

I-3 K-3型 VLBI システムの概要

河野宣之*

(昭和59年7月3日受理)

1. ま え が き

一般に、システムの開発に当っては、その目標と設計概念を明確にすることが最初の作業となる。これらは当然、開発のアイデアが出された時点で既に概念的にはでき上っている。特に、本システムのごとき多くの科学技術分野にわたり、システムの研究開発を分担していくことを必要とする場合、完成する数年後におけるそのシステムの有用性、他のシステムとの比較、関連技術レベル等を考慮した目標や設計概念を明確にしておかねばならない。このことは単に開発の失敗や完成時に価値の低いシステムの開発を防ぐのみでなく、研究開発が進み分担が細分化された時の“意志統一”の基本となると共に、途中の止むを得ない仕様の変更を矛盾なく行う際に重要な役割を果たす。

一方、完成した時点で、有用性、他のシステムとの比較、関連技術レベルに関してシステムを評価することは計画自体の評価のみならず、今後の機能追加や更に発展させたシステムの新たな研究開発を進める上で重要である。

ここでは、K-3システムの開発に当って設定した目標と設計概念を先づ紹介し、その後完成した現時点での同システムの機能、性能、応用可能分野、K-3システムと他のシステムとの比較について評価も含めながら述べることにする。

2. K-3システムの到達目標と設計概念

2.1 K-3システムの到達目標

到達目標について説明する前に、VLBIにおいて重要な意味をもつ“0.1 ns”について先づ述べておきたい。VLBIの測地応用を例にとると、原理的には遅延時間を測定して距離を求めるのであるから、0.1 nsがここで言う荒い議論では距離3 cmに等価であると考えて差支えない。

さて0.1 nsの持つ重要な意味の初めとして、VLBI局における時刻基準を生成する水素メーザ原子周波数標準の周波数安定度について述べる。現在の水素メーザの周波数安定度は $2 \sim 5 \times 10^{-15}$ (平均時間1時間~1日)程

度である。III., IV. で詳しく述べられるが、測地応用等を目的にした場合、地球回転の1周期に相当する1日が観測期間の単位となる。この間に2つのVLBI局の時計に生じるランダムで推定不可能な時刻の変動は0.1 ns~0.4 nsとなる。もちろんデータ解析方法によってはこの変動も一部推定量に含めることにより多少改善されるが、およそ0.1 nsが限界である。次は解析時に用いる物理モデルとVLBIの測定精度との関連である。大陸間で測定した場合、1~2 nsを境にして考慮すべき現象は急激に増加し、0.2 nsでは相対論効果、0.03 ns(1 cm)より小さくなると複雑極まる物理モデルに加えてアンテナの構造変化等も考慮しなければならない。すなわち、1 cm以上の精度では、物理モデル自体が不十分である可能性が大きく、またアンテナの構造変化については不明な点が多い。最後はVLBIの精度の限界を与える中性大気による伝搬遅延時間である。VLBI観測においては、各局で受信する準星等からの電波は各々の気象条件により異った中性大気による遅延を受け、この伝搬遅延時間はそのまま測定される遅延時間に重畳される。とりわけ水蒸気によるそれは時間変動が大きく不規則なため予測が困難であり、観測時に何等かの方法で別途測定しなければならない。この測定にはII-11で述べられる水蒸気ラジメータが用いられて来たが、VLBI観測が行われる仰角 $20^\circ \sim 30^\circ$ 以上の広範囲にわたる測定という厳しい条件の下では、その測定精度は距離に換算して1~3 cmが現在の技術レベルにおける限界¹⁾である。

このように“0.1 ns”はVLBIにとって1つの道標と言えるが、この先を旅するには、更に高度の技術という食料と、自然に対する理解という地図が必要となる。

このような理由から研究開発計画の目標を「0.1 nsの精度で遅延時間を測定し、3 cm以上の諸現象(物理パラメータ)を知ることができる総合VLBIシステムの開発」を目標に設定した。

2.2 設計概念

設定目標をより具体化するため、先づVLBIの基本的な理論に立ち返り、必要なサブシステムと全体の構成、各サブシステムに与えられるべき基本条件を明確にしなければならない。次に、保守・運用や将来の拡張への方

* 鹿島支所 第三宇宙通信研究室

向づけ、特に K-3 システムを米国との実験に使用するための米国の Mark III システムとの適合性等各サブシステムに共通する概念を明確にしなければならない。前者については開発計画の根幹をなすものであるからその必要性は言うまでもないが、後者を怠ると、総合システムとして機能しなかったり、その後の発展性や有用のないシステムになりかねない。

そこで VLBI の原理に一度立ち回り、基本的に必要な項目を明確にしておく。なお詳細な式の展開については文献(2)を参考にしてもらいたい。

観測目標としている天体からの信号を遠く離れた 2 点で受信することを考える。当面の目的は 2 点での受信信号 S, S' から 2 点に到達した時間差 (遅延時間 τ) を求めることである。実際に受信して出力される信号には受信機や大気等から発生する雑音を含んでいる。従って受信機から出力される信号 X_1, X_2 は

