

リアルタイムキネマティックGPSの測位誤差に関する実験的研究

Experimental Study on the Positioning Error in Real Time Kinematic GPS

坪井 広美*
Hiromi Tsuboi

岡本 修**
Osamu Okamoto

要 約

GPSは1970年代に米国国防総省を中心に軍事目的で開発が開始され、現在では時間・場所・気象条件に制限のない測量機器、あるいは測位センサとして一般に認識され、実務領域においても急速に浸透してきている。しかし、運用面における利便性だけが取りざたされ、その測位精度に関しては観測条件に複雑に影響されることから未だ解明されていない部分も多い。そこで、建設分野での主な利用形態であるリアルタイムキネマティックGPS（以下、RTK-GPS）について、定点連続測位と衛星配置を変化させた測位実験を行った。その結果、同一衛星配置では測位結果に再現性があること、測位誤差の分布が衛星配置から求められる共分散楕円に良く整合することより、衛星配置から測位値の誤差傾向とその大きさを予測することが可能であることなどがわかった。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. RTK-GPSの概要
- § 3. 定点測位実験
- § 4. 測位結果の考察
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

GPS (Global Positioning System) は、1970年代に米

国で軍事目的に開発された人工衛星を利用した測位システムである。このシステムの管理・運営は米国国防総省、NATOおよびオーストラリアなどで合同で行われているが、その情報の一部を一般に開示しているため、地球上のいつでも三次元測位が可能なシステムとなっている。

これを利用したGPS測量には、従来の測量方法にはない次のような特徴がある。

- ①広域性.....全世界、全天候、24時間、陸上、海上
- ②利便性.....小型、軽量、耐環境
- ③即時性.....リアルタイムでの出力 (RTK-GPS)
- ④発展性.....高度情報通信時代、マルチメディアへの対応

このような特徴を持ったGPS測量が急速に建設分野へ

* 技術研究所土木技術課

** 技術研究所機電課

浸透してきている。特に、測量専門業者では公共測量への利用に関する指針¹⁾が整備されてきたことから、実務レベルでの利用が一般的になってきている。しかし、工事測量や測位センサとしての利用にはいまだ多くの課題が残されているといえる。特に、測位誤差の発生要因の特定と測位精度の把握が大きな課題であるといえる。

GPSの測位精度に関する研究は、受信機メーカーをはじめ利用者側でも行われてきている。しかし、その内容は利用時の特定条件下での検討が多く、衛星配置などの観測条件と精度に関する研究は少ないといえる。

そこで、本研究では建設分野で主に利用されているRTK-GPSについて、周辺に特別な障害物がない安定した条件下での長時間におよぶ連続測位と衛星数と配置を変化させた定点測位を通して、RTK-GPS測位誤差について実験的に検討する。

§ 2. RTK-GPSの概要

2-1 GPS測測の分類と概説

GPS測測の分類を図-1に示す。GPS測測は測位方式により単独測位と相対測位に大別される。単独測位は、受信機1台で利用者の絶対位置をリアルタイムに求めるもので、カーナビゲーションなどに代表される利用形態である。単独測位の原理は、衛星と受信機との距離を測ることにより測位地点の座標(X,Y,H)を求めるもので、座標のほか受信機時計の誤差を含めて4つの未知数を同時に4衛星を観測することによって解くものである。この単独測位の精度はSA (Selective Availability: 管理・運営側による人為的な衛星信号の精度劣化) 下で一般に100m程度といわれている。

一方、相対測位は基準点からの基線ベクトルを求めることにより、未知点の位置を確定するものである。これには、ディファレンシャル法と干渉測位法があり、ディファレンシャル法は複数点における単独測位を行い、これらを差し引くことにより相対位置を求めるもので、衛星軌道情報の誤差や電離層の粗密に起因する影響など共通の誤差要因を消去できることから、1m程度の測位精

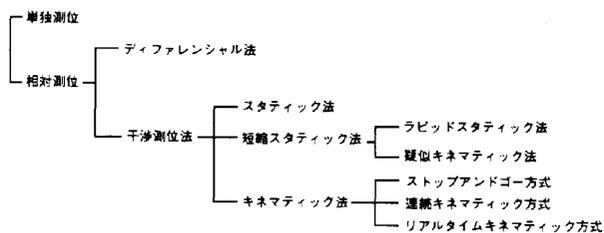


図-1 GPS測測の分類

度を確保することができる。干渉測位法はGPS測測の中で最も高精度な測位方式で、測量分野での利用はほとんどこの測位方式によるものである。また、干渉測位法は単独測位法やディファレンシャル法が衛星から送られてくるコード情報(C/Aコード)を用いて衛星までの距離を測定するのに対して、搬送波の位相を利用するので、数mmオーダーで高精度な測測が可能であり、スタティック法とキネマティック法とに分類される。スタティック法は1基線の測定に20分~数時間を必要としオフラインの解析が必要であるが、測位精度は2cm以下と最も高精度である。キネマティック方式は、基準点の受信情報を無線で未知点側に送信することにより、結果をリアルタイムに求めることができるもので、測位精度は一般に2~3cm程度となる。

