

## K5 相関処理支援アプリケーション “ PARNASSUS ” の開発 PARNASSUS, an Aid Application for Software Correlation on K5/VSSP

測地部 町田守人

Geodetic Department Morito MACHIDA

独立行政法人情報通信研究機構 近藤哲朗・小山泰弘

National Institute of Information and Communications Technology

Tetsuro KONDO and Yasuhiro KOYAMA

### 要 旨

観測局から送られてくる膨大な VLBI 観測データを効率的に処理することが、相関局の主要な役割である。この遂行のためには、高速の CPU を備えたコンピュータの整備や並列分散処理の実行が基本条件となる。これに加えて、相関処理システムの安定した維持運営には、システムを構成するハードウェア上の仕様・能力だけでなく、システムの操作性、保守性、拡張性などの運用環境、ユーザビリティについての検討も欠かせない。つくば VLBI 相関局では、相関処理系の基幹プログラムとして K5/VSSP を導入した。これを効率的に運用するために、相関処理支援アプリケーション “ PARNASSUS ” (パルナッソス) を開発した。本稿では、超長基線測量における相関処理の役割の紹介を交えながら、相関処理支援アプリケーション開発に関して、概要、導入経緯、運用状況、今後の機能拡張計画を報告する。

### 1. はじめに

深宇宙の天体電波源（準恒星状天体）を自然が備えてくれた万古不易の視準目標として観測を行い、不規則な時系列データが綿綿と続く暗号のような記録から相関処理という手法を通じて有意な情報を導き出す超長基線電波干渉法（VLBI）は、日本列島の縦断はもちろん、大陸間をつなぐ数千 km の長大なスケールの基線を mm の精度で決定できる、壮大でありかつ繊細な宇宙測地技術である。大型のアンテナが VLBI 観測のたびに駆動する様子は壮観を呈するが、観測によって得られたデータから目的とする物理量である基線ベクトルを直ちに手に入れることができるわけではない。一般に通信分野では、伝送したい情報信号（ベースバンド信号）を搬送波（キャリア）と呼ばれる高周波信号で変調してから送る。天体電波源から放射される電波は自然現象として発生するので、人工的な信号が含まれているわけではなく、規則性がなく無秩序に時間変化する波形にとどまる。このような雑音性の波形であっても、次章で示すように相関処理という手続きを通じて、天体電波源からの電波がそれぞれの電波望遠鏡に到達する時刻の差（遅延時間）が導き出され、その結果をもとにし

て電波望遠鏡間の基線ベクトルが求められる。観測の過程では、観測装置の性能に基づいて、どれだけ微弱な宇宙電波を受信・検出することができるのか、という観測の感度や、どれだけ数多くの天体電波源を観測することができるか、という観測の精度やデータ取得条件が規定される。得られたデータからどのような情報を引き出すことができるのか、という手続きは相関処理以降の行程にゆだねられる。不規則に時間変化する時系列データから相関処理を経て遅延時間という有意な情報が抽出される状況は、採掘した岩石から選鉱によって有用鉱物を精鉱する過程に例えることができる。

通常の測地測量では、観測データを取得したのち、計算整理を行って測量成果が得られる。これらの一連の手続きに従う点で VLBI も変わりはないが、計算整理に相当する過程が技術的な見地から、相関処理、一次解析、グローバル解析に分かれているのが特徴である。測地 VLBI というプロジェクトの基本的理解には観測技術・相関処理技術・解析技術の 3 本柱が必要となる。国土地理院では 1981 年に VLBI 観測システムの開発が始まった。観測に関しては、長年にわたって蓄積されてきた運用経験を通じて観測体制が整備・確立されてきた。測地 VLBI において、電波望遠鏡は観測手段であるとともに、世界における日本の位置を規正する拠点として解析結果（座標値）を保持する実質的な担体となっている。測地網の規正、国際地球座標系の構築、プレート運動の監視、地球姿勢パラメータの決定、深宇宙衛星探査ミッションの支援など、VLBI 観測の解析結果は社会の様々な領域で利用されている。大型のアンテナに象徴される VLBI の観測と、このような様々な分野で新たな知見を与えてくれる高精度の結果を生み出す解析に対する人々の認知度が高い反面、相関処理に関しては、観測に随伴する単なる中間行程という印象を与え、相対的に関心が低い傾向があった。これまでに、国土地理院が展開する超長基線測量に関して、いくつかの報告が提出されてきた。そのほとんどは観測に関する解説や解析結果の吟味に関連した事項に限られ、相関処理が紹介される機会は従来まで稀であった。

VLBI 観測データを収めた記録媒体の輸送に代えて、ネットワークを介して電子的にデータを伝送する e-VLBI (electric VLBI) の積極的な活用が、UT1 決定を目的とする VLBI プロジェクトで始められている。観測終了から相関処理、解析に要する時間を短縮させ、地球姿勢パラメータ提供の速報化を図る上で、高速データ転送技術とともに、準リアルタイムの相関処理技術を欠かすことはできない。VLBI プロジェクトを推進する上で、相関処理が重要な鍵を握っているとさえ言える。本稿では、いままで馴染みが薄かった相関処理を焦点に据えて、その重要性を踏まえて相関処理支援アプリケーションの開発について報告する。

2. 相関処理のしくみ

構造を無視できる遠方の点状天体電波源から平面波状に伝播してくる雑音性信号を地球上に設置された二つの電波望遠鏡 X 局と Y 局で受信して、それぞれの波形を  $x(t)$  ,  $y(t)$  とする。これらのスペクトルを  $X(\omega)$  ,  $Y(\omega)$  とする。簡単にするため  $X(\omega)$  のスペクトル強度を中心周波数が  $\omega_c$  , 帯域幅が  $\Delta\omega$  の矩形スペクトルで近似する。

$$|X(\omega)| = \begin{cases} 1 : |\omega - \omega_c| < \frac{\Delta\omega}{2} \\ 0 : otherwise \end{cases} \quad [ 1 ]$$

$y(t)$  は  $x(t)$  を時間軸上で遅延時間  $\tau_g$  だけずらす操作を受けたことに相当するので、

$$y(t) = x(t - \tau_g) \quad [ 2 ]$$

と表せる。時間シフトに対するフーリエ変換より、

$$Y(\omega) = X(\omega) \cdot e^{-i\omega\tau_g} \quad [ 3 ]$$

$$\left(\omega_c - \frac{\Delta\omega}{2} < \omega < \omega_c + \frac{\Delta\omega}{2}\right)$$

$x(t)$  ,  $y(t)$  の相互相関関数  $c_{xy}(\tau)$  をフーリエ変換して得られるクロス・スペクトルは、

$$C_{XY}(\omega) = X(\omega) \cdot Y^*(\omega) \quad [ 4 ]$$

[ 1 ], [ 3 ], [ 4 ] より

$$C_{XY}(\omega) = X(\omega) \cdot X^*(\omega) \cdot e^{i\omega\tau_g}$$

$$= |X(\omega)|^2 \cdot e^{i\omega\tau_g} \quad [ 5 ]$$

$$= e^{i\omega\tau_g} \quad \left(\omega_c - \frac{\Delta\omega}{2} < \omega < \omega_c + \frac{\Delta\omega}{2}\right)$$

[ 5 ] の逆フーリエ変換から  $c_{xy}(\tau)$  を求めると、

$$c_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)Y^*(\omega) \cdot e^{i\omega\tau} d\omega$$

$$= \int_{\omega_c - \Delta\omega/2}^{\omega_c + \Delta\omega/2} e^{i\omega\tau_g} \cdot e^{i\omega\tau} d\omega$$

$$= \Delta\omega \cdot \frac{\sin \frac{\Delta\omega}{2}(\tau + \tau_g)}{\frac{\Delta\omega}{2}(\tau + \tau_g)} \cdot e^{i\omega_c(\tau + \tau_g)} \quad [ 6 ]$$

通信工学の分野では  $\frac{\sin x}{x}$  の形の関数が頻繁に登場するので、これを sinc 関数とか標準化関数と称する。sinc(x)  $\equiv \frac{\sin x}{x}$  の表式を用いると、相互相関関数は

$$c_{xy}(\tau) \propto \text{sinc}[\pi B(\tau + \tau_g)] \cdot \cos[2\pi f_c(\tau + \tau_g)] \quad [ 7 ]$$

ここで  $\omega_c = 2\pi f_c$  ,  $\Delta\omega = 2\pi B$  とした。[ 7 ] は相互相関関数が  $\text{sinc}[\pi B(\tau + \tau_g)]$  を包絡線として振動しながら  $\tau = -\tau_g$  で最大となることを示している。こ

の  $\tau = -\tau_g$  に出現するひときわ高いピークのことをメイン・ローブ (main lobe) , メイン・ローブの両脇に生じる細かい小さな振動的な部分をサイド・ローブ (side lobe) という (図 - 1) . 相互相関関数を計算してメイン・ローブ位置の判定から遅延時間  $\tau_g$  を決定することができる。これが相関処理によって遅延時間を導き出す手法である。実際の計算では、地球自転の影響等に対する複雑な取り扱いや、メイン・ローブの位置を精密に決めるための手法が用いられる。

