

修士学位論文

GNSS解析ソフトウェアの開発とその利用  
に関する研究

平成23年度

(2011年9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

0955020 劉 陽



修士学位論文

GNSS解析ソフトウェアの開発とその利用  
に関する研究

平成23年度

(2011年9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

0955020 劉 陽

# 目次

<b>第1章 序論</b> .....	<b>1</b>
1 - 1 研究の背景 .....	1
1 - 2 研究の目的 .....	1
<b>第2章 RTK 基礎</b> .....	<b>3</b>
2 - 1 測位原理 .....	3
2 - 1 - 1 搬送波位相と Ambiguity .....	3
2 - 1 - 2 観測地誤差要因 .....	4
2 - 1 - 2 - 1 一重位相差(Single Difference) .....	5
2 - 1 - 2 - 2 二重位相差(Double Difference) .....	6
2 - 1 - 2 - 3 線形結合 .....	7
2 - 2 FLOAT 解アルゴリズム .....	8
2 - 3 FIX 解アルゴリズム .....	11
2 - 4 LAMBDA法 .....	12
2 - 5 GPS 信号強度 .....	15
<b>第3章 GNSS 解析ソフトウェア</b> .....	<b>18</b>
3 - 1 開発背景と目的 .....	18
3 - 2 画面仕様 .....	18
3 - 2 - 1 メインフレーム画面 .....	18
3 - 2 - 2 天空衛星位置動画表示画面 .....	19
3 - 2 - 3 Google Map 表示画面 .....	20
3 - 2 - 4 水平誤差プロット画面 .....	21
3 - 2 - 5 測位誤差時系列画面 .....	22
3 - 2 - 6 衛星情報一覧表示画面 .....	23
3 - 2 - 7 速度情報表示画面 .....	24
3 - 3 ファイル仕様 .....	25
3 - 3 - 1 ファイル一覧 .....	25
3 - 3 - 2 ファイル詳細 .....	26
3 - 3 - 2 - 1 Stand Alone 単独測位のデータ .....	26
3 - 3 - 2 - 2 DGNSS 測位データ .....	27
3 - 3 - 2 - 3 RTK 測位データ .....	28
3 - 3 - 2 - 4 ベストな測位解データ .....	29
3 - 3 - 2 - 5 Ref Obs 基準側観測データ .....	30
3 - 3 - 2 - 6 Rov Obs 基準側観測データ .....	31

3 - 3 - 2 - 7	Reference 基準としてレファレンスデータ	32
3 - 3 - 2 - 8	Velocity 速度関連情報	32
3 - 3 - 3	天空画像ファイル	33
3 - 3 - 3 - 1	Movie ファイル	33
3 - 3 - 3 - 2	Photo ファイル	33
<b>第4章</b>	<b>GNSS レファレンスデータの生成について</b>	<b>34</b>
4 - 1	レファレンスデータ	34
4 - 2	レファレンスデータの生成	34
4 - 2 - 1	アンビギュイティ決定について	35
4 - 2 - 2	アンビギュイティ保存	35
4 - 3	アンビギュイティ保存法を用いたレファレンスデータ	36
4 - 3 - 1	実験概要	36
4 - 3 - 2	レファレンスデータの生成過程	37
4 - 3 - 3	生成したレファレンスデータの評価	39
4 - 4	まとめ	41
<b>第5章</b>	<b>GNSS 解析ソフトウェア利用</b>	<b>42</b>
5 - 1	回折のRTKへの影響	42
5 - 2	測位に利用する衛星選択の重要性	45
5 - 3	GNSS 解析ソフトウェアを用いた実験	46
5 - 3 - 1	静止実験	46
5 - 3 - 1 - 1	実験概要	46
5 - 3 - 1 - 2	ノバテル受信機	49
5 - 3 - 1 - 3	測位結果の分析	51
5 - 3 - 2	移動実験	61
5 - 3 - 2 - 1	実験概要	61
5 - 3 - 2 - 2	測位結果	62
5 - 3 - 2 - 3	測位結果の分析	63
5 - 4	L2C 信号	67
5 - 5	L2C 信号を用いたRTK 結果	71
5 - 6	まとめ	72
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>74</b>

# 第1章 序論

## 1 - 1 研究の背景

現在都市部の測位環境は非常に厳しく、特に高層ビル街では可視衛星数が少なく、マルチパスの影響で衛星の信号強度も低い。船舶の沿岸部や港湾内でも同様の環境が見られる。このような場所では、GNSSの測位性能が低下することが知られている。2周波(L1+L2)のLAMBDA法とRatioテストの組み合わせにおいて、Ratio3以上の場合でも、測位結果が飛んでいるケースがある。実際衛星はどの影響を与えた、衛星の状況が厳しい原因を分析する。実際の車の走行道路の建物の天空情報と衛星配置を利用することが必要です。そのために移動体において、魚眼カメラで取得した建物の天空情報と衛星配置と観測データ及び解析結果を連動させる教育用GNSS解析ソフトウェアを開発した。

## 1 - 2 研究の目的

本研究では、実際の車の走行中の建物等を含む天空情報と衛星配置を利用することで、測位性能が低下する原因を調査することを目的とした。

GPS測位における誤差を引き起こす要因はいくつか存在しており、GPS衛星位置に関する誤差要因と擬似距離に関する誤差要因の大きく2種類に分別される。GPS衛星位置に関する誤差は、実際のGPS衛星位置と衛星軌道情報(Ephemeris)を利用して計算した位置が異なることによって生じる。また太陽の輻射圧力による摂動等で衛星運動の乱れによる誤差もある。擬似距離に関する誤差には主に、電離層、対流圏による遅延誤差やマルチパス誤差、受信機雑音などがある。また擬似距離はアンテナがGPS信号を受信した時刻と信号送信時刻の差に光速を乗ずることで算出するが、GPS衛星時計と受信機時計が一致していないために時計誤差が生じ、正しい距離を求めることができない。それらの誤差は、DGPS測位、干渉測位は基準局側の補正データ等を利用し、利用者側の測位誤差要因を相殺することによって測位精度を向上させているが、受信機雑音とマルチパスによる誤差は、基準局と移動局の周辺環境が異なるため、基準局からの補正データでは解決できず、測位誤差を相殺することはできない。マルチパスによる誤差は、すべてのGPS測位精度に影響を及ぼす。

マルチパスによる誤差を調査するために静止または移動体において、魚眼カメラで取得した建物の天空情報と衛星配置と観測データ及び解析結果を連動させるGNSS解析ソフトウェアを開発した。本解析ツールではGoogle Map上での位置、天空写真と衛星配置、各衛星の信号強度、単独測位、DGPS、RTKの測位結果、車の速度等を同時に表示することができる。この

ツールを利用して、DGPS や RTK の大きな誤差の時間帯を抽出し、それらの原因を調査して、測位精度を改善することを目的とした。

## 第2章 RTK 基礎

### 2 - 1 測位原理

GPS測位では測位を行うための2つのパラメータとして衛星位置と衛星-利用者間の距離を用いる。衛星-利用者間の距離として単独測位やDGPS測位は擬似距離を使用する。干渉測位は、衛星-利用者間の距離として擬似距離の代わりに搬送波位相(Carrier Phase)を利用する。擬似距離と比較すると搬送波位相の測距精度が高いため、干渉測位は数mmから数cmの測位が可能となる。干渉測位は、座標が既知である固定基準局に対する利用者の相対位置を求める方法が一般的である。原理は、座標が既知である固定基準局で搬送波位相を測定し、同時に利用者側でも搬送波位相を測定する。基準局と利用者側で同じ衛星から測定した搬送波位相の差(行路差)を求めることにより、基準局からの基線ベクトルを求める。基線ベクトルを求めることができれば、利用者の座標は基準局からの相対位置として求めることが可能である。図2-1に行路差と基線ベクトルの関係図を示す。基線ベクトルは3つの未知数で表され、解くためには3個の行路差が必要である。つまり3衛星の測定値が観測できれば良いことになるが、単独測位と同様に受信機の時計誤差を消去するためにもう1機の衛星が必要となる。

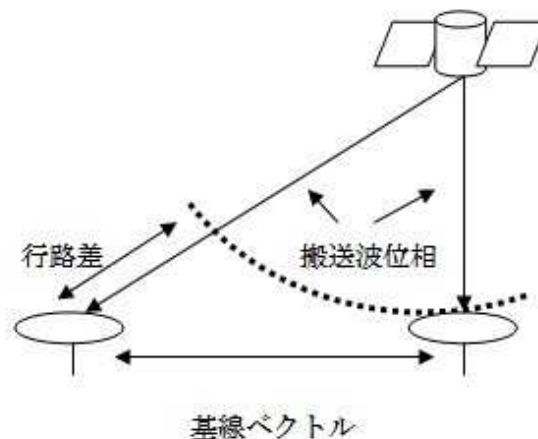


図2 - 1 行路差と基線ベクトル

#### 2 - 1 - 1 搬送波位相と Ambiguity

搬送波位相は、衛星のC/Aコードや航法メッセージ等の情報をGPS衛星から地上に運ぶ媒体であり、電波である。搬送波自体はサイン波であり情報は無く、変調することによって情報を



持たせることができる。GPSの搬送波にはL1帯とL2帯の2種類があり、L1帯は1,575.42MHz、L2帯は1,227.6MHzの周波数である。それぞれを1波長で表すとL1帯は約0.19m、L2帯は約0.24mである。搬送波位相は1波長を1サイクル(波数)として表される。搬送波の測距精度は1波長の100分の1であるため、搬送波位相はL1帯で約2mmの精度で測定できる。このように波数を少数点以下まで測定した値を搬送波位相と呼ぶ。GPS受信機から出力される搬送波位相は、波数を0.01サイクルの精度で測定し積算した値である。ここで*i*番衛星のL1帯の搬送波位相  $\varphi_{L1}^{(i)}$  (cycle)を式で表現すると、

$$\varphi_{L1}^{(i)} = \lambda_{L1}^{-1}(r^{(i)} - I_{L1}^{(i)} + T^{(i)}) + f_{L1}(\delta t_u - \delta t^{(i)}) + N_{L1}^{(i)} + \varepsilon_{L1}^{(i)} \quad (2-1)$$

となる。ここで  $\lambda_{L1}$  はL1帯の波長(m)、 $r$  は衛星-利用者間の正確な距離(m)、 $I_{L1}$  はL1帯の電離層遅延量(m)、 $T_{L1}$  はL1帯の対流圏遅延量(m)、 $f_{L1}$  はL1帯の周波数(MHz)、 $\delta t_u$  は受信機の時計誤差(s)、 $\delta t$  は衛星の時計誤差(s)、 $N_{L1}$  はL1帯搬送波の整数値バイアス  $\varepsilon_{L1}$  (cycle) はマルチパス等の誤差(cycle)である。上付き文字  $I$  の括弧は、次数と衛星番号の区別するためのものである。擬似距離と異なる点は、まず搬送波が電離層を通過するとき、位相速度は見かけ上速くなるため電離層遅延量の符号は負となることである。次にマルチパスの影響が擬似距離のmレベルと比較して、搬送波はcmレベルと小さい。最後に整数値バイアス(Integer Ambiguity)と呼ばれる項の存在である。搬送波位相は整数部(1波長の数)と小数部とで構成されている。小数部は0.01サイクルの精度で正確に測定できることは先ほど述べたが、整数部の絶対値は整数値バイアスのために正確に測定できない。整数値バイアスはその名の通り整数値となるが、衛星ごと、受信機ごとに異なる値を示すため、電離層、対流圏遅延を相殺するように他の測定値を利用して相殺することができない。しかし搬送波を連続的に観測できている期間においては、整数値バイアスは変化しないため、一度決定(Integer Ambiguity Resolution)できると連続的に正確な搬送波位相を得ることができる。サイクルスリップ等の原因で連続観測が中断した場合整数値バイアスは変化するため、もう一度決定しなおす必要がある。干渉測位計算アルゴリズムはDGPS測位と同様で単純であるが、整数値バイアスの決定が容易でない。干渉測位にはいろいろな種類があるが、基準局からの基線ベクトルを求めることには相違なく、整数値バイアスの決定方法の違いによる分別である。

## 2 - 1 - 2 観測地誤差要因

式(2-1)には整数値バイアス以外の誤差項(電離層、衛星時計等)がある。これらの誤差項はDGPS測位と同様に基準局の測定値等を利用することで相殺できる。整数値バイアスの決定、

測位精度の改善のために誤差項を相殺したほうがよい。ここでは搬送波位相の誤差項の削除法を記す。

## 2 - 1 - 2 - 1 一重位相差(Single Difference)

### 受信機間一重位相差

図2-1のように、基準局と利用者側の受信機で同時に同じ衛星から測定した搬送波位相の差、つまり行路差を求める方法である。受信機間一重位相差  $\varphi_{u-r}^{(i)}$  は、

$$\begin{aligned}\varphi_{u-r}^{(i)} &= \varphi_u^{(i)} - \varphi_r^{(i)} \\ &= \lambda^{-1}[(r_u^{(i)} - r_r^{(i)}) - (I_u^{(i)} - I_r^{(i)}) - (T_u^{(i)} - T_r^{(i)})] + f[(\delta t_u - \delta t_r) - (\delta t^{(i)} - \delta t^{(i)})] \\ &\quad + (N_u^{(i)} - N_r^{(i)}) + (\varepsilon_u^{(i)} - \varepsilon_r^{(i)}) \\ &= \lambda^{-1}(r_{u-r}^{(i)} - I_{u-r}^{(i)} + T_{u-r}^{(i)}) + f\delta t_{u-r} + N_{u-r}^{(i)} + \varepsilon_{u-r}^{(i)}\end{aligned}\quad (2-2)$$

で表される。ここで添え字のu は利用者側、r は基準局を示し、u · r は利用者側の測定値から基準局の測定値を引いた値を示す。式(2-2)では衛星時計誤差の項が相殺されていることがわかる。受信機間一重位相差では衛星時計誤差が消去できる。整数値バイアスは基準局と利用者側の差となるが整数の値となる。式(2-2)は基線長が短距離である場合、電離層と対流圏の項は同じ衛星であるため相殺できる。式(2-2)から短基線長の受信機間一重位相差は、

$$\varphi_{u-r}^{(i)} = \lambda^{-1} \cdot r_{u-r}^{(i)} + f \cdot \delta t_{u-r} + N_{u-r}^{(i)} + \varepsilon_{u-r}^{(i)}\quad (2-3)$$

となる。当然のことながら基線長が長距離の場合や電離層の活動が活発である場合は相殺されずに誤差項を消去することはできない。

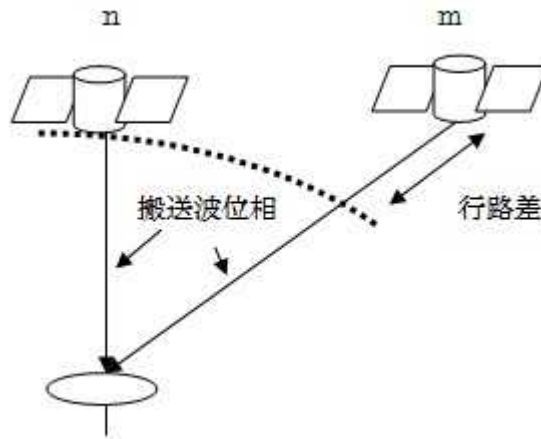


図2-2 衛星間一重位相差

## 衛星間一重位相差

図2-2 のように、1 個の受信機で同時刻に測定したGPS 衛星2 機の搬送波位相差を取った値を衛星間一重位相差と言う。例えば利用者側の受信機でn 番衛星とm 番衛星の搬送波位相を測定したとすると、衛星間一重位相差  $\varphi_u^{(n-m)}$  は、

$$\begin{aligned}
 \varphi_u^{(n-m)} &= \varphi_u^{(n)} - \varphi_u^{(m)} & (2-4) \\
 &= \lambda^{-1}[(r_u^{(n)} - r_u^{(m)}) - (I_u^{(n)} - I_u^{(m)}) + (T_u^{(n)} - T_u^{(m)})] \\
 &\quad + f[(\delta t_u - \delta t_u) - (\delta t^{(n)} - \delta t^{(m)})] + (N_u^{(n)} - N_u^{(m)}) + (\varepsilon_u^{(n)} - \varepsilon_u^{(m)}) \\
 &= \lambda^{-1}(r_u^{(n-m)} - I_u^{(n-m)} + T_u^{(n-m)}) + f\delta t^{(n-m)} + N_u^{(n-m)} + \varepsilon_u^{(n-m)}
 \end{aligned}$$

で表される。式(2-4)から衛星間一重位相差では受信機の時計誤差の項が相殺できる。

衛星間一重位相差は搬送波位相を測定した衛星が異なるため、電離層、対流圏の項を相殺することはできない。衛星間一重位相差も受信機間一重位相差と同様に整数値バイアスの項は整数である。

### 2 - 1 - 2 - 2 二重位相差(Double Difference)

どちらの一重位相差でも時計誤差を完全に消去することができない。二重位相差は衛星時計誤差と受信機時計誤差の両方を理論的に完全に消去できる。二重位相差は受信機間一重位相差からも衛星間一重位相差からも求めることができ、結果は同じである。図2-3が示すように2

地点の観測場所と、それぞれの地点で2機のGPS衛星からの搬送波位相から二重位相差  $\varphi_{u-r}^{(n-m)}$  は、

$$\begin{aligned} \varphi_{u-r}^{(n-m)} &= (\varphi_u^{(n)} - \varphi_r^{(n)}) - (\varphi_u^{(m)} - \varphi_r^{(m)}) & (2-5) \\ &= \lambda^{-1} (r_{u-r}^{(n-m)} - I_{u-r}^{(n-m)} + T_{u-r}^{(n-m)}) + N_{u-r}^{(n-m)} + \varepsilon_{u-r}^{(n-m)} \end{aligned}$$

で表される。ここで式(2-5)はn番衛星とm番衛星の受信機間一重位相差を求め、それらの値を差し引いた値である。式(2-5)を並べ替えることにより、利用者側と基準点の衛星間一重位相差の引き算になることがわかる。式(2-5)からは衛星時計誤差と受信機時計誤差が完全に消去され、基線長が短距離であれば電離層、対流圏の項も相殺される。干渉測位は行路差から基線ベクトルを求めると説明したが、実際の干渉測位には、一重位相差では時計誤差が完全に消去されないために使用しない。二重位相差を行路差に相当する値として測位を行う。また、基線ベクトル、未知点の座標を求めるためには独立した二重位相差が3個必要であるため、コードを利用する測位と同様に、最低4衛星の測定値が必要である。測位計算では独立した二重位相差を算出するためある衛星を基準にする。一般的には衛星仰角の最も高い衛星を基準衛星とする場合が多い。

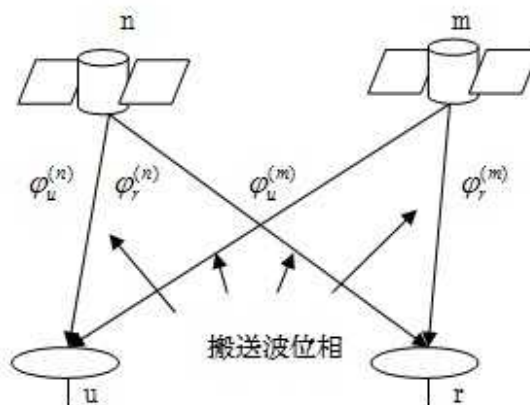


図 2 - 3 二重位相差

### 2 - 1 - 2 - 3 線形結合

GPSにおける線形結合とは、L1帯とL2帯の搬送波位相の測定値を二乗や平方根等の項を含まない形で結合し、見かけ上測定された新しい搬送波位相を求めることをいう。線形結合で求められるi番衛星の新しい搬送波位相  $\varphi^{(i)}$  は、

$$\varphi^{(i)} = g_1 \cdot \varphi_{L1}^{(i)} + g_2 \cdot \varphi_{L2}^{(i)} \quad (2-6)$$

で表される。ここで  $g_1$ 、 $g_2$  は任意の数を示している。 $g_1$ 、 $g_2$  の与え方によって様々な搬送波を算出できる。 $g_1$ 、 $g_2$  にはどのような値を代入してもよいが、大きすぎる値では線形結合で求めた搬送波位相の雑音が増加し、搬送波位相の持つ正確性を失われる。線形結合された搬送波位相の波長 周波数  $f$  は、

$$f = g_1 \cdot f_{L1} + g_2 \cdot f_{L2}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c}{g_1 \cdot f_{L1} + g_2 \cdot f_{L2}} \quad (2-7)$$

で表される。

## 2 - 2 FLOAT 解アルゴリズム

干渉測位において一番の問題は整数値バイアスの存在である。FLOAT解アルゴリズムは、この整数値バイアスを未知数の1つと考えて逐次近似計算によって求める方法である。測位計算を繰り返し行い求められる整数値バイアスが実数であることから、求められた座標をフロート解と呼ぶ。ここで時刻  $t$  における  $i$  番、 $j$  番衛星の位置を  $(x^{(i)}(t), y^{(i)}(t), z^{(i)}(t))$ 、

$(x^{(j)}(t), y^{(j)}(t), z^{(j)}(t))$  とし、基準衛星を  $j=1$  とする。また基準局、未知点の座標を  $(x_r, y_r, z_r)$ 、

$(x_u, y_u, z_u)$  とする。各衛星と各局における距離は、

$$R_m^{(k)}(t) = \sqrt{(x^{(k)}(t) - x_m)^2 + (y^{(k)}(t) - y_m)^2 + (z^{(k)}(t) - z_m)^2} \quad (2-8)$$

と表される。ここで  $k$  は、 $i$ 、1番衛星を示し、 $m$  は  $r$  (基準局)、 $u$  (未知点) を示している。 $R$  は衛星とアンテナ間の正確な距離である。式(2-8)から二重位相差  $\varphi_{u-r}^{(i-1)}$  は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
\lambda \cdot \varphi_{u-r}^{(i-1)} &= [R_u^{(i-1)}(t) - R_r^{(i-1)}(t)] + \lambda \cdot N_{u-r}^{(i-1)} \\
R_u^{(i-1)}(t) &= R_u^{(i)}(t) - R_u^{(1)}(t) \\
R_r^{(i-1)}(t) &= R_r^{(i)}(t) - R_r^{(1)}(t)
\end{aligned} \tag{2-9}$$

