度真値からのずれ	0.16	-0.63	-0.62	-0.98	1.31	-0.14
高度平均	70.70	69.91	69.92	69.56	71.85	70.40

	7月25日		8月25日		9月25日	
	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位	通常測位	高精度測位
水平精度	2.17	0.72	2.25	0.69	1.99	0.69
標準偏差 緯度	1.68	0.40	1.55	0.42	1.39	0.41
標準偏差 経度	1.37	0.60	1.63	0.55	1.42	0.55
緯度真値からのずれ	-0.08	-0.17	0.41	0.00	0.75	-0.02
経度真値からのずれ	1.05	-0.03	0.82	-0.27	0.80	-0.29
高度精度	4.21	1.46	3.75	0.97	3.11	0.96
高度真値からのずれ	1.88	0.70	-2.41	0.77	0.20	-0.50
高度平均	72.43	71.24	68.13	71.31	70.74	70.04

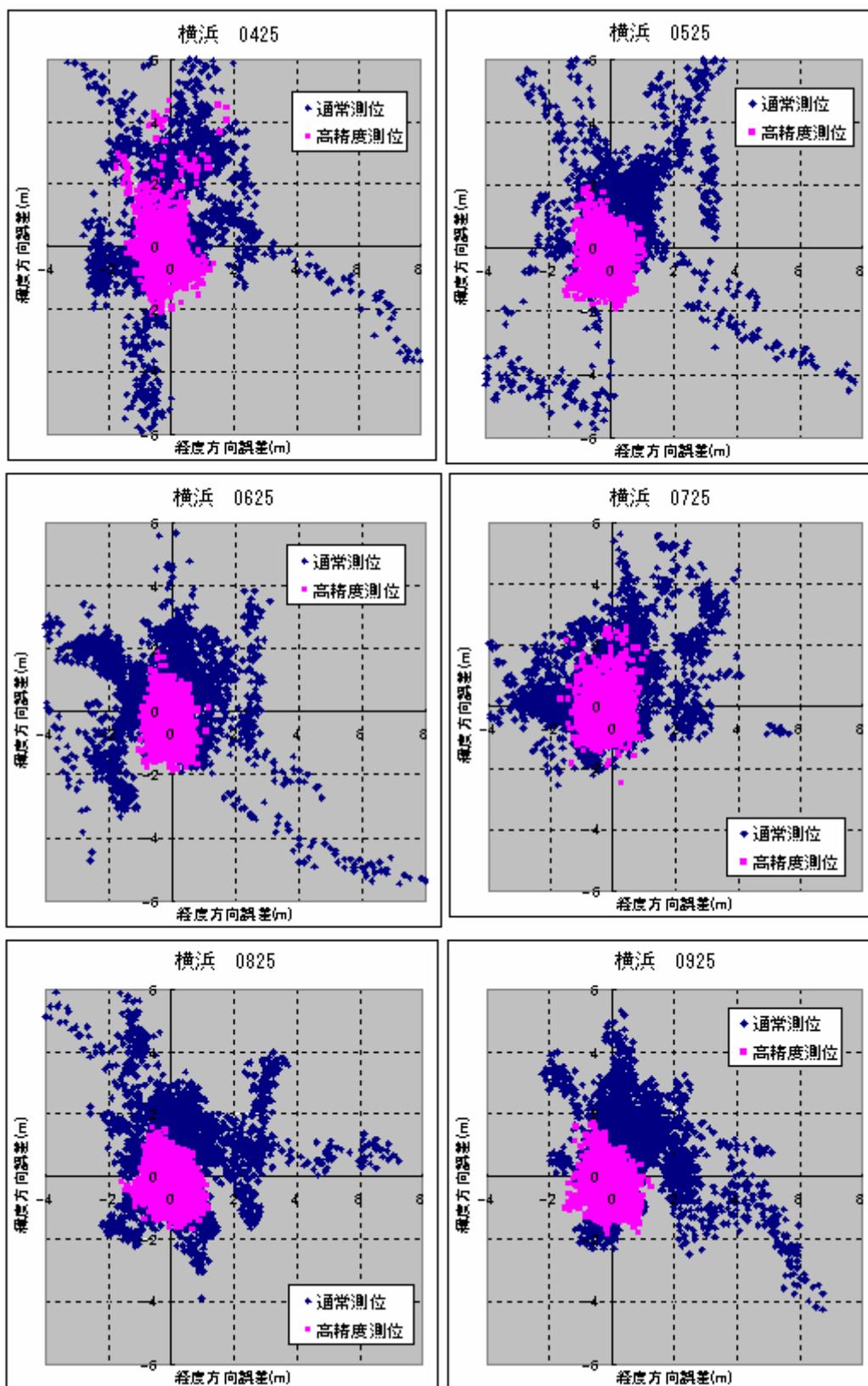


図4.5 a 横浜での水平方向での測位結果の比較 (04/25 ~ 09/25)

