

第5章

GPSによる測定値と誤差要因



久保 信明 (東京海洋大学)

2部 位置、速度、時刻の推定

- 5章、6章、7章
- 言うまでもなく、位置、速度、時刻は重要なアウトプット
- それらの精度は受信機の性能や環境により大きく変化する
- 2部では、GPSによって与えられる測定値とPVTの推定値を得るために、これらの測定値を処理するためのアルゴリズムを見ていく

5章で述べられている概要

- 5章では、各種誤差要因について検討されています。各誤差要因によって引き起こされる距離誤差の大きさと性質の理解・また誤差削減への様々な手法による効果の分析等です
- GPSから正確な位置、速度、時刻を得るための能力は、明らかにそれらの誤差を推定したり、可能であれば削減したりする能力に依存しています

第5章の内容（P137-185）

- **測定値のモデル**
- コントロールセグメントにおける誤差
- 信号伝搬モデリングによる誤差
- 測定値誤差
- ユーザの測距誤差
- 測定誤差（実測データによる）
- コードと搬送波位相測定値の融合
- 誤差の低減（DGPS）
- まとめ

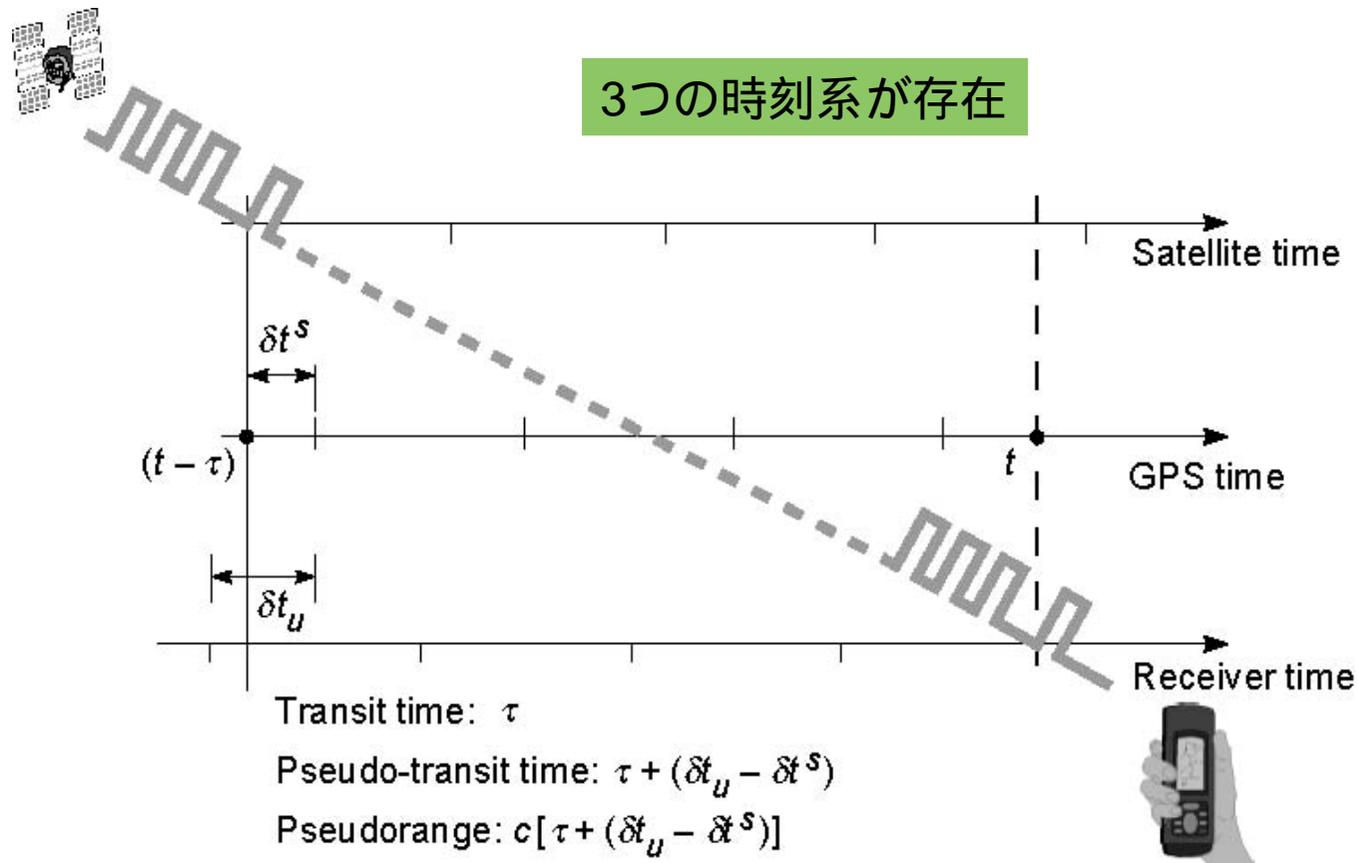
測定値のモデル

- コード位相測定値
- 搬送波位相測定値
- コードと搬送波位相測定値のための有益なモデル
- 誤差要因とそのモデル

コード位相測定値

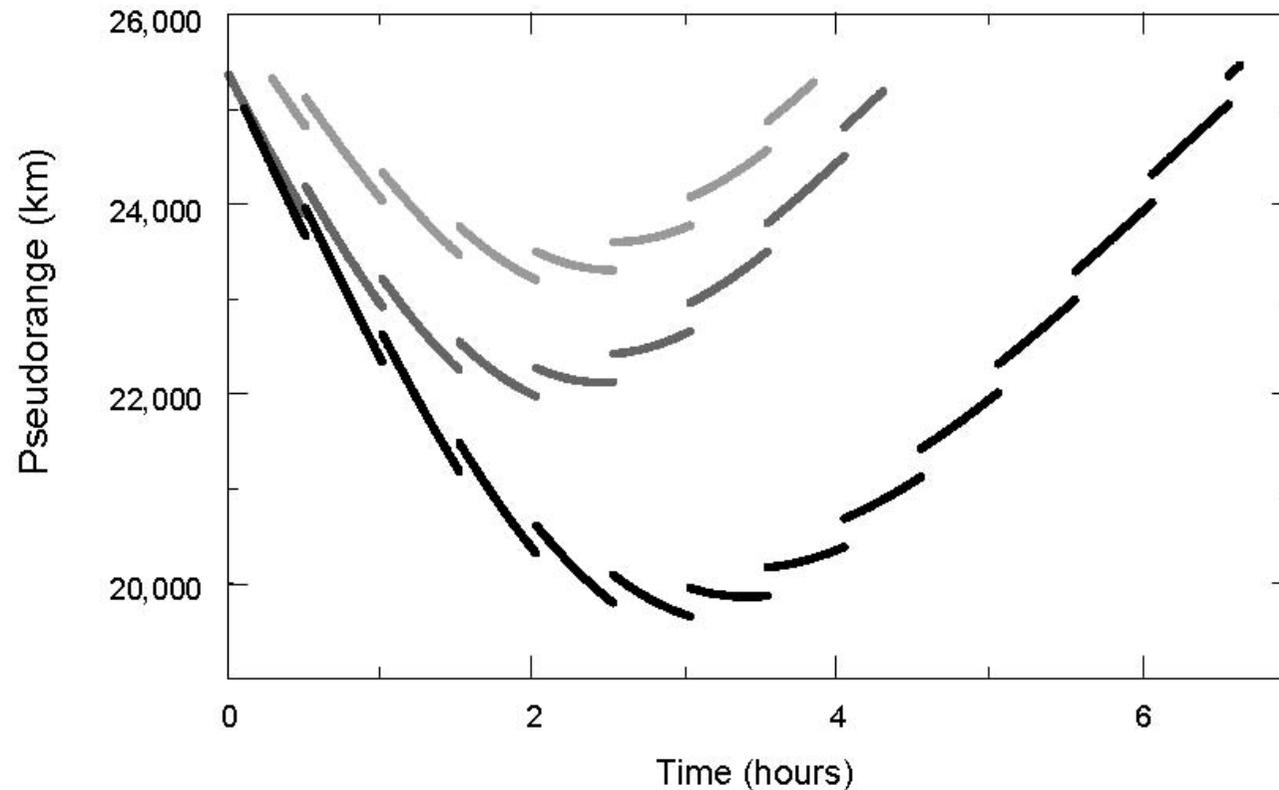
- GPS受信機によって生成される基本的な測定値は、衛星から受信機へ到達する信号の**伝搬時間**で、受信機の時計によって決定される信号受信時刻と信号自身にマークされた衛星における発射時刻との差として定義される。
- この伝搬時間は受信機内部では、衛星から受信した信号と受信機で生成されるC/Aコードの**レプリカを一致させるために必要となった時刻シフトの量**として測定される。
- この測定値には衛星と受信機の時計が同期せずに**独自のタイミング**で進んでいるため、バイアスが存在する。

擬似距離測定値の概念図



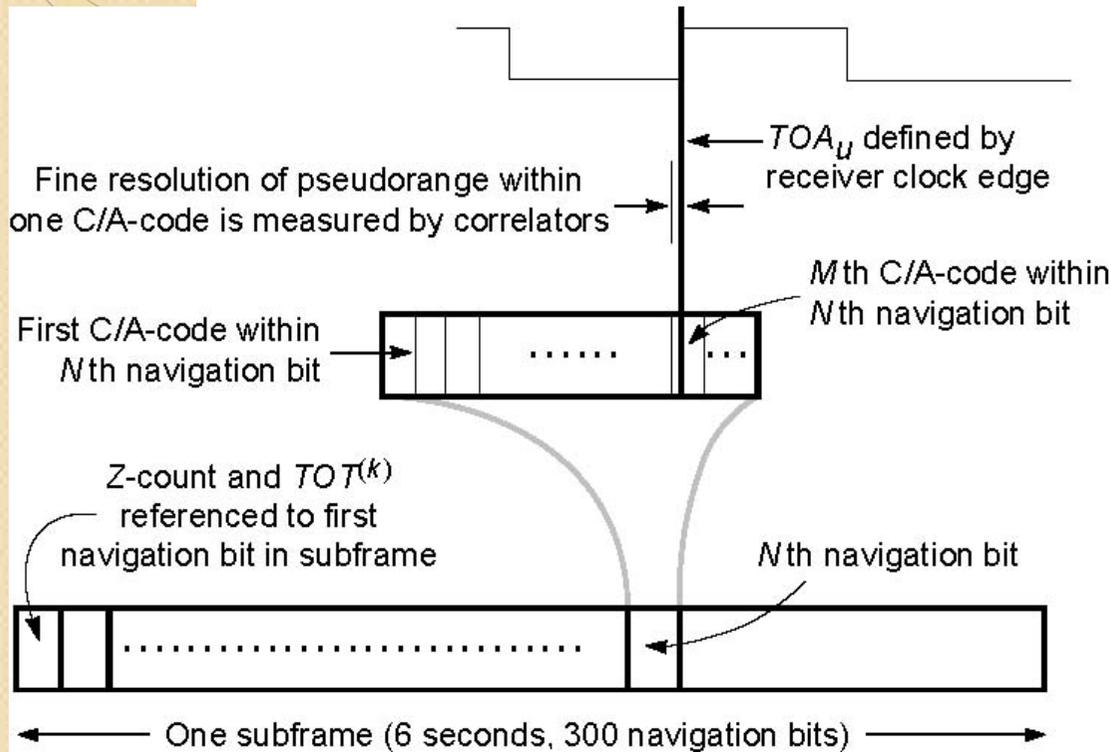
擬似距離測定値の概念図．受信機と衛星時計は同期していない．ここで測定される伝搬時間は受信機の時計による信号受信時刻と衛星から送信される信号に付加されている衛星時計による発信時刻との差である．

