

III. 4 相 関 処 理 ・ 解 析 シ ス テ ム

高橋 幸雄* 浜 真一* 近藤 哲朗*

(平成元年10月6日受理)

III. 4 THE NEW VLBI CORRELATION AND ANALYSIS SYSTEM

By

Yukio TAKAHASHI, Shin'ichi HAMA, and Tetsuro KONDO

The VLBI correlation processing and analysis system have been developed on a new computer system which is installed for the Western Pacific VLBI Network. The new computer system consists of (1) HP9000-330 for correlation processing, (2) HP1000-A900 for VLBI database and analysis, (3) HP1000-A400 for VLBI operation, and (4) MICRO-VAX360 for the control of the 34 m antenna subreflector and the analysis of source brightness distribution (mapping).

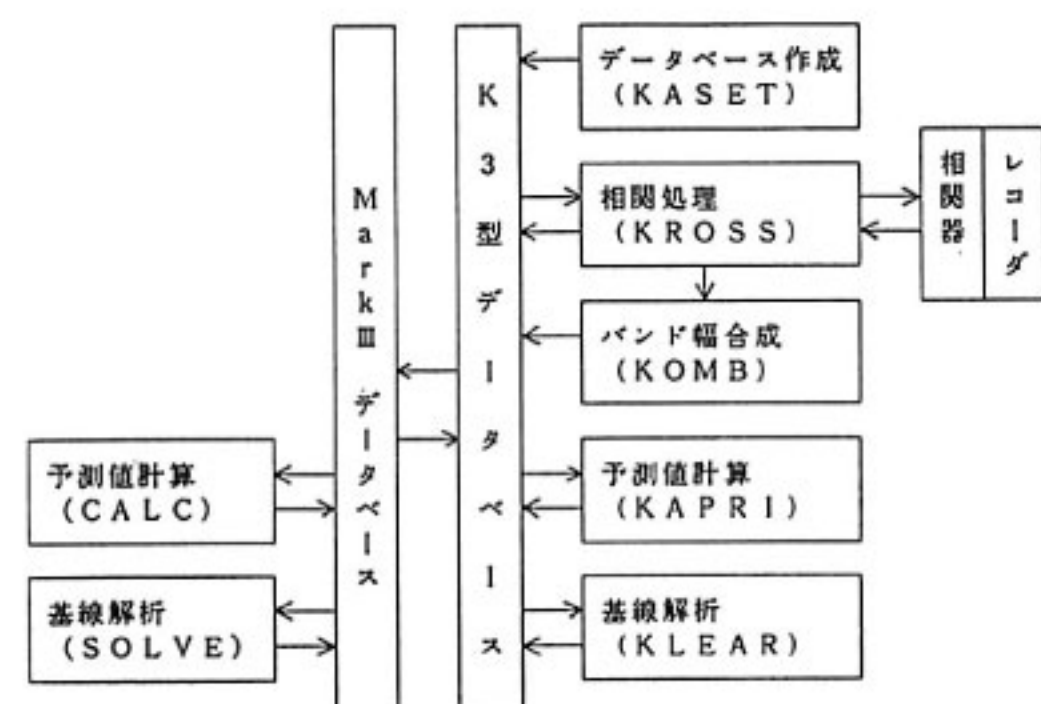
The newly developed software for correlation processing has been checked and good results have been obtained, such as larger correlation amplitude, longer integration time, and better observed delay. The new high density recorder system (K-4 system) has also been developed. It has operated successfully in the correlation processing of the K-4 test experiments conducted on the baseline between the 26 m antenna at Kashima and 5 m antenna at Tsukuba. The baseline analysis using the data obtained by K-4 new correlation processing system are in agreement with those obtained by the K-3 system.

1. は じ め に

昭和58年以来K-3型相関処理・解析システム⁽¹⁾は、日米実験・国内実験等の相関処理・解析を行い、多くの成果をあげてきた。本システムは、各周波数毎に相関処理を行うソフトウェア (KROSS)、各周波数データの位相合成を行い観測遅延時間を求めるバンド幅合成ソフトウェア (KOMB)、VLBI の処理・解析を行うのに必要な情報を集めたデータベースを作成するソフトウェア (KASET)、理論的に予測観測遅延時間を高精度で計算するソフトウェア (KAPRI)、基線ベクトル・時系等の推定を行うソフトウェア (KLEAR)、データベースの情報を読み書きするデータベースハンドラ (KASTL) の6つの大きなソフトウェアおよび相関器、データレコーダ、計算機から成り立っている。また、米国で作成された Mark-III 型のデータベースハンドラ、予測値計算及び基線解析推定のソフトウェアも稼働可能で、状況に応じて各ソフトウェアを運用できる。これらのソフトウェアの概要を第1図に示す。

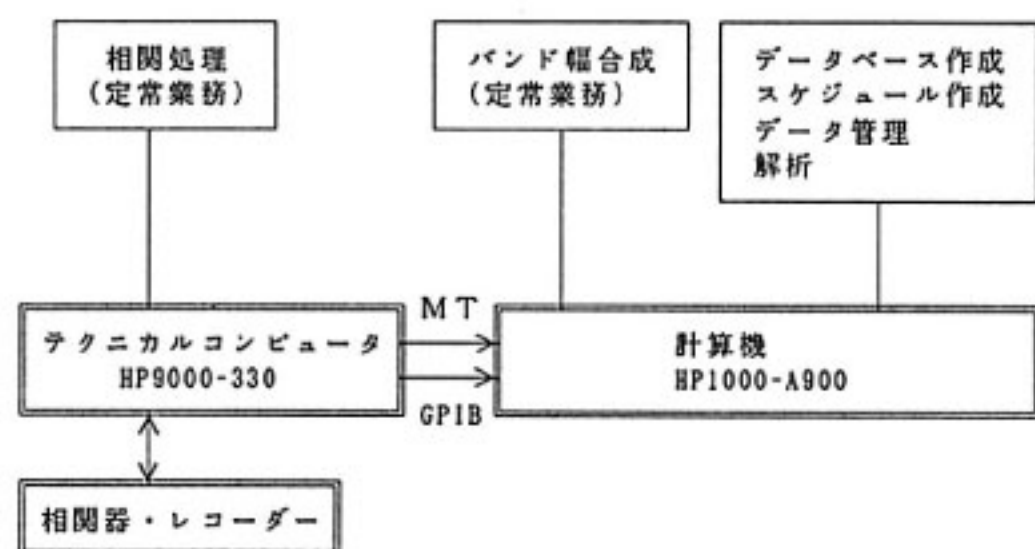
しかしながら、現在は1世代前の計算機 (HP 1000-45F) を使用しているため処理能力の高い新しい計算機への移行が望まれており、また、高密度記録用のレコーダに対応した新しい機能を備えたソフトウェアの開発を行なう必要が出てきた。