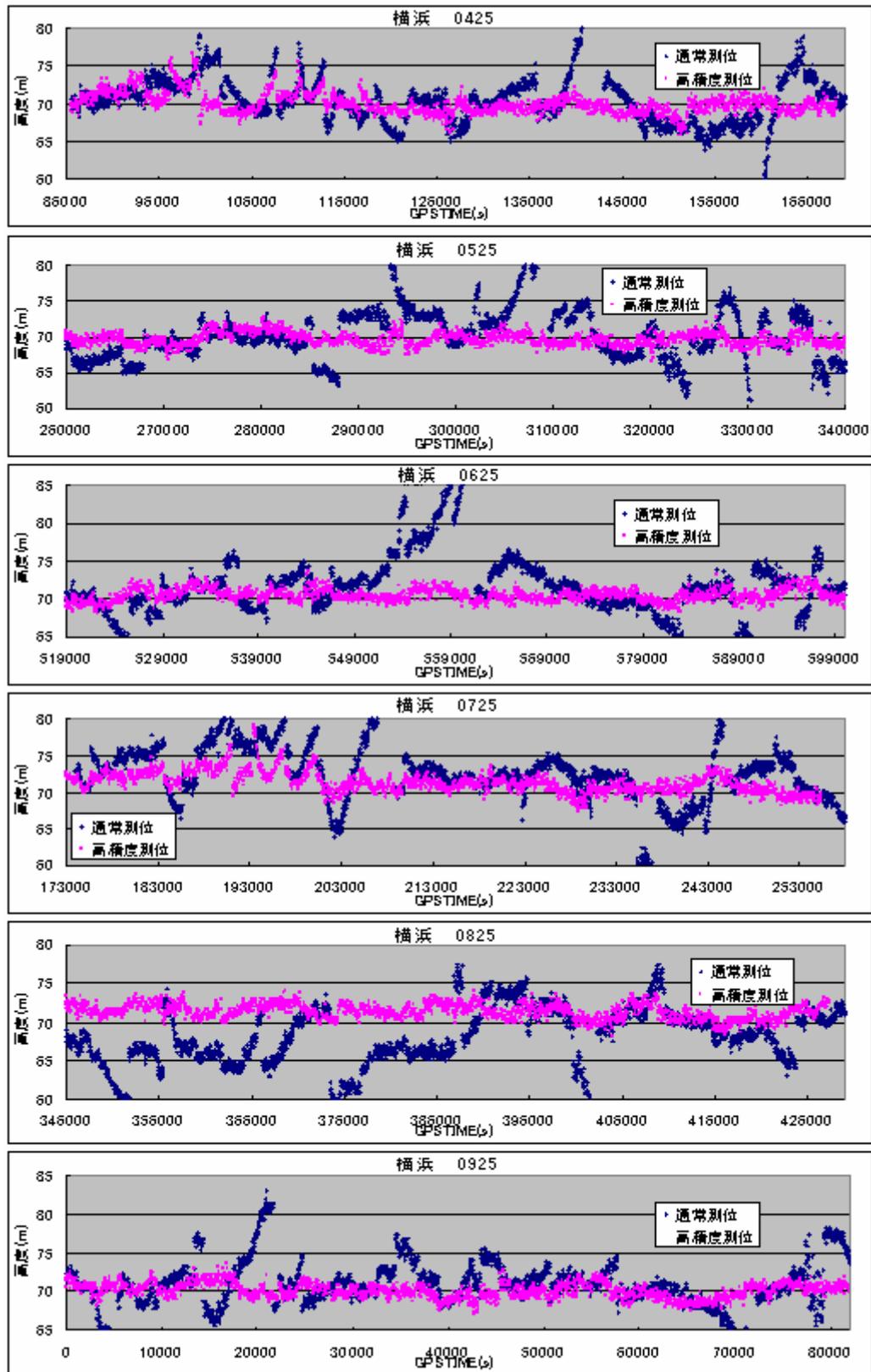


図 4 . 5 b 横浜での高度方向での測位結果の比較 (04/25 ~ 09/25)

