

平成24年度 修士論文

GPS 測位誤差と地震発生との関連解析

指導教員 本島 邦行 教授
羽賀 望 助教

群馬大学大学院工学研究科
電気電子工学専攻

高橋 恭平

目次

1. 序論.....	1
2. GPS 測位.....	2
2.1. 測位原理.....	2
2.2. GPS 測位誤差要因.....	5
3. GPS 測位誤差計測システム.....	10
3.1. 観測方法.....	10
4. 測位誤差距離計算手法.....	12
5. 観測データ.....	17
5.1. 通常時.....	17
5.2. 平均値線の作成.....	19
5.3. 測位誤差異常の例.....	22
6. GPS 測位誤差の異常判定.....	24
6.1. 衛星配置による測位精度指標.....	24
6.2. 太陽フレアの影響.....	25
7. 関連性の解析方法.....	26
7.1. 関連付け時間長.....	26
7.2. 無相関時併発確率.....	27
7.3. 確率利得.....	27
8. 解析対象とする地震.....	29
9. 解析結果.....	32
9.1. 解析条件.....	32
9.2. 内陸性地震と海洋性地震.....	32
9.3. PE_I の閾値.....	36
9.4. α による関連性の変化.....	37
9.5. 最も関連性が強まる条件.....	38
10. 確率による検証.....	40
11. 結論.....	41
12. 今後の課題.....	42
謝辞.....	43
参考文献等.....	44

1. 序論

日本は世界有数の地震大国であり、過去 20 年を振り返ってみると、1995 年には阪神淡路大震災、2004 年には中越沖地震、そして、2011 年には東北地方太平洋沖地震などの大規模な地震が発生しており、その復旧、復興には莫大な時間と予算が必要となる。中でも、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震は、地震の規模が観測史上最大を記録し、世界中の学者が調査対象として注目している。そして、次に発生する可能性のある大規模地震についての予測・対策が連日報道されてきた。しかしながら、これらの予測は今後 10 年、20 年と長期的な予測でしかなく、建造物の補強や交通網の整備などの面では対策は可能であるが、いつ起こるか分からない地震に対して、人々は事前に避難所へ行くなどの行動は取りづらい。また、現在行われている緊急地震速報も、地震発生直後の初期微動を感知することで、主要動が到来する前に地震発生を知らせ、危機回避行動を取ってもらうのが目的だが、震源近くでは間に合わないという点が問題である。そのため、人命を救うためには 1 ヶ月、1 週間くらいの短期地震予知が必要であると考えられる。

従来地震予知では、主に地震が発生するプレートの境界や断層などの地下を調査して、地学的な観点から予知を行っている。しかし近年、地震の前兆現象として地下ではなく、大気圏や電離圏における電磁気学的現象が数多く報告されている。例えば、普段は観測できない見通し外の電波が地震発生の前に観測できた研究事例【1】【2】や、見通し内の電波の受信電力が変動した事例研究【3】がある。また、地震発生前に電離層に異常が観測された研究事例【4】【5】【6】や、GPS(Global Positioning System)で使用している電波が電離層で遅延したという研究事例【7】もある。そこで我々は、GPS 測位における測位誤差を観測することで、電離層の異常を捉え、短期地震予知を行えないか検証するため、市販されている GPS モジュールを用いて GPS 測位誤差計測システムを構築し、2010 年 11 月より GPS 測位誤差の計測を始めた。

多くの研究は、発生した 1 つの地震についてその前後の電磁気現象を述べたものであるが、本稿では、長期観測によって得られたデータを用いて、GPS 測位誤差と地震発生の関連性を統計的に解析した結果を述べる。

2. GPS 測位

GPS は、アメリカ合衆国が運用する軍事用の測位システムである。そのため、以前は民間向けの電波には意図的に測位誤差を大きくする処置がなされていた。その後、民間にも広く利用してほしいということで、意図的な測位誤差は解除され、民生品でも高精度な位置情報を得られるようになった。これにより、現在ではカーナビゲーションや携帯電話・スマートフォンなどにも組み込まれるようになり、今後も様々な場面での多目的な利用が見込まれている。

現在、予備の衛星を除けば、地上から約 20,000[km] の上空の 6 つの軌道の上に 4 基ずつ、計 24 基の GPS 衛星が周回している。GPS 衛星には高精度の原子時計が搭載されており、各 GPS 衛星から送信される電波には、衛星自身の位置情報(X, Y, Z)と電波を送信した時刻の情報が載っている。GPS 測位で使用する電波は、周波数の異なる 5 種類の電波がある。その内、4 種類は主に軍事用や研究用に使用される電波で、民生用は L1 と呼ばれる搬送波の周波数が約 1,575.42MHz の電波を使用して測位を行っている。

2.1. 測位原理

GPS 測位では、GPS 衛星から観測器の位置情報が直接送られているのではなく、観測器側が計算によって位置座標を求めている。

まず、電波を受信した観測器側では、電波の送信時刻と受信時刻との差に光速を乗じることで、GPS 衛星までの光学的な疑似距離を求めることができる(式(1))。

そして、未知数として受信器の 3 次元位置座標(x, y, z)の 3 つがあるので、図 2.1.1 に示すように 3 基の GPS 衛星からの疑似距離が分かれば連立方程式(式(2))を解くことで、位置座標を求めることができる。

$$r^2 = (X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2 \quad \text{式(1)}$$

$$\begin{cases} r_1^2 = (X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2 + (Z_1 - z)^2 \\ r_2^2 = (X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2 + (Z_2 - z)^2 \\ r_3^2 = (X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2 + (Z_3 - z)^2 \end{cases} \quad \text{式(2)}$$

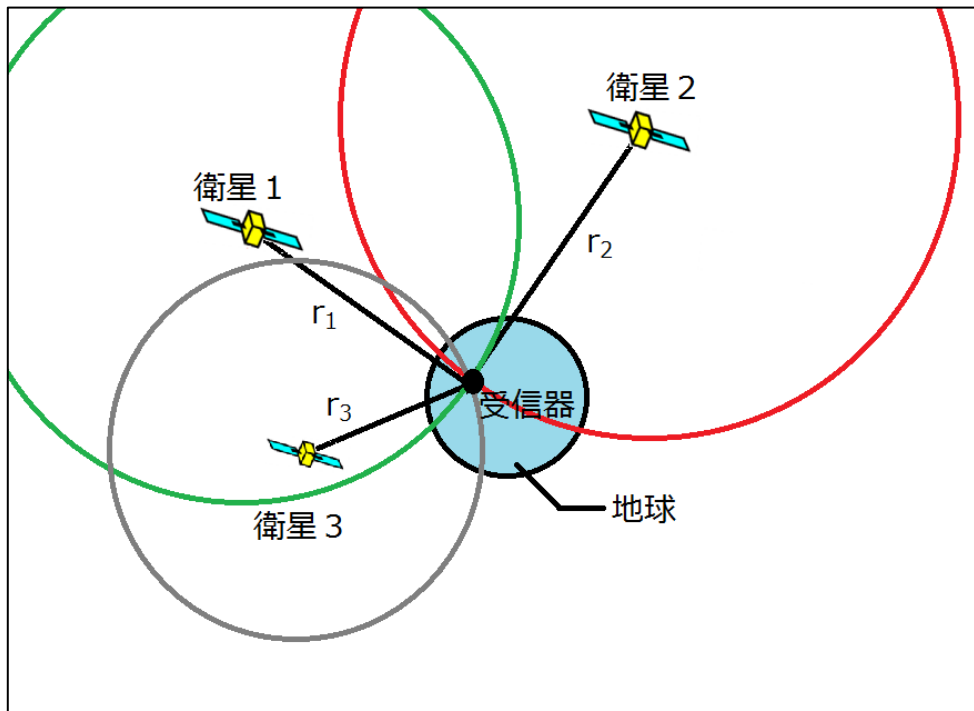


図 2.1.1: 3 基の衛星による測位($r_{1,2,3}$: 疑似距離)

しかし、GPS 受信器自体の内部時計に高精度の原子時計は載せられないため、GPS 衛星の原子時計と観測器内部との時間誤差である Δt が 4 つ目の未知数となり疑似距離は式(3)となる。

$$(r - c\Delta t)^2 = (X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2 \quad \text{式(3)}$$

この Δt は定数であるとは限らないため、実際の測位では図 2.1.1 に示したような方法で位置座標は求めていない。

実際の測位では以下に示す手法で測位を行っている。まず、2 基の衛星との距離の差 $\Delta \ell$ を

式(4)のように求める。

$$\begin{aligned} \Delta \ell &= c(t_1 - \Delta t_1) - c(t_2 - \Delta t_2) = ct_1 - ct_2 - c(\Delta t_1 - \Delta t_2) \\ &= r_1 - r_2 - c(\Delta t_1 - \Delta t_2) \end{aligned} \quad \text{式(4)}$$

※ c : 光速

$t_{1,2}$: 衛星 1,2 から電波が送信された時刻と受信した時刻との差

$r_{1,2}$: 衛星 1,2 と受信器までの疑似距離

$\Delta t_{1,2}$: 衛星 1,2 の原子時計と受信機の内部時計との時間差

Δt_1 と Δt_2 は等しくはないが、その差は小さいため、打ち消しあうことで、 Δl の誤差は、疑似距離 r の誤差に比べて遥かに小さくなる。

2 基の衛星からの距離が一定の点の集合は、この 2 基の衛星を焦点とした回転双曲面を形成するため、3 基の衛星について、双曲面の交わる領域に受信器が存在することが分かる。これを双曲線航法と呼ぶ(図 2.1.2)。

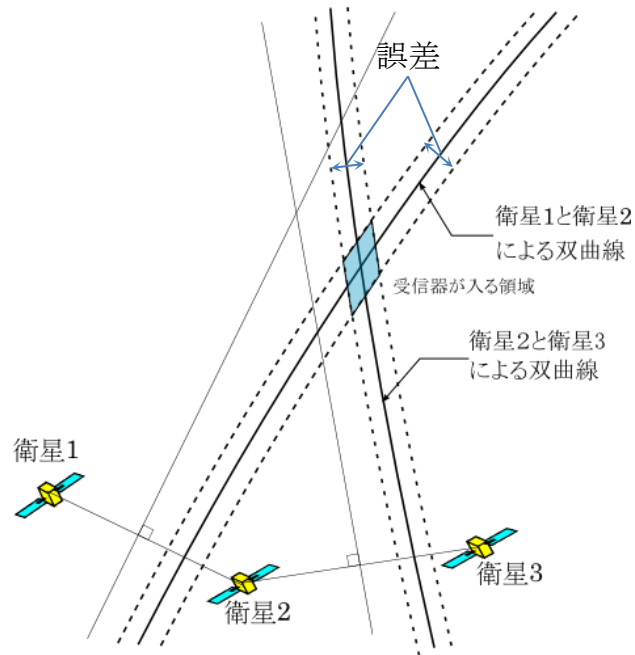


図 2.1.2: 2次元の場合の双曲線航法
(実際の測位は3次元なので、双曲面となる)

2.2. GPS 測位誤差要因

GPS 測位誤差要因として、以下の 6 つが挙げられる。

I. 電離層遅延

電離層とは地上から約 50km から 800km 上空までの層のことで、電離層では、窒素や酸素などの気体分子が紫外線や X 線により電離しており、電子密度が高い状態となっている (図 2.2.1)。

昼	夜
F2 層(220~800km)	F 層(150~800km)
F1 層(150~220km)	
E 層(90~150km)	
D 層(50~90km)	

図 2.2.1: 電離層の高度

電離層中の総電子数が変化すると屈折率変化が生じ、電離層を通過する電波は、伝搬速度の変化や屈折による伝搬経路の変化の影響で遅延が発生する。電離層による遅延量 D_{iono} [m]は式(5)で求められる。

$$D_{iono} = \frac{40.3N_e}{f^2} \quad \text{式(5)}$$

N_e : 経路上の全電子数, f : 搬送波の周波数

式(5)から電離層遅延量は周波数に依存していることが分かる。そのため、異なる 2 つの周波数を用いれば、搬送波位相の線形結合を計算することで、遅延量を推定し、影響を抑えることができるが、本研究で使用している GPS モジュールでは 2 周波での測定はできないので遅延量を測るのは不可能である。

また、GPS 測位では 4 つの衛星からの電波を受信できれば測位が可能とされており、理論上は受信可能な衛星数が 2 倍に増えれば測位精度は $\sqrt{2}$ 倍に向上する。しかし例外もあり、例えば、図 2.2.2 に示したように仰角の低い衛星からの電波は電離層を通過する経路が長くなるので、電離層遅延量が多くなる。そのため、測位に使用する衛星に低仰角の衛星が増えると、測位誤差が増加する場合もある。