$$X_1 = S + N_1 \quad \dots\dots(1)$$

$$X_2 = S' + N_2 \quad \text{但し } S' = S e^{+i\omega\tau} \quad \dots\dots(2)$$

と書くことができる。ここで ω は受信帯域にわたる角周波数である。目標とする天体が人工衛星の場合は S の強度は大きい、準星等を受信する一般の観測の場合、 $(S^2/\overline{N_i^2})^{1/2}$ の比 (S/N 比) は 0.001 程度と圧倒的に N が大きい。ここに、雑音 N_1, N_2 を含む X_1, X_2 からいかにもっともらしい遅延時間 τ を導出するかの問題が生じる。結論から言えば、2 つの出力信号 X_1, X_2 の相互相関の実部を最大にする τ が遅延時間の最尤推定値である。すなわち

$$\text{Max} \left\{ \sum_{j=1}^N \text{Re} \{ X_{1j} \cdot X_{2j}^* e^{-i\omega_j \bar{\tau}} \} \right\} \quad \dots\dots(3)$$

$$\text{但し } X_{1j} \cdot X_{2j}^* = |X_1| \cdot |X_2^*| e^{+i\omega_j \tau}$$

なる $\bar{\tau}$ が求める遅延時間である。ここで j は受信帯域にわたる周波数成分を示す。

ところで (3) 式は前で問題にした信号対雑音比 (S/N 比) を改善することには何も関与していないので、前に述べた S/N 比が 0.001 のような場合のために少し変形する。VLBI では S も N_1, N_2 も広い周波数帯域を持っており、通信の場合に行われる受信帯域を狭くすることは信号自身のそれも狭くすることになり S/N 比の改善にはならない。しかし N_1, N_2 は 2 つの受信点で独立に付加される雑音であるから、長時間にわたる (3) 式の積分は $X_1 \cdot X_2^*$ の信号成分と雑音成分の比を大きくすることになる。そこで、積分時間内における遅延時間 τ の時間変化 (主として地球の自転による) を考慮して (3) 式を時間積分を含む式に書き代える。

$$\text{Max over } \left[\sum_{\bar{\tau}, \bar{\tau}, \bar{\phi}} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \text{Re} \{ X_{1j} \cdot X_{2j}^* \right.$$

$$\left. e^{-i[\omega_j(\bar{\tau} + \bar{\tau} + tk) + \bar{\phi}_j]} \right] \quad \dots\dots(4)$$

$$\text{但し } X_{1j} \cdot X_{2j}^* = |X_{1j}| \cdot |X_{2j}^*| e^{+i[\omega_j(\tau + tk) + \phi_j]}$$

ここで $\bar{\tau}$ は遅延変化率、 k は積分時間を K 個に分割したときの k 番目の部分、 $\bar{\phi}_j$ は位相差である。(4) 式は VLBI における基本式であり、VLBI に必要とされる機能は (4) 式から導くことができる。

先づ $\bar{\phi}_j$ 及び $\omega_j \tau$ に注目する。 $\bar{\phi}_j$ は 2 つの受信信号の位相差であるから、アンテナで受信して周波数変換する際の 2 つの局の局部発振信号の位相差や周波数帯域ごとにそれぞれ遅延の異なるチャンネルに分割されるために生じる位相差等が重量されている。積分時間内の $\bar{\phi}_j$ 及び $\omega_j \tau$ のランダムな変動は当然 (4) 式の値を小さくしてしまうため、積分時間 K の間に数度以内にしたいたい。このために必要な条件は

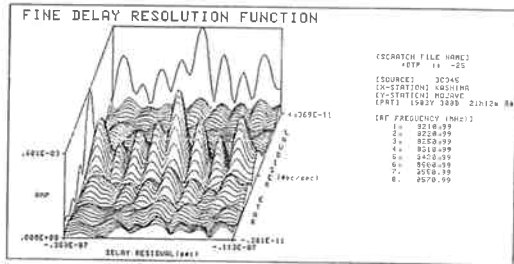
① 受信に際しては、通常の積分時間である数分間に数度以上のランダムな位相雑音を加わらないこと。

このためには局部発振器の原振の周波数安定度は $4f/f$ 受信周波数 8GHz を仮定すると 2×10^{-14} 以下でなければならない (高安定な水素メーザ原子標準の必要性)。

② ケーブルの温度変化による伸縮は数 mm が予想され、これによるゆるやかな位相変動を避けることは不可能であるため、全チャンネルについて別途測定しなければならない (局内遅延校正装置の必要性)。

次に遅延時間 τ に注目する。我々の当面の目的は $\bar{\tau}$ を精確に求めることであるから、(4) 式と τ の関係を調べて見る。議論を簡単にするため、 $\bar{\tau}, \bar{\phi}_j$ を 0 とし、 X_{1j}, X_{2j} は帯域幅 B MHz の理想的な矩形フィルターを通過した信号と仮定すると、 $N=1$ (BMZ) の場合は、(3) 式は明らかに自己相関関数に等しく、 $\sin \pi B \bar{\tau} / \pi B \bar{\tau}$ となる。遅延時間の測定精度は当然 S/N 比にもよるが、 $\bar{\tau}$ が 0 附近の主ビームの幅 (約 $1/\pi B$) が一応の目安となる。従って測定精度を向上するためには、受信帯域幅をできるだけ広くとり、前述の主ビーム幅を狭くしなければならない。そこで目標である遅延時間を 0.1 ns で求めるには、 $1/\pi B$ を 1 ns 程度すなわち 300 MHz の帯域が必要となる。しかし帯域幅 300 MHz の信号を受信し、記録し、データ処理を行うことは技術的に非常に困難であり、せいぜいその 10 分の 1 が限界である。しかもこの観測を 1 日連続して行う必要があり、ここに到ってはその可能性はほとんどない。