GPS測測のうち、RTK-GPSは、測位結果がリアルタイムに出力されることから、工事測量や測位センサとして建設分野での利用の主流となりつつある。しかし、このRTK-GPSは、観測条件により精度が大きく異なり、十分な精度が保証されない場合があることから、実務レベルでの利用の障害となっている。RTK-GPSの測位精度は種々の観測条件に影響されるだけでなく、リアルタイムの出力値を利用するため、スタティック測測に代表される後処理による解析が不可能であることから、測位精度を把握し、誤差を保証することは困難である。

2-2 RTK-GPSの原理²⁾

図-2にRTK-GPSの構成を示す。衛星と受信機間の波数を単位とした搬送波位相の Φ は、電離層や大気等による電波伝搬遅延等による衛星からの搬送波位相の観測の偶然誤差を無視すると、式(1)で表される。

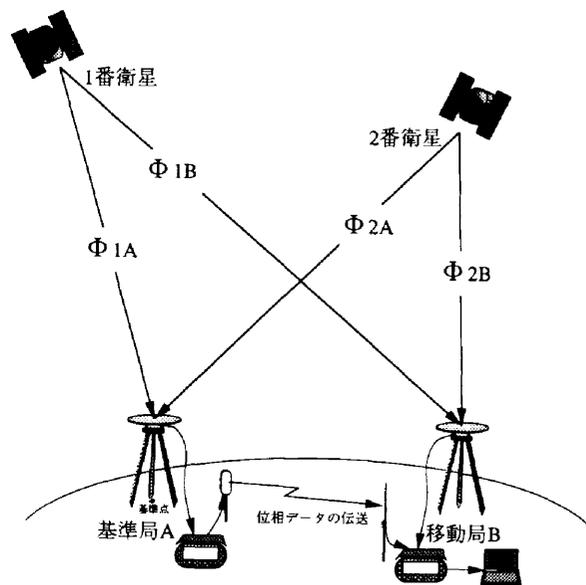


図-2 RTK-GPSの構成

$$\Phi = \left(\frac{f}{c}\right) \cdot \rho + d + \delta + N \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 f は搬送波の周波数、 c は光速、 ρ は衛星から受信機までの距離、 d は衛星時計、 δ は受信機時計の誤差による搬送波位相の誤差、 N は搬送波位相の整数値バイアスである。

1番衛星と2番衛星からの搬送波位相をそれぞれ基準局(A)、移動局(B)2台の受信機で測定するとき、各受信機で測定された1番衛星からの搬送波位相を Φ_{1A} 、 Φ_{1B} 、また2番衛星からの搬送波位相を Φ_{2A} 、 Φ_{2B} とし、二重位相差 $DD\Phi(1,2;A,B)$ を式(2)のように定義する。

$$DD\Phi(1,2;A,B) = (\Phi_{2B} - \Phi_{2A}) - (\Phi_{1B} - \Phi_{1A}) \quad \dots\dots (2)$$

ここで、衛星時計の誤差 d (衛星の送信機の位相ゆらぎ)および、受信機時計の誤差 δ (受信機の局部発振器の位相ゆらぎ)が、二重位相差の処理によって完全に消去される。

既知の基準点に設置された基準局では、4つ以上の衛星からの搬送波位相の積算値を測定し、その値を移動局へ無線装置を用いて伝送する。同時に、移動局でも同じ衛星からの搬送波位相を積算しており、基準局での搬送波位相データと比較することにより、移動局の三次元位置を求めることができる。GPS衛星からの搬送波位相の測定値の分解能は、L1の波長約19cmの1/100程度であるから、数cm程度で相対位置を求めることができる。

各衛星からの送信周波数が等しいと仮定すると、式(1)、(2)を用いて、1番衛星を基準衛星として i 番衛星に対する二重位相差 $DD\Phi(1,i;A,B)$ は、式(3)のように表すことができる。

$$DD\Phi(1,i;A,B) = \left(\frac{f}{c}\right) \cdot (\rho_{iB} - \rho_{iA} - \rho_{1B} + \rho_{1A}) + N_{iAB} \quad (i=2,3,4\dots) \quad \dots\dots (3)$$