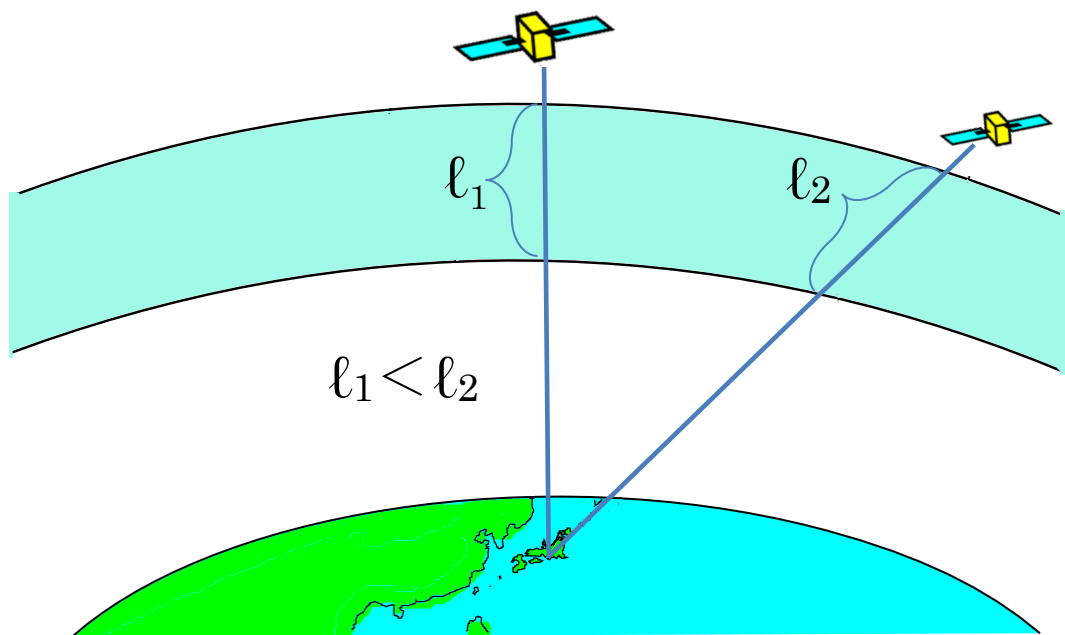


図 2.2.2: 電離層を通過する電波

II. 衛星軌道

GPS 測位では式(1)に示したように GPS 衛星自体の位置情報も重要な要素である。衛星からの電波には軌道係数と呼ばれるパラメータが含まれており、計算によって各衛星の位置を求めている。このパラメータは図 2.2.3 に示した地上にある 5 つの監視局でモニタすることで修正し、更新しているが、更新している間に、地球の形状・太陽や月の引力などの影響により誤差が生じる。結果として、GPS 衛星自体の位置情報にも誤差が含まれてしまうので、測位にも誤差が発生する原因となる。

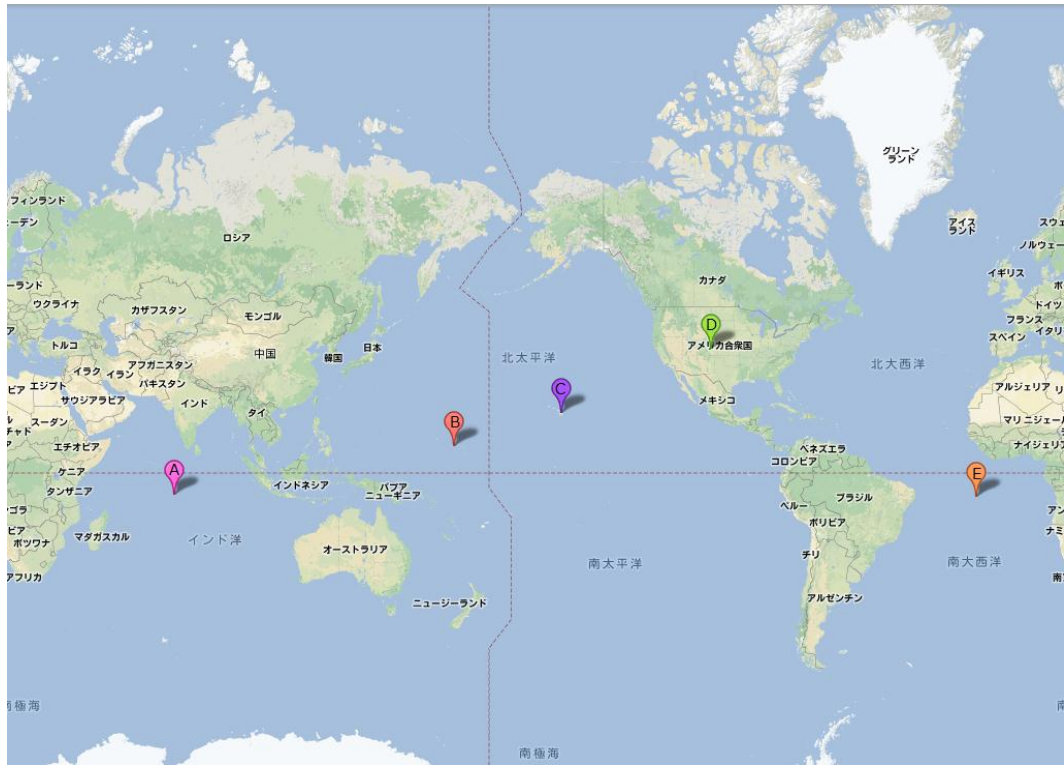


図 2.2.3: GPS 衛星モニタ局の位置(©2013 Google, SK M&C, Tele Atlas, ZENRIN)

- A: ディエゴ・ガルシア島(イギリス領)
- B: ケゼリン環礁(マーシャル諸島共和国)
- C: ハワイ島(アメリカ合衆国)
- D: コロラド・スプリングス(アメリカ合衆国)
- E: アセンション島(イギリス領)

III. 衛星クロック

GPS 衛星には高精度の原子時計が搭載されており、正確な時刻を得ることができる。しかしながら、衛星は上空 20,000km を周回しており、相対論的效果や特殊相対性理論などによって地上とは時間の進み方が異なる。また、20,000km 離れたところからの電波は地球(観測器)に到来するのに約 70ms を要し、その間に地球は自転により約 30m(日本での概算値)移動してしまう。よって、非回転系と回転計で誤差が生じる。これを Sagnac 効果という。

IV. マルチパス

周りをビル等に囲まれた場所で測位を行うと精度は悪くなることがある。これは、電波が様々な場所で反射し、伝搬経路が変化した電波を受信してしまうためである。マルチパスは高度が低くなるほど周囲の影響が大きくなるので、開けた場所で高度が高ければ、マルチパスの影響は少なくなると考えられる。

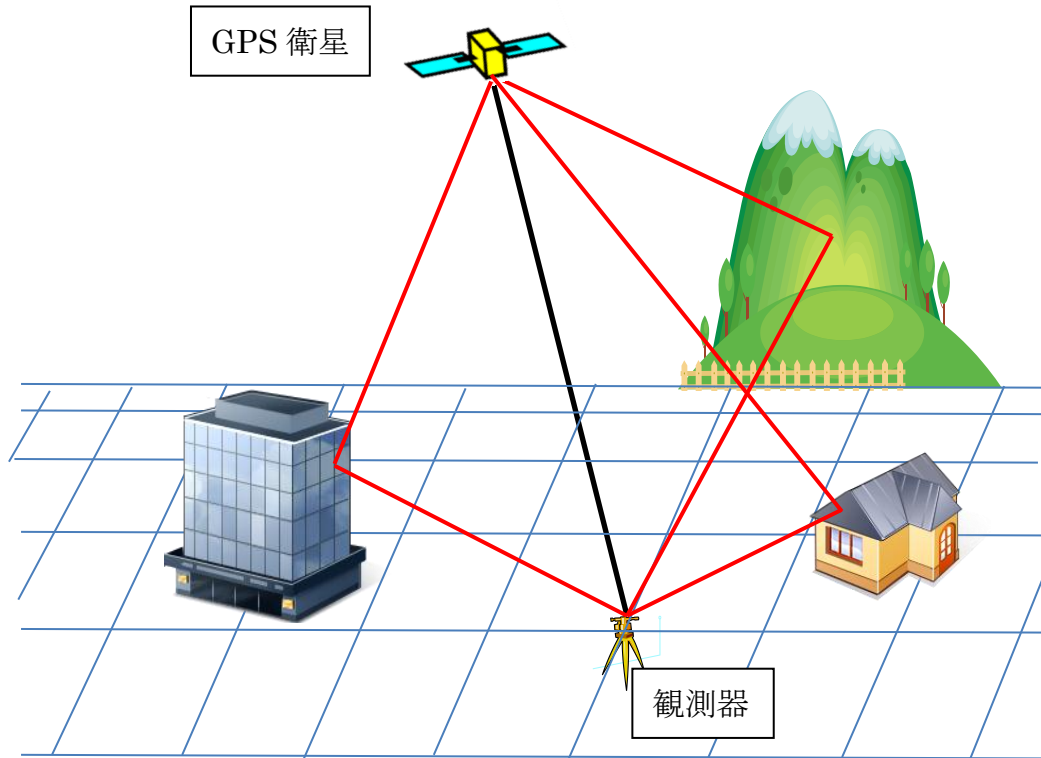


図 2.2.4: 電波の反射による経路変化

V. 対流圏遅延

大気中でも電波はわずかに遅延し、測位誤差の原因となる。対流圏遅延は大きく2種類に分類できる。1つは乾燥大気に起因する遅延で、GPS衛星からの電波によって中性の気体分子に電気双極子が誘導され、それが励起されることによって生じる。これを静水圧遅延と呼ぶ。もう1つは湿潤大気に起因する遅延で、水分子が永久電気双極子を形成しているために、特に強く励起されることで生じる。これを湿潤遅延と呼ぶ。対流圏遅延全体に占める割合は静水圧遅延が90%となっており、ほとんどが静水圧遅延である。しかしながら、湿潤遅延の方は、時間的空間的変化が大きい。電離層遅延は2周波測定で影響をキャンセルできるが、大気中の遅延量には周波数依存性がないため、2周波による遅延量の測定は不可能である。しかし、電離層に比べて変化が少なく、モデル化が容易であり、補正することができる。

VI. その他

その他については情報が少ないので、誤差の原因となる要素はよく分からないが、モジュールの計算性能や個体差に因るものと思われる。

I～VIまでの各測位誤差要因の全体に占める割合を図 2.2.5 に示す。

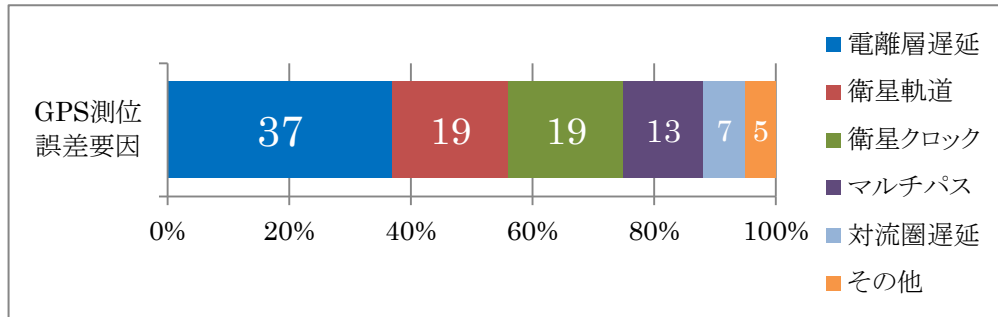


図 2.2.5: GPS 測位誤差要因の内訳

3. GPS 測位誤差計測システム

第 3 章では、GPS 測位誤差を計測するために製作した GPS 測位誤差計測システムについて述べる。

3.1. 観測方法

GPS 測位誤差を計測するため、市販されている GPS モジュールを用いて製作した GPS 測位誤差観測装置を群馬大学工学部(群馬県桐生市)の電気電子棟屋上に設置し、研究室内の PC と接続することで、GPS 測位誤差計測システムを構築した。

