

# RTK-GPSにおけるデータ伝送方式及び高精度測位維持に関する研究

著者	浪江 宏宗
学位授与機関	東京商船大学
学位授与年度	1996
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1342/00000686/">http://id.nii.ac.jp/1342/00000686/</a>

# 修 士 論 文

題 目 RTK-GPSにおけるデータ伝送方式及び  
高精度測位維持に関する研究

指導教官 安 田 明 生 教 官

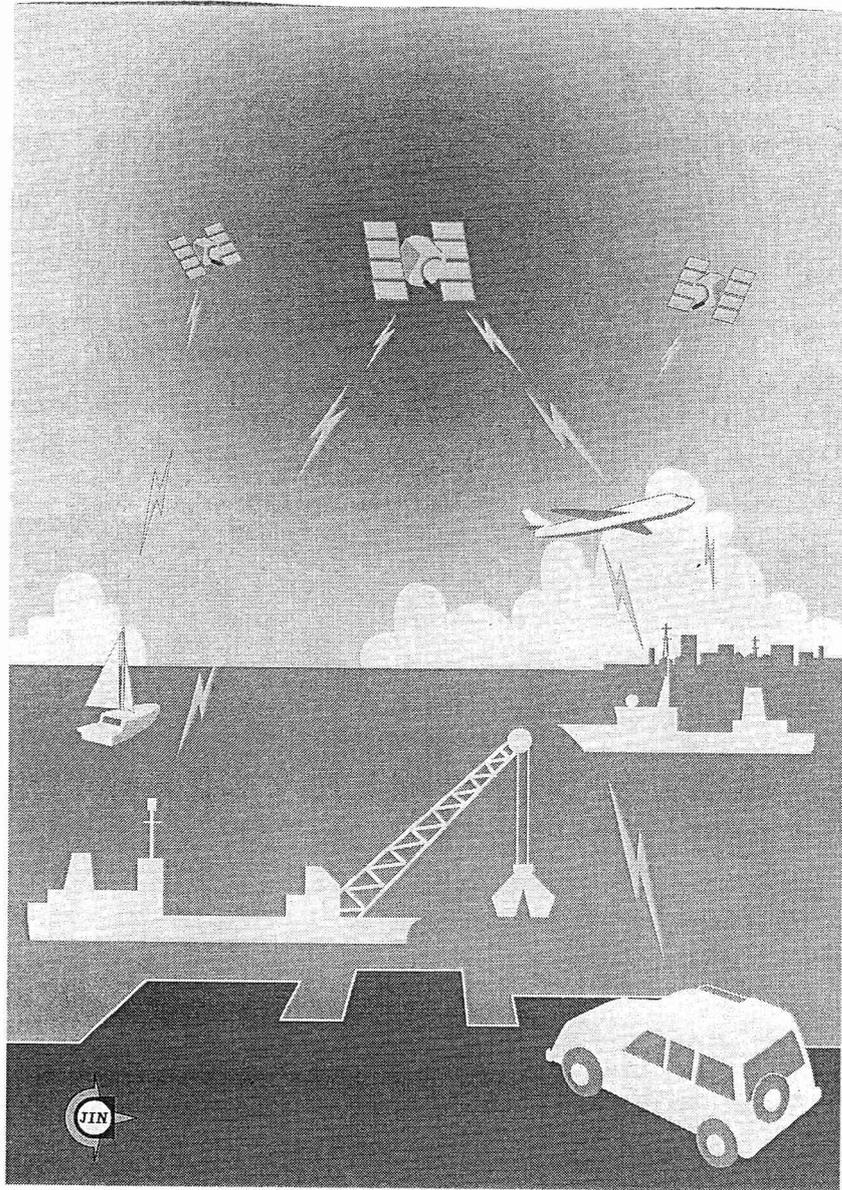
課 程 名 流通情報工学専攻

学籍番号・氏名 95207 浪 江 宏 宗

平成 9 年 1 月 31 日 提 出



# RTK-GPS におけるデータ伝送方式 及び高精度測位維持に関する研究



浪江 宏宗

平成9年 1月 31日

---

# 目次

<b>1 緒論</b>	<b>2</b>
1.1 はじめに	2
1.2 GPS の概要	2
1.3 RTK の概要	5
1.4 本研究の目的と概要	11
<b>2 RTK 測位原理</b>	<b>13</b>
2.1 RTK のシステム構成	13
2.2 搬送波位相データ	14
2.3 二重位相差	16
2.4 測位計算アルゴリズム	18
2.5 アンビギュイティ	22
2.6 RTK 測位原理の幾何学的解釈	24
2.7 RTK-OTF	27
<b>3 テレビ音声多重放送をデータ伝送に利用した RTK 測位</b>	<b>28</b>
3.1 はじめに	28
3.2 RTCM SC104 Ver.2.1 データ	29
3.3 Trimble CMR	35
3.4 実験概要	41
3.5 データ伝送時間	43
3.6 RTK 測位結果と考察	43
3.7 まとめ	45
<b>4 RTK の高精度測位維持についての 1 手法</b>	<b>47</b>
4.1 はじめに	47
4.2 共分散楕円	48
4.3 シミュレーション概要	51
4.4 シミュレーション結果	51

---

---

4.5	実時間への適用実験	54
4.6	まとめ	56
<b>5</b>	<b>結論</b>	<b>57</b>
5.1	総括	57
5.2	今後の課題	58
5.3	GPS 将来展望と問題	59

---

# 第 1 章

## 緒論

### 1.1 はじめに

1970 年代に DOD ( Department of Defence : 米国国防総省 ) によって開発が始められた GPS ( Global Positioning System : 全世界的測位システム ) は、1993 年末に正式にシステムとしての完成宣言が行われ、24 衛星の運用で全世界をカバー、地球上いつでもどこでも三次元測位を可能とする衛星測位システムとして世界中で広く利用されている。その主要目的はいうまでもなく移動体 ( Mobile ) の航法支援である。現在となってはカーナビ等の普及により身近なシステムとなっているが、元をたただせば大陸間弾道ミサイルがもたらした副産物であった。

### 1.2 GPS の概要

図 1.1<sup>(1)</sup>に GPS 衛星\* ( 以下衛星 ) の軌道の概念図を示す。

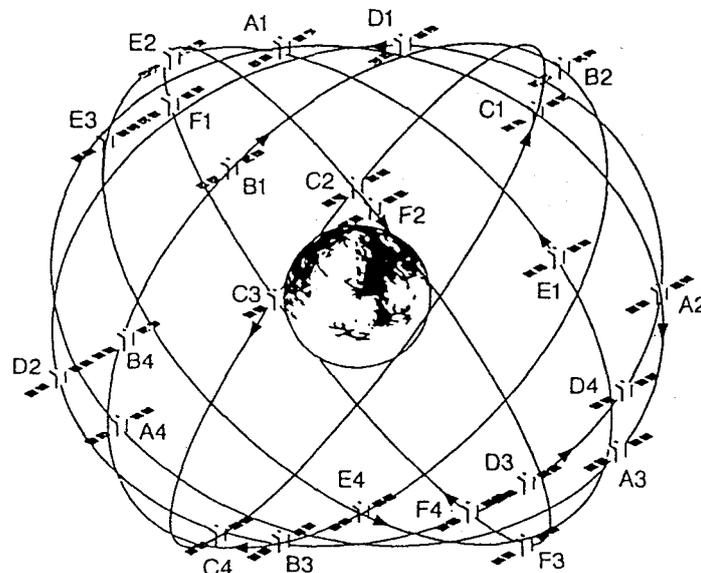


図 1.1: GPS 衛星の軌道概念図

\*正式には NAVSTAR 衛星 ( Navigation System with Time and Ranging ) という。

表 1.1<sup>(2)</sup>に衛星の主要諸元を示す。

表 1.1: GPS 衛星の主要諸元

項目	スペック
数	4機×6軌道面 = 24機
設計寿命	約 7.5 年
軌道半径	約 26,561 km
周回周期	約 11 時間 58 分 2 秒 ( 0.5 恒星時 )
軌道傾斜角	約 55 度
電波送信電力	約 25 W
搬送波周波数	L1 帯 : 1.57542 GHz ( 10.23 MHz × 154 ) L2 帯 : 1.2276 GHz ( 10.23 MHz × 120 )
測距信号	C/A コード : L1 帯で送信。一般に公開されている。 P コード ( Y コード ) : L1 帯、L2 帯双方で送信。非公開。
単独測位精度	C/A コード : 約 100 m ( 2drms 値、SA 下 ) P コード : 約 16 m ( 2drms )

同表から分かるように、24機の衛星が昇交点経度の異なる軌道半径約 26,000 km、軌道傾斜角約 55 度の 6 軌道面にそれぞれ 4 機ずつ配置されている。周回周期は約 11 時間 58 分 2 秒で恒星時に同期している。近年よく著されている軌道の概念図では、軌道傾斜角より判断して明かに間違ってしまったものを提示していることがあるため、厳密な意味では注意が必要である。

また、送信電力は約 25 W で、全ての衛星は測距のための信号を、L1 帯 ( 1.57542 GHz ) と L2 帯 ( 1.2276 GHz ) の 2 周波の搬送波を 2 相位相変調して送信している。基準発振器の周波数は 10.23 MHz でこれを L1 帯では 154 倍、L2 帯では 120 倍して搬送波を発生している。衛星から送信されている測距信号は乱数的な暗号の形態をなしており、GPS 受信機では乱数表に相当するコード・パターンを参照しながらその信号の内容を解読する。この乱数的なコードを PN コード ( Pseudo Random Noise Code : 擬似雑音符号 ) という。乱数的といっても通常の十進の乱数ではなく不規則的な '0' と '1' の系列をなしている。図 1.2<sup>(3)</sup>にその様子を簡単に示す。

ここで不規則的といっても不規則といわないのは、このようなパターンがある程度の長さ続くと、再び同じパターンを繰り返すためである。コードは擬似雑音符号発生器で個々の衛星に固有のものが割り当てられている。このコードで搬送波を位相変調するので、全衛星が同一の搬送波周波数で混信することなく受信することができる。従って、逆に受信機側では各々の衛星のコードを知らなければ受信できないことになる。

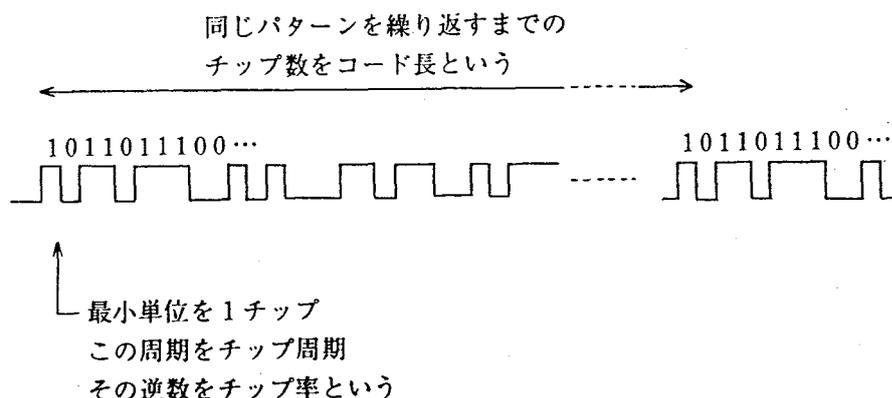


図 1.2: PN コードの概念図

つまりこのコードは時刻タイミング・測距信号としての機能と、衛星を判別するための機能をもつのである。

測距信号には C/A コード ( Clear and Acquisition, Coarse and Access ) と P コード ( Precise ) と呼ばれるものがあり、GPS の民間用の使用モードは衛星から送信されてくる L1 帯の搬送波に乗った C/A コードのみを基に測位する SPS ( Standard Positioning Service : 標準測位サービス ) である。SPS には米国の国防上の安全性への配慮から DOD による故意の精度劣化操作 SA ( Selective Availability : 選択利用性 ) が施されている。SA はブロック II 衛星から装備され、正式には 1990 年 3 月 25 日から開始された。SA は衛星に装備されている時計に誤差をもたせることによって故意に測距誤差を増大させるもので、時計の基本周波数に変動する誤差を導入していると考えられる。このため保証されている測位精度は公称  $2\text{drms}^{\dagger}$  値約 100 m、高度方向の  $1.96\sigma^{\ddagger}$  で 156 m といわれている。同様に速度誤差は 0.3 m/s、時間の誤差は 340 ns とされている。いずれも 95% 誤差円の半径あるいは 95% を含む平均値からの偏差である。99.99% なら緯度経度方向 300 m、垂直方向 500 m であるとされている。

また、米軍関係者のみが使用可能な P コードによる PPS ( Precise Positioning Service : 精密測位サービス ) では公称  $2\text{drms}$  で 16 m の測位精度であるといわれている。P コードは L1 帯及び L2 帯の搬送波双方に乗っているため、これを利用して電離層による誤差を補正できる。クロック周波数は基準発振器の 10.23 MHz で C/A コードの 10 倍なので帯域幅も広く、より雑音的となるため、秘匿性も高くなる。P コードはそのコード周期が 7 日間にも及ぶもので、一般の利用者向けではない。ただしコード・パターンが ICD-GPS-200 で公表されたため、このコードを利用する受信機が一部市販

<sup>†</sup>緯度経度方向放射状測位誤差の 2 乗平均の平方根の 2 倍 ( twice the root-mean-square ) で、測位点の平均位置を中心に半径  $2\text{drms}$  の円を描けば、その円の内側に全測位点の約 95% が含まれる。

<sup>‡</sup>高度方向の標準偏差  $\sigma$  の 1.96 倍で、平均高度  $\pm 1.96\sigma$  の範囲に全測位高度の 95% が含まれる。

された。このため DOD は P コードと同一のクロック・レートの Y コードを付加し、いつでも米軍関係者以外は利用不可能となる操作を行えるように修正した。Y コードは AS ( Anti-Spoofing : 妨害防止電波 ) 運用時のみ発動されるが、現在はほとんどこのモードで運用されている。

P コード及び C/A コード、いずれにも 50 bps で航法データが載せられており、これを解読して衛星位置などを求め、軌道計算や電離層補正などを行うことができる。表 1.2<sup>(2)</sup>に航法データの概要を示す。

表 1.2: 航法データの概要

項目	内容
伝送レート	50 bps
構成	1500 bit/フレーム 1 周期 ( 12.5 分 ) 25 フレーム
航法データの 主要内容	衛星位置データ ( Ephemeris ) 搭載している時計のデータ ( GPS 時間とのずれ等 ) 電離層補正係数データ 他の衛星位置データ ( Almanac )

それぞれの衛星からは衛星健康状態や衛星識別番号、衛星軌道データ、衛星時計補正データ、電離層補正係数等のデータが送信されてくるが、コード・パターンを使用して解読することにより初めてこれらの内容を取り出すことができるのである。

搬送波位相を測距に使用する RTK-GPS ( Real-Time Kinematic GPS : リアルタイム・キネマティック GPS 以下 RTK ) では、航法データは取得できないものの AS 時でも位相の測定は可能であり、搬送波位相を測距に使用することで更に高精度測位が可能となる。次に RTK の概要を述べる。

### 1.3 RTK の概要

GPS の単独測位では移動体での利用が大きな特長であった。従来の搬送波位相を使用した測量では原則として静止状態での利用しか考えていなかった。そして基線解析はオフラインで行うため、結果を得るのに若干の時間を要した。それを更に実時間に近く、しかも更に高精度に位置を決定しようというのが KGPS である。また、それをまさにほぼ実時間で行うのが RTK である。

衛星から送信されてくる搬送波は、時間と場所を選ばず世界中で 24 時間観測可能である。搬送波の L1 帯の波長は約 190.29 mm であり、L2 帯では約 244.21 mm であ

る。使用する GPS 受信機によって精度は異なるが、通常この波長の 1/100 程度の位相分解能を得ることは割合容易であるといわれている。L1 帯の搬送波位相を測距に使用すると、標準偏差で数 mm 程度の距離分解能を取得できる。よって、これを連続的に追尾 (Tracking : トラッキング) し、精密な物差として利用すれば、高精度測位が実時間で可能となるわけである。次に RTK の応用について、実例を挙げて簡単に説明する。

(1). 海洋及び沿岸における応用

- 船舶離着棧操船

船舶の離着棧時には安全性の面から cm 単位の測位精度と cm/s 単位の計速精度が必要である。図 1.3<sup>(4)</sup> に RTK を使用して測定した TSL ( Techno Super Liner : テクノスーパーライナ ) 着棧試験時のシステム概念図を示す。

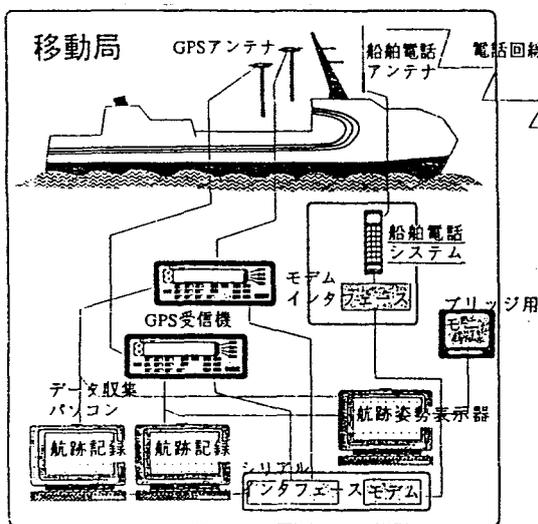


図 1.3: TSL 測位システムの概念図

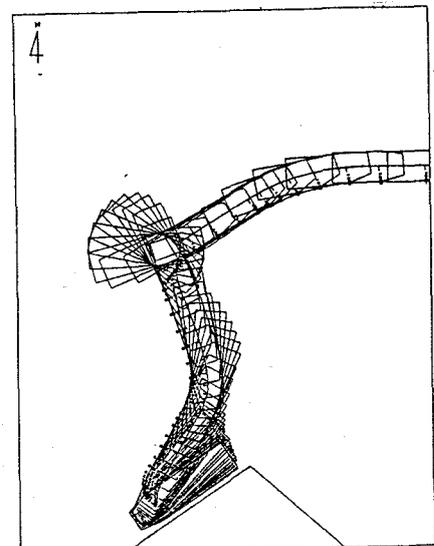


図 1.4: 着棧試験時の航跡

基準局を横須賀港新港埠頭の設置された。TSL の利用者局までのデータ伝送は通常の自動車電話が使用されており、事前に東京湾の湾口部でも利用可能であることが確認されていた。TSL の航跡を確定させるため、船体の右舷側及び左舷側の 2ヶ所に GPS アンテナを設置し、測位結果から船舶の方位を推定した。

図 1.4<sup>(4)</sup> にそのときの航跡を示す。高精度測位が要求される船舶の離着棧時には、港湾内や岸壁近辺での操船がほとんどとなるため、船体に設置されたアンテナが船上の構造物のみではなく、周辺の建造物等によって影響を受け、電波障害が発生する恐れがあるため、マルチパスによる精度の劣化やサイクルスリップ等に対応するための事前対策が重要であると考えられる<sup>(4)</sup>。

- 沿岸工事

沿岸工事における位置決定は、設計や施工の基本となるものであり、高精度な測位が要求される。RTK は高精度測位がリアルタイムかつ三次元的に可能であることから、浚渫船や測量船への塔載も盛んに進んでいる。写真 1<sup>(6)</sup>に巨大なフローティング・クレーン ( Floating Crane ) を使用した沿岸工事の外観を示す。この工事には建設資材である巨大なケーソンの誘導、及び設置位置を精密に決定するために RTK が併用されている<sup>(6)</sup>。



写真 1: 沿岸工事の外観 ( 提供 西松建設 (株) )

- 海中測位

各種機械や構造物を海中及び海底の所定位置に精密に設置する場合や、海底のプレート運動や地殻変動の状況を調査するとによって地震や火山活動を予測する場合。図 1.5に海中位置測定システムの概念図を示す<sup>(5)</sup>。

まず、RTK を用いて船舶の位置を正確に決定し、次に船舶より吊り下げた測定機器や作業機器等の位置を決定するものである。

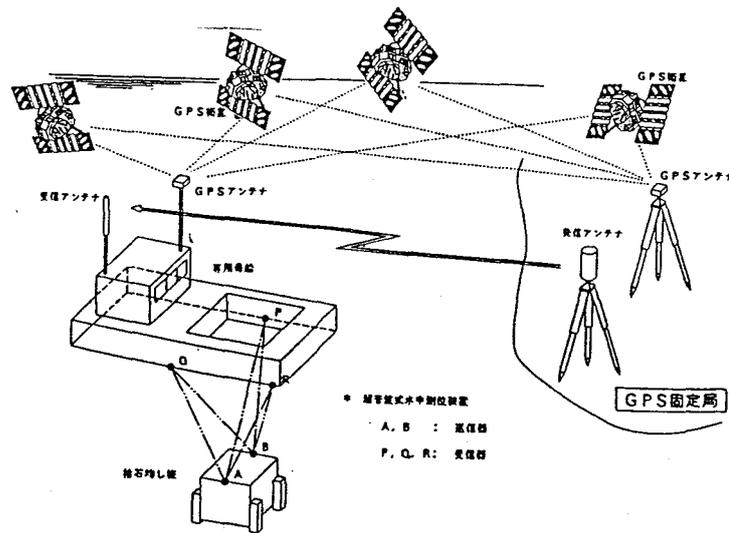


図 1.5: 海中位置測定システムの概念図

● 潮汐測定

一見、平坦に見える海面も、地球の重力場の不均一や海流などの影響のために、大きなスケールで見ると決して平坦ではなく、地球全体で見ると 150 m にも及ぶ凸凹があると知られている。この海面高度の変動を高精度に計測してジオイド ( Geoid ) を考慮するとにより、潮汐や海洋学的な面からの海面高度変化のプロセスを知ることができる。図 1.6<sup>(7)</sup>に RTK を使用して測定した船舶の位置とジオイドの様子を示す<sup>(7)</sup>。RTK による測定値は

