

## 研 究

## △VLBI 法による静止衛星の高精度軌道決定

塩見 正\* 小園 晋一\* 有本 好徳\*\* 永井 清二\* 磯貝 光雄\*

(昭和 59 年 3 月 6 日受理)

PRECISE ORBIT DETERMINATION OF A GEOSYNCHRONOUS  
SATELLITE BY △VLBI METHOD

By

Tadashi SHIOMI, Shin-Ichi KOZONO, Yoshinori ARIMOTO,  
Seiji NAGAI, and Mitsuo ISOGAI

An experiment was carried out to track a geosynchronous satellite by △VLBI method for 17 hours in the 4 GHz frequency band. A real time VLBI system with the baseline of 46 km was used, in which the observed data at the sub-station were transmitted to the main station via a microwave data link. Seven quasars were observed as reference sources. The geometrical delay was estimated within 0.3 nsec in the case of the satellite observations and within 10~140 nsec in the case of the quasars. The final accuracy of the △VLBI observables was approximately 2 nsec (60 cm). The satellite orbit was determined to the accuracy of 100 m using the △VLBI observables in addition to range and angle data which were obtained by a conventional radio tracking method. It was proved that △VLBI with appropriate baselines is a prospective method of precise tracking of a geosynchronous satellite for highly accurate orbit determination.

## 概 要

地上のマイクロ波回線を経由して観測データを伝送する、基線長 46 km の実時間 VLBI システムを用いて、△VLBI 法で 17 時間にわたって静止衛星を追跡する実験を行った。△VLBI 観測では 7 個の準星を基準電波源として用いた。幾何学的遅延時間は、静止衛星では 0.3 nsec 以内、準星では、10~140 nsec 以内の精度で推定された。△VLBI 観測値の総合精度は約 2 nsec (60 cm) で、同時に行われた測距及び測角のデータを併用して衛星の軌道が 100 m の精度で決定された。この実験は静止衛星の高精度軌道決定に、適切な基線での △VLBI 法による精密追跡が有望であることを実証した。

## 1. ま え が き

静止衛星を追跡する最も一般的で、かつ確立された方法は複数の地球局における測距である。通常、2 局ないし 3 局の地球局が使用され、距離の測定精度は約 1 m に達している。ある場合には、測距装置が 1 つの局 A に置かれ、他の局 B では衛星を経由してきた測距信号を単に折返す。A 局ではこの信号を受信して、A 局から衛星を経て B 局に至る距離を測定する。この方法で B 局での距離測定と等価な追跡データが得られる。また、1 追跡局で測距に加えて角度の測定が行われる場合がある。この場合、角度データの精度が高いことが要求される。衛星が高い周波数 (例えば 20 GHz) のビーコン電波を放射して、地球局に狭ビームの自動追尾アンテナがあると、約  $5 \times 10^{-4}$  deg の精度で角度データが得られる<sup>1)</sup>。これらの追跡データを用いた軌道決定精度は、衛星位置誤差にして数 km から数百 m である。

ところが、静止衛星の中には例えば TDRS (追跡・データ中継衛星、静止軌道上で追跡局としての機能を有する) のように、100 m 以内の誤差で軌道を決定することが望ましい衛星がある。一般に、リモートセンシング

\*鹿島支所 衛星管制課

\*\*現 通信・放送衛星機構

VLBI: Very Long Baseline Interferometer (超長基線電波干渉計)

や、衛星航法、さらに将来的には宇宙機を受信局として用いる VLBI などの分野においても高い精度で軌道決定を行う必要性が増大すると考えられる。

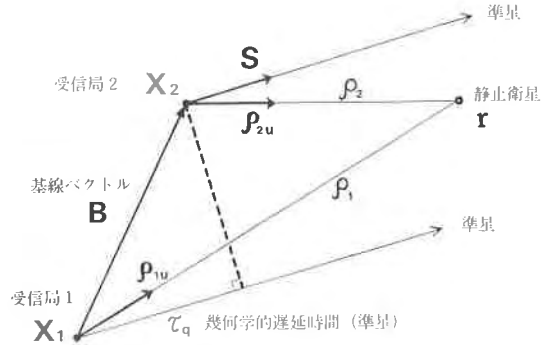
一方で、アメリカの深宇宙探査機の軌道決定精度を高めるのに障害となっていた問題が VLBI による追跡で大幅に解決された。すなわち、従来のドップラ追跡では何日間もの観測で約  $10^{-5}$  deg の精度の角度データが得られたのに対して、VLBI によって 1 日程度の観測でさらに 1 桁以上高い精度が達せられることが明らかにされてきた<sup>(2)</sup>。

我々は、VLBI が静止衛星の高精度追跡手段としても有効であることに着目し、準星を観測して較正を行う  $\Delta$ VLBI 法によって静止衛星を追跡する実験を行った。VLBI は宇宙機の追跡手段としてみた場合次のような利点をもっている。すなわち、地球局は宇宙機が発射する電波を受信するだけでなく、送信機能を必要としない。宇宙機が発射するいかなる形式の電波でも、例えば変調された通信信号でも、中継器の単なる雑音でも観測できる。観測の感度が高く、測定精度が高い。 $\Delta$ VLBI 法によって、基準となる準星の位置精度と同等の精度まで、測定の絶対精度を高めることができる。

電波研究所は、1977年に鹿島（茨城県）と横須賀を結ぶ 125 km の基線で受信帯域幅 2 MHz の VLBI によりアメリカの静止衛星 ATS-1 を追跡する実験を行ったことがある<sup>(3)</sup>。その時には、両局から衛星までの距離の差が約 4 m の精度で測定された。本論文では、1982年 6月に鹿島と平磯（茨城県）を結ぶ 46 km の基線の長時間 VLBI システムを用いて、7個の準星による  $\Delta$ VLBI 法で実験用静止通信衛星 CS を追跡した実験について述べる。この実験では、両局から衛星までの距離の差が約 60 cm で測定され、 $\Delta$ VLBI 法が静止衛星の高精度軌道決定のために有効であることが実証された。

以下、2章では  $\Delta$ VLBI 法による静止衛星の追跡原理と、鹿島—平磯基線の VLBI での CS の追跡の軌道に関する観測性について述べる。3章では、実験システムを説明し、受信系のシステム雑音を始めとする種々の要因による誤差の解析を行う。4章では、実験の方法及び実施スケジュールを述べ、5章において VLBI データの処理の方法及び処理結果を示す。6章では、 $\Delta$ VLBI 観測値を用いた CS の軌道決定結果を示し、観測精度がさらに向上した場合や、日本国内においてとりうるさらに長く、複数の基線での観測を行う場合について、期待される軌道決定精度の検討を行っている。最後に 7章で簡潔に結論を述べる。

## 2. $\Delta$ VLBI 法による静止衛星の追跡



第1図  $\Delta$ VLBI 法による静止衛星追跡の幾何学的関係

### 2.1 $\Delta$ VLBI 法による静止衛星追跡の原理

$\Delta$ VLBI 法は、位置が既知の電波源、例えば準星と、測定対象の電波源、例えば人工衛星の VLBI 観測値の差をとり、両者に共通な誤差を除去する方法である。この方法によって、理想的な条件下では基準の電波源としての準星の位置精度と同等の精度で、静止衛星の位置を測定することができる。第1図に、静止衛星と準星及び VLBI の基線の幾何学的関係を示す。

準星を VLBI で観測して受信信号を相関処理して得られる遅延時間の推定値  $\hat{\tau}_q$  は次式で表される。

$$\hat{\tau}_q = \tau_q + n_q \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $\tau_q$  は幾何学的遅延時間であり、 $n_q$  は2局間での時計の誤差や局内遅延時間の差、伝搬媒質の影響の差、受信系のシステム雑音などに起因する誤差である。これは固定的あるいは変化のゆるやかな誤差と、不規則な誤差を含んでいる。 $\tau_q$  は次式で与えられる。

$$c\tau_q = S \cdot B \quad \dots\dots(2)$$

ここで

$c$  : 光速

$S$  : 準星方向に向いた単位ベクトル

$B$  : 準星の電波の同一位相面を受信する2つの受信局によって形成される基線ベクトルである。

次に静止衛星を VLBI で観測して得られる遅延時間の推定値  $\hat{\tau}_s$  は次のように与えられる。

$$\hat{\tau}_s = \tau_s + n_s \quad \dots\dots(3)$$

$$\tau_s = \rho_1 - \rho_2 \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 $\rho_1, \rho_2$  は静止衛星から発射された電波の同一位相面が受信局 1, 2 に達するのに要した時間である。また  $n_s$  は静止衛星を観測するときの固定的及び不規則的な誤差である。