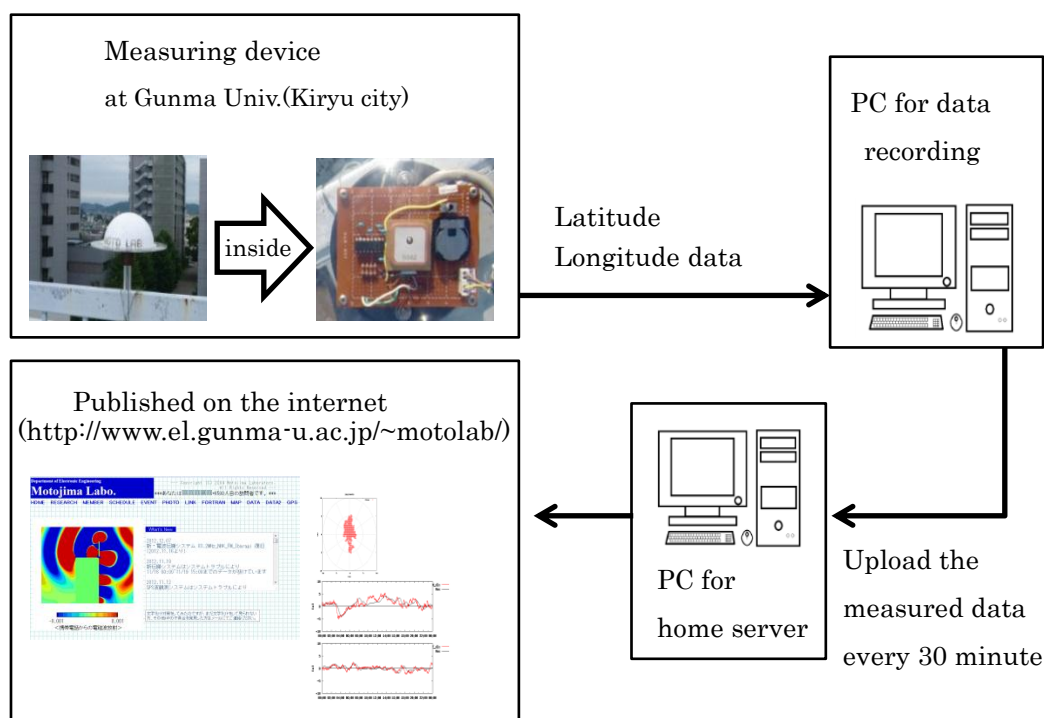


図 3.1.1: GPS 測位誤差計測システム概要

GPS モジュールから取得できるデータは NMEA-0183 形式(表 3.1-1~3) に準じており、水平方向の位置座標データは緯度と経度の 2 つで表される。しかし、このように緯度や経度といったデータのままである測位誤差がどの程度発生したのかが分かりにくいいため、測位誤差を距離で表すこととした。観測した測位誤差距離は 30 分ごとに研究室のホームページに載せているため、ネットワーク環境があればどこからでも閲覧が可能となっている。測位誤差距離の算出方法については第 4 章で述べる。

表 3.1-1: NMEA フォーマットの一般的なセンテンスの構成

\$	アドレスフィールド	,data1,data2,data3...,*Checksum,	CR	LF
----	-----------	----------------------------------	----	----

\$: センテンスの開始

CR(キャリッジリターン)と LF(ラインフィード): センテンスの終了

表 3.1-2: アドレスフィールドのパラメータ例

アドレスフィールド	データの種類
GPGGA	位置座標、測位時刻など
GPGSV	衛星の方位角や仰角など
GPGSA	測位状態など
GPVTG	受信器の移動速度、方位など
GPRMC	位置座標、測位時刻、方位など

表 3.1-3: 主な項目のデータ形式

項目	データ形式
日付	ddmmyy d: day, m: month, y: year
時刻(UT)	hhmmss.sss h: hour, m: minute, s: second
緯度 (0° ~90°)	ddmmm.mmmm d: degree, m: minute
経度 (0° ~180°)	dddmm.mmmm d: degree, m: minute

4. 測位誤差距離計算手法

GPS 測位誤差計測器を設置した場所(A 点)の位置情報と GPS モジュールが出力する位置情報(B 点)の差から測位誤差距離を算出する。

測位誤差を距離で表すため、位置座標の分かっている 2 点間の距離を求める方法を述べる。

A 点の緯度と経度を(θ_{NA} , θ_{EA})とし、同様に B 点は(θ_{NB} , θ_{EB})とする。2 点間の位置座標の差から距離を求めるために、地球のモデルを図 4.1 に示したような長軸(赤道半径) $a = 6,378,000$ [m]、短軸(極半径) $b = 6,357,000$ [m]の回転楕円体として定義する。

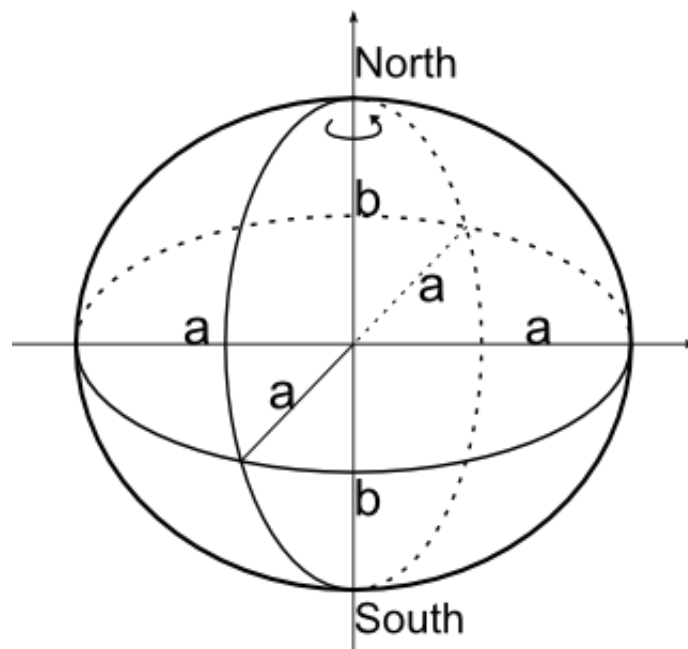


図 4.1: 回転楕円体

まず、緯度の差から南北方向誤差距離 R_{ns} [m]を求める。図 4.1 に示した回転楕円体を垂直方向に切った時に、その切り口は図 4.3 に示したような楕円になる。

楕円方程式により、図 4.2 のy軸から P 点までの弧の長さ ΔS は式(6)によって求められる。

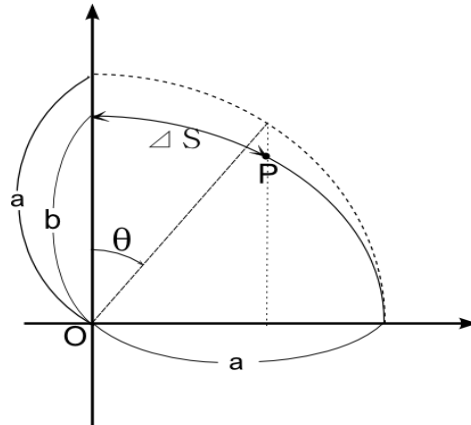


図 4.2: 楕円の弧の長さ

$$\Delta S = a \int_0^\theta \sqrt{1 - \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2}\right) \sin^2 \theta} d\theta \quad \text{式(6)}$$

式(6)を利用して、図 4.3 に示した楕円の円周上にある 2 点間の距離を求める式を式(7)に示す。

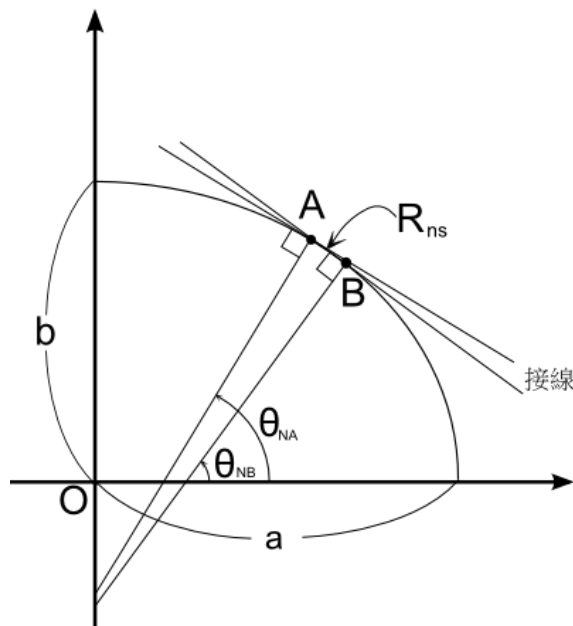


図 4.3: 南北方向距離 R_{ns}

$$R_{ns} = a \int_{90^\circ - \theta'_{NA}}^{90^\circ - \theta'_{NB}} \sqrt{1 - \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2}\right) \sin^2 \theta} d\theta \quad \text{式(7)}$$

ここで、式(7)の $\theta'_{NA, NB}$ は化成緯度と呼ばれる値で、GPS モジュールから得られる緯度とは異なるため、緯度 $\theta_{NA, NB}$ から化成緯度 $\theta'_{NA, NB}$ を求めなくてはならない。

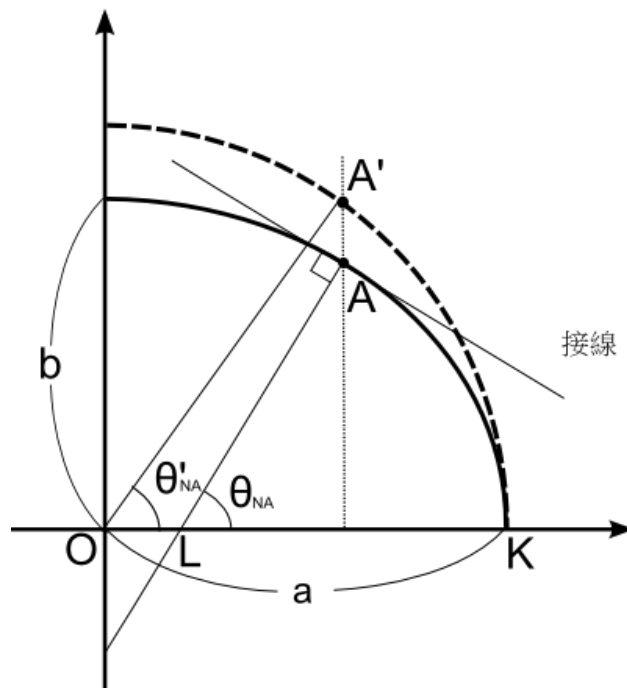


図 4.4: 緯度 θ_{NA} と化成緯度 θ'_{NA}

図 4.4 において、実線で示したのは長軸 a 、短軸 b の楕円、点線は半径 a の円である。A 点から楕円との接線に垂直な直線を引き、X 軸との交点を L としたとき、 $\angle ALK$ が位置座標として得られる緯度 θ_{NA} である。式(7)中の化成緯度 θ'_{NA} は、点 A から y 軸と平行に伸ばした線と半径 a の円との交点 A' から、円の中心 O に向かって引いた線と X 軸とがなす角度であり、図 4.4 における $\angle A'OK$ である。よって、式(8)により緯度 $\theta_{NA, NB}$ から化成緯度 $\theta'_{NA, NB}$ を求めることができる。

$$\theta'_{NA,NB} = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a} \tan \theta_{NA,NB}\right) \quad \text{式(8)}$$

次に、東西方向の誤差距離を求める。回転楕円体を化成緯度 θ'_{NA} で水平に切った切り口を 図 4.5 のように半径 R [m] の円であると仮定する。半径 R は点 A の化成緯度 θ'_{NA} と楕円の長軸 a を用いて式(9)で表すことができ、東西方向誤差距離 R_{ew} [m] が式(10)により求まる。

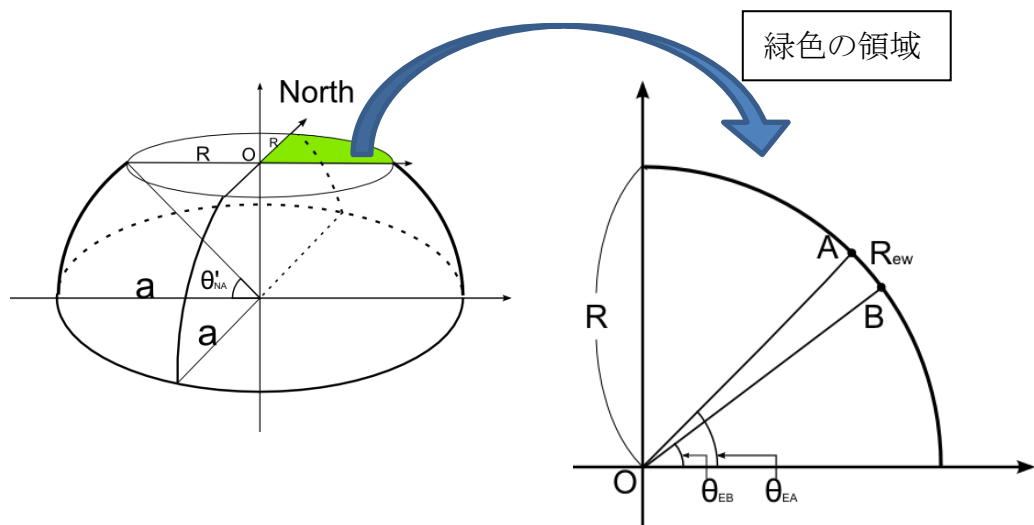


図 4.5: 東西方向距離 R_{ew}

$$R = a \cos \theta'_{NA} \quad \text{式(9)}$$

$$R_{ew} = 2\pi R \frac{\theta_{EB} - \theta_{EA}}{360} \quad \text{式(10)}$$

ただし、半径 R が A 点の化成緯度 θ_{NA} に依存しているため、この計算が有効なのは、2 地点の緯度がほぼ同じ値のときである。しかしながら、本研究における GPS 測位では、GPS モジュールを設置した A 点の位置座標と GPS モジュールが出力する位置座標(B 点)の緯度は非常に近い値を示すはずなので、式(10)を用いて測位誤差を距離に換算しても問題ないと思われる。