はここで  $\lambda$  は用いている搬送波の波長(m)を示す。式(2-9)は観測可能な衛星数をsvnとすると [svn-1]個作成できる。衛星の位置は衛星軌道情報から計算でき、基準局の座標は既知であるため、未知数は[svn-1]個の整数値バイアスと未知点の位置  $(x_u, y_u, z_u)$  の3個で計[svn+2]となる。

作成できる式より未知数の数が多いため、このままでは解くことができない。この問題は連続的に搬送波位相を測定できている間であれば整数値バイアスは変化しない特性を利用することで解決できる。2つの観測時刻から  $2 \times [\text{svn}-1]$ 個の式を作成することができる。2つの観測時刻中にサイクルスリップ等による連続測定中断が無ければ、未知数の数は変化しないため、解くことができる。式(2-9)の既知の値は左辺、未知数を右辺へ移項すると、

$$\lambda \cdot \varphi_{u-r}^{(i-1)} + R_r^{(i-1)}(t) = R_u^{(i-1)}(t) + \lambda \cdot N_{u-r}^{(i-1)} \tag{2-10}$$

と書き換えることができる。つまり(左辺 - 右辺)が0になるときの各未知数が求めたい解となる。式(2-10)の左辺は既知の値であるので  $Y^{(i-1)}(t)$  としてまとめると、

$$Y^{(i-1)}(t) = R_u^{(i-1)}(t) + \lambda \cdot N_{u-r}^{(i-1)} \tag{2-11}$$

と書き換えることができる。式(2-11)は二乗や平方根があり、このままでは容易に解くことができない。そこで単独測位計算方法を使用する。未知数を近似値と補正量の和であらわし、式を補正量についての連立1次方程式に展開することで容易に未知数を解く方法である。ここで、未知数(未知点の位置座標、整数値バイアス)と補正量の関係は、

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{u,n+1} = x_{u,n} + \Delta x \\ y_{u,n+1} = y_{u,n} + \Delta y \\ z_{u,n+1} = z_{u,n} + \Delta z \\ N_{u-r,n+1}^{(i-1)} = N_{u-r,n}^{(i-1)} + \Delta N \end{array} \right. \tag{2-12}$$

と表される。ここで添え字nは逐次計算回数を示し、n=0の未知数は初期値を示す。n回目の計算で求められる式(2-11)の  $Y^{(i-1)}(t)$  の近似距離に相当する右辺  $Y'^{(i-1)}(t)$  は、

$$Y'^{(i-1)}(t) = R_{n,u}^{(i-1)}(t) + \lambda \cdot N_{n,u-r}^{(i-1)} \tag{2-13}$$

$$= \sqrt{(x^{(i)}(t) - x_{n,u})^2 + (y^{(i)}(t) - y_{n,u})^2 + (z^{(i)}(t) - z_{n,u})^2} \\ - \sqrt{(x^{(1)}(t) - x_{n,u})^2 + (y^{(1)}(t) - y_{n,u})^2 + (z^{(1)}(t) - z_{n,u})^2} + \lambda \cdot N_{n,u-r}^{(i-1)}$$

と表せる。近似距離  $Y'^{(i-1)}(t)$  と、既知の  $Y^{(i-1)}(t)$  との残差  $\Delta Y^{(i-1)}(t)$  は、

$$\Delta Y^{(i-1)}(t) = Y^{(i-1)}(t) - Y'^{(i-1)}(t) \quad (2-14)$$

として求められる。 $(x_{u,n}, y_{u,n}, z_{u,n})$  と  $N_{u-r}^{(i-1)}$  を残差  $\Delta Y^{(i-1)}(t)$  分に相当する分だけ修正すれば、

正しい解に近づくことができる。このためには、近似距離  $Y'^{(i-1)}(t)$  の  $(x_{u,n}, y_{u,n}, z_{u,n})$  と  $N_{u-r}^{(i-1)}$  に

よる偏微分、

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_n^{(i-1)}(t) = \frac{\partial Y'^{(i-1)}(t)}{\partial x} = -\left( \frac{x^{(i)}(t) - x_{u,n}}{R_{n,u-r}^{(i)}(t)} - \frac{x^{(1)}(t) - x_{u,n}}{R_{n,u-r}^{(1)}(t)} \right) \\ \beta_n^{(i-1)}(t) = \frac{\partial Y'^{(i-1)}(t)}{\partial y} = -\left( \frac{y^{(i)}(t) - y_{u,n}}{R_{n,u-r}^{(i)}(t)} - \frac{y^{(1)}(t) - y_{u,n}}{R_{n,u-r}^{(1)}(t)} \right) \\ \gamma_n^{(i-1)}(t) = \frac{\partial Y'^{(i-1)}(t)}{\partial z} = -\left( \frac{z^{(i)}(t) - z_{u,n}}{R_{n,u-r}^{(i)}(t)} - \frac{z^{(1)}(t) - z_{u,n}}{R_{n,u-r}^{(1)}(t)} \right) \\ 1 = \frac{\partial Y'^{(i-1)}(t)}{\partial N_{u-r}^{(i-1)}} \end{array} \right. \quad (2-15)$$

を用いる。 $(x_{u,n}, y_{u,n}, z_{u,n})$  の各補正量に置き換えると、

$$\Delta Y^{(i-1)}(t) = \alpha_n^{(i-1)}(t) \cdot \Delta x + \beta_n^{(i-1)}(t) \cdot \Delta y + \gamma_n^{(i-1)}(t) \cdot \Delta z + \lambda \cdot \Delta N_{u-r}^{(i-1)} \quad (2-16)$$

となり、一次方程式の表現に書き換えることができたので、後は単独測位計算と同様に補正量が収束するまで計算を行う。FLOAT 解測位計算では、基準時刻( $t=0$ )と観測時刻( $t=1$ )の2つの時刻で、最低4機以上の同じ衛星の組み合わせから算出した測定値を用いるため、可視衛星数を  $(s+1)$  とすると  $2s$  個の(2-16)式を立てることができる。扱いを容易にするため次のような行列を用いる。

$$G = \begin{pmatrix} \alpha_n^{(2-1)}(0) & \beta_n^{(2-1)}(0) & \gamma_n^{(2-1)}(0) & \lambda & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \alpha_n^{(3-1)}(0) & \beta_n^{(3-1)}(0) & \gamma_n^{(3-1)}(0) & 0 & \lambda & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_n^{(s-1)}(0) & \beta_n^{(s-1)}(0) & \gamma_n^{(s-1)}(0) & 0 & 0 & 0 & \cdots & \lambda \\ \alpha_n^{(2-1)}(t) & \beta_n^{(2-1)}(t) & \gamma_n^{(2-1)}(t) & \lambda & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \alpha_n^{(3-1)}(t) & \beta_n^{(3-1)}(t) & \gamma_n^{(3-1)}(t) & 0 & \lambda & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_n^{(s-1)}(t) & \beta_n^{(s-1)}(t) & \gamma_n^{(s-1)}(t) & 0 & 0 & 0 & \cdots & \lambda \end{pmatrix}$$

$$\delta Y = \begin{pmatrix} \Delta Y_n^{(2-1)}(0) \\ \Delta Y_n^{(3-1)}(0) \\ \vdots \\ \Delta Y_n^{(s-1)}(0) \\ \Delta Y_n^{(2-1)}(t) \\ \Delta Y_n^{(3-1)}(t) \\ \vdots \\ \Delta Y_n^{(s-1)}(t) \end{pmatrix} \quad \delta X = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta N_{u-r}^{(2-1)} \\ \Delta N_{u-r}^{(3-1)} \\ \vdots \\ \Delta N_{u-r}^{(s-1)} \end{pmatrix}$$

したがって、 $2s$ 個の式(2-16)の連立方程式は、

$$\delta Y = G \cdot \delta X \quad (2-17)$$

で表すことができ、

$$\delta X = (G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot \delta Y \quad (2-18)$$

と式(2-17)を変形させ各未知数の補正量を算出し、補正量が収束するまで式(2-17)の計算を繰り返し行う。補正量が収束したときの推定値が未知数の座標である、整数値バイアス(実数)となる。

### 2 - 3 FIX 解アルゴリズム

FLOAT解は、整数値バイアスを実数として求めた。FIX解とは、整数値バイアスの正しい値を実数でなく整数(波数)にして求めた測位解のことである。正しい整数値バイアスを求める方法としては、FLOAT解が収束した時の整数値バイアス(実数)を四捨五入して整数値とする方法



がある。またDGPS測位結果との比較や衛星の組み合わせの変化等による求め方もある。実際に整数値バイアスを決定することができたならば、観測時刻tにおける測定値(最低4衛星)のみで、測位結果を高精度に求めることができる。式(2-10)において整数値バイアスNの項が既知の値となり左辺に移項できる。よって式(2-11)は、

$$Y^{(i-1)}(t) = R_u^{(i-1)}(t) \quad (2-19)$$

と書き直すことができる。式(2-19)の線形化を行うと、

$$\Delta Y^{(i-1)}(t) = \alpha_u^{(i-1)}(t) \cdot \Delta x + \beta_u^{(i-1)}(t) \cdot \Delta y + \gamma_u^{(i-1)}(t) \cdot \Delta z \quad (2-20)$$

で表すことができる。したがってFIX 解では時刻t の測定値のみで測位できるため、可視衛星数を(s+1)個とすると、式(2-20)はs 個できる。行列を用いると、各行列は、

$$G = \begin{pmatrix} \alpha_n^{(2-1)}(t) & \beta_n^{(2-1)}(t) & \gamma_n^{(2-1)}(t) \\ \alpha_n^{(3-1)}(t) & \beta_n^{(3-1)}(t) & \gamma_n^{(3-1)}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_n^{(s-1)}(t) & \beta_n^{(s-1)}(t) & \gamma_n^{(s-1)}(t) \end{pmatrix} \quad (2-21)$$

$$\delta Y = \begin{pmatrix} \Delta Y_n^{(2-1)}(t) \\ \Delta Y_n^{(3-1)}(t) \\ \vdots \\ \Delta Y_n^{(s-1)}(t) \end{pmatrix} \quad \delta X = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}$$

で表すことができる。したがって、FIX 解は上記の行列を式(2-18)に代入して、繰り返し計算を行うことにより求めることができる。

## 2 - 4 L A M B D A 法

LAMBDA(Least-square Ambiguity Decor relation Adjustment)法では、Ambiguityを決定する1つの方法として、測位計算においてAmbiguityを未知数の1つと考え、単独測位における最小2乗法と同様に逐次近似計算によって実数で求めるといったfloat解アルゴリズムがある。この実数のAmbiguity として与えられるfloat 解は、単純に四捨五入して整数値を求めようとする、細長い探索楕円により示され、強い相関により誤った値が得られてしまう。LAMBDA法では、Ambiguity を決定する際に、できる限り無相関化を行うことで、最適な解が得られるようにす

る工夫がされたアルゴリズムである。

LAMBDA法のアルゴリズムは簡単に3段階のStepによって構成される。

Step1 : float解アルゴリズムからfloat解を求め、それらの共分散行列を求める。

Step2 : float解アルゴリズムから正しい整数のAmbiguityをできるだけ高い確率で推定する。

Step3 : 最終的に求めたAmbiguityより、位置を算出する。

$$c(N) = (N - \hat{N})^T W_{\hat{N}} (N - \hat{N}) \quad (2-22)$$

まず、Step1のfloat 解アルゴリズムからfloat解を求め、それらの共分散行列  $Q_{\hat{N}}$  を求めると

いったstepから始まる。次のStep2がLAMBDA法の中で最も重要なStepであり、整数最小2乗問題として与えられるコスト関数、を最小にするベクトル  $N$ (整数値のAmbiguity)を求める。 $\hat{N}$

はStep1において求めたfloat 解推定値であり、相関行列と呼ばれる  $W_{\hat{N}}$  は、共分散行列  $Q_{\hat{N}}$  の逆

行列である。このStep2での最大の目標は、各Ambiguity推定値をできる限り無相関化(Decorrelation)することである。一般に無相関が意味するのは、ここでは  $W_{\hat{N}}$  が対角行列であることな

ので、 $W_{\hat{N}}$  の対角化が無相関化を意味する。

そこで、結果として得られた相関行列が対角行列になるように変数変換を導入することで  $W_{\hat{N}}$  の対角化を図る。この対角化を行うためには、Ambiguityの整数性を保持するべく、整数を整数に写像する変数変換が必要であるので、Z変換と呼ばれる変数変換が要求される。要求されるZ 変換は、

- ( ) Zのすべての要素は整数である
- ( ) Zは逆行列を持つ
- ( ) Z-1のすべての要素は整数である
- ( ) Zはユニモジュラ行列である (すなわち、 $|\det(Z)| = 1$ )

以上のような条件を満たす必要がある。ここで、変換Zを定義する。

$$M = Z^T N \quad , \quad \hat{M} = Z^T \hat{N} \quad , \quad Q_{\hat{M}} = Z^T Q_{\hat{N}} Z \quad (2-23)$$

この変換により、式(2-22)は新しい整数最小2乗問題、

$$\min(M - \hat{M})^T Q_{\hat{M}}^{-1} (M - \hat{M}) \quad (2-24)$$

に変形される。要求される変換Zを達成するために、 $Q_{\hat{N}}$ 、 $Q_{\hat{M}}$ をコレスキー分解すると、

$$Q_{\hat{N}} = L^T DL \quad , \quad Q_{\hat{M}} = Z^T L^T DLZ = \bar{L}^T \bar{D} \bar{L} \quad (2-25)$$

となる。ここで、L は下三角行列であり、Dと $\bar{D}$ は対角行列、

$$D = \text{diag}(d_1, d_2, d_3, \dots, d_n) \quad , \quad \bar{D} = \text{diag}(\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{d}_3, \dots, \bar{d}_n) \quad (2-26)$$

であり、さらに、 $d_i > \bar{d}_i > 0$ である。このプロセスでは $Q_{\hat{N}}$ の $L^T DL$ 因数分解と、 $Q_{\hat{M}}$ の $\bar{L}^T \bar{D} \bar{L}$ 因数分解を与えるための要素の更新から始まり、

( )  $Q_{\hat{M}}$  はできるだけ対角である (すなわち、 $\bar{L}$ の非対角成分はできるだけ十分小さい)

( )  $\bar{D}$ の対角成分は降順に分配される (すなわち、 $(d_1 \geq d_2 \geq d_3 \geq \dots \geq d_n)$ )

この二つの目標を達成するために、ユニモジュラ行列Zを見つけようとするのである。このプロセスの繰り返しによりユニモジュラ行列Zが構築される。もしこのZを用いて、 $W_N$ を完全に対角化可能であれば、LAMBDA法は単純なアルゴリズムになるであろう。しかしながら、そのような場合はほとんど起きることは無く、各Ambiguity推定値が完全に無相関化されることはない。そのため、このZによる変数変換により、 $W_N$ を可能な限り対角に近づけるための変換を行うことで、できる限り無相関化を行う。

ユニモジュラ行列Zによる定義、式(2-23)より、float解 $\hat{N}$ はできる限り無相関化された $\hat{M}$ に変換され、この $\hat{M}$ に対して四捨五入を行い、得られたMからNに戻す変換、つまり逆Z変換を行えば、式(2-22)の元の最小2乗問題に対する最小解が得られる。

$$N = (Z^T)^{-1} M \quad (2-27)$$

この最終的に求めたInteger Ambiguityを用いて、Step3において測位計算を行い、位置を算出する。以上が3段階のStepから構成されるLAMBDAアルゴリズムである。図2-4にLAMBDA法の流れを示す[5]。

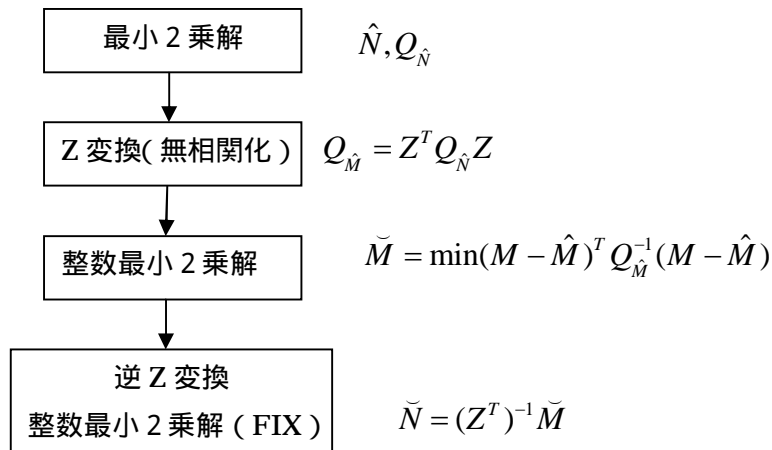


図2-4 LAMBDA 法flow chart

## 2 - 5 GPS 信号強度

GPS 測量において、測点で得られるデータは搬送波位相という数字の羅列であって、在来測量のような分かりやすい距離や角度ではない。そのためか、測定中の位相の値は、受信機の表示では見ることはできないのが普通である。したがって、現場での問題対処には限界がある。

そこで測量現場でのデータの確認手段には、受信強度(信号強度)がある。大抵のGPS受信機では衛星ごとの受信強度も表示できるようになっている。信号強度は信号の受信能力を表示できる。意味として電波の強さと雑音の比(Signal to noise ratio、SNR)である。信号強度SNを式で表現すると、

$$SN = \frac{P_s}{N_0} \quad (2-28)$$

となる。ここで  $P_s$  は受信信号電力(W)、 $N_0$  は GPS 受信機の雑音密度(W/Hz)である。受信信

号電力  $P_s$  を式で表現すると、

$$P_s = \frac{P_L G_T G_R}{L_A 4\pi R^2} \times \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2-29)$$

となる。ここで  $P_L$  は送信信号電力(W)、 $G_T$  は送信アンテナ利得、 $G_R$  は受信アンテナ利得、 $R$  は衛星とユーザ間の距離(m)、 $\lambda$  は波長(m)である。2000 年には GPS 衛星は L1C/A コードに

27W の電力は使用とされている。この値をデシベルで表すと  $10\log_{10}27=14.3(\text{dBW})$  となる。衛星とユーザ間の距離  $R$  は、地球上のユーザの位置によって変わるために、ユーザから見た衛星の仰角として求めることができる。  $R$  を式で表現すると、

$$R = -R_E \sin \theta + \sqrt{R_E^2 (\sin^2 \theta - 1) + R_{SV}^2} \quad (2-30)$$

となる。ここで  $R_E$  は地球半径(6,371km)、 $R_{SV}$  衛星軌道長半径(26,560km)、 $\theta$  はユーザから見た衛星の仰角である。衛星がユーザの天頂方向に位置する時、その距離は 20,193km となり、ユーザから見て  $5^\circ$  に衛星が位置する場合はこの距離は 25,237km に増加する。送信アンテナ利得  $G_T$  式で表現すると、

$$G_T = \frac{2}{1 - \cos \alpha} \quad (2-31)$$

となる。この角度  $\alpha$  を天底角という、天底角はユーザの水平線から見た衛星の仰角にも関係する。

アンテナの雑音を含む受信機全体の雑音密度  $N_0$  を式で表現すると、

$$\begin{aligned} N_0 &= 10\log_{10} k[T_A + T_R(F, G)] \\ &\approx 10\log_{10} k\left[T_A + 290\left(\frac{F}{G} - 1\right)\right] \end{aligned} \quad (2-32)$$

となる。ここで  $T_A$  はアンテナの雑音、 $F$  は受信機雑音指数、 $G$  は構成要素の利得、 $k$  はボルツマン定数  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  である。式(2-32)計算した  $N_0$  を式(2-28)に代入して、L1C/A コードの信号強度を計算する。具体的な L1C/A コードの信号強度は表に示した。

表 2-1 L1C/A コードの受信電力と信号強度

	低仰角衛星 ( $\theta = 5^\circ, \alpha = \pm 13.9^\circ$ )	中仰角衛星 ( $\theta = 40^\circ, \alpha = \pm 10.6^\circ$ )	高仰角衛星 ( $\theta = 90^\circ, \alpha = \pm 0^\circ$ )
衛星アンテナ入力端の電力	14.3dBW	14.3dBW	14.3dBW
距離 ( km )	25237	22016	20193
伝搬損失 ( $1/4 R^2$ )	-159.0dB	-157.8 dB	-157.1 dB
送信アンテナ利得	12.1 dB	12.9 dB	10.2 dB
受信アンテナ利得	-4 dBic	+2 dBic	+4 dBic
L1C/A コード受信電力	-164dBW	-156 dBW	-156 dBW
雑音電力密度( $N_0$ )	-201dBW/Hz	-201dBW/Hz	-201dBW/Hz

(F=3dB, G=0.8, TA=100K)			
信号強度	37 dBHz	45 dBHz	45 dBHz

GPS の信号対雑音比(SNR)の劣化について考える。民生用信号の受信電力は衛星の仰角にしたがって-164dBW~-156dBW間で変化する。雑音の電力密度はおおよそ-201dBW/Hzであり、信号対雑音比(SNR)は 37dBHz ~ 45dBHz となる。言い換えると 1Hz の帯域幅では信号電力は雑音電力より約 5,000 ~ 32,000 倍強い[3]。

受信強度の数値は受信機によってまちまちであって、統一した単位にはなっていない。本研究において使用した NovAtel 社製 OEM4 受信機は、取得した信号強度のデータとして搬送波電力対雑音電力密度比 (Carrier to noise density ratio、 $C/N_0$ )が出力される。他の受信機では信号対雑音比 (Signal to noise ratio ,SNR)を出力する受信機もある。実際の信号の強さ(dBW)から  $C/N_0$  (dBHz) への変換は図 2-5 に示した[11]。

