

修士学位論文

マルチGNSSによる  
列車位置計測に関する研究

平成 22 年度

(2011 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海運ロジスティクス専攻

仁禮 和男

## 修士学位論文要旨

# マルチGNSSによる列車位置計測に関する研究

東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 海運ロジスティクス専攻  
0855023 仁禮和男

近年、GPS/GNSSは携帯電話やカーナビゲーションを始め、社会生活の上で欠かすことのできないインフラストラクチャーへと成長した。それに伴い様々なアプリケーションが生まれ、多くの産業でもシステムの一部に組み込まれるようになってきている。この中のひとつである列車の保安制御におけるGPS/GNSSの活用法について着目する。

GPS/GNSSを利用すると三次元の絶対位置座標と高精度な時刻が容易に得られるため、鉄道システムでも車両の測位（位置検知）や装置間の同期などに活用している事例がある。しかし一方では、GPS/GNSSの脆弱性と、測位や時刻同期をGPS/GNSSのみに依存することの危険性が指摘されている。よって列車保安制御へ応用するには、誤った位置情報による事故を避けるため、安全上配慮しなければならない課題の抽出とその対策が必要であるとされている。

本研究ではGPS/GNSSを用い、列車の保安運用に足りうる信頼性の高い位置情報を得るための新たな測位手法の提案とその評価を行った。衛星測位を行う際、測位結果は測位環境に支配されることが多い。市街地や山間部においては衛星が遮蔽されることやマルチパスの影響を受ける可能性が高いためである。これを改善するための手法として、3次元線路マップを利用した拘束条件付き測位手法を提案する。これは列車が走行する線路の3次元座標列を利用し、列車が線路上にしか存在しないことを測位計算の中に拘束条件を加えたものである。これにより、理論的には2衛星のみで測位を行うことができる。しかし、2衛星での測位は信頼性の確保が難しいという結論に達し、評価としては衛星が3機以上での測位結果を用いた。3衛星での測位を行う上では単独測位と比較すると、高いアベイラビリティが得られ測位精度向上も確認できた。

また本手法における測位結果の信頼性向上のためMSAS補正及びRAIM機能の実装を行い、また2組のアンテナと受信機を使用し、独立した測位解を比較する検定法について検証した。これにより実装前と後では精度向上が見られた。

これらの結果から、列車の保安運用で活用する上で従来の測位手法よりも有効であることが示せた。

# 目次

## 第 1 章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目	1

## 第 2 章 GPS 測位の基礎理論について

2.1 はじめに	2
2.2 GPS 測位における基礎理論	
2.2.1 観測モデル	2
2.2.2 最小二乗法	3
2.2.3 DOP	5
2.3 MSAS	
2.3.1 MSAS 概要	6
2.3.2 MSAS 補正值	8
2.4 RAIM	9

## 第 3 章 3次元線路座標マップを利用した測位計算手法

3.1 はじめに	11
3.2 計算手法概要	12
3.3 3次元線路マップ	12
3.4 区間検索	14
3.5 1次元拘束条件付き測位	16
3.6 拘束条件付き測位における DOP	18
3.7 静止点観測による新測位手法評価実験	
3.7.1 評価手法及び実験概要	19
3.7.2 区間検索能力検証実験	
3.7.2.1 実験詳細	21
3.7.2.2 実験結果	21
3.7.3 3衛星及び2衛星での動作検証実験	
3.7.3.1 実験詳細	24
3.7.3.2 実験結果	24
3.7.4 単独測位との性能比較実験	
3.7.4.1 実験詳細	32

3.7.4.2	実験結果	32
3.8	移動状態観測における新測位手法評価実験	
3.8.1	実験詳細	40
3.8.2	実験結果	42
3.9	まとめ	45
第4章 3次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位 における信頼性向上について		
4.1	はじめに	46
4.2	MSASの利用について	
4.2.1	MSAS補正評価実験	
4.2.1.1	実験概要	46
4.2.1.2	実験結果	47
4.3	3次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位 におけるRAIM	
4.3.1	シミュレーションデータによる動作検証実験	50
4.3.2	実験結果	52
4.4	2組のアンテナと受信機を使用した測位解検定法	
4.4.1	アンテナ間距離を利用した測位解検定手法	54
4.4.2	検定手法検証実験	
4.4.2.1	検定手法評価実験概要	55
4.4.2.2	実験結果	57
4.4.2.3	手法の組み合わせによる評価実験概要	61
4.4.2.4	実験結果	61
4.5	まとめ	62
第5章 総括		
5.1	総括	63
5.2	今後の課題	64

参考文献

謝辞

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究の背景

GPS は三次元の絶対位置座標と高精度な時刻が容易に得られるため、様々な分野でシステムに組み込まれていった。これは鉄道の分野でも同じで、車両の位置検知や装置間の同期に使用されている。近年、次の段階として保安制御に応用する研究として列車を智能化し、事故を回避できる列車制御システムの開発が進んでいる。これは、踏切事故や自然災害へのより高度な対応を図ることを目的とし、各種の情報を基に列車自らが走行可能な安全限界速度を決定して、予測可能な事故を回避できる高度列車安全制御システムの実現を目指すものである。そのための情報基盤技術として、高精度位置検出システムや地理空間情報基盤などの開発が必要不可欠である。この高精度位置検出システムに GNSS が利用される予定であり、保安運用に耐えうる信頼性や連続性、精度を持った位置情報を得なければならない。

鉄道は我々の最も重要なインフラの一種であり、日本全国に鉄道は敷かれている。つまり列車が走行する環境としては多岐にわたる。衛星測位にとって理想的なオープンスカイの場合もあれば、高層ビル街や森の中など衛星電波を反射、遮蔽する物の多い環境でも当然走行することになる。その中で測位をし、一定以上のクオリティを維持するには従来の測位手法では十分とはいえない状況である。

## 1.2 研究の目的

前節より、列車の GNSS の保安運用に関して問題となっている反射物、遮蔽物の多い環境での運用に耐え、かつ信頼性の高い新しい測位手法を提案し評価することを本研究の目的とする。新手法に関して以下の 2 つの項目に分けて研究を進める。

- ( 1 ) 3次元線路座標マップを利用した測位計算手法
- ( 2 ) ( 1 ) における信頼性向上

## 第2章 GPS測位の基礎理論について

### 2.1 はじめに

本章では、GPS測位に関する数多くの測位手法や理論等、本研究に深く関係する部分に関してのみを抜粋して説明する。GPS測位の基礎理論等の詳細については参考文献等を参照のこと。

### 2.2 GPS測位における基礎理論

本節では、GPS測位における位置推定すなわち測位についての基礎理論を解説する。

#### 2.2.1 観測モデル

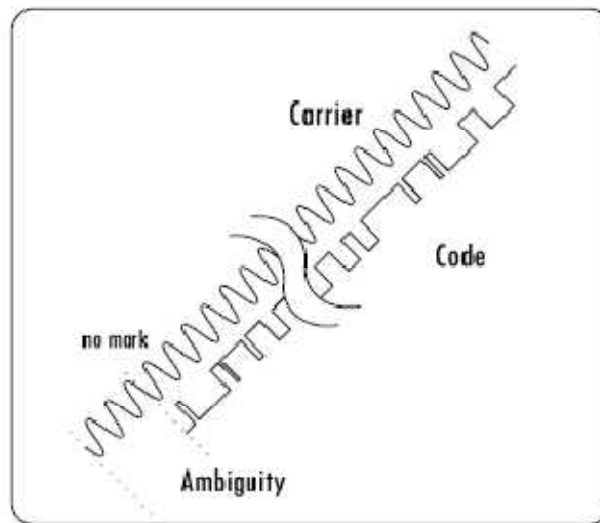


図 2-1 : GPS 信号におけるコード擬似距離と搬送波位相

GPS 受信機において得られる、GPS 衛星からの測位信号観測値は、擬似距離 (Pseudorange) 及び搬送波位相 (Carrier-Phase) である。擬似距離は GPS 受信機から生成される最も基本的な測定値で、衛星から送信された PRN (pseudo-random noise) コードの受信時刻から伝搬時間を求め、光速を乗算したものと定義される。擬似距離  $P_i$  の観測モデルは、以下のように表すことができる。

$$P_i = \rho + c(dt - dT) + T + I_i + \varepsilon_{(P_i)} \quad (2.1)$$

ここで  $i$  は搬送波周波数帯 ( $i=1,2$ )、 $\rho$  は衛星-受信機間の幾何学距離 (m)、 $c$  は光速

(m/s)、 $dt$  及び  $dT$  はそれぞれ受信機及び衛星時計誤差(s)、 $T$  は対流圏遅延(m)、 $I$  は電離圏遅延(m)、 $\varepsilon$  は観測誤差 (m)を表す。

搬送波位相は擬似距離と比べ、その測距能力の高さからしばしば測量などの数cmオーダーでの測位が可能な精密測位に利用されている。搬送波位相とは、受信機内で検出されたドップラー周波数の積算であり、搬送波位相  $\Phi_i$  の観測モデルは以下で表すことができる。

$$\Phi_i = \rho + c(dt - dT) + T - I_i + \lambda_i \cdot N_i + \varepsilon_{(\Phi_i)} \quad (2.2)$$

$\lambda$  は搬送波波長(m)、 $N$  は搬送波位相バイアス(cycle)である。

### 2.2.2 最小二乗法

GPS 測位における位置推定、すなわち未知パラメータ推定において最も一般的に用いられる推定手法は最小 2 乗法である。

最小 2 乗法とは、観測値と観測モデルから得られた理論値との差すなわち観測値に含まれる誤差の 2 乗和が最小になるようにモデルのパラメータを決定する手法である。

未知パラメータを  $x$ 、観測量を  $z$  とすると、以下の関係式が成り立つ。

$$z = Hx + \varepsilon \quad (2.3)$$

ここで、 $H$  は観測モデルによる未知パラメータへの係数を表した計画行列、 $\varepsilon$  は観測誤差である。これを観測方程式と呼び、誤差の2乗和  $f$  は以下の式で表せる。

$$\begin{aligned} f &= \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_n^2 \\ &= \varepsilon^T \varepsilon \\ &= (z - Hx)^T (z - Hx) \\ &= z^T z - 2z^T Hx + x^T (H^T H)x \end{aligned} \quad (2.4)$$

$f$  を最小にするために、(2.4)を偏微分して極値を求めると以下のようなになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x} &= -2z^T H + 2x^T (H^T H) = 0 \\ x^T (H^T H) &= z^T H \end{aligned} \quad (2.5)$$

(2.5)の両辺に転置行列をとり、展開すると、

$$H^T Hx = H^T z \quad (2.6)$$

これを正規方程式と呼び、 $x$ について解くと、

$$x = (H^T H)^{-1} H^T z \quad (2.7)$$

と書けるので、最小2乗解が得られる。

GPS測位の場合には、観測モデルが非線形であるため、未知パラメータである3次元座標の近似解が予め与えられることを仮定し、その周りで観測モデルを線形化して解く。観測モデルを $h(x)$ 、観測量を $z$ とし、未知パラメータの近似解を $x_0$ とし、観測モデルが近似解の周りで十分に線形に近いと仮定すると、観測誤差を $\varepsilon$ として、

$$\begin{aligned} z &= h(x) + \varepsilon \\ &= h(x_0) + H(x - x_0) + \varepsilon \end{aligned} \quad (2.8)$$

と書けるので、未知パラメータ $x$ の最小2乗推定値 $\hat{x}$ は以下で求めることができる。

$$\hat{x} = x_0 + (H^T W H)^{-1} H^T W (z - h(x_0)) \quad (2.9)$$

ここで、計画行列 $H$ と重み行列 $W$ は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} H &= \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x=x_0} \\ W &= \text{diag}(\sigma_1^{-2}, \sigma_2^{-2}, \dots, \sigma_n^{-2}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

$\sigma_i$ は観測 $i$ の観測誤差標準偏差であり、ここでは各観測間に相関が無いことを仮定している。また、最小2乗推定値 $\hat{x}$ の共分散行列 $P$ は以下で求められる。

$$P = (H^T W H)^{-1} \quad (2.11)$$

非線形を扱う最小2乗法では、初期の近似解 $x_0$ の精度が悪い場合、推定値 $\hat{x}$ を再度



近似解と置いて逐次近似計算により解を収束させることにより推定値の精度を改良する場合があります、これを Gauss-Newton 法と呼ぶ。

### 2.2.3 DOP

GPS における測距精度は疑似距離の測定精度によって決定する。位置を求める方程式は式(2.7)であるが、これは疑似距離の変化分と位置解の変化分の対応関係を表しているともいえる。よって、疑似距離に小さな変動 $\Delta\bar{r}$ があった際受信機位置  $x$ 、 $y$ 、 $z$  に与える影響 $\Delta\bar{x}$ は式(2 - 7)と同様に、

$$\Delta\bar{x} = (H^T H)^{-1} H^T \Delta\bar{r} \quad (2.12)$$

となる。 $\Delta\bar{r}$ と $\Delta\bar{x}$ の共分散行列をそれぞれ  $\text{cov}(\Delta\bar{r})$ 及び  $\text{cov}(\Delta\bar{x})$ とすると、誤差伝搬の法則により、これらの間には

$$\text{cov}(\Delta\bar{x}) = [(H^T H)^{-1} H^T] \cdot \text{cov}(\Delta\bar{r}) \cdot [(H^T H)^{-1} H^T]^T \quad (2.13)$$

の関係がある。全ての衛星の疑似距離の測定精度が等しく、標準偏差が  $\sigma$  とすると

$$\text{cov}(\Delta\bar{x}) = [(H^T H)^{-1} H^T] \cdot \sigma^2 I \cdot [(H^T H)^{-1} H^T]^T = \sigma^2 \cdot (H^T H)^{-1} \quad (2.14)$$

となるため、 $C = (H^T H)^{-1}$ とすると対角成分の平方根は

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma\sqrt{C_{11}}, & \sigma_z &= \sigma\sqrt{C_{33}} \\ \sigma_y &= \sigma\sqrt{C_{22}}, & \sigma_s &= \sigma\sqrt{C_{44}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

となる。ここの  $s$  は受信機クロック誤差項を表す。4 × 4 行列  $C$  は利用者からみた相対的な衛星の配置によって決まるのでこの行列によって疑似距離の測定精度が測位精度にどのような影響を及ぼすかが分かる。つまり測位精度を決める要因には(1)疑似距離の測距精度、(2)利用者と衛星との幾何学的位置関係の2つである。(2)の幾何学的配置を簡単な指標として DOP(Dilution Of Precision:精度劣化指数)と呼ばれる値があり次のように定義される。

$$\begin{aligned}
GDOP &= \sqrt{C_{11} + C_{22} + C_{33} + C_{44}} \\
PDOP &= \sqrt{C_{11} + C_{22} + C_{33}} \\
HDOP &= \sqrt{C_{11} + C_{22}} \\
VDOP &= \sqrt{C_{33}} \\
TDOP &= \sqrt{C_{44}}
\end{aligned}
\tag{2.16}$$

これらの意味はそれぞれ

GDOP：位置と時刻の決定精度を総合的に表す

PDOP： $\varphi$ ,  $\lambda$ ,  $h$  に関しており位置決定精度を表す

HDOP：関係しているのは $\varphi$ ,  $\lambda$  で、水平方向の位置の決定精度を表す

VDOP：垂直方向の位置の決定精度を表す

TDOP：時刻の決定精度を表す

となる。GPS におおよその測位精度は測距精度に DOP を乗じることで概算できるため、

測距精度 × HDOP = 水平方向の測位精度

測距精度 × VDOP = 垂直方向の測位精度

の関係がある。

## 2.3 MSAS

### 2.3.1 MSAS 概要

MSAS とは、複数の地上モニタ局で GPS 測位信号の誤差を測定し、各地のデータを用いて総合的に補正值を計算し、衛星から放送する DGPS 方式の補正システムである。補正方法は従来の DGPS と同様であるが、衛星同様空からデータを送信できるため、障害物に囲まれていても使用できるという利点がある。GPS 信号と同様に測位に使用できる信号も送信しており、追加の 25 番目の GPS 衛星として測位にも使用できる。MSAS は、GPS 観測を行うモニタ局、データの計算、衛星へのアップロード及び衛星の制御を行う中央局、補正データ放送を行う運輸多目的衛星 (MSAT) で構成されている。MSAS 補正值は、モニタ局で観測を行って得られた測位誤差を中央局に集約し、総合的に計算されている。モニタ局は国内 6 箇所 (札幌、常陸大田、東京、神戸、福岡、那覇)、海外 2 箇所 (オーストラリア、ハワイ) あり、今後増設も検討されている。

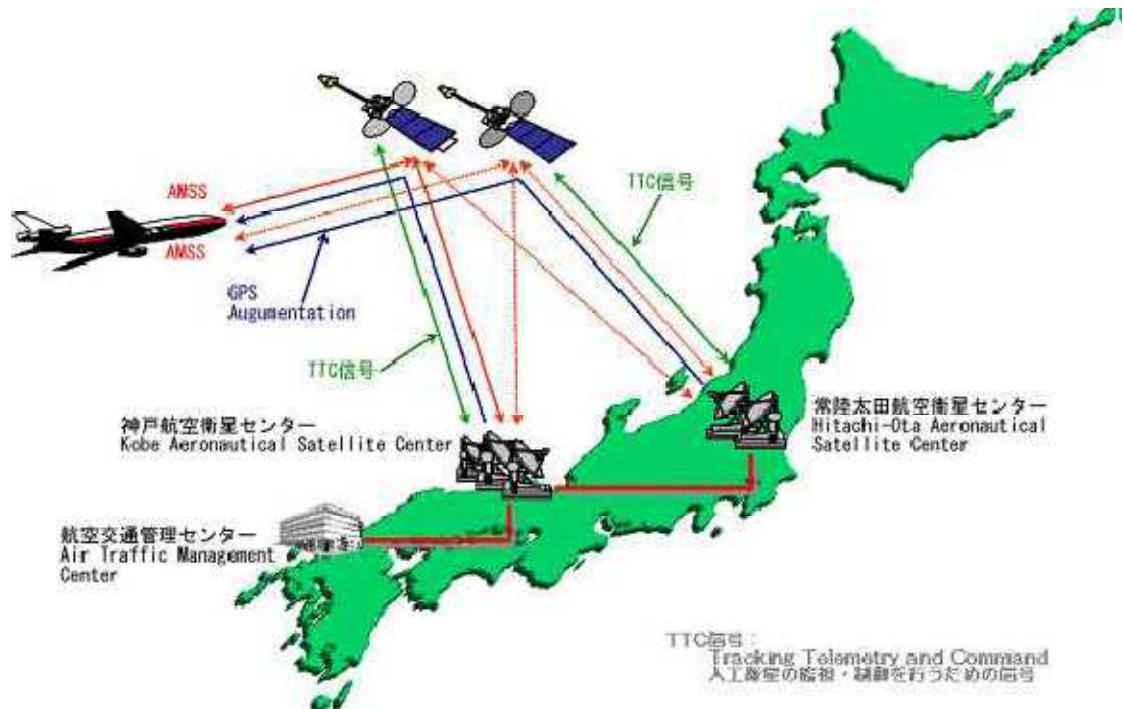


図 2-2 MSAS システム概要図

MSAS は、国際民間航空機関( ICAO: International Civil Aviation Organization )の国際標準に規定されている静止衛星型衛星航法補強システム ( SBAS: Satellite Based Augmentation System ) に準拠した測位システムである。MSAS から放送される補正情報は国際標準フォーマットに準じており、同様に SBAS に準じたシステムである米国の WAAS、欧州の EGNOS などと同じ受信機で受信することが出来る。また、GPS 受信機と同じ回路を使用して測位計算が可能であるため、ソフトウェアの書き換えのみで新たなハードがいらぬといった利点もある。MSAS で使用している運輸多目的衛星(MTSAT : Multi-functional Transport Satellite)は、そもそも航空機用に導入された静止衛星で、近年特に交通量が急増している北太平洋ルートをはじめとするアジア太平洋地域の交通容量拡大と安全性向上のために設置されたシステムである。衛星は静止衛星であるため観測には仰角が 40 ~ 45 度程度必要となる。MTSAT のカバー範囲は図 2-3 に示すように日本を中心とするアジア・オセアニア地域であるが、衛星から送信できるデータ量に限りがあるため MSAS サービスエリアは限られた地域内となる。それでも、ビーコン DGPS(局から半径約 200km)と比べて広域で使用可能である。現在 MSAS が放送している補正情報のサービス範囲は、北緯 5 ~ 65 度、東経 105 ~ 170 度程度で、北太平洋を中心とした日本周辺となっている

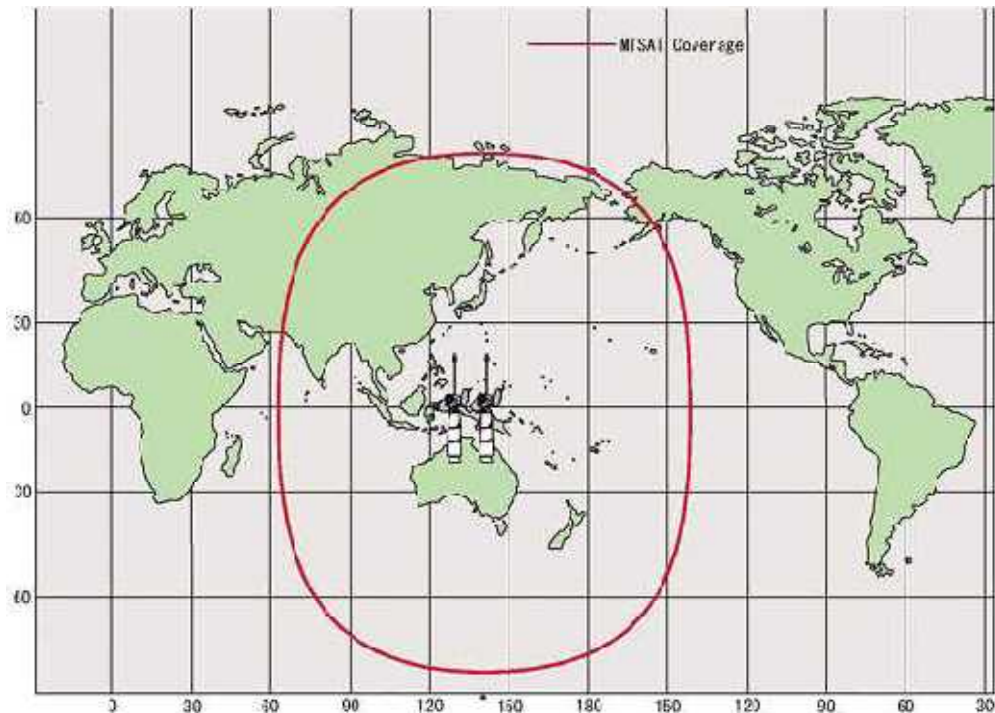


図 2-3 MTSAT カバー範囲

### 2.3.2 MSAS 補正值

MSAS メッセージは測位に使用する補正值だけでなく、衛星の状態を示すメッセージなど補正に必要な各種情報も放送されている。その種類は大きく三つに分けられる。

- 1) 広域 DGPS 補正情報：GPS 信号の補正值。衛星軌道や時計、電離層などの補正情報
- 2) 測距機能：GPS 信号と同様の測位信号。WAAS 衛星を GPS 衛星と同様に測位に使用できる
- 3) インテグリティ：GPS 信号の異常情報

表 2-1 に詳しいメッセージの内容を示す。これらのメッセージナンバーは SBAS に準拠している。主な DGPS 用補正值は、メッセージ 2-5 の高速補正、メッセージ 24 の高速/長期補正、メッセージ 25 の長期補正とメッセージ 26 の電離層補正である。高速補正は衛星時計の変化の早い成分（SA 等）、長期補正は衛星軌道と衛星時計の変化の遅い成分を配信している。対流圏補正はモデルで行っている。