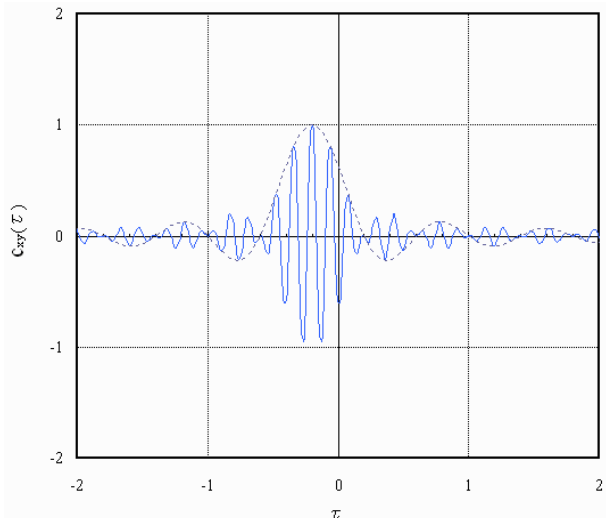


図 - 1 相互相関関数の概形

### 3. 関連処理の周辺事情

#### 3.1 超長基線測量の行程

ソフトウェアの要求仕様が生まれる背景状況を明らかにすることは、ソフトウェア開発者の理解増進を通じて開発成功への寄与が期待される。ここでは、ソフトウェアの要求定義に先立って、関連処理だけでなく、上流過程である企画、観測や後続過程である解析、成果公開の概要を明らかにする。

測地部では、超長基線測量の区分のもとで基本測量の一つとして測地 VLBI 観測を計画的に実施している。超長基線測量は超長基線電波干渉計装置を用いて行う測量である。超長基線測量の作業規程では超長基線電波干渉計装置の呼称が用いられるが、以下では簡単に電波望遠鏡と呼ぶ。

天体電波源からの極微弱な放射を地表において受動的に観測せざるを得ない制約から、大型の集光器（開口アンテナ）を備えるのが電波望遠鏡の特徴である。最近になって口径 1 m 級の超小型電波望遠鏡を搭載する可搬型 VLBI 観測システムの研究・開発が始まっているが、電波望遠鏡の現状の形態では大型の観測装置を特定の場所に固定して運用する。基準点測量や水準測量などの伝統的な測地測量では、持ち運びできる等身大の寸法の観測器械が用いられる。これらのコンパクトで能動的な測量器械に比べて、電波望遠鏡は大いに異なる印象を与えるかもしれない。いったん建設されると、デンと鎮座したままテコでも動かないが、担っている役割は経緯儀と同じく測量用の観測器械である。基準点測量における計画 - 観測 - 計算整理 - 成果公開という作業行程の基本的な枠組みは、超長基線測量においても同様に適用できる。具体的には次に掲げる諸段階を経て、超長基線測量の成果が得られる。

##### 3.1.1 企画

超長基線測量では、基準局（X局）- 相手局（Y局）の 2 素子電波望遠鏡の組合せが観測を構成する最小の要素になる。単独の電波望遠鏡では VLBI 観測が成立しない。VLBI 観測を実施しようとするには、観測に先立って、同一の天体電波源を同時刻に視準可能な他局を確保しなければならない。いつ、何のために、どういう観測をするか、計画・調整・仲介を行う段階であり、超長基線測量における最上流行程といえる。

##### 3.1.2 観測

企画事項に基づいて具体的に準備を行い、観測データを取得する段階が観測である。時分秒にという天体電波源方向へ電波望遠鏡を向けて秒間視準（追尾）を継続する、という観測内容を、決められた規約・書式に従ってコード化する。

この観測内容の立案（スケジューリング）によって、アンテナを含めた観測機器の設定情報、天体電波源位置情報、フラックス情報を含む観測計画ファイル（スケジュール・ファイル）が作成される。スケジュール・ファイルを制御計算機に入れて観測支援ソフトを実行すると、観測内容に沿って自動制御によってアンテナが駆動を開始する。測地目的には、Sバンド（2 GHz 帯）と Xバンド（8 GHz 帯）が慣例的に用いられてきた。アンテナ駆動と平行して、視準している天体電波源からの放射を含む白色雑音性信号を適当に周波数変換・標本化して、正確な時刻符号を付けて記録媒体に出力する。後の解析で使う気象データ（気温、気圧、湿度）も 1 視準ごとに計測する。

関連処理で遅延時間を検出するには、世界中の観測局が共通の時刻系と連鎖していることが前提となる。そのような時刻系になりえるのが、協定世界時（Coordinated Universal Time, UTC）である。精密周波数標準（水素メーザ）から供給される安定した 1 pps 信号を GPS 観測で得られる 1 pps 信号と比較することによって UTC と同期した時刻系を観測局ごとに保持している。

##### 3.1.3 関連処理

データ処理を行って、解析に必要な情報を抽出する段階である。観測によって天体電波源からの雑音性信号の時系列データが得られたら、X局に対する Y局の遅延時間決定が次の関心事になる。両局の観測データに時間軸上でパターンマッチングをかけながら、相互相関を最大にする時刻差を求める。冗長な raw データから卓越的である雑音成分が除去されて、個々の視準ごとに天体電波源に関する遅延時間や遅延時間変化率などの有意な情報が取り出される。相関出力からバンド幅合成によって精密な遅延時間測定値が求められ、バンド・視準する天体電波源別に整理してファイルへ出力される。バンド幅合成の結果を、測地 VLBI 分野で標準仕様となっている Mark 型データベースへ統合する。ここでは、遅延時間測定値のほかに、観測局の気象データ、観測日時の地球姿勢パラメータ、局位置の先験値、天体電波源位置情報などが取り込まれる。

##### 3.1.4 解析

超長基線測量における解析には、一次解析とグローバル解析の二種類がある。一つのセッションに固有のパラメータだけを求める一次解析に対して、各セッションに共通するパラメータを求めるのがグローバル解析である。

一次解析では、関連処理で得られた遅延時間・遅延時間変化率から、時系の変動の推定（クロック補

正), 大気遅延の推定(大気遅延補正), ケーブル補正, 電離層補正, 相対論的効果の補正, 観測周波数の配列間隔に起因する任意性(アンビギュイティ, ambiguity)の除去を行う。その後, 観測重みを決定してX-Y局間の基線ベクトル, 電波源位置, 地球姿勢パラメータなど, 企画事項に応じて様々なパラメータを推定する。

大陸間をまたぐ長大な基線を張るグローバルなネットワークや, 一つの国内での局所的なネットワークの両方のスケールで, 世界中のどこかで日々VLBI観測が実施されている。グローバル解析では, 世界中で実施された多数のばらばらなセッションのデータベースを寄せ集めて, あたかも一つのセッションのごとく包括的に取り扱い, 観測局の位置や速度場を首尾一貫した解析で求める。これに対して, 一次解析は一つのセッションの観測の良否を点検する役目を果たす。

### 3.1.5 成果公開

一次解析後に, データベースを更新して, IVSの管轄下にあるデータ・センターへ進達する。ここでVLBIの成果として保管・提供が行われる。

## 3.2 国際協調体制における役割分担

超長基線測量を構成する企画-観測-相関処理-解析-成果提供の5つの主要な行程それぞれに, 実施内容に応じた資源とノウハウ両面での備えを要する。これらの全行程を一人, あるいは一つの機関だけで展開することは, 時間的にも経費的にも困難である。VLBIコミュニティに国際協調体制の確立へ向けた気運が高まり, 1999年に国際VLBI事業(IVS: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry)が設立された。IVSに結集する参加機関が, それぞれの保有する資源の内容に応じて, 役割を分担しながらVLBI事業が効率的に展開されている。

IVS配下の分業体制では, 次に掲げる7種類の領域が揃えられている; 観測計画の企画を取りまとめる「オペレーション・センター」, 観測を実施する「観測局」, 相関処理を担当する「相関局」, データを解析する「解析センター」, VLBI成果の保管と提供を担当する「データ・センター」, VLBIに関する新技術の開発を担当する「技術開発センター」, IVSの事業展開を取りまとめる「コーディネーティング・センター」。例えば, 独立行政法人情報通信研究機構(以下,「NICT」という。)は, 観測局, 相関局, 解析センター, データ・センター, 技術開発センターの5つの領域を分担する機関としてIVSから公認を受けて, VLBI観測・相関処理に関連する様々な技術開発を軸に積極的にIVSの活動に参画し

ている。

## 3.3 国土地理院の主要なVLBI資源

国土地理院は観測局と相関局という二つの領域に対応する資源を備えており, IVS参加機関の一つとして活動している。つくばVLBI観測局(Tsukuba VLBI Station)は1998年3月に国土地理院構内に建設された。主鏡口径32mのカセグレン・アンテナを備え, IVSから公認を受けた観測局として, IVSによる計画・調整のもとで様々なカテゴリーの国際VLBI観測(国際超長基線測量)に参加している。国内観測(国内超長基線測量)については, 新十津川VLBI観測局, つくばVLBI観測局, 父島VLBI観測局, 始良VLBI観測局からなる国土地理院独自の観測網GARNET(GSI Advanced Radiotelescope NETWORK)で定期的な測地VLBIセッションを実施している。