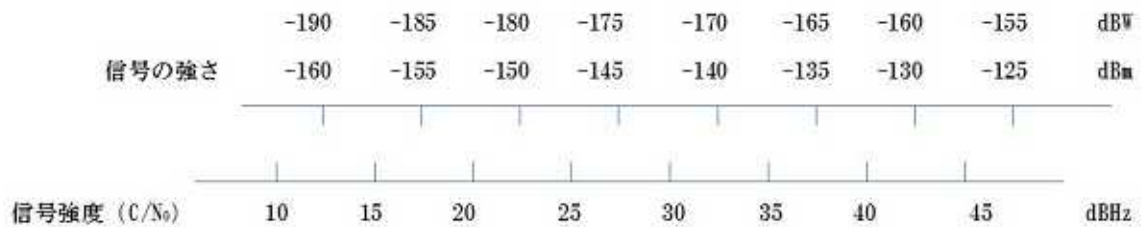


図 2-5 信号強度と信号の強さの関係

## 第3章 GNSS 解析ソフトウェア

### 3 - 1 開発背景と目的

現在都市部の測位環境は非常に厳しくて、特に高層ビル街では可視衛星数が少ない、マルチパスの影響で衛星の信号強度も低いである。衛星は回折の影響を与えて、衛星の状況が厳しい原因を分析するために、実際の車の走行道路の建物の天空情報と衛星配置を利用することが必要である。そのために移動体において、情報通信工学研究室と my soft 会社共同に、魚眼カメラで取得した建物の天空情報と衛星配置と観測データ及び解析結果を連動させる教育用 GNSS 解析ソフトウェアを開発した。

GNSS 解析ソフトウェアは魚眼カメラで取った天空情報と衛星配置などのデータを利用して、実際の測位環境を再現することができる。GNSS 解析ソフトウェアを利用する時はある時間の車位置、天空の衛星配置、各衛星の信号強度、単独測位、DGPS、RTK の測位結果、車の速度の情報を一緒に表示することができる。このソフトを利用して、DGPS や RTK の大きな誤差の時間帯を抽出し、それらの原因を調査するために役立たせた。

### 3 - 2 画面仕様

#### 3 - 2 - 1 メインフレーム画面

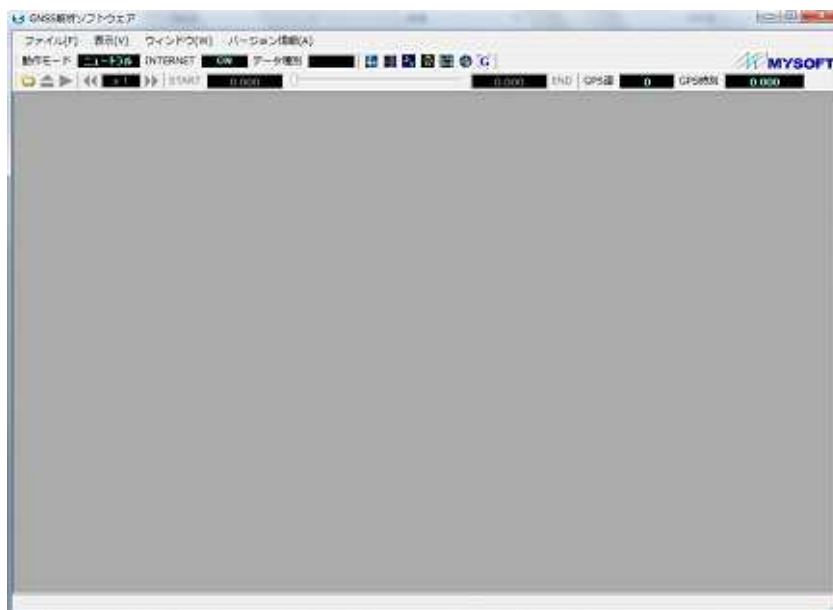


図 3-1 メインフレーム画面表示画面

アプリケーションの基本となる型枠として動作する。ユーザからのリアクションへの対応と各画面の統合(MDI形式)を行う。

### 3 - 2 - 2 天空衛星位置動画表示画面

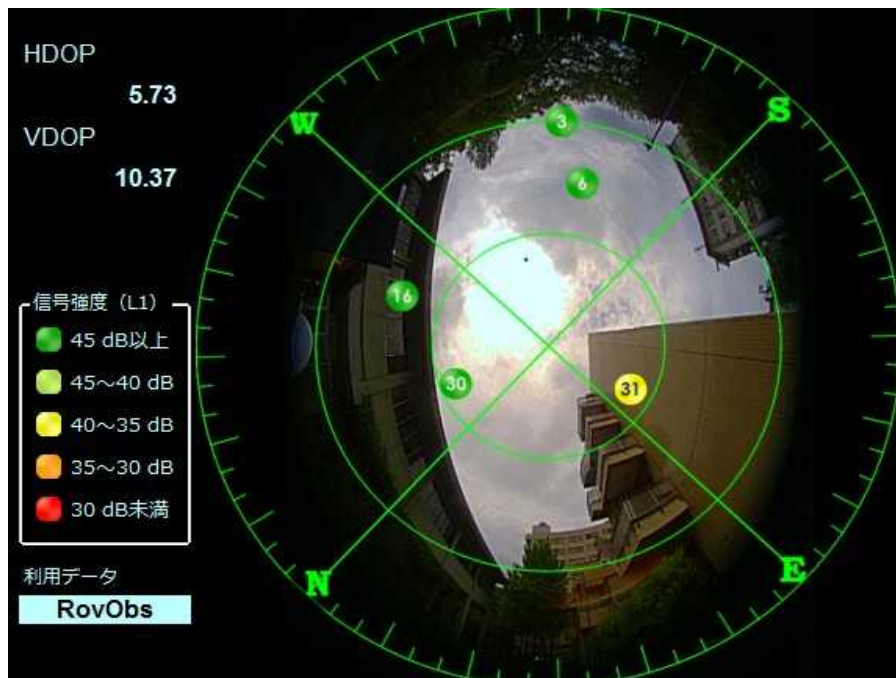


図 3-2 天空衛星位置動画表示画面

魚眼カメラにて天空を撮影した AVI 動画を表示し、その地点での受信可能な各衛星の位置、信号強度をグラフィカル表現にて表示する。

表 3-1 天空衛星位置動画表示コンポーネント

項目	概要	種別	部品	内容
天空動画	AVI ファイル		Direct Show	最背面に動画を表示する。 ただし、AVI ファイルが存在しない場合、静止画 JPEG を表示するか、黒色で何も表示しない。
衛星位置表示パネル	衛星番号、仰角、方位角、信号強度、移動体進行方向			各衛星の仰角、方位角にて、位置を表現 衛星表示色 ( 緑 : 45dBHz 以上, 黄緑 : 45 ~ 40dBHz, 黄 : 40 ~ 35dBHz, 橙 : 35 ~ 30dBHz, 赤 : 30dBHz 以下 )



### 3 - 2 - 3 Google Map 表示画面



図 3-3 Google Map 表示画面

最終結果の緯度、経度を用い、変位を Google Map 上にプロット表示する。拡大縮小とマウスのドラッグドロップによる座標移動を可能とする。インターネット接続不可の状況では使用できない。

表 3-2 Google Map 表示コンポーネント

項目	概要	種別	部品	内容
Google Map	HTML 表示	グラフィック	ブラウザ	緯度、経度をパラメータとし、JavaScript を利用した Google Map API にて、移動体の軌跡を表示する。
Latitude	緯度	実数値	テキスト	度表現：小数点以下 6 桁
Longitude	経度	実数値	テキスト	度表現：小数点以下 6 桁

### 3 - 2 - 4 水平誤差プロット画面

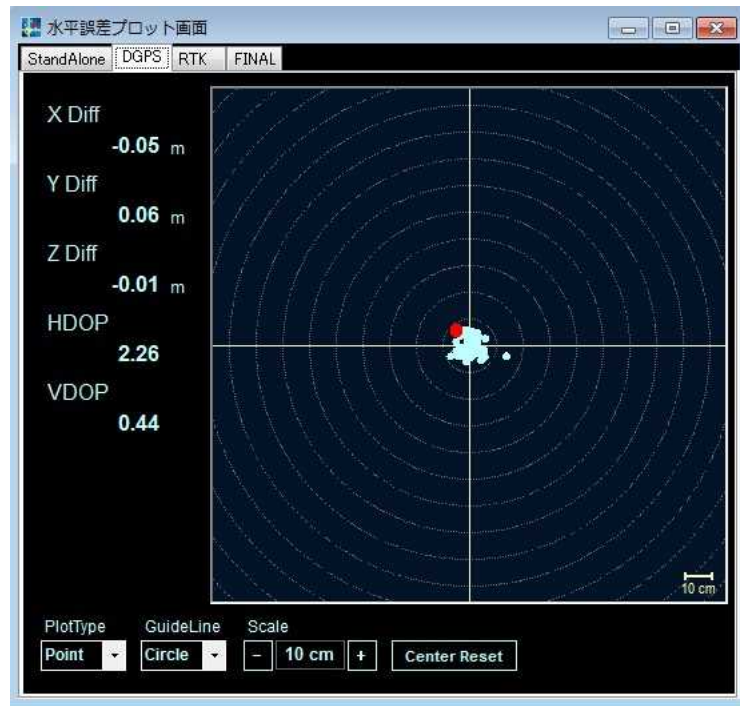


図 3-4 水平誤差プロット画面

レファレンスデータとの誤差(Diff)をプロット表示する。各測位方式と最終結果について、タブ切替により見られるようにする。拡大縮小とマウスのドラッグドロップによる座標移動を可能とする。

表 3-3 水平誤差プロット画面のコンポーネント

項目	概要	種別	部品	内容
Latitude	緯度	実数値	テキスト	度表現：小数点以下 6 桁
Longitude	経度	実数値	テキスト	度表現：小数点以下 6 桁
Altitude	高度	実数値	テキスト	m 表現：小数点以下 2 桁
XDiff	経度方向ずれ	実数値	テキスト	m 表現：小数点以下 2 桁
YDiff	緯度方向ずれ	実数値	テキスト	m 表現：小数点以下 2 桁
PlotType	プロットの形状	文字列	リスト	Point：点表示、Line：線表示
GuidLine	ガイドラインの形状	文字列	リスト	Grid：格子表示、Circle：同心円表示
Scale	表示レンジの変更	-	ボタン	-：縮小、+：拡大 初期設定ファイルで変更可能
Center Reset	中心にリセット	-	ボタン	表示を原点中心にリセットする

### 3 - 2 - 5 測位誤差時系列画面



図 3-5 測位誤差時系列画面

原点からの変位を緯度方向、経度方向、高度で時系列グラフ表示する。各測位方式と最終結果について、タブ切替により見られるようにする。

表 3-4 測位誤差時系列画面のコンポーネント

項目	概要	種別	部品	内容
Latitude	緯度方向ずれ	実数値	テキスト	m 表現：小数点以下 2 桁
Longitude	経度方向ずれ	実数値	テキスト	m 表現：小数点以下 2 桁
Altitude	高度方向ずれ	実数値	テキスト	m 表現：小数点以下 2 桁
グラフ	時系列表示			縦軸を各値、横軸を時間とする。 横軸右側を現在のデータとし、左方向へ履歴が推移する。 縦軸中心を 0 とし、上が +、下が - の表現。

### 3 - 2 - 6 衛星情報一覧表示画面

図 3-6 衛星情報一覧表示画面

受信可能な各衛星の位置、信号強度を一覧表現にて表示する。基準局での観測(ref\_obs)、移動体での観測(rover\_obs)をタブ切替により見られるようにする。

表 3-5 衛星情報一覧表示画面のコンポーネント

項目	概要	種別	部品	内容
Ch	チャンネル番号	整数値	テキスト	整数 1 ~ 15
PRN	衛星番号	整数値	テキスト	整数 1 ~ 32
EI	仰角	実数値	テキスト	小数点以下 2 桁
Az	方位角	実数値	テキスト	小数点以下 2 桁
L1:Pseudo-Range	L1 疑似距離	実数値	テキスト	小数点以下 2 桁
L1:Carrier-Phase	L1 搬送波位相	実数値	テキスト	小数点以下 2 桁
L1:Doppler	L1 ドップラー	実数値	テキスト	小数点以下 2 桁
L1:C/N <sub>0</sub>	L1 信号強度 dBHz	実数値	テキスト	小数点以下 2 桁 (あるべき信号強度をカッコつきで表示)
L2:Pseudo-Range	L2 疑似距離	実数値	テキスト	小数点以下 2 桁
L2:Carrier-Phase	L2 搬送波位相	実数値	テキスト	小数点以下 2 桁
L2:Doppler	L2 ドップラー	実数値	テキスト	小数点以下 2 桁
L2:C/N <sub>0</sub>	L2 信号強度	実数値	テキスト	小数点以下 2 桁 (あるべき信号強度をカッコつきで表示)

### 3 - 2 - 7 速度情報表示画面



図 3-7 速度情報表示画面

受信機の速度を表示する。

表 3-6 速度情報表示画面のコンポーネント

項目	概要	種別	部品	内容
Vx	速度(緯度成分)	実数値	テキスト	m/s 表現 : 小数点以下 2 桁, km/h 表現 : 小数点以下 3 桁
Vy	速度(経度成分)	実数値	テキスト	m/s 表現 : 小数点以下 2 桁, km/h 表現 : 小数点以下 3 桁
Vz	速度(高度成分)	実数値	テキスト	m/s 表現 : 小数点以下 2 桁, km/h 表現 : 小数点以下 3 桁
Velocity	スカラー値	実数値	テキスト	m/s 表現, km/h 表現 : 小数点以下 3 桁

### 3 - 3 ファイル仕様

#### 3 - 3 - 1 ファイル一覧

表 3-7 利用したファイル一覧

ファイル識別子	ファイル名	種別	概要
StandAlone	pos.csv	再生用ファイル (測位結果)	単独測位結果データを CSV 形式にて保持するファイル
DGNSS	dgps.csv	再生用ファイル (測位結果)	DGNSS 測位結果データを CSV 形式にて保持するファイル
RTK	rtk.csv	再生用ファイル (測位結果)	RTK 測位結果データを CSV 形式にて保持するファイル
Final	final.csv	再生用ファイル (測位結果)	ベストな測位解の情報を CSV 形式にて保持するファイル
RefObs	ref_obs.csv	再生用ファイル (観測データ)	基準側の衛星観測データを CSV 形式にて保持するファイル
RovObs	rover_obs.csv	再生用ファイル (観測データ)	移動体側の衛星観測データを CSV 形式にて保持するファイル
Reference	reference.csv	再生用ファイル (レファレンスデータ)	基準となるレファレンスデータを CSV 形式にて保持するファイル
Velocity	velocity.csv	再生用ファイル (速度情報データ)	速度情報として時系列蓄積データとして CSV 形式にて保持するファイル
Movie	.avi	天空画像ファイル (動画)	魚眼カメラで撮影記録し AVI 形式で保存された動画ファイル
Photo	.jpeg	天空画像ファイル (静止画)	動画ファイルを取得しない場合の代替となる JPEG 形式の静止画ファイル
Ini	GnssAnalyzer.ini	初期設定ファイル	アプリケーション初期設定ファイル

### 3 - 3 - 2 ファイル詳細

#### 3 - 3 - 2 - 1 Stand Alone 単独測位のデータ

Stand Alone 単独測位のデータのデフォルトファイル名称は pos.csv (初期設定ファイル内で変更可能)、ファイル形式は CSV ファイル形式である。

表 3-8 pos.csv のファイルフォーマット

GPS 週, GPS 時刻, フラグ(0 or 1), 可視衛星数, 経度方向ずれ(m), 緯度方向ずれ(m), 高度方向ずれ(m), 緯度(deg), 経度(deg), 高度(m), HDOP, VDOP, [可視衛星番号【可視衛星数分】] < CRLF >

表 3-9 pos.csv ファイルのフィールド項目説明

順番	項目	概要説明
1	GPS 週	GPS 時刻の週番号
2	GPS 時刻	GPS 時刻の秒(小数点以下 5 位)
3	フラグ	データ有効性(0:無効,1:有効)
4	可視衛星数	信号を受信できている GPS 衛星数
5	経度方向ずれ	リファレンスデータとの差分: 単位(m)
6	緯度方向ずれ	リファレンスデータとの差分: 単位(m)
7	高度方向ずれ	リファレンスデータとの差分: 単位(m)
8	緯度	受信箇所の緯度値: 単位(degree)
9	経度	受信箇所の経度値: 単位(degree)
10	高度	受信箇所の高度値: 単位(m)
11	HDOP	水平精度低下率
12	VDOP	垂直精度低下率
13~	可視衛星番号	受信できている衛星番号(チャネル順で)

### 3 - 3 - 2 - 2 DGNSS 測位データ

DGNSS 測位データのデフォルトファイル名称は dgps.csv(初期設定ファイル内で変更可能)、ファイル形式は CSV ファイル形式である。

表 3-10 dgps.csv ファイルフォーマット

GPS 週, GPS 時刻, フラグ(0 or 1), 可視衛星数, 経度方向ずれ(m), 緯度方向ずれ(m), 高度方向ずれ(m), 緯度(deg), 経度(deg), 高度(m), HDOP, VDOP, [可視衛星番号【可視衛星数分】] <CRLF >
---

表 3-11 dgps.csv ファイルのフィールド項目説明

順番	項目	概要説明
1	GPS 週	GPS 時刻の週番号
2	GPS 時刻	GPS 時刻の秒(小数点以下 5 位)
3	フラグ	データ有効性(0 : 無効, 1 : 有効)
4	可視衛星数	信号を受信できている GPS 衛星数
5	経度方向ずれ	リファレンスデータとの差分 : 単位(m)
6	緯度方向ずれ	リファレンスデータとの差分 : 単位(m)
7	高度方向ずれ	リファレンスデータとの差分 : 単位(m)
8	緯度	受信箇所の緯度値 : 単位(degree)
9	経度	受信箇所の経度値 : 単位(degree)
10	高度	受信箇所の高度値 : 単位(m)
11	HDOP	水平精度低下率
12	VDOP	垂直精度低下率
13~	可視衛星番号	受信できている衛星番号(チャンネル順で)



### 3 - 3 - 2 - 3 RTK 測位データ

RTK 測位データのデフォルトファイル名称は rtk.csv (初期設定ファイル内で変更可能)、ファイル形式は CSV ファイル形式である。

表 3-12 rtk.csv ファイルフォーマット

GPS 週, GPS 時刻, フラグ(0~2), 可視衛星数, 経度方向ずれ(m), 緯度方向ずれ(m), 高度方向ずれ(m), 緯度(deg), 経度(deg), 高度(m), Ratio, 残差最小値, 残差 2 番目最小値, HDOP, VDOP, [可視衛星番号【可視衛星数分】] < CRLF >

表 3-13 rtk.csv ファイルのフィールド項目説明

順番	項目	概要説明
1	GPS 週	GPS 時刻の週番号
2	GPS 時刻	GPS 時刻の秒(小数点以下 5 位)
3	フラグ	データ有効性(0: 無効, 1: 通常, 2: 精度低)
4	可視衛星数	信号を受信できている GPS 衛星数
5	経度方向ずれ	リファレンスデータとの差分: 単位(m)
6	緯度方向ずれ	リファレンスデータとの差分: 単位(m)
7	高度方向ずれ	リファレンスデータとの差分: 単位(m)
8	緯度	受信箇所の緯度値: 単位(degree)
9	経度	受信箇所の経度値: 単位(degree)
10	高度	受信箇所の高度値: 単位(m)
11	Ratio	
12	残差最小値	
13	残差 2 番目最小値	
14	HDOP	水平精度低下率
15	VDOP	垂直精度低下率
16~	可視衛星番号	受信できている衛星番号(チャンネル順で)

### 3 - 3 - 2 - 4 ベストな測位解データ

ベストな測位解データのデフォルトファイル名称は final.csv (初期設定ファイル内で変更可能)、ファイル形式は CSV ファイル形式である。

表 3-14 final.csv ファイルフォーマット

GPS 週, GPS 時刻, フラグ(0~5), 進行方向方位, 経度方向ずれ(m), 緯度方向ずれ(m), 高度方向ずれ(m), 緯度(deg), 経度(deg), 高度(m), 99% (3 ) の信頼度値, 95% (2 ) の信頼度値, 67% (1 ) の信頼度値, HDOP, VDOP, 可視衛星数, [可視衛星番号【可視衛星数分】] <CRLF>

表 3-15 final.csv ファイルのフィールド項目説明

順番	項目	概要説明
1	GPS 週	GPS 時刻の週番号
2	GPS 時刻	GPS 時刻の秒(小数点以下 5 位)
3	フラグ	データ有効性(0:無効,1:単独測位,2:DGPS,3:FLOAT,4:RTK1,5:RTK2)
4	可視衛星数	信号を受信できている GPS 衛星数
5	経度方向ずれ	リファレンスデータとの差分: 単位(m)
6	緯度方向ずれ	リファレンスデータとの差分: 単位(m)
7	高度方向ずれ	リファレンスデータとの差分: 単位(m)
8	緯度	受信箇所の緯度値: 単位(degree)
9	経度	受信箇所の経度値: 単位(degree)
10	高度	受信箇所の高度値: 単位(m)
11	信頼度値 (3 )	99% (3 ) の信頼度値
12	信頼度値 (2 )	95% (2 ) の信頼度値
13	信頼度値 (1 )	67% (1 ) の信頼度値
14	HDOP	水平精度低下率
15	VDOP	垂直精度低下率
16~	可視衛星番号	受信できている衛星番号(チャンネル順で)

### 3 - 3 - 2 - 5 Ref Obs 基準側観測データ

Ref Obs 基準側観測データのデフォルトファイル名称は ref\_obs.csv (初期設定ファイル内で変更可能),ファイル形式は CSV ファイル形式である。

表 3-16 ref\_obs.csv ファイルフォーマット

GPS 週, GPS 時刻, 可視衛星数, [衛星番号, 仰角, 方位角, 擬似距離(L1), ドップラー周波数(L1), 搬送波位相(L1), 信号強度(L1), あるべき信号強度(L1), 擬似距離(L2), ドップラー周波数(L2), 搬送波位相(L2), 信号強度(L2), あるべき信号強度(L2) 【可視衛星数分繰り返す】] <CRLF>

表 3-17 ref\_obs.csv ファイルのフィールド項目説明

順番	項目	概要説明
1	GPS 週	GPS 時刻の週番号
2	GPS 時刻	GPS 時刻の秒
3	可視衛星数	信号を受信できている GPS 衛星数
4[1]	衛星番号	受信した衛星番号
5[2]	仰角	衛星の仰角 ( degree : 0 90 )
6[3]	方位角	衛星の方位角 ( degree : N 方向から時計回り )
7[4]	擬似距離(L1)	L1 信号の疑似距離
8[5]	ドップラー周波数(L1)	L1 信号のドップラー周波数
9[6]	搬送波位相(L1)	L1 信号の搬送波位相
10[7]	信号強度 ( L1 )	L1 信号の信号強度
11[8]	あるべき信号強度(L1)	L1 信号のあるべき信号強度
12[9]	擬似距離(L2)	L2 信号の疑似距離
13[10]	ドップラー周波数(L2)	L2 信号のドップラー周波数
14[11]	搬送波位相(L2)	L2 信号の搬送波位相
15[12]	信号強度 ( L2 )	L2 信号の信号強度
16[13]	あるべき信号強度(L2)	L2 信号のあるべき信号強度

