

平成 2 2 年度

卒業論文

# 衛星測位における天空写真の利用について

学科名 海事システム工学科  
(情報システムコース)

学籍番号 0 7 2 1 0 0 8

氏 名 安藤 隆浩

指導教官 久保 信明

## 目次

第1章 序論	
1.1 はじめに	3
1.2 GPSの概要	3
1.3 準天頂衛星の概要	4
1.4 測位衛星による計測原理	5
1.4.1 GNSS/GPS測位による計測原理	5
1.4.2 GPSによる単独測位	5
1.4.3 誤差要因	7
1.5 本研究の目的	7
第2章 天空率を求めるプロセス	
2.1 天空率の算出方法	9
2.2 画像処理	9
2.2.1 2値化	10
2.2.2 モノクローム画像への変換	11
2.2.3 RGB値と輝度	11
2.2.4 BMPファイル	12
2.3 閾値の決定	13
2.3.1 閾値の決定方法の種類	13
2.3.2 判別分析法	14
2.4 天候による閾値への影響	15
第3章 都市部における準天頂衛星の利便	
3.1 天空率の検証	19
3.2 各区域での平均天空率	21
3.3 準天頂衛星のデータ	24
3.3.1 国道を走行時に受信した準天頂衛星のデータ	24
3.3.2 準天頂衛星のアルマナック	27
3.4 マスク角内の天空率	28
第4章 測位精度の考察	
4.1 天空写真と衛星位置からの検証	30
4.2 新たな残差による検証方法	39
4.3 測位結果の修正	42

第5章 まとめ

5.1 結論	43
5.2 今後の課題	43

謝辞

参考文献

## 第1章 序論

### 1.1 はじめに

現在、我々が利用している測位衛星は米国の GPS だが、他にもロシアのグロナス (GLONASS) や欧州のガリレオ (GALILEO) の運用・計画があり、さらには日本でも準天頂衛星があるが、近い将来にはこれらの利用も可能になる。この他にも中国では北斗 (Beidou) という名の測位衛星が計画中であるが、これの完成時期は不明で情報が極めて限定されている。最近はこれらの測位衛星系を総称して、GNSS (Global Navigation Satellite System、汎地球測位航法衛星システム) と呼ばれている。

### 1.2 GPS の概要

GPS (Global Positioning System、全地球測位システム) とは、米国が開発した人工衛星による位置決定のためのシステムである。1973 年ころから開発が始動した GPS は、第一世代の人工衛星システム NNSS (Navy Navigation Satellite System) の改良発展型と見ることできる。もともとは米国と同盟国の軍事用であったが、現在は一般市民への位置情報提供システムの重要な社会基盤となっている。

GPS 衛星は、高度 2 万 km に 6 つの軌道を描く計 24 個 (1 軌道に 4 基) の GPS 衛星が配置されている。(図 1.1)

軌道上には予備衛星が 1 基配置できるようになっており、現在 (2009 年 12 月) の運用数は 31 基となっている。各衛星は約 11 時間 58 分 2 秒 (およそ恒星日の半分) で軌道を 1 週し、1 年で同じ配置に戻るよう制御されているといわれている。実際には衛星軌道は随時変更されており完全には決定していない。衛星の軌道は 2m の範囲で地上のモニター局で管理されており、高い精度の衛星軌道情報 (エフェメリス : Ephemeris) を 30 秒周期で対応した衛星が放送している。

GPS 衛星 (ブロック / A) の設計寿命は 7.5 年とされる。各衛星は 10.23MHz の基準発信機を搭載しており、154 倍の  $L1 = 1575.42\text{MHz}$  と 120 倍の  $L2 = 1227.6\text{MHz}$  の 2 周波の右旋円偏波を全地球に向けて送信している。信号は全衛星同一の周波数を用いて C/A コードと P コードとともに衛星ごとに異なるゴールド符合と呼ばれる擬似ランダム雑音 (PRN : Pseudo Random Noise) で BPSK (Bi-Phase Shift Key ; 2 相位相変調) 変調されている。具体的に GPS 衛星からコードに載せられて送信されるデータは、エフェメリス、衛星時計の補正值、電離層補正パラメータ、全衛星の位置情報 (アルマナック : almanac) 等である。GPS 受信機は測位する際、GPS 衛星を探し、受信できる衛星からの距離を求める。衛星を探すのに必要なのがアルマナックであり、衛星の位置を求めるために必要なのがエフェメリスである。アルマナックは全衛星の大まかな軌道情報で 1 日に 1 回更新され、寿命が長い。

エフェメリスは 2 時間ごとに更新され、精度が高いが寿命が短く、最大 4 時間となっている。

また、GPS では GPS タイムというものがあり、この時刻のもと運用されている。各衛星には、セシウム原子時計と、ルビジウム原子時計が搭載されている。この原子時計は地上の官制システムで管理されており、この補正情報を軌道情報とともに衛星が放送している。GPS タイムは 1 週間で一回りするようになっておる。また世界標準時 UTC と GPS タイムの違いも管理されている。

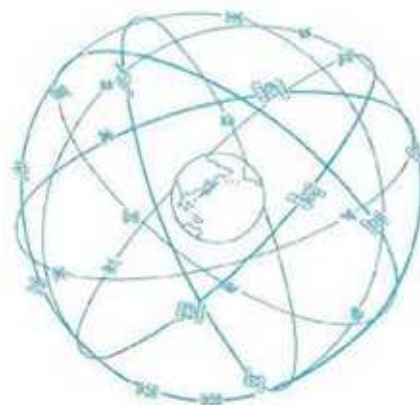


図-1.1 GPS衛星群

### 1.3 準天頂衛星の概要

準天頂衛星(QZS : Quasi-Zenith Satellites)は、公転周期が惑星の自転周期(地球なら 23 時間 56 分)に等しい対地同期軌道のうち、適切な軌道傾斜角と軌道離心率を持たせることで、特定の一地域の上空に長時間とどまる準天頂軌道(Quasi-Zenith orbit)をとる人工衛星である。通常、複数の衛星が一組となって一定軌道を周回する。

日本で受信可能な特定地域上のみ留まる 3 機の衛星によって米国の GPS を補完するために、計画が進められている準天頂衛星システム(QZSS : Quasi-Zenith Satellite System)と呼ばれるものがある。複数の人工衛星を日本上空の準天頂軌道(図 1.2)に投入することにより、常に日本上空で高仰角となるように少なくとも 1 機の衛星を滞空させることができるのである。2010 年 9 月 11 日に 1 基目である「みちびき」が打ち上げられ、2013 年にはすべてが運用状態にされる予定である。

このシステムを用いると、準天頂衛星からの電波はほぼ真上から届くようになり、ビルや山などの障害物の影響を少なくすることが可能となる。よって、GPS の機能を向上させるシステムとして期待されているのである。またここでは余談となるが、このシステムは、移動体向けの通信・放送サービスにも有効であると考えられている。



図-1.2 日本上空の準天頂軌道

#### 1.4 測位衛星による計測原理

測位衛星による測量は「衛星を使った三角測量」である。

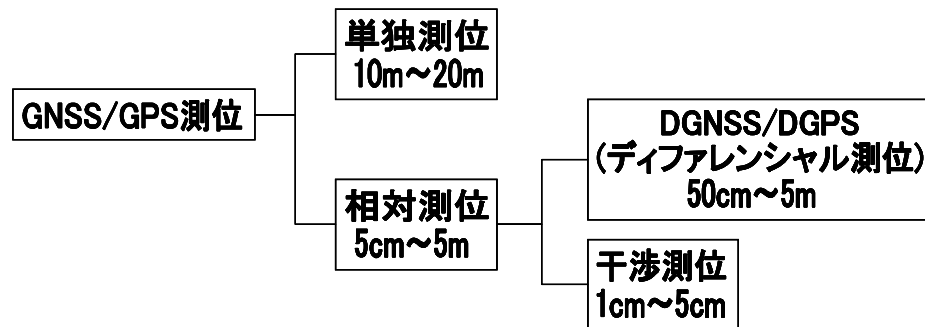
各衛星のその時々々の位置は送信電波に記述されているため既知である。また、GPS 衛星と地上受信機には時計が搭載され、衛星からの電波が受信機に達するまでに要した時間がわかり、時間  $\Delta t \times$  電波速度(光速)で、衛星と受信機間の距離が算出できる。したがって、受信機の座標(X,Y,Z)は3個の衛星から電波を受信すれば、三角測量で求めることが可能となるのである。

ただし、実際には時計にも誤差があるため未知数は(X,Y,Z,t)の4つとなり、4個の衛星から電波を受信する必要がある。

##### 1.4.1 GNSS/GPS 測位の方法

GNSS/GPS 測位の方法は、観測手法や解析方法等により数多くの方法があるが、大別すると単独測位と相対測位に分類される。また、相対測位は DGNSS、DGPS(ディファレンシャル GNSS/GPS)と干渉測位に分かれる。(表 1.1)

表-1.1 GNSS/GPS測位の方法



##### 1.4.2 GPS 衛星による単独測位

単独測位は、1つの受信機で同時に4個以上のGPS衛星からの電波を受信し、各衛星からの距離を算出して測位する方法である。

距離の算出にはGPS衛星から送信される搬送波に乗ったC/AコードやPコードを利用する。これによって算出された距離は真の距離と時計誤差の分の代数和となっており、この距離を擬似距離(pseudo range)という。擬似距離はコードによってもたらされるのである。コードの値が変化すると、搬送波の位相は反転する。GPSで使われる2種類のコードであるC/AコードとPコードは、最小時間幅はそれぞれ $1\mu s$ 、 $0.1\mu s$ である。L1はC/Aコー

ドとPコードで、L2はPコードのみで変調されている。コード利用は、衛星から受信点までの電波伝播時間の決定、搬送波の再生、受信電波の混信の解消、機密性の保持、などの特徴を有している。

GPS受信機に内蔵された時計は、衛星の原子時計と比較し、精度が数桁劣る。つまり、衛星原子時計が刻む電波の発信時刻は正確でも、受信機で測定された到達時刻には大きな誤差が含まれている。ただし、ある瞬間に同じ受信機で複数の衛星の電波を同時受信すれば、各々の測定値に含まれる時計誤差は同じ値となる。こうして、受信点の3次元位置とともに、受信機時計の誤差も未知量に加え、4つの未知数を決定するために同時に4個以上の衛星からの擬似距離を利用するのである。(図 1.3)。このとき、4個の衛星を同時か、または実質的に同時とみなせる短時間内に測定することが大切である。また、このとき求められる高さは地球中心楕円体(WGS 84等)からの高さであり、地域の水準原点からの高さ、いわゆる標高とは必ずしも整合しない。これはジオイドの起伏によるものだが、局所座標系に座標変換すれば、単独測位では目立つほど大きな違いがないのが普通である。

以上を総合すると、単独測位の精度は数m~10m程度で、車両、船舶、航空機などの航法支援には十分であるが、一般に地殻変動観測の手法としては精度が不足する。

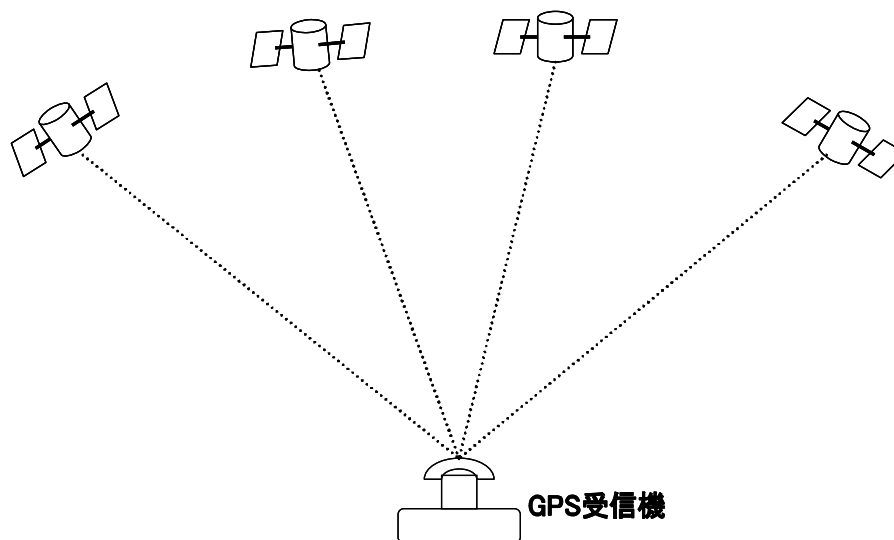


図-1.3 単独測位

\* 補足

・ C/Aコード (Coarse/Access Code)

GPS衛星のL1信号に変調されているコード。このコードは1,023の1と0がランダムな列で並んでおり、1.023MHzのチップ率で、1ミリ秒で繰り返される擬似ランダム雑音(PRN)。コードは捕捉しやすい特性を持っている。

チップ率とはチップレート(Chip Rate)ともいい、擬似雑音符号の毎秒のビット数、ビット率と同じであるが、習慣的にこの呼び方が使われている。

#### ・ P コード ( P-code )

Precise code(精密コード)または Protected code(保護されたコード)。NAVSTAR 衛星から放送されるコード、そして衛星の信号の遅れ、そして擬似距離を決めるために GPS 受信機によって使用される。

P コードは GPS の搬送波上に非常に長い(約 1,014 ビット)バイフェーズ変調した擬似ランダムのバイナリーのデータである。チップ率は 10.23MHz で、38 週間後に繰り返さる。各衛星はこのコードの独自の 1 週間の部分を使用している。

#### 1.4.3 誤差要因

GPS のデータは、様々な誤差要因によりバラつきが現れる。誤差要因を列挙すると下記のようになる。特に、斜面や山地、都市部(高層ビル街)での GPS 測位では上空視通状態が悪く計測精度が悪化することがある。

##### ・ 伝搬遅延

- 1：電離層の影響(電子密度は昼前後極大で深夜極小、夏至に高く冬至に低い)
- 2：水蒸気の影響(夏と冬、昼と夜で水蒸気量が周期的に変化)
- 3：気圧の影響(気圧変化 5mb で伝搬遅延 1cm)
- 4：衛星配置(低角度の場合)

##### ・ ノイズ

- 1：上空視通の問題(データ数が少ない)
- 2：基線長が長くなる
- 3：多重反射(マルチパス)
- 4：超高压送電線や雷
- 5：アンテナケーブルのくびれやくぼみ
- 6：ケーブルとコネクタの接続不良