$\Delta$ VLBI 法では、 $\hat{\tau}_q$  と  $\hat{\tau}_s$  との差をとり、これを観測値  $\hat{\tau}_0$  とする。すなわち、

$$\hat{\tau}_0 = \rho_1 - \rho_2 - \tau_q + n_s - n_q \quad \dots\dots(5)$$

準星と衛星との離角が小さく、かつ両者の観測時刻が十分接近しているならば、(5)式における  $n_s - n_q$  は固定誤差の成分が互いに相殺するので、不規則誤差のみになる。さらに準星の位置および基線を既知とすれば、 $\tau_q$  は(2)式から得られ既知である。それで  $\Delta$ VLBI 観測値は、2局におけるシステム遅延時間の差や時刻同期誤差、及び伝搬媒質の影響による伝搬時間の差といった固定の誤差の影響を受けることなく、衛星の軌道情報を  $\tau_s = \rho_1 - \rho_2$  という形で与える。なお、残った不規則誤差は後述(3.2節)のように、VLBI 観測の信号対雑音比を高めることによって小さくすることができる。

$\tau_s$  は次式で表される。

$$c\tau_s = ||r - x_1|| - ||r - x_2|| \quad \dots\dots(6)$$

ここで、

$r$  : VLBI で観測された電波を発射したときの静止衛星の位置

$x_i$  :  $r$  の位置にある静止衛星が発射した電波を受信したときの局  $i$  ( $i=1, 2$ ) の位置観測値  $\hat{\tau}_0$  の、衛星位置の変位  $\Delta r$ 、受信局位置の誤差  $\Delta x_i$ 、及び準星の位置誤差  $\Delta S$  に関する感度  $\Delta \hat{\tau}_0$  は、(2)(5)及び(6)式から次のように与えられる。

$$c\Delta \hat{\tau}_0 = (\rho_{1u} - \rho_{2u}) \cdot \Delta r - \rho_{1u} \cdot \Delta x_1 + \rho_{2u} \cdot \Delta x_2 - B \cdot \Delta S - S \cdot (\Delta x_2 - \Delta x_1) \quad \dots\dots(7)$$

ここで、

$\rho_{iu}$  : 局  $i$  における衛星の視線方向単位ベクトル

である。すなわち、 $\Delta$ VLBI 観測値は2局における視線方向単位ベクトルの差の方向における、衛星の位置変位の情報を与える。(7)式の第2及び第3項は衛星観測における受信局の位置誤差の影響を示し、第4及び第5項は準星観測における準星位置誤差及び受信局位置誤差の影響をそれぞれ示す。

### 2.2 鹿島一平磯基線の $\Delta$ VLBI の観測感度

CS の追跡実験に用いられた鹿島一平磯基線について(7)式の第1項によって、 $\Delta$ VLBI 観測値のCS軌道に関する観測感度を検討する。3章の第1表の受信局位置データを用いて、(7)式第1項の感度ベクトルは次式で与えられる。

$$\rho_{ku} - \rho_{ku} = C_{kh} \rho_{kh} \quad \dots\dots(8)$$

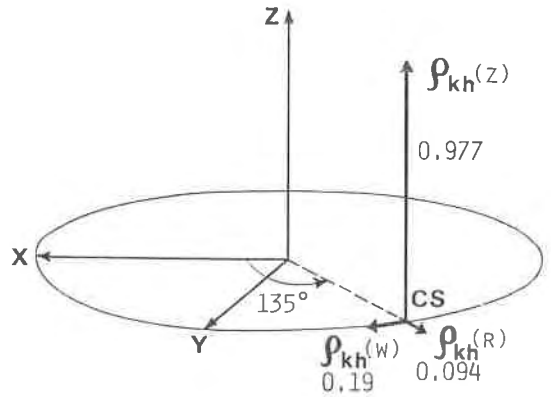
ここで

$\rho_{ku}$  : 鹿島におけるCSの視線方向単位ベクトル

$\rho_{ku}$  : 平磯におけるCSの視線方向単位ベクトル

$$C_{kh} = 9.36 \times 10^{-4}$$

$\rho_{kh}$  : 単位ベクトル



第2図 鹿島一平磯基線の  $\Delta$ VLBI 観測のCS軌道に関する観測性

である。 $\rho_{kh}$  を第2図に伝す。鹿島一平磯基線の  $\Delta$ VLBI 観測値が、主としてCSの南北方向の位置変位に関する観測感度をもつことが明らかである。 $C_{kh}$  は観測感度を量的に示す。すなわち、 $\Delta r_{kh}$  を  $\rho_{kh}$  方向のCSの位置変位とするとこれに対応する  $\Delta$ VLBI 観測値  $\Delta \tau_{kh}$  は

$$c\Delta \tau_{kh} = C_{kh} \Delta r_{kh} \quad \dots\dots(9)$$

となり、これからCSの位置変位の観測精度  $\sigma_r$  は

$$\sigma_r = c\sigma_{\tau_{kh}} / C_{kh} \quad \dots\dots(10)$$

で与えられる。 $\sigma_{\tau}$  は  $c\sigma_{\tau_{kh}}$  が1mのときと1070mなり、 $c\sigma_{\tau_{kh}}$  が10cmになると107mである。基線長が短いので観測性は必ずしもよくない。 $\Delta$ VLBIの観測値を用いて、100m以内の位置精度で軌道決定を行うためには、 $\Delta$ VLBIの観測精度のめやすとして10cmを目標とする必要がある。

## 3. 観測精度

### 3.1 実験システム

CSを $\Delta$ VLBI法で追跡する実験システムを第1表に示す。使用したVLBIシステムは、K-II VLBIと呼ばれ、鹿島と平磯の2受信局で基線が形成され、受信周波数は4GHz帯である。K-II VLBIの1つの特徴は実時間VLBIシステムであることである。平磯局で受信した生データはデジタル化され符号化されて、地上のマイクロ波回線を経由して実時間で伝送される。鹿島局では、ラグ数32ビット(1ビットは250nsec)で実時間で相関処理が行われ、予測値を用いてFRINGE回転を止めながら10msec間の積分が行われる。こうして得られた10msec毎の複素相関関数は、時刻符号や実時間相関処理において使用された遅延時間の予測値、ビットシフト量などの情報とともにデジタルテープに記録される。遅延時間を精密に推定する後処理は別途行われる。受信周波数帯域幅は1チャンネルあたり2MHzで、最大

第1表 K-II VLBI による CS の  $\Delta$ VLBI 追跡システム

受信局	鹿島	平磯
経度(東経, 度)	140.662675	140.621737
緯度(北緯, 度)	35.9542028	36.3679429
高度(準椭楕円体*より, m)	77.1346	71.6750
*SAO-C7: 地球赤道半径=6378.142 km, 扁平率=1/298.255		
基線長(m)	46057.433	
VLBI システム	鹿島	平磯
受信アンテナ直径	26 m	10 m
受信アンテナ利得	58.9 dB	48.9 dB
システム雑音密度	111 K	130 K
受信中心周波数	CH1: 4031 MHz, CH2: 4041 MHz, CH3: 4061 MHz, CH4: 4091 MHz CH5: 4131 MHz	
受信帯域幅	2 MHz/CH	
サンプリング	4 Mbits/sec	
原子標準 (安定度 10 秒)	セシウム ( $2.5 \times 10^{-12}$ )	ルビジウム ( $< 1.6 \times 10^{-12}$ )
データ伝送	7 GHz 帯地上データ回線を介して, 平磯局の観測データを鹿島局に伝送する	
相関器	実時間相関器, 相関ラグ数 32 bits, 積分時間 10 msec	
時刻同期	7 GHz 回線を介して 1 秒パルスを伝送して同期をとる	
時刻校正	鹿島の原子時計を短波標準電波 (JJY) を用いて校正する (精度 $\pm 1$ msec)	
静止衛星	人工衛星 CS (実験用中容量静止通信衛星)	
軌道	経度(東経) $135$ 度 $\pm 0.1$ 度, 軌道傾斜角 $0.27$ 度(注)	
観測電波	4 GHz 帯中継器の雑音出力	
追跡局	鹿島, 4 GHz 帯でトーン方式測距及び 19.45 GHz のビーコン電波を 13 m アンテナで自動追尾して測角	
準星	P0949+00, P1055+01, 3C273, 3C279, DW1335-12, NRAO 530, 3C454.3	

(注) 南北軌道制御が 1982 年 1 月以來実施されておらず, 軌道傾斜角が徐々に増大している。

5 チャンネルで観測ができる。各チャンネルは 100 msec 毎に順次切替えられる。我々の実験では、第 2 及び第 3 のチャンネルで観測を行った。これらのチャンネルの中心周波数はそれぞれ 4041 MHz 及び 4061 MHz である。

静止衛星 CS は 4 GHz 帯の帯域幅 200 MHz の中継器を 2 台搭載している。そのうちの 1 台の中継器が発生する雑音電波を VLBI で観測した。一方、鹿島局には CS の追跡施設があり、4 GHz 帯の TT&C 回線によって 100 kHz の測距トーン信号を用いて測距を行いつつ、CS の 19.45 GHz のビーコン電波を直径 13 m のアンテナで自動追尾し、角度を測定することが可能である。 $\Delta$ VLBI 観測と平行してこの施設による CS の追跡が行われた。

### 3.2 VLBI 観測の精度

(1) SNR と遅延時間及び遅延時間変化率の推定精度  
VLBI 観測における信号対雑音比 (SNR) は一般に

次式で定義される<sup>(6)</sup>。

$$SNR = L \cdot \sqrt{\frac{T_{a1}T_{a2}}{T_{a1}T_{a2} + T_{a1}T_{s2} + T_{s1}T_{s2}}} \cdot 2BT \quad \dots\dots(11)$$