折しも、西太平洋電波干渉計計画による新アンテナ及び関連施設が整備され、新しく処理・解析用の計算機も



第1図 現用の相関処理・解析システム
(矢印はデータの流れを示す)

* 関東支所 鹿島宇宙通信センター 第三宇宙通信研究室



第2図 新しい相関処理・解析システムの概念図
(矢印はデータの流れを、点線は将来の構想を示す)

導入された。そこで、これらの計算機に処理・解析ソフトウェアを移行している。そのうち、データベースハンドラ、予測値計算ソフトウェア等は米国で開発されたものを導入し、またバンド幅合成ソフトウェアはK-3型ソフトウェアを移植して稼動状態にある。この新計算機上の基線解析及びデータベース作成ソフトウェアは現在開発中である。一方、相関処理ソフトウェアは、現用のシステムより高密度記録が可能なレコーダや将来の新しい相関処理に対応させるため新しく開発を行った。第2図に、新計算機と新しい処理・解析ソフトウェアの概要を示す。バンド幅合成は現用の計算機より高速の計算が可能な計算機 (HP1000-A900) で行なう。本論文では、西太平洋電波干渉計システムで導入された新計算機の概要と、これら計算機を使用した相関処理・解析システムについて述べる。

2. 新計算機システムの概要

西太平洋電波干渉計システムでは、アンテナ施設以外に多くの計算機が導入された。第1表に、周辺機器を含めた新計算機システムの概要を示す。

新計算機システム導入にあたっては以下に示す事項を考慮にいった。

- ① 現用の処理・解析に使用している計算機システム (HP1000-45F) 及び米国 VLBI グループ使用の計算機と互換性の高いものとし、ソフトウェアの移植作業を容易にする。
- ② 定常業務である相関処理とデータ管理・解析とを分離独立し運用を簡素化する。
- ③ VLBI 観測は専用計算機で行う。
- ④ 新 34 m アンテナの複雑な制御 (サブフレクター 5 軸制御) 及び各種の取得データの解析用に高性能の計算機を導入する。特に電波源構造解析用にグラフィック機能が優れたユーティリティの豊富な機種とする。

以上の基準に基づき、西太平洋電波干渉計システムでは次のような計算機を導入した。

第1表 新計算機の性能・周辺機器

計 算 機	性能・周辺機器
HP1000-A900	約3MIPS, 3MBメモリ実装, 16ビットCPU 571 MB ハードディスク, ラインプリンタ 1600/6250 bpi MT ドライブ 3.5 inch フロッピーディスクドライブ, (言語) FORTRAN77, BASIC, ASMB, PASCAL,
HP1000-A400	約1MIPS, 1MBメモリ実装, 16ビットCPU 81 MBハードディスク 3.5 inch フロッピーディスクドライブ (言語) FORTRAN77
HP9000-330	約2MIPS, 3MBメモリ実装, 32ビットCPU 81 MBハードディスク 3.5 inch フロッピーディスクドライブ (言語) HP-BASIC
μ VAX3600	約3MIPS, 64MBメモリ実装, 32ビットCPU 622MB ハードディスク, レーザプリンタ, 1600 bpi MT ドライブ プロッタ (言語) FORTRAN77

第2表 新計算機ソフトウェアの目的・機能

計 算 機	ソフトウェア	目的・機能
HP1000-A900	SKED CATLG DBH CALC (KOMB) (SOLV)	データの管理・解析 スケジュール作成 データベース管理 データベースハンドラー 予測値計算 バンド幅合成 パラメータ推定
HP1000-A400	KAOS	VLBI 観測運用
HP9000-330	NKROSS	相関処理
μ VAX3600	簡易 AIPS	34 m アンテナの制御, データ取得・解析 VLBI 用電波源解析

(アンダーラインは計算機の主要目的を示す)

- ① 相関処理を1台のデスクトップ計算機 HP9000-330で行う。
- ② VLBI 観測用計算機として HP1000 A シリーズの低位機種である A400 を使用する。
- ③ データベース管理・解析及びバンド幅合成は計算速度の速い HP1000 A シリーズの上位機種である A900 を使用する。これにより解析・研究専用機としての性能を十分発揮させる。
- ④ 複雑な 34 m アンテナ制御用に μ VAX3600 を専用機として導入し、さらに取得データの解析及び電波源の構造解析等に用いる。

こうした新計算機を用いた相関処理・解析システムを開発している。このうち相関処理システムに関して、相関器はK-3型相関器を使用し、データレコーダは、K-3型レコーダ以外に、新しく開発したK-4型高密度レコーダも使用し⁽²⁾、これらに対応した相関処理ソフトウェアの開発を行っている。解析ソフトウェアについては、現在稼働中のソフトウェアと同等以上のものを移植中である。新計算機で稼働状態または移植中のソフトウェアを使用目的とともに第2表に示す。このうち観測運用ソフトウェアについては本季报特集号で詳しく述べられる⁽³⁾。