#### 1.5 本研究の目的

衛星測位は都市部、特に高層ビルが多く立ち並ぶ場所では精度が悪くなることは周知の事実であり、これは空の開け具合が狭いことによる。このことから、衛星測位を行う上で空の見え方というものは非常に重要であることは想像できるであろう。そこで、都市部での空の見え方はどのようなものなのか、実際に現場へ行き、天空写真の撮影を行った。本研究では、この天空写真が衛星測位においてどのように利用できるか検討して行く。また、空の開け具合を具体的に示すために天空写真の空の部分を天空率として扱うことにする。



検討の方法として、都市部での平均天空率の算出、天空率の算出方法を応用し準天頂衛星の都市部での有効性を検証、最後に移動体の測位精度と天空率の関連性を具体的に示して

く。

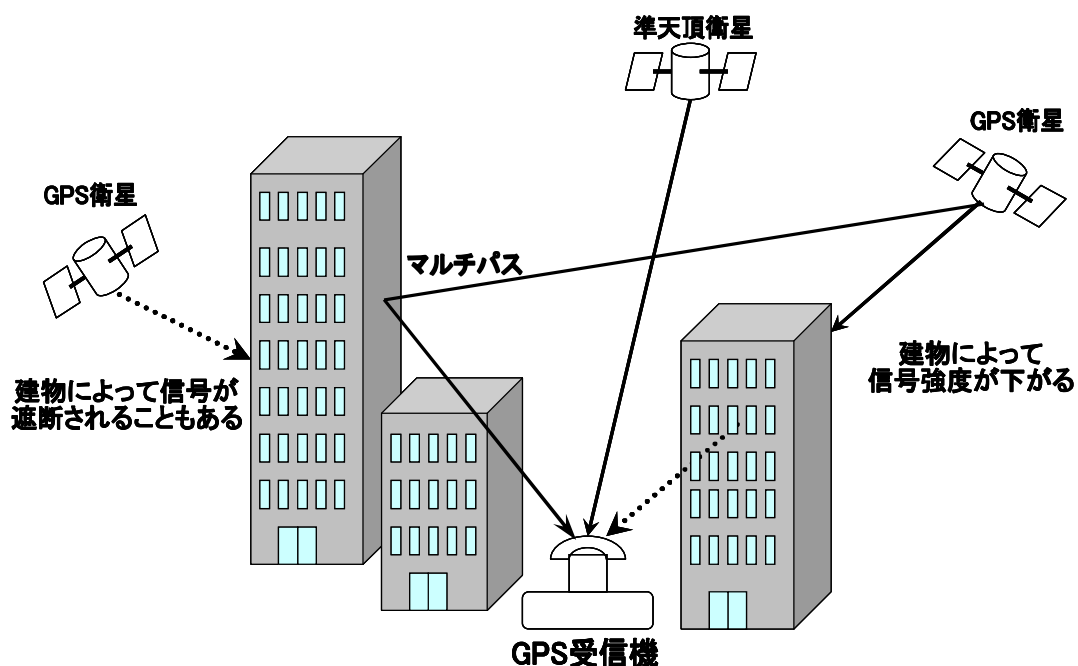


図-1.4 準天頂衛星の配置

\* 補足

・マスク角

マスク角とは、中級以上の受信機で一定の仰角に満たない衛星を使用しないために設定する角度のことである。高い測位精度を得るためには、仰角の低い衛星を利用しないほうがよい。これは仰角が低い衛星から送信される電波は、誤差の一因となる大気圏を斜めに通ることにより通過距離が長くなり、さらには地上付近の影響も受けやすいからである。

## 第2章 天空率を求めるプロセス

### 2.1 天空率の算出方法

はじめに今回、天空率を算出した方法を大まかに説明したいと思う。

まず実験に必要なものは天空写真である。今回は魚眼レンズを使い天空写真を撮影した。この天空写真をVC++のプログラムを用いて2値化を行い、2値化後の写真(図 2.1)の白の部分の割合を算出するというものである。

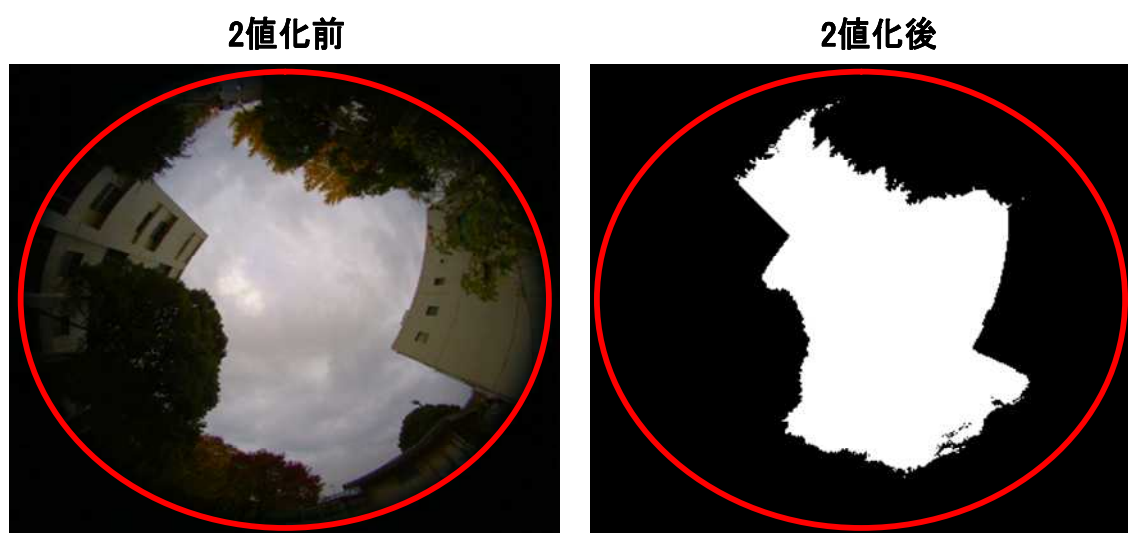


図-2.1 2値化処理

また天空率を求める計算としては下記のとおりである。

円の半径を $r$ 、白のピクセル数を $w$ としたとき、天空率 $S$ は

$$S = w / r^2 \quad (\text{式 } 2.1)$$

となる。

### 2.2 画像処理

画像処理は、電子工学的(主に情報工学的)に画像を処理して、別の画像に変形したり、画像から何らかの情報を取り出すために行われる処理全般を指す。

画像処理の流れの一例として、画像入力 - 画像変換 - 分類というものを挙げる。まず対象とする画像を入力し、この画像に対して変換処理を行う。変換の方法としてはさまざまな

ものが存在するが、基本的なものでは濃淡画像を白黒 2 値にする「2 値化」、濃度変化から物体の境界を見出す「エッジ検出」などがよく用いられる。

今回 2 値化を選んだ理由としてはエッジ検出の難しさにある。今回扱う画像は天空写真であり、エッジ検出は照明が厳密に制御された環境で単純な物体を扱うのでない限り、エッジと判断すべきピクセル間の輝度変化の大きさは固定の閾値で済む問題ではなくなり、単純には決められないのである。ゆえに、今回は 1 つの閾値で処理が可能な 2 値化を採用した。

### 2.2.1 2 値化

2 値化とは濃淡のある画像を白と黒の 2 階調(0 か 1)に変換する処理である。ある閾(しきい)値を定めて、各ピクセルの値が閾値を上回っていれば白(1)、下回っていれば黒(0)に置き換える。また、この処理を行う前にカラー画像は濃淡のある画像、すなわち無彩色(モノクローム)画像にする必要がある。(図 2.2)

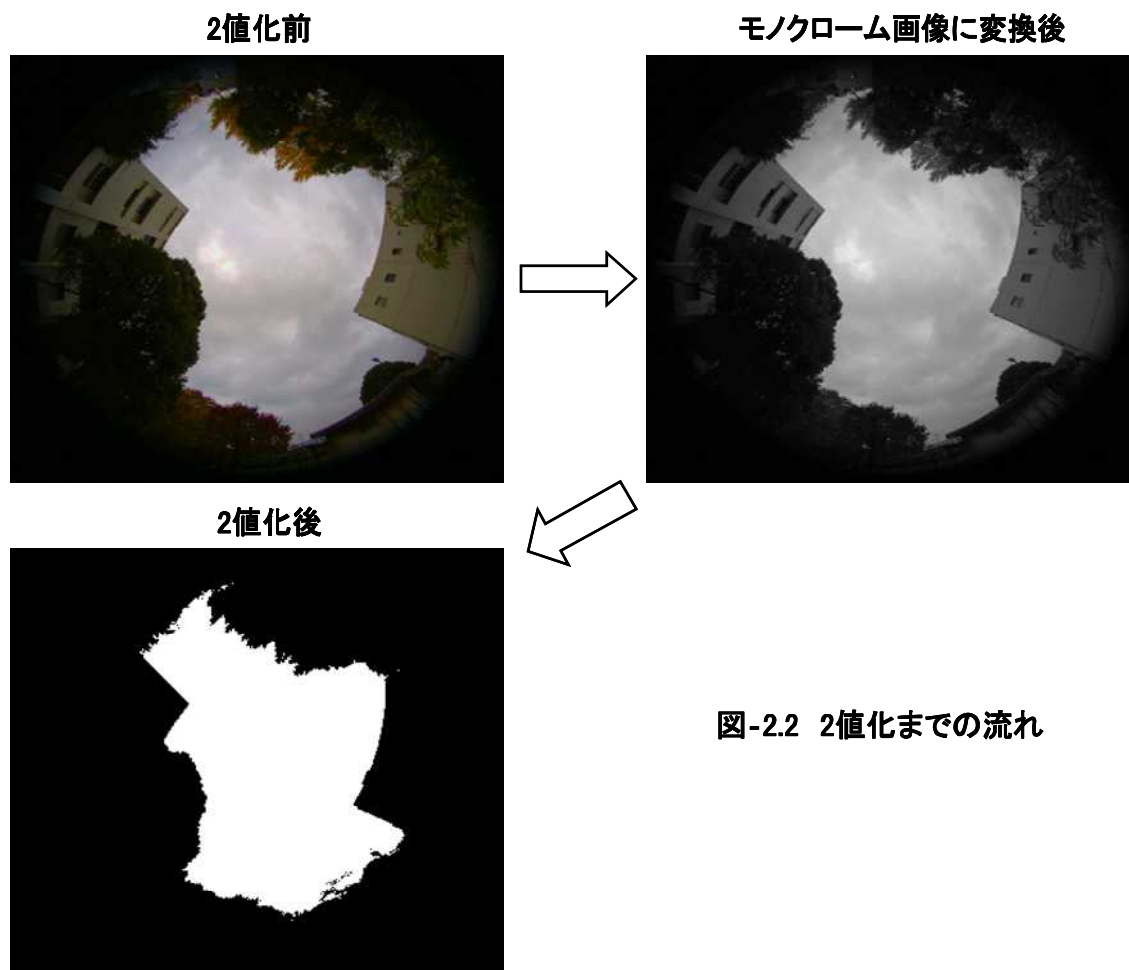


図-2.2 2値化までの流れ

## 2.2.2 モノクローム画像への変換

モノクローム(以下モノクロ)は単色のことであるが、こと映像の範疇では単色ないしその濃淡で映像を現す様式である。映像表現としては光の強弱を色のある、なしもしくは濃淡に置き換えた形態で、黒を白の上に配して映像表現することが多いことからいわゆる「白黒」がそのまま「モノクロ」と表現される。

カラー画像からモノクロ画像へ変換する際に必要となるものは、カラー画像のピクセルごとの RGB 値である。これら 3 つの R 値、G 値、B 値は有名な光の 3 原色であり、これらの平均を取ることで明るさ(輝度)を求めることができる。この輝度とは画面上に表すとモノクロである。よって、各ピクセルから抽出した RGB 値を輝度値(Y)で返すことでカラー画像をモノクロ画像へ変換できるのである。

## 2.2.3 RGB 値と輝度

R(赤)、G(緑)、B(青)を 3 次元空間の直行座標軸に割り当て、それぞれの最大の明るさを 1 とすれば、すべての R、G、B で表現可能な色は(図 2.2)に示すように幅が 1 の立方体の中に入る。この立方体が RGB 色空間である。

原点は黒(K)を表し、向かい合う頂点は白(W)を表す。この K と W を結ぶ直線がモノクロを表しており、K W 直線から離れるほど色は鮮やかになる。また、赤とシアン(Cy)、緑とマゼンタ(Mg)、青と黄(Ye)はそれぞれ K W 直線に対して対象な位置にあり、互いに補色になっている。補色どうしを加えると K W 直線上の無彩色となる。

また、輝度とはディスプレイなどの画面の明るさの度合いのことである。もっとも単純な輝度を求め方は次の式に示すような RGB 値の平均を取る方法である。

$$Y = (R + G + B) / 3 \quad (\text{式 } 2.2)$$

ただし、この式を用いて処理を行うと青色であった部分が妙に明るく感じたり、緑色だった部分が暗く感じる画像となってしまう。これは人間の視覚における色に対する感度特性が、一般的に緑色の輝度には敏感に反応し、青色の輝度にはあまり反応しないという傾向があるためである。これを考慮すると次の式となる。

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.144B \quad (\text{式 } 2.3)$$

また、輝度は色を表す独立な変数、色信号  $C_1$ 、 $C_2$  を用いて YCC 空間として表されることもある。(図 2.3)

さらに色信号  $C_1$ 、 $C_2$  は(式 2.3 より)以下の式で求められる。

$$C_1 = R - Y = 0.701R - 0.587G - 0.114B \quad (\text{式 } 2.4)$$

$$C_2 = B - Y = -0.299R - 0.587G + 0.886B \quad (\text{式 } 2.5)$$

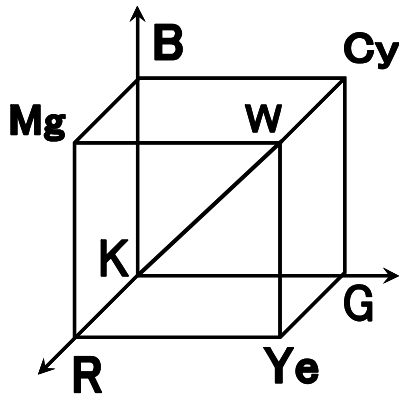


図-2.3 RGB空間

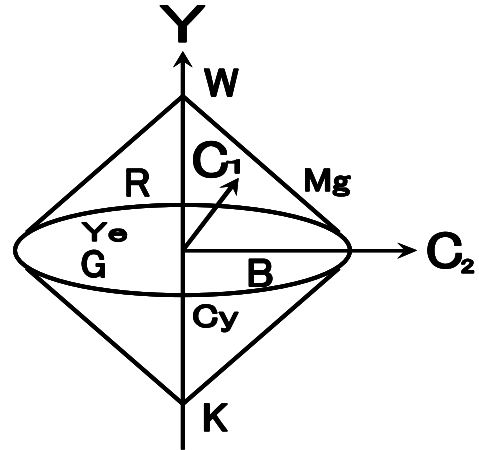


図-2.4 YCC空間

#### 2.2.4 BMP ファイル

BMP ファイルは Windows で標準的に利用されている画像ファイルの形式である。モノクロからフルカラーまでの画像を扱うことができる。非圧縮ファイルであるためデータサイズが大きくなるが、組み込みマイコンで扱う場合には JPEG や GIF のように展開のためのデータ処理が必要なく、取り扱いが簡単である。