また、NMEA-0183 形式の緯度と経度の分解能は表 3.1-3 より 1/1000 分である。群馬県桐生市の位置する北緯 36 度 25 分付近において、緯度の 1/1000 分の差は式(7)から約 18cm、経度の 1/1000 分の差は式(10)から約 15cm となる。

5. 観測データ

第5章では、GPS 測位誤差計測システムを用いて観測された測位誤差のデータについて述べる。

5.1. 通常時

実際に観測したデータの一例を図 5.1.1 に示す。

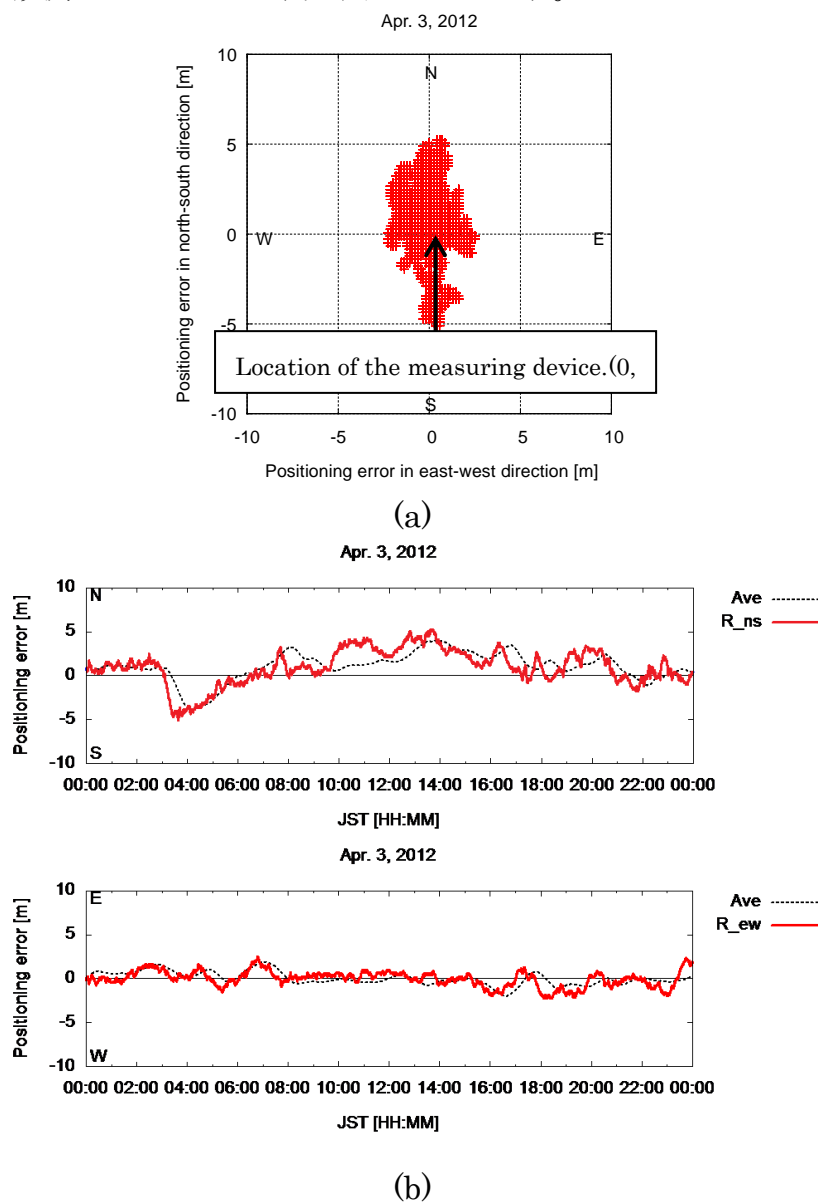


図 5.1.1: 観測データの一例 (a)2次元プロット (b)時間変化

図 5.1.1 (b)について、縦軸は測位誤差距離(R_{ns} 及び R_{ew})、横軸は日本時間、赤線で示した波形が実際に観測した測位誤差距離を表す。0[m]は GPS 測位誤差観測器を設置した場所の位置情報と GPS モジュールが出力した位置情報が一致した場合である。

図 5.1.1 を見ると、北方向の測位誤差は南東西方向の測位誤差に比べて変動が大きいことが分かる。これは、日本が北半球に位置していることが関係している。

図 5.1.2 に示したように日本では GPS 衛星の軌道の関係で、北東から北西の方角にかけて、仰角が約 60° 以下の範囲には GPS 衛星が通過しない。そのため、南北で衛星数のバランスが悪くなりやすく、測位精度が劣化してしまう。一方で、東西方向では衛星数に偏りが生じにくいいため、測位誤差は発生しにくいと考えられる。

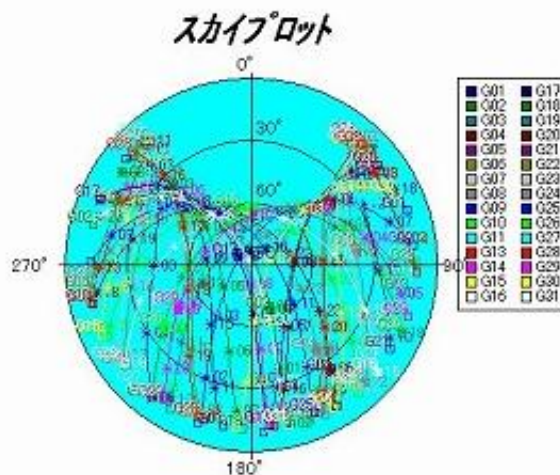


図 5.1.2: 東京での GPS 衛星配置の時間変化

また、測位誤差は時間経過によって変動していることが分かる。この変動は、衛星の幾何学的配置に因る測位誤差である。GPS 測位では上空の複数の衛星を捕捉することによって位置を求めているが、捕捉可能な衛星数や仰角によって測位精度は変化する。そして、衛星は軌道上を周回しているため、時間によって捕捉可能な衛星数や仰角は刻々と変動してしまう。そのため、測位誤差は時間変動する。しかし、衛星の幾何学的配置に因る測位誤差は本研究で観測対象としている電離層遅延に因る測位誤差とは異なるため、影響を考慮しなければならない。

5.2. 平均値線の作成

衛星配置に因る測位誤差を考慮するため、実際に観測した測位誤差を Data、過去 10 日間の 10 分毎の平均値を Average として、電離層遅延に因る測位誤差(PE: Positioning Error)を式(11)によって求める。

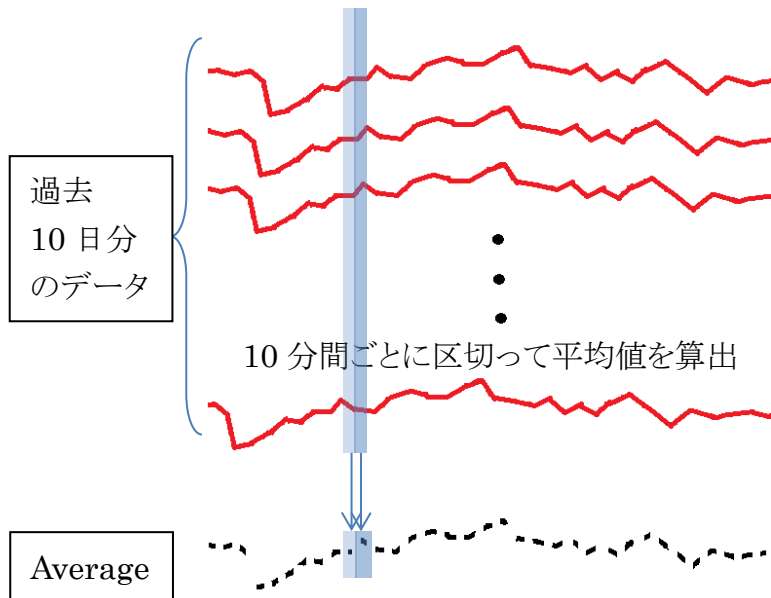


図 5.2.1: 平均値の算出手法

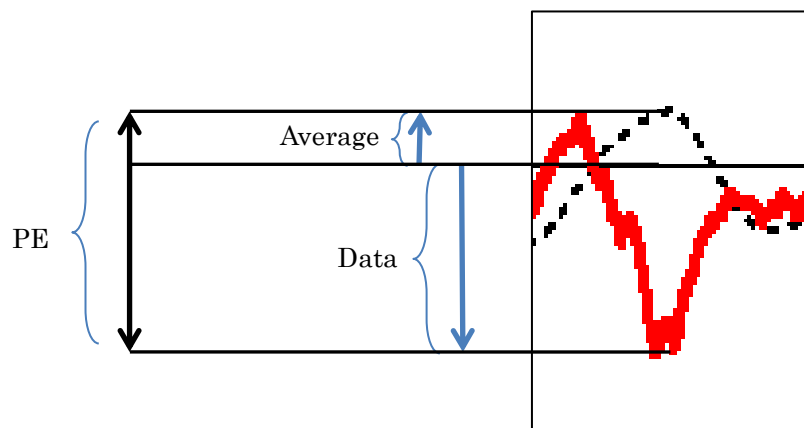


図 5.2.2: PE の導出

$$PE = |Data - Average| \quad \text{式(11)}$$

ここで、第 2 章で述べた測位誤差要因の内、衛星軌道、衛星クロック、マルチパスの 3 種類については、定点観測という条件の下、式(11)を用いることで、影響をキャンセルすることができると考えている。なぜなら、図 5.2.3、図 5.2.4 に示したように定点観測している条件では、日変動しないと考えられる上記 3 種類の測位誤差要因については、平均値との差を取ることによってその影響がほぼ無くなると考えられるからである。

反対に日変動している電離層遅延は異常が発生したときに差分 PE に顕著に表れるようになる。

また、対流圏遅延については、日変動していると考えられるが、第 2 章の図 2.2.5 に示したように全体に占める割合が小さいため、影響は少ないと考えている。

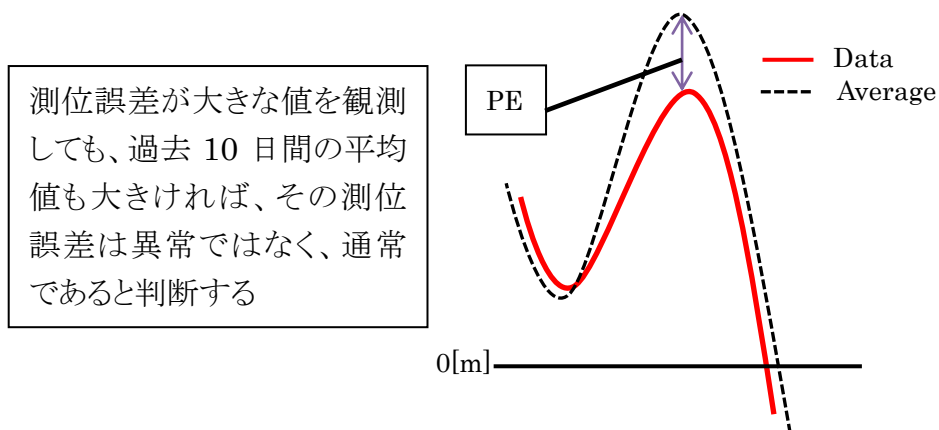
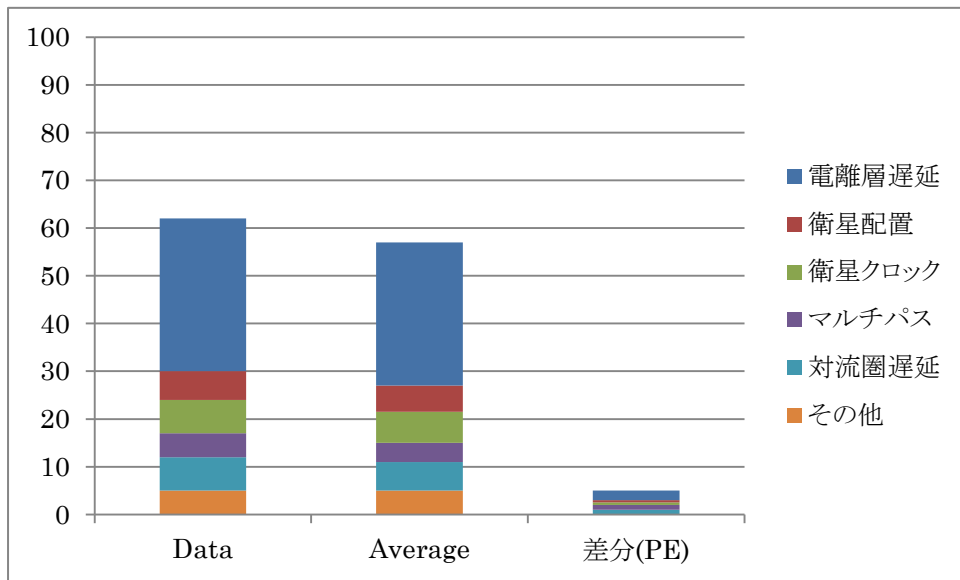


