

## V L B I で測る基線長のゆらぎ ----- 電離層の寄与

鹿島支所 第三宇宙通信研究室  
近藤哲朗、日置幸介

### 1.はじめに

V L B I で測った基線長の変化を時間に対する1次式であてはめた後の残差(ゆらぎ)には大きくばらつくものもあり、1次式であてはめがうまくいっていないことを物語っている。このゆらぎが実際の地面の動きを反映しているかどうかを議論するには慎重でなくてはならない。それは基線長の推定においてまだモデル化されていない物理量の影響が含まれているかもしれないからである。基線長の推定に影響を及ぼしそうなものには、実際の地面の動きの他に中性大気や電離層があり、これらが基線長推定に及ぼす影響を評価することはV L B I データを真に測地目的ひいては地震予知につなげるうえで重要であろう。そこで今回は電離層が基線長推定に及ぼす影響を考えた。その動機となったのは実験中の平均Kpと鹿島-フェアバンクス基線長のプロットにみられる何か相関のありそうな関係(図1)やハワイ-フェアバンクス基線長の残差に見られる何か周期性のありそうな変動(図2:文献[1]より引用)である。(特に筆者の内1人(TK)には何かの変動即電離層起源という強い偏見がある。)

### 2.電離層は基線長のゆらぎの原因となり得るか?

測地目的V L B I では電離層の影響を取り除くために2周波数帯(SおよびXバンド)で電波星からの電波を受信する。これは電離層があるために生じる余分な遅延は周波数の二乗に反比例するという原理に基づく。この原理からSバンドで測った遅延とXバンドで測った遅延の1次結合で電離層中の余分な遅延を求めることができ、局位置の推定の前にこの余分な遅延を差し引いておけば電離層の影響は取り除かれたことになる。しかしここで以前から気にかかっていたことが1つあった。それはSバンドの電波とXバンドの電波では当然電離層中の伝播路が異なってくるが、その影響は取り除かれるのだろうか?ということである。

今、簡単のため均質で厚さLの平面状の電離層を考えて、電波星からの電波がアンテナに届くまでの経路を模式的に示すと図3のようになる。電波星を出た電波のうちXバンドはQ-D-C-B-Aの経路を通って、SバンドはQ-E-B-Aの経路を通ってアンテナに届く。Xバンドの電波が電離層を通過する長さ( $l_x$ )とSバンドの電波が電離層を通過する長さ( $l_s$ )の違いは仰角が低くなるほど大きくなる。つまりSバンドの電波はより長い経路をよりゆっくりの速さで通過して行くことになるが、現在の「V L B I 解析ソフトウェア」で行われて