またこのファイルは前節で述べた RGB 値が、各ピクセルごとに各値 256 階調(0~255、8 ビット=1 バイト)の構造体配列となっている。具体的に表すと(R,G,B)の配列(RGB 空間の座標)として(0,0,0)が黒(原点)であり、(255,255,255)が白、(255,0,0)が赤、(0,255,0)が緑、(0,0,255)が青となる。

データの内容としては BMP ファイルの冒頭部分にその BMP ファイルの大きさや色数に関する情報が記録されたヘッダ部分があり、そのあとにピクセル毎の色データが RGB 形式でそのまま記録されている。BMP ファイルのピクセルデータは、下の行から順に記録されている。(図 2.5)

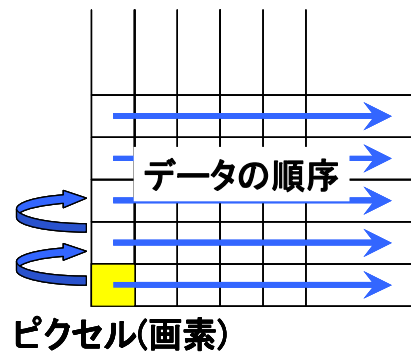


図-2.5 データの順序

## 2.3 閾値の決定

2 値化処理を行う際に決定しなければいけないのが閾値である。モノクロ画像は各ピクセル 0～255 の 256 階調 1 次元(黒～白まで)なので、0 から 255 の中から閾値を決定しなければならない。単純に考えれば中間の 127 か 128 を取ればいいのだが、実際はそううまくは行かない。天空写真の空の部分を白にしなければならないため、閾値は写真を撮影した日の天候、撮影が行われた場所の状況によって大きく変わってくる。特に写真に太陽が入り込むとその影響は著しい。

### 2.3.1 閾値の決定方法

閾値の決定には下記に列挙するように多くの方法がある。

#### 1：閾値指定法

閾値を直接設定。

#### 2：P タイル法

パターン領域の面積比率(パターンデータ数/全データ数)を指定して閾値を決定。

#### 3：モード法

双峰性を持つヒストグラムの場合、その谷間を閾値とする。2 つの峰の部分がそれぞれ背景とパターン領域に対応。

#### 4：判別分析法

2 値化した時、背景とパターン領域に関するクラス内分散とクラス間分散の分散比が最大になるように閾値を決定。この方法は、ヒストグラムに双峰性が見られない場合でも閾値を決定可能。

#### 5：動的閾値決定法

画像の部分領域ごとに閾値を変化させて 2 値化を行う。ライティングの影響により画像の濃淡にむらがある場合に利用する。動的に閾値を決定する方法として移動平均法と部分画像分割法をサポートしている。

#### 6：レベルスライス

濃度値ヒストグラムにおいて、下限閾値と上限閾値で指定された範囲をパターン領域として抽出。

#### 7：ラプラシアン・ヒストグラム法

物体の輪郭付近に存在する濃淡の変化を利用(ラプラシアン・ヒストグラム)して閾値を決定。

#### 8：微分ヒストグラム法

物体の輪郭付近に存在する濃淡の変化を利用(微分ヒストグラム)して閾値を決定。

今回使用した閾値の決定方法は4の判別分析法である。その理由としては何千枚にも及ぶ天空写真を解析する上で閾値の決定は自動化でなければいけないのは必然的である。また、ヒストグラムに双峰性が見られない場合でもこの方法が可能なることから、判別分析法を選択した。

### 2.3.2 判別分析法

判別分析法(Discriminant analysis method)は大津の2値化とも言われ、分離度(separation metrics)という値が最大となる値を閾値とする手法である。

分離度はクラス間分散(Between-class variance)とクラス内分散(Within-class variance)との比で求める事ができ、以下の様に求める。

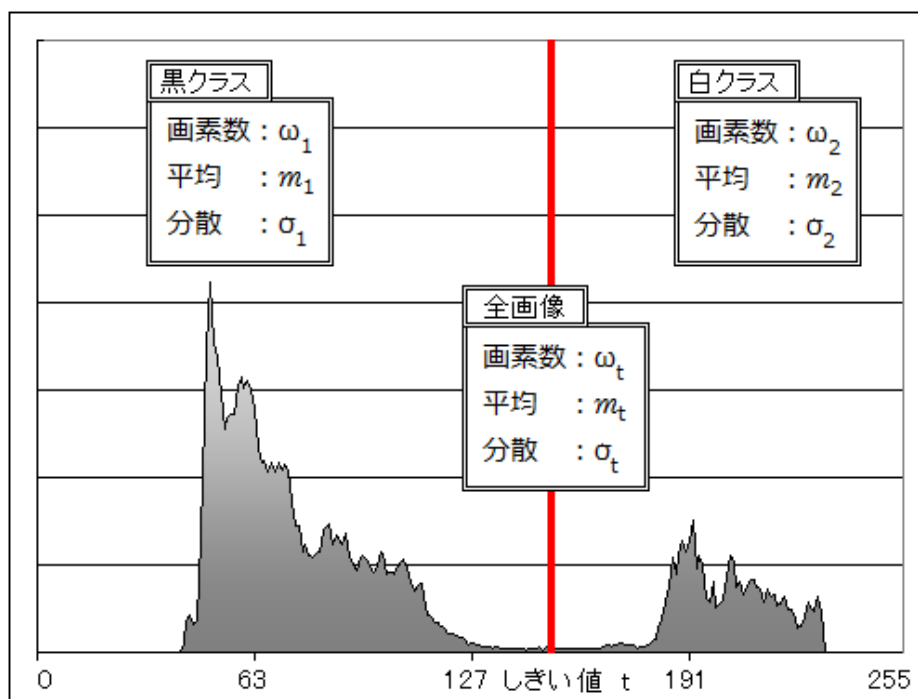


図-2.5 判別分析法

変数  $t$  (0 ~ 255) で 2 値化したとき、 $t$  よりも

輝度値が小さい側(黒クラス)の画素数を  $\omega_1$ 、平均を  $m_1$ 、分散を  $\sigma_1$

輝度値が大きい側(白クラス)の画素数を  $\omega_2$ 、平均を  $m_2$ 、分散を  $\sigma_2$

画像全体の画素数を  $\omega_t$ 、平均を  $m_t$ 、分散を  $\sigma_t$  としたときクラス内分散  $\sigma_w^2$  は

$$\sigma_w^2 = \frac{\omega_1 \sigma_1^2 + \omega_2 \sigma_2^2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (\text{式 } 2.6)$$

クラス間分散  $\sigma_b^2$  は

$$\begin{aligned}\sigma_b^2 &= \frac{\omega_1(m_1 - m_t)^2 + \omega_2(m_2 - m_t)^2}{\omega_1 + \omega_2} \\ &= \frac{\omega_1\omega_2(m_1 - m_2)^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2}\end{aligned}\quad (\text{式 2.7})$$

としてあらわす事ができる。

ここで、全分散(Total variance)  $\sigma_t^2$  は

$$\sigma_t^2 = \sigma_b^2 + \sigma_w^2 \quad (\text{式 2.8})$$

としてあらわす事ができることから、求めるクラス間分散とクラス内分散との比である分離度は

$$\frac{\sigma_b^2}{\sigma_w^2} = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_t^2 - \sigma_b^2} \quad (\text{式 2.9})$$

となり、この分離度が最大となる  $t$  が閾値となる。

#### 2.4 天候による閾値への影響

では、どれほど変化があるか実例をあげてみることにする。右の写真(図 2.6)は東京海洋大学の敷地内で撮影したものである。天気は曇りである。これを中間の値である閾値 127、判別分析法に基づいて決定された閾値 102 に設定しそれぞれ 2 値化を行うと下記のようなになる。(図 2.7)



図-2.6 天空写真





閾値 $t=127$

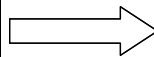


閾値 $t=102$

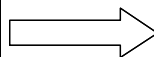
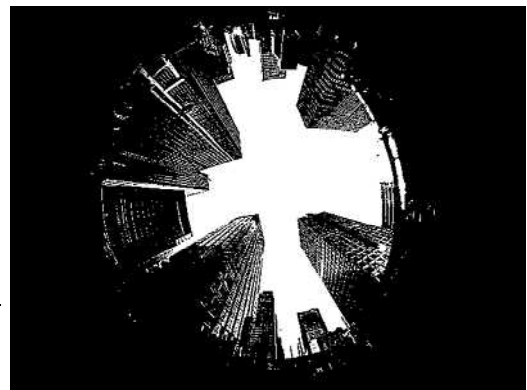
図-2.7 閾値別での2値化処理(1)

一見同じように見えるが丸の付いた部分を見てみると、空の部分にも関わらず黒くなってしまっている部分がある。

また、晴天の場合(図 2.8)を見てみると下のようになった。



閾値 $t=127$



閾値 $t=135$

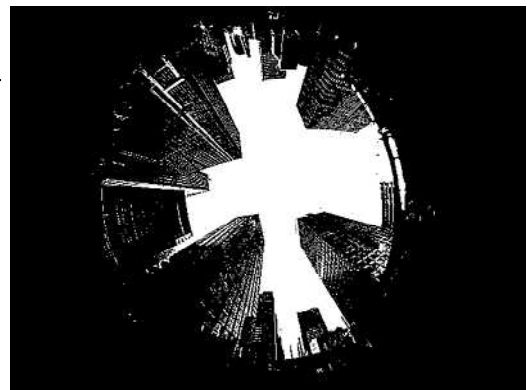


図-2.8 閾値別での2値化処理(2)

これは大きな差は見られない。閾値の差があまりないためであると考えられる。

しかし、次の写真(図 2.9)を見てみると同じ晴天でも太陽が写真内に入ることにより閾値

に大きな変化を与えてしまう。

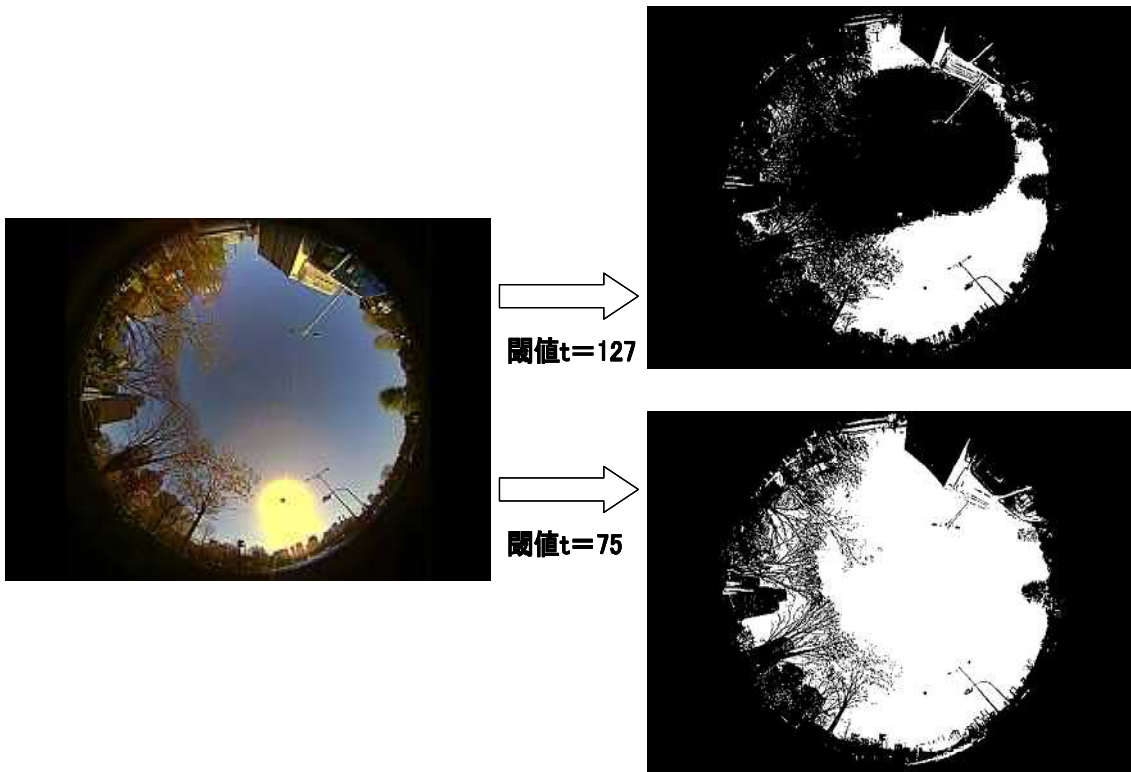


図-2.9 閾値別での2値化処理(3)

これは、カメラのスペック上仕方ないことであるが、太陽が入ることによってカメラは太陽の明るさを最大値(すなわち 255)にしようとするため、他の部分が全体的に暗くなってしまふのである。これは太陽が入ることによって色の深さが 256 階調では表現が難しくなったといえる。このとき、この写真のヒストグラムは下記のようになり(図 2.10)、他のヒストグラム(図 2.11)より明らかに分析判別法によって決定した閾値が下がっているのがわかる。