3つの衛星からの 擬似距離測定値例



静止した受信機により得られた3つの衛星からの擬似距離測定値．擬似距離における変動は大部分が衛星の運動と地球の回転によって生じる幾何学的な距離変化である．不連続な部分はすべての測定値に共通であり，これは受信機時計における1msごとの時計のずれによって生じている

擬似距離の構築



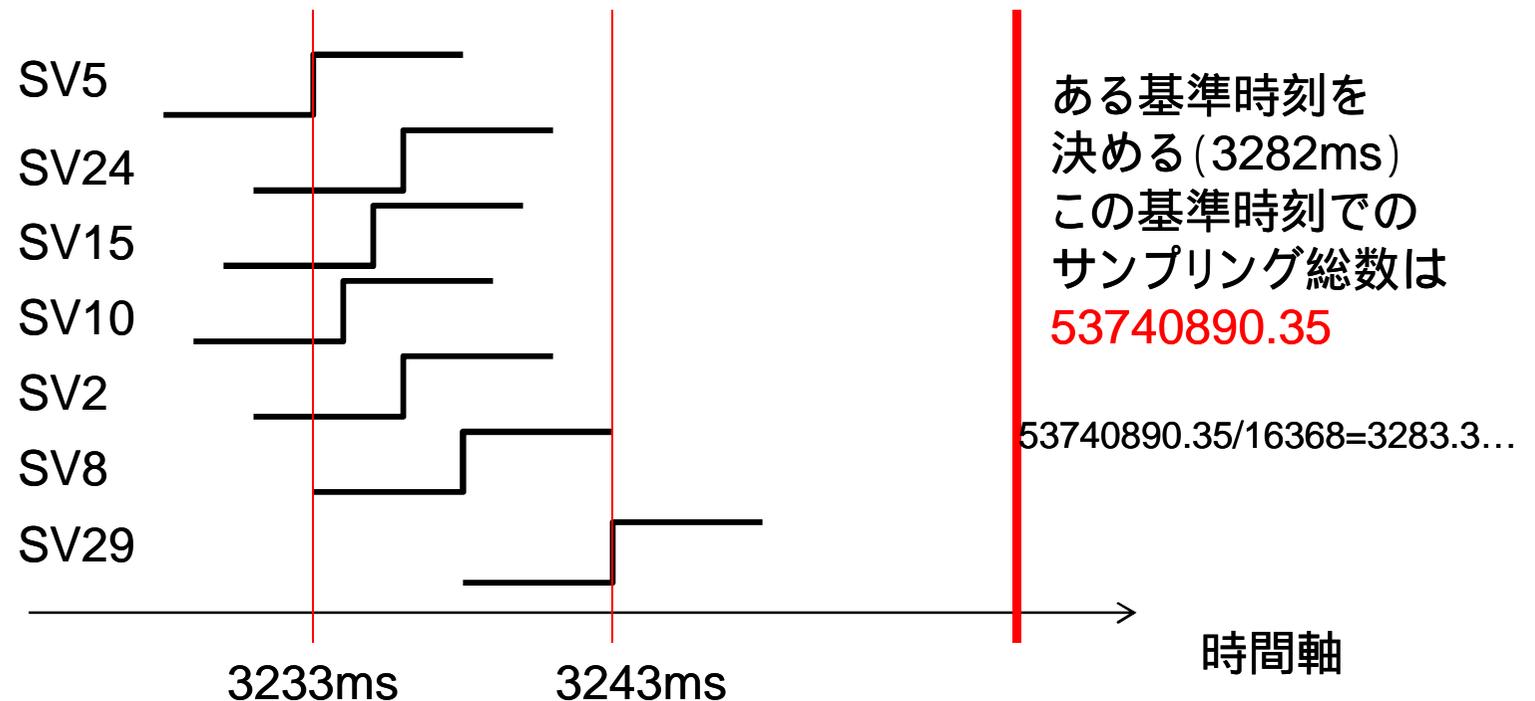
擬似距離 = 光速 * (受信時刻 - 発射時刻)

発射時刻 = Zカウント
+ 航法ビットの数
+ C/Aコードの数
+ C/Aコードチップの数
+ C/Aコードチップの位相

第1版では受信機の章にあった

ソフトウェアGPSによる実例

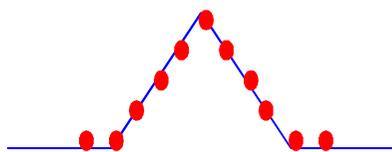
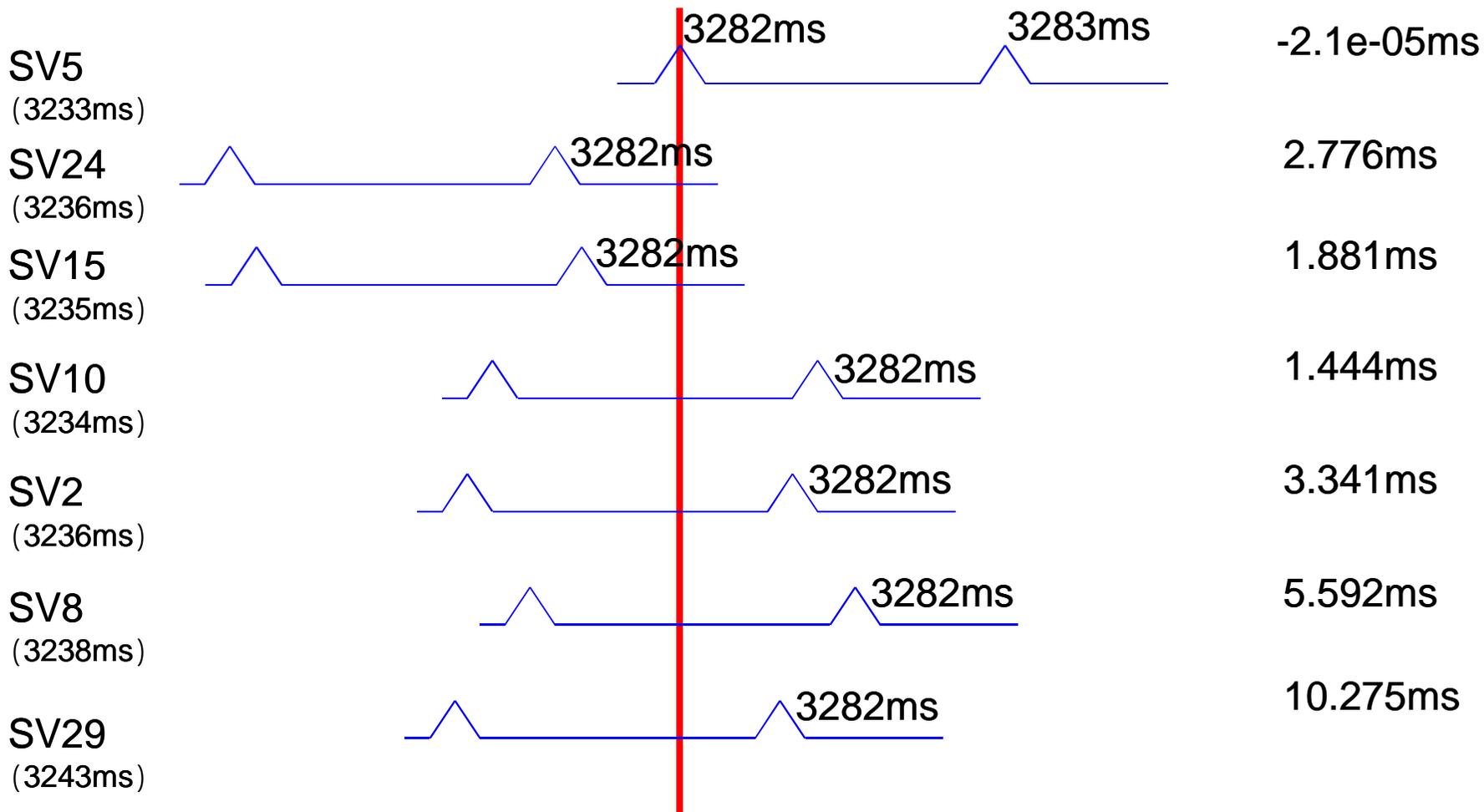
- 2010年1月4日に研究室屋上でIFデータを取得（7機分解析）
- サブフレームの先頭は以下の通り



ただし、また1ms以内の正確な到達時刻の差はわからない

正確な時刻差を計算

53740890.35のときに各衛星のずれはいくらか？



$$\text{擬似距離 (m)} = (75\text{ms} + \text{diff}[\text{prn}]) \times \text{光速} \times 0.001$$

$$\text{受信GPS時刻} = \text{TOW} + 50\text{ms} + \text{伝搬に要した時間}$$

時間軸

搬送波位相測定値

- コード位相より精度の高い測定値は、衛星から受信される搬送波位相測定値で、受信機が生成した搬送波信号の位相と衛星から受信した搬送波信号の位相との測定瞬間時における差である
- いかなるタイミングで受信した信号の位相も、信号の伝搬時間から信号発射時の衛星における位相に関連させることができる