つくばVLBI相関局(Tsukuba VLBI Correlator)は国土地理院・宇宙測地館の中央局に1997年に開設され, 測地VLBI向けの相関処理装置が備えられている。IVSから公認を受けた相関局として, 国際観測のうちのつくばVLBI観測局が参加するUT1観測と, 国土地理院が主務となって実施する国内観測セッションの相関処理を担当している。

## 3.4 相関局の役割

基準点測量における“計算整理”の行程に対比されるのが相関処理である。相関局の役割は, 観測局からVLBI観測データを集めて, 包括的に相関処理したのち, 一次解析の結果をデータ・センターへ提出するという一連の業務に集約される。この役割を実際に遂行する上で, 考慮すべき様々な側面が存在する。相関局が機能するには, まず第一に相関処理に必要な設備(ハードウェア, ソフトウェア)とスタッフを要する。相関処理設備の安定的・効率的な維持運営は, 重視すべき要素の一つである。相関器のスペックだけでなく, 相関処理システムの操作性・保守性の確保, 一定水準に達するオペレータの確保, オペレーション技能の維持, 利用技術の理解, 運用手順の鍛錬, 処理上の知見の継承について情報共有を図らなければならない。

## 4. K5/VSSPの導入

観測データを取得するデータ記録系(観測局)を上流側とすると, 下流側に位置する一次処理系(相関局)では, そのデータを後処理する必要上から, 取り扱う記録媒体の種類・形状, データの記録方式, データのフォーマットに関して, データ記録系と整合している必要がある。本章では, K5/VSSPによる相関処理に際して知っておかなければならない観測上の事項について述べる。

#### 4.1 K5/VSSP

1960年代に考案されたVLBI技術は、様々な研究開発や周辺要素、時代の要請を取り込んで変遷を呈してきたが、現在なお発展を続けている。VLBI観測で視準する天体電波源は強度が極微弱であり、フリンジ検出に必要な観測時間を増やすにつれてデータ量が增大する。これに対応するため、高密度大容量記録の可能な記録媒体が用いられる。VLBI技術の発展の経過を振り返ると、記録媒体や記録方式の改良が一つの基軸となっている。1990年代前半に郵政省通信総合研究所（CRL）が開発したK-4システムは、最高256Mbps / 16チャンネルの記録に対応できる磁気テープ依存型の記録系システムであり、その後10年間以上にわたって定常的に運用されてきた。

2000年代に入り、次世代VLBI技術に関する議論が国内・国際VLBIコミュニティで活発に展開された。次世代システムとして新たな目標となった高次サンプリング、汎用性、ソフトウェア相関、実時間処理、コスト低減等の要求に応じるために、VLBIデータの記録媒体としてハードディスクを用いるシステムの構築が世界の主要な研究所で取り組まれてきた。CRLが開発を進めてきたK5/VSSP（K5/Versatile Scientific Sampling Processor）は、2000年代前半に実用段階に達した。データ記録系と相関処理系の双方を網羅した設計が行われ、汎用PC上での動作が実現されている。

K5/VSSPの開発当初にはインターネットVLBI（IP-VLBI）という呼称が用いられたこともあるが、現在ではVLBI観測データをインターネット等のネットワーク経由で電子的に相関局へ伝送する方式のことをe-VLBIと称して、K5/VSSPとは区別されている。ただし、開発段階からK5/VSSPはe-VLBIを指向した設計が続けられてきた。CRLが開発したVLBI観測システムのシリーズ名には、開発拠点となった鹿島宇宙技術センターの頭文字をとってKが冠されている。

##### 4.1.1 ハードウェア

K5/VSSPはパーソナルコンピュータ（PC）上で動作するVLBIデータ取得装置である。A/D変換を行うサンプラー・ボード（IP-VLBIボード）を組み込んだユニットと各種プログラム群から構成される。IP-VLBIボードはPCとのインターフェースにPCIバスを採用している。A/Dコンバータを搭載したIP-VLBIボードがPC筐体内に直接組み込まれて出荷される。K5/VSSPの主な仕様を表-1に掲げる。開発当初はIP-VLBIボード用のデバイス・ドライバの整備状況からFreeBSD上で設計が進められてきた。その後の市場におけるLinux機の流通拡大にあわせて、Linux上で動作するように改良された。IP-VLBI

ボードを組み込んだK5/VSSPデータ取得装置は、NICTと共同開発した日本通信株式会社から製造販売されている。

表-1 K5/VSSP（IP-VLBIボード）の主要な仕様

標本化周波数	4MHz, 8MHz, 16MHz
量子化ビット数	1, 2, 4, 8
最大データレート	64Mbps / 1チャンネル
チャンネル	4 / 1基
観測モード	1または4チャンネル / 1基
ファイル生成モード	1チャンネル / 1ファイル または 4チャンネル / 1ファイル
基準信号入力	1PPS, 10MHz (+10dBm)
PCとのインターフェース	PCIバス(5V仕様)
OS	Linux

##### 4.1.2 ソフトウェア

K5/VSSPデータ取得装置の動作に必要なプログラム群は開発元であるNICTが各カテゴリー別にパッケージソフトウェア化して管理している（近藤ほか、2005）。各プログラムのソースは全てC言語で記述されている。開発はVisual C++ 6.0上で行われてきたが、FreeBSDやLinux環境下でも同じソースを使用できるように配慮されている。国土地理院にはNICTとの共同研究提携に基づいて、これらのパッケージがライセンス供与されている。

###### (1) データ取得プログラム群

K5/VSSPを使ってVLBI観測データを取得するうえで必要なプログラム群である。観測前のシステムチェック、時刻あわせ、データ取得、データチェック等の機能を備える。

###### (2) 相関処理プログラム群

apri\_calcでは視準する天体電波源ごとに各基線での遅延時間および遅延時間変化率の予測値を計算する。corは相関処理を実行する。sdelayは相関器出力から粗決定（サーチ結果表示）を行う。Mark5データをK5/VSSPフォーマットへ変換するプログラムも備えている。

###### (3) バンド幅合成プログラム群

複数のチャンネルの粗決定結果からバンド幅合成処理を行うプログラムがkombである。CRLのKSPプロジェクト時に使われたFORTRANによるバンド幅合成プログラムからC言語による記述に書き換えられ、HPワークステーションからPC上へ移植できるようになった。開発当初はK5/VSSPソフトウェア相関出力であるcoutフォーマットに直接は対応して

いなかったため、いったん cout フォーマットを K-4 フォーマットへ変換したのち、K-4 資源上でバンド幅合成が行われていた。2005 年 5 月リリース版から、cout フォーマットの相関出力を直接 komb へ引き渡せるように改良された。

#### (4) eVLBI プログラム群

VLBI 観測時に、リモート PC からの要求により観測やデータのネットワーク伝送を行うためのプログラム群である。現在、実時間運用をめざした開発が続けられている。

#### 4.1.3 K5/VSSP による観測データ取得

アンテナで集められた天体電波源からのマイクロ波領域の高周波 (RF 信号) を周波数変換で中間周波数帯 (IF 帯)、次いでベースバンドに変換したのち、下側側帯波 (USB) が端末の IP-VLBI ボードでデジタル化され、記録データとしてハードディスクへファイル出力される。4 基の K5/VSSP 装置で記録系を構成するのが測地 VLBI における通常の運用形態である。X バンドで 8 チャンネル、S バンドで 8 チャンネルの計 16 チャンネル分のベースバンド信号を IP-VLBI ボード 1 基あたり 4 チャンネルずつ入力して、1 ビット標準化されたバイナリ型データが 4 チャンネル単位で一つのファイルにひと括りに整約されて、1 視準ごとに記録媒体に保存される。

K5/VSSP 装置では、ハードディスクを記録媒体としている。IDE ディスクを標準装備しているほか、転送速度がより高速の SATA ディスクを接続することができる。相関処理では、ハードディスクに書き込まれたデータ・ファイルを読み出して、汎用 PC 内部でソフトウェア指向の相関処理を実行する。

#### 4.1.4 オブス

オブスは測地 VLBI における jargon の一つである。通常の測地 VLBI 観測では、地平線上に現れている天体電波源を、全方位にわたって均一に視準する。24 時間の間に延べ数百個の天体電波源が観測される。電波源名称・観測開始時刻などの情報を指定することで個々の観測を特定できるが、これに代えて、個々の視準を“ 番目のオブス” というように、問題にしているセッション中の最初の観測からの順番を指して特定することが慣例的である。

#### 4.1.5 周波数グループ

データ・ファイルに収納された 4 チャンネル単位のデータを区別するための属性の一つとして、観測データ・ファイル命名規則上、周波数グループという指標が用いられる。X バンドの 1 ~ 4 チャンネルを a, X バンドの 5 ~ 8 チャンネルを b, S バンド