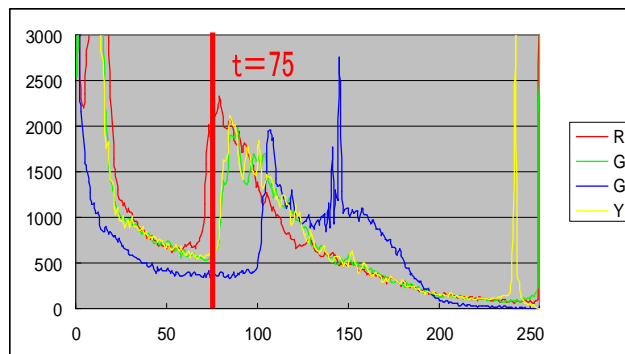


図-2.10 図-2.9のヒストグラム

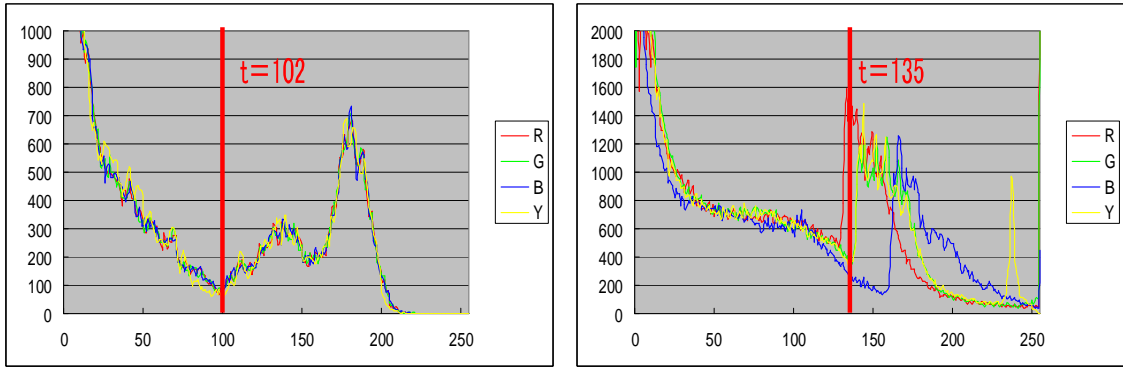


図-2.11 図-2.7、2.8のヒストグラム

以上より如何なる条件でも安定した閾値を決定できる判別分析法を用いて 2 値化を行うことにした。

### 第3章 都市部における準天頂衛星の利便

#### 3.1 プログラムで求めた天空率の精度

前章は天空率の求めるプロセスを説明してきたが、最も重要なのがこの方法によってもたらされた結果がどれほどの精度なのかということである。それを確かめるべく「SPCONV」というソフトを使い確かめてみる。このソフトは首都大東京の永田助教授が作製したフリーソフトで、魚眼レンズで撮影した画像データの射影方法を変更するプログラムである。この他にもいろいろなツールが用意されているが、今回使用したツールは天空率計測である。これは手作業で自分が指定した範囲の割合を自動で算出してくれるものである。(図 3.1)

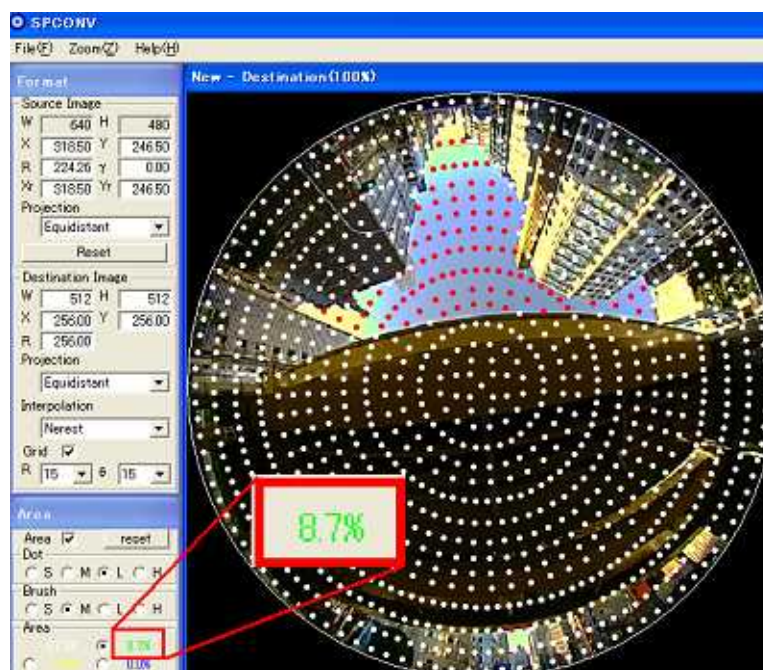


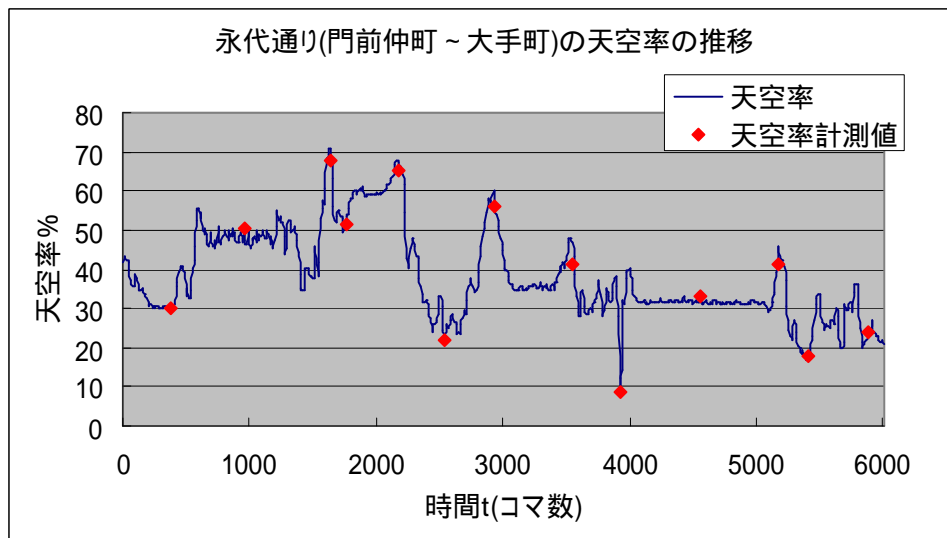
図-3.1 天空率計測

これを使って永代通り(門前仲町～大手町)のデータをまとめた表が下記のものである。  
(表 3.1)

**表-3.1 天空率と計測結果**

時間 t (コマ数)	天空率 (%)	天空率計測 (%)
380	30.23982	30.2
970	47.50816	50.2
1640	70.73496	68.0
1760	51.8964	51.6
2170	67.01253	65.0
2540	23.32282	21.7
2930	60.12987	55.9
3550	47.12754	41.3
3920	9.203652	8.7
4560	31.51497	33.2
5180	46.03688	41.4
5410	17.56399	17.8
5880	23.31118	23.9

天空率を時系列で表したグラフにこの結果をプロットしたものが次のグラフである。(図 3.2)



**図-3.2 天空率と計測結果**

数%のズレはあるが、これは枯れ木や、電柱など GPS からの電波の障害にはあまりなりえない所も細かく解析しているためであり、この程度の誤差なら十分に信頼できるといえる。

\* 補足

・ 天空写真の撮影方法

今回天空写真を取得する方法として、魚眼レンズを写真(図 3.3)のように車の上付け、天空の映像の撮影を行った。これによって取得した動画(AVI ファイル)から、「Area61 ビデオブラウザ」を使い BMP ファイルを単位時間ごとに抜き出した。「Area61 ビデオブラウザ」は、MPEG/AVI/WMV/RM ファイル等を早送り再生、スロー再生、リピート再生できる動画再生ソフトでありながら、同時に、任意のサイズで静止画を自動連写で切り出したり、動画の内容をサムネール一覧表示したりできる動画処理ソフトである。なお、「Area61 ビデオブラウザ」は 1 秒間を 15 等分の静止画像として抜き出せるので、今回は 10 コマずつ抜き出した。よって、天空写真を抜き出した単位時間(写真間の時間)は約 0.667 秒となる。



図-3.3 天空写真の撮影方法

3.2 各区域の平均天空率

今回撮影を行った場所は丸の内、新宿、月島の3箇所である。これらの撮影はそれぞれ以下の場所で行った。(図 3.4)



図-3.4 観測地(道順:濃→薄)

左上:丸の内  
 右上:月島  
 左下:新宿

このときの各箇所の天空率の推移をグラフで表したのが下記のものである。なお、グラフの赤いラインはマスク角 45 度の天空率を表している。(図 3.5)

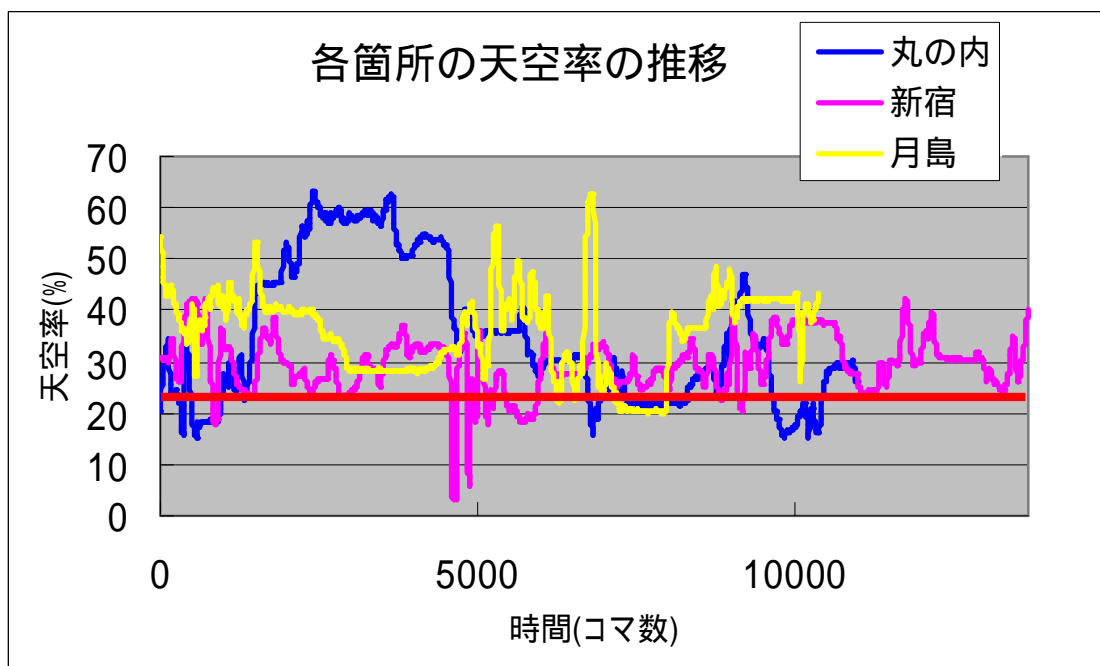


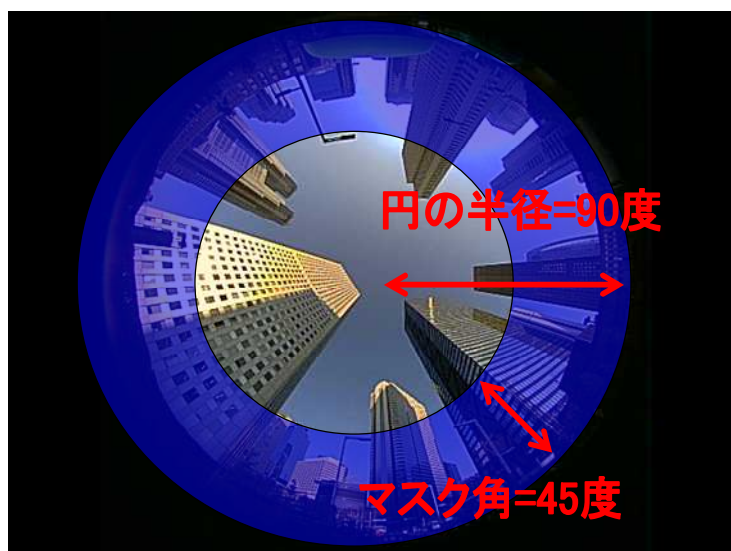
図-3.5 各箇所の天空率の推移

道のりにもよるが、3箇所の中で新宿がもっとも低い天空率で推移している。また、丸の内のほうが月島よりも天空率が良好に見えるが、これは車が停止中も含まれているため、実際は丸の内のほうが上空視通は厳しい。特に、丸の内の3000コマ付近の天空率が60%前後にあるが、これは皇居前の場所で停止していたためであり、決して空が開けているわけではない。これを踏まえ、次の表は車が停止中のときの天空率を除き、求めた各箇所の平均天空率を示したものである。(表 3.2)

**表-3.2 平均天空率**

場所	平均天空率(%)	天空率に相当するマスク角(度)
丸の内	31.57	39.43
新宿	28.96	41.57
月島	37.96	34.55

これを見ると天空率は30%前後であることから、マスク角を45度に設定すれば、よい測位が行えそうである。しかし実際は、天空写真の外側から均等にかぶさるように建物が建設されていることなどありえない。例えば下記の写真は天空率が30%前後の天空写真がある。(図 3.6)



**図-3.6 マスク角45度での天空写真(新宿)  
(天空率:33.2%)**

このようにマスク角を45度に設定したとしても都市部では多くの高層ビルが上空視通を遮るのである。そのため都市部での平均天空率はどれも厳しい値となっている。

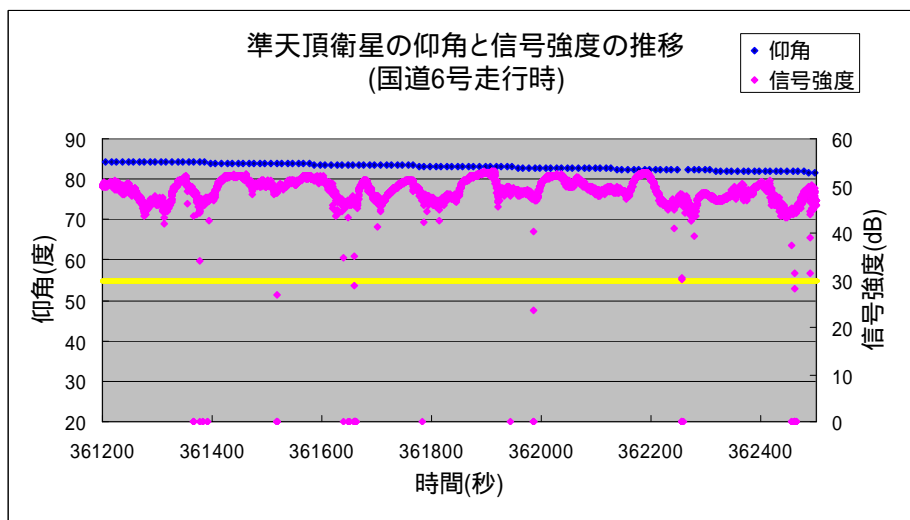
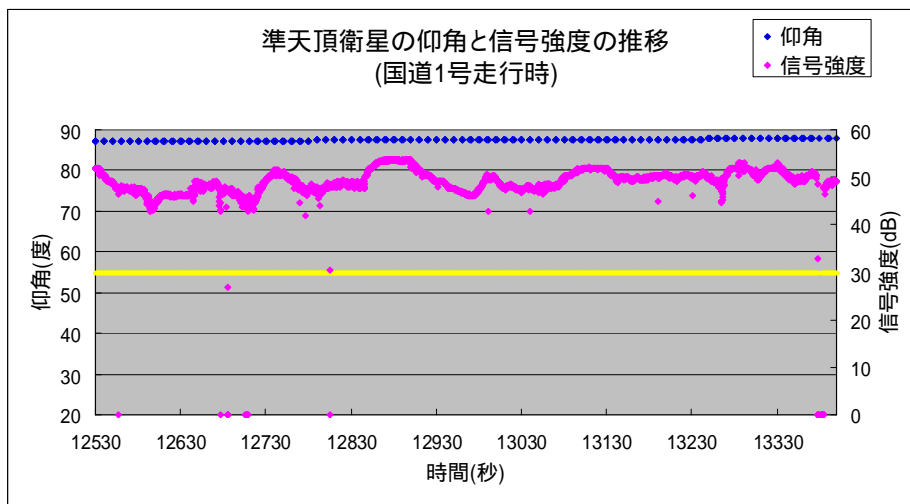