搬送波位相測定値

$$\phi(t) = \phi_u(t) - \phi^s(t - \tau) + N$$

$$\phi(t) = f \cdot \tau + N$$

$$= \frac{r(t, t - \tau)}{\lambda} + N$$

時計のバイアスと
測定誤差がない場合

$\phi_u(t)$ は受信機が生成した信号の位相

$\phi^s(t - \tau)$ は時刻 $(t - \tau)$ での衛星での信号の位相

τ は信号の伝搬時間

N は整数不定性

f と λ は信号の周波数と波長

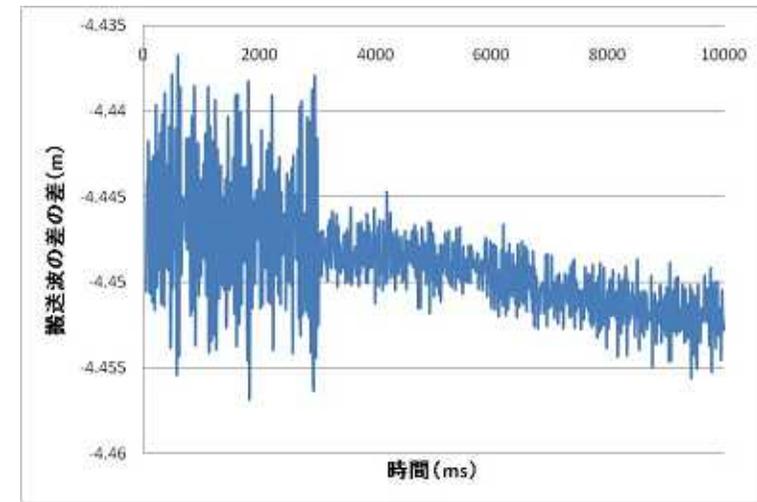
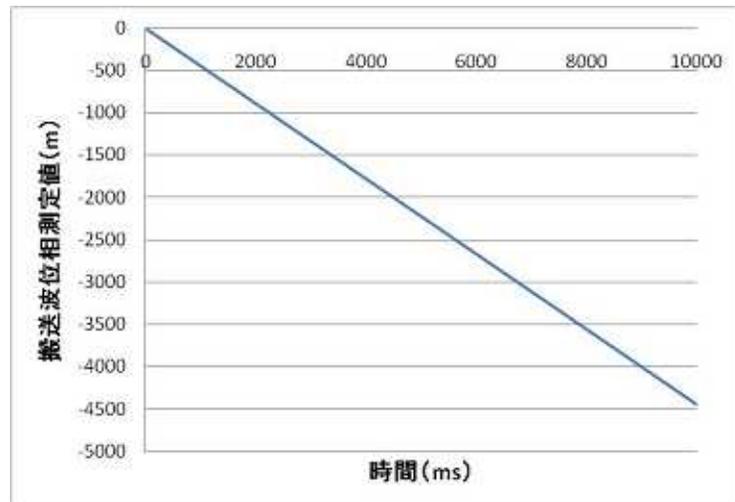
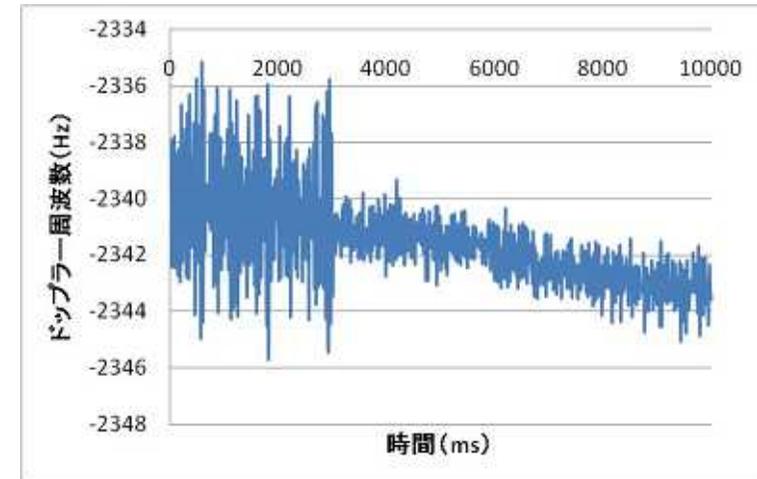
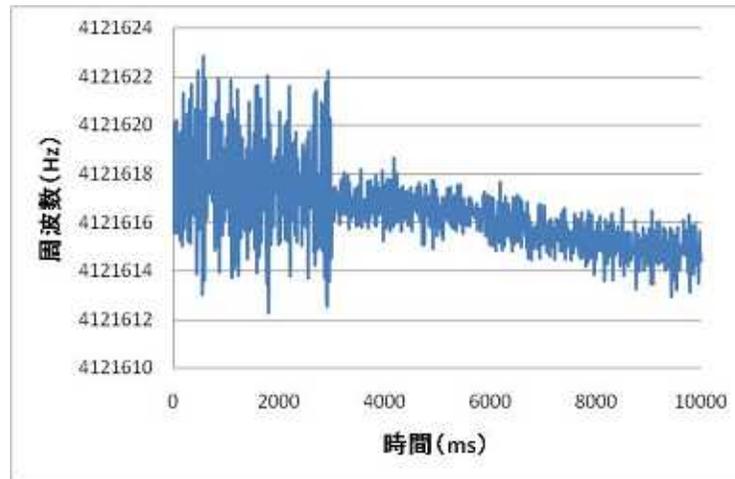
$r(t, t - \tau)$ は時刻 t でのユーザ位置と時刻 $(t - \tau)$ での衛星位置との間の幾何学的距離

整数不定性については第7章で

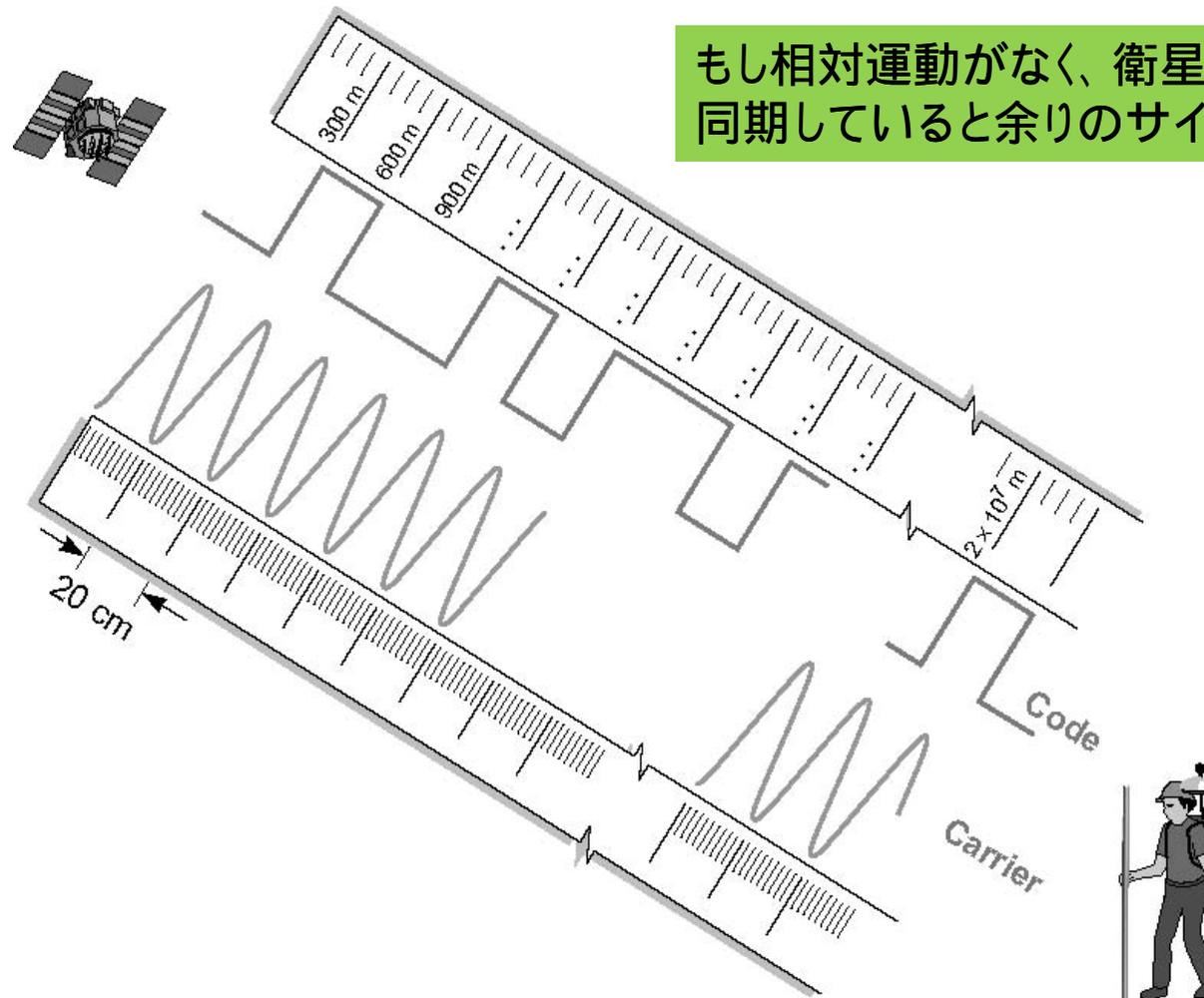
f はドップラー周波数

(搬送波位相測定値はドップラー周波数の積算)

実際の搬送波位相測定値



コードと搬送波位相測定値のための有益なモデル



もし相対運動がなく、衛星と受信機クロックが同期していると余りのサイクルは動かない。

誤差要因とそのモデル

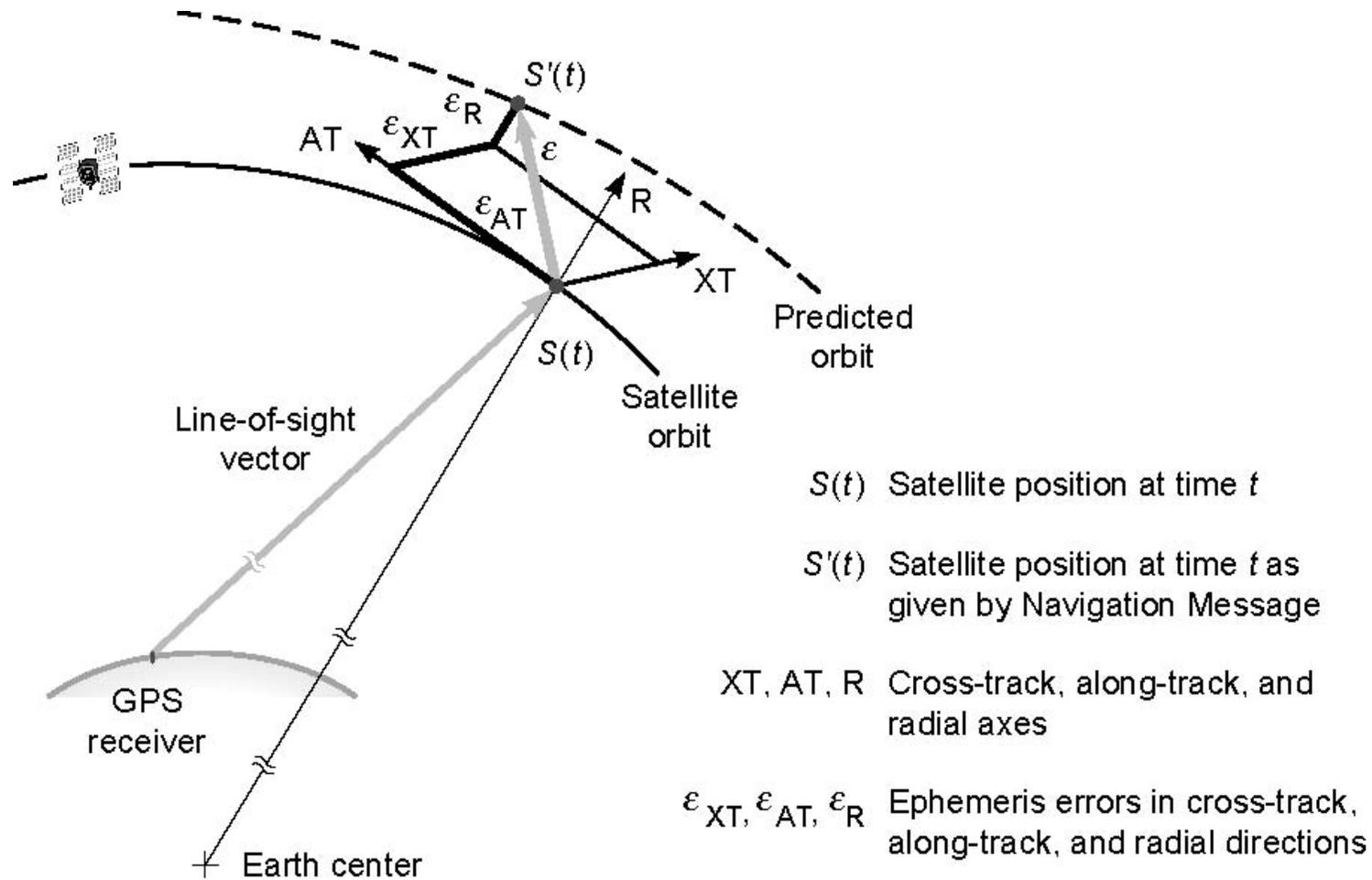
- 測定誤差は、ノイズとバイアスに分類される。ノイズは短時間でも平均すると0になるような非常に速く変化する誤差のことで、バイアスはある時間間隔で一定の値を持続する傾向をもつ誤差のことである。このような特徴は測定誤差の影響を理解するのに有用である。以下に誤差の分類。
 - 1) 衛星から放送される航法メッセージ中のパラメータ値の誤差。この航法メッセージについては制御局が責任を持つ。
 - 2) 衛星から受信機への信号の伝搬時間に影響を与えている電離層や対流圏に関係する不確定要素
 - 3) 測定の正確さに影響を与える受信機ノイズ、アンテナ付近の様々な障害物によって反射される信号による干渉