表 2-1 SBAS (MSAS) メッセージ内容

タイプ	内容	タイプ	内容
0	テストモード	17	GEO アルマナック
1	PRN マスク情報	18	IGP マスク情報
2-5	高速補正	24	高速/長期補正
6	インテグリティ情報	25	長期補正
7	高速補正劣化係数	26	電離層補正
9	GEO エフェメリス	27	SBAS サービス情報
10	劣化パラメータ	28	クロックエフェメリス共分散
12	SBAS 時刻	63	NULL メッセージ

GPS 衛星の補正には、これらのデータを用いて計算する。衛星軌道誤差と衛星時計誤差は、長期補正で得られた補正值（軌道誤差と時計誤差）を GPS 衛星の航法メッセージで得られた値にそれぞれ加算して使用する。電離層遅延、高速補正及び対流圏遅延は、得られた補正值を擬似距離に加算する。

## 2.4 RAIM

RAIM(receiver autonomous integrity monitoring)とは 1990 年代から使われている古典的なインテグリティ方式である。機能としては各測位衛星に関する距離情報の整合性を検査することで観測値の異常を検出するものである。利用には冗長な衛星が必要であり、5 機以上の衛星が利用可能でなければならない。また FDE(Fault Detection and Exclusion)機能というものもある。これは異常が認められた観測値を特定した際、これを測位に使用する衛星から除外する機能である。ここでは多くの RAIM 手法の中で最もオーソドックスな手法である Least-Squares-Residuals Method について紹介する。

### ・ Least-Squares-Residuals Method

この方法は名前の通り最小二乗解をもとに観測値の検定を行う。 $\hat{x}_{LS}$  を推定最小二乗解、推定される観測位置と受信機クロックバイアスにより予想される擬似距離と実際の擬似距離観測値の差分を  $y$  とすると、2.2.2 項より最小二乗解は

$$\hat{x}_{LS} = (H^T H)^{-1} H^T y \quad (2.17)$$

と表せる。式(2.12)より、

$$(\text{predicted } y) = H\hat{x}_L \quad (2.18)$$

となり、推定最小二乗解から予想される擬似距離修正量、 $(\text{predicted } y)$ が求められる。これと実際の擬似距離修正量  $y$  の差分を  $w$  とすると、 $w$  は

$$w = y - (\text{predicted } y) = [I - H(H^T H)^{-1} H^T] y \quad (2.19)$$

と表せる。この  $w$  の二乗和は一般的に SSE(sum of squared errors) と呼ばれている。

$$SSE = w^T w \quad (2.20)$$

この SSE 値に閾値を設定し異常観測値の検知を行うことができる。

異常衛星を探知するためには通常衛星 5 機以上あれば可能である。例えば衛星が 5 機見えていたとする。測位は可視衛星が 4 機あればできるので、5 通りの測位解を得ることができる。5 つの測位解において SSE 値を求め閾値を超えた場合異常と判断する。例として仮に図 2 - 4 のような結果となったとする。数字は衛星番号を表す。1, 2, 3, 4 番衛星で測位した際 SSE 判定は正常であるが 5 番衛星を含む組み合わせは異常となっている。よって 5 番衛星に異常が発生していることが検知できることが分かる。このように受信機側で異常衛星を検知排除することで測位解の信頼性を高めることが可能である。

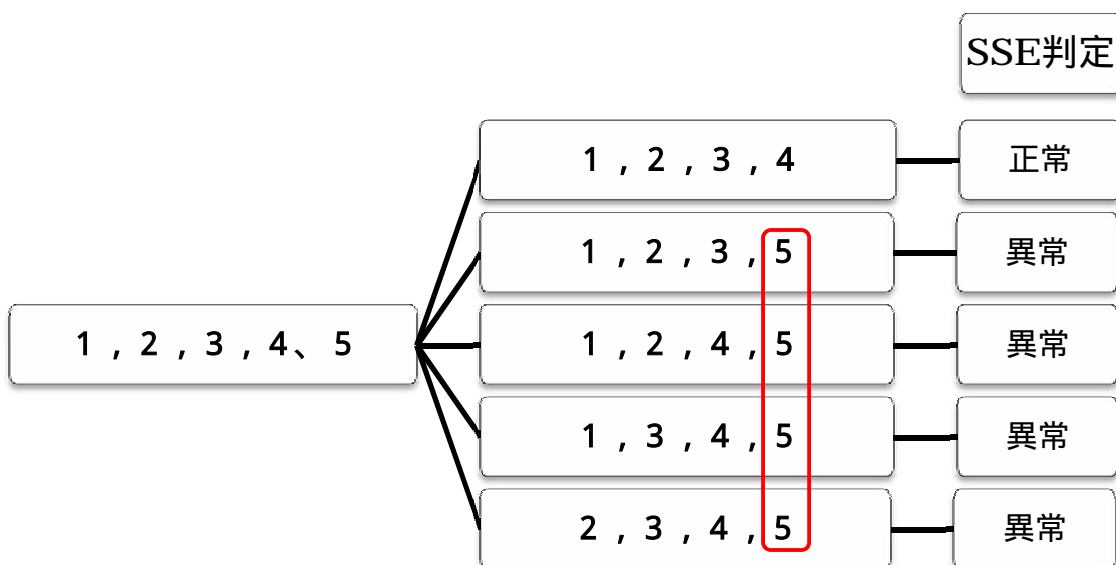


図 2 - 4 Least-Squares-Residuals Method による異常衛星検知例

## 第3章 3次元線路座標マップを利用した測位計算手法

### 3.1 はじめに

本研究で提案する測位手法は1周波観測値を使用することを前提としている本章では3次元線路マップを利用した測位計算手法を提案し、その性能評価を行う。実際の鉄道を用いて評価するべきであるが、列車の安全管理等様々な問題があり事実上無理である。よって東京都国分寺市にある財団法人鉄道総合技術研究所の国立研究所内にある試験線で実際に車両を走らせ評価を行う。試験線について下図に示す。赤い軌跡が列車の走行する線路で全長約620mである。



図3-1 鉄道総研国立研究所内試験線

### 3.2 計算手法概要

本節では3次元線路マップを利用した測位計算手法について簡単に説明し、その手順を示す。

列車というのは当然線路の上を走り、事故でも起こらない限りそれ以外の場所を走ることではない。この前提からもし線路の正確な絶対座標を詳細に得ることができれば、隣接する座標同士を直線でむすんだ軌跡上に列車は必ず存在すると仮定できる。よって列車が、

1. どの座標間に存在するか(区間検索)
2. またその座標からどの程度離れているか(1次元拘束条件付き測位)

が分かれば列車の位置を特定できることになる。以降、各節で詳しく示す。

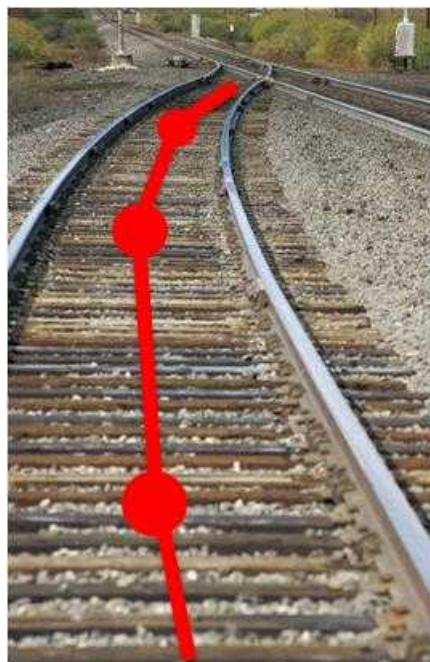


図3-2 3次元線路座標イメージ図  
(赤丸：3次元座標)

### 3.3 3次元線路マップ

測位計算で利用する3次元マップには当然のことながら高い精度が要求される。本研究で評価に利用する試験線の3次元座標マップ及び推定アンテナ軌跡座標列は鉄道総研によって作成されたものである。

作成された3次元座標マップはGPS測量によって求めた基準点座標とTS(トータルステーション)による細部測量および線路の線形情報等のデータをもとに作成されている(図3-3、3-4)。試験線における実際に測位に使用する際は3次元座標マップをもとに車輦の屋根上部に設置された衛星受信アンテナの軌跡を推定したものである。推定アンテナ軌跡座標は詳細な線路情報を用い車輦の傾き等を考慮して推定されており、高い精度が期待できる。推定アンテナ座標列に関する情報は表3-1に示す。今回利便上、推定アンテナ座標に番号を割り振る。割り振り方は図3-5の から矢印の方向に順に割り振るものとする。



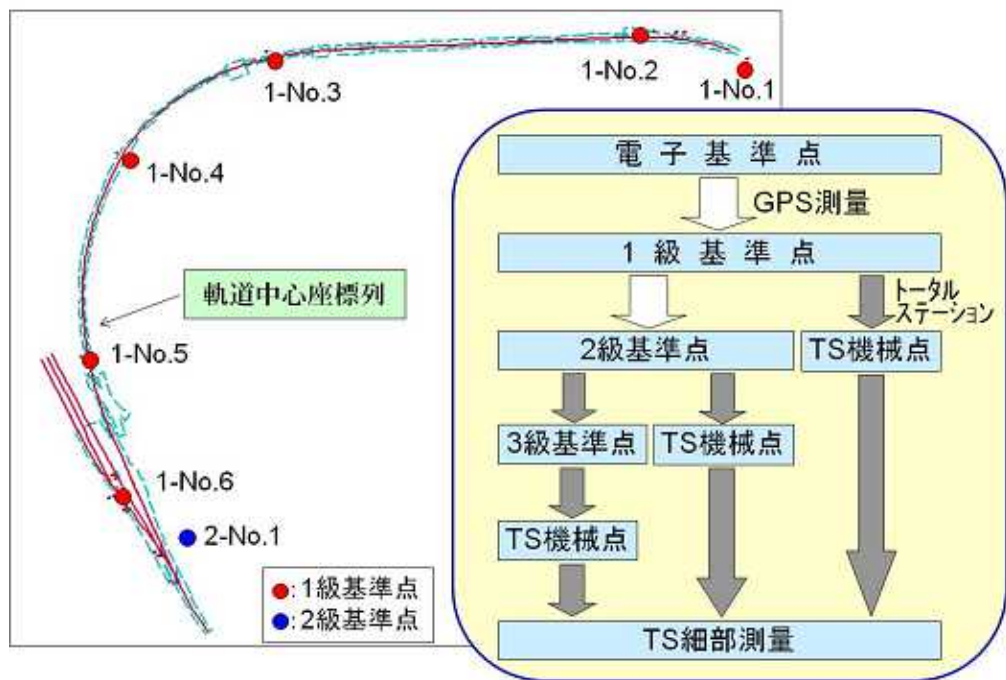


図 3 - 3 試験線データ作成概要及び基準点配置図

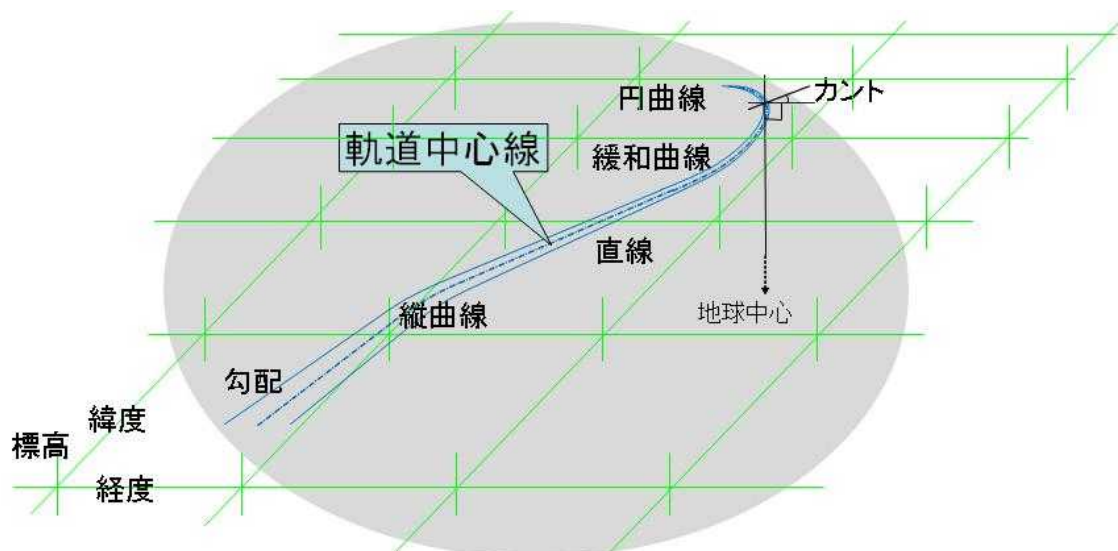


図 3 - 4 線路情報イメージ

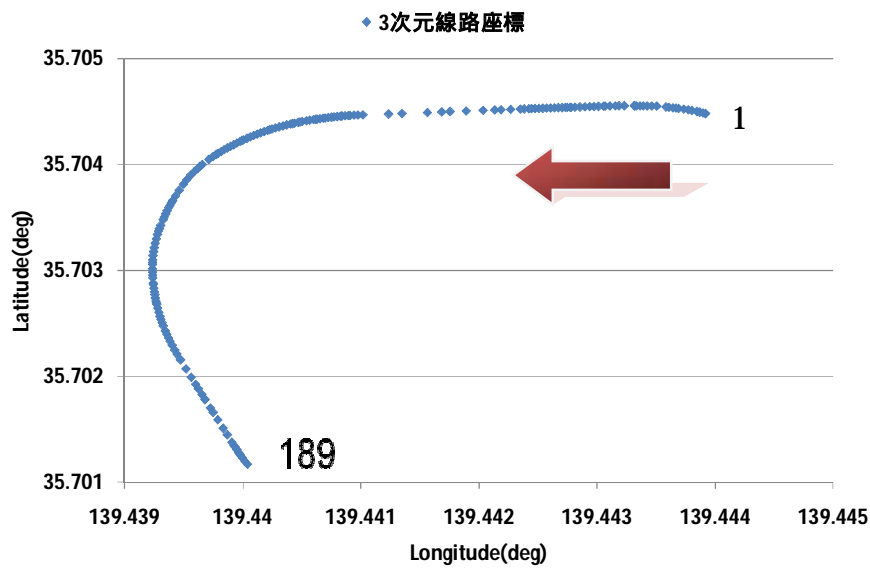


図 3 - 5 推定アンテナ軌跡座標マップ

線路長	約 756m
座標数	189 個
座標間隔 ( 曲線区間 )	約 2 ~ 3m
座標間隔 ( 直線区間 )	最長約 20m

表 3 - 1 試験線及び推定アンテナ座標列情報

### 3.4 区間検索方法

本節では列車がどの座標間にいるか検索する手法について示す。具体的には観測値と座標点における疑似距離衛星間 1 重差の残差 2 乗和を求めることで検索する。衛星位置と線路座標が既知であるので、衛星から線路の座標までの距離と観測値を比べ、もっとも残差の小さいものが観測点に近いと予想される。ここで問題になるのが受信機クロック誤差である。疑似距離の誤差項である衛星時計誤差、対流圏遅延、電離圏遅延は予測することが可能であるが、受信機クロック誤差予測不可能である。これを解消するため、衛星間 1 重差を利用する。

・ 衛星間 1 重差

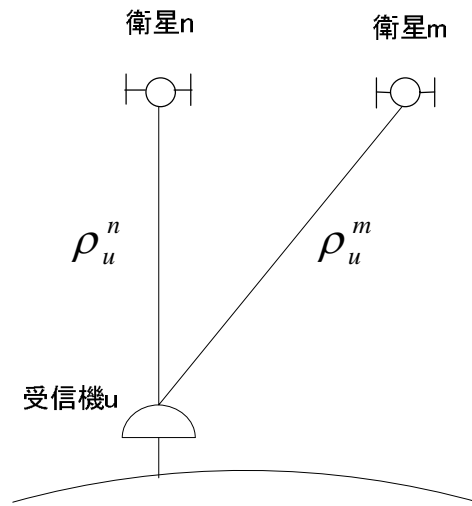


図 3-6 : 衛星間 1 重差

1 個の受信機で同時刻に測定した GPS 衛星 2 機の擬似距離の差を取った値を衛星間 1 重差と言う。例えば利用者側の受信機で n 番衛星と m 番衛星のコード擬似距離を測定したとすると、衛星間 1 重差は

$$\begin{aligned}
 P_u^{n-m} &= P_u^n - P_u^m \\
 &= (\rho_u^n - \rho_u^m) - (I_u^n - I_u^m) + (T_u^n - T_u^m) \\
 &\quad + c\{(\delta t_u - \delta t_u) - (\delta t^n - \delta t^m)\} + (\varepsilon_u^n - \varepsilon_u^m) \\
 &= \rho_u^{n-m} - I_u^{n-m} + T_u^{n-m} + c\delta t^{n-m} + \varepsilon_u^{n-m}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

で表される。 $\rho$ は衛星-移動局間の正確な距離(m)、 $I$ は L1 帯の電離層遅延量(m)、 $T$ は L1 帯の対流圏遅延量(m)、 $\delta t$  は受信機の時計誤差(s)、 $\delta t$  は衛星の時計誤差(s)、

$\varepsilon$ はマルチパス等の誤差(cycle)である。ここで添え字の  $u$  は移動局における値であることを示す。式(3.1)から衛星間 1 重差では受信機の時計誤差の項が相殺できることが分かる。

よって衛星 座標点間と観測値の衛星間 1 重差の残差から観測点の位置を検索することができる。 $W$ を衛星 座標点間と観測値の衛星間 1 重差の残差とすると

$$W_i = \begin{pmatrix} (P^2 - P^1) - ((\rho_i^2 - c\delta t^2 + T^2 + I^2) - (\rho_i^1 - c\delta t^1 + T^1 + I^1)) \\ (P^3 - P^1) - ((\rho_i^3 - c\delta t^3 + T^3 + I^3) - (\rho_i^1 - c\delta t^1 + T^1 + I^1)) \\ \vdots \\ (P^m - P^1) - ((\rho_i^m - c\delta t^m + T^m + I^m) - (\rho_i^1 - c\delta t^1 + T^1 + I^1)) \end{pmatrix} \tag{3.2}$$

と表せる。実際には残差の2乗和を求め、それが最小となる座標点を検索する。

### 3.5 1次元拘束条件付き測位手法

本節では前節で求めた座標間をもとに、拘束条件付き測位を行う。拘束条件は列車が座標間の線分上にのみ存在するということである。

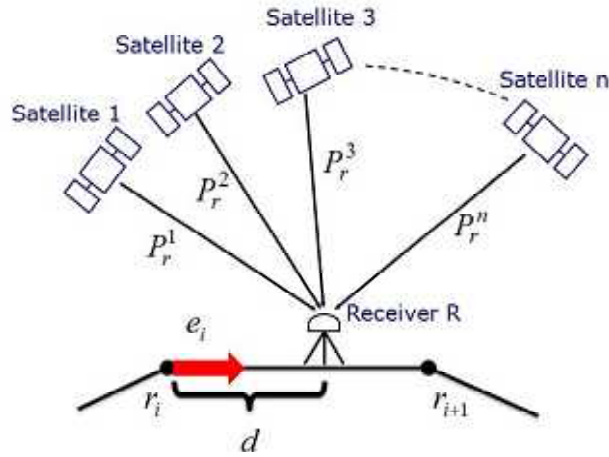


図 3 - 7 拘束条件下での列車の関係図

図 3 - 7 より列車の位置を  $R$ 、座標点を  $r_i$ 、 $r_{i+1}$ 、また  $r_i$  からの距離を  $d$  とすると、単位ベクトル  $e_i$  は

$$e_i = \frac{r_{i+1} - r_i}{|r_{i+1} - r_i|} \quad (3.3)$$

となり  $R$  は

$$R = r_i + de_i \quad (3.4)$$

と表せる。後はこれを用いて  $R$  と受信機クロック誤差を最小二乗法によって推定することによって測位することが可能である。その際、擬似距離観測モデルを少し変形させる必要がある。図 3 - 8 より、幾何学距離  $\rho_R^s$  は

$$\begin{aligned} \rho_R^s &\approx \rho_i^s + d \cos \theta \\ &= \rho_i^s + d \frac{e_i^T (r_i - r^s)}{\rho_i^s} \end{aligned} \quad (3.5)$$

と変形できる。よって擬似距離観測モデルは

$$\begin{aligned} P^s &= \rho_R^s + c\delta t_R - c\delta t^s + I_R^s + T_R^s + \varepsilon \\ &= \rho_i^s + d \frac{e_i^T (r_i - r^s)}{\rho_i^s} + c\delta t_R - c\delta t^s + I_R^s + T_R^s + \varepsilon \end{aligned} \quad (3.6)$$

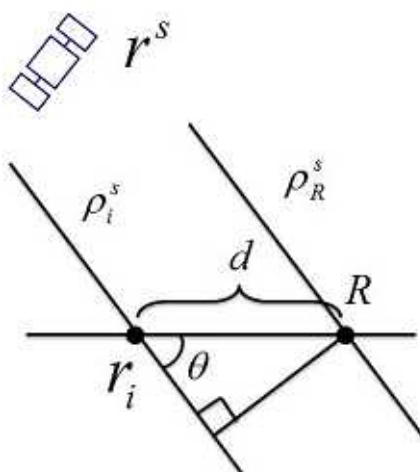


図 3 - 8 列車の幾何学的関係

と表せる。以下に最小二乗法による解法の手順を示す。取り扱いを簡単にするため方程式を行列式により表現する。観測モデルを

$$h(x) = \begin{pmatrix} \rho_i^1 + d \frac{e_i^T (r_i - r^1)}{\rho_i^1} + c\delta t_R - c\delta t^1 + I_R^1 + T_R^1 + \varepsilon_R^1 \\ \rho_i^2 + d \frac{e_i^T (r_i - r^2)}{\rho_i^2} + c\delta t_R - c\delta t^2 + I_R^2 + T_R^2 + \varepsilon_R^2 \\ \vdots \\ \rho_i^m + d \frac{e_i^T (r_i - r^m)}{\rho_i^m} + c\delta t_R - c\delta t^m + I_R^m + T_R^m + \varepsilon_R^m \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

とする。未知パラメータを  $x = (d \quad \delta t_R)^T$  とすると観測モデルによる未知パラメータへの係数を表した計画行列  $H$  は

$$H = \begin{pmatrix} \frac{e_i^T (r_i - r^1)}{\rho_i^1} & 1 \\ \frac{e_i^T (r_i - r^2)}{\rho_i^2} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{e_i^T (r_i - r^n)}{\rho_i^n} & 1 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

となる。観測値を  $y = (P^1 \quad P^2 \quad \dots \quad P^n)^T$ 、初期値  $x_0 = (0 \quad 0)^T$  とすると未知パラメータ  $x$  の最小 2 乗推定値  $\hat{x}$  は 2.2.2 節より以下に式で求めることができる。

$$\hat{x} = x_0 + (H^T H)^{-1} H^T (y - h(x_0)) \quad (3.9)$$

ここで求めた  $r$  からの距離  $d$  の値は拘束条件により、 $0 \leq d \leq |r_{i+1} - r_i|$  の範囲となる。

### 3.6 拘束条件付き測位における DOP

前節および 2.2.3 節より、擬似距離に小さな変動  $\Delta d$  があつた際、座標  $r \sim$  受信機間の距離  $d$  に与える影響  $\Delta r$  は

$$\Delta \bar{x} = (H^T H)^{-1} H^T \Delta \bar{y} \quad (3.10)$$

となる。 $\Delta d$  と  $\Delta r$  の共分散行列をそれぞれ  $\text{cov}(\Delta d)$  及び  $\text{cov}(\Delta r)$  とすると、誤差伝搬の法則により、これらの間には

$$\text{cov}(\Delta \bar{x}) = [(H^T H)^{-1} H^T] \cdot \text{cov}(\Delta \bar{y}) \cdot [(H^T H)^{-1} H^T]^T \quad (3.11)$$