4.2 考察

4.2.1 受信機の位置

高精度単独測位を行うと、どの電子基準点でも精度が向上した。しかし、宮崎や石垣島では図4.2bからもわかるように、特に高度方向で誤差を補正しきれていない。その傾向は年間を通じて起こっているため、原因は一過性のものではないことがわかる。

また、宮崎と石垣島2の基準点自体に問題がある可能性もあるため、電子基準点は約20km間隔で三角形の網目状に設置されていることから、石垣2に近い石垣1と西表島の基準点でも解析を行ってみた。石垣1、西表島の測位結果を図4.6に示した。

図4.6、を見ると、宮崎や石垣2に限らず、その周辺地域でも高精度化がうまく行えていないことがわかる。つまり、この地域全体に何か誤差要因があると考えられる。

表4.6 石垣島1と西表島の位置

場所		石垣島1	西表島
ECFF 座標	X	-3271690.2036	-3231751.1186
	Y	4795887.1776	4828984.3153
	Z	2632486.3925	2621361.1060
緯度		24.5366	24.4263
経度		124.3013	123.7920
高度		42.9526	40.5801

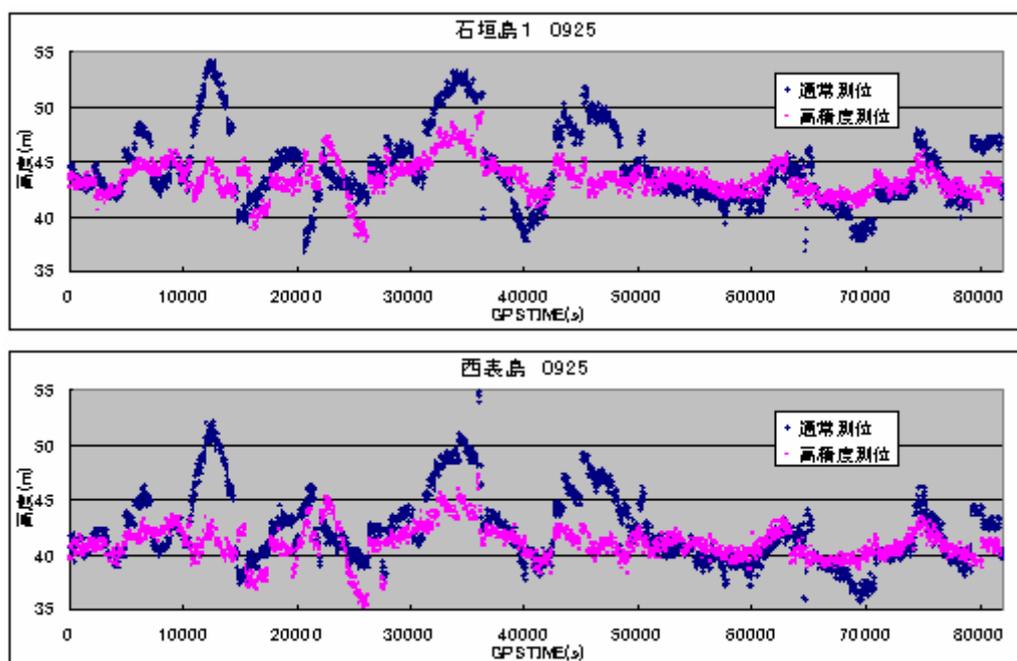
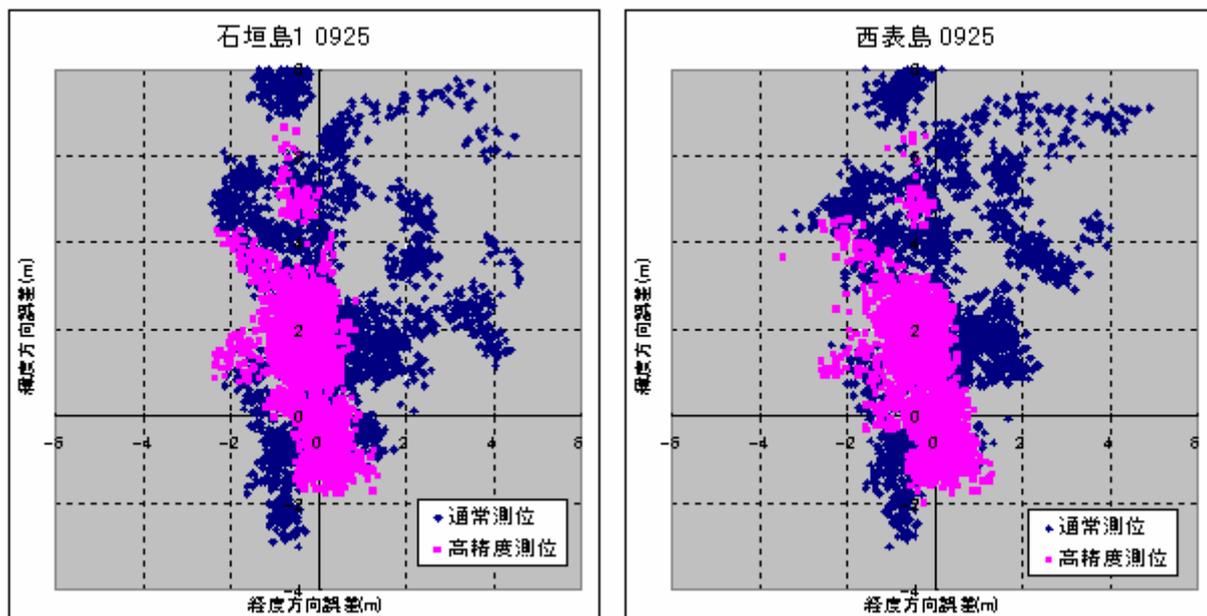