GPSから正確な位置、速度そして時刻を得るための能力は、明らかに上記の誤差要因を推定したり、可能であれば削減したりする能力に依存しています。

第5章の内容（P137-185）

- 測定値のモデル
- **コントロールセグメントにおける誤差**
- 信号伝搬モデリングによる誤差
- 測定値誤差
- ユーザの測距誤差
- 測定誤差（実測データによる）
- コードと搬送波位相測定値の融合
- 誤差の低減（DGPS）
- まとめ

エフェメリスの誤差要素



エフェメリスの誤差と時計誤差 (軌道情報すなわち衛星位置)

暦/時計	精度(暦/時計)	リアルタイム	更新	サンプル
航法暦	2m/7ns		2hour	
IGS最短1	0.1m/5ns		4/day	15分
IGS最短2	0.05m/0.2ns	3時間	4/day	15分
IGS高速	0.05m/0.1ns	17時間	1/day	15/5分
IGS Final	0.05m以下/0.1ns	13日程度	毎週	

上記はIGS (International GPS Service) サービスによるもの

第5章の内容（P137-185）

- 測定値のモデル
- コントロールセグメントにおける誤差
- **信号伝搬モデリングによる誤差**
- 測定値誤差
- ユーザの測距誤差
- 測定誤差（実測データによる）
- コードと搬送波位相測定値の融合
- 誤差の低減（DGPS）
- まとめ

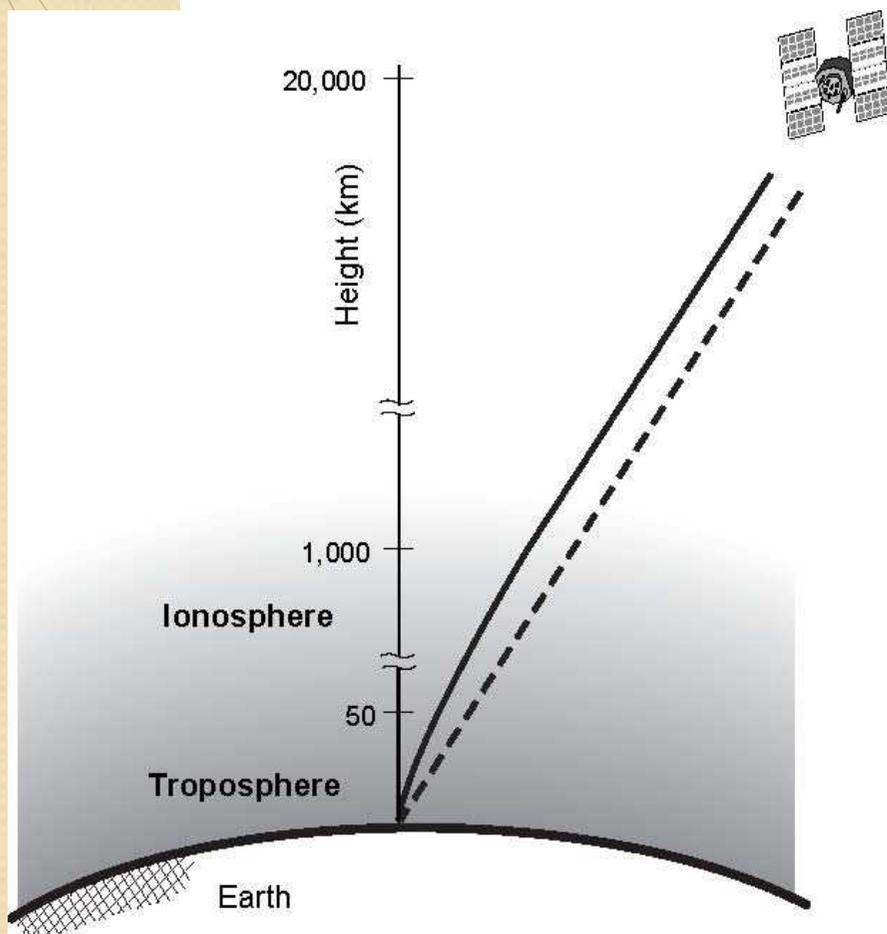
信号伝搬モデリングによる誤差

- 信号の屈折・波の伝搬・分散性媒質
- 電離層遅延量について
- 対流圏遅延量について

電離層や対流圏等の実際の物理的側面からのアプローチについては、優れた研究者の方がおられる。

本節では、GPS測位の観点から見た、これら大気圏のGPS電波に対する影響についてよくまとめられていると思われる。

地球上の大気におけるGPS信号の屈折

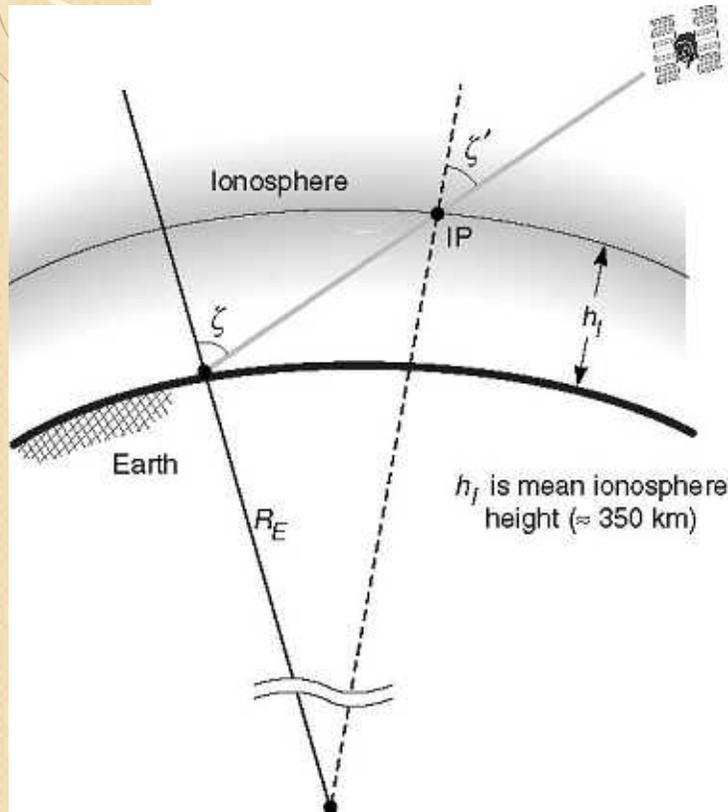


地球上の大気におけるGPS信号の屈折はその信号の速度と方向を変化させる。信号経路が曲げられることによる経路長の増加分は一般的に**無視される大きさ**である。しかし、**伝搬速度の変化は無視されない値**となる。

ある媒体における屈折指数が信号の周波数に依存しているならば、その媒体は**分散性がある**と言う。**Lバンド帯の電波信号においては、電離層は散逸性があり、対流圏はそうではない。**

GPS信号が電離層と対流圏を通過する際の余分な伝搬時間を決めるために、**伝搬経路に沿った屈折指数**を決める必要がある。

電離層遅延量

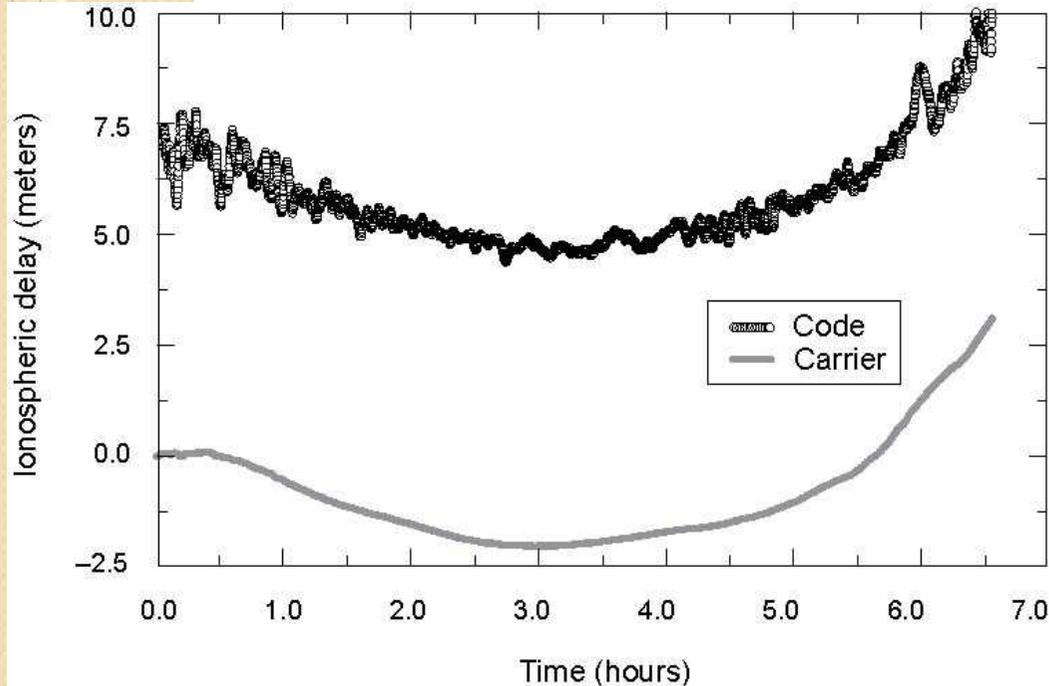


地球上, 約50kmから約1,000kmまでの高さに広がっている電離層は, 電離された気体(自由電子とイオン)の存在する領域である. 電離は太陽放射によって引き起こされ, **電離層の状態は主として太陽の活動の強さによって決まる.**

電離層の物理的な性質は昼と夜の間で大きく変化する. 太陽が昇ってくると, 紫外線は気体分子をイオンや自由電子に分離しはじめる. ローカルタイムで午後2時頃のピークに至るまで, 電子密度は上昇し, その後減少しはじめる. **電離層内における無線信号の伝搬速度は, その経路における総電子数に依存している. 遅延量も総電子数に依存している.** 総電子数とは受信機から衛星までに伸びている1m²断面積を持つチューブの中の電子数を全て足したもののことである.