### 3 - 3 - 2 - 6 Rov Obs 基準側観測データ

Rov Obs 基準側観測データのデフォルトファイル名称は rover\_obs.csv (初期設定ファイル内で変更可能)、ファイル形式は CSV ファイル形式である。

表 3-18 rover\_obs.csv ファイルフォーマット

GPS 週,GPS 時刻, [衛星番号,仰角,方位角,擬似距離(L1),ドップラー周波数(L1),搬送波位相(L1),信号強度(L1),あるべき信号強度(L1),擬似距離(L2),ドップラー周波数(L2),搬送波位相(L2),信号強度(L2),あるべき信号強度(L2) 【可視衛星数分繰り返り】]<CRLF>

表 3-19 rover\_obs.csv ファイルのフィールド項目説明

順番	項目	概要説明
1	GPS 週	GPS 時刻の週番号
2	GPS 時刻	GPS 時刻の秒(小数点以下 5 位)
3	可視衛星数	信号を受信できている GPS 衛星数
4[1]	衛星番号	受信した衛星番号
5[2]	仰角	衛星の仰角 ( degree : 0 90 )
6[3]	方位角	衛星の方位角( degree : N 方向から時計回り )
7[4]	擬似距離(L1)	L1 信号の疑似距離
8[5]	ドップラー周波数(L1)	L1 信号のドップラー周波数
9[6]	搬送波位相(L1)	L1 信号の搬送波位相
10[7]	信号強度 ( L1 )	L1 信号の信号強度
11[8]	あるべき信号強度(L1)	L1 信号のあるべき信号強度
12[9]	擬似距離(L2)	L2 信号の疑似距離
13[10]	ドップラー周波数(L2)	L2 信号のドップラー周波数
14[11]	搬送波位相(L2)	L2 信号の搬送波位相
15[12]	信号強度 ( L2 )	L2 信号の信号強度
16[13]	あるべき信号強度(L2)	L2 信号のあるべき信号強度

### 3 - 3 - 2 - 7 Reference 基準としてレファレンスデータ

Reference 基準としてレファレンスデータのデフォルトファイル名称は reference.csv (初期設定ファイル内で変更可能)、ファイル形式は CSV ファイル形式である。

表 3-20 reference.csv ファイルフォーマット

GPS 週, GPS 時刻, フラグ(0 or 1), 緯度(deg), 経度(deg), 高度(m) < CRLF >

表 3-21 reference.csv ファイルのフィールド項目説明

順番	項目	概要説明
1	GPS 週	GPS 時刻の週番号
2	GPS 時刻	GPS 時刻の秒(小数点以下 5 位)
3	フラグ	データ有効性(0 : 無効, 1 : 有効)
4	緯度	レファレンスの緯度値 : 単位(degree)
5	経度	レファレンスの経度値 : 単位(degree)
6	高度	レファレンスの高度値 : 単位(m)

### 3 - 3 - 2 - 8 Velocity 速度関連情報

Velocity 速度関連情報デフォルトファイルの名称は velocity.csv (初期設定ファイル内で変更可能)、ファイル形式は CSV ファイル形式である。

表 3-22 velocity.csv ファイルフォーマット

GPS 週, GPS 時刻, フラグ(0 or 1), V<sub>x</sub>, V<sub>y</sub>, V<sub>z</sub>, 速度(m/s), 速度(km/h) < CRLF >

表 3-23 velocity.csv ファイルのフィールド項目説明

順番	項目	概要説明
1	GPS 週	GPS 時刻の週番号
2	GPS 時刻	GPS 時刻の秒(小数点以下 5 位)
3	フラグ	データ有効性(0 : 無効, 1 : 有効)
4	V <sub>x</sub>	速度経度方向成分

5	Vy	速度緯度方向成分
6	Vz	速度高度方向成分
7	速度	速度絶対値：単位(m/s)
8	速度	速度絶対値：単位(km/h)

### 3 - 3 - 3 天空画像ファイル

#### 3 - 3 - 3 - 1 Movie ファイル

Movie ファイルは天空衛星位置動画表示画面で表示される動画ファイルである。デフォルトファイル名称 名称は任意（ファイル選択時のデフォルトの拡張子は、「.avi」）、ファイル形式は AVI ファイル形式である（魚眼カメラメーカーの独自仕様有）。

#### 3 - 3 - 3 - 2 Photo ファイル

Photo ファイルは天空衛星位置動画表示画面で動画ファイルが存在しない場合の代替となる静止画ファイルである。デフォルトファイル名称は名称は任意（ファイル選択時のデフォルトの拡張子は、「.jpg」）、ファイル形式は JPEG ファイル形式である。

## 第4章 GNSS レファレンスデータの生成について

### 4 - 1 レファレンスデータ

誤差を計算する時は真値がとても重要なデータである。実際の測位結果を評価する時、ミスFIXを判断する時、真値が必要である。レファレンスデータは真値として利用する。レファレンスデータは、GNSS解析ソフトウェアを利用する過程で、重要なデータである。

現在、レファレンスデータはPOS/LVという測位機器を利用して、生成する方法がある。POS/LVは、Applanix社製のGPS/IMU(Global Positioning System/Inertial Measurement Unit：慣性航法装置)というシステムである。元来、航空機や船舶の高精度位置姿勢計測に用いられている技術であるが、近年地上の移動体に搭載する装置が提供されている。車載型GPS/IMUにより、GPS 測位ができない箇所でも高精度を保ちながらシームレスに位置計測をすることが可能になった。

POS/LV 測位機器の構成は、GPS アンテナ 2 個、IMU1 台、DMI(距離計)1 台、PCS(データ制御部)からなる。これらを車両に取り付け、走行中の車両の参照点(リファレンスポイント)における位置姿勢情報を取得する。位置情報は緯度・経度・標高、姿勢情報は Roll・Pitch・Heading の角度が得られる。測位機器の特徴として、以下の4つがある[7]。

POS/LV の持つ三次元直交座標系における、2つのGPS アンテナとIMU の位置関係を決定することにより、高精度な位置姿勢情報を取得可能。

GPS 非受信時間に依存して計測精度が劣化する。

GPS 電波が非受信の場合でも位置データを取得できる。

専用の後処理解析ソフトを用いることにより200Hzのデータを得ることができる。

### 4 - 2 レファレンスデータの生成

POS/LV システムは非常に高価な測位機器である。本論文では、POS/LV 測位機器を利用しない場合の、レファレンスデータの生成方法を検討した。現在RTKのRatio3以上の正しいFIX解の水平誤差は、精度がほぼHDOP×10cm以内に入る。この正しいFIX解を真値として利用する。FIX解の回数を増加させるために、RTK後処理でアンビギュイティ保存方法を利用し、測位できない場所では、移動方向と速度で位置を計算することを試みた。以上の方法を利用してレファレンスデータを生成する。生成したレファレンスデータとPOS/LV測位機器の結果を比較して、生成したレファレンスデータの精度を評価した。

## 4 - 2 - 1 アンビギュイティ決定について

第2章の2-4で説明したように、搬送波位相バイアス二重差の推定値は一般には実数であり、同時に得られた測位解は FLOAT解と呼ばれる。搬送波位相バイアス二重差は、FIX解では整数となるが、この整数条件を利用して適当な統計的な妥当性を仮定し、推定値を整数に固定することにより測位解の精度を改良することが行われる。これを整数アンビギュイティ (Integer Ambiguity)を決定する、あるいはFIXすると言い、最終的に得られた測位解はFIX解と呼ばれる。相対測位における整数不定性決定の効率化、高速化や高信頼性化は精密測位技術における主要課題のひとつであり、過去の多数の研究により各種の手法が考案されてきた。整数不定性決定の手法は本論文の範囲外であり詳細は説明していない[8]。

## 4 - 2 - 2 アンビギュイティ保存

決定した整数アンビギュイティを保存する方法について簡単に説明する。図4-1に示した様に、 $N_1(t_1)$ は $t_1$ 時刻の1番衛星の整数アンビギュイティである。もし仰角一番高い主衛星の状況が変わらないうえに、各衛星のサイクルスリップがないなどの条件を満足する時、バイアス二重差の推定値を利用せず、 $t_1$ 時刻のエポックで保存した整数アンビギュイティ $N_n(t_1)$ を利用して、 $t_2$ 時刻の位置を計算する。保存した整数アンビギュイティを利用した測位解はHOLD解と呼ぶことにする。整数アンビギュイティを保存する方法を利用することにより、精密な位置を算出できる回数が多くなった。HOLD解の精度は前のエポックで整数アンビギュイティ推定したFIX解の精度と同程度である。よってFIX解の信頼性が重要となる。保存するときの条件によってFIX解の信頼性が異なるため、本論文では、3つの整数アンビギュイティ保存方法のFIX解の信頼性を比較して、整数アンビギュイティ保存方法を検討した。

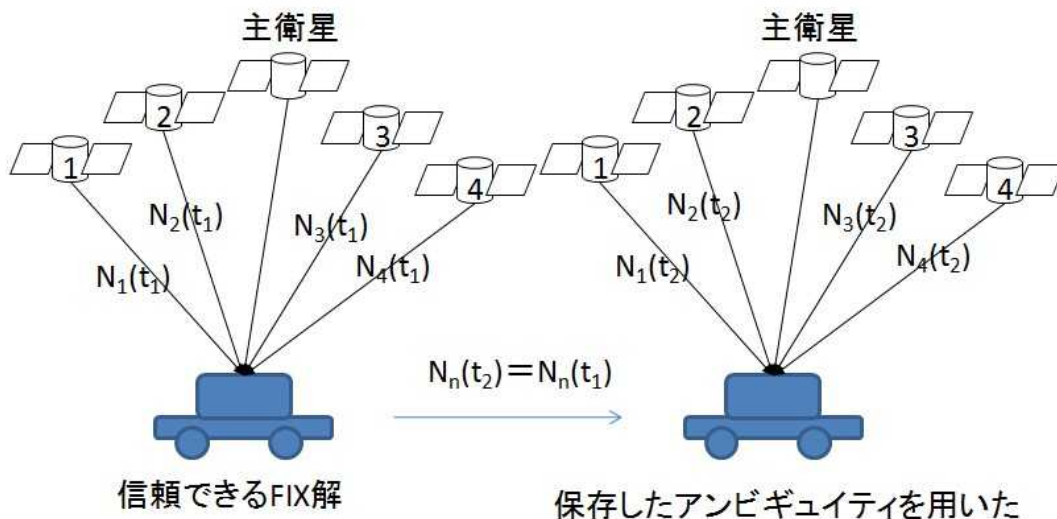


図 4-1 アンビギュイティ保存方法



## 4 - 3 アンビギュイティ保存法を用いたレファレンスデータ

### 4 - 3 - 1 実験概要

レファレンスデータ生成方法を紹介するために、2010年10月24日のGPS時刻87590秒から88840秒まで約20分間月島周辺で移動体実験を行った。基準局は海洋大第四実験棟屋上、移動局は月島周辺で走行した。使用受信機はノバテルOEM4受信機、ノバテルのアンテナとPOS/LV機器である。



図4-2 レファレンスデータ生成実験の場所

赤色の星印は基準局の場所である。赤色の線は移動局の走行経路である。

#### 4 - 3 - 2 レファレンスデータの生成過程



図4-3 Ratio3以上のFIX解結果

表4-1 Ratio3以上のFIX解の結果の誤差（トータル測位回数は5000回）

FIX解の回数	0.1m以内	0.1m - 0.2m	0.2m - 0.3m	0.3m - 0.5m	0.5m - 1m	1m以上
3438	810	1229	1094	216	78	11
78.1%	23.6%	35.7%	31.8%	6.3%	2.3%	0.3%

図4-3はRatio3以上のFIX解の結果である。1250秒のデータで5000エポック存在した。利用可能衛星4機以上の回数は4405回の88.1%であった。Ratio3以上のFIX解の回数は3438回で78.1%であった。表4-1はPOS/LVの結果を真値として、Ratio3以上のFIX解の測位結果のレファレンスからの誤差である。1m以上のミスFIXの回数は11回、0.3%であった。精度が良い測位結果の回数を増やすために、整数アンビギュイティの保存方法を利用した。本論文では、3つの整数アンビギュイティ保存方法のFIX解の信頼性を比較して、整数アンビギュイティ保存方法を検討した。下に3つの整数アンビギュイティの保存方式の概要を示した。

方式1 Ratio3以上で正しいFIX解と判断し、整数アンビギュイティを保存し、次のGPS時刻で利用した。

方式2 連続2回Ratio3以上で、FIX解と判断し、整数アンビギュイティを保存し、次のGPS時刻で利用した。

方式3 連続2回Ratio3以上、利用衛星数5機以上でFIX解と判断した。整数アンビギュイティを保存し、保存した整数アンビギュイティを次のGPS時刻で利用した。

以下に方式3の2つの例を示した。

表4-2 方式3の保存方法1

GPS 時刻	衛星数	主衛星	Ratio	3 番	21 番	23 番	16 番	13 番
87738.5	4	6 番	24.69	33174	-	-9	-21	-
87738.75	4	6 番	27.95	33174	-	-9	-21	-
87739	6	6 番	1.02	33174	-831539	-9	-21	-23
87739.25	6	6 番	9.24	33174	-831543	-9	-21	-20
87739.5	5	6 番	11.65	33174	-831543	-9	-21	-
87739.75	5	6 番	3.58	33174	-831543	-9	-21	-
87740	5	6 番	9.83	33174	-831543	-9	-21	-

表4-2はGPS時刻87738.5秒から87740秒までの各衛星の整数アンビギュイティを示した。例えば、GPS時刻87738.5秒と87738.75秒の連続2回のRatio3以上データの利用衛星が4機であり、利用衛星5機以上の条件を満足しなかったため、そのGPS時刻の整数アンビギュイティを保存していない。GPS時刻87739.25とGPS時刻87739.5のデータは連続二回のRatio3以上、利用衛星数も5機以上で、連続2回のデータの整数アンビギュイティを保存して、次のGPS時刻で利用した。GPS時刻87739.75秒のデータは、保存した整数アンビギュイティを利用して位置を計算した。

表4-3 方式3の保存方法2

GPS 時刻	衛星数	主衛星	Ratio	3 番	31 番	21 番	16 番	19 番
87611.25	6	6 番	2.9805	-52	-2611133	-829779	-38	-2125648
87611.5	6	6 番	3.0426	-52	-2611132	-829779	-38	-2125648
87611.75	6	6 番	4.1382	-52	-2611132	-829779	-38	-2125648
87612	6	6 番	4.3563	-52	-2611132	-829779	-38	-2125648
87612.25	6	6 番	3.2772	-52	-2611132	-829779	-38	-2125648
87612.5	6	6 番	3.7579	-52	-2611132	-829779	-38	-2125648
87612.75	6	6 番	3.7045	-52	-2611132	-829779	-38	-2125648

87613	6	6番	4.2999	-52	-2611132	-829779	-38	-2125648
87613.25	6	6番	2.5642	-53	-2611132	-829777	-38	-2125648

表4-3はGPS時刻87611.25秒から87613.25秒までの各衛星の整数アンビギュイティを示した。GPS時刻87611.5秒と87611.75秒は連続2回のRatioが3以上、利用衛星数が5機以上の場合である。主衛星も変化していない。各衛星の整数アンビギュイティを保存し、次の時刻に利用した。得られた結果はHOLD解とした。GPS時刻87613.25はRatioが3未満である。その時刻は前に保存した整数アンビギュイティを用いた。3つの保存方式で計算した結果を下の表4-4にまとめた。

表4-4 各保存方式の測位結果の誤差

方式	FIX and HOLD 回数	0.1m以内	0.1m - 0.2m	0.2m - 0.5m	0.5m - 1m	1m以上
方式1 (回数)	3728	952	1377	1270	83	46
割合	84.63%	25.54%	36.94%	34.07%	2.23%	1.23%
方式2 (回数)	3725	951	1377	1269	82	46
割合	84.56%	25.53%	36.97%	34.07%	2.20%	1.23%
方式3 (回数)	3690	951	1377	1269	81	12
割合	83.77%	25.77%	37.32%	34.39%	2.20%	0.33%

表4-4は各方式のFIX and HOLD解の回数と、各誤差の統計（割合）を示した。FIX and HOLDの割合は測位回数とFIX and HOLDの回数の比である。各誤差の統計は、測位回数とFIX and HOLD解の回数の比である。

3つの方式の中で、方式3のFIX and HOLD解の回数が低いが、POS/LVとの誤差が1m以上のミスFIXの回数が12回である。方式1と方式2の結果では、FIX and HOLD解の回数が多いが、誤差1m以上のミスFIXが多い。方式3をレファレンスデータ生成として一番良い方式と考えた。

レファレンスデータは後処理で生成できるため、得られた結果の時間逆方向の整数アンビギュイティを使用して、同じ様に計算することができる。時間逆方向と考慮した結果はFIX and HOLD 回数は3859回（測位回数に対する割合では87.6%）であった。ミスFIXの回数は12回で変化はなかった。時間方向だけの結果よりFIX解の回数が169回を増えた。時間逆方向以外にも後処理のため、さらにFIX解を増やすことが可能であるが、本節ではアンビギュイティを保存する方法の例を示すことができた。

#### 4 - 3 - 3 生成したレファレンスデータの評価

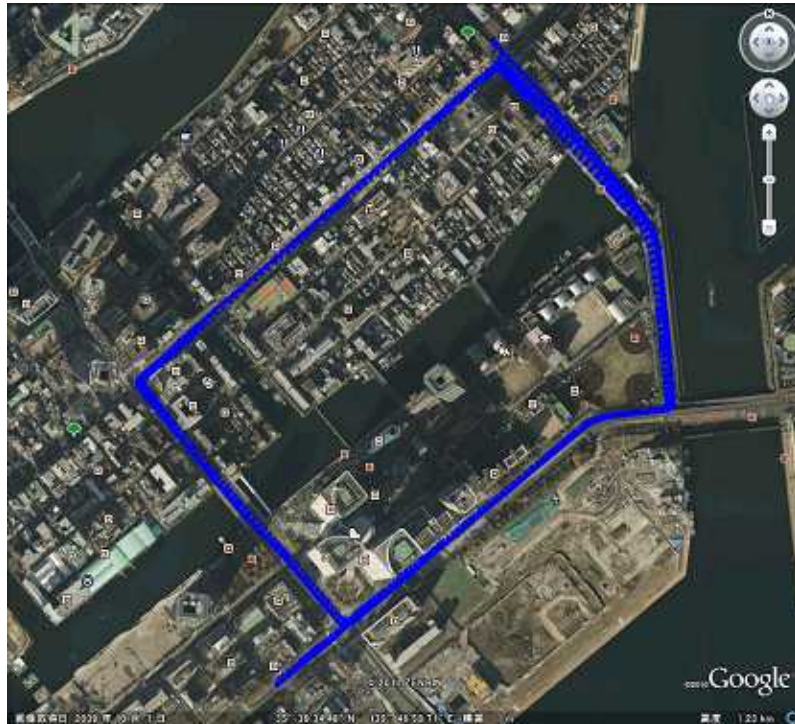


図4-4 移動実験の範囲月島周辺のPOS/LVの結果

図4-4に示した青いプロット点はPOS/LVの測位結果である。POS/LVの結果を利用して、生成したレファレンスデータの結果と比較し、精度評価を行った。



図4-5 生成したレファレンスデータ

保存方式3の結果を使用し、測位結果がない時間帯では速度ベクトル情報を利用し、位置情報を計算した。今回のデータでは、10秒以上測位できないケースは3回あった。最大で測位できない時間間隔は45秒であった。

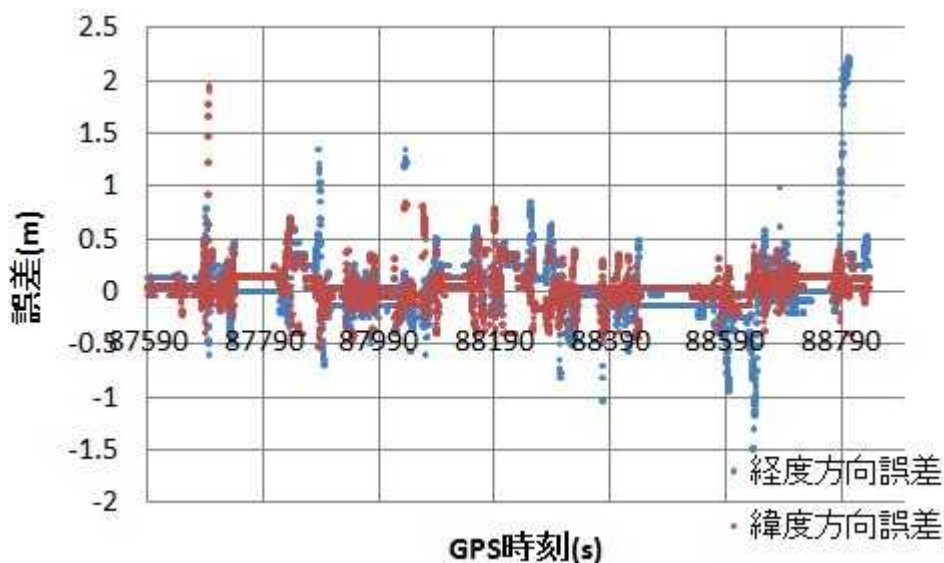


図4-6 生成したレファレンスデータ水平誤差

図4-6に、生成したレファレンスデータの水平誤差を示した。途中、逸脱している誤差は、速度ベクトルを積分した結果によるものである。

#### 4 - 4 まとめ

本章では、2010年10月24日に月島周辺で取得したデータ利用し、レファレンスデータを生成する方法を紹介した。

3つの保存方式の結果を比較した結果では、保存方式3の方法が一番良いと考えた。保存方式3では、0.5m以上の誤差が少なく、とくに1m以上の場合は、方式1,2より大幅に減少した。整数アンビギュイティ保存方式3を使用し、さらに、時間方向と時間逆方向の整数アンビギュイティを利用して、FIX and HOLDの結果を計算した。得られた結果と速度情報を利用し、FIXできない所と測位不能場所の位置情報を計算し、最終的なレファレンスデータを生成した。生成したレファレンスデータの誤差では、全体として、97.9%の結果の誤差が1m以内であった。POS/LV等のシステムをレファレンスとして利用できない時に、1m以内の精度でレファレンスを生成する手法として、本章で述べた手法は有効であるといえる。