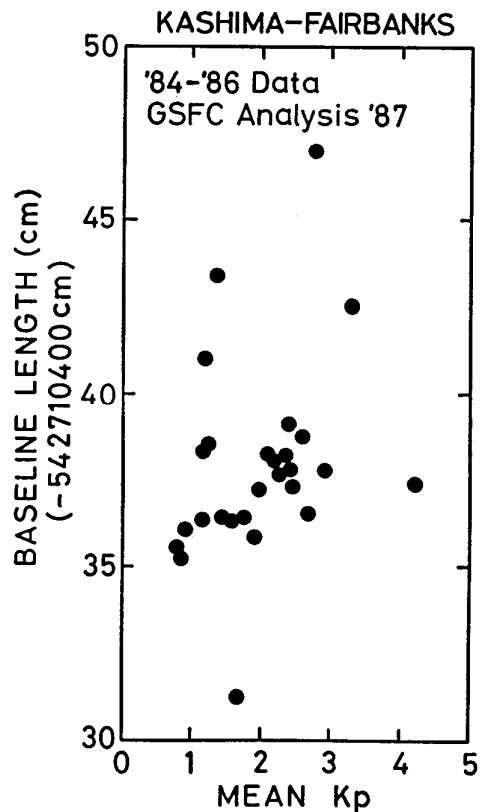


図1. 鹿島-フェアバンクス基線長('84-'86)と実験中の平均Kp。GSFCグループ'87解析データ。

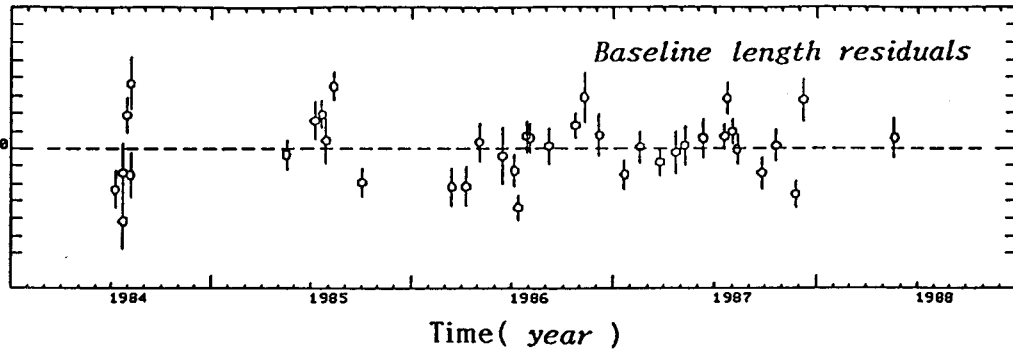


図2. カウアイフェアバンクス基線長ゆらぎの時間変化 (文献[1]より引用)。

いる電離層補正ではこれらの事情は考慮に入れられてない。つまりXバンド、Sバンドとも同じ経路を通るとした場合の補正となっており、図3で示されるように経路が違う場合、電離層をより厚く見積もってしまうことになる。言い換えるとより厚い電離層を通過してきたと見なした補正は過剰補正であり局位置を垂直方向に浮び上がらせてしまうことになる。地球上の離れた2局が垂直方向に浮び上がると基線長は長くなってしまふ。

それでは伝播経路の違いが実際の電離層補正にどの程度影響するか見積もってみよう (---ここでは1局への到達電波しか考えないが実際のVLBIのように2局への到達時間差を考えても同じ議論となる)。ある時刻にDEで表わされる波面がアンテナAに到達するまでにかかる時間をTx (Xバンド)、Ts (Sバンド)とすると、

$$T_x = l_0/c + l_x/V_{gx} + l_a/C_a$$

$$T_s = l_s/V_{gs} + l_a/C_a$$

と表わせる。ここでc, Caは真空中、中性大気中での光速度、Vgx, VgsはX, Sバンドの電離層中での群速度である。したがって、このときのSバンド遅延とXバンド遅延の差をΔT1とすると、

$$\begin{aligned} \Delta T1 &= T_s - T_x \\ &= l_s/V_{gs} - l_x/V_{gx} - l_0/c \end{aligned}$$