電離層を通過する信号経路長は天頂角とともに増加する. 増加した経路長は, 天頂方向の遅延量に乘じる乗数で説明される. その乗数は**傾斜係数**と呼ばれる.

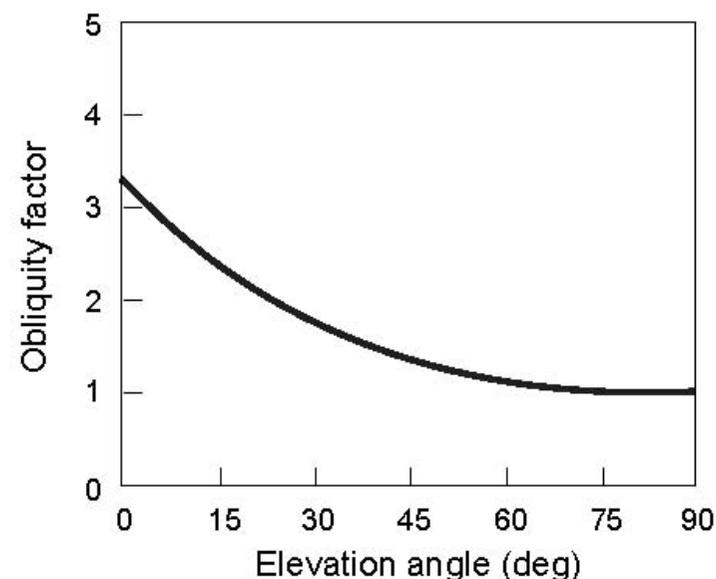
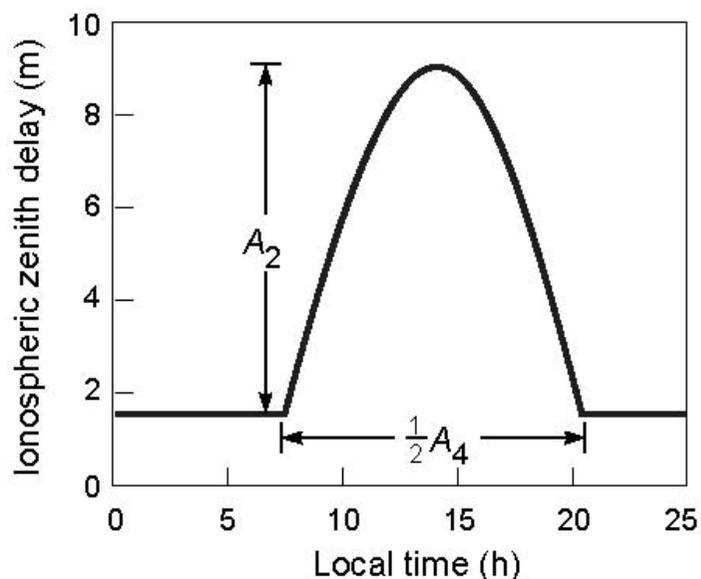
2周波測定値による遅延量の推定



ノイズの大きいコード位相に基づいた電離層遅延量の推定値は搬送波位相に基づいた推定値によって**スムーズ**にすることができる。結果的に得られるスムージングされた電離層遅延量の推定値は、**仰角が30度以上の衛星に対しては10cm以内の精度を保っている。**L1 L2間のディファレンシャル遅延残差を考慮する必要がある

L1帯とL2帯の両方におけるコードと搬送波位相測定値から得られたL1帯の電離層遅延量の推定値。コードによるほうはノイズが大きく、搬送波によるものはノイズは小さいが、バイアスが残っている。搬送波位相が追尾されている限り、電離層遅延量における変化量は非常に正確に測定される。

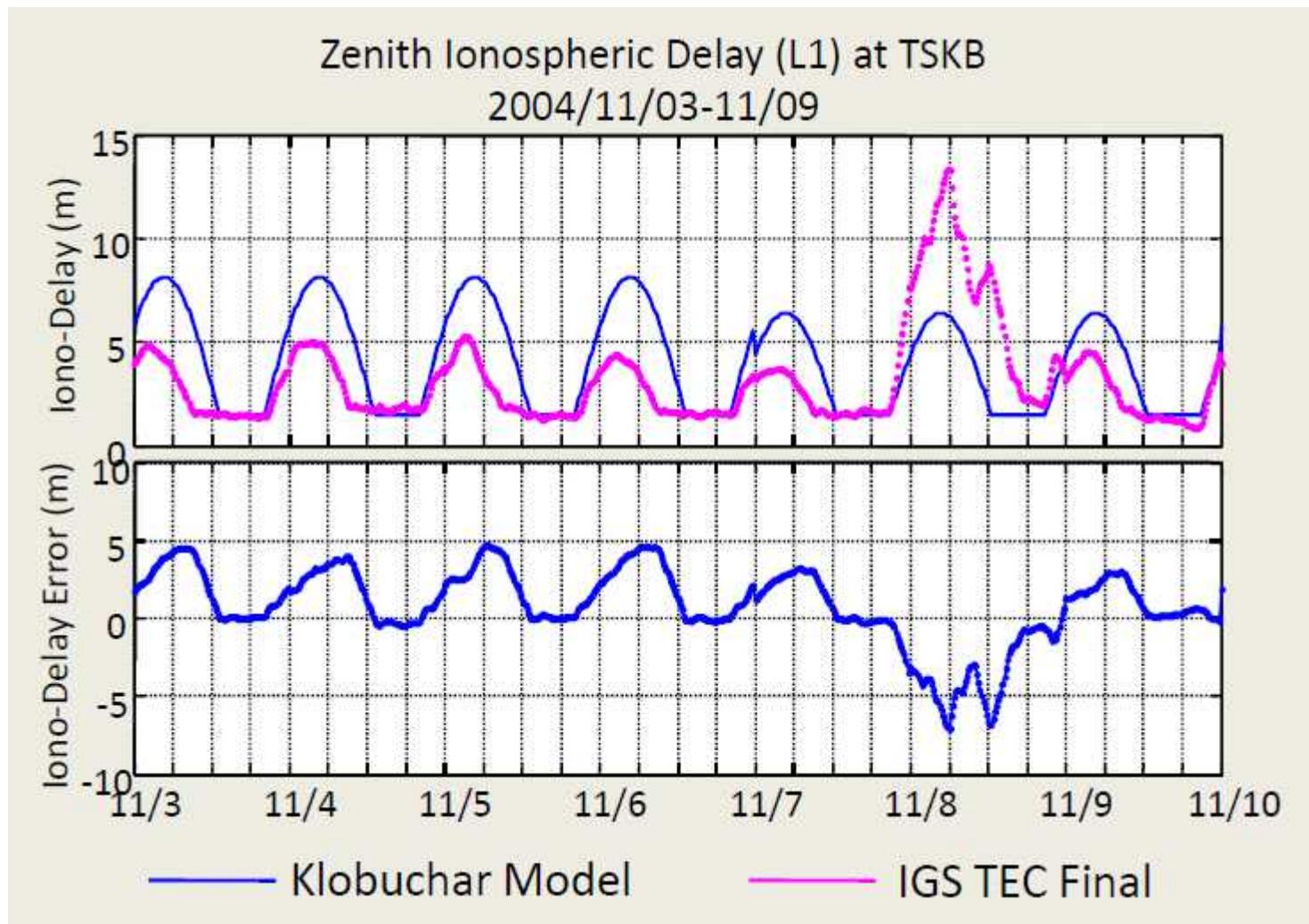
放送モデル



Klobucharの電離層モデル。各変数値は電離層の状態を反映するように制御局で決められ、衛星によって放送される。**推定精度は50%程度以上**。現在では、このモデルよりもより正確に電離層遅延量を推定できるモデルが存在する。推定精度は80%以上。

CODE (Global Ionosphere Maps from the Center for Orbit Determination in Europe)

放送モデルと2周波より算出した電離層遅延量との比較 (by 高須さん)

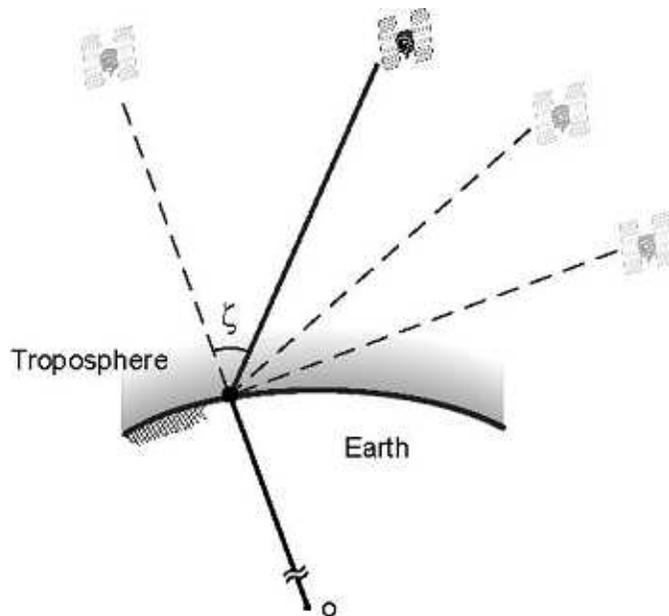


対流圏遅延量

- GPS信号は乾燥空気および水蒸気から構成される地球大気の下層部分によっても屈折される。水蒸気の全ては、海面から測定して高度約12km以下に存在（大部分は4km以下）している。中性大気による全般的な影響は、対流圏効果と呼ばれている。
- GPS信号の伝搬速度は、自由空間でのそれよりも低く、したがって衛星への距離は実際よりも長くなる。その値は衛星の仰角に依存しており、一般的に2.5m-25mである。L1とL2の周波数帯におけるコード位相と搬送波位相測定値は、すべて共通の遅延を経験になる。この遅延量はGPS測定値から推定することができないため、モデルが必要
- 水蒸気の密度はローカルな天候に左右されやすく、また短い周期で変化する。幸運にもほとんどの対流圏遅延量は予測可能な乾燥大気によるものである。

対流圏モデル

- **ガースタモイアンモデル**は、気体の法則に基づいており、高度による気圧、温度、湿度の変化に関する仮定を単純化することで導出される。
- **ホップフィールドモデル**は、広範囲の測定値に基づいて実験的に得られた地上と、地上高 h での乾燥空気の屈折指数の関係に基づいている。