### 3.3 準天頂衛星のデータ

ここではすでに打ち上げがなされた準天頂衛星「みちびき」の実際のデータを見ていく。

#### 3.3.1 国道を走行時に受信した準天頂衛星のデータ

今回データの取得を行ったのは日本橋から、国道1号、6号、15号、17号、20号をそれぞれに5kmほど走行した時のデータである。各道路での準天頂衛星の仰角と信号強度の推移を以下のグラフに表した。(図 3.7)



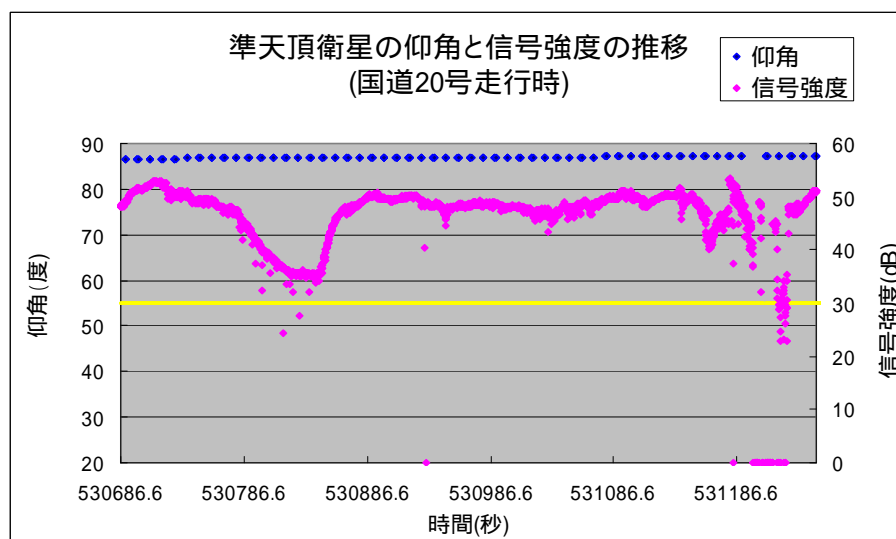
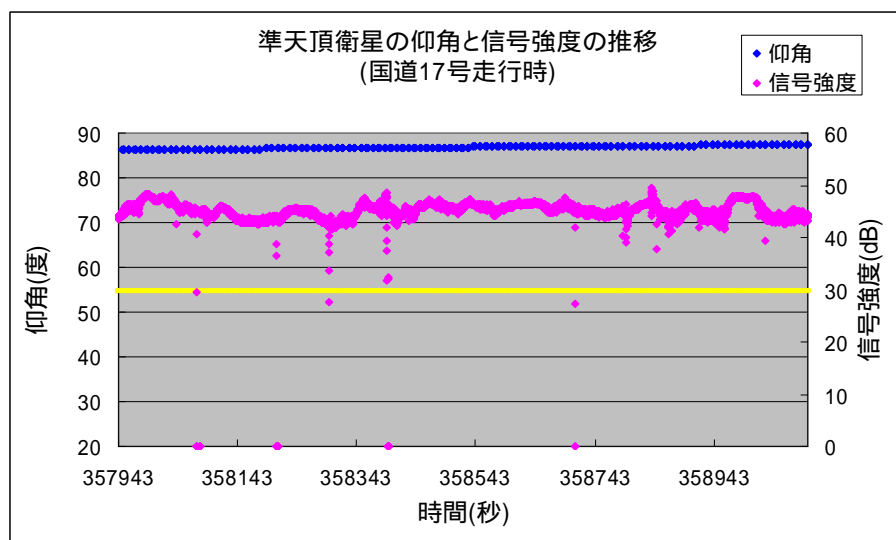
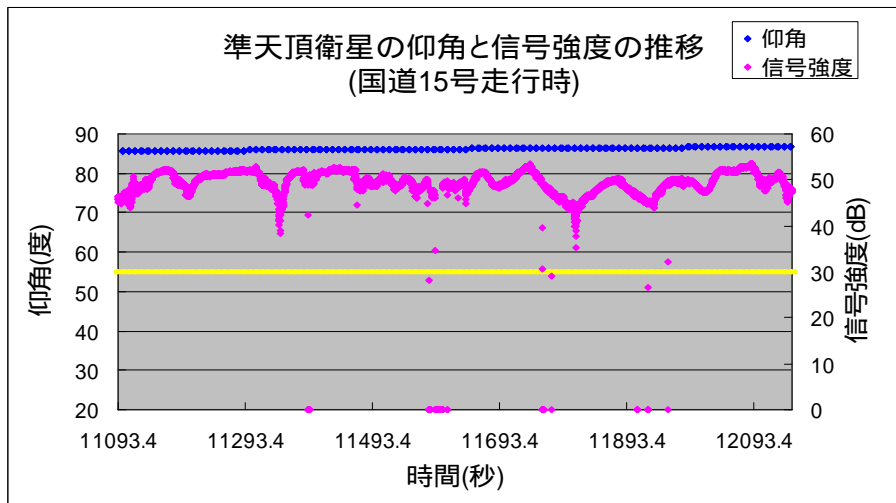


図-3.7 各国道の準天頂衛星の仰角の推移と信号強度

どのデータも仰角が 80 度以上を保っており、信号強度も 45 前後である。このとき、国道ごとにヒストグラムを作成すると以下のような結果となった。(表 2.3)

なお、ヒストグラムのデータ範囲はそのときの信号強度を  $x$  とすると、 $x=0$ (受信なし)、 $0 < x < 30$ (測位に使用不可)、 $30 < x$ (測位に使用可能)の 3 段階に分けている。

**表-3.3 各国道の信号強度のヒストグラムとその割合**

	信号強度	ヒストグラム	割合(%)
国道 1 号	0	35	0.81
	30未満	1	0.02
	30以上	4296	99.17
国道 6 号	0	60	0.92
	30未満	4	0.06
	30以上	6434	99.06
国道 15 号	0	93	1.76
	30未満	3	0.06
	30以上	5185	98.18
国道 17 号	0	24	0.41
	30未満	3	0.05
	30以上	5763	99.53
国道 20 号	0	67	2.36
	30未満	20	0.71
	30以上	2748	96.93

割合を見て分かる通り、ほぼ常に信号を受信できていることが分かる。さらに受信がされていない場所や、30以下の信号を受信したときはどのような場所なのか「Google Earth」を用いて調べてみると下記の写真のような高架下、または歩道橋の真下のみであり、他のところはすべて信号強度 30 以上となった。(図 3.8)

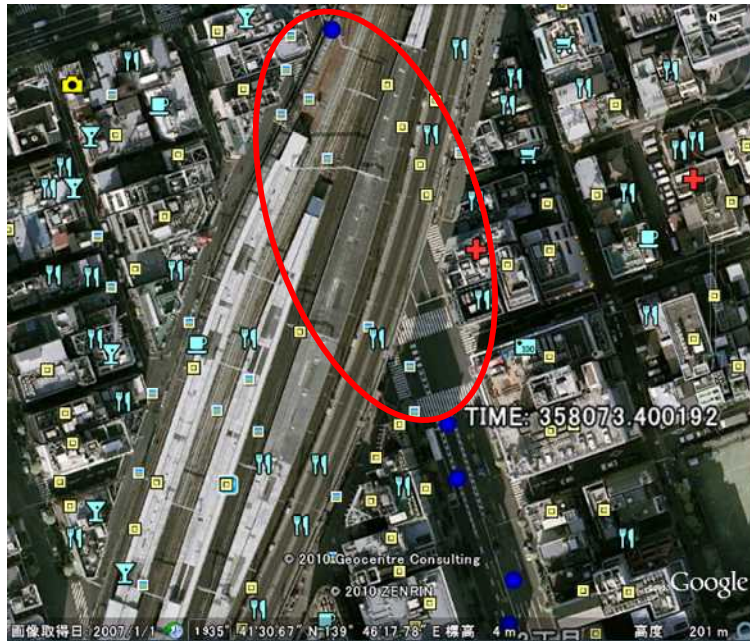


図-3.8 国道17号、神田ガード下

### 3.3.2 準天頂衛星のアルマナック

では、準天頂衛星は1日にどの程度高仰角に滞在しているのか「宇宙航空研究開発機構 JAXA」から配信されている準天頂衛星「みちびき」のアルマナックより、「みちびき」の1日の仰角の推移をグラフ化してみた。(図 3.9)

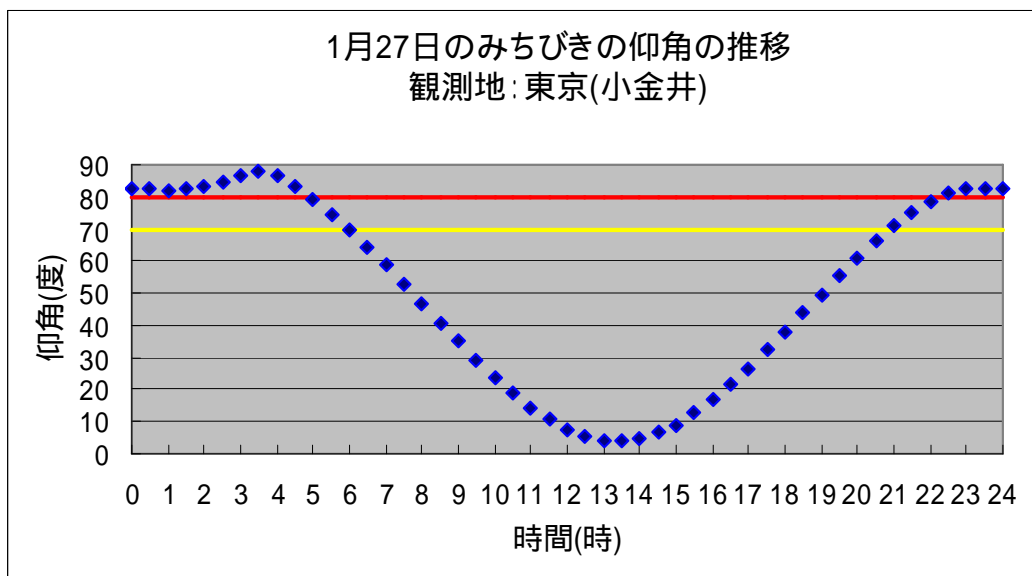


図-3.9 準天頂衛星「みちびき」の1日の仰角の推移  
(2011年1月27日のアルマナックより)

仰角 70 度、80 度以上にいる時間はそれぞれ約 9 時間半、7 時間となっており、およそ半日、天頂付近に滞在していることがわかる。今後予定されている残り 3 基の打ち上げがなされれば、日本では常に天頂付近に少なくとも 1 基は滞在していることが容易に想像できるであろう。

### 3.4 都市部での準天頂衛星の受信

前節より準天頂衛星の具体的な仰角がわかった。しかし、高仰角だからといって本当に高層ビル街で遮断されずに受信できるのか、マスク角を 70 度、80 度に設定し検証していく。第 2 章で説明した方法に基づいて、マスク角を 70 度、80 度に設定したときの天空率を求める。その天空率より、各箇所、各マスク角の平均天空率を算出してどれほどの割合でクリアしているのか具体的に検証することができる。なお、マスク角を設定した際の天空率の求め方は以下のようにになっている。(図 3.10)

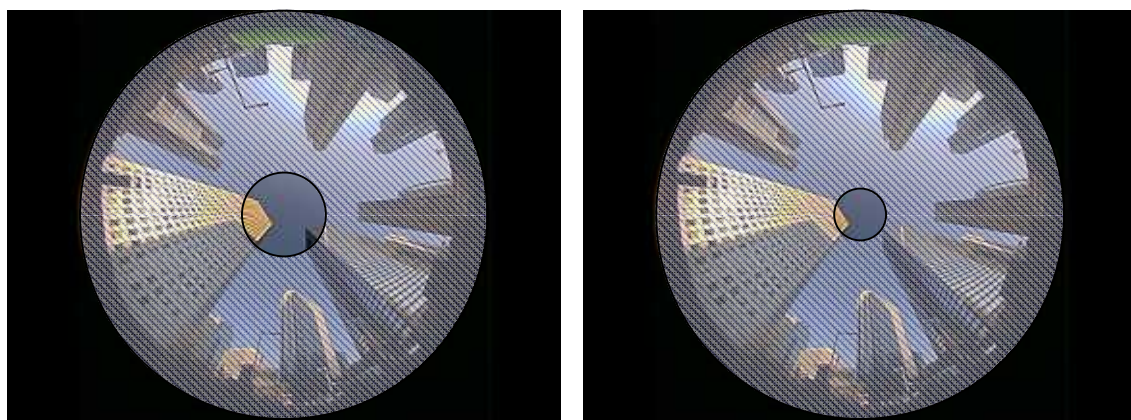


図-3.10 マスク角の設定  
左:マスク角70度 右:マスク角80度

BMP ファイルのサイズを  $l \times h$ 、半径  $r$  としてマスク角  $\theta$  のとき

$$(r / \theta)^2 > (x-l/2)^2 \times (y-h/2)^2 \quad (\text{式 } 3.1)$$

を満たす変数  $x$ 、 $y$  が(図 3.9)の内円の内側(斜線がない部分)のピクセル座標となる。これより、内円の内側の白のピクセル数を  $w_m$  としたとき、マスク角設定後の天空率  $S_m$  は

$$S_m = w_m / (r / \theta)^2 \quad (\text{式 } 3.2)$$

となる。

これを用いて、丸の内、新宿、月島のマスク角を 70 度、80 度に設定し、各箇所の平均天空率を算出した。その結果を下の表に示す。(表 3.4)