の 1 ~ 4 チャンネルを c, S バンドの 5 ~ 8 チャンネルを d と決めている。

#### 4.1.6 データ量

K5/VSSP 記録系では、通常は一つの観測局において一つのオブスあたり 4 つのデータ・ファイルが生成される。一つのデータ・ファイルの容量は、観測時間 × 記録帯域幅 × A/D 変換ビット数 × チャンネル数で与えられる。これが 4 周波数グループ分あって、全体で観測オブス総計だけデータ・ファイル容量がある。次の仕様で 1 つのセッションでの 1 基線分のおおよそのデータ容量を見積もる。

1 オブスの視準時間：	250 秒
記録帯域幅：	8MHz
AD 変換ビット数：	1
1 グループ内のチャンネル数：	4
観測オブス数合計：	250 個

1 オブスでは 1 GB × 4 グループ、1 セッションでは 250GB × 4 グループの総容量となる。1 セッション分のデータを収納するには、一般的に流通している 250GB の SATA ディスクを最低でも 4 枚程度準備しなければならない。

#### 4.1.7 記録媒体の形状

SATA ディスク本体を金属性収容架台上に搭載したカートリッジ状の体裁で取り扱う。このカートリッジをまとめて収納するために、ドライブ・ユニットが用いられる。1 台あたり 16 個のスロットを持ち、SATA ディスクとのインターフェース、電源供給ユニット、送風用ファンを備えている。

#### 4.2 K5/VSSP の導入

従来の磁気テープ依存の VLBI 専用資源から、実用段階を迎えつつあったハードディスクを記録媒体として用いる次世代型データ取得システムへ移行する動向が、世界各国の VLBI 関連施設で始まった。国土地理院においても、VLBI コミュニティの潮流を視野にいれつつ、K5/VSSP の導入に取り組んできた (藤咲ほか, 2005; 町田ほか, 2005)。観測局と相関局が歩調を合わせ、一斉に K5/VSSP へ切り替えなければならない。2005 年 4 月を運用開始目標にして、必要な準備を進めてきた。

#### 4.2.1 観測局への導入

2003 年に 4 組の K5/VSSP データ取得装置を導入して、つくば・新十津川・父島・始良局へ配備した。2004 年前半から K4 と K5/VSSP の並行観測に取り組み、観測運用試験を行った。2005 年 4 月下旬から、



国内観測と UT1 観測において K5/VSSP による定常運用へ移行した。国際観測に関しては、2006 年に全面的に K5/VSSP へ移行した。

#### 4.2.2 相関局への K5/VSSP 導入

つくば相関局では、2004 年前半に CPU 速度の遅い旧型の PC を集めて、K5/VSSP による相関処理の運用試験を行った。2004 年後半からは本格的な K5/VSSP 相関処理システムの構築と定常運用に向けて、高速 CPU を備えた市販のサーバを調達して、各種セットアップを始めた。また、並行観測で得られた K4 と K5/VSSP の観測データを相関処理・一次解析して、両システムの整合性を検証した(石本, 2004; Kondo et al, 2005)。これらを踏まえて、2005 年 4 月下旬から K5/VSSP による相関処理へ完全移行した。

#### 4.3 K5/VSSP による相関処理手順

##### 4.3.1 予測値計算

予測値計算では、PRT (processing reference time) における遅延時間と遅延時間変化率の先験的な値(以下、「アプリオリ」という。)を求める。アプリオリの理論値は観測局の位置・視準する天体電波源の方向(赤緯, 赤経)・地球姿勢パラメータに依存する。これらの基礎的な入力情報とともに、UTC に対する同期誤差(クロック・オフセット)を加えて、アプリオリの計算を実行する。観測終了直後の時点では地球姿勢パラメータの確定値がまだ公表されていないことが多く、できるだけ精度の良い推定値をもって代える。これらの入力情報の一部は、スケジュール・ファイルの指定により処理される。計算されたアプリオリは予測値ファイルに出力される。

UTC 同期誤差が大まかに判明している場合は、予測値計算を開始する時点でクロック・オフセットの初期値として入力する。後述のフリッジサーチ実施後に得られる遅延時間残差をクロック・オフセットの修正値として初期値に加えて、改めて予測値計算を実行して、次いで本相関処理を実行する。この手順を繰り返して、遅延時間残差が十分小さくなるまでアプリオリの改善を図る。

##### 4.3.2 フリッジサーチ

フリッジ(干渉縞)は前述のメイン・ローブのことである。天体電波源からの電波は不規則雑音に近く、帯域幅  $\Delta\omega$  が広いほど鋭いフリッジを示す。このピーク位置から遅延時間、遅延時間変化率が解釈される。1 マイクロ秒以下の同期誤差の場合、アプリオリの理論値の近傍に通常のサーチ幅(サーチラグウィンドウ)を使って容易にフリッジを見つけることができる。通常は 1 チャンネルあたりに割り当てられるサーチラグウィンドウは数マイクロ秒幅な

ので、UTC 同期誤差がこれ以上の場合、例えば 10 マイクロ秒の場合はフリッジを見つけれない。

観測の際に計測される精密周波数標準からの 1 pps と GPS 観測による 1 pps の差は、クロック・オフセットを推測する手がかりとなる。観測ログ中に出力される 1 pps の差をクロック・オフセットの初期値として予測値計算に入力して、フリッジサーチによって実際にフリッジが見つかるかどうか試す。フリッジが見つければ、遅延時間残差をフィードバックしてクロック・オフセットの初期値に対する補正値として加えることにより、アプリオリが改善される。フリッジサーチはサーチラグウィンドウの中央付近にフリッジを見つけることができるようなクロック・オフセットとクロック・レートの組み合わせを実際の相関処理(本相関処理)に先立ってあらかじめ求めることを目的として行う予備的な相関処理ということができる。フリッジサーチのアルゴリズム自体は本相関処理と同じであり、用いるプログラムも同じである。サーチラグウィンドウを通常の本相関処理より広く設定するオプションを付けたり、フリッジが検出されない場合には同期誤差の量を適当に与えて、フリッジを検出するまで繰り返し計算を行う。

##### 4.3.3 本相関処理

フリッジサーチを経て決定されたクロック・オフセットとクロック・レートの修正値を、全てのオプションに対して共通に適用してアプリオリを計算する。このアプリオリを使って相関処理を行う。1 ビット標準化によるデータ処理に特化した XF 型相関処理の計算が、汎用 PC 上でソフトウェア的に実施される。相関処理の計算結果は、K5 相関出力ファイルに収められる。この段階でフリッジが検出されない場合、相関処理の計算に関わる各種パラメータを変えて再計算を行い、フリッジ検出を試みる。

##### 4.3.4 粗決定

フリッジサーチや本相関処理で得られるのは相互相関関数である。この結果から K5 相関出力を積分して、実際に遅延時間と遅延時間変化率をチャンネルごとに推定する。推定結果のグラフ出力と SNR (信号比)・遅延残差のテキスト出力から、フリッジが得られたかどうかを判定する。

##### 4.3.5 バンド幅合成

測地 VLBI 観測では、X バンドと S バンドとも、それぞれ広帯域(500MHz)の入力から 1 チャンネルあたりの帯域幅を 4 MHz または 8 MHz として 8 つのチャンネルで観測データを取り出して記録する。バンドごとに 8 チャンネル分の粗決定の結果を同期加算

して1つの値に合成する。バンド幅合成では、チャンネル間の信号の位相差を補正しながら精密に遅延時間が決定される(精決定)。バンド幅合成処理を経た出力ファイルはコム・ファイル(kombファイル)と呼ばれる。

#### 4.3.6 データベース作成

バンド幅合成を経たコム・ファイルは1基線・1オプス・バンド別に作成される。多数のコム・ファイルは相関処理の最終段階でバンド別に統合され、一つのMark-形式のデータベースが構築される。データベース作成には、コム・ファイルのほかに、観測ログ・ファイルを準備しなければならない。

#### 4.4 並列分散処理

相関処理すべき件数は、オプス数×周波数グループ×基線数で与えられる。これらの処理要件を1台の計算機で逐次データと呼び出して処理しようとすると、膨大な時間を要する。K5/VSSPソフトウェアには、相関処理を実行する際に運用者の都合や選択に即したシステム構築を可能とする汎用性が備わっている。効率的な相関処理のためには、この汎用性を生かした並列分散化処理が適っている。データ構造まで立ち入る方式、アルゴリズムを工夫してCPUを効率的に使う方式など、様々な並列分散処理のアイデアが提案されてきた。実例の一つに、インターネット接続された複数のクライアント側PCに利用者からの入力がないスクリーンセーバー状態が生じたときに、自動的にサーバからデータをダウンロードして相関処理を分担するVLBI@homeプロジェクトが挙げられる(Kondo et al, 2005)。ひとくちに並列分散処理と言っても多岐にわたっており、どのような方式を採用するか検討の余地がある。