対流圏を通過する信号の伝搬経路長は仰角が低いと大きく増加する。

傾斜係数は

30度で2

15度で4

10度で6

5度で10

電離層や対流圏を通過する GPS信号の伝搬の主な特徴

	電離層	対流圏
変動性	高い（日、季節、太陽周期、フレア）	低い（水蒸気量に応じてのみ急激に変化）
天頂の遅延量	数mから数十m	海面で2.3mから2.6m
傾斜係数	30度で1.8、15度で2 5度で3	30度で2、15度で4 5度で10
天候方向のモデリング誤差	1mから10mまたはそれ以上（2周波測位でより正確に測定可能）	5cmから10cm
分散性の有無	あり	なし

第5章の内容（P137-185）

- 測定値のモデル
- コントロールセグメントにおける誤差
- 信号伝搬モデリングによる誤差
- **測定値誤差**
- ユーザの測距誤差
- 測定誤差（実測データによる）
- コードと搬送波位相測定値の融合
- 誤差の低減（DGPS）
- まとめ

測定における誤差 (受信機雑音とマルチパス)

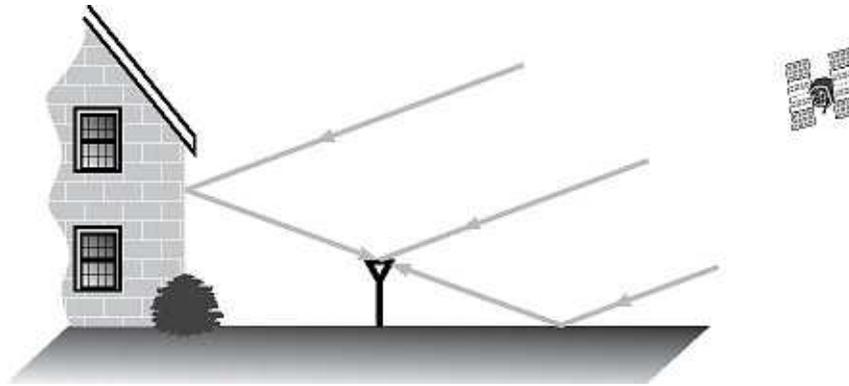
- 受信機がどのくらい正確に、アンテナに到達するGPS信号のコードと搬送波位相を測定できるかである。ここで測定の精度と確度との区別をしなければならない。確度とは真値との関係において評価されるものである。特に厳密に論じなければ、精度とは単に測定の分解能または細かさを表したものである。
- 次に二つの誤差の原因を考察する。一つ目は、本質的に信号を乱す受信機雑音で、コードあるいは搬送波位相の測定の分解能に影響するものである。二つ目は、マルチパスで、これは実際に測定されている位相を変化させるような干渉信号を導くものである。どちらの現象も後の章で詳細に議論される。

受信機雑音

- コードと搬送波位相測定値は、受信機雑音と呼ばれるランダムな測定雑音によって影響を受けている。受信機雑音とは、GPSの帯域において、アンテナで受信される電波による放射を全てカバーしている広い意味の言葉である
- いかなる干渉信号の存在しない場所でも、受信機は、GPS信号とランダムに変動する雑音が加わった信号を見ることになる。測定値の誤差は、受信機雑音に起因し、信号強度に応じて変化し、よって衛星仰角に応じても変化する（搬送波で1mm程度、コードで10cm程度）。現在の受信機は1サイクルの精度で搬送波位相を測定することは困難ではない

マルチパス

マルチパスとは、二つ以上の経路を通してアンテナに到達する信号の現象のことである。典型的にアンテナは直接の信号(視線方向)と周辺の建物や地表から反射される一つ以上の反射波を受信している(下図)。反射信号は、**たいてい直接信号よりも遅延しており、強度も弱まっている。**

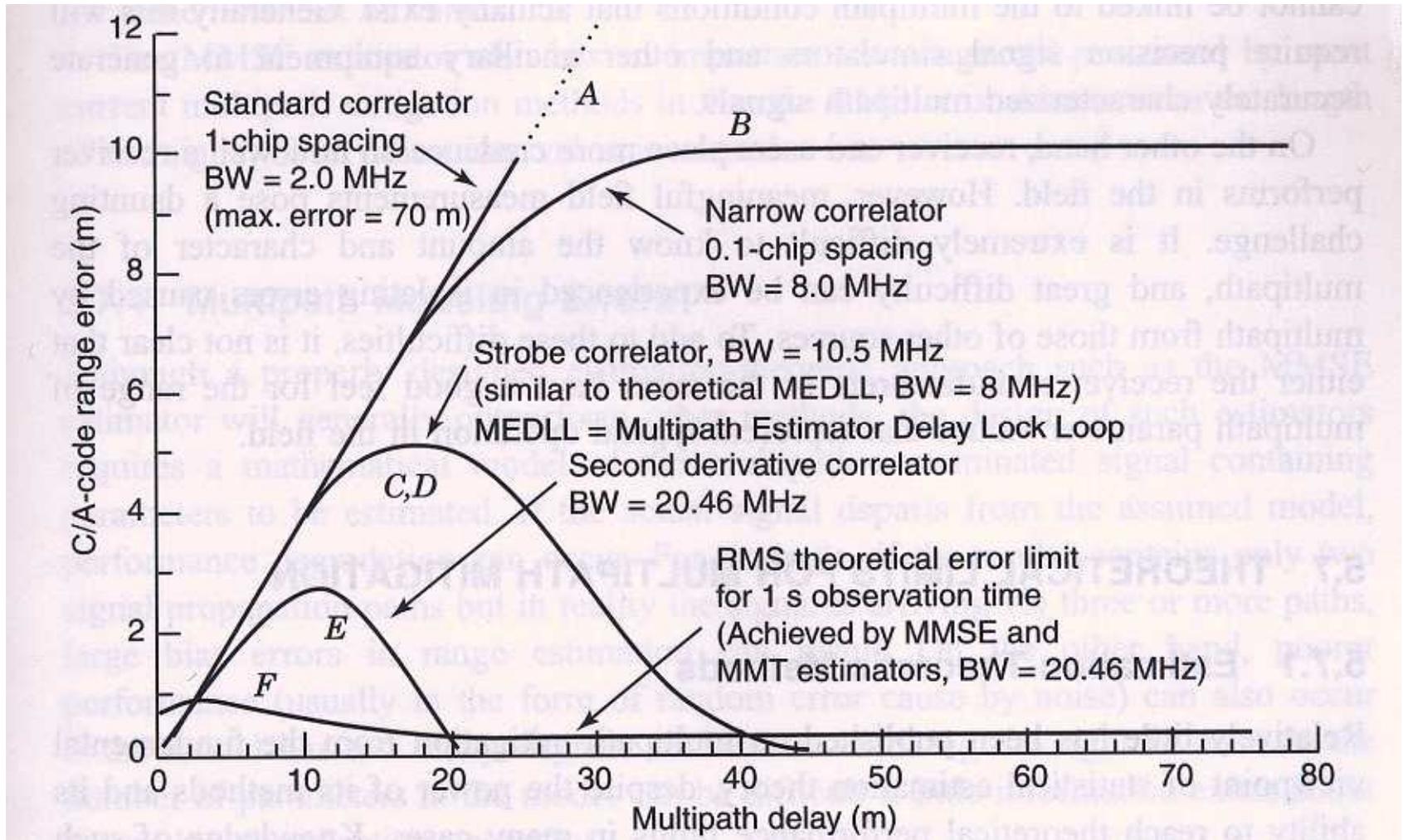


マルチパス:信号が二つ以上の経路によってアンテナに到来する。
反射信号は、通常直接波よりも遅れて到来し、信号強度が小さい。

つづき

- マルチパスによる距離測定値誤差は、**反射信号の強さと直接信号に対する反射信号の遅延に依存している**。マルチパスにより、**コードで1mから5m程度（または以上）、搬送波では1cm程度の影響を受ける**。
- マルチパスを防ぐ主要な方法は、**反射物から離してアンテナを設置することであるが、いつも可能ではない**。マルチパスの効果は、**アンテナ設計**段階において、いくつかのタイプの反射による寄与分を下げることによって軽減されうる（特に地面方向）。
- 受信機における信号処理の段階においても軽減可能である。いくつかの受信機メーカーは、**自社独自の技術を開発し、実装してきた**。

マルチパス低減技術と遅延距離の関係



第5章の内容（P137-185）

- 測定値のモデル
- コントロールセグメントにおける誤差
- 信号伝搬モデリングによる誤差
- 測定値誤差
- **ユーザの測距誤差**
- 測定誤差（実測データによる）
- コードと搬送波位相測定値の融合
- 誤差の低減（DGPS）
- まとめ

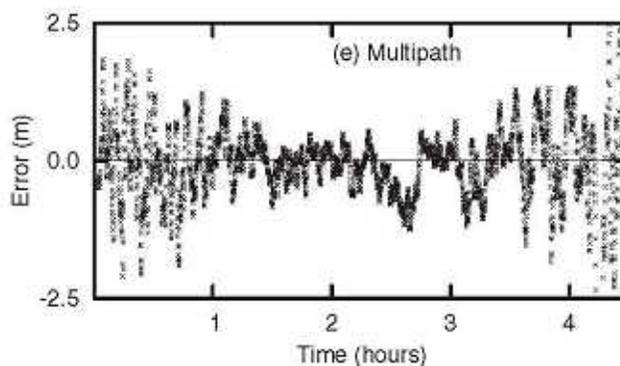
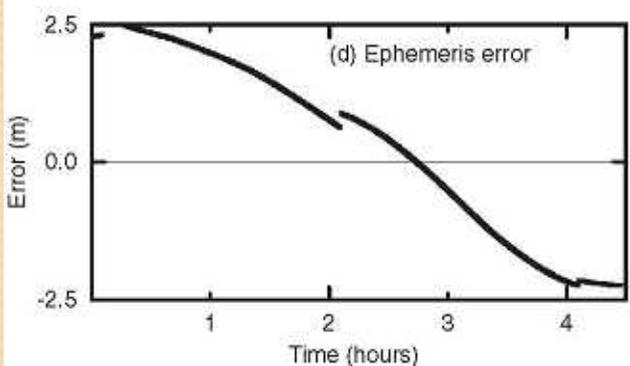
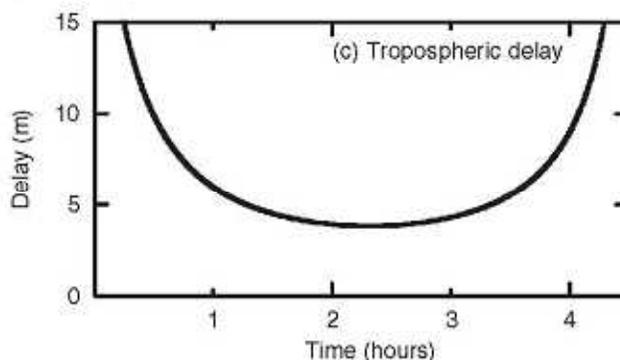
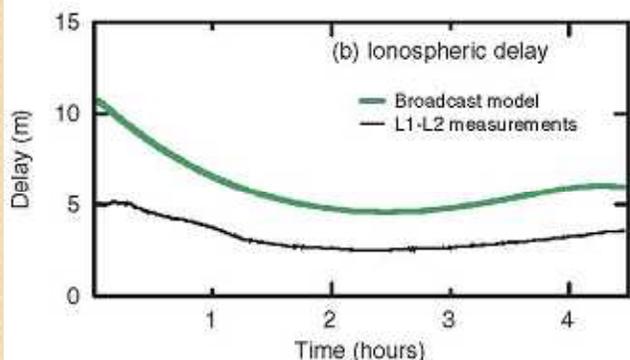
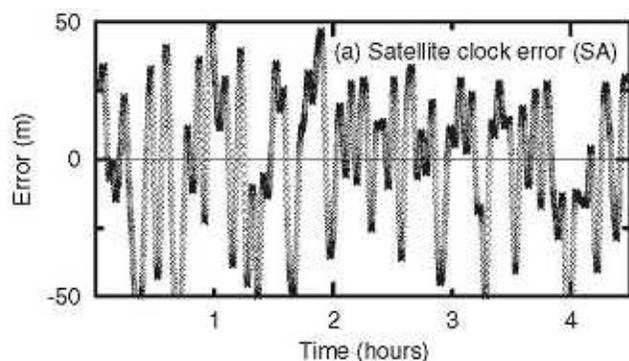
ユーザの測距誤差