**表-3.4 各マスク角の平均天空率**

	マスク角70度 天空率(%)	マスク角80度 天空率(%)
丸の内	87.02	97.55
新宿	86.58	96.97
月島	91.58	98.78

数%の遮断物があるが、これは高架下や歩道橋の真下のときのデータによるものであり、高層ビルなどではほぼ遮断されることがない状態となった。この結果より、準天頂衛星は高架下や、地下でない限り受信が可能であり、都市部の衛星測位では非常に有効であることがわかった。

## 第4章 測位精度の考察

### 4.1 天空写真と衛星位置からの検証

天空写真とそれと同時に取得した衛星情報をもとに天空率と測位精度の関連性を検証していく。下記の写真は丸の内の天空写真を撮影すると同時に取得した GPS データ (2010/12/23) をもとに、測位結果を Google Earth にプロットしたものである。(図-4.1)

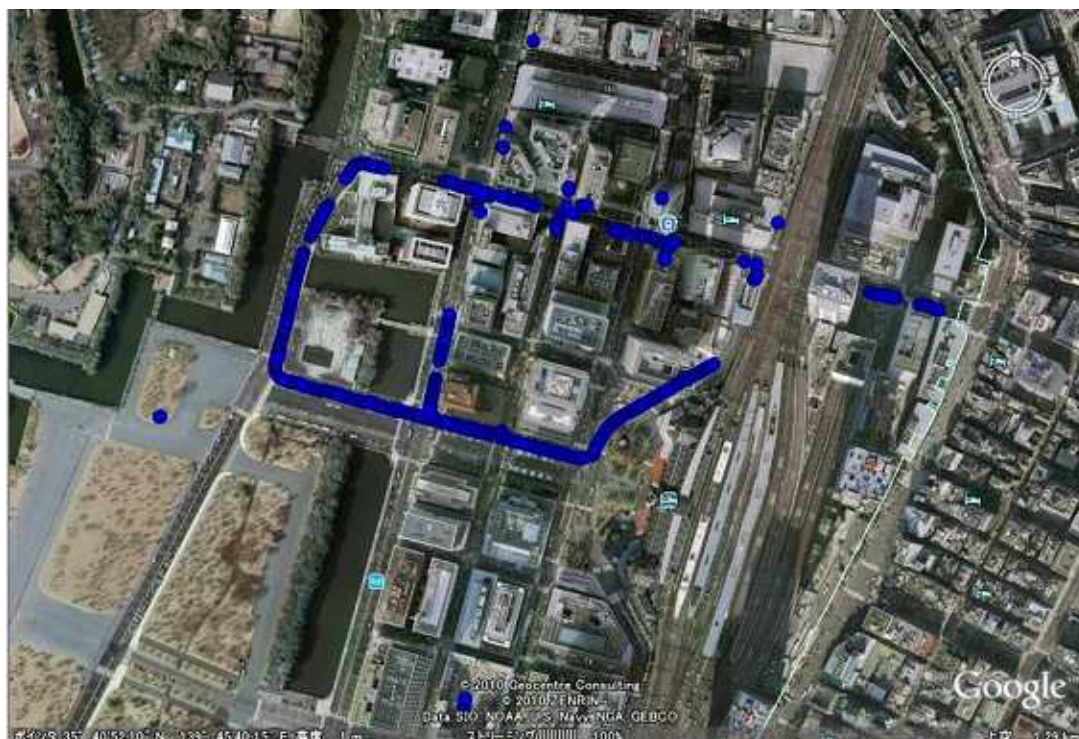


図-4.1 観測地(丸の内)

(図 4.1)を見て分かるとおり、測位位置が大きくずれてしまったところが複数ある。他の測位結果が正常なことから、具体的な原因を考えると衛星配置、上空視通の問題、マルチパスが考えられる。この要因となっている衛星を天空写真と衛星位置から考えていく。なお、ひとつの点に見えるが時間の前後のデータが重なりひとつに見える箇所が複数ある。そのような箇所はその時間帯の中間の時間を選び検証することにする。

補足ではあるが、今回使用した GPS 測位のプログラムは信号強度が 30 以上、且つ、仰角が 10 度以上の衛星を可視衛星としている。また、天空写真は写真の下方が前方、車の進路方向となっている。

No.1(図 4.2)



図-4.2 No.1 観測地と測位結果

緑の印がその時刻の観測地であり、赤の印がその場での GPS 測位によってもたらされた位置である。このときの観測地とは GPS 時刻と天空写真の時間を照らし合わせて導き出した位置である。(P31,33,35,38 同様)

No.1-1 の測位を行ったときの天空写真と可視衛星の配置は以下のとおりである。(図 4.3) また、可視衛星の仰角、方位角、信号強度を(表 4.1)に示す。また、前後の時間のデータから信号強度の推移をグラフで示す。(P32,図 4.4)

表-4.1 No.1-1の可視衛星情報

衛星番号	仰角	方位角	信号強度
4	50.34	311.31	48.64
13	42.72	127.62	41.35
17	72.69	168.11	49.33
20	26.00	49.30	44.56

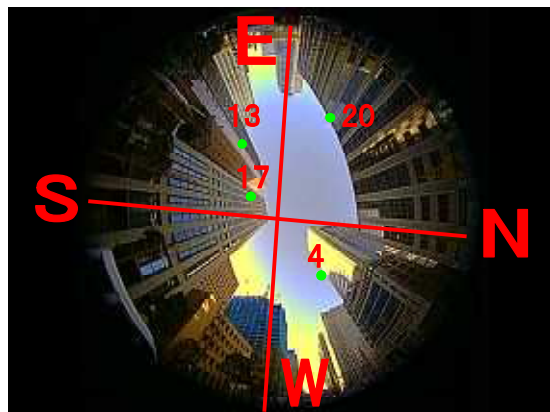


図-4.3 No1-1の天空写真と可視衛星の配置  
(GPS時刻:361437秒 天空率:30.23%)



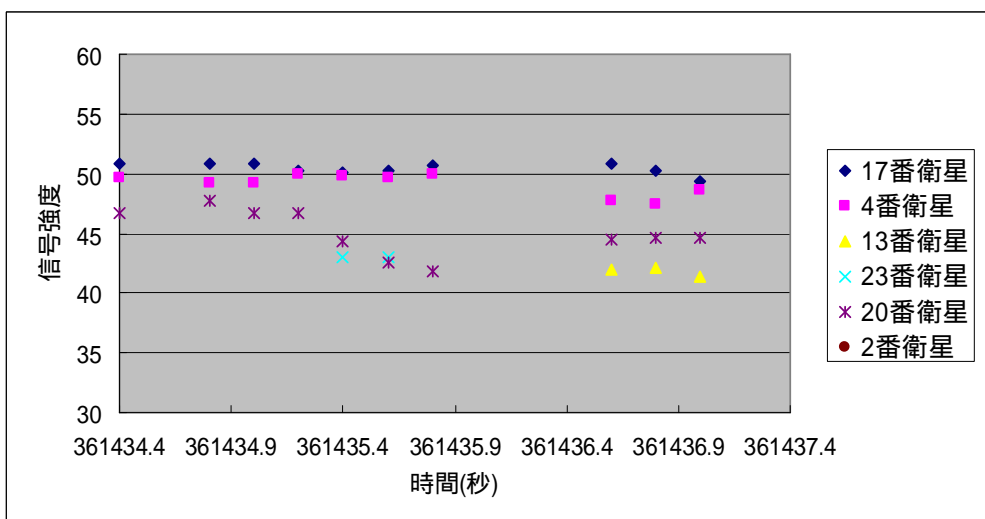


図-4.4 No.1-1の信号強度の推移

まず 20 番衛星の配置であるが明らかにビルの陰となっている。さらに 13 番衛星もビルの陰になっており、この 2 衛星の信号が多重反射(マルチパス)によって受信されたものであると考えられる。さらには、このとき可視衛星は 4 つしかないため、最小二乗法ができないこともこの結果(P31,図 4.2)の要因であると言える。

次に No.1-2 のデータを見てみる。(表 4.2、図 4.5、図 4.6)

表-4.2 No.1-2の可視衛星情報

衛星番号	仰角	方位角	信号強度
2	21.17	293.04	43.85
4	51.01	312.35	46.55
10	40.67	238.64	39.85
23	42.32	78.92	49.33

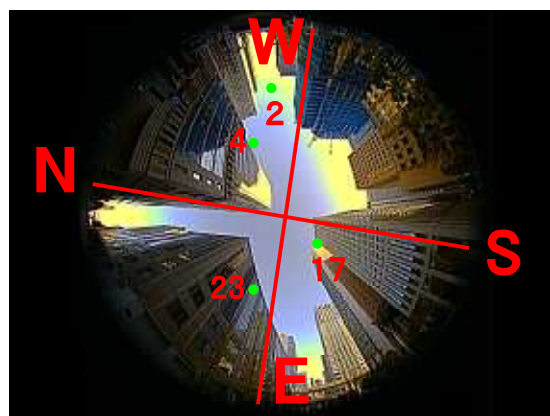


図-4.5 No1-2の天空写真と可視衛星の配置  
(GPS時刻:361791.4秒 天空率:30.34%)

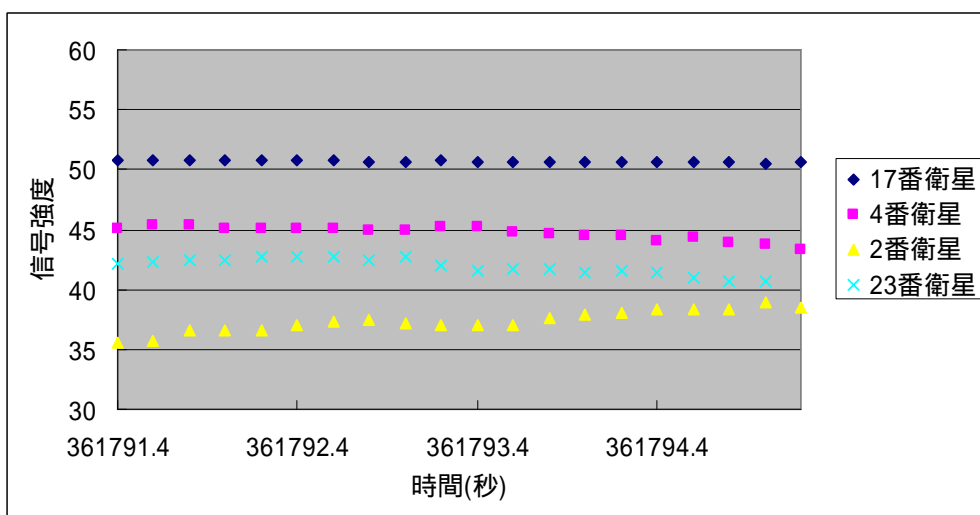


図-4.6 No.1-2の信号強度の推移

GPS時刻を見てもわかるとおり、実際のところ No.1-1 と No.1-2 は時間が大幅に違う。なぜなら天空写真が逆さまになっていることからわかるように、No.1-1 のデータを取得したのがデータを集めに行ったときのいわゆる”行き”であり、No.1-2 のデータを取得したのが”帰り”だからである。このときの誤差要因としては、やはりビルの陰となっている2番衛星であろう。No.1-1 より観測地とのずれが小さいのは誤差要因となる衛星が1基少ないためと考えられる。

No.2(図 4.7)



図-4.7 No.2 観測地と測位結果

No.2 の可視衛星情報と天空写真と可視衛星配置、信号強度の推移。(表 4.3) (図 4.8、4.9)

表-4.2 No.2の可視衛星情報

衛星番号	仰角	方位角	信号強度
2	21.17	293.04	43.85
4	51.01	312.35	46.55
10	40.67	238.64	39.85
23	42.32	78.92	49.33

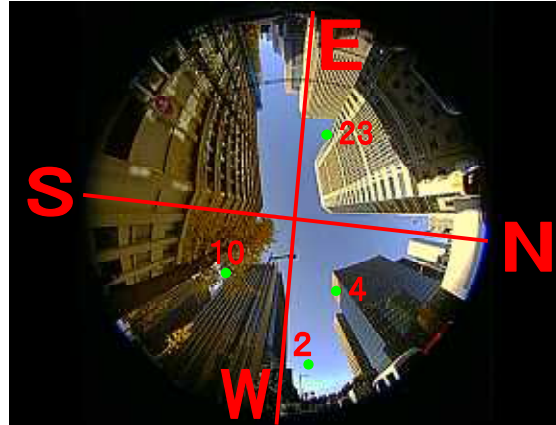


図-4.8 No.2の天空写真と可視衛星の配置 (GPS時刻:361561秒 天空率:21.95%)

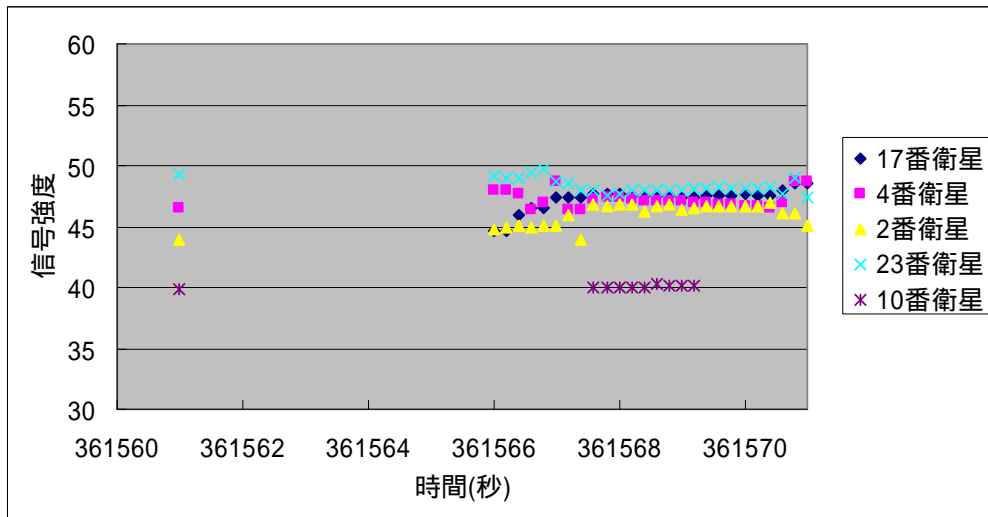


図-4.9 No.2の信号強度の推移

信号強度の推移からもわかる通り、時間が飛んで受信されている。このことから No.2 付近は GPS 信号を受け取るには難しい場所であると推測でき、測位結果が悪くなるのは容易に想像できる。天空写真を見ると誤差要因としてあげられる衛星として 10 番衛星がある。その理由として、ビルの陰であり、かつ、4つの可視衛星の中で最も信号強度が低いからである。