3. 相関処理システム

現在の相関処理ソフトウェアは、国内外の多くの実験の相関処理を行っているが、次のような問題点が生じている。

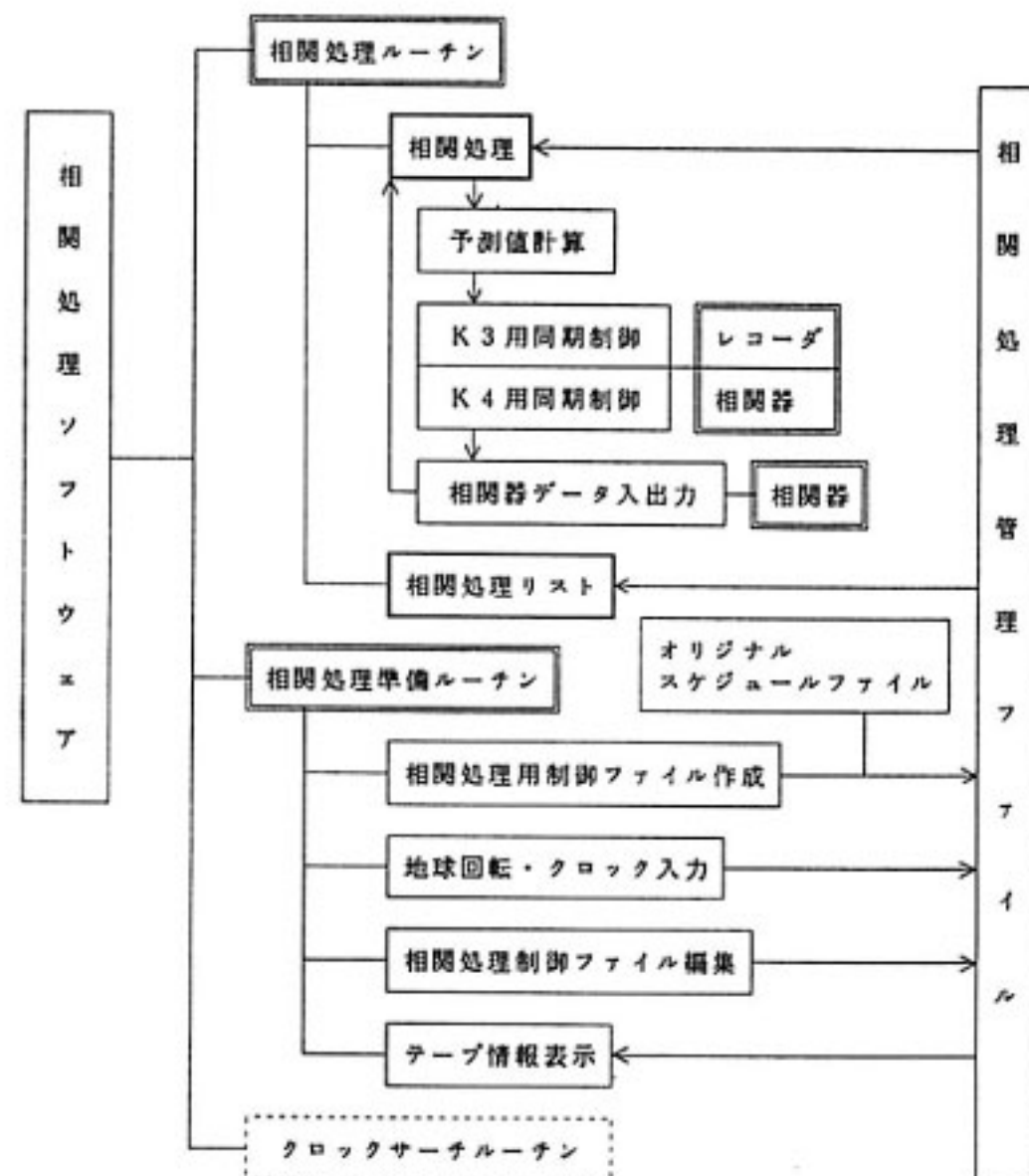
- ① 2台の計算機(HP1000-45F, 10L)を同時に使用し構造が複雑であるため、鹿島で開発している新システム(K-4型システム)に対応した相関処理用に改良することが困難である。
- ② 相関処理の準備が複雑であるとともに、相関処理時のトラブル対策が簡単に行えない。
- ③ 同一計算機で、定常業務の相関処理とデータベース作成及び1次解析の両方に使用され、お互いに計算速度・メモリなどの制約を受けている。

これらの問題点を解決すべく、新計算機 HP9000-330 上で相関処理ソフトウェアを開発した。

3.1 新相関処理ソフトウェアの特徴

新相関処理ソフトウェアの特徴について以下に述べる。

- ① 旧相関処理ソフトウェアは計算機2台を使っているのに対して、専用計算機1台のみで相関処理が行えるようにした。
- ② FORTRAN 言語を使用した GPIB 制御を用いた旧相関処理ソフトウェアに対して、BASIC 言語を基本とした GPIB 制御によるソフトウェアとした。
- ③ 予測値計算値の改良を行なった。
局の位置を考慮に入れた大気モデルを採用
遅延時間、その変化率の計算方法の改良
- ④ 同期達成が早く、積分時間が長くなり信号対雑音比(SNR)が大きくなる。
- ⑤ 相関処理専用のデータベース(管理ファイル)で管理する。
- ⑥ 表示機能を充実し、エラー処理が簡単になるようにした。
- ⑦ 1つのプログラム(約8000ステップ)にすることで



第3図 新相関処理ソフトウェアの構造の概念図
(破線は開発予定のルーチン)

編集作業を容易にした。なお機能毎に独立なサブルーチンとして構造を簡素化した。

相関処理データファイルは、GPIB または磁気テープを使って、バンド幅合成及びデータ管理をしているA900または45Fの計算機に簡単に転送できるため、データ転送における困難性はない。