## 第5章 GNSS 解析ソフトウェア利用

### 5 - 1 回折のRTKへの影響

都市部におけるマルチパス環境は、決して良いとはいえない状況である。特にGPS/GNSSでは、見通しの良い経路が確保されていることが重要であるため、高層ビル街や狭い路地では、反射や回折といった、様々な影響を受けることになる。図5-1に、高層ビル街で受けやすい、反射波が支配的な状況の概観を示した。実際の直接波は45dBHz程度の信号強度であるが、ビルによる回折の影響を受け、10dB以上減衰している。ここで、比較的強い鏡面反射による信号が混入すると、反射波が支配的な状況になることがわかる。

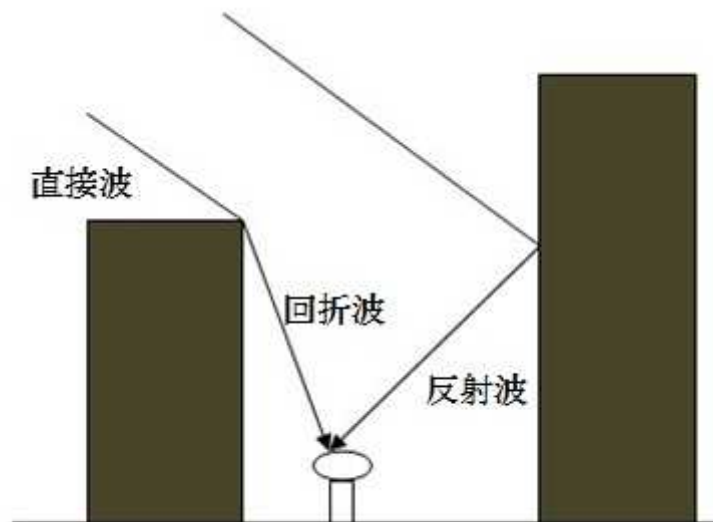


図5-1 反射波が支配的な状況

電波通路に障害物があると、直進性を有する電波は遮蔽され受信点まで達することができなくなる。ただし、電波には障害物を回り込む回折現象があるため、障害物の背後でも受信可能であるがその受信電力は弱くなる。一般的に電波通路の中心線と障害物との間隔をクリアランスといい、この値が第1フレネルゾーンの半径より大きいと、電波のエネルギーが十分に通過することが知られている。クリアランスが第1フレネルゾーンより小さくなるにつれて単調に受信電力が減少し、受信機の最低推奨信号強度付近でGPS電波を正常に受信できなくなる。

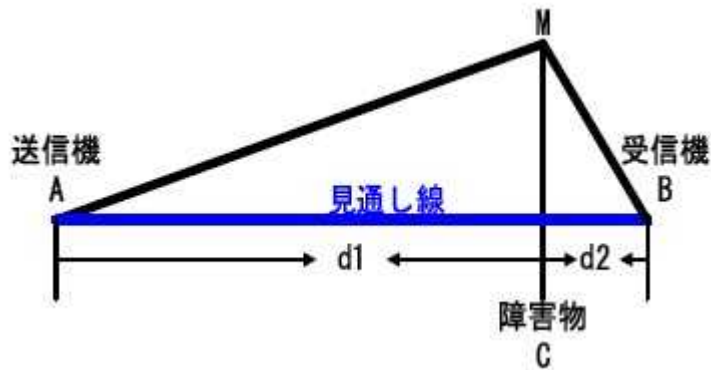


図 5-2 第 1 フレネルゾーン

第 1 フレネルゾーンは第 1 フレネル楕円体と第 2 フレネル楕円体とによって囲まれる帯状の部分である。第 1 フレネルゾーンの半径は以下の式(5-1)で与えられる。  $r$  は第 1 フレネルゾーンの半径、  $\lambda$  は電波の波長、  $d_1$  は AC、  $d_2$  は CB である。

$$r = \sqrt{\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (5-1)$$

周波数が L1 帯で 1.5754GHz、L2 帯で 1.2276GHz の GPS 衛星の電波で、この第 1 フレネルゾーンを算出すると次のようになる。GPS 衛星から障害物までの距離を 2 万 km、受信アンテナから障害物までの距離を 10m と仮定すると、L1 帯で 1.39m、L2 帯で 1.56m となる。受信アンテナから障害物までの距離を 50m にした場合、L1 帯で 3.08m、L2 帯で 3.49m となる。L1 帯信号より L2 帯信号の確保すべきゾーンが大きいことがわかる。一般的に、GPS の受信アンテナを設置する場合、回折の影響を受けなくするためには、衛星アンテナ間の電波通路と障害物の距離は少なくとも数 m 以上必要である。

次に障害物の近傍を通過する GPS 電波の信号強度の回折による損失値を実際に計算する。障害物は簡単のため厚さが無視できる理想的なナイフエッジとする。ナイフエッジによる回折波の自由空間波に対する相対的な回折損  $J(v)$  は、  $v$  が -0.7 より大きいときは次の式で近似される [6]。

$$J(v) = 6.9 + 20 \log[\sqrt{(v-0.1)^2 + 1} + v - 0.1] \quad (5-2)$$

なおパラメータ  $v$  は次の式で与えられる。

$$v = H \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left( \frac{1}{D1} + \frac{1}{D2} \right)} \quad (5-3)$$

$H$  は送受信点を結ぶ直線とナイフエッジの先端との距離（視線を遮る場合は正とする）、 $\lambda$  は GPS 電波の波長、 $D1$  及び  $D2$  は、送信点及び受信点とナイフエッジの先端との距離を示す。



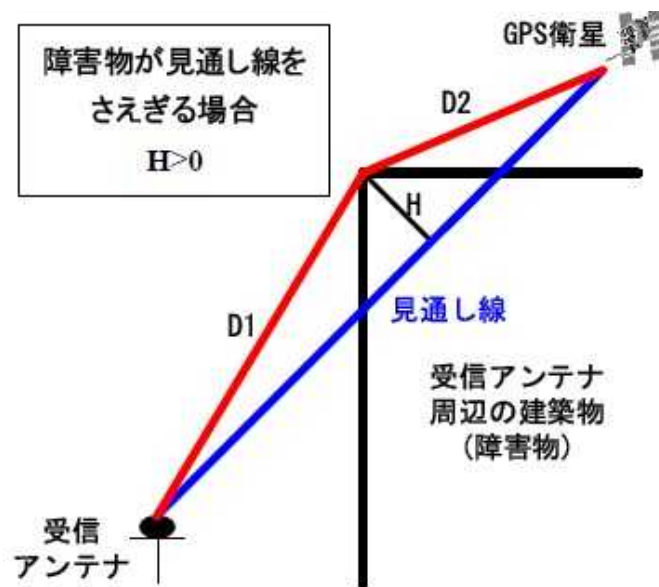


図5-3 GPS測位における回折

表5-1 L1帯信号とL2帯信号も回折損の値

H	D2	D1	L1 帯信号の パラメータ	L1 帯信号 の回折損	L2 帯信号の パラメータ	L2 帯信号 の回折損
0m	2 万 km	10m	0	6.033	0	6.033
1 m	2 万 km	10m	1.026	14.092	0.913	13.351
2 m	2 万 km	10m	2.052	19.251	1.826	18.312
5 m	2 万 km	10m	5.13	27.036	4.564	26.023
0m	2 万 km	20m	0	6.033	0	6.033
1 m	2 万 km	20m	0.725	12.029	0.645	11.430
2 m	2 万 km	20m	1.451	16.534	1.291	15.674
5 m	2 万 km	20m	3.627	24.039	3.227	23.038
0m	2 万 km	50m	0	6.033	0	6.033
1 m	2 万 km	50m	0.459	9.953	0.408	9.537
2 m	2 万 km	50m	0.918	13.383	0.816	12.686
5 m	2 万 km	50m	2.294	20.165	2.041	19.208
0m	2 万 km	100m	0	6.033	0	6.033
1 m	2 万 km	100m	0.324	8.833	0.289	8.529
2 m	2 万 km	100m	0.649	11.456	0.577	10.903
5 m	2 万 km	100m	1.622	17.384	1.443	16.495

Hは送受信点を結ぶ直線とナイフエッジの先端との距離(視線を遮る場合は正とする)、D1

及びD2 は、送信点及び受信点とナイフエッジの先端との距離を示す。表5-1はD1を10m、D2を2万kmと設定したときに、L1とL2帯信号のパラメータである $v$ の値も示した。パラメータ $v$ や、 $H$ が大きくなるにつれて、回折損の値は大きくなっている。式(5-2)より、パラメータ $v$ は $H$ の値によって決定されるので、回折損は $H$ の値によるものであり、GPS衛星と受信機間を結ぶ直線とナイフエッジの頂上との距離 $H$ を0.5mと仮定すると、L1帯で10.4dB、L2帯で9.9dB回折損を受けることになる。よって、仰角が低い衛星であれば見通し境界上に遮蔽物が存在することによって、最低推奨信号強度を保つことができなくなる可能性がある。また、高仰角の衛星であっても、遮蔽物に見通し境界が数十cm程度遮られれば、受信強度が大幅に下がり、測位精度に影響が出てしまうと考えられる。

## 5 - 2 測位に利用する衛星選択の重要性

図5-4と図5-5はノバテルOEM4受信機を利用して取得した衛星の信号強度のデータである。青線はL1-C/Aの信号強度、赤線はL2P(Y)の信号強度である。同じ時間帯で、回折の影響を受けた衛星と受けない衛星に大きな差があることがわかった。見通しの十分にある6番衛星と比較すると、7番衛星は回折の影響を受けており、信号強度が安定していないことがわかった。

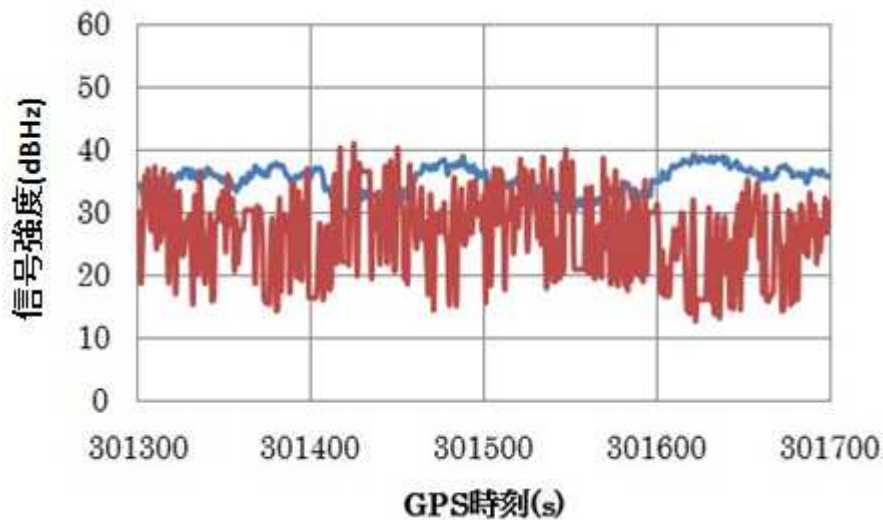


図5-4 OEM4受信機7番衛星の信号強度

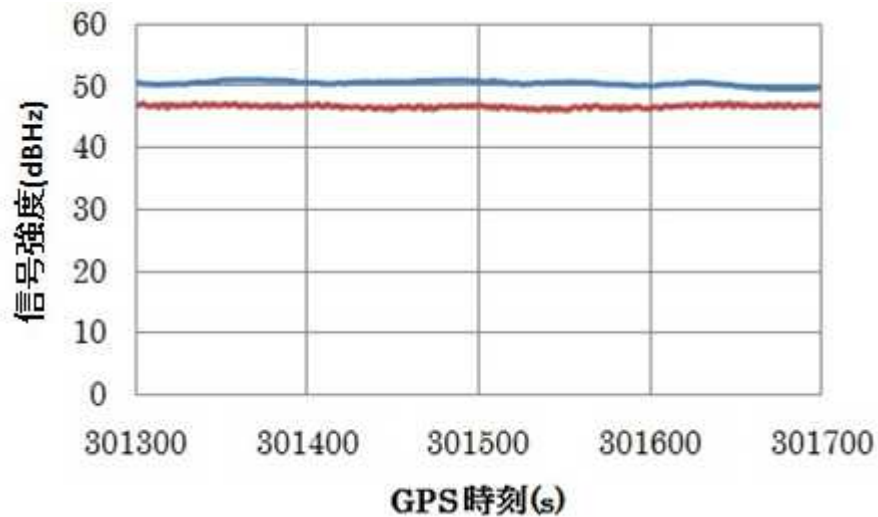


図5-5 OEM4受信機6番衛星の信号強度

### 5 - 3 GNSS 解析ソフトウェアを用いた実験

ここでは静止と移動体の実験を行った。実際の実験を通して、GNSS解析ソフトウェアの利用方法を紹介する。

#### 5 - 3 - 1 静止実験

静止実験では3時間と24時間二つの実験を行った。実際のデータと天空写真同時に利用して、分析する。

##### 5 - 3 - 1 - 1 実験概要

静止実験は東京海洋大学構内で行った。図5-6のように基準局と移動局を設置した。赤色の星印は第四実験棟屋上に設置した基準局である。青色の星印は図書館前の駐車場に設置した移動局である。3時間と24時間の設置場所は同じである。解析に使用したデータは以下の通りである。

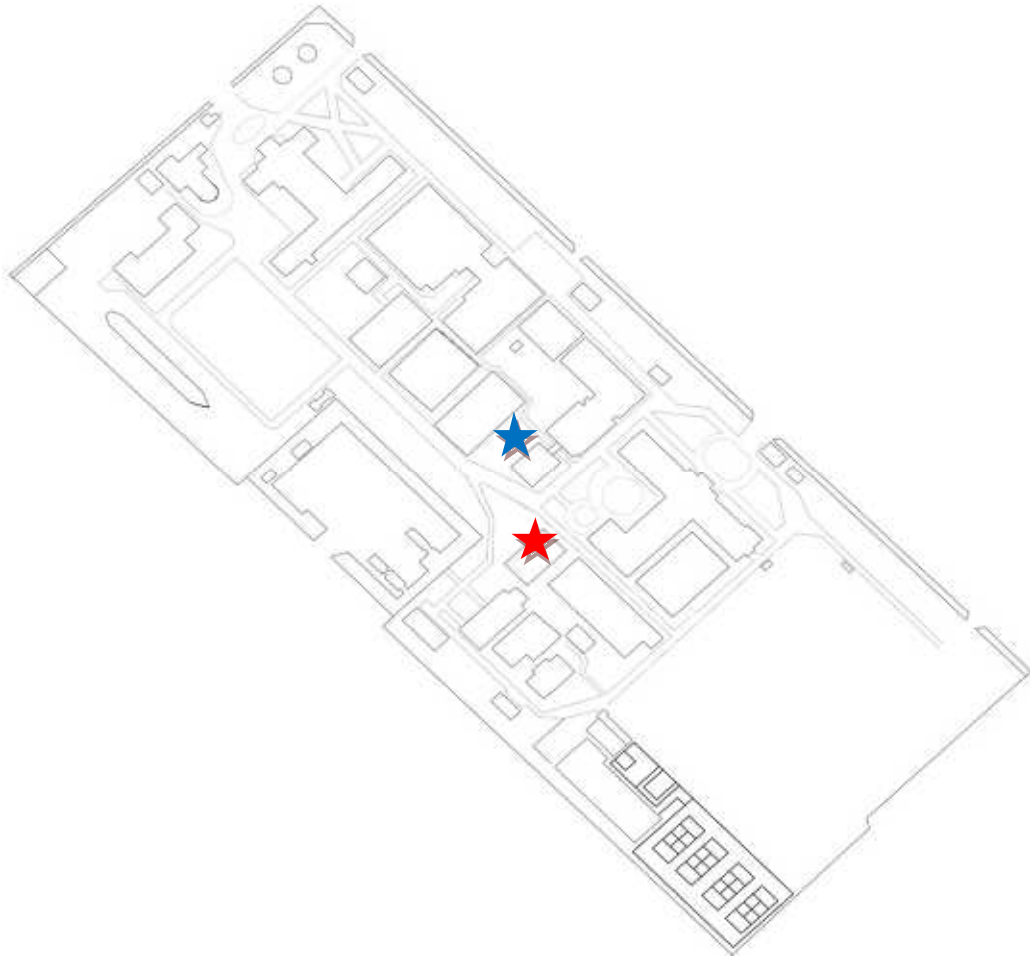


図5-6 東京海洋大学構内の基準局、移動局位置の概要図

表5-2 静止実験の実験概要

実験	3時間	24時間
取得日時	2011年5月8日15時から2011年5月8日15時まで	2011年5月21日13時から2011年5月22日13時まで
サンプリングレート	1Hz	1Hz
基準局受信機	JAVAD受信機	JAVAD受信機
移動局受信機	JAVAD受信機とノバテル受信機	JAVAD受信機

表5-3 測位利用衛星の概要

実験	3時間	24時間
マスク角	10度	10度

L1最低信号強度	30 dBHz	30 dBHz
HDOP	15以下	15以下

通常の衛星選択では、信号強度やマスク角そして受信機の出力するフラグをチェックした。本調査では、研究室で以前より利用していた「あるべき信号強度によるチェック」を再検証した。

屋上の12時間データを利用して、2つの受信機の各仰角のL1-C/A平均信号強度とL2P(Y)平均信号強度を図5-7と図5-8に示した。L1-C/A及びL2P(Y)のあるべき信号強度をそれぞれ点線で示した。この点線より低い信号の衛星は測位に利用しないこととした。閾値は経験的に決定した。

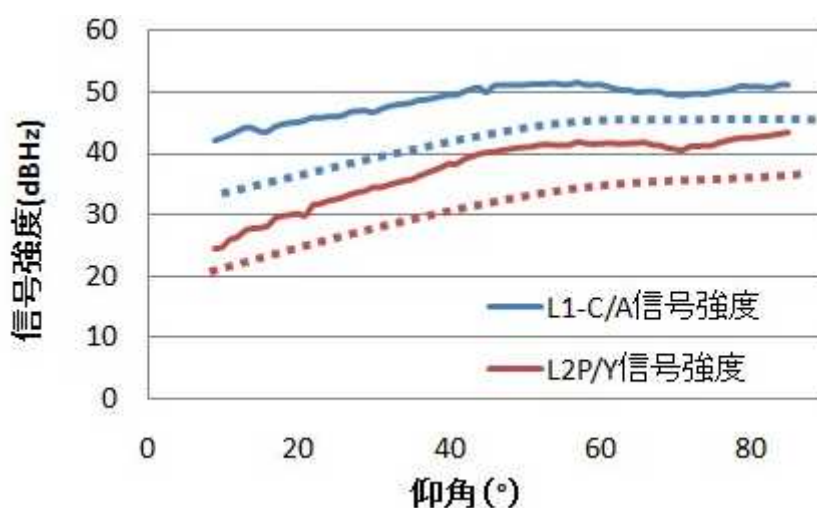


図5-7 JAVAD受信機の平均信号強度

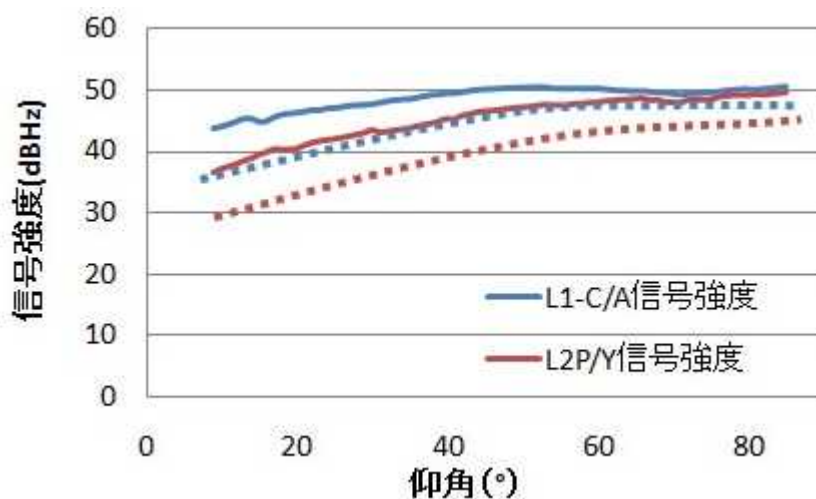


図5-8 ノバテル受信機の平均信号強度

ノバテル受信機のL2P(Y)信号強度がJAVAD受信機より高いことがわかる。一方、L1-C/Aについては同程度であった。2つの受信機の差については、本論文の主旨ではないが、使用する受信機によって性能差（信号強度の出力値計算方法に差がある）があることを認識することが重要であるといえる。以下にミスFIXの原因を分析する。

### 5 - 3 - 1 - 2 ノバテル受信機

ノバテル受信機を使用する時、以下の重要なステータス情報があり、受信したデータの一部で確認できる。表5 - 4の四角で囲んだ部分が受信チャンネルごとのステータス情報である。表5 - 6にその内容の詳細を記述した。そこでは、PLLが正常にロックしているか、ハーフサイクルアンビギュイティが解決されているか等の重要な情報が記載されており、各チャンネルの擬似距離や搬送波位相を計算に用いる際に考慮しなければならないことがわかる[10]。

このようなステータス情報は、詳細に出す受信機と出さない受信機があることに注意しなければならない。

表5-4 ASCファイル（観測データ）の例

```
#RANGEA, COM1, 0, 62.5, FINESTEERING, 1636, 293320.800, 00000000, 5103, 2360;14,
31, 0, 21404604.038, 0.060, -117835700.475560, 0.009, -1945.500, 45.7, 311.316,
08109c04,
31, 0, 21404598.899, 0.110, -91834945.986400, 0.009, -1515.977, 40.3, 298.300,
01309c0b,
.
.
.
6, 0, 20493005.733, 0.034, -113045220.404961, 0.005, 1383.859, 50.4, 394.410,
08109ca4,
6, 0, 20493002.819, 0.046, -88102108.622007, 0.005, 1078.332, 47.9, 358.280,
01309cab*c7e0806c
```