図 4.6 石垣島1・西表島付近での測位結果

4.2.2 電離層の影響

4.2.1で示したように、低緯度地域で補正がうまくいかない原因として電離層の影響がある。電離層は地球全体に存在しているが、日本近海では、緯度20度付近で活動が活発になるため、この付近での電離層のモデル化は難しいとされている。

従来のクロバッチャモデルでは低緯度地域や極付近、電離層移動の激しい時間帯のモデル化もすべて同じ式で一様に行うため、これらのような電離層の活動が活発な条件下ではモデル化をうまく行えない。そこで今回は全地球電離層マップを使用する。このプログラムで使用している電離層マップは、IGS解析センターCODEが配布しているものである。

このプログラムで使用している電離層マップは、IGS解析センターCODEが配布している全地球電離層マップである。第三章で述べたように、CODEの電離層マップは電離層上の2次元グリッドの交点にある垂直電子の数によってマップのモデル化を行っている。これはつまり交点と交点の間、つまりグリッドの中部分までモデル化は行っていない。

グリッドの間隔をメートル法に換算した場合、経度5°緯度2.5°間隔は、444.5km×277.5kmとなり（緯度の1秒が約30.9m、経度1秒が、東京周辺では約25m、札幌辺りで約22.6m、那覇辺りで約27.8mとし、これらを平均して24.7mとした）宮崎や石垣島のような低緯度地域の昼間などは電離層の活動が活発でグリッドの中は四隅とは電離層の状態が異なっている可能性もあり、グリッドの内部に位置する基準点だとモデリングの都合上、補正の効果は低くなる。

宮崎のような低緯度地域では一部の衛星の電波がこの電離層帯を通過するため、電離層での誤差が大きくなる。また、緯度20度台の石垣島は電離層の激しい部分の真下に存在しているため、他の地域よりも電離層の影響が大きくなることが予測される。（もちろん、電離層の動きが活発でない中緯度から高緯度地域ならば、十分に精密な電離層マップとして使用することが出来る）

解析結果が電離層の影響を受けているか調べるため、電離層遅延量の傾向を2周波で単独測位を行った場合の電離層遅延量の傾向と比較してみる。L1とL2帯の2つの周波数を使用する2周波GPS受信機の場合、その測定値からは測定誤差の原因の1つである電離層遅延量が正確に推定することが出来る。つまり、電離層遅延量の傾向が2周波で測定した場合の傾向と異なるということは、その衛星は電離層の影響が大きいということになる。