の関係がある。全ての衛星の擬似距離の測定精度が等しく、標準偏差が  $\sigma$  とすると

$$\text{cov}(\Delta \bar{x}) = [(H^T H)^{-1} H^T] \cdot \sigma^2 I \cdot [(H^T H)^{-1} H^T]^T = \sigma^2 \cdot (H^T H)^{-1} \quad (3.12)$$

となるため、 $C = (H^T H)^{-1}$  とすると対角成分の平方根は

$$\sigma_d = \sigma \sqrt{C_{11}}, \quad \sigma_s = \sigma \sqrt{C_{22}} \quad (3.13)$$

となる。ここで  $\sigma$  は座標  $r$  から単位ベクトル  $\hat{u}$  方向への誤差分布を表す。 $\hat{u}$  は 3 次元ベクトルであるので  $\overline{C}$  は PDOP に相当する。よって 3 次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位における DOP を次のように定義する。

$$\begin{aligned} \overline{DOP} &= \sqrt{\overline{C} + \overline{C}} \\ \overline{DOP} &= \sqrt{\overline{C}} \\ \overline{DOP} &= \overline{C} \end{aligned} \quad (3.14)$$

### 3.7 静止点観測による新測位手法評価実験

本節では先述した区間検索手法及び1次元拘束条件付き測位手法について静止点観測データを用いて動作確認を行い、測位性能を評価する。

#### 3.7.1 評価手法及び実験概要

本節では3次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位の測位能力の検証を行う。測位能力に関する評価項目は以下の3点である。

区間検索能力検証

3衛星及び2衛星での動作検証

衛星仰角マスクを変化させて単独測位との性能を比較

は区間検索が正常に行うことができるか検証する。観測衛星数の違いにより検索性能に影響することが考えられる。よって衛星仰角マスクを変化させることで観測衛星数を絞り区間検索能力を評価する。では新たに提案する測位手法で3衛星及び2衛星で測位することが可能であるか、またどの程度の測位能力であるのかを検証する。測位に使用する衛星が少ないために、衛星配置による影響を大きく受けることが考えられる。よって様々な衛星配置を想定しどのような影響が出るか検証する。では単独測位と測位率及び測位精度を比較し評価する。観測衛星数の違いが測位性能に影響することが考えられるため衛星仰角マスクを変化させ、マスク角ごとの測位率及び測位精度を比較する。今回使用する静止点観測データは列車屋根上部にアンテナを設置し(図3-9)、試験線路上に停車して観測を行った。停車位置は図3-10の示す位置である。観測点位置は後処理基線解析により求めている。

～ に共通する実験環境を表3-2に示す。



図3 - 9 車輦屋根上のアンテナの設置状況

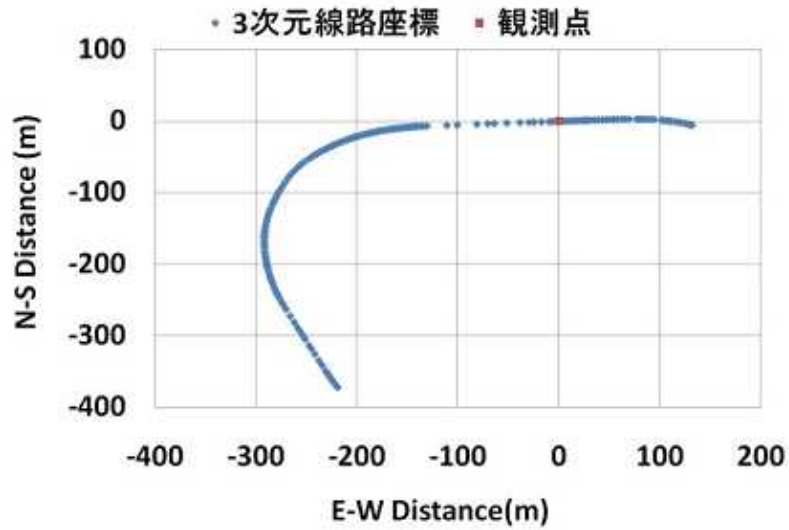


図3 - 10 観測点（列車停止位置）

表3 - 2 共通実験環境

共通実験環境	
計測時間	2010/8/19 02:45:00~04:45:00 (GPSTIME)
Interval	1 s
受信機	NovAtel OEM4
アンテナ	NovAtel GPS702



### 3.7.2 区間検索能力検証実験

#### 3.7.2.1 実験詳細

ここでは区間検索の動作確認および検索能力を検証する。観測値数の違いによる検索能力を評価するため、衛星仰角マスクを10、20、30、40度の4通りに変化させて区間検索を行った。後処理基線解析によって求めた観測点と3次元線路マップの位置関係は図3-11で示す。図3-11は観測点を原点としている。観測点は座標45番と46番の間にあり、やや45番よりの位置である。よって検索結果として45番の座標番号を検索成功とする。

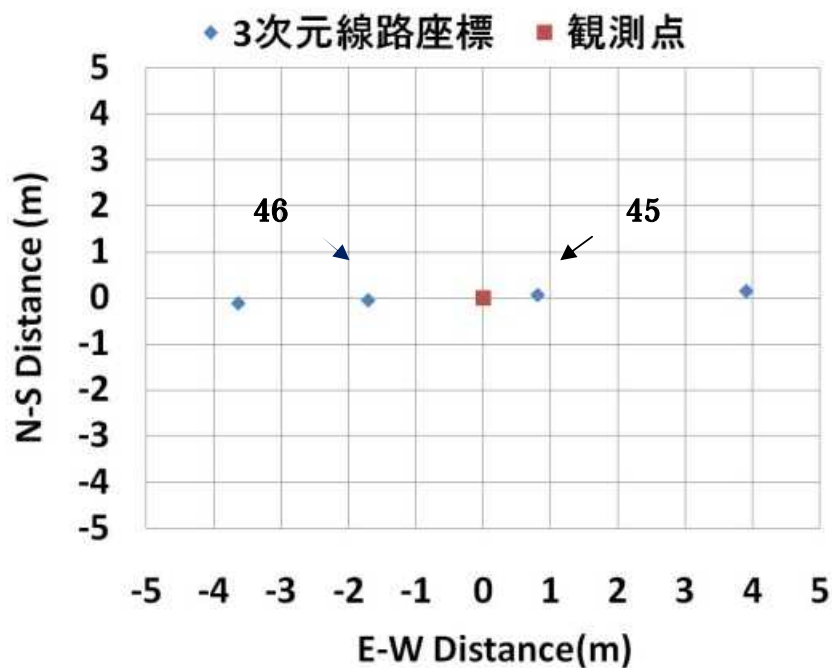


図3-11 3次元線路座標の位置

#### 3.7.2.2 実験結果

図3-12に検索成功例として1エポックにおける座標ごとの衛星座標点間と観測値の衛星1重差の残差2乗和を示す。図3-12を見ると観測点に最も近い座標45の残差2乗和が最も小さくなっており、観測点の検索が成功していることが分かる。次に2時間分の観測データから検索の成功率を検証する。変化させたマスク角ごとの観測結果を図3-13に、検索結果の成功率を表3-3に示す。また図3-14に各衛星仰角マスクにおける衛星数、PDOPの時間変化を示す。

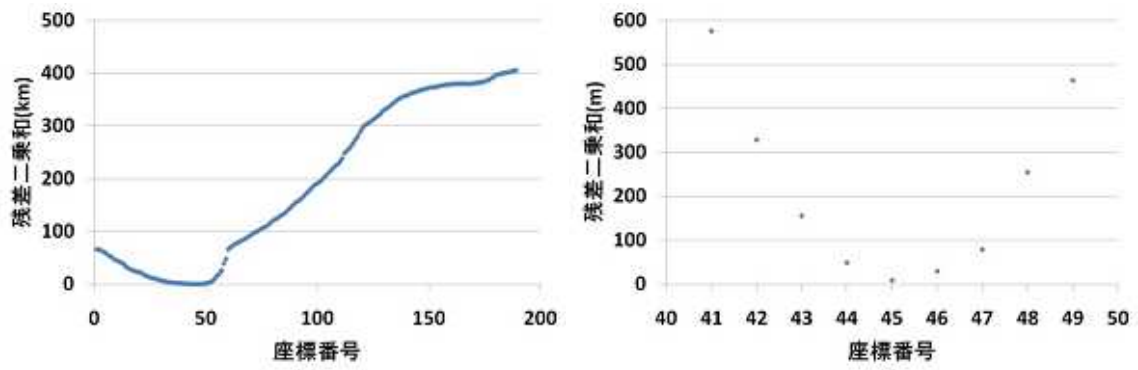


図3 - 1 2 座標ごとの衛星 座標点間と観測値の衛星間1重差の残差2乗和  
(右は観測点付近の拡大図)

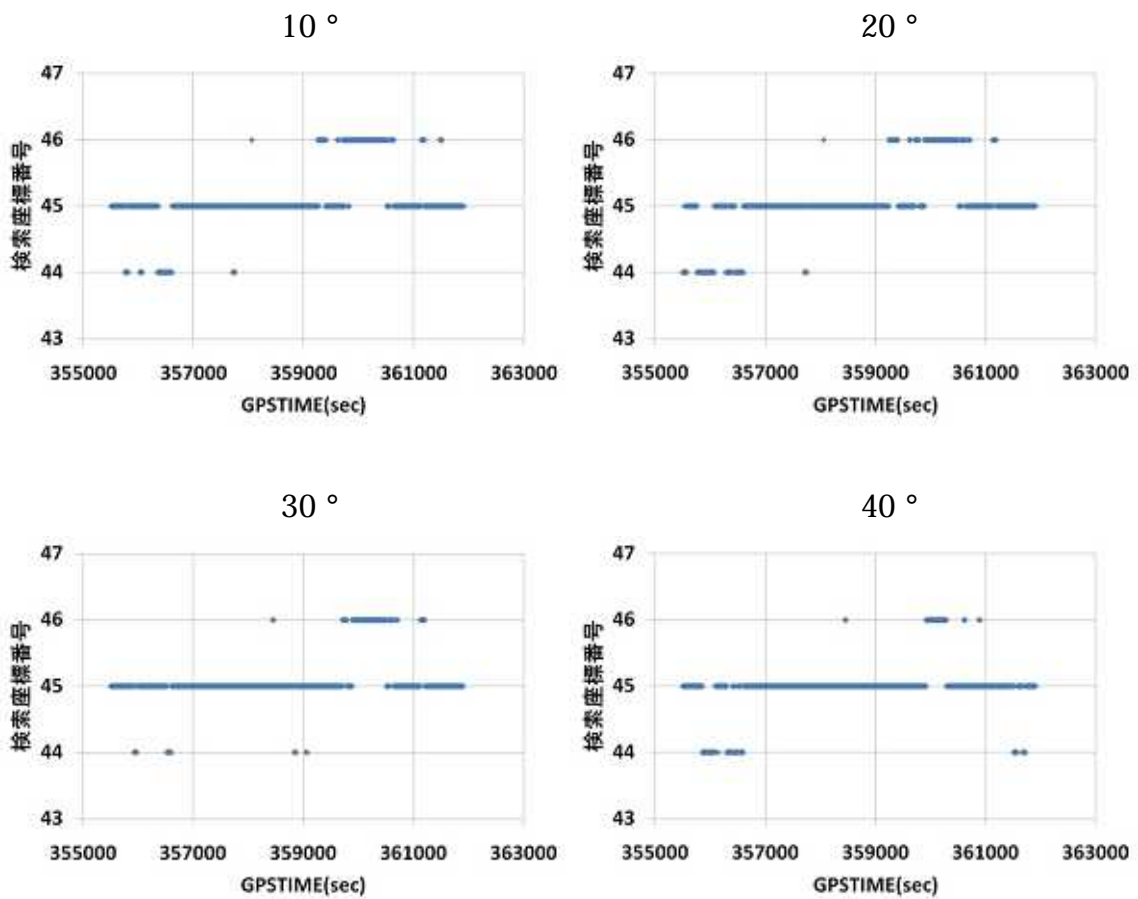


図3 - 1 3 衛星仰角マスクの異なる観測点検索結果

表 3 - 3 検索結果割合

Mask 角	検索番号			TOTAL
	44	45	46	
10	5.2%	73%	21.8%	100%
20	9.2%	69.8%	21%	100%
30	2.4%	77.5%	20.1%	100%
40	7.7%	84.6%	7.7%	100%

■ 衛星数 ■ PDOP

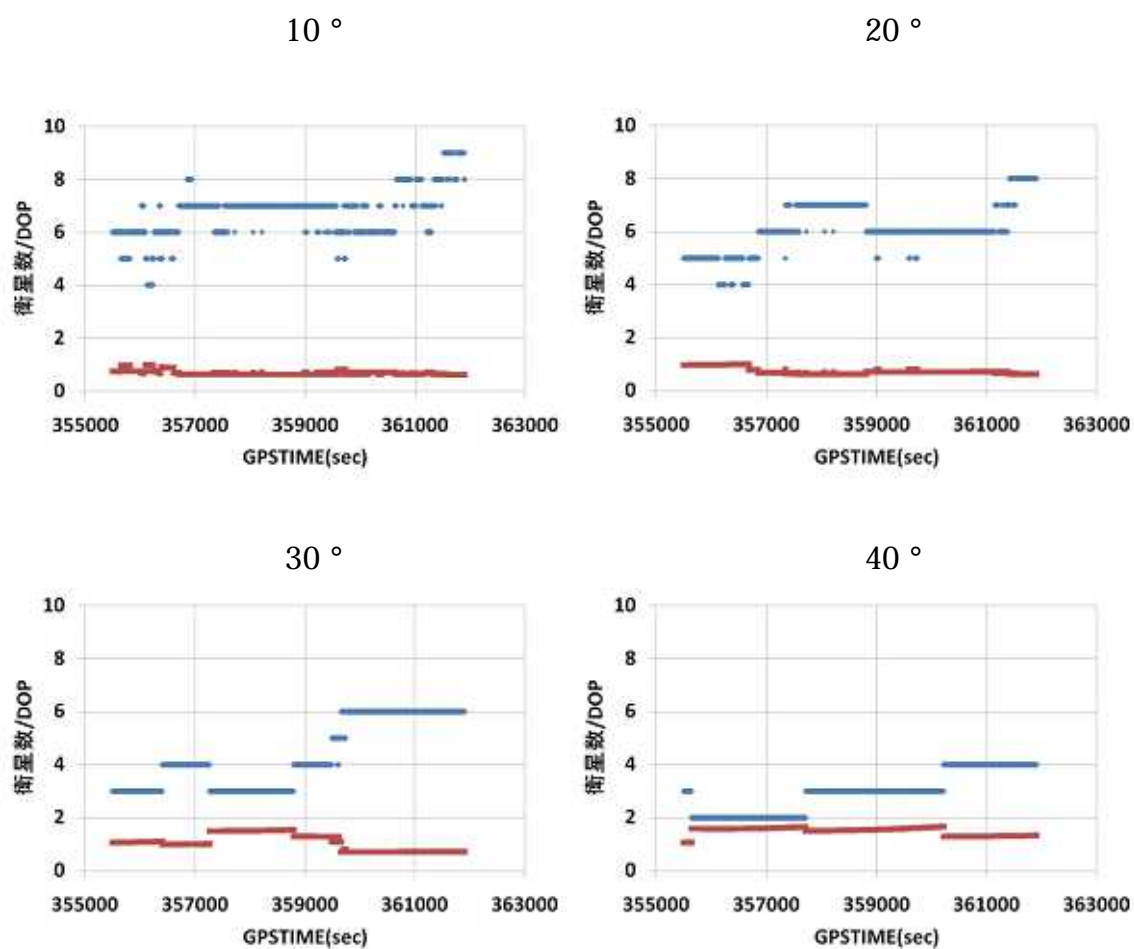


図 3 - 1 4 各衛星仰角マスクにおける衛星数、PDOP の時間変化

### 3.7.3 3衛星及び2衛星での動作検証実験

#### 3.7.3.1 実験詳細

3衛星及び2衛星での測位能力を検証する。本測位手法を使うことにより3衛星及び2衛星での測位が可能となれば単独測位手法よりも高いアベイラビリティを得ることができると予想できる。しかしながら測位に使用する衛星が減るとということは衛星配置の影響をより多く受けることが予想される。よって本実験では様々な衛星配置をシミュレートし、本手法における2,3衛星測位時の衛星配置の依存性について評価する。可視衛星2,3衛星での測位を必要とする環境は高いビル街などの悪条件下と考えられるため今回の実験では、静止観測データにおいて高仰角に位置する3衛星及び2衛星を選択し測位し測位率、測位精度によって評価する。使用する観測データは静止点観測データで衛星仰角マスク30度において6衛星を観測できる時間帯50分のデータを抽出し使用する。抽出した観測データの衛星配置を図3-15に示す。衛星配置の依存性を示すために、使用する観測データから測位に使用する衛星の組み合わせを3衛星測位実験では20通り、2衛星測位実験では15通りの衛星配置をシミュレートする。

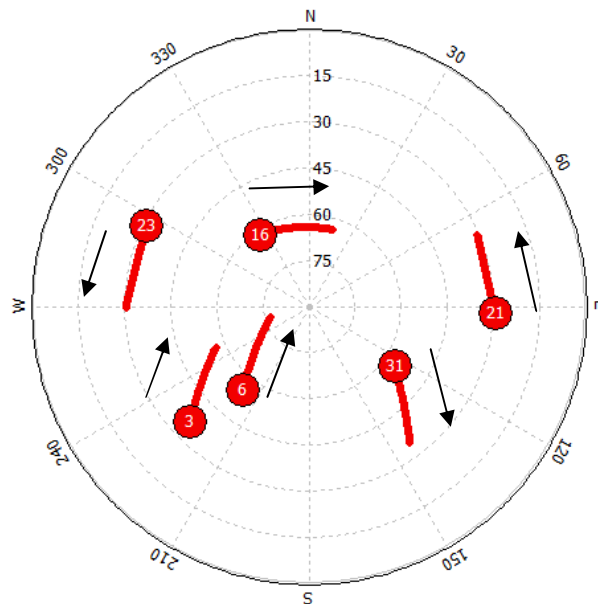


図3-15 衛星仰角マスク30度における衛星配置

#### 3.7.3.2 実験結果

##### ・3衛星測位実験結果

表3-4に各衛星の組み合わせごとの平均PDOPと水平位置誤差の標準偏差を記す。また図3-16に水平位置誤差とPDOPのプロット図を示す。測位率に関してはそれぞれ100%である。本実験でシミュレートした全ての衛星の組み合わせで3衛星測位を行うことができることを確認した。図3-16からPDOP3を超え

たあたりから位置誤差が大きく上昇している。

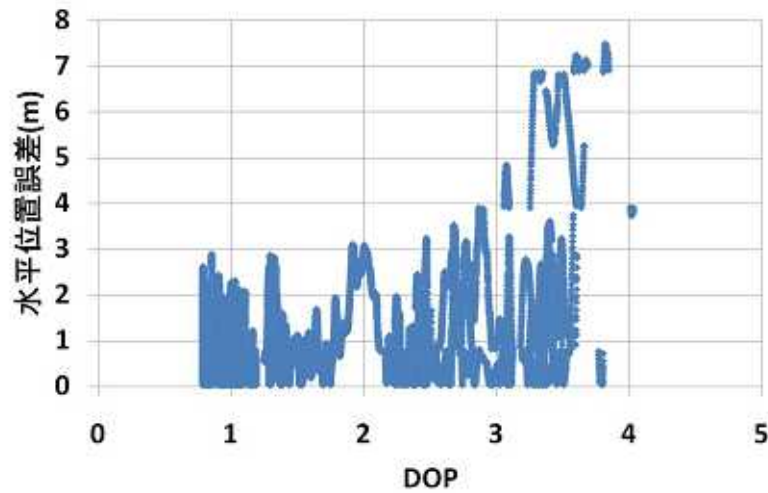


図3 - 16 水平位置誤差とPDOPのプロット

表3 - 4 3衛星測位の平均PDOPと水平位置誤差の平均値及び標準偏差

衛星組み合わせ			平均PDOP	水平位置誤差	
				平均値(m)	標準偏差(m)
3	6	16	2.821	1.928	1.655
3	6	21	0.942	0.692	0.859
3	6	23	2.867	1.09	1.422
3	6	31	1.325	0.59	0.881
3	16	21	0.988	0.696	0.793
3	16	23	1.907	1.199	1.105
3	16	31	1.370	0.583	0.868
3	21	23	0.792	0.606	0.788
3	21	31	0.971	0.461	0.638
3	23	31	1.048	0.526	0.833
6	16	21	1.170	0.733	1.169
6	16	23	1.911	0.955	0.971
6	16	31	1.802	0.776	0.969
6	21	23	0.834	0.613	0.897
6	21	31	1.207	0.474	0.750
6	23	31	1.105	0.568	0.748
16	21	23	0.851	0.626	0.892
16	21	31	1.605	0.848	1.312
16	23	31	1.103	0.552	0.716
21	23	31	0.819	0.456	0.621

・ 2 衛星測位実験結果

表 3 - 5 に各衛星の組み合わせごとの平均 PDOP と水平位置誤差の標準偏差を記す。測位率に関してはそれぞれ 100% である。表 3 - 5 を見ると組み合わせ番号、 、 、 において水平位置誤差が大きく上昇していることが分かる。この組み合わせ時の衛星配置、測位結果、PDOP、水平位置誤差の時間変化、区間検索結果、検索失敗時の衛星座標点間と観測値の衛星 1 重差の残差二乗和を図 3 - 17 ~ 20 に示す。図 3 - 17 ~ 20 を見ると区間検索を失敗していることが分かる。検索が失敗している原因として衛星座標点間と観測値の衛星 1 重差の残差二乗和の極小値が線路座標列上に 2 点存在しており、そのため区間検索に曖昧性が出ているためと考えられる。

衛星組み合わせ		平均 PDOP	水平位置誤差	
NO	PRN 番号		平均値(m)	標準偏差(m)
	3 6	5.49	3.075	2.073
	3 16	2.83	1.693	1.942
	3 21	1	0.797	0.7
	3 23	5.71	59.475	124.703
	3 31	1.38	1.003	0.643
	6 16	6.14	2.470	2.315
	6 21	1.23	1.158	0.688
	6 23	2.74	48.796	122.963
	6 31	1.84	16.014	77.254
	16 21	1.61	1.742	1.021
	16 23	1.95	0.936	0.935
	16 31	2.66	62.179	131.2237
	21 23	0.86	0.837	0.583
	21 31	3.67	4.616	2.157
	23 31	1.12	0.850	0.519