新相関処理ソフトウェアの構造を第3図に示す。

次に新相関処理ソフトウェアの予測値計算の改良について述べる。これまでの予測遅延時間及びその変化率は、各観測の中央の時刻での計算値を用いていたため、各観測の始めと終わりで予測値による補正が不十分であった。そこで、各観測時間全体で予測値が観測値と合うように、観測時間を4等分($-2T, -T, 0, T, 2T$: $T = \text{観測時間}/4$)し、各時刻での遅延時間($\tau_1, \tau_2, \tau_0, \tau_3, \tau_4$)を再現する最小2乗法で、次のように計算した遅延時間及び変化率($\tau, \dot{\tau}, \ddot{\tau}, \ddot{\tau}$)を用いる。

$$\tau = \tau_0 + (12(\tau_2 + \tau_3 - 2\tau_0) - 3(\tau_1 + \tau_4 - 2\tau_0)) / 35$$

$$\dot{\tau} = (\tau - \tau_4 - 8(\tau_2 - \tau_3)) / (12T)$$

$$\ddot{\tau} = (2(\tau_1 - \tau_0) - (\tau_2 - \tau_4) - (\tau_3 - \tau_4)) / (7T^2)$$

$$\ddot{\tau} = (2(\tau_2 - \tau_3) + (\tau_4 - \tau_1)) / (2T^3)$$

大気の遅延補正については、(大気遅延時間=天頂方向の遅延×仰角依存性)で計算を行う。相関処理での大気の遅延補正は、解析での高精度なモデル計算に比べて、粗い精度でよい。これまでは、天頂方向の遅延を常に典型的な値7nsとしていた。しかし、観測局の高度が1000m異なった場合、1割程度減少するので、観測

第3表 相関処理管理ファイル

ファイル名	発生単位	内 容
実験情報 (KROSS-PAR)	実験	地球回転・クロック・周波数テーブル・相関処理基線・観測処理番号
テープ算理 (KROSS-TAP)	観測・局	観測時間・テープカウンター
観測管理 (KROSS-OBS)	観測・基線	観測時間・相関処理回数・テープの FORWARD/REVERSE
相関処理ファイル名 (KROSS-LAST) (KROSS-NAME)	常駐	最後の相関処理ファイル名 各実験で相関処理した全ファイル名
アドレス管理 (ADRESS-FILE)	常駐	相関器・レコーダのアドレス レコーダの種類 (M96 OR SONY)

局の高さを、U. S. 標準大気をもとに次のように補正した。

天頂方向の遅延[ns] = $(7.98 - 8.74 \times 10^{-4} \times \text{高さ(m)})$

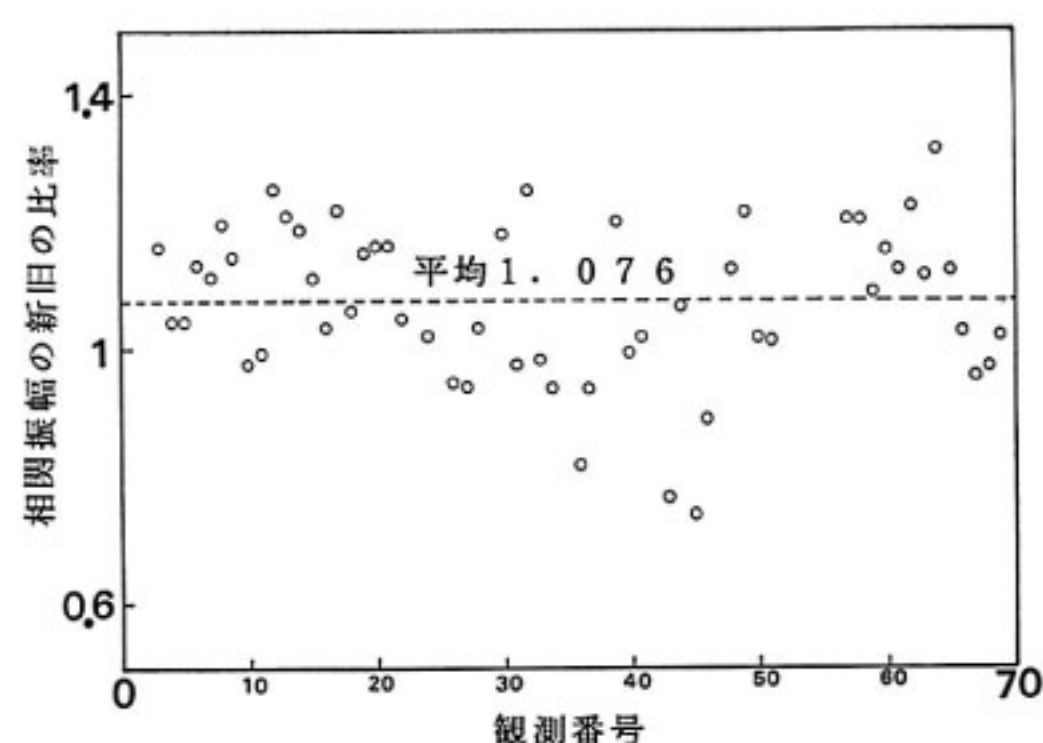
次に相関処理を管理している管理ファイルについて述べる。このファイルは、VLBI 観測に先だって必ず作られるオリジナルスケジュールファイルから作成される。これを使用することにより、簡単に詳細な情報管理ができるようになった。これまで数時間かかっていた相関処理の準備も数分で出来るようになった。また、管理ファイルを使った表示を充実し、相関処理の状況を容易にモニターできるようにした。また、相関処理が成功した以外にはファイルに書き込みを行わないので、途中で中断、再開が容易にできる。

これらの相関処理管理ファイルは、その発生単位から考えて次の6つのファイルに分類される。1 実験に一つの実験情報ファイル (KROSS-PAR)、各観測毎・局毎に観測状況を管理するテープ管理ファイル (KROSS-TAP)、各観測毎・基線毎に観測状況を管理する観測管理ファイル (KROSS-OBS)、相関処理データファイル名を管理するファイル (KROSS-NAME, KROSS-LAST)、および相関器・レコーダアドレスを管理するファイル (ADRESS-FILE) である。これらの項目を第3表に示す。これらはすべてマニュアルでも編集可能である。