4.2.3 仰角・方位角マスク

基準点から見て緯度の低くなる方向にある衛星はどうしても電離層の影響を強く受ける配置になるため、電離層での誤差を小さくするにはこのような衛星を除いて測位を行う必要がある。仰角の低い衛星ほど電離層を通過する距離が長くなるため、電離層遅延が大きくなりやすい。一般に、仰角が10度の衛星の電離層遅延量は垂直遅延量の3倍程度といわれている。今回は方位角が150度から210度、つまり基準点である宮崎から見て南方方向にある衛星で、仰角30度以下の衛星を測位演算から除去してみる。

図4.6は、9月25日の宮崎で、2周波測定で算出した電離層遅延量と、高精度測位で算出した電離層遅延量、高精度測位を行う際に方位角が150度から210度までマスクを30度にした場合の電離層遅延量を比較したものである。図4.6の左図は全体図、右図は左図の拡大である。

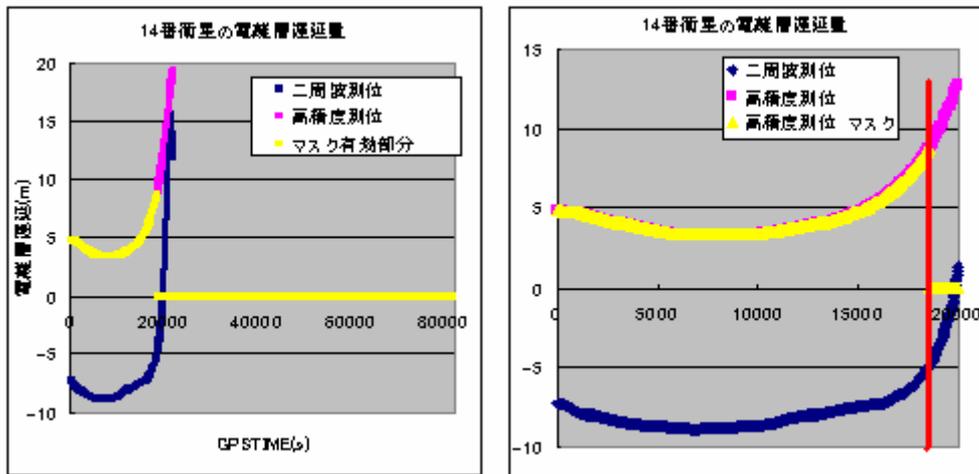


図4.7 9月25日の宮崎における14番衛星電離層遅延量の推移

方位角が150度から210度まで仰角30度でマスクをかけた場合（黄線）、高精度測位の電離層遅延量の一部（図4.6、右図赤線より右側）が0となっており、マスクをかけたことにより測位計算に使用しなくなった値があるのがわかる。これは、観測中に衛星の仰角が30度以下になったからである。

高精度測位プログラムで算出した電離層遅延量と2周波測位の電離層遅延量を比較すると波形は一致しておらず、電離層の影響を受けていることがわかる。しかし、マスクをかけた際に使用している部分と2周波単独測位で出した電離層遅延量を比較すると、オフセットはあるが波形は一致していることがわかる。故に、波形が一致している部分、つまりマ

マスクをかけた際に使用している部分は電離層遅延の補正がうまく行えているといえる。これらの電子基準点では方位角 150 度から 210 度の南方に電離層の勢いが強い部分が存在しているため、仰角の低い衛星からの電波は強い影響を受け、誤差が増大したと考えられる。

次に通常測位、高精度測位、高精度測位で仰角、方位角に制限をかけた場合の測位結果を見てみる。表 4 . 7 と図 4 . 8 は、9 月 25 日に宮崎で通常測位、高精度測位、仰角と方位角に制限をかけ高精度測位を行った場合の測位結果である。使用する衛星に制限をかけると、水平精度は 0.87 となり 1 m を切り、測位結果がサブメートルに収まっていることがわかる。しかし、使用する衛星の角度が制限されるため、高度方向の精度は 1.63 と 1 m を越えてしまう。

表 4 . 8 も同様に、9 月 25 日に鹿児島で通常測位、高精度測位、仰角と方位角にマスクをかけて高精度測位を行った場合の測位結果である。鹿児島の場合もマスクをかけると水平精度が向上しているため、マスクをかけることは有効であるといえる。しかし、宮崎同様高度方向の精度は 1 を越える。