表 3 - 5 2 衛星測位の平均 PDOP と水平位置誤差の標準偏差

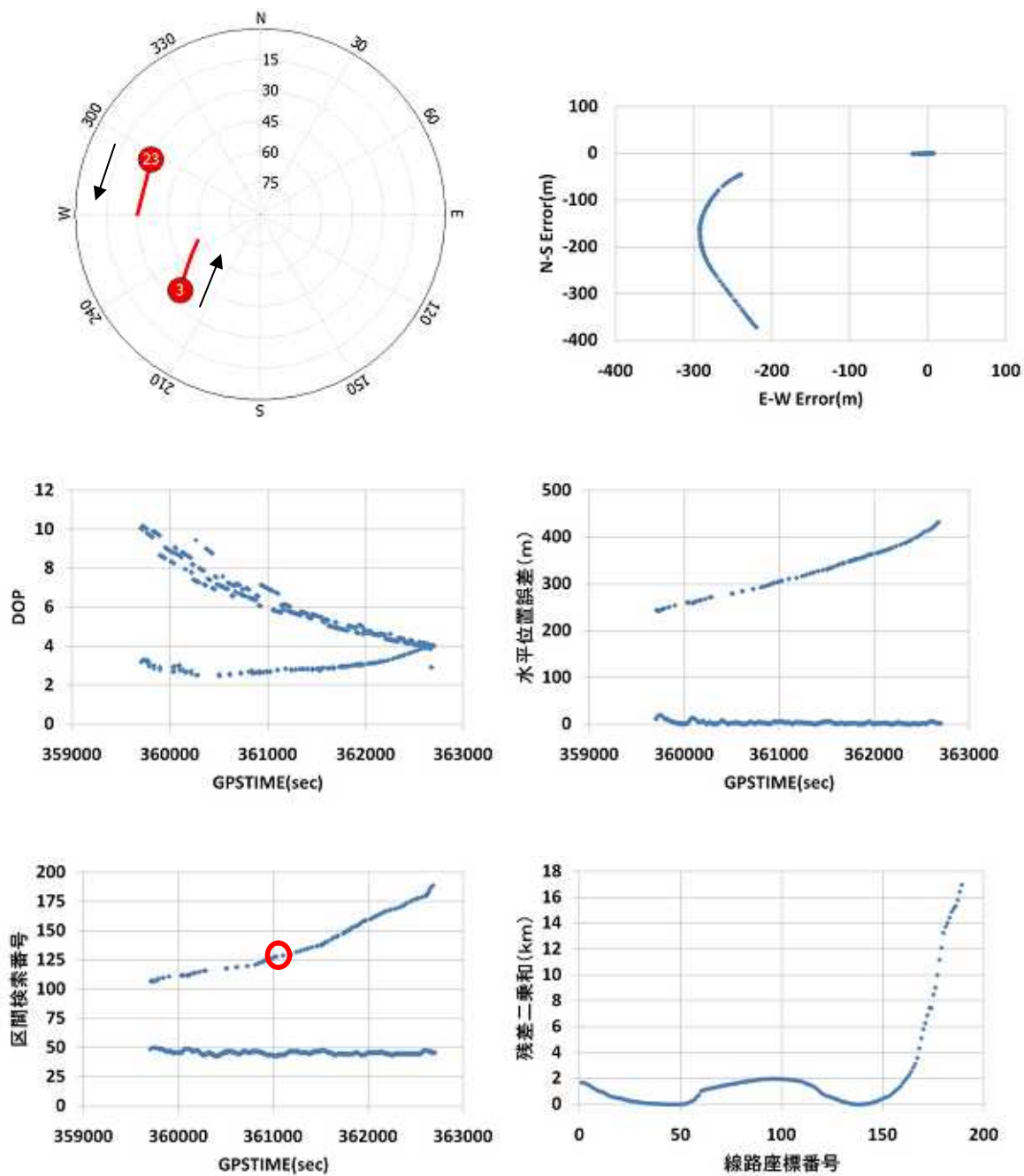


図3 - 17 PRN 番号 3、23 衛星測位時の観測結果

左上：衛星配置図 右上：水平方向測位誤差

左中：PDOP 時間変化 右中：水平位置誤差の時間変化

左下：区間検索結果

右下：検索失敗時(○)の衛星 座標点間と観測値の衛星 1 重差の残差二乗和

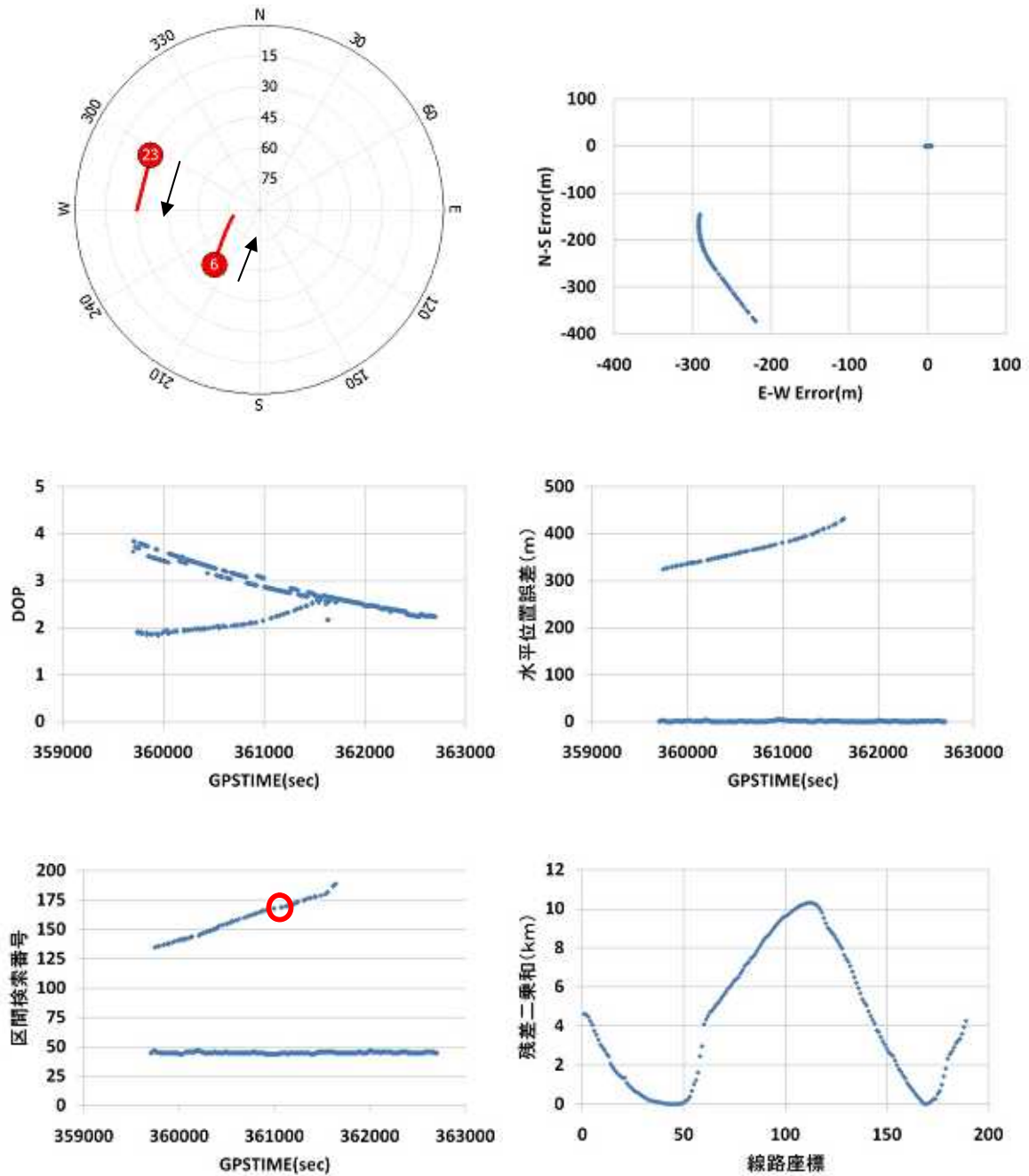


図3 - 18 PRN 番号 6 , 2 3 衛星測位時の観測結果

左上：衛星配置図 右上：水平方向測位誤差

左中：PDOP 時間変化 右中：水平位置誤差の時間変化

左下：区間検索結果

右下：検索失敗時(○)の衛星 座標点間と観測値の衛星 1 重差の残差二乗和



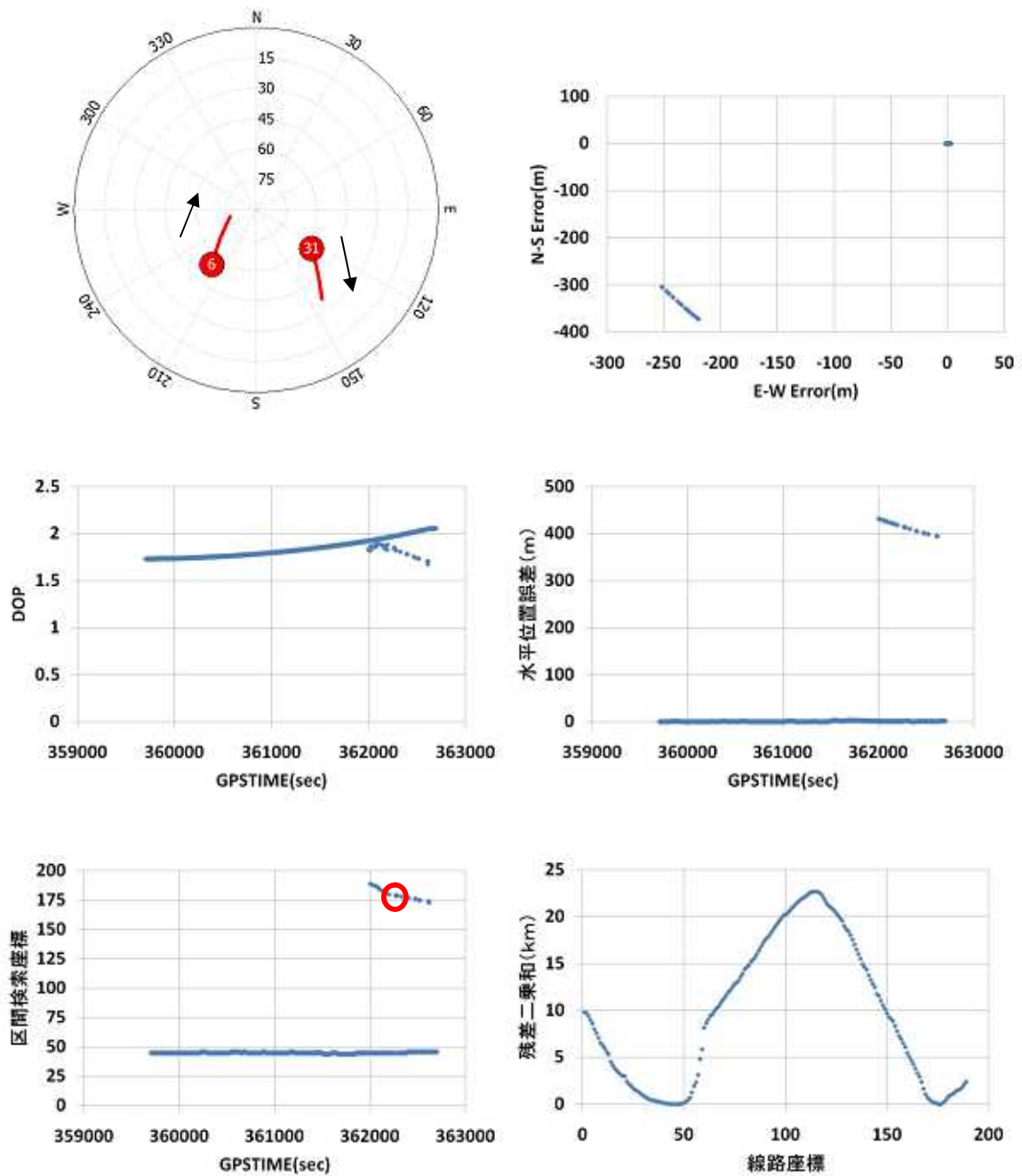


図3 - 19 PRN 番号 6 , 3 1 衛星測位時の観測結果

左上：衛星配置図 右上：水平方向測位誤差

左中：PDOP 時間変化 右中：水平位置誤差の時間変化

左下：区間検索結果

右下：検索失敗時(○)の衛星 座標点間と観測値の衛星 1 重差の残差二乗和

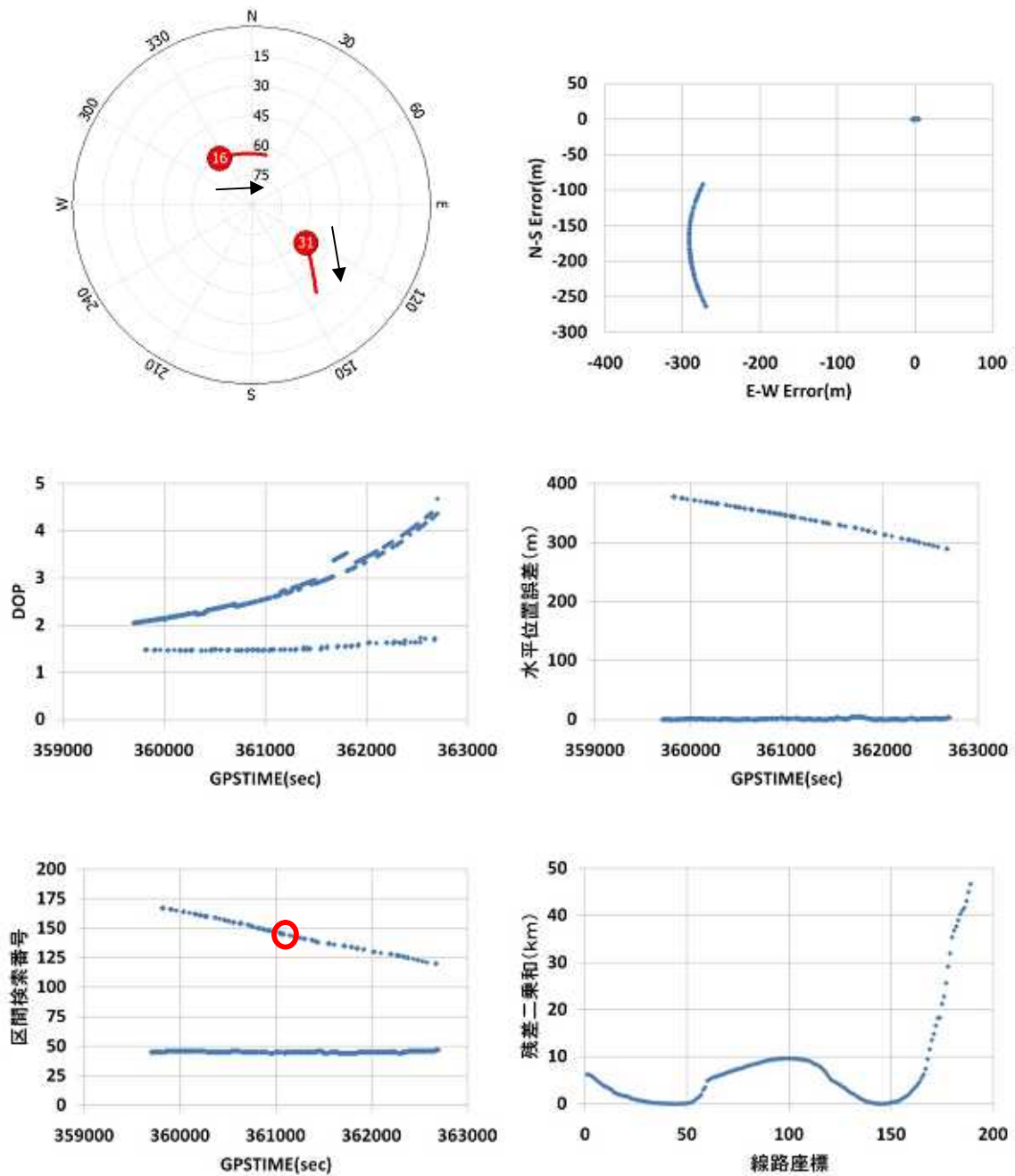


図3 - 20 PRN 番号 16 , 31 衛星測位時の観測結果

左上：衛星配置図 右上：水平方向測位誤差

左中：PDOP 時間変化 右中：水平位置誤差の時間変化

左下：区間検索結果

右下：検索失敗時(○)の衛星 座標点間と観測値の衛星 1 重差の残差二乗和

・ 2 衛星測位時の区間検索の曖昧性

2 衛星の擬似距離が交わる点は 3 次元空間では円状になる。地表において考える場合、図 3 - 2 1 に示すように 2 衛星の擬似距離の交点は 2 点に定まる。今回区間検索に失敗した原因としてこの 2 つの交点が線路上に存在したケースと考えられる。実際に 2 衛星をむすぶ直線とその垂線上に測位点が分布していることが分かる(図 3 - 2 2)。

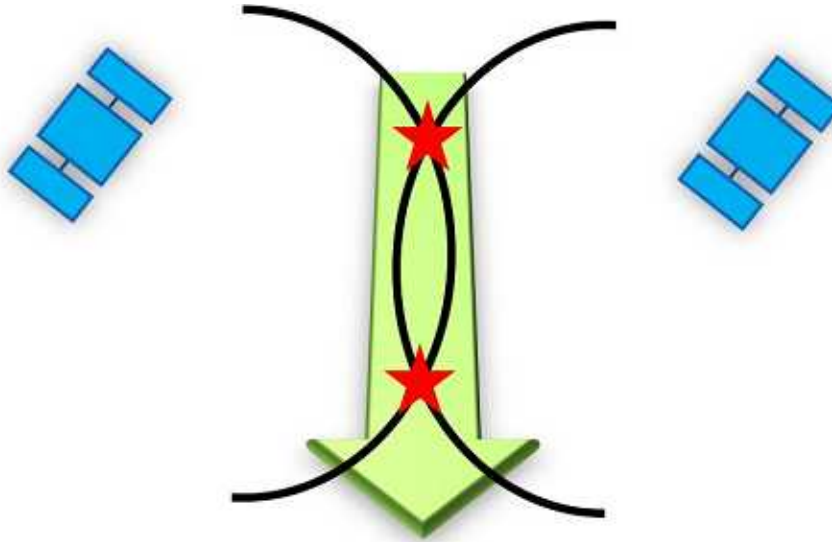


図 3 - 2 1 2 衛星の擬似距離の線路上における交点イメージ図 ( 緑矢印は線路 )

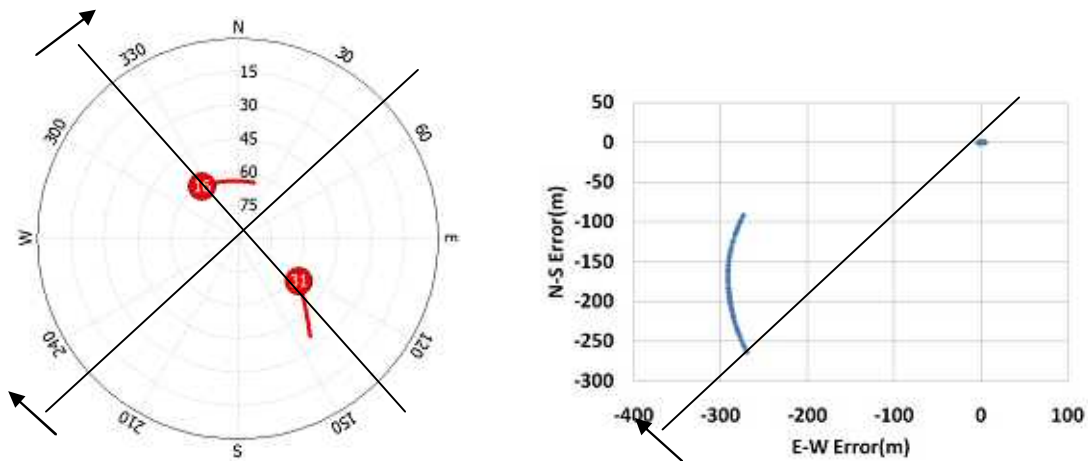


図 3 - 2 2 衛星の移動に伴う測位点の分布(ケース )

よって 2 衛星における区間検索はこの曖昧性が常に付きまとうことになる。この理由から 2 衛星測位を現段階では使用できないという結果となった。

### 3.7.4 単独測位との性能比較実験

#### 3.7.4.1 実験詳細

3次元線路マップを利用した拘束条件付き測位と単独測位と測位率及び測位精度を比較し評価する。観測衛星数の違いが測位性能に影響することが考えられるため衛星仰角マスクを変化させ、マスク角ごとの測位率及び測位精度を比較する。

#### 3.7.4.2 実験結果

表3 - 6に各衛星仰角マスクにおける測位結果を、図3 - 23に可視衛星数の時間変化を示す。また図3 - 24, 25に各衛星仰角マスクにおける水平位置誤差、3次元位置誤差の時間変化を、図3 - 26 ~ 29に東西方向、南北方向、高さ方向の誤差の時間変化を示す。予想通り単独測位に比べ高いアベイラビリティを得ることができ、また水平方向、3次元方向における誤差の減少を確認した。

表 3 - 6 衛星仰角マスクごとの測位結果

		Mask 角(deg)	10	20	30	40
単独測位	測位率(%)		100	100	66.2	25.7
	水平位置誤差(m)	平均値	0.909	0.888	1.019	1.275
		標準偏差	0.569	0.548	0.55	0.551
	3次元測位誤差(m)	平均値	2.799	2.771	2.788	4.157
		標準偏差	1.444	1.482	1.893	2.194
拘束条件付き測位	測位率(%)		100	100	100	71.2
	水平位置誤差(m)	平均値	0.655	0.659	0.975	1.128
		標準偏差	0.533	0.543	0.616	0.746
	3次元測位誤差(m)	平均値	0.685	0.680	0.996	1.146
		標準偏差	0.516	0.531	0.600	0.734