ここで、添字1は基準とした衛星の番号で仮に1とする。 i は他の衛星、Aは基準局の受信機、Bは移動局の受信機である。

式(3)の第1項は未知のパラメータとして移動局の位置の x, y, z 成分の3つの未知数を含んでいる。第2項

の整数値バイアスは、衛星からの信号がトラッキングされていれば変化なく、衛星毎に一定値となり未知数は1つである。したがって、4衛星の場合は3つの独立な方程式に対して、未知数は全部で6個となり、このままでは解が得られない。しかし、時刻の経過と共に衛星の位置は変化するので、一定時刻後にも同様の式が3つ求められ、合計6つの方程式で6つの未知数が決定され、移動局の三次元位置が求まる。

§ 3. 定点測位実験

3-1 目的

RTK-GPSの測位結果に影響する観測条件は、主に次の3つが考えられる。

- ①衛星数
- ②衛星の配置
- ③受信環境

今回はこのうち③受信環境を一定とし、①衛星数と②衛星の配置に留意して実験を行う。長時間連続的に定点測位を実施することにより、同一衛星配置での測位結果の再現性を確認する。

また、衛星数とその配置を変化させた定点測位実験から、衛星数の減少に伴う測位値の変化および測位誤差分布と衛星配置から求められる共分散楕円との整合を確認する。

以上、同時に2種の受信機で測位し、さらに受信機による相違についても考察する。

3-2 実験方法

(1) 使用装置

実験に使用したGPS受信機は、2周波タイプの米国Trimble社製および米国Ashtech社製である。受信機の仕様を表-1に示す。

(2) 実験場所および観測条件

実験は周辺にノイズの発生要因となるものがなく衛星からの搬送波の受信環境が比較的安定した、東京都町田市の実験場で行った。GPSアンテナは高さ3.6mのコンクリートスラブ上に据え付けた堅固な鋼製架台($h=1.2m$)に、基準局と移動局の距離(基線長)を2mとして設置した。また、受信機、モニタおよびデータ記録用パソコンはスラブ下に設置し、アンテナ近傍に近寄ることのないよう配慮した。機器の設置概要を図-3に示す。

基準局の位相データは、無線による伝送ではなくケーブルを用いて直接移動局の受信機に入力する。また、衛星観測仰角を水平面より10度以上とし、この範囲の上空には全く遮蔽物がない観測条件での測位となる。また、各

表-1 受信機の仕様

	Trimble 1000SSE	Ashtech Z-12	
公称精度	水平	1 cm + 2 ppm · D	2~3 cm
	垂直	2 cm + 2 ppm · D	3~4 cm
チャンネル数	L1×9 L2×9	L1×12 L2×12	
基準局アンテナ	Compact L1/L2 with Groundplane	Precision Antenna L1/L2	
移動局アンテナ	Compact L1/L2	Marine Antenna L1/L2	

D: 基線長

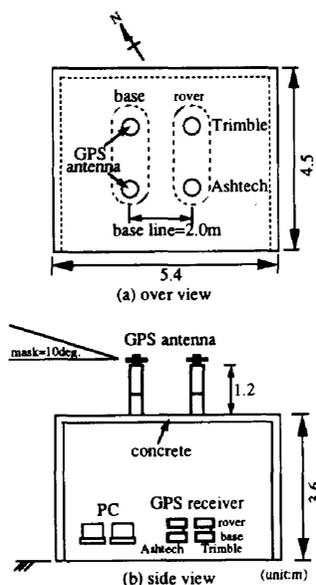


図-3 機器の設置概要

測点の座標は三等三角点を用いたGPS静止測量結果を真値とした。

(3) データ収集

解析に使用するデータは、移動局側の衛星配置と三次元座標の他、受信機から出力されるHDOPそして、衛星からの電波(C/Aコード)のSN比である。

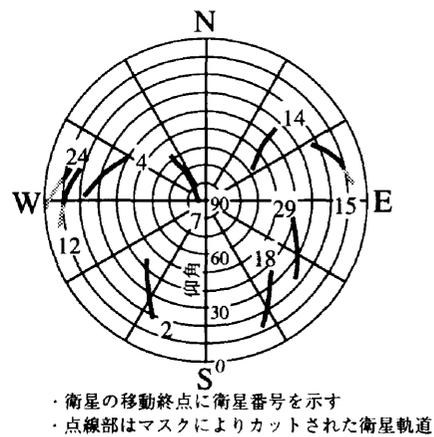
連続測位は平成7年7月8日4:59(UTC)から7月10日4:46(UTC)までの約48時間、衛星配置を変化させた定点測位は平成7年7月7日4:17(UTC)から7月8日4:39(UTC)までの期間に実施した。