マスクをかけると高度方向の精度は下がるが、図 4 . 8 を見ると、高精度測位では補正しきれていなかった、電離層の活動が活発な昼間の時間帯の高度方向のばらつきが解消されていることがわかる。よって、水平位置と垂直位置を知りたい場合、優先したい条件によってマスクの有無を検討すべきであると考えられる。

表 4 . 7 宮崎での測位誤差の平均値と標準偏差

	通常測位	高精度測位	高精度測位マスクあり
水平精度	2.37	1.01	0.87
標準偏差 緯度	1.38	0.53	0.46
標準偏差 経度	1.93	0.86	0.75
緯度真値からのずれ	0.76	0.16	0.18
経度真値からのずれ	1.46	-0.42	-0.55
高度精度	4.24	2.01	1.63
高度真値からのずれ	0.91	0.01	-0.14
高度平均	39.17	38.27	38.12

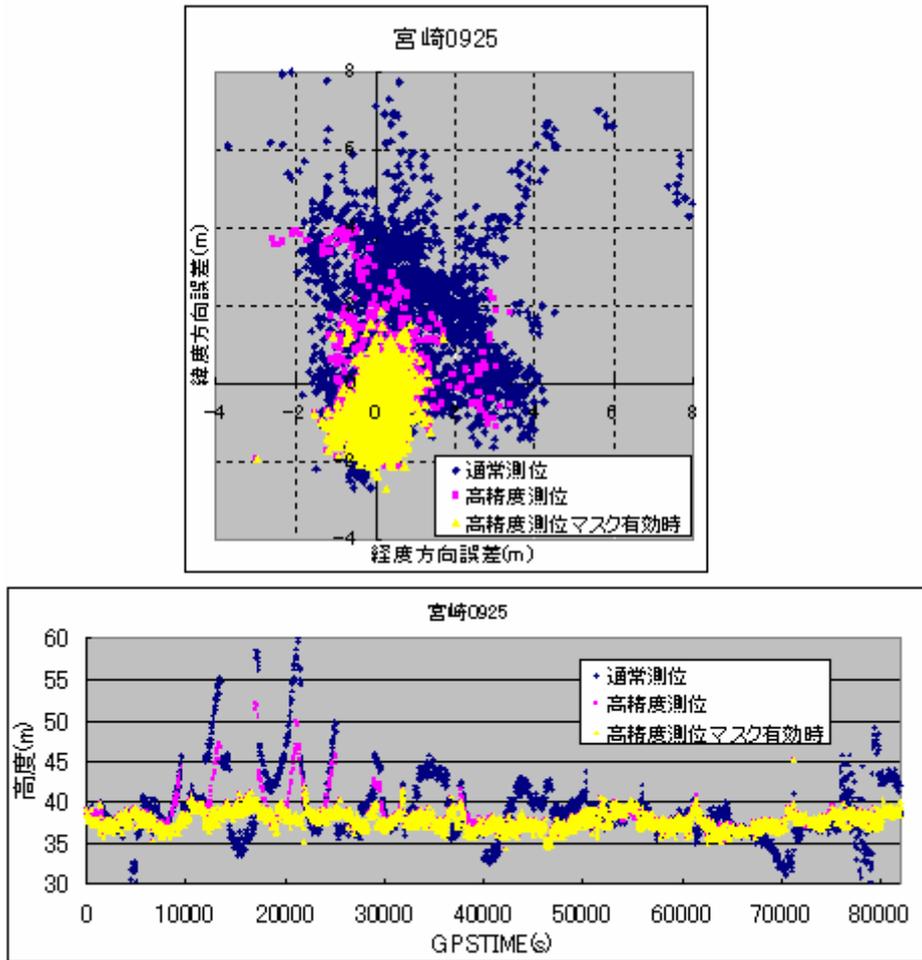


図4.8 宮崎での測位結果 (マスク有効時)

表4.8 鹿児島島での測位誤差の平均値と標準偏差

	通常測位	高精度測位	高精度測位マスクあり
水平精度	2.44	0.99	0.75
標準偏差 緯度	1.42	0.48	0.38
標準偏差 経度	1.99	0.86	0.65
緯度真値からのずれ	0.79	0.11	0.11
経度真値からのずれ	1.33	-0.42	-0.63
高度精度	4.55	1.85	1.02
高度真値からのずれ	-0.17	-1.58	-1.97
高度平均	502.93	501.52	501.13