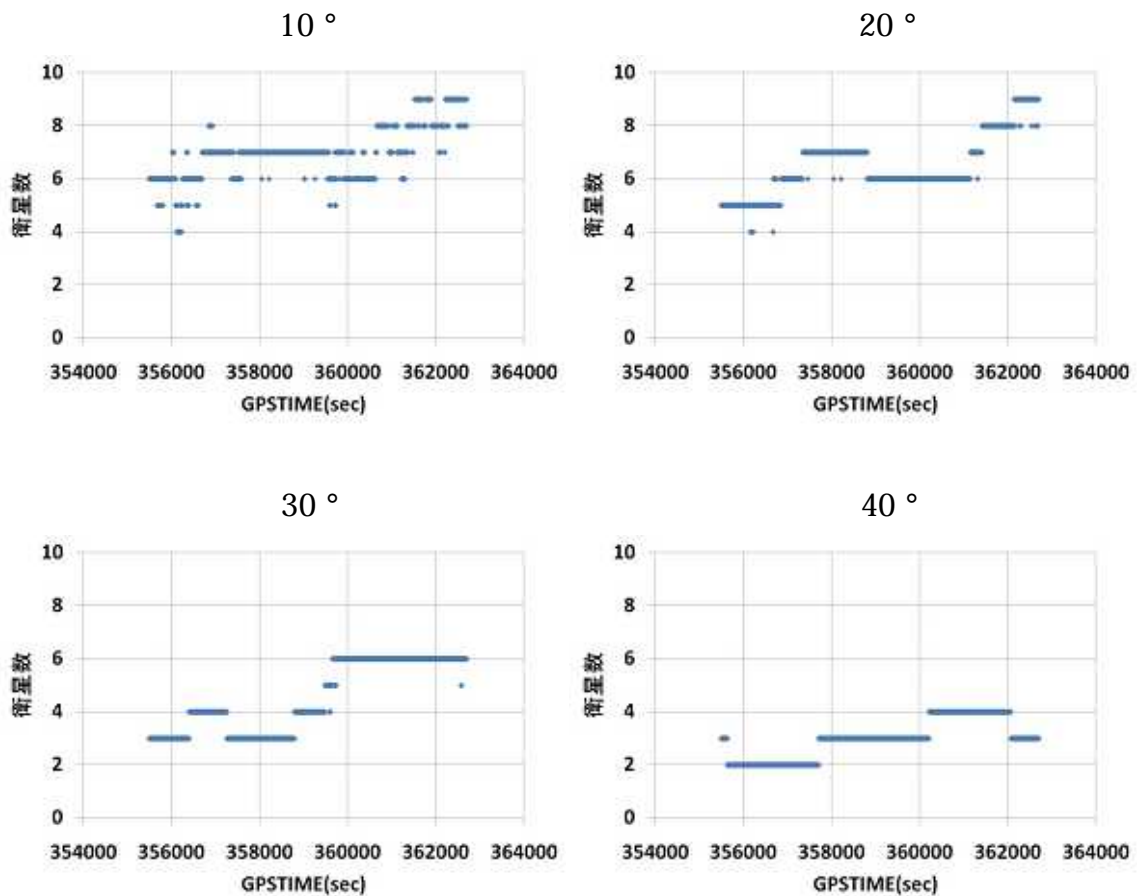


図 3 - 2 3 各衛星仰角マスクにおける可視衛星数の時間変化

■ 単独測位 ■ 3次元マップを利用した拘束条件付き測位

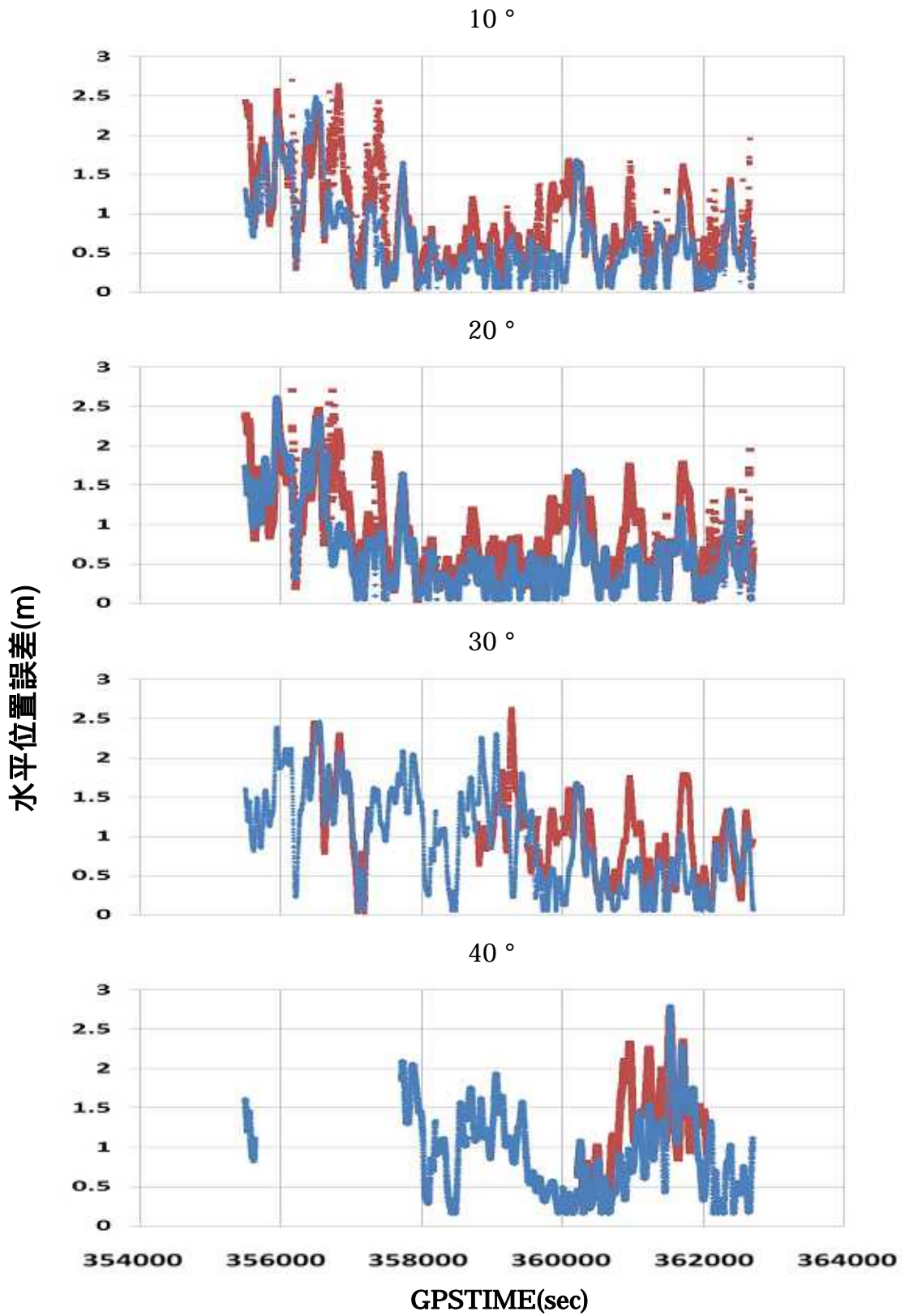


図3 - 2 4 各衛星仰角マスクにおける水平位置誤差の時間変化

■ 単独測位 ■ 3次元マップを利用した拘束条件付き測位

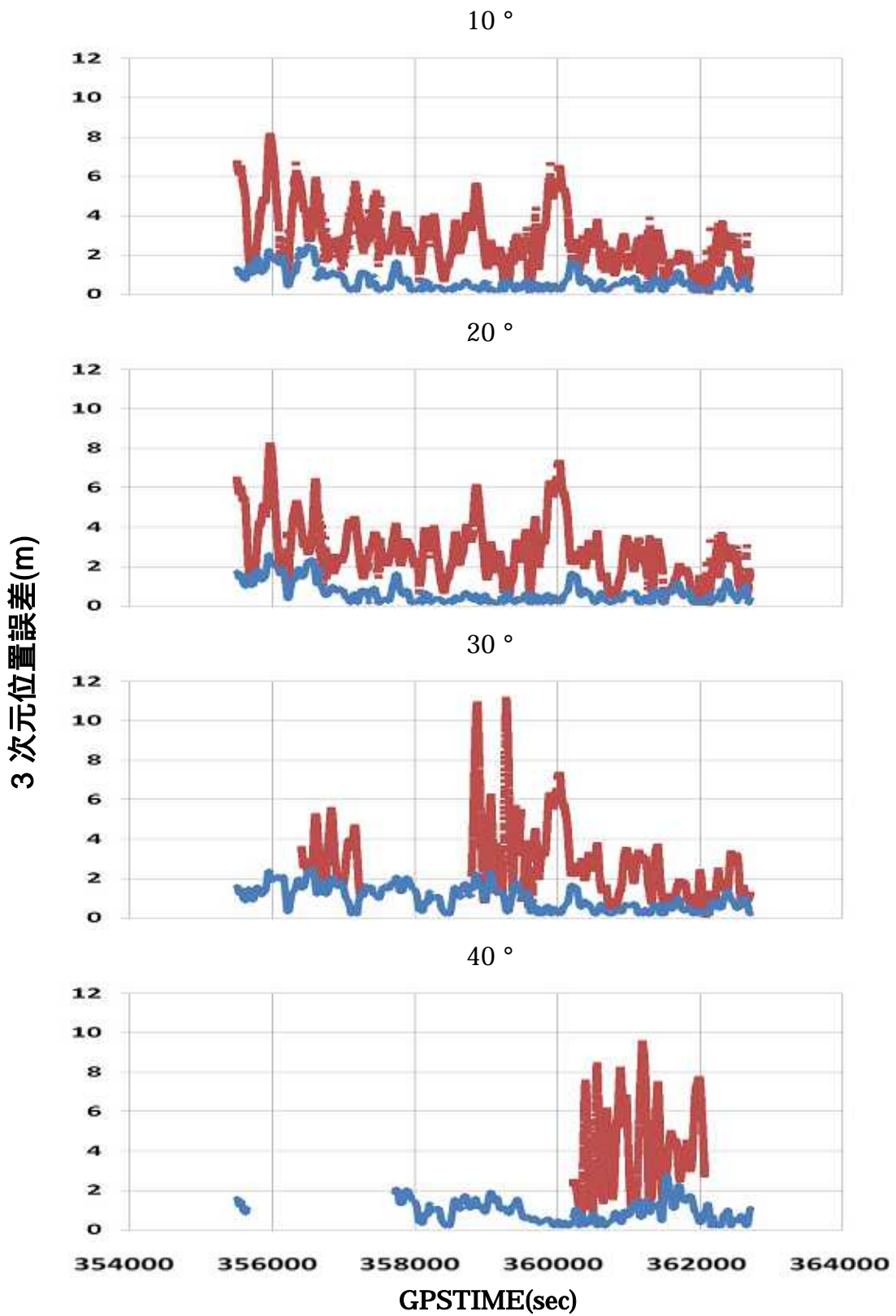


図3 - 25 各衛星仰角マスクにおける3次元位置誤差の時間変化

■ 単独測位 ■ 3次元マップを利用した拘束条件付き測位

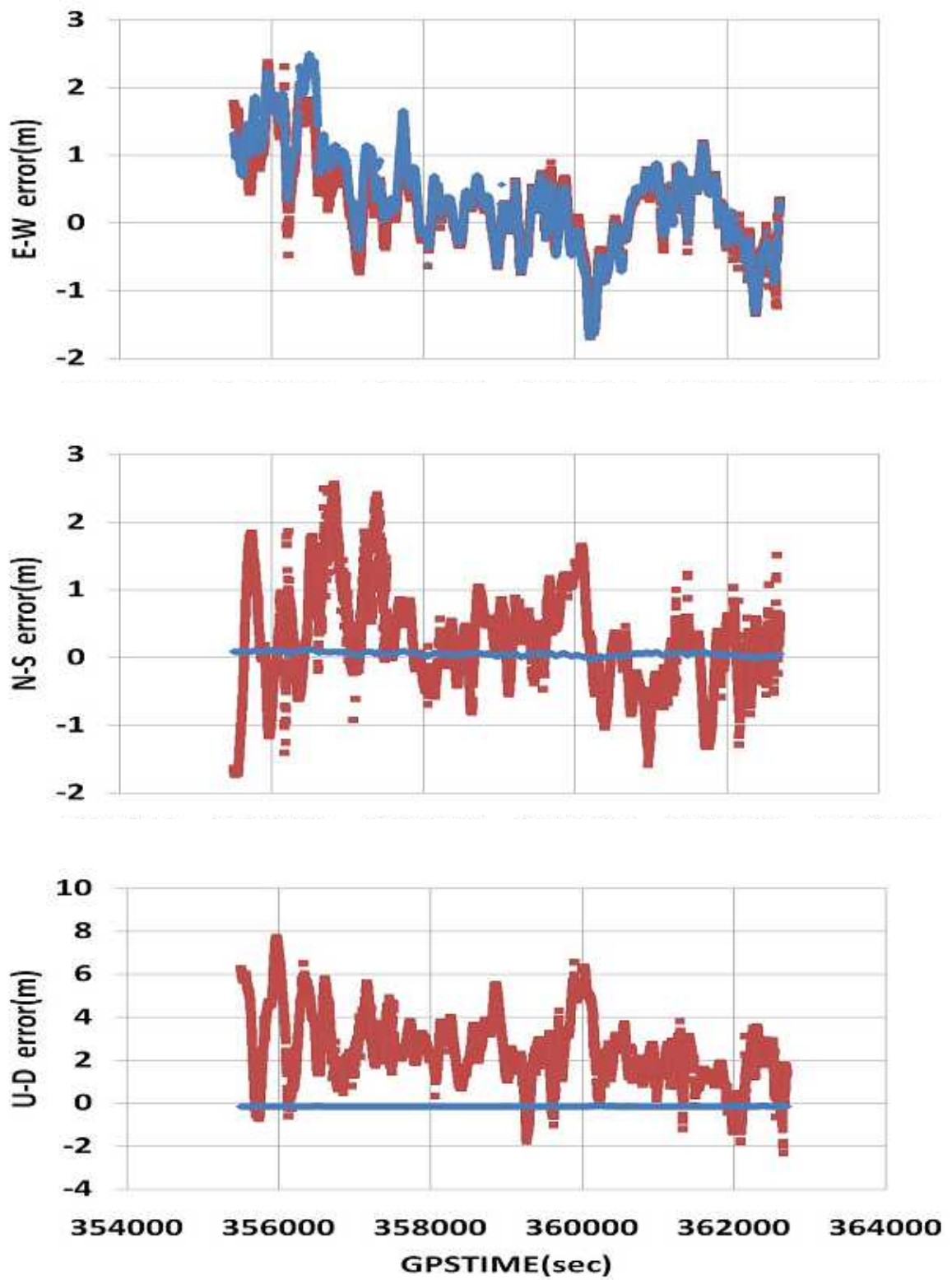


図3 - 26 東西方向、南北方向、高さ方向の誤差の時間変化(Mask 角 10 度)



■ 単独測位 ■ 3次元マップを利用した拘束条件付き測位

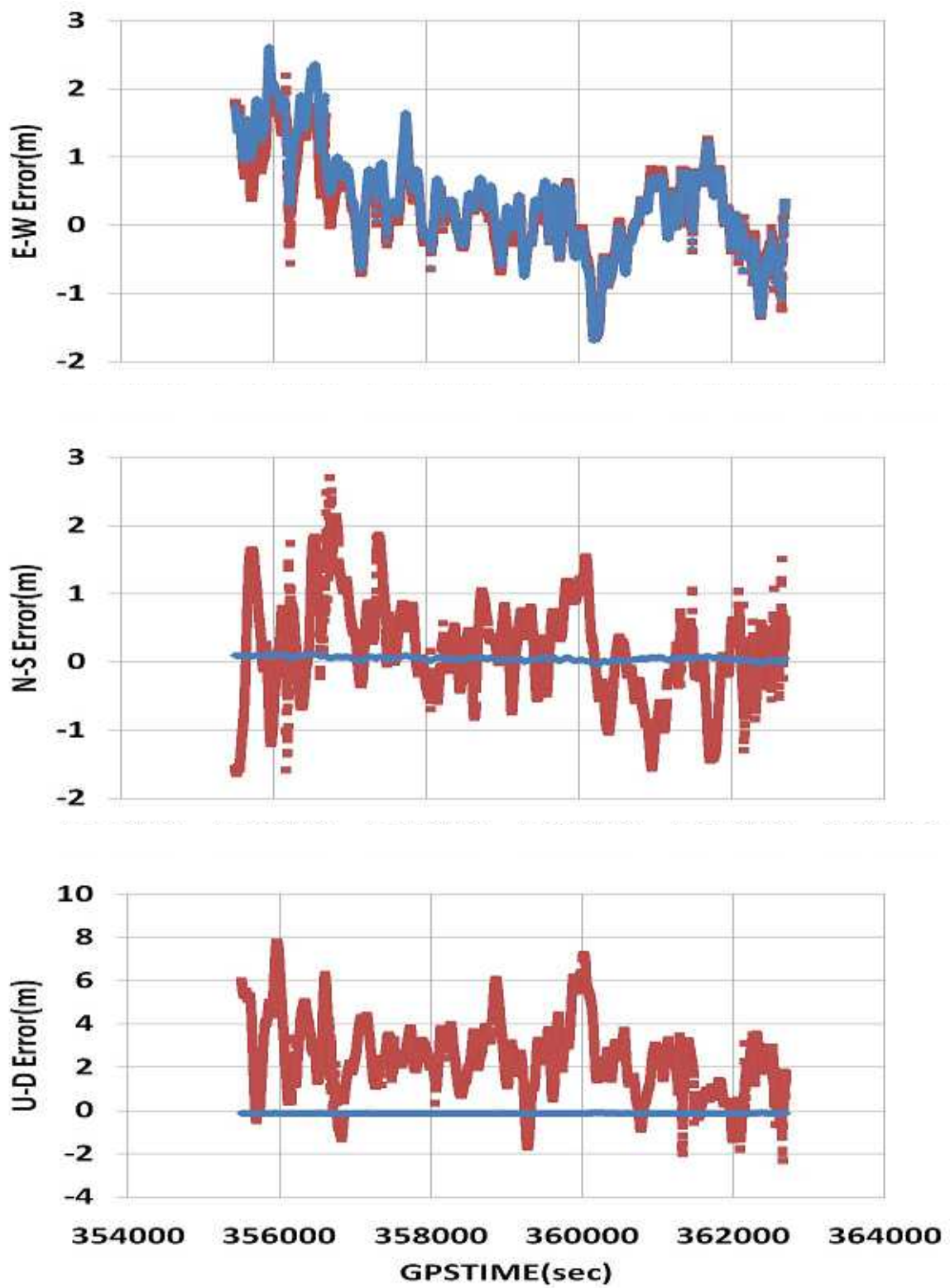


図3 - 2 7 東西方向、南北方向、高さ方向の誤差の時間変化 (Mask 角 20 度)

■ 単独測位 ■ 3次元マップを利用した拘束条件付き測位

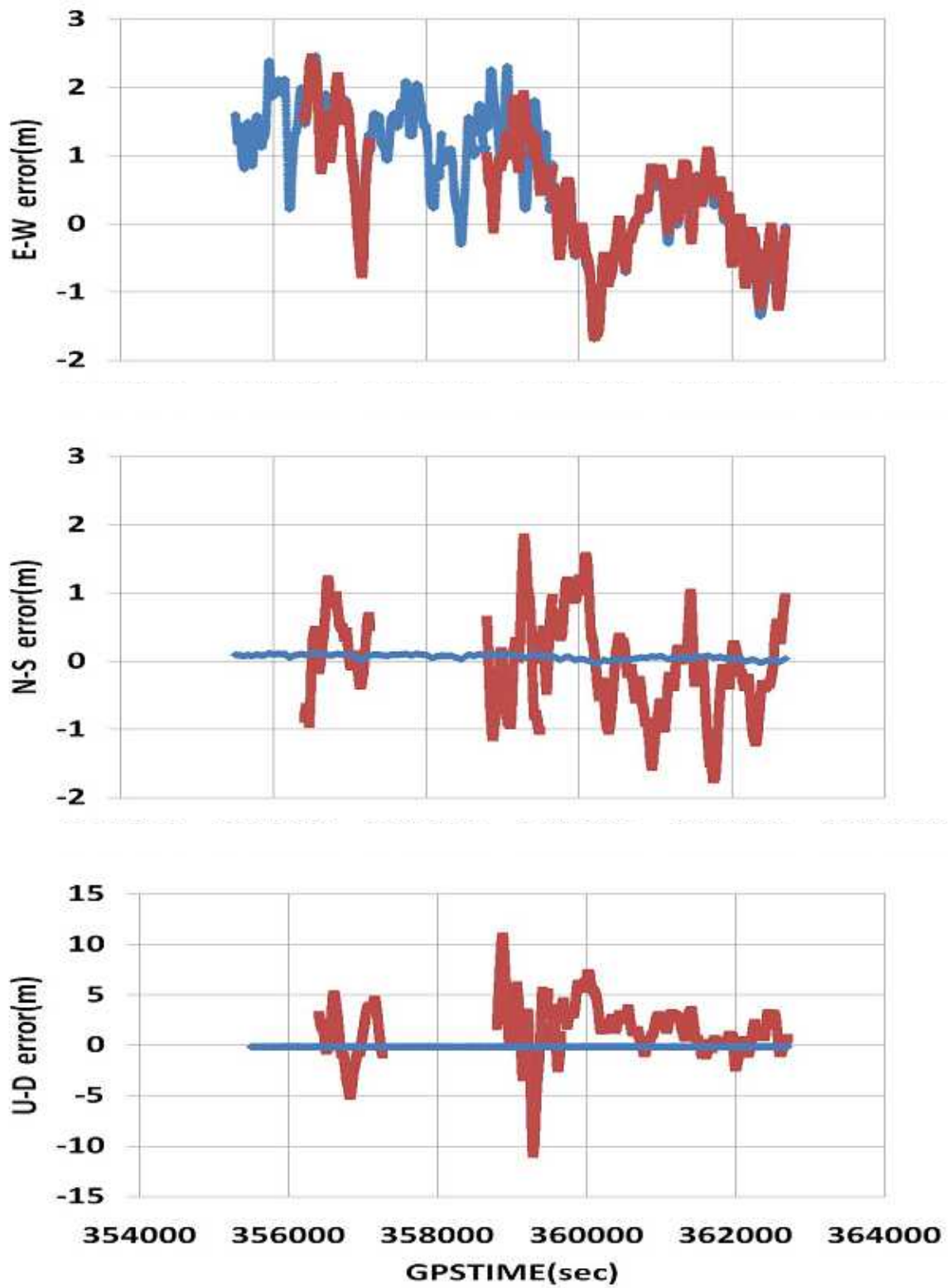


図 3 - 2 8 東西方向、南北方向、高さ方向の誤差の時間変化(Mask 角 30 度)

■ 単独測位 ■ 3次元マップを利用した拘束条件付き測位

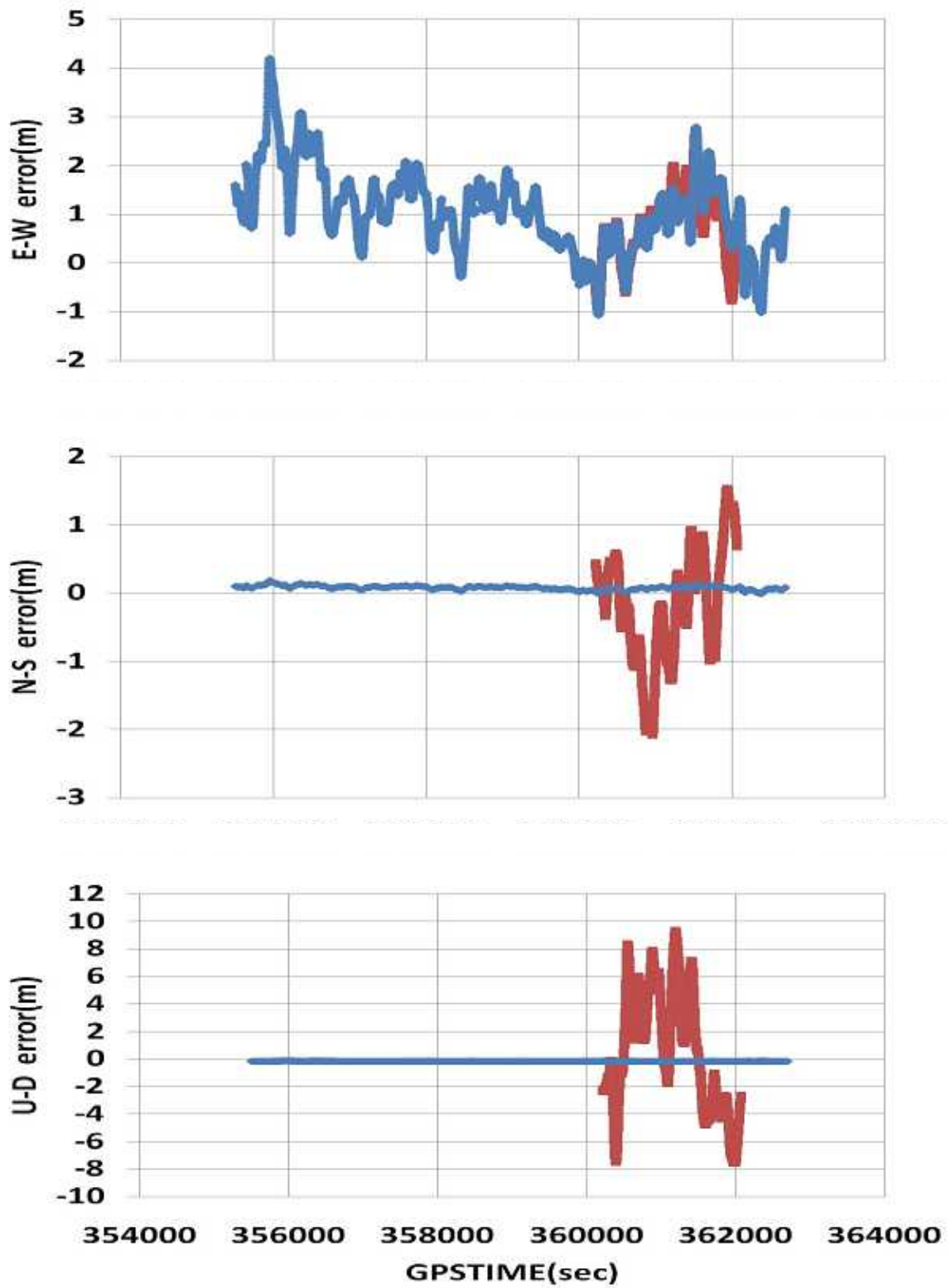


図3 - 29 東西方向、南北方向、高さ方向の誤差の時間変化(Mask 角 40 度)