図 5.2.3: 測位誤差異常が発生していない場合

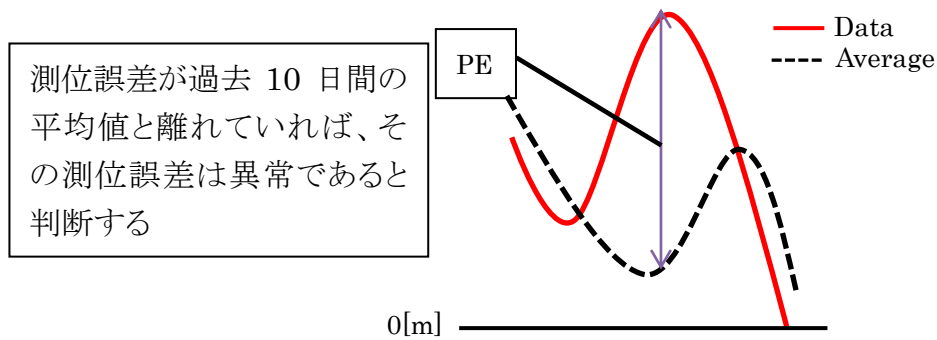
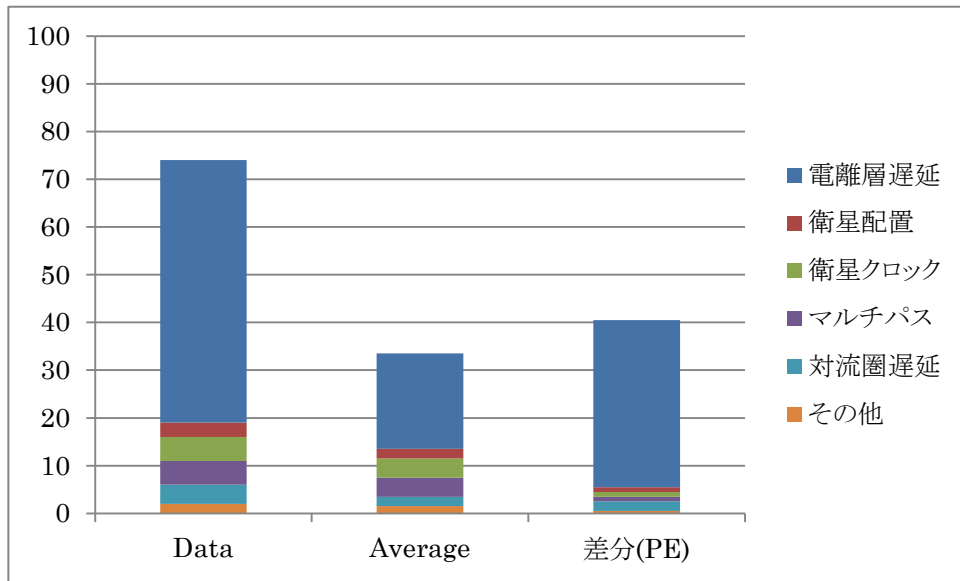


図 5.2.4: 測位誤差異常が発生している場合

図 5.2.3 及び図 5.2.4 は GPS 測位誤差を疑似的に表したグラフで、図 5.2.3 は電離層による測位誤差が異常でない場合を表している。この場合、差分 PE 自体の値も小さく、電離層遅延に因る測位誤差の値も小さい。しかし、図 5.2.4 に示した電離層による測位誤差が異常である場合は、PE の値も大きく、電離層遅延による測位誤差の割合も大きいため、異常であると判断する。

5.3. 測位誤差異常の例

観測期間中にいくつか測位誤差に異常が見られた。その内の 1 つを図 5.3.1 に示す。

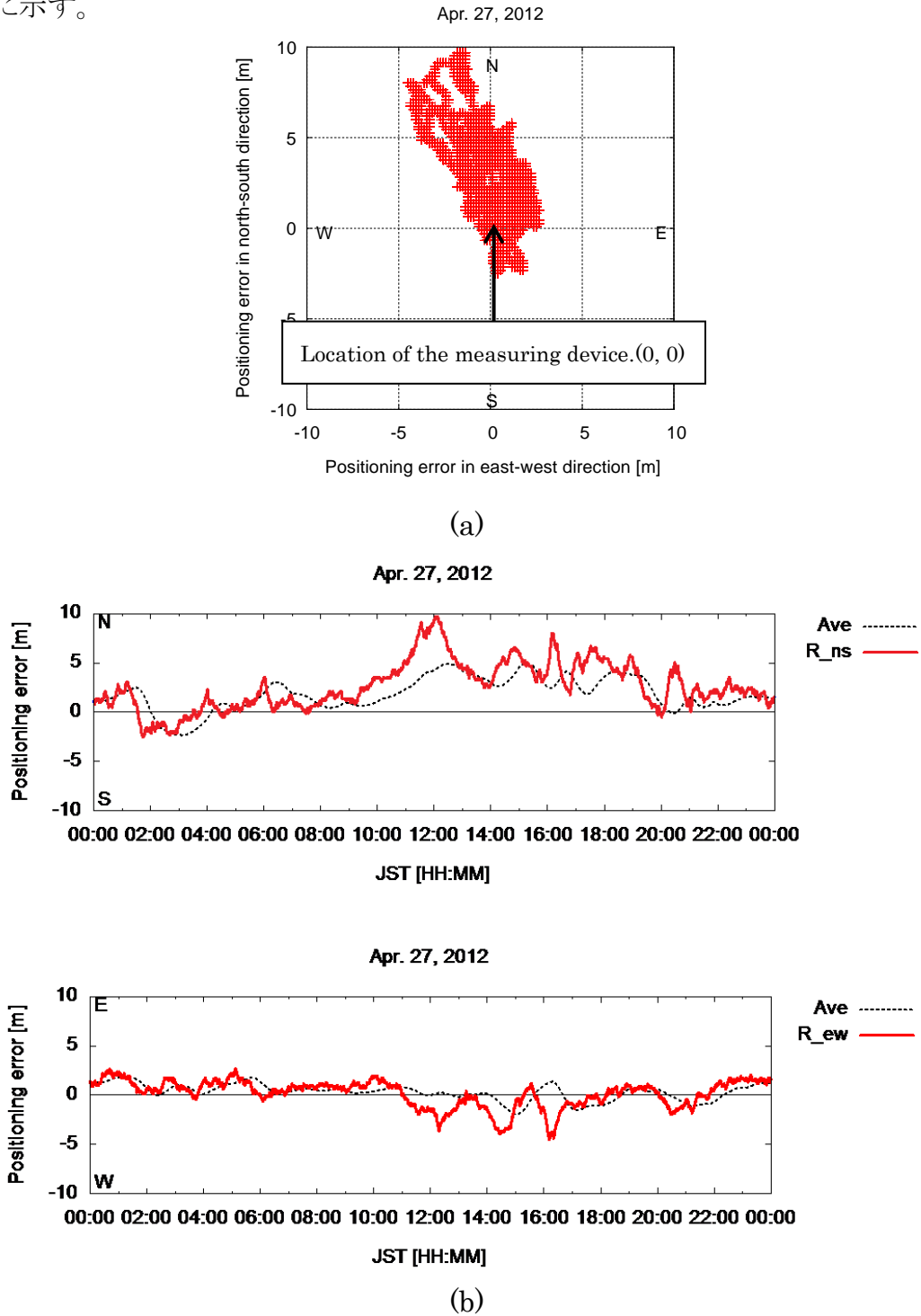


図 5.3.1: 異常データの一つ (a)2次元プロット (b)時間変化

図 5.3.1 では、図 5.1.1 とは異なり 10:00～20:00 にかけて測位誤差距離が平均値線から大きく離れていることが分かる。よって、PE の値は大きくなり、この時間帯において電離層遅延に因る測位誤差が異常値を示していると考えられる。

実際に、この測位誤差異常が観測された 2012 年 4 月 27 日の 2 日後の 4 月 29 日には千葉県北東部を震源とするマグニチュード 5.8 の比較的規模の大きな地震が発生している。

そのため、4 月 27 日に地震の前兆現象として GPS 測位誤差異常が観測されたと言えそうだが、この 1 件だけでは偶然の可能性もあるので、GPS 測位誤差異常と地震発生との関連性を統計的に検証する必要がある。統計的検証手法については第 7 章で述べる。

6. GPS 測位誤差の異常判定

第 5 章 3 節で GPS 測位誤差異常が発生したと述べたが、どの程度の測位誤差が発生した場合に異常と判断するか定量的に評価する必要がある。

第 6 章では、GPS 測位誤差を異常と判断する評価基準について述べる。

6.1. 衛星配置による測位精度指標

GPS モジュールから出力される測位データの中には衛星の幾何学的配置によって変化する測位精度の状態を示す DOP(Dilution of Precision: 精度低下率)が含まれている。その内、水平方向に対する DOP である HDOP(Horizontal DOP)を分母に、式(11)を分子として式(12)を定義する。

HDOP は測位精度が良好であれば 1 以下の値、精度が劣化している場合は 1 以上の値を示す。そのため、仮に式(12)の分子が大きい値を示したとしても、測位精度が劣化している場合は、HDOP の値が大きくなり、 PE_I の値は小さくなるため、衛星配置による影響を抑えることができる。

$$PE_I = \frac{|\text{Data} - \text{Average}|}{\text{HDOP}} \quad \text{式(12)}$$

式(12)のように測位誤差を HDOP で割ることによって、式(11)よりもさらに衛星配置の影響を抑えた、電離層遅延に因る測位誤差距離を定義した。この PE_I (Positioning Error Index)が異常判断基準値を超えたときに GPS 測位誤差異常の発生と判断する。

6.2. 太陽フレアの影響

電離層に異常をきたす原因として太陽フレアの発生が挙げられる。太陽フレアが発生すると、大量の電磁波や高エネルギー荷電粒子が宇宙空間に放出され、その一部は地球に降り注ぐ。電磁波が地球に到来すると、電離層において気体分子の電離が活性化され、電子数が変動するため、GPS 測位に影響を与える要因となる。

太陽フレアの規模の大きさは、アメリカの静止気象衛星 GOES(Geostationary Operational Environment Satellite)によって観測された軟 X 線の強度によってクラス分けされ、表 6.2-1 に示したように 10 のべき乗の形になっている。

表 6.2-1

X 線(波長 $1\sim 8\text{\AA}$)の強度 = $D \times 10^E [\text{W}/\text{m}^2]$

E の値	-4	-5	-6	-7	-8
クラス分類	X	M	C	B	A

例えば強度 $3.5 \times 10^{-5} [\text{W}/\text{m}^2]$ のときは M3.5 と表記される

M クラス以上の太陽フレアは発生頻度が低いですが、地球に与える影響が大きいため、M クラス以上の太陽フレアが発生してから 3 日間は、GPS 測位誤差異常が発生していても、太陽フレアの発生に伴う電離層擾乱であると判断し、解析対象からは除外する。

7. 関連性の解析方法

第7章ではGPS測位誤差と地震との関連性を統計的に解析する手法について述べる。

7.1. 関連付け時間長

測位誤差異常と地震発生との関連性が最も強まる時間間隔を解析するために、関連付け時間長として t_{seq} を定義し、測位誤差異常発生から t_{seq} 日以内に対象とする地震が発生していた場合に、その測位誤差異常を“関連あり”とする。