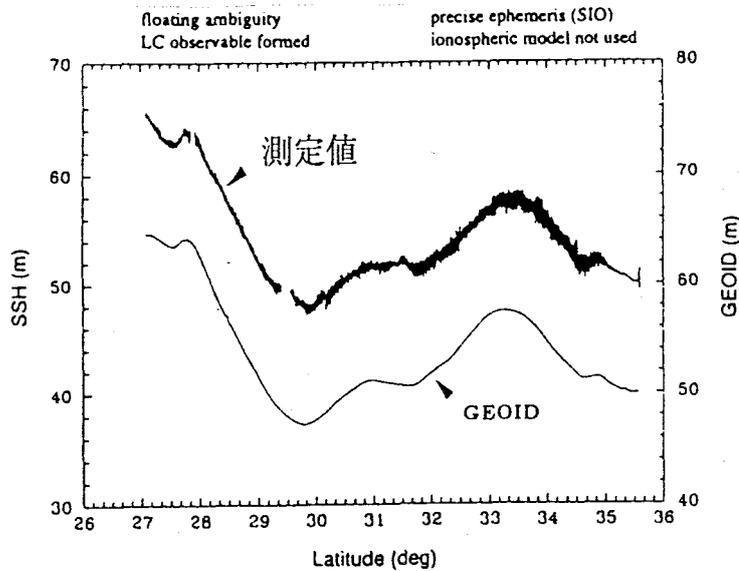


図 1.6: 船舶の位置とジオイド分布

小刻みに変動しているが、これは測位誤差と波浪の影響が統合されたものであると考えられる。測定値とジオイドの変化がよく一致していることが分かる。

また、図 1.7<sup>(8)</sup>に岸壁に繋留中の船舶の上下動を RTK で測定し、潮汐変動を測定した結果を示す<sup>(8)</sup>。

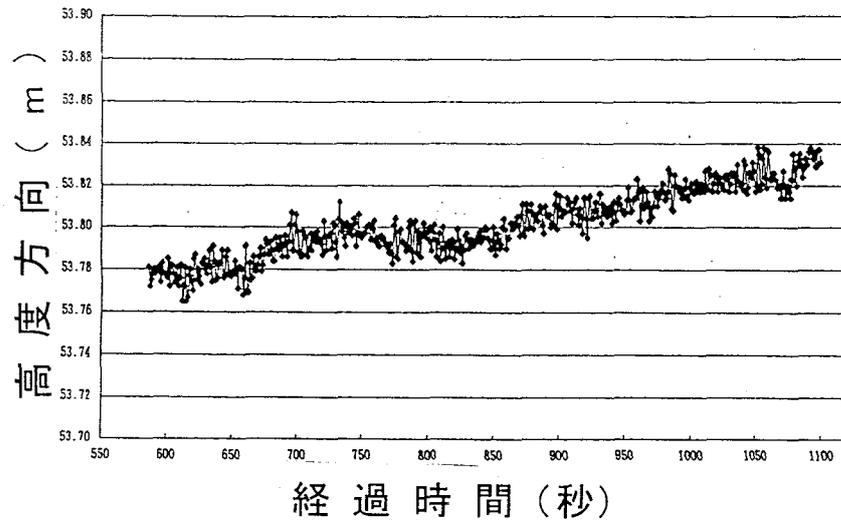


図 1.7: 潮汐変動の測定結果

小刻みな変動は、波浪によるものと RTK の測位誤差に起因するものが統合されていると考えられる。全体の変化として RTK の測定高度が徐々に大きくなっているが、これが潮汐による変動であると考えられる。

- 姿勢測定

図 1.8<sup>(9)</sup>に RTK を利用した姿勢角度測定装置を使用して動揺を測定した結果を示す。

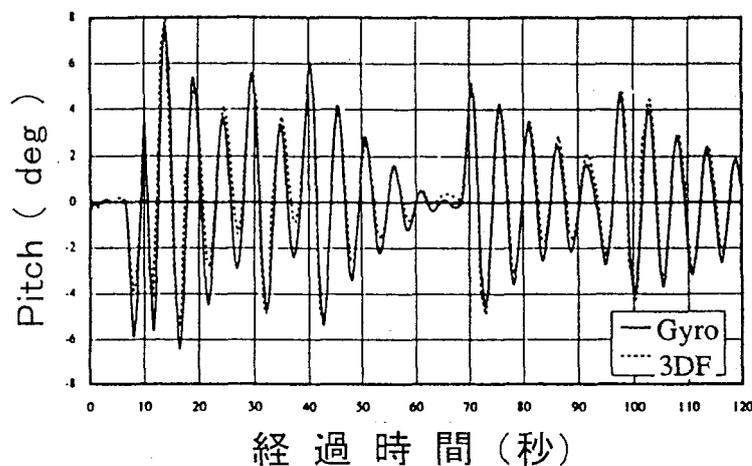


図 1.8: 動揺測定結果

図中の 3DF は RTK を使用したものの、Gyro は比較に用いたバーチカル・ジャイロの出力結果である<sup>(9)</sup>。RTK の測位結果はジャイロと比較してよく追従していると考えられる。

## (2). 航空分野における応用

## ● 擬似衛星 (Pseudolite : シュードライト)

航空機の航空路への精密進入誘導を支援するもので、図 1.9 にその概念図を示す<sup>(10)</sup>。航空機は実際の衛星と擬似衛星からの電波を受信し、基準局か

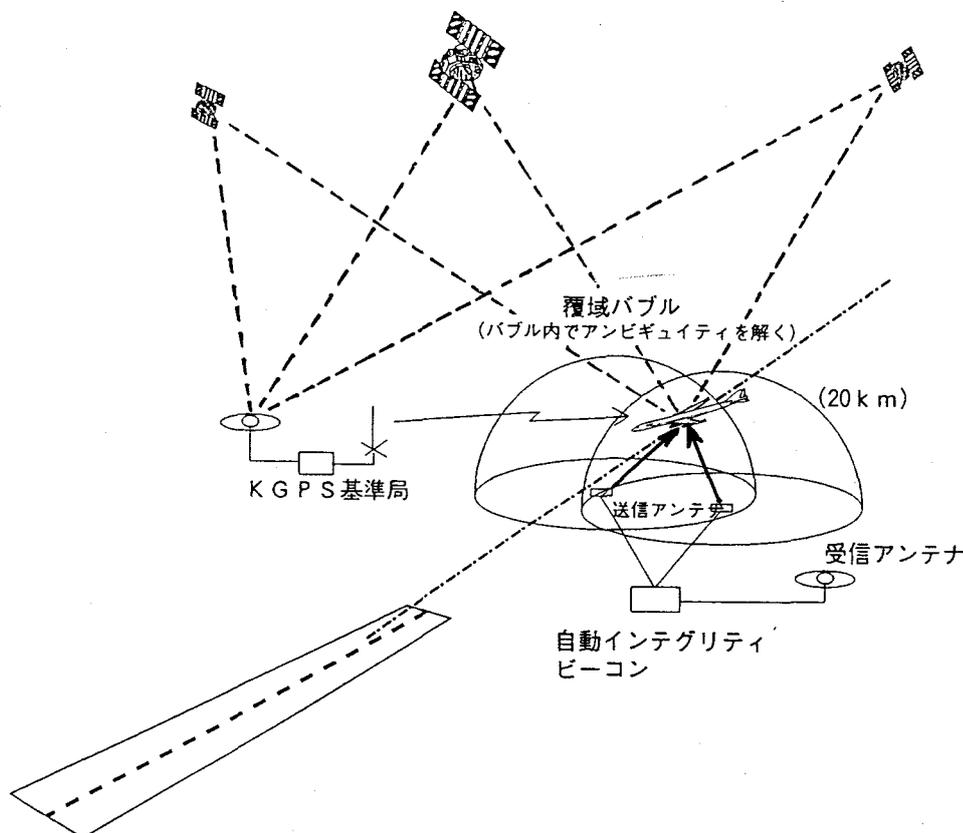


図 1.9: 擬似衛星の概念図

ら送信されてきたデータを利用して RTK 測位を行う。擬似衛星は予め既知の位置に設置されており、実際の衛星をほとんど同じ役割りをはたしている。航空機の着陸時には RTK の信頼性が重要視されるが、このように擬似衛星を使用することによって信頼性が向上する。

## ● 姿勢測定

航空機の姿勢角度を測定するものである。図 1.10<sup>(11)</sup>に RTK を利用した姿勢角度測定装置を使用して動揺を測定した結果を示す。左図が比較に用いた慣性航法装置による出力結果、右図が RTK を使用したものである<sup>(11)</sup>。このようなシステムを航空機等比較的高速で移動する移動体で使用する場合には、信頼性や測定結果の出力遅延が大きな問題となる。

以上のように高精度でかつ実時間性を要する測位測定計測分野に対して、様々な形態で RTK を効果的に適用するための研究が進んでおり、既に実現に近づいているものもある。またこれから更に多方面で応用されてゆくと考えられる。

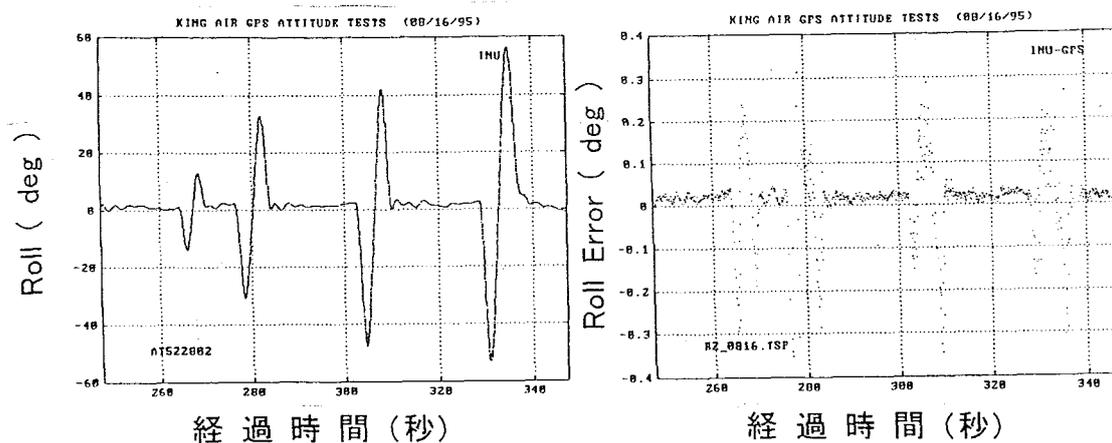


図 1.10: 動揺測定結果

## 1.4 本研究の目的と概要

前節で示したように、現在 RTK は様々な分野で有効に利用する実験研究が盛んに行われており、その範囲は今後更に拡大の一途をたどるであろうと思うわれる。しかし、実際に RTK を使用するにあたって、幾つかの深刻な問題点が浮き彫りとなっており、それらを解決しなければなかなか実用化への道のりは遠いといえる。

まず第 1 にデータリンクが問題として挙げられるであろう。RTK には必ず 2 台以上の GPS 受信機が必要で、一方の受信機から他方の受信機に搬送波位相データ等を伝送しなければならない。このためデータリンクが必ず必要となる。現在までのところ、各メーカー共に独自で開発したデータ伝送フォーマットを使用している場合が多く、どのメーカーの受信機にも共通して対応できる基準局及びデータリンクの設置が困難な状況となっている。また、RTCM SC104 Ver.2.1 ( Radio Technical Commission for Maritime Service Special Committee No.104 Version 2.1 : 米国海上無線技術委員会第 104 特別委員会 バージョン 2.1 以下 RTCM ) ではこの状況を改善し、RTK をより一般へ拡大するため、メッセージの Type18~21 にそのデータ伝送フォーマットを定めており、既にこのデータ伝送フォーマットのデータを扱う受信機が市販されている。

このように RTK を一般に普及させる動きが進行するという状況の中で、RTK のデータリンクを構成するための 1 研究として、著者は現在世界的にも広く認知されている RTCM RTK データ ( Type1, 3, 18, 19 ) を、現行のテレビ音声多重データ放送を利用して伝送し、RTK 測位する実験を行った。また、Trimble Navigation Limited が公表した CMR データを使用して同様の実験を行った。これらのデータ伝送フォーマットの詳細については、後の章で記述する。

次に、RTK 測位の不安定さが問題として挙げられる。これは建物等による遮蔽や干渉によって衛星から送信されている搬送波の位相が何らかの影響を受け、その結果

---

として測位分布が拡大したり大きくドリフトしたり、またジャンプしたりするという状況がしばしば発生している。これは RTK を応用した各種測定装置の実用化の大きな妨げとなっている。

そこで、これらの状況を改善するための 1 つの方法として、著者は KGPS 測位結果の緯度経度方向測位分布と衛星配置によって決定される緯度経度方向測位分布の予測を示す共分散楕円とを比較することにより、測位誤差の原因となっている衛星の推測を試みた。

次の章では、これらの研究結果を報告する前に、RTK の測位原理について詳述する。

## 第 2 章

# RTK 測位原理

### 2.1 RTK のシステム構成

RTK の主な構成要素はほとんど DGPS と同じである。すなわち、既知固定基準局 ( Reference Station, Base Station 以下基準局 )、データリンク ( Data Link ) 及び利用者局 ( User Station, Remote Station, Rover Station : 移動局 以下利用者局 ) である。図 2.1 に RTK の概念図を示す。既知の固定点に設置された基準局受信機では 4 機

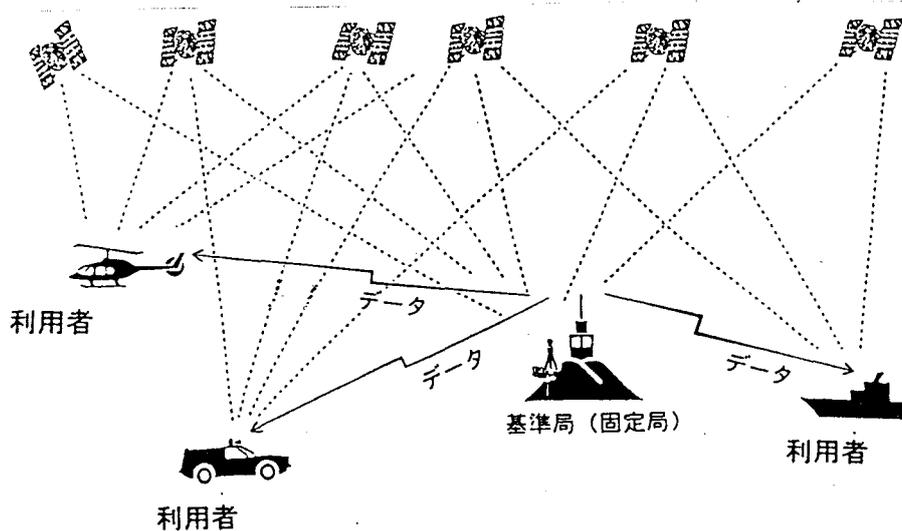


図 2.1: RTK の概念図

以上の衛星からの搬送波位相を測定し、そのデータを利用者局に伝送する。同時に、利用者局受信機でも同じ衛星からの搬送波位相を測定し、基準局から伝送された位相データと比較することで、利用者局の三次元位置が求められる。

GPS 受信機で受信された衛星から送られてくる搬送波位相データは、搬送波の波数を単位とした位相データであるので、まず搬送波位相データについて述べる。次に、高精度測距を実現する搬送波の一重位相差及び二重位相差について記述する。次に、

搬送波位相のアンビギュイティ (Ambiguity\*) と RTK の測位計算についてそれぞれ述べる。そして、最後に RTK 測位の幾何学的な解釈について記述する。

## 2.2 搬送波位相データ

### (1). 搬送波位相データ

RTK では衛星から送信されてくる搬送波位相データを用いて測位計算を行う。電離層や対流圏等による誤差及び受信系の S/N 比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、受信機 A で測定された衛星 i からの搬送波位相データ  $\Phi_{iA}$  は、式 (2.1)<sup>(12)</sup> で表される。

$$\Phi_{iA} = \frac{f}{c} \rho_{iA} + d_i + \delta_A + N_{iA} \quad (2.1)$$

ただし、

- $f$  : 搬送波周波数
- $c$  : 光速
- $\rho_{iA}$  : GPS 受信機アンテナ A と衛星 i 間の距離
- $d_i$  : 衛星 i の時計の誤差による搬送波位相データの誤差
- $\delta_A$  : 受信機 A の時計の誤差による搬送波位相データの誤差
- $N$  : アンビギュイティ

である。

図 2.2 に実際に NovAtel Communications 社製の 3151R 型 GPS 受信機から取得した、搬送波位相データの時系列の一例を示す。

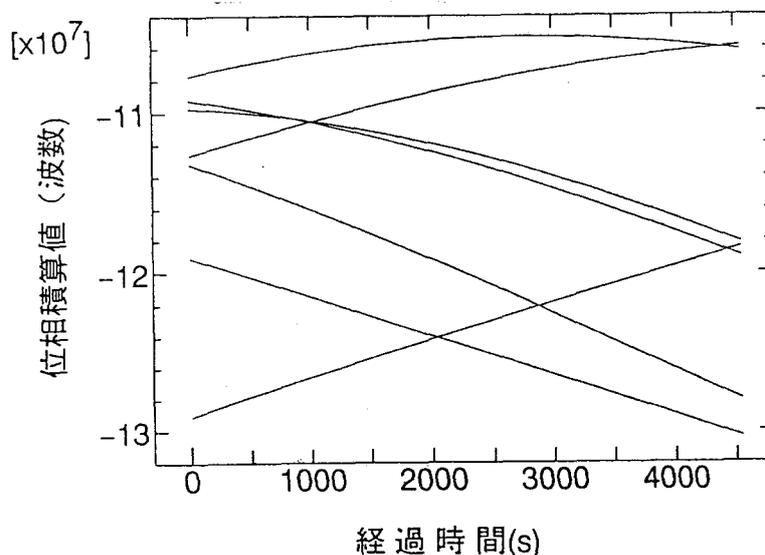


図 2.2: 搬送波位相データの時系列の一例 (複数衛星)

\*日本では整数値バイアスと呼ばれることもある。

同図には複数の衛星から同時に取得したデータを示した。一見、位相データの増減は緩やかであるように見えるが、縦軸は搬送波の波数を単位として 10 の 7 乗のオーダーであり、急激に増減していることが分かる。

次に、図 2.3 に搬送波位相データの揺らぎ誤差の状況の一例を時系列で示す。

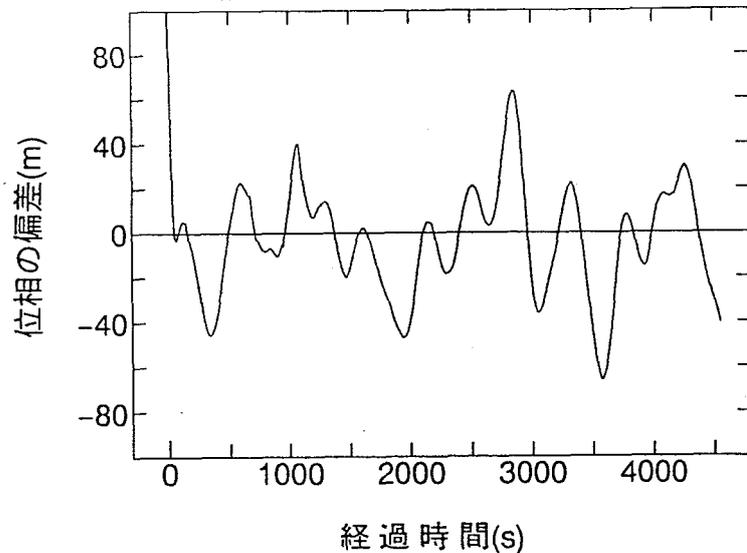


図 2.3: 搬送波位相データの揺らぎ誤差の時系列の一例

同図より、平均 60 m 程度の振幅で大きく変動していることが分かる。このことから SA は搬送波位相、つまり C/A コードの時刻同期タイミングを決定する、衛星内の時計に対して施されていると考えられる。

## (2). 衛星間一重位相差

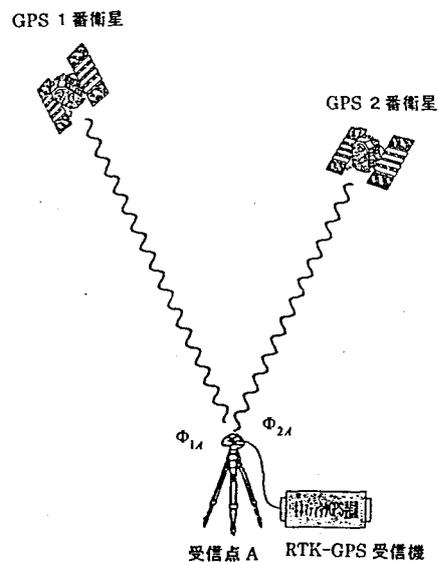


図 2.4: 衛星間一重位相差の概念図

図 2.4<sup>(13)</sup> に示すように、ある時刻に受信機 A で同時に観測している衛星群内の 2 機をそれぞれ  $i$  及び  $j$  とし、測定された搬送波位相データをそれぞれ  $\Phi_{iA}$ 、 $\Phi_{jA}$  とすると、受信機 A に対する搬送波位相データの衛星間一重位相差  $D\Phi$  は、

$$D\Phi(i, j; A) = \Phi_{jA} - \Phi_{iA} \quad (2.2)$$

である。2つの搬送波位相データ  $\Phi_{iA}$ ,  $\Phi_{jA}$  に共通して含まれていた受信機の時計誤差による位相データの誤差が衛星間一重位相差の処理によって完全に消去される。しかし、衛星時計誤差による位相データの誤差は残る。

### (3). 受信機間一重位相差

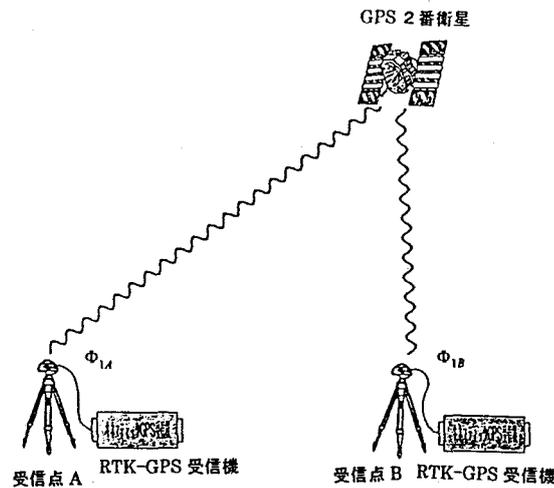


図 2.5: 受信機間一重位相差の概念図

図 2.5<sup>(13)</sup>に示すのようにある時刻に受信機 A, B でそれぞれ測定された衛星  $i$  からの搬送波位相データを  $\Phi_{iA}$ ,  $\Phi_{iB}$  とすると、衛星  $i$  に対する搬送波位相データの受信機間一重位相差  $D\Phi$  は、

$$D\Phi(i; A, B) = \Phi_{iB} - \Phi_{iA} \quad (2.3)$$

である。2つの搬送波位相データ  $\Phi_{iA}$ ,  $\Phi_{iB}$  に共通して含まれていた衛星内部の時計誤差による位相データの誤差が、搬送波位相データの受信機間一重位相差の計算により完全に消去される。しかし、受信機の時計誤差による位相データの誤差は残る。

## 2.3 二重位相差

図 2.6<sup>(14)</sup>に示すのようにある時刻に、 $i$  番衛星と  $j$  番衛星から送られてくる搬送波位相データをそれぞれ A, B 2 台の受信機で測定する。このとき、各 GPS 受信機で測定された  $i$  番衛星からの搬送波位相データを  $\Phi_{iA}$ ,  $\Phi_{iB}$ 、また  $j$  番衛星からの搬送波位相データを  $\Phi_{jA}$ ,  $\Phi_{jB}$  とすると、搬送波位相データの二重位相差  $DD\Phi(i, j; A, B)$  は式 (2.4)<sup>(12)</sup> のようになる。