この大難関を突破するアイデアを提案したのはヘイスタック観測所の Rogers⁽³⁾ である。彼は狭い帯域幅のチャンネルでも広いスパンにわたって数チャンネル配置すれば、主ビームの幅は最大スパンの逆数になることを示し



1チャンネル2MHzの帯域幅で8チャンネルを最大スパン360MHzに取った時の(4)式の例。横軸は遅延時間 τ 、縦軸は遅延変化率 $\dot{\tau}$ である。

第1図 バンド幅合成の例

た。このことは数百MHz全帯域を受信しなくとも、1チャンネル2MHz程度の数チャンネルをこの帯域内に配置すれば、遅延時間は0.1nsの精度で求められることに他ならない。このRogersの提案(バンド幅合成と言われる)こそがVLBIの地球物理学や位置天文学への応用を切り開いたのである。さて、このバンド幅合成の具体例を第1図に示すことにする。1チャンネル2MHzの帯域幅でわずか8チャンネルを最大スパン360MHzに取った時の(4)式の例である。8チャンネル分の帯域幅16MHzを受信した時は主ビームの幅は約20nsにもなるのに対し、第1図の例ではわずか0.9nsである。従って S/N 比を大きくとれるように設計すれば上記のチャンネル配置で0.1nsの精度は達成できよう。しかし $B=300\text{MHz}$ における $\sin \pi B\tau/\pi B\dot{\tau}$ と比較するとサイドローブのレベルがはるかに高い。そこで S/N 比が悪い場合、主ビームとサイドローブを間違えはしないか心配になる。実際この間違いは弱い星を受信した場合度々犯す。しかし通常の実験では強度の強い星を含む十数個の星を次々に観測するため、また第1図から明らかのようにサイドローブは周期的であることから誤る量もあらかじめ分かっているため、この間違いを容易に発見できる。ところで極端な例として最大スパンを構成する2チャンネルだけの場合にどうなるかと言うと、主ビームと同じ高さのサイドローブが遠々と続くことになって、最早搜索願を出しても主ビームは見つからない。

これまで遅延時間 τ の推定精度について着目したが、別の方向に目を向けることにする。(4)式から求められる $\dot{\tau}$ は実は観測する電波源と受信する2点(局)から幾何学的に求められる遅延時間(τ_g)と、両局の時計の時刻差(τ_c)、両局の受信系で生じる局内遅延差(τ_i)及び伝搬路上で生じる伝搬遅延差(τ_p)の和である。IIIで詳しく述べられるように地球物理学や位置天文学に应用する場合、 τ_g 以外については、観測期間中一定あるいは一定の割合の時間変化を推定パラメータに含めるので、こ

れらは何等問題を生じない。更に言えば、観測期間ごとに全く異った値であってもよい。後者については局内遅延量が観測ごとに変わると、推定結果もその影響を受けるという誤った認識を持つ人が時々いるので特に述べた。もちろん時刻差を推定する場合にはこれらを求めておかねばならないことは当然である。さて τ_i 、 τ_c 、 τ_p が観測期間中(積分時間内ではない)例えば1日にランダムな変動をしていると、この変動はモデル化できないため、 τ_g にその変動を押しつけることになる。従って τ_g のモデルを構成する各種パラメータを推定値 $\bar{\tau}$ から求める場合にはこの変動の影響を直接受けることになる。 τ_c つまり独立な両局の時計の時刻差の変動は測定方法がないため、観測期間中0.1ns以内でなければならない。従って両局の時計である水素メーザ原子標準の周波数安定度は前に述べたようにおよそ $5 \sim 10 \times 10^{-15}$ を必要とする。 τ_i 、 τ_p の変動については局内遅延校正装置及び水蒸気ラジオメータと気象データにより別途測定又は推定を行わざるを得ない。

これまでは(4)式を実行可能と仮定して来たが、実際には容易でない。先づ前述したバンド幅合成を行う場合でも、1チャンネル2MHzで、例えば8チャンネルの信号 X_1 、 X_2 (厳密に言えばこの逆フーリエ変換)を記録し、同期再生しなければならない。従って、観測期間を1日とし、実際に記録するのはその1/3と仮定しても、少くとも数10MHzを8時間にわたって記録することを想定しなければならない。同期再生については、相関器のバッファメモリとの兼ね合いもあるが、10k bits相当の範囲内で長期間同期したまま再生できる必要がある。またその制御方法も確立しなければならない。

(4)式の相互相関を求める場合に注意しておかねばならないことがある。レコーダから再生される信号は実際には時系列であって、周波数成分ではない。時系列をフーリエ変換して直接(4)式を計算することは非常な無駄となるため、 X_{1j} 、 X_{2j} に相当する時系列 $x_{1j}(t)$ 、 $x_{2j}(t)$ の時間領域で先ず相関を取り、十分積分して S/N 比を大きくし、データ量を 10^{-6-7} 程度圧縮してから(4)式を実行すればはるかに容易になる。しかしこのためにはホストコンピュータから十分な精度の τ 、 $\dot{\tau}$ の予測値が必要であり、この予測値による相互相関を実時間で実行する必要がある。