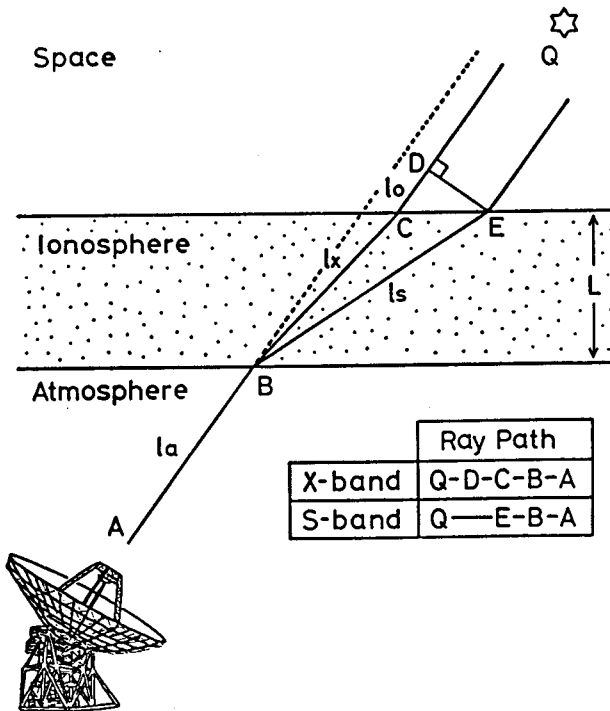


図3. 電離層中でのSバンド電波とXバンド電波の伝播路。

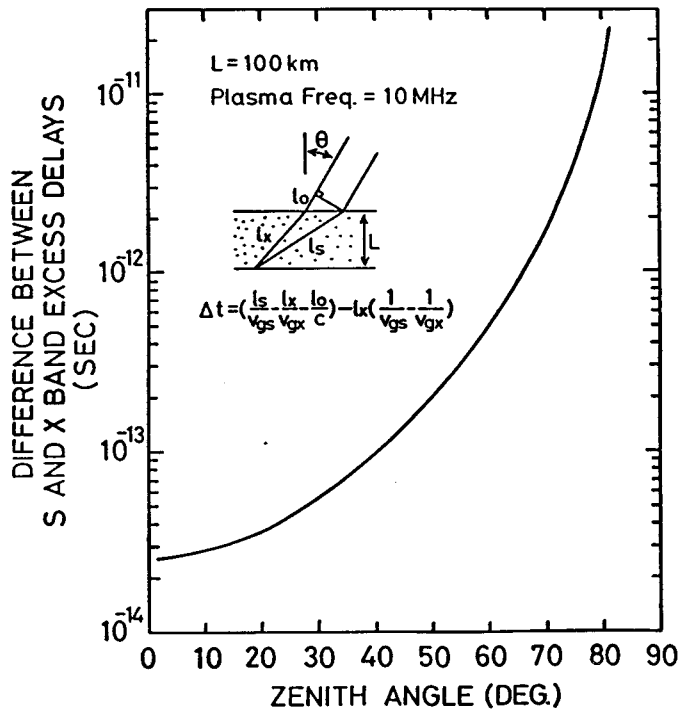


図4. Δtと天頂離角の関係。詳細は本文を参照して下さい。

となる。ここでSバンドの電波がXバンド電波と同じ経路を通った場合を考えると、その場合の波面DEがアンテナAに到達するまでの時間(Sバンド)  $T_{s'}$  は

$$T_{s'} = l_0/c + l_x/V_{gs} + l_a/C_a$$

となる。このときのSバンド遅延とXバンド遅延の差を  $\Delta T_2$  とすると、

$$\begin{aligned} \Delta T_2 &= T_{s'} - T_x \\ &= l_x(1/V_{gs} - 1/V_{gx}) \end{aligned}$$

である。この  $\Delta T_2$  にSバンド受信周波数 ( $f_s$ ) およびXバンド受信周波数 ( $f_x$ ) から計算される定数 ( $f_s^2/(f_x^2 - f_s^2) = 0.067$ ) を乗じたものが「VLBIソフトウェア」で行っている電離層遅延補正である。しかし実際に得られるのは  $\Delta T_1$  であるために補正量に

$$\begin{aligned} \Delta t &= \Delta T_1 - \Delta T_2 \\ &= (l_s - l_x)/V_{gs} - l_0/c \end{aligned}$$

の誤差が生じる。 $\Delta t$  を数値計算で求め天頂離角 ( $0^\circ$  は天頂) に対してプロットしたのが図4である。この計算では電離層をプラズマ周波数 ( $f_p$ ) 10 MHz で厚さ 100 km としたが、これは中緯度の昼間の電離層に相当する。尚屈折角の計算にはスネルの法則を用い、屈折率、群速度の計算には下式を用いた。

$$\begin{aligned} \text{屈折率 (n)} &= 1 - f_p^2/2f^2 \\ \text{群屈折率 (ng)} &= 1 + f_p^2/2f^2 \\ \text{群速度 (Vg)} &= c(1 - f_p^2/2f^2) \end{aligned}$$