§ 4. 測位結果の考察

4-1 同一衛星配置での測位値の再現性

GPS衛星は現在6軌道上をそれぞれ4個、合計24個の衛星が稼働している。このGPS衛星は1恒星日に地球を2周する軌道周期であることから同一衛星配置が23時間55分56.6秒の周期で現れることとなる⁴⁾。そこで、連続した2日の1時間分のデータについて、同一衛星配置での測位値の再現性を確認する。ここでは、定点測位結果の一例として、7月8日および9日の5:00~6:00(UTC)について考察する。図-4にこの時間帯の衛星配置の経時変化を、図-5に同時刻における測位値の経時変化と同一衛星配置となる1周期後との偏差の経時変化をそれぞれ示す。

RTK-GPSによる定点測位値の挙動は、大きな変動とともに小さな変動が常に起こっている。この大きな変動は、同一衛星配置となるように、時間軸を合わせることで、ほぼ同じ挙動を示す。衛星配置1周期後との偏差



・衛星の移動終点に衛星番号を示す
・点線部はマスクによりカットされた衛星軌道

図-4 衛星配置の経時変化

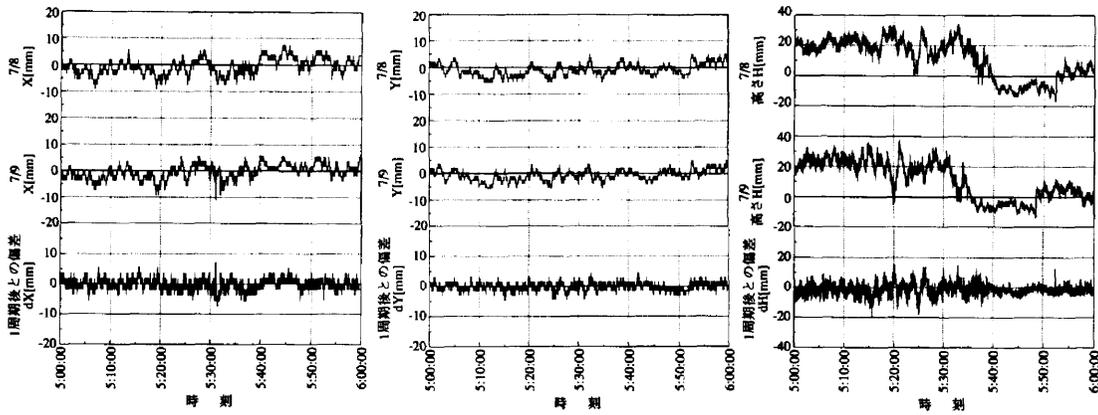
は真値付近での小さな変動のみであることから、マルチパスの状態など受信環境に変化がなければ、大きな変動には同一衛星配置において再現性があることがわかる。さらに、図-6に7月8日の5:00~6:00(UTC)の測位誤差と同一時間帯の1周期後との偏差ヒストグラムを示す。X、Y、H座標のいずれも、1周期後と偏差をとることにより大きな変動を補正する効果があるが、特に比較的測位値の変動が大きいH座標についての補正の効果は大きいといえる。これらから、時間軸を1周期分ずらして測位値同士の偏差をとることにより、測位値の大きな変動は消去できることから、RTK-GPS測位の瞬時値の補正が可能であると考えられる。

また、異種の受信機間には挙動の共通性がないことから、測位値の経時的な挙動は受信機特有のものであると考えられる。しかし、観測位置が数m移動しただけでマルチパスなどの受信環境が変化するので、今後実験的に確認する必要がある。