(4)式を基にしてVLBIシステムに要求される基本的な条件について述べて来たが、3.1で述べた目標を達成するには未だ不十分である。すなわち、①目的に最も適当な観測スケジュールを作成し、②複雑な装置の自動運用を行い、③相関時の正確なアプリオリ値(τ 、 $\dot{\tau}$)を供給し、④求められた $\bar{\tau}$ 、 $\bar{\dot{\tau}}$ から目的とする物理量を推定す

第1表 システム全体に関係する基本条件

項目	内容
精 度	全サブシステムは遅延時間の決定精度に対して 0.1ns 以上の誤差を生じないこと。 ランダム誤差については Mark III システムのそれと同等又は以下であること。 ソフトウェアについては 3cm の寄与に限定せず、最新理論と結果を導入する。0.1ns の精度はバンド幅合成によって達成する。
保 守 運 用	磁気テープの交換以外は計算機制御による自動運用とする。 制御計算機とのインターフェースは IEEE-488 バスに統一し、制御ソフトウェアは容易に修正できる FORTRAN を使用する。 各サブシステムはデスクトップコンピュータによる簡易なテストプログラムで画一的な保守を行えること。 小型可搬局を目指して単純化、ユニット化を行う。 全ソフトウェア改良・拡張を容易にするためデータベースを構築し、関連する全ソフトウェアがデータベースで結合されること。
将 来 性	近い将来 1cm 以上の精度を達成するため、複数受信機による 700MHz 以上の超広帯域バンド幅合成を行えること。
Mark IIIとの適合性	全サブシステムに関し Mark III との適合性を持つこと。 データ処理結果や解析結果の出力形式は変換ソフトウェアを作成し、これにより日米データの相互変換を行う。

ることが必要である。4つの項目は全てソフトウェアで処理すべきものであり、②を除いて互いに密接に関連している。例えば目的とする物理量を推定するのに適当な観測スケジュールを知るにはそのモデルを用いて初めて可能であるし、遅延時間や物理量はそのモデルに基づいて計算される。このように②を除く全てのソフトウェアは互いに関連しているため、内部矛盾のない構成と実行が望まれる。特に物理モデルに関しては絶えず修正、改良が加えられるため、往々にして各ソフトウェアで異った定数を使用し、内部矛盾を生じることがある。これらを守るには、観測スケジュールの作成からデータ処理、パラメータの推定に至る全ソフトウェアに共通するデータベースの構築が不可欠となる。

アプリアリ値を計算する物理モデルのソフトウェアはデータ解析面から見ると、ソフトウェアの評価の対象としてその中心となるべきものである。地球物理学や位置天文学の最先端の理論の導入に際しては、遅延時間の測定精度 0.1 ns よりかなり小さい寄与のものであっても、明確にされているか又は予想するに十分な理由がある現象については予測値の計算に入れるべきであろう。これは、現時点の VLBI が未知パラメータを推定し、それが妥当であるかを検証するという性格上必要なことである。

以上 K-3 システムに含まれるべきハードウェアとソ

フトウェアについて概括し、必要となる基本的な機能と性能を VLBI の基本式である(4)式をめぐって述べて来た。これらを基に、K-3 システムは保守運用、拡張性、更に国際実験に使用されるため米国 Mark III システムとの適合性を考慮して設計概念⁽⁴⁾は作られた。第1表はシステム全体に関連する設計概念である。これらを全て満たすように各サブシステムの基本設計が行われ、更に細部の設計が行われた。

3. K-3 システムの機能及び性能

3.1 機能及び性能

K-3 システムは 2. で述べた必要なサブシステムを全て備えており、第1表で示した概念に基づき必要な機能

・性能を有している。K-3 システムの特長を上げると、

(1) 将来、可搬で小型・軽量・安価な VLBI システムの開発を目指して、従来行って来た 1 つの広帯域受信機を用いたバンド幅合成に代わる、複数受信機による超広帯域バンド幅合成が行える。

(2) 自動運用計算機による自動運用が行える。各装置と計算機のインターフェースは IEEE-488 バスで統一され各装置毎にインテリジェント機能を持たせているのでデスクトップコンピュータで容易に単体テストが行える。

(3) 国際実験を行うため、米国 Mark III システムと

適合性がある。

(4) IF 以後データレコーダまで2式が備えられており、基準受信系と結合して局内での VLBI 試験が行える。

(5) データ処理・解析用全ソフトウェアがデータベースで結合され、統一的な処理・解析を行うことができる。

これは米国の例にみられる、データ処理系と解析系の分離による、ソフトウェアの改造に際して自己矛盾を生じる危険性を避けるためである。

等である。

K-3システムの構成及び各装置の主要諸元については I-2 の第5図及び第2表を参照していただきたい。

3.2 米国システム等との比較

現在まで、VLBI システムは4ヶ国で約10種開発されて来た。これらの中で電波天文や測地に応用されたものとして、カナダ、米国(Mark I, II, III)、中国、日本(K-1, 2, 3)であるが、精度、汎用性の点から、K-3と比較しうるのは米国で開発された Mark II, Mark III に限定してよいであろう。

Mark II は1972年に開発されたシステムであり、開発後数年間は電波天文や測地にも利用されて来た。しかしその後1980年に高精度で且つ総合 VLBI システムとして Mark III が開発されたため、測地・位置天文学への利用は Mark III に漸次移行し、Mark II は電波天文や衛星の軌道決定等に利用されるようになった。第2表は Mark II, III 及び K-3 の主要諸元の比較表である。