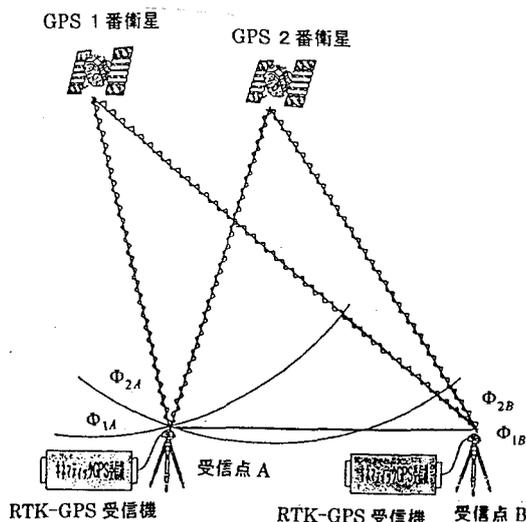


図 2.6: 二重位相差の概念図

$$\begin{aligned}
 DD\Phi(i, j; A, B) &= (\Phi_{jB} - \Phi_{jA}) - (\Phi_{iB} - \Phi_{iA}) \\
 &= (\Phi_{jA} - \Phi_{iA}) - (\Phi_{jB} - \Phi_{iB})
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

ここで、受信機内部の時計誤差による位相データの誤差及び衛星内部の時計誤差による位相データの誤差が完全に消去される。i, j 番衛星と A 点が既知なので、 $DD\Phi$ を測定できれば $\Phi_{jB} - \Phi_{iB}$ 、すなわち未知の点 B から i, j 番衛星までの距離差に関連した値が正確に求まることになる。

以上のように、RTKでは二重位相差の処理を行うことでSAなどによる位相データの誤差を相殺して高精度測距を実現している。図 2.7に、前述の搬送波位相データを用いて計算した二重位相差の時系列の一例を示す。

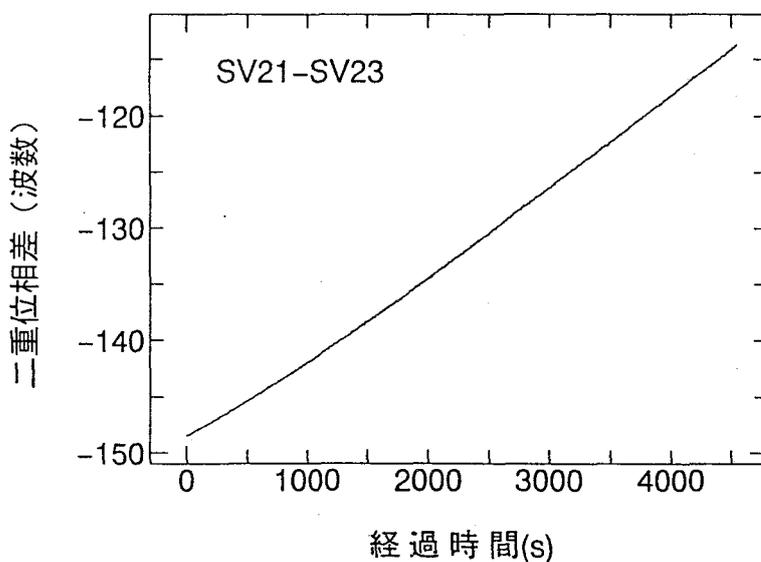


図 2.7: 二重位相差の時系列の一例

同図のようにサイクルスリップが発生していなければ、1 波長以上の位相のジャンプはなく連続的に変化する。

更に、図 2.8 にこの二重位相差の回帰曲線からのばらつき誤差の時系列の一例を示す。

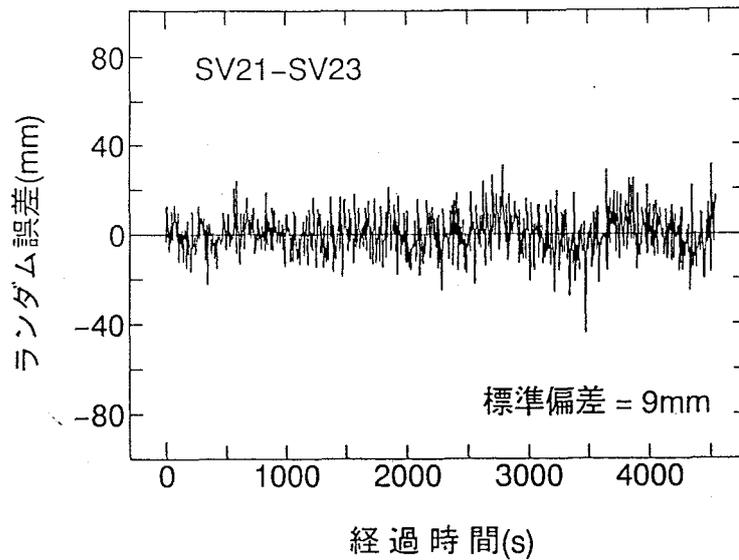


図 2.8: 二重位相差のランダム誤差の時系列の一例

二重位相差の処理によって相殺されなかったランダムな誤差は回帰曲線に対して標準偏差が 9 mm 程度となっており、これが今回使用した NovAtel 3151R GPS 受信機固有の測距精度であるといえる。

次に、RTK 測位計算アルゴリズムについて詳述する。

## 2.4 測位計算アルゴリズム

GPS では地球中心と楕円中心の一致した楕円体を基準にした、WGS-84 ( World Geodetic System 1984 : 全世界的測地系 1984 ) と呼ばれる座標系により経度と緯度、及び高さが計算される。また、使用している xyz 三次元直交座標系は ECEF ( Earth Centered Earth Fixed ) と呼ばれ、地球の中心を原点、地球の自転軸方向を z 軸 ( 天の北極方向 )、グリニッジ基準子午面と赤道が交わる方向を 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。

各衛星からの搬送波の周波数が等しい ( ドリフトなし ) と仮定すると、前出の二重位相差の式 (2.4) は次式のようにも書き表すことができる。

$$DD\Phi(i, j : A, B) = \frac{f}{c} \{ (\rho_{jB} - \rho_{iB}) - (\rho_{jA} - \rho_{iA}) \} + N_{ijAB} \quad (2.5)$$

ここで、 $\rho$  は基準局受信機及び利用者局受信機のアンテナ位置  $(x_A, y_A, z_A)$ 、 $(x_B, y_B, z_B)$ 、更には衛星  $i$ 、衛星  $j$  の位置  $(x_i, y_i, z_i)$ 、 $(x_j, y_j, z_j)$  の各 xyz 三次元直交座標を用いると、

$$\begin{aligned}
\rho_{iA} &= \sqrt{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2 + (z_i - z_A)^2} \\
\rho_{jA} &= \sqrt{(x_j - x_A)^2 + (y_j - y_A)^2 + (z_j - z_A)^2} \\
\rho_{iB} &= \sqrt{(x_i - x_B)^2 + (y_i - y_B)^2 + (z_i - z_B)^2} \\
\rho_{jB} &= \sqrt{(x_j - x_B)^2 + (y_j - y_B)^2 + (z_j - z_B)^2}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

である。

ここで、基準局位置の位置は既知であると仮定し、未知のパラメータを整理すると、衛星位置  $(x_i, y_i, z_i)$ 、 $(x_j, y_j, z_j)$  は衛星から送信される軌道データを元に求めることができるため、利用者局の xyz 三次元直交座標成分  $(x_B, y_B, z_B)$  と各二重位相差毎のアンビギュイティということになる。式 (2.5) 第 2 項のアンビギュイティは搬送波をトラッキングし続けていれば変化なく、二重位相差毎に一定値となり未知数は各式毎に 1 つずつである。従って、独立な二重位相差から定義される方程式の数よりも未知のパラメータの方が多く、このままでは解は得られない。しかし、一定時間後にも同様に別の方程式が次々に定義されるので、利用者局位置も固定であると仮定すれば、アンビギュイティと共に利用者局位置が求められる。

実際の計算では、エポック 1 における式 (2.4) 及び式 (2.5) を使用して、1 番衛星を基準衛星<sup>†</sup>とする。すると、式 (2.7) のように独立な二重位相差から方程式が定義される。ただし  $s$  は測位計算に使用した (衛星の数)-1 とする。

$$\begin{aligned}
(\Phi_{2B} - \Phi_{2A} - \Phi_{1B} + \Phi_{1A}) - f/c(-\rho_{2A} + \rho_{1A}) &= f/c(\rho_{2B} - \rho_{1B}) + N_{12AB} \\
(\Phi_{3B} - \Phi_{3A} - \Phi_{1B} + \Phi_{1A}) - f/c(-\rho_{3A} + \rho_{1A}) &= f/c(\rho_{3B} - \rho_{1B}) + N_{13AB} \\
(\Phi_{4B} - \Phi_{4A} - \Phi_{1B} + \Phi_{1A}) - f/c(-\rho_{4A} + \rho_{1A}) &= f/c(\rho_{4B} - \rho_{1B}) + N_{14AB} \\
&\vdots && \vdots \\
(\Phi_{sB} - \Phi_{sA} - \Phi_{1B} + \Phi_{1A}) - f/c(-\rho_{sA} + \rho_{1A}) &= f/c(\rho_{sB} - \rho_{1B}) + N_{1sAB}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

エポック 2 でも同様に独立な二重位相差、

$$\begin{aligned}
(\Phi'_{2B} - \Phi'_{2A} - \Phi'_{1B} + \Phi'_{1A}) - f/c(-\rho'_{2A} + \rho'_{1A}) &= f/c(\rho'_{2B} - \rho'_{1B}) + N_{12AB} \\
(\Phi'_{3B} - \Phi'_{3A} - \Phi'_{1B} + \Phi'_{1A}) - f/c(-\rho'_{3A} + \rho'_{1A}) &= f/c(\rho'_{3B} - \rho'_{1B}) + N_{13AB} \\
(\Phi'_{4B} - \Phi'_{4A} - \Phi'_{1B} + \Phi'_{1A}) - f/c(-\rho'_{4A} + \rho'_{1A}) &= f/c(\rho'_{4B} - \rho'_{1B}) + N_{14AB} \\
&\vdots && \vdots \\
(\Phi'_{sB} - \Phi'_{sA} - \Phi'_{1B} + \Phi'_{1A}) - f/c(-\rho'_{sA} + \rho'_{1A}) &= f/c(\rho'_{sB} - \rho'_{1B}) + N_{1sAB}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

が定義でき ( ' 付きのパラメータはエポック 2 のデータを意味する。)、アンビギュイティと利用者自身の xyz 三次元位置座標を求めることができる。

<sup>†</sup>独立な搬送波の二重位相差を容易に得るため、基準衛星を決めている。

しかし、式 (2.7) 及び式 (2.8) 中の  $\rho, \rho'$  は、実際はそれぞれ式 (2.6) であり、未知数の 2 乗や平方根があって線形でないため簡単に解くことができない。このような場合には、未知数をその近似値と修正値との和で表し、式をその修正値について展開する。ここで修正値は微小であると仮定し二次以上の高次項を無視し、式を線形化する。そうすれば、修正値についての連立一次方程式となり、逐次近似計算により必要な精度まで計算を繰り返し、未知数を容易に求めることができる。

まず、 $n$  回目の演算後の利用者局位置を  $(x_n, y_n, z_n)$  とすると、そのときの  $i$  番衛星と利用者局間及び  $j$  番衛星と利用者局間の近似距離差  $\rho_n = \rho_{nj} - \rho_{ni}$  は、

$$\rho_n = \sqrt{(x_n - x_j)^2 + (y_n - y_j)^2 + (z_n - z_j)^2} - \sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 + (z_n - z_i)^2} \quad (2.9)$$

で表される。ここで、添字  $n$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) は逐次近似計算の回数である。ただし、 $n = 0$  というのは初めに仮定した利用者局位置  $(x_0, y_0, z_0)$  であり、近似距離差  $\rho_0$  は衛星と初めに仮定した利用者局間の計算距離である。

式 (2.7) と式 (2.8) は、この仮定のために、実際は両辺に対して等式は成立しない。そこで、これらの各式において (右辺)-(左辺) を計算して次のような行列とする。

$$B = \begin{pmatrix} \{f/c(\rho_{2B} - \rho_{1B}) + N_{12AB}\} - \{DD\Phi(1, 2 : A, B) - f/c(-\rho_{2A} + \rho_{1A})\} \\ \{f/c(\rho_{3B} - \rho_{1B}) + N_{13AB}\} - \{DD\Phi(1, 3 : A, B) - f/c(-\rho_{3A} + \rho_{1A})\} \\ \{f/c(\rho_{4B} - \rho_{1B}) + N_{14AB}\} - \{DD\Phi(1, 4 : A, B) - f/c(-\rho_{4A} + \rho_{1A})\} \\ \vdots \\ \{f/c(\rho_{sB} - \rho_{1B}) + N_{1sAB}\} - \{DD\Phi(1, s : A, B) - f/c(-\rho_{sA} + \rho_{1A})\} \\ \{f/c(\rho'_{2B} - \rho'_{1B}) + N_{12AB}\} - \{DD\Phi'(1, 2 : A, B) - f/c(-\rho'_{2A} + \rho'_{1A})\} \\ \{f/c(\rho'_{3B} - \rho'_{1B}) + N_{13AB}\} - \{DD\Phi'(1, 3 : A, B) - f/c(-\rho'_{3A} + \rho'_{1A})\} \\ \{f/c(\rho'_{4B} - \rho'_{1B}) + N_{14AB}\} - \{DD\Phi'(1, 4 : A, B) - f/c(-\rho'_{4A} + \rho'_{1A})\} \\ \vdots \\ \{f/c(\rho'_{sB} - \rho'_{1B}) + N_{1sAB}\} - \{DD\Phi'(1, s : A, B) - f/c(-\rho'_{sA} + \rho'_{1A})\} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

また、利用者局の近似位置  $(x_n, y_n, z_n)$  に対するそれぞれ修正値は  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  であり、両者の関係は式 (2.11) のようになる。

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + \Delta x \\ y_{n+1} = y_n + \Delta y \\ z_{n+1} = z_n + \Delta z \end{cases} \quad (2.11)$$

式 (2.9) を修正値  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  の周りで展開して、二次以上の高次項を無視すると線形方程式 (2.12) が得られる。

$$\rho_{n+1} = \rho_n + \frac{\partial \rho}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial \rho}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial \rho}{\partial z} \Delta z \quad (2.12)$$

ここに  $\partial \rho / \partial x, \partial \rho / \partial y, \partial \rho / \partial z, \partial \rho' / \partial x', \partial \rho' / \partial y', \partial \rho' / \partial z'$  は次式のようなになる。

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{x-x_j}{\sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2+(z-z_j)^2}} - \frac{x-x_i}{\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}} \\ \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{y-y_j}{\sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2+(z-z_j)^2}} - \frac{y-y_i}{\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}} \\ \frac{\partial \rho}{\partial z} = \frac{z-z_j}{\sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2+(z-z_j)^2}} - \frac{z-z_i}{\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}} \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho'}{\partial x'} = \frac{x'-x'_j}{\sqrt{(x'-x'_j)^2+(y'-y'_j)^2+(z'-z'_j)^2}} - \frac{x'-x'_i}{\sqrt{(x'-x'_i)^2+(y'-y'_i)^2+(z'-z'_i)^2}} \\ \frac{\partial \rho'}{\partial y'} = \frac{y'-y'_j}{\sqrt{(x'-x'_j)^2+(y'-y'_j)^2+(z'-z'_j)^2}} - \frac{y'-y'_i}{\sqrt{(x'-x'_i)^2+(y'-y'_i)^2+(z'-z'_i)^2}} \\ \frac{\partial \rho'}{\partial z'} = \frac{z'-z'_j}{\sqrt{(x'-x'_j)^2+(y'-y'_j)^2+(z'-z'_j)^2}} - \frac{z'-z'_i}{\sqrt{(x'-x'_i)^2+(y'-y'_i)^2+(z'-z'_i)^2}} \end{cases} \quad (2.14)$$

ここで、 $\alpha = \partial \rho / \partial x, \beta = \partial \rho / \partial y, \gamma = \partial \rho / \partial z, \alpha' = \partial \rho' / \partial x', \beta' = \partial \rho' / \partial y', \gamma' = \partial \rho' / \partial z'$  とおき、行列  $A$  を次のように定める。

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 0 & 1 & 0 & & \vdots \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 0 & 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ \alpha_s & \beta_s & \gamma_s & 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \\ \alpha'_1 & \beta'_1 & \gamma'_1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \alpha'_2 & \beta'_2 & \gamma'_2 & 0 & 1 & 0 & & \vdots \\ \alpha'_3 & \beta'_3 & \gamma'_3 & 0 & 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ \alpha'_s & \beta'_s & \gamma'_s & 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

更に次のような行列計算を行うと、それぞれのパラメータの修正量が計算できる。

$$(A^T A)^{-1} A^T AB = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \\ \Delta N_3 \\ \vdots \\ \Delta N_s \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

ができる。ただし、 $\Delta N$  はアンビギュイティの修正値であり、



図 2.9に前述の測位計算アルゴリズムを使用して測位計算を行い、同時に求められたアンビギュイティの時系列の一例を示す。

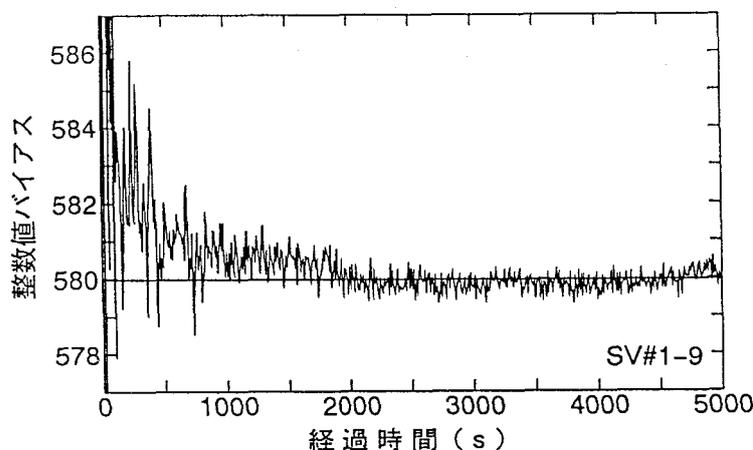


図 2.9: アンビギュイティの収束状況 (SV9)

同図は 9 番衛星のものであるが、時間の経過と共にある整数値に収束してゆく様子が分かる。収束するまでに所要する時間は異なるものの、他の二重位相差の式に含まれるアンビギュイティも同様にある整数値に収束した。これは時間の経過と共に衛星が移動したため、図 2.10<sup>(15)</sup>に示すように衛星と受信機アンテナとの距離差によって定義された回転双曲面群が衛星の移動に伴って変化し、移動しない点として真の解が明確になったためであると考えられる。

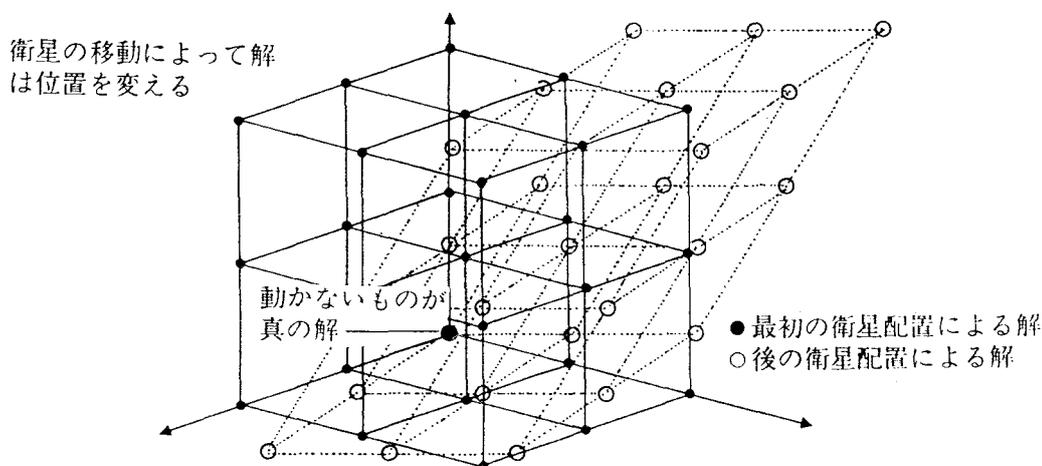


図 2.10: 回転双曲面群の変化

ここで、Fix 解と Float 解の測位精度を見てみることにする。図 2.11には左から Fix 解、アンビギュイティを真のアンビギュイティから  $\pm 1$  以下の範囲の実数値にフィックスしたものの、Float 解の順にその測位分布を示している。

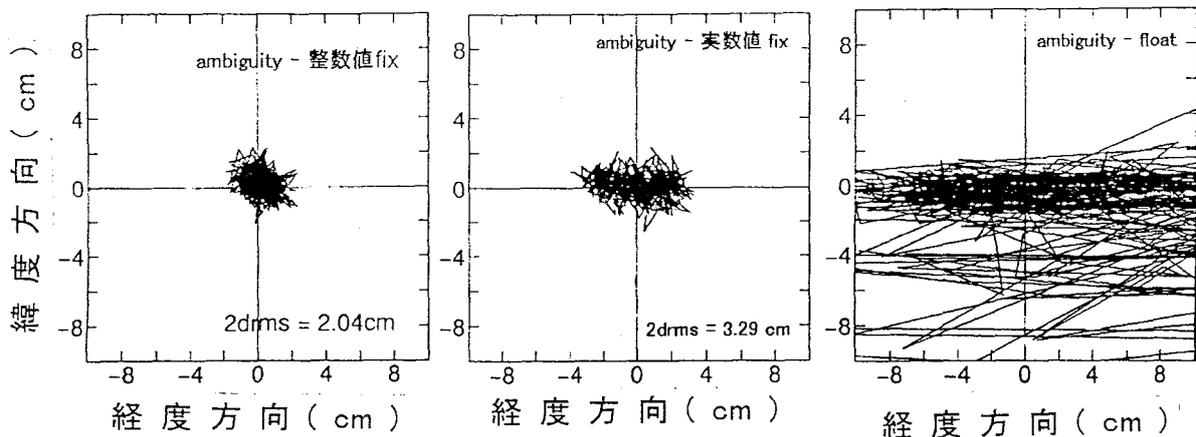


図 2.11: 解の種類と測位精度

同図より同じ搬送波位相データを使用して RTK 測位しているにもかかわらず、Fix 解が最も精度が良く、Float 解に至ってはかなり大きな測位分布を示していることが分かる。また、実数値にフィックスした解では、Float 解程測位分布は劣化していないが、Fix 解と比較すると精度が劣っていることが分かる。このことから Fix 解が最も精度が良く、アンビギュイティを整数値バイアスと呼ぶゆえんはここにあるということが出来る。

また、サイクルスリップの対策として、追尾している衛星に対して独立な二重位相差だけに限定せず、独立でないものも含めて計算できる限りの二重位相差を求める方法を検討している。この方法は、二重位相差がそれぞれある値に収束した後はその値に固定して測位を続け、もしサイクルスリップが発生すれば、発生した衛星の搬送波を使用して計算した二重位相差値がジャンプすること、及びそのとき計算されたアンビギュイティが固定している値から大きく逸脱することによって明かに発見できるので、ソフトウェア的にその二重位相差は測位計算から排除するということが可能ではないかと考えている。