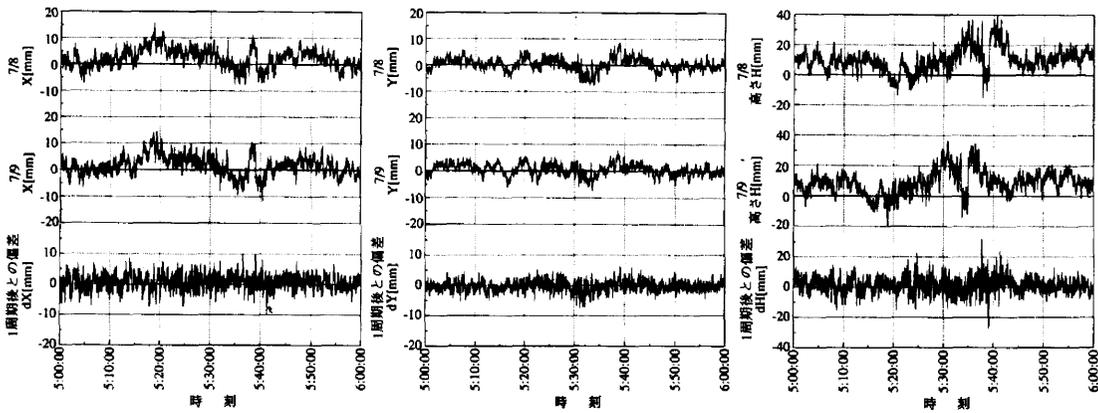
4-2 衛星数の減少に伴う測位値の挙動

衛星数とその配置を変化させた定点測位から、衛星数の減少に伴う測位値の挙動を把握する。この実験は、衛星数を7個から1個ずつ4個まで受信機側で強制的に排除し各々約3分間データを取得したものである。結果の一例として、7月8日1:07(UTC)から7月8日1:19(UTC)に行った衛星数の減少に伴う測位値の経時変化を図-7に、この時間帯の衛星配置を図-8にそれぞれ示す。なお、HDOPは衛星数7個で1.1、以下6個から4個と減少に伴い、1.5~8.9と変化した。

衛星数が6個までは、X、Y、H座標ともにほぼ安定し、公称精度を確保している。しかし、衛星数が5個となりHDOPが7.0以上となると、どちらの受信機も測位値のばらつきが大きくなることが分かる。特に、X座標に比べてYおよびH座標のばらつきが極端に大きい。

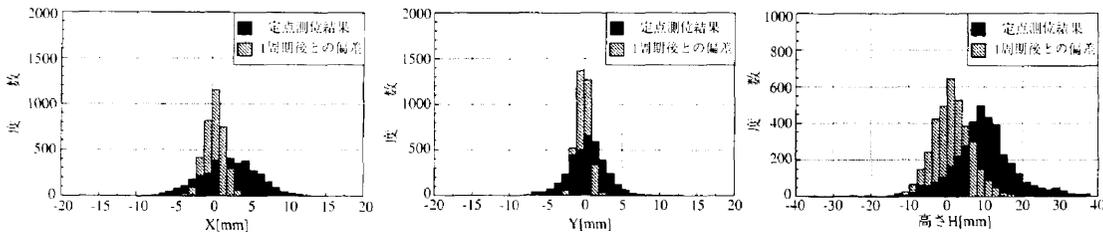


(a) Trimble

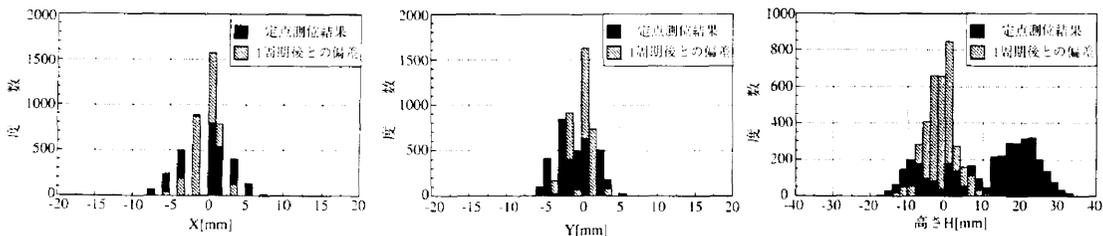


(b) Ashtech

図-5 定点測位誤差の経時変化



(a) Trimble



(b) Ashtech

図-6 定点測位誤差と1周期後の偏差ヒストグラム

今回の実験条件では、衛星数が5個以下となり、 $HDOP$ が7.0以上となると測位誤差が大きくなった。このことから、測位結果の瞬時値を利用するRTK-GPSにおいては、衛星数と $HDOP$ などの DOP 値をリアルタイムに監視し、測位値を評価する必要がある。