$\Delta t$  は天頂では0となるべき量であるが、数値計算での桁落ちのため図4ではある値 (0.025 psec) に近づいてしまった。したがって天頂付近での信頼性は低い。経路差で生じる誤差の議論には影響を及ぼさないような小さい値である。さて、 $\Delta t$  は天頂離角  $80^\circ$  (仰角  $10^\circ$ ) でもたかだか 10 psec のオーダーでありこれを電離層遅延の補正量とした場合には更に1桁下がって 1 psec オーダーの量となる。このために生じる位置の誤差は 0.3 mm と現在の VLBI の精度 3 cm に比べて十分に小さく無視し得ることが分かる。球面上の電離層を考えても  $\Delta t$  はほぼ同じオーダーと思われる。

したがって、SバンドとXバンドの伝播経路の違いから生じる電離層補正の誤差は無視し得るといえる。それでは図2に見られた相関らしきものは偶然であったのだろうか。そこで、GSFCのVLBI解析グループから今年新たに届いたデータを用いて基線長のゆらぎと地磁気活動度との相関を調べることにした。

### 3. 基線長のゆらぎと地磁気活動度

GSFCのVLBI解析グループは毎年局位置や基線長の解析結果を公表している。今回届いたデータ集[2]はマシンリーダーダブル(MS-DOSファイル)で結果のみを用いての研究には甚だ便利である。このデータ集はすでに「第二VLBIデータベース」として当所のACOS上で利用できるようになってきている[3]が、MS-DOSファイルを扱えるパソコン上でも利用できる。ここでは、パソコン上でBASICで解析プログラムを作成し、MS-DOSファイルとしてデータベース化した太陽黒点相対数や地磁気活動度指数と基線長のゆらぎとの相関を調べた。データベース化した地磁気活動度指数関係データを表1で示す。

表1. 現在使用可の地磁気活動度指数関係データ(MS-DOSファイル)

	データ期間	備考
太陽黒点相対数	1980.1~1987.12	1日値
Apインデックス	1980.1~1987.12	"
Dstインデックス	1981.9~1986.3	1時間値

今回の解析には太陽黒点相対数の1日値とApインデックスの1日値を用いたがこれはVLBIデータベースには実験の開始の日付しか入っていない(開始時刻および継続時間は分からない)ためである。Apインデックスを用いたのにはもう1つ理由がある。それはKersleyらによつてApインデックスと電離層の厚さに良い相関が報告されているからである[4]。

数ある基線の中でIRIS実験と称する地球回転パラメータの測定に使用されている基線がデータ数が豊富であり、統計的議論に向いている。そこでこれらの基線の内、Haystack-Fort Davis(HRAS\_085)基線(基線長約3100 km、データ数479、期間'80-'87)とFort Davis-Wettzell基線(基線長約8400 km、データ数290、期間'83-'87)を用いて解析してみた(文献[3]にそれぞれの基線長の変化をプロットしたものが示されている)。図5に基線長変化を1次式であてはめた後の残差(ゆらぎ)と太陽黒点相対数との関係、そして図6にゆらぎとApインデックスとの関係を示す。図5および6で示されるように、ゆらぎと太陽黒点相対数やApインデックスの間にはどうやら有意な相関はなさそうである。図2に見られた何やら相関のありそうな関係も、今回送られてきたデータを用いると図7のようになり相関はみられない。したがって、電離層が基線長のゆらぎの、少なくとも直接の原因とはなっていないといえそうである。