## 2.6 RTK 測位原理の幾何学的解釈

図 2.12 に示すように、RTK は衛星を焦点とした回転双曲面の、複数組みの交点として位置を求める方法である。

まず初めに、衛星 A ( $a_1, a_2, a_3$ ), 衛星 B ( $b_1, b_2, b_3$ ) を焦点とする回転双曲面の式を求めることかたアプローチを試みる。この 2 衛星と、ある点 ( $x, y, z$ ) との距離差を  $r$  とすると、距離差が一定であるような点の集合を表す図形の式は、

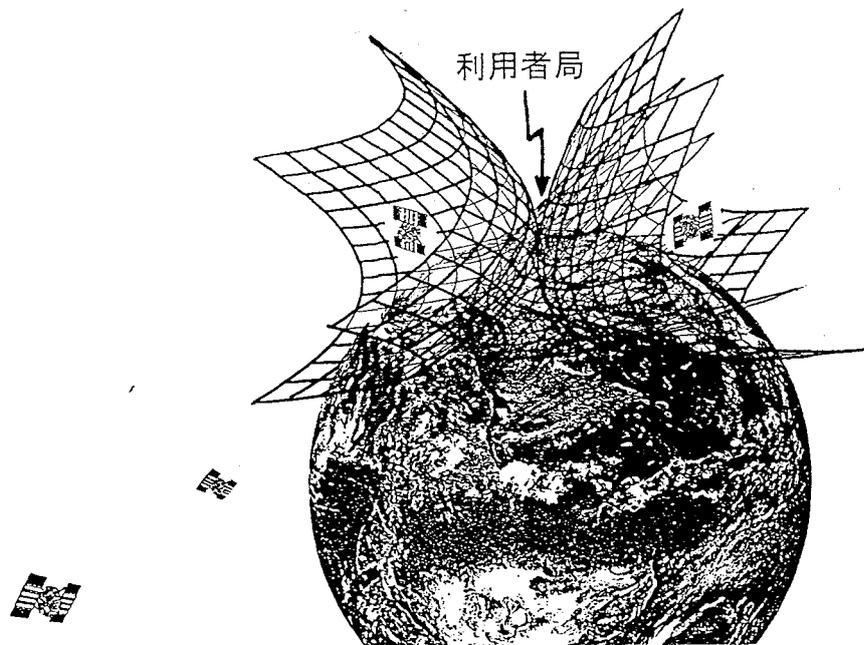


図 2.12: 回転双曲面群の移動

$$\begin{aligned}
 F(x, y, z) &= \sqrt{(x - a_1)^2 + (y - a_2)^2 + (z - a_3)^2} - \sqrt{(x - b_1)^2 + (y - b_2)^2 + (z - b_3)^2} - r \\
 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

となる。この式によって定義される図形は、2衛星（回転双曲面の焦点となっている）を通る平面で切断した切口にできる双曲線を、2衛星を通る直線を軸として、その周りに回転させてできる回転面となっている。これが回転双曲面体（Hyperboloid）と呼ばれるゆえんである<sup>(16)</sup>。

この回転双曲面の変化量を表す指数として、この回転双曲面上の利用者局受信機のアンテナ位置  $(x_0, y_0, z_0)$  における接平面の変化量を使用する。具体的には、回転双曲面は焦点となっている衛星が時間経過と共に移動するため、それにつれて形状が変化する。同様に、この接平面も時間経過と共に変化する。そして、平面の性質から変化前と変化後にできる2つの接平面は、ある角度をなすことになる。このなす角度を回転双曲面上の利用者局受信機のアンテナ位置における、回転双曲面の変化量を表す指数と定義する。

次に、この回転双曲面上の任意の点  $(x_0, y_0, z_0)$  における接平面の方程式を求める。平面の方程式は、その法線ベクトルと求める平面上の点、1点の座標が求めることができれば決定できる。ちなみにこの場合、1点の座標は  $(x_0, y_0, z_0)$  を使用すればよいため既知である。

今、一般に空間における曲面の方程式は、

$$F(x, y, z) = 0 \quad (2.19)$$

で与えられる<sup>(17)</sup>。この式に対して曲面上の任意の点  $(x_0, y_0, z_0)$  で曲面と直交するベクトル、いわゆる法線ベクトルは、

$$\text{grad}F = \left( \frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \frac{\partial F}{\partial z} \right) \quad (2.20)$$

となることが分かっている<sup>(17)</sup>。よって、この通りに式 (2.18) を展開し、 $(x, y, z) = (x_0, y_0, z_0)$  を代入すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x} &= \frac{x_0 - a_1}{\sqrt{(x_0 - a_1)^2 + (y_0 - a_2)^2 + (z_0 - a_3)^2}} - \frac{x_0 - b_1}{\sqrt{(x_0 - b_1)^2 + (y_0 - b_2)^2 + (z_0 - b_3)^2}} \\ \frac{\partial F}{\partial y} &= \frac{y_0 - a_2}{\sqrt{(x_0 - a_1)^2 + (y_0 - a_2)^2 + (z_0 - a_3)^2}} - \frac{y_0 - b_2}{\sqrt{(x_0 - b_1)^2 + (y_0 - b_2)^2 + (z_0 - b_3)^2}} \\ \frac{\partial F}{\partial z} &= \frac{z_0 - a_3}{\sqrt{(x_0 - a_1)^2 + (y_0 - a_2)^2 + (z_0 - a_3)^2}} - \frac{z_0 - b_3}{\sqrt{(x_0 - b_1)^2 + (y_0 - b_2)^2 + (z_0 - b_3)^2}} \end{aligned} \quad (2.21)$$

となる。ここで、接平面の方程式を求めるわけであるが、実は 2 平面のなす角度を求める場合は、その平面の各法線ベクトルのなす角度を求めればよく、この法線ベクトルのみを利用して求めることができる<sup>(16)</sup>。

最後に、2つの方向ベクトル  $(x_1, y_1, z_1)$ 、 $(x_2, y_2, z_2)$  のなす角度  $\theta$  は、

$$\theta = \cos^{-1} \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} \quad (2.22)$$

で容易に計算することができる<sup>(16)</sup>。図 2.13 に以上の方法を用いて計算した、回転双曲面の利用者局位置でも角度変化量の時系列の一例を示す。同図より、回転双曲面

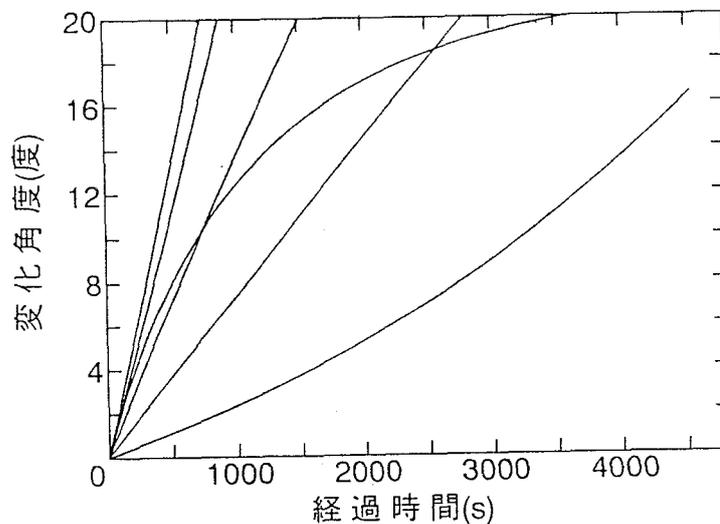


図 2.13: 回転双曲面の角度変化量

は滑らかに変化していることが分かる。

---

## 2.7 RTK-OTF

通常の RTK 測位では、静止状態でアンビギュイティを解いているが、移動体への応用時には静止又は移動中によらず、任意の時点でアンビギュイティを解くことが必要不可欠となる。すなわち、搬送波の二重位相差データの移動体への適用に関しては、移動開始時にアンビギュイティをいかにして効率よく決定するか、いかに移動中にサイクルスリップが発生した場合の処理を行うかなどが、実用化に向けての課題となる。移動体の移動中に、実時間でアンビギュイティを求めることを Ambiguity Resolution On-the-Fly (オンザフライ、この処理アルゴリズムを OTF アルゴリズムと呼ぶ。OTF は受信機の受信タイプ (2 周波, 1 周波など) 及び他の航法装置との接続などによって、種々のアプローチが考えられている。しかし、この技術のアルゴリズムの詳細については公表されておらず、ブラック・ボックスとなっている。今後、調査する必要がある。

## 第 3 章

# テレビ音声多重放送をデータ伝送に利用した RTK 測位

### 3.1 はじめに

RTK は GPS 衛星からの搬送波位相データを測距に使用した測位システムであり、通常のコード DGPS よりも遥かに高精度な測位が実時間で可能なため、精密かつ実時間性を要する測位測量分野において様々な形態で利用する研究が進んでいることは既に第 1 章で詳述した。また RTCM では利用を一般に拡大するため、Type18~21 にそのデータ伝送フォーマットを定めており、既にこのフォーマットのデータを扱う受信機が市販されている。

しかし、移動しながら実時間で測位を行う RTK では基準局から搬送波位相データを利用者局に伝送する必要がある。測量用の GPS 受信機では各メーカーごとに定めたデータ規格があり、これを何らかの方法で伝送して RTK 測位を行う。至近距離に基準局を用意できる場合には、無免許で使える特定小電力無線装置が市販されており、100~300 m が利用可能範囲とされている。それ以上になると、例えば携帯電話とモデムを組み合わせるなど工夫が必要となる。以上のように、現在どのメーカーの受信機でも共通して使用できるデータ伝送フォーマットを用いた RTK 測位用のデータリンクは皆無である。

このように、搬送波位相データのデータ伝送フォーマットを統一し、RTK を一般に普及させる動きが進行する中で、著者は現在世界的に認識されている RTCM RTK データ (Type1, 3, 18, 19) を、現行のテレビ音声多重データ放送を利用して伝送し、測位する実験を行った。また、Trimble Navigation Limited が 1996 年 9 月にカンザスシティで開催された ION GPS-96 で公開したフォーマット CMR を用いて同様の実験を行った。まず、RTCM で定められているデータ伝送フォーマットについて詳述し、次に CMR について詳述する。その後、今回行った実験研究についての説明を行う。

## 3.2 RTCM SC104 Ver.2.1 データ

搬送波位相データの伝送フォーマットに関しては、その規格が RTCM SC104 Ver.2.1 で細かく決められており、現在このフォーマットは世界的に認識されているという状態にある。この節では、このデータ伝送フォーマットの内、今回の研究に使用したものについて詳述する<sup>(18)</sup>。

### (1). 2ワード・ヘッダ ( 2 Word Header )

RTCM メッセージはひとまとめをフレーム ( Frame ) と呼び、30 bit からなる複数のワード ( Word ) で構成されている。全てのフレームの始めは「2ワード・ヘッダ」と呼ばれる2ワードが伝送される。図3.1<sup>(19)</sup>に示すように、最初の8 bit は ' 0110110 ' のプリアンプル ( Preamble ) で、次に6 bit のフレーム ID ( Frame ID ) が続く。これは後述のメッセージのタイプを示す。

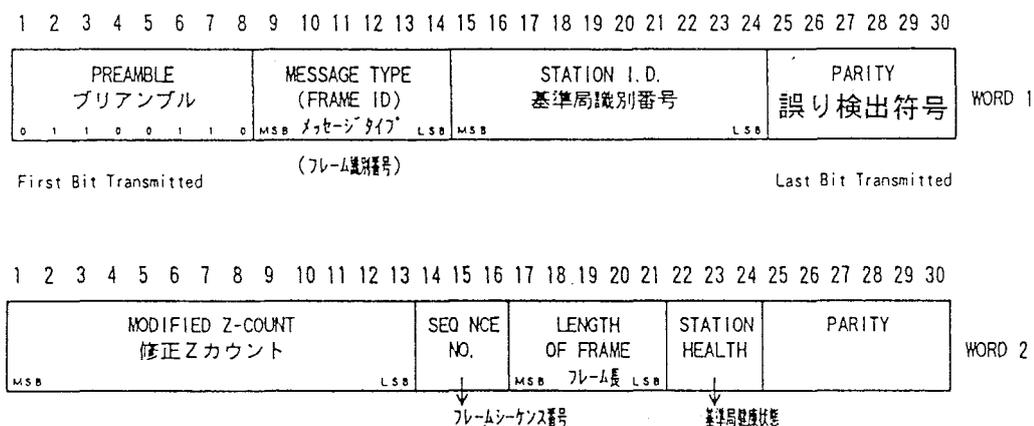


図 3.1: 2ワード・ヘッダの構成

次の12 bit は基準局の ID 番号 ( Station ID ) で、最後の8 bit はパリティ・チェック ( Parity ) 用のビットである。これは全てのワードに付加されている。次のワードの最初の13 bit は修正 Z カウント ( Modified Z-count ) と呼ばれ、データ更新時刻を毎時の最初の時間からの秒数を LSB を 0.6 秒として表示する。0~5999 までの数字が現れる。次の3 bit はデータの順序を0から6までの数字を連続的に表示し、データの連続性のチェックに使われる ( Sequence No.indexSequence No. : フレーム・シーケンス・ナンバ)。次の5 bit は1フレームに含まれるワードの数を表示する ( Length of Frame : フレーム長)。パリティ前の3 bit は基準局健康状態 ( Station Health ) を示す。7は基準局が稼動していないことを、6は稼動しているがモニタされていないことを表す。その他はサービス提供者が

定義するとなっている。

2ワード・ヘッダの後には0～63までの種々のタイプのメッセージが続く。表3.1<sup>(18)</sup>に RTCM メッセージ・タイプの内容を全て示す。それぞれ、「確定」、「削除」、「保留」、「仮設」、「未定」となっており、保留、仮設、未定のメッセージ・タイプについては以降の RTCM 委員会で順次審議されてゆくものと考えられる。

表 3.1: RTCM メッセージ・タイプ

Type	概略の内容	状況
1	ディファレンシャル補正データ	確定
2	デルタ・ディファレンシャル補正データ	確定
3	基準局 xyz 三次元位置座標パラメータ	確定
4	測量用	削除
5	軌道上の衛星の健康状態	確定
6	ヌル・フレーム (2ワード・ヘッダのみ送信。)	確定
7	ビーコンのアルマナック	確定
8	擬似衛星のアルマナック	仮設
9	ディファレンシャル補正データの部分的な送信形態	確定
10	Pコード・ディファレンシャル補正データ	保留
11	C/Aコード L1帯, L2帯デルタ補正データ	保留
12	擬似衛星局パラメータ	保留
13	地上送信局パラメータ	仮設
14	測量用補助メッセージ	保留
15	電離層 (対流圏) メッセージ	保留
16	特別なメッセージ	確定
17	エフェメリス・アルマナック	仮設
18	搬送波位相測定データの生データ	仮設
19	擬似距離測定データの生データ	仮設
20	RTK 搬送波位相データ	仮設
21	RTK 擬似距離補正データ	仮設
21～ 58	未定	-
59	メーカー独自のメッセージ	仮設
60～63	多目的に利用	保留

これらのメッセージの内、RTKに関するデータは Type18～21に含まれている。RTCM RTKでは特に Type18, 19の搬送波位相測定データと擬似距離測定データの生データが使用される。また、データ伝送が不安定な場合、RTK測位が実行されないなどの可能性があることから、通常 Type1及び Type3も同時に使用される。この結果、RTCM RTK測位ではデータ伝送の状況が悪くても、測位を中断せず DGPS測位に切り替わる。まず以下に RTCM RTKに関連するデータについて詳述する。

(2). メッセージ・タイプ 1

Type1 は基準局で観測した全追尾衛星についての補正データを含んでいる。図 3.2<sup>(20)</sup>に 2 ワード・ヘッダに続く第 3 ワードから第 7 ワードまでを示す。

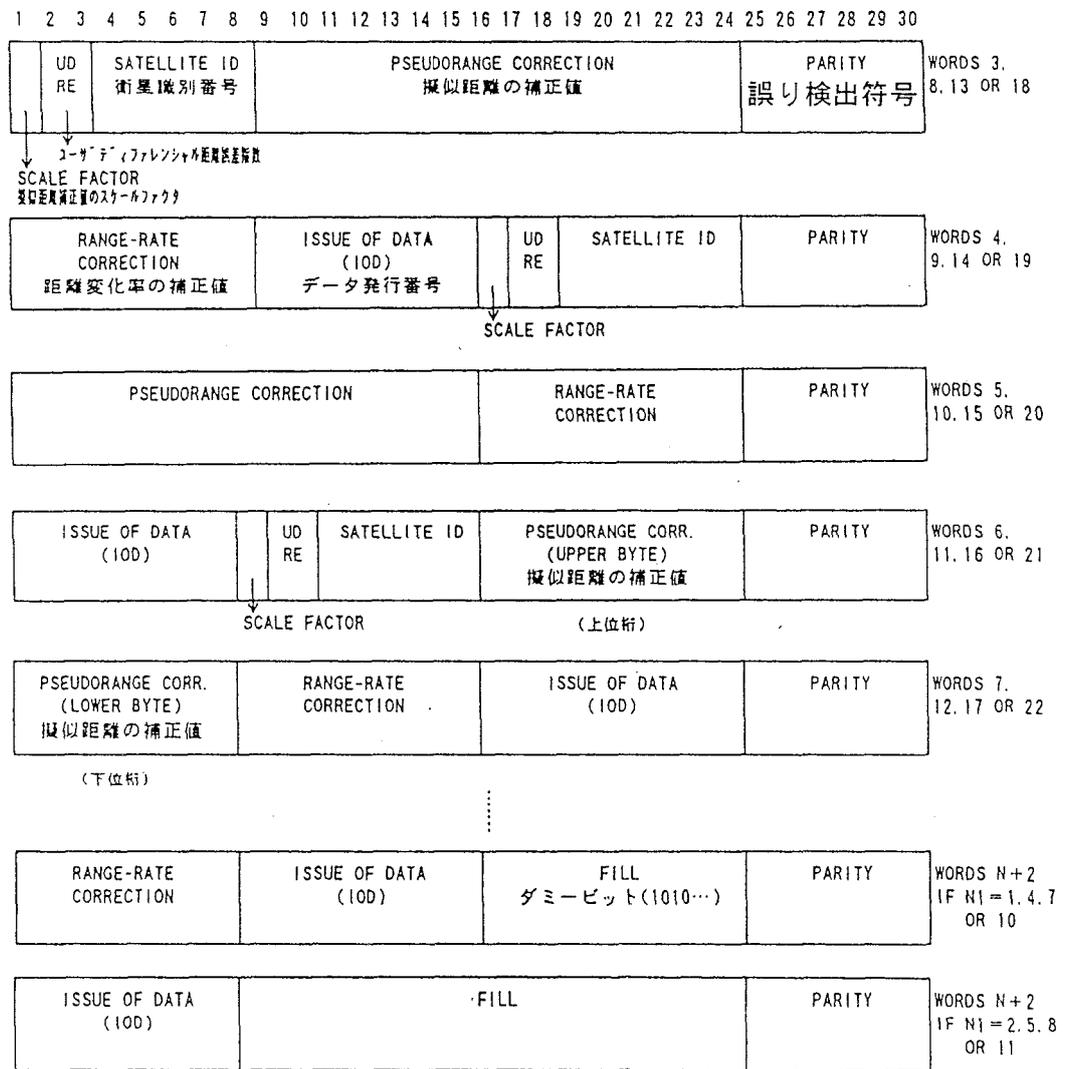


図 3.2: Type1 の構成

第 3 ワードの第 1 bit はスケール・ファクタ (Scale Factor) で、その意味は表 3.2<sup>(18)</sup>に示す。

表 3.2: スケール・ファクタ

ビット (0 or 1)	内 容
0	0.02 m 0.002 m/s
1	0.32 m 0.032 m/s

2～3 bit は利用者ディファレンシャル距離誤差 ( UDRE : User Differential Range Error ) である。計算法については不明であるが、基準局で利用者局におけるディファレンシャル処理後の擬似距離データ誤差の概算を推定して送信しているようである。

次の 5 bit は 1～32 番までの衛星識別番号 ( Satellite ID )、次の 16 bit は擬似距離補正值 PRC ( Pseudo Range Correction )、次のワードの先頭 8 bit は距離変化率補正值 RRC ( Range Rate Correction ) でそれぞれスケール・ファクタのビットが '0' のとき  $\pm 655.34 \text{ m}$  と  $\pm 0.254 \text{ m/s}$ 、'1' のとき  $\pm 10485.44 \text{ m}$  と  $\pm 4.064 \text{ m/s}$  の範囲の値をとる。次の 8 bit は IOD ( Issue of Data : データ発行番号 ) で衛星から航法データが更新された場合に 1 増える。ここまでの 40 bit で 1 衛星分の補正データが構成されており、都合 5 ワードで 3 衛星分のデータが伝送される。4 衛星以上ある場合は次の 5 ワードのセットが続き、例えば 5 衛星で終わった場合は残りのビットは Fill といい、'101010 ...' のようなダミー・ビットとしてフレームの最終ワードがビット足らずにならないようにセットされる。

表 3.3<sup>(21)</sup> に衛星数とワード数の関係を示す。

表 3.3: 衛星数とワード数の関係

衛星数	ワード数	ビット数 ( bit )
3	7	210
4	9	270
5	11	330
6	12	360
7	14	420
8	16	480
9	17	510
10	19	570

基準局から利用者局に伝送されたデータは次のようにして使用される。伝送されてきたデータに付された時間 ( 修正 Z カウント ) を  $t_0$  とし、そのときの  $PRC(t_0)$  と  $RRC(t_0)$  と、GPS 受信機で測定した時刻  $t$  の擬似距離測定値  $PRM(t)$  を使って、修正擬似距離  $PR(t)$  を、

$$PR(t) = PRM(t) + PRC(t_0) + RRC(t_0) \times (t - t_0) \quad (3.1)$$

で求めて測位計算を実行する<sup>(18)</sup>。

(3). メッセージ・タイプ3 ( 基準局 xyz 三次元位置座標パラメータ )