さらに、図-7において、ばらつきの大きさがX座標と

Y座標で相違があることから、X-Y平面上での測位誤差に指向性があることが予想される。そこで、次項において、この測位誤差の指向性と衛星配置の相関について考察する。

4-3 測位誤差楕円と共分散楕円

RTK-GPSの定点測位における三次元誤差分布は楕円体

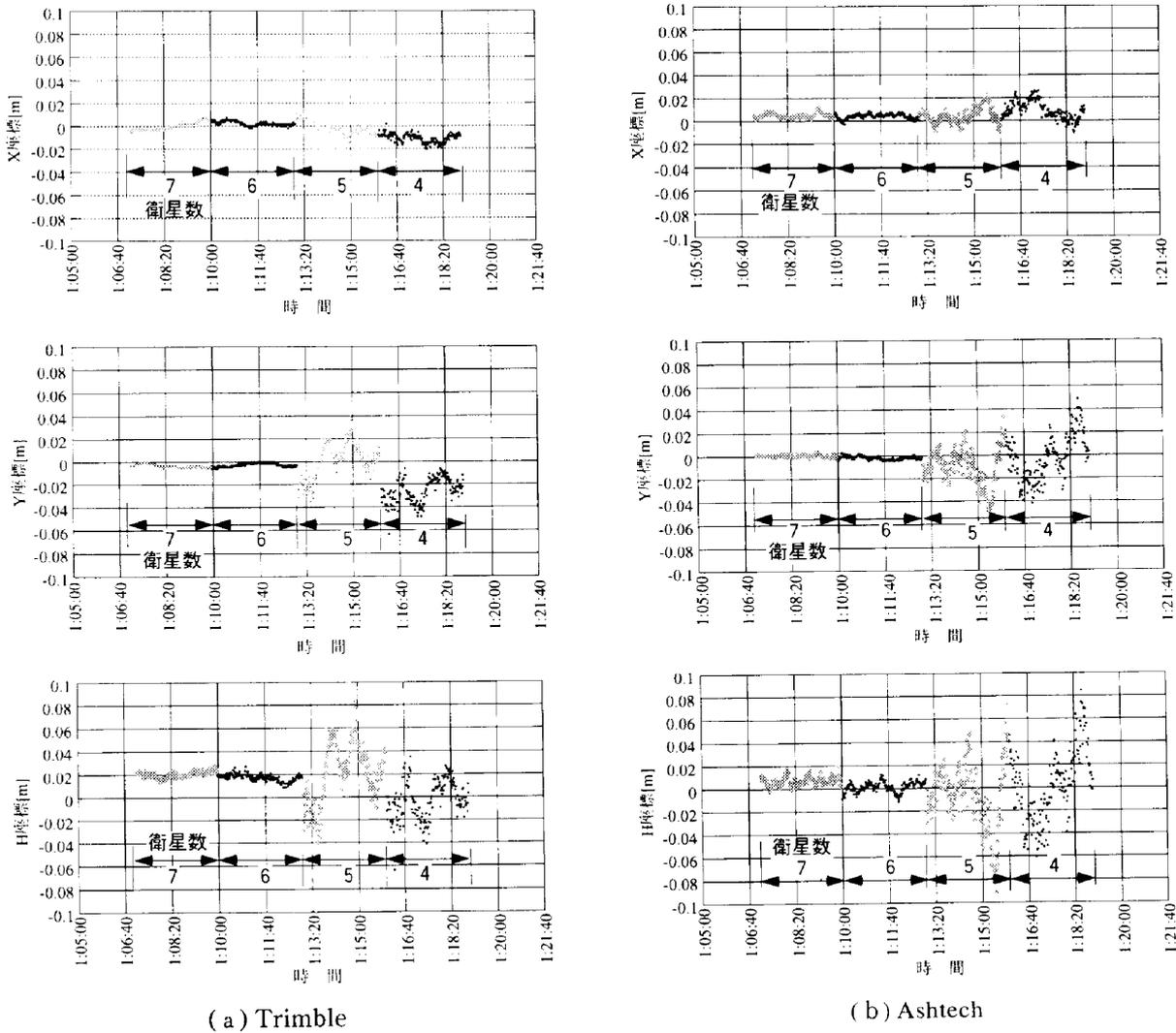


図-7 衛星数の減少に伴う測位値の経時変化

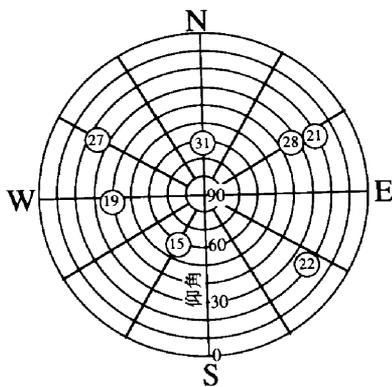


図-8 GPS衛星の空間配置

となり、X-Y平面上では指向性のある誤差楕円として評価できる。この誤差楕円と衛星配置の相関について衛星配置から求められる共分散楕円を用いて以下に考察する。

(1) 共分散楕円の算出^{1) 5)}

誤差を表す二つの確率変数 x' 、 y' がそれぞれの標準偏差

σ_x 、 σ_y で正規分布に従い、相関係数を ρ_{xy} とすると、確率が一定の曲線はX-Y平面において楕円となり、式(4)で表される。

$$\frac{x^2}{\sigma_x^2} - 2\rho_{xy} \frac{xy}{\sigma_x \sigma_y} - \frac{y^2}{\sigma_y^2} = (1 - \rho_{xy}^2)C \quad \dots\dots (4)$$

この楕円を共分散楕円という。ここで、 C の平方根は楕円の軸の長さ按比例するが、この楕円の内に確率変数 x' 、 y' を観測する確率 P は C の関数で式(5)となる。

$$P = 1 - \exp(-C/2) \quad \dots\dots (5)$$

実測値による誤差楕円は、 x' を平面直交座標系のX方向、また、 y' を同じくY方向の測位誤差と考えて、それぞれの標準偏差および相関係数を求めて式(4)に代入することにより求められる。