### 3.8 移動状態観測における新測位手法評価実験

#### 3.8.1 実験詳細

本節では3次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位の移動体における測位能力の検証を行う。移動体における精度検証を行うために干渉測位を同時に行い、得られた結果を基準位置として使用する。しかし測位環境によっては干渉測位解を得られないことも考えられるため、線路上に設置されたRFIDからの位置情報と速度発電機からの車軸パルスから求められる位置を補間して基準位置を求める。車上機器の構成は図3-30に示す。また実験環境を表3-7に示す。今回実験では図3-31の星印からスタートし三角印で折り返すように試験線を2往復走行した。この観測データをもとに衛星仰角マスクを変化させて測位し、単独測位との比較を行う。変化させる仰角マスクは10、20、30度とする。観測時の衛星配置を図3-32に示す。

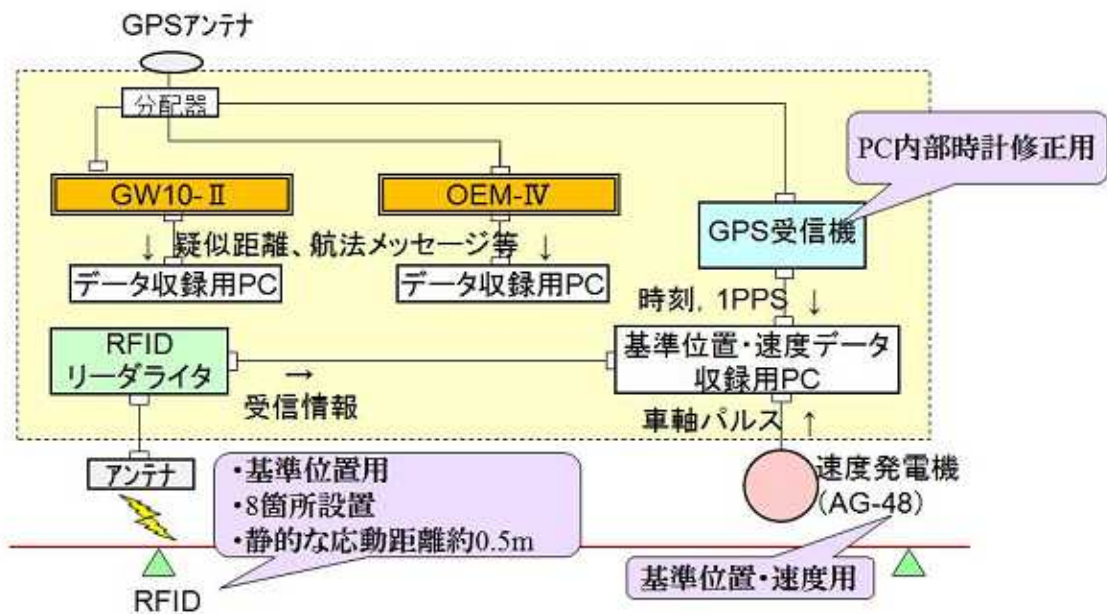


図3-30 車上機器構成

表3-7 実験環境

実験環境	
計測時間	2010/8/19 05:14:30~05:27:04 (GPSTIME)
Interval	0.2s
受信機	FURUNO GW-10-
アンテナ	NovAtel GPS702
RTK 用受信機(rover/base station)	NovAtel OEM /NovAtel OEM

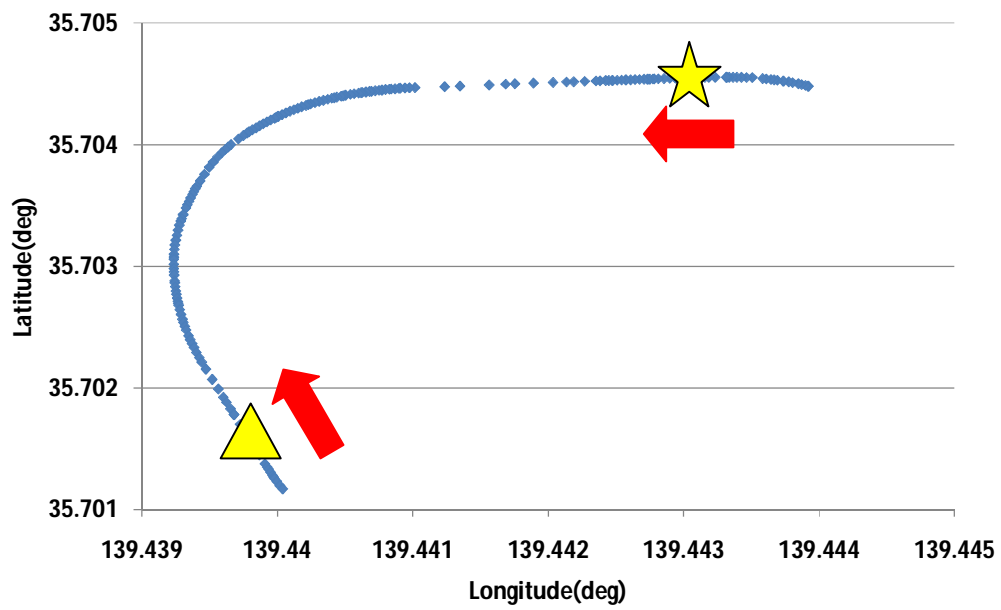


図 3 - 3 1 走行順路 (星、三角印は折り返し点)

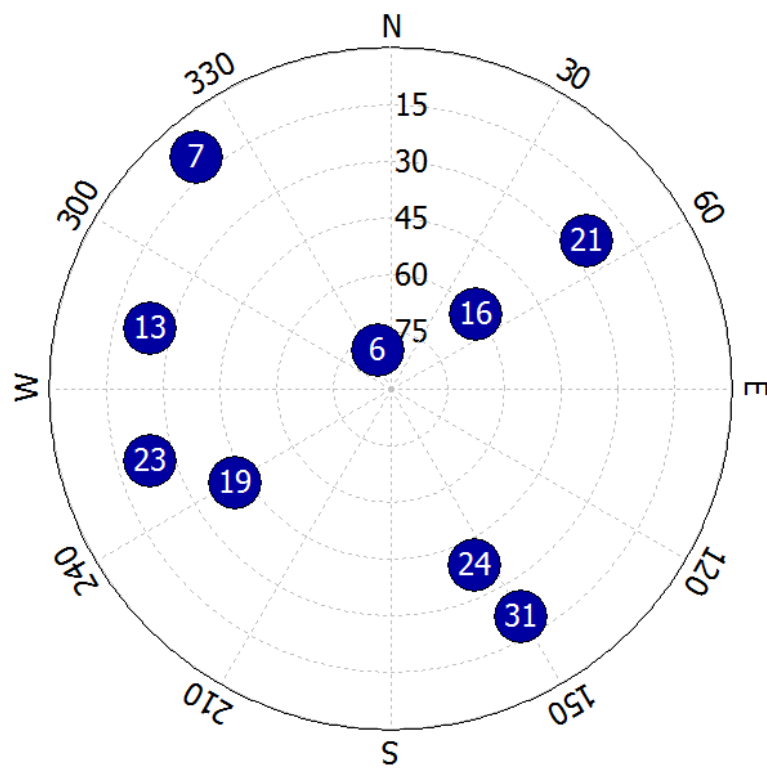


図 3 - 3 1 観測時の衛星配置

### 3.8.2 実験結果

図3-32に基準位置の時間変化を記す。表3-8に各衛星仰角マスクにおける測位結果を示す。また図3-33に各衛星マスクの衛星数及びPDOPの時間変化、図3-34に水平位置誤差の時間変化を示す。表3-8より単独測位に比べ測位精度の向上が見られた。

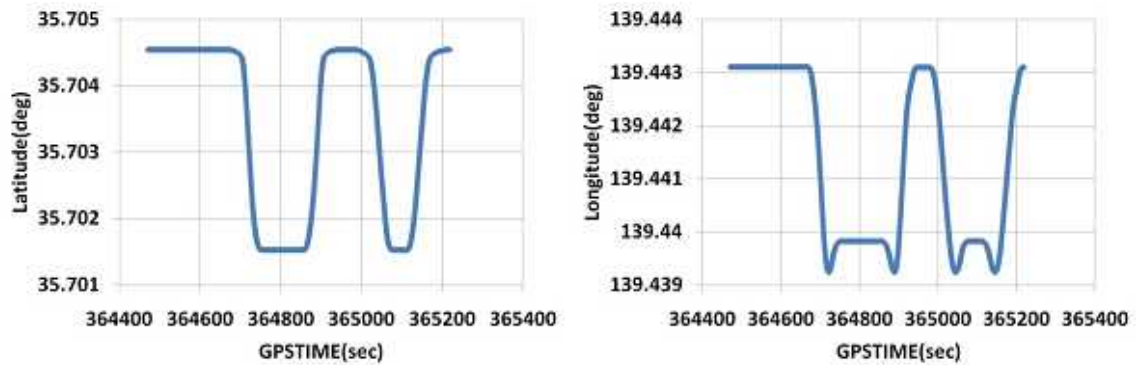


図3-32 基準位置

左：緯度方向時間変化 右：経度方向時間変化

表3-8 各衛星仰角マスクにおける測位結果

Mask 角(deg)		10	20	30	
単独測位	測位率(%)	99.76	99.12	99.12	
	水平位置誤差	平均値(m)	2.34	2.57	4.40
		標準偏差(m)	1.53	1.62	2.74
拘束条件付き測位	測位率(%)	99.76	99.76	99.76	
	水平位置誤差	平均値(m)	1.20	1.42	1.80
		標準偏差(m)	0.954	1.12	1.40

■ 単独測位 ■ 3次元マップを利用した拘束条件付き測位

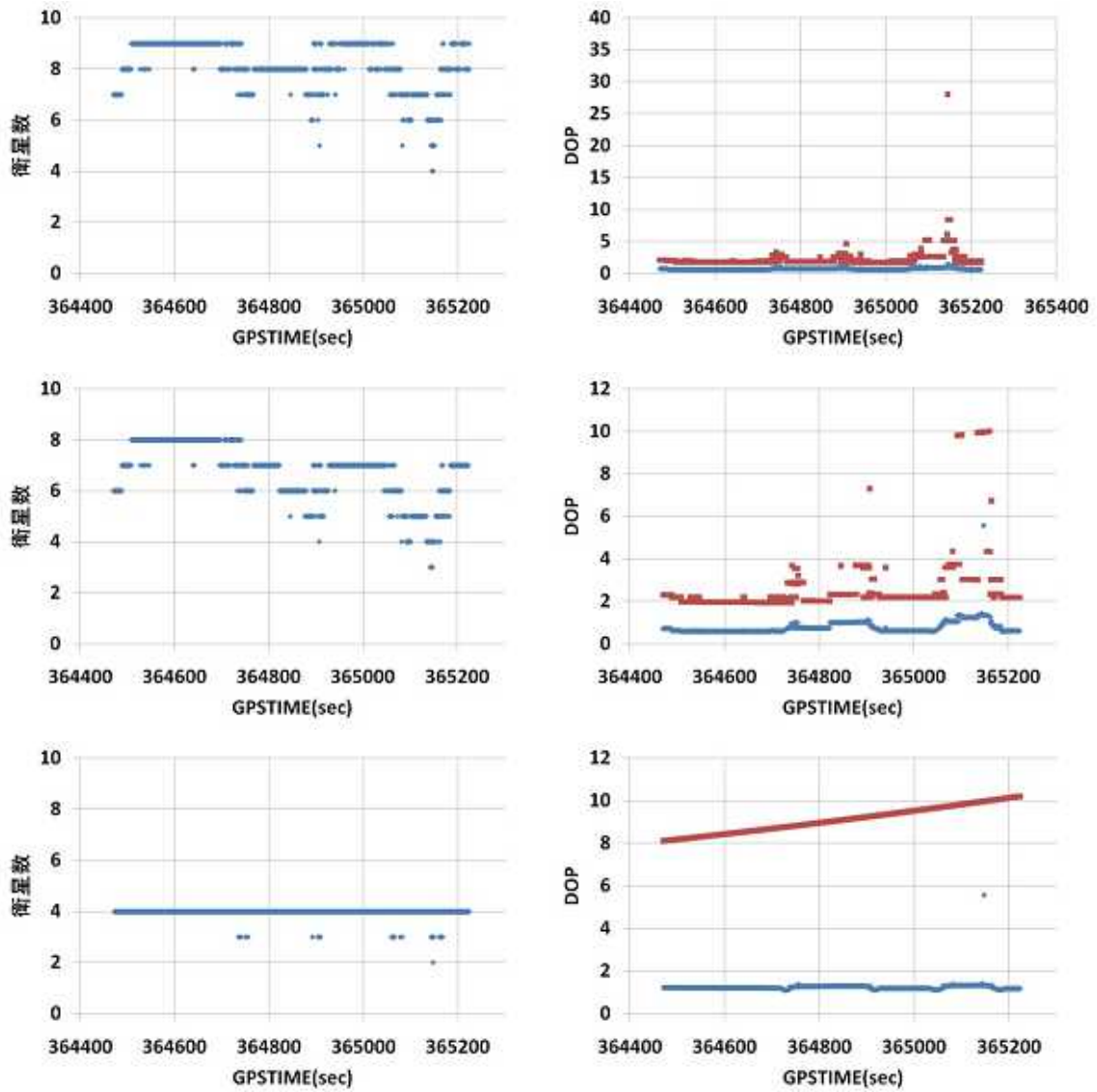


図3 - 3 2 各衛星マスクの衛星数及び PDOP の時間変化  
 左：衛星数の時間変化 右：PDOP の時間変化  
 上：Mask 1 0度 中：Mask 2 0度 下：Mask 3 0度

■ 単独測位 ■ 3次元マップを利用した拘束条件付き測位

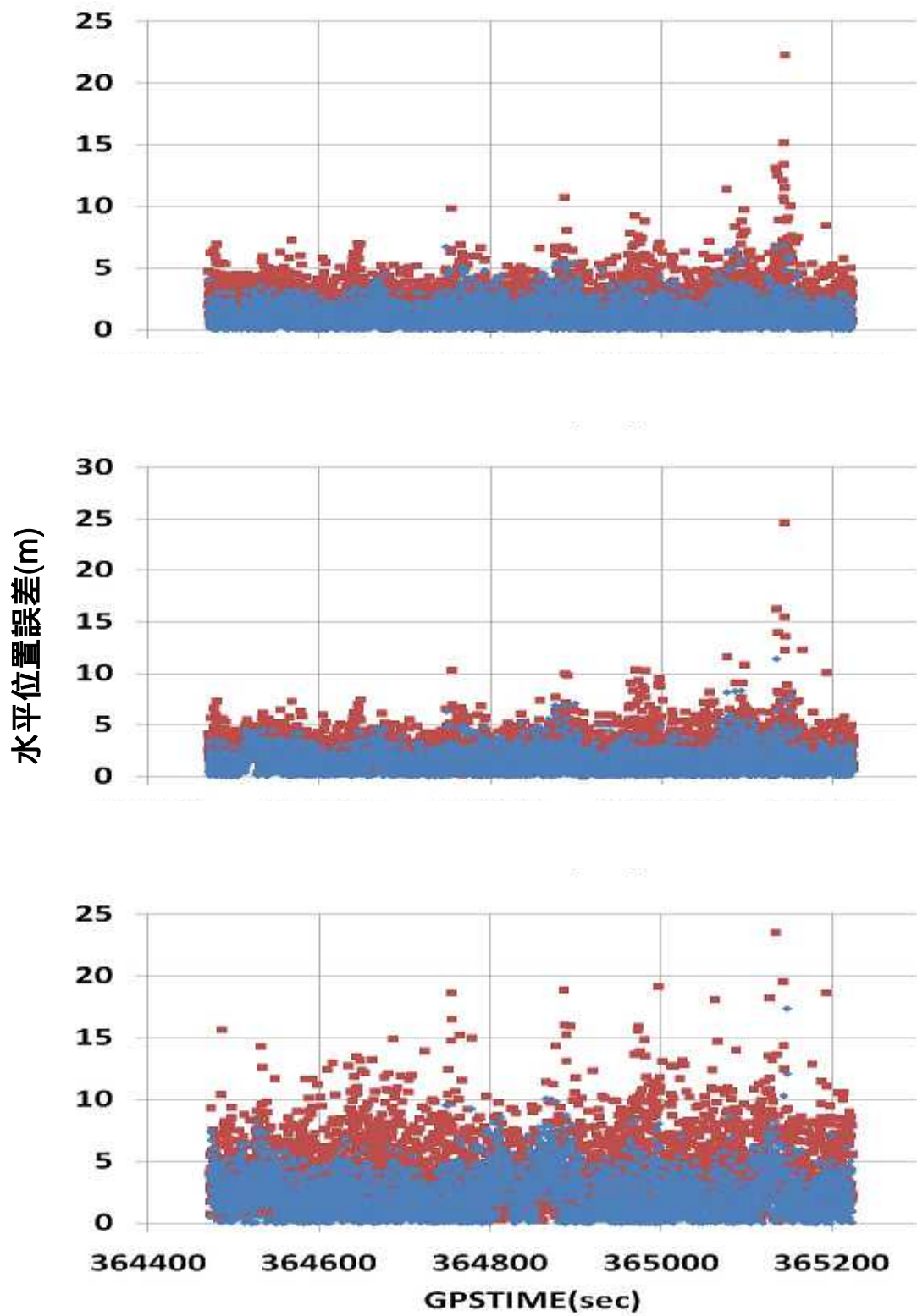


図3 - 33 各衛星マスクの水平位置誤差の時間変化  
上：Mask 10度 中：Mask 20度 下：Mask 30度



### 3.9 まとめ

本章では3次元線路マップを利用した測位計算手法を提案し、その性能評価を試験線において行った。鉄道総研の試験線において車輦上部にアンテナを設置し観測したデータをもとに測位手法の評価を行った。

静止点観測実験において区間検索能力、2衛星時、3衛星時各々の測位能力の調査及び単独測位との測位能力の比較を行った。区間検索能力、2衛星時、3衛星時各々の測位能力の調査から2衛星時の区間検索の曖昧性の問題を発見し、現段階での2衛星測位は使用できないという結果となった。単独測位と本手法の測位能力の比較したところ、本手法は単独測位に比べ高いアベイラビリティを得ることができ、また水平位置誤差及び3次元位置誤差の減少を確認した。

移動状態観測実験において単独測位と本手法の測位能力を比較検証した。本手法は単独測位に比べ水平位置誤差の減少を確認した。

## 第 4 章 3次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位における信頼性向上について

### 4.1 はじめに

3章では3次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位を提案、評価を行い単独測位に比べ高いアベイラビリティと移動状態での精度改善を確認した。本章では信頼性を高めるためにMSASによる補正機能およびRAIM機能を実装し、その効果を検証する。また2組のアンテナと受信機を使用した測位解の検定法について検証する。

### 4.2 MSASの利用について

2章で紹介したようにMSASの機能として大きく3つに分けられる。

1) 広域 DGPS 補正情報 : GPS 信号の補正值。衛星軌道や時計、電離層などの補正情報

2) 測距機能 : GPS 信号と同様の測位信号。WAAS 衛星を GPS 衛星と同様に測位に使用できる

3) インテグリティ : GPS 信号の異常情報

MSAS は航空機用にインテグリティ情報を発信しており、情報を受信している限り衛星の異常情報を迅速に得ることが可能である。また測距機能を有しており、MSAS からのレンジング信号を受信し測位信号として利用することでアベイラビリティの改善が見込まれる。しかし既存研究により MSAS のレンジング信号は GPS 信号に比べノイズが大きく、測位に使用した際に大きな誤差を生じる可能性が示唆されている。よって本研究ではレンジング機能については評価しない。残る広域 DGPS 補正情報については測位精度の改善が期待できる。本節ではこの広域 DGPS 補正情報によって 3 次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位結果がどの程度改善されるのか評価を行う。

#### 4.2.1 MSAS 補正評価実験

##### 4.2.1.1 実験概要

3次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位においてのMSAS補正効果を検証する。列車上部にアンテナを設置し、図4-1に示す位置に列車を停止させ

静止点観測を行った。実験環境は表 4 - 1 に示す。観測点は後処理基線解析によって求めている。この静止点観測データから MSAS 補正を行った場合と行わない場合の測位結果を比較する。

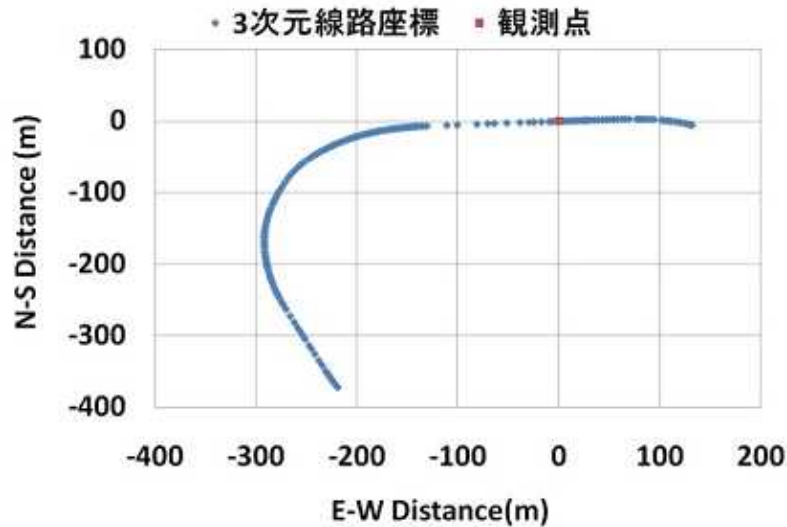


図 4 - 1 観測点 (列車停止位置)

表 4 - 1 実験環境

実験環境	
計測時間	2010/8/19 02:30:00~03:30:00 (GPSTIME)
Interval	0.2s
受信機	FURUNO GW10 -
アンテナ	NovAtel GPS702
衛星仰角マスク	20度

#### 4.2.1.2 実験結果

図 4 - 2 に観測衛星数、図 4 - 3 に水平位置誤差の時間変化を示す。また表 4 - 2 に測位結果を示す。図 4 - 3 並びに表 4 - 2 を見る限り MSAS 補正を行った際に精度改善効果はあまりみられなかった。この原因として使用した受信機の特性和して受信機ノイズが大きいためと考えられる。