図 3.3<sup>(22)</sup>に Type3 の構成を示す。

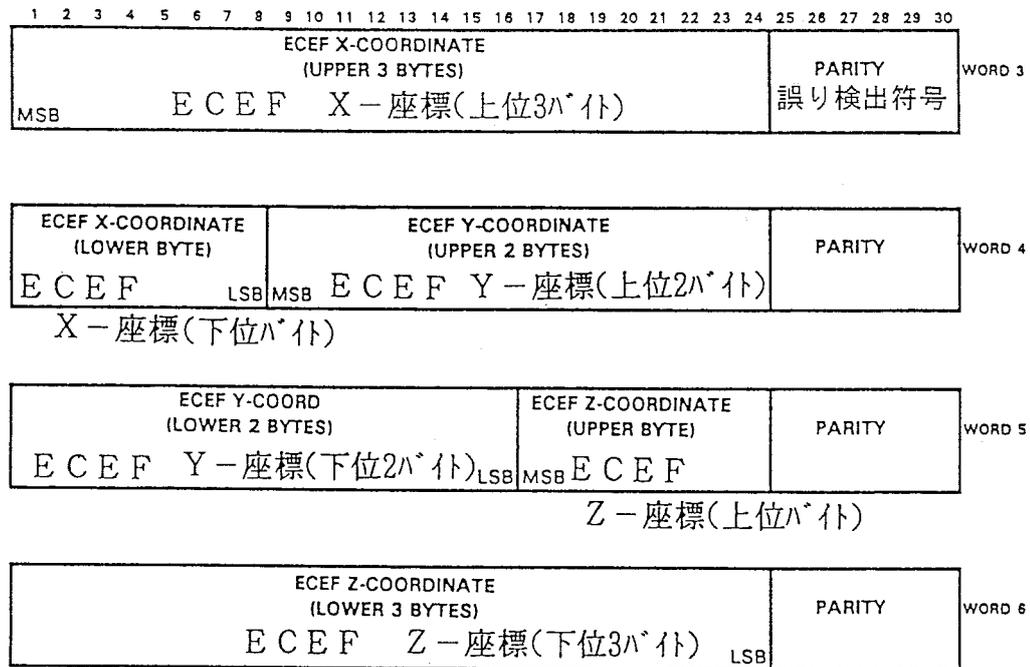


図 3.3: Type3 の構成

2ワード・ヘッダを含めて6ワードで、基準局の ECEF の xyz 三次元座標を 1 cm の分解能で伝送する。x, y, z 座標それぞれ 32 bit を使用し、基準座標系としては WGS-84 を使用している。

(4). メッセージ・タイプ6 ( ヌル・フレーム )

2ワード・ヘッダのみ伝送されるもので、他のメッセージの準備ができていないときに、信号の連続性を維持するため不定期に伝送される。

次に示す、Type18, 19 には測量や高精度測位、ナビゲーション ( Navigation ) に有効なデータが含まれている。このデータは整数値のアンビギュイティを解くために搬送波位相を利用する RTK をサポートするためのものである。メッセージは 4 つとも非常によく似ている。各 3 ワードで構成されており、2ワード・ヘッダに続く最初のワードはヘッダ中の修正 Z カウントをより高精度にするために使用される GPS 時間測定データである。そして、各追尾衛星のデータが含まれている 2 つのワードが続く。更に L1 帯か L2 帯、電離層補正が厳密でない擬似距離か、もしくは電離層補正が相違している搬送波位相データ、C/A コードか P コード、そして半分か 1 波長の L2 帯搬送波位相測定データを示すフラグが伝送される。擬似距離データと擬似距離補正データに対する搬送波ス

ムージング・インターバルが伝送されている。

- (5). メッセージ・タイプ 18 ( 搬送波位相測定データの生データ )  
 搬送波位相測定データを伝送する。図 3.4<sup>(18)</sup>に構成を示す。

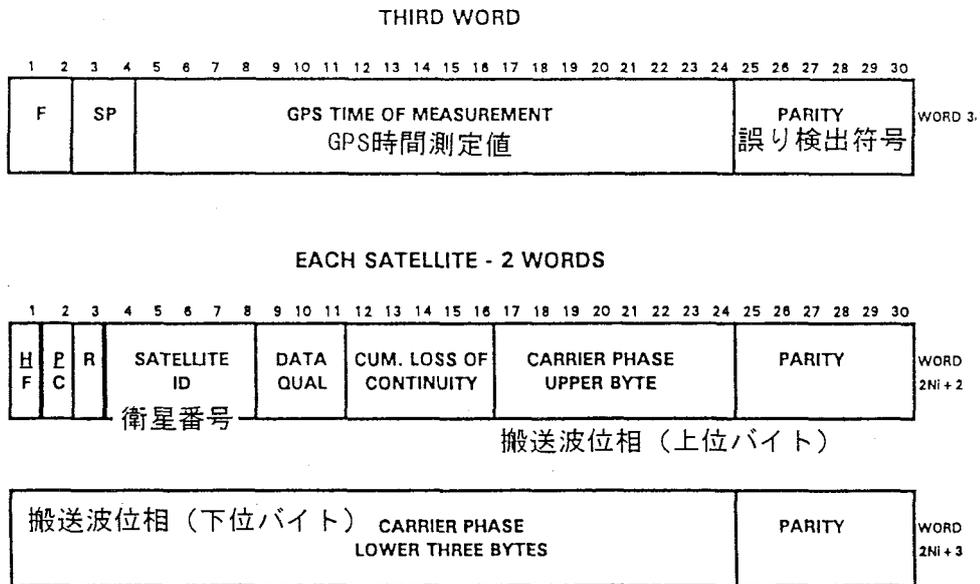


図 3.4: Type18 の構成

このデータは、衛星からのデータに含まれているエフェメリスを用いて修正されてはいない。5~24 bit で伝送される GPS 時間測定データは 1 ms 毎に 0~599999 ms までの範囲である。2ワード・ヘッダの修正カウントに加算して時間の精度を向上させる。次のワードの H/F は L2 帯の測定が半波長か 1 波長かを示すインジゲータである。'0' が半波長、'1' が 1 波長を示す。P/C は C/A コードか P コードかを示すインジゲータである。'0' が C/A コード、'1' が P コードを示す。データ・クオリティは 3 bit のインジゲータを十進数に変換した  $x$  を変数として、 $\frac{1}{256}e^{\frac{x}{3}}$  サイクルの  $1\sigma$  位相測定データ誤差を予想するものである。電離層差異位相測定データ  $\Phi_{IONODIFF}$  は次式で表される。

$$\Phi_{IONODIFF} = \frac{60}{77}\Phi_{L1} - \Phi_{L2} \tag{3.2}$$

$$\Phi_{IONODIFF} = \frac{120}{77}\Phi_{L1} - \Phi_{L2} \tag{3.3}$$

ただし、

$\Phi_{L1}$  : L1 帯搬送波位相測定データ

$\Phi_{L2}$  : L2 帯搬送波位相測定データ

上式が 1 波長の L2 帯サイクルを使用した場合、下式が半波長を使用した場合である<sup>(18)</sup>。

(6). メッセージ・タイプ 19 ( 擬似距離測定データの生データ )

擬似距離測定データを伝送するものである。図 3.5<sup>(18)</sup>にその構成を示す。

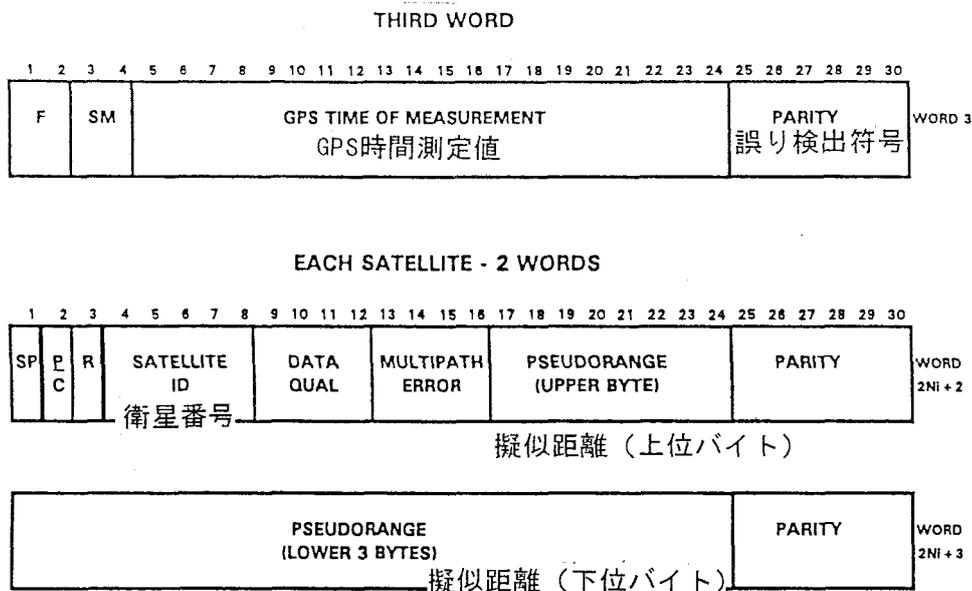


図 3.5: Type19 の構成

このデータは衛星からのデータに含まれているエフェメリスを用いて修正されてはいない。Type18と同様の内容については記述しない。最初のワードの2, 3 bit はスムージング・インターバルで擬似距離データのキャリア・スムージングに対するインターバルを示している。第2ワード9~12 bit のデータ・クオリティは、4 bit のインジゲータを十進数に変換した  $x$  を変数として、 $0.02e^{0.4x}$  の  $1\sigma$  擬似距離測定データ誤差を予想するものである。第2ワード13~16 bit のマルチパス・エラーは、4 bit のインジゲータを十進数に変換した  $x$  を変数として、 $0.1e^{0.4x}$  の  $1\sigma$  マルチパス・エラーを予想するものである。'1111' はマルチパス・エラーが決定されていないことを示す。

次に、Trimble Navigation Limited が公開した RTK のデータ伝送フォーマット、CMR について詳述する。

### 3.3 Trimble CMR

RTK のデータリンクとしては、デジタル無線が割合よく使用されるが、携帯電話やラジオ局の FM サブキャリアの信号も使用される。また最近になってデジタル MCA などの小電力無線を使用したものも実用化に向けての実験が開始されている。このような全てのデータリンクのメディアでは、使用可能なデータの周波数の割り当てが十分に整っているとはいえない状況にある。よってデータ伝送フォーマット

を設計する際には、周波数帯域幅を最小にするようになされなければならない。このデータ伝送フォーマットに関しては、現在まで各メーカー共に独自のフォーマットを採用していた。どのメーカーでもそのフォーマットに対応した受信機を製作可能な、公表された基準フォーマットがない状態では、利用者は異なるメーカーの基準局を混在して使用することができない。RTCM では前述の通り RTK の利用者をサポートするために Type18~21 にそのデータ伝送フォーマットを公表することにより、RTK の普及を大きく妨げているこの問題に対して解決方法を検討するように提起した。しかし、RTCM のメッセージは多くのデータリンクにおいて使用する段階で重要であると考えられるデータ圧縮アルゴリズムを含んでいない。

RTK のデータ伝送フォーマットは、初期の段階ではどのメーカーも公表していなかった。しかし、ついに 1996 年 9 月、カンザスシティで開催された ION GPS-96 において Trimble Navigation Limited 社は独自の RTK 用コンパクト・データ伝送フォーマット (CMR : コンパクト観測レコード : Compact Measurement Record) を公開した。このフォーマットにはメッセージ・プロトコルだけでなく、観測データの圧縮伸長アルゴリズムが含まれており、RTCM RTK データと比較して半分以下のデータ伝送レート (2400 bps) で高精度な RTK を実現できるといわれている。次に、この CMR について詳述する<sup>(23)</sup>。今回の研究ではこれらのデータを使用して RTK 測位をする実験も行った。

CMR のメッセージ・ブロックは全て 6 byte のヘッダとトレーラと呼ばれるフレームに囲まれている。表 3.4<sup>(23)</sup>にそのパケット構造の詳細を示す。

表 3.4: CMR のパケット構造

パラメータ	バイト数	説明
STX	1	伝送スタート ( 02h )
ステータス	1	Status Byte ( 00h )
タイプ	1	CMR2 メッセージ・タイプ
Length	1	データ・ブロックのバイト数
CMR データ・ブロック	-	以下に定義するメッセージ・データ
チェックサム	1	( Status+Type+Length+Data Block ) mod 256
ETX	1	伝送終了 ( 03h )

STX から Length までがパケット・ヘッダ、チェックサムと ETX がパケット終了である。

また表 3.5<sup>(23)</sup>にそのフォーマットの構造を示す。

表 3.5: CMR の構造

内容	バイト数 ( byte )
パケット・ヘッダ	4
観測データ・ヘッダ	6
衛星 1 の L1 帯観測データ	8
衛星 1 の L2 帯観測データ	7
⋮	⋮
衛星 n の L1 帯観測データ	8
衛星 n の L2 帯観測データ	7
パケット終了	2
⋮	⋮
( 観測データ・パケット )	Type0 : 9 衛星分 147 byte
⋮	⋮
パケット・ヘッダ	4
基準局位置のヘッダ ( Type1 )	6
基準局位置フィールド	7
パケット終了	2 ( Type1 19 byte )
⋮	⋮
( 観測データ・パケット )	
⋮	⋮
パケット・ヘッダ	4
基準局位置のヘッダ ( Type2 )	6
基準局位置フィールド	75
パケット終了	2 ( Type2 : 87 byte )
⋮	⋮

CMR には RTK 測位に必要な以下の 3 つのメッセージが定義されている。

(1). 観測データ ( Type0 : Observables )

CMR フォーマットはヘッダとデータの部分に分けられる。ヘッダは各観測エポック毎に伝送され、観測データ・ブロックのタイミングと衛星追尾に関連したデータを含んでいる。観測データ・ブロックは基準局で追尾している各衛星の数だけ繰り返される。まず、表 3.6<sup>(23)</sup>にヘッダの内容を示す。

表 3.6: Type0 のヘッダの内容

パラメータ	bit	範囲	説明
バージョン	3	0~7	フォーマットの拡張可
基準局識別番号	5	0~31	基準局識別
メッセージ・タイプ	3	0~7	データ・ブロック情報
衛星数	5	0~31	-
エポック	18	0~240,000 ms	GPS 時間の modulo240
クロック・バイアス	2	0, 3	0:invalid, 1:valid
クロック・オフセット	12	± 0.5 ms	500 ns 単位

観測データ・ブロックはコードと位相のデータを含んでいる。表 3.7<sup>(23)</sup>に観測データ・ブロックの内容を示す。

表 3.7: 観測データ・ブロックの内容

パラメータ	bit	範囲	説明
衛星 PRN 番号	5	0~31	-
コード識別フラグ	1	0, 1	0 : C/A コード, 1 : P コード
L1 帯位相データ・フラグ	1	0, 1	位相データの有効性 0 : invalid, 1:valid
L2 帯データ・フラグ	1	0, 1	0 : L1 帯のみ, 1 : L1 帯と L2 帯
C/A コード擬似距離	24	0~2 <sup>21</sup>	1/8 L1 帯波長
搬送波コード	20	±2 <sup>19</sup>	搬送波位相データ 1/256 L1 帯波長
SN 比	4	0~15	信号対雑音比
サイクルスリップ・カウント	8	0~255	-

L2 帯のデータは各衛星の L1 帯の観測データに直接付加される。次に、表 3.8<sup>(23)</sup>に L2 帯のデータ・ブロックの内容を示す。

表 3.8: L2 帯データ・ブロックの内容

パラメータ	bit	範囲	説明
L2 帯コード・フラグ	1	0, 1	0 : コードなし, 1 : コードあり
P コード・データ・タイプ	1	0, 1	0 : P コード, 1 : Cross Correlation
L2 帯コード・データの有効性	1	0, 1	0:False, 1:True
L2 帯位相データの有効性	1	0, 1	0:False, 1:True
L2 帯位相データの波長フラグ	1	0, 1	0 : 半波長, 1 波長
Reserved	3	-	-
L2 帯擬似距離測定データ	16	±2 <sup>15</sup>	1 cm 単位
L2 帯搬送波位相測定データ	20	±2 <sup>19</sup>	1/256 L2 帯が単位
L2 帯 SN 比	4	0~15	信号対雑音比
L2 帯サイクルスリップ・カウント	8	0~255	-

(2). ECEF 基準局位置座標 ( Type1 )

基準局が参照する基準局位置座標は、利用者局の測位位置にとって非常に重要な要素となっていることはいままでもない。WGS-84 測地系は GPS 測位に使用

される座標系としては最も基本となるものである。CMR フォーマットの Type1 は、基準局のアンテナ位相中心の ECEF 座標とオフセット量をコンパクトに含んでいる。観測データ Type0 と同様に、Type1 にもヘッダとデータ・ブロックを含んでいる。まず、表 3.9<sup>(23)</sup>に基準局位置座標のヘッダの内容を示す。

表 3.9: Type1 のヘッダの内容

パラメータ	bit	範囲	説明
バージョン	3	0~7	バージョン 将来の拡張可
基準局識別番号	5	0~31	基準局識別
メッセージ・タイプ	3	0~7	データ・ブロック情報
バッテリー電圧低下フラグ	1	0, 1	0:OK, 1:LOW
メモリ容量低下フラグ	1	0, 1	0:OK, 1:LOW
Reserved	1	-	-
L2 帯追尾フラグ	1	0, 1	0: 使用不可, 1: 使用可
Reserved	1	-	-
エポック	18	0~240,000 ms	エポック時間の modulo240 秒
基準局の状態	2	0~3	0:unknown, 1:Static, 2:Kinematic
Reserved	4	-	-
受信機の種類	8	0~255	0~32:Trimble, 33~254:他社, 255:未定義

基準局の状態のフィールドにおいて、基準局も移動することを前提にした Kinematic のパラメータがもうけられており、そのような状態での高精度測位が行われることを示唆している。また、当然のことながら受信機の種類のフィールドに、他社の受信機の種類データを記述するスペースがもうけられているところが興味深い。

基準局のアンテナの位相中心をアンテナのオフセットに関する WGS-84 座標は Type1 のデータ・ブロックに含まれている。表 3.10<sup>(23)</sup>に基準局位置座標メッセージの内容を示す。

表 3.10: Type1 のメッセージの内容

パラメータ	bit	範囲	説明
ECEF x 座標	34	± 8589934592 mm	アンテナ位相中心 WGS-84
アンテナ高	14	± 8192 mm	" のアンテナ高
ECEF y 座標	34	± 8589934592 mm	" WGS-84
東方向オフセット	14	± 8192 mm	" の東方向オフセット
ECEF z 座標	34	± 8589934592 mm	" WGS-84
北方向オフセット	14	± 8192 mm	" の北方向オフセット
位置座標精度	4	0~15	" の三次元精度 (表 3.11 参照)
Reserved	4	-	-

表 3.11<sup>(23)</sup>に基準局アンテナ位相中心位置座標の三次元精度の内容を示す。

表 3.11: 基準局アンテナ位相中心座標の三次元精度

パラメータ	精度	パラメータ	精度	パラメータ	精度
0	不明	5	50 m	10	10 cm
1	5 km	6	10 m	11	5 cm
2	1 km	7	5 m	12	1 cm
3	500 m	8	1 m	13	5 mm
4	100 m	9	50 cm	14	1 mm
				15	Exact

### (3). 基準局の情報 ( Type2 )

基準局情報メッセージは、利用者が基準局の正式な名称 ( 英数字 ) 等を使用する必要がある場合、例えば測量に利用する場合などのために用意されている。基準局情報のヘッダはメッセージ・タイプ除いて基準局のヘッダと同じである。表 3.12<sup>(23)</sup>に基準局情報メッセージのデータ・ブロックの内容を示す。

表 3.12: Type2 のメッセージの内容

パラメータ	bit	範囲	説明
レコード長	1	0~255	基準局データ・ブロックの全長
Short Station ID	8	ASCII 文字列	-
COGO Code	16	ASCII 文字列	基準局の位置属性
Long Station ID	50	ASCII 文字列	基準局の正式名称

以上のように観測データは通常 1 秒毎に伝送される。観測データは伝送レート 2400 bps でも伝送可能となるよう、データ圧縮アルゴリズムを使用している。具体的には、CMR フォーマットでは、図 3.6 に示すように基準局の擬似距離を光速の幅で分割し、その端数部分のみを伝送する。つまり搬送波位相で観測した距離の時間変化は、コードで測定した擬似距離の時間変化とおよそ一致し、搬送波位相は擬似距離データのオフセットとして表すことができるのである。

データ伝送フォーマットを規格化することの最大のメリットは利用者が異なるメーカーの受信機を使用している場合でも利用可能となることである。RTCM で提案されたメッセージでは少なくとも 9600 bps のデータ伝送レートを要するが、この CMR では 2400

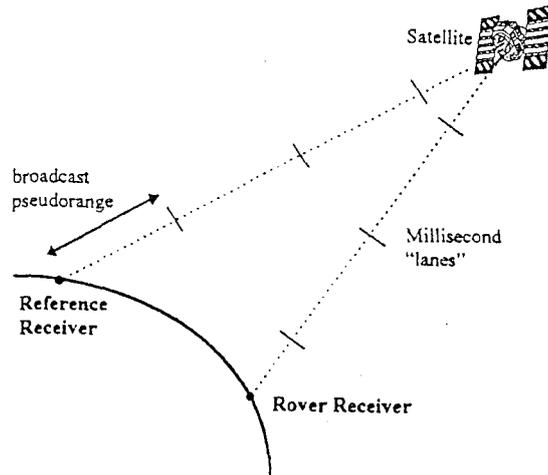


図 3.6: データ圧縮の概念図

bps で伝送可能といわれており、より一般の利用者にとって受け入れ易いものといえる。よって今回の実験では、この CMR を使用した RTK 測位実験も行った。

次に、まず実験の概要について述べる。

### 3.4 実験概要

図 3.7 に実験の概念図を示す。

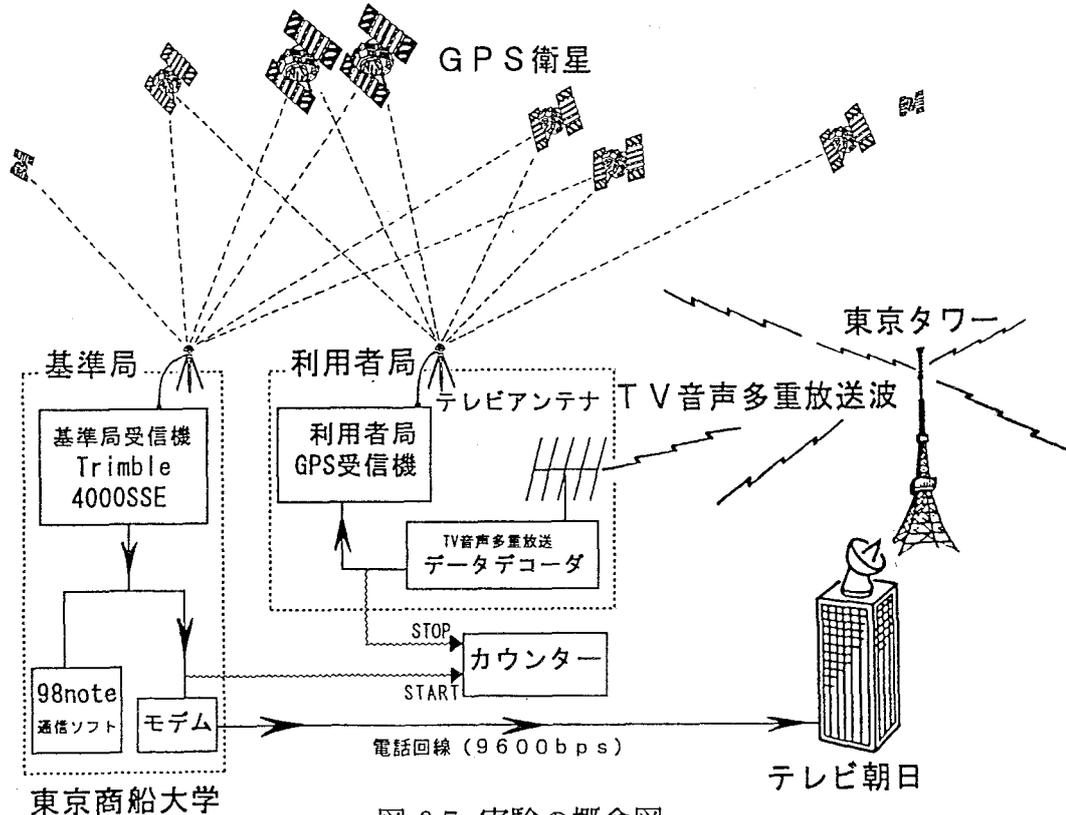


図 3.7: 実験の概念図

まず、東京商船大学の航海学科実習棟屋上にアンテナを設置した Trimble Navigation Limited 社製の GPS 受信機 4000SSE 基準局から、1 秒毎に出力される RTCM RTK データ ( RTCM Type1, 3, 18, 19 ) を通常の電話回線を用いて 9600 bps で港区六本木のテレビ朝日に伝送する。写真 2 に 4000SSE 受信を、また写真 3 に GPS アンテナの設置状況を示す。