また、GPS衛星の配置による共分散楕円は、衛星配置から得られる共分散行列を計算する際に求められるX方向およびY方向への疑似距離測定誤差の σ_0 の拡大係数(σ_{xx} 、 σ_{yy})から得られる σ_x 、 σ_y

$$\sigma_x = \sigma_{xx} \sigma_0 \quad \dots\dots (6)$$

$$\sigma_y = \sigma_{yy} \sigma_0 \quad \dots\dots (7)$$

と、共分散行列の要素である σ_{xy}^2 から得られる相関係数 ρ_{xy}

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_{xx} \sigma_{yy}} \quad \dots\dots (8)$$

を式(4)に代入することにより求められる。

一方、 σ_0 は、水平方向放射状測位誤差 d_{rms}

$$d_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) / N} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad \dots\dots (9)$$

を用いて、これに式(6)、(7)を代入することにより次式で与えられる。

$$\sigma_0 = d_{rms} / \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2} \quad \dots\dots (10)$$

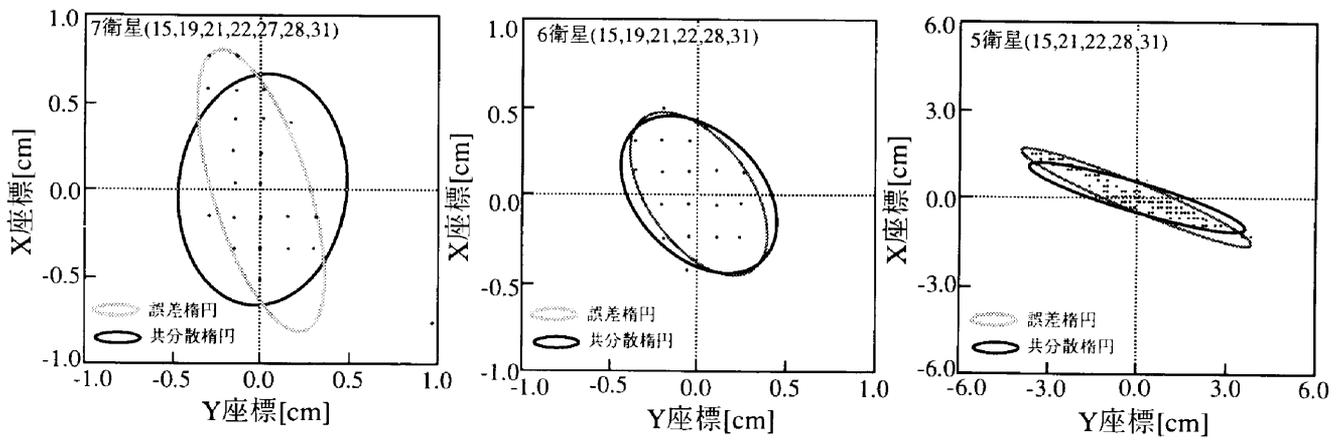
(2) 測位誤差楕円と共分散楕円

図-7に示したデータのX-Y平面上での測位誤差楕円について考察する。図-9に同データから算出した測

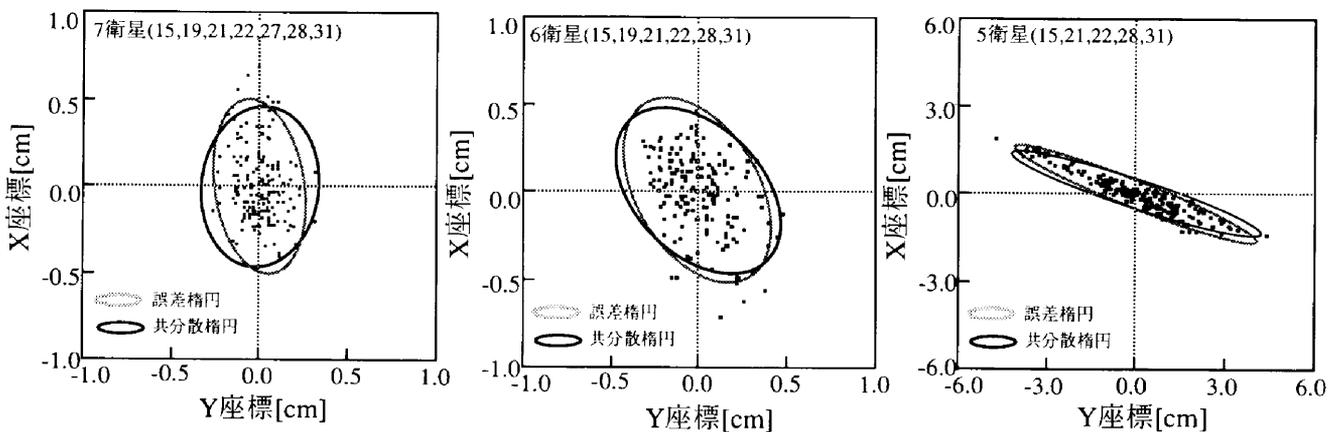
位誤差楕円とその時の衛星配置から算出した共分散楕円を示す。ここで、(a) Trimbleの測位点数が少なく表現されているが、これは測位値の最小表示が0.2cmであるためであり、データ数は(b) Ashtechと同じである。また、5衛星のスケールは、7、6衛星に対して6倍となっている。