K-3, Mark III と Mark II の大きな違いは受信チャンネル数が前者において最大28、通常14であるのに対し、後者は1~5である。これに対応してレコーダは前者が Honeywell M-96 の改造による 4.5Mbps×28ch

の記録をし、後者は家庭用カセット VTR の改造によるわずか4Mbps の記録を行うに過ぎない。この理由は K-3, Mark III が広いスパンでバンド幅合成を行い、遅延時間を正確に求めることを目的としているからである。一方 Mark II は安価なカセットテープを使用し、装置自体も K-3, Mark III のレコーダに比べて数十分の1と安い。遅延時間を正確に求める必要のない分野や、受信する信号が強く受信帯域幅による S/N 比の改善を必要としない電波天文学や衛星の精密軌道決定等に現在も利用されている理由である。

K-3は第2表からはば Mark III に対応することが明らかであろう。しかし観測周波数で、K-3 は既に述べたように、精度1cm 以上を目指して複数受信機による700MHz 以上の超広帯域バンド幅合成を行うため、広い受信帯域を持っている。自動運用ソフトウェアでは Mark III は SNAP という特殊言語を使用しているのに対し、K-3 では一般的に使用されている FORTRAN を用いているため、頻繁に生じるソフトウェアの改良に容易に対応でき、更にサブシステムごとにデスクトップコンピュータによる診断が可能になっている等運用面で優れている。データ処理・解析ソフトウェアでは、データ処理ソフトウェアがデータベースで結合され、観測スケジュールの作成からデータ処理、解析を一貫して行える利点は非常に大きい。またこれらのソフトウェアに組込まれた位置天文学、地球物理学に関する物理モデルについては文部省緯度観測所、建設省国土地理院等の協力を得て最高水準のものが完成したと言える。

次に近い将来期待される進展について述べることにする。VLBI システムは非常に高価であり、高度の総合技術を必要とすることから、ここ数年の間では新たなシステムが急激に開発されるとは考えにくい。むしろ、K-3 及び Mark III を中心に改良が進められると予想すべき

第2表 Mark II, III と K-3 との比較

	K - 3	Mark III	Mark II*1 (Block 0)
観測周波数 (MHz)	2200~2320 7860~8600	2200~2320 8100~8600	(Sバンド)
受信チャンネル数	1, 7, 14, 28	1, 7, 14, 28	1~5 (時間的に切替える)
1チャンネル周波数帯域幅	125kHz~4MHz(通常2MHz)	125kHz~4MHz(通常2MHz)	2MHz
レコーダ	Honeywell M96改造	Honeywell M96改造	RCA・VCT201又は IVC825A
テープ幅	1"	1"	1/2"
Hメーザ安定度	1000秒で 2×10^{-15} (HV2/HV1)	1000秒で 3×10^{-15} (NR7/NR6)	—
自動運用ソフトウェア	KAOS (FORTRAN)	Field System (SNAP)	—
1Gbits当りのテープ価格	1000円	1000円	100円

*1 (米国立天文台では Mark II, ジェット推進研究所では Block 0 と呼ばれている)

であろう。実際、Mark III では VLBI システムで最大の問題の1つであるデータレコーダの高密度記録において、現在の32倍を目指している。一方電波研究所ではVTRを用いて10倍以上を目標にデータレコーダの開発を進め、実現は真近である。現在、5局が参加するVLBI観測では、1日当たり1巻10数万円のテープを約200巻使用するが、記録密度が10倍になるとわずか20巻、各局4巻を要するだけとなる。テープの供給量が観測時間を制限し、且つ応用分野の拡大を制限している現状を見ると、このような記録密度の向上はVLBIの利用に画期的な飛躍をもたらすことは間違いない。しかしながら、記録密度の向上は、同時にデータ処理速度の向上を伴わない限り観測時間の拡大に有効につながらない。例えば前述の5局参加の1日観測では、Haystack 観測所の相関器では昼夜を分かたず処理を行っても0.4ヶ月程度を要する。言い換えれば、1年に30日の観測分しか処理することができない。

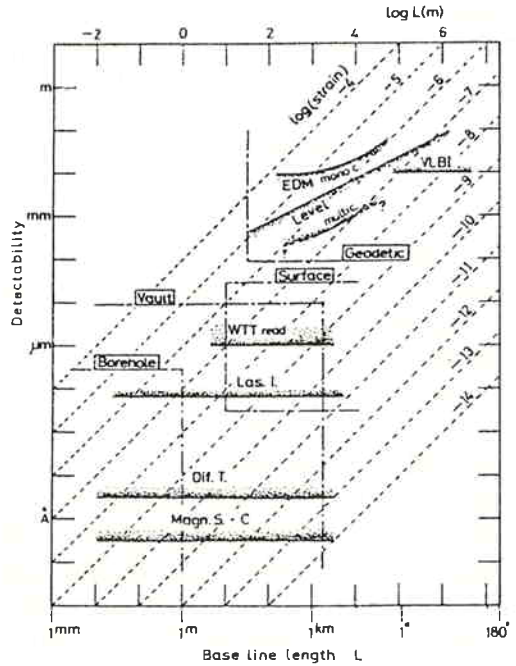
相関器についても K-3, Mark III の改善課題として、種々検討されている。このような開発競争はVLBIのもう1つの問題である水蒸気ラジオメータの高精度化にも見られる。K-4あるいはMark IVの出現といった今後の発展に興味深々といったところである。