つくばVLBI相関局では、複数のラックマウント型サーバをネットワーク接続して、管理計算機から強制的に処理を割り当てる方式を採用した。この方式では、並列分散処理の効率はサーバのCPUやサーバの台数に依存する。1基線・1オプス・1周波数グループを分散化の最小限度とした。

#### 4.5 K5/VSSP 相関処理システム

##### 4.5.1 ハードウェア構成

つくばVLBI相関局には、2系統のK5/VSSP相関処理システムを備えている。両系統のハードウェア構成を表-2に掲げた。全てのサーバは市販のLINUX機である。

表-2 相関システムの構成仕様

	1号機	2号機
管理計算機	1台	1台
(CPU能力)	Intel Pentium4 (3GHz)	Intel Pentium4 (3GHz)
データサーバ	23台	8台
(CPU能力)	Intel Pentium4 (3GHz)	Intel Pentium4 (3GHz)
相関処理サーバ	16台	8台
(CPU能力)	Intel Xeon (3.06GHz)	Intel Xeon (3.4GHz)
フォーマット	K5/VSSP	
記録媒体	シリアルATAディスク・カートリッジ	
基幹パッケージ	ipvlbi20080110, komb20071214	
支援アプリケーション	PARNASSUS 1.3版	
OS	LINUX	
用途	国内観測処理	UT1 観測処理
稼動開始	2005年4月	2006年8月

相関処理サーバはラックマウント型でXeonの高速双対CPUを搭載している。相関処理のタスクを専用に引き受けて、相関処理の実行機能だけ果たす。データ・ファイルを収納した記録媒体を接続するのがデータ・サーバの主要な役割である。1台あたり2本のSATA接続ケーブルでドライブ・ユニットとつながっている。ディスク・カートリッジをドライブ・ユニットに装填すれば電気的な接続が完了する。装填後に、当該データ・サーバからマウントのためのコマンドを実行することで、論理的な接続が完了して、実際にデータと呼び出すことが可能になる。おのおのデータ・サーバも高速のCPUを搭載しているので、相関処理用サーバ同様に分散処理を担わせることが可能である。

##### 4.5.2 ソフトウェア構成

NICTのK5/VSSP相関処理用パッケージ(以下「基幹プログラム」という。)は管理計算機上に導入されている。これを効率的に取り扱うための相関処理支援アプリケーションも、管理計算機上に実装される。このほか、相関処理結果の視覚的な表示に使われるPGPLOTを展開する。

##### 4.5.3 ファイル共有の方法

K5相関処理システムでは、並列分散処理にあたって、おのおのデータ・サーバがrawデータやスケジュール・ファイルを共有している必要がある。データ・サーバには、/disk/serv??/sd1, /disk/serv??/sd2というフォルダを設けて、ここに2枚のディスク・カートリッジを/dev/sda1,



/dev/sdb1 という装置名でマウントする。NFS (ネットワーク・ファイル共有システム) のサーバとして、データ・サーバごとに/etc/exports を書き換えて、これらのディレクトリへ、管理サーバと関連処理用サーバからのアクセス許可を設定する。管理サーバには、/home/vlbi/iplbi/というディレクトリをつくり、ここにスケジュール・ファイル、ログ・ファイル、予測値計算ファイルを置く。管理サーバの NFS サーバ設定では、これらのファイルへ、データ・サーバと関連処理サーバからアクセスすることを許可する設定にしてある。NFS クライアントとしての設定に代えて自動マウンティングを採用しており、/etc/autu.master と/etc/autu.misc を編集して、ネットワークを介したディスクのマウントを行う。これにより、分散処理の環境が整えられる。

## 5. アプリケーション開発

### 5.1 背景

K5/VSSP への移行後の時点から振り返れば、かつての K-4 関連処理システムにおいては、複雑な現場状況が呈されていた。多段式に連結された VLBI 専用に製造された装置で構成された K-4 関連処理システムでは、複数の磁気テープを同期再生させながら、それぞれのハードウェアを駆使して関連処理が行われた。1つの基線に1つの関連器が対応した。基線単位での並列処理は可能だが、多基線用へのシステムの拡張性に乏しい。どこかで不具合が発生すると、システム全体のパフォーマンス低下を招いた。データ処理にあたり、シーケンシャルな取り扱いを余儀なくされた。職人技のような“こつ”や“秘伝”、“裏技”の習得が随所に要求された。これによって得られた反省は、経験が浅いオペレータにも容易に取り扱える業務用システムの構築が必要だ、という点に尽きる。K5/VSSP では、個々の観測データを電子的ファイルとして取り扱う設計になっている。メカニク的な問題から解放され、関連処理そのものに専念できる環境を迎えた。これに加えて、近年、国内観測、UT1 観測とも観測回数が増加傾向にある。つくば VLBI 関連局で処理すべき処理件数が増加している。プログラム実行にあたり、コマンドラインからの煩雑な手入力に代えて、視認性の高い画面を伴ったユーザーインターフェースを介して包括的にオペレータからの処理条件等の入力指示を受け付けて、各種処理過程を統括するアプリケーションを開発することにした。この開発は、2004 年から始められた K5/VSSP への移行作業と併行して、関連処理の定常運用を支援するシステムの導入として検討を続けた。

## 5.2 アプリケーションの要求仕様

### 5.2.1 要求仕様作成上の留意

ソフトウェア開発には人と予算が投入され、多くの時間が費やされる。限られた予算の範囲で顧客が要求する品質や機能を確保することが、ソフトウェア開発の成功といえる。発注者が描く要求仕様に基づき、開発者が詳細な設計やプログラミングを行う。ソフトウェアが備えるべき機能を分析してまとめることが、ソフトウェア開発における重要な過程と位置づけられている。ソフトウェアに対する要求仕様の技法は要求工学として工学的に体系化されている。関連処理支援アプリケーション開発を成功に導くために、可能な範囲で要求工学の手法を取り入れながら発注仕様の練成に努めた。

### 5.2.2 開発の行程

ソフトウェア開発には、開発戦略の案内役として開発行程の展開を規定するモデルが用いられる。例えば、落水型モデル (water-fall model) では、要求分析 - 要求定義 - 外部設計 - 内部設計 - プログラム設計 - プログラミング - テストという行程を経てソフトウェア開発が進められる。関連処理支援アプリケーション開発では、要求分析・要求定義を発注仕様書にまとめ、概略のアプリケーション操作画面の作成までを発注者側である宇宙測地課が担当して、内部設計から後の過程をソフトハウスに外注することにした。開発工期を4期に分けて、段階的に開発を進めながら機能の統合を図った (表 - 3)。

表 - 3 PARNASSUS 開発行程

完成時期	搭載機能
2005 年 3 月	予測値計算
2005 年 9 月	予測値計算 + 関連処理
2006 年 1 月	予測値計算 + 関連処理 + バンド幅合成
2006 年 3 月	予測値計算 + 関連処理 + バンド幅合成 + データベース作成

### 5.2.3 要求分析

#### (1) アプリケーションの全体象

当該アプリケーションは、K5 関連処理システムの管理計算機に実装される。利用者の指示する処理条件・処理の範囲に応じて、データ処理要求を基幹プログラムへ引き渡して、関連処理の実行を支援する。単に関連処理に必要な個々の機能を実現するだけでなく、大量のデータ処理要求に対応できる設計にする。関連処理系のハードウェア資源を並列・分散的に使用しながら、予測値計算以後、データベース作成までの範囲を統括する。

## (2) 機能要求

予測値計算・フリンジサーチ・相関処理・粗決定・バンド幅合成に NICT の基幹プログラムを利用することを前提として、システムを構築する。基幹プログラムに相関処理支援用アプリケーションを統合した状態で運用する。相関処理支援アプリケーションには、PARNASSUS (パルナッソス) の名称を与える。PARNASSUS とは、「NICT により開発された、相関処理に使える一連の進歩的な処理用アプリケーション」という意味の Processing Application in Reference to NICT's Advanced Set of Softwares Usable for Synchronization からの頭字語である。基幹プログラムの動作範囲は、1 回の実行あたり 1 基線・1 オブスに限られる。実際の相関処理で取り扱う複数基線・複数オブスにわたる大量の処理件数に対応できるように、PARNASSUS にプロセス管理、並列分散化処理のジョブ管理の機能を備える。サーバに接続されたディスクのマウント情報の管理、相関処理の各段階におけるステータスの管理、処理条件のテキスト保存機能も PARNASSUS に含まれる。

## (3) 操作性

処理過程を効率的に遂行するためには、利用者がアプリケーションを容易に操作できる作業環境を提供しなければならない。このために、GUI (Graphical User Interface) を充実させ、利用者が画面を介して対話的に操作できる環境をつくる。利用者からの必要最小限な指示に基づき相関処理過程が実行されるように作り込み、デフォルトの入力設定値を与えて冗長な介在を減らす。選択項目は入力値の特性に応じて、マウスのクリック、チェックボタン、ラジオボタン、プルダウンメニュー等を活用する。数値入力には専用フィールドを用意してキーボードから手入力する。