写真 2: Trimble 4000SSE



写真 3: GPS アンテナの設置状況

テレビ朝日ではこのデータをテレビ音声に多重し、東京タワーより放送する。これを東京商船大学、新宿の DX アンテナ及び港区浜松町の Trimble Japan において受信する。更に、デコードした後利用者局受信機に入力し、1 秒毎に測位した。測位実験は日を変えて計約 8 時間行った。また、同図のモデムからデコーダまでのデータ伝送時間をカウンタを用いて測定した。

### 3.5 データ伝送時間

図 3.8 に測定したデータ伝送時間を示す。

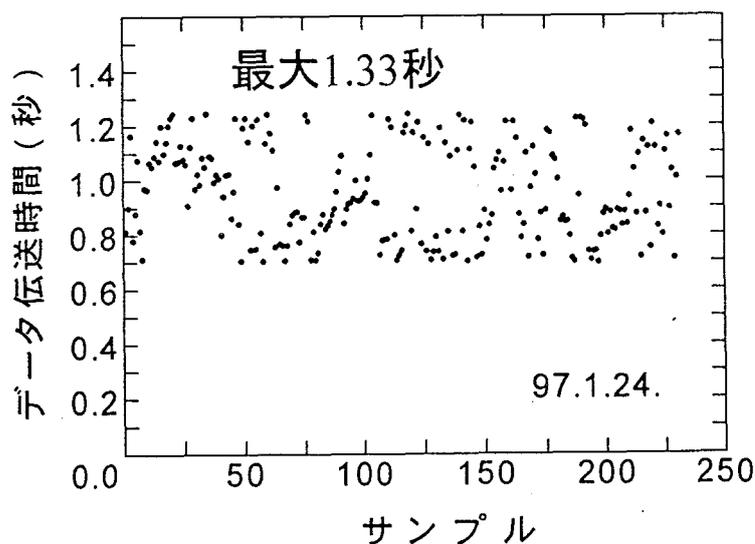


図 3.8: データ伝送時間

伝送時間の最大値は 1.33 秒、最小値は 0.74 秒であった。RTCM RTK データは 1.60 秒までの伝送遅延であれば、仕様通りの高精度な測位が可能であるといわれており、これを十分に満足していることが分かる。また同図より、伝送時間に 0.59 秒程度のバラツキが見られるが、これはテレビ朝日においてテレビ音声に RTCM RTK データを多重する際のデータパケットの流れを調整すれば、ある程度解消できると思われる。

### 3.6 RTK 測位結果と考察

RTCM RTK データでは Type1 が同時に送信されているため、利用者局受信機におけるデータ受信状況により測位結果が Fix 解から Float 解、更に精度の悪いコード DGPS 解へと解の種類が移行する。そこで、仕様通りの高精度測位が行われている目安となる Fix 解の割合を調査した。表 3.13 及び表 3.14 に 10 月 28, 29 日の両日に行った都内の各地点における測位の、全データに対する Fix 解の割合を示す。

表 3.13: Fix 解の割合 1

10月28日	全データ数	Fix 解の数	Fix 率 (%)
東京商船大学	12,884	11,669	90.57
新宿	7,197	6,716	93.32
浜松町	12,999	12,485	96.05

表 3.14: Fix 解の割合 2

10月29日	全データ数	Fix 解の数	Fix 率 (%)
東京商船大学	18,799	17,950	95.48
新宿	18,532	16,331	88.12
浜松町	18,618	17,907	96.18

同表より Fix 解は全測位の 90 % 前後であったことが分かる。利用者局において基準局からのデータが受信されずに、5 秒毎に Fix 解からはずれるというような状況が発生したこともあった。また、図 3.9 に東京商船大学と浜松町の Trimble 社のそれぞれの地点における Fix 時の測位結果の一例を示す。

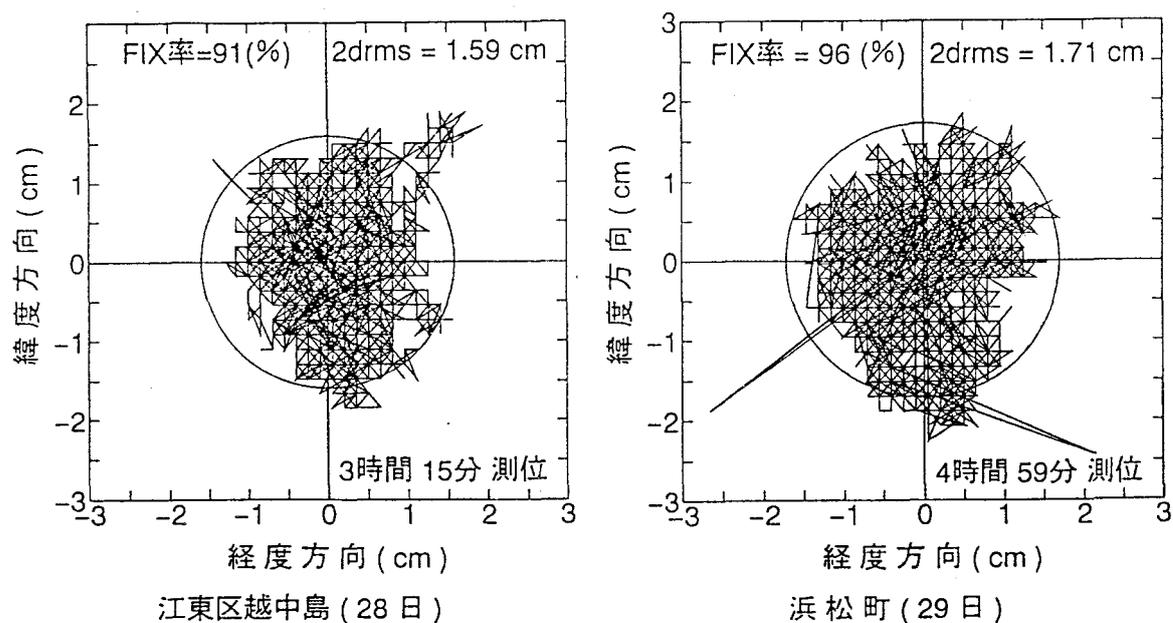


図 3.9: RTK 測位結果 (Fix 時, RTCM データ)

同図より、この間の測位精度は 2drms で 1.59 cm、1.71 cm と仕様通りの高精度測位が実現されていることが分かる。別の時間帯、別の地点でもほぼ同様の測位結果が得られた。このことから、Fix 解が取得できていれば 2drms で 2 cm 以下の高精度測位が実行されていると考えて良い。

次に、Trimble CMR データを使用して同様のデータ伝送経路を使用した上、東京商船大学で RTK 測位を行った。この結果、Fix 率は 100%であった。CMR のデータ量は RTCM RTK データと比較して 2分の1以下であるため、このような素晴らしい結果が得られたと考えられる。図 3.10にこのときの緯度経度方向測位分布を示す。

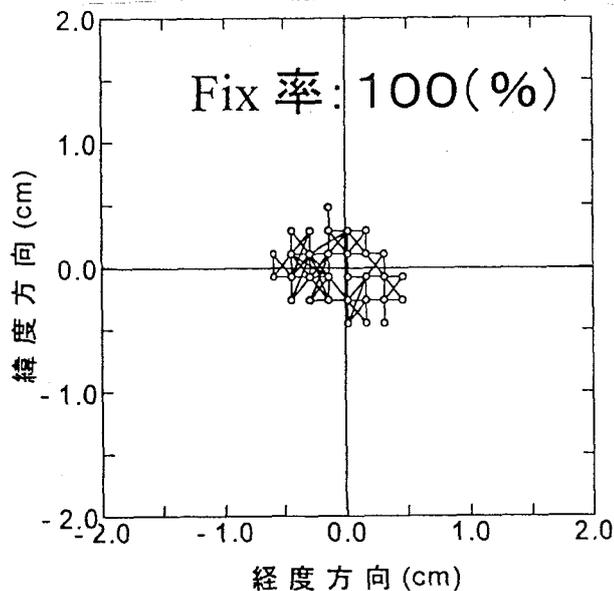


図 3.10: RTK 測位結果 ( Fix 時, CMR データ )

同図からも分かるように 2drms は 5 mm 以下と、RTCM のデータを使用した場合よりも高精度な測位が行われていた。このことから、Trimble CMR データは非常に有効であるといえることができる。

### 3.7 まとめ

移動しながら実時間で測位を行う RTK では基準局から利用者局に搬送波位相データを伝送する必要がある。しかし、現在どのメーカーの受信機でも共通して使用できるデータ伝送フォーマットを用いた RTK 測位用のデータリンクは皆無である。そこで、著者は現在世界的に認識されている RTCM RTK データを、現行のテレビ音声多重データ放送を利用して伝送し、測位する実験を行った。また、Trimble Navigation Limited が公開しているフォーマット CMR を用いて同様の実験を行った。

その結果、RTCM RTK データを使用した測位では、今回構成したシステムの全データ伝送時間が最大値は 1.33 秒であった。RTCM RTK データは 1.60 秒までの伝送遅延であれば、仕様通りの高精度な測位が可能であるといわれており、これを十分に満足していることが分かる。また、高精度測位が行われているフラグとなる Fix 解は全体の約 90%をしめていた。この間の測位精度は 2drms で 2 cm 以下と、仕様通りの高精度測位が実現されていることが分かる。次に、CMR データを使用した RTK 測

位では、高精度測位が行われているフラグとなる Fix 解は 100%であった。この間の測位精度は 2drms で 5 mm 以下と、RTCM RTK データを使用した測位と比較してかなり高精度であるといえる。

以上の結果より、テレビ音声多重データ放送をデータリンクとして利用し、高精度な RTK のシステムを構成することも可能であるとい結論を得た。今後、このシステムをより一般に普及させるために、測位結果が Float 解もしくは単なるコード DGPS 測位へ移行する原因を追求し、Fix 率を向上させる必要がある。

## 第4章

# RTK の高精度測位維持についての1 手法

### 4.1 はじめに

RTK を各分野へ応用するにあたって、解決しなければならない問題が山積みされている。マルチパス ( Multipath ) もその1つである。マルチパス誤差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 ( じょうらん ) することにより発生し、真の相関のピーク検出を妨害する。図 4.1 にマルチパスの概念図を示す。

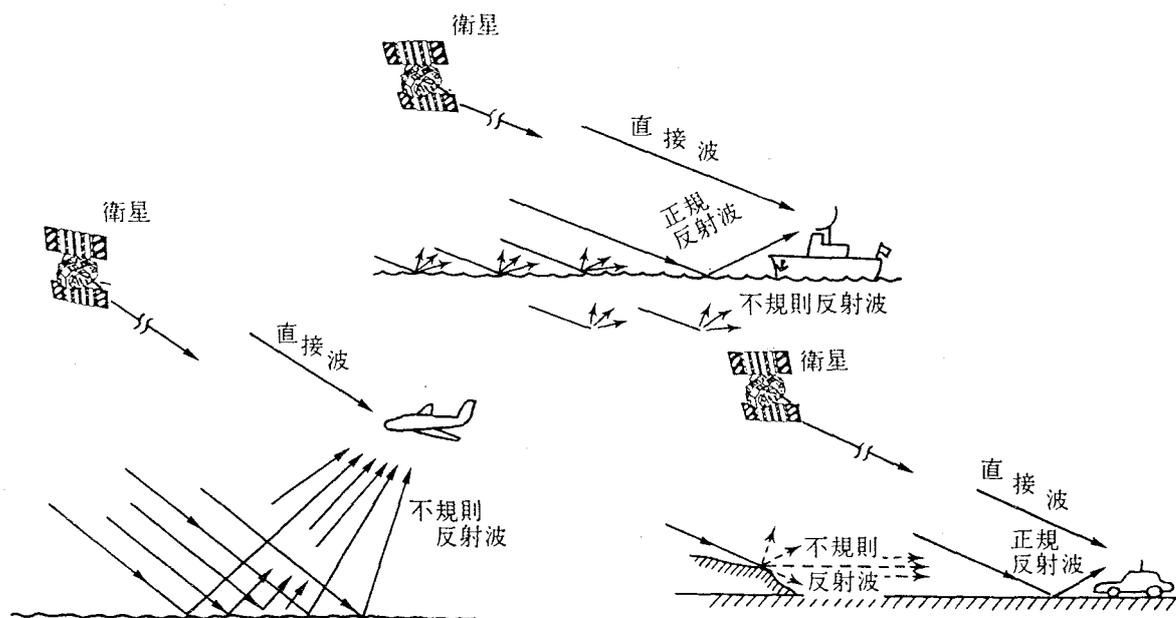


図 4.1: マルチパスの様子

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 15 m もの誤差を生じることがある。RTK では特にマルチパスによる誤差が無いように注意す

る必要がある。低仰角の衛星を使用しないなど、また設置場所について細心の注意を払う必要がある。また、アンテナをグランド・プレーンに載せて地面の反射波を拾わないようにする工夫もある。写真4にグランド・プレーンを装備したGPSアンテナの様子を示す。



写真4: グランド・プレーンを装備したGPSアンテナ

RTK 測位を行っているとき、このマルチパスや建物等による遮蔽、干渉によって衛星から送出されている搬送波の位相が何らかの影響を受け、その結果として測位分布が拡大したり、またシフトやドリフト、及びジャンプをするという状況がしばしば発生している。このような状況を改善しない限り、RTK の各分野への応用は困難なものとなる。

そこで、著者はその測位分布と衛星の配置によって決定される共分散楕円とを比較することにより、測位誤差の原因となっている位相データを送信している衛星の推測を試みた。そして、更に測位分布が極端にある方向に拡大している場合には、その拡大している方向に位置する衛星の位相データを排除して測位計算を続けることにより、RTK の高精度測位を維持する可能性を実際のデータを用いてシミュレーションし、検討を行った。また、この原理を実時間に適用する実験を行った。

まず、衛星配置から決定される測位分布の予測を示す共分散楕円について詳述する。

## 4.2 共分散楕円

GPS の測位精度を評価する指数として DOP ( Dilution of Precision : 精度劣化指数 ) があることはよく知られている。この値は衛星から利用者局までの測距誤差の拡大係数ということができ、衛星配置と利用者局の位置関係のみによって決定される

共分散行列  $A$  のトレース  $(A^T A)^{-1}$  から算出される<sup>(24)</sup>。すなわち、これらはある衛星  $i$  の仰角及び方位角をそれぞれ  $EL_i, AZ_i$  とすると、

$$A = \begin{pmatrix} \cos EL_1 \cos AZ_1 & \cos EL_1 \sin AZ_1 & \sin EL_1 & 1 \\ \cos EL_2 \cos AZ_2 & \cos EL_2 \sin AZ_2 & \sin EL_2 & 1 \\ \cos EL_3 \cos AZ_3 & \cos EL_3 \sin AZ_3 & \sin EL_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos EL_i \cos AZ_i & \cos EL_i \sin AZ_i & \sin EL_i & 1 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$$(A^T A)^{-1} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_{zz}^2 & \sigma_{zt}^2 \\ \sigma_{tx}^2 & \sigma_{ty}^2 & \sigma_{tz}^2 & \sigma_{tt}^2 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

となる。これから各 DOP 値の計算式は、

$$GDOP = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 + \sigma_{tt}^2} = \sqrt{\text{trace}(A^T A)^{-1}} \quad (4.3)$$

$$PDOP = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2} = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2} \quad (4.4)$$

$$HDOP = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2} \quad (4.5)$$

$$VDOP = \sqrt{\sigma_{zz}^2} \quad (4.6)$$

$$TDOP = \sqrt{\sigma_{tt}^2} \quad (4.7)$$

と定義される。ここでそれぞれ GDOP は Geometrical DOP で幾何学的精度劣化指数、PDOP は Position DOP で測位精度劣化指数、HDOP は Horizontal DOP で緯度経度方向精度劣化指数、VDOP は Vertical DOP で高度方向精度劣化指数、TDOP は Time DOP で時間精度劣化指数を表す。この式から GDOP は各方向への誤差を丸めた RSS 値であることが分かる。

行列 (4.2) の  $\sigma_{xx}$  は経度方向、 $\sigma_{yy}$  は緯度方向、 $\sigma_{zz}$  は高度方向への測距誤差の標準偏差  $\sigma_0$  の拡大の倍数となる。なお、 $\sigma_0$  は全衛星に対して共通 (等しい) であるものとする。 $\sigma_0$  は UERE (User Equivalent Range Error と呼ばれ、受信点における測距誤差の見積りの際に  $\sigma_{UERE}$  と表記されるものに相当する。また  $j-k$  間の相関係数  $\rho_{jk}$  は式 (4.2) から  $\sigma_{jk} = \sigma_{kj}$  ( $j \neq k$ ) の関係を使用して、

$$\rho_{jk} = \frac{\sigma_{jk}^2}{\sigma_{jj}\sigma_{kk}} \quad (4.8)$$

のように決定される。

一方、一般に2つの確率変数  $x, y$  がそれぞれ2変数正規分布に従い、それぞれ標準偏差が  $\sigma_x, \sigma_y$ 、相関係数が  $\rho_{xy}$  であるとする、確率分布が一定の曲線は楕円となり、次式で表される<sup>(24)</sup>。

$$\frac{x^2}{\sigma_x^2} - \frac{2xy\rho_{xy}}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} = (1 - \rho_{xy}^2)C \quad (4.9)$$

ただし、

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_{xx}\sigma_0 \\ \sigma_y = \sigma_{yy}\sigma_0 \end{cases} \quad (4.10)$$

である。また、この楕円の内側に測位点を観測する確率  $P$  は  $C$  の関数であり、

$$P = 1 - \exp\left[-\frac{C}{2}\right] \quad (4.11)$$

となる<sup>(24)</sup>。この確率を95%とする場合には  $C$  の値は約5.99とすればよい。このようにして決定された楕円を共分散楕円と呼ぶ。以上の方法を使用することによって、衛星配置は衛星軌道データにより瞬時に取得できるので、実時間で測位分布の傾向が予想できることになる。また同時に  $z$ - $x$ 、若しくは  $y$ - $z$  の組合せをとることにより、高度方向の測位分布に対しても予想される誤差の傾向が求められることになる。

更に、ここで  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ 、相関係数  $\rho_{xy} = 0$  とすると、式(4.2)は次式のように円となり、円形正規分布を表す。

$$x^2 + y^2 = C\sigma^2 \quad (4.12)$$

式(4.11)において  $P$  を0.5とすると、 $C$  の値は  $1.1774^2$  となり、半径  $1.1774\sigma$  の円内に50%の測位点が含まれることになる。この円を50%確率円と呼び、この円の半径を CEP (Circular Error Probable : 円形確率誤差)<sup>(25)</sup> と呼ぶ。

衛星配置と GDOP に関して次のことが知られている。

- 同一軌道面に属する衛星群だけ、又は高度の等しい衛星群だけを使用した場合、三次元測位はできない。
- 測位点とすべての衛星が同一平面上にあるときは二次元測位すらできない。
- GDOP との関係でいえば、衛星を頂点とする多面体の体積はできるだけ大きくとることが望ましい。そのためには2又は1機の衛星は比較的高仰角に、残りの衛星は低仰角に位置することが理想である。しかし、低仰角の衛星からの電波は大気圏通過距離が長くなるため測距誤差が拡大し、更にマルチパスの影響も無視することができなくなる。

次の節では、今回の研究で行ったシミュレーションの概要について説明する。

### 4.3 シミュレーション概要

シミュレーションに使用したデータは、NovAtel Communications 社製の GPS 受信機 3151R 2 台を用いて収集した。写真 5 に使用した受信機を示す。

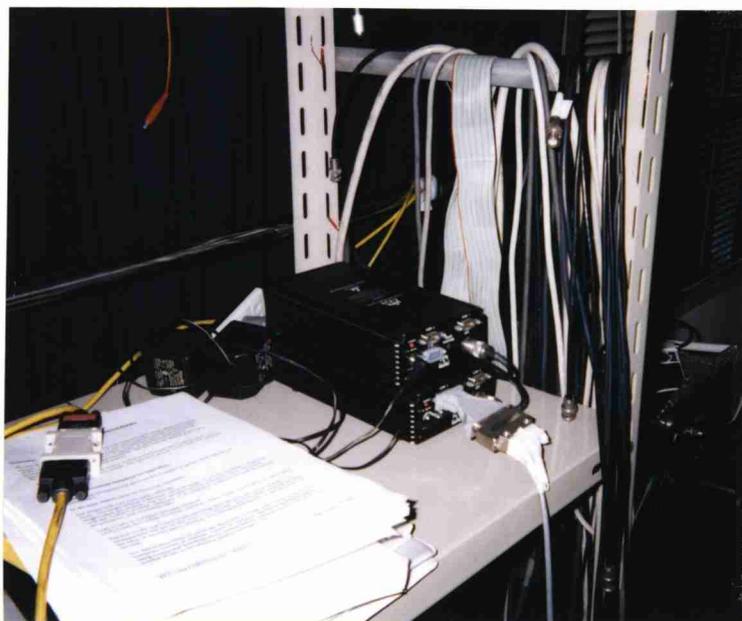


写真 5: NovAtel 3151R 受信機

まず、東京商船大学・航海学科実習棟の屋上に、互いに約 14 m 離してアンテナを設置し、それぞれに接続した受信機で同時に全追尾衛星に対する搬送波位相データ、衛星位置及びそれらの測定時刻の各データを、5 秒毎に約 5 時間にわたって収集した。今回のシミュレーションには、この中、全ての搬送波位相データに対してサイクルスリップが発生していない、1995 年 9 月 25 日 16 時 10 分から 17 時 26 分にかけての約 76 分間ぶんのデータを使用した。

次に、周囲の建物や地形、または建設機器などによって衛星から送出された搬送波が遮蔽されたり干渉されたりして、その位相が何らかの影響を受けた場合を想定し、特定の 1 衛星の搬送波位相データに平均値 0、標準偏差約 57 mm ( L1 帯の搬送波波長約 190 mm の 0.3 倍 ) の正規乱数を加算して測位計算を行った。更に、5 秒毎の測位結果約 4560 点の緯度経度方向測位分布と衛星配置から求めた共分散楕円と比較検討した。