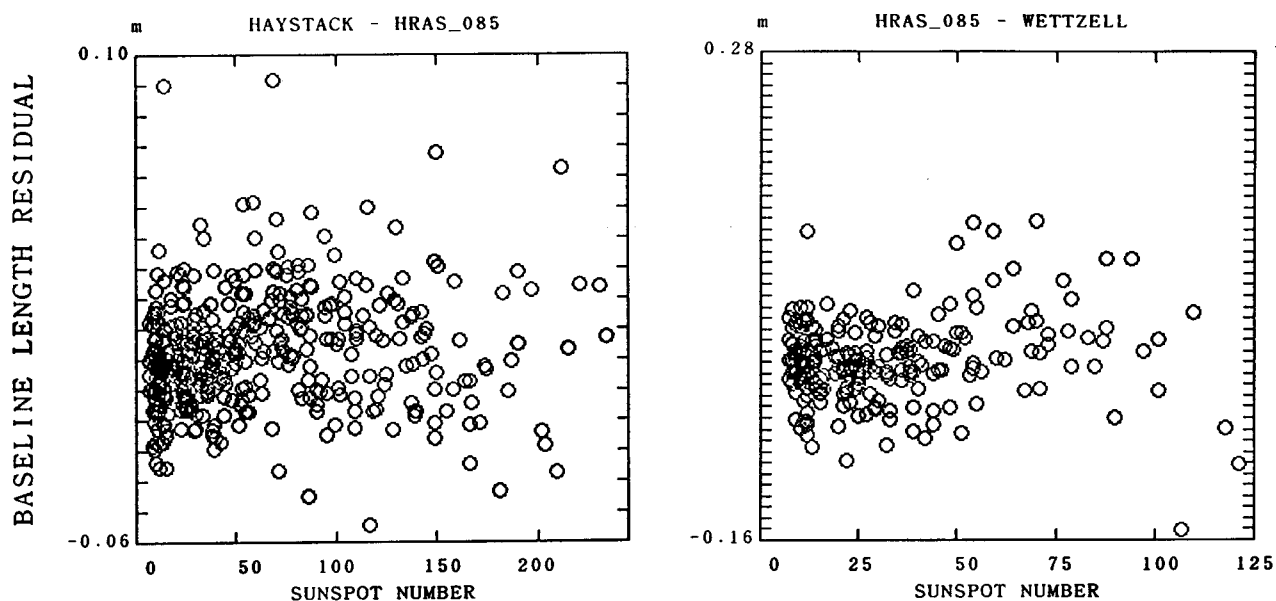


図5. 基線長ゆらぎと太陽黒点相対数。

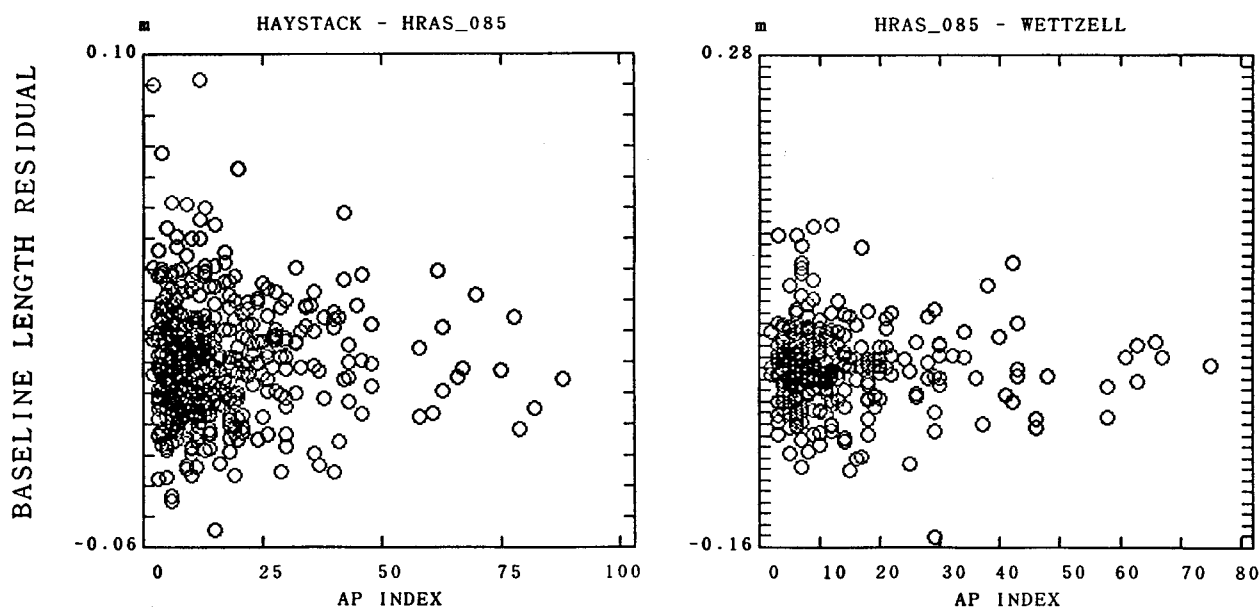


図6. 基線長ゆらぎと地磁気Apインデックス。

#### 4. おわりに

電離層が基線長ゆらぎの原因ではなかろうかという危惧(偏見)はその定量的な評価からも、実際のデータを用いた統計的評価からも棄却された。残るのは中性大気の影響であるが、地磁気擾乱指数のように客観的にその状態を汎地球的に表わす指数がなく(あるのかもしれないが筆者等は知らない)、単純な統計的評価は困難そうである。今回GSFCから送られてきたデータを見ると以前の彼らの解析に比べてゆらぎが小さくなっているように見えるが、それは中性大気モデルの改良(遅延の仰角依存性モデルの改良)および推定法の改良(天頂遅延の時間変化を1時間毎の折れ線近似で推定)のためである。つまり、大きなゆらぎの原因は中性大気であったことの間接的な証ともいえる。それではもう基線長のゆらぎは地面の変化を表わしているのだろうか? 現在行っている中性大気の遅延補正は天頂方向の遅延をモデルに従って視線方向に投影したものでありこの投影にあたっては方位角の違いは考慮に入れられてない。したがって方位角によって水蒸気量が大きく異なった場合(鹿島では一方が海でありこのようなことは大いに起り得ると思うのだが)は当然基線長推定に影響を及ぼすであろう。次回はこの影響を考察してみる予定である。