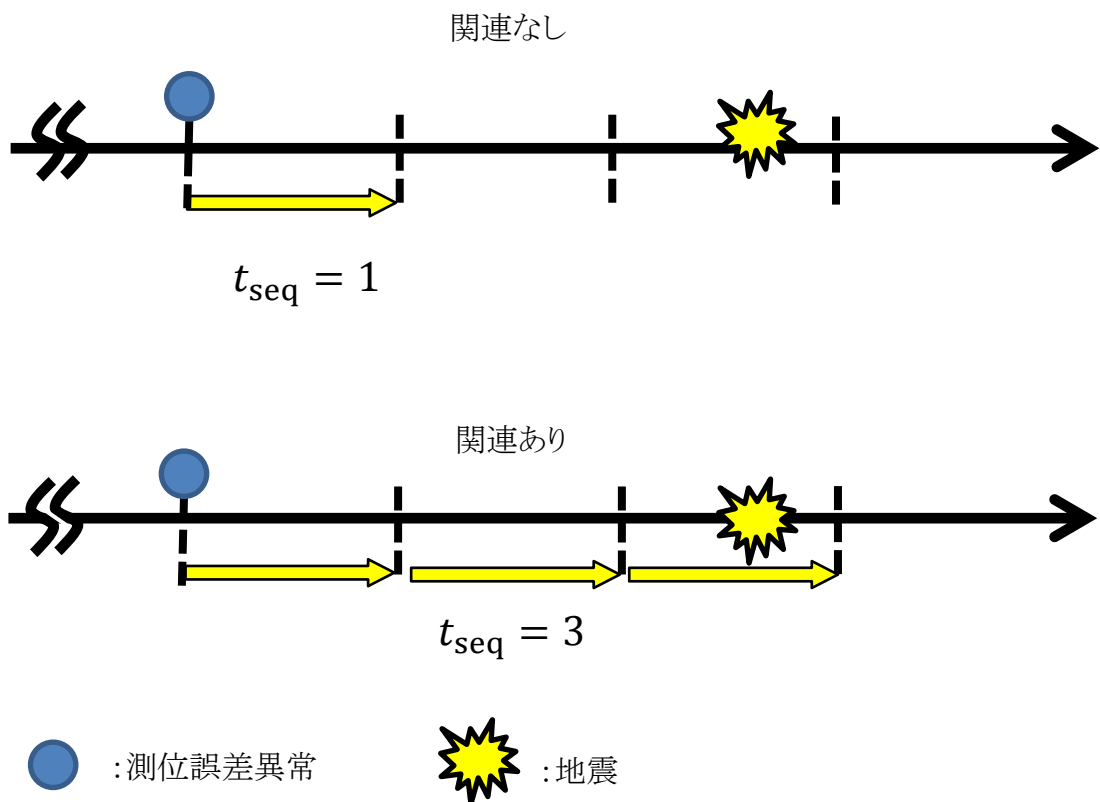


図 7.1.1: 関連付け時間長

図 7.1.1 で、 $t_{seq}=1$ のとき測位誤差異常は“関連あり”とならないが、 $t_{seq}=3$ のときは“関連あり”となる。すべての測位誤差異常に対して t_{seq} を $-30\sim 30$ 日の範囲で 1 日刻みで変化させて解析を行う。

7.2. 無相関時併発確率

全解析対象期間長 T_{all} に対して、地震発生回数 N_{eq} や測位誤差異常回数 N_{anom} の値が大きすぎると、測位誤差異常と地震との間に全く関連性がなかったとしても、“関連あり”となる確率は上昇する。そこで、測位誤差異常と地震発生との間に関連性がなくランダムに発生したと仮定した場合に、“関連あり”となる確率(無相関併発確率)を求める。

全解析期間長 T_{all} 中に、地震と測位誤差異常が 1 回だけ発生したとする。1 回の測位誤差が発生してから t_{seq} 以内にその地震が発生する確率は $|t_{seq}|/T_{all}$ で与えられるので、これに全解析期間長内に発生した地震発生回数 N_{eq} を乗じること、
式(13)によって求める。

$$P_{unc} = \frac{N_{eq} \cdot |t_{seq}|}{T_{all}} \quad \text{式(13)}$$

7.3. 確率利得

実際に測位誤差異常と判定された回数 N_{anom} に対して、“関連あり”となった測位誤差異常回数 n_{obs} を用いて“関連あり”となった確率 P_{obs} を式(14)によって定義する。

$$P_{obs} = \frac{n_{obs}}{N_{anom}} \quad \text{式(14)}$$

式(13)と式(14)から無相関併発確率と実際に“関連あり”となった確率との比を式

(15)によって計算し、確率利得 ratio とする。

$$\text{ratio} = \frac{P_{\text{obs}}}{P_{\text{unc}}} \quad \text{式(15)}$$

ratio の値が 1 を超えていれば、無相関と仮定した場合と比べて、実際の確率の方が高いということなので、測位誤差異常と地震との関連性が強いことを示す。また、ratio \approx 1 の場合は、無相関時とほぼ同じ確率であるということを示しているので、測位誤差異常と地震との関連性は弱いことを示す。

式(15)で求まる ratio の値を、GPS 測位誤差異常と地震との関連性の評価基準とする。

8. 解析対象とする地震

地震の前兆現象として発生する電離層擾乱は震央を中心として同心円状に広がり、影響を与える範囲は地震の規模を示すマグニチュードの大きさによって変化することが予想される。また、ある程度の規模でないと電離層へ影響は与えないと考えられる。そこで、地震発生前に測位誤差異常が観測された地震と、観測されなかった地震は、観測地点(群馬県桐生市)から震央までの距離(L)の分布に何か特徴が見られないかを調査する。

図 8.1 に示したのは、解析対象期間の 2011 年 6 月 1 日から 2012 年 6 月 30 日までの 396 日間に発生した地震のマグニチュードと L の関係を表したグラフである。規模が小さすぎる地震は電離層まで影響を及ぼさないと考え、マグニチュード M は $M \geq 4.5$ とした。黒丸で示した地震は第 9 章の解析結果で測位誤差判定基準を $PE_i \geq 4.1$ 、関連付け時間長 t_{seq} を 3 日としたときに、測位誤差異常と“関連あり”となった内陸性地震である。

マグニチュードが小さいと、遠方で発生した地震は“関連あり”とはならないが、マグニチュードが小さくても観測地点の近辺で発生した地震は“関連あり”となる傾向が見受けられる。そこで、 L を M と係数 a を用いて式で定義した。

$$L = 10^{aM} [\text{km}] \quad \text{式(16)}$$

式(16)に示したように観測地点から震央までの距離 L をマグニチュード M を変数として表した。また、係数 a がそれぞれ 0.3, 0.4, 0.5 の場合を図 8.1 に載せた。

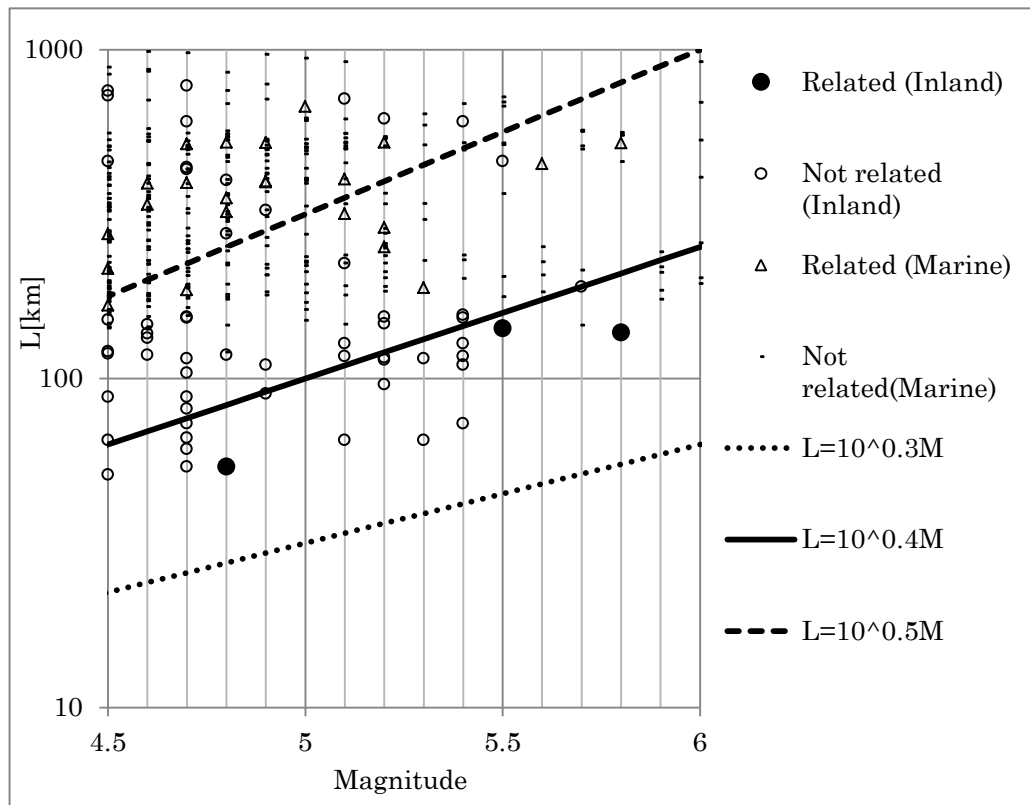


図 8.1: 震央までの距離 L とマグニチュード M の関係

図 8.1 の内陸性地震について、 $\alpha=0.3$ のときは解析対象とする地震が全くないことが分かる。また、 $\alpha=0.5$ のときは対象とする地震が多すぎて、関連性の無い地震まで解析対象に含まれてしまうことが分かる。

そこで、 α の値を変えた場合に測位誤差異常と地震との関連性がどう変化するかを解析することで、測位誤差異常と地震との関連性があると判断できる α の上限値を決定する。

参考のため、図 8.2 に式(16)の係数である α を 0.4 とした時の L の範囲を示す。 L の範囲はすなわち地震発生を予測する際の地震発生予測域となる。

また、図 8.2 には図 8.1 で“関連あり”となった地震の発生場所を記した。

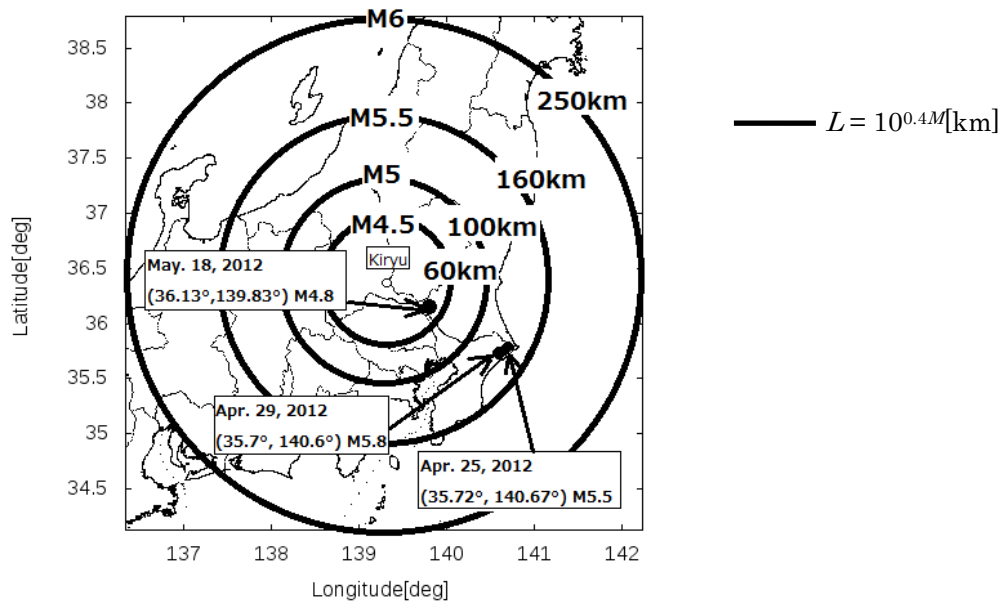


図 8.2: $\alpha = 0.4$ の場合の地震発生予測域

9. 解析結果

第9章では、第7章で述べた解析手法によって得られた結果を述べる。

9.1. 解析条件

解析対象としたのは2011年6月1日から2012年6月30日までに発生した測位誤差異常とマグニチュード4.5以上の地震である。

9.2. 内陸性地震と海洋性地震

震央の位置が陸地である内陸性地震と、海上である海洋性地震に分類して、ratioを計算した。マグニチュードは5以上の地震を解析対象とした。

まず始めに、南北方向の測位誤差異常と地震との関連性を解析した。

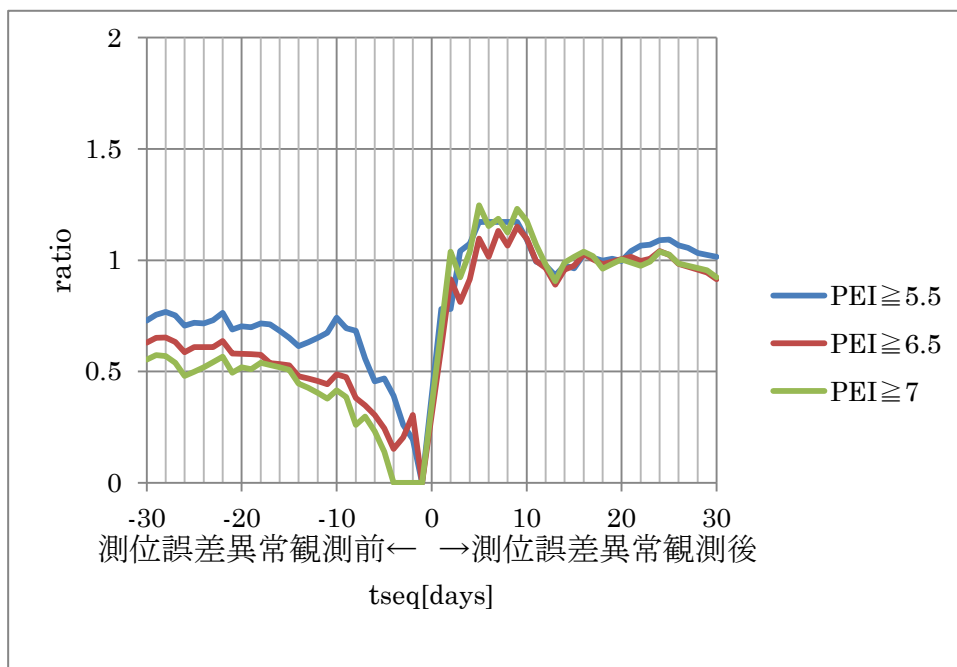


図 9.2.1: 内陸性地震(南北方向の測位誤差を解析に使用)