3.3 他の測位システム等との精度比較

VLBI は遅延時間とコヒーレンスを測定することができる。遅延時間は光速を乗ずることにより距離に換算き、基線を仮定すれば角度分解能に換算できるから、VLBI の測定精度を測距(測位)精度又は角度分解能について他のシステムとの比較ができる。

初めに測距精度について他のシステムとの比較を試みる。第2図は志知氏⁽⁵⁾がまとめた各種計器の測定精度を示している。連続観測方式では横坑(Vault)、坑井(Borehole)、地表長基線(Surface)のとりうる範囲を鎖線で示している。センサとしては磁気センサ(Magn. S)、差動トランス(Diff. T)、レーザ干渉計(Las. I)、水位直読式水管傾斜計(WTT)がある。測地測量(Geodetic)としては、多色レーザ測距(Multi C)、光波測距(EDM)と水準測量(Level)がある。VLBI の距離測定精度を1cmとすると相対精度(精度/基線長)としては $10^{-7} \sim 10^{-9}$ であり、1km以内では従来の技術のそれと比較して決して良くない。しかし数10km以上の測定から他の技術を追い抜き、1000km以上では唯一の測定技術となっている。

近年VLBIを初めとする宇宙技術が測地、天体観測、時刻比較等多方面に利用され、測定精度の飛躍的改善がなされて来た。これらの技術は日進月歩の状況にある現在、測定精度の比較は非常に困難ではあるが、私見も含



第2図 地震変動観測における種々の装置および技術の測定精度

100km~200km以上の長基線の測定において、1~2オーダ VLBI の精度が良い。1000km以上についてい宇宙技術以外に高精度の測定は不可能である。

第3表 宇宙技術を利用した測位システムとの比較

システム名	精度
人工衛星利用	
NNSS	25m~100m
同上 Common View	1m~5m
GPS	
Pコード使用	4m~12m
擬似 VLBI (又はコードの位相測定)	0km~200km で 3~7cm
SLR	10cm~20cm (repeatability として 2cm~10cm*1)
VLBI	1cm~3cm

*1 2年間に30万回測定し、誤差1.8cmという結果がある。また NASA CDP プロジェクトにおける現在の精度は8cmであり、近い将来4cmの目標を達成するとの報告がある。

めて比較して見る。第3表は宇宙技術を利用した主な技術について、測定距離とこれに対応する精度を示している。

NNSS (Navy Navigation Satellite System) は船舶の航行や長距離の測地に利用されている電波航法シ

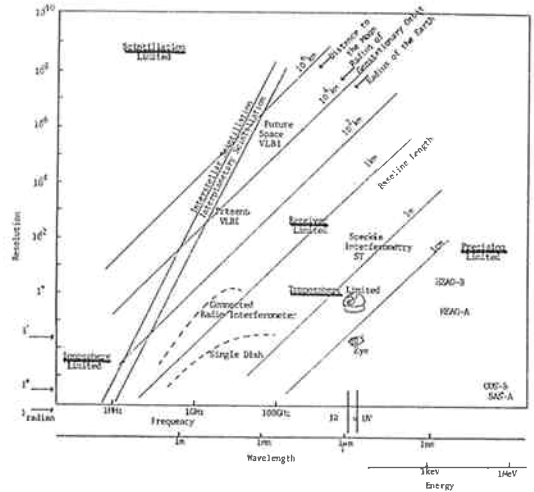
テムである。NNSS 衛星の発射する 399.968 MHz 及び 149.988 MHz の 2 波のドップラー周波数偏移を測定して局の位置を求める。衛星の軌道は別途求められている。第 3 表で Common View とは、観測局が 1 つの衛星を同時に観測することである。この場合衛星の軌道予測誤差による位置測定誤差が小さくなり、一般に精度は向上する。

GPS (Global Positioning System) は次世代の衛星電波航法システムとして、米国が精力的に開発を進めている汎地球的規模の測位システム⁽⁶⁾である。最終的には NDS (Navigation Development Satellite) と呼ばれる周期 12 時間の衛星を赤道傾斜角 55° で 120° 離れた 3 つの軌道面に 6 個づつ等間隔に合計 18 個配置されることになっている。測位原理は、上記衛星が基準となる時計を搭載しており、この時計を基準にして 10.23 Mbps の P コードと 1.023 Mbps の C/A コードと呼ばれる 2 つのコードを送信する。受信側も独自の基準時計を基準にして前述のコードを受信し、送信時刻と受信時刻の差を求める。衛星の時刻とこれを管理する標準時刻との差及び軌道情報は別に与えられるから、標準時刻と受信局の時刻差も未知数に入れて受信局の位置を求める。

GPS を利用した短距離ではあるが高精度で測定する方法 (MACROMETER 及び SERIES) も実現している。前者は NDS から送信する 10 バンドの電波を 2 局で同時に受信し、VLBI と同様に関連処理を行い、後者は NDS から送信する P コードを 2 局で同時に受信してその位相差を正確に求めるものである。

VLBI の好敵手は第 3 表から明らかなように SLR (Satellite Laser Ranging) である。第 3 表では VLBI が約 4 倍精度が良いとしているが、脚注に記しているように誤差 1.8 cm という結果も報告されており、精度(確度)については意見のわかれる所である。SLR と VLBI で得られる観測局の位置は異った座標系で表されることに注目しなければならない。SLR では衛星の位置に関係して地球重心の座標系を用い、一方 VLBI では無限遠に近い準星の位置を基準にする。良く知られているように地球重力は極めて複雑であり、SLR は膨大な衛星-地上局間の距離データを基に、この重力モデルを仮定して衛星の位置と地上局の位置を決める。またこれとは逆に重力モデルの改善も行う。一方 VLBI では SLR と異なり、観測局の位置決定は実に単純明快である。いづれにせよ、2 点間の距離については使用する座標系に関与しないので、両者を同一地点に置いて観測し、その結果を比較してみることは非常に重要である。