ここで

$T_{ai}$ : 局  $i$  におけるアンテナ温度 ( $i=1, 2$ )

$T_{si}$ : 局  $i$  におけるシステム雑音温度 ( $i=1, 2$ )

$B$ : 受信帯域幅 (1 チャンネル)

$T$ : 積分時間

$L$ : 1 ビットサンプリングなどによる SNR の低下を示す ( $\approx 0.4$ )

そして  $T_{ai}$  は次式で与えられる。

$$T_{ai} = \frac{\lambda^2}{8\pi k} SG_i C_i \quad \dots\dots(12)$$

ここで

- λ : 受信電波の波数
- k : ボルツマン定数
- S : 電波源の電力束密度
- G<sub>i</sub> : 局 i の受信アンテナ利得 (i=1, 2)
- C<sub>i</sub> : 局 i の受信偏波整合度 (0 ≤ C<sub>i</sub> ≤ 1, i=1, 2)

なお、(12)式は片側偏波成分のみを受信する場合に適用される。受信周波数を 4 GHz とし、C<sub>i</sub>=1 として T<sub>ai</sub> をデシベル表示すると(12)式から、

$$T_{ai} \text{ dB(K)} = -67.9 + G_i \text{ dB} + S \text{ dB}(J_y) \dots\dots(13)$$

をうる。ここで、1J<sub>y</sub> = 10<sup>-26</sup> W/m<sup>2</sup> · Hz である。

準星の観測においては、T<sub>a1</sub>, T<sub>a2</sub> ≪ T<sub>s1</sub>, T<sub>s2</sub> が成り立ち、(11)式は次のように書ける。

$$SNR = L \cdot \sqrt{\frac{T_{a1} T_{a2} 2BT}{T_{s1} T_{s2}}} \dots\dots(14)$$

遅延時間は、電波源からの信号が VLBI を構成する片方の局に、他の局に対して遅れて到達する時間差である。これは、2局での受信信号の相関関数をフーリエ変換して得られるクロススペクトル関数の位相の、周波数軸に関する一次傾斜と与えられる。位相の分散は SNR の二乗に反比例するので、複数の周波数チャンネルにおける位相データから遅延時間を推定すると、その標準偏差 δ<sub>τ</sub> は次式で与えられる。

$$\delta\tau = \frac{1}{\omega_{eff} SNR} \dots\dots(15)$$

$$\omega_{eff} = \sqrt{\sum_{i=1}^K (\omega_i - \bar{\omega})^2}, \quad \bar{\omega} = \sum_{i=1}^K \omega_i / K$$

ここで、ω<sub>eff</sub> は実効的な帯域幅で、K はチャンネル数、ω<sub>i</sub> は各チャンネルの中心周波数であり、SNR は各チャンネルに対して評価する。1チャンネルのみのデータを処理して遅延時間を推定するときは、受信帯域幅を K 個の副帯域に分割したときの各副帯域の中心周波数を ω<sub>i</sub> とし、SNR は各副帯域に対して評価する。

遅延時間の変化率は、位相の時間変化率から得られ、その推定値の標準偏差 δ<sub>τ</sub> は次式で与えられる。

$$\delta\tau = \frac{1}{\omega_0 T_{rms} SNR} = \frac{1}{\omega_0 T_{eff} SNR_t} \dots\dots(16)$$

$$SNR_t = SNR / \sqrt{M}, \quad T_{eff} = \sqrt{M} T_{rms}$$

$$= \sqrt{\sum_{i=1}^M (t_i - \bar{t})^2}, \quad \bar{t} = \sum_{i=1}^M t_i / M$$

ここで、ω<sub>0</sub> は受信周波数、t<sub>i</sub> は積分時間 T を M 個の小区間に分割したときの各区間の中心時刻、SNR<sub>t</sub> は各区間において評価したものである。

(2) CS 観測の精度

K-II VLBI で観測する CS の 4 GHz 帯中継器の、通

信波が入力されないときの実効放射電力は約 46.7 dBm である。地表面での電力束密度は 31.0 dB(J<sub>y</sub>) となる。

(13)式で S=31.0 とし、CS から送信される電波の偏波と VLBI 局の受信アンテナの偏波とが一致していることを考慮に入ると、CS 観測におけるアンテナ温度 T<sub>a</sub> は次式で与えられる。

$$T_a \text{ dB(K)} = -33.9 + G \text{ dB} \dots\dots(17)$$

第 1 表に与えられている受信アンテナ利得を用いて、鹿島局と平磯局のアンテナ温度はそれぞれ、T<sub>ak</sub>=25.0 dB(K), T<sub>ah</sub>=15.0 dB(K) となる。(17)式にこれらのアンテナ温度、第 1 表に与えられている両局のシステム雑音温度、そして帯域幅 B=2 MHz を代入して、L=0.4 とすると CS 観測の SNR が次式で与えられる。

$$SNR \text{ dB} = 25.2 + \frac{1}{2} \cdot T \text{ dB(sec)} \dots\dots(18)$$

(18)式において積分時間 T=10 sec とすると SNR=30.2 dB となる。(19)式においてこの SNR と、ω<sub>eff</sub>=2π × 0.5 × 10<sup>6</sup> rad/sec (1チャンネル観測で、実効帯域幅が 0.5 MHz) を用いると、δ<sub>τ</sub>=0.30 nsec (9.0 cm) を与える。すなわち、CS の電波はかなり強く、受信系のシステム雑音の点だけからみると、10秒間の積分をすれば目標とする精度が達成できる。

(3) 準星観測の精度

準星観測の場合には、(14)式を用いる。第 1 表に与えられている両局のアンテナ利得と、(13)式で与えられるアンテナ温度及び 1チャンネルの帯域幅を代入して、

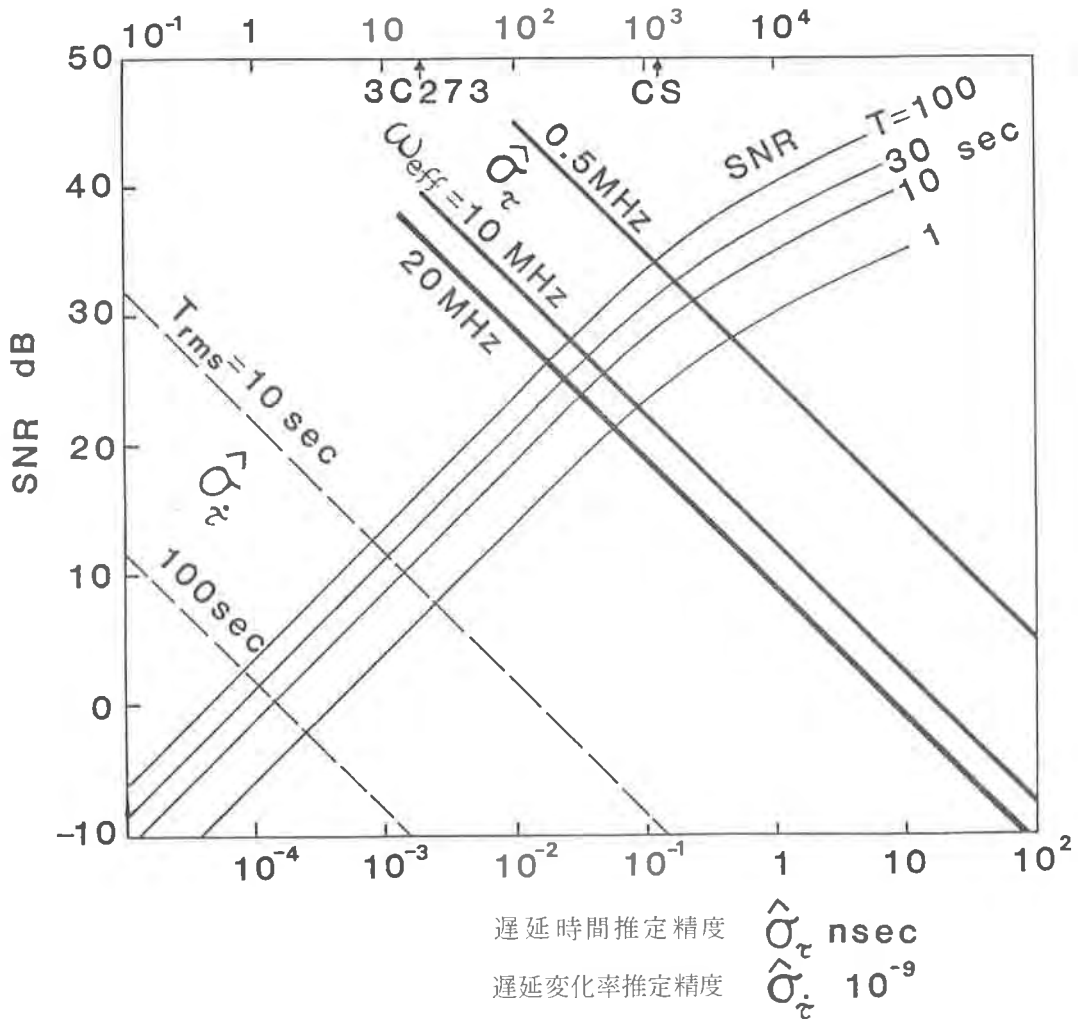
$$SNR \text{ dB} = -5.8 + S \text{ dB}(J_y) + \frac{1}{2} \cdot T \text{ dB(sec)} \dots\dots(18')$$