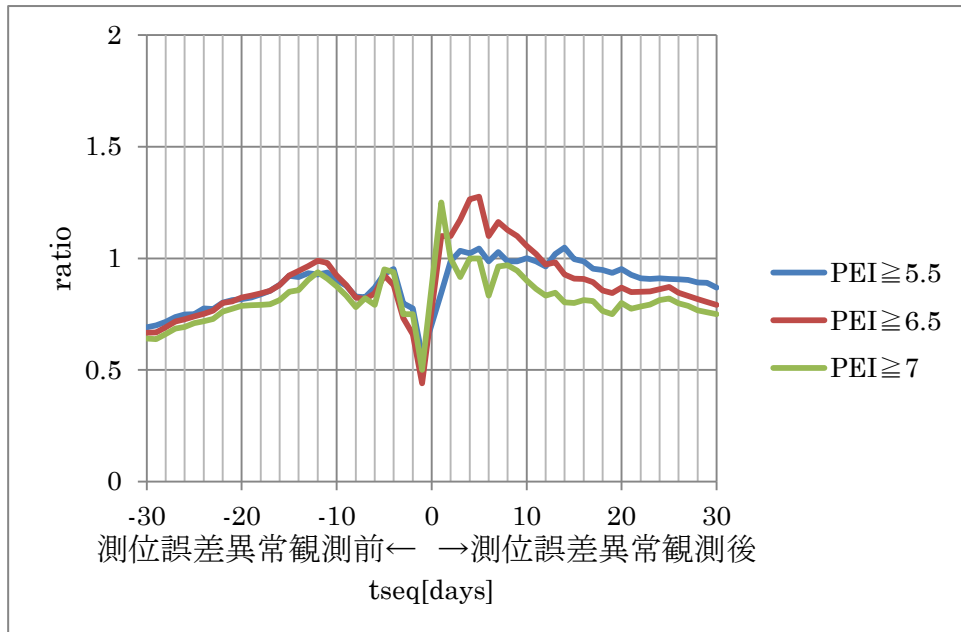


図 9.2.2: 海洋性地震(南北方向の測位誤差を解析に使用)

図 9.2.1 は、南北方向の測位誤差に対して、異常判定基準をそれぞれ $PEI \geq 5.5$, $PEI \geq 6.5$, $PEI \geq 7$ とした場合の ratio の値を示したグラフで、横軸は関連付け時間長 t_{seq} である。

t_{seq} が正の値のときは測位誤差異常が観測されてから地震が発生していたときの関連性を表し、負の値のときは反対に地震が発生してから測位誤差異常が発生していた場合の関連性を表している。

図 9.2.1 と図 9.2.2 から、内陸性地震も海洋性地震も t_{seq} が正の値のときに ratio が大きい値を示し、ratio が最大値になったのは、 $1 \leq t_{seq} \leq 10$ の範囲であることから、測位誤差異常が発生してから 10 日以内には、関連する地震が発生していることが分かる。

しかしながら、ratio の値は最大でも 1 を少し超えた程度であり、これは、無相関のときの確率とほぼ同じであるといえる。そのため、南北方向の測位誤差と地震との関連性は強いとは言えない。

続いて、東西方向の測位誤差異常と地震との関連性を解析した結果を示す。

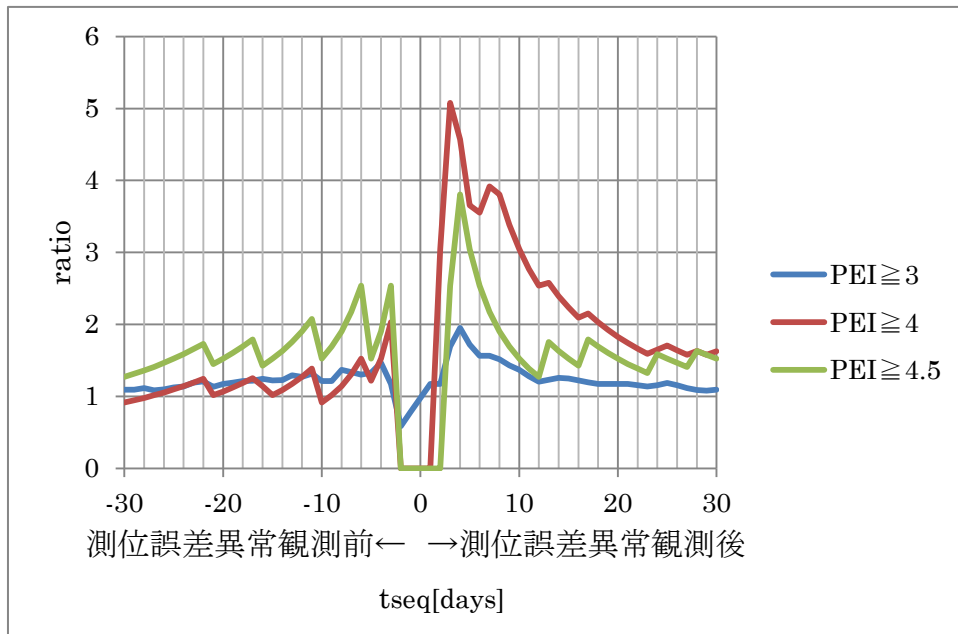


図 9.2.3: 内陸性地震(東西方向の測位誤差を解析に使用)

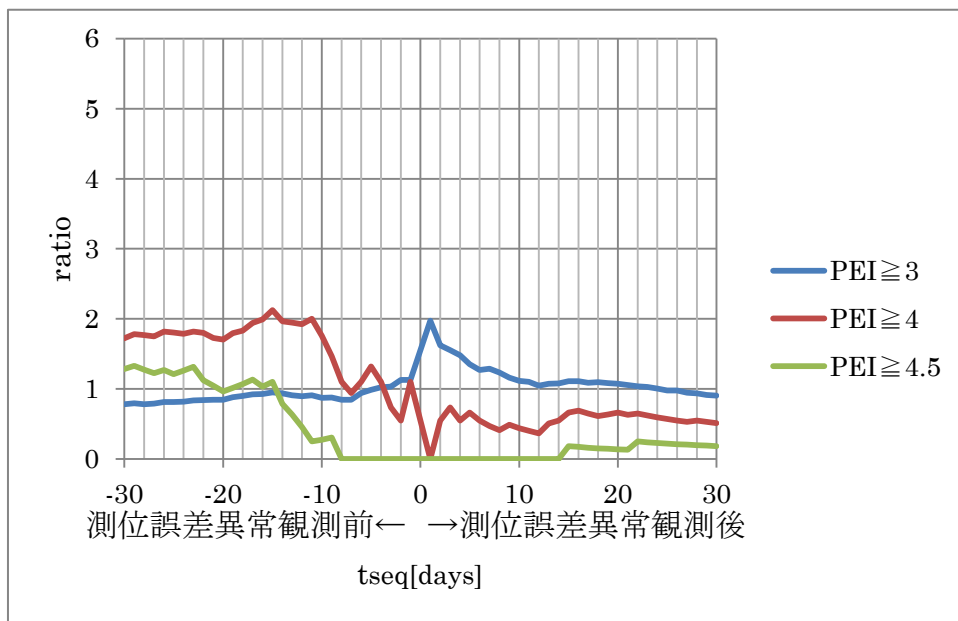


図 9.2.4: 海洋性地震(東西方向の測位誤差を解析に使用)

図 9.2.3 と図 9.2.4 は、東西方向の誤差距離に対して、異常判定基準をそれぞれ $PE_I \geq 3$, $PE_I \geq 4$, $PE_I \geq 4.5$ とした場合の ratio の値を示したグラフである。

図 9.2.3 において、図 9.2.1 や図 9.2.2 と同様に t_{seq} が正の値のときに ratio が最大になり、特に、 $PE_I \geq 4$ とした場合の $t_{seq}=3$ のときに最大値をとることが分かる。この場合の ratio は約 5 であることから、測位誤差異常と地震とがランダムに発生したときに、測位誤差異常が“関連あり”となる確率に比べて、約 5 倍の確率で測位誤差異常と地震が“関連あり”となったことを示している。

図 9.2.1 から図 9.2.4 の解析結果から、内陸性地震を対象として解析した場合の方が、海洋性地震を対象として解析した場合よりも測位誤差異常との関連性が強いことが分かった。

あくまで予測だが、地震の前兆現象として電離層に影響を与える何らかの要因が海水によって、影響力が弱まったしまったのではないかと考えられる。

また、図 9.2.1、図 9.2.2 と図 9.2.3、図 9.2.4 の比較によって、南北方向の測位誤差を用いて異常判定を行うよりも、東西方向の測位誤差を用いて異常判定を行った方が測位誤差異常と地震との関連性は強まることも同時に分かった。これは、東西方向の測位誤差が、南北方向に比べて安定していることと関係があると思われる。

なぜなら、東西方向距離は第 5 章 1 節で述べた通り、普段から衛星配置に因る測位誤差が発生しにくい傾向があり、電離層擾乱による測位誤差が南北方向より、はっきりと観測できるからだと考えられる。

そのため、以降の解析結果については、内陸性地震を解析対象とし、測位誤差も東西方向のみを用いて異常判定を行った場合の結果のみ載せることとする。

9.3. PE_Iの閾値

測位誤差異常判定基準値である PE_I の値がある閾値を超えたときに測位誤差異常と判断しているが、その閾値をいくつにしたときに測位誤差異常と地震との関連性が最も強くなるのかについて解析を行った。

第7章2節の結果から、関連性の強まる値として、 $t_{seq}=3$ を選択し、 $M \geq 5$ の内陸性地震について、式の α が 0.38, 0.4, 0.42, 0.44 の4パターンを解析対象とした。測位誤差については東西方向のデータを使用した。

また、PE_Iの閾値としては3.4から4.5の範囲を0.1刻みで変化させた。解析結果を図9.3.1に示す。

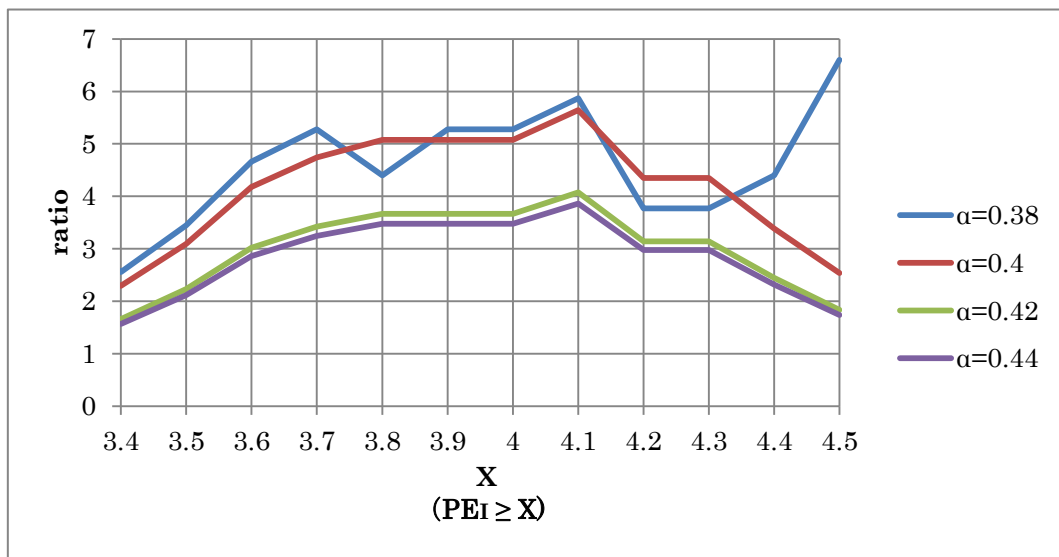


図 9.3.1: 異常判定閾値による関連性の変化

図 9.3.1 から、 α が 0.4, 0.42, 0.44 の3パターンについては PE_I が大きすぎても小さすぎても ratio の値が小さくなる傾向が見受けられる。これは、PE_I が大きすぎるときは、異常と判定される測位誤差が少なくなってしまう、その結果“関連あり”となる測位誤差異常回数 n_{obs} も減ってしまったためであると考えられる。PE_I が小さすぎるときは、測位誤差異常回数が多くなり、地震との関連性がない測位誤差異常まで含んでしまったためであると考えられる。