次に天体観測における角度分解能の面から比較してみる。第 3 図は平林氏⁽⁷⁾がまとめたものであり、天体観測



第 3 図 天体観測における角度分解能

VLBI は最も高分解能な観測技術であり、光学望遠鏡の分解能より約 2 オーダ高い、点線は現在の分解能を示している。

機器の角度分解能を示している。VLBI の分解能は基線長に比例するので、基線長をパラメータとして分解能を示している。第 3 図から明らかなように、数千 km の基線での VLBI の分解能は群を抜いており、光学観測と比較して 2 オーダも良い。

以上測距(あるいは測位)精度と角度分解能について K-3 及び Mark III VLBI システムと他の測位システム等の比較を行った。距離(あるいは位置)の測定精度については数 km 以内では磁気センサ等数多くの優れた測定装置があり、数 km から数十 km では多色レーザ型測距、数十 km から 200 km では GPS による擬似 VLBI 法、200 km 以上、地球の直径にわたる範囲で VLBI が最も優れており、これに SLR が続く。一方分解能については数十 km 以内では通常の干渉計が現存するため、100 km 以上でその威力を発揮することになる。このように K-3 VLBI システムは 100 km ~ 200 km 以上で従来の技術を越え、距離を伸ばす程その差は大きくなる。すなわち VLBI はその名の通り超長基線でその巨大な威力を発揮するという至極当然の結論に落ち着く。

4. K-3 システムの応用

K-3 システムの応用については、既にいくつか述べて来たがここで整理しておく。VLBI の基本式である(4)式のいづれに着目するかによってその応用が異なる。また(4)式のいづれを目的にするかによって観測スケジュールを定めるべきであるとも言える。現在最も注目され、広い分野に应用されつつあるのは(4)式における遅延時間 τ である。遅延時間 τ は、2.2 で述べたように VLBI 局と電波

源の幾何学的関係から決まる幾何学的遅延時間 τ_g , 伝搬遅延時間 τ_p , VLBI 局に置かれた時刻標準の時刻差 τ_c , 局内遅延 τ_i の和である。但し K-3 システムは, τ_p, τ_c, τ_i については観測期間 1 日程度では τ_g に 0.1 ns 以上の誤差を与えない性能を有しているので τ_g に含まれる 3 cm 以上のパラメータの推定は可能である。 τ_g には観測局間を結ぶ基線ベクトル (その長期的時間変化はプレート運動や広域地殻変動に対応する), 地球回転速度, 極運動, 地球潮汐, 海洋負荷, 歳差, 章動, 電波源の位置等の一般相対論効果を含む位置天文学や地球物理学に関係した諸量が介在している。次に τ_g の予測誤差を 3 cm 以内に押え込むか, あるいは多少の精度の劣化を見込めば, 逆に τ_p, τ_c, τ_i の応用の道が開ける。 $\tau_p + \tau_c + \tau_i$ の総和及びその 1 次変化率はデータ解析時に必ず推定しなければならない。その理由は, 両局の水素メーザ原子標準の周波数差によって時刻差 τ_c は 10 ns/日程度の 1 次の変化を持ち, しかも総和及びその一次変化率は予測できないからである。一方 τ_p は 2.2 で述べたように, 1 つの電波源を観測するごとに, その方向における値が水蒸気ラジオメータによって別途測定されている。従って, τ_i を何等かの方法で測定しておけば, τ_c 及び τ_i を知ることができ, 国際的な時刻比較が可能になる。 τ_i の時間変化量については遅延校正器により 0.1 ns の精度で常時測定されているが, 絶対量の測定を自局で行う場合には数 ns は避けられない。そこで簡易な基準受信系を設け, この局内遅延を基準にして, 両局の局内遅延を 0.1 ns 精度で測定すればこの確度で両局の時刻差を求めることができる。国際的な時刻比較における従来の方法では数 + ns ~ 100 ns の精度であり, 確度の点では一般に運搬時計 ($\pm 0.1 \mu\text{s}$) に依っている。従って 1 ns ~ 10 ns の確度が定常的に VLBI によって実現すれば画期的な前進となる。 τ_p については電波伝搬への応用となるが τ_p に関しては既に述べたように 1 日の中でも時間変化が激しく, 水蒸気ラジオメータで別途測定する方法を取っている。 τ_g の予測精度が向上し, 更にシステムを安定させ $\tau_c + \tau_i$ を ± 0.1 ns 以内の変動に押え込まない限り, 原理的に応用の可能性がない。 τ_p の応用はむしろ, τ_p の小さな変動による位相 $\omega\tau_p$ の短期の変動を測定することにより, 大気の流れを知ることに興味を持たれる。大気による伝搬する電波の位相変動 (位相シンチレーション) は水素メーザと同様コヒーレンスの低下を招く。水素メーザは技術の進歩により改善し得るが, 位相シンチレーションは避けられない自然現象であり, 積分時間の長さ按比例してその影響は大きくなる。特に中性大気によるものは周波数に比例して増大するため, VLBI の 1 つの限界を与える重要な現象である。