### 4.4 シミュレーション結果

図 4.2 にデータ取得時の衛星配置を示す。

矢印は衛星の移動方向を示している。同図よりシミュレーションに使用した衛星の搬送波位相データは、SV1, SV5, SV9, SV20, SV23, SV25 の計 7 機の衛星からのものであった。

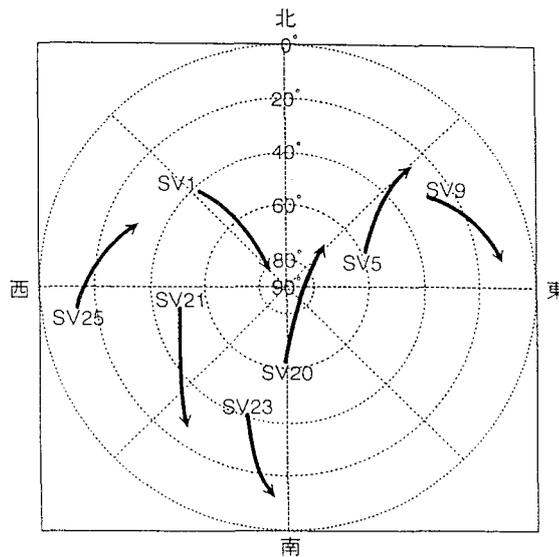


図 4.2: 衛星配置 ( 矢印は衛星の移動方向 )

まず、図 4.3 に測距誤差を加算しないときの、生の搬送波位相データのみを使用して RTK 測位計算を行った結果の緯度経度方向測位分布を示す。

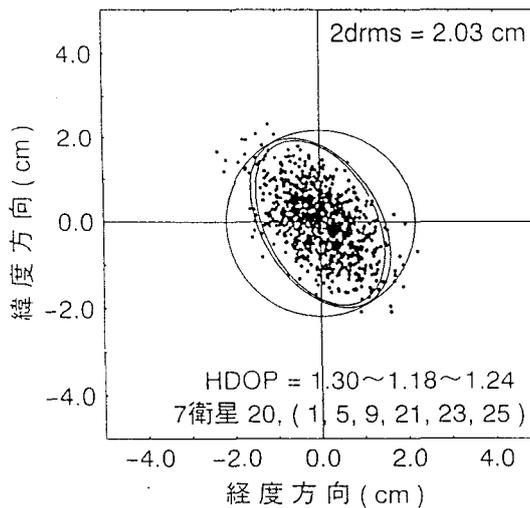


図 4.3: 緯度経度方向測位分布 ( 7 衛星利用 )

測位計算には常時 7 機の衛星全てを使用しており、HDOP は概略 1.30 から 1.18、そして 1.24 と変化した。図中の実線で描かれた楕円は共分散楕円である。2 つ描かれているのは、それぞれ測位の開始時と終了時のものである。なお、全ての二重位相差に対して 8 mm の測距誤差を想定して共分散楕円を描いているが、この値は今回使用した NovAtel 3151R ではおよそ 4 mm から 12 mm であることを確かめているので、特別な値ではない。更に図中に描かれている円は、その内側に全測位点の 95 % を含む半径 2drms の円で、その値は 2.03 cm である。同図より共分散楕円と測位分布はは

ほぼ一致していることから、全ての衛星に対する測距誤差もほぼ一定であるということが出来る。

次に、図4.4に5番衛星に対して測距誤差を加算して測位計算した場合の緯度経度方向測位分布を示す。

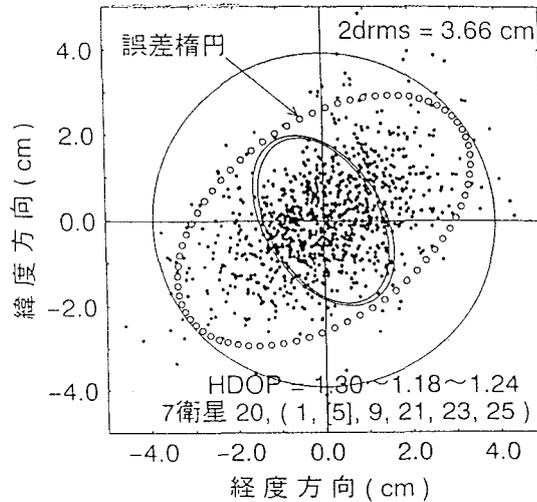


図 4.4: 緯度経度方向測位分布 (SV5 測距誤差加算)

図4.2, 4.3, 4.4より測距誤差を加算した5番衛星の方向に測位分布が拡大していることが分かる。2drmsは2.03 cmから3.66 cmと拡大した。他の衛星に測距誤差を加算しても、ほとんど同様に測位分布はその衛星の方向に拡大した。なお、白丸印で描かれた楕円は測位点の95%をその内側に含む誤差楕円である。

次に、図4.5にこの測距誤差を加算した5番衛星を除き、計6衛星を使用して測位計算を行った場合の緯度経度方向測位分布を示す。

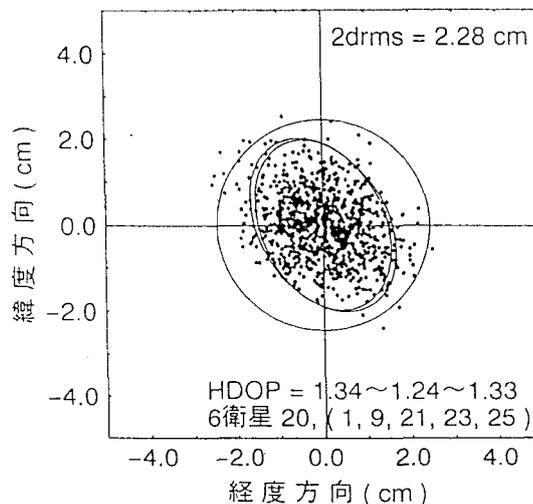


図 4.5: 緯度経度方向測位分布 (SV5 除去)

同図より、使用した衛星の数が1機減少したため、HDOPの値は全体的に0.06程度

大きくなったが、測距誤差の大きい衛星を除くことにより、測位精度が大幅に改善されることが分かる。2drms は 3.66 cm から 2.28 cm へと改善された。このシミュレーションにより、この原理の性質の概略を把握できた。

## 4.5 実時間への適用実験

シミュレーションでは十分に満足のいく結果が得られた。しかし、これは単なるキネマティック測位である。よって、次にこの性質を実時間の測位に適用できるかどうかを調べるため、RTK を利用して実験を行った。実験に使用した GPS 受信機は、Trimble Navigation Limited 社製の GPS 受信機 4000SSE 2 台である。まず、東京商船大学・航海学科実習棟屋上に、互いに約 3 m 離してアンテナを設置した。基準局受信機と利用者局受信機はケーブルで直結しており、基準局受信機で測定された各種データを、直接利用者局受信機に伝送している。なお、RTK の測位結果は 1996 年 3 月 14 日 18 時 00 分から 18 時 08 分にかけて約 8 分間、1 秒毎に収集した。

図 4.6 に 18 時 00 分から 18 時 04 分にかけての 4 分間の測位に対する緯度経度方向測位分布を示す。

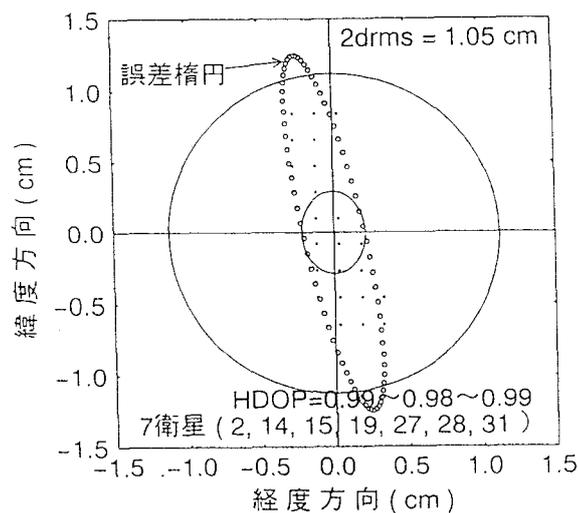


図 4.6: 緯度経度方向測位分布 (7 衛星使用)

測位には SV2, SV14, SV15, SV19, SV27, SV28, SV31 の計 7 衛星を使用しており、HDOP の値は 0.98 から 0.99 と推移し、また 2drms は 1.05cm であった。しかし、同図より、明らかに共分散楕円と測位分布は一致しておらず、測位分布が共分散楕円に対して縦に伸びていることが分かる。

次に、図 4.7 にこの時間帯における衛星配置を地平面図で示す。

同図より、図 4.6 の測位分布の拡大している方向には 14 番衛星があることが分かる。また、アンテナから見てその方向には建造物があり、これにより搬送波の干渉が発生

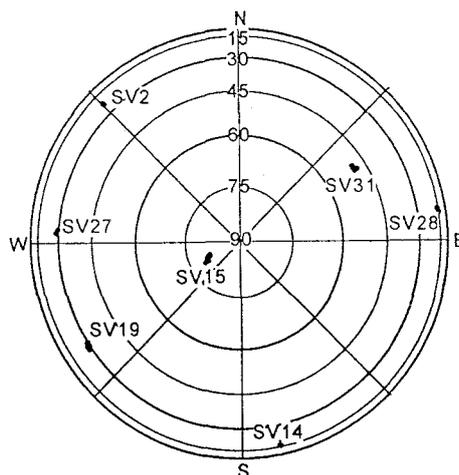


図 4.7: 衛星配置 (地平面図)

している可能性があることが分かった。よって、14 番衛星から送出されてきた搬送波位相が何らかの影響を受け、測距精度が劣化していると考えた。

図 4.8に前述の測位の直後、18 時 04 分から 18 時 08 分にかけての 4 分間、この 14 番衛星を除去して行った測位に対する緯度経度方向測位分布を示す。

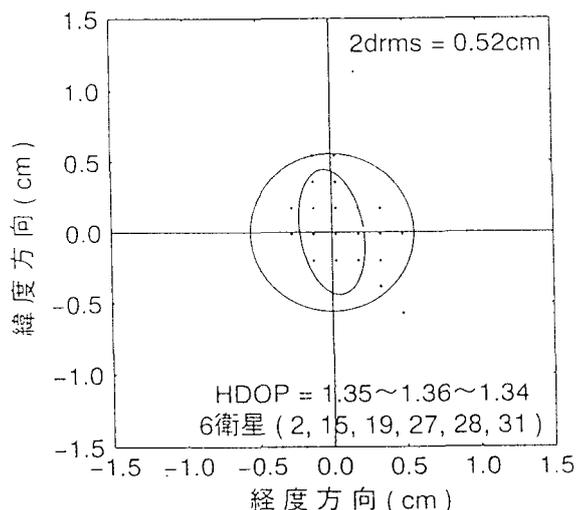


図 4.8: 緯度経度方向測位分布 (SV14 除去)

測位に使用している衛星は計 6 機となり、HDOP の値も 1.35 程度に拡大したが、同図より、2drms は 0.52 cm と格段に測位精度が改善されていることが分かる。

この性質を実時間に応用するためには、測位分布の短時間把握が 1 つの課題となる。共分散楕円は衛星配置から瞬時に取得できるが、測位分布を把握するためにはある程度の時間を必要とする。しかし、今回のように単に他の衛星と比較して格段に測距精度の悪い衛星があるのかないのか、またあるならば、緯度経度方向測位の結果はおおよそどのような指向性を持つのかを把握するためだけならば、短時間で十分に測

距誤差の大きい衛星を推測できると考える。受信機からは 0.2 秒毎に測位結果を出力できるものも出回っているので、実際には 10 秒程度で推測できると考える。

## 4.6 まとめ

RTK 測位を行っているとき、このマルチパスや建物等による遮蔽、干渉によって衛星から送出されている搬送波の位相が何らかの影響を受け、その結果として測位分布が拡大したり、またシフトやドリフト及びジャンプをするという状況がしばしば発生している。このような状況を改善しない限り、RTK の各分野への応用は困難なものとなる。そこで、測位分布と衛星配置によって決定される共分散楕円とを比較することにより、測位誤差の原因となっている位相データを送信する衛星の推測を試みた。そして、更に測位分布が極端にある方向に拡大している場合には、その拡大している方向に位置する衛星の位相データを測位計算から排除することにより RTK の高精度測位を維持する可能性を実際のデータを用いてシミュレーションし、検討を行った。また、この原理を実時間に適用する実験を行った。

この結果、RTK 測位を行う場合、常時測位分布と衛星配置から求められる共分散楕円をモニタしていれば、ある程度以上の測距誤差を有する位相データを送信する衛星が存在した場合にはそれを推測でき、またその衛星の位相データを排除して測位計算を続けることで高精度測位を維持できると考える。よって、この性質が実時間で RTK の高精度測位を維持するための手段の 1 つとして利用できるという結論に至った。

今後、測位分布をより現実に近い見地から把握するために、緯度経度方向測位分布としてではなく、三次元測位分布として、すなわち共分散楕円としてではなく、共分散楕円体として捉え、かつこの性質と他の幾つかの指標 (SN 比等) を複合した上で、RTK を実際に使用する際に高精度測位を維持できるシステムを構成したいと考えている。

## 第 5 章

### 結論

#### 5.1 総括

移動しながら実時間で測位を行う RTK では基準局から利用者局に搬送波位相データを伝送する必要がある。しかし、現在どのメーカーの受信機でも共通して使用できるデータ伝送フォーマットを用いた RTK 測位用のデータリンクは皆無である。そこで、著者は現在世界的にも認識されている RTCM RTK データを、現行のテレビ音声多重データ放送を利用して伝送し、測位する実験を行った。また、Trimble Navigation Limited が公開しているフォーマット CMR を用いて同様の実験を行った。

その結果、RTCM RTK データを使用した測位では、今回構成したシステムの全データ伝送時間が最大値は 1.33 秒であった。RTCM RTK データは 1.60 秒までの伝送遅延であれば、仕様通りの高精度な測位が可能であるといわれており、これを十分に満足していることが分かる。また、高精度測位が行われているフラグとなる Fix 解は全体の約 90 % をしめていた。この間の測位精度は 2drms で 2 cm 以内と、仕様通りの高精度測位が実現されていることが分かる。

次に、CMR データを使用した RTK 測位では、仕様通りの高精度測位が行われているフラグとなる Fix 解は 100 % であった。この間の測位精度は 2drms で 5 mm 以内と、RTCM RTK データを使用した場合と比較して更に高精度測位が実現されていたことが分かる。

以上の結果より、テレビ音声多重データ放送をデータリンクとして利用し、高精度な RTK のシステムを構成することも可能であるとい結論を得た。

次に、RTK 測位を行っているとき、このマルチパスや建物等による遮蔽、干渉によって衛星から送出されている搬送波の位相が何らかの影響を受け、その結果として測位分布が拡大したり、またシフトやドリフト及びジャンプをするという状況がしばしば発生している。このような状況を改善しない限り、RTK の各分野への応用は困難なものとなる。そこで、測位分布と衛星配置によって決定される共分散楕円とを比較することにより、測位誤差の原因となっている位相データを送信する衛星を推測する

ことを試みた。そして、更に測位分布が極端にある方向に拡大している場合には、その拡大している方向に位置する衛星の位相データを測位計算から排除することにより RTK の高精度測位を維持する可能性を実際のデータを用いてシミュレーションし、検討を行った。また、この原理を実時間に適用する実験を行った。

この結果、RTK 測位を行う場合、常時測位分布と衛星配置から求められる共分散楕円をモニタしていれば、ある程度以上の測距誤差を有する位相データを送信する衛星が存在した場合にはそれを推測でき、またその衛星の位相データを排除して測位計算を続けることで高精度測位を維持できると考える。よって、この性質が実時間で RTK の高精度測位を維持するための手段の 1 つとして利用できるという結論に至った。

## 5.2 今後の課題

現在、FM 音声多重データ放送、デジタル MCA、携帯電話等、様々なデータリンクが RTK データの伝送手段として考えられ、また日夜実用化に向けての実験研究が行われている。その中で、今回行ったテレビ音声多重データ放送をデータ伝送手段として利用し、RTK 測位を行う研究では、更にこの伝送手段を 1 つ提案した形となった。このように、複数のデータリンクの候補の中から、利用者自身がその状況に最適なものを選択する幅を拡大できたということに大きな意味があると考えられる。しかし、このシステムを実用化するためには、まだまだ問題が山積みされている。例えば、このシステムをより一般に普及させるために、測位結果が Float 解もしくは単なるコード DGPS 測位へ移行する原因を追求し、Fix 率を向上させる必要があるだろう。このような問題を解決するために、今後も実験研究を続けてゆきたいと考えている。

GPS ではインテグリティという言葉がしばしば使用される。インテグリティ ( Integrity ) とは英和辞典によれば「完全、無傷」であるが、航法に使用するときには「完全性」と訳すこともある。しかし、本来の定義とは少し意味が違うのでカタカナで原文のまま呼ぶこととする。まず、航法システムのインテグリティを定義すると次のようになる。すなわち、インテグリティとは航法システムが規定されている性能の範囲内で動作しなくなったときに、そのシステムが航法に使用されないように、またその誤動作が検出されたときは、それを利用者に何らかの方法で提示するシステムの能力である。いいかえると、もしインテグリティが確立されていれば、そのシステムは誤ったデータをあたかも真のデータのように伝えることは決してない。そのシステムが規定値をはずれてしまい誤差が拡大している場合には、それを利用者に知らせるかまた場合によっては電波を止めるなどの処置がなされる。このようなことから、航法システムのインテグリティの性能を表すパラメータは、誤動作の検出の能力と誤動作発生後のそれを使用者に警報するまでの時間遅れであるといえる<sup>(26)(27)</sup>。

一般に航法システムではその使用段階があり、それぞれの段階に応じたシステムと

多段階に利用可能なシステムがある。船舶の航法でいえば、大洋航行、沿岸航行、狭水道航行、港湾内航行、接岸などがある。航空でいえば、大陸間の大洋上や人口の少ない陸上における飛行、空港周辺（ターミナル）における飛行、空港への進入、着陸、地上滑走などの段階があり、これらを交通の粗密で分類することも多い。これらの各航行段階で要求される測位精度や測位頻度又はシステムに故障あるいは異常が発生した場合に通報されるべき警報の緊急度等インテグリティ・パラメータは異なってくる。インテグリティとはシステムあるいは衛星の故障をすばやく利用者に告知するシステムの機能であるともいえる。

GPSのこの機能はシステムとしては米国の国防上の目的のみ考えられ、民間の利用者にとっては十分なものとはいえない。インテグリティが現時点で最も大きな問題になっているのは民間航空の分野である。GPSは正常に動作している間は非常に優れた測位の能力を提供しているが、技術的な問題で、常にその状態が維持できるという保証は得られない。システムに故障はつきものであるからである。

今後、利用者のニーズが何であるのかを的確に捉え、RTKを実用化するにあたって当面最も問題となるであろう信頼性と一般性を追求し、幾つかの指標（SN比、インテグリティ、三次元測位分布等）を複合した上で、誰でも手軽にRTKの高精度測位を利用できるよう研究を続けてゆきたいと考えている。

### 5.3 GPS 将来展望と問題

GPS衛星は高度約20,000 kmの軌道に打ち上げられている。衛星が頭上にあるときは、電波の速度は毎秒約300,000 kmであるから、衛星から発射された電波は約0.07秒で地上に届くことになる。地球に大気が無ければ電波は真空中を伝搬してくるので、電波の伝搬速度は常に一定である。しかしながら、地球は図5.1<sup>(28)</sup>に示すように、大気で覆われているので、電波の速度は光速若干ではあるが減速する。そのため、電波到達時間からの擬似距離測定では距離を過大に見積もることになり誤差を生じる。地球の表面を覆っている大気は地表面付近では大体 $1\text{kg}/\text{m}^2$ であり、上空に行くにつれ急速に希薄になっている。500 kmの高度では密度は地表の $10^{-12}$ 程度に減少する。この大気層の上部は太陽からの輻射により電離されており、電離層を形成している。電離層の電子密度と高さは、太陽の活動期、季節、時刻、緯度、経度等によって複雑に変化する。

太陽活動による影響は約11年周期で電離層の電子密度を大きく変化させる。太陽活動によるものは太陽の表面に現れる黒点数が多くなると活発になり、ウォルフ黒点数と呼ばれる数値が指標として用いられている。図5.2<sup>(28)</sup>に見られるように1990年代の初頭に極大期（Solar High）を迎え、現在は極小期に入っている。前回の極大期はGPSが完成する前であったため、十分な観測ができなかった。次回の極大期は21

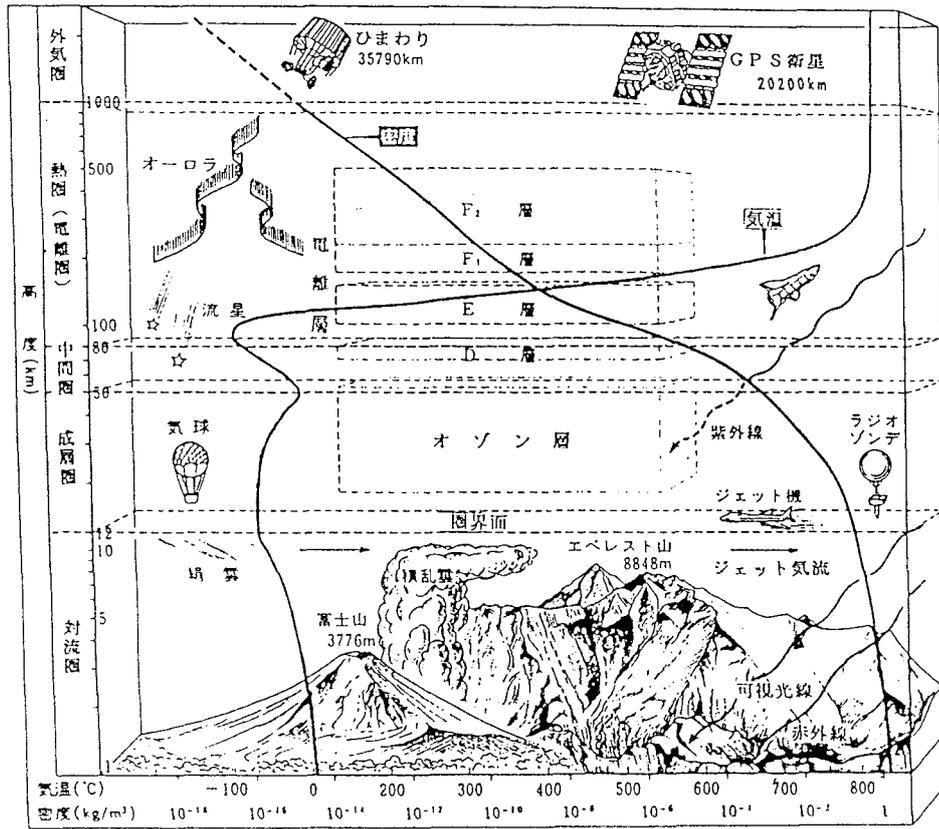


図 5.1: 地球を取り巻く大気圏

世紀の初めころとなるが、GPS が完成してから初めての経験となり、また電離層補正モデルがほとんど効果発揮できないと予測されているため、通常 1 m であった誤差が 6~7 m になる警告されている。モデル化が困難なため DGPS も効果がないといわれており、実際にどのような影響が生じるか不安視されている。