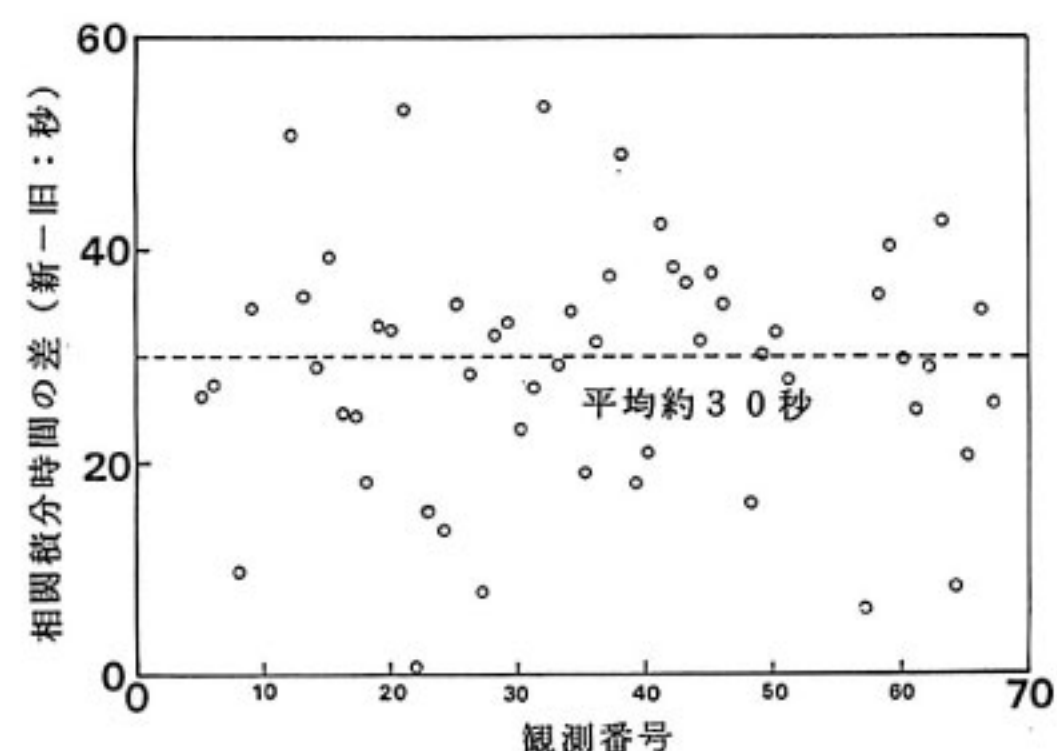
3.2 新旧相関処理ソフトウェアの比較

1989年6月15～16日に鹿島 26 m アンテナと建設省国土地理院の 5 m アンテナ (筑波) と K-4 型システム性能確認実験を行った。この実験では、Xバンド7チャンネルの信号を、K-3 型、K-4 型両 VLBI システムで記録した。新相関処理ソフトウェアの性能を確認するために、K-3 型システムで記録したテープを新旧相関処理ソフトウェアで相関処理を行い比較した。実験の中で約半分の62観測 (テープ14巻) のデータについて、遅延時間、相関振幅および相関積分時間 (SNR に関係) について比較した。

3.2.1 相関振幅の比較

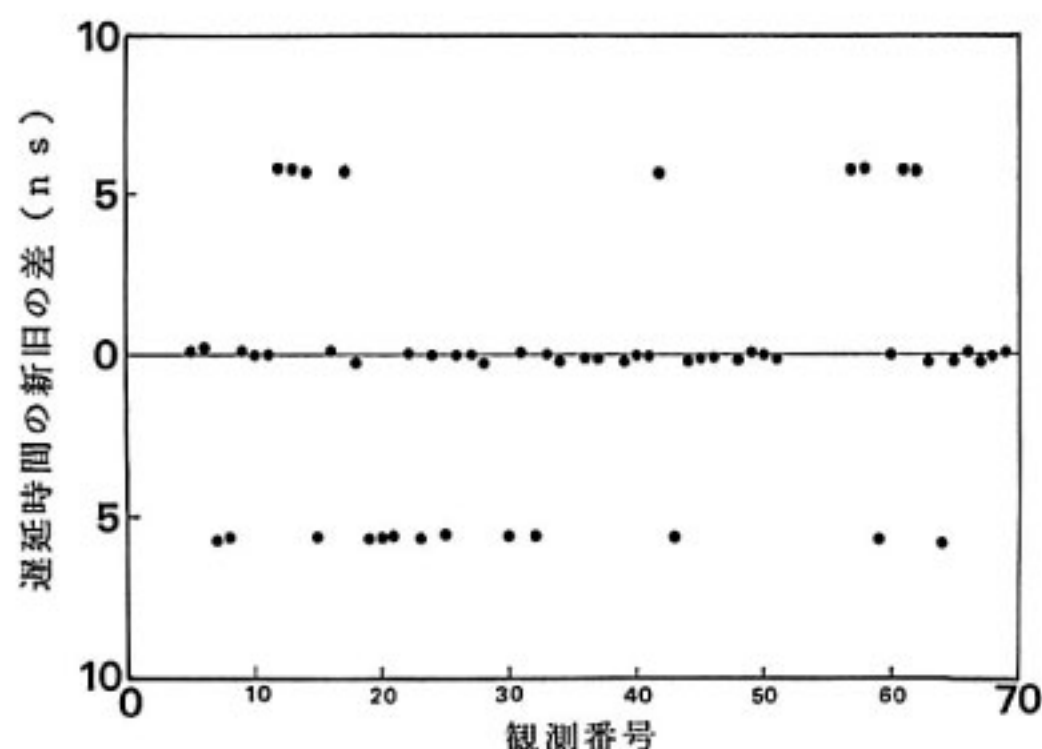


第4図 相関振幅の新旧の比率
(新相関処理の相関振幅/
旧相関処理の相関振幅)