局内遅延時間 τ_i の応用は現在急激に広がりつつあり, 電波ホログラフィーや仰角の変化に伴うアンテナ鏡面の歪の測定等が考えられている。

VLBI の応用で忘れてならないものに電波天文学がある。そもそも VLBI は, 共通のローカル発振器を用いた電波干渉計の分解能を更に上げようとして考案されたものである。(3)式において議論を簡単にするために τ に含まれる τ_g 以外は全て零とすると, τ_g は 2 つの局と電波源の位置の幾何学的関係から決まり

$$\omega\tau_g = -\frac{D}{c}\omega\{\sin\delta_B\cdot\sin\delta_S + \cos\delta_B\cdot\cos\delta_S\cdot\cos(L_S - L_B)\} \quad \dots\dots(5)$$

となる。ここで D は基線長, c は光速であり, (L_B, δ_B) と (L_S, δ_S) はそれぞれ基線と電波源の (時角, 赤緯) である。今, 赤緯が $\Delta\delta_S$ だけ異なる等しい強さの 2 つの電波源を同時に受信 (1 つのアンテナでは分解できない) しているとすると, (5)式の右辺第 2 項の $(L_S - L_B)$ は 1 日周期で変化し, この間の周波数 ω における 2 つの電波源に対する位相差は,

$$D(\omega\tau_g) \sim \frac{D}{c}\omega\cos\delta_B\cdot\sin\delta_S\cdot\cos(L_S - L_B)\cdot\Delta\delta_S \quad \dots\dots(6)$$

となる。右辺の振幅が π に等しい場合, $D(\omega\tau_g)$ は 1 日周期で $-\pi$ から π まで変わることになる。すなわち等しい強度をもつ 2 つの電波源による電波の位相差が丁度 180° ずれた時には相関が零 ((3)式が零), 0° である時は 2 倍になる。(6)式の右辺は D を地球の直径にとるとマイクロ波帯では $\Delta\delta_S$ を一万分の数秒角の時に $-\pi \sim \pi$ の変化をする。このことは 1 万分の数秒角を分解できることを示している。この分解能は驚異的である。ここではコヒーレンスの変化のみについて述べたが, 通常の干渉計と同様に, 種々の時角でコヒーレンスと $\omega\tau_g$ (位相) を求めることにより, 電波源の輻射強度分布を得る (マッピング) ことができる。

以上述べた K-3 の応用について第 4 表にまとめる。

5. む す び

K-3 システムの機能及び性能については, 3 回にわたる日米実験によって既に確認されている。しかしながら K-3 システムは決して "完成品" ではなく, VLBI システムの持つ根本的な課題は依然残されている。とりわけ, 低コスト化, 高密度記録装置の開発による運用経費の縮小, データ処理の高速化, 小型化等は緊急を要する重要課題である。今回の開発で育った高い技術を礎に, 今後得られる成果を活用して, これらの重要課題を解決することにより, 世界のいたる所で "地球の測定" が実

第4表 K-3 システムの応用

測 定 量	推定パラメータ	目的・応用分野
遅延時間	基線ベクトル (基線ベクトルの時間変化) 地球回転速度 極運動 歳差 章動 電波源の位置 海洋負荷 地球潮汐 時刻差	測地網の規正 { プレート運動の実測 } 長期的な地震予知 { 広域地殻変動の測定 } 天文学, 地球物理学 (一般相対論) 人工衛星及び惑星空間の飛しょう体の精密軌道決定 国際精密時刻比較
(位相変化)	位相差	位相シンチレーションの測定, 電波伝搬
振 幅 (コヒーレンス)	振幅 (あるいは振幅と位相差)	電波星の構造, 電波天文, 交差偏波の測定 電波ホログラフィー, アンテナの構造変化 電波星の高分解能マッピング

現することを期待したい。

最後に当所の VLBI 計画推進に当って日頃御指導をいただいている若井所長, 佐分利元本部長を初めとする所内幹部の方々, またソフトウェア開発に協力いただいた文部省緯度観測所及び建設省国土地理院の関係者に深く感謝致します。

参 考 文 献

(1) Resch, G.M., Chavez, M.C and Yamane, N.I.; "Description and Overview of an Instrument Designed to Measure Line-of-Sight Delay Due to Water Vapor", TDA Progress Report 42-72, pp. 1-19, October-December 1982.
 (2) Whitney, A.R.; "Precision Geodesy and Asrometry via Very-Long Baseline Interferometry",

Dr. Thesis, Jan. 1974.

(3) Rogers, A.E.E.; "Very long baseline interferometry with large effective bandwidth for phase-delay measurements", Radio Science, Vol. 5, No. 10, pp. 1239-1247, Oct. 1970.
 (4) 郵政省電波研究所 "超高精度電波干渉計 (K-3) 研究開発概念書", 昭和55年.
 (5) 志知龍一, "地殻変動における VLBI の利用", 「測地・地球物理学における VLBI 利用」に関するシンポジウム集録, pp. 54-58, 昭和55年6月.
 (6) リモート・センシング技術センター; "宇宙技術を用いた広域地殻変動観測システムの調査研究報告書".
 (7) Hirabayashi, H., Chikada, M., Inoue, M. and Morimoto M.; "Space VLBI", Proceedings of the Space Station Symposium, pp. 30-37, Oct. 1982.