表 4 - 2 MSAS 補正に対する水平位置誤差の標準偏差

		MSAS 補正なし	MSAS 補正あり
水平位置誤差 ( m )	平均値	1.696	1.591
	標準偏差	1.293	1.216

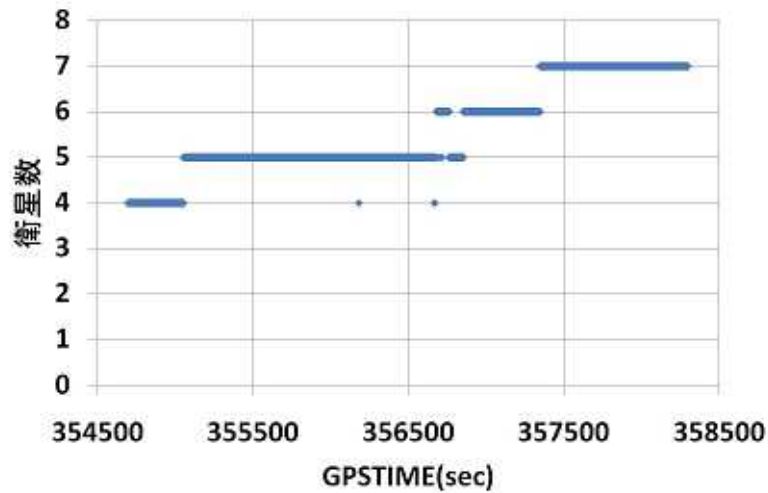


図4 - 2 観測衛星数の時間変化

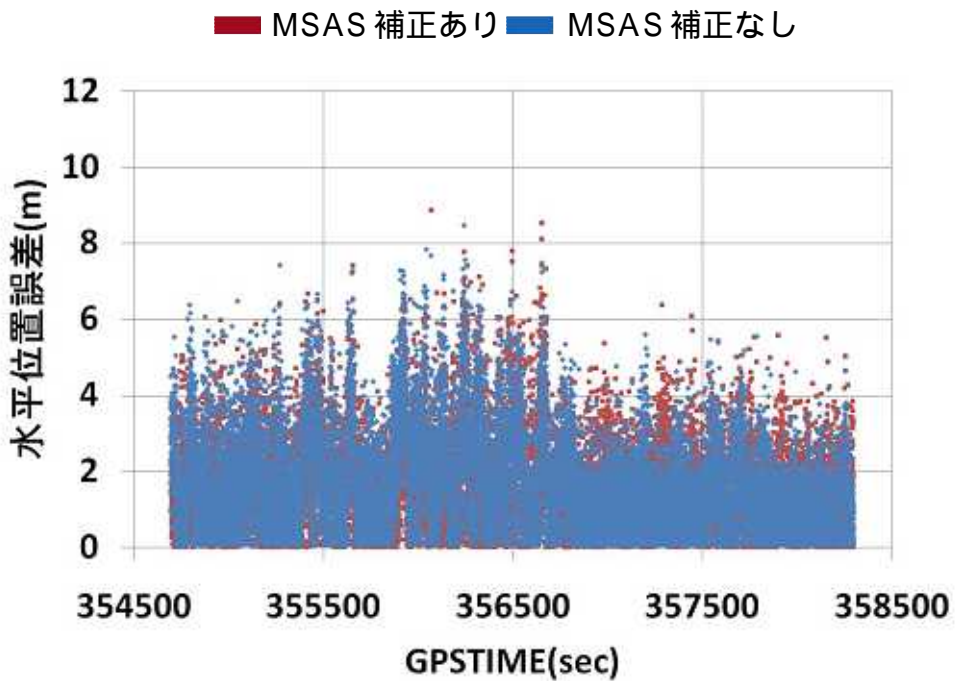


図4 - 3 水平位置誤差の時間変化

・受信機ノイズの影響

本実験で使用した FURUNO 社製 GW10- の受信機ノイズを調査するためにゼロベース観測実験を行った。また他の受信機と比較するため ublox 社製 EVK-5H、NovAtel 社製 OEM- の受信機において同様の試験を行った。各受信機の擬似距離 2 重差を図 4 - 4 に、標準偏差を表 4 - 3 に示す。図 4 - 4、表 4 - 3 から、GW10- の受信機ノイズが他の受信機に比べ大きいことを示している。

ゼロベース観測における擬似距離 2 重差の標準偏差の 1 / 2 が受信機ノイズの標準偏差と考えることができるため、表 4 - 3 より GW10- の受信機ノイズの標準偏差は 0.93mとなる。MSAS 補正の効果に対してこの値は大きく、埋もれてしまう可能性が高いと予想される。

■ GW10- / GW10- ■ EVK-5H/ EVK-5H ■ OEM- / OEM-

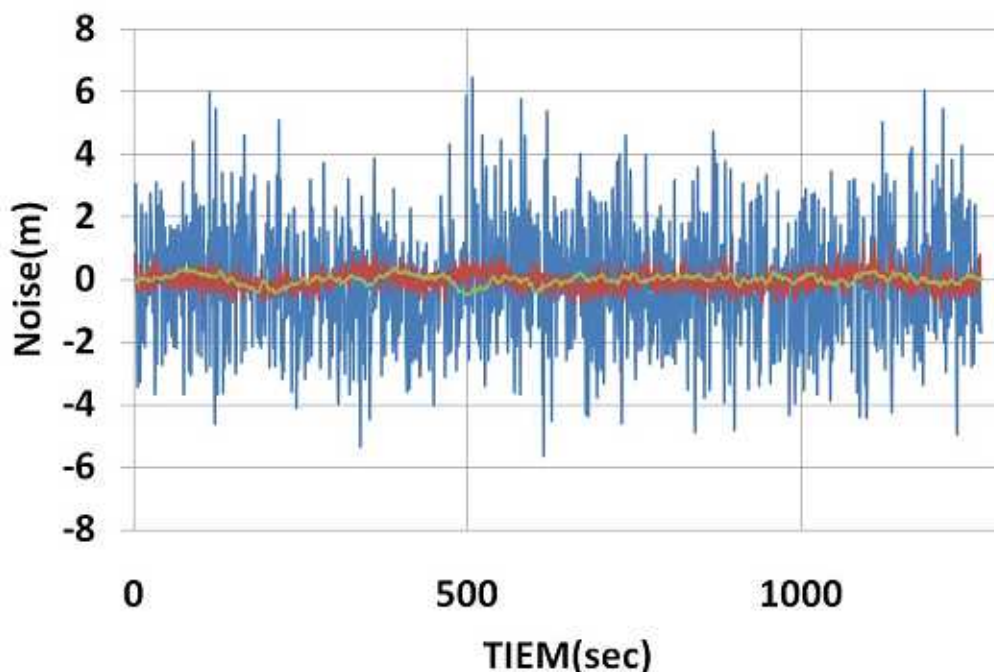


図 4 - 4 受信機ノイズ

表 4 - 3 各受信機の受信機ノイズの標準偏差

受信機の組み合わせ	擬似距離 2 重差の標準偏差(m)
GW10- / GW10-	1.86
EVK-5H/ EVK-5H	0.30
OEM- / OEM-	0.16

#### 4.3 3次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位における RAIM

2章で紹介したように RAIM は信頼性を向上させる手法として広く用いられている。本節では 3次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位手法においての RAIM の動作検証を行う。

#### 4.3.1 シミュレーションデータによる動作検証実験

本節では実際に観測した擬似距離に意図的に誤差を加えたデータを利用して 3次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位手法における RAIM の動作検証を行う。図 4 - 1 に示す位置で静止点観測を行った。観測データの詳細は表 4 - 4 の通りである。観測時の衛星配置を図 4 - 5 に示す。また図 4 - 5 より PRN 番号 21 番の衛星に誤差を上乗せし意図的に異常観測値を生成する。上乗せする誤差は 10 , 15 , 20 m とし、上乗せした誤差量に対して RAIM の効果を検証する。図 4 - 6 に誤差を上乗せしていない状態での観測データの単独測位および 3 次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位結果のプロット図を、また表 4 - 5 に水平位置誤差の平均値及び標準偏差を示す。

表 4 - 4 実験環境

実験環境	
計測時間	2010/8/19 03:45:00~04:00:00 (GPSTIME)
Interval	0.2s
受信機	NovAtel 社製 OEM-
アンテナ	NovAtel GPS702
衛星仰角マスク	20 度

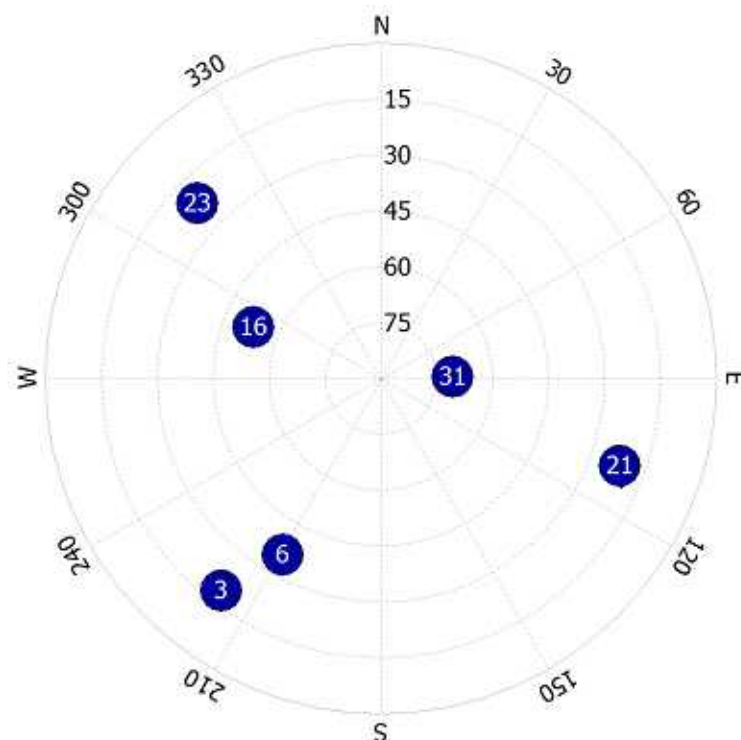


図 4 - 5 衛星配置

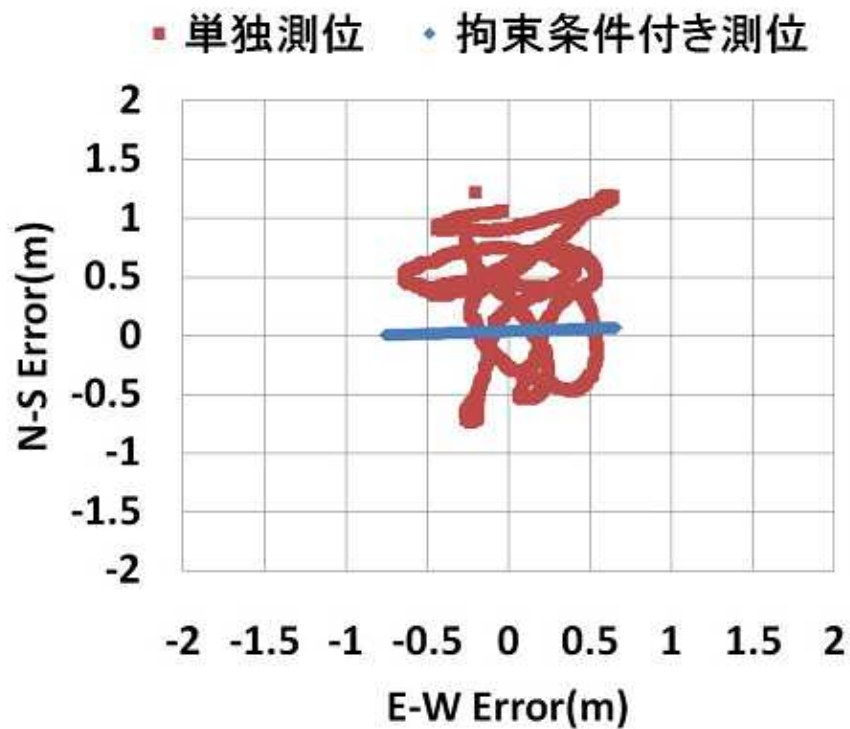


図 4 - 6 水平方向位置誤差

表 4 - 5 水平位置誤差の平均値及び標準偏差

	水平位置誤差	
	平均値(m)	標準偏差(m)
単独測位	0.611	0.296
拘束条件付き測位	0.320	0.186

・ RAIM の閾値 ( SSE ) 設定

RAIM における閾値の設定は異常値検出率に直結するため適当な値を設定しなければならない。表 4 - 6 に誤差がない観測値を使用した際の 3 次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位における 3 衛星の組み合わせとその平均 PDOP、水平位置誤差、SSE 値の平均値及び標準偏差を示す。また SSE 値は最大値も表記する。今回閾値として表 4 - 6 より SSE 値の最大値の 6.37m を参考に 7m と設定する。

表 4 - 6 3 衛星測位における組み合わせとその PDOP、水平位置誤差、SSE 値

衛星組み合わせ			平均PDOP	水平位置誤差(m)		SSE(m)		
				平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	最大値
3	6	16	4.017	3.722	1.908	0.206	0.193	0.84
3	6	21	0.889	0.625	0.405	0.949	0.688	2.43
3	6	23	3.869	2.412	1.909	1.110	1.123	4.43
3	6	31	1.284	1.181	0.377	0.594	0.529	2.20
3	16	21	0.913	0.644	0.461	1.580	1.605	6.37
3	16	23	2.939	2.223	1.546	1.234	1.092	4.18
3	16	31	1.328	1.175	0.492	0.800	0.888	3.53
3	21	23	0.792	0.740	0.483	0.927	1.006	4.11
3	21	31	0.931	0.657	0.415	2.685	1.331	5.67
3	23	31	1.092	0.965	0.454	1.153	1.158	4.72
6	16	21	1.019	1.084	0.493	0.303	0.454	1.74
6	16	23	2.888	2.234	1.406	0.233	0.249	0.97
6	16	31	1.591	0.765	0.421	0.220	0.282	1.21
6	21	23	0.836	0.973	0.471	0.587	0.775	3.64
6	21	31	1.112	0.364	0.263	1.982	1.109	4.36
6	23	31	1.165	0.601	0.333	0.655	1.066	4.65
16	21	23	0.850	1.062	0.493	1.011	1.609	5.87
16	21	31	1.226	0.627	0.735	1.746	1.271	5.18
16	23	31	1.176	0.558	0.388	0.752	0.660	3.31
21	23	31	0.843	0.673	0.515	1.964	1.236	4.36

#### 4.3.2 実験結果

表 4 - 7 に誤差ごとの単独測位、拘束条件付き測位の結果、また RAIM による異常検知率と異常衛星を特定し、除外した際の測位結果を示す。表 4 - 3 より RAIM の実装によって異常観測値を検出、除外され測位精度が改善されたことが確認できる。よって 3 次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位手法における RAIM の実用性がシミュレーション上確認できた。図 4 - 7 に誤差 20 m における単独測位と RAIM 機能を ON、OFF した際の水平位置誤差を示す。



表 4 - 7 RAIM 検証実験結果

誤差(m)			0	10	15	20
単独測位	水平位置誤差	平均(m)	0.611	3.957	5.972	7.996
		標準偏差(m)	0.296	0.404	0.442	0.479
拘束条件付き測位 (RAIM-OFF)	水平位置誤差	平均(m)	0.320	3.384	5.110	6.833
		標準偏差(m)	0.186	0.379	0.370	0.379
拘束条件付き測位 (RAIM-ON)	異常検知率(%)			47.922	89.491	100
	水平位置誤差	平均(m)		2.267	1.393	0.859
		標準偏差(m)		1.257	1.438	0.386

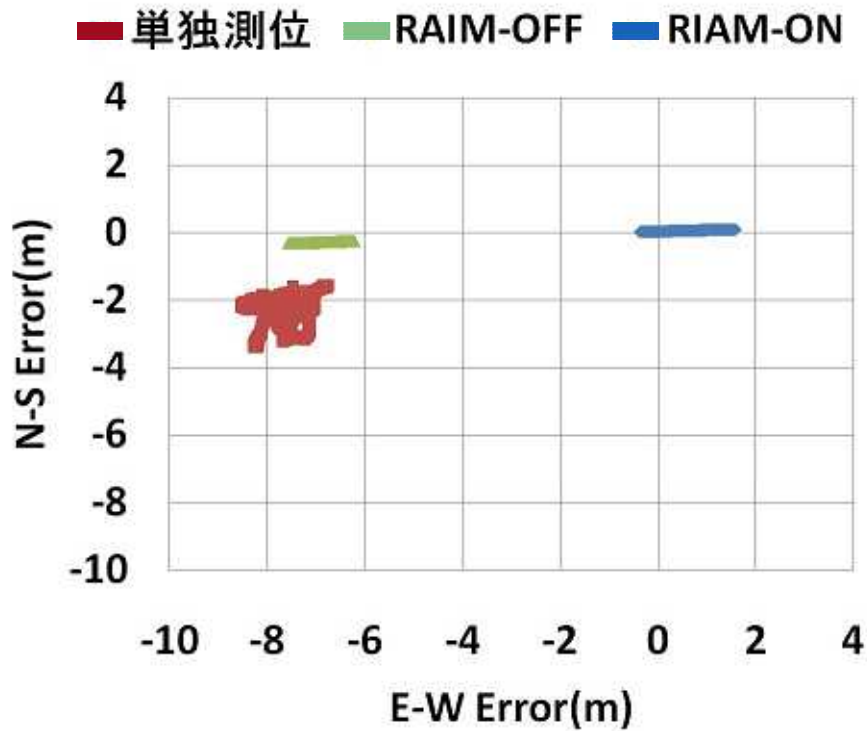


図 4 - 7 誤差 20 m における単独測位と RAIM 機能を ON、OFF した際の水平位置誤差

#### 4.4 2組のアンテナと受信機を使用した測位解検定法

検討中のシステムでは、測位計算に用いる情報の正当性を担保するため、2組のアンテナと受信機を使用して航法メッセージを照合してから測位計算するとされている。これまでは1組のアンテナと受信機で信頼性を向上させる手法について述べてきたが、測位解は2つ得られることになる。そこで、本節では2つの測位解の検定手法について述べる。

##### 4.4.1 アンテナ間距離を利用した測位解検定手法

無線通信において通信の質や信頼性を向上させる際によく用いられる手法としてダイバーシティ方式があげられる。ダイバーシティとは複数のアンテナで受信した同一の無線信号について、電波状況の優れたアンテナの信号を優先的に用いたり、受信した信号を合成してノイズを除去したりする技術のことである。一般に2本のアンテナが1/2波長以上離れていれば、それぞれのアンテナの受信状態の相関はないと言われ移動体通信において大きな効果を得られるとされている。このことから図4-8のように2アンテナをGPS信号の1/2波長以上(1波長:約19cm)離して設置し、互いのアンテナの受信状態に相関がないとするならばそれぞれの受信機から出力される測位解から求められるアンテナ間距離と実際のアンテナ間距離を比較することでマルチパス等の影響による異常な測位解を検知することが可能である。

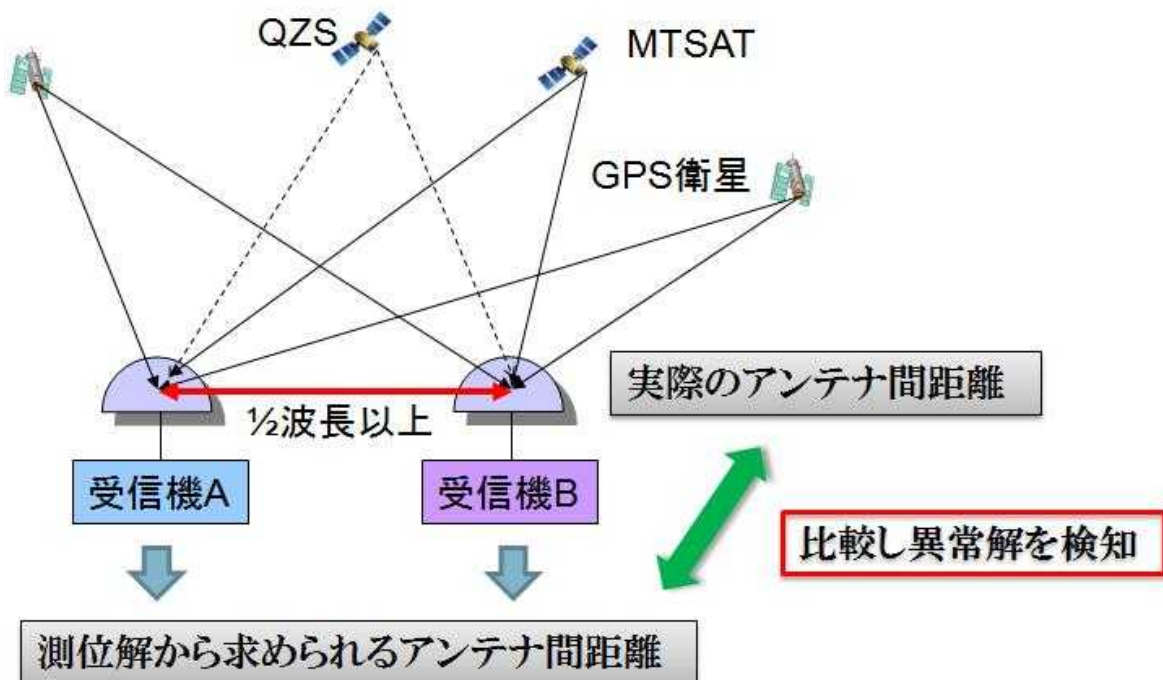


図4-8 2組のアンテナ、受信機による測位解検定法イメージ

## 4.4.2 検定手法検証実験

### 4.4.2.1 検定手法評価実験概要

前節で述べたアンテナ間距離を利用した測位解の検定手法の効果を検証する。図4-9のように列車上部にアンテナを2つ設置する。アンテナ間隔は18.15mと十分に離している。3次元線路座標マップを利用した拘束条件付き測位手法で求めた2アンテナの位置からアンテナ間距離を計測する。測位によって求めたアンテナ間距離と実際の距離の差に閾値を設け、閾値を超えた場合異常値として測位解から除外する。検定に受かった測位解と検定しない場合の測位率、測位精度を比較する。今回の実験では図4-10の星印からスタートし三角印で折り返すように試験線を2往復走行した。移動体における精度検証を行うために干渉測位を同時に行い、得られた結果を基準位置として使用する。しかし測位環境によっては干渉測位解を得られないことも考えられるため、線路上に設置されたRFIDからの位置情報と速度発電機からの車軸パルスから求められる位置を補間して基準位置を求める。車上機器の構成は図4-9に示す。また実験環境を表4-8に示す。またアンテナの設置状況を図4-11に示す。

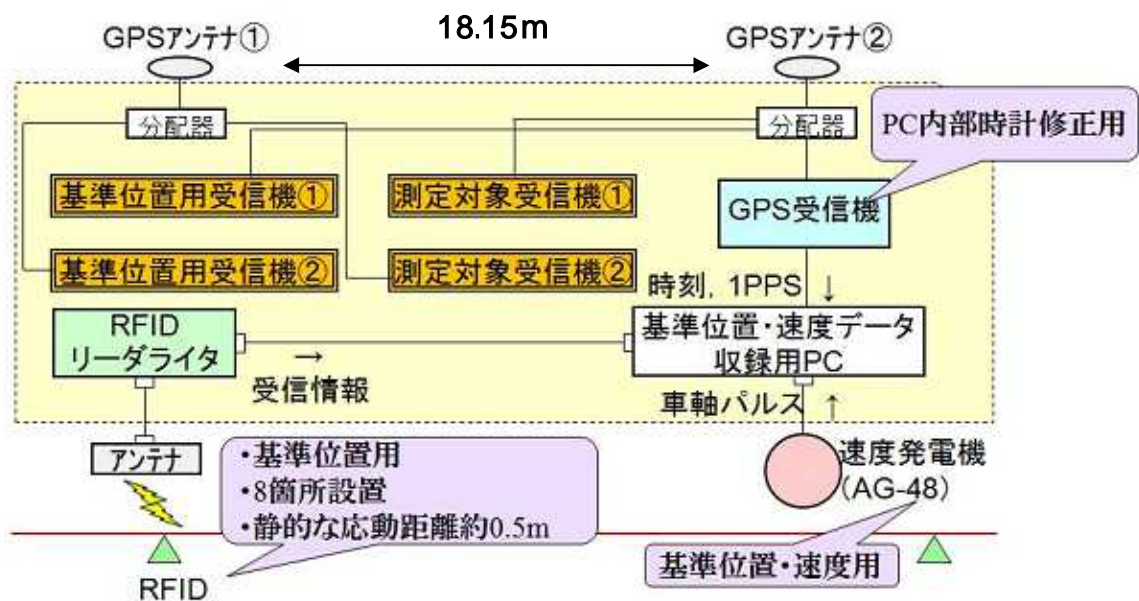


図4-9 車上機器構成

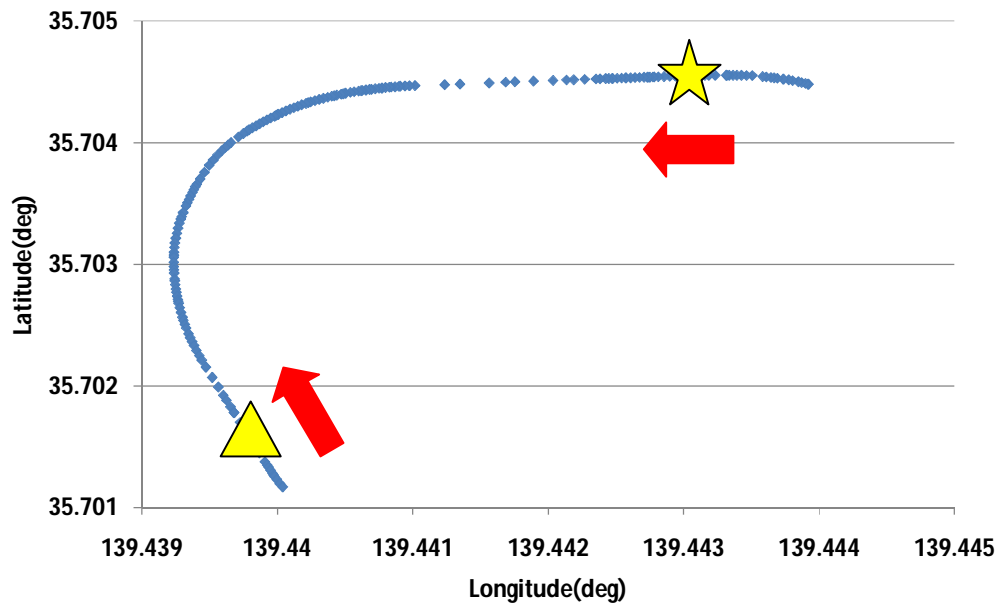


図 4 - 1 0 走行順路

表 4 - 8 実験環境

実験環境	
計測時間	2010/8/19 05:14:30 ~ 05:27:04 (GPSTIME)
Interval	0.2s
測定対象受信機 ( / )	FURUNO GW-10- / FURUNO GW-10-
アンテナ ( / )	NovAtel GPS702/ NovAtel GPS702
基準位置用受信機 ( / )	NovAtel OEM- /NovAtel OEM-
基準位置用基準局	NovAtel OEM-
衛星仰角マスク	10度
アンテナ間隔	18.15m