を得る。準星の地表面での電力束密度はせいぜい数 J<sub>y</sub> 程度であるので、CS の場合とは異なって必要な SNR を得るには積分時間を長くしなければならない。1チャンネルでの観測では SNR を大きくするにも限界があるので、通常は複数のチャンネルで観測し、(19)式の ω<sub>eff</sub> を大きくする。

例として、強い電波源である準星 3C273 をとる。(18')式において S は約 13 dB(J<sub>y</sub>) である。積分時間 T を 30 sec とすると SNR は 14.6 dB で、実効帯域幅が 0.5 MHz の 1チャンネル観測では、(19)式から δ<sub>τ</sub>=11 nsec (3.3 m) となる。従って、遅延時間の推定精度を高めるためには T を大きくし、かつ実効帯域幅を広げる必要がある。

第 3 図は、観測する電波源の相関強度を与えて、(11)式によって SNR を求め、この SNR から(15)及び(16)式によって遅延時間とその変化率の推定精度を直ちに読みとれるようにしたものである。例えば、3C273 の場合には、

電波源の相関電力束密度  $J_y$



第3図 K-II VLBI の観測精度 電波源の電力束密度を与えて SNR を読みとり、この SNR から遅延時間とその変化率の推定精度を知る。

積分時間が30秒間で、実効帯域幅が20 MHzであると、上述のCSの遅延時間推定とほぼ同じ0.3 nsec程度の精度が達せられる。

(4) K-II VLBI システムの諸誤差

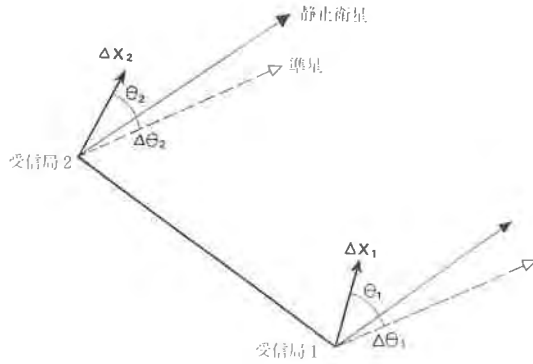
これまでの節において、受信システムの雑音によるVLBI観測値の誤差を検討した。ここでは、 $\Delta$ VLBI観測値に影響する他の誤差、すなわち準星の位置誤差、受信局の位置誤差（UT1誤差、極運動補正誤差を含む）、局の時計の誤差、局内遅延誤差及び伝搬媒質の影響の補正誤差を検討する。

(i) 準星の位置誤差

K-II VLBI は基線長が46 kmであり、準星の位置誤差0.01'' ( $2.8 \times 10^{-6}$  deg) に対する遅延時間誤差はただか0.008 nsec (0.23 cm) である。これは我々の場合には無視できる。

(ii) 受信局の位置誤差

(7)式が示すように、2つの受信局の位置誤差の電波源の視線方向成分の差が遅延時間誤差となる。受信局1, 2の位置誤差ベクトルをそれぞれ  $\Delta x_1, \Delta x_2$ 、静止衛星と  $\Delta x_1, \Delta x_2$  とがなす角をそれぞれ  $\theta_1, \theta_2$ 、静止衛星の視線方向と準星の視線方向とがなす角をそれぞれ  $\Delta \theta_1, \Delta \theta_2$  とする (第4図)。 $\Delta$ VLBI観測誤差  $\Delta \tau_s$  は、



第4図 受信局の位置誤差の影響

$$\begin{aligned}
 c\Delta\tau_s &= -\Delta x_1 \cos \theta_1 + \Delta x_2 \cos \theta_2 - [-\Delta x_1 \cos(\theta_1 + \Delta\theta_1) + \Delta x_2 \cos(\theta_2 + \Delta\theta_2)] \\
 &\approx \Delta x_1 \sin \theta_1 \cdot \Delta\theta_1 - \Delta x_2 \sin \theta_2 \cdot \Delta\theta_2 \quad \dots\dots(19)
 \end{aligned}$$

と書ける。ここで、 $\Delta$ VLBI観測においては $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ が小さく選ばれることを考慮した。ところで、UT1誤差及び極運動に起因する $\Delta x_1$ と $\Delta x_2$ とは短基線の場合

にはほとんど等しくなる。また、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ もほとんど等しくなるので、これらの効果の(19式への寄与は無視できる。従って、(19式で考慮すべきものは受信局の測地(測量)誤差である。2局の測地誤差を $\sigma_{g1}$ 、 $\sigma_{g2}$ とすると、(19式から、

$$c^2\Delta\tau_s^2 = \Delta\theta_1^2\sigma_{g1}^2 + \Delta\theta_2^2\sigma_{g2}^2 \quad \dots\dots(20)$$

を用いると、例として、 $\Delta\theta_1 = \Delta\theta_2 = 10 \text{ deg}$ 、 $\sigma_{g1} = \sigma_{g2} = 20 \text{ cm}$ を用いると、 $\Delta\tau_s = 0.16 \text{ nsec}$ (4.9 cm)となる。

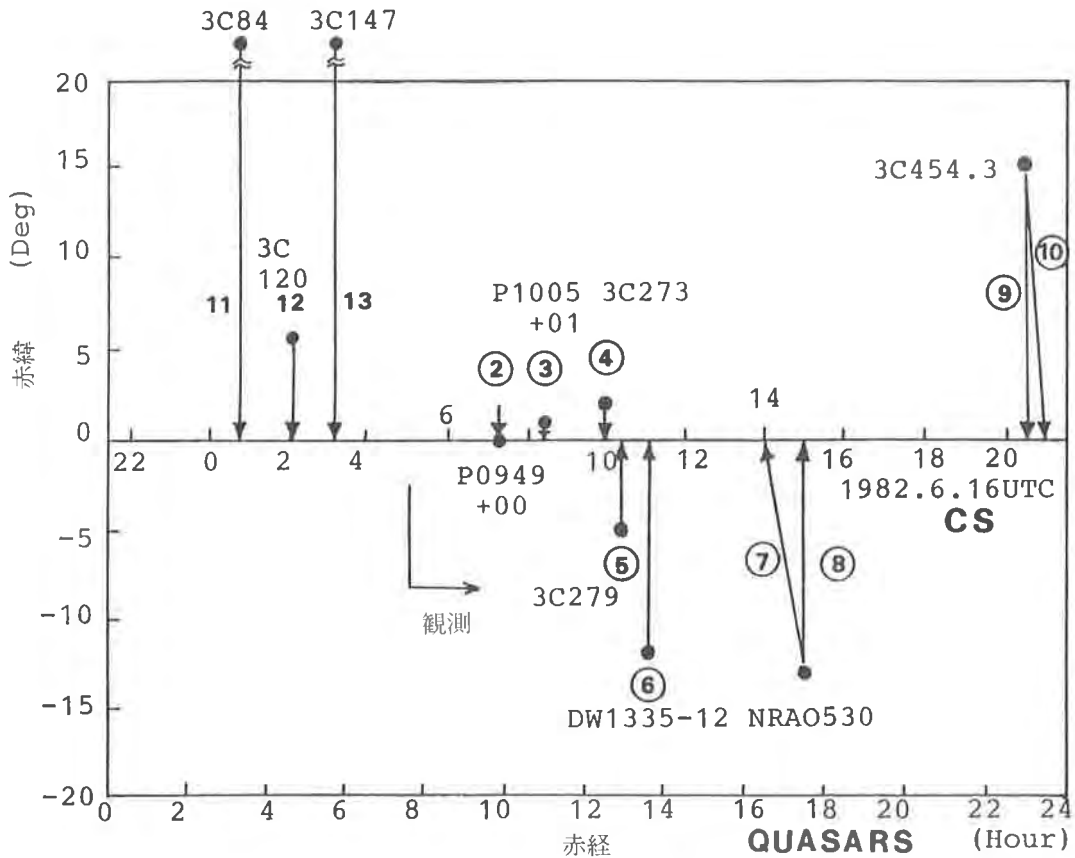
iii) 時計の誤差

2つの受信局の時計の間の時刻オフセットは $\Delta$ VLBI法では相殺される。しかし、準星の観測時刻と衛星の観測時刻とで時刻オフセットが変化すると、これが $\Delta$ VLBI観測値の誤差 $\Delta\sigma_i$ を生じる。すなわち、