No.3(図 4.10)



図-4.10 No.3 観測地と測位結果

写真の赤の破線の箇所について補則をしておく。ここはプロットがひとつもないが実は観測地のひとつである。この路地は天空率が20%を切るという非常に厳しい状況であった。そのため可視衛星が確保できずに測位結果がプロットされなかった。

No.3-1の可視衛星情報と天空写真と可視衛星配置、信号強度の推移は以下の通りである。なお、信号強度の推移はNo.3-1～3-3まで同じグラフ内に示す。(表 4.3) (図 4.11、4.12)

表-4.3 No.3-1の可視衛星情報

衛星番号	仰角	方位角	信号強度
2	21.92	293.81	45.70
4	51.82	313.62	47.61
12	11.68	312.10	34.66
17	70.30	168.02	43.46

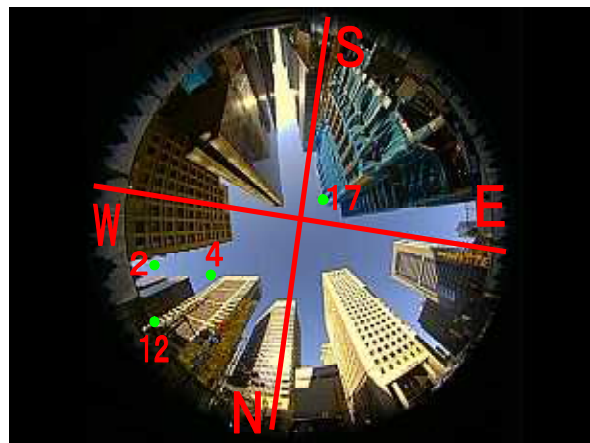


図-4.11 No3-1の天空写真と可視衛星の配置  
(GPS時刻:361711.2秒 天空率:17.95%)

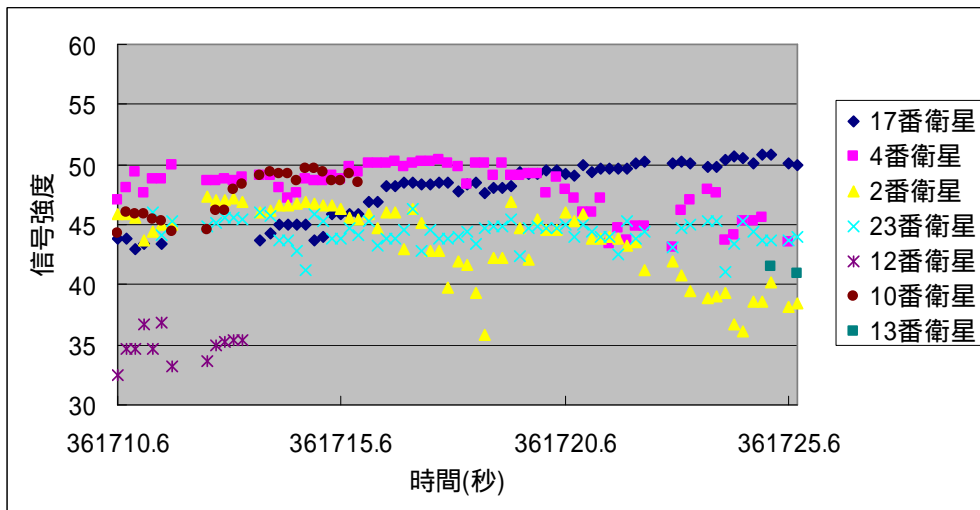


図-4.12 No.3の信号強度の推移

これは先ほど述べた路地を出た直後に取得できたデータである。(図 4.10)を見てわかるとおり、測位結果が非常に飛んでしまっている。12番衛星が非常に厳しい中信号の受信がされているのがわかるであろう。仰角が11.68度というのはこの位置ではまず直接受信ことはないと考えられる。そのため、この衛星が非常に悪い値を与えてしまい、No.3-1のような測位結果になってしまったと考えられる。

次に No.3-2 の可視衛星情報と天空写真と可視衛星配置。(表 4.4) (図 4.13)

表-4.4 No.3-2の可視衛星情報

衛星番号	仰角	方位角	信号強度
2	21.94	293.82	46.91
4	51.83	313.64	48.97
12	11.68	312.09	35.33
23	42.22	77.32	45.37



図-4.13 No3-2の天空写真と可視衛星の配置 (GPS時刻:361711.4秒 天空率:17.95%)

No.3-1 の 0.2 秒後のデータである。そのため天空写真には変わりがない。衛星配置も 17 番衛星が 23 番衛星に変わっただけである。ここでも測位に悪影響を与えている衛星は 12 番衛星が考えられる。理由は No.3-1 と同様に、ビルの陰となっている。可視衛星も 4 基のみのため、観測地から大きくずれた結果となったと言える。

次に No.3-3 のデータ(表 4.4)(図 4.14)だが、No.3-1、No.3-2 よりも前の時間のデータである。(図 4.7)を見る限りではそれほど悪い測位に見えないのだが、実はこれは破線の路上を走行中の測位結果である。

**表-4.4 No.3-3の可視衛星情報**

衛星番号	仰角	方位角	信号強度
2	21.92	293.80	45.87
4	51.82	313.62	47.04
10	41.65	239.66	42.43
12	11.68	312.11	34.50
17	70.30	168.02	43.79



**図-4.14 No3-3の天空写真と可視衛星の配置  
(GPS時刻:361710.6秒 天空率:15.82%)**

これもまた 12 番衛星は、ビルの陰に隠れている。相変わらず大きな誤差要因となっているのだが、前のデータと違うのは可視衛星数が 5 基あるということである。これによって最小二乗法が行えるため、測位結果は前の 2 つの結果よりも幾分は改善されている。

また、この 3 つの結果と共通している点が 12 番衛星を受信できていることであり、これはこのとき移動局が停止していたため、マルチパスにより受信してしまった典型的な例であるといえる。

No.4(図 4.15)

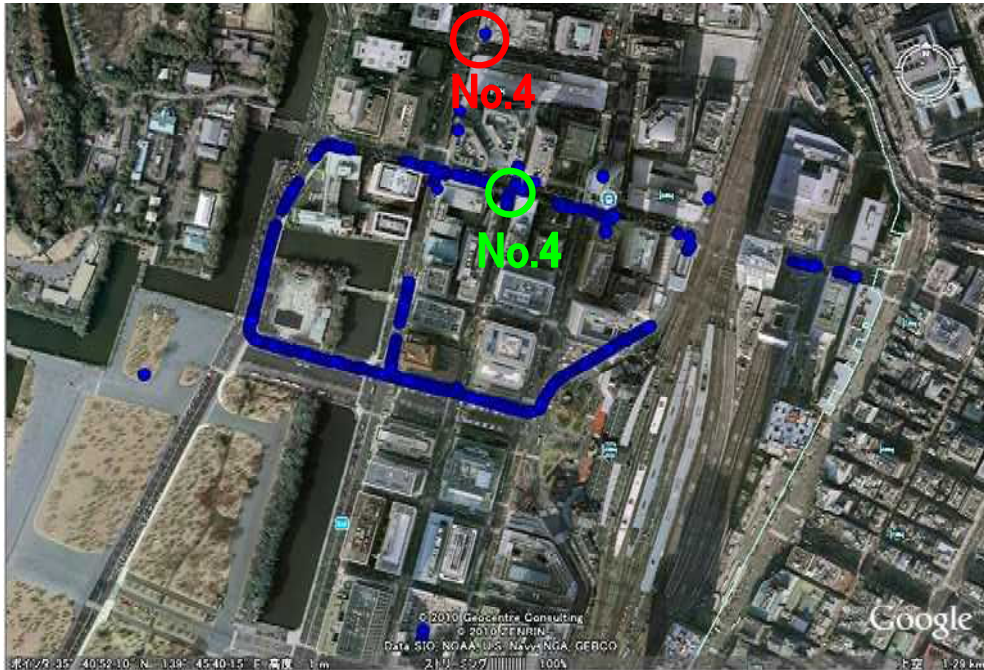


図-4.15 No.4 観測地と測位結果

このデータは No.3 で、破線で印した道路から出てきたときのデータである。衛星情報、衛星配置は以下の通りである。なお、信号強度の推移は(図 4.12)を参照されたい。(表 4.5)(図 4.16)

表-4.5 No.4の可視衛星情報

衛星番号	仰角	方位角	信号強度
2	22.00	293.88	38.38
13	44.39	125.17	40.91
17	70.17	168.02	50.02
23	42.21	77.19	43.94



図-4.16 No.4の天空写真と可視衛星の配置  
(GPS時刻:361725.8秒 天空率:20.90%)

このデータも仰角が低い衛星は伝播遅延やノイズが多くなってしまふことがわかるデータではないだろうか。ちょうど 2 番衛星をさえぎるビルがなくなんとか信号を受信できているが、このときの 2 番衛星の擬似距離は 23,694,918m である。また、地心直行座標での観測地の座標と 2 番衛星の座標より 2 点間の距離は 23,695,060m で擬似距離との差はおお

よそ 141.5mの誤差があった。また、2 番衛星はこれまで上げてきた中すべてに可視衛星として入っており、No.1～No.4 まですべてにおいて誤差要因であったと考えられる。

ここまで、測位結果が芳しくない時間の衛星配置を見てきたが、この検証方法だと誤差要因となる衛星が推測できるだけであり、天空率と測位精度を関連付けるものが発見できなかった。

#### 4.2 残差からの検証

GPS データを解析していたところ、測位精度が悪いとき、残差の絶対値が大きくなることがわかった。このときの残差とは、「最小二乗法で収束する測位位置と各衛星位置との距離」と、「擬似距離 + 誤差推定値」の差のことである。つまり観測データ側（上記の后者）に誤差がない場合は、1 点に収束することになる。もちろん 4 基では最小二乗法は適用されないで、この値は可視衛星数が 5 基以上という条件のときのみ算出される。実際に最小二乗法の試行回数による残差の変化を表に示してみる。なお、列の番号は最小二乗法の試行回数を指す。(表 4.6)

**表-4.6 残差の変化(1)**

	1	2	3	4	5
17番衛星	-28.70	0.56	0.60	0.59	0.59
4番衛星	-1685.12	-0.99	-0.99	-0.99	-0.99
13番衛星	785.10	-1.17	-1.12	-1.12	-1.12
23番衛星	14.81	0.47	0.50	0.50	0.50
20番衛星	-668.61	-0.08	-0.07	-0.07	-0.07

\* DGPSTIME=361163.6

これは、測位結果が良好な時間の残差の変化である。試行回数を重ねると残差の絶対値が小さくなっていることがわかる。次に、測位結果が悪いときの残差の変化を見てみる。

(表 4.7)

**表-4.7 残差の変化(2)**

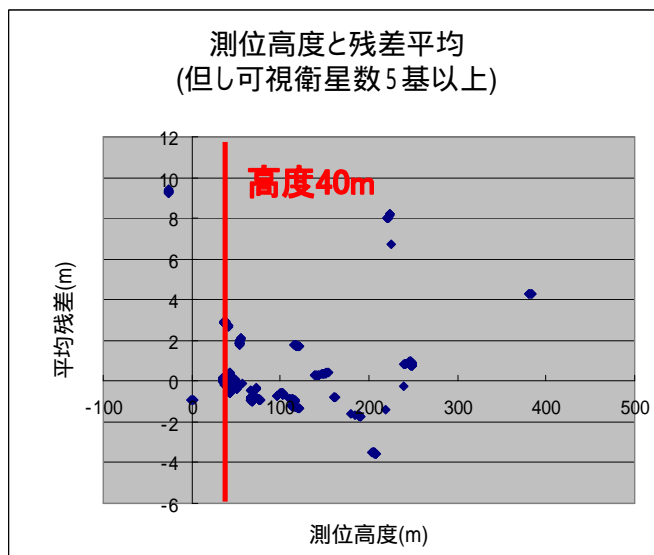
	1	2	3	4	5
17番衛星	-418.22	-9.56	-9.59	-9.59	-9.59
11番衛星	-1889.84	9.26	9.15	9.15	9.15
2番衛星	-1693.63	-88.96	-89.05	-89.05	-89.05
10番衛星	-445.19	21.82	21.79	21.79	21.79
12番衛星	-1753.85	84.89	84.79	84.79	84.79

\* DGPSTIME=361710.6



このように、誤差が大きいと試行回数を重ねても残差の絶対値は小さくならない。これより、残差は測位精度と関連性があることがわかる。よって、この残差を分析し、天空率と測位精度の関連性を検証して行く。

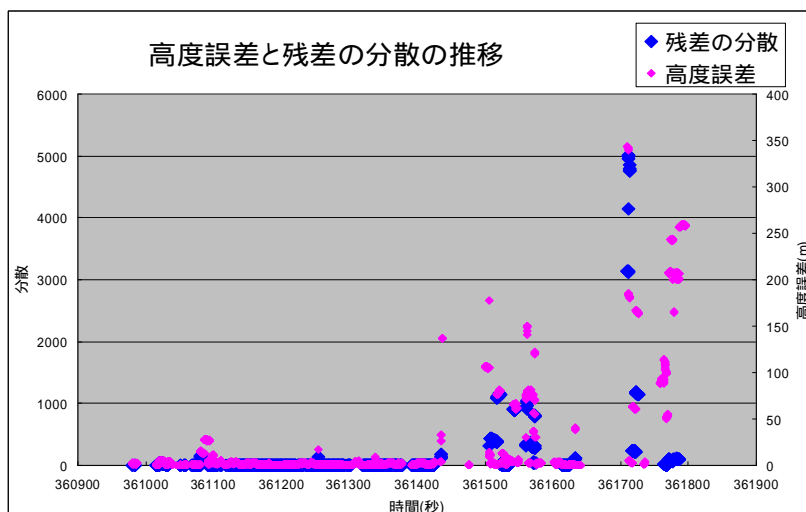
また、次に注目したのが測位高度であり、残差の変化に対して大きくズレが生じていた。下記のグラフは時間ごとの残差の平均と測位高度をプロットしたものである。(図-4.17)