図4 - 1 1 車輻の屋根におけるアンテナ設置状況  
左：アンテナ1（車輻前部） 右：アンテナ2（車輻後部）

#### 4.4.2.2 実験結果

図4 - 1 2 にアンテナ1, 2の水平位置誤差と衛星数の時間変化、表4 - 9 に測位率及び水平位置誤差の平均値と標準偏差を示す。またアンテナ1, 2の測位解から求められるアンテナ間隔と実際のアンテナ間隔の差を図4 - 1 3 に示す。

##### ・ 閾値の設定

アンテナ間距離の誤差に閾値を設けることで測位解の判定を行う。図4 - 1 3 より閾値としてアンテナ間距離の誤差の $\pm 5, 4, 3$  mの範囲を設定し、閾値における測位率、水平位置誤差を求める。表4 - 1 0 にアンテナ1の結果、図4 - 1 4 に水平位置誤差の時間変化を示す。

表4 - 1 0 より測位率は落ちるが測位精度は改善されていることが確認できる。また図4 - 1 2 と図4 - 1 4 を比較してみると、測位誤差の大きなものを取り除かれていることが分かる。

表 4 - 9 アンテナ 1 , 2 における測位率及び水平位置誤差の平均値と標準偏差

	測位率(%)	水平位置誤差	
		平均値(m)	標準偏差(m)
アンテナ 1	98.485	1.347	1.048
アンテナ 2	85.809	1.285	0.937

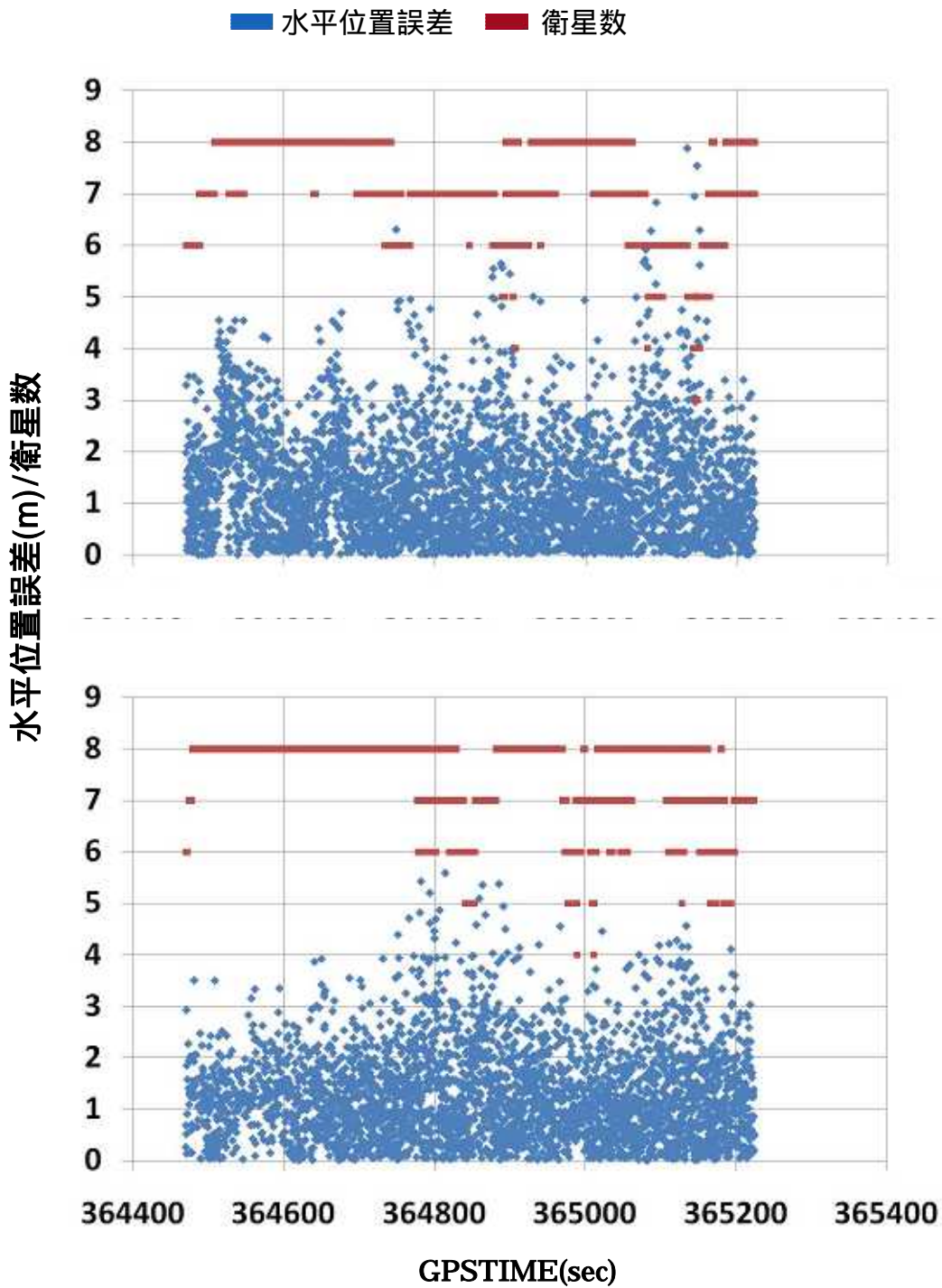


図 4 - 1 2 アンテナ 1 , 2 の水平位置誤差と衛星数の時間変化

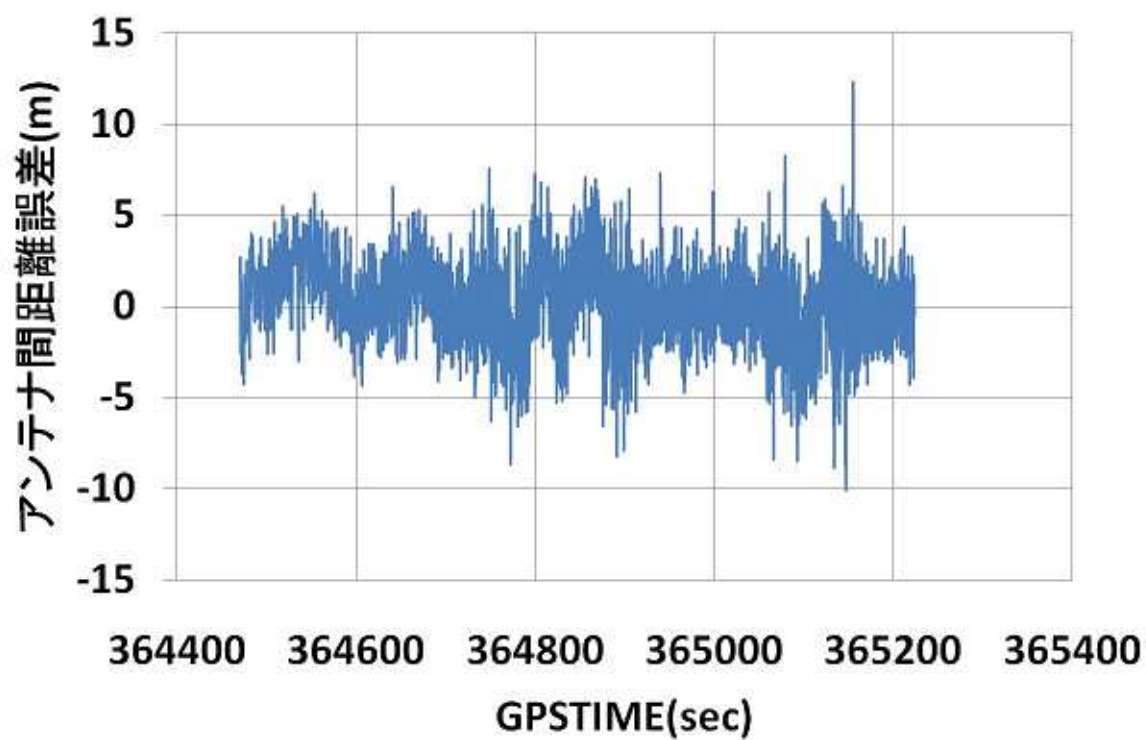


図 4 - 1 3 アンテナ間距離誤差

表 4 - 1 0 アンテナ 1 における検定後の測位結果

閾値(m)	測位率(%)	水平位置誤差		
		平均値(m)	標準偏差(m)	最大誤差(m)
± 5	81.7	1.265	0.967	6.295
± 4	77.3	1.200	0.905	5.389
± 3	69.9	1.126	0.851	4.770

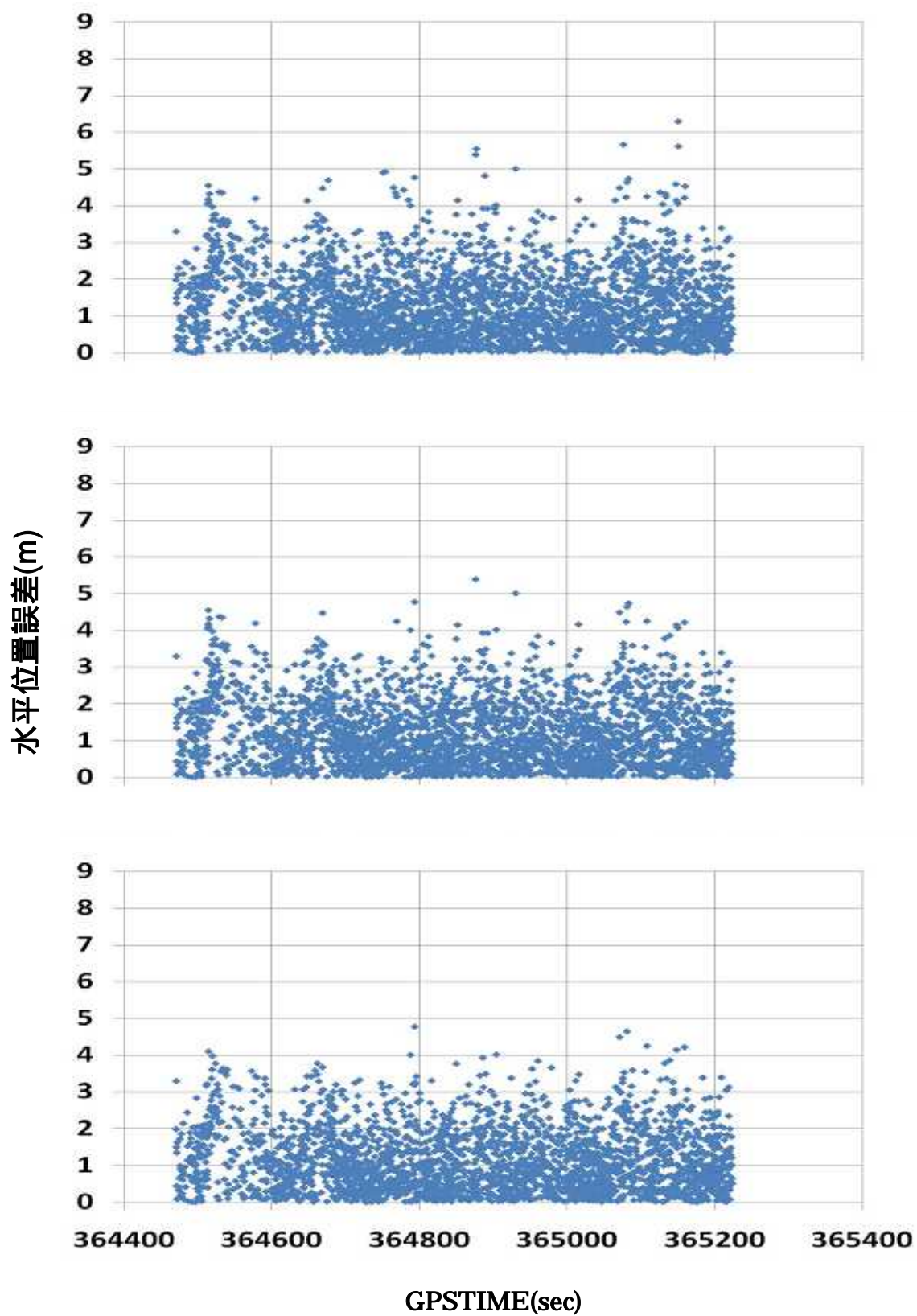


図4 - 14 アンテナ1の検定後の水平位置誤差の時間変化  
 上：閾値±5 m 中：閾値±4 m 下：閾値±3 m



#### 4.4.2.3 手法の組み合わせによる評価実験概要

また前述した MSAS 補正及び RAIM を利用した際の測位結果をアンテナ間隔距離を利用した検定法で検定し、その結果を単独測位結果と比較する。利用する観測データは 4.4.2.1 におけるデータを利用する。今回衛星仰角マスクは 30 度、アンテナ間隔の閾値は  $\pm 5$  m とする。

#### 4.4.2.4 実験結果

図 4 - 1 5 に水平位置誤差の時間変化を表 4 - 1 1 に測位結果を示す。3.8.2 の図 3 - 3 3 と比較した際、測位率の低下はあるが最大誤差が低下しているのが分かる。

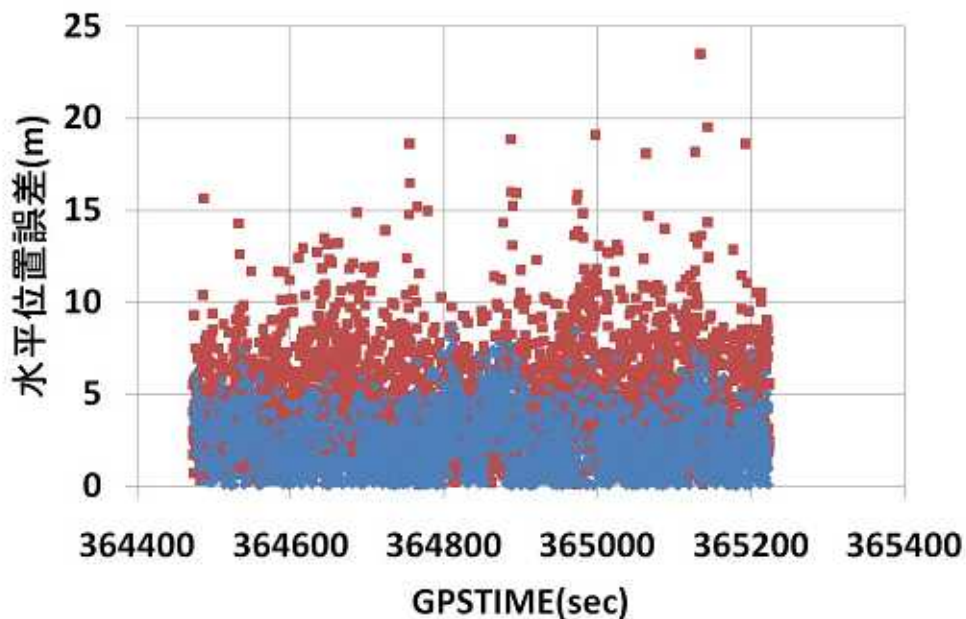


図 4 - 1 5 アンテナ 1 の検定後の水平位置誤差の時間変化

表 4 - 1 1 仰角マスク 30° における測位結果

	測位率(%)	水平位置誤差		
		平均値(m)	標準偏差(m)	最大誤差(m)
単独測位	99.12	4.40	2.74	23.52
拘束条件付き測位	78.67	2.36	1.57	8.59

#### 4.5 まとめ

本章では3次元線路マップを利用した拘束条件付き測位における信頼性向上を目的とした。信頼性を高めるためによく用いられる MSAS による補正および RAIM 機能を実装し、その効果を検証した。また2組のアンテナと受信機を使用し、独立した測位解を比較する検定法について検証した。

MSAS 補正効果の評価実験では3次元線路マップを利用した拘束条件付き測位手法においてどの程度効果が得られるか調査した。しかし評価に使用した受信機の受信機ノイズが他の受信機に比べ大きいため、目立った効果を得ることができなかった。

次に RAIM 動作検証実験では実際の観測データに誤差を加えることでマルチパス環境を意図的に作り出し、3次元線路マップを利用した拘束条件付き測位手法を利用した RAIM によって異常衛星を検知できるか検証した。新手法を利用した RAIM で異常衛星の検知に成功し、さらに排除することで測位精度の改善を確認した。

最後に2組のアンテナと受信機を利用した測位解の検定法の検証では、独立した測位解を比較することで誤差が大きな測位解を排除することが可能か調査した。測位率は下がるものの、精度の改善が見られ、誤差の大きな測位解の排除に成功した。

## 第5章 結論

### 5.1 研究の総括

本稿では列車の保安制御における活用法に着目し、列車は安全に走行できる区間を指定されその線路上を走るという特殊性から3次元線路マップを利用した測位手法を新たに提案し評価を行った。またこの手法における測位解の信頼性を向上させるためにMSAS補正、RAIMを実装し、動作確認と効果を検証した。また単体の受信機での信頼性向上にこだわらず、2組の受信機とアンテナを用いて独立した測位解を比較することで測位解の検定を行う手法を提案し検証した。

第2章では、一般的なGPSの測位における基礎的な事項について言及した。本研究で対象とするRAIMの代表的な手法であるLeast-Squares-Residuals Methodを紹介した。

第3章では、3次元線路マップを利用した拘束条件付き測位について提案した。鉄道総研が所有する試験線において列車上部にアンテナを設置し静止状態及び移動状態での実験を行いその観測データを用いて測位手法を評価した。本手法では理論上2衛星での測位が可能であるため静止点観測実験において区間検索能力、2、3衛星測位能力の調査を行った。その結果、2衛星測位時の区間検索の曖昧性の問題を発見し、現段階での2衛星測位は使用できないことを確認した。単独測位と測位能力の比較したところ、単独測位に比べ高いアベイラビリティを得ることができた。また水平位置誤差及び3次元位置誤差の減少を確認した。

第4章では、3次元線路マップを利用した拘束条件付き測位における信頼性向上を目的とした。信頼性を高めるためによく用いられるMSASによる補正およびRAIM機能を実装し、その効果を検証した。また2組のアンテナと受信機を使用し、独立した測位解を比較する検定法について検証した。MSAS補正評価実験では使用した受信機の受信機ノイズが大きいことから思うほど効果を得ることができなかった。RAIMの動作検証においてはシミュレーション上では異常観測値の検知及び排除に成功し、その際測位精度の改善も確認した。2組のアンテナと受信機を使用し、独立した測位解を比較する検定法では、測位率の低下があるものの精度の改善と、誤差の大きな測位解の排除に成功した。

以上のことから本研究で提案する3次元線路マップを利用した拘束条件付き測位手法は単独測位よりアベイラビリティおよび測位精度が高く、またMSAS補正

や RAIM といった機能を併用することでより信頼性の高い測位解を得ることで列車の保安運用に近づけるものと考える。

## 5.2 今後の課題

本研究では鉄道総研内の試験線で観測したデータのみで評価を行った。今後ビル街等の様々な環境で観測し評価を行うことで現状隠れている問題が出てくる可能性があり、その都度対策を施し、より信頼性の高いシステムを目指すことが必要である。また前年に準天頂衛星「みちびき」が打ち上げられ、現在様々な機関で準天頂衛星システムの技術検証が行われている。準天頂衛星システムが本格的に運用された場合、日本の天頂付近に常に 1 機の準天頂衛星が観測できることになる。準天頂衛星システムにおけるレンジング機能及び補正機能を使用することで 3 次元線路マップを利用した拘束条件付き測位手法においてよりアベイラビリティと信頼性が向上すると考えられる。準天頂衛星システムが正式運用された際はこの評価を行うべきである。

## 参考文献

- [1] P.Misra, P.Enge 原著, A.Yasuda 他 訳 (2004) 「精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機-」, 社団法人 日本航海学会 GPS/GNSS 研究会
- [2] Bradford W. Parkinson et al.(1996) 「Global Positioning System:Theory and Applications Volume 1」
- [3] T.Takasu 「測位衛星による高精度測位技術開発研究」,  
<http://gpspp.sakura.ne.jp/index.shtml>
- [4] T.Sakai (2007) 「GPS のための実用プログラミング」
- [5] G.Xu (2003) 「GPS -Theory, Algorithms and Application-」
- [6] T.Sakai (2003) 「GPS 技術入門」
- [7] T.Sakai (2006) 「広域補強システム MSAS の性能評価」, 日本航海学会 GPS/GNSS シンポジウム 2006 , pp. 40 ~ 44
- [8] T.Sakai (2006) 「広域 DGPS と MSAS」 日本航海学会 GPS/GNSS シンポジウム 2006 , pp. 171 ~ 179
- [9] Y.Mouri (2008) 「日本版広域補正システム MSAS の測位精度評価」

## 謝辞

本稿作成及び日々の研究において、多岐にわたるご指導を賜りました安田明生教授に心より感謝申し上げます。ふまじめな私を熱心に根気強く見守っていただいたおかげで最後までやりとげられました。本当にありがとうございました。

日々の研究において、久保信明准教授にもご指導・ご助言頂きました。中曽根君の今後をよろしく願います。

海洋大の産学連携研究員である高須知二先生には、研究に関する貴重なご助言を何度も頂きました。高須先生のご協力無しでは本稿を作成出来ませんでした。心より感謝の意を表します。

技官の川村雅志先生にも色々のご指導いただきました。日々の生活、GPS/GNSSシンポジウムで様々なことを教えていただき、感謝申し上げます。

日頃よりお世話になりました研究室 OB の皆様にも心より感謝の意を表します。特に富永麗司さんには、学部4年生のころ厳しくも温かく指導していただきました。本当にありがとうございました。また近藤俊一郎さん、五味泰人さん、土本和彦、湯浅純一さんには研究や私生活において様々なアドバイスをいただきました。有難うございました。

博士課程の山田英輝さん、素敵な笑顔をありがとうございました。いつも笑顔で相談に乗っていただき、感謝申し上げます。

同期の川崎洋平さんや衛星航法工学研究室ならびに情報通信工学研究室の皆様にも感謝致します。お世話になりました。また、本研究は財団法人鉄道総合技術研究所との共同研究の一部であり、同法人からのご支援に対し心より謝意を表します。

最後に両親、祖父、祖母、弟、妹など家族の皆に心から感謝致します。

2011年3月 仁禮 和男