衛星数が5個および6個の場合は、測位誤差楕円と共分散楕円はよく一致し、測位誤差の指向性は共分散楕円を用いて表現できることが分かる。また、受信機による相違は、測位値の経時的挙動には差が見られたが、誤差の分布は7衛星の場合を除いてほぼ同じ結果となっている。Trimbleの7衛星の測位誤差楕円が大きいのが、27番衛星を排除した6衛星の結果が良好であることから、Trimbleの27番衛星のみが、マルチパスなどの影響で測距精度が低下し測位誤差が大きくなったものと考えられる。

以上より、RTK-GPSの測位誤差の指向性は、衛星配置から求められる共分散楕円を用いて事前に予測できるこ



(a) Trimble



(b) Ashtech

図-9 誤差楕円と共分散楕円

表一 2 疑似距離測定誤差の標準偏差 σ_0

	(cm)		
	7衛星	6衛星	5衛星
Trimble	0.30 (1.12)	0.17 (1.51)	0.24 (7.12)
Ashtech	0.21 (1.11)	0.18 (1.50)	0.23 (7.74)

() 内は、HDOP

と分かる。しかし、1つの衛星でもマルチパスなどによる受信障害がある場合は、測位誤差が大きくなるので注意が必要である。

(3) 疑似距離測定誤差の標準偏差 σ_0

疑似距離測定誤差の標準偏差 σ_0 は、共分散楕円の大きさを決めるものであり、式 (10) から求められる。今回の実験で得た σ_0 の値を表一 2 に示す。

衛星数が減少しても σ_0 は変化なく、0.2cm程度である。また、受信機による相違は7衛星の場合を除いて、ほとんど見られない。したがって、遮蔽物や受信障害等がない安定した受信環境では、今回得た σ_0 と衛星の配置から求められる共分散楕円により、RTK-GPS測位の瞬時値に対しての誤差楕円の指向性とその大きさを事前に予測することが可能であることが分かる。

§ 5. まとめ

RTK-GPS測量はリアルタイムに三次元座標を精度よく出力できることから、工事測量や測位センサなど、その利用範囲は無限にあると考えられる。しかし、実際の利用に際しては、複雑な観測条件に左右される測位精度に十分留意し、これを把握する必要がある。

そこで、安定した受信環境において定点測位実験を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 同一地点での衛星配置は、23時間55分56.6秒周期

で同一配置となり、同一衛星配置での測位値の大きな変動には再現性があり、1周期後との偏差をとることによる補正が可能である。

(2) 衛星数が減少し、DOP値が増加すると測位誤差が大きくなることから、瞬時値を利用するRTK-GPSにおいてはこれらの値をリアルタイムに監視する必要がある。

(3) 衛星配置から求められる共分散楕円と測位誤差楕円はよく整合することから、事前に分かる衛星配置から測位誤差の指向性を予測することが可能である。

(4) 衛星と受信機間の測距誤差である σ_0 は、使用した2台の受信機で、いずれも約0.2cmとほぼ同じ値であった。

今後は、衛星の軌道誤差やマルチパスの影響が大きい衛星の決定方法とその衛星を排除することによる測位精度の確保手法について研究を進める予定である。

最後になりましたが、一連のRTK-GPSの測位精度評価に関する研究でご指導頂いております東京商船大学安田明生教授、そして大学院生の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省国土地理院；GPSを用いる公共測量作業マニュアル (案)、平成5年3月
- 2) 兪、安田；キネマティックGPSにおける衛星配置と測位精度について、日本航海学会論文集、vol.94、1996
- 3) 木村；船舶電子航法ノート<110>、船の科学、vol.39、pp.96-101、1986
- 4) 安田、平田他；GPSにおけるGDOPと測位誤差分布について、日本航海学会論文集、vol.79、昭和63年
- 5) 奥田、安田；GPSにおける測位誤差分布について、電子情報通信学会論文誌、B-II vol.j75-B-II no.2、1992
- 6) 坪井、岡本；リアルタイムキネマティックGPSのケーソン沈設工事への適用、応用測量論文集、平成8年6月