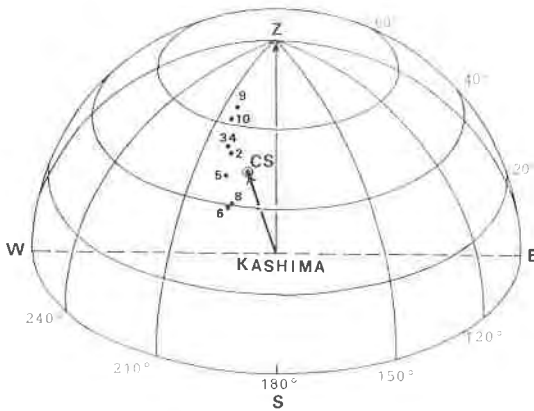
$$\Delta\sigma_i = \dot{\tau}_e \Delta t \quad \dots\dots(21)$$

ここで、 $\dot{\tau}_e$ は時刻オフセットの変化率(あるいは原子周波数標準の周波数差)、 $\Delta t$ は準星と衛星の観測時刻の間隔である。 $\dot{\tau}_e = 0.1 \text{ psec/sec}$ 、 $\Delta t = 30 \text{ min}$ とすると $\Delta\sigma_i = 0.18 \text{ nsec}$ (5.4 cm)である。

iv) 伝搬媒質の影響



第5図  $\Delta$ VLBI観測スケジュール ②~⑩は $\Delta$ VLBI観測番号。7ではCSのみ観測、11, 12, 13は計画のみで観測せず。



第6図 鹿島局での観測電波源の方向 数字は観測番号

考慮すべき伝搬媒質は、太陽風プラズマ、地球の磁気圏及び電離層、中性大気である。太陽風プラズマの影響は準星観測時のみ生じるが、十分小さい。それ以外の媒質の影響も  $\Delta$ VLBI 観測によって数 cm 以内になり、我々の目標精度に対しては小さいものである。

以上から、受信システムの雑音以外の原因による  $\Delta$ VLBI 観測値の誤差は 0.2~0.3 nsec 程度で、精度目標の 10 cm 以内である。

#### 4. 実験の方法

##### 4.1 観測スケジュール

11 個の準星を用いた  $\Delta$ VLBI 法により、CS を 24 時間にわたって観測する計画をたてた。実際の観測では、機器の不具合のために観測時間を縮少し、17 時間にわたり 7 個の準星を用いて観測を行った。第 5 図は観測計画を示す。相関強度が  $1J_{\theta}$  以上の準星が用いられた。また、CS との離角が大きくても、相関強度が大きい準星はいくつか使用された。第 6 図は、鹿島局における地平座標系において、CS と各々の準星の観測時刻における仰角及び方位角を示している。

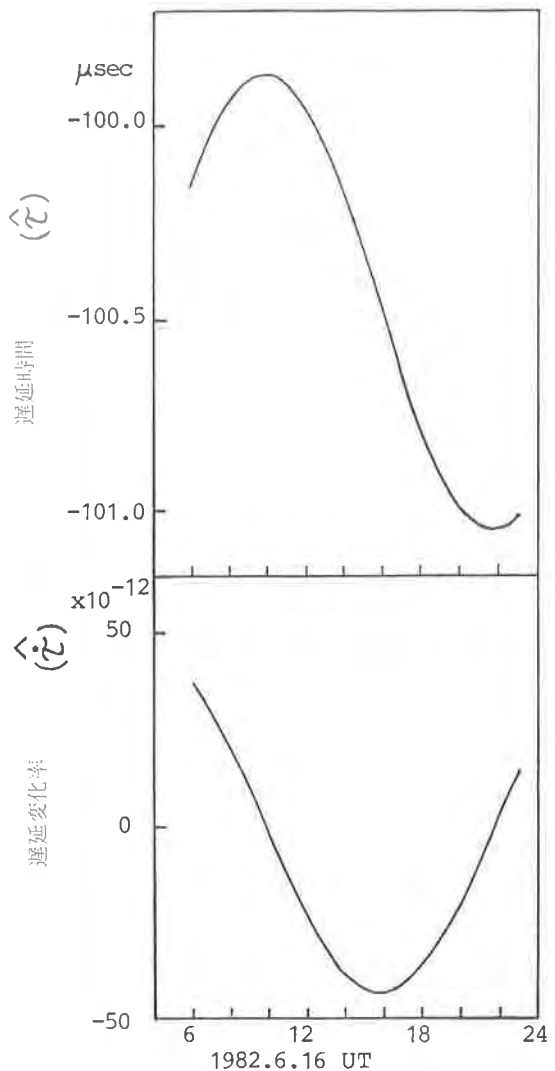
原則として、1 回の観測を 10 分間の準星観測、続いて 10 分間の CS 観測、そして再び 10 分間の準星観測で構成した。すなわち、CS の観測は前後の準星の観測でサンドイッチのようにはさまれている。CS の VLBI 観測値を位置が既知の準星の観測値で容易に較正することをねらったものである。10 分間の観測のうち最初の数分は受信アンテナを目的の電波源に指向させるための制御時間として必要である。VLBI データの記録は、準星では 45 秒間、CS では 20 秒間、各 10 分間の観測の後半において、すなわちアンテナが完全にプログラム追尾方式で電波源をとらえている時に行われた。

##### 4.2 実時間相関器の制御

実時間相関器は、1 局の受信データを予測値に従って遅延させ、階段関数で近似した正弦波関数を用いてフリンジ回転を止めながら、10 msec 間積分する機能をもっている。準星の観測では、10 レベルの階段関数を用いた。CS 観測の場合は、遅延時間の変化率が小さくただか  $\pm 50 \times 10^{-3}$  ns/sec であるので、そのまま 10 msec 間の積分が行われた。第 7 図は CS の遅延時間及びその変化率の予測値を示す。

##### 4.3 時刻の較正及び同期

鹿島局のセシウム時計は、日本の短波標準電波 (JJY) を用いて、UTC に対して  $\pm 1$  msec 以内の誤差で較正された。K-II VLBI の基線が短いだけでなく、2 つの



第7図 CS の遅延時間及びその変化率の予測値



受信局と観測する電波源の経度差が小さいので、±1 msecの時刻の較正精度は我々の目的には十分である。つまり、時刻の誤差すなわち地球の自転角の計算誤差による受信局の位置誤差が、VLBI 観測値に最も影響しにくい幾何学的関係が成立している。

平磯局と鹿島局の時刻同期は、マイクロ波回線を経由して1秒パルスを伝送する方法で0.1 μsec以内の誤差で行われた。これは実時間相関器において良好な相関を得るのに十分な精度である。

5. △VLBI データの処理

5.1 遅延時間の推定方法

実時間相関器において10 msec間ずつ積分されて磁気テープに記録される複素相関関数は次式で表現される。

$$R_{oxy}(t_i, \tau) = C_1 \sum_{t_i}^{dt} \{ C_2 \cdot x(t+\tau) y(t-\tau_h) f(t) \} \quad \dots\dots(2)$$

ここで

- $R_{oxy}(t_i, \tau)$  : 時刻  $t_i$  での複素相関関数
- $C_1$  : 実時間相関器より磁気テープにデータが転送されるときに乗ぜられる係数
- $C_2$  : 受信信号の1ビットサンプリング効果 (=  $2/\pi$ )
- $x(t)$  : 鹿島局での受信信号
- $y(t)$  : 平磯局での受信信号
- $\tau_h$  : 予測遅延時間に近いビットシフト (1ビット = 250 nsec)
- $f(t)$  : 階段関数で近似したフリンジストップ関係
- $\sum_{t_i}^{dt}$  :  $t_i$  から  $dt$  (= 10 msec) の時間積分

②式を正規化した複素相関関数を  $R_{xy}(\tau)$  とすると、

$$R_{xy}(\tau) = \frac{C_3}{dt C_1 C_2} R_{oxy}(\tau) \quad \dots\dots(23)$$

ここで  $C_3$  は、階段関数を用いてフリンジストップ関数を近似したことに対する補正係数である。 $R_{xy}(\tau)$  をフーリエ変換し、予測遅延時間とビットシフトとの差を補正しながら積分して次の正規化された相互スペクトル関数  $S_{xy}$  を得る。

$$S_{xy}(\omega_k, t_i) = \frac{1}{dT} \sum_{t_i}^{dt} \mathcal{F}[R_{xy}(t, \tau)] e^{-i\omega_k(t-\tau_h)} \quad \dots\dots(24)$$

ここで

$\omega_k$  : ビデオ周波数,  $\omega_k = 2\pi Bk/32$ ,  $B=2$  MHz,  $k=0, 1, 2, \dots, 31$