- 1周波受信機(L1)からの擬似距離測定値における簡単な**ユーザ測距誤差モデル**を検討．**目的は、単純なモデルを設定することである．**
- モデルには、電離層、対流圏ともに適切なモデルを適用．
制御局に帰する距離誤差は、rmsで**約3m**
中緯度での大気伝搬モデルによる距離誤差は、rmsで**約5m**
雑音とマルチパス（環境良）による距離誤差は、rmsで**約1m**
- これらの誤差要因を結合した誤差は、**利用者距離誤差(URE)**（**利用者等価距離誤差(UERE)**）と知られている．それぞれ相関がないものとしてモデル化することが合理的で、UREはこれらの各誤差成分(単位はmとする)の二乗和ルートとして定義．
- ここでは $3^2+5^2+1^2$ の**でUREのrms値は約6m**となる。

第5章の内容（P137-185）

- 測定値のモデル
- コントロールセグメントにおける誤差
- 信号伝搬モデリングによる誤差
- 測定値誤差
- ユーザの測距誤差
- **測定誤差（実測データによる）**
- コードと搬送波位相測定値の融合
- 誤差の低減（DGPS）
- まとめ

測定誤差(実測データによる)



L1の擬似距離測定値における誤差成分の推定値を図に示す．測定値は1997年3月に取得．正午あたりに衛星が昇り始めてから，午後4時30分頃に沈む．

もっとも高い仰角は38度．誤差の推定において，精確なアンテナ位置は既知，受信機の時計バイアスとドリフトを外部のセシウム原子時計を使用することにより回避．

測定値は，L1帯とL2帯のコードと搬送波位相から成っている．

各種誤差を示した目的

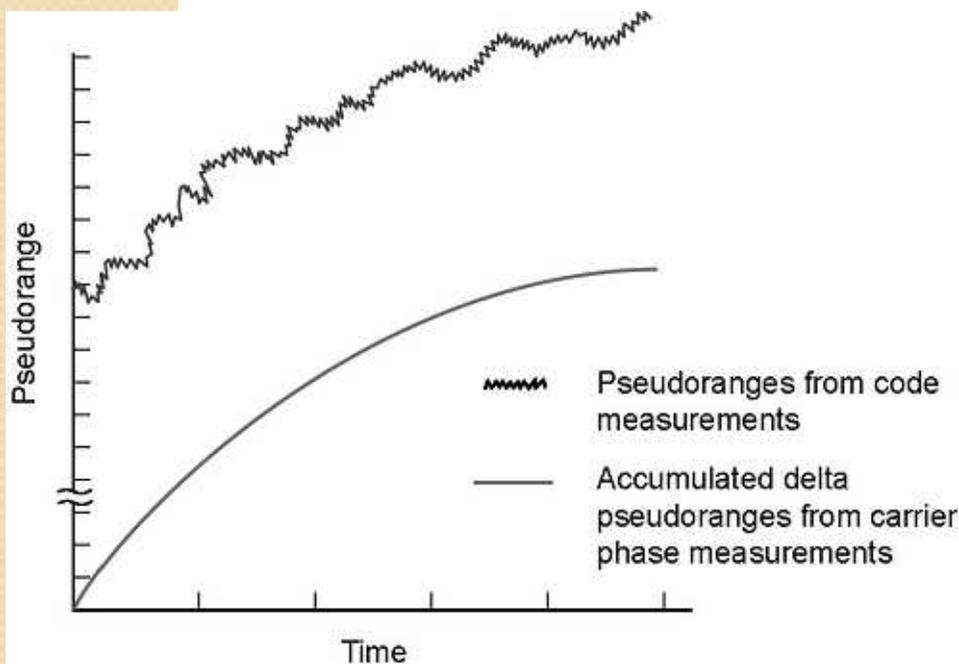
- 各種誤差を示した目的は、**誤差の大きさと性質に対する認識を簡単に提供すること**。
- 先に示したように、誤差はかなり変動しやすいもので、電離層遅延と対流圏遅延を補正しないと、測定値には、緩やかに変化するバイアスを含むことになる。マルチパスによる誤差は波のようになる。受信機ノイズは、1エポックごとの測定で無相関であることが期待されるが、マルチパス誤差からそれを分離することができない。よって、マルチパス誤差と受信機ノイズの合わさった影響は、ノイズのように振る舞い、次節で論議されているように、**平滑化することによってある程度まで軽減可能**である。

第5章の内容（P137-185）

- 測定値のモデル
- コントロールセグメントにおける誤差
- 信号伝搬モデリングによる誤差
- 測定値誤差
- ユーザの測距誤差
- 測定誤差（実測データによる）
- **コードと搬送波位相測定値の融合**
- 誤差の低減（DGPS）
- まとめ

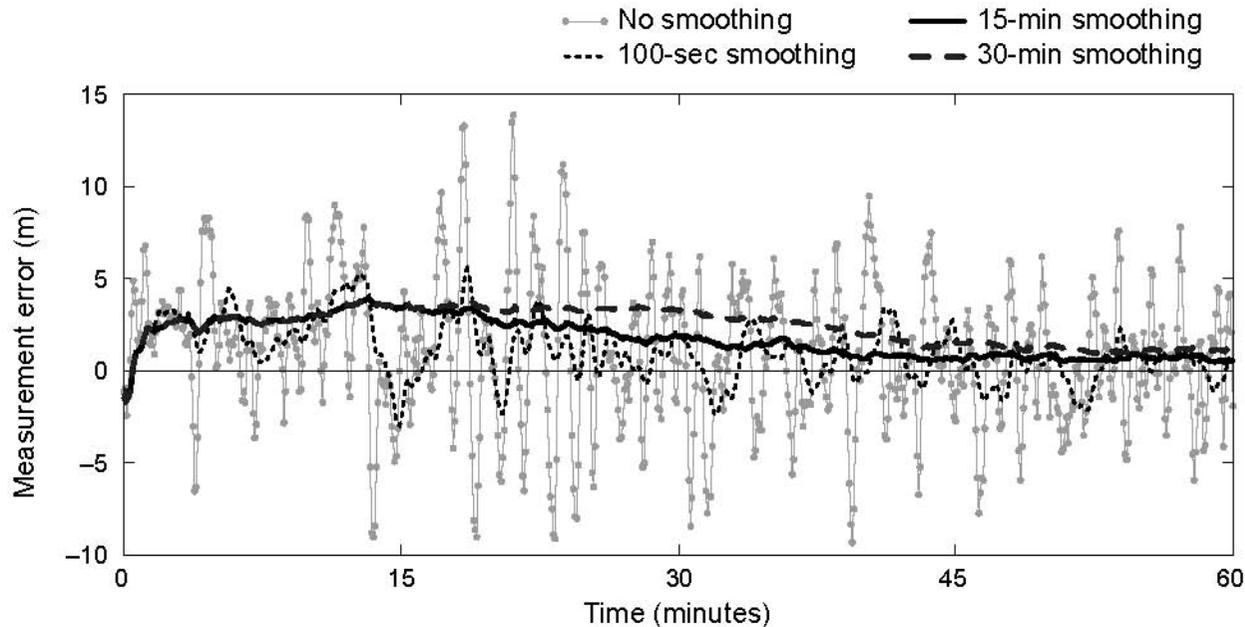
コードと搬送波位相測定値の融合

搬送波位相測定最大の可能性は、誤差をほとんど取り除くことができる相対測位において達成される（7章）。本項では、精度は高いが一定のバイアスを含む搬送波位相測定値と、精度は低いバイアスを含まないコード測定値を組み合わせることによる利益について調査する。



コードと搬送波位相測定値より計算される擬似距離の概念図。コードに基づいた擬似距離はノイズが大きい。搬送波位相の推定値は、正確であるが、あいまいである。よって、図のプロット開始点は、0としている。搬送波位相測定値は、正確な擬似距離の変化量を与えるので、コードに基づいた擬似距離をスムーズにすることが可能

搬送波位相によりスムージングされた擬似距離



異なるフィルター時間で搬送波位相によりスムージングされた擬似距離

コード測定値におけるキャリアスムージングは、最近の受信機では日常的に使用されており、**地味な改善を提供している**。長さMの再帰的フィルタを使用

$$\bar{\rho}(t_i) = \frac{1}{M} \rho(t_i) + \frac{(M-1)}{M} [\bar{\rho}(t_{i-1}) + (\Phi(t_i) - \Phi(t_{i-1}))],$$
$$\bar{\rho}(t_1) = \rho(t_1).$$