利用者は必ずしも VLBI の相関処理に十分習熟しているとは限らない想定にした。相関処理のセクションに異動してくるスタッフが業務遂行上必要となる電波天文学・マイクロ波工学・データ処理・プロジェクト管理に関する専門知識や経験を有しているわけではない。このような状況を踏まえて、暗黙知や“こつ”などの記録に残りにくいにも関わらず伝承を要する操作部分を排除した明確な画面を作り、特定の専門家にしか使いこなせないような寿命の短いソフトウェアに陥らないように意図している。

## (4) 並列分散処理

K5/VSSP 導入後に始めた運用試験では、処理要件情報を公示して、タスクを抱えていない相関処理サーバが自由にアクセスして次のタスクとして処理要件を取得する自由応募方式を試した。タスクを公示

するリストの上から順に 1 件ずつ、応募してきたサーバに対して先着順に処理要件がサーバへ引き渡される。複数のサーバが一斉に 1 つのタスクの取得を試みるので、いわば野放し状態となり、サーバ間で競合が起こって未処理になるタスクが生じた (図 - 2)。この結果を踏まえて、PARNASSUS ではタスクへのアクセス制御を講じる。PARNASSUS が処理要件情報を公示したリスト (マスターファイル) を管理しながら相関処理サーバのタスク処理状況を監視する。タスクを抱えていない手持ち無沙汰のサーバがあれば、PARNASSUS がマスターファイルから次のタスクを手配して強制的に割り当てる一元管理方式を採用する (図 - 3)。この方式では、複数のサーバに同時に複数のタスクを競合なく与えることが容易になる。

## (5) 自動フリンジサーチ機能

相関処理に際して、先験的に知る必要があるパラメータの一つに、VLBI 観測局における UTC と時系のズレが挙げられる。このズレを予備的に求める手続きがフリンジサーチである。何らかの問題により時系のズレが不明のときに備えるのが、自動フリンジサーチ機能である。ラグ数を大きくとって、広いサーチ範囲でのフリンジサーチを 1 台のサーバで実行しようとする、この区間内にフリンジがあったとしても、非常に時間がかかる。K5/VSSP では分散処理が可能なので、広いサーチ範囲  $[A, B]$  を  $[A, A + \Delta], [A + \Delta, A + 2\Delta], \dots, [A + (N-1)\Delta, A + N\Delta]$  の幅  $\Delta$  の  $N$  個の区間に均等分割してから、分散処理によってそれぞれの区間でフリンジサーチ処理を複数のサーバで実行する。粗決定結果中で、SNR・遅延残差のチャンネル間格差について利用者が与える閾値や条件を満たした場合、フリンジ検出と判断する。

## (6) 保守性

PARNASSUS に対する新たな機能の追加、既存の機能の修正・拡張が可能となるように、保守性を考慮した構造にすることを規定した。これは、基幹プログラムのバージョンアップに追従できるようにするためである。

## (7) セキュリティ事項

プログラミングにあたり、情報セキュリティ上問題となるおそれのあるソフトウェアやツールの使用禁止、情報セキュリティ上問題となる動作やネットワークに悪質な迷惑行為を引き起こす動作を当該アプリケーションに含めないことを仕様書に規定した。

## (8) 制約事項

PARNASSUS には NICT の基幹プログラムを用いるの

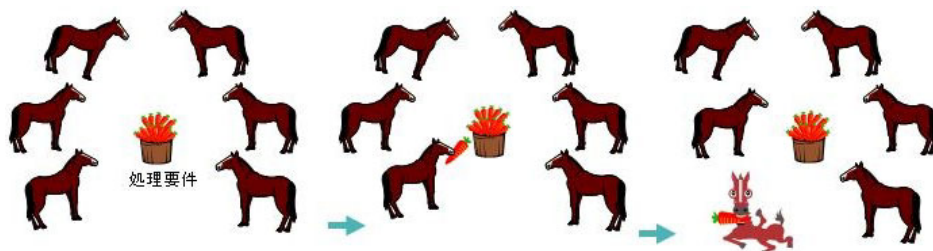


図 - 2 自由応募方式での並列分散処理のたとえ

処理するタスクをニンジンに、関連処理サーバを馬に喩える。(左)タスクを公示すると(飼葉桶に入っているニンジン)、複数の関連処理サーバがタスクを獲得しようと集まる。(中央)早いもの勝ちで1台の関連処理サーバへタスクが渡される。(右)タスクを獲得した関連処理サーバ上で関連処理計算が実行中となる。残されたタスクに向かって、他の関連処理サーバがタスク獲得を試みる。



図 - 3 一元管理方式での並列分散処理のたとえ

関連処理支援アプリケーション (PARNASSUS) をウサギに喩える。ニンジンと馬は図 - 2 と同様。(左)オペレータ (利用者) が PARNASSUS へ処理要求を与えると、PARNASSUS は処理待ちの関連処理サーバがあるかどうかシステム内を監視する。(中央)処理待ちの関連処理サーバを複数台見つけて、PARNASSUS がそれぞれにタスクを与える。(右)タスクを獲得した複数の関連処理サーバが並列的に関連処理計算を実行する。

で、操作画面には NICT のクレジットを表示させる (図 - 4)。このほか、PARNASSUS 開発に関して受注者が業務遂行上の必要から作成する著作物について、国土地理院への著作権無償譲渡の了解を仕様書に規定した。

### 5.3 外部設計

#### 5.3.1 画面設計

要求仕様の分析から、利用者が操作する主要な画面部分の入力項目やレイアウト、画面展開の順序などの設計を実施した。

#### 5.3.2 主要な入出力画面

##### (1) プロジェクト定義

PARNASSUS は、与えられた処理条件のもとで関連処理を実行したのち終了するだけでなく、入力条件や処理範囲を保存する機能をもつ。プロジェクトと称する包括的な作業単位を定義して、処理対象セッションの定義、観測スケジュール・ファイルの引き

渡しを行う (図 - 5)。

##### (2) 予測値計算

予測値計算の基幹プログラム (apri\_calc) には、スケジュール・ファイル、クロック・オフセット、クロック・レート、地球姿勢パラメータ、オブス番号、基線種類などの情報をパラメータとして引き渡す (図 - 6)。apri\_calc を実行すると、予測値計算の実行結果がアプリアリ・ファイルへ出力される。

##### (3) 関連処理

関連処理の基幹プログラム (cor) には、アプリアリ・ファイル、積分時間、サーチ・モードなどの情報をパラメータとして引き渡す。関連処理が正常に実行されると、チャンネル別の相互相関関数のグラフが画面へ出力され、K5 関連出力ファイルに NICT による K5 関連出力フォーマットである FORMAT7 形式 (2003-07-18 制定 / 2005-05-20 改訂) に従って各種処理データが出力される。