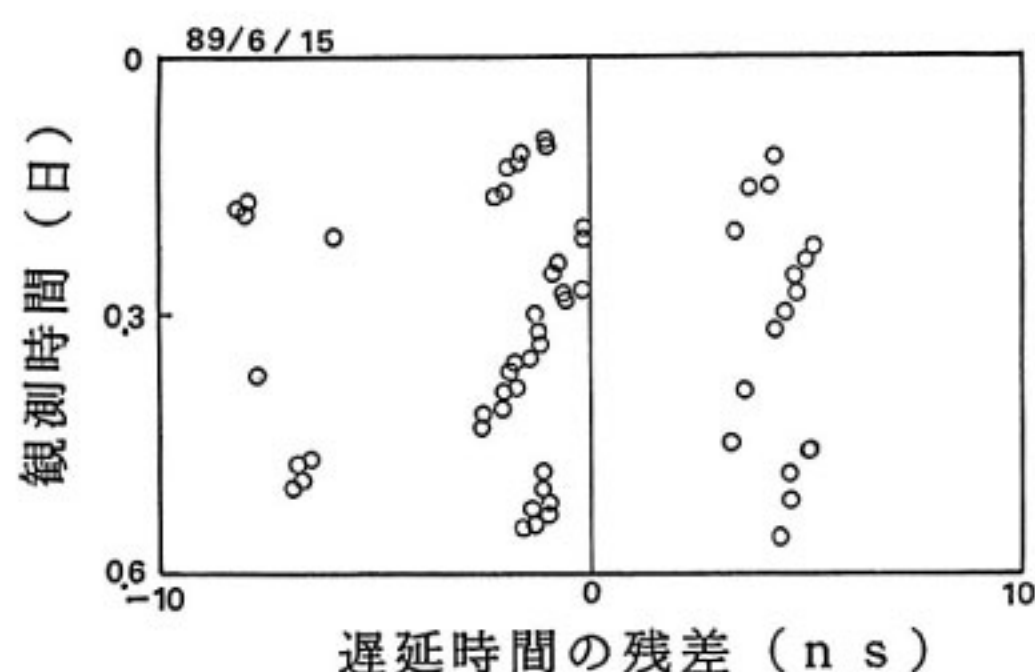


第5図 相関積分時間の差 (秒)
(新相関処理の相関積分時間－
旧相関処理の相関積分時間)

第4図に、新旧相関処理の相関振幅の比を示す。予測値計算の改良などで、相関振幅は旧相関処理ソフトウェアに比べほとんど大きくなり、平均約8%の相関振幅の上昇が見られた (新相関処理振幅/旧相関処理振幅 = 1.076)。このことは、測地 VLBI にはそれほど影響しないが、VLBI で電波源の相関強度を測定する場合に重要となる。



第6図 遅延時間の新旧の差 (ns)
(新相関処理の遅延時間－
旧相関処理の遅延時間)



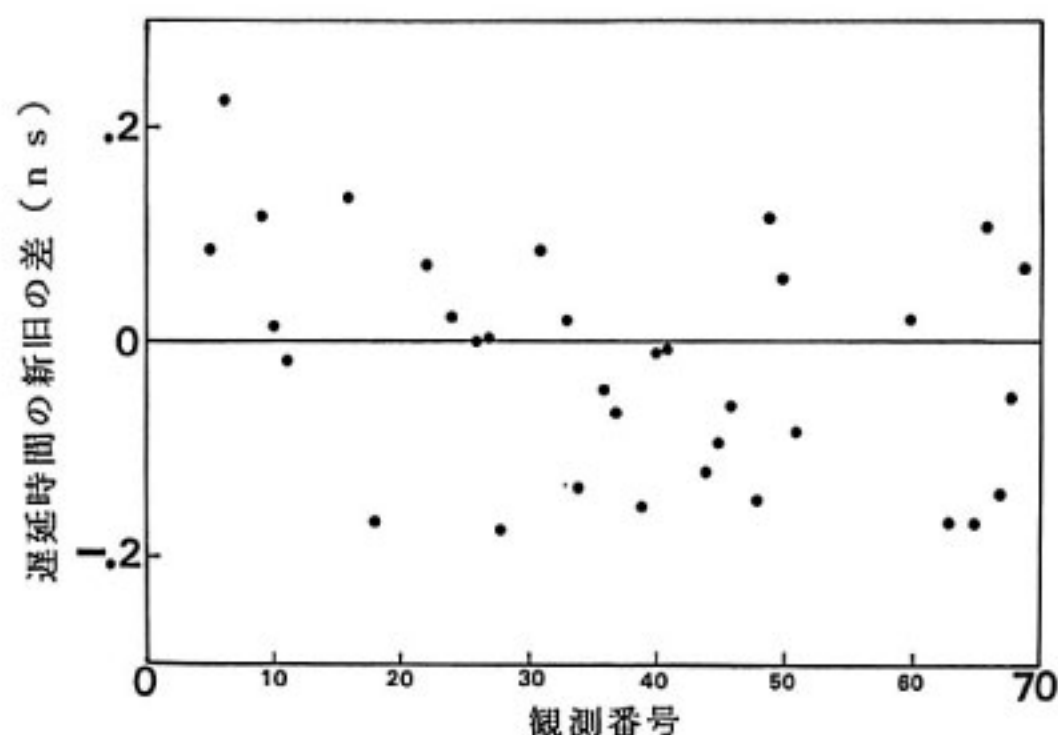
第7図 旧相関処理による観測遅延時間と予測値の差 (ns)
(新相関処理の遅延時間－予測値)

3.2.2 相関積分時間の比較

第5図に、新旧相関処理の相関積分時間の差を示す。新相関処理ソフトウェアではテープの同期制御が10秒程度で達成出来るので積分時間が長くなり、平均約30秒積分時間が増加し、SNRが高くなる。このことは、短時間観測の相関処理に有効となる。

3.2.3 遅延時間の比較

新旧の相関処理ソフトウェアで求められた観測遅延時間の差を第6図に示す。±5.5 nsの違いが見られる観測が23個もあった。この大きな違いを見るために、旧相関処理ソフトウェアで処理されたXバンドの遅延時間と予測値の差を調べた。第7図に示すように、5～6 nsの間隔で3つのグループにわかれ、第6図と同じような傾向が見られた。このことは、今回の実験においては幾つかの観測で旧相関処理が別の相関を捕まえていたことを示し、この大きな違いについては新相関処理ソフトウェアの遅延時間が正しいことがわかった。この原因として、新旧相関処理ソフトウェアの違い以外に、新旧相関処理を行った間隔があいていたためレコーダの再生系の状況