表 4 . 9 石垣島 2 での測位誤差の平均値と標準偏差

	通常測位	高精度測位	高精度測位マスクあり
水平精度	3.11	1.69	1.87
標準偏差 緯度	1.32	0.59	0.53
標準偏差 経度	2.82	1.58	1.79
緯度真値からのずれ	0.18	-0.17	-0.09
経度真値からのずれ	3.00	0.64	0.91
高度精度	3.28	1.58	1.50
高度真値からのずれ	1.58	0.25	0.59
高度平均	48.38	47.05	47.39

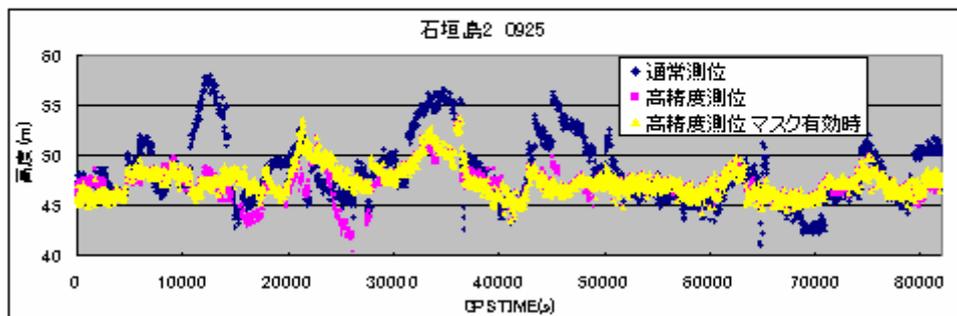
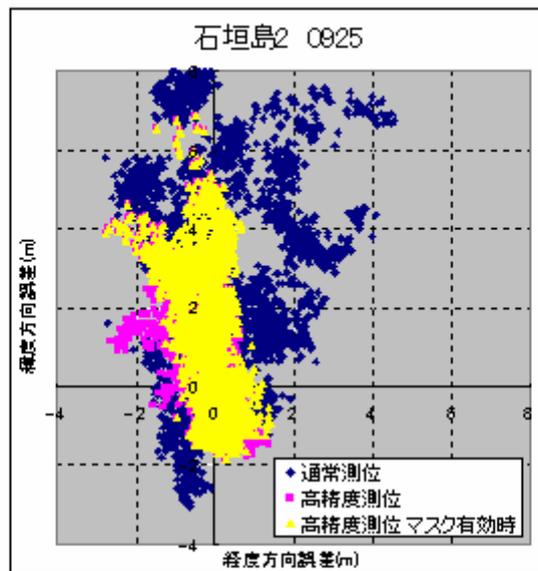


図 4 . 9 石垣島 2 での測位結果 (マスク有効時)

表 4.9 と図 4.9 は石垣島 2 で通常測位、高精度測位、仰角と方位角に制限をかけ高精度測位を行った場合の測位結果である。石垣島 2 ではマスクをかけると精度は逆に上がってしまう。原因としては、石垣島自体が電離層の活動が激しい緯度帯にあるためどの衛星も電離層の影響が大きく、測位に使用する衛星数が少なくなると測位が難しくなる。このような低緯度地域の場合、2 周波を用いない場合は電離層遅延誤差を完全に排除することは難しいと言える。

4.3 まとめ

4.1.1 では稚内、天童、横浜、名古屋、明石、広島、宮崎、石垣島 2、と全国 8 箇所の電子基準点データを使用して測位実験を行い、宮崎、石垣島 2 以外の電子基準点では水平精度、高度精度ともに 1 m をきり、サブメートル単位の精度を確認した。

4.2.2 では横浜で 9 月 24 日から 30 日までの 1 週間の測位を、4.3.3 では横浜で 4 月 25 日から 9 月 25 日までの半年間（毎 25 日）の測位を行い、日時や季節を問わず高精度化が有効であることを確認した。