表5-5 ASCファイル（観測データ）の内容

フィールド	フィールド種類	内容
1	PRN	GPS:1-32、SBAS:120-138、GLONASS:38-61
2	glo freq	GLONASS周波数+7

3	psr	擬似距離
4	psr std	擬似距離の標準偏差
5	adr	搬送波位相
6	adr std	搬送波位相の標準偏差
7	dopp	ドップラー周波数
8	C/No	信号強度
9	locktime	連続信号追尾時間 (サイクルスリップ無)
10	ch-tr-status	信号追尾ステータス 表5-6示す

表5-6 信号追尾フィールドの内容

	ビット	説明	値と内容
N0	0	信号追尾状態	0 - 11 4 = L1 信号、11 = L2 信号
	1		
	2		
	3		
N1	4	SV 番号	0-n
	5		
	6		
	7		
N2	8	Phase lock	0=利用しない、1=利用
	9		
	10		
	11		
N3	12	Code locked	0=利用しない、1=利用
	13	相関機種類	0-7
	14		
	15		
N4	16	衛星システム	0=GPS、1=GLONASS、 2=WAAS、3-6=Reserved 7=Other
	17		
	18		
	19	Reserved	
N5	20	Grouping	0=利用しない、1=利用
	21	信号種類	GPS:0=L1C/A、1=L2P(Y)、17=L2C  GLONASS:0=L1C/A、4=L1P、5=L2P(Y)
	22		
	23		

N6	24		
	25		
	26	誤差訂正	0=利用しない、1=利用
	27	L1 信号が主要	0=利用しない、1=利用
N7	28	搬送波位相	0=1/2 を増加、1=増加しない
	29	Reserved	
	30		
	31	Channel assignment	0=自動、1=強制

### 5 - 3 - 1 - 3 測位結果の分析

#### 3時間の静止実験

3時間の静止実験では、JAVAD受信機の結果は10800のエボックのうちに測位できる回数は6803回、測位率は62.99%である。FIX解の回数は4217回、FIX率は61.99%である。ミスFIXの回数は6回、ミスFIX率は0.15%である。ノバテル受信機の結果では、10800のエボックのうちに測位できる回数は10229回、測位率は94.71%である。FIX解の回数は2765回、FIX率は27.03%である。ミスFIXの回数は38回、ミスFIX率は1.37%である。なお、FIX率は、測位できる回数に対するFIX解の回数の割合である。

測位結果と真値の差はHDOP × 10cmより大きい場合はミスFIXと判断した。表5-7と表5-8に示したのは、3時間静止実験の閾値（あるべき信号強度）を変化させたときのJAVAD受信機とノバテル受信機のRTKの結果である。閾値については、L1のみとL1、L2両方をチェックする場合がある。

表5-7 JAVAD受信機のRTKの結果（トータル測位回数は10800回）

閾値 (単位：dB)	測位回数	測位率	FIX解の回数	FIX率	ミスFIX の回数	ミスFIX率
閾値なし	6803	62.99%	4217	61.99%	6	0.1%
L1:5、L2:10	6498	60.17%	3708	57.06%	0	0.0%
L1:6、L2:11	6558	60.72%	4074	62.12%	0	0.0%
L1:7、L2:12	6603	61.14%	4202	63.64%	0	0.0%
L1:5	6701	62.05%	4807	71.74%	0	0.0%
L1:6	6737	62.38%	4946	73.42%	6	0.1%
L1:7	6769	62.68%	4954	73.19%	6	0.1%



表5-8 ノバテル受信機のRTKの結果（トータル測位回数は10800回）

閾値 (単位：dB)	測位回数	測位率	FIX解の回数	FIX率	ミスFIX の回数	ミスFIX率
閾値なし	10229	94.71%	2765	30.31%	38	1.37%
L1:5、L2:10	8705	80.60%	3437	39.48%	17	0.5%
L1:6、L2:11	8838	81.81%	3395	38.85%	26	0.8%
L1:7、L2:12	9022	83.53%	3247	36.75%	37	1.2%
L1:5	9309	86.19%	3439	38.31%	24	0.7%
L1:6	9505	88.01%	3331	37.00%	33	1.0%
L1:7	9668	89.52%	3127	34.61%	37	1.2%

測位率はトータル回数と測位回数の比である。FIX率は測位回数とFIX解の回数の比である。ミスFIX率はFIX解の回数とミスFIXの回数の比である。2つの受信機の結果を比べると、JAVAD受信機の結果が全体にわたって良いことがわかる。また、あるべき信号強度を利用しないケースは、おおむね最も性能が低いことがわかり（JAVAD受信機の1つのケースを除いて）、あるべき信号強度の効果が高いことがわかった。

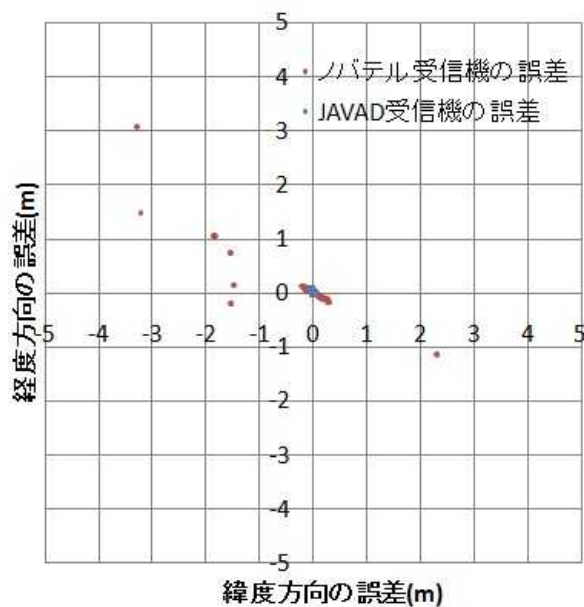


図5-9 JAVAD受信機とノバテル受信機RTK結果の誤差

2つの受信機で同時に取得したデータのRTKのRatio3以上の測位結果を図5-9に示した。あるべき信号強度の閾値、L1:7dB、L2:12dBの結果である。誤差がHDOP × 10cm以上はミスFIXと判定した。

表 5-9 JAVAD 受信機とノバテル受信機 RTK 結果 (トータル測位回数は 10800 回)

利用受信機	測位回数	測位率	FIX 解の回数	FIX 率	ミス FIX の回数	ミス FIX 率
JAVAD 受信機	6589	61.01%	4203	63.79%	0	0.0%
ノバテル受信機	9022	83.53%	3247	35.98%	28	0.9%

表5-9は、あるべき信号強度の閾値、L1:7dB、L2:12dBの結果である。ここではあえてベストな条件を選択していない。2周波 (L1+L2) のLAMBDA法とRatioテストの組み合わせにおいて、Ratio3以上の場合はFIX解と判断した。誤差がHDOP×10cm以上の場合はミスFIXと判断した。あるべき信号強度によるチェックした結果では、2つの受信機の結果は同じ様にFIX率が高くなり、ミスFIX率が減少した。

ミスFIXの時間帯を抽出し、原因を分析するために天空情報と衛星配置の画面を利用する。GPS時刻：300816秒の天空衛星配置を図5-10に示した。利用衛星は5機で3番、6番、11番、19番、13番であった。23番と24番衛星は、仰角が10度以下のため使用されていない。16番衛星はあるべき信号強度より排除された。

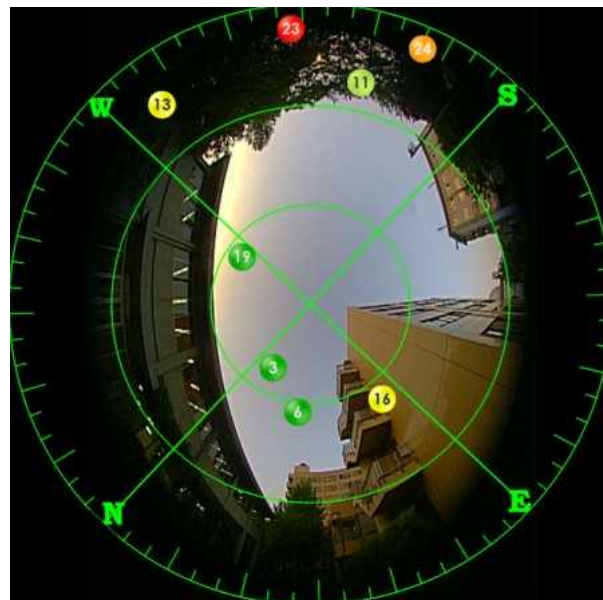






図5-10 GPS時刻：300816秒の天空衛星配置

表 5-10 GPS 時刻：300816 秒の各衛星の信号強度（ノバテル）

衛星番号	L1-C/A 信号 強度 (dBHz)	L1-C/A あるべき 信号強度 (dBHz)	L2P(Y)信号 強度 (dBHz)	L2P(Y)あるべき 信号強度 (dBHz)
19	51.1	41.3	50.1	29.4
3	51.9	41.5	49.1	29.8
6	51.1	40.8	48.7	28.3
16	38.2	40.6	26.9	27.9
11	45.3	34.4	39.7	23.2
24	36.1	30.6	32.8	21.0
23	35	31.2	20.8	21.3
13	38.8	32.8	29.9	22.3

GPS時刻：300816秒から300848秒まで32秒間、9回のミスFIXがあった。利用衛星は5機で3番、6番、11番、19番、13番であった。実際の天空写真より、13番と11番衛星が建物の近くで回折の影響を受けた可能性が高いため、それぞれの信号強度の推移を示した。

図5-11と図5-12はノバテル受信機の13番衛星と11番衛星の信号強度の推移結果である。全ての図の  はL1-C/Aの信号強度  はL2P(Y)の信号強度、 はL1-C/Aのあるべき信号強度  はL2P(Y)のあるべき信号強度である。この2つの結果より、13番衛星の信号強度、特にL2P(Y)の信号強度が安定してないことが分かった。しかしながら、L2P(Y)の信号強度はあるべき信号強度より高い時間帯もあり完全には排除できていない。13番衛星は障害物の回折の影響を受けていたと考えられる。GPS時刻：300816秒のミスFIXの原因と考えられる。

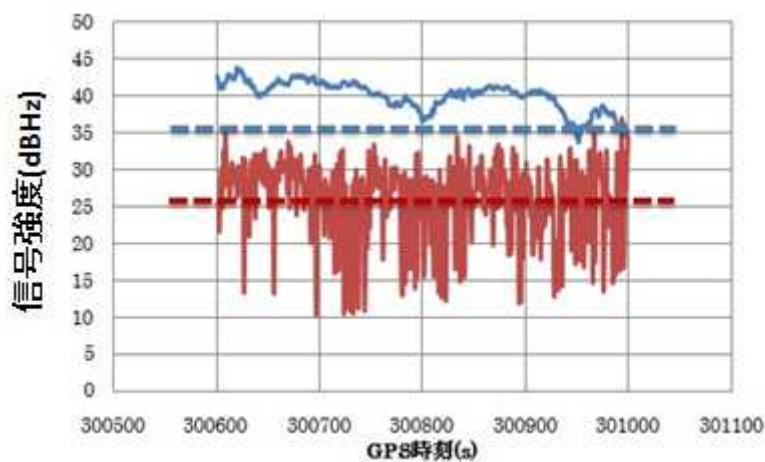


図5-11 ノバテル受信機13番衛星の信号強度

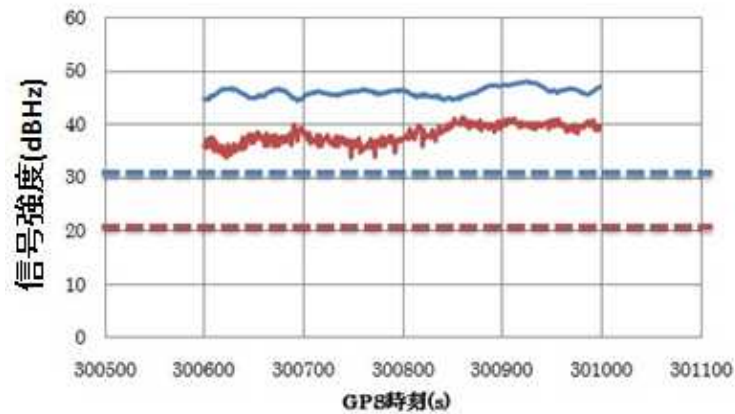






図5-12 11番衛星の信号強度

同じ時間帯のJAVAD受信機のRTK測位結果では、ミスFIXの回数がない。図5-13と図5-14はJAVAD受信機の信号強度の推移を示した。2つの図の  はL1-C/Aの信号強度  はL2P(Y)の信号強度、  はL1-C/Aのあるべき信号強度  はL2P(Y)のあるべき信号強度である。JAVAD受信機のGPS時刻：300816秒の各衛星の信号強度を表5-11に示した。この2つの図の結果より、JAVAD受信機で取得したデータでは、信号強度がノバテル受信機の信号強度より低く、安定して推移していることがわかった。衛星が回折の影響を受けた時間帯では、JAVAD受信機の信号強度が閾値より低くなり、一方、ノバテル受信機の信号強度が大きく振幅していることがわかった。

JAVAD受信機のデータでは、13番衛星の信号強度より、L2P(Y)帯の信号強度が特に低いことがわかる。点線はあるべき信号強度である。L2P(Y)の信号強度はあるべき信号強度より低く、13番衛星を測位から排除できたことがわかる。このように、異なる受信機の信号強度値の違いによって、異なる測位結果を得ることがわかった。アンテナは同じで、分岐したケーブル長も同じであることから、受信機の差が今回のRTKの性能の差になった可能性が高い。

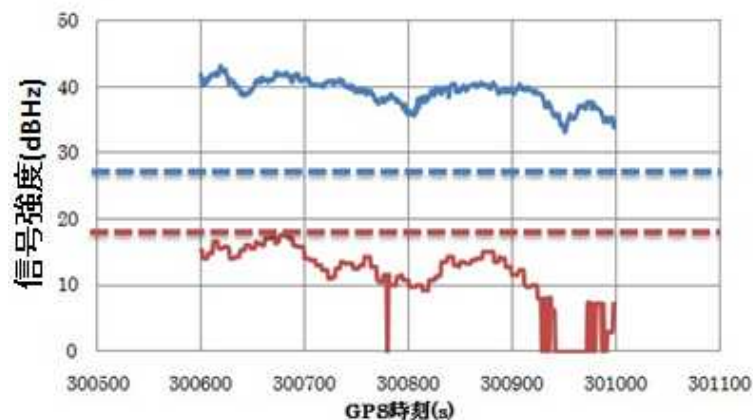


図5-13 JAVAD受信機で取得した13番衛星の信号強度

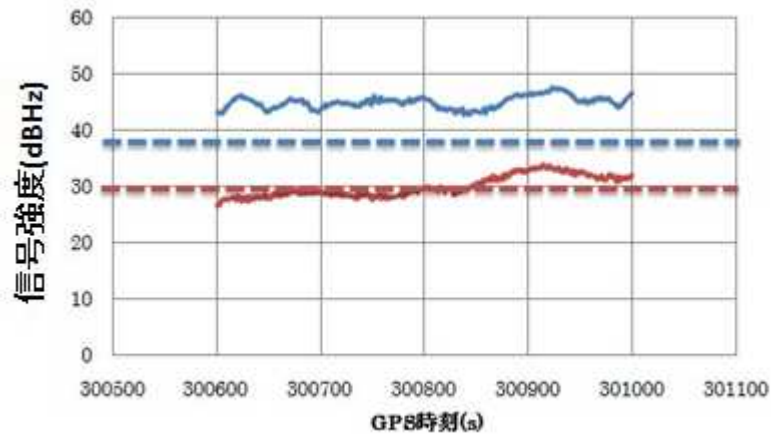


図5-14 11番衛星の信号強度

表 5-11 GPS 時刻：300816 秒の JAVAD 受信機取得した各衛星の信号強度

衛星番号	L1-C/A 信号強度 (dBHz)	L1-C/A あるべき信号強度 (dBHz)	L2P(Y)信号強度 (dBHz)	L2P(Y)あるべき信号強度 (dBHz)
3	54.25	43.5	45.25	36.8
19	54	43.3	45.75	36.4
11	43.75	36.4	29.75	30.2
23	25.75	32.8	0	28.1
6	53.5	42.8	44.75	35.3
13	37.75	34.8	9.25	22.3
24	34.75	32.6	13.25	28.0
16	36.75	42.6	0	34.9

表5-11はGPS時刻：300816秒のJAVAD受信機取得した各衛星の信号強度である。JAVAD受信機の利用衛星が3機のみで、測位できなかった。結果としてミスFIXの結果を排除することができたといえる。

ノバテル受信機では、GPS時刻：300816秒から300848秒まで32秒間、9回のミスFIXが見られた。具体的な13番で衛星の信号強度を以下の表5-10に示した。

表5-12 ノバテル受信機の13番衛星の信号強度

GPS 時刻	衛星番号	L1-C/A 信号強度 (dBHz)	L1-C/A あるべき信号強度 (dBHz)	L2P(Y)信号強度 (dBHz)	L2P(Y)あるべき信号強度 (dBHz)
--------	------	--------------------	------------------------	-------------------	-----------------------

300816	13	38.8	34.8	29.9	22.3
300819	13	39	32.8	25.3	22.3
300820	13	39.3	32.8	27.7	22.3
300821	13	39.4	32.8	27.2	22.3
300830	13	40.1	32.8	30	22.3
300844	13	40.8	32.8	30.9	22.2
300845	13	40.6	32.8	28.9	22.2
300846	13	40.5	32.8	24.7	22.2
300848	13	40.4	32.8	26.8	22.2

9回のミスFIXの中で、7回のL2帯の信号強度が30 dBHz未満である。13番衛星の影響を排除するために、衛星利用判断基準を以下のように変更して計算を行った。

具体的には、L1帯の最低信号強度だけではなく、L2帯の最低信号強度の条件も利用した。表5-13と表5-14は、L2帯の利用最低信号強度25dBHzと最低用信号強度30dBHzの条件での結果である。各閾値のFIX解とミスFIXの回数を表示した。L2帯にも最低信号強度の条件を付加することにより、ミスFIXの回数が減少した。特に最低信号強度30dBの場合、ミスFIXの回数が少なくなった。GPS時刻: 300816秒から300848秒まで32秒間の9回ミスFIXは2回に減少した。さらに、表5-8と比較すると、正しいFIX解の回数も増加していることがわかった。これは、搬送波位相を用いるRTKにおいては、観測データをきちんとした品質チェックを行った上で利用することが重要であることを示唆しているといえる。

表5-13 ノバテル受信機L2帯最低信号強度25dBHzのRTKの結果(トータル測位回数は10800回)

閾値(単位:dB)	測位回数	測位率	FIX解の回数	FIX率	ミスFIXの回数	ミスFIX率
L1:5、L2:10	8795	81.44%	3429	38.99%	16	0.4%
L1:6、L2:11	8845	81.90%	3398	38.42%	20	0.5%
L1:7、L2:12	8891	82.32%	3273	36.81%	22	0.5%
L1:5	8831	81.77%	3434	38.89%	16	0.4%
L1:6	8875	82.18%	3400	38.31%	20	0.5%
L1:7	8909	82.49%	3271	36.72%	22	0.5%

表5-14 ノバテル受信機L2帯最低信号強度30dBHzのRTKの結果(トータル測位回数は10800回)

閾値(単位:dB)	測位回数	測位率	FIX解の回数	FIX率	ミスFIXの回数	ミスFIX率
L1:5、L2:10	8779	81.29%	3483	39.67%	8	0.2%
L1:6、L2:11	8839	81.84%	3512	39.73%	10	0.3%

L1:7、L2:12	8891	82.32%	3448	38.78%	11	0.3%
L1:5	8816	81.63%	3483	39.51%	8	0.2%
L1:6	8858	82.02%	3512	39.65%	10	0.3%
L1:7	8903	82.44%	3448	38.73%	11	0.3%

## 24時間の静止実験

24時間の静止実験では、JAVAD受信機を採用した。結果は24時間1Hzで86400のエボックのうち測位できる回数は68632回、測位率は79.43%である。FIX解の回数は37059回、FIX率は53.99%であった。ミスFIXの回数は185回、ミスFIX率は0.5%である。

2011年5月21日13時から2011年5月22日13時まで24時間の静止実験を行った。表5-15は24時間静止実験の閾値を変化させたときのJAVAD受信機のRTK結果である。あるべき信号強度によるチェックした結果では、各閾値の結果は同じ様にFIX率が高くなり、ミスFIX率が低くなった。

表5-15 24時間静止実験の各閾値のRTKの結果（トータル測位回数は86400回）

閾値 (単位: dB)	測位回数	測位率	FIX 解の 回数	FIX 率	ミス FIX の回数	ミス FIX 率
L1:5	68040	78.75%	37073	54.49%	148	0.3%
L1:6	68408	79.18%	37170	54.34%	148	0.3%
L1:7	68590	79.39%	37235	54.29%	149	0.3%
L1:8	68620	79.42%	37251	54.29%	149	0.3%
L1:5、L2:10	66649	77.14%	36535	54.82%	131	0.3%
L1:6、L2:11	67280	77.87%	36908	54.86%	133	0.3%
L1:7、L2:12	68000	78.70%	37171	54.66%	147	0.3%
L1:8、L2:13	68360	79.12%	37235	54.47%	149	0.3%