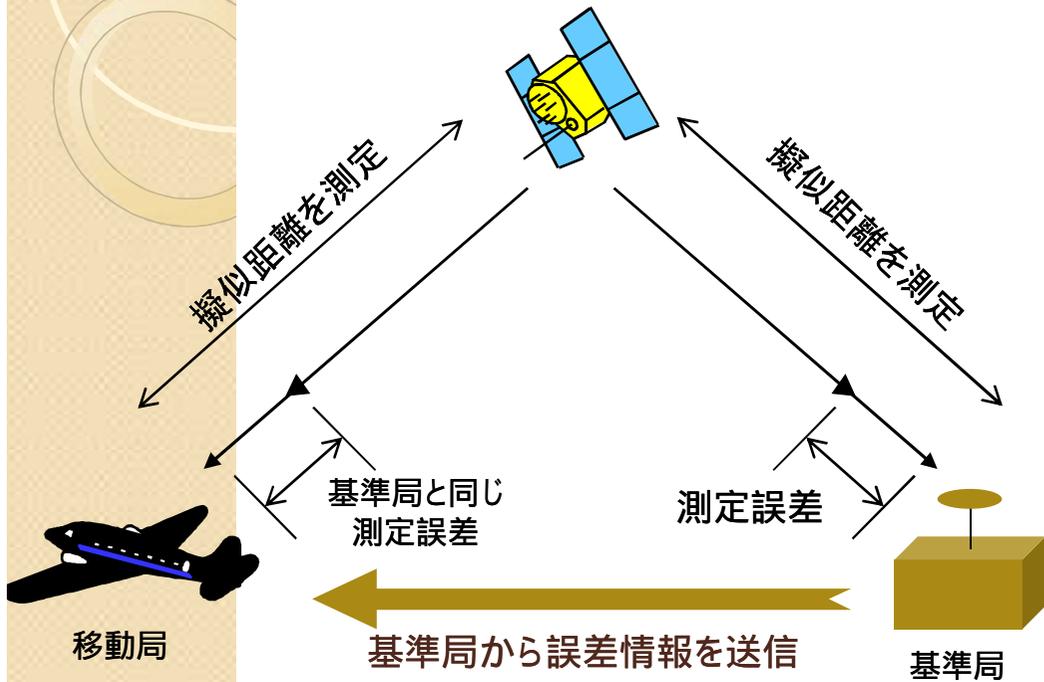
第5章の内容（P137-185）

- 測定値のモデル
- コントロールセグメントにおける誤差
- 信号伝搬モデリングによる誤差
- 測定値誤差
- ユーザの測距誤差
- 測定誤差（実測データによる）
- コードと搬送波位相測定値の融合
- **誤差の低減（DGPS）**
- まとめ

誤差の低減：デファレンシャルGPS (DGPS)

- DGPSの基本的な概念は、衛星の時計、衛星軌道暦、大気伝搬による誤差がGPS利用者から数10kmないし数100kmまではほぼ同じであり、時間とともにかなりゆっくり変化するという事実を利用したものである。言い換えると、これらの誤差は時間的、空間的な相関を持っている。
- GPS受信機の位置が既知ならば、その誤差の総量は、衛星ごとに推定することができる。そしてGPS利用者が上述の範囲内で誤差推定値を利用できるならば、利用者は測定値にそれらの推定値を適用することができ、測定誤差を減少させ、測位された位置の質を改善されることになる。これがDGPSの基本概念である。

ディファレンシャルGPS



- GPSの誤差要因の多くは空間的な相関があるから、離れた地点間でも測距誤差は似ている。
- 位置がわかっている基準局で測距誤差を求め、この誤差情報を移動局に送信、移動局側で補正する。
- ディファレンシャル補正の精度は移動局ー基準局間の距離(基線長)に依存。
- 基準局受信機に加え、無線リンクなどが必要。

誤差要因	補正の可否	備考
衛星軌道		長基線では精度低下
衛星クロック		よく補正できる
電離層遅延		活動が激しいと精度低下
対流圏遅延		高度差に注意
マルチパス	×	低減できず
受信機雑音	×	低減できず

説明続き

- 越中島校舎をユーザ、品川校舎を基準局として、SV15番のGPS衛星の誤差要因を考えると、
- 品川校舎のアンテナ位置は既知なので、衛星 - アンテナ間の距離 (21000km) がわかる。これに対して、衛星クロック (3m)、電離層 (10m)、対流圏 (5m)、その他 (50cm) の誤差が加わったものが擬似距離として測定される (受信機クロックは測位計算で除去するので無視)。このとき、それらの誤差量 (18.5m) を測定できる。

SV15(品川)



左から衛星クロック、電離層、対流圏、その他、真の距離
これら全てを足した距離が擬似距離として品川アンテナで測定される。

SV15(越中島)

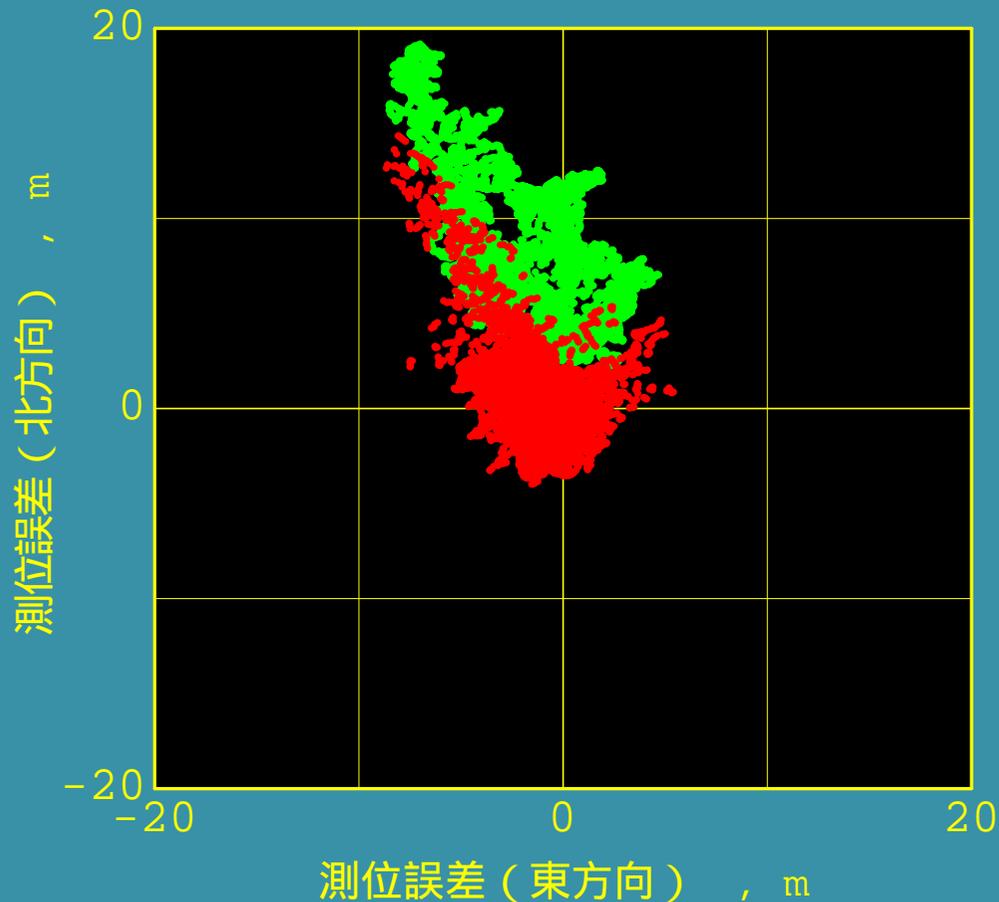


越中島でも上記の前の3つの誤差はほとんど変わらない。
よって自分で推定するよりも、品川の誤差情報を使用したほうが良い。

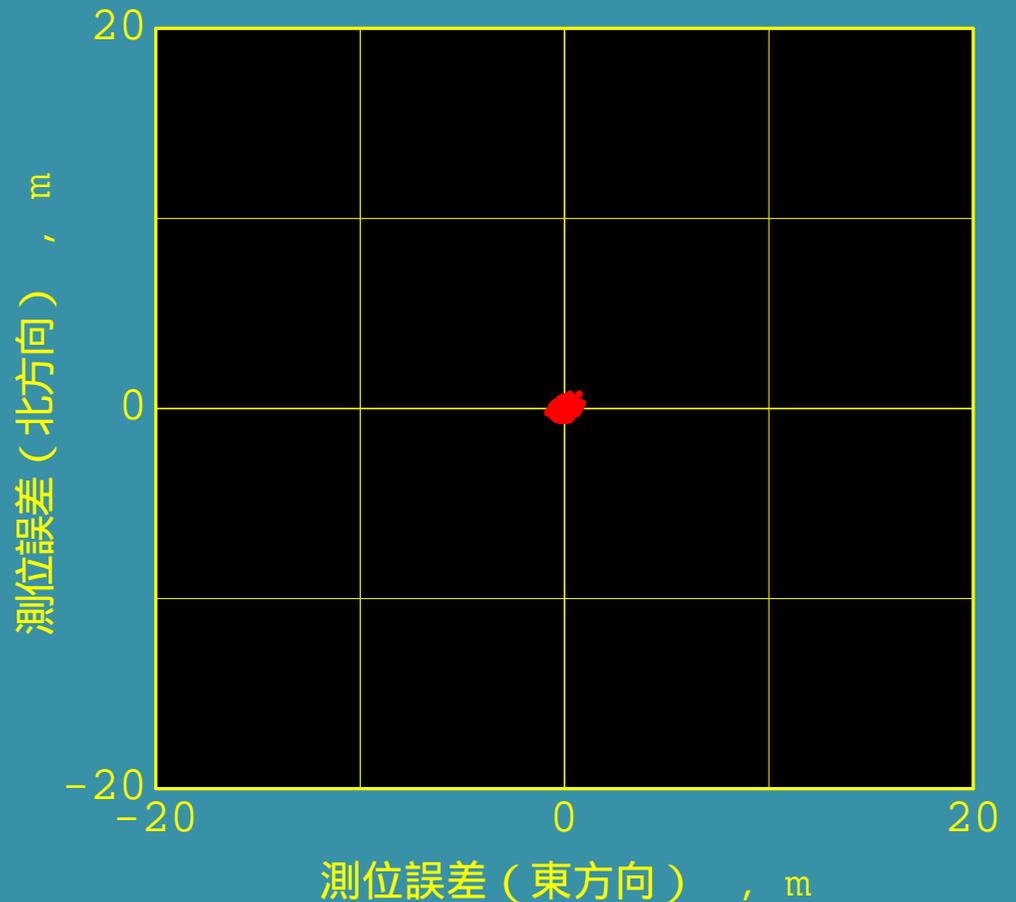
説明続き

- このSV15の持つ誤差量を越中島のGPS受信機に教えれば、越中島のGPS受信機は**良い誤差推定値を持つ**ことになる。
- 越中島のGPS受信機が、この情報を持たない場合は、**単独測位で上記の誤差量をモデル等で推定して計算**しなければならない。その推定精度は、上記の品川から送られてくる誤差情報よりも悪いことが知られている。
- **単独測位とDGPSの違いは、下記の主要な誤差を自分自身で推定するのか？それとも付近の基準局の誤差情報をもらうのか？にある。**

ディファレンシャルGPSの効果 (by坂井さん)



1周波・2周波受信機による測位結果例



ディファレンシャル処理した結果(1周波)

5章のまとめ

- 本章では、GPS測定値やその誤差について調べた。GPSを最大限に活用する能力は、測定値を乱す様々な誤差要因をいかに上手に理解するのに依存している
- コードの測定値は、衛星までの擬似距離、すなわち共通のバイアスを持つ距離を提供する。搬送波位相の測定値はambiguityという複雑な整数値バイアスを持つ距離情報を提供する。バイアスやambiguityは別にして、両測定では共通の各種誤差の影響を受ける
- 衛星の位置や時計のバイアス、伝搬遅延による誤差は、空間的に高い相関をもっている。言い換える、この誤差は、10km離れた2人のユーザーにほぼ同じである。この原理を利用した多くのDGPSサービスは、現在メートルレベルの測位を世界規模で提供している (WAAS, EGNOS, MSAS)