最も ratio の値が高くなったのは PE_I ≥ 4.1 とした場合で、 α が 0.4, 0.42, 0.44 の3パターンで最大値を取り、 α が 0.38 のときも PE_I ≥ 4.5 を除けば、PE_I ≥ 4.1 とした場合に ratio は最大になる。この結果から、東西方向の測位誤差について PE_I ≥ 4.1 とした場合に測位誤差異常と地震との関連性が強まると判断した。

9.4. α による関連性の変化

続いて、解析対象となる地震を判定する式(16)の係数 α について解析を行った。今回は $M \geq 5$ に加えて、 $M \geq 4.5$ の内陸性地震も解析対象とした。また、 α の範囲は 0.36 から 0.54 までを 0.01 刻みで変化させた。解析結果を図 9.4.1 に示す。

また、第 9 章 3 節の結果から測位誤差については、東西方向のデータを使用し、 $PE \geq 4.1$ となった場合を測位誤差異常と判定した。

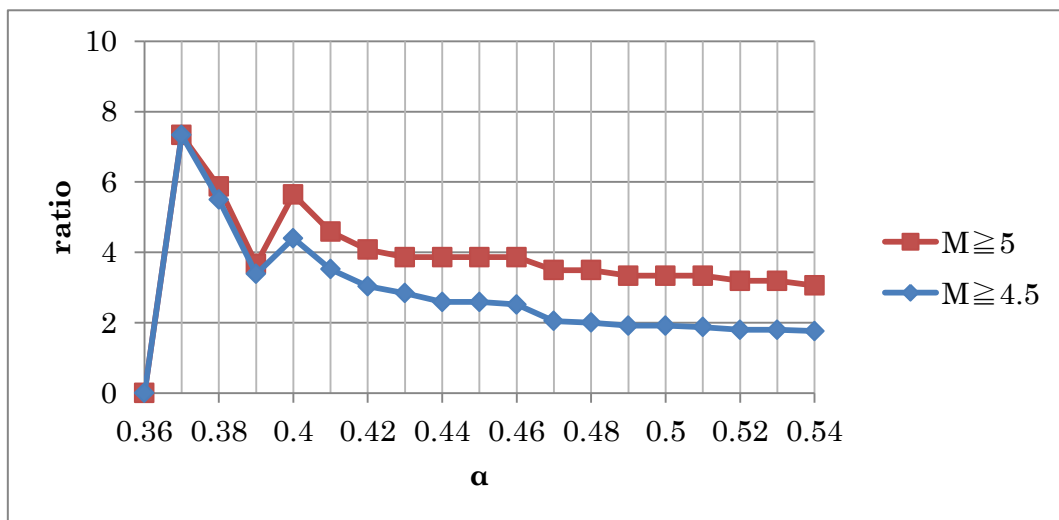


図 9.4.1: α の値による関連性の変化

図 9.4.1 より、 $M \geq 5$ の場合も $M \geq 4.5$ の場合も、ほぼ同じ波形となり、 $\alpha = 0.37$ で ratio が最大になる。そして、 α を大きくして、解析対象とする地震の発生範囲を広げていくと、一度 ratio が下がった後、 $\alpha = 0.4$ で再び上昇している。

ratio の値が最大になったのは $\alpha = 0.37$ だが、 $\alpha = 0.4$ で再び上昇したということは、対象範囲を広げていったときに、測位誤差異常と関連のある地震が解析対象に含まれたことを示しているため、 α の値としては 0.4 が妥当であると判断した。

9.5. 最も関連性が強まる条件

第9章4節までの解析から、測位誤差異常と地震との関連性が強まる各パラメータが決定したため、その値を用いて解析した結果を図9.5.1に載せる。

改めて解析条件を記述すると以下ようになる。

- ・解析対象期間長: 2011年6月1日から2012年6月30日までの396日間
- ・対象とした地震: $L \leq 10^{0.4M}[\text{km}]$ の範囲に含まれる内陸性地震
- ・測位誤差異常判定基準: 東西方向の測位誤差に対して、 $PE_L \geq 4.1$ となった測位誤差
- ・関連付け時間長: -30~30日の範囲を1日刻みで変化

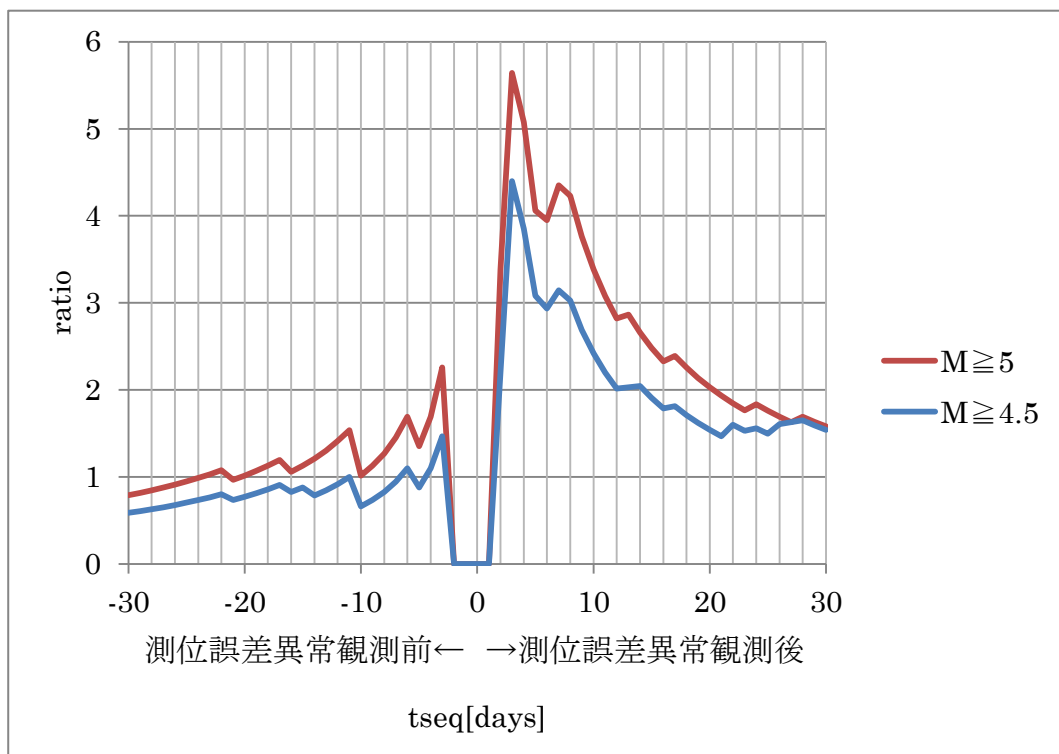


図 9.5.1: 測位誤差異常と地震との関連性

図 9.5.1 から、 t_{seq} が負の値のときより正の値の方が **ratio** が大きいので、地震の前兆現象として GPS 測位誤差異常が観測されていることが分かる。そして、関連付け時間長 $t_{\text{seq}}=3$ のときに最も **ratio** が大きくなっていることから、測位誤差異常を観測してから 3 日以内に内陸性地震が発生していた割合が高かったことが分かる。また、 $M \geq 4.5$ のグラフより、 $M \geq 5$ のグラフの **ratio** が大きいので、ある程度規模の大きな地震でないと前兆現象として測位誤差異常を観測できない傾向があることが分かった。

ratio の最大値は約 5.6 なので、測位誤差異常と地震との間に関連性が無く、ランダムに発生したと仮定した場合に両者が 3 日以内に発生する確率より、実際の観測結果から得られた確率の方が 5.6 倍高いことを示している。

10. 確率による検証

第9章にて測位誤差異常と地震との関連性が最も強まるパラメータが決定した。

第10章では、的中率(測位誤差異常を観測した後に地震が発生した確率)と、誤報率(測位誤差異常を観測したが地震が発生しなかった確率)と、見逃し率(地震発生前に測位誤差異常が発生していなかった確率)を用いて評価する。

第9章の解析結果から、内陸性地震($M \geq 5$, $L \leq 10^{0.4M}$ [km])と東西方向の測位誤差異常($PE_L \geq 4.1$)について、 $t_{seq} = 3$ で確率を求める。

全解析対象期間長 396 日の内、東西方向の測位誤差異常は 9 回発生した。その内、5 回の測位誤差異常については観測後 3 日以内に地震が発生していた。一方で、対象とした内陸性地震は 13 回発生しており、その内、2 回の地震は発生前の 3 日前までに測位誤差異常が発生していたが、残りの 11 回は発生していなかった。

このことから、確率を計算すると、的中率は約 56% (5 回/9 回)、誤報率が約 44% (4 回/9 回)、見逃し率は約 85% (11 回/13 回)となった。

的中率だけをみると 5 割を超えており、測位誤差を観測することで、地震発生を予測できそうだが、その一方で見逃し率も高く、ほとんどの地震は地震発生前に測位誤差異常を観測できていなかったという結果になった。

このことから、解析対象となったすべての地震が発生前に電離層へ影響を与えていたとはいえ、前兆現象として電離層へ影響を与える地震には、他に特徴があると考えられる。

11. 結論

地震の前兆現象として発生する電離層擾乱を、GPS 測位誤差を観測することで間接的に捉えることを目的として、GPS 測位誤差計測システムを構築した。

定点測位した長期間の観測結果から、東西方向の測位誤差異常と内陸で発生した地震との関連性は、互いが無相関であると仮定した場合に比べ、約 5.6 倍になることが分かった。

確率利得 ratio が最大になったのは、関連付け時間長が 3 日のときであったということは、測位誤差異常を観測してから 3 日以内に地震が発生する確率が最も高いことを示している。

実際に、測位誤差異常を観測してから、3 日以内に地震が発生していた確率は約 56%という結果を得たが、その一方で、地震が発生する前に測位誤差異常を観測できていなかったという事例も多くなってしまった。

12. 今後の課題

現在は群馬大学工学部電気電子棟屋上のみで観測を行っており、図 8.2 に示した地震発生予測域は広範囲になっている。製作した GPS 測位誤差計測システムは、高価な計測器や広いスペースを必要としないため、今後は多点観測を行うことによって、図 8.2 に示したような円が各地点で形成することができ、地震が発生する可能性のある地域が絞り込めるのではないかと考えられる。

また、本研究で使用した GPS 測位データは、2011 年 11 月に観測を始め、約 2 年程度のデータしか保存されていない。今後、より多くのデータを解析することによって、新たな傾向が見つけられる可能性がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、学部4年から3年間ご指導ご鞭撻頂きました本島邦行教授ならびに、1年という短い間でしたが、同じくご指導ご鞭撻頂きました羽賀望助教授に感謝の意を表すとともに厚く御礼申し上げます。

また、修士学位論文の主査を引き受けてくださった山越芳樹教授ならびに副査を引き受けてくださった弓仲康史准教授に厚く御礼申し上げます。

そして、研究を支えてくれた研究室の先輩・同輩・後輩の皆様方に心からの感謝と御礼を申し上げます。

本研究に用いた地震データは気象庁の気象統計情報を利用させて頂きました。また、太陽フレアのデータはNOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)の情報を利用させて頂きました。関係者各位に心から御礼申し上げます。

参考文献等

- 【1】Hayakawa, M., Molchanov, O. A., Ondoh, T., and Kawai, E, The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals, J. Comm. Res. Lab.,Tokyo, 43, 169-180, 1996.
- 【2】Nishi, M., Shinbara, H., Shin, K., and Yoshida,T., “見通し外 FM 放送波 77.1MHz の 3 年間 3 区間における観測結果”, Journal of AtmosphericElectricity, Vol.31, No.1, 2011, pp11-22.
- 【3】本島邦行,“見通し内 VHF 帯伝搬異常と地震発生との統計的関連性”, Journal of AtmosphericElectricity, Vol.31, No.1, 2011, pp37-49.
- 【4】Liperovskaya, E. V., V. V. Bogdanov, P.-F. Biagi, C.-V. Meister, and V. A. Liperovsky, “Daytime variations of foE connected to earthquakes,” Natural Hazards and Earth Syst. Sci., vol.11, no.6, pp.1807-1812, 2011.
- 【5】廣岡伸治, 服部克己, 紺晋平, 市川卓, 竹田辰興, “東北地方太平洋沖地震に先行する電離圏異常の 3 次元構造解析,” 大気電気学会誌, vol.5, no.2 (no.79), pp.70-71, 2011.
- 【6】廣岡伸治, 服部克己, 紺晋平, 市川卓, 竹田辰興, “東北地方太平洋沖地震に先行する電離圏異常の 3 次元構造解析その 2,” 大気電気学会誌, vol.6, no.1 (no.80), pp.146-147, 2012.
- 【7】Agostino, M. De., and M. Piras, “Earthquake forecasting: a possible solution considering the GPS ionospheric delay,” Natural Hazards and Earth Syst. Sci., vol.11, no.12, pp.3263-3273, 2011.
- 【8】楢岡積分・楢岡関数入門 安藤四郎 著 日新出版
- 【9】トランジスタ技術 2008 年 2 月号 CQ 出版社