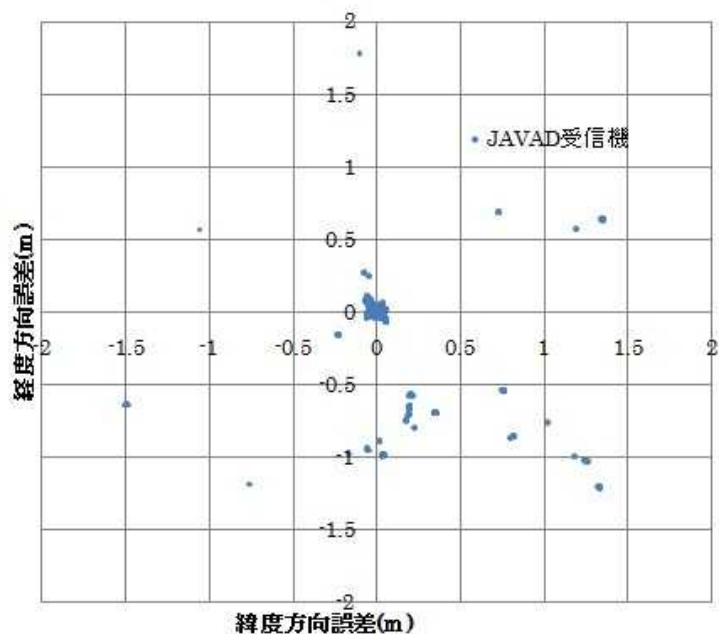


図5-15 24時間静止実験の誤差（閾値L1:5dB、L2:10dB）

図5-15はあるべき信号強度の閾値L1:5dB、L2:10dBの結果の誤差の図である。

ミスFIXの時間帯を抽出して、原因を分析するために天空情報と衛星配置の画面を利用する。GPS時刻591761秒の天空情報を図5-16に示した。利用衛星は2番、5番、10番、26番である。4番衛星はあるべき信号強度より排除された。

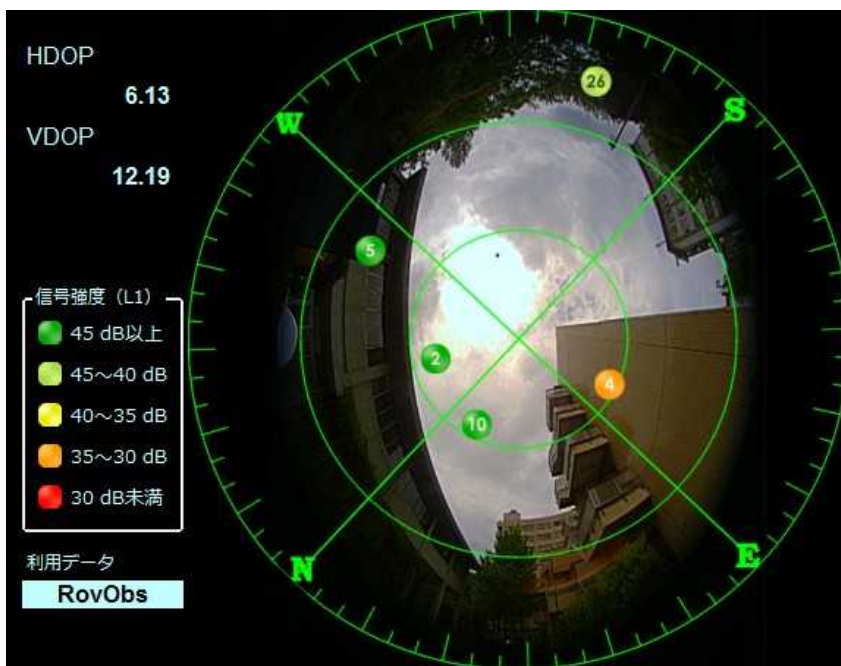






図5-16 GPS時刻591761秒の天空情報と衛星配置



表 5-16 GPS時刻：591761秒の JAVAD 受信機取得した各衛星の信号強度

衛星番号	L1-C/A 信号強度 (dBHz)	L1-C/A あるべき信号強度 (dBHz)	L2P(Y)信号強度 (dBHz)	L2P(Y)あるべき信号強度 (dBHz)
26	42.5	35.08	24.5	24.41
2	52.75	43.45	45.5	31.61
4	34.25	43.16	0	30.98
10	52.5	43.27	43.75	31.23
5	51.5	41.47	51.5	28.18

GPS時刻：591761秒から591929秒までの約3分間、21回のミスFIXがあった。利用衛星は2番、5番、10番、26番であった。実際の天空写真より、5番と26番が障害物の近くで回折の影響を受けた可能性が高いため、ミスFIXになった原因と考えた。それぞれの信号強度の推移を示した。

図5-17と図5-18の  はL1-C/Aの信号強度  はL2P(Y)の信号強度、 はL1-C/Aのあるべき信号強度  はL2P(Y)のあるべき信号強度である。この2つの図より、26番と5番衛星が回折の影響を受けたと考えた。5番衛星については、直接波は大きな回折を受けていない可能性が高いが、反対側の大学院棟の壁面による反射の影響が見られた（信号強度に反射波に特有の正弦波がみられた）。特に26番衛星の信号強度が低く、前もって排除することができ、ミスFIXも排除できた。26番衛星は障害物の回折の影響を受けていたと考えられる。GPS時刻：591761秒のミスFIXの原因と考えられる。

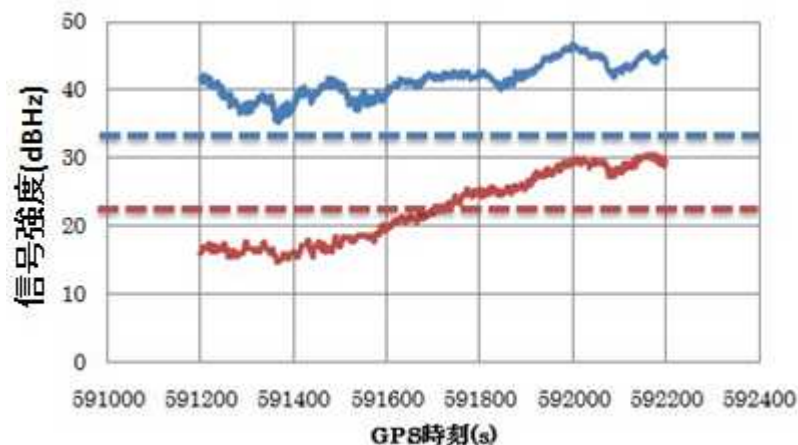


図5-17 JAVAD受信機26番衛星の信号強度

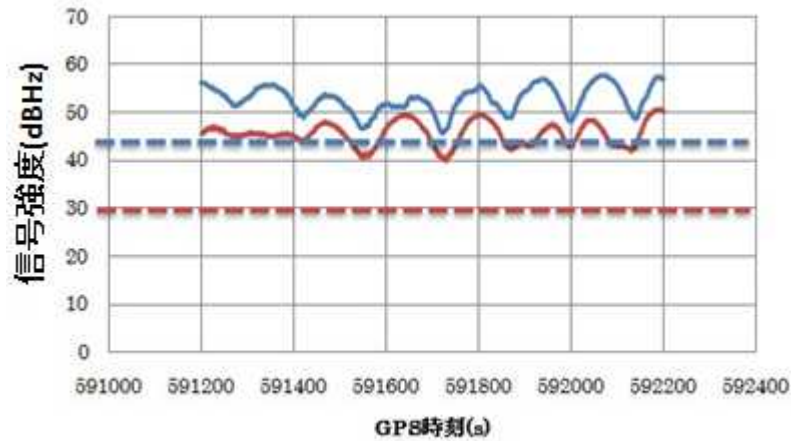


図5-18 JAVAD受信機5番衛星の信号強度

GPS時刻：591761秒から591929秒まで約3分間、21回のミスFIXが見られた。このミスFIXは、26番衛星の信号強度が、今回提案したあるべき信号強度の閾値を超える瞬間より起こっており、明らかに回折の影響によりミスFIXしたことがわかった。天空写真と同時に観測データを解析することにより、これまでわからなかった回折の原因をつきとめることが可能となった。

### 5 - 3 - 2 移動実験

#### 5 - 3 - 2 - 1 実験概要



図5-19 月島移動実験の場所

月島移動実験の場所は図5-19に示した。赤色星印は基準局の場所である。赤色の線は移動局の走行経路である。具体的な概要が表5-17に示した。2011年3月3日GPS時刻353354秒から354359秒の間では、5010回データであった。

表5-17 移動実験実験概要

実験場所	月島周辺
取得日時	2011年3月3日GPS時刻353354秒から354359秒
サンプリングレート	5Hz
基準局受信機	JAVAD受信機
移動局受信機	JAVAD受信機
場所	図5-19示す
マスク角	10度
L1-C/A最低信号強度	30 dBHz
HDOP	15以下

### 5 - 3 - 2 - 2 測位結果

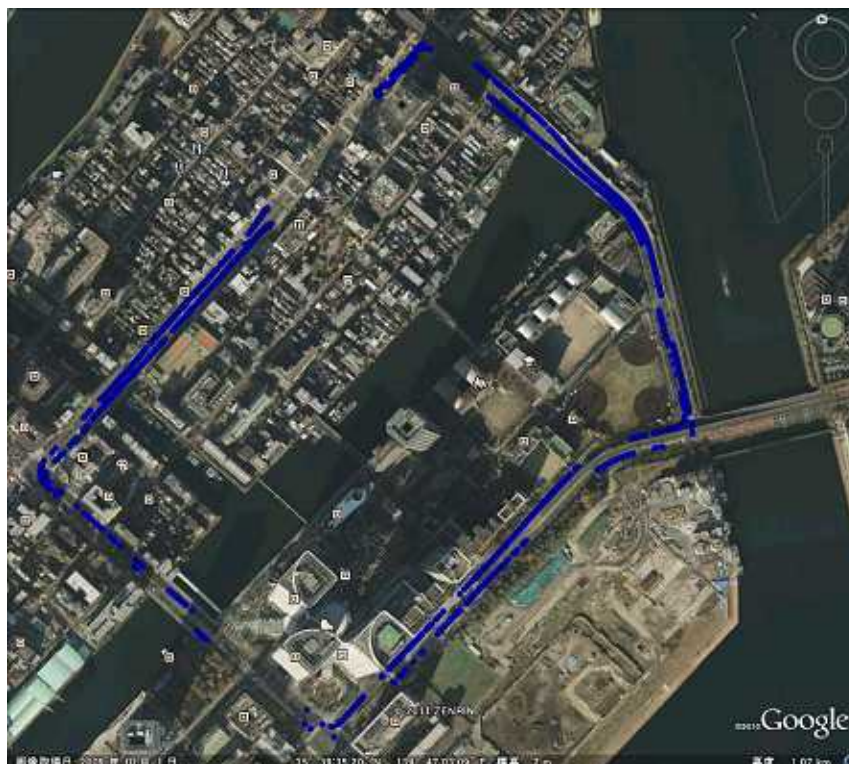


図5-20 月島周辺の移動実験RTK結果

2周波 (L1+L2) のLAMBDA法とRatioテストの組み合わせにおいて、あるべき信号強度の閾

値は、L1:8dB、L2:13dBの結果を図5-20に示した。5010のトータル測位回数の中では、測位回数は4605回、測位率は91.9%である。Ratio3以上のFIX解の回数は2691回。FIX率は58.4%である。これは各閾値の中では一番良い結果である。

表5-18 各閾値のRTKの結果（トータル測位回数は5010回）

閾値（単位: dB）	測位解の回数	測位率	FIX解の回数	FIX率	ミスFIXの回数	ミスFIX率
閾値なし	4780	95.4%	2183	45.7%	20	1.0%
L1:5、L2:10	4276	85.3%	2006	46.9%	9	0.4%
L1:6、L2:11	4327	86.4%	2499	57.8%	11	0.4%
L1:7、L2:12	4513	90.1%	2641	58.5%	11	0.4%
L1:8、L2:13	4605	91.9%	2691	58.4%	11	0.4%
L1:9、L2:14	4676	93.3%	2529	54.1%	13	0.5%
L1:10、L2:15	4720	94.2%	2348	49.7%	13	0.6%

### 5 - 3 - 2 - 3 測位結果の分析

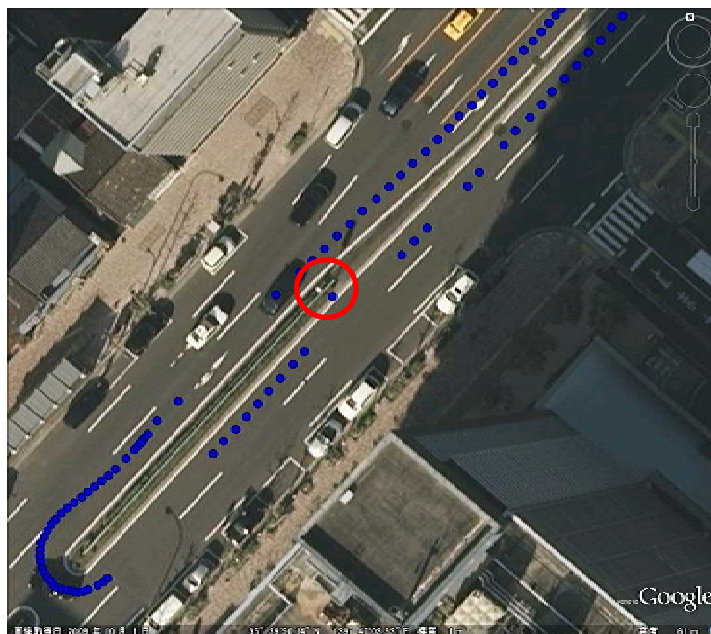


図5-21 月島周辺の移動実験RTK結果のミスFIX

図5-21は月島周辺の移動実験RTK結果の一部を拡大した図である。赤丸の中ではGPS時刻：353931秒の結果である。その時のRTK測位結果は明らかに車線からずれていた。GoogleMapの地図の精度は、月島付近で1m以内であることがわかっているため、この結果は明らかにミスFIX解によるものである。

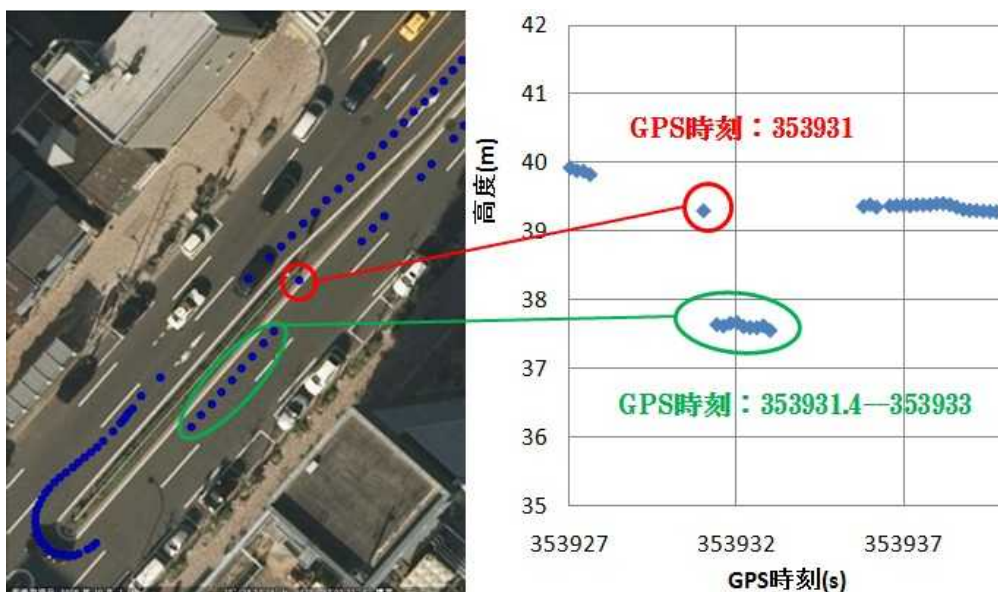


図5-22 月島周辺の移動実験RTK測位結果と高度方向結果

図5-22にGPS時刻：353931秒の車線からずれた結果を再度示した。高度方向の結果も合わせてのせている。GPS時刻：353931.4秒から353933まで、連続9回のFIX解結果が車線からずれていなかったが、高度方向が2m以上飛んでいることが分かった（この付近での正しい高度方向は39mから40mの間であることがわかっている）。よって緑丸で示した9回の測位結果もミスFIXと判断した。この10回のミスFIXの原因を調査するためにGNSS解析ソフトウェアを利用した。GPS時刻：353931秒の天空情報と衛星配置を下の図5-23に示した。GPS時刻：353931秒の各衛星の信号強度も表5-22に示した。

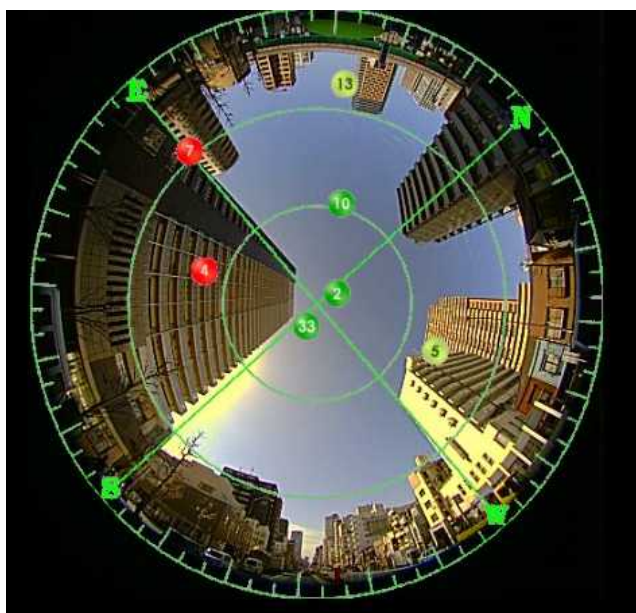






図5-23 GPS時刻：353931秒天空情報と衛星配置

表5-19 GPS時刻：353931秒各衛星信号強度

衛星番号	L1-C/A 信号強度 (dBHz)	L1-C/A あるべき信号強度 (dBHz)	L2P(Y)信号強度 (dBHz)	L2P(Y)あるべき信号強度 (dBHz)
2	47.25	39.5	39	33.9
4	26.75	37.5	35.75	29.7
13	41.5	31.5	0	25.3
7	23.75	33.1	0	26.2
5	43.75	37.3	32.25	29.2
33	47	39.5	42.5 (L2C)	33.8 (L2C)
10	46.75	37.9	34	30.5

図5-24の  はL1-C/Aの信号強度  はL2P(Y)の信号強度、  はL1-C/Aのあるべき信号強度  はL2P(Y)のあるべき信号強度である。図5-24の結果より、5番衛星が回折の影響を受けていることがわかった。

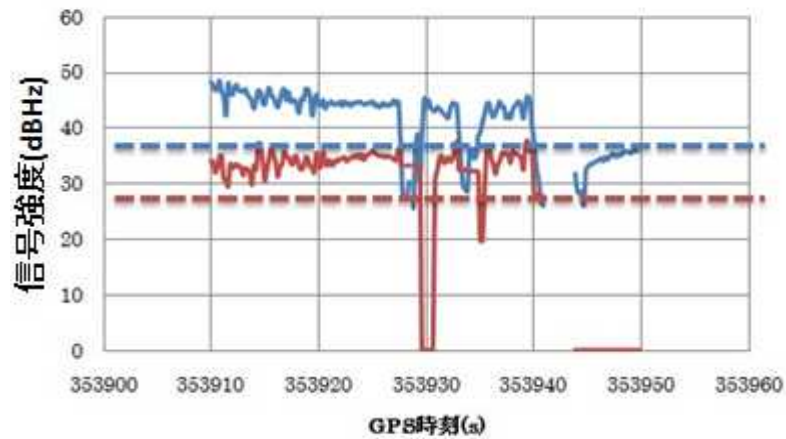


図5-24 5番衛星信号強度

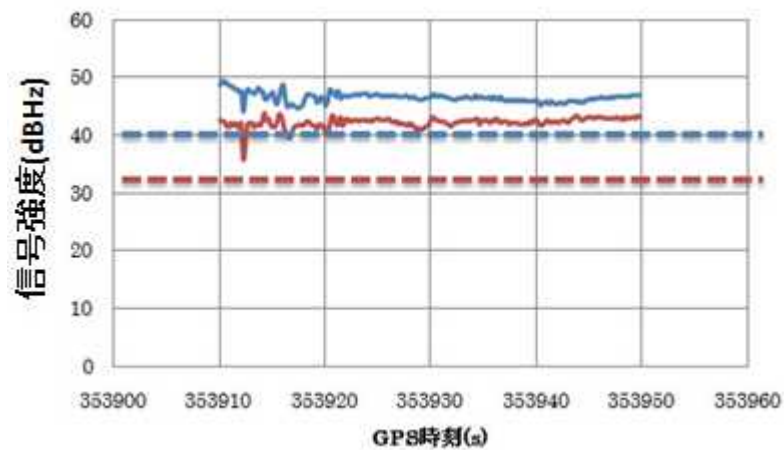


図5-25 33番（準天頂）衛星信号強度





図5-25は準天頂衛星の信号強度の図である。GPS衛星と違い、準天頂衛星は米国の軍用のL2P(Y)は送信されておらず、L2C信号を送信している。図5-25の  はL1-C/Aの信号強度、 はL2Cの信号強度、 はL1-C/Aのあるべき信号強度、 はL2Cのあるべき信号強度である。準天頂衛星は日本独自の測位衛星である。2010年9月に打ち上げられた。準天頂衛星の信号パラメータを表5-23に示した。表5-23の信号パラメータは準天頂衛星の一部であり、他に準天頂衛星固有の信号も存在する。GPSのL2P(Y)信号と比較すると、L2C信号のレベルが高いことがわかる。

表5-21はGPS時刻：353931秒から353933まで2秒間の10回のミスFIXの5番衛星信号強度を示した。5番衛星のL1-C/AとL2P(Y)信号強度は極端に低くないが、L1-C/AとL2P(Y)の信号が安定していないことがわかる。また、5番衛星が回折の影響を受けていることが天空写真よりわかるため、この衛星がミスFIXの原因と考えられる。本節の移動体の分析結果からも、天空写真を同時に利用することによる効果があることがわかった。特に衛星の回折の影響をある程度見分けることがRTKには重要であることがわかった。

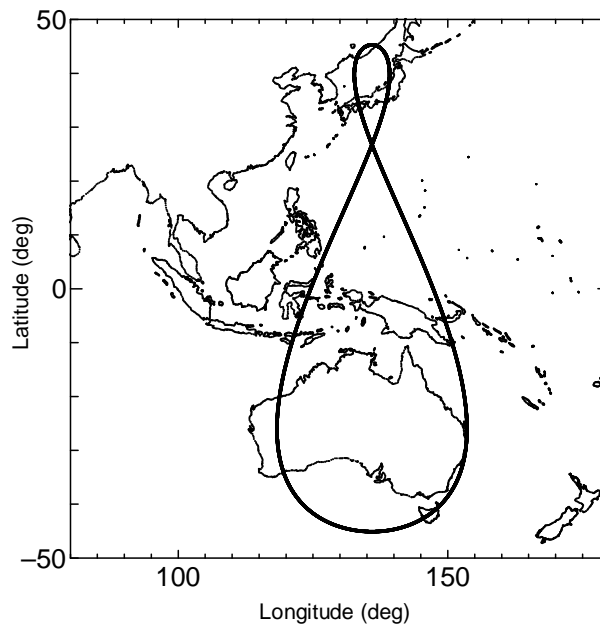


図 5-26 準天頂衛星の軌道

表 5-20 準天頂衛星の信号パラメータ

周波数帯:	L1	L2C	L5
搬送波 [MHz]	1575.42	1227.6	1227.6
チップ率 [MHz]	1.023	1.023	10.23
バンド幅[MHz]	24.0	24.0	24.0