#### 参考文献

- [1] 日置 幸介、「VLBIデータの多変量解析(1)～基線長ゆらぎの因子分析と主成分分析～」、第398回研究談話会資料、1988、11月。
- [2] Ma, C., J. Ryan, and D. Caprette, "Crustal dynamics project data analysis - 1988, VLBI geodetic results, 1979-1987", NASA TM100723, 1988.
- [3] 日置 幸介、近藤 哲朗、「第二VLBIデータベース」、第406回研究談話会資料、1989、3月。
- [4] Kersley, L. and H.H. Hosseinieh, "The dependence of ionospheric slab thickness on geomagnetic activity", J. Atmos. Terr. Phys., 38, 1357-1360, 1976.

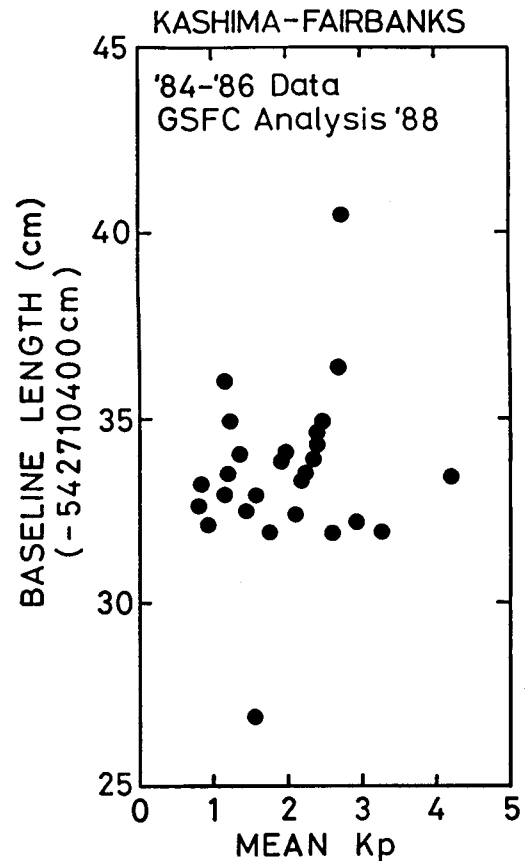


図7. 鹿島-フェアバンクス基線長('84-'86)と実験中の平均Kp。GSFCグループ'88解析データ。