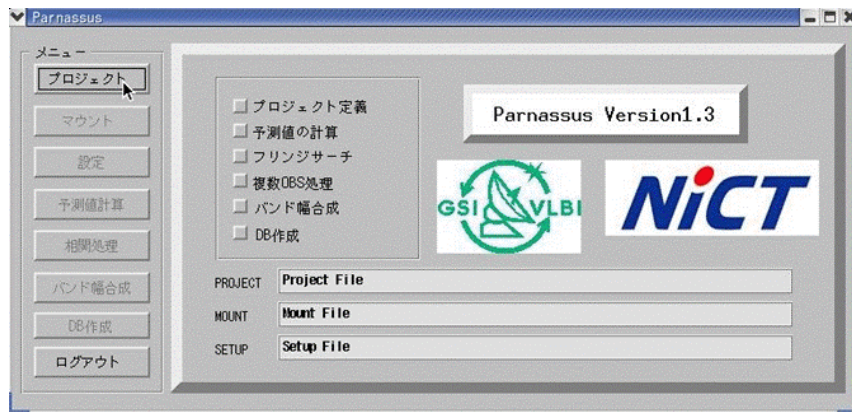


図 - 4 PARNASSUS メインフレーム

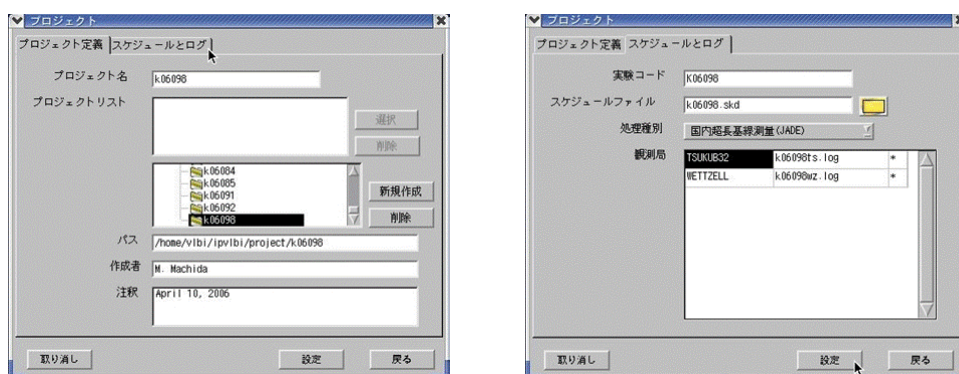


図 - 5 プロジェクト設定画面

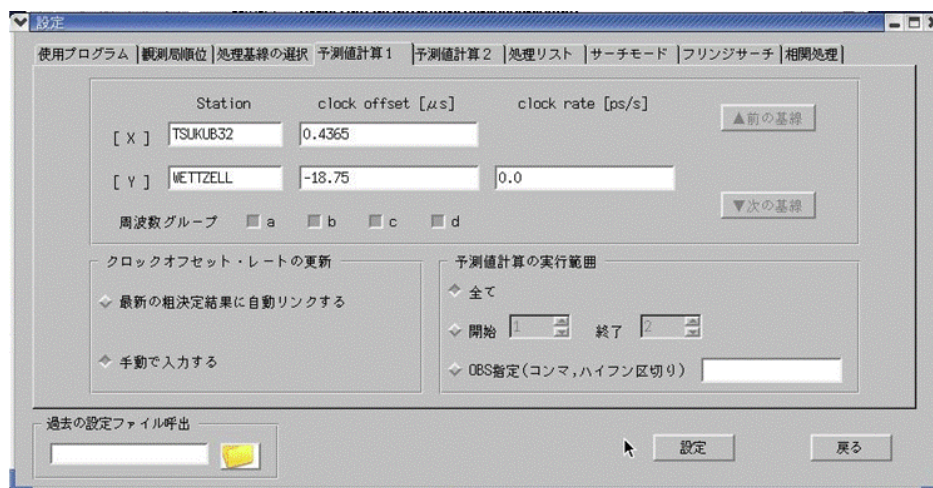


図 - 6 予測値計算設定画面

#### (4) バンド幅合成

バンド幅合成の基幹プログラム (komb) には、K5 相関出力ファイル、バンド幅合成に用いるチャンネル指定、位相校正信号のチャンネル間位相差などの情報をパラメータとして引き渡す。

#### 5.4 内部設計

要求仕様の内容と外部設計による各操作画面に関

する資料に基づいて、データ入出力とアプリケーション内部での処理過程を詳細に分析した。この結果からフローチャートを作成して処理の手順を明確に構造化した。アプリケーション内部での処理に伴って生成される各種外部ファイルの書式を決定した。プログラムの骨格をなすクラスの実装を実施した。実装環境となる K5/VSSP 相関処理システムのハードウェア構成下で並列分散処理を実現する方法を検討

した．fork 関数を用いて子プロセスを生成して，これらが独立に処理を実行する手法を採用した．相関処理サーバへ ssh でログインしたのち，おのおの子プロセスによって相関処理サーバ上で相関処理を実行させる．この手法には，管理計算機からの一元管理が容易になり，複数の相関処理要件を複数の相関処理サーバへ実行させる分散処理プロセスを安定して運用することが期待された．

並列分散処理の管理には，処理対象基線・オブス番号，アプリオリ・ファイル，未処理 / 処理の区別，処理を担当するサーバ名などの個々の処理要件の同定に必要な情報をもれなく記載したマスターファイルを用いた．処理の進捗は，随時マスターファイル中のステータスの変更に反映される仕様になっている．処理状況の監視やサーバ稼働状況の把握を即時的に視認できるので，運用性の向上に役立てることができる．

### 5.5 プログラミング

PARNASSUS のプログラミングには Boland 社 Kylix3 Professional を使い，C++を開発言語に用いた．ソフトハウスにおいて PARNASSUS の動作環境を模擬した仮想開発環境を構築して，ここでコーディング・動作テスト・デバックを繰り返しながら開発を進めた．

### 5.6 統合動作テスト

実際の動作環境に試作版 PARNASSUS をインストールして，発注者側の担当職員と相関処理オペレータが操作性を確認した．この統合動作テストの反映事項に基づき，最終的なデバックが行われた．

### 5.7 運用状況

予測値計算・フリンジサーチ・相関処理・バンド

幅合成・データベース作成の要求機能を順次統合しながら開発を進めてきたが，最新版の PARNASSUS (Ver 1.3) が 2006 年 3 月に完成した．実装環境に導入して実運用に入った．これまでのところ，アプリケーション自体にバグ等は見つかっておらず，良好に運用されている．

PARNASSUS の支援により K5/VSSP 相関処理システムの操作性が向上した例を図 - 7 に示す．観測時間に対する相関処理に要した時間の比を PF 値 (Processing Factor) と言い，K-4 相関処理システムおよび K5/VSSP 相関処理システムにおける UT1 観測についての PF 値を比較した．分散処理することにより，相関処理に要する時間が大幅に短縮されたことがわかる．

### 6. 残された問題

つくば VLBI 相関局が K5/VSSP を導入して以来 K5 相関処理システムにはハードウェア領域に属するいくつかの問題が起きはじめている．PARNASSUS は K5 相関処理システムにおいてハードウェア領域より上位レベルで動作する．並列分散処理のための命令を発する司令塔の役割を PARNASSUS が担っているので，実際のタスクを担うハードウェア領域に問題があれば，理想的な稼働は望めない．PARNASSUS を含めて K5 相関処理システムの開発が一段落したが，今後はサーバの更新，ディスク備蓄の充実などの維持・保守面の取り組みが求められる．

#### 6.1 サーバの経年劣化

K5 相関処理システムでは，相関処理サーバやデータ・サーバに市販の PC を採用している．1つのセッションが 24 時間で完了する観測と比べて相関処理には時間がかかる．昼夜貫徹した稼働が 1 年を通じて続くので，並列分散化によって強制的に割り振ら

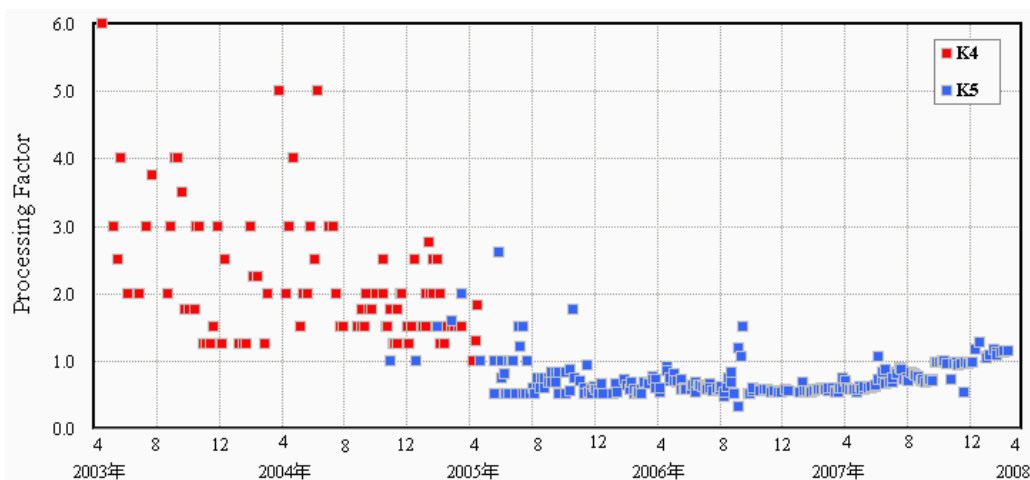


図 - 7 K-4 および K5/VSSP 相関処理システムにおける UT1 観測での相関処理における PF 値

れたタスクが恒常的に相関処理サーバやデータ・サーバに負荷をかけている。業務用 PC としては過酷な使い方をしているといえる。

特に、運用開始から2年間継続して運用してきた1号機システムでは、何台かのデータ・サーバが故障している。残りのサーバ群が相関処理タスクを引き受けなければならないので、追加分担の負荷がさらに負担を強めて、サーバ群の故障の増加が懸念される。既存のデータ・サーバの中にも、相関処理の最中に突然停止する事例が何度か起こった。同一観測局を含む多基線を処理する場合、特定のディスクに収められている観測データを読みにいこうとして、複数の相関処理タスクによりアクセスが同時に集中して、NFS が機能を停止したためと考えられる。相関処理サーバには、処理中にCPUからの発熱によりOSがシステムダウンに至った事例があった。1つの解析室に多数のサーバが集積しているので、備え付けの空調機の効きが悪くなっている。K5相関処理システム全体の効果的な冷却は今後の課題の一つである。

## 6.2 記録媒体とその周辺

ハードディスクについては、頻繁な読み書きを繰り返しているため、ディスク自体の劣化に伴うデータ読み込み速度の低下を招いている。ディスク・カートリッジには、頻繁にハードディスクの着脱を繰り返している。インターフェース部の接触不良や劣化を招き、正常なディスクを装填してもデータ・サーバから認識できない不具合が起きている。

## 7. 今後の展望

### 7.1 双対CPU能力の活用

現行の並列分散処理では、相関処理サーバに搭載されている双対CPUの能力をまだ最大限活用するには至っていない。複数タスク処理を双対CPUの活用によって効果的に実行するために、相関処理サーバへのアクセス制御を改善することでPARNASSUSの更新を図る。