4.2.1 では、石垣島 1 と西表島で測位を行い、精度の向上が見られないのが石垣島 2 だけではなくこの地域全体であるということがわかった。

4.2.2、4.2.3 では、測位に使用する衛星を制限することにより、宮崎や鹿児島など緯度が低めの地域でも水平精度、高度精度ともに 1 m を切り、当初目指した精度を実現できることが確認できた。しかし、石垣島 2 のように上空の電離層の活動が活発な地域の場合は水平方向の補正が 1 を越えてしまうことがわかった。

よって、中緯度、高緯度地域ではこのソフトウェアを用いることで単独測位の高精度化を行うことが出来、サブメートル単位の精度を得ることが出来るといえる。

第五章 結論

5.1 総括

本論文ではサブメートルの精度を得るため、実際の生データを解析し、誤差要因を調査し、改良した補正方法を議論し、効果を示した。

第二章では

GPS 概要および GPS 単独測位の原理を示した。GPS 単独測位での誤差要因は以下の通りである。

- 衛星軌道誤差、航法暦による誤差 (1) は約 2 . 1 m。
- 衛星時計誤差、航法暦による誤差 (1) は約 2 . 1 m。
- 電離層誤差、クロバッチャモデルによる誤差 (1) は約 4 . 0 m。
- 対流圏誤差、経験モデルによる誤差 (1) は約 0 . 7 m。
- 受信機雑音、マルチパスは受信機固有のモデル化できない誤差として存在する。

第三章では、従来の 1 周波受信機の GPS 単独測位の誤差要因を解消し、高精度化を行うために改良した点とそのアルゴリズムを示した。具体的には以下の通りである。

- 衛星位置の計算について、従来の航法暦に変わって、IGS の提供する精密衛星軌道を使用した。15 分間隔の位置情報から任意時刻の衛星位置を算出するために、多項式内挿アルゴリズムを用いた。
- 衛星時計の補正について、従来の航法暦に変わって、IGS の提供する精密衛星時計を使用した。時計補正量を算出するために、軌道計算同様の多項式内挿アルゴリズムを用いた。
- 電離層遅延量の推定について、従来のクロバッチャモデルに変わって、CODE の提供する全地球電離層マップ (GIM) を使用した。電離層遅延量(m)を算出するために、時間と平面、2 つの内挿アルゴリズムを用いた。
- 対流圏遅延の推定について、従来の気温、気圧、水蒸気分圧を求めるそれぞれの経験モデルに変わって、IGS の提供する R I N E X フォーマットの気象データを使用した。

第四章では第三章で高精度化を行ったプログラムを用いて、実際に解析実験を行い、結果を考察し、さらに改良点を加えた。解析結果は以下の通りである。

- 中緯度地域では精度は高く、サブメートル単位の精度を確認した。だが、宮崎、石垣島 2 の電子基準点では水平精度、高度精度ともに 1 m を上回り、低緯度ではそのままだと高精度化の効果が出ない。
- 連続した 1 週間の測位と、半年間（毎 25 日）の測位を行ったところ、測位結果は日時や季節を問わず同じ傾向を示していた。
- CODE の作成する電離層マップは、クロバッチャモデルよりは精密であるが、電離層の変化が激しい時間帯の低緯度地域の電離層を再現しきれていない。
- 宮崎や鹿児島などの中低緯度地域では、電離層の影響が大きそうな衛星（南方）をカットするとデータの補正ができ、精度が向上する。

以上により、実験を行った地域において、高精度化プログラムはうまく働いたと言え、単独測位の精度は向上したといえるだろう。特に本州では高精度化が期待できる。

5.2 今後の課題

今回の実験で、信号経路が低緯度地域にかかる衛星を測位に使用しない場合、精度の向上につながる事がわかった。衛星の制限のために方位角と仰角にマスクをかけたが、マスクの値は結果を見ながら手動で段階的にかけていた。衛星位置と誤差の法則性を見つけ衛星ごとに自動的に重みを付けて計算するようになれば、さらに精度の向上が見込まれる。よって、重みを付けるための条件を調べ、プログラムに実装することが期待される。

石垣島のように電離層の活動が活発だと思われる低緯度地域では、マスクをかけても精度は向上せず、むしろ低下した。つまり、マスクはあまり有効な策とはいえない。

また、赤道に近い低緯度地域だけでなく、極地方に近い高緯度地域も電離層の活動が活発でモデル化しにくく同様の結果であると思われるため、対策を検討する必要がある。