**図-4.17 測位高度と残差平均**

丸の内の実際の高度は約 40m である。残差が少なく、高度が 40m、座標で表すと(40,0)の点付近は測位精度が高いと考えられ、逆にそこから離れているところは精度が低いと言える。

しかしこの表現だと各衛星の残差のバラつきが分からない。この問題を解決するため、次に注目したのは残差の分散である。次のグラフは残差の分散と高度誤差(測位高度-40m)を時系列で示したものである。(図-4.18)



**図-4.18 残差の分散と高度誤差の推移**

高度誤差は可視衛星数が4基でも算出されるので分散よりデータ数は多いが、見ての通り、分散が大きくなっているときに高度誤差も大きくなっていることが分かる。さらに、天空率の推移と残差の分散、高度誤差をグラフで表すと天空率が20%前後のところは各値が大きくなっているか測位結果が得られていない(プロットなし)ことがわかり、各値が大きくなっている時間帯は4.1節で検証していた時間帯に合致する。(図-4.19、20)

また、グラフの前半、天空率が20%前後にも関わらず、残差の分散及び、高度誤差が小さいところがあるが、これは移動局が走行中であり、マルチパス誤差を含んだ信号を受信しなかったためだと考えられる。ゆえに、プロットが少ないところから、上空視通が悪いことが伺える。

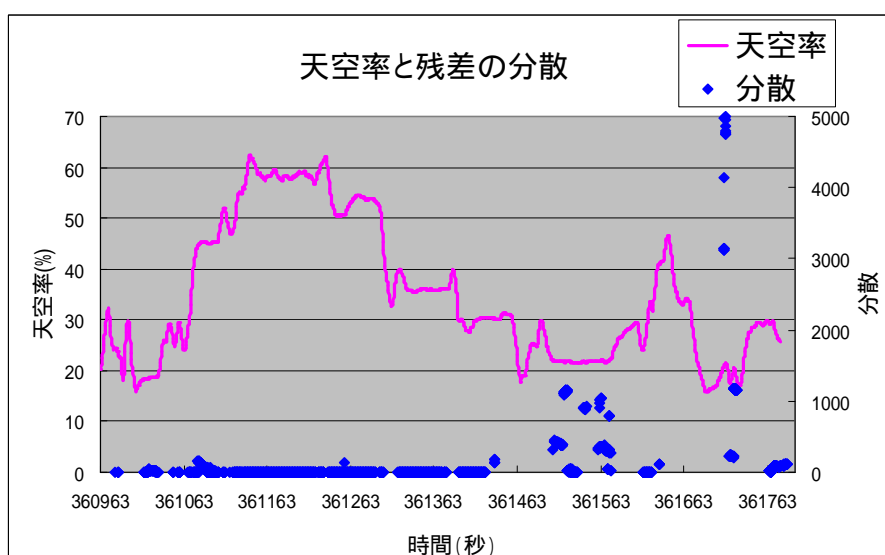


図-4.19 天空率の推移と残差の分散

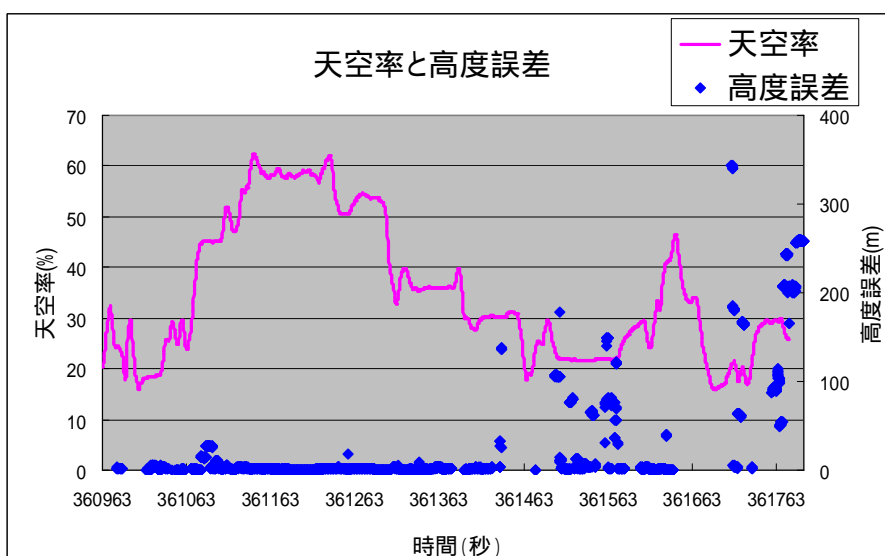


図-4.20 天空率の推移と高度誤差

このことから、残差の分散が測位精度に大きく関わっていることがわかった。また残差の分散と高度誤差の相関係数は 0.57 であった。そこで、次のようなグラフを作成してみた。(図-4.21)

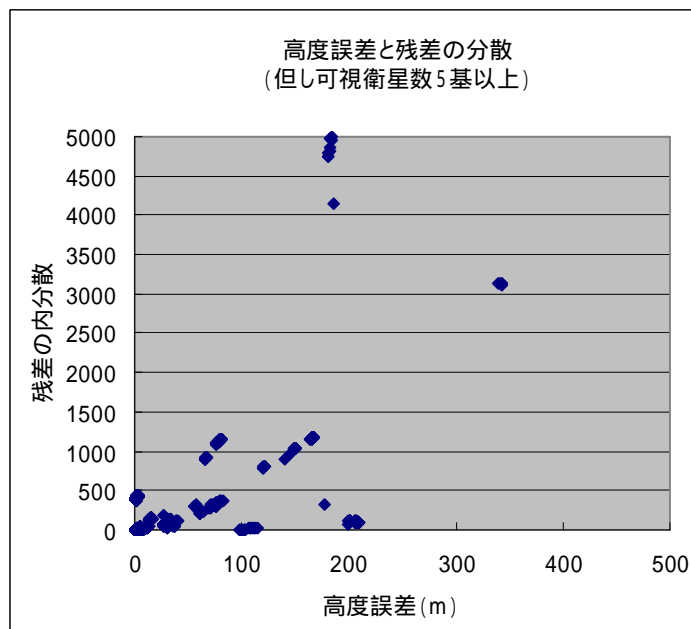


図-4.21 高度誤差と残差の分散

これまでの結果から、このグラフではプロットが原点に近ければ近いほど測位精度が高いということになる。このグラフを用いれば、例えば原点から半径  $r$  以上のエポック\*を取り除くと言った作業が可能となる。

\* 補足

・エポック(epoch)

記録を行うデータ間隔。今回はデータ間が 0.2 秒なのでエポックは 0.2 となる。また、一連の観測をセッション(session)という。

#### 4.3 測位結果の修正

前節で分析した高度誤差と残差の分散から、位置データを修正していく。(図 18)と(図 19)のグラフをより、高度誤差を  $d$ 、残差の分散としたとき、以下の条件を1つでも満たすエポックを取り除くようにした。

$$d > 30 \quad (\text{式 } 4.1)$$

$$> 450 \quad (\text{式 } 4.2)$$

$$(d/30)^2 + (\sigma/450)^2 > 1 \quad (\text{式 } 4.3)$$

この条件をグラフに表すと下記のようなになる。(図 4.22)

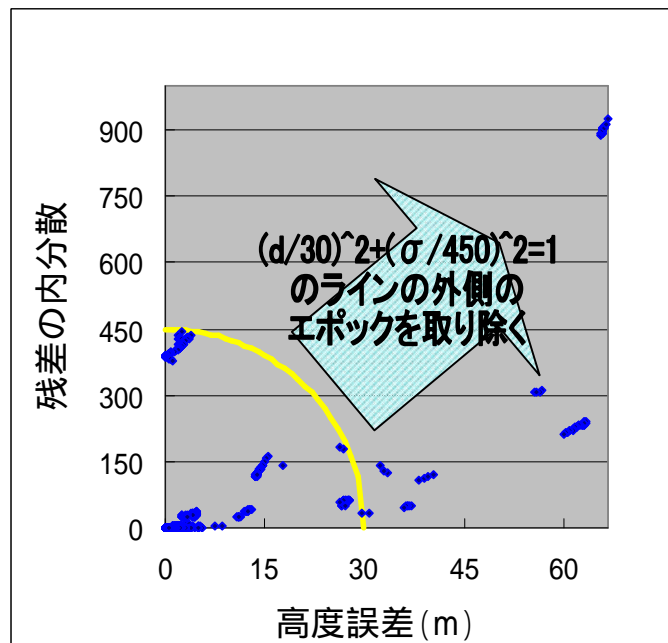
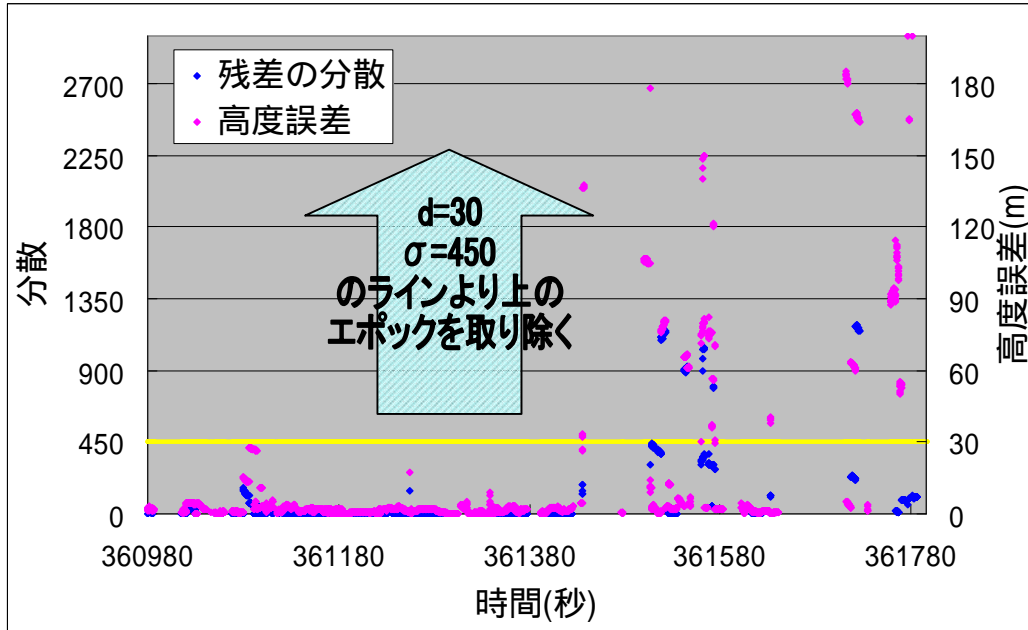


図-4.22 エポックを取り除く条件

グラフの黄色のラインが条件を表している。この中に含まれないエポックを取り除いた結果が次のプロット図である。(図 4.23)



◆ 元データ ■ 修正後

図-4.23 条件よりエポックを取り除いた測位結果

エポックを取り除いたことにより測位率は66%から55%に減少したものの、これはプロット図を見ても分かる通り大きな誤差のエポックを取り除いたためだと思われる。そのため大きく外れているプロットがなくなり、うまく修正がなされた。この結果より、残差の分散は測位結果の修正にとっても有効であることがわかった。さらに、残差と高度誤差は移動体の測位精度を示す値として信頼できる値といえる。ゆえに(図 19、20)は天空率が測位精度に関連があることを裏付けるものとなっている。

また、これより天空率からエポックの取捨選択が可能のように思えるが、天空率のみだけではエポックの取捨選択は難しい。なぜなら、同じ天空率でも、建物の高さによる測位精度の影響や、移動局の速度も考慮する必要があるからである。さらに、先ほど残差の相関係数は0.57であると述べた。これは強い相関関係があると言えるのだが、この相関関係は因果関係を包含しない、擬似相関である。これら二つの因果関係を包含しているのは1.4節で述べた誤差要因である伝播遅延や、ノイズである。天空率はこの誤差要因の1つに過ぎないため、これだけではエポックの取捨選択が難しい。そのため本研究ではこの作業を行わなかった。

## 第5章 結論

### 5.1 まとめ

首都圏東京の3箇所で天空写真の撮影を行い、天空率を求めてきた。さらに、残差の分散や高度誤差の関係から天空率は測位精度にも関連性があることが示せた。よって、今後さらに多くの場所のデータが取れば都市部での衛星測位(パラメータの設定など)に大いに役立つことは間違いない。また、東京と同規模の都市においても同等な結果が得られるとことが予測でき、日本のみならず海外での測位にも有効なのではないかと考えられる。

準天頂衛星は都市部でも長時間観測できることがわかった。さらに準天頂衛星は日本だけでなく、人口が集中している東アジア全般も範疇に収めている。そのため、発展途上国の多い東アジアでは、今後、非常に有効なシステムとなりえるであろう。

### 5.2 今後の課題

今後、天空写真を利用し衛星測位の検証を行っていくうえで、魚眼カメラの歪み、撮影中のカメラの傾きを考慮する必要があり、動画の時刻とGPS時間を同期させることも重要である。

本研究で作成した天空率を求めるプログラムは、天空率計測の結果と数%の誤差が発生したのも事実であった。この誤差をいかに解消していくかということも重要である。原因としては空の明るさの変化にカメラが対応できていない、ビルや周りの自動車の色などが考えられる。さらに、同じ天空率でも建物の高さによる測位精度への影響も考えなければならぬ。

また、平均天空率を求める際に観測者の移動速度も重要な点であるが、今回は速度をそれほど重視しなかった。移動中か停止中かという程度の判断で平均天空率の算出を行ったので、さらに精度の高い平均を出すのなら天空写真を撮る際に速度も同時に記録する必要がある。

## 謝辞

本研究で使用させて頂きました準天頂衛星の受信機をお貸しくださいました宇宙航空研究開発機構 JAXA 様に厚く御礼申し上げます。

AVI ファイルより時刻を抜き出すにあたり、ご協力いただきました株式会社マイクロソフトの三上朋克様に心から感謝します。

## 参考文献

- 1 . 土屋 淳・辻 宏道 「GNSS 測定の基礎」 日本測量協会 2008
- 2 . 酒井 幸市 「画像処理とパターン認識 入門」 森北出版 2006
- 3 . 宇宙航空研究開発機構 JAXA 「使う みちびき アルマナック」  
<http://qz-vision.jaxa.jp/USE/ja/almanac#wrapper>