受信電力[dBW]	-159	-160	-155
-----------	------	------	------

表5-21 5番衛星信号強度

GPS時刻	衛星番号	L1-C/A信号強度 (dBHz)	L1-C/Aあるべき信号強度 (dBHz)	L2P(Y)信号強度 (dBHz)	L2P(Y)あるべき信号強度 (dBHz)
353931	5	43.75	37.3	32.25	29.2
353931.4	5	43	37.3	35	29.2
353931.6	5	42.5	37.3	33.75	29.2
353931.8	5	42.25	37.3	34	29.2
353932	5	41.75	37.3	34.75	29.2
353932.2	5	43.25	37.3	34	29.2
353932.4	5	44.5	37.3	34.5	29.2
353932.6	5	44.25	37.3	35.75	29.2
353932.8	5	44.25	37.3	37.5	29.2
353933	5	39	37.3	32.5	29.2

#### 5 - 4 L2C 信号

GPS近代化計画の一環としてL2C信号を追加した。衛星航法システムにとって、信号（周波数）の追加は性能向上のための効果的な方法である。GPSブロックIIR-M衛星とIIF衛星はL2周波数にL2C信号を追加した。信号の追加により、電離層遅延補正の改善やアンビギュイティ決定の高速化が期待できる。L2Cコードは、L2P(Y)コードよりも送信電力が強化されている（-164.5dBW -160dBW）。受信感度の向上と考えた。さらに、軍用のL2P(Y)信号を使わずに2周波数を利用できるため、民間でも2周波が利用できるようになる。L2P(Y)信号を受信する受信機は、米国特許の関係で高価である。GPSでは第二民間周波数信号（L2C）を追加し、ブロックIIR-Mと F衛星で追加された。2周波受信機の感度向上、低価格化が期待できる。表5-22と5-23にGPS衛星の概要を分けて示した[2]。

表5-22 各ブロックのGPS衛星の規格概要

GPSの各型衛星	/ A	R	R-M	F
測位信号	L1C/A,L1L2P(Y)	L1C/A,L1L2P(Y)	L1C/A,L1L2P(Y)	L1C/A,L1L2P(Y)
新信号	無	無	L1 L2 M ,L2C	L1 L2 M ,L2C,L5
最初の打上	89年4月14日	97年6月22日	05年9月22日	10年5月14日
打上数	28	21	8	1
重量 ( lbs )	2175	2370	2370	3439
太陽電池 ( W )	700	1136	1136	2400



設計寿命(年)	7.5	10	10	12
---------	-----	----	----	----

表 5-23 各 GPS 衛星の概要

軌道	SVN	PRN	ブロック	CLOCK	軌道	SVN	PRN	ブロック	CLOCK
A-1	39	9	IIA	CS	D-2	46	11	IIR	RB
A-2	52	31	IIR-M	RB	D-3	45	21	IIR	RB
A-3	38	8	IIA	CS	D-4	34	4	IIA	RB
A-4	48	7	IIR-M	RB	D-5	24	24	IIA	CS
A-5	27	27	IIA	RB	D-6	63	1	IIR-M	RB
B-1	56	16	IIR	RB	E-1	51	20	IIR	RB
B-2	62	25	IIF	RB	E-2	47	22	IIR	RB
B-2	30	30	IIA	CS	E-4	54	18	IIR	RB
B-3	44	28	IIR	RB	E-5	23	32	IIA	RB
B-4	58	12	IIR-M	RB	E-6	50	5	IIR-M	RB
C-1	57	29	IIR-M	RB	E-6	40	10	IIA	CS
C-2	33	3	IIA	CS	F-1	41	14	IIR	RB
C-3	59	19	IIR	RB	F-2	55	15	IIR-M	RB
C-4	53	17	IIR-M	RB	F-3	43	13	IIR	RB
C-6	36	6	IIA	RB	F-4	60	23	IIR	RB
D-1	61	2	IIR	RB	F-5	26	26	IIA	RB

2005年09月から R-M と F 衛星が打ち上げられており、2011年の8月現在で GPS の L2C 信号を送信する衛星は9機であり、残りの GPS 衛星からは L2P(Y)信号を送信されている。表 5-26 より、現在 R-M 衛星の番号は1番、5番、7番、12番、15番、17番、29番と31番である。F 衛星の番号は25番である。R-M と F 衛星は L2C 信号を送信している。

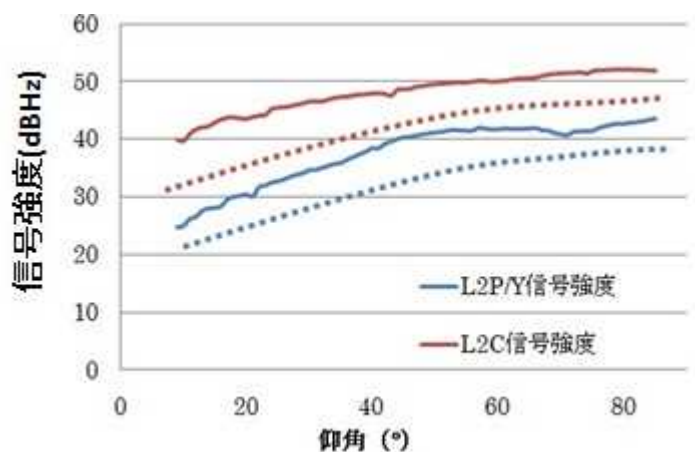


図 5-27 L2C 信号と L2P(Y)信号の平均信号強度

JAVAD 受信機を取得した L2P(Y)信号と L2C 信号の各仰角の平均信号強度は図 5-27 に示した。L2P(Y)信号の平均信号強度は全ての GPS 衛星の L2P(Y)信号強度を利用して計算した。L2C 信号の平均信号強度は 8 機の R-M 衛星と 1 機の F 衛星の L2C 信号強度を使用して計算した。L2C 信号の信号強度が高いことが明らかである。また、L2C 信号の搬送波位相は L2P(Y)信号より 1/4 周期が遅れて送信されていることが知られている。

L2C 信号と L2P(Y)信号を比較するために、2 つの静止実験を行った。

2011 年 7 月 24 日東京海洋大学構内の第 4 実験棟の屋上で 24 時間 1Hz のデータを取得した。同じ JAVAD アンテナを使い、2 つの JAVAD 受信機に分岐し同時にデータを取得した。この場合、マルチパス誤差を完全に除去することができる。

2011 年 8 月 3 日東京海洋大学構内の第 4 実験棟の屋上で 24 時間 1Hz のデータを取得した。約 30m 離れた 2 つの JAVAD アンテナを使って、2 つの JAVAD 受信機で同時にデータを取得した。この場合、マルチパス誤差は 2 つのアンテナで独立しており除去することはできない。

同じ JAVAD アンテナを使用した実験では、2 つの受信機は基準局と移動局として、RTK の結果を計算した。図 5-28 は 2011 年 7 月 24 日の衛星数の概要である。

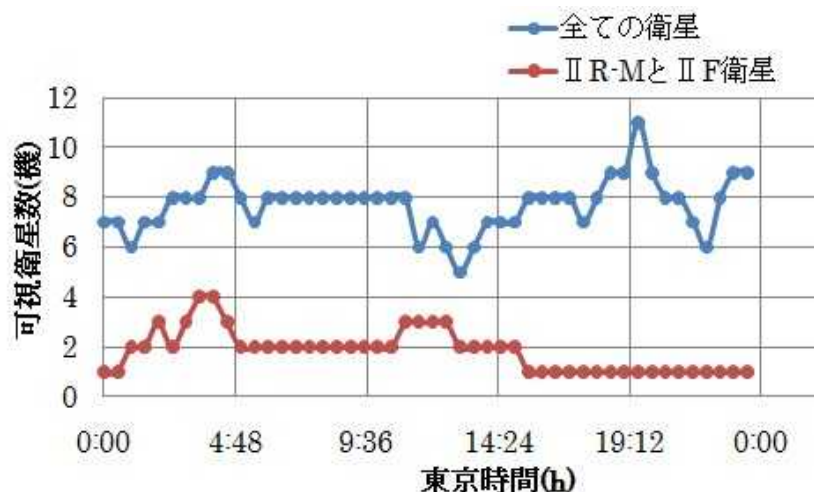


図5-28 2011年7月24日の24時間マスク角15°の可視衛星数

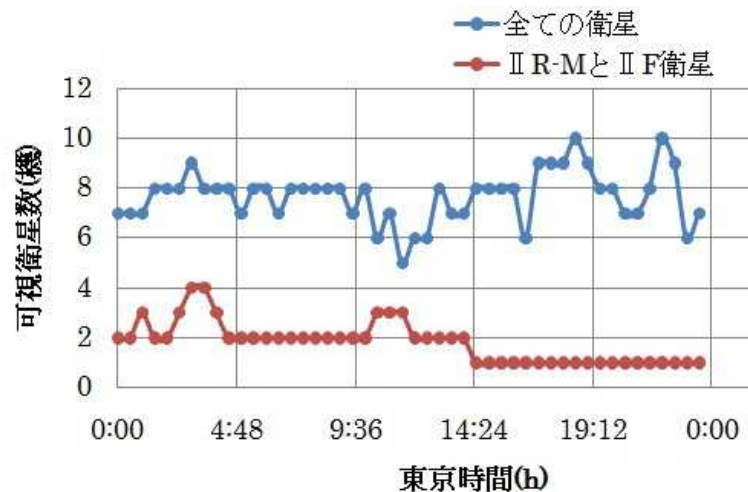


図5-29 2011年8月3日24時間マスク角15°の可視衛星数

#### の結果

基準局と移動局で、全てのGPS衛星でL2P(Y)信号を使用した結果は86400エポックの中でFIX解の回数は79709回、FIX率は92.3%である。ミスFIXはなかった。

基準局と移動局は8機 R-M衛星と1機 F衛星のL2C信号を使用し、残りのGPS衛星はL2P(Y)信号を利用して、計算した結果は86400エポックの中でFIX解の回数は79190回、FIX率は91.7%である。ミスFIXはなかった。

基準局は全てのGPS衛星がL2P(Y)信号を使用した。移動局は8機 R-M衛星と1機 F衛星のL2C信号を使用し、残りのGPS衛星はL2P(Y)信号を利用して、RTKの結果を計算した。1回もFIXしなかった。この原因は位相がずれているためである。

移動局のL2C信号の搬送波位相を1/4 プラスして、RTKを再計算した。86400エポックの中でFIX解の回数は78371回、FIX率は90.7%である。ミスFIXはなかった。

#### の結果

2つのアンテナを使用した実験では、2つのアンテナが約30m離れており、2つの受信機は基準局と移動局として、RTKの結果を計算した。図5-29は2011年8月3日の衛星配置である。

2011年8月3日の2つのJAVADアンテナを使用した実験では、基準局と移動局は全てのGPS衛星がL2P(Y)信号を使用した結果は86400エポックの中でFIX解の回数は84527回、FIX率は97.8%である。ミスFIXはなかった。

基準局と移動局は8機 R-M衛星と1機 F衛星のL2C信号を使用し、残りのGPS衛星はL2P(Y)信号を利用して、計算した結果は86400エポックの中でFIX解の回数は83961回、FIX率は97.1%である。ミスFIXはなかった。

移動局のL2C信号の搬送波位相に1/4 をプラスして、RTKの結果を計算した。86400エポッ

クの中でFIX解の回数は83960回、FIX率は97.1%である。ミスFIXはなかった。

2つの実験より、L2P(Y)信号を利用する場合と、L2C信号をL2P(Y)の代わりに利用する場合は、FIX率はほぼ同じであり有意な差は見られなかった。

## 5 - 5 L2C 信号を用いた RTK 結果

本章の5-3で紹介した月島周辺移動実験の実験結果を表5-24に再度示した。各閾値の結果においてGPS時刻353931秒から353933秒までの10回のミスFIXを排除できなかった。

表5-24 月島周辺各閾値の結果（トータル測位回数は5010回）

閾値（単位: dB）	測位解の回数	測位率	FIX解の回数	FIX率	ミスFIXの回数	ミスFIX率
閾値なし	4780	95.4%	2183	45.7%	20	1.0%
L1:5、L2:10	4276	85.3%	2006	46.9%	9	0.4%
L1:6、L2:11	4327	86.4%	2499	57.8%	11	0.4%
L1:7、L2:12	4513	90.1%	2641	58.5%	11	0.4%
L1:8、L2:13	4605	91.9%	2691	58.4%	11	0.4%
L1:9、L2:14	4676	93.3%	2529	54.1%	13	0.5%
L1:10、L2:15	4720	94.2%	2348	49.7%	13	0.6%

5番衛星は R-M衛星である。L2C信号が送信されている。信号強度の高いL2C信号を用いたほうが有利と考え、実験を行った。全てのGPS R-M衛星と F衛星はL2P(Y)ではなく、L2C信号を使用し、計算した。各閾値のL2C信号を用いた結果は表5-25に示した。

表5-25 L2C信号利用した各閾値の結果（トータル測位回数は5010回）

閾値（単位:dB）	測位回数	測位率	FIX解の回数	FIX率	ミスFIXの回数	ミスFIX率
L1:5、L2:10	4174	83.3%	1969	47.2%	2	0.1%
L1:6、L2:11	4549	90.8%	2407	52.9%	3	0.1%
L1:7、L2:12	4682	93.5%	2600	55.4%	3	0.1%
L1:8、L2:13	4763	95.1%	2663	55.8%	3	0.1%
L1:9、L2:14	4815	96.1%	2478	51.4%	5	0.2%
L1:10、L2:15	4845	96.7%	2280	47.1%	5	0.2%

表 5-24 と表 5-25 を比較して、同じ閾値では、L2C 信号を用いた方の FIX 解の回数が少なくなったが、ミス FIX の回数も少なくなった。GPS 衛星が回折の影響を受けた時、L2C 信号と L2P(Y)信号は同様に影響を受けることが天空写真と観測データよりわかった。L2C 信号と L2P(Y)信号の結果は FIX 率と FIX 解の回数においてほぼ同じである。L2C 信号の信号強度は高いが、マルチパスの影響を受けた衛星を排除するという意味においては、L2P(Y)を用いても同じであるといえる。ただし、ミス FIX の回数が減少していることは注目すべき点である。

## 5 - 6 まとめ

2 つの静止実験と 1 つの移動実験を行い、GNSS 解析ソフトウェアを利用し、ミス FIX の原因を調べた。静止実験では、測位場所を東京海洋大学構内とし、上空環境が厳しい場所を選択した。図 5-30 は取得場所の天空写真である。左側の図書館と右側の二号館及び第 4 実験棟は一部の衛星を遮蔽することがわかる。



図 5-30 東京海洋大学構内の静止実験の天空情報

建物の回折の影響を受けた衛星を排除するために、あるべき信号強度と最低利用信号強度、2 つの条件を提案した。なお、ノバテル受信機の L2P(Y)の信号強度が JAVAD 受信機より高く、L1-C/A については同程度であった。よって、ノバテル受信機の L2 帯の最低信号強度は 30dBHz

とし、JAVAD 受信機は 25dBHz とした。3 時間の実験結果では、ノバテル受信機では、FIX 解の回数が最低信号強度を導入することにより、あるべき信号強度のみより 206 回増加し、ミス FIX の回数は大幅に減少した。24 時間の実験結果では、JAVAD 受信機の最低利用信号強度を 25dBHz に設定したことにより、ミス FIX の回数は大幅に減少した。

月島の移動実験では、ある時刻から 10 回のミス FIX が連続的に起こった。その時間帯の 5 番衛星の L2 帯の信号強度に着目すると、GPS 時刻 353931 秒の直前に受信されたことがわかった。L1-C/A 信号と L2P(Y)信号のあるべき信号強度による衛星チェックを行っていたが、5 番衛星の信号強度がそれほど低くなかった。しかし天空写真より、5 番衛星が回折の影響を受けた可能性が高く、ミス FIX の原因と考えた。

信号強度の高い L2C 信号が本実験にどのように有利に働くかを調査した。全ての GPS R-M 衛星と F 衛星の L2C 信号を使用して、実験データを分析した。L2C 信号と L2P(Y)信号の結果は FIX 率と FIX 解の回数が大体同じであった。ただし、L2C 信号を用いた結果のほうが、ミス FIX を減少させることができた。マルチパスの影響を受けた場合、L2P(Y)でも L2C でも同様であるため、大きな差にはならなかったのではないかと予想した。

## 第6章 結論

本研究では、東京海洋大学情報通信研究室とマイソフトで共同開発した GNSS 解析ソフトウェアを利用して、現在都市部内部の RTK、DGPS の誤差の大きい時間帯の原因を調査した。ここでは第4章と第5章で得られた結果を要約する。第1章から3章は、論文のベースとなる基礎の部分である。

2周波(L1+L2)のLAMBDA法とRatioテストの組み合わせにおいて、LAMBDA法によって求めた整数アンビギュイティを保存する手法を検討した。アンビギュイティを保存する判断を以下の3種類でチェックした。Ratio3以上;2回連続Ratio3以上;2回連続Ratio3以上、利用衛星5機以上。前記の判断を満足したFIX解の整数アンビギュイティを保存して、次のGPS時刻でも利用する。月島データの結果より、3つの方式のFIX and HOLD結果を比べると、方式3の結果は、誤差が0.5mを超える回数が少なかった。とくに1m以上の誤差は、方式1,2の結果より大幅に減少した。さらに、方式3のFIX and HOLD解の結果に加えて、GPSによる速度ベクトルを利用し、FIXできない時間帯の位置を計算した。後処理であるため、時間軸方向と時間軸逆の方向についても検討した。生成したレファレンスデータの測位率は98%となり、97.9%の結果の誤差が1m以内であった。最大誤差は3m以内であった。本月島データでは、98%のレファレンスを生成できたが、場所によっては生成できないことがある。高層ビル街でも100%に近いレファレンスを生成することが、今後の課題である。

2回の静止実験と1回の移動実験を行った。静止実験は3時間の実験と24時間の実験を行った。建物の回折影響を受ける衛星を排除するためあるべき信号強度と最低利用信号強度の2つの条件を利用した。また比較のため、2種類の受信機を利用した。JAVAD受信機とノバテル受信機を比較すると、L2P(Y)の信号強度がノバテルの受信機の方が高く、両方で閾値を別々にした。あるべき信号強度の場合では、L1-C/A信号とL2P(Y)信号のあるべき信号強度による衛星チェックを行った。海洋大の3時間の静止実験では、閾値をL1:5dB、L2:10dBとした結果が最もFIX率が高く、ミスFIXの回数も少なかった。しかしながら、20回のミスFIXが残った。さらに最低利用信号強度を利用し、さらに建物の回折による影響を排除した。ノバテル受信機のL2帯の最低信号強度は30dBHzとし、JAVAD受信機は25dBHzとした。3時間の実験では、ノバテル受信機の結果は、FIX解の回数があるべき信号強度の時より206回増加し、ミスFIXの回数は大幅減少した。24時間の静止実験でも、JAVAD受信機の結果で、FIX解の回数があるべき信号強度の時より増加し、ミスFIXの回数が減少した。月島移動実験では、L1-C/A信号とL2P(Y)信号のあるべき信号強度による衛星チェックを行った。各閾値の結果より、閾値をL1:5dB、L2:10dBとした結果が最もFIX率が高く、ミスFIXの回数も少なかった。ミスFIXの時間帯の天空写真を全て抽出し、特定の衛星が回折の影響を受けていることを確認することができた。ミスFIXの結果を排除するために、信号強度の高いL2C信号を用いて、測位結果を再計算した。L2C信号とL2P(Y)信号の結果はFIX率とFIX解の回数が、ミスFIXの回数が大幅

に減少した。L2C 信号の信号強度が高く、マルチパスの影響を受けた衛星の排除、ミス FIX の回数を減少させるために有意と考えた。ただし、更なる実験検証が必要である。

本研究で開発した GNSS 解析ソフトウェアを利用することにより、これまでわからなかったミス FIX の大きな原因として回折の影響があることがわかった。さらにこれまで L1 帯だけで信号品質をチェックしていたが、L2 帯も信号品質チェックに利用するメリットについて検証することができた。



## 参考文献

- [1] 安田 明生「GPS シンポジウム2010」、社団法人 日本航海学会GPS研究会、pp105-107、2010
- [2] 土屋 淳、辻 宏道「GNSS 測定の基礎」、日本測量協会、pp252-253、2008
- [3] Pratap Misra and Per Enge 原著 日本航海学会GPS研究会 訳「精説GPS：基本概念・測位原理・信号と受信機」、正陽文庫、pp259-272、2004年12月
- [4] 鈴木崇史、久保信明、安田明生、「GPS測位におけるマルチパス誤差の評価」第20回センシングフォーラム資料、pp.129- 134、2003
- [5] 岡本 伸也「長其線DGPS 測位および干渉測位の精度に関する研究」、東京海洋大学修士論文、pp25-31、2003
- [6] 鈴木 崇史「GPS測位におけるマルチパス波の影響とその低減に関する研究」、東京海洋大学修士論文、pp47-49、2004
- [7] POS/LV ( <http://www.applanix.com/products/land/pos-lv.html> )
- [8] 高須 知二「測位衛星による高精度測位技術の開発研究」  
<http://gpspp.sakura.ne.jp/index.shtml>
- [9] Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces 「GLOBAL POSITIONING SYSTEM WING (GPSW) SYSTEMS ENGINEERING & INTEGRATION」、pp101-102、2010
- [10] 「OEMV Family Firmware Reference Manual Rev 8」、pp358-362、2010
- [11] Frank van Diggelen 「A-GPS:Assisted GPS , GNSS , and SBAS」 ARTECH HOUSE、pp138-139、2009