$t_i$  : 積分開始時刻

$\mathcal{F}[R_{xy}(\tau)]$  :  $R_{xy}(\tau)$  のフーリエ変換

$\hat{t}$  : 予測遅延時間

$\sum_{t_i}^{dT}$  :  $t_i$  から  $DT$  の時間の積分

我々は  $DT=1$  sec とした。

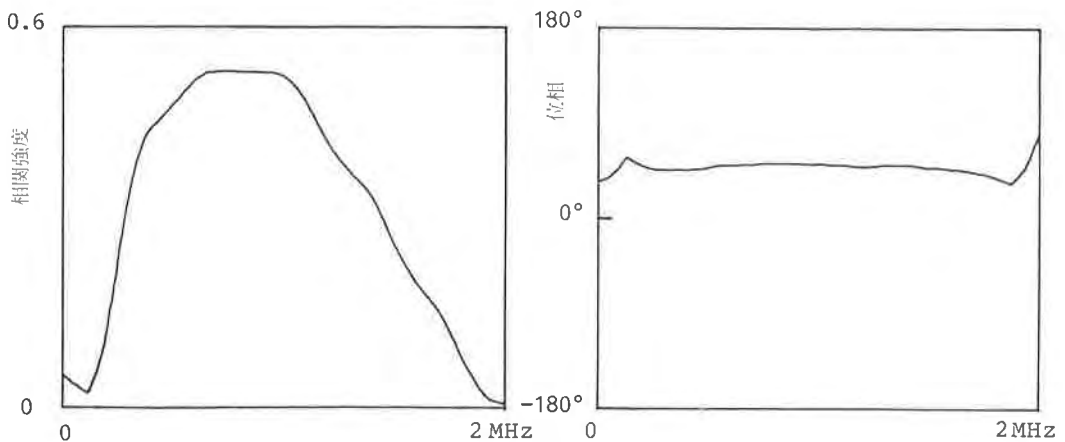
真の遅延時間に対する遅延時間残差を  $\Delta\tau$ , 真の遅延時間変化率に対する残差を  $\Delta\dot{\tau}$ , 真の遅延時間加速度 (二次の変化率) に対する残差を  $\Delta\ddot{\tau}$  とおく。これらの推定値は次の相関強度関数  $X_C$  を最大にする  $\Delta\tau$ ,  $\Delta\dot{\tau}$ ,  $\Delta\ddot{\tau}$  として与えられる。すなわち、

$$(\Delta\tau, \Delta\dot{\tau}, \Delta\ddot{\tau}) = [\Delta\tau, \Delta\dot{\tau}, \Delta\ddot{\tau}] \max(X_C) \quad \dots\dots(25)$$

$$X_C = \left| \frac{1}{T\omega_B} \sum_{\omega_B}^{T\omega_B} S_{xy}(\omega, t) e^{-i\omega\Delta\tau} e^{-i\omega_0(\Delta\dot{\tau}t + 1/2\Delta\ddot{\tau}t^2)} \right| \quad \dots\dots(26)$$

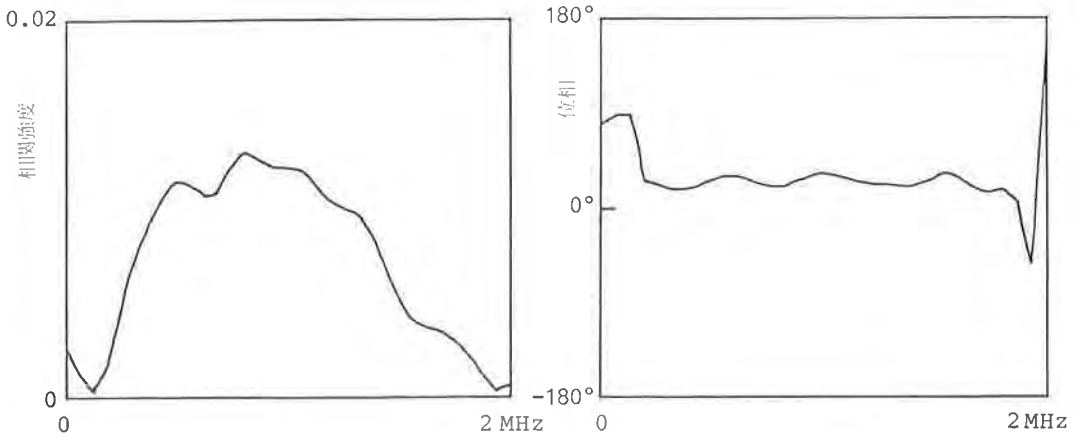
ここで、

$T$  : 積分時間



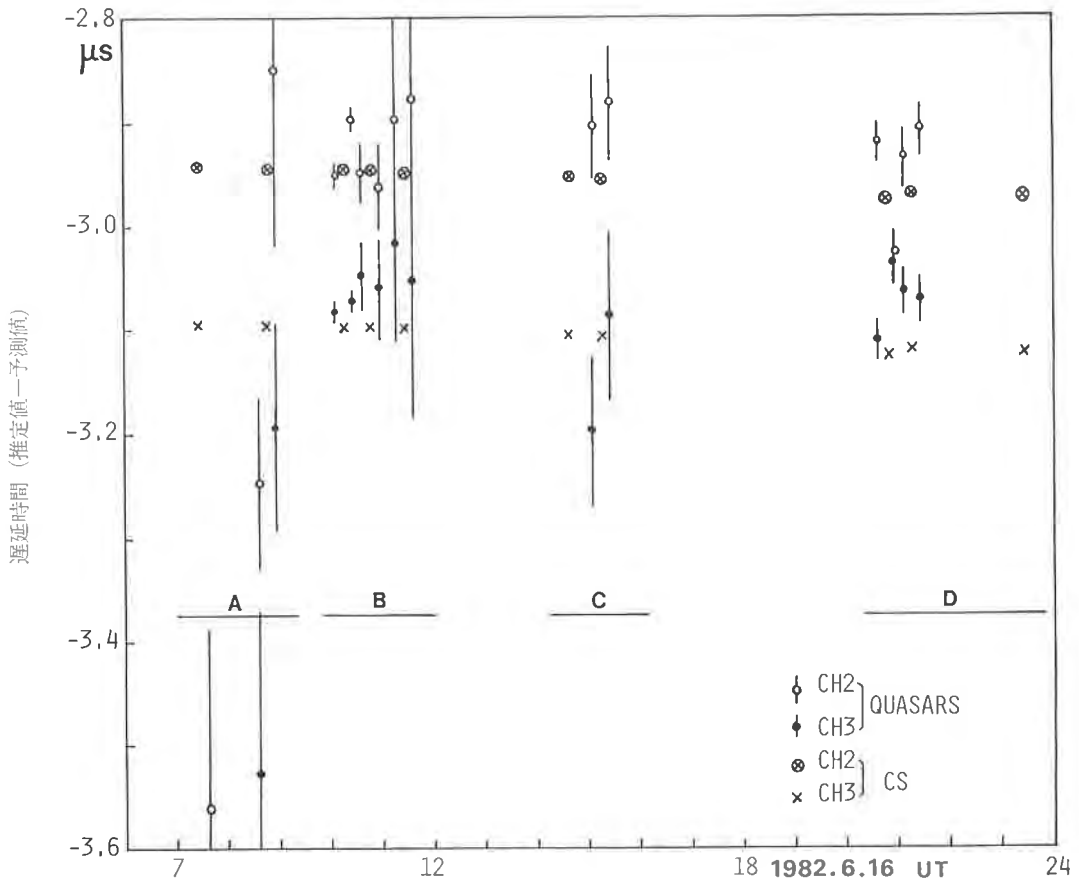
CS 1982.6.16 10:17 25 UT, CH 2, INTEGRATION 10 sec

第8図 CS 電波の相互スペクトルの例



3C273 1982.6.16 10:26 27 UT, CH 2, INTEGRATION 15 sec

第9図 準星電波の相互スペクトルの例



第10図 遅延時間推定値 予測値との差を示す。縦線は標準偏差。A~Dは時間区分。

第2表 遅延時間推定精度

観測番号	電波源	電波源位置 (1950.0系)		相関強度 (相関電力 / 電密度 $J_V$ )		遅延時間推定精度 (nsec)
		赤緯	赤経			
2~10	CS	—	—	0.412	(1240)	0.3
		H M S				
2	P0949+00	09 49 24.800	0°12'24"00	0.00078	(2.3)	140
3	P1055+01	10 55 55.330	1 50 03.35	0.00092	(2.8)	130
4	3C273	12 26 33.248	2 19 43.26	0.0093	(28)	11
5	3C279	12 53 35.835	-5 31 08.03	0.0029	(8.7)	38
6	DW1335-12	13 35 00.200	-12 42 10.00	0.00086	(2.6)	130
8	NRAO 530	17 30 13.538	-13 02 45.93	0.0017	(5.1)	63
9, 10	3C454.3	22 51 29.521	15 52 54.30	0.0046	(14)	23

$\omega_B$ : 帯域幅

$\omega_0$ : 受信周波数 (ch 1: 4041 MHz, ch 2: 4061 MHz)

$\omega$ : ビデオ周波数 (0~2 MHz)

$T$ :  $t$  に関して  $T$  の時間の積分

$\int \omega_B$ :  $\omega$  に関して  $\omega_B$  の間の積分

である。我々の実験においては、 $T$  は準星の場合は30秒、CSの場合は20秒とした。ただし、2チャンネルの交互受信をしたので、各チャンネルの実質積分時間はこれらの半分である。相関強度が大きいCS電波の観測では積分時間はこれで十分である。準星の観測ではさらに長い積分時間をとることが望ましいが、実際上は両局の原子時計の安定度が不十分なために積分時間に限界がある。