衛星軌道データや衛星内部時計の補正係数等を載せて送信されている航法データには、GPS 週と一緒に記述してある。GPS 時間は 1 週間を基準としてリセットされるため、現在何週目であるかを知る必要がある。航法データの構造上から、この GPS

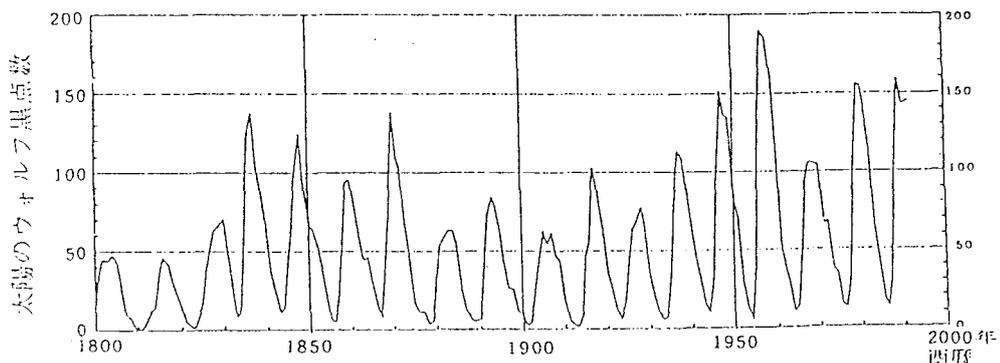


図 5.2: 太陽のウォルフ黒点数の変化

---

週の記述には 10 bit の領域が割り当てられているため、週は 1023 週までしかカウントできないことになる。GPS の第 1 週は 1980 年 1 月 6 日の週からカウントが開始されているため、1999 年 8 月 21 日までしか記述できない。この事態に現在使用されている GPS 受信機、その他の機器が対応できるのか興味深く、また不安材料の 1 つである。更に新しい周波数帯、L5 帯の設置も非常に期待がもたれる。

---

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、様々な形で御指導頂きました東京商船大学・情報通信工学研究室の安田明生教授に心からお礼申し上げます。安田明生教授の指導力の大きさに支えられ、またその方針に同調致しました。その結果、なんとかここに修士論文を仕上げる事ができました。

テレビ音声多重データ放送をデータ伝送に利用した RTK 測位に関する研究において、実験に御協力頂きました全国朝日放送の笹野耕治氏、エル・エス・アイ ジャパンの田中隆氏、Trimble Japan の福田昌史氏、更に茶塚俊一氏をはじめとする DX アンテナの皆様には謝意を表します。実験に際し、私の不注意からなかなか成功せず、笹野耕治氏には大変御迷惑をお掛け致しました。福田昌史氏には Trimble Japan 社におまねき頂き、Trimble 社の製品について懇切丁寧な説明と、たくさんの資料を頂きました。

また、高精度測位維持の研究において御討論頂きましたセイコー エプソンの兪豊氏に謝意を表します。KGPS のシミュレーション計算ソフトや、共分散楕円の計算ソフトは兪豊氏の成果によるところが大きいと考えます。

色々御指導御助言を頂きました山下晃司助教授、川村雅志文部技官に謝意を表します。川村雅志文部技官には GPS アンテナの設置から維持方法、研究室内の管理に至るまで様々に御指導頂きました。

また、本論文を記述する、TEX のスタイル・ファイルを快く提供して下さった鳥羽商船高等専門学校教官の鈴木治氏の感謝申し上げます。鈴木治氏には研究室の管理運用から、研究の進行状況に関してまで様々に御心配をお掛け致しました。

更に、色々御討論頂きました Navigation GPS ML のメンバの皆様には謝意お表します。

最後に色々お世話になりました本学情報通信工学研究室のメンバの皆様には心から感謝申し上げます。特に同期の山田隆博君は、私が研究が上手くゆかないとき、静かに励ましてくれました。助かりました。ありがとう。

---

## 参考文献

- (1) 衛星測位システム協議会, 「GPS 導入ガイド」, pp.52, 1993年10月30日
  - (2) 今江理人 : 「GPS の原理と応用」, 電気学会誌, Vol.116, pp.672~675, 1996年10月
  - (3) 日本測地学会 : 「新訂版 - 人工衛星による精密測位システム -」, pp.63, 1989年11月15日
  - (4) (社) 日本航海学会 : 「GPS/DGPS 利用技術の展望」, シンポジウム テキスト, pp.64, 平成8年11月29日
  - (5) (社) 日本航海学会 : 「GPS/DGPS 利用技術の展望」, シンポジウム テキスト, pp.70, 平成8年11月29日
  - (6) 坪井 広美・岡本 修, 「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」, 日本測量協会, 応用測量論文集 Vol.7, pp.21~28, 1996年6月24日
  - (7) 木津 昭一・花輪 公雄, 「搬送波位相測定に基づく差動 GPS ( 干渉測位 ) とその海洋研究における利用について」, 日本航海学会誌 NAVIGATION 第126号, pp.21~28, 平成7年12月25日
  - (8) (社) 日本航海学会 : 「GPS/DGPS 利用技術の展望」, シンポジウム テキスト, pp.74, 平成8年11月29日
  - (9) 織田 博行・五十嵐 和之・関 信次・石井 真, 「GPS を用いた運動測定システム」, 日本航海学会誌 NAVIGATION 第126号, pp.29~34, 平成7年12月25日
  - (10) (社) 日本航海学会 : 「GPS/DGPS 利用技術の展望」, シンポジウム テキスト, pp.109, 平成8年11月29日
  - (11) (社) 日本航海学会 : 「GPS/DGPS 利用技術の展望」, シンポジウム テキスト, pp.77, 平成8年11月29日
  - (12) 日本測地学会 : 「新訂版 - 人工衛星による精密測位システム -」, pp.155, 1989年11月15日
  - (13) (社) 日本航海学会 : 「GPS/DGPS 利用技術の展望」, シンポジウム テキスト, pp.29, 平成8年11月29日
  - (14) (社) 日本航海学会 : 「GPS/DGPS 利用技術の展望」, シンポジウム テキスト, pp.30, 平成8年11月29日
-

- 
- (15) 土屋 淳・今給黎 哲郎 : 「GPS 測量と基線解析の手引 改訂版」, (社) 日本測量協会, pp.172, 1994 年 12 月 22 日
  - (16) 占部 実・光藤 富士男 : 「理工系一般教育代数・幾何教科書」, 共立出版株式会社, 昭和 44 年 3 月 15 日
  - (17) 山内 恭彦 : 「応用数学叢書 代数学および幾何学」, 共立出版株式会社, 昭和 38 年 8 月 10 日
  - (18) RTCM SPECIAL COMMITTEE No.104 : ' RTCM RECOMMENDED STANDARDS FOR DIFFERENTIAL NAVSTAR GPS SERVICE VERSION 2.1 ', RTCM Paper 194-93/SC104-STD, JANUARY 3,1994
  - (19) (社) 日本航海学会 : 「GPS/DGPS 利用技術の展望」, シンポジウム テキスト, pp.22, 平成 8 年 11 月 29 日
  - (20) (社) 日本航海学会 : 「GPS/DGPS 利用技術の展望」, シンポジウム テキスト, pp.24, 平成 8 年 11 月 29 日
  - (21) (社) 日本航海学会 : 「GPS/DGPS 利用技術の展望」, シンポジウム テキスト, pp.25, 平成 8 年 11 月 29 日
  - (22) 衛星測位システム協議会, 「GPS 導入ガイド」, pp.92, 1993 年 10 月 30 日
  - (23) Dr.Nicholas C.Talbot, ' Compact Data Transmission Standard for High-Precision GPS ', PROCEEDING OF THE 9TH INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION ION GPS-96 PART 1 OF 2, pp.861-871
  - (24) 安田 明生・平田 誠・奥田 邦晴・今津 隼馬, 「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 第 79 号, pp.25~31, 昭和 63 年 9 月
  - (25) R. S. パーリントン他著 : 「確率・統計ハンドブック」, pp.124~125, 森北出版, 1975 年
  - (26) 木村 小一 : 「船舶電子航法ノート ( 208 )」, 船の科学 Vol.47-10, pp.81~85, 1994 年 10 月
  - (27) 木村 小一 : 「船舶電子航法ノート ( 209 )」, 船の科学 Vol.47-12, pp.78~81, 1994 年 12 月
  - (28) (社) 日本航海学会 : 「GPS/DGPS 利用技術の展望」, シンポジウム テキスト, pp.14, 平成 8 年 11 月 29 日
-

## 本研究に関して発表した論文

### 第 2 章

浪江 宏宗・安田 明生・岡村 知則：「リアルタイムキネマティックの傾斜計への応用」, 日本航海学会論文集 第 94 号, pp.125~129, 平成 8 年 3 月 25 日

浪江 宏宗・兪 豊・安田 明生：「KGPS における測位値の短時間決定」, 1996 年電子情報通信学会 総合大会 講演論文集 通信 1, pp.196, 1996 年 3 月 11 日

### 第 4 章

浪江 宏宗・安田 明生：「KGPS の高精度測位維持に関する研究 - 共分散楕円と 95 % 誤差楕円の比較 -」, 日本航海学会論文集 第 95 号, pp.1~6, 平成 8 年 9 月 25 日

---

# 索引

- 1.96  $\sigma$ , 4  
21 世紀, 60  
2drms, 3, 4, 45, 52, 54, 55, 57  
2 Word Header, 29  
2 周波, 3  
2 相位相変調, 3  
2 変数正規分布, 50  
3DF, 9  
4000SSE, 42, 54  
50 % 確率円, 50  
  
Almanac, 5  
Ambiguity, 14  
Anti-Spoofing, 5  
AS, 5  
  
Base Station, 13  
  
C/A コード, 3, 4, 15, 33, 34  
CEP, 50  
Circular Error Probable, 50  
CMR, 11, 36, 45, 57  
  
Data Link, 13  
Department of Defence, 2  
DGPS, 13, 60  
DGPS 測位, 58  
Dilution of Precision, 48  
DOD, 2  
DOP, 48  
DX アンテナ, 43, 62  
  
Earth Centered Earth Fixed, 18  
ECEF, 18, 33, 38  
Ephemeris, 5  
ETX, 36  
  
Fill, 32  
Fix, 22, 45, 57  
Fix 率, 58  
Float, 22, 58  
Floating Crane, 7  
FM サブキャリア, 35  
FM 音声多重データ放送, 58  
Frame, 29  
Frame ID, 29  
  
GDOP, 49, 50  
Geoid, 8  
Geometrical DOP, 49  
Global Positioning System, 2  
GPS, 2  
GPS アンテナ, 6, 48  
GPS 衛星, 2, 59  
GPS 時間, 60  
GPS 時間測定データ, 33  
GPS 受信機, 11  
GPS 週, 60  
Gyro, 9  
  
HDOP, 49, 52-55  
Horizontal DOP, 49  
Hyperboloid, 25  
ICD-GPS-200, 4
-

- Integrity, 58  
IOD, 32  
ION GPS-96, 28  
Issue of Data, 32  
KGPS, 12  
L1 帯, 3~5, 33, 51  
L2 帯, 3~5, 33, 34  
L5 帯, 61  
Length of Frame, 29  
LSB, 29  
Mobile, 2  
Modified Z-count, 29  
Multipath, 47  
Navigation, 2, 33  
NovAtel, 14, 51  
On-the-Fly, 27  
OTF, 27  
Parity, 29  
PDOP, 49  
PN コード, 3  
Position DOP, 49  
PPS, 4  
PRC, 32  
Preamble, 29  
Precise Positioning Service, 4  
PRN, 38  
Pseudolite, 10  
Pseudo Random Noise Code, 3  
Pseudo Range Correction, 32  
P コード, 3, 4, 33, 34  
Range Rate Correction, 32  
Real-time Kinematic GPS, 5  
Reference Station, 13  
Remote Station, 13  
root-mean-square, 4  
Rover Station, 13  
RRC, 32  
RRS, 49  
RTCM, 11, 29, 36  
RTCM RTK データ, 42, 45, 57  
RTK, 7~11, 13, 14, 17, 22, 24, 27, 33, 36, 45, 47, 48, 54, 56, 57, 58, 62  
RTK-GPS, 5  
RTK-OTF, 27  
RTK データ, 58  
SA, 3, 4, 15, 17  
Satellite ID, 32  
Scale Factor, 31  
Selective Availability, 4  
SN 比, 14, 38, 56  
SPS, 4  
Standard Positioning Service, 4  
Station Health, 29  
Station ID, 29  
STX, 36  
Techno Super Liner, 6  
Tracking, 6  
Trimble, 28, 36, 42, 45, 54, 57, 62  
TSL, 6  
UDRE, 32  
UERE, 49  
User Differential Range Error, 32  
User Equivalent Range Error, 49  
User Station, 13  
VDOP, 49  
Vertical DOP, 49

- WGS-84, 18, 33, 38  
Word, 29  
World Geodetic System 1984, 18  
Yコード, 3, 5  
アンビギュイティ, 14, 19, 21~23, 27, 33  
アンテナ, 18, 40  
位相, 5, 6, 11, 13, 15~17, 38, 48, 51, 56, 57  
位相変調, 3  
一重位相差, 13  
緯度経度方向精度劣化指数, 49  
緯度経度方向測位分布, 12  
移動局, 13  
移動体, 2, 5, 27  
インテグリティ, 58, 59  
ウォルフ黒点数, 59  
衛星位置, 5, 19, 51  
衛星間一重位相差, 15  
衛星軌道データ, 5, 50, 60  
衛星群, 50  
衛星健康状態, 5  
衛星識別番号, 5, 32  
衛星測位システム, 2  
衛星追尾, 37  
衛星時計誤差, 16  
衛星時計補正データ, 5  
衛星配置, 12, 48, 50, 51, 54~57  
エフェメリス, 34, 35  
エポック, 19, 22  
エル・エス・アイ ジャパン, 62  
円, 50  
沿岸, 6, 7, 59  
円形確率誤差, 50  
円形正規分布, 50  
オフライン, 5  
オンザフライ, 27  
海上無線技術委員会, 11  
海中, 7  
海洋, 6  
海流, 8  
海底, 7  
回転双曲面, 23~26  
回転面, 25  
海面, 8  
海面高度, 8  
拡大係数, 48  
角度変化量, 26  
確率分布, 50  
確率変数, 50  
火山活動, 7  
カーナビ, 2  
カウンタ, 43  
干渉, 11, 48, 51, 54, 56, 57  
慣性航法装置, 10  
完全性, 58  
観測エポック, 37  
観測データ, 40  
岸壁, 6, 9  
幾何学的精度劣化指数, 49  
擬似衛星, 10  
擬似距離, 32, 35, 40, 59  
擬似雑音符号, 3  
基準衛星, 19  
基準局, 6, 11, 13, 18, 19, 33, 38, 45, 54, 57  
基準局位置座標メッセージ, 39

- 基準局情報メッセージ, 40  
基準子午面, 18  
基準発振器, 3, 4  
基線解析, 5  
軌道, 2  
軌道計算, 5  
軌道傾斜角, 3  
軌道半径, 3  
軌道データ, 19  
軌道面, 50  
基本周波数, 4  
キャリア・スムージング, 35  
極小期, 59  
極大期, 59  
曲面の方程式, 25  
仰角, 48  
狭水道航行, 59  
共分散行列, 49  
共分散楕円, 12, 48, 50~52, 54~57  
共分散楕円体, 56  
距離差, 17, 20, 23, 24  
距離分解能, 6  
距離変化率補正值, 32  
緊急度, 59  
近似値, 20  
空港, 59  
グランド・プレーン, 48  
グリニッジ, 18  
クロック, 4, 5  
計算距離, 20  
計算誤差, 22  
計速精度, 6  
携帯電話, 35, 58  
警報, 59  
繫留, 9  
ケーソン, 7  
健康状態, 29  
建設資材, 7  
国防上, 59  
国防上の安全性, 4  
黒点数, 59  
コード周期, 4  
コード・パターン, 3~5  
誤動作, 58  
高仰角, 50  
航空, 59  
航空機, 10  
航空分野, 10  
航空路, 10  
恒星時, 3  
航跡, 6  
交通, 59  
高度方向精度劣化指数, 49  
航法, 58  
航法支援, 2  
航法システム, 58  
航法データ, 5, 32, 60  
港湾, 6  
港湾内航行, 59  
混信, 3  
コンパクト観測レコード, 36  
固定点, 13  
サイクルスリップ, 6, 22, 24, 27, 51  
最小自乗法, 22  
座標系, 18  
残差, 22  
三次元位置, 13, 19, 22, 33  
三次元測位, 2, 50  
三次元測位分布, 56  
三次元直交座標, 18, 22

- 時間精度劣化指数, 49  
時刻タイミング, 4  
時刻同期タイミング, 15  
地震, 7  
姿勢角度, 9, 10  
姿勢測定, 9, 10  
自動車電話, 6  
ジャンプ, 12  
遮蔽, 11, 48, 51, 56, 57  
ジオイド, 8  
受信機間一重位相差, 16  
十進, 3  
シュードライト, 10  
周回周期, 3  
修正 Z カウント, 29  
修正値, 20  
収束, 22, 23  
周波数帯域幅, 36  
重力場, 8  
浚渫船, 7  
昇交点経度, 3  
情報通信工学研究室, 62  
焦点, 24, 25  
小電力無線, 35  
真空中, 59  
スケール・ファクタ, 31  
スムージング, 35  
正規乱数, 51  
セイコー エプソン, 62  
静止状態, 5, 27  
整数値バイアス, 14, 22  
精度劣化指数, 48  
精密進入誘導, 10  
精密測位サービス, 4  
赤道, 18  
接岸, 59  
接平面, 25, 26  
線形, 20  
線形化, 20  
線形方程式, 20  
全国朝日放送, 62  
全世界的測位システム, 2  
全世界的測地系 1984, 18  
船体, 6  
選択利用性, 4  
船舶, 6, 8, 59  
測位計算, 14, 48, 51, 52, 56  
測位結果, 51, 54, 56, 58  
測位誤差, 12, 48, 56, 57  
測位精度, 4, 6, 22, 45, 55, 57, 59  
測位精度劣化指数, 49  
測位頻度, 59  
測位分布, 12, 48, 50, 52, 54~57  
測位点, 4  
測量, 5  
測量船, 7  
測定時刻, 51  
測距, 3, 5, 6, 17  
測距誤差, 4, 48, 49, 52, 56, 58  
測距信号, 3, 4  
測距精度, 18, 55  
ソフトウェア的, 24  
相関係数, 49, 50  
双曲線, 25  
送信電力, 3  
操船, 6  
帯域幅, 4  
大気層, 59  
太陽, 59  
大洋, 59

- 大陸間, 59  
大陸間弾道ミサイル, 2  
対流圏, 14  
楕円, 50, 52  
楕円体, 18  
多重, 43  
単独測位, 5  
ターミナル, 59  
多面体, 50  
  
地殻変動, 7  
地球, 59  
逐次近似計算, 20  
逐次計算, 22  
地上滑走, 59  
地表付近, 59  
着陸, 6  
着陸, 59  
直接波, 47  
潮汐, 8, 9  
頂点, 50  
地平面図, 54  
  
追尾, 6, 24  
追尾衛星, 33, 51  
通報, 59  
  
低仰角, 50  
デジタル MCA, 35, 58  
デジタル無線, 35  
テクノスーパーライナ, 6  
デコーダ, 43  
データ圧縮アルゴリズム, 36, 40  
データ発行番号, 32  
データリンク, 11, 13, 35, 45, 57, 58  
データ伝送, 6, 62  
データ伝送時間, 43, 45, 57  
データ伝送フォーマット, 11, 35, 45, 57  
データ伝送レート, 36  
テレビ朝日, 42  
テレビ音声, 43  
テレビ音声多重データ放送, 11, 28, 45, 57, 58, 62  
伝送手段, 58  
伝送遅延, 57  
伝送フォーマット, 29  
伝送レート, 5, 40  
点の集合, 24  
電波, 59  
電波障害, 6  
電波到達時間, 59  
伝搬速度, 59  
電離, 59  
電離層, 4, 14, 34, 59  
電離層補正, 5, 33  
電離層補正係数, 5  
電離層補正モデル, 60  
電話回線, 42  
  
時計誤差, 16, 17  
東京タワー, 43  
動揺, 10  
トラッキング, 6, 19  
ドリフト, 12  
トレース, 49  
  
ナビゲーション, 33  
二次元測位, 50  
二重位相差, 13, 16, 19, 22, 24, 27, 52  
ヌル・フレーム, 33  
端数, 13  
波数, 15

- バーチカル・ジャイロ, 9  
波長, 5, 22, 51  
パリティ, 29  
反射波, 47  
搬送波, 3~5, 11, 15, 18, 19, 27, 48, 54,  
56, 57  
搬送波位相, 5, 13~15, 33, 40, 55  
搬送波位相測定データ, 34  
搬送波位相データ, 11, 14-16, 29, 45, 51,  
57  
搬送波周波数, 3, 14  
搬送波スムージング, 34  
ピーク検出, 47  
飛行, 59  
秘匿性, 4  
標準測位サービス, 4  
フィックス解, 22  
輻射, 59  
プリアンブル, 29  
プレート運動, 7  
フレーム, 29  
フレーム ID, 29  
フレーム・シーケンス・ナンバ, 29  
フレーム長, 29  
ブロック II 衛星, 4  
フロート解, 22  
フローティング・クレーン, 7  
平均位置, 4  
米軍, 4, 5  
米国, 4  
米国国防総省, 2  
平面の方程式, 25  
ベクトル, 26  
変化量, 25  
妨害防止電波, 5  
方向ベクトル, 26  
放射状測位誤差, 4  
法線ベクトル, 25, 26  
マルチパス, 6, 47, 50, 56, 57  
マルチパス・エラー, 35  
右手系, 18  
民間, 59  
民間航空, 59  
民間用, 4  
メッセージ・タイプ, 30  
メッセージ・タイプ 1, 31  
メッセージ・タイプ 18, 34  
メッセージ・タイプ 19, 35  
メッセージ・タイプ 3, 33  
メッセージ・タイプ 6, 33  
メッセージ・プロトコル, 36  
モデム, 43  
モデル化, 60  
モニタ, 56, 58  
安田明生, 62  
予測, 7  
乱数, 3  
リアルタイム, 7  
リアルタイム・キネマティック GPS, 5  
離着機時, 6  
離着機操船, 6  
利用者局, 6, 13, 19, 22, 45, 48, 57  
利用者局位置, 19, 20, 26  
利用者局受信機, 18, 43, 54  
利用者ディファレンシャル距離誤差, 32  
連立一次方程式, 20