第8図 遅延時間の新旧の差 (ns)
(新相関処理の遅延時間－
旧相関処理の遅延時間)

(パリティエラーの増大等) が変わっていたことが考えられる。これについては、ソフトウェアの直接比較だけでは行うことができず、詳細な検討を行うまでには到っていない。次に詳細な違いを見るために、大きな違いがあった観測を除いて $-0.3 \text{ ns} \sim 0.3 \text{ ns}$ の範囲に拡大した新旧相関処理の違い調べた。第8図に示すように、典型的な遅延時間残差と同程度の約 0.1 ns の違いが見られた。これを幾つかの区間に分けて見れば共通した違いを見いだせる。VLBIの基線解析では、実験を幾つかの区間に分け時系の流れを推定するため、こうした部分的な違いは、推定された時系の流れの中に含まれてしまう。そのため、基線解析結果や推定後の最終残差への影響は、新旧相関処理の約 0.1 ns の違いよりもっと小さくなり、今回の実験で優劣を判断することは難しい。今後幾つかの実験で詳細な検討を行って行かなければならない。

遅延時間変化率の新旧相関処理の差は標準偏差で 0.035 ps/s と典型的な遅延時間残差 0.1 ps/s と比べて小さく問題は無い。

3.3 K-4型レコーダシステムの相関処理

相関処理ソフトウェアをK-4型システムに対応させるためには、基本的には同期達成部分だけを変更すれば良い。しかもK-4型レコーダどうしでは、レコーダ内蔵の同期制御機能を使って簡単に同期制御が出来る⁽³⁾。ただし、同期制御を短時間で行うためには、各局間の再生時刻差が1秒以内になるようにテープ位置を調整しておく必要があり、この調整を行う部分が必要となる。新相関処理ソフトウェアをK-4型レコーダ用に改良し、性能確認実験の相関処理を行なった。相関処理した観測遅延時間とその変化率を用いた基線解析結果を第4表に示す。また、K-3型システムで1988年2月に行なった鹿島・筑波実験の解析結果と比較したところ、その差は

第4表 K-4型システム性能確認実験の解析結果

鹿島— 筑波	1988年2月鹿島・ 筑波実験 (K-3型システム)	K-4型システム 性能確認実験 (K-4型システム)	差
X成分	40719.331±0.020m	40719.327±0.019m	-0.4 cm
Y成分	33656.704±0.017m	33656.713±0.016m	0.9 cm
Z成分	13590.709±0.022m	13590.716±0.018m	0.7 cm
基線長	54548.556±0.007m	54548.561±0.005m	0.5 cm
残差 遅延時間	0.098 ns	0.091 ns	
変化率	0.075 ps/s	0.151 ps/s	