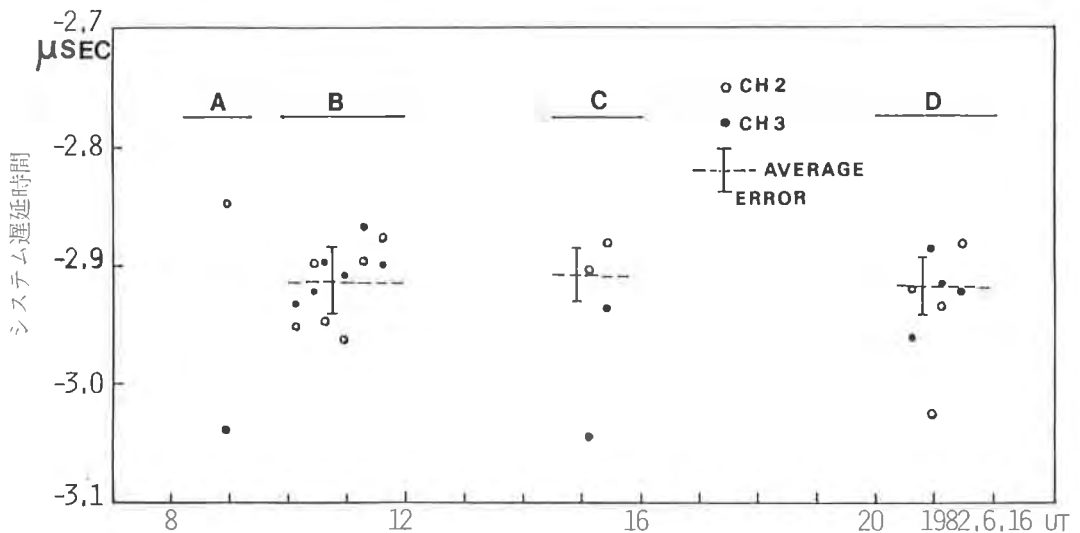
準星とCSの全ての観測について上述の方法で遅延時間  $\tau = \hat{\tau} + d\tau$ 、及び遅延時間の変化率  $\dot{\tau} = \hat{\dot{\tau}} + d\dot{\tau}$  を求

めた。相互スペクトルの典型的な例を第8図及び第9図に示す。

5.2 システム遅延の推定

準星とCSの観測データを処理して得られた遅延時間推定値を第10図に、相関強度と遅延時間の推定精度(1チャンネルあたり)を第2表に示す。CSの遅延時間の推定精度は、3.2節における評価から予測されることだが、0.3 nsecとなっている。準星の場合には、これも予測されるように約10~140 nsecである。

第10図は、チャンネル2とチャンネル3の間で遅延時間に差があることを示している。この差は、受信システムの特性のチャンネル間の差によって生じたものである。CSの場合、この遅延時間差はきわめて安定している。第10図の4つの時間区分A, B, C, Dにおけるチャンネル間の遅延時間差の平均値は、それぞれ152.46 nsec, 151.32 nsec, 151.56 nsec, 149.68 nsecである。



第11図 第2チャンネルのシステム遅延時間推定値。チャンネル間遅延時間差を用いて補正した第3チャンネルのデータも付加してある。破線は区間B, C, Dにおける平均遅延時間。

第3表 第2チャンネルのシステム遅延時間

時間区分	システム遅延時間(nsec)	RMS(nsec)
A*	$\tau_A = \tau_B$	
B	$\tau_B = -2913.51$	29
C	$\tau_C = -2907.96$	23
D	$\tau_D = -2918.18$	25

\* $\tau_B$  を  $\tau_A$  として用いる

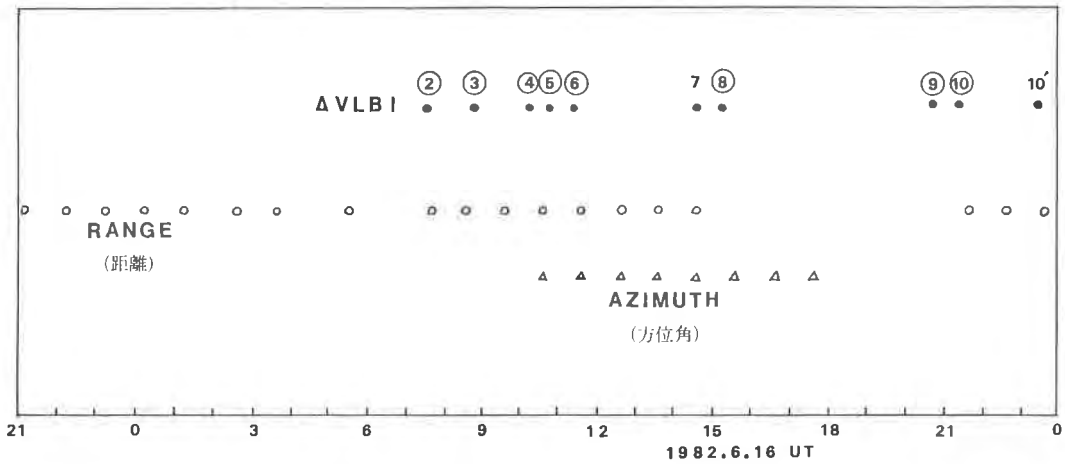
これらの遅延時間差が準星のチャンネル間の遅延時間差として適用できると仮定し、準星のチャンネル3の遅延時間推定値にこれらを加えて、チャンネル2に等価な遅延時間推定値を得る。これを第11図に示す。準星の遅延時間予測値を真と仮定すると、第11図は K-II VLBI の各時間区分におけるチャンネル2のシステム遅延時間の推定値を与える。データ点数が少ない区間Aを除いて、区間B, C, Dにおいてそれぞれ平均操作を行い、これらの区間におけるシステム遅延時間  $\tau_B, \tau_C, \tau_D$  を求める。これらを第3表に示す。

### 6. $\Delta$ VLBI 観測値を用いた軌道決定

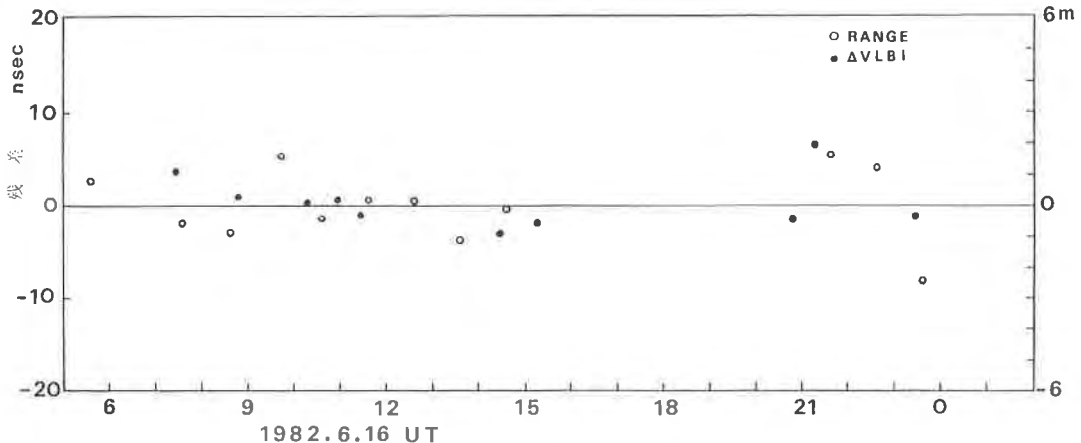
#### 6.1 軌道決定

5.2節で得たシステム遅延時間を補正して、CS の真の VLBI 観測値が得られる。この VLBI 観測値単独では CS の軌道決定に必要な情報の量と質をもっていない。というのは、K-II VLBI の基線は1つであり、基線長が短く、かつ観測数が少ないからである。そこで、CS 鹿島局の追跡システムによって得られた距離と方位角の観測値も用いて軌道決定を行った。これらの追跡データの観測時刻を $\Delta$ VLBI の観測値の時刻とともに第12図に示す。

CS の軌道決定は電波研究所において開発された軌道決定プログラム (KODS)<sup>(9)</sup>を用いて行われた。その結果、 $\Delta$ VLBI 観測値は距離と角度の追跡データを用いて決定した軌道に対して、 $-83.2$  nsec ( $-25.0$  m) の固定誤差をもっていることがわかった。これを除去した観



第12図 CS の追跡データの時刻分布 数字は観測番号。7, 10' は CS のみ観測。



第13図 CS の軌道決定における観測残差

測値を用いた軌道決定における残差を、距離観測値の残差とともに第13図に示す。全ての  $\Delta$ VLBI 観測値の残差の二乗平均誤差 (RMS) は 2.7 nsec (81 cm) であり、距離観測値の残差の RMS は 97 cm である。 $\Delta$ VLBI の最後から2番目 (21 h 17 min UT) の観測値の残差だけは大きいのでこれを除くと、 $\Delta$ VLBI 観測値の RMS は 1.9 nsec (58 cm) である。