### 7.2 サーバへのアクセス制御の改良

相関処理の最中にサーバが突然停止する問題に対処するには、ハードウェアとソフトウェアの両面からの取り組みが求められる。タスクをランダムに割り振ったり、おのおののサーバへのタスクの割り振り制御の順番付けを基線ごとに変えたりして、特定のサーバへのアクセスが集中しないようにPARNASSUSを改修する。サーバ間の関連付けにも見直しをかける。

相関処理サーバへのPARNASSUSによるソフト的なアクセス制御を講じて、特定のデータ・サーバへ

同時にアクセスできる数を減らすには限界がある。より高速な処理への対応にはデータ・サーバの台数増加が一つの現実的な案である。

### 7.3 上位互換プログラムへの対応

現在はK5/VSSPの後継機K5/VSSP32がNICTで開発され、観測に使用されている。このシステムのプログラムに対する入出力仕様はK5/VSSPと完全互換性を備えている。ここで開発されたPARNASSUSの運用性は基幹プログラムをK5/VSSP32へ置き換えても継承される。観測局側で記録系がより高次サンプリングを可能とするK5/VSSP32に代わっても、つくばVLBI相関局側ではPARNASSUSを含めて対応可能である。

## 8. おわりに

NICTが開発したK5/VSSPでは、VLBI観測データを電子的ファイルとして取り扱うことができるようになった。観測局から集められた大量のVLBI観測データをつくばVLBI相関局で効率的に処理するために、相関処理支援アプリケーション“PARNASSUS”を開発した。並列分散処理方式や対話的に操作しながら運用する作業環境を備え、2006年3月から定常業務で運用されている。今後の様々な運用状況に即して、必要な改良を図る予定である。

## 付 記

本稿で報告した相関処理支援アプリケーションの開発過程における担当者は次のとおりである。所属名は開発当時である。

〔K5/VSSPの開発〕近藤哲郎，小山泰弘

（以上，独立行政法人情報通信研究機構）

〔K5運用試験〕石本 正芳，高島 和宏

〔要求分析〕高島 和宏，石本 正芳，町田 守人

〔要求定義〕石本 正芳，町田 守人

〔外部設計〕町田 守人，石本 正芳

（以上，測地部 宇宙測地課）

〔内部設計〕高野 桂輔，農澤 健太郎・谷本 大輔

〔プログラミング開発〕高野 桂輔・谷本 大輔

〔テスト〕高野 桂輔

（以上，株式会社エイ・イー・エス）



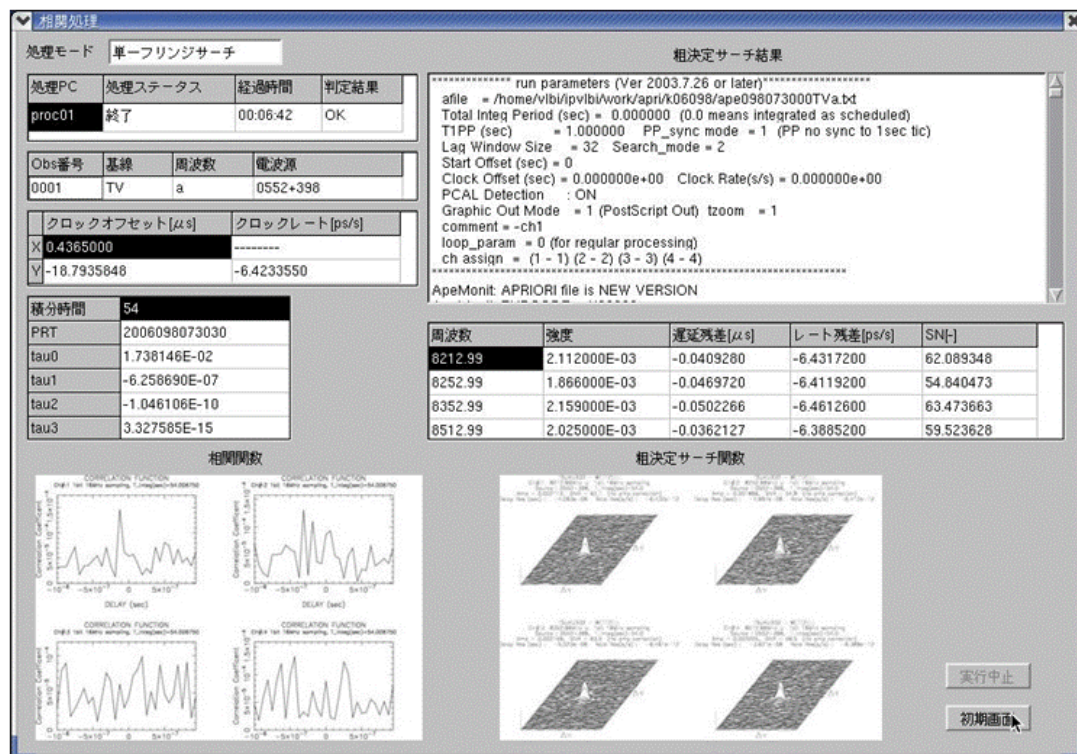


図 - 8 フリンジサーチ画面

## 参考文献

- 石本正芳, 高島和宏, 町田守人, 藤咲淳一, 栗原 忍 (2004): K5 システムによる国内 VLBI 観測の処理結果について, 日本測地学会第 102 回講演会要旨, 163-164 .
- H. Osaki (2002): “Advancement of Versatile Scientific Sampling Processor (VSSP)”, IVS CRL Technology Development Center News No.21, 16-17 .
- 大西淳, 郷 健太郎 (2002): 要求工学 (ソフトウェアテクノロジーシリーズ 9), 共立出版株式会社 .
- T. Kondo, Y. Koyama (2005): “Comparison of observed delays and delay rates between K4 and K5/VSSP”, IVS NICT Technology Development Center News No.26, 1-5 .
- T. Kondo, Y. Koyama, H. Takeuchi (2005): “Technology Development Center at NICT”, IVS Annual Report 2004 (edited by D. Behrend and K. D. Baver, NASA/TP-2005-212772), 272-275 .
- T. Kondo, Y. Koyama, H. Osaki (2003): “Current Status of the K5 Software Correlator for Geodetic VLBI”, IVS CRL Technology Development Center News No.23, 18-20 .
- 近藤哲朗, 小山泰弘, 竹内 央 (2005): K5/VSSP ソフトウェア群の現状報告, VLBI 技術による宇宙研究シンポジウム集録 (独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 編集), 45 - 48 .
- 通信総合研究所 電磁波計測部門 宇宙電波応用グループ (2004): 鹿島 34m アンテナ 2003 年 年次報告書 .
- 高島和宏, 町田守人, 藤咲淳一, 石本正芳, 小門研亮, 谷本大輔 (2006): VLBI 観測局の高度化に関する研究 (第 3 年次), 平成 17 年度 調査研究年報 (国土地理院技術資料 A・4 - No.4), 53-56 .
- 高島和宏, 石本正芳, 町田守人, 藤咲淳一, 栗原 忍 (2005): 機関報告 - 国土地理院における測地 VLBI, 2004 年度 VLBI 懇談会シンポジウム集録, 19-22 .
- 独立行政法人情報通信研究機構 VLBI グループ (代表者 近藤哲朗) (2004): VLBI 測地技術の開発とプレート運動の実証, 測地学会誌, 第 50 巻, 第 4 号, 245-262 .
- 藤咲淳一, 高島和宏, 石本正芳, 小門研亮, 谷本大輔 (2005): 15 日間連続 VLBI 観測「CONT05」へのつくば観測局の参加について, 日本測地学会第 104 回講演会要旨, 13-14 .
- 町田守人, 高島和宏, 石本正芳 (2005): K5/VSSP を用いた VLBI 相関処理システムの機能拡張, 日本測地学会第 104 回講演会要旨, 15-16 .



- M. Machida , K. Takashima , H. Shigematsu , E. Iwata ( 2007 ) : “ Tsukuba VLBI Correlator ” , IVS Annual Report 2006 ( edited by D. Behrend and K. D. Baver , NASA/TP-2007-214151 , 2007 ) , 151-154 .
- M. Machida , M. Ishimoto , K. Takashima , T. Kondo , Y. Koyama ( 2006 ) : “ K5/VSSP data processing system of small cluster computing at Tsukuba VLBI Correlator ” , IVS 2006 General Meeting Proceedings ( edited by D. Behrend and K. Baver , NASA/CP-2006-214140 , 2006 ) , 117-126 .
- M. Machida , M. Ishimoto , K. Takashima ( 2006 ) : “ Tsukuba VLBI Correlator ” , IVS Annual Report 2005 ( edited by D. Behrend and K. D. Baver , NASA/TP-2006-214136 , 2006 ) , 186-189 .
- 町田守人 , 石本正芳 , 高島和宏 ( 2004 ) : 測地 VLBI 将来観測計画と相関処理要求 , VLBI 次世代相関器ワークショップ , 情報通信研究機構鹿島宇宙通信研究センター , 2004 年 8 月 ,  
( <http://www2.nict.go.jp/w/w114/stsi/ivstdc/soukankiws/pdf/Machida.pdf> ) .