1 cm 以下と良い一致を見た。また、残差が 0.1 ns 以下と小さいことから、この新相関処理ソフトウェアは問題ないと考えられる。

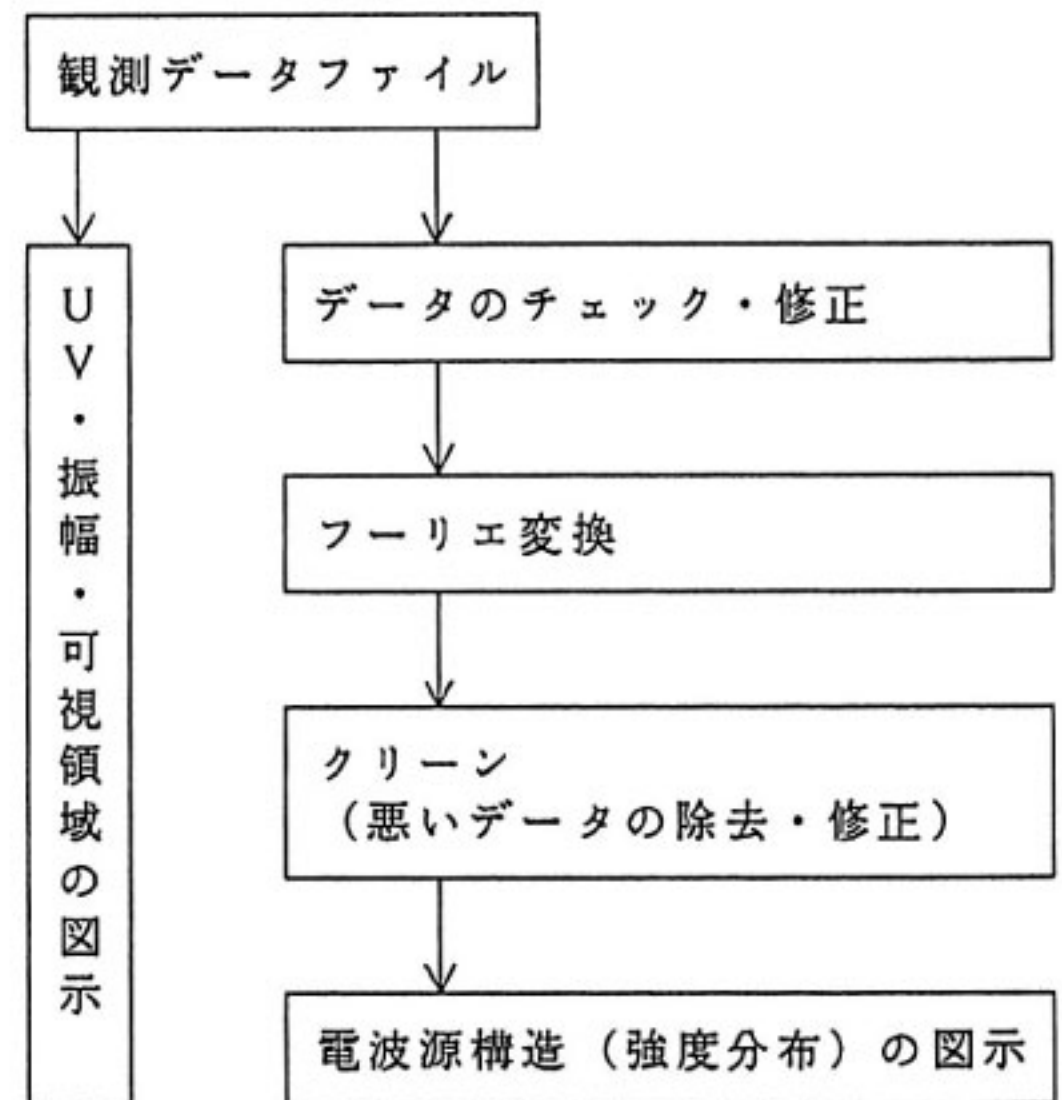
4. 解析ソフトウェア

4.1 VLBI 一次解析ソフトウェア

相関処理後に行う作業として、バンド幅合成、データベース作成、高精度予測値計算、基線解析がある（これらの作業を一次解析と呼ぶ）。これらに対応したソフトウェアは、現在新計算機 A900 に移植中である。現在使用している K-3 型データベース（複数ファイルで情報管理）は、データのランダムアクセス（任意に読み書きする方法）が可能で、部分的なデータの修正等には有効である。しかし、VLBI の解析ではほとんどがシーケンシャルアクセス（順番に読み書きする方法）で、ランダムアクセスの威力が発揮できないため、K-3 型データベースは速度の点で劣る。そこで K-3 型データベースは、新計算機では使用しないことにし、その代わり米国 VLBI グループが開発した Mark-III 型データベースとそれを用いた解析ソフトウェアを中心に、新計算機に移行することとした。現在、バンド幅合成ソフトウェアは、K-3 型を移植し稼働中である。また、データベース管理・ハンドラソフトウェア、予測値計算、観測スケジュール作成ソフトウェア、基線解析ソフトウェアは、米国の Mark-III 型を移植し、基線解析ソフトウェアを除き稼働中である。また、データベース作成用ソフトウェアは、鹿島で独自に開発予定である。これら一次解析ソフトウェアがすべて完成することで、新計算機に VLBI の作業を移行でき、その能力を充分に発揮できるものとする。また、カルマンフィルターや差分法⁽⁴⁾を用いた推定法や、スケジュール作成を自動化する方法など、新しいソフトウェアを検討中である。

4.2 VLBI 電波源構造解析ソフトウェア

新しく導入された μ VAX3600 は、34 m アンテナ 5 軸制御や 34 m で観測したデータの解析以外に、VLBI データを用いた電波源構造解析にも使われる。米国カリフォルニア工科大学の Dr. Pearson は、VLA（米国



第9図 VLBI 用電波源構造解析ソフトウェアの概要
(矢印はデータの流れを示す)

New Mexico 州電波干渉計：VERY LONG ARRAY) 用に開発した電波源構造解析ソフトウェア (AIPS) に類似したソフトウェア (CALTECH VLBI PROGRAMS⁽⁵⁾) を VAX 計算機上で開発した。このソフトウェアは μ VAX3600 に移植され稼働状態になっている。このプログラムによる電波源構造解析の流れを第9図に示す。観測データファイルは VLBI データベースから作成される。今後、これまで行われた VLBI の実験のデータを用いて電波源（クエーサ等）の構造解析を行う予定である。

5. ま と め

現在の相関処理・解析ソフトウェアは HP1000-45F という1世代前の計算機上で稼働しており、計算機の維持、計算速度・メモリ、煩雑な相関処理、データの管理領域、相関処理とデータ管理・解析の同時使用の制約など多くの問題が出てきた。折しも、西太平洋電波干渉計システム計画で新しい計算機が導入され、処理・解析システムのこれらの計算機への移行が行われた。各計算機は、ほぼ予定通りの目的を達成している。このうち HP9000-330 に移行した新相関処理ソフトウェアは、BASIC 言語で作成し、専用管理ファイルを用い表示機能を充実したことで、運用及び改良が容易となっている。また、同期制御及び予測値の改良により、旧相関処理ソフトウェアと比較して、相関振幅が1割程度大きくなり、積分時間も約30秒長くなった。遅延時間の観測値については 0.1 ns 程度の違いが見られたが、この違い

は推定されたクロックの流れの中に含まれてしまうので、新旧相関処理の優劣は多くの実験の処理結果を比較しなければならない。しかし、K-4型システムを用いた性能確認実験の解析後の残差が0.1 ns以下と小さいことから、問題なく相関処理ができることがわかった。また、高密度記録のK-4レコーダの相関処理も行い、新しい記録システムの運用に向けて大きな第一歩を踏み出した。今後南極VLBI実験などの新しい実験の相関処理に大いに役立つものと思われる。

謝 辞

西太平洋電波干渉計システムにおける新計算機の導入における当時の責任者である吉野主任研究官に感謝致します。また、計算機導入に御尽力頂いた総務部、鹿島管理課、VLBI本部、センターの関係者各位に深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) “K-3型超長基線電波干渉計(VLBI)システム開発”, (Ⅲ) K-3型相関一次処理システム, (Ⅳ) K-3型データ解析ソフトウェア, pp. 157-327, 電波研究所季報特集号, Vol. 30, 1984.
- (2) 浜真一, 木内等, 雨谷純, “K-4型高密度レコーダ”, 本季報特集号.
- (3) 小山泰弘, 高羽浩, “鹿島局 34 m アンテナシステム”, 本季報特集号.
- (4) 高橋幸雄, “差分法による VLBI 推定法” 日本測地学会第67回講演会要旨, pp. 33, 昭和62年5月.
- (5) T. J. Pearson, “CALTECH VLBI PROGRAMS”, CALTECH VLBI PROGRAMS HELP FILES, January, 1987.

////////////////////////////////////