以上により、K-II VLBI システムによって得られた  $\Delta$ VLBI 観測値の精度は約 2 nsec (60 cm) であり、これは 100 kHz の測距トーンを用いて得られる距離観測値の精度より優れていることがわかる。この精度はまた、第2表の最も相関強度の大きい準星 3C273 の遅延時間推定精度よりもさらによい。準星の遅延時間の推定精度が 10~140 nsec の広がりをもっているにもかかわらず、最終的に 2 nsec の精度が達せられた理由は3つ考えられる。第1は各観測時間帯でシステム遅延時間が安定しており、準星による較正が有効に行えた。第2は、CS の遅延時間のチャンネル間の差を利用して2つのチャンネルの観測値を合成することにより、観測値の分散を小さくすることができた。第3は各時間帯においていくつかの準星を観測することにより、システム遅延時間の推定が有効に行えた。

$\Delta$ VLBI 観測値に含まれていた固定誤差の原因は4つ考えられる。第1は、CS 観測と準星観測とでシステム遅延時間が異なることである。チャンネル2及び3において、CS 観測と準星観測の間でシステム遅延時間の差がそれぞれ、 $A_2$  及び  $A_3$  とする。CS 観測のチャンネル間システム遅延時間差を用いて準星観測のチャンネル間システム遅延時間差を補正すると、生じる誤差  $A_{23}$  は次式で与えられる。

$$A_{23} = (A_2 + A_3) / 2 \quad \dots\dots(27)$$

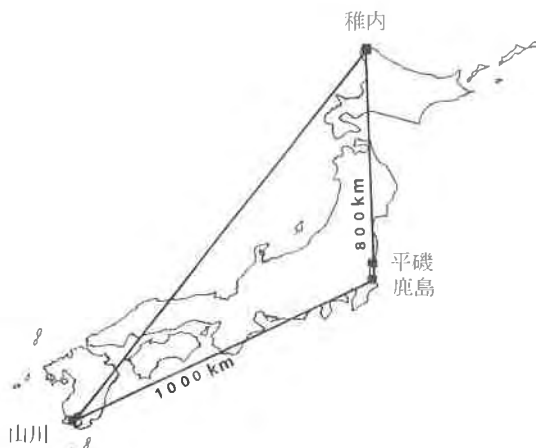
第2の原因は、軌道決定に用いた他の観測値、すなわち距離と方位角の観測値が含む誤差の影響である。もちろん、これらの観測値は別途、高い精度で較正が行われているが<sup>6)</sup>、わずかの固定誤差が残っている可能性がある。第3の原因は、観測局の位置誤差である。第4の原因は、軌道決定プログラムで用いている座標系システムと、VLBI のデータ処理で用いている座標系システムとの微妙な差異である。しかし、我々の実験ではこれらについて明確に分析することは困難である。というのは、準星の観測値の精度に限界があり、基線が一つで基線長が短く、 $\Delta$ VLBI 観測値の情報の質と量が不十分だからである。従って、上述のようにこれを便宜上、 $\Delta$ VLBI 観測値の固定誤差を導入することで処理した。

6.2  $\Delta$ VLBI 観測値の情報量

軌道決定で得られる CS の位置及び速度の共分散行列

第4表  $\Delta$ VLBI 観測値による CS の軌道決定精度の向上と、観測値に含まれる情報量

基線 (受信局)	$\Delta$ VLBI 観測値精度 ( $\sigma_r$ )	衛星位置推定精度			$\Delta$ VLBI 観測値の情報量 ( $\frac{1}{2} \log_2 \frac{ P_{22} }{ P }$ )
		$v_1$	$v_2$	$v_3$	
	$\infty$	64 m	130 m	4.5 m	0
1 基線 (鹿島—平磯)	1 m	31 m	120 m	4.3 m	1.4
	10 cm	10 m	36 m	4.0 m	5.8
3 基線 (鹿島—稚内) (鹿島—山川) (山川—稚内)					
	1 m	1.9 m	8.1 m	3.7 m	12.8



第14図 日本国内における三長基線の例

$P$  の固有値  $v_i$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ) は、軌道決定精度を評価する一つの手段である。特に、 $v_1, v_2$  及び  $v_3$  はほぼ位置の誤差のめやすとして用いることができる。第4表に、第12図で示される距離及び方位角の観測値に加えて、いろいろな精度及び基線による  $\Delta$ VLBI 観測値を用いた軌道決定の精度を  $v_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) を用いて示す。 $\Delta$ VLBI 観測値の精度が  $\sigma_r=1$  m の場合、 $\Delta$ VLBI 観測値を用いない場合 (すなわち、 $\sigma_r=\infty$ ) に対して、衛星位置の1つの成分 ( $v_2$ ) の精度が改善される。これは、2.2節で述べたように、K-II VLBI が主として一つの方向 (Z 方向) に良好な観測性をもっていることに対応している。我々の実験では  $\Delta$ VLBI 観測値の精度は約 60 cm であり、約 100 m の軌道決定精度が期待される。もし、 $\sigma_r=10$  cm が達成されれば、数十 m の軌道決定精度が期待できる。

さらに、日本国内の3局による3基線 (第14図) を用いた  $\Delta$ VLBI 観測値が得られることを仮定すると、

$\sigma_r = 1 \text{ m}$  で数mの軌道決定精度が達せられることが示されている。

以上では、共分散行列  $P$  の3つの固有値のみについて検討した。これらは衛星の位置精度に対応している。他の推定パラメータ、すなわち衛星の速度の精度をも含めて  $\Delta\text{VLBI}$  観測による軌道決定精度の改善度を調べる。それは、 $\Delta\text{VLBI}$  観測値が軌道推定過程にもたらす情報量  $I$  で評価できる。情報量  $I$  は次式で定義される<sup>(7)</sup>。

$$I = \frac{1}{2} \log_2 \{ |P_{\infty}| / |P| \} \quad \dots\dots(28)$$

ここで  $P_{\infty}$  は、 $\Delta\text{VLBI}$  観測値を用いないときの推定値の共分散行列であり、 $| \cdot |$  は行列式を意味する。従って、 $|P_{\infty}| / |P|$  は、 $\Delta\text{VLBI}$  観測値を用いることによって、全ての推定パラメータに関する誤差楕円体が縮小する比率である。第4表には、この情報量も示されている。観測精度と基線配置に大きく依存するものの、 $\Delta\text{VLBI}$  観測値が静止衛星の軌道に関する多くの情報量を与えうることが明らかである。

## 7. む す び

実時間 VLBI システム (K-II) を用いて  $\Delta\text{VLBI}$  法で CS を追跡した。得られた  $\Delta\text{VLBI}$  観測値は約 2 nsec (60 cm) の精度をもち、これは同時に実施した測距及び測角の精度を上回った。実験に用いられた VLBI の基線長が短く、また単一基線であったので  $\Delta\text{VLBI}$  観測値単独では、CS の軌道を決定するのに不十分であった。しかし、距離及び角度の追跡データによる軌道決定にくらべて、 $\Delta\text{VLBI}$  観測値を加えた軌道決定がより高い精度を達成することが確かめられた。このことは、 $\Delta\text{VLBI}$  観測値に含まれる軌道情報量を評価することによっても明らかである。

我々の実験では、CS の軌道を約 100 m の精度で決定できた。 $\Delta\text{VLBI}$  観測値の精度を上げ、複数の適正に配置された基線を使用すればさらに高い精度が期待できる。簡単な検討によると、観測精度が 3 nsec (1 m) で、日本国内の3局 (稚内、鹿島、山川) による3基線

を用いて CS を  $\Delta\text{VLBI}$  で追跡した場合、約 10 m の位置決定精度が達成できる。従って、 $\Delta\text{VLBI}$  法は高い軌道決定精度を必要とする静止衛星の追跡に非常に有効な手法となるであろう。

## 謝 辞

本実験は、鹿島支所第三宇宙通信研究室及び平磯支所太陽電波研究室の支援のもとに実施された。特に、K-II VLBI の利用とデータ処理においては鹿島支所第三宇宙通信研究室の河野宣之室長、高橋富士信主任研究官、小池国正研究官に援助をしていただき深く感謝する。

## 参 考 文 献

- (1) 有本好徳, 塩見正, 西垣孝則, 川瀬成一郎, 村上秀俊; 一局追跡による静止衛星の軌道保持実験結果, 信学会技術報告, SANE 82-14, 1982年6月.
- (2) Jordan, J.F., Deep space navigation systems and operations, ESA Internatisonal Symposium on Spacecraft Flight Dynamics, May 1981.
- (3) 川瀬成一郎, 田中高史; VLBI による静止衛星の軌道決定, 電波研季報, 24, 130, pp. 518-524, 1978.
- (4) Kawano, N., F. Takahashi, T. Yoshino, K. Koike, H. Kumagai and N. Kawajiri, Development of real-time VLBI and measurements of scintillation, J. of RRL, 29, 127, pp. 53-102, July 1982.
- (5) Whitney, A.R., Precision geodesy and astronomy via Very-Long-Baseline Interferometry, Doctoral Thesis, MIT, Jan. 1974.
- (6) Kawase, S., N. Kawaguchi, T. Tanaka and K. Tomita, Optical calibration of geostationary satellite tracking systems, IEEE Trans. on AES, 17, 2, pp. 167-172, Mar. 1981.
- (7) 有本卓, カルマン・フィルター, 産業図書, 昭和52年10月.

